

## 解 説

# 加速器の要求に堪えるレーザー光源を目指して ～フォトカソード RF 電子銃用レーザー光源開発～

富澤 宏光\*

## Towards the Reliable Laser Light Source for Future Accelerators

Hiromitsu TOMIZAWA\*

### 1. はじめに

（財）高輝度光科学研究センター（SPring-8）加速器部門にて、開発研究してきたフォトカソード RF 電子銃用光源レーザーの高品質化について述べる。私の入所当時（2000年）、同部門線型加速器グループでは、フェムト秒バンチビーム生成プロジェクトの一環として、単セルのSバンド・フォトカソード RF 電子銃の開発研究をしていた。この電子銃は、ピコ秒紫外レーザーを光源とし、無酸素銅から成る RF 空洞の壁の一部を光陰極（フォトカソード）として利用するものである。この RF 電子銃からのピコ秒電子ビームをフェムト秒レーザーと衝突させ、逆コンプトン散乱により発生させたフェムト秒 X 線を医療用などの光源として開発することがプロジェクトの趣旨であった。この逆コンプトン散乱のための衝突用レーザー光源（50 fs）とフォトカソード用レーザー光源（20 ps）は同一のフェムト秒テラワット・レーザーから分岐して作るという方針と装置の購入が決まっていた。

2001年に納入されたこのレーザー装置は、そのレーザー断面強度分布（空間プロファイル）が一様ではなく低品質な光源であった。また、この光源で生成した電子ビームの規格化水平エミッタンスを測定すると 0.1 nC/bunch で  $6.0 \pi \text{ mm mrad}$ （パルス幅：5 ps）であった。これは X 線自由電子レーザー発振（飽和）に、世界が要求する高輝度電子源のエミッタンスである、1.0 nC/bunch で  $1.0 \pi \text{ mm mrad}$  の目標値にはほど遠い。

さらにまた、レーザーの種光であるレーザーオシレータのモードロックが数時間しか持続しなかった。SPring-8 では、加速器に求めるビーム品質の高さと再現

性<sup>1,2)</sup>において常に高いものが要求される。それは、ユーザーを抱えた営業用マシンであるためであるが、それだけでなく巨大加速器の安定化にこだわる研究所の“文化”がある。しかし、当時のフェムト秒レーザーの連続安定度は、1週間程度であった。このころ、熊谷教孝部門長に実機で使えるレーザー光源の連続安定度を尋ねたところ、“1年間”と即答され、目の前が真っ暗になったことがある。同時期に、播磨の地では X 線自由電子レーザー計画（後の SCSS 計画）が持ちあがり、新竹積氏がフォトカソードはレーザーが不安定なので採用せず、熱カソードで行くという方針を表明していた。そういう状況の中で、フォトカソード用レーザー光源の長期安定化と高品質化に的を絞った研究開発が始まった。

本解説では、2章で高輝度電子源の光源としてのレーザーの原理と開発方針、3章でその安定化対策のための戦略、4章でこの戦略に沿って実施したレーザーの安定化とパルス整形の歴史的概説、5章でレーザー光源の今後の展望について順に述べることにする。

### 2. レーザー光源像とその開発方針

#### 2.1 要求される光源性能と実際のレーザー構成

一般的に加速器の要求するレーザー光源とはどのようなものか？加速器とは数ヶ月に亘る連続運転を強いられる総合システム機器である。おそらく加速器はレーザーにとって最大のヘビーユーザーであろう。では安定なレーザー光源は原理的に不可能なのか？もし原理的に不可能ならばそのような研究はやめるべきである。原理的な問題を検討しないで安定化の研究を進めることは、原理を理解しないでレーザー光源を不安定と主張することと同様に無責任であると思う。ここで、固体

\*（財）高輝度光科学研究センター 加速器部門 Japan Synchrotron Radiation Research Institute (JASRI/SPring-8)  
(E-mail: hiro@sp8sun.spring8.or.jp)

レーザについて、発振原理から考え直してみることにする。

まずここで議論の前提とするのは、我々が採用したテラワット級のフェムト秒レーザの3倍高調波である紫外光源（波長：263 nm）である。まずはこのレーザについて概観してみる。このレーザの構成は、種光を作る発振器であるレーザオシレータ（繰り返し周波数：89.25 MHz；Sバンドの32分周）と、その後種光を増幅する外部増幅器（繰り返し周波数：10 Hz）から成るMOPA方式（Master Oscillator Power Amplifier）と言われるものである。この増幅器は2段から成り、初段が再生増幅器（Regeneration Amplifier）、後段がマルチパス増幅器（Multipass Amplifier）で、両方とも共通のフラッシュランプ励起 YAG レーザを分岐して励起光源としている。再生増幅器では共振器内のポッケルスセルにより、10 Hz でパルス列を切り出して選択増幅する。このレーザパルスを次のマルチパス増幅器で同じ結晶を4回往復させ、30 mJ/pulse にまで増幅するようになっている。

このレーザは、結晶媒質にチタンサファイヤを用いている。その結晶母材であるサファイヤは、ダイヤモンドに次いで熱伝導率が良い透明材料で、室温で冷却すると銅と同等の熱伝導率になる優れた材料である。そのため、結晶での熱のこもりが少ない。この母材に Ti<sup>3+</sup> をドーブしたチタンサファイヤ結晶は、ス

ペクトル・バンド幅が 400 nm（700～1100 nm）と広く、超短（フーリエ変換限界）パルス生成に最も適している。そもそもフェムト秒の超短パルスとは、10 nm を越す広い帯域のレーザパルスのスペクトル成分間の相対位相を揃える、フーリエ変換限界の時間幅を有するレーザパルスである。この広いスペクトルの各波長の光路長の違いを回折格子ペアで制御し、自由にパルスを伸ばしたり（パルス・ストレッチャー）、縮めたり（パルス・コンプレッサー）することができる。このことを利用し、増幅器に入る前に種光パルスを回折格子ペアで長く伸ばすことでピークパワーを抑制しながら増幅し、別の回折格子ペアで圧縮することで、ペタ（10<sup>15</sup>）ワット級の超高強度・超短パルスまで得ることができる<sup>3)</sup>。このようにしてピークパワーを抑えながら増幅する方法を、チャープパルス増幅（CPA: Chirped Pulse Amplification）という。

ところで、英語のチャープ（Chirp）とは小鳥のさえずりのことである。森に響き渡る小鳥のさえずりをイメージしてもらえば、低周波から高周波、あるいは逆方向に周波数が連続的に変わっていることがわかるであろう。このように周波数チャープとは、レーザパルスの周波数スペクトルが時間的に変化する現象であって、時間とともに増加する場合を正チャープ、減少する場合を負チャープと呼ぶ。一般に光を透過するガラスなどの媒質では、赤（低周波）の方が青（高周波）

