

[09-A03]

Twiss Parameter Matching for The Beam Transport Line of The SPring-8 Linac

K. Yanagida, S. Suzuki, T. Asaka, A. Mizuno, T. Taniuchi,
T. Hori, T. Kobayashi, H. Akimoto and H. Hanaki

Japan Synchrotron Radiation Research Institute, Accelerator Division,
Mihara 323-3, Mikazuki-cho, Sayo, Hyogo, 679-5198 Japan

ABSTRACT

Transverse beam sizes are measured using three wire scanners and four screen monitors to obtain the twiss parameters at the first screen monitor. The computation program outputs the twiss parameters and the matched parameters, i.e., excitation currents of quadruple magnets in the matching section. Measurements and computations were performed several times, and obtained parameters showed agreements within errors.

SPring-8線型加速器ビーム輸送系のためのTwissパラメータ整合

1. はじめに

SPring-8線型加速器に於いて、1998年にL3及びL4ビーム輸送系の新設が行われた[1]。これにより従来のブースターシンクロトロン (LS) の他に、ニュースバル蓄積リング (L4) 及び組立調整実験棟 (L3) へのビーム供給を開始した。

L3ビーム輸送系は基本次のアイソクロナス光学系を成し、輸送系入口 (線型加速器終端部) で特殊なTwissパラメータをとる。一方、L4ビーム輸送系ではニュースバル蓄積リングまでの距離が約150mと長く、輸送系入口でのTwissパラメータを精度良く整合させる必要がある。

Twissパラメータはエミッタンス測定時に副次的に計算されるが、精度良く測定する場合に多くの時間を必要とする傾向がある。SPring-8線型加速器では緊急時 (例えばクライストロンや電磁石電源の故障により光学系が変化した場合) にも即座にTwissパラメータを測定し、整合がとれるシステムを構築した。

2. ビームサイズの測定

図1に線型加速器終端部に於けるプロファイルモニタ及び電磁石の配置を示す。プロファイルモニタは3台のワイヤスキャナー[2][3] (WG) 及び4台のスクリーンモニタ (PM) から成り、精度は異なるが計7点の横方向ビームサイズが測定される。ちなみに、QT及びQMは四極トリプレット電磁石及び四極電磁石を表す。QT2-M20及びQM1~4、10、11-LSをTwissパラメータ整合用四極電磁石として使用する。シケインは現在常時使用している。

ワイヤスキャナーによる、典型的な測定例を図2に示す。正電荷のピークは二次電子放出に依るもので、ビームプロファイルを表す。2mm間隔で出現する負電荷のピークは、他のワイヤから放出された二次電子を捕獲しているものである。

電荷密度分布が正規分布であると仮定して、標準偏差及びそのエラーを計算する。有限な太さ ($\phi 0.3\text{mm}$) のワイヤを用いた計測のため、見かけ上の標準偏差が増加する。その補正として、無限に小さいビームを仮定した場合の見かけ上の標準偏差 (0.091mm) を補正值として差し引く。

以上の計算を行った後、補正後標準偏差及びエラーを1.65倍し、それらをビームサイズ σ 及び測定エラー σ_{err} と定義する。1.65倍するのは、エミッタンスを全電荷の90%を含む面積と定義している (90%エミッタンス) ためである。図2の場合では、 $\sigma=0.167\text{mm}$ 、 $\sigma_{\text{err}}=0.007\text{mm}$ である。

標準偏差を計算した場合、副次的に検出全電荷が得られる。図2の場合には107pCであった。ビーム全電荷は2.28nC (=40ns×57mA) であるから二次電子放出係数は4.7%となる。

スクリーンモニタによるビームサイズは目視によりビーム境界を定め決定する。測定エラーは経験的に一律0.2mmと仮定している。この値は、ワイヤスキャナーに依るものより1桁程度大きい。スクリーンの傾きによる補正 (0.2mmを仮定) をx方向のみに行う。

