

# SAD によるリング設計

## OHO '99 高エネルギー加速器セミナー

黒田 茂

1999/7/2

### 目次

1. 序文.....	2
2. 計算の準備..... 3	
3. オプティクス計算..... 6	
3.1 周期的セルの計算.....	6
3.2 周期的セル間のマッチング.....	9
3.3 リング全体の計算.....	13
4. FFS でよく使われるコマンド.....	15
4.1 フィットの条件の設定.....	15
4.2 フィットの変数.....	16
4.3 計算用コマンド.....	17
4.4 その他の便利なコマンド.....	17
5. おわりに.....	19

# 1. 序文

KEKで開発された計算機コードSADの大きな機能の一つにオプティクスへのマッチングがある。これは望むようなオプティクスにするためにはマグネット等の値をどう設定すればよいか計算することである。ここでは、SADを使ってマッチング等を行うやり方を、具体的にATF(Accelerator Test Facility)のダンピングリングの設計を例にとり、詳細を述べる。ただし実際SAD内でどのような計算が行われるか等は筆者の力量を超えるので触れない。その詳細については鎌田氏の講義を参照していただき、ここではSADのユーザーからの視点でひとつのリングの設計を紹介していきたい。初めてSADを使って何かを設計したい人に少しでも助けになれば幸いと思う。

まずは、ATFのダンピングリング<sup>1)</sup>についてであるが、これはリニアコライダー用のダンピングリングのテストマシンである。したがって、その設計は非常に小さなエミッタンスと短いダンピングタ

イムを目指す。具体的には、目標として、

$$\gamma \epsilon_x = 3 \times 10^{-6} \text{ m}$$

$$\tau_y = 10 \text{ msec}$$

を目指す。また、将来の実機のR&Dとしてコンバインドタイプの偏向電磁石やウイグラーマグネットを採用しているのも一つの特徴である。

コンバインドタイプの偏向電磁石を使う利点は、これがデフォーカシング成分をもつため偏向電磁石中でのデイスパージョンを小さくできる点にある。また、ダンピングパーティションナンバーもかせぐことができるので、平衡エミッタンスを小さくするのに非常に有利である。

ダンピング時間を短くするためには一周当りのシンクロトンエネルギーロスが大きくしてやらなければならないが、そのような装置のひとつとしてウイグラーマグネットが考えられている。

リングの形としてはレーストラック型で、図1にそのレイアウトを示す。図からわかるようにリングはスーパーピリオド2の対称性をもつ。

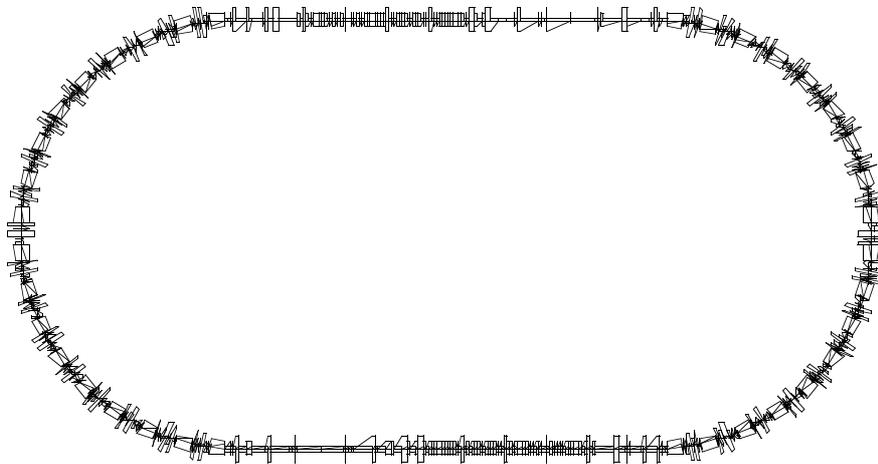


図1 ATFダンピングリングの見取り図

ーク部に周期的セルを配し、2つの直線部にウイグラーマグネットが設置される。もちろんこの直線部にRF部や入射および取り出し部も設置されることになる。リングのデザインエネルギーは1.54GeVである。リングは最終的にはマルチバンチ、マルチ

トレインで運転されることになる。設計時のスペックはバンチ間隔1.4nsecで20バンチのトレインを5トレイン貯蔵できることを目標とした。入射および取り出しキッカーのライズタイム、フォールタイムを60nsecと仮定するとおおよその周長は決まってし

まう。RF周波数は714MHzなので、ハーモニックナンバーを330にすることにすると、周長は約138.56 mである。

リングのダンピングタイムは次式で与えられる。

$$\tau_y = \tau_y^B \frac{1}{1 + \frac{s_W \rho_B}{2 \pi \rho_W^2}}$$

ここで $\tau_y^B$ はウイグラーマグネットがないときのダンピングタイム、 $s_W$ はウイグラーマグネットの磁極中での軌道長である。よって $\tau_y^B$ が与えられたとき $\rho_W$ と $s_W$ 、すなわちウイグラーマグネットの強さとその台数をダンピングタイムが目標値になるように調整しなければならない。

偏向電磁石は1mのコンバインドタイプのものを36台使うことにした。この電磁石の曲率半径は約5.7mである。このとき $\tau_y^B$ はエネルギー1.54GeV

では約16msecである。ウイグラーマグネットは、磁場計算等諸々の理由により、次のようなものが採用された。

長さ	2 m
磁場	1.8 T
磁極長	10 cm
周期	40 cm

曲率半径は約2.9mである。このウイグラーマグネットを使ってダンピングタイムを10 msec以下にするためには6台以上の電磁石が必要である。実際のリングでは、各直線部にこのウイグラーマグネットを4台ずつ計8台使うことにする。

またリングの平衡エミッタンスは次式で与えられる。

$$\epsilon_x = \frac{L_B \langle \frac{1}{\rho^2} \rangle_B J_B}{L_B \langle \frac{1}{\rho^2} \rangle_B J_B + L_W \langle \frac{1}{\rho^2} \rangle_W J_W} \epsilon_x^B + \frac{L_W \langle \frac{1}{\rho^2} \rangle_W J_W}{L_B \langle \frac{1}{\rho^2} \rangle_B J_B + L_W \langle \frac{1}{\rho^2} \rangle_W J_W} \epsilon_x^W$$

ここで $\rho$ は曲率半径で、添字B,Wはそれぞれアーク部およびウイグラー部を表わす。 $L, J$ はその部分の長さおよびダンピングパーティションナンバーである。ウイグラー部の寄与については、ウイグラーマグネットを決めてしまえば、ウイグラー部のデイスパージョンは小さいとして、この区間のベータ関数だけで決まってしまう。したがって、アーク部のエミッタンスをいかに小さくするかが問題となる。 $J_W = 1$ として先に述べた曲率半径等の値を使えば、

$$\begin{aligned} \epsilon_x &\cong \frac{J_B}{J_B + 1} \epsilon_x^B + \frac{1}{J_B + 1} \epsilon_x^W \\ &\leq \frac{1}{2} (J_B \epsilon_x^B + \epsilon_x^W) \end{aligned}$$

また

$$\begin{aligned} \epsilon_x^W [\text{m}] &\approx \frac{3.84 \times 10^{-13} \gamma^2}{\rho_W} \langle \mathcal{H}' \rangle_W \\ &\approx \frac{3.84 \times 10^{-13} \gamma^2}{2\rho_W} \bar{\beta}_W \left( \frac{l_W}{2\rho_W} \right)^2 = 1.1 \times 10^{-10} \bar{\beta}_W \end{aligned}$$

なので、ウイグラー部での平均のベータ関数の値を5mとしてやれば、 $3 \times 10^{-6}$  m以下の規格化平衡エミッタンスを達成するためには、アーク部でのエミッタンス $\epsilon_x^B$ を $J_B \epsilon_x^B = 1.45 \times 10^{-9}$  mとなるようにしてやれば十分である。実はこの条件は、上の式の変形の時に分母の $J_B$ だけを1として求めたので、

少し厳しすぎるものになっている。しかし、大体この値を目指して設計すればよい。

SADを使ったオプティクス計算としては、まずアーク部のオプティクスをエミッタンスが目標値に近くなるように決める。次にウイグラー部のベータ関数を適当に小さくなるようにしてやる。アーク部、ウイグラー部のオプティクスが決まったらそれらの間をマッチングしてやればひとつのリングのオプティクスが完成する。最後にそのリングのエミッタンスやダンピングタイムを確認して終了となる。以下にその詳細について述べる。

