

京大赤外 FEL のシミュレーション

留高 烈^A、山根 功士朗、紀井 俊輝、増田 開、吉川 潔、大垣 英明、山崎 鉄夫
 京都大学エネルギー理工学研究所
 〒611-0011 京都府宇治市五ヶ庄

概要

京都大学エネルギー理工学研究所の自由電子レーザー装置においては、アンジュレータと光共振器の新設を予定しており、光共振器の設計と入射する電子ビームの質について目標値を定めるために、1次元モデルと、軸対称3次元モデルについて計算を開始している。本報告では現在までに得られた結果について述べる。

1. はじめに

京都大学エネルギー理工学研究所の自由電子レーザー (Free Electron Laser, FEL) 装置は今年度中に電子加速器が完成する見込みであり、その後、下流にアンジュレータと光共振器を設置し、FELの発振をめざす予定である。図1に建設中のFEL装置の外観図を示す。加速器は4.5空洞の熱陰極型高周波電子銃と長さ3mのS-band加速管からなり、およそ35MeVまで電子を加速することが可能になる。

FELとしては、最終的に偏光可変赤外FELを目標にしているが、現段階では旧自由電子レーザー研究所 (FELI, 現大阪大学工学研究科自由電子レーザー研究施設 iFEL) と東大原子力施設のリニアックにおける発振実験の折に使用したアンジュレータ^[1]を使用する。なお、FEL光波長の微調整のために、アンジュレータのギャップを固定型から可変型に改造を行った。光共振器の設計に先立ち、現段階で得られると予想される電子ビームとアンジュレータのパラメータを用いて、計算を行い、発振可能な波長帯やゲイン等を評価した。

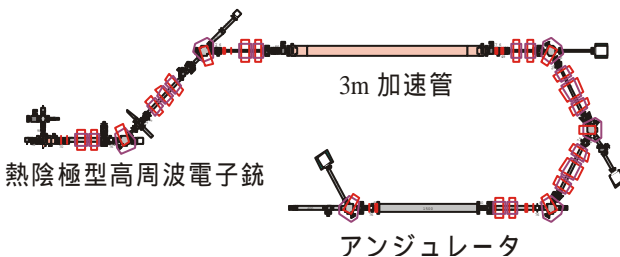


図1. FEL装置の概観

2. 1次元モデルによるゲインの計算

2.1 1次元 FEL 方程式

アンジュレータ中を蛇行する電子ビームとそこで発生するFELとの相互作用は、Maxwell方程式より近似的に以下のように導かれる^[2]。

$$\begin{cases} \frac{\partial a}{\partial t} = -j \langle \exp[-inz] \rangle_{n_0} \\ n \frac{\partial^2 z}{\partial t^2} = -|a| \cos(nz + f) \end{cases} \quad (1)$$

ここで、

$$\begin{aligned} t &\equiv \frac{tc}{L} \\ a &\equiv \frac{2pNenK_n(x)LE}{g_0^2 mc^2} \exp[-if] \\ j &\equiv \frac{pNe^2 nK_n^2(x)L^2 r_0}{e_0 g_0^3 mc^2} \\ n &\equiv L[(k+k_0)\bar{b}_z(t) - k] \\ z &\equiv (k+k_0)\bar{z}(t) - \frac{4p}{ck}t \\ K_n &\equiv K(-1)^{n/2} [J_{(n+1)/2}(nx) - J_{(n-1)/2}(nx)] \\ x &\equiv \frac{K^2}{4(1+K^2/2)} \end{aligned}$$

である。上の式で用いた記号の意味は以下の通りである。

c	光速	m	電子の静止質量
e_0	真空の誘電率	e	電子の電荷量
t	時間	z	位置
k	FELの波数	k_0	アンジュレータの波数
E	FELの電場	b	電子ビーム速度
L	アンジュレータ長		
N	アンジュレータ周期数		
n	FELの次数 ($n=1$ のとき基本波)		
g_0	電子ビームの入射エネルギー		
f	FELの位相		
K	アンジュレータパラメータ		
r_0	電子ビームの電子密度		

^A i-tometaka@iae.kyoto-u.ac.jp

ゲイン G_n は FEL の初期振幅と終端振幅の比、 a_f/a_0 を用いて以下のように定義する。

$$G_n \equiv \frac{a_f}{a_0} - 1 \quad (2)$$

式(1)は解析的には解を得ることができないが、小信号・小ゲインの仮定の下に近似を行うと、 a による展開で解析的に解くことが可能である。そのときのゲインは以下で表される^[3]。

$$G_n = -\frac{j}{2} \frac{\partial}{\partial n_0} \left[\frac{\sin^2(n\mathbf{n}_0/2)}{(n\mathbf{n}_0/2)^2} \right] \quad (3)$$

ただし、 \mathbf{n}_0 は無次元速度 \mathbf{n} の初期値である。

一方、発振波長 λ_n はアンジュレータの周期長 I_u 、K 値及び電子ビームのエネルギー を用いて近似的に以下で与えられる。 n は高調波の次数である。

$$\lambda_n \approx \frac{I_u}{2ng} (1 + K^2) \quad (4)$$

この式を用いて当所のアンジュレータで発振可能な基本波長を計算した結果、図2に示すように $3.31 \mu\text{m}$ から $19.0 \mu\text{m}$ までの発振が可能であることが分かった。

