



## 2005年度ノーベル物理学賞 —受賞者とその業績について—

宅間 宏<sup>†</sup>

### 2005 Nobel Prize in Physics - About the Laureates and their Contributions -

Hiroshi TAKUMA<sup>†</sup>

#### 1. はじめに

ノーベル財団から2005年10月3日に発表された今年のノーベル賞受賞者は、米国・ハーバード大学のR. J. グラウバー (Glauber) 教授(以下敬称略)、NIST (National Institute of Standard and Technology) とコロラド大学の共同機関JILA (Joint Institute of Laboratory Astrophysics) のフェロー(教授相当)であるJ. L. ホール(Hall)博士、ドイツ・マックス・プランク量子光学研究所長・ミュンヘン大学教授のT.W.ヘンシュHänsch教授の3人である。このうち、ホールとヘンシュ(以下敬称略)は共同受賞である。筆者はこれら三人の方々とは、尊敬と親しみを持って長くお付き合いして来たので、今回のノーベル賞は従来に無い感激を覚える。

#### 2. 各受賞者について

##### 2.1 R. J. グラウバー

グラウバーは1925年生まれで、三人の中では最長老である。ハーバード大学でPhDの学位を取得し、現在同大学のMallinckrodt Professor of Physicsであるから、秀才中の秀才である。その一方で、気さくな飾らない人柄は多くの人に親しみを覚えさせる。

彼はレーザーが出現する以前からそれまでの半古典的な取り扱いを一步前進させ、レーザーが専ら半古典論で論じられていた1960年代に、ディラックが基盤を作った量子電磁力学の上に光子のコヒーレンスの理論を完成させた。その成果の例として、半古典論では考え難かった異なる光子の間の高次の干渉(例えば1956年のハンブリー・ブラウンとツイスの干渉、以後HB-T干渉と略記)を明快に説明している。

グラウバーがノーベル・レクチャーで引用したように<sup>1)</sup>、ディラックの“THE PRINCIPLES OF QUANTUM MECHANICS”の第3版(筆者が学生の頃、胸をときめかせながら学んだ名著)には、「それぞれの光子は、それ自身としか干渉し得ない。異なる光子間の干渉は、決して起きないのである。」と書かれている。事実、半古典論、すなわち電磁場は古典的に、物質系は量子力学的に取り扱う体系では、2次のコリレーションは消えてしまってHB-T干渉はあり得ないが、グラウバーはディラックによるボソンを消滅演算子と生成演算子の和で表すディラックの量子電磁力学の体系で光子の計測とは何かを量子力学的に明確に記述し、コヒーレント光とインコヒーレント光の光子統計上の差異を示している。

彼の業績を詳しく解説することは、このようなスペースを制約された場では不可能であるが、参考論文<sup>2)</sup>でエッセンスを知ることができる。これはレーザー物理学を専門とする者の必読すべき文献と思う。

ところで、10年ほど以前、周囲の同僚たちが筆者の定年退官記念に開催して下さったすばらしい国際ミニシンポジウムにも、グラウバーはホール等と一緒に快く参加して下さった。因みに、このミニシンポジウムの招待講演者の中から、今回の二人のほかに、1997年にはレーザーによる中性分子の冷却でスティーヴン・チュー(Steven Chu)とW. D. フィリップス(Phillips)が、2001年には中性原子のBECでC. ワイマン(Wieman)が受賞しているので、実に5人のノーベル物理学賞受賞者が出たことになる。光科学の重要性を示す一例として注目される。

<sup>†</sup>電気通信大学レーザー新世代研究センター(〒182-8585 東京都調布市調布丘1-5-1)

<sup>†</sup>The Institute for Laser Science, the University of Electro-Communications, 1-5-1 Chofugaoka, Chofu, Tokyo 182-8585

## 2.2 J. L. ホールとT. W. ヘンシュ

今回受賞した3氏の中でも、ホールは、筆者が1963年から約1年半NBS(後にNIST[National Institute of Standards and Technology]と改称)のボウルダー研究所に滞在して以来、40余年を通じての最も親しい友である。彼はJILA (Joint Institute of Laboratory Astrophysics)のNBS所属の研究員として半世紀近く、レーザーの発振周波数を安定化して、長さと周波数の新しい標準を作る事、そしてその確度を限りなく高めていくことを「天職」と云える程大切にしていた。勿論その成果を光速不変等の重要な基本原理をより高い精度で証明する事に応用することも忘れなかった。すべての物理量の標準を可能な限り高い精度で保つというNISTの最も重要な使命の一つで、彼はその意味では職務遂行に全力で努力して来た人という事が出来る。

しかし、日常的な彼の様子からは、そのような義務感への囚われは少しも感じられない。その時々の研究課題に興味本位で取り組んで、何よりも好きな実験的研究を大いに楽しんでいる。

