

情報通信の

未来をつくる 研究者たち



宮崎哲弥 和田尚也 古川英昭 宮澤高也 原井洋明
ベド カフレ 井上真杉 大和田泰伯 淡路祥成
川西哲也 菅野敦史 門脇直人 李 還幫 原田博司
石津健太郎 村上 誉 児島史秀 有本好徳 辻 宏之
高橋 卓 秋岡眞樹 豊嶋守生 高橋幸雄 中尾康二

情報通信の

未来をつくる 研究者たち

井上大介 衛藤将史 高橋健志 野島 良 大久保美也子
松尾真一郎 益子信郎 西永 望 下條真司 三輪信介
木俵 豊 岩澤昭一郎 大井隆太郎 翠 輝久 水上悦雄
内山将夫 吉田俊介 金 京淑 村上陽平 隅田英一郎
柏岡秀紀 風間淳一 安藤広志 岩爪道昭 荒川佳樹
大岩和弘 寶迫 巖 武岡正裕 佐々木雅英 大友 明
王 鎮 成瀬 康 今水 寛 平林美樹 岩本政明 井口俊夫
川村誠治 浦塚清峰 笠井康子 高橋暢宏 津川卓也
亘 慎一 井戸哲也 花土ゆう子 今村國康 岩間 司
和氣加奈子 福永 香 藤井勝巳 水野麻弥 登坂俊英

はじめに

インターネットや携帯電話の普及などを通じて、読者の皆様も、情報通信技術(ICT)の発展を身近に感じておられるのではないかと思います。今日、ICTは、私たちの生活を支える基盤として、また、日本の経済の成長と発展、豊かで安心・安全な社会の実現の原動力として、重要な役割を果たしています。

情報通信研究機構(NICT)は、情報通信分野を専門とする唯一の公的研究機関として、現在、以下の4つの基盤技術の研究開発に取り組んでいます。

- ①より便利で高品質かつ安全なネットワークを、低消費エネルギーで実現するネットワーク基盤技術
- ②より人に優しいコミュニケーションを実現するユニバーサルコミュニケーション基盤技術
- ③未来の情報通信にパラダイムシフトをもたらす新概念を創出する未来ICT基盤技術

- ④高精度な時刻情報や環境情報などを誰もが便利で安全に利用できるようにする電磁波センシング基盤技術

本書では、こうした研究開発に取り組んでいる研究者が自らの言葉で、それぞれの研究開発の内容を紹介しています。例えば、脳や生物のメカニズム、物質の特性といった自然界の原理を解明し、革新的な技術を創造しようとするものから、インターネットに代わる新たなネットワークや災害時にもつながるネットワークの構築を目指すもの、超臨場感通信や音声翻訳通信を実現しようとするものまで、一読されるとNICTで進められている研究開発の広がりには驚かれるかもしれません。

情報通信のような分野では、基礎研究が、周辺技術の進展によって、急に応用に結びつくことはよくあります。また、異なる研究分野にまたがる研究により、全く

新しい技術が生み出されることも期待されます。私たちは、幅広い研究者の力を結集することで、次の世代につながる技術的基盤を築いていきたいと考えています。

私は、常々 NICT のような研究機関において一番大事なのは、何よりも研究者一人ひとりだと思っています。研究者は、明るい未来の実現に向けて、目を輝かせて頑張っています。研究者にとって、研究開発の成果が世の中で使われることに過ぎる喜びはありません。

本書は、そうした研究者一人ひとりの姿が見えるよう編集しました。紙面の制約で一部の研究者しか紹介できませんでしたが、NICT では多くの研究者が日夜研究開発に取り組んでいます。

本書が、NICT の研究者とその研究活動のご理解の一助となることを願っています。



宮原 秀夫 (みやはら ひでお)

理事長

大阪大学総長を経て、2007年9月から現職。工学博士。



はじめに 002

第 I 章 ネットワーク基盤技術

1. 光ネットワーク技術

● ネットワーク進化の最先端をリードし、
新世代ネットワークの実現を目指す 008
宮崎 哲弥

● 光パケット・光パス統合ネットワーク ... 010
和田 尚也・古川 英昭・宮澤 高也

● ID・ロケータ分離による新世代ネットワーク
アーキテクチャ 014
原井 洋明・ベド カフレ

● 地域の神経網を担うネットワーク
NerveNetの研究 018
井上 真杉・大和田 泰伯

● 光通信インフラの革新を目指して 022
淡路 祥成

● 「ひかり」を自由にあやつる 026
川西 哲也・菅野 敦史

2. ワイヤレスネットワーク技術

● NICTワイヤレスネットワーク研究所の
研究開発概要 030
門脇 直人

● 体とその周囲を取り巻く
ボディエリアネットワーク 032
李 還幫

● 高度電波利用データベース技術を利用した
次世代ワイヤレス通信ネットワーク 036
原田 博司

● 電波をフレキシブルに利用する
コグニティブ無線システム 040
石津 健太郎

● 東日本大震災被災地における無線LANによる
インターネット環境の構築 044
村上 誉

● 新しい無線システムを生み出す
ワイヤレスグリッド技術 048
児島 史秀

● 高速・大容量通信を実現した
新しい光無線通信装置 052
有本 好徳

● 電波を使った侵入者検知システムの開発
..... 056
辻 宏之

● 「きずな」(WINDS)の宮城県での運用について
..... 060
高橋 卓・秋岡 眞樹

● 宇宙光通信と衛星量子鍵配送 064
豊嶋 守生

3. ネットワークセキュリティ技術

● 安心・安全に情報をやりとりできる
ネットワークセキュリティの研究開発を推進
..... 068
高橋 幸雄

● インシデント分析センター
nicter 070
中尾 康二・井上 大介

● ネットワークリアルタイム可視化システム
NIRVANA 076
井上 大介・衛藤 将史

- セキュリティ情報交換と標準化(CYBEX) 080
高橋 健志
- 暗号技術の新展開 084
野島 良
- プライバシ保護技術 088
大久保 美也子
- 過不足のないセキュリティを実現する
セキュリティアーキテクチャ 092
松尾 真一郎

4. 新世代ネットワーク基盤構成技術及びテストベッド技術

- 新世代ネットワーク
次世代ネットワークのさらに先を見据えて ... 096
益子 信郎
- 新しいネットワークのかたち
ITU-T Y.3001について 100
西永 望
- 新世代通信網テストベッド JGN-X 104
下條 真司
- 大規模エミュレーション環境StarBED³
(スターベッド・キュービック) 108
三輪 信介

第 II 章 ユニバーサルコミュニケーション基盤技術

- コミュニケーションの壁を越えるための
ユニバーサルコミュニケーション基盤技術
..... 114
木俣 豊
- 世界初! 200インチ裸眼3Dディスプレイによる
自然な立体視の実現 116
岩澤 昭一郎
- 電子ホログラフィ 120
大井 隆太郎
- 声できくと、声で答える。
観光案内アプリAssisTra 124
翠 輝久・水上 悦雄

- 身近になった多言語自動翻訳 128
内山 将夫
- fVisiOn: 何も無いテーブルの上に浮かぶ
3D映像の作り方 132
吉田 俊介
- 実世界とクラウドをつなぐICTインフラ ... 136
金 京淑・村上 陽平
- 世界中の人々が母国語で外国人と対話できる
多言語音声翻訳技術 140
隅田 英一郎・柏岡 秀紀
- 情報分析技術 144
風間 淳一
- 五感を伝える多感覚統合・評価技術 148
安藤 広志
- 大量の情報を蓄え研究を支える情報基盤技術
..... 152
岩爪 道昭
- 人の視覚限界に迫る映像技術 156
荒川 佳樹

第 III 章 未来ICT基盤技術

- 量子・超高周波・ナノ・バイオ研究による
先端技術確立を目指して 162
大岩 和弘
- 超高周波ICTの挑戦: 超高速無線通信や
未踏センシングへ向けて 166
竇迫 巖
- 究極の光通信技術を目指して 170
武岡 正裕
- 限りなく速く、
そして絶対安全な通信に向けて 174
佐々木 雅英
- 超高速光通信への扉を開く、
高機能フォトニックポリマー 178
大友 明
- 高感度・高速超伝導ナノワイヤ単一光子検出器
..... 182
王 鎮

● 脳とICTの融合： 脳情報通信技術の確立に向けて	186
成瀬 康	
● 思い通りに操作できるブレイン・マシン・ インターフェイスに大きく前進	190
今水 寛	
● DNAナノ構造体でつくる分子ロボットを利用した アンビエントセンサーネットワーク	194
平林 美樹	
● 2種類の遺伝情報を使い分けて生きる テトラヒメナ	198
岩本 政明	

● 日本のタイムスタンプの仕組みを世界に輸出	238
岩間 司	
● 携帯電話使用と脳腫瘍に関する 疫学研究のためのばく露評価	242
和氣 加奈子	
● 電波と光波をつなぐ計測技術	246
福永 香・藤井 勝巳・水野 麻弥・登坂 俊英	

情報通信研究機構 (NICT) の沿革、 NICTの施設等所在地	251
---	-----

第IV章 電磁波センシング基盤技術

● 社会を支える電磁波計測技術	204
井口 俊夫	
● 気象レーダで風を見る	206
川村 誠治	
● 東日本大震災の被災地の様子を知りたい	210
浦塚 清峰	
● 超高感度センサが拓く新しい地球大気のすがた	214
笠井 康子	
● 世界の雲分布を計測し地球温暖化の鍵を探る	218
高橋 暢宏	
● 東北地方太平洋沖地震後の大気の波、 宇宙まで到達	222
津川 卓也	
● 太陽から地球までの観測データをもとに 宇宙環境の変動を予測する宇宙天気予報	226
巨 慎一	
● 誤差6,500万年に1秒	230
井戸 哲也	
● 世界最高水準の日本標準時をつくる	234
花土 ゆう子・今村 國康	

第I章

ネットワーク基盤技術

I-1.光ネットワーク技術

宮崎哲弥、和田尚也・古川英昭・宮澤高也、原井洋明・ベド カフレ、
井上真杉・大和田泰伯、淡路祥成、川西哲也・菅野敦史

I-2.ワイヤレスネットワーク技術

門脇直人、李 還帮、原田博司、石津健太郎、村上 誉、児島史秀、
有本好徳、辻 宏之、高橋 卓・秋岡眞樹、豊嶋守生

I-3.ネットワークセキュリティ技術

高橋幸雄、中尾康二・井上大介、
井上大介・衛藤将史、高橋健志、野島 良、
大久保美也子、松尾真一郎

I-4.新世代ネットワーク基盤構成技術及びテストベッド技術

益子信郎、西永 望、下條真司、三輪信介



I-1 ネットワーク進化の最先端をリードし、 新世代ネットワークの実現を目指す



宮崎 哲弥 (みやざき てつや)

光ネットワーク研究所
研究所長

2002年より独立行政法人通信総合研究所(現 NICT) 超高速フォトニックネットワークグループ勤務。超高速光通信・全光信号処理、多値光通信方式の研究に従事。博士(工学)。自ら実験をしなくなつて久しくなります。レーザー光を様々な光学機器を通してシングルモード光ファイバに結合させる実験をまたいつかしたいと思いつつ日々が過ぎていきます。

「光ネットワーク研究所では要素基盤技術からシステム化技術、さらにネットワークアーキテクチャまでの研究成果を統合し、革新的情報通信技術の開発を進めていきます。」

日常生活を支える光ネットワーク

光ファイバ通信ネットワークは、全世界的に急増しているインターネットトラフィックを支える情報社会のインフラとして、地球を1つに結ぶ光海底ケーブルなどの基幹系から各家庭への光ファイバ接続サービスや携帯電話の基地局網を支える末端のアクセス系に至るまで導入されています。現状の光ファイバ通信ネットワークではインターネットトラフィックの交差点となるノードに電子回路処理技術によるルータが設置され、パケットの宛先検索や経路切り替えが行われています。一方、ノード間を結ぶリンクは、光ファイバ1本あたりに異なる情報を複数の光波長に載せて一括伝送する波長多重伝送技術が用いられています。

しかし、伸び続ける情報伝送のニーズに既存のネットワーク技術だけで対応しようとすると、ノードにおいてはルータ内の処理が追いつかずトラフィックが滞ってしまうボトルネックが顕著となり、リンクにおいては波長数増大に伴う中継増幅器や光ファイバの伝送波長帯域不足、さらにネットワーク全体で設備規模や電力消費が膨大となるなどの問題が顕在化しつつあります。これらの問題は先進国だけに限らず、人口が急増し情報インフラ整備が進みつつある新興国においても社会の持続的発展のため解決すべき課題となるでしょう。一方で金融ビジネス、医療応用など低遅延性や確実性が重視される場合とメールやTwitterなど低価格性が重視される場合もあり、通信サービスに対する要求は多岐にわたっています。

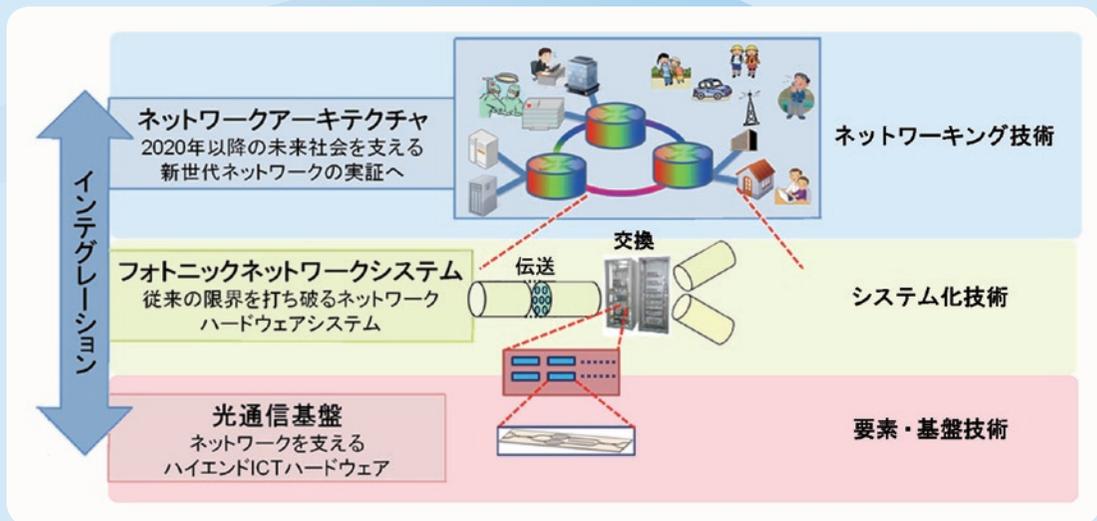


図1 光ネットワーク研究所の研究内容

● 明るい未来社会の実現を目指して

そこで、光ネットワーク研究所では様々なサービス要求に柔軟に適応し、通信量の飛躍的増加に伴う電力消費エネルギーの増大を抑えるとともに高信頼性も確保する、将来に向けて持続発展可能な新世代ネットワークの実現に向けて以下の研究課題について重点的に取り組んでいます。

まず、光パケットと光パスを統合的に扱うことのできるネットワークのアーキテクチャを確立します。この技術は、インターネットのデータ通信も混雑なく交通整理をしつつ、これまで困難であった通信の医療応用や超高精細動画通信などを、高品質かつ低消費電力でサービスして、生活の質の向上や低エネルギー社会など未来社会の実現に貢献するものです。また、切れにくいネットワークの実現を目指して、自律制御によるネットワークの高信頼化技術も開発します。

そして、この光パケット・光パス統合ネットワークを支えるハードウェアとして、光ネット

ワークの物理層における限界を打ち破る究極の光ノード技術や、マルチコアファイバ等を用いて飛躍的な通信容量の増大を可能とする光伝送技術と交換システム技術の研究を進めています。

さらに、1波長あたりの伝送速度の高速化技術、波長多重のための未開拓光波長帯域における光通信技術の開発や、あらゆる環境でブロードバンド接続を実現しつつ環境への影響も小さいICTハードウェア技術の研究開発にも取り組んでいます。

以上の研究課題に対して国内外の民間企業、大学などの研究機関とも連携し、光パケット・光パス統合ネットワークを中核とした新世代ネットワークの基盤となる革新的情報通信技術の研究開発を進めていきます。

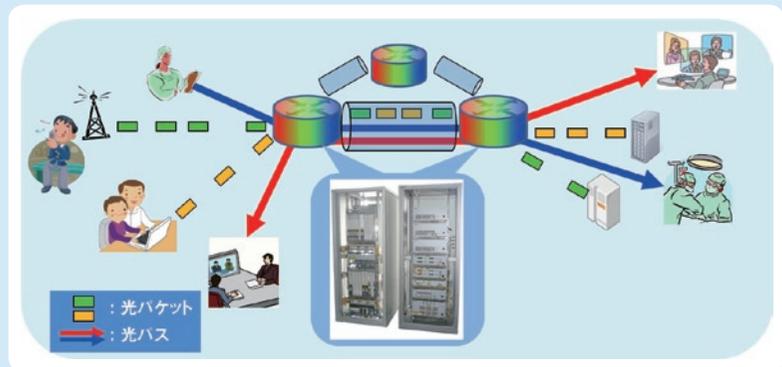


図2 光パケット・光パスの概念図

光パケット・光パス 統合ネットワーク

— 多様なサービスの実現、運用の簡易化、省エネに貢献 —



「多様なサービスを高速かつ省電力で提供可能な光パケット・光パス統合ネットワークの基本原則を説明し、NICTの最新の光技術を駆使して開発した光統合ノードを紹介します。」



和田 尚也 (わだ なおや)

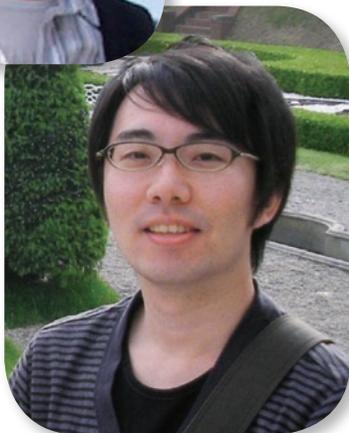
光ネットワーク研究所
フォトニックネットワークシステム研究室 室長

大学院博士後期課程修了後、1996年、CRL(現NICT)に入所。以来、フォトニックネットワークや光伝送システムに関わる研究に従事。博士(工学)。

古川 英昭 (ふるかわ ひであき)

光ネットワーク研究所
ネットワークアーキテクチャ研究室 主任研究員

大学院博士後期課程修了後、2005年、NICTに入所。以来、フォトニックネットワークに関わる研究、AKARIアーキテクチャ設計プロジェクトなどに従事。博士(工学)。趣味は旅行。



宮澤 高也 (みやざわ たかや)

光ネットワーク研究所
ネットワークアーキテクチャ研究室 研究員

大学院博士後期課程修了後、2007年、NICTに入所。以来、光ネットワークに関わる研究、AKARIアーキテクチャ設計プロジェクトなどに従事。博士(工学)。趣味は、ゴルフ、ミュージアム巡りなど。

はじめに

近年、通信トラフィックは増大し続けており、それに伴い、通信機器の消費電力も増加の一途をたどっていることから、低消費電力で大容量通信が可能な技術の開発が求められています。また、多様なコンテンツがネットワーク上で流通することが想定され、Web 閲覧やメール交換、センサ情報収集といったベストエフォート型サービス(通信のサービス品質(Quality of Services: QoS)は保証されないが、低コストかつ効率的なデータ通信)から、デジタルシネマ配信や遠隔医療といった QoS 保証型サービス(ネットワーク資源の排他的利用でコスト高だが、QoS が保証されるデータ通信)まで、多様な形態のデータ通信を提供できる仕組みが求められています。

これらの課題に対して、私たちは、通信機器に光技術を導入することで消費電力の抑制を図り、パケット交換・パス交換の両方式を採用することで多様な通信サービスの提供を可能とする、「光パケット・光パス統合ネットワーク」の研究開発を行っています。

光パケット・光パス統合ネットワークとは

現在のインターネットで使用されているパケット交換方式は、通信回線を多数のユーザで共有するため、回線利用効率を高めることができません。一方で、従来型の電話網などに取り入れられているパス(回線)交換方式は、ユーザが通信回線を一時占有するため、QoS を確保できます。光パケット・光パス統合ネットワークは、これら両交換方式を1つのネットワークで提供するものであり、ユーザは利用シーンに合わせて、ベストエフォート型サービスと QoS 保証型サービスを選択することができます(図1)。

また、現在のネットワークの中継装置であるルータでは、光信号を一旦電気信号に変換してデータ転送処理を行っており、処理量の増大に伴って大規模化する中継装置の消費電力が問題となります。そこで、データを光信号のままパケット交換処理が可能な光パケットスイッチと、データを光信号のままパス交換処理が可能な光パススイッチの研究開発が行われています。本統合ネットワークでは、光パケット交換機能と光パス交換機能を両方具備した光パケット・光パ

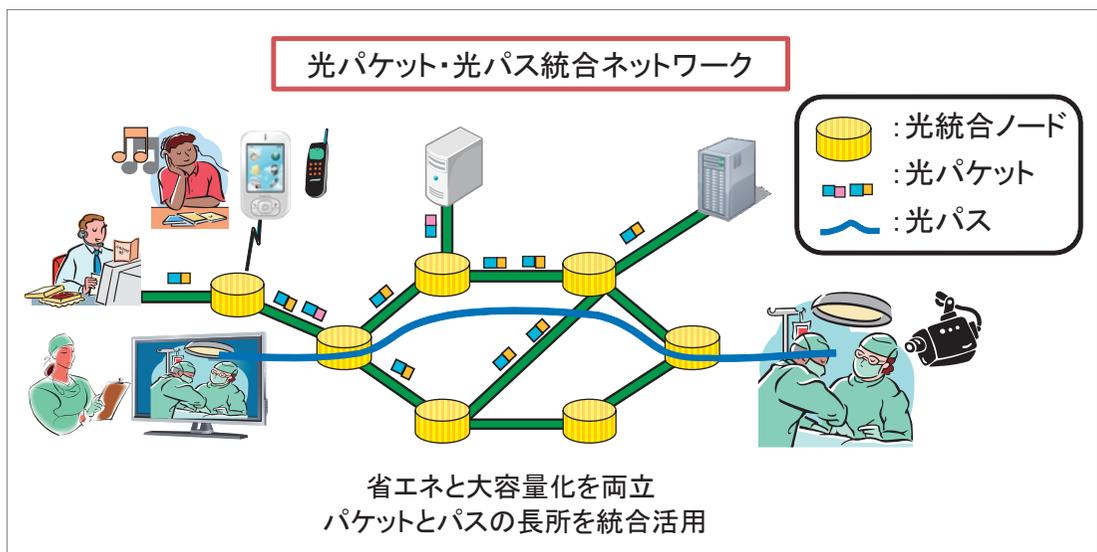


図1 光パケット・光パス統合ネットワークの概念図

ス統合ノードを用い、データ伝送速度に依存しない低消費電力かつ大容量の転送処理を可能にします。

本統合ネットワークでは、光パケット交換用と光パス交換用にそれぞれ別のネットワーク資源(波長)を割り当てており、複数の波長を並列で伝送および処理可能な波長分割多重技術を用いて、両交換方式を共存させています。両交換方式に割り当てている資源量を、トラフィックの状況やユーザの要求に応じて動的に変えることで、資源の効率的な利用ができます。例えば、災害時に通信が繋がりにくい場合、光パケットの資源量を増やすことで、多数のユーザが回線を使用することができます。一方、重要な通信の品質を確保する要求が増えた時に、光パスの資源量を増やすこともできます。また、光パケット交換用資源では、通信相手に届ける実際のデータだけでなく、光パス資源の予約/解放のための制御信号も光パケットで送受信することで、余分な制御用インターフェースを減らし、ネットワークの制御部および管理運用を簡易化することができます。

開発した光パケット・光パス統合ノード

我々は、2011年に、NICTの最新の光技術(光スイッチ、光増幅器、等)の研究成果を結集し、安定性と操作性に優れた光パケット・光パス統合ノードを開発しました(図2)。この光統合ノードは、光ファイバを環状に接続したリングネットワーク用に開発されており、100Gbpsの光パケット信号と、1チャンネルあたり10Gbpsの光パス信号(計7チャンネル)を、同時に転送できます。本光統合ノードには、光パケットスイッチ機能、光パススイッチ機能、光信号をクライアント側ネットワークから光統合ネットワークに挿入するAdd機能、光統合ネットワークからクライアント側ネットワークへ分岐するDrop機能、前述の動的な資源割り当て機能などがあります。ここでは、Add機能を有する光挿入装置及びDrop機能を有する光分岐装置の中に、光パススイッチが搭載されています。

これまで、光統合ノード2台を光ファイバ50kmで接続したリングネットワークを構築し、遠隔地からNICTのテストベッドネットワーク

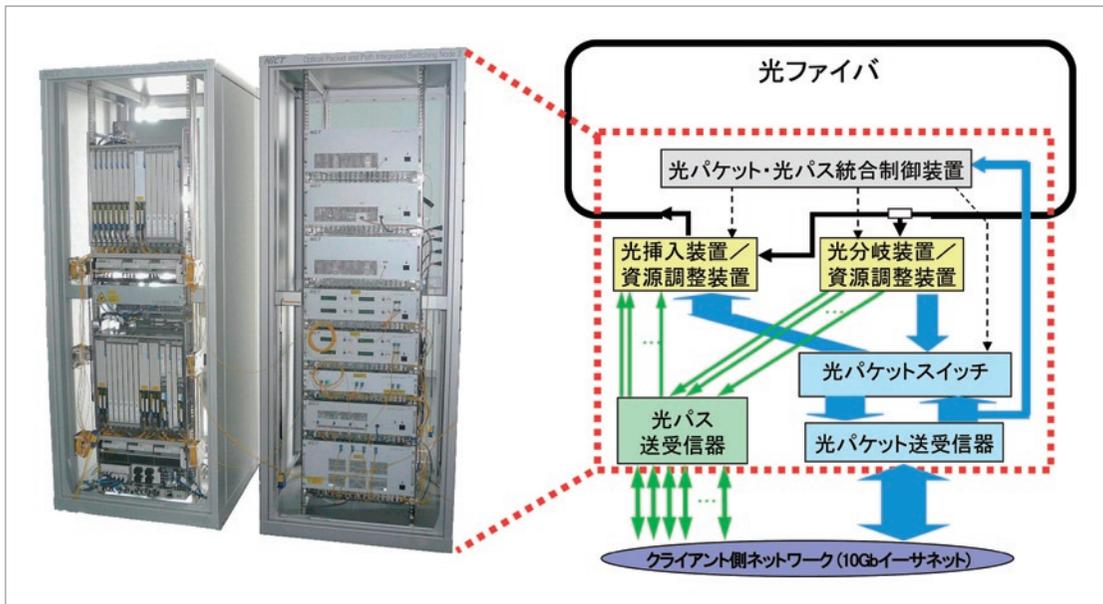


図2 開発した光パケット・光パス統合ノード

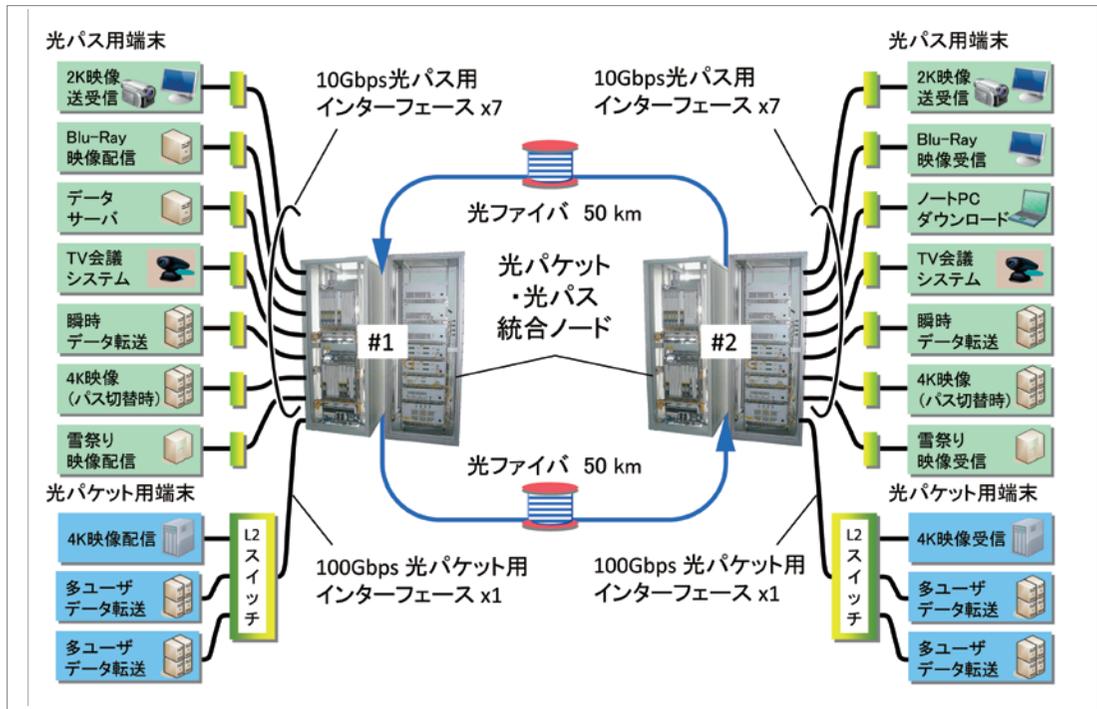


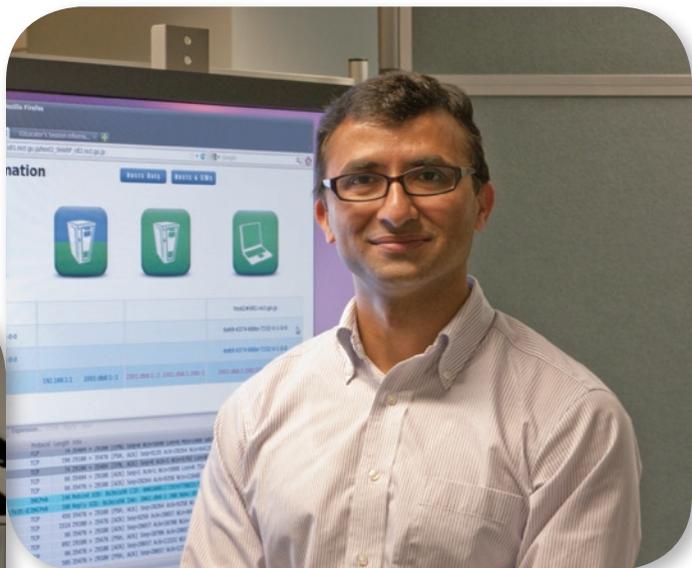
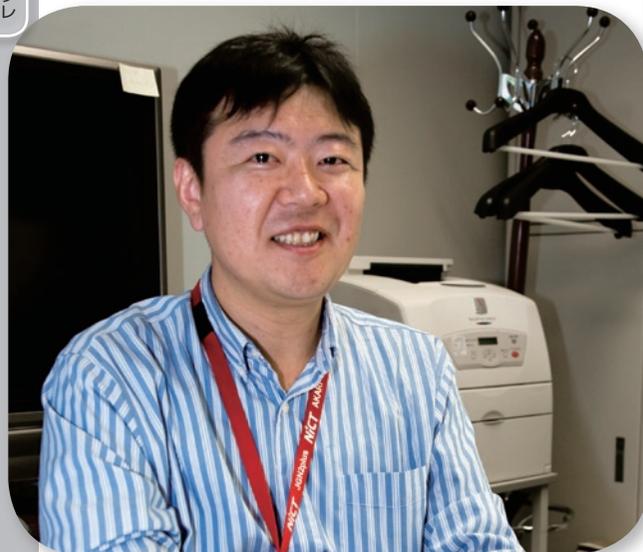
図3 実証ネットワークの構成図

JGN-Xの通信回線を経由して送られてきた4K映像(ハイビジョンの4倍の解像度)などの高精細映像の転送、双方向テレビ会議、高速データ転送などの動態展示を行い、安定動作を実証してきました(図3)。

● 今後の展望

今後は、光統合ノードの機能をさらに強化するため、光バッファ機能の導入、統合制御装置の高機能化や自動化等の研究開発を進め、JGN-Xのインフラとして利用するとともに、多くのユーザや管理者が容易に利用できる、信頼性の高い光パケット・光パス統合ネットワークの実用化を目指していきます。

ID・ロケータ分離による 新世代ネットワークアーキテクチャ



「我々が提案するHIMALISというID・ロケータ分離方式を紹介します。これは、異種間ネットワーク通信、移動通信、マルチホーム、セキュリティ対応等に適した方式です。」

原井 洋明 (はらい ひろあき)

光ネットワーク研究所
ネットワークアーキテクチャ研究室 室長

入所当時の光ネットワーク分野を含めて、現在はより幅広く新世代ネットワークの研究開発に従事。2007年IEEE ComSoc Asia-Pacific Young Researcher AwardにおいてOutstanding Young Researcher表彰。2009年文部科学大臣表彰若手科学者賞受賞。趣味はプロ野球のナイトゲームを見ることだが実践できていない。たまた、野球観戦、ゴルフ・スキー。

Ved P. Kafle (ベド カフレ)

光ネットワーク研究所
ネットワークアーキテクチャ研究室 主任研究員

現在、新世代ネットワークの設計、実装、評価、アルゴリズム最適化、プロトコル及びアーキテクチャの研究開発に従事しています。現在の関心事は、新しいネーミング及びアドレス方式、ID・ロケータ分離アーキテクチャ、名前またはIDの解決メカニズム、異機種ネットワーク層プロトコルの統合、ユビキタスセンシングとコンピューティングのためのインターネットへのリソースに制約のあるセンサーネットワークの統合、分散移動管理機能、通信ネットワークのプライバシー、セキュリティ及び信頼性にあります。2009年に新世代ネットワークアーキテクチャの標準化への貢献に対し、日本ITU協会賞を受賞しました。同じ年に、国際会議ITU-T Kaleidoscopeにおいて論文賞を受賞しました。休みには2人の娘と遊んだり、日本のネパール人のコミュニティでボランティア活動をしたり、バドミントンやジョギングを楽しんでいます。

はじめに ーなぜ新世代ネットワークなのかー

今やインターネットは、私たちの日常生活になくてはならないものになっています。近い将来には、インターネットには、家電製品、乗り物、健康・環境監視センサーなどの多種多様なデバイスが相互接続される日が来るでしょう。しかし、40年前に設計されたインターネットは、当時遠方の知人のコンピューターとの通信をするためのもので、携帯・微小デバイスの無線接続、セキュリティとサービス品質の提供、低消費電力での大容量のデータの効率的な転送などは考慮されていませんでした。アプリケーションがこのような要求をするようになって、様々な機能がオリジナルのインターネットアーキテクチャに、全体の最適化を考慮することなく、ランダムに追加されてきました。その結果、現在のインターネットには負荷がかかり過ぎ、本来あった拡張性という特徴が次第に失われてきました。それゆえ、前述した要求を、さらに将来に生じる要求も満たすようにするために、私たちは白紙から新世代ネットワークを設計してきました。

新世代ネットワークは、海外では、“Future Internet” とか“Future Network” などと呼ばれていますが、現在のインターネットでの制約条件は継承しません。新世代ネットワークは、膨大

な数の多種多様な移動デバイスを想定し、様々なネットワークプロトコルをサポートします。この記事では、このような目標を達成するために必要な ID・ロケータ分離という概念について、現在のインターネットのアーキテクチャと比較しながら説明します。

ID・ロケータ分離の概念

図1(a)は、現在のインターネットのプロトコルの階層構造を示します。IPアドレスは、アプリケーション層とトランスポート層で、端末やセッションやサービスの識別子(ID)として利用され、同じIPアドレスが、ネットワーク層ではネットワーク内での端末の接続位置(ロケータ)として利用されます。1つのIPアドレスをIDとロケータの両方に使用することは、異種のプロトコル、移動通信、マルチホーム接続、セキュリティ、経路制御の拡張などに適していません。端末が、ネットワークを移動した場合、端末のIPアドレス(IDとロケータの両方)が変更され、元のIPを識別子として用いた現在進行中のセッションが切れます。また、マルチホーム接続は、接続しているネットワークが混雑・切断した場合に、別のインターフェースに切り替えるためのものですが、それぞれのインターフェースは独自のIPアドレスを持っている

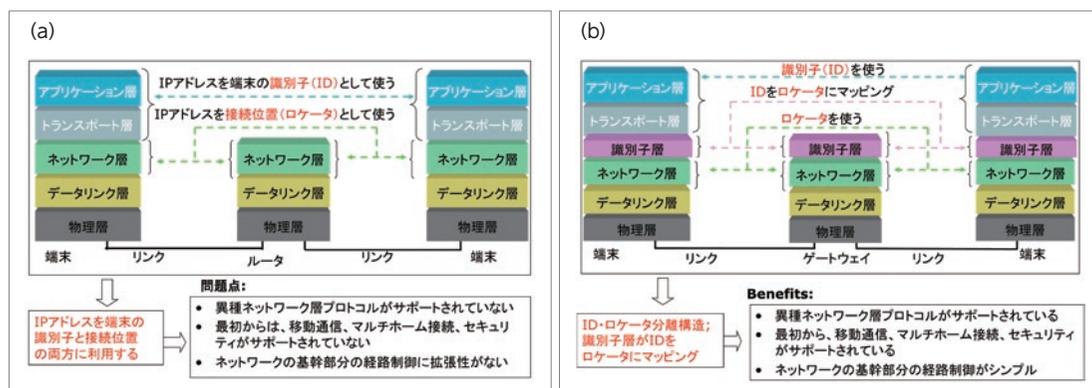


図1 プロトコル階層図 (a) 現在のインターネットの場合 (b) ID・ロケータを分離した新世代ネットワークの場合

ため、接続切り替え時にセッション ID が変更になり、通信セッションの滑らかな継続は困難です。同様に、IP アドレスに紐付いたセキュリティ情報は、端末の IP アドレスの変更で無効になります。さらに、コアネットワークは、それぞれのエッジネットワークまたはアクセスネットワークごとの経路表を作成しますが、エッジネットワークのサイズが小さく、数が非常に多くなった場合には、基幹の経路表のサイズは非常に大きくなり、エッジネットワークの IP アドレスの設定が頻繁に変更になると、基幹の経路表を更新する処理負荷が高くなり、最終的には、基幹の経路制御の機能に支障が出るでしょう。

従って、新世代ネットワークの protocols 階層は、図 1(b) に示すように ID とロケータを切り離す (ID・ロケータ分離) 必要があります。トランスポート層とネットワーク層の間に挿入された識別子層は、ID をロケータにダイナミックにマッピングし、端末の移動やマルチホーミングによってネットワーク層がロケータを変更した場合にも、アプリケーション層やトランスポート層は、端末や通信セッションの識別用に同じ ID を使い続けることができます。この特徴は、ネットワーク層で別の種類の protocols を使うことを可能とします。データのパケットのヘッダには、送信元と宛先の両方の ID とロケータが含まれています。ゲートウェイは、パケットがエッジネットワークとコアネットワークを横断する際に、ID をヘッダの中のネットワーク protocols やロケータの値を変換するための参照値として使います。これにより、新世代ネットワークでは、エッジネットワークやコアネットワークで異なるタイプのネットワーク層 protocols の利用が可能となります。

● HIMALIS アーキテクチャ

ID・ロケータ分離の概念に基づき、NICT は HIMALIS (Heterogeneity Inclusion and

Mobility Adaptation through Locator ID Separation: ロケータと ID を分離することによる異質性の許容と移動への適応) アーキテクチャを提案してきました。図 2 は HIMALIS アーキテクチャの主要な構成要素であるエッジネットワーク、コアネットワーク、論理制御ネットワークを示しています。コアネットワークはエッジネットワーク同士を接続するために高速なルータとリンクで構成されています。

● ネットワークアクセス機能

端末 (図 2 の端末 1) がエッジネットワークに接続するとき、DHCP (Dynamic Host Configuration Protocol) 等の初期設定 protocols の実行や AA、LNS、GW の ID やロケータ等のエッジルータのパラメータを入手します。端末は次に、認証と登録のために AA にコンタクトします。認証が済むと、端末には新しいロケータが割り当てられます。端末の端末名、端末 ID、ロケータ、公開鍵は LNS のホストテーブルに保存され、端末 ID とロケータは GW の ID テーブルに保存されます。端末にはアクセスキーも割り当てられ、信頼性の証明や AA、LNS、GW との暗号化メッセージのやりとりに使われます。端末は新しいロケータを HNR に、ロケータ更新メッセージを送ることによって登録します。こうしてこの端末は他の端末と通信する準備ができました。

● セッション初期化機能

端末 1 が端末 2 と通信したいとき、端末 1 は端末 2 の端末名しか知らないため、端末 1 は端末 2 の ID、ロケータ、公開鍵を LNS に問い合わせます。LNS は DNR、HNR から情報を入手して端末 2 の ID、ロケータ、公開鍵を受け取り端末 1 に送ります。こうして端末 1 は端末 2 に対して制御パケットを交換し始め、セキュリティコンテキスト (セッションキーなど)

を確立し、両方の GW の ID テーブルに ID・ロケータのマッピングを保存します。GW は ID テーブルから ID・ロケータのマッピングを使うことによってパケットのヘッダの中のネットワークプロトコルやロケータの変換を行います。

● 移動通信機能

(a) 移動端末(たとえば端末 1)は 移動して新エッジネットワークにアクセスして新しいロケータを得て、(b) 旧 GW にある端末 1 のロケータ情報を新しいロケータに更新し、移行中にも旧 GW が新しい GW にパケットが転送されるようにし、(c) 端末 2 とその GW の情報を更新し、新しい位置にいる端末 1 にパケットを転送できるようにする、(d) 端末 1 の HNR レコードを更新し、(e) 旧エッジネットワークから切断する、という手順で信号をやりとりします。HIMALIS アーキテクチャでは、ネットワー

クアクセスやセッション初期化のプロセスで確立されたセキュリティコンテキストを移動管理機能の安全確保にも使用できます。

● 実装の様子

HIMALIS アーキテクチャに基づく ID・ロケータ分離の技術は NICT における新世代ネットワークの研究の重要な要素です。私たちは HIMALIS アーキテクチャを、ローカルなテストベッドネットワーク上で実装してきました。DNR と HNR の機能は PlanetLab(約 1,000 ノードから成る地球規模のオーバーレイテストベッドネットワーク)のノードにも実装し、実験しています。最近では、HIMALIS を Linux のカーネルに実装し、それを JGN-X に接続して実験・検証できるようになっています。このように HIMALIS アーキテクチャを継続的に改良し、広範な検証を通じて、HIMALIS が普及するよう研究開発をしていきます。

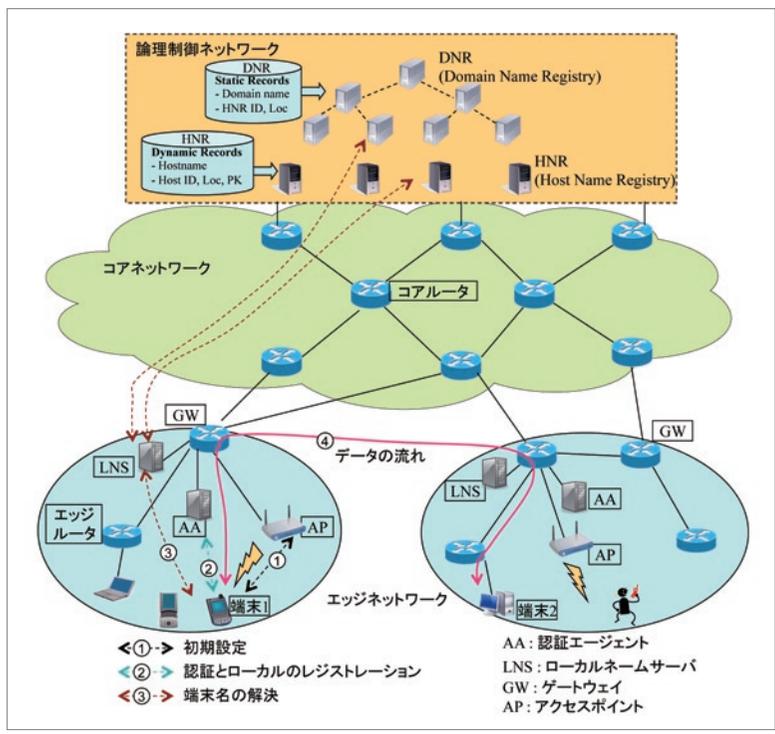


図2 HIMALISアーキテクチャの構成要素

地域の神経網を担うネットワーク NerveNetの研究

「人や街の状況をセンサが捉え、データが処理・判断されて様々なサービスや情報が提供されるスマートな街への期待が高まっています。その神経系を担うネットワークの研究を紹介します。」



井上 真杉 (いのうえ ますぎ)

経営企画部
企画戦略室 プランニングマネージャー

大学院博士課程修了後に郵政省通信総合研究所(現NICT)に入り、超高速無線LANやモバイル通信の研究に取り組む。人々にとって必要な情報通信は？という利用者視点で将来の情報通信を考えている。

大和田 泰伯 (おおわだ やすのり)

光ネットワーク研究所
ネットワークアーキテクチャ研究室 研究員

中学時代に中古で買ったMacintosh IIcxと草の根BBSを通じて通信に興味を持つ。大学院博士課程修了後、大学の特任助教やベンチャー企業立ち上げなどを経験し、現職にて無線分散アクセス網の研究に従事。趣味は写真やアウトドア、アーチェリーなど。



● 未来の地域社会の通信

私たちはアクセスネットワーク(人が最初に接続されるネットワーク)の研究を2006年から行っています。そのコンセプトは、人が五感で感じるように、センサが感知する気象、交通、災害、防犯などの地域事象データをネットワークを通じて収集・処理し、また人が反射的に行動を起こすように、センサデータに基づいた情報やサービスを適切なタイミングで地域社会や住民、その地域を訪れた人に提供するものです。そして、非常時にも頼れる強いものです。いわば地域の神経網の役割を果たす意味でそのネットワークをNerveNet(ナーヴネット)と名付けました。

● NerveNetに必要な3つの機能

NerveNetに必要な機能の1つは「自律・自

動的にネットワークを構成する」機能です。地域の情報通信サービス企業、自治体、NPO(非営利団体)などが地域の要求に基づいて適宜ネットワークを構築するためには、簡易に設置できることが大切です。災害時も通信を継続させるために、一部が故障したり切断されたりしても自律的にネットワーク構成を変更して機能を維持する必要があります。

2つ目は、「ネットワーク単体で情報サービスを提供する」機能です。例えば「私と同じ興味を持ち、この近くを通る人へこの情報を3日間提供したい」という要求があるとします。現在は、地域ネットワークの外のインターネット上にあるサーバがその要求を受けてサービスを提供します。これに対し、ネットワーク単体で情報サービスが提供できれば、災害等で外部への接続が途切れても提供を継続できます。インターネットと接続して連携しながらもネットワーク単体での

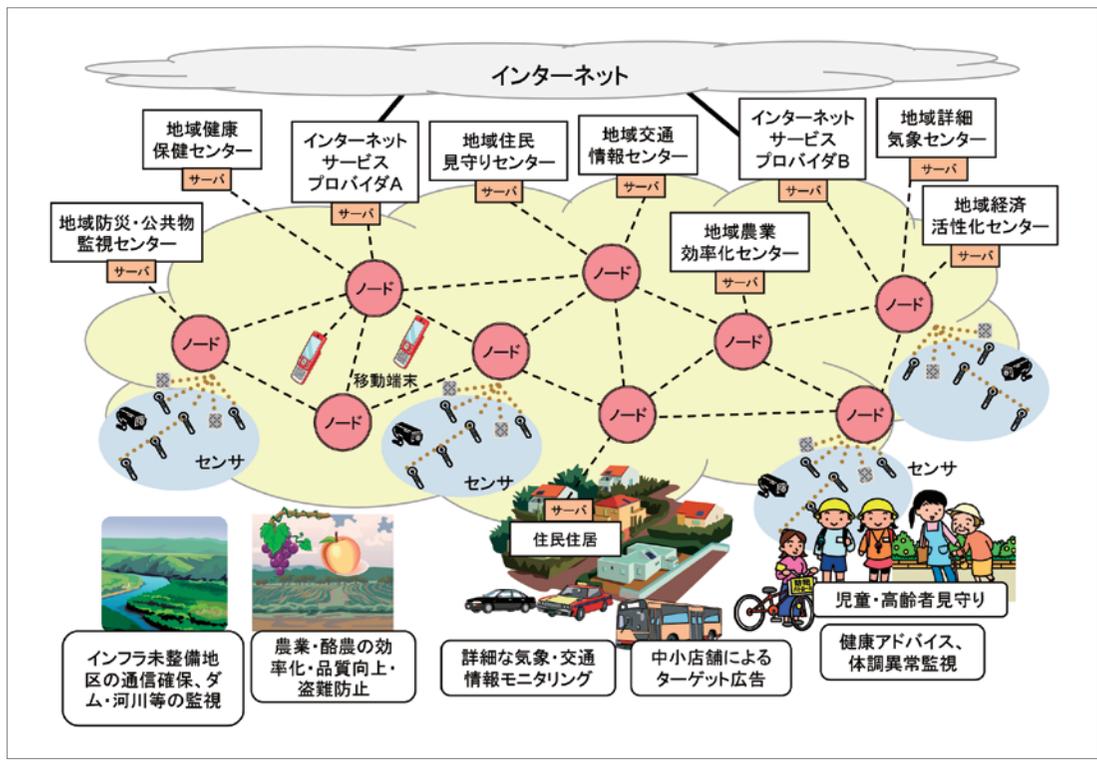


図1 地域分散ネットワークNerveNetの構成と活用イメージ

情報提供機能を活用することで、コスト低減と、地域企業や住民等による自営的情報通信による地域活性、地域産業振興が期待できます。

3つ目は、「プラットフォーム」機能です。現在は、児童見守りや気象観測などサービスごとにネットワークシステムを構築するのが一般的です。要望はあっても規模が小さいサービスは実現されにくい状況です。サービス種別に依存しない共通基盤を築ければコストを低減でき、多様なサービスを生みやすくなります。

● 通信制御と情報処理を分散実行する NerveNet の構成

NerveNet は、複数のノード(通信装置)同士が無線(有線も可)で自動的につながることでネットワークを構成できるシステムです(図 1)。各ノードが設置されると、電波が届く周辺のノードを探して自動的に無線接続します。電波が直接届かない遠くのノードに至るルートを自動探索し、複数ルートを記憶します。そのため、あるルートの途上で通信障害が発生しても、直ちに別ルートに切り替えられるという災害に強い特長があります。各ノードにはユーザ端末、サーバ、センサなどを接続でき、インターネットなど外部ネットワークを介さずにそれら同士の通信を行えます。例えば、自分の子どもの居場所情報を自宅のサーバで収集管理することも可能です。また、複数のノードで外部ネットワークに接続できるので、インターネット上の通常サービスも利用できます。

ノード自身はデータベースを搭載し、ノード間でデータを同期する機能があります。これに

より、ユーザの必要とする情報をネットワーク上で分散して保持することができます。通信障害が発生しても、接続可能なノードから必要な情報を取得できます。

NerveNet は、平時では既存の携帯電話システム等と併用して重層的ネットワークを構成し、社会の耐災害性向上やスマートフォンの大量データ通信の分散化に寄与できます。また、災害発生後の被災地において停止した既存通信システムを代替する臨時通信システムとしても威力を発揮します。

デモ実験の実施のため、2011年10月には、都立小金井公園で実施された東京都・小平市・西東京市・武蔵野市・小金井市合同総合防災訓練の場で、臨時ネットワークとしてノード9台で NerveNet を構築し、安否確認とメッセージ配信を訓練参加者に体験してもらいました(図 2、3)。避難所に見立てた場所に配置した災害情報端末(無線でノードに接続)に IC カードをタッチすると、自分がその避難所にいることを登録できます。その情報がネットワークを通じて瞬時に他の避難所の災害情報端末に表示されます。また、

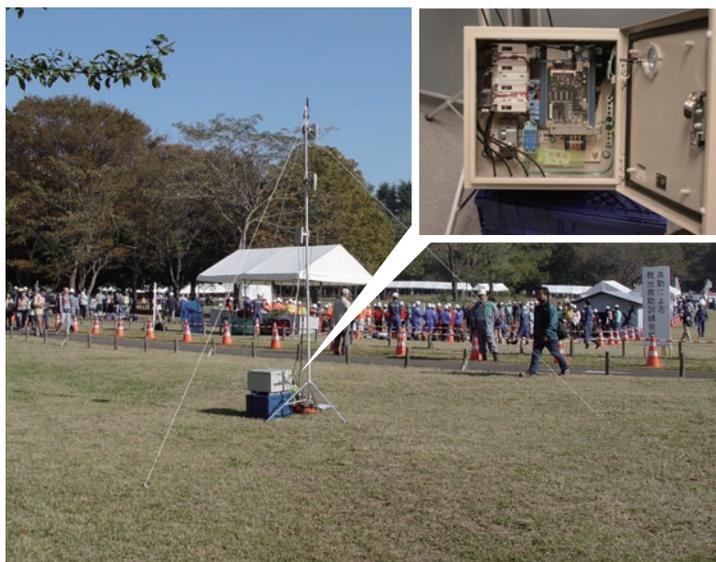


図2 ノード実証機と平成23年度東京都・小平市・西東京市・武蔵野市・小金井市合同総合防災訓練(都立小金井公園)での臨時ネットワーク構築の様子

合同総合災害訓練

発信者	発信場所	避難所2	発信内容
大和田泰伯			災害対策本部からの物資配給情報です。本日の物資配給時刻をお知らせします。A避難所の配給時刻は午前9時B避難所の配給時刻は午前9時30分を予定しております。

氏名	氏名
小泉 綾女	中村H
塩田 優	原井洋明
奥真 翔	勝田しんじろう
恩田 怜奈	大谷 誠一
柳原 健	沢田 里奈
浦野 そら	
小越 俊一	

1 現在の避難者数 33人
2 現在の避難者数 27人
3 現在の避難者数 24人
4 現在の避難者数 26人

5

100 m
200 フィート

©2011 Google - 地図データ ©2011 ZENRIN - 利用規約

広報発信 広報履歴一覧 安否確認(検索)

NICT 独立行政法人 情報通信研究機構
National Institute of Information and Communications Technology

図3 (上) 災害情報端末の画面(各避難所の避難者名や配信したメッセージを表示)
(右下) 災害情報端末を操作する防災訓練参加者



災害情報や支援物資情報など任意の情報を入力すると、他の災害情報端末に配信され音声発信されます。これらの情報は、外部サーバにも携帯電話網を通じて伝達し、インターネットから閲覧できるようにしました。

● 今後の展望

今後、災害対策技術の研究開発の実証として、東北地域内に構築する実験設備を用いた検証を行っていきます。耐災害性を高める通信技術の性能検証に加えて、それらを包含した通信システムの実現に向けた取り組みも予定しています。例えば、今後の社会基盤となる電気自動車(EV)用充電ステーション、LED 街灯、電子掲示板(デジタルサイネージ)等と通信を一体化した装置の技術検証や実用化検討を自治体や企業と共同で行っていく予定です。これらの取組みは、人と人、人と物との通信だけでなく、様々なセンサやデータ処理装置などの機器同士が人を介さずに通信する M2M(Machine to Machine) 通信、ある

いはモノのインターネット(Internet of Things: IoT)と呼ばれる新しい通信の実現につながり、これからの街づくりを支える情報通信基盤の一役を担うことになると考えています。私たちは、安心・安全で多彩な情報サービスが享受できる未来に向けて取り組んでいきます。

光通信インフラの革新を 目指して

—空間/モード分割多重光ファイバ通信時代の幕開け—

「情報通信の根幹を支える光ファイバ通信は容量枯渇の危機に直面しています。次世代の光ファイバ通信インフラを構築する空間/モード分割多重方式などの取組みを紹介します。」

淡路 祥成 (あわじ よしなり)

光ネットワーク研究所

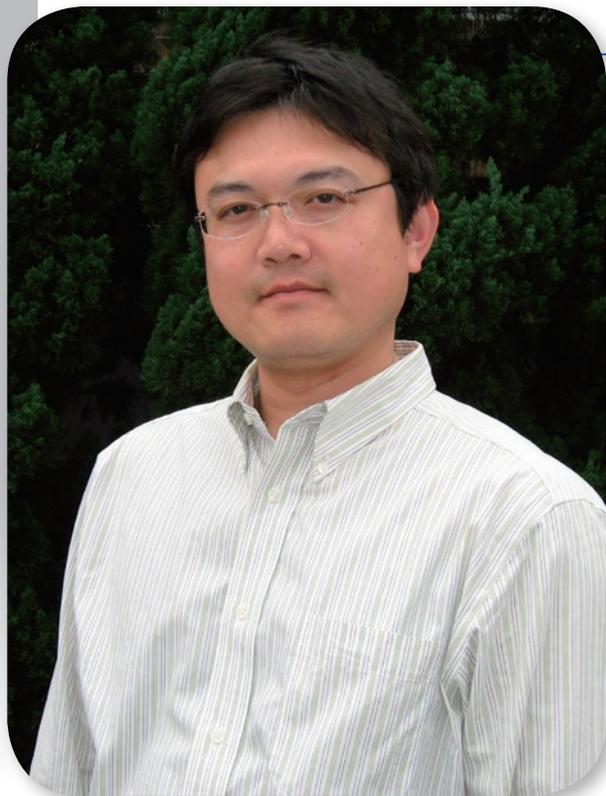
フォトニックネットワークシステム研究室 研究マネージャー

大学院修了後、1996年、郵政省通信総合研究所(現NICT)に入所。光信号処理、光増幅器、光パケットスイッチングなどに関する研究に従事。2004～2006年、内閣官房にて情報セキュリティ政策に従事。博士(工学)。

光ファイバ通信容量危機

インターネット人口の爆発的な増加をはじめ、スマートフォン/タブレットのめざましい普及やインターネットでのリッチコンテンツサービスの一般化を根幹で支えているのは、他の通信媒体に比べて圧倒的に大容量・低損失な光ファイバ通信であることはよく知られています。しかしながら、光ファイバの持つ伝送帯域といえども無限ではありません。これまで表面化していなかったのですが、光ファイバ通信研究の最先端では容量枯渇に関する危機感がにわかに増大しています。

通信用のシリカ*1系光ファイバは、波長1.55ミクロン付近に極低損失を実現できる透明な領域を持っており、この波長帯で実用的な光増幅器が発明されたことで、一気に通信容量の拡大が行われ



たのが1990年代の終わりでした(図1)。つまり、光ファイバ通信の大容量という特徴は伝送媒体の低損失領域と光増幅器の増幅領域が広い波長帯で重なり合ったから生じたものに他なりません。従って、波長分割多重(WDM)通信の初めの頃は波長チャンネル数の増設のために未利用の発振波長のレーザ光源と光増幅器の開発を行う周波数開拓が盛んに行われました。ひと通り1.55ミクロン近傍の周波数開拓が進むと、無線通信と同様に周波数利用効率を上げる取り組みに研究の中心が移っていき、差動4値位相変調(DQPSK)や直角位相振幅変調(QAM)、直交周波数分割多重(OFDM)といった高度な変調フォーマットが光技術によって実装可能になってきています。

周波数利用効率は理論的にはシャノン限界^{*2}に沿って、信号品質(OSNR)の向上とともに高くなっていきますが、ここで光ファイバ特有の問題が発生しました。OSNRを向上させるためには、信号光のパワーを増加させる必要があり、波長多重

されたそれらの信号チャンネルの合計パワーは直径わずか9ミクロン程度の光ファイバのコアに集中します。このような非常に高いパワー密度においては、光ファイバを構成するシリカ材料といえども顕著な三次の非線形性(光の強度に依存して光信号自身に変化する現象。材料によって、二次、三次…と効果の大きさが変化する。)を示し、信号光の波形歪みやスペクトル変化などを引き起こすためOSNRには実質的に極大値が表れます。また、さらにパワー密度が高くなると光ファイバのコアがプラズマ^{*3}化して焼損するファイバフューズ現象を引き起こし、通信機器の破損や火災の危険性にもつながってきます。

● NICT発 –世界に向けてのEXATイニシアチブ–

このようなパワー挿入限界、増幅器の帯域限界と、トラヒック需要予測を鑑みて、当時仏アルカテルのE. Desurvireが2006年の論文で容

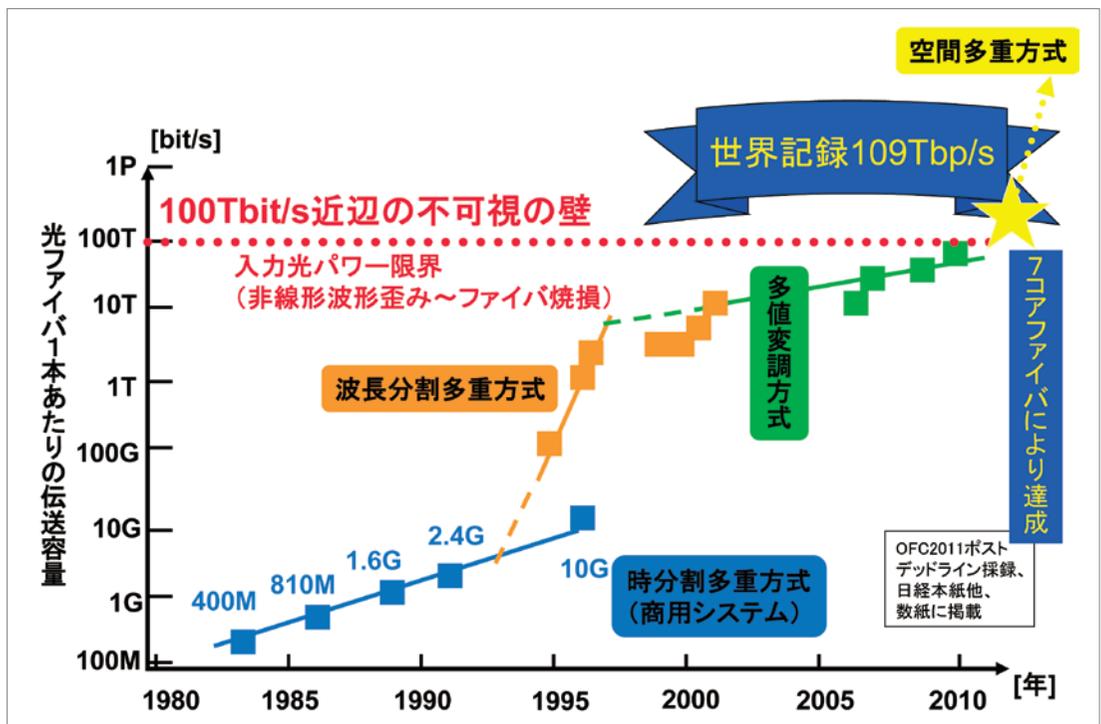
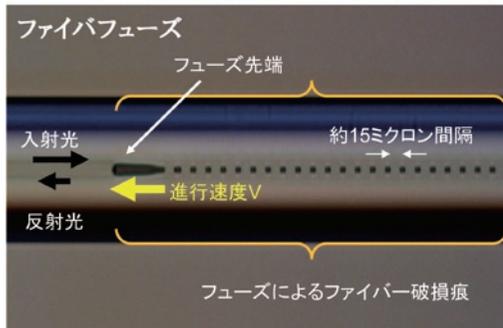


図1 容量枯渇とブレークスルー

- EXAT : EXtremely Advanced Transmission
- 光通信インフラの飛躍的な高度化に関する研究
 - NICTは2008年1月に第一期研究会を設置・開始
 - 飛躍的な高度化とは、現在の技術を3桁～5桁超えるリンク伝送容量・ノード処理容量の高度化をめざす

30年前に実用化された
SSMFの限界を打破



Multi-level modulation
Multi-core fiber
Multi-mode controlling
Triple "Multi-" Techs

図2 EXATイニシアチブと3M技術

量枯渇(Capacity Exhaustion) について問題提起しています。実際に、光ファイバ1本あたりの伝送容量の伸びは2001年を境に100テラビット毎秒に漸近して飽和しつつあるようにも見えます(図1)。しかしながら、このような危機的問題に対しての反応は芳しくなく、事実上放置されていたのですが、2008年1月にNICTの呼びかけにより、産学官の研究者が結集して誕生したEXAT研究会(光通信インフラの飛躍的な高度化に関する研究会)が本格的に取り組みを始めました。議論の結果、容量枯渇を打破し、来たる20年後に3～5桁(千～10万倍)の容量増加を実現するためには、多値変調(Multi-level modulation)、マルチコアファイバ(Multi-core fiber)、マルチモード制御(Multi-mode controlling)の3つの技術領域(3M技術: Triple Multi- Techs)を発展させることが重要であるとの結論を得て(図2)、同年11月に国際シンポジウムを開催して日本発のEXATイニシアチブとして世界に発信を始めました。その後も

関連の深い研究機関から矢継ぎ早に論文発表を行った結果、海外でも当該分野の急速な展開が始まっています。特に、マルチコアファイバやマルチモード(数モード)ファイバを積極的に利用した空間/モード分割多重伝送方式は、先述の光挿入パワー限界を大幅に押し上げることが可能な技術です。

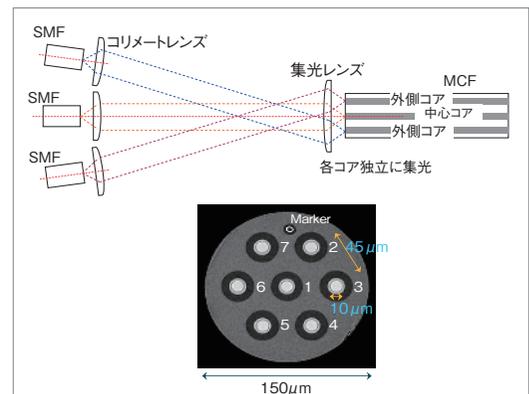


図3 レンズ結合型マルチコアファンイン/ファンアウトとトレンチアシスト型7コアファイバ

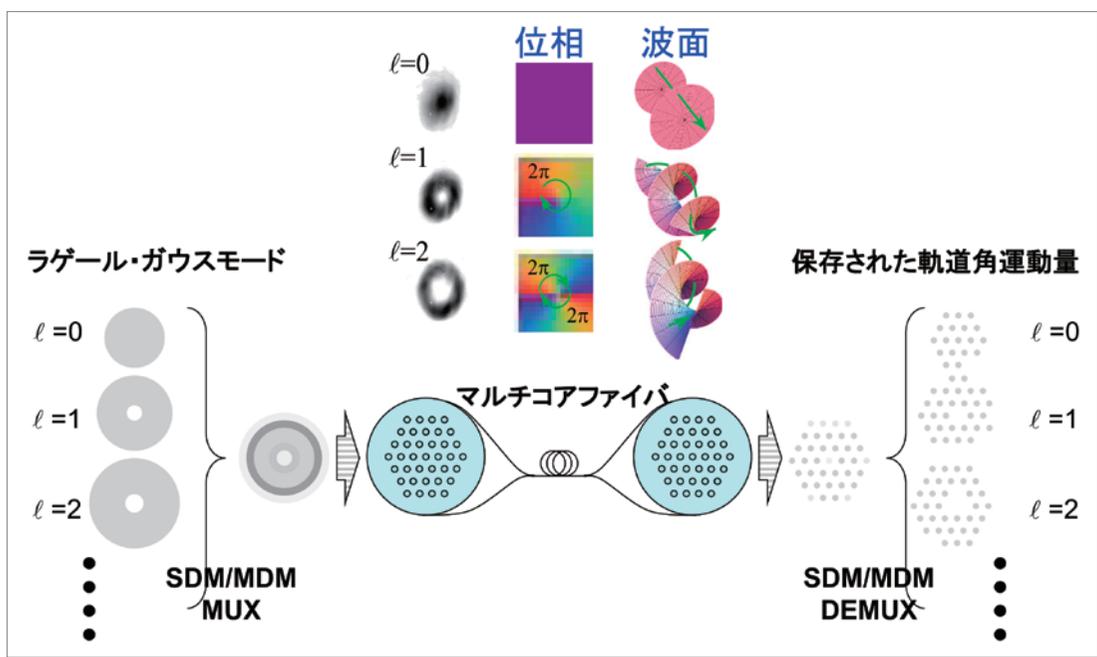


図4 マルチコアファイバによるラゲール・ガウスモード分割多重信号伝送

● 多角的な研究体制から生み出された世界記録

NICTにおいては、「革新的光ファイバ技術の研究開発」と「革新的光通信インフラの研究開発」の委託研究を実施して、国内の研究機関の力を結集し当該分野の研究開発の加速を図ると共に、自らも率先して先鋭的かつハイリスクな研究に取り組んでいます。

一例を紹介すると、空間光学の常識からは実現不可能とされていたレンズ結合型マルチコアファンイン/ファンアウト結合装置の開発に成功し、トレンチアシスト型7コアファイバを用いて、2011年に、当時、伝送容量の世界記録である109テラビット毎秒を達成しました(図3)。100テラビット毎秒は容量枯渇問題で実質的な壁と考えられていたので、これを新しい空間分割多重方式で突破したのは歴史的にも意義深いことと言えます。

また、NICTでは学会等で多数派を占める、高次LPモードを用いたモード分割多重方式と一線を画し、光通信業界ではほとんど知られて

いなかったラゲール・ガウスモードを用いたモード分割多重方式と光ファイバ伝送の実証実験を世界で初めて行いました(図4)。

● 今後の展望

今後は、引き続き我が国が当該分野で重要な役割を果たしていくために、国際協力・連携等を積極的に進め、関連技術の標準化、実用化の加速に貢献していきたいと思います。

用語解説

- *1 シリカ
二酸化ケイ素(SiO₂)、いわゆるガラス。
- *2 シャノン限界
通信チャンネルが持つ信号対雑音比と周波数帯域幅によって決まる、伝送容量の限界のこと。1948年にC. E. Shannonが定式化した。
- *3 プラズマ
気体の温度が上昇すると気体の分子は解離して原子になり、さらに原子核のまわりをまわっていた電子が原子から離れ、陽イオンと電子に分かれる(電離)。電離によって生じた荷電粒子を含む気体をプラズマという。

「ひかり」を自由にあやつる

— 高速高精度光変調技術で拓く大容量通信と宇宙をみる極限技術 —

「高速で高精度な光変調技術の研究は、将来の大容量光通信を実現するだけにとどまらず、宇宙をみるための究極の精度を持つ光信号源の研究につながっています。」



川西 哲也 (かわにし てつや)

光ネットワーク研究所
光通信基盤研究室 室長

学生ベンチャー、大手メーカー、大学といろんな環境を経て1998年にCRL(現NICT)のメンバーになりました。国内外の様々な機関の研究者、大学からの研修生の皆さんと力を合わせて光通信技術やマイクロ波フォトリソグラフィーの研究をしています。

菅野 敦史 (かんの あつし)

光ネットワーク研究所
光通信基盤研究室 主任研究員

2005年筑波大学大学院卒。筑波大学大学院VBL特別研究員を経て2007年NICT入所。大学時代のテーマである半導体光物性研究から一貫して光技術の研究に従事。高じて写真が趣味となり日夜研鑽中。



● 光変調技術で「ひかり」をあやつる

今や「ひかり」といえば新幹線というよりも先にインターネットが思い浮かぶのではないのでしょうか。誰もが携帯電話やインターネットを使ったときに、どこかで「ひかり」を使った通信、すなわち、光通信のお世話になっているはずです。光ファイバを使えば、遠くまで光にのせた情報を伝えることができます。人間同士が会話をするときには音の高さや強さ、長さを変化させて情報を伝えるように、光通信では光を変化させます。このことを光変調と呼びます。最も簡単な光変調として光が「ある」、「ない」の2通りでデジタル信号を送るオンオフキーイング(OOK)と呼ばれる方法がこれまで使われてきました。最近では、メールを消さずにどんどんため込む、デジタルカメラでどんどん撮影するといった、とにかくデータを保存しておいて必要なときに選んで取り出すというライフスタイルが広がりつつあり、大量のデータをス

ムーズにやりとりする技術が求められています。私たちは、このようなニーズに応えるため、高速光通信を支える光変調技術の研究開発を進めており、光変調の高速性の追求に加えて正確に光をあやつる技術で世界トップクラスの成果を上げています。この技術は様々な分野での利用が期待できる中で、私たちは、極限性能を追求する電波天文への応用を目指した研究を行っています。ここでは大容量通信を実現するための最新の高速高精度光変調技術と巨大な電波望遠鏡を支える基準信号発生技術を紹介します。

● 高速高精度光変調で大容量の光通信を

光は光波とも呼ばれ、電波と同じ電磁波の一種です。電磁波を特徴付けるのは、大きさ(振幅)、振動の速さ(周波数)、波動のタイミング(位相)の3つの要素です。これらを変化させることで、情報を伝えます。先にご紹介した OOK は、振幅

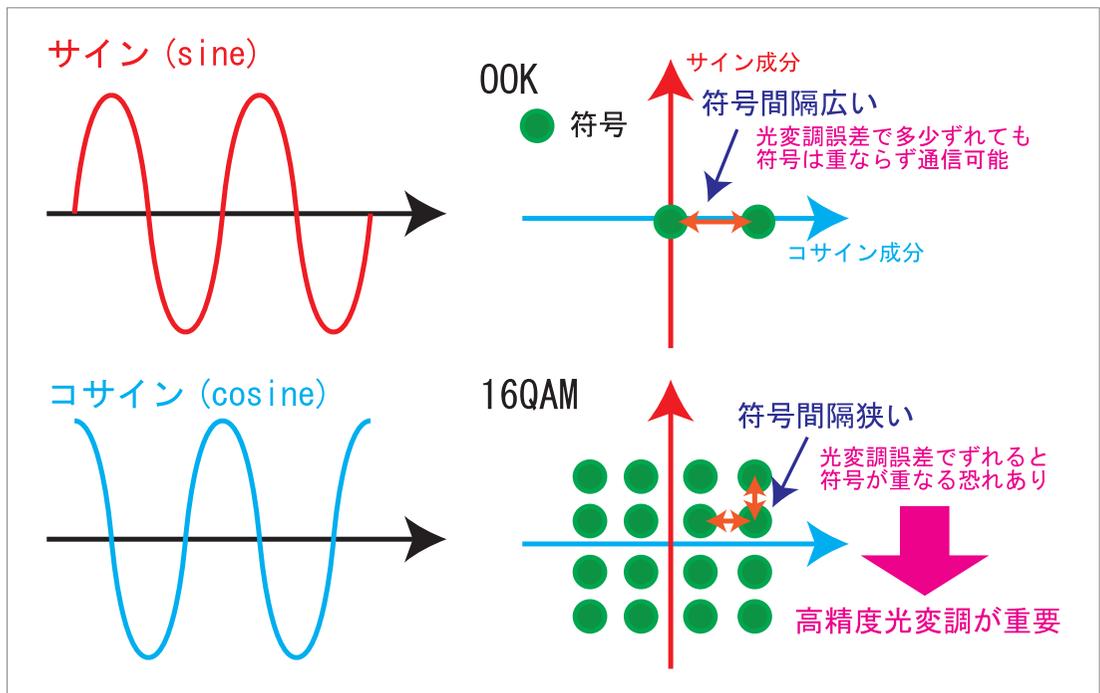


図1 (左) 光の波形：サインとコサイン (右) OOKと16QAMのコンステレーション

が“1(オン)”か“0(オフ)”の2通りの光波の状態(シンボルまたは符号と呼ぶ)を使うもので、1回の光変調でデジタル信号を1つ(1ビット)伝えることができます。より多くの情報を送るためには、①光変調をより速くする、②1回の光変調でより多くのビットを送る、という2つのアプローチがあります。①は高速に、②は高精度に光を変調する技術に相当します。長年にわたり①の高速化が研究のトレンドでしたが、NICTでは世界に先駆けて①と②の両立に取り組んできました。

ここで、②の高精度光変調について説明します。位相、振幅をそれぞれ、2通りずつ、組み合わせを考えると全部で4つの符号を使えば1回の変調で2ビットを送ることができます。nビット送るためには 2^n 個の符号が必要です。符号を増やすには正確な光変調が重要になります。日本語の発音に例えてみましょう。五十音に加えて、同じ「あいうえお…」でも振幅の小さいものを別の音とすると決めたとします。そうすると、短い言葉でたくさんの情報を伝えることはできるかもしれませんが、音の大きさを正確に言い分ける、聞き分ける能力が必要になります。光変調でも同

じことがいえます。光の状態をより正確に制御できないと符号の区別ができなくなります。波動の一種である光波は図1(左)に示すようなサイン、コサインの2成分で表されます。周波数を一定とすると、光波の状態、つまり、光変調の形式はこれらの2成分を縦軸・横軸とした平面上の点で表すことができます。一度にたくさんの情報を送るときには多数の符号が必要になります。符号を2次元平面上に表した図のことをコンステレーション(星座図)と呼びます。複雑なコンステレーションをもつ信号を高速で発生させることが大容量伝送実現の鍵です。図1(右)は16個の符号を使って一度に4ビットの信号を送る16値直交振幅変調(16QAM)と従来のOOKのコンステレーションです。16QAMでは符号間の距離が小さく、高精度光変調が重要であることがわかります。NICTは一度に2ビット送ることができる4値位相変調(QPSK)と高速な変調速度を両立する技術を世界で初めて2004年に発表し、それ以降、1つの光で100Gbpsの通信を実現することは特別なことではなくなりました。さらに世界初の50Gbps 16QAMを可能とする集積

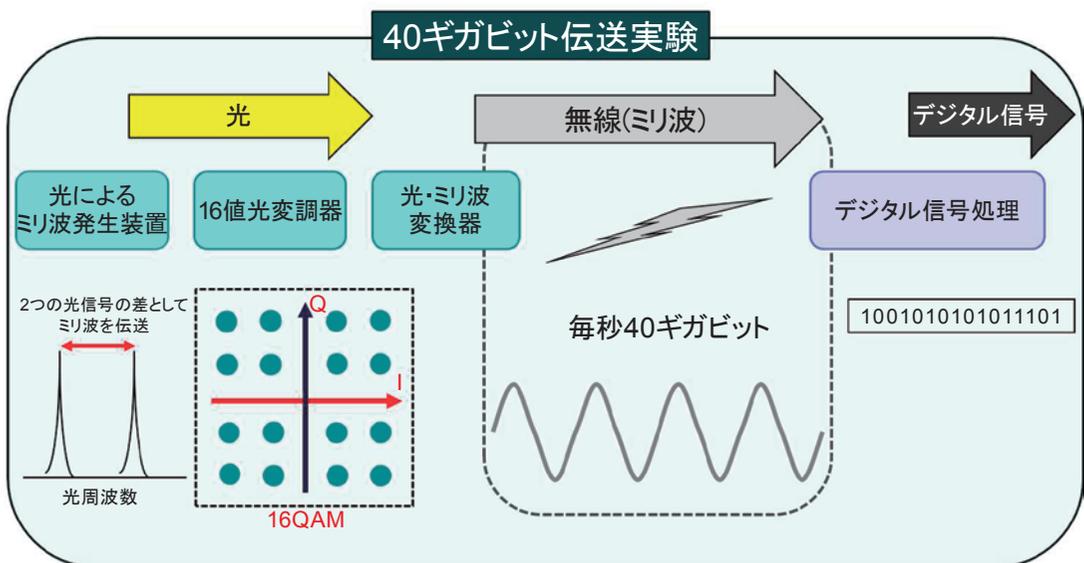


図2 光ファイバ無線技術による超高速無線伝送の概念図

光変調デバイスを実現しました。無線分野では従来から様々で複雑な変調方式が利用されてきましたが、光の周波数は携帯電話の使用周波数と比べて10万倍高く、複雑な変調方式は困難であるというのが常識でした。しかし、ここで紹介した高速高精度光変調技術や、高速信号処理技術などによりこの課題は克服されつつあります。一方、光変調技術で、高度な無線変調信号を発生させることも可能となり、世界最高速度(2011年9月当時)の40Gbps無線伝送を実現しています(図2)。

● 究極の高精度光変調で宇宙をみる

また、極限技術へのチャレンジとして、国立天文台と共同で世界最大の電波望遠鏡ALMA(アタカマ大型ミリ波サブミリ波干渉計)向けの基準信号発生技術の研究を行っています。ALMAはチリの高山地域で国際プロジェクトとして開発が進められている世界最高の感度と分解能を備えた電波望遠鏡です。最長18.5km離れた66台以上のパラボラアンテナで構成されます。これらのアンテナを連動させるためには基準光信号が必要となります。光変調の精度を表す重要

な指標である消光比(光をオフしたときに消え残る光の大きさを表す)がありますが、従来技術と比べて1万倍を達成しました(図3)。ALMAが必要となる高い安定度、広い周波数範囲での信号発生などの条件を満たす信号源を高い消光比の光変調技術で実現しました。高い消光比の変調はALMA向けの信号源だけではなく、より高度な変調方式実現に重要であることが明らかになってきています。基礎研究から応用研究までを一貫して確実に進めていくことの重要性を示す成果であるといえるでしょう。

大容量通信のために光ファイバの中でコンステレーションを描きながら、本当の宇宙をみるための技術にもつながるなんて、夢があると思いませんか？

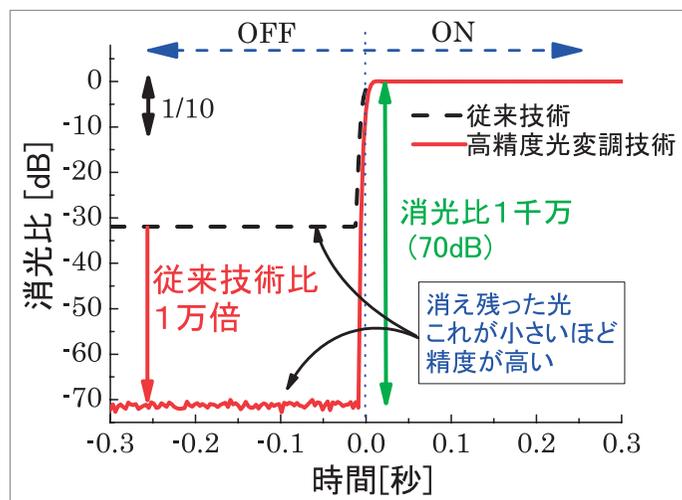


図3 高消光比変調による光のオン/オフ

I-2 NICTワイヤレスネットワーク 研究所の研究開発概要



門脇 直人 (かどわき なおと)

ワイヤレスネットワーク研究所
研究所長

子供の頃からラジオ少年として育ち、今でもラジオなしでは生きていけない。スポーツは大学で少しかじったアメリカンフットボールとスイミング。カラオケではサザンオールスターズ、読書はSF、特に J.P. ホーガンが好き。空海を尊敬し、たまに寺社仏閣巡りに出かける。

「移動環境や災害等の非常時、有線によるアクセスが困難な領域などで、周波数資源やエネルギー資源を有効利用しつつ、人やモノが柔軟かつ確実に繋がるワイヤレスネットワークの研究開発を行っています。」

ワイヤレスネットワーク研究所は、新世代ネットワークにおける重要な役割を担うワイヤレス通信技術の研究を進めると同時に、安心・安全でスマートな社会実現への貢献、ワイヤレスコミュニケーションの源泉である周波数資源の一層の高度利用への貢献を果たすことを目的とした研究開発を行っています。図に研究開発の方向性を示します。

● 新世代ネットワーク実現のためのワイヤレス研究

ワイヤレス通信技術は、光ファイバの敷設が困難な地域や移動環境においてネットワーク接続を行うために必要不可欠です。様々なユーザの要

求に応え、確実にネットワーク接続を実現するため、簡易な低速伝送端末からギガビット級の超高速伝送までスケラブルに通信可能なワイヤレスネットワーク技術や、基地局やアクセスポイントに依存しない自律的なワイヤレスネットワーク技術、地上のみならず海域や上空、宇宙空間の移動体をブロードバンドに接続する宇宙通信技術を開発することにより、ネットワークのカバレッジや利用形態を大きく拡張することが可能となります。これらの技術は光ファイバ網との連携・融合により、新世代ネットワークの構築において重要な機能を実現可能とするものです。

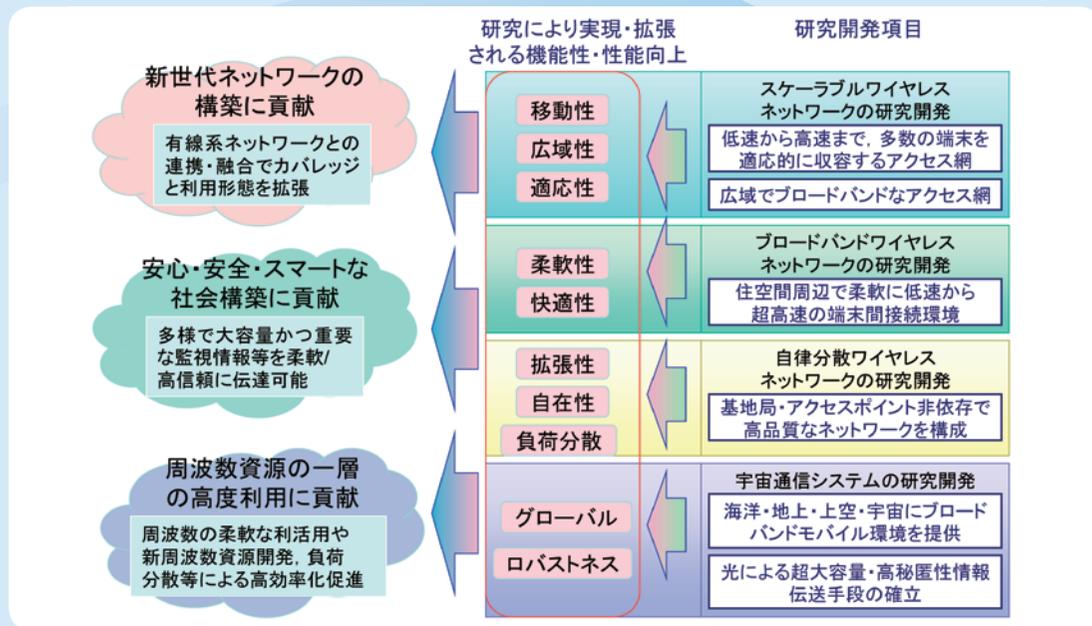


図 ワイヤレスネットワーク研究所の研究開発の方向性

● 安心・安全でスマートな社会構築に貢献するワイヤレス研究

前述のスケーラブルなワイヤレスネットワーク技術は、これまでに研究開発を進めてきたコグニティブ無線技術、スマートユーティリティネットワーク技術等を基に融合システム化およびプラットフォーム化技術を確立することにより実現できるものです。この技術は自然環境やエネルギー消費量、電波利用環境など多様な情報を集約し、かつ解析された情報をフィードバックすることにより、例えばエネルギー消費量を制御するようなシステムの構築に貢献できます。また、通信インフラのない地域での観測情報収集などを可能とする自律ワイヤレスネットワーク技術や、観測衛星など宇宙からの大容量観測情報を地上に伝送する宇宙通信技術は、環境監視や国土保全、防災・減災のために重要な役割を果たします。東日本大震災の直後には、超高速インターネット衛星「きずな」用地球局を被災地に運び、救援活動に当たる東京消防庁や航空自衛隊の前線基地と首都圏の本部の間にブロードバンド衛星回線を提供し活動を支援しました。また、コグニティブ無線ルータを避難所等に設置して被災者や地方自治体にインターネット接続環境を提供する等の活動を行いました。このように安心・安全でスマートな社会構築に直接貢献するシステム研究と実証をあわせて推進しています。

ブ無線ルータを避難所等に設置して被災者や地方自治体にインターネット接続環境を提供する等の活動を行いました。このように安心・安全でスマートな社会構築に直接貢献するシステム研究と実証をあわせて推進しています。

