＜第 35 回炉物理夏期セミナー・若手研究会報告＞
(2) 特異値分解法による BWR 安定性実験炉雑音信号の解析

北海道大学大学院工学研究科　修士課程 2 年　尾崎哲浩

1. はじめに

これまで BWR の炉心安定性解析においては、自己回帰モデル同定法（AR 法）や自己相関関数解析法などの手法が主に用いられている。しかし、これらの手法では、安定性に関係の深い信号成分の強度が小さい場合には正確な安定性情報を引き出すことが難しい。また、AR 法では安定性の重要な指標となる減幅比の算出結果が AR モデル次数に大きく依存し、モデル次数の決定に解析者の知見を必要とする。特異値分解解析法は、信号を互いに無相関な信号成分に分離し、それぞれを個別に解析できるので強度の小さい安定性情報でも十分に引き出すことが出来る。本研究では、さまざまな実機の炉雑音データに対して本手法を適用し、その有効性を実証すると共に、本手法における問題点を発見し、改良することが目的である。

２．特異値分解解析法

N 個の観測時系列データ（$x(t_i), i = 1,2,\cdots,N$）が与えられたとき、系の動力学的性質は遅れ時間座標系で再構築された運動軌道の幾何学的性質を解析することで調べることができる。埋め込み空間次元を n とし、その空間内の運動軌道の各点を時系列データから以下のように与える。

$$\mathbf{X}(t_i)^T = \left[x(t_i), x(t_{i+1}), \cdots, x(t_{i+n-1})\right]$$

Takens の定理によると、このように遅れ時間座標系で表わされた運動軌道は、時系列データを生み出した現実の位相空間上の運動軌道と位相同系な軌道である。共分散行列 $\mathbf{C}$ を埋め込み空間内の運動軌道から次のように定義する。

$$\mathbf{C} = \frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}\mathbf{X}(t_i)\mathbf{X}(t_i)^T$$

$\mathbf{C}$ に対する固有方程式は、特異値を σ_i^2、固有ベクトルを $\mathbf{v}_i$ とし、

$$\Sigma = \begin{pmatrix} \sigma_1^2 & & & \mathbf{0} \\ & \sigma_2^2 & & \\ & & \ddots & \\ \mathbf{0} & & & \sigma_n^2 \end{pmatrix}、\mathbf{V} = \left[\mathbf{v}_1 \quad \mathbf{v}_2 \quad \cdots \quad \mathbf{v}_n\right]$$

とすると、

$$\mathbf{CV} = \Sigma\mathbf{V}$$

と表される。共分散行列 C は実対称行列であるのでそれぞれの固有ベクトルは直交する。すなわち、

$$\mathbf{v}_i\mathbf{v}_j = \delta_{ij} \qquad (\delta: \text{クロネッカーの } \delta)$$

各々の固有ベクトルと埋め込み空間内の運動軌道から、展開固有関数は次のように与えられる。

$$\varphi_m(t_i) = \mathbf{v}_m^T \mathbf{X}(t_i)$$

このとき、元の観測信号はこの展開固有関数の和として表すことができる。すなわち、

$$x(t_i) = \frac{1}{N}\sum_{m=1}^{n} \varphi_m(t_i)$$

となる。この展開固有関数のそれぞれを解析することにより、観測信号中に含まれるさまざまな信号成分についてそれぞれ個別に調べることができる。さらに、

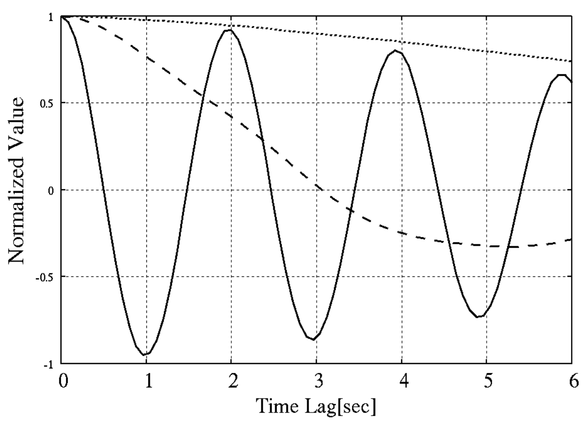
$$\frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N} \left|\varphi_m(t_i)\right|^2 = \sigma_m^2$$

の関係より、特異値の大きさの自乗は対応する展開固有関数に相当する信号成分強度の自乗平均となる。

３．解析結果

Ringhals-1 号機安定性実験で計測された BWR 炉内各所に設けられている局所中性子出力検出器信号（LPRM 信号）に対して特異値分解解析を行い、分解された信号で特異値の大きな成分の自己相関関数について調べると、図１のように LPRM 信号には主に 3 つのタイプの自己相関関数に関係する信号成分が共通に含まれていることが分かった。

