

# KARCFRONT

未来 ICT 研究所ジャーナル

Vol. **31**  
2015  
SPRING

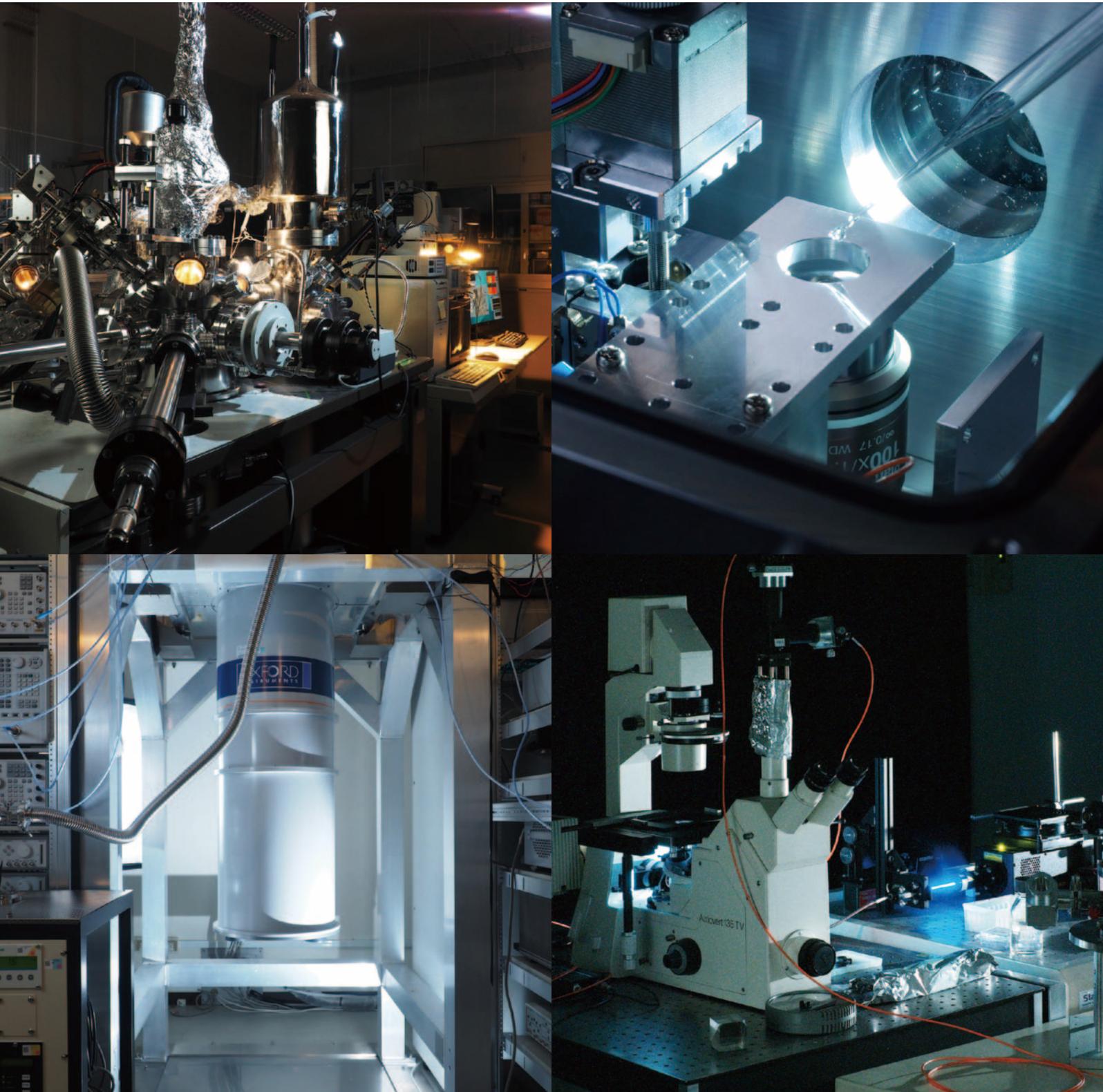


特集に寄せて

新概念の創出と情報通信技術の新たな道筋の開拓

特集

未来ICT研の先端研究を支える  
独創的な技術と装置



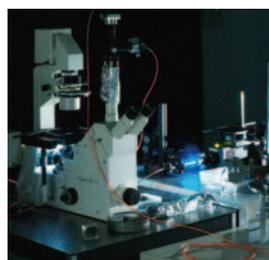
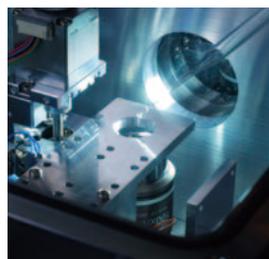
# KARC FRONT

未来 ICT 研究所ジャーナル

Vol. **31**

2015  
SPRING

## Contents



特集に寄せて ..... 3

新概念の創出と情報通信技術の新たな道筋の開拓

企画室 室長 照井 通文

特集

## 未来ICT研の先端研究を支える 独創的な技術と装置

超高真空 SPM プロセスシステム ..... 4

ナノ ICT 研究室 研究マネージャー 田中 秀吉

可搬型超高真空搬送装置 ..... 5

ナノ ICT 研究室 研究マネージャー 田中 秀吉

イオン性液体を屈折率マッチングオイルとした  
新規顕微ユニット ..... 6

ナノ ICT 研究室 主任研究員 山田 俊樹

蛍光ライブセルイメージングの温度制御装置 ..... 7

上席研究員 原口 徳子

超伝導ナノワイヤ単一光子検出器を用いた  
超高精度な蛍光相関分光システム ..... 8

ナノ ICT 研究室 主任研究員 山下 太郎

テラヘルツイメージャ ..... 9

研究所長 寶迫 巖

超高周波 ICT 研究室 研究マネージャー 關根 徳彦

マツハツェンダ変調器型光コム発生器を用いた  
高周波数精度テラヘルツ波源 ..... 10

超高周波 ICT 研究室 主任研究員 諸橋 功

量子もつれ光源 ..... 11

量子 ICT 研究室 主任研究員 和久井 健太郎、研究員 金 鋭博

ジョセフソン量子回路 測定 / 制御 装置 ..... 12

巨視的量子物理プロジェクト室 室長・上席研究員 仙場 浩一

主任研究員 吉原 文樹、研究員 布施 智子

ウェアラブル脳波計 ..... 13

脳情報通信融合研究センター 脳機能計測研究室 副室長 成瀬 康

TOPICS ..... 14

未来 ICT 研究所 STAFF 総覧 ..... 16

# 新概念の創出と情報通信技術の 新たな道筋の開拓

企画室 室長

照井 通文

## 研究における技術開発の役割

今回、特集記事として技術開発の観点から未来ICT研究所において独自に開発された技術やシステムを紹介することとなりました。ところで、「科学と技術」と聞いてどのような印象を持つでしょうか。日本では「科学技術」と一言で表現する場合がありますが、英語で表記すれば、Science and Technologyであり、全く別の概念です。

20世紀に入ると、研究により解明された原理を技術に応用して産業に役立てようとする考えが有力となり、政府や企業が研究開発を推進するようになりました。そして、現在は科学と技術を、「自然の法則性の解明」と現実への「応用」として単純に区別することがますます難しい状況になっています。

この点については、非常に多くの考察や議論がなされています。ここでは詳細には触れませんが、近代は科学の活動も高度な技術を用いた実験・観測手段への依存を高めてきており、科学研究において技術の発展が重要な役割を担っていることは疑いがないと思います。例えば、理論的に予想されていたものが、技術の発展によって観測可能となりその正しさが証明される場合があります。また、理論的に予想されていなくても、観測や計測ができなかったことができるようになり、未知なる世界があることを知るのは非常に有意義なことです。

## 未来ICTのミッションと技術開発

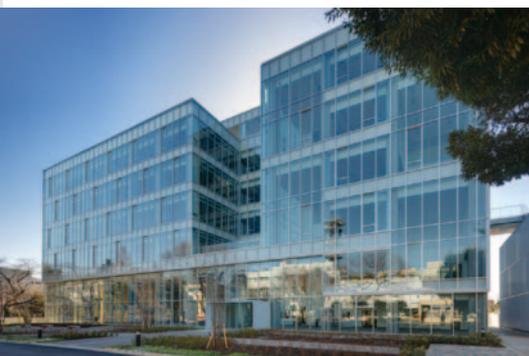
独立行政法人 情報通信研究機構は、情報通信分野を専門とする唯一の公的研究機関として、情報通信技術 (ICT) の研究開発を推進しています。その中で、未来ICT研究所は、未来の情報通信の基礎となる「新概念の創出と情報通信技術の新たな道筋の開拓」を使命としています。

