

JAERI-M  
89-061

1次元単一モード非線形自由電子  
レーザー（F E L）増幅コード  
—使用マニュアル—

1989年5月

岸本 泰明・小田 久子\*

日本原子力研究所  
Japan Atomic Energy Research Institute

JAERI-M レポートは、日本原子力研究所が不定期に公刊している研究報告書です。  
入手の問合せは、日本原子力研究所技術情報部情報資料課（〒319-11茨城県那珂郡東海村）  
あて、お申しこしください。なお、このほかに財団法人原子力広済会資料センター（〒319-11茨城  
県那珂郡東海村日本原子力研究所内）で複写による実費領布をおこなっております。

JAERI-M reports are issued irregularly.  
Inquiries about availability of the reports should be addressed to Information Division, Department  
of Technical Information, Japan Atomic Energy Research Institute, Tokai-mura, Naka-gun,  
Ibaraki-ken 319-11, Japan.

© Japan Atomic Energy Research Institute, 1989

---

編集兼発行 日本原子力研究所  
印 刷 日立高速印刷株式会社

1 次元單一モード非線形自由電子レーザー ( F E L ) 増幅コード  
— 使用マニュアル —

日本原子力研究所那珂研究所核融合研究部  
岸本 泰明・小田 久子\*

( 1 9 8 9 年 4 月 2 6 日受理 )

自由電子レーザーの基本設計に有用である、実空間 1 次元・單一モードの非線形 F E L 増幅コードが作製された。ウィグラー磁場はヘリカル形状で与えられ、電子ビームの安定伝播のための縦磁場、ビームのエネルギー広がり、さらに、任意形状の tapered wiggler が考慮されている。また、粒子間の静電的な相互作用が取り入れられているため、コンプトン領域からビームの電流密度の大きなラマン領域の比較的広い動作領域に渡っての非線形過程まで含めた F E L の増幅特性が解析できる。ここで開発された F E L コードは、約 97% のベクトル化率を有しており、装置設計の最適化を図るためにパラメータスタディにも適している。

1-Dimensional Single-Mode Nonlinear FEL Amplification Code

- User's Manual -

Yasuaki KISHIMOTO and Hisako ODA\*

Department of Thermonuclear Fusion Research  
Naka Fusion Research Establishment  
Japan Atomic Energy Research Institute  
Naka-machi, Naka-gun, Ibaraki-ken

(Received April 26, 1989)

The 1-dimensional single mode nonlinear FEL amplification code is developed which is useful for the basic design of Free Electron Laser. The wiggler field is given by the helical configuration, and the guide magnetic field for the stable beam propagation and the incident beam energy spread are taken into account. The tapered-wiggler with arbitrary configuration is also considered. The nonlinear FEL characteristics in the wide range from Compton to Raman regimes are analyzed since the electrostatic interaction between particles is included. The FEL code developed here is vectorized about 97%. Therefore, the large amount of parameter study for the optimization of machine design is possible.

Keywords: Free Electron Laser, Raman FEL, Compton FEL, Helical Wiggler, Induction Linac, Electron Beam, Nonliner Saturation

---

\* Kanazawa Computer Service Corp.

## 目 次

1.はじめに	1
2.基礎方程式	6
2.1 分散式	6
2.2 Maxwell方程式及び運動方程式	8
2.3 エネルギー変換効率	10
2.4 初期条件	11
3.プログラムの説明	13
3.1 FEL 1次元解析コード用入力パラメータ設定プログラム(FEL1DPRM)	13
3.2 FEL 1次元解析コード(FEL1DVP)	14
3.3 FEL 1次元解析コード作図プログラム(FEL1DGKP)	17
3.4 システムフロー	18
4.プログラム取扱い説明	19
4.1 FEL 1次元解析コード用入力パラメータ設定プログラム(FEL1DPRM)	19
4.2 FEL 1次元解析コード(FEL1DVP)	24
4.3 FEL 1次元解析コード作図プログラム(FEL1DGKP)	36
5.考察とまとめ	58
謝　　辞	59
参考文献	59

## Contents

1. Introduction .....	1
2. Basic equations .....	6
2.1 Dispersion relations .....	6
2.2 Maxwell equation and motion equation .....	8
2.3 Energy conversion efficiency .....	10
2.4 Initial conditions .....	11
3. Program explanation .....	13
3.1 Search program of input parameter for 1D FEL analysis code (FEL1DPRM) .....	13
3.2 1D FEL analysis code (FEL1DVP) .....	14
3.3 Graphic program for 1D FEL analysis code (FEL1DGRP) .....	17
3.4 System flow chart .....	18
4. Program user's manual .....	19
4.1 Search program of input parameter for 1D FEL analysis code (FEL1DPRM) .....	19
4.2 1D FEL analysis code (FEL1DVP) .....	24
4.3 Graphic program for 1D FEL analysis code (FEL1DGRP) .....	36
5. Discussion and summary .....	58
Acknowledgement .....	59
References .....	59

## 1. はじめに

自由電子レーザー (Free Electron Laser) は、原子・分子における励起レベルによる誘導放射を用いた通常のレーザーと異なり、高エネルギーの相対論的電子ビームが電磁場（多くの場合は静磁場），もしくは、媒質と相互作用してコヒーレントな電磁場を放射する系に対する総称である。自由電子レーザーの最大の特徴は、相対論的なドップラー効果を利用するにより、発振周波数のコヒーレンス性と波長可変性を同時に得たことであり、その大出力化の可能性とも相俟って、半導体を中心とした物性分野のみならず、大出力を必要とするウラン濃縮や核融合（磁場閉じ込め方式及び慣性閉じ込め方式），さらにプラズマ診断の分野から近年多大の期待が寄せられるようになっている。

通常 F E L は、高エネルギーの電子ビームを発生させる電子加速器、及び周期的に変化する静磁場を発生させるウイグラーと呼ばれる磁界発生装置から構成されている。現在使用されているウイグラー (wiggler) には 2 種類あり、図 1(a), (b) のようなものである。図 1 の(a) は直線的ウイグラー (linear wiggler, undulator とも呼ばれる) と呼ばれ、磁石の N 極と S 極を交互に配置したものである。また(b) は、ヘリカルウイグラー (helical wiggler) と呼ばれ、図のような 2 重らせん配位を持つ導線に互いに逆向きの電流を流してある。これによりらせんの軸付近では、軸に垂直で、方向が軸が進むに従って回転するような磁場ができている。

ウイグラーに入射された電子ビームは、周期的に変化する磁場により蛇行運動をする。ウイグラー中に電磁場が存在する時、その波長を  $\lambda$ 、ウイグラーの周期長を  $\lambda_w$ 、電子ビームの進行方向 ( $z$  軸方向) の相対論的因素を  $r_z = (1 - v_z^2/c^2)^{-1/2}$  ( $v_z$  は電子の進行方向の速度成分、 $c$  は光速) とすると近似的に  $\lambda = \lambda_w / 2r_z^2$  の関係が成り立つ。さらに電子の全相対論的エネルギー  $mc^2 r = mc^2(1-v_z^2/c^2)^{-1/2}$  に対して  $r_z = r / (1+K^2)^{1/2}$  ( $K \equiv eB_w/k_w mc^2$ ,  $B_w$  はウイグラーの磁場強度,  $k_w = 2\pi/\lambda_w$ ) であることを用いると上の関係式は

$$\lambda = \frac{\lambda_w}{2r_z^2} (1 + K^2) \quad \dots \dots \dots \quad (1)$$

となり、この関係が成り立つ時、電子ビームと電磁波とは共鳴的に相互作用して発振が起こる。<sup>1)</sup> (1) 式からわかるように、ウイグラーの周期と磁場強度が一定の場合、発振波長はビームエネルギーの 2 乗に反比例する。また、ウイグラー磁場強度  $K^2$  の増加により長波長側にシフトする。そのため F E L では、電子ビームのエネルギーを変える事により同一のウイグラーに対して発振波動を容易に変える事ができる（波長可変性）。又 F E L の場合、その增幅媒質は電子ビームそのものであり、通常のレーザーのように媒質の損傷等によるパワー密度の制限はなく大出力化に適した系であると言える。

自由電子レーザーの作動領域には、I. コンプトン散乱（高ビームエネルギー、低ビーム電流）と II. ラマン散乱（低ビームエネルギー、高ビーム電流）による 2 つのモードがあり、(1) 式の関係は F E L の動作特性が、主として粒子の個別運動で記述されるコンプトン領域で成り立つも

のである。核融合特に磁場閉じ込め方式のプラズマ加熱に用いるような平均出力パワー  $P_r \sim$  数 G W, 全出力エネルギー  $-W_r \sim$  数 M J の高出力を必要とするものには, 誘導加速器(induction linac)を高密度のビームソースとして用いたラマン領域での作動モードが一般的に有望であると考えられている。この場合には(1)式の関係式には, 電子ビームの密度  $\xi = \omega_b / r^{1/2} k_w c$  ( $\omega_b = (4\pi n_b e^2/m)^{1/2}$ ,  $k_w = 2\pi/\lambda_w$ ,  $n_b$ : ビーム密度)に対する補正項が加わり,  $k_+ \gg k_w \xi r_z$  ( $k_+ = 2\pi/\lambda$ : 放射電磁波の波数)の条件の下,  $\xi$  に関して 1 次の範囲内で,

$$\lambda \sim \frac{\lambda_w}{2r^2} (1 + K^2) (1 + \frac{\xi}{r_z \beta_z}) \quad \dots \dots \dots \quad (2)$$

となる ( $n_b$  の増加により長波長側にシフトする)。ここに  $\beta_z = v_z/c$  である。さらに大電流下では, ビームを安定に伝播させるためのガイド磁場が必要となることがあるが, そのようなときには(2)式はさらに補正を受けることになる。

FEL の設計においては種々の条件や多数のパラメータ設定が必要である。1次元モデルの範囲内では, 例えば,

ビーム系では,	ビームエネルギー	$E_b(r)$
	ビーム電流	$I_b$
	ビームエネルギー広がり	$Ar/r$
ウイグラー系では,	ウイグラー周期	$\lambda_w$ ( $k_w = 2\pi/\lambda_w$ )
	ウイグラー周期数	$N$ (全 wiggler 長 $L = N\lambda_w$ )
	ウイグラー磁場強度	$B_w$
	ウイグラー磁場断熱立上周期数	$N_w$ ( $L_w = N_w \lambda_w$ )
	ガイド磁場強度	$B_0$
電磁場系では,	発振周波数	$\omega$
	発振波数	$k_+$
	入射電磁波パワー	$P_{in}$

等が考えられる。これらのパラメータはビーム中での分散を互いに満足するようにコンシスティントに決められる必要があり, 放射電磁波の成長率や放射出力及びエネルギー変換効率が目的に沿うように最適化を図らなければならない。放射電磁場の線形成長の飽和レベルはエネルギー変換効率<sup>1)</sup>にして数%, ラマン過程動作領域で 10% 程度に抑えられることが一般的に知られているが,<sup>2)</sup> この値はウイグラーのピッチや磁場強度を空間的に変化させたティペード・ウイグラー(tapered wiggler)を用いることによって改善される<sup>3)</sup>。このような高い出力密度を得るために tapered wiggler の設計まで含めるとさらにウイグラーのピッチや磁場の空間変化率或いは空間分布に関連したパラメータが増すことになる。又, より設計の精密化を図るためには電子ビームの系方向の分布やビームエミッタス, 導波管形状や磁場の系方向の不均一性等の 3 次元効果や非線形な現象まで考慮して解析する必要がある。

FEL の非線形過程まで含めた動作特性を数値的に解析する手法としては二つのタイプによ

るものが取られてきている。一つは、相互作用する荷電粒子の運動方程式を数千個～数十万個の粒子について解き、ビーム系での電磁場の伝播及び電磁場と粒子との相互作用を調べるシミュレーションコードである。<sup>2)</sup> 他方は、異なった初期条件に対して粒子の運動方程式を積分し電子ビームの位相空間での分布を求め、電磁波の吸収・放出過程につき位相空間で平均し定量的な電磁波の增幅率や飽和過程を調べる方法である。<sup>3), 5)</sup>

本論文は、上に述べたような複雑なFELの基本設計を行う上で、比較的有用であると思われる後者の单一モード実空間一次元の半解析的粒子モデルによる非線形過程まで含めたFEL增幅コードのマニュアルを示したもので、H.P.Freund<sup>5)</sup>によって開発された方法を踏襲し粒子間の静電的相互作用、電子ビームのエネルギー広がり、更にウイグラーの周期長と磁場強度を空間的に変化させる tapered wiggler に発展させたものである。このFELプログラムは以下の3つの部分より構成されている。

I. ガイド磁場 ( $B_0$ )を考慮した電磁波モードと静電波モードに対する式を連立させ、ヘリカルウイグラー中での粒子の定常軌道を用いて分散式の実部を解き、与えられた {  $E_b$ ,  $I_b$ ,  $\lambda_w$ ,  $B_0$ ,  $\omega$  } に対してウイグラーの磁場強度  $B_w$  及びビーム中での電磁波の波数  $k_+$ (実数) を求める。 $B_0 = 0$  の時ここで得られた結果は(1)式及び(2)式(但し、ビームの電流密度が弱い場合)に対応する。

II. プログラム I から得られた装置パラメータ {  $\lambda_w$ ,  $B_w$ ,  $B_0$ ,  $E_b$ ,  $I_b$  } と電磁波パラメータ {  $\omega$ ,  $k_+$  } の下で、粒子の運動方程式とそれから得られる非線形電流をソース項に有する Maxwell 方程式を初期値問題として解き、電磁場及び静電場の空間発展を求める。ビームのエネルギー広がりは、粒子の位相空間における初期分布において考慮される。このコードを起動させることにより、与えられたビーム及び装置パラメータに対する電磁場の線形成長率、線形成長の飽和距離、電磁場強度の飽和レベル及びエネルギーの変換効率、さらに粒子の速度分布や位相空間の中での粒子の振る舞い等を知ることができる。

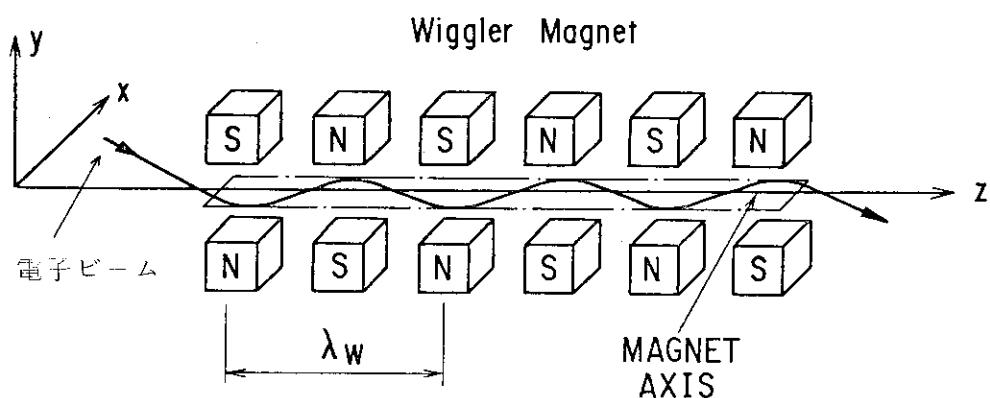
III. プログラム II の FEL コードで得た結果を図形出力する。このプログラムでは、任意の座標における位相空間での粒子の運動の様子や粒子の速度分布関数を図形出力することができる。

ここで作成したFEL増幅コードはコンプトン領域からラマン領域の比較的広い範囲のビームエネルギーとビーム電流に対して適用することができ、特に粒子間の静電的な相互作用が考慮されていることから、電流密度の高い大出力ラマン領域FELで問題となる静電ポテンシャルの問題も取り扱うことが出来る。ここで取り扱うFELの配位は、2重らせん配位よりもなるヘリカルウイグラーをモデル化したものである(図1(b))。本コードマニュアルは、5章より成り立っている。第2章は、プログラム(I)及び(II)の分散式(2-1)及びMaxwell方程式と運動方程式(2-2)が記述されており、ビーム入射等に関連した初期条件が、2-4に述べられている。第3章は、基礎方程式の規格化とプログラムの説明が各々のコードに対応して述べられている。

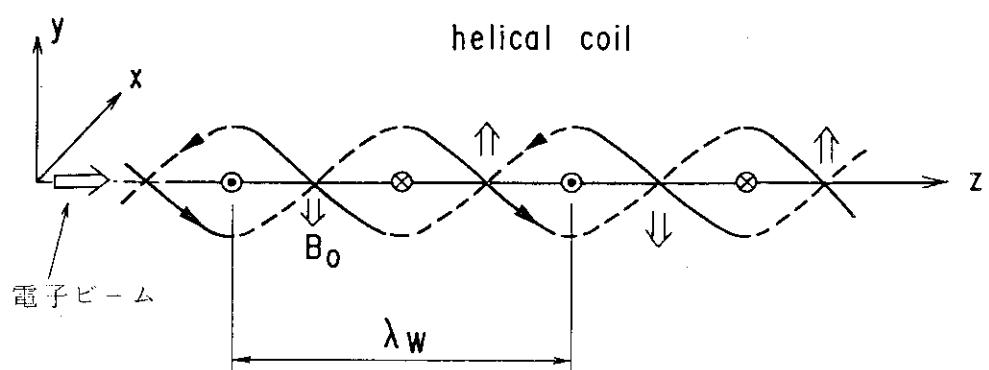
べられている。ここで取り扱うF E L プログラムは、 J C L 関連を除くと以下の通りである。

- I. FEL1DPRM ..... FEL1次元解析コード用入力パラメータ設定プログラム  
FEL1DPCG ..... FEL1DPRMの図形出力プログラム
- II. FEL1DVP ..... FEL1次元解析コード
- III. FEL1DGRP ..... FEL1DVPの図形出力プログラム

第4章は、各コードの取り扱い説明を述べたもので、出力結果の説明とコードの実行方法が記述されている。第5章は、出力結果についての考察を中心いたまとめである。



(a) 直線 ウィグラー



(b) ヘリカル ウィグラー

図 1 2 種類の ウィグラー

## 2. 基 础 方 程 式

この章では、2.1節においてはヘリカルウェグラー中の粒子軌道及び分散式、2.2節においてFELコードの基礎方程式を記述し、各々の数値解析手法についての簡単な説明を行う。2.3節はエネルギー変換効率の定式化、2.4節においてはビームの安定伝播から要請される初期条件について述べる。

### 2.1 分散式

ここでは二重らせんコイルに電流を逆向きに流し、中心軸近傍にヘリカル磁場を作るヘリカルウェグラーを想定し、同時にビーム伝播の安定性を図るために、ビームの進行方向に沿って縦磁場（ガイド磁場）を考慮する。ヘリカルコイルの十分中心近傍においては静磁場は、

$$\mathbf{B}(z) = B_0 \mathbf{e}_z + B_w(z) \left\{ \mathbf{e}_x \cos \left[ \int_0^z k_w(z) dz \right] + \mathbf{e}_y \sin \left[ \int_0^z k_w(z) dz \right] \right\} \quad \dots \dots \quad (3)$$

で表せる。ウェグラーの磁場強度  $B_w$  及び波数  $k_w$  は tapered wiggler を考慮すると一般的に  $z$  の関数であるが、以下の分散式の解析においては  $B_w = \text{一定}$  及び  $k_w = \text{一定}$  の領域において考えることにする。

ガイド磁場  $B_0$  が存在する時、モード間結合を考慮しないヘリカルウェグラー中のビームモードと電磁波モードを表す分散式は次式で与えられる。<sup>6)</sup>

$$\begin{cases} \omega \\ \omega^2 - k_+^2 c^2 - \frac{\omega_b^2 (\omega - k_+ v_3)}{r(\omega - \Omega_0/r - k_+ v_3)} \end{cases} = (k - \kappa) v_3 \quad \dots \dots \quad (4)$$

$$\dots \dots \quad (5)$$

$$\text{但し, } \kappa = \omega_b \phi^{1/2} / r^{1/2} r_z v_3$$

$$\phi = 1 - \frac{\Omega_0 \beta_w^2 r_z^2}{(1 + \beta_w^2) \Omega_0 - r k_w v_3}$$

