

サイエンス・プラザ

2009年のノーベル物理学賞の業績

京都大学名誉教授・甲南大学教授 佐藤 文隆

2009年ノーベル物理学賞は二つの革新的な光技術の発明に贈られた。一つ目はチャールズ・K. カオが1966年頃に光ファイバー実用化の突破口を切り拓いたこと、二つ目はW.S. ボイルとG.E. スミスが1970年に撮像デバイスのCCDを発明したことである。ここ数年、個人や組織の行動パターンをも変えてしまうような情報通信のイノベーションが急速に進行している。人類史上でも、これは電気の利用以来の画期的な技術革新である。これを可能にしたのが光通信技術であり、これを支えるハードウェアが光ファイバーとCCDなどの光と電子をつなぐ半導体デバイスである。

(イ) 光ファイバー 電気通信から光通信へ

文字、音声、映像、動画などのアナログ情報はいったんFAXやビデオなどの変換器でデジタル情報に変換され、送信機から通信路を伝って受信

機に達し、デジタル情報はスピーカーや液晶パネルなどで再び元のアナログ情報に復元される。この情報通信システムの中での「通信路」とは、従来の電気通信では電線であり、光通信では光ファイバーである。1950年代に光通信という夢が登場し、それによって(1)決まった時間に送れる情報量が飛躍的に増大できることと、(2)通信路に混入する雑音を減らすことができる可能性を見出した。

(1)はデジタル信号を表現する波動の性質で理解できる。オンオフのビット信号は瞬時でなく各々有限時間 Δt 持続するものであり、1秒間に送信できるビット数(bps)は $1/\Delta t$ となる。ところが振幅や位相を変調して波に情報を載せるのであるから Δt は基本波の周期より長くなければならず、最小値は周期である。したがってbpsをあげるには短い周期、高い周波数の波で情報を流す方がよい。こういう原理で電気通信の技術はどんどん高周波の波を用いる通信技術を開発しギガヘ

◆ も く じ ◆

サイエンス・プラザ	サイエンス・カフェ
2009年のノーベル物理学賞の業績…………… 1	ちょっと変わったクッキーのはなし…………… 15
テロメアと老化：2009年のノーベル生理学 医学賞を契機に考える…………… 7	高校生へ私が選んだ1冊の本 クラゲの光に魅せられて ノーベル化学賞の原点…………… 16
授業実践 理科の授業にデジタル教材を活用する…… 12	

ルツ (GHz) オーダーのマイクロ波での大容量通信まで進歩した。しかし、マイクロ波よりも 10 万倍も周波数が大きい光を用いることが出来れば、より bps の大きい、大容量通信が原理上可能になる。

全反射で閉じ込められる光

光通信でも光を導くために、電気通信の電線の役割を果たすものが要る。水中から水面に向けて光を当てるとき、水面の方向に近い角度で入射すると、水の屈折率が大きいために空気中に出ず、水中に全反射されることが知られている。この原理で噴水の水の束などに沿って光が閉じ込められることは 19 世紀の光学でも指摘されていたようである。

1958 年、カバニーらがコアとクラッド（被覆部）から成る石英ガラスの中を光が伝わる光ファイバーを製造した。続いて、英仏の通信技術者たちがマイクロ波での導波管の開発の延長線で、光伝搬の考察を始めた。その中の、屈折率に勾配をつけた自己収束型のファイバーのアイデアも日本の西澤潤一や米国のグループが提案した。

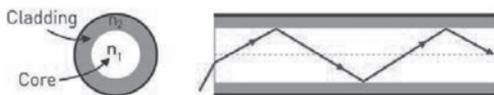


図 1 屈折率の違うコアとクラッド（被覆）の構造をもつ光ファイバー。屈折率は $n_1 < n_2$

しかしながら、当時の光ファイバーの材料の状態は、前述の様な光学的に全反射でファイバー内に光が閉じ込められるなどという議論をするには程遠い状態で、光の束の大半が原子分子の散乱によってバラバラになる状態だった。これは大気中で太陽光線の一部がレイリー散乱によって青空として空一面に広がる様なものである。光源のパターンの変形でデジタル情報が遠方に伝わるには、光の束を散乱させずに長い距離を進めることが必要であったのである。当初は 20 m で 1% にまで減衰するありさまだった。

