

KARCFRONT

未来 ICT 研究所ジャーナル

Vol. **24**
2012
SUMMER

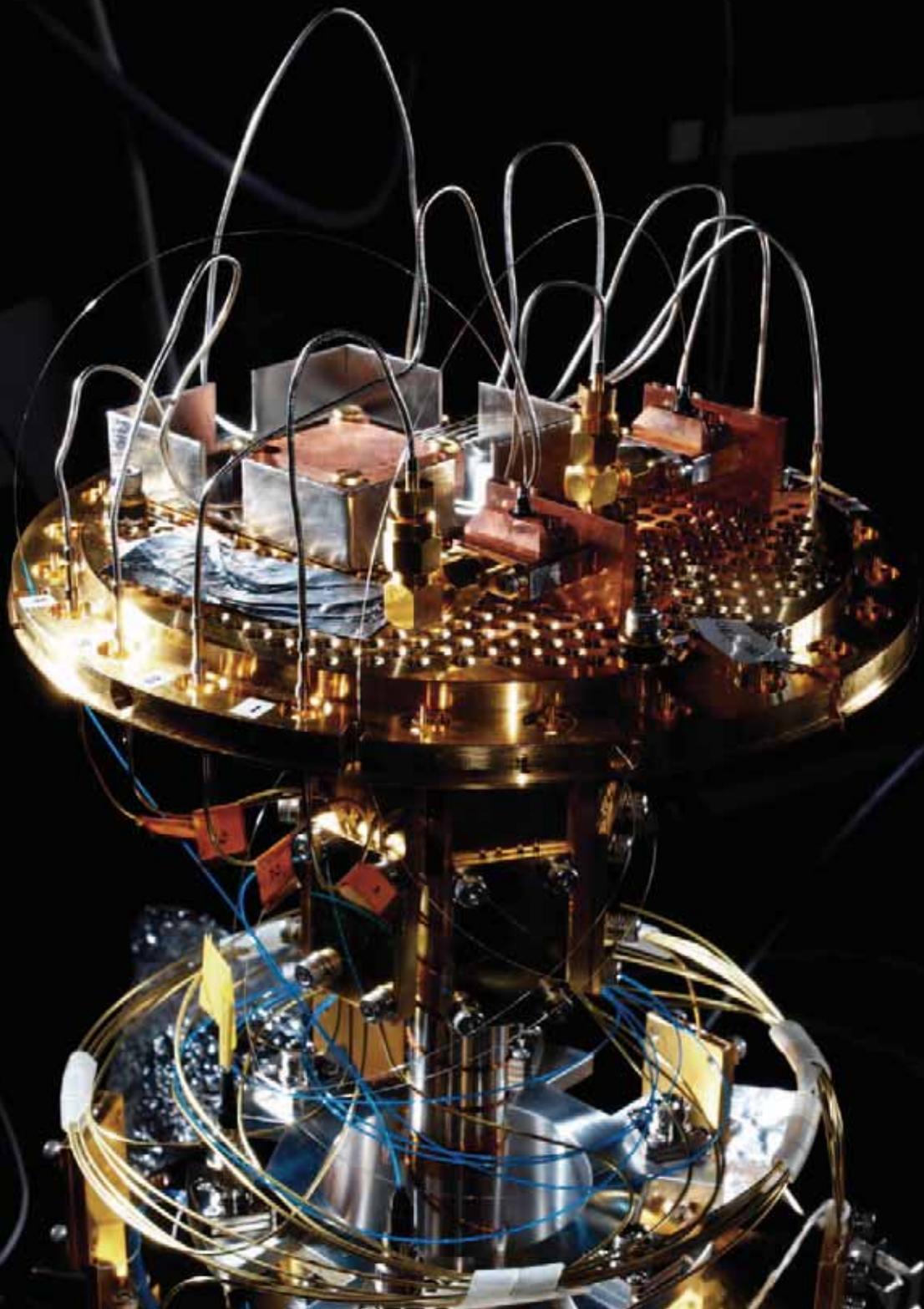


特集：超伝導研究・技術の展開

超伝導デバイス開発に見る基礎研究のあり方

単一磁束量子(SFQ)論理回路が
目指す情報処理デバイス

超伝導ナノワイヤによる
究極の光子検出技術を確立する





特集：超伝導研究・技術の展開1 3



成功と危機から学んだ研究者の道

超伝導デバイス開発に見る基礎研究のあり方

主管研究員 王 鎮 工学博士

特集：超伝導研究・技術の展開2 8



超伝導による究極の省エネルギー情報処理技術

単一磁束量子(SFQ)論理回路が目指す情報処理デバイス

研究マネージャー 寺井 弘高 博士(工学)

特集：超伝導研究・技術の展開3 11



超伝導による情報通信の技術革新を目指して

超伝導ナノワイヤによる究極の光子検出技術を確立する

主任研究員 三木 茂人 博士(工学)

TOPICS 14

報道発表「相同染色体の認識と対合の因子を発見！ 国際的科学誌『Science』に掲載」 / 未来 ICT 研究所の研究成果が雑誌に掲載 / 報道発表「タンパク質モーターによるメソスコピック構造の創発を発見、数理モデル化に成功(『Nature』3月22日号に掲載)」 / 報道発表「世界初！量子鍵配送とリンクした「ネットワークスイッチ」の開発に成功」 / 「DNA を利用した分子センサー」が日経産業新聞に掲載 / 受賞報告 三木主任研究員が文部科学大臣表彰 若手科学者賞、王鎮主管研究員が近畿情報通信協議会会長表彰を受賞

未来 ICT 研究所 STAFF 総覧 16

成功と危機から学んだ研究者の道

超伝導デバイス開発に見る基礎研究のあり方

未来 ICT 研究所では、旧通信総合研究所時代の 1989 年から超伝導デバイスを研究してきました。その研究を中心になって推進してきた王鎮主管研究員に、これまでの研究を振り返り、長年の経験から見えてきた成功への秘訣と研究者としての心構えをうかがいました。



Q：来日当時の超伝導フィーバーを振り返ってどう思いますか。

王：私が1985年に来日した頃、世界的な超伝導フィーバーが起きました。超伝導を研究する者にとっては天国のような時代で、どこへ行っても“金の卵”といった扱いでした。その火付け役となった物質が高温超伝導体「酸化物系超伝導体(YBCO)」です。

YBCOが発見される以前の超伝導体は、液体ヘリウム(沸点：約 - 269)で冷却して超伝導状態を保たなくてはなりませんでした。液体ヘリウムは資源的に希少で、高価でしたので、実用化には冷却コストの面でハードルが高かったのです。一方、YBCOは液体窒素(沸点：約 - 196)で超伝導状態を保てます。液体窒素ならば1リットルあたり100円程度と、冷却コストが液体ヘリウムに比べて大幅に低減でき、産業界では高温超伝導体による「第三次産業革命の到来」が期待されています。

未来ICT研究所
主管研究員

王 鎮

Wang Zhen

工学博士

略歴

1991年、長岡技術科学大学大学院工学研究科博士課程修了後、郵政省通信総合研究所(現NICT)入所。関西先端研究センター超伝導エレクトロニクスグループ、グループリーダー。2007年、未来ICT研究所ナノICTグループ、グループリーダー。2011年より現職。

近況

ここ10年、応用研究を引っ張って走りましたが、そろそろ基礎体力のリフレッシュが必要と思っている近頃です。テニスに励み、基礎体力を鍛えています。

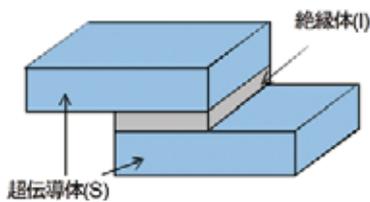


図1 超伝導トンネル接合の概念図。超伝導デバイスでは絶縁体を超伝導体でサンドイッチにした構造をもつ。2つの超伝導体の中で、超伝導電子がペアを作る距離よりも薄く絶縁体を作らなければならない。

ました。日本のほとんど全ての大手電機メーカーは高温超伝導の研究開発をはじめ、世界中で超伝導研究者が急増したほどです。

ところが、実際に私が研究対象に選んだのは酸化物高温超伝導体ではなく、低温超伝導体の窒化ニオブ(NbN)でした。

Q：当時、高温超伝導ブームの中、なぜその研究をしなかったのでしょうか。

王：高温超伝導体は新しい超伝導物質としてすばらしいものですが、実用材料として、特に私たちの研究分野である超伝導エレクトロニクスにおいては、いくつかの問題がありました。

