

## 第4章 経済・社会の高度化に寄与する

### 1 大容量、高速光通信ネットワーク

NTT 未来ねっと研究所所長 萩本 和男

#### 1 - 1 基幹網インフラの構築

光ファイバ通信は、C.Kao 博士の光ファイバ通信の唱道を契機に、1970 年代より精力的な研究が始まり、ファイバの低損失化、室温半導体レーザの成功などエポックメイキングな発明・考案により、飛躍的な進歩を遂げ、1980 年代に入って、導入が始まり、日本では1985 年には日本縦貫網が構築された。今日の情報通信社会の基盤としての光ファイバ網の礎となっている。

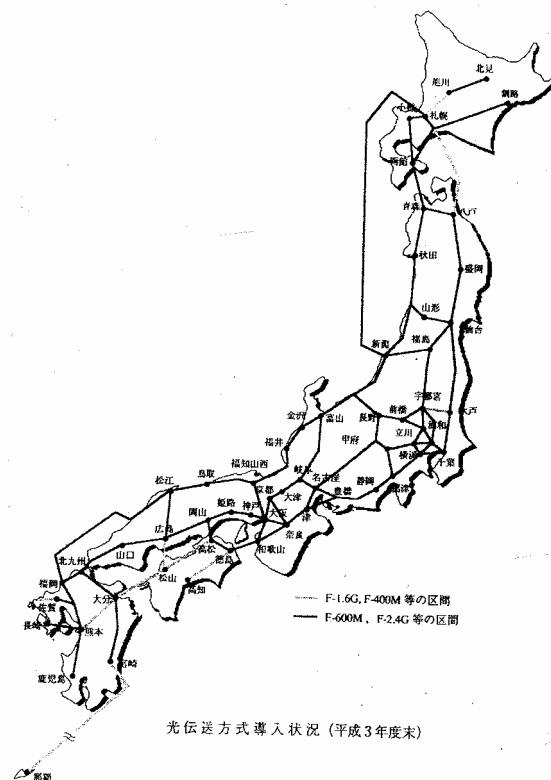


図1 日本縦貫単一モード光ファイバ網

図1の光ファイバ網は、1本のファイバで、400Mb/sの容量と30kmの中継間隔で日本の期間網を構築した。それ以前の同軸ケーブル方式では、容量こそ同じであるが、中継距離は平均して1km余りであり、マンホールに中継器を設置して、主要都市間を結んでいたが、ファイバによって電源の完備された中継局舎にのみに装置を設置することで都市間を結ぶことが可能になり、システムコストはもちろんのこと、運用コストも大きく下げることが可能となった。

図2は、1980年当時のF-400M方式の現場試験風景である。右側が、マンホール内、左側が局舎内である。マンホールに中継装置を設置する必要がなくなることは、大きなインパクトであることがうかがわれる。

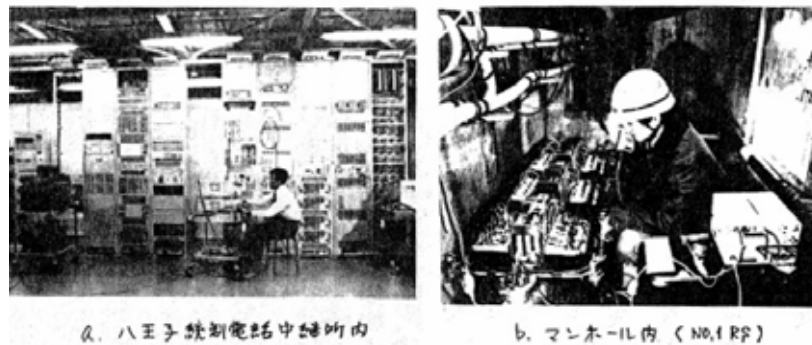


図 4.11 現場試験風景

図2 1980年当時の現場試験風景

図1の全国網は、伝送容量400Mb/s、中継距離30kmで始まったが、光ファイバは、低損失波長域が1.3~1.6ミクロンと広く数十テラヘルツの通過帯域を持った伝送である。その後の精力的な研究開発により、現在(2007年6月)では、伝送速度は1ch当たり40Gb/s、これを40ch波長多重して、1.6Tb/sの信号を、新しいラマン光増幅技術を使った光増幅中継器により500kmの再生中継間隔で伝送することが可能となり、主要ルートに導入されている。図3に、約30年間の進展の過程を主要技術とともに示している。この間に、同軸方式と比べると、伝送容量で、4000倍、中継距離で500倍、1ビット当たりのコスト単価で、1万分の1以下になっている。乱暴な言い方をすれば、太平洋横断が1万kmであるので、当時から見れば、いまでは米国は1kmとなりというインパクトである。インターネットが距離を克服するに至った大きなテクノロジー背景の一つである。

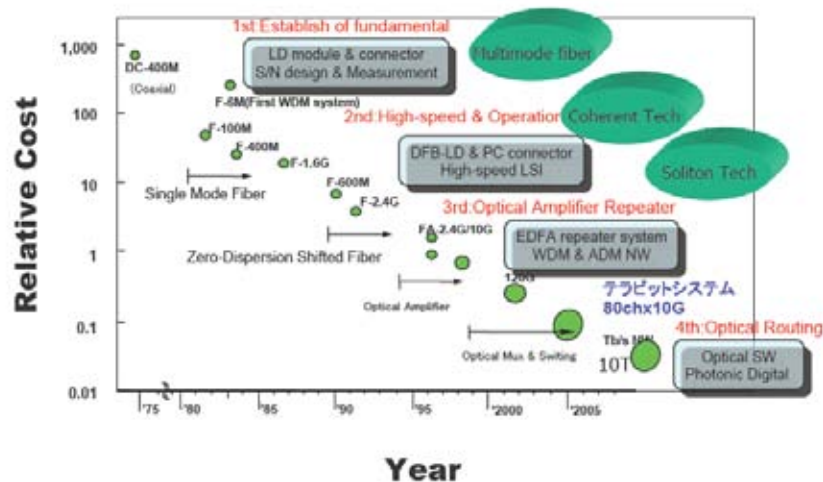


図3 光伝送の主要技術とコスト削減

図3の歴史は、光ファイバの有効活用の歴史でもあるわけである。伝送としての光ファイバでは、ガラス材料固有の特性であるが、1.5 ミクロン付近に極低損失波長域がある、一方で、帯域を左右する波長分散が1.3 ミクロン付近で零となる特徴を持っている。そのため、図4のように、ゼロ分散波長が、1.3 ミクロン付近となる標準的なファイバに加え、1.5 ミクロン付近にゼロ分散波長をずらしたゼロ分散波長シフトファイバ、さらに分散の傾きを平にした分散フラットファイバなどが、研究開発され標準化された。

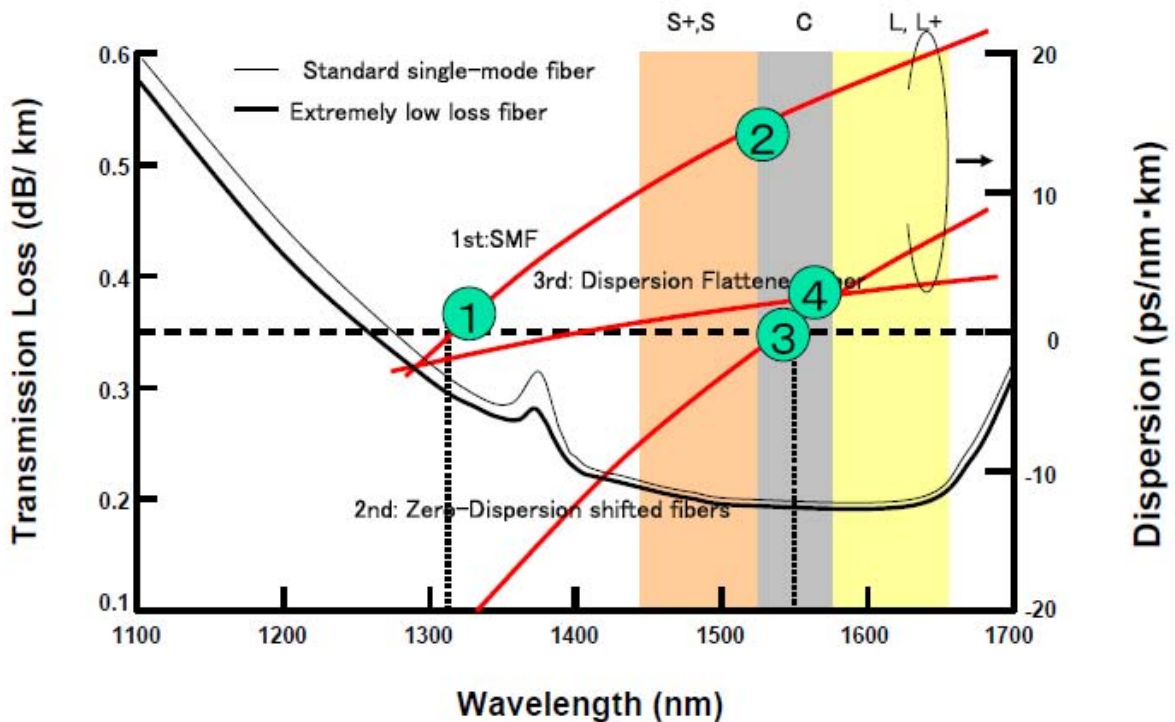


図4 光ファイバの損失と分散特性

標準ファイバで、近距離やアクセス系を中心に広く使われている。ゼロ分散シフトファイバは、長距離系や海底伝送用に主として用いられている。分散フラットファイバは、究極の伝送として、研究途上にある。このようにファイバ自身の進歩と呼応して、装置の性能向上が著しく進んだ。この中で、大きな伝送容量の拡大をもたらした側面は、2面あってエレクトロニクス技術とフォトニクスの技術である。80年代から90年代は、半導体技術を基にLSI技術が進歩を遂げ、電気信号の多重化処理の高集積化と高速化が進んだ。ムーアの法則と呼ばれて、2年で3倍の集積度の拡大を遂げた。90年代に入ってから、光増幅技術の進展が目覚ましく、図5は、初めて伝送実験に使われたエルビウム添加ファイバ増幅器である。



図5 エルビウム光ファイバ増幅器の例(はじめて光伝送実験に成功した例)

普通のファイバと同じ構造をしていて、シリカをベースにしている点も全く同じで、コアの部分にわずかにエルビウムという希土類元素が添加されている点が特徴である。

このファイバ増幅器で、テラヘルツの帯域と 1000 倍の電力利得を発生する。光ファイバ増幅器は、WDM (波長多重) 方式で束ねられた 100ch を超える波長信号を一括で増幅中継できるため、伝送路の容量拡大と経済化に極めて大きなインパクトがあり、90年代の後半から、WDM 方式が広く使われるようになった。この効果は、海底システムで極めて顕著であり、図6にあるように、大西洋・太平洋を中心に広く世界を繋ぐ伝送路として用いられている。海の中には、中継器が 50 km 程度の間隔で敷設されているが、中継器は単に光ファイバ増幅器だけであり、100G を超えるケーブル容量を実現している。

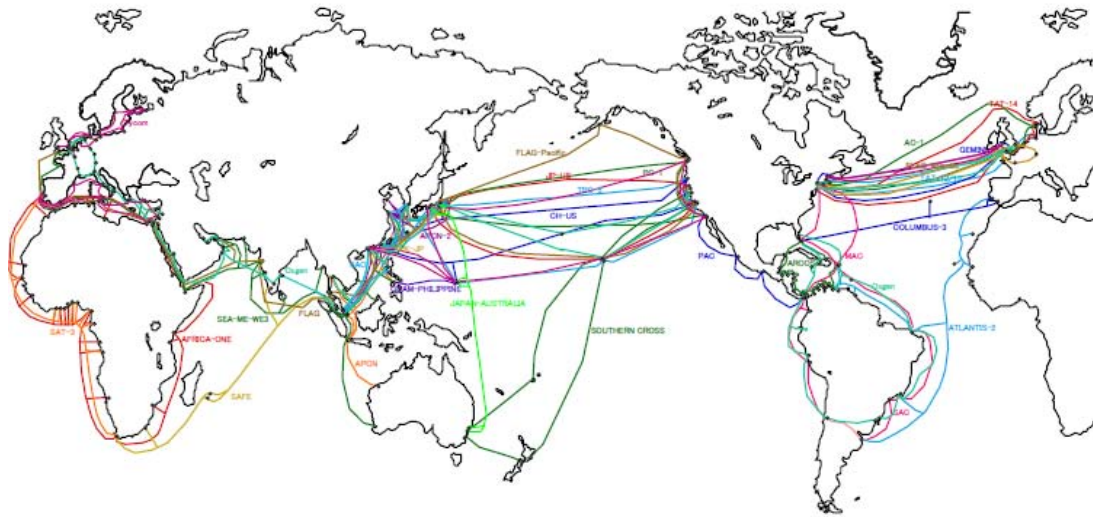


図6 国際光ネットワーク

その結果、大容量回線は、衛星から海底通信にシフトし、海底ケーブルの方が、遅延の少ない良好な音質の電話回線を提供できるようになった。

このように大容量化には、電気信号の高速化と WDM による光信号での多重化が有効である。

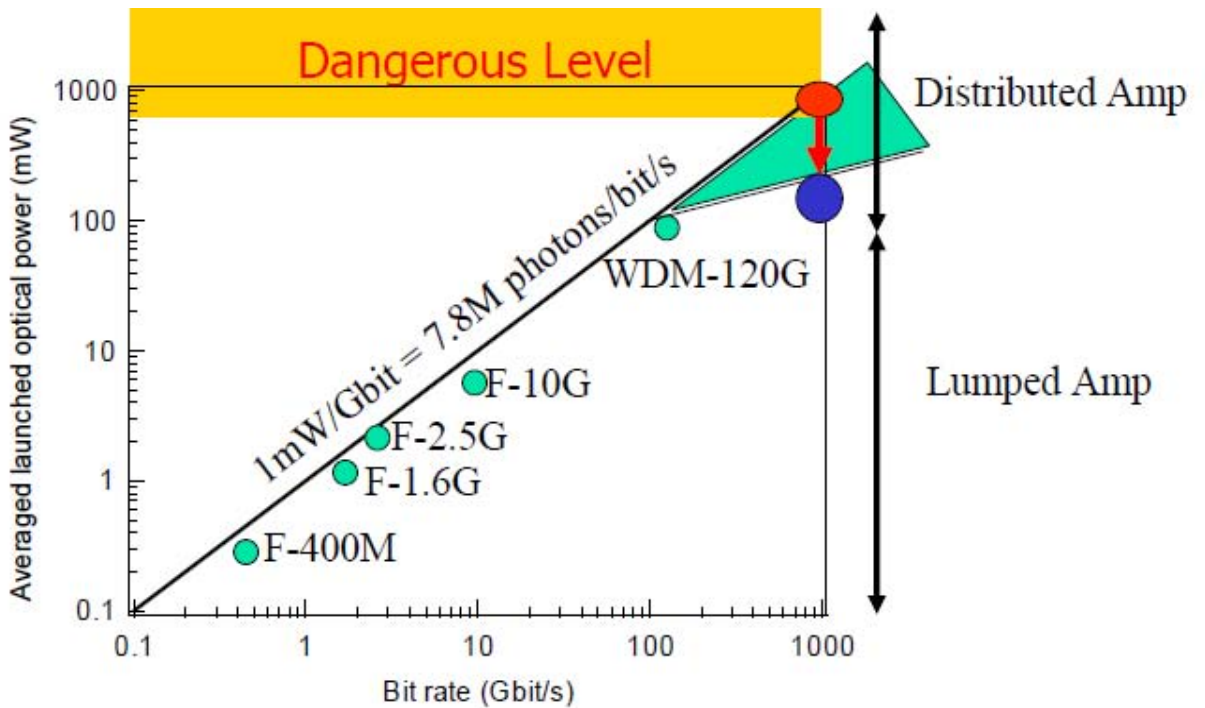


図7 送信パワー対送信信号

波長多重方式は、信号を異なった波長で束ねて容量を拡大するため、伝送容量の増大と共に送信信号のパワーも、ほぼ直線的に増大しているのがわかる(図7)。つまり、10Gb/sを1ch送るのに約10mW必要だとすると、100Gでは100mw、1Tでは、1W必要になり、運用上の制約になってくる。それは、光増幅器を中継器として使うと、伝送路の送信端が、最も高い信号電力なり、伝送するに従い減衰し、受信端で最小となる。図6の傾向を緩和するには、伝送路の一部を増幅器として使うラマン増幅が有効である。これは非線形光増幅機構を用いるためかなり高い励起パワーが必要なため従来有効とは思われておらず、エルビウム光ファイバ増幅器(EDFA)が用いられていたわけである。しかし、これを活用してWDMの多重土をあげてきた結果、ラマン励起に必要なパワーレベルに届いてきた。そこで、パラメーターを最適化して、EDFAと組み合わせることで、実用的なラマン分布増幅中継技術として確立し、実用化・導入が始まった。図3にあるように最近では、テラビットクラスの伝送システムが日本の基幹ルートを担っている。最新のシステムでは、ラマン増幅が用いられるようになっている

