総 説

自由電子レーザーとその利用技術の開発[†]

富增多喜夫

(株)自由電子レーザ研究所

573-01 大阪府枚方市津田山手 2-9-5

Key Words: free electron laser, electron accelerator, undulator, optical cavity, oscillation, tunability, MW power, ultra violet, visible, infrared, mid infrared

1. はじめに

自由電子レーザー(free electron laser : FEL)は、高速の電子(自由電子)ビームが真空中で規則的に蛇行するときに放射するシンクロトロン放射光(synchrotron radiation : SR)を利用する。SRは白色光なので、このままではレーザーにならない。しかし、蛇行ごとに発生するSRの方向が揃いビーム状に絞られると、SRが干渉し合って単色光が発生する。FELはこの単色光を増幅、発振させたものである。

1950年前後のスタンフォード大学は世界に先駆けてクライストロンや電子リニアックを開発中であった。オックスフォード大学から来たモッツはアンジュレータ(電子蛇行器)を開発して電子リニアックからの電子ビームを蛇行させ、ミリ波や可視光の発生に成功した。実験の理論解析には、電気試験所〔現電子技術総合研究所(電総研)〕の中村正郎が参加している¹⁾。1960から1970年代には全長2マイルの電子リニアックのほかに43 MeV超伝導リニアックも10年の歳月をかけて開発されていた。FELの発明者であるメイディらは超伝導リニアックからの安定で質の良い電子ビームがFEL発振に

不可欠と考え、超伝導ヘリカルアンジュレータと光共振器を試作して、1976年から1977年にかけて3.4 μm FELの発振に成功した²⁾。

1960年メイマンによって発明された在来のレーザーは、ルビーや炭酸ガスなどの原子や分子の励起状態から放射される波長と位相の揃った光である。したがって、波長は大きく変えられず、出力も媒質の排熱効率によって制限される。

しかしFELは、在来レーザーのコヒーレントで単色という長所と波長が電子の速度(運動エネルギー)や電子の蛇行振幅(電子の蛇行させるアンジュレータの磁場強度)で任意に変えられ、出力も媒質に制限されず、大出力化も可能という長所を兼ね備えている。

冷戦期の米国は、このような夢のレーザー出現に鋭敏に反応し、1983年に始まるレーガン大統領のSDI(戦略防衛構想)計画の中核技術としてFELを取り上げている。そして、ロスアラモス国立研究所とボーイング社などの企業を中心に3000億円を超える予算と11年の歳月を費やしてFEL研究が推進された³⁾。結果的にはFELはビーム兵器とはなり得ず、ロスアラモス国立研究所の小型FEL装置以外は、ボーイング社の可視域FEL装置もリング型共振器の制御も含めて所期の成果は得られていない。

しかし、米国ではスタンフォード大学、カリ

[†] Development of Free Electron Lasers and Their Applications. Takio TOMIMASU : Free Electron Laser Research Institute, Inc., 2-9-5, Tsudayamate, Hirakata-shi, Osaka-Pref. 573-01, Japan.

表 1 FEL 利用研究施設の電子加速器, FEL 出力, 研究テーマなど (1996年1月現在)

研究所	電子加速器	電子銃	初発振 (建物建設年)	波長域 (μm)	ピーク出力 ()平均出力	研究テーマ
Stanford Univ. (USA)	超伝導リニアック 66 MeV, 5.6 A	熱陰極	1977	3 - 10 15 - 60	1.2 MW (1 W)	物性物理 生物・医学
UCSB (USA)	バンデグラフ 6 MeV	熱陰極	1985	350 - 2 500 60 - 350 30 - 90	(~ 10 kW)	半導体物性
Duke Univ. (USA)(Mark III)	常伝導リニアック 45 MeV, 40 A	熱陰極 RF Gun	1986	1.8 - 9.5	2 MW (3 W)	物性物理
Vanderbilt Univ. (USA)(Mark III)	常伝導リニアック 45 MeV, 40 A	熱陰極 RF Gun	1991 (1987)	2 - 8	3 MW (6 W)	物性物理 生物・医学
FOM FELIX (Netherlands)	常伝導リニアック 45 MeV, 70 A	熱陰極	1991	5 - 30 16 - 110	5 MW (0.5 W)	原子・分子物理 生物・医学
LURE CLIO (France)	常伝導リニアック 70 MeV, 75 A	熱陰極	1992	1.8 - 17.5	10 MW (9 W)	物性物理
LANL AFEL (USA)	常伝導リニアック 15 MeV, 100 A	光陰極	1993	4 - 6	10 MW (1.5 W)	医療応用
FELI (Japan)	常伝導リニアック 33 MeV, 42 A 75 MeV, 50 A 165 MeV, 60 A 20 MeV, 40 A 20 MeV, 40 A	熱陰極	(1993) 1994 1995 1995 1996 1996	5 - 22 1 - 6 0.23 - 1.2 20 - 60 50 - 100	5 MW(1 W) 15 MW(3 W) 10 MW(2 W) 5 MW(1 W) 5 MW(1 W)	半導体物性 同位体分離 医療応用 生物工学 新素材

