

平成31年4月12日

(社) レーザー学会・ファイバーレーザー技術専門委員会

ファイバーレーザー技術ロードマップ (案)

参考資料

- | | |
|------------------------------|----------------------------|
| 1. 序論 | : 西澤典彦 |
| 2. レーザーマップ
(ファイバーレーザーの特長) | : 小関泰之, 白川晃 |
| 3. 技術マップ
(各技術の説明) | |
| 3-1. 要素技術 | : 山下真二, 藤本 靖 |
| 3-2. レーザー技術 | : 西澤典彦, 白川 晃 |
| 3-3. 応用技術 | : 吉富 大, 吉田英次 |
| 3-4. レーザー加工 | : 松下俊一 |
| 3-5. バイオ・医療 | : 足立宗之, 小関泰之 |
| 3-6. 光通信 | : 葛西恵介 |
| 3-7. センシング(光周波数コム) | : 美濃島薫 |
| 3-8. エネルギー・高強度 | : 藤本 靖 |
| 4. パワーマップ | : 白川 晃, 松下俊一
島 大介, 吉田英次 |
| 4-1. CW ファイバーレーザーの超高出力化 | |
| 4-2. パルスファイバーレーザーの超高出力化 | |

1. 序論

西澤典彦

ファイバーレーザーは、効率が高く、小型・安定な、実用性の高いレーザーです。本質的に優れたポテンシャルを有するファイバーレーザーは、レーザー技術の中心的な存在となってきています。また、レーザー加工や医療などのレーザー応用の分野でも、実用性や特性に優れたファイバーレーザーが、本命の光源になってきました。ファイバーレーザーの出力パワーは、年々、指数関数的に増加をし続けています。また、新しい光ファイバーや要素デバイスの発展のお陰で、波長可変化、広帯域化などの高機能化も進み、今後も益々発展していくことが期待されています。

このような背景の下、レーザー学会ファイバーレーザー技術専門委員会では、ファイバーレーザー技術に関するロードマップを作成致しました。第一線でご活躍のファイバーレーザーに関する研究者・技術者が産官学から集まり、議論を重ね、作成したものです。これまでの歴史から最近の急速な発展と今後の展望、更に広範囲に渡る応用展開を一望することができます。

まず、ファイバーレーザーの特徴を「レーザーマップ」に分かりやすくまとめました。

次の、「技術マップ」では、ファイバーレーザーの技術とその市場・応用展開について、これまでの歴史から今後の展開までをロードマップにまとめました。更に、各項目について、一般の方にも分かるような平易な説明文を用意しました。

最後に、「パワーマップ」では、ファイバーレーザー出力の年ごとの推移と対応する応用分野の展開をグラフにまとめました。前述の様に、驚くことに、ファイバーレーザーの出力光強度は、年々、指数関数的に伸び続けており、技術研究の進展から、今後もその伸びが続いていくと予想されています。ファイバーレーザーには、広い分野の発展を牽引する役割が期待されていくことが予想されます。

尚、不足な点やお気づきの点がある方は、是非、ファイバーレーザー技術専門委員会までご連絡頂ければ幸いです。

2. レーザーマップ（ファイバーレーザーの特長）

小関泰之，白川晃

レーザーは、単色光、高強度光、超短パルス光など、さまざまな特長を持った光を発生する装置です。現在、レーザーは産業、通信、基礎研究、医療など、極めて広い領域において活用され、我々の社会を支えています。レーザーには固体レーザー、気体レーザー、半導体レーザー、ファイバーレーザーなどの種類があり、中でも、ファイバーレーザーは近年急速な発達を遂げ、図 2.1 に示すように、高い性能と実用性、高機能性を兼ね備えていることから、大きな注目を集めています。ファイバーレーザーはその名の通り光ファイバーにより構成されます（図 2.2）。このことが、以下のような優れた特長につながっています。

- ・ 高輝度・高出力性：ファイバーレーザーでは、光ファイバー中の光導波路構造によって光の空間分布を制御して光をファイバー内に閉じ込めます。従って、ファイバーレーザーの出力光は優れたビーム品質と集光特性を実現します。これはレーザー微細加工等において有利な特長です。これに対し、固体レーザーや気体レーザーなどの空間光学を用いるレーザーでは熱レンズ効果によるビーム品質低下が問題となります。また、光ファイバーは光デバイスの中でも圧倒的な低損失（数 dB/km）と高い破壊閾値を誇ります。さらに、ファイバーレーザーでは、レーザー光と励起光が同一の光ファイバーを重ねて導波するため、高い励起効率やエネルギー効率を実現できます。このため、高輝度かつ kW 級の高出力光の発生が可能です。
- ・ 実用性：光ファイバーは、単位体積当りの表面積が広く、放熱効率に優れています。このため、多くのファイバーレーザーは水冷の必要がありません。また、空間光学系を用いないことから、外乱に強く長期安定性に優れ、メンテナンスフリー動作が可能です。さらに、光ファイバーは小型・軽量で柔らかいため、ファイバーレーザーはコンパクトな筐体に収めることが可能です。また、光ファイバーを用いると光を照射箇所まで取り回すこともできます。
- ・ 高機能性：近年、光ファイバーに複雑な屈折率分布やフォトニック結晶構造を形成する技術が急速に進展しています。屈折率構造を巧みに利用したダブルクラッドファイバーでは、励起光とレーザー光を異なる空間モードで伝搬させることで、極めて高輝度な光の発生を可能にしています。光ファイバーの分散特性や非線形光学特性の制御性も、製造技術の進展とともに飛躍的に高まっています。さらに、ファイバーレーザーの利得媒質として用いられる希土類イオン添加ファイバーは広い利得帯域を有し、波長可変レーザーや超短パルス生成にも有利です。ファイバーレーザーの動作波長はイオンの利得帯域で決まり、従来は Er イオンによる 1.5 μm 帯動作や Yb イオンによる 1.0 μm 帯動作が主流でした。近年、添加可能な希土類イオンの種類が増え、近赤外光や可視光の発生も可能になっています。また、光ファイバーが有する非線形光学特性を活用すると、超広帯域光発生や波長変換機能を実現できます。これらの機能を活用することで実現される光コム光源は、従来の光源とは一線を画する高精度な光計測を実現します。ナノカーボン素子や可飽和吸収半導体ミラー等の光学素子と組み合わせた超短パルス発生も実現されています。

FIBER LASER

ファイバーレーザー



ファイバーレーザーは高効率・高強度・高品質の光を発振する。小型化が可能で、高機能化が実現される。また、様々な環境・状況で安定な発振が得られる。
特にビーム品質が高いため、様々な分野で応用できる。

図 2.1. ファイバーレーザーの特長.

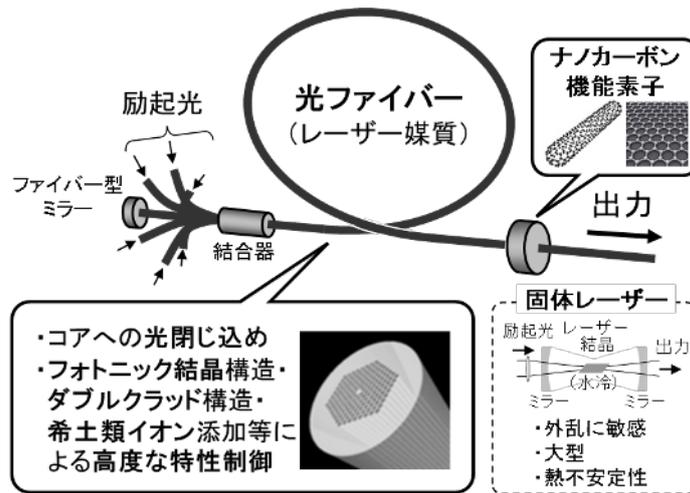


図 2.2. ファイバーレーザーの模式図.

