

## INTERVIEW

民生有望技術——日本は何を？

# あらゆる悪天候下でも画像化 できる量子レーダカメラとは

玉川大学教授 量子情報科学研究所所長

広田 修 氏



現在もっとも注目されている新技術に“自動運転車”がある。実用化は近いといわれているものの障害物の検知などで全天候性を追求した場合、車載センサ技術等の面ではまだいくつもの壁がある。たとえば濃い霧の中を走行するには100m先の障害物を鮮明に画像化する必要があるからだ。そうした中、今春、ロンドンで開催された量子物理学の国際会議で玉川大学量子情報科学研究所の研究グループが画期的な研究成果を発表した。米国で開発された「量子計測原理」を転用することによって日本の研究者が「量子レーダカメラ」の設計法を確立したのだ。そのリーダーである広田所長に将来の可能性も含めて聞いた。

聞き手／本誌編集部

まず量子レーダカメラとはどのようなものなのか、読者の多くはあまり知らないと思いますので、広田先生がどのような経緯でこの研究を始められたのかということからお聞きしたいと思います。

広田 量子情報科学という学問は私が40年前に東工大時代に始めたのですが、この学問を広げるためには国際会議を作らなければと思います。玉川大学へ移ったときに世界初の量子通信の国際会議を立ち上げて20年間、今日までやってきました。私たちは新しい科学から魅力的な技術が生まれてほしいと願い、そして多くの科学者が努力した結果として生まれたテクノロジーが「量子コンピュータ」と「量子暗号」でした。

しかし残念なことに、この二つは実用化が難しい。原理原則は間違っていないのですが、実用に供するということになるとマイクロな量子現

象を使うときにスケーラビリティという実用機能化能力が重要となり、人間が使えるレベルまでもってくることはほぼ不可能でした。そんな意気消沈をしていたとき、ノースウエスタン大学の先生とずっと巨視的な量子現象を使って新機能を実現できることはないかと考えました。それが1990年代の後半です。それをDARPA（米国国防高等研究計画局）が支援してくれることになり、2000年から研究が始まりました。そのときのアイデアは、マイクロな現象を利用する量子暗号ではなくて、もっと巨視的な、普通のレーザ光を使えるような量子暗号で「Y-00型光通信量子暗号」と命名しました。それを長い時間かけて、今日、実用化までもってきました。

このほかにアプリケーションがないかということで並行して研究してきたのが「量子レーダ」です。これは2007年くらいからDARPAが

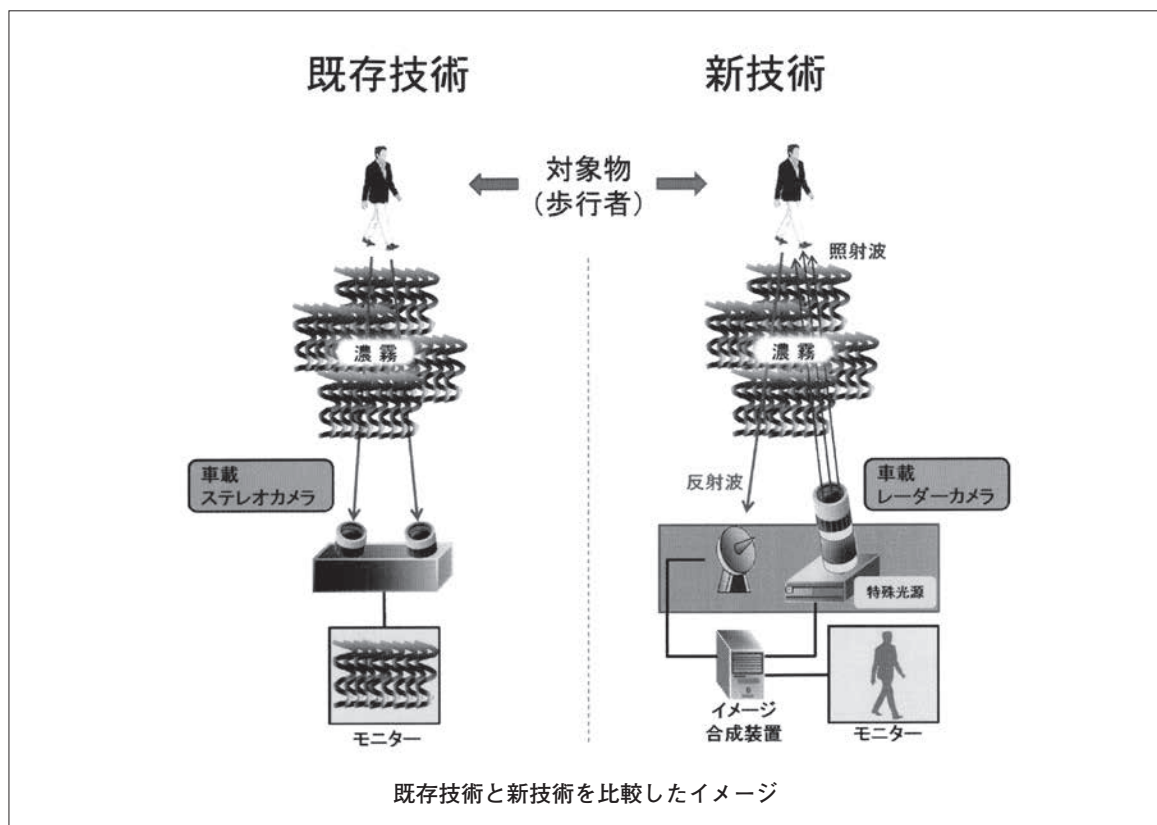
「量子センサプロジェクト」として始めたもので、中心となったのはMIT（マサチューセッツ工科大学）でした。内容は以下のようなものです。

