

## 自由電子レーザーについて

原 研 大久保 牧 夫

## 1. はじめに

自由電子レーザー ( free-electron-laser, FEL ) とは, ライナックまたは蓄積リングの相対論的電子ビームを, 磁界を用いて周期的または1回うねらせ, 電子軌道の接線方向に沿って発生させた電磁波=光である。電子の進行方向に沿って多数の電磁石又は永久磁石を極性が交互になるように並べ, 電子ビームを一定の空間周期で蛇行させる装置をアンジュレータ ( undulator ) という。又, 1回だけうねらせる装置をウィグラー ( wiggler ) と呼んでいる。いずれも, 放射される光の波長は可変であり, きわめて強い干渉性の光が得られる。

通常のレーザーは, 原子・分子の束縛状態間の遷移によるものであるが, FELは束縛されていない自由な電子によるレーザーであり, 名前の意味もこれに由来する。FELの発振波長は連続可変であり, また媒質は真空であるため出力に上限はない。電子ビームのエネルギーを直接光に変換するため高い効率が期待される。

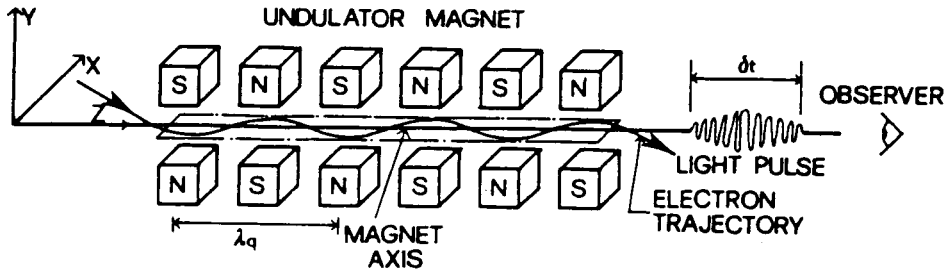
FELは高品位の相対論的電子ビームを必要とするので, 現在の電子加速器に関する最高水準の技術が求められている。FELの増幅・発振の実験は1976-77年にスタンフォード大学の超電導ライナックで初めて行なわれた。その後約10年, 各所で実験や理論的研究が続けられ, 加速器のハイテク利用法の一つとして若い研究者を集めている。なお開拓の余地は十分にあり, きわめて魅力ある分野といえよう。

## 2. FEL発振の原理

FELの良い文献が多数発表されているが<sup>1~5)</sup> 以下にFEL発振の原理を概観する。FEL装置は(1)相対論的電子ビーム, (2)電子ビームを蛇行させるアンジュレータ, (3)反射鏡により光を閉じ込める光共振器, の3要素から成る。

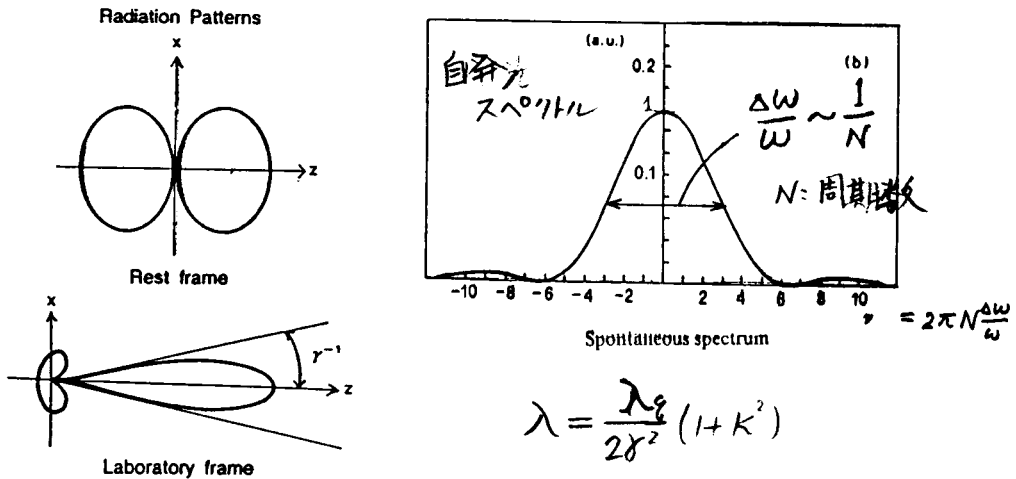
説明の順序として, アンジュレータ中に電子を通すと発光する現象 ( 自発放射光 ) について述べよう。Fig. 1に示すように, 平面アンジュレータは入射電子ビーム軌道 ( Z軸とする ) に垂直な磁場が, 周期  $\lambda_q$  で正弦波的に反転を繰り返すように作ってある。光速に近い速度  $v$  の電子 (  $\beta = v/c$ ,  $\gamma = 1/\sqrt{1-\beta^2}$ ,  $c$  は光速 ) が入射すると, 電子は垂直に振られ双極子放射を出す。その時間周期は  $\lambda_q \sqrt{1-\beta^2} / v_0$  (  $v_0$  はアンジュレータ軸上での電子の平均速度 ) である。実験室系からこの双極子放射を見ると, ドブラー効果により前方では波長

