

# KARCFRONT

未来 ICT 研究所ジャーナル

Vol. **21**

2011  
AUTUMN

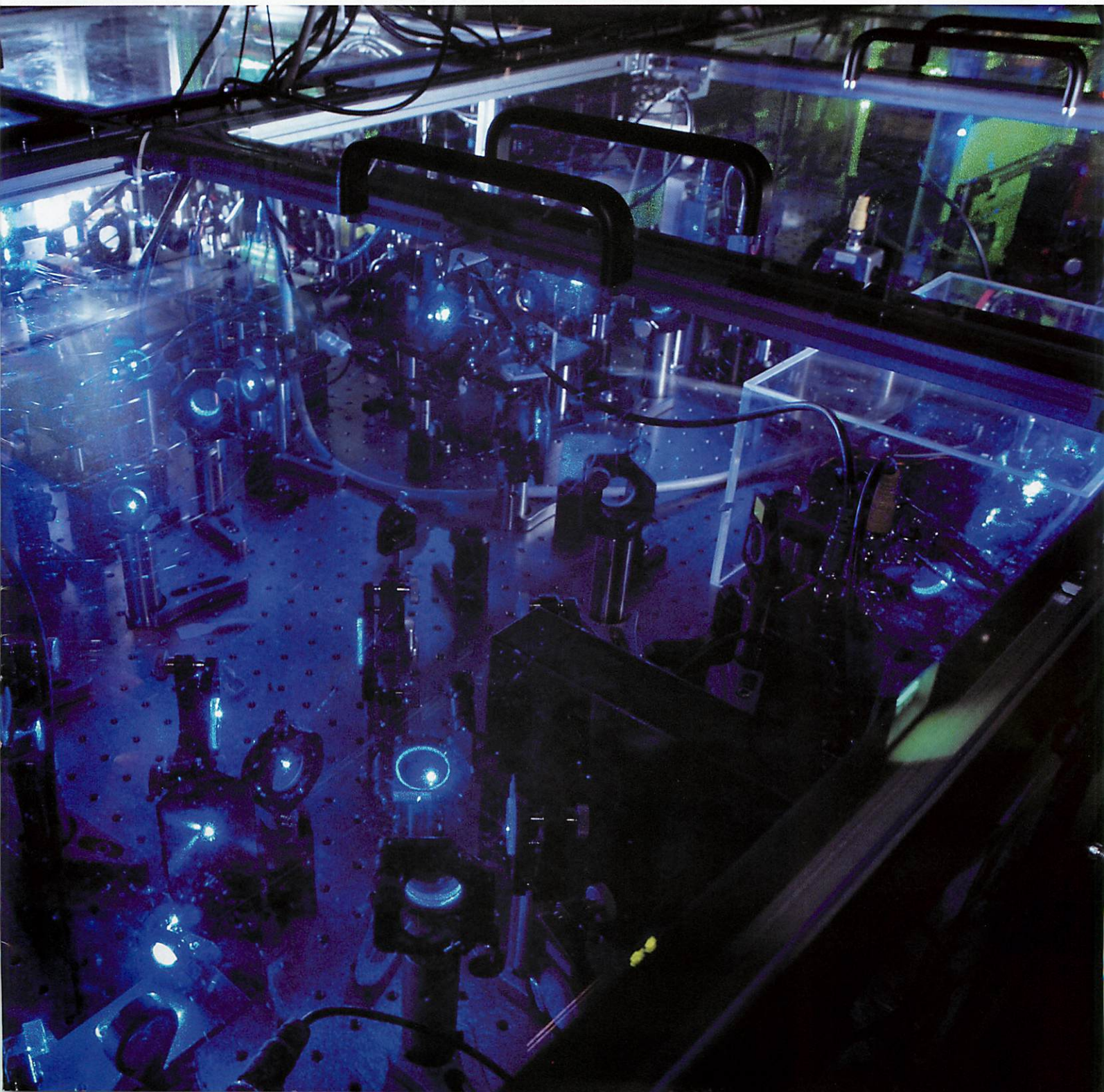


巻頭インタビュー

研究成果のスピーディな実用展開を目指し  
一気通貫型の新体制がスタート

特集：新体制研究室紹介

- 電磁波利用の新たなフロンティア
- 光の束を解きほぐす

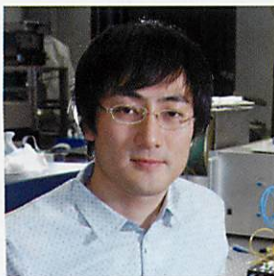




# KARC FRONT

未来 ICT 研究所ジャーナル

Vol. **21**  
2011  
AUTUMN



## Contents

巻頭インタビュー ..... 3

### 研究成果のスピーディな 実用展開を目指し 一気通貫型の新体制がスタート

特集：新体制研究室紹介1 ..... 4



超高周波電磁波の利用による  
非破壊・非接触センサーや大容量高速無線通信を実現

### 電磁波利用の 新たなフロンティア

超高周波 ICT 研究室

特集：新体制研究室紹介2 ..... 7



高速かつ安心な情報通信を実現する量子情報通信技術

### 光の束を解きほぐす

量子 ICT 研究室

KARC TOPICS ..... 8

脳情報通信融合分野における共同研究に係る契約書及び協定書の締結について / NHK「サイエンス ZERO」取材・放送報告 / 研究成果が著名な国際学術誌に論文掲載 / 第4回研究交流会開催報告 / 未来 ICT 研究所施設一般公開 2011 開催報告 / 大阪大学基礎工学科との包括協定意見交換会の実施 / 受賞報告——王鎮主管研究員が文部科学大臣表彰科学技術賞を受賞、NICT フェローに

クローズアップ研究者1 ..... 12



### 光コムを用いた精密な テラヘルツ波信号生成を目指して

諸橋 功 博士 (工学)

クローズアップ研究者2 ..... 14



### パルス光の量子雑音制御と 量子通信技術の実用化に向けて

衛藤 雄二郎 博士 (理学)

未来 ICT 研究所 STAFF 総覧 ..... 16





情報通信研究機構  
未来ICT研究所  
研究所長

## 大岩和弘

理学博士

# 研究成果のスピーディな 実用展開を目指し 一気通貫型の新体制がスタート

今年度から、未来ICT研究センターは研究組織を再編、「未来ICT研究所」と名称を変更し、第三期中期計画を開始しました。新しい組織では、高レベルの基礎研究を基に、材料・デバイスの開発を行う神戸研究所の3グループ（バイオICT、ナノICT、脳情報通信）と、実用化に近い領域を得意とする小金井本部の2グループ（量子ICT、超高周波ICT）が一体となり、基礎研究の成果をいち早く実用化へと導く体制が整いました。

現在、本研究所が長年培ってきた研究成果は、次々と実用化段階を迎えようとしています。例えばナノICT研究室では、開設当初から高周波特性をもつ超伝導体、窒化ニオブの将来性に着目して20年間以上システム化のための技術を培ってきました。近年、この技術が電波望遠鏡の受信機として実用化されるとともに、本研究所量子ICT研究室による量子暗号通信の単一光子検出素子としても利用されています。

その他にも、現行材料の代替として期待される有機EO材料のデバイス化も目前に迫っています。さらに、生体分子材料を使ったセンサーの開発にバイオICT研究室が取り組んでいます。このように、未来ICT研究所が一丸となって取り組む研究開発は新体制の下、一段と加速するでしょう。

第三期中期計画では、内部組織のつながりを強化する一方、外部組織との共同研究にも力を入れます。特に、ヒトの脳の高次機能を対象とした脳情報通信研究室の研究は、多角的な視点をもって進めることが重要です。そこで、大阪大学および国際電気通信基礎技術研究所とともに「脳情報通信融合研究プロジェクト」を開始しました。また、超高周波ICT研究室でも、テラヘルツ利用技術において電磁波計測研究所とのプロジェクト研究を進めています。

未来ICT研究所は開設以来、情報通信技術の革新につなげるための基礎的な研究に重点を置いています。長い期間に培った研究開発力は競争優位性をもたらします。ゆるぎない基盤を育みながら、社会のニーズや時代の変化にすばやく対応し、情報通信の技術革新につなげる、そんな骨太の研究開発を推進していきたいと考えています。

