

J A E R I - M
93-041

非線形原子炉雑音および
非定常原子炉雑音の
統計的解析に関する研究

1993年3月

林 光二

JAERI-Mレポートは、日本原子力研究所が不定期に公刊している研究報告書です。
入手の問合わせは、日本原子力研究所技術情報部情報資料課（〒319-11 茨城県那珂郡東海村）あて、
お申し込みください。なお、このほかに財団法人原子力弘済会資料センター（〒319-11 茨城県那珂郡
東海村日本原子力研究所内）で複写による実費領布をおこなっております。

JAERI-M reports are issued irregularly.
Inquiries about availability of the reports should be addressed to Information Division Department
of Technical Information, Japan Atomic Energy Research Institute, Tokaimura, Naka-gun, Ibaraki-
ken 319-11, Japan.

© Japan Atomic Energy Research Institute, 1993

編集兼発行 日本原子力研究所
印 刷 ニッセイエプロ株式会社

非線形原子炉雑音および非定常原子炉雑音の統計的解析に関する研究

日本原子力研究所東海研究所原子炉工学部

林 光二

(1993年2月1日受理)

原子炉システムの非線形機構の解明と異常診断を目的とした非線形炉雑音解析手法の研究を行った。従来の非線形同定法GMDH(組み合わせデータ処理法)に新たに考案した近似応答関数を付加し、非線形スペクトル解析や非線形機構の解析に役立つ手法を確立した。また、原研の研究炉NSRRで観測された炉出力振動の測定実験と解析を行い、不安定性の原因を明らかにした。更に、非定常炉雑音の解析手法とデータ収録法に関する研究を行った。瞬時の自己回帰スペクトルの時間軸分解能を向上させ、原子炉運転状態の追跡や異常診断に役立つ手法を確立した。また、非定常炉雑音データ収録用前処理システムを開発し、測定試験を通じて実用性を実証した。

Study on Statistical Analysis of Nonlinear and
Nonstationary Reactor Noises

Koji HAYASHI

Department of Reactor Engineering
Tokai Research Establishment
Japan Atomic Energy Research Institute
Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken

(Received February 1, 1993)

For the purpose of identification of nonlinear mechanism and diagnosis of nuclear reactor systems, analysis methods for nonlinear reactor noise have been studied. By adding newly developed approximate response function to GMDH, a conventional nonlinear identification method, a useful method for nonlinear spectral analysis and identification of nonlinear mechanism has been established.

Measurement experiment and analysis were performed on the reactor power oscillation observed in the NSRR installed at the JAERI and the cause of the instability was clarified. Furthermore, the analysis and data recording methods for nonstationary noise have been studied. By improving the time resolution of instantaneous autoregressive spectrum, a method for monitoring and diagnosis of operational status of nuclear reactor has been established. A preprocessing system for recording of nonstationary reactor noise was developed and its usability was demonstrated through a measurement experiment.

Keywords: Reactor Noise Analysis, GMDH, Nonlinear System Identification, Nonlinear Impulse Response Function, Nonlinear Frequency Response Function, Nonlinear Spectrum, Reactor Power Oscillation, NSRR, Nonstationary Noise Analysis, Instantaneous AR Spectrum, Nonstationary Signal Preprocessing System

目 次

1. 序 論	1
1.1 はじめに	1
1.2 非線形炉雑音の出現	3
1.3 非線形炉雑音解析手法	6
1.4 非定常炉雑音データの収録と解析	8
1.5 本論文の概要	12
2. バイスpekトル解析とその限界	14
2.1 はじめに	14
2.2 バイスpekトルの理論	14
2.3 適用例	16
2.4 むすび	22
3. GMDHに基づく階層モデルの理論と応用	24
3.1 はじめに	24
3.2 非線形システムの同定	25
3.3 GMDHの概要と階層モデル	27
3.4 基礎関数の統計的意味	37
3.5 線形自己回帰型階層モデル	39
3.6 非線形自己回帰型階層モデルの同定	42
3.7 階層モデルを用いた解析手法	46
3.8 むすび	49
4. PWR炉心槽の異常振動のモデリング-確率ダフィング方程式の同定-	51
4.1 はじめに	51
4.2 PWRにおける異常炉心槽振動	52
4.3 テスト・データの生成	55
4.4 非線形自己回帰型階層モデルによる解析	57
4.5 むすび	60
5. BWR炉出力振動のモデリングと安定性監視	62
5.1 はじめに	62
5.2 BWRにおける非線形炉出力振動	63
5.3 非線形理論に基づく新しい安定性監視法	70
5.4 テスト・データの生成	75
5.5 非線形自己回帰型階層モデルによる解析	76
5.6 むすび	81

6. NSRR 炉出力振動の観測と解析	82
6.1 はじめに	82
6.2 研究炉における炉出力振動	82
6.3 NSRR の概要と原子炉診断実験	84
6.4 観測データとその解析	88
6.5 炉出力振動のメカニズムの研究	100
6.6 むすび	100
7. 瞬時 AR スペクトルによる非定常炉雑音解析	102
7.1 はじめに	102
7.2 非定常データの瞬時スペクトル解析	102
7.3 シミュレーション研究	106
7.4 PWR 停止運転時の解析への応用	111
7.5 むすび	115
8. 非定常炉雑音データ収録用前処理システムの開発	116
8.1 はじめに	116
8.2 DC バイアス分離方法	117
8.3 ゲイン設定法	122
8.4 バイアス分離装置の開発	124
8.5 新しいフィルタ・アンプの開発	127
8.6 試 験	129
8.7 むすび	132
9. 結 論	133
謝 辞	135
参考文献	136
付録1 参考文献(著者アルファベット順)	146

Contents

1. Introduction	1
1.1 Introductory Remarks	1
1.2 Occurrence of Nonlinear Reactor Noise	3
1.3 Analysis Methods for Nonlinear Reactor Noise	6
1.4 Recording and Analysis of Nonstationary Reactor Noise Data	8
1.5 Summary of This Paper	12
2. Bispectral Analysis and Its Limitation	14
2.1 Introductory Remarks	14
2.2 Theory of Bispectrum	14
2.3 Applications	16
2.4 Summary	22
3. Theory and Application of a Layered Model Based on GMDH	24
3.1 Introductory Remarks	24
3.2 Identification of Nonlinear Systems	25
3.3 Summary of GMDH and Layered Model	27
3.4 Statistical Meanings of Fundamental Function	37
3.5 Linear Autoregressive Model	39
3.6 Identification of Nonlinear Autoregressive-type Layered Model	42
3.7 Analysis Method Using Layered Model	46
3.8 Summary	49
4. Modeling of Abnormal Vibration of Reactor Core Barrel in PWR - Identification of Stochastic Duffing Equation -	51
4.1 Introductory Remarks	51
4.2 Abnormal Vibration of Core Barrel in PWRs	52
4.3 Generation of Test Data	55
4.4 Analysis Using Nonlinear Autoregressive-type Layered Model	57
4.5 Summary	60
5. Modeling of BWR Power Oscillation and Stability Monitoring	62
5.1 Introductory Remarks	62
5.2 Nonlinear Power Oscillation in BWRs	63
5.3 New Stability Monitoring Methods Based on Nonlinear Theory	70
5.4 Generations of Test Data	75
5.5 Analysis Using Nonlinear Autoregressive-type Layered Model	76

5.6 Summary	81
6. Observation and Analysis of Power Oscillation in NSRR	82
6.1 Introductory Remarks	82
6.2 Power Oscillations in Research Reactors	82
6.3 Overview of NSRR and Experiments for Reactor Diagnosis	84
6.4 Observed Data and Its Analysis	88
6.5 Studies on Mechanism of Power Oscillation	100
6.6 Summary	100
7. Nonstationary Reactor Noise Analysis Using Instantaneous AR Spectrum	102
7.1 Introductory Remarks	102
7.2 Instantaneous Spectrum of Nonstationary Data	102
7.3 Simulation Studies	106
7.4 Application to Analysis of Data during Shut-down Operation of PWR	111
7.5 Summary	115
8. Development of Signal Preprocessing System for Nonstationary Reactor Noise Data Recording	116
8.1 Introductory Remarks	116
8.2 Methods for DC Bias Separation	117
8.3 Gain Set-up Methods	122
8.4 Development of Bias Separator	124
8.5 Development of New Filter-amplifier	127
8.6 Test	129
8.7 Summary	132
9. Conclusion	133
Acknowledgements	135
References	136
Appendix 1 References in Alphabetic Orders of Authors	146

1. 序論

1.1 はじめに

本章では、まず原子炉雑音解析を概観し、次にこれまでに行われてきた非線形雑音解析、現在知られている非線形解析手法、次いで非定常雑音データの収録と解析の現状について述べ、本論文の研究を位置付ける。

1.1.1 雑音とその起源

原子炉プラントの様々な場所で測定される計装信号、例えば中性子束、温度あるいは流量などは、ある平均値の周りで時刻の経過とともに不規則に変動しているのが普通である。この不規則な変動成分をゆらぎと呼び、原子炉で測られるゆらぎを特に「原子炉雑音」あるいは単に「雑音」と呼ぶ。

研究初期には、雑音は核的な成因によって生じる中性子束ゆらぎだけを意味していたが、高出力炉の出現とともにその意味も拡張され、今日では原子炉2次系のプラント部分をも含めた原子炉システム全体で観測される種々のゆらぎを総称する言葉となった。原子炉計装の各種センサによって観測される物理量のゆらぎは、センサ自身が内部で発生するバックグラウンド雑音と測定対象の物理量のゆらぎから成る。通常、雑音は後者の意味で使われている。

雑音の起源は次のように考えられている。まず、原子炉の内部には、「雑音源」と呼ばれるゆらぎの発生機構が多数存在する。黒田(1968)、斎藤(1975)によれば、これらは大別して、核的、流体力学的、熱的および機械的な雑音源の4つに分類される^{1) 2)}。雑音源で発生したゆらぎは、何等かの物理的な伝達機構あるいはシステム工学の立場からすれば伝達関数を通じて変形や他のゆらぎとの結合を繰り返し、やがてセンサに到来する。

雑音は、原子炉の運転とともに発生し運転条件の変化とともにその姿を変えていくが、これは、原子炉の運転条件の変化によって引き起こされる雑音源や伝達経路の発生、消滅、変化によって説明される。したがって、雑音には原子炉プラント内部の雑音源や伝達関数から成る発生機構、それらの動特性、運転状態に関する様々な情報を含んでいると考えられている。

1.1.2 雑音解析と診断

原子炉プラントを1つの動特性システムとして捉えると、雑音は原子炉プラントに内蔵された種々の雑音源が発生するゆらぎ信号をこれに印加した時の応答信号に相当する。雑音は不規則なゆらぎであるから、これを確率過程と見なし統計的な解析を施し、その中に埋め

込まれた発生機構、動特性、運転状態に関する情報を、うまく引き出そうという試みが「炉雑音解析」である。炉雑音解析を用いる目的は、今日では大別して

- (1) 雑音源の同定とその性質の調査,
- (2) 動特性同定,
- (3) 状態監視,
- (4) 異常の早期検知と診断

の4つに分類される³⁾。(1)は、特別なセンサを設けなければ測定できないような現象、例えば制御棒や炉内中性子検出器の振動、あるいは直接測定できない現象、炉内沸騰の有無、ボイド率、沸騰チャンネル内の気泡速度などに関する情報を既存のセンサだけを用いて情報を得る。(2)は特定の物理量の間に応答特性の測定、炉物理や動特性パラメータの推定、動特性モデルの同定などである。(3)は、炉出力レベルの測定、燃料燃焼にともなう特性変化、炉心安定性の監視などである。また、(4)は炉心や炉内構造物、2次系プラントの構成機器の現在の状態に関して、上述の炉雑音解析で得られた知見を基に普段と違う点を見つけ、さらに異常の有無、位置、程度、将来の予想などを推定するものである。

1.1.3 炉雑音と時系列解析手法

炉雑音を一種の確率過程と見なせば、その解析には時系列解析の手法が適用できる。時系列解析は、変数の時間的发展に関する確率的な側面をその時刻歴すなわち時系列データから推定する一種の統計的解析である。

炉雑音のデータ解析は、1950年代後半に初めて行われた^{1), 3)}。始めFeynmanら(1956)やOrndoff(1957)によって炉物理パラメータの推定を目的として、中性子束検出器の計数出力に相関解析が適用され、次いでMoore(1958)やCohn(1959)によって、白色雑音入力 of 仮定を設けて、炉出力のパワースペクトルがゼロ出力炉の原子炉伝達関数のゲインの2乗に比例するという簡単な線形モデルを導入した解析が行われた。

この当時のデータ処理はアナログ素子を用いた相関分析器やバンド・パス・フィルタを用いたスペクトル推定器が使用された。したがって、遅れ時間点や周波数点はスポット的に設定し測定を繰り返すという方法が取られた。

その後、1960年代になり、解析対象の原子炉の出力が大きくなると測定変数の数も増え、スペクトル解析を通じて、1入力1出力型のオープン・ループ・システムを仮定した周波数応答関数、コヒーレンスなどの推定が行われるようになった。また測定技術では、特に磁気テープによる記録技術、アナログ・デジタル(A/D)変換器とデジタル計算機が進歩し測定精度が向上した。そこで問題になってきたのは、高出力炉ではゆらぎ間のフィードバック効果が無視できなくなってきたことである。

1970~1980年代は商業用発電炉群の本格的稼働と高速計算機の普及によって、多変数多サンプルデータの大規模な統計的処理の時代となり、膨大な観測データに基いて定常運転時におけるプラント動特性の同定や炉心内の熱水学的な現象、炉内構造物の振動現象等の局所的な解析、診断が行える様になった^{4), 5), 6), 7)}。

その間、原子炉雑音解析に用いられる時系列解析の手法も、従来の古典的な相関スペクトル解析に代って、FFT(高速フーリエ変換)によるスペクトル解析、自己回帰モデルに基づくシステム同定とその応用解析手法等の線形システムを対象とした解析手法が、定常線形という枠内ではあるが、計算機の大幅な性能向上と共に十分な活路を見出してきた。

特に、多変数自己回帰(MAR)モデルを応用した解析手法は、日本では、1970年代初頭に赤池ら(1971)によって普及が図られ、炉雑音解析にもFukunishiら(1976, 1977), Matsubaraら(1977)によって応用された⁸⁻¹¹⁾。このMARモデルはパラメトリックな動特性モデルの一種であるが、スペクトル解析に用いた場合には従来の方法よりも滑らかな推定値が得られること、フィードバック・システムを表現でき、モデル係数とインパルス応答関数あるいは周波数応答関数とが関係付けられていること、システムをサブ・システムと雑音源に分解できることなど、数々の利点を持っていたため、大いに普及した。また、この頃、MARモデルを中心とした炉雑音解析手法に基づく原子炉動特性同定・異常診断用計算機コード・システムSTARが筆者ら(1980)によって開発された¹²⁾。炉雑音の分野で、これはアナログ信号の取り込みからグラフ出力までの解析作業を一貫して系統的に処理できる初めてのシステムとなった。その後、MARモデルは雑音源の推定精度が問題になり、国際的なベンチマーク・テスト¹³⁾による評価やアナログ・シミュレーション・データに対するフィッティング試験(筆者ら(1988)¹⁴⁾)が行われた。

1.2 非線形炉雑音の出現

原子炉システムの動特性は反応度入力に関して非線形項を含む方程式で記述されるため、一般に動特性を論じる場合には、ある出力レベルでの比較的小さな出力変動だけに限って、線形化などの近似解法を適用して取り扱うのが普通である。しかし、反応度フィードバックがある場合には非線形項が無視できなくなるため、原子炉の起動、停止、パルス運転、暴走実験など出力が大幅に変化する場合には、その解析は困難を極める。

これと同様に、零出力炉から始った炉雑音解析は、終始一貫して、定常出力時の測定と定常線形手法が適用されてきた。ところが、定常線形手法による信号解析が定着し、炉雑音信号の測定と解析の経験が蓄積されてくると、非線形現象の観測例が次第に増加し、また測定技術の進歩により非定常信号の観測もある程度可能となってきた。これらの解析は、システムの異常診断の見地から次第に重要になりつつあり、これまで種々の理由で後回しにされてきた非線形現象、非定常信号の解析が、いよいよ避けて通れない問題としてクローズアップされるようになってきた。

原子炉プラント内部の雑音源や伝達機構に非線形性が存在する場合、炉雑音にも何等かの形で非線形効果が反映され、時としてこれらが顕著に現れることもある。これら非線形効果を反映した炉雑音データに対して炉雑音解析を適用し、非線形効果の特徴を解析したり、非線形動

特性システムの同定を行う場合、取り扱う炉雑音の性質もまた適用する解析手法も従来のものとは一線を画したものとなる。しかしながら、従来、原子炉システムの非線形性、炉出力や炉心槽の非線形振動現象などは確定系を対象とした解析的な立場から研究されていたため、これらを総称する言葉が無かった。そこで、本論文では非線形効果の影響を含む炉雑音を「非線形炉雑音」と呼び、またこれらの解析を「非線形炉雑音解析」と呼ぶことにする。

1.2.1 初期の観測例と理論的研究

米国の初期の沸騰水型原子炉(BWR)のBorax-IIでは、ときどき炉出力がバースト状に振動する事が観測された(Thie(1963))。Akcasu(1961)はこれがパラメータ励振に基づくものであろうと考え、簡単なモデルについての解析とアナログ・シミュレーションを行っている¹⁵⁾。

反応度ゆらぎによるパラメータ励振について、Williams(1969,1971)は、Fokker-Plank方程式による解析を述べている¹⁶⁾。パラメータ励振ないし非線形特性については、Kristら(1973)、Karmeshuら(1975,1976)、Williams(1976)、Akcasuら(1976)、Sako(1978,1980,1982,1984)、Konno(1983,1984,1985,1988)などの研究がある³⁾。

1.2.2 高次スペクトルによる非線形性の解析

非線形炉雑音の存在はかなり以前から議論され、その理論的研究は進められてきたが、時系列解析手法を用いた解析例はあまりなかった。

黒田(1969)はBWRのフィードバック・ループにおける非線形効果について言及し、バイスペクトル、クロス・バイスペクトルやWiener-Schetzen流の多次元核などの測定の必要性を説いている¹⁾。その後10年近く遅れて、Kurodaおよび筆者(1979)、筆者(1980)は実際に日本原子力研究所(以下原研)のJPDR(動力試験炉)の測定データに対してバイスペクトル解析を行った¹⁷⁻¹⁹⁾が、JPDRは初期のBWRであり炉心安定性が極めて良いこと(後に、Vander Hagen(1988)らによって同型のオランダDodewaardの安定性が評価されている²⁰⁾)、ならびに測定時に挿入したM系列信号の影響が強くてたために、非線形性の存在の確証は得られなかった。

ほとんど同時期にVath(1979)は、解釈の複雑なバイスペクトルの使用を避けて、2つの異なる周波数成分間の相関関係を測るクリス・スペクトルを提唱し、実際、ナトリウム冷却高速炉KFK-IIの炉出力ゆらぎの解析を行い、1.7Hzと3.4Hzに現れる2つの共鳴ピークが相関を持っていることを示した²¹⁾。

その後、バイスペクトルは、Konnoと筆者ら(1988)によってBorsssele炉の1次系圧力ゆらぎの解析に用いられた^{22, 23)}。また、Pineyroら(1989)はスペクトル推定の新しい方法を提案する論文の中で、高調波を含むシミュレーション・データの解析を行う際に、補足的にバイスペクトル解析を使用した²⁴⁾。

一方、Behringerら(1990)は、Wiener-Hermite関数の2次近似を用いて、非白色雑音で駆動される線形系の出力のパワー・スペクトルを計算し、示した²⁵⁾。

1.2.3 確率動特性モデルのあてはめによる研究

PWR (加圧水型原子炉)の炉心槽の支持端での固定力が弱いために生じた異常炉心槽振動(パネ要素の破壊)は、1970年代の始めに米国のPalisades炉で観測され、Thie(1972), Fryら(1974)によって解析が行われた^{26, 27)}。Konno(1986)は、この中性子束ゆらぎの振動波形に確率的跳躍現象が見られることに着目し、炉心槽の簡単な物理モデルとしてパラメトリックなポテンシャル関数を持つ1次元非線形振動モデルを適用し、この同定を行い、中性子束ゆらぎの確率的跳躍現象が非線形的機構によって起きていることを示した²⁸⁾。また、同様の非線形振動現象が、1985年に東ドイツのBruno Leuschner-2で観測され、Liewersら(1988, 1989), Konnoら(1988)によって解析されている²⁹⁻³¹⁾。

1.2.4 非線形炉出力振動の観測

BWRの高出力化にともない炉心安定性を再検討するために、実機を使用した実験が、1970年代末から1980年代前半に、米国のPeach Bottom-2炉, Vermont Yankee炉, スウェーデンのTVO-II炉, イタリアのCaorso炉, 西ドイツのKRB-B炉, -C炉などで行われ、出力/流量のマップにおける自然循環領域あるいは最低ポンプ速度曲線の最上部付近で、リミット・サイクリ的な非線形炉出力振動が観測された³²⁾。

特に、CaorsoではGialdiら(1985)によって炉雑音解析の立場から実験が行われ、従来の線形手法で定義された安定性監視のための特徴量減幅比(Decay Ratio)が議論された³³⁾。一方、March-Leubaら(1986)によって、Vermont Yankeeの観測データを当てはめた現象論的非線形動特性モデルが作られ、その不安定性が研究された^{34, 35)}。この中で雑音を付加した場合のシミュレーション・データに関して、線形手法を用いたスペクトル解析が行われ、リミット・サイクリ的な振動の発展と高調波成分との成長の関係を示した。

しかし、1988年に米国のLaSalle-2で予期しなかった高振幅の炉出力振動が出現し、自動スクラムまで振動を抑止できなかった事故(Murphy 1988)があって以来、BWRの安定性とその監視の問題が再確認された³⁶⁾。スウェーデンのBWRでは、Ogumaら(1988), Bergdahlら(1988, 1990)によってForsmark-2, -1, Ringhals-1の高出力、低流量領域での炉出力振動が、炉雑音解析の視点から測定され解析された。これらの結果、リミット・サイクリ的な非線形振動が強く現れており、減幅比も1に近い値を持つことが示された³⁷⁻³⁹⁾。

以上のBWRの非線形炉出力振動の観測例は、これまでに観測された炉雑音の中では非線形性が最も顕著であったが、非線形解析手法を用いた炉雑音解析は行われなかった。

一方、原研のNSRR(原子炉安全性試験炉)は、小型研究用原子炉であるにも関わらず炉出力変動が大きいことから筆者ら(1984)によって炉雑音測定実験が行われ、非線形炉出力振動現象が発見され、また実験と通常の線形の統計的手法を用いた解析を通じて炉出力振動の原因が明らかにされた^{40, 41, 44)}。これについては、本論文の後章に詳細に述べる。さらに非線形機構に関して、Konnoと筆者ら(1990)によって非線形動特性モデルを用いた研究が行われ^{42, 43)}、またSuzudoと筆者ら(1991)によってカオス理論に基づく研究が行われている⁴⁴⁾。

1.3 非線形雑音解析手法

1.3.1 非線形スペクトル解析

非線形スペクトル解析の手法は、古くから研究されてきた。

最も有名なのはHasselmannら(1963)による海洋波のバイスペクトルの測定である⁴⁶⁾。彼等の論文は、バイスペクトルの測定値を示すとともに、海洋波の非線形モデルによる計算値との比較を行っている。というのは、バイスペクトルの解釈は容易ではないからである。バイスペクトルは3つの周波数(f_1, f_2, f_3)の成分間の相関関係を表す関数であるが、3番目の周波数は他の周波数と従属関係にあり、隠れ変数($f_3 = -f_1 - f_2$)となっているため、2次元周波数平面(f_1, f_2)上のバイスペクトルは、12の象限と対称関係を持ち、極めて複雑に畳み込まれてしまう。このため、その解釈は容易ではないのである。

バイスペクトルの理論的な研究は、その後Rosenblattら(1965)、Van Ness(1966)によってなされた^{46, 47)}。バイスペクトルの定義自体は明快で、初期のころに問題だった計算法も3次の相関関数、その2重Fourier変換、ウィンドウ関数なども、1960年代後半から1970年代前半にかけてFFTの普及とともに確立され、その後は、それぞれの応用分野で対象とする非線形波あるいは非線形システムの解析に如何に役立てるかという方法論だけが研究された。しかし、バイスペクトルは、モデリング手法ではなく、単にFourier成分の3重積の意味しかもたないため、結果の解釈には現象に関する精密な理論的情報を要し、これがこの手法の適用限界を決定していた。

一方、さらに高次の一般的なスペクトルは、Brillingerら(1965, 1967)によって理論的に研究された⁴⁸⁻⁵⁰⁾が、これらはバイスペクトル以上に計算時間の問題、解釈の問題が深刻なため普及しなかった。

また、変わったところでは、2.2節で既に述べたように、異なる周波数のFourier成分の2重積で定義されたVath(1979)のクリス・スペクトルがある²¹⁾が、その後普及したという形跡は見当たらない。

定常線形システムの解析に自己回帰(AR)モデリング手法が普及した今日では、その便利さは周知の事実であり、非線形解析の分野においても時間領域において非線形信号の発生機構を直接モデリングできる手法が待望されていた。

ところが、近年になって、バイスペクトルの推定法は、新しい局面を迎え、Liiら(1982, 1984)によって、またNikiasら(1985)によって、3次の白色雑音(非白色雑音)を仮定したARMA(自己回帰移動平均)モデル、MA(移動平均)モデル、ARモデルに基づく推定法が次々と確立された⁵¹⁻⁵³⁾。これにより、滑らかなスペクトル推定が可能となったが、使い勝手は、次節に述べる時間領域での非線形モデルの同定手法ほど自由ではない。

1.3.2 非線形同定手法

非線形システムの同定手法は、対象システムの構造が未知の場合には、一般的でかつ実用的な手法というものは、わずかに次の3つの方法が知られている。(相良(1983)の解説⁵⁴⁾には(1)と(2)だけが取り上げられているが、その後(3)が知られるようになった。)

- (1) Volterra級数展開による方法
- (2) GMDH(組合せデータ処理法)
- (3) 非線形ARモデル

(1) Volterra級数展開による方法

Volterra(1959)の級数展開法⁵⁵⁻⁵⁷⁾は、最も古典的な方法であり、理論的には非線形信号の一般的なモデリングを可能とする手法であるが、その実現に当っては現在の計算機的能力を持ってしても計算効率の面から多大な困難が予想され、実用的ではないとされてきた。しかし最近では、渡辺、横山ら(1986, 1987, 1989)によってKarhunen-Loeve展開や直交汎関数級数を用いて計算時間を削減する方法が研究され⁵⁸⁻⁶⁰⁾、また市川の解説(1990)⁶¹⁾に多くの他の研究が紹介されている。

原子力の分野では、初期の頃、Gyftopoulosら(1964)によって、2次までのVolterra核を測定する方法として、原子炉に非線形特性を励起する3値系列のPRBS(疑似不規則信号)の研究がなされたが、実用化されなかったようである^{62, 63)}。

(2) GMDH

GMDH(Group Method of Data Handling; 組合せデータ処理法あるいは自己組織化法)は、Ivakhnenkoら(1970, 1971)によって1968年に提唱された手法で、Volterra級数展開法の欠点であった計算効率をサイバネティクスの視点から改良を試みた手法である^{63, 64)}。基本的には、非線形システムを簡単な非線形多項式から成るカスケード・モデルで近似する方法であるが、通常の統計的フィッティングとは異なり、サイバネティクスの情報処理と階層型モデル構造が採用されている。これらはニューラル・ネットワークの原型であるRosenblatt(1958)のパーセプトロン⁶⁵⁾における閾値的情報選択機構と階層的構造に着想を得て作られたものである。(パーセプトロンについてはMinskyら(1969)が詳細に解説している⁶⁶⁾)。

GMDHは、産み出されてから約20年を経過し、その間、様々な問題点の指摘と改良が為され、種々の分野でその応用が試みられてきた。これらについては、池田ら(1975, 1979-1980)、田村(1978)が解説している⁶⁷⁻⁶⁹⁾。

特に、基礎関数の選択とその集合である階層モデルの決定に関しては、近藤ら(1979)、田村ら(1979)、斎藤ら(1981)⁷⁰⁻⁷²⁾が自己回帰モデルの分野で出現した赤池(1974, 1976)の情報量基準AIC^{73, 74)}をこれに適用し、ある程度の客観的なモデリングができるようになった事は事実であるが、しかしこれはあくまでもできあがったモデルの統計的な評価の1手段に過ぎず、問題の核心となる入力情報の選択基準は、Heuristicsから離れる事ができなかった。

このため、日本における制御工学の分野での適用例は、そのほとんどが観測データの量が少

なく、しかもこれといって有効な解析手法が見出せない分野に限られていた。原子力の分野でも事情は余り変わらず、化学関係で1例(池田ら(1989)⁷⁵⁾、制御関係で1例(篠原ら(1977)^{76, 77)}見られるだけであった。また、炉雑音信号のモデリングに使用した例は不明である。

筆者らは、炉雑音信号の解析にGMDHの適用を試み、さらにGMDHにより得られたモデルに基づいた新しい解析手法を考案した⁷⁸⁻⁸⁰⁾。これらについては、本論文の後章に述べる。

(3) 非線形ARモデル

非線形ARモデルは、線形ARモデルの係数を指数関数を用いて振幅従属にして非線形性を表現できるようにしたものである。指数関数の採用によって数値計算上の発散を回避することができる。始め、2次のARモデルを基本としたものがPriestly(1981)によって研究され(指数型ARモデル)^{81, 82)}、後に、Ozaki(1985)によって全次数の場合に拡張された(振幅従属ARモデル)⁸³⁾。

さらに、尾崎ら(1991)は、河川の貯蔵モデルの例を取り上げ、新たに提唱した局所線形化法という離散化法を用いて連続時間のモデルを離散化し、局所線形化離散化モデルを作った。これにより、非線形ARモデルのパラメータが決定されると、もとの連続時間のモデルも一意に決ることが示された⁸⁴⁾。

しかし、この新しい研究は、今のところ河川の貯蔵モデル以外の応用例は報告されておらず、原子力の分野での研究もまだ無い。

(4) その他

上記、3つの方法の他に信号圧縮法なる方法が李ら(1989)によって報告されている⁸⁵⁾。これはシステムが基本的に線形で、これにオン・オフ要素や不感帯などの非線形成分が含まれているときに、線形要素と非線形要素を分離し、前者だけを同定する手法である。

1.4 非定常炉雑音データの収録と解析

1.4.1 非定常炉雑音の重要性

原子炉プラントのプロセス信号に重畳するゆらぎ成分、いわゆる炉雑音信号は、プラント動特性や内部の状態に関する様々な情報を豊富に含んでいる。これを利用すればプラント特性のより詳細な情報を得ることができ、さらにはその変化や異常の兆候を高感度で早期に捕えることも可能になることから、炉雑音解析に基づく運転監視や異常診断の研究が行われている。

炉雑音解析は、従来は定常不規則過程を対象とした統計的解析手法を利用して行うのが一般的であり、また炉雑音データも定常運転時には比較的容易に測定できる。このため、その適用範囲はこれまで定常運転時の原子炉プラントだけに限定されてきたが、運転監視や異常診断の観点からすれば、起動から停止までの全運転範囲に対して炉雑音を常時収録する必要がある。

これは特に、今後商業用炉が負荷追従運転されるようになると一層重要となる。

ところが、原子炉の起動、停止、出力変更といった過渡運転時には、炉雑音信号は非定常となるため、従来の炉雑音解析手法はそのままでは適用できず、また炉雑音データの測定も定常運転時に比べて難しくなるといった問題が生じる。

例えば、オランダのPWR Borssele炉で観測された2次系の負荷変動に起因した炉出力の過渡的変動現象(Turkcanら(1985)⁸⁶⁾、原研のNSRRで観測される出力変更時の非定常性と非線形変動現象(筆者ら(1984)^{40, 41)})など、従来の定常性を仮定した解析手法やデータの収録法では対応しきれない例が目立つ様になり、どうしても非定常データ専用の方法が必要となってきた。

1.4.2 解析手法の問題

非定常時系列データの解析については、種々のものが提案されている。日野(1977)の成書⁸⁷⁾の解説によれば、非定常スペクトルだけでも次のものがある。

- (1) 発展スペクトル(Evolutionary Spectrum : Priestley(1965))
- (2) 瞬時スペクトル(Instantaneous Spectrum : Page(1952))
- (3) 一般化スペクトル(Generalized Spectrum : Bendat et al. (1966))
- (4) 物理スペクトル(Physical Spectrum : Mark(1970))
- (5) 多重フィルタ・スペクトル(Multifilter Spectrum : 亀田(1975))
- (6) 発達スペクトル(Developing Spectrum : 日野(1975))

しかし、これらはいずれも解析対象、引き出すべき物理情報毎に定義したスペクトルであり、同じスペクトルの名前を使っているが、通常の定常パワー・スペクトルの持つ「スペクトル密度関数」とは異なるものも含まれている。見方を変えれば、非定常データを解析する一般的な方法というものが存在しない、という事を物語っている。

非定常データの解析を、定常パワー・スペクトルと同じ意味を持つもので行う事ができれば、解析対象の理解に都合が良い。この意味から、局所定常性を仮定した解析方法は、最も理解しやすく、また最も一般的である。非定常性が弱く、ある短い時間区間だけを取ると定常と見なせるような場合には、局所定常性を仮定することにより、従来の統計的解析手法が適用できることが知られている。

初期の頃に、サンプル・データを局所定常とみなせる小区間に分けて解析する方法が研究された。Ozakiら(1975)は、小区間毎にARモデルをフィッティングし、モデルのAICの相対比較を通じて、各区間の統計的な性質の変化を検出する方法を提案し、これを非定常データのスペクトル解析に応用した⁸⁸⁾。この時に用いたARモデルのフィッティング計算法は通常のYule-Walker法であった。

後に、Kitagawaら(1979)は、この問題にHousholder変換を利用した最小2乗ARモデルを適用して、時間軸分解能の向上と計算のオンライン化を図り、瞬時のARスペクトルによる非定常データ解析手法の実用化を試みた⁸⁹⁾。さらに、スペクトル推定に関してけちの原理から導出したAICの与えるモデル次数が低すぎる嫌いがあることから、Kitagawaら(1985)はモデル

の次数とスペクトルの滑らかさをバランスさせた Bayes 型モデルによる方法を提案した^{90, 91)}。

一方、特性変化や異常生起の検知を目的に定常時の解析結果と相対的な比較を行う手法は、入力データが非定常であっても適用は可能である。

システムの入出力に関する観測データからシステムの動特性を近似する時系列モデルが得られれば、このモデルに入力データを印加することによりシステムの出力が予測できる。システムの出力値と予測値の誤差は残差と呼ばれ、多変数自己回帰モデルなどの場合には一般に白色雑音が仮定されている。しかし、入力データの統計的性質がモデル作成時のものと異なると、同じモデルでは近似の度合いが悪くなるため、残差成分は増加傾向を示し、白色性も崩れる。定常時(正常時)に作られたモデルを用いて予測誤差フィルタとし、その残差成分の性質の変化を監視することにより、システムの動特性変化や異常生起の検知が可能となる。

この方法は、正常時(定常時)との相対的な比較を通じて行うため、入力データが非定常であっても適用でき、自己回帰モデルを始めとする種々の時系列モデルが利用されている。この手法は、どのような問題に適用し、どのような特性を検出するか、また残差系列の特性変化をどのように判別するか、という事が問題であり、応用分野個別に開発がすすめられている。

1.4.3 非定常炉雑音の解析

炉雑音の分野では、非定常炉雑音データの解析手法は、現在のところほとんど未開拓である。

(1) マクロ的時間変化の解析

第2回炉雑音解析専門家会議 SMORN-II (1977) ではまだ非定常を取り上げた論文は見当たらない。

SMORN-III (1981) では、2つの例が見られる。Albrechtら(1982)は、市販のデジタル信号解析器の機能を使って、PDF (確率密度関数) の時間変化を測定している⁹²⁾。Van Der Veerら(1982)は、オランダの BWR Dodewaard の運転経験について述べ、第8～第11燃料交換サイクルにわたるマクロ的な見地から、パワー・スペクトルの変化を追っている⁹³⁾。これはある意味で非定常性の評価をした最初の論文とも言える。