$$\begin{aligned} \lambda &= \sqrt{\frac{1-\beta_0}{1+\beta_0}} \cdot c \cdot \lambda_q \sqrt{1-\beta_0^2} / v_0 \\ &= \frac{\lambda_q}{2\gamma^2} (1+K^2) \end{aligned}$$



第1図 アンジュレータに入射する電子による自発放射光

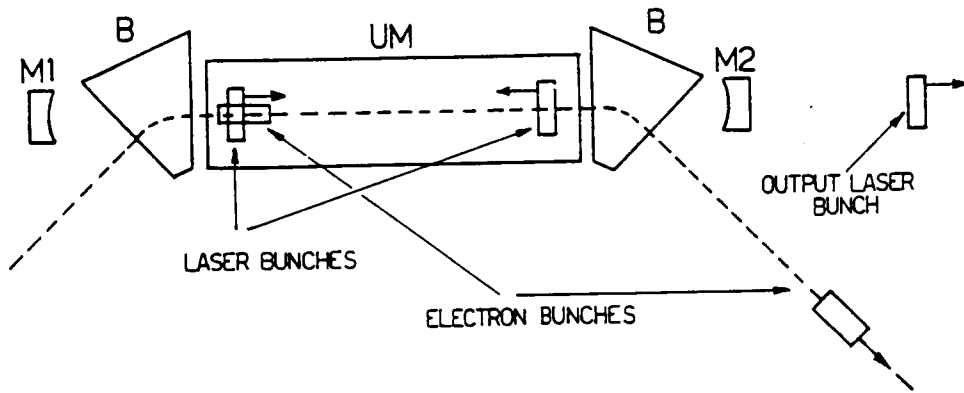
の放射光（共鳴光）に見える。（ここに  $K = 0.093 B \cdot \lambda_q$ 、 $B$  および  $\lambda_q$  の単位はそれぞれ KG, cm）。角分布は前方に著しく強く（Fig. 2），その広がり角は約  $2/\gamma$  ラジアンである。



第2図 自発放射光の角度分布とスペクトル分布

（たとえば，130 MeV ( $\gamma = 255$ )， $\lambda_q = 4$  cm， $K = 1$  に対し， $\lambda = 0.61 \mu\text{m}$  の赤色の可視光が得られる）。この放射光のスペクトルの中心周波数  $\omega$ ，半値幅  $\Delta\omega$  は，アンジュレータの周期数を  $N$  とすると  $\Delta\omega/\omega \sim 1/N$  である。また放射光は電子の振動面に偏光している。

レーザー発振：高周波加速器から得られる電子ビームは，加速高周波のある位相角付近にかたまっていて（バンチド・ビーム），一定の周期（高周波の周期またはその整数倍）で出て来る。このビームにより FEL の増幅・発振を起させるには，Fig. 3 に示すようにアンジュレー