● 周波数資源の一層の高度利用のためのワイヤレス研究

携帯電話をはじめ多様な無線通信システムの爆発的な利用拡大に伴い、システム拡張や新たなブロードバンドワイヤレス技術の導入のための周波数確保は困難な状況になってきています。そのため、周波数資源の一層の高度利用技術が求められています。この要求に応えるため、コグニティブ無線技術を応用したホワイトスペース通信技術(特定の場所や時間帯での未利用周波数帯を活用したワイヤレス通信技術)や、インフラ系/自律系ワイヤレスネットワークおよび有線系ネットワークの協調によるトラヒック分散技術、さらにテラヘルツ領域の通信応用技術の研究開発など、周波数利用の一層の効率化や新たな周波数資源の開発に取り組んでいます。

体とその周囲を取り巻く ボディエリアネットワーク

－健康見守り、視覚障がい者安全補助へのアプローチ－

「ボディエリアネットワーク(BAN)とその標準規格 IEEE802.15.6 について述べ、超広帯域無線を用いて試作した健康見守りのための BAN と視覚障がい者安全補助のための BAN を紹介します。」

李 還幫 (リ カンホウ)

ワイヤレスネットワーク研究所
ディペンダブルワイヤレス研究室 主任研究員

1994年名古屋工業大学大学院博士後期課程了。博士(工学)。同年郵政省通信総合研究所(現 NICT)入所。以来、技術試験衛星 ETS-VI や COMETS などを用いた移動体衛星通信の実験研究、ウルトラワイドバンドとボディエリアネットワークの研究開発および標準化活動などに従事。1999～2000年、米国スタンフォード大客員研究員。2002年より電通大客員准教授、2009年より同客員教授。2006～2012年、IEEE802.15.6 副議長。2011年より電子情報通信学会通信ソサイエティ研専連営会議副議長。1995年度電子情報通信学会学術奨励賞、1997年度同論文賞、2002年科学技術庁注目発明、2009年 NICT 個人成績優秀賞、2012年 IEEE-SA Standards Board acknowledges with appreciation 各受賞。著書「ビタビ復号を用いたブロック符号化変調方式」、[Wireless Body Area Network](共著)など。現在、歴史本を嗜み中。



ボディエリアネットワークとその標準化

ボディエリアネットワーク(BAN: Body Area Network)は、図1に示すように、体の表面、中およびそのごく近辺に配置されている小型端末を無線通信で結ぶことによって構成され、体とその周囲を取り巻く無線ネットワークです。体温、心電、3軸加速度などを測るセンサーと組み合わせれば、体の健康状態と活動状況をリアルタイムにモニタでき、生活習慣病予防や高齢

者見守り、そして看護負担軽減などでの利用に役に立ちます。また、ゲームコントローラやワイヤレスヘッドホンなどの身の回りで用いる小型端末間の音声、画像、データのワイヤレス伝送にも利用できるため、安心、安全、便利な暮らしを支える技術として、注目を集めています。

近年、無線 LAN や Bluetooth などが普及し、身近で利用されるようになってきていますが、これらの無線標準規格を策定したのは、

IEEE802 LAN/MAN 標準化委員会です。同標準化委員会は、2007 年 12 月に BAN の無線標準規格を策定するためのタスクグループを設置し、アメリカ、欧州およびアジアから30以上の研究機関、企業、大学が集まり、世界で共通に利用できる BAN 仕様を定める作業を進めました。そして、2012 年 2 月に、BAN の無線標準規格が完成され、IEEE802.15.6 という番号が付与されて発行されました。

● 超広帯域無線と BAN

標準規格 IEEE802.15.6 は、通信方式や電波仕様などを定義する物理(PHY)層、およびネットワークのセットアップと端末のチャネルアクセス方法などを定義する媒体アクセス制御(MAC)層の規格を定めています。NICT は健康見守りとヘルスケアへの応用に重点を置きながら、BAN タスクグループの立ち上げ、標準仕様の提案および標準化作業において中心的な役割を果たしました。図 2 に示すように、NICT は法制化小委員会、チャネルモデル小委員会、技術仕様要件小委員会などを主導しました。

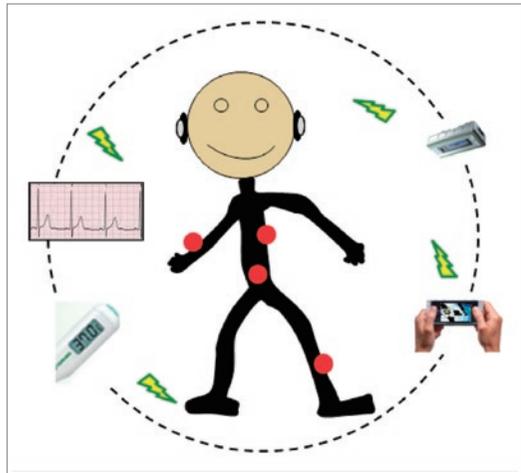


図1 体とその周囲を取り巻くBAN

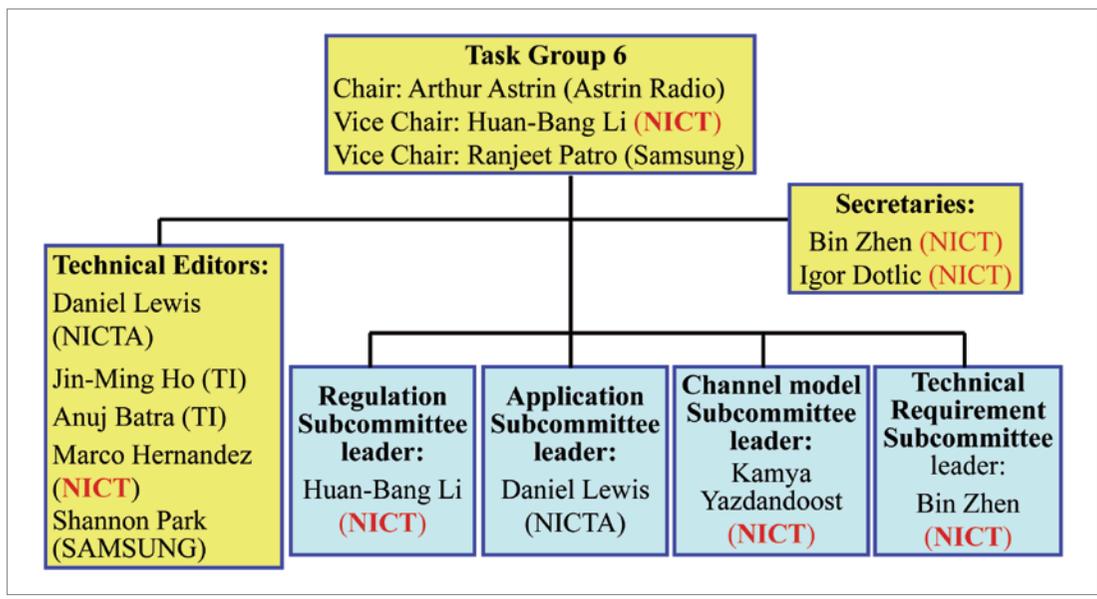


図2 BAN標準化タスクグループの組織図

BANは狭帯域無線技術または超広帯域(UWB: Ultra-Wideband)無線技術を用いて実装できます。狭帯域無線技術は確立されているものが多いのに対して、UWB無線技術は新しく開拓する必要のある技術です。UWBは非常に広い周波数帯域幅(500MHz以上)にわたって電力を拡散させ、極めて低い電力密度をもって通信を行うことが特徴で、以下の利点を有します。

- ・放射電力密度は従来の狭帯域信号の数万～数十万分の一程度で、人体への影響が小さいと考えられます。
- ・低消費電力の特徴があり、小型電池で動作するBANにとって好適です。
- ・放射電力密度が低く、かつ高い周波数を使用するため、電波の伝搬距離が限定的であり、システム間の共存にとって好都合です。
- ・狭帯域PHYよりも高いデータレートをサポートします。

一般にUWBに割り当てられている周波数帯域は、ローバンド(日本では3.4～4.8GHz)とハイバンド(日本では7.25～10.25GHz)に分けられるため、国と地域によって使用周波数帯域が異なります。ローバンドの使用は干渉回避の制限がかけられるため、制限のないハイバンドを用いたシステムが望まれます。

超広帯域無線を用いたBANの研究開発

● 健康見守りBAN

健康見守りBANは、図3に示すように腕時計型、ペンダント型、腰ベルト装着型などの体へ取り付ける小型端末と固定型端末から構成されます。これらの端末はそれぞれ脈拍、心電、3軸加速度、体重等のセンサーと組み合わせて用いられます。端末は全て国内法制度で認められているUWBハイバンドを用いました。腰ベルト装着型端末はBANのハブであり、ネットワークの形成と制御、および他の端末へのチャネル割当を行うなどの役割を担っています。各端末は1秒ごとにデータを送信していますが、1回のデータ送信とハブから受信したとの返信を受け取るまで約4ミリ秒で完了します。残りの時間は送受信を行わないスリープモードに移り、消費電力の削減につとめています。

図3のモニタ画面の例では、各種取得データがリアルタイムに表示され、3軸加速度計によって、人の転倒を検知してアラームを鳴らしている例を示しています。

● 視覚障がい者安全補助用BAN

視覚障がい者安全補助用BANは、アメリカ、欧州、および日本などで共通に利用できる

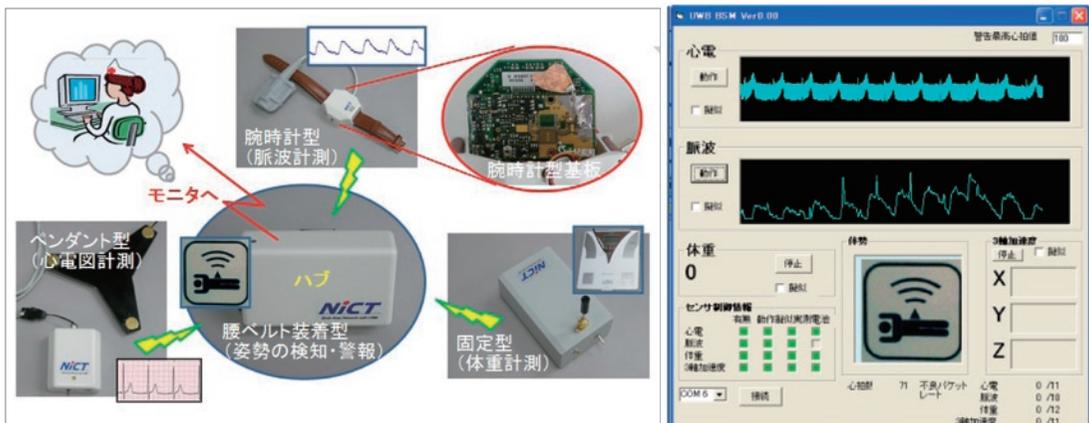


図3 健康見守りBANの構成とモニタ画面例



図4 視覚障がい者安全補助用BAN

UWB ハイバンド 7.25 ~ 8.5GHz を用い、その全体構成は図4のとおりです。

サングラスにカメラを取り付けて交通信号などの色信号、腕時計型端末からは脈波、SpO₂ (血中酸素飽和度)、体温などのデータ、杖に取り付けられている超音波センサからは進路障害物検知情報などを取得させます。これらの情報をUWB 経由でベルト装着ユニット(ハブ)に送り、特にカメラの画像伝送はUWBの高速データレート特徴を利用しています。ハブでは認識した色を音声で教え、また、進路に障害物があるときに、これを検知し音声で告げます。モニタには、障害物までの距離や、脈波、SpO₂、体温などのデータが表示され、これらのデータを音声または振動等の形で使用者に伝えれば、周囲状況の把握や健康管理などにさらなる活用が可能です。

まとめ

BAN は体を取り巻く小型端末からの音声、画像、データなどを利便的に取り扱い、様々な利活用が可能です。標準規格 IEEE802.15.6 が成立し、そして発行されたことは、さらに BAN の技術開発に拍車をかけ、安心・安全な福祉社会を実現する1つのコア技術として、大いに期待されます。

高度電波利用データベース技術を利用した次世代ワイヤレス通信ネットワーク

「ブロードバンド通信用周波数の枯渇に対応するため、『空間的』『時間的』に利用可能な周波数を二次利用する技術が高度電波利用データベースを用いたワイヤレス通信です。」

原田 博司 (はらだ ひろし)

ワイヤレスネットワーク研究所
スマートワイヤレス研究室 室長

大学院修了後、1995年よりCRL(現NICT)勤務。主に次世代無線通信システムの研究開発(通信方式)、標準化活動に従事。モットーは「波は乗るものではなく、波は作るものである」、「2回考える前に、まずは行動」。博士(工学)。

背景

携帯電話に代表される無線局の数は既に1億台を超え、既に移動通信に適した周波数帯で確保できるチャンネル数(周波数帯域)は限界に達しつつあります。しかしながら、昨今のブロードバンド化への要求の高まりとともに、次世代で求められる無線機に対してもブロードバンド化が要求され、周波数の有効利用を行いつつブロードバンド通信を行う周波数帯域を確保する必要があるというジレンマに陥っています。

この問題を解決するために、免許されている無線局(これを周波数の一次利用者と呼びます。)の利用周波数帯であっても、空間的、時間的に利用されていない時間であれば、その周波数を一次利用者への干渉を起こさないよう利用を行う周



波数の二次利用(共同利用)を行うワイヤレスネットワークの研究開発を現在行っています。

図1にその利用モデルを示します。1つは、この技術を基地局に導入した場合です。基地局自らが一次利用者に割り振られていない周波数、もしくはシステムに既に割り振られているが利用されていない周波数を見つけ出し、その周波数を用いて独自の通信システムを実現させるものです。もう1つが、端末に導入した場合です。端末自らが一次利用システムに割り振られていない周波数、もしくは各システムに割り振られているが利用されていない周波数を見つけ出し、次に、その周波数を用いて端末間で通信を行います。

この周波数の再利用を行うワイヤレスネットワークを実現するには、電波の一次利用者の電波の利用状況を適切に把握するとともに、

①一次利用者からの通信領域と再利用を行う無線局の通信領域が干渉しないよう電波を高度に監理する高度電波利用データベース技術及びこの技術を用いたワイヤレスクラウドネットワーク、②電波の一次利用者に干渉を与えることがわかった場合、もしくは、通信トラフィックが変わった場合に、周波数、送信出力、通信方式等の各種無線パラメータを変更する再構築可能無線機(基地局、端末)等の研究開発が必要になります。

● 高度電波利用データベース技術を利用したワイヤレスクラウドネットワーク

高度電波利用データベース技術を利用した周波数共同利用ワイヤレスクラウドネットワークの概要を図2に示します。同図においては、一次利

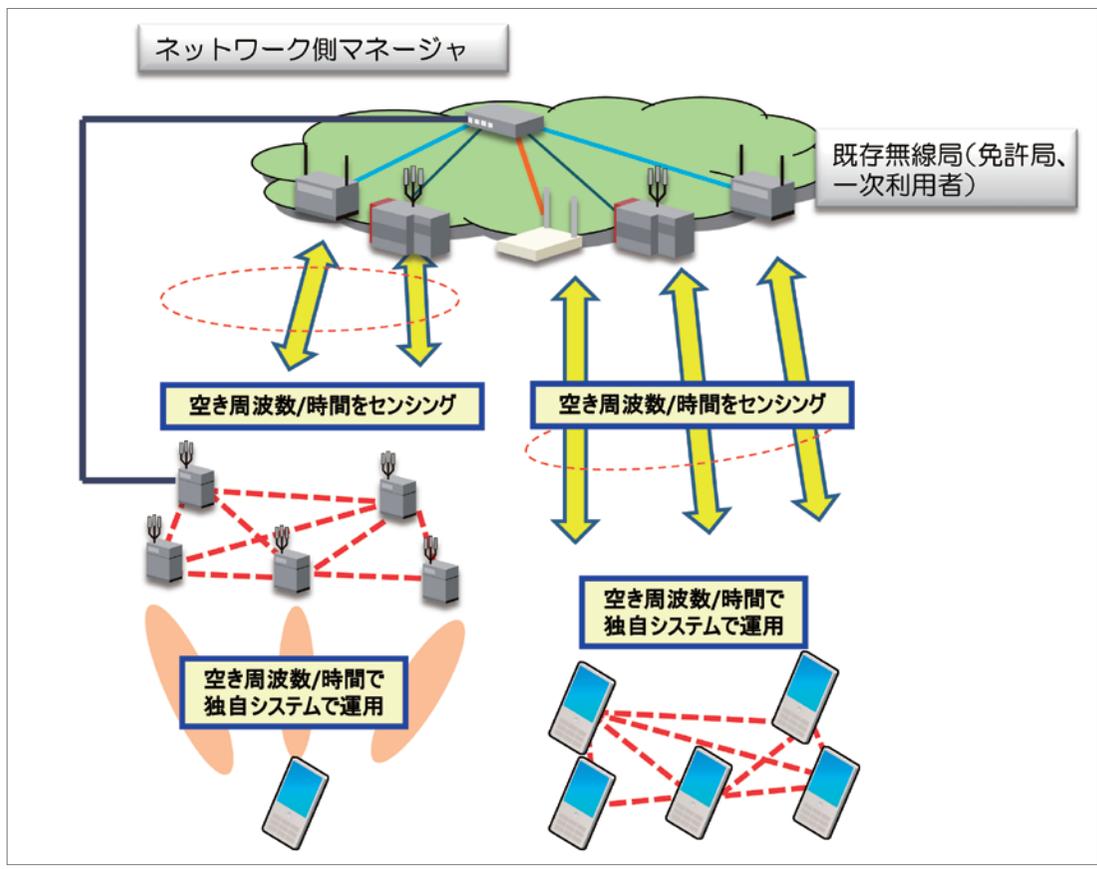


図1 利用モデル

用者が利用している周波数帯を3つの二次利用者(二次利用無線ネットワーク)が利用することを想定しています。

まず、すべての二次利用者は、(a)一次利用者と二次利用者間の高度電波利用サーバ(以下サーバ(a)とする。)にアクセスします。このサーバ内には電波の利用状況を示すデータベースがあり、一次利用者の位置、無線局の情報(出力に代表される無線パラメータ)、アンテナに関する情報(高さ、利得、方向等)の情報が格納されています。このサーバに対し、二次利用者は自身の無線局の情報、位置、アンテナの情報等を入力し、一次利用者干渉を与えない周波数を調査してもらいます。そして、二次利用者はこの周波数を利用して通信を開始します。

上記の手順により、一次利用者と二次利用者との間で干渉を起こさない通信が実現できますが、二次利用者間には干渉を引き起こす可能性が

あります。そこで、さらに同図(b)、(c)で記載した二種類の二次利用者間電波監理/共存サーバを用いて二次利用者間で干渉が起きないように周波数の監理を行います。

(b)と(c)の違いは、(b)は異種アクセス方式を用いた二次利用者間の電波監理/共存を検討するサーバであり、(c)は同種アクセス方式を用いた二次利用者間の電波監理/共存を検討するサーバである、ということです。(c)は必要に応じて設置され、すべての二次利用者が(c)を介さず直接(b)に接続されることもあります。

(b)および(c)の基本動作はほぼ同じです。各サーバは、二次利用者から、自身の位置、無線機の情報、アンテナに関する情報を得、これをもとに、各二次利用者干渉を与えない周波数等の通信パラメータを調査してもらいます。そして、二次利用者はこの周波数を利用して通信を開始します。干渉を与えるようでしたら、干渉を減ら

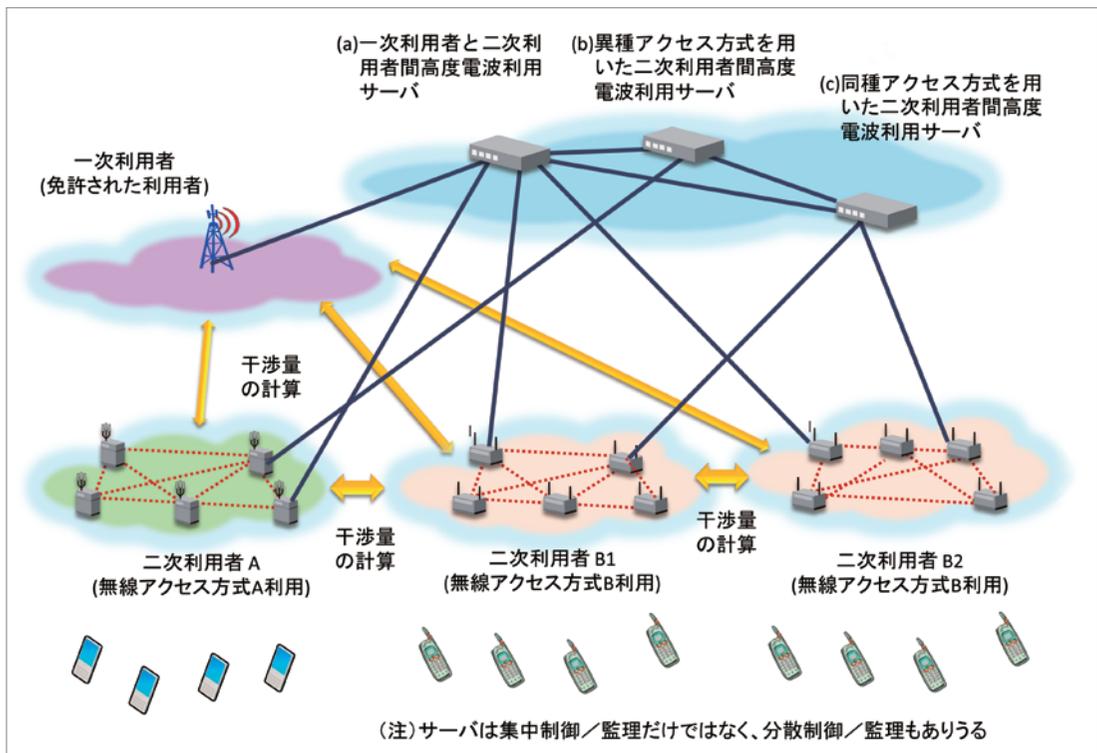


図2 高度電波利用サーバ技術を利用した周波数共同利用ワイヤレスクラウドネットワークの概要

すための方策(周波数の変更、出力の低減等)をそれぞれの利用者に必要に応じて提案します。

以上のような高度電波利用データベース技術を用いることによる周波数共用を行うことにより、高密度な電波利用を行います。NICT では、すでに図 3 に示すワイヤレスクラウドネットワーク用サーバ群を設置し、この技術が実現できる体制にあります。さらに、図 4 に、このサーバで表示可能な一次利用者の電波利用状況を示します。



図3 整備しているワイヤレスクラウドネットワーク用サーバ群

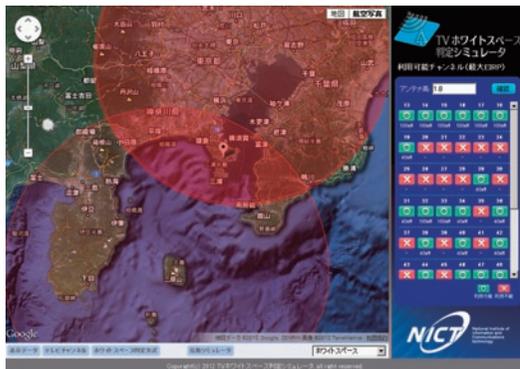


図4 高度電波利用サーバの利用例(一次利用者、この例はTV局の放送エリアの表示と、ある位置での利用可能なチャネルの情報の表示)



図5 再構築可能無線機(左: 高周波部、右: 信号処理部)

再構築無線機の研究開発

さらに、このワイヤレスクラウドネットワークで決定した各種無線パラメータが変更可能な無線機についての研究開発を行っています。図 5 に示すように、周波数、出力等を自由に変更可能な、各種周波数(400MHz - 5GHz 帯)で対応可能な、アンプ、ミキサ等の開発およびそれらを集積化した高周波部、そして、信号処理回路を駆使し、ソフトウェアの変更のみで、通信方式を変更可能なソフトウェア無線機の開発を行っています。すでに、IEEE802.11 系、802.16 系無線システム、第 3 世代携帯電話システム等が実現できるソフトウェアの開発も終了しています。これらの既存システムをこの高度電波利用サーバを利用して、利用可能な周波数に自由に移動することができ、電波の高密度利用が可能になります。

今後の展望

このようなネットワーク実現のためには、国際的な仕様の基準づくりである標準化が必要になります。また、各国の規制当局との調整が必要になります。現在、米国、英国、日本を中心として、この技術基準づくりが行われつつあります。現在まで、国際標準化機関へ 1,000 件以上の寄与文書を提出し、研究開発の成果を標準化させようとしており、すでに数多くの技術が標準仕様として採択されています。今後は実現に向けた大規模実証、国際協調を積極的に行う予定です。



電波をフレキシブルに利用する コグニティブ無線システム

ー試作システムの紹介と国際標準規格への取り組みー

「携帯電話のような無線端末が接続するシステムは、通信方式や周波数があらかじめ決められています。無線端末の接続先や使用するアプリケーションは場所や時間により異なるので、同一地域で複数のシステムを同時に運用する場合、電波の利用に偏りが生じます。その結果、効率的に電波を使用できず、通信速度が遅くなるなどの問題が発生します。このような問題を解決する『コグニティブ無線技術』について紹介します。」

石津 健太郎 (いしづ けんたろう)

ワイヤレスネットワーク研究所
スマートワイヤレス研究室 研究員

大学院修了後、2005年よりNICT勤務。実証システム開発や国際標準化活動など精力的な研究開発を推進。東日本大震災後には、開発した機器を自ら展開して支援活動を実施。学生時代はボーイスカウト指導者。現在の趣味は、登山、水泳、ドライブなど。博士(情報科学)。

背景

携帯電話を使った無線によるデータ通信の利用は、1990年後半にメール交換や簡単な情報提供サービスにより始まりましたが、特にスマートフォンが一般的になった2010年以降では、従来はケーブル(有線)接続によりパソコンでアクセスしていたような情報も、日々の生活の中で無線ネットワークを使って通信されるようになりました。無線ネットワーク通信の需要は爆発的に増加を続けており、今後はますます拡大することが予想されます。

無線通信を行うために必要な周波数は無線通信事業者や無線システムに割り当てられますが、特に6GHz以下の移動通信に適した周波数は割当てがひっ迫しています。利用者の需要に応えよ



うと様々な無線技術の研究開発が行われてはいますが、周波数の割当てには限界があり、電波を限りある資源と考えて、より効率的に利用することが求められています。その技術のひとつとして、「コグニティブ無線」と呼ばれる技術が注目されています。

コグニティブ無線とは、システムが周囲の電波環境を認識(センシング)して、その結果に基づいて最適な電波の利用方法を決定し、その決定に基づいて無線システムの機能を変更(再構築)する一連の技術を指します。例えば、運用されている複数の無線システムのうち、利用率が低い無線システム

を積極的に使用すれば、電波をより有効に利用できるようになります。

コグニティブ無線技術は、図1に示すように大きく2つに分類できます。「ヘテロジニアス型」は、運用中の無線システムのうち、利用率が低い等の観点から無線システムを選択し、無線資源に余裕がある無線システムを積極的に使用することにより、無線ネットワーク全体の通信速度や利便性を向上させます。「周波数共用型」は、地理的あるいは時間的に他システムへの電波干渉を与えないと判断される周波数を使用することで、新たな無線システムの運用を可能にします。

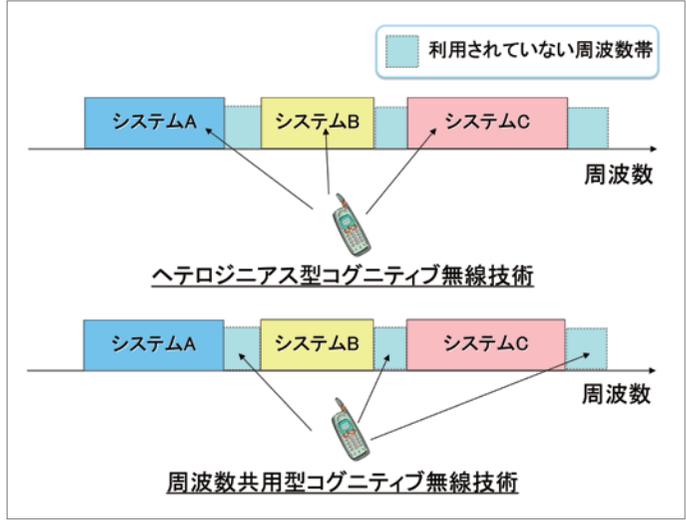


図1 コグニティブ無線技術の分類

● コグニティブ無線システムの構成と試作

コグニティブ無線技術は、それぞれの端末に個別に適用しても効果はありますが、多くの端末に適用して協調して制御を行えば、より効率的な運用が可能です。特に、LTE、WiMAX、無線LANのような異なる無線システムから構築された「異種無線ネットワーク」では、図2に示すように複数の機器が協調制御された無線ネットワークを構築でき、端末や基地局の測定情報を

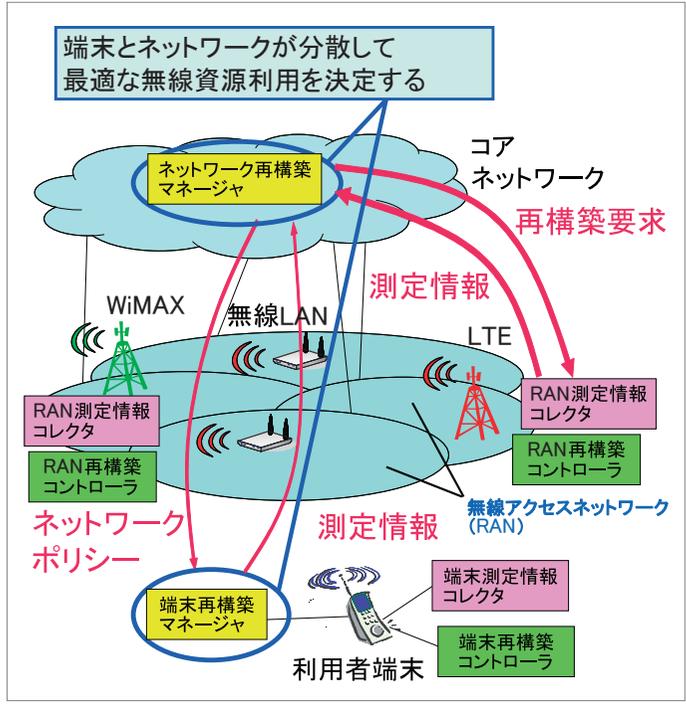


図2 コグニティブ無線ネットワークの構成

ネットワーク再構築マネージャに報告して、高速、安定、低料金など各無線システムの異なる特徴に着目した統計処理や高度な分析に基づく制御が可能になります。

ここでは、コグニティブ無線ネットワークの実現例として、2つの試作機を紹介します。まず、ヘテロジニアス型の実現例として、図3に示すコグニティブ無線ルータシステムがあります。このシステムでは、商用の異種無線ネットワークと利用者端末向けローカ

ル無線LANを「コグニティブ無線ルータ」と呼ばれる機器が中継します。ネットワーク再構築マネージャとコグニティブ無線ルータが協調して無線アクセスネットワークを選択しますので、利用者は使用する無線アクセスネットワークを気にせず、自動的に最適なものを利用できます。NICTでは、2010年9月から1年半の間、神奈川県藤沢市に500台のコグニティブ無線ルータを設置して大規模実証実験を行い、市町村規模での動作を評価しました。また、東日本

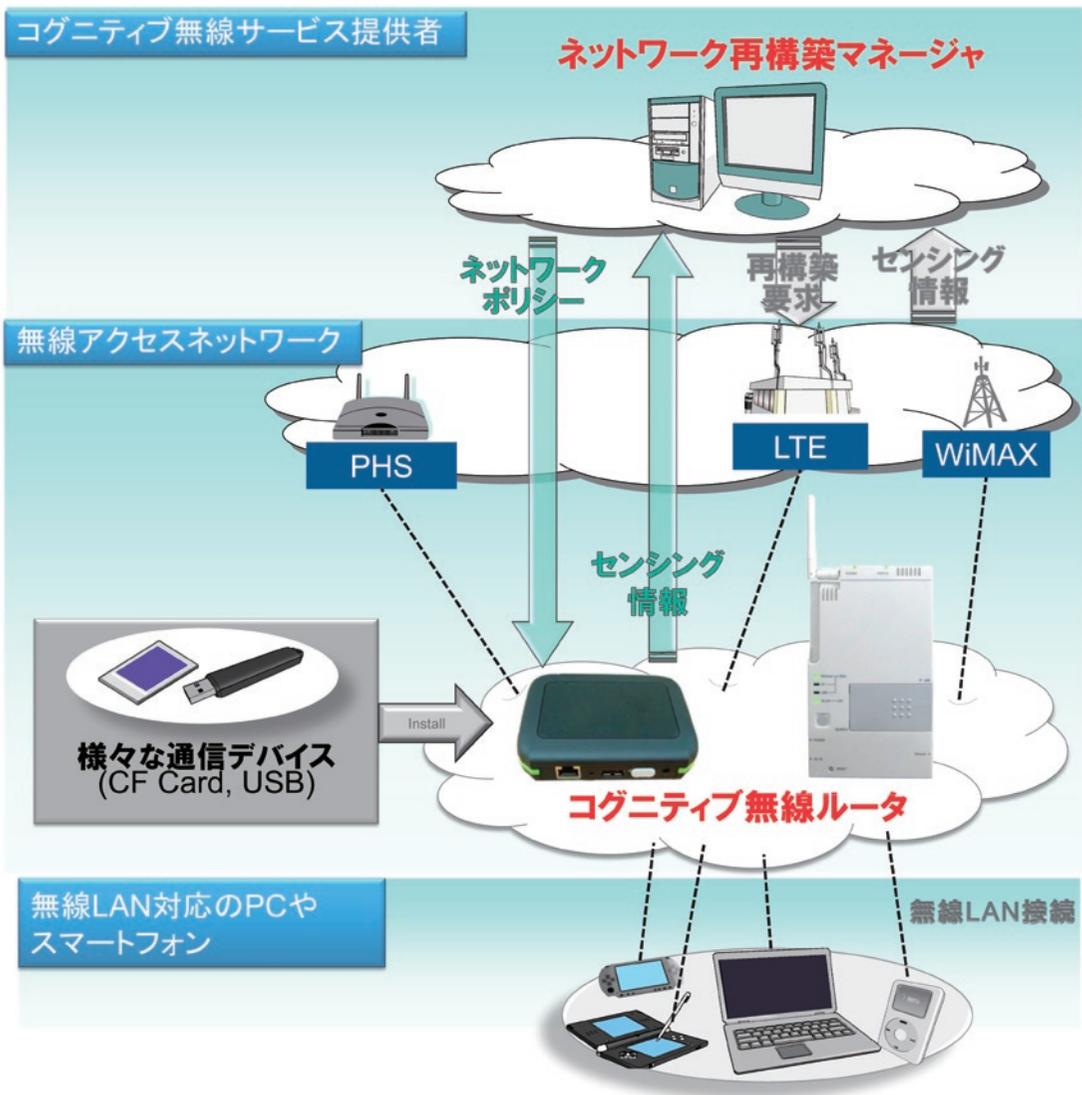


図3 ネットワークポリシーに基づき無線通信システムデバイスの選択制御が可能なコグニティブ無線ルータシステム（ヘテロジニアス型の一例）

大震災後には通信手段が失われた避難所や病院等に提供し、無線ネットワークの運用が不安定な状況でも安定した通信を提供できることが確認されました。

一方、周波数共用型の実現例として、図4に示す再構築可能なコグニティブ無線基地局とコグニティブ無線端末から構成されるシステムを開発しました。このシステムでは、基地局が400MHz～6GHzの周波数において電波強度測定、通信方式判定、電波干渉検出を行い、ネットワーク再構築マネージャはそのセンシング情報を受信した上で、空き周波数帯のデータベースを参照して電波干渉を与えない周波数と通信方式を決定します。基地局と端末は、ネットワーク再構築マネージャからの指示に基づき機能を再構築して通信を行います。

● 国際標準規格への取り組み

コグニティブ無線技術の一部は、様々な国際標準化規格として提案してきました。そのひとつであるIEEE1900.4は、コグニティブ無線ネットワークの基礎アーキテクチャとしては世界初の規格であり、NICTはその創設時から参画し、2009年2月に策定を完了させました。IEEEの他にも、NICTではITUや欧州の標準化団体においても、議論の初期段階からコグニティブ無線に関して研究開発した技術の提案を続けています。

● 今後の展望

さらなる電波の有効利用を行うため、テレビ放送周波数を利用して通信を行うための議論が

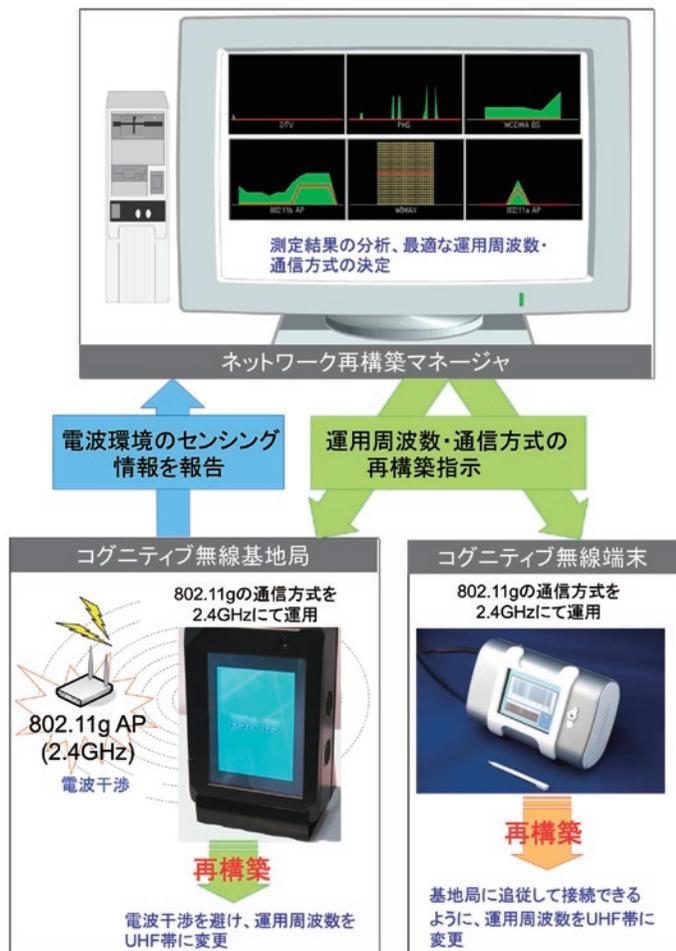


図4 電波環境センシングに基づき運用周波数と通信方式(PHY/MAC)の再構築が可能なコグニティブ無線システム(周波数共用型の一例)

始まっています。このような周波数帯は「ホワイトスペース」とも呼ばれ、電波を有効に利用する技術の突破口として、世界でも技術基準の策定が始まっています。日本でも、総務省が2009年11月にホワイトスペース活用に向けた検討チームを発足させ、現在では具体的な技術基準の策定を検討しています。このような周波数の利用には、放送に影響を与えないことを確認する方式の研究開発や、日本独特の国土事情や周波数利用を考慮した慎重な技術検討が必要であり、現在、NICTでは要求される技術の開発を進めています。

東日本大震災被災地における 無線LANによる インターネット環境の構築

—NICTが開発した「コグニティブ無線ルータ」の活用—

村上 誉 (むらかみ ほまれ)

ワイヤレスネットワーク研究所
スマートワイヤレス研究室 主任研究員

1997年北大・工・電子卒。1999年同大大学院修士課程了。同年郵政省通信総合研究所(現NICT)入所。2003～2005年デンマーク国オールボー大学客員研究員。子どもの頃から家電製品が好きで、大学時代に初めて手にした携帯電話とPHSで移动通信分野に目覚めました。季節が変わると携帯電話の機種を買い替えることを趣味とし、趣味と実益を兼ねた研究者生活を送っています。

「使用可能な無線システムを認識して通信先を切り替えることで、高い耐障害性を発揮する『コグニティブ無線ルータ』を東日本大震災被災地に震災直後より提供しています。」



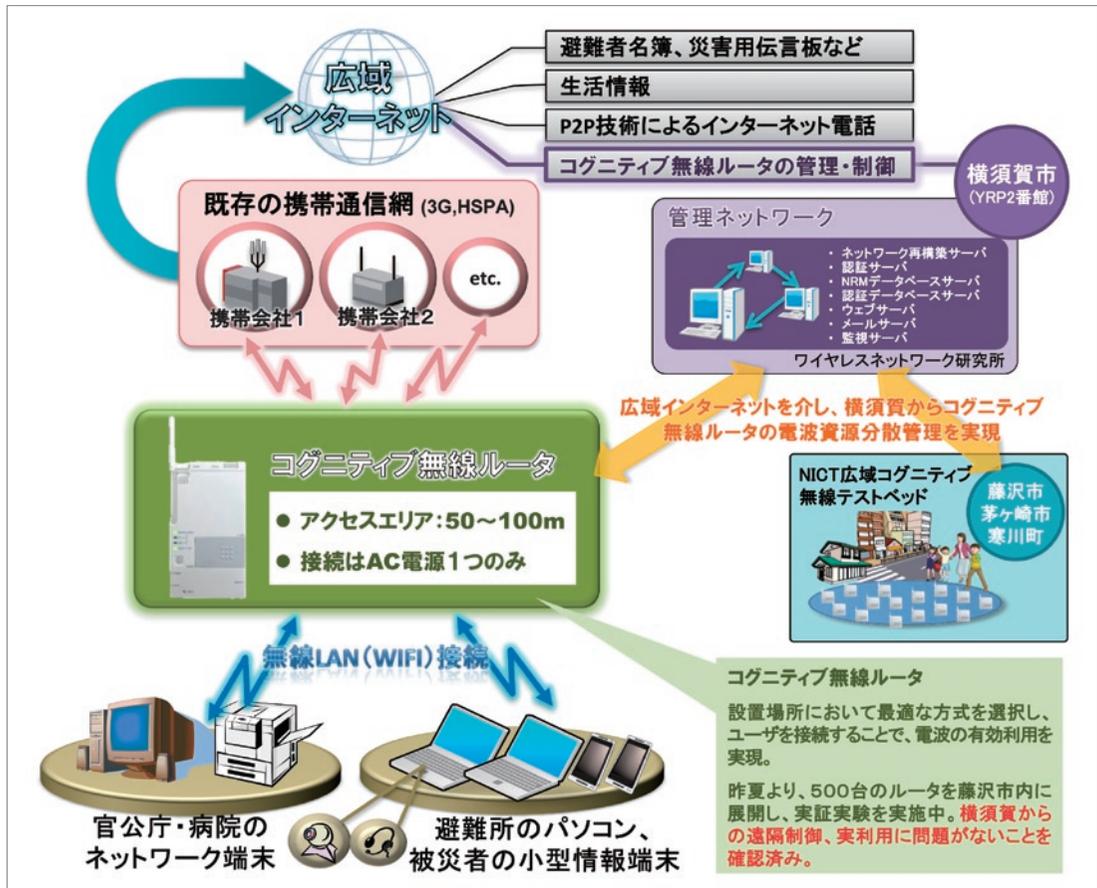


図1 コグニティブ無線システムの構成

● コグニティブ無線システムとは

私たちスマートワイヤレス研究室では、携帯電話や無線 LAN 等の異種の無線システムを統合的に取り扱い、電波の有効利用や効率的な情報通信ネットワークを実現するコグニティブ無線技術の研究を進めています。本技術を活用すれば、短時間でインターネット環境を構築すると共に携帯電話回線の効率的利用等が実現できます(図 1)。本技術を実装したコグニティブ無線ルータを用いると、無線 LAN によるインターネット環境の構築が容易に行え、大規模機能実証にて可搬性と耐障害性に優れることが確認されています。東日本大震災において、少しでも復興の手助けになればと考え、これまで岩手県内の避難

所に 28 台、宮城県内に 17 台、福島県内に 23 台の計 68 台のコグニティブ無線ルータを設置し、高速で安定したインターネットアクセス環境を提供してきました。

このコグニティブ無線システムは、当研究室が大きく関わって規格化した IEEE1900.4 というコグニティブ無線の制御方式に準拠して、機器の稼働状況や電波環境、トラフィック量等の情報が当研究室の管理装置に収集され、自動で情報分析を行ってコグニティブ無線ルータにフィードバックして制御を行い、安定で高速な通信環境が常に維持できるように運用されています。

● 東日本大震災被災地での利用について

被災地に設置したルータ(図 2)は、様々な形で利用されています。最初に設置した岩手県大槌町立安渡小学校は海岸沿いの避難所になっていましたが、被災された方々は、ルータと同時に設置された PC を使って津波被害状況を伝えるインターネット上のニュース映像や安否情報を確認されていました(図 3、4)。その際、震災後 20 日以上経過しているにもかかわらず、映像を見ながら「こんなふうには津波が来ていたんだ!」と会話されていたのが印象的でした。また、救援物資等の情報を検索・閲覧したり、子どもたちが息抜きに動画を探して楽しんでいたり、限られた情報の中で生活する際の心の安心を満たす手段としても利用されていることに気がきました。また、手持ちの小型携帯端末を無線 LAN でインターネットに接続し、情報を取得する姿も見られました。避難所の他にも、災害対策本部の連絡手段や、病院において医師が医療データベースにアクセスする手段として、また、被災地で活動されているボランティアの方々の通信手段としても利用されています。

● 今後の展望

東日本大震災においては、1995 年に発生した阪神・淡路大震災で得られた教訓が活かされ、物資の備蓄や被災時の対処マニュアルは機能したと言われています。では通信環境はどうかというと、日進月歩の通信技術の世界では、被災地に求められる通信のあり方はかなり変わってきていると思います。まず、携帯電話の普及によって、個人が電話やメールを直接やりとりすることが可能となりました。私たちが被災地入りしたときには、すでに衛星回線を使った臨時電話回線が整備されている避難所が数多くあり、もちろんそれらも



図2 インターネット接続に用いたコグニティブ無線ルータ

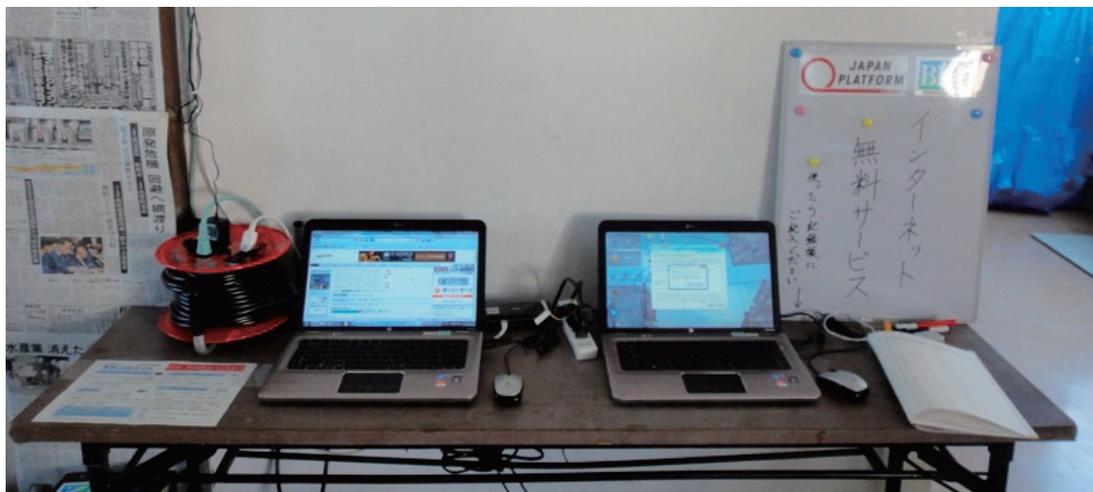


図3 避難所の小学校内に設置したコグニティブ無線ルータによるインターネット接続環境



図4 端末を操作して様々な情報を求める被災された方々

重宝されていたのですが、インターネット接続については可能な避難所であっても、スタッフ専用であったり時間制限があるなど、自由な通信が行えない状況でした。ブログやSNS、インターネット掲示板やTwitterなどのコミュニティサイトを介した通信が一般に可能となった現在、テレビや電話ではなかなか手に入らない口コミ情報や蓄積された情報の参照を可能にするインフラは、厳しい生活の中で少しでも安心を提供する手段になり得ると考えます。

今後、こういった通信手段の進化に合わせ、専門家の視点から災害時の通信のあり方についてどのような技術が求められるか、常に念頭において研究開発を進めていきます。スマートワイヤレス研究室では特にここ数年、世界の最先端の通信技術の研究を進めながら、それをいかに実用化に結びつけるかを追求しています。標準化団体に対し提案して商品化のための仕様の共通化を行ったり、一部機能について民間企業と共同で商品化一歩手前の技術検証を行うなどしており、東日本大震災の際に設置したコグニティブ無線ルータもそのような活動から生まれたものです。他にも多くの技術の研究開発を進めていますので、被災時に限らず様々な形で皆様に使っていただけるよう努力いたします。

震災後1年半以上が経過して、有線インターネット回線の復旧や、避難所から仮設住宅への移転等により、状況に応じて設置した機器が有効に活用していただけるよう移設をすすめています。このような移設のプロセスを通じ、着実な復旧の歩みを感じています。まだ被災地の復興には長い道のりがありますが、本システムがその一助となりますことを、心より願っております。

新しい無線システムを生み出す ワイヤレスグリッド技術

—省電力型SUNの研究開発と標準化—

児島 史秀 (こじま ふみひで)

ワイヤレスネットワーク研究所
スマートワイヤレス研究室 主任研究員

1999年大阪大学大学院博士後期課程修了。同年郵政省通信総合研究所（現 NICT）入所。以来、384kbps 高速 PHS、低レート動画リアルタイム伝送、ROF マルチサービス路車間通信、VHF 帯自営用移動通信の研究開発に従事した。現在、SUN における PHY/MAC 技術に関する研究開発、および標準化推進活動に従事。博士（工学）。休日には、現勤務地でもある横須賀の散策を嗜むも、坂のあまりの多さに戸惑う。

「将来の効率的エネルギー運用の
カギを握るスマートメータのための
高度無線通信方式の研究開発に
成功し、国際標準規格として承認
されることで世界的に認められて
います。」



● 検討の背景と技術課題

電気・ガス・水道メータの検針データ収集を無線通信を用いて自動的に行うスマートユーティリティネットワーク (SUN: Smart Utility Networks) が、業務合理化とサービス向上をもたらす新たな無線システムとして注目を集めています。本システムは次世代電力網スマートグリッドにおけるスマートメータ用無線ネットワークとしても有望です。

図1にSUNの利用イメージを示します。図1(a)では、各家庭のメータに取り付けられたSUN無線機の検針データが、無線通信によってSUNのサービスエリア内で集約され、そこから必要に応じてWAN (Wide Area Networks) 等の広域無線システムによって伝達されます。わが国でのSUNのサービスエリアは、図のように集合住宅の一棟や、一戸建住宅地の一区画に相当し、1km程度の規模になると考えられます。

SUNに求められる主要技術課題は以下のとおりです。

● マルチホップ通信技術

図1(a)に示されるように、SUNのサービスエリア内で無線機間の伝搬距離による電波減衰や、建造物の遮蔽等による電波減衰の影響で、十分なサービスエリアが確保できない場合があります。この場合、無線機同士がバケツリレーのように通信を中継する形態が有効です。メータの新規設置や撤去等の状況変化に応じて、中継経路は自律分散的に設定されることが望まれます。

● 省電力動作技術

電池駆動の場合 (例えばガスメータ) に電池交換のコストを下げるため、無線機の省電力動作が望まれます。具体的な数値目標として、電池交換なしの10年間の動作を想定しています。

図1(b)は別の利用イメージとして、放射線量監視の例を示しています。本利用イメージにおいても、SUNのマルチホップ通信技術は、多地点にわたる監視を、また、省電力動作技術は年規模での長期的な監視を効果的に実現することができます。

私たちはマルチホップ通信機能を有する省電力型SUN実現のための高度PHY/MAC技術に関する研究開発を行っています。

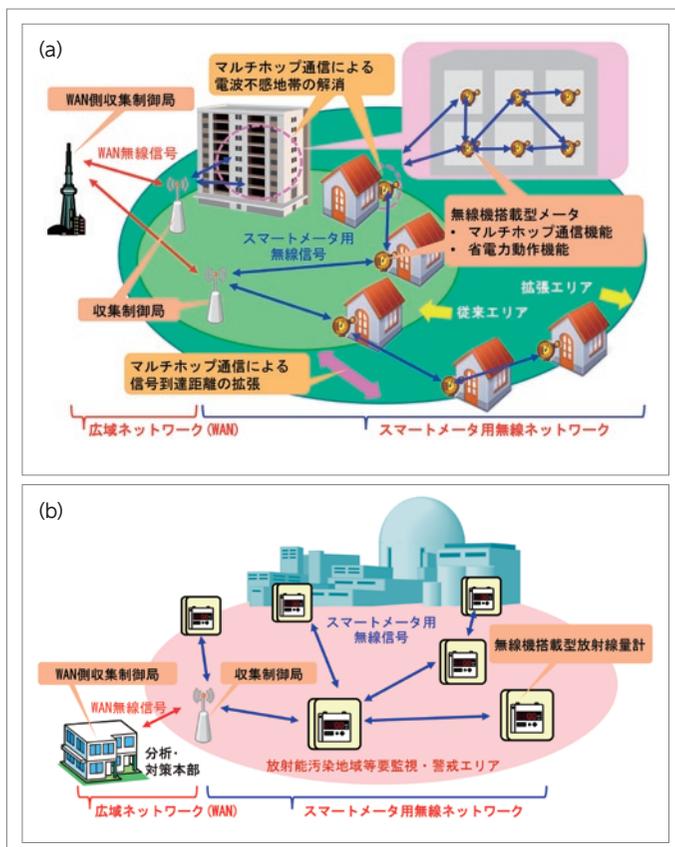


図1 SUNの利用イメージ: (a) ガスメータの自動検針 (b) 放射線量モニタリング

● 小電力型 SUN のための PHY/MAC 技術

● PHY 技術

SUN の運用周波数として、わが国で有望と考えられているのは、スマートメータ無線用に新たに割り当てられた 920MHz 帯です。データ伝送速度としては、100kbps 程度が前述の検針データ収集の用途には最も適当と考えられています。また、SUN のサービスエリア内に配置されるメータの個数は最大で 10,000 台にも達することから、低コストの無線機実装が必須となり、シングルキャリア変調のひとつである FSK 方式の適用が検討されています。

● MAC 技術

図 2 に、検討するスーパーフレーム構成を示します。スーパーフレームは、定期的に送信される同期用信号のビーコンの間隔内で設置される時間単位です。本検討では、消費電力の低減を目的と

してビーコンは休止可能としています。同時に、アクティブ期間であるスーパーフレーム長の割合を、図のようにスリープ期間に対して小さくし、データフレームの送受信はスリープ期間にも継続して行われるようにすることで、さらに消費電力を低減しています。各無線機は以上のような同期を用いながら、図のようにツリー

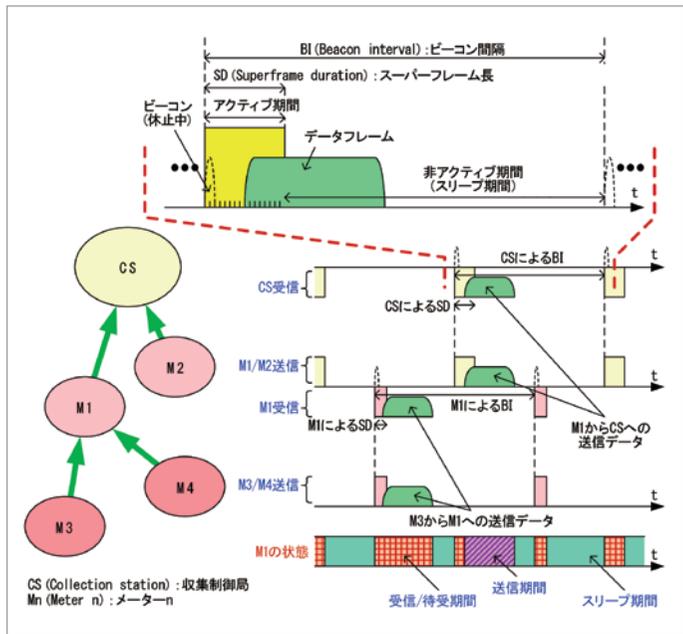


図2 省電力マルチホップ通信の概要

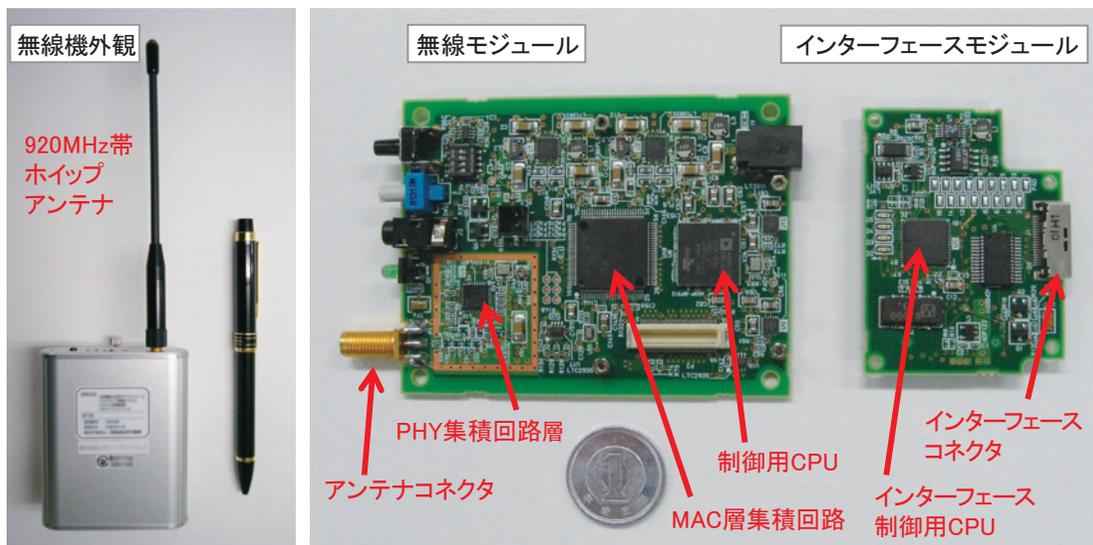


図3 開発されたSUN無線機

状構造を自動的に構成し、マルチホップ通信によって、検針データを収集制御局へと中継していきます。

の計測値を定期的にインターネット上のサーバにアップロードし、遠隔地からの確認を可能とした動作画面を示しています。

SUN 無線機の開発と実証

SUN 普及の歩みと今後の展開

前述の仕様に基づき開発した SUN 無線機を図 3 に示します。周波数帯は 920MHz 帯で、送信電力は 20mW です。図 4 は、SUN の動作例を示します。図 4(a) は SUN 無線機をガスメータ実機に接続することで収集された各検針値の表示画面です。また図 4(b) は同様に放射線量計

IEEE 802 委員会では、SUN の PHY 仕様、MAC 仕様について、それぞれ IEEE 802.15.4g、IEEE 802.15.4e というタスクグループで標準化が行われ、ともに 2012 年 3 月に標準規格が策定されました。前述の検討内容は、NICT による提案として両規格に採用されています。NICT におけるワイレグリッド研究開発の主要テーマである SUN システムは、上記標準化の終了や、規格認証団体 Wi-SUN の設立を足がかりとし、着実に普及のシナリオを歩み始めています。

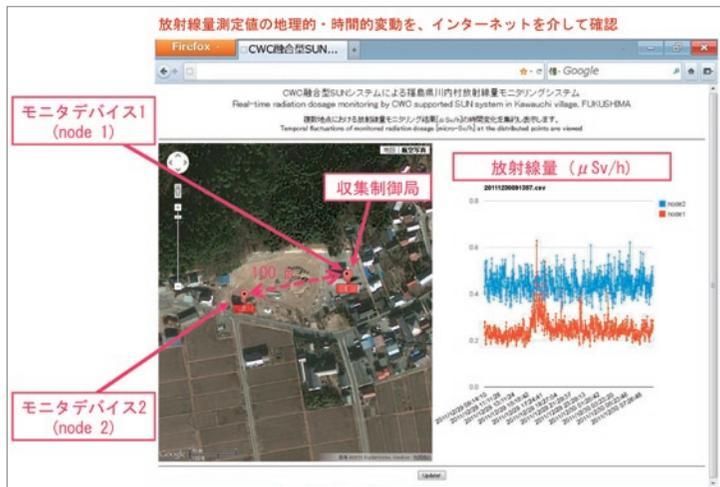


図4 SUNの動作画面 上: (a) ガスメータの自動検針 下: (b) 放射線量モニタリング

高速・大容量通信を実現した新しい光無線通信装置

ーファイバ敷設が困難な場所でも1km以内なら高速・大容量の通信ネットワークが構築可能にー

「空間光をシングルモード光ファイバに直接結合することにより、1本の光ファイバと等価な信号伝送を実現した光無線通信装置について紹介します。」

有本 好徳 (ありもと よしのり)

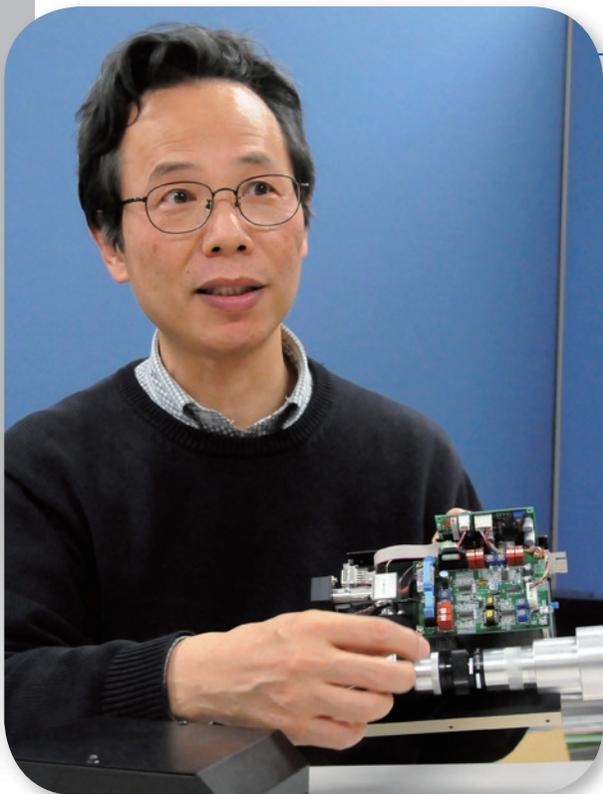
ワイヤレスネットワーク研究所
宇宙通信システム研究室 主任研究員

大阪大学大学院修了後、1979年郵政省電波研究所（現NICT）に入所。衛星管制、宇宙通信、光無線通信などの研究に従事した後、現在は光無線通信装置の開発に携わっている。装置の光学設計、電気設計、機械設計は筆者自身がおこなっている。博士（工学）。

NICTでは、10,000km以上の遠距離にある人工衛星との間で、レーザ光を使って大容量通信を実現する技術を、10年以上にわたって研究してきました。この研究開発で蓄積したレーザ光の精密な追尾技術を活用して、光ファイバの敷設が困難な場所でも光ファイバと同等の高速・大容量の通信ネットワークが構築できる新しい光無線通信装置を開発しました。

● 世界最高の通信容量を持った光無線通信装置

空間を通してレーザ光を伝送する光無線通信は、光ファイバ通信や電波を用いた無線通信と比較すると、ケーブルの敷設や無線局免許等の手続きが不要で、相手局が見えれば数kmにわたって高速・大容量の信号が伝送できるため、今でも



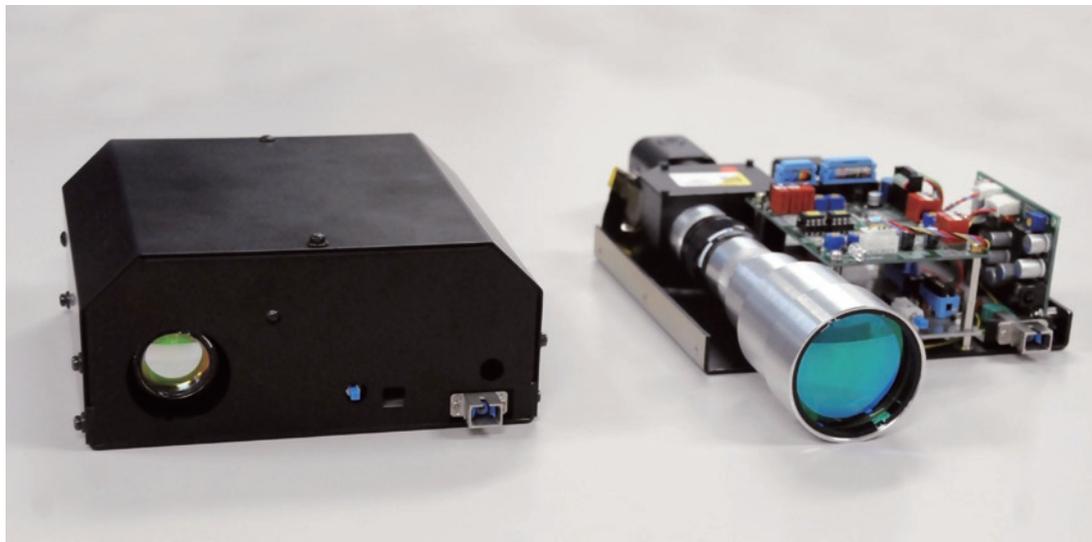


図1 光無線通信装置(左)と遠距離用の大型望遠鏡を取り付けた場合(右)

複数の製品が企業や大学内の LAN の拡張や映像信号の伝送等に使われています。しかしながら、これらの製品は波長 $0.78 \mu\text{m}$ から $0.85 \mu\text{m}$ のレーザを使っているため、送信出力を人体(目)に対して安全な数 mW に制限する必要があり、また、使用している光源や受光デバイスの動作速度の制約から、ギガビットイーサネット(1.25Gbps)程度までの通信が実用上の限界でした。さらに、ネットワーク機器との接続において光電変換が必要なため、伝送サービスごとに信号波長や変復調方式、信号形式を変えた装置を開発する必要がありました。

このような問題点を解決し、無線通信においてもシングルモード光ファイバ通信を使ったネットワークと同じように 10Gbps から 1Tbps の高速・大容量を実現するためには、空間を伝送した光を直接光ファイバに結合する光無線通信方式が有効と考えられます。しかしながら、 $10 \mu\text{m}$ という微小な光ファイバの開口に光を効率良く安定に結合させる高い精度を持った光学系を実現することは容易ではありません。通信相手から空間を伝送してきたレーザ光は大気ゆらぎによって到来角が変動したり、光無線通信装置の

設置場所の振動や建物の熱ひずみによって入射角が変動するので、安定した信号受信のためには、これらの変動を打ち消す自動追尾システムも必要になります。

そこで、衛星間光通信のために NICT で開発してきたレーザ光の精密な指向・追尾技術を活用することにより、光ファイバとの結合に必要な精度を持った小型の光無線通信装置(図 1)を開発しました。この装置を使って、2006 年から現在までに、10/100 ギガビットイーサネット、光符号分割多重化(CDMA: Code Division Multiple Access) 信号、さらには高密度波長多重(DWDM: Dense Wavelength Division Multiplexing) による 1.28Tbps の大容量光信号が、地上の数百 m の距離にわたって光ファイバと同様に伝送できることを示してきました。

● 開発した装置の概要と屋外伝送実験

NICT で開発した光無線通信装置の動作原理を図 2 に示します。この装置は、光アンテナ(ビームエキスパンダ)、水平・垂直の 2 方向についてビームの角度を制御できる高速ミラー駆

動機構、追尾センサを内蔵したファイバ結合光学系から構成されています。

伝送に用いる波長 $1.55 \mu\text{m}$ の信号光と波長 $0.98 \mu\text{m}$ のビーコン光の2種類のレーザを1本のシングルモードファイバから送信しますが、対向する装置では、このビーコン光の方向をファイバ結合光学系にある追尾センサで検出し、ミラーの角度を動かしてファイバの入射角を一定に保つことにより光ファイバと同等の安定した信号伝送を行います。

このような単純な構成を用いているにも関わらず、追尾サーボの帯域が 8kHz 以上と広く、装置の内部損失も 2dB 以下と小さくできたため、光ファイバとの直結を特徴とする数少ない光無線通信装置の中では世界最高性能を実現しています。内部構造の詳細を図3に示します。装置全体の重量は 1.2kg 以下、設置調整時のみに使用する CCD カメラを除いた消費電力は 1.2W 以下で、電池駆動でも 24 時間以上の連続運用ができます。

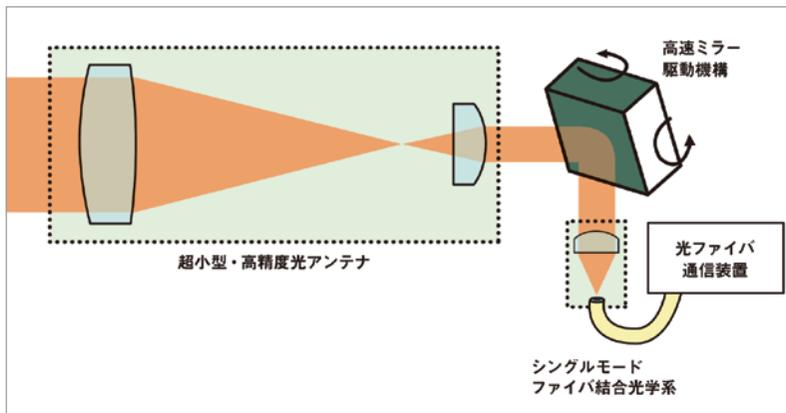


図2 新しい光無線通信装置の動作原理

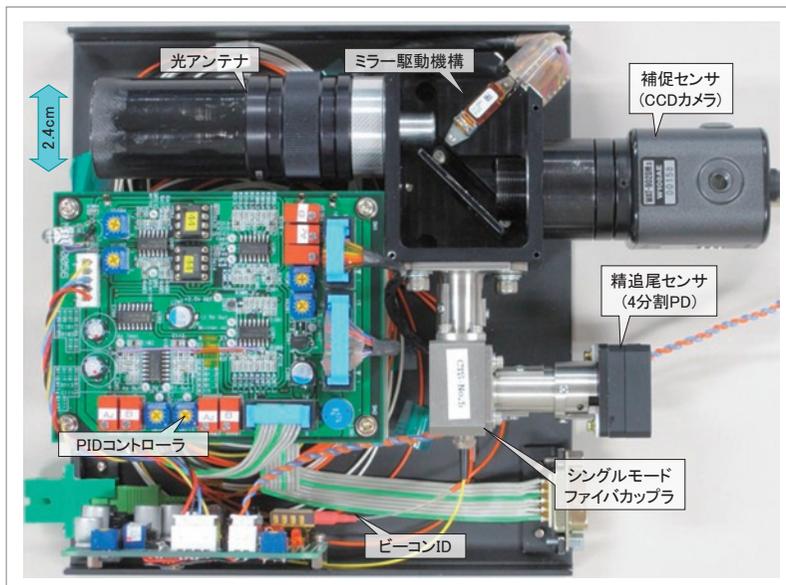


図3 光無線通信装置の内部構造

この装置 2 台を対向させることにより、距離 30m から 1km まで各種の光信号伝送を実施してきました。図 4 及び 5 には、2007 年にイタリア・ピサにあるサンタナ大学で 1.28Tbps の DWDM 信号伝送実験を実施した時の様子を示しています。2009 年にも同じ場所で 10Gbps のイーサネット信号伝送実験を実施しています。

最初の屋外実験から 5 年が経過しましたが、この装置を超える性能を持った光無線通信装置は未だに開発されておらず、NICT が技術的に世界をリードする位置にあります。この技術を実用化するための技術移転にも取り組んでおり、製造コスト削減のための設計の見直し、設置調整の簡易化のための検討も進めております。大型の車両や船舶・航空機に 10Gbps 以上の伝送容量を持った通信を提供するためには、本稿で紹介した光無線通信方式しか解決手段がないため、情報通信技術が成熟するにつれて本研究開発成果を活用する分野が広がっていくものと期待しています。



図4 サンタナ大学通信研究所の屋上に設置した光無線通信装置



図5 サンタナ大学通信研究所から対向局を見た伝送路の様子

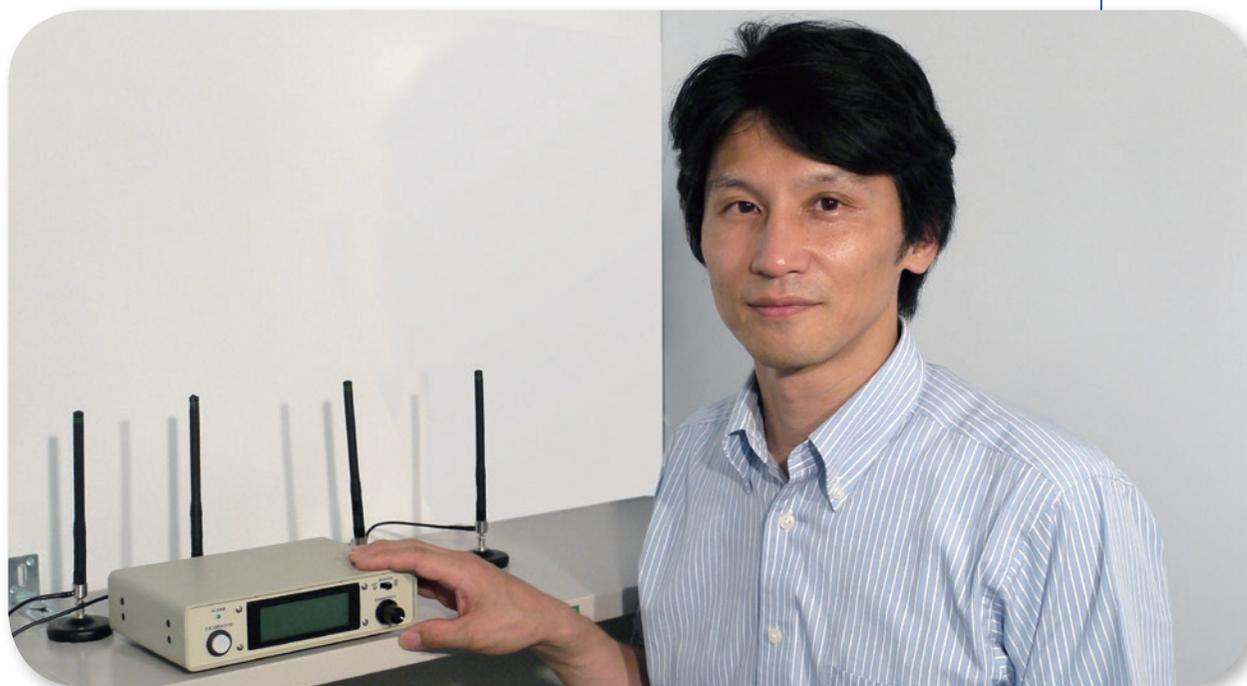
電波を使った 侵入者検知システムの開発

辻 宏之 (つじ ひろゆき)

ワイヤレスネットワーク研究所
宇宙通信システム研究室 主任研究員

大学院修了後、1992年、郵政省通信総合研究所(現NICT)に入所。アレーアンテナ信号処理、航空機通信システムなどの研究に従事。横浜国立大学大学院客員教授。博士(工学)。人に役立つ技術をめざし、これまでアレーアンテナを使った発信者の位置特定技術やセキュリティシステムなどの研究を行ってきました。現在は、航空機や列車などでインターネットが快適につながる環境をめざした技術に関心を持ち研究に取り組んでいます。

「新発想・新原理の電波による侵入検知システム1台だけで、今まですべての窓・ドアに付けていた開閉センサーや陰までは見通せなかった赤外線センサーをすべて置き換えてしまいます。」



システムの概要

最近、セキュリティへの関心が高まり、ホームセキュリティシステムを導入する人も少なくありません。これまで、人の侵入や窓・ドアの開閉といった「イベント」を検知するためには、焦電型赤外線センサーやドアセンサーなどを侵入経路または対象物ごとに取り付ける方法が一般的です。しかし、すべての窓にセンサーを設置することは面倒であるばかりでなく、当初想定していない侵入経路・対象物は検出できないという欠点もあります。このような課題に対し、NICT では電波を使って夜間・休日などで無人になった空間全体を丸ごと監視できる新しいタイプの侵入者検知システムを開発しました。このシステムは、部屋に1つ設置するだけでよく、今までの侵入センサーのように全ての窓や経路に機器を設置する必要がありません。しかも感知レベルの不安定さや物陰までは見通せないという欠点のある赤外線センサーをも全て置き換えてしまうことができる新しいセキュリティシステムです。

開発のきっかけ —失敗から学ぶ—

このシステムの開発は意外なところから始まりました。2006年頃、空間上に複数配置したアンテナ(以後、アレーアンテナと呼びます)を使って、屋内の電波発信源の位置を正確に推定しようという研究を、当時卒業研究のため研修員であった慶応義塾大学の学生と行っていました。この技術は高速無線伝送や位置管理を行うといったアプリケーションの要素技術として利用できます。方式の検討と実験を繰り返し行っていました。なかなか良い結果が出ず失敗の繰り返しでした。その1つの原因として、少しでも家具が動いたりドアが開いたりすると電波の伝わり方が変化し、推定結果に大きく影響するという問題がありました。年の瀬も迫ったあるとき、検討していた方法が部屋の環境変化に敏感であるなら、位置を検出するのではなくホームセキュリティのためのセンシングに使えるのではと思いつき、実験を行ったのがクリスマスイブでした。結果は予想以上で、送受信のアンテナを部屋に1か所それぞれ

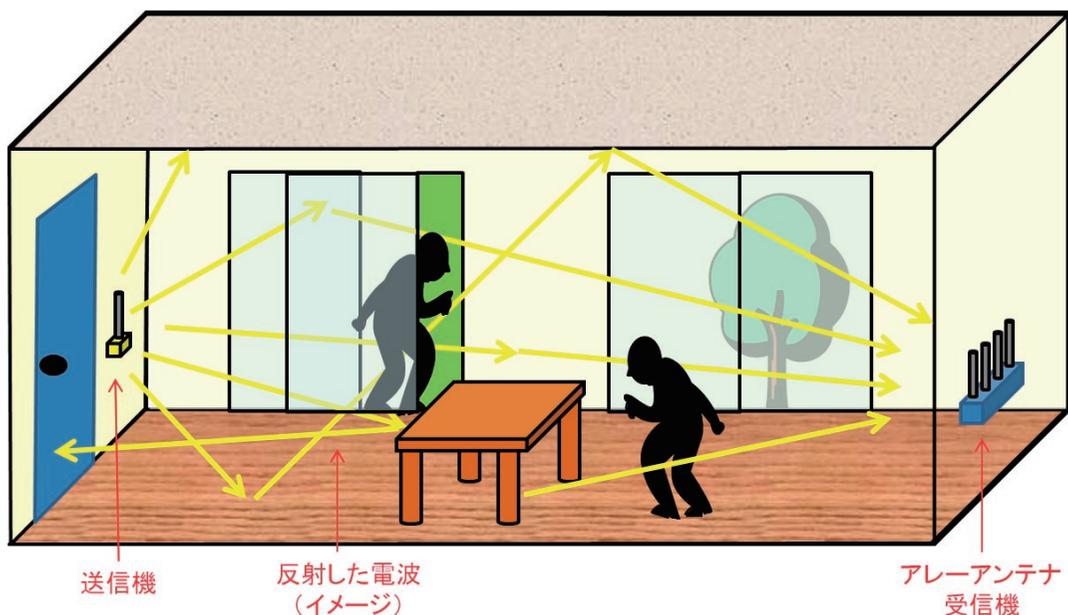


図1 アレーアンテナを使ったセキュリティシステムのしくみ

設置するだけで、ドアの開閉、人の動き、家具の移動など見事に検知できることが確認できました。それがきっかけとなり現在に至っています。余談ではありますが、その学生は急ぎよ卒業論文のテーマが変更になりましたが、無事卒業できました。

● アレーアンテナを使ったセキュリティシステムの動作原理

本システムの動作原理を簡単に説明します。図1のようにある部屋の1か所に電波を出す送信機を置き、別の場所にアレーアンテナを持った受信機を置きます。送信機から四方八方に放射された電波は、床、天井、窓、家具といったあらゆるものに反射もしくは吸収されて、複雑な経路を経た後受信点に到着します。このあらゆるものと複雑な経路というのがこのシステムのポイントです。この結果、受信点のアレーアンテナには様々な方向から電波が入射し受信されます。もしもこの送受信間の途中経路で人の侵入や窓が開くなどのイベントが発生すると電波の伝わり方が変わり、受信点では電波の受信強度ばかりでなく入射する角度が変化します。本システムではこの空間的に変化する電波の入射のパターン変化をアレーアンテナでうまくとらえることによりイベントを検出します。これまで受信点において1つのアンテナで受信強度の変化のみを検出する方式はありましたが、この方式では送信機の変動や些細な室内の変化により受信強度が変化してしまい誤検知を引き起こすことが多かったため実用化に至っていませんでした。一方、アレーアンテナを用いる方式は、電波の伝わり方を空間的に検出するため確実な検出を実現することができます。通信では一般に電波の複雑な反射(マルチパスと呼ばれる)は、通信品質を劣化させる原因となるため厄介な存在でしたが、ここでは電波のマルチパスを積極的

に利用し、センサーから見通せない隠れた場所でのイベントも検出できるという利点を持っています*。

* 近年、マルチパスの環境でアレーアンテナを利用し、通信速度や品質を改善する手法が開発され無線LANなどで実用化されています。

● リアルタイムイベント検出評価装置の開発

当初、この研究を行うに当たり、既存の装置を組み合わせることで実験および評価を行ってきました。その結果、実験装置自体が大きくなり、またデータを収集してから解析を行うという方式をとっていたため扱いにくく効果もわかりにくいという欠点がありました。そこで、システム構成の見直しと信号処理の方式を工夫することにより、装置の小型化と小型マイコンでのリアルタイム処理を可能としたイベント検出評価装置の開発に成功しました。装置の外観を図2に示します。この装置は送受信装置が一体となっており、イベントを検出する処理装置も内蔵しています。この装置にアンテナを接続するだけで、人の侵入や窓などの開閉のイベントの発生を音で知らせてくれます。またUSBポートを内蔵しており、PCを接続すれば、データの記録やその他詳細な情報を表示することができます。様々な解析を行うことができます。

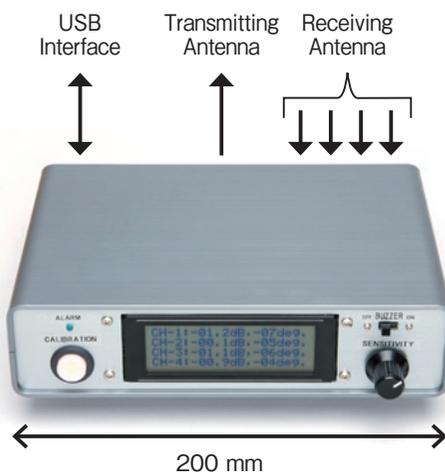


図2 リアルタイムイベント検出評価装置の外観

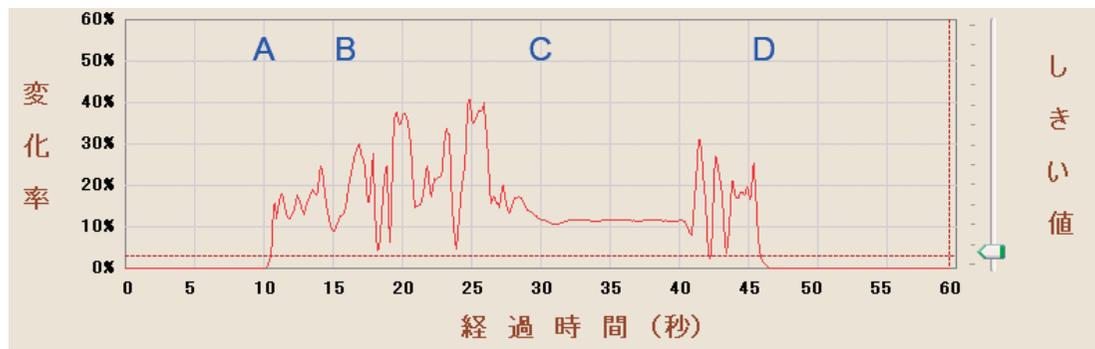


図3 イベント検出結果の例

なお、この装置のハードウェアの構成は、現在の携帯電話端末よりも単純であるため、将来は携帯電話程度の小型化は可能であると考えています。

● 評価装置によるイベント検出

この評価装置を使った実際のイベントの検出例を示します。ある部屋に人がドアを開け侵入したときの検出結果を図3に示します。横軸は時刻で、縦軸は本方式により得られた状態の変化を数値化した結果を示します。ここでは時刻Aでドアを開けて人が部屋に入り、時刻Bから部屋の中を歩きまわり、時刻Cで一旦静止後、時刻Dで部屋を出るといった動作を行っています。図3の結果より、何もイベントが発生していないときグラフはほぼ0を保ったまま一定の値ですが、時刻Aからのドアの開閉、時刻Bからの人の動きとともに値が変化しているのがわかります。また、この装置ではこの値に適当なしきい値を設定し、あるレベルを超えるとイベントの発生としてブザー音を出すようになっています。このしきい値を調整することで検出感度が調整できます。最後に部屋を出てドアを閉めると、もとの0に戻っています。さらに、人が部屋で静止している時刻Cと人がいないときの値を比較すれば、人の動きだけでなく、部屋の人の存在までも検出できることがわかります。

● まとめと今後の展開

開発したシステムは、部屋に1つ設置するだけで部屋全体の監視を実現し、送受間の見通しがとれない場所のイベント検出も可能となりました。装置が簡便で容易に設置できるため、現状の警報システムとの連携も容易となっています。また本システムは、部屋の人の動きや存在の有無、家具などの配置の変化、さらには浴室やトイレ内などの人の動きの監視、物の置き忘れまでも検出ができるため、今後様々な使われ方が期待されます。現在は、より安定して精度の高い検出方法の改良を進めるとともに実用化を目指しています。

「きずな」(WINDS)の 宮城県での運用について

「東日本大震災において、消防、自衛隊の要請で、超高速インターネット衛星『きずな』を用いて救助活動の支援を行い、災害時の衛星通信の威力と可能性を改めて実感しました。」



高橋 卓 (たかはし たかし)

ワイヤレスネットワーク研究所
宇宙通信システム研究室 研究マネージャー

大学院修士課程修了後、1991年に郵政省通信総合研究所(現 NICT)入所。高速衛星通信、衛星通信システムなどの研究に従事。

秋岡 眞樹 (あきおか まき)

ワイヤレスネットワーク研究所
企画室 専門推進員

大学院修了後、科学技術特別研究員を経て1993年に郵政省通信総合研究所(現 NICT)に入所。宇宙環境、宇宙技術などの研究に従事。博士(理学)。



● 超高速インターネット衛星「きずな」(WINDS)

「きずな」は2008年2月に種子島宇宙センターからH-IIAロケット14号機で打ち上げられました。打ち上げ後4年以上たちましたが、順調に運用を続け、数々の実験を精力的に実施しています。最大の特徴は、世界最高速の衛星通信性能をもち、アジア太平洋全域をサービスエリアとするブロードバンドIP通信が可能であることです。「きずな」にはNICTが開発した再生交換機を搭載しており、搭載交換機を使用した再生交換モードでは、多数の地点を同時に結んで最高155Mbpsの通信が可能です。また、搭載再生交換機をバイパスしたベントパイプモードでは2点間で1.2Gbps超の通信が可能で、様々な実験やイベントをこなしてきました。

スーパーハイビジョン映像の伝送実験や高精度4Kカメラによる3D映像など、次世代の映像コンテンツの大容量伝送実験を成功させています。2009年7月には、皆既日食映像伝送実験において、車載局を硫黄島に持ち込みハイビジョン4チャンネル分をNICT本部(小金井市)へリアルタイムで伝送し、インターネット等を介して報道番組等ひろく日本中のお茶の間にも提供しました。2010年1月には、神奈川県の大和成和病院の手術室と神戸国際会議場を「きずな」で結び、心臓外科手術の3D映像中継実験を成功させています。