SMORN-IV (1984) では、7つの例が見られる。炉雑音の主成分の周期と非定常的な変化時間の関係から見て、マクロ的な解析は4例である。Valkoら(1985)は、主ポンプ振動の長期挙動(8ヵ月)をパワースペクトル・パターンで評価している⁹⁴⁾。Mullensら(1985)は、高中性子束試験装置における炉内、炉外中性子ゆらぎの運転にともなう変化を時間一周波数スペクトルで図示している⁹⁵⁾。Le Guillouら(1985)は、Phenix 炉の燃料交換サイクル毎(第3～第26)のスペクトルやコヒーレンスの変化を追っている⁹⁶⁾。Dachら(1985)は PWR の炉心内構造物の振動挙動の測定に関連して、計装燃料体の中性子検出器ゆらぎのパワー・スペクトルの時間変化を図示している⁹⁷⁾。

音響信号の解析は主成分の周波数帯と変化時間の相対関係を考えれば、ある意味ではマクロ的である。Aberleら(1985)は高速炉における燃料体内の流炉閉塞に関連する実験で、音響信号の時間一周波数スペクトルを測定している⁹⁸⁾。

SMORN-IV 以降、原子炉の運転経験を語るセッションには、必ずといって良いくらい時間一周

波数スペクトルなどが登場している。

(2) 時間オーダーの変化の解析

同じSMORN-IV(1984)で、炉雑音の変化を時間オーダーで解析した例が始めて登場した。Wehlingら(1985)は論文の中で「非定常」という言葉を使っている¹⁰⁰⁾。彼等は、原子炉起動時の冷却材温度の変化に対する、压力容器の振動および圧力ゆらぎのパワースペクトルを評価し、ピーク周波数の変化の温度依存性を調べている。またTürkcan(1985)は、Borssele炉の起動時のループ圧力に関して同様に、温度依存のパワー・スペクトルを示している¹⁰⁰⁾。

(3) 分秒オーダーの変化の解析

原子炉の状態監視や異常診断には、分秒の単位での異常検知が重要となる。この観点から、非定常解析手法を検討すると、時間分解能の高さと計算処理の速さが重要となる。先の(1)、(2)の例は非定常の範疇に入るかも知れないが、通常の定常解析手法が使用された。しかし、分秒単位の変化は非定常性を考慮する必要がある。

筆者ら(1982)は、Ozakiらの手法にBurgのフィッティング計算法を応用した方法を研究し、Halden炉出力の1分毎のスペクトルから共鳴ピーク周波数の時間的変動の検出を試みた¹⁰¹⁾。また筆者(1984)は、Marple(1980)の最小2乗ARのフィッティング計算法¹⁰²⁾に注目し、この瞬時スペクトル解析への適用性を評価した¹⁰³⁾。これは後に時間一周波数スペクトルに応用され、Borssele炉の停止運転時の2次系の雑音解析が行われた¹⁰⁴⁾(筆者ら(1988))。解析は200sec毎に8secのデータを用いて行われた。これについては、後章に詳細に述べる。

Kitamuraら(1985)、Türkcanら(1985)は、Housholder変換を利用したフィッティング計算法とYule-Walker法の比較、BWR炉出力模擬信号の解析を行い、またBorssele炉のタービン・トリップ時の過渡現象解析に適用した^{105, 106)}。全256secの過渡応答データを12.8sec毎に解析した。

Kuroda(1988)らは、KitagawaらのBayes型のARモデルにより、Borssele炉の炉外中性子束信号、1次系ループ圧力ゆらぎ、Phenix炉の炉外中性子束信号、1次系ポンプ流量ゆらぎの解析を行った¹⁰⁷⁾。

(4) 定常モデルに基づく異常診断

正常時にフィッティングされた自己回帰モデルを用いて予測誤差フィルタを形成し、原子炉の異常診断に応用した例は比較的多い。これらの応用は一種の非定常解析でもある。尾熊および筆者ら(1980)^{108, 109)}は、原研J M T R(材料試験炉)に設置されていた軽水炉燃料照射用水ループOWL-1(大洗水ループ1)の漏水検出に、自己回帰モデルによる予測誤差フィルタを適用した。これは、ループの配管が集合した機械室で起きた配管弁からの水漏洩事故を契機に行った研究で、ループ水は高熱であり機械室はコンクリート壁で囲まれているため運転中に漏洩が起きると室内の空気湿度が上昇することを利用し、空調用の給気、排気ダクト付近に備えた各露点計信号から機械室の湿度に関する2変数動特性モデルを同定して、正常時の予測誤差フィルタを作り、漏水の監視をするというものであった。

ここで取り扱った給排気露点計信号は、原子炉プラント外の因子(主に天候)や空調機の動特性(オン・オフ動作, フィードバック)の影響を受けるため非定常な変動を起すが、機械室自体の動特性は自体はこれらの因子に依存せず、正常時は定常であるため1入力1出力型の定常線形モデルが出力の予測に適用できたのである。データが非定常的であるため、変動の詳細な予測には向かないが平均値的な変動をうまく表すことができ、漏水事故時の観測データをこれに適用したところ、このフィルタを使えば漏水は実際に点検で発見された時点より24時間以上前に発見できたであろうことが分かった。

(5) その他の解析

Konno(1988)はカオスと非定常時系列の特徴付けとその異常診断への応用の研究を行った。非定常性のクラス分けの理論である²²⁾。

1.4.4 非定常炉雑音の測定

一方、炉雑音データの測定には、計装信号中の直流(DC)バイアス成分の分離、ゆらぎ成分のフィルタリングや増幅などの信号前処理技術、さらに多チャンネル化、オンライン化にともなう収録系のリモート制御、データ伝送に関する技術が必要である。このうち、オンライン技術に関しては、Turkcanら(1984)によって既に実用化され、また信号前処理のリモート制御も既に実用化されている¹¹⁰⁾。しかし、こと非定常炉雑音の前処理技術は未だ解決されていないのが実情である。

非定常炉雑音信号の収録には信号前処理に関する幾つかの技術的な問題点が残っており、N S R Rでの実験(筆者ら(1984)^{40, 41)}によれば、特に下記の2点を解決する必要がある。

- (1) ゆらぎ成分とDC成分との分離
- (2) 最適なゲインによるゆらぎ信号の増幅

(1)に関連した技術としては、最近になって、DC成分の推定だけを目的とした過渡追従型デジタル・フィルタ(佐野ら(1987)¹¹¹⁾やデータ収録システムに既に取り込まれたデータを対象とした前処理用非線形デジタル・フィルタ(馬場ら(1988)¹¹²⁾が研究されているが、炉雑音信号の収録を目的とした、アナログ信号レベルでの前処理技術とは異なる。

そこで、筆者ら(1988)¹¹³⁻¹¹⁵⁾は、前記漏水検出でのデジタル・フィルタの使用経験を生かし、これらに関する技術開発を試み以下の2つの新しい信号前処理装置を開発した。

- (1) 超低周波バイアス成分の自動分離装置、
- (2) 最適ゲイン選択機能付きフィルタ・アンプ

1.5 本論文の概要

以上、原子炉雑音解析の小史、非線形炉雑音解析と現在知られている非線形解析手法、非定

常炉雑音データの収録と解析の現状について概観した。

本論文の目的は、非線形モデリング手法の1つであるGMDH(組合せ計算法)を用いて、非線形炉雑音信号のモデル化を図り、原子炉システムに見られる非線形現象の発生機構やその特性の解析に役立つ方法を確立することにある。また、非線形性と関連して、非定常炉雑音の新しい解析を試みる。収録法を確立することにある。

第2章では、従来の非線形スペクトルの1つである、バイスペクトル解析について概説し、2つの応用解析の例、JPDR-IIにおけるPRBS(疑似不規則2値信号)の印加実験の解析、Borssele炉1次系圧力ゆらぎの解析を紹介し、その適用の限界について述べる。

第3章では、GMDHに基づく階層モデリング手法の理論に関する章である。ここでは、非線形システムの同定法としての位置づけ、従来の統計的同定手法との関係やニューラル・ネットワークとの関係について述べ、GMDHに基づく階層モデル・フィッティングの方法を概説する。また、階層モデルの統計的意味、線形階層モデルとARモデルとの関係を理論的に明らかにする。さらに、非線形自己回帰型階層モデルを応用した解析手法として、非線形インパルス応答関数、非線形周波数応答関数ならびに非線形パワー・スペクトルの推定法を提案する。

第4章は、階層モデリング手法の応用の1つとして、PWRにおける異常炉心槽振動を取り上げる。まず実例を紹介した後、これをモデル化した確率ダフティング方程式のシミュレーション・データに対して行った階層モデルの同定とその結果について述べ、先に提案した解析手法の有効性を示す。

第5章は、第2の応用例としてBWR炉出力振動を取り上げる。まず、幾つかのBWRで実際に観測された炉出力振動を例示した後、簡単な確率BWRモデルのシミュレーション・データを使用し、階層モデリングとその安定性モニタへの応用について議論する。

第6章は、NSRRの非線形炉出力振動の発見と解析の現状についてである。まず、研究炉における非線形炉雑音の観測例について述べ、特にNSRRで行った異常診断研究について、詳細に述べる。

第7章は、瞬時ARスペクトルを用いた非定常炉雑音解析手法とその応用である。まず非定常データの瞬時スペクトル推定に使用する1次元ARモデルについて、4つのアルゴリズムに関して評価を行い、次に人工的に作成した非定常データの解析結果を示す。最後に、PWR停止運転時の特性解析への応用例を示す。

第8章は、非定常炉雑音データ収録用前処理システムの開発について述べる。はじめに、従来のDCバイアス分離法の問題点を議論し、次に新たに開発したデジタル・フィルタを応用した方法について述べる。また、ゲイン設定法に関しても同様に従来の方法の問題点を議論し、最適ゲインの自動探索法について述べる。次に開発した2つの装置を紹介した後、原子炉での測定試験について述べる。

第9章に結論を述べる。

2. バイスpekトル解析とその限界

2.1 はじめに

本章では、始めに従来の非線形スペクトルの1つであるバイスペクトル解析について概説し、筆者らが行った2つの応用例、動力試験炉 J P D R - II における P R B S 印加実験データとオランダの Borssele 炉の1次系圧力ゆらぎの解析結果を示し、その適用の限界について述べる。

2.2 バイスpekトルの理論

2.2.1 定義と方法

バイスペクトルは、3つの異なる周波数成分の間の相関を記述する、非線形スペクトルであり¹⁾、次の様に定義される。

$$B(f_1, f_2) = E[X(f_1)X(f_2)X(f_3)] ; f_3 = -f_1 - f_2 \quad (2.1)$$

ここで、 $E[\cdot]$ は集合平均を示す。 $X(f)$ は信号 $x(t)$ の区間 $(0, T)$ の有限Fourier変換

$$X(f) = \int_0^T x(t) \exp(-i2\pi ft) dt \quad (2.2)$$

であり、FFT(高速Fourier変換)を利用して計算できる。一方、別の定義を用いれば、バイスペクトルは、3次の相関関数の2重Fourier変換によっても推定できる。

$$B(f_1, f_2) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} R(\tau_1, \tau_2) \exp[-i2\pi(f_1\tau_1 + f_2\tau_2)] d\tau_2 d\tau_1 \quad (2.3)$$

ここで、3次の自己相関関数は、

$$R(\tau_1, \tau_2) = E[x(t)x(t+\tau_1)x(t+\tau_2)] \quad (2.4)$$

と定義される。これがBlackman-Tukey型の推定法である。バイスペクトルは、一般に複素数となるから、ゲイン以外に位相を持つ。位相はバイフェーズとも呼ばれ、次の様に定義される。

$$\Psi(f_1, f_2) = \arctan \frac{\text{Im}[B(f_1, f_2)]}{\text{Re}[B(f_1, f_2)]} \quad (2.5)$$

さらに、線形のクロス・パワー・スペクトルで2つの信号の周波数成分間の正味の相関の強さを見るのにコヒーレンス関数が定義されたのと同様に、バイスペクトルでは、異なる3つの周波数の成分間の正味の相関の強さを測る量としてバイコヒーレンスが定義される。

$$BCOH(f_1, f_2) = \frac{B(f_1, f_2)}{[S(f_1)S(f_2)S(f_1+f_2)]^{1/2}} \quad (2.6)$$

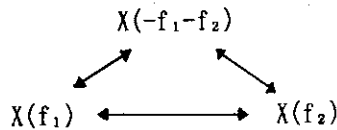
ここでS(f)はパワー・スペクトルである。

後に述べる解析では、バイコヒーレンスやバイフェーズに対する規格化計算の際の数値計算上および統計的な誤差を避けるために、バイスペクトルの振幅情報だけを用いた。バイスペクトルの計算は、Blackman-Tukey型のもと、FFTによるもの両方を使用した。

2.2.2 バイスペクトルの物理的意味

(1) 物理的意味

バイスペクトル $B(f_1, f_2)$ は、2つの非線形モード f_1 と f_2 に対する2次の相互作用の係数の直接的な測定量を表現する。換言すれば、モード f_1, f_2 , および $f_1+f_2+f_3=0$ を満足する媒介モード f_3 の間の相関の強さの指標というように物理的に解釈される。



また、バイスペクトルは、時系列 $x(t)$ の3次モーメント μ_3 と次の関係があり、Gauss性からのずれの度合いを表現する。Gauss性からの偏差が大きくなると、バイスペクトルは増大する。

$$\mu_3 = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} B(f_1, f_2) df_1 df_2 \quad (2.7)$$

ここで、 $\mu_3 = E[(x(t)-\mu)^3]$, また $\mu = E[x(t)]$ 。

Gauss過程の確率密度関数は、平均と分散、すなわち2次までのモーメントで記述できるが、非線形あるいは非Gauss過程は、さらに高次のモーメントが必要になる。特に、3次と4次のモーメントは、確率密度関数の形状の振幅方向および確率密度方向への偏りに関する情報を含んでいるから、これらを標準偏差で規格化したスキューネス(歪み度)Skやフラットネス(とがり度)Flは、非線形性や非Gauss性の測定に役立つ統計量となる。

$$Sk(x) = \frac{\mu_3}{(\sigma^2)^{3/2}} = \frac{E[(x(t)-\mu)^3]}{(E[(x(t)-\mu)^2])^{3/2}} \quad (2.8)$$

$$Fl(x) = \frac{\mu_4}{(\sigma^2)^2} = \frac{E[(x(t)-\mu)^4]}{(E[(x(t)-\mu)^2])^2} \quad (2.9)$$

スキューネスが0のとき、振幅分布は±で対称となり、バイスペクトルは0になる。Gauss分布の場合、スキューネスは0、フラットネスは3になる。

(2) バイスペクトルの対称性

相関関数には次の対称関係が存在する。

$$\begin{aligned} R(\tau_1, \tau_2) &= R(\tau_2, \tau_1) & (2.8) \\ &= R(-\tau_1, \tau_2 - \tau_1) = R(\tau_2 - \tau_1, -\tau_2) \\ &= R(-\tau_2, \tau_1 - \tau_2) = R(\tau_1 - \tau_2, -\tau_2) \end{aligned}$$

このため、バイスペクトルは線形スペクトルの共役関係以外に6つの対称関係が存在する。

$$\begin{aligned} B(f_1, f_2) &= B^*(-f_1, -f_2) & (2.9) \\ B(f_1, f_2) &= B(f_2, f_1) \\ &= B(f_1, -f_1 - f_2) = B(-f_1 - f_2, f_1) \\ &= B(f_2, -f_1 - f_2) = B(-f_1 - f_2, f_2) \end{aligned}$$

ただし、*は複素数共役。

したがってバイスペクトルは (f_1, f_2) 平面上に12の象限を展開する(Fig. 2.1)。この対称関係

とNyquist周波数 $(f_N=1/2\Delta t)$ を考慮すると、バイスペクトルは2次元 (f_1, f_2) 平面内で、頂点 $(f_1=0, f_2=0)$ 、 $(f_1=f_N/2, f_2=f_N/2)$ 、 $(f_1=0, f_2=f_N)$ を持つある最小の三角形内に描写される。

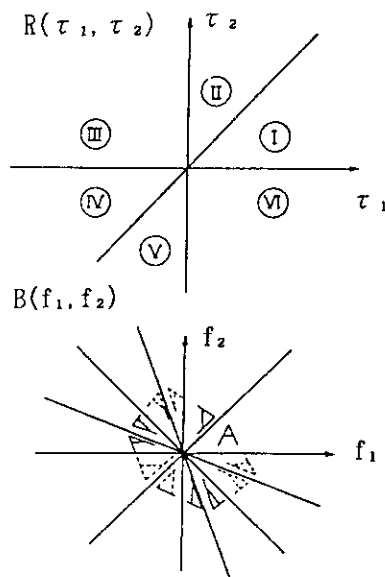


Fig. 2.1 3次の相関関数 $R(\tau_1, \tau_2)$ およびバイスペクトル $B(f_1, f_2)$ の対称性

2.3 適用例

2.3.1 JPDR-IIにおけるPRBS印加実験の解析

JPDR-IIの出力50%時の測定データ²⁾に対してバイスペクトル解析を行った(Kurodaおよび筆者ら(1979), 筆者(1980))³⁻⁵⁾。これをまとめると以下ようになる。

解析は、2つの制御端(2次系バイパス圧力調整弁, 強制循環ポンプ主制御器)から独立な2種類のPRBS(疑似不規則2値信号, ここではM系列信号)を印加した実験のものと、自然状態のものと2種類のデータに対して行った。

スキューネスの推定の結果、M系列信号印加時の信号は、ほとんどが小さい値(0.1以下)を示した。比較的大きな値(-0.5~-0.7)を示した3つの信号、すなわち圧力、計装燃料体の冷却材入口温度、出口温度は、データに重畳するトレンド分の影響によるもので本質的なものではなかった。このため、バイスペクトル解析では有効な結果は得られなかった。

一方、自然状態のデータでは、タービン側蒸気流量(1.9)と計装燃料体の冷却材出口温度

(-1.0)の2つが大きなスキューネスを示したが、後者は計測上のスパイク雑音が原因であった。前者は物理的な機構は不明だが、Fig. 2.2(a)の様に非Gauss性の強い信号波形を示しており、バイスペクトル解析の結果、強い非線形性の存在を明らかにできた。(例えば、Fig. 2.2(b)中、(0.135Hz, 0.07Hz)と(0.22Hz, 0.135Hz)付近の2つのピークは、0.07, 0.135, 0.22Hzの成分が互いに干渉していることを示している)。

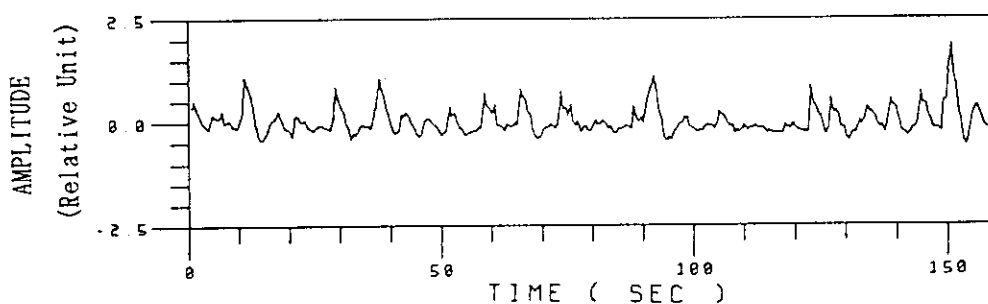


Fig. 2.2(a) JPDR-IIで測定された蒸気流量雑音.

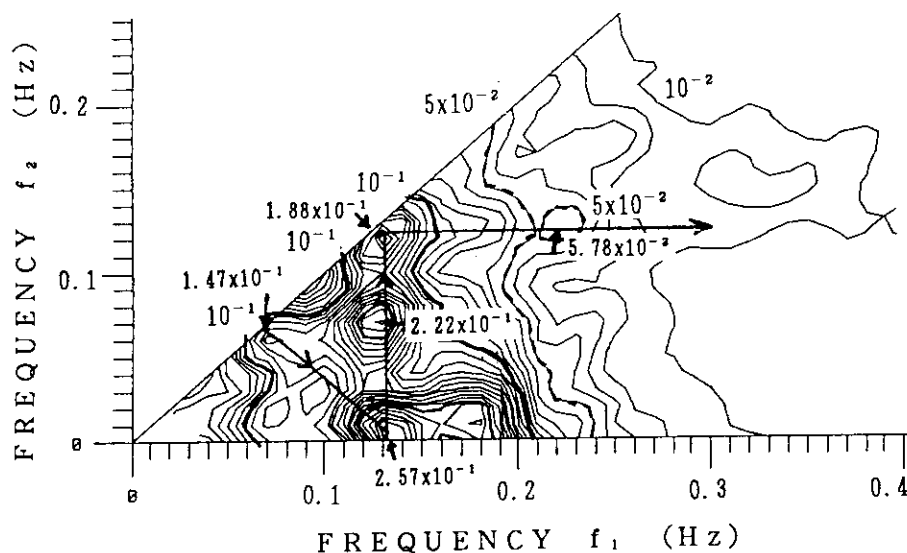


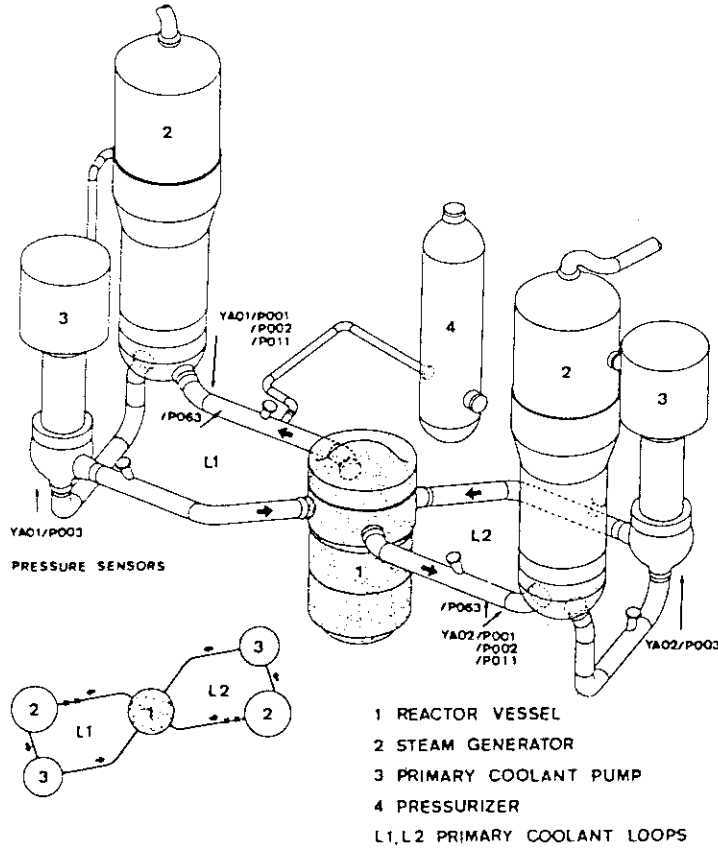
Fig. 2.2(b) 蒸気流量雑音のバイスペクトル推定結果.

しかし、炉出力信号に関しては、BWRで期待されるボイド・フィードバック機構による非線形成分の存在は、確証が得られなかった。自然状態とM系列印加時のスキューネスは、炉外中性子検出器で-0.043から+0.08、また炉内検出器では-0.098から+0.218と、共に2倍程度大きくなることが示されたが、データ長が短いこと、挿入したM系列信号の影響(特に、強制循環ポンプ主制御器側のものは対称性が悪い)が分離できないことなどから、結論はでなかった。さらにバイスペクトル解析では、このように小さいスキューネスを持つ信号の場合には、差異が見つからなかった。

今日、この解析を検討してみると、JPDR-IIは初期のBWRであり炉心安定性が極めて良い(後にVan der Hagenら(1988)によって同型のオランダDodewaardの安定性が評価されている⁹⁾)こと、しかも測定は、最大出力90 MWthの50%で行われたこともあり、炉出力振動に関係した非線形性の検出には無理があったと考えられる。

2.3.2 Borssele炉1次系圧力ゆらぎの解析

次に、オランダのPWR Borssele炉の1次系圧力ゆらぎに対してバイスペクトル解析を行った(Konnoおよび筆者ら(1988)^{7, 8)}。



Borssele炉は2系統の冷却ループを持つ出力450MWeの小型PWRである。この炉では、これまで種々の炉雑音解析が行われ、スペクトル・ピークの物理的成因もまた研究されてきた(Dragtら(1977), Türkcan(1982), (1985), Ogumaら(1985)⁹⁻¹²⁾。

原子炉システムとセンサの位置はFig. 2.3の通りである。圧力容器から出た2つの冷却用ループの配管が蒸気発生器にたどりつく付近に、圧力センサYA01.P001(Loop-1)とYA02.P001(Loop-2)が配置されている。ここで、測定される圧力ゆらぎ(Fig. 2.4(a), (b))は、バースト状の振動を起こしているのが知られている。

Fig. 2.3 Borssele炉の原子炉システムとセンサー位置.

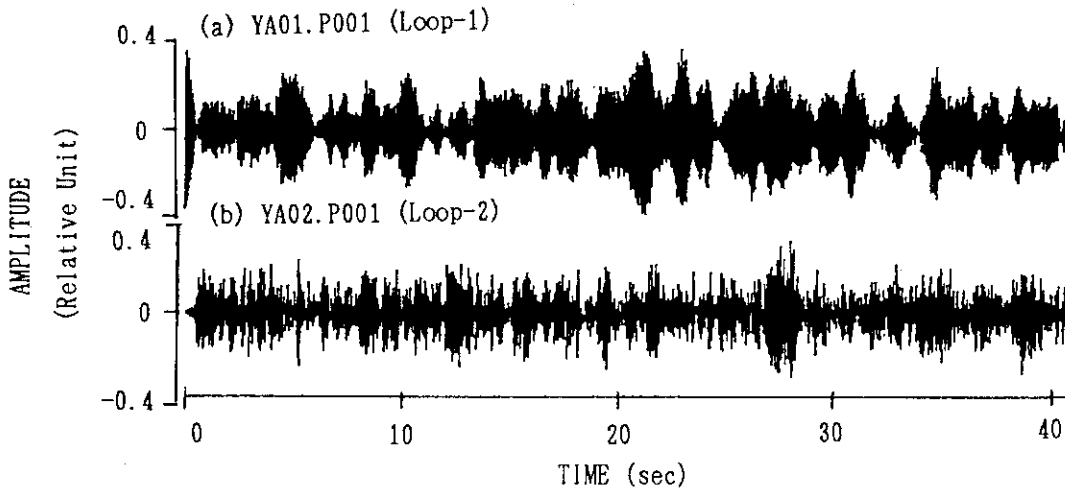


Fig. 2.4 1次系圧力ゆらぎ.

これらの圧力ゆらぎのパワー・スペクトル(Fig. 2.5(a), (b))は, 多数のピークが見られる。

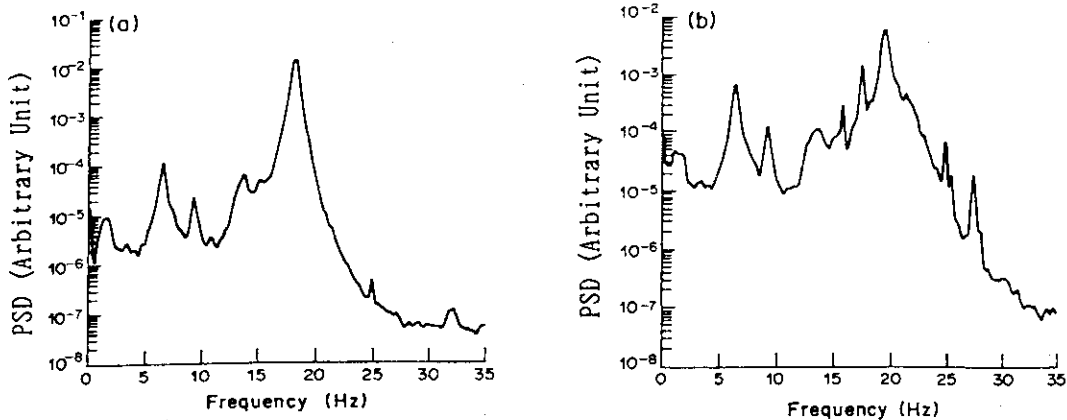


Fig. 2.5 1次系圧力ゆらぎのパワースペクトル((a);YA01.P001, (b);YA02.P001).

これらは, Türkcan(1985)によって, Table 2.1に示すように, 圧力振動, 定在波, 圧力ゆらぎ, あるいは単に圧力と同定されている¹²⁾。

Table 2.1 観測されたピーク成分(Türkcan(1985))

周波数(Hz)	ピーク成分	周波数(Hz)	ピーク成分
1.25	圧力振動	15.0	炉内中性子
1.50	炉外中性子と圧力が同相	17.25	圧力(Pump-2のみ運転)
1.875	圧力振動	18.25	圧力センサの共鳴(Pump-1のみ運転)
3.25	圧力ゆらぎ	19.625	圧力センサの共鳴(Pump-2のみ運転)
6.5	定在波	21.375	圧力(Pump-2のみ運転)
9.25	圧力実効反応度(定在波)	25.75	圧力(Pump-2のみ運転)
10.7	圧力振動	25.375	ポンプ振動(Pump-2のみ運転)
12.7	圧力(Pump-2のみ運転時)	29.375	ポンプ振動(Pump-2のみ運転)
13.5	定在波	31.375	圧力(Pump-1または-2のみ運転)

しかし, 何故バースト状の振動を引き起こすのかは不明である。ピーク周波数成分間には相互の関係があるように見える。すなわち,

ピーク周波数	関係
1.125	$1/3f_0$
1.5	$1/2f_0$
3.25	f_0
6.5	$2f_0$
13.5	$4f_0$
19.6	$6f_0$
25.75	$8f_0$

という関係を近似的に満足するように見える。

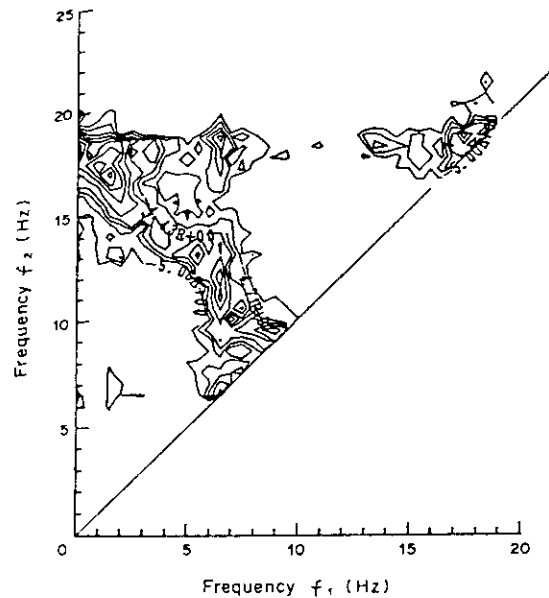
これらの規則性は、非線形メカニズムが存在することを示唆する。これらの成分間の関係は、バースペクトル解析の適用によって、明らかにすることができる。

Fig. 2.6(a), (b)に、圧力ゆらぎYA01.P001(Loop-1)のバースペクトルを示す(サンプリング時間間隔 $\Delta t=0.01s$, サンプルの総数 $N=32768$)。Table 2.2に、そのピーク位置と解釈をまとめた。同様に、圧力ゆらぎYA02.P001(Loop-2)のバースペクトルとその解釈をFig. 2.7(a), (b)とTable 2.3に示す。Table中で、II型、III型、とあるのは、それぞれ2成分、3成分の正弦波の重ね合わせ、IV型は偏りのある場合の線形 Langevin 方程式によって記述される線形ゆらぎを示す。

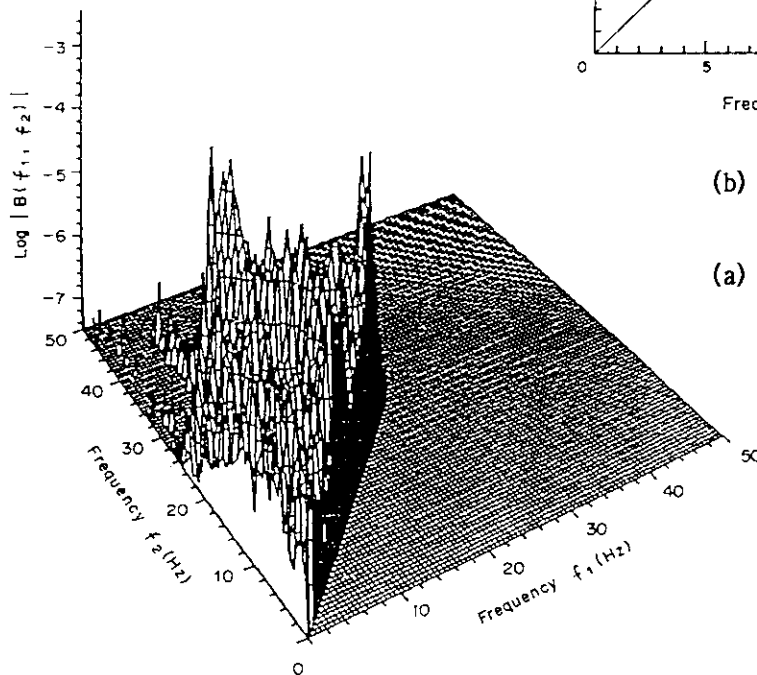
Table 2.2 Loop-1圧力ゆらぎ(YA01.P001)のバースペクトル上のピーク位置とその解釈。

ピーク位置 (f_1, f_2)	解釈
9, 9 18, 18	2次の高調波の相互作用 II型あるいはIV型($f_2=f_1+f_1=2f_1$)
6.5, 6.5 6.5, 13 6.5, 18	2次および3次の高次高調波の相互作用 III型($f_2=f_1+2f_1=3f_1$)
13.5, 18	モード:13.5, 18, 31.5の相互作用 III型($f_2=f_1+f_2$)
1, 18	モード:1, 18, 19の相互作用 III型($f_2=f_1+f_2$)

* このケースでは、18Hzのピークが支配的である。



(b) 等高線図.

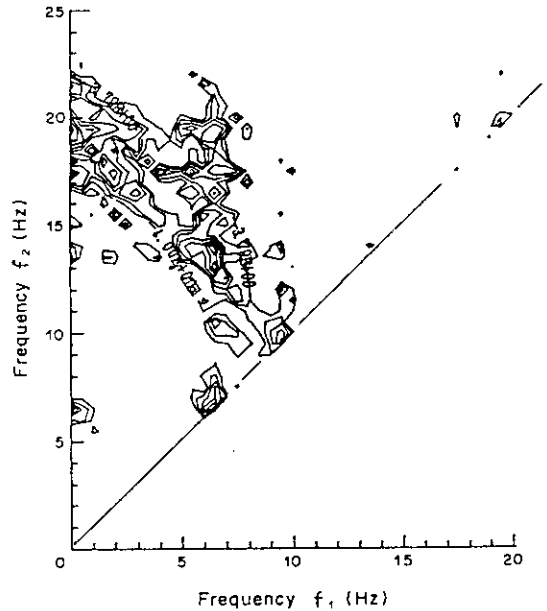


(a) 立体図.

Fig. 2.6 Loop-1圧力ゆらぎ(YA01.P001)のバースペクトル.

Table 2.3 Loop-1圧力ゆらぎ(YA02.P001)のバイスペクトル上のピーク位置とその解釈.