### 未来 ICT 研究所

企画室

ナノ ICT 研究室

バイオ ICT 研究室

脳情報通信研究室

超高周波 ICT 研究室

量子 ICT 研究室



超高周波電磁波の利用による  
非破壊・非接触センサーや大容量高速無線通信を実現

## 電磁波利用の 新たなフロンティア

最先端 ICT 分野の包括的な研究を目指す未来 ICT 研究所ですが、  
その中でも超高周波 ICT 研究室は超高周波帯における  
基盤技術の研究開発を通して周波数資源開拓に取り組んでいます。  
2011 年 4 月からの第三期中期目標として  
ミリ波・テラヘルツ波のセンサー<sup>ほうまこ</sup>応用や情報通信への  
利用を掲げる超高周波 ICT 研究室の寶迫室長を訪ねました。



**Q:**超高周波ICT研究室では、これまでのような研究をしていたのですか。

**寶迫:**電波と光の中間にあつてテラヘルツ波と呼ばれている超高周波電磁波分野の研究に取り組んでいます。テラヘルツ帯 (100GHz~10THz) はその独特な物理特性から、さまざまな分野での応用が期待されていた周波数帯域です。特に1990年代以後、超短パルスレーザー技術を活用することでテラヘルツ帯の電磁波を常温で扱えるようになり、多くの研究者の関心を集めるようになりました。

我々の研究室でもテラヘルツ波デバイスの開発に早くから着手しており、これまでに量子カスケードレーザの開発に成功し、委託研究先のNECと協力しテラヘルツカメラを実用化させるなど、基盤技術の確立に努めてきました。また、これらのデバイスを活用するために民間企業や大学、研究機関との共

未来ICT研究所 副研究所長  
超高周波ICT研究室 室長

### 寶迫 巖

博士(理学)

#### 略歴

1993年、大学院博士課程修了後、日本鋼管株式会社勤務。1995年、通信総合研究所COE特別研究員。1996年、通信総合研究所(現 情報通信研究機構(NICT))入所。2008年情報通信研究機構 先端ICTデバイスグループ リーダー。2011年情報通信研究機構 未来ICT研究所 副研究所長 超高周波ICT研究室室長(兼務)に。

#### 研究分野

遠赤外線(テラヘルツ) 検出器、テラヘルツ帯半導体レーザ、テラヘルツ帯計測システム

#### 近況

種無しぶどう(デラウェア)の栽培に挑戦中です。今年はお出張でジベレリン処理の時期を逃しましたが、その後、暑い日々が続きましたので、甘い種ありぶどうを堪能できました。



## テラヘルツ波の特徴とその応用

全宇宙の電磁波エネルギーの50%がTHz帯、ビッグバン以来放射された全光子の98%がTHz帯

### テラヘルツ波

電波と光波の境界に位置する、周波数100GHz~10THzの未開拓・未利用電磁波領域。20世紀に始まる人類の電磁波開拓の歴史において、最後に残された電磁波として、今世界中が注目している。

	マイクロ波	テラヘルツ(THz)波	赤外光	可視光
振動数(Hz)	10 <sup>10</sup>	10 <sup>11</sup> 10 <sup>12</sup> 10 <sup>13</sup>	10 <sup>14</sup>	10 <sup>15</sup>
波長	10mm	1mm 100 $\mu$ m 10 $\mu$ m	1 $\mu$ m	
波数(cm <sup>-1</sup> )	1	10 100 1000	10 <sup>4</sup>	

### センシング・イメージングにおけるテラヘルツ技術の位置づけ

X線より安全、非極性物質（セラミックス、プラスチック、紙）や煙を透過、水分や生体物質で強い吸収、物質（分子）同定

	ミリ波	THz波	赤外線	可視光線	紫外線	X線
透過性	◎	○	△	×	×	◎
	~数cm	~1cm	~数mm	表面で反射	表面で反射	金属も透過
指紋スペクトル	回転、分子振動、水素結合、ファンデルワールス力	共有結合、イオン結合				原子内電子遷移
	分子を特定	化学結合を特定				元素を特定

### 近距離無線における既存技術動向とテラヘルツ無線の位置づけ

大容量・高速伝送方向制御性・小型化低送信電力・非干渉  
大気伝搬：吸収が大きく飛ばない、干渉しない

	マイクロ波	ミリ波 (60GHz)	THz波	赤外線 (光)
通信速度	0.1-1Gbit/s	1.5-4Gbit/s (WirelessHD)	10-100Gbit/s	10-100Gbit/s
アンテナサイズ	中 (>10mm)	近距離応用ではmm程度	小 (<0.5mm) (レンズとの併用可)	小 (レンズ)
ビーム位置決め	不要	容易 (電子的ビーム走査可)	比較的容易	難
コスト	安価	Si-IC技術導入で劇的に安価に	アンテナとの集積により安価に	安価
最近の応用事例	無線LAN TransferJet	HDTVのデータ伝送 (家電メーカー)	放送素材、デジタルシネマの非圧縮伝送	携帯端末間でのデータ転送

同研究も積極的に展開し、センシングやイメージング技術への応用にも取り組んできました。こうした基盤技術に裏打ちされた研究開発力が我々の強みともいえます。

**Q:**これまでの研究で、テラヘルツ波のどのような独特な物理特性が分かってきたのでしょうか。

**資迫:**物質（分子）は指紋スペクトルと呼ばれる固有の吸収スペクトルをテラヘルツ領域に持つことが明らかになっており、特定物質（分子）の検出や、検査対象物内部に含まれる物質（分子）の種別判別に役立てることができま。即ち、分光分析にテラヘルツ波を使うことで分子を直接特定する測定も可能です。逆にテラヘルツ帯光子のエネルギーは、分子そのものの回転や振動、分子間の水素結合、ファンデルワールス力などのエネルギーと同程度ですので、これらの測定から様々な物質の化学や物理的理解のための計測に貢献することができます。しかもテラヘルツ波はプラスチックやセラミック、紙、布といった非極性物質に対するある程度の透過性があるため、このようなセンシングやイメージングを非破壊・非接触で実現でき、多くの分野での活用が期待されています。

我々の研究室や関連する研究室、委託研究等で関わってきた分野だけでも、例えば古典絵画の顔料分析技術や、火災発生現場などでの有害ガス発生状況を数メートル離れた場所から測定できる検知装置に活用されています。最近では、震災で倒壊を免れた建物の安全性を調査するため、壁材や化粧板を剥

がさずに内部構造を確認できる装置への応用も進められようとしています。

**Q:**2011年からの第三期中期計画において、超高周波ICT研究室はどのような役割を担っていくのでしょうか。

**資迫:**現在、センシングやイメージングなどへの応用がクローズアップされているテラヘルツ波ですが、我々が一貫して取り組んでいるのはテラヘルツ波の発振や検出といった基盤技術の進展にあります。従来、テラヘルツ波は高い出力を得にくく、高感度検出には極低温冷却検出器が必要であるなど取り扱いにくいという運用上の課題を抱えており、第二期中期計画では我々はその解決をテーマに取り組んでいました。その結果、高出力化や安定化、常温検出器による高感度検出（委託研究）な

どを実現でき、センシングやイメージング技術への応用が可能になったという経緯があります。

そして2011年度から始まる第三期中期計画における我々のテーマは、センシングやイメージングに加え、テラヘルツ波の活用による数十Gbit/sを超える超高速大容量無線技術の実現です。まずはこれらの技術領域に共通する基盤技術を実現するため、大きく二つのアプローチを考えています。一つがアンテナやフィルタなど、超高周波対応デバイスを実際に開発し、周波数特性を実測できる技術の確立です。二つ目がレーザなどの光技術を活用し、テラヘルツ帯の基準信号となる実用的なテラヘルツ周波数コム技術を開発し、計測技術の国際標準化を先導するというものです。



**Q:テラヘルツ波の応用先として今後は無線通信に注力するのでしょうか。**

**竇迫:**テラヘルツ波は大量の情報を高速で伝送でき、将来的には100Gbit/sという高速伝送も可能です。しかも波長が短いので、送受信用のアンテナを小さくできるというメリットもあります。近年、60GHz帯（ミリ波帯）を利用した無線高速通信が注目されていますが、サブミリ波帯（テラヘルツ帯）に属する300GHz帯ではさらにアンテナサイズを5分の1にでき、面積比では25分の1になるなど、通信機器の小型軽量化ニーズに対応できます。

一方、高周波帯、特にテラヘルツ波のような超高周波帯の電磁波は大気中の水蒸気などにより吸収されるため、長距離通信に向かないという指摘もありますが、我々はむしろ大きな大気吸収のため干渉を起し難いという特性を活かし、近距離通信に特化できる周波数帯と考えています。例えば、構内無線LANや携帯端末同士の無線接続、非接触ICカードの機能強化にも利用で