まず、当時、私たちは、超伝導技術を使ってエレクトロニクス分野における超高感度な電磁波検出デバイスの開発と応用を目指していました。高温超伝導体は超伝導転移温度(T_c)が高く、高周波デバイスに適していると期待されていましたが、発見されてまもなく、YBCOに100ギガヘルツを超える高周波が入射すると、電気抵抗が一般的な素材である銅よりも大きくなることが判明し、高周

波デバイスへの応用に向かないことが分かりました。つまり私たちの研究目的にとって高温超伝導体は良い材料ではなかったのです。

もう1つの理由は、高温超伝導体は酸素を含む多元素物質であるため、当時の技術では、高品質の薄膜・デバイスを作製することは困難でした。特に、超伝導デバイスにはわずか1~2ナノメートルの界面制御技術が要求され、将来の技術進展を考えると、高温超伝導体のエレクトロニクス分野へ進出することはそう簡単ではないだろう、と判断しました。

20年後の今日、高温超伝導薄膜やデバイスの作製技術は進んできましたが、エレクトロニクスへの応用については期待するほどの進展は見られていません。入所当時、最先端の高温超伝導体を使わないという選択にはいろいろと圧力がありましたが、今から思えば、この判断に間違いはなかったのです。

Q：窒化ニオブはどこが超伝導材料として優れているのですか。

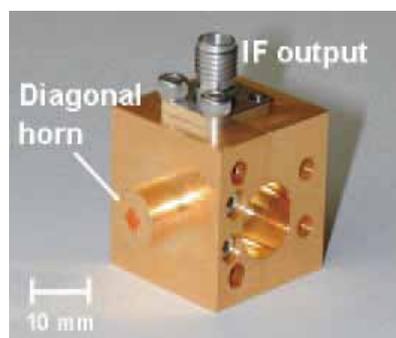


図2 超伝導 SIS ミキサーブロック。窒化ニオブトンネル接合を用いた SIS ミキサーチップが搭載され、中国科学院紫金山天文台の電波望遠鏡にも使われている。

王：高温超伝導が発見されるまで、超伝導デバイスには主にニオブ(Nb)を使っていました。ニオブは単元素の金属材料で薄膜化しやすい点や、超伝導コヒーレンス長¹が長いことためデバイスの作製が比較的容易だというメリットがありました。超伝導デバイスのトンネル接合は、超伝導体と超伝導体の間にごく薄い絶縁層を挟んで作ります(図1)。この絶縁層の厚さは、超伝導電子ペアがトンネル効果によって通り抜けできるようにコヒーレンス長よりも薄くしなければなりません。ニオブのコヒーレンス長は30ナノメートルあるので、当時の薄膜、デバイス加工技術でも高品質なトンネル接合を作ることができ、高感度な電磁波センサー、磁気センサーや高速デジタル回路などで応用されていました。

高温超伝導ブームのさなか、ニオブトンネル接合を用いた高感度電磁波受信機が300ギガヘルツのサブミリ波帯において量子雑音²限界までの高性能を達成し、電波天文観測や地球環境計測分野で実用化しつつあ



図3 2007年の大晦日、窒化ニオブ SIS ミキサーが搭載されている中国科学院紫金山天文台の電波望遠鏡で、オリオン座からの一酸化炭素スペクトルを検出した。世界で初めて窒化ニオブ SIS ミキサーが実用化された。

りました。野辺山の電波天文台でもニオブの超伝導体を使った受信機が実用化されていました。しかし、超伝導デバイスは、材料自体の性質で決まるギャップ周波数という値よりも高い周波数の電磁波を受信すると超伝導状態が解かれてしまいます。ニオブのギャップ周波数は700ギガヘルツですから、そろそろ限界が見えてくるころだったので、より高い周波数の電磁波を検出する超伝導デバイスの開発が急務だったのです。

そこで私たちが着目したのは、ニオブに比べて2倍高いギャップ周波数をもつ窒化ニオブでした。窒化ニオブは、基本的にニオブと同じ加工プロセスでデバイス、回路作製ができるので、高温超伝導が発見される前にポストニオブの超伝導材料として研究されていましたが、高温超伝導のブームで忘れられていました。もちろん、当時、高温超伝導体も考えましたが、前述したように薄膜、デバイス化の難しさなどから高周波デバイス材料には適していないと判断して、窒化ニオブによる薄膜、デバイス化の研究をスタートしました。

Q：どのような成果をあげられたのですか。

王：まず、デバイスや回路応用の基礎となる薄膜作製に着手しました。窒化ニオブはニオブより優れた超伝導特性をもっていますが、その特性は薄膜の結晶性に強く依存するため、安定した高品質な薄膜作製は困難でした。私たちは窒化ニオブと同じ結晶構造をもつ酸化マグネシウ

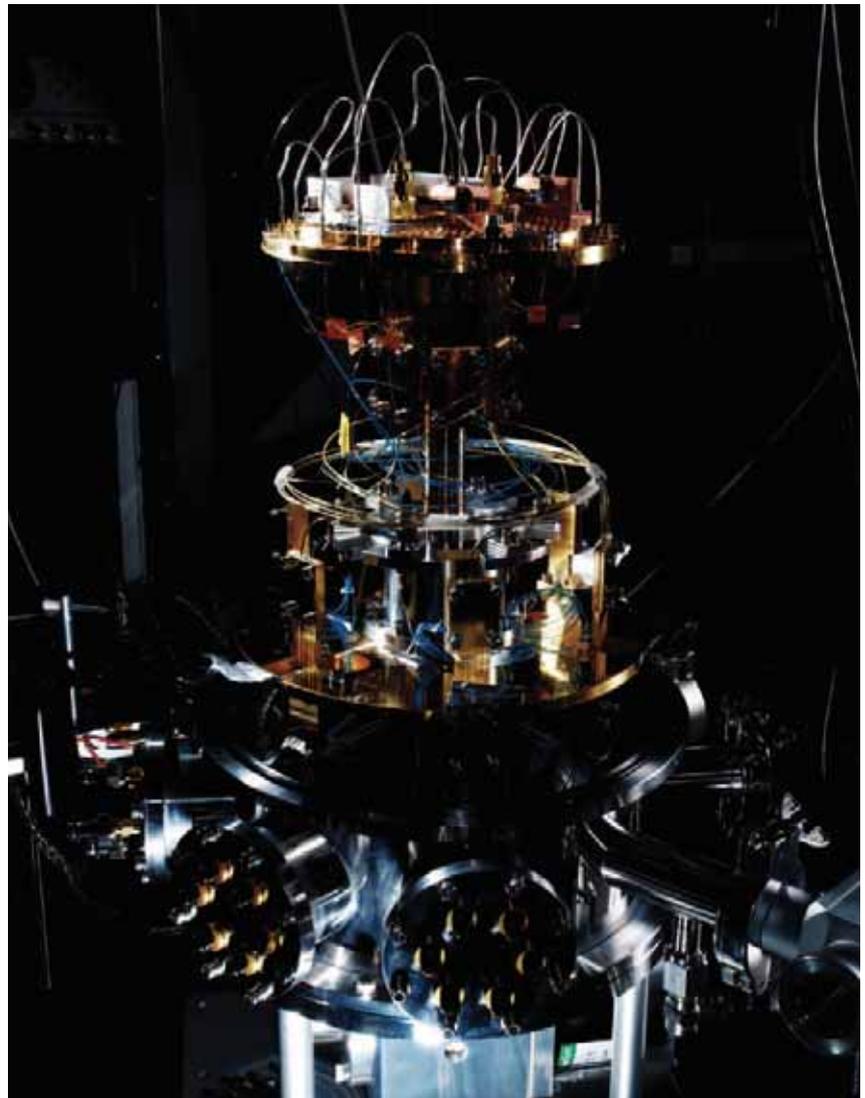


図4 単一光子検出システムの内部。光子1個を検出することができる超伝導デバイス。(単一光子検出器の詳細は11～13ページを参照)