2.2 1次元モデルによる計算結果

式(1)、(3)を用いて発振波長に対するゲインを計算した結果を示す。式(1)については数値解を求めた。アンジュレータのパラメータについては導入を予定しているアンジュレータのパラメータを用いた(表1)。以下では、 $K=0.95$ で計算を行った。図3は、ビームエネルギー 25MeV 、ビーム半径 1mm 、ピーク電流 2A における計算結果であり、図4は、ビームエネルギー 25MeV 、ビーム半径 1mm 、ピーク電流 20A

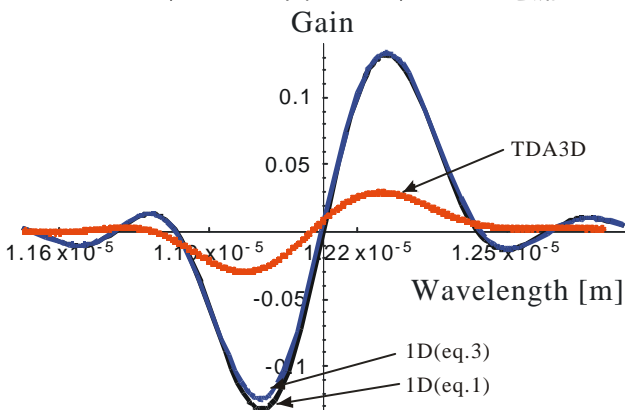


図3. 25MeV、2A のときのゲインスペクトル

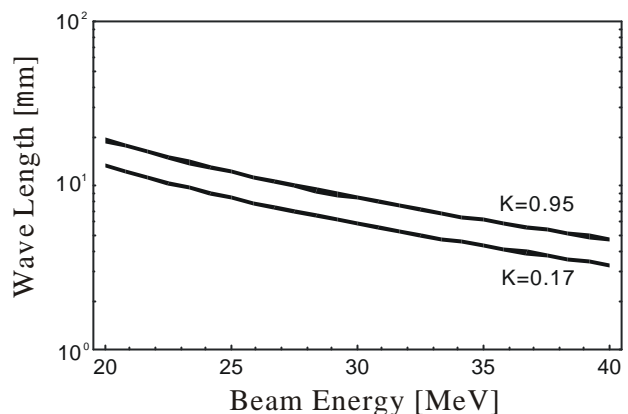


図2. 電子ビームのエネルギーと発振波長

における計算結果である。

小信号・小ゲイン領域とみなせる図3では2つの結果はよく一致していることが分かる。最大ゲイン約13%であり、そのときのFELの波長は約 $12.26 \mu\text{m}$ であった。

大ゲイン領域とみなせる図4では共振波長が短波長側に、最大ゲインが長波長側にずれ、式(3)の近似の精度が悪くなっていることが分かる。式(1)を用いたときの最大ゲインは約140%であり、そのときのFEL波長は $12.26 \mu\text{m}$ であった。なお、式から分かるように、この計算には filling factor は入っていない。電子ビームの形状やエネルギー分散、光の形状等を考慮に入れたFELゲインの見積もりには1次元モデル計算では限界があるので、3次元計算を次章で行う。

表1. アンジュレータの主なパラメータ

型	Halbach
全長	1.6 [m]
周期数	40
周期長	4 [cm]
ギャップ	26-45 [cm]
ピーク磁場	0.25-0.045 [T]
K 値	0.95-0.17

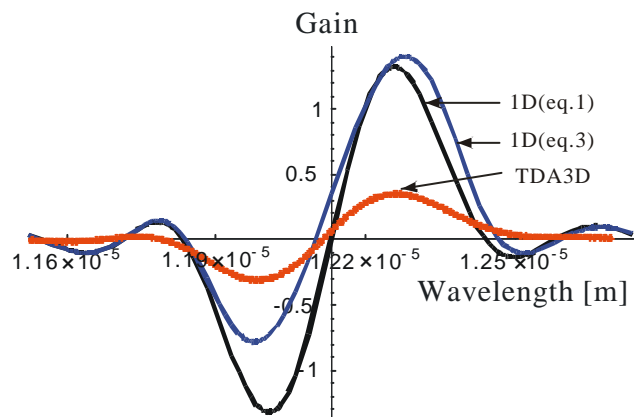


図4. 25MeV、20A のときのゲインスペクトル

3. TDA3D によるゲインの計算

3.1 TDA3D

TDA3D^[4]は T.M.Tran J.S.Wurtele らによって開発された、軸対称 3次元モデルのシミュレーションコードである。エミッタンス、ビーム径、ベータatron振動など、1次元モデルには現れない空間的広がりを考慮に入れてシミュレーションを行うことが出来る。このため、光共振器を考慮に入れたゲイン計算が可能であり、共振器設計の指針を与える事を目的に計算を行った。