ここに、 $k = k_+ + k_w$  は動重力ポテンシャルの波数、 $\Omega_0 = eB_0/mc$ 、 $\beta_w = v_1/v_3$  であり、 $(v_1, v_2, v_3)$  は基底ベクトルを、 $\mathbf{e}_1 = \mathbf{e}_x \cos k_w z + \mathbf{e}_y \sin k_w z$ 、 $\mathbf{e}_2 = -\mathbf{e}_x \sin k_w z + \mathbf{e}_y \cos k_w z$ 、 $\mathbf{e}_3 = \mathbf{e}_z$  で与えられるウェグラー系でヘリカル座標を採用した時の粒子の速度成分を表す。(5)式より  $\omega$  を消去すると  $\tilde{k}_+$  に対する 2 次方程式

$$(\tilde{v}_3^2 - 1) \tilde{k}_+^2 + 2 \tilde{v}_3^2 (1 - \tilde{\kappa}) \tilde{k}_+ + \tilde{v}_3 (1 - \tilde{\kappa}) \left\{ \tilde{v}_3 (1 - \tilde{\kappa}) - \frac{\tilde{\omega}_b^2}{r \tilde{v}_3 - r \tilde{\kappa} \tilde{v}_3 - \tilde{\Omega}_0} \right\} = 0 \quad \dots \dots \quad (6)$$

が得られる。但し、 $\tilde{v}_j = v_j/c$  ( $j = 1, 2, 3$ )、 $\tilde{k}_+ = k_+/k_w$ 、 $\tilde{k} = k/k_w = \tilde{k}_+ + 1$ 、 $\tilde{\omega}_b = \omega_b/k_w c$ 、 $\tilde{\Omega}_0 = \Omega_0/k_w c$ 、 $\tilde{\kappa} = \tilde{\omega}_b \phi^{1/2}/r_z^{1/2} v_3$  で規格化している。電磁波は、 $v_3$  をパラメータとして(6)式を解いた 2 根の内、前方散乱の根に対応する  $\{\omega, k_+ > 0\}$  の高周波モードを採用する。(6)式において、粒子の進行方向の速度  $v_3$  は、電磁場が存在しないときのヘリカルウイグラー中の定常軌道の解

$$\left\{ \begin{array}{l} v_1^2 + v_3^2 = (1 - \frac{1}{r^2}) c^2 \\ \end{array} \right. \quad \dots \dots \dots \quad (7)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} v_1 = \frac{B_w v_3}{\Omega_0 - r k_w v_3} \\ \end{array} \right. \quad \dots \dots \dots \quad (8)$$

を用いる。(7)式、(8)式は、 $\tilde{v}_3$  に関する 4 次の代数方程式

$$\begin{aligned} r^2 \tilde{v}_3^4 - 2r \tilde{\Omega}_0 \tilde{v}_3^3 + (\tilde{\Omega}_w^2 + \tilde{\Omega}_0^2 + 1 - r^2) \tilde{v}_3^2 + 2r \tilde{\Omega}_0 (1 - r^{-2}) \tilde{v}_3 \\ - \tilde{\Omega}_0^2 (1 - r^{-2}) = 0 \end{aligned} \quad \dots \dots \dots \quad (9)$$

となる。ここに、 $\tilde{\Omega}_w = \Omega_w/k_w c$ 。(9)式は、 $\tilde{v}_3$  に対し 4 個の解を与えるが、この中の 1 根は  $\tilde{v}_3 < 0$  となり、残り 3 根の内、 $0 < \tilde{v}_3 < 1$  に属する 1 根は、不安定軌道解となり、共に実根で  $0 < \tilde{v}_3 < 1$  を満足する残りの 2 根が安定軌道の解であることが知られている。この 2 つの安定軌道は GROUP-1 軌道及び GROUP-2 軌道と H.P.F reund<sup>6)</sup> によって命名されており、ガイド磁場 ( $\Omega_0/r k_w c$ ) が大きくなるに従って安定軌道は GROUP-1 から GROUP-2 の軌道に遷移する。なお、遷移領域においては、分散式に解が存在しなくなり F E L の動作領域に属さないのでガイド磁場の取り方には注意を要する。(9)式より得られた GROUP-1 或いは GROUP-2 に属する安定軌道解  $\tilde{v}_3$  (及び  $\beta_w = \tilde{v}_1/\tilde{v}_3$ ) を用いて(6)式を解き  $\{\omega, k_+ > 0\}$  に対応する高周波電磁波モードを決定する。

以上の方針では、与えられたビームパラメータ  $\{r, \omega_b\}$  とウイグラー-パラメータ  $\{k_w, B_w, B_0\}$  に対して、ビームの進行方向の速度  $v_3$  と成長率のもつとも大きいと期待されるビームプラズマ中の電磁波の周波数  $\omega$  と波数  $k_+$  を決定したが、低出力の電磁波を入射するためのレーザー源が存在し F E L を增幅器として用いる場合には、あらかじめ発振周波数  $\omega$  が決っている場合が多い。そのような場合には、(4), (5), (7) 及び (8) 式を解く際の未定パラメータとして、 $\{\omega, v_3\}$  の組から、 $\omega$  以外の他の 2 つの組に変更する方が便利である。ただし  $v_3$  を既知のパラメータとして設定するのは現実的ではないので、 $v_3$  は未定パラメータとして残しておくのが適切である。この時も得られた進行方向の速度  $v_3$  が GROUP-1 或は GROUP-2 に属する安定軌道解であること及び得られた電磁波の波数が  $k_+ > 0$  を満足する前方散乱の高周波モードであることを確認することが必要である。ここで作成したプログラムでは、ヘリカルウイグラーを用いているためウイグラーの磁場強度  $B_w$  を未定パラメータに選択しており、その時の数値手法は 3.1 に記載されている。

## 2.2 Maxwell 方程式及び運動方程式

### 2.2.1 Maxwell 方程式

(3)式で与えられるヘリカルウイグラーからの放射光は円偏波であることより、そのベクトルポテンシャル  $A_s(z, t)$  は次のように与えられる。

$$\mathbf{A}_s(z, t) = A_s(z) \left\{ \mathbf{e}_x \cos \left[ \int_0^z dz' k_+(z') - \omega t \right] - \mathbf{e}_y \sin \left[ \int_0^z dz' k_+(z') - \omega t \right] \right\} \quad \dots \dots \dots \quad (10)$$

又ビーム中を伝播する静電波のスカラーポテンシャル  $\phi(z, t)$  は、

$$\phi(z, t) = \phi(z) \cos \left[ \int_0^z dz' k(z') - \omega t \right] \quad \dots \dots \dots \quad (11)$$

により与えられる。ここに、 $A_s(z), \phi(z)$  はビームの進行方向  $z$  に対して緩やかに変化する振幅関数である。又電磁場及び静電場によってビーム中に誘起される振動電流  $\mathbf{J}(z, t)$  は、

$$\mathbf{J}(z, t) = - \frac{e n_b L}{N_t} \sum_{i=1}^{N_t} \mathbf{v}_i(z, t_{i0}) \frac{\delta[t - \tau(z, t_{i0})]}{v_{iz}(z, t_{i0})} \quad \dots \dots \dots \quad (12)$$

ここで、 $N_t$  は相互作用長  $L$  の中にある電子の総数であり、 $n_b$  は平均電子密度、 $\mathbf{v}_i(z, t_{i0})$  は  $t = t_{i0}$  で相互作用領域に入射した電子が  $z$  の位置を通過する際の速度を表している。一方、電磁波と静電波に対する波動方程式とポアソン方程式は Coulomb ゲージ ( $\nabla \cdot \mathbf{A}_s = 0$ ) を採用すると、

$$\left\{ \nabla^2 \mathbf{A}_s - \frac{1}{c^2} \frac{\partial \mathbf{A}_s}{\partial t^2} = - \frac{4\pi}{c} \mathbf{J}_t \quad \dots \dots \dots \quad (13) \right.$$

$$\left. \nabla \frac{\partial \phi}{\partial t} = 4\pi \mathbf{J}_L \quad \dots \dots \dots \quad (14) \right.$$

ここで、 $\mathbf{J}_t, \mathbf{J}_L$  はそれぞれ  $\nabla \cdot \mathbf{J}_t = 0$  および  $\nabla \times \mathbf{J}_L = 0$  を満足する縦電流と横電流を表している。ヘリカル座標系 ( $\mathbf{e}_1, \mathbf{e}_2, \mathbf{e}_3$ ) を用いて (10) 式、(11) 式及び (12) 式を (13) 式と (14) 式に適用し、かつ波の 1 周期につき位相空間内で平均操作を行うと次の方程式系が得られる。

$$\frac{d^2 a_s}{dz^2} + \left( \frac{\omega^2}{c^2} - k_+^2 \right) a_s = \frac{\omega_b^2}{c^2} \left\langle \frac{v_{z0}}{c} \cdot \frac{P_1 \cos \phi - P_2 \sin \phi}{P_3} \right\rangle \quad (15)$$

$$2k_+^{1/2} \frac{d(k_+^{1/2} a_s)}{dz} = - \frac{\omega_b^2}{c^2} \left\langle \frac{v_{z0}}{c} \cdot \frac{P_1 \sin \phi + P_2 \cos \phi}{P_3} \right\rangle \quad (16)$$

$$\frac{d \phi}{dz} = -2 \frac{\omega_b^2}{c^2 \omega} \left\langle v_{z0} \sin \phi \right\rangle \quad \dots \dots \dots \quad (17)$$

$$k\phi = -2 \frac{\omega_b^2}{c^2\omega} \langle v_{z0} \cos\phi_\ell \rangle \quad \dots \dots \dots \quad (18)$$

但し

$$\psi = \psi_0 + \int_0^z dz' (k_+ + k_w - \frac{r m \omega}{P_3}) \quad \dots \dots \dots \quad (19)$$

$$\phi_\ell = \phi_0 + \int_0^z dz' (k - \frac{r m \omega}{P_3}) \quad \dots \dots \dots \quad (20)$$

ここで、 $a_s = e A_s / mc^2$ ,  $\phi = e \Phi / mc^2$  で規格化されており、 $P_j = r m v_j$  ( $j=1,2,3$ ),  $\psi_0$  は個々の電子の初期位相  $\psi_0 = -\omega t_0$ ,  $\psi$  と  $\phi_\ell$  はそれぞれ、動重力ポテンシャルと静電波に対する電子の位相を表す。また、 $k_w(z) = 2\pi/\lambda_w(z)$  は tapered wiggler を考慮するので、空間座標  $z$  についての関数で与えられるものとする。 $\langle \dots \rangle$  は波の一周期の中に含まれる電子数  $N$  について平均したもので、次式で定義される。

$$\langle \dots \rangle = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (\dots) \quad \dots \dots \dots \quad (21)$$

ここで、 $N = 2\pi v_{z0} N_t / \omega L$  で与えられ、 $N$  が非常に大きいときには次式に移行する。

$$\langle \dots \rangle = \frac{1}{2\pi} \int_{-\pi}^{\pi} d\phi_0 \int d\mathbf{P} f_b(\mathbf{P}) (\dots) \quad \dots \dots \dots \quad (22)$$

$f_b(\mathbf{P})$  は電子ビームの速度分布関数 ( $\int f_b(\mathbf{P}) d\mathbf{P} = 1$ ) であり、 $z$  軸方向の運動量の広がりをガウス分布で仮定すると、 $f_b(\mathbf{P}) = \exp [-(P_z - P_{z0})^2 / 4P_z^2] \delta(\mathbf{P}_\perp) / \sqrt{\pi} 4P_z$  となる。 $(\mathbf{P}_\perp$  は垂直方向の電子の運動量で、後述するように (2-3)，断熱立ち上げのウイグラー磁場に対しては、電子ビームの安定伝播の条件より  $\mathbf{P}_\perp = 0$  として、ビームの角度広がり (ビームエミッタنس) は考慮しないことにする。以下では、ビームのエネルギー広がり  $4r_z$  をパラメータとして与える。この時  $4P_z$  は、 $4P_z = rmc 4r_z / r_z^2 (r_z^2 - 1)^{1/2}$  で与えられる。

### 2.2.2 運動方程式

相対論的な電子の運動方程式は、

$$\frac{d\mathbf{P}}{dt} = \frac{e}{c} \frac{\partial \mathbf{A}_s}{\partial t} - \frac{e}{c} (\mathbf{v} \times (\nabla \times \mathbf{A}_s) + \mathbf{v} \times \mathbf{B}) + e \nabla \Phi \quad \dots \dots \dots \quad (23)$$

で与えられ、ここに  $\mathbf{B}$  は(3)式で与えられる静磁場を示している。(23)式の  $A_s$  と  $\Phi$  に(10)式と(11)式の励起項を適用し、Maxwell 方程式と同様にヘリカル座標系で表すと、運動方程式は、

$$\frac{dP_1}{dz} = - \left( \Omega_0 - \frac{k_w P_3}{m} \right) \frac{m P_2}{P_3} + mc \left\{ \left( \frac{r m \omega}{P_3} - k_+ \right) a_s \sin \phi + \cos \phi \frac{da_s}{dz} \right\} \quad \dots \dots \dots \quad (24)$$

$$\frac{dP_2}{dz} = (\Omega_0 - \frac{k_w P_3}{m}) \frac{m P_1}{P_3} - \Omega_w m + mc \left\{ \left( \frac{r m \omega}{P_3} - k_+ \right) a_s \cos \phi - \sin \phi \frac{da_s}{dz} \right\} \dots \dots \dots \quad (25)$$

$$\begin{aligned} \frac{dP_3}{dz} &= \Omega_w m \frac{P_2}{P_3} + \frac{mc}{P_3} \left\{ a_s k_+ (P_1 \sin \phi + P_2 \cos \phi) - \frac{da_s}{dz} (P_1 \cos \phi - P_2 \sin \phi) \right\} \\ &\quad - \frac{r m^2 c^2}{P_3} \left\{ k \phi \sin \phi_\ell - \cos \phi_\ell \frac{d\phi}{dz} \right\} \dots \dots \dots \quad (26) \end{aligned}$$

$$\phi = - \frac{2 \omega_b^2 v_3}{c^2 \omega k} \langle \cos \phi_\ell \rangle$$

となる。 $(19)$ 式,  $(20)$ 式及び $(24)$ 式から $(26)$ 式までは, 採用する電子の数 $N$ だけ必要となるので,  $5N + 4$ 個の連立微分方程式を初期値問題として解くことになる。

### 2.3 エネルギー変換効率

粒子から電磁波へのエネルギーの変換効率は, 電磁波の pointing flux  $S_w = \omega^2 A_s^2 / 4\pi c$  及び入射した単一エネルギー電子ビームのパワー密度  $P_b = I_b E_b / e$  ( $I_b = e n_b v_3$ ,  $E_b = (\gamma - 1) mc^2$ ) を用いて,

$$\eta = \frac{1}{\xi^2 \gamma (\gamma - 1) \beta_z} \left( \frac{\omega a_s}{c k_w} \right)^2 \dots \dots \dots \quad (27)$$

で評価される。 $(27)$ 式は静電波の持つエネルギーが電磁波成分に比べ十分に小さければ

$$\eta = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \frac{\gamma - \gamma_i}{\gamma - 1} \dots \dots \dots \quad (28)$$

に一致する。但し,  $(27)$ ,  $(28)$ 式はビームのエネルギー広がりがない場合の関係式であり,  $(22)$ 式のようにビームの分布関数が  $f_b(\mathbf{P})$  で与えられる時には,  $E_b$  及び  $I_b$  の値は

$$\left\{ \begin{array}{l} E_b = mc^2 \int d\mathbf{P} \left\{ \left( 1 + \frac{P^2}{m^2 c^2} \right)^{1/2} - 1 \right\} f_b(\mathbf{P}) \\ I_b = \frac{e n_b}{m} \int d\mathbf{P} \frac{P_3 f_b(\mathbf{P})}{\gamma} \end{array} \right. \dots \dots \dots \quad (29) \quad (30)$$

で置き換えられる。

## 2.4 初期条件

ビーム入射領域 ( $z = 0$ ) でのウイグラーの磁場強度及び電子速度の初期値は、電子が  $z$  軸方向に進行を続けるとき  $z$  軸から離れない条件  $\langle \mathbf{v}_\perp \rangle = 0$  より決定される。ここに、 $\langle \rangle$  はウイグラーの長周期に渡っての平均操作を表す。電子の速度の垂直成分  $\mathbf{v}_\perp$  は

$$\mathbf{v}_\perp = \frac{\partial H}{\partial \mathbf{P}_{e\perp}} = \frac{1}{r m} (\mathbf{P}_{e\perp} - \frac{e}{c} \mathbf{A}) \quad \dots \dots \dots \quad (31)$$

で表される。ここに  $H$  は、電子のハミルトニアンであり、 $H = [m^2 c^4 + c^2 (\mathbf{P}_e + e\mathbf{A}/c)^2]^{1/2} - e\phi$  で与えられる。 $\mathbf{P}_e = \mathbf{P} - e\mathbf{A}/c$  は電子のカノニカルな運動量、 $\mathbf{A} = \mathbf{A}_s + \mathbf{A}_w$  ( $\mathbf{A}_w$  はウイグラー磁場に対応するベクトルポテンシャル) は、全ベクトルポテンシャルである。従って、 $\langle \mathbf{v}_\perp \rangle = 0$  の条件は、 $\langle \mathbf{v}_\perp \rangle = \langle \mathbf{P}_\perp \rangle / r m = 0$  ( $\langle \mathbf{A} \rangle \sim 0$  と仮定する) となり、カノニカルな垂直運動量  $\mathbf{P}_{e\perp}$  は運動の恒量であることを用いると、 $z = 0$  の初期で  $\mathbf{P}_{e\perp} = 0$  が満足されていれば成り立つことになる。従って  $z = 0$  での電子の運動量  $\mathbf{P}$  は、 $z = 0$  でのベクトルポテンシャル  $\mathbf{A} = \mathbf{A}_w + \mathbf{A}_s \sim \mathbf{A}_w$  より、 $\mathbf{P} \sim e\mathbf{A}_w$  ( $z = 0$ ) の関係から決定される。これは、ビームの入射点において有限なウイグラー磁場が存在すると、ビームの安定伝播の要請から、有限な垂直方向の運動量を持たせてビームが打ち込まなければならないことを示している。このため、ビームの入射点においては、ウイグラー磁場強度  $\mathbf{A}_w$  を  $\mathbf{A}_w = 0$  にとり、磁場を断熱的に立ち上げることによって  $z$  軸に平行 ( $\mathbf{P}_\perp = 0$ ) にビームを打ち込む手法が一般的に取られる。このため、ここでは以下のようにウイグラー磁場を断熱的に立ち上げる。

$$B_w(z) = \begin{cases} \frac{1}{2} B_{w0} \left[ 1 - \cos \left( \frac{k_w z}{2n} \right) \right] & \text{for } 0 \leq z \leq n\lambda_w \\ B_{w0} & \text{for } z \geq n\lambda_w \end{cases} \quad \dots \dots \dots \quad (32)$$

ここで、 $n$  は任意の整数とする。

粒子の  $z = 0$  での初期値は、ビームのエネルギー広がりがない場合は

$$\begin{cases} P_{1j} = 0 & \dots \dots \dots \quad (33-a) \\ P_{2j} = 0 & \dots \dots \dots \quad (33-b) \end{cases}$$

$$\begin{cases} P_{3j} = rm(c(1 - 1/r_j^2))^{1/2}, (j = 1, 2, \dots, N) & \dots \dots \dots \quad (33-c) \end{cases}$$

の関係で与え（但し、 $r = E_b/mc^2 + 1$ ），エネルギー広がりがある場合には同様に、 $P_{3j} = rm(c(1 - 1/r_j^2))^{1/2}$  とし、 $\{P_{3j}\}$ （或いは  $\{r_j\}$ ）は  $f_b \propto \exp(- (P_{3j} - P_{z0})^2 / 4P_{z0}^2)$  の関係を満足するように、正規乱数を用いて与える。また、粒子の波に対する初期位相は均一として

$$\begin{cases} \phi_j = A\phi(j-1) - \pi & \dots \dots \dots \quad (34-a) \\ \phi_{\ell j} = A\phi(j-1) - \pi & \dots \dots \dots \quad (34-b) \end{cases}$$

とする。但し  $\Delta\phi = 2\pi/N$  である。

電磁波及び静電波の波数の初期値は、分散式より得た値  $k_+$  および  $k = k_+ + k_w$  を用いる。  
 $z = 0$  での電磁波の強度  $a_s$  及び  $da_s/dz$  は以下で与える。

$$\begin{cases} a_s = \frac{e}{mc^2\omega} (4\pi c P_{in})^{1/2} \\ \frac{da_s}{dz} = 0 \end{cases} \dots \dots \dots \quad (35-a) \quad (35-b)$$

ここに、 $P_{in}$  は入射電磁波のパワー密度 ( $W/cm^2$ ) である。静電ポテンシャルの初期値

$$\phi = - \frac{2\omega_b^2}{c^2\omega(k_+ + k_w)} \langle v_{z0} \cos \psi_\ell \rangle \dots \dots \dots \quad (36)$$