きます。さらには超高速無線伝送という特長を活かしてICT機器の内部データ配線の無線化も可能です。これなどは内部配線や組み立て工数が大幅に削減でき、また接続を再構成できるなど大きな利点があると考えられています。

**Q:幅広い利用先が想定できるのですね。**

**竇迫:**一般に電波（3THz以下の周波数の電磁波）は国や地域を越えて飛んでいく性質を持つため、周波数ごとに使用目的を定めた国際的なルールが必要になります。そのルールを管理しているのが国際電気通信連合（ITU）です。現在、275GHz以下の周波数帯については利用目的などが定められた規定がありますが、我々が研究するテラヘルツ帯の275GHz以上の周波数帯ではまだルール化されていません。そこでテラヘルツ帯における国際的な利用方法を日本が先導して提言できるようにその環境作りにも取り組んでいます。その推進に欠かせないのがテラヘルツの周波数標準の開発です。

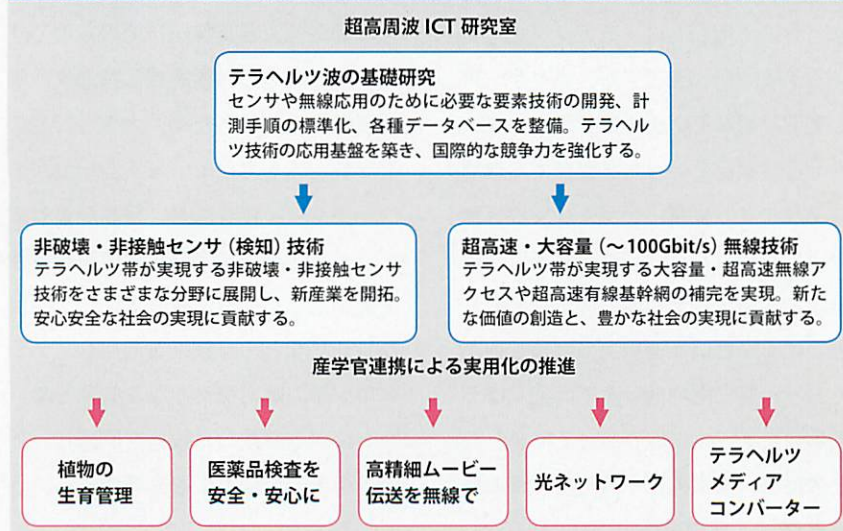
周波数標準とは、時間を測定する時の基準となる原子時計のような存在で、国際標準の制定に欠かせない技術です。利用可能なテラヘルツ帯の周波数標準を実現するために、量子カスケードレーザをテラヘルツ周波数コムにロックした高精度かつ高出力光源の開発に取り組んでいます。この技術を実現することで幅広い範囲での周波数測定に対応でき、しかも高い精度での周波数測定が可能になります。

**Q:研究室では、今後も基礎研究に注力していくのでしょうか。**

**竇迫:**コアコンピタンスとしてはテラヘルツ波に関する半導体素子技術の研究開発にあります。今回、光デバイスの研究開発に活用してきたフォトニックデバイスラボと超高速電子デバイスの研究開発に活用してきたミリ波デバイス研究棟の管理体制を一本化してフォトニクスとエレクトロニクスが融合した超高周波デバイスの開発環境を整備し、NICTの様々な研究開発に資するだけでなく、地域の企業や大学研究室に開放する取り組みも始めました。

超高周波デバイスの研究開発には多大な設備投資が必要です。そのため、ベンチャー企業や大学研究室単独では、研究開発がなかなかできないという現実があります。超高周波帯では発振器やアンテナなどのデバイスをつなぐ伝送路での損失が極めて大きくなってしまったため、研究室レベルでの実験においても集積化技術が求められるからです。こうした設備面での支援を提供することで、日本の基礎研究のすそ野を広げていくことも狙っています。

**超高周波 ICT 研究室の取り組み テラヘルツ電磁波技術プロジェクト**

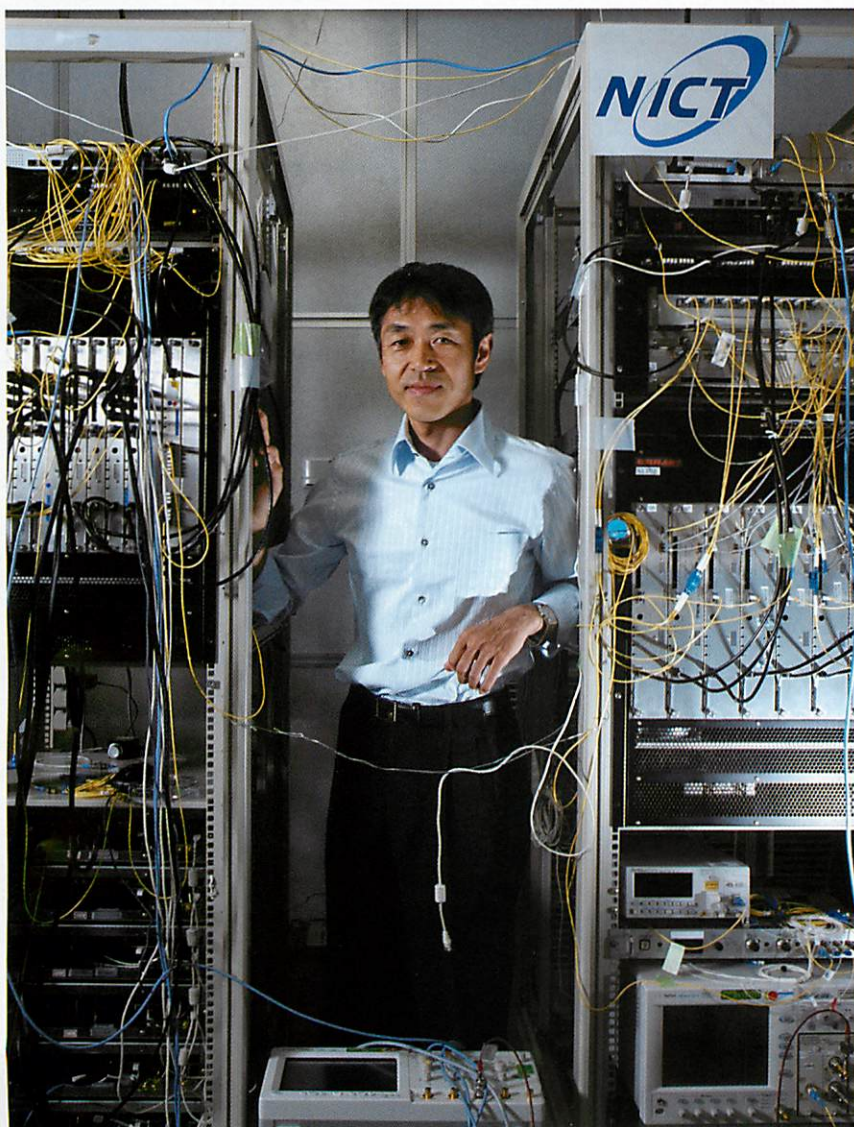




高速かつ安心な情報通信を実現する量子情報通信技術

## 光の束を解きほぐす

未来 ICT 研究所では、量子力学を活用した量子情報通信技術の開発にも取り組んでいます。2011年4月から始まった第三期中期目標でのテーマをうかがうとともに、量子情報通信の現在の状況について量子 ICT 研究室の佐々木室長に聞きました。



**Q:**この4月からスタートした第三期中期計画ですが、量子ICT研究室ではどのようなテーマを掲げているのでしょうか。

**佐々木:**量子ICT研究室も今年で発足から11年目。5年を一区切りとする中期計画はこの春で第三期を迎えています。量子ICT（量子情報通信技術）は、究極の低電力・大容量化を実現する量子通信と絶対に盗聴されない量子暗号の2つの柱からなります。第二期では「量子通信の基盤の確立」と、「量子暗号ネットワークの試験運用」の2つをテーマに取り組みました。量子通信技術では、低電力・大容量化の重要な新原理を世界に先駆け実証できました。また、都内の敷設ファイバ網上に量子暗号ネットワークの試験運用システム『Tokyo QKD Network』を構築し45km離れた拠点間の動画転送の完

未来ICT研究所  
量子ICT研究室 室長

## 佐々木 雅英

博士(理学)