フォルニア大学サンタバーバラ校, バンダビルト大学, デューク大学, ロスアラモス国立研究所の5か所に FEL の利用研究施設が設置された。この影響を受けて, 1990年代になると, ヨーロッパではオランダ FOM の FELIX, フランス LURE には CLIO と呼ばれる FEL 利用研究施設が設置されている。表 1 は, 世界の FEL 利用研究施設の電子加速器, 初発振, 波長域, ピーク出力 (平均出力), 研究テーマ等を示す。

これらの施設では, FEL の波長可変の特長を生かして生体アブレーションによる外科, 歯科, 眼科など医療技術への利用, 半導体超格子構造や酸化物超伝導体といった新材料の電子構造解析への利用など新しい産業の芽を育てる利用研究が数多く発表されている⁴⁾。

一方, 1980年前後の日本では, スタンフォード大学での $3.4 \mu\text{m}$ FEL 発振成功に関する電総研の近藤 淳による調査報告⁵⁾や金沢大学の

川崎 温らによるセンチ波発生実験報告⁶⁾がある。しかし, 米国のビーム兵器としての FEL 開発に批判的であった1980年代の日本では, 超 LSI 産業に必要なリソグラフィ光源として SR を発生する小型電子蓄積リングの開発に力が注がれ⁷⁾, FEL 装置の開発では米国に10年の遅れをとった。

わが国の FEL プロジェクト研究としては, 1984年によく科学技術庁振興調整費で研究 (日本大学, 電総研, 理化学研究所, 大阪大学レーザー核融合センター) が始まり, その後原子力試験研究費によるクロスオーバー研究の一つとして FEL 研究が継続されている。後者は日本原子力研究所東海研究所の超伝導リニアックを用いる FEL 装置の建設, 電総研でのアンジュレータ技術, 理化学研究所と動力炉・核燃料開発事業団 (動燃) による光共振器用光学材料の開発を中心としたものである。

日本初の FEL 発振は, 1991年3月電総研の

TERAS リングを用いて筆者らによって達成されている⁸⁾。その後、分子科学研究所⁹⁾、電総研・川崎重工業¹⁰⁾、東京大学工学部・自由電子レーザー研究所¹¹⁾、大阪大学産業科学研究所¹²⁾等で FEL 発振を達成しているが、どれも出力は弱く利用研究は行われていない。

図 1 は、国内で FEL 装置を開発している研究所または FEL 装置のニックネームを示す。符号の位置は、電子加速器のエネルギーと FEL 波長を、符号の種類で加速器の種類を表す。国内外合わせると 80 以上のプロジェクトが進行中であるが、実際に利用研究に使える施設は表 1 に示した八つの利用研究施設にすぎない。

現在筆者が所属する¹³⁾自由電子レーザー研究所 (FEL 研) は、1991 年 3 月 28 日に基盤技術研究促進センターが 60 億円、民間 13 社が 26.3 億円を出資して設立された。計画では 1997 年 3 月末までの 6 年 4 日で産業用 FEL 装置と利用技

術を開発する。試作しても動かない前例も多いのに利用技術までも開発するというのは誠に厳しい計画であった。しかし、当初重視されなかった熱陰極電子銃の活用、入射器の集束系、24 μ s パルスマイクロ波源や 6.72 m 長光共振器等の試作がうまくいって、1994 年 10 月に MW 級の 6 μ m FEL 発振に成功した¹³⁾。その後可変波長域も 4.8 - 14 μ m と広がり、1995 年 10 月からは世界で 8 番目の FEL 利用研究施設として、週 2 日、バイオ・医療、半導体応用の研究に使用されている¹⁴⁾。

1995 年 12 月には、光の回折による発振波長限界から熱陰極電子銃ではエミッタンスが大きく無理とされていた電子リニアックによる 0.35 μ m という世界最短波長での発振を達成した。1996 年 6 月には 0.27 μ m 発振にも成功して、紫外から中赤外域をカバーする世界初の FEL 利用研究施設となっている¹⁵⁾。

ここでは、FEL 発生原理と FEL 研での研

図 1 国内における FEL 装置の最短波長と電子エネルギーの関係および加速器の種類

究を紹介しながら世界最先端 FEL 施設, FEL 利用技術などの現状を述べる。

2. 自由電子レーザー発生の原理

自由電子レーザーは初めてという方も多いと思われるので, 自由電子が発生する電波が単色光となり, さらに自由電子レーザーになる過程を, キーワードも含めて説明していきたい。

