

ノーベル物理学賞 2018

Gérard A. Mourou 博士とチャープパルス増幅法

—2018年ノーベル物理学賞受賞を祝して

渡部俊太郎
鍋川康夫
板谷治郎
小林洋平

わたなべ しゅんたろう

東京大学名誉教授

なべかわ やすお

国立研究開発法人理化学研究所 光量子工学研究センター アト秒科学研究チーム

いたに じろう

東京大学物性研究所附属極限コヒーレント光科学研究センター

こばやし ようへい

東京大学物性研究所附属極限コヒーレント光科学研究センター

2018年10月2日、The Royal Swedish Academy of Sciences は同年のノーベル物理学賞を、Arthur Ashkin 博士、Gérard A. Mourou 博士、Donna Strickland 博士、の3名に授与すると発表しました。Ashkin 博士は「光ピンセットの発明とその生物系への応用」、Mourou 博士と Strickland 博士は「高強度超短パルス光の発生法の発明」が受賞理由です。いずれも「レーザー物理学における画期的な発明」として認められました。本稿ではチャープパルス増幅法(Chirped Pulse Amplification, CPA)と呼ばれる後者の発明について4人の筆者で対談しながら解説するとともに、受賞者のMourou 博士と筆者のエピソードを紹介します。

CPA 誕生の頃

鍋川 最初になぜ我々が今回の解説を仰せつかったかを、渡部先生の方からご説明願います。

渡部 私が東京大学物性研究所の極限レーザーグループで研究室をもっていた時に、Mourou さんがミシガン大学のサバティカルを利用して私の研究室に半年ほど東京大学の客員教授として滞在していました。来日は1994年8月29日、離日は1995年1月6日です。このとき技官だったのが鍋川君、博士課程の学生だったのが小林君、翌年私の研究室に学生として加わり、ミシガン大学に留学してMourou さんの下で博士課程の研究を行

ったのが板谷君です(図1(a)、(b)参照)。図1(a)の写真に写っている助手の近藤君*1を含めて全員がチャープパルス増幅法(CPA)のお世話になっています。

板谷 当時の渡部先生の研究は、エキシマレーザーというガス媒質を用いた紫外レーザーを用いて高強度超短パルス光を発生する、というものでした。若干専門が異なると思うのですが、固体レーザーのCPAが発明される経緯についてはどのように感じておられましたか。

渡部 CPAのアイデアと実験結果が査読学術誌で最初に発表されたのは1985年¹、現在とほぼ同じ形のCPAの手法が発表されたのが1988年²です。当時MourouさんはRochester大学の助教から教授になる頃で、高強度超短パルスのガラスレーザーの開発を行っていました。したがって、これらの研究内容はガラスレーザーに関する技術という印象を受け、色素レーザーやエキシマレーザーを用いた超短パルス光の研究者にとっては、あまり興味を惹くものではなかったと思います。また、ガラスレーザーはレーザー核融合の施設で使われていたのですが、この目的の場合にはパルス幅を短縮することのメリットはそれほど大きくないと考えられていました。CPAが大きく注目

*1—近藤公伯：量子科学技術研究開発機構・関西光科学研究センター 光量子科学研究部部長。図1(a)左端。



図1—私蔵写真(渡部)

(a) 渡部(左から2番目), Mourou先生(渡部の右隣), 小林(右から4番目), 鍋川(右端)。東京大学物性研究所渡部研究室実験室にて。1994年。(b) Mourou先生の長女 Marieさん(左から2番目), 次男 Vincent君(左から3番目), 小林(右から2番目), 板谷(右端)。東京大学生産技術研究所屋上にて。1994年。(c) Mourou先生の夫人 Marcelleさん(左端), Mourou先生(中心), Strickland先生(右端)。CPA 25周年シンポジウム(Laval大学)にて。2010年。