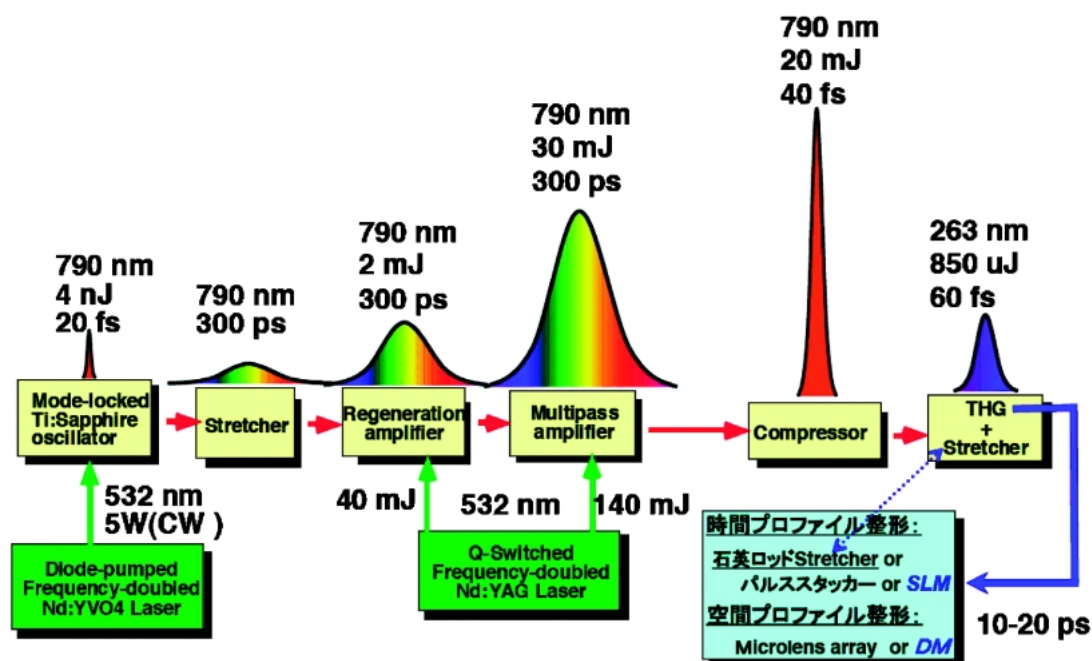


図1 SPring-8 光源レーザパルスの成長および整形過程：図中の虹色（青から赤へ）はレーザパルスの正チャープを表す。レーザパルスの紫外への変換後（THG）、時間プロファイル（最初のシステムは石英ロッドでのパルス伸長だけ）と空間プロファイル、低エミッタンスビーム生成のためにそれぞれ最適化する。

よりも早く進むため、こちらの方を正分散媒質と呼び、正チャープもこれになっている。図 1 に虹色でこの正チャープしたパルスの状態を表す。

次に、非線形効果を利用して紫外光源を作る。このフェムト秒レーザはテラワットという高いピーク強度を持つため、結晶の非線形効果を効率良く利用できる。まず、ここで増幅・圧縮されたレーザパルスを基本波（中心波長：790 nm；スペクトル・バンド幅：20 nm）とする。その 3 倍高調波（中心波長：263 nm）を 2 個の非線形結晶（BBO 結晶）を用いて発生させる。1 つ目の結晶で 2 倍高調波（中心波長：395 nm）をまず発生させ、その光を利用して 2 番目の結晶で 3 倍高調波を発生させる。固体レーザによる短波長光発生基礎となるのは、入射する 2 つのコヒーレント光（波長  $\lambda_1, \lambda_2$ ）に対して、2 次の非線形光学効果を利用した BBO 結晶媒質内での相互作用の結果である、エネルギー保存則に従う波長  $\lambda_3$  の発生、即ち和周波混合（SFM: Sum-Frequency-Mixing）である。2 倍高調波発生（SHG: Second Harmonic Generation）は、SFM の 2 つの入射光の波長  $\lambda_1$  と  $\lambda_2$  が等しい場合に対応する。第 3 高調波発生（THG: Third Harmonic Generation）は、通常 SHG で発生した 2 倍高調波（ $\lambda_2$ ）と残存する基本波（ $\lambda_1$ ）との SFM により実現される。基本波から 3 倍高調波への変換効率は約 10% である（2 倍高調波への変換効率は約 50%）。

これまで述べたように、レーザパルスはパルス幅の伸長、増幅、圧縮、紫外光への波長変換を受ける。納入時のレーザ装置の構成では、その後に石英ロッドを通過させることで、紫外パルスを正チャープさせてパルス幅を伸ばすシステムであった（石英ロッド THG Stretcher）。この一連の過程を、次々と開発していったパルス整形システムとともに、図 1 に示す。この紫外レーザ光を伝送し、RF 空洞内の銅カソード面に適切な RF 位相で正確に照射して高品質電子ビームを生成する。そのため、レーザ入射のタイミングとポインティングには、次節で述べるような高いレベルが求められる。

## 2.2 高品質 SPring-8 レーザ光源開発の指針

### 2.2.1 長期間安定なレーザ光源開発の指針

この分野で先進的な欧州連合の PHIN プロジェクト (<http://www.infn.it/phinf/>) などでも述べられているように、高輝度ビーム生成のためにはレーザ技術は必須である。以下に、最初に目標として定めた SPring-8 レーザ光源に求められる安定度の条件を列記する。既に 1999 年頃、ギガワット級の高強度ピコ

秒レーザ光源では安定なものを榊住友重機械が実現していた<sup>4)</sup>。このことから、このフェムト秒レーザの安定化に対しても同様の安定度は達成できるとして目標値とした。

- 1) レーザ・パルスエネルギーの安定度 (rms) は 3 倍高調波で 1% 程度。
- 2) レーザの連続長期安定度は 1 年。ただし、ユーザー運転サイクルを 2 ヶ月と考えてレーザ増幅器光源のフラッシュランプを交換する。交換後、1 時間以内に安定することが条件。1 年間連続運転の場合は、フラッシュランプ（寿命：30 万ショット以上）励起ではなく、半導体レーザ（LD）励起（寿命：1 万時間以上）とする。
- 3) レーザパルスと RF の同期のタイミング・ジッタ (rms) は 1 ps 以下であること (100 fs が目標)。
- 4) 紫外レーザ（3 倍高調波）のポインティング・スタビリティは、レーザ出射後 1~2 m の距離で照射したときに、カソード面上で 10  $\mu\text{m}$  (p-p) 程度。

### 2.2.2 高輝度電子ビーム生成のためのレーザパルス整形の指針

次に重要なのは、フォトカソード RF 電子銃における低エミッタンスビーム生成のための最適なレーザパルスの 3 次元強度分布である。レーザの空間プロファイルは一般的な単一モード発振の場合について考えると、理想的にガウシアン分布である。残念ながら、電子銃光源として最適なレーザの形状がそうであるわけではない。同時に、最適なレーザの時間プロファイル（時間軸方向の強度分布）についても考察が必要である。時間プロファイル制御の有用性は Yang 氏（当時、榊住友重機械）等の研究でも明らかにされている<sup>5)</sup>。逆コンプトン散乱のための衝突用レーザ光源としては、ピーク強度が必要なのでフェムト秒の超短パルスが理想であるが、フォトカソード光源として最適ではない。特に、我々の場合は、パルス幅の伸長が最大の問題であった。

そこで、低エミッタンスを実現するためのレーザパルス形状（3 次元の強度分布形状）の整形について考察する。ここで注意すべきは、例え補償光学系で最適化制御しても、技術的に毎ショットの整形が不可能なことである。このことはレーザのパルス形状の最適化には、その前提として本質的な安定度を要求することを意味する。ここで、補償光学系とは、レーザ光などの波面や空間およびスペクトル強度分布の歪みを、動的に補正、排除する可変光学系のことである。

RF 電子銃のエミッタンスが増大する支配的要因は

次の4つである。それは、熱エミッタンス（初期エミッタンス）、加速電界拡がり、RF電界の時間変動、及び空間電荷効果である。これら4つが独立であると仮定できる場合は、これらの自乗和の根で全体のエミッタンスが決まる。これらのエミッタンス増大要因を抑えるためには、レーザーパルスの最適化が必須である。この他にも高電界にすることも低エミッタンス化に有効である（SPring-8のRF電子銃は世界最高のカソード表面最大電界：190 MV/m<sup>6</sup>）。以下に、増大要因別に検討し列挙する。

#### 1) 熱エミッタンス：

レーザースポット径と電子発生初期の運動量拡がりの積で決まるエミッタンスの初期値。レーザーの空間プロファイルや、カソードの量子効率分布の不均一性が、この初期値を大きくする。このため、空間プロファイルのホットスポットを無くすこと、カソード上のスポット径を極小化することが、この初期値を低く抑えるのに有効。

#### 2) 加速電界拡がりによるエミッタンス増大：

電子銃空洞内の電場拡がりや非対称性によるエミッタンス増大要因。カソード上のレーザースポット径を極小化することにより低減できる。

#### 3) RFの時間変動によるエミッタンス増大：

当然ながら、RFは時間的に電磁場強度が変動する。このため、電子バンチ内の電子は、バンチ内の進行方向位置により異なった電磁場で加速され、エミッタンスの増大が起こる。RFエミッタンスとも言う。