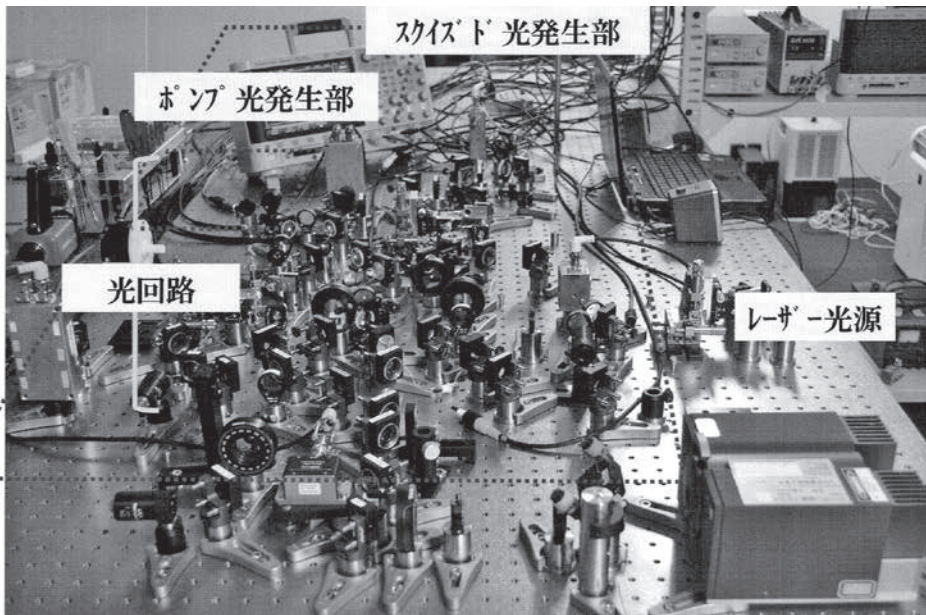
レーダ技術の中で、いままで機能的に不可能だろうといわれていた機能が量子エンタングルメント効果を使ってできることを、1970年代にソ連の物理学者が見つけていました。しかしソ連が研究していた頃には周辺技術が何もないので、実現はほとんど夢物語だったのです。ところが、2000年に入って量子情報科学が発展したので、それが技術体系化できるのではないかということになり DARPA が動き始めました。当時、私はノースウエスタン大学の客員だったので、5年プロジェクトに参加することになりました。年に1～2回くらいの割りで日本と行き来していました。

ご承知のように、MIT の電子科学研究所 (RLE) は第二次世界大戦中にレーダを開発し

た研究所です。その研究所長が、DARPA プロジェクトがスタートしたときに、これは絶対に自分の研究所でやると主張したのです。MIT は歴史的にもレーダ開発を成功させたという自負がありますからね。その人がリーダー格として研究は始まりました。