されたのは、ガラスレーザーよりも遥かにパルス幅が短くなり、しかも取扱いが容易なチタンサファイア(Ti:S)レーザーが登場した1990年くらいからでしょう。

鍋川 そのような中で、どうしてMourou先生は渡部研を滞在先として選んだのでしょうか。

渡部 はっきりしたことはわかりません。最初にMourouさんと話をしたのは1988年に比叡山で行われた国際会議(International Conference of Ultrafast Phenomena (ICUP))だったと思います。このとき我々の研究室からは当時の助手の遠藤君*2がピー

クパワー4TW*3の高強度超短パルスエキシマレーザーの実験結果を報告しています。体育館のような広大な実験室で開発された大型の装置でしたが、当時のピークパワーの最大値を記録しました。研究内容としてはMourouさんの研究していたガラスレーザーに対する完全な競争相手だったわけです。その後の国際会議(High Energy Density Physics OSA topical meeting, Snowbird, 1989年)では彼に「装置のOHP*4を貸してくれ」といわれて貸したとこ

tre, Czech Republic

*3—パルス光のピークパワーはおおよそ(パルスエネルギー)/(パルス幅)で表される。TWは「テラワット」と読み、 10^{12} Wを表す。

*2—遠藤彰: Leader of Research Program 1, HiLASE Cen-

ろ、「TWのピークパワーを得るのにガスレーザーではこの巨大な装置が必要だが、我々のCPAを使えば通常の光学テーブルに取まってしまう(Table-top-terrawatt laser, T³(T-cube)laser)」と発表されてしまいました。

鍋川 しかし、私が渡部研究室に参加した1992年には、エキシマレーザーだけではなくTiSレーザーのCPAシステムが既に一通り動いていました。

渡部 後で板谷君に紹介してもらいますが、高強度超短パルス光の重要な応用研究として高次高調波発生があります。当時は高次高調波の発生メカニズムもはっきりわかっておらず議論が続いており、また波長をいかに短くするかという国際競争の只中でもありました。我々は当時学生だった猿倉君*5の力を借りて、1989年には小型・高繰返し化したエキシマレーザーによる高次高調波発生の最短波長記録を作っていました³が、装置の前段部分(増幅前の種光となる超短パルス光を作る部分)は色素レーザーでありにも複雑でした。レーザーを開発した渡辺君*6は既に研空室を離れていましたし、素人の新人(鍋川)にこれを動かせというのは無理でした。そこで、ここにTiSレーザーのCPAシステムを導入すれば安定して装置全体が動き、国際競争に勝ると期待したのです。思えば我々がCPAシステムを採用したことでMourouさんは親近感をもったのかもしれませんが。1993年の国際会議(International Conference Multiphoton Processes (ICOMP), Quebec)に参加した折、Mourouさんから「日本に数カ月ほど滞在したいので受け入れてほしい」と頼まれたのです。このときMourouさんは既にミシガン大学に移っていました。

鍋川 なるほど、そのような経緯だったのですね。私は渡部先生が受け入れのための事務手続きに翻

弄されていたことが強く印象に残っています。

渡部 まずは滞在費です。幸い文部省(当時)の外国人招へい制度に採択されました。次に住む所を決めなければなりません。奥さん、次男、長女の計3人を伴うということでしたので、4人で暮らせる場所を種々検討しました。その結果、なんとか白金にある大学のインターナショナルロッジを借りられたのですが、来日当初1月分の空気がなかったのです。困り果てて様々な方に話をしたところ、電通大の植田先生*7から「宅間先生*8のところなら何とかなるのでは」助言されたので宅間先生に相談したところ、宅間先生の親族の住宅を借りることができたのです。

小林 娘さんは港区の公立小学校に通っていましたね。

渡部 娘さんの学校選びも大変だったのですが、来日手続きも苦労しました。Mourouさんは、大雑把というか、細かいことは気にしないというか、大抵のことは何とかかなと思っている節があります。当時は主にFAXでやり取りしていたのも原因の一つですが、こちらから要求した必要書類がなかなか返ってきません。おかげでビザの取得手続きがまったく進みません。国際貨物会社を使ってこちらで記入した書類を急送しましたが、Mourouさんがデトロイトの領事館でビザを取得できたのは来日の前日でした。いろいろ苦労はしましたが、Mourouさんのおおらかな性格を理解すると、まったく憎めないのですよ。

