

# 光速をめぐる

工学研究科電子工学専攻  
量子機能工学講座 量子電磁工学分野  
北野正雄

## 1. 光速の発見——マクスウェルの奇跡

光が1秒間に地球7周半の速さで飛んでいるということは、すでに知っていると思います。何しろ、最も速い乗物である旅客機の100万倍の速さですから、「すごい！」と一瞬感心しても、光に乗れるわけもないので、自分には関係のないことだと思ってしまう人が多いことでしょう。しかし、光の速さやそれにまつわる探求が、現代の科学技術のルーツであり、今でもいろいろな場面でわれわれの生活を支えてくれています。

光の速さが本格的に測定されたのは、19世紀の中ごろです。距離の分かった2点の間を光が往復する時間を測ればよいのですが、当時は短い時間を測定することがむずかしかったので、なるだけ遠い丘の上に鏡をおき、往復に要する時間を長くにとって実験が行われました。現在では、レーザとオシロスコープなどの簡単な時間測定装置を使えば、高校生でも光の速さを調べることができますが、当時の技術を考えてと大変困難な実験であったことが想像されます。（たとえば、3 kmの往復に要する時間は $2 \mu\text{s} = 2 \times 10^{-6}\text{s}$ ですから、ストップウォッチではとても測れません。）それでも、フィゾーやフォーコーらは、高速回転する鏡や歯車を巧みに利用して、光の速さをおよそ $3 \times 10^8\text{m/s}$ と決めることに成功しました。有限とはいえ、その途方もない速さに彼らも皆さんと同様な感想をもったかも知れませんね。まして、この測定値が現在の科学技術の扉を開ける鍵の役割を果たすとは夢にも思っていなかったでしょう。

この一見役立ちそうもない鍵を鍵穴に差し込み、扉をみごとに開けてみせたのがマクスウェルです。英国ケンブリッジ大学で、電磁気学に関する理論的研究を始めていた彼は1855年、24歳のときに最初の論文を発表しました（図1）。当時の電磁気学は、実験によって明らかにされてきた、電荷間の静電力、磁石や電磁石のつくる磁場やその作用、時間変化する磁場による誘導電場などの多様な現象や効果を定量的に説明する方程式群（今日、マクスウェル方程式 [1] とよばれている）としてまとめる段階にありました。

光は電荷や磁石に影響を与えることはありませんから、当時は電気、磁気とは全く無縁のものだと考えられていました。（今でも日常感覚としては、光が電磁波であるということはなかなか納得できませんね。光に触っても感電しませんし、磁針に影響をうけることもありません



図1. 若き日（1855年ごろ）のマクスウェル。  
（Wikipediaより）

ん。) マクスウェルは理論を整理してゆく過程で、今まで知られていない効果の存在に気づきました。それは時間変化する電場が電流と同じように磁場を発生するというものです。変位電流とよばれるこの効果は、普通の状況ではあまり役に立つものではありません。しかし、電磁気学の方程式の数学的性質を大きく変えるという思いがけない効果をもたらしました。すなわち、電場や磁場が電荷や磁石のそばに留まらず、互いに絡み合った波として遠方に伝わるのが理論的に予測されたのです。この未知の波の速さは理論から  $V=1/\sqrt{\epsilon_0\mu_0}$  と計算されました。ここで、 $\epsilon_0$  は真空の誘電率（電気定数）、 $\mu_0$  は真空の透磁率（磁気定数）を表します。これらの定数は高校の物理でも習うように、それぞれ、電荷の間の力  $F_e$  と平行電流間の力  $F_m$  を求める際に必要な定数です。これらの定数はコンデンサの静電容量やコイルのインダクタンスを測定することで実際の値を求めることができます。たとえば、面積  $S$ 、間隔  $d$  の平行平板コンデンサに蓄えられる電荷  $Q$  と電圧  $U$  の比は  $Q/U = C = \epsilon_0 S/d$  と表すことができるので、 $Q$ 、 $U$ 、 $S$ 、 $d$  を測定すれば  $\epsilon_0$  を定めることができます。実際このような方法でマクスウェルは2つの定数を測定によって定めて、 $V$  の値を計算してみました。すると、驚くべきことにフィゾーらが先に測定していた光の速度とほぼ一致したのです。

