

自己回帰モデルによる電子ライナックの変動要因解析

猪坂 智^{1,A)}、加藤龍好^{A)}、小西敏文^{A)}、榊 泰直^{B)}、磯山悟朗^{A)}

^{A)} 大阪大学産業科学研究所量子ビーム発生科学研究分野

〒567-0047 大阪府美穂ヶ丘 8-1

^{B)} 原子力研究所東海研究所

〒319-1106 茨城県那珂東海村白方字白根 2-4

概要

我々は阪大産研 L-バンド電子ライナックを用い、遠赤外線領域での自由電子レーザー (Free-Electron Laser : FEL) や自己増幅自発放射光 (Self-Amplified Spontaneous Emission : SASE) の実験研究を行っている。しかしライナックを長時間運転するとき、電子ビームのエネルギー変化やビーム軌道に変動が生じ、研究の妨げとなっている。

この電子ビームの不安定要因をつきとめるため、2年前から測定が比較的簡単な RF (位相・パワー) 変動や温度・電源電圧変動を測定してきた^[4]。解析には確率統計モデルのひとつである自己回帰モデルを用いた。今回は試験的にビーム電流も測定パラメータに加えた。

1. ライナックの構成と測定

阪大産研 L-バンド電子ライナックの構成と本研究の測定体系を図 1 に示す。ライナックの冷却設備としてはライナック棟全体を管理する空調システムに加え、ライナック室、クライストロン室にはパッケージエアコンが設置されている。昨年の空調工以降、空調冷媒は個別に外気に排熱されている。また CT3 と呼ばれる冷却水システムがあり、各機器を循環し、屋上のクーリングタワーにより排熱される。RF は 2 台のクライストロンから供給される。

位相、パワー変動測定は Pre-Buncher 入り口でビームと同期している点で行った。同時に (a) ~ (f) で示される各機器の表面温度、CT3 冷却水配管の表面温度に加え、ライナック室、クライストロン室、制御室の各室温を測定した。また電源電圧は制御室で測定した。測定は午前 10 時から午後 10 時まで 10 秒間隔で行い、そのうちライナックのシャットダウンやビーム調整のない 5 時間分の測定結果を図 2 に示す。

ライナック室内の温度変動に比べ、クライストロン室内の温度変動が大きく、RF 位相の変動が供給源である 5MW-クライストロンの表面温度変動とよく似た変動をしている。20MW-クライストロンの表面温度と CT3 の温度変動が非常に良く似た周期変動をしている。

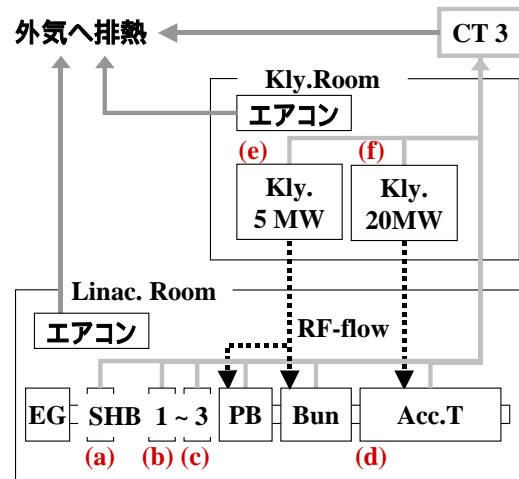


Figure 1 : Schematic diagram of the temperature control system and the measurement system.