原子・分子から外れて真空中や物質中を自由に運動する電子を自由電子という。日頃経験する静電気も物体表面の原子から電子が外れて自由電子となって移動したことによる。身近で自由電子(電子)を使っているものにブラウン管式テレビや電子レンジがある。

自由電子(電子)が, 図2のように振動すると電磁波(電波)が発生し, 四方に広がる。電子が振動しながら高速で一方向に動くと, 電波はドップラー効果によって短波長化され, 高速電子の相対論効果で指向性を持つようになる。

電子の速度が光速に近づくに従って, 電波はマイクロ波, ミリ波, 赤外線, 可視光, 紫外線, 真空紫外, 軟 X 線, X 線となる。これらの光はシンクロトロン放射光と呼ばれる連続スペクトル光であるが, 干渉効果によって単色光となる。FEL の発生には, この干渉効果によ

る放射光の単色化と相対論効果による前方指向性は極めて重要である。

相対論効果による前方指向性の説明は省略し, 電波の発生, ドップラー効果による電波の短波長化, 光の干渉効果の過程を一連の図で表したのが図2である。まず, 電子塊(10⁹個以上の電子が2 mm 径以下の塊状になっている)の振動によって電波が四方に伝播する。電子塊が光速に近い速度でアンジュレータ(蛇行器)で規則的に蛇行すると, ドップラー効果によって前方々向の電波は短波長化された自発放出光となり, これが1 mm 径以下に絞られると干渉効果によって波長 λ の単色光となる。

$$\lambda = \lambda_0(1 + K^2/2)/(2\gamma^2) \quad (1)$$

ここで, γ はローレンツ因子で, 電子の運動エネルギーを E_k , 電子の静止エネルギーを m_0c^2 とすると,

$$\gamma = E_k/m_0c^2 + 1 \quad (2)$$

K は電子の蛇行を特長づけるパラメータで,

$$K = 93.4 B_0 \lambda_0 \quad (3)$$

であり, $B_0(T)$, $\lambda_0(m)$ は, それぞれアンジュレータのピーク磁場, およびアンジュレータの1周期長である。この自発放出光の単色性($\Delta\lambda/\lambda$)_sは, 蛇行の周期数を N とすると, 電

図2 電子の蛇行運動によって発生する電磁波の短波長化の原理

子ビームのエネルギー幅 $\Delta E/E$ と規格化エミッタンス ε_n (ビーム径と発散角の積に比例した量) が零という理想的な電子ビームの場合, 次式で与えられる。

$$(\Delta\lambda/\lambda)_s = 1/(2N) \quad (4)$$

$\Delta E/E$ と ε_n が零でない場合には,

$$(\Delta\lambda/\lambda)_s = \left[\left(\frac{1}{2N} \right)^2 + \left(\frac{\Delta E}{E} \right)^2 + 2|hx| \frac{K^2}{(1+E^2)^2} \frac{\varepsilon_{nx}^2}{\lambda_0^2} + 2|hy| \frac{K^2}{(1+K^2)^2} \frac{\varepsilon_{ny}^2}{\lambda_0^2} \right]^{1/2} \quad (5)$$

となり, 自発放出光のスペクトル幅 (FWHM) は $1/(2N)$ より大きくなる。電子ビームのエネルギー幅とエミッタンスが小さくないと, FEL が発振しないという理論の根拠の一つである¹⁶⁾。

ここで, hx, hy の値は電子が螺旋運動をするヘリカルアンジュレータでは $hx=hy=1$ で, 電子が蛇行運動する平面アンジュレータでは, $hx=0, hy=2$, または $hx=2, hy=0$ である。 $\varepsilon_{nx}, \varepsilon_{ny}$ はそれぞれ x 方向および y 方向の規格化エミッタンスである。

図 3 (下) に FEL 研アンジュレータ 3 ($N=67$) による自発放出光を, 図 3 (上) に $0.603 \mu\text{m}$ FEL の発振スペクトルを示す。 $1/(2N) = 0.75\%$ であるから約 5 % の自発放出光のスペクトル幅 (FWHM) は, ほとんど電子ビームのエネルギー幅とエミッタンスによるものである。しかし, 特定波長 λ_R のみが増幅され発振すると, スペクトル幅 $(\Delta\lambda/\lambda)_L$ は一種の相転移を起こして図 3 (上) のように自発放出光のスペクトル幅の 50 分の 1 程度になる。

$$(\Delta\lambda/\lambda)_L = (1/\pi) \sqrt{\lambda_R / N \sigma_z} \ll (\Delta\lambda/\lambda)_s \quad (6)$$

ここで, σ_z は電子ビーム進行方向 (Z 方向) の電子パンチ長 (標準偏差) を示す。

図 4 に FEL 発振装置の例を示す。電子ビームを供給する電子加速器と電子ビームを蛇行させるアンジュレータ, アンジュレータを挟むよ

図 3 FEL 研アンジュレータ 3 による自発放出光 (下) と $0.603 \mu\text{m}$ FEL の発振スペクトル (上)