将来に直面する課題の中には、既存の技術で解決するには限界があると思われるものがあります。既存技術の延長線上ではなく、全く異なる新しい立ち位置から研究を進めて飛躍的に限界を突破することが必要になっています。未来ICT研究所は、ナノ、バイオ、脳、量子、超高周波といった戦略的分野設定と先導的な研究を行っています。未開拓な領域に踏み出すには、これまでにない観測・計測技術の開発が必須であり、原子・分子レベルでの計測、生物のダイナミクス観察、新規光源や検出器など、独創的な研究を可能とする様々な実験装置の開発を手掛けてきました。

今回紹介するものはその一例にすぎませんが、先に述べた技術開発が科学の発展に重要であることがお分かりいただけたと思います。同時に、研究者の研究に対する強い思いも感じられるのではないのでしょうか。これらの装置開発が新たな情報通信概念や技術の創出に結びつき、未来の情報通信にイノベーションをもたらものと期待しています。



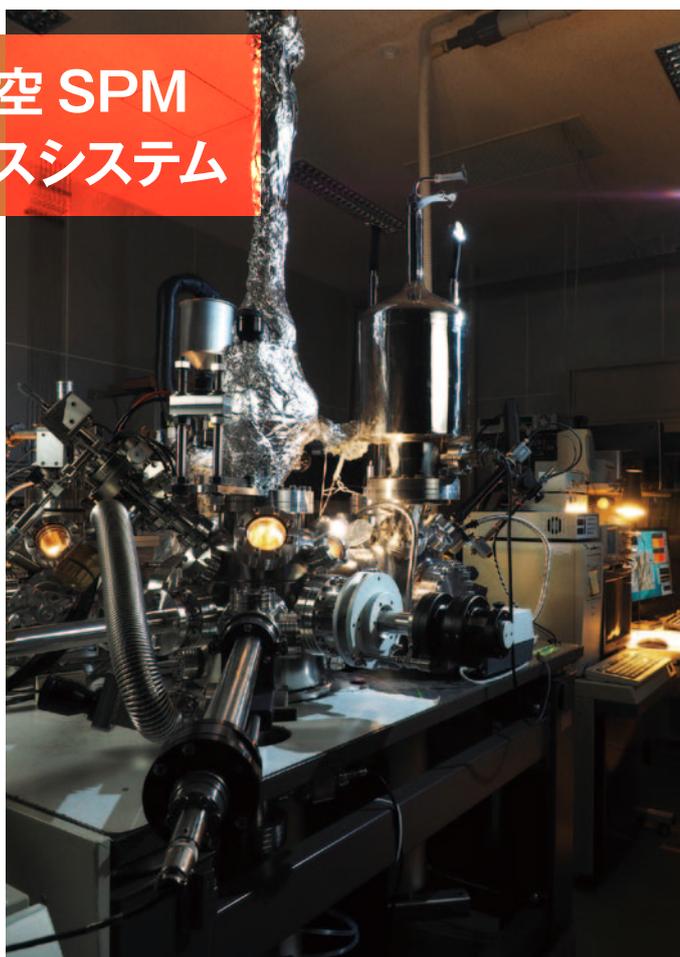
第一研究棟 (神戸)



NICT 本部 第三研究棟 (小金井)

# 超高真空 SPM プロセスシステム

ナノICT研究室  
研究マネージャー  
田中 秀吉



走査型プローブ顕微鏡 (Scanning Probe Microscopy; SPM) は、観察対象のイメージや物理量を原子・分子レベルの空間分解能で取得する実空間顕微手法としてだけでなく、信号取得に使用するきわめて先鋭な探針先端によって、観察視野内にある原子・分子サイズの構造を精密に加工調整もできるため、ナノ加工技術における重要な実験ツールとして一般に認識されている。ただし、その高い性能を発揮させるには外界からの擾乱じょうらんやノイズを極限レベルまで抑え込む必要がある。

一方、原子・分子サイズの構造を扱う際には、基板や分子構造が大気中のガスや水分によって汚染、破壊されないように周囲の環境を調整する必要もある。このような事情から、原子・分子サイズのナノ構造を取り

扱う実験機器や材料は、常に超高真空環境下で運用する必要がある。この場合、実験に使用するすべての機器をひとつの大きな超高真空容器に収納し、その中で試料のやり取りを行うことになるが、試料の調整・観測に際しての実験条件は手法によって大きく異なるので注意が必要である。

例えば、SPM観測では、常に周囲の環境を極限レベルで安定させる必要がある。これに対して、分子ナノ構造を配置する基板の清浄化処理にはアルゴンガスをチャンパー内に導入して表面を削る (スパッタリング) が必要あり、チャンパー内への反応ガスの導入は避けて通れない。また、清浄化した基板表面に薄膜やナノクラスターを作りこむ際には、ダストや異物の混入が必然的に

発生する。さらに、作製した構造を安定化させるために、基板を200～1000℃程度に加熱することも必要となるが、これらすべての処理をひとつのチャンパー内で行うことはあまり望ましくない。

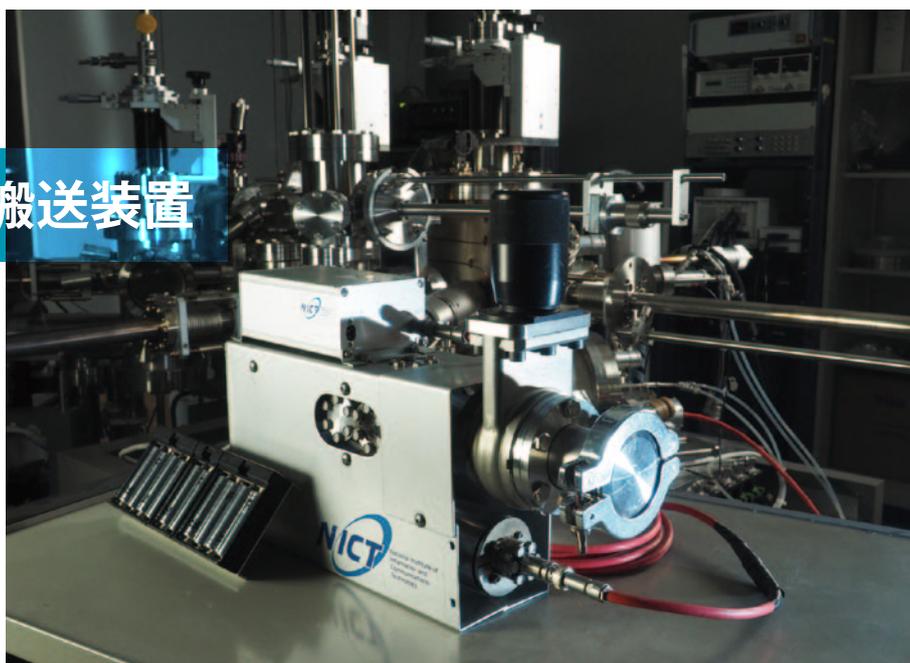
そこで私たちは、複数のチャンパーをひとつなぎに接続して、各プロセスを経た試料を大気にさらすことなく、超高真空中で共有して観察・調整できる超高真空SPMプロセスシステムを構築した。構築にあたっては、一連のプロセスに必要な機能、作業手順と実験環境を検討し、それぞれ独立した排気系を持つチャンパーに最適な実験条件を設定した。

具体的には、薄膜作成用のPLD (Pulsed Laser Deposition) プロセスおよびガス中基板加熱用チャンパー、汎用測定用チャンパー、有機分子や金属クラスターの精密堆積用チャンパー、アルゴンスパッタや通電加熱による基板クリーニング用チャンパー、 $-200^{\circ}\text{C}$ の極低温から $1000^{\circ}\text{C}$ の高温まで対応可能なSPMおよび分光観測チャンパーなどから構成されている。

特に、このシステムのコアとなるSPM部分が外来振動を極端に嫌うため、システム全体をコンパクトにまとめてすべてのチャンパーが同一の空気ばね型除振台に搭載されるように配置した。この際、システム全体の重心と除振台の重心が一致するように全体のバランスを考慮して、システム全体の振動パターンが複雑にならないように配慮している。このシステムを用いれば、原子レベルで平坦化した絶縁基板表面に配置した有機分子のような、観察や調整がきわめて困難な構造についても原子・分子レベルの実験が可能となる。

## 可搬型超高真空搬送装置

ナノICT研究室  
研究マネージャー  
田中 秀吉



高度化された近年の研究開発は、複数の研究拠点による共同作業を前提としたものが多く、共通の試料を共有しての実験がコラボレーションスタイルとして定着しつつある。これは、各研究拠点がそれぞれ得意とする技術を結集することにより、効率的かつ先鋭的に大きな研究成果を上げようとする考え方に基づくものである。

一方、ナノテクノロジーや半導体加工技術の分野に目を向けると、その技術はすでに原子・分子スケールの精度で素材を計測・加工することが可能なレベルにまで達しており、その精緻なプロセスの実施には残留ガスや汚染物質を極限まで除去したきわめてクリーンな環境(超高真空環境)が必須となっている。