CPAとは

渡部 Mourouさんが来日して、私の研究室でも本格的なTiSレーザーCPAシステムを開発することになりました。CPAについては担当していた鍋川君に説明してもらいましょう。

鍋川 はい。図2に概念図を示します。超短パルスレーザー光はモード同期レーザー発振器(図2

*4—当時の学会発表はオーバーヘッドプロジェクター(OHP)と呼ばれる投影機を用いて行われていた。ここでのOHPは図や文字を印刷または手書きした透明フィルムを指す。

*5—猿倉信彦：大阪大学教授

*6—渡辺昌良：電気通信大学教授、副学長

*7—植田憲一：電気通信大学名誉教授

*8—宅間宏：電気通信大学名誉教授

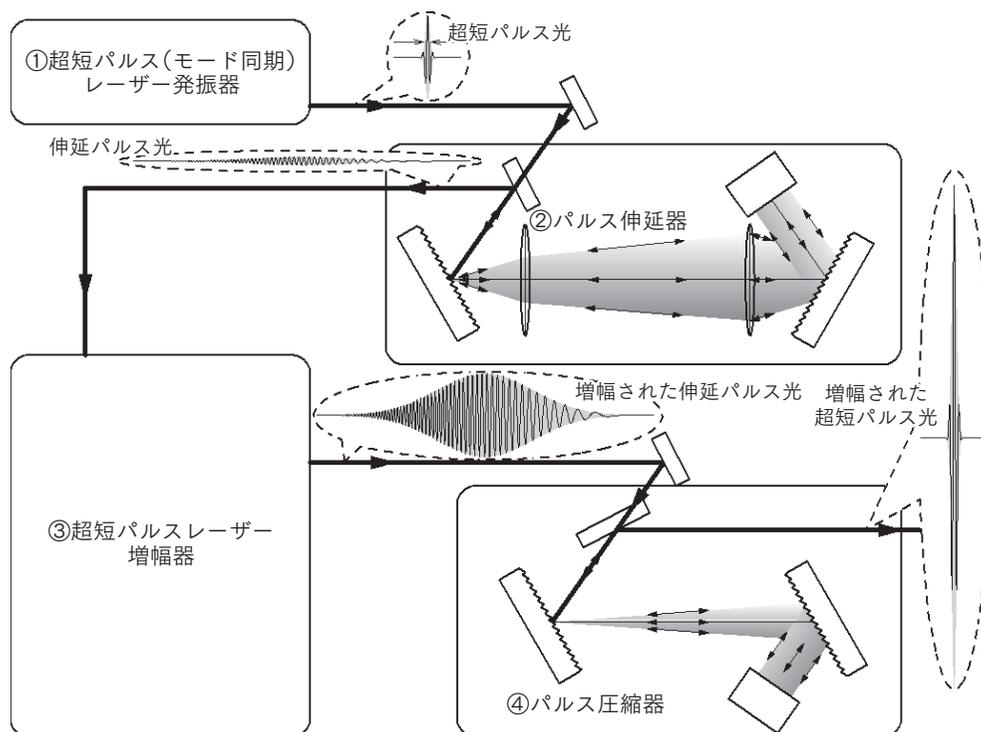


図2—チャープパルス増幅法(CPA)の原理
 レーザー光の経路を矢印付きの直線で表す。点線で囲まれた部分は各場所でのパルス光(パルス包絡線に囲まれた振動電場)の時間波形を模式的に示したもの。②および④のパルス伸延器・圧縮器では回折格子が用いられている。このため超短パルス光が波長に応じて空間的に広がる様子をグレースケールで模式的に表している。