3. Twissパラメータの計算

計7点のビームサイズ σ 及び測定エラー σ_{err} を入力

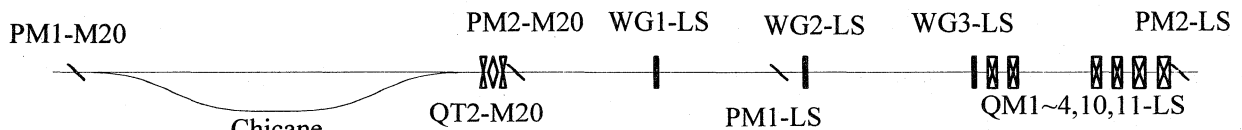


図1 Twissパラメータ測定時の機器配置図

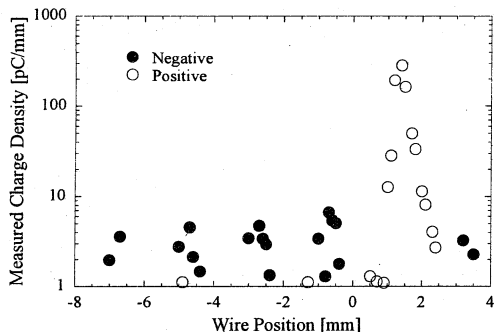


図2 ワイヤスキャナーによって測定されたビームの横方向電荷密度分布 (プロファイル)

した後、ワークステーション (WS) 上でプログラムを走らせる。このプログラムはPM1-M20地点でのTwissパラメータ等及びそのエラーを計算し、最適な整合用四極電磁石の励磁電流値を決定する。

計算の手法では最小二乗法を採用しており、最適化させる変数 (ビームサイズ) を σ_{calc} とした時、加重統計エラーの二乗和;

$$\sum w[i] \left(\frac{\sigma[i] - \sigma_{calc}[i]}{\sigma[i]} \right)^2 \quad (1)$$

が最小になるようにする。ここで $w[i]$ は重みで、ビームサイズで規格化された測定エラーの逆数である。

$$w[i] = \left| \frac{\sigma[i]}{\sigma_{err}[i]} \right| \quad (2)$$

現時点では、シケイン等で生じた分散はシケイン出口に於いて閉じていると仮定し、分散関数は考慮していない。設定するTwissパラメータは輸送系によって大きく異なり、PM2-LS地点では表1の通りである。

図3~6は実際に測定されたビームサイズ (点) 及び測定エラー (バー) をプロットしたものである。同時に計算エンベロップ (点線) 及び整合後の計算エンベロップ (実線) も記す。ここでの設定TwissパラメータはL4用である。3月12日の時点 (図3及び図5) で整合を取り、且つシケインより上流側の運転パラメータは同一であるので、4月1日 (図4及び図6) の時点では既に整合が取れているはずである。図6では点線と実線はほぼ一致しているが、図4では若干ずれている。今後検討が必要である。

4. エラーの計算

測定の精度を確認するために、Twissパラメータ等のエラーを出力する。エラーの計算では、統計エラーを平均化したもの (統計エラー平均) 及び

表1 PM2-LS地点での設定Twissパラメータ

輸送系	β_x [m]	α_x	β_y [m]	α_y
LS	6.97	1.62	9.31	-0.10
L3	38.85	8.57	14.94	0.96
L4	5.09	1.29	6.42	-0.12