は、初期位相  $\psi_\ell$  を設定した時のノイズレベル（計算機誤差）で与えることとする。

### 3. プログラムの説明

#### 3.1 FEL 1 次元解析コード用入力パラメータ設定プログラム (FEL1DPRM)

プログラム FEL1DPRM は、FEL 1 次元解析コード FEL1DVP の入力パラメータを設定するため、与えられた入射ビームエネルギー  $E_b$ 、ビーム電流密度  $I_b$ 、発振周波数  $f$ 、ガイド磁場  $B_0$ 、ウイグラー周期  $\lambda_w$  に対してウイグラー磁場強度  $B_w$  と  $z$  方向の電子速度  $v_3$  を求めるプログラムである。(4), (5)式、及び(7), (8)式を規格下すると次のようになる。

$$\left\{ \begin{array}{l} \tilde{\omega} = (\tilde{k} - \tilde{\kappa}) \tilde{v}_3 \\ \tilde{\omega}^2 - \tilde{k}_+^2 = \frac{\tilde{\omega}_b^2 (\tilde{\omega} - \tilde{k}_+ \tilde{v}_3)}{\gamma (\tilde{\omega} - \tilde{\Omega}_0 / \gamma - \tilde{k}_+ \tilde{v}_3)} = 0 \end{array} \right. \quad \dots \dots \dots \quad (37)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \tilde{v}_1^2 + \tilde{v}_3^2 = (1 - \gamma^{-2}) \\ \tilde{v}_1 = \tilde{\Omega}_w \tilde{v}_3 / (\tilde{\Omega}_0 - \gamma \tilde{v}_3) \end{array} \right. \quad \dots \dots \dots \quad (38)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \tilde{v}_1^2 + \tilde{v}_3^2 = (1 - \gamma^{-2}) \\ \tilde{v}_1 = \tilde{\Omega}_w \tilde{v}_3 / (\tilde{\Omega}_0 - \gamma \tilde{v}_3) \end{array} \right. \quad \dots \dots \dots \quad (39)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \tilde{v}_1^2 + \tilde{v}_3^2 = (1 - \gamma^{-2}) \\ \tilde{v}_1 = \tilde{\Omega}_w \tilde{v}_3 / (\tilde{\Omega}_0 - \gamma \tilde{v}_3) \end{array} \right. \quad \dots \dots \dots \quad (40)$$

ここに、 $\tilde{k}_+ = k_+ / k_{w0}$ ,  $\tilde{k} = k / k_{w0}$ ,  $\tilde{\omega} = \omega / c k_{w0}$ ,  $\tilde{\omega}_b = \omega_b / c k_{w0}$ ,  $\tilde{v}_i = v_i / c$ ,  $\tilde{\Omega}_w = \Omega_w / c k_{w0}$ ,  $\tilde{\Omega}_0 = \Omega_0 / c k_{w0}$ . これらの式から、 $\tilde{v}_3$  と  $\tilde{\Omega}_w$  に関する非線形連立方程式を導き出し、 $f(\tilde{v}_3, \tilde{\Omega}_w) = 0$ ,  $g(\tilde{v}_3, \tilde{\Omega}_w) = 0$  を満たす  $\tilde{v}_3$ ,  $\tilde{\Omega}_w$  を求める。 $f$  及び  $g$  は次式で与えられる。

$$\left\{ \begin{array}{l} f(\tilde{v}_3, \tilde{\Omega}_w) = \tilde{\omega}^2 - (\tilde{\kappa} - 1 + \frac{\tilde{\omega}}{\tilde{v}_3})^2 - \frac{\tilde{\omega}_b^2 \tilde{v}_3 (1 - \tilde{\kappa})}{\gamma \tilde{v}_3 (1 - \tilde{\kappa}) - \tilde{\Omega}_0} = 0 \\ g(\tilde{v}_3, \tilde{\Omega}_w) = \left( \frac{\tilde{\Omega}_w \tilde{v}_3}{\tilde{\Omega}_0 - \gamma \tilde{v}_3} \right)^2 + \tilde{v}_3^2 + \frac{1}{\gamma^2} - 1 = 0 \end{array} \right. \quad \dots \dots \dots \quad (41)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} f(\tilde{v}_3, \tilde{\Omega}_w) = \tilde{\omega}^2 - (\tilde{\kappa} - 1 + \frac{\tilde{\omega}}{\tilde{v}_3})^2 - \frac{\tilde{\omega}_b^2 \tilde{v}_3 (1 - \tilde{\kappa})}{\gamma \tilde{v}_3 (1 - \tilde{\kappa}) - \tilde{\Omega}_0} = 0 \\ g(\tilde{v}_3, \tilde{\Omega}_w) = \left( \frac{\tilde{\Omega}_w \tilde{v}_3}{\tilde{\Omega}_0 - \gamma \tilde{v}_3} \right)^2 + \tilde{v}_3^2 + \frac{1}{\gamma^2} - 1 = 0 \end{array} \right. \quad \dots \dots \dots \quad (42)$$

この非線形連立方程式の解法には、ニュートン法を用いており、アルゴリズムは以下のとおりである。

#### — アルゴリズム —

①  $\begin{cases} f(x, y) = 0 \\ g(x, y) = 0 \end{cases}$  の解の近似値を  $(x_0, y_0)$  とする。

②  $\partial f(x, y) / \partial x$ ,  $\partial f(x, y) / \partial y$ ,  $\partial g(x, y) / \partial x$ ,  $\partial g(x, y) / \partial y$  及び Jacobian  $J(f, g) \equiv \partial f(x, y) / \partial x \cdot \partial g(x, y) / \partial y - \partial g(x, y) / \partial x \cdot \partial f(x, y) / \partial y$  を求める。

$$\textcircled{3} \quad \begin{cases} x_{i+1} = x_i - \left( \frac{f(x, y) \cdot \partial g(x, y) / \partial y - g(x, y) \cdot \partial f(x, y) / \partial y}{J(f, g)} \right) \\ y_{i+1} = y_i - \left( \frac{g(x, y) \cdot \partial f(x, y) / \partial x - f(x, y) \cdot \partial g(x, y) / \partial x}{J(f, g)} \right) \end{cases}$$

$$\textcircled{4} \quad \begin{cases} |x_{i+1} - x_i| \leq \epsilon + |x_{i+1}| \\ |y_{i+1} - y_i| \leq \epsilon + |y_{i+1}| \end{cases}$$

を満たしたものと解とする。満たさない場合は、 $x_i \leftarrow x_{i+1}$ ,  $y_i \leftarrow y_{i+1}$  として②に戻る。また、これに付随して任意の $\{E_b, I_b, B_0, \omega, \lambda_w\}$ に対して、 $B_w$ がどの程度の値かを示す図形出力プログラムを作成したのでその使用方法を、4.1.5 項に示す。

### 3.2 FEL 1次元解析コード (FEL 1DVP)

(15)～(20)式及び(24)～(26)式を 5  $N + 4$  個の連立微分方程式の初期問題として再編成すると以下の様になる。

$$\frac{d a_{s1}}{dz} = -(\tilde{\omega}^2 - \tilde{k}_+^2) a_s + \tilde{\omega}_b^2 \langle \tilde{v}_{z0}, \frac{\tilde{P}_1 \cos \phi - \tilde{P}_2 \sin \phi}{\tilde{P}_3} \rangle \dots \dots \dots \quad (43)$$

$$\frac{d a_s}{dz} = a_{s1} \dots \dots \dots \quad (44)$$

$$\frac{d \tilde{k}_+}{dz} = -2 \tilde{k}_+ \frac{a_{s1}}{a_s} - \frac{\tilde{\omega}_b^2}{a_s} \langle \tilde{v}_{z0}, \frac{\tilde{P}_1 \sin \phi + \tilde{P}_2 \cos \phi}{\tilde{P}_3} \rangle \dots \dots \dots \quad (45)$$

$$\frac{d \phi}{dz} = -2 \frac{\tilde{\omega}_b^2}{\tilde{\omega}} \langle \tilde{v}_{z0} \sin \phi, \ell \rangle \dots \dots \dots \quad (46)$$

$$\frac{d \tilde{P}_1}{dz} = -(\tilde{\Omega}_0 - \tilde{k}_w \tilde{P}_3) \frac{\tilde{P}_2}{\tilde{P}_3} + \left\{ \left( \frac{r \tilde{\omega}}{\tilde{P}_3} - \tilde{k}_+ \right) a_s \sin \phi + \cos \phi \frac{d a_s}{dz} \right\} \dots \dots \dots \quad (47)$$

$$\frac{d \tilde{P}_2}{dz} = (\tilde{\Omega}_0 - \tilde{k}_w \tilde{P}_3) \frac{\tilde{P}_1}{\tilde{P}_3} - \tilde{\Omega}_w + \left\{ \left( \frac{r \tilde{\omega}}{\tilde{P}_3} - \tilde{k}_+ \right) a_s \cos \phi + \sin \phi \frac{d a_s}{dz} \right\} \dots \dots \dots \quad (48)$$

$$\begin{aligned} \frac{d \tilde{P}_3}{dz} &= \tilde{\Omega}_w \frac{\tilde{P}_2}{\tilde{P}_3} + \frac{1}{\tilde{P}_3} \left\{ a_s \tilde{k}_+ (\tilde{P}_1 \sin \phi + \tilde{P}_2 \cos \phi) - \frac{d a_s}{dz} (\tilde{P}_1 \cos \phi - \tilde{P}_2 \sin \phi) \right\} \\ &\quad - \frac{r}{\tilde{P}_3} \left\{ \tilde{k}_\phi \sin \phi, \ell - \cos \phi, \ell \frac{d \phi}{dz} \right\} \dots \dots \dots \quad (49) \end{aligned}$$

$$\frac{d \psi}{dz} = \tilde{k}_+ + \tilde{k}_w - \frac{r \tilde{\omega}}{\tilde{P}_3} \dots \dots \dots \quad (50)$$

$$\frac{d\phi_\ell}{dz} = \tilde{k} - \frac{r\tilde{\omega}}{\tilde{P}_3} \quad \dots \dots \dots \quad (51)$$

ここで  $\tilde{k} = -\frac{2\tilde{\omega}_b^2}{\tilde{\omega}\phi} <\tilde{v}_{z0} \cos\phi_\ell>$

但し、 $\tilde{k}_w = k_w(z)/k_{w0}$ ,  $\tilde{z} = k_{w0}z$  である。

ウイグラー磁場強度  $\Omega_w$  は、断熱的立ち上げを行っているため以下のように定義する。

$$\tilde{\Omega}_w(z) = \begin{cases} \frac{1}{2}\tilde{\Omega}_w \left[ 1 - \cos\left(\frac{\tilde{z}}{2n}\right) \right] & \text{for } 0 \leq \tilde{z} \leq 2\pi n \\ \tilde{\Omega}_w & \text{for } \tilde{z} > 2\pi n \end{cases} \quad \dots \dots \dots \quad (52)$$

(47)～(51)式は、電子の数  $N$  だけ必要となるので、 $5N + 4$  個の連立微分方程式を  $\tilde{z} = 0 \sim 2\pi N_s$  ( $z = 0 \sim \lambda_w N_s$ ) (ここで  $N_s$  は周期の数) まで解く。またこのコードでは、初期値問題の数値解法として、4次 Runge-Kutta 法を用いた。静電ポテンシャルを含まない計算を行う場合は、 $d\phi/d\tilde{z} = 0$ ,  $d\phi_1/d\tilde{z} = 0$ ,  $\tilde{k}=0$  とし、 $\phi$ ,  $\phi_\ell$ ,  $k$  の初期値は、全て 0 とする。また、ウイグラーには、周期及び磁場強度を空間的に変化させる tapered wiggler を用いるため、 $\tilde{k}_w$  及び  $\tilde{\Omega}_w$  はプログラム内の設定を変更することにより、任意の形にすることが出来るが、現在、 $\tilde{k}_w$  については linear と adiabatic の 2 つ、 $\tilde{\Omega}_w$  については linear の tapering が設定できるようになっている。その関数形について、以下に示す。

$$\tilde{k}_w = \begin{cases} 1 & (0 \leq \tilde{z} \leq 2\pi n_k) \\ \alpha_k (\tilde{z} - 2\pi n_k) + 1 & (\tilde{z} > 2\pi n_k) \\ \beta_k (\tilde{z} - 2\pi n_k)^2 + 1 & (2\pi n_k \leq \tilde{z} \leq 2\pi n_{ak}) \\ \delta_k & (\tilde{z} > 2\pi n_{ak}) \end{cases} \quad \begin{array}{l} : \text{linear taper} \\ \dots \dots \dots \quad (53) \\ : \text{adiabatic taper} \end{array}$$

$$\tilde{\Omega}_w(z) = \begin{cases} \frac{1}{2}\tilde{\Omega}_w \left[ 1 - \cos\left(\frac{\tilde{z}}{2\pi}\right) \right] & (0 \leq \tilde{z} \leq 2\pi n) \\ \tilde{\Omega}_w & (2\pi n < \tilde{z}) \\ \alpha_b (\tilde{z} - 2\pi n_b) + \tilde{\Omega}_w & (\tilde{z} > 2\pi n_b) \end{cases} \quad \dots \dots \dots \quad (54)$$

但し、 $n_k$ ,  $n_{ak}$ ,  $n$ ,  $n_b$  は整数である。

ビームにエネルギー広がりがある場合には、 $z$  軸方向の運動量の広がりをガウス分布で仮定し、(22)式の平均操作は以下のようになる。

$$\langle \dots \rangle = \frac{1}{2\pi A} \int_{-\pi}^{\pi} d\phi_0 \int_0^{p_{z,\max}} dP_z \beta_z \exp \left[ - (P_{z0} - P_z)^2 / 4P_z^2 \right] (\dots) \quad \dots \dots \dots \quad (55)$$

但し、 $A = \int_0^{p_{z,\max}} dP_z \exp \left[ - (P_{z0} - P_z)^2 / 4P_z^2 \right]$

ここに、 $p_{z,\max}$ は $P_z$ の取り得る最大値とする。 $(55)$ 式の積分操作において、 $\phi$ 方向の粒子の分布については $(34)$ 式を用いて等間隔に配置するが、運動量方向についてはガウスの求積方を用いるため、ルジャンドル多項式 $P_n(\xi)=0$ となる点を採用する。 $P_z = \Delta P_z + P_0$ とすると、 $(55)$ 式は

$$\langle \dots \rangle = \frac{\Delta P_z}{AN_\phi} \sum_{j=1}^{N_p} \omega_j \left\{ \sum_{i=1}^{N_\phi} \beta_{zij} \left\{ \exp \left[ - (P_{zij} - P_{z0})^2 / 4P_z^2 \right] \right\} (\dots)_{ij} \right\} \quad \dots \dots \dots \quad (56)$$

但し、 $A = \Delta P_z \sum_{j=1}^{N_p} \omega_j \left\{ \exp \left[ - (P_{zij} - P_0)^2 / 4P_z^2 \right] \right\}$

となる。ここに、 $N_\phi$ と $N_p$ は、 $\phi$ 方向及び $P_z$ 方向に採用する粒子数 ( $N = N_\phi N_p$ )、 $\omega_j$  ( $j = 1, 2, \dots, N_p$ ) はルジャンドルの $N_p$ 次の重み関数であり、本コードでは $N_p = 10$  を採用している。同様に、ビームにエネルギー広がりがある場合のビームエネルギー $E_b$  ( $(24)$ 式) とビーム電流 $I_b$  ( $(30)$ 式) は以下で与えられる。

$$E_b = \frac{\Delta P_z mc^2}{A} \sum_{j=1}^{N_p} \omega_j \left\{ (r_j - 1) \exp \left[ - (P_{zij} - P_{z0})^2 / 4P_z^2 \right] \right\} \quad \dots \dots \quad (57)$$

$$I_b = \frac{e n_b \Delta P_z}{A} \sum_{j=1}^{N_p} \omega_j \left\{ v_{zj} \exp \left[ - (P_{zij} - P_{z0})^2 / 4P_z^2 \right] \right\} \quad \dots \dots \quad (58)$$

また、このコードは、F E Lの最適化を行うための多量の parameter studyを可能にするために、ベクトル化されている。ベクトル化を行ったことによる実行性能の向上は、表 1 に示されるとおりであり、そのベクトル化率は約97%である。

表1 ベクトル化によるcpu時間の比較

・計算に用いたパラメータ (静電ポテンシャルを含む場合)

総周期数	= 150	1周期の刻み数	= 100	粒子数	= 60
$\gamma$	= 3.5	$\xi$	= 0.1	$N_w$	= 10
$\Omega_0/\gamma k_w c$	= 0.5	$\Omega_w/\gamma k_w c$	= 0.5		
$a_s$	= $10^{-7}$	$da_s/dz$	= 0.0		
$\alpha_B$	= 0.0	$n_B$	= 60		
$\alpha_k$	= 0.0	$n_k$	= 60		

プログラムモード	オリジナル版			VP版	
	SYSTEM	M380	M780	VP100	M380
CPU-TIME (sec)	197.63	106.51	132.77	149.67	17.62
VU-TIME (sec)	-	-	6.84	-	13.29

### 3.3 F E L 1次元解析コード作図プログラム (FEL1DGRP)

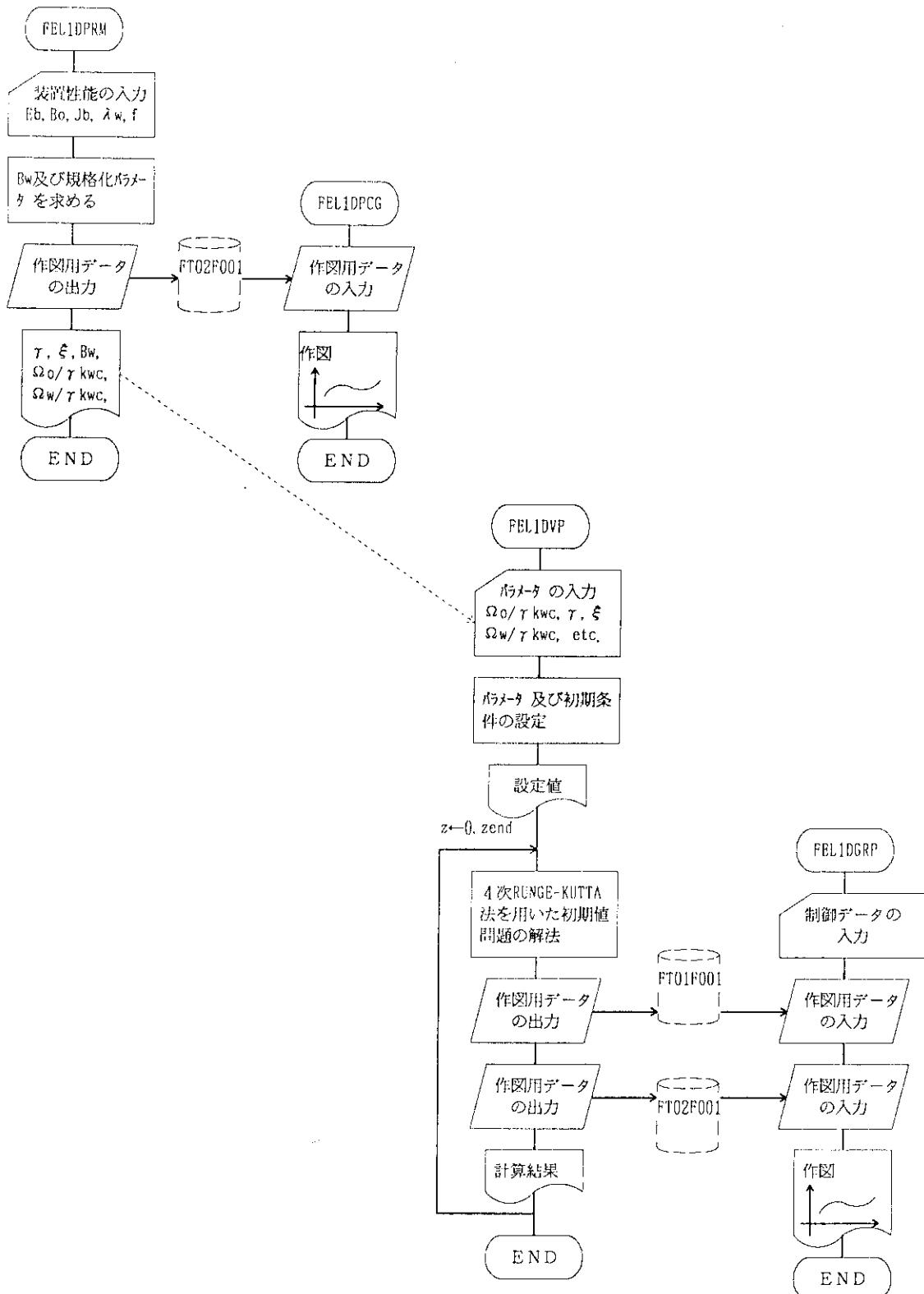
プログラムFEL1DGRPは、F E L 1次元解析コードFEL1DVPの計算結果をファイルで渡すことにより、自動的に作図できるもので、図形入出力サブシステムARGUS-V4<sup>7)</sup>を用い作成した。但し、ウィグラー周期の図を必要とする場合、もしくはy軸の目盛をそろえたい場合などは制御データを入力することにより目的とする図を得ることもできる。出力される図は、