このような超高真空環境を作製・維持するには、スパッタリングイオンポンプ(SIP)と呼ばれる重厚長大な排気装置を常時稼働させる必要があるため、複数の拠点間で試料を共有するには、この重厚長大なポンプを稼働させながら超高真空システム

ごと持ち運ぶ必要があった。しかし、市販品として入手可能なSIPは小型のものでも重量が10kg以上あるのに加えて、その動作には商用電源から、常時、電力の供給が必要となる。このような実験装置を気軽に運ぶことはほとんど不可能であり、これがこの研究領域におけるコラボレーションの自由度を制限していた。

私たちの研究室では、超高真空環境を可搬化するために、SIPの軽量化と低消費電力化という観点から、その基本動作原理にまで踏み込んだ新型イオンポンプの開発を行った。その結果、市販の単三乾電池20本の使用で30時間以上動作可能な小型軽量イオンポンプの開発に成功した。その到達真空度は、従来のイオンポンプと同等以上の性能(無負荷状態で $10^{-9}$ ~ $10^{-8}$ Pa)であることを確認している。

ここに示したのは、このポンプを使って機器構成した、実験試料を超高真空環境下に維持したまま長距離輸送するための格納容器(可搬型超高真空搬送装置)で、その総重量は

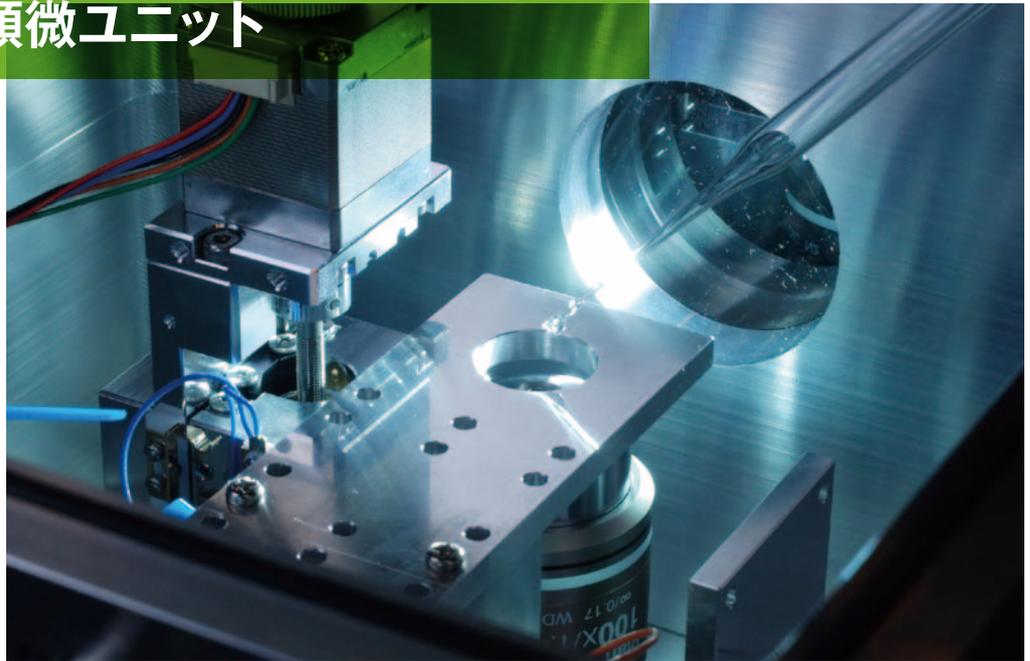
電源やゲートバルブを含めて5kg程度である。

使用に当たっては、容器に備え付けの小型ポンプを稼働させた状態でプロセス用の超高真空チャンバーに接続して試料を搬送装置内部に入れ、ゲートバルブを閉めて切り離す。この装置をキャリーバッグやケースに入れて目的地まで運び、試料搬送先の超高真空チャンバーに再び接続して試料を受け渡す。こうすれば、超高真空下に維持し続けなければならない実験試料を、大気にさらすことなく複数の実験装置や研究拠点の間で搬送し、共有することが可能となる。

超高真空維持に関する性能評価の目的で、電池動作による真空度をモニターしながら神戸と関東エリアを往路は自動車、復路は新幹線で往復したところ、周囲の気温変化や外部からの振動入力により若干の圧力変動はあったものの、常に $10^{-8}$ Pa台前半の真空度が維持されていることが確認された。このスペックは、通常の半導体やナノ材料を扱ううえで必要十分なものである。

# イオン性液体を屈折率マッチングオイルとした新規顕微ユニット

ナノICT研究室  
主任研究員  
山田 俊樹



単一蛍光体の蛍光挙動解析やイメージングのため、イオン性液体を屈折率マッチングオイルとした新規な顕微ユニットを開発した。この顕微ユニットを用いると、高真空中 ( $10^{-5} \sim 10^{-6}$  Torr) や様々な周囲ガス環境下において、試料からの蛍光を高効率に集光することが可能になる。具体的には屈折率マッチング媒体としてのイオン性液体と高い開口数 (NA、1.3~1.5) をもつ液浸対物レンズを高真空中に置いた高分解能で明るい集光系であり、比較的小型に作製してあるため、顕微鏡に取り付けることができる。

通常、大気中においては、揮発物質を含む屈折率マッチングオイルと



イオン性液体

液浸対物レンズを用いるとこのような計測が可能であるが、一般に高真空中で行うことはできない。また、通常の高真空中の測定では、長い作動距離をもつ対物レンズを大気中におき、真空との隔壁となる光学窓を通して、試料を励起し、また試料からの蛍光を同じレンズを用いて集光して測定する。長い作動距離をもつ対物レンズの開口数は0.6程度であり、分解能は $1/NA$ に比例し、明るさは $NA$ の2乗に比例するため、高分解能で明るい測定を行うことは困難である。

イオン性液体は、難揮発性、高イオン電導性、不燃性、高熱安定性、特異な物質溶解能、広い電位窓、広い液体範囲などの特異な物性を持っており、水や有機溶媒とは異なる新規な液体で、常温熔融塩として近年様々な用途に用いられるようになっている。

一方、この顕微ユニットにおいて必要とされるイオン性液体の物性

は、高真空中における不揮発性に加えて、きわめて低い自家蛍光をもつこと、ガラスや合成石英基板との屈折率 (1.48~1.51) のマッチングが良いことであるが、多くのイオン性液体の中から、これら全ての特性をもつイオン性液体を数種見出すことができた。開発においては、この部分が最も困難なところであった。これまでイオン性液体をこのような用途に用いた例はなく、新規性があるところである。

この新規顕微ユニットは、高真空を含む様々な周囲ガス環境下における蛍光検出による単一分子分光だけでなく、顕微ラマン散乱計測、表面プラズモン顕微計測、非線形光学顕微計測などいろいろな顕微計測に利用できる。新規顕微ユニットは単純な構成であるにもかかわらず、非常に広範な応用性を持っており、今後、ナノ・バイオの分野における分光・センシングなど様々な利用が期待できる。

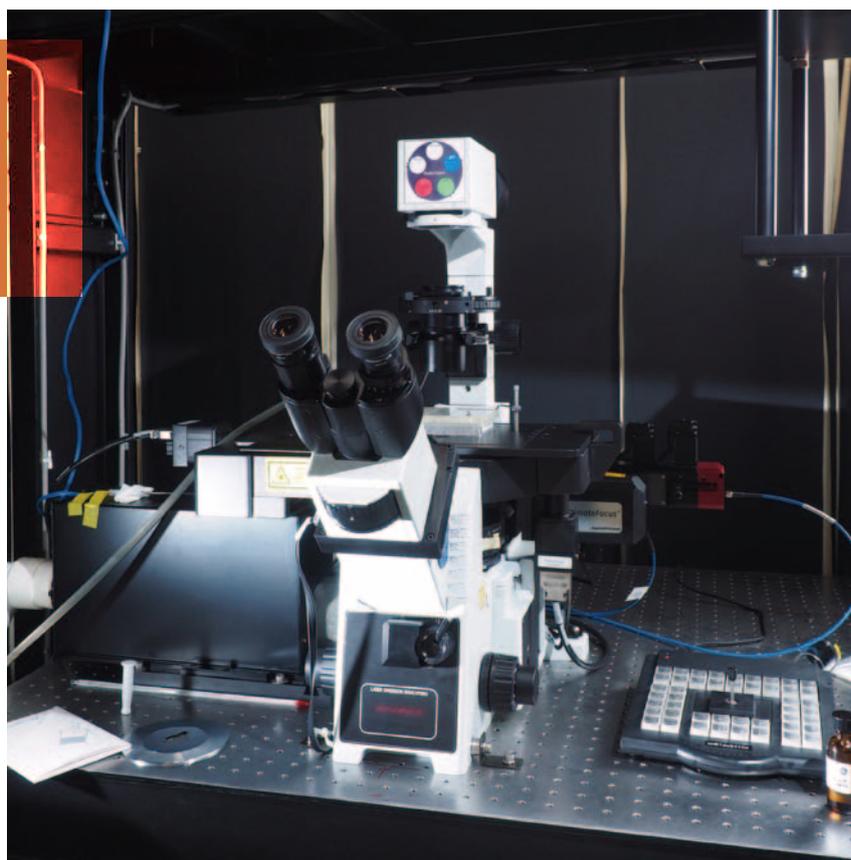
## 蛍光ライブセル イメージングの 温度制御装置

上席研究員  
原口 徳子

蛍光ライブセルイメージングは、いまや生命科学にとってなくてはならないテクノロジーのひとつである。これによって、細胞や生物を構成する分子を蛍光で染め分けることが可能になり、その挙動が生きたまま見えるようになった。つまりガン細胞が分裂したり・転移したりする様子や、生体組織が再生していく様子が、分子レベルで観察できるようになったのである。