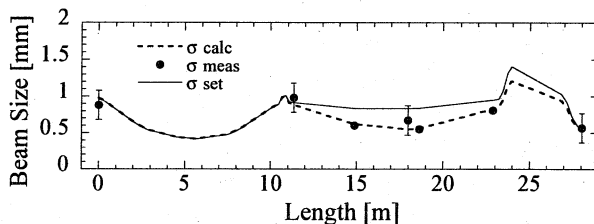


図3 1999年3月12日測定x方向のビームサイズ

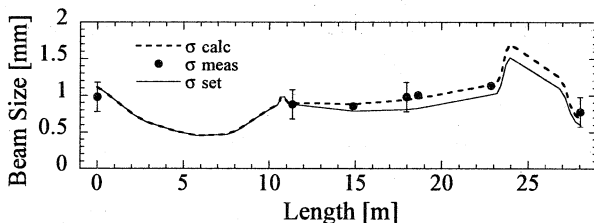


図4 1999年4月1日測定x方向のビームサイズ

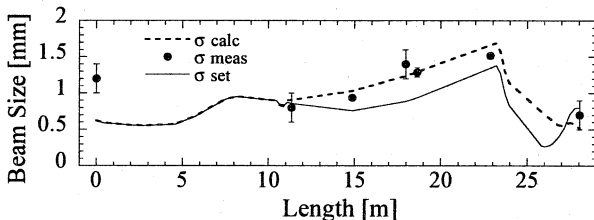


図5 1999年3月12日測定y方向のビームサイズ

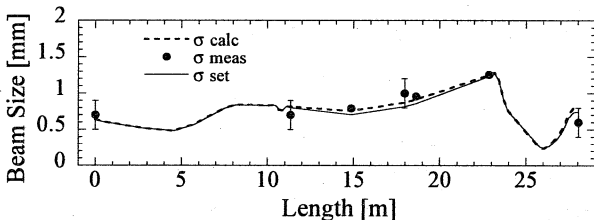


図6 1999年4月1日測定y方向のビームサイズ

測定エラーを平均化したもの (測定エラー平均) を独立に計算し、それらの二乗和の平方根をTwissパラメータ等のエラーとする。エラーの小さい測定が行われると、高い精度の整合が可能となる。

Twissパラメータ等から計算されたビームサイズ (x及びyそれぞれ計7点) を初期値とする。7点のうち上流から1点ずつ、あるビームサイズを微小量 (例えば1%) 変化させる。この状態で計算を行うとTwissパラメータ等が微小量変化する。この変化の割合が、あるビームサイズ測定値に対するエラーの伝播係数 (無次元量) になる。伝播係数には自動的に測定エラーの重みが組み込まれている。

あるビームサイズに就いて、統計エラー平均へ

の寄与は規格化されたビームサイズの差分 ($\sigma[i]-\sigma_{calc}[i])/\sigma[i]$ に伝播係数と Twiss パラメータ等自身を掛けたものであり、測定エラー平均への寄与は規格化された測定エラー $\sigma_{err}[i]/\sigma[i]$ に伝播係数と Twiss パラメータ等自身を掛けたものとなる。

統計 (測定) エラー平均は各ビームサイズからの寄与の二乗和を有効なデータ数 (今回は4点) で除算し、平方根を取ったものである。

参考までに図5の測定における統計エラー平均、測定エラー平均、エラー、伝播係数及びエラー寄与を表2に示す。加重して計算しているため、ワイヤスキャナー測定点での伝播係数はスクリーンモニタ測定点でのそれに比べて大きくなるが、各エラー平均への寄与はほぼ同じになるはずである。例えば測定エラー平均への寄与ではほぼ同じオーダーになっている。

表2 図5測定時のTwissパラメータ等及び各エラー平均への寄与

	β [m]	α	ϵ [π nm \cdot rad]
測定値	3.84	0.53	100
統計エラー平均	1.88	0.33	31
測定エラー平均	1.35	0.22	28
エラー	2.32	0.39	42
<hr/>			
PM1-M20点寄与	β [m]	α	ϵ [π nm \cdot rad]
伝播係数 (無次元)	0.60	0.62	0.30
統計エラー平均へ寄与	2.17	0.31	28
測定エラー平均へ寄与	0.75	0.11	10
<hr/>			
WG2-LS点寄与	β [m]	α	ϵ [π nm \cdot rad]
伝播係数 (無次元)	1.73	1.45	0.90
統計エラー平均へ寄与	0.01	0.001	0.1
測定エラー平均へ寄与	0.32	0.04	4

