

[O9-A04]

## Statistical analysis and control of electron beam fluctuation

H.Sakaki, H.Yoshikawa, T.Hori\*, and M.Mizumoto

JAERI Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki, 319-1195

\* SPring-8 Mikazuki-cyo, Sayo-gun, Hyogo, 679-5198

### Abstract

The energy fluctuation of the beam which is produced by the large scale electron linac is statistically analyzed. The result shows that the mutual contribution of disturbances exists in this linac. We took account of these effect of disturbances, and we made the energy fluctuation model by the adaptive identification. As a result, the energy fluctuation was suppressed less than  $\pm 0.1\%$  by the control based on this model.

## 電子ビームエネルギー変動の統計的解析とその制御

### 1 はじめに

Linac は加速器施設の最上流に位置し、電子ビームを安定に供給せねばならず、下流の実験者の要求からその性能を可能な限り長時間維持することが不可欠である。そのため設計段階において、構成機器の性能のみならず Linac を取り巻く様々な外乱因子の影響まで、細部にわたり十分に検討される。

SPring-8 の Linac も、十分な検討が行われたために、運転が始められた当初 (1996 年 8 月) から、目標性能を達成していた。しかし、この Linac には現在の設計性能を更に 1 桁以上向上させる要求が挑戦的な目標としてあり、今までに検討された外乱因子はもちろんのこと、現在問題視されていないレベルの因子でも、目標の障害となり得ると考えられるものは、すべて調査、検討される必要がある。

本研究は、次目標の性能達成に向け、Linac を統計的手法で解析し、実際と対応づけることから、加速ビームのエネルギー変動の解明を行うことを目的とする。解析の結果、提案されるべき新たな結果が得られたので報告する。また、得られた結果を応用して、実験的に加速エネルギーに予測的な制御を試み、次目標で必要とされるエネルギーの性能に対して有用な結果を得たので重ねて報告する [1].

### 2 エネルギー変動解析の経緯

Linac の運転中、加速過程に様々な外乱因子が影響し、加速ビームの性能低下を引き起こすため、設計段階から外乱因子の定量的な評価がおこなわれる。たとえば、Linac から変動のない一定エネルギーのビームが供給されることが理想であるが、

- 電力会社から供給される電源ラインの電圧変動、
- 加速器構成機器が設置されている部屋の室温変化、
- 構成機器を冷却する冷却水の温度変化、
- 加速位相調整時の誤差、
- 加速管自身の温度変化による加速ゲインの変化、

- ビームローディングの影響、

などの因子で変動するため、設計段階から解析的に評価し、目標性能が達成されるように、これら因子の許容変動範囲が見積もられる。(ただし、本報告では簡略化のために上記にあげた外乱因子のうち以下は考慮しない。

- 加速管の温度変化によるゲインの変化：加速管は独自の精密温調機によって 0.1 度以下の温度変動にコントロールされており、ほとんど変化しないため。
- 電子ビームに対するローディングの効果：通常 Linac はピーク電流 100mA 以下 (1Hz, ビーム幅 40 ナノ秒のパルス運転) で運転され、加速管フィリングタイム 0.6 $\mu$  秒等から見て無視できるため)

一般的に Linac の設計では、上記に挙げた外乱因子が独立に振る舞うと仮定され、各外乱因子の分散が伝搬されていくと仮定して計算が行われる。そのため、主観的にその仮定にとらわれて、時系列で得られたエネルギー変動などの性能変動と各外乱因子を線形相関分析することで、エネルギー変動に対する各外乱因子の影響を検討してきたが、各外乱因子はともに分散があり、相関分析では優位な差が見られず、変動に対する影響の特定が難しかった。解析用のデータ収集を重ねるうちに、独立と仮定された外乱因子が、加速エネルギーに対して独立かつ直接に影響しておらず、因子間で相互に相関をもってエネルギー変動に複雑に寄与している可能性に気づいた [2].

このような場合は、物理的な解析手法より、統計的なアプローチの方が有効である。そこで、Linac を一般的な物理モデルではなく、入出力データを使った統計的モデルで表現し、実際の現象との対応づけを行うことでエネルギー変動に関する解析を赤池が提案した手法で行った [3].