- ① 計算条件一覧
- ②  $a_s$  and  $\phi$  vs.  $z/\lambda_w$
- ③  $a_s^2$  and  $\phi^2$  vs.  $z/\lambda_w$
- ④  $1/k_w \cdot d(1na_s)/dz$ ,  $1/k_w \cdot d(1n\phi)/dz$  vs.  $z/\lambda_w$
- ⑤  $k_+/k_w$  and  $k/k_w$  vs.  $z/\lambda_w$
- ⑥  $v/c (\equiv \beta)$  vs.  $z/\lambda_w$
- ⑦ energy conversion efficiency  $\eta$  vs.  $z/\lambda_w$
- ⑧  $k_w/k_{w0}$  and  $\Omega_w/k_w c$  vs.  $z/\lambda_w$
- ⑨  $1/k_w \cdot d\phi/dz$  vs.  $\phi$
- ⑩  $r$  vs.  $\phi$
- ⑪  $r$  分布関数

であるが、その詳細については、4.3.2項に示す。

## 3.4 システムフロー

FEL1次元解析コードシステム（プログラム：FEL1DPRM, FEL1DPCG, FEL1DVP, FEL1DGRP）を実行するに当っての一連の流れを以下に示す。



## 4. プログラム取扱い説明

### 4.1 FEL 1次元解析コード用入力パラメータ設定プログラム (FEL1DPRM)

#### 4.1.1 入力データ

入力データを以下に示す。以下のレコードはすべてフリーフォーマット入力である。

レコードNo	入力項目	単位	内 容
1	$E_b$	MeV	入射ビームエネルギー
2	$B_0$	kG	ガイド磁場
3	$J_b$	kA/cm <sup>2</sup>	ビーム電流密度
4	$\lambda_w$ -start, end, inc	cm	ウェーブ周期
5	$f$ -start, end, inc	GHz	発振周波数

## 4.1.2 実行方法

tss を用いたプログラムの実行方法を以下に示す。 tss 端末の READY 状態で以下の処理を行う。下線部が入力部分である。

```

READY
ALLOC F(FT02F001) DA(FT02.DATA) OLD .... 図形出力用ファイルを割り当てる。
                                         (図形を出力しない場合は、ダミー
                                         を指定する。)

READY
ALLOC F(FT03F001) DA(FT03.DATA) OLD .... エラーメッセージ出力用ファイルを
                                         割り当てる。

READY
ALLOC F(FT06F001) DA(FT06.DATA) REU .... 結果出力用ファイルを割り当てる。

READY
RUN FEL1DPRM.FORT77
FORTRAN COMPILER ENTERED
END OF COMPILATION

ENTER BEAM ENERGY           (MEV) ==> 5.0 .... ノート No. 1  $E_b$  を入力。

ENTER GUIDE MAGNETIC FIELD (KG) ==> 0.0 .... ノート No. 2  $B_0$  を入力。

ENTER INJECTION CURRENT DENSITY (KA/CM2) ==> 1.273239545
                                         .... ノート No. 3  $J_b$  を入力。

ENTER LAMBDA-W(CM)      START, END, INCREMENT ==> 10.0 10.0 0.0
                                         .... ノート No. 4  $\lambda_w$  の開始値、
                                         終値、増分値を入力。

ENTER FREQUENCY(GHZ)    START, END, INCREMENT ==> 250.0 250.0 0.0
                                         .... ノート No. 5  $f$  の開始値、
                                         終値、増分値を入力。

ENTER BEAM ENERGY           (MEV) ==> /* .... 引続き計算を行う場合は、
                                         新しい値、終了する場合は
                                         /* を入力。

END OF GO, SEVERITY CODE=00
READY

```

ここで、DD名：FT06F001に割り当てたファイルに出力結果、FT03F001に割り当てたファイルにエラーメッセージが出力される。両ファイルのDCBは、LRECL = 137, RECFM = FBAを指定する。また、FT02F001に割り当てたファイルを用いて4.1.5項に示す図形出力をを行う。このファイルのDCBはRECFM = VBSである。

## 4.1.3 出力結果の説明

4.1.2 で示された方法で出力結果の説明を以下に示す。

```

① BEAM ENERGY          (MEV) = 5.000000000000000000
② GAMMA                = 10.7846783678373708
③ VZO                  (M/SEC) = 298500903.232933342
④ GUIDE MAGNETIC FIELD (KG) = 0.0
⑤ INJECTION CURRENT DENSITY (KA/CM2) = 1.27323954500000003
⑥ LAMBDA-W   (CM) = 10.0000000000000000 10.0000000000000000 0.0
⑦ FREQUENCY (GHZ) = 250.0000000000000000 250.0000000000000000 0.0
⑧ === OMEGA0/GAMMA/KW/C & GZAI ===

```

```

LAMDAW    1.0000D+01
OMEGAON   0.0
GZAI      4.7056D-01

```

```
⑨ === BW (GAUSS) ===
```

```
=====
LAMDAW/FREQ 2.5000D+02
-----
1.0000D+01 1.3320D+03
-----
```

```
⑩ === OMEGAW/GAMMA.KW.C ===
```

```
=====
LAMDAW/FREQ 2.5000D+02
-----
1.0000D+01 1.1532D-01
-----
```

- ① 入射ビームエネルギー  $E_b$  (MeV)
- ②  $\gamma$
- ③ 入射ビーム速度  $v_z$  (m/sec)
- ④ ガイド磁場  $B_0$  (kG)
- ⑤ ビーム電流密度  $J_b$  (kA/cm<sup>2</sup>)
- ⑥ ウィグラー周期の開始値, 終値, 増分値  $\lambda_w - \text{start}, \text{end}, \text{inc}$  (cm)
- ⑦ 発振周波数の開始値, 終値, 増分値  $f - \text{start}, \text{end}, \text{inc}$  (GHz)
- ⑧ 各ウィグラー周期  $\lambda_w$  (LAMDAW) に対する,  $\Omega_0/\gamma k_w c$  (OMEGAON),  $\xi$  (GZAI) の値
- ⑨ 各ウィグラー周期 ( $\lambda_w$ ), 発振周波数(f)に対するウィグラー磁場強度  $B_w$  (kG)  
(計算が収束しなかった場合は, -9.9999 が出力される。)
- ⑩ 各ウィグラー周期 ( $\lambda_w$ ), 発振周波数(f)に対する  $\Omega_w/\gamma k_w c$   
(計算が収束しなかった場合は, 0.0 が出力される。)

## 4.1.4 エラーメッセージ一覧

以下にエラーメッセージ一覧とユーザーの対応を示す。

- NLMD = ??? ==> INSUFFICIENT DIMENSION SIZE. INCREASE NDIM1.  
 $\lambda_{\psi}$ に関する配列の領域数が足りない。プログラムのパラメータ文の変数NDIM1の値を???以上に変更せよ。
- NFREQ = ??? ==> INSUFFICIENT DIMENSION SIZE. INCREASE NDIM2.  
 $f$ に関する配列の領域数が足りない。プログラムのパラメータ文の変数NDIM2の値を???以上に変更せよ。
- VZON > 1.0  
 収束計算途中で、 $v_z$ の値が1を越えた。収束計算を停止する。
- PHI < 0  
 収束計算途中で、 $\phi$ の値が0以下になった。収束計算を停止する。
- GZAI = ???? GAMMA = ##### EQUATIONS NOT ITERATED.  
 $\xi = ???? \gamma = #####$ のとき、収束回数を越え計算が収束しなかった。
- GZAI = ???? GAMMA = ##### JACOBIAN = 0  
 $\xi = ???? \gamma = #####$ のとき、ヤコビアンが0になり計算が収束しなかった。
- GZAI = ???? GAMMA = ##### BWN < 0  
 $\xi = ???? \gamma = #####$ のとき、ウィグラー磁場の値が0未満になり計算が収束しなかった。

## 4.1.5 図形出力プログラム (FEL1DPCG) の説明

FEL1DPCG は F E L 1 次元解析コード用入力パラメータ設定プログラム FEL1DPRM の実行結果を、任意の { $E_b, J_b, B_0, f, \lambda_w$ } に対して、 $B_w$ がどの程度の値を示すかを、一目で見ることが出来るようにしたプログラムである。出力結果は図 2 のような図形となり、シンボルは、 $B_w$ の範囲を示している。 $+$  は  $0 \leq B_w < 1 \text{ kG}$ ,  $\circ$  は  $1 \leq B_w < 5 \text{ kG}$ ,  $|$  は  $5 \leq B_w < 10 \text{ kG}$ ,  $\times$  は  $B_w \geq 10 \text{ kG}$  を表している。

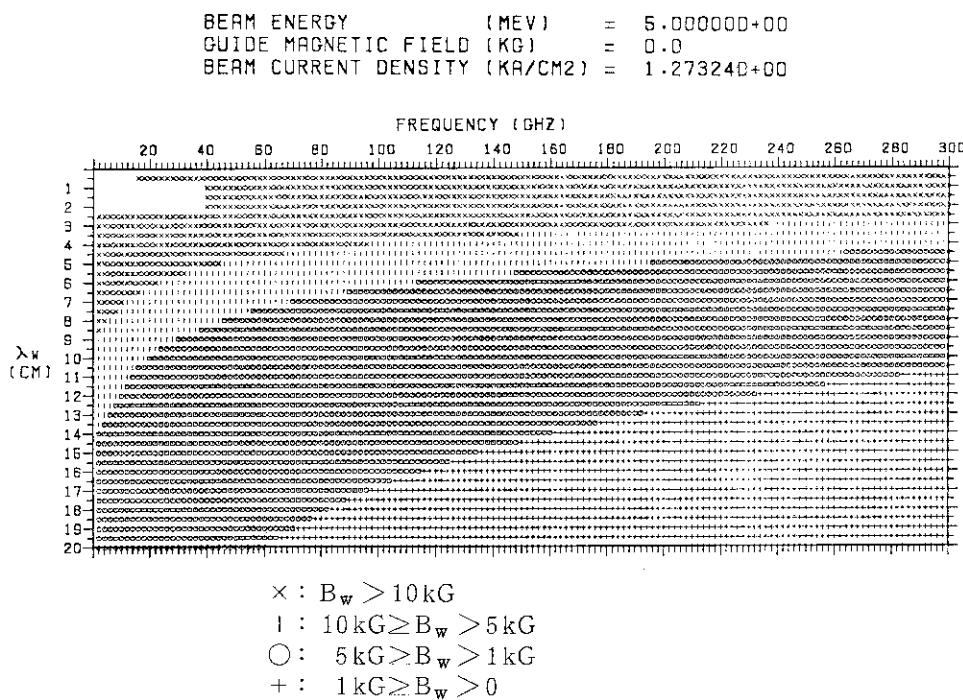


図 2 Wiggler 波長と発振周波数との関係

図 2 の図形を出力する J C L 例を以下に示す。

```
//JCLG JOB
//JCLG EXEC JCLG
//SYSIN DD DATA,DLM='++'
// JUSER 12343991,YA.KISHIMOTO,0032.01
// T.1 W.0 I.2 C.2 GRP
OPTP PASSWORD=ILQVEFEL,NOTIFY=J3991
//***** ****
// EXEC FORT77,SO='J3991.FEL1DPCG' ①
// EXEC LKED77,GRLIB=PNL
//***** ****
// EXEC GO
//MPTMST DD DSN=SYS1.KPATNLIB,DISP=SHR
//GDFILE DD SYSOUT=L,OUTLIM=60000 ③
//FT02F001 DD DSN=J3991_FT02.DATA,DISP=OLD ②
++
//
```

- ① ソースプログラム名
- ② 4.1.2 項で FT02F001 で指定したファイル名
- ③ 図形出力クラスを指定する。

## 4.2 F E L 1次元解析コード ( F E L 1 D V P )

### 4.2.1 入力データ

入力データは、以下の規則に従って、作成する。

各入力項目に対し、登録名称を表2に示すように設定し、登録名称=（数値）という形で入力する。

この際の、制限事項は以下の通りである。

- ① 入力されない登録名称に対しては、標準値が設定される。
- ② 1項目の入力は、2行以上にわたらない事。
- ③ 行の1カラム目を‘C’で始めると、コメントになる。
- ④ 1行は72カラムとする。
- ⑤ 入力項目の区切りは、‘,’カンマで示す。

表2 入力項目と登録名称の対応  
(入力単位が示してあるもの以外は、すべて無次元量とする。)

登録名称	入力項目	標準値
OPT	計算に静電ポテンシャルを加えるオプション = 0 : off = 1 : on	1
N	1周期内の粒子の数 N	500
PITCH NO.	ウィグラーの全周期数 N <sub>s</sub>	50
MESH NO.	1周期あたりのRUNGE-KUTTA法の分割数	500
PIN	初期の入射パワー密度 (W/cm <sup>2</sup> ) Pin	100
DA/DZ	初期のベクトルポテンシャルの1階微分値	0.0
GAMMA	粒子エネルギー γ (= (1 - v <sup>2</sup> /c <sup>2</sup> ) <sup>-1</sup> )	10.0
GZAI	規格化されたビーム密度 ξ (= ω <sub>b</sub> /r <sup>1/2</sup> k <sub>w</sub> c)	0.4
OMEGA0	規格化されたガイド磁場強度 Ω <sub>0</sub> /r k <sub>w</sub> c	0.0
OMEGAW	規格化されたウィグラー磁場強度 Ω <sub>w</sub> /r k <sub>w</sub> c	0.2
N(BW)	Ω <sub>w</sub> (z)のadiabatic領域の周期数 n <sub>w</sub>	10.0
NT(BW)	Ω <sub>w</sub> (z)のtaperingを開始する周期数 n <sub>b</sub>	PITCH NO.
AT(BW)	Ω <sub>w</sub> (z)のlinear taperingの傾き α <sub>b</sub>	0.0
NT(KW)	Ω <sub>w</sub> (z)のtaperingを開始する周期数 n <sub>k</sub>	PITCH NO.
AT(KW)	Ω <sub>w</sub> (z)のlinear taperingの傾き α <sub>k</sub>	0.0

ATN(KW)	$k_w(z)$ のadiabatic taperingの決定周期数	NT(KW)+20
ATP(KW)	$k_w(z)$ のadiabatic taperingの $k_w/k_{w0}$ の値*	1.0
LAMDA(CM)	初期のウィグラー周期 (cm) $\lambda_w$	10.0
NLEVEL	レベル計算の開始周期数	35
PRINT	印刷間隔 (何周期毎に印刷するか?)	PITCH NO.
DLT-GAMMA	ビームのエネルギー広がり $\Delta \gamma$	0.0
N(GAMMA)	エネルギー空間における粒子の数	1
N(PSI)	位相空間における粒子の数	500

\*adiabatic taper の傾き  $\alpha$ は、以下のように定義される。

$$\alpha = (ATP-1) / [ \{ 2\pi (ATN-NT) \} ]^2$$

入力例を以下に示す。

```
C=====
C      FREE-ELECTRON-LASER AMPLIFIERS SYSTEM ANALYSIS CODE
C          TEST    INPUT   DATA
C-----
OPT      = 1
N        = 500      , PITCH NO. = 100      , MESH NO. = 500
PIN      = 1.02      , DA/DZ     = 0.0D-00 ,
GAMMA    = 10.7847D0, GZAI       = 4.7056D-1,
OMEGAO   = 0.00      , OMEGAW    = 0.11532D0,
N(BW)    = 10        , NT(BW)    = 60.00      , AT(BW)    = 0.00
NT(KW)   = 20.00      , AT(KW)    = 0.00      ,
ATN(KW)  = 50.00      , ATP(KW)   = 5.00      ,
PRINT    = 100      ,
LAMDA(CM) = 10.00D0 , NLEVEL    = 35
C DLT-GAMMA = 1.07847D-1, N(GAMMA) = 10      , N(PSI)    = 50
C DLT-GAMMA = 2.15694D-1, N(GAMMA) = 10      , N(PSI)    = 50
```

## 4.2.2 JCL例

## (1) ロードモジュールの作成方法

```

//JCLG JOB
//JCLG EXEC JCLG
//SYSIN DD DATA,DLM='++'
// JUSER 12343991,YA.KISHIMOTO,0032.01
  T.O W.O I.2 C.1
  OPTP PASSWORD=ILoveFEL,NOTIFY=J3991 →①
// EXEC FORT77VP,SO=J3991.FEL1DVP,A='ELM(*),INCLUDE',RGN=1024K,
//      B='NOVS,NOVMSG' →②
//SYSINC DD DSN=J3991.FEL1DINC.FORT77,DISP=SHR
// EXEC LKEDCT77,LM=J3991.FEL1DVP,UNIT=00020
++          ③           ④
//
```

- ① ソースプログラム名
- ② インクルードファイル名
- ③ ロードモジュール名
- ④ ロードモジュールを作成するユニット名

## (2) ロードモジュールの実行方法

```

//JCLG JOB
//JCLG EXEC JCLG
//SYSIN DD DATA,DLM='++'
// JUSER 12343991,YA.KISHIMOTO,0032.01
    T.6 W.O I.3 C.1
    OPTP PASSWORD=ILOVEFEL,NOTIFY=J3991,CLASS=0
//*****EXEC LMGO,LM=J3991.FEL1DVP ① →②
//FT01F001 DD DSN=J3991.RNZ01.DATA,DISP=OLD
//FT01F001 DD DSN=J3991.RNZ02.DATA,DISP=OLD →③
/*FT01F001 DD DSN=J3991.RNZ01.DATA,DISP=(NEW,CATLG,DELETE),UNIT=TSSWK,
/* DCB=(RECFM=VBS,DSORG=PS),SPACE=(TRK,(30,10),RLSE)
/*FT02F001 DD DSN=J3991.RNX01.DATA,DISP=(NEW,CATLG,DELETE),UNIT=TSSWK,
/* DCB=(RECFM=VBS,DSORG=PS),SPACE=(TRK,(300,10),RLSE)
//SYSIN DD *
C=====
④ C      FREE-ELECTRON-LASER AMPLIFIERS SYSTEM ANALYSIS CODE
C          TEST     INPUT   DATA
C-----
OPT      = 1
N        = 500      , PITCH NO. = 100      , MESH NO. = 500
PIN      = 1.D2      , DA/DZ     = 0.0D-00 ,
GAMMA    = 10.7847D0, GZAI       = 4.7056D-1,
OMEGAO   = 0.D0      , OMEGAW    = 0.11532D0,
N(BW)    = 10        , NT(BW)    = 60.D0    , AT(BW)     = 0.D0
NT(KW)   = 20.0DO   , AT(KW)    = 0.D0    ,
ATN(KW)  = 50.0DO   , ATP(KW)   = 5.D0    ,
PRINT    = 100      ,
LAMDA(CM) = 10.00DO , NLEVEL    = 35
C DLT-GAMMA = 1.07847D-1, N(GAMMA) = 10      , N(PSI)     = 50
/*
+++
//
```

① ロードモジュール名

② 図形出力用ファイル名（論理機番:FT01F001）

ファイル編成は、レコード形式=VBS を指定する。

③ 図形出力用ファイル名（論理機番:FT02F001）

ファイル編成は、レコード形式=VBS を指定する。

④ 入力データ

## 4.2.3 出力結果の説明

① \*\*\*\*  
 FREE-ELECTRON-LASER  
 AMPLIFIERS SYSTEM  
 ANALYSIS CODE  
 \*\*\*\*

DATE : 1989-04-13  
 TIME : 12:04:20

② C=====  
 C FREE-ELECTRON-LASER AMPLIFIERS SYSTEM ANALYSIS CODE  
 C TEST INPUT DATA  
 C-----  
 OPT = 1  
 N = 500 , PITCH NO. = 100 , MESH NO. = 500  
 PIN = 1.D2 , DA/DZ = 0.0D-00 ,  
 GAMMA = 10.7847D0, GZAI = 4.7056D-1,  
 OMEGA0 = 0.00 , OMEGAW = 0.11532D0,  
 N(BW) = 10 , NT(BW) = 60.00 , AT(BW) = 0.00  
 NT(KW) = 20.000 , AT(KW) = 0.00 ,  
 ATN(KW) = 50.000 , ATP(KW) = 5.00 ,  
 PRINT = 100 ,  
 LAMDA(CM) = 10.0000 , NLEVEL = 35  
 C DLT-GAMMA = 1.07847D-1, N(GAMMA) = 10 , N(PSI) = 50  
 C DLT-GAMMA = 2.15694D-1, N(GAMMA) = 10 , N(PSI) = 50