レーザーの安定化は、ガスレーザーの発振の中心周波数を、ラム・ディップの中心に合わせることから始まり、やがて周波数安定性の高い外部共振器に対して周波数を安定化し、その上でレーザーの出力周波数を分子のスペクトル線に合わせる方法が標準的になった。当然の要求として、スペクトル線を可能な限り先鋭化するという、興味深い物理的な研究課題が課せられたが、やがてR. L. バーガー (Berger) とホールによる3.39マイクロンのメタンのスペクトル線を先鋭化してヘリウム・ネオンレーザーの標準として用いる方式<sup>3)</sup>が、世界的に最も広く用いられるようになった。

いっぽうで、ホールより10才ほど若いヘンシュは、ハイデルベルク大学でイオントラップのパイオニアであるP. トシュック (Toschek) 教授の下で学び、1970年にスタンフォード大学のA. ショウロウ (Schawlow) 教授 (1984年ノーベル物理学賞) の研究室に移り、そのレーザー分光における目覚ましい活動は、ショウロウのノーベル賞受賞に大きく貢献した。その後ドイツに戻り、マックス・プランク量子光学研究所とミュンヘン大学とで活躍してきた。

ホールとヘンシュは、互いに協力し、また良きライバルとして競い合いながら、困難な割には地味なこの超高精度レーザー分光の領域でトップ・ランナーの地位を常に保ってきた。ホールの数多い優れた研究成果の中でも筆者を最も感動させたのは、ドップラー効果に起因する線巾を除去して先鋭化したスペクトル線が、光子の吸収・放出に伴う運動量変化によって生じる「リコイル・ダブルット」の観測である。1976年当時としては驚異的な分解能 ( $8 \times 10^{10}$ ) でダブルット構造を見事に観測することに成功したこの研究には、フランスのCh. ボーデ (Borde) 教授と慶応大学の上原教授が協力している<sup>4)</sup>。高分解能レーザー分光法の威力を見せつけた、歴史に残る快挙と云うことができる。

ホールとヘンシュは、レーザー周波数の安定性と精度の最先端を開拓する過程で、物理学の基礎原理をより高精度で検証してきた点でも共通している。例を挙げればきりが無いが、ホールは、マイケルソン・モーレーの実験<sup>5)</sup>などによって、特殊相対論の基礎となる光速の等方性のより高精度な証明を繰り返し、ヘンシュは最も基本的な原子系である水素原子の超微細構造の測定精度を上げることにこだわり続けてきた。二光子吸収によって1S順位のラムシフトを測定したことも注目される<sup>6)</sup>。また最近の仕事としては、極低温にレーザー冷却したルビジウム原子の同位体の自由落下を精密に測定することで等価原理を検証した実証実験<sup>7)</sup>も面白い。

そしてこのような努力の結果、ついにこの両者が到達したのが、今回授賞の主たる理由となったと考えられる、可視全域を高精度で一定の波長間隔を持つ無数のコヒーレント光で覆う「周波数コム」の実現である<sup>8,9)</sup>。

原理的には、所謂Q-スイッチによって、一定時間周期の極短パルス列を規則的に発生することによって周波数コムは

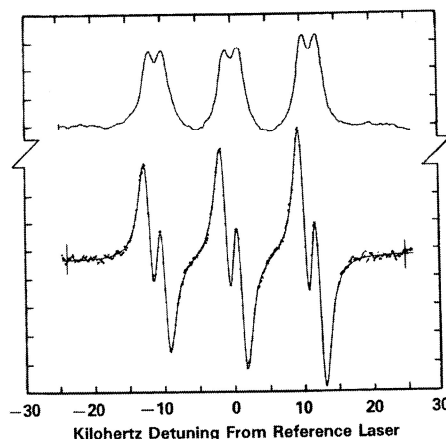


Fig. 1 Recoil doublet of the main hyperfine components of methane observed by J. L. Hall et al (Ref. 4). The lower trace is the experimental result in differentiated line shape, and the upper one is the integrated line shape.



Photo. 1 Roy J. Glauber with Herbert and Margot Walther at the Nobel Concert.

