

未来 ICT 基盤技術

2.11 脳・バイオ ICT 基盤技術

2.11.1 第1期中期計画期間

バイオコミュニケーション技術の研究

第1期中期計画では、進化・適応・柔軟性等の生物の巧みで優れた情報処理・伝達機能を実社会での情報処理に役立てることを目的として、生物の情報処理や伝達機能の解析を中心とした基礎技術開発を目標に研究開発を実施した。特に生物機能の計測技術開発に注力し、生体機能分子や細胞の本来の機能を保った状態でたったひとつの分子や細胞を生きた状態で直視・機能計測・操作する技術の開発や、非侵襲でヒトの脳活動を計測する装置の開発・整備を精力的に進めた。この技術開発によって中期計画後半には、生体機能分子・細胞の機能や動作機構の解明やヒトの高次脳機能の定量的評価が加速度的に進展した。加えて、生体機能分子や細胞の計測で解明されたアルゴリズムやその実体を利用したバイオナノ素子の構築のための基礎技術開発を始動するなど、第2期中期計画以降への展開につながる成果を挙げた。

(1) 生体機能分子の研究

100万分の1 mm サイズ(ナノメートル、nm)の生体機能分子には、柔軟で巧みな情報処理能力、自己修復・自己複製・自律性などの働きが備わっている。生体機能分子が生体特有の高性能な機能を作り出しているメカニズムを明らかにすることで、これらの生物特有の能力を備えた知的情報処理素子の開発を目指す基礎研究を進めた。生体機能分子の素過程を精細に計測して生命現象の基本的特質に迫るためには、溶液中の多数の分子の平均特性ではなく、たったひとつの生体機能分子をとらえて、その動的過程を直接計測することが求められる。この測定にはナノメートルレベルの変位量とピコニュートン(100億分の1 g 重)レベルの微小な力、及び入力としての化学物質 ATP の加水分解反応を計測することが求められる。超低背景光蛍光顕微鏡システムの開発や、良質な蛍光特性を示す蛍光標識 ATP 分子の合成・評価(Biophysical Journal 誌掲載、平成15年1月)に加えて、この ATP 分子が生体機能素子の上でどのような向きに結合しているかを5度の角度精度で明らかにする装置な

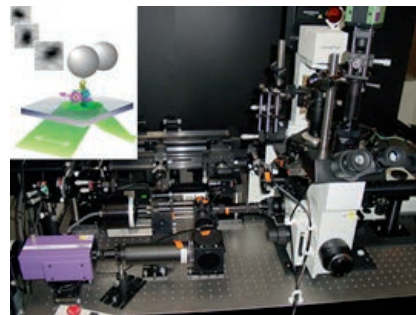


図2.11.1 蛍光分子1分子の向きを高精度で決定できる測定装置

どを開発した(図2.11.1)。この技術によって、大きさ10 nmの超小型タンパク質モータ、 F_1 -ATPaseにATPが結合・解離する瞬間とこれに伴う構造変化とを同時に計測することに世界で初めて成功し、 F_1 -ATPaseに結合したATP分子の向きを正確に測定することにも成功した(Nature Structural & Molecular Biology 誌掲載、平成16年2月)。並行して微小ガラス針法とレーザートラップ法による微小力測定装置を開発し、水溶液中での分子運動の精密位置計測を空間・時間分解能0.1 nm、0.02 msecにまで高めることに成功した。これらの技術開発によって、植物細胞が持つミオシン(The EMBO Journal 誌掲載、平成15年3月)や真核生物の鞭毛運動に関わるダイニンなどの生体機能素子の力発生や、一定の歩幅で連続的に運動する事などを明らかにした。これらの成果は、Nature(平成15年2月)をはじめとする著名な国際的科学誌に掲載され、現在も多くの研究論文に引用されている。

また、ダイニン分子の電子顕微鏡観察と単粒子解析法による詳細解析から、ATP加水分解に共役した約15 nmにも及ぶ大きな構造変化を明らかにした。この成果は、国際的科学誌 Nature(平成15年2月)に掲載され、その表紙を飾った。NICTは、構造の詳細解析からダイニンの力発生メカニズムを提唱し、後年、この作業仮説は世界中の研究者によって実験的に検証・支持され、大学の生物学の教科書に取り上げられるほどに、最も受け入れられたダイニン力発生モデルの1つとなった。

(2) ナノ新素材としての生体機能分子

生体機能素子は非線型・非平衡系のアナログ素子であり、生体機能素子の工学的直接利用における情報処理は新たなアルゴリズムを生むものと期待される。この研究開発では、タンパク質や DNA を基板や微小粒子に固定化して、これによって生じる運動や力を外界に取り出すための基礎技術の開発を進めた。タンパク質の発生する力や運動を一方向に効率よく抽出し、タンパク質をアクチュエータとして利用した研究成果は先駆的研究となり (Biophysical Journal 誌掲載、平成13年9月)、後年トップクラスの科学誌の総説にも取り上げられた。この研究に関連した6報の発表論文は、現在までに600件を超える被引用件数を誇る。

(3) 細胞機能の研究開発

細胞は一種の情報処理システムである。直径10 μm ほどの微小な細胞空間内で起こる現象を生きたままの状態で見えることは、スーパーコンピュータの中で行われている情報処理を明らかにすることに相当する。NICTでは、最先端光学顕微鏡技術とコンピューター解析の手法を用いて、細胞機能の非破壊解析・非接触操作技術を開発し、細胞機能の解明のための技術基盤を日本にとどまらず世界的に提供してきた (図2.11.2)。また、この技術を用いて当研究グループが明らかにしてきた、染色体と細胞核の構造とそのダイナミクスは、当該分野の進展に大きく貢献するものとなっている。

タイムラプス装置を装着した
3次元マルチカラー蛍光顕微鏡

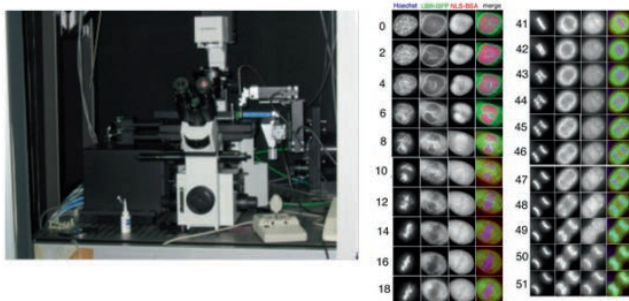


図2.11.2 生細胞内での複数の情報担体の動態観察を可能にする光学顕微鏡技術

特に、世界的な注目を集めている研究成果は、分裂酵母における減数分裂の細胞生物学とヒト細胞の増殖過程の細胞生物学である。前者では、体細胞分裂から減数分

裂に移行する際、核内で劇的に変化する染色体の配置の制御メカニズムに迫った。体細胞分裂期にセントロメアを特定部位に留める分子や、減数分裂前期にテロメアを特定部位に留める分子の網羅的検索を行い、分裂酵母とヒトで共通に存在するセントロメアタンパク質 (The EMBO Journal 誌掲載、平成13年8月) 及びテロメアタンパク質 (Current Biology 誌掲載、平成13年10月) を同定した。ヒト細胞の増殖過程の細胞生物学では、独自に開発した生細胞イメージング技術を用いて細胞の分裂に際して再編成される細胞核の仕組みを研究し、セントロメアや核膜分子の新たな機能について明らかにした。これらの成果は、Developmental Cell 誌 (平成14年4月) や Journal of Cell Science 誌 (平成13年12月) などに論文として多数発表した。その論文被引用件数は現在2,000件を超えるものとなっており、当該研究分野への大きな学術的貢献を果たしている。

また、研究開発の中で構築してきた分裂酵母 GFP 融合タンパク質ライブラリーは、後に第3世代として開発・発展して、世界中の研究者に利用されている。さらに、NICTが培ってきた生細胞蛍光イメージング技術の実技講習会「細胞生物学ワークショップ」を開始し、現在まで毎年継続して開講している。国内の多くの若手研究者が参加して、彼らの、ひいては日本の細胞生物学分野の技術向上と研究進展に貢献する事業へと成長している。

(4) 脳情報の研究活動

平成10年に神戸に竣工した脳機能研究棟には、計測特性の異なる MRI と MEG の2種類の大型脳機能計測装置が整備されている。1つの研究グループが基礎研究に特化して、この2つの大型計測装置を利用できる研究環境は、平成10年当時では国内唯一のものであった。この計測装置を補完的に活用することで、ヒトの高次脳機能に関する基礎的な研究、視覚、運動、言語、情動といった脳機能の様々な課題の解明に取り組んできた。同時に、計測法自体の高度化にも熱心に取り組み、MRI と MEG の計測法の統合、MRI の革新的計測法の開発、更には、NIRS の導入や高時間分解型脳機能計測装置の新規開発などにも取り組んだ。平成16年には、3T (テスラ) の MRI 装置が新たに導入されたことで、先駆的な研究成果の発信が加速し、後の脳情報通信融合研究センター (CiNet) の研究へ続くものとなった。このグループの特

色ある研究の一例を以下に挙げる。

ヒトの視覚的意識と脳内確率過程：ヒトの脳は認識すべき対象について推定と補完を行うことで外界の様子を脳内に構築している。視覚情報の不足のために推定される対象の解が複数ある場合(多義図形知覚)や対象認識が難しい場合(隠し絵認識)にはヒトの脳は興味深い反応を示す。この反応について、知覚や認識の成立する時間的性質を詳細に調べたところ、脳内ではある種の確率過程が働いており、その結果として視覚的意識(意識される見え)が創発的に成立することを発見した。ひらめきやわかりといった情報通信技術の発展にとって極めて重要なヒトの脳機能の一端に解析の手がかりを得た研究成果として広く注目された(図2.11.3)。この研究も CiNet において発展的に研究が継続されている。



図2.11.3 視覚情報の意識化プロセスの研究

2.11.2 第2期中期計画期間

(1) 脳情報通信技術の研究開発

第1期に導入・整備した各種の非侵襲脳機能計測システム(MRI、MEG、EEG、NIRS)を活用することによって、第2期には視覚や言語をはじめとする人間の脳機能の様々な問題に取り組み、ユニークな成果をあげた(トピックス a)、b)。また、計測法や解析法自体の高度化に熱心に取り組んだことも特色であり、MRIの革新的計測法の開発や理論モデルとの統合的研究も進めた(トピックス c)、d)。第1期から引き続きテーマ公募型共同研究のオープンラボ(平成17~19年)にも取り組んだ。このような活動を通じて、情報通信分野における脳研究

の意義が社会的に認知されることにも貢献し、第3期の脳情報通信融合研究センター(CiNet)における研究活動へと発展的に引き継がれた。

a) 視覚意識の創発性の発見

人間の脳研究において最も興味深く重要なテーマの1つが意識の性質の理解である。認識すべき対象に関する感覚情報が不足するとき、意識にのぼる認識内容は独自の特性を示す。第1期の多義図形認識の研究を発展させて、第2期には初見では無意味に見える程度に情報劣化した画像の認識(劣化画像認識)の時間的特性を定量的に研究し、見えがはっとひらめいて意識にのぼる現象(創発的認識)が一定の数学的定式に従うことを発見した。その数学的関係は、認識対象の視覚情報を構成する部分的特徴を確率的に補完するモデルから導出できることを示し、全体の情報が部分の情報の確率的相互作用から創発するしくみを示した(初発表米国神経科学会(口頭)、平成17年11月:その後の進展を含め PLoS ONE 誌掲載、平成26年12月)(図2.11.4)。このような脳の創発性の神経機構をより実体的に解明する課題は、第3期における脳活動計測による研究に引き継がれている。



図2.11.4 創発的認識の時間法則とそれを説明する神経活動の確率過程モデル

b) 言語文脈情報の利用と意味理解に関わる脳内処理

ことばの意味理解に関わる脳活動をとらえるため、多義語を呈示して、文脈情報によってその意味が確定する過程の脳活動をMEGで調べた(例:こうえん → 公園、講演、後援など)。意味処理に関連する左半球側頭葉前部(上記)と並んで、左半球下前頭部(単語呈示の約200ミリ秒後から活動開始)が意味を確定する働き(意味理解)において重要な役割を果たしていることを明らかにした(NeuroImage 誌掲載、平成19年11月)(図2.11.5)。この例をはじめとして、人間のコミュニケーションの基

本となる言語理解と脳活動の関係の解明に取り組んだ。

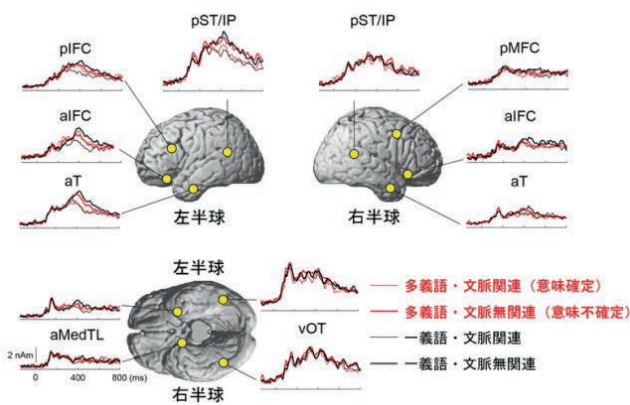


図2.11.5 ことばの多義性と文脈に依存した脳活動変化のMEG計測

c) 神経線維の活動をとらえる革新的MRI計測法の可能性

現在のfMRIは神経活動によって引き起こされる脳血流変化を信号源としているため、脳血流変化が起きる神経の細胞体(脳の灰白質)の活動は検出できるが、神経の線維(脳の白質)の活動は検出できない。そこで従来のMRIが計算する水素原子核スピンの「位相」情報ではなく、「位相勾配」情報を計算してみたところ、神経線維の活動(電位変化)を反映すると思われる信号の検出に成功した(Human Brain Mapping 第18回年会発表、平成24年6月)(PGC法)。左右手の各指を交互の順番でタッピングするとき、脳梁(左右大脳半球をむすぶ神経線維束)を通じた左右の情報交換が必要であるが、PGC法により、予想される脳梁の神経線維束の活動信号が検出された(図2.11.6:ダークグレイ部)。この研究は、神

経線維連絡の活動を可視化する手法として、また、脳内情報連絡の研究の革新的手法として、第3期中期においても更なる研究が進められている。

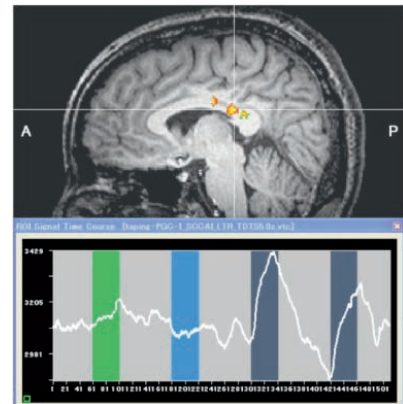


図2.11.6 脳梁の神経線維活動を反映すると思われるMRI信号

d) 神経集団の同期的活動と脳波発生の関係

脳機能発現を理解するためには、脳部位や活動時間帯の解明のみならず、神経活動ダイナミクスの「様式」の解明が必要であり、特に神経活動の振動や同期が重要なテーマである。そこで、多数の神経集団の同期的活動と脳波の発生との関係をモデル化により定量的に解析した(Physical Review E 誌掲載、平成22年7月)(図2.11.7)。このようなモデル研究は、神経集団の協力的振舞いとマクロな機能発現の関係を研究する基礎となるものである。

(2) 分子通信技術の研究開発

第2期中期計画においては、生物に見られる超低エネルギーでの高機能な情報処理・伝達の仕組みに学んだ柔

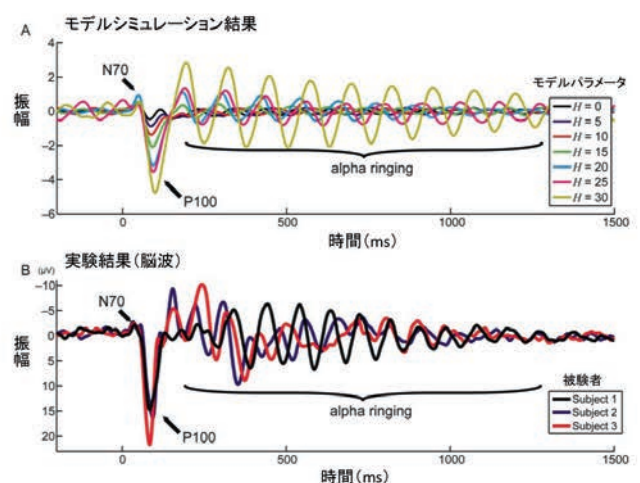
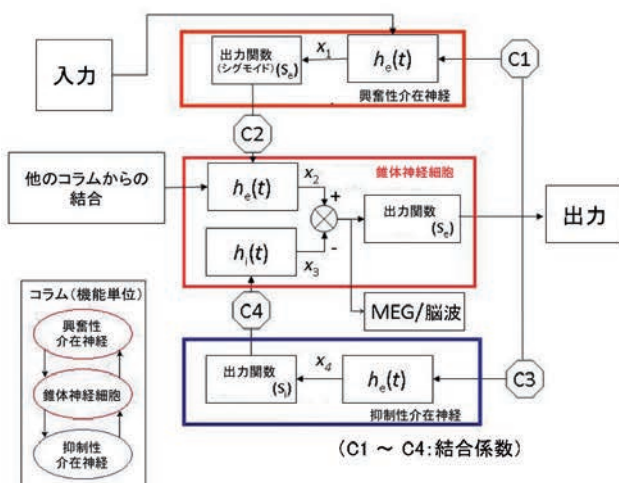


図2.11.7 神経集団の振動子モデル(左図)と脳波の実験値との比較(右図)

軟性に富むコミュニケーション・インタフェース技術として、新しい情報通信の概念「分子通信」に関する原理検証研究に取り組んだ。研究活動においては、分子通信の要素技術として、生体分子システムと細胞を対象とした構造と機能の相関解析を進めた。さらに、生体機能の実験を通して抽出した自己組織性、自律性、特異的認識能力などの要素技術を活用して、細胞や分子間相互作用による自律的な情報伝達を実現する分子通信ネットワーク検証モデルを構築した。

a) 分子通信の要素技術

最先端の細胞・分子イメージング技術を駆使して細胞内の DNA の構造とダイナミックスを高精度で解析し、その核内配置の決定過程を同定した。この解析結果は高く評価され、Science 誌等に掲載されている

