

# CLEAR UP CAUSES OF BEAM ENERGY( $E, \Delta E$ ) DRIFT USING THE REGRESSION ANALYSIS FOR SPring-8 LINAC

H.Akimoto, H.Sakaki, H.Yoshikawa, T.Hori, T.Asaka, A.Kuba and H.Yokomizo  
 Japan Synchrotron Radiation Research Institute (JASRI)  
 SPring-8, Kamigori-cho, Ako-gun, Hyogo-ken, 678-12, JAPAN

## ABSTRACT

The SPring-8 Linac has been RF aging and beam commissioning, and the linac has been the electron beam incidence to Synchrotron. It is important that the Synchrotron is supplied with the stable beam from the Linac. In this paper, we describe the beam energy fluctuation by the regression analysis.

## SPring-8 線型加速器の回帰分析法を使用したビームエネルギー ( $E, \Delta E$ ) 変動原因の特定手法

### 1. はじめに

大型放射光施設 SPring-8 線型加速器は RF エージング、ビーム加速試験を経て、電子ビームをシンクロトロンに入射している。電子ビームの条件は繰り返し 1 Hz、パルス幅  $1 \mu s$ 、電子銃出口でのビーム電流 39 mA、1 GeV 偏向電磁石通過後のビーム電流 15 mA である。シンクロトロンから要求されるスペックである  $1 \text{ GeV} \pm 1\%$  のビームエネルギーを満足するために、各種加速器コンポーネントを調整するが、様々な要因によりビームのエネルギー ( $E, \Delta E$ ) が、時間の経過に伴い変動し、シンクロトロンへの入射効率が低下する。そこで入射効率を安定に維持するために、要因を可能な限り分析し、その結果を反映した対策を講じなければならない。

複雑に絡み合う要因を分析する手法として多変量解析法が知られているが、今回はビームのエネルギー変動要因を特定するために、最も一般的に使われている回帰分析を用いた。本稿では、回帰分析を行うための、具体的な実験内容、解析結果について報告する。

### 2. 測定系の概要

#### 2.1 ハード構成

実験に使用する装置の概略を図 1 に示す。各実験ごとに WS (hp workstation) から各機器 (プロファイルモニタ、補正電磁石、電子銃電源) の制御画面を経由し、パラメータの設定と制御を行う。電子銃直後に設置された SCM-B (壁電流モニター) から得られるビーム電流波形はデジタルオシロスコープ (テクトニクス, TDS310) に入力され GPIB 経由で計算機に取り込まれる。さらに、PM2-LS(Profile Monitor)、PM3-LS の NTSC (National

Television System Committee) 規格の映像信号を画像処理プログラムでデジタル表示し、ビーム位置と形状の数値データを収集する。

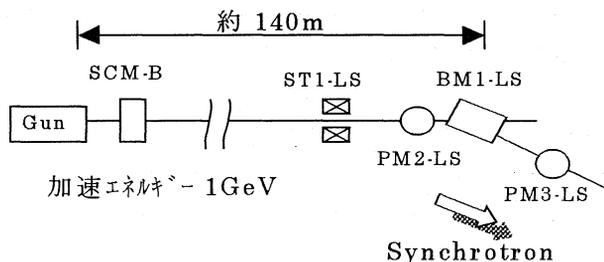


図 1 : 線型加速器実験装置概略図

#### 2.2 画像処理

回帰分析を行うためには、CRT に映し出される電子ビームの NTSC 規格の映像信号を、デジタル信号に変換する必要があります。以下に示す手順でそれを達成している。

電子ビームに同期したプロファイルモニタの映像信号を取り込むために、NTSC 規格の映像信号をデジタル変換する VME-bus 用カメラ I/F ボード (アドバンテス, Advme2210) を使用した。このボードは、TTL レベルの外部トリガー信号が入力された後、設定した遅延時間を経てデジタル化が開始されるよう特別に製作した。画像データのデジタル変換後、VME 計算機内で JPEG (Joint Photographic Expert Group) 圧縮し、線型加速器の制御プロトコルに沿った形式で WS へ転送される。WS 上では、JPEG 圧縮されたデータを解凍し CRT に画像データを表示する。同時に、画像データの輝度情報から計算されるプロファイルモニタ上でのビーム位置及び、ビーム形状データをファイルに記録する。

### 3. 実験概要

エネルギー変動の要因として、主に

- ①ビームに対するバンチャーの位相変動
  - ②電子銃から出力されるビーム電流値変動
- が考えられる。

以下に、これらの要因を検討する必要性を述べる。

#### ・RF系の位相について

SPring-8 線型加速器のRF系は、2856MHzで励振され、プリバンチャー2台、バンチャー1台、加速管26本で構成されている。特にバンチャーの位相変動はバンチング効率に直接影響を及ぼすため、エネルギー変動に大きく影響する。