これを可能にしたのは、言うまでもなく蛍光顕微鏡の開発であるが、GFP(緑色蛍光タンパク質)をはじめとする蛍光タンパク質の発見(2008年ノーベル賞受賞)も重要な貢献をした。昨年は、超解像蛍光顕微鏡の開発にノーベル賞が与えられた。蛍光顕微鏡を使った観察には、人類の大きな期待が込められているのである。

私たちは、世界に先駆けて、生きた細胞内の分子の挙動を観察する「蛍光ライブセルイメージング技術」を開発してきた。まず重要なことは、蛍光顕微鏡装置であることはいうまでもないが、観察を成功させるのに案外重要で難しいのが、細胞を一定温度(ヒト細胞の場合は摂氏37度)に保つ温度制御である。細胞のために温度制御が必要なのだが、これが



装置にとってはやっかいな問題となる。サンプルの場所だけを温度制御すると、レンズがサンプルに接触することによって温度が下がってしまい、設定温度を維持できない。また、対流によって試料が泳いでしまう。温度が変動すると、顕微鏡の熱膨張により焦点がずれる。

そのような温度の上下動を最小に留め、細胞にも装置にも適する温度制御を実現するために、私たちは、顕微鏡装置全体をすっぽり中に組み入れる様式の温度制御装置を作製した。その装置は、摂氏10~50度の範囲で0.1度の精度で安定に温度を維持することができ、サンプルと顕微鏡を常に同じ温度に保つことができる。顕微鏡の動作はすべてコンピュータで制御し、壁にあけた穴を通して、外部から顕微鏡に接続している。この装置内にカビなどの雑菌が生えないように、装置内ではク

リーンルーム仕様の滅菌フィルターで濾過した風を循環している。

実は、第1号機を作製した際には、風による振動を抑えるために、風量を調節する電気回路を取り付けていたが、この回路がCCDカメラにノイズを与えることが分かったので取り外した。ところが、ノイズの発生源を突きとめるのに、実に3カ月も要した。しかも、風自体は、大きな問題にならないことが分かったので、第2号機からはこの電気回路は付けていない。

このような温度制御装置を約20年前に作製し、摂氏37度でほぼ連続使用しているが、カビひとつ生えていない。温度制御室内に蛍光顕微鏡を設置することによって、細胞にとっても装置にとっても安心・安定な温度を実現したことによって、蛍光ライブセルイメージングがうまく行えるのである。

# 超伝導ナノワイヤ単一光子検出器を用いた 超高精度な蛍光相関分光システム

ナノICT研究室  
主任研究員  
山下 太郎



ライフサイエンス分野において、蛍光相関分光法 (fluorescence correlation spectroscopy; FCS) は、細胞中の分子の数や大きさを、生きた状態で測定できる重要な手法として知られている。FCSでは、蛍光でラベリングした分子からの微弱な発光を検出することで情報を抽出するため、高感度な単一光子検出器が必須となる。

これまでのFCSシステムでは、半導体ベースのAPD (avalanche photodiode、アバランシェ・フォトダイオード) が一般的に用いられてきた。APDは可視波長帯において60~70%の高い検出効率を有する一方、アフターパルスと呼ばれるノイズの問題が知られている。アフターパルスは、APDが光子を検出した後に連鎖的に発生する偽の出力パルスであり、光子検出直後のサブマイクロ秒の時間領域に生じる。FCSでは、検出した光子間の時間的な自己相関を通じて分子の情報を評

価するため、サブマイクロ秒以下の短い時間スケールで生じる過程に関する情報はアフターパルスによるノイズに埋もれてしまい、解析が不可能であった。

そこで私たちは、これまで開発を進めてきたSSPD (superconducting nanowire single-photon detector、超伝導ナノワイヤ単一光子検出器) のFCSシステムへの応用を目指して研究を行った。SSPDにはAPDのようなアフターパルスが存在せず、しかも高感度・高速応答性を有するため、サブマイクロ秒以下の短い時間領域においても高精度なFCS測定が可能となる。従来のSSPDシステムは波長1.55 $\mu\text{m}$ の通信波長帯に最適化されていたため、今回新たに可視波長帯に対応するFCS用SSPDを開発した。

まず、デバイス構造に関して、誘電体ミラー上に光キャビティ構造を設け、その上に超伝導ナノワイヤを配置することでナノワイヤへの光吸

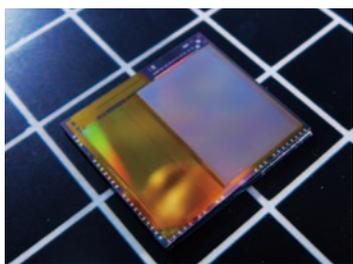
収率を向上させた。また、FCSシステムで用いられるコア径50 $\mu\text{m}$ のマルチモードファイバーと高効率に光結合するため、SSPDの受光部を従来の15 $\mu\text{m}$ 角から直径35 $\mu\text{m}$ の円形へと拡大し、さらにファイバー端に屈折率分布型レンズを付けて集光することで、ほぼ100%の高効率なカップリングを実現した。その結果、波長635nmの入射光子に対して検出効率70%を達成した。

開発したSSPDをFCSシステムに実装して、蛍光分子であるRhodamine BのFCS測定を行った結果、サブマイクロ秒の時間領域においてもアフターパルスの影響を受けないノイズフリーな自己相関曲線が得られ、SSPDを用いたFCSシステムの優位性が明らかになった。これにより、回転拡散をはじめとするサブマイクロ秒以下の高速な物理・化学過程の観測が可能となり、未知の生命現象や原理の解明が飛躍的に進むことが期待される。

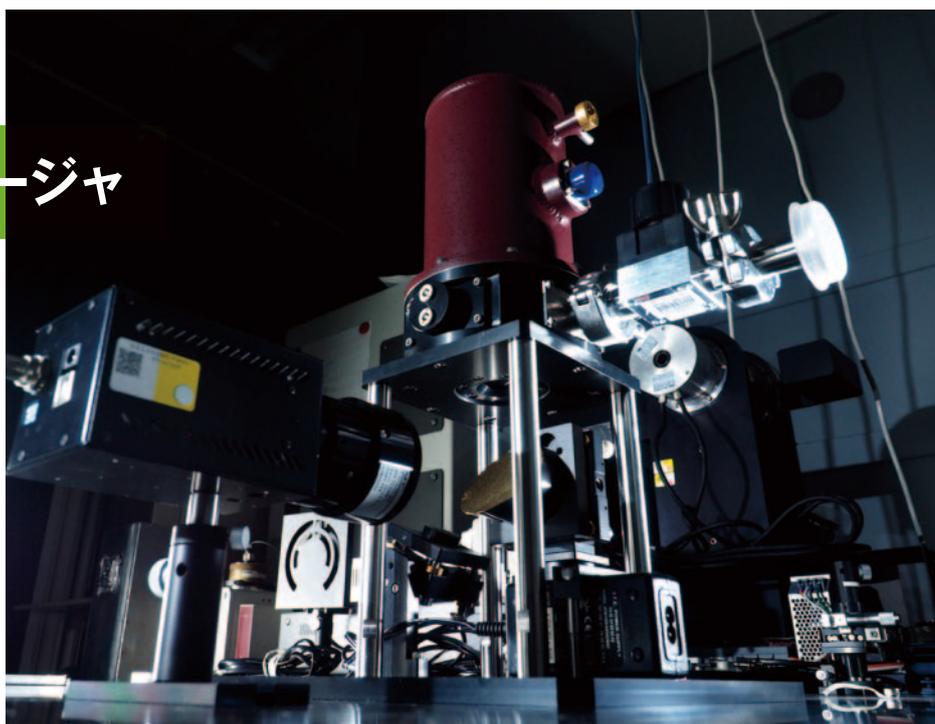
## テラヘルツイメージャ

研究所長  
寶迫 巖

超高周波ICT研究室・研究マネージャー  
關根 徳彦



マイクロボロメータアレイセンサーチップ



テラヘルツ量子カスケードレーザー照明(右)とテラヘルツカメラ(左)