ム(MgO)基板を用い、室温において窒化ニオブの単結晶薄膜を成長させる技術を開発し、高品質な窒化ニオブ薄膜を安定して作製することに成功しました。

次に、窒化ニオブのトンネル接合を開発しました。窒化ニオブのギャップ周波数はニオブより高いのですが、超伝導コヒーレンス長はニオブよりはるかに短く、5ナノメートル程度しかありません。そのた

め、トンネル接合を作る際に、絶縁層の厚さは5ナノメートル以下、実際には1～2ナノメートルの間で厚さが均一かつ穴がないように作らなければなりません。当時、世界では酸化マグネシウムを絶縁体にするのが一般的でしたが、トンネル接合の界面における酸化物と窒化物との相互作用と相互拡散を考えて、あえて格子の相性が良い酸化マグネシウムを選択せず、同じ窒化物の窒化ア

ルミニウム(AIN)を選ぶことにしました。そして、2年後の1993年に、世界で初めて窒化ニオブのトンネル接合(NbN/AIN/NbN接合)の作製に至ったのです。

その後、このトンネル接合を使った高感度・低雑音の電磁波デバイスであるSISミキサの開発に成功しました(図2)。1995年に、サブミリ波帯において世界で初めて低雑音動作を実証し、ポストニオブとして窒化ニオブ技術は低雑音受信機分野で注目されるようになりました(図3)。

1991年にスタートした窒化ニオブ技術は、十数年にわたって基礎研究に磨きをかけて、現在、NICTの超伝導研究のコア技術として、中期計画の柱である単一光子検出器(図4)や単一磁束量子回路(図5)、超伝導量子ビットデバイスなどの研究開発を支えています。さらに、窒化ニオブ技術は世界のトップランナー

として、国内外の研究機関との共同研究により、電波天文観測や量子情報通信、量子光学などの分野で広く活用されています。

Q:このような成果にもかかわらず、研究所存続の危機になったのはなぜでしょうか。

王:通信総合研究所関西支所(情報通信研究機構未来ICT研究所の前身)は、もともと基礎研究をするため1989年に設立された研究所です。当初の関西支所は、旧通信総合研究所にはなかった新しい研究分野ばかりで、それぞれの研究テーマが必ずしも情報通信と直接結びつくような研究をしなくてはならないという縛りはありませんでした。私たちは、限られたリソースのなかで、とにかく世界一流の研究をすること、優れた論文を書くこと、研究所の知名度を上げること、それだけで必死でした。しかし、独立行政法人化してま

もなく、10年以上も続けた基礎研究がいかに情報通信に役立つかと強く問われたのです。たしかに、私たちの研究は世界一流の成果を出していました。しかし、その成果は情報通信の発展に寄与するものでなければなりません。ここは情報通信の研究所なのです。

このように外部の環境、内部の環境すべてが急速に変化してしまいました。私たちは戸惑いを感じながら対応しているうちに、未来ICT研究所は存続の危機に立たされてしまい、情報通信に対する貢献が強く求められるようになったのです。

Q:どうやって危機から脱出できたのですか。

王:意識改革です。当時、私自身もそのような環境の変化をなかなか受け入れられずにいました。正直言って、転職することも考えました。しかし、よくよく考えてみると、たしかに基礎研究が自由にできる大学と国の研究機関は違うのです。特に、材料・デバイスの研究は出口なしで成り立つものではなく、私たち全員の意識改革が必要でした。

振り返ってみると、意識改革ができたからこそ、今の新しい道を拓くことができたので、存亡の危機に出合っただけよかったと思っています。もし危機がなかったら、私たちは別の研究をしていたかもしれません。

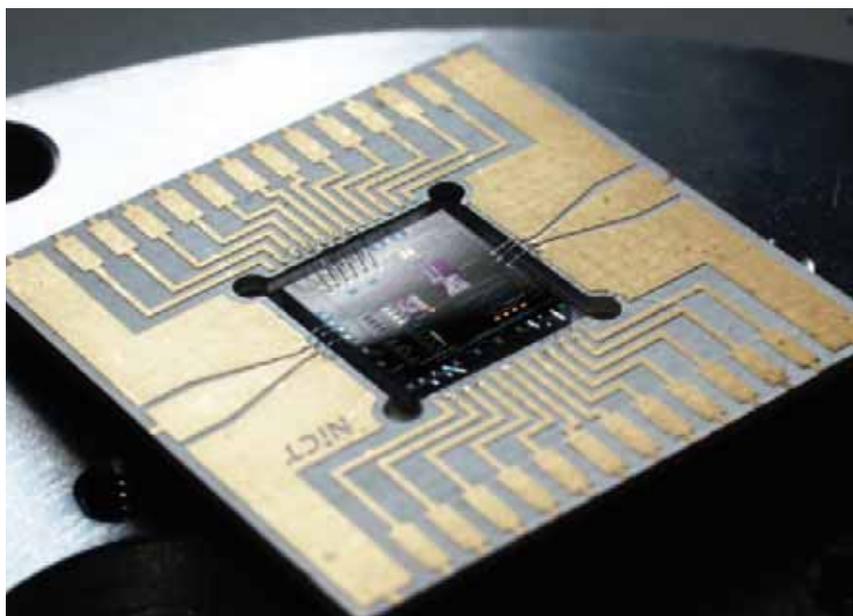


図5 超伝導単一磁束量子回路。超高速かつ超省電力のデジタル回路として期待されている。(超伝導単一磁束量子回路の詳細は8~10ページを参照)

こうした背景があって、私たちはそれまでの研究課題を整理し、15年間の基礎研究で蓄積した窒化ニオブ技術を活用して、機構内の連携により、量子情報通信を目的とした超伝導単一光子検出器やフォトニックネットワークに応用が期待される超伝導単一磁束量子回路の研究を始めたのです。

そして、新しく研究開発を始める際に決めた方針は、それまでのやり方とはまったく違うものになりました。若い研究員にはしばらく論文を書くことを考えないで、システムを作って実用化させることを求めました。研究員たちもこの重要性を理解してくれ、研究を始めてわずか3年で世界最高性能のマルチチャンネル超伝導単一光子検出システムの開発に成功し、量子暗号鍵配送のフィールド実証実験までこぎつけてくれました。結果的には、優秀な論文もたくさん発表できました。

これほど早くシステム応用が進められたのは、基礎研究を長年やってきた恩恵でした。もしも、研究所の存続を問われたときに超伝導の研究を止められていたら、NICTではこのような成果は出ていません。基礎研究は、いつ花が咲くかわかりません。しかし、咲いたときには大きな花になります。長い目でみて研究してもらうことは重要なのです。

Q：共同研究についてこだわりがあるようですが。

王：今までいろいろなところと共同研究をしてきました。その中で学び、



図6 窒化ニオブを用いた超伝導デバイス技術の歩み。高温超伝導研究が盛んな中、あえて低温超伝導研究にこだわり、次々に研究の成果が実を結んでいる。

信念としているものがあります。共同研究の相手は自分より“強い”人でなくてはなりません。強いとは、自分よりも賢い、自分より優れた研究をしている人です。仲間意識で共同研究者を選んではいけません。

そして、共同研究者との間では互いの信頼関係をいかに築くかが重要です。これは成果が出てきたときに特に重要です。これらの条件をクリアしないと、良い共同研究にはならないし、長続きもしません。成功するか、失敗するか、すべてここにかかってくるといっても過言ではありません。信頼関係を築くには、まず、同じモチベーションをもって役割分担を明確にすることが大事です。

そして、何か問題が起きたときには、自分の立場から主張するのではなく、相手の立場に立って考えることが大切です。難しいことですが、今は個人研究の時代ではなく、いかに共同研究をこなせるかも研究者の資質として問われる時代です。

Q：最後に、何か若い研究者に向けたメッセージがありますか。

王：研究者にとって、新しい研究をスタートすることは勇気がいることですが、自分がやってきた研究をやめるという決断を下す勇気も必要です。それがなければ新しいものは生まれません。

これからも社会情勢の変化や組織のミッションにより、研究プロジェクトの見直しや再編を強いられることがあるかと思いますが、このような不断の意識改革が研究者には必要です。意識を変えるには、自分の研究だけでなく、常に世の中の流れを知っていなければなりません。

NICTも日本も世界も刻々と変化しています。もちろん、流れに流されることとは違います。研究者は自らの視点によって独自の研究をするべきです。しかし、流れを知らないで自分だけが取り残されることがないように、周りに無関心であってはいけないのです。これが研究所存続の危機を経験した私からのメッセージです。

