

[A18a08]

## System analysis for Linear Accelerator

H.Sakaki, H.Yoshikawa, T.Hori, T.Asaka and H.Yokomizo

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

### Abstract

We try to analyze the phase control of the linac by AR-model developed by Dr.Akaike. It becomes clear that the microwave phase depends on three parameters of electric power voltage, cooling water temperature and room temperature.

## 線型加速器安定化に関するシステム解析

### 1 はじめに

加速器施設に、高いビームクオリティが求められるに従い、目標を達成するために構成機器に関する高性能化、高安定化が進められているのはいうまでもないが、それらの機器を組み合わせて運転を行ってみると、予想もしない外乱をうけて、目標クオリティの達成を脅かす場合が多い。当然のことではあるが、加速器を1つのシステムとしてとらえ、外乱原因を究明した上で、その外乱伝搬ループ（フィードバック系）をできるだけ根元から断ち切り、安定化をはからなければ高度化する加速器施設のトータル的な性能向上がはかれないためである。

一般的なシステムを解析するために、赤池[1]は、多変数自己回帰モデル（ARモデル）を構成し、システムをフィードバック系としてとらえて、客観的に解析する方法を確立し、様々な分野においてシステムの最適化に成功している。この解析手法は、複雑で大きなシステムにも適し、大型加速器全体を一つのシステムとして検討するのに適する。

以下では、SPring-8線型加速器位相制御について、赤池法によるシステム解析を用い、できるだけ客観的にシステム構造を評価し、安定化に対する検討を行ったので報告する。

### 2 多変数自己回帰モデル解析

#### 2.1 解析データ

今回のシステム解析は、位相システムをターゲットにした。いうまでもなく位相は、外乱受けやすいものの一つ[2]でありシステム解析が望まれるためである。

- 一次系冷却水温度変化量（クライストロン冷却水）
- ブースターモジュレータ内HVDC（DE-Qされる前の電圧：商用電源の変動+IVRの変動）変化量
- 室温変化量（klystron室）
- 位相比較器から得られる位相変化量（比較される位相は、レファレンスラインの基準位相と2本の加速管を通過後の位相。）

解析データは上記に示すように、システムの中で各機器の共通のパラメータとなって、フィードバックを組むもので

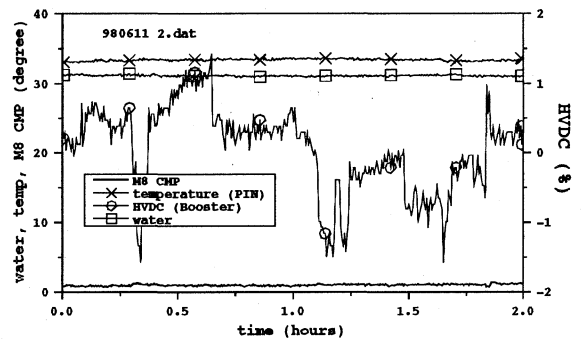


図1: 収集されたデータ (その1)

比較的計測がやさしいものを選び、VMEを利用した線型加速器制御系[3]で収集（20秒周期で収集）する。なお、位相変化は、クライストロンの出力変化に伴う位相変化と、導波管の熱伸縮による位相変化を区別する必要があるが、今回の計測系ではそれらの区別ができず、一括された位相変化として観測されている。図1は収集したデータであり、縦軸は、位相、気温、水温が変化量（度）、HVDCはデータの平均値からの変動の割合（%）をとる。HVDCの変化が激しく見られるが、これは商用電源電圧自身の変動がある上、それに対応するためにIVRが追従して動作しているためである。位相、水温については変動がほとんどなく、きわめて安定な状態が記録されている。以下の解析は図1データを中心にした解析である。

#### 2.2 モデル同定

一般的な多変数ARモデルは、

$$x_i(s) = \sum_{j=1}^k \sum_{m=1}^M a_{ij}(m)x_j(s-m) + e_i(s) \quad (i=1, 2, \dots, k) \quad (1)$$