## 1 - 2 光アクセスネットワークの進展

コア系で光ファイバ通信が広く用いられているようにアクセス系でも、光ファイバ通信技術に注目が集まっている。伝送路として、光ファイバの有効性が実証され、経済性が高まるに連れて、長距離系だけでなく、地域ネットワーク・メトロネットワーク、さらに、アクセスネットワークへ、光ファイバの適用が進んでいった。図8に、日本のブロードバンドの浸透状況を示す。当初、CATV(ケーブルテレビ)・ADSL(非対称デジタル加入者線)が伸びたが、最近では、FTTH(Fiber To The Home)の伸びが上回っている。

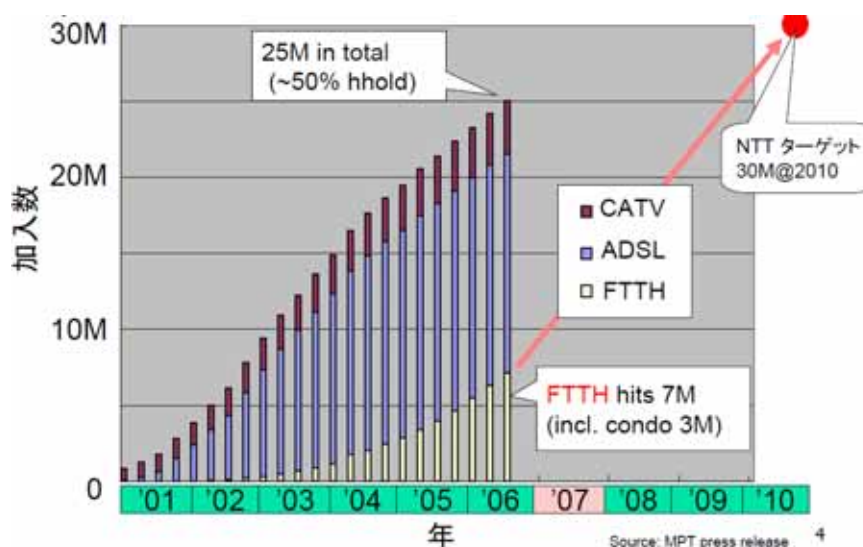


図8 日本のブロードバンドの進展

NTT は、2010 年までに、3000 万ユーザの確保目指して、高速性と経済性を可能にする GE-PON システムを精力的に導入している。このシステムの概略を図 9 に示す。

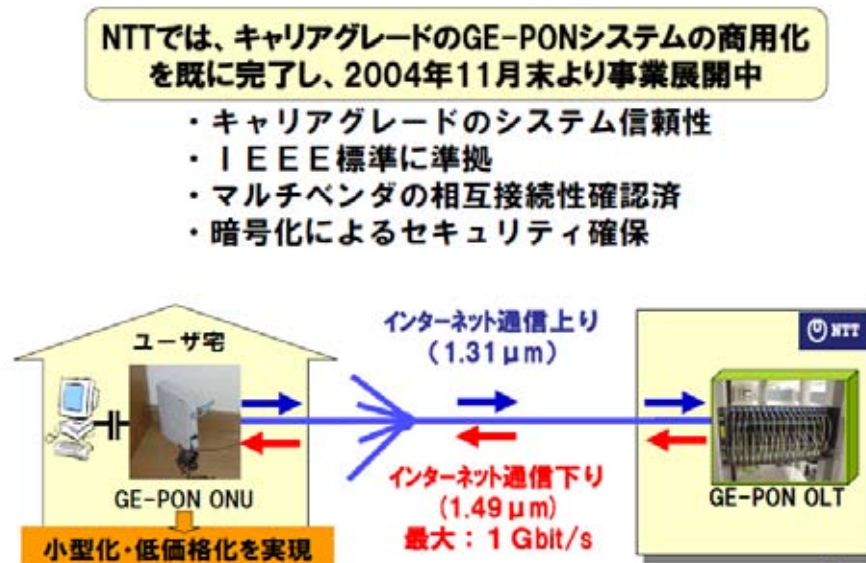


図9 GE-PON システム

このシステムでは、加入者システムゆえの経済化に工夫して、電話局と加入者宅の間でファイバを途中で32分岐して、局装置と途中のファイバ設備の共用を測っています。また、データ通信系と親和性の高いイーサ系のインタフェースを用意しています。各家庭は、最大 100Mbit/s のアクセス速度が可能です。局側は 1G イーサのインタフェースにより、ユーザ数で共有するベストエフォート系のサービスを提供しています。さらに、過程への引き込みの作業では、ファイバが曲げに弱いオープン型の導波路構造であることに対し、図 10 のようなコアの光閉じこめ効果を拡大できるフォトリック結晶構造のファイバコードを開発した。これによって、図内にあるように極端に曲げても、光損失が発生しないファイバコードが可能になった。ファイバに不慣れな人でも、扱うことができる。

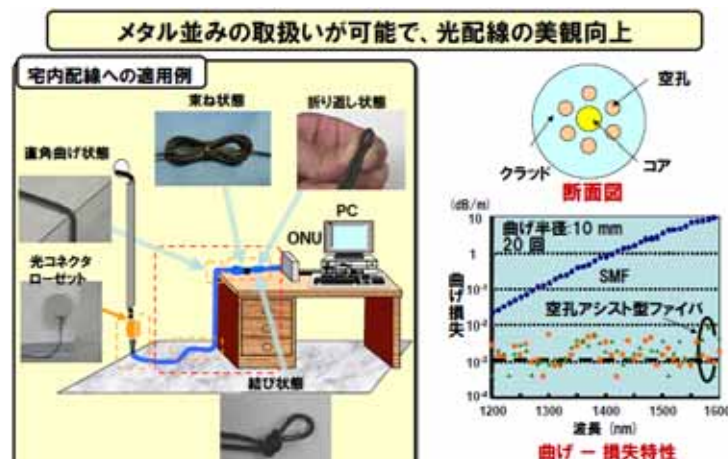


図10 曲げに強い光ファイバ

### 1 - 3 フォトニックネットワーク技術

ブロードバンドアクセスの普及により、バックボーン側にトラヒックの増大が急である。しかも、従来のトラヒックパターンとは異なるため、需要予測が簡単ではない。そのため、

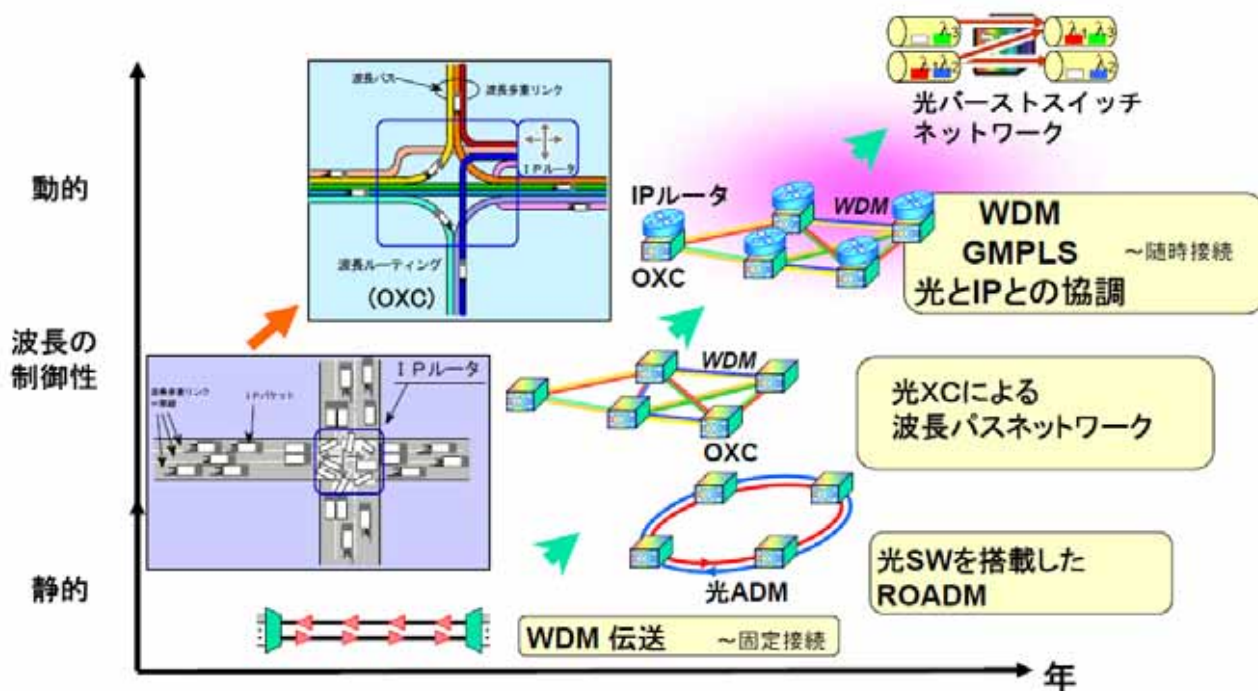


図11 フォトニックネットワーク

図11のように、リングネットワークやメッシュネットワークに、光スイッチを加え、光のパス（道）を切り替えることで、トラヒック増や障害対応をファイバ単位や波長単位で行うことができる。その結果、大容量の信号を効率良く扱うことができ、ネットワーク運用がフレキシブルに行うことができる。また、電気のスイッチを多数経てルート設定を行う場合に比べ、フォトニックネットワークの活用が期待されている。さらに、図12にあるように、光スイッチにより、電気のスイッチの段数を減らすことで、遅延の少ない広帯域な波長単位のネットワーク運用が可能になる。図13に、メトロネットワークで、よく使われている ROADM（再構築可能な分岐装入装置）を示す。電気のスイッチを使うのではなく、PLC（平面光回路）を用いて、分岐・装入スイッチを作った。これは、可動部分が無く、安定なスイッチング特性を実現している。



- サービスと物理層をつなぐIP統合網への移行
  - 国家基盤たる大規模、広帯域、高信頼、経済的NWの構築
- IPの帯域要求に対し、迅速に光の物理網を設定できるネットワーク制御技術として、GMPLSの研究を推進

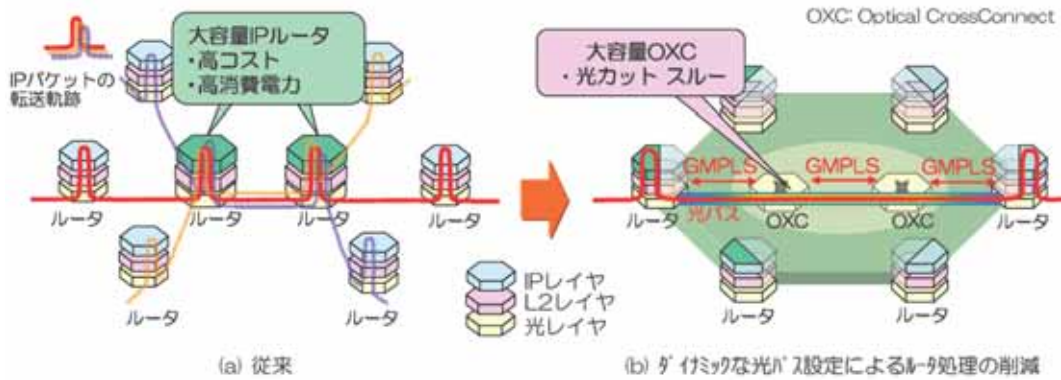


図12 GMPLS を用いたフォトニックネットワーク

このシステムの特徴は、あらかじめ敷設した状況から、分岐装入数を変更でき、トラヒックに応じたネットワーク構成に遠隔で、切り替えることができる。ネットワーク運用のコスト削減効果大きい。

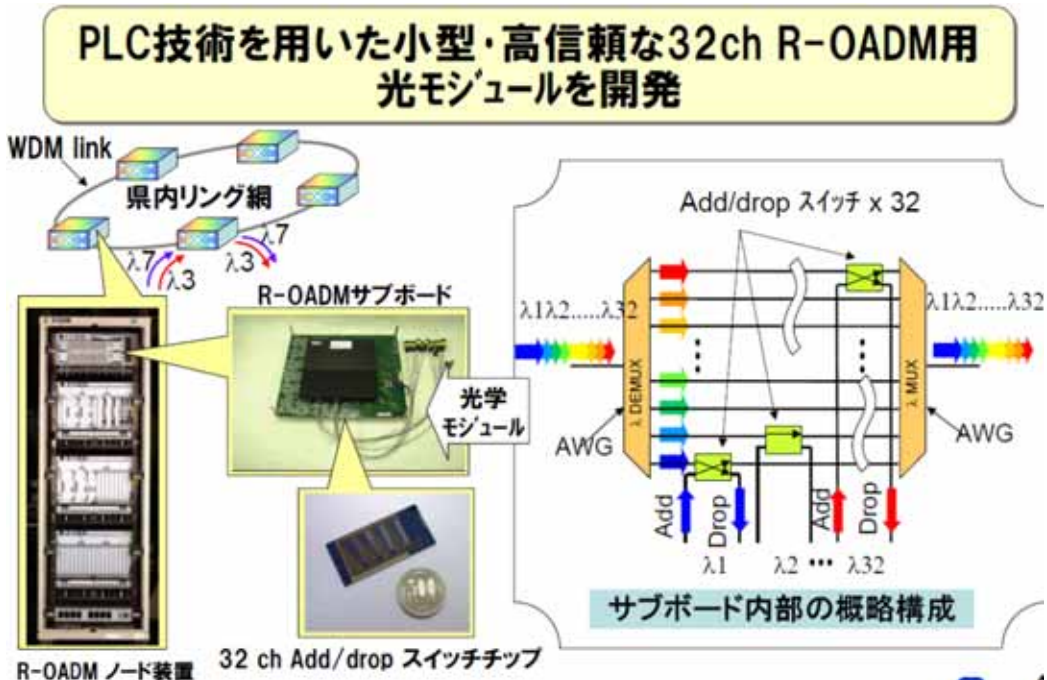


図13 ROADMs

このようなフォトニックネットワークを繋ぐリンク部分は、やはり WDM 技術が活用されており、図14は、14T/s の信号を一本のファイバに束ねた伝送実験で、2006年のチャンピオンデータである。

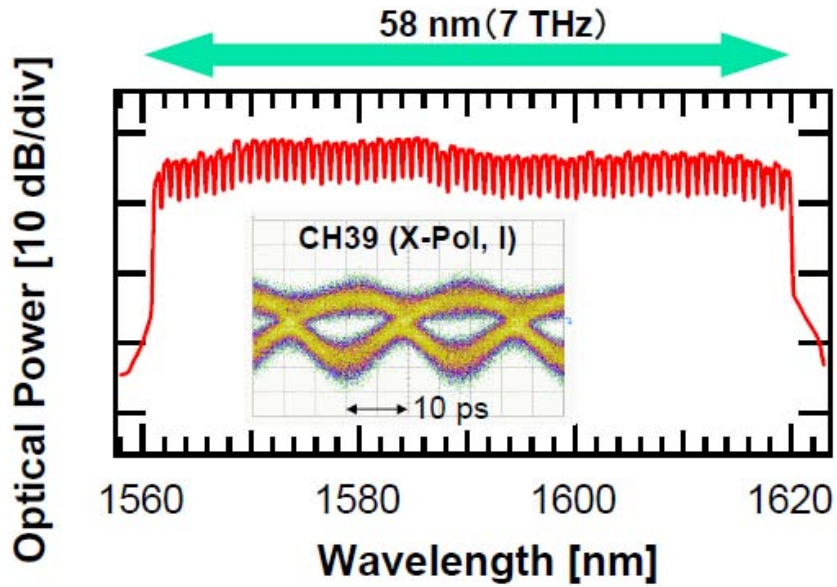


図14 14Tb/s の光スペクトラム

#### 1 - 4 ブロードバンドアプリケーション

インターネットの普及と PC やストレージシステムの反転により、コンテンツのデジタル化が飛躍的に進み、世界中のどこからでも、インターネットにアクセスできれば、デジタルコンテンツを楽しむことができるようになった。その量は、年々増えており、興味深いデータが、UC バークレー大学より示されている。(図15)

