

解説

自由電子レーザー

河村 良行

理化学研究所 〒351-01 和光市広沢 2-1

(1986年10月13日受理)

Free Electron Laser

Yoshiyuki KAWAMURA

The Institute of Physical and Chemical Research,
2-1, Hirosawa, Wako 351-01

1. ま え が き

コヒーレントな電磁波(光を含む)を発生するための研究は19世紀末のラジオ波の研究に始まり,その後マイクロ波の研究へと短波長化の道をたどっていったが,1960年レーザーの出現で一挙に可視光の領域へ突入した.このような大幅な発振波長の短縮化が実現した反面,レーザー発振は原子・分子等の励起エネルギー準位間の遷移に基づいているために,発振波長は基本的に固定(色素レーザー等,狭い波長領域でなら可変波長のレーザーも存在する)であり,これがレーザーの一つの弱点であるといえる(ただしレーザー光を波長標準に用いたりする場合等,利点となる場合もある).

自由電子レーザー(以下 free electron laser を省略して FEL と書く)はこれまでのレーザーとは異なり原子・分子等の励起エネルギー準位間の遷移を利用せず,光速度に近い速度の電子が周期磁界(ウィグラー)中を通過することにより,直接電磁波の自然放出,誘導放出等を行ない,その波長はウィグラーの周期長や電子ビームの速度を変えることにより任意に設定することができる.このように FEL の最大の特長はその可変波長性である.

1977年に米国スタンフォード大学の FEL 研究グループが,電子ライナックを電子ビーム源として $3.4 \mu\text{m}$ の波長で FEL 発振に成功して, FEL に対する関心が急速に高まった^{1,2)}. 1983年にはフランスのパリ大学の FEL 研究グループが電子蓄積リングを電子ビーム源として可視域($6,500 \text{ \AA}$)の FEL の発振に成功し³⁾, 1984

年にはカリフォルニア大学サンタバーバラ校(UCSB)の FEL 研究グループが,バンデグラフを電子ビーム源として遠赤外($400 \mu\text{m}$)の FEL 発振に成功している^{4,5)}.

これらとは別の流れとして,パルスパワー技術によって得られる大電流の高エネルギーパルス電子ビーム源を電子ビーム源としてミリ波からサブミリ波領域で大出力 FEL の発振を得るための研究が,米国の Naval Research Laboratory, コロンビア大学, MIT, ヒューズ研究所等の FEL 研究グループで1970年頃から行なわれて来ており発振を実現している⁶⁻⁹⁾.

前者のように,原子核物理学研究用に開発されてきたライナック,蓄積リング,バンデグラフ等の高エネルギー微小電流電子ビーム源を用いた方式はコンプトン型 FEL,後者のようにレーザーガス励起,プラズマ加熱等のために開発された低エネルギー(前者と比較して相対的に)大電流電子ビーム源を用いた方式はラマン型 FEL と呼ばれて区別されている.

わが国においても,金沢大学¹⁰⁾,大阪大学レーザー核融合研究センター^{11,12)},理化学研究所^{4,12)},宇宙航空研究所等でラマン型 FEL の研究が進められており,電子技術総合研究所,分子科学研究所,日本大学原子力研究所¹³⁾,大阪大学産業科学研究所等ではコンプトン型 FEL の研究が進められている.

本稿では1章に続いて2章では FEL の原理の解説を行ない,3章では現在までの FEL の発振の代表的な例について紹介し,4章では現状について述べる.