犬の歩く速さと人間の歩く速さがほぼ等しいからといって、だれも「人間は犬だ」と思いませんが、 $3 \times 10^{-8} \text{m/s}$  という日常離れた値が一致したことから、「光は電磁波かも知れない」と結論づけてもそれほど不自然ではないでしょう。実際、マクスウェルは光が彼の理論が予測する電磁波の一形態であることを確証し、コンデンサや電流計を用いた室内実験による彼の光速度の決定方法を「この実験では光は装置を見るためにしか使われていない」といって自慢したそうです。（電磁波に関するマクスウェルの論文は1864年に出版されましたが、日本では明治維新の前夜、三条小橋池田屋事件の年にあたります。）

## 2. 20世紀の科学・技術へ

光速をきっかけとする、マクスウェルの大発見は現代科学技術の根幹をなす2つの方向、(1) 電波の発見とその通信への利用、(2) 相対性理論の発見に発展してゆくことになります。

光の波長 ( $0.5 \mu\text{m}$ ) と速度から、周波数を求めると  $10^{15} \text{Hz}$  程度になります。電場や磁場がこのように非常に短い時間で符号を変えているために、通常の方法では平均化されてしまい、直接観測することができないのです。そこでもっと周波数の低い電磁場を発生する試みが行われました。1888年ごろ、ヘルツはコイルやアンテナなどの電気回路の部品を用いて波長が 1m 程度の電磁波を発生させることに成功しました。これが、電波（ラジオ波、ヘルツ波とも呼ばれる）の発見です。早速、マルコーニはこれを電線なしの通信、すなわち無線通信に利用して、1901年には大西洋横断通信に成功しました。2007年の今日では老若男女1人1人が携帯電話で無線通信を行うようになっていますが、これももとをたどればマクスウェルのお蔭なのです。

もう1つの方向は1905年のアインシュタインの相対性理論につながるものです。光速  $c$  は波長  $\lambda$  と周波数  $f$  を用いて  $c = f\lambda$  と表すことができます。（マクスウェルの論文では光速は  $V$  などで表されていましたが、後になってラテン語で速さを表す“celeritus”の頭文字をとって  $c$  と書かれるようになりました。最近では  $c_0$  と書くことが推奨されています。）アインシュタインは光源から光速  $c$  にほぼ等しい速度で遠ざかる乗物から、その光を見た場合を想像しました。（このように頭のなかで実験を行うことを思考実験といいます。）光を普通の波と考えると、遠ざかる観測者から見ると、波長は変わりませんが、周波数はドップラー効果で減少してほぼゼロになります。光速もそれに応じて減少してほぼゼロとなるはずですが、ところが困ったことに、周波数がゼロ、波長が  $0.5 \mu\text{m}$  の電場や磁場はもはやマクスウェル方程式を満たさないのです。大方の人びとはマクスウェル方程式が不完全であると考えましたが、アインシュタインは逆にドップラー効果の式の方を疑いました。そして、周波数が減少するのに対して、光速  $c$  を一定に保つように、波長が長くなると考えました。これは全く直観に反する考え方ですが、30kmで公転する地球を乗物とみなして、光速の変化を捉えようとした

マイケルソンの実験の否定的な結果などによく一致するものでした。(高校の物理で光のドップラー効果を扱わないのは、波長の変化を相対論なしで説明できないからです。) このように現代物理学の出発点である相対性理論はマクスウェルの電磁理論と光速に関する考察を通して生み出されました。

### 3. 光の速度の制御 — 光を止める

光は真空中では速度  $c$  で伝わりますが、物質の中では異なった速度になりえます。物質内の光の速度を決めるのは実は少しむずかしい仕事です。それは波の形が時刻とともに変化してゆくので、どの部分に着目するかで異なった速度が得られるからです。図2を見て下さい。これはカメラのフラッシュのような一瞬の光(光パルスといいます)を表したものです。連続的に持続する光は正弦波で表すことができますが、光パルスの場合には正弦波の一部が切り出されたような形になっています。波の頂点を結ぶ線(点線)は包絡線と呼ばれます。一方、中身の正弦波は搬送波といいます。また、光パルスの始まり(つきはじめ)は波頭とよべれます。真空中では光パルスはその形を変えずに速度  $c$  で伝わってゆきます。しかし、物質中では形が変わってゆくので、搬送波と包絡線と波頭はそれぞれ別の速さで伝わることになります。つまり、3種類の速度を考える必要が出てきます。これらはそれぞれ