3. 技術マップ

FL が拓く New Science

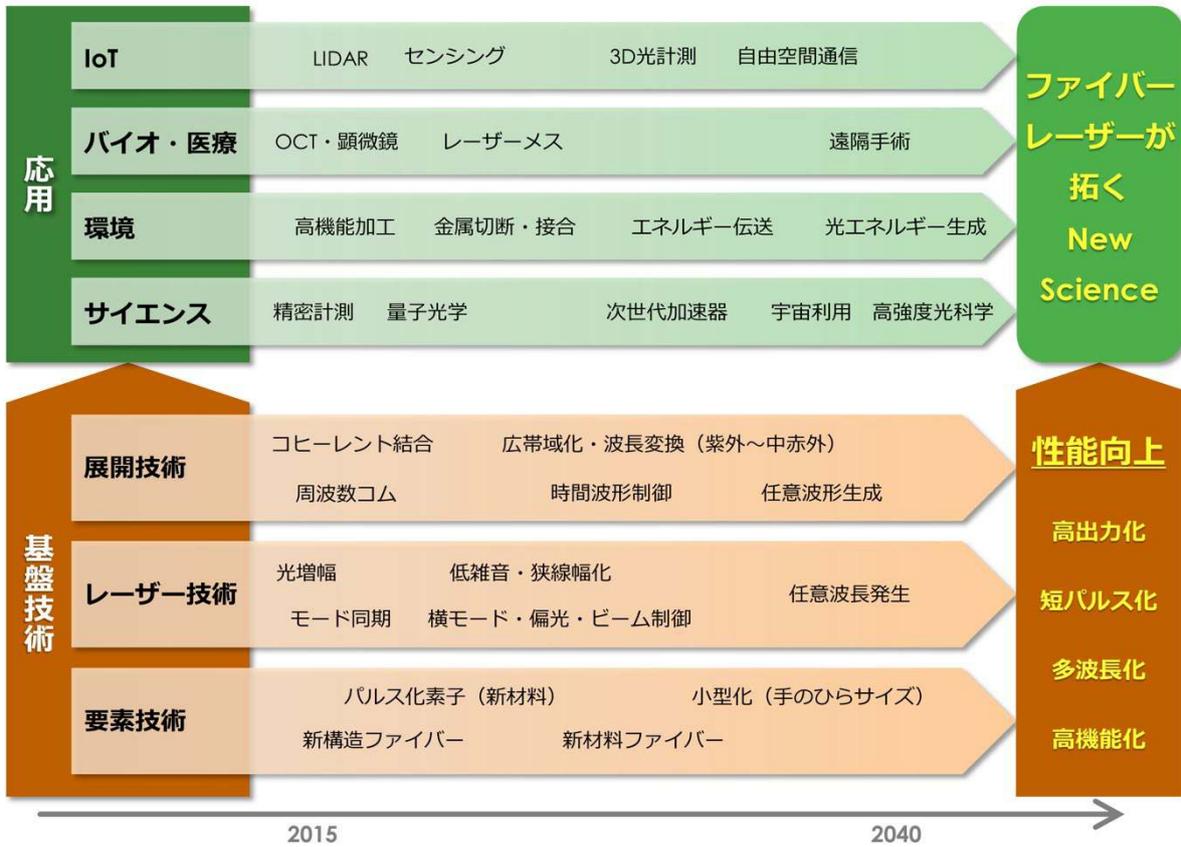
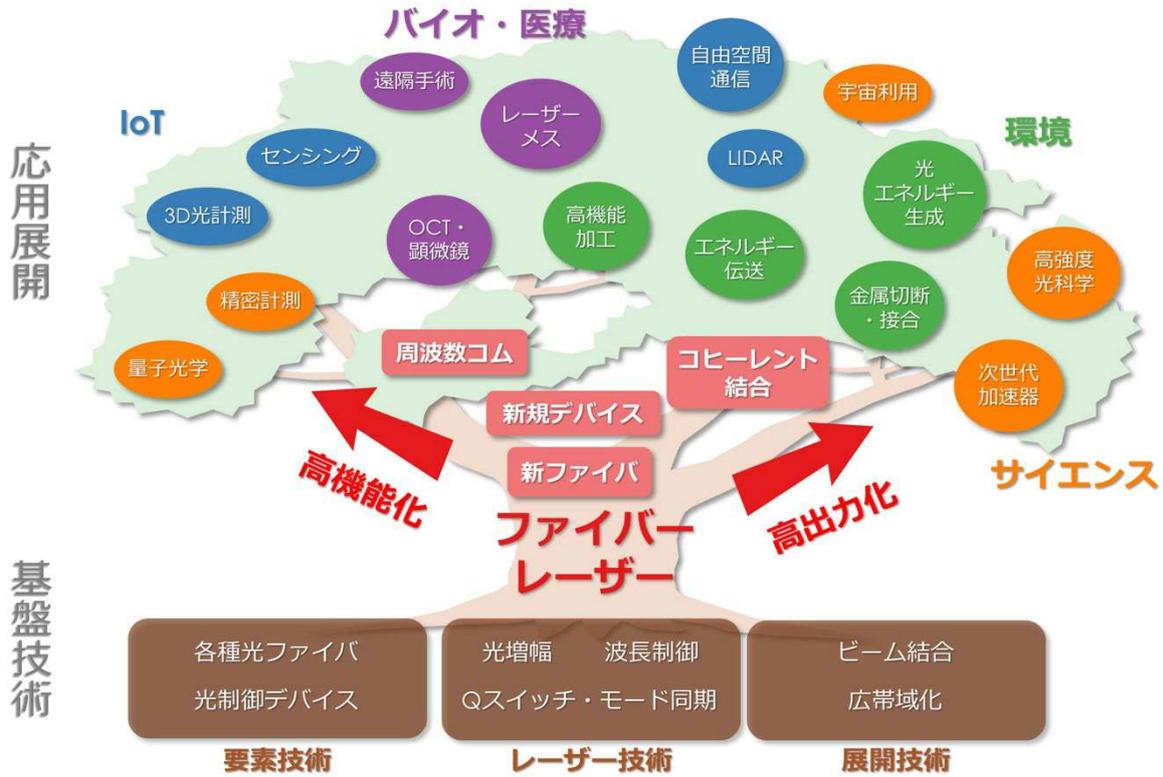


図3. 技術マップ.

3-1. 要素技術

山下真司, 藤本 靖

誘電体のコア・クラッドを持つ導波路が提案されてすぐ, Nd ドープバリウムクラウンガラスコアを持つファイバーレーザー発振[3.1.1]が報告されている. 以来, これまでに, グレーデッドインデックス(GI)ファイバー, 低損失ファイバー, 光増幅用 Er (エルビウム) 添加ファイバー, 分散補償ファイバー等, 主要な技術が開発された. これらの技術により, コアガラスへの不純物添加による光増幅機能付与 (各種希土類ドープファイバー) と, 光ファイバー断面構造の設計 (偏波保存ファイバー, フォトニック結晶ファイバー, ダブルクラッドファイバーなど) による分散値などの物性値制御が可能となり, 良質な励起光源の出現も相まって, 高効率光ファイバーレーザー光源へと発展した.

広帯域な希土類ドープファイバーを用いれば, フェムト秒領域の短パルス光ファイバーレーザーを作ることができる. そのためには受動モード同期技術が用いられる. レーザー共振器中にモード同期素子として高速な可飽和吸収素子(saturable absorber, SA)を置くことで, レーザー共振器の縦モードを同期させることができ, ピコ秒からフェムト秒領域のパルス列 (繰り返し周波数は共振器長に反比例) を得ることができる. フェムト秒パルス発生のためには, 高速 (リカバリ時間 10 ps 以下) かつ飽和強度の低い SA が必須である. フェムト秒光ファイバーレーザーに用いられている SA としては, 従来から光ファイバー中の非線形性を利用したもの (非線形偏波回転, 等) や半導体型 SA (SESAM, 等) が用いられてきているが, 光ファイバーレーザーにとってはそれぞれ一長一短がある. これに対し近年, カーボンナノチューブ(CNT)・グラフェン等のナノカーボン型 SA が用いられるようになってきている[3.1.2, 3.1.3] (図 3.1.1). これらは本質的に高速 (リカバリ時間 1 ps 以下) であり, 飽和強度も低く, 非常に広帯域 (CNT で帯域 200 nm 以上, グラフェンは 1000 nm 以上) である. さらに光ファイバーデバイス化が非常に容易で光ファイバーレーザーとの整合性が良い. 特に図 3.1.1 に示すような GHz 超の高繰り返し短共振器光ファイバーレーザーに適している[3.1.4]. またこれらの材料のもつ高非線形性も注目されている.

超短尺希土類ドープ光ファイバーと CNT を用いた GHz 超の繰り返し周波数を持つ受動モード同期短パルス光ファイバーレーザーが実現し, 光ファイバーによる研究開発はインフラ・装置のフェーズから, 機能性光学素子のフェーズに移りつつある. 今後, 高濃度希土類ドープシリカコアガラスの製造技術[3.1.5]や, 特殊モードや機能を制御する断面構造設計の発展, また, それら機能性光素子の有機的な組み合わせにより, 新しい光ファイバーデバイスなどの開発が期待される. また, 光ファイバーレーザーに関する物理量として波長があり, 耐候性フッ化物ファイバーなどの新規ホストガラスの実現によって, シリカガラスでは達成できなかった新しい波長領域 (Pr フッ化物ファイバーによる可視光[3.1.6], Er フッ化物ファイバーによる中赤外光[3.1.7]) への展開が可能となって来ており, 新発光材料の探索も含め, 新波長・新材料・新構造を持つ機能性光ファイバー素子の研究展開が期待される (図 3.1.2). またそれに応じて, SA 等の光素子も新たな波長帯への対応が期待されており, SA としてはグラフェン等の 2 次元薄膜が有力視されている[3.1.8].