2. FEL の発生の機構

この章では FEL の動作原理の概略を述べる。本稿のほかにも FEL に関するいくつかの解説があるので、FEL 発振の機構のさらに詳しい解説は他に譲る¹³⁻²⁰⁾。

図1の(a)に示されているように電子が周波数 f_0 で上下に振動すると周波数 f_0 の電磁波が主として振動方向と垂直な方向に放射される。これはマイクロ波管等の電子管の電磁波放出の基本原理解である。次に、図1の(b)に示されるように、速度 v の電子がピッチ λ_0 の周期磁界(ウィグラー)中を運動しながら運動方向と垂直に振動している場合を考える。電子のエネルギーを γ で表わし、実験室系で観測する周波数を f とする。 γ は相対論的係数として定義されるものであり電子のエネルギーを E (MeV) とすると

$$\gamma = E/0.511 + 1 \tag{1}$$

と表わされる(ただし光速を c , 電子の質量を m とすると $mc^2 = 0.511$ MeV となる)。電子の速度を v , 光速を c とすると

$$\beta = v/c = \sqrt{1 - \gamma^{-2}} \tag{2}$$

となる。

f は光のドップラー効果により

$$f = f_0(1 - \beta) \tag{3}$$

となる。ただし $f_0 = v/\lambda_0$ である。

(2), (3)式より $\gamma \gg 1$ のとき、すなわち電子のエネルギーが大きく速度が光の速度に近いとき

$$f \approx 2\gamma^2 f_0 \tag{4}$$

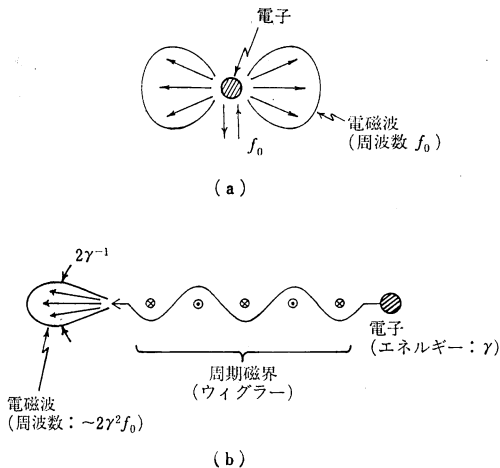


図1 (a) 静止している電子からの電磁波放出
(b) 相対論的エネルギーをもつ(光速に近い速度で運動する)電子が周期磁界中を運動するときの電磁波放出

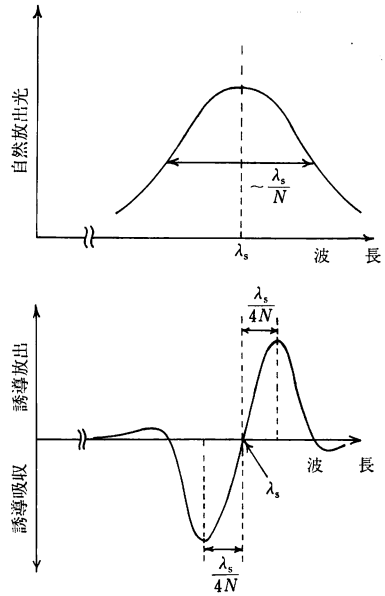


図2 自由電子レーザーにおける自然放出光と誘導放出光のスペクトル

となる²¹⁾。

たとえば $\lambda_0 \approx 10$ cm, $E = 100$ MeV ($\gamma \approx 197$) とすると, $\lambda \approx 1.29 \mu\text{m}$ となる。

以上, FEL で波長の短い自然放出光が得られる理由を説明した。レーザーとして発振を行なわせるためにはこのほかに誘導放出の機構を有する必要がある。すなわち、電子から電磁波にエネルギーを移す機構が必要である²²⁾。誘導放出の機構については紙面の都合上ここでは省略し、次に結果のみを示す。

図1の(b)に示されるようにエネルギー γ , 速度 v の電子が周期長 λ_0 , 周期数 N のウィグラー中を通過するとき、自然放出光、誘導吸収および誘導放出のスペクトルは図2のようになる。図中の自然放出光のスペクトル中心 λ_s は(3), (4)式より求まるものであり、そのスペクトル幅は λ_s/N となる。 $\lambda_s(1 + 1/4N)$ と $\lambda_s(1 - 1/4N)$ の波長でそれぞれ誘導放出および誘導吸収のスペクトルのピークがあることが理論的および実験的に明らかにされている。自然放出光のスペクトル幅は誘導放出光のそれと比較して十分広くこれを含んでいるので、十分の利得があり、共振器の Q 値が十分高ければ、誘導放出のスペクトルピークでレーザー発振が起こる。発振波長は γ を変えることにより任意に設定できる。