1 超伝導コヒーレンス長：超伝導における電子ペアの空間的広がりを表す長さの尺度。
2 量子雑音：量子力学の不確定性原理に基づく量子ゆらぎに由来する雑音。

超伝導による究極の省エネルギー情報処理技術

単一磁束量子(SFQ) 論理回路が目指す 情報処理デバイス

原発事故や石油価格の高騰によってエネルギー問題への関心が高まっています。この問題に対し、未来 ICT 研究所では超伝導技術を応用して高速かつ低消費電力の ICT 機器を実現する「SFQ 回路」を開発しています。SFQ 回路は「0」「1」信号の切り替えのエネルギー効率を飛躍的に高めることができ、その実用化が期待されています。



研究の背景

私たちの身の回りには電気を使って動くさまざまな機器があふれていますが、とりわけパソコンや携帯電話、スマートフォンといった ICT 機器は人々の生活に深く浸透しており、もはや ICT 機器なしに社会生活は成り立たなくなっています。

ICT 機器の中には、情報が集中する基幹系ネットワークのルーターや、データセンターなど大規模設備も含まれますが、例えば日本国内のデータセンターが消費する電力は原発2基分の発電量に相当する年間約100億kWhに達する勢いです。パソコンやスマートフォンといった端末機器を含めると、2020年には、ICT機器の消費電力だけで日本の全電力使用量の20%に達するという予測

ナノICT研究室
研究マネージャー

寺井弘高

Terai Hiroataka

博士(工学)

学歴

1996年 名古屋大学博士課程修了

略歴

1996年 NEC基礎研究所に勤務の後、1997年に郵政省通信総合研究所(現NICT)COE特別研究員。1998年に郵政省通信総合研究所入所、関西先端研究センター(現未来ICT研究所)に勤務、現在に至る。2000年応用物学会講演奨励賞、2004年超伝導科学技術賞、2010年日本学術振興会・146委員会賞受賞。

研究分野

電子工学、量子情報工学、超伝導エレクトロニクス

近況

ビールがおいしい季節になってきました。テニスで汗を流して、ビールを飲む。体にはよくありませんが、やめられません。近所の温泉銭湯に行くのも密かな楽しみです。温泉で汗を流したあとは...やっぱりビールです。

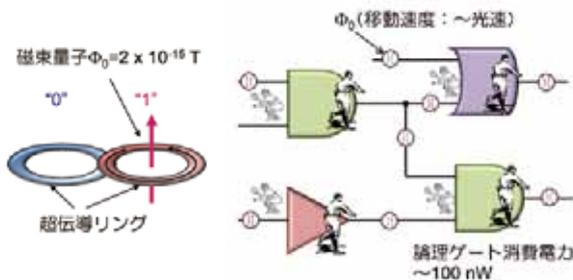


図1 SFQ回路の動作原理。
 (左) 超伝導リングに入ることができる磁束は Φ_0 の整数倍になる。 Φ_0 の有無を情報の“0”と“1”として論理演算が可能である。(右) SFQ回路の動作は論理ゲート間をボール(0)が光速で行き交うというイメージ。

もあります。これからは自然エネルギーへの転換と同様、ICT機器の消費電力の削減も重要課題なのです。

ICT機器の頭脳となっているのはCMOS¹に代表される集積回路であり、このCMOS集積回路技術のたゆみない進歩がICT社会を上げたといっても過言ではありません。しかし、CMOS回路の性能向上のよりどころである素子の微細化にも限界が見え始めており、今後の大幅な性能向上が難しくなっています。省電力へ期待が高まっているにもかかわらず、新たな技術革新なしに、ICT機器が消費する電力の増大を食い止めることは、今後ますます困難になっていくと考えられます。このような使命を達成するべく、私たちは「超伝導」をキーワードに、情報通信分野における技術革新を目指して研究に取り組んでいます。

消費するエネルギー (E_{sw}) は、約 0.1 ~ 1 fJ (フェムトジュール: 10^{-15} ジュール) 程度です。超伝導を利用した単一磁束量子 (Single Flux Quantum: SFQ) 論理回路は、CMOS回路の E_{sw} よりはるかに小さい 0.01 ~ 0.1 aJ (アトジュール: 10^{-18} ジュール) で動作するので、情報処理の省エネという観点から非常に魅力的です。

超伝導とは、ある温度以下で物質の電気抵抗が消失する現象です。超伝導体でリングを作ると、その中に入ることでできる磁束は、磁束量子 (2.07×10^{-15} T) の整数倍になります。図1に示すように、SFQ回路はこの磁束量子を情報担体として、論理ゲート間でボールをやりとりするようなイメージで計算します。磁束量子のエネルギーは極めて小さく、

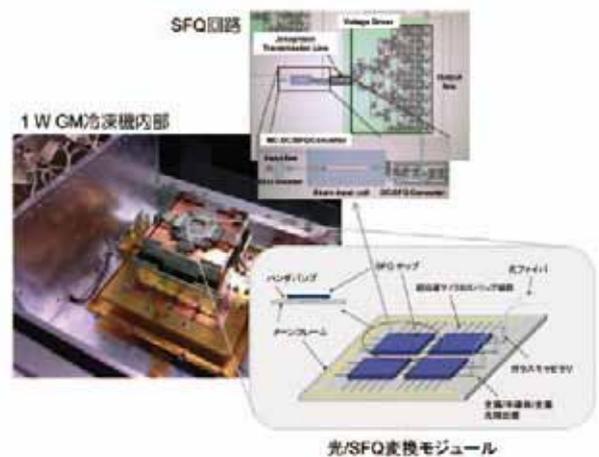
かつ光速に匹敵する速さでゲート間を動きます。そのため、SFQ回路の消費電力は極めて小さくなり、高速演算処理が可能です。実際、SFQ回路では100 ギガヘルツ(計算回数が1000億回/秒)を上回る動作が実証されており、ゲート当たりの消費電力も100 ナノワット程度にすぎません。半導体回路の中にも100 ギガヘルツ以上で動作するものもありますが、それらの消費電力は非常に大きく、大規模集積化はできません。それに対して、SFQ回路は高速性と省電力の両方の利点が大きな魅力で、将来の情報通信のキーデバイスとして注目されているのです。

一方、超伝導現象は極低温でしか発現しないため、冷却装置が必要です。「超伝導 = 巨大冷凍機」というネガティブなイメージをもつ人も多いと思います。しかし、最近の小型冷凍機の進化はめざましく、私たちが開発した超伝導単一光子検出器 (Superconducting Single-Photon Detector: SSPD) システムは、19 インチ (50cm弱) のラックに冷凍機を含めたすべてが収納できるほど

SFQ回路とは何か?

現在、情報のほとんどはデジタル情報として処理されています。すなわち「0」と「1」の世界です。この「0」と「1」とをできるだけ小さなエネルギーで識別することが、情報処理における省エネと言えます。最先端のCMOS回路においてトランジスタ1個が1回のスイッチングで

図2 光 / SFQ インターフェイス高速テスト用冷凍機システム。65 GHz 帯域まで信号伝送可能な同軸ケーブルを 16 本備えた冷凍機システム。マルチチップモジュール集積型の光 / SFQ インターフェイスを実装して、高速光応答のテスト可能。



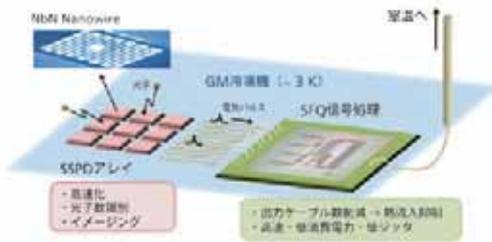


図3 SFQ信号処理によるSSPDの高性能化。SSPDを多ピクセル化することで、さらなる高速化、光子数識別、イメージングが可能になる。熱流入の原因となる信号ケーブル数を減らすため、高速、低消費電力で動作するSFQ回路により信号を処理する。

小さく、冷媒の液体ヘリウムは不要で、家庭用100 V交流電源で動作します。スイッチを入れるだけで、どこでも連続運転できます。データセンターや基幹系ネットワークルーターといった大規模設備では、発熱を取り除く空調にシステム全体の50%近い電力を費やしているのが現状で、このようなところにSFQ回路を適用すれば、冷凍機込みでも大幅な節電効果が期待できるでしょう。