### 3 システム解析

#### 3.1 解析データの収集

解析に使用する時系列データは、できるだけ測定系の雑音が小さなデータを利用し、解析の信頼性を向上させたい。

特にエネルギー変動の測定は、解析の上で最も重要であるため可能な限り測定系の雑音削減に注意が払われなければならない。そこで、今回はわれわれが開発した画像処理を用いたエネルギー変動モニタ [4] を使用し、外乱因子とエネルギー変動を時系列で収集する。画像処理を用いた測定は、構造上電気的に完全に絶縁されるため、Linac の運転上避けられない RF 系が発生する電磁雑音の影響や、電子ビームのダクト衝突による SN の悪化などは全くない。データの信頼性が要求される今回のような測定において、高い分解能のデータを提供することができる。

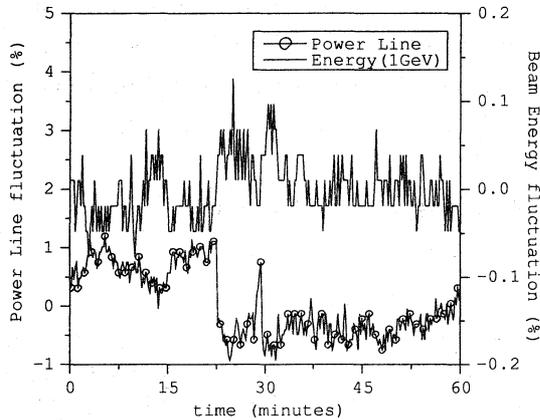


図 1: Time series data of energy fluctuation and power line changes

解析用時系列データは 12.5 秒周期で収集された。収集された時系列データの例として、図.1 に得られたエネルギーとライン電圧 (400V) 変動の時系列データを示す。縦軸にはそれぞれの変動率 (%) をとる。ライン電圧は、自施設内の電力消費による電圧変化のみならず、施設外の変電設備の系統電圧調整のタップ切り替えなどで大きく変化をする。この図では測定開始から 22 分後にその影響と思われる変動が観測されている。Linac では電圧の変動幅は、最大 6% まで許容し、変動が生じて性能に大きく寄与しないように設計がされているが、電源ライン変動とエネルギー変動の相関が読みとれる。

### 3.2 ノイズ寄与率の計算

収集されたデータからノイズ寄与率を計算する。解析には約 70 分のデータが使われた。また、AIC によってモデルの次数を計算したところ  $M=4$  を得た。この時系列データを用いて各変数のノイズ寄与率を計算すると、図.2 が得られた。図.2 の左上図は冷却水温の変動に寄与する各変数のホワイトノイズの寄与率を示したものである。この図では、冷却水温自身の変動部分の (A) の面積が寄与の多くの部分を占め、それ以外に低周波領域に (B) (C) で示される電源ラインと室温のホワイトノイズの寄与の存在が若干読みとれる。また、図.2 の右上図は電源ライン、左下図は室温、右下図はエネルギー変動に対する寄与率を示した。これらを総合すれば以下が読み取れる。

- 冷却水の温度変動に関する寄与率  
冷却水温は、大半が自身のノイズで変動しているが、低

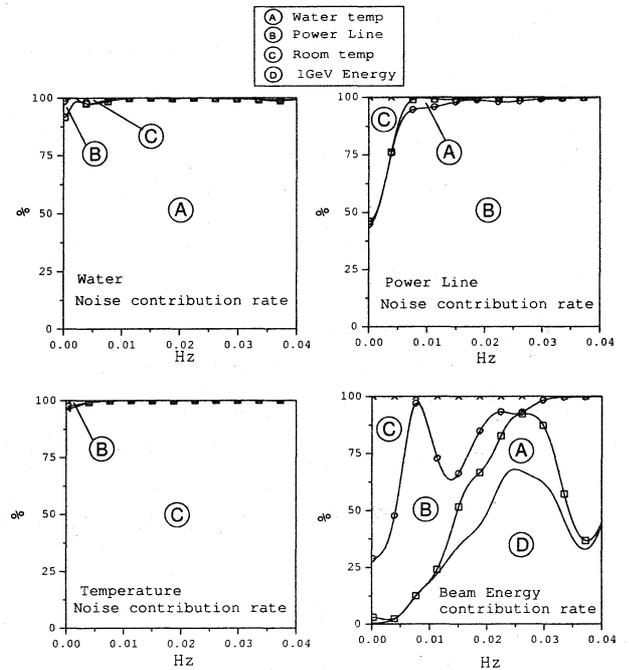


図 2: Noise contribution rate of Linac

周波数では電源ラインと室温 (大型エアコンによる気温変化を含む) の影響を少し受ける。

- 電源ラインの変動に関する寄与率  
電源ラインは、低周波数では室温の影響を大きく受ける。また、中間の周波数では冷却水温制御系の影響を受けている。
- 室温の変動に関する寄与率  
室温は、ほぼ自身のノイズで寄与され、他の変数の影響をほとんど受けない。
- エネルギー変動に関する寄与率  
エネルギーの変動は、低周波数では室温の影響と電源ラインの変動の影響が大半を占めている。また、中間周波数では冷却水温の影響が大きくなる。そして、高周波数では再びラインの影響が増加する。