実際には、電子はエネルギーがほとんどゼロから加速されるので、フェイズスリップも起こす。このような影響も含めてエミッタンス増大を最も小さくするよう、制御する必要がある。具体的には、レーザーのカソード面照射のタイミング、パルス幅等を調整することにより、低減が可能。

#### 4) 空間電荷効果によるエミッタンス増大：

プロファイルの歪みが非線形空間電荷効果を通じ、ソレノイド磁場で補正不可能なエミッタンス増大につながる。バンチ内の電荷密度を低くすることで抑制されるが、バンチ形状を工夫し、空間電荷効果の非線形成分を抑えることでも低減できる。

同じ電荷量で、これらすべてのエミッタンス増大要因を抑制するためには、レーザー光源パルスの大きさと形状を最適化しなければならない。そうすると、均一なレーザースポット径を小さくし、レーザーパルス幅を伸ばすことで電荷密度の低減を図ることが考えられる。

しかし、レーザーパルス幅を長く伸ばすと、得られる電子ビームのバンチ幅も長く伸びたままの可能性もある。

しかし、ここに都合の良い原理がある。カソードから生成される電子は、レーザーのパルス幅分、時間幅を持って生成される。その間にRFの電場は変動するが、レーザー照射のRF位相に対するタイミングを適切に選べば、この間にRFの電場が強くなるようにできる。そうすると、カソード直後の電子の速度は、光速に比べて十分に小さいので、電子バンチの先頭は速度が遅く、後方は速度が速くなるように生成される。したがって、電子銃空洞内で電子ビームはバンチ圧縮される。このため、ある程度レーザーパルス幅を長くしても、十分に短い電子バンチを得ることのできる解がある。ただし、レーザーパルス幅を伸ばし過ぎるとRFエミッタンスが増大してくる。Sバンドでは20 ps（位相にして±10°）が、空洞内バンチ圧縮効果、RFエミッタンス増大効果の2点から見てほぼ適当であるとの水野明彦氏（JASRI加速器部門）の計算結果を踏まえ、これを目標のレーザーパルス幅とした。

次に、非線形空間電荷効果の抑制の観点から、バンチ形状を最適化することを考える。バンチ幅が無限に長く、円筒形に均一に分布している場合には、この効果は電子ビームの動径方向に対して線形である。現実のバンチは短く、その両端で非線形の効果が生じる。そのため、他の最適パルス形状の提案がある。最近、Limborg 女史（SLAC）等のシミュレーション結果から、エリプソイドが最適形状との提案がある<sup>7)</sup>。

以上のことから、SPring-8のRF電子銃用レーザー光源パルスは電子ビームを生成したときに、長さ20 psの円筒“ビール缶”形状を実現すべきということになった（レーザースポット径は1~2 mm）。実際には、光源レーザーパルスの最適形状は電子ビームバンチの最適形状からずれた歪んだものになるはずである。したがって、少なくともその歪みを補償するように、3次元のレーザーパルス形状（時間と空間プロファイル）を整形する必要がある。そこで、補償光学系による電子ビームバンチ形状の最適化（補正）制御をオプションとして用意することにした。この方法によれば、射影またはスライス・エミッタンスを低減するように3次元のレーザーパルス形状を実験的に最適化制御できるというメリットがある。

上述の方針以外に、この研究開発において貫いた、もう一つの重要な方針がある。それは最初からなるべく“パッシブ”な方法だけを用い、必要以上に“アクティブ”に制御を行わないことである。それは最初から制御の塊にすると物事の本質が見えなくなってしまう

からである。この思想的影響もまた、SPring-8の“文化”の流れの中に身を置いていたためかもしれない。

### 3. レーザの不安定要素とその抑制対策

さて、先に述べたこのレーザー光源システムの構成のどこが不安定要因に成り得るのか。レーザーは不安定であるのが原理的な問題だという虚言に、惑わされないためにも、問題点を整理・分類して見ていく必要がある。

まずレーザーオシレータであるが、その発振原理であるモードロックは後述するように、本来安定なものである。モードロックとは、正確に一定の時間間隔にパルス列(単一の縦モード)をロックすることである。通常のレーザー発振は、CWモードといい、励起されたレーザー媒質結晶の利得がある時間幅のうちいくつもの縦モードが存在する。モードロック状態ではスペクトル・バンド幅が広く、CWモードでは逆に狭くて単色である。

モードロックを掛けるには、光共振器内を一往復する間に、一つのパルスしか存在できないように、何らかの方法で他のパルスと差別化して利得が損失を原理的に上回るようにしてやればよい。SPring-8のレーザーオシレータはカーレンズ・モードロックを使っている。カーレンズ効果とは、レーザーパルスがその強度により、入射した結晶内でそれ自身の周りに屈折率分布を誘起することで凸レンズを形成して自己収束する効果のことである。この効果により、或る強いパルスを優先的に増幅させることで、1パルスだけ光共振器内に存在できるようになる。正確にいうと、孤立波(ソリトン)が安定に存在する最適なピーク集光強度になるように、モードロックは掛かるのである。その最適なピーク集光強度を与えるには、適正な励起光源の強度を与えればよい。この種の励起光源はCW動作のために、長期間安定(連続運転寿命が2万時間超)であるので特に問題にはならない。

以上のことから、オシレータは原理的に安定なもので、不安定要素は発振原理以外の外乱要因である。以下に、オシレータの不安定要素とアクティブな安定化制御策を列記する。

- 1) 光共振器長(光路長で)の変化:  
共振器の長さはそのミラーの一つをピエゾ素子で位置制御することにより、縦モードの周波数が一定となるようにフィードバック制御する。これを“Femtolock”と呼ぶことにする。
- 2) 励起光源のレーザー結晶照射位置の変化(励起光源のポインティング・スタビリティ):

レーザーオシレータ出力が一定になるように、その励起光源の輸送ミラーをフィードバック(出力低下の閾値を設定して逐次制御)する。これを“Femtoalign”と呼ぶことにする。

- 3) ミラー等光学素子特性の経年変化:  
実際に光学素子の経年変化は損傷事故以外に劣化しない(10年前はチャープミラーが可逆的経年変化をしたが、コーティング技術の進歩により現在は見られない)。

また、後段にあるレーザー増幅器や、3倍高調波(以下、3倍波と略す)の紫外レーザーの不安定性は、フェムト秒であることから熱伝導が原因で、そのような早い時間スケールの現象は説明できない。また、レーザー結晶に吸収される熱を換算しても、さほど大きな影響が考えられないことなどから、少なくともレーザーパルス自身による熱が原因で引き起こされる不安定性ではない。むしろ、熱歪みが問題になるのは、その30%が結晶で熱となる増幅器の励起用レーザー光(YAGレーザーの2倍波:532nm)による、レーザー結晶での熱レンズ効果である。しかし、プロファイルがこれらの光学素子での熱歪みから生じる収差により悪化しても、熱負荷が同じで再現さえすればよい。したがって、安定度と直結するわけではない。そこで、残るプロファイルの問題は整形技術で対応することにした。以下に、増幅器以後の不安定要素を列挙し、そのアクティブな安定化制御策も併記する。

- 4) オシレータからの種光の変化:  
強度の変動は増幅器出力にほとんど寄与しない。しかし入射光軸の変動(ドリフト)は影響する。
- 5) 励起光源のレーザー結晶照射位置変化:  
励起光源の入射光軸の変動(ドリフト)は増幅器出力に影響する。励起光源強度は一定値以上である必要がある。この強度を一定にするようにフィードバックしてフラッシュランプ印加電圧を自動制御する。これを“Autopower”と呼ぶことにする。(コストは高くなるがLD励起に換えれば、このドリフト問題はなくなる)
- 6) ミラー等光学素子特性の経年変化  
実際に光学素子の経年変化は損傷事故以外に劣化しない。