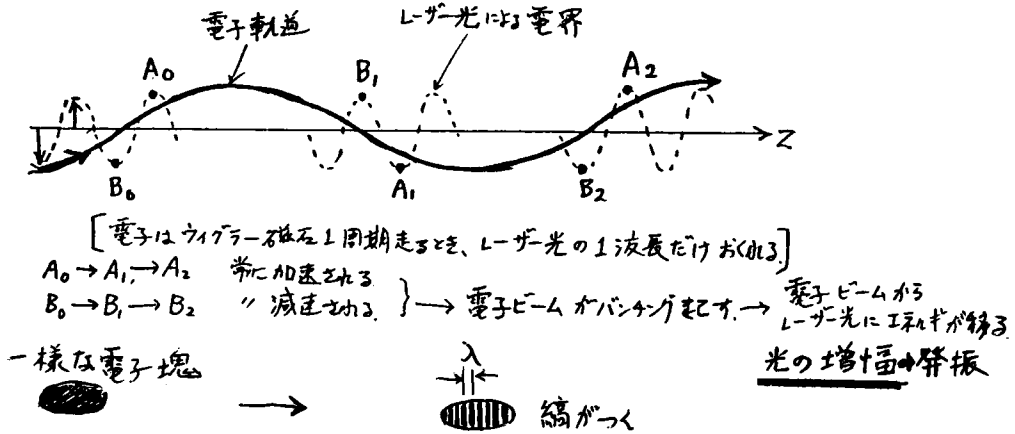


第3図 FEL光共振器内での電子バンチと光バンチ。この図では、電子がアンジュレータに入射した状態と、電子が通過し終わった状態が重ねて描かれている。B-偏向磁石、UM-アンジュレータ、M1-完全反射ミラー、M2-出力ミラー（一部透過）

タを2枚の反射鏡（ミラー）ではさみ、光共振器を構成する。光がこのミラー間を往復する時間とバンチド・ビームの時間間隔を精密に合わせる。アンジュレータ内で電子が蛇行すると、すでに存在するレーザー光の電場（進行方向に垂直）とエネルギーをやりとりする。

電子がアンジュレータ内を半周期（ $\lambda_q/2$ ）進む間に、共鳴光の位相に対し $\lambda/2$ だけ遅れてくる。結局、初めに光の加速位相角に乗った電子は常に加速され、 $\pi$ だけずれた電子は常に減速を受けることになる。（Fig.4）その結果、アンジュレータの入口で密度が一樣であった電子バンチは光の波長の周期で密度変調され、空間密度に濃淡が発生する。ここで密度の濃い部分が減速位相になる—ように微妙な調整を行う—と、電子ビームからレーザー電場へエネルギーが変換され、光が増幅される（誘導放出）。増幅された光は光共振器内で折り返し反射され、次に来るビーム・バンチと相互作用し電子ビームからエネルギーを引出す。アンジュレータ入口で光の塊と重なっている電子バンチは、出口では $N\lambda$ だけずり落ちている。ミラーの損失を含めた光の増幅率が1以上であれば、光の強度は時間と共に増大し（発振）、ある一定値に飽和する。ミラーをわずかに透明にし出て来る光を利用する。電子ビームエネルギーから、光エネルギーへの変換効率率は、一樣アンジュレータで、 $\sim 1/2N$ （ $N$ :周期数）である。しかしテーパード・アンジュレータ（アンジュレータ中での電子エネルギーの減少に合わせて磁石のパラメータを変えたもの）では、もっと高い変換効率を持ち、可視光ではまだ $\sim 2\%$ 程度であるがミリ波では35%（リバモア研究所）を得た例がある。

# 光の増幅、発振



第4図 アンジュレータ内での電子とレーザー光の相互作用

## \* 電子ライナックのビームの質

アンジュレータ中での光増幅率は、理想的な電子ビームに対し、およそ光の波長の  $3/2$  乗、電流密度に比例し、アンジュレータ周期数の3乗に比例する。従ってミリ波、遠赤外領域は、比較的容易に発振すると思われるが、短波長の可視光、紫外光の発振には、周到な準備が必要である。たとへば可視光を発振させるにはエネルギー拡がり  $\Delta E/E \sim 10^{-3}$ 、ビーム径 1 mm 以下、拡がり角度  $10^{-3}$  rad 以下、電流数 10 A (マイクロパルス) 程度の (きわめて高品位な電子ビームが必要である)。ちなみに従来のライナックのビームは  $\Delta E/E \sim 10^{-2}$ 、ビーム径 3~10 mm、拡がり角  $\sim 10^{-3}$  rad、電流 ~ 数 10 A (マイクロパルス) 程度であり、10~100 倍大きい。さらに FEL 発振を立上げるには、長いマイクロパルス幅 ( $\sim 100 \mu \text{sec}$ ) が必要であり、パルス中に電子ビームエネルギー、ビーム径等を一定に保つために特別な工夫が必要になる。

## \* コンプトン及びラマン・レジム

FEL 方式を電子ビームにより 2 つに分類される。

- ① コンプトン領域：高エネルギー、小電流ビーム、電子間の相互作用は無視できる。赤外、可視光用。
- ② ラマン領域：低エネルギー、大電流ビーム、電子間の相互作用大きい。ミリ波、遠赤外用。