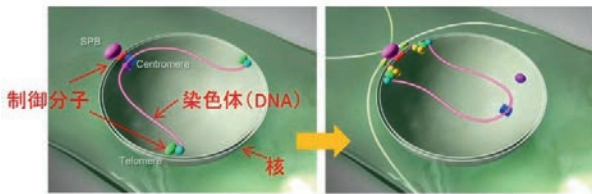


図2.11.8 細胞内 DNA のダイナミックス

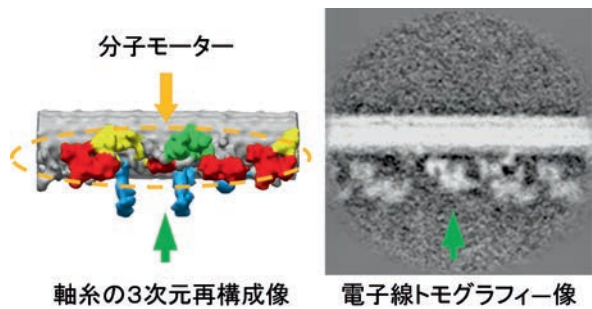


図2.11.9 生体分子機能構造体(軸系)の3次元構造

(図2.11.8)。また、分子間相互作用による自律的な情報伝達技術に関して、生体分子機能構造体の構造と機能の高精度解析に成功し、分子複合体の設計図に関する新知見を獲得するとともに、生体分子ネットワークの自律的動作の構造 - 機能相関を明らかにした。この成果は The Journal of Cell Biology 誌(平成21年11月)、Nature Structural & Molecular Biology 誌(平成22年10月)等に掲載されている(図2.11.9)。

b) 分子通信ネットワーク構築

細胞間コミュニケーションを可能とするチャンネルを発見した細胞を用いて、これをマイクロ・ナノファブリケーションで加工した基板上に自律的に配置させて、マイクロ・ミリメートルスケールの分子通信ネットワークの検証モデルを形成し、自律性のある情報伝送を可視化することに成功した。この成果は、これまで概念としてのみ提示されていた分子通信ネットワークの実現可能性を、実際に生物由来のパーツを利用することによって初めて示したという点で大きな意味を持っている。研究成果は FEBS letters 誌(平成21年11月)に掲載されている(図2.11.10)。

2.11.3 第3期中期計画期間

(1) 脳情報通信技術の研究開発

第3期中期計画に入り、脳科学と情報通信技術の融合を目指し、1) ヒトの情報理解メカニズムを明らかにすることによる個々人に適した情報提示技術の構築、2) 脳情報インタフェース技術の高度化・汎用化のための基盤技術の確立、3) 高次脳情報に関する脳活動計測技術及び解析技術の研究開発、を推進した。同時に、平

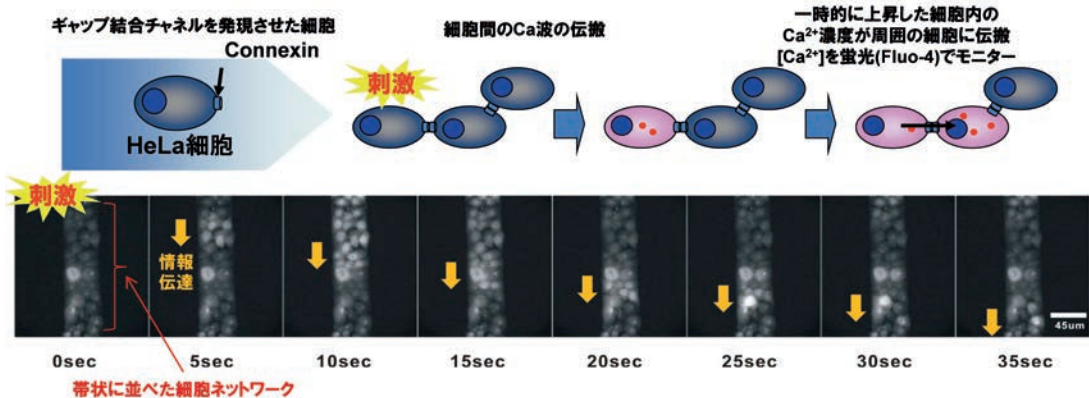


図2.11.10 細胞による分子通信ネットワークの構築

成21年1月に国立大学法人大阪大学と取り交わした「脳情報通信分野における融合研究に関する基本協定書」に基づき国立大学法人大阪大学吹田キャンパス内に、ヒト脳機能の非侵襲計測を行う実験棟の整備を進め、平成25年春に脳情報通信融合研究センター（CiNet）を開設した。CiNetは、NICTの神戸やけいはんな地区で研究を行っていたNICTの研究者と国立大学法人大阪大学の研究者を中心として構成され、加えて周辺の大学や企業の研究者が参加している。CiNetでは、主に以下の4つの研究領域：1)「こころ」が伝わる情報通信技術（HHS）、2)人の脳機能に学ぶ情報通信ネットワークの構築（BFI network）、3)高度なコミュニケーションを実現するインタフェース技術（BMI）、4)脳機能を情報通信へ展開するための基礎技術（計測基盤技術）、を設け、領域横断的に研究を推進している（図2.11.11）。

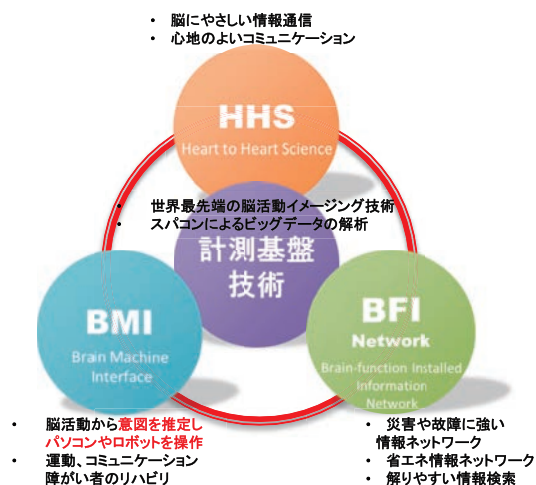


図2.11.11 CiNet：4つの研究領域

融合研究センターであるCiNetは、研究分野として脳科学と情報通信の融合研究を推し進め、組織として大学・企業との融合研究を進める場となっている。

CiNetに導入された最新の7T-MRI装置（図2.11.12）は、平成25年7月の設置後すぐに計測準備を開始し、3か月後には、脳活動変化に対応した極微小領域（1mm角以下）の血流量変化の計測に成功した。従来型である3T-MRI装置では3mm角程度の分解能であることを考えると、数十倍の空間分解能の向上が実現した。図2.11.13の赤及び黄色の個々の点が示すように、脳の皮質構造に沿った活動位置の特定に成功した。この結果は、細胞レベルで詳細に研究されてきた脳の局所構造と



図2.11.12 7T-MRI装置の外観

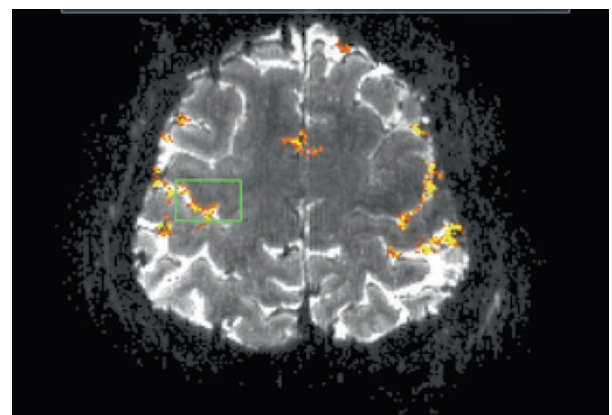


図2.11.13 7T-MRI装置を用いて撮影した微小領域の脳活動イメージ

機能の関係が、MRI装置で全脳領域にわたり一度で記録できる技術につながる。

また、日常生活において容易に計測を可能にするために、ドライ電極を利用した小型モバイルワイヤレス脳波計（図2.11.14）を開発し、平成25年2月に製品化している。

このような脳活動の計測技術を応用し、運動を準備している時の脳活動から、どのような運動をするかを推定することが可能となった。また、情動を司るといわれている「扁桃体」という脳部位の活動が、公平性に関わる意思決定に関与していることを発見した（Nature



電極：ドライ電極対応
脳波チャンネル数：8
重さ：67g（本体のみ）
接続方式：無線（Bluetooth）

図2.11.14 ドライ電極を利用した小型モバイルワイヤレス脳波計

Neuroscience 誌、平成22年)。「側座核」といわれる部位の脳活動も公平性に関わる行動パターンと相関が高く、側座核の活動を分析することで、本人も意識しない間に、ある程度行動を予測できることが明らかになりつつある。

さらに、ヒトが脳内で構築している意味空間を構成、可視化するとともに、人が見ている世界の意味空間が、(対象を探索するなどの)注意によって歪むことがわかった(Nature Neuroscience 誌、平成25年4月)。

このような知見を利用することで、ヒトが理解しやすい情報提示の手法、効率的な視覚的演出技術の確立が期待される。

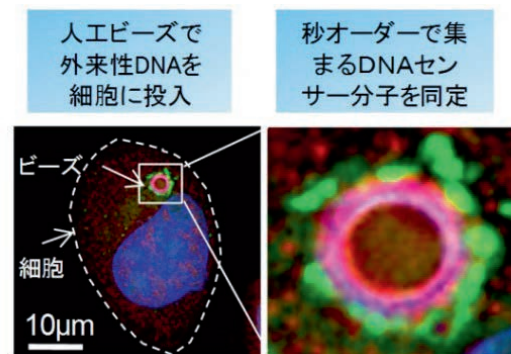
(2) バイオ ICT の研究開発の概要

バイオ ICT の研究開発については、生体における情報処理機能の解明に取り組み、未来の情報通信の基礎となる新しい概念の創出と、それを活用した情報通信パラダイムの創出を目指している。第3期中期計画においては、細胞や生体分子の機能とつくりを理解し、それらを操作・調整する技術、高い精度で並びを制御する技術、構造や機能を評価する技術の構築、及び高いスループットで生体信号を処理する手法の構築に取り組んでいる。これらを基にして、細胞や生体分子によって構成されたセンサシステム(以下、細胞・分子センサシステム)を再構築し、人や生物の情報認識メカニズムについての理解を深め、生体が備えている化学物質や力学刺激などの非言語・非視覚情報を検出するための優れたセンシング機構を、情報通信技術に利活用するための基盤の構築を目指している。研究取組の柱として、a) 生体材料の調整・配置技術の構築、及びb) 生体信号抽出・評価法の構築を据えている。前者においては、化学物質や力学刺激などの情報を検出するための生体のセンサシステムのグランドデザインを検討し、それを基に検出対象である化学物質や力学的刺激に反応するように、細胞や生体機能分子を操作・調整・配置する技術を創ることを目指し、後者においては、細胞や生体機能分子の入力情報に対する構造変化や機能変化の計測・評価に必要な技術を検討し、細胞・分子センサシステムでの、検出信号の増幅及び処理、解析に関する基盤技術の開発を進めている。以下にこれまでの研究の取組と成果について述べる。

a) 生体材料の調整・配置技術の構築

① 細胞機能を人為的に調整するための要素技術として、

生きた細胞内へ導入するマテリアルの検討を行った。具体的には外来性の DNA を生細胞に導入し、それによって誘起される細胞の応答現象についての解析に取り組んだ(図2.11.15)。その結果、DNA 結合処理を施したマイクロビーズを、生細胞内へ効率よく侵入させる条件を見出した。さらに、DNA の細胞内への侵入を検知し、それに結合することによって働くセンサ分子を同定することに成功した。これらの成果は第3期中期計画前半に得られており、細胞機能を外来物質によって調整するための基礎技術となる。



ビーズ導入細胞全体像 導入した DNA ビーズ像
赤: DNA センサ分子、緑: 膜蛋白質、青: DNA

図2.11.15 細胞への DNA ビーズ導入と細胞応答

② 生体機能分子の配向を制御するための要素技術として、DNA を利用した分子支持体によりナノメータの分子配置精度を実現する手法の検討を行った。DNA オリガミや DNA タイルなど、分子自体の自己組織能によって多様な構造体を形成できる DNA 分子に着目し、タンパク質分子の末端に導入した標識分子をターゲットとして認識する部位を DNA 構造体の任意の位置に導入

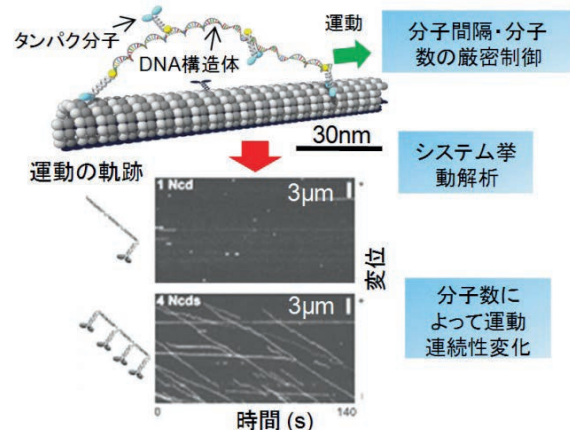


図2.11.16 DNA 構造体を足場とした生体分子配置制御

する技術を構築した。これにより、一定の順序で混ぜるだけで自己組織的に形成される、タンパク質分子を任意の間隔で配置する分子システムの作成に成功した(図2.11.16)。さらに、構成したタンパク質分子システムが正常に機能を発揮すること、分子の並べ方により機能発現の効率を制御できることを確認した。以上より、ナノメータ精度で構成分子の間隔を制御することを可能とする分子足場構造構築法の有効性を確認するに至った(Proceeding of the National Academy of Sciences of the United States of America 誌掲載、平成24年12月)。

③ ミクロな生体分子によって創発されるマクロな構造の自己組織化過程の実体モデルとして、運動性タンパク質により、基板平面上で駆動されるタンパク質フィラメント(マイクロメータスケールの自走粒子)間の微視的な相互作用によって、自己組織的なミリメータスケールの規則的構造形成が誘導されることを実験的に示した(図2.11.17)。その形成条件を評価し数理モデルを構築することで、生体分子システムの自己組織構造形成の制御につながる知見を得ることができた。この成果は、生体分子システムのみならず、自走粒子一般の集団運動を理解する上で重要な知見と実験手法を提供するものである(Nature 誌掲載、平成24年3月)。

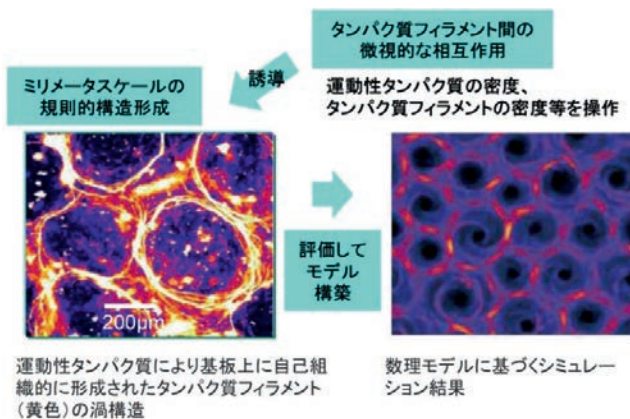


図2.11.17 ミクロな生体分子によるマクロな自己組織構造形成

b) 生体信号抽出・評価法の構築

① 生体機能分子を用いた情報検出機能の構築の取組として、DNA分子によって構成されるDNAタイルと呼ばれる人工構造体を活用し、外部から与えた生体分子を検知して、その構造を崩すことで内部に閉じ込めておいた任意の機能を発現する仕掛けを人為的に付与する手法を考案した(図2.11.18)。実際にこの手法に基づき、外

来のRNA分子を検出して蛍光物質を発生するようデザインしたDNA構造体を作成することに成功し、構造体がロボットのように設計通りの一連の動作を行うことを、原子間力顕微鏡によるタイル構造の崩壊過程の観察と、試料の蛍光強度の増加のモニタリングによって確認した。これらの成果は第3期中期計画前半に得られており、DNA構造体へ人為的に情報検出機能を導入することが可能であることを示すことができた。

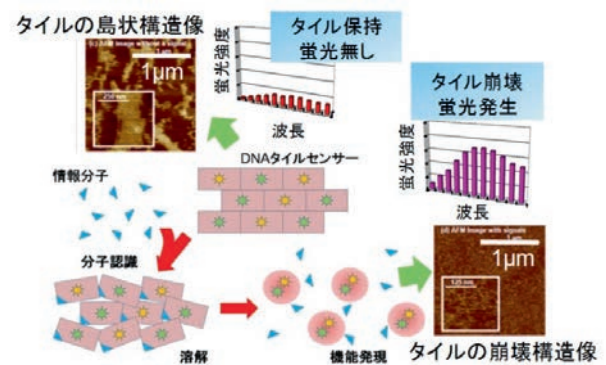


図2.11.18 DNA構造体への情報検出機能の付与

② 生体システムを構成する素子のシステム内での挙動を解析する手法の検討に関し、生細胞内において、染色体の特定部位を認識する制御分子(非コードRNA)を可視化する顕微鏡観測手法を構築し、制御分子と染色体によって構成されるシステムの挙動を、時間を追って解析することに成功した(図2.11.19)。この手法により、細胞の減数分裂時において、制御分子が染色体の特定部位に集積することが、染色体を正しく並べるために重要なステップであることを明らかにし、遺伝情報の確実な継承戦略の解明につながる重要な知見を得るに至った(Science 誌掲載、平成24年5月)。