## 2. 計算の準備

SADを走らせるためにまず、いわゆる‘台本’と呼ばれるものを用意する。これはSADの計算に必要なパラメーターや電磁石そのものおよびその並び方等を定義するものである。

図2にその例を示す。第一行はコメント文である。‘！’記号の後ろはコメント文であるとみなされる。次の行ではエネルギーを指定している。この例の場合は1.54GeVである。三行目ではいくつかのフラッグをたてている。以下の表にこれらのフラッグが‘ON’のときの意味をまとめる。

```

! ATF-DR : FOBDO+WIGGLER
MOMENTUM= 1.542282 GEV;
OFF ECHO CTIME;ON COD RFSW RADCOD;
me=.511e-3; energy=1.542282; gamma=energy/me;
;
DRIFT LB  =(L = .3 )
      L   =(L = .14 ) LF   =(L = .1 ) LDF  =(L = .1 )
;
BEND BH   =(L = 1 ANGLE = .1745329252 K1 = -1.215541827 )
      ZY   =(L = .06 ANGLE = 0 ROTATE = 90 DEG )
      ZX   =(L = .06 ANGLE = 0 )
;
QUAD QF2  =(L = .09 K1 = .8412360142009 )
      QF3  =(L = .06 K1 = .0143664997472 )
;
SEXT SF   =(L = .06 K2 = 45.0881236862 )
      SD   =(L = .06 K2 = -74.9932329008 )
      SBH  = ( )
;
!----- Sextupole component by fringe effect -----
LINE
      BHC  =(SBH BH SBH)
;
MARK IP   =(ALPHAX = .0185967062 BETAX = 6.1520462282
      ALPHAY = -8.30876337E-3 BETAY = 1.3210958227
      EX = .1341066129 EPX = -2.795867E-4
      EMIX  =9*1.00E-4/gamma EMIY =9*1.00E-4/gamma DP =0.005)
;
CAVI CAV  =(VOLT = 770000 FREQ = 714000000 )
;
! --- BPM definition -----
LINE BPMCELL1=(LBPM1 M LBPM2)
      BPMCELL2=(LBPM3 M LBPM4)
;
MONI M =( );
DRIFT LBPM1 =(L = .057) LBPM2=( L=0.1-0.057)
      LBPM3 =(L =0.1-.052) LBPM4=( L=0.052)
LINE FOBDO =(IP
      QF2 BPMCELL1 SF LB SD BPMCELL2 BHC LDF LQF3 LDF ZY L ZX LF QF2 )
;

```

図2 SAD台本の例

ECHO	実行時に台本をダンプする
CTIME	CPU タイムの情報を表示する
COD	エミッタンス計算時に COD を見つける
RFSW	RF のスイッチをいれる
RADCOD	エミッタンス計算時に COD 上でのシンクロトロン放射によるエネルギー損失を考慮する

その他いろいろなフラッグが存在するが、それらについては参考文献 2 を参照していただきたい。四行目はユーザーが変数を定義している。ここでは電子質量等を定義しているが、あとで頻繁に使う定数などをこのようなかたちで定義しておくことと便利である。

さていよいよ加速器およびその構成要素の定義である。この例ではまずドリフトスペースを定義している。

DRIFT LB =(L=.3)

というのは'LB' という名前のドリフトスペースの長さが 30cm であることを示す。SAD では単位系は MKSA 単位系が用いられる。以下順に偏向磁石、四極および六極電磁石が定義されている。偏向磁石の場合は長さ以外にその偏向角を定義しなければならない。それは'ANGLE' というパラメーターで指定されている。単位はラジアンである。この例では示されていないが E1, E2 というパラメーターで入射角と出射角を指定できる。これらのデフォルト値は 0 でセクター型の偏向磁石であることを示す。レクタアンギュラー型にしたいなら、E1=0.5 E2=0.5 と書いておけばよい。すなわち、E1, E2 は入射角、出射角と偏向角の比である。また ATF のダンピングリングで用いられる主偏向磁石はコンパインドタイプなので、四極成分をもつ。これはパラメーター'K1' で指定される。'K1' は次式で定義される。

$$K1 = \frac{L}{B_0 \rho} \frac{dB_y}{dx}$$

ここで L は磁石の長さ、 $B_0$ 、 $\rho$  は主偏向磁石の磁場および曲率半径である。したがって  $B_0 \rho = p[\text{GeV}] / 0.3$  である。また  $dB_y / dx$  は磁場勾配である。結果として'K1' は 1/m の次元をもっている。また'ZY' という磁石は垂直方向の補正電磁石なので磁場の方向を 90° 回転させてやる必要がある。これが'ROTATE' というパラメーターで指定されている。このパラメーターを使えば任意に磁石

の角度を変えることができる。

四極磁石の定義では長さと共に定義した'K1' を指定すれば十分である。六極電磁石についても同様に長さと共に示される'K2' を指定すればよい。

$$K2 = \frac{L}{B_0 \rho} \frac{d^2 B_y}{dx^2}$$

'K2' の次元は  $1/m^2$  である。例で'SBH' という六極電磁石については何も指定していないが、実はこれは主偏向磁石のフリンジの六極成分の効果後にシミュレーションを行うために導入されたものである。長さも強さも 0 である。

この例では次に'BHC' というラインを定義している。これはさきほど述べたように主偏向磁石の両側に長さ 0 の六極電磁石をつけてひとつのかたまりと見なそうとしているわけである。

次はマーカーと呼ばれるものを定義している。後で述べる FFS というコマンドに使われるラインはこのマーカーから始まらなければならない。マーカーの実体は長さをもたない点であり、そこでの Twiss パラメーター等を指定できる。この例ではマーカー'IP' でのエミッタンスを指定するのに、はじめに定義した'gamma' というパラメーターを使っている。もっとも、FFS での計算の条件としてリングの場合によく使われる周期条件を課してしまえば、ここで指定した Twiss パラメーター等の値は意味がなくなる。しかしそのような場合でもラインの先頭の要素としてマーカーは定義されてなくてはならない。そのようなときは簡単に

MARK IP =( )

のように指定するのもよい。

次に定義されている要素は加速空洞である。これは加速電圧 VOLT (単位は V) と加速周波数 FREQ (単位は Hz) を指定できる。

次にまた'LINE' を定義しているが、これは BPM (ビームポジションモニター) の両側にドリフトスペースをつけてひとつのかたまりにしている。BPM はこのあとに定義されているが長さ 0 で特に何も指定する必要はないが、'M' が BPM であるという宣言だけはしておかなければならない。

そして最後に定義している'FOBDO' というラインを後々計算に使われることになる。このラインには今まで定義してきた主偏向磁石や四極磁石などが実際の加速器となるように並べられている。先にも述べたが、計算は FFS というコマンド内でおこなわれるのでこのラインは'IP' というマーカーから始まっている。またこの例のようにひとつのラインのなか

に他で定義した'BHC' や'BPMCELL1' 等のラインを組み込むこともSADでは可能である。もうひとつおもしろい例として、ここで定義したライン'FOBDO'を使って、

```
LINE FOBDO18=(18*FOBDO)
```

というように定義することもできる。これはライン'FOBDO'を18個続けて並べたものである。

これで一通りの準備ができたのでいよいよ計算にはいることになる。

### 3. オプティクス計算

オプティクスの計算はFFSというコマンドの中でおこなわれる。先に用意した台本のあとに  
FFS USE='linename';

と書けば'linename'というラインを用いた計算モードに入る。FFSから抜けるには'STOP'と打てばよい。このようにFFSまで含んだファイルを正確には台本と呼ぶが、ここでは加速器の定義等の準備と計算という意味で分けて考えることにする。初めからFFSで計算させる内容が決まっていれば、台本としてそのように書いてSADを走らせればよい。しかし、計算の途中でいろいろとチェックをしたいなどという場合には、FFSのなかで適当なところに'end'と書いておくことよい。こうしておけば、この'end'にきたところでSADは端末からのコマンド待ちの状態に入る。このようにインタラクティブに計算が可能なのもSADの便利な特徴のひとつである。