5. その他

表3に運転パラメータが異なる場合の測定例を4例示す。同じ行に記されているものはほぼ同一の運転パラメータ時のものである。Twissパラメータに就いては殆どがエラーの範囲内で一致しているが、エミッタンスに就いてはあまり一致していない。この原因については、エネルギーの拡がりによる影響 (クロマティック効果等) が大きいと考えている。今後、調査・検討が必要である。

最後に測定及び計算時間であるが、ワイヤスキャナーでの測定は運転・制御用WS上のプログラムを使用して15分、スクリーンモニタでの測定は5分、ビームサイズ解析及びデータ入力に10分、計算は

表3 同一な運転パラメータ時の測定結果

40ns-80mA	1998/11/11	1998/11/11
β_x, β_y [m]	48 \pm 11, 15 \pm 4.7	36 \pm 10, 11 \pm 2.2
α_x, α_y	3.3 \pm 0.8, 0.7 \pm 0.4	2.2 \pm 0.6, 1.0 \pm 0.5
ϵ_x, ϵ_y [π nm \cdot rad]	31 \pm 7, 58 \pm 10	42 \pm 8, 71 \pm 20
<hr/>		
40ns-70mA	1999/01/26	1999/01/26
β_x, β_y [m]	34 \pm 11, 3.0 \pm 1.7	35 \pm 13, 9.6 \pm 2.7
α_x, α_y	1.5 \pm 0.7, 0.6 \pm 0.3	2.1 \pm 0.8, 1.2 \pm 0.3
ϵ_x, ϵ_y [π nm \cdot rad]	18 \pm 5, 56 \pm 19	20 \pm 5, 32 \pm 11
<hr/>		
1ns-200mA	1999/03/12	1999/04/01
β_x, β_y [m]	15 \pm 3.4, 3.8 \pm 2.3	17 \pm 8.6, 4.7 \pm 1.6
α_x, α_y	2.1 \pm 0.4, 0.5 \pm 0.4	2.2 \pm 1.4, 0.6 \pm 0.1
ϵ_x, ϵ_y [π nm \cdot rad]	62 \pm 7, 100 \pm 42	71 \pm 34, 85 \pm 25
<hr/>		
1ns-1.4A	1999/03/31	1999/04/15
β_x, β_y [m]	5.8 \pm 1.4, 6.6 \pm 1.3	8.2 \pm 3.5, 4.8 \pm 0.4
α_x, α_y	0.3 \pm 0.1, 1.0 \pm 0.2	0.1 \pm 0.2, 0.9 \pm 0.2
ϵ_x, ϵ_y [π nm \cdot rad]	89 \pm 20, 114 \pm 22	65 \pm 19, 43 \pm 6

計算用WS (CPU Alpha 21264, 500MHz) を使用して1分である。

6. まとめ

現在、このシステムは運転サイクル開始の立上時に稼働中で、クライストロン稼働号機変更等によって運転パラメータを変更した場合でも整合用四極電磁石の励磁量を変更することにより、ビーム輸送系入口でのTwissパラメータを再現させている。その結果、1998年9月にL3及びL4 (ニュースバル制御下のビーム輸送系を含めて) の四極電磁石励磁量を決定したが、以降変更していない。

今後の課題として、スクリーンモニタによる測定精度を高めるために、薄型スクリーン (0.1mm厚程度) + シャッターカメラ + 画像処理システムへの変更を予定している。プログラムではシケイン分散部でのビームサイズを入力可能なように、分散関数を組み込む予定である。

参考文献

- [1] K. Yanagida et al., "Beam Transport for SPring-8 Linac Future Plan", Proc. of the 11th Sympo. on Accl. Sci. and Tech., 1997, Harima Sci. Garden City.
- [2] K. Yanagida et al., "Emittance Monitor for SPring-8 Linac", Proc. of the 1994 Int. Linac Conf., 1994, Tsukuba.
- [3] K. Yanagida et al., "Analog Processor for Emittance Monitor in SPring-8 Linac", Proc. of the 10th Sympo. on Accl. Sci. and Tech., 1995, Tokai.