「きずな」の地球局設備は、地上網で広く普及しているイーサネットと外部機器と接続されます。このため、コンピュータやテレビ会議、IP電話をはじめ、多くのネットワーク対応機器をその

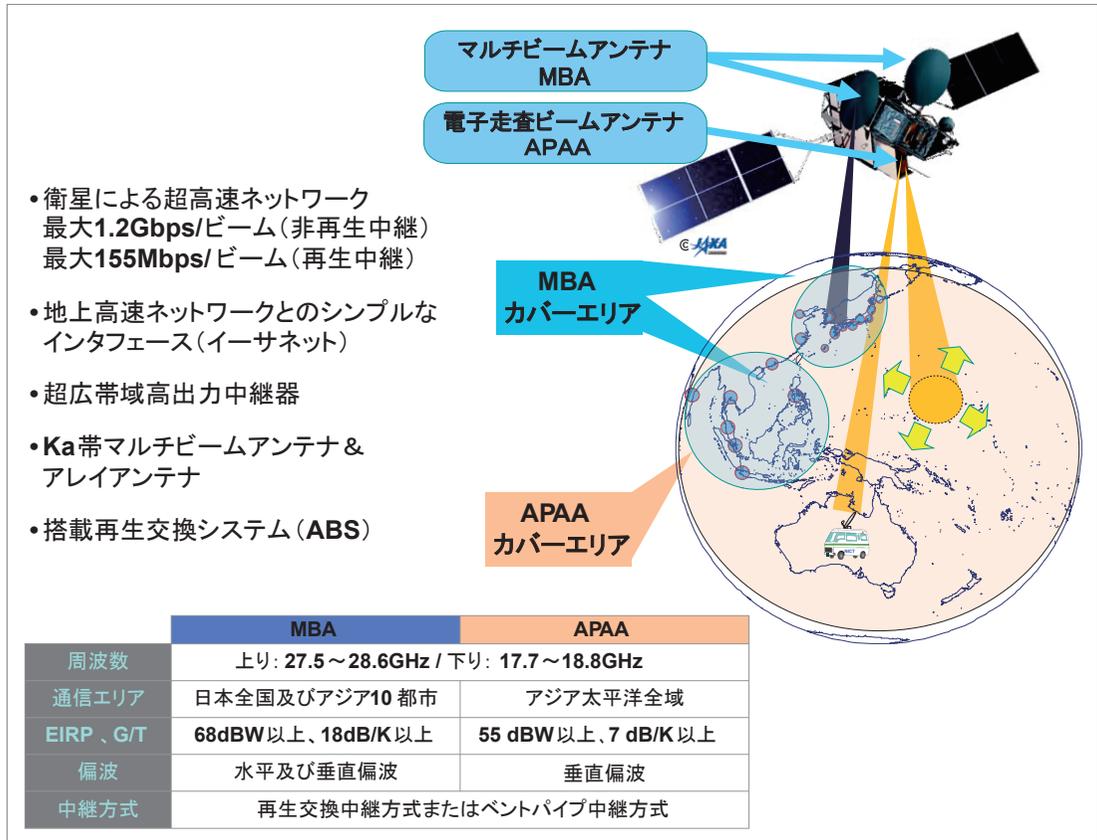


図1 超高速インターネット衛星「きずな」(WINDS)の概要

まま接続して運用する事ができます。このシンプルなインターフェースは、最先端の通信衛星である「きずな」をととも使い勝手のよいものになっています。

● 災害時の衛星通信利用について

地上の光ファイバー網と異なり、地上通信網のないどんなところでも、地球局設備があればすぐに大容量ブロードバンド回線を開設できる点が「きずな」の強みです。これは、大規模災害による通信途絶に対しても大きな力を発揮します。この点について、実際の現場で活動する消防などの関係者も「きずな」に強い関心を持っていました。2010年10月に沖縄でAPEC電気通信・情報産業大臣会合が開催された際には、併設され

た政府展示において災害救助活動における「きずな」の利用を含む展示実験を東京消防庁の方々と協力して実施しました。災害時に緊急援助隊として遠隔地に派遣されたときの通信に関する問題点や重要性などの議論をもとに、2011年4月からのNICT第3期中期計画が開始されたら協力して取り組もうと、具体的なプランを練り始めていたところでした。

その矢先、3月11日に東日本大震災が起こってしまいました。すぐにNICT本部から関係機関に情報収集を始めましたが、思うように電話が通じません。テレビを見ているだけで、想像したこともないような被害に見舞われていることはわかります。「きずな」を使用する状況になった場合に備えて、念のため衛星運用スケジュールの確保と必要な資機材の集積準備を開始しました。夜



図2 気仙沼市での活動状況

屋上に可搬型VSAT (IDU及びODU) を展開し、窓越しにケーブルを災害対策本部に引き込んで運用した。

中、日付も変わった12日未明、東京消防庁の担当者から、「緊急消防援助隊が活動する現地との通信に「きずな」を使いたいとの話が出ているが、協力してもらえる可能性はあるか？」との連絡がありました。大急ぎで資機材の確保状況の確認と情報収集と準備を本格化させました。また、一緒に「きずな」プロジェクトを進めている宇宙航空研究開発機構(JAXA)の担当者とも調整し、「きずな」使用のスケジュール変更とリソース等の確保に協力していただきました。あたふたと一応の準備を整え、14日には現地に追加派遣される緊急消防援助隊の東京都隊とともに大手町の東京消防庁本庁を出発しました。

14日深夜に気仙沼市に入り、15日朝に気仙沼市災害対策本部の置かれた気仙沼消防署・防災センターに到着、設置場所や電源・信号線ルート等の調査・調整を始めました。東京側で作業しているチームメンバーの手際よさもあり、アンテナ設置、室内や消防車両へのケーブル敷設、アプリケーション機材の立ち上げも含め、夕方4時ごろには大手町の東京消防庁作戦室との間に衛星回線が確保できました。

その後、航空自衛隊の災害派遣の部隊とともに松島基地に移動し、入間(埼玉県)と松島の間にブロードバンド通信回線を提供しました。

● 被災地での活動を踏まえて

NICTは防災につながる研究はしているものの、防災機関ではありません。「きずな」のチームも災害対応機関の活動に役立つ研究をこれから…、というところでしたので、「きずな」の持てる力を十分に発揮できたとは思っていません。報道される被害状況に衝撃を受けて、何かできることがあるならやらなければ、と走り出してしまったようなもので、準備も十分といえるものではありませんでした。それでも、実際の災害対策現場で「きずな」が使われたことで、ささやかながらも被災

地と救援部隊のお役に立つことができました。加えて、「あれもできる」「ここはこうすればよい」とたくさんのことに気付くことができました。

今回の一連の活動で、「きずな」による衛星通信はハイビジョンの映像やテレビ会議に加え、IP電話やWiFi付携帯電話も衛星回線とうまくつなぎこむと被災地でかなりの有効活用が期待できることがわかりました。「きずな」を使えばそのままインターネットにつなぎこめますので、被災地での救助活動や被災者支援にそのまま役立てられます。ファイル共有ツールやVPNなども有用です。作業開始後半日程度でブロードバンド回線を開通させられる即応力を今回も発揮してくれました。災害現場で使うツールはワイヤレスでアクセスできるものでなければ、運用現場にかえて負荷をかけてしまうかもしれないことも貴重な教訓としたいと思います。そして、とにかく電源の継続的な確保の大切さ。ここにあまり詳しいことを書く余裕はありませんが、後から考えるとあたりまえに思えてしまうことも多いです。

今後、衛星通信の先端技術を追求する研究開発に加え、それを実際の現場で使えるものに仕上げていくためにやるべきことがいろいろとあることをあらためて痛感させられました。報道や関係機関などでは、衛星携帯電話をはじめ衛星通信の重要性があらためてとりあげられているようです。今回の活動の中で気付いたことで検証の必要なことは、被災地から帰ってすぐ実験や検討を始めています。現場の人たちに現場のイロハも教えていただきながら研究開発を推進していきたいと考えています。

東日本大震災で亡くなられた方のご冥福と、被災された地域の復興を心よりお祈り申し上げます。

宇宙光通信と衛星量子鍵配送

「衛星からのデータ通信容量が年々増加しており、今や衛星通信でも光通信の時代に入りました。光通信はレーザーを使うため、光を用いる量子 ICT 技術とも親和性が良く、将来、衛星量子鍵配送も期待されます。」

豊嶋 守生 (とよしま もりお)

ワイヤレスネットワーク研究所
宇宙通信システム研究室 室長

1994 年、郵政省通信総合研究所(現 NICT)に入所。ETS-VIによる光通信実験に従事し、その後 JAXA 出向、ウィーン工科大学在外研究を経て、OICETS との光通信実験を実施。博士(工学)。



● 衛星通信におけるデータ伝送速度の増加

年々高速化する地上通信回線は、やがて近い将来には光ファイバにより全てがつながるネットワークが実現されると考えられています。こうした「光」を使った情報通信技術は、宇宙通信ネットワークにも拡大応用され、宇宙と地上における通信が「光」で結ばれる光ネットワーク時代の到来が想定されます。電波も光波も同じ電磁波ですが、光は数百テラ Hz という搬送波周波数のために、アンテナや機器の小型・軽量化が可能で、周波数資源の有効活用ができ法的規制も緩やかです。2015 年には、観測衛星等からのデータ伝送速度が約 20Gbps 以上になると試算されており(図 1)、このような高速・大容量通信は光通信でなければ実現できません。近年に

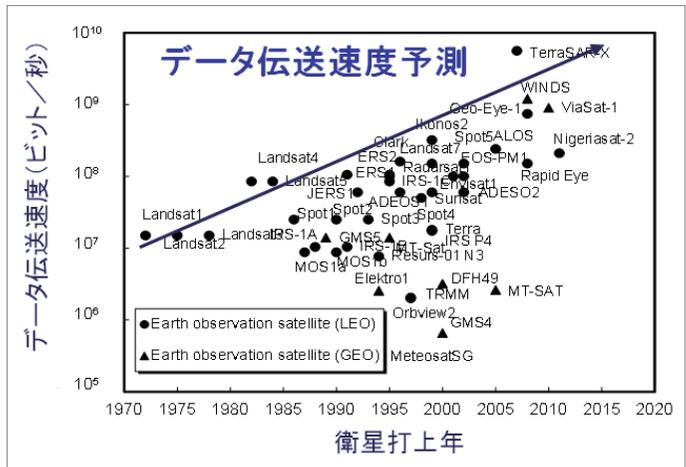


図1 衛星のデータ伝送速度の動向



図2 NICT光地上局の望遠鏡

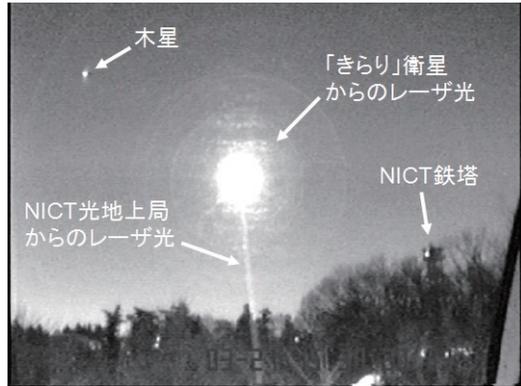


図3 世界初の低軌道衛星-地上局間の光通信実験

おける目覚ましい光学技術の発達に伴い、レーザーを用いた宇宙通信が実現可能な時代に突入しました。

衛星-地上間光リンクの確立

NICTでは、1994年に技術試験衛星VI型「きく6号」(ETS-VI)を用いて、世界で初めて地上-静止衛星間の光通信実験に成功しました。その後、欧州宇宙機関(ESA)では、静止衛星ARTEMISと地球観測衛星SPOT4との間で、2001年から光通信回線をデータ中継のために1日2回定期的に利用しています。宇宙航空研究開発機構(JAXA)の開発した光衛星間通信

実験衛星(OICETS*、以下「きらり」)は、2005年8月に軌道高度610kmの太陽同期軌道へ投入され、2005年12月にARTEMISとの間で双方向光衛星間通信実験が国際協力として実施されました。当時、筆者もJAXAに出向し光通信機器の開発に携った後NICTに戻り、2006年~2009年、東京都小金井市にあるNICT宇宙光通信地上局(以下、NICT光地上局、図2)の上空において、世界初の地上-低軌道衛星間の光通信実験を実施しました(図3)。この実験により、低軌道衛星-地上局間光回線への大気ゆらぎの影響を初めて実測できたことは、学術的意義だけでなく、都市部に散在するビル間の光通信、航空機等の飛翔体との光通信、地上における光無線技術等へ広範に応用されることが期待されています。

空間量子鍵配送への応用

情報通信技術では、情報漏えいや不正アクセスなどを防止する情報セキュリティ技術の要請が高まっており、盗聴技術が高度化する中で暗号技術は益々重要になってきています。量子暗号システムは、量子信号の伝送媒体として光子を用いているため、光通信とは非常に親和性が



図4 UQCC国際会議でのビル間量子鍵配布のデモンストレーションの様子

よいシステムです。現状、ファイバ中での量子鍵配送では、ファイバ中の損失などの影響によりその伝送距離は150km程度が限界で海を挟むような大陸間を伝送できませんが、自由空間においては、より遠方への伝送が可能で、地球を周回する衛星を用いると、地球上のどこでも量子鍵配送が可能となります。多くの場合、量子鍵配送には光の偏光が用いられますが、前述した衛星「きらり」との光通信実験において、世界で初めて衛星-地上間での偏光特性を取得し、量子鍵配送への影響を定量的に測定することができました。NICTでは、空間伝送用の量子鍵配送システムの実現性を確認するためにプロトタイプモデルを開発し、2010年10月に開催されたUQCC国際会議において距離約1.37kmのビル間で量子鍵配送のデモンストレーションを行いました(図4)。

地球規模での衛星を用いた量子鍵配送

任意の2つの地上局を用いた量子鍵配送・共有実験は、地球規模で図5に示す手順で実現可能となります。

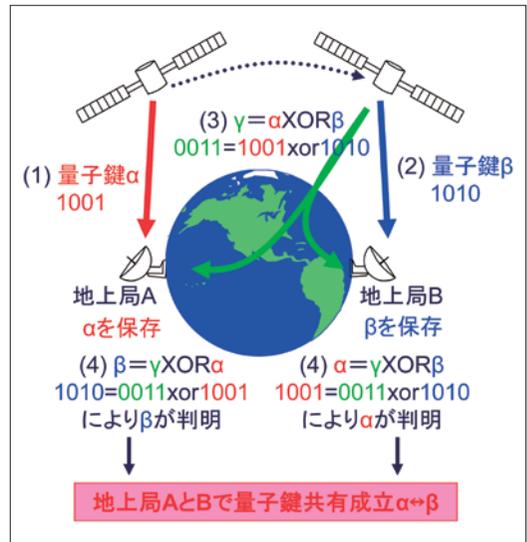


図5 任意の2つの地上局を用いた量子鍵配送

- 1) 衛星から量子鍵 α を量子鍵配送により生成・配信し、地上局Aで量子鍵 α を保存します。
- 2) 地上局Bの上空で、衛星から量子鍵 β を生成・配信し、地上局Bで量子鍵 β を保存します。
- 3) 衛星では量子鍵 $\gamma = \alpha \text{ XOR } \beta$ を算出し通常の通信回線で両ユーザに配信します。(XORは排他的論理和で、 γ は盗聴されてもよい)

4) それぞれの地上局で自分の量子鍵と γ を排他的論理和(XOR)することで相手の量子鍵を共有できます。

任意の2つの地上局を用いた量子鍵配信・共有実験は、例えば、ヨーロッパで量子鍵を衛星に送信し、地球の反対側の日本で受信することによりグローバルな量子鍵配信が可能となります。ファイバ通信では現状150km程度しか量子鍵配送できないと言われていまずので、ファイバ通信の距離では実現できない長距離伝送が可能である衛星量子鍵配送では、地球規模で量子鍵配送が可能であるということは、将来の応用へ重要な意味を持つと考えられます。

● 今後の展望

宇宙通信システム研究室では、小型衛星の打ち上げ機会を捉えて、軌道上から小型光トランスポンダ(Small Optical Transponder: SOTA)による光通信の宇宙実証を考えています。現在、SOTAのフライトモデルを開発中で、50kg級の小型衛星へ搭載する予定です。その搭載質量は6kg程度で、直径約5cmの光アンテナを備えています(図6)。SOTAには、量子鍵配送の基礎実験用の非直交な偏光を持つレーザーを2台搭載しており、地上局においてフォトンカウンティングレベルでの光子測定実験を行う予定です。これにより、量子鍵配送に必要な基礎的なデータを取得する予定です。こうした光学技術は、地球観測衛星等で取得される様々な環境・災害観測データの伝送に役立つ他、高セキュリティな回線確保のため、社会の安心・安全を支える基盤として期待されています。

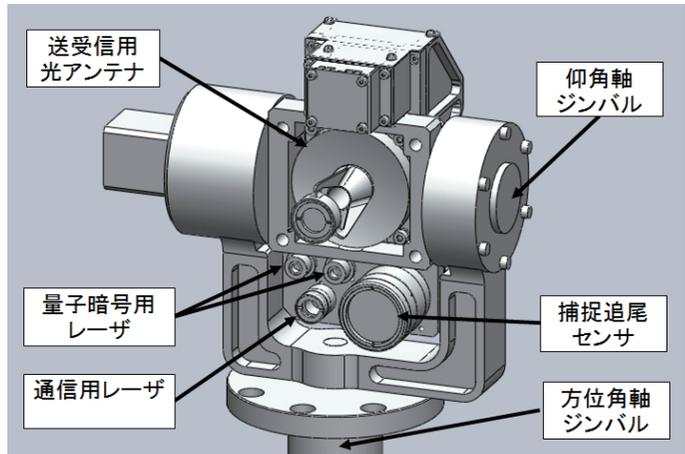


図6 開発中の超小型衛星搭載用の小型光トランスポンダ

*キーワード

【光衛星間通信実験衛星「きらり」(OICETS)】

「きらり」(OICETS)は、欧州宇宙機関(ESA)の先端型データ中継技術衛星「ARTEMIS」との間での実証実験を主な目的に、2005年8月24日にカザフスタン共和国バイコヌール宇宙基地からドニエプルロケットにより打ち上げられた技術試験衛星です。「きらり」のような低高度地球周回衛星と地上局間の光通信においては、受信光レベルが大気による減衰やゆらぎにより大きく変動するため、高速で移動しながら地上局に正確にレーザーを送信し続けるには極めて難易度の高い技術が必要となります。本稿で紹介したように、NICTとJAXAは、同衛星と光地上局との間で光通信実験に成功しました。こうした低軌道地球周回衛星と光地上局とを結ぶ光通信実験成功は世界で初めてのことで、日本の技術力の高さを証明することができました。

I-3 安心・安全に情報をやりとりできる ネットワークセキュリティの研究開発を推進

高橋 幸雄 (たかはし ゆきお)

ネットワークセキュリティ研究所
研究所長

出身は島根県の西の端、益田市の中国山脈を見渡せる周りに誰もいない星のきれいな田舎で育ちました。1982年京都大学理学部(修士)を卒業し、郵政省電波研究所(現 NICT)に入所しました。VLBIと呼ばれる電波望遠鏡を使ったプレート運動、日本等の位置の基準、さらには天文の研究を行い、また、日本の標準時のもとになる日本標準時、さらには位置認証の研究を実施してきました。2008年情報セキュリティ大学院大学で学位(情報学)を取得しました。毎週自転車の遠乗りとジョギングとお酒を楽しんでいます。



「情報通信社会の中で大きな脅威となっているサイバー攻撃時のセキュリティの課題に関して、安心・安全な情報をやり取りできるように、ネットワークセキュリティの研究開発を推進しています。」

はじめに

今やインターネットに代表される情報通信ネットワークは、生活において不可欠なライフラインの1つになっており、またクラウドやスマートフォンなど新しい技術により大きな変革を迎えています。その中で、サイバー攻撃は、DDoS 攻撃や、標的型・APT 攻撃、Web、SNS、メールを介した攻撃など、多種多様でかつ極めて巧妙になってきており、大きな脅威となるとともに、防御や対策が難しくなっています。サイバー攻撃は、金銭目的や主義主張、さらには国家的な紛争・脅威にも使われ、オールジャパンあるいは国際連携で協力して対抗する必要があります。

ネットワークセキュリティ研究所の目指すもの

ネットワークセキュリティ研究所では、誰もが安心・安全に通信を行うことができるように、NICT の中立性を活用し、サイバー攻撃に対抗するための理論と実践を融合させたネットワークセキュリティの研究開発を実施し、世界的な研究拠点になることを目指しています。

サイバー攻撃は、多くの場合、ウィルス、ワーム、ボット等の総称である“マルウェア”によって引き起こされており、日夜新種の攻撃が出現しています。そのため、日々の攻撃に対応を行う“現在志向”の実践的研究開発と、中長期的視点で攻撃

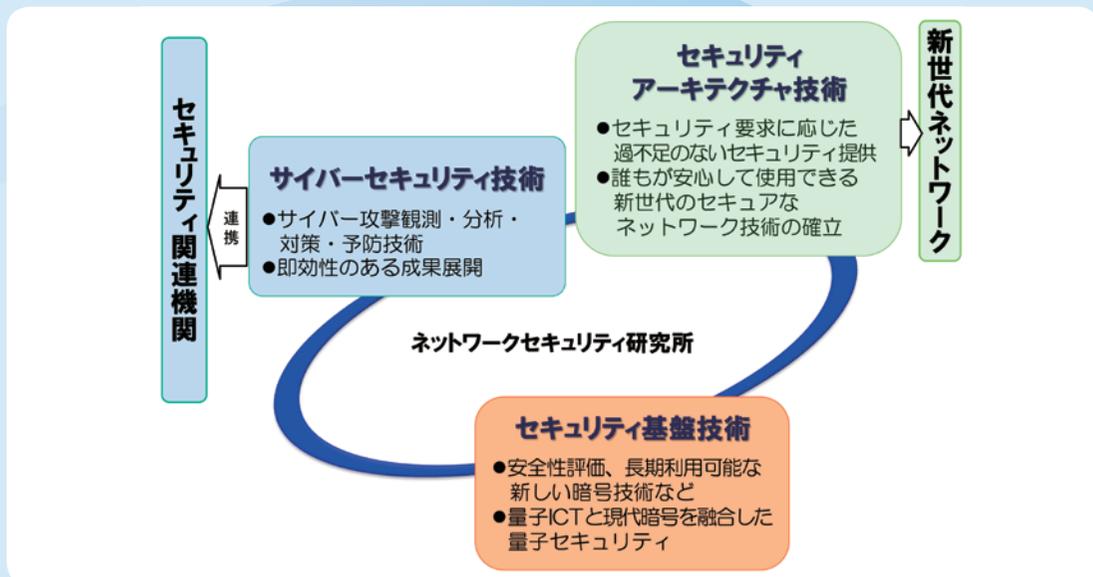


図 ネットワークセキュリティ研究所の3つの研究課題

をしにくくする“未来志向”の先進的研究開発の両輪で推進し、攻撃側優位の現状から防御側優位にしていきたいと考えています。

● ネットワークセキュリティ研究所の研究開発について

当研究所は、サイバーセキュリティ技術、セキュリティアーキテクチャ技術、セキュリティ基盤技術の研究開発を、三位一体で実施しながら、ネットワークセキュリティの研究を推進しています。

サイバーセキュリティ技術では、サイバー攻撃をリアルタイムで把握し適切な対応を実施するため観測・分析・対策技術の研究開発を行うとともに、攻撃の前兆を捕えて予防を行うための基盤技術を確立し、攻撃者にとって抑止力となる実践的かつ先行的対策を可能にしていきます。また、Web、SNS、スパムメール等のサービスレイヤでのサイバー攻撃や標的型攻撃に対応した観測・分析・対策の技術開発を進めていきます。さらに、得られたマルウェアや攻撃トラフィックのデータを、研究や人材育成に役立てることで、日本のセキュリティ技術のポテンシャル向上に貢献していきます。

セキュリティアーキテクチャ技術では、クラウドやモバイル技術の急速な発展による多様化した

ネットワーク環境や利用環境に対応し、利用者の要求に応じたセキュリティが確保できるアーキテクチャ技術の研究開発を実施しています。多様化したネットワーク環境では、インターネットのような一様なネットワーク、一様なセキュリティでは対応できなくなり、安全性も不十分となってしまいます。そのため、サイバー攻撃の回避、複雑度の高いシステムに対応可能な過不足のない脆弱性管理、大規模認証などが行えるセキュアな新しいネットワークを実現するための技術開発を行っていきます。

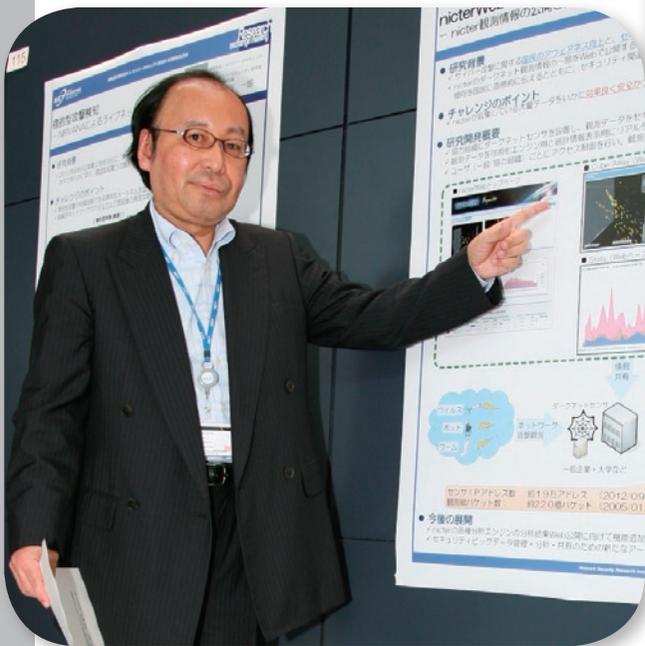
セキュリティ基盤技術では、盗聴検知が可能で極めて安全性が高い量子セキュリティ技術や、既存の現代暗号よりも遥かに安全性が高く超高速の量子計算機が実現しても安全な長期間利用可能な新しい暗号技術を開発していきます。また、電子政府推奨暗号リストの維持等への貢献など、暗号の安全性に関する研究や活動を行っていきます。

● おわりに

研究の成果展開や社会貢献を積極的に行い、国内外の研究機関等とも連携し、国民誰もが安心・安全に情報通信を行うことができるように研究開発を進めて参ります。

インシデント分析センター nicter

—世界最先端のサイバーセキュリティ技術の研究開発—



「nicter は進化型のセキュリティ
フレームワーク。日本の、そして世界の
セキュリティを向上させるため、
実践的なサイバーセキュリティ技術の
研究開発を行っています。」

中尾 康二 (なかお こうじ)

ネットワークセキュリティ研究所
主管研究員

1979年早稲田大学卒業後、国際電信電話株式会社に入社。KDD 研究所を経て、現在 KDDI 情報セキュリティフェロー、及び NICT ネットワークセキュリティ研究所 主管研究員兼務。ネットワーク及びシステムを中心とした情報セキュリティ技術に関わる技術開発に従事。

井上 大介 (いのうえ だいすけ)

ネットワークセキュリティ研究所
サイバーセキュリティ研究室 室長

2003年横浜国立大学大学院工学研究科博士課程後期修了後、独立行政法人通信総合研究所(現 NICT)に入所。2006年より nicter の研究開発に従事。現在ネットワークセキュリティ研究所 サイバーセキュリティ研究室 室長と、ネットワーク研究本部 ネットワークシステム総合研究室 研究マネージャーを兼務。博士(工学)。SF 小説や SF 映画、テクノ、ハウス、エレクトロがエネルギー源。

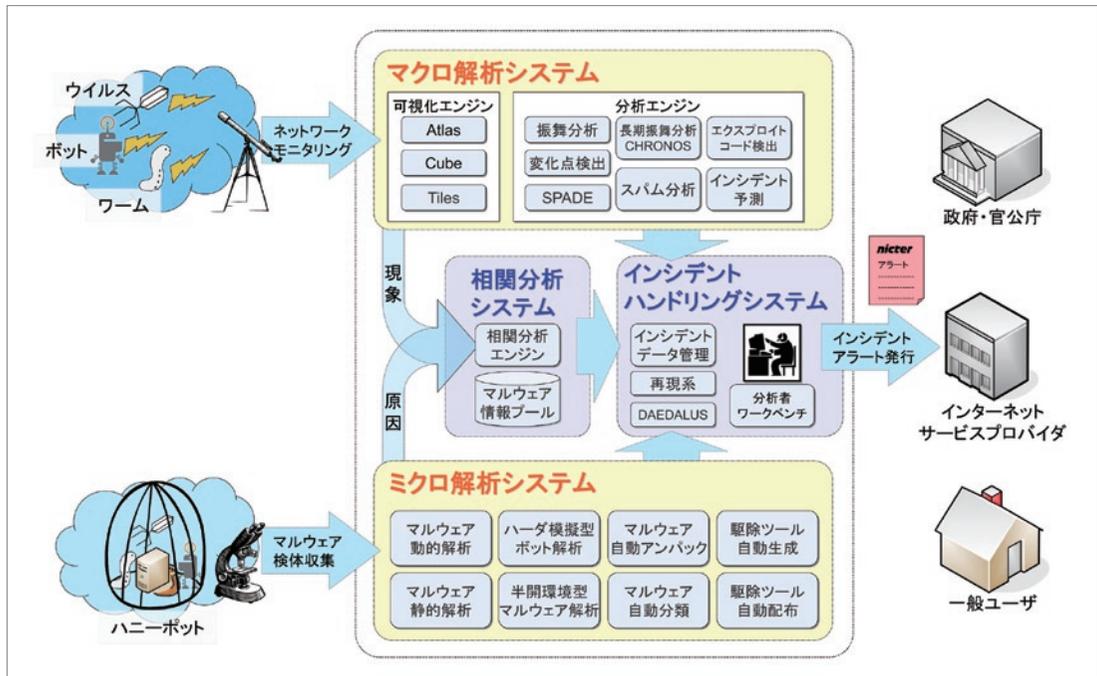


図1 nictcrの全体像

はじめに

インターネットは私たちの社会活動や経済活動に多大な恩恵をもたらし、インターネット普及以前の時代にはもはや逆戻りできない不可逆的变化を現代社会の隅々にまで及ぼしています。一方、その発展と同調するように、インターネットにおけるサイバー攻撃の脅威も拡大の一途を辿っています。サイバー攻撃は人間であるクラッカー*1が引き起こすものですが、そのツールとして使われるのがマルウェア*2と呼ばれる不正なプログラムです。90年代前半までマルウェアは愉快犯もしくは自己顕示を目的として作成・流布されることが多かったのですが、90年代後半以降は金銭詐取を目的とした組織的な犯罪のツールとして利用され始め、高度化・巧妙化が急速に進んでいます。

このような、マルウェアに起因するサイバー攻撃に対抗するために、ネットワークセキュリティ

研究所サイバーセキュリティ研究室では、インシデント分析センター nictcr*3の研究開発を進めています。

インシデント分析センター nictcr

nictcr はリモート感染型マルウェア*4の世界的な活動傾向をリアルタイムに把握し、それに起因したサイバー攻撃の早期発見、原因究明、対策導出を可能にするため、マクロ解析システム、マイクロ解析システム、関連分析システム、インシデントハンドリングシステムの4つのサブシステムから構成されています(図1)。以下では、これらのサブシステムの概要を紹介します。

マクロ解析システム

マクロ解析システムでは、国内外の複数地点に観測用のセンサを設置し、「未使用」のIPアドレス

*1 悪意を持ってハッキング行為を行う者。
 *2 ウィルス、ワーム、トロイの木馬、スパイウェア、ポットなど情報漏えいやデータ破壊、他のコンピュータへの感染など有害な活動を行うソフトウェアの総称。“malicious”と“software”を組み合わせた造語。

*3 Network Incident analysis Center for Tactical Emergency Response.
 *4 ネットワークを経由して能動的に攻撃を行うことで感染を広げるタイプのマルウェア。最近では2008年11月に感染爆発を起こしたConfickerや、2011年8月から増加傾向が確認されているMortoなどが有名。

を大量^{*5}に観測しています。本来、未使用のIPアドレスに対して通信は成立し得ませんが、実際に観測してみると相当数のパケットが届きます。これらの大部分は、マルウェアが次の感染対象を探すためのスキャンや、マルウェア同士がP2Pネットワークを確立するためのランデブー用の通信など、マルウェアに起因したパケットなのです。したがって、未使用のIPアドレス(以下、ダークネット)を観測・分析することによって、インターネットにおけるセキュリティインシデントの一大要因となっているマルウェアの活動傾向を捉えることが可能になります。以下、マクロ解析システムに含まれる可視化エンジンについて概説します。

(1) Atlas

Atlas(図2)は、ダークネットに流れ込むトラフィック(以下、ダークネットトラフィック)を世界地図上でリアルタイムにアニメーション表示する可視化エンジンです。ダークネットに到着したパケットの1つ1つについて、送信元IPアドレスから送信元の緯度・経度を割り出し^{*6}、その送信地点から宛先IPアドレスが属する国の首都に向けてパケットが飛来する様子をアニメーション表示することで、世界的なマルウェアの活動傾向を直感的に把握することができます。各パケットの色はパケットの種別^{*7}を表し、パケットの軌道の高さはポート番号の大きさに比例(対数軸)し

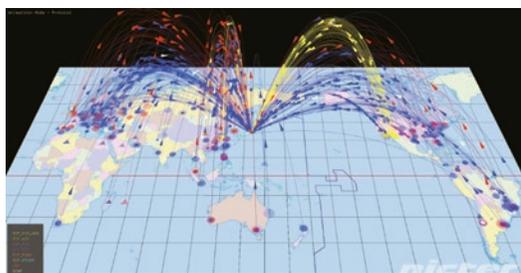


図2 Atlas

*5 2012年3月末現在で約19万のIPv4アドレス。

*6 IPアドレスと緯度・経度のマッピングはMaxMind社のGeoIP City Databaseを利用

ています。また、マウス操作による視点の変更や拡大縮小、パケットオブジェクトのクリックによる詳細情報の表示など、分析者のインタラクティブな操作が可能です。

(2) Cube

Cube(図3)は、ダークネットに到達したパケットを、その送信元と宛先の各種情報に基づいて、三次元空間に浮かぶ立方体中にアニメーション表示する可視化エンジンです。立方体の縦軸に送信元/宛先IPアドレスを、横軸に送信元/宛先ポート番号を取り、送信元(図3の左平面)から宛先(図3の右平面)に向けてパケットを通過させることで、マルウェアによるスキャンの形状などが可視化されます。CubeはAtlasと同様、マウス操作による視点の変更や拡大・縮小、パケットの詳細情報などを表示でき、送信元ホストからの攻撃の様子をリアルタイムに把握することが可能です。

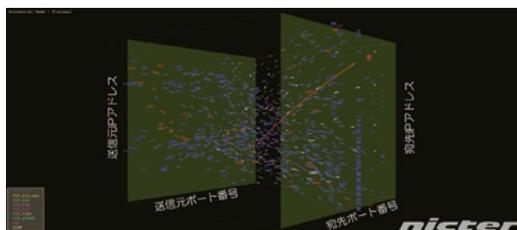


図3 Cube

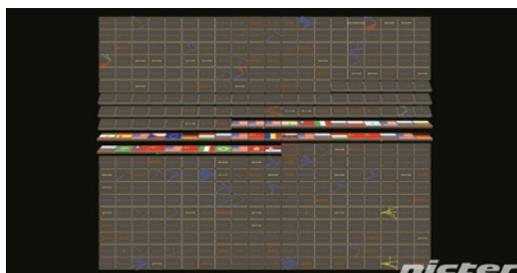


図4 Tiles

*7 青: TCP SYN, 黄: TCP SYN-ACK, 緑: TCP ACK, 桃色: TCP FIN, 紫: TCP RST, 橙: TCP PUSH, 水色: TCP OTHER, 赤: UDP, 白: ICMP(後述のCube, Tilesにおける色も同様)

(3) Tiles

Tiles(図 4) はダークネットトラフィックを送信元ホストごとにスライスし、各ホストの短時間(30 秒間)の挙動を分析・可視化するエンジンです。図 4 の小さなタイルの 1 つ 1 つが送信元ホストごとの挙動を表しており、最新の分析結果に随時更新されていきます。タイルの裏側は送信元ホストが属する国の国旗が示されています。1 つのタイルは、パケットの時刻、送信元 / 宛先ポート番号、宛先 IP アドレスを用いて可視化および分類されます。この分類の履歴を蓄積することによって、ある送信元ホストの挙動が既知のスキャンパターンであるのか、あるいは新規のスキャンパターンであるのかをリアルタイムに判定することが可能となります。

マクロ解析システムでは前述の可視化・分析エンジンに加えて、図 1 上部に示すような各種分析エンジンの研究開発を行っています。

● ミクロ解析システム

ミクロ解析システムは、ハニーポットと呼ばれるおとりサーバや Web サイトの巡回を行う Web クローラなどでマルウェアの検体を捕獲し、その検体を自動解析するシステムです。以下、ミクロ解析システムに含まれる動的解析エンジン(図 5)について概説します。

リアル空間においてウィルスをシャーレで培養して観察するように、動的解析はマルウェアをサンドボックスと呼ばれる箱庭環境で実行し、その際にマルウェアが使用した API*⁸ やネットワークアクセスなどの挙動を解析する手法です。ところが、近年の高度化されたマルウェアは動的解

析に対抗するため、自己の周囲のネットワーク環境を調査して、自己がサンドボックス内にいることを検知すると実行停止や自己消去を行なうなどの解析回避機能を持っています。そのため、nicter の動的解析エンジンは、サンドボックス内に DNS サーバや Web サーバなど多数のダミーサーバからなるインターネットエミュレータを配置することで、マルウェアの解析回避機能を無効化しています。また、マルウェアが解析回避のために行う仮想マシン検出に対抗するため、マルウェアを実行する犠牲ホストは OS 自動復元機構を持った実マシンによって構成されています。

このようなサンドボックス内での動的解析の結果、犠牲ホストからは API ログが、インターネットエミュレータからはサーバログが出力され、それらのログからマルウェアの挙動が抽出できます。加えて、犠牲ホストとインターネットエミュレータの間で観測されるパケットデータに含まれるスキャンが、後述する相関分析の鍵となります。

動的解析エンジンは 1 検体あたり 6 ~ 9 分の高速な解析を実現し、さらに解析の並列化により 1 日あたり最大 7,000 検体の解析が可能となっています*⁹。

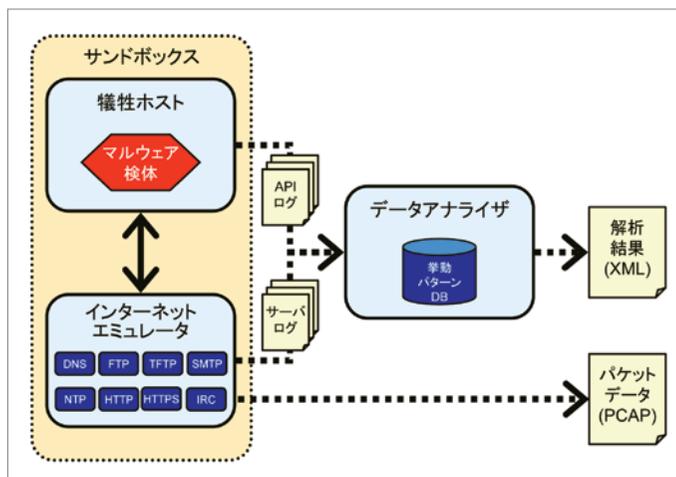


図5 マルウェア動的解析エンジン

*8 Application Program Interface.
 *9 2012年3月末現在。

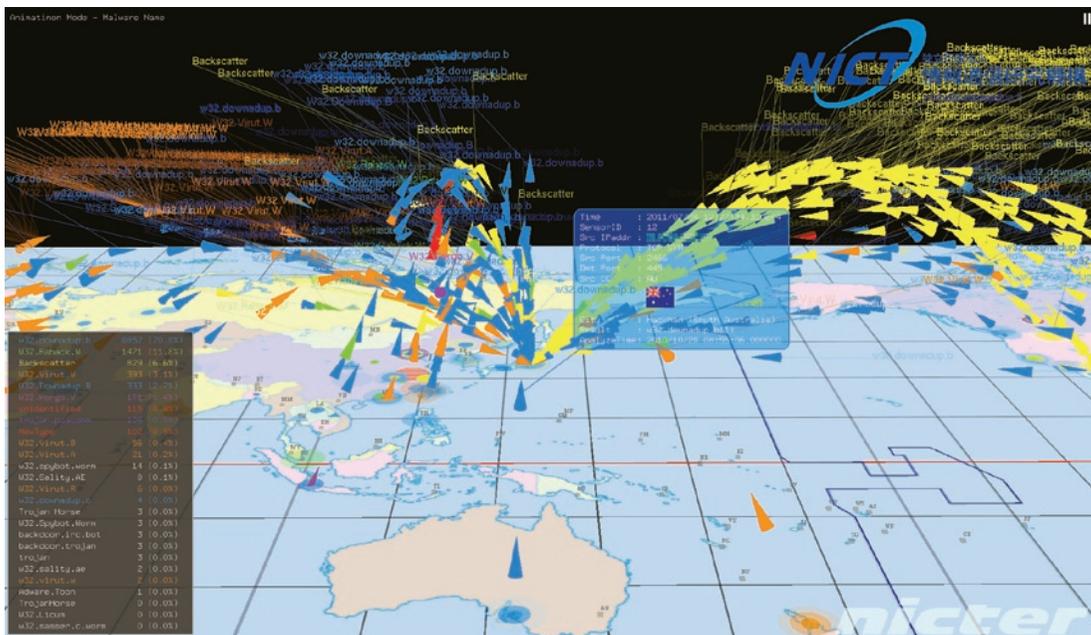


図6 相関分析結果の可視化

ミクロ解析システムでは、前述の動的解析エンジンに加えて、図1下部に示すような各種解析エンジンの研究開発を行っています。

● 相関分析システム

相関分析システムは、マクロ解析システムにおいて観測されたマルウェアからのスキャンを各種の特徴^{*10}によってプロファイリングし、ミクロ解析システムにおいてマルウェアから抽出されたスキャンのプロファイルとの照合を行い、類似したプロファイルを持つマルウェアの候補を探し出します。つまり、マクロ解析システムで捉えた「現象」（サイバー攻撃）と、ミクロ解析システムで蓄積した「原因」（マルウェア）とを結びつける答え合わせのシステムです。マクロ解析結果とミクロ解析結果はマルウェア情報プール(MNOP: Malware kNOWLEDge Pool)に蓄積されるとともに、相関分析エンジンによってリアルタイムに照合が行われます。

図6は可視化エンジンAtlas上で相関分析結果を可視化したものです。各パケットオブジェクトの上方に、相関分析の結果、第一候補として挙げられたマルウェア名を表示しています。また、パケットの詳細情報の中にもマルウェア名(図6の例ではw32.downadup.b)を表示しています。さらに、相関分析の結果を累計することで、マルウェアの世界的な活動傾向を把握することが可能となります。図6の左下のボックスは、相関分析結果(マルウェア名ごとのユニークホスト数)の累計を表しており、2011年時点で70%を超えるホストがw32.downadup.b(あるいはそれと同様のスキャンエンジンを持つマルウェア)に感染しているものと自動推定しています。

● インシデントハンドリングシステム

インシデントハンドリングシステムは、マクロ解析、ミクロ解析、相関分析の各サブシステムからの出力を集約・蓄積し、インシデント発生時の

*10 パケットのプロトコル、TCPフラグ、送信元ポート番号およびその変化、宛先ポートのセット、宛先IPアドレスの遷移(シーケンシャル/ランダム)、単位時間あたりのパケット数、ペイロード長など。

データ管理や、その再現を可能にします。また、DAEDALUS^{*11}は nicter の大規模ダークネット観測網を応用したアラートシステムです。以下、DAEDALUS について概説します。

従来のダークネット観測は組織外からダークネットに飛来するパケットを観測する、つまり“外から内”への異常な通信を収集するという考え方でした。一方、DAEDALUS は組織内から送出されたパケットを分散配置されたダークネットで観測する、つまり“内から外”(または内から内)への異常な通信を網にかけるという、従来とは逆転したダークネットの活用法に基づいています。換言すると、DAEDALUS は組織内で起こったマルウェア感染などをダークネットによって検知し、該当する組織にアラートを自動送信することで、ダークネット観測をサーバやホストが存在するライブネットの保護に活かすシステムです。

図7は DAEDALUS の可視化エンジンです。中央の球体がインターネット、その周りを周回している各リングが、nicter のセンサを設置している各組織のネットワークを表しています。球体とリングの間を飛び交う流星状のオブジェクトはダークネットトラフィックを表しています。リングの水色の部分がライブネット、濃紺の部分がダークネットであり、リングの外周の「警」のマークは組織内でアラートの原因となった送信元ホストを指し示しています。この可視化エンジン上でのアラート表示と同時に、該当組織にはメールベースのアラートが自動送信され、実際のセキュリティオペレーションのトリガとして活用されています。

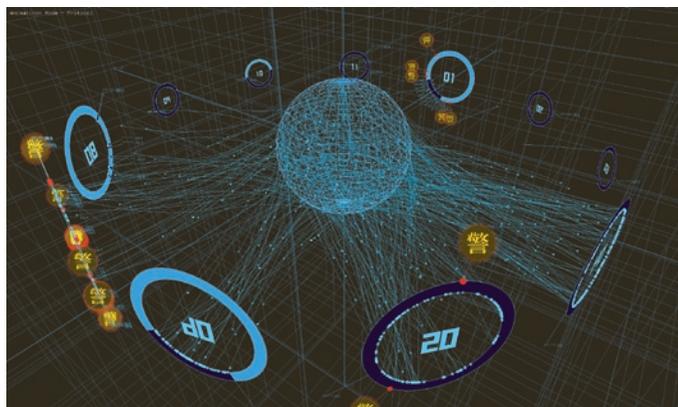


図7 DAEDALUSの可視化エンジン

まとめと今後の課題

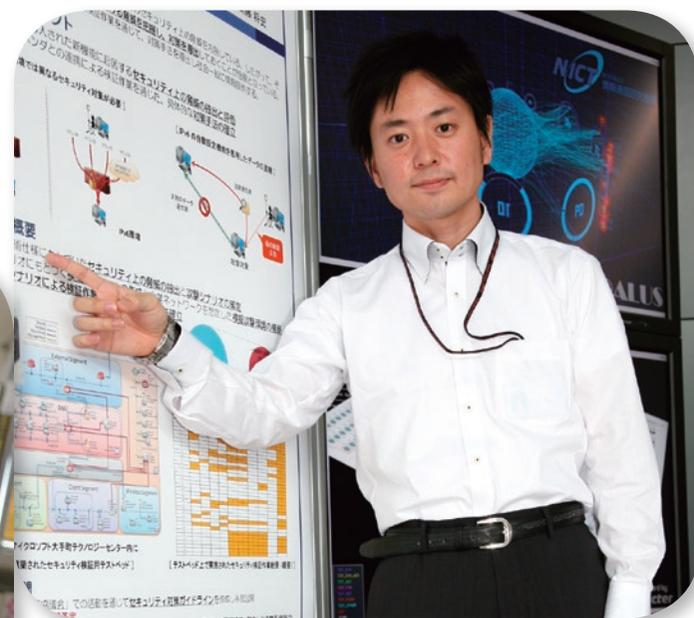
本稿では、セキュリティインシデントの早期発見、原因究明、対策導出を目的としたインシデント分析センター nicter について概説しました。nicter の研究開発によって、ネットワーク経由で感染を広げるリモート感染型マルウェアの大局的な活動傾向の把握と迅速な原因究明が可能となり、その分析結果の一部は nicterWeb^{*12} というサイトから一般公開を行っています。また、nicter の大規模ダークネット観測網を応用したアラートシステム DAEDALUS の外部展開など、研究成果の社会還元を推進しています。

一方、本稿の冒頭でも述べたように、インターネットにおける脅威は日々進化しており、Web を媒体とした攻撃手法(ドライブ・バイ・ダウンロード攻撃)や、SNS を媒介したマルウェア、特定の組織を狙った標的型攻撃など、これまでの nicter の仕組みでは捉えられない新たな脅威が生まれてきています。今後も、このような新たな脅威に対抗可能な実践的研究開発を推進するとともに、攻撃者側が圧倒的に有利な現在の状況を一変させ得る根源的なセキュリティ技術の研究開発を、産学官の連携の下に取り組んでいきます。

*11 Direct Alert Environment for Darknet And Livenet Unified Security.
*12 <http://www.nicter.jp/>

ネットワークリアルタイム可視化システムNIRVANA

—トラフィックの「今この瞬間」を描き出すネットワーク管理支援ツール—



「複雑化するネットワークを見える化し、ネットワーク管理を『苦しみのない世界』に。NIRVANAはnicterからスピノフした強力なネットワーク管理支援ツールです。」

井上 大介 (いのうえ だいすけ)

ネットワークセキュリティ研究所
サイバーセキュリティ研究室 室長

2003年横浜国立大学大学院工学研究科博士課程後期修了後、独立行政法人通信総合研究所(現 NICT)に入所。2006年よりnicterの研究開発に従事。現在ネットワークセキュリティ研究所サイバーセキュリティ研究室 室長と、ネットワーク研究本部 ネットワークシステム総合研究室 研究マネージャーを兼務。博士(工学)。サッカーアルゼンチン代表とS.S. ラツィオがエネルギー源。

衛藤 将史 (えとう まさし)

ネットワークセキュリティ研究所
サイバーセキュリティ研究室 主任研究員

2005年、NICT入所。以来、nicter プロジェクトやIPv6セキュリティなど、情報通信セキュリティ技術の研究開発に従事。nicterプロジェクトでは主に次世代型サイバー攻撃観測プラットフォームの研究に取り組む。博士(工学)。

● はじめに

ネットワークが生活空間の隅々にまで張り巡らされ、地球上のどこかに蓄積された膨大なデータにハンドヘルドデバイスやタブレットコンピュータからアクセスし、海外にいる同僚とリアルタイムにビデオ会議をする…。私たち 21 世紀初頭の人類を取り巻く通信環境は、スタートレックの生みの親、ジーン・ロッデンベリー氏の豊かな空想をも上回るスピードで進化を続けているようです(もちろん亜空間通信はまだ実現していませんが)。しかしながら、その通信環境を支えるネットワークの管理は、エンタープライズ号の艦内のようにコンピュータ任せとはいかず、現代のネットワーク管理者達を悩ませ続けています。

そこで、ネットワークセキュリティ研究所サイバーセキュリティ研究室では、通信環境の進化とともに複雑化するネットワーク管理の負荷を軽減するために、ネットワークリアルタイム可視化システム NIRVANA*1 の開発を行っています。NIRVANA は、ネットワークを流れるトラフィックをリアルタイムに可視化することで、ネットワークの疎通確認や障害検知、輻輳の把握や設定ミスの検出などを迅速に行うことを可能にし、組織のネットワーク管理の効率を劇的に向上させる支援ツールです。そして、その可視化の仕組みは、同研究室で研究開発を進めているインシデント分析センター nicter で培ってきた技術群を応用したものです。

● ダークネットからライブネットへ

インシデント分析センター nicter は、サイバー攻撃の発生を早急に把握するために、インターネット上に複数のセンサを設置し、未使用の IP

アドレス(以下、ダークネット)の大規模観測を行っています。ダークネットにはマルウェアが次の感染対象を探すためのスキャンなど、不正なトラフィック(以下、ダークネットトラフィック)が大量に届きます。nicter では、ダークネットトラフィックを自動分析すると同時にリアルタイムに可視化し、迅速なセキュリティオペレーションを実現するための研究開発を行っています。

この nicter のダークネットトラフィック向けに開発した可視化技術を、ライブネットトラフィック(ユーザ端末やサーバ等が接続された実ネットワークを流れる通信)に応用し、強力なネットワーク管理支援ツールとしてスピノフしたシステムが NIRVANA なのです。

● NIRVANA のシステム構成

NIRVANA は、観測対象ネットワークからトラフィックを収集するセンサシステム、収集したトラフィックを集約するゲートシステム、集約されたトラフィックを視覚化する可視化システムという 3 つのサブシステムからなります(図 1)。これは、nicter のダークネット観測システムから継承したシステム構成です。

センサシステムには、観測対象ネットワークからポートミラーリングやネットワークタップによって複製・分岐されたライブネットトラフィックを入力します。また、sFlow*2 によってサンプリングされた情報を入力することもでき、組織のネットワーク環境に応じた柔軟な観測方法を選択可能です。センサシステムは観測対象ネットワークに複数設置できるため、例えば、組織のネットワークが日本各地に分散しているような場合にも対応できます。

ゲートシステムは、センサシステムにおいてパケットサマリデータ*3 に変換されたライブネットトラ

*1 nicter real-network visual analyzer

*2 高速・大容量化したネットワーク管理の効率化を可能にする、ネットワークスイッチ等における情報収集技術のインターネット標準(RFC 3176)。

*3 パケットをネットワーク層とトランスポート層のヘッダ情報と、アプリケーション層のハッシュ値に圧縮したデータ。ライブネットトラフィックに比べ、大幅なデータ量の削減が可能。

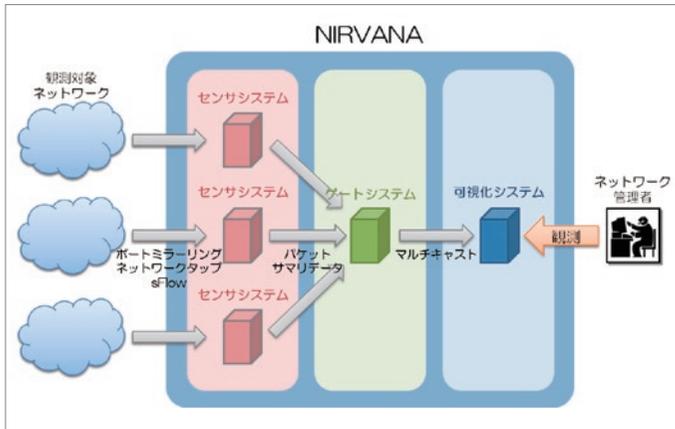
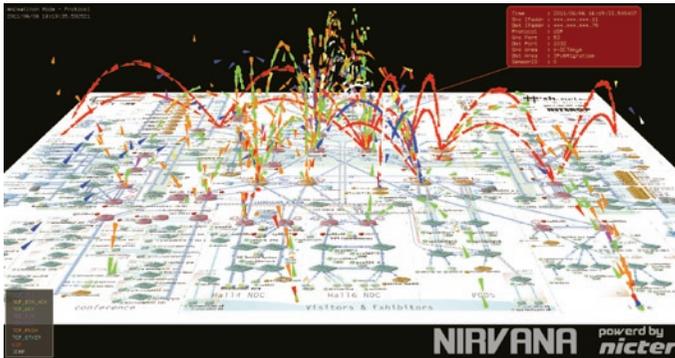


図1 NIRVANAのシステム構成

図2 NIRVANAによるライブネットトラフィックの可視化（パケットモード）^{*4}

フィックを集約し、可視化システムに向けてマルチキャストします。組織のネットワーク規模に応じて、ゲートシステムを複数設置することも可能です。

可視化システムは、ゲートシステムからマルチキャストされたパケットサマリデータを受信し、リアルタイムに3Dアニメーション表示します。可視化に必要な情報はマルチキャストされていますので、ネットワーク管理者が複数いるような場合でも、可視化システムのハードウェアを追加してマルチキャストを受信すれば、多地点でのモニタリングが可能になります。可視化システムは単体動作させることも可能であり、ローカルに保存したPCAPファイル^{*5}を再生して可視化することができます。

● NIRVANAによるライブネットの可視化

NIRVANAの可視化システムは、リアルタイム性、インタラクティブ性、カスタマイズ性を重視して設計・開発されています。リアルタイムに可視化されたライブネットトラフィックは、ネットワーク管理者の操作によってインタラクティブに拡大縮小や視点切替え、一時停止、詳細情報の表示などが行えます。また、3Dオブジェクトの形状や色、軌道の高度、スピードなど多岐に渡るパラメータをカスタマイズ可能です。さらに、フィルタリング機能も充実しており、送信元 / 宛先 IP アドレスやプロトコル、ポート番号、センサシステムのIDなどによってトラフィックのフィルタリングが可能です。

NIRVANAにはパケットモードとフローモードという2つのモードがあります。パケットモードは、ライブネットトラフィックをパケット単位で可視化するモードであり、ネットワークの疎通確認や、経路の障害検知などに威力を発揮します。図2は、Interop Tokyo^{*6} 2011の展示会場ネットワーク[ShowNet^{*7}]にNIRVANAを導入し、パケットモードでトラフィックを可視化したものです。各パケット(ロケット)の色はパケットの種別^{*8}を表し、パケットの軌道の高さはポート番号の大きさに比例(対数軸)しています。また、図右上の赤色のウインドウには、選択されたパケットの詳細情報が表示されています。パケットはルータをホップするように流れていきますが、これにはOSPF^{*9}によって

^{*4} Copyright (c) Interop Tokyo 2011 NOC Team Member and NANO OPT Media, Inc. All rights reserved.

^{*5} ネットワーク上を流れるパケット情報を保存するためのファイル形式。多くのネットワーク管理ツール(tcpdump、Wireshark等)で利用されています。

^{*6} 例年、数百の出展社が最新のネットワーク機器やソリューションを展示し、同時に多数の講演やコンファレンス等が開催される、ネットワーク分野における世界最大規模のイベント。

^{*7} 国内外のネットワークベンダが世界最先端のネットワーク機器を結集して構築する、Interopの心臓部とも言える展示会場全体のネットワーク。

定期的に取得したルーティングテーブルを利用しており、パケットの送信元 / 宛先 IP アドレスの組からその経路を決定しています。そのため、観測中に経路の変更が起こった場合でも動的に追従可能です。

一方、フローモードはトラフィックの流量を直感的に把握するためのモードです。フローモードではネットワーク機器間のトラフィック量を表現するためにリボン状の曲線を用い、その高さや太さ、色によって相対的な流量を表しています。図3は「ShowNet」をフローモードで可視化したものです。図中央の基幹ルータ間のホップが赤いリボンで表現されており、この機器間を流れるトラフィック量がネットワーク中で最大であることが把握できます。また、各機器の上に表示されている青と赤のバーは、それぞれ送・受信パケット数(設定によってはデータ量)を表しています。フローモードを用いることで、ネットワークのボトルネックを迅速に把握することが可能になり、前述のパケットモードとの併用で、ネットワーク管理の負荷を劇的に軽減できます。

NIRVANA の中で描かれるネットワーク図は、汎用の作画ツール Microsoft Visio^{*11} によって作成できます。NIRVANA はネットワーク図中の各オブジェクト(ネットワーク機器)に設定された IP アドレスを読み込んで、図中の座標に IP アドレスを自動設定することができます。そのため、ネットワークの構成変更が頻繁に起こるような組織でも、容易に NIRVANA のネットワーク図をアップデートすることができます。また、ネットワーク管理者のアイデア次第で、様々なネットワーク図を用いることができます。

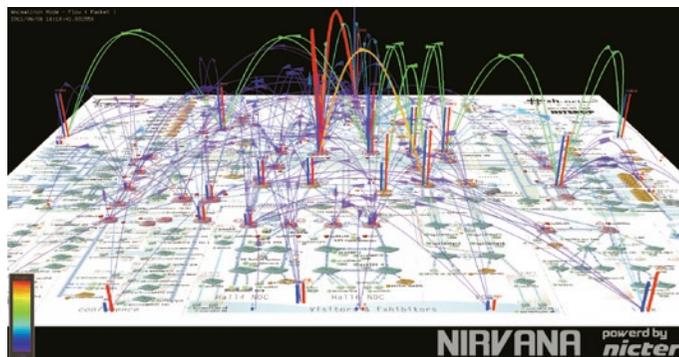


図3 NIRVANAによるライブネットトラフィックの可視化(フローモード)^{*10}

まとめ

仮想化技術の発達やクラウドコンピューティングの普及などにより、ますます複雑化するネットワーク管理が「苦しみのない世界」となることを目指し、インシデント分析センター nictcr の研究成果からスピノフした NIRVANA の社会展開と、さらなる高度化を進めていきます。

^{*8} 図2の例では、青:TCP SYN、黄:TCP SYN-ACK、緑:TCP ACK、桃色:TCP FIN、紫:TCP RST、橙:TCP PUSH、水色:TCP OTHER、赤:UDP、白:ICMP。

^{*9} Open Shortest Path First、ダイクストラ法によって最短経路のルーティングテーブルを作成するルーティングプロトコル。

^{*10} Copyright (c) Interop Tokyo 2011 NOC Team Member and NANO OPT Media, Inc. All rights reserved.

^{*11} Microsoft 及び Visio は、米国 Microsoft Corporation の米国及びその他の国における登録商標又は商標です。

セキュリティ情報交換と標準化 (CYBEX)

—地球規模でのサイバーセキュリティ構築に向けて—

高橋 健志 (たかはし たけし)

ネットワークセキュリティ研究所
セキュリティアーキテクチャ研究室 研究員

早稲田大学理工学研究科修了、2002年 Tampere University of Technology にて研究員、2004年同大学国際情報通信研究科にて研究員、2006年(株)ローランド・ベルガー社にてコンサルタントを経て、2009年より現職。情報通信プロトコル、サイバーセキュリティ、およびマルチメディア符号化に関する研究に従事。好きなことは新たな経験。経験の積み重ねこそが人生と信じ、現在はサイクリング、テニス、クッキング、そして中国語の学習に注力。博士(国際情報通信学)。

「組織・国境を越えた情報交換を促進することにより、サイバーセキュリティを向上させたい。その土台となる情報交換フレームワークについて、研究・標準化活動を展開しています。」



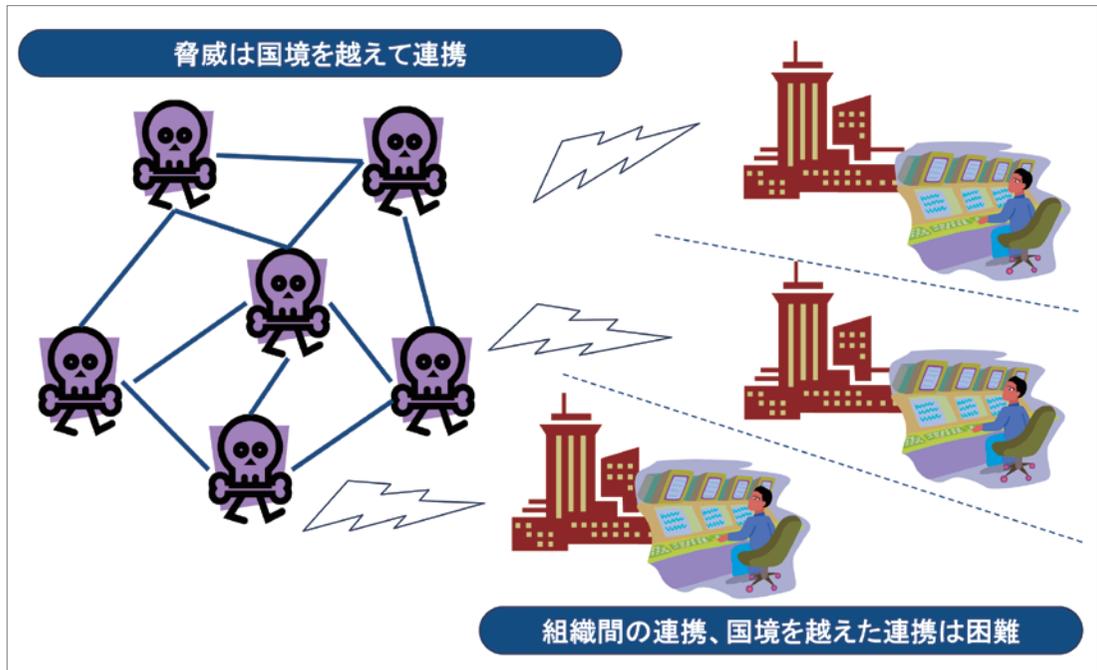


図1 脅威に劣後する対策

● 研究活動の背景

インターネットが世界規模で普及したことにより、近年、サイバー社会が急速に発展してきました。しかしながら、サイバー社会におけるセキュリティ、すなわちサイバーセキュリティに関しては、未だ発展途上の段階にあります。サイバー社会には国境はなく、脅威は国境を越えて襲ってきますが、その対策は各国・各組織が個別に対応しているのが現状です(図1)。すなわち、悪意のあるユーザーはリターンキーを押すだけで、互いに連携して世界中のコンピュータに対し攻撃が可能ですが、その対策は各国・各組織で独立して実施されています。各組織が連携するには、組織の壁を越えた情報交換が効率的に行われる必要がありますが、現時点では、必要に応じてメール、電話、対面での打ち合わせなど、時間と人手を要して実施しているのが現状です。

このような状況が生じている主な要因の1つ

に、情報交換のフォーマットやフレームワークが各国・各組織で統一されていないことが挙げられます。各国・各組織が協力してサイバーセキュリティ対策を実施するためには、サイバーセキュリティ情報の交換フォーマットやフレームワークがグローバルに共有される必要があります。

● 国際標準 CYBEX(X.1500)の構築

前述の情報共有フレームワークを構築すべく、我々は現在、国際標準化組織ITU-TにおいてCYBEX(Cybersecurity Information Exchange Techniques)という、組織間でのサイバーセキュリティ情報を交換するのに必要な技術群・フレームワークを定義しています。尚、CYBEXは組織間での情報交換に特化しているため、その情報の取得・活用についてはCYBEXの範囲外です(図2)。

CYBEXでは、この「サイバーセキュリティ情報の交換・共有」を実現するために、情報の表現手法、発見・交換手法、信頼性構築手法、

伝送手法のそれぞれを規定しています。特に、この情報の表現手法、発見・交換手法においては、後述する我々のオントロジの研究が大きく活かされています。CYBEX 自体は、ITU-T 勧告 X.1500 として勧告化されましたが、CYBEX を実現する具体的な技術については、今後も更なる発展が求められ、私も研究成果を積極的に ITU-T や IETF という国際標準化機関での活動に活かしています。

● 情報交換の基礎となるオントロジ

CYBEX に貢献する活動の 1 つとして、我々は

サイバーセキュリティ情報のオントロジを構築しました(図 3)。オントロジとは、世界を概念レベルでモデリングしたものを指しますが、ここでは、サイバーセキュリティオペレーションのあるべき姿をモデル化したものを指し、サイバーセキュリティオペレーションの業務領域、そのそれぞれの領域の業務を実施するプレイヤー、および彼らが扱う情報群という、3種類の情報を構造化して定義しています。すなわち、「どのオペレーションを」「誰が」「どの情報を利用して」実施するかをモデル化しています。本オントロジ構築に当たっては、日本だけでなく、米国、韓国のサイバーセキュリティ

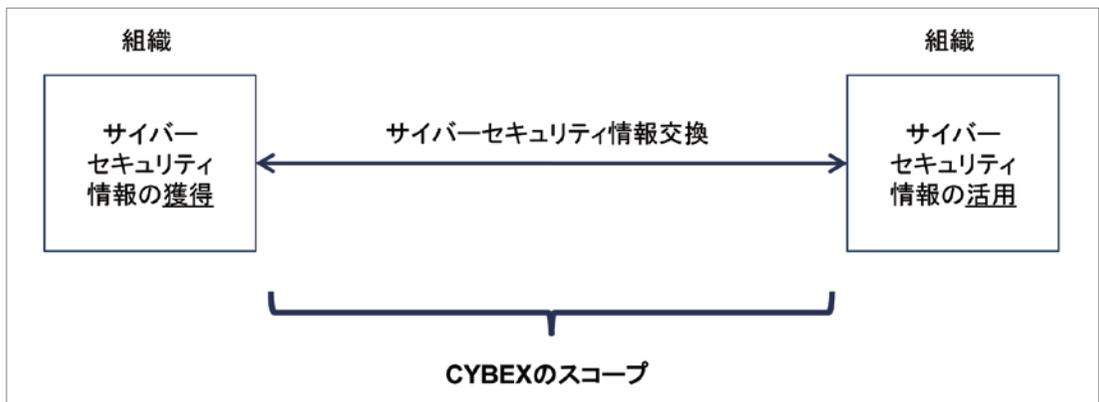


図2 CYBEXの範囲

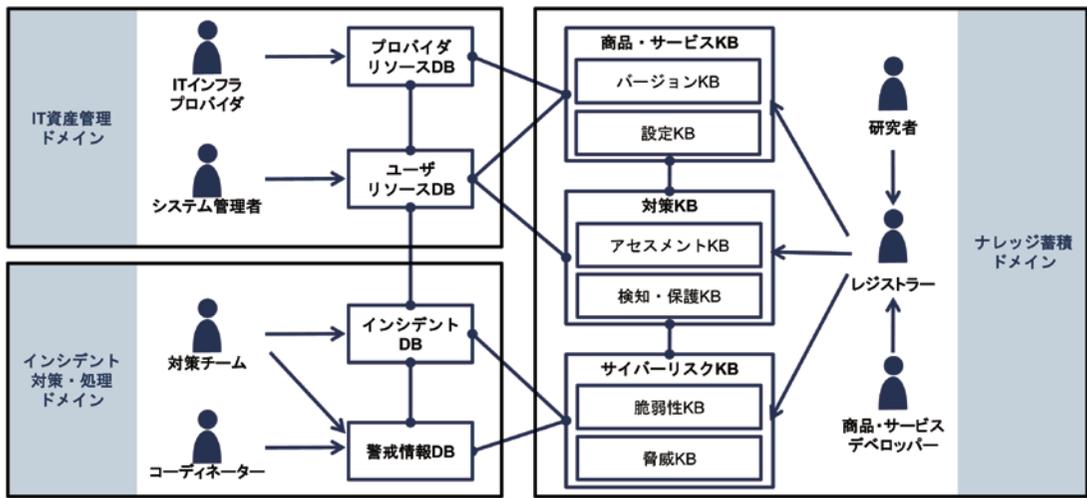


図3 サイバーセキュリティオントロジ

オペレーションの現状を鑑みており、サイバーセキュリティ先進国の知見が大いに活かされています。

本オントロジにより、サイバーセキュリティオペレーションの中でどのようなプレイヤーがどのような情報を必要とし、どのような情報交換がなされるべきかというものを体系立てて議論していくことが可能となり、CYBEX で交換されるべき情報を網羅的に議論するための土台となっています。これまでも様々な業界標準の動きはあったものの、部分最適な規格になる傾向がありました。CYBEX では、本オントロジに基づいて検討を進めることにより、サイバーセキュリティオペレーションを広く俯瞰しての規格制定を構築することを目指しています。

● 地球規模でのサイバーセキュリティ向上を目指して

このように、私はサイバーセキュリティ情報を「知」として共有するための手法・フレームワークを研究しております。ここにご紹介したもの以外にも、これらの世界中に存在するサイバーセキュリティ情報を、効果的に発見するための手法などの研究および開発も手掛けています。本オントロジに限らず、研究の成果を世の中に生きる形に昇華すべく、成果の国際標準化活動への展開、およびデモツールの構築・公開にも積極的に貢献しています。詳しくは、我々のホームページ (<http://cybex.nict.go.jp/>) をご参照ください。

暗号技術の新展開



野島 良 (のじま りょう)

ネットワークセキュリティ研究所
セキュリティ基盤研究室 主任研究員

大学時代に暗号技術を試みましたが、全く歯が立ちませんでした。その延長線上に今の自分がいますが、今は暗号解読ではなく、暗号技術を設計する立場になりました。博士(工学)。

「盗聴者への情報漏えいを防ぐことを主目的として発展してきた暗号技術に対する新たな展開先、プライバシー確保型 IP トレースバックを紹介します。」

● 暗号技術の広がり

暗号技術は、2者間の通信において盗聴者にメッセージの内容が漏れないようにすることを主目的として発展してきました。しかし、近年のインターネットの発展に伴い、その応用範囲は急激に拡大しています。中でも、我々が所属するネットワークセキュリティ研究所においては、内積暗号、秘匿計算プロトコルと呼ばれる汎用性の高い暗号技術の研究・開発に力を注いできました。ここでは、秘匿計算プロトコルの一種である「オブリビアス秘密鍵暗号プロトコル」とその応用技術「プライバシー確保型IPトレースバック」について紹介したいと考えています。

そもそもIPトレースバック技術とは、インターネット上で不正を働いたユーザを追跡する技術です。もう少し具体的に述べると、IPトレースバックにおいては、各ルータが通過するパケットを保存しておきます。そして、実際に攻撃が行われた際には、攻撃を行ったパケットが保存されているルータを探索することにより、結果的に攻撃を行ったコンピュータを見つけ出すことが可能となります。

このIPトレースバック技術は非常に有用な技術ですが、探索する際に不正ユーザだけではなく、正当なユーザのプライバシーをも暴露してしまう可能性があります。我々が提案したプライバシー確保型IPトレースバック技術は、IPトレース

バック技術の一種です。ただし、正当なユーザのプライバシーを確保しながら、不正ユーザを追跡することが可能になります。

IPトレースバックとプライバシー確保型IPトレースバックに関する問題は、次のように単純化することができます。2人のユーザ(花子と太郎)を考えます。太郎はIPアドレスの集合 $A = \{a_1, \dots, a_n\}$ を、花子はIPアドレス a を保持しているとします。花子の目的は、 A の中に a が含まれているかどうか調べる事です。この問題は、花子が a を太郎に送り、太郎が A の中に a が含まれているかどうかを調べる事により解決可能になります。実際にIPトレースバックでは、同じようなことが行われます。一方、プライバシー確保型のIPトレースバックにおいては、問題が若干難しくなります。この技術を実現するためには、太郎が A を漏らさずに、そして花子が a を漏らさずに、 a が A に含まれているか調べる必要があります。この一見解決不可能な問題を、我々は、オブリビアス秘密鍵暗号プロトコルを開発・応用することにより解決しました。ここでは、このオブリビアス秘密鍵暗号プロトコルの概要とその応用についてご紹介します。

● 秘密鍵暗号

秘密鍵暗号においては、秘密鍵 SK を使いメッセージ M を暗号化することができます。



図1 秘密鍵暗号の説明

この暗号化されたメッセージを $\text{Enc}(\text{SK}, M)$ と表します。ここで秘密鍵 SK を保有する人だけが、 $\text{Enc}(\text{SK}, M)$ から M を取り出すことが可能になります。逆に、 SK を保有していない人は M に関する情報を一切得る事ができません(図 1)。秘密鍵暗号として代表的なものに、DES(Data Encryption Standard) と AES (Advanced Encryption Standard) があります。

● オブリビアス秘密鍵暗号

オブリビアス秘密鍵暗号プロトコル(以降、OEP)は、2者(太郎、花子)間の暗号プロトコルです。

太郎は秘密鍵暗号の秘密鍵 SK を、花子はメッセージ M を保有します。このプロトコルは、お互いの情報 SK と M を秘密にしたまま暗号文 $C = \text{Enc}(\text{SK}, M)$ を計算することを可能にします。ここで、もちろん C を得られるのは花子であり、太郎は C に関する情報を一切得る事ができません(図 2)。

ここで「オブリビアス」という単語に関してですが、直訳すると「気付かない」という意味がありま

す。太郎と花子は相手の入力について「気付かない」ため、プロトコル名にオブリビアスという用語が使われています。

● IPトレースバックへの応用

プライバシー確保型 IPトレースバック技術において、太郎と花子は、お互いの情報を隠しながら、 a が $A = \{a_1, \dots, a_n\}$ に含まれているかどうかを検証する必要性がありました。この問題は、OEP を使うと簡単に解決できます。

- (1) 太郎は、秘密鍵暗号の秘密鍵 SK を選び、 $\text{Enc}(\text{SK}, a_1), \dots, \text{Enc}(\text{SK}, a_n)$ を花子に送ります。
- (2) 花子は、OEP を使い $\text{Enc}(\text{SK}, a)$ を得ます。そして、 $\text{Enc}(\text{SK}, a_1), \dots, \text{Enc}(\text{SK}, a_n)$ の中に、 $\text{Enc}(\text{SK}, a)$ と同じになるものがあつた場合、 a が A に含まれていると判定します。OEP を使うことにより、お互いに SK と a が漏れないため、花子の秘密情報である a が太郎に漏れる事はありません。さらに、 SK が花子に漏れないので、 n 個の暗号文から太郎の秘密情報 A が漏れることもありません(図 3)。

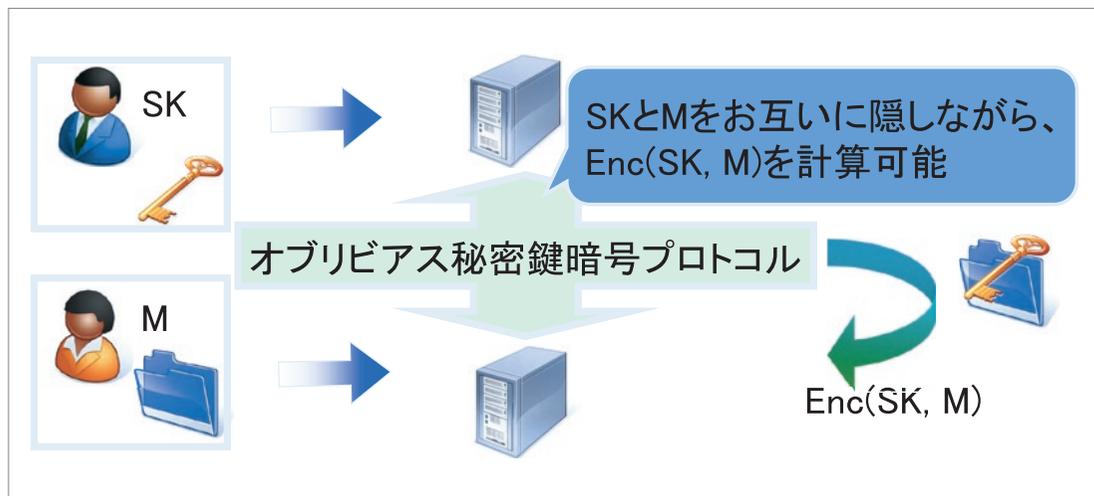


図2 オブリビアス秘密鍵暗号プロトコルの説明

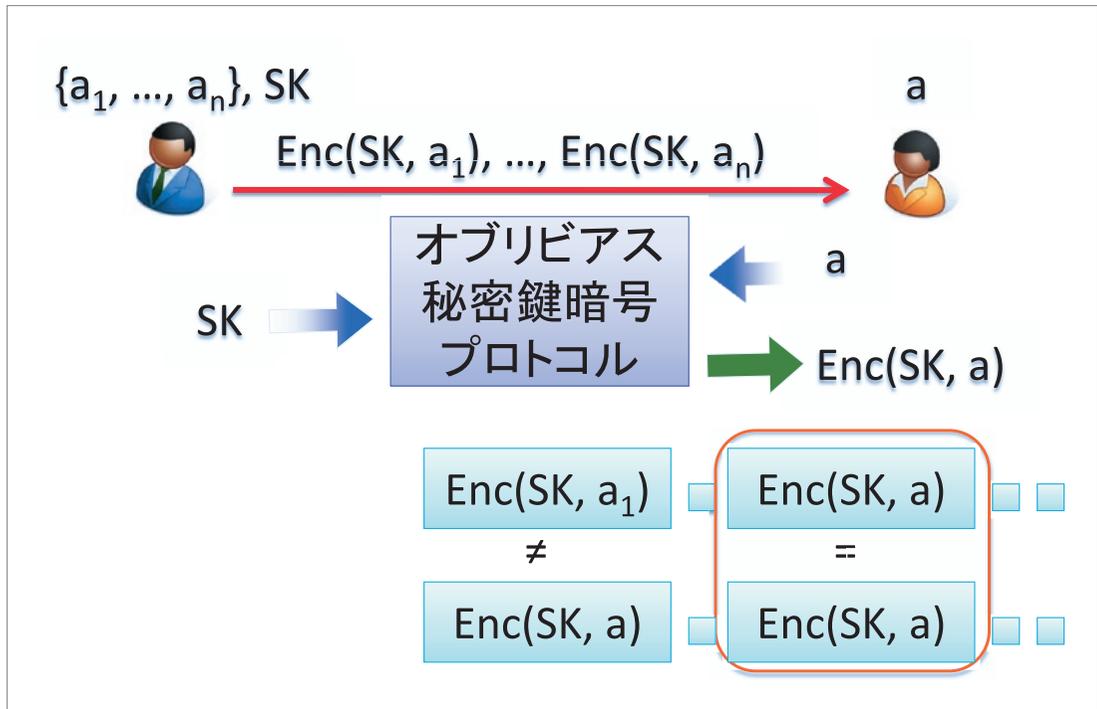


図3 プライバシー確保型IPトレースバックの説明

● 今後の研究について

ここまでオブリビアス秘密鍵暗号プロトコル、及びプライバシー確保型 IP トレースバック技術を簡単に紹介してきました。その具体的構造まで説明することはできませんでしたが、既にオブリビアス秘密鍵暗号プロトコルは、実装・実験が無事に終了しています。今後は、IP トレースバック技術、オブリビアス秘密鍵暗号の更なる発展・普及に努めたいと考えています。

プライバシー保護技術

大久保 美也子 (おおくぼ みやこ)

ネットワークセキュリティ研究所
セキュリティアーキテクチャ研究室 主任研究員

のどかな景色の水のきれいな田舎で育ち、子どもの頃は暗くなるまで野山を駆けて遊んでいました。スポーツの経験は、陸上競技(短距離走や幅跳び)、バレーボール、剣道を少々…。基本的にスポーツ全般好きです。近視 & 乱視で中学の頃眼鏡をかけ始め、現在では体の一部です。暗号の研究は社会人になってから本格的に始めたのでやや遅めのスタートでしたが、生涯現役!を目指しています。

「複雑に入り組んだサービス間の中にあっても個々の要求に応じ、プライバシーを守れる仕組み作りが今後ますます重要となります。本稿では、ネットワーク上でフレキシブルにプライバシー保護を実現する技術について紹介します。」



● はじめに

ネットワークの用途が日々変化し拡大をし続けている昨今、これまで対面もしくは書面でしか扱えなかった契約・取引・売買などの手続きもインターネットを介して行えるようになってきました。このように利便性の向上に伴い、ネットワーク上で不正なくこれらの手続きが行えるよう、意識して防御しなければならないことも増えてきています。また、近年では、インターネットを活用することにより様々な情報が入手可能となり、簡単にほしい情報を集めたり調べたりすることができるようになりました。その一方で、自分で気がつかないうちにプライバシーに関わる情報を侵害されうる可能性も高くなっています。

このような状況を踏まえ、私たちの研究室ではネットワークを本来の効率性や利便性を損ねることなく、安全性とプライバシー保護機能とをフレキシブルに提供できる大規模認証基盤の実現を目指して研究を進めています。

● ネットワークの利用用途の変化と求められる機能

ネットワーク上で不正行為が行われないようにするためには様々な要求条件が満たされなければなりません。例えば、契約の場合では、ネットワーク上で通信している相手が本当に契約相手本人か？電子データで送られてくる契約書の内容は通信の途中で改ざんされていないか？本人の意思確認が出来るか（本人印のようなものが確認できるか）？などをチェックできる仕組みが必要になります。

一方で、個人的な内容を含む契約・取引・売買などの場合には、必要以上には個人個人のプライバシーに関わる情報は漏らしたくないという

要求が出てきます。例えば、電子オークションなどでは、応札の手続きを匿名で進めたいなどの要求が出てきます。また、電子投票などでは、有権者が投票を行う際に誰であるかが特定されてはいけない、立候補者の誰に投票したのかが識別されてはいけない、などの要求が出てきます。

一見すると不正を防止し安全性を保つための要求条件とプライバシーを保護するための要求条件が相反する要求事項に見えますが、暗号技術を活用することによりそれらの要求事項を両立させることができるようになります。

保護したいプライバシー情報は、ユーザごとに、また利用シーンごとに異なります。さらに大規模ネットワークへ多数の端末が接続するこれからのネットワーク上では、考慮すべき状況が複雑化・多様化します。同一ユーザであったとしても用いる端末やデバイスが異なる場合や異なるサービス間でユーザ情報の交換などが行われる場合など、起こりうる複合的な事象を全て踏まえた上で、守られるべきセキュリティレベルを保ちつつ個々のプライバシーを保護することが望めます。例えば、複数のサービス間で同一ユーザであることが識別される必要がある場合、同一ユーザであることを識別されることがプライバシーの侵害につながる場合等も出てきます。また、複数の異なるデバイスを用いていても、同一ユーザであることが識別されることによりプライバシー侵害などの可能性も出てきます。

ある用途や目的に特化し、保護すべきプライバシー情報を確定するようなシステム設計であれば、従来からある暗号技術などを複数用いることにより、ある程度構成することができます。しかし、目的が多様化し、また保護すべきプライバシー情報も画一的でなくなってきている昨今、それらの方向性の異なる要求事項を1つのシステムで実現することは困難もしくは構成すること

が出来たとしてもシステムの肥大化を招いてしまいます。

● 我々の目指す安全かつ利便性の高いセキュリティ技術

そこで私たちの研究室では、プラットフォーム上でのユーザおよびサービス提供側などの様々な要求条件にフレキシブルに応えられるプライバシー保護機能を備えた認証方法の提供を可能にする暗号技術を研究対象としています。

例えば1つのプラットフォームで、電子投票や申請システムやアンケートなどそれぞれの目的・保護したいものの要求条件に沿った機能を提供可能となる総合情報基盤を目指しています。

これらの実現により、コスト面では、1システム数百万から数億円かかる複数システムを1システム分のコストで提供することが可能となります。また、機能面では、1つのプラットフォー

ム上でユーザ・サービス提供側双方の安全性を保持した上で、個別ユーザごとの、またサービス提供者ごとの異なる要求事項や、ユーザの利用目的や提供サービスごとに異なる必要な機能などをフレキシブルに実現できるプライバシー保護機能を備えた認証の提供が可能となります。

具体的には、図に示すように、目的により異なるプロトコル(メッセージの内容を匿名にするブラインド署名、署名者のIDを匿名にするグループ署名など)を構成するために、それぞれのプロトコルを個別に構成するのではなく、1つのデジタル署名を活用することにより、両方のプロトコルの機能を同一のプラットフォーム上で提供することが可能となります。また、効率面では従来技術を複数用いた構成に比べ、システム全体としてのコンパクト化を実現でき、利便性についても、用途ごとへのフレキシブルな機能提供が可能となります。

提案方式の特徴

メッセージや署名の匿名性を守りながら正しい署名であることは検証できる機能を効率的に提供可能

提案方式の応用

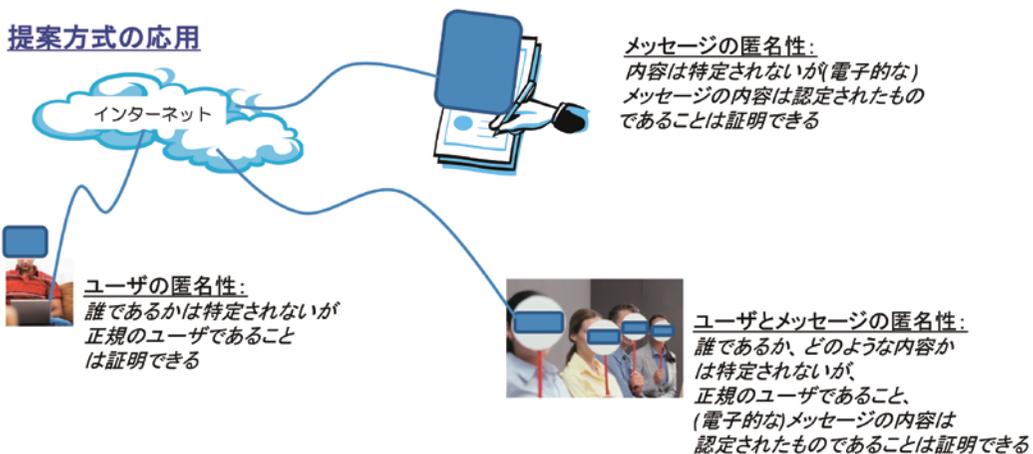


図 プライバシ保護のための提案方式の活用イメージ

● 今後の展望

ネットワークの利用用途は限りなく広がって
いく可能性を秘めています。私たちの研究室
ではその可能性を最大限に伸ばしていけるよ
う、セキュリティの技術を防御するための
手段として用いるのではなく、その可能性を
促進する手段として活かしていきたいと考
えています。