以下に具体的に計算の様子を見て見る。

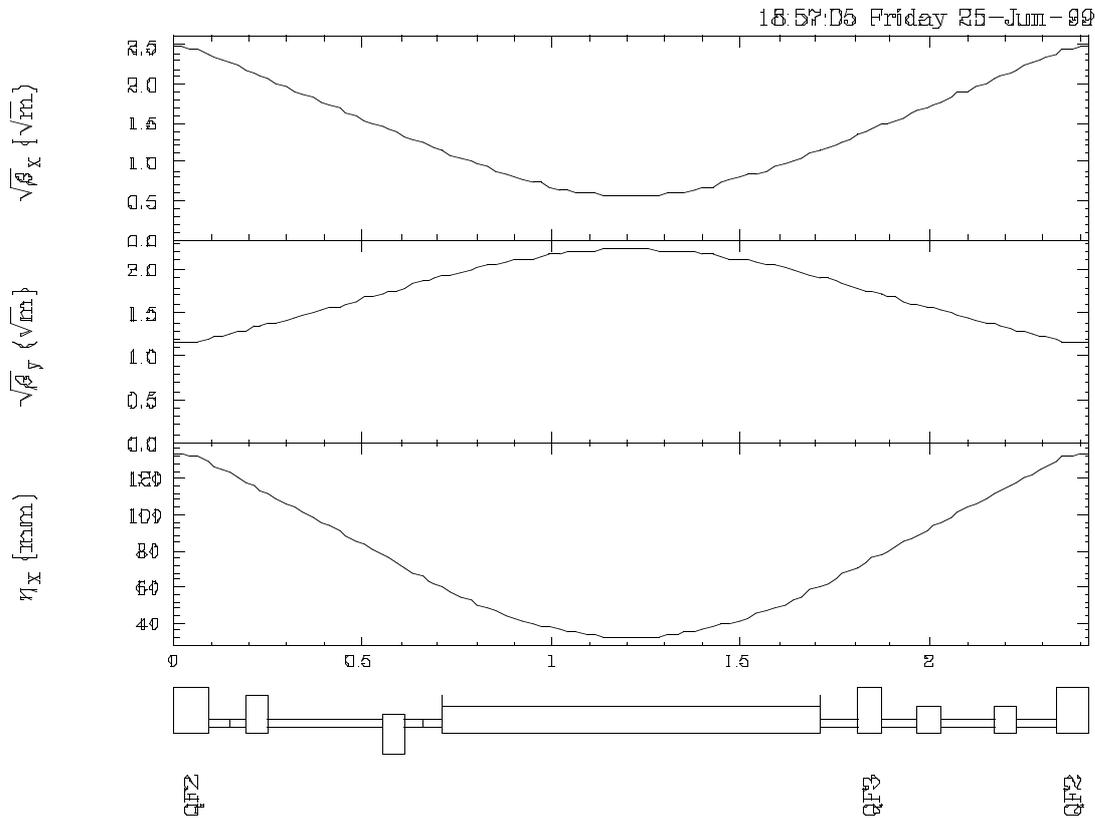


図3 アーク部セルのオプティクス

#### 3.1 周期的セルの計算

まずはアーク部の周期的セルの計算である。このセルはまさに先程の台本の例の'FOBDO'というラインで定義される。イメージが湧くようにオプティク

スの絵を図3に示す。図3の一番下にこの部分の加速器要素が描かれている。中央大きな長方形が主偏向磁石で'QF2' 'QF3'と名前が示されているのが四極磁石である。実際にこのオプティクスを計算したFFSのコマンドを図4に示す。

ここでしていることは、まず'CONVERGENCE'というパラメーターを $1 \times 10^{-20}$ にセットしているが、これは計算の精度を現わすパラメーターで通常は $1 \times 10^{-8}$ 程度でも十分である。もちろん'CONVERGENCE'が小さければ小さいほど精度は高い。次の行

```
CELL CAL NX NY
```

であるが、最初の'CELL'は計算が周期境界条件のもとに行われることを指定する。残りは計算の結果にチューンNX( $v_x$ ) NY( $v_y$ )を打ち出すことを指定するものである。

```
FFS USE=FOBDO;
CONVERGENCE=1E-20;
CELL CAL NX NY
NX 140/360 NY 0.14413
FREE Q* GO
end
STOP
```

図4 アーク部周期セルの計算

いよいよ次の行からが、計算の本体である。まず、

```
Matched. ( 1.9417E-22) DP = 0.00500 DP0 = 0.00000 ExponentOfResidual = 2.0
OffMomentumWeight = 1.000
$$$ f AX ##### # .018594 $$$ f BX ##### # 6.152046
$$$ f NX .38889 1 .388889 $$$ f AY ##### # -.008308
$$$ f BY ##### # 1.321096 $$$ f NY .14413 1 .144130
$$$ f LENG ##### # 2.420000
```

図5 図4のコマンドの計算結果

さて、序文で述べたように、このアーク部の周期的セルはこの部分だけでのエミッタンス $\epsilon_{xB}$ をできるだけ小さくすることが求められている。磁石の配置や偏向磁石の仕様が決まってしまうと、独立な四極磁石は'QF2'、'QF3'の2つしかないため、セルのオブティクスは2つのチューンによって完全に決まる。実際にいろいろなチューンでエミッタンスを計算して2次元のチューンスキャンをすることは、そんなに手間のかかることではない。図4の例にあるチューン( $v_x, v_y$ ) = (140/360, 0.14413)はこのようなスキャンで求められたものである。

エミッタンスを計算するには、たとえば例4の'end'のところからコマンドの入力待ちのときに'EMIT'というコマンドを入力する。こうするとエミッタンス以外にも様々な物理量を計算して打

出してくれる。図6にこの'EMIT'の出力の例を示す。これは先のアーク部の周期的セルについて計算したものであるが、始めに軌道やTwissパラメーターを打ち出した後にエネルギーやモーメントムコンパクトファクター等のパラメーターを計算している。その後チューン、ダンピングタイム、ダンピングパーティションナンバーなどを打ち出した後エミッタンス等が計算されている。この例では水平エミッタンスは $1.17879E-9$  mとなっている。水平方向のダンピングパーティションナンバーは1.5726となっているので $J_B \epsilon_{xB} = 1.85 \times 10^{-9}$  mである。オーバーエスティメイトではあるが目標の $1.45 \times 10^{-9}$  mよりは若干大きい。リング全体ができあがった時点でもういちど確認の必要がある。

図5にその出力を示す。図中の'\$\$\$'はラインの終点を示すが、そこでのTwissパラメーター $\alpha_x, \beta_x$ 等が示されている。チューンについてはその目標値も一緒に示され、良くフィットしていることがわかる。

'GO'の後に例では'end'というコマンドが来ているが、この'end'でSADは端末からのコマンドの入力待ちの状態になる。ここで何か作業をしたければ、適当なコマンドを打てばよい。台本に戻りたければ'in 77'と打てば次の'STOP'に行きFFSコマンドから抜ける。この際、先の計算で得られた変数、すなわち四極磁石の強さは保存される。

この例はアーク部のセルでRFキャビティーなど

は入っていないので、それに関連したパラメーター Vc 等は 0 になっている。実際にはこの計算は 6 次元の位相空間上でなされるもので、本来はまず閉軌道を見つけることから始まる。(この例は 1 セル

について考えているので、本当の閉軌道というのはもともと存在しないが、ここでの閉軌道とは周期的境界条件を満足する軌道という意味である。)

In[23]:= emit

Closed orbit:

	x	px/p0	y	py/p0	z	dp/p0
Entrance :	.000000	.000000	.000000	.000000	.000000	.000000
Exit :	.000000	.000000	.000000	.000000	.000000	.000000

Extended Twiss Parameters:

AX:	.018594	BX:	6.152046	ZX:	-5.5E-17	EX:	.134107
	PSIX:	1.20E-18		ZPX:	2.24E-17	EPX:	-2.80E-4
R1:	.000000	R2:	.000000	AY:	-.008308	BY:	1.321096
	ZY:	.000000	EY:	.000000			
R3:	.000000	R4:	.000000	PSIY:	.000000	ZPY:	.000000
	EPY:	.000000	AZ:	.000000	BZ:	1.000000	
			PSIZ:	.000000			

Units: B(X,Y,Z), E(X,Y), R2: m<sup>-1</sup> PSI(X,Y,Z): radian<sup>-1</sup> ZP(X,Y), R3: 1/m