電子ビームの電流を I (A), ビームの半径を r とすると、一光路当りの小信号利得 g は電子ビームのエネル

ギ-広がりが $\Delta\gamma/\gamma < 1/8N$ のとき近似的に

$$g \approx 1.7 \times 10^{-3} \times (I/\pi r^2) \times N^3 \{K^2/(1+K^2)^{3/2}\} \lambda_0^{1/2} \times \lambda_s^{3/2} \quad (5)$$

となる (ただし r, λ_0, λ_s は同一単位である)^{13,15)}. K はウィグラーの特性を示す無次元量のパラメータであり, ウィグラーの磁場強度を B_0 (kG), 周期長を λ_0 とすると

$$K \approx 0.0934 \times B_0 \times \lambda_0 \quad (6)$$

となる^{14,15)}.

(5)式より明らかなように, 小信号利得 g は波長 λ_s の $3/2$ に比例するため, 短波長になるほど g が小さくなり, 発振が困難になる. λ_s は一定として g を大きくするためには I または N を大きくする必要がある. とくに g は N の 3 乗に比例しているので N を大きくすることは g を増やすのにとくに有効である. ただし (5)式が成り立つためには $\Delta\gamma/\gamma < 1/8N$ の必要があるので, g を増やすために N を増やすと $\Delta\gamma/\gamma$ の小さい, すなわち質の良い電子ビーム源が必要となる.

3. 代表的な FEL の発振例

3.1 スタンフォード大学における初の FEL 発振

1976 年にスタンフォード大学では, 電子ライナックからの質の良い電子ビームをウィグラーの中を通すことによって $10.6 \mu\text{m}$ において誘導放出の観測に成功した¹⁾. これに続いて 1977 年に $3.4 \mu\text{m}$ 帯での発振に成功している²⁾. これらの成功がその後の FEL 研究の活性化を促した.

図 3 および図 4 に誘導放射測定のための実験装置の概略と, 実験結果を示す. 電子ビームのエネルギーおよび電流はそれぞれ 24 MeV および 70 mA (ピーク値) であり, 測定された利得は一光路当り 7% であった. 図 4 からわかるように, 電子ビームのエネルギーの変化に対して誘導放出および吸収が観測され, 理論的に予想される結果 (図 2 参照) と一致した.

図 5 と図 6 に, $3.4 \mu\text{m}$ における発振実験に用いられた実験結果を示す. 表 1 と表 2 にこのとき用いられた電

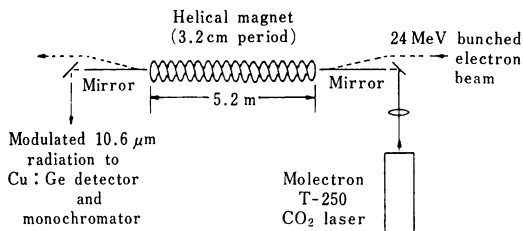


図 3 自由電子レーザーの利得測定実験配置図¹⁾

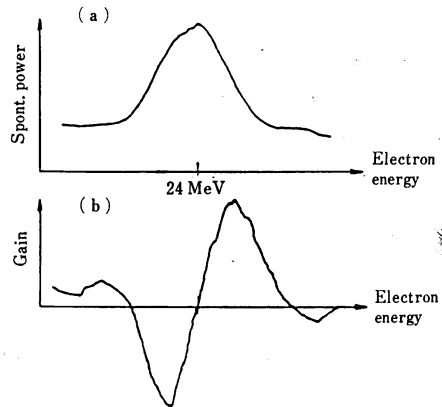


図 4 図 3 の装置による自由電子レーザーの自然放出光および誘導放出光スペクトルの実測例¹⁾ (a) 電子ビームのエネルギーに対する $10.6 \mu\text{m}$ の自然放出光スペクトル, (b) 電子ビームのエネルギーに対する $10.6 \mu\text{m}$ の誘導放出および誘導吸収スペクトル¹⁾