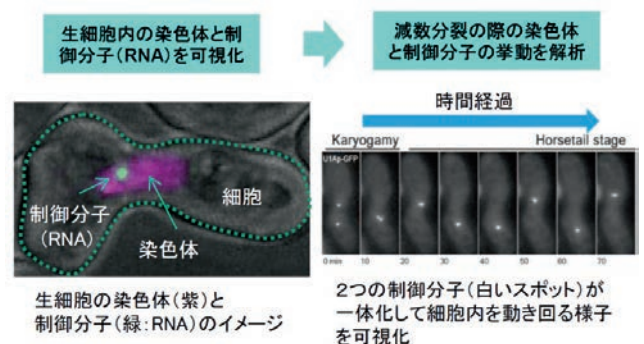


図2.11.19 生細胞内での染色体と制御分子の動態解析

2.12 ナノ ICT 基盤技術

近年の情報通信サービスの多様化と普及によって通信量が急激に増加していることから、情報通信ネットワークの更なる高速化と大容量化が要求されている。しかし、既存技術の延長線上での高速化・大容量化は電力消費の増大を招くことから、革新的なシステムとその基盤となる ICT ハードウェア技術の革新が不可欠となっている。NICT では、有機分子材料や超伝導材料などの優れた光・電子機能と、先進のナノ構造制御技術を駆使し、光検出効率や光変調速度、消費電力などの性能を、従来の材料を用いた技術では達成不可能なレベルへ向上させる、革新的な ICT ハードウェア技術の研究開発を行っている。有機材料は、分子内の π 共役電子が光の電磁場と共鳴することから、無機材料に比べて高速で高効率な光応答を示す。また、超伝導材料は、完全導電性や磁束の量子化など他の材料にはないユニークな物性を有している。しかし、光と物質との相互作用が基本的に小さいため、その材料性能を高めるだけでは素材が持つポテンシャルを十分に引き出すことは難しい。一方、最新のナノ加工技術によって、光の電磁場や分子間相互作用を精密に制御することが可能となってきている。すなわち、精緻なナノ構造を作製し、光を微小空間に閉じ込める、あるいは相互作用領域を限定するなどして、有機材料や超伝導材料と光との相互作用を高効率化させることにより、ICT デバイスの革新的な性能を実現することが我々の研究目的である。NICT では、有機材料及び超伝導材料とナノ技術を融合した研究(有機ナノ ICT 基盤技術の研究及び超伝導 ICT 基盤技術の研究)を、基礎・材料研究の段階から長期にわたって行ってきており、一部のテーマは既に応用の実を結んできています。例えば、超伝導デバイスの研究では、窒化ニオブ (NbN) の薄膜形成技術やナノワイヤ作製技術を確立し、電磁波や光応答特性に優れた超伝導デバイス技術を創出してきた。その技術基盤に基づいて作製される超伝導単一光子検出器 (SSPD) は、従来用いられてきた半導体アバランシェフォトダイオードに比べて遥かに高い性能が実現され、既に量子暗号通信システムのキーデバイスの1つとして不可欠な存在となっているとともに、微弱光検出を必要とする様々なアプリケーションへの展開が期待されている。有機デバ

イスにおいても、有機電気光学 (EO) ポリマーを用いた 100 GHz を超える超高速光変調技術の実現が視野に入ってきている。既に、電気光学特性において従来の無機材料 (LiNbO₃) を凌駕する性能の有機 EO ポリマーの開発に成功しており、高速光変調器は試作の段階に進んでいる。さらに、ナノ加工により作製したシリコンフォトニック結晶と有機 EO ポリマー材料を融合することで、光変調器そのものをマイクロメートルスケールに小型化する研究にも取り組んでいる。以下に、ナノ ICT 分野の主な研究成果について紹介する。

2.12.1 第1期中期計画

(1) 有機ナノ ICT 基盤技術の研究

a) 機能向上のための分子設計・合成技術

有機分子の光、電子、及び電気的特性を効果的に発現させるためには、構成分子の結合状態と電子状態の空間的制御、及びエネルギー移動の方向制御により、分子そのものの機能ポテンシャルを高めることがまず重要である。当研究では、分子の電子構造制御に加え、分子間の結合の方向性、複合分子組織体の大きさ、形状などを制御し、分子単体の光、電子機能だけでなく、デバイス構造における機能発現や安定性などの総合的な機能向上を試みた。3次元的に空間制御された分子組織体である dendrimer 構造を用いて、dendrimer の骨格中に色素を導入し、色素間のエネルギー移動による発光機能の失活や光酸化による退色を抑制することに成功した (平成 14 年 Applied Physics Letters 誌等掲載)。

b) 自己組織化による分子デバイス高次構造作製と評価

これまで半導体デバイスの高性能化のために取り組まれてきた、大きな素材を小さく加工していくトップダウン方式の素子作製技術では、分子間の相互作用を高度に制御することは困難であり、分子を積み上げて高次構造を構築するボトムアップ方式の素子作製技術の開発が不可欠である。NICT では、ナノスケールサイズの有機分子構造体が有する自己組織化現象に注目し研究に取り組んできた。自己組織化による高次構造作製では、まず、目的とする構造や特性を数ナノメートルスケールの分子

構造にブレークダウンして設計し有機化学的に合成する。これを分子ユニットとして基板や電極上に散布し、分子ユニット間の相互作用に基づいて隣接ユニットを結合させる。この方式によれば、ちょうどレゴ®ブロックを組み立てていくような感覚で原子・分子スケールの高次な構造を比較的容易に作製することができる。

代表的な機能性分子であるポルフィリン分子について、ターシャリーブチルフェニル基を付加することで、ブチル基が金属基板上で移動するための“足”として機能し、シアノフェニル基を付加することで水素結合により選択的結合する“手”として機能することが、高分解能の走査トンネル顕微鏡 (STM) 観察により明らかとなった (図2.12.1) (平成13年 Nature 誌掲載)。この技術を発展させ、異なる化学活性を有する複数種の分子構造体から成る8 nm ピッチの微細グリッド構造を自己組織化現象によって自発形成させる技術も開発している。

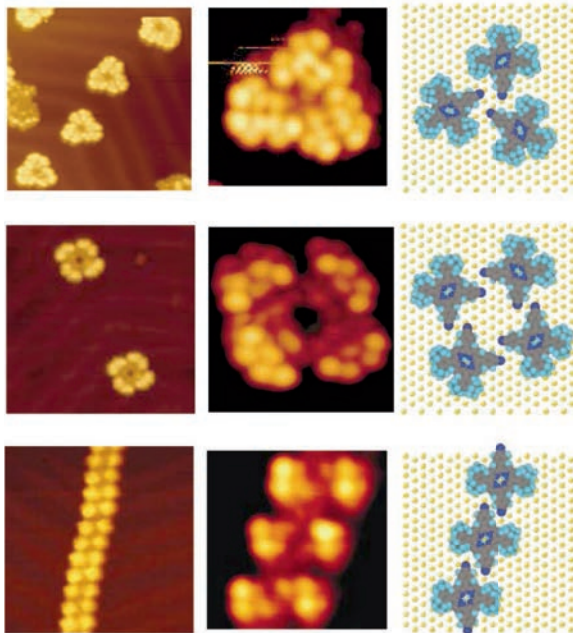


図2.12.1 自己組織化した分子のSTM像

有機分子を基板上に配置し電子デバイスとして動作させるためには、絶縁性基板上で分子を配置しなければならない。しかし、絶縁性基板上ではSTMによる観察ができないため、分子配置を確認できないことから、絶縁性基板上で分子構造を確認する技術の開発にも取り組んできた。非接触型原子間力顕微鏡 (NC-AFM) の高性能化を行い、SrTiO₃単結晶基板の原子レベルで平坦な表面を作製する技術を開発することで、この表面に有機分

子ユニットを配置し、平成15年に、絶縁性基板上に配置された分子ユニットの非接触型原子間力顕微鏡による高分解能観察に世界で初めて成功した (図2.12.2)。

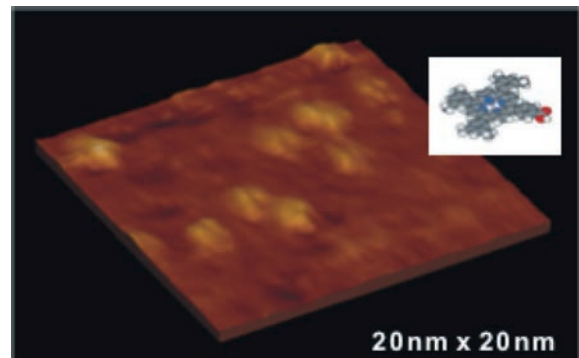


図2.12.2 絶縁体基板上分子の分子分解能 AFM

有機分子を基板上に配置し自己組織化をさせるためには、分子を加熱により気化し真空槽内部に分子線として導入する必要がある。しかし、複合機能を有する分子は分子量が大きく、気化せずに熱分解してしまう。このような非揮発性/熱分解性の試料分子を電氣的に中性状態のまま真空槽内部に分子線として導入する方法として、スプレー・ジェット技術を開発した (図2.12.3)。この技術は非揮発性/熱分解性をもつ分子でも、溶媒さえ選べば試料溶液を準備することは可能であることが多いという発想に基づいている。つまり試料溶液を出発点として常圧下で試料溶液を噴霧し、得られたミスト粒子を従来気体で中性分子線を生成するのと同様にパルスノズルを用いて真空槽に導入する技術である。

有機分子の高効率発光と自己組織化構造を用いたレーザー発振にも取り組んだ。コレステリック液晶をラビング処理した基板の間に挟むと、基板に対して垂直に配向

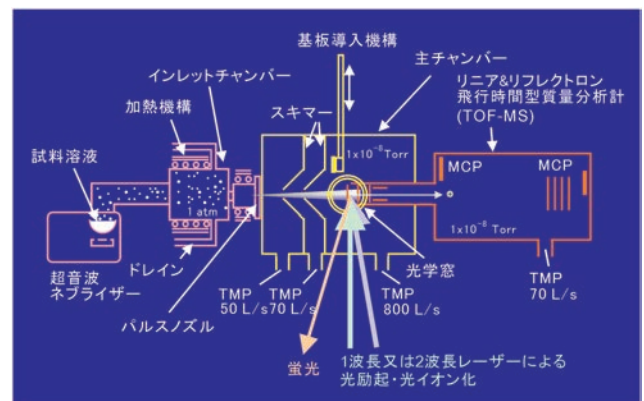


図2.12.3 スプレー・ジェット装置

した超分子らせん構造を示し、1次元フォトニック結晶と見なすことができる。平成15年に蛍光色素をドープした液晶セルから、フォトニック結晶の反射バンドに起因する低しきい値の円偏光レーザー発光を確認した。さらに、交流電場によるレーザー発振の可逆制御にも成功した。

(2) 超伝導 ICT 基盤技術の研究

a) 高周波デバイス

NbN の高周波デバイスとしての実用化を目指すために MgO 基板の導波管技術の開発を行い、平成14年に世界で初めてテラヘルツ帯導波管型 NbN SIS 受信機の開発に成功した(図2.12.4)。また、テラヘルツ帯低雑音受信機として期待されている HEB ミキサの研究では、平成14年に0.93 THz で510 K の低雑音動作に成功し、当時、NbN HEB ミキサとして世界最高性能を示した。

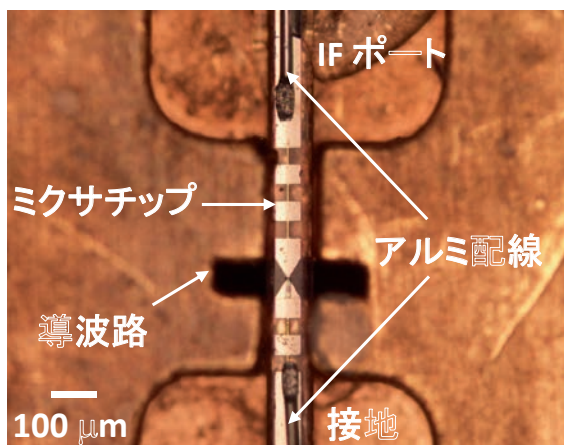


図2.12.4 900GHz帯 NbN 導波管型 SIS ミキサブロック

b) 超伝導単一磁束量子 (SFQ) 回路

超伝導を利用した SFQ 論理回路は、CMOS 回路より4桁小さい0.01~0.1 aJ (アトジュール: 10^{-18} ジュール) で動作する、究極の低エネルギー情報処理技術である。SFQ 回路では、超伝導ループの中で量子化された磁束 (磁束量子: 2.07×10^{-15} T) を情報担体として使用する。複数の超伝導ループとループ内の磁束量子を出し入れするためのスイッチとして機能するジョセフソン接合を組み合わせることで、あらゆる論理演算を実現できる。論理ゲートにおける消費電力、動作遅延は極めて小さく、高速性も兼ね備えており、100 GHz を上回る動作が実証されている。

平成11年に SFQ 回路の研究を始めて2年後の平成13

年には、all-NbN 集積化回路技術を開発し、16ビットシフトレジスタ、バッファなどの SFQ 回路の10 K動作に世界で初めて成功した。1万接合大規模 SFQ 回路という挑戦的な目標に向けて研究開発を行い、NEC、名古屋大学、横浜国立大学との連携により、大規模 SFQ 回路セル設計技術と集積回路作製技術を確立した。平成15年には、超伝導 SFQ ネットワーク要素回路(図2.12.5)を開発し、世界最高速(45 GHz)の動作に成功した。

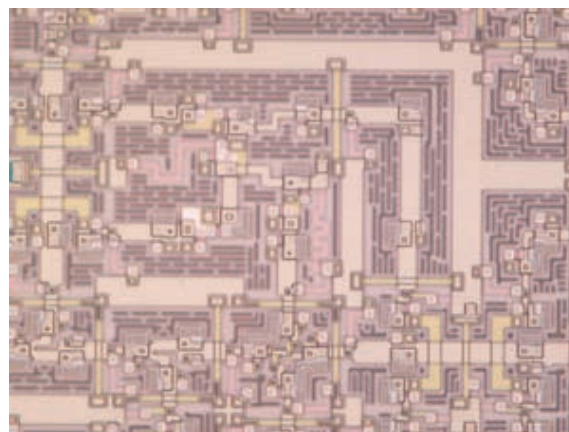


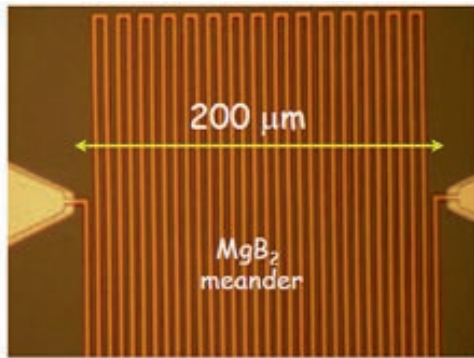
図2.12.5 大規模 SFQ 回路を用いたネットワーク要素回路

c) 超伝導量子ビット

NbN の新たな研究方向の探索として、平成14年に米国カンサス大学との共同研究により、NbN 量子ビット素子を開発し、固体量子ビットデバイスとして世界最長デコヒーレンス時間(5 μ s)を達成した。この結果は、同年 Science 誌に掲載され、被引用回数は350回を超えている。その後、平成16年に米国 NSF 財団の競争的研究資金を獲得し、5年間の共同研究を行った。

d) ニホウ化マグネシウム (MgB₂) デバイス

平成13年に新しい超伝導体 MgB₂ を発見し、それに伴い、薄膜・デバイス化を目指した研究を行った。共蒸着法による MgB₂ の高品質薄膜の作製技術を確立するとともに、平成15年に世界で初めて MgB₂ トネル接合の作製に成功した。また、戦略的創造研究推進事業 CREST の研究に参画し、大阪府立大学、日本原子力研究開発機構、大阪府立産業技術総合研究所などとの共同研究により、MgB₂ 中性子検出器(図2.12.6)を開発し、平成17年に既存の中性子検出器より2桁速い高速動作を実証した。

図2.12.6 MgB₂中性子検出器

2.12.2 第2期中期計画

(1) 有機ナノ ICT 基盤技術の研究

a) 自己組織化による分子デバイス高次構造作製と評価

有機分子を組み上げる手法としては、2.12.1 (1) b) で述べた他に、DNA などの生体高分子の自己組織化によって形成される構造を分子配列制御のテンプレートとして利用する方法も有望である。DNA はアデニン (A)、グアニン (G)、シトシン (C)、チミン (T) という4種の塩基から成るが、A-T、G-C といった特定の組み合わせに基づく相補的な結合を形成することから、この配列を制御することで2次元のみならず3次元の高次構造を人工的に作製することが可能となる。我々は、DNA の分子配列構造を確認する方法として、高分解能の溶液ナノプローブ技術を開発し、平成20年に光入力による DNA の動的構造変化観察を世界最高の高解像度で観測することにも成功した。また、翌年には液中にて DNA のストランド構造 (3 nm) や光機能性分子 (ハロロドプシン) のナノ分解能直接観察に成功した (図2.12.7)。

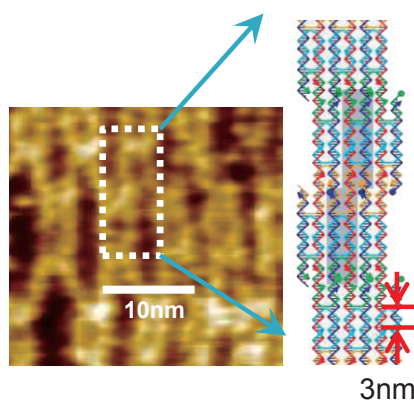


図2.12.7 DNA ストランド構造の高分解能液中観察

b) 単一分子レベルのデバイス

有機材料を分子レベルまでスケールダウンすることで、バルク材料では困難であった単一光子や単一電子の操作や制御が可能になる。これにより、超省エネルギーで動作する光・電子デバイス、量子的な原理に基づいて情報処理を行うデバイスが実現する。

単一分子または数個の分子から成るデバイスを作製した際、数 nm の領域にアクセスするインターフェースが必要になる。単一分子への電氣的インターフェースとして、集束イオンビームを用いてギャップ幅の3 nm ナノギャップ電極を作製し、単一分子の電気伝導特性測定に成功した。光学的インターフェースの場合は、通常用いる光の波長が数百 nm であり分子レベルの領域に個別にアクセスすることは不可能である。これを解決するため金属界面を伝搬する表面プラズモンを利用することを研究してきた。平成20年、数値計算により電界を集中させる構造や光のモードによって3.5 nm 以下の大きさに700倍以上の光強度を集光することが可能であることを示した (図2.12.8)。また平成22年には、表面プラズモン超集束を電気信号で動的に制御する構造を考案し、3次元数値解析シミュレーションにより動作を検証するとともに、SOI 基板を用いて超集束の電氣的制御構造を試作した。