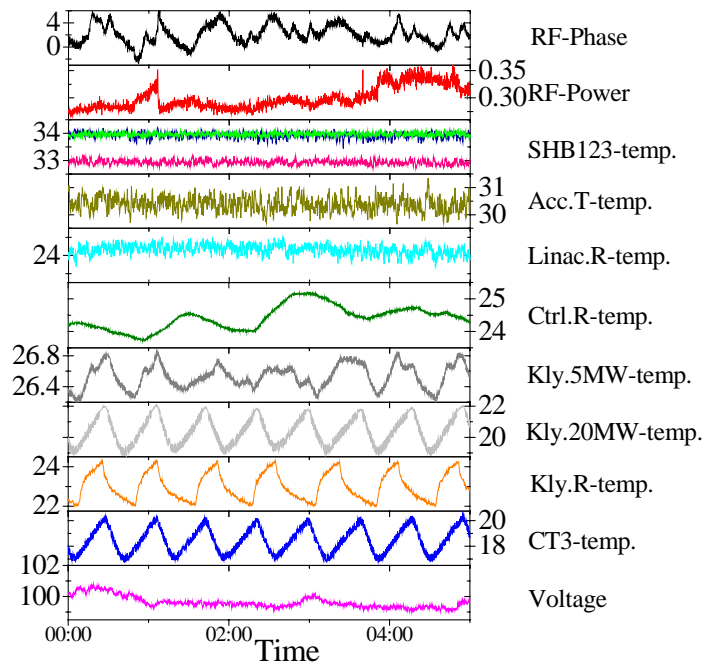


Figure 2 : RF phase and the power for PB measured together with the various temperatures and the AC voltage on 27 February 2002.

¹ E-mail : sato25@sanken.osaka-u.ac.jp

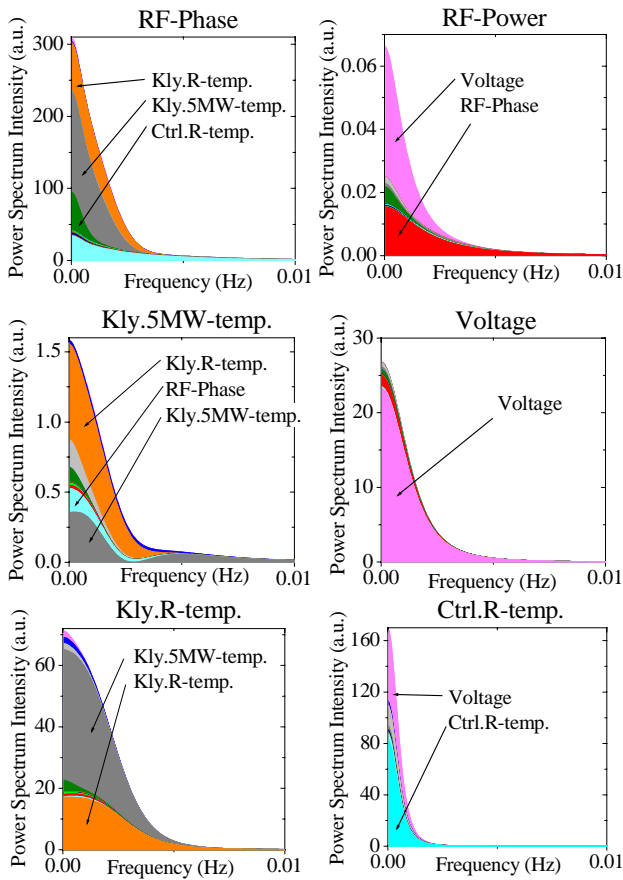


Figure 3 : Power Spectrum with Noise Contribution Ratio for data measured on 27 February 2002

2 . 自己回帰モデルによる解析

自己回帰モデルは一般的な確率統計モデルであるため応用される分野に制限がない。実際、火力発電所の制御や生体のフィードバックシステムの解析、経済の変動要因の解析などさまざまな分野で応用されている^[1,2]。近年、加速器分野でも安定性解析に活用されており、Spring-8 や原子力研究所での実績がある^[3,5,6]。

測定された時系列データをモデル化することで、パワースペクトル、ノイズ寄与率、インパルス応答を求めることができる。これらはフィードバック構造をもつシステム内で時間変動するある変数が、ほかの変数の時間変動からどの程度影響を受けているかを示すものである。結果的にシステム全体のフィードバック構造を推定することが可能となる。

3 . 解析結果

図2の測定結果に対し、自己回帰モデルにあてはめ解析を行った。図3にパワースペクトルを示す。各パワースペクトルはノイズ寄与率により色分けしており、その面積から寄与の様子が視覚的にわかる。