### 略歴

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。

### 研究分野

量子情報通信の理論及び実証実験、光波光子統合制御、光子検出技術、量子暗号ネットワーク

### 近況

私たちの研究室は組織変更と合わせて、この5月に新築の研究棟(小金井本部3号館)に引っ越しました。全面ガラス張りの建物は、窓から見える景色の半分以上が空です。大きな空を臨みながら新鮮な気持ちで、未来を見据えた研究に励んでいます。



全秘匿化を世界で初めて成功させました。第三期では、従来の成果をさらに発展させ、量子通信に欠かせない量子受信機のプロトタイプを開発し、従来の理論限界を超える大容量通信の本格実験に着手したいと考えています。量子暗号技術では、装置をさらに改良し、実社会での実用に耐えうる信頼性の確保や低コスト化を目標に、産学官連携による実証実験を積み重ねていくことを考えています。

**Q:量子力学を情報通信に活用すると、どうして通信の大容量化が可能になるのですか。**

**佐々木:**光通信には光源としてレーザーが専ら使われていますがこれも基はと言えば、量子力学を基礎に発明された技術です。そして光ファイバーはレーザー光の伝送路として考案されており、その意味では量子力学の活用は既に始まっているのです。例えば水道の蛇口

量子力学は2つの基本原理、不確定性原理及び重ね合わせの原理で動いている。例えば、量子力学のルールで野球をやるととても奇妙なことになるが、代わりに計算や通信をやったら革新的な情報通信が実現できることがわかってきた。

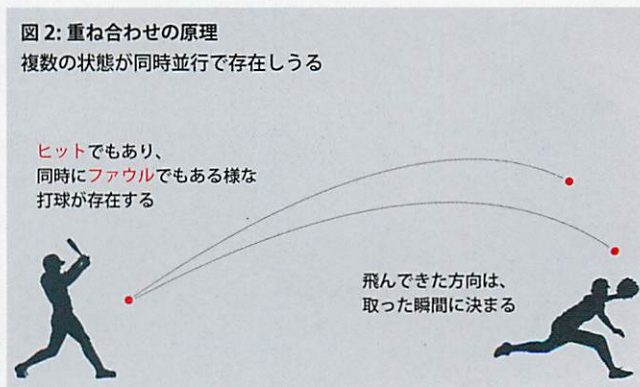
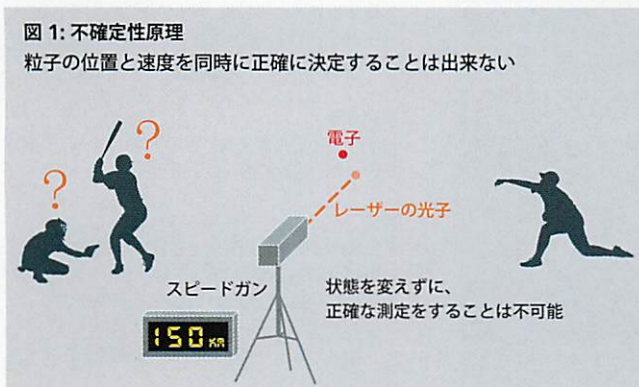
を絞ると水滴になりますが、レーザー光も同じで、光源を絞るとやがて光子と呼ばれるそれ以上細かくできない光の粒になります。レーザー光とはその多数の光子が理路整然と並び、全てが一体となって放出されている現象です。実際、このきれいに揃った光子の束「レーザー光」は、損失によって数は減りますが理路整然とした整列は崩れることなく保たれますので、最も長距離伝送に適した光の状態です。現在の光通信は、この届いたレーザー光をそのまま束で受信しますが、量子通信では届いた光子の束をまず1個1個の光子にまで分解し、それから細かく束ね直して伝送過程で起こったエラーを従来よりうまく修正することで、光子当たり最大の情報を取り出します。これによって、今までと同じ光量でより多くの情報を送ることができるのです。

**Q:そもそも量子力学とはこういった物理法則に従っているのでしょうか。**

**佐々木:**量子力学はもともと原子スケールの超微細な現象を捉えるための法則で、粒子は位置と速度を同時に測定できないという「不確定性原理」(図1)と、

粒子は複数の状態を同時に維持できるという「重ね合わせの原理」(図2)という二つの原理から成り立っています。我々が暮らす日常世界では経験することのない現象です。なかなか実感できませんが、原子スケールではこれが普通のことなのです。なぜそのようなになっているのかは私もよくわかりませんが、100年以上にわたる研究で正しいことが確かめられています。我々研究者は、特殊な装置を組み立て、それを用いて何度も何度も実験を繰り返すことで量子力学の世界を実感し操ることが出来ます。そして、量子力学を新しい情報通信へ活用するところまで到達しました。実際、低損失の光ファイバーが開発され、低雑音で高感度の光子検出が開発されたことで、光子を何10キロメートルも離れた場所へ送り届け、都市圏スケールで量子力学の法則を直接利用できるようになり、量子ICTが注目されるようになったのです。

我が国では10年以上、NICTが中心となり戦略的な産学官連携による研究開発を推進してきたことで、量子ICT分野では、世界を牽引する技術力と研究体制を築くまでになりました。





**Q: どうして光ファイバーの中では量子力学の法則が成立するのでしょうか。**

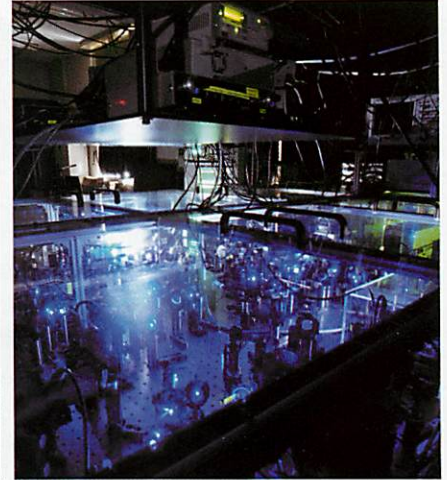
**佐々木:** それは、光ファイバーの透明度の高さが理由の一つです。例えば富士山の山頂で明かりを灯しても大気中の塵や埃が邪魔して東京までは届きませんが、光ファイバーを使うと光はいつも簡単に東京まで届けることができます。光ファイバーの中には塵も埃もないからです。つまり、光ファイバーを通る光子から見れば、東京と富士山間の距離も原子核と電子の隙間と同じくらい近い距離なのです。すなわち、光ファイバーを介して量子力学の法則が適用される原子スケールの世界を、東京から富士山までの巨視的スケールにまで引き延ばすことができるわけです。しかし、実際には光ファイバーの透明度の向上などの技術的な限界があり、太平洋を越えるような超長距離までは、まだ引き延ばせないのが現状です。これが光子1個1個で暗号化の鍵を運ぶ量子暗号の伝送距離の限界になっています。

**Q: その量子暗号技術というのはどういうものなのですか。**

**佐々木:** 量子暗号は、量子力学の法則のうち、「不確定性原理」の利用を軸にした技術です。これは粒子の位置と速度のような、ある物理量の対は同時に正確に測定することはできないというものです。それは、一方の物理量を測定するとその影響で粒子の状態が変化し、もう一方の物理量の値をかき乱してしまうためです。この仕組みをうまく利用し光子1個の状態に暗号鍵の情報を載せ、盗聴者が何らかの操作をすると



左：量子暗号の送信装置。黄色い線は光子が通る光ファイバー。  
右：光の重ね合わせ状態を作るための実験装置。



それが必ず発覚するようにして盗聴や改ざんを完全に見破るわけです。そして、盗聴されていない安全な鍵を毎回送るデータのサイズと同じだけ用意して暗号化することで絶対に解読されない暗号化が実現できます。今はこの完全性を実際の敷設ファイバー環境で実用するため、民間企業と共同で長期間の運用試験を行っています。

今後は、先ほど触れた光ファイバーでの伝送限界を超える新しい中継技術の開発や、多くのユーザーで利用して頂くためのネットワーク化技術の開発が課題です。

**Q: これからの量子通信技術はどういった展開をみせるのでしょうか。**

**佐々木:** 実用化目前まで来た量子暗号に対して、究極の低電力・大容量化に向けた量子通信はこれから実用化へ向けた技術開発が本格化します。その基礎理論はある意味行き着くところまで行き着いていて、与えられた送信エネルギーの下で人類が実現しうる通信性