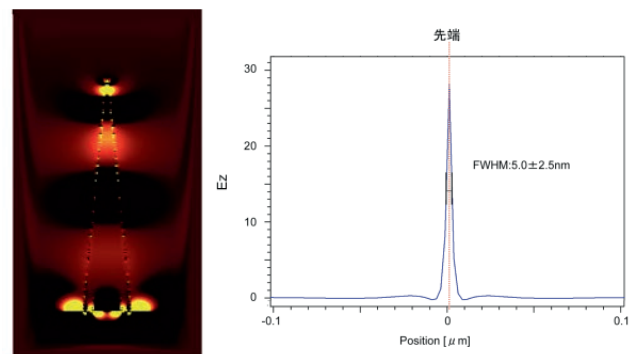


図2.12.8 金属表面を伝搬する表面プラズモンによるナノ集束

単一分子レベルの素子として、ナノギャップ電極間に光機能分子やフォトクロミック分子をコートしたナノ粒子を配置し、光ゲート型分子単一電子トンネル素子を試作、平成20年に光による単電子トンネル (SET) 特性のゲート変調を確認した (図2.12.9)。また、平成22年には有機ワイヤー分子と金ナノ粒子から成るハイブリッド材料のダブルドット単電子トランジスタ構造を、自己組

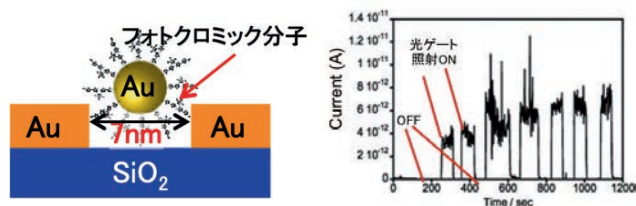


図2.12.9 SET デバイス構造と光ゲート特性

織化手法を用いて作製し、ハイブリッド粒子間の相互作用を反映した微分コンダクタンスの超周期構造を世界で初めて観測した。

その他、単一分子計測・解析及び単一光子発光などの評価のために、平成20年に特殊仕様の高感度光検出器PMTとイオン液体を用いた高真空下高NA高S/Nの発光計測系の開発、ナノスケールの素子の信号処理アーキテクチャとして、平成19年からブラウン運動を利用した低発熱で高効率の可逆非同期セル・オートマトン回路の考案などを行った。

(2) 超伝導 ICT 基盤技術の研究

a) 高周波デバイス

大学共同利用機関法人自然科学研究機構国立天文台からの受託研究によりALMAバンド10用NbN導波管型SIS受信機を開発し、平成19年に0.8 THzで量子雑音7倍程度の低雑音動作に初めて成功した。また、中国科学院紫金山天文台(PMO)との共同研究によりNICT製0.5 THz帯超伝導SIS受信機をPMOのポータブルサブミリ波電波望遠鏡(図2.12.10)へ搭載した。このNbN SIS受信機は、平成19年12月31日午前5:35:14にオリオンAのCOスペクトルを観測し、世界で初めてNbN SIS受信機の実用化に成功した。この結果は、平成20年のスペース・テラヘルツ国際会議とApplied Physics



図2.12.10 PMO サブミリ波電波望遠鏡

Letters誌で発表され、電波天文分野にも大きなインパクトを与えた。平成7年にNbN/AlN/NbNトンネル接合を用いた準光学SISミキサの開発から、MgO基板を用いた導波管技術まで、実用化の第一歩を踏み出すには12年の歳月を要した。

b) 超伝導量子ビット

NbN量子ビット素子の研究は、平成22年以降、日本電気株式会社、独立行政法人理化学研究所、国立大学法人東京大学との共同研究に発展し、エピタキシャルNbN接合を用いたトランズモン型量子ビット研究の研究として現在も継続している。この共同研究で得られた成果は、その後平成23年にApplied Physics Letters誌、平成25年にPhysical Review Letters誌に掲載され、材料科学という観点から超伝導量子ビットのデコヒーレンス要因を明らかにしようとする試みとして注目を集めている。

c) 超伝導ナノワイヤ単一光子検出器(SSPD)

SSPD素子は図2.12.11に示すように、厚さ10 nm以下の超伝導薄膜から成るナノワイヤを受光面積全体にメアンダ状(蛇行状)に敷き詰めた構造をしている。超伝導臨界電流よりもわずかに小さいバイアス電流を流した状態でSSPDに光子が入射すると、光子のエネルギーで超伝導状態が壊れ、素子の両端に電圧が発生する。この電圧を室温のエレクトロニクスで計測することで、高効率に光子を検出できる。SSPDは、アバランシェフォトダイオード(APD)などの半導体光子検出器に比べて、圧倒的に高い検出効率、低暗計数率、低ジッタ、広い波長感度領域など優れた性能を有しており、量子光学、量子情報通信技術、生体医療計測等、様々な分野での応用が期待されている。

SSPD素子作製に向けて、電子線リソグラフィ技術及び反応性イオンエッチングによって、線幅100 nmの

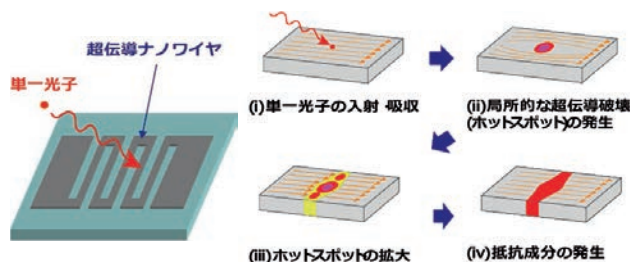


図2.12.11 SSPD の概念図と動作原理

メアンダ状のナノワイヤにパターニングする加工技術を確立した。受光部面積は、入射単一光子との高い光結合効率を得るために、15-20 μm 角程度とした。平成19年には、NEC、米国 NIST、NICT 量子 ICT グループとの共同研究により SSPD を用いた量子暗号鍵配送 (QKD) フィールド実験を行い、世界最長距離 (97 km)、最高速 (10 kbps/photon) を達成し、平成22年には東京 QKD ネットワークでの実証実験に成功した。

d) 光・超伝導インターフェース

SFQ 回路を用いた光・超伝導インターフェース研究は、超伝導 SFQ 回路と光デバイス技術を融合し、フォトニックネットワークへの応用を目指している。この研究では、超伝導技術だけではなく、低温で動作する InGaAs フォトダイオード (MSM-PD) や、MSM-PD と超伝導マイクロストリップ線路を集積化した極低温動作光入力モジュールなどの研究開発を、超高速フォトニックネットワークグループと光デバイスプロジェクトとの連携によって推進してきた。その結果、4.2 K における極低温動作通信波長帯 MSM-PD と光モジュールの開発に成功し (平成22年に Applied Physics Letters 誌に掲載)、また、光入力モジュールと SFQ チップを接続し、光パルスから SFQ パルスへの変換動作の検証実験を行い、光パルスにより SFQ パルスの発生を実証した (平成23年に IEEE Transaction on Applied Superconductivity 誌に掲載)。

2.12.3 第3期中期計画

(1) 有機ナノ ICT 基盤技術の研究

a) 機能向上のための分子設計・合成技術

有機電気光学分子の電気光学機能強化のための分子設計では、世界最高性能の有機電気光学分子の合成に成功し、平成23年に図2.12.12に示すような分子内水素結合により π 共役構造が安定化することで電気光学機能が増

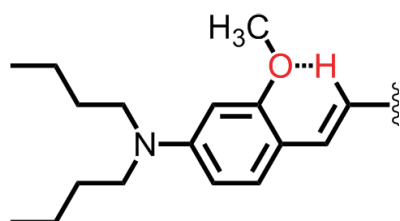


図2.12.12 分子内水素による構造安定化

大する効果を発見し、有機電気光学分子の更なる高機能化に向けた新たな分子設計指針を獲得した。

b) フォトニック結晶構造による有機分子の発光制御

有機分子を利用した光デバイスを実現するにあたり、デバイスサイズをナノスケールや分子スケールまでスケールダウンするだけでは、光と分子の相互作用が小さいために、実用的な機能を得ることは容易ではない。特に単一分子を光デバイスとして利用するためには、吸収断面積が非常に小さい単一分子に対して効率よく光を作用させたり、単一分子から効率よく光を取り出したり、単一分子の光機能を自在に制御したりするための技術開発が必要となる。我々は、ナノメートルスケールの微小空間において光閉じ込めや伝搬制御を可能にするフォトニック結晶 (PC) に着目し、有機分子の発光制御の実現に取り組んできた。単一分子からの発光制御を行うために、低バックグラウンド発光の無機酸化物材料を用いた可視光領域のフォトニック構造を設計・製作し、平成24年に共振モードとの結合による発光寿命の長寿命化を確認した (図2.12.13)。

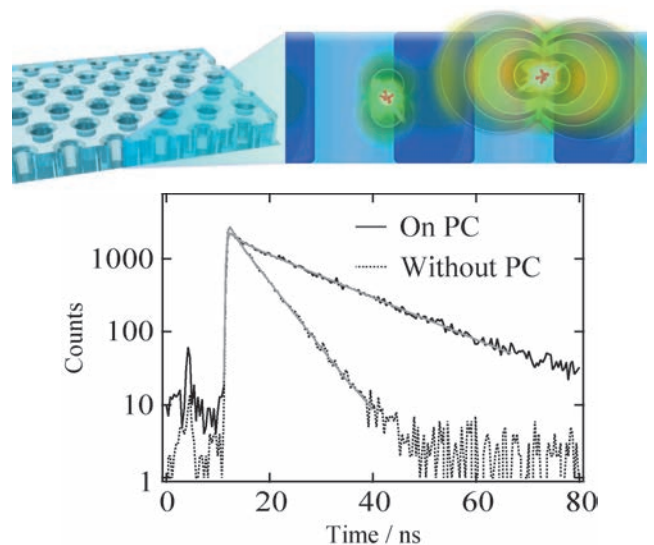


図2.12.13 フォトニック結晶による単一分子の発光抑制

c) 有機 EO ポリマー光変調器

光変調技術は光通信において情報伝送速度を決定する基幹技術であり、低電力で100 GHz を越える超高速変調を可能にする有機 EO ポリマーが注目を集めている。NICT では、光通信技術の超高速化と省電力化に向けて、EO ポリマー材料の開発から変調器やスイッチ、光集積回路技術の研究までを総合的に行っている。EO ポリ

マーは、EO 効果を示す分子をポリマー中に分散した材料であり、分子内水素結合を利用した独自の分子設計指針により、世界最高性能の EO 分子の開発に成功している。EO ポリマー光変調器の作製では、基板に電極／下部クラッド／EO ポリマー／上部クラッド／電極の積層構造を作製する。しかし、一般的なポリマーは、有機溶媒に可溶であるために、積層構造を作製できない。我々は、光架橋性有機 EO ポリマーの合成に成功し、成膜後の架橋により耐溶媒性を発現させることで、平成24年にオールポリマーの高効率な有機 EO 変調器構造の作製に成功した(図2.12.14)。これまで、光変調器の基本特性を評価し、平成25年には、50 GHz の高周波信号に対する光応答を確認している。

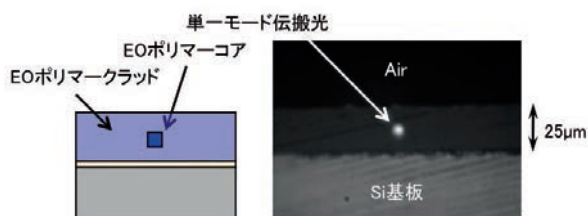


図2.12.14 オール EO ポリマー光変調器

光通信技術は、長距離通信だけでなくサーバー間のデータ通信から集積電子回路中の光配線までの応用が進められている。これに伴い、光変調器の小型省電力化が重要な研究課題となっている。NICT では、有機 EO ポリマーと Si フォトニック結晶構造を組み合わせることで、光変調器の高速化と小型化を同時に実現することを

目指して研究を行っている。これまで、高精度な Si 加工技術を確立し、平成25年に従来デバイスに比べて素子サイズで1/100の有機 EO ポリマーとシリコン1次元フォトニック結晶導波路のハイブリッド EO 変調器を試作し光変調動作を実証した(図2.12.15)。

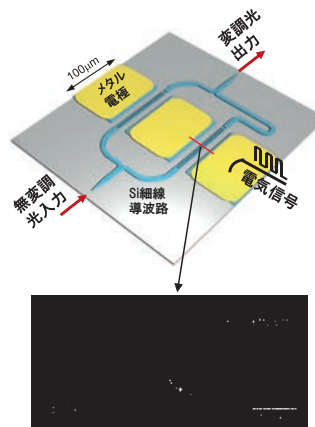


図2.12.15 超小型 EO 変調器

d) 生体分子を用いた高機能光検出器

数十億年をかけて創りだされた生物は現在の技術でも作りだすことが困難な高度な機能を有したナノスケールのバイオ分子を有している。このバイオ分子そのものを利用して現在の技術と融合することにより、生体システムの高度な機能を活かした新たなバイオメテック人工システムが実現できる。

光機能性生体分子膜バクテリオロドプシン (bR) は、光駆動のプロトンポンプ機能を有しており、電極と電解液界面の bR に光を照射すると時間微分応答性の光電流

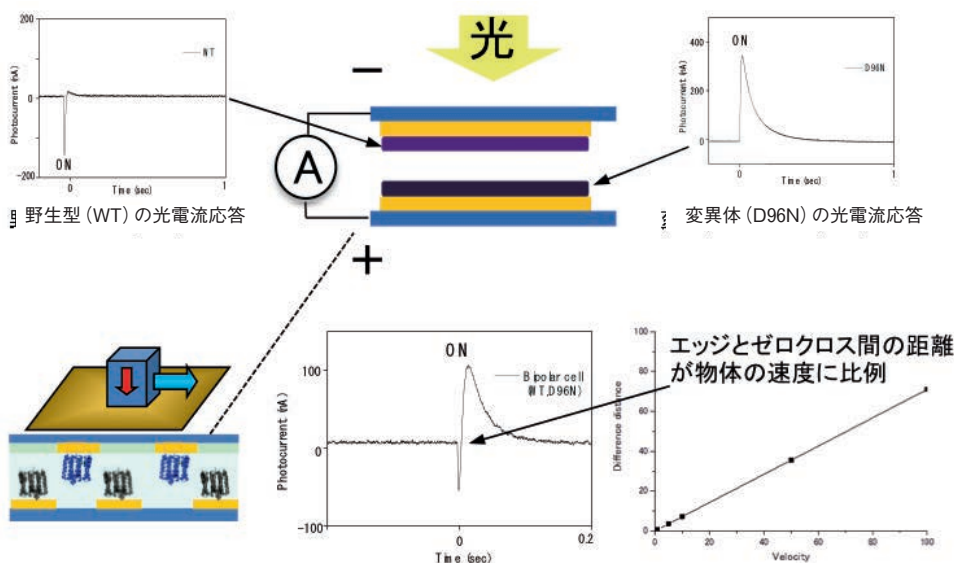


図2.12.16 bR オプティカルフロー検出器のバイポーラセルの基本動作

が得られ、光強度の変化のみに応答する信号が外部から電源供給を受けることなく得られる。平成23年にbRを用い生体視覚機能を模した抑制領域と興奮領域を有する人工視覚機能型光センサを試作し、空間変位に対する微分応答特性などの素子レベルの演算処理機能の基本特性の確認に成功した。また、平成24年に配向制御膜のパターニングにより双極型光検出器構造を作製し、素子レベルのエッジ検出機能の確認にも成功した。平成25年には、bRの野生型と遺伝子操作により光応答時定数を大きくした変異型とを組み合わせオプティカルフロー検出器を試作し、単一のバイポーラセルの基本動作確認(図2.12.16)を行うとともに、その実験データをもとに光学的相対速度場検出のシミュレーションを行い、動作特性を検証した。

(2) 超伝導 ICT 基盤技術の研究

a) 超伝導ナノワイヤ単一光子検出器 (SSPD)

ナノワイヤは膜厚4 nmの非常に薄い超伝導薄膜であるため、ナノワイヤ層の光吸収効率(NbNは30%程度)によって検出効率が制限されるという問題があった。NICTでは、ナノワイヤ層での光吸収効率を改善するために、ナノワイヤ層の両側に光反射層を持つダブルサイドキャビティ構造を導入し、平成25年には、暗計数率40 cpsにおいて80%のシステム検出効率、約67 psの低ジッタを実現し(図2.12.17)、APDを遥かに凌ぐ性能を達成した。

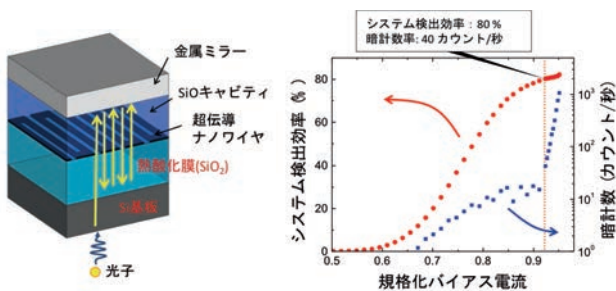


図2.12.17 ダブルサイドキャビティ SSPD の概念図と検出効率

SSPD素子の本質的な応答速度は、励起電子のエネルギー緩和時間に依存し、NbN薄膜を用いた場合の緩和時間は30 ps程度と非常に短く、本質的な動作周波数は数十GHzに達する。しかし、現実のSSPD素子の応答速度は、長いナノワイヤ長に起因する素子の寄生イン