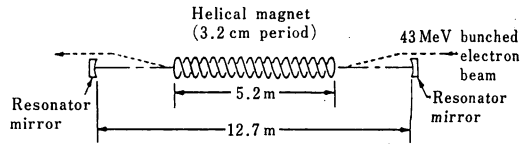


図 5 $3.4 \mu\text{m}$ における自由電子レーザー発振実験装置図²⁾

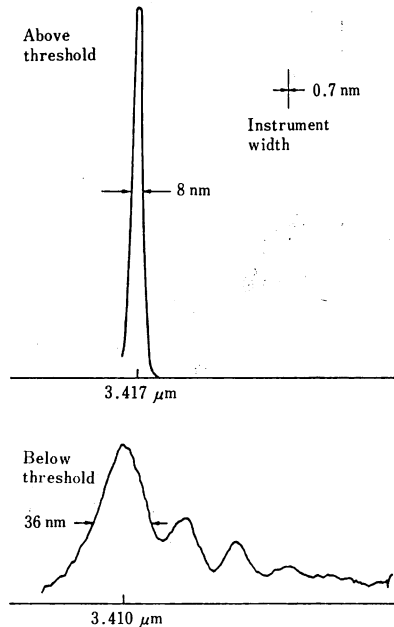


図 6 図 5 の装置による自由電子レーザー発振実験結果 (上) 発振閾値を越えた場合の出力波形, (下) 発振閾値を越えない場合の出力波形

子ビーム、ウィグラーの仕様と、FEL 発振光の特性を示す。発振の閾値を越えるとスペクトル幅が約 1/4 になり出力のピークは約 7×10^7 倍になっており、FEL の発振が起きていることが明らかである。

3.2 その他の FEL の発振例

1983年パリ大学の FEL 研究グループは電子蓄積リングを電子ビーム源として初めて可視域 FEL の発振に成功している³⁾。この実験ではウィグラーの一部の磁場配列を修正して光学的クライストロン (transverse optical klystron を略して TOK と記す)^{23,24)} を構成することによって小信号利得を 2~7 倍にした。これに

表 1 3.4 μm における自由電子レーザー発振実験の実験パラメータ²⁾

| 実験装置 | 実験パラメータ | |
|-------|-----------------|-----------------------------|
| 電子ビーム | エネルギー | 43.5 MeV |
| | エネルギー拡がり (半値全幅) | 0.05% |
| | 平均電流 | 130 μA |
| | ピーク電流 | 2.6 A |
| | エミッタンス | 0.06 mm \cdot mrad |
| ウィグラー | 形式 | ヘリカル形 |
| | ピッチ | 3.2 cm |
| | ピッチ数 | 163 |
| | 全長 | 5.2 m |
| | 磁場強度 | 2.4 kG ($K \approx 0.72$) |
| 光共振器 | 共振器長 | 12.7 m |
| | 出力鏡透過率 | 1.5% |

よって一光路利得が約 0.1% となり、発振の閾値を超えることができた。表 3 および表 4 に実験装置のパラメータおよび実験結果を示す。

その後、種々の改良が加えられ、1986年現在では一光路利得が約 0.4%、平均出力が約 60 mW、可変波長域が 6500~4700 \AA となっている。

米国の UCSB の FEL 研究グループは、1984年、バンドグラフを電子ビーム源として遠赤外域で準定常 (長パルス) 発振に成功している^{4,5)}。彼らはウィグラー中における電流値を上げ、かつエネルギー利用率を上げる目的でバンドグラフで発生した電子ビームをウィグラーを通過した後再びバンドグラフの高圧ターミナルに回収することを試み、95%のエネルギー回収率を得ている。ウィグラーと相互作用させない場合の回収率は 99.5%に達した。表 5 および表 6 に実験のパラメータおよび実験結果を示す。1986年現在では加速電圧が 6 MeV まで上げられ、発振波長域は 110~400 μm 、発振スペクトル幅は少なくとも 5 μs にわたって、発振波長の約