の①で作り出すことができます。①の横の点線の囲みは発振器から出力されるパルス光の電場を模式的に示しています。矢印で示した時間幅は1 ps～数 fs*9です。通常はこのパルス光が数十 MHz 程度の繰返しで出力されるので、発振器の平均パワーは数 mW から 1 W 程度ですが、1 パルスあたりのエネルギーはせいぜい 1 nJ くらいにしかありません。高強度の超短パルス光を得るためにはこの「弱い種光」を励起されたレーザー媒質に通すことによって増幅してあげればよいわけです。典型的にはエネルギーを 100 万倍程度まで引き上げます(繰返しは低くなります)。ただし増幅レーザー媒質としてガラスや結晶などによる固体レーザーを用いると大きな問題が発生します。超短パルス光の瞬時強度が高くなりすぎるとレーザー媒質

が破壊されてしまうのです。あまりにも光の強度が強いと固体の屈折率が変化し(Kerr 効果)、光の強度の強い部分にさらに光が集光される現象(自己収束)が起こります。これが破壊の原因です。

Mourou 先生は、この問題を「増幅前にパルス幅を伸ばし」「増幅後にパルス幅を元に戻す(圧縮する)」手法で解決しました。図2の②に示す通り、発振器からの出力光はパルス伸延器でパルス幅を伸ばされてから③の増幅器で増幅されます。このときのパルス幅は 100 ps～ns 程度です。③の横の点線の囲みで示した通り、パルスエネルギーは大きくなりますが、瞬時強度は高くないのでレーザー媒質は破壊されません。増幅したパルス光をパルス圧縮器に通すことで大きなパルスエネルギー(mJ～J レベル)を保ちながらパルス幅を元に戻すと、所望の高強度超短パルス光が得られるというわけです。例えば、パルス幅 100 fs・パルスエネルギー 100 mJ ならピークパワー 1 TW ですが、

*9—ps(picosecond)は 10^{-12} 秒, fs(femtosecond)は 10^{-15} 秒を表す。以後の文中では ns(nanosecond, 10^{-9} 秒)および as(attosecond, 10^{-18} 秒)も使用する。

この程度の出力の CPA ならば光学テーブル上に乗る小型テーブルトップシステムになります。

渡部 CPA ではパルス幅を自在に伸ばしたり縮めたりする点が重要ですが、これはどのように行っていますか。

鍋川 図2の点線の囲みに示したパルス光電場の振動の様子を注意深く見てください。伸延したパルス光電場は振動の周期が時間的に変化するよう描かれています。超短パルス光は広い周波数帯域の光を含んでいます。回折格子対などを用いることで、これらの周波数成分に対して少しずつずらした遅延時間(群遅延)を与えると、この図のように時間的に周波数が変化する(これをチャープと呼びます)「長い」パルス光が得られます。パルス圧縮器で伸延器と反対符号の群遅延を与えれば、伸ばしたパルスが元に戻るというわけです。これがチャープパルス増幅(CPA)と呼ばれる所以です。

板谷 ただし、Strickland 先生との共著で発表した1985年の論文の内容は、この手法とは少し違っていましたね。

渡部 当時はガラスレーザーの波長で1 ps くらいのパルス幅の超短パルス光を発生する手法が複雑でした。パルス幅100 ps くらいのパルス光をモード同期発振器から出力し、シングルモードファイバーに通します。自己位相変調でスペクトル幅が広がるので、これをそのまま増幅前の種光として用いたのです。ファイバーにより正の群遅延が与えられているので、ファイバーがパルス伸延器も兼ねていたわけです。現代の装置と比べると大変不安定なレーザー発振器とランプ励起の増幅器を用いた実験なので、当時大学院生だった Strickland さんも相当苦労したのではないのでしょうか。図2の手法は1988年の論文で発表されており、このときに CPA という名称が付けられています。

鍋川 ところで Mourou 先生は、どうやって CPA を思いついたのでしょうか？

渡部 Mourou さん本人からは「レーダーで同様の技術がある」と聞きました。また、Strickland さんの博士論文にもそのことが書かれています⁴。

Mourou さんは超高速エレクトロニクスにも詳しいので、パルスマイクロ波の増幅器からヒントを得たのかもしれませんが。新たな技術開発には異なる分野の研究を応用することも重要ですね。