ダクタンスによって制限されている。素子の小面積化により寄生インダクタンスを低減することが可能であるが、受光面積の減少は検出効率の低下を招く。高い検出効率を維持しつつ高速化を実現する方法として、小面積化素子の開発とそのアレイ化に取り組んできた。しかし、アレイ化した素子では、多数の信号線からの熱流入により冷却効率が減少することから、本中期計画において冷却された同一素子内でのSFQ回路による信号処理を提案した(図2.12.18)。平成25年には、SFQ回路による信号処理を用いた4ピクセルSSPDアレイの検出効率の入射光子数依存性から計数率100 MHz以上を確認し、シングルピクセルの25 MHzからの向上を実証している。また、これまで、高速化のためにナノワイヤのフィリングファクタを減少すると検出効率も減少すると考えられていたが、平成25年に数値シミュレーションによりフィリングファクタを通常の50%から16%に低減しても75%のシステム検出効率を得られることを確認し、低フィリングファクタ化により最大計数率がこれまでの25 MHzから2.8倍の70 MHzに向上することを実証した。

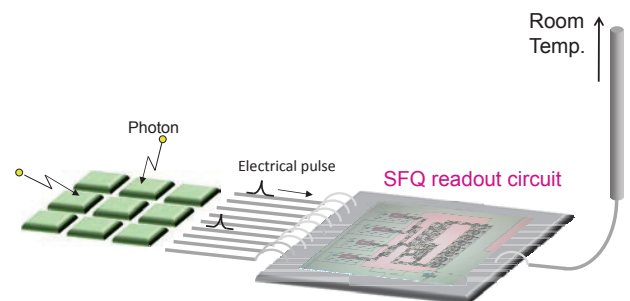


図2.12.18 SSPDアレイ化とSFQ信号処理

b) 光・超伝導インターフェース

超伝導ナノワイヤを利用した光検出器の応答時間を評価し、平成25年に、受光面積を従来の $15\ \mu\text{m} \times 15\ \mu\text{m}$ から $1\ \mu\text{m} \times 1\ \mu\text{m}$ に小型化することにより応答時間を14 nsから0.3 nsへと大幅に高速化できることを確認した。また、同年 $1\ \mu\text{m} \times 1\ \mu\text{m}$ の受光面積でエラーレートが 10^{-12} 以下となるために必要な1パルス当たりの光子数は約54,000と見積もられ、10 GHzの動作周波数においても従来の半導体フォトダイオードよりも1桁以上低い70 μW の光入力パワーで動作することを確認した。

2.13 量子 ICT 基盤技術

2001年(平成13年)4月、当時の通信総合研究所(CRL)に量子情報技術研究室が発足し、NICTで量子情報通信技術(量子ICT)の研究開発が本格的に始まった。折しも、量子力学と情報科学が融合し量子情報科学という新分野が急激に成長し始めていた。実際、Physical Review誌など物理学の主要誌に量子コンピュータや量子暗号、量子情報理論に関するおびただしい論文が発表されるようになり、世界各国でこれらに関する国家プロジェクトが立ち上がっていった。この13年間、NICTでは、量子ICTの新原理開拓やその実証実験に取り組むとともに、その実用化に向けて産学官の様々な研究機関に委託研究を受託頂き、All Japanの体制で戦略的に取り組んできた。その成果は、国際的著名誌への論文掲載や、世界最高速での量子暗号化が可能な都市圏の試験ネットワーク“Tokyo QKD Network”の構築等に繋がっている。本稿では、これまでの取組を当該分野の発展の歴史と合わせて整理する。

2.13.1 黎明期(～2000年度)

量子通信の源流はシャノンによる通信理論誕生(1948年)と同時期まで遡る。1950年に、すでにガボールは、シャノン理論を物理学の一分野としてとらえるべきであるとして量子論との統合を試み、光子検出器があれば通信路容量は古典論より上がるだろうと示唆した。同時に通信にはプランク定数によって決まる「量子雑音」という不可避な雑音が伴うことも指摘した。1960年にはメイマンがレーザーの発振に成功し、レーザーによる新時代が幕を開ける。レーザーの光子のエネルギーは、周波数が電波の10万倍あるため、温度に換算すると光子1つで1万度くらいに相当し、光子という粒の性質が電波の通信より顕在化する。レーザーの誕生は、量子通信理論の構築を迫っていたわけである。

まもなくベル研究所のゴードンが、シャノン理論を量子力学の言語である行列力学を用いて書き換え、シャノンエントロピーに代わってフォンノイマンエントロピーという量を通信の分野に初めて導入した。彼は、のちにホレボー情報量と呼ばれることになる表現を1964年に

通信路容量の上界予想として発表した。しかし、当時、量子測定を定式化する理論は未完成で、システム全体の完全な記述までには至らなかった。1970年代にはホレボーら旧ソ連の学者が量子一括測定という概念をゴードン予想に持ち込み、上界が実は真の通信路容量だろうと証明を試みる。しかし当時はまだ成功しない。再び進展し始めるのは1990年代になってからである。

一方、1980年代には量子暗号と量子計算の概念が発明される。量子暗号の発明は偶然で、1982年に物理学者のベネットと暗号学者ブラサールがプエルトリコのホテルのプールで偶然出会って、何気ない会話からのちにBB84と命名される量子暗号が生まれたと言われる。1985年には、ドイチェが多世界宇宙論の理論を発展させ量子計算の概念を提唱した。

1994年には、ベル研究所のショアによって、離散対数問題を高速で解く量子計算アルゴリズムが発見され、量子コンピュータが実現されれば、現代暗号も数分で解読できることがわかってきた。これを契機に、量子通信、量子暗号、量子計算の研究が合流して、量子情報科学の誕生につながる。

ちょうどその頃、CRLでも、光の量子制御技術や量子通信に関する研究が始まった。当時はまだ光情報処理研究室の中の一研究課題として、理論研究を中心に進められていた。1999年頃から郵政省の下で量子情報通信に関する調査研究が始まり、CRLが中心になって産学官の識者と協力し研究開発戦略に関する報告書をまとめた。2001年(平成13年)にはCRLに量子情報技術研究室が発足し、高度通信・放送研究開発助成金交付業務(TAO)による量子暗号に関する委託研究と連携する形で、量子情報通信の本格的な研究開発が始まった。

2.13.2 第1期中期計画

研究室で最初に取り組んだのは、量子通信の基本原則の実証実験である。それは、究極の通信効率を実現するための符号化技術に関するものである。1964年のゴードン予想に対して、1970年代にホレボーが量子測定理論を適用し厳密な上界定理として証明したが、実際に達

成可能な通信路容量かどうかについては、その後20年、未解明のままであった。突破口が開かれたのは、1995年である。古典雑音が無い場合について、シューマッハーら米英の理論チームが、ホレボー上界は実際に達成可能な伝送容量であることを証明した。そして、翌年、ホレボーも古典雑音を含む一般的な場合へ証明を拡張し、シューマッハーらも同時に一般化に成功する。彼らの理論は、これまでのシャノン限界を超える通信が可能であることを示していた。しかし、具体的にどういう技術を用いればシャノン限界を超えた新しい通信領域へ踏み出せるか、という点については未解明で、ただそういう領域が存在するというを示しているに過ぎなかった。

CRL では、そのエッセンスを抜きだし、実験可能なモデルへ具現化するという作業から始まった。結局、シャノン限界を超えるためには、復号過程で量子コンピュータの原理、すなわち重ね合わせの原理に基づく量子計算を用いるのが本質的であり、その過程で符号語状態間の量子干渉を引き起こして信号の識別性を向上させることで超シャノン限界の通信が可能になることがわかってきた。この仕組みの効果は、次のようにシンプルに表現できる：伝送に費やす通信資源の量を2倍に増やすと、伝送情報量が2倍以上に増える（超加法的符号化利得）。これに対して従来の理論では、伝送情報量は最大で2倍までは増えるが、決して2倍以上に増えることはない（図2.13.1）。

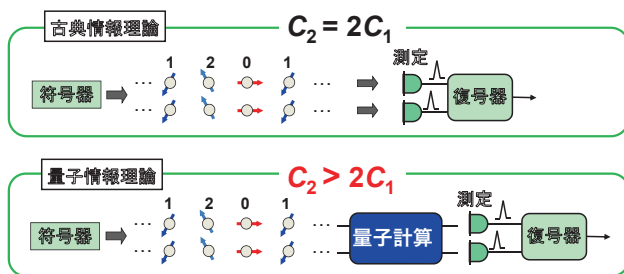


図2.13.1 古典情報理論と量子情報理論での復号方式の比較と超加法的符号化利得

超加法的符号化利得の原理実証実験は2003年（平成15年）に成功した。図2.13.2がその実験データで、縦軸が取り出された情報量、横軸のオフセット角は、送信状態と最適な復号基底間の相対位相で、最適値の前後に振って情報量の劣化を測定している。水平の赤の破線が従来の符号化を用いた場合の限界（シャノン限界）、黒の点

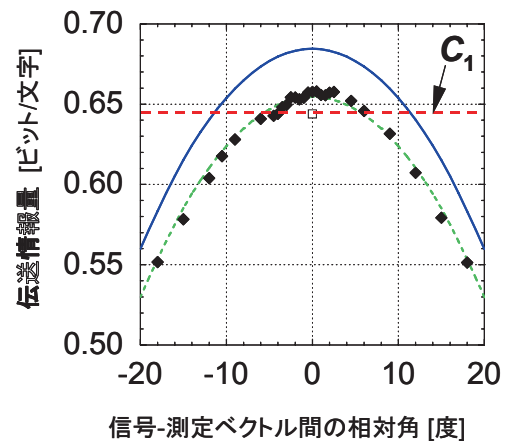


図2.13.2 超加法的量子符号化利得の実験データ

が実験データで、わずかに上に出ている部分が超加法的量子符号化利得の実験データであり、光子の信号帯域を2倍にした時、2倍以上の情報量が伝送されていることを示している。青の線は理論値を示す。大容量化へ向けた新しい原理が、ようやく見えてきたわけである。その本質は従来にはない量子計算を組み込んだ新しい受信過程にあり、この新しい復号器のことを量子デコーダと呼ぶ。

一方、量子暗号の分野は、2000年以降、本格的な実験が世界各国で始まり、ID Quantique（スイス）や MagiQ（アメリカ）などのベンチャー企業も誕生した。2005年には、アメリカの国防総省国防高等研究計画局の支援を受けたプロジェクトがボストン地区に3地点を結ぶ量子暗号ネットワークを構築しフィールド実験に成功した。その後、アメリカでは、国家機密の研究に移行していく。ヨーロッパでは2004年に欧州連合のプロジェクト SECOQC が発足し、12か国、41機関の研究チームによる研究開発が始まった。

同じ頃、NICT では、量子鍵配送装置のプロトタイプの開発を三菱電機株式会社、日本電気株式会社（NEC）及び国立大学法人東京大学に委託する形で推進し、着々と基盤技術を開発していった。そして、2005年度末（平成17年度末）に、NICT 光テストベッド JGN2の秋葉原アクセスポイントにて、三菱電機システムと NEC システムを相互接続し暗号鍵の最初のリレー実験に成功し、将来のネットワーク化への布石を打っていた。この時点ではまだ20kmのポビンファイバーを用いた室内伝送実験であった。

2.13.3 第2期中期計画

2003年(平成15年)に行った超加法的符号化利得の原理実証実験では、実はまだ伝送に適した信号は用いていなかった。伝送に適した信号はレーザー光、つまりコヒーレント状態で、この状態こそが唯一、損失があっても干渉性を維持できる理想的搬送波の状態である。しかし、このような巨視的信号で量子計算を行う技術は、まだ実用レベルにはなく、2003年(平成15年)の実験では、単一光子の偏光・経路変調符号という特殊な信号で原理実証を行っていた。

第2期中期計画では、量子デコーダの実現を目指して、コヒーレント状態を自在に量子制御するための研究開発を本格化した。主要な課題は2つあり、1つは巨視的に異なるコヒーレント状態の重ね合わせ状態を自在に生成制御する技術、もう1つはそのような状態を最高精度で計測する技術である。巨視的に異なるコヒーレント状態の重ね合わせ状態は、シュレーディンガーの猫のパラドックスとして知られる典型的な量子効果を内在しており、シュレーディンガーの猫状態とも呼ばれ、情報通信に新しい局面を切り開く重要なリソースとなるものである。このシュレーディンガーの猫状態を光の伝播モード内に生成するのは量子光学積年の夢であった。そのためには、光子レベルでの強い非線形過程が必要で、これが困難な壁として立ちはだかっていた。すでに1990年代にスクイズド光と光子検出器を組み合わせる測定誘起型非線形過程を使う方式が提案されており、第1期中期計画後半には、NICTの研究室でも必要な技術が整備され始めていた。2003年(平成15年)から試行錯誤を続けていたが、2004年にフランス国立科学研究センターのシャルル・ファブリ研究所のグループがシュレーディンガー猫状態への第一歩となる状態の生成に成功し、初めて同じゴールをねらうライバルの存在を知った。2005年秋にはデンマークのニールス・ボーア研究所でも類似の状態を生成したとの報が入り、12月には、シャルル・ファブリ研究所がついにシュレーディンガー猫状態の生成についてサイエンス誌に投稿したと知ることとなった。

落胆からはい上がり、NICTの研究室も独自の実験装置の改良を進め、2006年(平成18年)春には何とかシュレーディンガーの猫状態を生成できるようになった。夏になり、国際会議に向けて実験の改良を続けていた研究

員が、偶然試した新しい結晶で、これまでとは質的に違った高純度のシュレーディンガー猫状態の生成に成功した。図2.13.3は単一光子状態とシュレーディンガー猫状態の電場振動の様子を示したものである。光子1個の電場振幅は不確定性原理のために完全にランダムになり、位相変化に依存しない2本の平行な分布から成る。分布がぼやけているのが不確定性原理による量子雑音である。下の図はウィグナー関数と呼ばれる表現で、原点付近に負のくぼみがあるのが量子特有の効果を表している。

この状態から光子を増やしていくと、徐々に波として振動する様子が現れ始める。右の図は位相が180度ずれて振動する2つの波が同時に存在している状態を表している。そのウィグナー関数は原点で負の値をとっており、2つの波が量子力学的に重ね合わさった状態であることを示している。

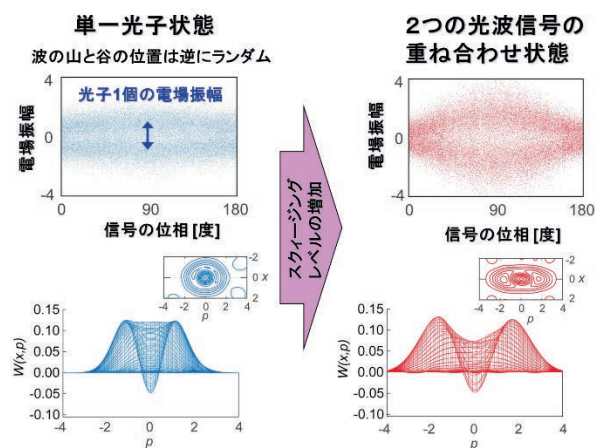


図2.13.3 単一光子状態とシュレーディンガー猫状態の電場振動の様子とウィグナー関数分布

その後、NICTで開発したシュレーディンガー猫状態生成技術を用いて、シュレーディンガー猫状態の大きさ(波の振幅)を増幅する技術や、重ね合わせ状態における奇数光子と偶数光子の比重を自在に制御する技術など、新しい技術を次々と開発し、量子光学に新局面を切り開きながら新しいICTへの基盤を構築してきた。成果はPhysical Review Letters誌、Nature Photonics誌等、物理・光学分野で最も著名な国際論文誌に掲載され、新聞、Webサイト等でも紹介された。一連の研究で用いられた実験系の写真を図2.13.4に示す。3メートル四方ほどの光学定盤上に精密光学部品がびっしりと並び、それらを制御するための電子機器と電気ケーブルがひしめき合っている。まだ、2ビット程度の量子計算処理し

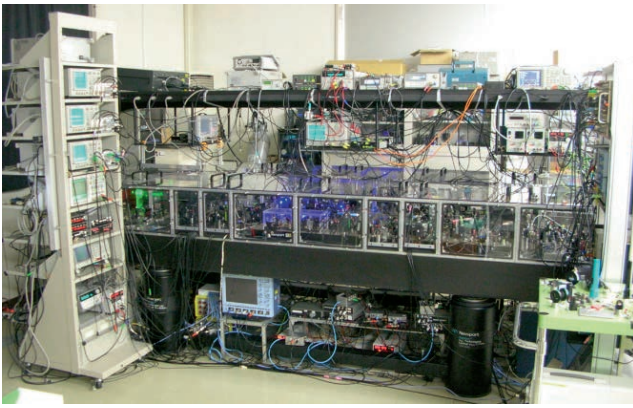


図2.13.4 シュレーディンガー猫状態を生成・制御する装置

かできないが、将来は、より小型で多ビットの処理ができるような量子回路に改良していく計画である。そして、このような回路内にシュレーディンガー猫状態をあらかじめ用意しておき、ファイバから入ってきたコヒーレント状態と相互作用させ、ある適切な状態に変換してから測定することで、従来限界を超える高効率の通信を実現するのが量子デコーダであり、量子 ICT 分野での長期的な目標である。現在の光通信では1ビット当たり10万個以上の光子を使っているが、このような量子デコーダが実現できると、1ビット当たり1個に満たない光子でも、信頼性の高い情報伝送が原理的に可能であることが理論的に示されている。

量子暗号分野では、欧米で研究開発が加速する中、フィールド実験の時代に入り、日本では三菱電機株式会社、NEC に続き、NTT にも本格参入していただき、順調に第2期中期計画に移行した。ヨーロッパでは、SECOQC プロジェクトのもとで多地点間の量子暗号ネットワークの構築が始まっていた。NICT に最新の超伝導光子検出器が整備されたのを機に2007年(平成19年)夏、当初計画には無かったが、NEC と NICT の連携による本格的なフィールド実験に踏み切った。SECOQC が2008年に大規模なフィールド実験を予告しており、日本でも早急に経験値を上げておく必要があった。けいはんなオープンラボにおいて、京都と奈良の県境にある JGN2 の敷設ファイバを用いた、波長多重による量子暗号の伝送技術の実験を行った。