うに配置された一対のミラーに合わせ鏡のような働きをさせる光共振器でできている。

球状の電子塊がアンジュレータで蛇行して発生した波長 λ_R のパルス光をミラー間で往復させる。パルス光は往路で後続の電子塊とぴったりと重ね合わせ, 電子塊が蛇行によって放出する光エネルギーをパルス光に加えて光パワーを増幅する。

電子塊がアンジュレータを通過するときパルス光が得るパワー利得を G とし, パルス光がミラー間を往復すると 2 回ミラーで反射するが, その際の損失を α とすると, パルス光と電子塊がアンジュレータを通過するごとに光パワーは $[1+(G-\alpha)]$ 倍となる。したがって, パルス光が電子塊と重なり合ってアンジュレータを n 回往復すると, 光パワーは初めは徐々に, 後になるほど急速に増加し, 最終的には $[1+(G-\alpha)]^n$ 倍になる。たとえば, $G-\alpha=0.18$, $n=128$ の場合では光パワーは約 16 億倍となる。利得 G はヨーロッパグループで開発され

図 4 FEL 装置の主要部, 電子加速器, アンジュレータ, 光共振器

た半実験式を用いて計算され, 実験データをうまく説明できている¹⁷⁾。

図 5 は FEL 研での $6\mu\text{m}$ FEL マクロパルス波形 (上) と電子ビームマクロパルス波形 (下) を示す。FEL 研電子リニアックで加速された電子塊のマイクロパルス間隔は, 熱陰極電子銃 500 ps パルスグリッドパルサの 22.3125 MHz できまり, 現在は $44.8\text{ ns} \times c = 13.44\text{ m}$ 弱で, 光共振器長の 2 倍に設計されている。近々 89.25 MHz に改善して 11.2 ns にして FEL の平均出力を 4 倍にする予定。マイクロパルスのパルス長は, 電子銃を出たときは 500

ps (約 9 cm 長) だがプリバンチャーとバンチャーで約 10 ps (3 mm 長) にバンチ化される。したがって, アンジュレータを通過する電子塊のマイクロパルス長は約 10 ps, マイクロパルス間隔は 44.8 ns, マイクロパルスが約 540 個連なってパルス長 $24\mu\text{s}$ のマクロパルスが 100 ms ごとに続く。

FEL マイクロパルス長は, 光共振器長の微調整によって多少変わるが 10 ps 以下。図 5 の FEL マクロパルス波形からも明らかなように, FEL マイクロパルスの立上りに約 $6\mu\text{s}$ かかるので, マクロパルス幅は約 $18\mu\text{s}$ となり, これが 100 ms ごとに続く。約 1 MW の FEL ビームを物に当てるとパチパチと音を立て閃光を発する。

図 5 の FEL マクロパルス出力が飽和に達するまでの時間 τ_s は, 光共振器長を L_c , 自発放出光パワーを P_0 , FEL 飽和パワーを P_s とすると, 次式で与えられる。

$$\tau_s = 2(L_c/c) \ln(P_s/P_0) / \ln[(1+G)(1-\alpha)] \quad (7)$$

図 5 の場合, $L_c = 6.72\text{ m}$, $G - \alpha = 0.16$ から約 $6\mu\text{s}$ で $P_s/P_0 \approx 10^9$ となる。FEL 研の場合, $P_0 = 1\text{ W}$ レベルで, 光共振器内の光パワーは 1 GW となる。赤外域用光共振器は, 直径 6 cm

図 5 FEL 研の $6\mu\text{m}$ FEL マクロパルス波形 (上) と電子ビームマクロパルス波形 (下)

の銅製凹曲面に金コートしたミラーを向かい合わせたものである。FEL は出力ミラーの中心にある 1 mm 径のアパーチャーから光共振器内パワーの 0.5%, すなわち 5 MW を出力として取り出せる。

このように FEL のパワーレベルは、アンジュレータの自発放光と比べて 6 桁以上強く、スペクトル幅は 1 桁以上狭くなるので、7 桁以上高輝度である。放射光リングに設置したアンジュレータからの光子エネルギーは、FEL の光子エネルギーより 2-4 桁高いので光子当たりのコスト比較は難しいかもしれないが、FEL のピコ秒パルス特性を生かした多光子吸収反応も可能なので、FEL 光子のコストはリング設置のアンジュレータからの光子と比べて数桁安くなる。

3. 自由電子レーザーとその利用技術の開発現状

在来レーザーが発明されて数年で実用機が続出したの比べると FEL 発振成功から 20 年近くたって実用機 8 台は少なすぎる。この差は在来レーザーが光学材料が揃えば 1 人でどこでも作れるように安価で容易で場所をとらないのに対して、最も利用分野が広そうな数 μm FEL 装置でも高価（最低 2 億円）で難しく場所をとるところにある。