研究開発の現状

日本、米国、欧州で活発な研究が行われた結果、現状では1万個を超えるジョセフソン素子(半導体回路のトランジスタに相当)を含むSFQ回路が動作する技術レベルに達しています。米国では無線基地局用のギガヘルツ帯デジタル受信機などの実用化研究も進んでいます。さらなる回路の大規模化が依然として課題になっています。大規模回路設計支援ツールや集積度向上を目指した多層配線プロセスの研究開発が進んでおり、極低温で回路をデバッグする技術などが開発されれば、設計や製作プロセスにフィードバックがかかり、動作可能な回路規模は飛躍的に向上するでしょう。

また、これまでのSFQ回路の研究

は、超伝導材料として超伝導転移温度(T_c)が9.5K(約-264)のニオブを用いて行われてきましたが、私たちのグループでは T_c が16K(約-257)の窒化ニオブを用いたSFQ回路の研究開発を進めています。ルーターやサーバーといった大規模システムでは、最終的に冷凍機込みでのエネルギー効率が重要となるため、冷凍機の電力・コストをできるだけ低減することが、実用化への鍵となるかもしれません。

一方、SFQ回路を冷凍機に実装する技術も重要です。高帯域な同軸ケーブルは熱の良導体でもあり、多チャンネルの高速な信号入出力は冷凍機への熱負荷という観点から困難です。光を利用した信号入出力はこの信号帯域と熱流入のトレードオフを解決するコア技術であり、私たちのグループでは、マルチチップモジュール(MCM)²構造に光検出器とSFQ回路を実装した独自の光入力インターフェースを開発しています。すでに1550 ナノメートル波長帯の光/SFQ変換動作を実証しており、図2に示す冷凍機システムでの高速動作実証を目標に研究開発を進めています。

今後の研究展開

基幹系ネットワークのルーターやサーバーといった大規模システムでは、数千万、数億のジョセフソン素子を集積し、それらをMCMとして冷凍機に実装、さらに高速な信号入出力を実現する必要があります。実用化までの道のりはまだまだ長いと

言わざるを得ません。企業が短期の収益を重視する中、NICTのような公的研究機関がこのような研究開発を牽引していく必要がありますが、それでも実製品を伴わない研究開発には限界があります。私たちは、将来的な大規模システムへの応用を見据えつつ、超伝導センサーと組み合わせた小規模SFQ回路の応用についても研究を進めています。

私たちのグループが開発しているSSPDは、多ピクセル化することでさらなる高速化、光子数識別、イメージングが可能になりますが、多数の信号ケーブルを介した熱流入がここでも問題になります。どうしても極低温での信号処理が必要ですが、SFQ回路はこのような用途にたいへん適しています。図3にイメージを示したように、多数の出力ケーブルをSFQ信号処理によって大幅に減らすことができます。SSPDとSFQ回路の両方の技術を併せもっている研究機関は、世界的にもNICTだけであり、信号処理まで含めた独自の研究開発により、世界最高性能のSSPDが実現できると考えています。

このような超伝導センサーと一体化した実製品の研究開発を通して、数千万素子規模のSFQ回路が動作可能な技術レベルにまで成熟すれば、ルーターやサーバーといった大型ICT機器を目指した大規模SFQ回路システムの研究に移行していくことも十分に考えられます。

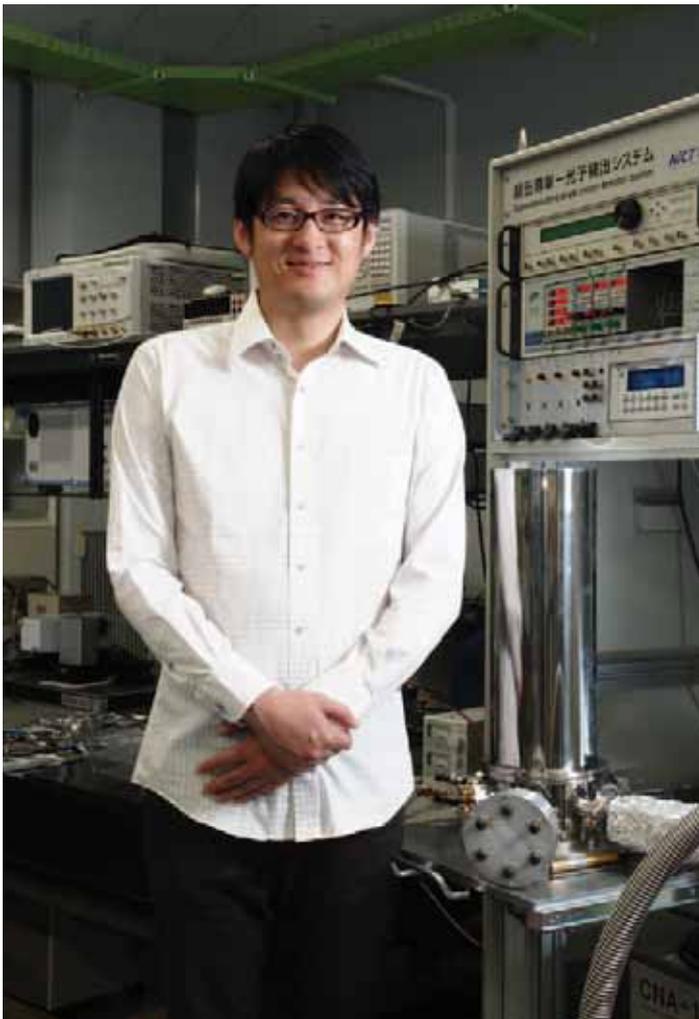
1 CMOS: Complementary Metal Oxide Semiconductor、相補型金属酸化膜半導体。

2 マルチチップモジュール: 基板の上にチップを複数個搭載したモジュール。

超伝導による情報通信の技術革新を目指して

超伝導ナノワイヤによる究極の光子検出技術を確立する

光子1個を検出できるデバイスの開発は、さまざまな最先端の研究分野から求められています。未来ICT研究所では、長年培ってきた超伝導技術を駆使して単一光子検出器を開発しました。情報通信をはじめ広い分野での実用化を目指し、その性能向上に努めています。



研究の背景

光の最小単位である光子を検出することは、量子情報通信技術や量子光学などをはじめとするさまざまな研究分野においてなくてはならない基盤技術の1つになっています。入射された光子を間違うことなく(低暗計数率¹⁾、確実に捕捉し(高検出効率)、高速に処理(高計数率)することができる検出器が、これらの応用研究において強く求められています。

一方、超伝導材料は、完全導電性、完全反磁性、磁束の量子化など、他の材料では見られないユニークな物性を示します。こうした特徴をうまく利用して、さまざまな高機能デバイスに関する研究開発が行われています。超伝導デバイスは、極低温まで冷却しなければならないことが欠点の1つとして捉えられがちですが、極低温環境は熱雑音が極めて小さ

ナノICT研究室
主任研究員

三木茂人

Miki Shigehito

博士(工学)

学歴

2003年 神戸大学大学院自然科学研究科博士後期課程 修了

略歴

2003年 科学技術振興機構戦略的創造事業(CREST) 研究員。2005年10月より現職

研究分野

電子工学、量子情報工学、超伝導エレクトロニクス

近況

最近、5歳になる娘のバレエの発表会を見に行きました。バレエを始めてまだ3か月ほどで、娘が一番年下でしたが、一番上手でした。そうです、親ばかりです。

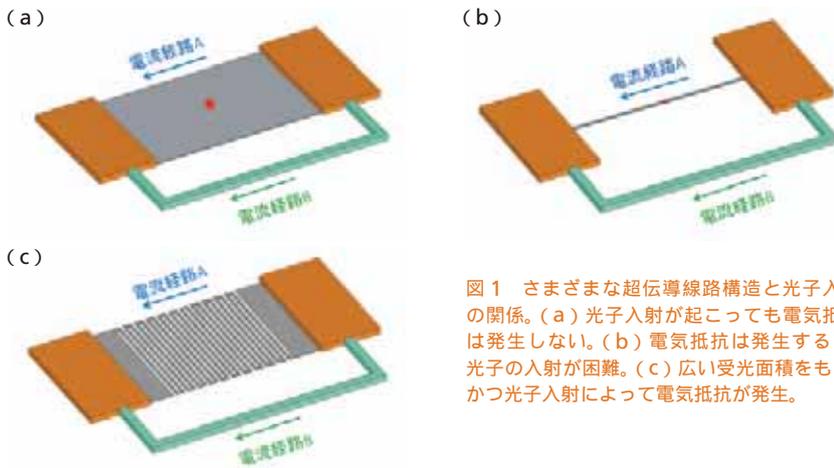


図1 さまざまな超伝導線路構造と光子入射の関係。(a) 光子入射が起こっても電気抵抗は発生しない。(b) 電気抵抗は発生するが、光子の入射が困難。(c) 広い受光面積をもち、かつ光子入射によって電気抵抗が発生。