2008年10月8日、ウィーンで SECOQC のフィールド実験が研究者や報道陣に公開された。平均の伝送距離は30km、鍵の生成速度は1 kbps で音声の完全秘匿化を行える性能だった。その後、ヨーロッパでは、ジュネーブ、

マドリッドに量子暗号のテストベッドが開設され、南アフリカではダーバンに、中国では蕪湖(Wuhu) にフィールドテストベッドが開設され、米国でも Telcordia やロスアラモス国立研究所が粛々と伝送実験に取り組んでいた。

日本では、2009年(平成21年)から JGN2plus の敷設ファイバを用いて、多地点の量子暗号ネットワーク“Tokyo QKD Network”の構築に着手した。QKD は、量子鍵配送の英語略である。量子暗号では、まず、送り手と受け手に量子鍵配送装置を用意し、光回線を介して安全な暗号鍵(0,1の乱数列)を共有する。次に、送り手はこの鍵と送りたい情報を足し算(ビット値の論理和)して暗号文とし伝送する。受け手は暗号文に共有しておいた暗号鍵を足し算すると情報が復元される。一度使用した鍵は二度と使わないワンタイムパッド方式で運用することで原理的に破れない暗号通信が可能となる。

NICT、NEC、三菱電機株式会社、NTT のほか、東芝欧州研究所、ID Quantique、オーストリア工学研究所やウィーン大学にも参加していただき、2010年(平成22年)10月に、最新鋭の Tokyo QKD Network を開設し、そこで動画伝送の完全秘匿化に世界で初めて成功した(図2.13.5)。わずか2年で伝送距離は、SECOQC ネットワークの2倍近くの50 km に伸び、暗号化速度は100倍以上に向上した。また、各機関の仕様の異なる QKD 装置を相互接続するための最新のアプリケーションインターフェースを開発し、ネットワーク運用を行いながら様々なノウハウを蓄積した。そこでの成果は、テレビ、新聞、Web サイトなど多くのメディアで広く紹介いた



図2.13.5 量子暗号ネットワーク (Tokyo QKD Network) と盗聴不可能なテレビ会議システム

だき、Nature Photonics 誌、Science 誌などトップ科学誌のニュース欄でも紹介された。

2.13.4 第3期中期計画

コヒーレント状態の自在な量子制御と並んで量子 ICT の実現に欠かせないのが、パルス内の光子数を正確に識別できる光子数識別器である。これは、光が光子の集まりであるという離散性を最大限に活用するために必須の技術である。量子通信のほか、量子計算及び量子計測標準の実現に欠かせない技術である。光子数識別器は低雑音であるのはもちろん、光子を電気信号に変換し読み出す効率(量子効率)もほぼ100%に近くなくてはならない。このような要求を満たす光子数識別器としては、現在、超伝導転移端センサーが最も有望な方式であり、第2期中期計画期間中に独立行政法人産業技術総合研究所、日本大学、独立行政法人物質材料研究機構に研究開発を委託し、世界トップレベルの光子数識別器が開発された。

この技術を活用し、量子 ICT 研究室では、まず量子デコーダの基幹部品となる量子受信機の開発に取り組んだ。図2.13.1で説明した量子デコーダでは、2つ以上の光信号を測定する前に量子計算機を通して量子的な演算を行い、その後光子を検出するというものであったが、前述の通りこれをコヒーレント状態の光で自在に行うことは現在の技術では困難である。量子受信機は、この量子計算の部分をもっと単純化し、1つの光信号に対してのみ量子計算(量子制御)を行い、その後光子を測定し、量子雑音による信号識別性能の劣化を限界まで抑制する受信機が、量子受信機である。

図2.13.6に、その概念図と実験結果を示す。コヒーレント光の位相変調で作られた0, 1の信号は、「量子受信機」内で、まず波の制御(量子制御)がなされ、その後光子数識別器で信号識別を行う(上部左は量子受信機の装置写真)。量子受信機が、従来の光通信理論の信号識別限界(ショット雑音限界)を超えた、超低ビット誤り率を実現し得ることは、理論上は予想されていたが、2011年(平成23年)に、本実験で NICT が世界に先駆けてその原理実証に成功した。本成果が物理学分野の国際的著名誌 Physical Review Letters 誌に掲載されると、その後世界の主要研究機関の量子受信機開発を促進することとなり、現在では、米国の NIST、Raytheon BBN

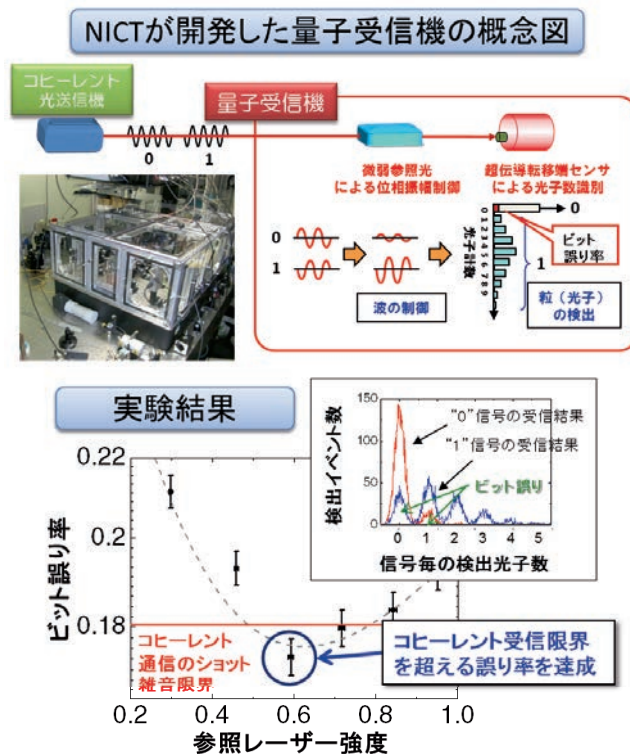


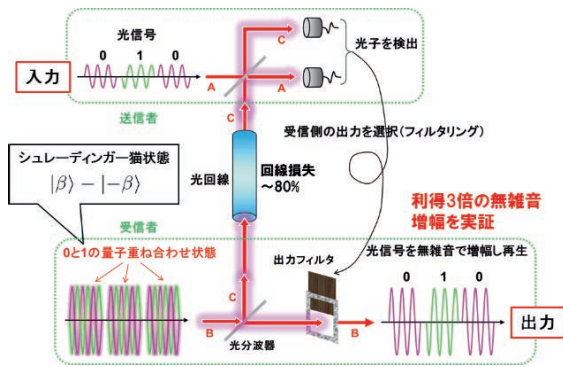
図2.13.6 開発した量子受信機概念図と実験結果

Technologies、ドイツの Max-Planck 研究所等から次々と本成果を発展させる新しい実験成果が発表されており、熾烈な研究開発競争が始まっている。

一方、第2期中期計画で開発したシュレーディンガーの猫状態の生成技術の応用研究も進め、光の入力信号を無雑音に増幅し、出力側に転送する「量子増幅転送」技術を発表し、2013年(平成25年)に実証に成功した。図2.13.7にその概念図を示す。図中下のグラフは、この技術を将来的に量子暗号に応用した場合の伝送距離に対する量子鍵生成率の試算であり、本技術が将来的により確立されていけば、従来の量子暗号の伝送距離限界を大きく超え得る可能性を示している。こちらの成果も光学分野の国際的著名誌である Nature Photonics 誌に掲載され、新聞、Web サイト等でも紹介された。

量子暗号分野においては、量子鍵配送システムの実用化をにらみ、現在のインターネットの安全性に直接寄与することを目的として、量子鍵配送システムで生成された情報理論的に安全な鍵をネットワークスイッチに供給し、IP ベースの通信の安全性を飛躍的に向上させ得るシステムの開発を行った。

現在のインターネットで使用されている標準通信プロトコルの TCP/IP の OSI 参照モデルでは7階層モデルに



量子暗号BB84に適用した場合の性能予測

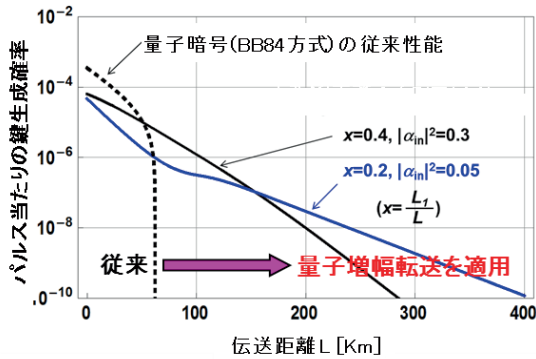


図2.13 7 量子増幅転送の概念図と実験結果

則って構成されている。この中で IP アドレスを基に通信を行っているのは第3層のネットワーク層 (Layer 3) であり、この層で利用されているスイッチでは IP アドレスを利用して通信先を判断している。IP パケット単位でデータの改竄防止や秘匿化を提供するプロトコルとして IPsec が開発されている (図2.13.8)。IPsec のこの機能に対し、暗号化と認証用に量子鍵配送で生成した情報理論的に安全な鍵を用いることで情報理論的に安全に暗号化と認証を IP パケットで実現するシステムを開発した。暗号化にはワンタイムパッドを用い、認証にも情報理論的安全性が証明されている Wegman-Carter 認証方式を採用した。量子鍵配送と IPsec を融合することにより現在の IP ベースの通信でメール、TV 会議システムなどアプリケーションを選ばず情報理論的に安全な

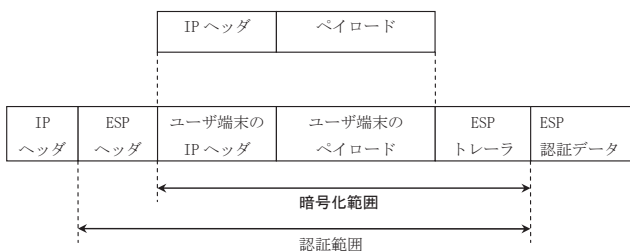


図2.13.8 IPsec のパケット構成：量子鍵配送による暗号化・認証範囲

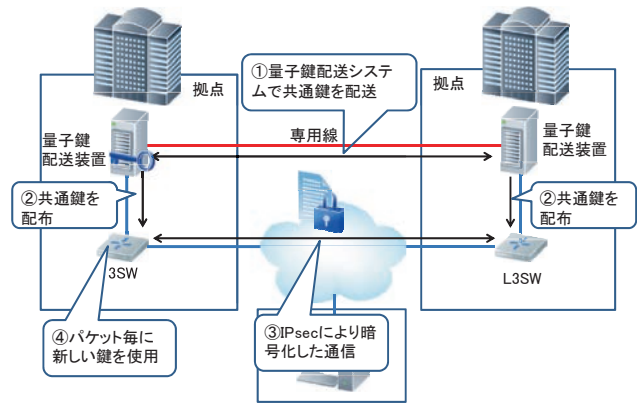


図2.13.9 量子鍵配送装置と組み合わせた Layer 3 スイッチ動作手順

通信が可能となった (図2.13.9)。

情報通信の総合的な安全性を高めるためにはあらゆる階層での安全性を担保する必要がある。ネットワーク拠点内部からの不正アクセスを防ぐ技術も量子鍵配送システムの総合的な安全性を高める上で不可欠である。特に量子鍵配送システムと物理的に接続するデータリンク層 (Layer 2) での安全性の向上が望まれている。Layer 2 でのパケットの中継はメディアアクセス制御 (MAC) アドレスを基に行われているが、MAC アドレスを詐称するツールはインターネットで公開されており、Layer 2 での成りすましによるデータ不正取得の実例が報告されている。NICT では量子鍵配送システムに実装されている物理乱数発生機を利用し、周期性のない乱数を Layer 2 スイッチとそれに接続されている端末とで共有させ、その乱数を用いて MAC アドレスを暗号化するシステムを開発した。MAC アドレスをパケットごとにワンタイムパッドで暗号化し、Layer 2 スイッチでは解読した MAC アドレスと予め設定されている IP アドレスを照らし合わせ、端末が偽証していないことを確認後にパケットを

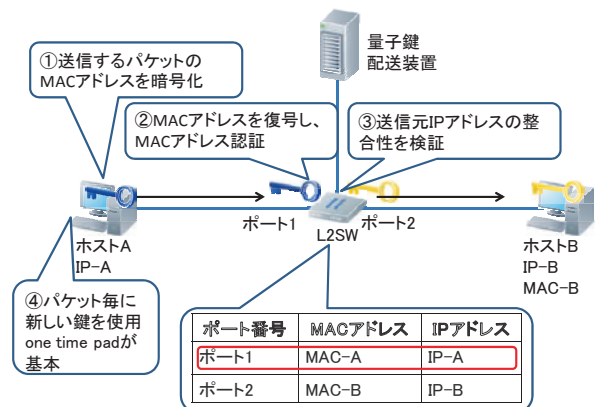


図2.13.10 量子鍵配送システムと組み合わせた Layer 2 スイッチ動作概要

繋ぐ。MAC アドレスの暗号化に使用する乱数はスイッチと端末しか知り得ない情報であるため、成りすますことが非常に困難なシステムとなった(図2.13.10)。さらに NICT では Layer 2 スイッチと端末で乱数を共有するためのデバイスとしてスマートフォンに着目し、スマートフォンを介して端末に乱数を供給し得るシステムを構築した。乱数発生機から乱数を受け取り、使用する端末にスマートフォンを介して転送するシステムを開発した。これによりスマートフォンを認証用デバイスとして用いることも可能となった。

量子鍵配送システムをネットワークスイッチと組み合わせることにより安全性と利便性、拡張性を向上させることに成功した(図2.13.11)。すなわち量子鍵配送システムを安全性を劣化させることなく IP ベースのネットワークとの親和性を向上させることが可能となった。利便性の向上はヒューマンエラーの確率を低減させ、より安全なシステムとなったといえる。

2.13.5 今後の展望

2001年(平成13年)の研究室発足以来、量子情報通信の新原理実証と基盤技術開発、そして量子暗号の基盤技術開発から実用化に向けた研究開発の2つを柱として、研究開発を進めてきた。

量子デコーダ技術については、この10年間の基礎研究開発の結果、現時点で最先端の光波制御・光子検出技

術を使い、この新しい原理を世界に先駆けて実証し、基礎研究としては世界最先端の地位を確立することができた。一方、実用までの道のりにはまだ時間が必要であろう。最近実用化が始まった光通信技術であるコヒーレント光通信方式でも、その原理実証実験が1980年代には既に盛んに行われていたことを考えると、量子デコーダの研究も、適正な予算規模の中で引き続き息の長い研究開発を継続することが重要である。

量子暗号については、より実用化に近い技術であり、NICT が産学官の様々な研究機関と連携することで、All Japan の体制を作り、基礎理論、デバイスの研究からネットワークシステム、アプリケーションの開発まで、戦略的な研究開発を進めることができた。それらを結集して東京の JGN 上で構築した量子暗号試験運用ネットワーク“Tokyo QKD Network”は、世界的にも最も実用に近い量子暗号ネットワークであるとの評価を確立している。一方で、本技術は国家機密・軍事機密等の最重要機密のセキュリティに関わる技術であることから、欧米や、特に最近では中国が、膨大な国家予算を投じて急激に追いつけている。日本としては、現在の技術的な優位性を生かし、実用化への最後の仕上げとして、長期試験運用実績の蓄積など、技術開発に引き続き取り組むと同時に、量子暗号の導入に興味を持っている(将来的な)ユーザーとの議論を通じて運用方法、アプリケーションなどの改良を進め、実際の導入事例へとつなげ、最終的には民間への技術の早期受け渡しを目指す。一方、量子暗号

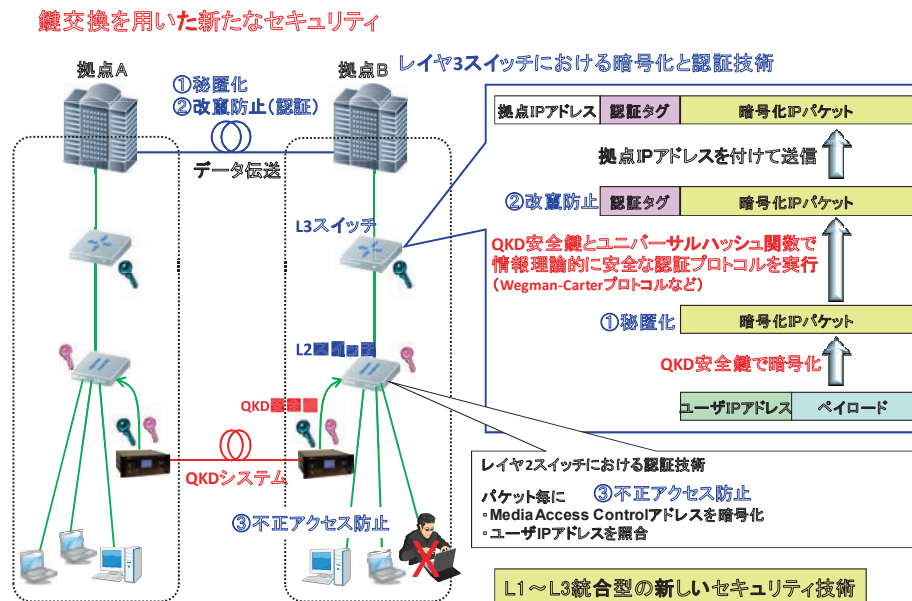


図2.13.11 量子鍵配送を用いたセキュアネットワークの概念図

の基礎研究においても、量子もつれなどを駆使したより高度な新世代の量子暗号プロトコルや、量子暗号の究極の安全性の条件を多少緩めることで大幅な伝送性能の改善を可能にする物理暗号(概念的には、従来の古典情報理論で長く研究されていたが、近年量子情報分野の研究者がその著しい進展を促している)など、次々と新しいアプローチが議論されており、引き続き産学官連携のもと、次世代の量子暗号・物理暗号の基礎研究開発に取り組むことも重要であり、NICTでは引き続き産学との連携を密にして研究開発に取り組んでいく所存である。