ピーク位置 (f_1, f_2)	解釈
9.25, 9.25 19.5, 19.5	2次の高調波の相互作用 II型あるいはIV型($f_2 = f_1 + f_1 = 2f_1$)
6.5, 6.5 6.5, 13 6.5, 19.5 6.5, 9.3	1, 2, 3次高調波間の相互作用 III型($f_2 = f_1 + 2f_1 = 3f_1$)
6.5, 11.5 6.5, 15 6.5, 16.5 6.5, 17.5 6.5, 21.3	3つのモードの相互作用 III型($f_2 = f_1 + f_2$)
17.5, 19.5	モード: 17.5, 19.5, 37の相互作用 III型($f_2 = f_1 + f_2$)
2, 19	モード: 2, 19, 21の相互作用 III型($f_2 = f_1 + f_2$)



(b) 等高線図.

(a) 立体図.

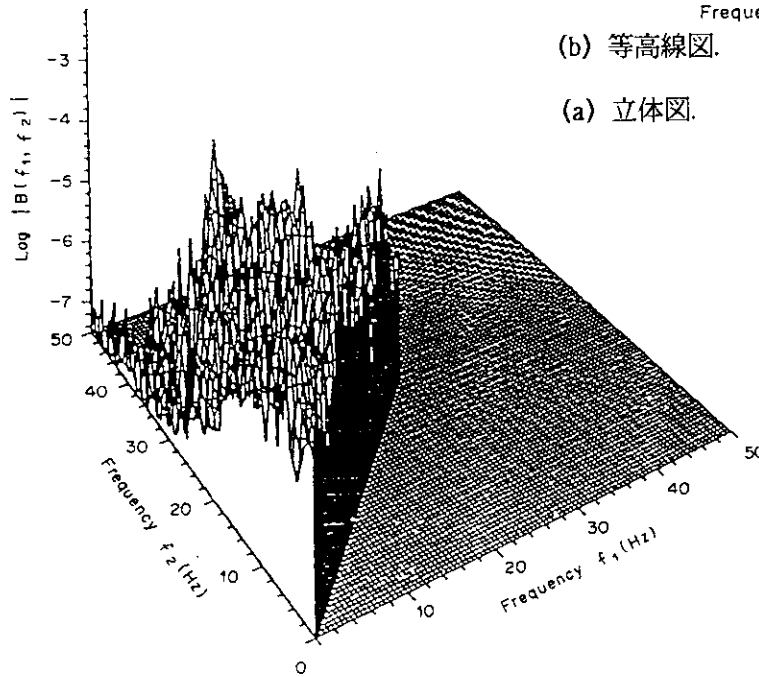


Fig. 2.7 Loop-2圧力ゆらぎ(YA02.P001)のバイスペクトル.

しかし、バイスペクトルに寄与する相互作用は、多くの可能な型が存在し、その解釈は困難を極める。何故ならば、II型(2成分の正弦波の重ね合わせ)の自己相互作用によって生じる2次の高調波モードを持つ相互作用は、ある周波数点(f_1, f_2)に寄与する。一方、1次、2次、3次の高調波モード(III型; 3成分の重ね合わせ)を持つ相互作用、また外部雑音によって駆動される線形調和振動子(IV型)は、いずれも同じピークの位置(f_1, f_2)に寄与する。したがって、これらを簡単に分解して理解することはできないからである。

以上の解析を通じて、Borssele炉で観測された圧力ゆらぎの解析を通じて、圧力ゆらぎの非線形性を示唆する幾つか事項を見つけた。

- (1) フラットネス(3.5)がGauss過程(3.0)よりも大きい
- (2) パワー・スペクトル上のピーク(例えば, 6.5, 13.5, 18.2Hz)がほぼ等間隔で現れる。
- (3) ピークは, バイスペクトルで示されたように, 他のピークと強い相関を持つ
- (4) 低周波($f < 1$)でパワースペクトルに長時間相関が見られる
- (5) 18Hzの主ピーク以上の高周波での急なスロープがある

[Fig. 2.5(a)からスロープは f^{-p} ($p > 8$)と見積もられるが, 調和振動子のスロープは f^{-4}]

流体の間欠性の確率理論に従えば, Borssele炉で測定した圧力ゆらぎの特徴

- (a) 多数の規則的なピークの発生
- (b) 間欠的なバーストの発生

の「定性的な説明」を与えることができる。しかし, Borssele圧力雑音の間欠性の原因は境界層における弱い乱流のそれと同じ性質を持っていると結論するためには, もっと厳密な研究が必要である。上と同じような間欠性が泡の音響放出において見つけることができる。バースト現象は熱水力学ではあちこちに見られる。したがって, これらの現象の経験的なモデリングは数多くの工学的応用を提供するであろう。

2.4 むすび

バイスペクトルをJPDR-IIならびにBorssele炉の炉雑音データに適用した。JPDR-IIの解析では, 自然状態で観測されたタービン側蒸気流量雑音に強い非線形性が存在することを示した。また, Borssele炉の1次系ループ圧力ゆらぎの解析では, これまで確認されていた数々のスペクトル・ピーク成分間に強い相関があり, 何等かの非線形機構が作用していることを示した。以上の様に, バイスペクトルが炉雑音信号に埋れた非線形性の特徴, 特に高調波成分間の相互干渉の証拠を捕えるのに有効な手法であることを示した。

一方, 非線形システム同定の見地からバイスペクトル手法を考えると, バイスペクトルは信号のFourier成分の3重積を測定する1手段に過ぎないため, 高調波の成因など, システム内部に隠れた非線形機構に関する解析を進めるためには, 非線形現象に関する十分な理論的支援が必要である。

上野ら(1976)は, バイスペクトル解析に関するレビューの結論で「パワー・スペクトルの場合もそうであったように, バイスペクトルはあくまでも信号の一側面を表現しているにすぎず, したがって, バイスペクトル解析に基づいて信号の発生機構などを推定あるいは決定するとい

う問題でも、自ら限界が存在するのである。」と、述べている¹³⁾。

炉雑音解析の場合には、バイスpekトルの利用が進んだ他の研究分野に比べると、非線形原子炉動特性理論に裏付けされたspekトル理論が未開拓なため、現在のところ、バイスpekトルで捕える情報が有効に活用できない状況にある。

さらに、バイスpekトルの定義自体は明快であるが、結果の解釈の困難さが、その使用を制限している。バイスpekトルは、3つの周波数(f_1, f_2, f_3)の成分間の相関関係を表す関数であるが、3番目の周波数は他の周波数と従属関係にあり、隠れ変数($f_3 = -f_1 - f_2$)となっているため、2次元周波数平面(f_1, f_2)上のバイスpekトルは、12の象限と対称関係を持ち、極めて複雑に畳み込まれてしまう。このため、その解釈は容易ではない。

これらの問題が、バイスpekトル手法の適用限界を決定している。したがって、バイスpekトル解析は、非線形性の存在の有無を証明する有効な手段として用いることができるが、システム内部に埋れた非線形機構の解明を目的とする場合には、それだけでは不十分で、次章以降に述べるような非線形モデリング手法が必要である。

3. GMDHに基づく階層モデルの理論と応用

3.1 はじめに

3.1.1 GMDHとは？

GMDHは、Ivakhnenkoら(1970, 1971)によって1968年に提案された一種のモデリング手法である^{1, 2)}。この手法は、多量のデータから系の特性を精密に同定する事を目的とした従来の統計的モデリング手法とは立場を異にし、少ないデータから複雑な(非線形)系を大雑把に同定する事を目的としており、今日のニューラル・ネットワーク³⁾の原型であるパーセプトロン^{4, 5)}の考え方をベースに開発した計算メカニズム「発見的自己組織化(Heuristic Self-organization)」を用いている。

GMDHは、計算メカニズムの枠組みを規定する概念(カスケード型階層モデル, 単一方向の学習等)であり、少ない計算量で最良の結果を得るために、カスケード・ユニットの関数形, 結合則等は問題に合わせて任意に構成できる柔軟性を持たせている。この事が逆に、GMDHの利用者に、自ら応用する問題に対して最良の結果を得るために必要なカスケード・ユニットの関数形や結合則など(これらの要素をHeuristicsと呼ぶ)を見つけ出す仕事を課し、また得られた階層モデルの物理的な解釈を困難にしている。

3.1.2 GMDHの研究史と問題点

GMDHは、提案後数年を経て日本でも研究が始められ、1970年代には数多くの研究が為され、今日では種々のHeuristicsや各分野での様々な応用例が知られている。これらについては池田ら(1975, 1979-1980), 田村(1978)が解説している⁶⁻⁸⁾。特に、基礎関数の選択とその集合である階層モデルの決定に関しては、近藤ら(1979), 田村ら(1979), 斎藤ら(1981)⁹⁻¹¹⁾が自己回帰モデルの分野で出現した赤池(1974, 1976)の情報量基準AIC^{12, 13)}をこれに適用し、ある程度の客観的なモデリングができるようになった。一方、フィッティングされた階層モデルは、物理的な解釈が一般に困難であり、「ブラック・ボックス」として取り扱われたため、その応用は観測データの量が少なくしかも通常的手法では扱えない複雑な系の予測問題に集中した。

1980年代に入ると、他の同定手法、例えば線形系の多変数自己回帰, 自己回帰移動平均モデル等の普及, バックプロパゲーションに基づくニューラルネットの出現, 他の非線形系の同定手法の進歩等によって、GMDHの価値は次第に減じ、その研究熱は下火になった。しかし、研究そのものが下火になった直接的な要因は、GMDH自身の「ブラック・ボックス」モデルに対する不信感にあったと思われる。この状況は、今日流行のニューラル・ネットでも同様で

ある。

原子力の分野での応用例はほとんど無く、わずかに、原子炉動特性の同定の問題(篠原ら(1977)^{14, 15)}、原子炉化学プラントの動特性同定の問題(池田ら(1989)¹⁶⁾が知られているだけで、炉雑音信号のモデリングに使用した例は不明である。

3.1.3 問題の解決と本章の主題

GMDHにより同定したモデルの数学的な考察が困難であるという状況は今日も変わっておらず、もとのシステムの物理パラメータと同定したモデルの構造や個々の部分表現の係数との一般的な対応関係は見出されていない。しかし、GMDHの適用範囲を時系列データのモデリングに限定した場合、筆者らが提案する方法を用いれば「ブラック・ボックス」モデルの物理的な解釈がある程度可能になる。

3.2節で、非線形システムの同定を簡単に述べ、3.3節でGMDHの概要と階層モデルを概説する。3.4節で基礎関数の統計的意味について考察する。3.5節では線形自己回帰型階層モデルと通常の線形自己回帰モデルの関係を明らかにする。3.6節では非線形自己回帰型階層モデルの同定について述べ、3.7節では、その応用解析法として、GMDHによって得られた階層モデルから系の全体的な応答特性を近似する非線形インパルス応答関数の推定法、さらにこれに基づく非線形周波数応答関数および非線形パワースペクトルの推定法を提案する。

3.2 非線形システムの同定

はじめに、非線形システムのモデルについて概説する。

3.2.1 Volterra級数展開

はじめに、入力 $x(t)$ 、出力 $y(t)$ を持つ、Fig. 3.1に示すような、1入力1出力型の非線形動特性システムの連続時間表現を考える。

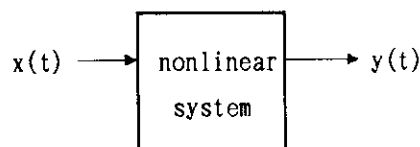


Fig. 3.1 非線形システム

このシステムの出力 $y(t)$ の瞬時値は、Volterra級数展開によって、次の多項式に近似できるものとする^{17, 18)}。

$$y(t) = b_0 + b_1 y_1(t) + b_2 y_2(t) + b_3 y_3(t) + \dots$$

$$= \sum_{i=0}^{\infty} b_i y_i(t) \quad (3.1)$$

ここで、 $\{b_0, b_1, \dots\}$ は係数。このとき、出力 $y(t)$ は、システムの動特性上の遅れ時間 τ を考慮した入力 $x(t-\tau)$ を用いて次の様に表現できる。

$$y(t) = b_0 + b_1 \int_0^t h_1(\tau)x(t-\tau)d\tau + b_2 \int_0^t \int_0^t h_2(\tau_1, \tau_2)x(t-\tau_1)x(t-\tau_2)d\tau_1 d\tau_2 + b_3 \int_0^t \int_0^t \int_0^t h_3(\tau_1, \tau_2, \tau_3)x(t-\tau_1)x(t-\tau_2)x(t-\tau_3)d\tau_1 d\tau_2 d\tau_3 + \dots \quad (3.2)$$

ここで、 $\{h_1, h_2, \dots\}$ は各次数毎のVorterra核と呼ばれ、システムのインパルス応答関数を表わす。いま、(3.1)式の各項を $\{y_0, y_1, y_2, \dots\}$ と記すと、これらは(3.2)式から、

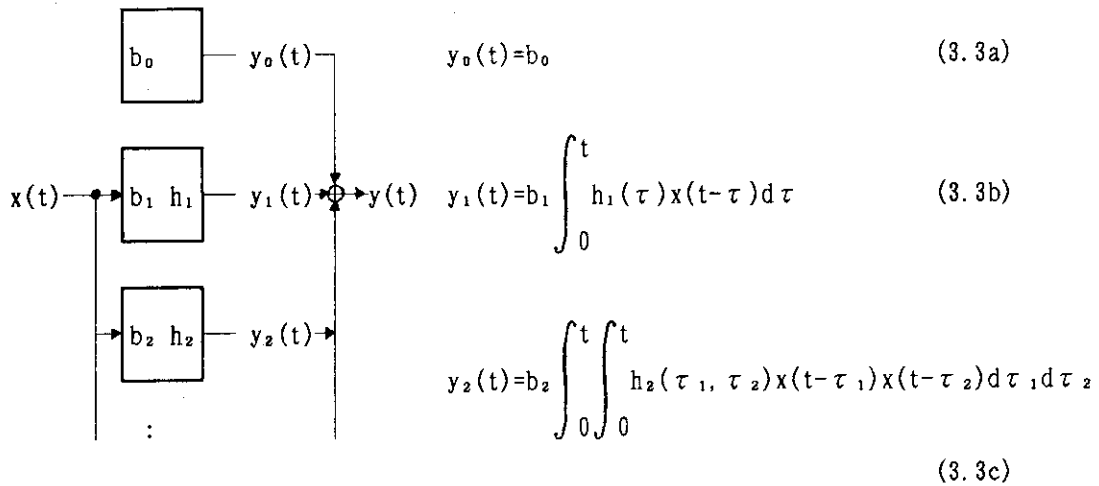


Fig. 3.2 Voltterra展開による表現

と表わすことができ、非線形システムはFig. 3.2に示すように、各次数のインパルス応答関数に対応するサブシステムの集合(総和)表現できることが分かる。

3.2.2 Kolmogorov-Gaborの多項式

離散時間系の場合、関係はKolmogorov-Gabor(KG)多項式によって、次の様に記述される¹⁹⁾。

$$y_t = h_0 + \sum_{i=1}^M h_{1i} x_{t-i} + \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^M h_{2ij} x_{t-i} x_{t-j} + \dots \quad (3.4)$$

ここで、 $\{h_0, h_{1i}, h_{2ij}, \dots\}$ は、時間遅れ (i, j, \dots) を持つ非線形インパルス応答関数、またはVolterra核、 M は最大時間遅れ点である。

3.2.3 非線形自己回帰モデル

時系列データを記述する線形モデルとして、次の自己回帰(A R)モデルが良く知られている。

$$x_t = a_0 + \sum_{i=1}^M a_{1i} x_{t-i} + \varepsilon_t \quad (3.5)$$

ここで、 $\{a_0, a_{11}, a_{21}, \dots\}$ はAR係数と呼ばれる。自己回帰モデルでは、出力がフィードバックする形を取っている。 ε_t はフィードバック・システムの入力変数で、平均値ゼロ、分散 σ^2 のGauss型白色雑音が仮定され、雑音源あるいは残差と呼ばれる。第1項目の a_0 は在っても無くても良い。

式(3.4)のKolmogorov-Gaborの多項式において、左辺の出力 y_t を入力 x_t で置き換えれば、線形の表現を拡張した非線形自己回帰モデルが得られる。

$$x_t = a_0 + \sum_{i=1}^M a_{1i} x_{t-i} + \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^M a_{2ij} x_{t-i} x_{t-j} \dots + \varepsilon_t \quad (3.6)$$

3.2.4 フィッティングの問題

式(3.4)のインパルス応答関数、あるいは式(3.6)の係数は、原理的には、入出力に関する十分な数の観測データ点が与えられれば、最小2乗法を適用することによって、計算できる。しかし、実際には、求める未知パラメータの数は、2次の場合でも $(1+M+M^2)$ 個で、以下次数の増加とともにMのべき乗で爆発的に増加していくから、直接的な計算は困難となる。

したがって、次数や遅れ時間点に制限が無く、しかも非線形構造に何の制約も設けない一般形で非線形システムを表現した場合には、極く次数の低い例を除いて、一般に同定は不可能となる。

3.3 GMDHの概要と階層モデル

3.3.1 GMDHの原理と特徴⁽⁶⁻⁸⁾

GMDHは、複数の局所演算ユニットを多層に配置した、関数フィッティング用のネットワークである。これに複数の入力データと1つの出力データを与えると、第1層から順に、局所的なフィッティングを通じて各ユニットを同定していき、また予測誤差等の基準に基づいて隣り合う層のユニット間の結合を取捨判別する事により、自己組織的にモデルを構築する。

GMDHは、関数あてはめのためのネットワーク・メカニズムの枠組みを規定する概念であ

り、使用するユニットの型、結合則等は任意である。このため、実際的な計算には種々のアルゴリズムが提案されているが、これらについては本論文のテーマと直接関係無いため、詳しくは参考文献[8](池田ら(1980))などを参照されたい。

(1) ネットワーク的側面

GMDHのネットワーク・メカニズムの枠組みは、次のように規定されている；

- 1) 多層構造
- 2) 基礎関数と呼ばれる簡単な非線形多項式を、多入力1出力を持つユニットとして使用、
- 3) 各ユニットの係数あてはめは統計的推定を通じて局所的に行う
- 4) あてはめたユニットの選択とそれらの結合は、Heuristics(発見則)に基づいて行う。

1)と2)が計算メカニズム、3)と4)が学習メカニズムに相当する。

(2) 統計的側面

GMDHによって構築される階層モデルは、簡単な非線形多項方程式から成る一種の並列カスケードモデルとして考えられる。GMDHは非線形システムを従来の非線形同定手法よりも、効率的にそして要点だけを精度良く同定することを可能にさせる。

(3) 利点と欠点

GMDHのシステム同定手法としての利点は次の通り。

- 1) 多変数非線形システムが簡単にモデリングできる。
- 2) 少ない入出力データでモデリングが行える。
- 3) 多変数、高次の非線形のモデルが得られる割に計算量が少ない。
- 4) システム構造に関する先験的情報が必ずしも必要ではない(しかし、あった方が良い)。

また、欠点として次のものがあげられる。

- 1) 基礎関数の形、入力データや局所モデルの結合則など(Heuristics)の一般的な規定が無い。結果を最良に導くためのHeuristicsを決定する一般的な理論は無いため、これらを、もっぱら経験的に探索する必要がある。
- 2) 得られたモデルが数学的に最尤推定になる保証はない。
- 3) 得られたパラメトリック・モデルの物理的な意味付けが困難である。
- 5) 手法自身の概念が通常の数学的手法に比べて難解である。
- 5) 現在の線形系の同定手法に比べると費やすべき計算時間が大きい。

3.3.2 自己組織化と統計的システム同定

統計的同定手法とは、モデルの構造をある差分方程式や伝達関数の形に定式化し、システムの入出力データからモデル・パラメータの最小2乗解または最尤解を推定する方法である。

実際の同定計算において、従来の方法では、まず固定したモデル構造に基づいて解析的に最適解を導出し、これを直に入出力データに当てはめるという方法が採用されてきた。これを計算アルゴリズムの観点から見ると、データに対する解析解の計算が直ちにモデル・パラメータの推定になり、解析解とモデル・パラメータは1対1の関係にある構造となっていた。したがって、この種の計算アルゴリズムは、解析解が得易い簡単なシステムに対しては威力を発揮するが、多数の入力変数を持ちしかも非線形であるといった複雑なシステムに対しては、その適用が極端に難しくなってくる。この種の複雑なシステムを同定するために考え出された同定計算アルゴリズムがGMDHである。

GMDHは、モデルの構造に冗長性を与えるために、多数の微小モデルを並列に配置し、これを何層にも重ねた並列カスケード型のモデル構造を採用している。これが従来の方法との相違点の1つである。ここで、微小モデルとは、離散型システムを考えた場合に現れる時間遅れ点の幾つかを入出力データとする、多入力1出力型の仮想モデルで、その構造は最適解が容易に求まる簡単な構造を持つものとする。この時、全体モデルは、カスケードの第1段に多数の微小モデルが配置され、段を重ねていくと最終段には唯一の出力点を持つという構造となる。さらに、カスケードの段数を未知とすれば、同定対象のシステムの複雑さに合わせていくらかでもモデルの複雑さを増していくことが可能となる。

この種の計算アルゴリズムでは、少なくとも個々の微小モデルのパラメータ同定に関しては、最適解を解析的に求めておいて、これを個々の部分的な入出力データに当てはめるという、従来と同様の方法で容易に推定できる。しかし、幾つかの時間遅れ点を入力とする微小モデルをカスケード接続して、全入出力情報を表現するモデルを構築しようとする、非常に多くの微小モデルとカスケード段数が必要となる。

この解決のために、GMDHでは、システムの入出力関係を大胆に近似し、要点だけを取り込むという方針を取った。すなわち、ある判定基準を用いて、全体モデルに盛り込むべき部分的入出力情報の取捨選択を行い、カスケード構造の簡素化を図った。これが、GMDHと従来の統計的同定手法とを明確に区別する大きな相違点である。この情報の取捨選択が介入する事により、最終的に得られるモデルは統計的に見て最小2乗解あるいは最尤解になるという数学的な補償を失うが、微小モデルの形の設定や情報の取捨選択を的確に行えばモデルを最適なものに近づけることができる。

最良の結果をもたらす微小モデルの形の設定方法や情報の取捨選択の基準は、モデル同定の成否に関わる重要な要素であるが、モデルの収束性といった数学的な議論だけで完全に決定できる性質のものではないため、経験的に探す必要がある。これらを一旦与えれば、GMDHは入出力データに基づいて最良な結果が得られるように自らモデルを組織していく。これが自己組織化の云われである。また、最良の結果を自ら発見していくためにGMDHに埋め込まれる情報取捨選択基準は、最良の結果をもたらす関数形を設定することも含めて、Heuristics(発見則)と呼ばれる。これらはGMDHにおいては、自然界に見られる情報の取捨選択に関する具体例、生物の神経回路網や植物の品種改良等にヒントを得て作られた経験的な基準を採用している。これが、GMDHがサイバネティクス的方法論の立場からデータ処理を行っているといわれる所以である。

3.3.3 ニューラル・ネットワークとの関係

ここでは、GMDHと今日盛んに研究されているネットワーク・メカニズムによる情報処理⁶⁾との関係について簡単に触れておこう。

ネットワーク・メカニズムは、生物の脳に代表される神経回路網(ニューラル・ネットワーク)にヒントを得て産み出された、並列分散型の高度な情報処理を目的とする1種の情報処理手法である。生物の神経回路網における情報処理のメカニズムは、

- 1) 比較的簡単な演算機能を持つユニットで構成される。
- 2) 多数のユニットが不規則に結合してネットワークを形成している。
- 3) ユニット相互間の結合の強さが調整でき、教育と学習によって調整される。
- 4) 情報処理は各ユニットで並列的に行われ、その結果は回路網全体に分散して蓄えられる。

といったモデルで表わされると考えられ、このメカニズムを情報処理に利用できれば、従来のノイマン型の計算機と直列型の演算アルゴリズムでは実現できない高度の情報処理が可能になると期待される。

生物の神経回路網を模擬した最初のネットワーク・メカニズムは、1958年にRosenblattの提案したパーセプトロン(Perceptron;学習するパターン識別機械)であった。この型のネットワーク・メカニズムは、古典的なメカニズムに属し、構造上階層的ネットワーク(層状ネットワーク)に分類される(麻生(1988))。パーセプトロンは、提案以後その基本能力と応用に関する種々の研究がなされたが、Minsky, Papert(1969)によってパーセプトロンの理論的な限界についての論文が発表されて、その流行にひとまず終止符が打たれた。

その後ネットワーク・メカニズムの研究は一時期停滞していたが、Hopfield(1982)によって相互結合型のネットワークが、またHintonら(1983)によってこれを確率的に拡張したボルツマン・マシン(Boltzmann Machine)が提唱され、再び活気を帯びた研究分野となっている。現在のところ、比較的簡単な情報処理ユニットを相互に結合した形態に関するものと、個々のユニットの結合を適切なものに調節する学習能力(自己組織能力)に関するものの2面から研究が進められている。

IvakhnenkoがGMDHを提唱した1968年は、パーセプトロンが普及しだした時期に当る。ここでは、GMDHがパーセプトロンからどのような影響を受けたかを知るために、パーセプトロンの情報処理³⁻⁴⁾のメカニズムを簡単に紹介しておこう。

パーセプトロンは、神経回路網を模擬した情報処理用メカニズムを実現するに当り、その構造や機能を次の様に具体化したネットワーク・メカニズムである。

- 1) ネットワークは、3層の階層型(カスケード)であり、各層は適当な数のユニットからなる。同一層内のユニット間の結合はなく、となり合う層のユニット間では入力層から出力層の向きの1方向の結合だけが存在する。

- 2) ユニットは、第1層には物理量変換用の1入力1出力型のしきい素子、また第2、第3層には線形加重和の機能を持つ多入力1出力型のしきい素子が用いられ、取り扱える信号は第1層の入力が実数、他の入出力は全て論理2値(0/1)である。
- 3) 第2、第3層のユニット間の結合だけが強さを調整でき、教育と学習により調整される。他の結合は固定である。
- 4) 学習は、正解と出力との誤差を学習信号に使う方法(誤り訂正型)によって行う。

若干の補足的な説明を加えると、この様な階層型ネットワークでは、メカニズムの動作に関して見ると、ネットワーク中を情報が入力層から出力層へ一度流れて状態変化が終る、という形態になっている。また、ユニットに論理演算型しきい素子が採用された理由は、パーセプトロンの開発目的がパターン認識にあり、論理型演算の方が都合が良かったからに過ぎない。後に実数型のユニットを用いたパーセプトロンも出現している。学習に関しては、ここに採用された方法は、パーセプトロン以降、2乗誤差最小化学習あるいは相関学習、確率的降下法による2乗誤差最小化学習へと拡張されたが、この種のアプローチはいずれも学習するユニット全てに正解を与える必要があるため、多層ネットワークの最終層のところでしか学習できないという欠点があることが知られている。

一方のGMDHは、複雑なシステムの同定を目的として開発された計算メカニズムであり、ネットワーク・メカニズムに必要な要因を全て満足する訳ではないが、パーセプトロンと対比させることができる。

- 1) ネットワークは、多層の階層型(カスケード)である。同一層内のユニット間の結合はなく、となり合う層のユニット間では入力層から出力層の向きの1方向の結合だけが存在する。各層のユニット数は、入力層のデータ数に依存する。
- 2) ユニットとして低次の多項式関数を用いる。変数の数が入力数となり、各変数の値を入力とし関数値を出力とする多入力1出力型の演算素子となる。
- 3) 各ユニット間の結合の強さは、入力に関しては実数パラメータによって、また出力に関しては0n/Offによって調整でき、学習によって調整する。(すなわち、微小モデルのパラメータ決定と採用すべき微小モデルの選択)
- 4) 学習(フィッティング)は、正解(出力の観測値)と計算出力(予測値)と相関または誤差を学習信号(判定)に使う方法によって、各層毎に段階的に行う。

GMDHに採用された計算メカニズムに関しては、各ユニットで簡単な情報処理を行い、これを多層化するというパーセプトロンのメカニズムがそのまま踏襲されている。

しかし、GMDHの目的は関数フィッティングにあるため、ユニットとしては線形加重和のしきい素子の代わりに、多入力1出力の非線形関数を用いている。この結果、ユニットの入力対応の線形加重パラメータの代わりに非線形関数パラメータが用いられ、ユニット間の結合は実数値データで行われる。さらにユニットの入力数は実際には2あるいは3と小さいものが用いられるため、複雑な関数を表現するためには層数が必要であり、また同一層内のユニット数は入

力数によって制限を受けてしまう。

また学習(GMDHにおいては微小モデルのパラメータ決定と)に関しては、相関学習、後に2乗誤差最小化学習と類似の方法を用いている。パーセプトロンでは学習メカニズムからくる制約のために、最終層のユニットしか学習能力が無かった。これを回避するため、GMDHでは第1層から順番に各層毎に学習(係数決定と経路選択)を行っている。これが可能な理由は、パーセプトロンの学習が独立なデータを1セット入力する毎に行っているのに対して、GMDHの場合は、統計的平均に必要な全てのデータを一括して入力し、各層の学習毎に同じデータを繰返し用いているからである。

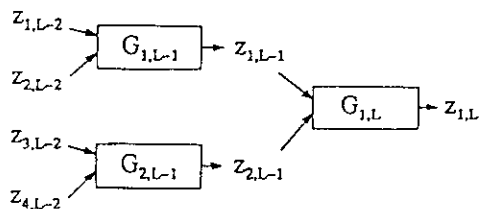
3.3.4 多層構造と完全表現

(1) 階層モデルの数式表現

GMDHを適用して最終的に得られるモデル(完全表現)は、局所演算ユニット(部分表現)をカスケード接続した階層モデルとなる。局所演算ユニットの関数型(基礎関数)には、一般に2入力1出力型の簡単な任意の多項式が用いられる。

いま、基礎関数をG、その出力(中間変数)をzと記すと、第L層におけるk番目の部分表現 $G_{k,L}$ と、その出力 $z_{k,L}$ は、前層(L-1層)の2つの中間変数 $z_{i,L-1}$ 、 $z_{j,L-1}$ を用いて、次の様に表せる。

$$z_{k,L} = G_{k,L}(z_{i,L-1}, z_{j,L-1}) \tag{3.7}$$



さらに、(3.7)式の入力に次々と前層の部分表現を代入していくと、各部分表現の結合はカスケード構造となり、1つの完成した階層モデルができあがる。いま、中間変数の添え字 i, j を各層毎に機械的に $1, 2, \dots$ と記せば、この階層構造は、Fig. 3.3の様に表せる。

これを1つの関数 f にまとめると、最大層数Lの階層モデルは次の様になる。

Fig. 3.3 GMDHにより作られる階層モデルのカスケード構造.

$$z_{1,L} = G_{1,L}(z_{1,L-1}, z_{2,L-1}) \tag{3.8}$$

$$= G_{1,L}(G_{1,L-2}(z_{1,L-3}, z_{2,L-3}), G_{2,L-2}(z_{3,L-3}, z_{4,L-3}))$$

⋮

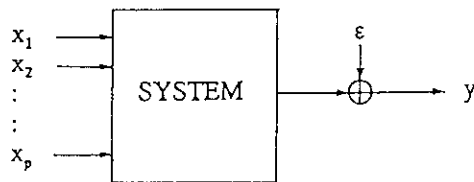
$$= f(z_{1,0}, z_{2,0}, \dots, z_{p,0}) \tag{3.9}$$

ここで、 $\{z_{i,0}; i=1, \dots, p\}$ は第0層における中間変数、すなわち、階層モデルの入力データである。階層構造は2のべき乗のカスケード型であるため、入力データ点の総数 p は 2^L 個となる。ただし、各入力データ点は重複して用いる事もできるから、 $p \leq 2^L$ となる。

上の説明から分かる様に、GMDHの階層モデルは、 p 個の入力データと1個の出力データ

との関係を記述する1つの関数に過ぎず、GMDHの階層モデル自身は、データ点に付随する時間遅れの問題や1変数・多変数の区別が無い。これらは、もっぱらシステム同定時に使用者が規定する外部条件となる。

(2) 多入力1出力静的モデル



例えば、 p 個の入力データとして p 個の変数 $\{x_1, x_2, \dots, x_p\}$ 、出力に1個の変数(y)を当てはめれば、Fig. 3.4に示す様な p 入力1出力の静的なシステムの同定を行う事に相当し、完全モデルは次の様に記述できる。

$$y_i = f(x_{1i}, x_{2i}, \dots, x_{pi}) + \varepsilon_i \quad (3.10)$$

Fig. 3.4 p -入力・1出力のシステム

ここで、 ε_i は予測誤差、 $i=1, \dots, N$

(3) 多入力1出力動的モデル

一方、 k 入力1出力動特性システムの同定では、入力データの候補として、各変数毎に過去 M 点までの時間遅れを考慮した $\{x_{1t-1}, \dots, x_{1t-M}, \dots, x_{kt-1}, \dots, x_{kt-M}\}$ を用いれば、完全モデルは

$$y_t = f(x_{1t-m_1}, \dots, x_{1t-m_1}, \dots, x_{kt-m_j}, \dots, x_{kt-m_j}) + \varepsilon_t, \quad t=1, \dots, N \quad (3.11)$$

と表現できる。ここで、 $\{m_1, \dots, m_j, \dots, m_1', \dots, m_j'\}$ は、入力データの候補の中から、階層モデルの入力データとして採用された合計 p 個の時間遅れ点である。

この様に、GMDHは種々の形態のデータを同一のメカニズムを用いて処理し、しかも、階層モデルから見れば変数のサンプル値も変数の個々の時間遅れデータ点もみな「変数」である事から、GMDHの論文によっては両者とも変数と呼ばれる事があるので注意を要する。

3.3.5 基礎関数

多入力、1出力のどんな多項式も基礎関数として使えるが、下に説明されるKolmogorov-Gabor型の2次の多項式が一般に用いられる。考えているシステムについてのある事前知識が使える時は、この知識に基づく専用の形の基礎関数を選ぶ方が良い。

式(3.4)のKG式を2次で打ち切った多項式は、 $M \times M$ 個の簡単な関数 g を持つ次の形に書き換えられる。

$$x_t = h_0 + \sum_{i=1}^M h_{1i} x_{t-i} + \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^M h_{2ij} x_{t-i} x_{t-j} \quad (3.12)$$

$$= \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^M g_{ij}(x_{t-i}, x_{t-j}) \quad (3.13)$$

ここで,

$$g_{ij}(x_{t-i}, x_{t-j}) = a_{0ij} + a_{1ij} x_{t-i} + a_{2ij} x_{t-i} x_{t-j} \quad (3.14)$$

関数 g は3つの係数および非対称2入力を持つ。入力 i と j の4つの組合せを加えて、並べ換える事により、係数の数を減らした関数が次の様に導き出される。

$$\begin{aligned} G(z_i, z_j) &= g_{ii}(z_i, z_i) + g_{ij}(z_i, z_j) + g_{ji}(z_j, z_i) + g_{jj}(z_j, z_j) \\ &= c_1 + c_2 z_i + c_3 z_j + c_4 z_i^2 + c_5 z_i z_j + c_6 z_j^2 \end{aligned} \quad (3.15)$$

この関数は、6つの係数と対称2入力を持つKG型の2次多項式である。

この関数を基礎関数として用いる事により、多層を通じて効率的な計算とより高次の項の発生が実現される。

3.3.6 階層モデルのフィッティング

入出力データ $\{x_t, y_t; t=1, \dots, N\}$ が与えられたとき、階層モデルは、次の過程に従って構築される(次ページFig. 3.5を参照)

- 1) 入力データに関するHeuristicsに従ってある数の時間遅れ点 M を選ぶ。(一般には2次の相関関数の絶対値の大きいものから適当な数だけ選ぶ)
- 2) 第1層の場合は入力データ、また第2層以上では計算された中間変数データの全組 (z_i, z_j) ($i, j=1, \dots, M$) に対して、次の局所モデルを用いて基礎関数 G のフィッティングを行う。

$$y_t = G_{ij}(z_i, z_j) + \varepsilon_t, \quad t=1, \dots, N \quad (3.16)$$

- 3) Heuristicsを用いて部分表現の候補として当てはめられた基礎関数 (G_{ij}) をある数選ぶ
- 4) 部分表現の候補 (G_{ij}) から予測値を計算する

$$z_k = G_{ij}(z_i, z_j) \quad (3.17)$$

これが、次の層の中間変数となる(添え字を新しく $k(k=1, \dots)$ とする)

- 5) 2)から4)までの過程を繰り返し、最適層数 L をHeuristicsを用いて選ぶ,

- 6) L層における最良の部分表現から、前層の部分表現を連続的に逆向きに結合することにより、完全表現が構築される。

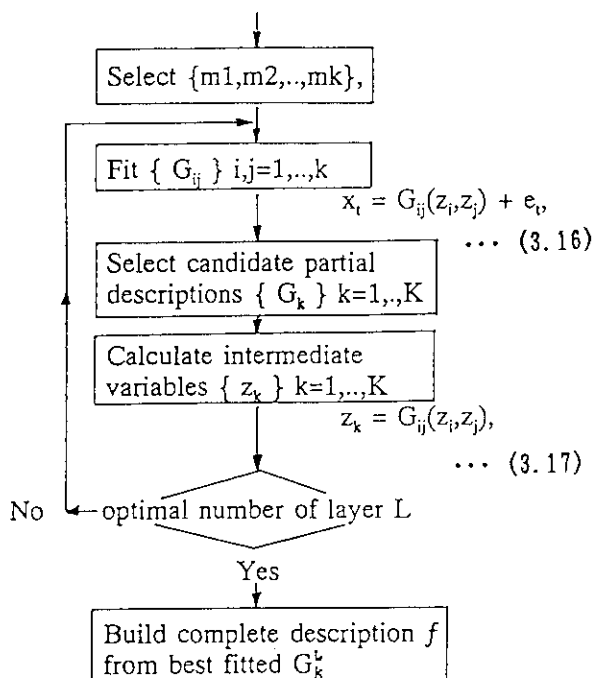


Fig. 3.5 GMDHによる階層モデルの構築手順.