I-1
光
ネット
ワーク
技術

I-2
ワイヤレス
ネット
ワーク
技術

I-3
ネット
ワーク
セキュ
リティ
技術

I-4
新世代
ネット
ワーク
基礎
構成
技術

II
コ
ン
パ
サ
ル
ミ
ニ
テ
ク
ス
基
礎
技
術

III
未
来
I
C
T
基
礎
技
術

IV
電
磁
波
セ
ン
シ
ン
グ
基
礎
技
術

過不足のないセキュリティを実現する セキュリティアーキテクチャ

ーネットワーク利用者の状況に合わせたセキュリティの実現ー

松尾 真一郎 (まつお しんいちろう)

ネットワークセキュリティ研究所
セキュリティアーキテクチャ研究室 室長

博士 (工学)。大学院修了後、1996年にNTTデータ通信株式会社に入社、情報セキュリティと暗号の応用に関する研究に従事。2009年にNICTに入所、2011年から現職。情報セキュリティの研究は国際標準化が重要であり、ISO/IEC JTC1における暗号技術の標準化作業の日本における主査を務め、国際標準化のために世界を飛び回る日々を送っています。日本発のセキュリティ技術が世界で利用される例を1つでも多く作るのが夢です。

「ネットワーク上のサービスを利用する際に、利用者にとって確認しにくいセキュリティを可視化し、複雑なシステムでも適切なセキュリティ技術を利用可能にします。」



● ネットワークの多様化とセキュリティ対策の複雑化

近年、ネットワークにおける様々な処理やサービスの環境が大きく変化しています。従来は、いわゆるクライアント・サーバという形態でサービスが実現され、情報セキュリティの設計もこの形態に合わせた形で行われてきました。しかし、クラウドコンピューティングが普及し、セキュリティを考える際の出発点となる情報資産の保管場所が多様化するとともに、スマートフォン、センサーやRFIDタグなど、従来のセキュリティ技術が保護の対象としていなかったデバイスが大量にネットワークに接続されるようになってきました。NICTが実現を目指している新世代ネットワークにおいても、およそ10兆個のデバイスがネットワークに接続され、ネットワーク仮想化やID・ロケータ分離^{*1}などの技術をベースにして、状況に応じた通信環境を提供することが目標になっています。

従来の情報通信技術(ICT)でのシステムにおけるセキュリティは、ITU-T^{*2}やIETF^{*3}などで

標準化されている技術を利用して実現されてきていますが、これらの技術は画一的な環境やセキュリティ要求に対応するものでした。しかし、ネットワーク環境が多様化・複雑化する場合には、ネットワークにおけるセキュリティ上の脅威も複雑化し、脅威への対策を見つけ出すことは非常に困難になります。このような状況では、既存のセキュリティ技術では、必要なセキュリティ対策が取られていなかったり、逆に過剰な対策で通信速度を犠牲にするケースが多く出現することになります。

そこで、このような複雑なネットワーク上の脅威に対して、過不足のないセキュリティ対策をタイムリーに実現するための仕組みが必要となっています。

● 過不足のないタイムリーなセキュリティ対策

ICTにおけるセキュリティ確保の基本的な考え方は従来から存在しますが、いたってシンプルです。

	(Ⅰ)脆弱性に起因しない攻撃	(Ⅱ)脆弱性に起因した攻撃
攻撃	サービス不能(DoS)攻撃など	不正侵入、マルウェア感染、情報詐取、プライバシー情報漏洩など
観測・分析技術	nicterによる攻撃の観測・分析 (サイバーセキュリティ研究室)	
		攻撃の原因となる脆弱性の分析や脆弱性への対処の大部分は人海戦術で実施
対策技術	nicterアラート/マルウェア対策ユーザサポート技術/予防基盤技術(サイバーセキュリティ研究室)	
	攻撃発生時のシステムレベルのマイグレーションは自動化困難	現在の認証・プライバシー保護技術は多様かつ膨大な数のデバイスには対応できない

図1 ICTにおけるセキュリティの分析と対策の分類と課題

あるサービスを実現するシステムを設計するときに、守るべき情報資産(クレジットカード番号、個人情報、パスワード)などと、その保管場所を洗い出し、個々の場所に保管された情報への攻撃の成功確率を見積もり、損害の期待値から優先順位付けを行い、カバーすべき攻撃について、必要な対策技術をシステムに組み込みます。この考え方自体は普遍的なものであり、将来においても大きくは変わらないと考えられます。しかし、システムが稼働した後にシステムの脆弱性が新たに発見された場合の対応は、該当するシステムの仕様に精通し、かつネットワークセキュリティのエキスパートが人海戦術で行っているというのが実情です。何が適切なパッチなのか、新しいパッチがセキュリティや性能の問題を引き起こさないのかなど、セキュリティパッチの管理だけでも膨大で、難しい作業になります(図1)。

新しい時代のネットワークに必要なことは、システム設計の時点だけではなく、いつまでもシステムがセキュアであることです。そのために、システム設計の時に必要な対策を見つけ出すこと、システム運用時に発生する脆弱性にタイムリーに

対応できること、脆弱性や脅威への対策は過不足がない、すなわち十分かつ通信性能を極力犠牲にしていないことが求められます。

● 新たなセキュリティアーキテクチャの実現に向けて

現在、我々が研究しているセキュリティアーキテクチャでは、複雑化するネットワークにおいて過不足のないタイムリーなセキュリティを提供する「フレキシブルセキュリティ基盤」と、モノに付けられるような計算能力の低いデバイスを含む10兆個のノードに対応できる認証・プライバシー保護技術「セキュリティコンポーネント」の実現のための技術の実現を目指しています。

フレキシブルセキュリティ基盤では、過不足のないタイムリーなセキュリティ対策を導出するための、セキュリティ知識ベース・分析エンジンの実現を目指しています(図2)。セキュリティ知識ベースは、ネットワーク機器等に潜む脆弱性、対策技術、ネットワーク形態、ネットワーク機器の性能などのデータベース(DB)を総称したものです。

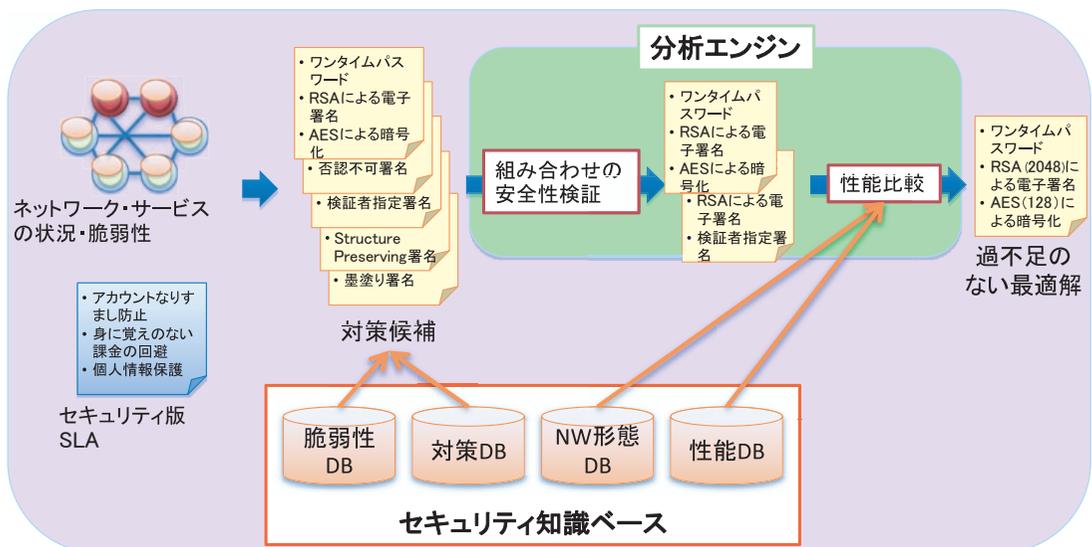


図2 セキュリティ知識ベース・分析エンジンの概念図

サイバーセキュリティ研究室のnicterの観測結果とも連携します。そして、分析エンジンは、セキュリティ知識ベースと連携し、複数のセキュリティ対策案の中から、安全かつ処理性能が一番高い対策を選び出すことで、過不足のないセキュリティを実現するものです。すでに、第一歩としてモバイル機器の利用者に向けて、その時に使っているサービスの脆弱性をセキュリティ知識ベースから引き出し iPad や Android タブレット上で可視化する Risk Visualizer(図 3)のプロトタイプを構築しました。フレキシブルセキュリティ基盤は、ネットワーク仮想化や ID・ロケータ分離といった新世代ネットワークの特長を活かすことで、新世代ネットワークにおける次世代のセキュリティの基盤となります。

セキュリティコンポーネントにおいては、計算能力の低いデバイスでも利用可能な認証・プライバシー保護技術を確立するとともに、異なる管理下にあるネットワーク同士でも認証やプライバシー保護ができる技術を研究しており、匿名性と文書の秘匿性を同時に実現できるプライバシー保護技術や、RFID タグ向けの認証技術を確立しています。これらの研究も、新世代ネットワークの実証に組み込む予定です。



図3 Risk Visualizerシステムにおけるネットワーク利用のリスク表示例

用語解説

*1 ID・ロケータ分離

端末の名前と位置を示す識別子を別々に管理し、方式が異なるネットワークでも、同じ ID を使用することで、端末の移動や経路上の障害等によりネットワークが切り替わっても継続して通信を可能とする NICT が開発している技術。

*2 ITU-T

国際連合の専門機関の1つである国際電気通信連合 (ITU) の電気通信標準化部門。

*3 IETF

インターネット技術の標準化について検討を行う組織。ここで策定された技術仕様は RFC として公表される。

I-4 新世代ネットワーク 次世代ネットワークのさらに先を見据えて



益子 信郎 (ましこ しんろう)

ネットワーク研究本部
副研究本部長

自分で作ることが好きで、野菜作りから家具、庭の造作など家周りで活動しています。学生時代から趣味にしてきた登山も最近は計画倒れの連続で、趣味とは言えない状況ですが、いつか子どもたちと山に行くのが夢です。

「NICTの新世代ネットワーク研究では、未来社会の基礎となるネットワークの開発を目指して、NICT内外の研究者を集結し、産学官の連携のもとに研究を推進しています。」

はじめに

ネットワーク環境の進歩により現代社会は大きく発展を遂げており、インターネットは、今や社会基盤として市民生活に欠くことのできないものとなっています。しかし一方で、インターネットでやりとりされるデータ量は爆発的に増え続けており、2025年には現在の数十倍から数百倍になると推定されています。そうすると、ICT機器の使用電力が増大し、エネルギー消費の観点からネットワークを自由に使えなくな

ります。また、セキュリティ面では、大量のデータや不正パケットを送りつけてサービスを妨害するDoS攻撃や迷惑メール問題など、複雑かつ巧妙化する脅威に対して抜本的な対策が求められています。さらに、ネットワークの構造そのものについても、次々と新しい要求に対処した結果、機能の重複や互換性の問題が発生しています。現行のインターネットのシステムにおいて、このような状態が続けば、やがてネットワークは行き詰ってしまうでしょう。この状況を打破するために、これまでのインターネッ

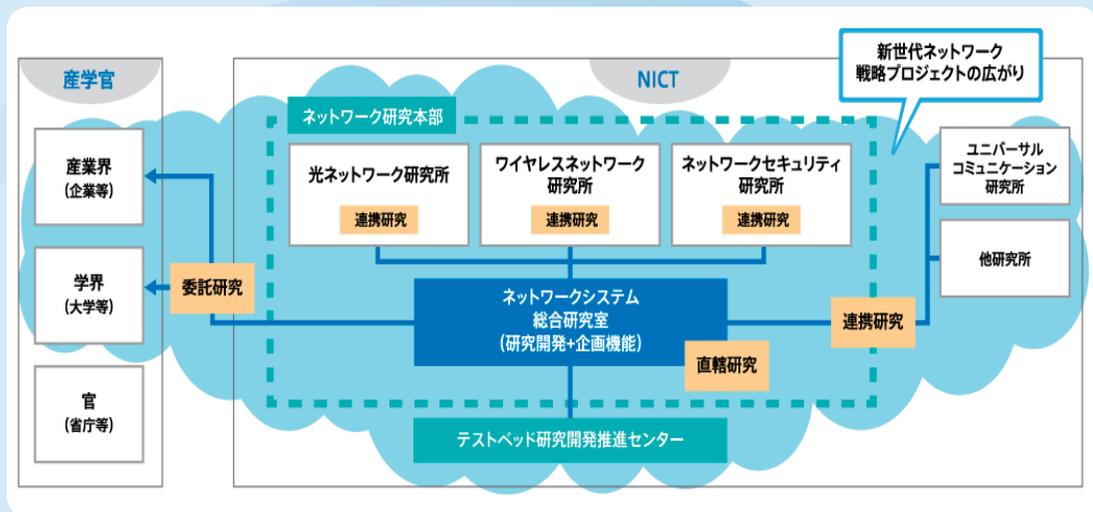


図1 新世代ネットワーク研究体制

トの改良ではなく、白紙から新しく作り直すべく研究開発を進めているのが「新世代ネットワーク」です。未来社会で新世代ネットワークが果たすべき役割は何かというビジョンを作成し、実現のために必要となる様々なネットワーク技術の研究開発に取り組んでいます。様々な社会問題を情報通信技術の力で解決し、個人や社会の潜在能力を開花させることにより、豊かで持続発展可能な社会の実現を目指しています。

● 新世代ネットワーク研究

NICT では、物理層からアプリケーション層まで各レベルでの研究開発から、それらの技術を統合したシステム開発までに至る総合的な研究開発を、産学官が連携して取り組んだ新世代ネットワーク戦略プロジェクトを開始しました(図1)。また、開発された技術を実際のネットワークに適用した際に安定して動作するかについて検証するテストベッドを用意し、システムの実用上の課題を検証しています。さらに、これらの一連の活動を企画、連動させるために、ネットワーク研究本部を設置するとともに、産学官連携の場である新世代ネットワーク推進フォーラ

ムを設置し、新世代ネットワークに関する戦略・方針を検討しています。

新世代ネットワークの研究開発は、有線、無線をシームレスにとらえ、物理レベルからコンテンツレベルまで、先端技術から応用技術までを総合的に推進する必要があります。また、このような広範囲にわたる研究開発には国を挙げて取り組む必要があること、大学などの研究機関における独創的な研究が研究開発の加速には不可欠であること、産業界における新世代ネットワーク実現に向けた研究開発にプロジェクトの成果を円滑に継承させる必要があることを考慮し、産学官が緊密に連携する体制の構築が必要です。このため、新世代ネットワーク戦略プロジェクトでは、委託研究や共同研究の枠組みを活用し、伝送技術からサービス技術まで大学や民間企業と連携しつつ複数の研究開発プロジェクトを立ち上げ、新世代ネットワーク実現のため研究開発を推進しています(図2)。

● 新世代ネットワーク技術の展開

テストベッド研究開発推進センターでは、新世代ネットワーク技術の確立に向け、様々な新技術を実装する新世代通信網テストベッド

- I-1 光ネットワーク技術
- I-2 ワイヤレスネットワーク技術
- I-3 ネットワークセキュリティ技術
- I-4 新世代ネットワーク基盤構成技術
テストベッド技術
- II ユニバーサルコミュニケーション基盤技術
- III 未来ICT基盤技術
- IV 電磁波センシング基盤技術

「JGN-X」と、大規模なネットワークエミュレーションを可能とする「StarBED³」等を活用し、産学官による研究開発と実証をスパイラル的に進展させ、そのプロトタイプ構築と運用を目指します。JGNは、先端的なネットワーク技術の研究開発や多様なアプリケーションの実証実験を推進するための大規模な研究開発用テストベッドネットワークとして、1999年からのJGN、2004年からのJGN2、2008年からのJGN2plusとして継続的に運用され、その都度、最先端の機能、性能を取り込みながら発展してきました。またStarBEDは、大規模汎用のネットワークシミュレーターとして、2002年からのStarBED、2006年からのStarBED2として継続的に運用され、インターネットからユビキタスネットワークへとミッションスコープを拡大してきました。

2011年4月、NICTの第3期中期計画スタートに合わせ、テストベッド研究開発推進センターを設置し、テストベッドを活用した研究開発体制を強化するとともに、機能、性能をバージョンアップしたJGN-X及びStarBED³の運用を開始しました(図3)。JGN-Xでは構築・運用の目的を新世代ネットワーク技術の確立とその展開にフォーカスし、日本を縦断する広域ネットワークに様々な新技術を実装するテストベッド環境を活用することで、ネットワークユーザと効果的に連携して、無線・光技術の統合管理、ネットワークの仮想化、多種多様レイヤの運用管理等の研究開発を加速していきます。また、「StarBED³」と一体化することで、エミュレーションから広域ネットワークでの実証に至るまで、ネットワークの総合的なテストベッド環境が提供可能になります。

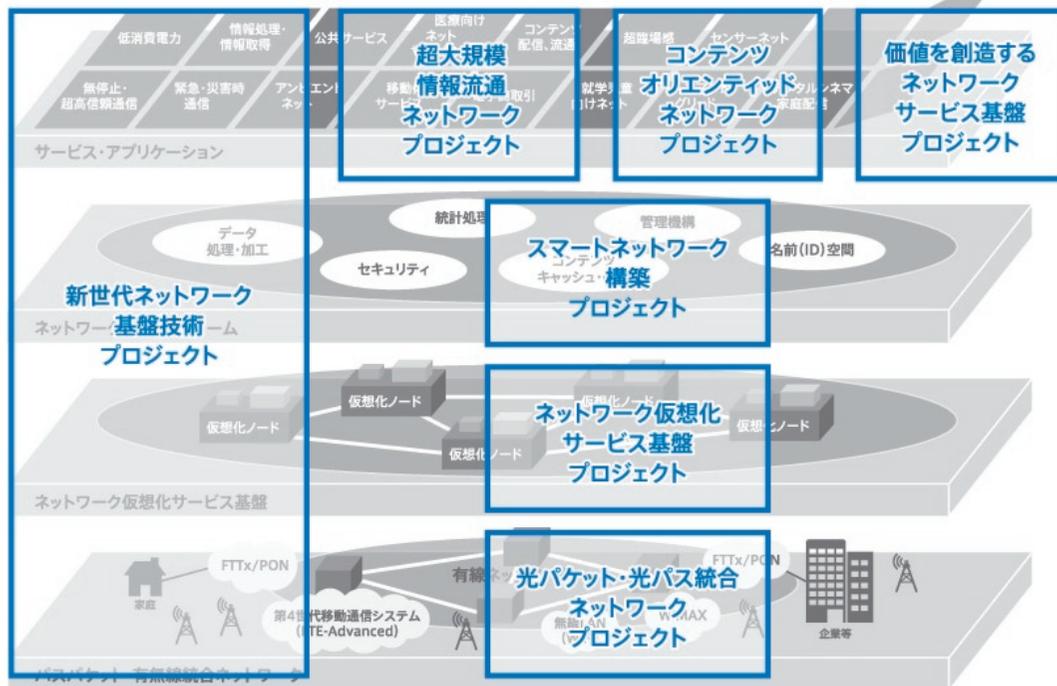


図2 新世代ネットワーク戦略プロジェクト

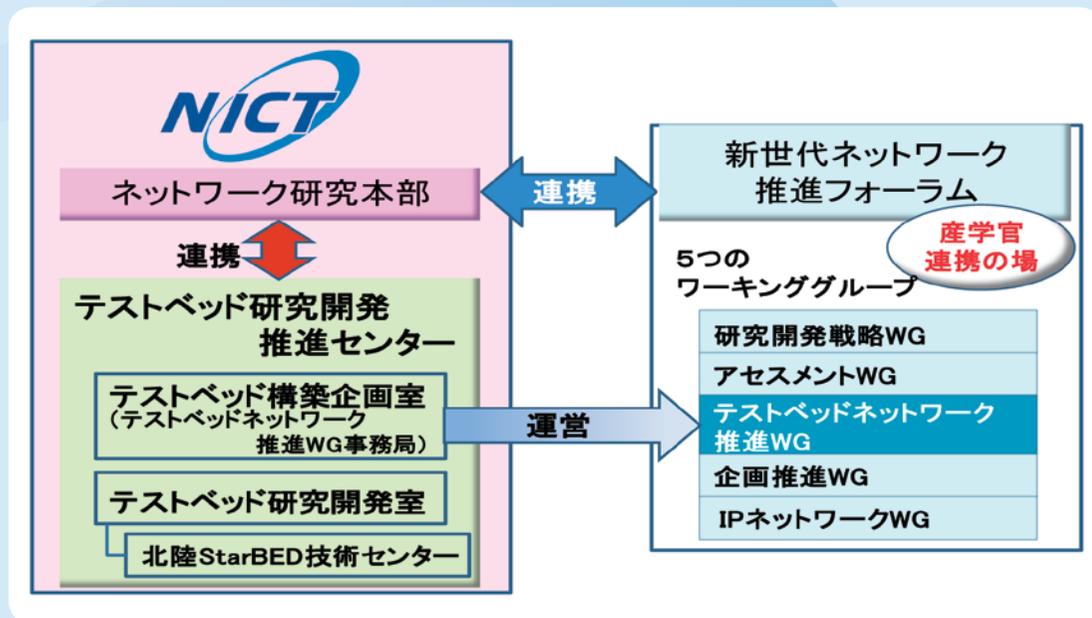


図3 新世代ネットワークの研究開発の推進体制

テストベッド研究開発推進センターでは、この JGN-X と StarBED³ を核としたテストベッド環境を活用し、産学官による新世代ネットワーク技術の研究開発と実証をスパイラル的に進展させ、その成果を本環境にタイムリーにフィードバックするとともに、ワイヤレス等のテストベッドとの連携を拡大していくことで、新世代ネットワークのプロトタイプを構築していきます。

新しいネットワークのかたち ITU-T Y.3001について

—新世代ネットワークの国際標準化がスタート—

「インターネットが動き始めてからもう何十年も経ちました。この勧告には世界の人々の新しいネットワークへの期待が詰まっています。」

西永望 (にしなが のぞむ)

ネットワーク研究本部

ネットワークシステム総合研究室 室長

大学院修了後、名古屋大学特別研究員、助手を経て、1999年郵政省通信総合研究所(現 NICT)に入所。博士(工学)。現在は大学時代の専門分野とは異なり、新世代ネットワークのプロモーションを生業として、日々世界を渡り歩いています。

● 新世代ネットワークの必要性とその標準化の成り立ち

インターネットは30年近く前に今とほぼ同じ構成(アーキテクチャ)になりました。その頃にインターネットをえる人はネットワークの研究者が中心だったといわれています。そのため、インターネットにつながっている人は仲間同士で、ネットワークセキュリティを考慮に入れませんでした。その当時インターネットは、仲間内で、メールやデータをやりとりする小さいネットワークだったのです。しかし今はどうでしょう。日本のインターネットの人口普及率は78%を超え、世界では20億人近くがインターネットを利用しています。インターネットを使ったアプリケーションも次々と生まれました。しかし、



このままでいいのでしょうか？いいえ、いつかは破綻するでしょう。そこで今のインターネットに替わる新しいネットワークが必要になります。この新しいネットワークを日本では「新世代ネットワーク」、世界では「将来ネットワーク(Future Networks)」と呼んでいます。NICTはこのインターネットの問題点にいち早く気づき、2006年頃から新世代ネットワークの研究開発に着手しました。NICTでは新世代ネットワーク技術の基礎検討を始めながら、社会的視点から、「どのような新世代ネットワークが将来望まれるか？」を中心に新世代ネットワークのビジョンや新世代ネットワークの実現目標を策定してきており、これを世界初の国際標準化の取組みに対して多数提案してきました。そして新しいネットワークの形、ITU-T Y.3001が策定されました。

● ITU 勧告*1 Y.3001*2 の内容

Y.3001は4つの目的と12の設計目標からなる将来ネットワークに関する世界で最初の標準化文書です。Y.3001では、以下の4つの目的を持つネットワークを将来ネットワークとして位置づけています。

1. サービス指向(Service awareness)

将来ネットワークは、アプリケーションやユーザーが要求するサービスを適切に提供することを目的とします。すなわち、ユーザーが今、使いたいサービス(たとえばメールの配信、Webページの閲覧)だけでなく、今後新しく爆発的に増えるサービスについても、管理や展開コストが著しく上昇しないように対応できるネットワークです。そのためにネットワークはアプリケーションやユーザーに最適となるように柔軟性を持たなければなりません。

2. データ指向(Data awareness)

将来ネットワークは分散環境に置かれた膨大なデータを処理するための最適な構成をしており、必要なデータがどこにあるとも、ユーザーが安全で、簡単に、素早くかつ正確にアクセスできることを目的とします。

3. 環境指向(Environmental awareness)

将来ネットワークでは、環境に配慮し、基本的な構成の設計やその結果としての実装、稼働時において、材料やエネルギー、温室効果ガスの削減をし、環境への影響を最小限に抑えることができます

4. 社会経済的観点

(Social and economic awareness)

将来ネットワークは、ネットワークを中心とした経済サイクルに、様々なプレイヤーが容易に参入できるように様々な社会経済的な課題に取り組みます。また、将来ネットワークは普及が容易で持続的であるために、ライフサイクルコストを削減できるような構成となります。これらによりユニバーサルサービスが可能で、すべてのステークホルダ(利害関係者)に適切な競争と適切な利益をもたらすものとなります。

これら4つの目的を達成するために、より具体的に12の設計目標を設定しました。以下の通りです。

1. 様々なトラフィック特性や振る舞いを持つネットワークサービスを収容できる**サービスの多様性(Service diversity)**
2. 新しいユーザーからの要求によって生まれる新しいサービスをサポートするための**機能的柔軟性(Functional flexibility)**

3. ネットワークの利用効率を向上させるための**資源の仮想化(Virtualization of resources)**
4. 大量のデータを最適かつ効率的に処理できる**データアクセス(Data access)性**
5. エネルギー効率を最大化させると共にユーザーの要求を最小のトラフィックで実現できるようにする**エネルギー消費量(Energy consumption)**
6. 地域にかかわらず、ネットワーク設備の提供を促進し、加速できる**サービスの普遍化(Service universalization)**
7. 持続的な競争環境を提供する**経済的インセンティブ(Economic incentives)**
8. 効率的に動作、維持が可能で、かつサービスや通信の増加をサポートできる**ネットワーク管理(Network management)**
9. 膨大な数の通信機器が様々な種類の異なるネットワーク間をダイナミックに移動する**モビリティ(Mobility)**
10. サービス要件とユーザーの要求に基づいて、ネットワーク機器の性能を**最適化(Optimization)可能**
11. モビリティとデータアクセスをスケーラブルにサポートできる**識別(Identification)**
12. 困難な状況においても、耐障害性を持つ**信頼性とセキュリティ(Reliability and security)**

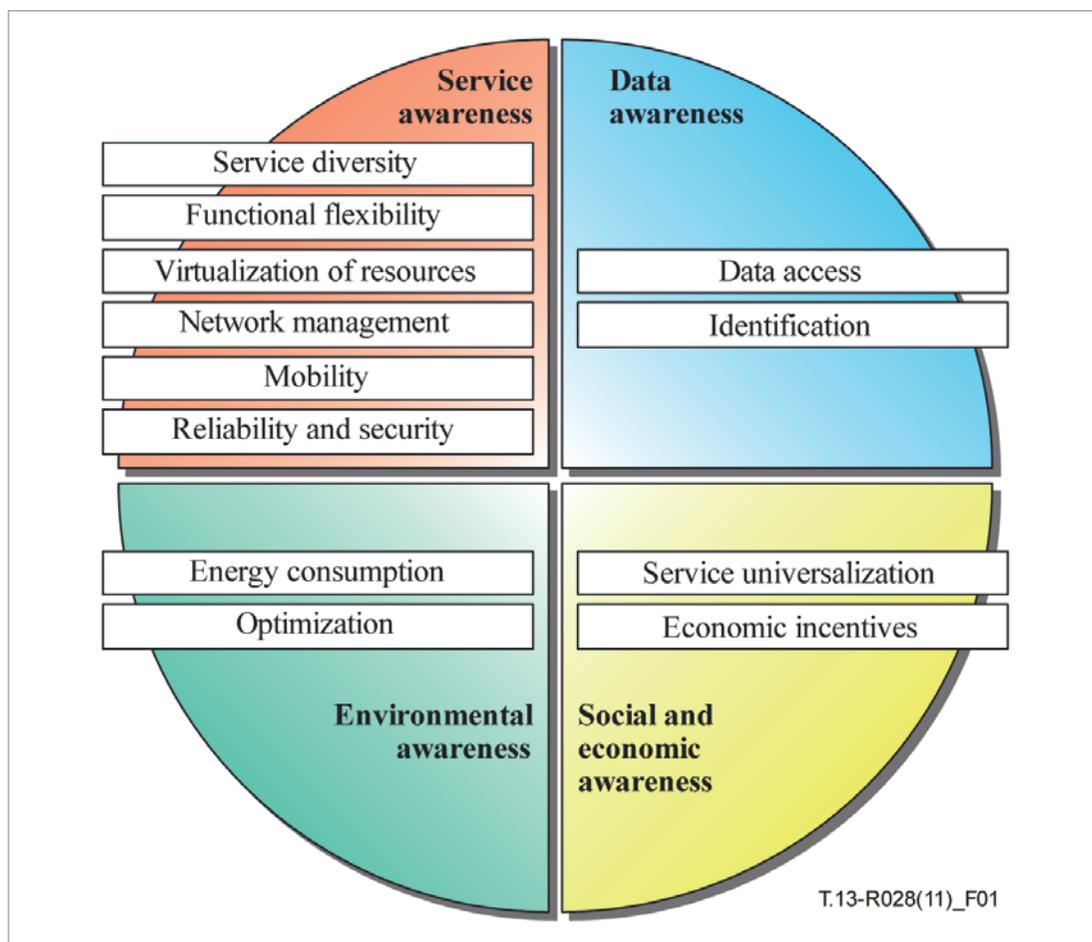


図 4つの目的と12の設計目標

将来ネットワークの目的と設計目標との関係を図に示します。設計目標によっては2つ以上の目的と関連するものもありますが、この図では主要なものに関係づけて表現されています。

● 将来ネットワークの今後

このY.3001は将来ネットワークの目的と設計目標を記述した文書で、将来ネットワークを構築するためには、様々な技術開発が必要となります。日本ではNICTが中心となって、産学官で新世代ネットワークを開発する、新世代ネットワーク戦略プロジェクトがすでに進行中です。今後は詳細部分の技術開発を進めると共に、開発した技術が世界中で使われるように国際標準化活動を推進していきます。

用語解説

*1 ITU 勧告

情報通信分野におけるデジタール標準規格。国内標準はデジタール標準を基礎として用いなければならないほか、政府調達においては、適当な場合にはデジタール標準に準拠した仕様で調達しなければならない等重要な標準規格。

*2 Yシリーズ

「グローバル情報通信インフラストラクチャー(GII)およびインターネットプロトコル」に関する規定。現在既にサービスが始まっている次世代ネットワーク(NGN)はY.2000シリーズで勧告化された。

参考文献

[1] Recommendation ITU-T Y.3001(2011),
Future Networks: Objectives and Design Goals.

新世代通信網テストベッド JGN-X



下條 真司 (しもじょう しんじ)

テストベッド研究開発推進センター
センター長

ネットワークの進化により、イノベーションを創出し豊かで、安全・安心な社会を新世代ネットワーク技術により実現すべく、欧米、アジアをはじめグローバルに活動中です。「未来を予測する最高の方法は、創造することだ」という米国の計算機科学者 Alan Kay 氏の言葉を信じつつ、活動しています。今年度は、自らもクラウドの中に生活することを決め、目下、様々な抵抗にあいながらも実践中。

「新しいネットワーク技術により、イノベーションを起こすべく NICT では JGN-X と StarBED という2つのテストベッドを展開し、技術開発を行うとともに、広く利用してもらっています。新たなサービスやビジネス創造につながる動きについてここで紹介します。」

● 新世代通信網テストベッド JGN-X

新世代ネットワークは、様々な問題を抱えるインターネットを新しい技術のイノベーションにより変革することによって実現できるものです。しかし、インターネットのように国際間にまたがる多様なステークホルダーと多様な技術が絡み合っていて上がっているものだと、その中でイノベーションを興すことは容易ではありません。そのため、新しい技術やアイデアを現状の技術とすりあわせつつ安全に試してみることで箱庭が必要です。それが、テストベッドです(図1)。テストベッドの目的としては、以下のようなものが挙げられます。

- ・ 複数の製品群との相互接続性と産業エコシステムにおける立ち位置の確認
- ・ 国際連携と標準化

- ・ 技術を実際に展開する際の社会的アセスメントと問題点の洗い出し
- ・ 技術の応用研究と運用に対する人材育成
- ・ 新しいイノベーションの創成

総務省では、1999年から我が国におけるブロードバンド技術の研究開発とその普及を目指してテストベッド網の構築が始まりました。当時、ブロードバンドは普及しておらず、まだMbpsの時代であったことから、将来をにらんでJapan Gigabit Network (JGN)と名付けられました(図2)。1999年4月から2004年3月までのJGN、2004年4月から2008年3月までのJGN2、2008年4月から2011年3月までのJGN2plus、2011年4月からのJGN-Xへと続いています。この間、2004年の通信・放送機構(TAO)と通信総合研究所(CRL)が統合されNICTが設立されたことにより、

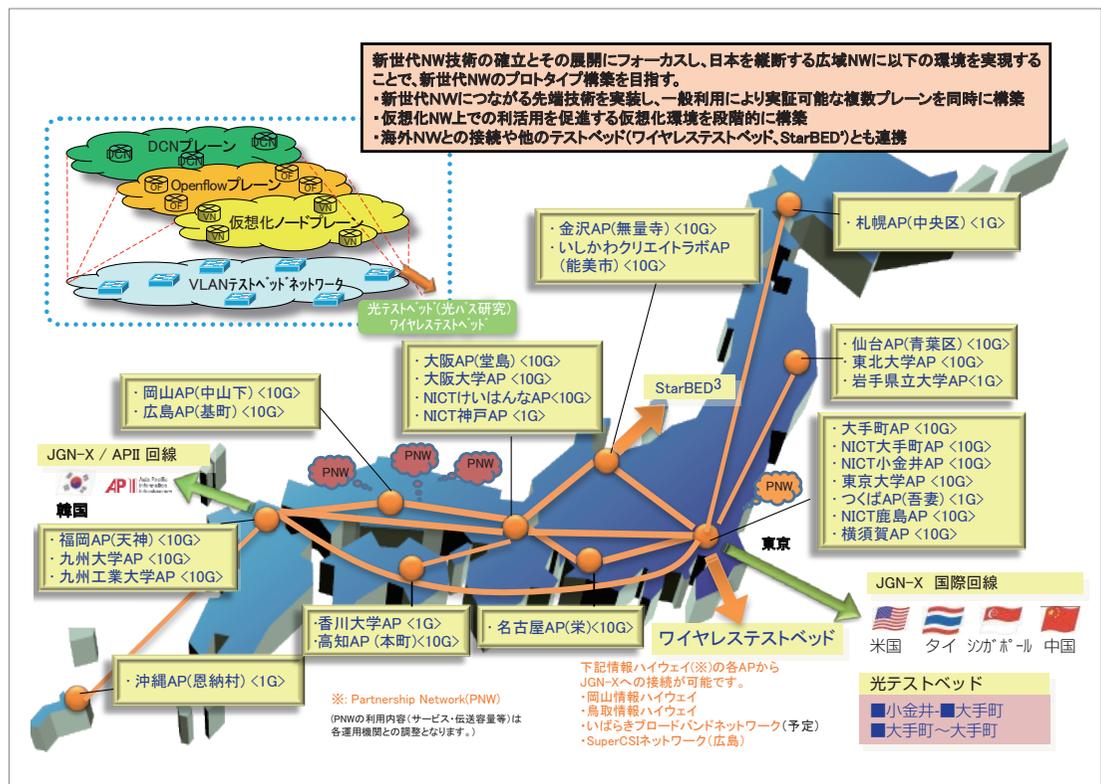


図1 JGN-Xの概要と構成

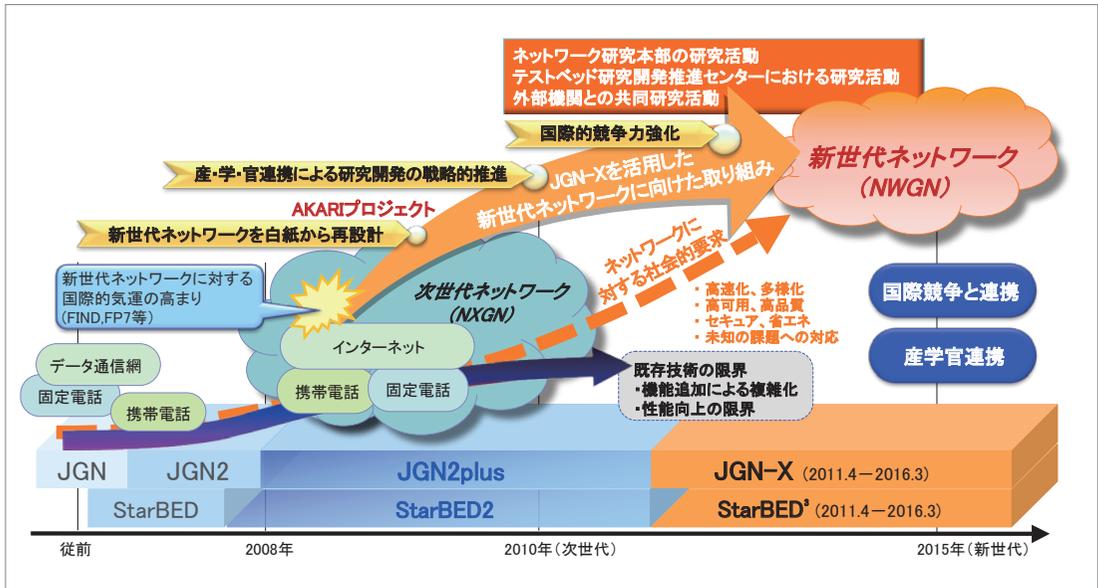


図2 テストベッドの進化

テストベッドの運営主体が NICT に移ることになりました。2011 年から新たな中期計画が始まるのにあわせて、これまで運用してきたネットワークテストベッドに、クラスタから構成される計算機群によるシミュレーション/エミュレーションテストベッド StarBED³ を加えて、2つのテストベッドインフラストラクチャを構築、運用し、利用者に提供しています。ネットワー

クテストベッドである JGN-X とシミュレーション/エミュレーションテストベッドである StarBED³ を統合して、ICT グローバルテストベッドと呼んでいます。これまでのインフラ偏重のテストベッド整備からサービスプラットフォームという、より上位サービスを提供するテストベッドへと大きく変貌を遂げ、2015 年頃までに最先端技術を組み込んだ大規模な実験ネットワークおよびエ

ミュレーション環境を順次構築・運用するとともに、実験ネットワークについては NICT で研究開発を進めている新世代ネットワークのプロトタイプに進化させ、2020 年頃には新世代ネットワークの実現を目指しています。



図3 SuperComputingでの国際バス設定の実験展示

● 新世代ネットワークへの進化

新世代ネットワークに向けて、様々な技術要素が提案されており、そのイメージは混沌としています。しかし、利用者側から期待されている新世代ネットワークはこれまでの単なる土管としてのネットワークではなく、セキュリティや QoS などの様々な要求にタイムリーに応える利用者それぞれに対するオンデマンドサービスネットワークです。

これを実現するための基盤的な機能が、ネットワーク仮想化です。すなわち、物理的なネットワークの上に、利用者それぞれのニーズに対応する仮想的なネットワークを複数、オンデマンドに作り出すことができる機能です。

JGN-X では、このネットワーク仮想化技術を活用して、新世代ネットワークプレーンと呼ぶインフラを構築し、その中長期的な運用および一般利用提供を通じて、新世代ネットワーク技術の実用化および普及を目指す取り組みを

開始しています。いくつかのプレーンが JGN-X 上に同時に存在しており、それぞれの仮想ネットワークの中では、各利用者が自分たちのためだけのネットワークサービスを受用しています。また、このネットワーク仮想化技術は、光パス・パケットスイッチのような柔軟な光ネットワークの上でこそ真価を発揮するため、早期の導入が望まれています。JGN-X ではネットワーク仮想化技術をはじめとするさまざまな新世代ネットワーク技術をいち早くテストベッド内に展開、サービスとして利用者に提供することで新しいサービスを利用した応用が花開くことも期待しています。また、JGN-X は米国、タイ、シンガポール、香港に足を持つ国際テストベッドであり、アジア太平洋地域への技術展開、協力が促進されることを狙っています。その成果は放送局と連携したさっぽろ雪まつりでの実証実験や Super Computing での国際的連携成果として現れています(図 3、4)。



図4 さっぽろ雪まつりでの映像伝送実験の様相

大規模エミュレーション環境 StarBED³ (スターベッド・キュービック)

—新世代のネットワーク技術を検証可能とするために—

三輪 信介 (みわ しんすけ)

テストベッド研究開発推進センター
テストベッド研究開発室 副室長
北陸 StarBED 技術センター センター長

大学院博士課程修了後、北陸先端科学技術大学院大学助手を経て、2001年独立行政法人通信総合研究所(現NICT)に入所。非常時通信、セキュリティテストベッドなどの研究に従事。博士(情報科学)。NICTでは、テストベッドとネットワークセキュリティの2足のわらじを履いています。実はさらに日本地域経済学会に所属する経済学者でもあるというマルチタレントが売りです。

「StarBED³では、複雑なシステムや様々なネットワーク、デバイスを模擬する技術を研究開発し、新世代ネットワーク技術の研究開発を支援する基盤を提供しています。」



はじめに

NICT では、さまざまな新世代のネットワーク技術やその上でのサービス技術の研究開発における検証や実験の基盤として、大規模エミュレーション環境 StarBED³ を構築・運用しています。ここでは、この StarBED³ について紹介します。

StarBED とは？

StarBED は 2002 年に当時の通信・放送機構により北陸 IT 研究開発センターに構築されました。2006 年からは NICT の北陸リサーチセンターとして、第 2 期プロジェクト(StarBED2 Project) を開始し、2011 年 3 月末の終了まで、特に、いかに本物に近い複雑さや規模を持った環境を実現するかに焦点を当てた検証・実験環境を提供してきました(図 1)。

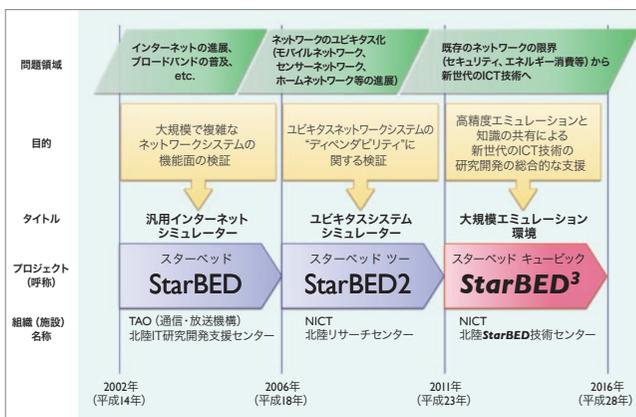


図1 StarBEDの変遷

さらに、2011年4月より新しいプロジェクトとして開始した StarBED³ では、組織を一新し、広域のネットワークテストベッド網である JGN-X と同じチームとして、施設も北陸 StarBED 技術センターとして、新たなスタートを切りました。StarBED³ では、さらに複雑化・大規模化しながら進化を続ける ICT 環境に対応し、起こりうる問題を予測するような検証や、実際に運用を行う人材の育成を行うための基盤の構築と提供を目指しています(図 2)。

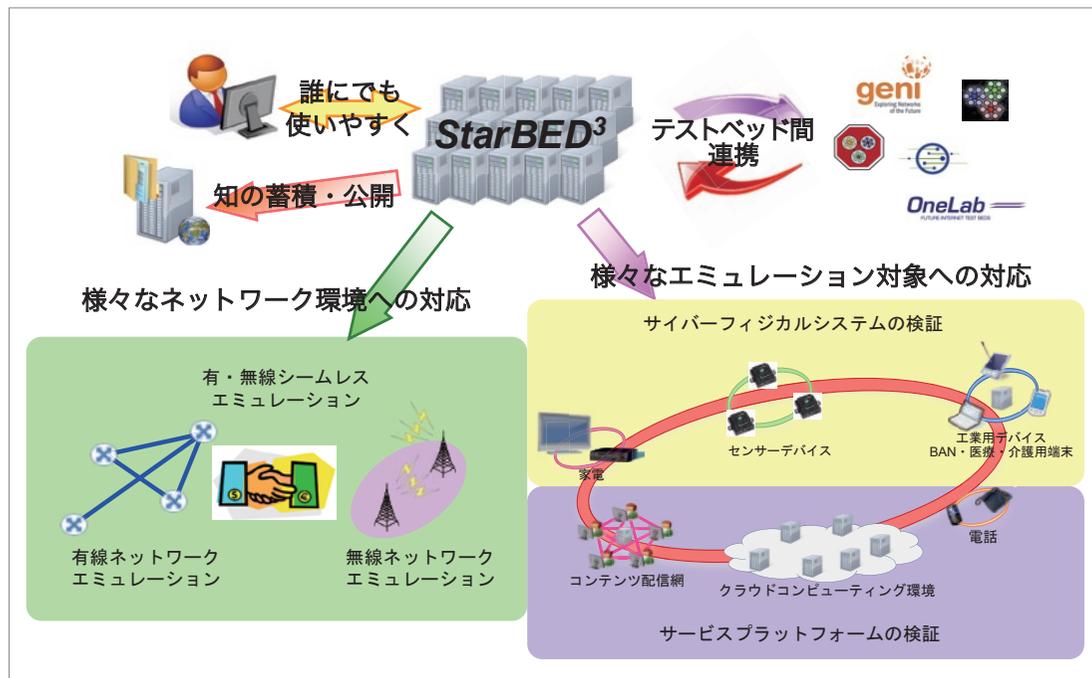


図2 StarBED³の研究課題イメージ

大規模エミュレーション環境 StarBED³ スターベッド・キュービックス / 三輪 慎介

StarBED の技術

北陸 StarBED 技術センターでは、1,000 台以上もの多数の PC サーバと 100Gbps を超える広帯域の相互接続スイッチといった設備を構築し、運用するだけでなく、その上にさらにインターネットそのものや無線、ユビキタスシステムなどを模擬するエミュレーション技術など検証・実験を支援する技術を研究開発しています。

例えば、StarBED の 1,000 台以上の PC サーバや相互接続を制御しながら実験を進めるための支援ツール群 SpringOS、物理的には有線ネットワークしか用意されていない StarBED で無線ネットワークを模擬するための QOMET、物理環境などの異なる環境やセンサーネットワークとホームネットワークなど異なる種類のネットワークを同じ時間軸の上でエミュレートできるようにする Rune など、大規模エミュレーション環境の

制御からエミュレーション技術まで幅広く研究開発を続けています(図 3)。

StarBED の利用事例

StarBED は、共同研究などを通して、多くの方に利用されています。ここでは一例として、NICT 内部での利用事例をご紹介します。

NICT では、サイバーセキュリティについてもさまざまな研究開発を行っており、その一環として、ウィルスやワーム・ボットなどのマルウェアの脅威を体験したり分析したりできる環境として、「小規模攻撃再現環境」を開発、構築してきました。小規模攻撃再現環境では、社内ネットワークなどを再現した環境で実際のマルウェアなどを発生させ、その挙動をホストおよびネットワークの両面から分析し、対処方法を安全に体験できます。小規模攻撃再現環境では、隔離した環境

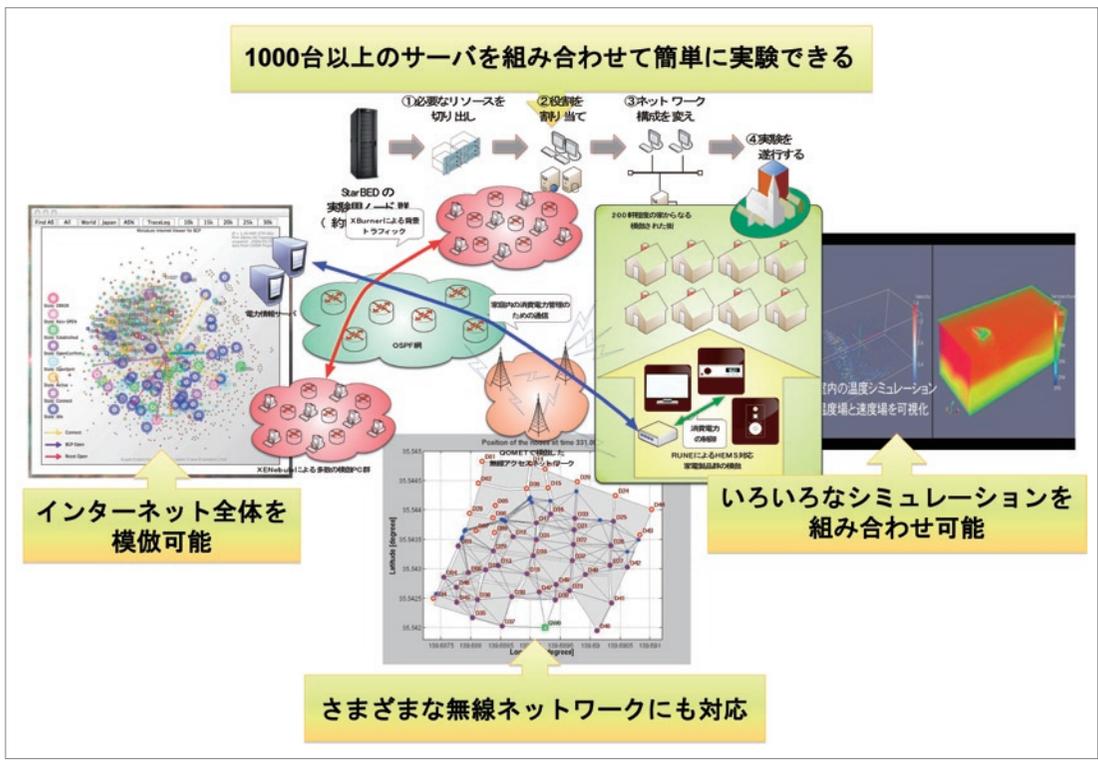


図3 StarBEDの技術

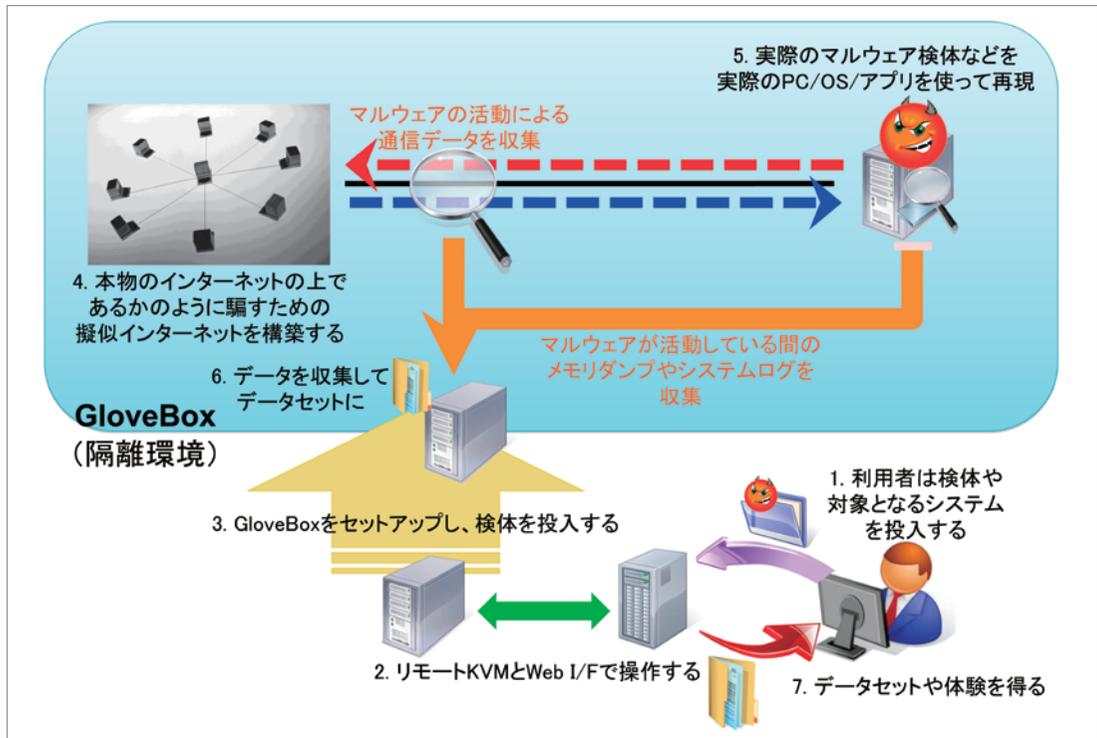


図4 小規模攻撃再現環境の概要

内でマルウェア等が動作するために、本来なら汚染される危険が伴うマルウェア等の分析や体験を安全に行うことができます(図4)。

StarBED は、インターネットなどと接続するための設定を特段行わなければ、インターネットなどとは接続されていない隔離環境として使うことができます。小規模攻撃再現環境の開発の際には、実際に StarBED 上に小規模攻撃再現環境のプロトタイプを構築し、隔離の具合や実際のマルウェア等に関するデータがきちんと取得できるのかなどの実験を行い、その結果を反映する形で小規模攻撃再現環境が構築されました。

このように、プロトタイプシステムを StarBED で構築して、その効果を検証した上で、実際のシステムを構築するような方法は、研究開発のコストやシステム構築失敗のリスクを下げる上で非常に有効な方法です。StarBED は、さまざまな検証・実験に使うことができる汎用の大規模エミュレーション環境を集中的に用意することで、NICT だ

けではなく社会全体の研究開発のコストやリスクを引き下げることに貢献できると考えています。

● おわりに

StarBED³ では、複雑化する ICT 環境に対応するために、StarBED 自身のエミュレーション能力の向上と、StarBED 以外のテストベッドとの連携機能の強化の 2 つのアプローチを採りたいと考えています。

幸いなことに、StarBED³ からはプロジェクトの組織体制が変更され、日本全域にわたる新世代のネットワークテストベッドである JGN-X と同じチームで研究開発を行っています。これによって、有機的なテストベッドの融合によるシナジーが得られるはずで、我々は、さらなる研究開発を続けることで、JGN-X と StarBED³ を中心としたテストベッドを、ICT 環境のいろいろな軸への拡大に対応させていきたいと思っています。



本部 (小金井)

第II章

ユニバーサル コミュニケーション 基盤技術



木俵 豊
岩澤昭一郎
大井隆太郎
翠 輝久・水上悦雄
内山将夫
吉田俊介
金 京淑・村上陽平
隅田英一郎・柏岡秀紀
風間淳一
安藤広志
岩爪道昭
荒川佳樹

コミュニケーションの壁を越えるための ユニバーサルコミュニケーション基盤技術



木俣 豊 (きだわら ゆたか)

ユニバーサルコミュニケーション研究所
研究所長

民間企業勤務を経て、2001年独立行政法人通信総合研究所(現 NICT)入所、2006年内閣府出向、2007年知識処理グループリーダーを経て2011年よりユニバーサルコミュニケーション研究所長。ユビキタスコンピューティング、情報分析の研究などに従事。趣味はドライブや写真撮影など。

「本稿では、NICT ユニバーサルコミュニケーション研究所で研究開発を進めている、言語の壁、情報の量と質の壁、距離や臨場感の壁などを越えるためのユニバーサルコミュニケーション基盤技術の概要を説明します。」

はじめに

ブロードバンドネットワーク技術やユビキタスコンピューティング技術によって、いつでもどこでも高速なネットワークの恩恵を享受できるようになりました。また、スマートフォンの普及によって、必要な ICT サービスを即座に利用できるようになっています。このように、情報通信インフラは充実しつつありますが、人と人がコミュニケーションするためには、まだまだたくさんの壁があります。

例えば、外国人とコミュニケーションする場合には「言葉の壁」があります。インターネットを通じて情報を利用する際には、大量の情報によって、信頼性が高く価値の高い情報の発見を阻む

「情報の量と質の壁」があります。さらには遠隔地の友人と簡単にテレビ電話をすることができませんが、限られた 2 次元のディスプレイによる「距離や臨場感の壁」があります。これらの壁を越えるには、自動翻訳技術や情報分析技術、超臨場感通信技術などのユニバーサルコミュニケーション基盤技術の研究開発が必要不可欠です。

ユニバーサルコミュニケーション技術

NICT ユニバーサルコミュニケーション研究所では、「言語の壁」を越えるための多言語音声翻訳や「情報の量と質の壁」を越えるための情報分析技術、「距離や臨場感の壁」を越えるための

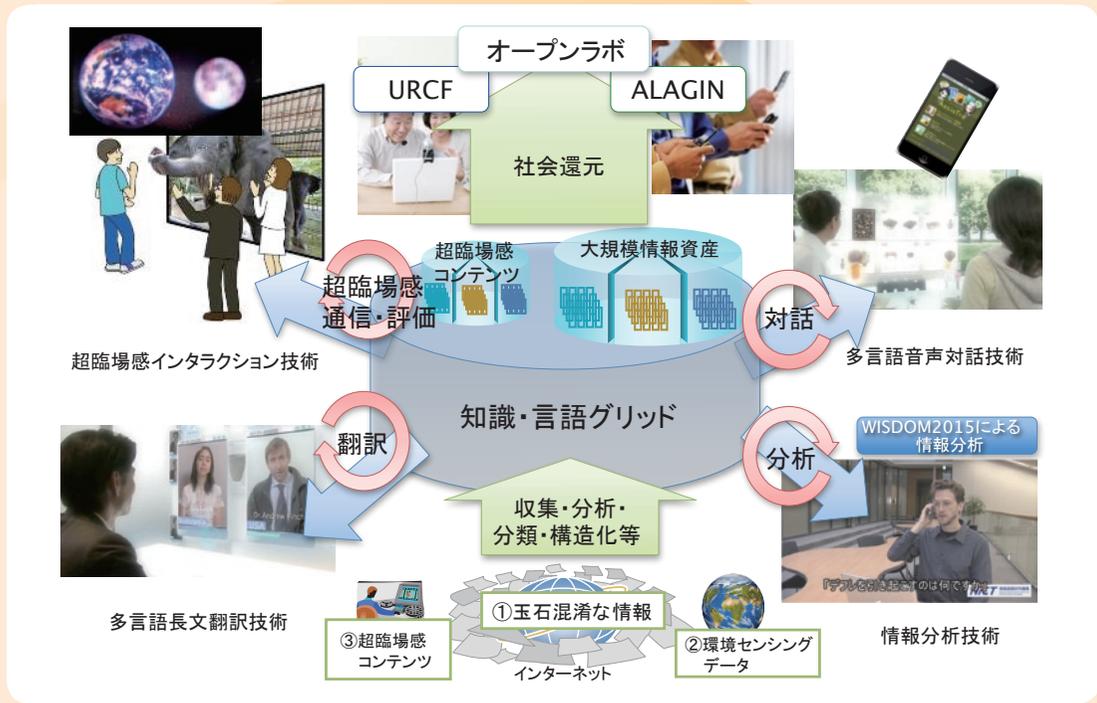


図 ユニバーサルコミュニケーション基盤技術の概念図

超臨場感通信技術を研究・開発しています。また、これらの技術を活用するために新世代ネットワークを活用した知識・言語グリッドと呼ばれる新たな情報活用基盤上で大量のWeb情報やセンサ情報などから構築された大規模高度情報資産を作り上げます。さらには、情報資産から「知」の情報を取り出し、多様な情報サービスへと利用できる仕組みを構築します。

この情報活用基盤によって、言語処理や知識処理の専門的な知識を持たないベンチャー企業などでも、高度な知識処理技術を用いた情報システムが容易に構築できるようになります。これらの技術を用いて既に多言語音声翻訳システム VoiceTra4U-M、音声対話システム AssisTra、情報分析システム WISDOM や一休などを開発しています。また、多感覚インタラクションシステム、臨場感あふれる映像を表示できる200インチ裸眼立体ディスプレイ及び究極の立体ディスプレイである電子ホログラフィも開発しています。これらのシステムを実現するためには、着実な研究開発が必要不可欠です。私たちは、高度な自然言語処理技術や音声処

理技術、多言語機械翻訳技術、大規模情報管理技術、情報検索技術、サービスコンピューティング技術、画像符号化圧縮伝送技術、電子ホログラフィ技術など多岐にわたる分野の基礎研究を行っています。

おわりに

これらの研究開発の成果は、単なる学術的な成果だけに終わらず、実用的に使えるレベルを目指すことで、他に類を見ない世界最先端の「社会で使ってもらえる」成果となっています。例えば、多言語音声翻訳技術などは、既に商用サービスに組み込まれて利用されており、一般の人々の生活に深く関わっています。このような社会への成果展開を目指した共同研究・開発のために、高度言語情報融合フォーラム(ALAGIN)と、超臨場感コミュニケーション産学官フォーラム(URCF)を設立しており、産学官での協力体制も進んでいます。要素技術の更なる高度化のみならず成果の社会展開を加速させながらユニバーサルコミュニケーション領域における国際的 COE 研究拠点を目指します。

I-1 光ネットワーク技術
I-2 ワイヤレスネットワーク技術
I-3 ネットワークセキュリティ技術
I-4 新世代ネットワーク基盤構成技術
II ユニバーサルコミュニケーション基盤技術
III 未来ICT基盤技術
IV 電磁波センシング基盤技術

世界初！200インチ 裸眼3Dディスプレイによる 自然な立体視の実現

岩澤 昭一郎 (いわさわ しょういちろう)

ユニバーサルコミュニケーション研究所
超臨場感映像研究室 主任研究員

大学院博士課程修了後、民間研究機関等を経て2006年からNICTにて大画面裸眼立体表示技術の研究開発に従事。小学校時代からの強度近視+乱視に近頃は激しい疲れ目も加わって、業務の画質調整時に機器が悪いのか、はたまた自分の目のせいなのか判断に迷うことがしばしば。趣味はものすごく偏った料理。

「3Dメガネなしでいろいろな視点から見られる立体表示技術を用いて、実寸大の自動車が収まる大きな画面サイズを持つ投射式ディスプレイの試作に成功しました。」



● 自然な 3D の実現

私は立体映像技術に関する仕事に取り組んでいます。研究開発の究極の目標は、映像通信技術によって通信相手先の状況がまるで自分の目前にあるかのように感じられて、これまでになくスムーズにコミュニケーションのできる環境を作り出すことです。その際、相手側に提示する映像の大きさ・精細さ・そして立体感の3つが特に大切だと考えています。

みなさんの多くは 3D テレビといえば専用のメガネをかけて楽しむもの、とっと思っていらっしゃるでしょう。映画館やテーマパークの 3D 映像でもやはり同じではないでしょうか。3D メガネを必要とする方式では右目と左目のそれぞれに対応する別の映像を見せることによって、立体的に見られるようになっていきます。このとき表示されるのは右目用と左目用の 2 種類の映像のみで、どの場所から誰が見ても同じ映像しか見られません。またテレビを見るのにわざわざ 3D メガネをかけなければいけないというのは多くの人々が負担に感じるのではないのでしょうか。たとえば街頭で通りがかりの人に立体的な広告を見せたいといった用途に 3D メガネが必要とあってはそもそも無理があります。

● 三次元的に見る

私たちの脳は外界を立体的に把握するためにいろいろな手がかりを利用しています。なかでも両目に映る見え方の違い(左右の目は離れたところに付いていますから物の見え方もわずかに違い、これを両眼視差といいます。)やどこから見るかによって物の見え方も変化する(運動視差と呼びます。)現象は、立体感つまり奥行きを知るためにとりわけ重要な情報として脳内で扱われることがわかっています。3D メガネ方式のように左目用と右目用の 2 種類の静止画像を見ている人は

両眼視差を手がかりとして奥行きを感じることはできますが、運動視差は生じないため手がかりとしては用いられることはありません。

3D メガネなしでより自然な立体像を見ることができるようになれば、初めに書いたようによりよいコミュニケーション環境の実現に大いに役立つと考えて、私たちは超多視点(色々な角度から映像が見られる)かつ裸眼に対応した大型画面の立体映像表示技術の開発に取り組ましました。その成果として完成させた試作ディスプレイは 3D メガネなしで、画面の大きさは 200 型(対角の長さが 200 インチ = 約 5 m)、表示される映像としてフルハイビジョンの情報量をもち、両眼視差に加えて滑らかな運動視差をも示せるために奥行きをより自然に感じることができる、といった数々の特色を備えています。既に販売されている裸眼(3D メガネのいらぬ) 3D 対応薄型テレビではいずれの特徴もまだ実現されていません。

● 超臨場感の要素

フルハイビジョン画質、すなわち高精細な映像が見えるということは臨場感を高める 1 つの要素になるというのはあえてここで説明をしなくても、みなさんが地上波デジタル放送対応テレビに買い替えられたときのことを思い出していただければ納得していただけるものと思います。

次に画面の大きさですが、画面サイズが大きということは単に迫力があるというだけでなく、自動車や人などいろいろな対象の全体像を実寸大で見ることができることを意味しています。つまり本物と同じ大きさで見ることができるため、より高いレベルの現実感を感じるようになります。50 型前後が主流の薄型テレビではこうはいきません。さらには多くの人々が一度に見ることもできますからこの点でも大画面というのは欠かせない特徴です。

さらに運動視差があることで、横に移動しながら見ると隠れていた面が見えるなどより自然な立体感を堪能できます。例としてショールームで本物の車を見ているとしましょう。左右に動いて車体を見てみるとヘッドライトが見えたり、室内インテリアで今まで隠れていた部分がどんな造りになっているのかわかるでしょう。ボディ部分に現れる光沢の出かたで表面の形を知ることができます。これらはみな運動視差によってもたらされる情報なのですが、私たちの表示技術でも近い感覚を味わえます。図1は実際に試作したディスプレイの画面を撮ったものです。車を見てください。正面から見ると開いているドアに隠れて見えないステアリングハンドルが右の端からは見えています。

● 超多視点で魅せる立体像

それではどのように立体映像を実現しているのか、ごく簡単に説明してみましょう。試作したディスプレイ装置は大きく分けて2つの要素(図2)、特殊なスクリーン光学系と、私たちがプロジェ

クタレイと呼んでいる投射光学系を組み合わせたものです。以下、図3を使って説明します。スクリーンは透過型で横方向は光を拡げず縦方向のみ光を散乱させる特殊な拡散面と、各視点を作るための集光レンズの2層から成っています。プロジェクタレイはプロジェクタユニットを多数並べたもので、全てのプロジェクタユニットから投射された光はスクリーンの拡散面で一度像を結びます。このとき全投射画像において対応する画素同士がぴたりと重なるように各プロジェクタユニットの投射レンズを調整しています。投射光が前述のスクリーンを通過した後は横方向にはほとんど拡がらず上下にのみ大きく拡がり、上から見たときにある場所に集まるように進みます。光が集まってくる場所は視点、すなわち映像が見られる地点となります。視点は1つのプロジェクタユニットに対して1ヶ所作られ、プロジェクタユニットを横に少しずつずらして並べているため同様に視点も横に並びます。隣り合う視点の間隔は約2cm(日本人の成人の両眼間隔のおよそ3分の1)と非常に密になっています。各視点にはその位置に応じて少しずつ違った



図1 実際に見える画面の例(見る場所を変えれば異なる角度の映像が見える)

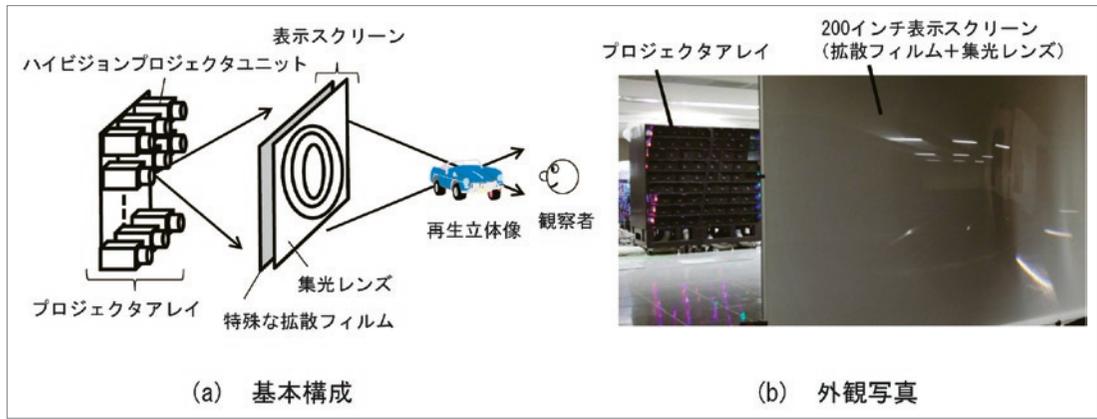


図2 開発した200インチ裸眼立体ディスプレイの構成

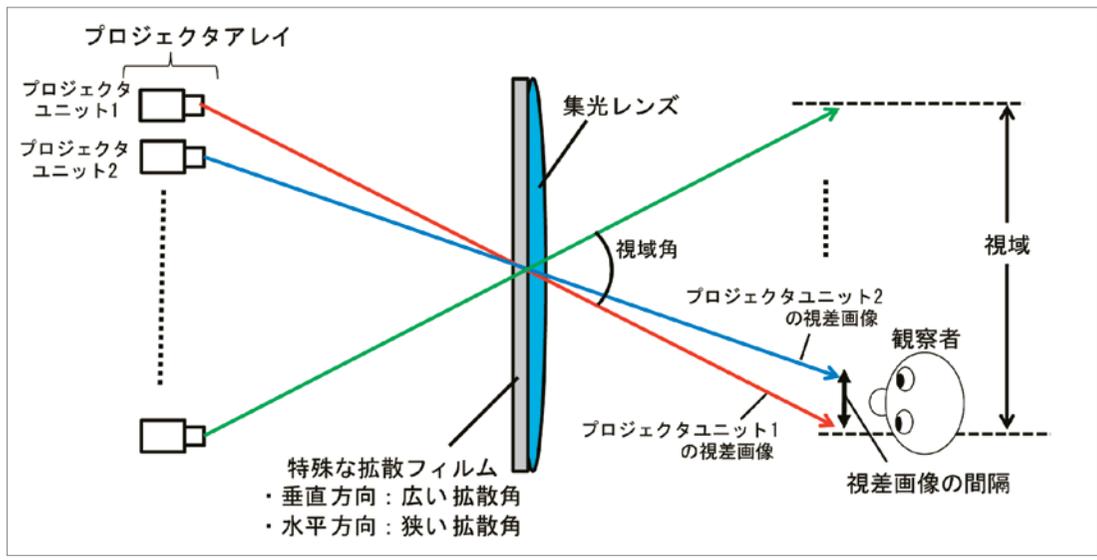


図3 立体表示原理(上から見た図)

角度の映像を届けているため、(一定の距離離れた)両眼で見たときそれぞれの目は異なる角度の映像を受け取ることになり、両眼視差により立体像を見ることができます。さらに頭を左か右に少し動かすだけで両眼には別の角度の映像がそれぞれ入ってきますから、見ている人は同時に運動視差による奥行きをも感じることができます。これにより両眼視差のみの場合に比べて自然に立体像を見ることができるのです。

● 今後の展開

すでに始めているのですが実写、すなわちカメラを使って超多視点の映像を撮影し、ネットワークを通じて伝送できるよう最適な画像圧縮方式の開発を急いでいます。さらには実験室内から出て実際に公共の往来に試作ディスプレイ装置を長期間設置して大勢の方々に見ていただきながら実証的に評価していくことを計画しています。

電子ホログラフィ

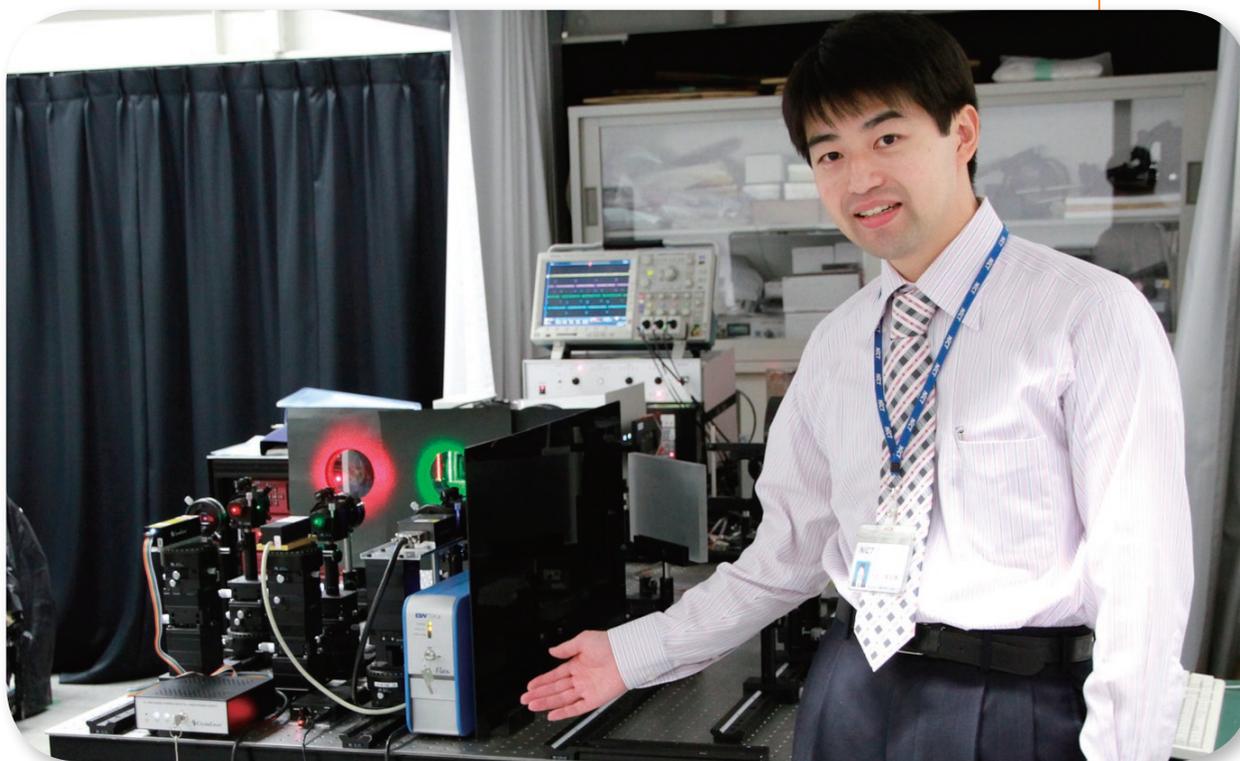
—近未来の表示技術—

大井 隆太郎 (おおい りゅうたろう)

ユニバーサルコミュニケーション研究所
超臨場感映像研究室 主任研究員

大学院博士課程修了後、放送局の研究所を経て、2006年からNICTにて電子ホログラフィの研究に従事。専門は3次元映像技術、イメージセンサ技術。趣味は水泳と飲み会。

「ホログラフィは3次元映像の記録・再生方法として最も理想的です。写真技術(静止画)として発達したこの技術を、撮影から表示まで全て電子化するのが電子ホログラフィの目標です。」



● 「電子ホログラフィ」とは？

読者の方は、ホログラムという言葉を知ったことがあると思います。例えばSF映画の「スター・ウォーズ」や「トータル・リコール」など、近未来の世界を表現する時に空中に立体で人物などを表示するシーンが出てきますが、ホログラムはこうした映画などに出てくるような3次元映像を記録したデータや媒体のことをいいます。

ホログラフィは、正確にはこの3次元映像を記録した媒体であるホログラムの製造技術のことです。ホログラフィには、ホログラムを実写する撮影技術、記録技術、および再生技術が含まれます。私たちは実写の立体映像を電子的にホログラム化し、伝送、記録、再生するまでの全てについて研究をしており、これを「電子ホログラフィ」と呼んでいます。

つまり、これまでの静止画のホログラフィ技術を動画に、しかも電子的に実現するものです。この技術により究極の3次元映像によるコミュニケーションの実現を目指しています。

● 通常の3Dテレビとホログラフィの違い

最近是一般家庭にも3Dテレビが普及しています。家電量販店では多数の3Dテレビを見ることが出来ます。市販の3Dテレビは、左目用、右

目用の少しだけ異なる左右2つの視点、つまり視差を与えた状態で被写体を同時に撮影し、その2つの映像素材を人の左右両眼にそれぞれ個別に見せることで、人間の脳内で立体を知覚させています。つまり人間の脳が持つ特性を利用した原理になっています。この方法は二眼立体と呼ばれ、映画のように画面の正面からじっと動かずに映像を見る場合には優れた方式で広く普及していますが、片目をつぶって見てみると立体的に見ることはできないという欠点があります。

また、画面に対して左側から見ている観客と、右側から見ている観客とでは、物の見え方が本来は異なるはずですが、もとの情報が左右の2視点分しかないため、どの席に座っても正面から画面を見ているときの立体映像しか見ることはできません。

立体視を実現する方法にはいくつかの種類があります(表1)。通常の3Dテレビの原理である二眼立体は、人間の視覚機能に頼った方式といえます。多眼立体は、レンチキュラーレンズ*1などを用いることで、見る位置が変化した場合にそれに応じた映像を見せることが可能です。ホログラフィでは表1の要素全てを記録再生できるため人間の目にとっては実物を見ているときと完全に同じ状態となり、ホログラフィは人の視覚機能に頼らない理想的な立体表示法といえるのです。さらに、例えば一眼レフカメラなどでホログ

表1 3次元映像記録・再生方法の比較

	両眼視差	運動視差	ピント調節(浅い)	ピント調節(深い)
二眼立体 (眼鏡式3Dテレビなど)	○			
多眼立体 (200インチディスプレイや iVisiOnなど)	○	○		
光線再生	○	○	○	
ホログラフィ	○	○	○	○

ラフィ像を撮影すれば、現実空間と同様に正確なピント合わせも可能です。

● 回折と干渉によってシャープな再生像を得る

電子ホログラフィの基本原理について説明する前に、まず2次元のテレビから考えてみましょう。通常のカラーテレビは被写体に反射した光の強さ(輝度)と色(波長)の情報を記録して、再生することができます。これに対してホログラフィでは、これら情報に加えてさらに、ホログラム面を通過する光の方向、つまり光の位相についても記録再生することで、立体映像を表示できます。

図1はこれを模式的に示したものです。撮影時は物体から反射した光である物体光 O (位相と振幅を持つ、ベクトル量)と既知の参照光 R の干渉縞 I (ホログラム、スカラー量)を記録します。再生時はこのホログラムに参照光 R と同じ光をあてて、物体光 O と位相・振幅が等しい光をふたたび発生させます。

二眼立体とホログラフィの間にある技術として、光線再生という技術があり、そこでは多数のレンズを使うことで光の方向をコントロールしています。レンズで位相を変調するので、どうしてもレンズの大きさ程度のポケ感が生じることや、レンズアレイから離れた位置での結像特性が急速に劣化する欠点があります。これに対しホログ

ラフィでは光の回折・干渉を用いて光の方向をコントロールするため、デメリットとしては光の波長程度の微小な画素を持つ特別な素子が必要になる事が挙げられますが、ホログラム面から遠く離れた位置でも非常にシャープな結像が得られるメリットがあります。

私たちの日常生活では光を光線として考えますが、光には波としての性質もあることをご存知かと思います。光の波長程度に細かい格子パターン(縞)が光が通過すると、光の一部は進行方向を変えられます。縞が粗いと少なく曲げられ、縞が細かいほどより大きく曲げられます。ホログラム全体に渡ってこのような粗い縞や細かい縞を予め書き込むことで、何も無い空中に立体像を再現できます。この縞は図1のように光学的に作ることもでき、またコンピュータ内で光の伝搬をシミュレートして、計算により作り出すこともできます。NICTでは実写のホログラム生成を行っており、例えば距離情報を取得できるカメラで撮られた3次元情報を、コンピュータ計算でホログラム化し、開発したホログラム表示装置で3次元像を立体再生するというシステムの研究をしています。

● 実験室レベルの巨大な表示システムは必要なの？

現状では電子ホログラフィ再生装置*2が大きいため、サイズをコンパクトにすることがまず課題に

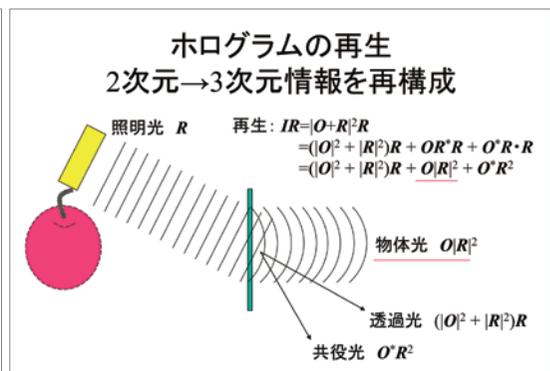
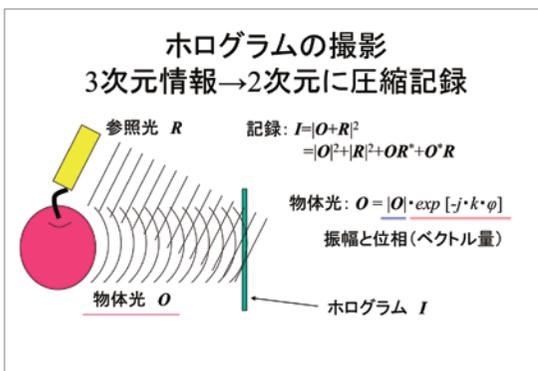


図1 ホログラムの記録と再生



(a) 近い: 自動車のタイヤの付近に焦点



(b) 遠い: 植木の葉の付近に焦点

写真1 電子ホログラフィ再生装置で再生した実写ホログラム像

再生像(a)、(b)はともに1枚の電子ホログラフィから再構成された立体像を再度カメラで撮影して得た画像。輝度、色に加えて、距離も正確に再現。

挙げられます。2010年度に報道発表した電子ホログラフィの表示装置では世界初の技術として視域角15度で対角4cmサイズのカラー動画表示を実現しました。その中で使用している光変調素子は3,300万画素のものが合計3枚で構成されており、カラー動画表示を実現するためには、素子の周辺に必要な駆動装置やメモリなども大きくなります。また、装置が大きい理由のひとつとして、ホログラムから原理的に発生する妨害光、つまりノイズを除去するために光学的なフィルタ処理を行っている部分のサイズが大きいために挙げられますが、今後の変調素子技術が進歩するのに従ってコンパクトなものになる見込みが十分にあります。現状で本当に必要なホログラム自体の部分は20cm角程度です。写真1は我々の電子ホログラフィ装置で再生された映像の例です。実際には動画像(ムービー)として再生されますが、像の大きさは高さ約2cm程度で、今後、表示サイズを大きくすることも課題です。

おわりに

今回の電子ホログラフィの成果は、今ただちに実用化されるというものではなく、研究開発の初期段階にあり、まだまだ研究が必要です。テレビ

がモノクロからカラーへ変わり、カラーからハイビジョンに進歩してきたように、その先の立体映像への進化も必ずやってくるでしょう。現在人類が知り得る立体表示の方法の中で、究極といえる電子ホログラフィによって社会生活をより豊かなものにすることができると信じています。

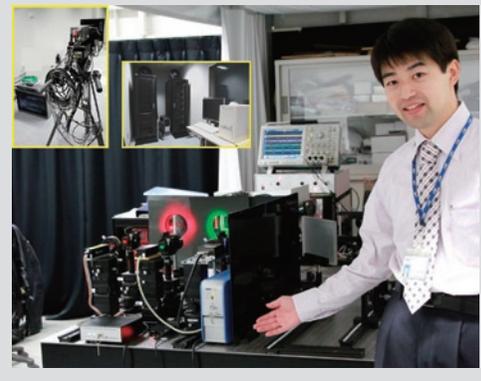
用語解説

*1 レンチキュラーレンズ

かまぼこ形の微細な半円筒レンズを多数並べて作ったシート状のレンズのことで、液晶画面や印刷物の表面に貼り付けて使う。半円筒レンズの働きで光の進行方向を変え、見る位置に応じて液晶画面や印刷物の異なる画素を観察できるようにするためのレンズのこと。

*2 電子ホログラフィ再生装置

上部黄色の枠内は距離カメラと演算用PCクラスター



声できくと、声で答える。 観光案内アプリ AssisTra

—自然な音声で簡単に情報を取得できるシステムの実現を目指して—

「音声コミュニケーション研究室の技術を用いたスマートフォン用の音声対話システム AssisTra を、Siri しゃべってコンシェルに先駆けて、2011年6月に公開しました。」



翠輝久 (みす てるひさ)

ユニバーサルコミュニケーション研究所
音声コミュニケーション研究室 研究員

人と人、人とコンピュータのコミュニケーションに関心を持ち、音声対話の研究をしています。

水上悦雄 (みずかみ えつお)

ユニバーサルコミュニケーション研究所
音声コミュニケーション研究室 主任研究員

コミュニケーションにおける相互調整の性質に関心があり、対話の評価研究をしています。趣味は映画(特にSF)観賞、公園探検と称する娘たちとの散歩、昆虫探索、車でのぶらり遠出旅行。

はじめに

NICTユニバーサルコミュニケーション研究所音声コミュニケーション研究室では、わずらわしい操作を覚えなくとも、その人にとって自然なコミュニケーションの手法で、容易に情報システムを利用できる社会の実現を目指して、研究を進めています。中でも私たちは、人に話しかけるような、自然な音声による要求を受け付け、その意図を理解・推測することによって、適切な情報を提示する、高精度対話処理技術を研究しています。これまでの研究成果の実証実験および実データ収集を目的として、観光案内 iPhone 用アプリ「AssisTra」を 2011 年 6 月にリリースしました。本稿では、AssisTra の中心機能である、『はんなのガイド 京都編』で利用されている音声対話処理技術について解説します。

『はんなのガイド 京都編』とは？

ユーザの自然な音声による要求を受け付け、音声と画面で、その要求に答える「音声対話システム」です。図 1 の例のような音声対話をすることができ、ユーザは京都の観光スポットやレストランなど観光に役立つ様々な情報を調べることができます。

音声対話処理技術

一般に音声対話システムは、図 2 のような構成をしており、大きく分けて、音声認識、音声言語理解、対話制御、応答文生成、音声合成の 5 つのモジュール(要素技術)で構成されます。『はんなのガイド 京都編』に用いられているこれらのモジュールは、すべて当研究室で開発したものです。以下では、これらのモジュールについて概説します。