2.14 超高周波 ICT 基盤技術

電波研究所時代から継続する NICT のミッションのひとつに電磁波の有効活用と未利用周波数の利用技術の開拓が挙げられる。独立行政法人通信総合研究所が発足した当時は、「テラヘルツ (THz)」すなわち 10^{12} Hz 程度の電磁波が最後の未利用周波数帯として注目され始めた時期と重なる。それまで、周波数の低い領域からは、長波、短波、マイクロ波、ミリ波といった電子デバイス技術に基づく研究開発が実施され、周波数の高い領域からは X 線、紫外線、可視光線、赤外線などの光デバイス技術に基づく研究開発が実施されてきた。独立行政法人化以前の段階では互いが関連することは少なかった。テラヘルツ帯は、電子技術と光技術の中間の周波数に当たり、電子デバイス、光デバイスの両面から技術的なアプローチが行われるとともに、双方の技術が融合して成果をあげることも期待されるようになった。NICT では、これらの技術トレンドを受け、電子・光それぞれの技術に積極的に取り組むとともに、第2期中期計画からは同一の研究室(グループ)として統合した体制で研究開発に取り組んでいる。本稿では、第1期中期計画からの13年間に及ぶこれら「超高周波 ICT」に関する話題をまとめた。

2.14.1 第1期及び第2期中期計画での研究開発

(1) テラヘルツ光源及びセンシング技術等の研究開発

第1期中期計画において、テラヘルツ帯「量子カスケードレーザ」を開発し、日本で初めてテラヘルツ帯でのレーザ発振に成功(平成18年3月6日報道発表)した。この成果により、作製が困難とされていた小型でコストを抑えたテラヘルツ帯における“レーザ光源”の実現見通しが得られた。この量子カスケードレーザは、ガリウムヒ素/アルミニウムガリウムヒ素系の半導体材料を用い、半導体の厚さを精密に制御しながら数百層あまりの多層膜を作り(図2.14.1(右))、電子の流れを巧みに制御できる量子カスケード構造を作製したものである。この量子カスケード構造を内部に持つ導波路の一方の端面に高反射ミラーを有する「ファブリー・ペロー型レーザ素子(図2.14.1(左))」を作製し、この素子を用いて3.4 THz

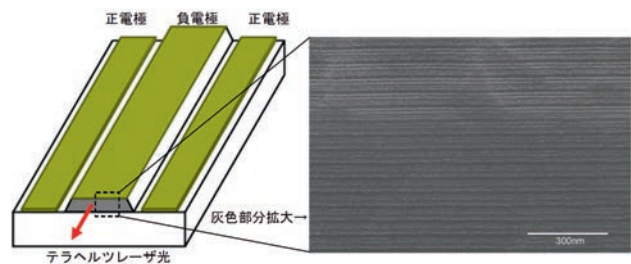


図2.14.1 (左)「量子カスケードレーザ」素子の見取り図(灰色部分が活性層、真中の活性層トップにある黄色ストライプは上部金属電極、その周りの2本の黄色ストライプは下部の金属電極。この間に電流を流してレーザ発振を得た。) (右)量子カスケードレーザ活性層の電子顕微鏡写真(多層膜が周期構造を成しているのが分かる。)

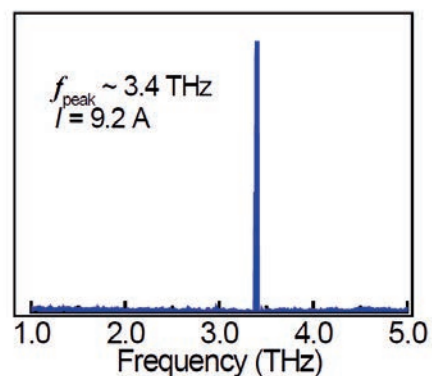


図2.14.2 量子カスケードレーザの発光スペクトル(図2.14.1の素子を約 -250°C に冷却し、電極間に9.2Aの電流を流した際に観測されたもの。レーザ発振に必要な電流(閾値電流)値を超えているため、レーザ発振を反映した鋭いスペクトルになっている。約3.4 THzのピーク周波数を持つ多モード発振が得られている。)

でのレーザ発振(図2.14.2)に成功した。

平成18~23年度には、テラヘルツカメラの開発及びテラヘルツ遠隔分光装置の開発を、委託研究「ICTによる安心・安全を実現するためのテラヘルツ波技術の研究開発」によって実施した。中赤外に感度ピークを持つ非冷却マイクロボロメータアレイセンサ技術を改良し、テラヘルツ帯において、従来のもより2桁以上高感度なハンディ型実時間非冷却テラヘルツカメラの開発に世界で初めて成功(平成21年6月18日報道発表)し、商用化した。このカメラと自主研究で開発した液体窒素冷却のテラヘルツ帯量子カスケードレーザ光源システム(連続波出力10 μW)を組み合わせ、模擬火災現場の高温の黒煙(5m程度)を透過して画像を撮影できることを確認(平

成23年3月8日報道発表(NEC))した。これらの成功を受け、諸外国の産軍共同体(例えば LETI(仏)、INO(カナダ)等)による同様なカメラ開発が一気に進んだ。国際競争力維持の観点から、第3期中期計画において画素数の拡大と更なる高感度化を目指した委託研究「THzギャップを埋める実時間 THz カメラの研究開発」(平成24～26年度)を実施中である。また、テラヘルツ波遠隔分光センシングシステムのプロトタイプを開発し、模擬火災現場において本システムの評価実験を行った結果、火災現場などで発生する危険ガスの一種とされる、シアン化水素ガスの遠隔検知に有効であることを検証(平成23年3月8日報道発表(NTT、独立行政法人産業技術総合研究所))した。

平成21～23年度には、テラヘルツ時間領域分光法のための超短パルス光源の開発を、委託研究「近接テラヘルツセンサシステムのための超短パルス光源の研究開発」にて実施した。自主研究において開発してきた光ファイバー通信用の高精度変調器(ニオブ酸リチウム結晶の電気光学効果を用いたマッハ・ツェンダー型変調器)及びこの変調器を利用した平坦な光コム発生器技術を民間に移転し、これらの技術に基づく超短パルス光源の研究開発を実施した。本光源はパルスの繰り返し周波数等の諸元を外部信号により制御でき、装置内に大きな共振器構造を持たないことから、高安定である。これまでにテラヘルツ帯時間領域分光法(THz-TDS)に用いられてきた超短パルス光源(チタンサファイアレーザ、モードロックファイバーレーザ)と比べ、制御性や安定性で優れており、またコストも抑えられるものとなっているため、今後の活用が見込まれている。

(2) Ge:Ga ディテクタ技術の研究開発

Ge半導体中にGaをドープした外因性半導体(Ge:Ga)はGaのアクセプタ準位が10.8 meVであるためカットオフ波長115 μm の光伝導型検出器として用いることができる。また、Ge:Gaに1軸性応力を加えることにより、荷電子帯での縮退が解けアクセプタ電離エネルギーは4.9 meVまで減少することが知られており、カットオフ波長は200 μm まで伸長可能である。半導体検出器の中ではGe:Gaが遠赤外領域において最も高感度であるため、歴代の赤外天文衛星に搭載され数多くの成果を得ることに成功してきた。NICTは、平成18年2月22日に打

ち上げられた我が国初の赤外天文衛星 ASTRO-F(あかり)のFIS用検出器開発を担当した。

半導体遠赤外検出器は熱雑音を排除するため、3K以下の極低温で用いる必要がある。またASTRO-F以前の検出器は単一素子で用い、感度の増加のために検出器をキャビティに実装することが一般的であった。しかし観測の効率化・高精度化のためには検出器のアレイ化が必須であり、小型化を実現するためにキャビティを排除することが求められた。新たな重要開発課題として①キャビティを必要としない20×3素子高感度モノリシックアレイ、②極低温動作読み出し回路の使用、③検出器と読み出し回路のダイレクトハイブリッドの実現が挙げられ、遠赤外検出器では世界初となる試みである。検出器1つの受光面積は500×500 μm^2 であり、検出器に印加されるバイアス電界と光の入射方向が平行となるlongitudinal型を採用した。宇宙空間での観測時に高エネルギー粒子が検出器に衝突した場合、非線形な感度特性を示し、観測精度を著しく劣化させてしまうため、検出器自体を小体積で構築する必要がある。そのため電極間距離は500 μm としたが、小体積は光吸収長の減少を意味し、高感度化のためには新機軸が必要であった。光吸収効率の増加にはアクセプタ濃度の向上が効果的であるが、素子全体で濃度を上げた場合、アクセプタ間のホッピング電流の増加を招き、検出器性能を劣化させてしまうことが問題であった。NICTでは、受光面と下部電極面にのみ高濃度のアクセプタドープ層を形成し、ホッピング電流を抑制しつつキャビティがない小型検出器でも14.6 A/Wという世界でもトップレベルの高感度検出器の実現に成功した(平成15年)。

極低温読み出し回路としては名古屋大学が中心に開発を進めたSi p-MOSを用いた電荷蓄積型アンプを使用した。この回路とGe:Gaの極低温下での熱収縮量は11 μm 超であり、この歪みに伴う応力を低減が可能で、熱サイクルを経ても電気的かつ機械的に良好なコンタクトを保てる技術が必要であった。近赤外・中間赤外のアレイ素子では低温でも低いヤング率を有しているInを突起(bump)状に形成したものが用いられている。一方Ge:Ga遠赤外検出器では歪量が大きく通常のIn bump形成技術を適用することが難しいため、直径100 μm のIn球を電極に並べ、50 μm 程度まで押しつぶすようにしてbumpを形成した。これにより熱歪を緩和しつつ、

M-V ロケットによる打ち上げの振動にも耐える良好な接続技術を確立した(平成13年)。

このダイレクトハイブリッド遠赤外検出器アレイの最小エネルギー検出限界は $5.6 \times 10^{-17} \text{ W}$ であり、衛星搭載用検出器としても世界最高レベルを達成した。ASTRO-F は JAXA により打ち上げられ(平成18年)、遠赤外領域での掃天観測に成功した(図2.14.3、図2.14.4)。

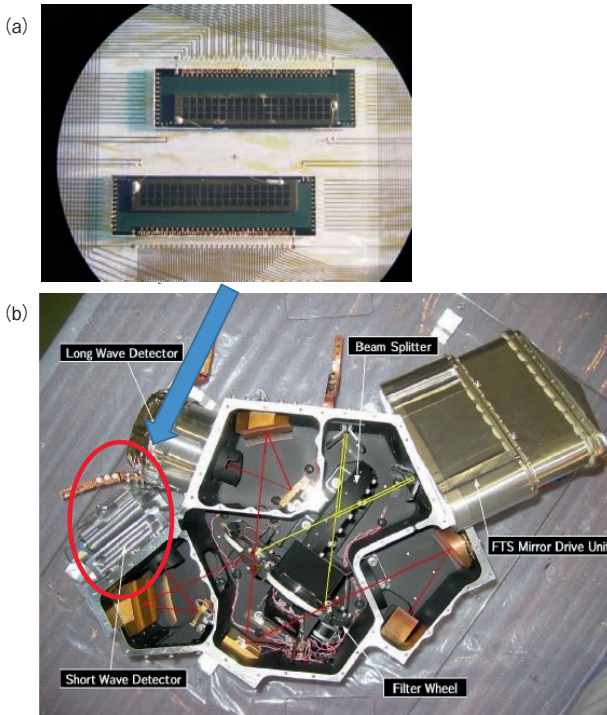


図2.14.3 (a) Ge:Ga ダイレクトハイブリッド遠赤外検出器アレイ写真 (b) FIS への実装

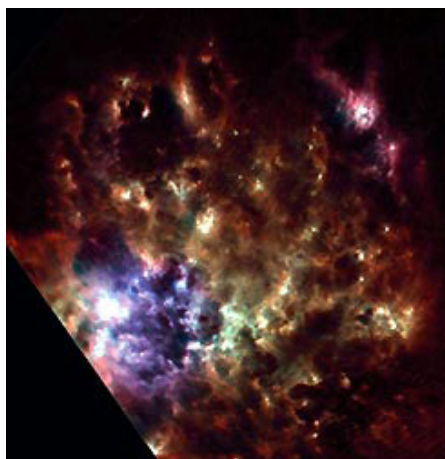


図2.14.4 FISによる大マゼラン星雲遠赤外線画像(60 μm 、90 μm 、140 μm 合成画像カラー合成) JAXA 提供

(3) THz-TDS 技術の研究開発

第1期及び第2期中期計画において、神戸研究所では

主に THz-TDS 技術の研究開発を進めた。

20世紀末になって100 フェムト秒(fs)程度の光パルスを安定に出力することが可能なチタンサファイアレーザが広く使われ始めたことと併せて半導体結晶成長技術を利用する新たなテラヘルツ電磁波発生、検出技術が発達してきた。このような状況のもと、レーザ技術(主に超短光パルスレーザ)と半導体技術を駆使してテラヘルツ帯の基礎技術および応用技術の開発を行ってきた。

21世紀初頭には光伝導アンテナによって40 THzに達する広帯域検出が可能であることを示した。これは従来考えられてきた光伝導アンテナの検出帯域の上限を打ち破る画期的な報告であった。その後、光学系の整備と超広帯域光源の導入により、超広帯域検出の実証ステージへと進んだ。広い周波数領域のテラヘルツ波に対する応答を調べることは材料研究、デバイス研究に重要であり、その情報はデバイス等の性能向上に必須の情報である。

光伝導アンテナによる超広帯域発生・検出は、国立大学法人大阪大学との共同研究を進め、その検出帯域を着実に67 THz(平成16年)、100 THz(平成19年)に延ばし、170 THz(平成20年)に達した。

この結果をもとに10 fsのパルス光が出力される超短パルスレーザを用いて広帯域テラヘルツ波センシングシステムを製作し、実用に供するに至った(図2.14.5)。測定帯域は0.1~15 THzをカバーしている。この検出帯域を活かして気体のテラヘルツ帯の吸収測定等を行った。



図2.14.5 広帯域テラヘルツ波センシングシステム 真空を保持できる金属箱の中にテラヘルツ電磁波の発生検出光学系が配置してある。

一方で、広帯域のアンテナ検出を活かすことで、半導体多重量子井戸中の縦波光学フォノン(LOフォノン)からのテラヘルツ電磁波放出が狭帯域化されていることを実験的に示した。超短パルス光技術の発展によって、半

導体のバンドギャップよりも大きなエネルギーを持つ超短パルス光を照射することで、2つの現象が起きることが知られていた。1つは、過渡電流によるテラヘルツ電磁波の発生、もう1つは、構成原子が一様に振動する、いわゆるコヒーレントフォノンの発生である。反転対称性が破れている界面を多数備えた半導体多重量子構造を用いることでコヒーレントフォノンからのテラヘルツ放射増強を目指し、大阪市立大学のグループと NICT 小金井との三者による共同研究を行った。量子井戸を構成する GaAs 結晶の LO フォノンの周波数に一致するテラヘルツ電磁波が発生し、GaAs エピ膜に比べて高強度の信号が発生していることを示した(平成17年)。さらに、励起エネルギー、量子構造を制御することで、発生条件の最適化を行えることを示し、LO フォノン領域の高強度光源としての可能性を示した(平成20年)。

また、電気光学効果によるテラヘルツ電磁波の発生及び検出において詳細な計算と実験を行い、実験結果を計算結果が十分に説明できることを示した(平成19年)。

ドイツとの共同研究では、市販の半導体レーザのキャビティを拡張し、回折格子とV字型ミラーを組み合わせることで2波長の同時発振を可能とし、その2つの発振線の差周波としてテラヘルツ電磁波を発生することに成功した(平成16年)。しかも、そのV字型ミラーを移動させることで差周波数を制御することを可能とした。本研究は、新たなCW光源として注目を浴びた。

注目を浴びつつあったテラヘルツ電磁波を用いた研究開発は、継続的に国内外の研究機関を共同研究という形で巻き込みながら、測定ノウハウを蓄積し、テラヘルツ波による様々なデバイス、有機・無機材料の評価を進め、テラヘルツ電磁波の有用性を示し続けた。

(4) ミリ波デバイス技術の研究開発

独立行政法人化する以前からミリ波デバイス技術に関する研究開発については継続して取り組んでいたが、第1期中期計画前後において、高い電子移動度を持ち高周波特性に優れるインジウム・リン(InP)系HEMTについて重点的に研究開発を実施した(図2.14.6)。その結果、デバイス構造の改善(短ゲート化、低抵抗化、寄生容量低減等)により画期的な成果が得られ、平成12年から平成18年頃にかけて、遮断周波数 f_T として300 GHz後半から560 GHz超級という当時のHEMTとしての世界最

高速記録を更新し、ミリ波実用化の基盤技術となる電子デバイス技術面から足場を確保する重要な役割を果たした。

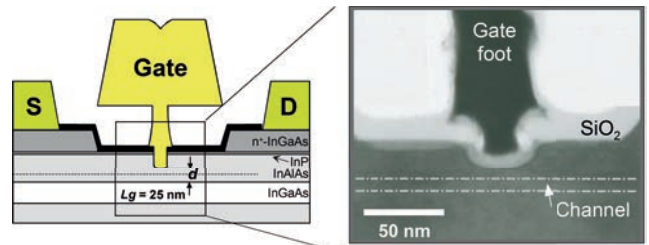


図2.14.6 InP系HEMTの断面構造と写真

さらに、平成16年からは、高耐圧・耐熱・耐放射線性に優れ、かつミリ波、テラヘルツ波帯で高出力が期待される素子として注目された窒化ガリウム(GaN)系トランジスタの研究に着手した。平成17年には f_T として190 GHzという当時の世界最高速記録を達成した。GaN系素材のミリ波帯での実用化に向けた先陣を切り開き、世界のGaN系HEMT研究を先導する役割を果たした。これら素子開発と並行して、ミリ波応用に向けたデバイス評価技術、回路設計技術面でのHEMTの基礎特性評価に関する研究、及び無線装置化に向けた研究を進めた。

一方、平成14年2月の米国FCCの発表に端を発する超広帯域無線周波数利用技術に係る世界的な動きに対応し、平成15年に超広帯域(UWB)デバイス技術研究に着手した。平成16年には世界初のUWB-CMOS集積回路の試作開発に成功した(図2.14.7)。さらに、平成18年には、更なる超広帯域化と低電力化を用いる近距離通信技術としてsUWB技術の研究に着手し、電子デバイス、