で表されるが、フィードバックを持つ系の解析にこのモデルを使用する際には、ノイズ $e_i(s)$ が異なる変数間で相関を

持たないことが必要となる。ここで、 $k$  個の各変数は、それぞれ平均値からの偏差とし、 $M$  はモデル次数で、現時点への影響が過去のいくつまでさかのぼるかを決定する量と定義する。この次数の決定に関しては、同定によって得られた  $a_{ij}(m)$  を用いて、予測を行う場合の誤差を示す量の推定値 (Final Prediction Error:FPE) を求め、これが最小となるような次数  $M$  を採用する、赤池のアルゴリズム [4] を利用した。

### 2.3 インパルス応答

システムの動的な応答は、同定された AR モデルを使って行うインパルス応答 (実態シミュレーション) によって解析できる。実態シミュレーションは、それぞれの変数に 1 単位のインパルス状の外乱が加えられた (何らかの理由で 1 サンプル周期だけ温度、位相角度、電源電圧等が瞬時に増加したと仮定) として、システムの動的応答をみるもので、冷却水温度のように現実にはインパルス的な変化を加えることのできないシステム変数にシミュレーションが可能で、客観的に全体的な動的応答を確認できる大きなメリットがある。シミュレーション結果 (図 2)、HVDC を例に挙げ

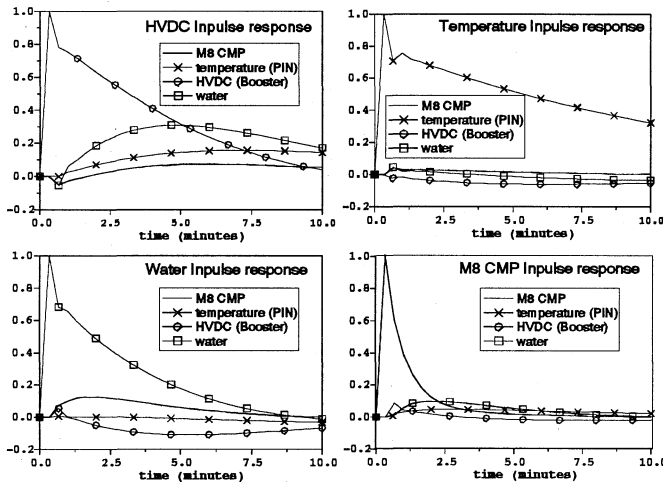


図 2: AR モデルの実態シミュレーション (その 1)

て説明すれば、インパルスが加わって、約 20 秒以内に位相変化がピークになり、その後 5 分後に水温のピークが観測されている。これは、HVDC の変化によってクライストロン出力電力が変化 (位相の変化として検出)、その電力変化によって、クライストロン冷却水の温度が上昇するという、実機に対するイメージに近い。また、すべての変数においてインパルス的な外乱を加えても、気温を除き約 10 分後には、システム全体としてゼロに安定に収束しており、実測されたデータが変動なく安定に推移していることと一致している。

より深い考察のために、同じ日の別時間データに対して (図 3: サンプル周期 20 秒、4 変数は全く同じものを収集)、同じ解析方法を用いて実態シミュレーションを行った (図 4)。図 2 とは違い、どのような変数にインパルス的な入力を加えても、一次系冷却水が直ちに発散し、それに伴い位相も発散している。収集パラメータ、解析法は全く同じにも関わらず、実態シミュレーションは発散しており、システム

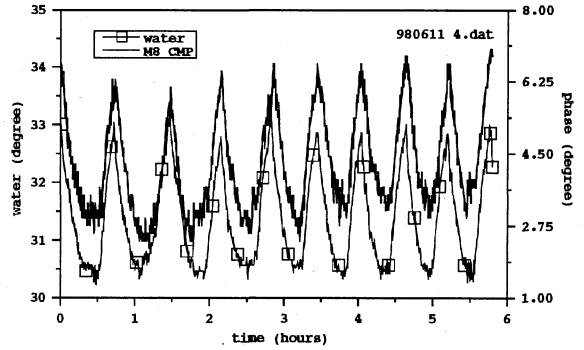


図 3: 収集されたデータ (その 2)