③ CALCULATED V3 VALUE = 0.0 -9.88991D-01 0.0 9.88991D-01

④ INITIAL VALUE OF V1 & V3 = -1.15320D-01 9.88991D-01

\*\*\*\*\* I N P U T \*\*\*\*\*

\*\*\* CALCULATION WITH SCALAR POTENTIAL \*\*\*

```

XLMID : WIGGLER PERIOD ( CM ) = 1.0000D+01
NP : NO. OF ELECTRONS IN A SINGLE WIGGLER PERIOD = 1.0000D+01
NPSI : NO. OF ELECTRONS IN A PHASE SPACE = 500
NGamma : NO. OF ELECTRONS IN A ENERGY SPREAD SPACE = 500
AS : NO. OF PITCH = 1
GZAI : PARAMETER (GZAI) = 100
OMGAOP : PARAMETER (COMEGA/GAMMA-KW-C) = 4.7056D-01
OMGAOP : PARAMETER (COMEGA/(GAMMA-KW-C)) = 0.0
GAMMAO : PARAMETER (GAMMA) = 1.1532D-01
DTGM : PARAMETER (GAMMA) = 1.0785D+01
RN : NO. OF ADIABATIC PITCHES IN OMEGAW(A) = 0.0
RNB : TAPERING START PITCH IN OMEGAW(Z) = 0.0
ABW : TAPERING SLOPE IN OMEGAW(Z) = 6.0000D+01
BBW : TAPERING PARAMETER IN OMEGAW(Z) = 0.0
RNK : TAPERING START PITCH IN KW(Z) = 1.2437D+00
D : LINEAR TAPERING SLOPE IN KW(Z) = 2.0000D+01
EKW : LINEAR TAPERING PARAMETER IN KW(Z) = 0.0
A:N : PITCH NO. IN ADIABATIC TAPER IN KW(Z) = 1.0000D+00
ATP : KW/KWO AT ATN IN KW(Z) (ADIABATIC TAPER) = 5.0000D+01
NSDLT : NO. OF STEPS IN THE SINGLE WIGGLER PERIOD = 500
OMGAON : THE AMPLITUDES OF THE AXIAL GUIDE FIELDS = 0.0
BWN : THE AMPLITUDES OF THE WIGGLER FIELDS = 1.2437D+00
VZO : INITIAL AXIAL VELOCITY = 9.9569D-01
WN : WAVE FREQUENCY = 8.3392D+01
WBZN : PARAMETER (COMEGAB**2) = 2.3880D+00
DLTZN : STEP SIZE = 1.2556D-02

-- INITIAL VALUE --
DA : THE AMPLITUDES OF THE VECTOR POTENTIALS = 7.2492D-06
DA1 : DIFFERENTIAL VALUE OF DA = 0.0
XKPLSN : WAVE VECTOR K+ = 8.3391D+01
DP : THE AMPLITUDES OF THE SCALAR POTENTIALS = 7.0085D-11
XKN : WAVE VECTOR K = 8.4391D+01
P1N : MOMENTUM (X) = 0.0
P2N : MOMENTUM (Y) = 0.0
P3N : MOMENTUM (Z) = 0.0
V1N : VELOCITY (X) = 0.0
V2N : VELOCITY (Y) = 0.0
V3N : VELOCITY (Z) = 0.0
OMGAWN : THE AMPLITUDES OF THE WIGGLER FIELDS = 9.9569D-01
ZSTRTN : INITIAL AXIAL POSITION = 0.0
DLTPSI : PHASE INCREMENT = 1.2556D-02

PHASE "
0.          PSI (-)  PSI (-)  PSI (-)  PSI (-)  PSI (-)  PSI (-)
1.          -3.1416D+00 -3.1416D+00
2.          -3.1290D+00 -3.1290D+00
3.          -3.1165D+00 -3.1165D+00
4.          -3.1039D+00 -3.1039D+00

```

\*\*\*\*\*  
⑥ O U T P U T  
\*\*\*\*\*

PITCH NO.	=	0,	2	(-)	=	0.0
DELTA-A	:	VECTOR POTENTIALS	( - )	=	7.24920-06	
K+	:	WAVE VECTOR	( - )	=	8.3391D+01	
DELTA-PHI	:	SCALAR POTENTIALS	( - )	=	7.0085D-11	
K	:	WAVE VECTOR	( - )	=	8.4391D+01	
DA1/DA	:	GROWTH RATE(VECTOR)	( - )	=	0.0	
DP1/DP	:	GROWTH RATE(SCALAR)	( - )	=	-5.3025D-01	
EFF	:	ENERGY EFFICIENCY	( - )	=	0.0	
RKW	:	KW(z)		=	1.0000D+00	
OMGAWN	:	OMEGAW(z)		=	0.0	
DA**2	:	VECTOR POWER		=	5.2550D-11	
DP**2	:	SCALAR POWER		=	4.9119D-21	

NO.	=	V1	( - )	V2	( - )	V3	( - )	PSI	( - )	PSI-L(-)	( - )	DPS1/DZ(-)	( - )	GAMMA(-)
1	0.0	0.0	9.9569D-01	-3.1416D+00	-3.1416D+00	6.3785D-01	1.0785D+01							
2	0.0	0.0	9.9569D-01	-3.1290D+00	-3.1290D+00	6.3785D-01	1.0785D+01							
3	0.0	0.0	9.9569D-01	-3.1165D+00	-3.1165D+00	6.3785D-01	1.0785D+01							
4	0.0	0.0	9.9569D-01	-3.1039D+00	-3.1039D+00	6.3785D-01	1.0785D+01							
5	0.0	0.0	9.9569D-01	-3.0913D+00	-3.0913D+00	6.3785D-01	1.0785D+01							
6	0.0	0.0	9.9569D-01	-3.0788D+00	-3.0788D+00	6.3785D-01	1.0785D+01							
7	0.0	0.0	9.9569D-01	-3.0662D+00	-3.0662D+00	6.3785D-01	1.0785D+01							
8	0.0	0.0	9.9569D-01	-3.0536D+00	-3.0536D+00	6.3785D-01	1.0785D+01							
9	0.0	0.0	9.9569D-01	-3.0411D+00	-3.0411D+00	6.3785D-01	1.0785D+01							
10	0.0	0.0	9.9569D-01	-3.0285D+00	-3.0285D+00	6.3785D-01	1.0785D+01							
11	0.0	0.0	9.9569D-01	-3.0159D+00	-3.0159D+00	6.3785D-01	1.0785D+01							
12	0.0	0.0	9.9569D-01	-3.0034D+00	-3.0034D+00	6.3785D-01	1.0785D+01							
13	0.0	0.0	9.9569D-01	-2.9908D+00	-2.9908D+00	6.3785D-01	1.0785D+01							
14	0.0	0.0	9.9569D-01	-2.9782D+00	-2.9782D+00	6.3785D-01	1.0785D+01							
15	0.0	0.0	9.9569D-01	-2.9657D+00	-2.9657D+00	6.3785D-01	1.0785D+01							
16	0.0	0.0	9.9569D-01	-2.9531D+00	-2.9531D+00	6.3785D-01	1.0785D+01							
17	0.0	0.0	9.9569D-01	-2.9405D+00	-2.9405D+00	6.3785D-01	1.0785D+01							
18	0.0	0.0	9.9569D-01	-2.9280D+00	-2.9280D+00	6.3785D-01	1.0785D+01							
19	0.0	0.0	9.9569D-01	-2.9154D+00	-2.9154D+00	6.3785D-01	1.0785D+01							
20	0.0	0.0	9.9569D-01	-2.9028D+00	-2.9028D+00	6.3785D-01	1.0785D+01							
21	0.0	0.0	9.9569D-01	-2.8903D+00	-2.8903D+00	6.3785D-01	1.0785D+01							
22	0.0	0.0	9.9569D-01	-2.8777D+00	-2.8777D+00	6.3785D-01	1.0785D+01							
23	0.0	0.0	9.9569D-01	-2.8651D+00	-2.8651D+00	6.3785D-01	1.0785D+01							
24	0.0	0.0	9.9569D-01	-2.8526D+00	-2.8526D+00	6.3785D-01	1.0785D+01							
25	0.0	0.0	9.9569D-01	-2.8400D+00	-2.8400D+00	6.3785D-01	1.0785D+01							
26	0.0	0.0	9.9569D-01	-2.8274D+00	-2.8274D+00	6.3785D-01	1.0785D+01							
27	0.0	0.0	9.9569D-01	-2.8149D+00	-2.8149D+00	6.3785D-01	1.0785D+01							
28	0.0	0.0	9.9569D-01	-2.8023D+00	-2.8023D+00	6.3785D-01	1.0785D+01							
29	0.0	0.0	9.9569D-01	-2.7897D+00	-2.7897D+00	6.3785D-01	1.0785D+01							
30	0.0	0.0	9.9569D-01	-2.7772D+00	-2.7772D+00	6.3785D-01	1.0785D+01							
31	0.0	0.0	9.9569D-01	-2.7646D+00	-2.7646D+00	6.3785D-01	1.0785D+01							
32	0.0	0.0	9.9569D-01	-2.7520D+00	-2.7520D+00	6.3785D-01	1.0785D+01							
33	0.0	0.0	9.9569D-01	-2.7395D+00	-2.7395D+00	6.3785D-01	1.0785D+01							
34	0.0	0.0	9.9569D-01	-2.7269D+00	-2.7269D+00	6.3785D-01	1.0785D+01							
35	0.0	0.0	9.9569D-01	-2.7143D+00	-2.7143D+00	6.3785D-01	1.0785D+01							

⑦ SATURATED DELTA-A LEVEL = 4.3533460D-02  
 ⑧ SATURATED POWER (W/CM2) = 3.6063857D+09  
 ⑨ SATURATED DELTA-PHI LEVEL = 1.5831598D-04  
 ⑩ SATURATED ENERGY EFFICIENCY LEVEL = 5.6700632D-01  
 ⑪ SATURATED ENERGY EFFICIENCY LEVEL = 5.6648042D-01  
     ( DELTA-A DERIVATIVE )

⑫ <<< CPU TIME >>> 469.88 SEC

- ① タイトル
- ② 入力データ一覧
- ③ (9)式を解いた $\bar{v}$ の解
- ④ 分散式を解く際に選択した $\bar{v}_1$ 、 $\bar{v}_3$ の初期値

- ⑤ 入力された、または、初期に設定されたパラメータ

CALCULATION WITH SCALAR POTENTIAL : 静電ポテンシャルを含んだ計算を実行。

CALCULATION WITHOUT SCALAR POTENTIAL : 静電ポテンシャルを含まない計算を実行。

XLMD	: 初期のウィグラー周期 (cm)
NP	: 1周期内の粒子の数
NS	: ウィグラーの全周期数
GZA1	: 規格化されたビーム密度 $\xi$
OMGOP	: 規格化されたガイド磁場強度 $\Omega_0 / \gamma k_{w0}$
OMGWP	: 規格化されたウィグラー磁場強度 $\Omega_w / \gamma k_{w0}$
GAMMA0	: 粒子エネルギー $\gamma$
DLTGM	: ビームのエネルギー広がり $\Delta \gamma$
RN	: $\bar{\kappa}_w(z)$ の adiabatic 領域の周期数 $n_w$
RNB	: $\bar{\kappa}_w(z)$ の tapering を開始する周期数 $n_b$
ABW	: $\bar{\kappa}_w(z)$ の linear tapering の傾き $\beta$
BBW	: $\bar{\kappa}_w(z)$ の linear tapering の y 切片
RNK	: $\bar{\kappa}_w(z)$ の tapering を開始する周期数 $n_k$
D	: $\bar{\kappa}_w(z)$ の linear tapering の傾き $\beta$
EKW	: $\bar{\kappa}_w(z)$ の linear tapering の y 切片
ATN	: $\bar{\kappa}_w(z)$ の adiabatic tapering の決定周期数
ATP	: $\bar{\kappa}_w(z)$ の adiabatic tapering の $k_w/k_{w0}$ の値
NSDLT	: 1周期あたりのRUNGE-KUTTA 法の分割数

OMGAQN	: 規格化されたガイド磁場強度	$\tilde{\Omega}_0 = \Omega_0/k_{wc}$
BWN	: 規格化されたウィグラー磁場強度	$\tilde{\Omega}_w = \Omega_w/k_{wc}$
VZO	: 規格化された初期のZ方向速度	$\tilde{v}_{z0} = v_{z0}/c$
WN	: 規格化された電磁波の周波数	$\tilde{\omega} = \omega/c k_w$
WB2N	: 規格化されたプラズマ振動数	$\tilde{\omega}_b^2 = (\omega_b/c k_w)^2$
DLTZN	: RUNGE-KUTTA 法の1ステップのきざみ巾	
CURRENT DENSITY	: ビーム電流密度	(kA/cm <sup>2</sup> )
NB	: 平均電子密度	(1/m <sup>3</sup> )
B0	: ガイド磁場強度	(T)
BW	: ウィグラー磁場強度	(T)
ENERGY	: 入射ビームエネルギー	(MeV)
△ENERGY	: 入射ビームエネルギー巾	(MeV)
VZ	: 初期のZ方向速度	(m/s)
OMEGA	: 電磁波の周波数	(Hz)
DA	: 初期のベクトルポテンシャル	$a_s$
DA1	: 初期のベクトルポテンシャルの一階微分値	$a_{s+}$
XKPLSN	: 初期の電磁波の規格化された波数	$k_+$
DP	: 初期のスカラーポテンシャル	$\phi$
XKN	: 初期の静電波の規格化された波数	$k_-$
P1N	: x方向の粒子の運動量	$p_1$
P2N	: y方向の粒子の運動量	$p_2$
P3N	: z方向の粒子の運動量	$p_3$
V1N	: x方向の粒子の速度	$v_1$
V2N	: y方向の粒子の速度	$v_2$
V3N	: z方向の粒子の速度	$v_3$
OMGAWN	: 初期の規格化されたウィグラー磁場強度	$\tilde{\Omega}_w$
ZSTRTN	: 初期の $k_{wz}$	$z$
DLTPSI	: 粒子の波に対する初期位相の間隔	$\Delta\phi$
POWER	: 初期の入射パワー密度	(W/cm <sup>2</sup> )
k+	: 初期の電磁波の波数	(1/m)
k	: 初期の静電波の波数	(1/m)
PSI	: 電磁波に対する粒子の初期の位相	$\psi$
PSI-L	: 静電波に対する粒子の初期の位相	$\psi_\ell$

## (6) 印刷間隔毎の計算結果 (全て無次元数)

PITCH NO. : 周期数

Z	: ウィグラーの長さ	$\tilde{z}$
DELTA-A	: ベクトルポテンシャル	$a_s$
$k_+$	: 電磁波の波数	$\tilde{k}_+$
DELTA-PHI	: スカラーポテンシャル	$\phi$
$k$	: 静電波の波数	$\tilde{k}$
DA1/DA	: ベクトルポテンシャルの成長率	$d(\ln a_s)/dz$
DP1/DP	: スカラーポテンシャルの成長率	$d(\ln \phi)/dz$
EFF	: エネルギーの変換効率	$\eta$
RKW	: 規格化されたウィグラー波数	$\tilde{\kappa}_w(z)$
BWN	: 規格化されたウィグラー磁場強度	$\tilde{\sigma}_w(z)$
DA**2	: $a_s^2$	
DP**2	: $\phi^2$	
V1	: x 方向の粒子の速度	$\tilde{v}_1$
V2	: y 方向の粒子の速度	$\tilde{v}_2$
V3	: z 方向の粒子の速度	$\tilde{v}_3$
PSI	: 電磁波に対する粒子の位相	$\psi$
PSI-L	: 静電波に対する粒子の位相	$\psi_\ell$
DPSI/DZ	: 電磁波と粒子の位相差	$d\psi/dz$
GAMMA	: 粒子エネルギー	$\tau$

- ⑦  $a_s$  の飽和レベル
- ⑧ 出力パワー密度の飽和レベル (W/cm<sup>2</sup>)
- ⑨  $\phi$  の飽和レベル
- ⑩ 飽和エネルギー変換効率 (28)式より算出したもの
- ⑪ 飽和エネルギー変換効率 (27)式より算出したもの
- ⑫ 計算に要したC P U時間 (sec)

## 4.2.4 エラーメッセージ一覧

以下に、コードのエラーメッセージとユーザーの対応を示す。

エラー番号	メッセージ	内容	ユーザーの対応
## ERROR1	NECESSARY DIMENSION SIZE IS GREATER THAN SETTING VALUE. PROGRAM STOP. (MAIN) USED SIZE = ??? MAXIMUM SIZE = ###	必要な配列のサイズがプログラム内で設定したサイズより大きい。 必要なサイズ = ??? プログラムサイズ = ###	MainプログラムのParameter文でNDIM=???で設定してある箇所を必要なサイズに変更する。
## ERROR2	THE INPUT ITEM (??? ???????) IS NOT RE- GISTERED.	入力項目がプログラム内に登録されていない。	入力項目名に誤りがないか確かめる。
## ERROR3	INITIAL VALUE OF K+ IS COMPLEX NUMBER.	分散式を解いたらk+の初期値が複素数になった。	入力値がFEL1D-PRMの計算結果と合致しているかどうか確認。
## ERROR4	THERE IS NO REAL SOLUTION OF V3.	初期のv <sub>3</sub> の解に実数解がない。	入力値がFEL1D-PRMの計算結果と合致しているかどうか確認。
## ERROR5	DISPERSION EQUATION CANNOT BE SOLVED.	分散式中のパラメータ中の値が負になり解くことができない。	入力値がFEL1D-PRMの計算結果と合致しているかどうか確認。

## ERRO6	NP .NE. NPSI*NGAMMA PROGRAM STOP. (MAIN)  NP = \$\$\$ NPSI = ??? NGAMMA = ####	総粒子数が位相空間中の粒子数と $\tau$ 空間中の粒子数の積に等しくない。  総粒子数 = \$\$\$ 位相空間中の粒子数 = ??? $\tau$ 空間中の粒子数 = ####	入力値が $NP = NGAMMA \times NPSI$ になるように変更する。
## ERRO7	NGAMMA MUST BE EQUAL TO ???? PROGRAM STOP. (MAIN)  NGAMMA = \$\$\$	$\tau$ 空間中の粒子数が????に等しくなくてはならない。  $\tau$ 空間中の粒子数 = \$\$\$	入力値が????に なるように変更 する。

## 4.3. F E L 1 次元解析コード作図プログラム ( F E L 1 D G R P )

## 4.3.1 入力データ

入力データは、以下の規則に従って、作成する。

## 〔1〕 'PARTICLE NO.' カード

$v/c$  vs.  $z/\lambda_w$  の作図の際に指定する。指定しない場合は標準値がとられる。

No.	変数名	フォーマット	内容	標準値
1	LBL	A20	'P A R T I C L E N O.'	-
2	NPRCL	*	選択する粒子の個数	10
3	NP1 (i=1, NPRCL)	*	粒子No.	粒子数を等分 割した値

## 〔2〕 'PITCH NO.' カード

$1/k_w \cdot d\phi/dz$  vs.  $\phi$ ,  $r$  vs.  $\phi$ , および  $r$  分布図の作図の際に指定する。指定しない場合は標準値がとられる。

No.	変数名	フォーマット	内容	標準値
1	LBL	A20	'P I T C H N O.'	-
2	NPRCL	*	選択する周期の個数	10
3	NP2 (i=1, NPITCH)	*	周期No.	周期数を等分 割した値

## 〔3〕 'PLOT11 AXIS' カード

$a_s$ ,  $\phi$  vs.  $z/\lambda_w$  の対数軸作図の際に指定する。指定しない場合は標準値がとられる。

No.	変数名	フォーマット	内容	標準値
1	LBL	A20	'PLOT11 AXIS'	-
2	P11MIN	*	y 軸の最小値	$10^{-11}$
3	P11MAX	*	y 軸の最大値	$10^{-1}$

## 〔4〕 'PLOT12 AXIS' カード

$1/k_w \cdot d(1na_s)/dz, 1/k_w \cdot d(1n\phi)/dz$  vs.  $z/\lambda_w$  の作図の際に指定する。指定しない場合はプログラム内部で、自動的にスケールが決められる。

No.	変数名	フォーマット	内容	標準値
1	LBL	A20	'PLOT12 AXIS'	—
2	P12MIN	*	y 軸の最小値	—
3	P12MAX	*	y 軸の最大値	—

## 〔5〕 'PLOT13 AXIS' カード

$a_s^2, \phi^2$  vs.  $z/\lambda_w$  の作図の際に指定する。指定しない場合はプログラム内部で、自動的にスケールが決められる。

No.	変数名	フォーマット	内容	標準値
1	LBL	A20	'PLOT13 AXIS'	—
2	P13MIN	*	左 y 軸の最小値	—
3	P13MAX	*	左 y 軸の最大値	—