Design momentum P0 = 1.5422820 GeV Revolution freq. f0 = 123881174 Hz  
 Energy loss per turn U0 = .0024266 MV Effective voltage Vc = .0000000 MV  
 Equilibrium position dz = .0000000 mm Momentum compact. alpha = .0030022  
 Orbit dilation dl = .0000000 mm Effective harmonic # h = .0000000  
 Bucket height dV/P0 = .0000000

Imag.tune:	0.0000000	0.0000000	0.0000000
Real tune:	0.3888889	0.1441300	0.0000000

Damping per one revolution:

X : -1.237115E-06 Y : -7.866765E-07 Z : -1.122912E-06

Damping time (sec):

X : 6.525060E-03 Y : 1.026121E-02 Z : 7.188675E-03

Tune shift due to radiation:

X : 9.038114E-10 Y : -5.414989E-10 Z : 6.514868E-10

Damping partition number:

X : 1.5726 Y : 1.0000 Z : 1.4274

Emittance X	= 1.17879E-9 m	Emittance Y	= .00000000 m
Emittance Z	= .00000000 m	Energy spread	= 6.53306E-4
Bunch Length	= .00000000 mm	Beam tilt	= .00000000 rad
Beam size xi	= .12218009 mm	Beam size eta	= .00000000 mm

図 6 'EMIT' コマンドの出力例

しかしRFキャビティーがないので、放射損失があった場合にはこの6次元の閉軌道は存在しない。そこでこの例は'COD' というフラグをOFFにして計算したものである。

同様にウイグラー部の計算も行われる。図7にそのコマンドの例を示すが、やっていることはアーク部と全く同じなので説明の必要はないと思われる。ただ、ここではアーク部セルのようにエミッタンスを最適化することを考える必要はなく、エミッタンスに関しては $\beta_x$ を小さくするようにすればよい。序文ではウイグラーマグネット中での平均を5 mと仮定したがその程度を目指すことにした。また垂直方向については、ウイグラーマグネットのアパー

チャーが小さいということから $\beta_y$ を5 m以下になるよう求められた。以上のようにしてこのセルのチューンは決められた。参考のためこのようにして計算されたオプティクスを図8に示す。ベータ関数についてはだいたい目標の値になっていることがわかる。

```
FFS USE=WIG;
CONVERGENCE=1E-20;
CELL CAL NX NY
NX 0.210 1 NY 0.130 1
FREE Q* GO;end
STOP
```

図7 ウイグラー部周期セルの計算

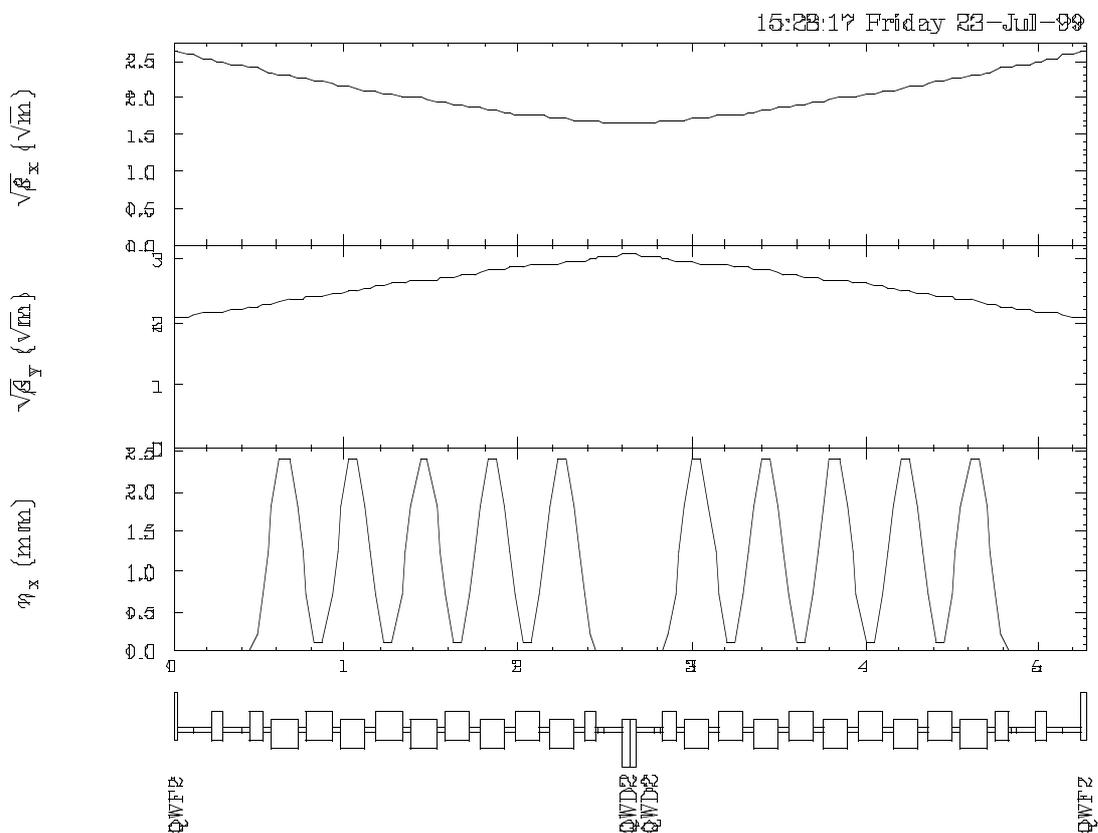


図8 ウイグラー部セルのオプティクス

### 3.2 周期的セル間のマッチング

3.1でアーク部およびウイグラー部の周期的セルのオプティクスを決定したが、リング全体を設計するにはこれらのオプティクスを変えずに両者をつないでやる必要がある。リングは図1のような形をしているのでビームが反時計回りに周回するとす

ると、図1の上半分ではまずアーク部からウイグラー部へ、次にウイグラー部からアーク部へと二つのマッチングセクションが必要になる。

はじめにアーク部からウイグラー部へのマッチングについて説明する。まずここで使われるビームラインを図9に示す。それぞれの加速器要素の定義を

示していないので分かりづらいが、名前がLで始まるものはドリフトスペース、Bは偏向磁石、Qは四極磁石、Sは六極磁石等と思っていただきたい。ここではウイグラーマグネットは偏向磁石を交互に並べたものとして計算しているが、それがWIGGLERという名前のラインにまとめられている。次のRING1というのが、アーク部からウイグラー部へのラインである。まず六つのアーク部セル(FOBDO)からはじまり三つの偏向磁石をはさんでいくつか四

極磁石が並べられている。実はこの部分の電磁石の配置はアーク部セルと同じである。ただ、デイスパージョン $\eta$ を消すためには、偏向磁石の存在する場所で四極磁石を調整する必要があるため、このセルの四極磁石には違う名前をつけておいて、あとでフィットの変数にしようというねらいがある。デイスパージョンだけでなく他のTwissパラメーターもフィットしなければならないので、そのあとにいくつか四極磁石を配置してウイグラー部へつないでいる。

```
LINE WIGGLER = (LWS BWN21 LW
                BWS LW BWN LW BWS LW BWN LW BWS LW BWN LW
                BWS LW BWN LW BWS LW BWN22 LWS );
```

LINE

```
RING1=( IP
        6*FOBDO
        QF2 BPMCELL1 SF LB SD BPMCELL2 BHC LDF LQF3 LDF ZY L ZX LF Q1 BPMCELL1
        SF L Q2 LDF SD BPMCELL2 BHC LDF LQ3 LDF ZY LZY8 ZX LZ8 BPM1 Q4 LQ4
        SF LDF SD BPMCELL2 IDUM BHC
        LQ5 ZY LDF ZX BPM1
        Q5 LKX1 IEX KIX KIX LKX2 LZY LDF Q6 LQ6 LZ8 BPM2 LM20
        Q7 LQ7 LDF LSEP
        IC
        LSEP LDF LQ8 Q8 BPM3 LM21 LZ8 L LZY
        LQ8N Q9 LDF LZY LK KII KII IIN LK Q10 BPM9 IB
        ZX LQ10 ZY BPM4 Q11 LQ11
        WIGGLER LWGL1
        ZX LZ811
        Q12 BPM5
        LDF ZY LDF3 LDF2 WIGGLER LDF2 LZY LBW1
        Q13 BPM5 LBW LDF2 WIGGLER LWGL3 ZX LZ812 QWF2
        IW )
```