く抑えられるため、他の材料では到達できない超高感度な「検出器」を作り出すのに最適であるといえます。私たちは、超伝導材料がもつユニークな物性と極低温下での極低雑音環境を利用して、超高性能な超伝導単一光子検出器 (Superconducting Single Photon Detector : SSPD) の研究開発を行っています。

超伝導で光子1個をキャッチする

超伝導体を超伝導転移温度 (T_c) と呼ばれる材料固有の温度より冷やすと、その電気抵抗はゼロになります。ここに何らかのエネルギーが入って超伝導状態が壊れると、有限の電気抵抗が発生します。このエネルギー入射による電気抵抗の劇的な変化をうまく利用すれば、光の最小単位である単一光子を高感度に検出することができるようになります。

図1(a)に示すような構造を考えてみます。図中のグレーの部分で表される超伝導線路に電流を流します。このとき、超伝導線路側を流れる電流経路Aとは別に、ある有限の電気抵抗をもった観測用電流経路Bを用意しておきます。超伝導線路は超伝導状態ならば電気抵抗はゼロなので、流れる電流は全て電流経路Aを流れます。このとき、光子が入射すると、

微小な空間において超伝導状態が壊れる領域(図1の赤色部分、ホットスポット)が発生します。このホットスポットの大きさに対して超伝導線路が広いと、電流はその両側の超伝導状態の部分を通るので、結局すべての電流は電流経路Aを流れたままになります。

超伝導線路をホットスポットによって「目詰まり(電気抵抗が発生)」させるためには、図1(b)のように、超伝導体を極細にする必要があります。この場合、ホットスポットの発生によって電気抵抗が発生し、電流経路Aに電流が極端に流れにくくなるために、電流は観測用の電流経路Bに迂回することによって、光子の入射を確認することができます。しかし、図1(b)のように、極細の短い超伝導線路だと、“的”が小さすぎ

て光子を細線に当てるのが困難になってしまいますので、図1(c)のように極細の長い超伝導線路を蛇行形状に配置すれば光子を当てるのも大きくなります。

極細の長い超伝導ナノワイヤを作る

先に述べたように、光子を効率よく検出するためには、極細の長い超伝導線路を作製しなくてはなりません。私たちのプロジェクトでは、窒化ニオブと呼ばれる超伝導材料について、世界最高水準の単結晶薄膜成長技術をもっています。この成膜技術を用いれば、膜厚4ナノメートルと原子の層でわずか数層程度の極薄の窒化ニオブでも超伝導性を示す薄膜を実現できます。

私たちは、これをさらに電子線描画装置やエッチング装置などを用いた極微細加工技術により、線幅100ナノメートル程度のナノワイヤに加工することに成功し、図2に示すようなSSPD素子を実現しています。このとき、SSPD素子内の1本のナノワイヤの総延長距離はナノワイヤ線幅の2万倍にあたる2ミリメートル

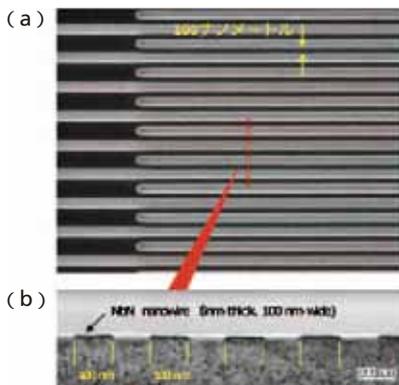


図2 超伝導ナノワイヤによる単一光子検出素子 (SSPD)。



図3 液体ヘリウム容器 (右) と SSPD システム (左)。

ルまで及びます。

「使える」検出器システムの開発

SSPDは超伝導転移温度以下まで冷やさないと動作しません。私たちがSSPD素子に用いている窒化ニオブ極薄膜は、超伝導転移温度が絶対温度で10K(約 -263)程度であるため、動作させるにはこれよりも十分に低い絶対温度4K(約 -269)以下まで冷やさなくてはなりません。超伝導検出器を極低温まで冷却する手法としては、古くから液体ヘリウムに浸漬する¹⁾方法が知られていますが、図3の右側に示すように、ヘリウム容器は大きく、液体ヘリウムの蒸発により冷却時間は制限されてしまいます。また、この液体ヘリウムを使用する方法はユーザーにとってどうしても敷居が高くなってしまいます。

そこで私たちは、SSPDシステムを実際に使用する側の量子ICT研究室と共同で、「使える」SSPDシステムを開発しました。「使える」SSPDシステムは液体ヘリウムを必要とせず、自動冷却が可能な機械式のギフォード・マクマホン(GM)式冷凍機を採用している²⁾ので、極低温の知識がなくても簡単に利用することができます。図3の左側に示すようにシステムの小型化に成功しており、このSSPDシステム1台で最大6個の検出器を搭載できます。開発されたSSPDシステムは、実際に量子ICTプロジェクトが推進している東京量子暗号鍵配送(QKD)ネットワークにおいて使用されており、その有効

性が実証されています。

検出器の性能向上

検出器の性能の向上は、SSPD開発の命題の1つとなっています。検出器の性能といっても、検出効率や暗計数率、タイミングジッタ²⁾など、いくつかの重要なファクターが存在します。ここではその中で最も重要なファクターの1つである、通信波長帯(波長1550ナノメートル)における検出効率を軸にして、性能改善に関する進展状況を紹介します。検出効率の進展をグラフに表したのが図4です。

2006年度からSSPDの研究開発を開始し、2007年にはじめて単一光子に対する素子応答を確認しました。しかし、この時点ではまだ検出効率について議論できるほどの値は得られていませんでした。翌年の2008年に冷凍機システムを開発し、デバイス性能も向上したことで、1~2%程度の検出効率を得ることに成功しました。競合素子である半導体アバランシェフォトダイオード(APD)と呼ばれる光子検出器に比べてまだまだ低い値でしたが、暗計数率がAPDに比べて圧倒的に低いことなどの特徴を考慮して総合的に評価すると、APDに対する検出器の性能の優位性を示すことができました。その後、さらなる構造改良によって2010年半ばには検出効率20%以上を達成し、検出効率だけで比較してもAPDを超える値を示せるようになりました。しかし、まだSSPDは性能改善の余地を十分に残してお

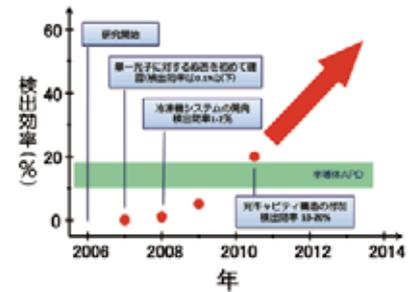


図4 SSPD 開発における通信波長帯(波長1550 ナノメートル)の検出効率の進展状況。

り、他の検出器では実現できない究極の性能を達成するために、日々開発を続けています。

超伝導単一光子検出器の広がり

これまでの研究開発によって、SSPDの性能の優位性や有効性を示すことができましたが、これはSSPDがもつポテンシャルの一端を示したにすぎず、今後の研究開発によりさらなる「広がり」が期待されます。例えば、これまでSSPDは主に通信波長帯(波長1550ナノメートル)における光子の検出を目的にしてきましたが、実はSSPDは、それよりも短い波長帯域、あるいは長い波長帯域においても有効です。また、現在のSSPDは光子の到来を検出することしかできませんが、今後の工夫により、到来した光子の数の計測や、光子が到達した空間的な位置をイメージングすることも可能になるような潜在力を秘めています。