いままでのレーダはスキャンングすればターゲットの画像イメージもある程度取れますが、霧とか天候が悪いといきなり性能が落ちます。DARPA の開発目標のレーダの新機能としての謳い文句は「全天候型の画像情報検出技術がないか」になりました。そのときのキーワードは「量子エンタングルメント」という物理現象なのですが、それを使うことによって天候に左右されない画像レーダが原理的には可能なわけです。その一般的な理論を MIT の先生方が中心にまとめあげました。これは「量子計測原理」という名称で体系化されました。われわれも、この原理を使用して、実用性のある量子レーダ





量子モード・エンタングルメント原理実験装置

カメラを誕生させるための理論の体系にコミットしました。彼らは、われわれの論文を基に改良研究を始めているようです。

**その改良研究とは理論的な改良ということですか？**

広田 そうです。米国では、衛星から地上のターゲットをどんな天候下でも見たいということのためのプロジェクトだったと思います。衛星から地上は何百キロメートルもの距離がありますから、エンタングルメント光を何百キロメートルも下の対象に照射して反射波を得るということは性能的に非常にきついです。従ってDARPAとしては最初の目標である衛星からの監視カメラ技術に、この量子計測原理を適用するのは無理だという結論に達しました。

ただ、われわれ日本の場合は軍事に縛られることがないので、いろいろシミュレーションした結果、数百メートルであればこの機能が利用できるのではないかと考えたわけです。数百メートルの距離でも応用可能で、天候が悪くても画像が取れるとすれば、そのアプリケーションは第一に自動車です。ところが自動車用で何が難しいかという、まず自動車自身が動いて

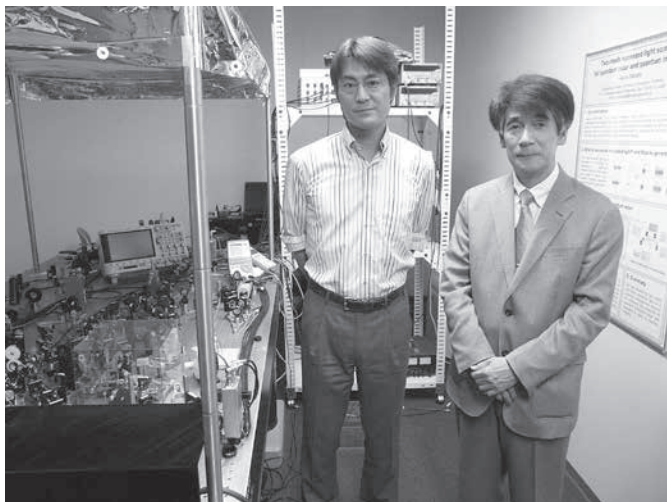
おりターゲットも動いているわけです。だからダイナミック（動的）な理論にしなければいけない。ところがDARPAでまとめた理論はスタティック（静止）な状況のものです。われわれは相対的に動くというダイナミクスを加味した、量子計測原理の理論構築をしなければならぬということの研究した結果、かなり汎用性のある結果を得ました。その成果をロンドンで初めて発表しました。

**通常の監視レーダですと、探知される方が動くことになります。その場合だと拘束条件はかなり楽になるのですか？**

広田 そうです、楽になりますね。制御機構をかなり簡単にできますから。ただ難しいのはエンタングルメントという情報は時間変動に対して壊れやすいので、量子通信理論の設計理論はかなり複雑になります。いまおっしゃったのはレーダのアンテナの位置が固定で、相手が動いているのを捉えるということですね。それなら少し楽になりますよ。

**具体的には何となくイメージできるのですが、ハード的にはどのような形になるのですか？**

広田 技術の基本要素というのが三つありま



研究室にて

す。まず光源技術ですが、エンタングルメントという物理現象をもった光源の製作、次は反射して戻ってくる光信号からその信号のもっている画像情報をコンピュータで計算するのですが、そのこのアルゴリズムの理論。これを画像再生処理と呼んでいます。第三はエンタングルメントという相関現象が伝搬過程において、どのような特性になるかをシミュレーションする装置です。それを使ってダイナミックな理論が実現できます。ただし、すべての要素が互いに補い合ってファンクションが連続的に機能するという設計にしなければならない。それをうまく開発できればいいのですが、まだそこまでできていません。理論だけができているという段階です。

**具体的な光源としてはどのようなものが考えられるのでしょうか？**

広田 光源は二種類ありまして、完全な量子をもったものと、そんなに強い量子ではない半量子の二つです。完全な量子を使えば当然精度が上がりますが、それを開発するのは大変時間がかかりそうです。