しかし、波長域 100 μm 前後に限れば、スタンフォード大学で開発された小型 FIR-FEL 装置のように数千万円で建設が可能である¹⁸⁾。この装置は、 $1.5 \times 2 \text{ m}^2$ と小型で、1 空洞半の 2856 MHz 加速空洞をもつ熱陰極型 RF 電子銃を用いて 1-3 MeV の電子ビームを加速し、50 cm 長のヘリカルアンジュレータ ($\lambda_0 = 1 \text{ cm}$) で 100-1000 μm の FEL を発生できる。アンジュレータは 50 周期で、1% の変換効率を期待していて、ピーク出力は 0.33 MW、マクロパルス幅 3 μs 、10 Hz で平均 0.3 W を予定している。用途は THz (テラヘルツ) プロブとして超格子構造、トンネル共鳴現象、高温超

伝導体の解明に役立つ。

紫外～中赤外域の大出力 FEL 装置としては、米国 Newport News の CEBAF が 400 M\$ をかけて 400 MeV 超伝導リニアックを建設し、0.15-20 μm の波長域で平均出力 1 kW を出そうという計画が進行中である¹⁹⁾。一方、ロシアの Novosibirsk にあるブドカー原子核物理研究所では、平均電流 100 mA の 35 MeV レーストラック型マイクロトロンを建設中で、平均 10 kW 以上の数 μm FEL を発生させて多光子吸収による化学反応の研究を予定している。レーザー発振に使用された電子ビームエネルギーは RF 空洞で回収し、電子ビームによる放射化を抑え、放射線遮蔽を軽減する²⁰⁾。

図 6 に FEL 研の 165 MeV 電子リニアック、電子ビーム輸送系、中赤外、赤外、可視-紫外をカバーする 3 台の FEL 装置、光伝送系およびレーザーモニタ室と四つの利用実験室への同時 FEL 分配系²¹⁾を示す。利用実験室 2 にはマニピュレータも設置され、4.8-14 μm FEL を 0.1 mm 径に絞って照射できる。

予算は総額 86.3 億円で、延床面積 4013 m^2 の建屋と植栽等に約 20 億円、FEL 装置と実験装置等に約 46 億円、人件費、高熱水料、公租公課、土地賃料等に約 20 億円を予定している。人員構成は、常勤役員 2 名、研究所 22 名（内 2 名は兼任）、事務 5 名の総人員 29 名である。社長は難波直愛（非常勤、三菱重工業^株取締役）で、常勤職員は副社長（分部武男）、研究所長（筆者）の 2 名で、研究員は所長以外は参加企業からの出向者である。

これらの建設は 1994 年 1 月から RF 源であるクライストロンとその変調器、加速管と真空排気装置の搬入、据付が始まり、1994 年 3 月には電子ビーム輸送系、4-5 月にはアンジュレータ 1 と 2 の据付、5-6 月は加速管の RF エージング、電子ビーム加速、7 月には光共振器 1 の据付と科学技術庁の施設検査があり、8 月にやっとアンジュレータ 1 を通る電子ビームのスペクトル測定ができた。しかし、加速電流が予

図 6 FEL 研 165 MeV 電子リニアック, 3 台の FEL 装置, 光伝送系, 利用実験室等の鳥瞰図

定通り得られなかったので, 8 月下旬には熱陰極電子銃の軸合わせ, 9 月中旬以後は電子銃の 150 kV 高圧電源を 2 度, クライストロン用パルストランスも破損するトラブルが続いた。

5 - 20 μm をカバーするアンジュレータ 1 ($\lambda_u = 3.4 \text{ cm}$, $N = 58$) を用いて FEL 実験が可能になったのは, 1994 年 10 月 3 日からで, 10 月 12 日には 6.7 μm 自発放射光を観測し, 光共振器のミラー間隔の調整には手間取ったが, 10 月 31 日には無事発振に成功した²²⁾。装置据付から 10 か月の発振達成であった。

1 - 6 μm をカバーするアンジュレータ 2 は全長 3 m ($\lambda_u = 3.8 \text{ cm}$, $N = 78$), 電子銃のグリッドパルサを 178.5 MHz でトリガーできるとして光共振器を 8.4 m に設計した。しかし,

この時点で光ファイバーによるグリッドパルサのトリガー系が不良で, 22.3125 MHz しかトリガーできなかったため, 1995 年 1 月中旬から 3 週間で光共振器長を 8.4 m から 6.72 m に改造した。発振実験は 2 月 9 日から始め, 2 月 27 日に 1.88 μm で発振し, 28 日に三次高調波である 0.63 μm の赤色 FEL を観測した。