## 3. 世界の開発状況

FEL の実験的研究を行っている所は世界で 2~30 以上あり<sup>6~8)</sup>、主なものを第 1 表に示す。

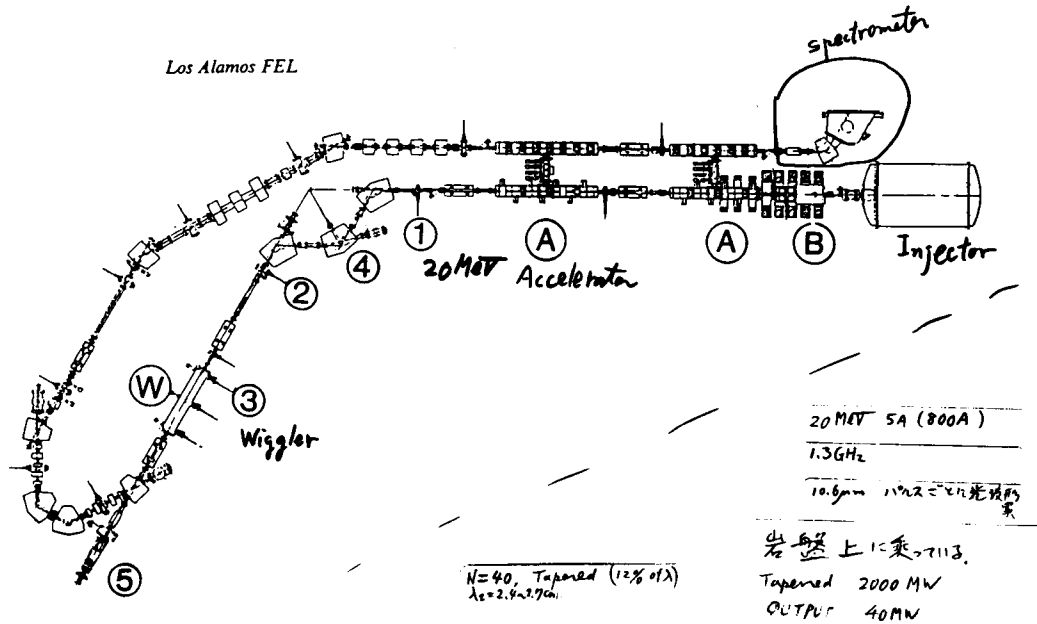
第1表 世界における自由電子レーザー開発研究の現状

| 国名    | 研究機関                       | 加速器   | 波長                                      | 発振例(成功年) |
|-------|----------------------------|---|---|----------|
| アメリカ  | ベル研究所                      | 20 MeV マイクロトロン                                | 100~400 $\mu\text{m}$                   |          |
| "     | BNL                        | 350 MeV 蓄積リング                                 | 0.35 $\mu\text{m}$                      |          |
| "     | コロビア大学とNRL                 | 1.2 MeV ダイオード                                 | 400 $\mu\text{m}$                       |          |
| "     | LBL                        | 5 MeV 誘導リニアック (ETA)                           | 2,000~8,000 $\mu\text{m}$               |          |
| "     | "                          | 50 MeV " (ATA)                                | 可視域                                     |          |
| "     | LANL                       | 20 MeV リニアック                                  | 10.6 $\mu\text{m}$                      | 発振(1984) |
| "     | ボーイング                      | 20 MeV リニアック (試験用)                            | 10.6 $\mu\text{m}$                      |          |
| "     | "                          | 120 MeV リニアック (Lバンド)                          | 可視域                                     | 発振(1987) |
| "     | EG & G TRW                 | 25 MeV リニアック (試験用)                            | 10.6 $\mu\text{m}$                      |          |
| "     | TRW                        | ~120 MeV 超電導リニアック                             | 可視域                                     |          |
| "     | スタンフォード大学<br>HEPL          | 43 MeV 超電導リニアック                               | 3.4 $\mu\text{m}$<br>~可視域               | 発振(1977) |
| "     | スタンフォード大学<br>SSRL          | 1.2 GeV 蓄積リング                                 | 軟X線域                                    | "        |
| "     | カリフォルニア大学<br>Santa Barbara | 6 MeV バンデグラフ                                  | 400 $\mu\text{m}$                       | 発振(1984) |
| "     | メリーランド大学                   | 2.1 MeV 円形 FEL                                | ミリ波域                                    | 発振(1985) |
| "     | ウィスコンシン大学                  | ~10 MeV タンデム・バンデグラフ                           | 赤外域                                     |          |
| フランス  | オルセ研究所                     | 160 MeV 蓄積リング (ACO)                           | 0.65 $\mu\text{m}$                      | 発振(1983) |
| イギリス  | ケルヴィン研究所                   | 150 MeV リニアック                                 | 10.6 $\mu\text{m}$                      |          |
| イタリア  | ENEA, フラスカッチ               | 20 MeV マイクロトロン                                | 10 $\mu\text{m}$                        |          |