図9 アーク部からウイグラー部へのビームライン

このRING1でのフィットは図10に示される。ここではCELLではなくてINSと指定しているので周期境界条件は適用されず、Twissパラメーターはラインの始点であるIPのTwissパラメーターから計算される。このIPはアーク部セルの始点となっていたものと同じもので、先の計算においてその値は保存されているので、最初の六つのアーク部セルではオブティクスは変わらない。そこでフィットの条件としてはウイグラー部でのTwissパラメーターが先の計算値と同じになるようにすればよい。図10において、

```
FIT IW AX @ BX @ AY @ BY @
```

とあるのはマーカーIW、これはウイグラー部セルのラインに入っており、ここでのTwissパラメーターは先のFFSで既に計算され保存されているのだが、ここでのTwissパラメーター $\alpha$ および $\beta$ を保存されたものと同じにしろということである。デイスパージョン $\eta_x$ およびその微分 $\eta_x'$ についてはウイグラー部の入り口で0にしなければならないが、そのためにはアーク部の最後の部分でいくつか四極磁石を調節してアーク部最後の偏向磁石の出口ですでに0にしておかなければならない。したがって $\eta_x$ 、 $\eta_x'$ はアーク部最後の偏向磁石からウイグラー部の入り口までずっと0になっているはずである。

```

!==(arc cell)-->(INJ/EXT insertion)-->(wiggler cell) ==
FFS USE=RING1;
INS;CONVERGENCE=1E-20;
FIT IW AX @ BX @ AY @ BY @
FIT IC EX 0 EPX 0
FIT Q3 EXM 0.14
FIT Q4 EXM 0.20
FIT IP *** BXM 15 BYM 15
FREE Q1 Q2 Q3 Q4 Q5 Q6 Q7 Q8 Q9 Q10 Q11 Q12
Q13
FIX Q6 Q7 Q8 Q9
Q* MAX 1.97
Q* MIN -1.9
Q2 MAX 0.6
Q3 MAX 0.6
Q12 MAX 0.50
Q13 MIN -0.50
GO;!end
T Q* LQ*
STOP

```

よって図10の例ではアーク部とウイグラー部の間の直線部にあるマーカーICというところで、 $\eta_x$  が0になるように条件を指定している。その後の

```

FIT Q3 EXM 0.14
FIT Q4 EXM 0.20

```

という部分はQ3, Q4でのディスパージョン $\eta_x$ の最大値をそれぞれ0.14 m, 0.20 mとしている。これは四極磁石Q3, Q4はアーク部にあり(Q3はラインLQ3に含まれる)、ここでのディスパージョンはエミッタンスに影響するので、なるべく小さくしておきたかったので、こういう条件も入れることになった。

```

FIX Q6 Q7 Q8 Q9

```

としているのは四極磁石Q6 Q7 Q8 Q9をフィットの変数からはずせ、ということである。これらの四極磁石は入射、取り出し部のキッカーおよびセプタムマグネットの間にあり、ATFの場合、諸般の事情によりここでの入射、取り出しビームの軌道を変えたくないということがあって、これらの四極磁石の値は固定した。

図10 アーク部からウイグラー部へのマッチング

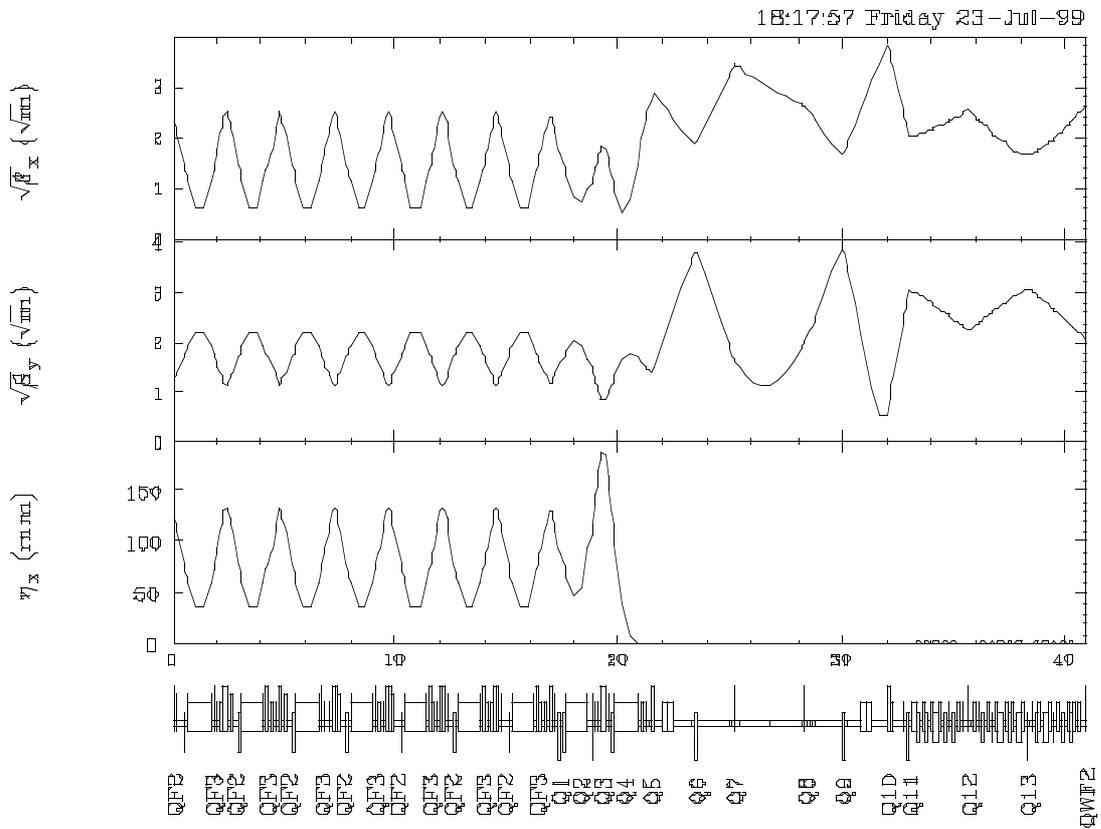


図11 アーク部からウイグラー部へのオプティクス

結局フィットの変数は Q1, Q2, Q3, Q4, Q5, Q10, Q11, Q12 および Q13 の九つである。

そのあと、いろいろと書いてあるのは変数の範囲の指定である。例えば、

```
Q* MAX 1.97
```

とあるのは、Q で始まる変数（ここでは四極磁石の k 値）の最大値を 1.97 としている。以下同様である。

このようにして計算されたこのビームラインのオ

プテイクスを図 1 1 に示す。

さて、もうひとつ残っているのはウイグラー部からアーク部へのマッチングである。ここで使われるラインを図 1 2 に示す。ここでは RING2 というウイグラー部からアーク部へかけて、間にいくつかの四極磁石をはさんだラインが定義されているが、RING1 同様アーク部の最初の三つのセルの四極磁石はマッチングに使われる。

```
LINE RING2=( IW
```

```
QWF2 BPM5 LDF ZY LDF3 LDF2 WIGGLER LDF2 LDF3
```

```
Q15 BPM5 ZY LQ15 BPM10
```

```
Q16 LQ16 ZX LZX13 BPM10
```

```
Q17 LQ17 ZY LZY15 BPM10
```

```
Q18 LQ18 ZX LZX14
```

```
Q19 LDF ZY LQ19 BPMCELL2
```

```
BHC LDF ZY LDF ZX LF
```

```
Q20 BPMCELL1 SF LF Q21 LDF SD BPMCELL2 BHC LDF LQ22 LDF ZY L ZX LF
```

```
Q23 BPMCELL1 SF L ZY LDF SD BPMCELL2 BHC LDF LQF3 LDF LA L ZX LF QF2
```

```
IS
```

```
6*FOBDO IP )
```

図 1 2 ウイグラー部からアーク部へのビームライン

```
!===== < wiggler cell -- insertion -- FOBO cell >=====
```

```
FFS USE=RING2;
```

```
INS;CONVERGENCE=1E-20
```

```
FIT IP AX @ BX @ AY @ BY @ EX @ EPX @
```

```
FREE Q15 Q16 Q17 Q19 Q20 Q22
```

```
Q* MAX 1.97 ;Q* MIN -1.90
```

```
Q22 MAX 0.6
```

```
GO;END
```

```
STOP
```