3.3.7 Heuristicsとパラメータ

GMDHによる階層モデルのフィッティングでは、先に述べたように、ある与えられた形の個々の基礎関数に対しては最小2乗解や最尤解を統計的に得ることができるが、それらを結合した階層モデルの理論的最適解は存在せず、GMDH自らが最良の結果を発見していくために、基礎関数形の設定方法や処理途中の情報の取捨選択の基準となるHeuristicsを与える必要がある。

Heuristicsは、一般に次の5種類に分類できる。

- (H-1) データの予備的選択 (遅れ時間点の棄却)
- (H-2) データの分割 (トレーニング用とチェック用への分割)
- (H-3) 基礎関数の形の決定
- (H-4) 基礎関数の候補の選択 (次層の入力データの組合せ数の制限)
- (H-5) 層数(最終層)の決定 (計算の停止)

各Heuristicsは、これまで種々のものが提案されてきたが、以下では主として本論文に採用

されたものについて簡単に説明する。

(1) 基礎関数の結合則

Heuristicsのうち、(H-1)(H-4)(H-5)が基礎関数の結合則である。
GMDHの計算メカニズムでは、入力データの選択や部分表現の選択を行うが、これは、ニューラル・ネットワークの観点から見れば、隣合う層のユニット間の結合経路の重み付けを意味する。GMDHの場合は重みは(1,0)、すなわち、接続か切断である。
本論文では、以下のものを使用した。

- (H-1) 2次の相関関数の絶対値の大きい順に、(時間遅れ点 \times 変数の数)を最大24個残す。
- (H-4) 部分表現の予測誤差(2乗平均値)の小さい順に、24個以下残す。
- (H-5) 各層の最小予測誤差(2乗平均値)を比較し、最初に極小点が現れる層

(2) 基礎関数の関数形の設定

GMDHの骨子となる基礎関数を何にするかは種々のものが提案されている。
通常の階層モデルのフィッティングにおいては、計算開始前にある1つの基礎関数形を与え、これをフィッティング過程の最初から最後まで一貫して使用する。この場合、始めに与えた基礎関数形が適切かどうかは結果を見て評価する以外にはなく、結果が思わしくない時には基礎関数形を試行錯誤的に取り替えながらフィッティング計算を繰り返す必要がある。

一方、基礎関数形を可変としたものも提案されている(近藤(1979)), 斎藤(1981))。これはKolmogorov-Gaborの多項式を基本として、多項式の項数を徐々に増やしていく方法であり、その評価関数としてはAICが用いられている。

本論文では、簡単化のために基礎関数形はフィッティング過程においては固定とした。

- (H-3) システムの構造に関する事前情報が無い場合は、KG型2次多項式を使う。

(3) データの分割

データの分割に関する規範は、階層モデルのフィッティング過程において、基礎関数のパラメータ推定用(トレーニング用)とその評価関数の計算用(チェック用)にデータを分割する際の判定に用いられるもので、この分割操作によってもフィッティングの結果が左右されるという経験則から産み出されたものである。データの分割に関する規範も問題に応じて種々のものが提案されている。しかし、パラメータ推定と評価関数の計算に独立なデータを要しない場合(例えば評価関数にAICを用いたもの等)には、この規範を使う必要はない。

本論文では、簡単化のために、Ivakhnenkoによって初期に提案された次のものを採用する。

- (H-2) データ分割は、観測データの分散値の大小関係を判定の基準とする。
(S/N比の意味で)分散値の大きいグループをトレーニング・データに、
小さいグループをチェック用・データに分割する。

3.3.8 基礎関数の最小2乗解

式(3.16)における各層の各部分表現の係数あてはめは、最小2乗法により為される。例えば基礎関数Gに2次のKG型多項式を使用した場合、部分表現の予測誤差を次のように最小化する事により、

$$e_t \rightarrow \min ; \frac{\partial |y_t - G_{ij}(z_i, z_j)|^2}{\partial (c_1, \dots, c_6)} = 0 \quad (3.18)$$

係数(c₁, ..., c₆)の最小2乗解を与える正規方程式が得られる。

$$C = B^{-1} A \quad (3.19)$$

ここで、ベクトルA、対称行列Bおよび係数ベクトルCは、

$$A = \begin{pmatrix} E(y_t) \\ E(y_t z_t) \\ E(y_t z_j) \\ E(y_t z_t^2) \\ E(y_t z_t z_j) \\ E(y_t z_j^2) \end{pmatrix}, \quad B = \begin{pmatrix} 1 & E(z_t) & E(z_j) & E(z_t^2) & E(z_t z_j) & E(z_j^2) \\ & E(z_t^2) & E(z_t z_j) & E(z_t^3) & E(z_t^2 z_j) & E(z_t z_j^2) \\ & & E(z_j^2) & E(z_t^2 z_j) & E(z_t z_j^2) & E(z_j^3) \\ & & & E(z_t^4) & E(z_t^3 z_j) & E(z_t^2 z_j^2) \\ & * & & & E(z_t^2 z_j^2) & E(z_t z_j^3) \\ & & & & & E(z_j^4) \end{pmatrix}, \quad C = \begin{pmatrix} c_1 \\ c_2 \\ c_3 \\ c_4 \\ c_5 \\ c_6 \end{pmatrix} \quad (3.20)$$

ここで、E()は集合平均、*は対称な要素である。

3.4 基礎関数の統計的意味

ここでは、基礎関数として通常良く使われるKolmogorov-Gabor型の2次多項式の最小2乗解(3.20)式を統計的な視点から検討する(筆者ら(1989)²⁰⁾)。まず、ベクトルAと行列Bの要素は、次の様に書ける。

$$A = \begin{pmatrix} my \\ Ry z_t \\ Ry z_j \\ Ry z_t \cdot t \\ Ry z_t \cdot j \\ Ry z_j \cdot j \end{pmatrix}, \quad B = \begin{pmatrix} 1 & m_i & m_j & R_{i0} & R_{i_k} & R_{j0} \\ & R_{i0} & R_{j-k} & R_{i0,0} & R_{i0,k} & R_{j0,-k} \\ & & R_{j0} & R_{i0,-k} & R_{i_k,k} & R_{j0,0} \\ & * & & R_{i0,0,0} & R_{i0,0,k} & R_{j0,-k,-k} \\ & & & & R_{i0,k,k} & R_{j-k,-k,-k} \\ & & & & & R_{j0,0,0} \end{pmatrix} \quad (3.21)$$

ここで、 $k=i-j$ 、 $\{m_y\}$ は出力 y の平均、 $\{R_{yz_i}, R_{yzz_{i,j}}\}$ は中間変数 z と出力 y の間の2次、3次の相互相関関数、 $\{m_i, R_{i_i}, R_{i_i,j}, R_{i_i,j,k}\}$ は、それぞれ中間変数 z_i に関する平均、2次、3次、4次の自己相関関数、 $\{m_j, R_{j_j}, R_{j_j,i}, R_{j_j,i,k}\}$ は、それぞれ中間変数 z_j に関する平均、2次、3次、4次の自己相関関数である。

行列 B を構成する統計的関数は、時刻 i または j を基準とする表現となっており、ここで表れる時間遅れ点は0および k だけである。ところで、2次、3次、4次の自己相関関数の間には、それぞれ2、6、24通りの対称関係が知られており、異なる2つの時刻 i と j を基準とする関数間だけでも次の関係が成り立つ。

$$R_{i_k} = R_{j_{-k}} \tag{3.22a}$$

$$\begin{aligned} R_{i_{0,k}} &= R_{i_{k,0}} = R_{j_{-k,-k}} \\ R_{i_{k,k}} &= R_{j_{0,-k}} = R_{j_{-k,0}} \end{aligned} \tag{3.22b}$$

$$\begin{aligned} R_{i_{0,0,k}} &= R_{i_{0,k,0}} = R_{i_{k,0,0}} = R_{j_{-k,-k,-k}} \\ R_{i_{0,k,k}} &= R_{i_{k,0,k}} = R_{i_{k,k,0}} \\ &= R_{j_{0,-k,-k}} = R_{j_{-k,0,-k}} = R_{j_{-k,-k,0}} \\ R_{i_{k,k,k}} &= R_{j_{0,0,-k}} = R_{j_{0,-k,0}} = R_{j_{-k,0,0}} \end{aligned} \tag{3.22c}$$

したがって、(3.21)式の行列 B の要素の表現は、その1例に過ぎない。いま、計算の都合の良いように、時間遅れ k を全て正の値にとった場合の表現は、

$$B = \begin{pmatrix} 1 & m_i & m_j & R_{i_0} & R_{i_k} & R_{j_0} \\ & R_{i_0} & R_{i_k} & R_{i_{0,0}} & R_{i_{0,k}} & R_{i_{k,k}} \\ & & R_{j_0} & R_{i_{k,k}} & R_{i_{k,k}} & R_{j_{0,0}} \\ * & & & R_{i_{0,0,0}} & R_{i_{0,0,k}} & R_{i_{0,k,k}} \\ & & & & R_{i_{0,k,k}} & R_{i_{0,0,k}} \\ & & & & & R_{j_{0,0,0}} \end{pmatrix} \tag{3.23}$$

さらに、推定に用いるデータのサンプル数が十分に大きく、推定結果が基準となる時刻に依存しない場合には、各相関関数の添え字 i と j は省くことができ、行列 B の要素は z に関する一般的な統計関数で表せる。

$$B = \begin{pmatrix} 1 & m & m & R_0 & R_k & R_0 \\ & R_0 & R_k & R_{0,0} & R_{0,k} & R_{k,k} \\ & & R_0 & R_{k,k} & R_{k,k} & R_{0,0} \\ * & & & R_{0,0,0} & R_{0,0,k} & R_{0,k,k} \\ & & & & R_{0,k,k} & R_{0,0,k} \\ & & & & & R_{0,0,0} \end{pmatrix} \tag{3.24}$$

式(3.21), (3.24)から, 2次のKG型多項式の最小2乗解に関して次のことが言える。

- 1) 出力に関する情報は3次までの y と z の相互相関関数によって, また入力に関する情報は4次までの z の自己相関関数によって表現される。
- 2) 用いられる時間遅れ点の情報は, $\{0, i, j, k(=i-j)\}$ の4点である。すなわち, 基礎関数の出力 y_t に対する2つの入力点(中間変数) z_i, z_j の遅れ時間 $\{i, j\}$ 以外に, これらの差の遅れ時間 $k(=i-j)$ も考慮される。ただし, 第2層以降では, 中間変数の遅れ時間点の解釈は難しくなる。

3.5 線形自己回帰型階層モデル

今度は, GMDHに基づく線形自己回帰型階層モデルと通常の線形自己回帰モデル(AR)に関する若干の理論的な比較を試みる(筆者ら(1989)²⁰⁾。

一般に, GMDHに基づく階層モデルは, そのパラメトリック表現とシステム構造との関係が明らかでなく, モデルの物理的な解釈が容易でないとわれてきた。その中で, 基礎関数に線形のものを用いた線形階層モデルは, フィッティング過程は見掛け上階層構造を形成するものの, 最終的に得られるモデルは本質的に単層構造となり, ARモデルと良く似ている。一方, ARモデルは最も普及した同定手法の1つであり, そのパラメトリック表現とシステムの構造(物理モデル)との関係も明確である。

そこで, 両モデルを比較することにより, GMDHに基づく階層モデルの物理的解釈を試みる。ここでは1変数の自己回帰モデルを取り扱う。

3.5.1 モデルのフィッティング計算

線形自己回帰(AR)モデルは, 次式で表される。

$$x_t = \sum_{m=1}^M a_m x_{t-m} + \varepsilon_t \quad (3.25)$$

$$= f(x_{t-1}, \dots, x_{t-M}; a_1, \dots, a_M) + \varepsilon_t \quad (3.26)$$

ここで, M はモデルの次数, $\{a_1, \dots, a_M\}$ はAR係数, ε_t は平均値ゼロ, 分散 σ^2 のGauss型白色雑音が仮定される。観測データ $\{x_t; t=1, \dots, N\}$ に対するこのモデルのあてはめは, モデル次数 M を1から順に行い, 最尤推定の意味で最も良い近似が得られるまで, 関数形を拡張していく方法が取られる。モデル次数毎に係数の数と入力データ点の数は1個ずつ増える。

$$\begin{aligned}
 x_t &\sim f_1(x_{t-1}; a_1) \\
 &\sim f_2(x_{t-1}, x_{t-2}; a_1, a_2) \\
 &\quad \vdots \\
 &\sim f_m(x_{t-1}, \dots, x_{t-m}; a_1, \dots, a_m) \\
 &\quad \vdots
 \end{aligned}
 \tag{3.27}$$

ここで、関数 f の添え字 $1 \sim m$ はモデル次数を表す。

次に、GMDHに基づく階層モデルの場合を考える。基礎関数 G は1次のKG多項式

$$G(z_i, z_j) = c_1 + c_2 z_i + c_3 z_j \tag{3.28}$$

を用いる。階層モデルのあてはめは、まず第1層で適当な M 個の遅れデータ点の全組合せ (i, j) ($i=1, \dots, M, j=1, \dots, M$) に対する基礎関数のあてはめから始る。第2層以降は前層の結果を次々と基礎関数に代入して、最も良い近似が得られるまで、関数形を拡張する。層数を1つ増す毎に、係数の数は、 $3, 9(=3+2 \times 3), 21(=3+3 \times 2+3 \times 4), \dots$ と増え、また第1層の入力データ点の数は2のべき乗で増加する。ただし、入力データ点は同じものの重複使用が許される。

$$\begin{aligned}
 x_t &\sim G_{1,1}(x_{t1}, x_{t2}) \\
 &= f_1(x_{t1}, x_{t2}; c_1, \dots, c_3)
 \end{aligned}
 \tag{3.29a}$$

$$\begin{aligned}
 &\sim G_{2,1}(z_{1,1'}, z_{1,2'}) \\
 &= G_{2,1}(G_{1,1'}(x_{t1'}, x_{t2'}), G_{1,2'}(x_{t3'}, x_{t4'})) \\
 &= f_2(x_{t1'}, x_{t2'}, \dots, x_{t4'}; c_{1'}, \dots, c_{9'})
 \end{aligned}
 \tag{3.29b}$$

$$\begin{aligned}
 &\sim G_{3,1}(z_{2,1''}, z_{2,2''}) \\
 &= G_{3,1}(G_{2,1''}(z_{1,1''}, z_{1,2''}), G_{2,2''}(z_{1,3''}, z_{1,4''})) \\
 &= G_{3,1}(G_{2,1''}(G_{1,1''}(x_{t1''}, x_{t2''}), G_{1,2''}(x_{t3''}, x_{t4''})), \\
 &\quad G_{2,2''}(G_{1,3''}(x_{t5''}, x_{t6''}), G_{1,4''}(x_{t7''}, x_{t8''}))) \\
 &= f_3(x_{t1''}, x_{t2''}, \dots, x_{t8''}; c_{1''}, \dots, c_{21''})
 \end{aligned}
 \tag{3.29c}$$

ここで、 $t-1 \geq t_1 > t_2 \geq t-M$
 $t-1 \geq (t_{1'} > t_{2'}), (t_{3'} > t_{4'}) \geq t-M$
 $t-1 \geq (t_{1''} > t_{2''}), \dots, (t_{7''} > t_{8''}) \geq t-M$

通常のARモデルとGMDHから得られる階層モデルの違いは、次の通り。

- (1) 通常のARモデルは取り込む入力データ点の時間遅れが連続しているのに対して、階層モデルでは不連続となる可能性がある。
- (2) 線形の階層モデルは、計算効率が悪くなる。

3.5.2 基礎関数の係数とAR係数

2次のKG型多項式の係数を与える正規方程式は、次の通り。

$$C = B^{-1} A \quad (3.30a)$$

ここで、ベクトルA、対称行列Bおよび係数ベクトルCは、

$$A = \begin{pmatrix} mx \\ Rxz_i \\ Rxz_j \end{pmatrix}, \quad B = \begin{pmatrix} 1 & m & m \\ & R_0 & R_k \\ & * & R_0 \end{pmatrix}, \quad C = \begin{pmatrix} c_1 \\ c_2 \\ c_3 \end{pmatrix}. \quad (3.30b)$$

ただし、 $k=i-j$ 、 $\{m, R_i\}$ は中間変数 z の平均、2次の自己相関関数、 mx は観測データ x の平均、 $\{Rxz_i\}$ は x と z の相互相関関数である。観測データ x の平均値を0とすると、係数は

$$\begin{aligned} c_1 &= 0 \\ c_2 &= \frac{Rxz_i R_0 - Rxz_j R_k}{R_0^2 - R_k^2} \\ c_3 &= \frac{Rxz_j R_0 - Rxz_i R_k}{R_0^2 - R_k^2} \end{aligned} \quad (3.31)$$

と求まり、第1層で、 $i=t-1, j=t-2$ とした場合は、特別に、モデル次数が2のARモデルの係数と完全に一致することが分る。

3.5.3 完全表現とARモデルの関係

GMDHによって線形自己回帰階層モデルをフィッティングした結果、層数 K の次の完全表現が得られたとする。

$$\begin{aligned} X_t &= G_{K,1}(Z_{K-1,1}, Z_{K-1,2}) + \varepsilon_t \\ &= f_K(X_{t1}, X_{t2}, \dots, X_{tn}; c_1, \dots, c_m) + \varepsilon_t \end{aligned} \quad (3.32)$$

ここで、 n は入力データ点の数、 m は係数の数で、それぞれ、

$$\begin{aligned} n &= 2^K \\ m &= 3 + 3 \times 2^1 + 3 \times 2^2 + \dots + 3 \times 2^{K-1} \end{aligned} \quad (3.33)$$

ある。層数の増加とともに、入力データ点の数は2のべき乗で増加し、また係数の数は2のべき以上の速さで増加する。しかし、このモデルは本来線形結合であるから、係数は $3 \times 2^{K-1}$ 個にまとめられ、さらに0次項は1個にまとめられるから、係数の数は $m=n+1$ となる。また、入力データ

点は重複使用が許されているから、独立なデータ点の数は、 2^k 個以下となる。これを今 p 個とすると、式(3.32)は、次の形に変換できる。

$$x_t = f_K(x_{t-t_1}, x_{t-t_2}, \dots, x_{t-t_D}; c_0, c_1, \dots, c_D) + \varepsilon_t \quad (3.34)'$$

$$= c_0 + \sum_{i=1}^D c_i x_{t-t_i} + \varepsilon_t \quad (3.34)$$

時間遅れ点 $\{x_{t-t_1}, x_{t-t_2}, \dots, x_{t-t_D}\}$ の中で、最大の遅れのものを x_{t-M} とし、係数を時間の順序に並べ変え、欠けている時間遅れ点に対応する係数を0と置き、記号を $\{a_i\}$ と書き直せば、モデル次数 M のARモデルが得られる。

$$x_t = a_0 + \sum_{i=1}^M a_i x_{t-i} + \varepsilon_t \quad (3.35)$$

通常のARモデルと異なる点は、最尤推定でないこと、不連続点があることである。

3.6 非線形自己回帰型階層モデルの同定

ここでは、GMDHで非線形自己回帰モデルを同定する場合、基礎関数の係数と自己回帰係数がどのような対応を見せるかについて検討する(筆者ら²²⁾)。

3.6.1 2次のKG多項式

Fig. 3.6の1変数非線形自己回帰過程で作られる信号 $\{x_t\}$ を考える。

$$x_t = a_0 + \sum_{i=1}^M a_{1i} x_{t-i} + \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^M a_{2ij} x_{t-i} x_{t-j} + \dots + \varepsilon_t \quad (3.36)$$

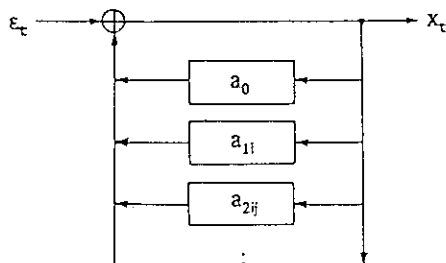


Fig. 3.6 非線形自己回帰モデル.

ここで、 $a_0, \{a_{1i}\}, \{a_{2ij}\}, \dots$ は自己回帰係数であり、 ε_t はGauss型白色雑音である。

このシステムの同定にGMDHを適用する。このシステムを近似する階層モデルは、 k 個の任意の時間遅れデータ点 $\{x_{t-m_1}, \dots, x_{t-m_k}\}$ を用いて、次の様に表される。

$$x_t = f(x_{t-m_1}, \dots, x_{t-m_k}) + \varepsilon_t \quad (3.37)$$

もし、システムが2次までの非線形項を含み、

最大時間遅れMが2である場合、GMDHの基礎関数にKolmogorov-Gabor型の2次の多項式

$$G(z_1, z_2) = c_1 + c_2 z_1 + c_3 z_2 + c_4 z_1^2 + c_5 z_1 z_2 + c_6 z_2^2 \quad (3.38)$$

を用い、第1層において入力を $\{x_{t-1}, x_{t-2}\}$ とする部分表現が同定され、しかも最適層が第1層と決定されれば、もとのシステムは完全に同定できる事になる。

$$\begin{aligned} x_t &= G(x_{t-1}, x_{t-2}) + \varepsilon_t \quad (3.39) \\ &= c_1 + (c_2 x_{t-1} + c_3 x_{t-2}) + (c_4 x_{t-1}^2 + c_5 x_{t-1} x_{t-2} + c_6 x_{t-2}^2) + \varepsilon_t \\ &= a_0 + (a_{11} x_{t-1} + a_{12} x_{t-2}) + (a_{211} x_{t-1}^2 + [a_{212} + a_{221}] x_{t-1} x_{t-2} + a_{222} x_{t-2}^2) + \varepsilon_t \end{aligned}$$

次に、第2層の場合を考える。

$$\begin{aligned} G(z_1, z_2) &= c_1 + c_2 z_1 + c_3 z_2 + c_4 z_1^2 + c_5 z_1 z_2 + c_6 z_2^2 \\ z_1 = G_1(x_1, x_2) &= c_7 + c_8 x_1 + c_9 x_2 + c_{10} x_1^2 + c_{11} x_1 x_2 + c_{12} x_2^2 \quad (3.40) \\ z_2 = G_2(x_3, x_4) &= c_{13} + c_{14} x_3 + c_{15} x_4 + c_{16} x_3^2 + c_{17} x_3 x_4 + c_{18} x_4^2 \end{aligned}$$

このとき、これを展開すると、0次～3次までは全部の項が、また4次は全組合せの半分以上の項(35項のうち19項)が発生する。

$$G(z_1, z_2) = (0 \text{ 次項}=1) + (1 \text{ 次項}=4) + (2 \text{ 次項}=10) + (3 \text{ 次項}=20) + (4 \text{ 次項}=19) \quad (3.41)$$

0次項

$$+(c_1 + c_2 c_7 + c_3 c_{13} + c_4 c_7^2 + c_5 c_7 c_{13} + c_6 c_{13}^2) \quad (3.41a)$$

1次項

$$\begin{aligned} &+(c_2 c_8 + 2c_4 c_7 c_8 + c_5 c_8 c_{13}) x_1 \\ &+(c_2 c_9 + 2c_4 c_7 c_9 + c_5 c_9 c_{13}) x_2 \quad (3.41b) \\ &+(c_3 c_{14} + c_5 c_7 c_{14} + 2c_6 c_{13} c_{14}) x_3 \\ &+(c_3 c_{15} + c_5 c_7 c_{15} + 2c_6 c_{13} c_{15}) x_4 \end{aligned}$$

2次項

$$\begin{aligned} &+(c_2 c_{10} + 2c_4 c_7 c_{10} + c_4 c_8^2 + c_5 c_{10} c_{13}) x_1^2 \\ &+(c_2 c_{12} + 2c_4 c_7 c_{12} + c_4 c_9^2 + c_5 c_{12} c_{13}) x_2^2 \quad (3.41c) \\ &+(c_3 c_{16} + c_5 c_7 c_{16} + 2c_6 c_{13} c_{16} + c_6 c_{14}^2) x_3^2 \\ &+(c_3 c_{18} + c_5 c_7 c_{18} + 2c_6 c_{13} c_{18} + c_6 c_{15}^2) x_4^2 \\ &+(c_2 c_{11} + 2c_4 c_7 c_{11} + 2c_4 c_8 c_9 + c_5 c_{11} c_{13}) x_1 x_2 \\ &+(c_5 c_8 c_{14}) x_1 x_3 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
&+(c_5c_8c_{15}) X_1X_4 \\
&+(c_5c_9c_{14}) X_2X_3 \\
&+(c_5c_9c_{15}) X_2X_4 \\
&+(c_3c_{17} + c_5c_7c_{17} + 2c_6c_{13}c_{17} + 2c_6c_{14}c_{15}) X_3X_4
\end{aligned}$$

3次項

$$\begin{aligned}
&+(2c_4c_8c_{10}) X_1^3 \\
&+(2c_4c_9c_{12}) X_2^3 \\
&+(2c_6c_{14}c_{15}) X_3^3 \\
&+(2c_6c_{15}c_{18}) X_4^3 \\
&+(2c_4c_8c_{11} + 2c_4c_9c_{10}) X_1^2X_2 \\
&+(c_5c_{10}c_{14}) X_1^2X_3 \\
&+(c_5c_{10}c_{15}) X_1^2X_4 \\
&+(2c_4c_8c_{12} + 2c_4c_9c_{11}) X_2^2X_1 \\
&+(c_5c_{12}c_{14}) X_2^2X_3 \\
&+(c_5c_{12}c_{15}) X_2^2X_4 \\
&+(c_5c_8c_{16}) X_3^2X_1 \\
&+(c_5c_9c_{16}) X_3^2X_2 \\
&+(2c_6c_{14}c_{17} + 2c_6c_{15}c_{16}) X_3^2X_4 \\
&+(c_5c_8c_{18}) X_4^2X_1 \\
&+(c_5c_9c_{18}) X_4^2X_2 \\
&+(2c_6c_{14}c_{18} + 2c_6c_{15}c_{17}) X_4^2X_3 \\
&+(c_5c_{11}c_{14}) X_1X_2X_3 \\
&+(c_5c_{11}c_{15}) X_1X_2X_4 \\
&+(c_5c_8c_{17}) X_1X_3X_4 \\
&+(c_5c_9c_{17}) X_2X_3X_4
\end{aligned} \tag{3.41d}$$

4次項

$$\begin{aligned}
&+(c_4c_{10}^2) X_1^4 \\
&+(c_4c_{12}^2) X_2^4 \\
&+(c_6c_{16}^2) X_3^4 \\
&+(c_6c_{18}^2) X_4^4 \\
&+(2c_4c_{10}c_{11}) X_1^3X_2 \\
&+(2c_4c_{11}c_{12}) X_2^3X_1 \\
&+(2c_6c_{16}c_{17}) X_3^3X_4 \\
&+(2c_6c_{17}c_{18}) X_4^3X_3 \\
&+(2c_4c_{10}c_{12} + c_4c_{11}^2) X_1^2X_2^2 \\
&+(c_5c_{10}c_{16}) X_1^2X_3^2
\end{aligned} \tag{3.41e}$$

$$\begin{aligned}
& + (C_5 C_{10} C_{18}) X_1^2 X_4^2 \\
& + (C_5 C_{12} C_{16}) X_2^2 X_3^2 \\
& + (C_5 C_{12} C_{18}) X_2^2 X_4^2 \\
& + (2C_5 C_{16} C_{18} + C_5 C_{17}^2) X_3^2 X_4^2 \\
& + (C_5 C_{10} C_{17}) X_1^2 X_3 X_4 \\
& + (C_5 C_{12} C_{17}) X_2^2 X_3 X_4 \\
& + (C_5 C_{11} C_{16}) X_3^2 X_1 X_2 \\
& + (C_5 C_{11} C_{18}) X_4^2 X_1 X_2 \\
& + (C_5 C_{11} C_{17}) X_1 X_2 X_3 X_4
\end{aligned}$$

(3.36)式に従う非線形システムは、最大時間遅れMが4の場合でも、推定すべき係数の数は、3次までの非線形項を含む場合には35個、4次までの場合には70個となる事からも分かる様に、システムがさらに高次の項を含むとか、最大遅れ時間点Mがもっと大きい場合には、一般に同定されるモデルの近似の度合いも悪くなる。

しかし、上に挙げた2次のKG多項式を用いた層数2のモデル・フィッティングの例では、推定すべきモデル係数の合計数は高々18個であるが、合計54項を発生することができ、特に0次～3次までは全部の項が、また4次は全組合せの半分以上の項(35項のうち19項)が発生できる事が分かった。入力データ点の組 (x_1, x_2) , (x_3, x_4) が、 (x_{t-1}, x_{t-2}) , (x_{t-3}, x_{t-4}) に対応する場合には、原理的には、3次については完全に同定でき、また4次の非線形システムについてもある程度は、近似できる事になる。しかも係数のフィッティングは、部分表現毎に少数の係数に対して行うことから、推定精度も直接的な方法に比べると勝っているといわれている。

しかし、ここで注意すべきは、54個の係数を(3.40)式の18個の係数で表すため、展開した各項の係数は互に従属関係にあるという点である。この事は、計算効率が高まる半面、自由度が減少し、最適な結果を導くためのHeuristicsの設定(如何に部分表現を選択するか、最も寄与している項は何か、など)が重要になってくる事を意味している。

3.6.2 1次+3次多項式

次に、(3.36)式に従った3次の非線形システムの同定を考える(筆者ら²²⁾)。

GMDHの基礎関数として、2次のKG多項式を用いてモデルをフィッティングした場合、前節で見たように、層を重ねると多量の非線形項を発生し、層数2で3次の非線形項は入力点の全組合せを完全にカバーする。したがって、これを使用すれば十分あてはめができるように見える。しかし、この場合、基礎関数は0～2次だけから構成されるから、第1層の各係数は3次の非線形項とは無関係な方向でフィッティングされるため、全体的な精度の悪化は避けられない。さらに、第2層の基礎関数のフィッティングでは、3次の非線形項の重みは54項のうちの少数派であるために、予測誤差の2乗平均を最小とするフィッティング方法では、悪条件が重なる。実際、筆者らは、この関数を用いて3次の非線形システムのフィッティングを試みたがうまくいかなかった。この形式の関数は、2のべき乗型の非線形システムにむいている。

解析対象のシステムの特徴が事前に分かっている場合には、この情報を積極的に利用し(ここでは、基礎関数の形に盛り込んで)、フィッティングの結果を最適なものに導く事ができるのも、GMDHの1つの特徴である。

ある種の非線形システムは、1次の線形項と3次の非線形項が重要であり、2次ならびに4次以上の非線形項は考慮しないでも良い場合がある(この例は4章に述べる)。この様な場合、基礎関数として、第1層では1次の線形項および3次の非線形項から成る(3.42)式の関数が使用できる。また第2層以降には、線形項だけからなる(3.43)式を使えば、第2層以降では(3.42)式の並列型となり余分な高次の非線形項は発生しない。

$$G(Z_1, Z_2) = c_0 + c_1 Z_1 + c_2 Z_2 + c_3 Z_1^3 + c_4 Z_2^3 \quad (3.42)$$

$$G(Z_1, Z_2) = c_0 + c_1 Z_1 + c_2 Z_2 \quad (3.43)$$

3.7 階層モデルを用いた解析手法

非線形システムの同定や解析への実際的な応用に際して、GMDHに基づく階層モデルのモデル表現や係数の直接的な使用は難しい。というのは、階層モデルをシステムの物理モデルに関係付ける一般的規則がほとんど知られてないからである。だから、その応用は、通常、システムを「ブラック・ボックス」として取り扱える信号予測の問題に限られている。ここでは炉雑音解析の視点で階層モデルを用いた解析手法を提案する(筆者ら(1991)^{21, 22)}。

3.7.1 予測

従来、GMDHによって得られた階層モデルは盛んに予測の問題に適用された。ここでは、予測、特に1点予測について述べる。システムを近似する階層モデルとして、k個の時間遅れデータ点 $\{x_{t-m_1}, \dots, x_{t-m_k}\}$ によって記述される次の1変数自己回帰型の非線形モデルが得られているとする。

$$x_t = f(x_{t-m_1}, \dots, x_{t-m_k}) + \varepsilon_t \quad (3.44)$$

このモデルに $\{x_{t-m_1}, \dots, x_{t-m_k}\}$ の観測値を与え、 ε_t をゼロに置けば、時刻tにおける信号xの値 x_t の1点予測は(3.45a)式で計算できる。予測誤差 ε_t は、(3.45b)式によって与えられる。

$$\hat{x}_t = f(x_{t-m_1}, \dots, x_{t-m_k}) \quad (3.45a)$$

$$\varepsilon_t = x_t - \hat{x}_t \quad (3.45b)$$

GMDHの階層モデルのあてはめは、予測誤差の2乗平均最小という見地から行っているから、モデルの近似が良ければ、予測誤差系列 $\hat{\varepsilon}_t$ はGauss型白色雑音に近づくはずである。逆に、予測誤差系列の統計的性質を調べることにより、モデルのあてはめの良さを判定することもできる。

3.7.2 階層モデルを用いた信号シミュレーション

一旦階層モデルが得られれば、モデルをGauss型白色雑音によって駆動することにより信号のシミュレーションができる。例えば、式(3.44)の場合、データ点 $\{x_{t-m_1}, \dots, x_{t-m_k}\}$ のうち、最も過去の値から x_{t-1} までの初期値をゼロと置き、雑音源 ε_t に平均ゼロ、分散 σ^2 のGauss型白色雑音を印加すれば、 $t \geq 1$ 以降の信号 x_t がシミュレーションできる。

シミュレーションでは、白色雑音の分散 σ^2 はモデルの残差共分散とおなじ大きさにすべきである。残差共分散は階層モデルのフィッティング時に得られる。この値は注意が必要である。線形モデルでは、システムの入出力は比例関係にあるから、信号振幅のスケールリングは自由にできる。モデル・フィッティングの前に観測データのスケールリングを行っても良いし、信号シミュレーションで駆動雑音の振幅を適当にスケールリングしても良い。スケールリングのゲインだけを押えておけば、事後に換算が可能である。