NICTの委託研究と自主研究が協調して、1つの装置「テラヘルツ (THz) イメージャ」を開発した。THz帯での実時間イメージ取得には、可視光の場合と同じように、THz光を照射する照明用光源とTHz光を検出する検出器が必要である。

効率的なイメージ取得には高輝度光源と2次元アレイ型検出器の組み合わせが望ましい。THzイメージャでは、その構成要素である照明用光源としてTHz量子カスケードレーザー (THz-QCL) 照明システムをNICTの自主研究で、2次元アレイ型検出器システム (THzカメラ) を委託研究 (2007～2010年度) によりNECがそれぞれ開発し、それらを組み合わせて実時間イメージングが可能な装置を実現した。これにより、これまでではラスタースキャンによって長時間かけて撮影していたTHzイメージが、QVGAフォーマット (画素：320×240) で每秒

30フレームで実時間撮影できるようになった。

ここで開発したTHz-QCL照明システム (周波数：3.1THz、平均出力：～10 $\mu$ W) は、液体ヘリウムより簡単に入手し利用できる寒剤の液体窒素を冷却に用いたシステムで、イメージャ以外の様々な応用にも簡単に使えるものである。

一方、THzカメラもTHz帯における十分な感度 (等価雑音パワーで10<sup>-13</sup>W/Hz<sup>1/2</sup>程度) を達成したため、単独で他の用途にも用いることができるものとなった。例えば市販化 (2010年度) したTHzカメラは、国内外の多くのTHz分野の研究者が購入し、これまで困難であった実時間計測によって各種THz光源のビームプロファイル計測などに用いられ、THz光源開発を後押しするものとなった。

このTHzカメラは、欧米におけるTHzカメラをリードするものであった。また、この成功例を見て欧

米ではTHzカメラの開発が本格化した。

開発時間の短縮と早期の市場投入を目指して、光源、アレイセンサーとともに、すでに存在する技術をベースにすることが重要な点であった。光源では、液体窒素温度で動作して十分な出力を得るために、THz-QCLデバイスそのもの、光学系、冷却用クライオスタットなどに様々な工夫をこらした。一方、アレイセンサーでは、すでに市販化されていた中赤外のマイクロボロメータアレイセンサーをベースにして、THz帯での感度を向上させることに注力した。

プロジェクトを開始するに当たっては、THz帯での足がかりを得るため、液体ヘリウム冷却のTHz-QCLからの出力が、中赤外のマイクロボロメータアレイセンサーで受けられるかどうかを確かめる必要があり、今から振り返るとこの足がかりを得ることが一番の難所であった。

# マッハツェンダ変調器型光コム発生器を用いた 高周波数精度テラヘルツ波源

超高周波ICT研究室  
主任研究員  
諸橋 功



テラヘルツ波は、分光や高速無線通信、医療・バイオなど、様々な分野への応用が期待されているが、高い周波数精度を持つテラヘルツ波の発生および検出技術が重要課題の1つとなっている。そこで私たちは、光周波数コム技術を用いたテラヘルツ波発生技術の開発を行っている。

たくさんの波長(周波数)成分が離散的かつ等間隔に並んだレーザー光を「光周波数コム(または単に光コム)」と呼び、時間や光周波数を高い精度で測定する基礎技術となっている。このように、光コムは“光のものさし”として機能するが、その“目盛”をどれだけ精密に並べられるかがカギとなり、高い制御技術が要求される。光コムの発生方法は、モード同期技術と光変調技術の2種類に



LiNbO<sub>3</sub> マッハツェンダ光変調器の外観

大別できる。光変調技術は、パルスレーザに比べて安定性や使いやすさの点で優れている。そこで私たちは、光変調により発生された光コムを用いた高周波数精度テラヘルツ波源の開発を進めているのである。

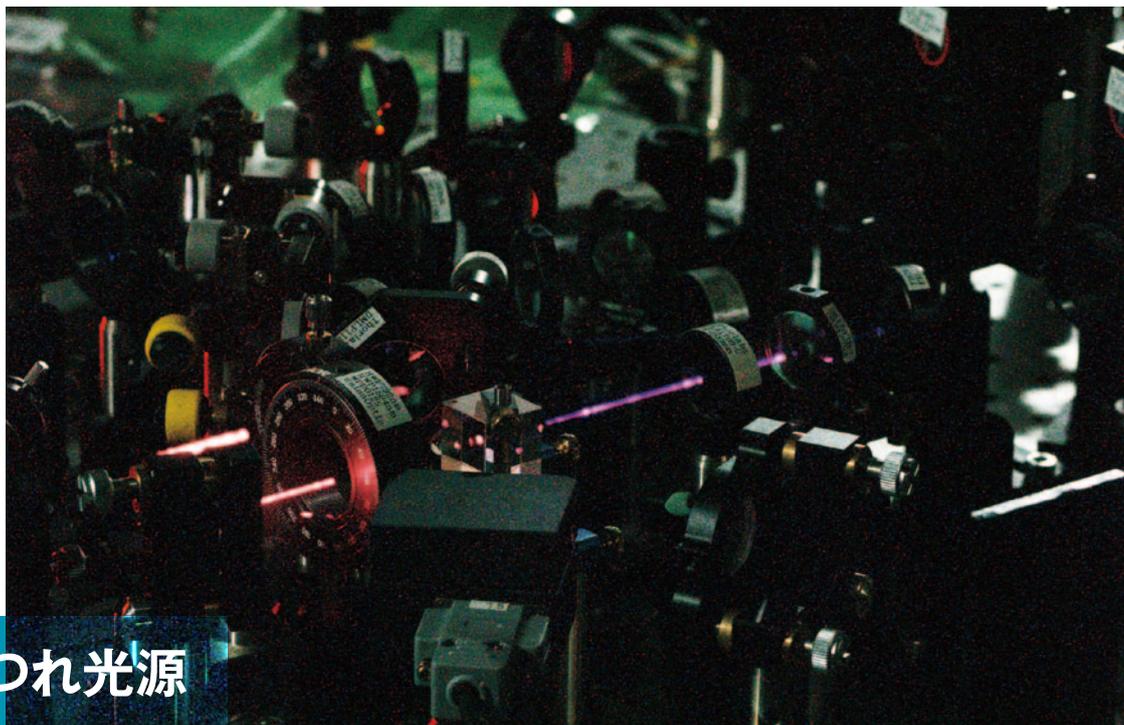
光変調器では、電気信号を加えることで光の振幅や位相を制御できるが、これを高周波信号で駆動した場合、入力した光成分以外に多数の周波数成分が生成される。それらは、変調器に入力した高周波信号の周波数と完全に一致した間隔で並ぶ光コムとして出力される。つまり、光変調器に高周波信号を印加するだけという非常にシンプルな構成で、光コムを発生することが可能である。しかも、高周波信号は非常に高い精度を持っているため、光コムの間隔も非常に高い精度で制御できることや、外部の振動などの影響を受けにくいという特徴を持っている。

しかし、単純に変調しただけでは各成分の強度がばらばらな光コムしか発生できないという問題があった。

そこで、マッハツェンダ変調器に振幅の異なる2つの高周波信号を入力し、かつ特殊な条件で駆動することにより、平坦性が非常に高い光コムを発生させることが可能になった。

テラヘルツ波の発生には差周波発生法を用いている。すなわち、ある周波数だけ離れた2光波を掛け合わせることで、その周波数差に対応したテラヘルツ波を発生させる方法である。この方法は、選択する光コムの成分を変えることで、発生するテラヘルツ波の周波数を簡単に変更することができるというメリットがある。また、テラヘルツ波の周波数精度は変調器に入力した高周波信号で決まるため、非常に高い周波数精度が簡単に得られる。

実際に、マッハツェンダ変調器で発生された光コムから2成分を抽出してフォトミキサに入力することにより、3THz(テラヘルツ)までの広い周波数範囲で高い周波数精度のテラヘルツ波を発生させることが可能となっている。



## 量子もつれ光源

量子ICT研究室

主任研究員

和久井 健太郎

研究員

金 鋭博

量子もつれ光源とは、量子力学的な相関をもつ光の粒のペア（量子もつれ光子対）を生成するための実験装置である。量子もつれ光子対は離れた2地点で強い結びつきを持つため、レーザー光では実現できない安全な通信（量子暗号）や高速の計算（量子計算）、さらには高精度の光計測を実現できる。しかし、量子もつれ光源には特殊な非線形光学結晶や駆動用レーザーを開発しなければならず、量子もつれ光子対の生成・検出を高速化することは容易でない。そのため、現在も世界中で研究開発が進められている。