Mourou 先生のこと

鍋川 当時の学生から見て Mourou 先生の印象はどうでしたか？

小林 昼食は六本木^{*10}の店をいろいろ案内したのですが、「行きたい店はありますか？」の答えが「マクドナルド」。日本食は合わなかったのかもしれませんが……。息子の Vincent 君からは英会話を習っていました。1度二人で江の島に行ったのですが、一日中英語しかしゃべれないという初めての経験で苦労しました。その後アメリカの学会に行ったときもロサンゼルス案内してもらっています。

渡部 板谷君はミシガン大学で Mourou 先生から直接指導を受けています。

板谷 Mourou 先生が渡部研に滞在していた当時、私は隣の研究室の学生でした。その後、博士課程で渡部研に移り、TiS レーザーの開発を行ったのですが、これが一段落したところでミシガン大学の Mourou 先生のところへ大学院生として滞在することになりました。この滞在については Mourou 先生がスポンサー探しに奔走してくれ、そのおかげでミシガン大学の地元 Ann Arbor に研究所をもつ企業から援助を受けることができました。

鍋川 滞在期間は？

板谷 1996年5月～1997年9月までの約1年半です。当時のミシガン大学は、CPA レーザーの開発と応用のために Center for Ultrafast Optical Science(CUOS)という全米科学財団の研究施設が設立されていて、Mourou 先生がその所長でした。私は Mourou 先生の発案で、高強度レーザーパル

^{*10}—当時の東大物性研の住所は東京都港区六本木7-22-1。生産技術研究所と同じ敷地内にあった。

スの時間波形をクリーンにする手法の開発に従事しました。ミシガン大での Mourou 先生は、大きな方針は言うけれども、実験上の細かいことについては立ち入らないで、自由にやらせてくれました。

鍋川 何か印象的だったことはありますか？

板谷 当時は TiS レーザーが全盛でしたが、Mourou 先生の下では、TiS レーザーの次の光源として、Yb 添加固体レーザーの開発も行われていました。TiS レーザーの CPA ができたら満足するのではなく、「その次は何か」と考えるところは Mourou 先生ならではのようです。CUOS では当時から既に、次世代レーザー、超高強度レーザーを用いたプラズマ物理、レーザー加工、そして眼科治療まで幅広い応用を検討し実験を進めていました。その後 20 年たち、当時の研究テーマの多くが形を変えて今の最先端の研究や実社会での応用につながっているように思えます。

鍋川 とにかく新しい研究のアイデアを試すということに貪欲であったことは私も印象に残っています。必ずしも成功したわけではないですが。

渡部 思い出しました。レーザーチャネリング^{5*}11を使った誘雷実験は失敗でした。レーザーチャネリングは観測できて、当時最高時間分解能のストリークカメラをメーカーから借りてパルス幅の測定まで行ったのですが……。

鍋川 電力中央研究所の方々に協力していただいて放電装置を持ち込みましたが、レーザーチャネリングの通り道に沿って放電することはまったくありませんでした。しかし Mourou 先生は失敗してもあまり気にせず常に物事をポジティブに捉える方だったと思います。

CPA の展開

渡部 最後に、CPA が基礎科学・産業応用にどのような貢献をしてきたかを紹介してください。

*11—高強度超短パルス光が集光された状態のまま空气中を長距離伝搬する現象。空気の Kerr 効果による自己収束と空気の電離による発散の効果が釣り合って生ずる。

板谷 1984 年の CPA の発明以降、高強度レーザー技術が劇的に進展しました。まずは超高強度化です。小型のテーブルトップレーザーで TW 出力なので、レーザー核融合のために開発されていた大型ガラスレーザーに CPA を適用すれば PW^{*12} が得られるという発想にもとづきます。実際、国内外のレーザー施設においてピコ秒・ペタワットの超高強度光源が実現しました。また、TiS レーザーを用いた大型 CPA レーザーも登場し、パルス幅が 30 fs 前後の超短パルスでの PW 出力も実現しました。こういったレーザーを集光して得られる超高強度光電磁場下での物理（プラズマを用いたレーザー粒子加速、相対論的なプラズマを利用した非線形光学、実験室内での天体物理現象の再現、など）の研究が可能となりました。ヨーロッパでは現在、ELI (Extreme Light Infrastructure) と呼ばれる CPA 技術にもとづく大型レーザーの開発プロジェクトが進行中です。