ノイズ寄与率と、実際の Linac の物理動作を対応づけて検討すると、エネルギー変動の過程が把握でき、それからエネルギー変動の発生過程は次のように推測される。

- (1) まず、Linac 全体の室温が天候などの影響で、大型エアコンが動作する。そして、Linac 内の室温変化が発生すると共に、エアコンにより電源ラインに電圧変化を生じる。  
また、これとは別に、電源ライン自身が施設外の影響で大きく変動する場合があります。これらは、エネルギー変動のノイズ寄与率の低周波数領域に関して寄与する。
- (2) (1) のいずれかの影響で加速 RF のゲインおよび位相が同時に変化する。これは、エネルギー変動のノイズ寄与率の高周波数領域で大きく寄与する。
- (3) (2) の加速 RF の出力の変化で、ダミーロードを冷却している冷却水温が変化する。この冷却水は、加速管を

ムエネルギーモデルを構成した。

$$\hat{y}(t) = \hat{b}_{(t-1)}u_{(t-1)} + \sum_{i=1}^2 \sum_{l=1}^4 \hat{a}_{i(t-l)}x_{i(t-l)} + \hat{a}_3x_{3(t-1)} + \sum_{l=1}^2 \hat{c}_{(t-l)}r_{(t-l)} + \epsilon(t) \quad (1)$$

ただし、各変数は、冷却水温  $x_1$ 、室温  $x_2$ 、電圧変動  $x_3$  であり、 $r$  は式誤差である。次数は、緩やかに変動する室温、冷却水温は、先のモデルの AIC で求められた 4 次に、瞬時に変動する電源電圧は 1 次、式誤差は任意に 2 次にした。  $u$  は制御入力であるが、以下に説明を加える。

13 台の RF 系による総加速ゲインは、各 RF 系のゲインを  $V_i$ 、外乱因子で発生する加速位相変化  $d\theta$ 、操作量  $\theta_{(op)}$  を考慮して、

$$V_{total} = \sum_{i=1}^{12} V_i \cos(d\theta_{i(vol)} + d\theta_{i(temp)} + d\theta_{i(op)}) + V_{13} \cos(d\theta_{13(vol)} + d\theta_{13(temp)}) \cdot \cos(\theta_{13(op)}) \quad (2)$$

と書ける。よって、13 台までで発生した総ゲイン変動は、13 台目の最終段のシステムのゲインをうまく制御すれば打ち消され、結果としてエネルギー変動を押さえることができる。(2) 式では、ゲイン変動を押さえるために操作可能な変数は、 $V_{13}$  および  $\theta_{13(op)}$  であるが、加速ゲイン  $V_{13}$  (変調器の設定電圧: 0.1kV 単位で調整) の操作に比べて操作性が格段に高い位相  $\theta_{13(op)}$  (設定位相: 0.014 度単位) を、制御入力変数とした。

## 4.2 逐次パラメータ推定および制御入力計算

エネルギー変動は、図.1 に示すように変電設備の系統の電圧調整のタップ切り替えなどの非定常な影響をうけて、非定常にかつ瞬時に推移する。このような非定常な系をオフライン推定し、実際の制御に用いると、十分な制御結果を得られない。そこで、われわれは非定常な環境下で逐次的にパラメータを同定する指数重み付きの拡大最小 2 乗法 [5] を用いて、モデル式の係数を計算する適応同定を行い、その結果から入力を算出、エネルギー変動を制御することにした。

## 4.3 制御システム

今回の制御方式の概念図を図.4 に示す。Linac は、最終段の RF 系 (M18 section) の加速管の通過後、1GeV に到達する。エネルギー変動を制御するには、1GeV のビームのエネルギーを測定する必要があるが、この測定は、電磁石で偏向されたビーム軌道を蛍光板スクリーンに投影し CCD カメラで測定する方法を用いる [4]。今回は、シケインと、その中に設置されているビームの軌道確認用蛍光板スクリーンを用いて、スクリーンのビーム位置をモニタし、このスクリーン上で位置の変動が無くなるように制御する。