検出器の性能や機能性についてこのような広がりが出れば、応用研究においてもいっそうの発展が期待でき、SSPDの重要性がさらに高まっていくだろうと考えています。

1 暗計数率：検出器が間違っず信号を発生する確率。

2 タイミングジッタ：光子の入射と出力信号発生とのタイミングのずれ。

TOPICS

報道発表「相同染色体の認識と対合の因子を発見！ 国際的科学誌『Science』に掲載」

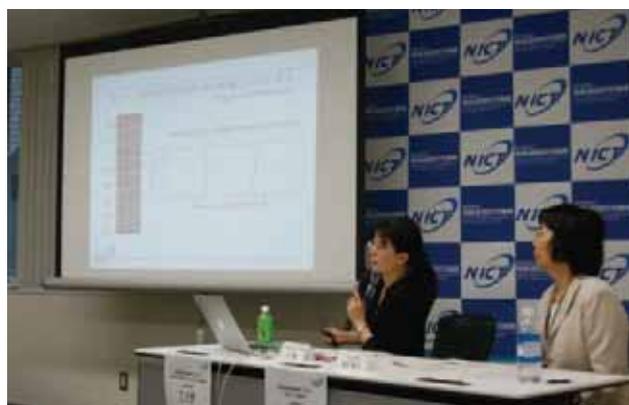
バイオ ICT 研究室の丁大橋主任研究員らは、分裂酵母において、遺伝情報を組み換える際に行われる相同染色体の対合という、生命の存続、継承や進化に極めて重要な意味を持つ生命現象を確かかつ安全に行う仕組みを新たに発見しました。

これまで、相同染色体の対合のメカニズムは明らかにされていませんでしたが、NICT は、この相同染色体の対合に、染色体の特定領域から転写される非コード RNA が重要な役割を果たしていることを明らかにしました。減数分裂における相同染色体の対合は、生物学や医学において非常に重要な研究課題であり、この分子機構の解明に向けて大きな前進となります。

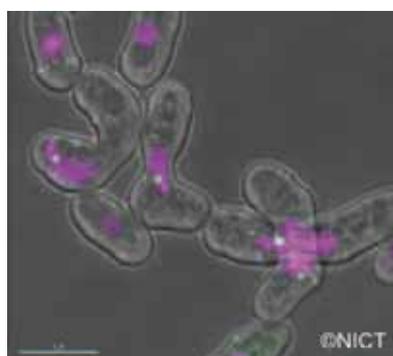
この成果は、国際的科学誌『Science』2012年5月11日号(電子版: 米国5月10日東部標準時間14:00)に掲載されました。

今後、今回発見した非コード RNA が相同染色体対合にどのように関わっているか、分子レベルの機構を解明するとともに、RNA などの生体分子を利用したバイオセンサーをはじめ、生物の持つ優れた特性を情報通信技術に応用することに取り組んでいきます。

また、この報道発表の内容は、5月11日の日経産業新聞(10面)、日刊工業新聞(22面)、神戸新聞(25面)などのほか、多数の電子メディアに掲載されました。



記者説明会の様子
左：丁主任研究員
右：原口上席研究員



独自のイメージング技術で
観察した染色体と RNA

未来 ICT 研究所の研究成果が雑誌に掲載

2012年4月2日発行の『日経エレクトロニクス』第1079号に、超高周波 ICT 研究室などの成果が掲載されました。この雑誌は1971年創刊の電子・情報・通信などエレクトロニクスすべての分野を対象とした、設計者向け情報誌です。

今回、掲載されたのは「未踏の『テラヘルツ波』電波と光から開発が加速」と題した12ページに及ぶテラヘルツ波についての解説記事で、国内の研究拠点の1つとして取材を受けました。QCL、THz コム(超高周波 ICT 研究室)のほか、NICT の研究成果が多数引用されました。

また、同号の論文ページでは、東脇正高主任研究員ほかの招待論文「酸化ガリウムをパワー素子に SiC よりも安く、高性能に」が掲載されました。現在、SiC、GaN よりも、高耐圧で低損失なパワー

素子を作製できる可能性があるとして、型 Ga₂O₃ に注目が集まっています。きっかけは、今年1月5日に東脇正高主任研究員らが報道発表した成果、「酸化ガリウム(Ga₂O₃) トランジスタ」を世界で初めて実現!」であり、その反響がうかがえます。本論文では、型 Ga₂O₃ の特徴や成果について詳細に紹介し、「2015年までに、口径4インチの基板と MOSFET を作製し、2020年までには、パワー素子として小規模な量産を開始したいと考えている」と具体的な目標を提示しました。



東脇正高主任研究員

受賞報告



受賞者：三木 茂人 ナノ ICT 研究室主任研究員
受賞名：平成 24 年度 文部科学大臣表彰若手科学者賞
授与団体：文部科学省

本賞は、科学技術分野において顕著な研究業績をあげた 40 歳未満の若手研究者に授与されます。今回は、通信波長帯超伝導ナノワイヤ単一光子検出器についての研究が評価され受賞となりました。



受賞者：王 鎮 主管研究員
受賞名：近畿情報通信協議会 会長表彰授与団体：近畿情報通信協議会

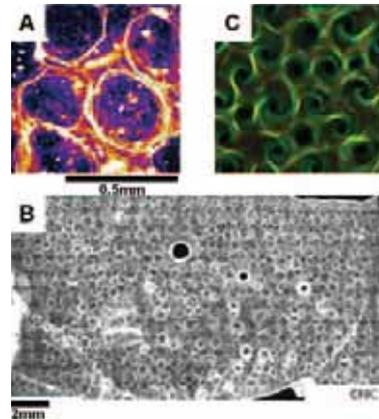
長年にわたり、超伝導現象を利用したデバイス開発に携わり、開発した窒化ニオブ超伝導電磁波受信機を世界で初めて電波天文観測へ応用することに成功するなど、情報通信技術の発展に多大な貢献を認められ、今回の受賞となりました。

報道発表「タンパク質モータによるメゾスコピック構造の創発を発見、数理モデル化に成功(『Nature』3月22日号に掲載)」

バイオ ICT 研究室と大岩和弘所長を中心とした国際共同研究チーム(NICT・愛知教育大学・東京大学・京都大学・CEA-Saclay)による研究成果が、国際学術誌『Nature』3月22日号に論文掲載されました。

タンパク質モータ・ダイニンが、長さ 15 マイクロメートルほどのタンパク質フィラメントや微小管を基板平面上で運動させる際に、微小管同士の衝突の繰り返しによって、直径数 100 マイクロメートルの動的な渦が格子状に配列して、センチメートルサイズの半規則な構造が創発されます。微小管の一時的な運動方向の偏りと、衝突の際の局所的相互作用を規定する単純なルールを仮定した数理モデルで、実験の結果を半定量的に再現することに成功しました。

集団化によって個々の短時間の記憶が集積する様子を示す単純かつ再現性のよい実験系の発見は、自己駆動粒子一般の集団運動を理解する上で重要なステップであり、高等生物(魚・家畜)を含む自己駆動粒子の集団運動様相の理解およびその制御につながる知見となるとともに、ボトムアップ的に構造形成を行う必要がある分子情報通信デバイス構築技術の実現に向けた重要な知見となります。



- A) 多数の微小管の動的相互作用によって創発した渦構造とその格子構造。渦の直径は約 0.4mm。
- B) 1cm x 2cm の実験槽全面を覆いつくすように形成された微小管の渦構造の格子。
- C) 棒状粒子の局所ルールと運動軌跡の曲率の分布を仮定して、シミュレーションして得られた渦構造格子。

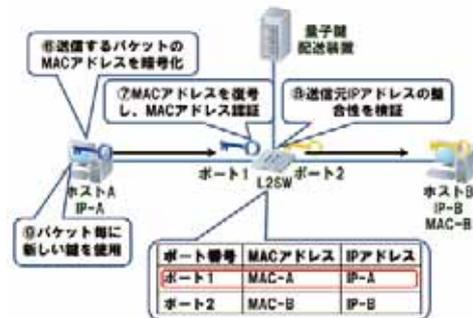
この成果は、同誌の News & Views でも取り上げられ、読売新聞(大阪版)・日経産業新聞・日刊工業新聞(3月22日)にも掲載されたほか、英国物理学会 IOP の発行する Physics World にも取り上げられています。