図1 『はんなのガイド 京都編』対話例

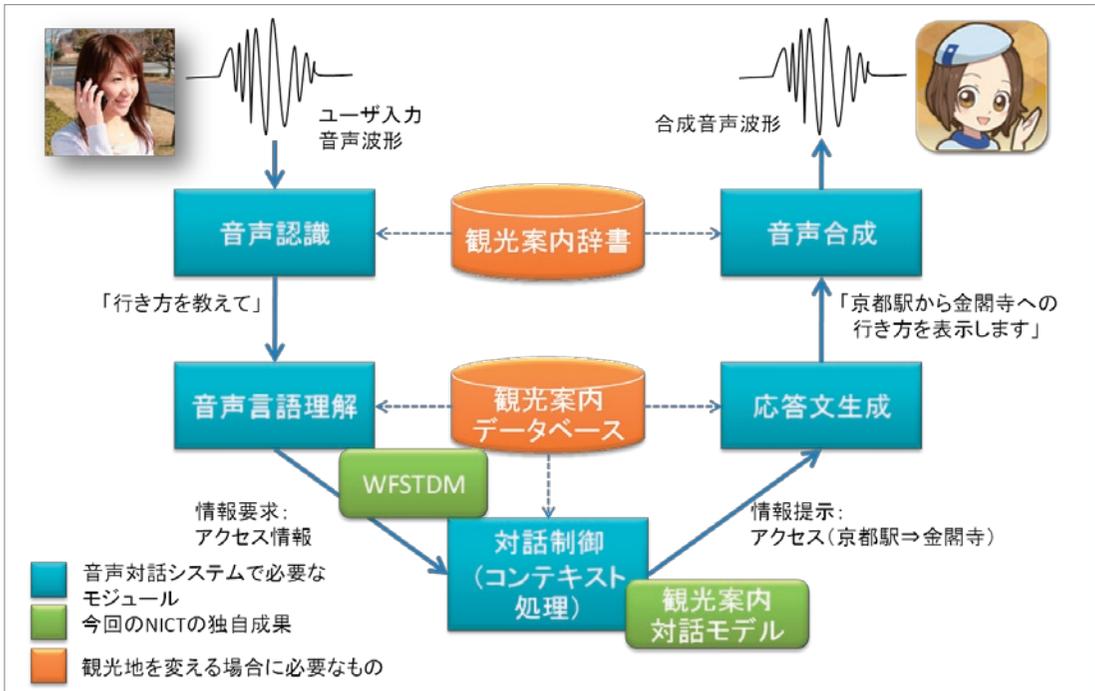


図2 音声対話システム構成図

・音声認識・音声合成・応答文生成

音声認識・音声合成は、隠れマルコフモデル*に基づく統計的手法を利用しており、大量の音声データを学習に用いることで、自然で連続的な音声発話文を認識し、人の発話音声に近い合成音を作成することができます。後述の大量の観光案内対話データを利用して、観光案内用に特化したモデルを作成することにより、高い音声認識率と、ユーザに話しかけるような自然な合成音声を実現しています。さらに、応答文生成で利用するテキストとして、プロのガイドの発話内容をもとに、桜、紅葉など様々な観点からの観光スポットの説明文を整備しました。

・音声言語理解

人間の自然発話には、ユーザや状況によって様々な言い回しが存在します。たとえば、「観光スポットへのバスを利用したアクセス方法」が知りたいと考えている場合を考えると、図3の例をはじめとして、多種多様な言い回しが

存在します。このような発話の意図を解釈することは人にとっては難しいことではありませんが、コンピュータがこれらの発話を理解するためには、これらの表現を同一のシンボル(コンピュータが処理可能な言葉)に変換する必要があります。これが音声言語理解の役割です。

この機能を実現するためには、ユーザが実際に使用する表現を収集するとともに、高精度な音声言語理解アルゴリズムを研究・開発することが重要になります。会話の中で実際に利用される言い回しを収集するために、私たちはプロの観光ガイドと旅行者の模擬会話を150時間300対話収録しました。これは、現在収集されている単一状況での音声対話データとしては世界的にも大規模なものです。さらに、プロトタイプ音声対話システムを構築して、被験者実験を行い、実際のシステム利用を想定した状況での発話表現を収集しました。これらのデータをもとに、私たちの研究室で独自に開発した音声言語理解・対話制御フレームワークである『重み付き有限状

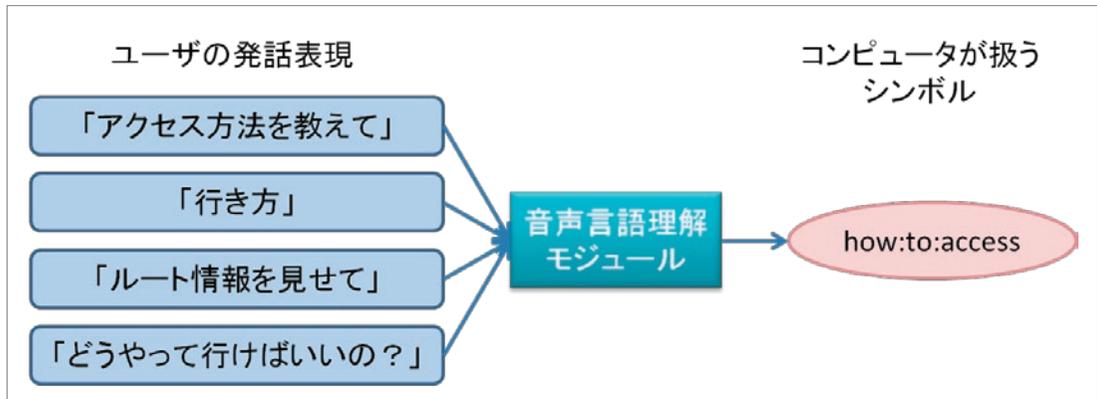


図3 言語音声理解の例

態トランスデューサ対話制御機構(WFSTDM: Weighted Finite-State Transducer-based Dialog Manager)』を用いて、WFST 表現による音声言語理解モデルを作成することで、高速かつ高精度な音声言語理解を実現しています。

・対話制御

まったく同じ発話が入力された場合でも、状況や発話履歴に応じて発話に含まれるユーザの意図が異なる場合があります。たとえば、「アクセス方法を教えて」という入力があった場合には、直前の対話内容に基づいて「どこから、どこまで、どのような交通手段で」などの情報を補完する必要があります。これらの発話に隠れた意図を適切に補って応答内容を決めることが対話処理の役割です。

このような対話履歴処理は、対話システムが利用される状況や、ユーザがシステムを使う目的に対する依存性が高いものです。そこで、ユーザの実際の利用状況に近い、前述の大規模対話データをもとに観光対話用の履歴処理モデルを作成し、対話履歴を適切に処理しています。

● おわりに

今回、アプリを公開し、収集されたログデータを分析していますが、システムの応答の精度はま

だ十分ではありません。人間の発話や意図の種類・言い回しのバリエーションが 150 時間程度の学習データではカバーしきれないほど多様で複雑なものであり、コンピュータが人の意図を正確に理解するためには、より大きな対話データを収集するとともに、音声言語理解や対話履歴処理の精度の改善が必要であることが分かりました。今後はシステム運用により収集した発話データを追加して各モジュールのモデルを再構築するとともに、より柔軟に発話を理解し対話を制御するアルゴリズムの研究を進めていきます。また、システムの利用の拡大を目指して、訪日観光支援に利用できるように『はんなのガイド 京都編』の英語版を 2012 年 3 月に無料公開しました。さらに、チケット予約や、コールセンター業務など、実世界で必要とされている様々なタスクを扱う音声対話システムを構築し、対話処理技術の実用性を証明していきたいと考えています。

用語解説

* 隠れマルコフモデル

観測される記号列(音声認識の場合、音声の特徴量)が、直前の m 個の記号から決定されるマルコフ過程であると仮定し、それを出力するような状態遷移系列が非決定的である(隠れている)とする確率モデルです。音声認識の場合、状態遷移確率などのパラメータが、大量のデータから学習され、最も高い確率で記号列を出力するような単語列や音素列が認識結果となります。

身近になった多言語自動翻訳

— 半世紀以上の研究開発を経て実用化されつつある技術 —

内山 将夫 (うちやま まさお)

ユニバーサルコミュニケーション研究所
多言語翻訳研究室 主任研究員

自動翻訳の研究を10年くらいしています。自動翻訳の性能をあげるにより、世の中が住みやすくなることに貢献したいと思っています。家族にわかる研究をするように努めています。

「自動翻訳は、長年の研究開発を経て実用化されつつあります。NICTの自動翻訳エンジンは、対訳データから自動構築可能です。この研究成果を社会に還元したいと思っています。」



● 身近になった多言語自動翻訳

自動翻訳の研究は、1940年代から始まりました。日本でも、1980年代に産学官で盛んに研究開発されて、たくさんの商用自動翻訳システムが開発されました。そして、現在では、インターネットのポータルサイトなどで、自動翻訳が無料で提供されていますし、商用の自動翻訳システムの提供も盛んです。

自動翻訳システムの種類には、基本的には、人手で記述した規則に基づいたシステムと、大量の対訳テキストから自動的に翻訳規則を学習するコーパスベースの自動翻訳システムの2種類があります。コーパスというのは、大量のテキストからなるデータベースのことです。

これまでは、一般的に利用されている自動翻訳システムは、人手で記述した規則に基づくシ

テムでしたが、最近では、コーパスベースの自動翻訳システムの性能も向上しています。NICTが研究している自動翻訳システムは、コーパスベースの自動翻訳システムです。その研究開発の基盤には、大きく分けると、ユーザ、言語資源、アルゴリズムの3点があります。

● ユーザ

自動翻訳システムの目的は、ユーザの役に立つことです。そのため、ユーザは、自動翻訳システムの研究において、もっとも尊重する必要があります。

NICTでは、旅行会話専用の自動音声翻訳システムとしてVoiceTraを開発しています(p.140-143参照)。また、eコマース用の自動翻訳エンジンとして、日本最大級のアプリサイト



図1 みんなの翻訳 (http://trans-aid.jp)

の、韓国サイトについて、日韓自動翻訳により商品説明文を韓国語に訳すサービスを提供しています。この自動翻訳エンジンのための対訳データを作成するために、株式会社バオバブとの共同研究により「留学生ネットワーク@みんなの翻訳」(<https://en.ecom.trans-aid.jp/>)を開発し、留学生のアルバイトにより効率的に対訳データを作成しました。また、ボランティアによる人手翻訳を支援するために東京大学図書館情報学研究室と共同で「みんなの翻訳」(<http://trans-aid.jp>)を運営しています(図1)。

このように、NICTでは、最新の研究成果を一般に利用していただくことにより、研究成果を社会に還元すると同時に、そのフィードバックを研究開発に役立てています。

言語資源

最も重要な言語資源は、対訳テキストです。統計的自動翻訳では、分野を限定した場合で十数万文、分野を限定しない場合には1,000万文以

上の対訳文が翻訳エンジンの訓練に必要です。図2は、eコマース分野における、訓練に利用した対訳文数と翻訳精度の関係を示しています。なお、AとBは商用の翻訳エンジンですが、これらは対訳文での訓練はしていないため、一定の精度です。

NICTでは、異なる言語の文書から自動的に文と文の対訳を作成する技術を開発しています。そして、この技術を利用することにより、日本と米国に同時出願された特許文書から1,000万文以上の大規模な日英対訳コーパスを自動作成しました。今後は、このコーパスを利用して、日英の特許翻訳や類似文検索などのサービスを開発する予定です。

また、NICTでは、新聞記事から25万文規模の日英対訳コーパスも作成しており、この対訳コーパスは、ライセンス契約により第三者も利用可能です。このコーパスは英辞郎に採用予定ですので、たとえば、「英辞郎 on the Web」でNICTが提供した対訳文が検索可能となります。

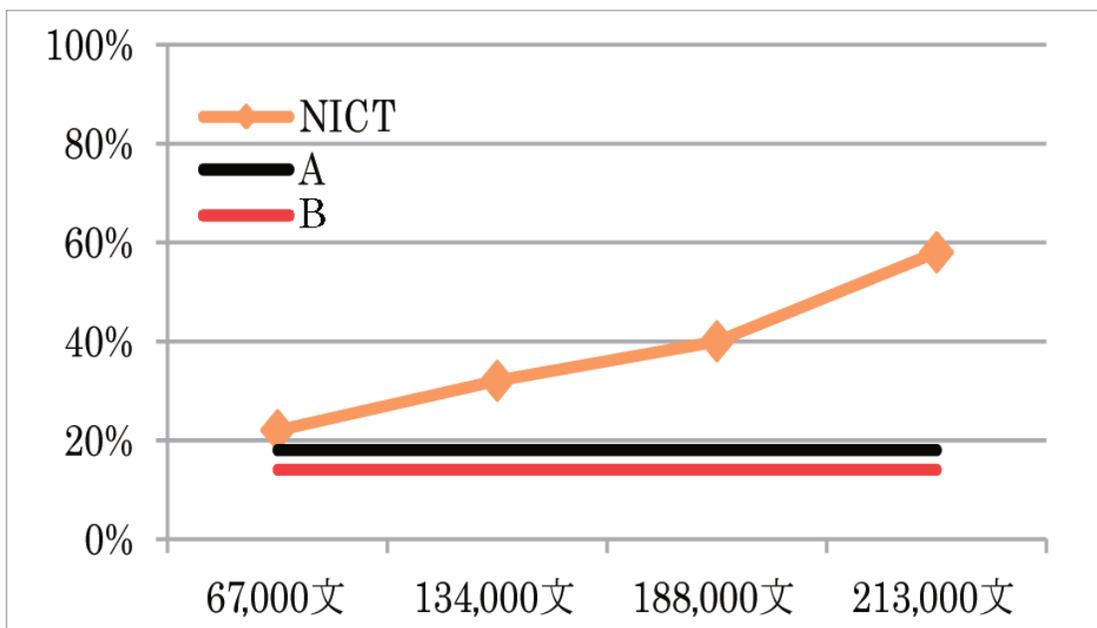


図2 日英翻訳の性能改善

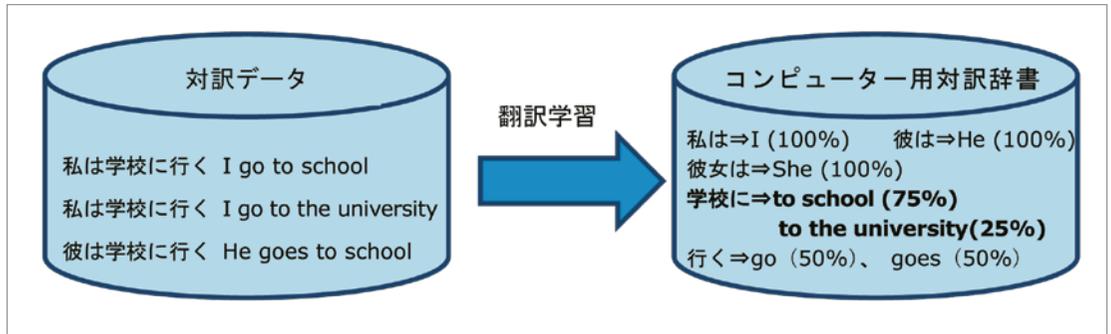


図3 コンピューター用対訳辞書の作成

● アルゴリズム

コーパスベースの自動翻訳は、1980年代に、長尾真氏により提案されました。その後、1990年代に、IBMにより、対訳コーパスから自動的に対訳辞書や翻訳規則を推定するアルゴリズムが開発されました。2000年代には、自動翻訳を(不完全ながらも)自動的に評価する方法が開発されました。現在では、英日や日英などの言語構造が離れた言語対の翻訳も、ある程度の精度で自動翻訳ができるようになりました。

コーパスベースの自動翻訳では、対訳コーパスから自動的に翻訳辞書を構築します(図3)。この翻訳辞書は、たとえば、「私」と「I」が対訳関係にあることを記述しています。さらに、通常の辞書と異なる点として、どのくらいの確率でこれらが対応関係にあるかも記述しています。更に、単語だけではなく、フレーズの対訳関係も大量に格納しています。

この辞書を使って日本語を英語に翻訳する方法の概略は、まず、日本語文をフレーズに分割します。そして、そのフレーズを英語に翻訳して、最後に、翻訳したフレーズを並べ替えて英語の語順にします。ここで、もちろん、個々の日本語のフレーズには複数の英語のフレーズが対応しますし、日本語文をフレーズに分割する方法も多量にあります。したがって、自動翻訳が出力可能な英語文の数は無数にあります。この無数の翻訳候

補の中から、前述の対訳関係の確率等を利用して、最適な英文を選択します。

もっとも、実際に行われている方法は、もっと複雑です。たとえば、英日自動翻訳の場合には、英語と日本語の構造差が大きいので、あらかじめ入力文の英語を構造解析して、日本語の語順に近くなるように英語の語順を変更してから、上述の方法で翻訳したりします。

自動翻訳の研究においては、これまで、ほぼ10年に1回の割合で、ブレークスルーとなる研究が起きていますので、ここ数年で、次のブレークスルーが起きるのではないかと思います。私たちは、そのブレークスルーをNICTから起こすように研究しています。

fVisiOn: 何も無いテーブルの上に 浮かぶ3D映像の作り方

—メガネなしで360度から見えるテーブル型3Dディスプレイの研究—

「テーブルを囲んだコミュニケーションのような自然な情報伝達環境を目指し、メガネなしで観察できる3D映像をテーブル上のそこにあるかのように提示する技術を紹介します。」

吉田 俊介 (よしだ しゅんすけ)

ユニバーサルコミュニケーション研究所
超臨場感映像研究室 主任研究員

大学院修了後、通信・放送機構(TAO)研究員、国際電気通信基礎技術研究所(ATR)研究員を経て、2006年よりNICT主任研究員。博士(学術)。人とコンピュータをつなぐ境界面(インタフェース)の研究者。「未来を作っています」と言えるハカセになるべく精進中。

● テーブルトップを介したコミュニケーション

コミュニケーションにはいろいろな形がありますが、この研究が対象としているのはテーブルの周りに集う人々のコミュニケーションです。テーブルの上(テーブルトップ)は様々な作業をみんなで共同して進めるのに適した空間です。書類や模型を並べる場所として使うことができますし、それらをみんなで共有して書き込んだり修正したりしながら議論を進めることができます。これをコンピュータで支援し、テーブルトップに表示されたデジタルな書類を扱えたり、3D映像の模型を修正できたりすれば、その場に集まった人同士だけでなく、データのやりとりで遠隔地間でもテーブルトップを介したコミュニケーションができるようになります。



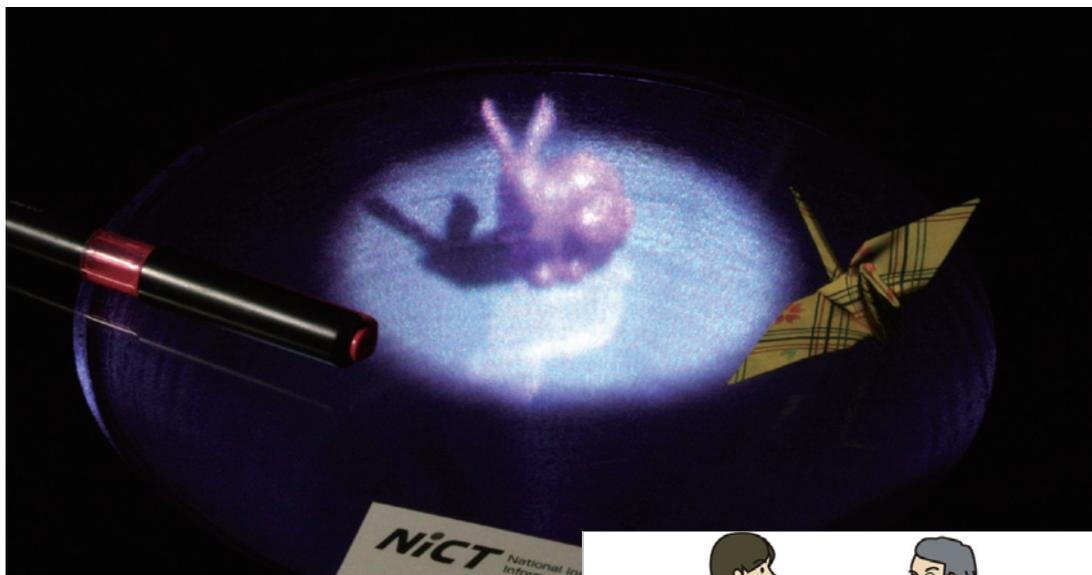


図1 テーブル型メガネなし3Dディスプレイ [fVisiOn]
 上 試作したfVisiOnによる3D映像。中央にウサギの3D映像と、
 周りに折り鶴やペンなどが置かれたテーブルトップ
 右下 テーブルトップを介したコミュニケーションの例

● テーブルトップに求められる 3D 映像

「fVisiOn (エフ・ビジョン)」と名付けたテーブル型 3D ディスプレイの研究は、テーブルトップにて 3D 映像をみんなで自然に共有するためにはどのようにすればよいのかという新しい着想より生まれました。

テーブルに置かれた模型がそうであるように、テーブルトップに表示された 3D 映像は、いろいろな方向から観察すると違った見え方をしなければいけません。しかし一般的な 3D ディスプレイの技術は、テレビのように正面側から 3D 映像を見ることが想定されていて、得られる立体感は奥行きのみで、3D 映像の横や後ろが見えるものではありませんでした。全周 360° から観察可能な 3D ディスプレイ技術も提案されていますが、それらはテーブルに置かれたガラスケースの中に表示するような仕組みであり、その表示装置がテーブルトップでの自由な作業を邪魔してしまうことが問題でした。また、より

自然なコミュニケーションを達成するためには、特別なメガネをかけることなく、何人でも同時に 3D 映像を観察できることが望ましいと言えます。

fVisiOn で提案する方式では、何も無い平らなテーブルの上に高さのある 3D 映像を浮かび上がらせて再生することができます。テーブルの周囲にいる人々は、特別なメガネを使うことなく、何人でも同時に周囲 360° からそれぞれの視点に応じた 3D 映像を観察できます。テーブルトップには作業の邪魔となる表示装置が一切ないので、従来と同じように 3D 映像の隣で書類を交わしたり、模型をそばに置いたりすることもできます(図 1)。

● fVisiOn を実現する技術

現実世界の物体は、両目が左右に離れているので、それぞれの眼には少しずつ違う見え方で写ります。この見え方の差が立体を感じる要因のひとつです。fVisiOnでは、円状に並べた多数のプロジェクタを使って様々な方向へ向かう光線群を大量に作り出し、それらの進み方をうまく制御する光学素子を使うことによって、見る方向で見え方が変わる映像をテーブルトップに表示します。これにより、立体的な映像として両目で知覚することができます(図2)。

fVisiOnの研究では、テーブルトップに適した(作業の邪魔にならない、斜め上からの観察に対応する、特別なメガネがいらぬ、みんなで使える)新しい3D映像の再生技術の考案に加え、それを実現するための技術開発に困難が伴いました。特に再生原理を実現する光学素子の作製が

難しかったのですが、すり鉢状の亚克力円錐に糸状のレンズを巻くという工夫で、必要な光学性能を得ることに成功しました。

現在の試作機では、テーブルトップから5cmほど飛び出した3D映像を周囲から観察できます。例えば、3D映像のウサギでは、頭側から見る人と尻尾側の人では見え方が異なり、テーブルに落ちた影もウサギの模型がそこあるかのように見え方が変わります(図3、4)。静止画だけではなく動画も再生可能で、実物の模型ではできない動きのある情報提示が可能であることもfVisiOnの利点のひとつです。

● 今後の展望

試作機はまだ生まれただけの状態であり、3D映像の品質は今後さらに改良を加えていきます。用意できたプロジェクタの数の制限(100台強)か

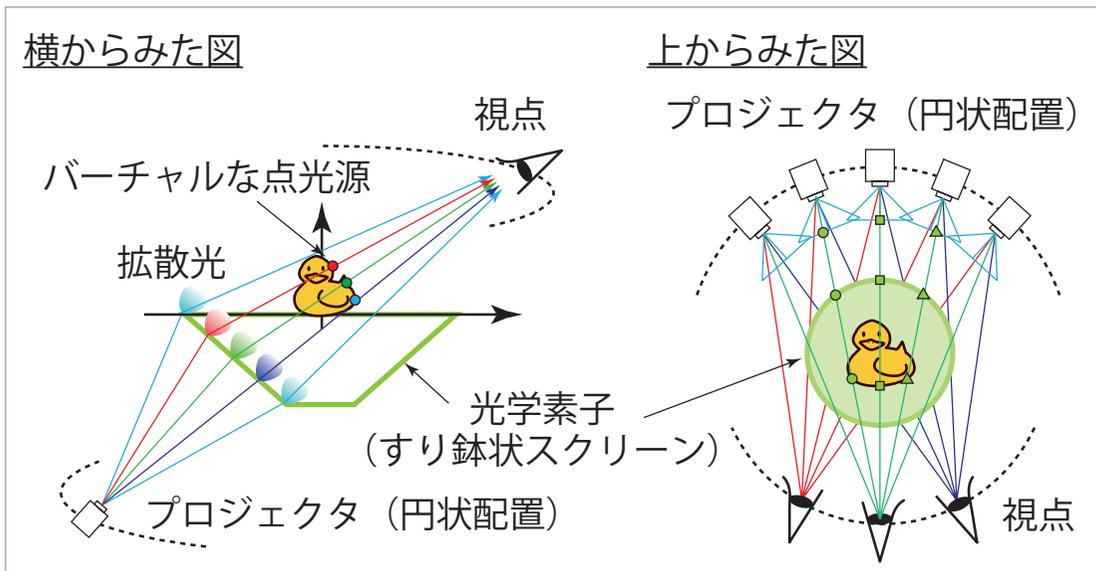


図2 fVisiOnにおける3D映像を再現する原理

- ・ 横から見た図のように、プロジェクタから投射された光線を、光学素子は垂直方向には拡散して、テーブルの周囲、斜め上方向の視点へ光を向ける。
- ・ 一方、光学素子は水平方向には光線を拡散させずにそのまま直進させる。
- ・ そのため、テーブルの周囲のある視点では、複数のプロジェクタから放たれた映像の一部(スリット状)がそれぞれ横に連なって1つの映像として観察される。
- ・ 別の視点では、それぞれ別の一部が連なった映像が見えるため、観察方向ごとに異なる映像を見せることができる。
- ・ この原理によって、観察方向に応じたそれぞれ異なる見え方が再現されるので、両目で見たときに3D映像として知覚される。

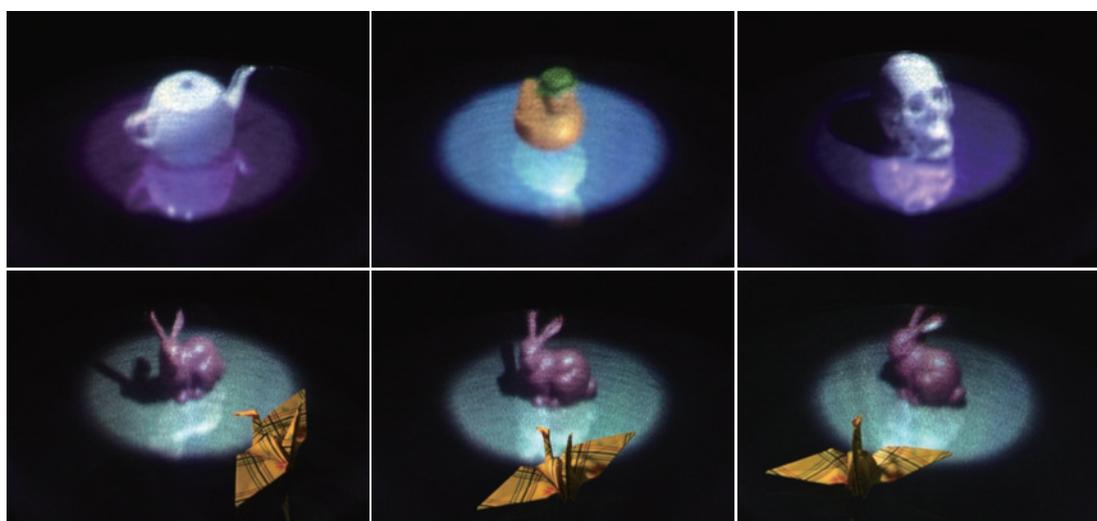


図3 fVisiOnで再生された3D映像の写真
 上段: 左からティーポット、おもちゃのアヒル、頭蓋骨
 下段: 3D映像のウサギと手前に置いた実物の折り鶴を異なる角度から撮影

ら観察範囲も今は 130° 程度ですが、360° からの観察へ拡張可能なことは原理的に確認できました。3D 映像の全周化は次の試作で試みたいと思います。

fVisiOn は従来からのテーブルトップ作業に親和性の高い 3D 映像技術です。これまでに述べたようなテーブルを介した議論や作業といった産業用途だけではなく、平面ではわかりにくい身体の構造を立体的に表現することで、お医者さんたちの手術の事前検討や患者さんとのコミュニケーションなど医療の場面でも役立つでしょう。また、提案技術は斜め上からの観察に最適化されていますので、3D 映像の地図を使った防災訓練や、交通管制などにも有効です。さらには、家族みんなで楽しめる 3D 映像のテーブルゲームや、将来的に大型化ができれば 3D 映像のサッカースタジアムといったエンタテインメントへの応用も広がります。

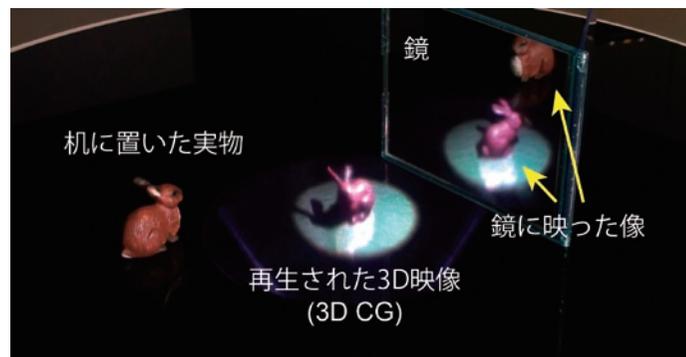


図4 机の上に鏡を置いた場合の写真
 鏡に映り込んで見える像が、実物と同じように、3D映像も反対側から見た様子になっていることがわかります。

普段の生活で利用しているテーブルにさりげなく 3D 映像を加える、それが fVisiOn の目指す究極の形です。

実世界とクラウドをつなぐ ICTインフラ

「クラウド上の多種多様な情報サービスと、実世界の大規模なセンシングデータを連携させることで、実世界に有用な情報を提供するシステムの構築を可能にするICTインフラを研究開発しています。」



金京淑 (キム キョンスク)

ユニバーサルコミュニケーション研究所
情報利活用基盤研究室 研究員

2007年韓国釜山大学自然科学研究科電子計算学博士取得。2007年11月よりNICT知識創成コミュニケーション研究センター知識処理グループ有期研究員、2010年8月に同研究員を経て、2011年より現職。時空間データベース、時空間データマイニングに興味を持つ。日本データベース学会会員。

村上陽平 (むらかみ ようへい)

ユニバーサルコミュニケーション研究所
情報利活用基盤研究室 主任研究員

2006年京都大学大学院社会情報学専攻博士課程修了。博士(情報学)。電子情報通信学会サービスコンピューティング研究専門委員会委員長を務める。

● 研究の背景

近年、インターネットを介してサーバ上のプログラム処理を情報サービスとして提供するクラウドが普及しています。クラウドは、サーバのCPUやハードディスクといったハードウェアの提供から、サーバ上で動作しているプログラムやデータといったソフトウェアの提供まで多岐にわたっています。このようなクラウド環境を用いて、実世界の情報をセンサーやモバイル端末上のアプリケーションから収集して、多様な情報サービスと適切に組み合わせることで実世界に有用な情報を提供するサイバー・フィジカル・システムが注目されています。我々の研究室では、このような実世界とクラウドを繋ぐサイバー・フィジカル・システムを実現するためのICTインフラの研究開発に取り組んでいます。さらに、このICTインフラを用いて、実世界の多種多様なBig Dataを収集し、その関係性を分析して配信することで実世界の Awareness を高めるサイバー・フィジカル・データクラウドの実現を目指しています。このICTインフラは、それぞれの大規模データや情報サービスのギャップを埋め、ユーザの要求に応じて適切に連携させる基盤ソフトウェア「ZODIAC (Zero-gap Orchestration for Data Intensive Actionable Collaboration)」と、ユーザに情報サービスを効率的に届けるネットワーク「Service-Controlled Networking」から構成されます。

● 異種・異分野 Big Data の検索

図1に示すZODIACの大規模データ管理技術では、様々な研究機関が持つ幅広い分野の科学

データ、社会を反映した新聞記事データや20億ページのWebコンテンツ、実世界の環境の観測データ(降水量、風速、震度等)など近年重要性が増しているBig Data間の相関関係を発見することで、分野間のギャップを越えて、様々な出来事や現象に関連するデータを横断的に検索・統合することを可能にします。たとえば、単純な時空間(位置・時間)の相関関係を使い、台風や地震などの自然現象の観測データと、新聞記事やWebコンテンツなどの社会の観測データを横断的に繋ぐことで、自然現象が人々の日常生活にどのような影響を与えたかをより詳しく、分かりやすく伝えることができます。

● 多様な情報サービスの連携

図1に示すZODIACの情報サービス連携技術では、大規模データ管理技術によって提供される検索サービスとデータ分析サービスを組み合わせることでクラウド上の新しい情報サー



図1 ZODIACの役割

ビスを実現し、災害など刻々と変化する状況を分析するアプリケーションの構築を容易にします。情報サービスの連携では、情報サービス間で交換するデータの形式や、情報サービスの利用手順にギャップが生じます。これらのギャップは情報サービスが多様化し、環境の変化が激しくなるにつれてより顕著になります。情報サービス連携技術は、データ間の依存関係に基づいてデータ形式の変換を行い、環境の変化に基づいて情報サービスの切り替えを行うことで、これらのギャップを越えて情報サービスの連携を可能にします。たとえば、降水量や河川の水位、交通状況などの様々な環境センサーサービスと、Twitterなどのソーシャルサービス、翻訳サービスを連携させることで、災害状況やユーザーに合わせてアナウンス内容や言語、伝達方法をリアルタイムに自動的に切り替えることができます。

情報サービスを届けるネットワーク

図2に示す情報サービスによるネットワーク制御技術(Service-controlled networking)は、クラウド上の情報サービスの連携プロセスに連動してネットワークの構成を柔軟に変更します。特に、データの大規模化・情報サービスの複雑化による新しい要求に応えるために、従来のインターネットよりも高い処理能力と拡張性を備えた「新世代ネットワーク」を活かし、膨大なデータを処理したり、多種多様な情報サービスを組み合わせたネットワーク構成をプログラムで調整することができます。これにより、災害などによりネットワークが混み合ったり、遮断されたりといった既存システムで想定していない事態が発生した場合でも、ユーザーが素早くデータを収集し蓄積できるように専用の連携ネットワークをオンデマンドに構成することができるようになります。

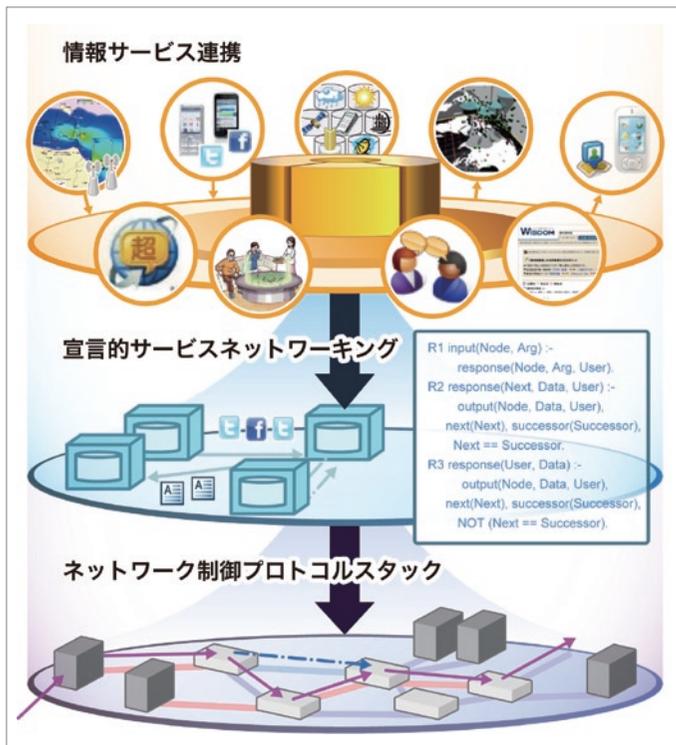


図2 情報サービスによるネットワーク制御技術

今後の展望

この ICT インフラによりクラウド上の情報サービスと Big Data の効率的な連携が可能になることで、実世界の観測データから実世界の状況を多面的に分析するアプリケーションの開発が促進されることが期待されます。たとえば、Stream Concordance(ストリームコンコダンス)は、Twitter上の意見を分析するアプリケーションです(図3)。Twitter上に流れるツイートを意見分析サービスで肯定、否定に分類し、ツイート内に出現するキーワードで整列させることで、社会の中でそのトピックがどのように語られているかをリアルタイムで把握することがで

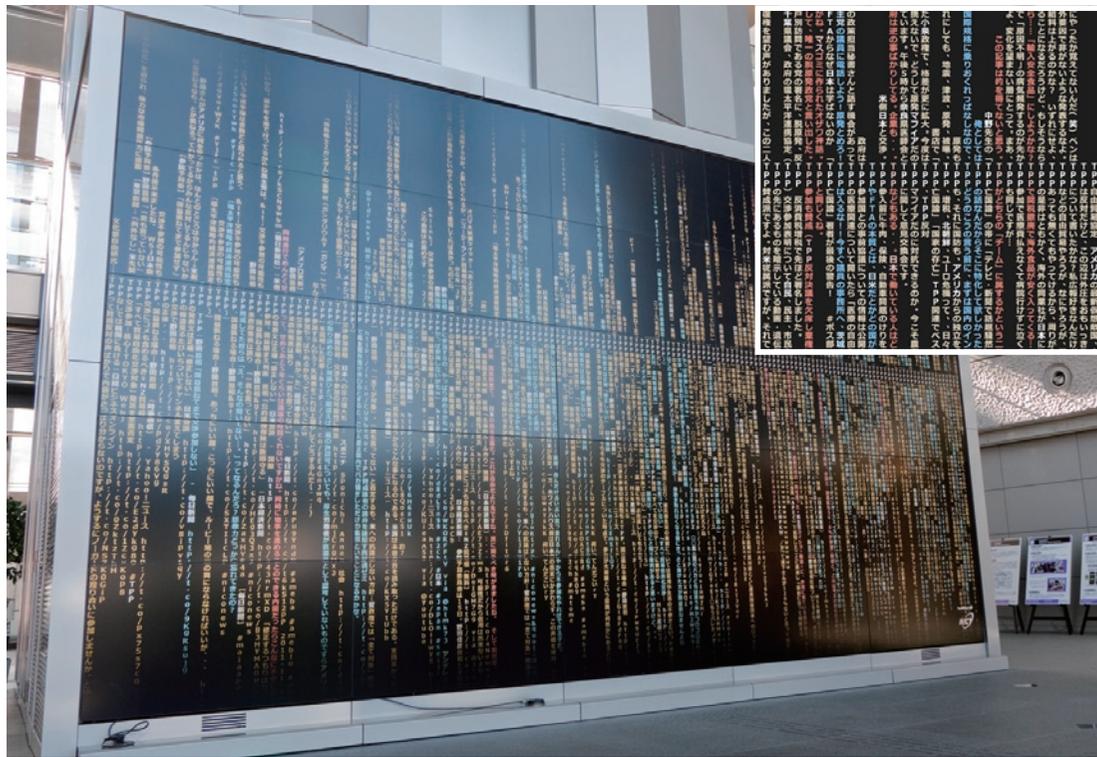


図3 Stream Concordanceを超高精細大画面に写し出した例（“TPP”を含むツイートを整列）

きます。このようなアプリケーションの開発を加速させるためにも、現在、世界中の科学データの共有を図っている国際科学会議(ICSU)による世界科学データシステムのWDS(World Data System)と連携して、利用できるデータや情報サービスの拡充を進めています。また今後はこのICTインフラを用いて「知識・言語グリッド」と呼ばれるユーザ参加型のテストベッドを公開することで、参加者によるデータや情報サービスの共有を可能にし、互いの情報サービスの利活用を促進していく予定です。

世界中の人々が母国語で外国人と対話できる多言語音声翻訳技術

—スマートフォンに話しかければ自動的に通訳するソフトウェア「VoiceTra」—

世界中の人々が母国語で外国人と対話できる多言語音声翻訳技術 隅田英一郎・柏岡秀紀



「スマートフォンの33台に1台にダウンロードされ利用されたNICTの多言語音声翻訳アプリの技術と評価、今後の展開について説明します。」

隅田 英一郎 (すみた えいいちろう)

ユニバーサルコミュニケーション研究所
多言語翻訳研究室 特別招へい研究員・室長

京大、IBM、ATR、NICTと居場所を変えつつ、もう四半世紀も自動翻訳をやっているロートルですが、今が一番楽しいですね。研究の進展が凄く速く、技術移転も好調だからです。自動翻訳は、アカデミックでもビジネスでも、かつてない熱いステージに達しました。一方、文脈処理や同時通訳等の大物課題もしっかり残っています。次の四半世紀もワクワクものです。皆さん、一緒に楽しみませんか？

柏岡 秀紀 (かしおか ひでき)

ユニバーサルコミュニケーション研究所
音声コミュニケーション研究室 室長

コンピュータと自然に会話できる世界を作ることに関われればと思います。音声翻訳、音声対話の研究をしています。大学を卒業した頃は、携帯電話は、珍しいものだったのに、今ではみんな持っているのが当たり前のようになり、想像以上に音声翻訳、音声対話が身近なものになりつつあります。突拍子もないことでも、すぐに当たり前になるかも、そんな研究がしたいと思っています。

言葉の壁はボーダーレス社会において大きな課題です。例えば、政府の『新成長戦略』*1では「訪日外国人を2020年までに現在の3倍の2,500万人(経済波及効果10兆円、新規雇用56万人)にする」としていますが、公共交通、宿泊施設、飲食店での外国語対応の遅れが、訪日外国人の最大の不満となっています。

このような「言葉の壁」を克服するため、NICTでは、多言語音声翻訳ソフトウェアの研究・開発を進めています。その成果として、音声翻訳ソフトウェア VoiceTra*2をスマートフォン用に公開しました。無償でダウンロードできるこのアプリケーションを使えば、例えば、図1と図2の組み合わせで示したような日本語と英語の対話がで

きます。電話をかける時のようにスマートフォンを耳元に近づけると短時間振動するので、これを合図に音声を入力すると、翻訳結果が音声で返ってきます。図1の1番目の窓はシステムが認識した(聞き取った)結果、3番目の窓が翻訳結果です。2番目の窓は、「逆翻訳」(翻訳文を元の言語に逆に翻訳する)の結果で、これを見て正しく翻訳できたかどうかを確認できます。VoiceTraは2010年8月に公開し、2012年3月時点で累計60万件を超えるダウンロード数を記録しています。日本人の200人に1人が利用者であり、日本のスマートフォンの33台に1台にダウンロードされた計算になり、音声翻訳技術を多数の方に知っていただくことができました。さらに、後述するように、民間事業者と事業化が始まり、NICT技術が社会に還元された代表例の1つになっています。

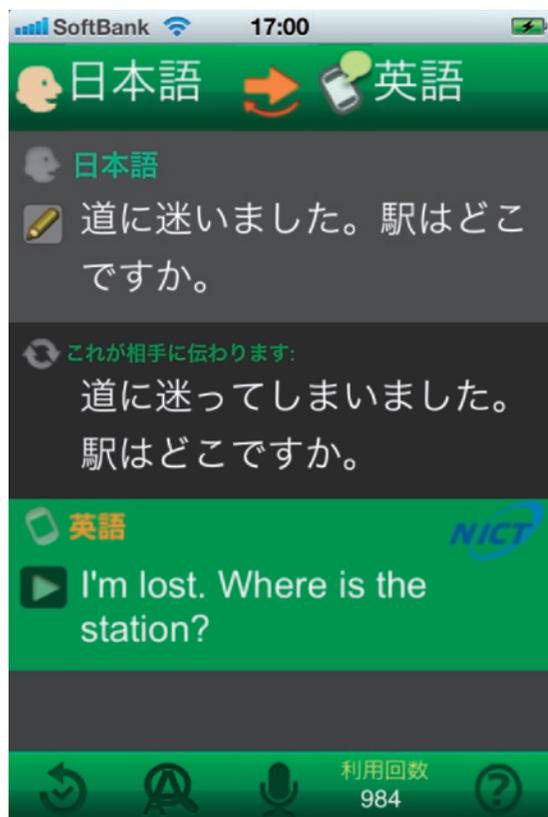


図1 例(日英翻訳)

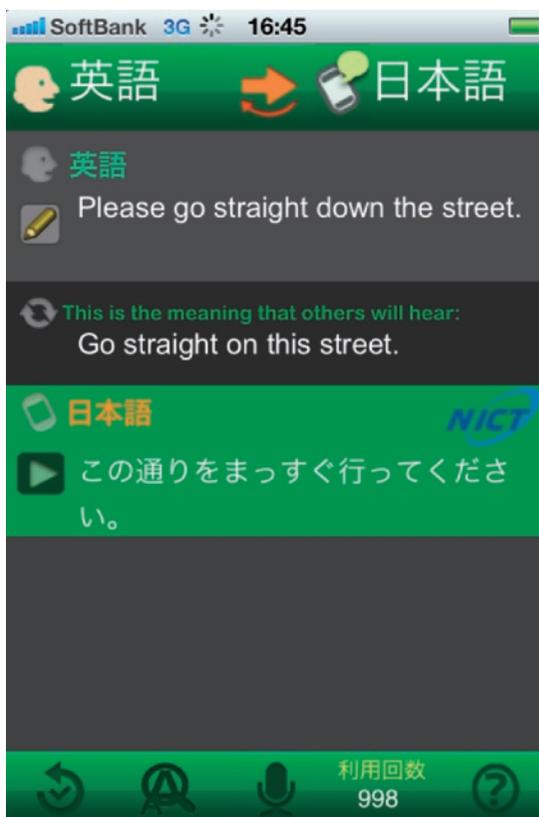


図2 左図の応答例(英日翻訳)

VoiceTra の技術

● 「基本の」音声翻訳技術

図3は、日本語音声認識が日本語文章となり、さらに英語文章に翻訳され、英語音声に合成される例を表しています。音声認識モジュールで、多くの話者の音声データから構成された音響のモデル(モデルは音声の要素である音素ごとに構成)と、入力音声との照合が行われて、音素列に変換されます。次に、この音素列は、かな漢字で表記される単語列確率(言語モデルと呼ぶ)を最大化するように変換されます。この変換では、日本語の大量のテキストから学習された、3つ組の単語列の生起確率をもとに、適切な単語列を求めます。これをさらに翻訳モジュールで、日本語の単語列が対応する英語の適切な単語の選択、および語順の入れ替えが行われます。日本語の単語列に対応する英語の単語列を選択するために、日本

語と英語の対訳文から学習された翻訳モデルを用います。次に、語順を英語に合わせるため、大量の英語のテキストから学習される3つ組の単語列の生起確率から英語として適切な単語列を求め、それを音声合成部へ送ります。音声合成部では、まず、英語の単語列にあわせて発音、イントネーションを推定します。次に、それにあう波形を、大量の音声から学習された音声特徴量に合わせてフレームと呼ばれる時間単位で作り、それらを接続して音声合成を行います。

図の下方にある大規模コーパス(日本語のデータや対訳文や英語の音声のデータなど)を基盤にして、そこから自動的にシステムを構築するため、コーパスベースの技術と呼ばれます。

● ネットワーク型の「音声翻訳技術」と実用化

さらに、前述の基本技術を実用化するために無線通信を活用したネットワーク型にしました。単一のコン

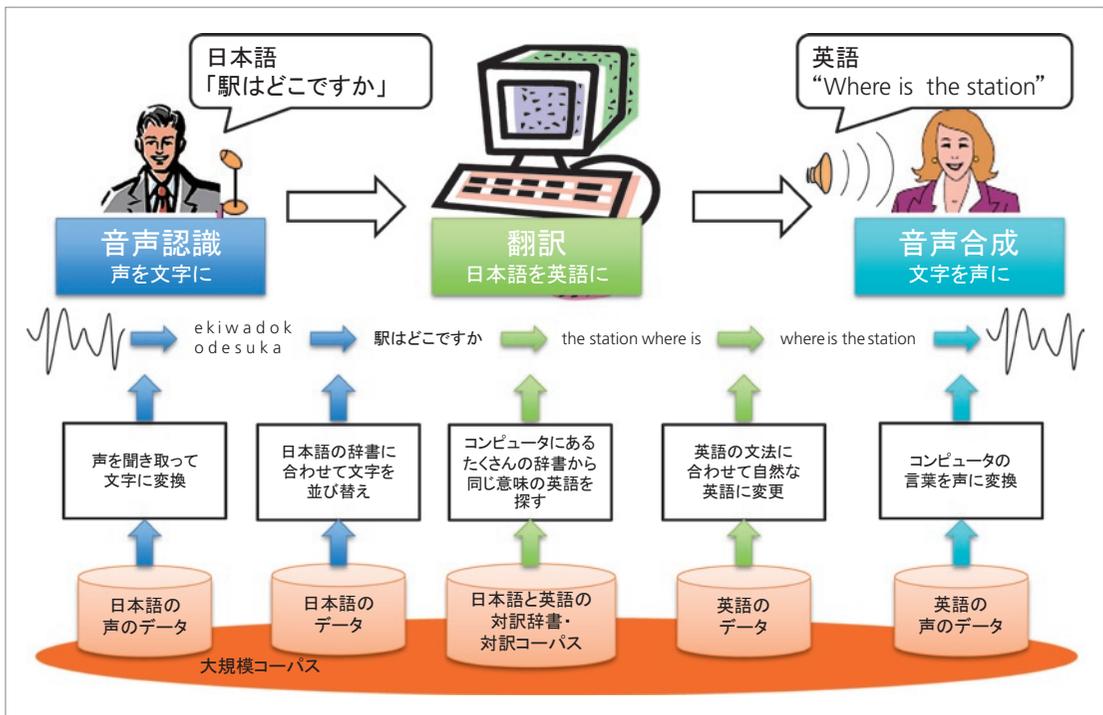


図3 音声翻訳の概略

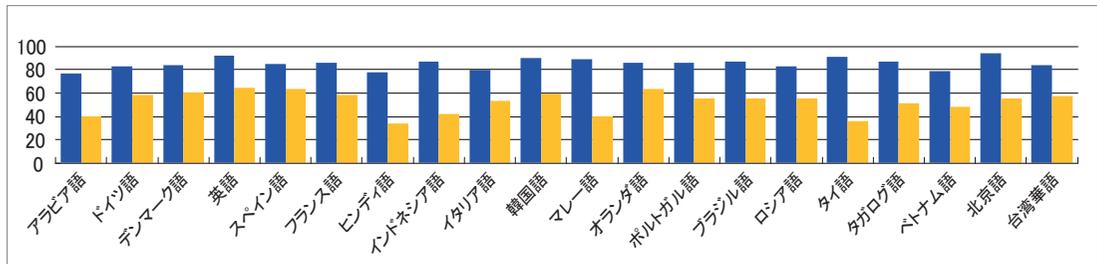


図4 翻訳率の比較 (広く利用されているソフトウェア (黄色) とNICTのソフトウェア (紺色) と比較。縦軸が日本語への翻訳率。横軸が翻訳元の言語)

コンピュータ内に閉じた実装では得られない可搬性、言語や語彙の拡張性、自律的な性能改善など特有の効果で、実用化を加速することができました。①利用者端末を100g程度に軽くできるので可搬性が高くなり実用性が増しました。②サーバはハードの制限がほぼないので、言語や語彙の拡張性は大きく、利用データに基づく自律的な性能改善が可能になりました。実際に、VoiceTraの利用データの一部を利用し音声認識の改善を行ったところ、対象言語により差はありますが、5%から10%、精度が向上できました。

NICTと成田国際空港株式会社(NAA)は2010年10月4日から2011年2月25日まで、商用化検証実験を実施しました。成田国際空港に関連する固有名詞(エアライン名、観光地名、駅名、商品名等)1,600件を追加し、従来、語彙の不足から「穴のカウンターは何処ですか?」と誤認識されていた音声も「ANAのカウンターは何処ですか?」と正しく認識・翻訳が可能となりました。NAAは、ネットワーク型の「音声翻訳技術」が外国人との「言葉の壁」解消のソリューションとなると判断し事業化に着手し、2011年12月末にアプリケーションを旅行者のスマートフォンにダウンロードするサービスを開始しました。VoiceTraは本件を含め4社に技術移転されました。

● 翻訳ソフトウェアの性能

VoiceTraは旅行会話を対象としていますが、その翻訳能力としては、おおよそTOEIC600点の人に相当します。VoiceTraの特徴は、多言語対応であると同時に高品質な点にあります。図4のグラフは、日本語への他の20言語からの翻訳について、広く利用されている多言語ソフトウェア(黄色で表示)とNICTのソフトウェア(紺色で表示)と、翻訳率(翻訳者が評価した意味が通じる率)で比較したものです。

● 音声翻訳研究の今後

音声翻訳技術は1986年に基礎研究が開始されましたが、VoiceTraは、同技術がついに実用化に至った、大きな成果の1つです。しかしながら、現在の音声翻訳技術には、長い文に対応できないこと、文脈を理解できないこと、などの課題があります。NICTは、これらの困難な研究課題に取り組み、ニュースや会議の同時通訳という次の大きな夢の実現を目指しています。

*1 <http://www.kantei.go.jp/jp/sinseichousenryaku/>
*2 <http://mstar.jp/translation/index.html>

情報分析技術

—大量の情報の中から価値ある情報を見つける—



風間 淳一 (かざま じゅんいち)

ユニバーサルコミュニケーション研究所
情報分析研究室 主任研究員

2004年に東京大学大学院を修了し、博士(情報理工学)を取得しました。その後、北陸先端科学技術大学院大学の助教を経て、2008年からNICTに勤務しています。専門は自然言語処理で、機械学習や確率モデルの自然言語処理への応用の研究を行ってきました。プライベートでは(最近はあまり行くことができませんが)釣りをしたり、けいはんな周辺の色々な名所を巡ったりしています。また、最近、家庭菜園を始めて、北陸先端大時代に知って好きになった加賀野菜の「金時草」を植えたりしています。

「大量の情報の中から価値ある情報を見つけるために私の所属する情報分析研究室で研究開発を行っている様々な技術、特に質問応答システム『一休』について紹介します。」

● はじめに

近年のインターネットの発達と、そこでの情報発信や検索の技術の発展には目覚ましいものがあります。しかし、現状で十分満足でしょうか。今でも、Web 検索の結果はページが単純にランキングされてリストアップされるだけで、検索する人が元々欲しかった情報を手に入れるためには、リストアップされたページを順に見ていくしか方法がありません。私の所属する情報分析研究室では、このような現状に満足せず、大量の情報の中から価値ある情報を見つけるための様々な技術の研究開発を行っています。

● 質問応答システム『一休』

質問応答とは、ユーザが「脳梗塞を防ぐのは何ですか?」のような質問文に対して、答えの候補を列挙する技術です。通常の Web 検索と大きく異なる点は、入力が文であることと、結果が「答え」の端的な列挙であるということです。このことから分かるように、通常の Web 検索よりも一段高度で、「価値ある情報の発見」という私たちの目的にかなっただ技術です。実は、質問応答の研究は古くから行われてきましたが、つい最近までは実用には届かない難しい技術ととらえられてきました。しかし、最近の技術の進歩で、かなり実用に近いところまで来ています。Web 上の大量のデータや、Wikipedia などのある程度組織化されたデータから、必要な知識を自動で抽出する技術が大きく進歩したためです。

我々の研究室でも、これまで開発してきた様々な技術を応用して、『一休』という質問応答システムを開発しています。このシステムの特徴は、Web に書かれていることであればおおよそどんなトピックに関する質問でも回答を返すことができるということです。音声入力機能を備え、スマートフォン上で動作します。技術的に

は、「言い換え認識」という技術が鍵となっています。私たち人間が使う言語では、同じ意味を表すために様々な表現を使うことができます。様々な言い方をされている所から回答を抽出するために、この言い換え認識の技術が重要となります。また、「推論」といういわば「計算機に考えさせる」技術を使って、Web に直接的に書かれていない回答を導くことも可能です。

ちなみに、我々がいるユニバーサルコミュニケーション研究所からほど近い京都府京田辺市にはとんちで有名な一休和尚(一休さん)が晩年を過ごしたお寺が有ります。『一休』という名前は、一休和尚のようにどんな難問でも答えられるようにという気持ちを込めてつけられました。

図 1 は、『一休』による質問応答の例を示した画面です。「脳梗塞を防ぐものは何ですか?」という質問に対して、「ダークチョコレート」「ナットウキナーゼ」「アスピリン」などの回答がされています。実は、「ダークチョコレート」という回答は、『一休』が用いている約 6 億ページの Web データの中にははっきりと簡単な形では書かれていません。『一休』は、Web 上の別々のところに書かれていた「ダークチョコレートは、動脈硬化を防止する働きがある。」「心臓病や脳梗塞などの原因になる動脈硬化は...」という 2 つの情報を自分で考えて組み合わせることで「ダークチョコレートは脳梗塞を防ぐ」という回答を導き出したのです。最近、アメリカの有名なクイズ番組で質問応答システムが人間のチャンピオンに勝ったというニュースがありました。それでも、そこで用いられたシステムには、『一休』のような進んだ推論の機能はありませんでした。『一休』は、この点で、一步進んだ質問応答システムと言うことができます。我々は、人間が行うような推論、つまり機械に考えさせる技術が、次世代の情報システムにおいて特に重要になると考えて、研究開発を進めています。

私も含めて、研究室の研究者は、開発のために日々『一休』のシステムを試していますが、通常の Web 検索では到底見つけることができない意外で価値ある情報を見つけ、それを自分の生活に実際に活かすという経験をしています。例えば、「味噌汁に何を入れますか?」という質問に対して「チーズ」を見つけて試してみたりといったことです。もう少し真面目な例を挙げると、「デフレの原因は何ですか?」という質問に対して、『一休』は、大きな利益を上げているある大企業を意外な答えとして挙げました。Web でさらに調べると、その企業が莫大な利益を内部で貯金し社会に還元しないためであるという根拠を見つけることができ、またその後、雑誌に同主旨の記事が発表されました。これらの例で重要なことは、味噌汁の具としてチーズを、デフレの原因としてその企業を自ら

思いつくことはその分野の素人ではかなり難しいということです。もしかしたら、専門家でも難しいかもしれません。

このように見てくると、現在の通常のインターネット環境では、いかに多くのことがまだ可能になっていないかが分かります。私たちは『一休』の例で示したような、価値ある情報の発見を効率的に行うことができる技術を開発し、普及させたいと考えています。これにより、社会生活をさらに大きく進歩・進展させることができると考えています。

● 耐災害情報技術

2011年3月11日に発生した東日本大震災では、Twitterをはじめとする情報技術の可能性が強く認識された一方で、大量に飛び交う情

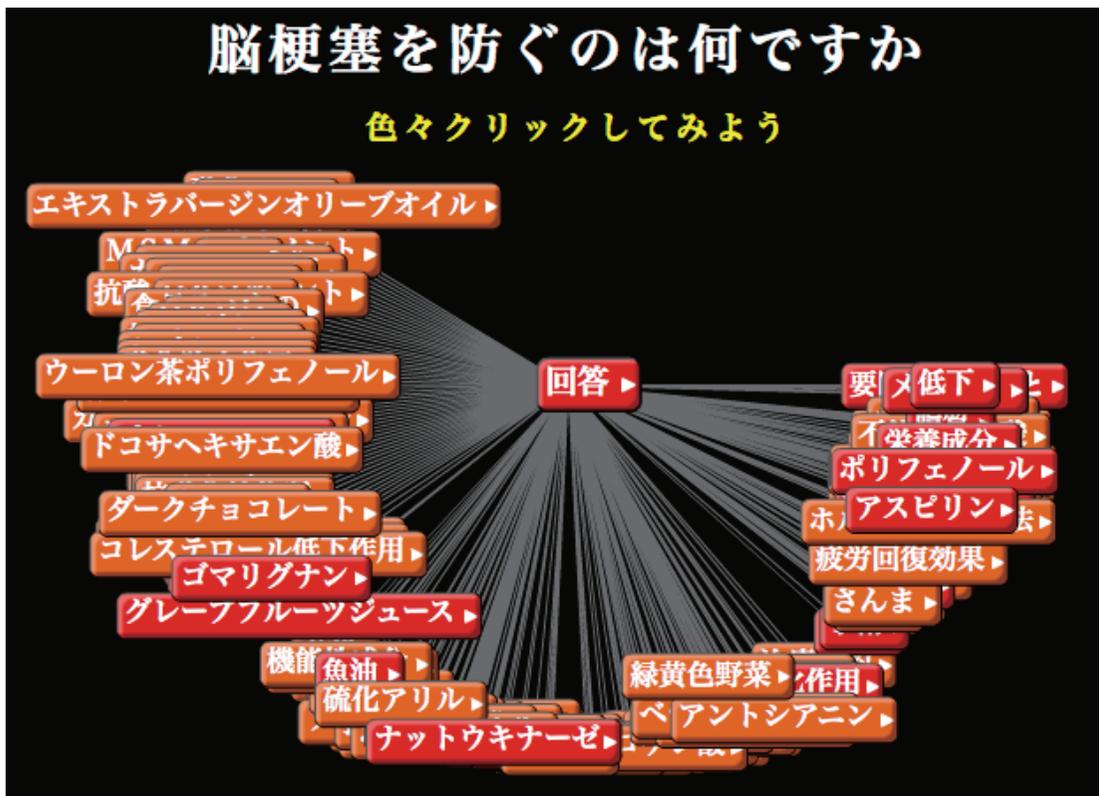


図1 「一休」による質問応答の例

報から状況を正確に把握し、救援や復興に役立てることがいかに難しいかを痛感させられました。結局のところ、私たちには「必要な情報を必要な人に届ける」技術の準備が十分にできていなかったのです。それが、大災害という極限状態になって露呈しました。あらためて、私たちが目標としてきた技術が必要とされていると感じています。情報分析研究室では、「宮城県で孤立しているのはどこですか?」といった災害時の質問に答えることが可能なシステムや、様々な事実や意見を分析して、多様な観点を考慮した冷静な判断を助けるシステムなどの開発を進めていきます(図 2)。

● おわりに

今、日本は原発、デフレなど難しい問題が山積みですが、そうした問題の解決の道筋はいくら Web 検索を使ったり、新聞を読んだりしてもなかなか分からないというのが多くの人の実感ではないでしょうか。現状の研究開発はまだ、そのレベルには達していませんが、将来的には、色々な人が書いている解決の道筋を可能な限り見つけ、分かりやすい形でまとめるといった技術にも繋がって行きたいと思っています。

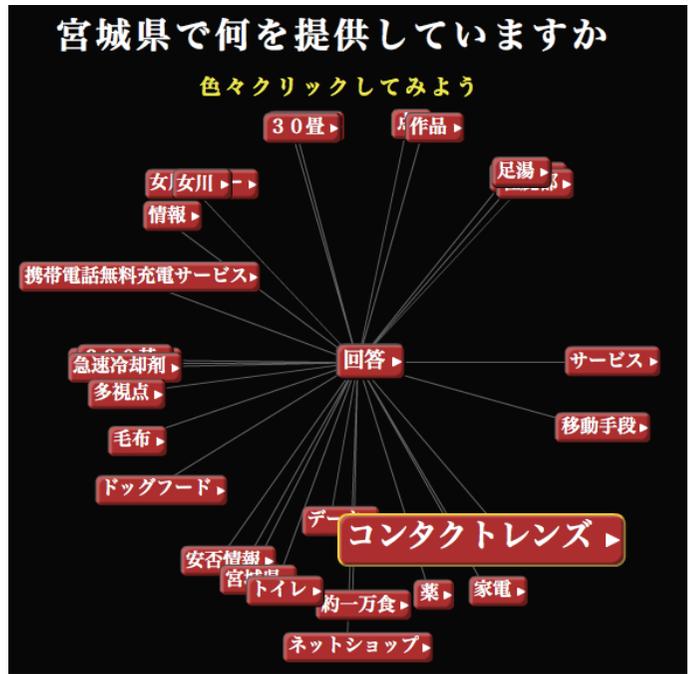


図2 「耐災害一休」プロトタイプによる質疑応答の例

五感を伝える 多感覚統合・評価技術

—自然でリアルな遠隔コミュニケーションを目指して—

安藤 広志 (あんどう ひろし)

ユニバーサルコミュニケーション研究所
多感覚・評価研究室 室長

京都大学にて学部(物理学)・修士課程(実験心理学)を修了後、渡米しMIT 脳・認知科学科にてPh.D(計算神経科学)を取得、その後、国際電気通信基礎技術研究所(ATR)に入社、主任研究員、研究室長を経て、2006年よりNICTの超臨場感プロジェクトに参画。心理物理学、認知脳科学、多感覚インタフェース等の研究に従事。趣味は、自然の風景写真やスナップ写真を撮ること。

「五感による自然でリアルな情報通信の実現を目指して、多感覚情報の統合提示技術、人の知覚認知メカニズムに基づく臨場感の定量的・客観的評価技術の開発を進めています。」

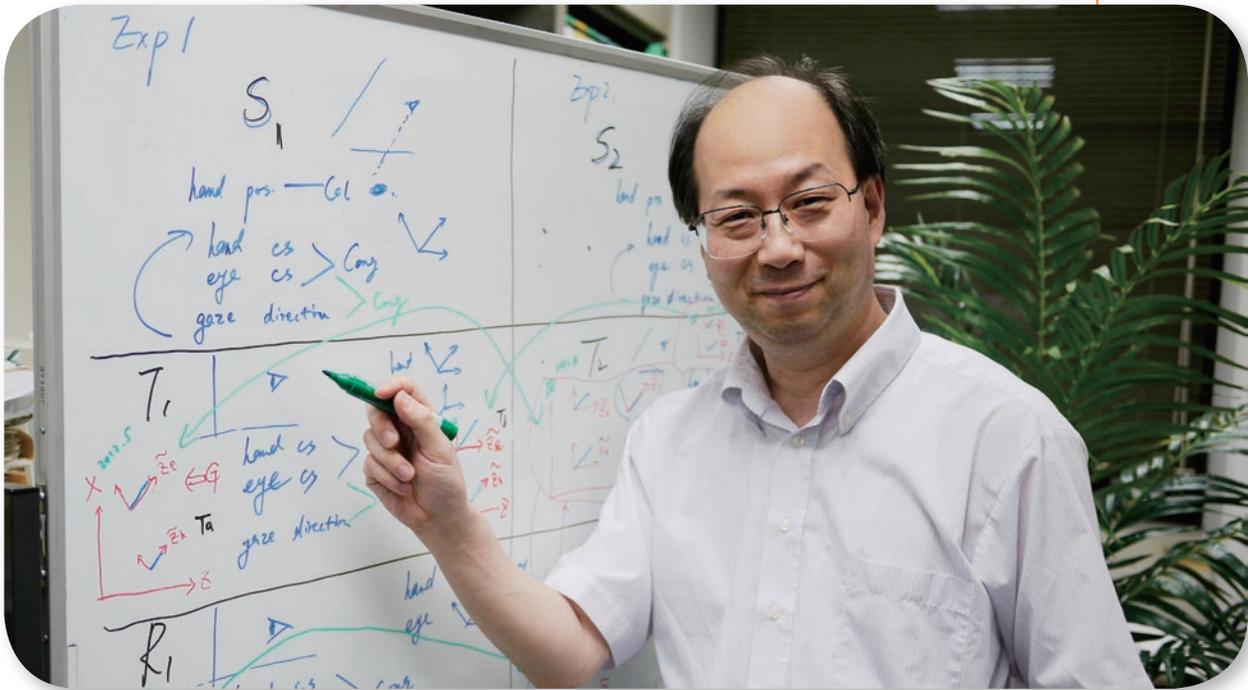




図1 多感覚インタラクションシステム (MSenS)

● 研究の狙い

私たちは、視覚、聴覚、触覚(体性感覚)、嗅覚、味覚といった五感の感覚器官を通して、外界で何が起きているのかを瞬時に理解しています。しかし、現在の情報通信技術では、立体映像、立体音響、感触、香り等の五感情報を統合し人に自然に伝えることはできず、遠隔地にいる人とも実際の対面(face-to-face)のような自然なコミュニケーションを行うことはできません。

多感覚・評価研究室では、このような現在の情報通信の限界に挑み、実世界でのコミュニケーションのように、五感による自然でリアルな情報通信を可能にするための多感覚技術の研究開発にチャレンジしています。また、多感覚の情報を人に違和感や不快感を与えずに、人にとって快適で心地よい情報を伝えるために、人が感じる臨場感を定量的、客観的に捉える測定・評価技術を開発し、人の知覚認知メカニズムを明らかにする研究を行っています。

● 多感覚インタラクション技術

図1は、立体映像、立体音響、感触、香りといった多感覚情報を統合してユーザの動作に合わせて提示する多感覚インタラクションシステム(MSenS)を示しています。このシステムを用いると、立体で提示されたバーチャルな物体映像をあたかも実物体のように自由に操れて、表面の凹凸・ざらつきや柔らかさといった、触れた時の感触も自然に伝わります。このような感触は、あらかじめ実物の表面構造を3次元デジタル化により計測し、物体のモデルを計算機に構築・保存しておき、物体の立体映像を力覚提示装置のペンで触れると、ペン先の位置をセンシングして、モータが3次元的な力をペンに発生させることで生成されます。

また、物体に触れると、その部分の材質(金属、木、皮等)特有の接触音が、触り方(こする、叩く等)に応じてリアルタイムで生成されます。人が音場

を感じる仕組み(音の頭部伝達関数)に基づき、頭の外に拡がる立体音をヘッドホンで聞くこともできます。さらに、私たちが開発した超小型香り噴射装置「マイクロ・アロマ・シューター」を用いて、異なる種類の香りを映像や音・感触とともに提示することができます。香りは、一旦空中に広く拡散してしまうと排除するのが困難になるため、香りの噴出を時空間制御して、香りを含む少量の空気を鼻にめがけて短時間だけ提示しています。

このような多感覚技術を用いて、通常は触れることのできない貴重な文化財(国の重要文化財「海獣葡萄鏡」、正倉院宝物「銀薫爐」等)や科学データ(小惑星イトカワ等)の五感体験など、さまざまな多感覚コンテンツの制作に取り組んできました。今後は、さらに、遠隔地の五感情報をリアルタイムで伝える多感覚通信技術を開発し、遠

隔会議や遠隔医療、災害時の遠隔操作等に役立てていきたいと考えています。

多感覚情報の知覚認知メカニズムと評価技術

一方、多感覚情報を人に安心・安全に伝えるためには、人の知覚認知メカニズムを明らかにし、多感覚情報が人に与える効果をできるだけ定量的に測定する必要があります。私たちは、眼鏡を必要とする3Dテレビの視聴が人の疲労に与える影響を調べる心理・生理評価実験を被験者500名に対して大規模に実施しました(図2)。また、人の知覚認知を定量的・客観的に測定・評価する新しい技術の開発も進めています。

その1つの方法は、心理物理測定による人の知覚の定量的評価です。これは、感覚刺激の物理



図2 眼鏡あり3D映像の心理・生理評価実験

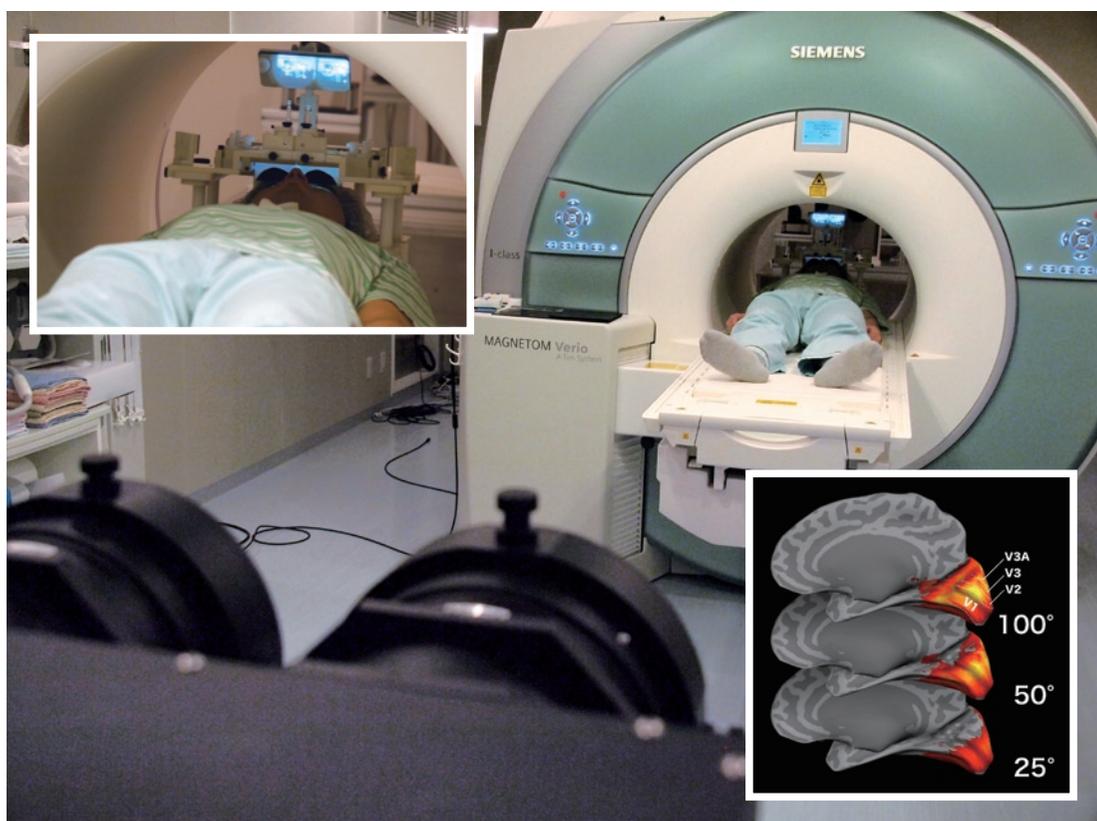


図3 超広視野立体映像提示装置を用いたfMRI脳活動評価実験

パラメータを厳密に制御し、物理情報と知覚反応との対応関係を定式化しようという手法です。私たちは、人が感じる物体の質感の定量的測定を試み、立体や動きの情報が物体表面の光沢知覚に大きく影響することを明らかにしました。

人の知覚認知を定量的に捉えるもう1つの方法は、脳活動計測です。心理物理測定では、刺激と反応の対応だけから知覚認知の仕組みを探ることになりますが、脳活動計測では、直接、脳の中で生じている現象を捉えることができます。私たちは、光沢感が脳の中で生じる仕組みをfMRI（機能的磁気共鳴撮像法）により明らかにしてきました。また、MRI装置の高磁場・狭空間でも使用できる超広視野立体映像提示装置の開発に世界で初めて成功し、水平視野角100°の立体映像が人に与える包囲感・没入感の脳内メカニズムの解明を進めています(図3)。

このような人の知覚認知を定量的・客観的に評価する技術を開発することにより、人に最適に多感覚情報を伝えるための技術要件を明らかにし、多感覚技術利用に関するガイドライン策定や国際標準化に寄与していきたいと考えています。

大量の情報を蓄え 研究を支える情報基盤技術

ービッグデータ時代のI/O指向ハイパフォーマンスコンピューティングー

岩爪 道昭 (いわづめ みちあき)

ユニバーサルコミュニケーション研究所
統括

奈良先端科学技術大学院大学修了後、日本学術振興会特別研究員、近畿大学理工学部助手、理化学研究所脳科学総合研究センター研究員を経て、2005年NICT入所。内閣府(総合科学技術会議事務局)出向等を経て、2011年より現職。知識ベースシステム、Web情報処理、オントロジー工学などの研究に従事。博士(工学)。趣味は、ジャズギター、ルアーフィッシング、キャンプ、アウトドアスポーツ全般。最近は、1歳半の娘と戯れることと、メタボ解消に始めたランニングに夢中。現在の目標は、フルマラソン完走。

「ユニバーサルコミュニケーションの実現に向けて、40億ページ以上のWebアーカイブをはじめとする大量の情報を収集、蓄積可能な大規模情報基盤の研究開発について紹介します。」



新型データセンターを背景に、研究所長命で編成された企画室共通基盤チームのメンバーとともに。
左から、原口弘志専門研究員、田中康司有期技術員、岩爪道昭統括、泥谷誠専門研究員、岩瀬高博特別研究員、藤井秀明専門研究員

● 背景

近年、ライフログ、インターネット・オブ・シングスと呼ばれるネットワークに接続されたセンサー、自動車等あらゆるモノから非定型かつ大量のデータがリアルタイムに生成されるようになってきました。このようなデータは、短期間に数億～数百億エントリー、ペタバイト級のデータ量に達することもあり「ビッグデータ」と呼ばれています。ビッグデータの集積、有効活用は、2012年1月のダボス会議^{*1}においても、議題に取り上げられるなど、ICT分野にとどまらず、グローバルな新しいビジネスサービスやイノベーションのフロンティアとして経済界においても期待と関心が高まっています。

NICTユニバーサルコミュニケーション研究所では、ユニバーサルコミュニケーションの実現に向けて、多言語音声技術や高度な意味処理に基づく情報分析技術等の基盤技術の研究開発に取り組んでいます。これらの技術では、大規模なテキストデータを収集し、大規模なコーパス^{*2}や各種の言語資源^{*3}を整備することが不可欠です。私は、インターネット上の大量の情報を効率よく集め、蓄え、用途に応じて高速に取り出すための情報基盤技術の研究開発に取り組んでいます。具体的には、(1)超高性能クローリング技術、(2)大規模分散データストア技術、(3)大規模計算機基盤構築・管理技術の実証的な研究開発を行っています。

● 超高性能クローリング技術

Webクローラは、ネットワーク上の情報を自動的に収集するソフトウェアの一種です。その実行原理は、Web文書のリンクを順次

たどるだけの極めて単純なものですが、ネット上にはスパムページや重複サイト等が多数存在します。また、ほとんど更新されない情報もあれば、ニュースのように頻繁に更新されるものもあります。一方でネットワーク環境や取得先のWebサイトに過度な負荷をかけないように十二分な配慮も不可欠です。

当研究所では、第2期中期計画(平成18～22年度)において開発された情報分析システムWISDOMの情報基盤として、Webクローラを開発、運用してきました。同クローラでは、1日に最大約1,000万ページのWeb文書を収集することができ、約10億ページのWeb文書を集積しています。第3期中期計画では、研究所全体の研究開発資源として活用可能な40億ページ以上のWebアーカイブの構築に向けて、質の高い情報を効率的に収集するためのクローラ制御の高度化、計算機やネットワーク環境に応じて柔軟にスケールする非同期的な並列分散収集機能の実現を目指しています(図1)。

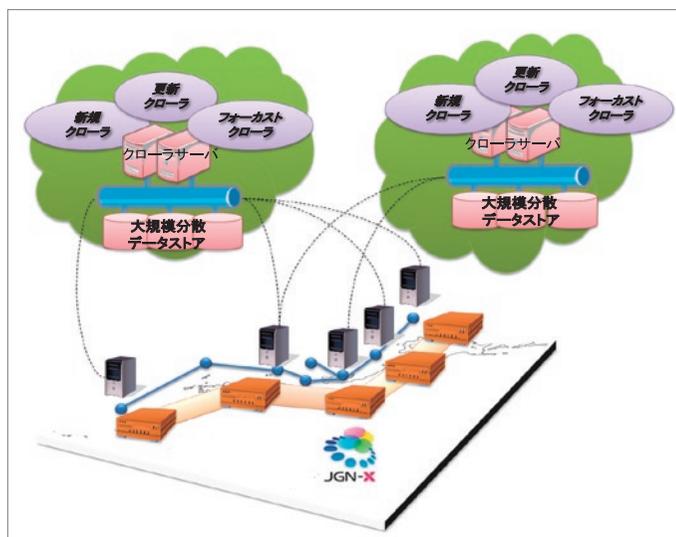


図1 並列分散クローリング環境

● 大規模分散データストア技術 (分散キー・バリュー・ストア技術)

数億～数百億エントリー、ペタバイト級のデータ量に及び大量かつ非定型なデータを研究開発やイノベーションのために戦略的に活用するためには、超高速に蓄え、必要に応じて取り出す仕組みが不可欠になります。しかし、従来の関係データベースシステム(以下、RDBMS)は、このような用途には必ずしも適しておらず、仮に実現しようとするとハード、ソフトともに高いコストが伴います。そこで、近年NoSQLと呼ばれる新しいデータベース技術が注目されています。NoSQLは、RDBMSのように関係モデルに基づく固定的なデータ構造ではなく、データや計算機資源の増加に応じてスケールアウト*⁴しやすいシンプルなデータ構造とシステムアーキテクチャを採用しています。NoSQLは、そのデータ構造や検索方式によってドキュメント指向型、カラム指向型、キー・バリュー型などのタイプがありますが、私の研究では、非定型なネット上の収集、蓄積により適した、分散キー・バリュー・ストア(以下、分散kvs)を採用しています。分散kvsは、データを格納する「データノード」、多重化されたデータノードを管理するとともに、分散kvsへアクセスするインタフェースを提供する「マスターノード」、アプリケーションから分散kvsにアクセスするための「クライアント」から構成されます(図2)。これによりデータや計算機資源の増加に応じた柔軟なデータノードの追加や自動障害復旧が可能となるほか、取扱うデータのサイズ

によっては、データを全てメモリ上に格納することで、毎秒数万～数十万件のデータストリームにも対応可能な超高速なインメモリデータベース*⁵も実現可能です。

現在、私は、分散kvsのオープンソース・ソフトウェアの1つであるokuyamaの開発者、岩瀬高博氏((株)神戸デジタル・ラボ)と共同で、ビッグデータ時代に対応した大規模データストア技術とそれに基づく大規模Webアーカイブ構築の研究プロジェクトに取り組んでいます。

● 大規模計算機基盤構築・管理技術～I/O指向ハイパフォーマンスコンピューティング

近年、コンピュータのコモディティ化*⁶が急速に進んでおり低価格かつハイスpekな計算機資源を利用できるようになってきました。では、多数のCPUや大容量のメモリ、ストレージを搭載した計算機をただ沢山並べれば首尾よく問題は解決するのでしょうか。

問題はそれほど単純ではありません。スパコン

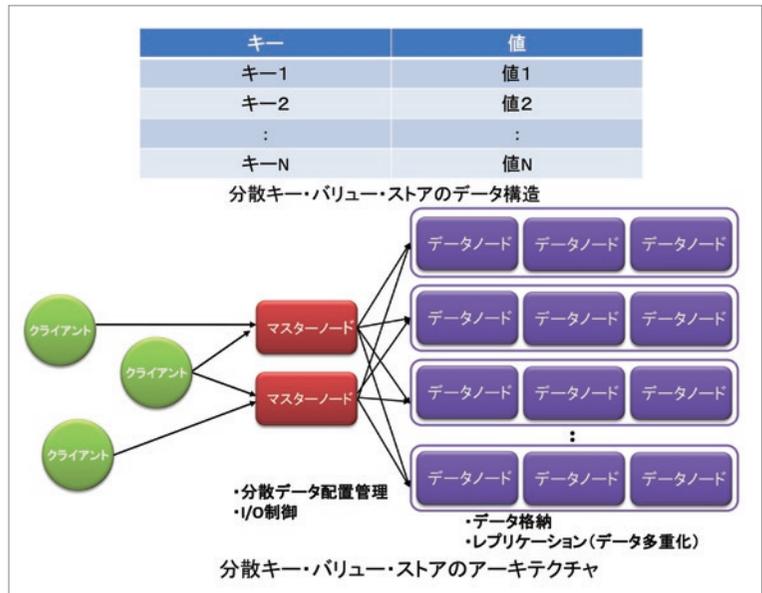


図2 分散キー・バリュー・ストア概要

に代表されるハイパフォーマンスコンピューティングの分野では、浮動小数点演算をいかに高速に実行するかということに主眼が置かれていました。しかし、ビッグデータ時代の到来によって、その様相は一変し、いかに大量のデータを取り扱えるかが重要になっています。

例えば、前述の情報分析システム WISDOM では、1つの Web 情報はたかだか 100 キロバイト程度の小さ

いものですが、これを数億～数十億件のオーダーで取り扱います。この際に、最も問題になるのは、演算速度ではなく、ストレージ上に存在する大量のデータへの書き込み / 読み出し (I/O) の速度です。特にハードディスクは、どんなに最新の高性能のものでも、メモリと比較すると $10^{-5} \sim 10^{-6}$ の速度になるため、データ I/O の遅延 (レイテンシー) がボトルネックとなり、情報システム全体のスループットが上がりません。

膨大なデータを効率よく活用するには、コンピュータの持つポテンシャルを最大限に引き出すために、I/O のレイテンシーを極力最小化するためのハードウェア構成はもちろん、分散ファイルシステム、分散処理フレームワークなどのミドルウェアも一体となったシステム構築技術が不可欠です。また大規模な計算機基盤を少人数・少コストで運用するための管理技術も非常に重要です (図 3)。

● 今後の展望

今後ますます重要性が増していくアジアに関する情報を 40 億ページ規模で集積化し、当研究所内外の研究開発及び成果の社会還元役に

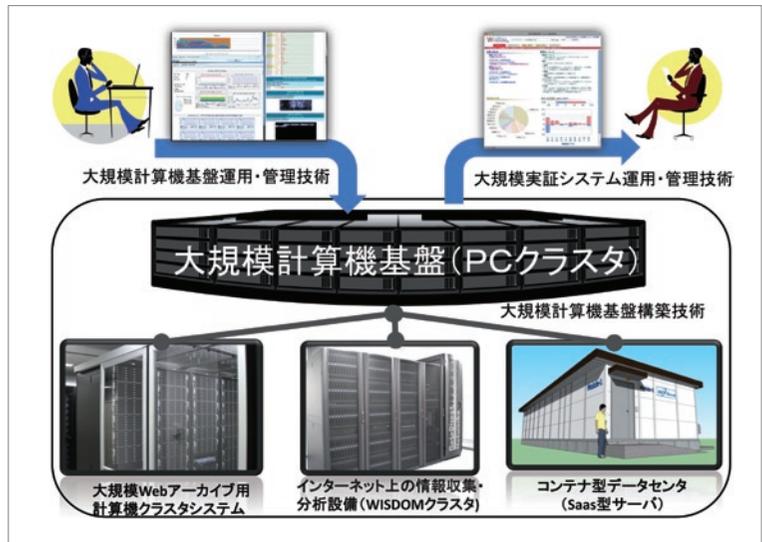


図3 大規模計算機基盤構築・管理技術

立つ情報のハブの実現を目指します。また、これらの実証的研究開発を通じて、ビッグデータ時代の新しいコンピューティング分野を開拓し、ユニバーサルコミュニケーション及び新世代ネットワークの実現に貢献していきたいと考えています。

用語解説

*1 ダボス会議

毎年1月末にスイスのダボスで開催される「世界経済フォーラム」の年次総会。世界中の知識人、経済・企業のトップ、政治家、学者、ジャーナリスト等が一堂に会し、世界が直面する重大な問題について議論する。

*2 コーパス

日本語や英語などの自然言語の文書を大量に集めた言語データのこと。

*3 言語資源

自然言語処理を研究する際に利用する辞書などの資源のこと。

*4 スケールアウト

サーバの数を増やすことで、サーバ群全体の処理能力を向上させること。

*5 インメモリデータベース

データストレージを主にメインメモリ上で行うデータベース管理システムのこと。

*6 コモディティ化

商品がメーカー、機能、品質等において差や違いがはっきりしなくなること。

人の視覚限界に迫る映像技術

—大容量映像データの伝送を可能とする映像伝送技術—

荒川 佳樹 (あらかわ よしき)

ユニバーサルコミュニケーション研究所
企画室 専門推進員

1980年早稲田大学大学院理工学研究科機械工学修了。
同年松下電器産業(株)(現パナソニック(株))入社。
1990年郵政省通信総合研究所(現NICT)入所。幾何・
画像・映像情報の研究に従事。工学博士。趣味は森
林浴とサボテン(霸王樹)。現在、「第三の眼」に興味を
持っています。