エネルギーと他の外乱因子の測定値は、一定周期で取り込まれ、拡大最小 2 乗法で (1) 式のモデルの係数値が、オンライン推定される。そして、推定された値から、直ちに制御入力  $u$  が計算され、次のサンプル時間後にエネルギー変動がゼロになるように位相器 ( $I\Phi A$ ) によって入力パワーが調整される。

## 4.4 エネルギー変動制御の実際

制御されていないとき (制御開始直前) のシケイン軌道で観測された、エネルギー変動と時系列で収集された RF 系を駆動している 400V の電源ラインの変動を図.5 に示す。

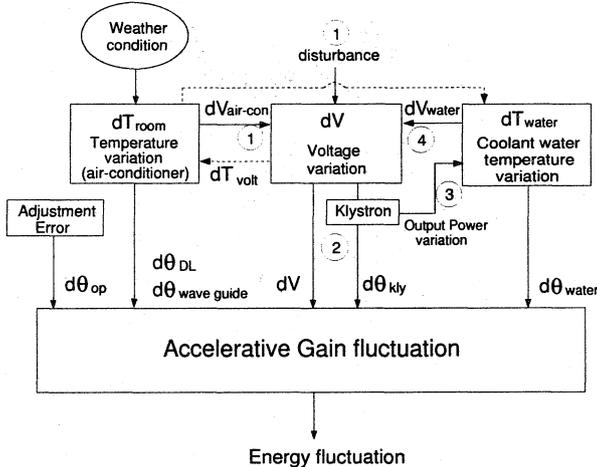


図 3: Identified disturbance model

除く構成機器の冷却にも流用されおり、構成機器に熱膨張を生じ加速位相に影響する。この変化はノイズ寄与率の中周波数領域に現れる。

- (4) 最終的に、冷却水温制御系の作動によって電源ラインが再び電圧変化を受ける。

この過程を視覚的に示すと図.3 のようになる。ここでは、ノイズ寄与率で得られた 10% 以上の寄与を横実線で示し、それ以外の微量なノイズ寄与を横点線で示している。縦実線は設計で考慮した外乱因子の影響である。また、線に添えられている①~④の番号は、上記の過程の (1)~(4) の番号に対応させている。

図の横のつながりを見れば、電源ラインの電圧は、他外乱因子の影響 (① ④の矢印) を大きくうけ、外乱の受け口になっていることが明らかである。さらに、この電圧の影響が、他者に影響を波及する (② ③の矢印) 構造になっていることも読みとれる。このような因子間の相互の影響が生じていたために、外乱因子の独立性にとらわれた線形相関分析で、優れた差が得られなかったと考える。

以上の解析結果から、現状の Linac を次目標の性能に向上させるために、特に電源ラインの安定化を考慮し、外乱因子が相互に影響し合うような循環を断つことが必要である。

## 4 エネルギー変動の実験的制御

解析結果から、エネルギー変動は、冷却水温、ライン電圧、気温変化の代表的な 3 つの外乱因子が複雑に絡み合って発生しているとイメージできる。エネルギー変動を発生させないようにするには、これら主だった外乱因子の現在の振る舞いが、将来どのようにエネルギー変動に関わるようになるのか予測できれば、先回りに RF パワーを微調してエネルギー変動を抑えることが可能である。