光ファイバーの透明度を増す

香港出身のカオは大学と大学院を英国のロンドン大学で修め、1956 年に電気工学で学位を得た。そして、光ファイバーの構想を打ち出した STL（英標準電信局研究所）の研究室でその開発に興味を持った。彼は散乱を減らすために鉄のイオンを除去し、材質をある程度改良して、1966 年にはある長さで実証実験をした。彼はまた、選ぶべき波長の考察もし、電気通信にとって代わる通信技術となるための目標を設定し、様々な要素における技術改良の必要性を説いて回った。彼は、本格的な材料改善をガラス企業にも説得して回り 1970 年には米国のコーニング社が 50 倍ほど減衰を減らすガラス材料を開発した。その後、日本の NTT 研究所も改善に貢献し、現在では 1 km で透過光が 95% に達するまでになった。

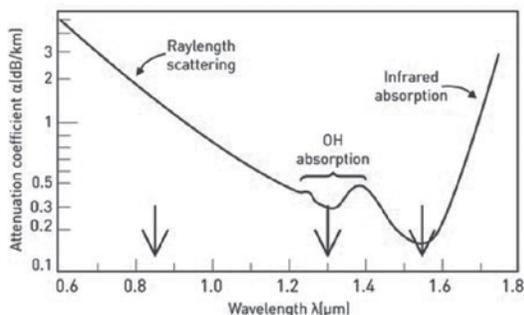


図 2 光ファイバー内での減光率。1.3 と 1.55 μm の波長のところで減光率が小さいので、カオはこの波長を使うことを提案した。

光通信の推進者として、カオは積極的に行動した。光ファイバーのブレイクスルーをコーニング社が達成したことが大きな弾みとなって、もう一つのデバイスである固体レーザーも 1974 年にはインテル社の林たちによって成功した。電気信号を光の信号に変換するには当初のガス・レーザーではだめだったのである。

電線を使用した電信の場合には、波長の長い電気的なノイズを遮蔽することはできない。このために、約 100 m 毎に機器で調整する必要があった。それに対して、光ファイバーでは被覆すれば外部

の光は完全に遮蔽できるため、原理的には調整器なしで100kmも飛ばすことが出来る。これは実用化の際にコストを減らすことに役立つ。

光ファイバーの他の応用

光通信以外で光ファイバーが重要な役割を果たしているのが、医療現場での内視鏡である。胃や腸の内部を、外部のレーザー光源から光ファイバーで強い光を導き照射することで、ビデオ撮影を可能にしているのである。こういう光源としての活用は遺跡調査や災害救助などにも役立つ。また、神戸のルミナリエなどで有名になったように、さまざまな光装飾デザインの素材として用いられている。

光子の粒子性による確率的拡がり

周波数の大きい光を用いれば、原理的には十万倍もの大容量通信が可能な様であるが、原理的にも実際にも数百倍のリミットがある。これは、周波数の小さい電磁波の古典的ふるまいと、周波数の大きい電磁波（可視光の光子やX線・ガンマ線）の量子的ふるまいの差に由来する。アインシュタインの光量子説がいうように、電磁波は振動数とプランク定数の積で決まるエネルギーをもつ光子の集団とみなせる。同じエネルギーの流れでも、振動数の小さい電磁波は大量の光子の滑らかな集団的ふるまいだが、可視光の周波数では一個の光子のエネルギーが大きいから少数の光子となり、粒子的な粒々さが顕著になる。このために、粒子数の相対ゆらぎが無視できなくなる。場の量子力学によると、粒子数 n のゆらぎ Δn と位相のゆらぎ $\Delta\phi$ の積は1のオーダーである。 n の絶対値が大きければ、 $\Delta n/n$ は小さくても、 Δn は大きくなれるから $\Delta\phi$ を小さくできる。これが古典的電磁波の特性である。それに対して、 n がもともと小さいから Δn も大きくなれず、 $\Delta\phi$ がばらつく。量子力学独特のこの固有のばらつきをカバーするには、受信機で光子を検出する時間 Δt を長くにとって多くの光子を集めて平均値からの幅を狭めることが必要になる。このために Δt はあまり小さく

は出来ず、単位時間に搬送できる情報量 bps も GHz での電信の数百倍ぐらいに抑えられるのである。

量子通信へ：量子テレポテーション

この改良された光ファイバー網を使った、これまでの光通信とは異なる原理での第二世代光通信の技術開発が現在進行している。これは量子暗号、量子計算などと並ぶ、光による量子通信である。現在利用されている光通信でも、レーザーや受信機などのデバイスはみな量子力学の産物である。しかし、電気から光への変換、減衰を回復する調整、光を受信して電気信号に変える、といったプロセスでは「観測された古典情報」によって次に引き継いでいる。量子デバイスはふんだんに用いられているが情報自体は古典情報である。