しかし、非線形モデルにおける駆動雑音の分散(振幅)は特別な意味を持っている。モデルのフィッティングは、与えられた観測データの振幅の範囲を良く近似するように行われるから、非線形モデルの場合には、振幅の有効範囲というものが存在し、取り扱える信号振幅の値に制限がある。このため、モデルの残差共分散以上の値を持つ雑音で駆動すると計算の発散を起こす。さらに、Gauss型白色雑音の場合は、高振幅の信号波形が出現する確率はゼロで無いから、長時間のシミュレーションを行うと発散する恐れがある。このためシミュレーションのために印加する雑音には、適当な振幅制限を施す必要がある。

一旦、シミュレーション・データが得られれば、種々の統計的方法による解析を通じてモデルの特性を確かめることが可能であるし、スペクトル解析なども行うことができる。

3.7.3 非線形インパルス応答関数の推定

線形自己回帰モデルの場合、各変数間に存在するサブシステムや各変数に付随する白色雑音の有色過程に関するインパルス応答関数が推定でき、これにより、周波数応答関数やパワースペクトル等の推定を通じて、システムに関する種々の有益な解析が行われている(赤池ら(1971)²³⁾など)。

一方、(3.6)式の非線形自己回帰モデルでは、例え1変数であっても、そのモデルが持つ非線形項の次数に応じて同数の非線形インパルス応答関数 $\{h_{11}\}, \{h_{21}\}, \dots$ が考えられ、しかも、時間遅れ変数が2以上の関数は項数が爆発的に増加する。例え同定に成功しても、非線形インパルス応答関数や、それから推定される高次の周波数応答関数と高次のスペクトルの計算処理上の取り扱いやその物理的な解釈は至難の技である。まして、GMDHにより同定される

階層モデルは、大胆な近似モデルであるから、前節に挙げた様な低次の場合の例外を除けば、個々の非線形インパルス応答関数 $\{h_{1t}\}, \{h_{2t}\}, \dots$ を全て完全に推定する事は原理的に不可能である。

しかし、システム同定の目的が個々の非線形インパルス応答の同定にあるのではなく、システム全体の非線形性を解析する事にあるのであれば、以下の実験的な方法によって、1つのインパルス入力に対するシステム全体の応答を近似的に評価できる(筆者ら(1991)²¹⁾)。

(1) インパルス応答の推定

1 変数線形自己回帰モデル

$$x_t = \sum_{i=1}^M a_i x_{t-i} + \varepsilon_t \quad (3.46)$$

においては、雑音源 ε_t から x_t に対するインパルス応答関数 h_t は、雑音源 ε_t に単位インパルス(+1)を時刻 $t=0$ に入力する事により、計算できる事が知られている(赤池ら(1971)²³⁾ など)。

$$h_t = \sum_{i=1}^M a_i h_{t-i} \quad (t > 0) \quad (3.47)$$

ここで、 $h_t=0(t < 0)$, $h_t=1(t=0)$ 。この例に習って、GMDHによる階層モデルの場合もある種のインパルスを入力する事により、同様の計算が可能である。計算手順は、極く簡単で、得られた階層モデルの表現(3.44)式の入力データ点 $\{x_{t-m_1}, \dots, x_{t-m_k}\}$ の初期値を全て0にして置き、時刻 $t=0$ の ε_t にあるインパルス投入し、 $t > 0$ における出力 x_t を逐次計算するだけで良い。

$$h_t = f(h_{t-m_1}, \dots, h_{t-m_k}) \quad (3.48)$$

ここで、 $h_t=0(t < 0)$, $h_t=+1, 0, -1(t=0)$ 。上式で求まるインパルス応答関数は、唯一つの時間遅れ変数 t で非線形システムの全体の応答を記述する関数になる。これを便宜上、非線形インパルス応答関数と名付ける。

(2) 振幅のスケーリング

ここで注意すべきは、入力すべきインパルスの大きさである。線形システムでは、信号振幅はあらゆる入力レベルに対して比例関係にあるから、+1の単位インパルスを入力すればすべてが分る。一方、非線形システムの応答は、入力信号の振幅の大きさや符号に依存し、異なるインパルス入力に対して常に異なる応答を見せるというやっかいな話が残っている。

しかし、この問題は、信号振幅のスケーリングと関係しており、GMDHによるモデル同定に際して、フィッティングすべき各変数の時系列データを、その標準偏差が単位振幅(+1)近辺にスケーリングされていれば、得られた階層モデルの有効振幅レンジは(-1, +1)近辺となり、入力インパルスの大きさは1としても、ある程度のシステムの特性は表す事ができる。

実際、本研究では入力インパルスとして、+1, 0, -1の3つを使用した。0は、インパルスが存在しない場合であるが、自動振動系のモデリングでは、外力に無関係に振動を始め、時間の

経過とともに振動の発展が見られる。これらのインパルス応答関数を、本論文では便宜上、正側、負側およびゼロ励起の非線形インパルス応答関数と呼ぶ事にする。

3.7.4 非線形周波数応答関数とパワースペクトルの推定

インパルス応答関数が求まれば、周波数応答関数を計算する事ができ、パワースペクトルも求まる。一般に、非線形インパルス応答関数 $\{h_{1,i}\}$, $\{h_{2,i}\}$, ... から求まる非線形周波数応答関数は、時間遅れ変数の数に対応した多重 Fourier 変換が必要で、計算も、またその解釈も困難になる。しかし、前節に定義した全体の特性を表す非線形インパルス応答関数 $\{h_i\}$ は、時間遅れが 1 変数であるため、これから周波数応答関数を計算するとすれば Fourier 変換 F は t に関して 1 回だけ実施できる。

$$\begin{aligned} h_t^{+1} &= F(h_t^{+1}) \\ h_t^{-1} &= F(h_t^{-1}) \end{aligned} \quad (3.49)$$

すなわち、1 回の Fourier 変換で得られるものは、通常の線形の周波数応答関数である。しかし、その基となる非線形インパルス応答関数は、ある特定のインパルスで非線形モデルを励起した結果であり、その周波数応答関数も、投入インパルスに対応した非線形情報を含んでいる。したがって、この関数は線形の場合の手順で簡単に計算できるにも関わらず、システムの非線形情報を得ることができ、また解釈も容易である。この意味から、これらの関数を通常の線形周波数応答関数と区別して、ここでは、正側および負側の入力インパルスに対する非線形インパルス応答関数から計算したものを、それぞれ、正側および負側の非線形周波数応答関数と呼ぶ事にする。

それぞれの場合の線形パワースペクトルは、システムの入力と見なされる残差 ε_i を、平均 0、分散 σ^2 の Gauss 型白色雑音と仮定すれば、次式で計算できる。

$$\begin{aligned} P_t^{+1} &= |h_t^{+1}|^2 \sigma^2 \Delta t \\ P_t^{-1} &= |h_t^{-1}|^2 \sigma^2 \Delta t \end{aligned} \quad (3.50)$$

ここで、 Δt はサンプリング時間間隔

これらも線形スペクトルであるが、先の非線形周波数応答関数と同じ意味から、それぞれ正側および負側の非線形パワースペクトルと呼ぶ事にする。

3.8 むすび

本章では、非線形システムの同定法の 1 つである GMDH を概観し、統計的同定法やニューラルネットワークとの関連性、GMDH の概要と階層モデルについて述べた。

次に、GMDHに良く使用されるKolmogorov-Gabor型の2次多項式の最小2乗解の統計的意味、および線形自己回帰型階層モデルと通常の線形自己回帰モデルの関係を明らかにした。さらに、非線形自己回帰型階層モデルの係数について考察した。

最後に、GMDHを非線形自己回帰型階層モデルの同定に適用した場合の応用解析法として、階層モデルから、系の全体的な応答特性を近似する非線形インパルス応答関数の推定法、さらに、これに基づく非線形周波数応答関数および非線形パワースペクトルの推定法を提案した。

ここで提案した非線形インパルス応答関数ならびに非線形パワースペクトルは、従来「ブラック・ボックス」として多く扱われてきたGMDHに基づく非線形階層モデルに、少し明りを灯し、基礎関数の係数の数値的フィッティングに視覚的な情報を提供する手段として、非線形系の同定と解析に多少なりとも役立つものと思われる。これらの具体的な応用例については、4章、5章に述べる。

4. PWR炉心槽の異常振動のモデリング —確率ダフニング方程式の同定—

4.1 はじめに

炉内構造物の冷却材流動による振動の典型的な例として、加圧水型原子炉(PWR)の炉心槽振動(コア・バレル・モーショ)が挙げられる。PWRの円筒状炉心槽の上部には凸縁があって压力容器の上部の凹縁で支持され、吊り下がっている。压力容器の上部のノズルから注入された1次冷却水は、压力容器と炉心槽の隙間を通過して、压力容器の最下部に回り、炉心槽下側から炉心に流入する。この際、冷却水の流動により炉心槽が振子になって不規則振動を起こすことがある。これが炉心槽振動である。

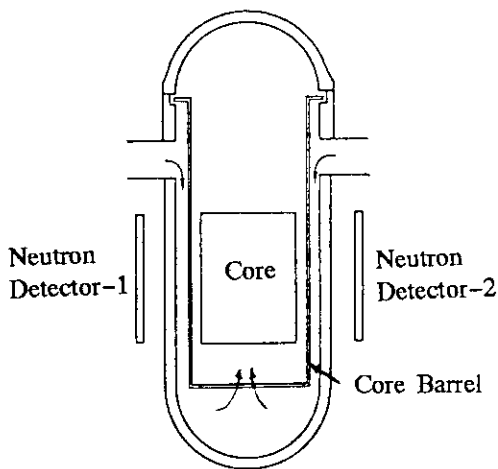


Fig. 4.1 PWRの炉心槽と中性子検出器

ここで、炉心槽の振動が自由な振り子運動であるうちは線形の領域であるが、何かの原因で機械的な止り機構が働き振り子振動が運動途中で妨げられると、非線形振動となる。この振動の状態は炉心内構造物のいずれかが衝突を起こしていることに相当し、摩耗や疲労が大きくなり、異常な状態である。この炉心槽の異常振動を微分方程式でモデル化したものに、確率Duffing方程式を用いたもの(Konno(1986, 1989)²⁻³⁾がある。

この章では、この確率Duffing方程式による炉心槽振動モデルを用いて、非線形振動雑音データを人工的につくり、GMDHに基づく階層モデルによる解析を試み、その有効性を実証する。

この振動自体は、通常の場合、線形振動として扱うことができ、またその測定や解析も容易である。例えば、炉心を挟んで両側にある2つの炉外中性子検出器のゆらぎは、その中間に位置する炉心が検出器方向に振動している場合には、強い相関を持つけれども、位相は逆になっているはずである。実際、Fryら(1974)は、米国のPalisades炉で測定された2組の中性子ゆらぎのコヒーレンス解析を行い、0.1~3Hzの周波数帯域でコヒーレンスはほぼ1であるのに、位相が180度異なっている例を示した¹⁾。今日では炉心槽の振動に関しては、様々な測定と解析が知られている。

ところで、炉心槽の振動が自由な振り子運動であるうちは線形の領域であるが、何かの原因で機械的な止り機構が働き振り子振動が運動途

4.2 PWRにおける異常炉心槽振動

4.2.1 Palisades炉における異常炉心槽振動

加圧水型原子炉(PWR)の炉心槽の支持端での固定力が弱いために生じた異常炉心槽振動(パネ要素の破壊)は、1973年の始めに米国のPalisades炉で確認された(Fryら(1974), Thie(1975)⁴¹⁾)。この炉では、炉心槽の振動は1.6Hzに共振ピークを持ち、その振幅分布の標準偏差は0.6%程度であるが、機械的な止り機構が働くので、非Gauss性になり、歪み、とがりを持つことが分った。炉外中性子検出器の出力ゆらぎの振幅は、正符号側に不規則な跳躍を見せている(Fig. 4.2(a), (b))。加速度計信号を見ると、跳躍と加速度信号のピークが同期しているのが分った。炉心槽支持部の修理後、ゆらぎの確率分布関数(Fig. 4.2(c))はGauss型にもどった。

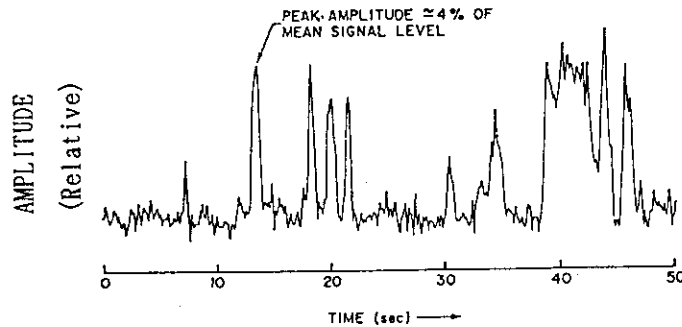


Fig. 4.2(a) Palisades炉における炉心槽異常振動時の炉雑音(その1)(Fry et al. (1974)¹⁾)

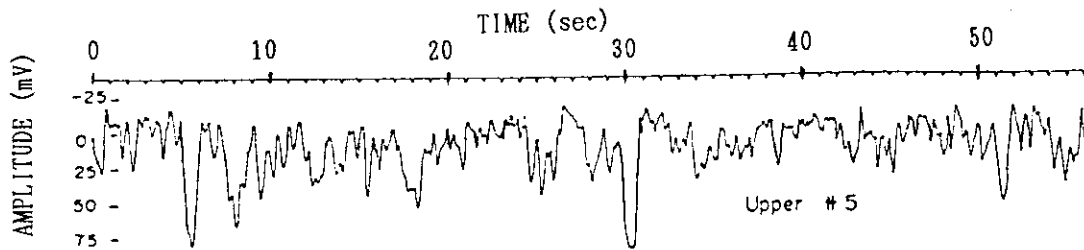


Fig. 4.2(b) Palisades炉における炉心槽異常振動時の炉雑音(その2)(Thie et al. (1975)⁴¹⁾)

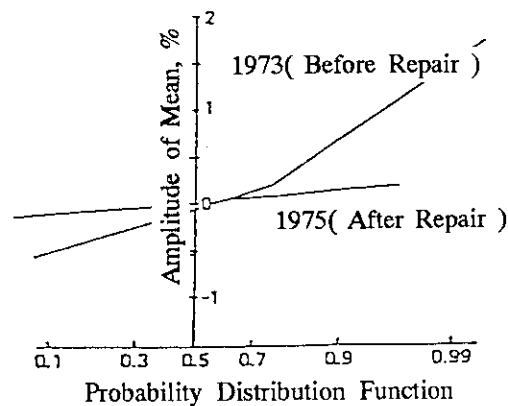


Fig. 4.2(c) Palisades炉雑音の確率分布関数(異常時と正常時)(Thie et al. (1975)⁴¹⁾)

この振動現象は、雑音解析によって、振動ゲイン δx と炉外中性子束検出器の位置の相対的中性子束ゆらぎ $\delta J/J$ が比例関係にあることが確認され、その後、炉心と圧力容器のギャップ水の変動から生じる中性子透過率の変化に関する実験と理論研究から、今日一般的に用いられる近似式が導かれた。

$$\frac{\delta J}{J} = \delta i = 0.15 \delta x \quad (4.1)$$

4.2.2 WWER-440型炉における異常炉心槽振動

1985年、旧東ドイツのBruno Leuschner-2炉で異常炉心槽振動が現れた(Liewersら(1988, 1989)⁵⁻⁶⁾)。この炉は、ソ連製のWWER-440型PWRで、本来炉心槽は原子炉圧力容器の下部付近に8本のガイド・ラグで固定されており、振動が知られているWesting-House社のPWRなどとは構造を異にしており、炉心槽振動は起きないはずであった。しかし、炉心は、炉心槽内側の「炉心バスケット」に在り、振動が可能な構造をしていたのである。炉外中性子検出器J12LとJ19Lの2つが正常時の7~8倍大きい振幅の炉雑音を観測し、振幅はそれぞれ正側および負側に偏りを持ち、非線形性を帯びていた。(Fig. 4.3)

この炉には、対角的な位置に炉外中性子検出器は配置されておらず、振動の監視には異なる角度の位置関係にある2組の検出器信号を角度変換し、炉心槽の質点の位置運動の軌跡をx-y軸の幾何平面に描くという面白い方法を開発し、用いている。

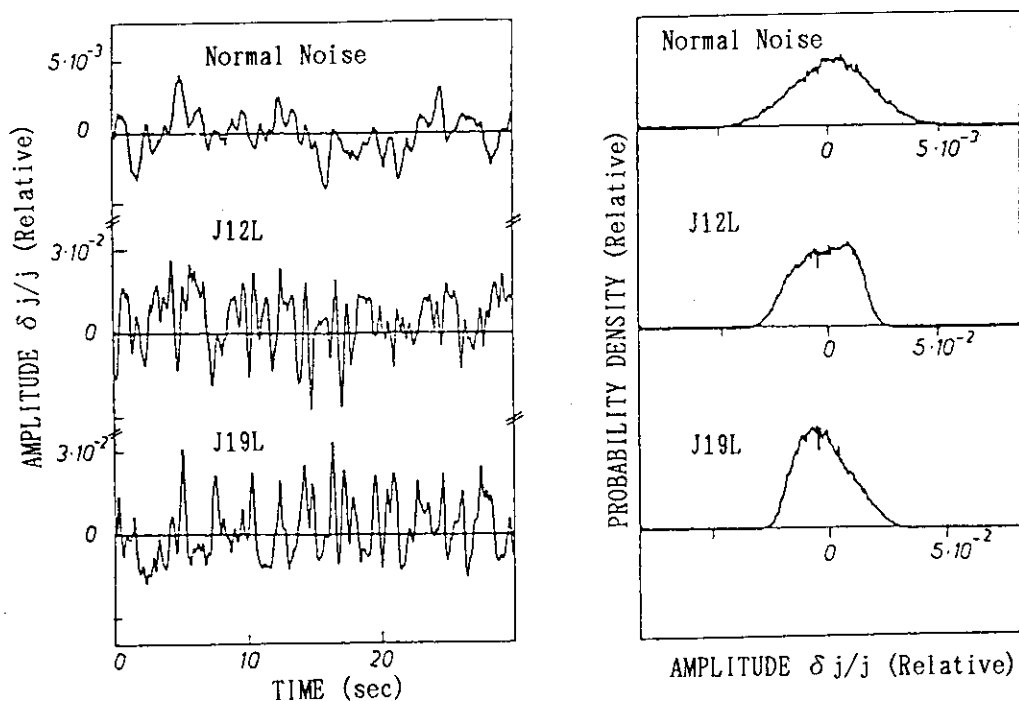


Fig. 4.3 Bruno Leuschner-2炉の異常炉心槽振動時の炉雑音と確率密度関数 (Liewers et al. (1988)⁵⁾)

4.2.3 異常炉心槽振動のモデル化

原子炉上部から吊り下げられた炉心槽振動の簡単な物理モデルとして、構造物の形状を無視して1質点系として祖視化した、Duffing方程式と呼ばれる微分方程式で表される次の様な1次元非線形振動モデルを考える(Konno(1986)²⁾)。

$$\frac{d^2x(t)}{dt^2} + k \frac{dx(t)}{dt} + \frac{\partial V(x)}{\partial x} = f_x(t) \quad (4.2)$$

ここで、 $x(t)$ は時刻 t における質点の位置、 k は減衰係数、 $f_x(t)$ は質点に与えられる外力である。また $V(x)$ は $x(t)$ の実効非線形ポテンシャルで、次式で表される。

$$V(x) = A_0 + \sum_{i=1}^n \frac{A_i}{i} x^i \quad (4.3)$$

$$= A_0 + A_1 x + (A_2/2)x^2 + \dots + (A_n/n)x^n$$

外力 $f_x(t)$ は、不規則な場合には揺動力と呼ばれ、(4.2)式は確率微分方程式となる。揺動力 $f_x(t)$ は、一般に非白色雑音であるが、低周波領域では白色雑音と仮定しても差し支えなく(Paidosis(1982); Konno(1986)²⁾の参考文献参照)、揺動力 $f_x(t)$ は平均0、分散 D のGauss型白色雑音であると仮定される。

$$\langle f_x(t) \rangle = 0 \quad (4.4)$$

$$\langle f_x(t) f_x(0) \rangle = D \delta(t)$$

$x(t)$ は、ポテンシャルが双峰形の場合には、細かい振動をしながら、振幅の大きさに応じて確率的に両ポテンシャル間を往来する。これが突発的な跳躍の繰返しのメカニズムとなる。

Konno(1986, 1989)^{2, 3)}は上記モデルを使って、Fryら(1974)¹⁾、Thieら(1979)⁴⁾によって別々に報告されたPalisades炉の炉心槽振動による炉出力の異常変動の2つの記録に対してあてはめを行った。これによると、

(1) Fryの報告の場合；係数は、

$$k=1.5, D=19, n=4, A_0=0, A_1=10, A_2=-50, A_3=0, A_4=100$$

と求められ、ポテンシャル関数は、次式の様に同定された。

$$V(x) = 10x - 50x^2 + 100x^4 \quad (4.5)$$

(2) Thieの報告の場合；この場合、実効ポテンシャルは、3重井戸型を採用してあてはめをおこなっている。

$$V(x) = J_1 \left[\frac{\partial}{\partial x} V(x) \right]^2 + J_2 x \quad (4.6)$$

このとき、係数は、

$$J_1=1/640, J_2=0, \\ k=1.0, D=5, n=4, A_0=0, A_1=-10, A_2=-120, A_3=0, A_4=100$$

で、ポテンシャル関数は次の様に同定された。

$$V(x) = 10x - 120x^2 + 100x^4 \quad (4.7)$$

4.3 テスト・データの生成

GMDHに基づく階層モデリング手法の有効性と有用性を検討するには、まず構造や特性の明らかな典型的な非線形雑音データに適用してみるのが最良である。この意味から、前節に述べた確率Duffing方程式によるPWR炉心槽の異常振動モデルを用いて模擬信号を発生し、これを使用して、階層モデルのフィッティングと解析を行うことにした⁷⁾。

4.3.1 確率ダフィング方程式による振動のシミュレーション

(4.2)~(4.4)式の1次元非線形振動モデルに対し、デジタル計算機において確率Runge-Kutta法を用いてシミュレーションを行った。計算の時間間隔は、0.003secとした。各係数は次の様に設定した。

$$k=1.0, D=20, n=4, \\ A_0=0, A_1=0, A_2=-50, A_3=0, A_4=100$$

ポテンシャル関数は、次の2重井戸型関数

$$V(x) = (-50/2)x^2 + (100/4)x^4 \quad (4.8) \\ = -25x^2(1 - x^2)$$

となり、2つのポテンシャルの位置は、

$$\frac{\partial}{\partial x} V(x) = -50x + 100x^3 \quad (4.9) \\ = -50x(1 + \sqrt{2}x)(1 - \sqrt{2}x)$$

より、 $x = -1/\sqrt{2}, +1/\sqrt{2}$ 、すなわち $x = 0, \pm 0.707$ となる。

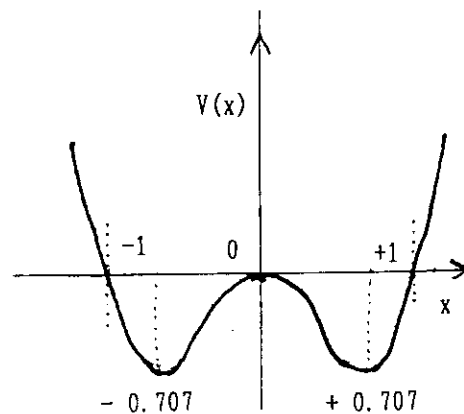


Fig. 4.4 ポテンシャル関数の形状

4.3.2 サンプリング・データとその統計的性質

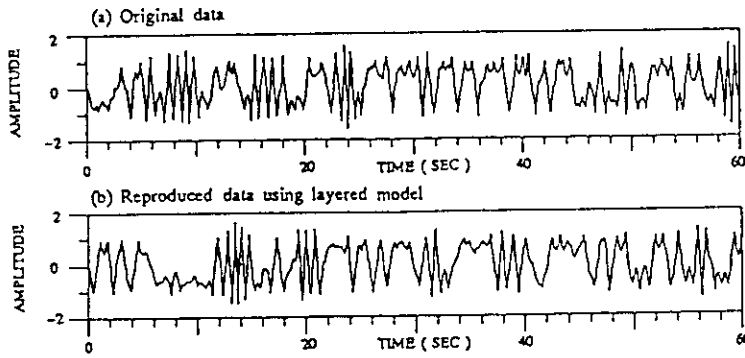


Fig. 4.5 Duffing方程式に基づく確率的振動

動をしながら、2つのポテンシャル間を確率的に跳躍する様子が伺える。

また、Case-2の確率密度関数と通常の線形パワー・スペクトル(ここではBlackmann-Tukey法)の推定結果をFig. 4.6(a), Fig. 4.7(a)に示す。図より、パワー・スペクトルは、一見単なるGauss型の有色雑音の様に見えるが、その確率密度関数は双峰形となる。

発生した振動データは、適当な遮断周波数を持つバターワース型デジタル・ローパス・フィルタを通した後、サンプリング時間間隔 $\Delta t=0.03, 0.06, \text{および} 0.15\text{sec}$ で改めてサンプリングし、3つのテスト用データ・セット(それぞれCase-1, 2, 3と呼ぶ)を作った。

Case-2のデータをFig. 4.5(a)に示す。信号は細かい振

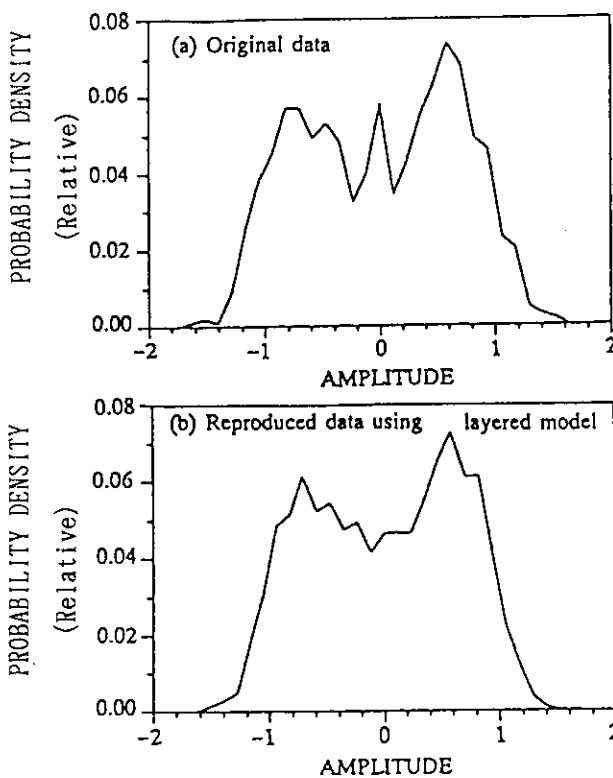


Fig. 4.6 推定した確率密度関数

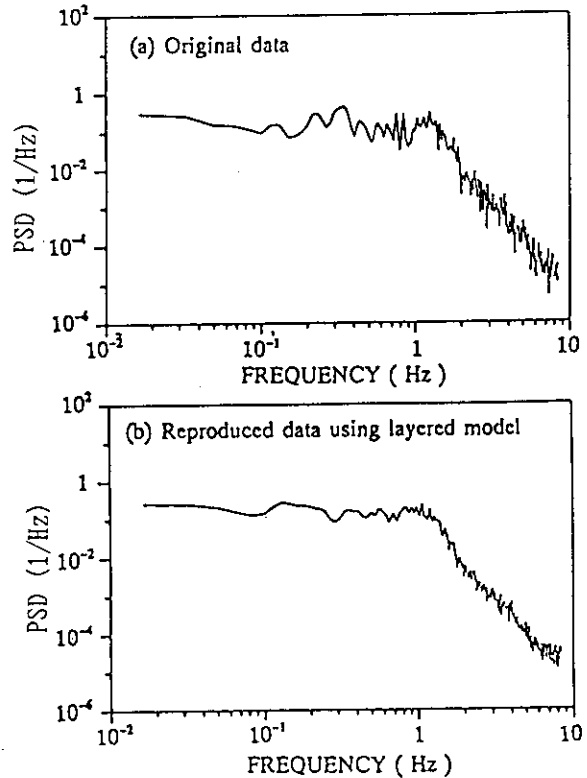


Fig. 4.7 推定したパワー・スペクトル

4.4 非線形自己回帰型階層モデルによる解析

4.4.1 GMDHによる階層モデルのフィッティング

前節で発生したテスト・データに対して、GMDHによる非線形自己回帰型1変数階層モデルのフィッティングを行った。基礎関数としては、始めにKolmogorov-Gabor型の2次の多項式を用いてフィッティングを行ったが、信号レベルの跳躍を起こす的確なモデルは得られなかった。このデータに関しては、もとのシステムの方程式の形から、1次の線形項と3次の非線形項が重要であり、2次ならびに4次以上の非線形項の寄与は無いと考えられる。そこで、基礎関数として、第1層では1次の線形項および3次の非線形項から成る(4.10)式の関数を用い、また第2層以降は余分な高次の非線形項が生成しない様に線形項だけからなる(4.11)式を使ってみた。

$$G(z_1, z_2) = c_0 + c_1 z_1 + c_2 z_2 + c_3 z_1^3 + c_4 z_2^3 \quad (4.10)$$

$$G(z_1, z_2) = c_0 + c_1 z_1 + c_2 z_2 \quad (4.11)$$

テスト・データのサンプル数は1000とし、データの分散値の大きいもの500個をトレーニング・データに、また小さいものをチェック・データにして、フィッティングを行った。各部分表現の選択基準には予測誤差を、また完全表現の選択基準にはAICを使用した。この結果、各ケースとも下記の1層のモデルが得られた。

(1) Case-1

$$x_t = -0.00049645 + 2.0294x_{t-1} - 0.98862x_{t-2} - 0.089319x_{t-1}^3 + 0.0034100x_{t-2}^3 + \varepsilon_t, \\ \sigma^2 = 7.0946 \times 10^{-4} \quad (4.12)$$

(2) Case-2

$$x_t = -0.0034150 + 2.0646x_{t-1} - 0.93126x_{t-2} - 0.28317x_{t-1}^3 - 0.020790x_{t-2}^3 + \varepsilon_t, \\ \sigma^2 = 5.0551 \times 10^{-3} \quad (4.13)$$

(3) Case-3

$$x_t = -0.040165 + 1.9032x_{t-1} - 0.19760x_{t-2} - 1.0883x_{t-1}^3 - 0.54873x_{t-2}^3 + \varepsilon_t, \\ \sigma^2 = 8.7435 \times 10^{-2} \quad (4.14)$$

4.4.2 階層モデルによる雑音シミュレーション

得られた階層モデルの妥当性をチェックするため、予測誤差 ε_t に平均0、残差共分散 σ^2 の白色雑音を入れて、雑音シミュレーションを行ってみた。各ケースとも信号レベルが2つのポテンシャル値間を確率的に跳躍した再生信号が得られ、モデリングが成功した事を確認できた。

しかし、ここで数値計算上の不安定性の問題が生じた。Case-1($\Delta t=0.03\text{sec}$)は40,000点の計算にも問題が無かったが、Case-2($\Delta t=0.06\text{sec}$)は約500点で、またCase-3($\Delta t=0.15\text{sec}$)は計算開始後約50点で信号振幅の発散が起きた。この現象は、数値計算に良く使われるオイラー差分の場合と似ており、基本的にはデータのサンプリング時間間隔 Δt の選択で防げる事が3つの例から分かる。

一方、現実的な問題として、不適当な Δt でサンプルされた既製のデータに対してフィッティングを要求される場合も多い。Case-2, 3の例がそれに相当する。これらのモデルを用いて、安定な雑音シミュレーションを行う方法として、添加する雑音の分散値を残差共分散の値よりも少し下げてやる事が考えられる。残差共分散に掛ける係数 $c(\leq 1)$ を、試行錯誤的に探すと、Case-2の場合 $c \leq 0.8$ 、Case-3の場合 $c \leq 0.1$ で不安定性は解消した。本論文のテスト・データの場合、2つのポテンシャルの位置そのものは振動メカニズムに依存し、外力に依存しないが、係数 c を小さくすると信号中の周波数帯域の高域側のパワーは減少するため、ポテンシャル間の跳躍の頻度が減少する。

このため、Case-3($c=0.1$)の場合は雑音シミュレーションによって再生された信号は、もとの信号に比べて間延びした波形となり、またパワースペクトルも高域側のパワーが減衰したものとなった。しかし、Case-2($c=0.8$)の場合は、係数がほとんど1に近い事から、雑音シミュレーションによって再生された信号波形は、Fig. 4.5(b)(前々ページ)に示す様にほとんどもとの波形と同じものが得られた。また、再生信号から推定した確率密度関数とパワー・スペクトルFig. 4.6(a), Fig. 4.7(b)も、もとの信号の図と良く一致しているのが分かる。

4.4.3 非線形インパルス応答関数の推定結果

各ケースの階層モデルに対して、非線形インパルス応答関数を推定した。Fig. 4.8, Fig. 4.9にCase-2とCase-3の結果を示す。

Case-2(Fig. 4.8)の場合、正側(+1)および負側(-1)インパルス応答関数は、両者ともに大きく振動しながら、次第に正および負のある値に収束して行く様子が分かる。これら2つの収束値は、それぞれ0.649129, -0.674778で、ポテンシャルの理論的な位置 ± 0.707 を比較的良く近似している事が分かる。またゼロ励起の場合は、弱い振動をしながら負側インパルス応答と同

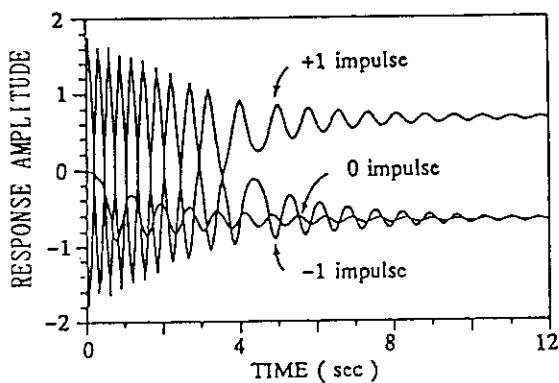


Fig. 4.8 非線形インパルス応答関数(Case-2).