能の限界まで明らかにしました。それは、1Wの送信エネルギーと現在の光ファイバー1本が与えられたとすると、例えば距離100kmの伝送では毎秒1ペタ(10の15乗)ビットという情報量です。これ以上の通信は不確定性原理のため実現できません。ですから低電力・大容量化にも越えられない限界があるわけです。一方、機能という点に関しては、量子テレポーテーションなどSFのような量子ならではの新しいネットワークパラダイムが今後次々に実現されてゆくでしょう。現在のICTは、物理学が許す膨大な可能性のほんの一部であり、今後も新しい夢を一つでも多く見つけ社会に役立ててゆきたいと思います。今後の発展のためには学際的な研究が重要になります。情報科学から物理学、工学など多くの領域の知見を包括できるのも量子ICTの懐の広さであり醍醐味でもあります。我々も分野を問わず多くの研究者とのセミナーや会議を積極的に行っていく予定です。



# KARC TOPICS

## 脳情報通信融合分野における共同研究に係る契約書及び協定書の締結について

大阪大学において6月29日、NICTと大阪大学の間で「脳情報通信融合分野における共同研究に係る実験棟の管理運営に関する基本契約書」の締結、またNICT、大阪大学及び国際電気通信基礎技術研究所（ATR）の間で「脳情報通信融合分野における共同研究に関する協定書」の締結がなされました。

前者は、NICTが大阪大学吹田キャンパスに設置する実験棟の管理運営を、効率的かつ安全と環境に配慮した方法で行うことにより、脳情報通信融合研究を円滑に推進することを取り決めた契約、後者は、世界のトップクラスの叡智の結集を図るとともに、効果的かつ効率的な産学官の連携により共同研究を推進することにより、国民生活の向上及び経済社会の発展に寄与並びに人類の福祉の向上に貢献することを謳った協定です。

また同日、実験棟建設予定地において安全祈願祭が鹿島建設等により取り行われ、宮原理事長、阪大鷲田総長等が参列、地鎮の儀がとり行われ、工事施工中の安全を祈願しました。

脳情報通信融合研究プロジェクトは、一昨年より3者で早期研究課題に着手していましたが、各組織の体制も整い、今後は本格的な研究に移行していくこととしております。また、3者として右図のロゴを使用することとしました。



阪大鷲田総長と宮原理事長  
(NICT-阪大間の契約書)



ATR 鈴木取締役、熊谷理事、  
阪大西尾副学長  
(NICT-阪大-ATR間の共同研究協定書)



## NHK「サイエンス ZERO」取材・放送報告

量子ICT研究室・ナノICT研究室・NICT委託研究による量子暗号技術の成果が「サイエンス ZERO (NHK 教育 7月2日(土) 0:00~0:30)」で取り上げられました。「サイエンス ZERO」は2003年より続く最先端の科学技術を紹介する番組です。今回は「ネット社会を守れ! 鉄壁の量子暗号」と題し、量子暗号の仕組みと研究開発の最前線が紹介されました。量子ICT研究室とNEC (NICT委託研究の受託企業)は、5月中旬から番組の台本作成に全面的に協力し、6月中旬には、NICT委託研究先の三菱電機、NTT、また協力企業のNECコミュニケーションシステムズ、及びナノICT研究室とともに最新の量子暗号装置を用いた秘匿TV会議の収録や秘匿スマートフォン、超伝導光子検出器について取材対応しました。番組では、暗号技術の概要紹介に続き、佐々木雅英・量子ICT研究室室長がスタジオ出演し、量子力学の世界が如何に不思議で魅惑的か、そして、それが単なる夢物語ではなく、実際に究極の暗号技術として利用段階に来ていることを、CGや取材映像を駆使して分かり易く解説しました。また、昨年NICTが主催した国際会

議 UQCC での伝送実験ライブデモの様子や、長距離化の切り札となる超伝導単一光子検出器について、王鎮主管研究員らが当機構で現在開発している最新鋭の装置を紹介しました。当機構による、素子開発からシステムまで一貫して量子暗号通信の研究開発をご紹介する良い機会となりました。

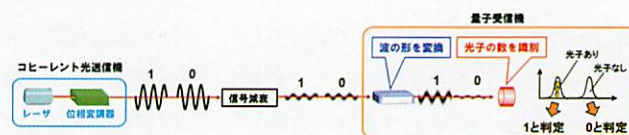


未来ICT研究所研究室にて  
取材を受ける王鎮主管研究員(左)

## 研究成果が著名な国際学術誌に論文掲載

量子ICT研究室と産業技術総合研究所、日本大学の研究成果が“Quantum receiver beyond the standard quantum limit of coherent optical communication”と題して、6月24日にPhysical Review Lettersにオンライン及び誌面で掲載されました。

この発表を受け、報道発表による成果発信も実施し、フジサンケイビジネスアイ、電波タイムズに掲載されたほか、日経プレスリリース、Laser Focus World Japanなど8つのウェブサイトで紹介されました。



量子受信機の構成と原理

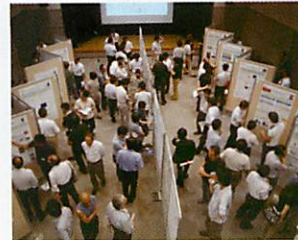


## 第4回研究交流会開催報告

7月8日(金)未来ICT研究所第一研究棟において、未来ICT研究所に所属する研究者を中心に研究交流会を開催しました。未来ICT研究所では新たな研究シーズの創出を目的とした研究交流会を毎年開催しております。本年度で4度目となりますが、今年も宮原理事長をはじめとする多くの幹部や他研究室からの参加者があり、ポスター発表の参加数も80点にのぼりました。未来ICT研究所では、この場の交流から既存研究室を支える個の研究や、新たな融合研究・領域横断的研究が生まれることを期待し、今後もこの交流会を研究推進の一手として継続する方針です。



研究奨励賞受賞者



会場の様子

## 未来ICT研究所施設一般公開2011開催報告

未来ICT研究所では毎年夏に施設一般公開を開催しております。本年は7月30日に開催しました。日ごろの研究活動のご紹介、近隣の方々との交流、科学技術に興味を抱いていただくことを目的としております。

また、当研究所の「ナノ」、「バイオ」、「脳」の研究者による講演会も開催しました。こちらは、今年で4回目になります。各研究者が、研究分野の紹介から最先端研究の報告まで、身近な事例を用いて解説させていただきました。午前、午後の2回の講演とも会場は、ほぼ満席となり、聴講者は熱心に聞き入れられており。当日回収したアンケートでは、講演回数の増加を望む声もいただきました。

未来ICT研究所では来年も夏に開催の予定です。またのお越しを心からお待ちしております。



プロジェクトブースの様子  
偏光板を使った「虹色ボックス」の作成



研究講演会の様子  
会場の様子

## 大阪大学基礎工学科との包括協定意見交換会の実施

大阪大学豊中キャンパスにおいて7月26日、NICT未来ICT研究所(神戸/KARC)と大阪大学基礎工学科(Σ)の間で、包括合意リニューアルに向けての意見交換会が開催されました。両者は研究協力に係る包括合意を平成17年度に締結し、共同研究や連携大学院といった様々な研究協力活動を双方の協力のもとに進めてきました。本年度はNICTの第三期中期計画開始と基礎工学研究科の設立70周年という節目の年にあたるため、これまでの包括合意の内容をリニューアルし、さらに強固かつ濃厚な協力関係を築くための

会合となりました。大阪大学から和田成生基礎工学副研究科長が、NICTから大岩和弘未来ICT研究所長が、それぞれの組織におけるこれまでの研究教育活動や成果、特色、理念、包括合意に基づく研究協力の取り組みや今後の方向性等について講演を行い、それをもとに、新たな連携推進の具体的な方策について活発な議論が交わされました。年内の新規包括合意契約実施に向けて基礎工学研究科内に作業部会を設置することで双方が一致しました。