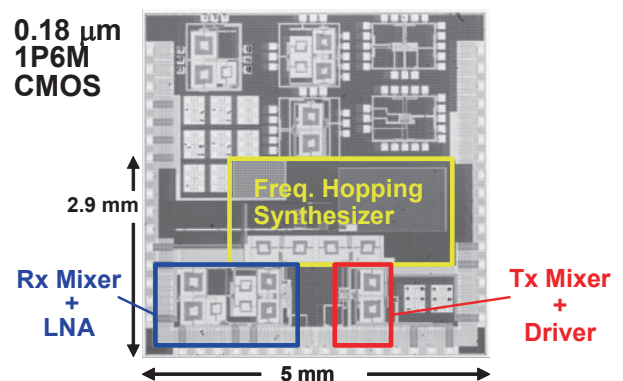


図2.14.7 UWB-CMOS集積回路の写真

無線装置化技術と組み合わせた近接場における共存型無線通信技術の開発により、周波数有効利用と、急速な需要拡大が予想される近接場通信技術の創生に向け研究を行った。

近距離無線技術に関連する端末技術として、発振器が空間との結合を持つ放射型発振器(図2.14.8)の構成を用い、準ミリ波～ミリ波、テラヘルツ波の領域で低電力消費と高効率を達成でき、小型低コスト化に適した新しい無線装置の研究開発を進めた。それらの技術を基に、無線ネットワークシステム、センサ技術の基本技術を確立し、更に小型軽量高効率の超広帯域 sUWB インパルス無線技術の基本技術の開発について平成23年頃までに成功した。

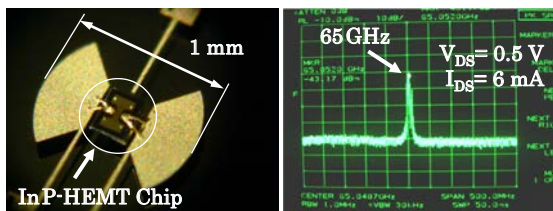


図2.14.8 高効率ミリ波無線放射装置と65GHzの直接発振放射出力

一方、超伝導磁気シールド型脳磁計技術の改良にも取り組み、世界最高性能のSQUID脳磁計技術に到達し、データ解析手法の研究を進め、ダイナミックな脳神経活動部位の時系列追尾を可能とし、脳神経ネットワーク機能の計測評価のための最先端技術を平成23年頃までに確立した。

また、全研究期間を通じ外部研究機関との協力関係を維持しながら研究を進めてきた。特に、ミリ波アンテナ及びシステム技術、デバイス雑音の研究、無線モジュールの小型高性能化、並びに各種の素材技術、試験評価技術について多くの外部機関との連携の下に研究を進めた。

2.14.2 第3期中期計画での研究開発

第3期中期計画では、それまで培ってきた超高周波ICTに関連した研究開発を継続・発展させ、100 Gbps級の超高速無線通信や超高速信号計測、テラヘルツ波を用いた高精度な非破壊非接触計測を平成32年頃までに可能にするために、超高周波領域での光源、検出器、増幅器、変復調器、光電変換器、アンテナなどの各要素技術、

リアルタイム計測による非破壊非接触センサ技術、及び超高周波帯での計測に必要な標準を定めるための技術を開発し、基盤技術を確立することを目標に研究開発を進めている。

(1) 超高周波基盤技術の研究開発

ミリ波、テラヘルツ波帯の利用技術確立を目的とし、超高速・高出力電子デバイス技術、システム技術に関する研究を行っている。

GaN系トランジスタについては、ゲート電極と高速電子を物理的・空間的に隔離するための窒化インジウム・アルミニウム(InAlN)バリア層を有するHEMTを作製し(図2.14.9)、InAlNバリア層を5nmから3nmに薄膜化することで約1.5倍の相互コンダクタンスを得ることに成功した。600 mS/mmを超える相互コンダクタンスとともに200 GHzを超える遮断周波数 f_r 及び最大発振周波数 f_{max} を得ており、100 GHz超で動作可能な高出力増幅器等への応用の可能性を示した(平成26年)。

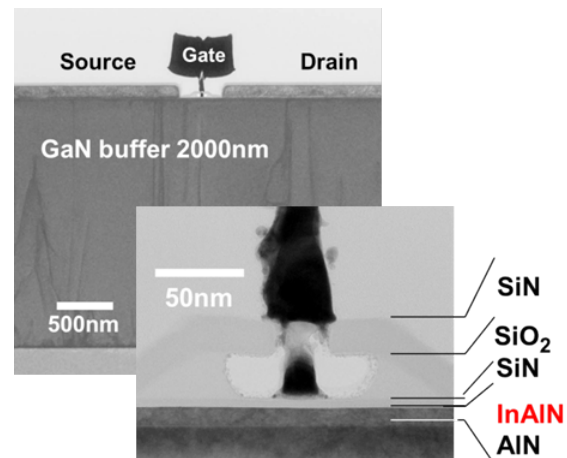


図2.14.9 GaN系HEMTの断面写真

インジウム・リン(InP)系トランジスタについて、従来のインジウム・ガリウム砒素(InGaAs)チャネル層にインジウム砒素(InAs)層を挿入したInGaAs/InAs/InGaAsチャネル層を有するHEMTにおいて、圧縮歪みによるInAs層のエネルギーバンド構造の変化と極薄InAs層における量子閉じ込め効果(2次元電子ガス)を考慮したモンテカルロ計算により、ゲート長を20nm程度まで微細化することで世界最高速トランジスタを実現できる可能性を示した(平成25年)。

InP系トランジスタに代わる低雑音・低消費電力ト

ランジスタとして期待されるインジウム・アンチモン (InSb) 系トランジスタについて、東京理科大学との共同開発により低温で成長したアルミニウム・アンチモン (AlSb) バッファ層を導入した半導体ウェハを作製し、これを用いてゲート長 50 nm の HEMT を試作し、170 GHz を超える f_T の達成に成功した (平成 25 年)。さらに、新しい SiGe 系素材を用いたデバイス技術の開発に向け、スパッタ成膜技術を用いた革新的な積層構造制御技術の開発を進めてきた。今後、高性能デバイス化技術研究による成果が期待される。

電子デバイスに関する先駆的な取組として、酸化ガリウム (Ga_2O_3) 電界効果型トランジスタを新たに開発し (図 2.14.10)、その動作実証に世界で初めて成功した (平成 24 年)。 Ga_2O_3 は、その優れた材料物性、大型単結晶基板を簡便、安価に生産可能であることなどから、高耐圧・低損失なパワーデバイス用途の新しい半導体材料として非常に有望であるにもかかわらず、その研究開発はこれまで全くの手付かずであった。現代の省エネルギー問題に直接貢献することができる新しい半導体デバイス研究開発分野であると同時に、近い将来の半導体産業の更なる発展に一翼を担う分野になると期待される。

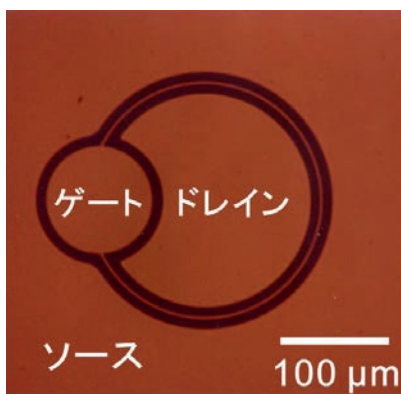


図 2.14.10 酸化ガリウム (Ga_2O_3) 電界効果型トランジスタの顕微鏡写真

超高速信号測定技術に関しては、ネットワークアナライザと周波数エクステンダにより 325 GHz までの導波管部品計測環境の整備を完了し、測定精度について評価を実施した。また、オンウェハ・プロービング計測環境の構築にも着手した。増幅器、アンテナ等が作製される同一基板上にインピーダンス標準基板を設計・形成し、これを用いて、一般的に用いられている SOLT 法に替わり、超高周波で精度が良いとされている TRL 法を実

証した。さらに、InP 系 HEMT の S パラメータ、遮断周波数を評価し、超高周波領域でのオンウェハ・プロービング測定への応用の可能性を示した (平成 25 年)。

システム技術に関連して、平成 23 年から 5 年計画で NTT、富士通株式会社と共同で総務省から「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」を受託し、300 GHz 帯の周波数を利用した無線通信技術の研究を実施している。また、平成 23・24 年度には総務省から技術試験事務「マイクロ波固定通信回線の高効率化に関する技術的条件の検討」を受託した。マイクロ波固定回線は防災無線等で中核的役割を担っているが、従来は屋外のアンテナと無線機室に設置された送受信機を長大な導波管を介して結合していた。本検討は、アンテナ直下の屋外に送受信機を設置しこれらを直結することにより電波の有効利用や消費電力の削減、耐災害性の向上を企図したものである。送受信機を屋外設置するには外気温の変化に対する特性の安定性が最大の課題だが、NICT で研究開発を主導している GaN 系 HEMT が高温下でも動作可能な素子として本検討における無線伝送実験の送受信機 (図 2.14.11) に採用された。屋外設置型のマイクロ波無線装置の 4 か月にわたる長期フィールド試験を実施し、GaN 系 HEMT が屋外での厳しい温度条件の下でも正常に動作することを実証した (平成 24 年)。



図 2.14.11 GaN 系 HEMT を用いた屋外設置送受信機

(2) 超高速無線計測技術の研究開発

第 3 期中期計画では、これまで培ってきたミリ波・テ

ラヘルツ帯の技術(特にデバイス技術)をベースに、周波数・パワー等の標準を含めたテラヘルツ帯計測に関する基盤技術の研究開発を推進してきた。特に、周波数計測応用で重要となるテラヘルツ帯の周波数コムに着目し、研究開発を実施している。

テラヘルツ帯の周波数コムの生成に当たっては、光技術をベースとしたコム発生を念頭に置いており、その場合、テラヘルツ波発生に用いる励起光としての近赤外領域のパルス特性が非常に重要である。さらに、汎用性を鑑み、コンパクト性・メンテナンスフリーの観点から、これまで①1.55 μm の通信波長帯半導体 CW 発振半導体レーザとマッハ-ツェンダー型ニオブ酸リチウム(LN: lithium niobate)変調器を組み合わせたパルス光源システム、及び②1 μm 帯のイッテルビウムドープファイバーモードロックレーザの2点に着目して研究開発を行ってきた。さらにこれらを用いてテラヘルツ波を発生・検出するための光-テラヘルツ変換素子についても研究開発を行っている。

①については、図2.14.12のようにCW発振レーザをニオブ酸リチウムから作製したマッハ-ツェンダー型(MZ)変調器に入射し、MZ変調器のアームにRF信号を印加することにより光周波数を中心に、RF周波数分だけ離れたサイドバンドを発生させ、いわゆる光周波数コムを生成する。しかし、このままでは時間領域でピコ秒程度のパルスであるため、MZ変調器の後段に、分散補償ファイバー・光増幅器・高非線形ファイバーを配置することにより超短光パルス、周波数領域で言えば広帯域の光周波数コムを生成する。これまでに、MZ変調器の高性能化、使用する光ファイバーの最適化などにより3 THzに及ぶ帯域を有する光周波数コムが得られた(平成24年、図2.14.13)。一方、帯域の他にもテラヘルツ波発生のためには光パルス強度が高い尖頭値を有することが望ましいため、チャープパルス増幅法による高ピークパワー化にも着手した。その結果、単一変調器の簡便

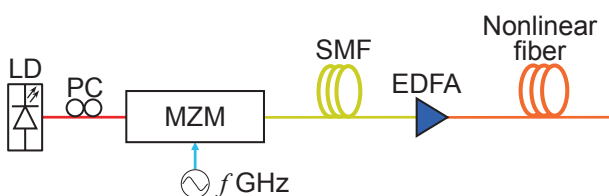


図2.14.12 MZ変調器ベースパルス光源システムの構成図

な構成で、広帯域という特性を維持しつつ、パルス幅280 fs、ピークパワー2.5 kWの高強度・超短光パルス発生を実現した(平成25年、図2.14.14)。

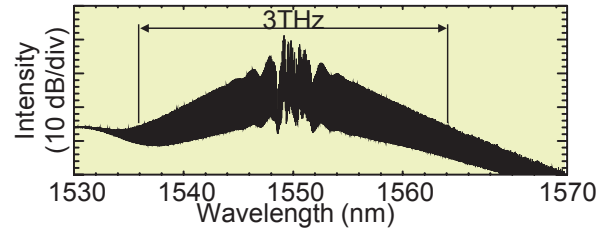


図2.14.13 3THz帯域を有する光周波数コムスペクトル

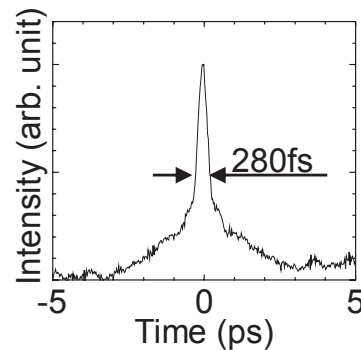


図2.14.14 高ピークパワーパルスの自己相関波形

②に関しては、イッテルビウムドープファイバーの高利得性による高出力特性や、光-テラヘルツ変換素子として光伝導アンテナ素子を考えた場合、励起波長の観点からの整合性の良さが期待できるという点が特徴として挙げられる。

イッテルビウムファイバーレーザのモードロック発振実現のために、リング型ファイバーレーザの構成を採用し、ファイバー中の非線形偏波回転(NPR)効果を利用した。これにより、120 fs以下の幅を持つパルス発振が得られた。また、更なる高出力化のために独自にダブルクラッド型イッテルビウムドープファイバー増幅器を開発した。これにより、フェムト秒(~200 fs)の短パルス性を維持したまま、高い出力(W級)の出力パルスを得ることに成功した(平成25年、図2.14.15)。

上記の2種のパルス光源システムの研究開発は引き続き行っているが、同時に光-テラヘルツ変換部分についても並行して進めている。1つはファイバーベースの1 μm 帯パルスと非線形光学結晶の組み合わせによるテ

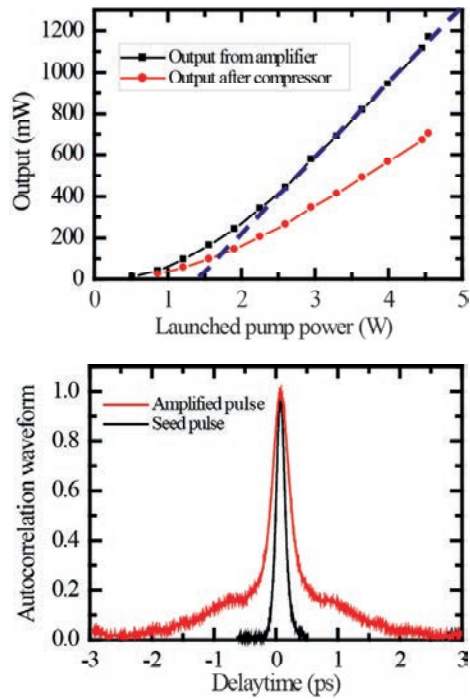


図2.14.15 1 μ m モードロックファイバーレーザーパルス増幅特性(上: 増幅後光出力、下: パルスの自己相関波形)

ラヘルツパルス発生である。現在のところ、非線形光学結晶にガリウム・リン結晶を用いると、約3 THz のスペクトル帯域を有することが判明しており、更なる最適化を目指している。また、変調器ベースの1.55 μ m 帯光周波数コムについては、通信波長帯の充実した光学部品をうまく利用することにより、200 GHz 以上の周波数可変域を有するチューナブルテラヘルツパルスや、2本のコム抜き出しと単一走行キャリアフォトダイオードの組み合わせによる700 GHz 帯のCW テラヘルツ波発生に成功した(平成25年)。特に、この700 GHz 帯テラヘルツ波は、簡易な構成で 10^{-11} 台(1秒平均)の周波数安定性が得られており、安定度の高いテラヘルツ波生成が出来ていることが示された(平成25年、図2.14.16)。

一方、テラヘルツ波の発生のみではなく、その検出についての検討も産官連携で行っている。ここではテラヘルツ分光・センシングのユースケース拡大を目指して超小型テラヘルツ波プローブを開発しており、検出可能周波数について従来マイクロ波帯までであったものを3 THz まで検出可能であることを示した(図2.14.17)。本成果は新聞や雑誌に掲載された(平成24年)。更なる高性能化を目指して研究開発を引き続き進めている。

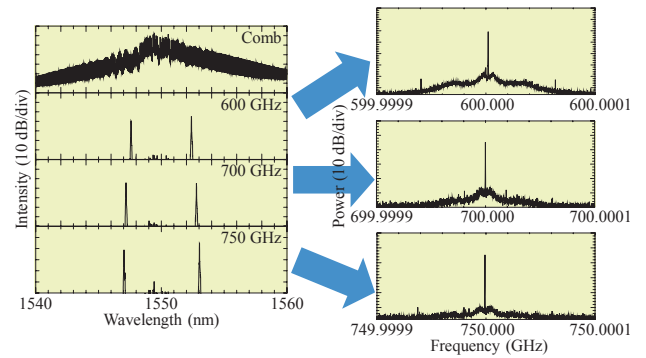


図2.14.16 変調器ベース光周波数コムから抜き出した2本のコムスペクトル(左)と変換後の700GHz 帯テラヘルツ放射スペクトル(右)

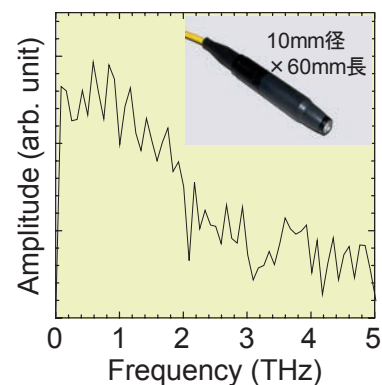


図2.14.17 超小型 THz プローブの写真とスペクトル