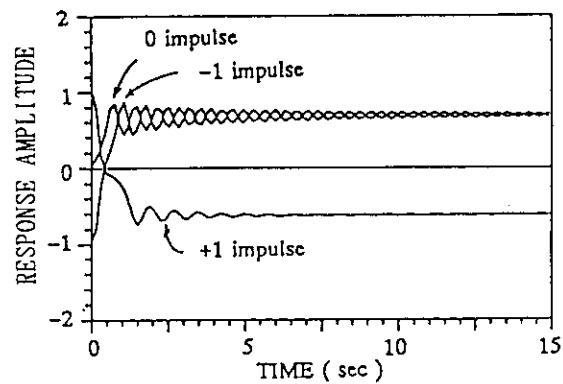


Fig. 4.9 非線形インパルス応答関数(Case-3)

じ値に収束するのが見える。振幅値0はポテンシャルの鞍点に対応しているが、フィッティング誤差等により鞍点が正側にずれている事を意味する。

一方、Case-3 (Fig. 4.9)の場合、 Δt が粗いためか、正側、負側ともに、大きな振動は見せず、いきなりランプ状にポテンシャル付近に動き、弱い振動をしながら、それぞれ、 -0.656525 、 $+0.683223$ に収束した。これらはCase-2に比べて符号が逆であり、ゼロ励起の場合は正側の値に収束している。

Case-2の応答は、インパルスが入力されてから、ポテンシャル値周辺に落ち着く約4secまで、

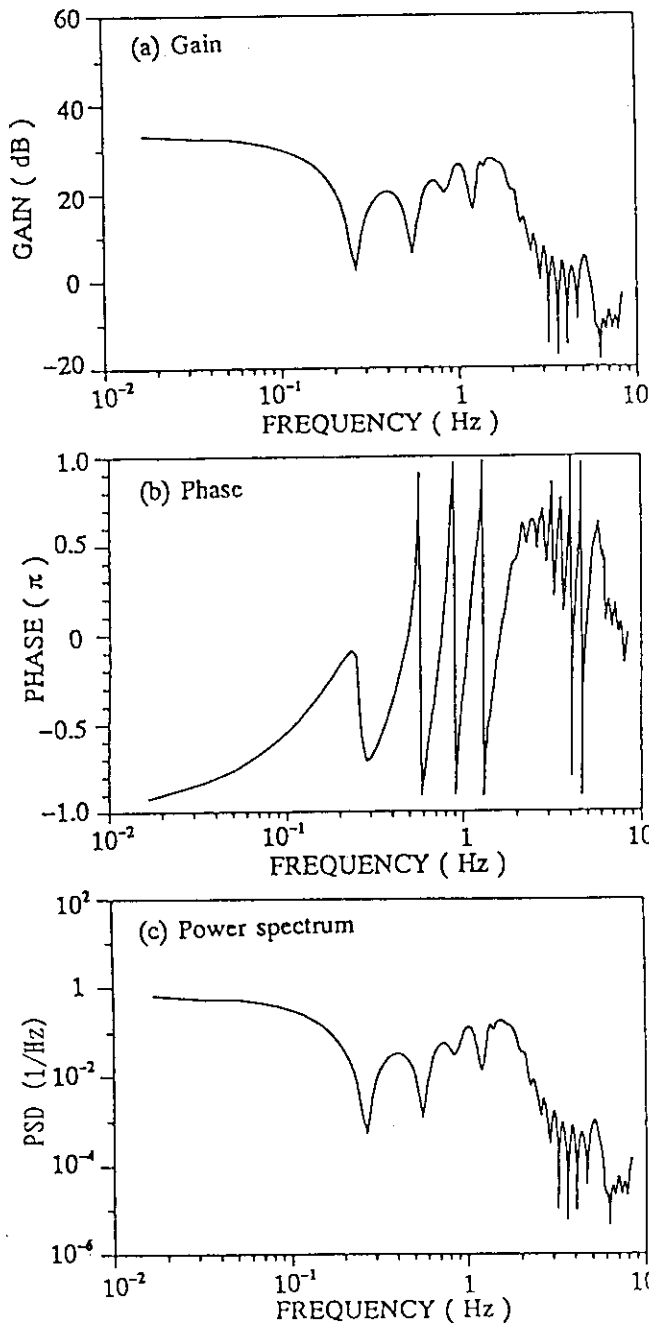


Fig. 4.10 非線形周波数応答関数と非線形パワー・スペクトル

0点を横切り、その度に符合を反転させる。一方、Case-3の応答は約2sec間に唯一度だけ符合を反転させる。したがって、この系に白色雑音を印加した場合には、白色雑音の符合は絶えず変るため、正と負の応答曲線のどちらに従うかは、確率的には1/2になり、信号の跳躍が起きる。Case-2とCase-3で入力インパルスの符合とポテンシャルの収束値の符合が異なるが、これ自体は意味を持たない。

以上の様に、いずれの結果からも、GMDHにより同定された階層モデルは、もとの物理モデルの構造、すなわち2つの井戸型ポテンシャル間を確率的に跳躍するという振動現象は信号の振幅と符号により生ずるといふメカニズムをしっかりと捕えている事が分かった。

4.4.4 非線形パワースペクトルの推定結果

前節で求めた非線形インパルス応答関数から、非線形周波数応答関数を推定し、さらにパワー・スペクトルを求めた。

Case-2の正側の非線形周波数応答関数のゲインと位相の推定結果をFig. 4.10(a)、(b)に示す。負側の場合、ほぼ同様の結果が得られ、位相が全周波数で180°異なったものが得られた。また、正側のパワースペクトルをFig. 4.10(c)に示す。パワースペクトルは、駆動雑音源に

Gauss型白色雑音を仮定して計算するため、先のゲイン関数の形状と同じのものが得られる。

Fig. 4.10(c)と元の信号から直に推定した結果Fig. 4.7(a)は一致しない。この理由は、片側符号のインパルスに励起されたインパルス応答には、確率的な跳躍効果が含まれてないからである。しかし、同定した階層モデルを両符号を持つ連続的なインパルスで励起した場合は、Fig. 4.7(b)で見た様に、元の信号と同様の形Fig. 4.10 非線形周波数応答関数と非線形パワー・スペクトル状を持ったパワースペクトルが得られる。

4.5 むすび

2つの井戸型ポテンシャル関数を持つ確率Duffing方程式により記述されたPWR炉心槽の異常振動モデル(1次元非線形振動モデル)に基づいて非線形炉雑音の模擬データを作り、これにGMDHに基づく階層モデリング手法を適用して、前章で提案した新しい方法による解析を試み、その有効性を検証した。その結果、次のことを明らかにした。

- ・ 2つの井戸型ポテンシャル関数を持つDuffing方程式に従う非線形システムは、1次と3次の項だけから成る非線形自己回帰型多項式モデルによってほぼ完全に近似できる。
- ・ 第3章で提案した新しい関数；非線形インパルス応答関数の使用により、モデルの物理的な解釈が可能である、すなわち、上記システムの特長である信号レベルの跳躍機構が説明でき、また2つのポテンシャルの位置とそれらの値が推定できる。
- ・ また、非線形周波数応答関数や非線形パワー・スペクトルの使用により、得られたモデル表現から周波数領域での非線形応答特性に関する情報を求めることができ、システムの周波数特性は平坦ではないが、確率的跳躍が起きることにより平坦な特性となる、など信号の周波数成分の増減の機構が説明できる。

以上のことから、GMDHに基づく非線形階層モデリング手法は、この種の非線形炉雑音に対して有効であると結論できる。同じデータに対して、通常の線形自己回帰モデルを適用した場合には、信号のパワー・スペクトルを近似するモデルを得ることができるが、確率的跳躍機構を表現できないため、その確率密度関数もGauss型となってしまう。これまで、このような非線形信号を対象とした非線形モデリングがほとんど行われていなかった、あるいは行われていても得られたモデルの物理的な解釈が行われていなかったことを考えると、本章に述べた同定の成功の意義は大きい。

また、本章では、第3章で提案した非線形インパルス応答関数ならびに非線形パワースペクトルを用いた解析例を挙げ、これらが、如何に非線形階層モデルの持つ情報を時間領域ならびに周波数領域で視覚化し、モデルの妥当性のチェック、非線形機構の解明、非線形システムの

パラメータ推定に役立つことを示した。本章の例では、完全表現はいずれも第1層のものとなったため、モデルは階層構造とならず単純な非線形多項式モデルとなったが、これらの新しい関数は、階層数とは無関係であるため、原理的には多層の複雑なモデルにも適用が可能である。

5. BWR炉出力振動のモデリング と安定性監視

5.1 はじめに

沸騰水型原子炉(BWR)の炉心では、水沸騰にともない多量の蒸気泡(Void;ボイド)が発生する。この気泡は中性子の減速と冷却水の流動を阻害するため、Fig. 5.1に示すように、反応

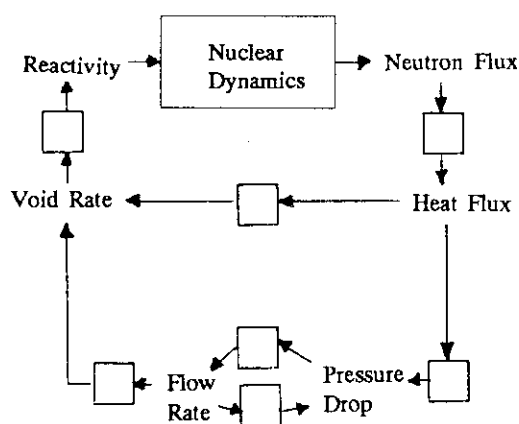


Fig. 5.1 BWRのボイド・フィードバック経路

度-炉出力の原子炉伝達関数に対して核・熱水力結合フィードバック・ループを形成する。

ボイド反応度係数は通常大きい負の値を持つため、炉出力の上昇を抑える効果を持ち、BWRの固有な安定性に貢献するとともに、これを積極的に利用した再循環ポンプ流量制御による炉出力の制御を可能にしているが、一方では、過度の負のフィードバックは炉出力振動を引き起こす可能性を持っている。実際、近年のBWRでは、炉心の高出力密度化が図られているため、通常の運転中でも炉出力振動が認められる。

この炉出力振動は、原子炉の核的動特性ならびに熱水力動特性が非線形であることから、本来、非線形振動現象と考えられるが、ボイド反応度フィードバックが小さい時には定常値の近傍で線形化して取り扱うことができ、実際、定常運転時の炉出力振動は原子炉に固有な振動周波数で単純な減衰振動を示し、その状態は安定である。しかし、原子炉の起動、停止運転時には、低流量・高出力といったボイド発生に都合の良い条件、運転の視点からは逆に悪条件を避けて通れないため、運転条件によっては過大なボイド反応度フィードバックが印加され、発散的な炉出力振動を引き起こすことがある。

過大なボイド反応度フィードバックによる不安定性を回避する目的で、BWR開発初期にはこれを抑える設計が為され十分安定な運転が実現できたが、近年の大型化されたBWRでは炉心の高出力密度化から再び不安定性が問題となり、各種実験や計算による安定限界の評価と不安定領域に踏み出さないための運転規則作りが行われ、一方では炉雑音解析に基づく安定性の監視が行われてきた。

この安定性の監視には「減幅比」など線形理論に基づいて定義された指標が使用され、燃料燃焼サイクルの始めの起動運転時などにオフライン的に測定される他、一部の炉では通常運転

期間中にもオンライン的に実時間ベースの監視が行われている。しかし、減幅比などは炉出力に関する線形インパルス応答関数の減衰特性を指標化した量であり、監視可能な範囲は線形インパルス応答関数が正しく推定できる安定限界以下の領域だけに限られるため、炉出力振動の状態が安定限界を越えて不安定領域に移ったとしてもこれを検知できないという欠点を持っている。

ところが、低流量高出力時の炉出力振動の観測例が増加するに連れて、規則に定められた条件で運転しても、原子炉の状態は安定限界付近に容易に近づくことがあり、何等かの悪条件が重なると安定領域を逸脱する可能性のあることが分かってきた。さらに、1988年に米国のLaSalle-2炉では、規則通りに安定領域で運転を行っていたにも関わらず、ある誤操作を契機に安定限界を越えて不安定領域に入り、炉出力が発散的に振動するという事故があった(Murphy(1988)¹¹)。このため、BWRの安定性と運転規則の見直し作業が始り、また一方で、安定限界付近で効果を発揮できる非線形炉雑音解析手法に基づく安定性監視法が必要になってきた。

この章では、BWRの非線形動特性モデルに基づいて人工的に作成した安定限界付近の炉出力振動データを用いて、GMDHに基づく非線形自己回帰型階層モデリング手法によるBWR非線形炉雑音解析への応用について議論する。始めに、BWRの非線形炉出力振動の観測例を概説し、従来の安定性監視法とその問題点を述べる。次に、非線形自己回帰型階層モデルを用いた炉出力振動のモデル化と非線形スペクトル解析について述べ、この手法が不安定性の兆候である高調波成分の発生を感度良く捕えることができ、安定限界付近での安定性監視に役立つことを示す。

5.2 BWRにおける非線形炉出力振動

5.2.1 炉出力振動と炉心安定性

一般に、定常線形系における安定性の議論では、何等かの原因で系の平衡状態が乱されても、その原因の消滅後、時間の経過とともに系の状態量がもとの平衡状態に戻るならば、系は安定で、戻らない時を不安定と定義される。また、非線形系の議論では、Liapunovの与えた安定の定義があり、状態空間における平衡点(特異点)の安定性から、漸近安定、局所安定、……など厳密に定義される。

しかし、原子炉系の安定性を議論する場合、ある外乱入力により到達する状態が安定なリミット・サイクルであって、これが非線形系における漸近安定であっても、その炉出力振動のピーク値が数100%である様な場合には、現実的には意味を持たない。というのは、実際の原子炉の運転では、出力が定格出力の110%前後以上に上昇した場合には、安全保護系によって自動停止させられてしまうからである。さらに、安定な減衰振動の状態から高振幅のリミット・サイクルに到達する過程は、原子炉の運転の立場から見れば、不安定な状態であり、また振動は発散的に見える。また、上記の一般的な安定性の定義は、系を記述する状態方程式から見た安

定性判別のために導入された概念であり、観測データに基づいて系の安定性を評価するための具体的な方法を与えている訳ではない。

したがって、観測データに基づいて原子炉系の安定性を議論する場合、炉出力振動が減衰振動を示し線形系で記述できる場合を安定、持続振動となる点を安定限界、それ以外を不安定と呼ぶのが普通である。本論文でもこれに従うことにする。

5.2.2 炉心安定性の研究

ここで、BWRの非線形炉出力振動の観測例と安定性の研究について述べておく。

(1) 開発初期における炉出力振動の観測例と出力/流量マップ

BWRの開発初期には、水沸騰に起因する不安定性に関して種々の実験的研究が行われた。その中で、米国のBorax-II炉で高出力、圧力低下時に観測された突発的な炉出力振動²⁾は、原子炉の非線形性の効果によって生じた典型的な振動現象であった(Fig. 5.2)。

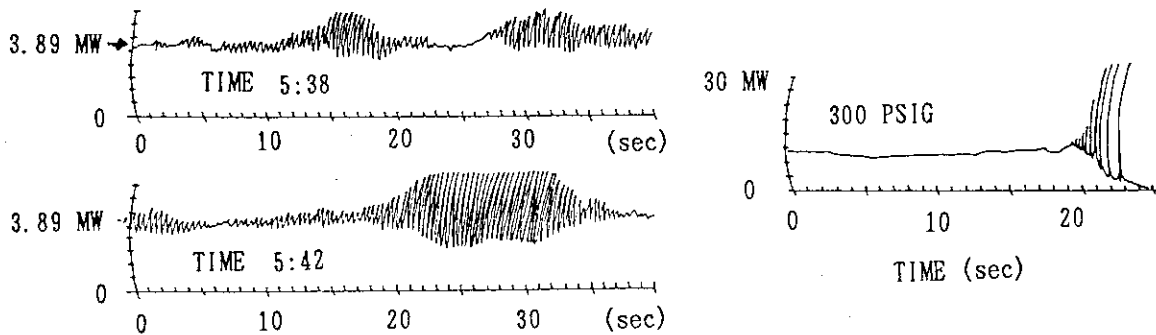


Fig. 5.2 Borax-II 沸騰型炉で観測された炉出力振動(左図：不安定振動，右図：発散的振動)
(Thie, J. A. (1963)²⁾より)

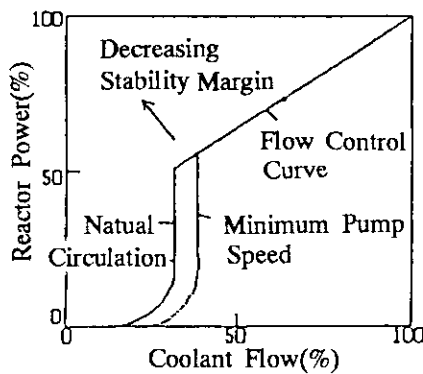


Fig. 5.3 BWRの出力/流量マップ

その後、燃料要素の設計に、中性子束に対する熱流束の変化を小さく抑え中性子束と熱流動の相互作用を弱める配慮がなされ、Dresden炉で十分安定した運転が実証され、実用的なBWRが誕生した。

また、Fig. 5.3に示すような出力/流量マップが作られ、原子炉の起動、停止運転時など、再循環流量制御による運転では、炉心安定性を考慮し、最低ポンプ速度曲線と流量制御曲線以内の低流量高出力運転を行ってはならないという運転規則が定められた。

(2) 近年における安定性に関する研究³⁾

しかし近年になり、経済性や安定した電力供給の観点から商業用発電炉の高出力化が図られ、燃料要素の細口径化が進み、再び高出力・低流量運転時の炉心不安定性の問題が浮上した。このため、炉心安定性に関して、実機を使用した実験が、1970年代末から1980年代前半に、米国の Peach Bottom-2 炉、Vermont Yankee 炉、スウェーデンの TVO-II 炉、イタリアの Caorso 炉⁴⁾、西ドイツの KRB-B 炉、-C 炉などで行われた (Fig. 5.4(a)~5.4.(d))。

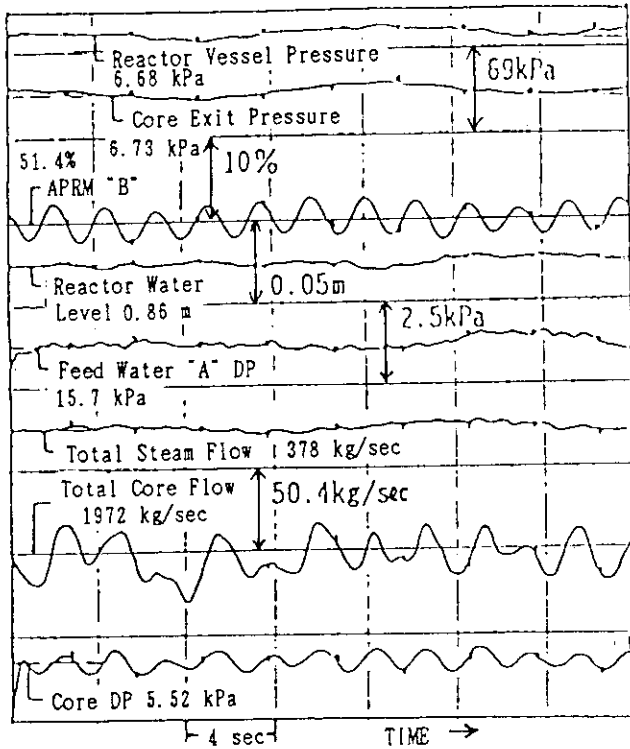


Fig. 5.4(a) Vermont Yankee 炉の出力振動。
(横溝(1990)³⁾より)

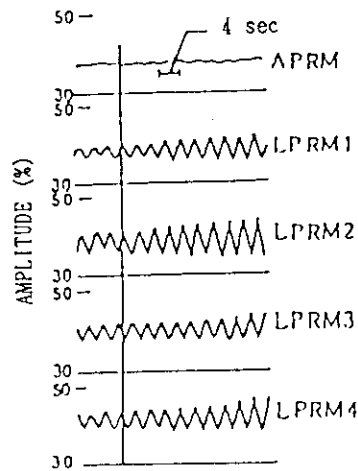


Fig. 5.4(b) TVO-II 炉の出力振動
(横溝(1990)³⁾より)

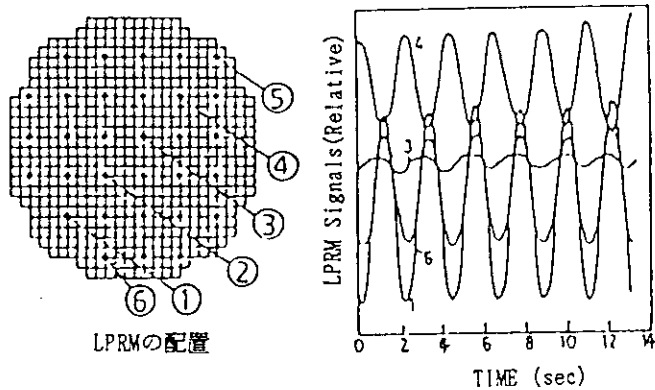


Fig. 5.4(c) Caorso 炉の出力振動
(横溝(1990)³⁾より)

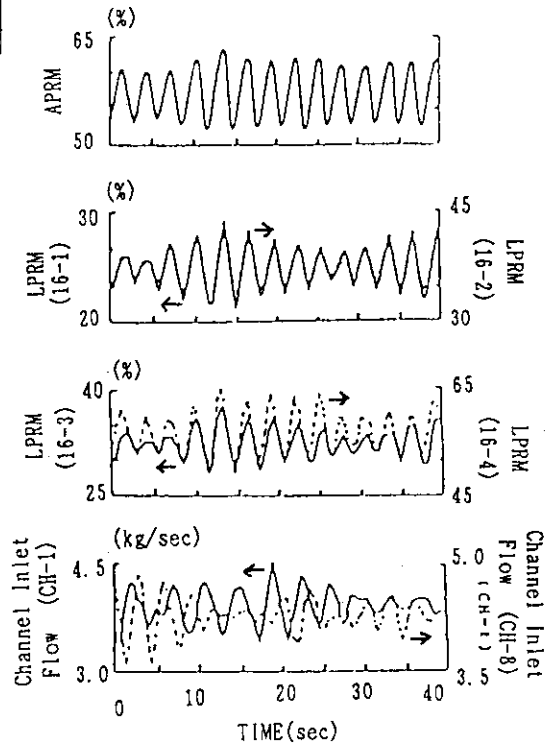


Fig. 5.4(d) KRB-C 炉の出力振動 (横溝(1990)³⁾より)

事の重大性に対処するため、米国NRC(原子力規制委員会)は不安定領域の確定と対応策に関する勧告を出し、各国でこの不安定性に関する研究がさらに盛んに行われるようになった。

5.2.3 炉雑音解析に基づく安定性監視法と問題点

次に、炉雑音解析に基づく従来の安定性監視法を紹介しそれらの問題点を明らかにしておく。

(1) 従来の安定性監視法

1970年代の後半に、商業用BWRの本格的な稼動が始り、炉雑音解析による安定性監視の研究が始った。Peach Bottom-2炉では、小レベルのPRBS(疑似不規則2値信号)による摂動の印加実験が行われ、実験データから得られた圧力から中性子への出力伝達関数に経験的な伝達関数のあてはめを通じて、BWRの安定性を示す指標として制動比(Damping Ratio)などが測定された。

しかし、Tunodaら⁹⁾(1978)は、このような特別な実験を行わなくても、通常運転中の中性子雑音から安定性を監視できることを示唆し、Upadhyayaら^{9, 10)}(1979)は、1変数ARモデルのインパルス応答関数から、この制動比が推定できることを示した。

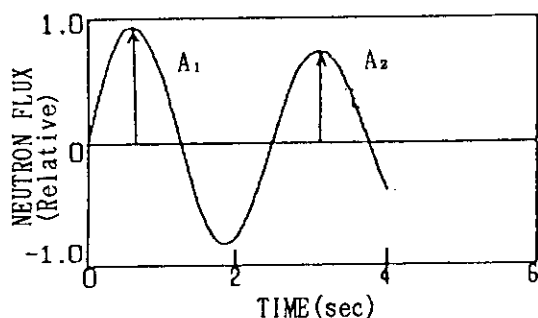


Fig. 5.6 インパルス応答とDR

$$\xi = \frac{\delta}{(4\pi^2 + \delta)^{1/2}} \quad (5.1)$$

$$\delta = \ln(A_1/A_2) \quad (5.2)$$

ここで、 A_1 、 A_2 はインパルス応答に現れる1番目と2番目の正のピーク値である。(Fig. 5.6)

Tunoyamaら¹¹⁾(1980)は、炉心動特性は安定性に関する周波数領域では2次系で表されると仮定すると、炉出力信号のパワー・スペクトルNPSD(ω)に次式を当てはめることにより、減幅比 λ が推定でき、これが指標になることを示した。

$$NPSD(\omega) = \frac{A}{\omega^4 + 2(2\xi^2 - 1)\beta^2 \omega^2 + \beta^4} \quad (5.3)$$

$$\lambda = \exp\left(\frac{-2\pi}{(1-\xi^2)^{1/2}}\right) \quad (5.4)$$

ここで、 ω は角周波数、 β^2 は特性周波数、 ξ は減衰定数、 A は定数。

さらにUpadhyayaら(1982)¹²⁾は、先の制動比を単純化した指標として、上式の場合と同じ言葉を使った「減幅比」DRを提案した。

$$DR = A_2/A_1 \quad (5.5)$$

もし、システムの応答が2次系で記述できるならば、インパルス応答は次式で記述できる。

$$x(t) = A \exp(-\sigma t) \sin(\omega_d t) \quad (5.6)$$

このとき、DRは、減衰係数(Attenuation Factor) σ と制動振動の周期 $T (=2\pi/\omega_d)$ の関数となる。通常のシステムでは、安定性の度合いは応答関数の安定な特性根の小さい方によって決まるから、DRを監視することにより、安定性が判別できる。 $0 \leq DR < 1$ であれば安定で、 $0 \leq \zeta < 1$ 。

その後、March-Leubaら(1985)^{13, 14)}は、安定な4次系や2つの0極をもつ4次系の場合、(5.5)式の定義ではロバスト性に欠けるため、始めの2組の振幅(A_1, A_2)を取るのではなく、安定した2組を取る漸近的減幅比DRを提案した。

$$DR = \lim_{i \rightarrow \infty} A_{i+1}/A_i \quad (i=1, \dots) \quad (5.7)$$

以上のように安定性監視のための様々な指標が提案され、また実際に悪条件下での運転の目安としてある程度役立ってきたが、これらは炉出力振動に関する線形インパルス応答関数の減衰特性を指標化した量であり、線形ARモデルなどを利用して推定することから、監視可能な範囲は安定領域に限られている。

(2) 低流量・高出力時の炉雑音測定実験と従来の監視法の問題点

しかし、低流量高出力時の炉出力振動の観測例が増加するに連れて、炉心構成や設計の違いにもよるが、規則を順守した運転であっても原子炉の状態は安定限界付近に容易に近づくことができ、そこでは何等かの悪条件が重なると安定領域を逸脱する可能性のあることが分かってきた。

Gialdiら(1985)⁴⁾は、イタリアのCaorso(BWR-4)で安定性の試験を行った。この炉では第1燃料燃焼サイクルで、炉出力振動のために2度のスクラムを経験していた。1度は炉出力/流量マップの臨界領域、他方はポンプ1台のトリップによるものであった。第2サイクルのための計算機による許認可解析では減幅比は $DR > 1$ (このDRは外乱入力に対する応答波形から直接計算したもので、許認可は $DR < 0.98$)と見積もられ、問題を解決するために安定性に関する試験が実施された。流量30数%、出力40~60%の領域において、4つのタービン制御弁の1つからPRBS(疑似白色不規則雑音)を印加しシステム圧力に摂動を加えた試験を実施したところ、自然循環運転の場合、APRM信号の応答にPRBSに従わない減衰振動が現れやがてリミット・サイクルに達した。この時の状態は、LPRMのデータから炉心半面が180度位相が異なるモードの振動となっていることが分かった。リミット・サイクルに達した場合を除く他の試験におけるAPRM信号のDRは、(5.3)、(5.4)式とほぼ同じ方法で炉雑音解析から評価され、0.45~0.79にあることが分かった。

1987年から、スウェーデンのForsmark-1,-2炉、Ringhals-1炉で、人工的な信号を印加し

ない炉雑音解析の立場からBWRの炉出力振動と安定性に関する一連の測定と解析が行われた。

Ogumaら(1988)¹⁶⁾はForsmark-2で観測される炉出力変動の解析を行い、ボイド反応度フィードバックを通じて結合する核的動特性と熱水力が炉出力変動を引き起こしていることを実験的に示し、さらに、この炉では炉出力63%、全炉心流量4100kg/sの時のDRの測定値が約0.7と高いことを示した。また、強い圧力振動が0.33Hzで現れており、高いDR下でポンプが停止した場合には、このような圧力振動の周波数が炉出力振動と一致しスクラムに発展する恐れのあることを示した。

Bergdahlら(1988)¹⁶⁾はForsmark-1で、高出力・低流量、すなわち炉出力65%、全炉心流量4100kg/sの時の0.5Hzの炉出力振動を調査した。その結果、DRは期待値0.6の代りに0.7~0.9以上という値を得た。このように高いDRは、炉心は振動を十分早く抑えることはできず、小さな摂動がスクラムを引き起こす、ということを暗示している。位相は全炉心で同相であっ

た。また、APRMのパワースペクトルに高調波らしきものが見られた。

さらにBergdahlら(1990)¹⁷⁾はRinghals-1炉で実験中に、炉出力75%、全炉心流量3720kg

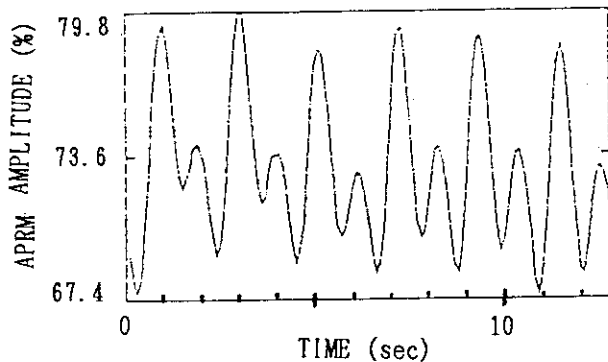


Fig. 5.7 Ringhals-1で観測されたリミット・サイクル(Bergdahlら(1990)¹⁷⁾)

/sの運転条件に遭遇し、周波数0.5Hzのリミット・サイクルを観測した(Fig. 5.7)。振幅は16%(ピーク対ピーク)を記録し、部分スクラムによって不安定領域から脱した。このリミット・サイクルの状況になる6時間前から測定を開始し、炉心半面間の位相差が130度、DRが局所的に0.9であることを示した。さらに、STP(信号伝達経路)解析(Oguma(1982)¹⁶⁾)を通じ

て、炉心内の一部に炉出力振動を支配する雑音源を見つけた。またリミット・サイクル開始直後のAPRM信号は、0.5Hzの成分からなるが、成長とともに2倍の高調波を持つことを示した。

以上の様に、低流量高出力時には、炉心構成や設計の違いにもよるが、原子炉の状態は安定限界付近にまで容易に近づくことができ、その場合DRは高い値を示し、さらに何等かの悪条件が重なると不安定領域に入る可能性があること、また不安定領域に入ると炉出力振動は高振幅のリミット・サイクルに到達するが、この時、原子炉固有の特徴周波数を基本波とする高調波が現れることが分かった。

ここで問題となるのは、線形理論に基づいて定義された指標の有効性である。減幅比DRは、0~1の連続量として定義され、振動が無い場合は0で、減衰特性が悪くなってくると次第に1に近づき、持続振動状態では1に収束することになっている。しかし、振動の状態が安定限界を越えた場合はどうか? 観測データに線形ARモデルをあてはめて線形インパルス応答関数を推定しDRを求めるという計算過程を考えると分かるように、炉出力振動に非線形効果が含まれている場合でも、結果が正しいか否かは別としてDRの計算が可能である。実際、リミ

ット・サイクル的な炉出力振動の場合にも計算でき、その場合でもDRは1またはそれ以下の値を示す。すなわち、減幅比は、現在の振動状態が安定領域、安定限界、不安定領域のいずれにあるのかという情報を提供できない。

したがって、線形理論に基づいて作られた指標は、振動の状態が安定領域にある場合に限って安定性の度合いを示す指標となり得るが、振動状態が非線形効果に起因する不安定領域にある場合には誤った報告もたらすことになる。

5.3 非線形理論に基づく新しい安定性監視法

BWRにおける炉出力振動の発生機構や安定性を調べる目的で、炉心構造を多数のブロックに分割した空間依存型の3次元動特性モデルが開発され研究されている一方で、非線形振動の本質を理解するのに便利な1点炉近似の現象論的非線形動特性モデルが、Konno(1986)¹⁹⁾やMarch-Leubaら(1986)^{20, 21)}によって研究され、不安定状態の炉出力振動の特徴などが明らかになってきた。

5.3.1 炉出力振動の現象論的非線形動特性モデル

Konnoは確率系の観点から原子炉の非線形動特性モデルを議論したが、炉型は特に限定しなかった。これに対し、March-Leubaらは炉型をボイド反応度フィードバックを持つBWRに限定し、各パラメータをVermont Yankee炉の実験データに当てはめて、より現実を則したモデル((5.8)式)とし、確定系を基本に一部確率系の観点から議論を行った。

$$\frac{dn(t)}{dt} = \frac{\rho(t) - \beta}{\Lambda} n(t) + \lambda c + \frac{\rho}{\Lambda}, \quad (5.8a)$$

$$\frac{dc(t)}{dt} = \frac{\beta}{\Lambda} n(t) - \lambda c, \quad (5.8b)$$

$$\frac{dT(t)}{dt} = a_1 n(t) - a_2 T(t), \quad (5.8c)$$

$$\frac{d^2 \rho_s(t)}{dt^2} + a_3 \frac{d\rho_s(t)}{dt} + a_4 \rho_s = k k_0 T(t) \quad (5.8d)$$

$$\rho(t) = \rho_s(t) + DT(t). \quad (5.8e)$$

ここで、 n は規格化した中性子密度の変動分、 c は規格化した先行核濃度の変動分、 T は平均燃料温度の変動分、 ρ_s はボイド反応度フィードバックの変動分、 k_0 はフィードバック係数、 k はフィードバック・ゲインで調整因子である。各パラメータは、Vermont Yankee Test 7Nのデータに当てはめて決定されたTable 5.1に示すものが用いられる。

このモデルは確定的モデルであり、温度 $T(t)$ や先行核濃度 $c(t)$ にインパルス的な外乱を印加することにより、炉出力(中性子束) $n(t)$ に現れる振動の発展の様子を調べることができる。

Table 5.1 Vermont Yankee Test 7Nの場合
のモデル・パラメータ²⁰⁾

パラメータ	値	単位
a_1	25.04	$K \cdot \text{sec}^{-1}$
a_2	0.23	sec^{-1}
a_3	2.25	sec^{-1}
a_4	6.82	sec^{-2}
k_0	-3.70×10^{-3}	$K^{-1} \cdot \text{sec}^{-2}$
D	-2.52×10^{-5}	K^{-1}
β	0.0056	--
Λ	4.00×10^{-5}	sec^{-1}
λ	0.08	sec^{-1}

このモデルでは、システムの安定性はフィードバック係数に依存する。 k_0 はシステムが持続振動を引き起こす安定限界に定められている。 k_0 に掛ける係数 k が $k < 1$ の場合、システムは安定であり、何等かの外乱が入力された場合、炉出力(中性子束)信号は原子炉固有の特徴周波数で単調な減衰振動を示す。 $k = 1$ の場合、炉出力(中性子束)信号は持続振動を示す。

$k > 1$ の場合、システムは不安定になり、出力振動は時間とともに増大し、やがてリミット・サイクルに到達する。

March-Leubaらは、確定系でありながら不規則性を示す「カオス」の観点から、 $k > 1$ の場合のシステムの安定性に関する研究を行った。各変数やその微分から作られる位相空間上の軌跡のパターンを用いて、フィードバック係数に

対する炉出力振動の軌跡の振る舞いを調べ、また軌道の周期性を評価するPoincare断面を用いて、このモデルでは周期倍分岐が起こること、分岐点は $k = 1.47$ とそれ以上の点にあることなどを明らかにした。

さらに、(5.8)式のモデルに平均値ゼロの帯域制限付きGauss型白色雑音を外乱源として加えた確率的モデルの安定性について調べ、 $k > 1$ になると雑音源の分散値の大小に関わらず時間とともにリミット・サイクルに到達すること、リミット・サイクル時の振動振幅は分散値には無関係でフィードバック・ゲイン k だけに依存することを示した。

5.3.2 カオス的な観点からの安定性監視法の研究

野村(1986, 1988)^{22, 23)}は、通常の非線形振動の振る舞いをカオス的な観点から調べる方法をBWRなどの原子炉システムの安定性監視に応用した次の状態空間投影法を提案した。

システムは n 階微分方程式によって表現されるとする。

$$\frac{d^n}{dt^n} x(t) = f \left(\frac{d^{n-1}}{dt^{n-1}} x(t), \dots, \frac{d}{dt} x(t), x(t), u(t), t \right) \quad (5.9)$$

ここで、 $x(t)$ はシステムの出力信号、 $u(t)$ は内部あるいは外部入力。このとき $x(t)$ とその微分から作られる n 次元位相空間に、もう1つの軸 $d^n x(t)/dt^n$ を加えると、従来の位相空間における軌跡は、新たな $n+1$ 次元空間における軌跡の1投影となる。