**それはレーザーを利用したハードウェアとなるのですか？**

広田 ハイパワーのレーザーを非線形結晶に入れて、パラメトリック現象を使うと出力の二つ

のビームが相互にエンタングル効果をもった光となります。この光源の開発は本学の政田教授がやっています。一方、普通のレーザーでも非常に弱い量子効果をもっています。これは擬似的に量子相関のような現象を起こすことができますので、原理実験用として開発中です。それは市販品のレーザーを買ってきてもやれますので、1年程度で完成かと思います。ただ、量子エンタングルメント光源というものの開発をするにはかなりのお金と人材投入が必要ですが、幸いなことに量子エンタングルメント光源の研究は長い歴史をもっていて、世界中の物理研究所で実験に成功しています。現在、どうやって小型化するかといいところまでできています。

この量子レーダのため特別にエンタングルメント光源を作る必要はまったくありません。どこかで小型化に成功してくれば、それを借りてきて光源とします。その光源を使って反射してきたものと、もう一方の光源からきたものを受信するのですが、二つの受信信号から画像を再生するアルゴリズムがわれわれのオリジナルなのです。原理原則はDARPAで開発された量子計測原理そのものなのですが、いま言ったように、ダイナミックスというものを加味して設計します。シミュレーションの結果ですが、数百メートル範囲で霧があっても普通のカメラでは見えないものでも、このカメラを使えば輪郭がはっきりと見えるのです。

**■ その受光部はどうなっているのですか？**

広田 受光部は秋葉原の電気街で売っている普通のフォトダイオードとCCDで十分です(笑)。反射してきたものを、フォトダイオードで光のエネルギーだけを取り出すのです。ターゲットに照射しない参照光はCCDで受光します。不思議に思われるかもしれませんが、ターゲットからの反射光を単にフォトダイオードで受光し、そのエネルギーだけからターゲットの画像が再生できます。いままでのカメラ技術の常識とはまったく違いますね。

もっと簡単に言えば、ターゲットに当たって

戻ってくる光は普通のフォトダイオードでエネルギーのみを受信しますので、途中で霧があるうとなかろうと関係ないのです。なぜ単なるエネルギー情報から空間的な画像が再現できるかが不思議に思えますよね。参照光を受信するCCD出力とのエンタングルメント効果が二次元情報である画像を引き出してくれるのです。これを古典物理学的に説明することは可能ですが、かえって非常に難しい理論が必要になります。

**自動車の衝突防止用レーダではドップラー効果を使いますが、エンタングルメントを使うと時間という概念がなくなるのですか？**

広田 ドップラー効果というのは、動体から返ってくる波長はシフトするので、それをとらえるとターゲットの速度が推定できるというものです。その場合、ターゲットはどういう形をしているかは分かりません。ターゲットがあるかないか、あるいはどれだけの速度かという時間的な情報を捕捉するためにエンタングルメントを使うという技術は別途あります。しかし時間軸の情報に加えて、やはり画像を捕捉するのが面白いと考えているのです。すなわち“見えないものが見える”技術を求めています。

**先生のおっしゃる意味はエンタングルメント効果で画像を捉える技術がまだ十分でなかったため、そこを強調されているのですか？**

広田 エンタングルメントを使えば従来のレーダの性能を上げることができるということは以前から分かっていたのですが、それだけならビックリしないでしょう。本来なら画像情報はCCDで直接反射波を受信して取るのですが、ターゲットから来る光の一次的なエネルギーだけ取ることにより、ターゲットの二次元情報である画像が取れるということは、いままでの理論にはなかったことです。そこはさすがアメリカの軍事技術でして、われわれ日本人とは見る目が違うなと感じました。彼らは既存の理論を完璧に理解していますが、それにとらわれずに超えるものを考えるという発想をもっていることに驚きました。ただ彼らはもう実用化

を諦めかけているように見えます。結局は想定した距離性能が出ませんからね。

われわれの考えている自動車であれば数メートル先が見えればいいわけですけど、だからこそわれわれがそこで、この技術を生かすことに成功できればMITだって喜ぶはずですからね。そうすればアメリカはそれを改良して、衛星からのカメラとか霧の中を見通せる監視カメラなどに応用発展させる可能性が出るわけです。