## 受賞報告——王鎮主管研究員が文部科学大臣表彰科学技術賞を受賞、NICTフェローに

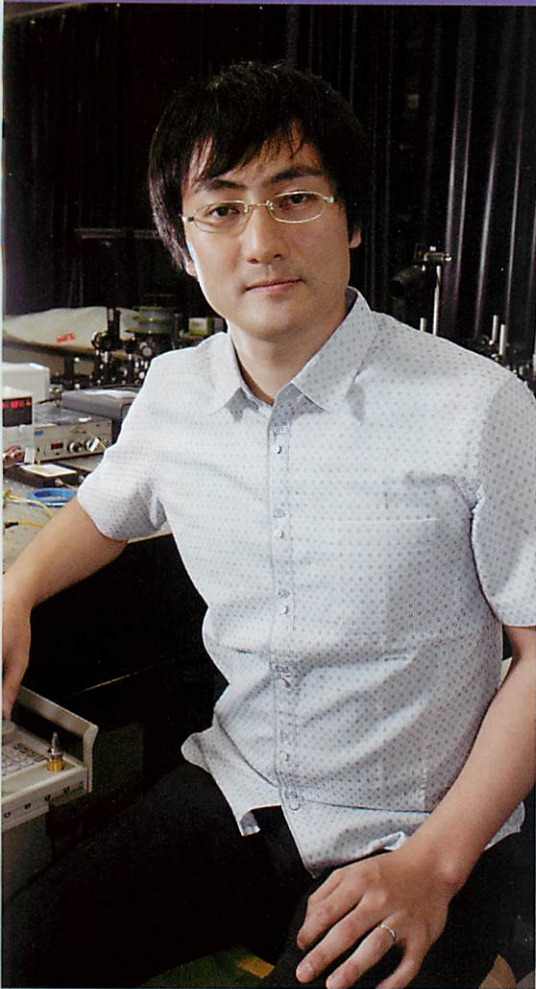
本科学技術賞は我が国の社会・経済、国民生活の発展向上等における最近の科学技術上の成果を顕彰するとともに、その成果に対する功績が顕著な個人あるいはグループに贈られる賞です。王鎮主管研究員が発表した、「窒化ニオブ系超伝導体によるテラヘルツ検出技術の先駆的研究」が評価され、今回の受賞となりました。また、NICTでは、職務として行った研究開発の業務において、特に顕著な業績があると認められる者にフェローの称号を授与することとしており、4月21日、王鎮主管研究員の「超伝導窒化ニオブ薄膜・

デバイス技術、及びそれを用いた世界最高水準のマルチチャンネル超伝導ナノワイヤ単一光子検出システムの開発」の功績が認められ、王鎮主管研究員はこの称号を受賞しました。



王鎮主管研究員(左)と宮原理事長  
(NICTフェローの授与)





超高周波ICT研究室  
専攻研究員

## 諸橋 功

博士(工学)

### 学歴

2003年 湘南工科大学大学院博士(後期)課程  
電気工学専攻修了

### 職歴

2003年 科学技術振興機構 戦略的創造事業  
(CREST) 研究員(産業技術総合研究所)  
2007年 1月より現職

### 近況

最近、めっきり運動をしなくなってしまったため、せめてもと思い、できるだけ階段を使うようにしました。6階まで昇るのは大変ですが、「足が細くなった」と言われたので、続けようと思っています。

# 光コムを用いた精密な テラヘルツ波信号生成を目指して

## 研究の背景

テラヘルツ波は、周波数が電波と光の中間に位置する電磁波であり、プラスチックや紙、布などを透過することから、非接触・非破壊検査に用いられつつあります。例えば、空港で飛行機に搭乗する前に行われるセキュリティチェックで、服の下に金属探知機では検出できない危険物を隠し持っていないかチェックするボディスキャナーとしてシカゴやロンドンなどの空港で実際に運用されています。日本でも導入のための実証実験が成田空港で行われました。また、禁止薬物や爆薬などの検出技術の開発も進められており、私たちの安全を守る技術として今後の発展が期待されています。他にも、絵画の分析にも使えることが示され、非常に注目を集めています。

このようにテラヘルツ波は、分光やイメージング、果ては医療・バイオなど、様々な分野で応用が期待されていますが、テラヘルツ波の発生

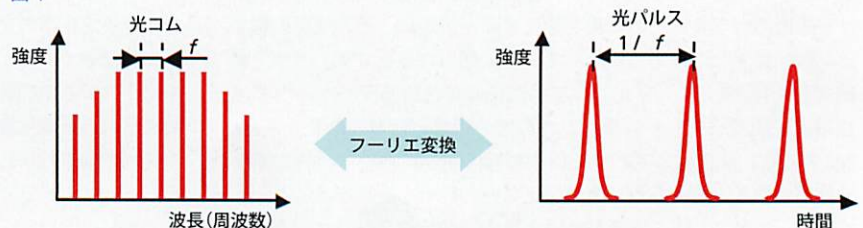
技術が今後の発展のための重要課題の一つとなっています。そこで私たちは、近年注目を集めている光周波数コムに着目し、それを用いたテラヘルツ波発生に関する研究を行っています。

## 光周波数コム

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のことを光周波数コム(または単に光コム)と呼びます。この光コムの登場により、時間や光の周波数をより高い精度で測定することが可能となりました。光コムは“光のものさし”として機能しますが、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ます。

光コムを発生する方法には大きく分けて二つの方法があります。一つはパルスレーザーを用いる方法で、もう一つは光変調器を用いる方法です。実は、光コムと光パルスは表と裏の

図 1





関係にあり、フーリエ変換と呼ばれる時間と周波数の変換により互いに結ばれています（図1参照）。つまり、周波数軸上で見れば光コムとなり、時間軸上で見れば光パルスとなります。したがって、光コムを作るといことは、光パルスを作ることとほぼ同じです（厳密には光の位相も考慮する必要があります）。光変調器を用いた方法は、パルスレーザに比べて精度や安定性、使いやすさの点で優れているため、私たちはこの方法を用いて研究を進めています。

### 光変調器型光コム発生器

光変調器に電気信号を加えると光の振幅や位相を制御することができますが、これに高周波信号を加えると、入力した光成分以外にいくつもの新しい成分が発生します。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びます。これは先に述べた光コムに他なりません。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原理で光コムを発生することができます。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が可能であることや、システム構成がシンプルのため、外部の影響を受けにくいという特徴を持っています。しかし、そのままでは各成分の強度がばらばらな光コムしか発生できません。そこで、光変調器に二つの高周波信号を入力することで平坦な光コムを発生できる技術に着目しました。これにより、各成分の

図2

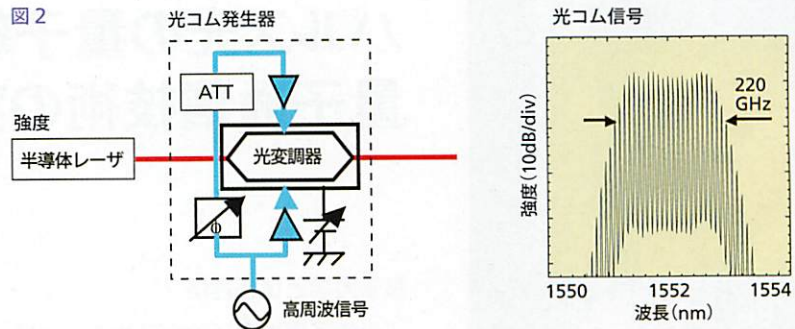
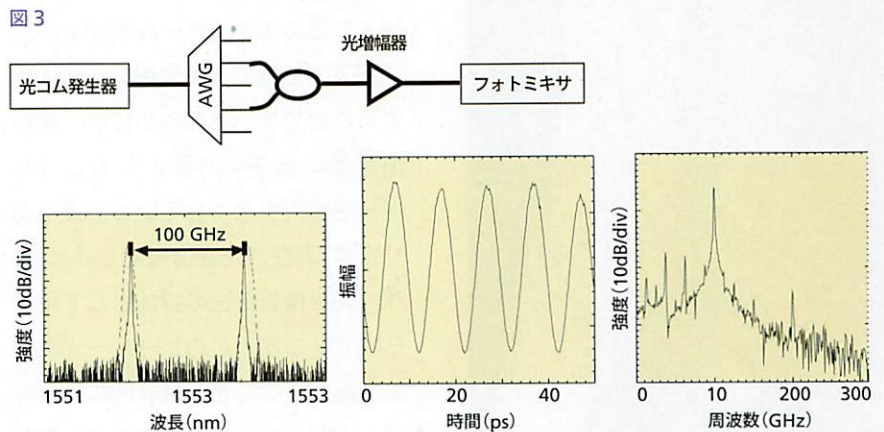