「21世紀の通信は『分身通信』(身体
性拡張 / 3次元遠隔操作通信)です。
その実現の第一歩として、超高精細
3次元映像技術とその伝送技術を
研究開発しています。」





図1 4K超高精細映像プロジェクタ(左)と4Kカメラ(右)(どちらも世界1号機)

● 人工知能と人工視覚

21世紀における人類の夢の1つは「人工知能」です。その中核となるのが、「人工視覚」の実現です。そして、この人工視覚を実現する第一歩として、「人の視覚限界に迫る超高精細3次元映像(画像)技術」を研究開発し完成することが、まず重要であると考えています。

● 4K 超高精細映像技術

1997年から、現行のHDTV(ハイビジョン)を超える超高精細映像技術とその伝送技術の研究開発に取り組んできました。NICTと日本ビクター(株)(現(株)JVCケンウッド、以下JVCと呼ぶ)は共同研究を行い、HDTVの4倍の解像度である800万画素(水平3,840×垂直2,048画素)を実現した4K超高精細映像プロジェクタ(2001年、図1左)および4K超高精細映像カメラ(2002年、図1右)を、いずれも世界に先駆けて世界1号機として完成しました。現行のハイビジョン映像は、水平1,920×垂直1,080画素です。このハイビジョン映像の4倍(4画面分)である3,840×

2,048または2,160画素の解像度を持つ映像を、水平解像度が $3,840 \div 4,000 = 4K$ 画素であることから、4K2Kまたは4K映像と呼んでいます。

● 分身通信と4K 超高精細ロボットビジョン

また、ネットワークを介して分身を実現する分身通信(身体性拡張通信、3次元遠隔操作通信)に関する研究開発を行ってきました。図2に示すように、人の手が持つ機能に近い触覚付き5本指ハンド(両手)を開発し、「分身ロボット」のプロトタイプを2003年に完成しました。

一方、JVCは、4Kカメラを当初(図1右)と比べて、体積比および重量比で約1/20に小型化かつ軽量化することに成功しました。図2上部に示すように、2005年に、この小型4Kカメラを、分身ロボットの頭部に、ロボットの眼として搭載しました。人の視力に一段と迫るロボットビジョンを実現しました。図3に示すように、この4Kロボットビジョンが撮像する超高精細映像を用いて、分身ロボットを遠隔から高臨場遠隔操作できるようになりました。

● マルチチャンネル映像伝送システム

現在、並列 PC で構成されるマルチチャンネル映像伝送システム(オールソフトウェアコーデック)を研究開発しています。この伝送システムは、図 4 に示すように、多数の HD 映像(多チャンネル映像)を同時 / 同期伝送することができます。さらに、このシステムでは、超マルチチャンネル映像同期伝送を実現していますので、例えば、200 視点を有する超多視点 3D 映像(メガネなし裸眼 3D 映像)を同期して伝送することも可能です。

最近の成果として、伝送ソフトウェアを PC マルチコアテクノロジーに最適化し、PC1台(1対)で、4K 超高精細映像をソフトウェアのみで伝送することを可能にしました。これにより、超高精細映像の伝送が手軽に行えるようになりました。一般家庭に 4K 映像が普及するのにもそう遠くないと考えています。

● 4K3D 超高精細 3 次元映像技術とその伝送

2010 年に、図 4 右上に示すように、NICT と JVC

は共同で、2 台の小型 4K カメラを用いて、4K3D 超高精細 3 次元映像カメラを開発しました。カメラを極薄型化することにより、人の眼の間隔 65mm にかなり近いカメラ間隔 70mm を実現しました。これにより、眼に自然な 3D 映像を撮影することが可能になりました。さらに一段と、人の視覚に近づくことができました。

2010 年 7 月 6 日(火)には、図 4 に示すように、NICT 鹿島宇宙技術センター(茨城県)と NICT ユニバーサルコミュニケーション研究所(京都府)を JGN2plus で接続し、マルチチャンネル映像伝送システム 8 チャンネルを用いて、4K3D のライブ映像を世界で初めて伝送上映することに成功しました。

さらに、2010 年 11 月 2 日(火)には、このマルチチャンネル映像伝送システムと超高速インターネット衛星「きずな」(WINDS、使用帯域 400Mbps)を用いて、4K3D 映像のライブ伝送にも成功しました。図 5 に示すように、大極殿(奈良平城遷都 1300 年祭会場)の 4K3D ライブ映像を、WINDS 車載局 → WINDS 衛星 → NICT 鹿島宇宙技術センター地上局 → JGN2plus → けいはんなプラザの伝送経路で、世界で初めて衛星通信することに成功しました。



図2 分身ロボット



図3 4Kロボットビジョンの撮像映像 (3D操作グローブを用いて遠隔操作)



図4 JGNを用いた4K3D映像ライブ伝送実験 (2010/7/6)

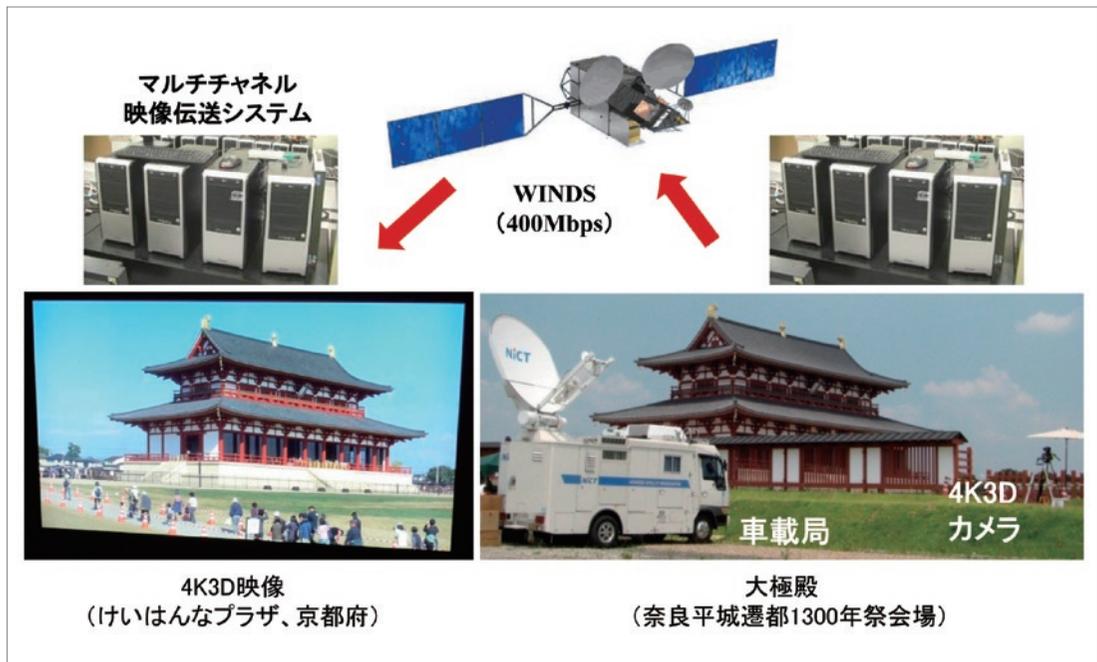


図5 WINDS衛星を用いた4K3D映像ライブ伝送実験 (2010/11/2)



ユニバーサルコミュニケーション研究所 (けいはんな)

情報通信の
未来をつくる
研究者たち

第Ⅲ章

未来ICT基盤技術

大岩和弘
竇迫 巖
武岡正裕
佐々木雅英
大友 明
王 鎮
成瀬 康
今水 寛
平林美樹
岩本政明



量子・超高周波・ナノ・バイオ研究による 先端技術確立を目指して



大岩 和弘 (おおいわ かずひろ)

未来 ICT 研究所
研究所長

甲子園を目指した高校時代の野球を引きずりつづけ「メタボの冷や水」ならぬ草野球に興じる。最近はバットではボールが打てなくなり、面積の広いラケットを頻繁に使うようになった。主戦場も球場からコートに移行中。

「未来 ICT 基盤技術の研究開発は、将来の情報通信技術の基礎となる新概念の創出と新たな道筋を開拓するものです。現行技術の延長ではない革新的機能や原理応用によって ICT の性能と機能の飛躍的向上を目指します。」

はじめに

クリックひとつで地球の反対側の情報に一瞬にしてアクセス、クラウドコンピューティングで大量データをいつでもどこでも容易に操作するなど ICT の技術革新によって私たちの生活は大変便利で豊かになりました。社会活動が情報通信ネットワークへ依存する度合は高まるばかりです。2010 年に新たに生まれたデジタル情報は 1,200 エクサバイトを超え、新規のデータ量は 2 年ごとに 4 倍に増えているといわれています。このため、情報通信機器の消費電力の大幅増加やセキュリティの脆弱性、ネットワーク制御の複雑化等の課

題が今後生じることが予想されています。コミュニケーション技術の観点からの課題は、ユーザにとって意味のある情報と単なるデータとが区別されずに情報提示が行われていることが挙げられます。技術開発が進んでいるヒューマン・マシン・インターフェースにおいても、利用者の状況によっては一層使いづらい場合もあるかもしれません。

明日の未来のために

このような情報通信技術の課題の解決を目指した研究開発として、NICT では 2020 年頃の実現を目指した新世代ネットワーク基盤技術やユニ

未来ICT研究所の研究領域

先端ICT分野における探索的研究から実用化研究開発までの融合

- ・ 先端融合領域の国際的研究拠点として、
- ・ 脳情報通信や細胞・分子センシングなどの未来のコミュニケーション技術の先導的研究開発
- ・ ネットワーク技術のブレークスルーを創出する高性能・高機能デバイスとシステムの研究開発

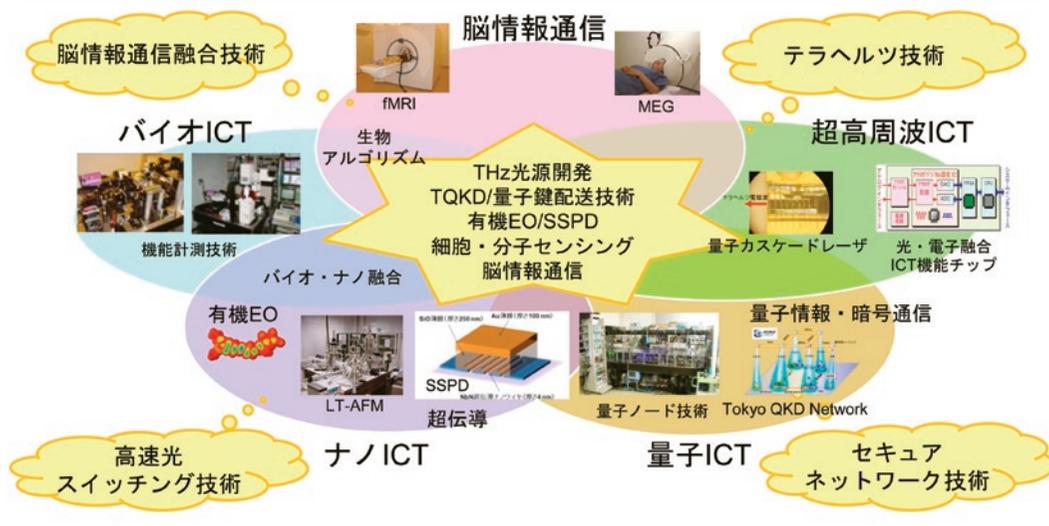


図1 未来ICT研究所の研究領域

バーサルコミュニケーション基盤技術の研究開発に取り組んでいます。この新たな情報通信技術でさえも、飽くことのない人間の知識欲や好奇心による情報量の増大に将来窮する場面が出てくることでしょう。2020年以降に顕在化するであろう課題を見据えて、未来ICT基盤技術として、ICTの能力、安全性、利便性を大きく発展させていくことと、新たなICTの開発を着実に今から進めていくことが、私たち未来ICT研究所に求められています。

未来ICT研究所

未来ICT研究所では、5つの研究室(超高周波ICT、量子ICT、ナノICT、バイオICT、脳情報通信)を結集、これまでに培ってきた競争優位の研究開発力を活かして情報通信技術のブレークスルーにつながる技術シーズを創出し、芽吹かせ、社会展開可能な苗木まで一貫して育てることができると研究体制を構築しました。

超高周波ICT研究室

超高周波ICT研究室では、光と電磁波の境界領域に位置するテラヘルツ帯の電磁波に関する研究開発を進めています。様々な分野での応用が期待されているテラヘルツ帯デバイスの研究開発に私たちはいち早く取り組み、基盤技術を確立してきました。100Gbpsにも及ぶ高速・大容量通信を可能にするテラヘルツ帯の電磁波を使って数十Gbps帯域幅の無線通信技術を確立するアクセス系の研究開発を進めています。波長の短さを活かすことで、送受信のアンテナサイズを小さくすることができます。装置の小型化・軽量化のニーズに対応できるのです。これに加えて、NICTで開発したテラヘルツ帯デバイス作製技術を中心に、超高周波デバイスの開発環境を整備しています。ここでは、テラヘルツ分光やイメージングなど全てを1ヶ所で試すことができる世界で唯一の開発環境を提供しています。減衰

明日の未来のために

未来ICT基盤技術

安心・安全で ユーザーに優しく 地球に優しい情報通信技術へ

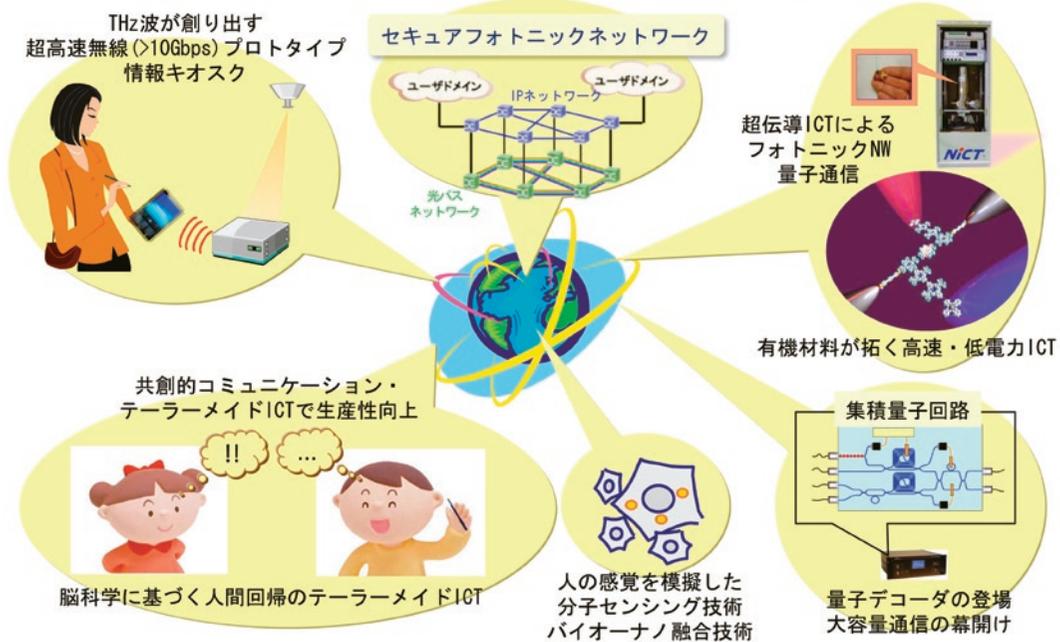


図2 未来ICT基盤技術が創り出す将来技術

が早いテラヘルツ帯の電磁波の研究開発には、あらゆる素子を1つのパッケージの中に作り込むことが必要です。ユーザがすぐに利用できる研究開発施設を整備することによって、企業・大学研究室でのテラヘルツ研究開発を支援し、この技術の実社会への展開を後押しします。

量子ICT研究室

量子ICT研究室は量子力学効果を応用して情報通信における絶対安全性、あるいは究極の大容量化を実現することを目指した量子暗号技術と量子ノード技術の研究開発を推進しています。量子暗号技術は量子力学の原理によって、伝送途中の盗聴を完全に検知するシステムです。都内に敷設されたネットワークの上に量子暗号の鍵配送ネットワーク試験システム、

東京 QKD ネットワークが稼働しています。この東京 QKD を使って、約 45km 離れた拠点間での動画伝送の完全秘匿化に成功しています。この東京 QKD ネットワークを更に改良することで、実用に耐え得る信頼性の確保と低コスト化、さらに現代暗号技術との相補的組み合わせによって、ニーズとコストに応じたセキュリティシステムの構築を目指しています。量子ノード技術では、これまでの伝送容量限界を超える量子の復号原理を検証し、実証してきました。この技術をチップの上に小型化して安定動作させることを目指した研究開発を進めています。

ナノICT研究室

ナノICT研究室では、既存デバイスでの実現が難しい、高速化と低消費電力化を両立する技

術の確立として、有機材料を用いた ICT 素子を構築しています。有機材料には、高効率・高速動作、低コストの利点があります。これまでに、電気光(EO)特性の高い有機材料を開発してきました。この材料の性能をさらに向上させ、ポリマーの中に織り込んで配向させる技術を開発することで、現有の材料の2倍以上のEO効果を持つ有機材料を作り上げ、高速光変調器の実現を目指しています。

ナノ ICT 研究のもう1つの柱は超伝導技術です。私たちは20年の長い時間をかけて、窒化ニオブの薄膜形成技術を確認し、高周波特性に優れた超伝導技術を生みだしました。量子暗号技術のキーデバイスとなっている単一光子検出器(SSPD)がその代表です。光キャビティ*の導入やSSPDのアレイ化によって、検出効率を50%にまで向上させ、カウントレートもGHz帯まで向上させます。高性能化したSSPDは、様々なアプリケーションで使われることになります。

● バイオ ICT・脳情報通信研究室

トップクラスの国際誌に掲載された研究成果の数々は、バイオ ICT 研究室の存在を輝かせています。細胞生物学・生物物理学分野での重要な成果を発信し続けてきた同研究室は、この研究に磨きをかけるとともに、応用に向けた研究開発を始めています。ナノテクノロジーと生体分子操作技術を融合した分子センサー、分子信号処理の研究開発を進めています。

脳情報通信研究室では、将来、ICT分野で重要な位置を占める脳機能研究について、情報通信技術との融合を目指した研究を推進しています。情報の受け手や送り手の主体が人間の脳であることを考えれば、情報をより正確に伝えて人間同士のコミュニケーションを快適かつ効率的に行うためには、脳における情報処理を知ることが大事だとわかります。人間の脳活動の非侵襲

計測法に特徴を持つこの研究室は、機能的磁気共鳴画像法や脳磁場計測装置を駆使してコミュニケーション技術の視点から脳機能研究を進めるユニークな存在です。研究開発が長期にわたる脳機能研究は、情報通信技術分野においては国立研究機関であるNICTが中心となって進めるべき研究です。一方で、研究分野が多岐にわたる脳機能研究を単一研究機関だけで実施することには限界があります。そこで私たちは総合大学との研究協力関係、脳情報分野で高い開発力を持つ企業との連携を進め、平成23年度に脳情報通信融合研究(CiNet)をスタートさせました。

私たちの脳は、わずかな情報を使って予測を瞬時に行います。このようなひらめきに似た予測はどのようなメカニズムで起こっているのでしょうか。データを点として扱わず、多様な結び付けを行うことで予測を行っている脳の情報処理の仕組みは、その解明自身が情報通信技術への大きな貢献となるでしょう。チャレンジングな研究課題ですが、情報科学と脳・神経科学が成熟してきた今こそ、脳科学と情報科学の融合的研究を進める絶好の時期なのです。

● おわりに

前述のとおり、未来 ICT 研究所では、テラヘルツ帯の電磁波を使った情報キオスク技術や量子情報通信、量子暗号技術、さらには高速低消費電力の有機 ICT などを開発していきます。脳を中心としたコミュニケーション技術の大きな変革を狙う研究開発もあり、まさに明日の未来のための研究開発を進めているのです。

用語解説

* 光キャビティ

光を閉じ込める(共振させる)ために、2枚の鏡を向かい合わせて作る構造。2つの鏡の間の距離が光の波長の整数分の1のときに、光を閉じ込めることができる。検出効率の大幅な改善を可能にする構造です。

超高速無線通信や 未踏センシングへ向けて

「超高速無線や非破壊検査・分析の新しい方法を実現するための手段として、テラヘルツ帯電磁波の利用のための研究開発を行っています。」

寶迫 巖 (ほうさこ いわお)

未来 ICT 研究所 副研究所長
超高速無線 ICT 研究室 室長

1988年東京大学教養学部基礎科学科卒。1993年同大学院博士課程了(理博)。同年日本鋼管(株)入社。LSI製造技術の研究に従事。1996年郵政省通信総合研究所(現NICT)採用、テラヘルツ帯の検出器、光学薄膜、レーザ、イメージングシステム、分光システム、超高速無線等の研究に従事。

はじめに

最近、「テラヘルツ波」という言葉を耳にする機会が増えたように思います。この言葉は周波数で言えば100GHz～10THzの電磁波を指す場合が多く、それはちょうど、電波と光の境界領域にある電磁波という意味でもあります。ちなみに電波法には「『電波』とは、三百万メガヘルツ以下の周波数の電磁波をいう。(第二条第一号)」とあります。三百万メガヘルツは3THzを指していますので、法律上の電波と光の区切りもこの周波数領域にあることが分かります。

近年、電子デバイスの微細化に基づく高速化が進み、数百GHz 辺りまでのローノイズアンプが開発されつつあります。半導体レーザでは、テラヘルツ帯で動作可能な量子カスケードレーザ



(THz-QCL: Terahertz-Quantum Cascade Laser) が 2004 年に初めて実現され、その後、動作温度の高温化が進み現在では 200K 程度となっています。また、超短パルスレーザ(中心波長: 780nm、パルス幅 < 100fs^{*1}) で電界が印加されたキャリア寿命が短い半導体(低温成長 GaAs など) を励起し、発生したキャリア(電子) がごく短時間だけ実空間を運動することにより、ピコ秒(10⁻¹²s) 程度のパルス幅を持つモノサイクル電磁波パルスを発生させることができるようになっています。このモノサイクル電磁波パルスには、100GHz 以上数 THz までの範囲の周波数成分が含まれるため、テラヘルツ帯分光分析の道具としてよく用いられています。この方法は THz-TDS(Terahertz Time-Domain Spectroscopy) と呼ばれています。さらにこの電磁波パルスを用いた測距技術が実現されており、光の領域(赤外線~X 線) では可視化できない複合材料(プラスチック、セラミックス、紙、布など) を用いた構造体の内部構造の調査などに用いられ始めています。

● 超高速無線通信への挑戦

超高周波 ICT の研究開発では、自らデバイス開発やシステム開発(THz-TDS システムやその要素技術、カメラ技術等) を行うだけでなく、数十 Gbit/s 以上の超高速無線やテラヘルツ帯でのみ実現可能な「未踏センシング」応用を目指した応用開発や様々な応用が実用化される際に必要となる技術基盤の開発(周波数標準、パワー標準、計測手順の標準化) も行っています。これらの開発は NICT 内の多くの研究室、NICT 委託研究、総務省の電波利用料財源による研究開発との連携によって進められているものです。

「超高周波搬送波による数十ギガビット無線伝送技術の研究開発(電波利用料 R&D、2011-2015、NTT/Fujitsu-Lab/NICT)」では、

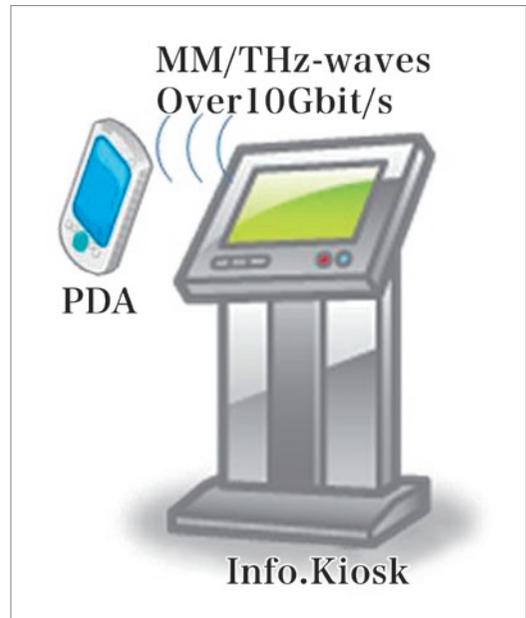


図1 キオスクダウンロードモデルの概念図

300GHz 帯の搬送波を用い、ネットワーク情報端末(Info. Kiosk) から数秒内で Blu-ray Disc に記録されている動画等の大容量データ相当(1 層 25GB) を携帯情報端末(PDA: Personal Digital Assistant) にダウンロードできるようなハードウェアの開発(図 1 参照: キオスクダウンロードモデルの概念図) を目指しています。PDA に装備されるメモリは大容量化が急速に進展しているため、このような超高速無線リンクの実現は今後必須のものとなると予想されます。この他にも様々な超高速無線応用が提案されつつあり、近い将来、人々の生活スタイルを大きく変える要因となるとの予想も出てきています。

光ネットワーク(有線) との連携技術としては、光信号の変調フォーマットを変えることなく無線伝送する技術の開発を実施しています。現状では無線区間は W バンド(75-110GHz) を用いていますが、20Gbit/s 以上伝送ができることが実験的に示されています(p.26-29 参照)。光ネットワークの伝送容量が増加することに対応する

には、より高い周波数のテラヘルツ帯を使うことになると考えています。

● 未踏センシングへの挑戦

テラヘルツ帯の特徴には大容量特性の他に、分子や分子間結合(水素結合、ファンデルワールス結合)に特有な吸収があることや、非極性



図2 液体窒素冷却THz-QCLシステム

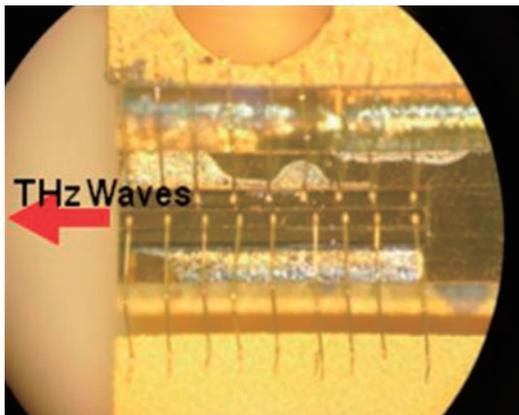


図3 QCLチップ写真

物質(プラスチック、セラミックス、紙、布、煙など)に対してある程度の透過性があることが挙げられます。また波長は 3mm ~ 30 μ m であるため、可視光カメラと同程度のレンズ径(開口)で、数 cm ~ 数 mm 程度の空間分解能を実現できる点も実用上重要な特徴です。そのため、バイオメディカル・薬学応用、複合材料開発での材料評価、様々な対象に対する非破壊検査などの応用が提案されています(p.246-249 参照)。これらの応用開発を支え実用化を促進するため、実時間イメージングの基盤技術としてテラヘルツ帯カメラ及びイメージング時の照明用となる高輝度光源として THz-QCL システム(図 2, 3)をそれぞれ開発して来ています。両者を組み合わせたイメージングシステムを利用して、火災時に発生する煙の中を可視化する技術のデモが東京理科大学火災科学研究センター実験棟を利用して 2011 年 2 月に行われました。この研究では煙中の有害ガスをテラヘルツ波でリモート検出する技術も開発しており、そのデモも同時期に実施しています。これらの技術開発やデモの詳細は YouTube*2 を参照してください。

THz-TDS の高精度化・ロバスト化・可搬化を目指した超短パルス光源の開発も基盤技術の開発として実施しています。NICT で開発したマッハーツェンダー変調器による平坦光コム発生技術を応用し、100fs 級の超短パルス光源を実現しようとするもので、この光源を用いることによって、THz-TDS が高精度化・ロバスト化・可搬化され様々な応用シーンに適用できると考えられています(図 4)。

● おわりに

テラヘルツ帯の開拓では、デバイス技術の完成度が高くないため、それ自身が研究対象です。デバイスの研究開発と同時に無線通信や様々な



図4 可搬型THz-TDSの予想図

センシング応用を開発して行く必要があります、研究遂行上の困難さは高いと言えますが、その分、研究成果が現実の応用に直結しています。今後の発展性は非常に大きく、やり甲斐のある内容だと言えるでしょう。

* 1 フェムト秒(10^{-15} 秒)

* 2 www.youtube.com/user/tokyouiversityTHZ

究極の光通信技術を目指して

—現代光通信の限界を超える量子受信機—

武岡 正裕 (たけおか まさひろ)

未来 ICT 研究所
量子 ICT 研究室 主任研究員

大学院修了後、2001年に入所。以来、量子情報理論、量子光学などの研究に従事。日本物理学会若手奨励賞、文部科学大臣表彰若手科学者賞受賞。2011～2012年に総務省へ出向。趣味はチェロの演奏など。音楽で学んだ感覚を研究に活かしたいと思っています。

「光通信の性能を物理的に許される極限まで高めることを目指し、最新の物理学である量子力学の理論を駆使した『量子情報通信』の研究に取り組んでいます。」



● はじめに

光通信の性能は、0, 1の信号を識別する際のビット誤り率と、その後の誤り訂正によって決まります。ビット誤り率は光源や受信機で生ずる雑音を除去することで小さくできますが、それでも原理的に消せない雑音、「量子雑音」が存在します(図1)。

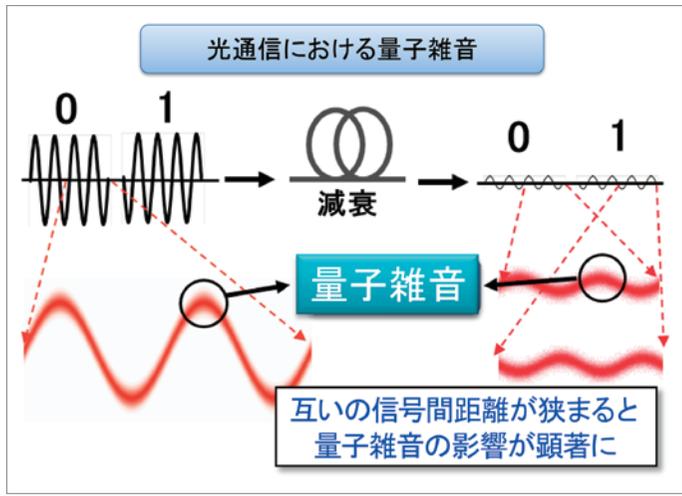


図1 光通信における量子雑音

その影響は、通信路の伝送損失が大きく、また信号密度が高くなればなるほど相対的に顕著に現れてきます。従来の光通信理論では量子雑音は制御不可能とされ、現在実用化されている光通信の最新方式でも、「ショット雑音」と呼ばれ除去できないものとされています。

一方、1960年代にレーザーが発明され、光通信への応用が検討され始めたころ、一部の研究者の間では、光通信と量子力学を融合するための先駆的な理論研究が進められ、量子雑音を適切に制御することで、ショット雑音を超えてビット誤り率を極限まで低減できる可能性が指摘されていました。しかし当時は技術的な問題もあり、こうした研究は今日に至るまで理論研究のレベルにとどまっていました。NICTでは、近年の光検出技術や量子物理学の急速な発展を利用してその実現に向けた研究にいち早く取り組み、世界で初めて光通信のショット雑音限界を破ることに成功しました。

● 光信号の識別と量子雑音

現在最新の光通信方式である「コヒーレント光通信」では、レーザー光の波の大きさ(振幅)やタイミング(位相)を変えて情報を載せ、受信側ではそれらの値を直接測り情報を取り出しています。

量子雑音をただの雑音とみなす現在の光通信理論では、これは最適な受信方法です。このときの受信誤り率の限界が「ショット雑音限界」または「標準量子限界」と呼ばれるもので、特に光信号が微弱な領域では通信性能を大きく制限します。

この限界を超えるには、量子雑音をマイクロレベルで制御して検出する必要があります。原子などマイクロの世界の物理を記述する量子力学によれば、物質の状態は「波動関数」で表現されます。波動関数が何かという説明はさておき、特徴的なのは、その状態を測定するとき、測定の方法(どのようなパラメータを測定するか)によって状態の性質の見え方が大きく異なってくるという点です。また、一度測定を行うとその影響により波動関数の状態は変化してしまいます。このため物質(波動関数)の全像を一度の測定で見ることができず、影絵のように見ている方向(選んだ測定方法)からの断片的な情報だけしか測れないのです。図2左に、光通信の場合の例を示します。光信号の波動関数を干渉計で測定すれば波としての位相の性質が現れ、一方、エネルギーを測れば強度(光子の数)の性質が現れます。そして、それぞれ状態の性質は異なって見えますが、いずれの場合も量子雑音の影響が強く現れ、信号識別にはショット雑音の限界が課されてしまいます。

量子受信機の実現

ではショット雑音限界を超えるためにはどうすればよいのか？それには量子雑音の影響が最も排除されて見える最適方向から、波動関数の測定を行えばよいのです。このように量子力学的に最適化された測定を行う装置が「量子受信機」です(図2中及び右)。この最適な測定は、理論的には数式できれいに書き下せますが、強度や位相の単純な測定ではないため、物理的にどう実現するかは非常に難しい問題です。NICTでは、そのような測定を光の干渉(波の制御)と光子検出(粒の測定)を組み合わせることで近似的に実現できる新しい受信法を提案しました(図3参照)。さらに独立行政法人産業技術総合研究所の最新の光子数識別器(超伝導転移端センサ)を導入した量子受信機を構築し、平均光子0.2個という極めて微弱な信号の送受信において、世界で初めてコヒーレント光通信のショット雑音限界の壁を打ち破ることに成功しました。1960年代の理論的な予想から半世紀後に、ようやくその正しさが実験的に証明されたこととなります。

今後の展望

本成果の意義は、まずは基礎科学の進展に寄与する点です。一方、今の通信事業者は光子レベルの微弱な信号で通信をしているわけではなく、そんな研究が必要なのか疑問に思われるかもしれません。しかし、例えば衛星通信では、通信距離が極端に長く中継増幅も出来ないため、受信側に到達する信号は極端に減衰します。実際、最近の人工衛星-地上間のフィールド試験では、受信器に到達する信号の光子数は100個以下にまで減衰されています。今後、衛星光通信の適用範囲が拡大し、例えば月-地球を結ぶ通信などを行う場合、さらに光子数の少ない信号を受信・識別する必要が生じるでしょう。また地上においても、一部の基幹ネットワークでは通信の大容量化に伴い光ファイバーが溶け出す限界近くまで光信号が詰め込まれており、ビットあたりの光電力(光子数)を極限まで下げることは重要な課題になっています。今回実現した量子受信機に、さらに量子的な誤り訂正の概念を取り入れると、限られたエネルギーの信号で物理的に許される究極の通信容量を達成できることが理論的に知られています。このような装置「量子復号器」の実現には、より本質的

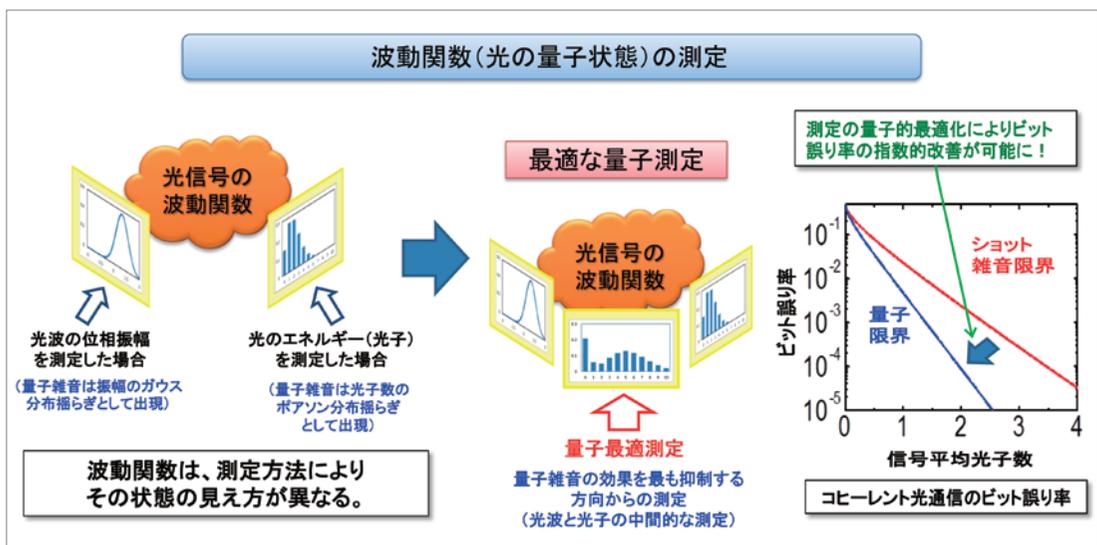


図2 波動関数(光の量子状態)の測定

に光の波動関数を制御しなければならず、それには実験物理やデバイス技術の大きなブレイクスルーが必要です。今後ますます増大する通信の大容量

化・省エネルギー化の要求に 20 年後 30 年後も応えていくため、このような革新的な技術の実現に向けた研究をこれからも続けてまいります(図 4)。

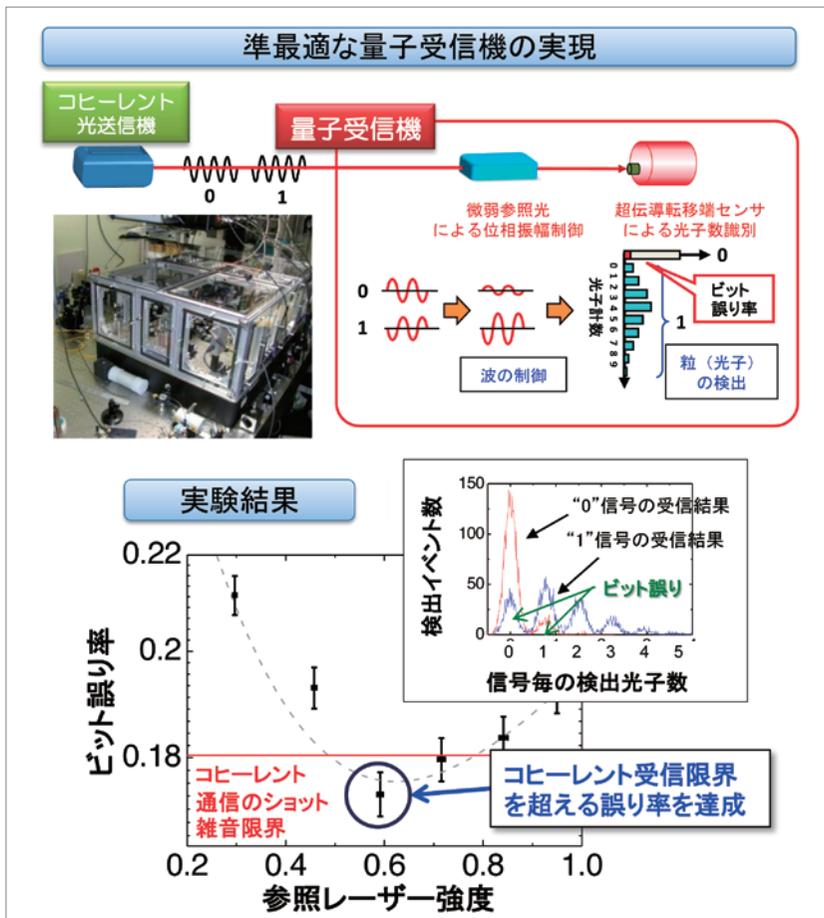


図3 準最適な量子受信機の実現

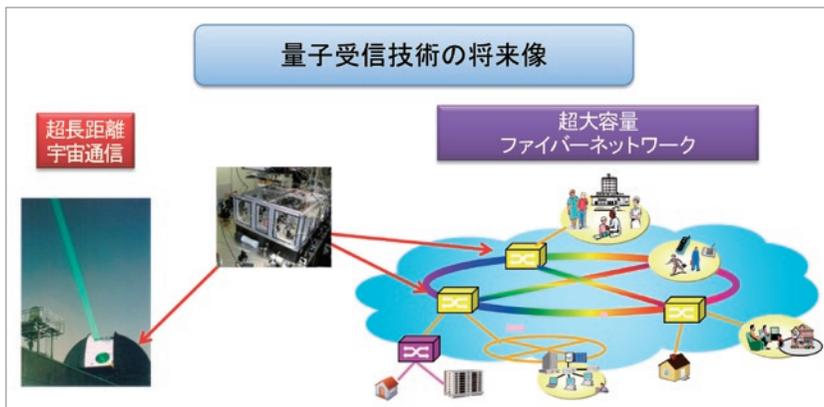


図4 量子受信技術の将来像

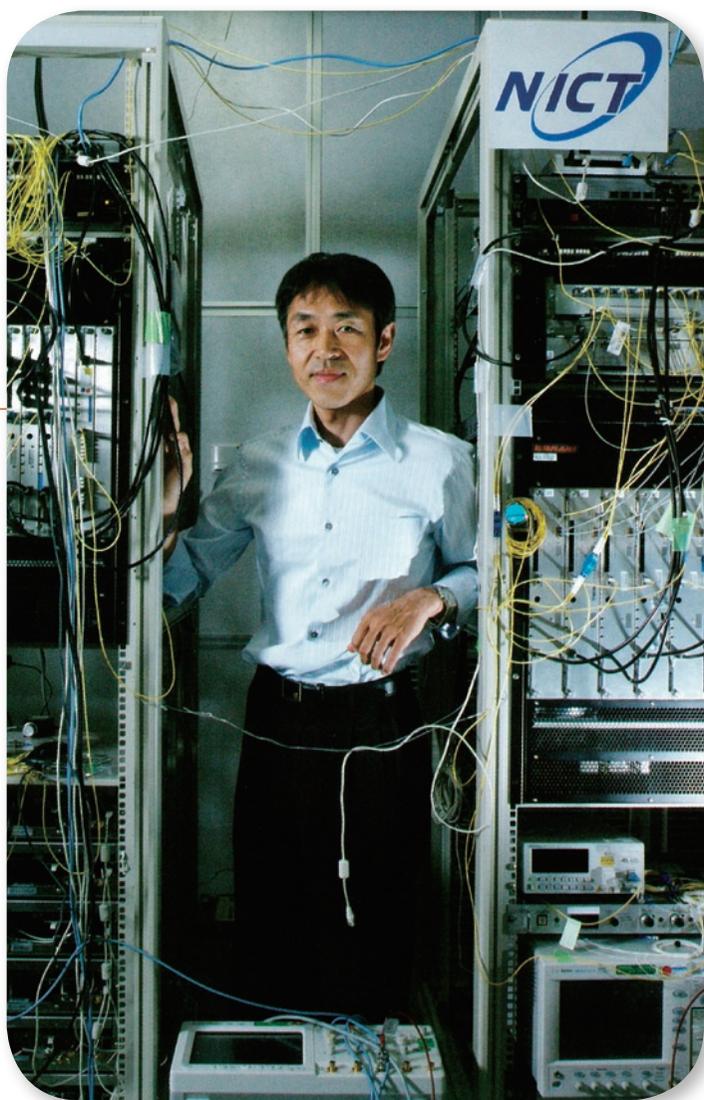
限りなく速く、 そして絶対安全な通信に向けて

佐々木 雅英 (ささき まさひで)

未来 ICT 研究所
量子 ICT 研究室 室長

1992年、大学院博士課程修了後、日本鋼管株式会社(現在のJFEホールディングス)入社。1996年、郵政省通信総合研究所(現NICT)入所。それ以来、量子情報通信の研究開発に従事し、2011年量子ICT研究室室長に。6階にある私たちの研究室では、窓から見える景色の半分以上が空です。遠くまで広がる大きな空を臨みながら、はるか未来を見据えた研究に日々励んでいます。

「量子情報通信は、盗聴不可能な暗号通信(量子暗号)や、低電力・大容量通信(量子通信)を実現する技術として期待されています。長期に亘り情報通信社会を支えるための必須の技術となるでしょう。」



● 量子通信の源流

量子通信の源流は1960年のレーザーの発明まで遡ります。それまで通信は電波を利用して行われていましたが、レーザーに使う光の粒子のエネルギーは、周波数が電波に比べ10万倍あり、温度に換算すると光子1つで1万度くらいに相当します。光が粒子であるという量子効果が顕在化するとともに、電波よりもっと大きな情報量を伝送できるだろうというアイデアがあって、そこから少しずつ量子通信は発展しました。ただ、当時はまだ光ファイバが実用化の段階にはなく、物理学の理論的な学問でしかありませんでした。

しかし、1980年代に入って、量子通信は非常に大きな転換点を迎えます。完全に盗聴を見破る量子暗号が発明されたり、光子だけでなく原子や分子を操る技術が実現されたことで、量子計算などあらゆる情報通信に量子効果を利用するという量子情報技術のアイデアがどんどん生まれるようになりました。量子暗号の発明は偶然で、1982年にIBMの物理学者のチャールズ・ベネットとモンリオール大学の暗号学者ジル・ブラサルがプエルトリコのプールで偶然出会って、何気ない会話から量子暗号が生まれたと言われています。1984年の国際会議で彼らが発表した最初の量子暗号プロトコルは、BB84と名付けられました。しかし、しばらくは大して注目されていませんでした。ところが、1994年に米ベル研究所のピーター・ショアが「量子コンピュータが実現すれば、現在の暗号はすべて破られてしまう」という理論を発表したことで、量子情報技術研究が一気に広がりました。量子暗号は量子コンピュータでも破れない究極の暗号として一気に注目されるようになりました。ちょうど冷戦

が終結した頃で、核による抑止力から、情報通信技術でいかに優位に立つかということが国家の存亡を左右する時代になっていたため、現代暗号を解読する量子コンピュータをどの国よりも先に持とう、あるいはより安全性の高い量子暗号技術を獲得しようという話になり、学術研究というより国家戦略として研究開発が行われるようになりました。

我が国でも、2000年に科学技術振興事業団(現在の(独)科学技術振興機構)が、量子暗号のプロジェクトを採択し、当時の郵政省でも量子暗号や大容量化に向けた量子通信の研究開発をプロジェクト化して、2001年に通信総合研究所(現在のNICT)で量子情報通信の本格的な研究開発が始まりました。

● 量子暗号の暗号化技術

量子暗号は、量子鍵配送とワンタイムパッド(鍵を毎回使い捨てで一度きり使って暗号化する)という2つのステップがあり、量子鍵配送では「0」と「1」のランダムな数列を使った鍵を作り、送受信者以外には絶対傍受されない状況で共有します(図1)。データに鍵を足し算して送信し、受信したデータにもう一度鍵を足せば元のデータに

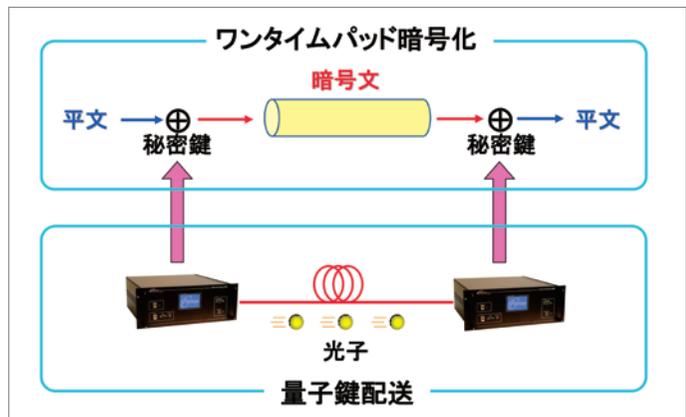


図1 量子暗号における操作の概要図
 量子鍵を共有していなければ、たとえデータを傍受できたとしても元のデータに戻すことはできない。

戻るといふ、極めて単純な方式です。量子暗号では傍受されれば必ず分かり、更に同じ状態での複製が不可能という特性を持っているので、安全な暗号が可能となります。

現在の暗号化技術でも鍵は使われていますが、単純な足し算ではなく素因数分解を使った複雑な仕組みを使っており、めったに解けるものではありませんが、コンピュータの能力が上がれば解けるようになります。1つの暗号化方式が破れるまでの平均寿命は、約13年とされています。量子暗号は、理論上こうした問題はありませぬ。

量子暗号の利用用途

量子暗号は原理的に盗聴できない究極の暗号ですが、性能はまだ低く、敷設ファイバ50kmで秘密鍵の生成速度が数100kbpsでMPEG4の動画データをワンタイムパッド暗号化できるレベルです。1対1でこの程度の距離で厳格に管理し

た秘匿通信をしたいという用途に特化されます。国家機密や個人の生命にかかわる医療情報の安全な通信などが用途として想定されます。欧米ではすでに製品も市販されています。購入しているのは研究機関がほとんどですが、一部は銀行などにも納入されています。

日本では、2001年から日本電気株式会社(NEC)と三菱電機株式会社(三菱電機)、日本電信電話株式会社(NTT)が、また、2011年からは新たに株式会社東芝(東芝)も加わってNICTからの委託や共同研究で量子暗号技術の開発を行っています。特に、NICTが有する光テストベッドJGN-Xを用いて、都市圏敷設ファイバで量子暗号ネットワークを構築し長期運用試験を行っています。図2は2010年末時点でのネットワーク構成を示したものです。図3は実際の量子暗号装置の一部です。2010年10月に公開した実験では、6カ所の拠点を結んで量子暗号ネットワークを構築し、途中で高度な

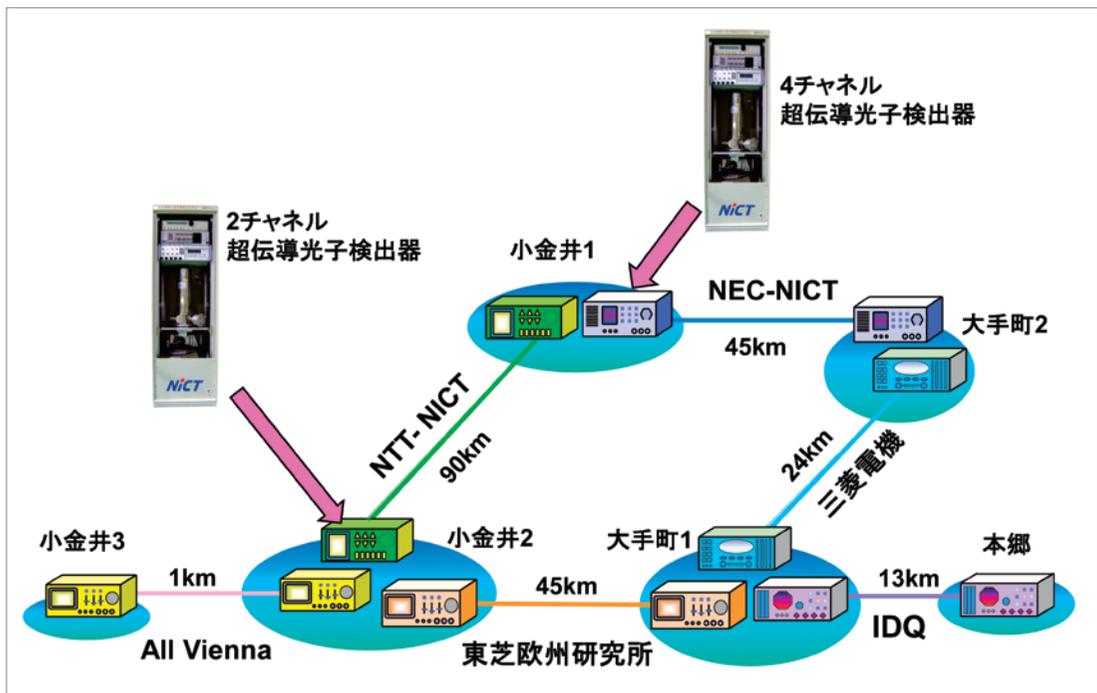


図2 2010年10月に行われた実験。各ノードに配置された量子暗号装置は、既存の光回線で繋がれている。

傍受装置を配置し、「実際に傍受されたことが分かるか」、「傍受されたら別の経路に迂回させられるか」、「その間データは途切れることはないか」、といった試験を行いました。2015年頃には、実際のネットワーク環境で利用する計画で技術のブラッシュアップが進んでいます。ただし、一般のユーザーが量子暗号を利用するようになるためには、伝送距離や伝送速度の課題があるため、まだ10年以上はかかるだろうと思われま

● 大容量化に向けた量子通信の必要性

実利用に近づいた量子暗号に比べ、大容量化に向けた量子通信はまだ基礎研究の段階です。今の光通信は、光パルスの有無で「0」と「1」の信号を表し光をエネルギーの塊としてしか制御していません。しかし、光を波と考えた場合、波と波がぶつかると波が強くなったり弱くなったりと相互に作用し、このような性質まで使うと、今の光通信よりもはるかに多くの情報量を伝えることができるようになります。さらに、光は波であると同時に粒子でもあり、光子としての性質を制御することで、与えられた送信エネルギーを最も効率よく使い、今よりも遙かに多くの情報を伝送する量子通信が可能になります。実現には受信側で光子を制御し、光子1個1個から最大の情報を取り出せる量子受信器の開発が必要です。まだ実験室での原理実証の段階であり、今後多くの未踏技術の開発が必要ですが、実現の暁には通信のほか計測技術にも革命をもたらすと期待されています。

現在、誰もが使っている携帯電話も、元々の理論は1948年にクロード・シャノンが発表した、「0」と「1」で画像や音声などの情報を送るための「情報理論」が最初で、当時はどうやって実現すればいいのかが全く分からない状態でありました。シャノンが予言した通信性能に到達したの

は、最近のことです。現実が理論に追いつくためには、約半世紀ほどかかったことになります。量子通信が実際の我々の生活に使われ世の中を変えていくのにも半世紀はかかるでしょう。半世紀後の社会はおそらく現在想像もできないような新機能を自在に使いこなしているかも知れません。その夢を1つひとつ見つけ出していこうと思ひ、今日も産学官連携で研究開発に取り組んでいます。



図3 量子暗号ネットワーク監視装置
一般に普及するためには、小型化する必要がある。

超高速光通信への扉を開く、 高機能フォトリソグラフィ

—光変調・光スイッチをさらに高速で低消費電力に—

「有機電気光学ポリマーは、情報通信の超高速化と省電力を実現する材料として期待されています。超高速光変調器や光スイッチなどの実現に向けた取り組みを紹介します。」

大友 明 (おおとも あきら)

未来 ICT 研究所
ナノ ICT 研究室 室長

夜空に天の川が流れる田舎で育ち、高校までサッカーで鍛えた体力には自信あり。でも今では愛犬との散歩が唯一の運動で衰えるばかり。日本代表の試合は深夜でも熱いエールを送り、近所迷惑と妻に叱られること度々。大学から自動車に興味を持ち 86 でラリーに興じる。現在の愛車は A4 クワトロ。

はじめに

いつでもどこでも誰とでもコミュニケーションを可能にした情報通信技術(ICT)は、今や私たちの暮らしにとって不可欠な社会基盤の1つになっています。情報通信ネットワークの発達の原動力となったのが、光通信技術の高速化と大容量化です。近年の通信量の増加傾向は、今後さらに加速すると予測されており、光通信技術のさらなる高速化と大容量化が求められています。しかし、情報通信システムが消費する電力は、既に無視できない存在となっており、消費電力の削減も同時に行うことが必須となっています。また、膨張し続け制御不能になりつつあるネットワークを根本から見直す動きが、NICTの推進する「新世代ネットワーク」を始めとして世界中で活発化しています。



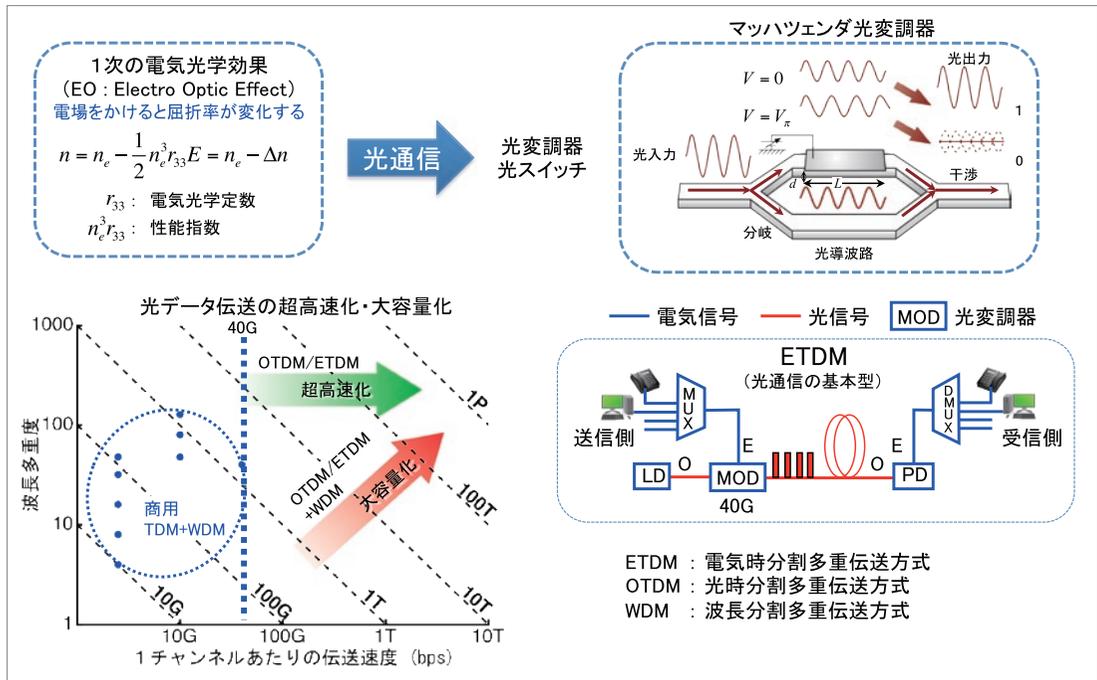


図1 電気光学変調器とフォトニックネットワークの高速化

そのような新しいシステムを支えるハードウェアにおいても低消費電力化は不可欠の課題です。しかし、既存技術の効率化による消費電力削減だけでは今後の通信量増大に対応するには限界があり、大幅な低消費電力化に導く革新的なデバイスが求められています。このような状況を背景に NICT では、有機材料の優れた光・電子機能を光制御デバイスに応用し、通信機器の高速化と同時に低消費電力化を図ることを目指した研究を行っています。

● 有機材料が光通信をさらなる高速化に導く

光通信ではまず電気信号を光信号に変換するところから始まり、これには電気光学(Electro-Optic: EO)効果を用いた光変調器が使われています(図1)。この光変調の速度が光通信の速度を左右することから、変調速度の高速化が進められてきました。今日の商用システムでは、変調速度は1チャンネルあたり40Gbpsにまで達しています。現在、光変調器に用いられている

材料は無機誘電体結晶であるニオブ酸リチウム(LiNbO₃: LN)です。LNは結晶成長技術とデバイス加工技術の向上により、今日までフォトニックネットワークの高速化を支えてきましたが、無機誘電体結晶固有の限界からこれ以上の高速化は望めない状況になっています。

EO効果は、電場をかけると屈折率が変化する効果で、液晶モニターからパルスレーザーまでオプトエレクトロニクスの発展を担ってきた物理現象です。光変調器では、電場による屈折率の変化を光の位相や強度の変化として光信号に変換します。代表的な光変調器の構造は図1に示すマツハツェンダ*1型光変調器です。入力光を分岐した後に屈折率の差によって相対的に位相を変化させ、再び交えることで干渉により出力光の強度を変化させます。材料の電気光学効果が大きい程、低い電圧で駆動することが可能になります。一口にEO効果と言っても、メカニズムは材料の種類によって異なり効果の大きさや応答速度が異なります(図2)。液晶は、分子の回転に起因する効果

で非常に大きな屈折率変化を示しますが、応答速度は遅くミリ秒程度です。LNに代表される無機誘電体結晶は、イオンの変位に起因する効果でEO効果は小さいですが高速変調が可能です。しかし、GHzを超えるマイクロ波領域では屈折率が大きいために光パルスとの速度差が生じ、動作速度は10GHz程度が限界とされてきました。それでも最新のデバイス技術では、導波路構造の工夫により40GHz程度まで高められています。LN変調器の高速化は既に限界に達しています。有機色素分子は、 π 電子^{*2} 応答による電子分極に起因する効果で、最も高速でかつ比較的大きなEO効果が期待できます。近年の通信容量のさらなる拡大の要求や、情報処理装置の高速化におけるチップ内光配線が必須の課題となってきたことに伴い、小型で低電力駆動の超高速光変調器が求められるようになり、有機EO材料の研究開発が活性化してきています。NICTでも屈折率変化がLNの2倍を超える材料の開発に成功しています。

EO色素分子の基本構造は、図3に示すように、電子供与基(ドナー)と電子受容基(アクセプター)を π 共役でリンクした内部分極構造です。内部分極が大きい分子は高いEO効果を示すことから、EO色素分子の開発では、ドナー/ π 共役/アクセプターの部位ごとに優れた特性を持つ構造を見出す努力が成されてきました。これまで、 π 共役とアクセプター構造については、大きなEO効果をもたらす構造が

見出されていますが、ドナー構造については、30年近く続くEO分子研究の間、大きな進展は見られていませんでした。NICTでは、ある構造をドナー構造に加えることで、EO効果を増強させる方法を見出しました。シンプルな方法です。ほとんどの分子に適用可能であり、特に基になる分子のEO効果が大きい程、増強効果が大きくなる傾向にあります。有機EO分子を用いて光変調器を作製するには、ポリマー中にEO色素分子を分散、配向^{*3}して導波路構造を作製します。ポリマー中の有機EO分子濃度と配向度が高い程EO効果が高くなりますので、分子の配向度を高めることも研究課題の1つとして取り組んでいます。今後は、独自に開発した高性能のEOポリマーを用いて変調器構造を作製し、超高速の光変調技術の研究を進めていきます。

● 有機EOポリマーの耐久性は？

私たちの身近にある有機物は日光に当たると色が褪せたりすることから、一般的に有機色素は光に弱いとされています。有機色素の退色のメカニズムは主に酸化によるものです。空気中の酸素分子は安定でありそのままでは有機物との反応性は低く、いわゆる活性酸素種の状態になることで強い酸化作用を生じます。光励起で生成される活性酸素種で主なものは、オゾンと一重項酸素^{*4}です。一方、酸素分子がオゾンや一重項酸素になるには紫外線や可視光

の様に約1eVよりも高いエネルギーの(1.27 μ mよりも波長の短い)光が必要です。光通信には波長1.3 μ m帯から1.55 μ m帯の赤外光を用いていますので、この光でオゾンや一重項酸素を直接発生することはありません。しかし、光強度が高くなると2光子吸収により一重項酸素を発生する可能性がでてきます。通常の光変調

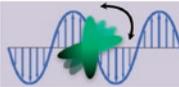
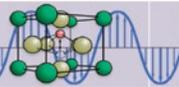
材料	液晶	無機誘電体結晶	有機色素分子
			
共鳴	配向分極 (双極子・分子回転)	イオン分極 (格子振動)	電子分極 (電子遷移)
電気光学効果 r (pm/V)	非常に大きい > 10,000	小さい 32	大きい > 150
屈折率変化 Δn	$10^{-2} - 10^{-3}$	$10^{-4} - 10^{-5}$	$10^{-3} - 10^{-4}$
応答速度 (sec)	遅い $10^{-3} - 10^{-6}$	速い 10^{-10}	非常に速い 10^{-14}
応用	空間位相変調器 (プロジェクター、モニター)	高速光変調器 ~40Gbps	超高速光変調器・スイッチ > 100Gbps

図2 代表的な電気光学材料の比較

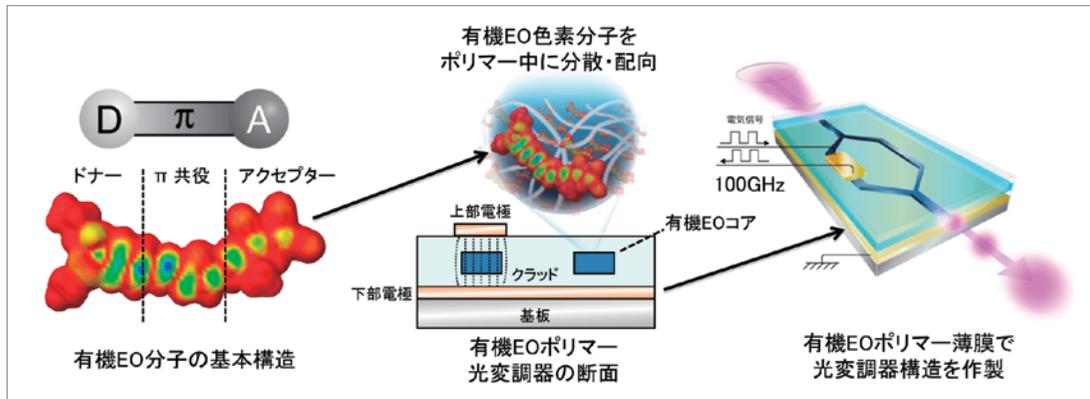


図3 有機EOポリマー光変調器

に用いられる光強度は問題がないレベルですが、今後導入が進む多値変調技術ではレーザー光が高出力化していくことから、酸素の影響を除外する研究も必要になってきます。

熱安定性については、EO色素の分解温度は200℃以上であり、デバイス作製プロセスにおいての問題はありません。しかし、EOポリマーはガラス転移温度以上になると配向が緩和しEO効果を失活^{*5}してしまいます。開発したEOポリマーのガラス転移温度は現在のところ135℃程度ですので、通常の使用環境では問題にはならないものの、大規模サーバー等の発熱環境下で長期の信頼性を確保するために、有機EOポリマーの熱安定性向上にも取り組んでいます。

さらに未来へ向けて

有機材料のEO効果は、理論的にはさらに大きな値が得られると見積もられており、NICTでは有機EO材料の開発を今後も続けていきます。有機ポリマー材料は、フレキシブルで他のデバイスと融合しやすいことも特徴の1つです。NICTでは、精度の高いシリコン加工技術を用いたフォトニックナノ構造と組み合わせることにより、光制御デバイスのさらなる低消費電力化やマイクロンサイズまでの超小型化、光バッファなどのオンチップ化に及びまで、未来のフォトニックネットワークを支える

キーデバイスを創る研究開発も行っています。

有機物は軽く、宇宙線の影響も受け難い材料ですので、衛星や惑星探査機等への搭載にも適しています。加えて有機物は、炭素、水素、窒素、酸素、硫黄などの汎用元素を用いて様々な機能をつくりあげることが出来る安価な材料ですので、資源確保が容易なレアメタルフリーの機能材料として、広範な応用展開が期待できると考えています。

用語解説

*1 マツハツェンダ

L.Mach と L.Zehnder によって 1891 年にほぼ同時に考案された干渉方法で、同一の光源から出た光を 2 つに分けて別々の光路を通した後重ね合わせるシンプルな構成であることから、光導波路での構築が容易です。

*2 π電子

分子の二重結合は結合軸に沿ったσ結合と直交したπ結合とからなり、π結合上の電子をπ電子と呼びます。二重結合と単結合が交互に連なったπ共役構造を持つ分子では、π電子は非局在化しており分子全体に広がっています。

*3 配向

分子の向きをそろえること。ポリマー中の色素はばらばらな方向を向いているため、色素の集合体であるポリマーのEO効果は相殺してしまいます。電場をかけ分子を一方にそろえることにより、ポリマーのEO効果を発現させることができます。

*4 一重項酸素

基底状態の酸素分子は、共有する電子のスピンの向きがそろった三重項状態にあり、一重項酸素は、基底状態より0.98eVエネルギーが高い励起状態の酸素分子で、電子のスピンの向きが反対になっています。一重項酸素は、光励起により直接発生することではなく、光励起された色素の三重項状態を介して生成されます。

*5 失活

ガラス転移温度以上になるとポリマーが柔らかくなり分子が動きやすくなるため、分子がバラバラな方向を向いてしまうことで、ポリマーのEO効果が失われます。

高感度・高速超伝導 ナノワイヤ単一光子検出器

—マルチチャンネルシステム開発と量子情報通信応用—

「超伝導窒化ニオブ(NbN)を用いた高感度・高速ナノワイヤ単一光子検出システムを開発し、通信波長帯において世界最高性能の達成と量子情報通信などの応用へ展開しています。」

王鎮 (ワン チン)

未来 ICT 研究所
主管研究員

学生の頃から巨視的量子現象である超伝導に魅せられ、約 30 年間一筋にやって来ましたが、まだ分からないことが多い。NICT に入所してから始めたテニスはなかなか上達しないけど、部員の少ない未来 ICT 研究所では貴重な戦力となっています。最近、15 年以上疎遠になっていた二胡を再び手に取り、稽古に励んでいます。

● 研究の背景

量子暗号や量子情報通信技術の実現には、高感度、高速かつ低雑音で単一光子を検出する技術の開発が 1 つの鍵となっています。光子検出器としては、光電子倍增管(PMT)、Si や InGaAs/InP などの半導体材料を用いたアバランシェフォトダイオード(APD)がすでに開発され、通信波長帯(波長: 1,550nm)では InGaAs/InP 半導体 APD が主に使用されています。しかし、半導体 APD は材料及び検出原理により検出効率や動作速度などが制限され、量子情報通信技術を実現するために光子検出技術のブレークスルーが必要とされています。そのため、我々は半導体 APD と全く異なる材料と原理で動作する超伝導ナノワイヤ単一光子検出器(SNSPD)の研究開発を行ってきました。



なぜ超伝導？

SNSPD は、巨視的な量子現象である超伝導がもたらした高速な電子・フォノン相互作用と極低温で動作するため、通信波長帯において PMT や半導体 APD の性能をはるかに凌駕するポテンシャルを有しています。また、SSPD の波長感度領域が極めて広く、素子 1 つで Si-APD と InGaAs/InP-APD の感度領域を全てカバーできます。さらに、SNSPD は APD のようなゲート同期動作が不要であるため、実用化の際にシステムの構築も容易とであるなど非常に大きなメリットがあります。表 1 では、各種光子検出器の性能を比較しています。SNSPD は、他の光子検出に比べて暗計数率が極めて低く、トータル性能を表す指標である性能指数が現時点でも既に 100 倍高く、研究開発の進展によりさらに性能向上が期待されています。

マルチチャンネル SNSPD システム開発

SNSPD では、超伝導ナノワイヤにおける超伝導状態から常伝導状態に移行する際に生じた急激な抵抗変化を利用して光子検出を行っています。

その性能を左右するキーテクノロジーとしては、高品質・極薄超伝導薄膜の作製、ナノワイヤ微細加工、入射光子と素子の高効率結合などが挙げられます。また、実用化のために、マルチチャンネル検出システムの開発が必要不可欠です。我々は、基礎研究で蓄積してきた NICT 独自の高品質窒化ニオブ(NbN)超伝導薄膜作製技術とナノ微細加工技術を駆使して、厚さ 5 nm 以下、線幅 80 ~ 100 nm のナノワイヤ単一光子検出素子(図 1)の作製に成功しました。また、光ファイバにより入射した光子を検出素子に効率良く結合させるために、光ファイバと SNSPD 素子の実装技術を開発し、ミクロンオーダーの精度で光ファイバと素子を合わせることを可能にしました(図 2)。さらに、実用化を目指して、無冷媒かつ家庭用 100V 電源で駆動可能な小型可搬式ギフォート・マクマホン(GM)冷凍機を用いたマルチチャンネル SNSPD システムを開発しました(図 3)。開発したマルチチャンネルシステムには、光ファイバを実装した SNSPD パッケージ 6 個を実装しており、同時に 6 チャンネルの光子検出が可能となっています。図 4 は 1,550nm 通信波長帯において測定した 6 チャンネル検出器のシステム検出効率と暗計数率です。全てのチャンネルは暗計数率

表1 通信波長帯光子検出器の性能比較

波長: 1,550nm				
検出器	検出効率 (%)	暗計数率 (c/s)	カウントレート (MHz)	性能指数 $\times 10^3$
 PMT	2	2×10^5	10	1
 InGaAs/InP APD	20	10×10^3	100	2
 SNSPD (NICT)	20	100	100	200

性能指数 = 検出効率 × カウントレート / 暗計数率

100c/s(カウント/秒)において20%を超える高い検出効率を示しています。表2に、システム仕様・性能をまとめています。現時点では、量子検出効率が20%、動作速度が100MHz、暗計数率が100c/sなど世界最高性能を達成しています。

量子情報通信応用

我々は、開発したマルチチャンネルSNSPDシステムを用いて、2007年にけいはんな地区において量子暗号鍵配送(QKD)のフィールド実験を行い、実際の敷設光ファイバで世界最長距離(97km)かつ最高速(10 kbits/s/photon)で量

子暗号鍵配送に成功しました。また、2010年には東京QKDネットワークに2台のSNSPDシステムを導入し、都市圏敷設光ファイバ網で世界初の量子暗号通信によるテレビ会議の実現に貢献しました。

今後の展望

SNSPDによる単一光子検出技術は、将来の量子情報通信技術を支えるコア技術として、実用化に向けた研究開発が始まったばかりです。現在、この技術は半導体APDを超える性能を示しており、素子の改良とシステムの最適化を図ることにより、更なる性能アップが期待できます。

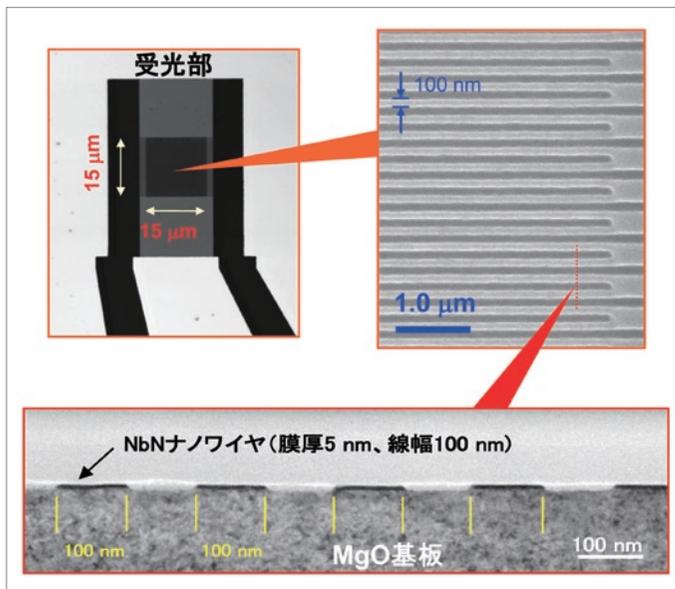


図1 窒化ニオブSNSPD素子とナノワイヤ受光部の電子顕微鏡写真

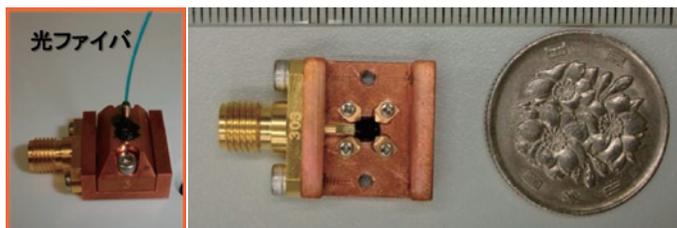


図2 光ファイバを実装したSNSPDパッケージ



図3 マルチチャンネルSNSPDシステム

今後、この技術は、光子検出器として、量子情報通信分野だけではなく、量子光学、宇宙物理学、生体質量分析、新薬開発、低エネルギー粒子検出など様々な分野への応用が可能と考えられることから、その実現に向けて我々はチャレンジを続けていきます。

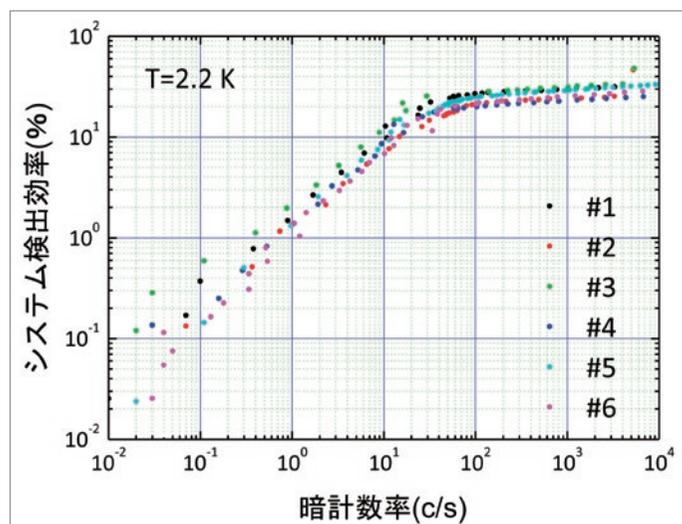


図4 1,550nm波長帯におけるマルチチャンネルSNSPDシステムの検出効率と暗計数率

表2 マルチチャンネルSNSPDシステム仕様・性能

チャンネル数	6
システム検出効率	20%
暗計数率	100 c/s
応答速度	100 MHz
ジッター	100 ps
動作温度	2.5 K
冷凍機消費電力	1.2 kW
サイズ	H175 x W57 x D65 (cm)

脳とICTの融合： 脳情報通信技術の確立に向けて

—真に伝えたい情報を伝える未来のICT技術—

「私たちは、脳から情報を取り出しそれを通信することにより、より自由なコミュニケーションを実現するというあたかもSFのような世界の実現を目指した研究を行っています。」

成瀬 康 (なるせ やすし)

未来ICT研究所

脳情報通信研究室 主任研究員

子供のころからパソコン好きの理系でありながら、歴史や経済にも興味があり、研究の道に進むか金融の道に進むかを悩んだほど。研究者になった今も、読書といえばビジネス書や歴史書が多い。歴史や経済を学ぶ過程で人の心理への興味が生じて脳研究を開始し、今に至る。趣味は職場の人と行うフットサルと飲み会。ビール腹撃退の為にスポーツジムにも通ってます。

はじめに

脳情報通信技術というのは、脳から情報を取り出し、それを通信することにより、言語等にとらわれることなく、より自由な、よりスムーズなコミュニケーションを実現することを目指す未来の情報通信技術です(図1)。例えば、アニメや映画のガンダム、攻殻機動隊やマトリックスなどで描かれているような世界の実現を目指す技術といえます。しかし、脳情報通信技術に関する研究は始まったばかりですので、このような世界の実現はまだまだ先の話ではありますが、目指すイメージはつかんでいただけないかと思います。私たちは、脳情報通信技術の確立を目指して様々な角度から脳についての研究を行っています。



● 脳情報を高精度に抽出する新しい手法

脳情報通信技術の実現のために、まず、はじめに確立するべき技術は、精度良く、容易に脳情報を取り出すことができる技術です。そこで、私たちは、比較的簡単に測ることができる脳波、特にアルファ波に注目し、脳波に適した信号処理手法を開発しました。脳波の信号は複雑であることから、これまでの手法では精度の良い脳情報を抽出することができませんでした。私たちは脳波における実験的研究及び数理モデル的研究の成果から得られた知見をもとに脳波に適した確率モデルを構築し、ベイズの定理を利用して脳情報を抽出するとい統計的手法を構築しました。この手法の概要は図2に示すように、まず、脳波に含まれる雑音成分を軽減しつつアルファ波を抽出し、それを振幅、位相に分解します。脳の状態が変化した場合、振幅や位相の状態が変わるため、その状態変化を検出することで脳の状態変化が起こったタイミングを見つける

というものです。脳の今の状態を検出できるという技術を発展させることでたとえば、与えられた情報を受け手が正しく分かったかどうかをその人の脳活動の状態を調べることで定量化することができると考えられます。現在は、より簡単に脳波が測れる脳波システムの開発も併せて行っており、精度良く、容易に脳情報を取り出すことができる技術を日々、向上させています。

一方、この取り出した脳情報から、その人が何を思ったか、どう感じたか、どう考えているのか、といったその人の脳の状態に関する情報を取り出すためには、脳内の情報処理・情報通信メカニズムを解明する必要があります。脳科学的、工学的、医学的といった多角的なアプローチを利用して、取り出した脳情報から、脳の状態に関する情報を取り出し、脳情報通信技術の実現を目指しています。



図1 脳情報通信技術の一例

● 脳情報通信融合研究のスタート

脳情報通信技術を確立するためには、前述のように、非常に様々な分野と融合する必要があります。現在、NICTでは、脳情報通信技術の確立を目指すために、これまでの脳科学に情報工学等の様々な分野を融合させた、脳情報通信融合研究をスタートさせました。この脳情報通信融合研究には、①ここところのコミュニケーションを脳機能から科学する Heart to Heart Science (HHS)、②脳に学ぶ情報ネットワーク技術を創成する Brain-Function installed Information Network (BFI Network)、③ここところを機械につたえる技術を確認する Brain-Machine Interface (BMI)、④これらを支えるための脳計測技術

を確認する計測基盤技術、の4つの柱があります(図3)。前述した研究内容は、この枠組みにおいては計測基盤技術に含まれるものであり、今後、これを利用することにより、HHS、BFI Network、BMI 研究を加速し、脳情報通信技術の確立を目指したいと考えています。

また、脳情報通信技術ができてしまうと心が読まれてしまいそうで怖いと考えられる方も多くいらっしゃるかと思います。私たちは、何を伝えて何を伝えるべきではないかという倫理・安全面も研究と同時に検討しております。そのような倫理面への取り組みの1つが、NICTの研究者が委員として参加していた総務省における「脳とICTに関する懇談会」の最終取りまとめにまとめられております。

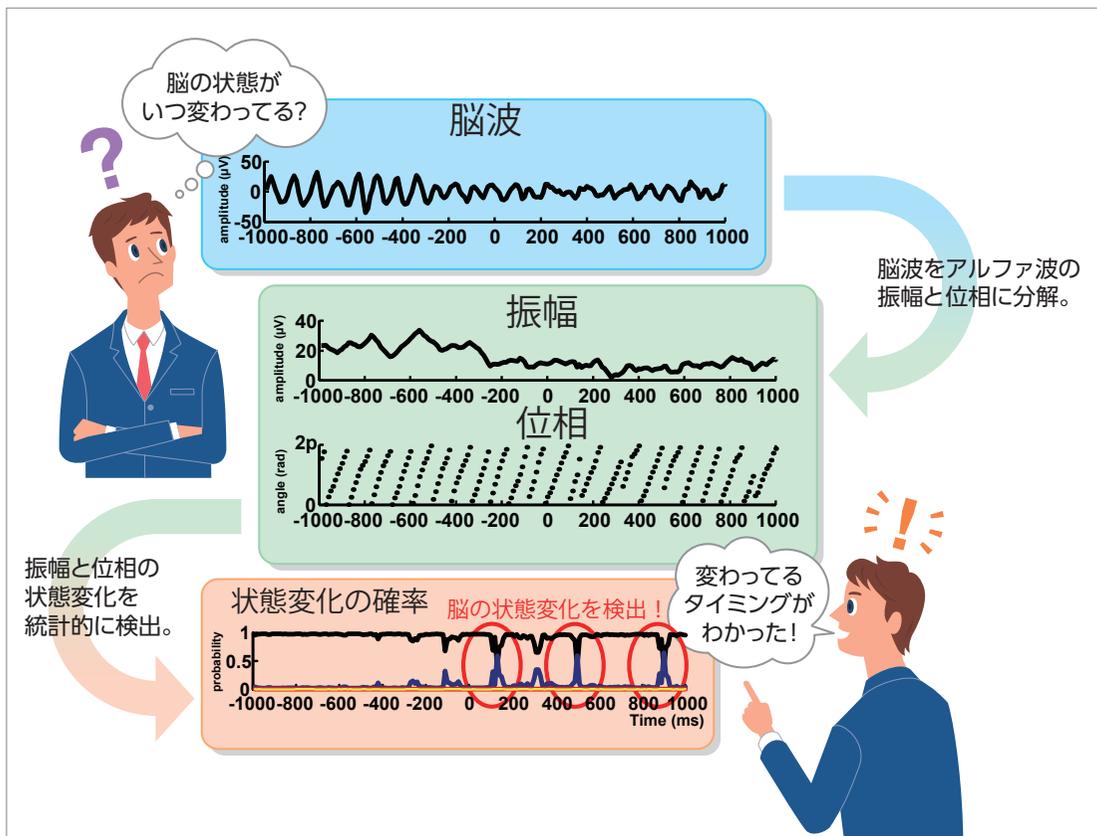


図2 私たちが構築した統計的手法を用いた高精度脳情報抽出法の概要

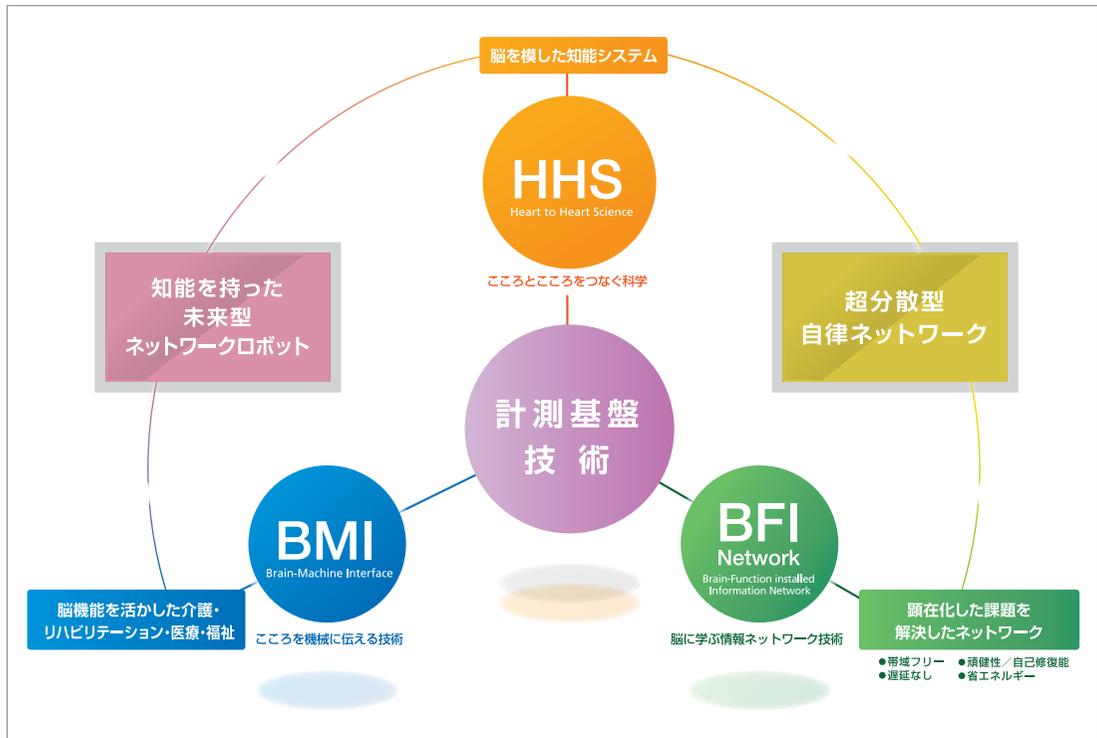


図3 脳情報通信融合研究の概要

● 今後の展望

脳情報通信技術に関する研究は始まったばかりであり、実現にはまだ時間がかかります。しかし、中長期的な視点のもと、脳情報通信融合研究という新しい枠組みを利用して脳情報通信技術の確立を目指します。私たちはこの技術を、まずは、高齢者や体の不自由な方のよりよいコミュニケーション手段として提供し、将来的には、すべての方の生活に役立つものにしていきたいと考えています。

思い通りに操作できる ブレイン・マシン・インターフェイスに 大きく前進

—脳活動から早い運動をなめらかに再現—

「脳の外に置いた磁場センサーで脳活動を計測、手の動きに関する重要な情報を効率的に選び出して、早い運動をそのまま滑らかに再現することに成功しました。」

今水 寛 (いまみず ひろし)