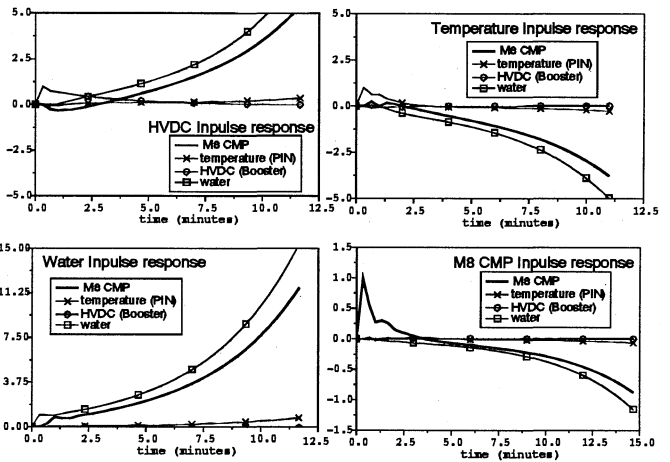


図 4: AR モデルの実態シミュレーション (その 2)

が AR モデルの特性根を、発散的に変えてしまうような何らかの過程を踏んでいることが客観的に示され、この点が今回のシステム解析の鍵となる。

### 2.4 パワー寄与率

(1) 式で示したように、各変数には  $e_i(s)$  で表されるそれぞれの変数と相関を持たないノイズ部分がある。この部分は、他変数から影響を受けない独自の動きで、フィードバック系の中では固有ノイズ (フィードバック系において制御されない部分) である。同定された AR モデルから、この部分のパワースペクトルを求めて、各変数に対して周波数的に解析するのがパワー寄与率解析である。(1) 式において、 $x_j(s)$  から  $x_i(s)$  への周波数応答関数  $a_{ij}(f)$  は、AR モデルの係数をフーリエ変換して、

$$a_{ij}(f) = \sum_{m=1}^M a_{ij}(m) \exp(-i2\pi f m) \quad (2)$$

となる。(1) 式のシステムは  $a_{ij}(f)$  によって、周波数的に  $x_j$  と  $x_i$  とを結合するものとなる。システムは、各変数  $x_i(s)$  ごとに固有ノイズ  $e_i(s)$  を持つようなフィードバック系であ

るとしたから、各  $x_i(s)$  はこれら  $e_j(s)$  からの影響の和として表される。また、 $e_j(s)$  は、互いに相関を持たないことが仮定されているから、各  $x_i(s)$  のパワースペクトル密度を  $p_{ii}(f)$  とすると、これは各々の  $e_j(s)$  からの和として表される。固有ノイズ  $e_j(s)$  のパワースペクトル密度を  $p(u_j)(f)$  として表わすことにすれば、 $x_j(s)$  からの  $x_i(s)$  への影響は、

$$p_{ii}(f) = \sum_{j=1}^k |b_{ij}(f)|^2 p(u_j)(f) \quad (3)$$

となる。但し、 $b_{ij}(f)$  は、(2) 式を利用した周波数応答関数で、

$$\begin{bmatrix} b_{11}(f) & \dots & b_{1k}(f) \\ b_{21}(f) & \dots & b_{2k}(f) \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ b_{k1}(f) & \dots & b_{kk}(f) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 - a_{11}(f) & \dots & -a_{1k}(f) \\ -a_{21}(f) & \dots & -a_{2k}(f) \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ -a_{k1}(f) & \dots & 1 - a_{kk}(f) \end{bmatrix}^{-1} \quad (4)$$