これまでは主に駆動用レーザーの強度増強により、量子もつれ光子対の生成速度の向上が試みられてきた。しかし、この方法では同時に雑音が増加するため、量子暗号に用いた場

合、通信性能の劣化を引き起こす。しかも、これまでは光ファイバ通信にとって重要な波長帯（1,550nm近辺）より短波長の、近赤外波長帯（800nm近辺）での研究開発がほとんどであり、駆動用レーザーの繰り返し周波数も76MHz（メガヘルツ）付近に留まっていた。

NICTでは、通信波長帯において高純度の量子もつれ光源を独自開発してきた。今回、繰り返し周波数2.5GHz（ギガヘルツ）の駆動用レーザーを高純度量子もつれ光源に組み合わせることで、雑音を増やすことなく、システム動作速度を30倍以上高速化することに成功した。駆動用パルスレーザーには、波長・パルス幅可変、かつ高速・安定動作が要求される。NICTが独自に開発・改良を進めてきた周波数コム

周波数コム光源



光源（図）は、これらの特長を全て兼ね備えている。今回、この周波数コム光源をもとにシステム全体を新規開発することで、量子もつれ光源の高速化が初めて実現した。

この成果が光ファイバ通信波長帯で実現したことにより、今後の研究では安価かつ高性能の光部品をよりいっそう活用できる。このことから、量子もつれ光源を用いた量子暗号・光量子計算・高精度光計測の実現に向けて、さらなる研究開発の加速化が期待される。

今後はシステム動作速度を10GHzまで向上させ、装置を小型化してフィールド環境下での量子暗号伝送実験などを進めながら、データセンター内の安全な光配線技術や企業内ネットワークへの応用に向けた研究開発を進めていく。

# ジョセフソン量子回路 測定 / 制御 装置

巨視的量子物理プロジェクト室  
室長・上席研究員

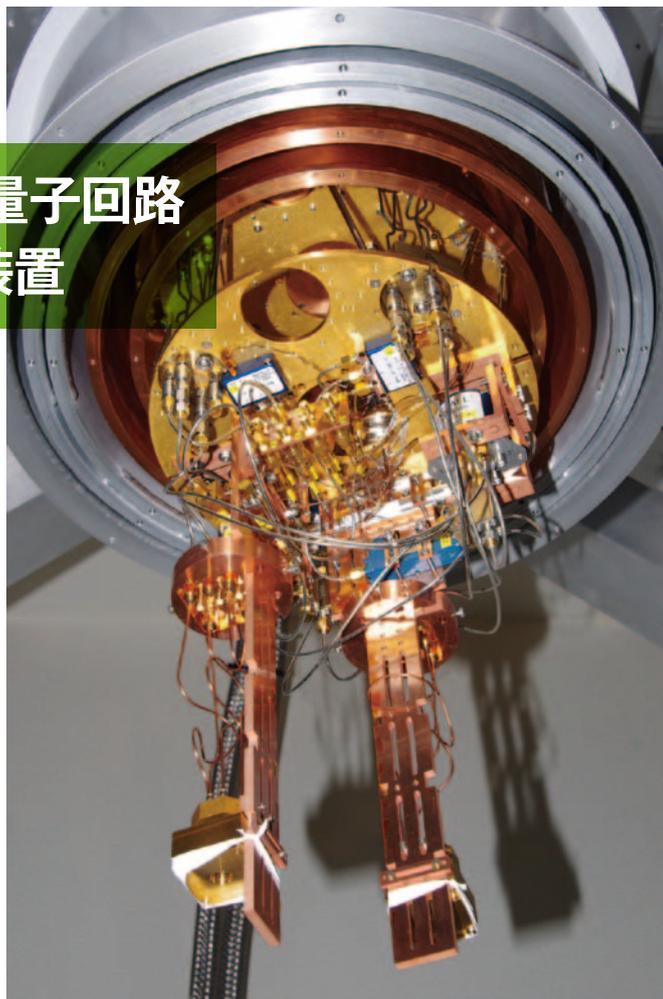
仙場 浩一

主任研究員

吉原 文樹

研究員

布施 智子



装置の内部

私たちのグループでは、光学顕微鏡でも見える大きさの電気回路で生じる、量子状態の測定や制御の研究をしている。従来、量子状態というと、原子や電子、光子などのいわゆる素粒子の状態を記述する際に使われてきたが、この四半世紀の間の微細加工技術の飛躍的な進歩によって、一辺が $1\mu\text{m}$ 以下の微小なジョセフソン接合を含む電気回路（以下、ジョセフソン量子回路）で



装置の全景

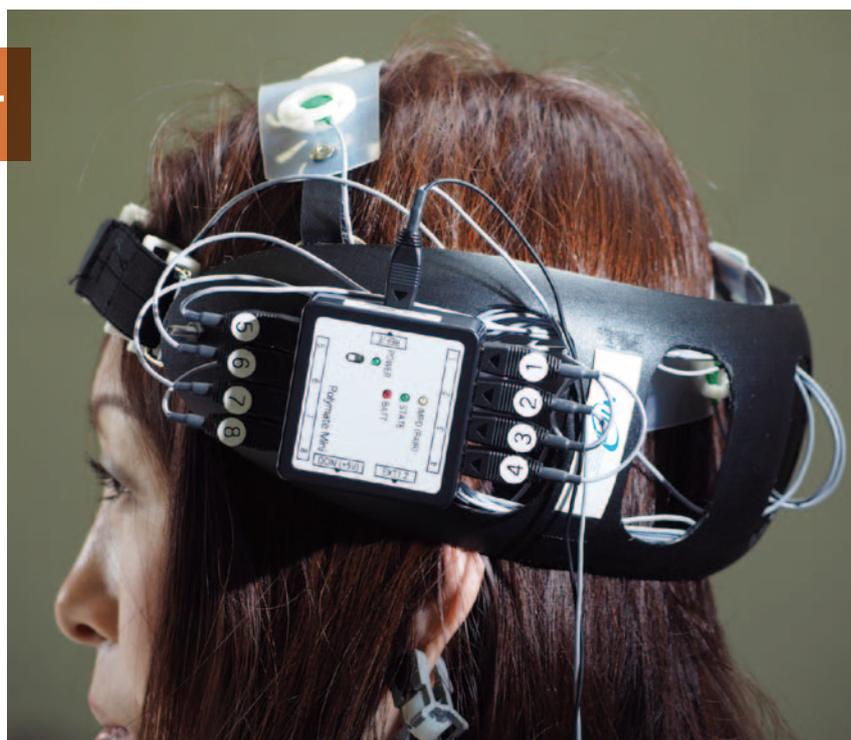
は、 $100\text{nA}$ 程度の巨視的電流の量子力学的振る舞いが発見された。また、最近15年間には、原子や電子同様、巨視的電流状態の重ね合わせや、量子力学的な可干渉性が実験的に次々と確認されてきた。従来存在しなかったこの新たなリソース（巨視的量子状態）は、精密計測、量子ノード、量子系のシミュレーション、さらには量子コンピュータのような量子力学に従って動くマシンの実現などに役立つと期待されている。

ジョセフソン量子回路を使う最大のメリットは、光子（マイクロ波）との相互作用の結合定数を回路設計で自在に変えられる点である。自然に存在する電子と光子の電磁相互作用の結合定数は、微細構造定数の値で厳格に定められているが、

ジョセフソン量子回路では、回路設計によって相互作用を光子自身のエネルギーよりも大きくすることも可能となる。そのような条件下では、結合系の基底状態の電磁場部分は、もはや光子の真空ではなくなる。外部から光子を入れなくても、自然発生した光子がジョセフソン量子回路にまとわりついたエキゾチックな状態が基底状態となっているのではないかと予想されている。元来、自然が定める基底状態を人為的に制御し利用することを目的に、希釈冷凍機を使って実験を進めている。ジョセフソン量子回路やマイクロ波のエネルギーは、温度に換算すると数百 mK であり、その特性を調べるためには、素子やマイクロ波部品をそれより低い温度（ $20\text{mK}$ 程度）に冷やさなければならないからである。希釈冷凍機の冷却能力の源である $^3\text{He}$ - $^4\text{He}$ 混合器に近いスペースは限られており、そこに素子とマイクロ波部品を固定して冷却しなければならない。そこで今回、このスペースに合わせて設計したホルダーやクランプを、社会還元促進部門研究開発支援室の小室さん、井上さんに製作していただいた。材料は、熱伝導の良い無酸素銅を使っている。現物合わせを行いつつ、このような特注部品を作製いただける小回りの利く支援室の協力は、私たちの実験には不可欠である。これらを使って組み上げたのが、この装置である。

## ウェアラブル脳波計

脳情報通信融合研究センター  
脳機能計測研究室・副室長  
成瀬 康



近年、脳波を用いたBMI (Brain Machine Interface) 技術が急速に進歩しているが、BMIの研究の多くは既存の導電性のジェルを利用する脳波計を利用している。しかし、導電性のジェルを利用した脳波計は装着に時間がかかり、また、取り外した後に洗髪が必要となるなど、ユーザビリティが低い。それ故、BMI技術を実際に多くの人に使うためには、ジェルを必要としないドライ電極により脳波が計測できるようにする必要がある。