図 1 3 ウイグラー部からアーク部へのマッチング

ここでのフィットの仕方を図 1 3 に示す。この内容についてはアーク部からウイグラー部へのフィットと同様なので説明の必要はないであろう。

最後に、このような直線部の計算の時に注意しなければならないことについて少し述べる。まずリングの入射、取り出し部および RF キャビテーターは通常このような直線部に配置される。そこでこれらの装置、キッカー、セプタムマグネットや RF キャビテーターが設置されるのに十分なドリフトスペースをどこかに確保しなければならない。この ATF ダン

ピングリングの例では、RING1 に LSEP という 1.4 m のドリフトスペースが二つセプタムマグネット用に用意されている。キッカーマグネットについては偏向角 0 の偏向磁石として KII および KIX という名前で RING1 に入っている。このようなことを自動的に行いたいのであれば、ドリフトスペースも変数にして例えば、

```
FREE LSEP
```

```
LSEP MIN 1.4;GO
```

とすれば、SAD が LSEP の長さを決めてくれる。

もうひとつは、リング全体の周長をこの直線部の長さで調節しなければならない時がある。リングの周長は RF 周波数等との関連で決まってしまう。ATF ダンピングリングの場合、周長は約 138.56 m である。このようなときは、いくつかのドリフトスペースを変数に入れて、

```
FIT IP *** leng 100
```

などの条件を課することができる。上の例は IP からラインの終わり (\*\*\* ) までの長さを 100 m にしなさいという意味である。このようにしてリングの周長を調節することができる。

### 3.3 リング全体の計算

ここまで計算が終わってれば、リング全体でのオブテイクスは今までに計算したものをただつなぐだけでよい。まず最初に確認しなければならないのは目標のエミッタンスやダンピングタイムが得られ

たかどうかである。リング全周のラインを作りFFS中でEMITコマンドを使った結果を図14に示す。この図より、エミッタンスは $1.08360E-9$  m (規格化エミッタンスで $3.3E-6$  m)、垂直方向のダンピングタイムは $9.7$  msecであることが読み取れる。

In[102]:= emit

Closed orbit:

x	px/p0	y	py/p0	z	dp/p0
Entrance :	3.243E-6	-1.20E-9	.000000	.000000	-2.03E-6 2.419E-5
Exit :	3.244E-6	-1.24E-9	.000000	.000000	-2.03E-6 2.419E-5

Extended Twiss Parameters:

AX: .018218	BX: 6.147780	ZX: -2.18E-7	EX: .134165
PSIX: 1.54E-19	ZPX: 3.479E-8	EPX: -2.75E-4	
R1: .000000	R2: .000000	AY: -.008885	BY: 1.321191
ZY: .000000	EY: .000000	R3: .000000	R4: .000000
PSIY: .000000	ZPY: .000000	EPY: .000000	AZ: -.011114
BZ: 5.996155	PSIZ: 2.27E-17		

Units: B(X,Y,Z), E(X,Y), R2: m<sup>-1</sup> PSI(X,Y,Z): radian<sup>-1</sup> ZP(X,Y), R3: 1/m

Design momentum P0 = 1.5422820 GeV Revolution freq. f0 = 2163633.4 Hz  
Energy loss per turn U0 = .1476087 MV Effective voltage Vc = .7700000 MV  
Equilibrium position dz = 12.890221 mm Momentum compact. alpha = .0019034  
Orbit dilation dl = .0000000 mm Effective harmonic # h = 330.00044  
Bucket height dV/P0 = .0190516

Imag.tune:	0.0000000	0.0000000	0.0000000
Real tune:	0.3353093	-0.2375357	-0.0069990

Damping per one revolution:

X : -6.439335E-05 Y : -4.785231E-05 Z : -7.915884E-05

Damping time (sec):

X : 7.177535E-03 Y : 9.658584E-03 Z : 5.838710E-03

Tune shift due to radiation:

X : -2.463885E-07 Y : 1.225149E-08 Z : 6.991603E-08

Damping partition number:

X : 1.3457 Y : 1.0000 Z : 1.6543

Emittance X	= 1.08360E-9 m	Emittance Y	= .00000000 m
Emittance Z	= 2.62036E-6 m	Energy spread	= 6.61102E-4
Bunch Length	= 3.96386733 mm	Beam tilt	= .00000000 rad
Beam size xi	= .12053573 mm	Beam size eta	= .00000000 mm

図14 リング全体でのEMITの出力

厳密な意味ではエミッタンスがやや目標 ( $\gamma\epsilon_x=3E-6$ ) に及ばないが、おおよそ目標は達成できている。

実はこの段階では、オブテイクスの設計はまだ完全に終わってはいない。リング全体でのチューンをまだ設定していない。ここでは触れないが、リング全体のチューンはダイナミックアパーチャー等の調査で決められる(小林氏の講義を参照されたい)。そうして決められたチューンに合わせてやる必要がある。実は直線部 RING1 でのマッチングにおいて条件の数は6であるのに対し変数の数は9であった。この残りの自由度を使ってチューンを合わせることができる。また ATF ダンピングリングには長さの関係上、完全な形の周期的ウイグラーセルはひとつも入っていない。そこでこの部分の四極磁石もチューンのフィットに使える(そうすると、何のためにウイグラー部のマッチングを行ったのか、という疑問が起こるが、こうなってみると一つの初期条件を決めたに過ぎない。アーク部とのマッチングに周期的ウイグラーセル 1.5 個分の四極磁石が必要であったのである)。図 1 5 にリング全体のチューンを設定

する FFS のコマンドの例を示す。

```
!===== < full ring >=====
FFS USE=RING0;
CELL CALC NX NY;CONVERGENCE=1E-20;!
FIT IP AX @ BX @ AY @ BY @ EX @ EPX @
fit
nux=15.145;nuy=8.715;
nx nux 1 ny nuy 1
free q1* qwf2 q20 q21
Q* MAX 1.97
Q* MIN -1.97
Q12 MINMAX 0.50
Q13 MINMAX 0.50
Q21 MINMAX 0.6
Q22 MINMAX 0.6
GO
STOP
```

図 1 5 リング全体のチューンの設定

```
In[151]:= fit nx nux 3 ny nuy 3 ;fix q*;free s* go
Matched. ( 4.3796E-21) DP = 0.01000 DP0 = 0.00000 ExponentOfResidual = 2.0
OffMomentumWeight = 1.000
      DP      -.010000 .000000 .010000
      Res.     3.550E-21 1.651E-27 8.292E-22
IP.1  AX  .01859  1  -.087478 .018594 .015164
IP.1  BX  6.15205  1  5.099104 6.152046 7.814708
IP.1  AY  -.00831  1  .102318 -.008308 -.110501
IP.1  BY  1.3211  1  1.852730 1.321096 .912287
IP.1  EX  .13411  1  .155339 .134107 .121738
IP.1  EPX -2.8E-4  1  .002065 -2.795E-4 -.002089
Q16.1  BXM 20    1  14.267033 16.446788 20.868319
$$$   f AX  ##### # -.087478 .018594 .015164
$$$   f BX  ##### #  5.099104 6.152046 7.814708
$$$   f NX  15.145  2  15.145000 15.145000 15.145000
$$$   f AY  ##### #  .102318 -.008308 -.110501
$$$   f BY  ##### #  1.852730 1.321096 .912287
$$$   f NY  8.715  2  8.715000 8.715000 8.715000
$$$   f LENG ##### # 138.55972
```

図 1 5 六極磁石の強さの決定

まず周期的アークセルでのオブテイクスを変えないように  
FIT IP AX @ BX @ AY @ BY @ EX @ EPX @

としたうえで

```
nx nux 1 ny nuy 1
```

によってチューン  $v_x$  を  $nux (=15.145)$  に  $v_y$  を  $nuy$

(=8.715) に設定しようとしている。ここで  $nux$  および  $nuy$  の後に 1 という数字が入っているが、これは今までは省略されていたもので、粒子のエネルギーについては ON MOMENTUM の 1 点だけを考えるということである。後は  $Q1^*$ ,  $QWF2$ ,  $Q20$  および  $Q21$  を使ってフィットを行っているだけである。