0.23 - 1.2 μm をカバーするアンジュレータ 3 は, 全長 2.68 m ($\lambda_u = 4 \text{ cm}$, $N = 67$) で²³⁾, 光共振器長は 6.72 m である。アンジュレータ 3 と光共振器, 電子ビーム輸送系等の据付が終わり, 科学技術庁の施設検査を受けたのが 7 月 27 日である。10 月から FEL 利用研究を始めるため, 8 月上旬からは FEL 装置 1 と 2 からの FEL ビームを利用実験室に伝送するための

ビーム伝送系の設置と伝送テスト, 10月中頃から12月上旬にかけて電子入射器の集束 coils の修理と FEL 装置 3 の光伝送系の据付等で, 本格的な FEL 装置 3 の発振実験は12月12日から始め, 12月19日に $0.63 - 0.54 \mu\text{m}$, 26日に $0.34 - 0.35 \mu\text{m}$ で発振した。図 7 に $0.35 \mu\text{m}$ FEL 出力波形 (上) と電子ビーム波形 (下) を示す¹⁵⁾。

FEL 研が, 熱陰極電子銃では困難とされた

図 7 $0.353 \mu\text{m}$ FEL 出力 (マクロパルス) 波形 (上) と電子ビーム電流 (マクロパルス) 波形 (下)

紫外域 FEL 発振に成功した理由として,

- (1) 500 ps グリッドパルスと 714 MHz プリバンチャー
 - (2) 短いドリフトスペース (0.4 m) と強集束磁場²⁴⁾
 - (3) 24 μs パルス, 24 MW クライストロンと 24 μs 高安定クライストロンパルス変調器²⁵⁾
 - (4) 短い光共振器 (6.72 m)²⁶⁾
 - (5) 偏向角 22.5° の S 字型ビーム輸送系²⁷⁾
- を採用したことが挙げられる。

波長可変な FEL で何ができるか, おおよそのところを図 8 に示した。上段に在来レーザーで代表的なものを, 下段にそれぞれの波長域で光が分子にどのような作用を及ぼすかを示している。波長 $0.1 - 0.5 \mu\text{m}$ の光で分子の解離や励起を, 数 μm から $20 \mu\text{m}$ の光によって分子の振動や回転を起こす。レーザー照射で物質が微粒子となって飛び散ることをアブレーションという。

在来レーザーの波長は飛び飛びで離散的であり, 特に $1 \mu\text{m}$ 以下の波長に集中している。しかし, FEL は広い波長域で波長可変であり, 在来レーザーのないミリ波から近赤外域の空白を埋めるレーザーである。立ち遅れた赤外ヘサ

図 8 レーザーが分子に及ぼす作用と利用研究テーマ

図 9 FEL 研の利用研究施設

ブミリ波域のセンサー開発や分光放射標準の確立、半導体超格子構造、高温超伝導の研究やアモルファス半導体のアニーリングに利用できる。特に電子リニアックの電子ビームを用いる FEL は、パルス長がピコ秒で、ピーク出力が MW という新しい特性を備えているので、アブレーション、超音波効果やショック波効果、多光子吸収励起反応を利用した同位体分離、毒物・危険物除去など、バイオ・医療も含めて FEL による産業応用の研究が可能になる。

赤外～サブミリ波域のセンサー開発では、中赤外域 ($2-20\mu\text{m}$) で超格子 (量子井戸) 光伝導を利用する高速センサー、遠赤外域 ($20-200\mu\text{m}$) からサブミリ波では検波型で薄膜アンテナ結合型センサーの開発が FEL 利用の立場からも熱望されている。

半導体や高温超伝導体への FEL 利用では中赤外から遠赤外域の FEL が有用である。FEL 研では、半導体ヘテロ接合の電位障壁測定に $8-12\mu\text{m}$ 、量子井戸構造を用いた光制御光変調の実証実験に $9-10\mu\text{m}$ 、SiC や a-Si のアニーリングに $11-13\mu\text{m}$ 、C や Si の同位体分離には $9-10\mu\text{m}$ の FEL を利用している。

図 9 に FEL 研の利用研究施設の概略図を示す。FEL は光伝送系を通して各実験室に分配される。

半導体ヘテロ接合の電位障壁高さは、図 10 に示すように半導体の接合面での不連続なエネ

ルギー変化量に相当し、それより大きなエネルギーの光を接合部に照射すると光電効果によって電子がたたき上げられ、光電流が発生する。これまでこの値を正確に決定する手段はなかったが、波長可変な FEL を用いて初めて可能となった。FEL 研では ZnSe/GaAs 素子で、 110 meV の測定結果を得ている²⁸⁾。

量子井戸構造を用いた高速光制御光変調の実証実験では、光変調素子として GaAs の基板の上に AlGaAs と GaAs の薄膜を交互に成長させた量子井戸構造のものを用い、変調光として $9-10\mu\text{m}$ の FEL を、被変調光として Ti サファイアレーザーを使用している。変調光の波長には、井戸構造によって生じたサブバンド間に相当する波長のものを選び、変調光照射時の