作られる。ただし、その場合に、レーザーは「基本モード」のみで発振し、共振周波数は、共振器長で決まる一定の間隔で事実上無限に広がっていなければならない。Qスイッチの周波数が、モード間隔に完全に一致したときに、パルスのピークにおける搬送波の位相のずれがなくなって、「時間的に連続する波形とその周波数スペクトルとは、互いにフーリエ変換で結ばれる」という数学的要請からの当然の帰結として周波数コムが設定されるが、実現するのは容易な事ではない。

レーザーの応答周波数が非常に広いことと、Qスイッチ発振出力のパルス幅が十分狭いことが要請される。波長範囲を近赤外から紫外までの全域に広げるには、非分散非線形光学素子が必要である。ホール等は、ルーセントテクノロジーが開発した穴あき光ファイバーを数メートルの長さで用いることにより実現できた。現在では、正分散媒質と負分散媒質との組み合わせ構造を持つ、長さ数cmの非分散非線形素子が用いられ、装置もコンパクトで使い易いものになっている。

周波数の国際標準は、1967年にセシウム原子の9.2 GHzのマイクロ波スペクトルに拠ることが決められ、その精度は次第に高められてきたが、高分解能のスペクトル線によって校正された高安定レーザーとリンクすることによって、周波数の確度が大きく向上した。1972年には、ホールも加わったNISTのチームによるマイクロ波周波数標準とメタン安定化ヘリウム・ネオンレーザーとの直接比較が、セシウム時計の周波数を遠赤外から赤外線領域の何種類ものレーザー光とその高調波をリンクすることによって行われ、最も正確な光速の決定がなされた<sup>10)</sup>が、多くの熟練実験家の共同作業によって多数の高安定レーザーを周波数ロックする極めて大掛かりなシステムで、とても常時運転できるものではない。それを1台のモード同期レーザーによって一気に可視領域と結合することを可能にし、しかもそのカバーする周波数領域を紫外線領域から赤外線領域に至る広い領域に広げたのが周波数コムである。標準としての使い勝手の良さは、目盛りが可視領域全域に広がっていることから云うまでもないが、直接マイクロ波周波数標準と結合できる利点は大きい。

現在NISTの周波数標準は、周波数コムを基本に研究されている。ここに至って、 $10^{-15}$ の精度まで向上したセシウム時計も、 $10^{-18}$ の精度が約束されている周波数コムによるレーザー時計にはとても及ばないことは明白である。時間と長さの次世代標準が、分子の吸収スペクトルによって制御された周波数コムに変わることは時間の問題と考えられる。

ホールとヘンシュの業績は、何れも正確な周波数測定を軸に、物理測定の精度を極限まで高めたことである。その精度は今後も更に高められる可能性を持っている。何故それほどまで高精度に執着するかという問いには次のように答えたい。特殊相対論の光速の不変性・一様性がどこまで正しいかだけでなく、原子構造を決める物理定数の不変性を始め、あらゆる物理法則に関する定数がどれほど不変であるか、反物質と通常物質との電荷の符号以外の等価性はどこまで正しいかなど、自然の仕組みを正確に記述する体系を明らかにした物理学者の責任として、可能な限り精度を高めつつ確認する必要がある。

### 3. ノーベルウイーク

最後に、ホールの「ゲスト」として招待されて初めて参加することによって、筆者はノーベル賞の授賞式(ノーベルの命日である12月10日に行われる)を中心に、ノーベル財団とスウェーデン科学アカデミーが、学術文化にとって非常に魅力的な一週間を演出していることを初めて知った。日本では殆ど知られていないが、この一週間には、受賞式や豪華な晩餐会だけでなく、学術に関心のあるすべての人に学ぶべき最高の機会が提供されているのである。特にノーベル・レクチャーには一般の聴衆にも席が用意されるほか、インターネットのノーベル賞のホームページ<sup>11)</sup>から入って、講演のスライドのPDFファイルをダウンロードできるほか、45分間のレクチャー全部を、オン・ダイヤモンドのビデオとして誰でも見ることが出来る。

要するにこの一週間は、人類の文化の祭典であり、国家を越えた人類の文化を支える人達の集いとして演出されている。出席していると、日本でよく見られるような、国としてノーベル賞の受賞者数を誇りたいと言う狭い視野はナンセンスに思えてくる。流石に100年を超えた歴史を持つ、厳正な受賞者選出を中心に伝統を築きあげた文化活動としての重みを感じる。

授賞式の前々日に開催されたノーベルコンサートでは、ストックホルム・ローヤルフィルハーモニー(授賞式にも演奏)とハーバード大学出身の異色の名チェリスト、ヨーヨーマの演奏を堪能できた。特にグラウバーの知人であるヨーヨーマはシルクロード・オーケストラとの共演も加え、ドボルザークのチェロ協奏曲で聴衆を魅了した。

授賞式(コンサートホールで開催)と、その後で開催される盛大な晩餐会(シティーホール)は燕尾服もしくはフォーマルな民族衣装の着用が義務付けられる格好だったものであるが、出席者に深い感銘と満足を感じさせる。

受賞者たちは、毎日色々な行事があって、さぞかし疲れることであろうと思われるが、生涯を通じて忘れたい記憶を残すに違いない。

云うまでもなくノーベル賞受賞者たちは何れも当代最高の研究者であり、偉大な業績を上げた人達である。しかし、我々は単に受賞者を崇拝するのではなく、受賞者で代表される、優れた学術的成果を生み出した人類の文化を尊ぶべきであり、そのような文化を担う一員であることを誇らしく思うべきであろう。