そこで、まず接触抵抗が高くても脳波計測を可能とするために、入力インピーダンスの高いアクティブ電極を採用し、髪の間に入っていきことができる電極チップを開発することで、ジェルを必要としないドライ電極による脳波計測を実現した。

導電性ジェルを利用した電極とドライ電極とで同時に脳波を計測したところ、ほぼ同じ計測データを得ることができた(10,000サンプル

ポイントデータで相関係数は0.96)。このことは、私たちが開発したドライ電極でも、ジェルを利用した従来の電極とほぼ同等の精度で脳波計測ができることを示している。

そして、可搬性を向上するために、小型・軽量化(約80g)を進めるとともに、Bluetoothによるワイヤレス通信で脳波を転送できるモバイルワイヤレス脳波計の開発を行った。さらに、個人間の頭の形状の違いを吸収して電極を頭皮にフィットさせることができるヘッドギアの開発も行い、より多くの人々が簡単に装着できる脳波計測システムの開発に成功した。

これまでの脳波計は、ジェルを必要としており、装着にも技術や時間が必要であったため、研究室や病院でしか脳波計測ができなかった。しかし、開発したウェアラブル脳波計を用いることで、日常生活においても容易に脳波計測が可能となり、日常生活でBMIを容易に使うことが

できるようになった。

ウェアラブル脳波計を開発する上で、最も苦労した点は、ヘッドギアの開発である。脳波は、電極が頭皮に接触しなければ計測できないが、頭の形が想定していた以上に個々人で大きく違っていたため、より多くの人にフィットするヘッドギアを作ることがなかなか難しかった。現在は、試行錯誤の結果、より多くの人にフィットするものができたが、まだまだ改良する余地があるため、今後、より良いものに改造していく予定である。

今後は、開発したウェアラブル脳波計をヘルスケアやBMIに利用することで、多くの人暮らしに役立つようなシステムの開発を行っていく。さらには、これまでのコミュニケーション手段では伝えることが難しく伝えたくても伝えられなかった情報を伝えることを可能とする、新しい技術の確立も目指したいと考えている。

# TOPICS

## 「nano tech 2015」に出展

未来 ICT 研究所は、2015 年 1 月 28 日～30 日に東京ビッグサイトで開催された世界最大級の先端技術展である nano tech 2015 に出展しました。

展示ブースでは、未来の光通信に資する「有機非線形光学デバイス（光電（EO）変換素子）」などのナノデバイス技術について材料から作製、実証へ至る最新の研究を紹介しました。先端基盤技術としての内容に加え、実際にウエハー上に形成された導波路デバイス形状の展示では、素子展開の進展に対して関心が集まっていました。バイオテクノロジー分野から情報通信への利用に関する研究、ミリ波・テラヘルツ波の通信素子、脳情報の展示では、最新の未来基盤技術研究の内容を展示しました。

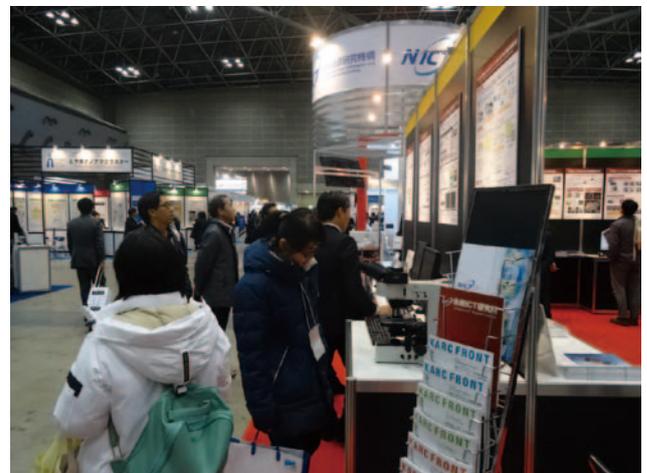
また、技術展開を進めている各デバイス先端開発センターの展示には、研究・開発だけでなく、関係する企業の方々から高い関心を集めました。社会還元促進部門からは、脳波計測、顕微鏡計測など、関連する技術移転の紹介があり、いずれも研究・技術開発だけでなく、多くの内外企業からの関心をいただきました。

なお、本展示会の全来訪者の 3 日間合計は 47,649 名でした（事務局発表）。

当研究所では、今後も研究成果の発信と研究交流の場、そして技術の社会還元促進の場として、この技術展に積極的に参加する方針です。



NICT ブースの様子



有機 EO の展示



社会還元促進部門、技術移転等の展示  
(モバイル真空ポンプ、簡易脳波計)



デバイス先端開発センター  
(グリーン / 深紫外光) の展示

## 報道発表

© 未来 ICT 研究所は右記のような研究成果を報道発表を通じて発信しました。詳細は、URL をご覧ください。

### 細胞内の運送屋、タンパク質「ダイニン」の自己制御メカニズムを発見

～細胞内の輸送ネットワーク制御機構の解明へ道筋～

発表日：2014 年 9 月 30 日 URL：<http://www.nict.go.jp/press/2014/09/30-1.html>

### 量子鍵配送に関する新理論を確立

～鍵生成速度についての原理的な限界を解明～

発表日：2014 年 10 月 24 日 URL：<http://www.nict.go.jp/press/2014/10/24-2.html>

### 量子通信の実現に向けた、量子もつれ光の高速生成技術を開発

～従来の 30 倍以上の高速化を実現～

発表日：2014 年 12 月 19 日 URL：<http://www.nict.go.jp/press/2014/12/19-1.html>

## ICNME 2014 を主催

2014年12月17日～19日の3日間、神戸国際会議場において、「11th International Conference on Nano-Molecular Electronics (ICNME 2014)」を主催しました。

本国際会議は、未来ICT研究所 ナノICT研究室の前身である関西先端研究センター・ナノ機構グループが牽引役となって1994年に世界に先駆けて企画したもので、今回で11回目の開催となります。有機分子機能材料の開発と応用に関連した有機分子エレクトロニクス研究の現状について、物理、化学、電気、電子、生物など様々な分野で活躍している研究者が一堂に会し、当該研究開発分野の現状と課題について最近の研究成果をもとに様々な観点、視点から自由に討議し、有機分子素子工学の発展に寄与することを目的としています。本会議は、(1) ナノ界面エレクトロニクスとナノ界面光学、(2) 分子フォトニクスとナノフォトニクス、(3) ソフトマテリアルの物理とエレクトロニクス応用、(4) 有機半導体デバイス、(5) ナノ界面形成とバイオエレクトロニクスの5つのセッションから構成されました。会議には世界9カ国から146名の参加登録があり、招待講演、口頭講演、ポスター講演を含む132件の世界トップレベルの優



会場の様子



講演の様子

た発表と活発な討議が行われました。また、多数の若手研究者の参加があり、この分野をリードする一流の研究者との質の高い議論を通して、次世代を担う若手研究者を育成する重要な場ともなりました。

有機ナノ素材に基づく情報通信技術は有機分子・電子機能材料に基づくデバイス技術の高度化、バイオ材料に基づくセンシング技術や省エネルギー化技術など、将来の情報通信に大きなパラダイムシフトをもたらすと考えられ、今後の研究展開の加速が期待される場所です。未来ICT研究所では、この有機ナノ素材の情報通信技術への応用と人材育成とを重視して、今後も継続して本国際会議の開催を行います。

## Cold Spring Harbor Course における技術講習講師

2014年6月29日～7月17日、米国 Cold Spring Harbor 研究所において、Cold Spring Harbor Course が開催され、バイオICT研究室の吉原基二郎主任研究員が講師として参加しました。この講習会は脳神経研究のための主要なモデル動物であるショウジョウバエの神経生物学の最新知識技術を教授することを目的として、毎年開催されています。世界中から厳選された若手研究者を対象として、緊密な教育を行う国際的な講習会であり、参加者からは分野をリードする科学者達を多数輩出しています。

講師としてこのワークショップに招かれることは大変名誉なこと

されており、今回は、吉原主任研究員が昨年 Nature 誌に発表したショウジョウバエ摂食神経回路に関する研究技術が国際的に高く評価され依頼を受けるに至りました。



講習会の様子



## 情報通信技術研究交流会 (AC・Net) 講演会・見学会を開催

2014年12月17日第206回情報通信技術研究交流会 (AC・Net) 例会を未来ICT研究所 (神戸) で開催しました。

情報通信技術研究交流会 (AC・Net) は、関西地区で情報通信技術に携わる人たちのヒューマン・ネットワークの輪を広げることを目的に、関西地区の情報通信分野の産官学の研究者・技術者交流の場として、1990年9月14日に発足しました。以来、未来ICT研究所では事務局を務めています。