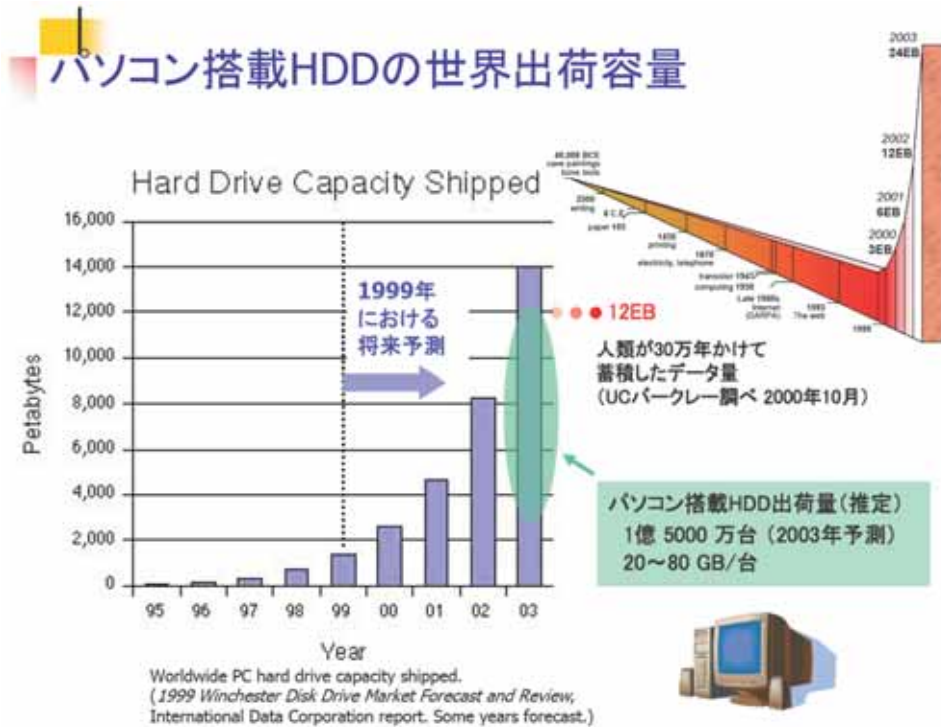


図15 HDD の出荷量とコンテンツ規模

すでに、相当数の規模で HDD が出荷されており、いささか古いデータであるが 2003 年には、全量で 10EB (エクザ・バイト) を超えている。一方で、人類が蓄積したデータの規模も同程度であり、すべてのコンテンツをネットワークを介して、世界中の HDD に格納・取り出しできるレベルに近づいている。現実の世界では、Google が、まさにそれをサービスとしている。

同様に、世界に分散されている CPU をネットワークで結合して、大きなスーパーコンピュータ並みの性能を出そうとする GLID 研究が盛んである。図 16 は、米国加州の UCSD 大 Optiputer というプロジェクトである。

## The OptIPuter Project

Collaborative Visualization of Large Remote Data Objects

- NSF Large Information Technology Research Grant
  - Lead campuses: Calit2 /UCSD and EVL/UIC (Larry Smarr, PI)
  - Partners: USC, SDSU, NWU, Texas A&M, Univ. of Amsterdam
- Driven by long-term national scientific projects
- Exploiting wavelength-based optical networks to re-optimize architectures for storage, computation and visualization!

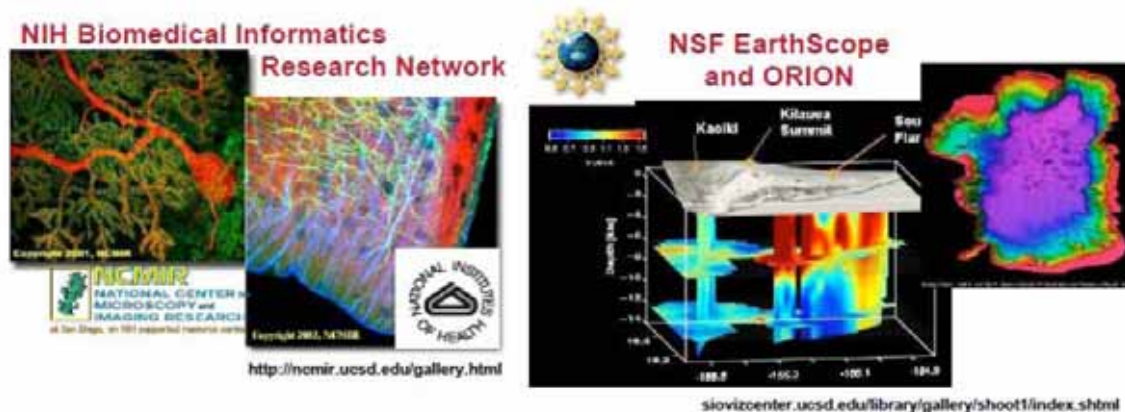


図16 オプティピューター

また、映像・エンターテイメントの代表である映画をデジタルで制作・配信・上映するデジタルシネマの取り組みが世界中で関心を呼んでいる。(図 17)ハリウッドを含め、ハイビジョンの 4 倍の解像度 (4K) で映画を配信・上映する実験が日本で本格化している。

## ネットワーク配信でこう変わる

デジタルシネマをネットワーク配信することで、下記のメリットが期待される。今回のトライアルでは、ネットワーク配信による映画配給の実用性を技術面、オペレーション面から検証したい。

- (1) フィルム配給ではできなかった、「緊急配信」など映画業界特有のニーズへの対応
- (2) すべての通信パスを1対1通信の光ファイバにすることによるセキュリティの向上
- (3) 映画本編に加え、暗号キーや上映記録をネットで自動配信することによる効率化
- (4) ライブ配信などODS\*と呼ばれる映画プラットフォームを使った将来サービスの可能性

\*ODS (Other Digital Stuff): 映画以外の上映コンテンツ。コンサートライブ、公演、授業などの映像など多彩

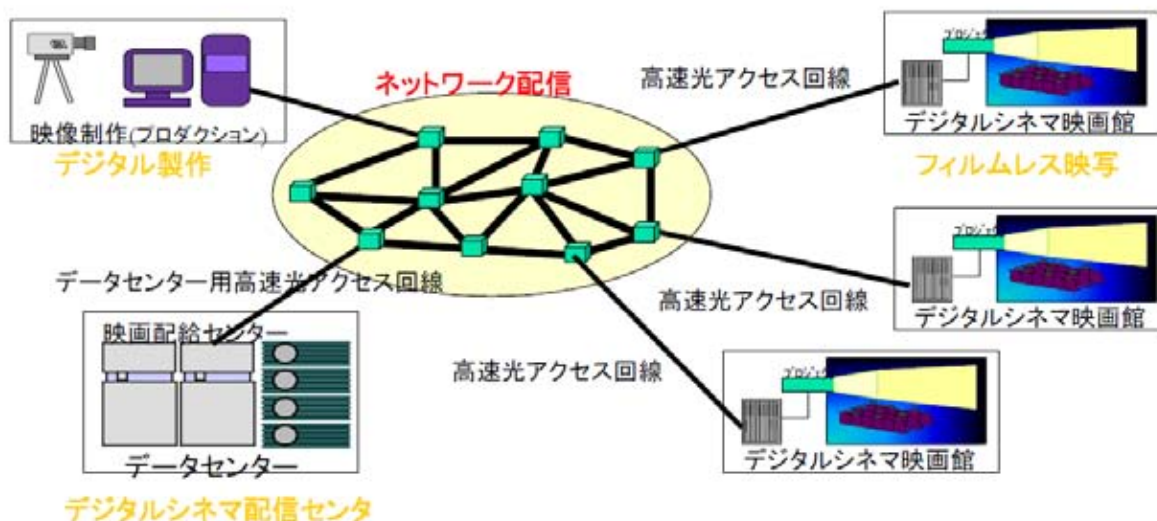


図17 デジタルシネマ

映像の美しさを追求した取り組みは、さらに高精細で、スムーズな動きをするナチュラルビジョンの取り組みも始まっており、大きな帯域を活用するアプリケーションの興味が尽きない。

### 1 - 5 おわりに

ブロードバンドのインフラが、世界で最も充実している国は、間違いなく日本である。この環境を最大限に活用し、世界が注目し、永く日本の競争力の源泉になるような強みを作っていきたい。それは、アプリケーションであり、光技術そのものであると期待している。

## 2 光による粒子の加速

(独)日本原子力研究開発機構量子ビーム応用研究部門長 加藤 義章

### 1 - 1 はじめに

電磁波である光は、光子と呼ばれる光の粒子の集まりである。光子は「ボース粒子」と呼ばれ、進行方向、周波数（波長）、偏光などで決まる一つの波の状態に、無限に多くの粒子を入れることができる。一つの波に多数の粒子が入った状態は「ボース・アインシュタイン凝縮(BEC)」と呼ばれる。(超流動は、ヘリウムのBECにより生じる。1995年には理想的なBECがアルカリ原子のレーザー冷却により生成され、コーネル、ワイマン、ケターレが2001年度[ノーベル物理学賞](#)を受賞した。)我々が日常浴びている太陽光や照明光では、進行方向や波長などが異なる極めて多くの波に光子が分散されており、一つの波に入っている光子の数はせいぜい数個程度である。これと異なりレーザー光は、まさにBEC状態の光で、出力1ワットのレーザー光の場合、約 $10^{18}$ 個/秒もの光子が一つあるいは少数の波に集中して伝播しており、その結果非常に大きな振幅のきれいな波（完全に制御されたコヒーレントな波）となっている。この性質を生かし、情報の高速送受信、物質の詳細な状態の測定と制御、無侵襲性の治療、極低温や超高温状態の生成など、極めて多様な応用が開発され、科学技術に極めて大きなインパクトを与えてきた<sup>1)</sup>。

光子は、電子や陽子などと異なり質量はゼロであるが、エネルギーを持っているので、光速でエネルギーを運び、物質に伝えることができる。物質は、光を吸収あるいは反射する過程で、光から圧力を受ける。光の圧力は通常はきわめて弱くこれを測定するのも困難であるが、光が極めて強くなると物質を動かすこともできるようになる。光による粒子の加速は1970年代に既に提案されていたが、最近になってようやく、小型レーザーによる高エネルギー単色電子の生成と制御が実証され、レーザー粒子加速の利用に関する本格化な検討が可能になってきた。一方、現在の加速器は、マイクロ波やラジオ波で生成した強い電界で電子やイオンを加速しているが、高性能化に伴い装置が大型化し、建設・維持コストが限界に近づきつつある。このため、原理的に小型化が可能な、光による粒子加速器実現への期待が高まっている。

電気の利用分野を大別して弱電と強電と呼ぶことがあるが、光の利用分野も情報の伝達や測定を主とする「弱い光」と、光で物質状態を変える「強い光」に大別することができる。本稿では、強い光で可能になる、粒子の加速とその利用について述べる。

## 1 - 2 加速器の利用

加速器は、産業、医療、基礎科学分野で広く利用されている<sup>2)</sup>。高エネルギーの粒子や電磁波（X線）は、透過能が大きく波長が短いので、物質内部の原子構造の観測に適している。また物質に大きなエネルギーを与えることができるので、構造の変化や新機能創出が可能になる。加速器で生成されるビームの品質（指向性、単色性、強度など）の向上に伴い、より高度な利用が可能になり、新たな利用分野が拓かれてきた。

産業分野では、物質の特性改善や新機能付与のための電子線照射、半導体へのイオン注入、放射光によるマイクロマシーン製造などのビーム利用が、確立されてきた<sup>3)</sup>。一方、最近大きく進歩しているのが医療分野における粒子線がん治療である<sup>4)</sup>。粒子線がん治療は、陽子線や炭素イオン線を人体に照射し、体内深部のがん細胞を破壊する治療法である。図1に示すように、粒子線はX線と異なり、一定距離を伝播した後でエネルギーを急速に失う性質をもっている。この特性を利用し、標的とするがん細胞のみを集中的に照射し、それ以外の正常な細胞への照射線量を少なくすることができる。粒子線治療は、放射線障害を起こしにくく、かつ効果的ながん細胞を破壊できるため、手術や化学療法を必要としない体に優しい治療法として、急速に普及しつつある。しかし、加速器本体、及び加速器から患者までイオンビームを輸送する装置が大規模で高価となり、広い普及が困難であるため、小型・低価格装置の開発が望まれている。

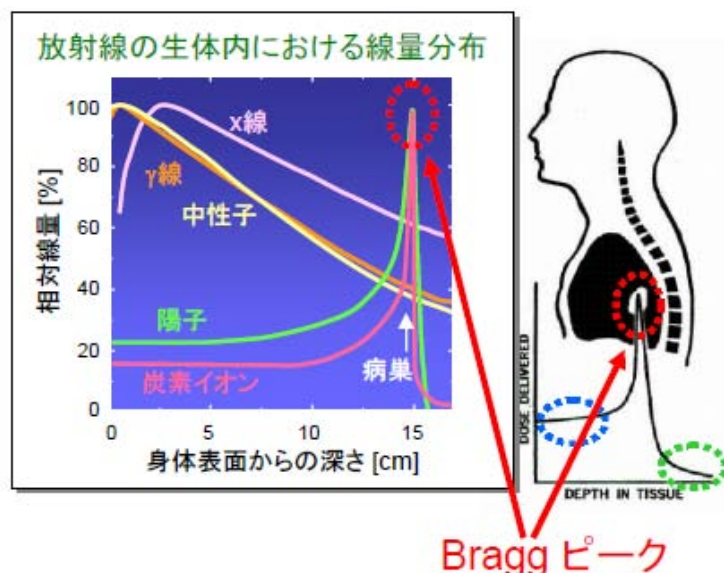


図1 各種放射線の生体内における線量分布の比較

高エネルギー物理学は、素粒子の探求を通じて、自然界の法則や宇宙の起源の解明などに関する未解明の課題への取り組みが続けられ、加速器のさらなる高エネルギー化が進められている。現在、世界最大の加速器は、7TeVの陽子同士を正面衝突させるCERNのLHCで、2008年から稼動開始され、質量の起源となるヒッグス粒子の発見が期待されている。LHCは円形で、その周長は山手線（一周34.5km）に近い27kmで、ジュネーブ市郊外の地下100mに設置されている。さらに、エネルギーが500 GeVの電子と陽電子を正面衝突させる全長約50 kmの直線加速器「リニアークライダー」に関する検討が、国際共同プロジェクトとして進められている。

### 1 - 3 高出力レーザー

本稿の主題である「強い光」を発生する超短パルス高出力レーザーについて述べる。短時間に発振するパルスレーザーのパルス当りのエネルギーを $E$ 、パルス幅を $\tau$ とすると、ピーク出力は $P(W)=E(J)/\tau(s)$ で与えられる。また出力 $P$ のレーザー光を面積 $S$ に集光すると、集光部での強度は $I(W/cm^2)=P(W)/S(cm^2)$ となる。レーザー装置の大きさは、レーザー媒質を決めると、エネルギー $E$ にほぼ比例する。したがって小型のレーザーでも、 $E$ を小さくすることで $P$ を大きくできる。レーザー光のスペクトル幅を $\Delta\nu$ とすると、パルス幅は $\tau \approx 1/\Delta\nu$  ( $s^{-1}$ )で与えられるので、帯域幅の広いレーザー媒質を用いれば、パルス幅を短くでき、その結果、極めて出力と強度の高い光を生成することができる。レーザー光は回折限界にまで集光できるので、例えば出力 $P$ のレーザー光を直径約10マイクロンに集光すると、強度はほぼ $I(W/cm^2)=10^6 P(W)$ となる。

高出力超短パルスレーザー光は、広帯域媒質を用いたレーザー発振器・増幅器システムにおいて、チャープパルス増幅法<sup>5)</sup>により生成される（図2）。発振器で生成した超短パルス光をそのまま増幅すると、強いレーザー光により光学部品が破壊される。そこで、発振器で生成した超短パルスレーザー光のパルス幅を $10^3$ - $10^4$ 倍に拡張して時間的に長く強度が低い光に変換し、強度を一定値以下に保ちつつ増幅し、増幅後に再度パルス幅を短く（パルス圧縮）して、ピーク強度の高いレーザー光とする。超短パルス光は広いスペクトルの光の重ね合わせでできているので、これを回折格子で分散させ波長により異なる光路長をとるようにすると、時間的に長く周波数掃引された（チャープされた）パルスに変換される。増幅後はこれと逆の操作を行い、周波数掃引を元に戻し、短いパルスを回復する。