#### ・電子銃から出力されるビーム電流について

現在、陽電子を発生させるための大電流用カソード (EIMAC 製,Y796 型) が使用されている。しかし、コミショニング時のストレージリングからの入射要請により、電子銃から出力されるビーム電流を、熱的な飽和領域以外の動作点でヒータ電圧を設定し、低電流 (40mA) のエミッション電流を得ている。これによる放出電流の変動により、ビームローディング電圧及び位相シフトがエネルギーの変動要因となる。

実験を行うにあたり 1GeV 偏向電磁石に対するビームの入射角度変動がビーム位置及び、拡がりの要因となる。これがエネルギー変動として、どの程度影響を及ぼすのか、合わせて評価した。

実験の具体的内容は、バンチャー以外の様々なパラメータは現状に固定したままで、バンチャーの位相を 320 度、313 度、306 度、299 度と 4 点設定して PM2-LS、PM3-LS のビームプロファイルを約 80 点測定する。同様に、電子銃からのビーム電流値を 45mA、62mA、79mA、95mA と 4 点設定、BM1-LS (Bending Magnet) に対する X 方向の入射位置を ST1-LS の電流値を -15A、-7.5A、0A、7.5A、15A と 5 点設定して PM2-LS、PM3-LS のビームプロファイルを各々約 80 点測定する。

### 4. 実験結果

数値の相関分布図の例を図2に示す。図2-AはST1-LSのX方向電流値を変化させた時のPM2-LSのX方向位置変化についての相関をあらわしている。当然の事ながら、相関係数は0.9995と強い相関がある。図2-Bはバンチャーの位相を変化させた時のPM3-LSのX方向位置変化について二次近似曲線を使用して相関をあらわしている。図2-Cは電子銃出口のビーム電流値を変化させた時のPM3-LSのX方向位置変化について二次近似曲線を用

使用して相関をあらわしている。図2-DはST1-LSのX方向電流値を変化させた時のPM3-LSのX方向位置変化について二次近似曲線を使用して相関をあらわしている。