図 10 ZnSe/GaAs 接合における光電流の変化

バンド間遷移による Ti サファイアレーザーの吸収率変化によって高速変調が可能になる²⁹⁾。

アモルファス半導体のアニーリングでは、SiC には $12.6\ \mu\text{m}$ 、a-Si には $11.2\ \mu\text{m}$ の FEL を照射してアニーリング効果を調べており、SiC の結晶化についてはすでに成果が発表されている³⁰⁾。いずれの実験でも分子結合の伸縮振動に共鳴する FEL の波長が選ばれている。

分子結合の伸縮振動共鳴と多光子吸収解離による C や Si の同位体分離の研究も始められている。フロン系ガスの CHBrF_2 には $9.3\ \mu\text{m}$ FEL を照射し、 ^{13}C 濃度が天然存在比 1 % から約 3 % に増加することが確認されている³¹⁾。FEL による同位体分離は、米国の Duke 大学でも始められたばかりで、スペクトル幅 ($\Delta\lambda/\lambda$) の改善も課題の一つである。

FEL のバイオ・医療応用への利用でも中赤外域 FEL によるアブレーションやショック波の効果が活用されている。アブレーションによる虫歯削り、レーザーメス、角膜手術もすぐに役立つ応用分野である。

FEL による虫歯の切削は、オランダの FELIX と FEL 研でしか報告されていないが、エナメル質に含まれるハイドロキシアパタイト $\text{Ca}_{10}(\text{PO}_4)_6(\text{OH})_2$ のリン酸基 ($-\text{PO}_4$) の伸縮振動が $9.4\ \mu\text{m}$ FEL に共鳴してアブレーションを起こすとされている³²⁾。図 11 にエナメル質と象牙質のアブレーションの波長依存性を示す³³⁾。水は $3\ \mu\text{m}$ 、 $6.2\ \mu\text{m}$ の FEL もよく吸収するので、最近 $3\ \mu\text{m}$ のエルビウム-ヤグレーダーによる熱吸収を利用して虫歯削りも行われている。しかし、 $3\ \mu\text{m}$ 、 $6-7\ \mu\text{m}$ の吸収ピークに比べて $9\ \mu\text{m}$ の吸収がきわめて大きいので、FEL 研では、 $9-9.6\ \mu\text{m}$ の FEL の虫歯照射効果を研究している。近い将来この波長域のレーザーをマニピュレータを使って照射し、虫歯治療ができるようになれば、ドリルによる虫歯削りの痛みから解放される。また人の歯はアモルファス状のハイドロキシアパタイトなので、アニーリングによる歯の改質も期待されて

図 11 エナメル質と象牙質のアブレーションの波長依存性

いる³²⁾。

アブレーションやショック波による細胞膜の加工や遺伝子導入実験も FEL 研で行われている。図 9 に示された利用実験室で利用できる FEL パワーは、 $15\ \mu\text{J}/\text{マイクロパルス}$ で、マイクロパルス長は最長 $10\ \text{ps}$ である。ピークパワーは $1.5\ \text{MW}$ (FEL 装置 1 の光共振器出口では $3\ \text{MW}$) で、マイクロパルス数は毎秒約 4000 である。この実験室では $6.1\ \mu\text{m}$ の FEL を用いてリンパ球や赤血球など造血系細胞の大本である幹細胞への遺伝子導入を試みている。実験では $6.1\ \mu\text{m}$ FEL 照射により pGFP 遺伝子を Molt-4 細胞に導入する実験はすでに成功している³⁴⁾。次いで、RAG-2 遺伝子が欠落した RAG-2 マウスと呼ばれるマウスの幹細胞に RAG-2 遺伝子を導入することにより、免疫不全症が治癒することを検証する。これらは、FEL の波長可変性とピコ秒パルスによって生ずるショック波特性を利用するもので、遺伝子のほかに薬物の細胞内導入の実験が行われている³⁵⁾。

昨年末発振した可視-紫外域 FEL の利用については、皮膚を傷つけずにガン治療ができるフォトダイナミックセラピー (photodynamic therapy: PDT) の研究を予定している。これは、 $0.65-0.7\ \mu\text{m}$ の赤い光がわずかだけでも人体にしみ込むのを利用する。

4. おわりに

FEL 研での産業用 FEL 装置と FEL 利用技術の開発プロジェクトは、基盤技術研究促進センター出資プロジェクトの一つとして1991年3月に発足し、1997年3月に終了する。

発足以来、FEL 装置の調査、設計、発注、建屋の設計、建設で1993年11月までかかり、1994年1月から1995年12月までの2年間で20-0.35 μm の中赤外、赤外、可視～紫外の波長域をカバーする3台の FEL 装置 1, 2, 3 で発振に成功し、当初の目標を達成した。特に、紫外域の発振では0.27 μm を達成し、電子リニアックによる世界最短波長の記録を更新中である。