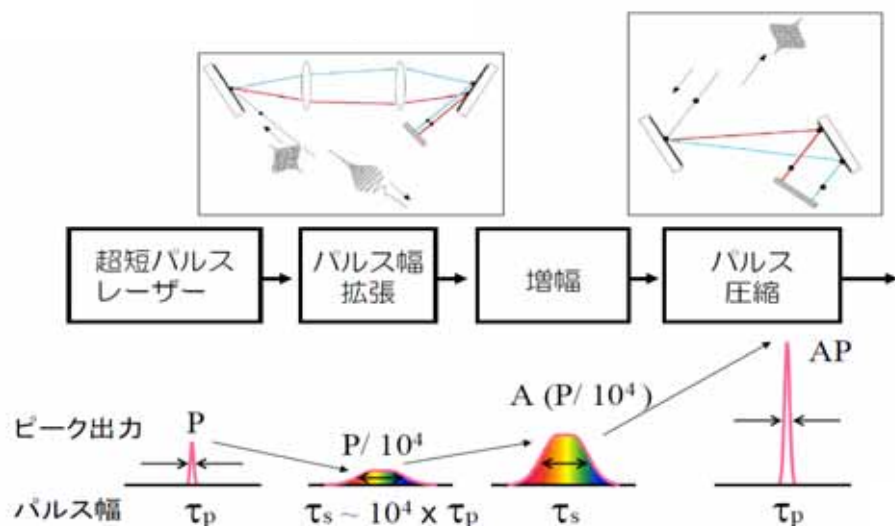


図2 チャープパルス増幅による高出力レーザー光の生成

図3にピーク出力が850TWと世界最高出力の超短パルスレーザーを示す。このレーザーは、ピーク出力は高いがパルス幅は19fsと短く、エネルギーは約40Jに過ぎないので、装置を小型化でき、繰り返し動作も可能となる。850TWのレーザー光を反射鏡により直径10ミクロンに集光すると、集光点での強度は約 $10^{21}$ W/cm<sup>2</sup>に達する。

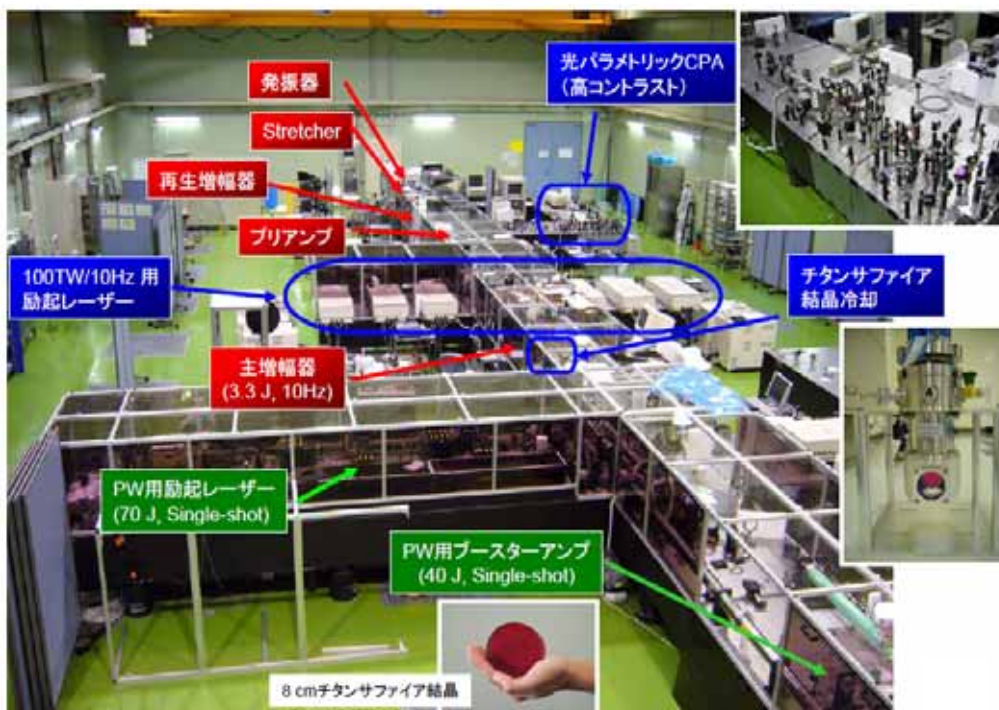


図3：高出力超短パルスレーザー(日本原子力研究開発機構)



図4に、レーザー光の強度の進歩を示す。レーザーは1960年の発明以来、Qスイッチ法によりナノ秒( $10^{-9}$ 秒)、モード同期法によりピコ秒( $10^{-12}$ 秒)の短パルス光の生成が可能になり、高ピーク出力化が進められた。1970年代に至り強度は横ばいになったが、チャープパルス増幅法の発明とチタンサファイアなど広帯域レーザー結晶の開発により、フェムト秒( $10^{-15}$ 秒)域のレーザー光の生成と増幅が可能になった。このため、1990年代から再度レーザーの高出力化が進み、最近では10-100TW級レーザーが市販され、エキサワット( $EW=10^{18}W$ )レーザーの開発も欧州で検討されている。

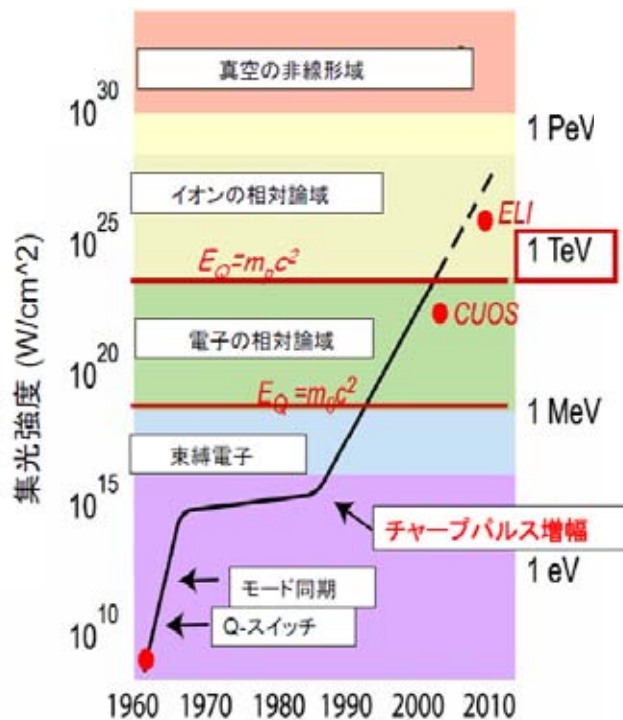


図4 超高強度域への展開 (図右の数字は、光で駆動された振動により電子が得るエネルギー)

レーザー光の強度に依存して、物質との相互作用が大きく異なる。レーザー光の電磁場により粒子はローレンツ力  $F$  を受ける。

$$F=e[E+(\nu/c)\times B] \quad (1)$$

ここに、 $e$ は粒子の電荷、 $c$ は光速、 $E, B$ は光の電界と磁界で、 $\nu$ は光電界(上式第一項)により粒子が振動する時の速度を表す。強度が約  $10^{15}W/cm^2$ 以上になると、光電界の方が、電子が原子核から受ける電界より大きくなり、電子は光で直接電離される。光がさらに強くなると、電子が得る振動エネルギーが大きくなると共に、速度も光速に近くなる。(1)式で、通常は $\nu \ll c$ のため第二項は無視できるが、 $\nu$ が $c$ に近くなると第一項と同程度の大きさになる。第二項は $z$ 方向の力であるので、粒子は前方に加速される(図5)。

このように相対論的効果が顕著になる領域を相対論的域と呼び、レーザー波長が約1ミクロンの場合、電子では  $2 \times 10^{18} \text{W/cm}^2$ 、陽子では  $4 \times 10^{21} \text{W/cm}^2$  で相対論域に入る。さらに  $10^{29} \text{W/cm}^2$  域に入ると、真空から電子と陽電子が生まれるなど真空の非線形性が表れるようになる。

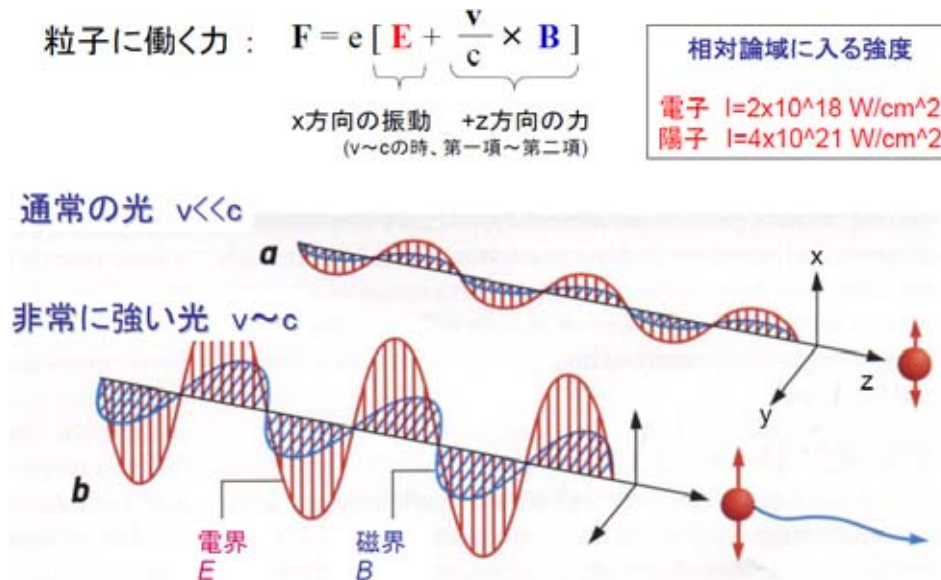


図5：相対論域における粒子の加速

#### 1 - 4 電界による粒子の加速

電子や陽子など電荷を持つ粒子は、強い電界により加速することができる。電極に高電圧をかけて粒子を加速する静電型加速器では、高圧電極から周辺部への放電により印加できる最大電圧が制限され、加速可能な最大エネルギーも限られる。一方、時間的に変化する磁界を用いて電車を動かすリニアモーターカーと同様な方法で、ラジオ波～マイクロ波域の交流電界を用い、粒子が常に加速されるように電界をかけて、荷電粒子を連続的に加速し、極めて高いエネルギーにすることができる。電子加速器では空洞共振器を用い、高周波との共振で空洞内に生じる強い電界により電子を加速する。波長の短い(周波数の高い)高周波を用いると、加速勾配を大きくし加速器を小型化できる。リニアコライダーでは、波長が約3cmの10GHz帯(Xバンド)の使用が計画されている。このような加速器では、共振器内の強い電界により空洞を構成する金属が絶縁破壊を起し、加速勾配は100MeV/m程度が限界となる。このため、電子と陽電子を500GeVまで加速するには夫々10km以上の加速距離が必要となり、ビーム収束等の機能を加え全長は約50kmとなる。

加速器を大幅に小型化する方法として、「レーザー電子加速器」が田島、Dawsonにより 1979 年に提案された<sup>6)</sup>。レーザー電子加速の原理を図 6(a)に示す。強いレーザー光が低圧気体中を伝播すると、気体が電離し電子とイオンで構成されるプラズマ状態となるが、光の圧力で電子が押しつけられ、その結果電子の粗密波（プラズマ波）が生じる。超短パルスレーザー光の空間的長さがプラズマ波長（プラズマ密度  $10^{18}\text{cm}^{-3}$ において 30 m）より短いと、大振幅のプラズマ波が励起される。伝播するレーザー光の跡に生じるこのプラズマ波は「レーザー航跡波」と呼ばれ、レーザー光とほぼ同じ速度で進む。プラズマは既に電離しているため、空洞共振器で問題となる絶縁破壊は制限要因とならない。大振幅プラズマ波の極めて強い電界下におかれた電子は、サーファーが波に乗って進むように効率よく加速され、波と共に進む（図 6(b)）。プラズマ波は、空洞共振器の加速勾配の約 1000 倍に当たる 100GV/mもの大きな加速電界を維持できる。したがってこれを実現できれば、加速器を大幅に小型化できることになる。電界がかかる距離 30 m は 10THzの電磁波の波長に相当するので、レーザー加速器は空洞共振器の代わりにプラズマ波を用いたテラヘルツ帯の加速器と見ることができる。

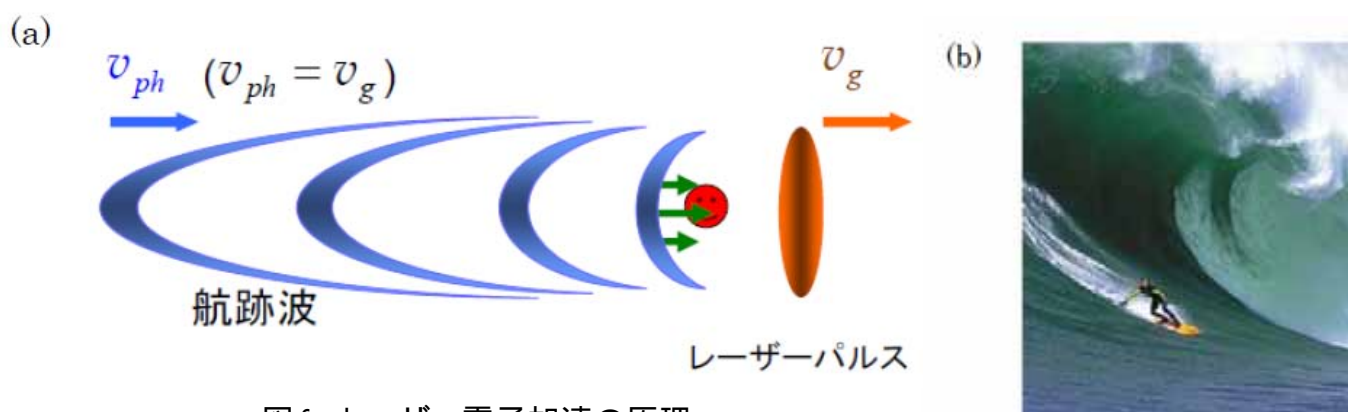


図6 レーザー電子加速の原理

(a)プラズマ波で生成された電界による電子加速は、(b)サーフィンと類似。

### 1 - 5 レーザー電子加速の実現

Strickland, Mourouにより 1986 年に提案されたチャープパルス増幅<sup>5)</sup>は、加藤等によりレーザー核融合用の高出力Ndガラスレーザーに初めて適用され<sup>7)</sup>、それを用いた先駆的な電子加速実験が中島等により行われた<sup>8)</sup>。その後ガラスレーザーより短いパルスを生成できるチタンサファイアレーザーを用いた実験も行われたが、生成される電子のエネルギーは連続的に分布し、単一エネルギー(単色)電子の生成は実現されていなかった。しかし、2003-2004 年に至り、欧米の複数の機関<sup>9-11)</sup>や産業技術総合研究所<sup>12)</sup>で単色電子

が生成され、”夢のビーム - 小型加速器の夜明け - ”としてNature誌の表紙を飾ることとなった(図7)。この方法では、例えば図8(a)に示すように、長さが1mm程度のガスジェットにレーザー光を集光することで、広がりが数ミリラジアンと極めて指向性の良い電子ビームが生成される<sup>13)</sup>。



図7 ”Dream Beam”と題された Nature 誌(2004年9月30日)

図8(a)の配置ではレーザー光の回折広がりにより加速距離が制限されるが、Leemans等は細管中にプラズマを作りレーザー光の導波路とすることでレーザー光の発散を抑え、加速距離を長くした(図8(b))。ピーク出力40TWの小型レーザーを用いて実験を行った結果、長さが3cmの細管を用い、エネルギー1GeVの単色電子の生成に成功した<sup>14)</sup>。電子が3cmにわたって徐々に加速されたとすると、このデータは30GeV/mの加速勾配に相当する。(実際は光路の一部で加速されていると考えられるので、加速勾配はもっと大きくなる。)さらに、レーザー光と対向する方向から弱いレーザー光を入れ、加速される電子の生成を制御する方法も開発され、電子加速の再現性が格段に向上した<sup>15)</sup>。これらの研究の積み重ねにより、レーザー電子加速の基礎が確立され、10GeV電子生成は時間の問題となり、TeV域の電子生成も見通せる段階となった。