| "     | INFN, フラスカッチ               | 600 MeV 蓄積リング (ADONE)                         | 0.51 $\mu\text{m}$                      |          |
| ソ連    | INP, トムスク                  | 1 MeV ダイオード                                   | 7,500~13,000 $\mu\text{m}$<br>7.5~13 mm |          |
| "     | INP, ノボシビルスク               | 370 MeV 蓄積リング                                 | ~0.6 $\mu\text{m}$                      |          |
| イスラエル | ワイズマン研究所                   | ~6 MeV タンデム・バンデグラフ                            | 赤外域                                     |          |
| 日本    | 大阪大 産研                     | 25 MeV リニアック (試験用)                            | 10.6 $\mu\text{m}$                      |          |
| "     | " "                        | 150 MeV リニアック                                 | 可視域                                     |          |
| "     | " レーザー研                    | 1 MeV ダイオード                                   | 4,700 $\mu\text{m}$                     |          |
| "     | " "                        | 2 MeV ダイオード (倍圧型)                             | サブ・ミリ波                                  | 発振(1986) |
| "     | 金沢大                        | 0.8 MeV ダイオード                                 | ミリ波                                     |          |
| "     | 理研                         | 1 MeV ダイオード                                   | ミリ波                                     | 発振(1986) |
| "     | 電総研                        | 600 MeV 蓄積リング                                 | 可視域                                     |          |
| "     | 日大                         | 35 MeV マイクロトロン                                | 赤外域                                     |          |
| "     | 東大原子炉                      | 35 MeV リニアック                                  | 赤外域                                     |          |
| "     | 分子研                        | 600 MeV 蓄積リング                                 | 可視域                                     |          |
| "     | 宇宙科学研                      | 1 MeV 円形 FEL                                  | ミリ波                                     |          |
| "     | 原研                         | ~50 MeV 超電導リニアック (第1段階)<br>~200 MeV " (第2 " ) | 赤外域<br>可視域                              |          |

加速器は常伝導RFライナック、超伝導RFライナック、パルスライン誘導型ライナック、蓄積リング、静電加速器、マイクロトロン等である。

\* 常伝導ライナックFEL (ロスアラモス)

ロス・アラモス研究所のFELの配置をFig. 5に示す。20MeV Lバンド (1.3 GHz) 常伝



第5図 ロス・アラモス研究所、常伝導ライナックFEL。

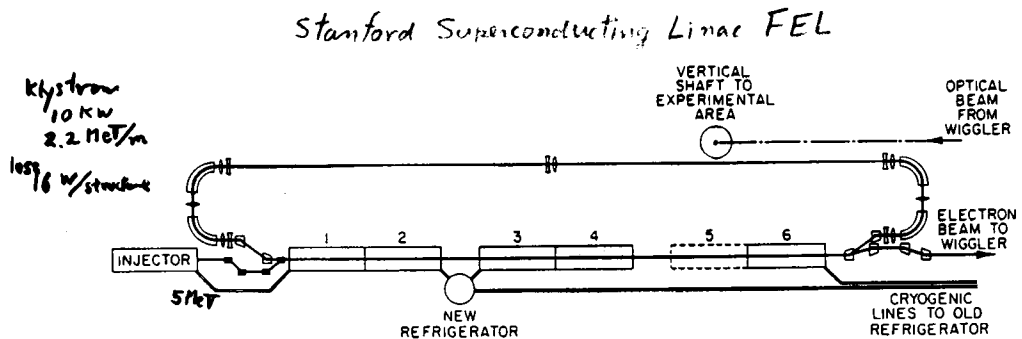
右上の入射器で発生した電子ビームは、バンチャーB、2本の加速管Aで20MeVに加速され、エネルギー分析器4を経て、アンジュレータWでレーザー発振(10.6 μm)を行う。Wを出た電子ビームは右上に送られ、高周波電界によるエネルギー回収が行われる。

導定在波サイドカップル型ライナックを使い10.6 μm (CO<sub>2</sub>レーザーに合わせた)を発振させている。FEL発振を立上げるのに、平坦な長いパルス(～100 μs)をクライストロンに印加する。アンジュレータはテーパ付きで、変換効率～2%、得られる光パワーは共振器内2000 MW、外部出力40MW(マイクロパルス)であり、ミラーの損傷(～1 GW/cm<sup>2</sup>以上)が深刻な問題である。常伝導ライナックFELではこの他ボーイングが120 MeV(進行波型)で可視光の発振に成功した。国内では阪大産研と東大原子炉施設で建設中である。

\* 超伝導ライナックFEL (スタンフォード大学)

スタンフォード大学高エネルギー物理研究所(HEPL)の超伝導ライナックFELはFig.