一方で、受賞者は、人類の学術文化を代表する意味で特別な立場に置かれることも事実である。それは受賞者がそれ

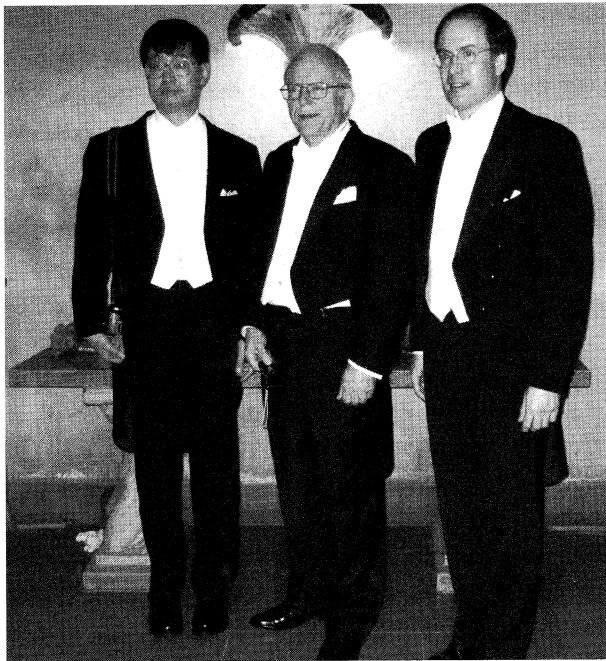


Photo. 2 John L. Hall with his collaborators, Jun Ye and Steven Cundiff, in developing the optical frequency comb. After the Nobel Banquet.



Photo. 3 Ted Hansch with P. Toschek (left), his thesis supervisor, and Sun Svanberg (right), the Chairman of the Nobel Physics Committee. At the reception of Royal Swedish Academy of Sciences.

までと全く異なる人生を歩むことを余儀なくされ、受ける賞金の額より遥かに大きな責任を担うことである。そのような責任感に基づく受賞者の社会への貢献を理解し、積極的に協力することも、学術文化を共に支える我々の重大な責任であろう†。

#### 参考文献

- 1) 2005 Nobel Lectures in Physics; R. J. Glauber, "100 Years of Light Quanta"; J. L. Hall, "Optical Atomic Clocks"; T. W. Hänsch, "A Passion for Precision". PDF files and on-demand movies are available from the home page: <http://nobelprize.org/physics/>
- 2) R. J. Glauber: Quantum Optics (R. J. Glauber, ed, Academic Press, 1969) p.15.
- 3) R. L. Berger and J. L. Hall: Phys. Rev. Lett. **22** (1969) 4.
- 4) J. L. Hall, Ch. Borde, and K. Uehara: Phys. Rev. Lett. **37** (1976) 1339.
- 5) A. Brillet and J. L. Hall: Phys. Rev. Lett. **42** (1979) 549; M. P. Haugan, C. M. Will, Physics Today **87** (1987) 69.
- 6) N. Kolachevsky, M. Fisher, S. G. Karshenboim, and T. W. Hänsch: Phys. Rev. Lett. **92** (2004) 033003.
- 7) S. Fray, C. A. Diez, T. W. Hänsch, and M. Weitz: Phys. Rev. Lett. **93** (2004) 240404.
- 8) J. Reichert, M. Niering, R. Holzwarth, M. Weitz, Th. Udem, and T. W. Hänsch: Phys. Rev. Lett. **84** (2000) 3232.
- 9) D. J. Jones, S. A. Diddams, J. K. Ranka, A. Stentz, R. S. Windeler, J. L. Hall, and S. T. Cundiff: Science **288** (2000) 635.
- 10) K. M. Evenson, J. S. Wells, F. R. Petersen, B. L. Danielson, G. W. Day, R. L. Berger, and J. L. Hall: Phys. Rev. Lett. **29** (1972) 1346.

† ノーベルウィークの行事に参加するには、ノーベル財団の招待が必要である。各受賞者は、配偶者と家族のほかには十名程度の“guest”を申請できるが、その数は限られているので、受賞者にあまり負担をかけないよう配慮する必要がある。特にノーベルコンサートは人数が制限され、すべてのゲストを招待することは受賞者の意図に添えない場合もあるが、チケットをゲストが購入することも可能なことを老婆心ながら付記したい。