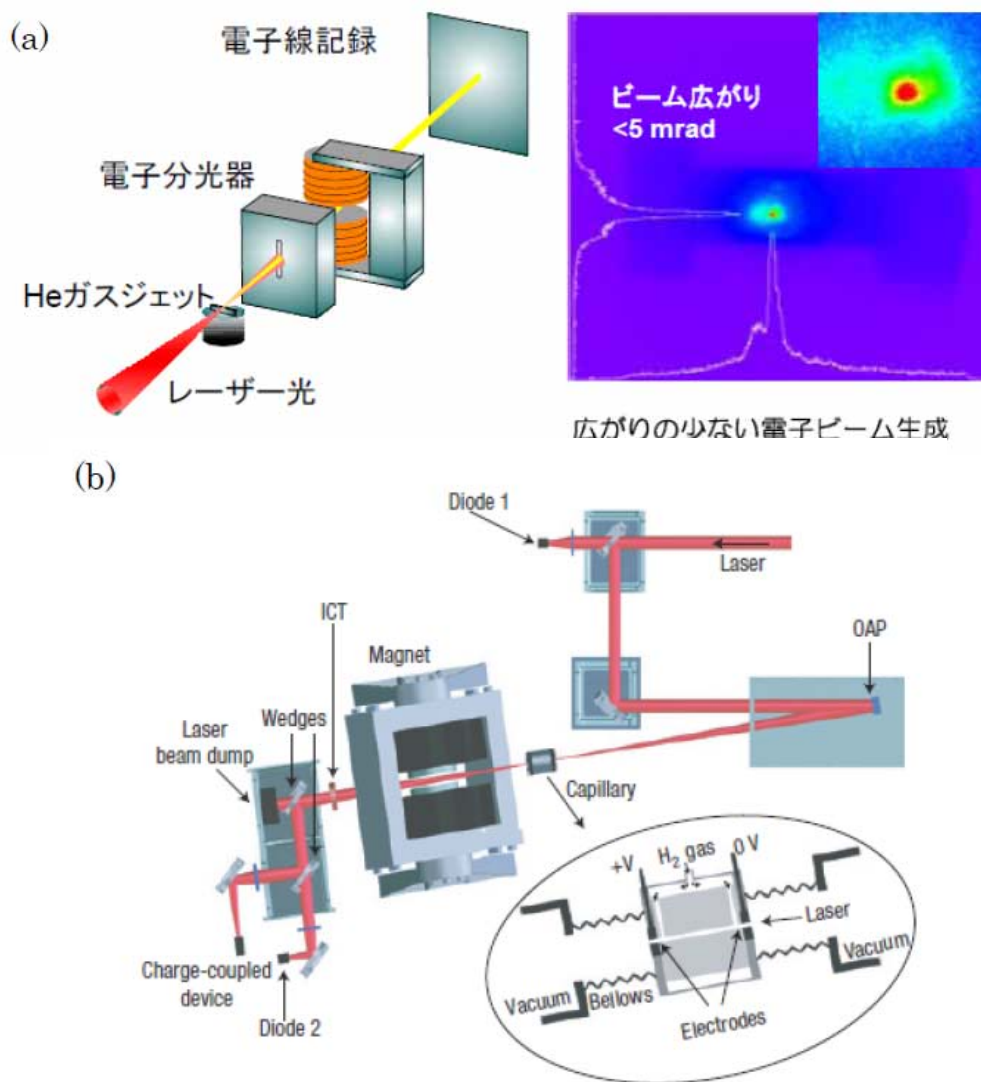


図8 レーザー電子加速の配置 ((a)ガスジェットを使用<sup>13)</sup>、(b)プラズマ導波路を使用<sup>14)</sup> )

レーザー加速で生成される電子ビームは、電子数が大きく（約  $3 \times 10^9$  個 = 0.3 nC）、角度広がり数 mrad と加速器で生成される高品質ビームと同程度に小さく、かつパルス幅が約 10 fs と極めて短い。また、電子ビームと同時に、強いテラヘルツ波が発生する。更に、電子ビームをアンジュレータに導き keV 域の X 線を生成し、あるいは電子ビームとレーザー光を衝突させて硬 X 線を生成することも可能である。すなわち、極めて小型の装置により、フェムト秒の高エネルギー・高輝度電子ビームと、テラヘルツ～X線域の超短パルス光を、完全に同期をとって発生することができる。したがって、フェムト秒時間分解・ナノメートル空間分解の構造解析など、従来の加速器では困難であった多様な新しい応用が開かれることになる。

## 1 - 6 光による高エネルギーイオンビームの生成

高強度レーザー光により、電子より重いイオンを加速することもできる。図9に示すように、レーザー光を薄膜に照射すると、レーザー光の圧力で生成された大電流の高速電子がその後面に小さな発散角で飛び出す。この電子流により生じる非常に強い電界によりイオンが加速され、高いエネルギーのイオンが生成される。小型レーザーを用いた実験で、最大エネルギー4MeVのイオンが生成されており、PW級レーザーを用いれば100MeV級のイオンを生成できることが、シミュレーション計算で予測されている<sup>16)</sup>。通常は最も加速されやすい陽子が観測されるが、水の吸着を除いた薄膜を用いると、炭素イオンビームを作ることもできる。

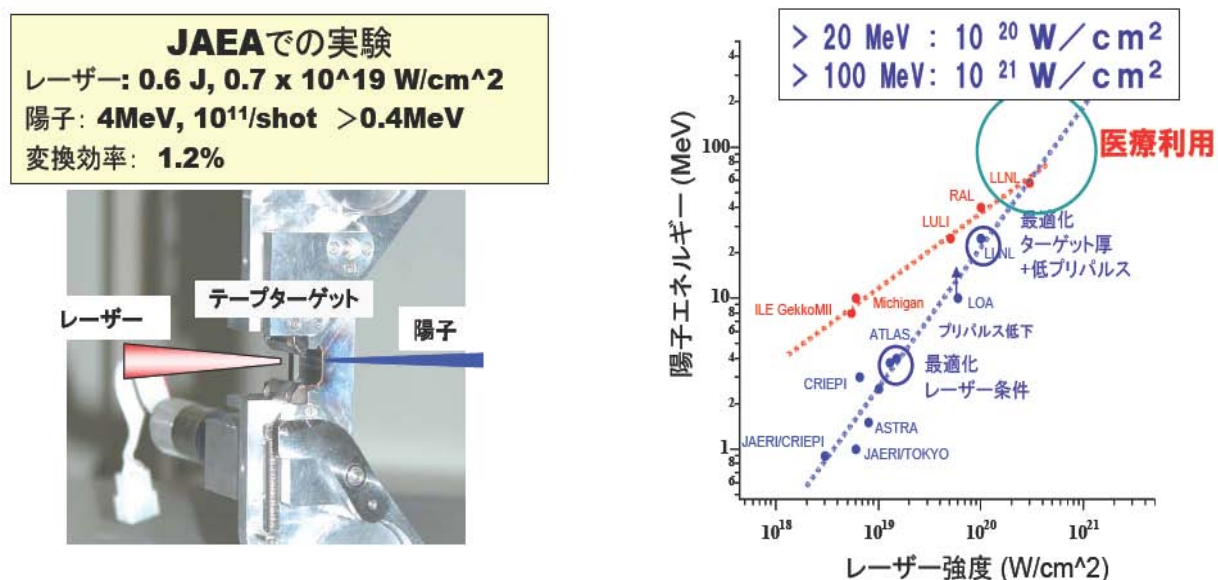


図9 レーザー光による高エネルギーイオンの生成

(左)実験配置例、(右)世界の研究機関で得られている実験データ(青はフェムト秒レーザー、赤はピコ秒レーザーで得られた結果)

小型の粒子線がん治療システムの開発を目指し、レーザー駆動イオン加速器の開発が米国、フランス等で開始されており、わが国でも新しいプロジェクトが発足した<sup>17)</sup>。レーザー駆動陽子線治療器の概念を図10に示す。レーザーを用いるとイオン生成部が小型化されるだけでなく、レーザー光を反射鏡等により患者の近くまで伝送した後に陽子を生成することができるので、加速器システムで必要とされる大規模なイオンビーム伝送部が不要になり、したがって装置全体を大幅に小型化できる。

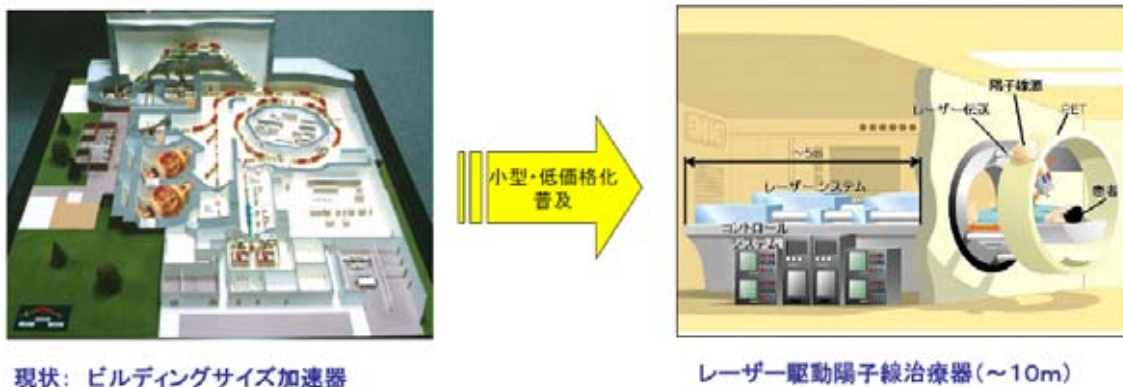


図10 レーザー駆動粒子線治療器(概念図)

なお、光強度が非常に強くなり、イオンの相対論域（陽子では  $4 \times 10^{21} \text{W/cm}^2$ ）に入ると、電子を介さなくても、光の圧力によりイオンが直接加速され、GeV級の陽子が殆ど広がらずに前方に飛び出すようになる。この領域が実現できると、従来大型加速器を必要としたイオンビームの生成と利用は大きな転換を遂げることになる。

### 1 - 7 まとめ

高エネルギー加速器は、科学技術、産業、医療分野の開拓に大きな役割を果たしている。しかし装置の大型化に伴う限界が表れ始めているため、より小型の加速器の開発が望まれている。高出力レーザー光を集光して生成される極めて高い電界で粒子を加速するレーザー粒子加速は、加速器を大幅に小型化できる可能性があり、生成される超短パルスの粒子線やX線により、新しい応用分野が開かれる可能性もある。

最近、レーザー電子加速により、エネルギー1GeVの単色電子が生成され、約30年前に提案されたコンセプトがようやく実証された。これにより、TeV域の電子生成の道筋が開かれ、本格的な取り組みが必要な段階に入ってきた。また、高強度レーザーによる高エネルギーイオン生成の研究も進められ、粒子線がん治療器の小型化を目指したプロジェクトが開始されている。

高出力レーザーは、半導体産業を始め、自動車、製鉄、電力、原子力などの分野でも使用され、製造技術の革新をもたらしている<sup>1)</sup>。レーザー加速の実用化に必要とされる高効率・高出力レーザーは、産業用レーザーと共通の要素が多いので、相互に連携して開発を進めることで、科学技術と産業の最先端を共に切り開くことができよう。

## 参考文献

- 1) 「光科学技術の最前線」編集委員会編、「光科学研究の最前線」、強光子場科学研究懇談会 (2005).
- 2) 世界物理年フォーラム「量子ビーム・テクノロジー革命」実行委員会編、「量子ビーム・テクノロジー革命」、シュプリンガー・ジャパン (2006) .
- 3) 高橋直樹、「量子ビーム技術の産業応用について」、文献2) pp.141-158.
- 4) 辻井博彦、「医学分野における量子ビームの利用」、文献2) pp.71-81.
- 5) D.Strickland and G. Mourou, Opt. Commun. **56**, 212 (1986).
- 6) T. Tajima and J.M. Dawson, Phys. Rev. Lett. **43**, 267 (1979).
- 7) K. Yamakawa, H. Shiraga, Y. Kato and C.P.J. Barty, Opt. Lett. **16**, 1593 (1991).
- 8) K. Nakajima, et al., Phys. Rev. Lett. **74**, 4428 (1995).
- 9) S.P.D. Mangles, et al., Nature **431**, 535 (2004).
- 10) C.G.R. Geddes, et al., Nature **431**, 538 (2004).
- 11) J. Faure et al. , Nature **431**, 541 (2004).
- 12) E. Miura, et al., Appl. Phys. Lett. **86**, 251501 (2005).
- 13) M. Mori, et al., Phys. Lett. **A356**, 146 (2006).
- 14) W.P. Leemans, et al., Nature Phys. **2**, 696 (2006).
- 15) J. Faure, et al., Nature **444**, 737 (2006).
- 16) T. Esirkepov, et al., Phys. Rev. Lett, **96**, 105001 (2006).
- 17) 文部科学省先端融合領域イノベーション創出拠点の形成：「光医療産業バレー」拠点創出.



### 3 新しい光:アト秒パルスとテラヘルツ光

(独)理化学研究所緑川レーザー物理工学研究室主任研究員 緑川 克美

#### 3 - 1 はじめに、

19世紀末のX線の発見以来、レーダー、レーザーそして放射光等、新しい光波あるいは電磁波の出現は常に科学と技術の地平を切り拓いてきた。そして21世紀は「光の世紀」とも呼ばれている。光で物の動きや構造を見ることは、いつの時代でも科学技術の基本である。しかし、これまでの光科学技術の開発は、可視光を中心とする限られた電磁波の領域で行われてきており、電磁波の幅広い領域に亘ってそのポテンシャルを十分に活用しているとは言えない。これは、近赤外～可視光の領域を外れると、レーザー光源のみならず、光学素子や検出器等の周辺機器もほとんど未開発であるためである。図1に示されるように、我々は広い電磁波領域のほんの一部しか有効に利用していないとも言える。しかし、最近の光源技術の進展は目覚ましく、ここで紹介するように、光学素子等の周辺技術は未成熟ではあるものの、これまではほとんど利用できなかった未踏の光波の領域において小型でコヒーレントな光源が実現しつつある。そのような新しい光源の出現は、これまで理論や概念でしか捉えることができなかった様々な物質系の未知の現象やダイナミクスの観

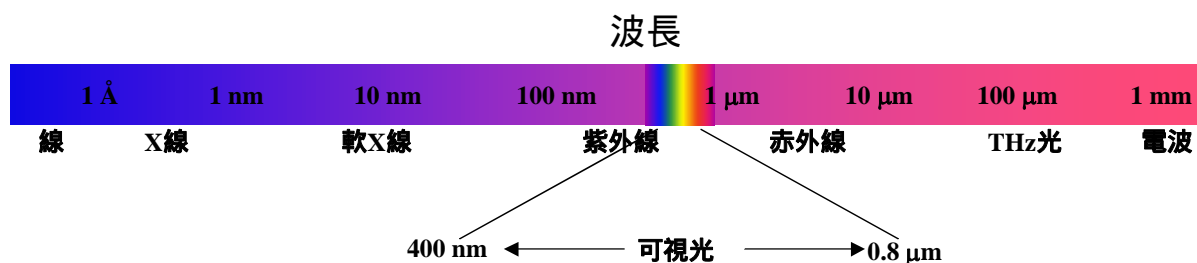


図1 電磁波の波長領域

測を可能にし、計測、分析、制御等を通して様々な分野に画期的進展をもたらすものと期待されている。ここでは、そのような新しい光として理化学研究所で研究開発されている軟X線領域のアト秒パルスとテラヘルツ光を紹介する。

#### 3 - 2 アト秒パルスの発生

フェムト秒レーザーの出現によって物理、化学、生物などの様々な分野において超高速現象の解明が進展するとともに、それが引き起こす非線形効果を利用して様々な物質状態の計測や微細加工が可能になった。フェムト秒レーザーは、今や日常的な研究の道具になりつつあるが、その先さらに短いアト秒領域のパルスの発生に関しては、現在の近赤外か