量子力学では波動関数で表現される量子状態を観測すると必ずゆらぎが伴う。平均の振る舞いは決まっているが、各回の観測で何が出るかは全くの確率事象である。このばらつきを乗り越えるには、前に述べたように、多数回の観測が必要となり、輸送容量も入力電力も下げられない。

第二世代の光通信の目標はできるだけ古典情報に変えるプロセスを通過せずに、量子情報のまま次々と移送できるようにすることである。現在、簡単な実験が始まっている量子テレポテーションなどはそのはしりである。

(□) CCD (charge-coupled device)

アインシュタインの光子説

光電効果現象を光の粒子説で説明したことでアインシュタインは1921年度のノーベル賞を受賞している。ちなみに、アインシュタインがこの説を提出したいわゆるミラクルイヤーである1905年のノーベル賞は、実験的に光電効果の性質を発見したドイツ人のレナートに贈られている。光電効果現象はヘルツが発見し、それを引き継いで明快な実験で性質を整理して見せたのがレナートだった。このレナートが後のナチス時代にユダヤ人アインシュタイン排斥の急先鋒になるのだから、皮肉な

巡り合わせである。

黒体放射スペクトルの理論的説明のためにプランクが作用量子仮説を1900年に導入した。アインシュタインはこの仮説を熱放射以外の問題に初めてひろげ、その後の量子物理の展開のきっかけを作った。これが光の粒子説であり、1907年の固体比熱の量子論へとつながり、1913年のボーアの原子模型となって、光子と電子の量子論が定着したのである。光子のエネルギーはプランク定数と振動数の積で与えられる。

光電効果は、光の電子へのエネルギーの受け渡しが瞬時に纏まって起こるというものである。光の波動説では、電子は広がった存在である電磁波によって多くの電子がじわじわと加速されて金属から飛び出すエネルギーを獲得するということになるが、現実はそうっていない。一個の光子が一個の電子にエネルギーを与えるようになっている。

半導体の中の光電効果

固体中では、電子は原子に結びついている荷電子と伝導帯の伝導電子から成る。当初の光電効果は、エネルギーを得た電子が金属外にまで飛び出すので現在は外部光電効果と呼ばれる。これに対して荷電子が光子からエネルギーを得て伝導帯に励起されて伝導電子となる現象は内部光電効果と呼ばれる。伝導電子は固体の中に留まっているが、あたかも自由電子の様に外部から付加する電場や磁場によってその動きを制御できるのである。このように、光の信号を電流（電子の動き）の信号に転換できるのである。アインシュタインの説は、この内部光電効果においても広範囲な半導体の光センサーの原理となっているのである。

撮像とディスプレイ

現代の映像機器はほとんどがデジタルな電気情報を復元するものである。動画といえども単に多数の静止画の早送りであるから、基本はある瞬間の静止画を電子情報で得られればいわけである。デジタルカメラとビデオの差は静止画像の取得の処理速度である。

光のパターン情報としてやってくる像を二次元の受光板で取得することが撮像である。受光板は多くのピクセルに区画分けされ、各々に小さな光センサーが配置されており、各々の光センサーが光量を伝導電子数の情報に変換する。全ての区画のこの情報があれば、それをもとに今度は受光の逆に映像機器のディスプレイ上のピクセル状のLEDによる発光で画像が復元できる。デジタルカメラではデジタルな電子情報はいったん一次的に配列して、例えば磁気の向きのようなデジタルな物理状態の連なりとして記憶させる。この記憶装置がハードディスクである。2007年のノーベル賞はこのハードディスク関連だった。

撮像受光板の2次元面を区画するピクセル数（いわゆる画素数）が多ければより鮮明な画像が得られる。現在はこの画素数が映像機器の価格の目安なので、一般にもひろく認識されている。ある大きさの受光板に多くの画素数を確保しようと思えば、各光センサーのサイズは小さくなる。ところが、各々の電子情報を取り出すセンサー毎の多数の読み出し端子のサイズがネックになって画素数は上がらない。各センサーからの情報が混じらないように区別し、そのまま外部に導いて読み出すという、うまい方式が要る。全情報の「読み出し」に画期的なアイデアがないと、電子的な撮像は実用にならないのである。