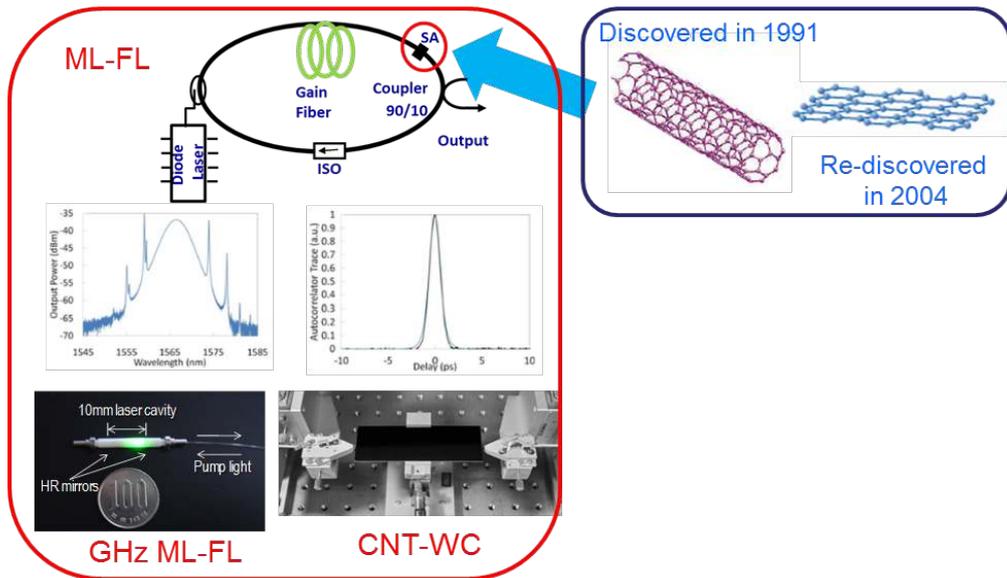


図 3.1.1. ナノカーボン型 SA によるモード同期光ファイバーレーザー。

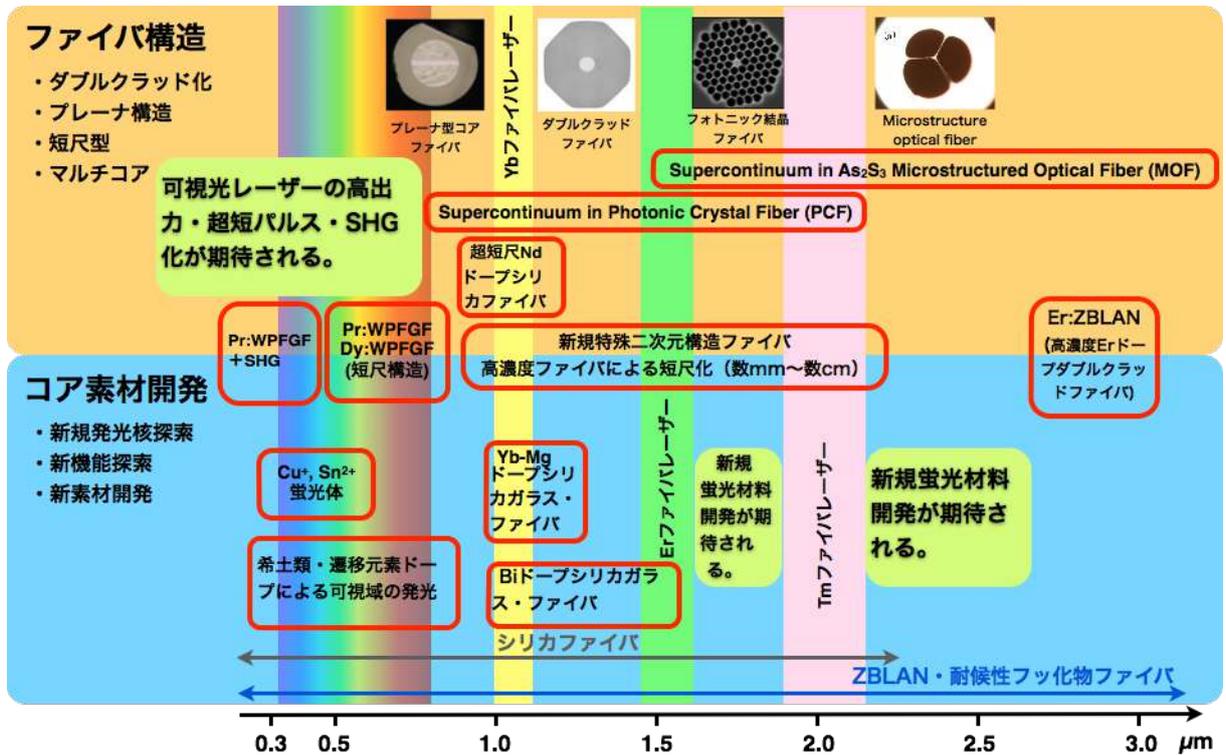


図 3.1.2. 光ファイバー構造及び光ファイバーコア素材の波長マッピングとその可能性。

参考文献

- [3.1.1] E. Snitzer, "Optical maser action of Nd^{+3} in a Barium crown glass," *Phys. Rev. Lett.* **7**, 444-446 (1961).
- [3.1.2] S. Y. Set, H. Yaguchi, Y. Tanaka, and M. Jablonski, "Laser mode locking using a saturable absorber incorporating carbon nanotubes," *J. Lightwave Technol.* **22**, 51-56 (2004).
- [3.1.3] S. Yamashita, "A tutorial on nonlinear photonic applications of carbon nanotube and graphene (invited tutorial)," *J. Lightwave Technol.* **30**, 427-447 (2012).
- [3.1.4] A. Martinez and S. Yamashita, "Multi-gigahertz repetition rate passively modelocked fiber lasers using carbon nanotubes," *Opt. Express* **19**, 6155-6163 (2011).
- [3.1.5] Y. Fujimoto and M. Nakatsuka, "A novel method for uniform dispersion of the rare earth ions in SiO_2 glass using zeolite X," *J. Non-Cryst. Solids* **215**, 182-191 (1997).
- [3.1.6] Y. Fujimoto, J. Nakanishi, T. Yamada, O. Ishii, and M. Yamazaki, "Visible fiber lasers excited by GaN laser diodes (invited)," *Prog. Quant. Electron.* **37**, 185-214 (2013).
- [3.1.7] S. Tokita, M. Murakami, S. Shimizu, M. Hashida, and S. Sakabe, "Liquid-cooled 24 W mid-infrared Er:ZBLAN fiber laser," *Opt. Lett.* **34**, 3062-3064 (2009).
- [3.1.8] S. Yamashita, A. Martinez, and B. Xu, "Short pulse fiber lasers mode-locked by carbon nanotubes and graphene (invited)," *Opt. Fiber Technol.* **20**, 702-713 (2014).

3-2. レーザー技術

西澤典彦, 白川 晃

ファイバーレーザーは, 1961 年に, Snitzer らによって初めて実証された[3.2.1]. 1960 年の Maiman による初めてのレーザー発振の翌年なのは, 驚くべきことである. その後, 1989 年に半導体レーザー励起の Er 添加ファイバー増幅器が開発されると, それを用いたファイバーレーザーの研究が進み始めた[3.2.2]. 当時はファイバーレーザーの出力はまだまだ小さく, 光通信やセンサ用の光源としての研究が主流であったが, 光通信技術の成熟と共に各種のデバイスの性能が向上し, それに伴ってファイバーレーザーの研究も進展をし始めた.

・モード同期ファイバーレーザー・短パルスファイバーレーザー

光ファイバー中での非線形効果(光強度による屈折率変化)や半導体製の可飽和吸収体(SESAM)によって, 受動モード同期(自然発生的な超短パルス発生現象)による超短パルス発振が最初に得られたのは, 1990 年代前半である[3.2.3-3.2.5]. 非線形効果を用いた偏波の回転や, 8 の字型のファイバー干渉計等, 受動モード同期を得るためにさまざまな共振器構成の研究が行われた. また, 変調器を用いて外部からの制御によって強制的にモード同期を掛ける能動モード同期もその頃報告がなされ, 研究開発, および製品化が進められた[3.2.6]. その後, 1998 年頃に SESAM を用いた手のひらサイズのコンパクトなファイバーレーザーが製品化され, 実用的なレーザーとしての注目度が上がり始めた[3.2.7]. また, 高出力が得られる Yb 添加ファイバーによる超短パルスレーザーが 2012 年頃, 更に中赤外域で発振の得られる Tm 添加超短パルスファイバーレーザーの発振が報告されるに至っている. この他に, 繰り返し周波数を調整できる半導体レーザーを種光としたファイバーレーザーもパルス光源として研究開発が進められている. また, ナノチューブやグラフェンを初めとする, 受動モード同期用の新しい可飽和吸収体の研究が盛んに進められている[3.2.8].

モード同期ファイバーレーザーは, 実用的な光周波数コムの種類光源として活用されており, 今後も重要な役割を担っていくと考えられる[3.2.9]. また, チャープパルス増幅などの超短パルス光の高強度化の技術も研究が進められてきた. 今後, 更なる高出力化に向けて, 単一横モードだけでなく, 高次の横モードを制御し, 活用していくことが期待されている. 同様に, 偏光やビーム制御も進められている[3.2.10]. また, 波長可変制御や超狭線幅・超広帯域光発生も光計測等に重要である[3.2.11]. 将来的には, 高度な加工応用などに必要となる, 任意時間波形制御や任意スペクトル波形制御技術の開発が進められていくと考えられる.

・高出力 cw, ns ファイバーレーザー

ファイバーレーザーの高出力化は, 1989 年のダブルクラッドファイバーの登場により始まった. マルチモードの高出力レーザーダイオード(LD)を励起源に使えるようになり, それまで数 10 mW 程度に限られていたファイバーレーザーの出力が飛躍的に増大した. また波長 900 nm 帯 InGaAs LD の高輝度高出力化により, 高量子効率・低量子欠損で熱負荷の小さい Yb 添加ファイバーが利得ファイバーに用いられるようになり, 更なる高出力化が実現した. 2004 年にシングルモード

(SM)で1kW, 2009年には10kWに到達している。更にErやTmなど他の希土類添加ファイバーでも100W-1kW級の動作が実現している。また多数のSMファイバーレーザー出力をバンドル化してマルチモードファイバーに合流することにより100kW級のファイバーレーザーも登場している。ファイバーの細線構造により長手方向に分散排熱できるため高い冷却能力を有し、自然空冷で上記高出力動作が実現している。従来型高出力レーザーに付随していた外部水冷装置などの付帯設備が不要であり実用性に優れたレーザーである。

シリカガラスでできたファイバー自体の破壊閾値は極めて高いため、レーザーの平均パワーの上限を決めるのは熱負荷と非線形性である。非線形性低減のためにコアの大モード面積(LMA)化の研究が2000年代から盛んに行われている。フォトニック結晶ファイバー(PCF)技術によりモード面積10000 μm^2 を超えるSM動作ファイバーが実現している。またレーザー励起レーザー(タンドム励起)によりYb添加ファイバーレーザーを一層の低量子欠損で動作させ熱負荷を一層低減する研究も行われている。これらにより単体のファイバーレーザーの平均出力をさらに向上させる挑戦が続くと考えられる。一方パルス動作は従来型高出力レーザーと比べ難しい。取り出せるエネルギーはビーム断面積で決まる飽和エネルギーを大きく超えることはできず、LMAファイバーでも10mJ程度が限界である。またピークパワーは非線形性で上限が決まり、その中でも自己収束効果により決まるパワー限界(約5MW)は定数でありコアのLMA化では克服できない。平均出力、パルスエネルギー/ピークパワーのさらなる向上は、複数のファイバーレーザーの電界を重畳して出力を向上するビーム結合が必要で、その研究が一層進むと考えられる。

参考文献

- [3.2.1] E. Snitzer, Phys. Rev. Lett. **7**, 444 (1961).
- [3.2.2] M. Nakazawa *et al.*, Appl. Phys. Lett. **54**, 295 (1989).
- [3.2.3] I. N. Duling III, Opt. Lett. **16**, 539 (1991).
- [3.2.4] K. Tamura *et al.*, Opt. Lett. **18**, 1080 (1993).
- [3.2.5] 西澤典彦, レーザーハンドブック第2版, 18・3, モード同期ファイバレーザー
- [3.2.6] M. Nakazawa, *Ultrafast Lasers*, Sect. 13 (Marcel Dekker, 2003).
- [3.2.7] M. E. Fermann, *Ultrafast Lasers*, Sect. 3 (Marcel Dekker, 2003).
- [3.2.8] S. Yamashita, J. Lightwave Technol. **30**, 427 (2012).
- [3.2.9] F. L. Hong, K. Minoshima *et al.*, Opt. Lett. **28**, 1516 (2003).
- [3.2.10] T. Omatsu *et al.*, Opt. Express **18**, 17967 (2010).
- [3.2.11] N. Nishizawa and T. Goto, IEEE Photon. Technol. Lett. **11**, 325 (1999).