である。そこで、

$$q_{ij}(f) = |b_{ij}(f)|^2 p(u_j)(f) \quad (5)$$

とすると、これが周波数  $f$  における  $x_j(s)$  のパワースペクトル密度の中で  $e_j(s)$  に寄与される部分を示す。従って、

$$r_{ij}(f) = \frac{q_{ij}(f)}{p_{ii}(f)} \quad (6)$$

とすることで、各変数に寄与される他の変数の固有ノイズ部を割合として表わすことができる。図5に、寄与率計算結

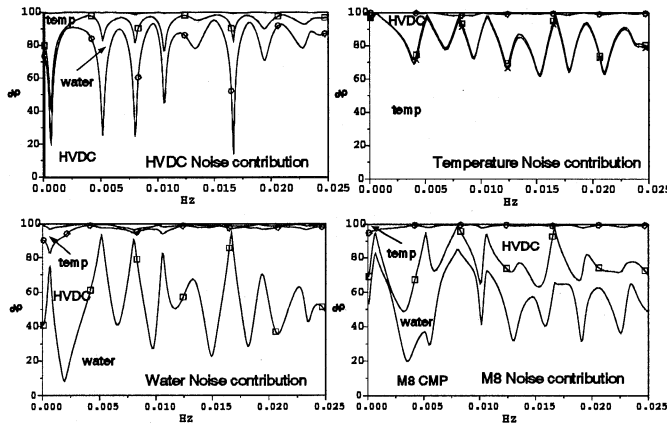


図5: 同定されたARモデルのノイズパワー寄与率

果を示すが、横軸は周波数、縦軸は各変数に対して各々の固有ノイズのパワーの占有割合を表している。これらから、以下の様な関係が読みとれ、後の考察で利用することにする。

- すべての変数に対して、HVDC (電源電圧変動) が影響している。
- 電源電圧変動は変動の大半を自分自身の固有ノイズで占めているが1分 (0.017Hz)、1分30秒 (0.0105Hz) 等の周期では冷却水の固有変動の影響を受けている。また、低い周波数領域では、気温の変化が影響してくる。

- 気温変化の大半は自身の固有ノイズであるが、電源電圧変動が約2割の変動に寄与している。
- 冷却水の変動にも低い周波数領域の変動に関して、2割程度気温の変化が影響する。
- 位相比較器の変動は、様々な固有ノイズが全体の周波数において影響している。これも低い周波数では気温の変化が影響してくる。

### 3 システム解析

#### 3.1 実態シミュレーションと寄与率

これまで得られた、実態シミュレーションとパワー寄与率から、定性的な動的応答図 (図6) を作成することができる。客観的にみたフィードバックを示すことができる。

まず、実態シミュレーションから+、-を決定する。+

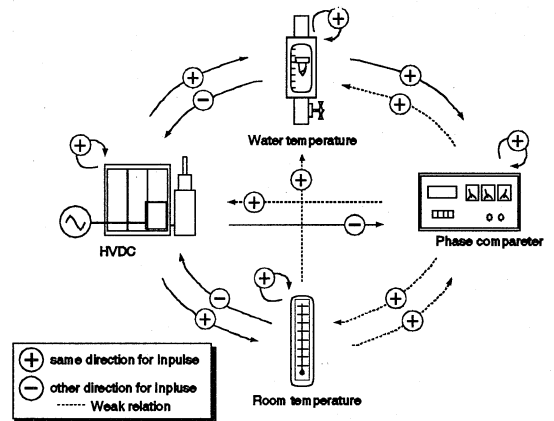


図6: 考察される位相変動フィードバック系

が付いているものは、矢の始まり部分の変数に正方向のインパルスが発生した際、終わり部分にある変数が同じく正方向に振る舞うことを表す。-はその逆である。これによりインパルスが加わったときの各変数の変化方向が規定できる。つぎに、パワー寄与率からその矢印の寄与具合を、矢印のスタイル (点線、実線) で表現する。今回は、図5において、寄与率の面積割合が10%以上を占めるものを強い関係として実線で示し、それ以外を点線として、インパルスに対してやや弱い関係であるとした。

この動的応答で特に注目すべきところは、HVDCで、自らが出発点になり残りすべての変数に約10%以上 (実線の矢) で、関与している点である。つまり、HVDCが引き金となり変動すれば直ちにシステム全体に大きな変動を発生させる可能性があることを示している。

#### 3.2 考察

今回のシステム解析の目的は、フィードバックをできるだけ客観的に分析し、外乱原因を究明して、不安定性の根元を絶つことにある。上記に示した解析データは、このための客観的な評価を我々に与えてくれるものであった。この評価を基盤に、現実の機器の動作と照らし合わせれば、最終的に位相変動の外乱伝搬ループ過程を把握、対策を検討できる。