CCD読み出し方式

こうした事態を解決したのがボイルとスミスであった。内部光電効果では、光量に比例して各ピクセルに電子が生じる。この電子の回収の仕方について画期的な方法を考案したのである。まず、

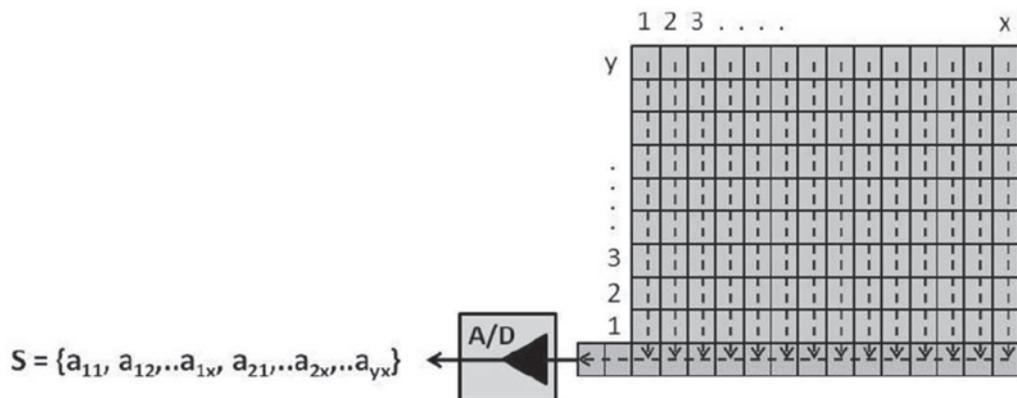


図3 CCDでの各ピクセルの電子数を読み出す方式。

半導体に“小さな”光センサーをマトリックス（行列）状に“多数”埋め込む。これはMOS（金属酸化半導体）という半導体技術で実現される。多数の光センサーの行列を x 軸（列）の座標 i と y 軸（行）の座標 j で番号づけると、各光センサーの座標は (i, j) で番地付けられる。露光時間の照射で各光センサーにある伝導電子数 a_{ij} が決まる。

例えば同じ行（横）に並ぶ n 個の情報を揃えて次々と列（縦）方向に移動させて受光板の端に持ってくる。次に、横方向に引き出して一次元の情報の並びとして読み出す。ポイルとスミスはこのような方式を考えたのである。例えば行列が $n \times n$ なら、第1行の情報は $(a_{11}, a_{12}, \dots, a_{1n})$ 、第2行の情報は $(a_{21}, a_{22}, \dots, a_{2n}), \dots$ 、第 i 行の情報は $(a_{i1}, a_{i2}, \dots, a_{in})$ である。したがって端から引き出される一次元の情報の並びは $(a_{11}, a_{12}, \dots, a_{1n}, a_{21}, a_{22}, \dots, a_{2n}, \dots, a_{i1}, a_{i2}, \dots, a_{in}, \dots, a_{n1}, a_{n2}, \dots, a_{nn})$ のようになる。ある露光時での電子をこうして全部引き出せば、次の露光が出来る状態に戻る。 $(a_{i1}, a_{i2}, \dots, a_{in})$ を物理的に一斉に移動するメカニズムは、縦方向には凸凹で、横方向には同じ強さの電位差を移動させるのである。空間的には電位を時間的に変化するパルスを印加して、溜まった伝導電子をリレー式に端に運ぶのである。内部光電効果で伝導電子を作る受光面の空間自体を、次のステップでは、電子数を読み出しのために運ぶ空間として利用するのである（図3、図4）。

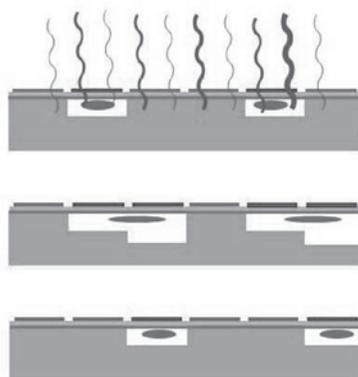


図4 上図 光が上から当たって光センサーのピクセルに伝導電子が登場。
 中図 となりの電位を深くして、右の区画に転送する。
 下図 電位を元に戻す。次に右側の電位を下げて右に転送。これを繰り返す。