## 〔6〕 'PLOT14 AXIS' カード

$k_+/k_w, k_-/k_w$  vs.  $z/\lambda_w$  の作図の際に指定する。指定しない場合はプログラム内部で、自動的にスケールが決められる。

No.	変数名	フォーマット	内容	標準値
1	LBL	A20	'PLOT14 AXIS'	—
2	P14MIN	*	左 y 軸の最小値	—
3	P14MAX	*	左 y 軸の最大値	—

## 〔7〕 'PLOT51 AXIS' カード

$v/c$  vs.  $z/\lambda_w$  の作図の際に指定する。指定しない場合はプログラム内部で、自動的にスケールが決められる。

No.	変数名	フォーマット	内容	標準値
1	LBL	A20	'PLOT51 AXIS'	—
2	P13MIN	*	y 軸の最小値	—
3	P13MAX	*	y 軸の最大値	—

## 〔8〕 'PLOT52 AXIS' カード

Energy Efficiency vs.  $z/\lambda_w$  の作図の際に指定する。指定しない場合はプログラム内部で、自動的にスケールが決められる。

No.	変数名	フォーマット	内容	標準値
1	LBL	A20	'PLOT52 AXIS'	—
2	P13MIN	*	y 軸の最小値	—
3	P13MAX	*	y 軸の最大値	—

## 〔9〕 'PLOT53 AXIS' カード

$k_w/k_{w0}$ ,  $\Omega_w/k_w c$  vs.  $z/\lambda_w$  の作図の際に指定する。指定しない場合はプログラム内部で、自動的にスケールが決められる。

No.	変数名	フォーマット	内容	標準値
1	LBL	A20	'PLOT53 AXIS'	—
2	P13MIN	*	左 y 軸の最小値	—
3	P13MAX	*	左 y 軸の最大値	—

## ⑩ 'PLOT2 AXIS' カード

$1/k_w \cdot d\phi/dz$  vs.  $\psi$  の作図の際に指定する。指定しない場合はプログラム内部で、自動的にスケールが決められる。

No.	変数名	フォーマット	内容	標準値
1	LBL	A20	'PLOT2 AXIS'	—
2	P13MIN	*	y 軸の最小値	—
3	P13MAX	*	y 軸の最大値	—

## ⑪ 'PLOT3 AXIS' カード

$r$  vs.  $\psi$  の作図の際に指定する。指定しない場合はプログラム内部で、自動的にスケールが決められる。

No.	変数名	フォーマット	内容	標準値
1	LBL	A20	'PLOT3 AXIS'	—
2	P13MIN	*	y 軸の最小値	—
3	P13MAX	*	y 軸の最大値	—

## ⑫ 'PLOT4 X-AXIS' カード

$r$  分布図の x 軸作図の際に指定する。指定しない場合はプログラム内部で、自動的にスケールが決められる。

No.	変数名	フォーマット	内容	標準値
1	LBL	A20	'PLOT4 X-AXIS'	—
2	P13MIN	*	x 軸の最小値	—
3	P13MAX	*	x 軸の最大値	—

## 13 'GAMMA SIZE' カード

$\gamma$  分布図の作図の際に指定する。指定しない場合はプログラム内部で、自動的にスケールが決められる。

No.	変数名	フォーマット	内容	標準値
1	LBL	A20	'GAMMA SIZE'	—
2	P13MIN	*	分布を表示する際の 1 区間の幅 データの最大値と最小値の間を 100 分割	

## 14 'GAMMA HEIGHT' カード

$\gamma$  分布図の作図の際に指定する。指定しない場合はプログラム内部で、自動的にスケールが決められる。

No.	変数名	フォーマット	内容	標準値
1	LBL	A20	'GAMMA HEIGHT'	—
2	P13MIN	*	y 軸の最大値	各図の最大値

### 4.3.2 實行方法

### (1) ロードモジュールの作成方法

ARGUSV4 内部の領域数の標準値(50000 word)では、本プログラムでは、不足となるので領域数を変更するために、ロードモジュールは、以下に示すマクロを用いて作成する。

マクロ : FELARGLM TSSMAC('TSSMAC.CLIST') SO(FEL1DGRP) LOAD(FEL1DGRP) LMOD(TEMPNAME)

NLP(ON) ARGSIZE(70000) NOEXEC

4

- ① 作図用ソースプログラム名を指定する。 (この場合、FEL1DGRP.FORT77)
  - ② ロードモジュール名を指定する。 (この場合、FEL1DGRP.LOAD)
  - ③ ロードモジュールのメンバ名を指定する。 (この場合、TEMPNAME)
  - ④ 変更する領域数。 (単位: word) (この場合、70000)

用いるTSSコマンドプロジェクトを以下に示す。

## TSSコマンドプロジェクト (FELARGLM)

```

PROC O TSSMAC('ARGPROC.CLIST') /*+
  SO(ON)
  ELM(*)
  FORT77(FORT77)
  JUSER(ON)
  OPT(2)
  INCLUDE(OFF)
  LANGLVL(77)
  CALL(BYNAME)
  PARM('NOASTER ALC')
  LOAD(əWK)
  LMOD(ARGUS)
  ENTRY(MAIN)
  PRVLIB('SYS9.NO')
  NLP(OFF)
  COM(OFF)
  COL(OFF)
  SP(50)
  SINC(10)
  FT05(*)
  DSN1(ON)
  DSN2(ON)
  DSN3(ON)
  DD1(FT01)
  DD2(FT02)
  DD3(FT03)
  ARGSIZE(OFF)
  OBJ(ON)
  LKEDUP
  NOEXEC

  /* USER TSS MACRO FILE          */
  /* FILE NAME OF SOURCE          (F) */+/
  /* MEMBER NAME OF S.F.          (F) */+/
  /* SOURCE FILE IDENTIFYER      (F) */+/
  /* USER ID FOR SOURCE FILE     (F) */+/
  /* OPTIMIZATION LEVEL          (F) */+/
  /* INCLUDE FILE NAME           (F) */+/
  /* LANGUAGE LEVEL               (F) */+/
  /* COMPILE OPTION               (F) */+/
  /*                                     (F) */+/
  /* LOAD MODULE FILE NAME        (L) */+/
  /* MEMBER NAME OF LOAD MODULE   (L) */+/
  /* PROGRAM NAME                 (L) */+/
  /* PRIVATE LIBRARY              (L) */+/
  /* LIBRALY NLP                  (L) */+/
  /* COM                           (L) */+/
  /* COLOR                         (L) */+/
  /* WORK LOAD MODULE SPACE       (L) */+/
  /*                                     (TRK) (L) */+/
  /* SYSIN FILE NAME              (R) */+/
  /* FILE NAME FOR DD1             (R) */+/
  /*                                     FOR DD2 (R) */+/
  /*                                     FOR DD3 (R) */+/
  /* DD-NAME                       (R) */+/
  /*                                     (R) */+/
  /*                                     (R) */+/
  /* ARGUS COMMON SIZE             */
  /* OPERATING OPTION              */
  /* LOAD MODULE UPDATE OPTION    */
  /* RUN OPTION                    */

```

```

***** ****
/*
/*   ((((( ARGUS )))))           JAERI      1984.03.31 *
/*
/*
/*           ===== TSS COMAND PROCEDURE ===== ( FORT77 VERSION ) *
/*
/*
/* CONTROL NOFLUSH NOMSG NOLIST
FREE F(SYSPROC)
ALLOC DA(&TSSMAC 'J2636.ARGPDOC.CLIST' 'SYS9.CMDPROC') F(SYSPROC) SHR
/*
SET &GO=&NOEXEC.ON
SET &LNEW=&LKEDUP.OFF
/*
ARGMAC SO(&SO) +
ELM('&ELM') +
FORT77(&FORT77) +
JUSER(&JUSER) +
OPT(&OPT) +
INCLUDE('&INCLUDE') +
LANGLVL(&LANGLVL) +
CALL('&CALL') +
PARM('&PARM') +
LOAD(&LOAD) +
LMOD(&LMOD) +
ENTRY(&ENTRY) +
PRVLIB('&PRVLIB') +
NLP(&NLP) +
COM(&COM) +
COL(&COL) +
SP(&SP) +
SINC(&SINC) +
FT05('&FT05') +
DSN1('&DSN1') +
DSN2('&DSN2') +
DSN3('&DSN3') +
DD1(&DD1) +
DD2(&DD2) +
DD3(&DD3) +
ARGSIZE(&ARGSIZE) +
OBJ(&OBJ) +
LNEW(&LNEW) +
GO(&GO)

/*
CONTROL NOFLUSH MSG LIST
FREE F(SYSPROC)
ALLOC DA(&TSSMAC 'SYS9.CMDPROC') F(SYSPROC) SHR
/*
FREE DA(&LOAD)
EXIT

```

## TSSコマンドプロシージャ (ARGMAC)

```

PROC O ARGLIB('J2636.ARGLIBV4')
SO(ON)                                     /* ARGUS SYSTEM LIBRALY NAME */
ELM(*)                                      /* FILE NAME OF SOURCE */
FORT77(FORT77)                            /* MEMBER NAME OF S.F. */
JUSER(ON)                                     /* SOURCE FILE IDENTIFIER */
OPT(2)                                       /* USER ID FOR SOURCE FILE */
INCLUDE(OFF)                                /* OPTIMIZATION LEVEL (F) */
LANGLVL(77)                                 /* INCLUDE FILE NAME (F) */
CALL(BYNAME)                                /* LANGUAGE LEVEL (F) */
PARM('NOASTER ALC')                         /* COMPILE OPTION (F) */
LOAD(@@WK)                                   /* LOAD MODULE FILE NAME (L) */
LMOD(ARGUS)                                 /* MEMBER NAME OF LOAD MODULE */
ENTRY(MAIN)                                  /* PROGRAM NAME (L) */
PRVLIB('SYS9.NO')                           /* PRIVATE LIBRARY (L) */
SP(50)                                       /* WORK LOAD MODULE SPACE (L) */
SINC(10)                                     /* (L) */
FT05(*)                                     /* SYSIN FILE NAME (R) */
DSN1(ON)                                     /* FILE NAME FOR DD1 (R) */
DSN2(ON)                                     /* FOR DD2 (R) */
DSN3(ON)                                     /* FOR DD3 (R) */
DD1(FT01)                                    /* DD-NAME (R) */
DD2(FT02)                                    /* (R) */
DD3(FT03)                                    /* (R) */
ARGSIZE(OFF)                                /* ARGUS COMMON SIZE */
OBJ(ON)                                      /* OPERATING OPTION */
LNEW(OFF)                                    /* LOAD MODULE UPDATE OPTION */
LKUPDT()                                     /* LINK SYSIN DATA FILE */
GO(ON)                                       /* RUN OPTION */

/*
***** ARGMAC
=====
/*
<<< ARGUS COMAND MACRO >>>      JAERI      1982.03.31
/*
=====
===== TSS COMAND PROCEDURE ( MACRO ) =====
/*
***** 
CONTROL NOFLUSH NOMSG NOLIST
  FREE F(FT05F001)
  FREE F(FT06F001)
  FREE F(FT85F001)
  FREE AT(SETFLW)
  FREE AT(SETFL98)
  FREE AT(LP)
  FREE AT(INMODE)
  FREE F(FT96F001 FT97F001 FT98F001 FT99F001)

/*
/*
CONTROL NOFLUSH NOMSG LIST PROMPT
=====
WRITE
WRITE      ((((( START ARGUS    &SYSDATE &SYSTIME )))))
WRITE
=====

IF &SO=ON THEN GOTO SFOB
CONTROL NOFLUSH NOMSG NOLIST
  DELETE TEMP.OBJ
  ALLOC DA(*) F(SYSTEM)
CONTROL FLUSH NOMSG NOLIST
  FREE F(SYSLIN)
  ALLOC DA(TEMP.OBJ) F(SYSLIN) SP(50 10) TR
/*

```

```

/*-----I
WRITE
WRITE      *** ARGUS : FORT77 ***
/*
IF &JUSER=&STR(ON) THEN SET &JUSER=&SYSUID
/*=====
CONTROL NOFLUSH MSG LIST
IF &INCLUDE NE OFF   THEN GOTO F77INC
  FORT77  '&JUSER..&SO..&FORT77' +
    OBJ(TEMP.OBJ) +
    LANGLVL(&LANGLVL) +
    OPT(&OPT) +
    &CALL +
    &PARM +
    NOGO +
    ELM(&ELM)
  GOTO F77END
F77INC: FORT77  '&JUSER..&SO..&FORT77' +
  INCLUDE('&INCLUDE') +
  OBJ(TEMP.OBJ) +
  LANGLVL(&LANGLVL) +
  OPT(&OPT) +
  &CALL +
  &PARM +
  NOGO +
  ELM(&ELM)
/*=====
F77END: SET &RC=&LASTCC
WRITE
WRITE      *** END OF FORT77 CODE: &RC ***
IF &RC LE 4 THEN GOTO ARGSIZE
/*
/*
FREE F(SYSLIN SYSTEM)
WRITE      * COMPILE ERROR *
GOTO ARGEND
SFOB: IF &OBJ=ON THEN GOTO ARGGO
/*
/*-----I
ARGSIZE: CONTROL NOFLUSH MSG NOLIST
IF &ARGSIZE=&STR(OFF) THEN GOTO ARGLNK
DELETE &TEMP.&OBJ.FORT77
DELETE &TEMP.&OBJ
/*===== PUT ( ARGUS )=====
GEM3 'J2636.ARGUSV4.FORT'
  ALLOC DA(&TEMP.&OBJ.FORT77) F(OUT) SP(3 1) TR
  PUT ARGUS OUT=OUT
END
FREE DA(&TEMP.&OBJ.FORT77)
FREE F(OUT)
/*===== CHANGE WORK SIZE =====
EDIT &TEMP.&OBJ.FORT77 OLD
V;CHANGE 2100 5300 /50000/&ARGSIZE/ A
END S
/*===== FREE F(SYSLIN)
  ALLOC DA(&TEMP.&OBJ) TR SP(5 1) F(SYSLIN)
  FORT77 &TEMP.&OBJ FIX OBJ(&TEMP.&OBJ) FLAG(W) NOGO
  DELETE &TEMP.&OBJ.FORT77
ARGLNK: WRITE      *** ARGUS :LKED ***
CONTROL FLUSH MSG LIST
  IF &LOAD NE &WK      THEN GOTO DLTELM
  IF &LNEW NE OFF      THEN GOTO DLTELM
  DELETE &LOAD..LOAD
  ALLOC DA(&LOAD..LOAD) NE CA SP(&SP &SINC) TR DIR(2) UNIT(TSSWK)
  GOTO GOLNK
/*

```

```

DLTELM: IF &LNEW=OFF THEN DELETE &LOAD..LOAD(&LMOD)
IF &LNEW=OFF THEN GOTO GOLNK
  CONTROL NOFLUSH NOMSG LIST
  SET &LKUPDT=@@@LINK.DATA
  FREE F(LKUP)
  DELETE @@@LINK.DATA
  ATTR LKUP RECFM(F B) LRECL(80) BLKSIZE(3200) DSORG(PS)
  ALLOC F(LDATA) DA(@@@LINK.DATA) NE CA SP(1 1) TR USING(LKUP)
  OPENFILE LDATA O
  SET &LDATA=&STRC INCLUDE OLDLM(&LMOD))
  PUTFILE LDATA
  SET &LDATA=&STRC ENTRY &ENTRY)
  PUTFILE LDATA
  SET &LDATA=&STRC NAME &LMOD.(R))
  PUTFILE LDATA
  CLOSEFILE LDATA
  FREE F(LKUP)
  FREE F(LDATA)
  FREE F(OLDLM)
  ALLOC DA(&LOAD..LOAD) F(OLDLM) SHR
GOLNK:  WRITE
  CONTROL FLUSH MSG LIST
  IF &ARGSIZE=OFF THEN GOTO LNK3
/*=====
  LINK (TEMP.OBJ &LKUPDT) +
  LOAD(&LOAD(&LMOD)) +
  LIB('&PRVLIB..LOAD' '&ARGLIB..LOAD' 'SYS9.GGS.LOAD' +
  'J2636.JGSP.LOAD' +
  'SYS9.JSSL.LOAD' 'SYS9.SSL.LOAD' 'SYS9.SSL2.LOAD' +
  'SYS2.FORTLIB') +
  LET +
  NOPRINT
  GOTO LNKEND
/*
/* == ARGUS SIZE UPDATE LOAD MODULE PRODUCE ==
LNK3: LINK (TEMP.OBJ @@TEMP@@.OBJ &LKUPDT) +
  LOAD(&LOAD(&LMOD)) +
  LIB('&PRVLIB..LOAD' '&ARGLIB..LOAD' 'SYS9.GGS.LOAD' +
  'J2636.JGSP.LOAD' +
  'SYS9.JSSL.LOAD' 'SYS9.SSL.LOAD' 'SYS9.SSL2.LOAD' +
  'SYS2.FORTLIB') +
  LET +
  NOPRINT
  GOTO LNKEND
/*=====
LNKEND:SET &RC=&LASTCC
  IF &LNEW=OFF THEN DELETE @@@LINK.DATA
  IF &LNEW=OFF THEN FREE F(OLDLM)
  WRITE      *** END OF LINK CODE: &RC ***
  WRITE
/*
/*
  FREE F(SYSTEM)
  IF &GO=ON     THEN GOTO ARGEND
  ELSE +
    IF &RC GT 8  THEN GOTO ARGEND
  WRITE
-----I
/*
ARGGO: WRITE      *** ARGUS : GO ***
/*
CONTROL NOFLUSH NOLIST MSG
  ATTRIB SETFLW BL(2700) LR(900) DSORG(PS)
  ATTRIB SETFL98 DSORG(DA) RECFM(F) BLKSIZE(3200) BUFN(1)
  ATTRIB LP BL(137) REC(U A)
  ATTRIB INMODE INPUT
  FREE F(FT06F001)
  ALLOC F(FT06F001) DA(*) US(LP)
  ALLOC F(FT85F001) DA(*)

```

## (2) J C L 例

```

//JCLG JOB
// EXEC JCLG
//SYSIN DD DATA,DLM='++'
// JUSER 12343991,YA.KISHIMOTO,0032.01
  T.3 C.3 W.0 I.4 GRP
  OOPTP NOTIFY=J3991,PASSWORD=ILOVEFEL
++
//      DD DSN=J2636.ARGSUJCL.CNTL(ARGGO),DISP=SHR
//      DD DATA,DLM='$$'                                ▶①
//ARGUSV4 EXEC ARGGO,LM='J3991.FEL1DGRP',PNM=TEMPNAME,GOUT=K  ▶②
//GO.FT01F001 DD DSN=J3991.RNZ01.DATA,DISP=OLD          ③
//GO.FT02F001 DD DSN=J3991.RNX01.DATA,DISP=OLD          ▶④
//GO.SYSIN DD *                                         ▶⑤
PITCH NO.
  12
⑥   20,25,30,35,40,45,50,55,60,70,80,90
PLOT11 AXIS
  1D-11 1000
PLOT53 AXIS
  0.0   6.0
PLOT2 AXIS
  -10.0 10.0
PLOT3 AXIS
  0.0   12.0
PLOT4 X-AXIS
  0.0   12.0
GAMMA HEIGHT
  80.0
/*
//$$
//
```