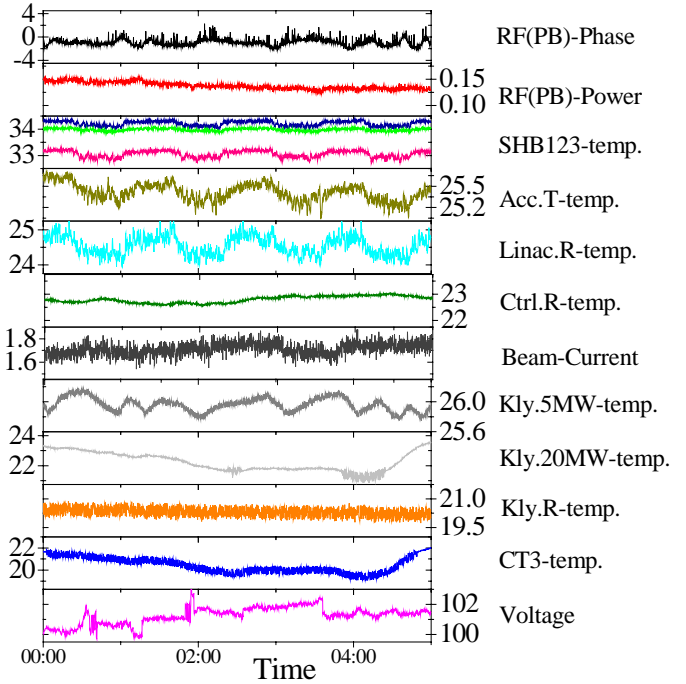


Figure 4 : Beam-current and RF phase and the power for PB measured together with the various temperatures and the AC voltage on 12 June 2002.

RF位相が供給源である5MW-クライストロンとクライストロン室温の温度変動から大きく寄与を受けている。さらに5MW-クライストロンとクライストロン室温のパワースペクトルを見ると、相互に影響し合っていることもわかる。またRFパワーには電源電圧が寄与しているが、電源電圧変動は自分自身の影響が大きいことから商用電源変動であると推測できる。

4 . ビームパラメータの測定

加速高周波に加えビームパラメータについても測定を行う試みを開始した。ビームエネルギーやビームポジションの測定を行うことが望ましいが、現在の測定体系を利用し測定できるのはビーム電流だけである。そこで、今回はテスト的にビーム電流をコアモニタにより測定した。各パラメータの変動の様子を図4に示す。図2と比較するため縦軸の幅を揃えている。ビーム電流についてはコアモニタの電圧値で示す。

図2では周期的な変動が見られた20MW-クライストロン表面温度、CT3の温度変動が緩やかな変動に変わっている。またRF-位相の変動要因であったクライストロン室温が安定であり、5MW-クライストロン表面温度の変動幅も狭くなっている。しかしSHBやライナック室温などのライナック室内の温度変動は図2に比べ大きい。さらに電源電圧も変動が大きく、スパイク的な変動が特徴的である。RFは位相、パワーともに変動は小さくなっている。