渡部 小型の CPA 光源とその応用については、どうでしたか。

板谷 小型の CPA 光源では、1 kHz 以上の高い繰返しで高強度フェムト秒(fs)パルスを発生することが可能になっています。安定して高強度超短パルス光を供給できるので、非線形光学現象による波長変換を容易に行うことができます。その結果、小型の CPA 装置で作り出すことのできるコヒーレント光の波長域は 6 桁(テラヘルツ、赤外、可視、極端紫外、軟 X 線)に及び、それぞれが超高速分光の研究に応用されています。特に、CPA の発明と同時期に発見された「高次高調波」と呼ばれる短波長光の発生は非常に興味深い現象でした。その発生原理の解明とレーザーパルス圧縮手法の発展によって、現在ではアト秒(as)領域のパルス光の発生が可能となりました。この研究分野は「アト秒科学」と呼ばれており、超高速光科学の最先端となっています。

小林 Mourou 先生は、超短パルス光でレーザー

*12—PW は「ペタワット」と読み、TW の 1000 倍のパワーを表す。

加工を行うと長いパルス光に比べて切り口がきれいになることにいち早く気づき、1994年に特許を申請しています。この特許はミシガン大学の地元企業が独占実施権をもっており、ファイバーレーザーを用いたレーシック用のレーザー装置などを製品化しました。現在この基本特許は期限が切れたので、超短パルスによるレーザー加工技術はますます広がっていくでしょう。

自動車産業などに使われる大型のレーザー加工機は Yb 添加固体レーザーによる装置開発が進んでおり、ここでも CPA が使われます。特にドイツでは Jena のファイバーレーザー、Stuttgart の薄ディスク、Aachen のイノスラブ、と各地域の研究所・企業別に様々な形状の固体レーザーを用いてレーザー加工機の開発競争が行われているところです。平均パワー 1 kW 近くまで及ぶこれらの大出力最先端レーザー加工技術の進展は、CPA のおかげと言っても過言ではありません。

渡部 CPA の発表から既に 30 年以上の月日が経ちました。我々の研究分野では、もうほとんどその存在を意識することなく日常的に CPA を用いたレーザー装置を使うようになりました。今回のノーベル賞受賞でその有用性を改めて認識すると共に、我々の研究生活を大いに刺激してくれた Mourou さんに「おめでとう」の祝意を述べて本稿を締めくくりたいと思います。

文献

- 1—D. Strickland and G. Mourou, "Compression of amplified chirped optical pulses," *Opt. Commun.*, **56**, 219(1985).
- 2—P. Maine, D. Strickland, P. Bado, M. Pessot, and G. Mourou, "Generation of ultrahigh peak power pulses by chirped pulse amplification," *IEEE J. Quantum Electron.*, QE-24, 398(1988).
- 3—N. Sarukura, K. Hata, T. Adachi, R. Nodomi, M. Watanabe, and S. Watanabe, "Coherent soft-x-ray generation by the harmonics of an ultrahigh-power KrF laser," *Phys. Rev. A*, **43**, 1669 (R)(1991).
- 4—D. T. Strickland, "Development of an ultra-bright laser and an application to multi-photon ionization," Ph.D. Thesis, <https://web.archive.org/web/20130707150743/http://www.ile.rochester.edu/media/publications/documents/theses/Strickland.pdf>
- 5—A. Braun, G. Korn, X. Liu, D. Du, J. Squier, and G. Mourou, "Self-channeling of high-peak-power femtosecond laser pulses in air," *Opt. Lett.*, **20**, 73(1995).