報道発表「世界初! 量子鍵配送とリンクした「ネットワークスイッチ」の開発に成功」

量子 ICT 研究室、セキュリティ基盤研究室および情報システム室は、完全秘匿通信を可能にする量子鍵配送システムの中継スイッチに、情報理論上“安全な鍵(共通乱数)”を与え、ネットワークの認証・暗号化において世界最高レベルの安全性を持つ「ネットワークスイッチ」を開発し、2012年3月6日これを報道発表しました。

現在、ネットワークを通しての情報漏洩が国家や国民の脅威となっています。今回の成果により、ローカルエリア間の通信での暗号の強化とネットワーク内部からのなりすましなどの不正アクセスに対して、耐性を強化することが可能となりました。

この成果は、日本経済新聞(3月5日11面)、日経産業新聞(3月7日7面)のほか3紙に、WEBでは8サイトで掲載されました。



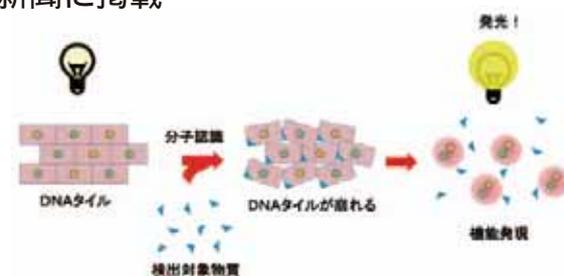
安全性向上の一例(概略図): layer2 スwitch に量子鍵を供給
<http://www.nict.go.jp/press/2012/03/06-1.html> より

「DNA を利用した分子センサー」が日経産業新聞に掲載

バイオ ICT 研究室は、DNA を利用したセンサーを開発し、この成果が 2012年3月21日の日経産業新聞(9面)に紹介されました。

「DNA タイル」と呼ぶ手法により、複数の DNA 鎖を編み作成した微小なタイルを自己組織化によって大きなタイル集合体にします。環境中に、DNA タイルと結合する標的物質が現れると、DNA がほどけてタイルが崩れます。するとタイルに埋め込んでいた DNA を設計図として、機能性 RNA が作り出されます。この RNA を発光させることで、標的物質の検出を可能にしました。また、標的物質が除かれると、ほどけたタイルは再び自然に絡まりあい、集合体となります。このため、DNA センサーは標的物質を繰り返し検出できます。

実験では、発光強度が3倍以上に高まり、標的物質が検出できることが明らかになりました。この分子センサーは環境中の特定微生物や病原菌の増加などのモニタリングに使用できます。



DNA タイルによるセンシング模式図

バイオ ICT 研究室は、さまざまな特徴を持つ DNA を活用し、新タイプのセンサーネットワーク構築に活用したいと考えています。また、発光ではなく化学物質放出機能を組み込むことなど、実応用に向けた検討を進めています。

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	
	真迫 巖	副研究所長 / 室長	博士 (理学)	
	王 錦	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)	
	小川 博世	客員研究員	工学博士	
	村田 勉	主任研究員	博士 (薬学)	
	企画室 (神戸)	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	工学博士
		片桐 祥雅	主任研究員	工学博士
泰 重之		特別研究員	博士 (学術)	
金訂 敬		グループリーダー		
山本 俊太郎		主任		
五十川 知子		主任		
黒田 康徳		職員		
猪木 誠二		有期技術員	博士 (工学)	
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 (物理学)
		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)
		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		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.	
牧瀬 圭正		研究員	博士 (理学)	
水沼 達郎		研究員	博士 (理学)	
瀧 直樹		特別研究員		
松田 真生		特別研究員	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 重永子		有期技術員		
富成 征弘		有期技術員		
三木 秀樹		短時間技術員	薬学博士	
バイオ ICT 研究室		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)	
	榊原 育	主任研究員	理学博士	
	田中 裕人	主任研究員	理学博士	
	近藤 裕次	主任研究員	博士 (理学)	
	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)	
	清水 洋輔	研究員	博士 (農学)	
	西浦 昌哉	研究員	博士 (学術)	
	古田 茜	研究員	博士 (理学)	
	古田 健也	研究員	博士 (学術)	
	松田 厚志	研究員	博士 (工学)	
	山本 孝治	研究員	博士 (理学)	
	岡正 華澄	有期技術員		
	小坂田 裕子	有期技術員		
	縦谷 知子	有期技術員		
	荒神 尚子	有期技術員		
	堤 千尋	有期技術員		
	森 知崇	有期技術員		
	吉雄 麻喜	有期技術員		
長瀬 有紀	有期補助員			
福田 紀子	有期補助員			
樋口 美香	有期補助員			
高村 佳美	有期補助員			

脳情報通信 研究室	梅原 広明	室長	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)	
	成瀬 康	主任研究員	博士 (科学)	
	藤巻 則夫	主任研究員	工学博士	
	Peper Ferdinand	主任研究員	Ph.D.	
	Leibritz Kenji	主任研究員	理学博士	
	劉 国相	主任研究員	博士 (工学)	
	安藤 博士	主任研究員	博士 (工学)	
	齋田 育宏	主任研究員	博士 (理学)	
	下川 哲也	主任研究員	博士 (工学)	
	鈴木 隆文	主任研究員	博士 (工学)	
	鈴木 秀明	主任研究員	理学博士・博士 (情報学)	
	春野 雅彦	主任研究員	博士 (工学)	
	山本 知幸	主任研究員	博士 (学術)	
	劉 健勳	主任研究員	工学博士・博士 (情報学)	
	東 高志	研究員	博士 (工学)	
	篠崎 隆志	研究員	博士 (科学)	
	寺園 淳子	研究員	博士 (工学)	
	Hanay Yusuf Sinan	研究員	Ph.D. (Electrical and Computer Engineering)	
	松本 敦	研究員	博士 (心理学)	
	森戸 勇介	研究員	博士 (理学)	
	渡邊 吉也	研究員	博士 (神経科学)	
丹羽 真隆	研究員	博士 (情報科学)		
早川 友恵	招聘専門員	博士 (心理学)		
眞波 歩	招聘専門員	博士 (工学)		
糸井 誠司	有期技術員			
野界 武史	有期技術員	博士 (工学)		
植田 智洋子	有期補助員			
藤田 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)		
Benjamin John SEYMOUR	特別招聘研究員	Ph.D. (Neurological Sciences)		
杉本 徳和	研究員	博士 (工学)		
水口 暢登	研究員			
Ganesh Gowishankar	専門研究員	Ph.D.		
吉岡 利福	専門研究員			
山岸 典子	短時間専門研究員	Ph.D.		
玄 相良	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			
吉川 友香	専門調査員			
蔡 暢	有期補助員	博士 (工学)		
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)	真迫 巖	副研究所長 / 室長	博士 (理学)	
	笠松 喜史	研究マネージャー	博士 (工学)	
	関根 徳彦	主任研究員	博士 (工学)	
	東脇 正高	主任研究員	博士 (工学)	
	安田 浩朗	主任研究員	博士 (工学)	
	小川 洋	主任研究員	博士 (工学)	
	Mikhail A Patrashin	主任研究員	博士 (工学)	
	諸橋 功	主任研究員	博士 (工学)	
	酒瀬川 洋平	研究員	博士 (工学)	
	浜崎 淳一	研究員	博士 (理学)	
	山下 良美	専門研究員		
	遠藤 聡	特別研究員	理学博士	
	大島 孝仁	特別研究員	博士 (工学)	
	佐々木 公平	特別研究員		
	原 紳介	特別研究員	博士 (理学)	
	藤代 博記	特別研究員	博士 (工学)	
	松井 敬明	特別研究員		
	三村 高志	特別研究員	工学博士	
	岸本 直	特別研究員	博士 (理学)	
	杉浦 洋平	短時間補助員		
	量子 ICT 研究室 (小金井)	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 (工学)	
金 鋭博		研究員	博士 (工学)	
Hugo Benichi		研究員	博士 (工学)	
和久井 健太郎		研究員	博士 (工学)	
玉木 潔		特別研究員	博士 (理学)	
衛藤 健二郎		特別研究員	博士 (理学)	
佐々木 悦郎		有期技術員		

(2012年7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

未来 ICT 研究所ジャーナル KARC FRONT
No.24 2012年8月8日発行 発行/大岩 和弘 編集/久保田 徹

兵庫県神戸市
未来 ICT 研究所への
アクセス