ら可視レーザー技術の延長では原理的に不可能であり、その発生には従来の超短パルス光の発生に用いられてきたモードロック法とは全く異なる技術が必要になる。これは、波長 800 nm のチタンサファイアレーザー光の光電場の 1 周期が 2.7 フェムト秒であることを考えれば容易に理解できる。すなわち、800nmの光で発生できる最短パルスは約 2~3 フェムト秒であり、アト秒領域のパルスを発生させるには、より光電場の周期が短い極端紫外から軟 X 線領域の短波長光が必要になる。たとえば、波長 800 nmのチタンサファイアレーザーの 27 次高調波の波長は、約 30 nmであるが、この高調波電場の 1 周期は 0.1 フェムト秒 (100 アト秒)であり、これを用いれば約 100 アト秒のパルスを発生させることができる。そのようなコヒーレントな軟 X 線光を発生する方法は幾つか存在するが、現在、アト秒パルスの発生に最も適しているのが高次高調波である<sup>1-3)</sup>。高次高調波は、プラズマ X 線レーザーやシンクロトロン放射光に比べて、可視域のフェムト秒レーザーの非線形波長変換を利用しているため原理的に時間コヒーレンスに優れているという利点があり、これを用いて現在最短で 130 アト秒のパルスの発生が報告されている<sup>4)</sup>。

#### ( 1 ) 高調波の原理

原子や分子にレーザー光を照射すると、電子は光電場により励振される。レーザー強度があまり大きくない場合は、電子の振動のエネルギーは光電場に戻されるが、レーザー強度が大きくなり、電子の振動運動エネルギーがイオン化エネルギーと同程度になると、光電場により原子内のクーロンポテンシャルが大きく歪められ、トンネル電離と呼ばれる現象がおこる。このトンネル電離で生成された自由電子は、光電場に捕らえられ加速されるが、光電場は正弦波なので半周期後には、その電場の向きが逆になり、電子は向きを変えて元の原子核の方向に加速され戻ってくる。このとき、ある確率で元の原子 (イオン) と再結合し、光電場から得た運動エネルギーとイオン化エネルギーの和にほぼ等しいエネルギーを高調波として放出する<sup>5)</sup>。この時の観測される典型的なスペクトル分布と高調波の発生装置の概略を図 1 に示す。高調波強度は、初めの数次においては指数関数的に減少するが、媒質のイオン化エネルギーに対応する波長付近から、いわゆるカットオフ波長近傍までは、次数の増加にもかかわらずあまり減少しない、この領域はプラトーと呼ばれ、このプラトーの形成が高次高調波の最も重要な特徴である。

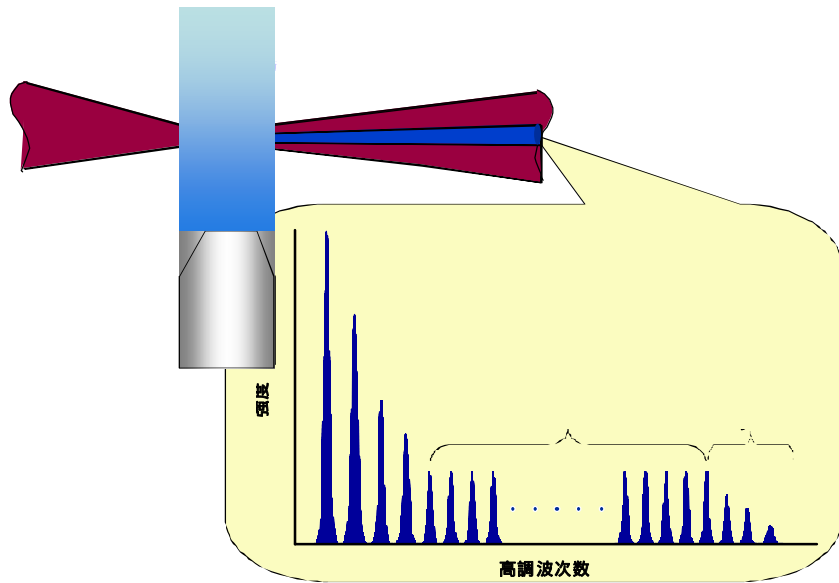


図2 高次高調波の発生装置と典型的なスペクトル

例えば、Ne原子中に波長 800 nmのレーザー光を約  $10^{15}$  W/cm<sup>2</sup>に集光すると、再結合時の電子のエネルギーは約 210 eVになり、6 nmまでのコヒーレント軟X線が得られる。このようにして高強度フェムト秒レーザーを原子や分子気体中に集光して得られる高次高調波の波長は、テーブルトップサイズのコヒーレント軟X線源として盛んに研究されており、その波長域は、いわゆる”水の窓”といわれる 2~4 nmにまで達している<sup>6,7)</sup>。

フーリエ合成の教えるところによれば、図1に示すような位相の揃った多数の高調波を重ね合わせると、時間領域では、等間隔のパルス列が形成される。このとき形成されるパルスの時間幅は、合成される高調波全体の帯域（高調波の本数）に反比例し、高調波の中心波長が極端紫外光より短くなると合成高調波数の総数が数本でも十分に1フェムト秒を切るパルス列が形成される。

高次高調波の発生は、励起光の半サイクルごとに起こるため、通常フェムト秒レーザーを励起光として用いた場合は、前述のようにアト秒パルス列が観測されるが、励起光を極端に短くし、高次高調波発生が励起光電場の半サイクルでしか起きないような条件では、高調波スペクトルが拡がり連続スペクトルとなり、これを適当なバンドパスフィルターで取り出すことにより、単一のアト秒パルスが得られる。Krauszらは、この方法を用いて初めてパルス単一アト秒パルスの発生に成功した<sup>8)</sup>。その時のパルス幅は、約 650 アト秒であったが、最近では、250 アト秒まで短くなっている<sup>9)</sup>。

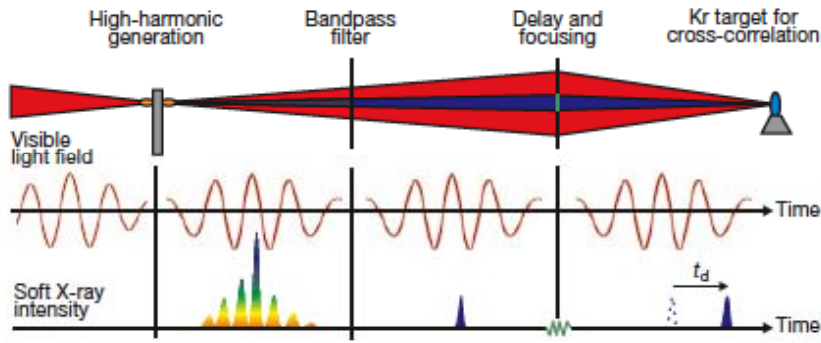


図3 高次高調波による単一アト秒パルスの発生原理

## (2) アト秒パルスの計測

通常、ピコ秒からフェムト秒領域の超短パルスの時間波形の計測には、自己相関法が用いられる。これは、測定されるパルスを2分割し、一方に時間遅延を与えた後、両方を非線形結晶等に重ね合わせて集光し、双方のパルスが結晶内で時間的に重なると信号強度が非線形に大きくなることを利用している。しかし、これを軟X線領域のアト秒パルスに利用しようとする、容易ではない。そこで、アト秒パルスの計測の当初は、可視域のフェムト秒パルスと軟X線領域のアト秒パルスを用いた、いわゆる2色イオン化法が用いられたが、この方法では自己相関法のように直接的にパルス波形が見える訳ではない<sup>10)</sup>。

自己相関法は最も信頼できる時間波形測定法であり、これにより実験データから直接的にその時間波形が観測できる。しかし、軟X線領域でのその実現には、2つの問題を解決する必要があった。一つは、軟X線領域で非線形光学現象を観測しなければならないことである。可視領域とは異なり有効な非線形光学結晶の存在しない軟X線領域では、原子や分子の2光子イオン化が有力な非線形光学現象のターゲットであるが、これを観測するためには可視光の $10^6$ 倍、約 $10^{12}$  W/cm<sup>2</sup>以上の強度が要求される<sup>11)</sup>。二つ目は、光学素子の問題である。自己相関を行うためには、被測定パルスを二分割するビームスプリッターや光学遅延回路を構成するための全反射鏡等が必要になるが、軟X線領域では、これらの光学素子は未だ開発されていない。最近、理研の鍋川等は、これらの問題を解決するために(i)高調波の強度に飛躍的増大<sup>12,13)</sup>、(ii)分割ミラーによる全反射型自己相関計の開発、を行いアト秒パルス列の自己相関計測に成功した<sup>14-16)</sup>。図4に理研で開発されて全反射型自己相関計によるアト秒パルスの計測システムを示す。

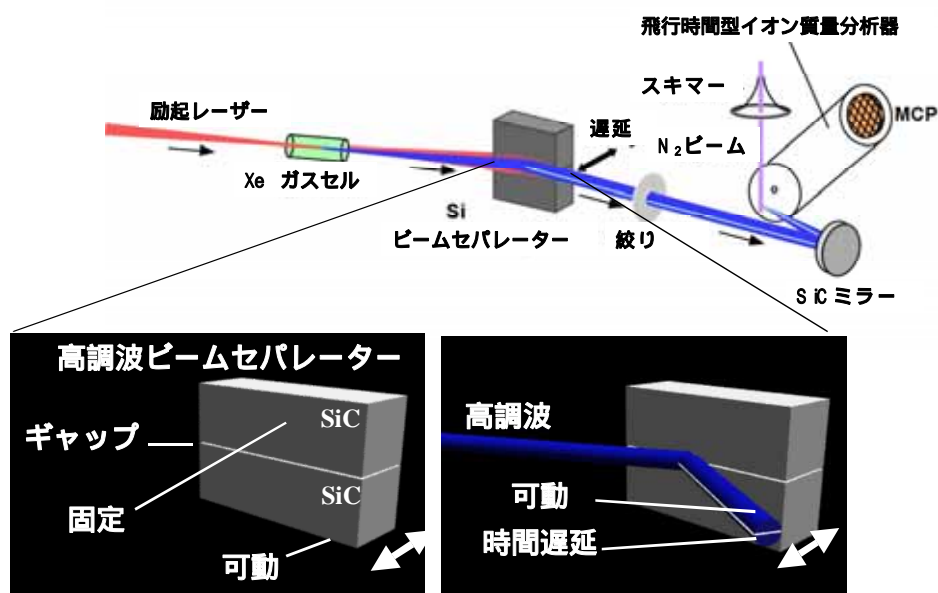


図4 全反射型自己相関計を用いたアト秒パルス計測システム

### 3 - 3 応用と今後の展望

近赤外から可視域の超短パルスレーザーを用いたこれまでの超高速現象の研究の対象は、主に分子の回転や振動現象、あるいは原子・分子の最外殻電子、すなわち価電子の励起・緩和過程に関するものがほとんどであった。これに対して内殻電子の励起状態の緩和や電子遷移に基づく非線形分極の応答など電子が関与する現象の多くは数フェムトからアト秒の時間領域で起こるため、特に内核電子等の実時間分光には軟X線領域の極超短パルス光源が必要とされる。原子の内殻励起状態の寿命は、従来は、その遷移の発光スペクトルの線幅の測定から間接的に決定していたが、Drescherらは、波長13 nmのサブフェムト秒パルスを用いて0.5 fフェムト秒の分解能で内核遷移の寿命を初めて測定した<sup>17)</sup>。また、最近では、より短い250 アト秒のパルスを用いて、光電場によって起こるトンネル電離の速度の測定を報告している<sup>18)</sup>。

一方、化学の分野では、フェムト秒レーザーによる分子のクーロン爆発が分子の過渡的な構造変化やエネルギーポテンシャルの変化の研究に利用されてきた。フェムト秒レーザーを強く分子に集光すると、電子はトンネル電離し多価イオンが生成されるが、イオンは電子に比べて十分重いので、電子が瞬間的にはがされてもその位置に留まり、その後イオン同士のクローン反発により爆発する。これを2次検出器で検出すると、爆発前の分子の形態が再現できる。しかし、これに可視レーザーを用いると、その光電場により分子の構造やポテンシャル自体が大きく変化してしまう。すなわち、プローブ光自体で被測定対象

が変化する問題が生じる。これに対して軟X線のアト秒パルスを用いると、より高速に多価イオンが生成されるばかりでなく不必要な構造変化を起さないという利点がある。しかし、従来の光源では、そのような多価イオンを生成できるアト秒パルスは発生できなかったが、最近、理研で開発された強力な高次高調波光源を用いて、初めて、このアト秒領域でのクーロン爆発が観測された<sup>19)</sup>。さらにこの現象を利用して、図5に示すようなアト秒パルスの光電場の構造の計測にも成功し<sup>16)</sup>、軟X線領域においてもアト秒精度で可視域と同様な、いわゆるフリンジ分解自己相関計測が可能であることを示した<sup>20)</sup>。これは、フェムト秒化学からアト秒化学への第一歩として評価されている。

これらアト秒領域の実時間分光計測は、開始されたばかりで未だ従来の概念を覆すような斬新なデータは得られていないが、今後、実験が進むにつれて新たな現象や知見が得ら

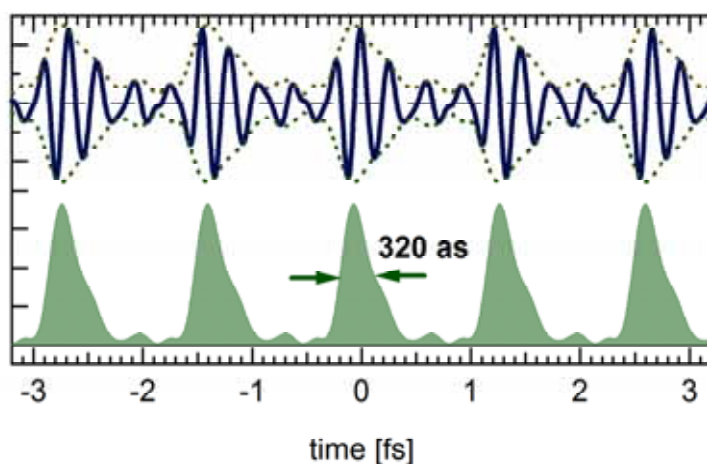


図5 分子のクーロン爆発を用いた自己相関法による計測されたアト秒パルスでの電場構造  
れることが期待される。

### 3 - 4 テラヘルツ光とは

テラヘルツ光は周波数が0.1-10 テラヘルツ（波長3 mm – 30 μm）程度の電磁波であり、従来、サブミリ波あるいは遠赤外線と呼ばれてきた波長帯にまたがる。この波長帯は電波と赤外線との中間に位置し、電波的な物質透過性と光波的な直進性や取り扱いやすさを併せ持つ。特に、テラヘルツ光は電波的な物質透過性を有する最短波長域であり、波長（～0.1mm）程度という空間分解能を活かした物質の透視イメージングへの応用に適している<sup>21-25)</sup>。また、光と同様にミラーやレンズ等による光学系の構築と輻射輸送が可能である。加えて、近年のテラヘルツ光源の進展と相まって、様々な分子結晶などからテラヘルツ帯

に特徴的な吸収スペクトル（いわゆる、指紋スペクトル）が多数発見されている。類似のスペクトル構造は赤外域で知られているが、テラヘルツ帯の構造の主要因は分子間相互作用と考えられ、類似の化学組成の物質でも分子構造が異なるとスペクトル形状に大きな違いが出やすい。これらの特長から多数の魅力的な応用の可能性が提案されている<sup>26-28)</sup>。とりわけ、3 THz以下(波長 100 μm以上)の領域は、物質に対する透過性が相対的に高いため、紙・衣服などの背後やプラスチックケース内に隠された対象物の検査といったセキュリティ関連への応用が期待されている<sup>27-29)</sup>。また、テラヘルツ波には放射線被ばくの心配がないため、不特定多数の対象に対する検査にも適用しやすい。テラヘルツ波と同様に物質透過性を有するX線では、特性X線などによる元素弁別はできても分子弁別は困難であり、このような利点はテラヘルツ波特有のものである。このようなこれらのテラヘルツ光の特性の利用して農業から半導体関連技術して医療まで様々な応用が提案されているが、ここでは理研仙台で研究開発が行われている郵便物中に隠された違法薬物や危険物質等の検出について紹介する<sup>27,30,31)</sup>。