本例会では、首都大学東京大学院人文科学研究科の萩原裕子教授の講演会と、未来ICT研究所の研究紹介、施設見学を行いました。



施設見学の様子

## 受賞報告



受賞者：井上 振一郎  
統括/深紫外光 ICT デバイス先端開発センター長  
受賞日：平成 26 年 9 月 17 日  
受賞名：応用物理学論文賞  
授与団体：公益社団法人 応用物理学会  
本受賞は、Applied Physics Express 誌に掲載された、同氏と共同研究者 (Tokuyama, Hexa Tech, 農工大, North Carolina State Univ.) の深紫外 LED の高効率化に関する研究成果が、応用物理学の進歩と向上に寄与する優れた業績であると認められたものです。



受賞者：東脇 正高  
統括/グリーン ICT デバイス先端開発センター長  
受賞日：平成 27 年 2 月 24 日  
受賞名：第 11 回 (平成 26 年度) 日本学術振興会賞  
授与団体：独立行政法人 日本学術振興会  
本受賞は、同氏の、「ワイドバンドギャップ半導体トランジスタに関する先駆的研究開発」に関する研究業績が高く評価されたものです。

# 未来 ICT 研究所 STAFF 総覧

研究所付	寶迫 巖	研究所長	博士 (理学)	
	久保田 徹	副研究所長	博士 (工学)	
	大岩 和弘	NICTフェロー/主管研究員	理学博士	
	王 鎮	NICTフェロー/招聘専門員	工学博士	
	原口 徳子	上席研究員	医学博士	
	小川 博世	客員研究員	工学博士	
	企画室 (神戸)	照井 通文	室長	博士 (理学)
宮内 哲		総括主任研究員	医学博士	
横田 和之		グループリーダー	—	
五十川 知子		主任	—	
大山 良多		有期技術員	—	
高橋 恵子		有期技術員	—	
井上 晶子		有期補助員	—	
大内 留美		有期補助員	—	
神田 由香里		有期補助員	—	
佐伯 香住		有期補助員	—	
寺本 智香		有期補助員	—	
山根 梓		有期補助員	—	
企画室 (小金井)		小倉 基志	主幹	—
		秋葉 誠	専門推進員	理学博士
	広瀬 信光	専門推進員	博士 (工学)	
	鈴木 与志雄	有期技術員	—	
	川瀬 典子	有期技術員	—	
	八代 祐子	有期補助員	—	
	佐藤 統洋	有期補助員	—	
	超高周波 ICT 研究室	笠松 章史	室長	博士 (工学)
		関根 徳彦	研究マネージャー	博士 (工学)
		齋藤 伸吾	主任研究員	博士 (理学)
		古澤 健太郎	主任研究員	博士 (理学)
諸橋 功		主任研究員	博士 (工学)	
安田 浩朗		主任研究員	博士 (工学)	
渡邊 一世		主任研究員	博士 (工学)	
Patrashin Mikhail		主任研究員	博士 (工学)	
浜崎 淳一		主任研究員	博士 (理学)	
原 紳介		主任研究員	博士 (理学)	
小川 洋		主任研究員	博士 (工学)	
酒瀬川 洋平		研究員	博士 (工学)	
山下 良美		専門研究員	—	
三村 高志		統括特別研究員	工学博士	
遠藤 聡		特別研究員	理学博士	
藤川 紗千恵		特別研究員	博士 (工学)	
藤代 博記		特別研究員	博士 (工学)	
松井 敬明		特別研究員	—	
量子 ICT 研究室		佐々木 雅英	室長	博士 (理学)
	早坂 和弘	研究マネージャー	博士 (理学)	
	武岡 正裕	主任研究員	博士 (工学)	
	藤原 幹生	主任研究員	博士 (理学)	
	和久井 健太郎	主任研究員	博士 (工学)	
	朱 金暎	研究員	博士 (工学)	
	金 鋭博	研究員	博士 (工学)	
	韓 太舜	招聘専門員	博士 (工学)	
	伊藤 寿之	有期技術員	博士 (地球環境科学)	
	北村 光雄	有期技術員	—	
	都筑 織衛	有期技術員	—	
	松尾 昌彦	有期技術員	—	
	ナノ ICT 研究室	大友 明	室長	Ph.D.
		田中 秀吉	研究マネージャー/専門推進員	博士 (理学)
		鶴澤 佳徳	研究マネージャー	博士 (工学)
		寺井 弘高	研究マネージャー	博士 (工学)
		笠井 克幸	主任研究員	博士 (工学)
川上 彰		主任研究員	博士 (工学)	
三木 茂人		主任研究員	博士 (工学)	
山下 太郎		主任研究員	博士 (理学)	
山田 俊樹		主任研究員	博士 (工学)	
梶 貴博		研究員	博士 (工学)	
梶野 顕明		研究員	博士 (工学)	
丘 偉		研究員	Ph.D.	
富成 征弘		研究員	博士 (工学)	
Penna Stefano		研究員	Ph.D.	
牧瀬 圭正		研究員	博士 (理学)	
青木 勲		有期技術員	—	
今村 三郎		有期技術員	工学博士	
上田 里永子		有期技術員	—	
小石 雅之		有期技術員	—	
五月女 誠		有期技術員	—	
三木 秀樹		有期技術員	薬学博士	
山田 千由美		有期技術員	—	
横濱 秀雄		有期技術員	—	
岡部 久美		有期補助員	—	
上月 真紀子		有期補助員	—	
高木 佳寿代		有期補助員	—	
竹内 尚輝		特別研究員	博士 (工学)	

バイオ ICT 研究室	小嶋 寛明	室長	博士 (工学)	
	小林 昇平	主任研究員	博士 (工学)	
	榎原 斉	主任研究員	理学博士	
	田中 裕人	主任研究員	理学博士	
	近重 裕次	主任研究員	博士 (理学)	
	丁 大橋	主任研究員	博士 (理学)	
	古田 健也	主任研究員	博士 (学術)	
	岩本 政明	主任研究員	博士 (理学)	
	小川 英知	主任研究員	博士 (バイオサイエンス)	
	平林 美樹	主任研究員	博士 (工学)	
	吉原 基二郎	主任研究員	博士 (理学)	
	佐川 貴志	研究員	博士 (生命科学)	
	櫻井 晃	研究員	博士 (生命科学)	
	清水 洋輔	研究員	博士 (農学)	
	丹下 喜恵	研究員	博士 (農学)	
	鳥澤 嵩征	研究員	博士 (学術)	
	古田 茜	研究員	博士 (理学)	
	松田 厚志	研究員	博士 (理学)	
	山本 孝治	研究員	博士 (理学)	
	平岡 泰	招聘専門員	理学博士	
	岡正 尊澄	有期技術員	—	
	小坂田 裕子	有期技術員	—	
	裾谷 知子	有期技術員	—	
	荒神 尚子	有期技術員	—	
	佐橋 律子	有期技術員	博士 (学術)	
	堤 千尋	有期技術員	—	
	森 知栄	有期技術員	—	
	吉雄 麻喜	有期技術員	—	
	長濱 有紀	有期補助員	—	
	樋口 美香	有期補助員	—	
	福田 紀子	有期補助員	—	
	高村 佳美	有期補助員	—	
	田中 美佳子	有期補助員	—	
	グリーン ICT デバイス先端 開発センター	東脇 正高	統括/先端開発センター長	博士 (工学)
		片桐 祥雅	研究マネージャー	工学博士
		上村 崇史	主任研究員	博士 (工学)
		Daivasigamani Krishnamurthy	主任研究員	Ph.D Materials Science
		中田 義昭	主任研究員	博士 (工学)
小西 敬太		研究員	博士 (工学)	
WONG MAN HOI		研究員	Ph.D Electrical and Computer Engineering	
安部 正幸		招聘専門員	工学博士	
佐村 秀夫		招聘専門員	工学博士	
加藤 直規		専門調査員	工学博士	
杉浦 洋平		短時間補助員	—	
深紫外光 ICT デバイス先端 開発センター	井上 振一郎	統括/主任研究員/先端開発センター長	博士 (工学)	
	Hao GuoDong	研究員	博士 (工学)	
	谷口 学	有期技術員	—	
	中屋 晃成	有期技術員	—	
巨視的 量子物理 プロジェクト室	仙場 浩一	上席研究員/室長	博士 (工学)	
	吉原 文樹	主任研究員	博士 (工学)	
	布施 智子	研究員	博士 (理学)	
	星 亜希子	有期補助員	—	

(2015年2月1日現在)



兵庫県神戸市  
未来 ICT 研究所への  
アクセス



独立行政法人 情報通信研究機構  
**未来 ICT 研究所**

〒 651-2492 兵庫県神戸市西区岩岡町岩岡 588-2  
TEL:078-969-2100 FAX:078-969-2200

〒 184-8795 東京都小金井市貫井北町 4-2-1  
TEL:042-327-7429 FAX:042-327-6961

E-mail:karc@ml.nict.go.jp  
http://www.nict.go.jp/advanced\_ict