## ノーベル物理学賞記念記事

興梠 元伸<sup>†</sup>

### Memory of the Nobel Prize in Physics

Motonobu KOUROGI<sup>†</sup>

2005年のノーベル物理学賞にRoy J. Glauber氏, T. W. Hänsch氏, John L. Hall氏の3氏が受賞したと知ったのは私が東京工業大学の大学院生だったときの指導教官, 大津 元一教授(現東京大学教授)からの携帯電話への一報だった。T. W. Hänsch氏, John L. Hall氏の両氏は, 私が学生の頃から御世話になった方々であり, 学位をとるときに多くの論文で勉強させていただいた。そして, 彼らのモードロックレーザーを用いた光周波数コム技術は, 私の研究と非常に関わりが深かったこともあって, 読売新聞の取材の申し込みがあったのだ。そして, 10月12日の朝刊の記事となった。私はすでに2000年ごろから彼らがノーベル賞を取ると確信していたので, 今回の受賞は私にとっては「想定内」であり数年間待ちわびていた。しかし, 私の確信は記者の方にとっては「想定外」であつたらしい。今回, ノーベル物理学賞を記念してのコラムの執筆の依頼を受け, その意に添う内容かどうかかわからないが, せっかくなので, 私がT. W. Hänsch氏, John L. Hall氏の両氏とどう関わりを持ってどのように研究が進展したか, 私が学生の頃の話から始まって, 私が彼らがノーベル賞を取るであろう事を確信するに至ったまでを述べたいと思う。

もう15年も前になるが私が東京工業大学の大学院生だったときの研究テーマはレーザーの周波数制御技術であった。半導体レーザーのスペクトル線幅狭窄化を始めとする半導体レーザーの極限の光の制御技術を大津教授の下で学んでいたのがあった。そして, 博士課程に進んだ頃に光周波数の絶対値測定に挑む事になった。1990年代以前の光周波数の絶対値測定にはT. W. Hänsch氏, John L. Hall氏らによって光周波数チェーンという方法が開発されすでに実現していた。しかし, この方法は大がかりな設備が必要であり, また任意のレーザーを測れるわけではないというデメリットもあった。ところが, 1990年にT. W. Hänsch氏があるアイデアを発表した<sup>1)</sup>。これにより小さな設備で, 任意のレーザー周波数を計測する可能性が見えてきた。それは「光で光を測る」という新しいコンセプトに基づく光周波数ディバイダーという技術である。

光周波数ディバイダーとは2つのレーザー光の周波数間隔を1/2にする技術である。例えばここにレーザーが2台あるとしよう。その周波数を $f_1$ と $f_2$ とする。その周波数間隔は $f_1 - f_2$ である。ところが, 光周波数ディバイダーを用いると2台のレーザーの平均値 $(f_1 + f_2)/2$ の周波数の光を作り出すことができる。この光と $f_1$ との差は $(f_1 - f_2)/2$ である。これは初めの周波数間隔の半分である。原理的には光周波数ディバイダーは半導体レーザーと非線形光学素子と簡単な電気回路で構築でき, 周波数間隔に関係なく実現できる魔法のような装置である。この装置を $n$ 台カスケード式につなげばどのような大きな周波数差であっても $1/2^n$ にできるのだ。最後に数十GHzになった周波数差のビートをカウントすれば,  $2^n$ 倍することで周波数差の測定が可能になる。そして, これをあるレーザーとそのレーザーの第二次高調波の間, すなわち1オクターブをつなぐことに適応すれば, 基本周波数とその第二次高調波の間の差周波数は基本周波数そのものであるので, レーザーの絶対周波数測定が可能になる。かりにレーザー周波数が1 PHzであっても十数台光周波数ディバイダーをつなげれば, 高々数10 GHzの周波数間隔になる。これを計れば光周波数の測定ができるのだ。

このアイデアは「光で光を測る」という新しいコンセプトに基づき, 非常にシンプルで美しかった。しかし, 当時の私は完全に同じ方法をとることを潔しとせず, 「光で光を測る」というコンセプトは変えないで別の方法を考えることにした。これが光周波数コムである。私の光周波数コムはノーベル賞のモードロックレーザーを用いた方法と異なり, LNをベースとしたファブリペロー変調器<sup>2)</sup>を用いた方法である。ファブリペロー変調器とは小林 哲郎氏(大阪大学教授)の発案の, 日本発祥の超高速光変調器であり, おそらくフェムト秒パルスを発生できる外部変調器として唯一の方法である。私は, そういった高速の変調器によって発生するサイドバンドを光周波数コム(櫛)として用いて光周波数を測定する方法を学生時代に国際会議で提案した<sup>3-6)</sup>。光周波数コムという言葉はこのとき初めて使ったのだと思う。このころの光周波数コムは1オクターブをつなぐには十分ではなく, つなげる範囲は1オクターブの数10分の1程度であった。1オクター

<sup>†</sup> 日本航空電子工業(株) (〒196-8555 東京都昭島市武蔵野3-1-1)

<sup>†</sup> Japan Aviation Electronics Industry, Limited, 3-1-1, Akishima, Tokyo 196-8555