### 3 - 5 テラヘルツ光の発生法

テラヘルツ光はガンダイオードあるいは共鳴トンネルダイオードのどのマイクロ波技術を使うと実現できるが、これらの技術で発生できるテラヘルツの周波数は、種々の応用には低過ぎるため、特殊な装置で周波数を逡倍する必要がある。また、シンクロトロン放射光や自由電子レーザーでもテラヘルツ光は得られる、これらの装置は巨大で非常に高価である。近年、テラヘルツ光研究が盛んになってきた大きな要因は、その光源の開発に画期的な進展が見られてためである。その一つは、テラヘルツパラメトリック光源の高出力化高効率化である<sup>32)</sup>。この方式では、周波数純度の高い広帯域波長可変テラヘルツ光をすること発生可能であり、テラヘルツ帯の微細な吸収スペクトルの測定や分光イメージングなどの応用が容易になる期待される。二つ目は、フェムト秒レーザーを光伝導アンテナに照射して発生する広帯域テラヘルツ光を用いた時間領域分光システムである<sup>33)</sup>。この方式は、フェムト秒レーザーの進展と相まって急速に普及するようになった。三番目の大きな進展は、量子カスケードレーザーの出現である<sup>34, 35)</sup>。このレーザーは、通常の半導体レーザーとは異なり、量子井戸のサブバンド間の遷移による発光にもとづいて発振する。半導体量子構造の作製技術の進展より、原子層レベルで高精度に制御された半導体量子構造を数百層にもわたって堆積させる技術が現実となり、まだ、極低温での動作ではあるが数THzまでの発振が報告されている。実用的には、非常に期待される技術ではあるが、室温動作を

得るまでには、未だ時間を要するものと思われる。

### 3 - 6 テラヘルツ分光イメージングによる封筒内の薬物検出

#### (1) 原理実証実験

テラヘルツ光の応用の一つとして注目されているのが、禁止薬物等の検出である。我が国では、世界の多くの国と同様に法的に検閲が禁じられており、封書のような郵便物を開封するには捜査令状が必要となる。しかし、麻薬・覚せい剤のような違法の薬物や爆薬・生物剤のような危険度の高い物質の探知はX線等の従来技術では困難であった。このように決め手となる探知法がないため、これらの薬物等は検査されずに流通していると考えられる。そこで理研では、このような用途へのテラヘルツ波の応用を目指して、警察庁科学警察研究所およびエスアイ精工(株)と共同して、代表的な約20種の麻薬・覚せい剤・爆薬のテラヘルツ吸収スペクトルを測定した。図1は代表的な透過スペクトル測定の結果である。測定サンプルは、薬物等の物質をポリエチレン粉末で15%に希釈し、ペレット状に成形して作成した。結果として、測定したほとんどの試料で特徴的なスペクトル構造が確認された。また、比較対象として封筒の透過スペクトルを図2に示す。封筒では3THz以上では透過率はほとんど0となっており、また、3THz以下では顕著なスペクトル構造が見られな

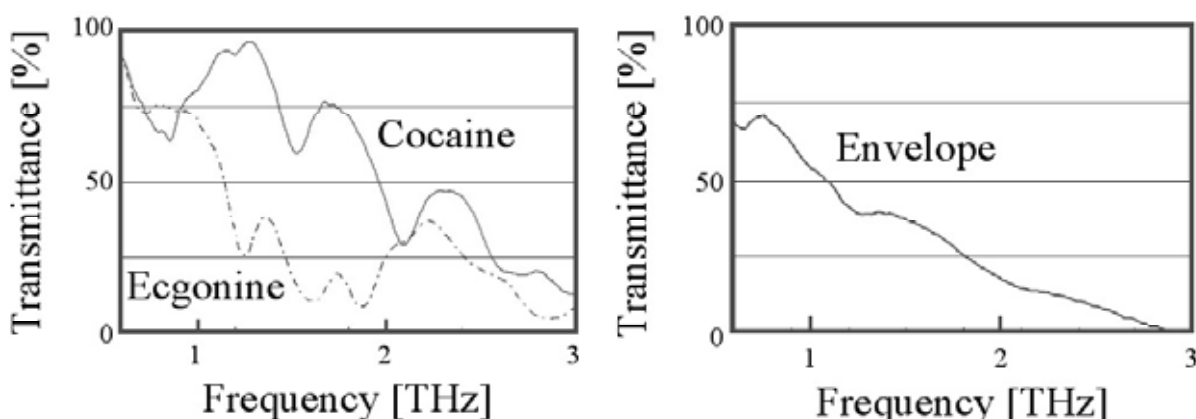


図6 薬物(左)と封筒(右)のテラヘルツ指紋スペクトル

い。従って、封筒内の薬物等を封筒を開けずに検出するには、0.5-3 THzの領域でのスペクトル測定が非常に有効であり、薬物等が封筒に入った状態でも物質弁別が容易であることが確認できた。

次に、実際の封筒内の薬物検出の実証実験として、薬物を15mm×15mmのポリエチレン製小袋に入れ、国際郵便用の封筒中に封入した。使用した薬物は、合成麻薬MDMA、覚せい剤メタンフェタミン(通称、ヒロポン)及び、参照試料のアスピリンである。このサンプ



ルに対して、波長可変光源であるテラヘルツパラメトリック発振器（Terahertz Parametric Oscillator；TPO）<sup>32)</sup>を用いた分光イメージングを適用して封筒内の物質の同定検出を試みた。TPO光源は、周波数純度が0.1THz程度で波長可変範囲が1-2THzのパルス型テラヘルツ光源である。固体のテラヘルツ帯のスペクトル構造は緩やかな吸収構造であることが多く、この用途に対して必要十分な周波数範囲とスペクトル分解能を有する。この光源を用いた分光イメージング測定系を図3に示す。光源からのテラヘルツ波はサンプル面上で集光され、透過光はテラヘルツ用レンズによって検出器（Siボロメータ）に集光される。サンプルは、2次元走査型のステージ上に設置し、ステージを動かしながら各周波数で測定を行う。

得られた結果を図7に示す。右端の3つの画像は分離された各成分の空間分布画像を示す。上から順に、MDMA（合成麻薬）、アスピリン（参照用）、メタンフェタミン（覚せい剤）であり、各成分の空間分布が適切に分離された。このことから、封筒を開封せずに物質同定が可能であることが示された。また、同様の方法が複数の成分が混ざっているサンプルにも適用可能なことも確認された。

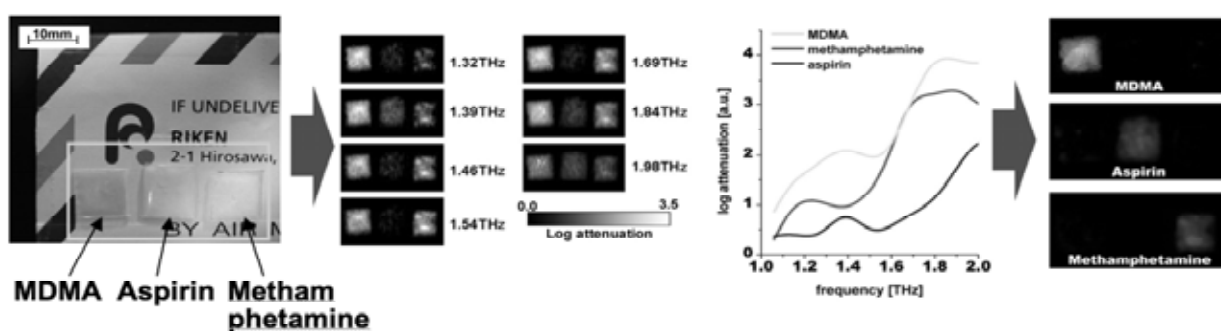


図7 封筒に入れられた禁止薬物の分光イメージングと参照用指紋スペクトル

## （2）検査装置の開発

テラヘルツスペクトルの利用により、従来困難であった封書内の物質の非破壊診断が可能となることが示されたが、他方、現実の利用に目を向けると、海外から送られてくる封書の数に1日に数10万通もあり、全ての封書を一つ一つ分光処理するのは実質的に不可能である。そこで、多量の郵便物を効率よく処理する方法として、(1) 薬物等の隠匿可能性を短時間にチェックして疑わしい封書を選別（スクリーニング）し、(2) 疑わしい封書のみを分光分析にかけて成分同定する、という2段階での検査装置を考案した。この装置では、特に禁止薬物の検知に主眼を置き、粉状の薬物を効率よく検知することを目指した。禁止

薬物が粉体の状態で輸送される場合、その典型的な粒径は数 100 $\mu\text{m}$  程度と考えられ、テラヘルツ波の波長と同程度となる。この場合、粉体にテラヘルツ波を照射すると散乱光が発生するため、この散乱光強度をモニターすることで粉体の有無を判別できると考えられる。一方、テラヘルツ波に対しては封書等の紙面は十分に平坦とみなせるうえに透過性も高いため散乱測定の大きな妨げにはならないはずである。これらのことから、テラヘルツ波を用いると封筒を開封することなく粉体の存在を検知できると考えられる。

実機では実験室のような理想的な環境は期待できず、特に、光学部品に不慣れな技術者でも光学調整が容易、コストの抑制、振動・雑音に強いシステム、といった条件が不可欠である。このため、プロトタイプ機を製作して実験を重ねたのち、平成 17 年度末に図 8 のようなスクリーニング装置を導入した。この装置では、光学調整の簡略化と部品点数の抑制のために放物面鏡をレンズ系に置き換えたり、高速で雑音や振動にも強いダイオード検出器 (NEP= $1 \times 10^{-10}$  W/ $\sqrt{\text{Hz}}$ 、応答速度 100kHz) を採用するなど、さらなる S/N の向上と調整の容易さを図っている。また、X線検査も組み合わせ、紙のみが入った封書の除去やターゲットの粉体位置の同定に利用している。最終的に目標とする封筒処理速度は毎秒 5-10 通であり、1 日に数 10 万通という封書の処理が可能な装置を目指して改良を進めている。

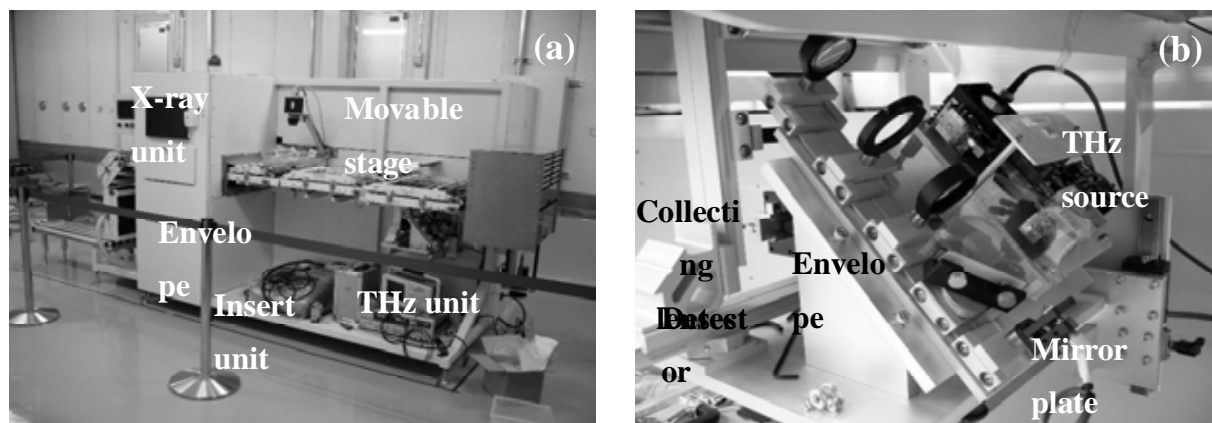


図 8 開発されたテラヘルツ光と X 線を併用したスクリーニング装置 (a) とテラヘルツユニット部 (b)

### 3 - 7 終わりに

フェムト秒高強度レーザーを希ガス等に集光して得られる高次高調波は、真空紫外から軟 X 線領域において非線形現象を発現できるほど強力な光源であるばかりでなく、現状ではフェムト秒からアト秒に至る極超短パルスを発生できる唯一の光源である。近年、その発生機構の解明と励起光源の進展とともに高効率および高出力化の努力がなされ、超短パル

ス性と高強度を兼ね備えた新しいコヒーレント軟X光源として注目されるようになった。ここでしめしたように軟X線領域の高調波では、従来のフェムト秒レーザーの限界を破るアト秒領域のパルスの発生が報告され、現在では新しい超高速光科学を開拓する重要なツールとなりつつある。

一方、テラヘルツ波に関しては、最近、その物質透過性や指紋スペクトルを利用した様々な応用が多数提案されている。特に、テラヘルツ波がよい透過性を示す非金属物質（ソフトマター）は産業分野で極めて利用が幅広いいため、工業製品等の様々な測定対象の検査技術としての応用展開が期待できる。そのために必要な技術として、コンパクトな光源・分光装置や撮像型の検出器の開発が重要な鍵を握っており、現時点では、前者を中心とした開発が進められているが、検出技術の開発は立ち遅れており、早急に開発を進めて行く必要があると考えられる。また、世界的には、国家的な支援が遅れていた米国でテラヘルツ波を後押しする動きがスタートしており、セキュリティ関連の利用目的で膨大な資金が注入されている。この動きは、テラヘルツ分野の展開を後押しすると期待できる一方、我が国としてもテラヘルツ分野の技術・応用開発を早急に進めることが重要であると考えられる。

## 謝辞

テラヘルツ光の記述に関しては、理研仙台の大谷知行氏、佐々木芳彰氏、渋谷孝幸氏、東北大学の小川雄一氏、名古屋大学の川瀬晃道氏の協力に感謝する。

## 参考文献

1. A. McPherson, G. Gibson, H. Jara, U. Johann, T. S. Luk, I. A. McIntyre, K. Boyer, and C. K. Rhodes, *J. Opt. Soc. Am. B* 4, 595 (1987).
2. M. Ferray, A. L'Huillier, X. F. Li, L. A. Lompré, G. Mainfray, and C. Manus, *J. Phys. B: At. Mol. Opt. Phys.*, L31 (1988).
3. P. Salieres, A. L'Huillier, P. Antoine, and M. Lewenstein: Study of the spatial and temporal coherence of high-order harmonics, B. Berderson and H. Walther eds., *At. Mol. and Opt. Phys.* 4, 83 (1999).
4. G. Sansone, E. Benedetti, F. Calegari, C. Vozzi, L. Avaldi, R. Flammini, L. Poletto, P. Villoresi, C. Altucci, R. Velotta, S. Stagira, S. De Silvestri, and M. Nisoli, *Science* 314, 443 (2006).
5. P. B. Corkum, *Phys. Rev. Lett.* 71, 1994 (1993).
6. Ch. Spielmann, N. H. Burnett, S. Sartania, R. Koppitsch, M. Schnürer, C. Kan, M. Lenzer, P. Wobrauschek, and F. Krausz, *Science* 278, 661 (1997).
7. E. Seres, J. Seres, F. Krausz, and C. Spielmann, *Phys. Rev. Lett.* 92, 163002 (2004).
8. M. Hentschel, R. Kienberger, Ch. Spielmann, G. A. Reider, N. Milosevic, T. Brabec, P. Corkum,