動的応答によって、位相システムが変動を開始する際に、HVDC が引き金となる可能性が示された。これを出発点にして、現実の機器の動作と照らし合わせて位相システムの発散過程を考える。特に、実態シミュレーションで冷却水によって発散する場合が示されたため、冷却水の動作を主眼に外乱伝搬ループ過程を検討した。位相システムのが大きな変動を起こしているとき(図3)の応答(図7)をみれば、以下のように冷却水制御が原因でフィードバック過程が構築されていると思われる。

1. 外気温の上昇等で、二次冷却水温度が上昇し、ファン1台から、2台運転に切り替わる閾値レベルである。(図1データの様に、システムが安定なときは、ファンが2台動くまでもなくHVDCの変動は冷却水システムによって吸収されて、位相変動は安定に収束する)
2. HVDC が電源電圧の変動等の影響を受ける。
3. HVDC の変化に伴い、RF の出力電力が変化し、位相も影響をうける。
4. RF の出力電力に変化を受けて一次系冷却水の温度が変化する。
5. 一次系変化に伴い二次系温度が変化、冷却ファン2台目が運転開始。冷却水にかかる最大負荷は、陽電子を加速させたときに機器が発生する総熱量を想定しており、電子のみの現在の運転では、2台目が作動すると過冷却で、急激な変化を一次系に与えてしまう。
6. 水温が急激に下がり、導波管の伸縮で位相が変化する。2台目のファン停止、同時に一次系の急激な下がりを防ぐために、PID コントロールされた二次系の流量弁も絞られる。
7. ファンと弁が絞られたために、冷却能力が著しく低下し、一次系の温度が上がり始め、導波管の伸縮で位相が変化する。この一連の変化が4~7の発散を生む。
8. 気温は低周波で変化するために、直ちに系には影響しない。

が検証できた。(この問題をふまえて、冷却水系は98年夏のメンテナンスで改造された)

## 4 おわりに

システムを構築し稼働させれば必ずフィードバック系が発生し、それが目標達成を阻む場合が多い。今回、位相の安定化に関して解析したが、冷却水制御がフィードバック系を促すものの筆頭になった。しかし、位相比較器のノイズパワー寄与評価(図5)を円グラフ表示(図8)して判るように、位相変動の5割強は、M8の位相比較器自身の変動(モニタの揺らぎ等)によるもの、HVDC、一次系冷却水温度の固有変化はそれぞれ2割程度で影響しており、改造によって筆頭のフィードバック系が吸収されたとしても、次なる外乱ループが不安定要素として強調されるであろう。つまり、このようなフィードバックができるだけ発生しない

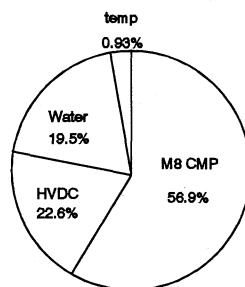


図8: 各変数の位相へのノイズ寄与割合

ように、各器機内で自他問わずノイズを吸収し、他者に伝播させないようなシステム、機器構成を検討できなければトータルの安定を望むことは困難である。

夏期メンテナンス終了後、9月に再開される運転では、改造された冷却水系で行われる。再度、改造系でシステム解析を行い、今回の考察の再検討を行いたい。また、線型加速器をさらに安定化させるために、システム解析で様々な角度から加速器システムを見ていきたい。

## 5 謝辞

大西氏、秋本氏をはじめSESの方々には測定を行う上で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。

## 6 REFERENCES

- [1] H.Akaike, "On the use of a linear model for the identification of feedback system", Ann. Inst. Statist. Math., Vol.20 (1968) 425-439.
- [2] T.Asaka et al., "Stability of RF system at SPring-8 linac", Proc. of this meeting, (1998).
- [3] H.Sakaki et al., "Current Status of Control System for the SPring-8 LINAC", Annual Report of SPring-8, (1996).
- [4] 赤池, 中川, "ダイナミックシステムの統計的解析と制御", サイエンス社, (1972).

図7: システムの平衡状態が崩れたとき

このように、赤池法によるフィードバック系の客観的な評価、解析を利用して、冷却水制御系の不備(インパルスの熱量変化を吸収するために2台目のファンが離散的な動作することで、過冷却が起こりシステムを発振させてしまう)