6の様に配置されている。ビームはリサーキュレーションされ、超伝導初段ライナック(5 MeV)を出て、超伝導加速管(4本1.3 GHz)を1回通った50 MeVのビーム及び2回通った110 MeVのビームが利用出来る。従って同じチーパード・アンジュレータで、0.3  $\mu\text{m}$ 及び1.5  $\mu\text{m}$ の光が発振する。超伝導ライナックでは、加速空洞壁での高周波損失は無視出来るぐ



第6図 スタンフォード大学、超伝導ライナックFEL  
超伝導加速管1~6を1回通過した50 MeVのビーム、及びリサーキュレートして2回通過した110 MeVのビームが得られる。それぞれ1.5  $\mu\text{m}$ 、0.3  $\mu\text{m}$ の発振を行う。

らい小さく、長いパルス幅(CWも可)のビームが安定して得られる。アンジュレータで光を出し終わった電子ビームの運動エネルギーを高周波電力として回収する実験が成功し、きわめて能率の良いシステムの実現が見込まれる。(加速管に逆位相でリサーキュレーションする。)

\* 大電流FEL

低電圧大電流( $\sim\text{kA}$ )ビームのFELであり、発振波長はミリ波、遠赤外になる。しかし大電力が得られる。リバモアでは誘導型ライナックの $\sim 3000\text{ A}$ ビームを用いて、トカマクプラズマ加熱用のミリ波( $\sim\text{GW}$ )を発生させている。国内では阪大レーザー研、理研、金沢大など研究している。

\* 蓄積リングFEL

蓄積リング(放射光発生用等)の一部にアンジュレータを挿入しFEL発振を起させる。電子ビームの質は極めて良好であり増幅率は高い。しかしFEL発振が立上って来ると、ビームの質を悪化させる。オルセー、フラスカッチ、BNL、SSRL(スタンフォード大学)、国内では電総研、分子研などが研究している。

\* バンデグラフFEL(サンタバーバラ)

カルフォルニア大学サンタバーバラ分校では6 MeVのバンデグラフ加速器の連続ビーム

(2 A)により遠赤外( $\sim 400 \mu\text{m}$ )を連続発振させている。アンジュレータを出た電子ビームをバンデグラフの高圧部に戻して99%程度のビームの回収を行っている。単色波発振に成功した唯一のFELである。

#### 4. おわりに

62年度から原研でもFEL開発研究を進めることになり、超電導ライナックによるFELを目標にしている。折しもアメリカ南部大学連合(SURA)がCEBAF(超電導電子ライナック、1.5 GeV、4 GeV)の建設に入り、世の中超電導づいている。電子ライナックを用いて中性子断面積測定を続けていた私だが、本誌読者に核データ以外の周辺情報を提供する意味で、未熟ではあるが解説をお引受けした。

#### References

- (1) G. Dattoli and A. Renieri ; Experimental and Theoretical Aspects of the Free Electron Laser ; Laser Hand Book Elsevier (1985)
- (2) 近藤 淳 ; 「ウィグラー及び自由電子レーザー」電総研調査報告第200号(1979) ; 「自由電子レーザー」応用物理 48 795 (1980)
- (3) 塚田甲子男 ; 「自由電子レーザーの発生」放射線, 11 , No.3 (1985)
- (4) 三間囃興 ; 「自由電子レーザー」, レーザー研究 15, 375 (1987)
- (5) 河村良行 ; 「自由電子レーザーにおける最近の進歩」, レーザー研究 13, 939 (1985)
- (6) Proceeding of the 7th Int. Conf. Free Electron Laser ; Nucl. Instr. Meth. A250 (1986 # Sept.)
- (7) Proceeding of the 8th Int. FEL Conf. ; Nucl. Instr. Meth. A259 (1987 # Sept.)
- (8) Special Issue on Free Electron Lasers ; IEEE trans. QE-23 No.9. (1987)