未来 ICT 研究所
脳情報通信研究室 副室長

専門は実験心理学。不可思議なヒトの行動に、合理的な理由を見いだすとき、心の底から面白いと思います。趣味という程ではありませんが、料理を楽しんでいます。毎年クリスマスにはローストチキンを焼きます。段取りと思い切りが重要なのは料理も実験も同じです。鍋の蓋を開けると、解析結果を見るときの高揚感も似ています。料理は9割成功するが、実験は9割失敗します・・・



● 背景

人間の脳活動から運動を再構成する技術は、ブレイン・マシン・インターフェイス(BMI)の基礎技術として注目されています。特に、脳を傷つせずに計測(非侵襲計測)した脳活動信号を利用して再構成することは、BMIが、広く一般に使われるための重要な鍵とされています。私たちと(株)国際電気通信基礎技術研究所(ATR)脳情報解析研究所の佐藤雅昭所長らは、手の速い運動(運動時間約0.4秒)を、非侵襲で計測した脳活動から滑らかに(0.02秒おきに)再構成することに成功しました。本研究は、ユーザーをトレーニングすることなしに、普段、運動を行っているときの自然な脳活動から、手の運動に関係する脳情報を効率的に抽出し、自然で滑らかな運動を高い精度で再構成できることを世界で初めて示しました。この成果は、BMIが医療応用だけでなく、情報通信のための自然で使いやすいインターフェイスとして、広く一般に使われる道を切りひらくと考えられます。

脳活動から運動を再構成する技術は、脳に電極を挿すなどの侵襲的な方法で、主に米国の研究者が成功をおさめましたが、手術やウィルス感染の危険性などから、近年では、非侵襲で計測した脳活動を利用する研究が盛んになってきています。従来の非侵襲的な手法では、脳波でコンピュータカーソルを操作する研究がよく知られていますが、これはコンピュータに読み取りやすい脳波パターンを生じさせるように、ユーザーを長期間訓練する必要がありました。訓練を必要とせずに速い運動を再構成した例はこれま

でありましたが、頭の外に設置したセンサーで計測した信号をそのまま使っていたため、脳のどの部分から発生した信号であるかを正確に特定できず、手の運動に関連する脳活動を効率的に抽出することは難しい状況でした。

● 実験と解析

本研究では、人間が指先をさまざまな方向に素早く動かしているときの脳活動から、指先がどこにあるかを、0.02秒の時間間隔で予測(再構成)しました。私たちは、速い運動に関連する脳活動を計測するために、高い時間解像度で計測可能な脳磁計(MEG: Magnetoencephalography)を利用しました(図1)。MEGは、神経細胞が活動することで生じる微細な磁場の変化を検出する装置です。しかし、MEGは、頭の外に置いたセンサーで磁場を計測するため、受信した信号が脳のどの場所から発生したものであるか、正確に知ることはできません。また、センサーの信号は、さまざま



図1 MEG装置の外観と、これを使った実験風景。矢印は人差し指の先端を示す

な脳の部位から発生した信号が入り混じっている(図 2A)ので、手の運動に関連する脳活動を効率的に選び出すことは難しいのです。そこで、まず、センサー信号を脳表面上の電流信号(皮質電流)に変換する関数(逆フィルター)を推定しました(図 2B)。逆フィルターの計算には、佐藤所長らが開発した「階層変分ベイズ法」を用いました。この方法は、脳の血流の変化を、優れた空間解像度で計測できる機能的磁気共鳴画像(fMRI)のデータも補助的に用い、数ミリメートルの精度で、センサー信号から信号源である皮質電流を計算できます(図 3 オレンジの矢印)。この方法で変換した皮質電流を利用すれば、手の運動に関連する信号を選択的に抽出して、高い精度で運動を再構成することが期待できます。実際、佐藤所長らが開発した「スパース推定法」を用いて、皮質電流の中から重要度の高いものを選び出し、選び出された皮質電流の重み付き総和(図 3 緑の矢印の線形予測モデル)で手先の位置を予測したところ、センサー信号をそのまま使う場合よりも、高い精度で予測することができました。

● 研究の意義

これまでの非侵襲 BMI は、脳活動のパターンから運動の種類を識別したり、数力所の標的の中から、どの標的に手を伸ばすかを当てることなどが主流で、人間の速い動きをそのまま再構成しようとする試みは少ない状況でした。速い動きを滑らかに再構成することで、ユーザーが「自分自身が操作している」という主体感・操作感を増すことができます。遠隔地からロボットアームを制御する場合など、そのような感覚は不可欠です。

● 今後の展望

本研究では、脳活動をオフラインで解析・再構成しましたが、今後はリアルタイムで運動を再構成することに取り組んで行きたいと思います。同様の手法は、イメージしたときや動かす前の脳活動から再構成することにも利用できる可能性があり、意図しただけで自在に操作できるインターフェイスの開発に繋がると期待されます。現代の情報端末は次第に操作が複雑になり、操作方法をマスターできないひとはますます情報が

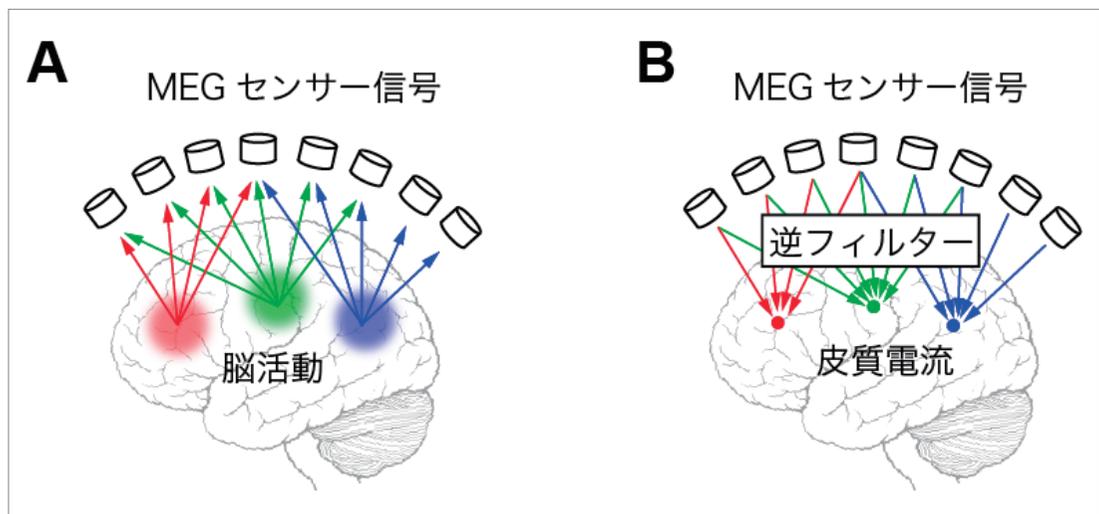


図2 MEGのセンサー信号にはいろいろな部位の脳活動信号が混在 (A)。センサー信号から脳活動を推定する逆フィルター (B)

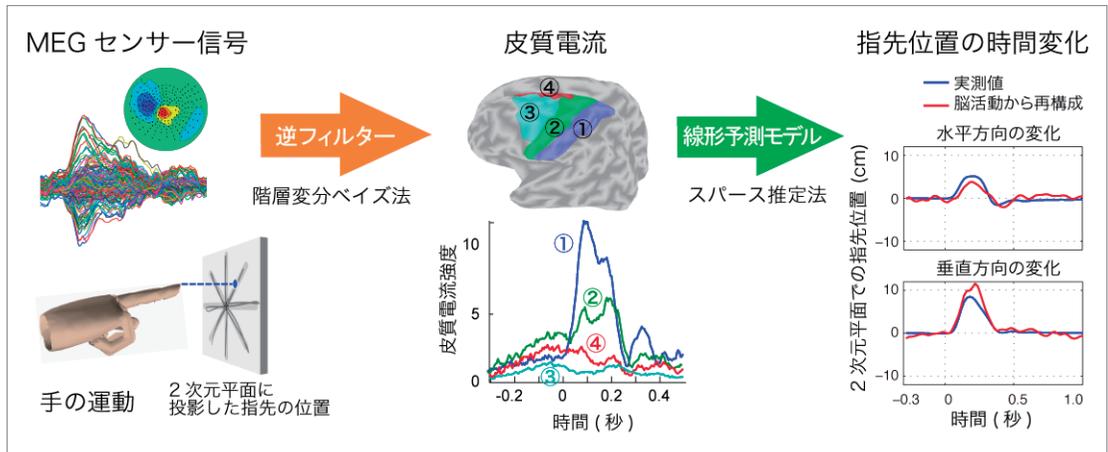


図3 手先の運動を脳活動から再構成する手法の概要

ら遠ざかってしまうという情報格差が問題になっています。意図しただけで自在に操作できるインターフェイスは、そのような問題の解決に役立つと考えられます。

DNAナノ構造体でつくる 分子ロボットを利用した アンビエントセンサーネットワーク

「複雑な生命維持活動を実現するソフトウェア、ハードウェア一体型のインテリジェントな情報素子であるDNAを利用した未来ICT技術の開発を行っています。」

平林 美樹 (ひらばやし みき)

未来ICT研究所
バイオICT研究室 主任研究員

私たちの脳は、DNAが造りだした究極のコンピュータです。その潜在的な能力を最大限に発揮するには、右脳と左脳をバランスよく活性化させることが重要であると考え、右脳への刺激を求めて、最近日本画を始めました。目覚めた脳と旺盛な好奇心を学際領域の研究に活かして、夢はノーベル賞のグランドスラムです。

● 研究の背景

私たちは、「細胞や生体分子システムの優れた機能を利用した情報通信の新概念につながる萌芽的な要素技術の開発研究」の一環として、プログラムに基づいて自律的に環境をコントロールすることができる生体材料で造られたセンサーロボットに関する研究を行っています。

ここでいうロボットとは、人間に代わって与えられた作業をこなす装置または、生物のような形や機能を持つ人工物を指します。私たちが目指すのは、ナノ/マイクロ世界の分子通信物質や環境シグナルをセンシングし、それらの情報に基づいて、微小世界の状態を自律的に管理することができるインテリジェントなDNAナノマシンです。例えば、微小世界の住人である微生物は、



放射性物質のような環境汚染源の除去や、農作物の品質や生産性の向上を可能にする様々な能力をもっていることが知られています。ナノロボットが作るセンサーネットワークを利用して、微小世界をコントロールすることで、そこに生きる微生物の多彩な能力を活かして、エネルギー、農業、漁業、医療などの分野で現代社会が抱える問題を解決し、次世代の安心・安全で快適な生活の実現に貢献することが可能になります(図1)。

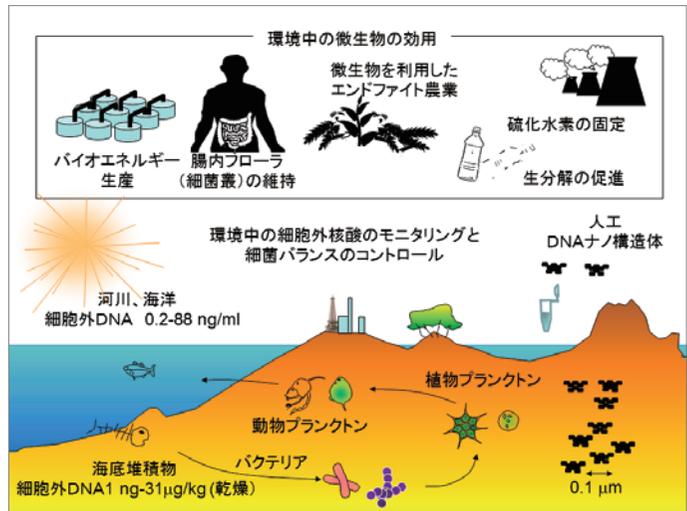


図1 DNAセンサーネットワークとマイクロワールド

● センシングターゲット

ここで紹介する DNA センサーロボットのセンシングターゲットは、生細胞が生産した核酸分子(DNA/RNA)です。核酸分子は、細胞内だけでなく、血液などの体液中や、私たちがとりまく海洋や湖沼などの環境中にも広く存在しています。細胞外の核酸分子は、細胞の崩壊によって放出されるだけでなく、細菌の増殖時期の一定期間や、他生物との相互作用あるいは、細菌同士の分子通信によって分泌されることが知られています。こうして生じた核酸分子は、環境中に蓄えられると共に、細菌により再び細胞内に取り込まれて、貧栄養条件下での栄養源、変異を起こした遺伝子の修復等に用いられます。細胞外に存在する核酸分子のうち、血液などの体液中に含まれる RNA は、細胞内の様子を反映して存在量が変動することから、生体内の生物学的変化を把握するための指標(マーカー)として診断に用いられています。

DNA センサーロボットは、このように生命活動の状態を反映する核酸分子をセンシングして

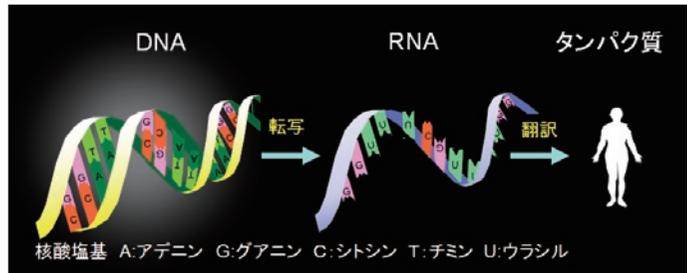


図2 遺伝情報伝達の流れ

細胞内の状態を報告したり、環境中にプールされている特定の配列を回収してまわったり、細胞内で核酸分子の変動を監視して、細胞の状態をコントロールするように設計することが可能です。

● DNA を利用した遺伝子スイッチ

DNA は、「タンパク質をコードする塩基配列プログラム」からなるソフトウェアと「プログラムを実行して複雑な生命維持活動を実現する」ハードウェアの両者の機能を併せ持つインテリジェントな情報素子です。生命の設計図となる遺伝情報は「複製」により DNA から DNA へ、「転写」により DNA から RNA へ、「翻訳」により RNA からタンパク質へと伝えられます(図2)。生命活動は、この「転写」と「翻訳」のタイミングを制御すること

で実現されています。これまで、このような制御はタンパク質が行っていると考えられていましたが、近年タンパク質をコードしていない核酸配列が積極的に関わっていることが明らかになってきました。たとえば、DNAを構成する4つの核酸塩基アデニン(A)、グアニン(G)、シトシン(C)、チミン(T)のうちGに富んだ配列は、図3左に示すような立体的な四重鎖が連なるグアニン四重鎖(G_4)とよばれる構造をとって、転写酵素の認識配列であるプロモータ配列に転写酵素が近づけない状態を作ること、「転写」のタイミング制御を行っていると考えられています(G_4 スイッチ)。 G_4 構造のオン/オフの切替えは特定のイオンを利用するなどして行われます。

一方、DNAセンサーロボットが搭載しているのは、人工的に設計されたトリプルクロスオーバー(TX)タイルを利用した人工遺伝子スイッチ(TXスイッチ)です。TXタイルは三段構造をもったDNAモチーフです。図3右にTXスイッチをDNA上に構成した例を示します。TXタイルがネットワークを形成しているときは、三段構造の

二段目の配列には、転写酵素が近づくことができないため、ここにプロモータ配列を配置することにより、 G_4 スイッチ同様、転写機能をオフにすることができます。TX構造のオン/オフの切替えは環境中の情報分子(ここでは細胞が生産する核酸分子)のセンシングにより行います。

機能設計

TXスイッチは、プロモータの下流に、RNAアプタマーをコードした配列を組み込むことにより、アプタマーが持つ様々な機能を実装することができます。アプタマーとは、ターゲット分子と特異的に結合して、様々な機能を発揮する核酸等から成る機能性分子です。例えば、ターゲット分子の持つ蛍光を増幅したり、毒性を弱めるなどの機能を実現することができます。また天然 G_4 スイッチと違って、人工TXスイッチは、TX構造のオン/オフの切替えに、システムの目的に合ったセンシングターゲットを使用できるように設計することが可能です。

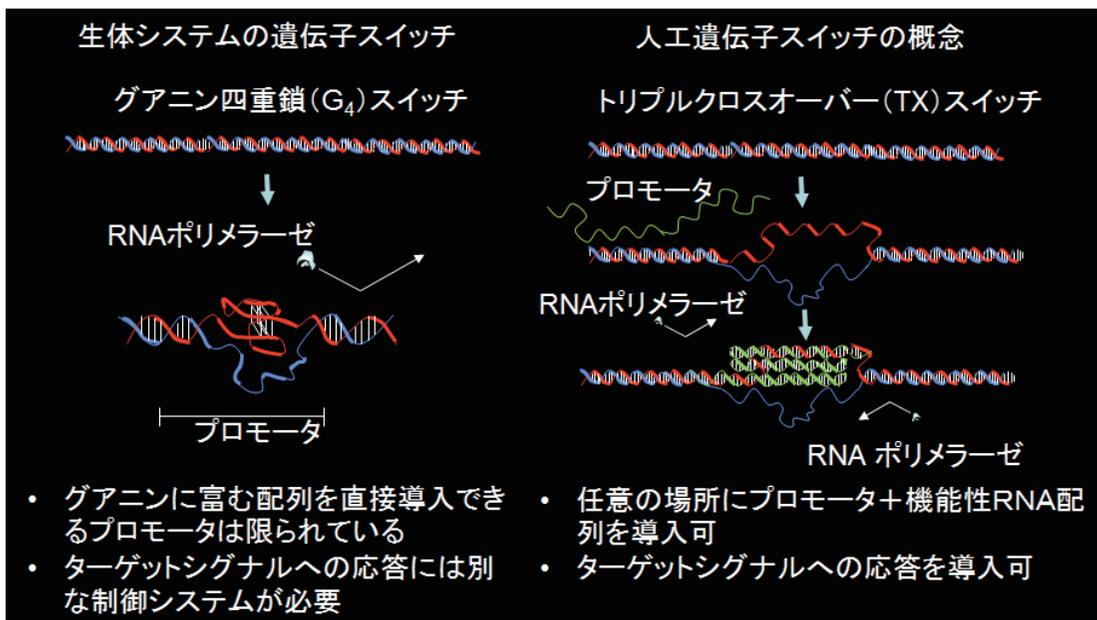


図3 人工遺伝子スイッチ

図4にTXスイッチを搭載したシステムの例を示します。ここでは、TXモチーフは、4本の短い一本鎖DNAが自己組織化により相補鎖を交換して三段構造を作っています。次に末端に相補配列を持つモチーフ同士が結合して、ナノ構造体ネットワークを形成します。この集合体は、RNA/DNAシグナルをセンシングターゲットとして、これを認識すると構造変化を起こし、モチーフに組み込まれたプロモータ領域にRNAポリメラーゼとよばれる転写酵素が作用できる状態になります。その結果プロモータ下流に組み込まれたRNAアプタマー配列の転写が開始されます。これが転写スイッチONの状態、オフになるまで繰り返し転写が実行されます。このアプタマー配列にMG(マラカイトグリーン)アプタマーとよばれる配列を採用すると、センシング結果をMGの蛍光増加の有無により可視化することができます。その他の目的に応じた新しい機能をもったアプタマーは、人工進化とよばれる方法により、ランダム配列のプールから取り出してくることができます。また人工材料と違って、複製、修復、再生といった機能も実装可能です。

DNAはこのように、機能や構造の設計が容易で、複雑な生命活動を実現することができる優れた能力を持ったインテリジェントマテリアルです。これらの特性を十分に活かすことにより、情報通信の新概念につながる新しいナノセンサーネットワークの構築が可能になると考えられます。

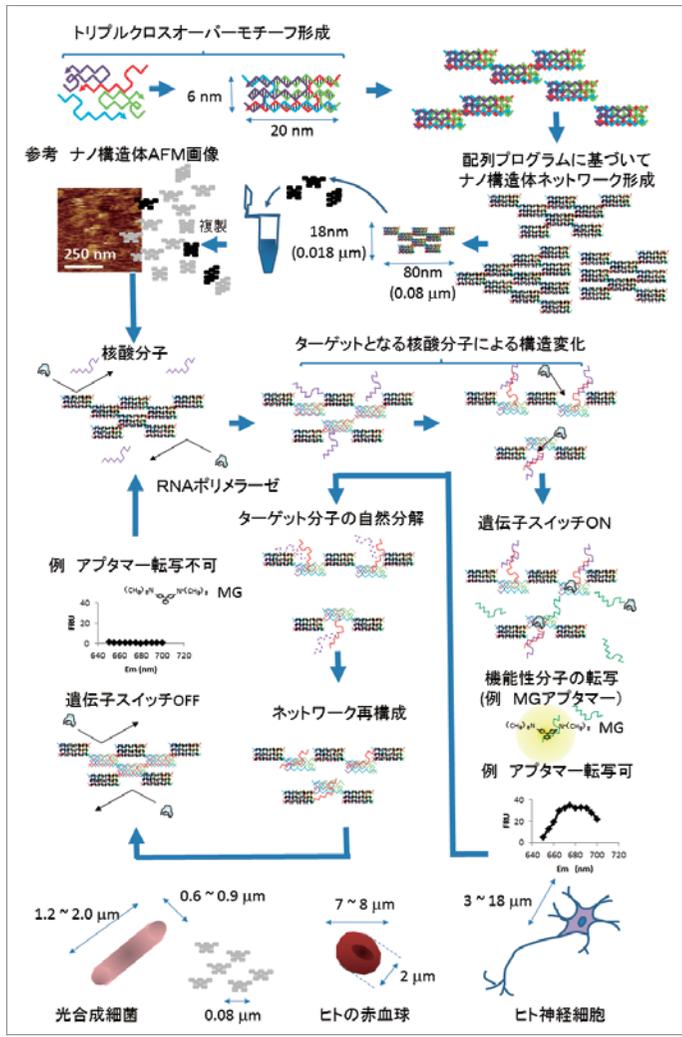


図4 センサーロボットのイメージ

● 今後の展望

アンビエントセンサーネットワーク社会は環境中に埋め込まれたアンビエントインテリジェンス(環境知能)が、自身でセンシングした情報を利用して、私たちの暮らしを豊かにする様々なサービスを提供してくれる社会です。生体材料の特性を生かした人工DNAナノ構造体を、ミッションを遂行する能力と判断力を持つインテリジェントロボットへと機能強化することで、本格的なアンビエントネットワーク社会が訪れると期待されます。

2種類の遺伝情報を使い分けて生きるテトラヒメナ

—単細胞生物の高度な生存戦略—

「巧妙な生存戦略を駆使して力強く生きる単細胞の微生物。彼らが持つユニークな生物システムは、様々な技術応用の可能性を秘めています。ここでは、その一例を紹介します。」

岩本 政明 (いわもと まさあき)

未来 ICT 研究所
バイオ ICT 研究室 主任研究員

大学院博士過程修了後、米ハワイ大学博士研究員を経て、2004年、特別研究員(JST)としてNICTに入所。現在は主任研究員。博士(理学)。子供の頃から自然と生き物が好きで、それが高じていつの間にか生物の研究者になっていました。研究以外の趣味は、釣り、川遊び(ガサガサ)、自然観察(野鳥など)、水族館巡り、他。

● 生物システムに学ぶには、まず生物を知ることから

今日、情報通信分野に限らず、さまざまな領域で、生物の特性を応用した技術開発が行われています。生物が持つ自律性、頑強性、環境適応性、情報処理能力、自己修復および自己複製能力など、そのいずれもが新技術を開発する際のお手本となり得ます。生物は、進化の過程でこれらの特性を獲得し、生存競争を通じて、それらに修正を加え、より良いものを作り上げてきました。その中には、人間が到底考えつかないような奇抜なシステムが無数に存在しています。そこから人間にとって有用なものを効率的に抽出するためには、まず対象となる生物をよく理解することが必要です。



私が研究対象としているのは、テトラヒメナ (*Tetrahymena thermophila*) という単細胞生物です(図1)。「単細胞」とは、俗に単純なものを形容する言葉として使われますが、それは誤りで、実際のところ、多くの単細胞生物はとても複雑な細胞の構造と機能を持っています。ヒトの場合、60兆個もの細胞の共同作業で行っている個体としての生命活動を、たった1個の細胞で行っているのですから彼らが複雑なのは当然といえます。また、動物の細胞が体内という安定な環境にあるのと違い、単細胞生物は激変する環境下で生活しています。そのような過酷な環境で生存競争を勝ち抜いてきた彼らは、とりわけ優

れた環境適応性と頑強性を持つ、細胞進化におけるひとつの頂点を極めた存在であるということが出来ます。

● 独特な方法で遺伝情報を使用・継承する テトラヒメナ

生物がもつ遺伝情報は、DNAとして細胞核の中にしまい込まれています。DNA鎖の本数は生物種によって異なりますが、細胞核内のひと揃いのDNA鎖のセットをゲノムと呼びます。細胞をコンピューターと見なした場合、細胞核はハードディスク*1、ゲノムは情報ということになります。ハードディスク内の情報は使えば使うほど、損傷、すなわちDNAに傷が入ります。細胞はこれを修復する機能を持っていますが、間違っ修復されたり、修復できなかった箇所が蓄積してくると、細胞コンピューターは正常に作動しなくなります。これが細胞老化であり、また時には制御が効かなくなって、ガン化してしまうこともあります。遺伝情報を傷つけないためには、遺伝情報を使わないことが得策ですが、生命活動を行う以上そのようなことはできません。

ところが、テトラヒメナはそれを実現しているのです。彼らはゲノム(情報)を重複させ、それらを2種類の細胞核(ハードディスク)に分けて保

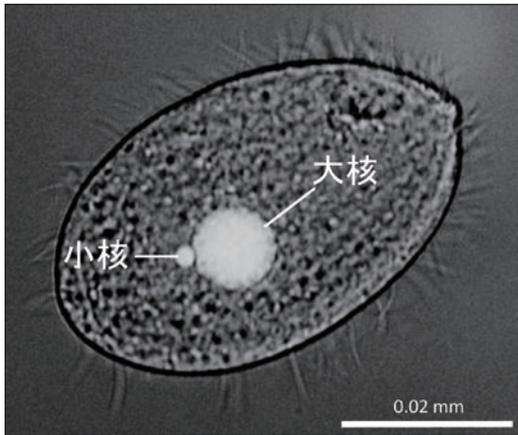


図1 繊毛虫テトラヒメナ (*Tetrahymena thermophila*) 大核と小核という2種類の細胞核をもつ。DNAを特殊な色素で染めて可視化した。

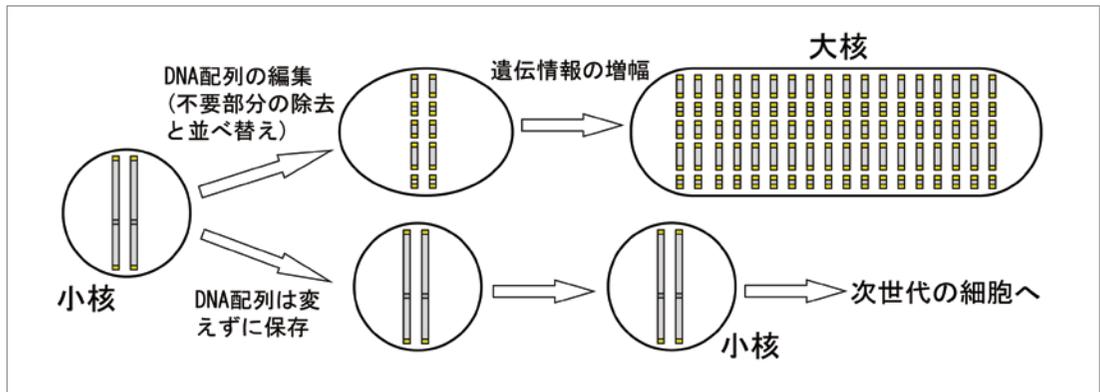


図2 編集と増幅によって形成される大核のゲノムDNA
もとは1つの小核から新たな大核と小核が作られる。各DNAの末端にはテロメア*2 (黄)が存在する。

持するという方法を獲得しました(図1)。一方を生命活動に使用し、他方は通常は使用せずバックアップとして保存しています。使用されるゲノムは、大核に包含されており、遺伝情報を効率よく大量に取り出すためにDNA配列は編集され、かつ数十～数百倍に増幅された状態になっています(図2)。この大核ゲノムは、日常的に使用されますが、一世代で使い捨てられます。片や小核のゲノムは、高度に圧縮された状態で、通常の生活では使用されません。しかし、いざという時(具体的には、栄養が無くなってしまった時)にそれは使われます。栄養が枯渇すると、彼らは異性細胞と交配^{*3}して子孫を作りますが、子孫細胞の新しい細胞核を形成するために小核ゲノムが使われるのです。

● 2種類のゲノム情報にアクセスするシステムに明確な違いが存在

テトラヒメナは、1台のコンピューター(細胞)に2種類のハードディスク(細胞核)を搭載してい

るわけですが、ハードディスク内のゲノム情報にアクセスするためのオペレーションシステムはどうなっているのでしょうか。我々は、テトラヒメナの特異な遺伝情報制御を可能にしている分子基盤はそこにあると考え、この仕組みを明らかにするための研究を行っています。細胞核は、核膜により細胞質と仕切られ、区画化された構造になっています(図3)。核膜には核膜孔と呼ばれる穴があいていて、細胞質から核内へのアクセスと、核内から細胞質への遺伝情報の取り出しは、この核膜孔を通して行われます。したがって、核内へのアクセス経路である核膜孔が同じ構造をしているならば、2種類のハードディスクを見分けて、個別に制御することはできません。我々は、核膜孔を形づくっているタンパク質成分を同定し、それらの機能解析を行うことで、2種類の遺伝情報を間違えずに制御する仕組みを明らかにすることを試みました。

核膜孔は、核膜孔複合体という構造体が形づく穴です(図3)。核膜孔複合体は約30種類の異なるタンパク質が組み合わさって構築され

ています。大核と小核の核膜孔複合体の成分を比較したところ、穴の内側に露出するタンパク質成分の1つであるヌクレオポリン98(Nup98)が、大核と小核では全く違ったものであることが分かりました(図3)。Nup98は、細胞質と細胞核の間で行われる双方向の物質輸送に必須の機能性タンパク質です。テトラヒメナの場合、大核の核膜孔に存在する大核型Nup98は、小核へ運ばれるべき物質が誤って大核内へ侵入することを阻止し、同様に、小核のNup98は、大核物質が小核へ侵入することを阻止していることが分かりました(図4)。このようにし

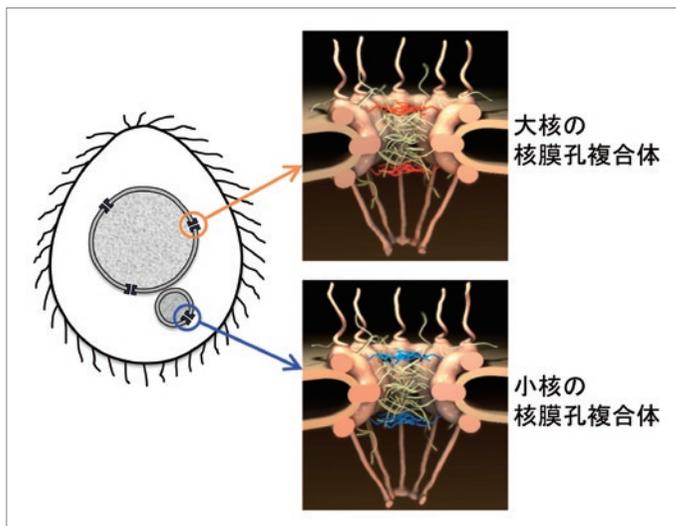


図3 テトラヒメナの核膜孔複合体とNup98

大核、小核とも二重構造の核膜(グレー部分)によって細胞質と仕切られている。右側のモデル図はともに上側が細胞質、下側が核内。大核のNup98をオレンジ、小核のNup98を青色で表わす。

て、それぞれのゲノムの制御に関わる因子は、正しい細胞核へと正確に運び分けられていることが明らかになりました。テトラヒメナは、核内へのアクセス経路に構造的な違いをつくり、それを利用して、2種類のハードディスク内の遺伝情報を巧みに制御していたのです。

● おわりに

テトラヒメナやゾウリムシなどの織毛虫類は、2～3億年前の琥珀化石から現存種とほとんど変わらない形の見出されています。恐らく、彼らの起源は、そこからさらに数億年をさかのぼることになるでしょう。そんな太古に、彼らがすでに遺伝情報の大量利用とバックアップ構築を両立させたシステムを完成させていたことに驚かされます。そのことは同時に、そのシステムが、彼らを進化の勝者へと導いた堅牢性と柔軟性を持ち合わせた秀逸なものであったことを推測させます。この遺伝情報の使い分けシステムは、生物学的に非常に興味深い現象であるだけでなく、その仕組みを理解することによって、細胞工学的な応用が期待できます。例えば、人工細胞や、DNA コンピューターを搭載したマイクロマシンが作製されるようになれば、それらに異なった情報を含んだ複数のハードディスクを持たせ、使用するディスクと情報を自在に切り替えることができる多機能マシンを設計したり、さらには、使用ディスクが破損した時に、バックアップから自動的に新しいハードディスクを再構築するシステムを持たせたりすることも可能になるかもしれません。

これまで謎とされていた織毛虫が2種類の細胞核に物質を正しく運び分ける仕組みを

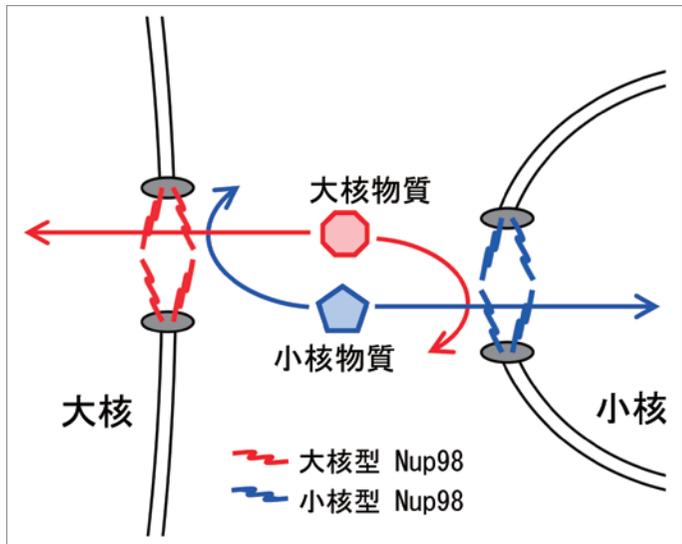


図4 Nup98による誤方向への核内輸送に対する阻害効果

明らかにしたこの研究は、原生動物学研究に大きなブレークスルーをもたらすものとして、2010年度の日本原生動物学会賞を受賞しました。

用語解説

*1 細胞核ハードディスク

細胞核ハードディスク内の遺伝情報は基本的に読み出し専用で、生物が自身のDNA配列に新たな情報を書き込むことはできない。

*2 テロメア

DNAを保護するために末端に存在する特殊な配列領域。大核ではDNAが断片化されているため、テロメアも大量に存在する。テロメア配列はテトラヒメナで初めて発見され、その研究は2009年にノーベル医学生理学賞を受賞した。

*3 交配

単細胞生物の交配は「接合」と呼ばれ、接着した2つの異性細胞間で、遺伝情報(細胞核)の交換が行われる。接合後は2つの細胞由来の遺伝情報が混ざり合った新たな遺伝型の細胞となり、新しい世代がスタートする。



未来ICT研究所 (神戸)

情報通信の
未来をつくる
研究者たち

第IV章

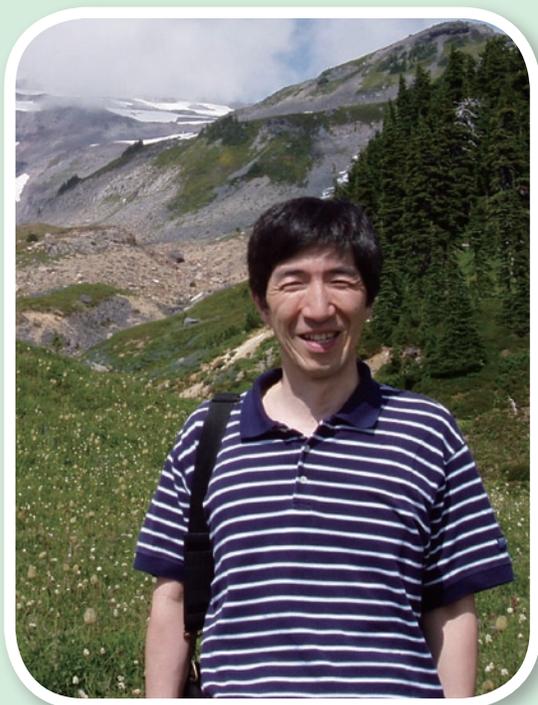
電磁波センシング 基盤技術

井口俊夫
川村誠治
浦塚清峰
笠井康子
高橋暢宏
津川卓也
亘 慎一
井戸哲也
花土ゆう子・今村國康
岩間 司
和氣加奈子
福永 香・藤井勝巳・
水野麻弥・登坂俊英



社会を支える電磁波計測技術

—原子・分子から宇宙空間スケールまでの課題解決に—



井口 俊夫 (いぐち としお)

電磁波計測研究所
研究所長

大学院修了後、研究員を経て、1985年郵政省電波研究所（現 NICT）に入所。海洋レーダの開発、熱帯降雨観測衛星のデータ処理アルゴリズム開発など、リモートセンシングの研究に従事。Ph.D. 趣味としては、最近はおつばら囲碁鑑賞と散歩をするぐらい。たまに、テニスを計画するも、その多くは雨のために流されるという雨男。

「電磁波計測研究所の研究対象は、時刻の生成、電磁波計測技術、リモートセンシング、宇宙環境計測など多岐にわたっています。ここでは、その研究内容を概観します。」

電磁波計測研究所には、センシング基盤研究室、センシングシステム研究室、宇宙環境インフォマティクス研究室、時空標準研究室および電磁環境研究室の5つの研究室があります。これら5つの研究室の研究対象は、原子・分子の大きさから宇宙空間までの幅広い空間スケールにわたっています。

飛び交う電波の計測

研究所名である電磁波計測には、電磁波を計測するという意味と電磁波を使って計測するという2つの意味があります。電磁波そのものの計測に関する研究をしているのが、電磁環境研究

室です。この研究室では、私たちが用いる電気器具からどのような電波がどれほど出ているかを正確に評価する技術の研究をしています。たとえば、電子レンジやLED電球といった身近な器具から、ほかの通信システムに害を与えるような電波が出ていないかといった研究や、携帯電話などから発せられる電波がどのくらい体に吸収されるかという研究をしています。

正確な時間の作成

他の4つの研究室では、電磁波を使っていろいろなものを測る研究をしています。時空標準研究

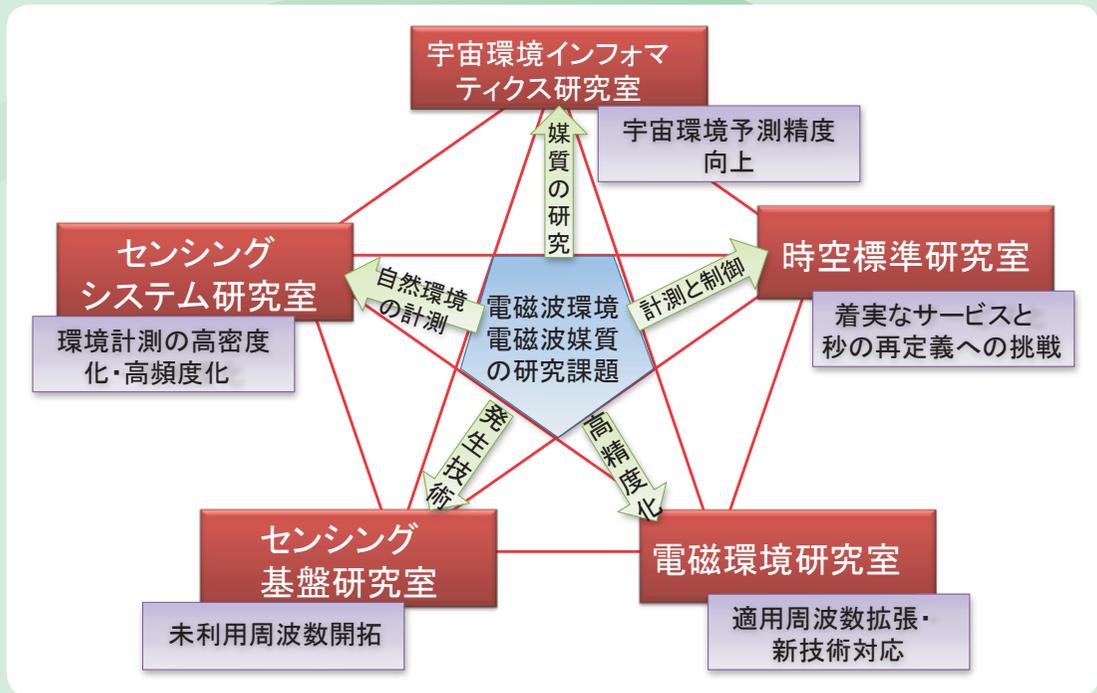


図 電磁波計測研究所の研究配置図

室では、電磁波を使って原子の遷移状態のエネルギー間隔を正確に測る技術を磨いています。電場や磁場あるいは光(電磁波)を使って原子やイオンをできる限り動かないようにし、そこに電磁波を当て、吸収される電磁波の周波数を精密に測ることにより、極めて正確な時間の基準をつくっています。この時間の基準から日本そして世界の時刻がつけられているのです。

● 電磁波による環境計測

センシング基盤研究室では、ミリ波(波長1～10mm、周波数30～300GHzの電波)以上の高い周波数の電磁波を使って、大気中の微量成分を測定したり、風を広範囲にかつ短時間で計測するリモートセンシングの技術の研究をしています。このような研究は、地球環境の状態を正確に把握するために重要な研究です。

センシングシステム研究室では、レーダ技術を用いたリモートセンシングの研究をしています。短時間に降雨の3次元分布がわかる次世

代ドップラレーダや衛星搭載レーダ等の先端的レーダシステム構築技術を確認するとともに、航空機搭載の合成開口レーダ(SAR)による移動体の速度計測技術等を含め、高性能かつ高機能なデータ取得・処理基盤技術を研究開発しています。

宇宙環境インフォマティクス研究室では、短波通信や放送、測位、また人工衛星の利用に悪影響を及ぼす宇宙の乱れを、観測とシミュレーションを用いて診断・分析し、より正確な宇宙環境情報を提供するための研究を行っています。

また当研究所では、無線機器の型式検定と較正、日本標準時の生成、供給と周波数校正、宇宙天気予報などを業務として行っています。このような幅広い分野の研究や業務に対し、色々な専門分野の研究者が協力し合って取り組んでいます。

気象レーダで風を見る

一雨域内の風をモニタする改良型バイスタティック観測システムー

「汎用性が高く安価なソフトウェア無線とデジタルビームフォーミングの技術で、従来の課題を克服する新しい観測手法を開発に挑戦しています。」

川村 誠治 (かわむら せいじ)

電磁波計測研究所
センシングシステム研究室 主任研究員

大学院博士課程修了後、日本学術振興会特別研究員を経て 2006 年に NICT へ入所。大気物理、レーダシステムなどに関する研究に従事しています。趣味は物作り。木工が大好きで電動工具を使って家具なども作りますが、子どもができてからはミシンで子ども服を作ったことも。博士(情報学)。

風観測の現状

近年、突風や局地的大雨(通称ゲリラ豪雨)などの気象災害が大きな社会問題の 1 つとなっています。時間・空間スケールの小さなこれらの災害の予測は、昨今、技術向上がめざましい気象予報モデル(数値モデル)でも未だ困難です。その原因の 1 つは、観測データの不足です。数値モデルの分解能がいくら向上しても、計算の初期値となる現在の状態(観測データ)が分からなければ正確な未来は予測できないのです。

風はこのような気象災害における重要な情報の 1 つです。現時点で日本全土をカバーする風観測としては、気象庁によるアメダス(地上風観測：全国約 850 地点、約 21km 間隔)やウィンダス(風の高度分布観測：全国 31 地点)があります



が、これだけでは空間スケールが数百 m から数 km といわれる局地的災害に対応することは困難です。風を時間・空間的により細かく観測できれば、そのデータは気象予報モデルの入力値としてだけでなく、直接的に局地的災害に対する非常に有効な防災・減災情報となります。今、このような高い時間・空間分解能で、広いエリアをカバーする観測が望まれています。

● 気象レーダによる風観測

このような要請に応え得る有望な観測手段の1つに、気象レーダがあります。気象レーダは空間分解能数百 m で雨を測る装置で、すでに気象庁・国土交通省によって日本全土をカバーする観測網が展開・運用されています。雨の強度分布を測る装置ですが、雨で反射されて返ってくる電波のドップラーシフトを測ることで、レーダビーム方向の風速も測ることができます。近年気象庁現業レーダでもこのドップラーシフトによる風観測が可能になってきました。ただし、こうして得られる風速は真の風速ではなく、あくまでも風速のレーダビーム方向成分です。

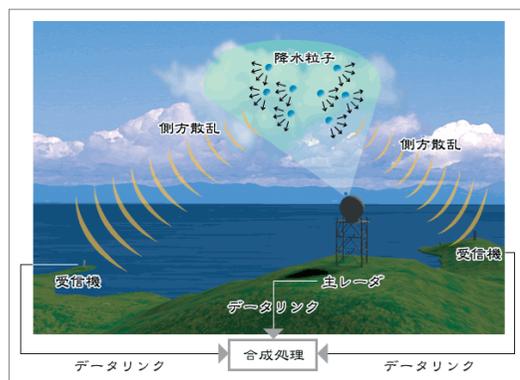


図1 バイスタティック計測のイメージ
通常のレーダでは、自分で送信した電波の後方への反射波(後方散乱)を自分自身で受信する(モノスタティック観測)。一方、電波は後方だけでなく様々な方向に反射される(散乱)。バイスタティック観測では横方向への散乱(側方散乱)を別の受信機で受けることで、モノスタティック観測によるビーム方向の風速成分に加えてもう1つ別の風速成分を得ることができ、真の風速分布が分かる。

気象レーダで真の風速を観測する有効な方法の1つにバイスタティック観測があります。図1はバイスタティック観測のイメージ図です。バイスタティック観測では、既存の送信局の周辺に安価な受信専用局を付加するだけで真の風速を求めることができます。

● バイスタティック観測の課題

バイスタティック観測には、実用化へ向けていくつかの課題がありました。その中でも特に深刻だったのが疑似エコー問題です。

図2は疑似エコー問題の模式図を示しています。バイスタティック観測では、送信局は非常に細いビームを送信し、受信局では幅の広いビームで横方向に散乱した電波(側方散乱)を受信します。この図では送信ビーム(メインローブ)は地点Aを向いているので、観測されるべきは地点Aの雨です。

地点Bは送信局と受信局を焦点とする同一楕円上にある任意の点です。ほとんどの電波は送信局⇒地点A⇒受信局と伝搬して受信されますが、目的と異なる方向に漏れ出す電波(サイドローブ)が存在するため、一部の電波は送信局⇒地点B⇒受信局と伝搬します。この時2つの経路長は全く同じなので、同一時刻に発射された電波は同一時刻に受信されることとなり、地点Aと地点Bの情報を区別することはできません。

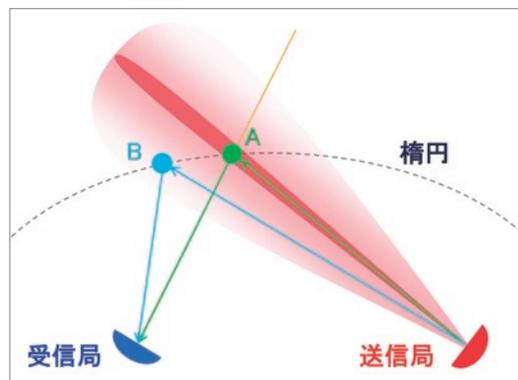


図2 バイスタティック観測・疑似エコー問題の模式図

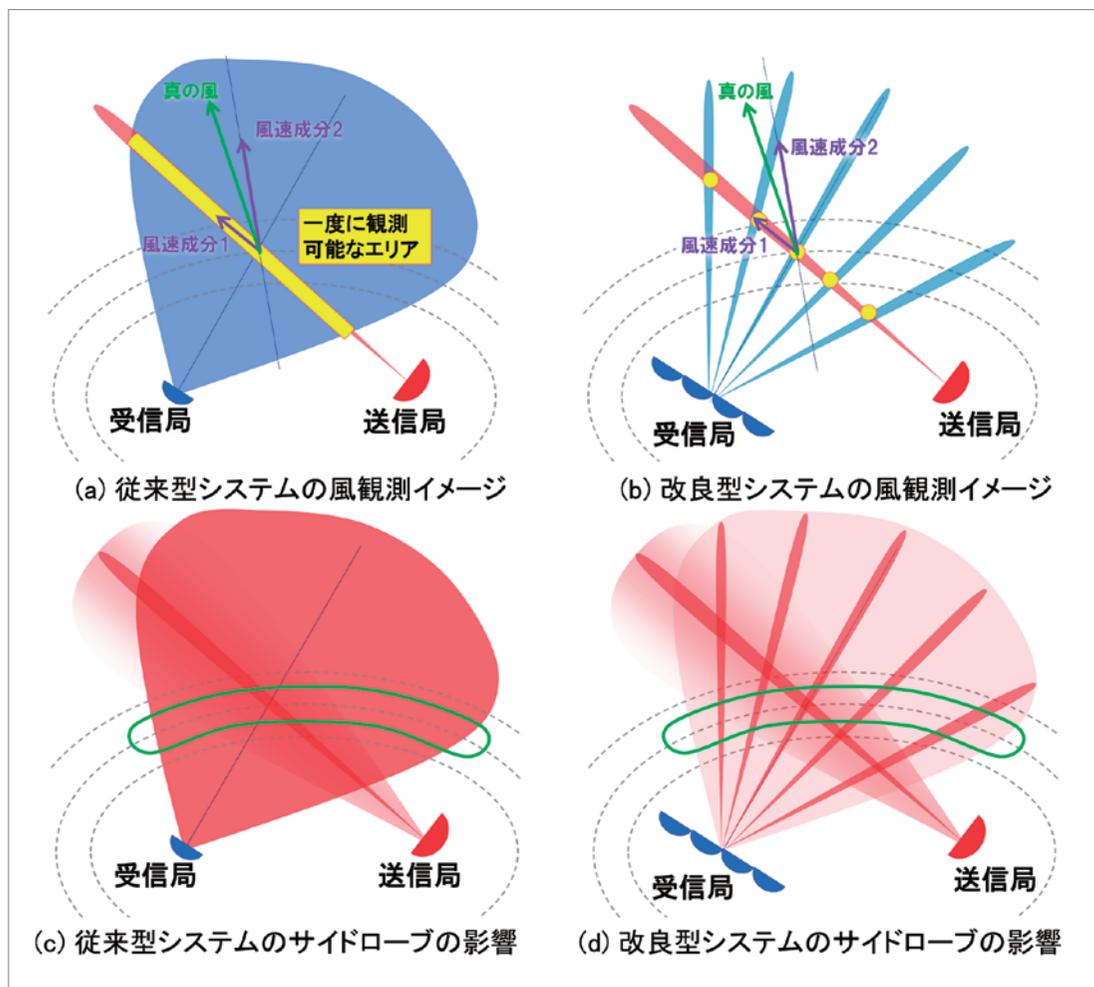


図3 バイスタティック観測システムの模式図

もし地点 A にほとんど雨が降っていなくても、地点 B に強い雨が降っていれば、その雨があたかも地点 A にあったかのように観測されてしまう、これが疑似エコー問題です。

改良型バイスタティック観測システム

我々が提案している改良型バイスタティック観測システムの模式図を図3に示します。改良型システムは次のような特徴を持ちます。(1)受信に複数の素子からなるアレイアンテナを用いる。(2)アレイの素子間隔を波長よりも長くすることで生じる多数の細いビーム(グレーティングローブ)を利

用する。(3)複数素子で受信した信号を位相調整しながら合成することで疑似的にビーム方向を変化させるデジタルビームフォーミング(DBF)*の信号処理を行う。図3の(c)と(d)ではサイドローブの影響を色の濃淡で表しています。改良型システムでは同一楕円上のほとんどの部分で従来型より色が薄くなっており、疑似エコーの発生がそれだけ抑えられることが期待できます。

シミュレーション結果を図4に示します。弱い雨の中に強い雨の領域を3つ配置した状態での受信信号時系列を計算したものです。送信ビームは図中②の雨だけを通っているのですが、従来システムでは①や③の雨の信号もはっきりと受信

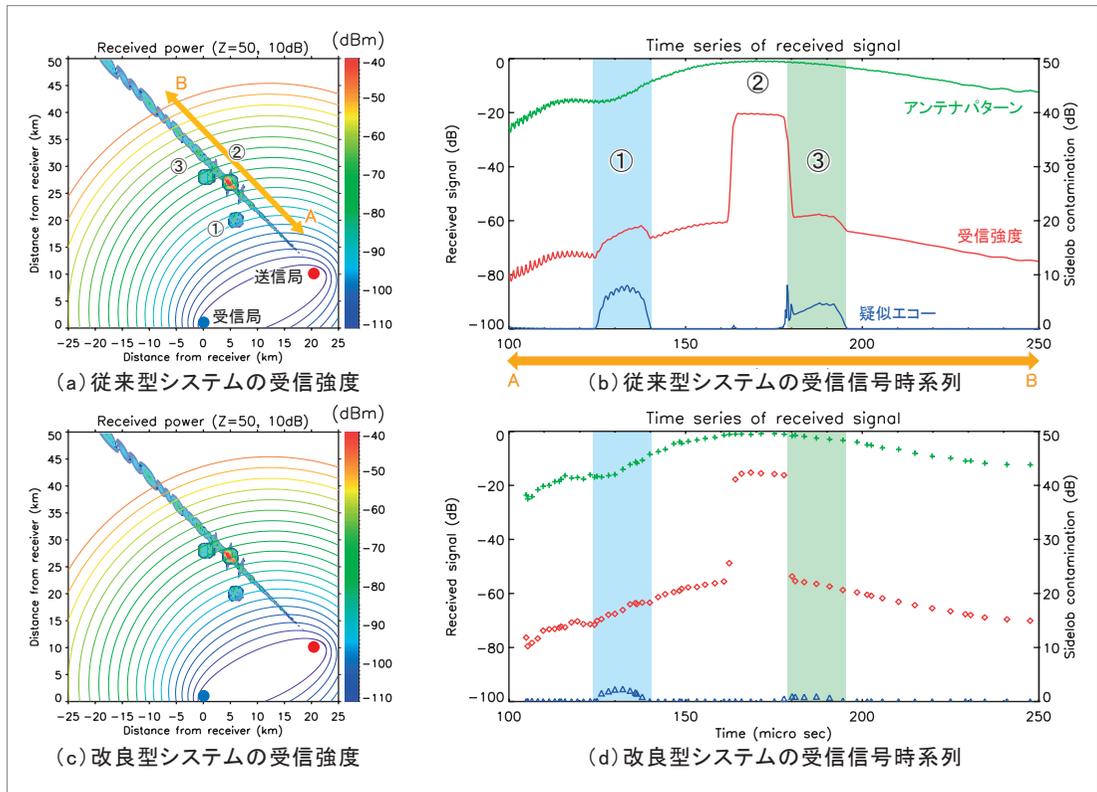


図4 受信信号時系列のシミュレーション結果

されてしまいます(疑似エコー)。改良型システム(DBF処理後)では①や③の信号が効果的に低減されており、疑似エコーの問題が大きく改善されていることが分かります。

● 今後の展開

現在、沖縄偏波降雨レーダ(COBRA)を使ってこの改良型バイスタティック観測システムの実証実験を行っています。受信機には安価で汎用性の高いソフトウェア無線を用い、コンパクトな受信システムの開発を目指しています。近い将来、局地的災害にも有効な観測システムの構築につながることを期待されます。

ソフトウェア無線の技術は、ソフトウェアを変更するだけで様々な用途に応用できます。その利点を生かし、気象レーダの他に、海流を測定する海洋

レーダでもバイスタティック観測システムの研究開発を進めています。これらバイスタティック観測の要は、既存のレーダに付加するだけで機能する受信システムです。この考え方を応用発展させると、自前では送信局を持たず、通信放送など他の目的で使われている電波を受信して情報を得る「パッシブレーダ」につながります。パッシブレーダは、周波数有効利用の観点からも今後重要となってくる技術です。我々は、地上デジタル放送波を用いたパッシブレーダの研究開発にも着手しています。

用語解説

* デジタルビームフォーミング(DBF)

アレイアンテナにおいて、複数素子で受信した信号を別々にサンプリングし、位相を調整しながら合成することで、後処理で疑似的にアレイアンテナのビーム方向を変化させる技術。

東日本大震災の被災地の様子を知りたい

—航空機搭載高性能SAR (Pi-SAR2) による緊急観測—

浦塚 清峰 (うらつか せいほ)

電磁波計測研究所
センシングシステム研究室 室長

南極の氷の厚さを測ることからリモートセンシングの研究を始めて、現在の航空機 SAR につながる仕事をしながら、雲仙岳の噴火、有珠山、三宅島の噴火、新潟県中越地震…とさまざまな災害現場に立ち会ってきました。その中でも 2011 年の東日本大震災の桁違いの恐ろしさには未だに震えが来ます。

「被害状況を広範囲に把握するため、NICT がかねてから開発していた航空機 SAR による観測を東日本大震災の直後から準備し、翌朝の被災地の様子を公開しました。」



はじめに

2011年3月11日に発生した東日本大震災は、死者・行方不明者が2万人を超える惨事となり、その被災地域も青森県から千葉県に至る太平洋側を中心に広大な範囲であり、すべての被災状況の把握が困難な状況でした。

NICTでは、地震発生翌日の2011年3月12日午前7時30分から10時45分に東北地方の太平洋沿岸および主要道路付近の航空機搭載高性能合成開口レーダ*（以後Pi-SAR2）による緊急観測を行いました。

Pi-SAR2は、NICTが開発した航空機搭載SARで、航空機から地上に向けて電波を送信し、地上を航空写真のように観測することができます。このレーダは、12,000mの高い高度からでも30cmの細かさ(分解能)で画像を得ることができます。また、5km以上の幅を連続して一度に観測することができます。

NICTでは1990年代末から1.5mの分解能を持つSAR(Pi-SAR)を開発して火山噴火や地震などの災害の観測に有効であることを実証してきました。Pi-SAR2は、2004年の新潟県中越地震のPi-SAR観測の経験から、もっと細かい情報が必要なことがわかり2010年に開発されたものです。東日本大震災の直前には九州地方の霧島山・新燃岳での観測を行っていたところでした。

Pi-SAR2は名古屋空港近くにあるダイヤモンドエアサービス社(以後DAS)が所有する航空機(ガルフストリーム2型機)に搭載して観測しますが、それには2日ほどかかります。

大きな揺れ、そして

NICTのPi-SAR2チームが東日本大震災に遭遇したのは、東京都小金井市のNICT本部においてでした。大きな揺れを感じてただならぬ事



図1 2011年3月12日の飛行パス(地図提供:国土地理院)
紫の長方形の部分が観測実施場所を表し、数字は観測の順序を表す。なお、管制からの指示により一部のパスにおいては観測が見送られた。

態と判断し、すぐにDAS社に連絡して、緊急作業で12時間以内にPi-SAR2を搭載してもらい依頼をしました。地震により電話が不通になったのは、DAS社への詳細な指示・依頼を済ませた直後でした。レーダ機器のうちデータを記録する記録モジュールは、この直前(3月9日)に実施した新燃岳の観測後の処理のため本部に持ち帰っており、航空機のある名古屋空港までのこのモジュールの緊急な輸送も必要でした。また、地震発生後から新幹線をはじめとする鉄道がすべて運休となっており、観測者の名古屋への移動手段も確保する必要がありました。そこで、自動車による機器輸送と観測者の移動をやむなしとして急遽レンタカーの手配をし、どうにか荷物運搬用のバンを借り受けることができました。もう少し判断が遅かったら、迅速な観測開始には結びつかなかったと思われる。

通常、Pi-SAR2 を運用するには、事前に航空局に飛行パスを申請する必要があります。Pi-SAR2 チームは、地震直後から報道による情報収集を進めて、大急ぎで図 1 に示すような飛行パスを作成し、DAS に緊急の申請手続きをメールで伝えて車に乗り込みました。航空機に搭乗する職員 3 名が NICT を出発したのは 23 時頃の事です。甲州街道等一般道は車で溢れ、渋滞していました。中央自動車道に乗ると車の流れはス

ムーズで、翌朝 5 時頃に名古屋に到着し DAS に入構しました。

到着後直ちに、配線のチェック、機器の動作確認、観測パラメータの入力の作業を行い、6 時 50 分頃から飛行前の天候、フライトコース等の確認の打合せを行い、航空機に乗り込みました。このとき、前日に大阪に出張中だった NICT の熊谷理事も名古屋に駆けつけて陣頭指揮に当たりました。



図2 2011年3月12日午前8時頃に観測された仙台空港付近の画像
画像の大部分を占める黒い部分は、津波により冠水した地域を示している。

名古屋空港を7時30分に離陸して、前日に作成した飛行コースに沿って観測を進めて行きましたが、福島第一、第二原子力発電所の周辺だけは、飛行を迂回するよう管制から指示があり、それ以外の地域はすべて観測を行いました。Pi-SAR2による観測は直線飛行を基本とするため、旋回時にはデータ取得しません。この観測と観測の間の時間を利用して、機上処理システムを用いて複数枚の画像再生処理を行いました。このときの画像は処理の迅速性を考慮し、2km四方の部分に限定しています。観測を終え、航空機が名古屋に着陸した11時過ぎから機上で処理した画像データをNICTのPi-SAR2チームに伝送を試みましたが、震災後の通信の輻輳のせい、機上の緊急処理データをすべて伝送できたのは、地震発生から24時間後の15時近くになりました。このデータは、NICTのWebサイトに特別ページを立ち上げて広く一般に向けて公開いたしました。

● 被害状況がひとめで

取得した生データは記録モジュールを小金井に戻る車に搭載して持ち帰り、翌日から詳細な(5km四方、偏波によるカラー画像)処理を行い、逐次、Webページに掲載していきました。このうちの1つを図2に示します。仙台空港の画像であり、画像の大部分を占める黒い部分は、津波により冠水した地域を示しています。

これらのデータは、災害現場において救難作業や復興作業等に活用されることおよび一般市民に広く状況を知らせることを目的として公開したもので、一定の目的は果たしたと考えておりますが、レーダ画像の判読には専門的知識が必要な部分もあり、今後はその点の改善が必要と考えています。

最後に、東日本大震災により亡くなられた方々のご冥福をお祈りするとともに、一日も早い復興を祈念しております。

用語解説

* 合成開口レーダ (SAR: Synthetic Aperture Radar)

マイクロ波を利用し、航空機等から地上に向けて電波を出し、地上を航空写真のように観測することのできるレーダ技術です。電波を使うため曇や雨の天気でも夜でも観測できるメリットがあります。

超高感度センサが拓く 新しい地球大気のすがた

—国際宇宙ステーション搭載超伝導サブミリ波サウンダ(SMILES)—

「世界最高感度により地球大気中の存在比で1兆分の1程度しか存在しない物質計測を達成した超伝導サブミリ波リム放射サウンダ SMILES(Superconducting Submillimeter-Wave Limb-Emission Sounder) を紹介します。」

笠井 康子 (かさい やすこ)

電磁波計測研究所
センシング基盤研究室 主任研究員

共同研究者：

佐川英夫、菊池健一、落合啓、入交芳久、安井元昭、
メンドロック ヤナ、パロン フィリップ

1995年東京工業大学大学院理工学研究科博士後期課程修了。理化学研究所基礎科学特別研究員を経て、1998年郵政省通信総合研究所(現 NICT)に入所。国際宇宙ステーション搭載・超伝導サブミリ波リム放射サウンダ(SMILES)を始めとした大気リモートセンシング観測研究に従事。趣味は SMILES。博士(理学)。



左から笠井康子、佐川英夫、菊池健一、落合啓、入交芳久、安井元昭
上部左からメンドロック ヤナ、パロン フィリップ

● はじめに

超伝導サブミリ波リム放射サウンド SMILES (Superconducting Submillimeter-Wave Limb-Emission Sounder) は 2009 年 9 月に国際宇宙ステーション (ISS) に打ち上げられ、現在は日本実験棟 (JEM) 曝露部に搭載されています (図 1)。オゾン層破壊や温暖化そして大気汚染などの地球大気環境変動では、大気中に存在する微量な分子やラジカル*の働きが鍵になります。反応性が高く大気組成の変化を起こす分子ラジカルは、アクティブであるほど存在量が低いという傾向があります。SMILES では、これまで鍵になる働きをすると考えられていたにも関わらず、あまりにも微量で従来は計測が困難であった物質、例えば地球大気中の存在比で 1 兆分の 1 程度しか存在しない一酸化臭素 BrO やヒドロパーオキシラジカル HO₂、100 億分の 1 程度の次亜塩素酸 HOCl などを検出しました。現在はこれらの超微量分子の大気中における振る舞いについて詳細な研究を進めています。

SMILES ミッションの目的は、

- 1) 4K (-269°C) 機械式冷凍機により冷却した高感度サブミリ波超伝導受信機システムの宇宙における技術実証
- 2) 世界最高の超高感度観測により地球大気の新しい姿を拓く

です。SMILES は NICT と宇宙航空研究開発機構 (JAXA) の共同開発ミッションで NICT においては 1997 年から本格的に開発を開始しました。SMILES では大気からのサブミリ波放射を受信し、周波数を落とすのちに分光します。SMILES 測器開発は近年の「小短軽」(小型、開発期間を短く、質量を軽く) 衛星開発の傾向とは逆行した挑戦的な開発でした。質量 500kg、消費電力 400W、これまで宇宙では例のなかった 4K 超伝導受信機開発、など大型でひとつ間

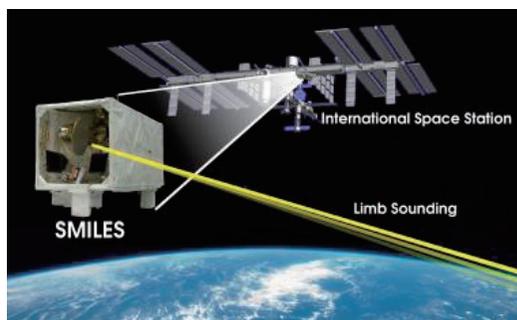


図1 SMILESと国際宇宙ステーション

違えば無謀とも言える技術的挑戦に対して、海外の親しい研究者からは“Crazy Japanese”と言われたものでした。測器の設計寿命は 1 年間でしたが、2010 年 4 月に局部発振器が不具合を起こし、さらには 2010 年 6 月から心臓部である超伝導ミキサを冷却する冷凍機が 4K に到達しなくなり、1 年に満たない期間で観測の継続を断念しています。しかしながら、従来より 10 倍以上の高精度の SMILES による観測は、地球大気の新しい姿を見せてくれました。これらの結果はオゾン層回復と気候変動の関わりを始めとした地球環境問題に対してユニークな視点を追加するでしょう。ここではごく一部ですが、初期的な成果なども紹介いたします。

● SMILES 観測スペクトルとデータ処理

SMILES は国際宇宙ステーションから見える地球周縁の大気サブミリ波放射スペクトルを観測します。SMILES 観測スペクトルの一例を図 2 に示します。一見シミュレーションとも見紛う、美しい測定スペクトルが得られました。2009 年 10 月に出た初データは国際会議等で紹介するたびに関連研究者から“Impressive! Japanese Technology!”などの敬意と称賛の言葉が次々と贈られてきました。これには SMILES 測器チームの技術力の高さを改めて感じました。

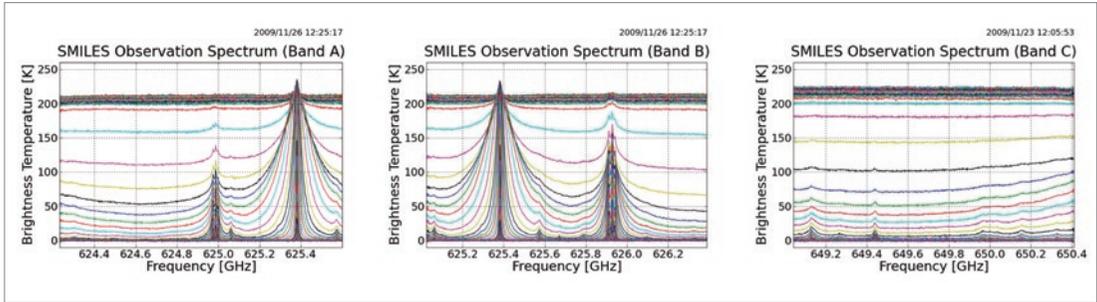


図2 SMILESで観測したスペクトル

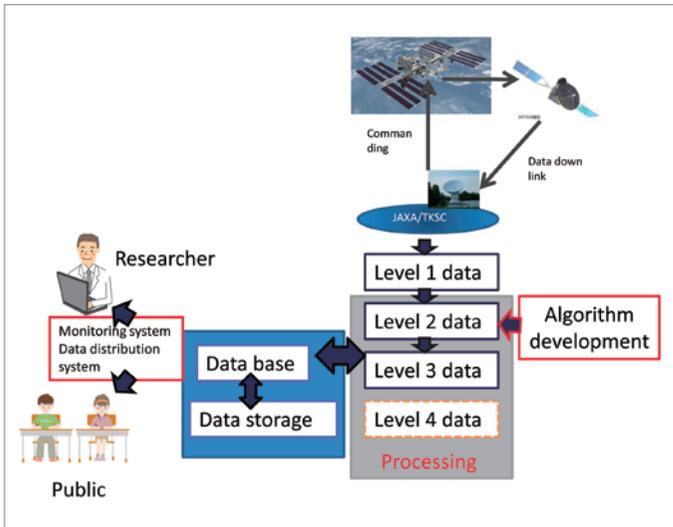


図3 SMILESのデータ処理系の概念図

NICTでは、測器開発のほか、このスペクトルから大気中分子・気温・水蒸気・氷雲・風速などを導出するLevel2アルゴリズム開発と処理、データのグリッド化などのLevel3データ処理を行うと共に、これらのデータ配布を行っています。NICTの地球環境計測分野はこれまで測器開発が主流であり、大容量の地球観測衛星データの準リアルタイム処理を行うのはこれが初めての試みでした。打ち上げ2カ月後の2009年11月末には宇宙ステーションからのSMILES観測データを準リアルタイムで処理したものを実況する「SMILES観測データのクイックルック」を世界に発信する準備が整いました。図3にデータ処理系の概念図と図4にはデータクイックルックページの一例を示します。

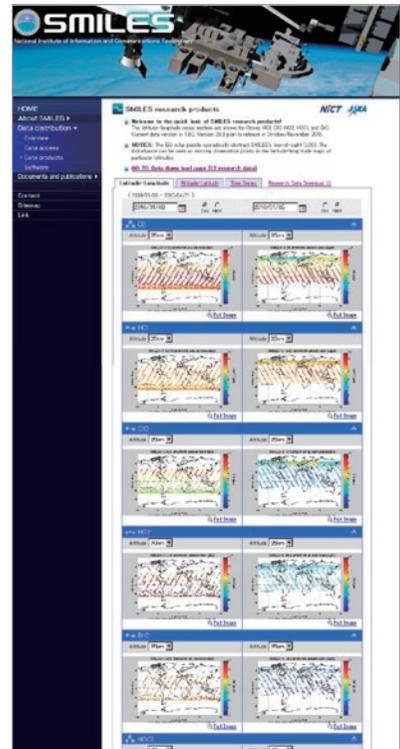


図4 SMILES観測データを実況するWebページの例

最近の成果

SMILESではこれまで上部成層圏から中間圏において光化学ラジカル物質(大気微量成分)の観測を行いました。これらのグローバルな日変化観測はこの高度領域においてはこれまで存在しておらず、世界で初めてのことでした。図5にはSMILES観測で初めて得られた赤道域上空におけるClOとHOClの24時間変化を示しました。例えば高度

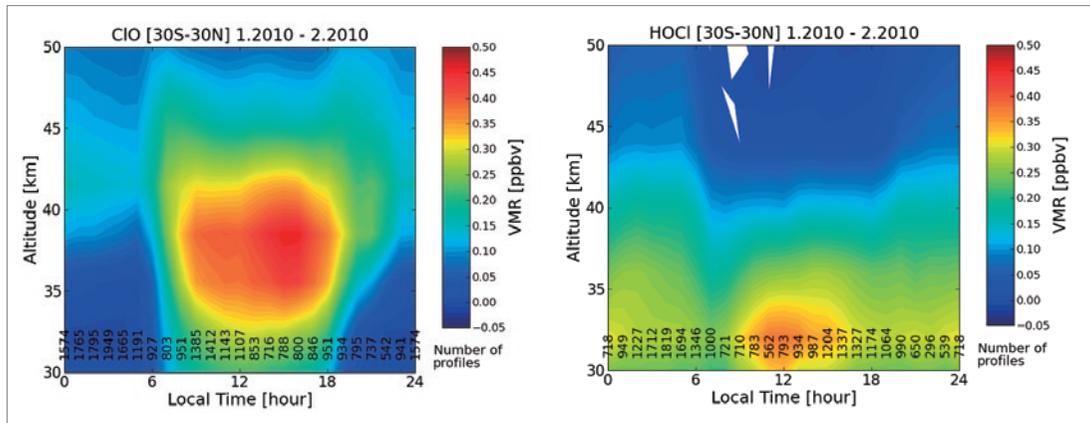


図5 上部成層圏（高度45km付近）において、日没とともにCIOがHOClに変換し、夜明けとともに再びCIOに戻る様子を初めて実測定で捉えました。[T.O.Sato, Titech, Private communication]

45km に注目すると、昼間には CIO の姿をした塩素原子 Cl が、夜間には $\text{CIO} + \text{HO}_2 \rightarrow \text{HOCl}$ の反応により HOCl となり、夜明けと共に $\text{HOCl} + h\nu \rightarrow \text{Cl} + \text{OH}$ 、 $\text{Cl} + \text{O}_3 \rightarrow \text{CIO} + \text{O}_2$ と変換していく様子を観測により捉えています。これらは理論的計算では予測されていたものの、グローバル観測では SMILES が初めて実証した現象です。SMILES 観測事実により定量的な解釈が可能になりました。オゾン破壊化学反応のメカニズムの詳細な理解は、人類の多くが居住する中緯度や赤道域におけるオゾン破壊量の定量的な見積りを可能にし、オゾン層破壊回復時期予測の精度向上に貢献します。これら SMILES で得られた研究結果を用いて今後は WMO(世界気象機関)への提言をしていくことを目指しています。

これから

現在、人類活動は地球大気環境システムに対する主要な強制力のひとつとなり、生物の生存基盤である大気質や水資源に対して影響を及ぼしています。宇宙からの大気環境の監視は、地球の温暖化や大気汚染と健康被害などの現実の実態把握の道具として非常に有効です。これらのデータを有効に使い、安心・安全な国民生活・

社会経済活動をサポートすることは今後も重要性を増すでしょう。しかし 20 年前とは異なり、現在では環境衛星観測は珍しいものではなくなりました。観測で得られる大量の衛星観測データに対してデータ処理が追いついていないことが問題になってきています。また、たくさんある衛星データの統合的解析の重要性も増してきました。今後は、NICT で進められているサイエンスクラウドプロジェクトを用いて、衛星データ処理を 1 桁高速化し、データ統合することにより新しい世界を展開していきたいと思っています。

参考

- SMILES のホームページ
<http://smiles.nict.go.jp/>
- SMILES 観測データのページ
https://smiles-p6.nict.go.jp/products/operational_latitude-longitude-2days.jsf

用語解説

* ラジカル

通常は 2 個 1 組で原子核の周りの軌道上を回転しているはずの電子が何らかの条件によって1つしかなくなっている状態のこと。

世界の雲分布を計測し 地球温暖化の鍵を探る

—EarthCARE (アースケア) 衛星搭載の雲プロファイリングレーダの開発—

「NICT がこれまで培ってきた雲や雨を計測するレーダ技術は地球全体の雲や降水を監視する衛星へと発展してきました。EarthCARE 搭載の雲プロファイリングレーダはそのうちのひとつです。この衛星は地球温暖化予測の研究等に役立てられます。」

高橋 暢宏 (たかはし のぶひろ)

経営企画部

企画戦略室 総括プランニングマネージャー

大学では気象学を専攻し、レーダを使った降水システムの解析等を行ってきた縁で、熱帯降雨観測衛星(TRMM)が打ち上がる3年ほど前に、郵政省通信総合研究所(現NICT)に入所した。以来、衛星搭載降雨レーダや雲レーダとかかわりを持ってきている。クラリネット演奏が趣味で、長年オーケストラで活動している。最近は、もっぴら息子と遊ぶことが最大の楽しみになっている。

地球温暖化問題の解決を目指して

地球温暖化に代表される気候変動の問題は、私たちに身近な問題となってきています。特に将来への不安を少しでも減らすという観点から、低炭素社会の実現、省エネ、エコというキーワードが頻繁に使われています。この問題に対する科学の役割としては将来の姿を正確に予測することが考えられます。例えば、将来どんな気候になるのか？四季はどうなるのか？年ごとの天候の変化は大きくなるのか？といった疑問に答えることです。その鍵となるプレイヤーは数値気候モデルです。いま話題の「京(けい)」や「地球シミュレータ」といったスーパーコンピュータがそれに該当します。地球温暖化問題では、二酸化炭素の増加による温暖化のシミュレーションが数多くなされて



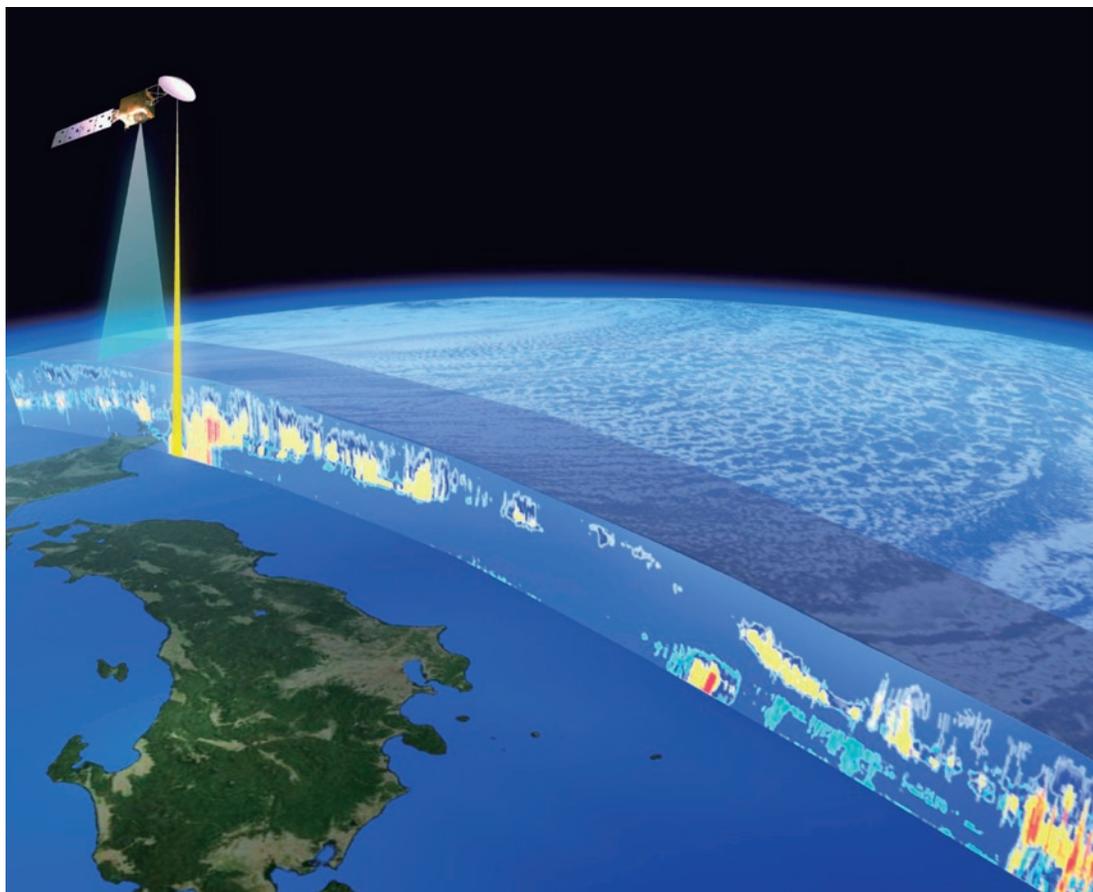


図1 EarthCARE観測イメージ CPRは雲の鉛直構造の情報を取得するのに用いられます。

いますが予測精度向上の鍵を握っているのは雲やエアロゾルといわれる大気塵です。といいますが、高い高度にある雲(絹雲など)は氷粒子からなっており、太陽光は透過しますが地球表面から放射される赤外線は吸収しますので、温暖化に寄与する効果を持っています(毛布の役割などといわれています)。一方、低い高度にある雲(層積雲など)は真っ白く見えることからわかるように、太陽光をよく反射して、地表面の気温を下げる効果を持っています。そして、エアロゾルは雲ができるときに核として働きます。そのため、雲の現れる高さが違ってくると温暖化の度合いが変わってくるのです。さらに細かく言えば、雲による効果は雲粒の大きさや雲の層の厚さ、また相状態(雨か雪か)などで決まるため、スーパーコン

ピュータによる予測であっても非常に難しい問題となっています。このようなことから、雲の、それも地球全体での、高さや厚さを正確に観測することが重要なのです。そこで、人工衛星の出番です。人工衛星なら広い太平洋の真ん中でも、人が住んでいないような砂漠でも、同じように観測することができるからです。

● EarthCARE ミッション

このような背景のもとに、EarthCARE ミッションはスタートしました。EarthCARE は英語の Earth Clouds, Aerosols and Radiation Explorer を略したもので、日本語では雲・エアロゾル放射ミッションと訳されますが、地球上の

雲とエアロゾルを立体的に観測し、地球上の放射バランスのメカニズムを明らかにすることを目的とした人工衛星です。この衛星計画は欧州宇宙機関(ESA)と日本(宇宙航空研究開発機構: JAXAとNICT)の共同開発計画であり、2015年の打ち上げを目指しています。図1に観測のイメージを示します。このEarthCARE衛星の大きな特徴は94GHz(波長約3mm)の雲プロファイリングレーダ(以下CPRといいます)とライダー(レーザー光を用いたリモートセンサー)を同時に搭載していることで、これによって雲やエアロゾルの出現高度などの鉛直の分布情報を測定します。CPRはJAXAとNICTが協力して開発し、ライダーなどその他の機器の開発および衛星打ち上げはESAが担当しています。

私たちが開発するCPRのチャレンジは雲の立体的な構造の計測にドップラー速度計測機能から得られる雲内の上下運動の情報を加えることによって、雲の実態を明らかにすることです。このドップラー速度計測機能は、雲や降水を測る衛星搭載のレーダとしてはEarthCAREが初めて挑戦するもので、世界から注目されています。

● NICT だからこそ

NICTではこれまでリモートセンシング機器の研究開発を長年にわたって行ってきており、その成果が1997年に打ち上げられた熱帯降雨観測衛星(TRMM)搭載の降雨レーダや2014年打ち上げ予定の全球降水観測計画(GPM)主衛星搭載の二周波降水レーダ(DPR)(いずれもJAXAと共同開

発)によって実を結んでいます。そして、さらに技術的に難しい高周波レーダ(雲レーダ)へと挑んできました。1996年には航空機搭載の雲レーダの開発を行い、この実績をもとに2007年からJAXAと共同でCPRの本格的な設計・開発を開始しました。NICTはこれまでの雲レーダの開発経験を活かして、送受信部と1次放射器の機能をもつ準光学給電部の開発を担当し、直径2.5mの大型アンテナと信号処理部、そしてレーダの全体システムをJAXAが受け持っています(図2にCPRの概念図を示します)。送受信部は94GHzの電波をパルス状に送信し、雲から返ってきた電波を受信する機能を持つ、CPRの心臓部と言えます。

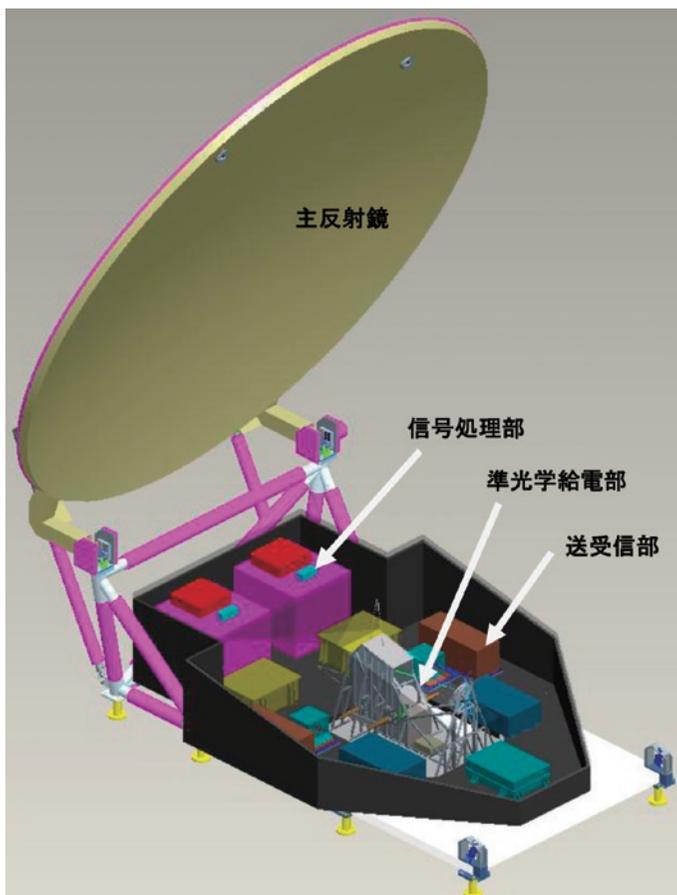


図2 EarthCARE衛星搭載雲プロファイリングレーダ(CPR)の概観図
CPRは直径2.5mの主反射鏡(アンテナ)、送受信部、準光学給電部、信号処理部から構成されています。

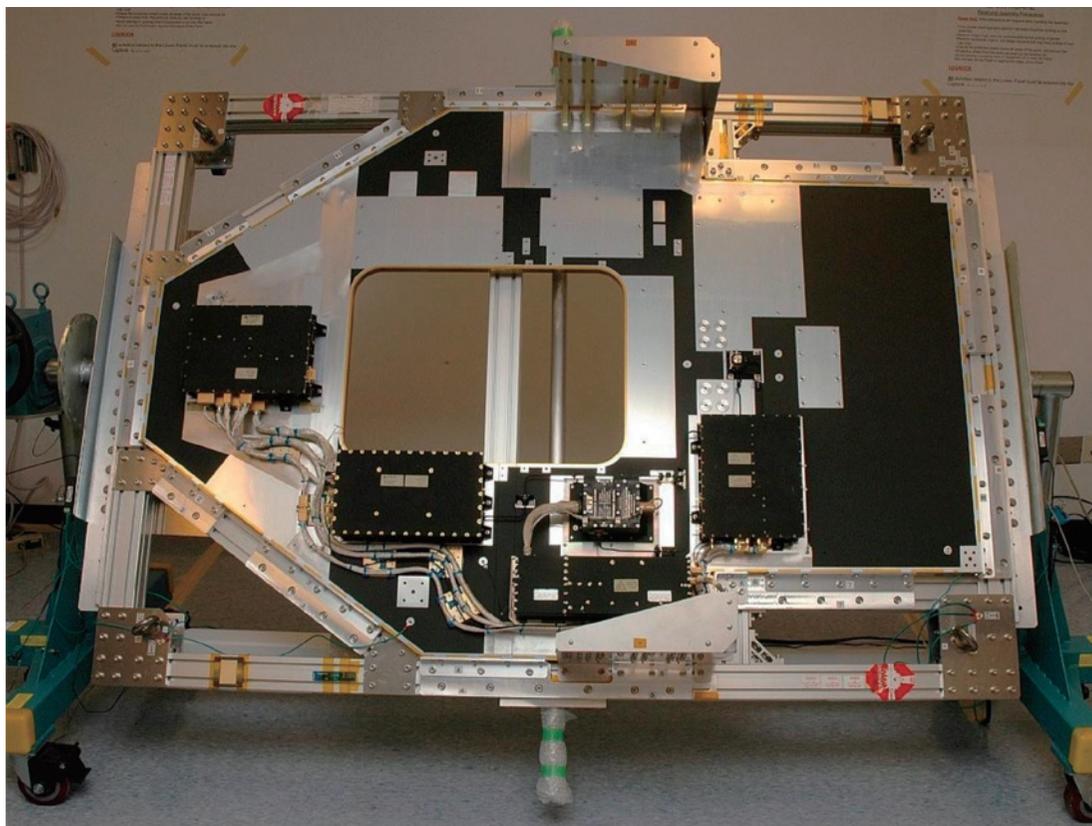


図3 EarthCARE/CPRの送受信部のエンジニアリングモデル

ます。準光学給電部は送信と受信を分離する機能を持ち、光学的なアプローチで少ない損失を実現するとともに、ドップラー計測機能を満たすための高い製造精度を実現しました。