図3



強度が一定な光コムを発生することができるようになってきました（図2参照）。

### テラヘルツ波の発生

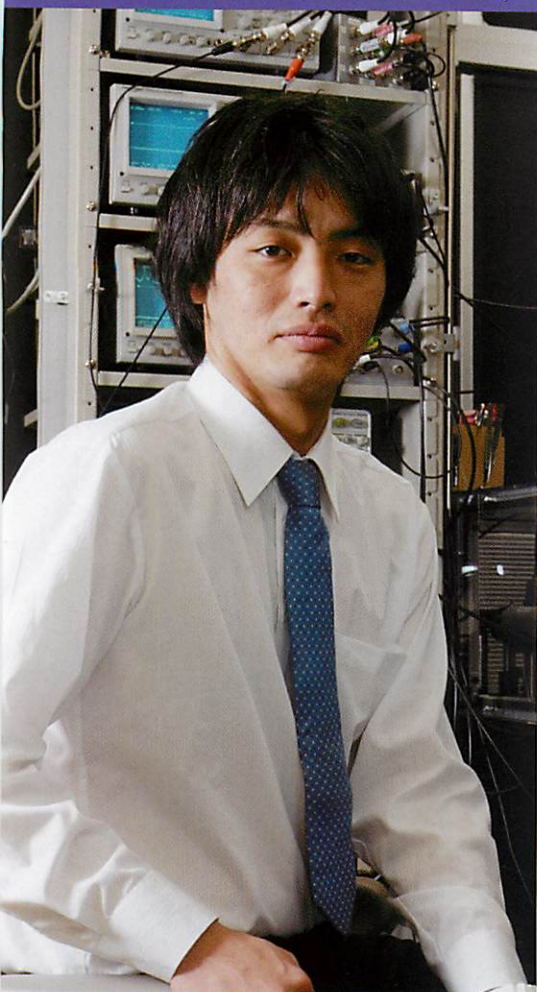
テラヘルツ波の発生には差周波発生法を用います。光混合とは2つの光を掛け合わせることで、2つの光の周波数差に対応した別の光を発生させる方法です。光コムから2つの成分を抽出し、フォトミキサと呼ばれる素子に入力することにより、テラヘルツ波を発生することができます。光コムから抽出する成分を変えることにより、発生するテラヘルツ波の周波数を簡単に変えることができるというメリットがあります。テラヘルツ波の周波数精度は光コム

の精度で決まるので、結果的に光変調器に入力した高周波信号で決まることになり、非常に高い精度が得られることとなります。現在はこの技術を用いて、100GHzの信号を高い精度で発生することが可能となっております（図3参照）。

### 今後の展開

光コムを用いることで、非常に精度の高いテラヘルツ波を安定に発生することが可能なのは示せたので、今後は発生できるテラヘルツ波の高周波化や様々な応用研究を進めたいと考えています。冒頭で述べた非破壊・非接触イメージングに限らず、高速無線通信への応用も行っていきたいと考えています。





量子ICT研究所 量子ICT研究室  
専攻研究員

**衛藤 雄二郎**

博士(理学)

#### 学歴

2006年3月 学習院大学大学院自然科学研究科物理学専攻博士前期課程修了  
2009年3月 学習院大学大学院自然科学研究科物理学専攻博士後期課程修了

#### 職歴

2008年4月 学習院大学大学院自然科学研究科物理学専攻平野研究室・学術振興会特別研究員DC  
2009年4月 東京工業大学大学院理工学研究科物性物理学専攻上妻研究室・学術振興会特別研究員PD  
2010年4月 (独) 科学技術振興機構ERATO 上田マクロ量子制御プロジェクト不確定性制御グループ・博士研究員  
2010年9月 現職

#### 近況

最近結婚しました。休日には奥さんと料理を作ったり、近所のスーパーへ出かけるのも楽しみです。閉店間際のスーパーは、野菜や総菜の蟹クリームコロッケなどが安くなるので、特に楽しみです。

## パルス光の量子雑音制御と量子通信技術の実用化に向けて

### 量子力学と情報通信

情報通信の究極的な目的の一つは、投入できるエネルギーが制限された状況下で伝送できる情報量を最大化することです。そのためには、単位情報量の伝送に必要なエネルギーを極力少なくしていく必要があります。現在の光通信技術では、レーザー光が情報伝送の媒体として用いられています。このレーザー光の強度を弱めていくと、最終的には「光子」と呼ばれる光1粒1粒の姿が現れてきます。光子は光の基本単位であることから、情報量あたりのエネルギーを最小化するためには、光子レベルの微弱な光を用いた情報伝送が必要になると考えられています。

それでは、単に既存の情報通信技術を発展させることで、光子レベルでの通信が可能になるのでしょうか?その答えはNOです。光子レベルの微弱な光では、量子雑音と呼ばれる量子力学由来の雑音の効果が顕著になります。量子雑音は、ハイゼンベルグの不確定性原理と呼ばれる量子力学の基本原則に由来するもの

であり、原理的に完全に排除することができません。(つまり技術的な不完全性に由来する雑音ではないということです。)雑音と名のつく通り、この量子雑音は情報を識別する際のエラーの原因となり、通信の質を劣化させる原因となります。一方、このような量子力学的性質を厄介者として捉えるのではなく、むしろ積極的に制御し利用しようとする技術が量子情報通信技術です。NICTの量子ICT研究室では、量子情報通信の新たな可能性を開拓し、既存技術を超える究極的な通信の実現を目指して研究を進めています。

本稿では、量子通信技術の実現および実用化に向けた私達の実験成果の一部について紹介します。これまで当量子ICT研究室では、連続光によりスクイズド光と呼ばれる量子的な光を生成し、量子情報通信分野における先駆的な実験を実現してきました。現在、更なる実用化に向けた第一歩として、学習院大学の平野琢也教授のグループと共同でパルス光と光導波路デバイスによるスク

光強度

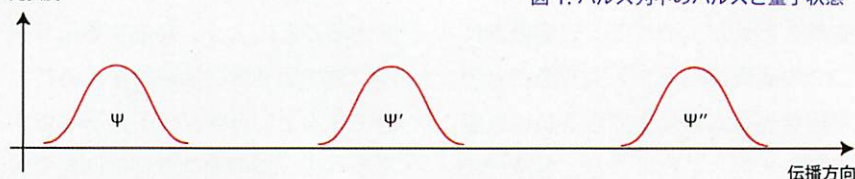


図 1: パルス列中のパルスと量子状態



スクイズド光の生成・観測技術の開発に取り組んでいます。以下では、まず量子情報通信におけるパルス光の重要性について説明します。次に、スクイズド光の持つ量子力学的性質と今回私たちが開発したスクイズド光の高効率検波技法について概説します。

### なぜパルス光を用いる必要があるのか？

連続光とは、強度が時間的に途切れることなく連続的に出射されている光を意味します。それに対して、パルス光とは細かい時間間隔で出射される光の事を意味します（図1）。パルス光は、パルス列中のそれぞれのパルスが時間的に分離されており、それぞれのパルスを独立な量子状態として捕らえる事が可能です。（図1中の $\Psi$ 、 $\Psi'$ 、 $\Psi''$ がそれに対応します。）一つの量子状態を時間的に分離された独立な一つのパルスという明確な形で定義できるため、パルス光は量子情報伝送の搬送波として適しており、実用化に対してはパルス光の使用が必要になると考えられます。

### スクイズド光と量子雑音制御

レーザーから出射される光の状態は、図2 (a) に示すようなある一定の揺らぎを持った非常にきれいな波（コヒーレント光と言います）となっています。この一定幅の揺らぎは、量子力学の不確定性原理に起因する量子雑音であり、光から完全に排除することは原理的に不可能です。し

かし、図2 (b) に示すように、ある特定の位相の振幅に対する量子揺らぎを圧搾（スクイーミング）することは可能です。その際、圧搾された位相と90度ずれた位相では、量子揺らぎは増大（アンチスクイーミング）します。このような量子雑音の圧搾された光をスクイズド光と呼びます。量子情報への応用という観点からは、高レベルのスクイーミングの生成と検波が重要となります。

### パルス光スクイーミングの高効率検波

通常スクイーミングの検出には、ホモダイン検出法と呼ばれる測定法が利用されます。ホモダイン検出では、強度の強い局部発振光と呼ばれる光とスクイズド光を合波し、それら二つの光の相対位相を適切な値に調整することで、スクイーミングが生じている振幅成分を観測します。ホモダイン検出は、局部発振光との干渉測定法であり、観測されるスクイーミングの大きさは局部発振光の時間波形に大きく依存することが知られています。

今回私達は、光パラメトリック増幅過程による波形整形技術という手法を開発し、最適な時間波形を持つ局部発振光を生成することに成功しました。波形整形により生成された局部発振光の時間幅はスクイズド光のそれより十分狭いため、パルススクイズド光との時間的な重なりが大きさが増し、スクイーミングの高効率検波が可能となります。この局部発振光を用いて、周期分極反転