- U. Heinzmann, M. Drescher, and F. Krausz, *Nature* 414, 509 (2001).
9. R. Kienberger, E. Gouliemakis, M. Uiberacker, A. Baltuska, V. Yakovlev, F. Bammer, A. Scrinzi, Th. Westerwalbesloh, U. Kleineberg, U. Heinzmann, M. Drescher, and F. Krausz, *Nature* 427, 817 (2004).
  10. P. M. Paul, E. S. Toma, P. Breger, M. Mullot, F. Audebert, Ph. Balcou, H. G. Muller, and P. Agostini, *Science* 292 (2001).
  11. S. Klarsfeld, A. Maquet: *J. Phys. B* 12, L533 (1979).
  12. E. Takahashi, Y. Nabekawa, T. Otsuka, M. Obara, and K. Midorikawa: *Phys. Rev. A* 66, 012802 (2002).
  13. 緑川克美、須田 亮、高橋栄治、鍋川康夫、*応用物理* 73、167 (2004) .
  14. Y. Nabekawa, H. Hasegawa, E. Takahashi, and K. Midorikawa, *Phys. Rev. Lett.* 94, 043001 (2005) .
  15. Y. Nabekawa, T. Shimizu, T. Okino, K. Furusawa, H. Hasegawa, K. Yamanouchi, K. Midorikawa, *Phys. Rev. Lett.* 96, 083901 (2006).
  16. Y. Nabekawa, T. Shimizu, T. Okino, K. Furusawa, H. Hasegawa, K. Yamanouchi, and K. Midorikawa, *Phys. Rev. Lett.* 97, 153904 (2006).
  17. M. Drescher, M. Hentschel, R. Kienberger, M. Uiberacker, V. Yakovlev, A. Scrinzi, Th. Westerwalbesloh, U. Kleineberg, U. Heinzmann, and F. Krausz, *Nature* 419, 803 (2002).
  18. M. Uiberacker, et al., *Nature* 446, 627 (2007).
  19. T. Okino, K. Yamanouchi, T. Shimizu, K. Furusawa, H. Hasegawa, Y. Nabekawa, K. Midorikawa, *Chem. Phys. Lett.* 432, 68-73 (2006).
  20. 鍋川康夫、緑川克美、*応用物理* 76、133 (2007) .
  21. B. B. Hu and M. C. Nuss , *Opt. Lett.* 20, 1716 (1995) .
  22. Q. Wu, T. D. Hewitt, and X.-C. Zhang, *Appl. Phys. Lett.* 69, 1026 (1996)
  23. D. M. Mittleman, S. Hunsche, L. Boivin, and M. C. Nuss, *Opt. Lett.* 22, 904 (1997) .
  24. Q. Chen, and X.-C. Zhang : *Appl. Phys. Lett.* 74, 3435 (1999).
  25. M. Yamashita, K. Kawase, C. Otani, T. Kiwa, and M. Tonouchi: *Opt. Exp.* 13, 115(2005) .
  26. Y. Watanabe, K. Kawase, T. Ikari, H. Ito, Y. Ishikawa, and H. Minamide, *Appl. Phys. Lett.* 83, 800 (2003)
  27. K. Kawase, Y. Ogawa, Y. Watanabe, and H. Inoue, *Opt. Exp.* 11, 2549 (2003).
  28. K. Yamamoto, M. Yamaguchi, F. Miyamaru, M. Tani, M. Hangyo, T. Ikeda, A. Matsushita, K. Koide, M. Tatsuno and Y. Minami, *Jpn. J. Appl. Phys.* 43, L414 (2004).
  29. T. Ikeda, A. Matsushita, M. Tatsuno, Y. Minami, M. Yamaguchi, K. Yamamoto, M. Tani, and M. Hangyo, *Appl. Phys. Lett.* 87, 034105 (2005).
  30. 渋谷孝幸、山下雅弘、小川雄一、大谷知行、川瀬晃道、*レーザー研究* 33, 837 (2005).
  31. 大谷知行、有吉誠一郎、佐々木芳彰、川瀬彰道、*応用物理* 75, 188 (2005).
  32. K. Kawase, J. Shikata, and H. Ito, *J. Phys D* 35, R1 (2002).
  33. 坂井清美、*分光研究* 50, 261 (2001).
  34. J. Faist, F. Capasso, D. L. Sivco, C. Sirtori, A. L. Hutchinson, and A. Y. Cho, *Science* 264, 553 (1994).
  35. R. Köhler, A. Tredicucci, F. Beltram, H. E. Beere, E. H. Linfield, A. G. Davies, D. A. Ritchie, R. C. Iotti and F. Rossi, *Nature* 417, 156 (2002).

## 第5章 提言 今後の展開方向と課題

太陽光は、地表上の気温を保つことなども含めて地球環境システムの根幹をなすものであり、人類は、光環境に様々に適応しながら、また、光を活用して、文明社会を築き上げてきたが、経済活動の高度化等に伴う地球温暖化、オゾン層の破壊等の地球環境問題は、地球上の生命の生存基盤の存続を脅かしかねないものとなっている。

また、太陽光は、光合成を通じて地球上の生命現象のほとんどすべてを支えており、文明社会の基礎となっている石油、天然ガス等の化石エネルギー資源や水力、風力等のエネルギーも、もとをたどれば皆、太陽光が源であるということが出来るが、太陽光の地表に到達するエネルギーのうち、食料やエネルギー源として有効に使われているのは、その十万分の一程度に過ぎないといわれている。

更に、人類は、白熱灯や蛍光灯などの照明やレーザー、放射光といった新しい光を創出し、また、光触媒、光ファイバー通信をはじめ、光に関連する科学技術を飛躍的に発展させてきたところであり、21世紀は、エレクトロニクスの時代からフォトニクス（光科学）の時代、「光の世紀」になると言われるほど、光科学技術の研究開発には大きな期待が寄せられているが、今なお、光の持つポテンシャルは、十分に活用されているとは言えない。

このような中で、経済と環境を両立させつつ、安全かつ安心して暮らせる豊かな未来の実現を図るためには、光全体を様々な可能性を秘めた資源として捉えて、これを活用し、又は創造する科学技術を振興していくことが極めて重要である。

こうした情勢を踏まえ、科学技術・学術審議会資源調査分科会では、科学技術の総合的な振興を使命とする科学技術・学術審議会の分科会として、光科学技術を振興し、光資源を総合的に活用する方策について、検討を行ってきた。これらの検討を踏まえ、光科学技術の今後の展開方向について提言を行うものである。

### 1 光資源を活用し、創造する科学技術の展開方向

#### 1 - 1 地球環境問題の解決のために

温室効果ガスの排出増加による地球温暖化、フロン等による成層圏オゾン層の破壊、光化学スモッグなどの大気汚染などの環境問題は、いずれも大気中の微量成分と太陽光が密接に関与して発生しているものであり、地球環境の変動やそのメカニズムを解明し、適切

な対策を講じていく上で、大気中の微量成分等を高精度で計測し、モニタリングしていくことが極めて重要である。

このような環境計測技術において光科学技術は幅広く活用されており、衛星に赤外分光計等のセンサーを搭載して宇宙から地球大気を計測する技術、地上からレーザー光を出射して散乱光を集光して計測するレーザーレーダー(ライダー)計測などのリモートセンシングのほか、いわゆるその場計測における新しい光吸収測定法やレーザーを活用した様々な計測技術が開発されている。

2008年には温室効果気体観測衛星(GOSAT)の打ち上げによる温室効果気体の濃度分布の観測等が実施される予定であるが、今後、光と地球環境との関係を含めて、地球環境問題のメカニズムを解析、解明し、その解決を図っていくためには、その場計測装置の小型化・ポータブル化と信頼性の一層の向上、人工衛星からレーザーを発射するライダー計測等、光科学技術を活用した計測技術の一層の向上を図る必要がある。

## 1 - 2 より豊かで快適な生活のために

### (1) 身近な暮らしに溶け込む「光触媒」

酸化チタン電極に光をあてると、水から酸素が発生する反応が加速され、白金電極と組み合わせることにより光電池として作動させることができるという「光触媒」のメカニズムが発見されたのは1972年である。それ以降、光触媒の強力な酸化作用への着目、超親水性効果の発見等研究者の新しい発想と企業等との連携などにより、光触媒を活用した抗菌タイルや空気清浄機、車のサイドミラーや外装建材などの新製品が数多く開発され、その市場規模は500~600億円に達している。

今後、可視光領域の光を利用できるような光触媒の開発を促進することにより、シックハウスのもととなるホルムアルデヒドを除去するための屋内での壁紙への活用を図るなど、光触媒の一層の活用、普及が期待される。

### (2) 安全・安心な食料の安定的な提供

光は、光合成等を通じて植物の成長や形態形成に、視覚等を通じて動物の行動に密接に関係しているが、光の波長や強度等とこれらの現象との関係の研究などを含め、光科学技術を活用することにより、より効率的かつ安全・安心な食料の生産が可能と

なるものと期待される。

#### 植物工場に係る技術開発

中長期的な国際的な食料需給の見通しについては、農用地面積の拡大に限界があることや砂漠化の進行等の環境問題の深刻化、人口の増大等、不安定な要素が多く、食糧自給率が40%と低い我が国にとって、食料を安定的に供給することは重要な課題である。また、無農薬、有機農産物など安全・安心な食料の供給を求める多様な消費者のニーズに応えていくことが必要である。

植物の成長には光が欠かせないが、光の波長や強度と光合成や光形態形成の関係が明らかになってきており、そのような知見をもとに、LEDなど比較的最近開発された光源を含め、様々な人工光源を用いて効率的に植物の栽培を行う技術の開発研究が進展してきている。

光、温湿度、二酸化炭素濃度、培養液などの環境条件を人工的に制御する植物工場は、気象条件に左右されず、また、無農薬での生産が可能であるという大きなメリットを有するものである。このため、LED光源と他光源との組み合わせや光照射方法など、より効率的な光活用技術の研究開発を、人工栽培に適した品種の開発や環境制御技術の開発、更には有機栽培など消費者のニーズを把握するためのマーケティング等も含めて、総合的に進めることが重要である。

#### 漁業生産に係る技術開発

光と魚の行動、魚の視覚、光と藻類の成長等に関する研究と新しい光源等を活用した技術開発により、漁業の生産性の向上や省エネルギーが図られることが期待される。

光力と集魚効果の研究などから、イカ釣り漁船の集魚灯の過剰な出力の抑制と光源のLEDへの転換が図られ、生産性の向上と省エネルギーが図られているが、今後、断続光の明暗周期、明暗照度比、照射光の色等と嫌忌効果（魚の回避行動）についての研究等により、光科学技術のいわゆる海洋牧場への応用などが期待される。

### 1 - 3 健康にくらすために

#### (1) 照明光に対するヒトの適応

人類の長い歴史から見ると、科学技術がもたらした現代文明の生活環境は極めて短い歴史しか持たないものであることから、人間の身体はこのような新しい環境になじんでおらず、無意識に「余分な緊張」を強いられている可能性がある。人工照明の発明により、人間の生活環境は大きく変わり、多大の恩恵を受けていることは言をまたないが、一方、最近の研究は、夜の昼光色の照明がそのような意識下の「余分な緊張」を生じさせることを示唆している。

また、光とメラトニン分泌の関係をはじめ、照度、分光分布、光曝露の時刻やその時間やパターンなど様々な光条件と、中枢神経系、自律神経系、ホルモン分泌系等の非視覚的生理反応の関係なども明らかになってきている。

今後、照明光の技術開発や標準化、使用計画等の検討に当たって、光環境と健康の観点から検討を行うことは重要であり、光環境に対する個人差、性差、年齢差等を含めた非視覚的生理反応などについての研究をさらに進める必要がある。

## (2) 光による診断・治療

### 睡眠障害やうつ病などの治療への光の活用

夜遅くまで強い照明を浴び、また交代勤務などで自然の昼夜とは異なった明暗サイクルで生活することの増えた現代のライフスタイルは、生物時計の機能不全の引金となり、「概日リズム睡眠障害」などの生体リズム障害を引き起こしている。

概日リズム睡眠障害、季節性うつ病等に対しては、高照度光の活用等による光治療が有効である場合が多く、また、例えば、外出の必要性が減って光を浴びる機会が減少する等生体リズムの同調因子の減弱により引き起こされている高齢者の不眠対策としては、いきなり睡眠薬を投与するのではなく、生活習慣を見直し、光を浴びることから始めることが望ましい。

睡眠障害やうつ病の治療には、他の治療法と高照度光を組み合わせることによって効果が高まるものと期待されており、そのような光を活用した治療を進めるための様々な条件整備を進める必要がある。

### 非侵襲生体診断と治療への光の活用

光科学技術は、パルスオキシメータ、OCT(光干渉断層画像)、酸素モニター、光マッピング(光トポグラフィー)、拡散光トポグラフィー、蛍光・生物発光イメージング、



非侵襲血糖値測定など、様々な生体診断に応用されてきており、我が国発の技術や我が国の研究が最先端にあるものも多い。今後、特に分子イメージングの研究との密接な関連の下に、光を活用した生体診断技術の研究開発をさらに進める必要がある。

また、光と反応して活性酸素を作り出す化学物質を導入して腫瘍を治療する光化学治療(PDT)など様々な光を用いた治療技術の研究開発を進める必要がある。

## 1 - 4 光科学技術によるイノベーション

### (1) 大容量、高速光通信ネットワーク

1980年代に導入が始まった光ファイバ通信は、ファイバ自体の性能の向上、波長多重(WDM)方式やラマン光増幅技術、光スイッチを活用したいわゆるフォトニックネットワーク技術など様々な光技術の開発により伝送速度、容量ともに飛躍的に拡大し、我が国のブロードバンド・インフラは、世界で最も充実したものとなっている。

今後、コンテンツのデジタル化が飛躍的に進展するものとみられ、また、映画をデジタルで製作・配信・上映するデジタルシネマの取組みにみられるような高精細映像の活用等が、娯楽、産業、医療、教育など幅広い分野で期待されている中で、光通信インフラは我が国国際競争力の源泉となるものであり、光を活用した情報通信関連技術の研究開発が様々な関連分野の研究開発とシナジー効果を発揮するような形で、一層進展することが期待される。

### (2) 光による粒子の加速とその応用

高エネルギー加速器による「強い光」は、粒子線がん治療などの医療分野をはじめ、産業、基礎科学分野などで広く利用されるようになってきているが、高性能化に伴い装置が大型化し、建設・維持コストが限界に近づきつつある。このような中で、原理的に小型化が可能な光による粒子加速器の実現への期待が高まっている。高出力レーザーによる粒子加速は、装置の小型化ばかりでなく、生成される超短パルスの粒子線やX線により、様々な分野でイノベーションをもたらす可能性がある。先端高出力レーザーは産業技術の革新ももたらすので、産業界と連携して開発の推進を図る必要がある。

### (3) アト秒パルス、テラヘルツ光など新しい光

これまでの光科学技術の開発は、主に可視光を中心とする限られた波長領域で行われ

てきたが、近時、これまでそのポテンシャルが十分に活用されてこなかった波長領域の光、すなわち、軟 X 線領域のアト秒パルス光やテラヘルツ光などの研究が進んでいる。このような新しい光は、これまで捉えることができなかった様々な物質系の未知の現象やダイナミクスの観測を可能にし、計測、分析、制御等を通して、様々な分野にイノベーションをもたらすことが期待されており、その研究開発の一層の推進を図る必要がある。

また、テラヘルツ光は、非破壊診断等セキュリティ関連分野での応用が多数提案されており、安全・安心な社会の構築という観点からも、その実用化に向けての技術開発を早急に進めることが重要である。

## 2 光資源を活用し、創造する科学技術に共通する課題

### 2 - 1 学際的交流の推進

光科学技術は、物理、化学、生物学、工学等幅広い分野の科学技術に関係する領域横断的な分野であり、エネルギー・環境、産業・医療、情報・通信等様々な分野の研究開発の基盤ともなっている。したがって、光科学技術の振興に当たっては、学際的な交流が円滑かつ広汎に行われること、すなわち、各分野間の横の連携、基礎研究分野と応用研究分野という縦の連携を一層強化することが重要である。

### 2 - 2 行政、産業等関係者の連携確保等

光科学技術の研究開発を推進し、実用化につなげていくためには、研究者、大学等研究組織間の連携はもとより、環境・エネルギー、産業・医療、情報・通信等の応用分野を所管する関係府省との行政的連携や企業との密接な連携を図る必要がある。

また、ニーズとシーズを融合・マッチングさせる研究開発の仕組みが必要であり、研究開発に当たってマーケティング等を考慮することも必要である。

### 2 - 3 人材の育成

光科学に関する教育は、大学教育においては、物理学、電子工学など一部の学科において講義が行われているにとどまっており、また、必ずしも体系的な教育が行われているとはいいがたい。特に生物、医学分野などにおいて光科学技術が大きな役割を果たしてきて

いることにかんがみると、それらの分野の学生に光科学を学習する機会を与えることなどを含めて、光科学技術に関する教育の充実・強化を図る必要がある。

また、若手研究者の外国研究機関における研修や光科学以外の分野の研究者との交流等により、幅広い視野を持った人材を育成することが重要である。

更に、光科学技術分野における優秀な人材を育成していくためには、高校以前の理科教育において、光科学を含む理科全般についての興味や探究心を育てられるようにすることが重要である。

#### 2 - 4 国民の理解と支持の獲得

光資源を活用し、創造する科学技術は、国民生活に極めて密接に関係するものであり、その振興を図るに当たって、国民、社会のニーズを研究者等が共有していくことが重要である。このため、光科学技術及びその果たす役割を、一般国民が十分に理解し、そのニーズが研究課題に反映されうよう、研究機関・研究者等の双方向コミュニケーション活動であるアウトリーチ活動を推進するとともに、インターネットや科学館など様々な手段、機会を活用して、わかりやすく情報を提供するなど、普及・啓蒙活動の一層の充実が必要である。