1995年10月からは、わが国初の FEL 利用研究施設として、国研、企業、大学との共同研究で半導体応用、同位体分離、バイオ・医療応用への FEL 利用が始まっている。

1997年3月で基盤技術研究促進センターからの出資は終了するが、産官学の皆様方により、世界初の紫外～中赤外 FEL 利用研究施設を活用していただけるようご協力をお願いしたい。

文 献

- 1) Motz, H. : *J. Appl. Phys.*, **22**, 529 (1951) ; Motz, H. and Nakamura, M. : *Ann. Phys.*, **7**, 84 (1959)
- 2) Deacon, D. A. G. et al. : *Phys. Rev. Lett.*, **38**, 892 (1977)
- 3) Warren, R. : "Star Wars and the FEL", Los Alamos National Laboratory (1995)
- 4) First International FEL User's Workshop, Stanford Univ., Aug. 27-29 (1994)
- 5) 近藤 淳 : 電子技術総合研究所調査報告 200 号 (1979)
- 6) 川崎 温, 他 : "自由電子レーザーの実験的研究成果報告書", pp. 1-65, 金沢大学理学部 (1983.12)
- 7) Tomimasu, T. : *Rev. Sci. Instr.*, **63**, 722 (1992)
- 8) 冨増多喜夫, 他 : 日本原子力学会誌, **33**, 682 (1991)
- 9) Takano, S. et al. : *Nucl. Instr. Meth.*, **A331**, 20 (1993)
- 10) Yamazaki, T. et al. : *ibid.*, **A331**, 27 (1993)
- 11) Nishimura, E. et al. : *ibid.*, **A341**, 39 (1994)
- 12) Okuda, S. et al. : *ibid.*, **A358**, 244 (1995)
- 13) Tomimasu, T. et al. : *Proc. PAC '95*, 257, Dallas, May 1-5 (1995)
- 14) Tomimasu, T. et al. : Digest of 1st Symposium on FEL Applications, 1, FELI, Oct. 16 (1995)
- 15) Tomimasu, T. et al. : Digest of 3rd Symposium on FEL Applications, 67, FELI, May 9 (1996)
- 16) 冨増多喜夫 : "入門自由電子レーザー", p. 9, 日本原子力学会 (1995)
- 17) Dattori, G. et al. : *IEEE J. Quantum Electron.*, QE-20, 637 (1984); Jaroszynski, D. A. et al. : *Nucl. Instr. Meth.*, **A318**, 582 (1992)
- 18) Lewellen, J. W. : *ibid.*, **A358**, 24 (1995)
- 19) Neil, G. R. et al. : *ibid.*, **A318**, 212 (1992)
- 20) Gavrilov, N. G. et al. : *ibid.*, **A304**, 228 (1991)
- 21) Okuma, S. et al. : *ibid.*, **A375**, 654 (1996)
- 22) Kobayashi, A. et al. : *ibid.*, **A375**, 317 (1996)
- 23) Miyauchi, Y. et al. : *ibid.*, **A375**, ABS 42 (1996)
- 24) Tomimasu, T. et al. : *ibid.*, **A358**, ABS11 (1995)
- 25) Oshita, E. et al. : *Proc. PAC '95*, 1608, Dallas, May 1-5 (1995)
- 26) Saeki, K. et al. : *Nucl. Instr. Meth.*, **A358**, ABS 56 (1995)
- 27) Miyauchi, Y. et al. : *Proc. 9th Symp. on Accelerator Science and Technology*, 416, KEK, Aug. 25-27 (1993)
- 28) Nishi, K. et al. : *Jpn. J. Appl. Phys.*, **35**, L760 (1996)
- 29) Mitsuyu, T. et al. : *Proc. IEEE Lasers and Electro-Optics Society 1996 Annual Meeting* ; Suzuki, T. et al. : Presented at 3rd FEL User's Workshop, Rome, Aug. 26-31 (1996)
- 30) Ohyama, H. et al. : *Jpn. J. Appl. Phys.*, **35**, L683 (1996)
- 31) 栗林志頭真, 他 : 第 12 回化学反応討論会講演要旨集, p. 143, 姫路工大, 平成 8 年 5 月 29-31 日
- 32) 荻野誠司, 他 : レーザ歯学会誌, **7**, No. 1, 67 (1996)
- 33) Walker, R. : *Proc. 1st Int'l FEL User's Workshop* 32, Stanford Univ., Aug. 27-29 (1994)
- 34) 安本正人, 他 : 第 43 回応用物理学関連連合講演会講演予稿集, p. 965, 東洋大学, 平成 8 年 3 月 26-29 日 ; Nishimura, E. et al. : Presented at 3rd FEL User's Workshop, Rome, Aug. 26-31 (1996)
- 35) Awazu, K. et al. : *SPIE*, **2681**, 167 (1996)