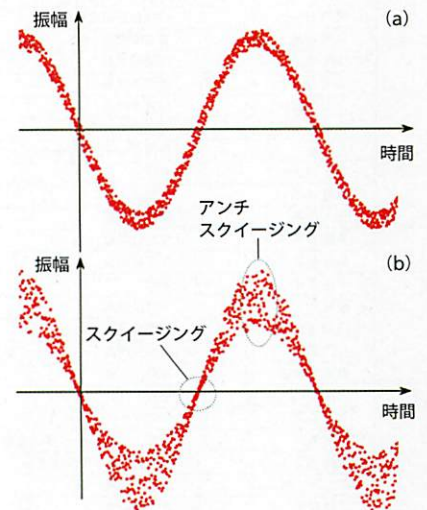


図2: コヒーレント光(a)とスクイズド光(b)

LiNbO<sub>3</sub>光導波路デバイスから生成されたピコ秒パルススクイズド光（波長1064nm）を観測し、約0.3倍まで圧搾された量子雑音の観測に成功しました。このスクイーミングの大きさは、光導波路デバイスを用いて観測された世界最大の値となっており、スタンフォード大学やオレゴン大学、学習院大学等で記録された値を大きく超えるものです。また、私達がスクイズド光を生成するために使用した光導波路デバイスは、光ファイバーとの結合が可能であることから、光ファイバーネットワークとの親和性が非常に高いという量子通信を実用化する上での大きな利点を持ちます。

### 今後の展望

今後、今回開発した装置を最適化し、パルス光を用いた量子状態制御技術を向上させることで、量子通信の実用化を目指していく予定です。



# 未来 ICT 研究所 STAFF 総覧

研究所付	大岩 和弘	研究所長	理学博士	
	寶迫 巖	副研究所長 / 室長	博士 (理学)	
	王 鎮	主管研究員	工学博士	
	柳田 敏雄	主管研究員	博士 (工学)	
	平岡 泰	主管研究員	理学博士	
	原口 徳子	上席研究員	医学博士	
	韓 太舜	R&D アドバイザー	博士 (工学)	
	久保田 徹	室長	博士 (工学)	
	澤井 秀文	総括主任研究員	工学博士	
	宮内 哲	総括主任研究員	医学博士	
企画室	片桐 祥雅	専攻研究員	工学博士	
	中尾 正史	専攻研究員	工学博士	
	山田 順一	専門研究員	工学博士	
	江田 英雄	招聘専門員	博士 (工学)	
	寒重之	特別研究員	博士 (学術)	
	金釘 敏	管理グループリーダー	—	
	山本 俊太郎	主任	—	
	鳥居 信夫	有期技術員	博士 (医学)	
	大山 良多	有期技術員	—	
	高橋 恵子	有期技術員	—	
	相田 有実	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 (工博)
		井口 政昭	有期技術員	—
		鈴木 与志雄	有期技術員	—
	ナノ ICT 研究室	大友 明	室長	Ph.D
寺井 弘高		研究マネージャー	博士 (工学)	
田中 秀吉		研究マネージャー / 専門推進員	博士 (理学)	
照井 通文		主任研究員 / 専門推進員	博士 (理学)	
井上 振一郎		主任研究員	博士 (工学)	
並井 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)	
山田 俊樹		主任研究員	博士 (工学)	
山下 太郎		研究員	博士 (理学)	
梶 貴博		専攻研究員	博士 (工学)	
丘 偉		専攻研究員	Ph.D	
牧瀬 圭正		専攻研究員	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	
バイオ ICT 研究室		上田 里永子	有期技術員	—
		三木 秀樹	短時間技術員	薬学博士
	小嶋 寛明	室長	博士 (工学)	
	山田 章	主任研究員 / 専門推進員	理学博士	
	丁 大橋	主任研究員	博士 (理学)	
	小林 昇平	主任研究員	博士 (工学)	
	榎原 齊	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)	
	岩本 政明	専攻研究員	博士 (理学)	
	小川 英知	専攻研究員	博士 (バイオサイエンス)	
	清水 洋輔	専攻研究員	博士 (農学)	
	西浦 昌哉	専攻研究員	博士 (学術)	
	平林 美樹	専攻研究員	博士 (工学)	
	古田 健也	専攻研究員	博士 (学術)	
	古田 茜	専攻研究員	博士 (理学)	
	松田 厚志	専攻研究員	博士 (理学)	
	Molnar Monika	特別研究員	Ph.D (Biology)	
	荒神 尚子	有期技術員	—	
	岡正 華澄	有期技術員	—	
	小坂田 裕子	有期技術員	—	
	梶谷 知子	有期技術員	—	
	堤 千尋	有期技術員	—	
	森 知栄	有期技術員	—	
	山根 美穂	有期技術員	—	
	吉雄 麻喜	有期技術員	—	
	高村 佳美	有期補助員	—	
樋口 美香	有期補助員	—		

脳情報通信 研究室	村田 勉	室長	博士 (薬学)	
	梅原 広明	研究マネージャー / 専門推進員	博士 (理学)	
	井原 綾	主任研究員	博士 (保健学)	
	加藤 誠	主任研究員	博士 (医学)	
	藤巻 則夫	主任研究員	工学博士	
	Peper Ferdinand	主任研究員	Ph.D	
	Leibnitz Kenji	主任研究員	理学博士	
	劉 国相	主任研究員	博士 (工学)	
	成瀬 康	研究員	博士 (科学)	
	魏 強	専攻研究員	博士 (工学)	
	下川 哲也	専攻研究員	博士 (工学)	
	篠崎 隆志	専攻研究員	博士 (科学)	
	曾 雄 崇弘	専攻研究員	博士 (工学)	
	鈴木 秀明	専攻研究員	理学博士・博士 (情報学)	
	春野 雅彦	専攻研究員	博士 (工学)	
	松林 淳子	専攻研究員	博士 (工学)	
	森戸 勇介	専攻研究員	博士 (理学)	
	矢倉 晴子	専攻研究員	博士 (保健学)	
	劉 健勳	専攻研究員	工学博士・博士 (情報学)	
	脳情報通信 研究室 (在けいはんな)	糸井 誠司	有期技術員	—
野界 武史		有期技術員	博士 (工学)	
藍田 美由紀		有期補助員	—	
今水 寛		副室長	博士 (心理学)	
内藤 栄一		研究マネージャー	博士 (人間・環境学)	
OZTOP Erhan		専攻研究員	Ph.D (Computer Science)	
杉本 徳和		専攻研究員	博士 (工学)	
Ganesh Gowrishankar		専門研究員	Ph.D	
宮脇 陽一		専門研究員	博士 (工学)	
吉岡 利福		専門研究員	学士 (理学)	
山岸 典子		短時間専門研究員	Ph.D	
玄 相昊		招聘専門員	博士 (工学)	
池上 剛		専門調査員	—	
中野 直		専門調査員	—	
古川 友香		専門調査員	—	
Ugur Emre		有期補助員	博士 (Computer Engineering)	
蔡 暢		有期補助員	博士 (情報学)	
Matthew Joseph de Brecht		有期補助員	博士 (情報学)	
超高周波 ICT 研究室 (小金井)		寶迫 巖	副研究所長 / 室長	博士 (理学)
		笠松 章史	研究マネージャー	工学博士
	齋藤 伸吾	主任研究員	博士 (理学)	
	関根 徳彦	主任研究員	博士 (工学)	
	東脇 正高	主任研究員	工学博士	
	安田 浩朗	主任研究員	博士 (工学)	
	小川 洋	専攻研究員	博士 (工学)	
	酒瀬川 洋平	専攻研究員	博士 (工学)	
	Patrashin Mikhail	専攻研究員	博士 (工学)	
	浜崎 淳一	専攻研究員	博士 (理学)	
	諸橋 功	専攻研究員	博士 (工学)	
	山下 良美	専門研究員	—	
	逸藤 聡	特別研究員	理学博士	
	原 紳介	特別研究員	理学博士	
	藤代 博記	特別研究員	工学博士	
	松井 敏明	特別研究員	—	
	量子 ICT 研究室 (小金井)	三村 高志	特別研究員	工学博士
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)	
藤原 幹生		主任研究員	博士 (理学)	
和久井 健太郎		研究員	博士 (工学)	
衛藤 雄二郎		専攻研究員	博士 (理学)	
Jonas Neergaard-Nielsen	専攻研究員	博士 (理学)		

(2011年8月1日現在)



独立行政法人 情報通信研究機構  
**未来 ICT 研究所**  
 〒 651-2492 兵庫県神戸市西區岩岡町岩岡 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



兵庫県神戸市  
 未来 ICT 研究所への  
 アクセス