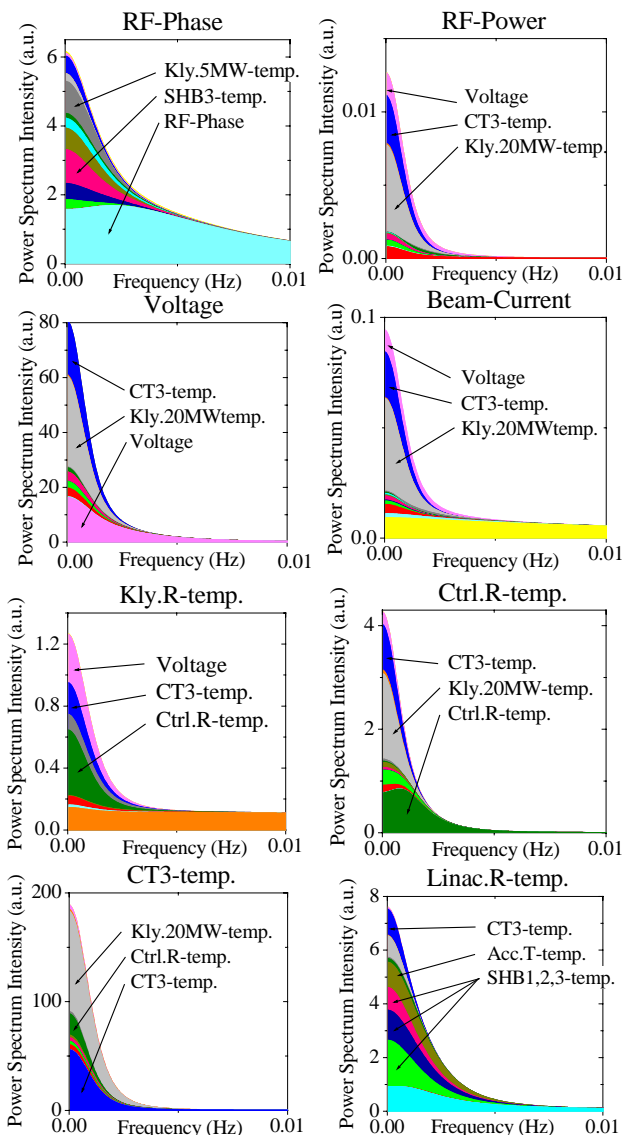


Figure 5 : Power Spectrum with Noise Contribution Ratio for data measured on 12 June 2002

5 . 解析結果

図4の測定結果を自己回帰モデルにあてはめ解析を行った。ノイズ寄与率を考慮したパワースペクトルを図5に示す。

RF-位相のパワースペクトルのピークは300から6まで大幅に減少している。RF-位相の変動原因であった5MW-クライストロン表面温度とクライストロン室温の変動が安定であったためと考えられる。ライナック室温はSHBや主加速管の表面温度から大きく寄与を受け、クライストロン室内からの寄与は小さい。電源電圧は商用電源の変動であると考えられる自分自身のほかに20MW-クライストロンやCT3温度変動から寄与を受けている。ビーム電流に関してはパワースペクトルがRF-パワーや電源電圧と似ている。しかしまだ測定は一度しか行っておらず、測定を繰り返し、確認する必要がある。

6 . フィードバック構造推定

ここまでの測定および解析の結果から、産研Lバンドライナックを取り巻くフィードバック構造を推定し、図6に示す。いくつかのパラメータは相互に相関があり、それらをグループとして破線で囲んでいる。寄与の方向と大きさは矢印の向きと太さで示している。

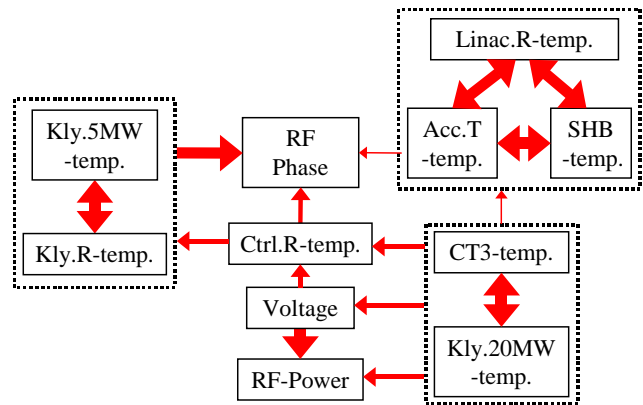


Figure 6 : Feedback structure of the system

7 . まとめと今後の予定

阪大産研L-バンドライナックの変動要因解析のため、RFの位相とパワー、环境温度、電源電圧、ビーム電流を測定した。測定結果を自己回帰モデルにあてはめ解析を行った。その結果、RF-位相変動とクライストロン室内の温度変動との強い相関性、RF-パワー変動と電源電圧変動との強い相関性が確認できた。またライナック室内とクライストロン室内の温度変動との無相関性も確認できた。これは昨年夏に行われた空調工事（空調冷媒を個別に排熱するようにした）の成果である。RFや温度の相関関係が明らかになり自己回帰モデルの適用が可能であることも証明された。今後のビームパラメータ測定のためには測定体系の再整備が必要である。

参考文献

- [1] 赤池弘次、中川東一郎 “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）
- [2] 赤池弘次 “時系列解析の方法” 朝倉書店（1998）
- [3] 榊 泰直 et al. T.SICE Vol.35-10 1283/1291（1999）
- [4] 小西敏文 修士論文 “阪大産研Lバンド電子ライナックの安定性の研究”（2001）
- [5] H.Sakaki : Proceeding of the 13th Symposium on Accelerator Science and Technology “Cluster analysis server system using Self-Organizing Maps (SOM)”
- [6] 榊 泰直 博士論文 “大型放射光施設線形加速管のモデリングとその設計”（2002）