3.2 1次元モデルとの比較

エミッタンス・電子ビームのエネルギー幅は 0 と仮定し、1次元モデルに近い条件で TDA3D を用いてシミュレーションを行った。レイリー長はアンジュレータ長の半分である 0.8m を用いた。図3は、ビームエネルギー 25MeV、ピーク電流 2A、ビーム半径 1mm とした場合であり、最大ゲインは約 2.9% となり、そのときの FEL の波長は約 12.25 μm であった。図4は、ビームエネルギー 25MeV、ピーク電流 20A、ビーム半径 1mm とした場合であり、最大ゲインは約 35.0% となり、FEL の波長は約 12.26 μm であった。

この結果を 1次元モデルと比較すると、共振波長及び、最大ゲインをとる波長はほぼ一致したが、ゲインについてはどちらも TDA3D による値の方が小さくなった。要因としては Filling factor が考えられ、その定量的な評価は現在検討中である。

3.3 電流量とエネルギー幅がゲインに与える影響

当所で使用している熱陰極型高周波電子銃の主なパラメータを () に示す。銃から得られる電子ビームはエネルギー幅が 7.6% と大きいので、そのままでは FEL の発振に向かないため、スリットを通し、エネルギー幅を狭めて利用する。その際、同時にビームの電流量も減少するため、ゲインの低下を招くことが予想される。そこで、エネルギー幅が RMS で 1%、0.5%、0.1% の 3通りの場合についてピーク電流を 5A から 35A まで変化させたときのゲインを計算した。ビームエネルギーは 25MeV、エミッタンスは 3.55 mm mrad とした。

図5はそれぞれの条件において最大ゲインをプロットしたものである。共振器を用いた発振においては、出力カップリングを考え、10%程度のゲインを目標値として設定する。この計算結果に従うと、エネルギー幅が 1%、0.5%、0.1% のとき、それぞれ 30A、12A、6A のピーク電流が必要であることが分かる。

電子ビームのパラメータは最適化された値にはなっていないため、今後、ゲインの向上を目指してレイリー長、電子ビームの最適化を行っていく予定である。最適化によりゲインの向上は望めるものの、現状の装置ではこの値を達成することに困難が予想され、パンチコンプレッサーなどを用いてピーク電

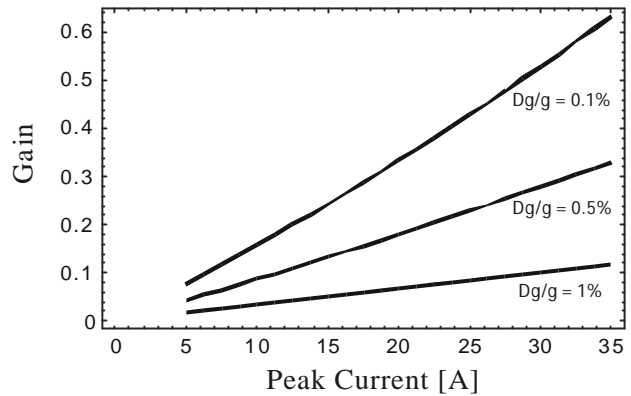


図 5. ピーク電流とゲインの関係

表 2. 熱陰極型高周波電子銃のパラメータ

エネルギー	5.8MeV @8MW
ピーク電流	34A
エミッタンス	3.55 mm-mrad
エネルギー幅	7.6%FWHM @4.8MW

流量を向上させるなどの方法が必要になると考えられる。

4. まとめ

当所のアンジュレータで発振可能な基本波長を計算した結果、3.31 μm から 19.0 μm までの発振が可能であることが分かった。

Filling Factor を考慮しない 1次元モデルと TDA3D の計算結果を比較したところ、共振波長や最大ゲインとなる波長は一致するが、ゲインは TDA3D の結果の方が大きく下回ることが分かった。このことについては、Filling Factor 等を含め、今後検討を行う予定である。

当所の装置で得られると予想されるビームパラメータとアンジュレータパラメータを用いて TDA3D でゲインの計算を行ったところ、発振に必要とされる 10%のゲインを得るには、エネルギー幅が 1%、0.5%、0.1% のとき、それぞれ 30A、12A、6A のピーク電流が必要であることが分かった。

今後は加速管からのビームパラメータについてのシミュレーション、アンジュレータギャップを変えたときのゲインと波長についてのシミュレーションを行い、アンジュレータ直前の電子ビーム輸送系と光共振器を設計する予定である。

参考文献

- [1] E. Nishimura, K. Saeki, S. Abe, A. Kobayashi, Y. Morii, T. Keishi, T. Tomimasu, R. Hajima, T. Hara, H. Ohashi, M. Akiyama, S. Kondo, Y. Yoshida, T. Ueda, T. Kobayashi, M. Uesaka, and K. Miya: Nucl. Instr. & Meth, **A341** (1994), 39.
- [2] W. B. Colson, IEEE J. Quantum Electronics, **17** (1981), pp.1417-1427.
- [3] W.B.Colson, Phys.Lett., **64A**(1977), pp.190-192.
- [4] T.M.Tran and J.S.Wurtele, Computer Physics Comm., **54** (1989), 263