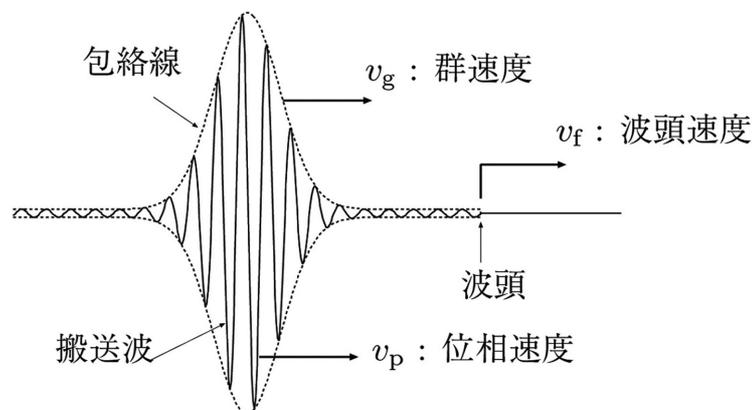


図2. 3種類の波の速度。位相速度、群速度、波頭速度は真空中ではすべて  $c$  に等しいが、物質の中では波頭速度の他はそれぞれ別の値をとるようになります。

れ位相速度、群速度、波頭速度と名付けられています。

位相速度  $v_p$  は物質の屈折率  $n$  と直接関係しており  $v_p = c/n$  であたえられます。位相速度は物質によって  $c$  より大きくなったり小さくなったりします。例えば、水の中では  $0.75c$  と少し遅くなります。波長もそれに比例して短くなります。真空中と物質中の波長の比はその物質の屈折率とよばれる量で、その名のように光線の曲がり方を決定するものです。

群速度は、パルスの外形(すなわち包絡線)が伝わる速度をあたえています。その値は屈折率の周波数に関する微分で決まります。最近の量子光学の技術を用いると、物質の性質を操作することで、群速度を真空での値  $c$  から大きく変化させることができます。(量子力学によれば、物理的な世界を構成するすべての要素は波と粒子の両方の性質を兼ね備えています。このような量子的な性質を利用して、光と物質を操作したり制御する方法を研究する分野を量子光学といいます。) 1999年ハーバード大学のハウらは、光パルスをルビジウム原子の蒸気の中を自動車程度の速度 ( $10^{-7}c$ ) で伝えることに成功しました。その後、彼女のグループを含む複数の研究チームが光パルスをさらに減速して、完全に静止させることに成功しました。一方、別の実験グループは群速度を  $c$  より大きくすることに成功しました。多くの教科書には群速度は相対性理論のために  $c$  を超えることはありえないと書かれていますが、よく考えてみると、そのような推論は間違っていることが分かります。相対性理論の制約を受けて  $c$  を超えられないのは、波頭速度です。(教科書に書いてあることが正しいとは限らないことを示すよい例です。だからといって教科書を読まなくてよいということにはなりません。)

アインシュタインが思考実験で思い浮かべていた「止まった光」が100年の後に、実験室で実現できたといえます。厳密に言えば、彼が問題としていたのは真空中の速度ですから、直接の関係はありませんが、それにしても光が実際に止められるとは誰も予想しなかったことです。なお、群速度の制御に関する解説は参考文献 [2、3]、やホームページ [4] をご覧下さい。

#### 4. ものさしとしての光速

光速の意外な利用方法をもう一つ紹介しておきましょう。それは長さの基準（ものさし）としての利用です。さまざまな量を正確に測ることは、現在の高度な科学技術の基盤を支える重要な技術です。カーナビに用いられているGPS（全地球測位システム）は26000kmの高度の人工衛星から目標までの距離を測定しているのですが、その精度は数mですから、7桁以上の正確さが必要とされています。これは、30cmのものさしを用いて、光の波長の1/10程度の長さの違いを区別していることに相当します。

科学的な根拠にもとづいて最初につくられた長さの基準はメートル原器です。メートルという長さは、特定の国やグループに依存しない、人類共有の尺度とすることを目指して、われらが星である地球の赤道から北極までの距離の1/10000と定められたものです。しかし、地球をそのままのものさしにすることはできないので、白金とイリジウムの合金を用いて1メートルの長さの棒（ルール）を作成し、これをものさしとすることになりました。メートル原器の作成のためには、地球の子午線の長さとの比較が必要ですが、このための測量が1792年から1798年にかけて行われました。測量を委嘱された二人の科学者は、フランス革命の混乱の中、フランス北端のダンケルクからスペインのバルセロナまでの子午線（の部分）の長さ（と仮のメートル原器の長さの比）を精密に測定しました。この大事業にまつわる興味深いエピソードが、文献 [5] に詳しく書かれています。