これら6項目を見て、不安定だと思った読者は多いのではないだろうか。しかし、3)と6)以外はすべて環境を安定化して熱膨張変化を抑え、光学ホルダーの機械的な安定度とレーザー架台の除振性能を上げるだけで解決する問題である。また残りの2項目は、ガラスなどの誘電体光学系が帯電することで埃を集塵

し、それがレーザーにより焼き付き損傷するのが原因である。それゆえ、各種光学素子が破壊閾値以下にもかかわらず、破損するのである。これを防ぐには、クリーンルームに置いて除電してやればいい話である。これは埃を極度に嫌う半導体工場では“常識”なのだが、55～60%以上に加湿してやると、劇的に誘電体表面の静電気を除電することができる。産総研の友人に聞いた話だが、このような恒温恒湿クリーンルームは電総研（現在の産総研）で最初に作られたらしい。当時、作った人たちは、周りに理解を得られないまま業界を去っていったとのことだが、今ではどこの半導体工場でも恒温恒湿は常識になっている。私はその方々を存じ上げないが、その先見の明と勇気に敬意を表し、心から御礼申し上げたい。

そもそも加速器が長期に安定なのは、共振空洞を温調水で物温変化を抑え、加速器架台を安定な地盤の上に作り、そして何よりも電子ビームを超高真空で外気から守っているためである。電子ビームにとっての超高真空の役割を、レーザーでは恒温恒湿クリーンルームが担っていると考えれば分かるであろう。加速器と同じように環境を“パッシブ”に安定化することが大切なのはレーザーも同じで、まずこれを第一の安定化方策とした。それでも安定度が足りない場合に初めて、先の6項目で示した不安定要素を、順次“アクティブ”に抑え込んでいくことにした。

#### 4. SPring-8でのレーザー光源開発史

本章では、2001年から2006年までの研究開発史を4つの時代に区分して概観する。ここでは、2.2節の始めに挙げた、目指すレーザー光源の安定度に関する条件1)～4)までをクリアしていった過程を記述する。また、毎年のように開発していったレーザーパルス整形技術の変遷についても述べる。

##### 4.1 第一幕“人間制御時代”

2001年から2002年まで“人間制御”によるレーザー運転でRF電子銃の実験は行われた。“人間制御”とは、人間がオシレータのモードロック状態のスペクトルと再生増幅後のレーザーパルス信号を見ながら、それらが同じになるように、常に手でオシレータのミラー群を微調することである。この時期の“人間制御”による運転経験から、レーザー全体の安定度はオシレータでほとんど決まることなど、安定条件に関する知見が多く蓄えられた。

次に、フェムト秒から10ピコ秒台にパルス幅を伸ばすために、全長90cmの石英ロッドにフェムト秒紫外パルスを打ち込む方法で、他のパルス整形技術が

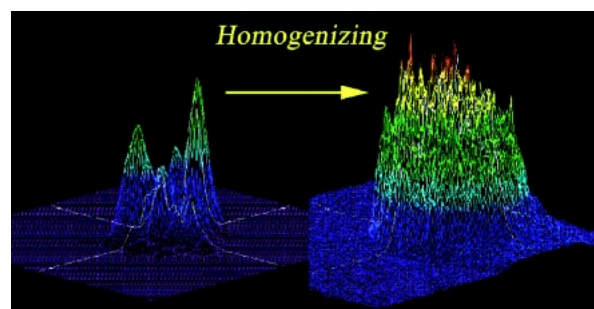


図2 空間プロファイル整形による改善結果

完成するまで暫定的に行った。この方法では、最初の数ミリで起こる非線形効果で広がったスペクトルを利用し、石英の正分散でパルス伸長させるが、現実的に5psが限界である。それは非線形効果を使うことにより、フィラメンテーションという困った現象を併発するためである。これは非線形効果により、石英ロッド中に不均一な屈折率分布が誘起され、レーザーパルス内の各部分がそれぞれ異なった自己収束を起こすために生じる現象である。これにより、空間プロファイルは悪化し、遠方へのレーザーの伝送効率も著しく低下することとなった。

この悪化した空間プロファイルを整形するためにマイクロレンズ・アレイを導入した。マイクロレンズ・アレイとはこの照明光学系の一種で、均一に照射するための光学系である。フォトカソードへのレーザー照射は面上で均一であればよく、この方法でも問題がない。この構造は六角形のマイクロレンズの集合体で昆虫の複眼のような構造であるため、フライアイ（ハエの目）レンズとも言われる。この光学系により改善された空間プロファイルの結果を図2に示す。規格化水平エミッタンスは、0.1 nC/bunch（パルス幅：5 ps；スポット直径：1.5 mm）で2.3  $\pi$  mm mradで、整形しない場合と比べて約3倍の改善であった<sup>8)</sup>。

当時のレーザー環境は、クリーンルームは除湿タイプのため、湿度が30%を切ることがしばしばだった。ポッケルスセルなどの光学系の損傷がよく起きた。これには水を張ったバケツを置いて対処した。また天井の吹き出し口が一カ所だけで、特定の場所のみに風が強く当たる問題があった。吹き出し口の場所をアクリル板で覆い、レーザーへの風の影響を緩和するなどした。

##### 4.2 第二幕“テストベンチ大改造時代”

安定化のためにはインフラから根本的にやるべきという観点から、2003年にテストベンチを拡張する大改造を行った。遮蔽室の拡張とクリーンルームの拡張と恒温恒湿化である。恒温恒湿クリーンルームは、温度や湿度を変えた試験ができるように、環境試験室と

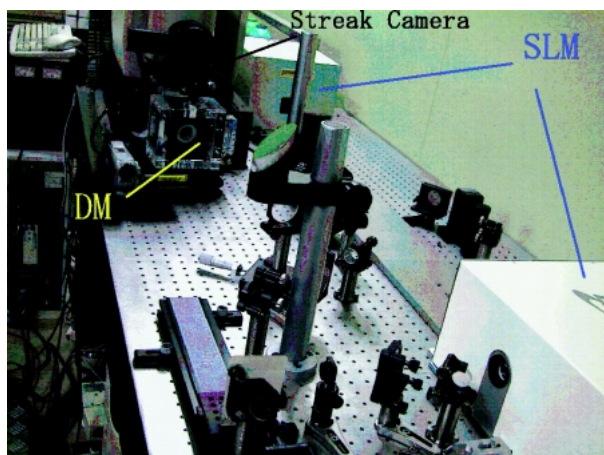


図3 完全・補償光学系レーザー整形試験システム

して整備した。床や壁をすべて帯電防止材料にし、コーナー R 巻き上げにして静電気・埃対策に万全を期した。また、風の影響を低減するため、天井吹き出し面積を一桁増やした。また、レーザー機器の配置も室内の風速分布を測定し、その影響が少なくなるように配慮した。レーザー定盤上で、相対湿度が 55% (安定度 2% : p-p), 温度が 21°C ( $\pm 0.3^\circ\text{C}$ ) になるように、通年 24 時間制御運転している。

またレーザー整形において 2003 年より、将来を見越した補償光学系の技術開発に入った。電子ビームの 3 次元パンチ形状をプロファイルモニターとパンチ長モニターで計測し自動数値評価することで、直接最適化することを最終目標としている。具体的には、補償ミラーで空間プロファイルまたは波面を、空間位相変調器で時間プロファイルを整形する。試験室内に設置した完全・補償光学系レーザー整形試験システム<sup>9)</sup>の写真を図 3 に示す。

この年より、先進小型加速器事業の高品質電子ビーム源開発の一環として、時間プロファイル (時間パルス波形) 整形のために、補償光学系である空間位相変調器 (SLM: Spatial Light Modulator) を導入した。この SLM は、回折格子で空間上にスペクトル展開されたレーザーの各波長の位相を、石英板列の各板の角度を変えることで制御し、レーザーの時間波形を整形するものである。