また、システムが n 次元状態方程式

$$\frac{d^n}{dt^n}x(t) = F(x(t), u(t), t) \tag{5.10}$$

ここで、 $x(t)$ は出力ベクトル(x_1, x_2, \dots, x_n),
 $u(t)$ は入力ベクトル(u_1, u_2, \dots, u_m); $m \leq n$

で表されるとき、 n 次元状態空間に先の n 個の微分軸を加えれば、従来の状態空間における軌跡は、新しい $2n$ 次元空間における軌跡の1投影となる。この新しい空間における軌跡を2, 3の軸を組合せた空間に投影し、炉雑音信号などを描くとシステム固有の変動パターンが得られる。これを監視することにより、システムの状態を監視する方法である。

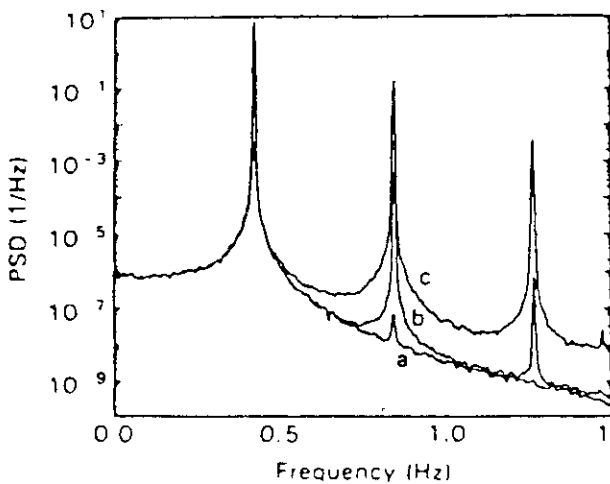
この手法は、提案と同時に種々の方程式とともにパターンが示されたが、パターンの蓄積には時間が必要なことと、その分類には専門的な知識を要するため、まだ実用域には達していない。

一方、Suzudoおよび筆者(1991)²⁴⁾は、炉出力振動現象の監視方法として、フラクタル測度と呼ばれる状態軌跡の性質を調べるカオスの特徴量を用いた監視方法を提案したが、本論文の範囲を越えるため、説明は割愛する。

5.3.3 安定限界付近のパワー・スペクトルと高調波出現の予測

March-Leubaらは、先の現象論的BWR動特性モデル(5.8)式に雑音源を付加した確率系の研究において、安定限界($k=1$)付近のフィードバック・ゲイン k に対する炉出力振動のパワー

・スペクトルを示し(Fig. 5.8), リミット・サイクル的振動に現れる高調波成分について調べた。



- (a) 安定限界よりわずかに下 ; $k < 1$
- (b) 安定限界よりわずかに上 ; $k \sim 1$
- (c) 安定限界より上 ; $k > 1$

振動状態は、(a)安定領域、(b)不安定領域にあり小振幅のリミット・サイクル、(c)リミット・サイクルである。ただし、ここで用いられている k は確定系で決定された安定限界である。

Fig. 5.8 $k \sim 1$ 付近の炉出力のパワー・スペクトル(March-Leubaら(1986)²⁰⁾ と炉出力信号には高調波成分が現れる。

2次の高調波は(a)の場合にわずかに現れるが、従来の方法を用いては測定不能である。というのは、そのような高調波成分は、実際の測定では、他の雑音成分によって隠されてしまうからである。高振幅のリミット・サイクルの場合にはそれが顕著になることから((c)の場合)、パワー・スペクトルを推定し高調波に相当する周波数点のピークの有無とその形状を調べることによって、リミット・サイクルか否かの判定を

行うことが可能だと述べ、この方法を安定性監視に用いることを提案している。

しかし、炉出力振動がリミット・サイクルに到達した場合には、前節の観測例にも述べたように、部分スクラム、あるいは全スクラムによってしかその振動状態を抜け出すことができない事を考えると、判定手段にはなるが運転監視の指標としては十分ではない。さらに、パワー・スペクトル上の高調波に相当する周波数点のピークが、真の高調波かどうかを判断するためには、通常はバースペクトル(第2章参照)やクリス・スペクトル(Väth(1979)²⁶⁾などの非線形スペクトル解析の結果を待たなければならない。

5.3.4 予測された高調波と観測結果の対比

不安定時の高調波の出現に関しては、Bergdahl(1988)¹⁶⁾らによって、Forsmark-1で行った実際的な実験(5.2.3節参照)の際に、APRM信号のバースト状の高振幅振動(ピーク対ピーク値16%)を観測し、そのパワー・スペクトル(Fig. 5.9)に2次の高調波らしきものが見つけられている。これが真の高調波かどうかの非線形スペクトルによる確認は残念ながら行われていないが、このバースト状振動が出現する前後にはこの成分は現れていない事から、ほぼ高調波と見なすことができる。また振動の前、最中、後の減幅比DRは0.9, 0.93, 0.85と非常に高い値が推定されている。

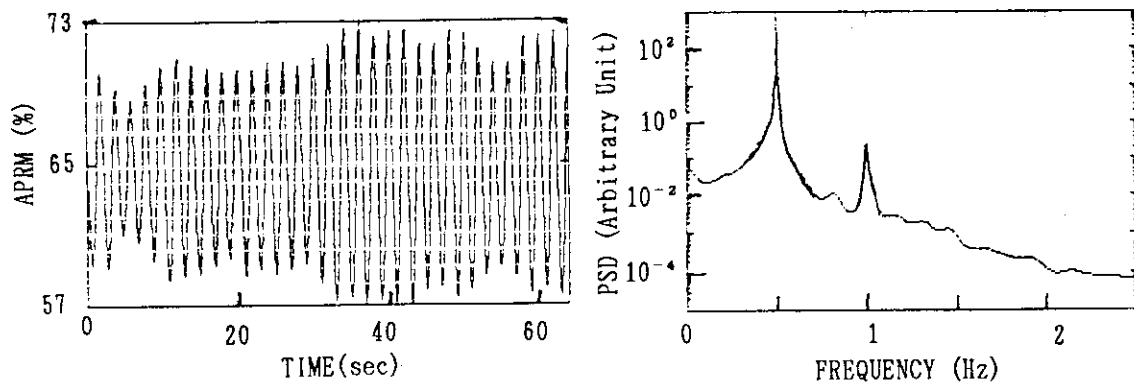


Fig. 5.9 Forsmark-1炉のAPRM信号とパワー・スペクトル (Bergdahlら(1988))

もしこの成分が真の高調波であったとすれば、(5.8)式のモデルから計算されたFig. 5.8の(b)と対比させると、その振動が観測された時の状態は、安定限界以上($k > 1$)にあったはずである。しかし、この実験では、そのバースト状の高振幅振動が観測された後も、発散的な振動やリミット・サイクル的な振動とはならず、部分スクラムなど無しに安定に運転が続けられた。このことから、この振動状態は安定限界以下($k < 1$)にあったと考えられる。

これらの矛盾は、(5.8)式のモデル・パラメータが Vermont-Yankee 炉 (GE 製) を対象に作られたもので、Forsmark-1 炉 (Asea-Atom 製) にそのまま適用するには問題があるのかも知れないが、それ以上に、モデルの安定限界 k_0 が確定系で定義されたものであり、雑音源を付加した確率系の安定限界はそれとは若干異なるためと説明できる。現に、Fig. 5.8 の (a) は $k < 1$ (安定領域) の場合のスペクトルであるにも関わらず、わずかな高調波の発生が見られる。この事は、非線形システムにおける駆動雑音源の存在は、システムを安定化する方向に働き、確定系で定義された安定限界 k_0 を引上げる事を示唆している。逆に言えば、振動状態の分岐点を越え高調波が発生してもシステムは安定であり、確率系では振動の分岐点と安定限界 k_0 が一致しない、ということを示唆している。

5.3.5 非線形炉雑音解析に基づく安定性の監視法

安定限界以上では、March-Leuba が提案したように、炉出力振動に含まれる高調波成分を何等かの方法で解析することにより、リミット・サイクルか否かの判定が可能である。

一方、前節の考察から、BWR の炉出力振動は確定系で定められる安定限界以下でも高調波を発生する分岐点が存在すると考えられる。これを事実とすれば炉出力振動のパワー・スペクトル上に出現する僅かな高調波ピークを見つけることにより、振動分岐点から安定限界点までの領域の監視が可能となる。もし、これが事実でなく振動の分岐点と安定限界点と一致している場合でも、安定領域から安定限界を越えてリミット・サイクルの状態に入る場合には、定常状態が訪れるまでは振幅は成長していくため、高調波ピークを僅かなレベルのうちに捕えることにより、不安定領域への突入を早期に検出できるはずである。

この監視法の実現性は、パワー・スペクトル上の高調波ピークを如何に感度良く推定するかにかかっている。パワー・スペクトル上の僅かな高調波ピークは、実際の測定では、他の雑音成分に隠されてしまうから、通常のスペクトル推定法では S/N (信号対雑音) 比を稼ぐために相当なサンプル平均を余儀なくされ、監視の目的には向かない。さらに、非線形機構による高調波成分か否かを判断するには、バイスペクトルなどの非線形スペクトル解析が必要となるが、これらの高次スペクトルは推定精度から通常のパワー・スペクトル推定よりも難しいことから、サンプル数が極めて大きい場合か、あるいは高調波成分が大きい場合でないとは有効に使用できない。この種の問題に最適な方法は、非線形時系列モデルに基づくスペクトル推定法である。炉出力振動データに含まれる高調波成分が僅かな場合、通常の線形手法では、高調波成分は、重ね合わせの原理を用いて基本波とは独立に表現されるため推定精度の確保が難しいが、非線形時系列モデルを使用すれば、時間領域で単純なべき乗で基本波と高調波を一緒に表現できるため有利である。非線形時系列モデルからスペクトルを推定する方法は、従来、確立されていなかったが、第3章で述べた様に非線形 AR 型階層モデルの場合には、筆者が提案した方法により非線形周波数応答関数や非線形パワー・スペクトルの推定が可能になった。

そこで、筆者は、このスペクトル解析に第3章、第4章に述べた非線形 AR 型階層モデルに基づく非線形パワー・スペクトル解析法の適用を提案する。炉出力振動データの解析にこれを適用することにより、従来の線形パワー・スペクトルよりも高感度で高調波の検出が可能にな

る。この場合、解析の成否を決めるのは非線形AR型階層モデルのあてはめの善し悪しである。GMDHによるモデル・フィッティングでは、基礎関数の選択が重要であるが、BWRの炉出力振動で特に問題とするのは2次以上の高調波の発生であるから、これを的確に表現できるものを使用する必要がある。3.6.1節に述べた2次のKG多項式

$$G(z_1, z_2) = c_1 + c_2 z_1 + c_3 z_2 + c_4 z_1^2 + c_5 z_1 z_2 + c_6 z_2^2 \quad (3.38)$$

は、線形項の他に2のべき乗の項を持ち、基本周波数の整数倍の高調波成分の表現に適している。

5.4 テスト・データの生成

GMDHに基づく階層モデリング手法によるBWRの非線形炉出力振動現象の解析と安定性監視への応用を議論するためには、BWRで観測された非線形炉出力振動時の典型的な炉雑音データが不可欠であるが、一般に入手は困難である。このため、本論文では、簡単な確率BWRモデルを用いて炉出力振動の模擬信号を作り、これを使用した。

5.4.1 簡単な確率BWRモデル

先のMarch-Leubaの確定的なモデル(5.8)式に適切な雑音源を付加してやれば、炉出力 $n(t)$ にも連続的なゆらぎが得られる。これを利用してテスト・データを作成した。具体的には、反応度の2階微分方程式(5.8d)式の右辺に、外部駆動源として帯域制限されたGauss型白色雑音を加えた。これは温度 $T(t)$ の確率的変動部分、すなわち温度ゆらぎと見なすことができる。

$$\frac{d^2 \rho_a(t)}{dt^2} + a_3 \frac{d\rho_a(t)}{dt} + a_4 \rho_a = k k_0 T(t) + w(t) \quad (5.11)$$

これにより、フィードバック係数 $k k_0$ も確率的に変動を起こすのと同等の効果が得られ、より現実的な不安定時の炉雑音に近づくことが期待される。フィードバック・ゲイン k は、5.4.3節の考察から、安定限界 $k < 1$ の幾つかの興味ある値を中心に5つの場合についてデータを作成し、試験を行った。

- (1) $k=0.1$; ほとんど減衰振動が起こらず確率的な変動を示し安定
- (2) $k=0.5$; 減衰振動が比較的目立つようになるが安定
- (3) $k=0.8$; かなり振動的であるが安定
- (4) $k=0.9$; かなり振動的であるが安定
- (5) $k=1.1$; リミット・サイクルになる

5.4.2 テスト・データの発生

シミュレーションは、時間領域で、確率Runge-Kutta法を用いて離散的に行った。時間間隔は0.003secである。使用した外部駆動源 $w(t)$ は平均0、分散 10^{-7} の帯域制限されたガウス型白色雑音である。テスト・データはデジタル・ローパス・フィルタリングの後、時間間隔0.12secで模擬データからサンプルした。

Fig. 5.10は $k=0.1, 0.8, 0.9$ の場合の模擬炉出力(中性子)雑音信号を示す。観測した最大振幅はそれぞれ7%, 20%, 30%(ピーク対ピーク値)であった。これらの振幅はシミュレーションにおいては外部駆動源 $w(t)$ の分散値に依存する。4096点のサンプルデータの1組がフィッティングに用いられた。

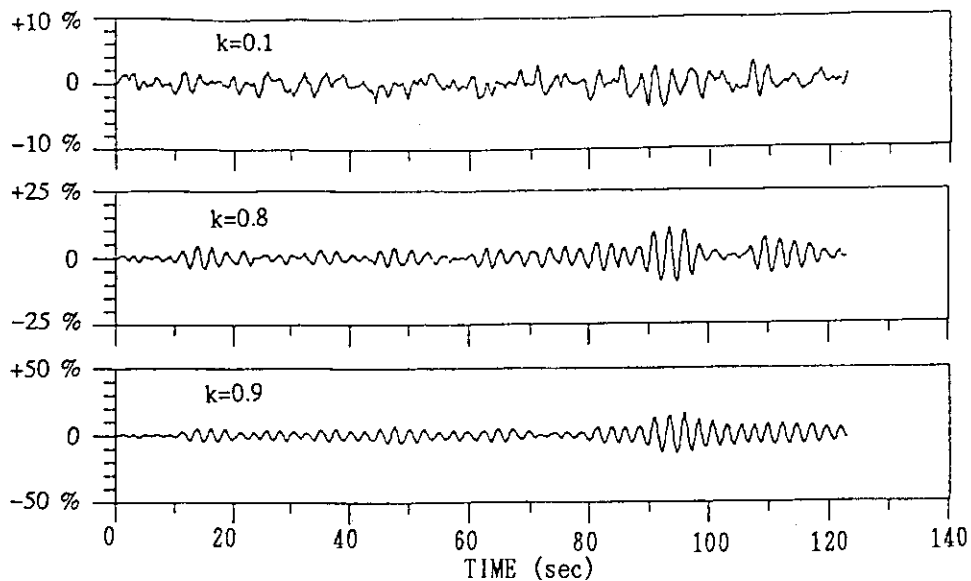


Fig. 5.10 BWRの中性子雑音の模擬データ($k=0.1, 0.8, 0.9$)

5.5 非線形自己回帰型階層モデルによる解析

フィードバック・ゲイン k の異なる5つのデータ・セットに対して階層モデルのフィッティングを行い、これを用いて解析を行った。従来手法との比較を示すために、1変数自己回帰(UAR)モデルを用いた解析も同時に行った。減幅比DRの値はUAR解析から求めたものが示してある。さらに、一部パワースペクトルを用いて非線形性の確認を行った。

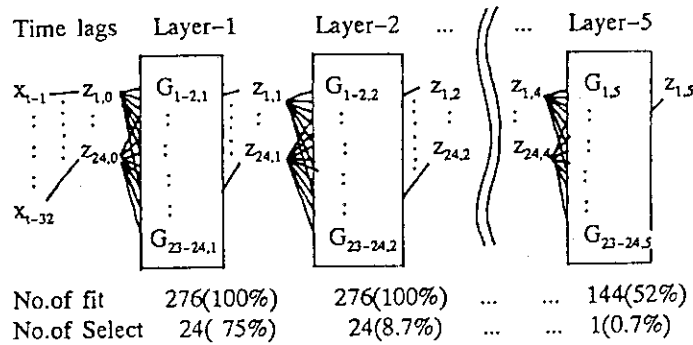
5.5.1 GMDHによる階層モデルのフィッティング

GMDHの基礎関数としては、2次のKolmogorov-Gabor型の多項式を用いて、非線形自己回帰型階層モデルをフィッティングした。

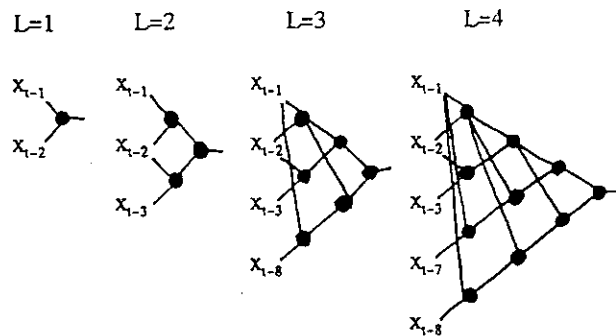
データは、はじめに分散値が1近辺($10^{-1} \sim 10^1$)になるように10のべき乗の適当な値でスケールリングを行った後、4096個の半分をトレーニング用に、また残りの半分をチェック用に、信号の分散値を基準に分割した。最大層数を5、入力データの時間遅れ点の総数を32、各中間層の部分表現の数を24に設定し、部分表現の選択の基準は予測誤差の2乗平均値を用いて、最終層の決定にはA I Cを用いた。

フィッティング過程、およびこのようにして得られたモデルの例をFig. 5.11に示す。

(1) Learning process of GMDH (Fitting process of the layered model) :
Maximum number of layer = 5



(2) Obtained connections of the partial descriptions : Examples of Layer number L=1,...,4.



(3) Example of the complete description : Single layer of layered model (L=1)

$$x_t = -0.0049952 + 1.8951 x_{t-1} - 0.98568 x_{t-2} + 0.013247 x_{t-1}^2 + 0.011695 x_{t-2}^2 - 0.025823 x_{t-1} x_{t-2} + e_t$$

where e_t is a Gaussian white noise with zero mean and variance $\sigma^2 = 0.027323$.

Fig. 5.11 BWRの中性子雑音の模擬データ(k=0.8)にフィッティングした階層モデルの例

5.5.2 階層モデルによる雑音シミュレーション

得られた階層モデルを白色雑音で駆動して、もとの炉出力雑音信号が再現できるかどうか、シミュレーションしてみた。この再生データに対して従来の統計的手法を適用し、もとのデータと再生したデータの統計的性質を比較した。この結果、両者とも確率密度関数や線形のスペクトルの意味で十分良く似ていることが確認できた。

5.5.3 $k=0.8$ の解析

フィードバック・ゲイン $k=0.8$ の場合、システムは比較的大きい減幅比($DR=0.78$)を持ち、振動的である。これらのデータから、1層の階層モデルと19次のUARモデルが得られた。

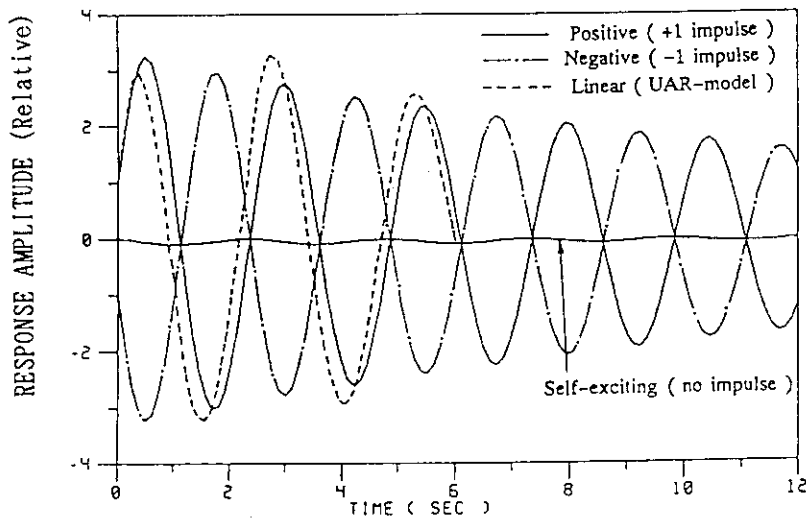


Fig. 5.12 非線形および線形インパルス応答関数($k=0.8$).

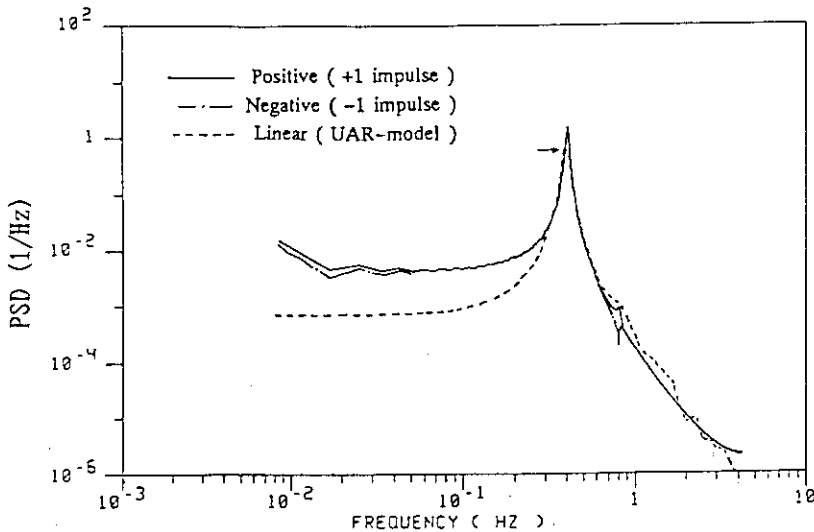


Fig. 5.13 非線形および線形パワー・スペクトル($k=0.8$).

Fig. 5.12は階層モデルの場合に推定された正負の非線形インパルス応答関数とUARモデルの場合の線形インパルス応答関数を示す。インパルス応答関数もまた、始めに振幅が増大し、次にゆっくりと制動する、という振動を示す。一方、両非線形インパルス応答関数ははっきりとした制動振動を示す。

Fig. 5.13は階層モデルの場合に推定された正負の非線形パワースペクトルをUARスペクトルとともに示す。BW Rシミュレーション・モデルにおける振動の原子炉特徴周波数である0.4Hzにおける顕著なピークが、各スペクトルに現れている。両非線形パワースペクトルにおけるピークはUARスペクトルのものよりわずかに高い、これは階層モデルの非線形の特徴として説明できる。非線形インパルス応答関数は、特定の大きさのインパルス(+1や-1)で励起

した場合の応答を表している事に注意すべきである。

一方、基本周波数の第2高調波(0.8Hz)については、UARスペクトルはその周波数点で広がったハンプを示すがピークには見えない。しかし、両非線形パワースペクトルは僅かなピークと凹みを示す。ここでは計算例を示さなかったが、フィードバック・ゲインが $k=0.1$, $k=0.5$ の場合には、非線形パワースペクトルもこのようなピークや凹みを示すことは無かった。この事は、 $k=0.8$ では中性子雑音信号が既に僅かな非線形性を持っていること、さらに、階層モデルで推定した非線形パワースペクトルがその様な僅かな高調波成分を表現できる事を示唆している。

5.5.4 $k=0.9$ の解析

フィードバック・ゲイン $k=0.9$ の場合、システムは非常に大きい減幅比($DR=0.93$)を持ち、不安定に近い。これらのデータから1層の階層モデルと20次のUARモデルが得られた。

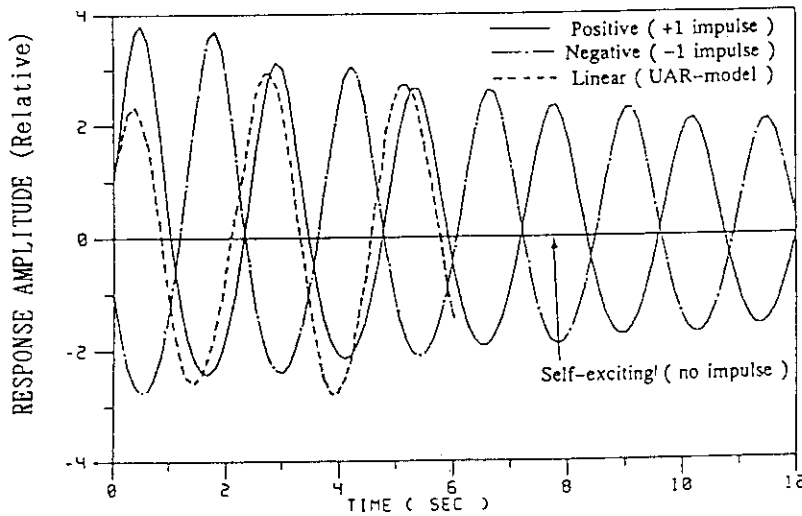


Fig. 5.14 非線形および線形インパルス応答関数($k=0.9$).

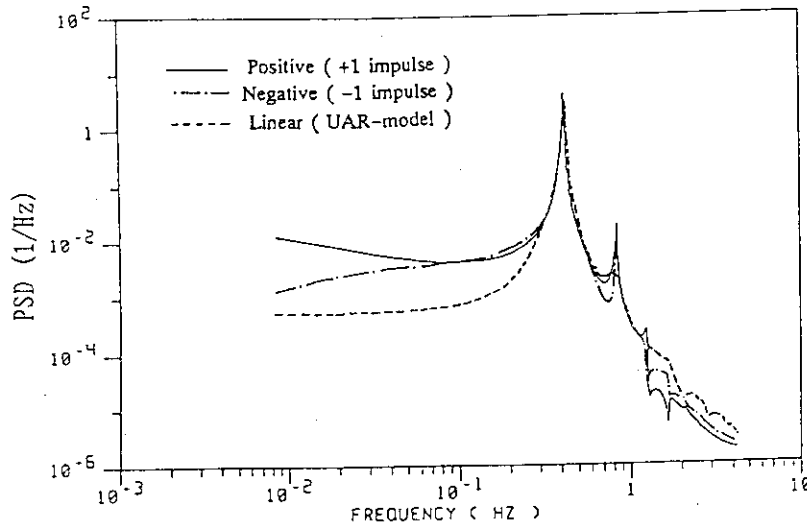


Fig. 5.15 非線形および線形パワー・スペクトル($k=0.9$).

Fig. 5.14は、非線形および線形インパルス応答関数を示す。線形インパルス応答関数は $k=0.8$ の場合と比べて似たような振るまいを示すが、制動が弱くなり、さらに振動的である。両非線形インパルス応答関数は正の振幅範囲で偏りを見せ、その範囲での強い非線形性を示す。

Fig. 5.15は、正、負の非線形パワースペクトルとUARスペクトルを示す。この場合、基本周波数のピークの大きさは各スペクトルで一致する。第2高調波のピークは、非線形パワースペクトルには非常に強く現れる。UARスペクトルではやや弱い成分の盛り上がりを見つけることができるが、形状だけでは高調波ピークの判断ができない。正の非線形パワースペクトルだけが、3次高調波のピークを示す。

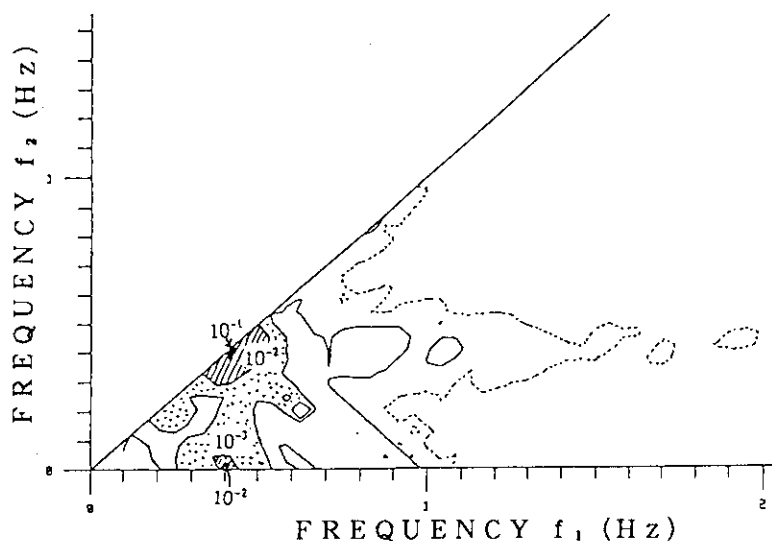


Fig. 5.16 バイスpekトル(ゲイン関数)の等高線図($k=0.9$).

その様に強い非線形性が存在する場合は、バイスpekトル解析によっても確認できる。Fig. 5.16はバイスpekトルのゲイン関数の等高線図を示す。バイスpekトルは(0.4, 0.0), (0.4, 0.4)Hzで2つの顕著なピークを示す。言換えれば、強い相関が、3つの周波数成分の間(0.4, 0.0, -0.4)および、(0.4, 0.4, 0.8)Hzにある。特に、後者の組合せは、高調波関係が2つの周波数成分0.4 Hzと0.8Hzの間で存在する事を意味する。

5.5.5 非線形パワー・スペクトルによる高調波の検出と安定性監視

5.3.5に述べたように、BWRの炉出力振動は確定系で定められる安定限界以下でも高調波を発生する分岐点が存在すると考えられ、これを事実とすれば炉出力振動のパワー・スペクトル上に出現する僅かな高調波ピーク成分を見つけることにより、振動分岐点から安定限界点までの領域の監視が可能となる。すなわち、部分スクラムや全スクラムでしか対応できない様な高振幅のリミット・サイクル状態に入る前に、その前兆現象である高調波の発生を捕え警報を与えることにより、安定な運転の確保が可能になる。

前節までに述べた解析では、 $k=0.8$, $k=0.9$ の場合がまさにその領域に相当する。

従来の安定性の指標である減幅比は、これらの場合、それぞれ0.78, 0.93を示した。安定性の観点からすると、これらは正しい評価をされているようにも見える。しかしRingshals-1でリミット・サイクルに陥った際に推定した減幅比は0.9~0.99の間に分布し、決して1には飽和しなかったのである。したがって、実際に指標として役立てようとする、理論的には1が安定限界を示すにも関わらず非線形効果が入り込むために1には収束せず、経験的な値としてDR=0.8とか0.9とかを閾値とした監視を行っているのが現状である。

一方、高調波成分出現を通常の線形手法で検出しようとしても、 $k=0.8$, $k=0.9$ の場合のUARスペクトルの解析結果から分かるように、 $k=0.8$ では痕跡すら見られず、 $k=0.9$ で辛うじて第2高調波の出現が予想される周波数に成分の盛り上がりが見られるだけであった。

ところが、筆者が提案した非線形AR型階層モデルに基づく非線形パワー・スペクトルの推定法をこの問題に適用した結果、 $k=0.9$ の場合は明確な高調波ピークが推定でき、また $k=0.8$ の場合でも高調波成分の痕跡を捕える事ができた。

したがって、非線形AR型階層モデルに基づく非線形パワー・スペクトルの推定法を適用す

ることにより、不安定状態に入る前の前兆現象である高調波の発生を、従来の線形スペクトルでは実現できない高感度で捕える事ができ、安定な運転に必要な監視手法として役立つことが分かった。

5.6 むすび

BWRの非線形炉出力振動に関して、従来の線形手法に基づく安定性監視法の問題点を明らかにし、次に非線形炉雑音解析の観点から新しい安定性監視法を議論し、不安定性の兆候である高調波成分の発生を高感度で検出する方法として、非線形自己回帰型階層モデルに基づく非線形パワー・スペクトル解析の適用を提案した。

次に、BWRの非線形動特性モデルを用いて人工的に作成した安定限界付近の炉出力振動データを利用して、GMDHに基づく階層モデリング手法による炉出力振動のモデル化と非線形スペクトル解析について議論した。この結果、次の事を明らかにした。

- ・ BWR炉出力振動の主成分は、簡単な2次のKolmogorov-Gabor型非線形多項式で十分近似できる。
- ・ 非線形自己回帰型階層モデルに基づく非線形パワー・スペクトル解析手法は、システム内部の非線形機構をモデル化できるため、安定限界付近の炉出力振動の安定性監視に応用した場合、従来の線形手法では達成できない感度で、不安定性の前兆である高調波成分の出現を検知できる。
- ・ 先に提案した非線形インパルス応答関数とそのパワースペクトル推定法は、階層に基づく解析に非常に役立つ。

6. NSRR炉出力振動の観測と解析

6.1 はじめに

研究炉は、一般に寸法が小さく出力が低く、そして構造も簡単である。原子炉動特性は1点近似で事足り、熱水力学的なフィードバックを考える必要もない。さらに小型の炉では、強制循環ポンプによる炉心冷却も必要なく、冷却材流動による炉内構造物の振動なども考える必要が無い。このため、小型研究炉の中性子ゆらぎは、核的雑音源だけに支配され、極めておとなしい炉であるのが普通である。

ところが、原研のNSRR(原子炉安全性試験炉)は、小型炉の割には炉出力のゆらぎが大きく、定常運転モードの最大出力付近(300kW)で運転中に高振幅のゆらぎによってスクラムした例も報告されている。中性子ゆらぎに以前見られなかった異変が生じたような場合には、新たに加わった雑音源を突き止めることはそれほど難しいことではない。その様な例にJRR-2の炉出力振動がある。しかし、NSRRの場合、スクラム後、通常の点検作業を行っても原子炉には異常は見つからなかった。

本章では、NSRRの炉出力変動(振動)の原因を探るために行った一連の実験と解析をまとめて述べる。

6.2 研究炉における炉出力振動

ここでは、2つの異なる研究炉で見られた炉出力振動について簡単に紹介しておく。

6.2.1 JRR-2の例

日本原子力研究所の研究炉JRR-2では、第9サイクル(1981年の3月)の起動時に、8MWまで出力上昇したところ、通常は見られない大きさの炉出力ゆらぎ(振動)が観測され始めた。このゆらぎは時間の経過とともに僅かに増加する傾向にあったが、その後10MWに変更するとゆらぎは3倍程度に大きくなった。このため、出力を8MW、5MWと落とし、中性子検出器の試験、冷却水温度や中性子分布を変化させた試験を通じて、炉心に問題があると推定されたため、原子炉を停止した。

この炉は、強制循環方式を採用した重水減速冷却、出力10MWのCP-5型小型研究炉で、材料試験、アイソトープの製造などに使用されている。制御棒は5本の粗調整棒と1本の調整棒から成る。燃料は45%濃縮ウランを使用しており、炉心にはU-A1分散型円筒型燃料体が24本挿入されている。この燃料体は、外径の異なる円筒状燃料要素が5枚同軸に重ね合わされた燃

料板群と、それを覆う外筒管からできており、中心部は中空で材料照射用の炉内照射カプセルを挿入できる構造になっている。

出力ゆらぎ増加の原因は、その後の調査により、炉心中央近くに配置されていた円筒型燃料体の1本の内部で、燃料板群と外筒管を固定する3本のネジが破損したため、強制循環による水流により燃料板群が浮き上がり、反応度外乱を引き起こしたものと分かった。(燃料体上部では流路閉塞の状態となり、ボイドが発生したと推定されている。) Fig. 6.1に、出力5MW時に観測された出力振動の波形を示す。

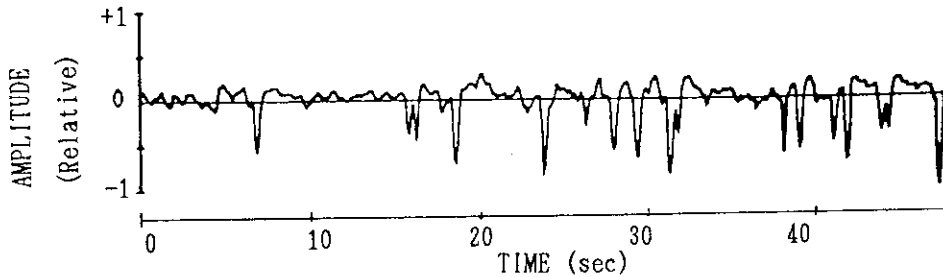


Fig. 6.1 JRR-2で観測された炉出力振動

6.2.2 NSRRの例

第2の例は、原研NSRR (Nuclear Safety Research Reactor)のもので、本章の主題でもある。この炉は、最大定常出力(300kW)付近で運転する場合、炉心の直上部付近の冷却材を攪拌する役目を持つN16ディフューザ・ポンプの運転条件によっては、かなりの大ききで炉出力変動(中性子束信号のゆらぎ分の増減)を引き起こすことが経験的に知られている。

この炉出力変動に係る最も典型的な事例として1980年7月11日に経験した原子炉スクラムが挙げられる。この日は13時3分に原子炉起動、13時35分に炉出力15Wに到達後、約10分間定出力運転。その後再び出力上昇を行い14時7分、300kW定出力運転に入った。スクラムが起きたのはそれから約1時間22分後、15時29分の時点である。

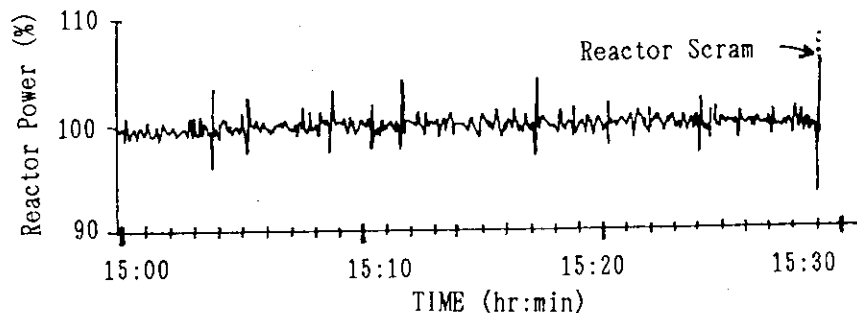


Fig. 6.2 NSRRのスクラム時の炉出力の記録チャート(Linearチャンネル).