3-3. 応用技術

吉富 大, 吉田英次

・縦モード制御

光周波数コム（縦モード制御）技術（図 3.3.1）は，光原子時計のための超精密分光計測に始まり，現在では，クロック伝送・高精度マイクロ波信号源・呼気診断・ガス検知・距離計測・宇宙探査・任意波形生成などへ応用の裾野が広がるに伴い，長時間安定性・簡便性・可搬性の要求が高まり，ファイバーレーザーへのシフトが急速に進んでいるといえる[3.3.1]. 共振器内電気光学(EO)変調や損失変調などによる高速制御技術が開発され，固体レーザーに匹敵する線幅が実現された．今後は，デュアルコム分光など各種応用に特化した柔軟な制御技術や宇宙探査（アストロコム）に代表される高繰返し化技術がさらに進展すると思われる．波長域では，波長変換を用いた極端紫外[3.3.2]や中赤外・テラヘルツ域[3.3.3]への拡張が精力的に研究されているが，今後，可視・中赤外の新素材ファイバー技術の進展や波長変換技術の向上などにより高安定・高出力なコム発生が期待される．

・コヒーレント結合

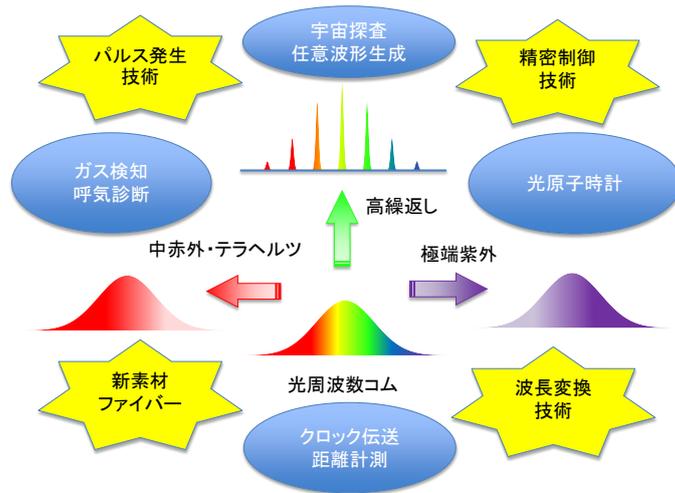
ニオブ酸リチウム(LN)等の位相変調器の集積化技術によるマルチチャンネル化（図 3.3.2）が可能となれば，バンドル化パルスファイバーレーザーのコヒーレント結合も容易となり，高ピーク高平均出力レーザーも実現可能であろう[3.3.4]. 連続発振出力は，半導体レーザーおよびファイバーレーザーのインコヒーレント結合により加算的に数 100 kW が可能となる．パルス出力は，ファイバー端バンドル化によるコヒーレント結合技術により，数 10 J や数 kW が可能となる．また，広帯域な位相同期光のコヒーレント結合による未踏の広帯域周波数コムや極短パルス発生も期待されるであろう．

・時間波形制御

周波数コムのモード毎に振幅・位相変調を行う方法による自由度の高い任意波形生成や高い周波数帯（40 GHz 以上）の位相変調器による高速パルスの波形生成が実現され，光通信・情報処理や時空間位相制御したレーザーシステムの種光源などへの応用に期待される．

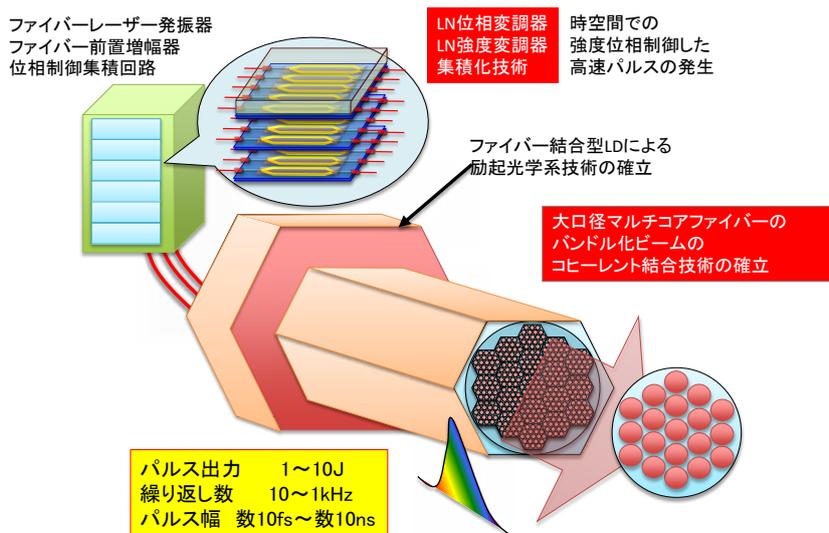
参考文献

- [3.3.1] 稲場 肇, 中嶋善晶, 保坂一元, 大苗 敦, 洪 鋒雷, レーザー研究 **39**, 819 (2011).
- [3.3.2] 小林洋平, レーザー研究 **39**, 831 (2011).
- [3.3.3] 安井武史, 謝 宜達, レーザー研究 **42**, 700 (2014).
- [3.3.4] 吉田英次, レーザー研究 **41**, 574 (2013).



20150527 Yoshitomi

図 3.3.1. 縦モード制御とその応用.



20150525 Yoshida

図 3.3.2. コヒーレント結合技術による高ピーク・高平均出力レーザーの展開.

3-4. レーザー加工分野

松下俊一

レーザー加工の歴史は古く、レーザーの発振が確認された直後からレーザー応用の一つとして今日まで精力的な研究開発が続けられている。レーザーの出力が数 100 W レベルになると、金属鋼板の切断や溶接が可能となる。早期に kW クラスの高出力化が実現された CO₂ レーザーを皮切りに、Nd:YAG レーザーも kW クラスの出力を実現し、加工用レーザーとして鉄鋼産業や重工業分野、自動車産業に導入されてきた[3.4.1]。一方、連続波(CW)ファイバーレーザーは、2000 年代中ごろに 1 kW 出力のレーザーが市販されるとその普及が始まり、その出力はシングルモードで 10 kW、マルチモードで 100 kW と、市販レーザーの中で最高出力を得るまでに至っている。ファイバーレーザーは、共振器がファイバーで構成されることから発振が安定であること、レーザー光はコア直径 10 μm 程度のシングルモードファイバーまたはコア直径数 100 μm 程度のマルチモードファイバーから出力されるため、他の高出力レーザーと比べビーム品質が高い。半導体レーザー励起かつ利得ファイバー中の光変換効率が高いため消費電力が低く、性能維持のために交換する光部品が少ないことからランニングコストが低いなどの利点を持つ。そのため、板金の切断や溶接加工な加工用レーザー光源としてファイバーレーザーは CO₂ レーザー、YAG レーザーと並びその地位を確立しつつある。また、優れた集光性のため銅などの高反射材料の切断、溶接も行えるようになり、レーザー加工の応用範囲を拡大している。ファイバーレーザーは、共振器から出力までファイバー中を光が伝播するため、環境耐性が高い。今後は、さらなる高出力化により造船や橋梁などの大きな建造物の切断や溶接への応用、レーザーの変調動作やスキャナーによるビーム走査法を活用した難加工材料の加工や異種材料の接合、金属の表面改質などへの応用、高いビーム品質特性がもたらす集光性の良さから、金属の 3 次元積層造形や高精細の加工などへの応用が期待されている。

パルスファイバーレーザーは、ファイバー共振器によるモード同期レーザーが 1990 年代後半に市販され、医療用のステントや Si ウェハの穴あけなど非熱領域の微細加工をはじめ、多光子励起を利用した透明材料の加工や眼科手術用のレーザーとして実用化が進められてきた。その後 10 W クラスの Q スイッチ型のナノ秒パルスレーザーが開発され、レーザーマーカー用として急速に普及した。これらは、光通信分野で開発されたファイバー型光部品技術により、励起用半導体レーザーや、フィルタやアイソレータなどの光部品をファイバーで接続できるため製造性が高く、高出力、高性能、高安定なレーザーを安価で実現した。最近では、半導体レーザーをシード光源に使い、ファイバーアンプで増幅する MOPA (Master Oscillator Power Amplifier) 型のパルスレーザーが、Q スイッチでは難しい数 10 ns 以下のパルスレーザーとして実用化が進んでいる。加工分野では加工スループットやタクトタイムが実用化の一つの指針であり、産業機器へ広く応用するためには高出力化が不可欠である。パルスレーザーは高出力化に伴いファイバー伝搬中に光学非線形効果によるエネルギー拡散やパルス波形歪など光学特性の劣化を誘発する。非線形効果を回避するため、モードフィールド径を拡大した LMAF (Large Mode Area Fiber) や PCF (Photonic Crystal Fiber)、シングルモード性を高めた 3CFiber (Chirally-Coupled Core Fiber) [3.4.2]、高次モードを活用した HOMF (Higher Order Mode Fiber) [3.4.3] などが提案され、数 10 kW から数 MW クラスのピー

クパワー出力が確認されている。今後、高出力化が進み、パルス幅やパルス出力タイミングの自由度が高まることで、樹脂などの難加工材料のレーザー加工や、金属やセラミクス、結晶などの超精密非熱加工の高速化が進み、産業機器への応用が期待されている。

参考文献

[3.4.1] 例えば、レーザーハンドブック第2版，レーザー学会編。

[3.4.2] C.-H. Liu *et al.*, “Effectively single-mode chirally-coupled core fiber,” in *Advanced Solid-State Photonics*, OSA Technical Digest Series (CD) (Optical Society of America, 2007), paper ME2.

[3.4.3] S. Ramachandran *et al.*, “Light propagation with ultra large modal areas in optical fibers,” *Opt. Lett.* **31**, 1797-1799 (2006).

3-5. 医療・バイオ分野

足立宗之, 小関泰之

・レーザーの医療・バイオ分野への応用の歴史

眼は可視光から近赤外光を効率よく透過するため、最も早くレーザー治療が試みられた。1961年にはルビーレーザーによる網膜治療の効果が調べられた[3.5.1]。現在では角膜、水晶体、虹彩、網膜などの治療に様々なレーザーが利用されている。1970年代からは、外科をはじめとする多くの診療科で、炭酸ガスレーザーのレーザーメス応用や、Nd:YAG レーザーの内視鏡下での消化器治療への応用が始まった。後者では光源から治療箇所までのレーザー光のファイバー伝送も行われた。1980年代以降は急速にレーザーの医療応用が進み、エキシマレーザー、色素レーザー、QスイッチNd:YAG レーザーなどの新しいレーザーが開発されると、すぐにその特性を活かす治療がおこなわれるようになった。現在では、眼科、外科、耳鼻科、泌尿器科、皮膚科、歯科など広い分野の治療にレーザーが使われている。

バイオ・診断分野においては、1970年代に高出力レーザーや広い発振帯域を持つ色素レーザー、半導体レーザーなどが開発されたことにより、蛍光顕微鏡技術が大きく進展した。1990年代には、光干渉断層撮影(optical coherence tomography, OCT)が開発され[3.5.2, 3.5.3]、すぐに眼底診断手法として実用化された(図 3.5.1)。その後も皮膚用や消化器用OCTなどの研究が活発に進められている。同じく1990年代からは超短パルスレーザーを光源とする多光子顕微鏡技術の研究が活発になされた。また、生体解析においても、1990年代以降、ラマン分光によるタンパク質解析やレーザー照射を利用した高分子の質量分析技術が開発され、実用化されている。

・ファイバーレーザーの医療・バイオ分野への応用

ファイバーレーザーが医療分野に使われたのは2000年代中頃からである。ミクロンオーダーの高い治療精度が要求される角膜屈折矯正手術に高ビーム品質かつ高安定な超短パルスファイバーレーザーが使われた。近年では、より高出力な超短パルスファイバーレーザーが白内障手術に使われている。また、歯科や外科など他の診療科への応用研究も進んでいる。バイオ分野においては、近年、超高分解能OCTのための超広帯域光発生技術の開発が進められている[3.5.4-3.5.6]。また、高速OCTイメージングでは高速波長掃引光源が活用されるが、その利得媒質には半導体光増幅器が使われるものの、コンパクトかつ安定性の高い光ファイバーによる光学系を用いることがスタンダードとなっている。超解像顕微鏡においては、ファイバーレーザーによる超広帯域光から得られる複数波長の可視パルス光が用いられる[3.5.7]。また、多光子顕微鏡では、深部観察において3光子・4光子励起が有利であることが近年指摘され、1.7~1.9 μm帯の高出力フェムト秒ファイバーレーザーの開発が進められている[3.5.8]。さらに、第二高調波(SHG)、コヒーレント反ストークスラマン散乱(CARS)、誘導ラマン散乱(SRS)顕微鏡など、他の非線形光学顕微法においても、コンパクトかつ安定なパルス光源としてファイバーレーザーの適用が進められている。