分解された信号成分のうち、減衰振動型の成分は理論数学モデル解析により共役複素根として表される支配極に関係することが分かった。従って、この自己相関関数のピーク間の比から減幅比、その周期から振動周波数を算出でき、BWR 安定性の指標とすることができると考えられる。



. Ringhals　　成分の自己相関関数

OECD/NEA が主催した BWR 安定性評価のためのベンチマーク問題では、Forsmark1/2 号機で採取された実験データが与えられている。この中で、Case4 とされる実験では、炉心一体振動と領域振動の二種類の振動成分が混在したデータが与えられている。Case4 で採取された LPRM 信号についてパワースペクトル密度関数を調べてみると、図 2 のように 0.5Hz 付近に二つのピークを持っていることが分かり、それぞれが両振動モードに相当するものであると考えられる。

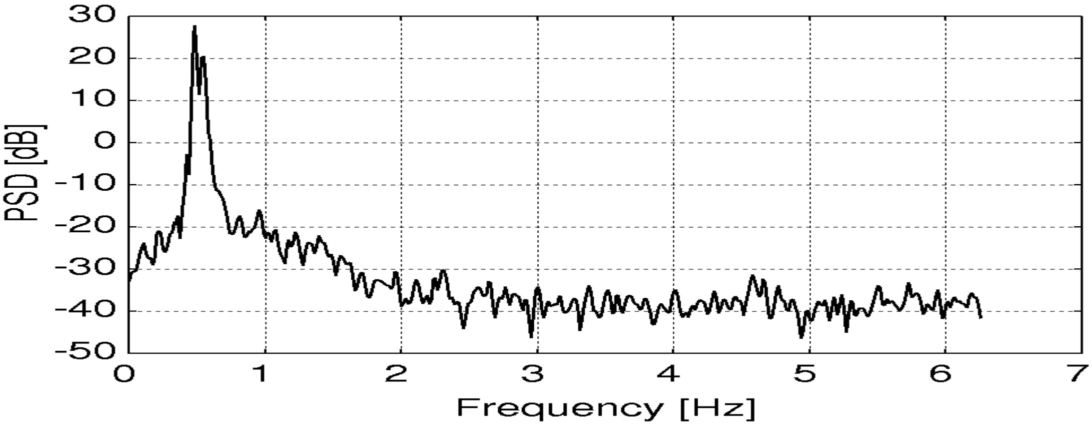


図 2. Forsmark-Case4 LPRM 信号のパワースペクトル密度関数

また、Case4 の LPRM 信号について特異値分解解析を行い減衰振動型の自己相関関数について観察すると、安定性に関係が深いと考えられる 0.5Hz 程度の振動成分に加え、周期の長い成分が混在しているように見える（図 3 上）。これは、0.5Hz 近傍の近接する二種の振動モードが混在しているための「うねり」によるものと考えられ、特異値分解解析により両振動成分を分離できていないと思われる。

本研究ではこの問題に対し、特異値分解解析を 1 つの LPRM 信号について繰り返し行うことにより分離できないか検討した。図 3 下は、LPRM 信号について特異値分解解析を 3 回行ったものであるが、うねりによる長周期の成分は見られず信号を分離したと考えられる。また、長周期の成分の存在により過小評価されていると考えられる減幅比もより正確に算出できる。

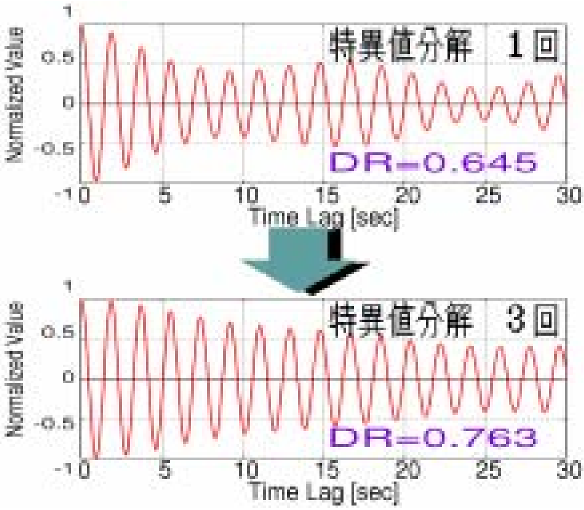


図 3. 特異値分解の繰り返しによる信号の分離