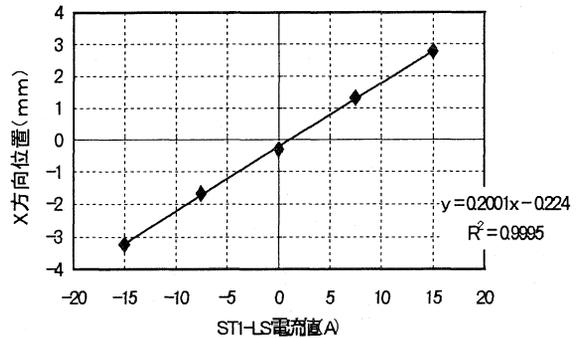


図2-A: X方向位置-ST1-LS電流値相関図

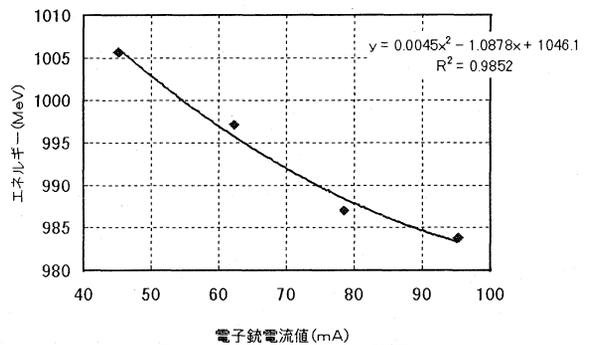


図2-B: エネルギーと電子銃電流値相関図

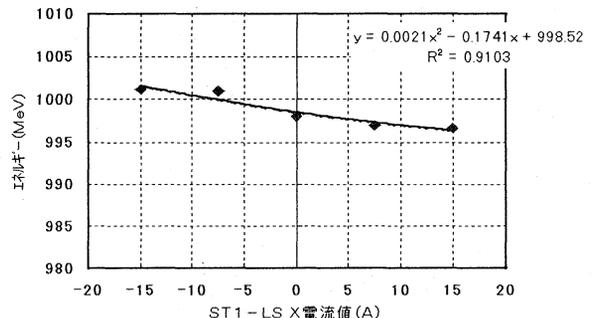


図2-C: エネルギーとST1-LS X電流値相関図

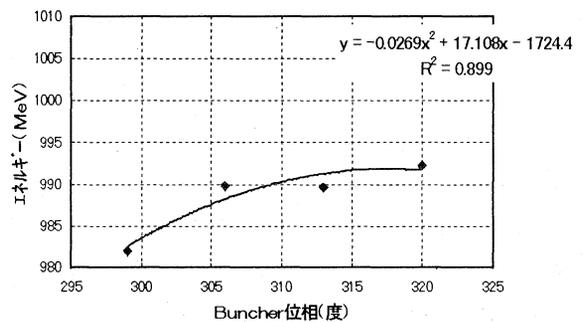


図2-D: エネルギーとBuncher位相相関図

	主効果(一次)			主効果(二次)			2因子相互作用		
係数名	$C_c$	$C_s$	$C_b$	$C_{c2}$	$C_{s2}$	$C_{b2}$	$C_{cs}$	$C_{cb}$	$C_{sb}$
係数値	-128.6	109.4	-33	-6.7	-2.1	18.4	-79.4	400.8	-519.6
標準誤差	65	61	36	7.5	1.1	3.1	21.3	203	179.7

表1: X方向のビーム中心位置(PM3-LS)、エネルギー変動

	主効果(一次)			主効果(二次)			2因子相互作用		
係数名	$C_c$	$C_s$	$C_b$	$C_{c2}$	$C_{s2}$	$C_{b2}$	$C_{cs}$	$C_{cb}$	$C_{sb}$
係数値	-257.2	-44.8	542.6	-18	-0.2	11.4	-0.7	817.8	131.6
標準誤差	48	45	27	5.6	0.87	2.36	15.9	151.1	133.8

表2: 水平方向のビーム幅(PM3-LS)、エネルギー分散

## 5. 多重回帰分析

実験により得られた測定値に対して 5%以内の誤差分布での評価を行うために、二次近似曲線でフィッティングした。バンチャー位相、ST1-LS X 方向の電流値、電子銃出口でのビーム電流値は、各因子がそれぞれ同じ水準になるように、それぞれのデータの最大値を+1、最小値を-1とコード化したものを用いた。このデータから用いた3つの因子とビームのプロファイルのデータを特性値の関係式で表す二次多項式モデルを作り分析を行う。

モデル式の各係数の名称は、電子銃ビーム電流： $C_c$ 、補正電磁石電流： $C_s$ 、バンチャー位相： $C_b$ 、電子銃ビーム電流の二乗項： $C_{c2}$ 、補正電磁石電流の二乗項： $C_{s2}$ 、バンチャー位相の二乗項： $C_{b2}$ 、電子銃ビーム電流+補正電磁石電流： $C_{cs}$ 、電子銃ビーム電流+バンチャー位相： $C_{cb}$ 、補正電磁石電流+バンチャー位相： $C_{sb}$ とする。

推定されたモデル式は、推定値の標準誤差を併記して、表1、表2のようになり、この係数から回帰分析が可能となる。一般的に回帰分析として行う推測は、モデル式の係数値と標準誤差値を比較し、分析を行う方法が用いられる。このとき、推定値の標準誤差から係数自身の誤差を求め、その誤差から推測結果に信頼性をもたせる。表1のPM3-LS X方向のビーム中心位置(エネルギー変動)では、電子銃ビーム電流値の二次項の絶対値は6.7である。これは標準誤差値7.5以下であるので、帰無仮説は廃却されず、電子銃ビーム電流値の二次項は積極的に支持されないことが判る。同様に推測を続ければ、明らかに補正電磁石+バンチャー位相の相互作用が大きく支持されることが判明する。以上の推測方法により、エネルギー変動を引き起こす因子として主効果の一次項と二次項の数値を考慮すれば、バンチャー位相の変動要因が最も支配的である結果が得られた。表2の水平方向のビーム形状(エネルギー分散)も同様の推測を行えば一次項の評価では、バンチャー位相、電子銃ビーム電流の

順で影響が大きいことが判る。次に、2因子相互作用においては、電子銃ビーム電流+バンチャー位相のみが大きく影響している。したがって、エネルギー分散を最小にするためには、この2つパラメータを平行して調整するオペレーションが重要である。

## 6. まとめ

回帰分析を使用すれば、ビームエネルギー ( $E$ 、 $\Delta E$ ) の変動抑制に一番有効な個所を特定することが可能であることが判った。今後は、回帰分析を応用して推測されたデータからさらに細かい要因を掘り下げていけるような手法を考える必要がある。

## 7. 謝辞

測定データを収集するにはスプリングエイトサービス(株)の方々にご協力いただきました。ここに感謝の意を表します。

## 参考文献

- [1] 田口玄一、“実験計画法(上)(下)”