・今後の展望

時代とともに医療用レーザーは大型のガスレーザーから固体レーザーへ、さらに半導体レーザーやファイバーレーザーと移っていく。今後、医療用レーザー光源自体にも、医療現場で使用す

るに耐えるロバスト性を有し、かつ高性能、低消費電力、小型、低コストが求められる。ファイバーレーザーはこれら全ての要求を満たすことのできる光源である。また、今後のレーザー治療においては、患者の Quality of Life (QOL)が重視され、より低侵襲な治療が求められる。そのためには患者への負担の少ない内視鏡手術技術と超短パルスファイバーレーザーなどによる高精度治療技術の向上が必要となる。内視鏡技術とファイバーレーザー技術は共に光ファイバーを利用するため適合性が高く、この2つの技術の融合により、治療分野の拡大や効率的かつ安全な低侵襲治療が実現すると期待される。さらにこれらを達成するには、リアルタイムイメージングや高精度かつ高速な診断・解析が必要になり、その光源としてもファイバーレーザーの役割は大きい。

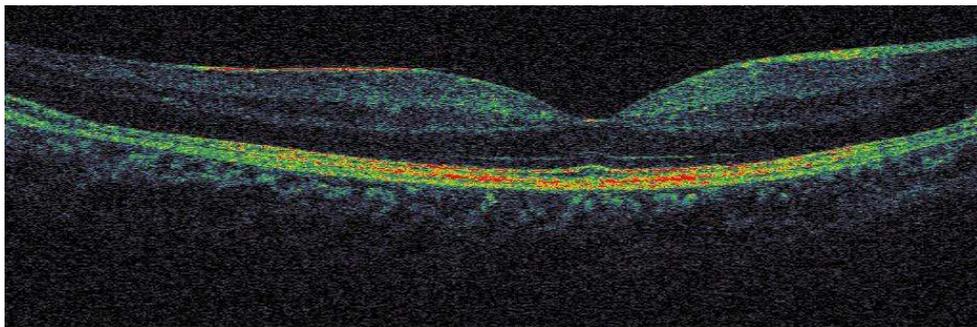


図 3.5.1. OCT 眼底断層像[3.5.4].

参考文献

- [3.5.1] M. Zaret *et al.*, *Science* **134**, 1525-1526 (1961).
- [3.5.2] 丹野直弘：「光波反射像測定装置」日本特許第 2010042 号 (1990).
- [3.5.3] D. Huang *et al.*, *Science* **254**, 1178-1181 (1991).
- [3.5.4] M. Nishiura *et al.*, *Jpn. J. Appl. Phys.* **49**, 012701 (2010).
- [3.5.5] S. Ishida *et al.*, *Proc. SPIE* **8571**, 85710B-1-6 (2013).
- [3.5.6] H. Kuroda *et al.*, *Appl. Phys. Lett.* **102**, 251102 (2013).
- [3.5.7] B. R Rankin and S. W. Hell, *Opt. Express* **17**, 15679-15674 (2009).
- [3.5.8] C. Xu and F. Wise, *Nat. Photon.* **7**, 875-882 (2013).

3-6. ファイバーレーザーの光通信への応用について

葛西恵介

1970年、実用的な半導体レーザーと低損失石英光ファイバーが実現されたことを契機に本格的な研究、実用化が開始された光通信は、1989年の1.48 μm 帯半導体レーザー励起エルビウム添加光ファイバー増幅器(EDFA: Erbium-Doped Fiber Amplifier)の発明[3.6.1]により大きな変革を遂げる。EDFAは複数の波長の信号光を一括して増幅することが可能であるため、90年代以降、波長多重(WDM: Wavelength Division Multiplexing)伝送技術が急速に進展し、光ファイバー1芯で1 Tbit/s以上の大容量基幹光ネットワークが実現されている。今日では無線通信技術を積極的に光通信に取り入れ、光の位相情報も利用したデジタルコヒーレント方式(デジタル処理信号技術と局発光源を用いたコヒーレント干渉検波を用いる)によって100 Tbit/sを越える大容量伝送が報告されるに至っている。

EDFAは単に“光増幅器”としてだけでなく先端光通信を支える光源技術としても重要な役割を果たしている。最近の光通信ではWDM伝送と並行し、TDM(Time Division Multiplexing)による高速化技術が進展している。特に光パルスを時間領域で多重するOTDM(Optical TDM)は電子回路の速度限界を超える超高速伝送を実現できる方式として注目されている。このような伝送に用いる光パルスレーザーとして、これまでEDFAを利得媒質として用いたモード同期ファイバーレーザーが開発されており[3.6.2, 3.6.3]、1波長あたり1 Tbit/sを越える超高速伝送が実現されている[3.6.4] (図3.6.1: モード同期レーザー 超高速OTDM伝送)。また、本レーザーの出力光パルスを非線形媒質に入射し、1オクターブ(2倍の周波数)以上に光スペクトルを拡大する研究が進められている[3.6.5, 3.6.6]。この拡大された光スペクトルは、スーパーコンティニューム光と呼ばれ、WDM伝送用多波長光キャリア光源として用いられる(図3.6.1: モード同期レーザー WDM伝送)。デジタルコヒーレント伝送においては線幅の狭い(位相雑音の少ない)光源が不可欠となる。本伝送に用いる光源として、線幅数kHzの単一周波数(波長)エルビウムファイバーレーザーが開発されており[3.6.7]、本レーザーを用いたコヒーレント伝送方式により、2048値にも及ぶ超多値QAM(Quadrature Amplitude Modulation)伝送が実現されている[3.6.8] (図3.6.1: 単一周波数(波長)レーザー コヒーレント通信)。

モード同期ファイバーレーザーの出力光パルスは周波数軸(波長軸)上では複数の光キャリアが並んだいわゆる光コム(光の櫛)となっている。光Metrology(光度量衡)の分野では、本光コム信号の各光キャリアの周波数(波長)とその間隔をそれぞれ波長(周波数)標準や時間標準(例えば原子、分子の吸収線や共鳴線)に安定化し、各光キャリアの絶対周波数が定義された光コムを光ファイバネットワークを介して世界中に光のものさし(標準信号)として遠隔配信する研究が進められている[3.6.9] (図3.6.1: モード同期レーザー及び標準信号配信)。

また近年では、1.55 μm 帯宇宙空間光通信への関心が高まっており、2013年にはNASAが衛星に初めてEDFAを搭載し、衛星-地上間通信を実証している。我が国においても2020年に衛星-地上間の1.55 μm 帯光通信実証実験が計画されている[3.6.10]。

ファイバーレーザーはスペクトル純度が高く(狭線幅)、大きな光出力も容易に得やすいなど優れた特性を有しており、従来の商用システムに適用すればその性能を大幅に改善できるポテンシ

ャルがある。今後はこのような優れた特性を活かし、さらに実用性の高いファイバーレーザーが実現され、光通信の高度化に寄与していくことが期待される。

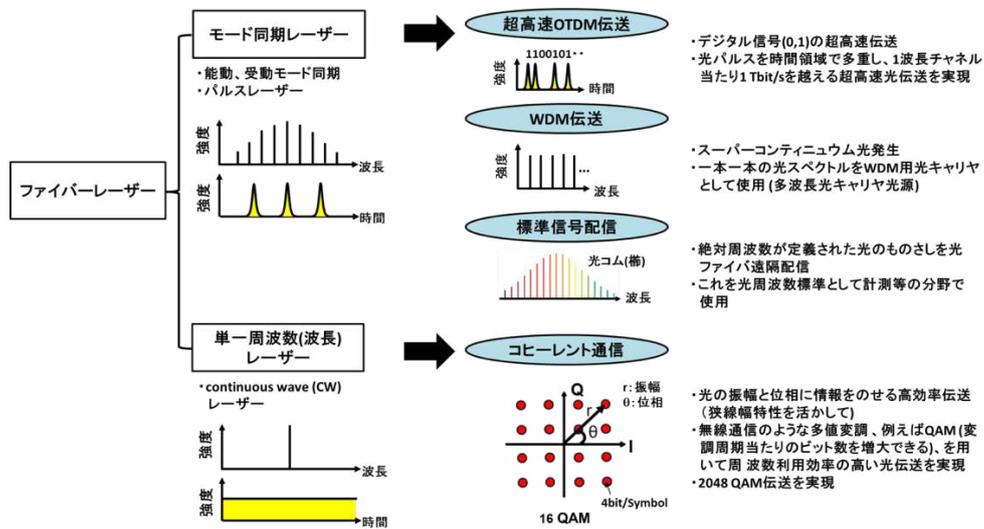


図 3.6.1. ファイバーレーザーの光通信分野への応用。

参考文献

- [3.6.1] M. Nakazawa *et al.*, “Efficient Er³⁺-doped optical fiber amplifier pumped by a 1.48 μm InGaAsP laser diode,” *Appl. Phys. Lett.* **54**(4), 295-297 (1989).
- [3.6.2] A. Martinez *et al.*, “10 GHz pulsed Er-Yb fiber laser using an optically deposited carbon-nanotube film in a fiber mirror,” in *Conference on Lasers and Electro-Optics 2010, OSA Technical Digest (CD)* (Optical Society of America, 2010), paper CTuII5.
- [3.6.3] M. Nakazawa *et al.*, “A repetition-rate stabilized and tunable, regeneratively mode-locked fiber laser using an offset-locking technique,” *Jpn. J. Appl. Phys.* **35**, part 2, no. 6A, L691-L694 (1996).
- [3.6.4] M. Nakazawa *et al.*, “1.28 Tbit/s-70 km OTDM transmission using third- and fourth-order simultaneous dispersion compensation with a phase modulator,” *Electron. Lett.* **36**(24), 2027-2029 (2000).
- [3.6.5] N. Nishizawa *et al.*, “Widely broadened super continuum generation using highly nonlinear dispersion shifted fibers and femtosecond fiber laser,” *Jpn. J. Appl. Phys.* **40**, part 2, no. 4B, L365-L367 (2001).
- [3.6.6] T. Morioka *et al.*, “Transform-limited, femtosecond WDM pulse generation by spectral filtering of gigahertz supercontinuum,” *Electron. Lett.* **30**(14), 1166-1168 (1994).
- [3.6.7] K. Kasai *et al.*, “Performance improvement of an acetylene (C₂H₂) frequency-stabilized fiber laser,” *IEICE Electron. Express* **3**(22), 487-492 (2006).
- [3.6.8] S. Beppu *et al.*, “2048 QAM (66 Gbit/s) single-carrier coherent optical transmission over 150 km with a potential SE of 15.3 bit/s/Hz,” *Opt. Express* **23**(4), 4960-4969 (2015).
- [3.6.9] S. M. Foreman *et al.*, “Remote transfer of ultrastable frequency references via fiber networks,” *Rev. Sci. Instrum.* **78**(2), 021101-2-021101-25 (2007).
- [3.6.10] 内閣府 宇宙開発戦略本部資料, “宇宙基本計画 宇宙基本計画工程表,” 2015年1月9日。