ブにするには一生かかると思っていた。

アメリカでの学会<sup>5)</sup>のあと、コロラドNISTに立ち寄ってJohn L. Hall氏に私の研究を説明したことを覚えている。ひどい英語だったと思うが、内容は絶賛していただいた。Photo. 1はコロラドにて撮ったものである。John L. Hall氏は左で、右端が私である。John L. Hall氏はその後、来日したとき私どもの研究室を訪れた。このとき、東工大長津田キャンパスの最寄駅前の居酒屋「あじやしき」にお連れしたのが思い出である。

さて、1995年ごろ、T. W. Hänsch氏が来日し研究室に来られた。そして、私に来てくれと言うのだ。こうして、教授の許可も得て数ヶ月であったがミュンヘンのマックスプランク研究所に行くチャンスを得た。Photo. 2はその時マックスプランク前で撮った写真である。中央がT. W. Hänsch氏である。Photo. 3には5台並んだ光周波数ディバイダーが写っている。私は、短い期間で何かできることをしなければと思い、一台の私の光周波数コム発生器をそこで作った。Photo. 4の真ん中あたりの金色のがそれである。当時すでにT. W. Hänsch氏のグループでは光周波数ディバイダーを進めると共に、フェ



Photo. 1 1992年コロラドにて撮ったものである。John L. Hall氏は左で、右端が私である。中央に写っているのは当時京都大学学生の中田 歌子氏(現大阪大学)である。

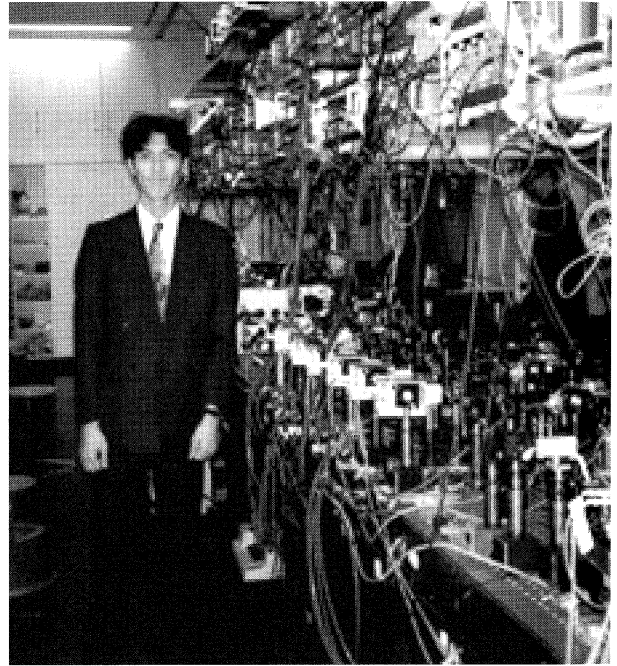


Photo. 3 1995年マックスプランクにて、5台並んだ光周波数ディバイダーである。



Photo. 2 1995年マックスプランクにて撮ったものである。中央がT. W. Hänsch氏、左と右が、私のところへ遊びに来た学生の今井 裕氏(現ソニー)と上妻 幹男氏(現東工大助教授)である。

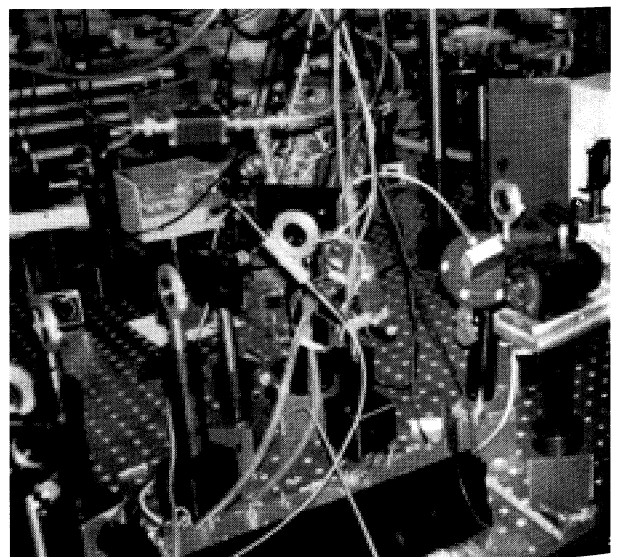


Photo. 4 1995年マックスプランクにて、私が製作した一台の光周波数コム発生器(ファブリペロー電気光学変調器)。真ん中あたりの金色のがそれである。

ムト秒モードロックレーザーによる光周波数コムの研究がスタートしていたが、この当時のフェムト秒モードロックレーザーは不安定であり、精密に制御することができなかつたからである。この原因は主に励起光源の不安定性に起因していたのだが、それが解決され学会発表できるレベルまで向上するのに数年かかることになる。テーマを与えられた実働部隊は大変だったであろうが、しかし、この当時から研究に取りかかっていたからこそ、ノーベル賞の成果が可能になったのだと思う。