表 2 3.4 μm における自由電子レーザー発振出力の光学的特性²⁾

| 出力光特性 | 発振閾値を越えたとき | 発振閾値を越えていないとき |
|--------------------------|-----------------|---------------|
| 発振波長 (μm) | 3.417 | 3.407 |
| スペクトル幅 (μm) | 0.008 | 0.031 |
| 平均出力 (W) | 0.36 | 10^{-8} |
| ピーク出力 (W) | 7×10^8 | 10^{-4} |
| 偏光 | 円偏光 | 円偏光 |

表 3 可視域自由電子レーザー発振実験の実験パラメータ³⁾

| 実験装置 | 実験パラメータ | |
|-------------|-----------------------------|---------------------------------|
| 電子ビーム | エネルギー | 160~166 MeV |
| | 発振時の電流 | 16~100 mA |
| | エネルギー拡がり (rms) | $(0.9 \sim 1.3) \times 10^{-3}$ |
| | 角度拡がり (rms) | 0.1~0.2 mrad |
| | 寿命 | 60~90 分 |
| ウィグラー (TOK) | 形式 | 垂直形 |
| | ウィグラー (TOK) 長さ | 1.3 m |
| | ウィグラー (TOK) ピッチ数 | 17 (内中央の 3 ピッチはドリフト部) |
| | 利得増倍率 | 2~7 倍 (TOK 方式に改造しないとときと比べて) |
| 共振器 | 共振器長 | 5.5 m |
| | 反射鏡の曲率半径 | 3 m |
| | 最大の Q 値を与える波長 | 6200~6800 \AA |
| | 6328 \AA における平均反射率 | 99.965% |
| | 共振器光路往復損失 | 7×10^{-4} |
| 出力鏡透過率 | 7×10^{-5} | |

表 4 可視域の自由電子レーザー発振出力の光学的特性³⁾

| | |
|-------------------|--------------------------|
| 発振波長 | 6400~6550 Å で可変 |
| スペクトル幅 | 2~4 Å |
| 平均出力 | 約 75 μW |
| 小信号利得 (TOK 方式のとき) | 約 1×10^{-3} /パス |
| “ | 約 2×10^{-4} /パス |
| (TOK 方式を用いないとき) | |
| 偏光方向 | 直線偏光 |

表 5 遠赤外域自由電子レーザー発振実験の実験パラメータ^{4,5)}

| 実験装置 | 実験パラメータ | |
|-------|-----------------------|----------------------|
| 電子ビーム | エネルギー | 3 MeV |
| | 電流 | 2A |
| | パルス幅 | 1~50 μs |
| | くり返し速度 | 1 Hz |
| | 電子ビーム回収率 (ウィグラーあり) | 95% |
| | 電子ビーム回収率 (ウィグラーなし) | 99.5% |
| | 加速電圧降下率 | 600 V/μs |
| ウィグラー | 形式 | 垂直形 |
| | 全長 | 5.76 m |
| | ピッチ | 3.6 cm |
| | ピッチ数 | 160 |
| 光共振器 | 共振器長 | 7.14 m |
| | 反射鏡曲率 | 5 m (円筒ミラー使用) |
| | 出力鏡透過率 | 11% (カップリングホール使用) |
| | 共振器損失 | 12% |

10^{-8} のシングル縦モード発振である⁵⁾。ただし全発振時間にわたるスペクトル拡がりや、各ショット間におけるそれを含む全スペクトル拡がりは約 10^{-3} とかなり広い。