こうしてチューンが設定されると六極磁石の値も決めることができる。SAD では、これをいくつかの運動量の異なる粒子についてのチューンをフィットすることで計算できる。図 15 にそのコマンドと計算結果の例を示す。ここでは

```
fit nx nux 3 ny nuy 3
```

とすることで ON MOMENTUM を含め 3 点で計算するよう指定している。その 2 点とは DP というパラメータで決まっており、ここでは DP は 1% になっている。つまりエネルギーが  $\pm 1\%$  違う粒子で

もチューンの値を  $nux$  と  $nuy$  になるように条件を設定している。DP の値を変えたければ FFS 中で、例えば、

```
DP = 0.005;
```

とすれば、DP は 0.5% になる。エネルギーの数を変えたければ、例えば、

```
fit nx nux 4 ny nuy 4
```

とすれば 4 点でのフィットにすることができる。あとは四極磁石を固定して (変数からはずして)、六極磁石でフィットを行っている。図 15 の計算結果を見て見ると、エネルギー  $\pm 1\%$  でのチューンの値が目標値 ( $nux = 15.145$ 、 $nuy = 8.715$ ) になっていることがわかる。

さてこれでやっと、リングの計算は終了した。最後にリング全体のオペティクスを図 16 に示してこの節を終わる。

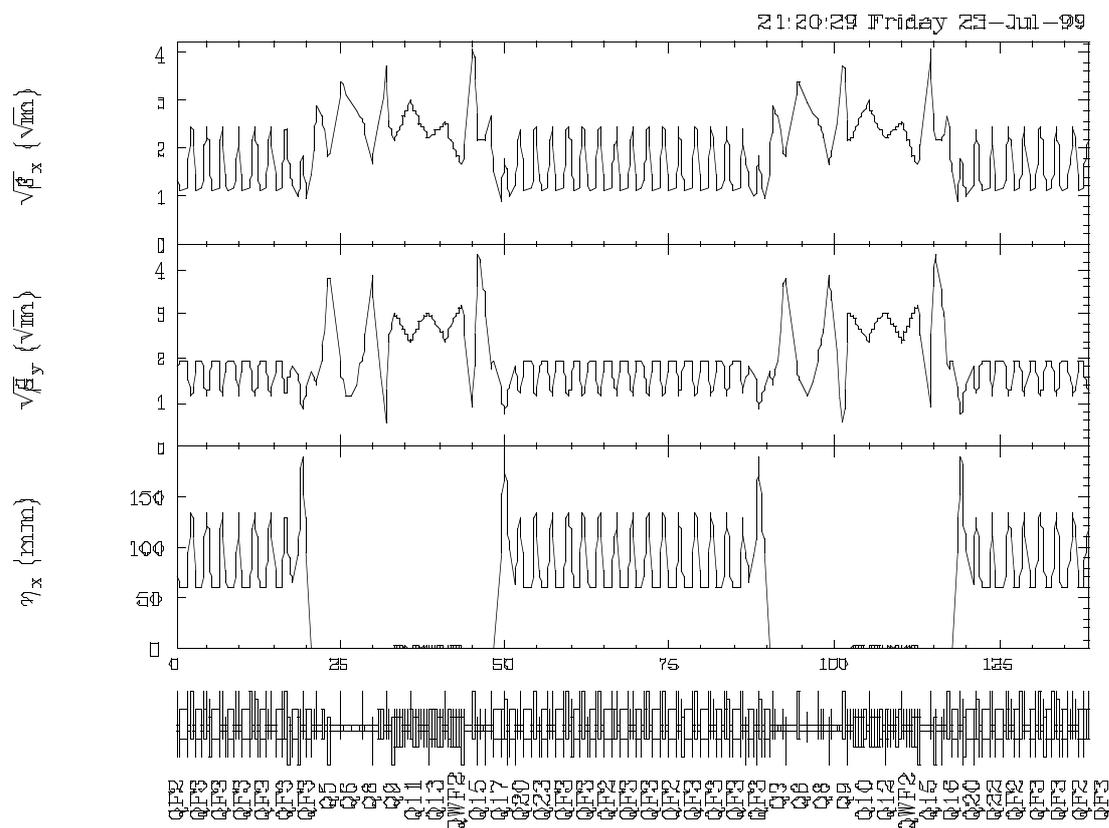


図 16 リング全体のオペティクス

## 4. FFS でよく使われるコマンド

ここでは、今まででてきたコマンドを含め FFS 中でよく使われるコマンドについて整理しておく。

ただし、コマンドの全てを網羅するつもりはないので、より詳しい情報については参考文献 2 を参照していただきたい。

### 4.1 フィットの条件の設定

まずフィット条件の一般的な設定の仕方は

FIT Element1 keyword1 value1 keyword2 value2 ...  
 である。これはElement1 でのkeyword1 をvalue1 に、  
 keyword2 をvalue2 にしなさいという条件である。チュー  
 ンについてのフィットで今まで出てきた例では、  
 Element1 を省略していたが、その場合 Element1 は  
 ラインの終点がセットされる。その他、頻繁に使う  
 keyword を以下にまとめておく。

keyword	意味
NX	$v_x$
NY	$v_y$
AX	$\alpha_x$
AY	$\alpha_y$
BX	$\beta_x$
BXM	$\beta_x$ の最大値
BY	$\beta_y$
BYM	$\beta_y$ の最大値
EX	$\eta_x$
EPX	$\eta_x'$
EXM	$\eta_x$ の絶対値の最大値
EY	$\eta_y$
EPY	$\eta_y'$
EYM	$\eta_y$ の絶対値の最大値
LENG	軌道長
GX	x 座標
GY	y 座標
GZ	z 座標

BXM, BYM 等のような条件の設定はビームサイ  
 ズなどを考慮しなければならないような計算のとき  
 には非常に便利である。

また、LENG, GX, GY, GZ 等は加速器のジオメト  
 リーに関するパラメーターであり、加速器の大きさ  
 等を考慮した設計の時には便利なコマンドである。  
 ここで、座標のとり方は通常ビームラインの始点を  
 原点にとり、ビームの方向を x 軸、最初の偏向磁石  
 によって曲げられる方向を y 軸にとり右手系を作る。  
 詳しくは、また参考文献 2 を参照していただきたい。  
 また

FIT Element1 Element2 keyword1 value1  
 keyword2 value2 ....

と書いておくことにより、Element1 と Element2 の  
 間での keyword についての条件を設定できる。例え  
 ば keyword が NX や NY であれば Element1 と  
 Element2 の間の位相の進みを、BXM, BYM 等であ  
 れば、この間での相当する Twiss パラメーターの最  
 大値を設定できる。加速器のジオメトリーに関する  
 パラメーターLENG, GX, GY, GZ 等についても、指  
 定された加速器要素間の長さや座標の差がフィット  
 の条件として課せられる。ただし keyword が  $\beta_x$  や  
 $\beta_y$  のような Twiss パラメーターの場合には、value  
 の値は無視され Element1 と Element2 での  $\beta_x$  や  $\beta_y$   
 が同じである、という条件が設定されることになる。

また 3.3 節で六極磁石の強さを決める時に見たよ  
 うに、value のあとにもう一つ数字を書くことによ  
 り、その数に応じた OFF MOMENTUM のフィット  
 が可能である。

条件をはずしたいときは、

FIT Element1 REJECT keyword

とすれば、keyword に関する条件ははずされる。ま  
 た

REJECT TOTAL

ですべての条件をはずすことができる。

## 4.2 フィットの変数

フィットに用いる変数であるが、3章での例では  
 四極磁石や六極磁石の強さが指定されていた。しか  
 しフィットの条件にビームラインのジオメトリーに  
 関するもの、例えば GX や LENG 等が入っていると  
 これだけではフィットは不可能である。そこでドリ  
 フトスペースの長さもフィットの変数として使うこ  
 とができる。例えば

FREE LF

とすれば LF の長さも変数となる。

同様に偏向磁石も変数にできる。この場合、通常  
 は偏向磁石の偏向角 ANGLE が変数となる。しかし  
 ATF ダンピングリングの場合のように偏向磁石が  
 コンバインドファンクション型であるとき、磁石の  
 四極成分 K1 を変数にしたい場合もある。そのとき  
 は FREE BH と入力する前に