- ① コマンドプロジェクトFELARGLMで作成したロードモジュール名（この場合はFEL1DGRP, LOAD）を、指定する。
- ② コマンドプロジェクトFELARGLMで作成したメンバ名（この場合はTEMPNAME）を指定する。
- ③ 図形出力クラスを指定する。
- ④ FEL1DVP 実行時に、FT01F001で指定したファイル名を指定する。
- ⑤ FEL1DVP 実行時に、FT02F001で指定したファイル名を指定する。
- ⑥ 入力データ

```

IF &STR(&FT05)=&STR(*) THEN ALLOC F(FT05F001) DA(*)
    ELSE ALLOC F(FT05F001) DA('&FT05') US(INMODE)
    ALLOC F(FT96F001) NEW TR SP(50 10) USING(SETFLW)
    ALLOC F(FT97F001) NEW TR SP(50 10) USING(SETFLW)
    ALLOC F(FT98F001) NEW BLOCK(3200) SP(200 10) USING(SETFL98)
    ALLOC F(FT99F001) NEW TR SP(100 10) USING(SETFLW)
CONTROL NOFLUSH MSG LIST
SETFO1: IF &DSN1=ON THEN GOTO SETFO2
    SET &DDO1=&DD1.F001
    ALLOC F(&DDO1) DA('&DSN1') SHR
SETFO2: IF &DSN2=ON THEN GOTO SETFO3
    SET &DDO2=&DD2.F001
    ALLOC F(&DDO2) DA('&DSN2') SHR
/*
SETFO3: IF &DSN3=ON THEN GOTO GOARG
    SET &DDO3=&DD3.F001
    ALLOC F(&DDO3) DA('&DSN3') SHR
GOARG: WRITE
ATTN DO
    CONTROL NOFLUSH NOMSG LIST
    FREE F(FT05F001)
    FREE F(FT06F001)
    FREE F(FT85F001)
    FREE AT(SETFLW)
    FREE AT(SETFL98)
    FREE AT(LP)
    FREE AT(INMODE)
    FREE F(FT96F001 FT97F001 FT98F001 FT99F001)
FREEF11: IF &DSN1=ON THEN GOTO FREEF12
    FREE F(&DDO1)
FREEF12: IF &DSN2=ON THEN GOTO FREEF13
    FREE F(&DDO2)
FREEF13: IF &DSN3=ON THEN GOTO AAA
    FREE F(&DDO3)
AAA: SET &CMD=
    &CMD
    END
/*
/*
/*
/*
=====
    CALL &LOAD..LOAD(&LMod)
=====
/*
/*
/*
    FREE F(MASTER)
/*
WRITE      *** END OF ARGUS CODE: &LASTCC ***
    FREE F(FT05F001)
    FREE F(FT06F001)
    FREE F(FT85F001)
    FREE AT(SETFLW)
    FREE AT(SETFL98)
    FREE AT(LP)
    FREE AT(INMODE)
    FREE F(FT96F001 FT97F001 FT98F001 FT99F001)
FREEF01: IF &DSN1=ON THEN GOTO FREEF02
    FREE F(&DDO1)
FREEF02: IF &DSN2=ON THEN GOTO FREEF03
    FREE F(&DDO2)
FREEF03: IF &DSN3=ON THEN GOTO ARGEND
    FREE F(&DDO3)
ARGEND: WRITE      ***** ARGUS END *****
    EXIT

```

## 4.3.3 出力結果の説明

資料 3 -①      \*\*\* FREE-ELECTRON-LASER AMPLIFIERS SYSTEM ANALYSIS CODE \*\*

(2)

$B_0$	$(T)$	$=$	$0.0$	$\Omega_0/\tau_{k\gamma c}$	$=$	$0.0$	$\Omega_0/\tau_{k\gamma c}$	$=$	$0.0$	$\Omega_0/\tau_{k\gamma c}$	$=$	$0.0$	$\Omega_0/\tau_{k\gamma c}$	$=$	$0.0$	$\Omega_0/\tau_{k\gamma c}$	$=$	$0.0$	$\Omega_0/\tau_{k\gamma c}$	$=$	$0.0$	$\Omega_0/\tau_{k\gamma c}$	$=$	$0.0$			
$B_\infty$	$(T)$	$=$	$1.33200-01$	$\Omega_\infty/\tau_{k\gamma c}$	$=$	$1.15320-01$	$\Omega_\infty/\tau_{k\gamma c}$	$=$	$1.07850+00$	$\gamma$	$=$	$1.07850+01$	$\Delta\gamma$	$=$	$+0.0$	$\Delta\gamma$	$=$	$-0.0$	$\Delta\gamma$	$=$	$4.70560-01$	$\delta$	$=$	$2.66200+17$	$\omega/\omega_{ck\gamma}$	$=$	$8.33920+01$
Energy (MeV)		$=$	$5.00000+00$	$k$	$(1/m)$	$=$	$5.30240+03$	$k^+$	$(1/m)$	$=$	$5.23960+03$	$\lambda$	$(cm)$	$=$	$1.00000+01$	no. of particle	$=$	$500$	no. of mesh	$=$	$500$						
Energy (MeV)	$(1/m * 3)$	$=$	$0.0$	$\Omega_\infty/\tau_{k\gamma c}$	$=$	$1.07850+01$	$\Omega_\infty/\tau_{k\gamma c}$	$=$	$1.07850+01$	$\gamma$	$=$	$1.07850+01$	$\Delta\gamma$	$=$	$+0.0$	$\Delta\gamma$	$=$	$-0.0$	$\Delta\gamma$	$=$	$4.70560-01$	$\delta$	$=$	$2.66200+17$	$\omega/\omega_{ck\gamma}$	$=$	$8.33920+01$
nb	$(1/m * 3)$	$=$	$2.50000+11$	$\Omega_0/\tau_{k\gamma c}$	$=$	$0.0$	$\Omega_0/\tau_{k\gamma c}$	$=$	$0.0$	$\Omega_0/\tau_{k\gamma c}$	$=$	$0.0$	$\Omega_0/\tau_{k\gamma c}$	$=$	$0.0$	$\Omega_0/\tau_{k\gamma c}$	$=$	$0.0$	$\Omega_0/\tau_{k\gamma c}$	$=$	$0.0$	$\Omega_0/\tau_{k\gamma c}$	$=$	$0.0$	$\Omega_0/\tau_{k\gamma c}$	$=$	$0.0$
frequency (Hz)	$=$	$2.50000+11$																									

A-Power (W/cm<sup>2</sup>) = 3.60640\*19

資料3 - ③

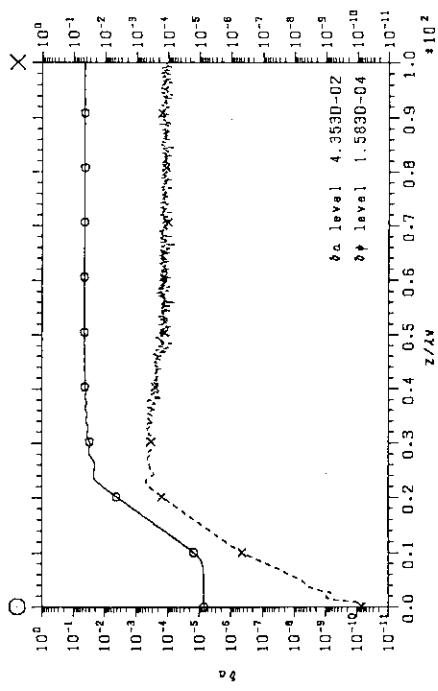


FIG. RADIATION-FIELD STRENGTH VS. AXIAL POSITION

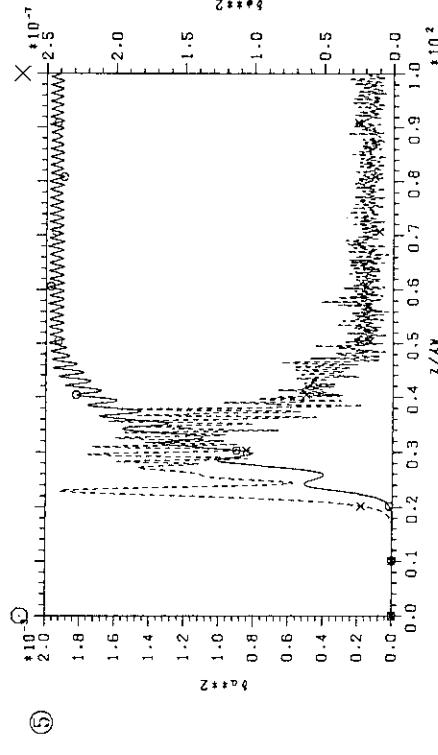


FIG. RADIATION-FIELD POWER VS. AXIAL POSITION

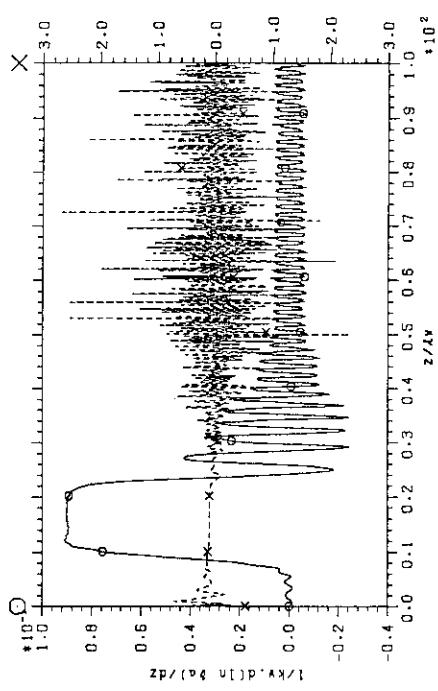


FIG. RADIATION-FIELD GROWTH RATE VS. AXIAL POSITION

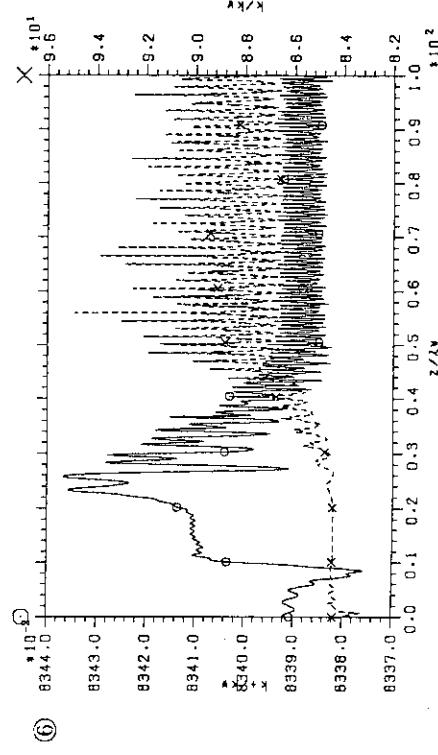


FIG. WAVE VECTOR STRENGTH VS. AXIAL POSITION

資料3 - ⑦

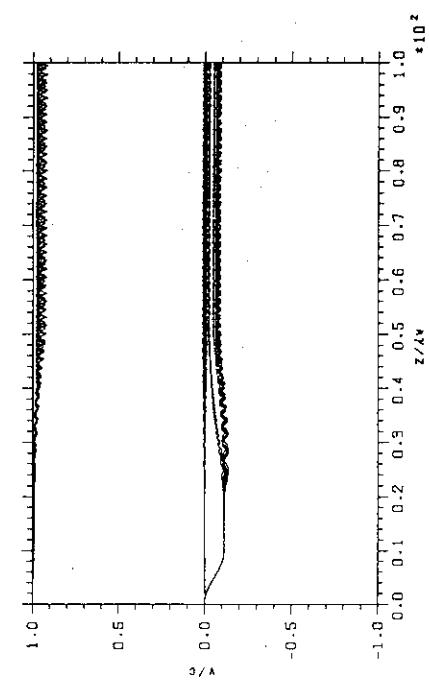


FIG. 16. SINGLE PARTICLES TRAJECTRIES VS. AXIAL POSITION

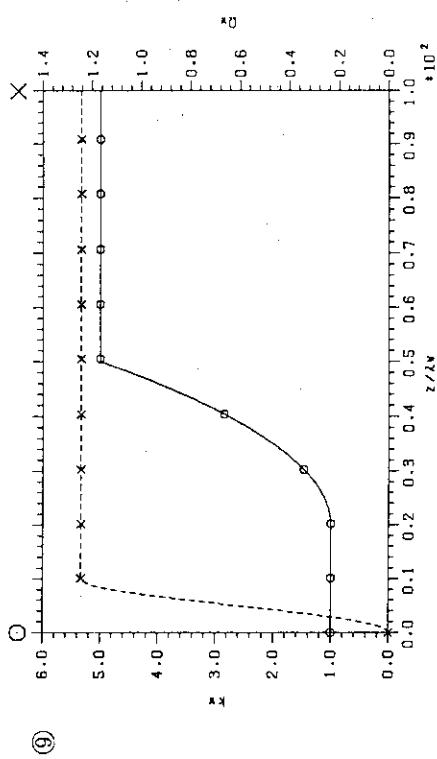


FIG. KW vs. Axial Position

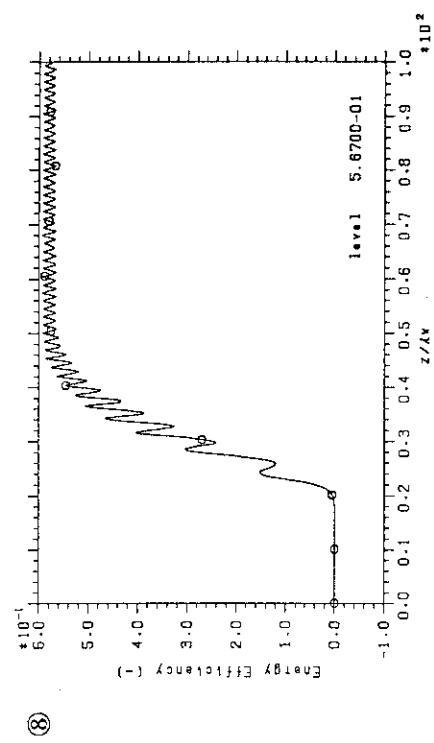
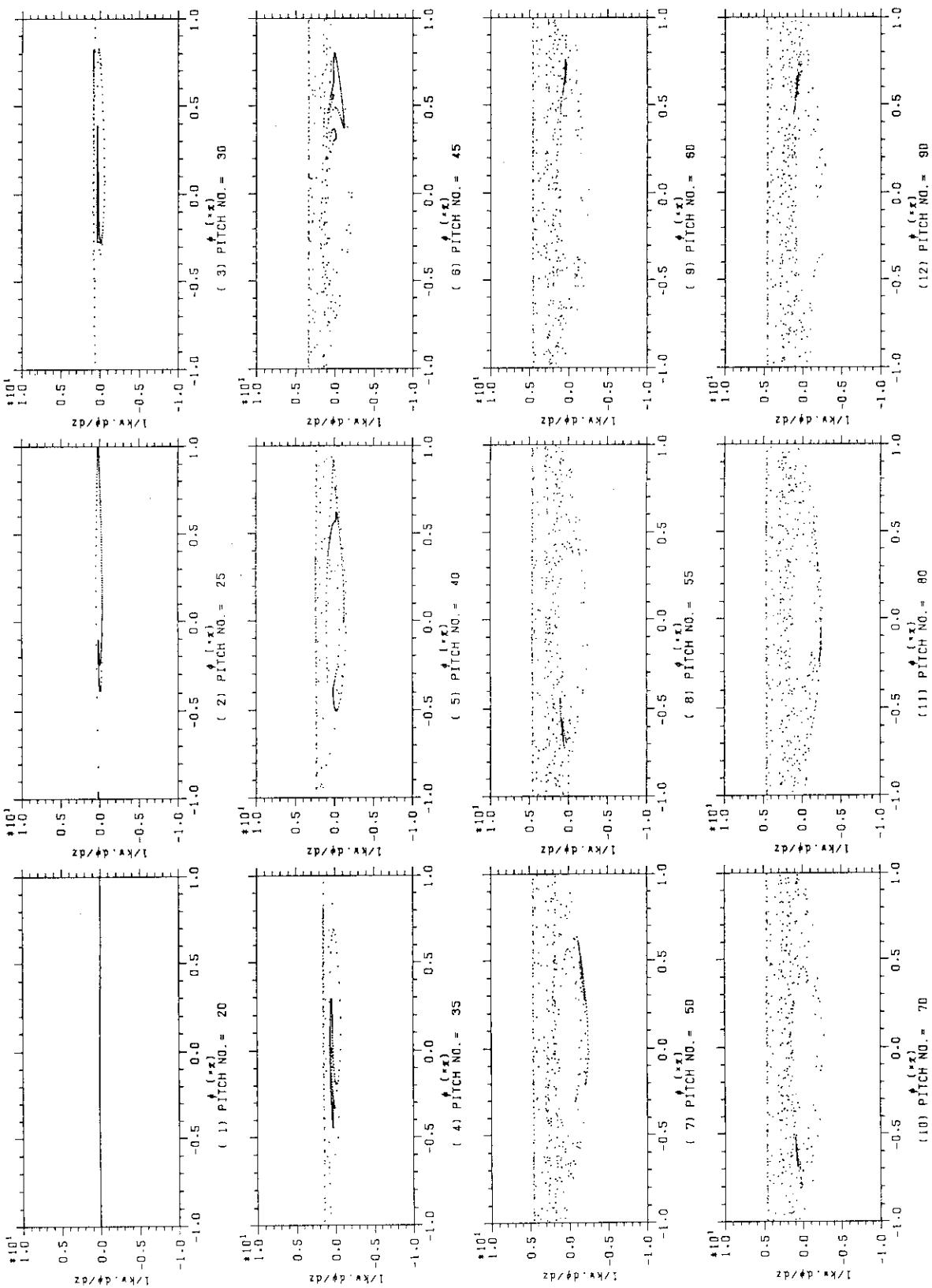
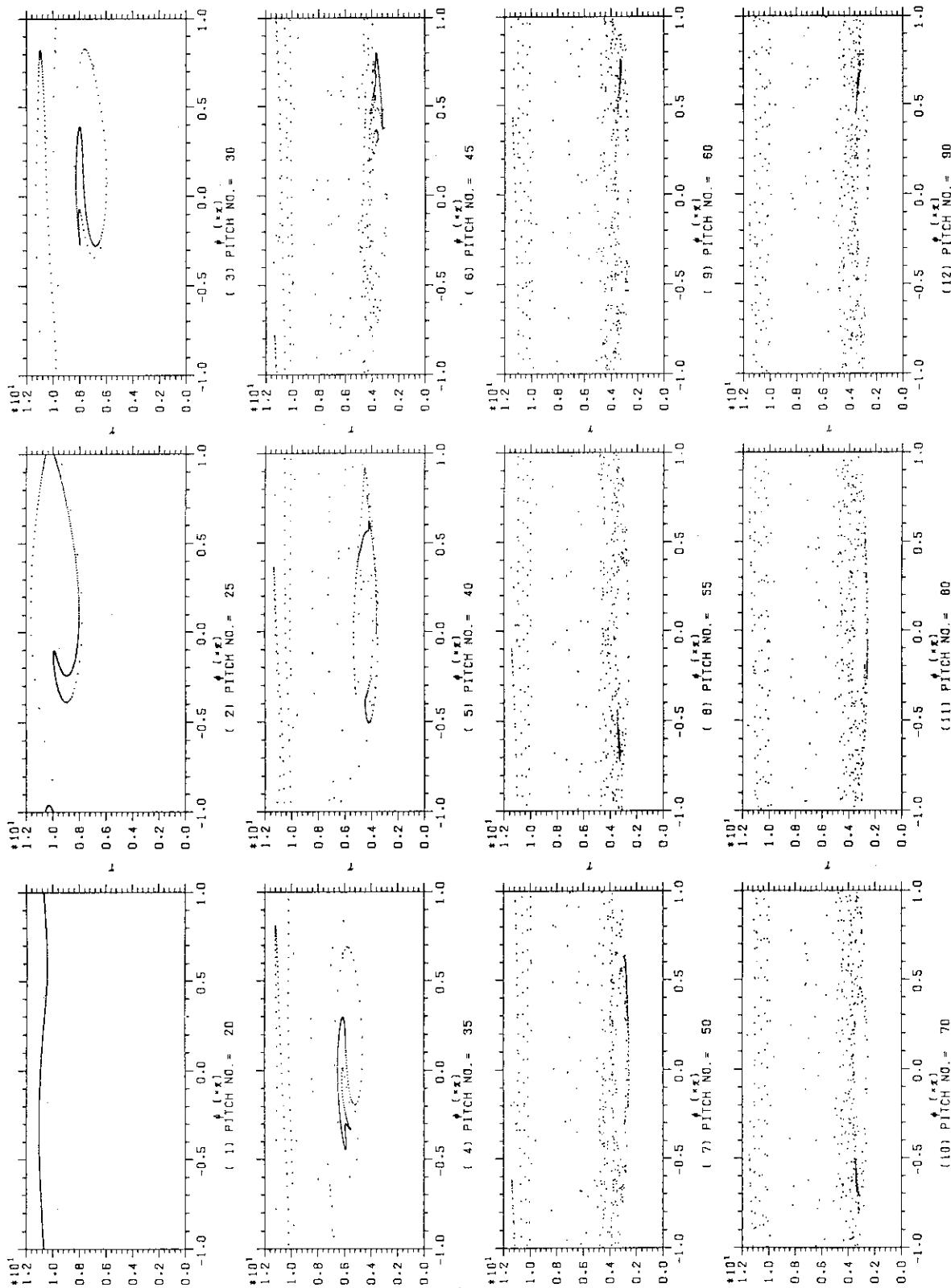