メートル原器のものさしとしての正確さは  $0.1 \mu\text{m}$ （7桁）程度で、すでにGPSの正確さに匹敵するものであったこととなります。1960年からはクリプトン原子の出す光の波長が基準として用いられることになりました。これによって正確さは2桁ほど改善されました。光の波長を長さの基準として用いることは、すでにマクスウェルによって提案されていました。科学技術の進展によって、このクリプトンによるものさしも不十分になってきました。次の段階は、こんな比喻で理解できるでしょう。

地球に似たある星では、住人はみな、たいへん正確な時計を持っており、時間をきちんと測ることができました。しかし、長さについては、ものさしの作り方や使い方が未熟で、測るたびに結果がばらつきました。ところで、この星のあちこちに棲息する亀に似た生き物は、その歩く速さがなぜか一定しており、どの亀の速度を測ってもおよそ0.03ヒロ/ハクでした。ハクはこの星の時間の単位、ヒロは長さの単位です。測定値が多少ばらつくのは、長さがうまく測れていないためであり、亀どおしを競争させると、ぴたりと同じタイミングでゴールすることが分かっていました。あるとき、この星のある科学者がこんな提案をしました。「これからは長さのものさしは廃止して、代わりに亀の速さを0.031ヒロ/ハクと定義しよう。」つまり、亀が1ハクの間に進む距離を0.031ヒロとしようということです。

このような考えに基づいて、地球では1983年、「1メートルは真空中で光が  $1/299\,792\,458$  秒の間に伝わる行程の長さ」ときめられました。真空中を一定速度で進む光が、かの星の亀の役割を果たしているわけです。以来、光速  $c = 299\,792\,458\text{m/s}$  は測定されるべき量ではなく、定義された量となりました。（9桁全部覚えておくといいですね。）量の比を定義することによって、間接的に単位を決めることは他にも例があります。真空の透磁率（磁気定数）は  $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{H/m}$  と定義されていますが、これによって電流の単位であるアンペアの大きさを決めたことになっています。

#### 5. 原子時計 — 究極の精度

ついでですから、時間のものさしについても見ておきましょう。時間の単位である秒は1956年まで

は地球の自転周期を用いて定義されていました。つまり、地球の自転周期を86400sとしていました。その後、地球の自転は変動が大きいことが判明したので、一時期、より安定な地球の公転が利用されるようになりました。さらに高い精度を求めて、1955年からは原子時計が時間のものさしとして採用されるようになりました。腕時計の中には水晶振動子という小さい音叉が入っていて、その振動を利用して時を刻んでいます。原子時計は水晶振動子の代わりに、セシウム原子がマイクロ波（1GHzから100GHz程度の電磁波の総称）に共振することを利用した装置です。腕時計は1日に1秒程度ずれるのが普通ですが、原子時計は数100万年に1秒しかずれないという素晴らしい性能をもっています。この原子時計の利用を前提に、1967年以来、「1秒はセシウム原子のマイクロ波振動の9 192 631 770周期の持続時間」（一部簡略化）と定められています。

このように時間の単位を地球の自転と無関係に定めることにしたため、原子時計の秒を単純に数えて時刻を決めると、長年の間にずれが積算されて不都合が生じます。そこで、うるう秒というしくみが利用されます。これは地球の自転と原子時計のずれが1秒に達する前に、1秒単位の補正を行うというものです。今回は2006年1月1日に調整が行われました。8時59分59秒の次に、8時59分60秒という余分の秒が挿入されました。（次の調整がいつ行われるかは未定ですが、次の機会には腕時計を前日に正確に合わせるなどして、うるう秒を実感してみましょう。1月1日、7月1日が候補日です。）

GPS衛星にはそれぞれ小型のセシウム原子時計が搭載されており、正確なタイミングで電波を発射しています。地上では複数の衛星からの電波を受信して、その時間差から三角測量の原理で自分の位置を計算することができます。

50年近く利用されてきた原子時計もさらに精度の高い方式を求めて研究が進められています。マイクロ波よりも周波数の高い電磁波である光を基準として用いることで3ないし4桁の向上が期待されています。何と、10億年に1秒しかずれない時計をめざしているわけです。2005年のノーベル物理学賞はこのような次世代原子時計の開発に関するテーマへの貢献によってジョン・ホールとテッド・ヘンシュに送られました。（もう一人の受賞者であるグラウバーは量子光学理論のパイオニアです。）彼らは2人とも工作好きの少年そのままの人柄であり、新しいものを作るのが楽しくてたまらないとい