その後、フェムト秒モードロックレーザーによる光周波数コムが実現する前までT. W. Hänsch氏のグループは私が作った光周波数コム発生器を私以上に完全に使いこなした。例えばT. W. Hänsch氏のライフワークのリドベルグ定数の測定になる水素、重水素の1s-2s遷移の周波数の高精度測定が行われた<sup>7,8)</sup>。また周波数ディバイダとの比較により光コム周波数測定の高精度が実証された<sup>9,10)</sup>。これらの研究の中で主に実働したのはT. Udem氏だ。彼は非常に私の光周波数コム発生器に関して興味を持った。ひとつは、光共振器の自由スペクトル域は $FSR = c/2nL$  ( $c$ : 光速,  $n$ : 屈折率,  $L$ : 共振器長)であらわされることが多いのだが、これは誤りであり $FSR = c/2n_g L$  ( $n_g$ : 群屈折率)が正しいことである。この事実は、モードロックレーザーのことをよくわかっている人には自明だと思うのだが、連続光のレーザーのユーザには気がつきにくい点である。私はこの事実を実験的に気がついた事話をした。現在、光周波数コム発生に用いられているフェムト秒モードロックレーザーの共振器内には群速度と位相速度を巧みに独立に制御する仕組みが使われているが、その開発に役立ったのだと思う。またもうひとつは光ファイバによる光周波数コム拡大である。1998年に私どものグループは、光ファイバ内の3次の非線形性により光コムスペクトル拡大の実験に成功していた<sup>12)</sup>。実験成功のうれしさのあまり、T. Udem氏にメールして光ファイバを使うことをアドバイスしたことがある。すでに、制御が可能になったフェムト秒モードロックレーザーを用いた光周波数コム発生器は、パルス発生器として繰り返し周波数が低くピークパワーが大きい、これを用いれば、どのようなファイバであってもある程度のスペクトル拡大が可能であると考えたからだ。しばらくして、T. Udem氏から穴の開いたファイバを作ってくれるところを探しているという話が来た。私には手にいれる方法はなかったが、彼らは入手することに成功した。それがフォトリソグラフィで加工されたファイバであった。フォトリソグラフィで加工されたファイバは非線形性が極めて大きかったので、フェムト秒モードロックレーザーによる光周波数コム幅は1オクターブに達した。彼らのホームページを飾った虹色のスペクトルは衝撃的であった。私は、このとき彼らがノーベル賞を取るであろう事を確信した。私が一生かかると予想していたものがたった10年でできてしまったからだ。しかもフェムト秒モードロックレーザーを用いた光周波数コム発生器が動くようになってから高々1~2年程度の話であった。

以上、私がT. W. Hänsch氏、John L. Hall氏の両氏とどう関わりを持ってどのように研究が進化したか、私が学生の頃の話から始まって、彼らがノーベル賞を取るであろう事を私が確信するまでの間、私が見てきたことを綴った。この技術の研究に私の研究が少しでも役にたったことは非常に誇らしく思っている。ただ新聞の取材でも言ったのだが、「ちょっと悔しい」という気持ちも無いことはない。もっと早くに技術的發展を予測をし、より積極的な行動していれば可能性はあったかもしれない。現在は私は、会社を設立して光周波数コム技術の実用化を進めている。リベンジと言うわけではないのだが、私の光周波数コム技術を積極的に実用化することで、独自の進化をしてゆきたい。

#### 参考文献

- 1) H. Telle, D. Meschede, and T. W. Hänsch: *Opt. Lett.* **15** (1990) 532.
- 2) T. Kobayashi, T. Sueta, Y. Cho, and Y. Matsuo: *Appl. Phys. Lett.* **21** (1972) 341.
- 3) M. Kourogi, K. Nakagawa, V. H. Shin, M. Teshima, and M. Ohtsu: *Proc. CLEO*, Baltimore, May (1991) CThR57.
- 4) M. Kourogi, K. Nakagawa, and M. Ohtsu: *Proc. IQEC*, Vienna, June (1992).
- 5) M. Kourogi and M. Ohtsu: *Proc. SPIE's OE/Technology*, Boston, November (1992) 1837.
- 6) M. Kourogi, K. Nakagawa, and M. Ohtsu: *IEEE J. Quantum Electron.* **29** (1993) 2693.
- 7) A. Huber, Th. Udem, B. Gross, J. Reichert, M. Kourogi, K. Pachucki, M. Weitz, and T. W. Hänsch: *Phys. Rev. Lett.* **80** (1998) 468.
- 8) T. Udem, A. Huber, J. Reichert, B. Gross, M. Prevedelli, M. Weitz, M. Kourogi, and T. W. Hänsch: *Proc. the XIII International Conference on Laser Spectroscopy (ICOLS '97)*; Z. J. Wang, Z. M. Zhang and Y. Z. Wang (eds), World Scientific, Singapore (1998).
- 9) Th. Udem, J. Reichert, and T. W. Hänsch: *Opt. Lett.* **23** (1998) 1387.
- 10) Th. Udem, J. Reichert, R. Holzwarth, T. Hänsch, and M. Kourogi: *Proc. the 1999 Joint Meeting of the European Frequency and Time Forum and the IEEE International Frequency Control Symposium*, vol. 2 (1999) p. 620.
- 11) Th. Udem, J. Reichert, T. W. Hänsch, and M. Kourogi: *Phys. Rev. A* **62** (2000) 031801.
- 12) K. Imai, M. Kourogi, and M. Ohtsu: *IEEE J. Quantum Electron.* **34** (1998) 54.