FIG. ENERGY EFFICIENCY VS. AXIAL POSITION

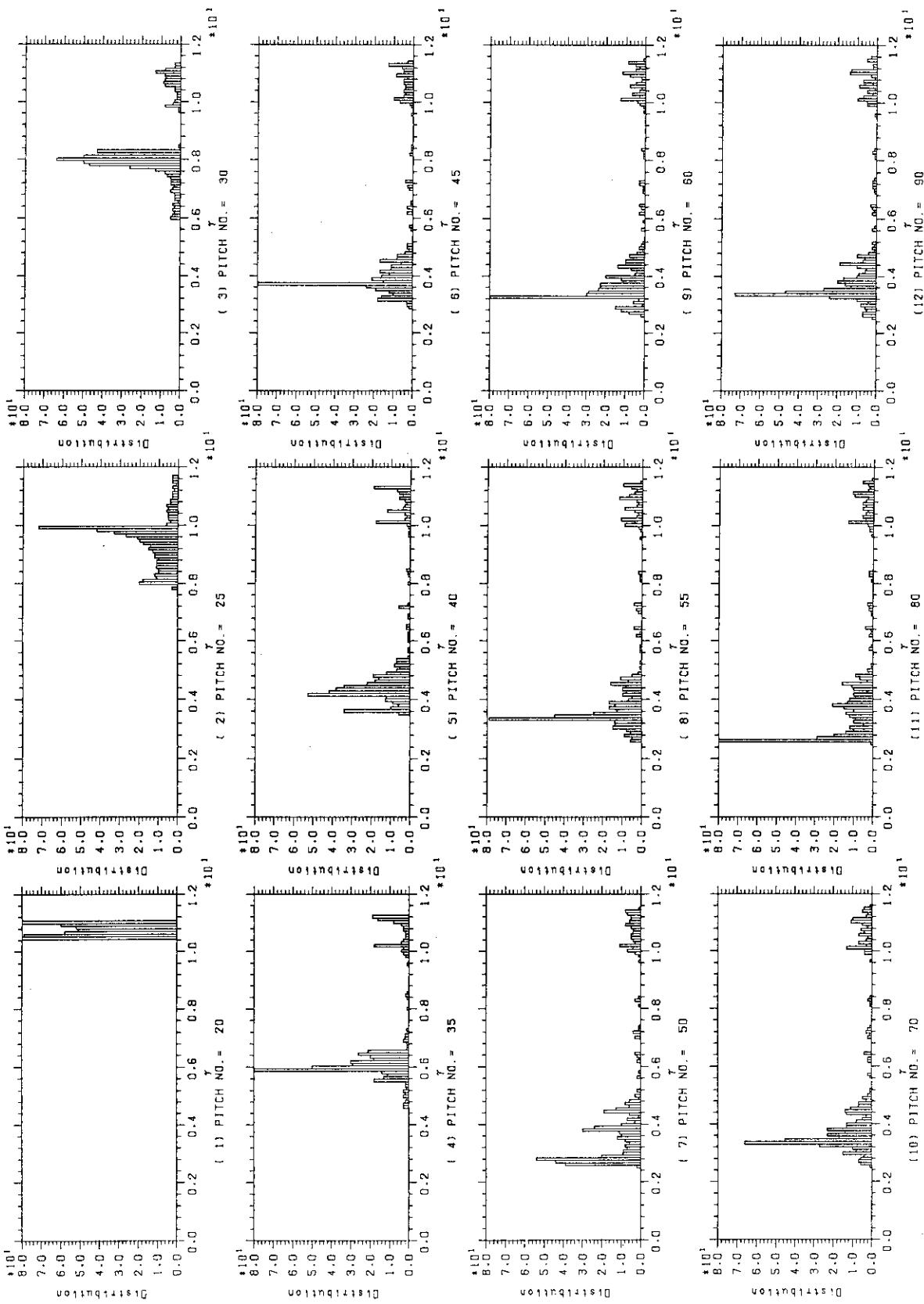
## 資料3 - ⑩



## 資料3 - (1)



## 資料3-⑫



## 資料 3-① タイトル

## ② パラメータ及び実測換算値

$B_0$	:	ガイド磁場強度	(T)
$B_w$	:	ウィグラー磁場強度	(T)
Energy	:	入射ビームエネルギー	(MeV)
$\Delta$ energy	:	入射ビームエネルギー巾	(MeV)
$n_b$	:	平均電子密度	(1/m <sup>3</sup> )
frequency	:	電磁波の周波数	(Hz)
$\Omega_0/\gamma k_w c$	:	ガイド磁場の規格値	
$\Omega_w/\gamma k_w c$	:	ウィグラー磁場の規格値	
$\gamma$	:	粒子エネルギー	
$\Delta \gamma$	:	ビームのエネルギー広がり	
$\xi$	:	規格化されたビーム密度	
$\omega/c k_w$	:	規格化された電磁波の周波数	
Power	:	初期の入射パワー密度	(W/cm <sup>2</sup> )
Current	:	ビーム電流密度	(kA/cm <sup>2</sup> )
$k$	:	初期の静電波の波数	(1/m)
$k^+$	:	初期の電磁波の波数	(1/m)
$\lambda$	:	初期のウィグラー周期	(cm)
$\delta a$	:	初期のベクトルポテンシャル	$a_s$
$\delta \phi$	:	初期のスカラーポテンシャル	$\phi$
$k^+/k_w$	:	初期の電磁波の規格化された波数	
$k^-/k_w$	:	初期の静電波の規格化された波数	
no. of particle	:	1周期内の粒子の数	
no. of mesh	:	1周期あたりのRUNGE-KUTTA 法の分割数	
A-Power	:	出力パワー密度の飽和レベル	(W/cm <sup>2</sup> )

③  $\delta a$ 、 $\delta \phi$  v s.  $z/\lambda_w$  の図

$\delta a$ level	:	$a_s$ の飽和レベル
$\delta \phi$ level	:	$\phi$ の飽和レベル

- 資料3 - ④  $1/k_w \cdot d(\ln \delta a)/dz, 1/k_w \cdot d(\ln \delta \phi)/dz$  vs.  $z/\lambda_w$  の図  
 ⑤  $\delta a^2$  and  $\delta \phi^2$  vs.  $z/\lambda_w$  の図  
 ⑥  $k+/k_w$  and  $k/k_w$  vs.  $z/\lambda_w$  の図  
 ⑦  $v/c$  vs.  $z/\lambda_w$  の図  
 ⑧ エネルギー効率 vs.  $z/\lambda_w$  の図
- l e v e l : 飽和エネルギー変換効率
- ⑨  $k_w/k_{w0}$  and  $\Omega_w/k_{w0}$  vs.  $z/\lambda_w$  の図  
 ⑩  $1/k_w \cdot d\psi/dz$  vs.  $\psi$  の図  
 ⑪  $r$  vs.  $\psi$  の図  
 ⑫  $r$  分布関数

## 4.3.4 エラーメッセージ一覧

以下に、コードのエラーメッセージとユーザーの対応を示す。

エラー番号	メッセージ	内容	ユーザーの対応
### ERRO1	NO. OF PARTICLES IS GREATER THAN DIMENSI ON SIZE.  NP = ??? NDIM1 = ###	粒子数がプログラム内で設定 したサイズより大きい。  粒子数 = ??? プログラムサイズ = ###	Mainプログラム のParameter文 でNDIM1=###で 設定してある箇 所を必要サイズ に変更する。
### ERRO2	NO. OF STEPS IS GREATER THAN DIMENSION SIZE.  NDIM3 = ###	ステップ数がプログラム内で 設定したサイズより大きい。  粒子数 = ??? プログラムサイズ = ###	Mainプログラム のParameter文 でNDIM3=###で 設定してある箇 所を必要サイズ に変更する。
### ERRO3	NO. OF SELECTED PARTICLES IS GREATER THAN ??????  DIMENSION SIZE=?????  NO. OF PARTICLES = #####	選択粒子数がプログラム内で 設定したサイズより大きい。  配列サイズ = ??????  粒子数 = #####	入力の選択粒 子数を配列サ イズより小さくす る。
### ERRO4	NO. OF SELECTED PITCHES IS GREATER THAN ??????  DIMENSION SIZE=?????  NO. OF PITCHES =#####	選択ピッチ数がプログラム内 で設定したサイズより大きい  配列サイズ = ??????  ピッチ数 = #####	入力の選択ピ ッチ数を配列サ イズより小さく する又は、Main プログラムの Parameter文で NDIM4=????? で 設定してある箇 所を必要サイズ に変更する。

### ERROR5	INPUT CARDLABEL IS UNREGISTERED. LABEL=&&&&&&	入力ラベル名が登録されていない。 入力ラベル名 = & & & & & &	入力ラベルに誤りが無いかどうか確かめる。
### ERROR6	TOO MANY LINES IN ONE FIGURE. LINE NO. IS LESS THAN 48.	v/c vs. z/λw の図の中に入れる粒子数が多すぎる。 1図の線数は48未満。	入力選択粒子数を15以下にする。
### ERROR7	GAMMA DISTRIBUTION IS GREATER THAN DIMENSION SIZE.  NGM = ?????? NDIM5 = #####	τ 分布の分割数が、プログラム内の配列サイズより大きい  分割数 = ? ? ? ? プログラムサイズ = #####	入力 τ 分布区間幅を大きくする 又は Main プログラムの Parameter 文で NDIM5= ##### で設定してある箇所を変更する。

## 5. 考察とまとめ

自由電子レーザーの基本設計に有用である、実空間1次元・単一モードの非線形FEL増幅コードが作製された。ウィグラー磁場はヘリカル形状で与えられ、電子ビームを安定に伝播させるための縦磁場（ガイド磁場）、入射ビームのエネルギー広がり、さらにウィグラーのピッチや磁場強度が空間的に変化する tapered wiggler 等が考慮されている。このFELコードを起動させることにより、与えられた装置パラメータ（ビームモード及び電磁波モードの分散式より決定される）とビームパラメータに対して、入射電磁波の線形成長率や線形成長の飽和距離（必要なウィグラー長に対応する）、電磁波の出力パワーやビームから電磁波へのエネルギー変換効率等を決定することができる。また、ビームの進行方向の粒子間の静電的な相互作用を取り入れるため、Coulomb ゲージの範囲内でポアソン方程式が解かれている。このため、特にビーム電流の大きなラマン領域で電磁波の成長に影響を及ぼすと考えられている静電ポテンシャルの効果を取り扱うことが可能である。さらに、図形処理プログラムを起動させることにより、任意のウィグラーの位置における粒子の速度分布関数や、位相空間での詳細な粒子の運動状態を知ることができる。このような図形処理は、特に高い効率を得るために tapered wiggler を用いた FEL 設計を行う上でも有用である。

4.3.3 項の出力結果の説明において用いたビーム及び装置パラメータは、ビームエネルギー  $E_b = 5 \text{ MeV}$  ( $r \sim 10.8$ )、ビーム電流密度  $I_b = 1.27 \text{ kA/cm}^2$ 、発振周波数  $250 \text{ GHz}$ 、ウィグラーのピッチ  $\lambda_w = 10 \text{ cm}$ （一定領域）及び磁場強度  $B_{w0} = 1.33 \text{ kG}$ （一定領域）、ガイド磁場  $B_0 = 0$  の場合の結果を示しており、 $20 \leq z/\lambda_w \leq 50$  の範囲でウィグラーのピッチに(53)式で与えられるような断熱的な tapered wiggler を使用している。資料 3-③からわかるように、線形成長の飽和距離  $L_s$  は、入力パワー密度  $P_{in} \sim 190 \text{ W/cm}^2$  に対して  $L_s \sim 10 \lambda_w$  (1m) 程度であり、ラマン領域特有の大きな成長率（資料 3-④より、 $\Gamma = d \ln a_s / dz \sim 0.056 \text{ cm}^{-1}$ ）を示している。tapered wiggler を使用しない時の平均の飽和出力パワーは、 $\bar{P}_r \sim 0.34 \times 10^9 \text{ W/cm}^2$ （エネルギー変換効率  $\eta = e \bar{P}_r / E_b I_b \sim 5.4\%$ ）程度である。これに対して、資料 3-⑨で与えられるような tapered wiggler を用いると、ウィグラー長  $L = 50 \lambda_w (= 5 \text{ m})$  程度で  $\bar{P}_r \sim 3.7 \times 10^9 \text{ W/cm}^2$  ( $\eta \sim 60\%$ ) となり高い変換効率が得られている。また、資料 3-③及び資料 3-⑤の点線は、静電ポテンシャルの空間分布を示しているが、電磁場と同様の線形成長が飽和した後、tapered wiggler の領域に入ると、電子群に対し  $20 \leq z/\lambda_w \leq 50$  の領域にウィグラー・ピッチの空間変化による実効的な静電場が作用しているのがわかる。資料 3-⑩と⑪は、線形成長の飽和前の  $z/\lambda_w = 20$  からの各粒子に対して、粒子と動重力ポテンシャルとの位相差（phase shift） $d\phi/d\tilde{z} = \tilde{k}_+ + \tilde{k}_w - r\tilde{\omega}/\tilde{P}_3$ （資料 3-⑩）及び粒子エネルギー  $\gamma$ （資料 3-⑪）の位相空間 ( $-\pi \leq \phi \leq \pi$ ) での振る舞いを示している。tapered wiggler を使用すると、粒子群は動重力ポテンシャルの井戸に捕捉された状態でポテンシャルの位相速度が小さくなるため、粒子のエネルギーが  $\gamma \sim 10$  付近から  $\gamma \sim 3.5$  付近まで減速され、粒子から電磁波にエネルギーが移行している。この様子は、粒子の速度分布関数を描いた資料 3-⑫から

もよくわかり、位相速度の減速過程で粒子の再非捕獲はほとんど起きていない。

なお、ここで開発された F E L コードは、約 97% のベクトル化率を有しており、装置設計の最適化を図るための多量の parameter study にも適している。しかし、実空間はビームの伝播方向だけ考慮した 1 次元モデルであり、かつ発振周波数に対しては単一モードのため、現在 F E L 研究の主流になりつつある径方向の媒質の不均一性や導波管形状の効果、あるいは side-band 不安定性等に関連した多モードの効果や発振周波数の広がり等は解析の対象外である。このため、現実の F E L 設計に対して数個の本質的な制約条件が付加されていることは、本コードの使用に先立ち特別の注意を要することを最後に付け加えておく。

### 謝 辞

本 F E L コード及び報告書を作成するにあたり、有益な議論と御教示を戴いた志甫諒主任研究員、前田彦祐プラズマ実験室長、プラズマ実験室 M T X グループの方々（大麻和美副主任研究員、小田島和男主任研究員、星野克道研究員、小川俊英研究員）に深く感謝致します。また F E L 実験及び理論の側面より熱心に討論を戴いた河原崎雄紀核物理第 2 研究室長、佐々木健元物理部副主任研究員（現・（財）原子力データセンター）、大久保牧夫物理部副主任研究員、田口俊弘元理化学研究所研究員（現・摂南大学電気工学科助教授）、車伸一郎レーザー技術総合研究所研究員、三間園興大阪大学レーザー核融合研究センター教授に深く感謝致します。最後に、終始一貫して激励していただいた 竹田辰興理論解析研究室長、田中正俊那珂研究所長に深く感謝致します。

### 参 考 文 献

- 1) 近藤 淳、電子技術総合研究所調査報告第 200 号 ( 1979 )
- 2) T. Kwan, J. M. Dawson, and A. T. Lin, Phys. Fluids **20**, 581 ( 1977 )
- 3) P. Sprangle, Cha-Mei Tang, and W. H. Manheimer, Phys. Rev. **A21**, 302 ( 1980 ).
- 4) K. N. Kroll, P. L. Morton, and M. N. Rosenbluth, IEEE J. Quantum Electron **17**, 1436 ( 1981 ).
- 5) H. P. Freund, Phys. Rev. **A27**, 1977 ( 1983 ).
- 6) H. P. Freund, P. Sprangle, D. Dillenberg, E. H. da Jornada, R. S. Schneider, and B. Lilerman, Phys. Rev. **A26**, 2004 ( 1982 ).
- 7) T. Takeda, T. Tsunematsu, and S. Tokuda : " Integrative Graphic Subroutine Package ARGUS-V4 ", Compt. Phys. Commun. **34**, 15 ( 1984 )

もよくわかり、位相速度の減速過程で粒子の再非捕獲はほとんど起きていない。

なお、ここで開発された F E L コードは、約97%のベクトル化率を有しており、装置設計の最適化を図るための多量の parameter study にも適している。しかし、実空間はビームの伝播方向だけ考慮した1次元モデルであり、かつ発振周波数に対しては単一モードのため、現在 F E L 研究の主流になりつつある径方向の媒質の不均一性や導波管形状の効果、あるいは side-band 不安定性等に関連した多モードの効果や発振周波数の広がり等は解析の対象外である。このため、現実の F E L 設計に対して数個の本質的な制約条件が付加されていることは、本コードの使用に先立ち特別の注意を要することを最後に付け加えておく。

### 謝 辞

本 F E L コード及び報告書を作成するにあたり、有益な議論と御教示を戴いた志甫諒主任研究員、前田彦祐プラズマ実験室長、プラズマ実験室 M T X グループの方々（大麻和美副主任研究員、小田島和男主任研究員、星野克道研究員、小川俊英研究員）に深く感謝致します。また F E L 実験及び理論の側面より熱心に討論を戴いた河原崎雄紀核物理第2研究室長、佐々木健元物理部副主任研究員（現・（財）原子力データセンター）、大久保牧夫物理部副主任研究員、田口俊弘元理化学研究所研究員（現・摂南大学電気工学科助教授）、車伸一郎レーザー技術総合研究所研究員、三間園興大阪大学レーザー核融合研究センター教授に深く感謝致します。最後に、終始一貫して激励していただいた 竹田辰興理論解析研究室長、田中正俊那珂研究所長に深く感謝致します。

### 参 考 文 献

- 1) 近藤 淳、電子技術総合研究所調査報告第200号(1979)
- 2) T. Kwan, J. M. Dawson, and A. T. Lin, Phys. Fluids **20**, 581 (1977)
- 3) P. Sprangle, Cha-Mei Tang, and W. H. Manheimer, Phys. Rev. **A21**, 302 (1980).
- 4) K. N. Kroll, P. L. Morton, and M. N. Rosenbluth, IEEE J. Quantum Electron **17**, 1436 (1981).
- 5) H. P. Freund, Phys. Rev. **A27**, 1977 (1983).
- 6) H. P. Freund, P. Sprangle, D. Dillenberg, E. H. da Jornada, R. S. Schneider, and B. Lilerman, Phys. Rev. **A26**, 2004 (1982).
- 7) T. Takeda, T. Tsunematsu, and S. Tokuda : " Integrative Graphic Subroutine Package ARGUS-V4 ", Compt. Phys. Commun. **34**, 15 (1984)

もよくわかり、位相速度の減速過程で粒子の再非捕獲はほとんど起きていない。

なお、ここで開発された F E L コードは、約97%のベクトル化率を有しており、装置設計の最適化を図るための多量の parameter study にも適している。しかし、実空間はビームの伝播方向だけ考慮した1次元モデルであり、かつ発振周波数に対しては単一モードのため、現在 F E L 研究の主流になりつつある径方向の媒質の不均一性や導波管形状の効果、あるいは side-band 不安定性等に関連した多モードの効果や発振周波数の広がり等は解析の対象外である。このため、現実の F E L 設計に対して数個の本質的な制約条件が付加されていることは、本コードの使用に先立ち特別の注意を要することを最後に付け加えておく。

### 謝 辞

本 F E L コード及び報告書を作成するにあたり、有益な議論と御教示を戴いた志甫諒主任研究員、前田彦祐プラズマ実験室長、プラズマ実験室 M T X グループの方々（大麻和美副主任研究員、小田島和男主任研究員、星野克道研究員、小川俊英研究員）に深く感謝致します。また F E L 実験及び理論の側面より熱心に討論を戴いた河原崎雄紀核物理第2研究室長、佐々木健元物理部副主任研究員（現・（財）原子力データセンター）、大久保牧夫物理部副主任研究員、田口俊弘元理化学研究所研究員（現・摂南大学電気工学科助教授）、車伸一郎レーザー技術総合研究所研究員、三間園興大阪大学レーザー核融合研究センター教授に深く感謝致します。最後に、終始一貫して激励していただいた 竹田辰興理論解析研究室長、田中正俊那珂研究所長に深く感謝致します。

### 参 考 文 献

- 1) 近藤 淳、電子技術総合研究所調査報告第200号(1979)
- 2) T. Kwan, J. M. Dawson, and A. T. Lin, Phys. Fluids **20**, 581 (1977)
- 3) P. Sprangle, Cha-Mei Tang, and W. H. Manheimer, Phys. Rev. **A21**, 302 (1980).
- 4) K. N. Kroll, P. L. Morton, and M. N. Rosenbluth, IEEE J. Quantum Electron **17**, 1436 (1981).
- 5) H. P. Freund, Phys. Rev. **A27**, 1977 (1983).
- 6) H. P. Freund, P. Sprangle, D. Dillenberg, E. H. da Jornada, R. S. Schneider, and B. Lilerman, Phys. Rev. **A26**, 2004 (1982).
- 7) T. Takeda, T. Tsunematsu, and S. Tokuda : " Integrative Graphic Subroutine Package ARGUS-V4 ", Compt. Phys. Commun. **34**, 15 (1984)