また、空間プロファイル整形のための補償ミラー (DM: Deformable Mirror) を準備した。この補償ミラーはその最適化制御に遺伝的アルゴリズム<sup>10)</sup>などを必要とする。そのためのソフトウェア開発を松井多志氏 (福井県工業技術センター) が担当し、遺伝的アルゴリズムによる空間プロファイル整形 (最適化) の共同研究を開始した。

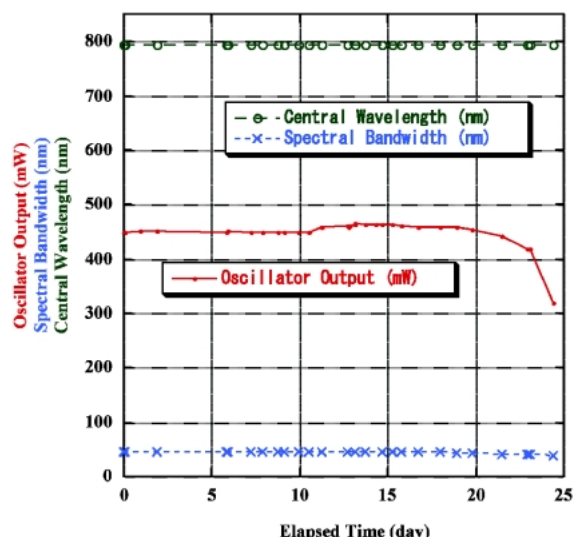


図4 オシレータのパッシブ安定化の結果

### 4.3 第三幕 “パッシブ安定化時代”

恒温恒湿レーザー環境試験室にレーザーを移設し、パッシブ安定化試験を開始した。この期間は 2004 年から 2005 年までの約 2 年間に当たる。

最初に、各種ホルダー類においては機械的に安定なものを、環境試験室でテストし厳選した。それらに置き換えると、最長で 3 週間ほどモードロックを保持するようになった。次にレーザー結晶内部の様子を顕微鏡カメラで 24 時間監視すると、結晶の中での励起レーザー光の位置が変動していることがわかった。これらの知見はすべて、フェムトレーザーズ社にフィードバックし、これらを解決する方法をともに模索した。時を前後して、フェムト秒からアト ( $10^{-18}$ ) 秒へと超短パルスレーザーのフロンティアは拡がり、モードロックではなく、さらに一歩進んだフェーズロック技術が重要になってきた。可視域ではアト秒になると光が一波長描けないために、“光の位相”をロックする必要性が生じたためである。このフェーズロック技術を導入し、Femtolock と Femtoalign の機構を備えた温調プレートのオシレータ “Synergy” が誕生した。

この温調プレートに流す水温を試験室温と同じ 21 度に設定した。パッシブ安定化のみの状態で 24 時間連続運転をした結果、25 日間モードロックが保持できた。この間、スペクトル形状は変化しなかったが、レーザー出力に長期ドリフト変動が見られた (図 4)。しかし、この程度の出力変動では増幅器後の最終段レーザー出力に影響はなかった。

次に、レーザーボックス内の“熱のこもり”の問題解決に、空冷だったポッケルスセルを水冷 (温調) し、増幅用レーザー結晶 2 個とともに 20 ( $\pm 0.1$ ) 度の温調

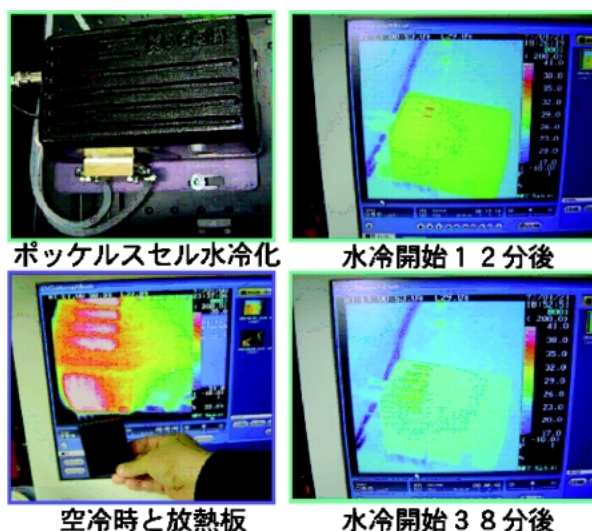


図5 ポッケルスセルの水冷化による環境安定化（サーモグラフィーによる撮像）

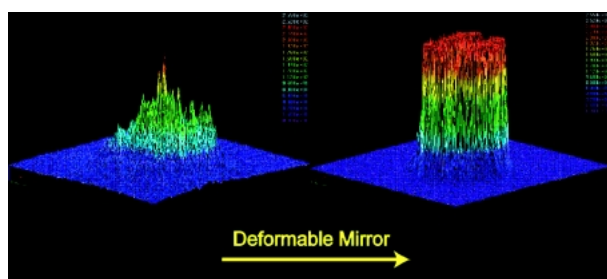


図6 補償ミラーによるフラットトップ整形結果

水で冷却した。この水温設定値はサーモグラフィーで観察し、温度分布が周辺と一樣になることを確認しながら決定した。図5に元々の空冷時と水冷化後の温度分布の変化を示す。

決定的にパッシブな安定化に貢献したのは、温調プレートによる YAG 管体安定化である。管体底面に温調プレートを密着させた。サーモグラフィーでの調査で、温調水が 28 ( $\pm 0.1$ ) 度の時に、温調開始後 1 時間で周辺との温度差分布の変化がなくなることを確認した。これら温調水は常時流していることでアライメントを保持している。また、各種電源から吹き出す廃熱状況もサーモグラフィーで調査し、その影響を低減できるように機器を配置した。

これらのパッシブ安定化により、紫外レーザー (3 倍波) の 1 日安定度は 1.4% (rms) が普通に達成されるようになった<sup>11)</sup>。これは基本波の安定度が 0.3% (rms) 以下を意味する。

一方、補償光学系のレーザー整形システムでは、補償ミラーによる空間プロファイルの自動最適化プログラムが 2005 年から実用段階に入った。補償ミラーで波

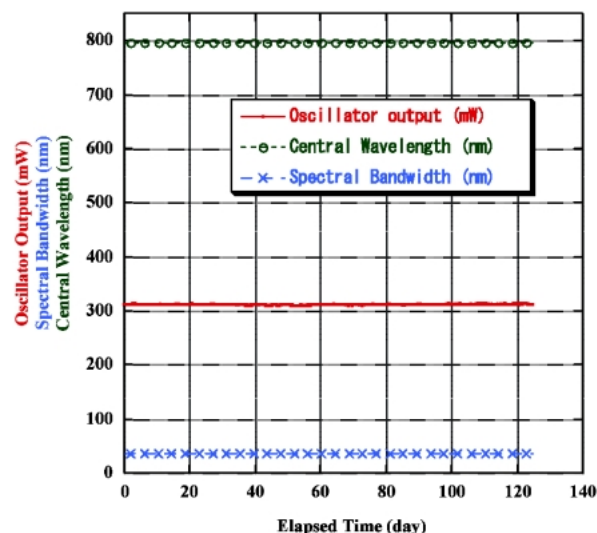


図7 オシレータのアクティブ安定化の結果

面・強度分布を自動最適化し、後続する凹凸レンズ各々の波面収差を利用することで、空間プロファイルのフラットトップ化を行った。結果として、図6に示すように完全に近い円筒型の空間プロファイルを実現した。この整形ビーム (パルス幅は依然 5 ps のまま) で、規格化水平エミッタンスは、0.1 nC/bunch (スポット直径: 1.0 mm) において 1.7  $\pi$ mm mrad に改善された<sup>12)</sup>。初めて  $2\pi$  の壁を破ることに成功した。次の目標は、パルス幅の伸長とバンチ電荷量を上げることに置かれた。