これはお国柄なのでしょうけれど、MITは軍の要求に縛られるところがあって要求を絶対に達成しなければならないという弱点があります。われわれはそんなこと考えなくても、身近な技術で考えつくような、それも最高性能でなくてよいわけですから、いままでのカメラより少しでも性能が良くなればいいのです。だから完全量子エンタングルメントでなくてもよいのです。それに準じた光源を作って、それで同じものができるという理論を立てればよいという発想で、今回、非常に統合的な理論ができました。

ただ、数式の長さがA4用紙で5ページになってしまいました(笑)。でもそれはコンピュータに計算させればすむ話で、アルゴリズムを整理整頓していけばどんなに長い数式でも難しいことではありません。以上より、本技術は新しいデバイスを開発しなくてもよいのが特徴でもありますね。この技術のコアは画像再生のアルゴリズムに尽きるので、俄然、実用性が出てきます。光源を除いて、その他は市販品で構いません。ただ計算プロセッサのところだけは特注しなくてはなりませんけどね。われわれの想定では、1億円くらいの開発費があれば1、2年で専用プロセッサくらいならできるとなっています。

**いろいろなところから共同研究の申し込みなどがきていませんか？**

広田 今年、日立製作所(ディフェンス社)

とは共同研究契約を結んだばかりです。そのほかにも自動車関係でセンサーや小糸製作所などから問い合わせがありました。隣国の防衛関係者にも声をかけられました。ただ、これは軍事技術の研究になるのでちょっと無理だと断りました(笑)。

**防衛省ではいま、ファンディング制度として注目されている産学の有望研究に投資する事業を行っていますがご存じですか？**

広田 はい知っています。ただ、われわれは理論に基づく基礎実験ができれば、それで十分なのです。さきほど1億円と言ったのはホットモデルを作るという意味です。これは産業界と連携しなければできないものですから、その制度がマッチするのかが検討してみます。さらに本学の研究者を育て増やすのにファンディング制度を使わせていただけるなら、さらに有り難いとは思いますが。

## ワンポイント MEMO

### 「量子エンタングルメント」

量子エンタングルメント(量子もつれ)とは、二つ以上の粒子や系が量子力学的に相関をもつ、またはそうした性質をいう。エンタングルメントした粒子や系は互いの空間的な距離に関係しない「非局所性」と呼ばれる相関関係をもっており、古典物理学では説明できない振る舞いをするのである。つまり異なる場所にある粒子のスピンの量子状態が独立して扱えないような関係として記述され、エンタングルメント関係にある二つの粒子をどんなに遠く(何光年でも)離していても両者の状態は変わらず、一方を測定すれば他方に瞬時に伝わるため、アインシュタインはこれを「奇怪な遠隔作用」と呼んでこの事実を否定しようとしたといわれる。この量子エンタングルメントを利用して、量子コンピュータや量子テレポーテーションの研究が行われている。

**最後に、たとえばステルス戦闘機はレーダによる発見が難しいといわれていますが、量子レーダカメラを使えば発見できるのでしょうか？**

広田 いくつか方法があると思います。戦闘機に照射した光や電磁波が吸収や散乱されると反射波をとらえるのは難しいと思いますが、乱反射された光が少しでも戻ってくれば画像化できると思います。ステルスの実現技術を詳細に分析する必要がありますが、近未来の面白い課題かと思えます。

**透視技術はいまもっとも注目されています、量子レーダカメラでは透視できるのですか？**

広田 光源から量子光を出して、それをすぐにマイクロ波に変換し、反射してきたマイクロ波を量子光に変換して受信するというメカニズムをMITの人たちが提案しています。すなわち電波の良いところと量子の良いところを融合するという技術です。アメリカはそれをうまく利用して実現させる可能性がありますね。

**警戒監視を考えれば、たとえ1キロメートルの近距離でも使えれば効果は大きいと思いますが？**

広田 それなら可能性はありますね。ただ米軍の場合は可能性のある技術となるとクラスファイされますので非公開となり、われわれは知ることができません。ただ、彼らが発明した原理原則についてはDARPAが情報公開していますので、それを見ると10キロメートルくらいのターゲットでは性能的に不十分だとの結論で終わっていました。でも別の技術を転用して水面下では開発しているかもしれませんね。

ただ、われわれは自動車のアプリケーションでよいと考えています。その方が大量に作って販売することができますので、まずそちらからです(笑)。

■ どうもありがとうございました。