## レーザー技術の基礎研究

鳥塚 健二<sup>†</sup>

### Basic Research in Laser Engineering

Kenji TORIZUKA<sup>†</sup>

私が所属する産業技術総合研究所(略称、産総研)では、最近、成果よりは効果を重視した「アウトカムの視点での研究評価」、と技術の5年後10年後を予測する「ロードマップ作り」が重要な作業になっている。いずれも研究活動について、どのようにその意義を説明していくか、という問題意識がある。この機会に、これらに関連して最近個人的に思う所を述べたい。

私どもの研究グループの研究対象は、いわゆるフェムト秒レーザーで、ピコ、フェムトから最近ではアト秒の単位まで使ってあらわされる超短光パルスを扱っている。もちろん各テーマ、各年度の設定目標等があるわけだが、私個人の研究動機には、もっと漠然とした長期的なものがあったように思う。その一つは、超短パルスレーザー光の出力がもっと人為的に制御できるのでは、という意識である。感覚的な表現で恐縮だが、どうも装置の都合で出る光に合わせる感覚があった。最近の言葉で後付で言えば、パルスタイミングや光波位相(Carrier-envelope Phase)の精密なコントロールになるかと思う。もう一つは、固体の超短パルスレーザーでも、もっと他の技術と融合して体系的な使い方にできないか、という点である。これは、通信ネットワーク指向の研究開発の方々と話す機会を通じて感じていた。研究の詳細は避けるが、ここ数年、幸いにグループの同僚や関係者の方々との協力で、個人的動機とも整合する方向で研究をすすめることができた。

さて、私も年齢的に、研究の現場指揮と管理の末端を兼ねた仕事になり、研究者の主観的な世界だけでなく、コーディネーション的な客観性を要する状況も増えてきた。レーザー技術の基礎研究は、さまざまな意味づけがあり得るのが特長で、それは強みでも弱みでもある。例えば、私どもグループの研究は産総研においては、情報通信エレクトロニクス分野における光フロンティア技術として位置づけられ、光の操作の新しい段階を開拓しようとしている。これは長期的な課題で、理想を言えば量子情報やナノフォトニクスといった光技術の将来像の中に、うまく光源技術が位置づけられないか、という問題意識になる。もちろん短期的にも、既存の光パルス応用において、タイミングや光波位相をコントロールする技術を有効に利用していく必要がある。超短光パルス技術は、物性やバイオ研究での超高速現象解明や制御、光周波数標準、透明媒体の3次元内部計測や加工といった多様な課題に寄与できる技術であるが、それには各分野の専門家との協力が必須になるだろう。私どもでは、最近まで共同プロジェクトでレーザーコンプトンパルスX線源を開発してきたが、これなども他技術との協力の好例かと思う。

いつの時代でも個々の研究者が能力を十分発揮できる状況が理想と思うのだが、最近ではもっと踏み込んで、能力をより効果的に発揮して欲しい、あるいは費用対効果を理解させてほしい、との社会からの要請を強く感じる。アウトカム思考やロードマップ作りは、産業や実用に近い開発をされている方々には「何をいまさら」な話題だろうが、私を含め、それらになじみにくかった類の研究開発にたずさわる者も、研究の持続と発展のために考えなければならぬ状況にある。また一方で、いかに計画や将来ビジョンがあっても研究実態が伴わなければ意味が無い。評価とそのフィードバックが、うまくそれらの要素を調整する事が必要なかと思う。

以上は自分自身でも未整理な話題なので恐縮だったが、些かなりとも読者の参考になれば幸いである。

<sup>†</sup>産業技術総合研究所 光技術研究部門 (〒305-8568茨城県つくば市梅園1-1-1 つくば中央第2)

<sup>†</sup>National Institute of Advanced Industrial Science and Technology (AIST), Tsukuba Central-2, 1-1-1 Umezono, Tsukuba, Ibaraki 305-8568