#### 4.4 第四幕 “アクティブ安定化時代”

2006 年から始まるアクティブな安定化の試験は、その前年までに整備した機器システムで実施した。パッシブな安定化により、紫外レーザー光源の 1 日の安定度は十分であったので、長期ドリフトを抑制するのが中心的課題となった。

まず、オシレータの Femtoalign のみを起動した場合の 24 時間連続運転テストを実施した。結果的に 59 日目にモードロックが維持できずに外れた。この間、レーザー出力に約 3 週間周期の長期ドリフトが見られた。そこで次に、Femtolock と Femtoalign の両機構を同時に起動して、24 時間連続運転をした。結果は、モードロックが不安定になることなく、保守作業で停止するまで 125 日間も出力安定度 0.3% (p-p) 保持することができた。図7から明らかなように、スペクトル形状もレーザー出力にも長期ドリフト変動がなく、不安定性の徴候が一切見られなかった<sup>13)</sup>。オシレータ安定化の問題は、これで解決した。

残るは、増幅器励起光源の YAG レーザの長期安定化である。この YAG レーザはフラッシュランプ励起



型である．このフラッシュランプは使用時間に応じて徐々に出力が低下してくるので、この長期ドリフトを抑制しないとイケない．連続運転テストの結果、フラッシュランプは2～3日に1回だけ、1Vずつ印加電圧を上げていけば、その出力低下分を補正できる．そこで、手でフラッシュランプ印加電圧を昇圧して、テラワット・レーザシステム全体の連続運転テストを行った．1.5ヶ月に亘り、安定な状態を連続で維持できた．現在、フラッシュランプ印加電圧を自動昇圧する完全自動運転を目指したプログラムを作成中である．

最後に残ったのは、時間パルス波形の最適化である．時間パルス整形のための補償光学系 SLM は、長期ドリフトの問題が解決しておらず、パルススタッカーによる矩形パルス整形を採用した．このアイデアは以前からあったが、“干渉させない干渉計”を作るようなもので、レーザ光源の長期安定化が成功するまで現実的ではなかった．

パルススタッカーとは、波長回転板と偏光ビーム・スプリッターで構成され、波長板で45°直線偏光にされたパルスレーザ光を偏光スプリッターキューブにより各偏光成分（S偏光とP偏光パルス）に分岐し、再びスプリッター（この場合は合成用）にて光路差をつけて再合成する光学系である．このことを段数分だけ繰り返す構成になっている．例えば3段の場合には8個のパルスに分岐して重ねることになる．このとき、合成パルスに干渉が起きないように、図8に示すようにSとP偏光のパルスを交互に並べる．

図9に示すように、各短パルス（2.5 ps）の立ち上がり（1 ps 程度）で5～20 psの矩形合成パルスが可能である．この光学系はS偏光を基準としてP偏光で光路差を調整する機構のため、常に合成パルスの先頭は1段目のS偏光パルスと一致する．そのため、それを基準とするRF電子銃へのレーザ入射位相は、この光学系の調整によりずれることがない．また、図9に示した3段で20 psの矩形合成パルスとなる構成の場合、1段目のP偏光をマスクすれば10 psに、2段目までのP偏光をマスクすれば5 psと、段階的に変えられる．この時、合成レーザパルス全体のエネルギーは初段の波長板を回転させることで調整可能となる．

次に2.5 psの初期パルス（チャープ）を、前述のフィラメンテーションを避け、石英製光学材料中での分散を使って伸ばして作る必要がある．3段構成のパルススタッカーの場合、レーザパルスは合計で約7.5 cmの石英（スプリッター分）を通過する．パルススタッカー後にカソードまで到達するまでの伝送光

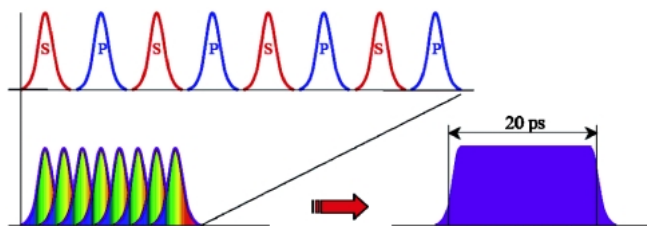


図8 干渉しないパルススタッカーの原理

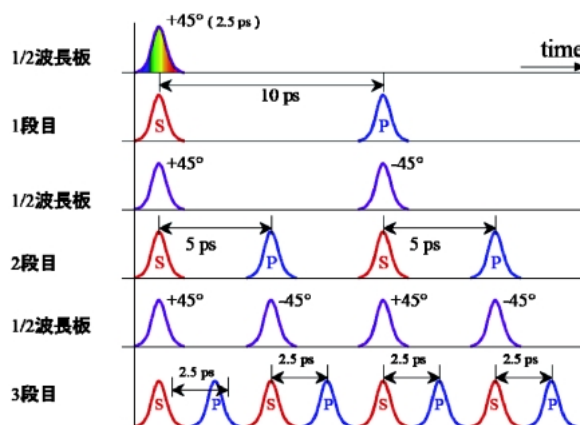


図9 パルススタッカーのタイミングチャート

学系上にある、石英製の光学窓やレンズの合計の厚さも同じ7.5 cmにする．ところで、波長263 nmにおいてスペクトル・バンド幅が4 nmのときは、7.5 cmの石英で2～2.5 ps伸びる．そこで最初に2.5 psに負チャープ（図9で左右反転した虹）で伸ばしたパルスを作る．それが、パルススタッカーを通過する間に正分散により圧縮され、ついには最短のフーリエ限界パルスになる．パルススタッカー内で段階的にパルスは8個に分岐されていくので、ピーク強度は下がっていく．それで負チャープパルスが最終的に数百フェムトに縮んでも、光学部品はダメージを受けないと推測した．その後、伝送光学系にある石英光学系を通りながら、今度は正チャープ（図9の虹）になりながら2.5 ps程度まで伸びると予想した．

具体的には、高調波発生器前段にあるコンプレッサーの回折格子ペアの距離を離して、負チャープのパルスを作る．その負チャープ量は回折格子をマイクロメータで平行移動して微調する．パルス幅が2.5 psにするための平行移動量は、実は基本波のスペクトル・バンド幅に依存する．目的とする3倍波のスペクトル・バンド幅は使用するBBO結晶の厚さによって変わる．結晶が厚くなると、実効的に基本波のスペクトル幅が削られてしまう．結晶厚を0.2 mmにすることで、2.5 psの紫外の負チャープパルス発生に成功し、合成パルス幅を20 psへ伸長する最大の難関を突