3-7. 「ファイバーレーザーのセンシング応用」の技術動向

美濃島 薫

計測・センシング技術は「科学技術の母」と呼ばれ、あらゆる分野の共通基盤技術であるとともに、それ自体が時代の最先端の科学技術の粋を集めるイノベーションの宝庫である。その基盤的技術革新を実用的な応用技術に高め、実社会にもたらす鍵となるのが、ファイバーレーザーの進展である。

近年、光波制御技術に大きな革新があった。それは、「光周波数コム（櫛）」と呼ばれる先端光源であり、20世紀末に登場し2005年にノーベル物理学賞が与えられている「人類が手にした最も正確なものさし」である。光周波数コムは等間隔の櫛状に整列する光周波数出力の集合で、モード同期パルスレーザーなどの出力を高精度に制御することで実現される。それにより、全ての物理量の中で最も精密な「周波数」を軸としてあらゆる基礎物理量の計測を統合する道筋が見えてきた。同時に、単なる超精密にとどまらない技術領域のリンクや融合が実現し、基礎科学や情報通信、製造、安全、宇宙、環境、医療など広範な分野に革新的基盤ツールをもたらしている。

光周波数コムの登場当初は、チタンサファイアレーザーを中心とした大型の固体レーザーが用いられていたが、長期安定性が悪く、装置が大掛かりで扱いが容易でないという実用上の欠点があった。この状況を一変させたのは、ファイバーレーザーによる光周波数コム（ファイバーコム）の登場であった。特に、光ファイバーは材料特性に加えて導波路構造を変化させることで分散特性を調整できるため、数種の光ファイバーの組み合わせによって高機能なレーザーやその制御系を含めたシステムを構成することができ、扱いが容易、コンパクト、長期安定動作に優れ、信頼性が高いという大きな利点をもつ。ファイバーコムの光周波数のものさしとしての研究は1990年代の終わりに始まり、初期から日本の研究グループは先導的役割を果たしてきた[3.7.1-3.7.4]。当初は、位相ノイズの点で課題があったが、その制御技術が大きく進展し、2004年には初の絶対光周波数計測が実証され[3.7.3]、現在では究極の狭線幅も実現された。また、ファイバーコムによる光周波数の絶対計測を用いて、光速度に基づくレーザー波長測定によるメートルの定義の忠実な実現が実用的に可能となり、2009年には長さの国家標準が光周波数コムに改定された。このように、ファイバーコムは周波数計測の標準システムとして世界中で用いられ、光周波数コムの誕生以前には、ひとつの測定を実施すること自体が国家プロジェクト級であった光周波数の絶対計測技術が、今では研究室レベルの簡便かつ実用的技術となり、その適用範囲を大きく広げている。

同時に、ファイバーコムの超高精度とロバスト性の両立は、単なる周波数計測にとどまらない光波の制御性を生かした多くの分野における応用の進展をもたらした(図3.7.1)。日本の研究開発は世界を先導し、光周波数コムの出現に前後して、当初から高精度な長さや距離計測への応用技術が開発されてきた[3.7.5]。その潮流は世界に広がり、現在では、産業分野における形状計測や位置・距離センシング技術の開発[3.7.6]や、長距離の高精度位置決め技術が不可欠な宇宙技術への展開などへ進展している。宇宙でのファイバーレーザーの利用を目指した実証研究も始まっており[3.7.7]、その進展によってますます応用性が拡大すると期待される。

また、光周波数コムによって高精度分光技術が革新的に進展し、分光データベースの提供によって基礎物理・化学の知見が進むとともに、センシングツールとしても画期的進展をもたらした。特に、絶対周波数を付与されたレーザー周波数の連続走査技術や、2000年代後半に盛んになってきた2台の光コムによるヘテロダインビートを用いたデュアルコム分光技術などの利用基礎技術の進展により[3.7.8, 3.7.9]、周波数軸の精密さと同時に時間軸特性を利用し、広帯域、高速、高分解能、高精度を実現する究極の線形・非線形分光技術が可能になった。これらにより、動的对象や、混合状態での分析、微量物質検出への道が拓かれ、環境、医療等における実用的なセンシングに期待が集まっている。また、その波長域は、光周波数コムの高精度な波長目盛りがコヒーレントにリンクされたまま、テラヘルツ波から極短紫外領域へ及んでおり[3.7.10, 3.7.11]、そのインパクトは計り知れない。新材料ファイバーによるファイバーコム波長域拡大によって、ますます適用性が拡大していくと期待される。

今後、より広範なイノベーションを牽引していくためには、現状では、基盤研究とエンドユーザーの間に立ちほだかるギャップを乗り越え「間をつなぐ技術」の研究開発が必要であり、ファイバーコムを核とする実用光源技術の更なる進展が不可欠である。分光、センシング、天文など分野融合的な新規トピックスが、光源技術の進展にフィードバックされ、実用的なツールとしての価値はますます高まっていくものと期待される。

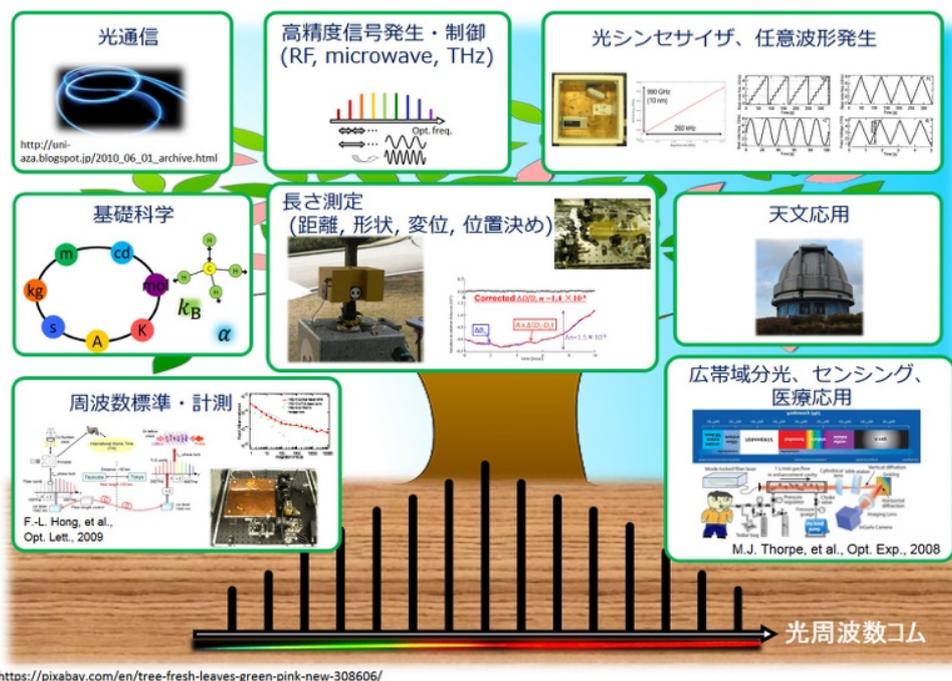


図 3.7.1. 光周波数コム波の拓く応用の世界。その広がりにはファイバーレーザーが欠かせない。

参考文献

- [3.7.1] A. Onae, T. Ikegami, K. Sugiyama, F. L. Hong, K. Minoshima, H. Matsumoto, K. Nakagawa, M. Yoshida, and S. Harada, *Opt. Commun.* **183**, 181-187 (2000).
- [3.7.2] F. L. Hong, K. Minoshima, A. Onae, H. Inaba, H. Takada, A. Hirai, and H. Matsumoto, *Opt. Lett.* **28**, 1516-1518 (2003).
- [3.7.3] T. R. Schibli, K. Minoshima, F. L. Hong, H. Inaba, A. Onae, H. Matsumoto, I. Hartl, and M. E. Fermann, *Opt. Lett.* **29**, 2467-2469 (2004).
- [3.7.4] H. Inaba, Y. Daimon, F.-L. Hong, A. Onae, K. Minoshima, T. R. Schibli, H. Matsumoto, M. Hirano, T. Okuno, M. Onishi, and M. Nakazawa, *Opt. Express* **14**, 5223-5231 (2006).
- [3.7.5] K. Minoshima, and H. Matsumoto, *Appl. Opt.* **39**, 5512-5517 (2000).
- [3.7.6] W. C. Swann, and N. R. Newbury, *Opt. Lett.* **31**, 826-828 (2006).
- [3.7.7] J. Lee, K. Lee, Y.-S. Jang, H. Jang, S. Han, S.-H. Lee, K.-I. Kang, C.-W. Lim, Y.-J. Kim, and S.-W. Kim, *Sci. Rep.* **4**, 05134 (2014).
- [3.7.8] I. Coddington, W. C. Swann, and N. R. Newbury, *Phys. Rev. Lett.* **100**, 013902 (2008).
- [3.7.9] T. Ideguchi, B. Bernhardt, G. Guelachvili, T. W. Hänsch, and N. Picqué, *Opt. Lett.* **37**, 4498 (2012).
- [3.7.10] T. Yasui, S. Yokoyama, H. Inaba, K. Minoshima, T. Nagatsuma, and T. Araki, *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.* **17**, 191-201 (2011).
- [3.7.11] A. Ozawa, and Y. Kobayashi, “vuv frequency-comb spectroscopy of atomic xenon,” *Phys. Rev. A* **87**, 022507 (2013).