### 4.1 エネルギー制御モデル

解析で得られた動特性をふまえて、制御入力を考慮した、外乱因子の履歴を用いた (1) 式のような予測モデル型のビー

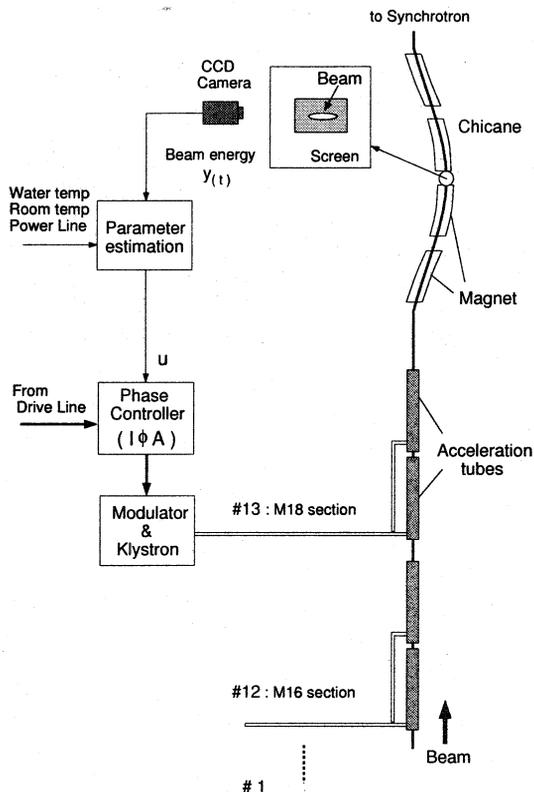


図 4: Configuration of the energy control system

縦軸にはそれぞれの変動割合 (%) をとる。制御がかけられる前は、全幅で 0.4% 程度のエネルギー変動がある。

次に、制御例を図.6 に示す。制御が開始されて数分で目標値に落ちつき、制御を行わないときのような変動は見られず、その値を安定に維持している。このときの変動幅はほぼモニタの測定限界の  $\pm 0.1\%$  であった。これらは、あくまで実験的に行われたものだが、エネルギー変動を抑制する有用な結果を得ることができた。

## 5 おわりに

Linac において、まず統計的なモデルを同定し時系列解析を行い、外乱因子の相互の寄与と、エネルギーに与える影響をノイズ寄与率で評価した。外乱因子が相互に影響しあうという結果は、次目標をもつ加速器施設に対して性能向上の新たな知見を与える。また、得られた知見を活かして、実験的に指数重み付きの拡大最小二乗法で、パラメータをオンライン適応同定し、外乱因子の履歴を用いた予測的なエネルギー制御を行って有用な結果を得た。実用化に向けてさらに検討を進めていく必要があるが、この成功は次目標に必要な性能をサポートする制御方法の一つとして注目される。

## 6 謝辞

SPring-8 線型加速器では、安積氏をはじめ高輝度光科学研究センターの職員の方々、また秋本氏をはじめ SES の

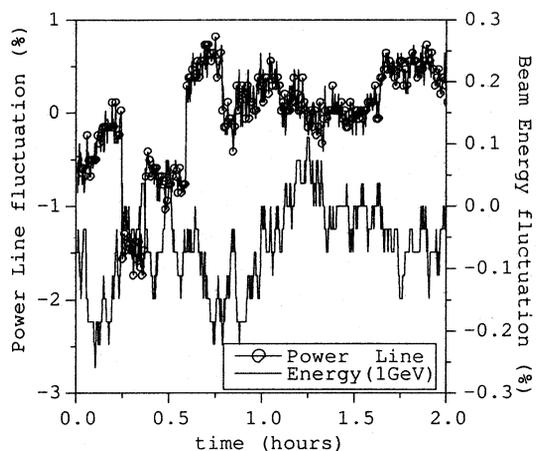


図 5: Measurement data of energy fluctuation

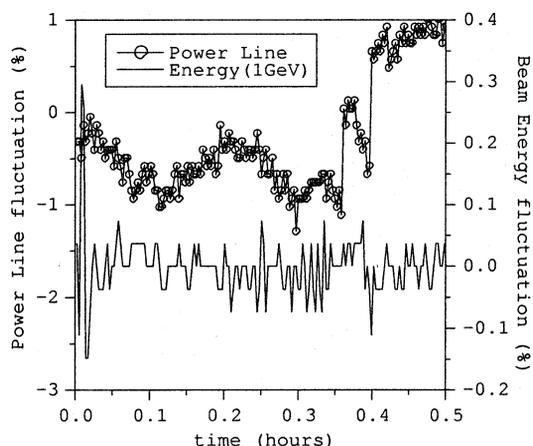


図 6: Response of using energy control

方々には多大なる御協力を頂きました。ここに感謝の意を表します。

## 7 REFERENCES

- [1] 榊, 吉川, 堀: 電子線型加速器のビームエネルギーの統計的解析とその制御, 計測自動制御学会誌 (投稿中)
- [2] H.Sakaki et al.: System analysis for Linear Accelerator, Proc. of THE 23rd LINEAR ACCELERATOR MEETING IN JAPAN, 102/105 (1998).
- [3] H.Akaike: On the use of a linear model for the identification of feedback system, Ann. Inst. Statist. Math., Vol.20 425/439 (1968)
- [4] 榊, 吉川, 堀: 画像処理を用いた線型加速器エネルギー変動測定装置, 計測自動制御学会論文誌, 35-5 587/593 (1999)
- [5] S. ヘイキン: 適応フィルタ入門, 現代工学社,(1987)