VARY K1 BH

と指定しておけばよい。

変数の範囲は min, max, minmax 等のコマンドを  
 使って、例えば次のように指定できる。

LSEP min 1

Q\* minmax 1.5

minmax とは最大値と最小値を同時に指定でき、上  
 の例では Q\* の強さは  $\pm 1.5$  以内であることを意味す

る。このように変数の範囲を制限してフィットすることにより、直線部のある部分に何か装置を設置しなければならないときや、磁石の磁場の可能な範囲がわかっているときには、現実的な答えを見つけることができる。またフラッグの一つに UNIPOL というのがあり、これをセットしておくともマッチングの際に変数の符号を変えない。これも電源の極性が決まっているときなどには便利である。

言うまでもないことではあるが、変数の数はフィットの条件の数より多くすることが一般的である。

### 4.3 計算用コマンド

ここでは CAL と GO について簡単に触れる。

CAL は現在での設定でオブティクス等の計算を行う。設定値そのものは変わらない。

一方、GO は先に指定されたマッチング条件を指定された変数でフィットを行い新しい変数の値を計算する。フィットそのものは初期条件に強く依存する。すなわち FFS に入る前に QUAD で指定された K1 や前に FFS があれば、そこで保存された K1 等が非常に影響してくる。そこで一度の GO で収束しなくても、まず何度か GO を繰り返してみることをおすすめする。うまくいく場合もある。どうしてもうまくいかないときは初期条件をがらりと変える手もある。例えば

```
QF2 0.5;GO
```

と入力すれば、QF2 の初期値を強制的にセットしてフィットを始める。

その他のチェックの方法としては、次の節のコマンドを参照していただきたい。

### 4.4 その他の便利なコマンド

ここでは今まで登場しなかったが、非常に有用なコマンドをいくつか紹介したい。

まず、ビームラインが本当に自分の意図したものになっているかを確認するために、その絵を描くこともできる。

```
OUT File_Name geo end
```

と入力すれば File\_Name というファイルに TopDrawer 用のファイルを作ってくれる。図 1 の絵はこうして作ったものである。

また図 3 のようなオブティクスを見てみたいときは、

```
OUT File_Name draw bx &by &ex q* end
```

とするとオブティクスの図をやはり TopDrawer 用のファイルとして作ってくれる。上の例では bx, by と hx を別々の枠に描き（区切りに & を使ったことによる）、q で始まる加速器要素の名前を表示しなさい、ということである。draw の引き数としては例にあげた Twiss パラメーターの他に、粒子の軌道 DX, DY やビームサイズ SIGX, SIGY 等もある。

図ではなくて、数値を確認したい時には disp というコマンドがある。図 17 にその例を示す。これは ip から bh までの情報を打ち出ささいということで、その結果が示されている。これにより各加速器要素の入り口での Twiss パラメーター等の情報が得られる。同様にジオメトリーに関する情報も

```
disp g
```

と入力することで得られる。

```
In[15]:= disp ip bh
```

AX	BX	NX	EX	EPX	Element	Length	Value	s(m)	AY	BY	NY	EY	EPY	DetR #
.01859	6.15205	.00000	.13411	-2.8E-4	IP	.00000	0	.000000	-.00831	1.32110	.00000	.00	.00	.00 1
.01859	6.15205	.00000	.13411	-2.8E-4	QF2.1	.09000	.8412360	.000000	-.00831	1.32110	.00000	.00	.00	.00 2
4.91997	5.69601	.00239	.12904	-.11167	LBPM1	.057	.057000	.090000	-1.2495	1.43153	.01056	.00	.00	.00 3
4.66773	5.14951	.00406	.12267	-.11167	M.1	.00000	0	.147000	-1.3515	1.57979	.01659	.00	.00	.00 4
4.66773	5.14951	.00406	.12267	-.11167	LBPM2	.043	.043000	.147000	-1.3515	1.57979	.01659	.00	.00	.00 5
4.47745	4.75627	.00545	.11787	-.11167	SF	.06000	29.555042	.190000	-1.4284	1.69932	.02077	.00	.00	.00 6
4.21194	4.23490	.00758	.11117	-.11167	LB	.30000	.3000000	.250000	-1.5358	1.87718	.02611	.00	.00	.00 7
2.88437	2.10601	.02359	.07767	-.11167	SD	.06000	-40.78000	.550000	-2.0725	2.95969	.04643	.00	.00	.00 8
2.61885	1.77582	.02853	.07097	-.11167	LBPM3	.048	.048000	.610000	-2.1799	3.21483	.04952	.00	.00	.00 9
2.40644	1.53460	.03316	.06561	-.11167	M.2	.00000	0	.658000	-2.2657	3.42823	.05182	.00	.00	.00 10
2.40644	1.53460	.03316	.06561	-.11167	LBPM4	.052	.052000	.658000	-2.2657	3.42823	.05182	.00	.00	.00 11
2.17633	1.29630	.03903	.05980	-.11167	SBH.1	.000	.000000	.710000	-2.3588	3.66871	.05416	.00	.00	.00 12
2.17633	1.29630	.03903	.05980	-.11167	BH	1.00000	.1745329	.710000	-2.3588	3.66871	.05416	.00	.00	.00 13

図 17 disp コマンドとその出力例

```

In[19]:= t
;
DRIFT LBPM1 =(L =.057 ) LBPM2 =(L =.043 ) LB   =(L =.3 )
      LBPM3 =(L =.048 ) LBPM4 =(L =.052 ) LDF   =(L =.1 )
      L     =(L =.14 ) LF     =(L =.1 )
;
BEND BH   =(L =1  ANGLE =.1745329252 K1 =-1.215541827 )
      ZY   =(L =.06 ANGLE =0  ROTATE =90 DEG )
      ZX   =(L =.06 ANGLE =0 )
;
QUAD QF2  =(L =.09 K1 =.8412360142009 )
      QF3  =(L =.06 K1 =.0143664997472 )
;
SEXT SF   =(L =.06 K2 =29.5550422098012 )
      SD   =(L =.06 K2 =-40.7800012029019 )
      SBH  =(K2 =0 )
      SQF3 =(K2 =0 )
;
MONI M           =()
;
MARK IP   =(AX =.0185938266623  BX =6.1520462762287
           AY =-.0083075025833 BY =1.3210958783651 EX =.1341066590521
           EPX =-2.79543424566E-4  DP =.01  EMITX =2.98194493614E-7
           EMITY =2.98194493614E-7 )
;

```

図 1 8 type(t) コマンドとその出力例

今のビームラインの加速器要素の設定値が知りたければ type または t と打てばその情報が得られる (図 1 8 を参照)。t のあとにスペースをはさんで要素の名前たとえば Q\* などとかがいておけば、Q で始まる要素についてだけを打ち出すこともできる。この出力はそのままコピーして台本に使えるので便利である。

最後に show と var というコマンドを紹介する。show は現在のマッチング条件を示してくれるもので、var はフィットの変数を打ち出すものである。たとえば、端末からの入力が可能なとき、いろいろなことをやっているうちに、マッチング条件やフィットの変数を忘れてしまったりしたときに、これらのコマンドは便利である。

```

In[17]:= show
! component1 component2 fun goal-value np scale
FIT $$$      NX      .388888889 5 ! * 6.283185307
FIT $$$      NY      .144130000 5 ! * 6.283185307

In[18]:= var
!Variable Keyword Now      ! Previous  Saved  Minimum  Maximum  Couple  Coefficient
SF      K2  29.55504220980 ! 45.08812368 45.08812368 -1.00000E10 1.000000E10 <-- 1.00000000
SD      K2  -40.7800012029 ! -74.9932329 -74.9932329 -1.00000E10 1.000000E10 <-- 1.00000000

```

図 1 9 show および var コマンドの例

var は現在の変数の値の他に一つ前の値および保存されている値も示してくれる。図 19 にこれらのコマンドの出力例を示す。

## 5. おわりに

この講義のタイトルは SAD を使ったリングの設計ということであったが、実際にはリングはそれぞれ特徴をもっており、その設計はそれぞれのリングに特有のものがあるかと思う。ここでは、ATF のダンピングリングを例として述べたのであまり一般的ではないかもしれない。ただ加速器の設計の際に SAD を使うとどのような計算ができるのか、その一部を紹介した、ということで筆を置かせていただく。

## 参考文献

1. 'ATF Design and Study Report' KEK Internal 95-4
2. SAD home page  
[www-acc-theory.kek.jp/SAD/sad.html](http://www-acc-theory.kek.jp/SAD/sad.html)