4. 最近の進歩

FEL の分野でも他のレーザー研究と同様に発振波長の短波長化が大きな課題である。前述のように FEL では発振波長を短くすると利得が下がること、また短波長域では高反射率の反射鏡がないことが短波長化を妨げている大きな要因である。短波長化の方法としては、1) ウィグラー中に H₂ 等のガスを封入して光の位相速度を下げるにより短波長発振を得るガス封入形 FEL (GFEL)、2) ウィグラーのピッチ数を上げ、かつ電流値を上げることによって XUV 域で高利得を得る方式、

表 6 遠赤外域自由電子レーザー発振出力の光学的特性^{4,5)}

| | |
|--------|-------------------|
| 発振波長 | 400 μm |
| スペクトル幅 | ≤ 0.02 μm (瞬時値) |
| 出力パワー | 3 kW (1 パルス当りの平均) |
| パルス幅 | 1~50 μs |
| 小信号利得 | 35%/パス |

3) FEL 出力電磁波をウィグラーとして用い、さらに短い波長の発振を得る二段階 FEL、4) ウィグラー自身を小型化してピッチ長を短くする方式、等種々の方式が提案または研究されているが、詳細は他の解説に譲る¹⁹⁾。

FEL の応用に関する研究も UCSB で開始されており¹²⁾、現在 FEL 装置本体が有る棟に隣接して応用実験棟を建設中である。応用分野としては、磁性、半導体物性、生体関連等を考えている。現在、米国を中心として世界中で 20 あまりのグループで FEL に関する研究が行われており、日本でもこの分野の研究は徐々に活発になりつつあり、8 グループで FEL 研究が行なわれている。

文 献

- 1) L. R. Elias, *et al.*: Phys. Rev. Lett., **36** (1976) 717.
- 2) D. A. Deacon, *et al.*: Phys. Rev. Lett., **38** (1977) 892.
- 3) M. Billardon, *et al.*: Phys. Rev. Lett., **51** (1983) 1652.
- 4) *Proceedings of the 7th International Free Electron Laser Conference*, Tahoe City, CA, USA, Sept. 8-13 (1985).
- 5) L. R. Elias, *et al.*: Phys. Rev. Lett., **57** (1986) 424.
- 6) G. Bekefi, *et al.*: Appl. Phys. Lett., **44** (1984) 280.
- 7) J. Fajans, *et al.*: Phys. Rev. Lett., **53** (1984) 246.
- 8) J. Masuda, *et al.*: Phys. Rev. Lett., **56** (1986) 1567.
- 9) J. Mathew, *et al.*: Phys. Rev. Lett., **56** (1986) 1805.
- 10) たとえば、川崎 温, ほか: “自由電子レーザー(FEL)の実験的研究”, 昭和 57 年度科学研究費成果報告書(1982).
- 11) たとえば、大東延久, ほか: レーザー研究, **13** (1985) 432.
- 12) *Proceedings of the 8th International Free Electron Laser Conference*, Glasgow, U. K., Sept. 1-5, 1986. (to be published)
- 13) 塚田甲子男: 放射線, **11** (1985) 3.
- 14) 近藤 淳: 電子技術総合研究所調査報告第 200 号(1979).
- 15) 近藤 淳: 応用物理, **49** (1980) 795.
- 16) 三間園興: 日本物理学会誌, **37** (1982) 906.
- 17) 三間園興: レーザー研究, **5** (1977) 135.
- 18) 川崎 温: 核融合研究, **54** (1985) 306.
- 19) 河村良行: レーザー研究, **13** (1985) 939.
- 20) G. Saxon: Rev. Laser Eng., **13** (1985) 398.
- 21) H. Motz: J. Appl. Phys., **22** (1951) 527.
- 22) J. M. Madey: J. Appl. Phys., **42** (1971) 1906.
- 23) N. A. Vinokurov: *Proceeding of the Tenth International Conference on High Energy Particle Accelerators*, Serpukhov, Vol. 27 (1977) p. 454.
- 24) D. A. Deacon, *et al.*: Appl. Phys., **B34** (1984) 207.