3-8. 高エネルギー・高強度

藤本 靖

高エネルギー・高強度レーザーの開発は米国とソ連におけるレーザー核融合研究計画より始まった。その礎を築いたのはNd 燐酸ガラスレーザーである。Nd 燐酸ガラスは適度な誘導放出断面積を有するため、高い蓄積エネルギーと取り出し効率が得られる。以来、現在に至るまで、高出力大型レーザーの主流となっているが[3.8.1]、近年、より高繰り返し動作を得られる光学セラミックスレーザーの発展もめざましい[3.8.2]。

ファイバーレーザーは、これらバルク型のレーザーに比べ高ビーム品質、高効率、メンテナンスフリーという特長を有している。また、スペクトルの時間空間制御性や、必要に応じファイバーの長尺性による非線形効果を期待できる。なかでも、Yb ドープファイバーレーザーは、100 nm におよぶ広い波長可変性を有し、エネルギー効率も高い。これらの特長を活用し、高出力レーザーの種光源として Yb ファイバーレーザーがよく使われてきた。

近年では、Yb ファイバーレーザーの平均出力パワーおよび出力パルスエネルギーの向上が著しい。平均出力パワーに関しては、高ビーム品質・高効率の Yb シングルモードファイバーレーザーで 20 kW が達成されており、レーザー加工をはじめとする高出力レーザー利用に浸透している[3.8.3]。出力パルスエネルギーに関しては、従来の Yb シングルモードファイバーでは数 10-100 nJ が限界であった。これはファイバーレーザーのコア断面積が小さいゆえに光損傷が生じやすいためである。しかし、2005 年頃から、高ビーム品質と高ピーク出力を達成するため、コア径 40-100 μm のラージモードエリア(LMA)ファイバーやロッド型フォトニック・クリスタル・ファイバー(PCF)が出現し、数 10 mJ クラスの出力パルスエネルギーが達成された。今後、ファイバー結合型 LD 励起大口径ファイバーの開発と、このファイバーレーザーのバンドル化およびマルチコアによるコヒーレント結合技術、およびそのための位相制御素子の集積化が進展すれば、数 10 J 級の出力パルスエネルギーも実現可能となり、特に科学分野において高ピーク高平均出力レーザーとして利用されるだろう (図 3.8.1) [3.8.4]。

この様な、Yb ファイバーレーザーの著しい出力向上に伴って、欧州で ICAN というプロジェクトが立ち上がり[3.8.5]、多数のバンドル構造をもつファイバーレーザーをベースとした粒子加速のドライバー開発が提案されている(図 3.8.2)。これらのレーザーは宇宙デブリの除去や、有害放射性核物質の核変換による無害化への利用が期待されている。また、マイクロ秒程度のパルスレーザーは超高压力下での物性や地球内部物質の探索の研究に大いに貢献することが期待されている。例えば、超高压下ではサブマイクロ秒で相転移を起こす物質が多いことが予想されており、それによる新物質創成やその物理現象の解明は重要なテーマである。また、コイルを用いたマイクロ秒パルス強磁場と超高压力下での相転移現象の相互作用による未踏の学術領域形成も興味深い。これらの学術研究分野において、時間・空間的に高度に制御されたレーザーパルスを作り出せる高出力・高強度ファイバーレーザーの進展には期待が大きい。

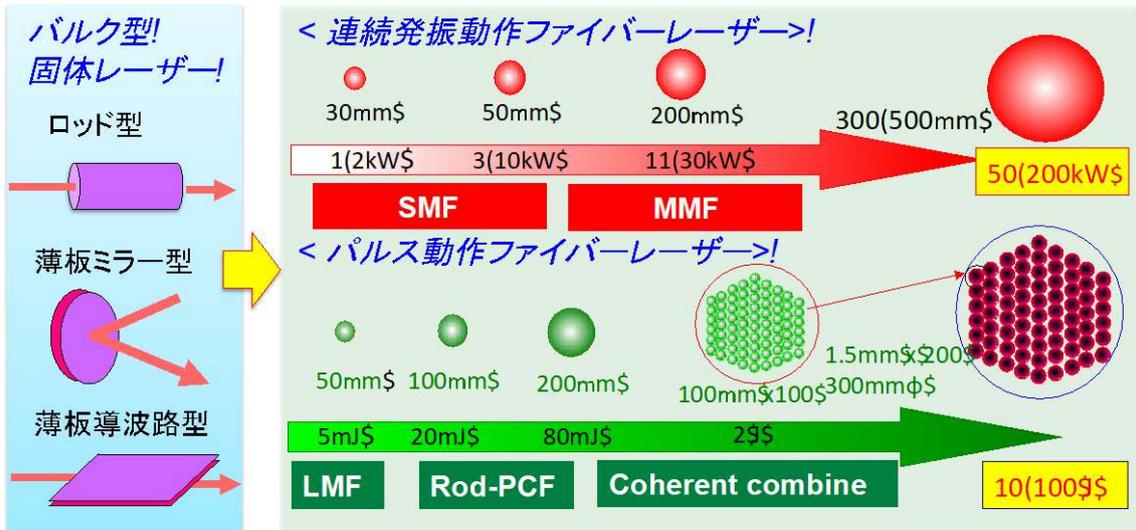


図 3.8.1. ファイバーバンドルによるファイバーレーザーの高出力化.

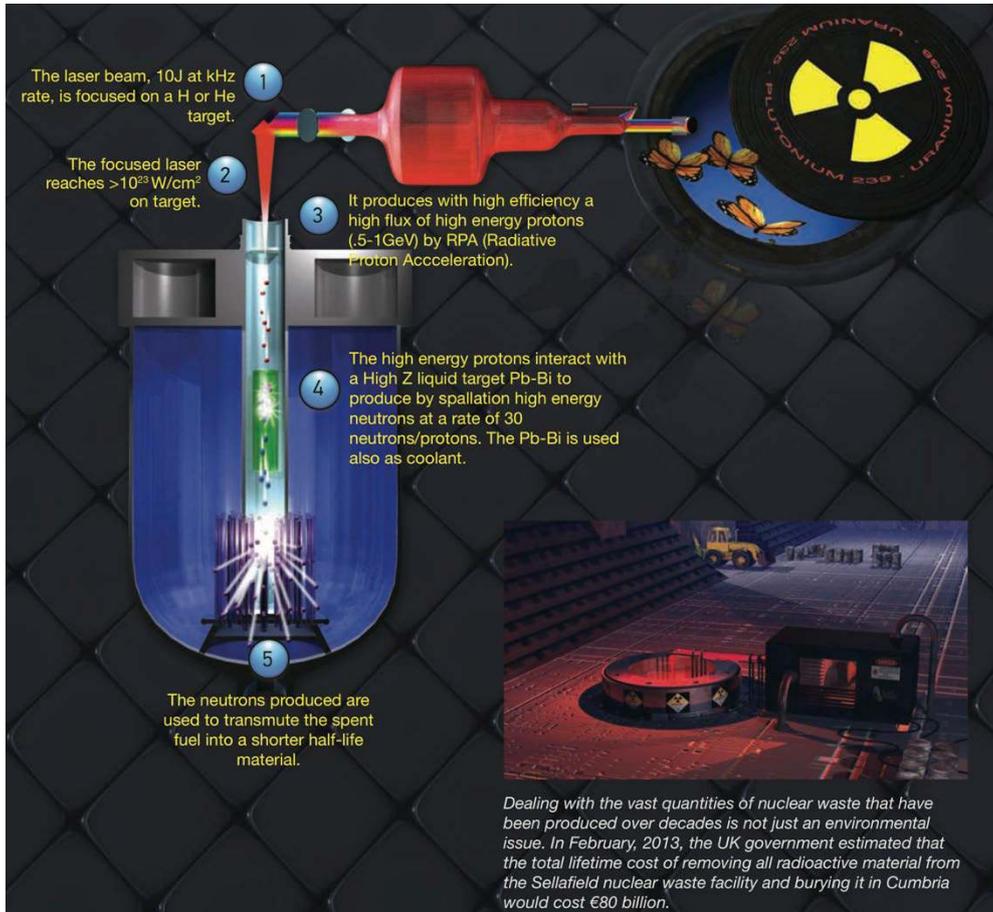


図 3.8.2. ICAN ファイバーレーザーコンセプトと核変換への応用.

参考文献

- [3.8.1] H. Shiraga, S. Fujioka, M. Nakai, T. Watari, H. Nakamura, Y. Arikawa, H. Hosoda, T. Nagai, M. Koga, H. Kikuchi, Y. Ishii, T. Sogo, K. Shigemori, H. Nishimura, Z. Zhang, M. Tanabe, S. Ohira, Y. Fujii, T. Namimoto, Y. Sakawa, O. Maegawa, T. Ozaki, K. Tanaka, H. Habara, T. Iwawaki, K. Shimada, H. Nagatomo, T. Johzaki, A. Sunahara, M. Murakami, H. Sakagami, T. Taguchi, T. Norimatsu, H. Homma, Y. Fujimoto, A. Iwamoto, N. Miyanaga, J. Kawanaka, T. Jitsuno, Y. Nakata, K. Tsubakimoto, N. Morio, T. Kawasaki, K. Sawai, K. Tsuji, H. Murakami, T. Kanabe, K. Kondo, N. Sarukura, T. Shimizu, K. Mima, H. Azechi, "Fast ignition integrated experiments with Gekko and LFEX lasers," *Plasma Phys. Contr. F.* **53**, 124029 (2011).
- [3.8.2] H. Yagi, T. Yanagitani, and K. I. Ueda, "Nd³⁺:Y₃Al₅O₁₂ laser ceramics: Flashlamp pumped laser operation with a UV cut filter," *J. Alloy. Compd.*, **421**, 195-199 (2006).
- [3.8.3] <http://japanese.ipgphotonics.com/index.htm>
- [3.8.4] 吉田英次, 山村健, 椿本孝治, 藤田尚徳, 宮永憲明, 酒川友一, 塚本雅裕, Yb 添加大口径ホトニッククリスタルファイバーを用いたナノ秒パルス高平均出力レーザーシステムの開発, *オプトロニクス* **400**, 153-159 (2015).
- [3.8.5] <http://www.izest.polytechnique.edu/izest-home/ican/>

4. パワーマップ

4. パワーマップ

白川 晃, 吉田英次, 島 大介, 松下俊一

4-1. CW ファイバーレーザーの超高出力化

1988年にダブルクラッド構造の光ファイバーによるファイバーレーザーが提案されたのを皮切りにファイバーレーザーの高出力化の研究が本格的に始まった。時を同じくして半導体励起エルビウム添加ファイバー中での光増幅が確認され、半導体励起による光ファイバー光増幅技術の実用化開発も始まった。1990年代に入ると、光カプラやファイバークレーティング、励起用半導体レーザーなどの周辺技術も向上し、様々なレーザーが提案された。当時の平均出力は数W程度であり、100Wクラスの光出力を得るには、ダブルクラッド構造のイッテルビウムファイバーレーザーの実現を待つことになる。1999年にシングルモードファイバー出力で110Wが確認されると、2000年には100Wクラスのレーザーが実用化され、励起用半導体レーザーの高出力化やファイバーバンドルによる光結合技術の進化もあり平均出力は急速に拡大することになる。その後、シングルモードファイバー出力は、2002年に1kWを超え2009年に10kWに到達した。