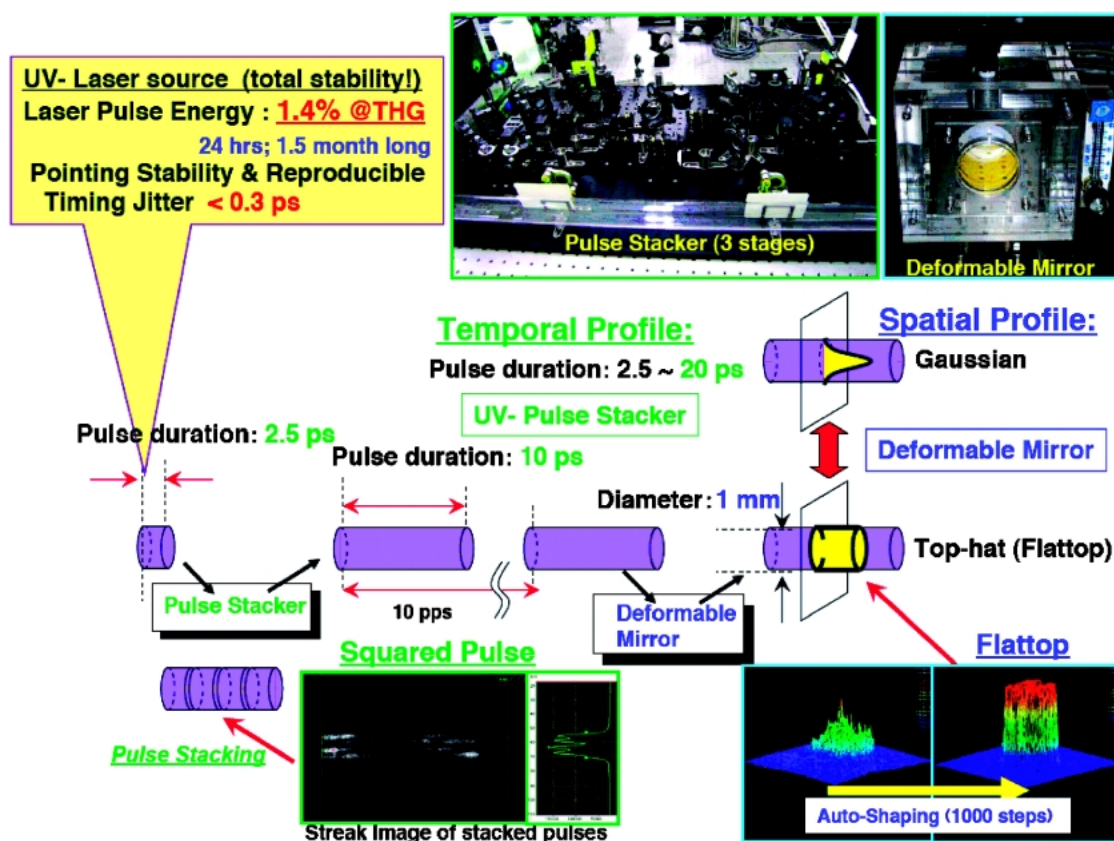


図10 レーザパルス 3D 強度分布整形システム：時間プロファイルを実スタッカーで矩形に再合成し，空間プロファイルは補償ミラーでフラットトップ化する．この2つの整形方法はお互いに干渉しないため，独立に最適化可能なシステムである．

破した．

パルススタッカーの製作に当たり，ホルダー類などは調整機構を無くし，ネジ止めも全て2箇所固定するなど，機械的安定性を優先した．そのかわり調整自由度がないので，材料の選択を含め設計を詳細に詰めた．この光学セットは製作に協力して頂いた株式会社ルミネックスから，パルススタッカー・キットとして発売されている<sup>14)</sup>．

この3段のパルススタッカーで合計8個パルスを，SとP偏光が交互になるように時間軸上に等間隔に並べ，後は伝送光学系媒質中での正分散により各パルスは伸びて理想的に重なり合うはずである．この重なり合いの状態は電子ビームを用いて確認した．まず，レーザー入射位相を意図的に電子ビームのエネルギー拡がりが大きくなるRF位相にする．そして，電子銃下流の偏向電磁石で曲げたところにあるプロファイラーとファラデーカップで，個々の8個のパルスのRF位相差と各パルスの重なりをビームエネルギーの位相依存性から計測する．この結果をもとに，各パルス間の時間差をパルススタッカー各段で，Sに対するP偏光の光路差を適正にマイクロメータで調整する．例え

ば，SとP偏光は再合成時の光路差が， $750\text{ }\mu\text{m}$ の時に2.5 psの時間的オフセットに相当する．その後，補償ミラーでの遺伝的アルゴリズムによる空間プロファイルの自動最適化を合わせて行い，円筒形状レーザーパルスの生成に初めて成功した<sup>15)</sup>．その時の整形システム概念図を図10に示す．

この3D整形システムでは，パルススタッカーを2段構成にし，10 ps（スポット直径：1.1 mm）の合成レーザーパルス（4パルスの合成）を作った．この円筒形状パルスから生成した電子ビームの規格化水平エミッタンスは，電荷量1.0 nC/bunch（26 MeV）の時， $3.0\text{ }\pi\text{mm mrad}$ であった．しかし，この時に用いた偏光スプリッターキューブは光学セメント接着式を採用したために，3日間の連続運転で破損するという問題が生じた．同時に，張り合わせの光学セメント接着部で，前述のフィラメンテーションが起り，P偏向側のプロファイルが悪化した．また，カソード表面に到達時の各偏光パルスの幅は，予測に反し1 ps程度であった．原因はスプリッターの構成材料と，負チャージパルスにあると考えられる．

そこで，破壊閾値が150倍のオプティカルコンタ

クト方式（昭和オプトロニクス社製）を用意しパルススタッカーの2段目までをオプティカルコンタクト方式に交換した。さらに、最初のチャープパルスを2.5 psの“負”から1 psの“正”に大幅な変更をした。この対策後に合成したレーザーパルスを用い、低エミッタンス実験を再開した。ビームサイズを小さくしていくと、エミッタンスは良くなっていった。調子に乗り過ぎてレーザーを集光し過ぎたため、レーザープロファイラーがダメージを受け、補償ミラーでの自動整形ができなくなった。そのため、空間プロファイルは整形せずに実験を続行した。結局、3段のパルススタッカー（3段目だけ光学セメント接着式）による20 ps（スポット直径：0.8 mm）の合成パルスで、電荷量1.0 nC/bunch（26 MeV）の時の規格化水平エミッタンスで2.3  $\pi$ mm mradに到達した<sup>16)</sup>。この時、レーザー出射後15 mの距離でカソード面上に照射されたレーザースポットのポインティング・スタビリティは100  $\mu$ m (p-p)程度であった。また、偏光スプリッターもオプティカルコンタクト方式にしてから、壊れることはなくなった。

#### 4.5 安定化のまとめと残された課題

2.2節の最初に掲げた安定度に関する条件1)～4)の目標値はほぼ達成し、長期間安定なレーザー光源を実現できた。残るは、パルス形状の精密な最適化のみである。こちらも必要な整形光学系は開発済みである。今後は、空間プロファイルの最適化と合成パルスの精密な重ね合わせにより、さらなる低エミッタンス化を図っていく。また、電子ビームバンチ形状を計測および数値評価して、補償光学系（SLMとDM）のみによる精密最適化も近く実現する。もちろん、世界最小のエミッタンスを目指して！（高輝度電子源のエミッタンスの世界記録<sup>5)</sup>は1.0 nCで1.2  $\pi$ mm mrad)

### 5. ファイバー・ベース光源開発へ

今まで述べたレーザー光源開発の間に、ファイバーレーザーの大きな進展があった。このファイバーレーザー技術は元々、光通信用として発展していたため、高出力レーザー光源の候補に挙げられることはなかった。ところが2000年にITバブル崩壊という光通信産業を揺るがす事件が起きる。それを契機に、ファイバーレーザー業界は加工分野に活路を求め、**図11**に示すように劇的に高出力化した。このファイバーレーザーの高出力は、ファイバーという低損失の光共振器をもつことで始まり、さらにその励起源である半導体レーザーの近年の高効率化により飛躍的に進んだ。

加速器の分野でもエネルギー回収型ライナック

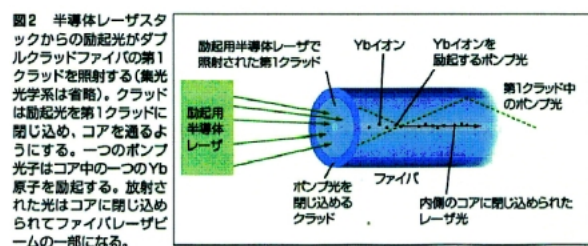
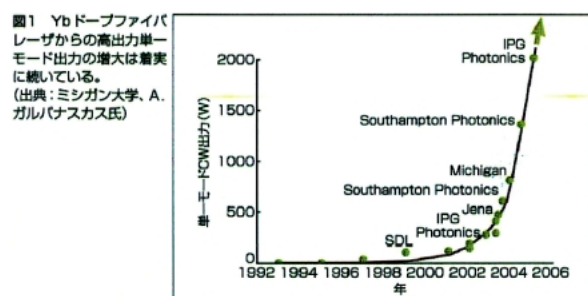


図11 近年のファイバーレーザーの躍進  
(出典：Laser Focus World 2005. 10. P45 © August 2005, Pennwell Corp.)