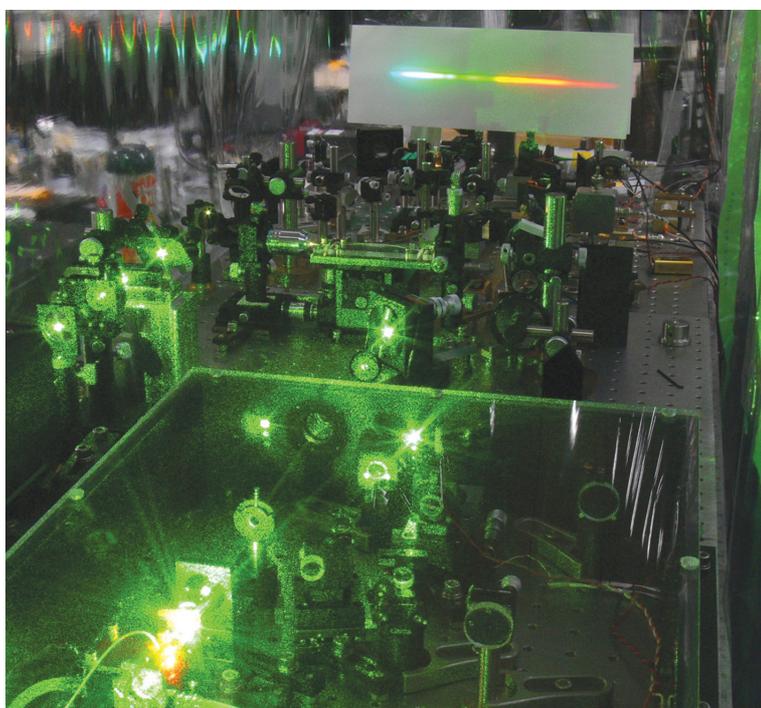


図3. 光周波数コム装置。虹色に見えるのはこの装置からの光をプリズムを通して見たものです。連続的に見えますが、実際には非常に細かい1億本以上のとびとびのスペクトルからなっていて、周波数を測るものさしの役目をします。[杉山和彦 助教授（電子工学専攻）提供]

う様子で、研究をしておられます。図3の写真は、彼らの受賞理由の中心である光コムとよばれる特別なレーザー装置で、光の周波数と電波の周波数を正確に比較することができます [6]。われわれの研究室でも、光コムを用いた周波数標準の研究を行っています。

## 6. おわりに

人間に限らず地上の生物は太陽からの光を直接あるいは間接のエネルギー源として、また視覚によって周囲を観察する目的で最大限に利用しています。人類はニュートン以来、光の探求を通して、自然に対する理解を深めてきました。また、ここでのべてきたように、光に関する研究成果を利用して科学技術を非常に高度なものにしてきました。CDやDVDの読み書きに使われているレーザーは人間が作り出した、非常に純度の高い秩序をもった光の一形態です。またインターネットや電話など情報通信のほとんどは、世界中に網の目のように張りめぐらされた光ファイバーにレーザーを通して行われています。

量子性をはじめとして、光にはまだまだ解明すべき課題が数多く残されています。みなさんも21世紀のマクスウェルを目指して光の研究に挑戦してみませんか。電気電子工学科では多くのグループが光に関する研究を行っています。

## 参考文献

- [1] 北野正雄：マクスウェル方程式 — 電磁気学のよりよい理解のために（サイエンス社、2005）。
- [2] 北野正雄、中西俊博：「風変りな光たち」、応用物理 72, 682 (2003)。  
<http://repository.kulib.kyoto-u.ac.jp/dspace/bitstream/2433/24184/1/kitano-jap72.pdf>
- [3] 北野正雄、中西俊博：「光の異常な伝搬を電気回路でシミュレートする」、日本物理学会誌 61, 758 (2005)。 <http://repository.kulib.kyoto-u.ac.jp/dspace/bitstream/2433/24177/3/buturi-61-10.pdf>
- [4] 群速度の電気回路によるシミュレーションに関する詳細：<http://www-lab15.kuee.kyoto-u.ac.jp/wave/>
- [5] ケン・オールダー、吉田三知代（訳）：「万物の尺度を求めて — メートル法を定めた子午線大計測」（早川書房）
- [6] 杉山和彦：「マイクロ波と光周波数を結ぶ周波数チェーン — モード同期レーザーによる光周波数計測技術」、日本物理学会 58, 175 (2003)。