2005年に、複数のシングルモードレーザー出力をマルチモードファイバーに結合した2kW出力のファイバーレーザーが市販され、ファイバーレーザーが産業用レーザーとして広く使われるようになった。現在、シングルモード出力で1.5kW、マルチモードファイバー出力で50kWのレーザーが製品として販売されている。図4.1.1にCWファイバーレーザーのパワーマップを示す。単一共振器によるシングルモードファイバー出力は理論的境界に近づきつつあり、超高出力化には革新的技術による理論境界の突破が必要である。現在は、複数のシングルモードファイバーレーザー出力を空間的に結合するコヒーレント結合技術を用いた高出力化に移行しつつある。CWファイバーレーザーの高出力化は金属加工や接合などの加工用途ではその特性や加工速度の向上につながる。また、エネルギー伝送や惑星探索などの宇宙利用の可能性もあり、今後も超高出力化は進むであろう。

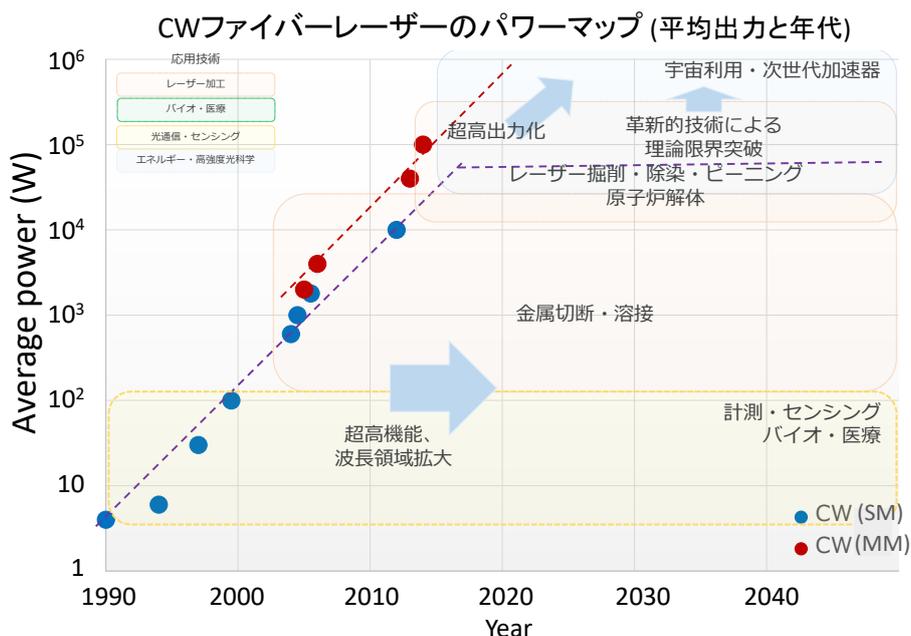


図 4.1.1. CW ファイバーレーザーのパワーマップ。

ファイバーレーザーの高出力化は主にイッテルビウム添加型ファイバーを中心に進んでいるが、計測・センシング、バイオ・医療等の応用分野では、対象の物質に最適な波長が必要である。図 4.1.2 に、CW ファイバーレーザーの発振波長と出力の関係を示す。CW ファイバーレーザーの発振波長・帯域は、ファイバーコアに添加される希土類イオンの利得波長帯域とホストガラスに依存する。今後は、各応用分野への適用を踏まえ、ファイバーレーザー出力の波長領域の拡大も超高出力化と並行して進むであろう。

CWファイバーレーザーのパワーマップ (平均出力と波長)

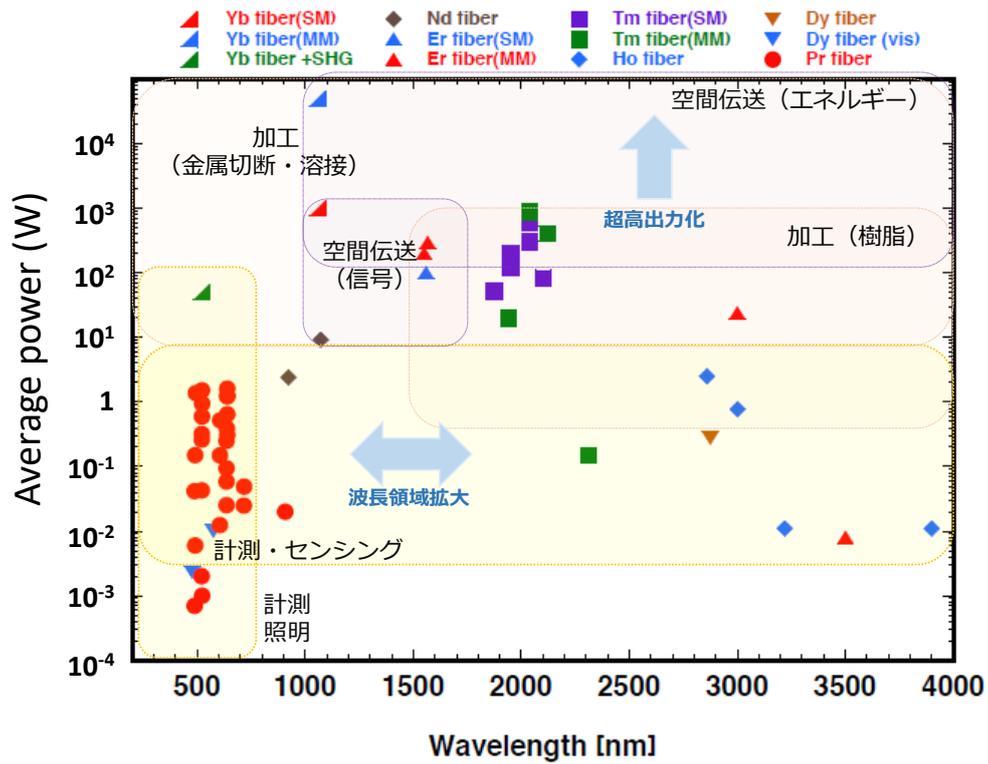


図 4.1.2. CW ファイバーレーザーの発振波長と出力.

4-2. パルスファイバーレーザーの高出力化

イッテルビウム系シングルモードファイバーのパルス出力は、数 10-100 nJ が限界であったが、2005 年頃から、高ビーム品質、高ピーク出力達成ため、コア径 40-100 μm のラージモードエリア (LMA)ファイバーやロッド型フォトニック・クリスタル・ファイバー(PCF)が出現し、最大パルス出力数 10 mJ が可能となった。今後、ファイバー結合型 LD 励起大口径ファイバーの開発と、ファイバーレーザーのバンドル化およびマルチコアによるコヒーレント結合技術（位相制御素子の集積化）が進展すれば、数 10 J 級出力も実現可能となり、特に科学分野に採用されている高ピーク高平均出力レーザーとして利用されるだろう。

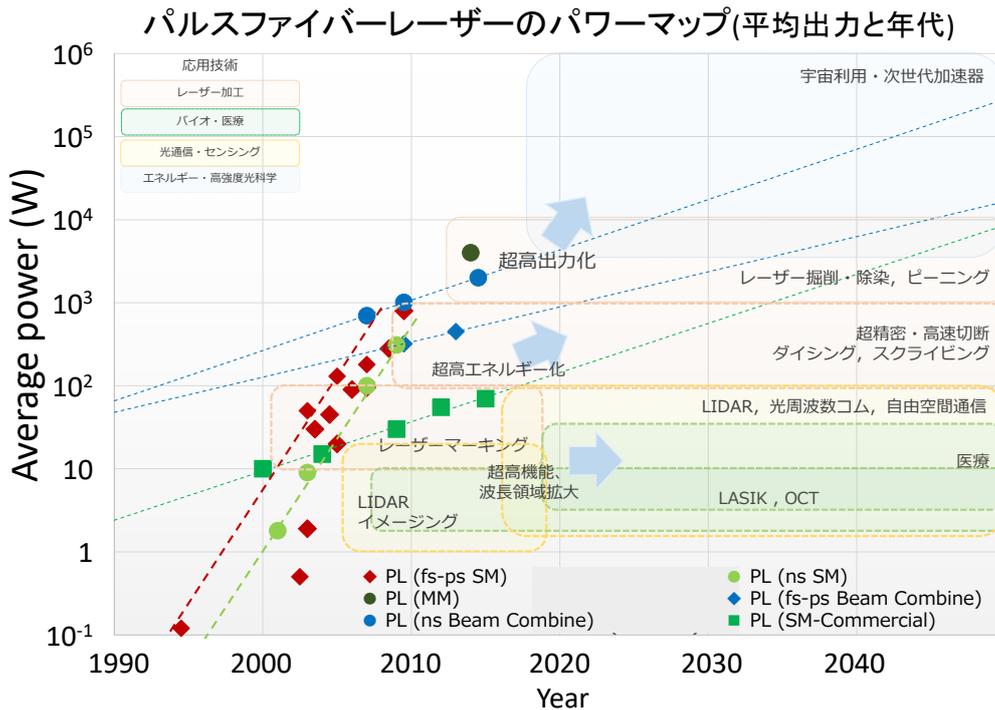


図 4.2.1. パルスファイバーレーザーのパワーマップ。

図 4.2.1 にパルスファイバーレーザーのパワーマップを示す。研究レベルでのフェムト秒からナノ秒のパルスファイバーレーザーは、平均パワーが 1 kW の領域に近づきつつある。CW ファイバーレーザーと同様にその理論的境界に近づきつつもあるため、今後はコヒーレント加算等の技術革新と並行してそのパワーが上昇していくであろう。

パワーマップには比較のためナノ秒パルスファイバーレーザー製品のパワー推移も示している。平均パワーの大きなパルスファイバーレーザー製品は、主にマーキングやエングレービングに用いられるナノ秒レーザーのためである。図 4.2.1 中の緑色四角形のプロットは、 M^2 値が 2 以下のシングルモードまたは準シングルモードファイバーレーザーのパワーを示している。1999 年に世界初のファイバレーザーマーカが 10 W クラスで実用化され、そのビーム品質の良好さから波長 1 μm 帯のレーザーマーカの主役となり、2014 年に 100W クラスまで汎用マーカに搭載されている。一方、マルチモードのナノ秒パルスファイバーレーザーに関しては、2014 年現在で 4kW のものが販売されている。(図中 深緑丸形) このビーム品質は M^2 で 100 のレベルであり、応用は表面改質やレーザークリーニングといったビームの集光性が求められないものである。

レーザーパワーの上昇はレーザーによる加工スピードの上昇につながるため、パルスファイバーレーザーにおいても今後もパワーの上昇は続くが、レーザーに求められるパワーはガルバノスキャナなどの加工系の高速化に依存すると考えられ、CW ファイバーレーザーに比べるとゆっくり高出力化が進むものと考えられる。