(ERL: Energy Recovery Linac) 用の1.3 GHzのCWレーザー光源用に、このファイバーレーザー増幅器が検討されている<sup>17)</sup>。熱カソードには困難な、CW（運転周波数）の高輝度電子（極低エミッタンス）源用としては最有力候補の一つであろう。ファイバーレーザーは、通常のレーザーのように機械共振器を持たない。そのため、調整の自由度はないが、代わりに不安定要素が少ない。また、その光共振器に単一モードファイバーを用いるので、空間プロファイルは理想的なガウシアンになるという優れた性質も併せ持つ。しかし、それは低エミッタンス電子ビーム生成に最適な形状ではない。

これを解決する方法の1つにファイバーバンドルによる3次元パルス整形方法がある。これはバンドルを構成する各ファイバーで分岐された、各ビームレットを3次元的にパルススタックさせることで、3次元的な強度分布が最適化された合成パルスを得ようというものである。この方法により、3次元パルス形状をエリプソイド状に整形でき、元の空間プロファイルのホットスポットも取り除いて均一化できる（**図12**のプロファイル参照）ことをSPring-8の紫外レーザー光源を使って、初めて実証した<sup>11)</sup>。さらにこの3次元パルスの形状を精密に最適化するのに、補償ミラーを援用するシステム<sup>18)</sup>を提案している（**図12**参照）。

ところが、この強力な整形方法はバンドル出射後に光が拡がってしまうため、短い作動距離でしかスポットでカソードに照射できない。しかし、背面照射可能な透過型カソードと組み合わせると、この作動距離

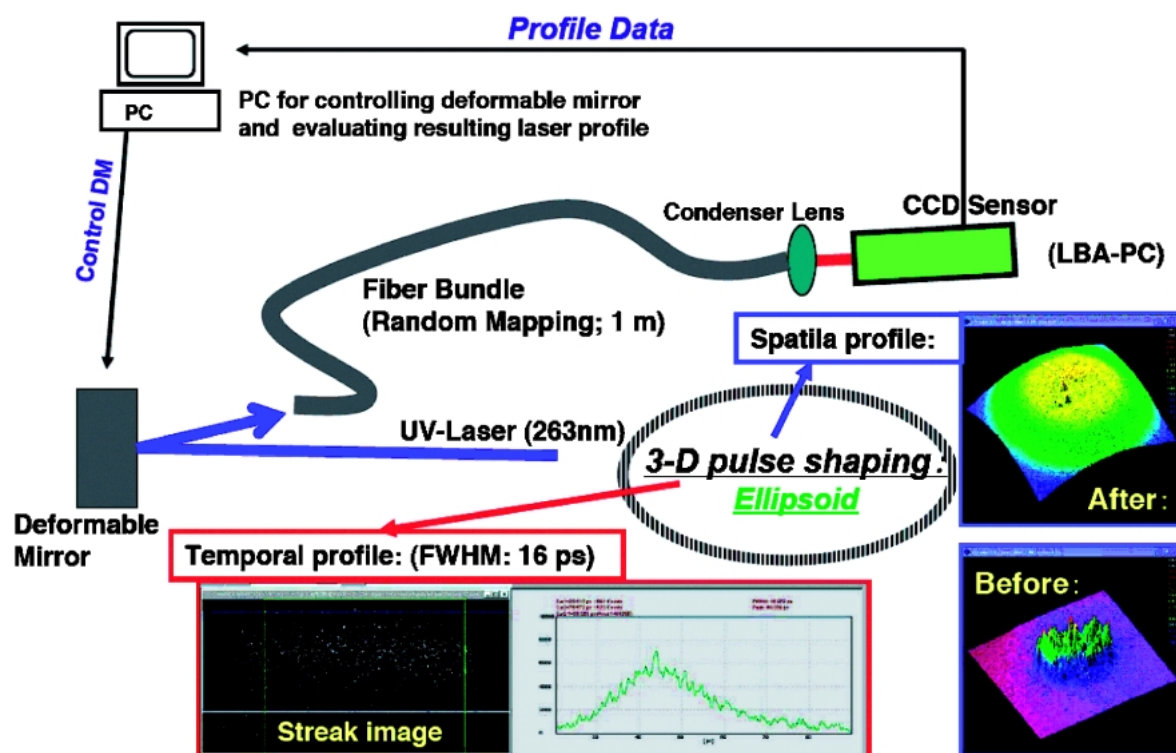


図12 補償ミラー支援によるファイバーバンドル自動3次元レーザパルス最適化システム

の問題がなくなり、この整形方法の有効性のみが発揮される。また、前述のファイバーレーザの低損失という特徴も、すべての光学系および伝送路において空中伝搬させず、ファイバー伝搬のみさせることが前提になっている。このファイバーバンドル整形技術は、3次元パルス整形とカソード照射面への伝送を同時に提供する。このファイバーバンドルによるパルス整形・カソード背面照射システムと半導体レーザ・シードのファイバーレーザ増幅器の組み合わせが、比較的近い未来のフォトカソード高輝度電子源の主流になるかも知れない。

### 謝辞

この研究の実現に、ご尽力頂いた皆様に心より感謝致します。特に、この協力関係を実現するにあたり、財高輝度光科学研究センター加速器部門の熊谷教孝部門長、線型加速器グループの花木博文リーダー、そして同部門の皆様には、多岐にわたる支援を頂きました。何よりも6年間にも亘るRF電子銃用レーザ光源開発には同部門の懐の深さがなければ、続けることは不可能でした。

このレーザ研究では、常に要素技術の開発が必要で、それに関する議論を多くの方々と重ねてきました。紙面の都合で氏名を挙げるのを割愛しますが、この場をお借りして御礼申し上げます。

### 参考文献

- 1) 花木博文, 加速器, Vol. 2, No. 3, p317 (2005).
- 2) H. Tanaka, et al., J. Synchrotron Rad., p378 (2006).
- 3) "Laser Labs Race for the Petawatt", Vol. 301, SCIENCE, p154 (11 July 2003).
- 4) F. Sakai, et al., Proc. Of PAC1999, New York, 29 March-2 April, p2036 (1999).
- 5) J. Yang et al., J. Appl. Phys. Vol 92, p1608 (2003).
- 6) H. Tomizawa, et al., Proc. of the 29th Linear Accelerator Meeting in Japan, Funabashi, Japan, 04-06 August, p147 (2004) (in Japanese).
- 7) C. Limborg-Deprey and H. Tomizawa, Erice, Italy, 9-14 October 2005, (2006) in press.
- 8) H. Tomizawa, et al., Proc. of EPAC 2002, Paris, France, 03-07 June, p1819 (2002).
- 9) H. Tomizawa, et al., Proc. Of the LINAC 2004, Luebeck, Germany, 16-20 August, p207 (2004).
- 10) 板谷太郎, AIST Today, p18 (April 2003).
- 11) H. Tomizawa, et al., Nucl. Instr. and Meth., A 557, p117 (2006).
- 12) H. Tomizawa, et al., Proc. of the FEL 2005, Stanford, CA, 21-26 August, p138 (2005).
- 13) H. Tomizawa, et al., Proc. of LO2006, St. Petersburg, Russia, 26-30 June (2006) in press.
- 14) Web site of the Luminex Trading, Inc. home page: <http://www.luminex.co.jp>
- 15) H. Tomizawa, et al., Proc. of the 31th Linear Accelerator Meeting in Japan, Sendai, Japan, 2-4 August, p16 (2006) (in Japanese).
- 16) H. Dewa, et al., Proc. of the FEL 2006, Berlin, Germany, 28 August-1 September, (2006) in press.
- 17) J. Hansknecht and M. Poelker, Phys. Rev. ST-AB 9, 063501 (2006).
- 18) H. Tomizawa, et al., Proc. of the NANOBEAM 2005, 36th ICFA Advanced Beam Dynamics Workshop, Uji Campus, Kyoto University, 17-21 October, p325 (2005).