現在、CPRはエンジニアリングモデルという実際に搭載する機器の性能を確認するためのモデルの開発を終え、打ち上げに耐え、宇宙環境において所望の性能が実現できることを試験・確認しています(図3、4にNICTが開発した送受信部と準光学給電部のエンジニアリングモデルの写真を示します)。今後、搭載機器の製造・試験、打ち上げがあり、そしてそのあとにCPRのデータを用いた研究が待っています。長い道のりですが、一步一步着実に進めることができれば、と考えています。

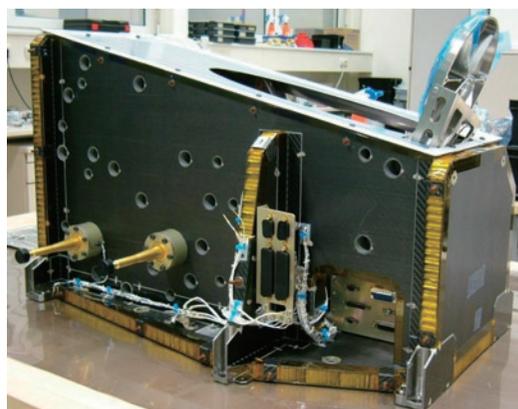


図4 EarthCARE/CPRの準光学給電部のエンジニアリングモデル

東北地方太平洋沖地震後の 大気の波、宇宙まで到達

—300 km上空の電離圏^{でんりけん}で波紋状の波を観測—

「巨大地震は地中や海洋の波だけでなく大気の波も起こし、300km上空まで到達していたことを示す現象が、NICTの電離圏定常観測によって初めて詳細に明らかになりました。」

津川 卓也 (つがわ たくや)

電磁波計測研究所
宇宙環境インフォマティクス研究室 主任研究員

大学院博士課程修了後、日本学術振興会特別研究員(名古屋大学、マサチューセッツ工科大学)等を経て、2007年、NICTに入所。電波伝播に障害を与える電離圏擾乱現象の監視・予測・補正に関する研究に従事。博士(理学)。特技は剣道で学生時代は体育会剣道部の主将として全国大会にも出場。趣味はバイクツーリングと最近始めたテニス。



はじめに

高さ約 60km 以上の地球の大気は、太陽からの極端紫外線等^{きょくたんしがいせん}によってその一部が電離され、プラスとマイナスの電気を帯びた粒子から成る電離ガス(プラズマ)となっています。このプラズマ状態の大気が濃い領域^{でんりけん}を電離圏と呼びます。この「宇宙の入り口」とも言える電離圏は、高さ 300km 付近でプラズマの濃さ(電子密度)が最も高く、短波帯の電波を反射したり、人工衛星からの電波を遅らせたりする性質を持ちます。電離圏は、太陽や磁気圏^{じきけん}、下層大気の活動等の影響を受けて常に変動しており、しばしば短波通信や、衛星測位の高度利用、衛星通信等に障害を与えます(図 1)。このような電離圏の変動の監視や、その予報につながる研究を行うため、電磁波計測研

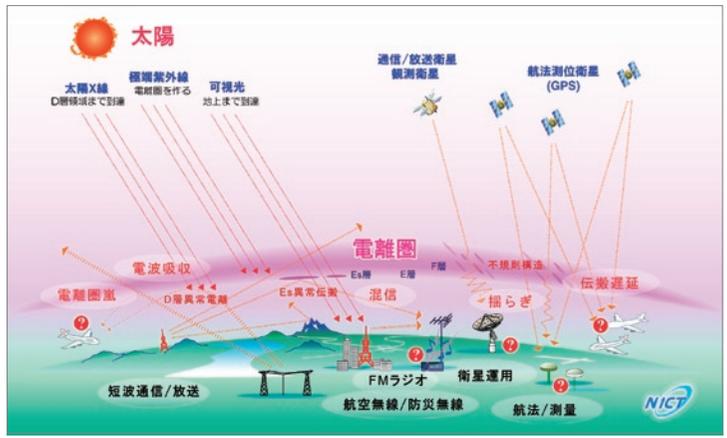


図1 電波伝播に対する電離圏の影響

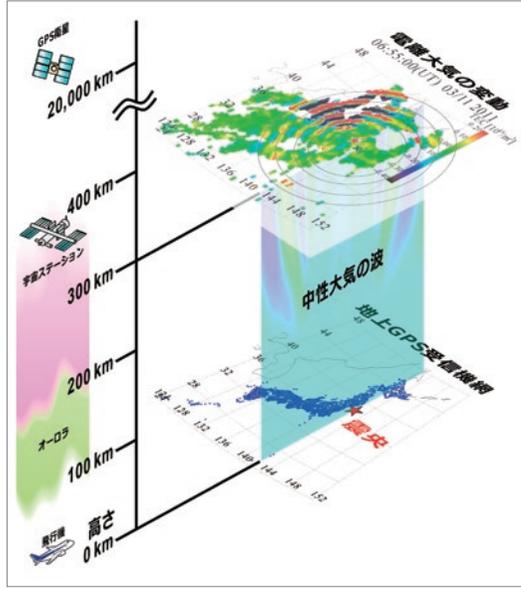


図2 地震後に高度300kmの電離圏まで大気波動が到達したことを示す現象の概要図
 高さ20,000kmを周回するGPS衛星の信号を、地上のGPS受信機網 (GEONET、約1,200観測点) で受信し、高さ300km付近の電離圏を観測します。地震後に、震央付近の海面で励起された大気波が、高さ300kmまで到達し、電離圏に波紋を作ったと考えられます。

研究所宇宙環境インフォマティクス研究室では、イオノゾンデ網による電離圏定常観測に加え、京都大学、名古屋大学と共同して国土地理院のGPS受信機網(以下「GEONET」)を利用した電離圏全電子数(以下「TEC」)観測を行っています。この観測の中で、2011年3月11日14時46分に

発生した東北地方太平洋沖地震(マグニチュード9.0)の約7分後から数時間にかけて、震源付近から波紋のように拡がり電離圏内を伝播する大気波動を捉えました(図2)。

● 地震後の電離圏観測

電離圏を突き抜ける電波は、伝播経路上の電子の総数と電波の周波数に依存して、速度が遅くなります。この性質を利用し、GPS衛星から送信される周波数の異なる2つの信号から、受信機と衛星を結ぶ経路に沿って積分したTECが測定できます。TECには、電子密度が最大となる高さ約300kmの電離圏の変化が強く反映されます。約1,200観測点から成るGEONETのデータを利用して算出されたTEC変動を図3に示します。このように稠密なGEONETと視野内にあるすべてのGPS衛星を用いることで、高い空間解像度で広範囲に電離圏が観測できます。図3では、TECの10分以下の短周期変動を示しており、単位はTEC Unit (TECU) = 10^{16} 個/m² で表されます。色はTEC変動の振幅を示しており、赤は定常レベルから+0.2TECU、黒は-0.4TECUです(この時刻の背景TECは20~30TECU)。

このTEC観測によると、赤い星印で示した震央(北緯38.322°、東経142.369°、アメリカ地質調査所による)から、約170km南東にずれた場所(×印)を中心に、地震の約7分後から電離圏で波が現れ始め、同心円状に広がっていました。私たちは、この同心円の中心を「電離圏震央」と名付けました。この電離圏震央は、海底津波計等で推定された津波の最初の隆起ポイントとほぼ一致していました。同心円状の波は、西日本では18時00分頃まで観測されていました。

図4は、イオノゾンデを用いた電離圏電子密度の高度分布を示しています。電離圏は電子密度に応じた周波数の電波を反射する性質がありますが、イオノゾンデは地上から周波数を変えながら上空に電波を放射し、電離圏からのエコーの時間を計測することにより、電子密度の高度分布を観測します。NICTでは、国内4ヶ所(北海道、東京、鹿児島、沖縄)で定常的に観測を行っています。図4では、鹿児島・山川の地

震直前(上図)と直後(下図)の電子密度の高度分布を示していますが、地震直後の高度分布が地震直前の通常見られる滑らかな分布とは異なって乱れており、20～30kmの鉛直波長を持つ波が高さ150～250kmの電離圏内を伝播していたことが分かりました。

これらの観測結果から、巨大地震は、地中の波(地震波)、海洋の波(津波)だけではなく、大気の波(音波、大気重力波)を起こし、その大気の

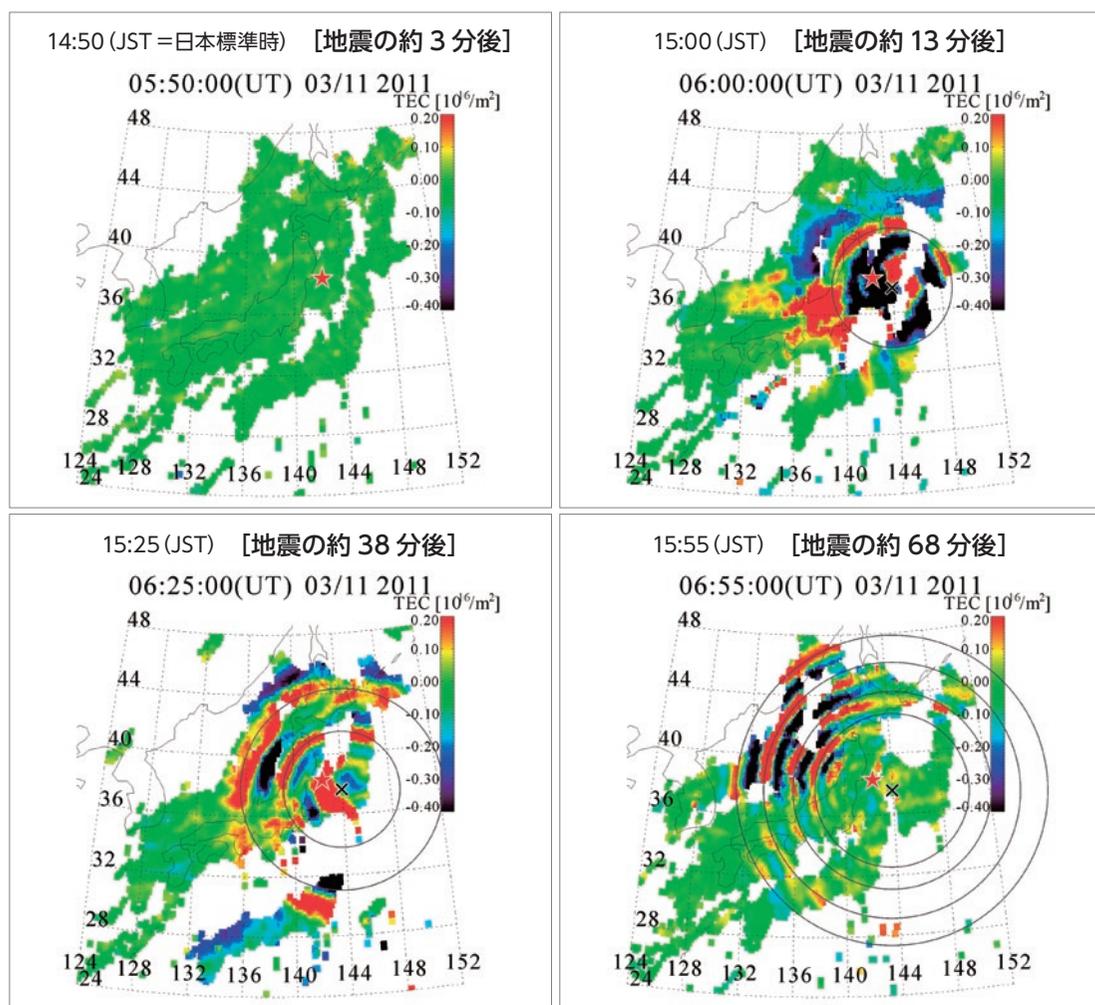


図3 GEONETを利用して算出されたTEC変動

TECは単位面積を持つ鉛直の仮想的な柱状領域内の電子の総数で、一般にTEC Unit (TECU) = 10^{16} 個/m²で表されます。ここでは、10分以下の短周期変動のみを示しています。色はTEC変動の振幅を示しており、赤は定常レベルから+0.2TECU、黒は-0.4TECUです(この時刻の背景TECは20～30TECU)。赤い星印は震央、×印は電離圏震央を示しています。同心円の補助線は電離圏震央を中心としています。

動画は右記Webサイトで閲覧・ダウンロードが可能です。 http://www.seg.nict.go.jp/2011TohokuEarthquake/index_j.html

波が電離圏まで到達したと考えられます(図5)。このような電離圏内の波は、2004年のスマトラ地震や2010年のチリ地震等、ほかの巨大地震でも観測されていますが、高い分解能かつ広範囲に、現象の起こり始めから伝播過程までの全体像を詳細に捉えたのは今回が初めてです。

● 今後の展望

近年、電離圏の変動は、太陽や磁気圏など上方からの影響に加え、対流圏など下層の中性大気の変動も大きく関わっていることが明らかになってきました。しかしながら、下層大気の広範囲かつ高解像度の観測が難しいこともあり、その電離圏への影響は未だ明らかになっていません。今回の観測は、下層大気の変動と電離圏の変動の因果関係が比較的是っきりしているため、両者の関係を明らかにする研究の貴重な資料になります。また、地震の約7分後には電離圏で変動が現れ始めることと、その変動の中心が津波の波源とほぼ一致することから、広域かつ高解像度のリアルタイム電離圏観測が進めば、宇宙からの津波監視といった実利用にも応用できる可能性を示しています。

※共同研究者(敬称略)
 NICT: 丸山隆、西岡未知、品川裕之、加藤久雄、長妻努、村田健史
 京都大学: 齊藤昭則
 名古屋大学: 大塚雄一
 電気通信大学: 松村充

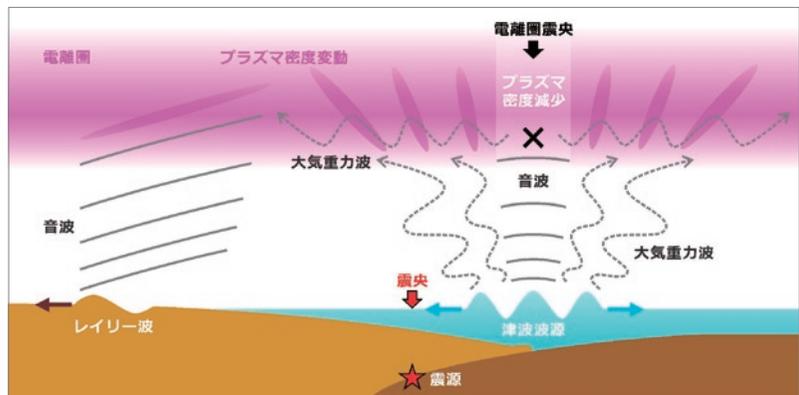


図5 地震後の大気波動と電離圏変動の発生メカニズム

電離圏で観測された同心円状の波の第一波(約3.5km/秒)は、レイリー波(表面波)で励起された音波によるものと考えられます。第二波以降の波は、電離圏震央や津波波面で励起された大気重力波によるものと考えられます。また、波紋状の波に加えて、電離圏震央付近では電離圏プラズマ密度の減少(背景に対して20%程度)や、約4分周期のプラズマ密度変動も観測されました。

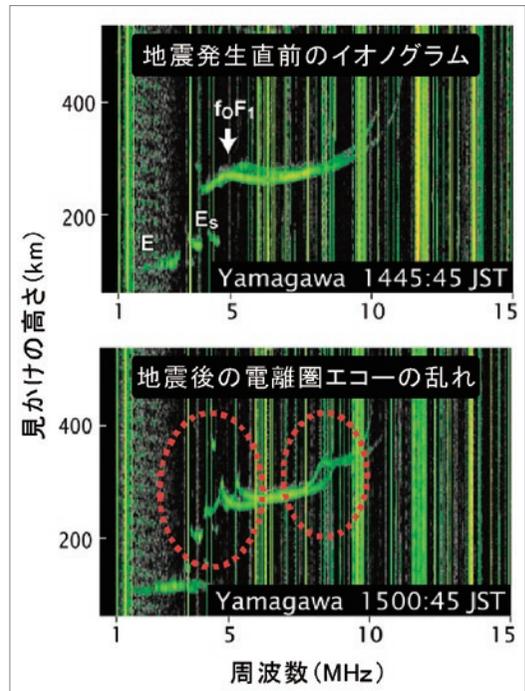


図4 鹿児島・山川のイオノンデ観測から得られた地震直前と直後のイオノグラム

イオノグラムの横軸は周波数、縦軸は見かけの高さで、電離圏に打ち上げた電波の反射(エコー)の様子を示しています。通常の電離圏エコー(上図)と異なり、見かけの高さ200~300km(実高度で150~250km)付近において、電離圏エコーの乱れが見られました(赤丸部分)。この乱れは、電離圏内に20~30kmの鉛直構造を持つ波が存在したことを示しています。

太陽から地球までの観測データをもとに 宇宙環境の変動を予測する宇宙天気予報

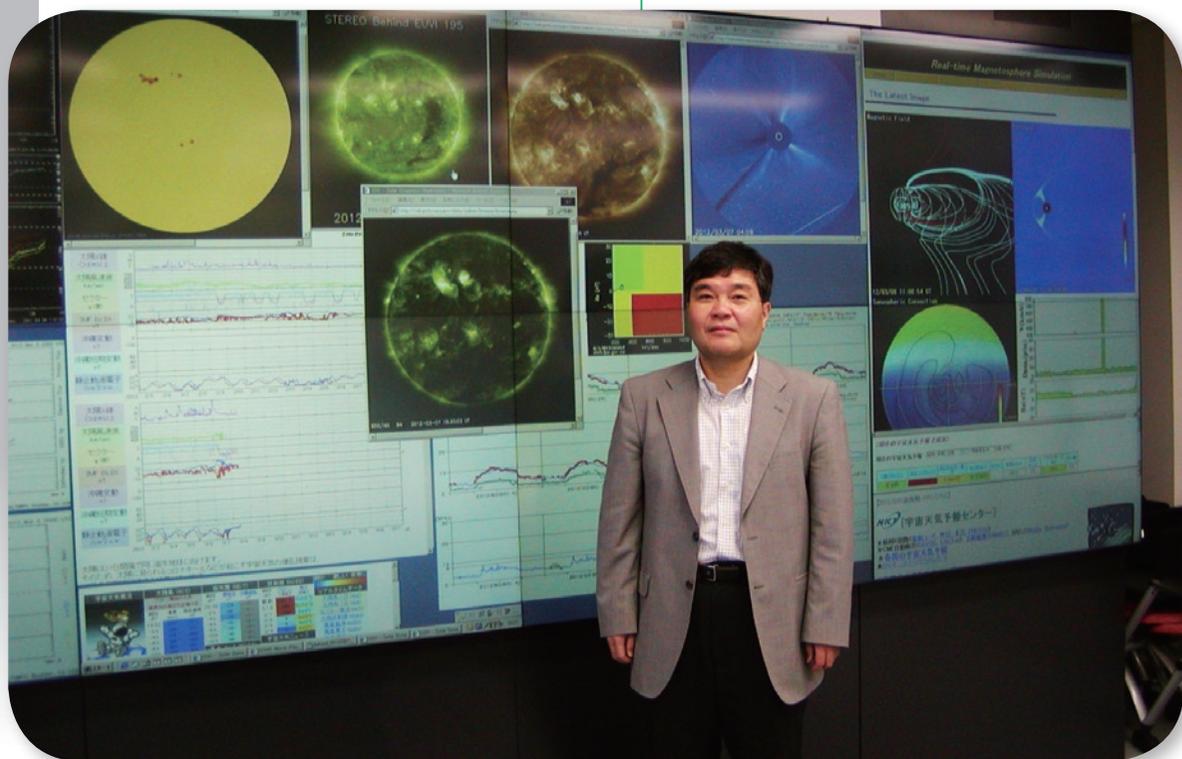
—日々の生活に少なからず影響を与える
宇宙環境の情報をリアルタイムに提供する—

「通信や放送などに使われている人工衛星、衛星を使った測位、電力システムなどに影響を与える宇宙環境の変動を予測する宇宙天気予報について紹介します。」

巨 慎一（わたり しんいち）

電磁波計測研究所
宇宙環境インフォマティクス研究室 研究マネージャー

宇宙天気の研究に長くたずさわっているのですが、まだ、本物のオーロラを見たことがありません。機会があればぜひ見に行きたいと思っています。



● 宇宙天気予報とは

宇宙環境の変動は地上の天気と同じように、さまざまな形で私たちの暮らしに影響を与えています。NICTは長年にわたり宇宙天気の研究や予測を行い、「宇宙天気予報」として情報提供を行っています。

真空中で何も無いと思われている宇宙空間にも微量の電気を帯びた粒子が存在し、それらの粒子により、宇宙の環境は日々変動しています。この宇宙環境の変動は地上と同様に太陽の影響を大きく受けています。例えば、太陽の表面で太陽フレアと呼ばれる爆発現象が発生すると、その影響が地球周辺にまで及びます。太陽フレアの発生から数十分から数時間後には、エネルギーの高い粒子が太陽から到来して人工衛星に障害を起こしたり、宇宙飛行士が被曝したりといった影

響が出ます。その後2、3日経過すると、太陽フレアに伴って放出される電気を帯びた雲のようなものが地球に到達して、地球の磁場が乱されます。地球の磁場が乱されるとオーロラが見えることがあります。その一方で地磁気の変動によって地上の送電システムに誘導電流が発生して障害が起きる可能性もあります。最近では、GPSなどの衛星を使った測位が一般的になって、旅客機の運航や離着陸、あるいは土地の測量や無人の農作業機械などにも利用されるようになってきていますが、衛星測位システムを高度に利用するためには、宇宙天気の影響も考慮する必要があります(図1)。

こうした人間の作ったシステムや人間に影響を与えるような宇宙環境の変動を総称して「宇宙天気」と呼び、太陽や太陽風などのリアルタイムの観測データから宇宙環境の変動を予測し、その

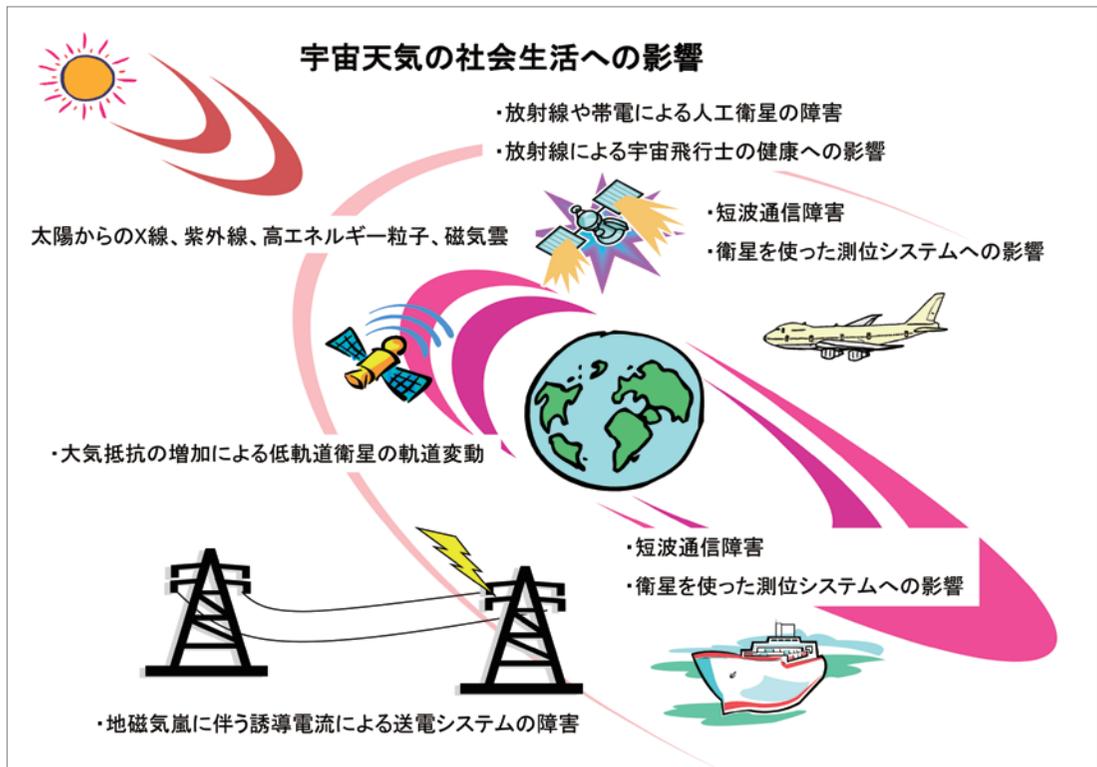


図1 宇宙天気の影響

情報を提供するのが宇宙天気予報です。私たちは日頃から外出前に天気を調べたり、テレビの天気予報を見て洗濯するかどうかを決めたりします。地上の天気予報と同じように、人工衛星など宇宙天気の影響を受ける可能性のあるシステムを運用している人たちは、宇宙天気予報を参考にしています。

実際、2003年10月末の「ハロウィン・イベント」と呼ばれている太陽の活動が非常に活発になった時期に、日本の人工衛星「こだま」に搭載されたセンサーにノイズが入って地球の方向を見失い、衛星の姿勢制御に不具合が発生しました。また、1989年3月にカナダのケベック州で起きた9時間にも及ぶ停電は、地磁気嵐による地磁気の大きな変動が原因です。

● 宇宙天気予報のはじまりについて

NICTが、その前身である郵政省電波研究所であった頃、1957年のIGY(国際地球観測年)の際には、既に現在の宇宙天気予報のルーツとなる短波電波を使った通信のための予報警報を行っていました。当時は国内外の通信や放送などで短波電波が広く利用されていました。その短波電波の伝播に影響を与える宇宙環境の変動を予測することは、電波研究所にとって重要な使命でした。また、IUWDS(ウルシグラム世界日業務)という国際機関があり、日本も参加して国際的な情報交換を行っていました。その後、1996年にIUWDSは、ISES(国際宇宙環境情報サービス)と名称を変更して現在に至っています。ISESには、現在、アメリカ合衆国、インド、オーストラリア、カナダ、韓国、スウェーデン、チェコ共和国、中国、日本、南アフリカ共和国、ブラジル、ベルギー、ポーランド、ロシアの14カ国が参加しています。

衛星通信や光ファイバーによる通信が増えたことで、以前に比べて短波通信の重要度は下

がってきましたが、人工衛星の利用や国際宇宙ステーションに人が滞在するなど人類の宇宙利用が進んできています。そこで、これまでの経験を宇宙天気予報として宇宙利用などにも役立てていこうということで、NICTは世界に先駆けて1988年に「宇宙天気予報」の研究プロジェクトをスタートさせました。このときから「宇宙天気予報」という言葉を使っています。アメリカがNational Space Weather Programと呼ばれる同様の研究プロジェクトを始めたのは1995年、ヨーロッパで欧州宇宙機構(ESA)が宇宙天気プロジェクトを始めたのは1998年のことでした。

● 宇宙天気の情報配信について

NICTの予報センターでは、太陽、太陽風、磁気圏、電離圏の地上や人工衛星によるほぼリアルタイムの観測データを常時モニタリングし(図2)、



図2 ACE衛星からのリアルタイム太陽風データを受信しているNICTのアンテナ



図3 毎日、午後2時半に行われる宇宙天気予報会議の様子 (右) 廊下に響きわたる鐘の音が、会議招集の合図

地球に影響を及ぼしそうな現象が起きた場合には、適宜、臨時情報を配信しています。毎日、午後2時半に予報会議(図3)を行い、日々のデータから太陽フレア発生や地磁気嵐発生の予報、太陽高エネルギー粒子現象の発生状況などについて検討を行い、その結果を日本時間(JST)の午後3時に配信しています。NICTのWebサイト(図4)から公開するほか、電子メールでも情報を送って配信しています。また、毎週金曜日には週報を配信しています。宇宙天気予報を一般の方にもわかりやすいかたちで情報提供するためYouTubeのNICT Channel*から「週刊宇宙天気ニュース」という動画による宇宙天気情報の配信も行っています。

NICTは、スーパーコンピュータを使ったシミュレーションにも力を入れていて、数値モデルの分野においては、他の国の予報センターに比べて進んでいます。リアルタイムデータによる「ナウキャスト」や経験モデルによる予測に加え、長期的には数値予報の活用が重要だと考えています。



図4 宇宙天気情報のWebページ (<http://swc.nict.go.jp>)

* YouTubeのNICT Channel:
<http://www.youtube.com/user/NICTchannel>

誤差6,500万年に1秒

—日本発の光格子時計で1秒の新たな定義を狙う—

「さらなる時の細分化を求める現代社会。時計の振り子を毎秒400兆回という光の振動で実現し、桁外れの精度を皆様にお届けすべく、光原子時計とその配信技術を研究しています。」

井戸 哲也 (いど てつや)

電磁波計測研究所
時空標準研究室 主任研究員

大学院修了後、JST-ERATO 研究員、JILA(米国 NIST/コロラド大学) Research Associate、JST- さきがけ研究者を経て、2006年、NICT に入所。大学院修了後より Sr 原子のレーザー冷却及びその原子時計への応用、また精密光計測技術や周波数コム技術を利用した真空紫外光発生の研究に従事。博士(工学)。

背景

NICT が国民の皆様へ供給している日本標準時は、世界標準時があってそれを中継して国内に配っている、というのではなく、あくまで NICT 内にある多数の原子時計で自ら生成しているものです。従って、NICT 内でできるだけ正確な1秒を生成する能力を保持する必要があります。現在、国際単位系の1秒はセシウム原子の9.2GHzのマイクロ波遷移^{*1}で定義されており、NICTにて開発したセシウム原子泉方式周波数標準は 1.4×10^{-15} の不確かさ(誤差 2,000 万年に1秒)で1秒を実現できます。

しかし、通信においてその媒体を電波から光へ変更して高速大容量が実現したように、周波数標準においても光による方式を確立すると性



能が劇的に改善します。そのため、前世紀末より光原子時計の開発が精力的に行われてきており、近年ではマイクロ波時計を凌駕する光原子時計方式が複数開発され、秒の定義を書き換えることが議論されています。光原子時計の方式として現在欧米発で30年以上の歴史のある単一イオントラップ方式*2と今世紀に入ってから日本で提案された光格子時計方式があります。また、光原子時計の開発と並んで秒の改訂の力を握るのが、遠隔地にある周波数標準を比較・校正する技術です。標準として世界中で皆が1秒を共有するためにはそれぞれの時計が一致した時間を生成することを確認する必要があります。光原子時計による高性能化に見合う性能改善を遠距離周波数比較技術においても実現する必要があります。

時空標準研究室ではストロンチウム(Sr)光格子時計を独自開発し、2010年半ばより動作を開始しました。そしてこの時計が生成する基準光周波数を、開発した光ファイバによる高精度光周波数標準伝送システムによって東京大学(以下「東大」)に伝送し、東大の光格子時計との遠距離周波数比較を行い、光格子時計の普遍性と光周波数標準の伝送・比較技術の確立を実現し、さらなる精度向上を図っています。

● 光格子時計とは

光原子時計は原子遷移に常にレーザー光が共鳴になるようレーザー周波数を調整することによって得られます。このときに原子が動いているとドップラーシフトを受けてしまうために原子を空間に強く固定する(トラップする)必要があります。前世紀においてはイオンを使用して電場でトラップするイオントラップが唯一の固定する方法でしたが、2001年に東大の香取秀俊教授は特定の波長のレーザー光の干渉縞(光格子)に原子をトラップすれば、周波数シフトを

起こさずに強くトラップでき、高性能な光原子時計を構築できることに気づき、2003年には筆者と共にドップラーシフトのない非常に先鋭な原子スペクトルを得る原理検証実験に成功しました。そして2006年には東大の他、米仏の研究機関で得られた時計遷移の周波数がよい一致を示したために、この光格子方式の原子時計はその信頼度が認められ、現在10近くの国立標準研究所において研究が精力的に進められています。

● 光ファイバによる高精度光周波数標準伝送技術

光ファイバは温度変化や振動による伸縮や屈折率変化によって光路長が変化し、このため受け手側ではドップラーシフトした間違った周波数を受信してしまいます。そこで、受信側で受信光の一部を同一ファイバで送信側に送り返し、送信側では伝送路で生じた位相雑音を検出し、それを抑制するよう位相補償を送信側で施すことによって受信側に忠実に光周波数を送信できます。2011年の実験では小金井-大手町間のNICTが運用する光ネットワークテストベッドJGN2plus(現JGN-X)を利用したNICT-東大間のファイバ長60kmにおいて約400THzの光周波数を積算時間1秒で標準偏差1Hz以下の伝送精度で伝送する能力をまず確認しました。ただし日本ではファイバ線が空中に宙づりされたり鉄道の近傍に敷設される等、雑音環境が劣悪な場合が多く、今回この精度は天候が穏やかな真夜中という好条件においてのみ得られたものです。欧州では静かな地中に敷設されたファイバによって伝送距離1,000kmのリンクも実証されており、今後、世界一の伝送能力を実証するにはファイバの敷設環境を改善することが必要不可欠になります。

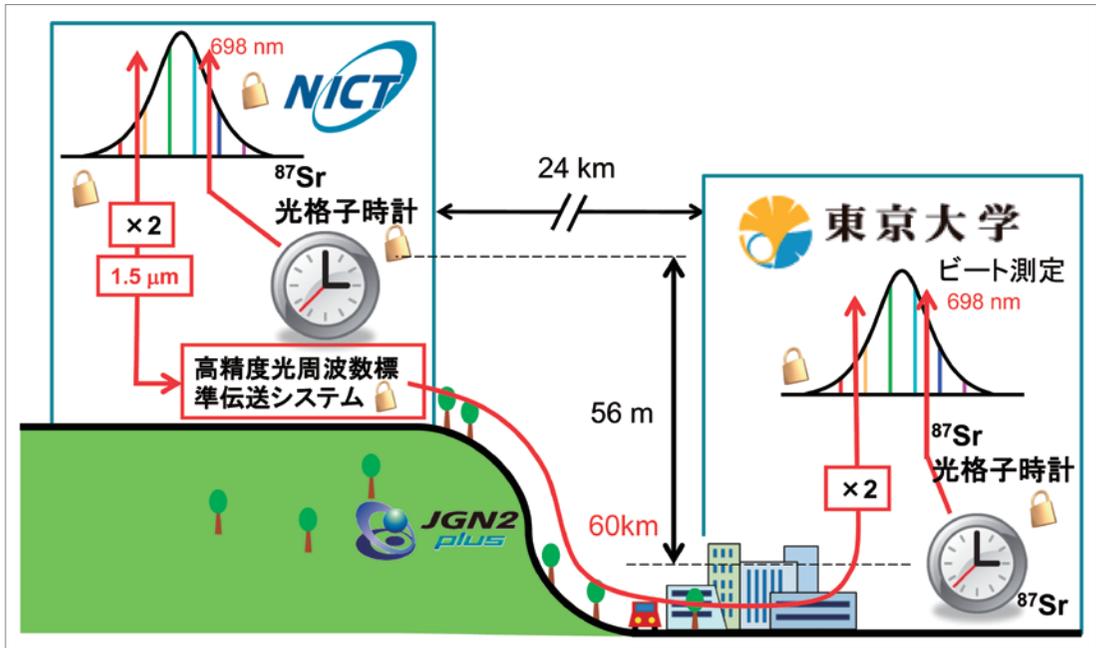


図1 NICT-東大光ファイバリンクによる光格子時計周波数比較の模式図
武蔵野台地の上にあるNICT小金井本部は東大本郷キャンパスに比べて標高が56m高い。

● NICT- 東大光格子時計周波数比較

その後図1に示す構成でNICTと東大の光格子時計の周波数比較を行いました。ストロンチウム光格子時計は波長698nmの光周波数標準信号を生成しますので、NICT(送信)側でまず光周波数コム^{*3}を利用して通信帯への波長変換を行い、その上で東大へ向けて前述の伝送システムを利用して信号を送出します。東大側では受信した光の2倍波をとって再び可視域に戻し、この2倍波に東大側の周波数コムを位相ロックします。これによって、NICTの光格子時計にコヒーレントにリンクされた光周波数コムが東大にて実現し、東大の時計が生成する光周波数とこの周波数コムのビート周波数を測定することにより2つの時計の相対的な周波数差をリアルタイムに測定することが可能になります。図2に1秒ごとに得られた2つの時計の周波数差を示します。NICTの時計の周波数が3~4Hz東大側より高いことが明

瞭に観測され、両地点の光格子時計が同じ周波数を生成していないことが分かります。しかし、この周波数差は主にNICT、東大の56mの標高差に起因しており較正することが可能です。NICTに比べて標高が低く重力が大きい東大では一般相対性理論が示唆するように時の流れが遅くなっていますので同一時間で比較すると周波数が小さくなります。従って2地点の標高差からこのシフト量は不確かさ0.1Hz以下で計算できます。そして最終的にNICTと東大の時計の較正不可能な原因不明の周波数差は430THzのうちわずか $0.04 \pm 0.31\text{Hz}$ (6,500万年に1秒)となりました。周波数標準はいつでもどこでもだれでも同じ周波数が得られることが必須です。この結果によって不確かさ 10^{-16} 台で遠隔地にある時計との周波数一致が初めて確認され、日本発の光格子時計の普遍性が確認されると同時に、周波数標準を正確に遠距離伝送する技術をも手中にしました。

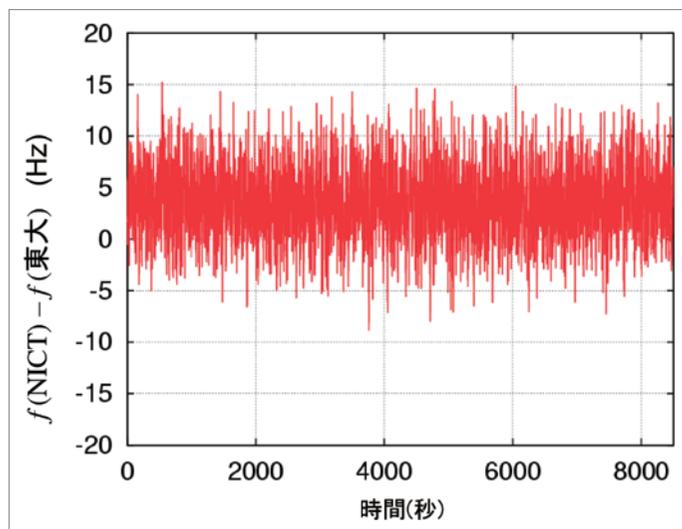


図2 NICT及び東大の光格子時計の周波数差
各点は積算時間1秒で得られており、NICTの光格子時計は3.7Hzだけ東大より周波数が高い698nm光(430THz)を生成している。

● 今後の展望

Sr 光格子時計は2006年に東大の他筆者が在籍していたJILA^{*4}(米国NIST/コロラド大学)で時計動作を開始した後、現在ではNICT・仏独の国立標準研究所においても運用されています。今回光ファイバを利用してNICT-東大間で16桁の周波数同一性が確認されましたが、秒の再定義を確実なものとするには時計自体のさらなる高性能化と共に、光ファイバ接続が困難な欧米の光格子時計との周波数一致を確認する必要があります。これを見据えて時空標準研究室では、現在、世界の標準時と日本標準時の時刻差測定で使用している人工衛星を利用した周波数・時刻比較技術の展開及びVLBI技術を用いた新たな時刻比較技術の開発により、大陸間規模での時刻・周波数比較精度向上を追求しています。また、イオントラップ方式の原子時計についても、光格子時計と同等もしくはそれ以上の性能が得られることがNISTによって研究室内相互比較で確認されており、NICTではこの方式についてもNISTとは異なったアプローチでインジウムイオンによる原子時計の開発を進めています。

用語解説

*1 マイクロ波遷移

原子遷移としては小さいマイクロ波のエネルギー差を持つ原子遷移のこと。通常マイクロ波域の原子遷移は核スピン・電子のスピン間のごく弱い相互作用によって生じる2つの状態間を結び遷移になります。

*2 単一イオントラップ方式

イオンをたった1個電場によってトラップしてそのイオンの吸収線を利用して時計レーザーを安定化する方式。イオンの電場による束縛では上下状態が同じ閉じ込めポテンシャルを感じるため電場の影響によって遷移周波数がシフトすることがありません。なお、一般に複数個をトラップすると近傍のイオンによって生じる不規則な電場のために周波数シフトが起きてしまいます。

*3 光周波数コム

パルスレーザーは、周波数スペクトルを見ると等間隔の周波数成分が存在する櫛状のスペクトルとなっているため、光周波数コム(optical frequency comb)と呼ばれます。一般にこの櫛スペクトルは位相雑音が少ない、非常に安定に動作するパルスレーザーにおいて得られます。

*4 JILA

国立標準技術研究所(NIST: National Institute of Standards and Technology)とコロラド大学の共同機関

世界最高水準の 日本標準時をつくる

「NICT では、日本標準時を『つくり』、世界中と『くらべ』、日本中に『くばる』という業務を行っています。世界の標準時にも貢献し、最高水準にある標準時がここにあります。」



花土 ゆう子 (はなど ゆうこ)

電磁波計測研究所
時空標準研究室 室長

1989年郵政省通信総合研究所(現 NICT)に入所。パルサータイミング計測、時間・周波数標準に関する研究に従事。趣味は野山歩き、絵を見ること。

今村 國康 (いまむら くにやす)

電磁波計測研究所
時空標準研究室 研究マネージャー

1976年郵政省電波研究所(現 NICT)に入所。無線機器の検定・試験法開発、国際間周波数・時刻比較の研究に従事。現在、周波数標準・標準時の運用・開発を担当。



● はじめに

「私たちの研究室(東京都小金井市)では、日本標準時をつくって供給しています」と説明すると、「え?日本の標準時は明石で決めているのでは?」「標準時を作るとは?」など、いろいろな質問を受けます。ここでは、世界と日本の標準時のなりたちと私たちの活動を、簡単に紹介します。

元々の標準時は、地球の自転を基に決められていました。地球の1回転を1日、それを細分化したものを1秒の単位とし、太陽が真南に来る時刻を昼と決めたのです。これを天文時といいます。しかし自転周期がさまざまな要因でゆらいていることが判明し、原子のもつより安定な固有の周波数を基に1秒の長さを決めることとなりました。これを原子時といいます。1967年の国際度量衡総会で「秒は、セシウム133原子の基底状態の2つの超微細準位の間の遷移に対応する放射の周期の91億9263万1770倍の継続時間である」という定義が定まり、1972年からは原子時が世界の標準時となりました。

現在、定義にもとづく1秒がほぼ実現できる超高精度セシウム原子時計が、世界中で10数台動いています(当研究室の原子泉型一次周波数標準器NICT-CsF1もその1台)。ただ、これらは連続運転が難しいため、精度は落ちるが連続運転が可能な市販されるセシウム原子時計をたくさん平均して連続時間を作り、それを超高精度セシウム原子時計で定期的に補正する、という方法で、標準時のおおもとである国際原子時TAIが計算されています。TAIの計算には、世界中の標準機関が持つ約400台の原子時計データが使われています。

TAIは天文時とは無関係であるため、天文時はだんだん原子の時刻からずれていきます。日常生活の感覚に合った天文時と原子時との差が0.9秒以上にならないよう、うるう秒という操作を加えることで、見かけ上原子の時刻と天文の時刻を一致させています。TAIにうるう秒調整をし

たものが協定世界時UTCであり、これが現在、世界の標準時として使われている時刻です。

TAIやUTCは、5日ごとの値が月に1度パリ郊外にある国際度量衡局BIPMで計算されていますが、結果の公表は約1ヶ月後です。世界の標準時は、とびとびで1ヶ月待たないとわからない、しかも計算機の中にしかない時刻なのです。これでは今が何時何分かがわかりません。そのため各国の標準機関では、連続した時間を独自につくりUTCに合うよう調整しながら実信号の形で供給しています。

NICTがUTC準拠でつくる時刻をUTC(NICT)と呼び、日本標準時はこれを基にしています。

● 日本標準時をつくる

NICTでは、長期間(1日以上)で安定なセシウム原子時計と短期間(1日以下)で安定な水素メーザ周波数標準器を組み合わせ、標準時を生成しています。まず原子時計相互のわずかな時刻差を高精度に計測します。このデータを基に18台のセシウム原子時計を最適な方法で合成します。たくさんの時計の合成結果を使うことで、各時計のゆらぎがならされるだけでなく、いくつかの時計が故障や寿命で止まっても途切れない時刻を作ることができます。この長期的に安定なセシウム合成原子時で、短期安定度の良い水素メーザ周波数標準器の信号を補正することで、短期も長期も安定な標準時が実現できるのです。その時刻ずれは約100万年に1秒程度です。

こうしてつくられた標準時は、GPS衛星などを仲介とする方法や商用通信衛星を利用した時刻比較方法で海外の標準時と時刻比較され、この結果を基にUTCとの時刻差がBIPMから公表されます。NICTは、その時刻差が小さくなるように調整しながら運用をしています。これがUTC(NICT)です。また同時に、時刻比較のデータがBIPMで



図1 日本標準時システム(左)と日本標準時生成に使われるセシウム原子時計(右)

活用されることで、NICTの原子時計はTAIをつくる時計群の一部としても大きく貢献しています。

日本標準時 JST は UTC(NICT) を 9 時間(東経 135 度分の時差)進めた時刻です。厳密には日本の東西で時刻差があるはずですが、東経 135 度の時刻を一律に日本の標準時としています。(明石は東経 135 度にあるので「明石の時刻が日本の時刻」というのは間違いではありませんが、明石で日本の時刻を決めているわけではないのです。)

日本標準時を構成する原子時計は、温度や地球磁場などの周辺環境で周波数が変化するのを避けるため、温度・湿度管理、電磁界シールドを施した原器室と呼ばれる特別な 4 つの部屋に分けて設置されており、相互に補完することでメンテナンスや万一のトラブルの際にも止まらないシステムが構築されています。

● 日本標準時をくばる

NICT でつくられた日本標準時及び 1 秒の基準である標準周波数は、いろいろな形で日本全国に向けて配信されています。その主なものが、電波時計の基準の電波として日本中の皆さんに利用して頂いている標準電波です。福島の送信所からは 40kHz、福岡と佐賀の県境にある送信所からは 60kHz の電波にのせて、時刻信号を常時発信しています。

そのほか、電話回線を使って時刻を配信する「テレホンJJY」、ネットワークを経由してオンラインでコンピュータの内部時計を同期させることを目的とした「NTP サーバ」等、各種サービスも実施しています。最近では、インターネットの普及によって商取引や特許出願など、さまざまな分



図2 はがね山標準電波送信所(佐賀県と福岡県の境)の全景

野で電子文書の重要性が増してきており、文書の改ざん防止という意味からも、文書作成の時刻を第三者が証明するといったタイムビジネスが注目されてきています。このような時刻認証事業者に対して、正確な日本標準時を配信するというサービスを行っています。また機器持ち込みやGPS衛星を使った遠隔較正サービスにより、ユーザーの周波数標準器と周波数国家標準との周波数偏差を測定する較正業務も行っています。

● 正確な標準時はなぜ必要なのか

正確な時刻と高精度な基準周波数は、日常生活だけでなく社会インフラが機能する上でも欠かせないものとなっています。例えば電波や光の行き来で距離を測る場合(GPSカーナビもこの

原理を利用)、1億分の1秒のずれは3mの誤差を生み、また仲介の時計が増えるほど時刻合わせの誤差も増えるため、大元の時計への要求精度は高くなります。産業経済を支える複雑で高精度なシステムでは、計測や制御の信号の周波数が狂ってしまうと正常に動作しなくなり、最悪の場合システムが破綻してしまうかもしれません。日本標準時とその基となる周波数国家標準は、高精度計測・制御の基盤となり、見えないところで最先端技術を支えているのです。

途切れてはならずやり直しもできず、常に正確で高精度な標準時と周波数国家標準を発生し続けることは、大変ですがとても重要な仕事です。私たちの研究室では、標準時の生成から供給までを絶え間なく行うとともに、更なる高精度化と新たなサービス展開に向けた開発を進めています。

日本のタイムスタンプの仕組みを 世界に輸出

「電子文書の原本性保証に必要不可欠なタイムスタンプを、日本は世界に先駆けて制度化・実用化しました。この日本発の仕組みを世界中で活用できるよう標準化活動を行っています。」

岩間 司 (いわま つかさ)

電磁波計測研究所
時空標準研究室 研究マネージャー

本人かなりの引きこもり体質で、土日に家から一步も外へ出ないことがままある。職場でも研究室と実験室にこもっているのを好むのだが、何の因果か毎年 ITU へ出席するためジュネーブへ飛ばされてしまう。しかしジュネーブでも会議以外では…。

● 電子文書に潜む脅威と今回の標準化のポイント

パソコンなどを使って作成するいわゆる電子文書は、何回複製(コピー)しても劣化の心配がなく、対応するソフトウェアさえあれば誰でも同じものを再現できることが大きな利点です。しかしながら、これは見方を変えると、元の文書を改ざんしたり、他人になりすまして文書を作成することも容易にできてしまうという欠点となります。これら電子文書の「改ざん」や「なりすまし」という行為はこれからのネットワークを中心とした情報流通社会においては大きな脅威となっています。

電子文書の改ざんやなりすましを防ぐために有効な手段として電子署名やタイムスタンプがあります。電子署名では「誰が」「何を」作成したかを証明することができ、タイムスタンプでは「い



つ「何を」作成したかを証明できます。そして電子署名とタイムスタンプを併用することにより「いつ」「誰が」「何を」作成したか証明できることとなります(図1)。

電子署名やタイムスタンプ付与の方法は、すでに標準化されており、特に電子署名については日本をはじめ各国で法制化されています。タイムスタンプについては、付与と並んで時刻の信頼性というもう一つの重要なファクタがあります。しかしながら、この信頼性については、協定世界

時(Coordinated Universal Time: UTC)にトレーサブル*¹であることのみが規定されていて、具体的な実現手段は明確ではありませんでした。

● 日本におけるタイムスタンプの制度化

日本におけるタイムスタンプを含むタイムビジネス標準化の動きは2002年1月から6月にかけて複数回行われた総務省主催のタイムビジネス研究会から始まります。この研究会において、日本のタイムビジネスの方向性が示されました。

その後、民間主体のタイムビジネス推進協議会が2002年6月に設立されました。また、NICTは総務省から委託を受け、2003年度から2005年度にかけて「タイムスタンプ・プラットフォーム技術の研究開発」を実施しました。

さらに総務省は2004年11月に「タイムビジネスに係る指針～ネットワークの安心な利用と電子データの安全な長期保存のために～」を公表

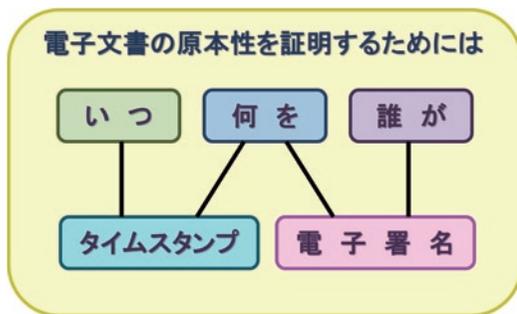


図1 電子文書の原本確保のための技術

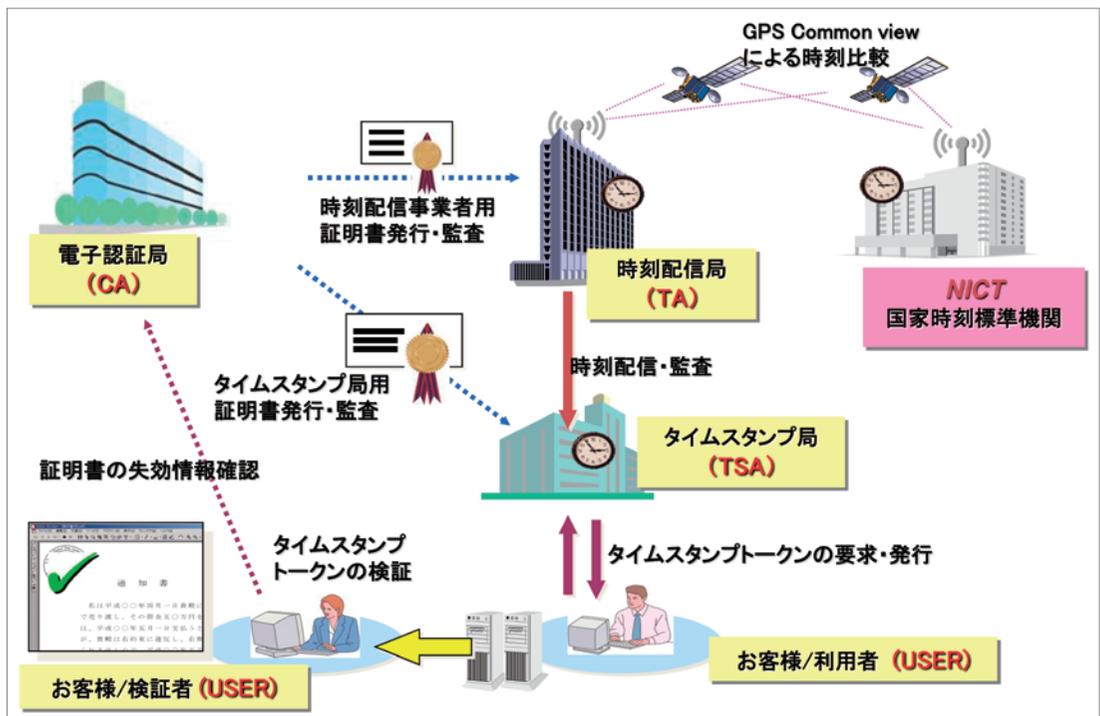


図2 日本のタイムスタンプの仕組み(デジタル署名方式の例)

しました。この指針により2005年2月から日本のタイムスタンプの仕組みを制度化した「タイムビジネス信頼・安心認定制度」が創設されたのです。

● 時刻の信頼性を重視した日本のタイムスタンプ制度

日本のタイムスタンプ認定制度における特徴は、タイムスタンプの根幹となる時刻の信頼性に重きを置いた点です。これまでタイムスタンプに用いる時刻についてはUTCへのトレーサビリティは求められるものの時刻の正確さについての規定はありませんでした。

日本の認定制度では、NICTの標準時と同期した時刻をタイムスタンプ局 (Time Stamping Authority: TSA) などに配信し、かつ、TSAがタイムスタンプに用いる時刻の正確さを監査する第三者機関として、時刻配信局 (Time Authority: TA) を規定しました。これにより、日本のタイムスタンプ制度においてはTSAの信頼できる時刻源の仕組みが明確化されました (図2)。

● ITUにおける勧告化^{*2}への道のり

NICTは日本の標準時に責任を持つ機関として、2000年の国際電気通信連合 科学業務に関する研究委員会 標準時及び標準周波数の通報に関する作業部会 (ITU-R SG7 WP7A) 会合に、タイムスタンプ局が用いる時刻の信頼性をいかにして確保するかを日本からの研究課題として提案しました。この研究課題は、修正のうえITU-R 238/7として採択されました。

2009年9月のITU-R SG7 WP7A会合において前述の日本で実際に制度化されているタイムスタンプ制度の仕組みをNICTが取りまとめ、国内委員会の承認を得たうえで日本からの勧告案として提出しました。提出された勧告案は時機を得た提案として各国から好意的に受け

入れられ、表現の修正などはありませんでしたが、ほぼ日本提案がそのままSG7に送られました。その後、2010年1月にSG7により採択され、この採択を受けITU-Rは直ちに承認手続きに入り、2010年4月に勧告案は勧告ITU-R TF.1876として承認されました。今回の勧告は提案からわずか7カ月という異例の速さで勧告化されたわけです。

● 勧告 ITU-R TF.1876の概要

今回の勧告の主旨は次の4点です。

- ・各国の時刻標準機関は要求される正確さでTSAに各機関のUTC (UTC (k)) を供給しなければならない。
- ・TSAからUTC (k) への時刻のトレーサビリティはタイムアセスメント機関 (Time Assessment Authority: TAA) による連続的なモニタリングで証明されなければならない。
- ・TAAはTSAの用いる時刻が要求される正確さを維持しているかどうか監査する機能も有する。
- ・TAAは各国の時刻標準機関または信頼できる第三者機関が行うべき機能である。

この勧告でTAAという機能を定義付けました。TAAはこれまでのTAを包含する機能であり、より一般化した概念です。ただし、この勧告はTAAという機能について定義しただけですので、今後の補強も求められています。このTAAの概念を導入することにより、日本のタイムスタンプの仕組みを海外に輸出する下地ができました。日本の認定制度においてもTAの機能がTAAに変更になりました (図3)。

● さらなる標準化への動き

このようにITUで勧告化された日本のタイムスタンプの仕組みですが、海外に輸出するためにはさらなる標準化が必要になります。

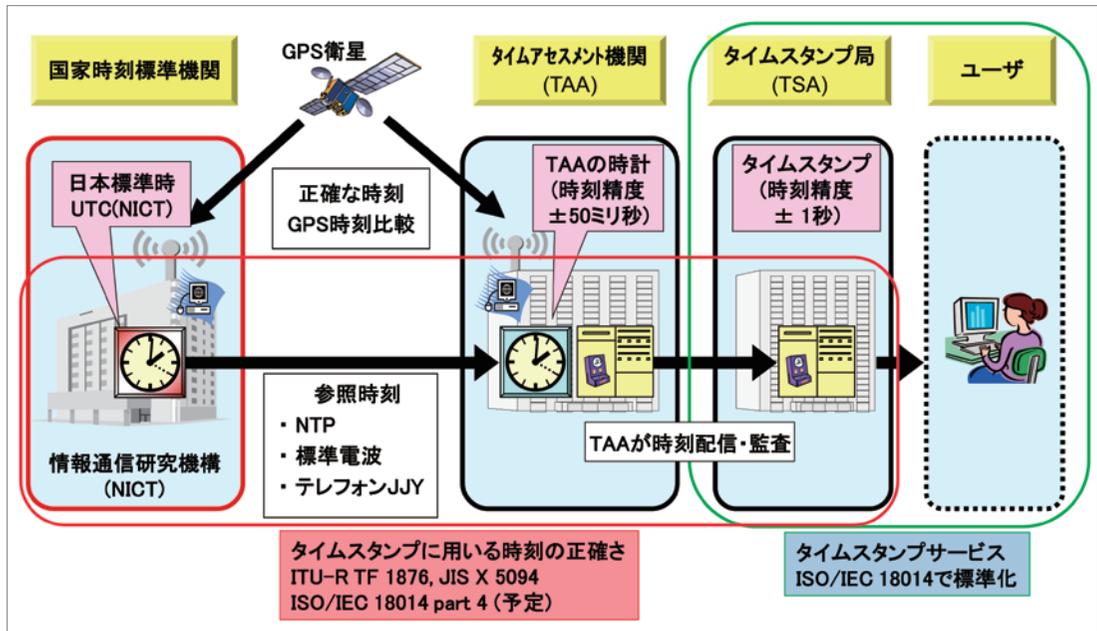


図3 日本のタイムスタンプの仕組みの標準化状況

まず日本の認定制度の運用実績をもとに、ITU-R勧告に認定制度の技術基準の数値を付加して日本工業規格 (JIS) として標準化作業を行い、2011年5月にJIS X 5094 [UTCトレーサビリティ保証のためのタイムアセスメント機関 (TAA) の技術要件] として制定しました。

このJIS X 5094をもとに国際標準化機構 (ISO) において標準化作業に着手しました。

ISOの国内委員会の審査を経てISO/IEC 18014のpart4として2011年6月に作業文書 (WD) を提出、10月のSC27WG2会議の審議を経て、各国からの意見に対処して修正し2012年5月には委員会文書 (CD) に昇格しています。このように現在JISで制定した日本の標準を、ISO/IECの国際標準にするための作業の最中です。

タイムスタンプの付与技術についてはISO/IEC 18014として標準化されていますが、時刻を保証できるシステムとして整備されている国はまだほとんどありません。日本のタイムスタンプの仕組みは世界的にも評価されており、ITUにおける勧告化を足がかりに日本のタイムスタンプ

の仕組みを同じISO/IEC 18014のpart4として世界の標準にするよう今後とも取り組んでいきます。

用語解説

*1 トレーサブル

タイムスタンプで用いる時刻が、正確さと不確かさ込みでUTCまでさかのぼることができること。

*2 ITU 勧告について

ITUでは、電気通信や放送技術に関わるさまざまな国際的な決まりを作っています。ITU-R 勧告は、主にITU-R SGの研究活動の成果として策定され、ITUメンバーステートによって承認された国際技術基準で、分野別にシリーズ化し、番号が付されます。

携帯電話使用と脳腫瘍に関する疫学研究のためのばく露評価

—頭部内の電波吸収への頭部不均質構造の影響—

「携帯電話による電波の生体安全性への関心が高まる中実施された携帯電話使用と脳腫瘍の関係を調べる国際的な疫学研究のために、携帯電話からの電波ばく露により頭部内に生じる電波吸収等のばく露評価を実施しました。」

和氣 加奈子 (わけ かなこ)

電磁波計測研究所

電磁環境研究室 主任研究員

学生の頃に目に見えない電磁波に興味を持ちました。趣味はダイビングのはずですが、ここ10年ほど行けていません。現在は3人の子育てに奮闘中で、子どもが大きくなったら一緒に海に行きたいと思っています。

● 携帯電話使用と脳腫瘍に関する疫学研究

携帯電話の普及に伴い、携帯電話による電波の生体安全性に対する関心が高まっています。その中で、世界保健機関(WHO: World Health Organization)の下部組織である国際がん研究機関(IARC: International Agency of Research on Cancer)の主導により、携帯電話使用と脳腫瘍の関係を調べる国際的な疫学研究(INTERPHONE study: International Case Control Study of Tumors of the Brain and Salivary Glands)が世界13か国共同で実施され、日本もその研究に参加しました。この疫学研究は症例対照研究と呼ばれるもので、脳腫瘍を罹患した方、それらの方々と年齢や性別など様々な条件が一致する健康な方に対して、携帯電話



からのばく露特性を調査し比較しました。携帯電話からのばく露の指標として、携帯電話の使用の有無、使用期間、累積使用時間だけでなく、携帯電話からの電波ばく露により頭部内に生じる電波吸収、すなわち比吸収率(SAR: Specific Absorption Rate[W/kg])が用いられました。

疫学研究のためのばく露評価

携帯電話からのばく露は、端末の近傍で局所的に大きく、離れるに従い急速に小さくなること、携帯電話による頭部 SAR 分布は機種により異なることが知られています。そこで上記の疫学研究では、実際の携帯電話端末に対して適合性試験と同様な方法で均質ファントムを用いて実験的に取得された SAR 分布を用いて、SAR 分布に基づく端末の分類、詳細な頭部モデルにおける3次元分布の推定法の確立を通して、各分類にお

ける均質ファントムからの3次元 SAR 分布の推定および実際に脳腫瘍ができた特定の位置での SAR の推定が行われました。図1にばく露評価の流れを示します。

上記の評価は、携帯電話端末の適合性評価試験と同様な方法で均質ファントムにおいて得られた SAR 分布をもとに行われました。しかし実際の人体頭部は、皮膚、頭蓋骨、筋肉、脳などの様々な組織からなる不均質構造となっています。そこで本研究では、脳における SAR 分布に人体頭部の不均質な構造が及ぼす影響を検討しました。

不均質モデルと均質モデルの比較

まず有限差分時間領域法(FDTD method: Finite Difference Time Domain Method)を用いて、NICT で開発した日本人成人モデル(TARO)の頭部の近傍に金属筐体と1/4波長の

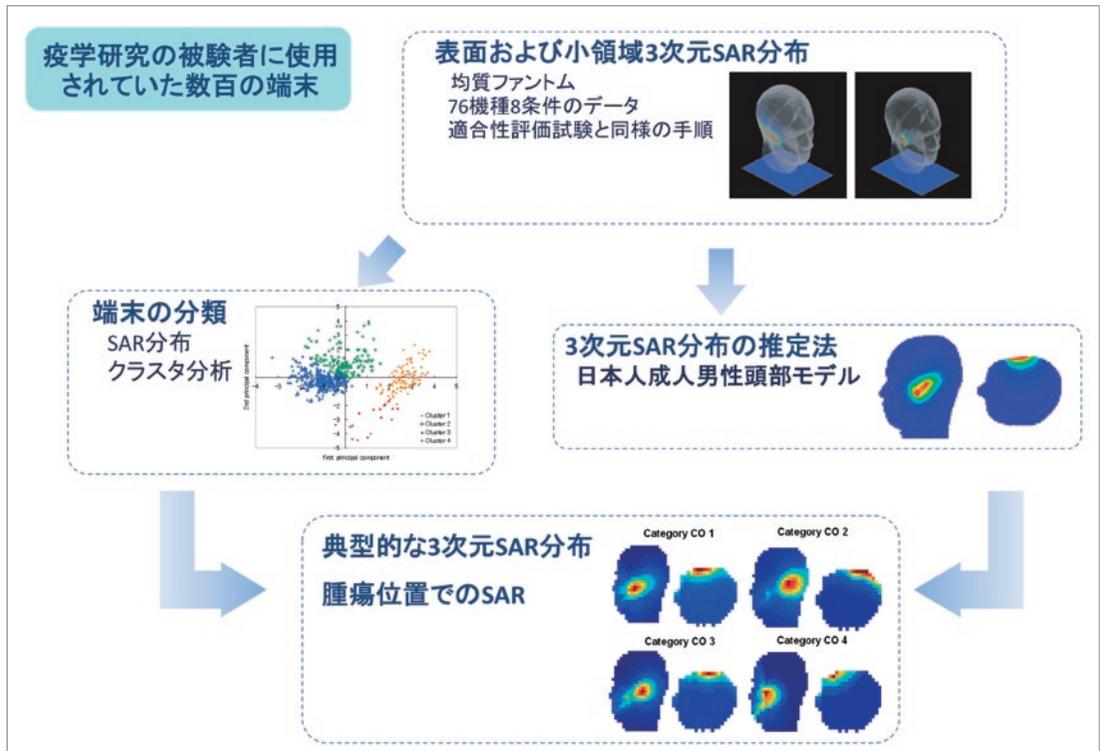


図1 疫学研究におけるばく露評価の流れ

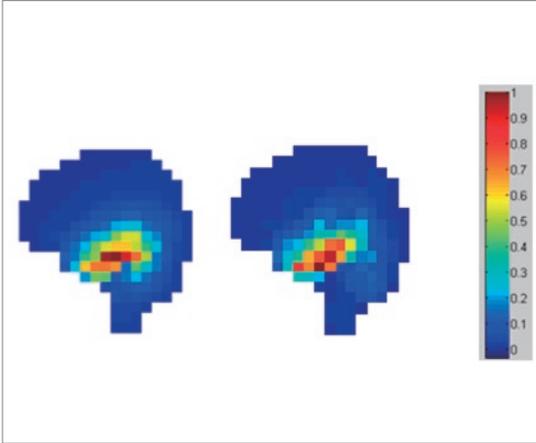


図2 不均質モデル(左)および均質モデル(右) 脳のSAR分布

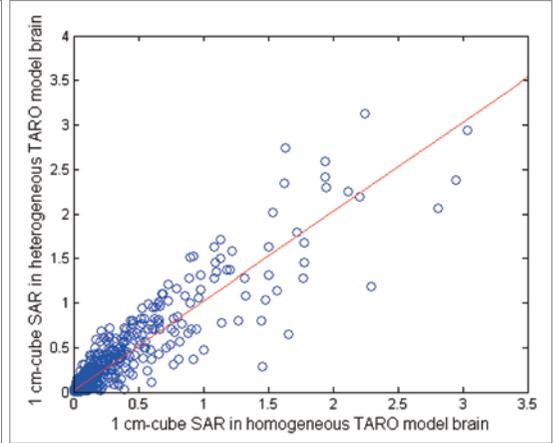


図3 均質モデルと不均質モデルの脳SARの散布図

モノポールアンテナからなる簡易な端末モデルを配置した場合のSAR分布の解析を行いました。頭部モデルを均質とした場合と不均質とした場合とで計算結果を比較しました。頭部モデルの電気定数は、不均質モデルには生体各組織の値を用い、均質モデルは比誘電率 39.425、導電率 0.855 S/m としました。周波数は 835MHz、アンテナの入力電力は 1W としました。

疫学研究では脳腫瘍の同定を 1cm 程度の解像度で行うことを目標としているため、比較はモデルの解像度を 1cm として行いました。図 2 に不均質モデル(左)と均質モデル(右)の脳の SAR 分布を示します。両者の分布は良く似ていることがわかります。不均質モデルと均質モデルにおける脳内の SAR の散布図を図 3 に示します。これより両者には正の相関があることがわかります。両者の SAR の相関係数は 0.93 と計算され、不均質モデルでの脳の SAR は概ね均質モデルのものと同傾向が一致しました。

脳腫瘍は脳のある特定の位置で生じることが多いと言われており、そこで図 4 に示すように脳を主要な解剖学的位置、すなわち側頭部、頭頂部、前額部、後頭部、小脳、脳幹に分類し、各部位での SAR を不均質モデルと均質モデルとで比較しました。各部位での不均質モデルと均質

モデルの SAR 値の相関係数と回帰係数を表 1 に示します。この結果から、側頭部、頭頂部、前額部で比較的相関が高いことがわかります。脳腫瘍は一般的にこれらの部位で発生することが多いと言われており、端末使用時の SAR は側頭部で比較的大きい傾向があることから、これらの部位で不均質モデルと均質モデルの結果が良く一致するという知見は疫学研究のばく露評価として重要と言えます。

● SAR 解析結果の疫学研究への適用とその後

本研究では、頭部内構造の不均質なモデルと均質なモデルとで端末からの電波にさらされた場合の SAR を比較しました。その結果、脳の SAR は不均質モデルと均質モデルとで相関があり、特に携帯電話使用と脳腫瘍の疫学研究で重要と思われる側頭部、頭頂部、前頭部などにおいては相関が高いことがわかりました。この結果から、実際の人体は不均質な構造をしていますが、均質なファントムを用いて得られた SAR 分布が疫学研究のばく露評価に利用できることを示しました。これを受けて、日本で実施した疫学研究では世界で初めて脳の各部位での SAR を考慮した解析が行われました。2010 年に国際共同

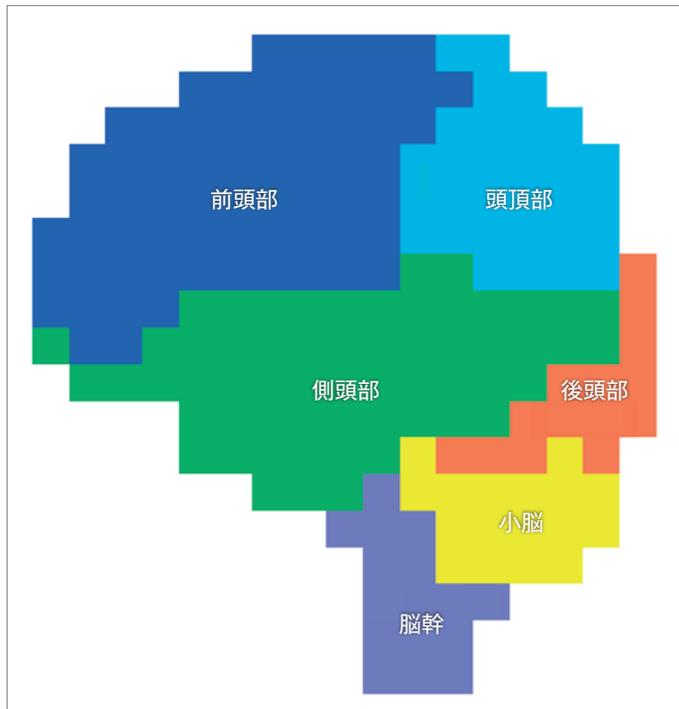


図4 脳の解剖学的構造の模式図

表1 脳の主要部位における不均質および均質モデルのSARの相関係数と回帰係数

	相関係数	回帰係数
側頭部	0.92	0.96
頭頂部	0.95	1.37
前頭部	0.94	1.19
後頭部	0.78	0.43
小脳	0.75	0.55
脳幹	0.23	0.099

研究結果の一部が報告され、全体として(10年以上の利用者に対して)携帯電話の使用による神経腫や髄膜腫の発生リスクの増加は見られなかったものの、累積通話時間が1,640時間以上のサブグループ(1日あたり30分の通話に相当)についてリスク増加が見られましたが、このサブグループについては携帯電話使用時間への回答がありえそうもない時間の場合があったりといった様々な誤差要因を考慮すると、リスク増加があるとは断定できないと結論づけられました。これまでの様々な研究から高周波電磁界の潜在的発がん性について包括的なレビューが2011年IARCにより実施され、高周波電磁界はグループ2B[ヒトに対して発がん性があるかもしれない]と評価しています。今後、WHOにより発がんだけでなくその他の健康影響を含む包括的な高周波電磁界の健康リスク評価が行われ、その後国際的なガイドラインの改定が実施される予定となっています。

電波と光波をつなぐ計測技術

—テラヘルツ波を使うために—

「電磁環境研究室では、近い将来、様々な応用開発が進むと期待されているテラヘルツ波帯(0.1THz～10THz)の電磁波の精密な電力測定や、物質との相互作用の研究をしています。」



福永 香 (ふくなが かおり)

電磁波計測研究所
電磁環境研究室 研究マネージャー

電磁波を使ってモノの劣化や不具合を診断する仕事をしています。電気と化学、科学と文化、日本と西欧など、異分野・異文化をつなぐフィールドワーカーです。



藤井 勝巳 (ふじい かつみ)

電磁波計測研究所
電磁環境研究室 研究マネージャー

中学生のとき、アマチュア無線とアキバに出会い、好きなアンテナはログペリと答えて大学院の面接試験を通過。直流からTHz帯まで、とにかく電波を正しく測りたいメトロロジストです。



水野 麻弥 (みずの まや)

電磁波計測研究所
電磁環境研究室 主任研究員

テラヘルツ波帯の基礎検討をコツコツ行いながら、いつかテラヘルツ波を利用した医学応用を実現したい、と考えているエンジニアです。



登坂 俊英 (とうさか としひで)

電磁波計測研究所
電磁環境研究室 研究員

電磁波の測定から対策まで行います。未知の分野に対して好奇心旺盛で実験好きな研究者です。

● はじめに

電磁環境研究室では、情報通信に用いられる電磁波が、他の目的で用いられる電磁波や電気・電子機器が動作する際に、外にもれ出してしまいう電磁波などと影響を与え合わないよう、電波の環境を守るための測定・評価・対策の研究をしています(図1)。その中でも、未踏周波数と呼ばれるテラヘルツ波帯(0.1THz~10THz)の電磁波は、まだ電力も周波数も国際標準の「ものさし」がありません。そのため発振器(光源)の出力もいわば

自己申告です。それでも実用上は困らないという応用分野も多いですが、それぞれがテラヘルツ波帯を使いたいとなった場合に、相互に影響を及ぼさない環境をつくるため、まず、テラヘルツ波の電力とその減衰量を正確に測ることが必要と考えています。

● テラヘルツ波帯は境界領域

テラヘルツ波帯は光と電波の間の周波数領域にあり(図2)、低周波側(電波側)からはミリ波帯を超える無線通信技術に、高周波側(光側)



図1 電波の環境を守るための測定・評価・対策の研究の概念図

からは赤外を超える分光技術(特定の周波数の吸収特性から物質の性質を探る手法)として用いられようとしています。学問分野としても、電波と光は別の工学分野と認識され、研究者の情報交換の場である学会も異なることが多いため、その境界は未開拓でした。また周波数帯の使い方も、電波側は、周波数を細かく分配して専有するのに対して、光側の分光技術は周波数を極めて広帯域に使い、物質ごとに吸収しやすい周波数を評価するなど、大きな違いがあります。物理量の単位も周波数、波長、波数が、それぞれの分野で使われており、測定方法も、

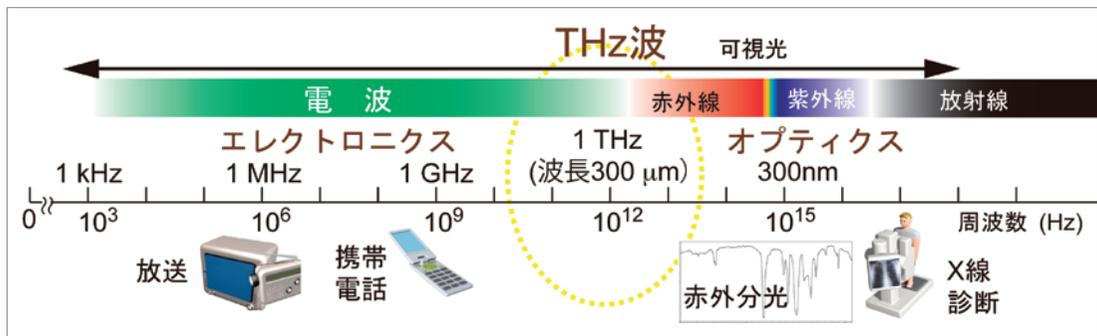


図2 電波と光の間にあるテラヘルツ波

電波側は導波管をつないで測る文化、光側はレンズで集めて測る文化があります。その異なる計測文化を結びつけるのも私たちの仕事です。

● テラヘルツ波を測る

今、無線通信では、60GHz帯が映像伝送や高速データ伝送、70GHz帯が自動車の衝突防止レーダに用いられていますが、情報端末の高性能化にあわせて、ハイビジョン画像のリアルタイム無線伝送など、超高速大容量の情報通信技術が必要とされており、120GHz帯や300GHz帯の無線通信利用の開発が進められています。その周波数帯の通信機器の性能を評価したり、電波を割り当てたり、また、これらの電波によって生じる混信や妨害の低減や、生体への影響の評価のためには、まず、高周波電力を、単に強い・弱いで表すだけでなく、「この無線機からの出力電力は何Wです」と言ったぐあいに、単位を付けて表現できるよう、国際単位系のSI基本単位にトレーサブルな(遡ることができる)測定を正しく行えるようになる必要があります(図3)。また、電力強度の測定可能範囲を拡げるために不可欠な

高周波減衰量標準の開発、空間を飛び交う電波の出入り口であるアンテナの利得や指向性の測定、周波数変換器(ミキサ)の変換損失の測定など、「テラヘルツ波を測る」ために必要な技術の確立を目指し研究開発を行っています。さらに、300GHz帯の無線通信を視野に入れ、電波を空間に発射した際の伝搬モデルの確立や、伝搬路上に存在する壁やプラスチックといった各種材料からの反射や遮蔽・吸収量の評価、電波の絶対強度測定に関する研究開発を行っています。

● テラヘルツ波で測る

電磁波を物質に照射した時の物質固有の吸収特性から材料の特性を探究するのが分光技術です(図4)。従来から用いられている、テラヘルツ波より周波数の高い中赤外領域においては、測定法がマニュアル化され、あらかじめ様々な物質の電磁波に対する応答が集められたデータベースが存在します。そのため何かわからない試料の応答を、データベースと照合して物質が何かを明らかにすることができるなど技術整備が進んでいます。一方、テラヘルツ波帯での分光技術は、水素結合などの弱い分子間の作用を感度良く捉えることができ、中赤外領域では困難な有機・無機複合体等の特性を評価できると期待されています。しかし、試料の状態や光学系の違いによって取得したデータが異なってしまうなど、まず正確にデータを取得するための手法が未だ確立されていません。そこで、同じ試料を異なる装置で測定し、データを比較したり、値が異なる理由を考察することによって、テラヘルツ分光装置を正しく選び、使うための方法を検討しています。また、様々な



図3 110GHzまでの電力計較正システム
現在、110GHz以上の電力計を較正するためのシステムを開発中。

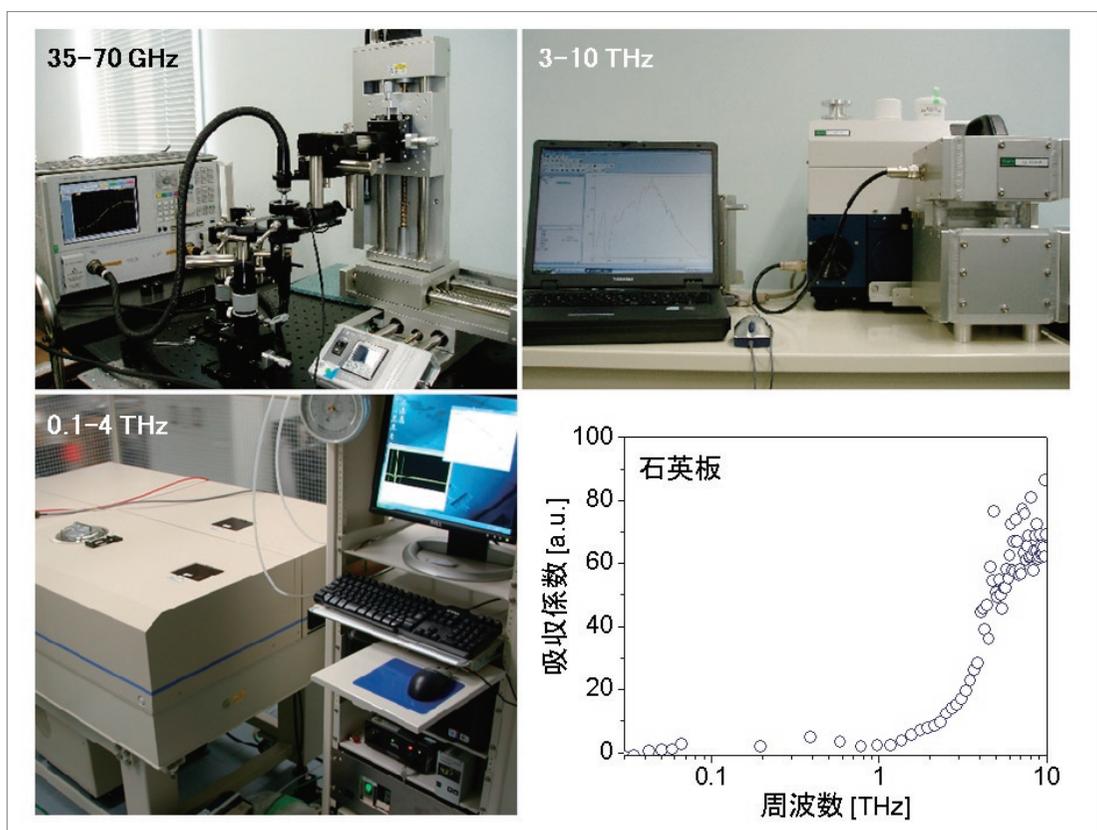


図4 分光システムと測定例

材料の吸収特性をデータベースに構築、その特性がなぜ現れるのかについても、シミュレーション等で検討をはじめています。さらにテラヘルツ波は不透明なモノの内部を壊さずに見るイメージング技術としても実用化が進められていますので、どのくらい小さいものまで見えるか、などの評価も行う予定です。

● まとめ

以上のように、私たちは、様々な応用開発が進むテラヘルツ波帯の電磁波を正しく測れるようになる、という地味ながらも、エンジニアリングの基本中の基本である「測る」という仕事に誇りをもって取り組んでいます。



電磁波計測研究所 (本部内)

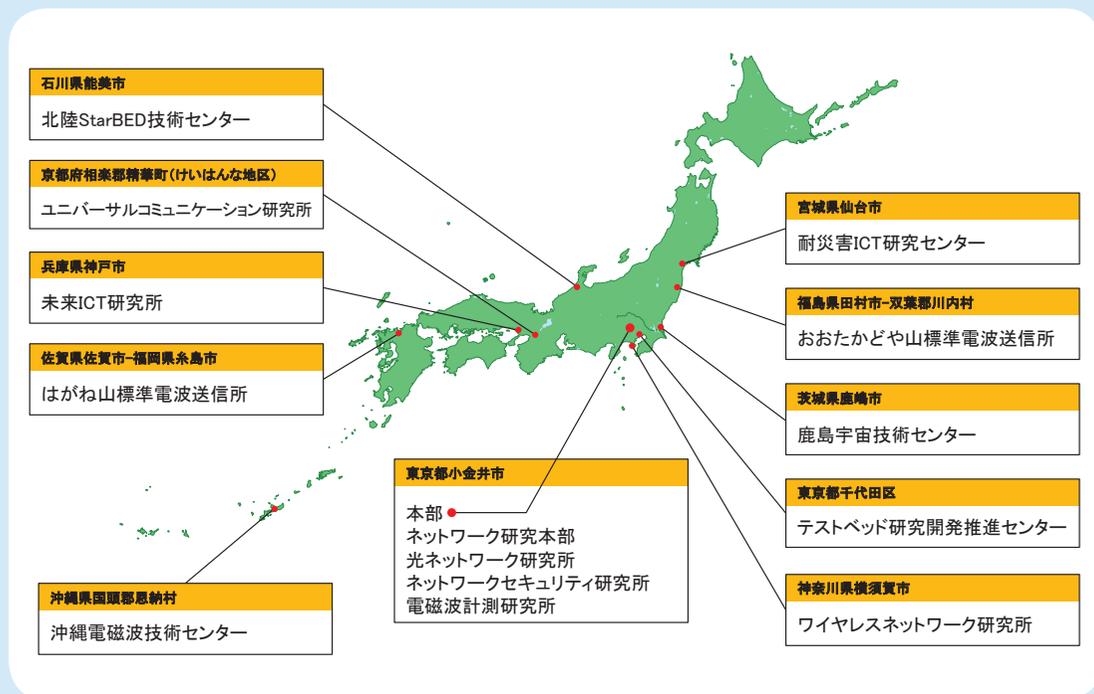


34mアンテナ (鹿島宇宙技術センター)

情報通信研究機構 (NICT) の沿革

独立行政法人情報通信研究機構は、明治 29 年(1896 年)に通信省電気試験所において無線電信の研究が開始されたことがそのはじまりとなっています。昭和 27 年(1952 年)に郵政省電波研究所が設立され、その後、郵政省通信総合研究所、独立行政法人通信総合研究所と幾つかの改称や改組を経て、平成 16 年(2004 年)に通信・放送機構と統合し、現在の独立行政法人情報通信研究機構が発足しました。

NICTの施設等所在地



平成24年(2012年)4月1日現在



「情報通信の未来をつくる研究者たち」

2012年9月30日 発行

発行 独立行政法人 情報通信研究機構

〒184-8795

東京都小金井市貫井北町4-2-1

TEL : 042-327-5392

FAX: 042-327-7587

E-mail : publicity@ml.nict.go.jp

URL : <http://www.nict.go.jp/>

印刷・製本 日興製版印刷株式会社

ISBN978-4-904020-03-6

本書の一部あるいは全部を無断で複写・複製、転載することを禁じます。

©2012 National Institute of Information and Communications Technology. All rights reserved.

Printed in Japan

ISBN978-4-904020-03-6



9784904020036