FAX, カラー, ビデオ

これまでの説明では初めから二次元の画像を念頭において説明してきたが、FAX やスキャナにおいては一次元状の受光棒が移動しながら二次元面をカバーする。電子を棒の端に転送して読み出せばいいことになる。

光の広域波長帯での光量を測定したのでは、白黒の画像しか得られない。カラーの電子画像を得るにはピクセルの上に三原色 RGB のモザイク状のフィルターで覆って色ごとの光量の情報を読み出せばよい。色情報を追加するので空間分解能はその分だけ悪くなるが、半導体の微小加工技術が進歩してピクセル数の増加が可能になって実現し

たのである。

さらに動画の場合は、現実の情景は刻々と変化しているので、「露光での伝導電子の生成と伝導電子の転送」の1サイクルを実行するには「転送」の間は遮光する必要がある。しかし、人間の目の時間分解能は30ミリ秒程度であるから、「生成と転送」の1サイクルがこれより十分短ければ滑らかな動画が得られる。ビデオカメラでは、毎秒30～60回の「露光、転送、読み出し」の1サイクルを実行している。

CCD 撮像器の進歩

米国ベル電話会社の研究所のボイルとスミスが、1970年に基本動作の機構を提案し、1970年代後半にはカメラが、1980年代には実用的なテレビカメラが製品化された。現在ではピクセルサイズは数 μm であり CCD のサイズは数 mm、すなわち一辺に約千個並び、平面全体では数百万ピクセル、メガ画素の性能をもつ。読み出しを端から行う関係からあまり大きな CCD は得策でなく、受光面を大きくするには幾つかの CCD をモザイク状に組み合わせることになる。また現在は、当初の読み出しの仕組みをさまざまに改良したものが使われている。

CCD の利用拡大

CCD の性能向上と価格の低下は一般の写真機事情を一変させた。現在では、CCD を用いたデジタルカメラが従来の銀塩フィルムカメラを完全に駆逐しつつある。また、ビデオカメラも CCD に取って代わられつつある。このカメラ技術の転換は CCD の価格の低下を可能にし、その普及をいっそう後押しした。

こうした CCD を用いた撮像機の登場は、大容量化したインターネットのインフラの普及ともあいまって、インターネット電話やテレビ会議を可能とし、通信技術の世界を大きく変えつつある。こうした一般の社会での利用拡大と並んで、CCD は天文学と医療の世界の技術を革新した。例えば1990年に打ち上げられた NASA のハッブル宇宙

望遠鏡の構想が登場したのはこの CCD カメラの実用化があったからである。大気外での天体観測は大気の揺らぎの影響を回避できるので天文学者の長年の夢であった。しかし、従来の銀塩写真では乾板を回収せねばならないから、ほとんど不可能なことであった。CCD の登場で画像情報がデジタル情報として送受信できるようになったのである。

現在は地上からの天体観測でも撮影は殆ど CCD 撮像に変わっている。これには天体からの非常に弱い微光の観測に CCD が適しているからである。写真乾板や CCD での映像の記録というのは、表面に到達した光子をカウントすることである。乾板では各光子が感光剤のハロゲン化銀の分子の状態を変えることであり、CCD では各光子が固体電子の状態を変えることである。しかし、何れの場合でも表面に達した光子すべてを捕らえることが出来るわけでない。この光子の捕捉率を量子効率というが、乾板では1～2%であったのが、CCD では90%以上に向上するのである。

デジカメでは長い露出で静止した夜景を撮れることが知られているが、弱い光源である天体の撮影は同じように長時間の露出で光子の数を稼ぐわけである。もっとも、星空の回転があるから天体の場合も追尾が必要である。さらに長時間の露出を行うと CCD の中で熱的なエネルギーによる伝導電子への励起が無視できなくなる。このノイズ混入を小さくするために天体観測では CCD を液体窒素で冷却して使用するのが普通である。従来、天文台には化学薬品を扱うために、現像室や暗室が必ずあり、化学薬品の臭いがしていたものである。ところが、このような天体の撮影技術の転換によって天文台から臭いが消え、窒素のボンベとパソコンが並ぶ姿に変身したのである。

さらに、CCD は胃カメラや内視鏡として医療分野での検査技術にも大きな貢献をしている。

つまり、これらの大きな社会的貢献に対して、今年のノーベル物理学賞受賞が授与されたと言えるだろう。

図参考：ノーベル財団