この日の炉出力の記録チャート(Fig. 6.2)を見ると、300kW定出力運転中の炉出力は平均的には極めて安定した状態が持続していたのが分る。しかしながら、その平均値周りの変動分(ゆらぎ分)のピーク値はかなり大きく、対数出力の記録上に現れる程の大きさを持った変動がスクラムまでの間に10数回見出すことができる。このうちの数回は、自動制御系による自動運

転モードが解除されたことから考えて±5%以上の炉出力変動であったこと、さらにスクラムの時点では、スクラム設定レベルが炉出力の110%に設定されていることから分るように+10%以上の炉出力変動があったものと考えられる。

この時の運転では、N16ディフューザ・ポンプは300kW定出力運転の間、始めの5分間程の期間を除き運転されており、炉心上部のノズルから噴出される水量を調節するバルブはほぼ全開であった。

このスクラムの後、各種点検作業を経て原子炉の再起動が試みられた。この際に、N16ディフューザ・ポンプの水量調節バルブは微開状態に調節された。この結果、炉出力は前回に比較して安定し、約2時間50分の270kW(一部300kW)定出力運転期間中に一度も問題となる程の大きな変動は観測されなかった。

6.3 NSRRの概要と原子炉診断実験

前節で紹介した2つの研究炉の出力変動の例は、その原因に根本的な違いがある。JRR-2の場合は、燃料体の異常により生じた事故であるのに対して、NSRRの場合は機器の故障や異常の類ではなく原子炉そのものは正常であり、動特性の不安定性に起因する現象であった点である。本節では、NSRRの炉出力変動の原因を探るために実施した実験について述べる。

6.3.1 原子炉の概要

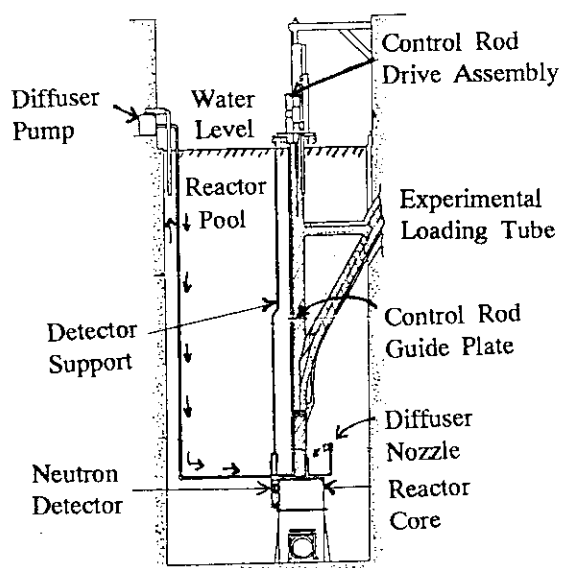


Fig. 6.3 NSRRの概観

NSRRは、米国GA社製TRIGA-ACPR (Annular Core Pulse Reactor:環状炉心パルス炉)であり、定常出力300kW、パルス出力最大23GWの原子炉安全性研究炉である¹⁾。燃料としてはウラン(平均約20%濃縮)－水素化ジルコニウム合金が使用され、炉心には157本の燃料要素が実装されている。炉心はオープン・プール底部に設置されており、出力時の炉心冷却はプール水(軽水)の自然循環により行われる(Fig. 6.3参照)。

炉心中心部には比較的大きな実験孔が鉛直方向に貫通しており、この実験孔に結合されている装填管を通じてプール水面上の炉室(入口奥側)からパルス照射用の試験カプセルを炉心内に装填できる構造になっているということが、NSRRの特徴の一つである。1975年に運転を開始して以来、この実験孔を用いてパルス出力による種々の燃料破損実験が行われてきた。

6.3.2 計装・自動制御系・ディフューザ

次に、本実験と解析を理解するために必要なNSRRの設備と計測信号について述べる。

(1) 原子炉計装

中性子検出器は、Fig. 6.4に示すように炉心周りに6本配置され、2本1組で炉心の3方向に固定されている。定常出力時には、運転用Linear(CIC型)、Log(FC型)、安全系用Safety-1、-2(FC型)の合計4本が使用される。各検出器は炉心外周部に固定された検出器案内管の内部に在り、ケーブルは金属製の被覆管内を通過してプール水面上に貫ける。被覆管はプール水面上および炉心上部の2点で支持されている。また、炉心には2本の計装燃料体が挿入され、燃料中心温度(F T-1, -2)が計測できる。これらの計装信号を利用してゆらぎ信号を収録した。

(2) 水流と炉心周りの温度ゆらぎ

炉心は自然循環により冷却される。炉心下の支持部には、将来の改造を見越して強制循環用のダクトが設けられているが、開口部はシールされている。現在は、炉心側面に開口部が設けられ、プール水はそこから直接流入し、上部グリッド板の穴から流出する形態になっている。

炉心出入口の冷却材温度に関する計装が無いため、Fig. 6.5に示すように、3つの熱電対を炉心側面の開口部付近、上部グリッド板から上に10cm、炉心側面の非開口部に配置し、これらを炉心入口、出口、側面の冷却材温度ゆらぎの測定値とした。

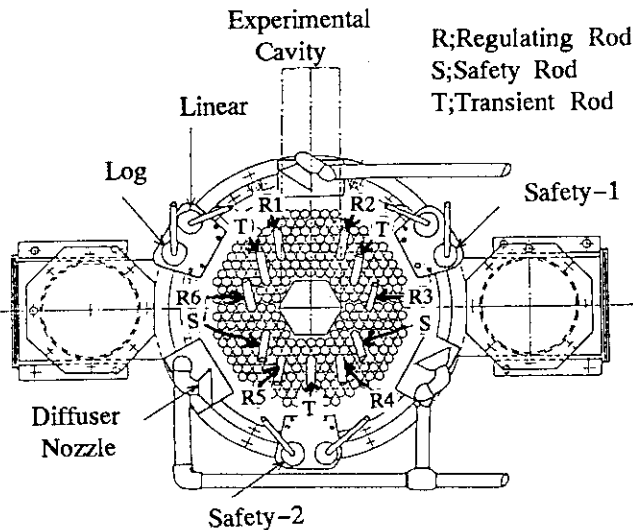


Fig. 6.4 上から見た炉心の概観

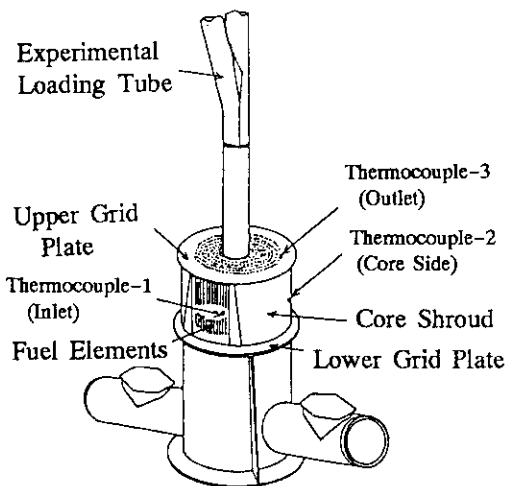


Fig. 6.5 熱電対の位置

(3) N16ディフューザ・ポンプ

NSRRの特徴の1つに、N16ディフューザ・ポンプがあげられる。放射性同位元素 ^{16}N は、原子炉の運転により炉心内で発生し、加熱された冷却水の自然上昇流によってプール水面まで運ばれ、プール周辺の放射線レベルを高くする。ディフューザは、噴出水で炉心上部の冷却水を攪拌し、 ^{16}N の上昇を阻止することによって滞在時間を稼ぎ、自然崩壊させることを狙った装置である。Fig. 6.4に示すように炉心上部に3つのノズルがあり、Fig. 6.3に示すようにプールの比較的上側の水を汲み上げて、これを炉心上部に噴出する。

(4) 制御棒

制御棒は、Fig. 6.4に示すように、炉心内に同心円状に11本配置され、6本が調整棒、2本が粗調整棒そして残り3本がパルス出力用のトランジェント棒である。定常出力時には6本の調整棒だけが使用される。制御棒は、プール水面上の制御棒駆動機構から連結棒を介して炉心部に吊り下がっている。調整棒用の連結棒だけは駆動機構と電磁石で結合され、その連結棒の水中部分には案内管が無く裸の状態である。調整棒の駆動はどれか1本を動かす手動モードと自動制御時に6本まとめて動かすBankモードがある。調整棒の駆動機構は、ラック・アンド・ピニオン方式である。

(4) 自動制御系

NSRRの出力調整用の自動制御系は、Fig. 6.6に示すブロック線図の通りで、2つの誤差信号発生器とマスター・スレーブ方式のサーボ系で構成される。

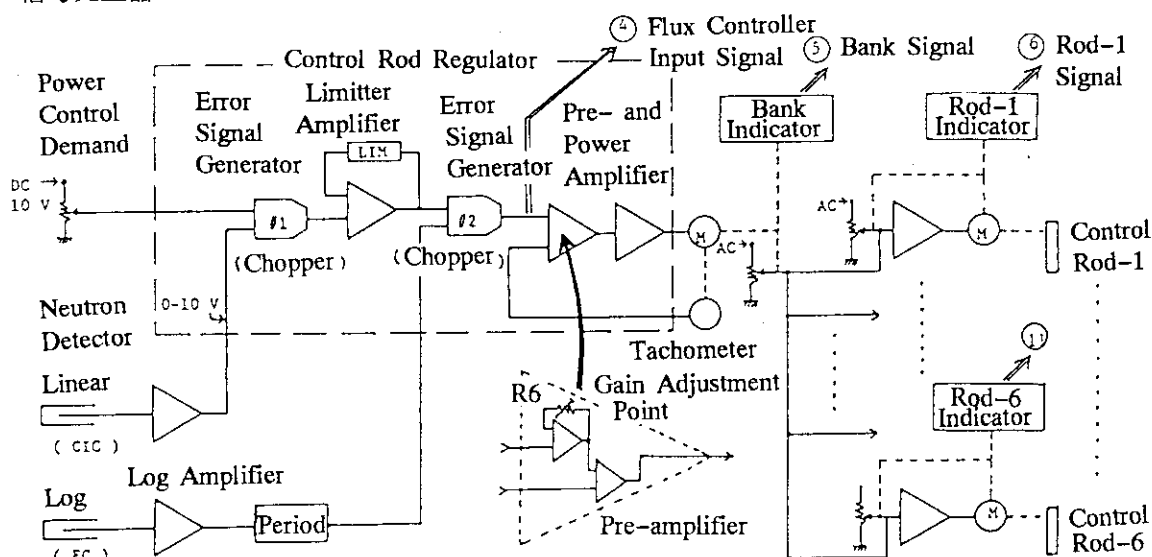


Fig. 6.6 自動制御系のブロック・ダイアグラム

1段目の誤差信号発生器は運転員のデマンド入力と現在の炉出力(Linear信号)の差信号を作る。この信号は60Hzの搬送波を振幅変調したもので、リミタ回路により最大振幅が制限されている。2段目の誤差信号発生器では、この振幅変調信号と対数炉出力(Logペリオド信号)の差信号となる。マスター・サーボ系は、自動制御時には差信号に従って、また手動操作時にはボタンを押している時間だけ、可変抵抗器の軸をモータで回転させ、後段のスレーブ・サーボ系の目標値を設定する。この際、モータの回転速度が一定になるようにタコ・ジェネレータ・フィードバックが掛けられている。スレーブ・サーボ系は各制御棒に対応し6系統ある。手動時には任意の1本以外は切り離される。自動制御時にはBankモードとなる。各スレーブ・サーボ系は入力部の可変抵抗器に記憶されている現在の位置と先の目標値の差電圧を入力信号として制御棒駆動機構のモータを回転させる。この回転角は入力部の可変抵抗器を動かしてフィードバックを掛ける仕組みになっている。マスター・サーボ系の目標値はBank指示計で、また各スレーブ・サーボ系の位置(すなわち制御棒の挿入位置)は、各Rod指示計でモニターできる。制御信号は60Hzか50Hzの振幅変調波であるが、指示計出力はこれを平滑化したものが得られる。

6.3.3 実験の概要

3回の実験(Phase-I~III)を行った^{2, 3)}。Phase-Iで全体の特性をつかみ、IIでは、制御系の一部と外乱源として疑われた冷却材温度ゆらぎを調べた。IIIでは制御系内部の各要素を詳細に調べ、また炉出力変動現象の出力依存性などを調べた。目的と運転条件をTable 6.1にまとめて記す。

運転条件は、実験毎に出力レベル、自動制御系(On, Off, 制御系入力ゲインの調整値(Fig. 6.6参照))、ディフューザ(On, Off, 水量調節弁開度(V))を変えた。

測定変数は、収録できる数に制限があるため、実験の目的と運転条件に合わせて選択した。測定した変数の一覧をTable 6.2に示す。各信号は差動アンプやハイ・パス・フィルタによるDC成分の除去、増幅、ロー・パス・フィルタなどの前処理を経て、FM記録アナログ・データ・レコーダに記録した。原子炉の運転は、定常最大出力時の場合¹⁶Nの発生のため制限があり最大3~4時間に抑えられている。また、出力変更時には信号が非定常となり収録系の調整にも時間を要する。このため、データの収録は1条件につき10min程度となった。

Table 6.1 実験目的と運転条件

	目的	出力	自動制御系	ディフューザ
Phase-I	現象の把握	300kW	On	Off, On (V=微開)
Phase-II	制御系の特性, 外乱源 (冷却材温度ゆらぎ)	270kW	On, Off	On, Off (V=0, 1/2, 2, 2.5)
Phase-III	出力依存性, 制御系の 詳細な特性,	15W, 2kW, 90kW 180kW, 270kW	On(ゲイン・V ¹⁶ W G=0, 1, 2, 3, 5)	On, Off (V=1/4)

Table 6.2 測定した炉雑音信号

Experiment Signal/Sensor	Phase-I (1) 83.07/14	(2) 83.07/18	Phase-II 83.12/09	Phase-III 84.08/
Neutron Linear	ch. 1	ch. 1	ch. 1	ch. 1
Neutron Log	ch. 2	ch. 2	ch. 2	-
Neutron Safety-1	ch. 3	ch. 3	ch. 3	ch. 2
Neutron Safety-2	ch. 4	ch. 4	ch. 4	ch. 3
Fuel Temp FT-1	ch. 5	ch. 5	ch. 5	-
Fuel Temp FT-2	ch. 6	ch. 6	ch. 6	-
Coolant Temp Inlet	-	-	ch. 9	-
Coolant Temp Outlet	ch. 8	-	ch. 10	-
Coolant Temp Core-side	-	-	ch. 11	-
Water Microphone	ch. 9	ch. 9	-	-
Accelerometer Linear	ch. 10	ch. 10	-	-
Flux Controller Input	-	-	-	ch. 4
Rod Indicator Bank	ch. 7	ch. 7	ch. 7	ch. 5
Rod Indicator R-1	-	-	ch. 8	ch. 6
Rod Indicator R-2	-	-	-	ch. 7
Rod Indicator R-3	-	-	-	ch. 8
Rod Indicator R-4	-	-	-	ch. 9
Rod Indicator R-5	-	-	-	ch. 10
Rod Indicator R-6	-	-	-	ch. 11

6.4 観測データとその解析

6.4.1 突発的な炉出力振動

NSRRでは高出力時の炉雑音測定は行われたことが無く、Phase-I実験が始めてのものとなった。1日目(Phase-I(1))には、ディフューザが運転されている状態(水量調節弁の開度V=微開)で、出力が300kWに達し自動制御系による定出力運転に入ってから、測定が開始された。約4時間の間各条件は変更されなかった。プール水温は19.6℃から27.5℃に上昇した。一方、また2日目(Phase-I(2))は、同じ条件で約3時間運転され、またプール水温の変化は19.1℃から24.9℃であった。

観測を始めてすぐに、小型研究炉には通常見られない数%の振幅を持つゆらぎが炉出力に現れ、変動パターンは時間の経過と共に変化していった。Fig. 6.7に典型的な5つの変動波形を示す。始めの4つは、Phase-I(1)に観測されたもので時刻の順に並べてある。また最後の1つはPhase-I(2)の例である。上から2番目は正弦波振動で±2%(ピーク値)、また最後の周期性の振動波形はさらに大きな振幅を持ち、正側3%、負側2%程度と上下非対象な振動を示し、しかも1周期毎に小さな尖りを持つを示すなど、非線形性を帯びることが分かった。

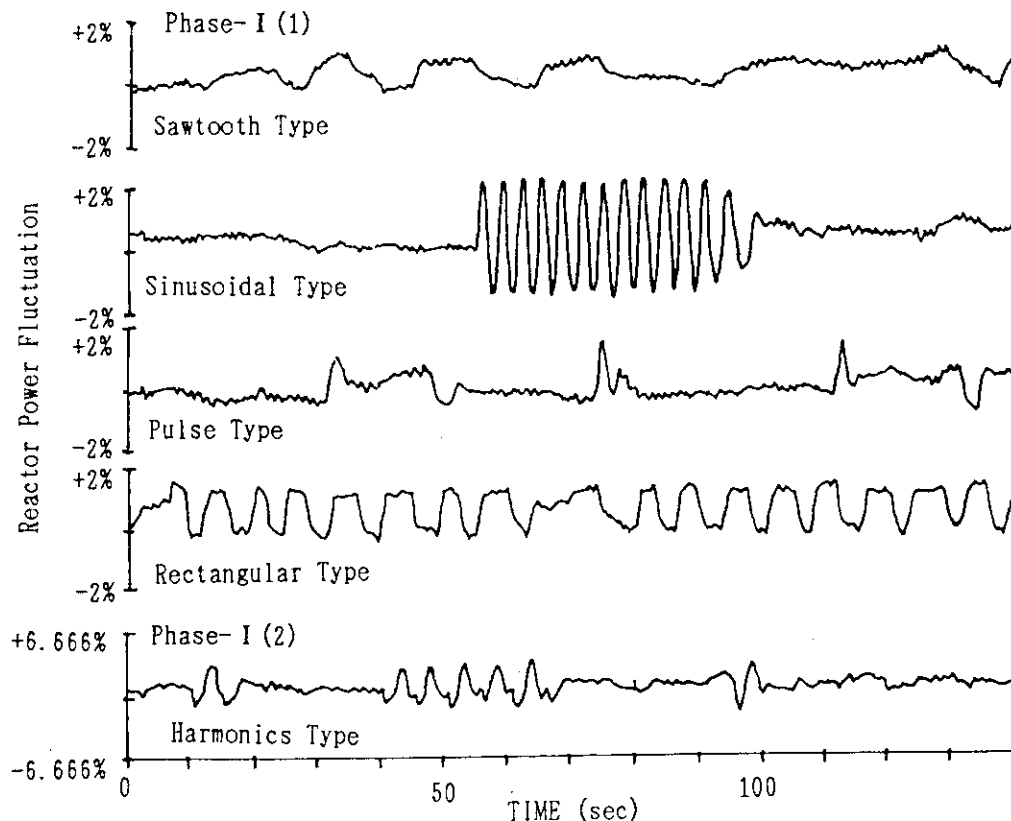


Fig. 6.7 NSRRで観測された炉出力振動の典型的な波形

Phase-I (1)に見られた炉出力変動パターンのうち、周期性の強い(a)鋸波状、(b)正弦波、(c)方形波状の3つについてスペクトル解析を行った。

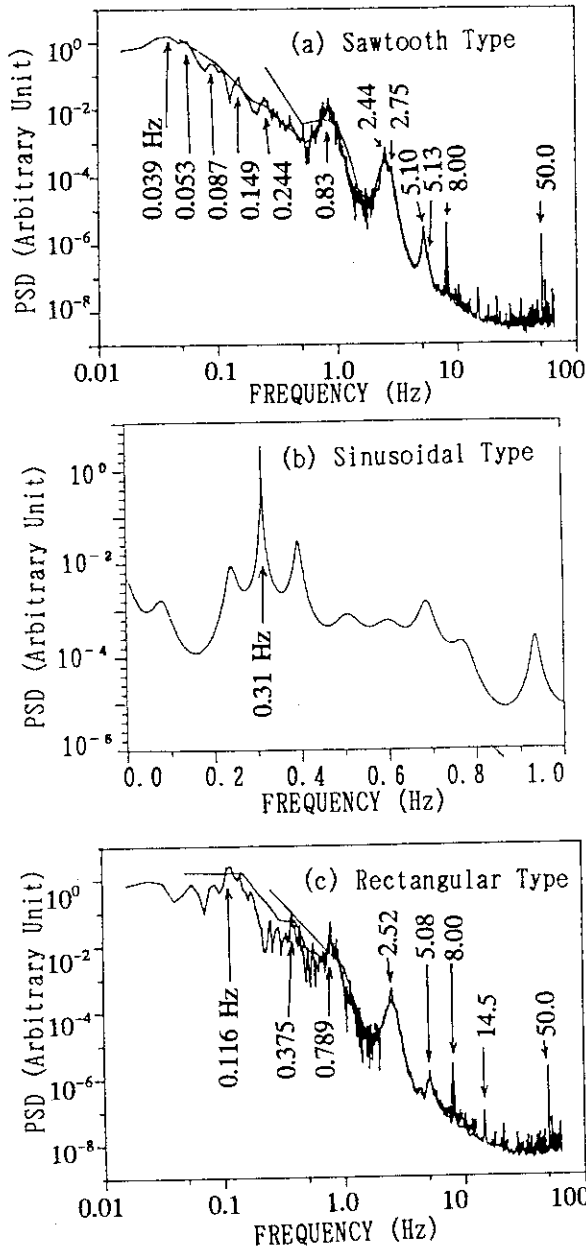


Fig. 6.8 炉出力振動のパワー・スペクトル

(a) 鋸波状変動のスペクトル

Fig. 6.8(a)に鋸波状の炉出力ゆらぎのパワー・スペクトルを示す。低周波0.04Hz付近に大きな成分があり、高周波に向うにつれて減少するが途中幾つかのピーク成分が見られる。変動を支配しているのは、0.04Hz(周期25sec)付近を遮断周波数とする不規則な低周波成分で、これが鋸波成分に相当する。すなわち、鋸波成分は一定の周期を持つ成分ではない。一方、0.8Hz付近とその3倍、5倍に鋭いピーク成分が見られる。これは、Fig. 6.7の観測波形に見られる細かい振動成分で、ディフューザの運転時だけに見られる成分である。主成分に比べて20dB程度小さい。高調波を発生していることから、単純には機械振動が疑われる。他の8Hz、50Hzは線スペクトルであることから、測定系の雑音であることが分かる。

(b) 正弦波状振動のスペクトル

正弦波振動が炉出力に現れた時には、これと同期した振動がBank信号や計装燃料体の燃料中心温度にも現れた。しかし、持続時間が短く突然現れ突然消えるため、時系列解析手法ではあまり有効な解析ができない。最も長い13周期のデータを用いて、1次元ARモデリング手法を用いたスペクトル推定を試みた(Fig. 6.8(b))。3つの信号(炉出力、Bank、燃料温度)は全て同一の共鳴周波数0.31Hz(周期3.2sec)を持つことが分かったが、推定精度が悪いため高調波成分に関しては情報が得られなかった。コヒーレンス関数により2つの中性子検出器信号の関係を解析したが、コヒーレンスは1(完全な相関)、位相は同相で、炉出力振動の空間依存性は否定された。

(c) 方形波状振動のスペクトル

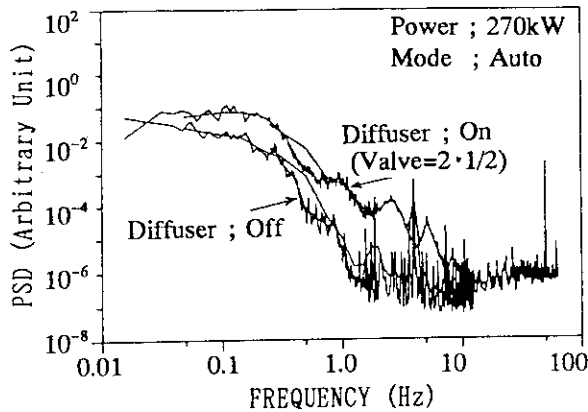
Fig. 6.8(c)に方形波状の炉出力ゆらぎのパワー・スペクトルを示す。主成分は遮断周波数0.12Hz(8.3sec)の不規則成分で、鋸波に比べれば規則波に近い。波形は完全な方形波ではなく多少鈍っているが、第3高調波に相当するピーク(0.38Hz)も見られる。ディフューザに関係した成分は同様に現れている。

6.4.3 外乱源—冷却材温度ゆらぎ

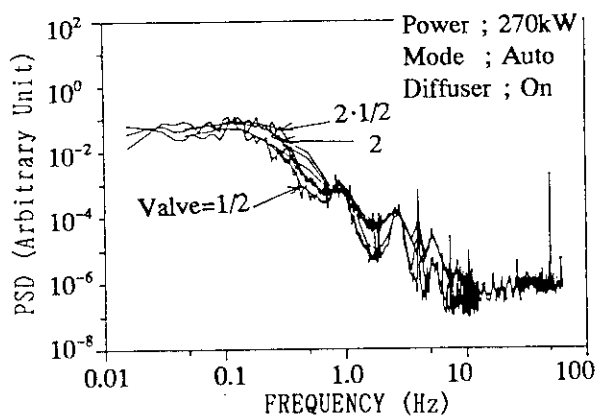
ここでは、ディフューザ運転が冷却材温度や炉出力の変動に及ぼす影響について述べる。ディフューザは、先に述べたように炉心上部でプール水を攪拌し、¹⁶Nの水中滞在時間を稼ぎ、崩壊に導く役目を担っているが、副次的に次の効果がある。

- ① プール水のマクロ的な温度分布を均一にする。
- ② プール水の局所的な(攪拌領域の)温度ゆらぎを増大させる。
- ③ 自然対流以上に強い水流を引き起す。

ディフューザが炉出力振動の外乱源を作るとすれば、まさに②の温度ゆらぎが外乱源である可能性が高い。



(a) ディフューザ運転時と停止時



(b) 異なる弁開度(V=1/2, 2, 2.5)

Fig. 6.11 ディフューザ運転条件を変えた時の炉出力変動の比較

(1) 炉出力変動に与えるディフューザの効果

炉出力変動に対するディフューザ運転の効果影響は、運転時と停止時のパワー・スペクトルの比較により評価できる。Fig. 6.11(a)は、Phase-IIの270kW自動制御運転時における両状態を比較したものである。運転により1.0Hz以下の低周波成分が増大し、特に0.2Hz付近で10dB程度増加しているのが明確に分る。

さらに、水量調整弁の開度(1/2, 2, 2.5)を比較したものがFig. 6.11(b)である。1.0Hz以下の炉出力変動成分は、線形ではないが開度に依存して増大することが分かる。1.0Hz以下は制御棒駆動による応答成分が現れる周波数領域であることから、これらの成分は、ディフューザの運転によって何らかの外乱が生じ、これが自動制御系に印加されてできたものと考えられる。

一方、約0.8Hzを基本波とする特徴的なピーク成分とその3倍、5倍の周波数に高調波らしき成分が現れることは、Phase-I実験で明らかにされているが、さらに水流調整弁が2以上では7倍の周波数付近にピークが現れる。これについては後述する。

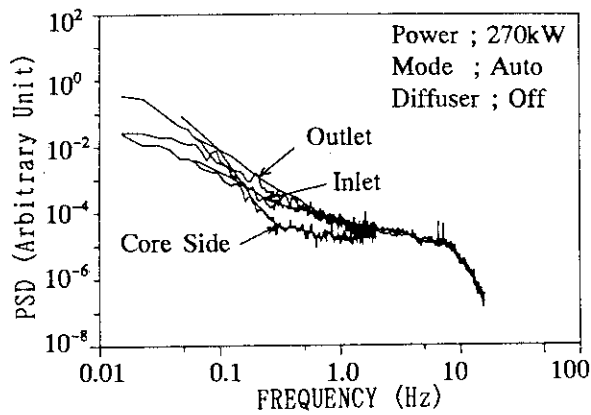
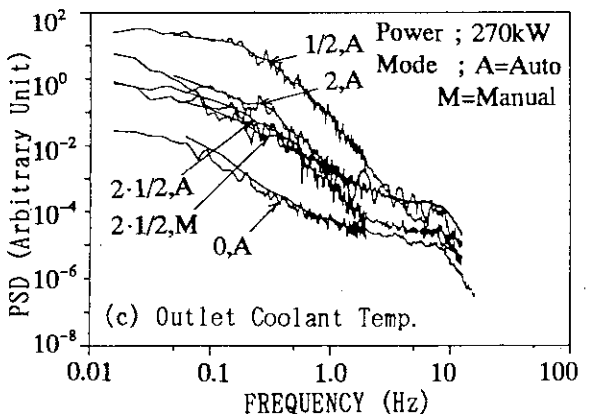
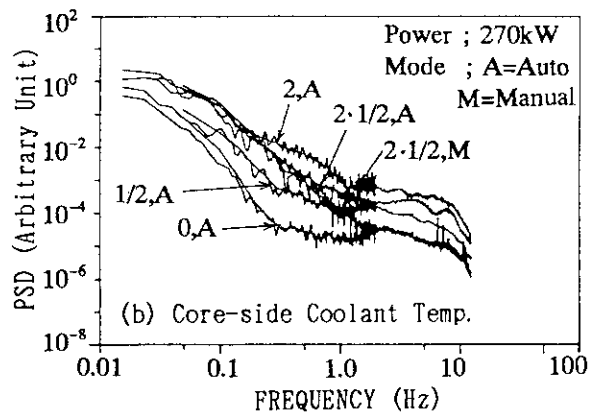
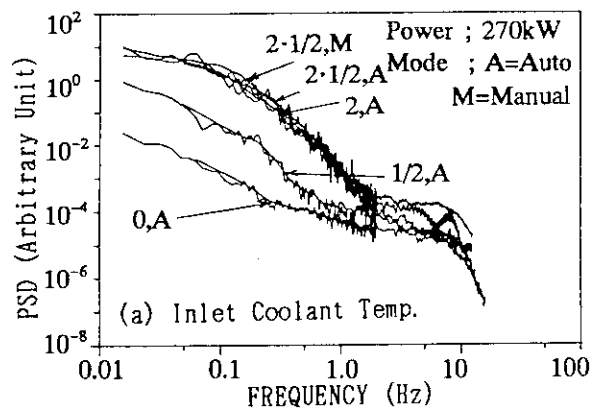


Fig. 6.12 ディフューザ停止時の各冷却材温度ゆらぎのパワー・スペクトル



(2) ディフューザと冷却材温度ゆらぎ

次に、炉心周りの冷却材温度ゆらぎに対するディフューザ運転の影響を評価する。NSRRは炉心内に冷却材温度センサを持たないため、臨時に配置した3つの熱電対(炉心開口部、グリッド板上、炉心側面)を代用した。便宜上、開口部を入口、グリッド板上を出口と呼ぶ。

始めにディフューザ停止時の各温度ゆらぎのパワー・スペクトルをFig. 6.12に示す。3者とも差異はわずかである。

Fig. 6.13(a)~(c)は、各センサのディフューザ停止時と運転時(弁開度 $V=1/2, 2, 2.5$)の比較を示す。入口温度ゆらぎは弁開度とともに増大し、開度2で30dB程度大きくなる。炉心側面の温度ゆらぎも同様の傾向があるが、増大量は少なく最大20dB程度である。ところが、出口温度ゆらぎは異なる傾向を見せ、開度1/2で40dBに増大するが、開度2以上ではかえって減少し、20dB程度になってしまうのが分かる。

炉出力や冷却材温度ゆらぎのパワー・スペクトル解析を通じて、ディフューザの運転により炉出力変動が増大した冷却材温度ゆらぎも増大することが明らかになった。しかし、炉出力と各温度ゆらぎ間のコヒーレンス解析を試みたところ、直接的な相関は見られなかった。この理由は、3つの温度ゆらぎの測定点がいずれも炉心の外にあり、かなりミキシングが進んでしまっているためと考えられる。

Fig. 6.13 各冷却材温度ゆらぎのパワー・スペクトル((a)入口, (b)炉心側面, (c)出口)のディフューザ運転条件による比較(弁開度 $V=0, 1/2, 2, 2.5$)

(3) 冷却材流路

先に、ディフューザ運転時に水量調節弁の開度を1/2から2に増やすと、出口温度ゆらぎが減少し、入口温度ゆらぎが増加することを述べた。Fig. 6.14は、このときの測定信号である。

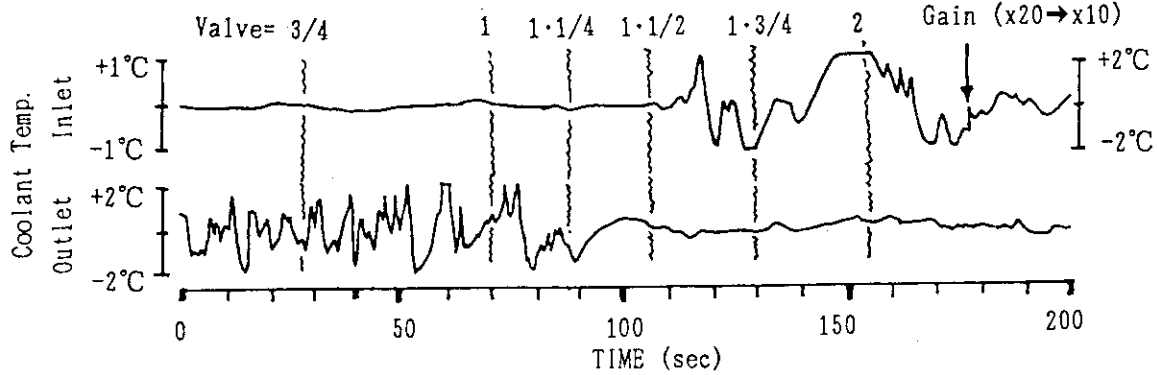


Fig. 6.14 ディフューザの弁開度を変えた場合の入口、出口温度ゆらぎの波形

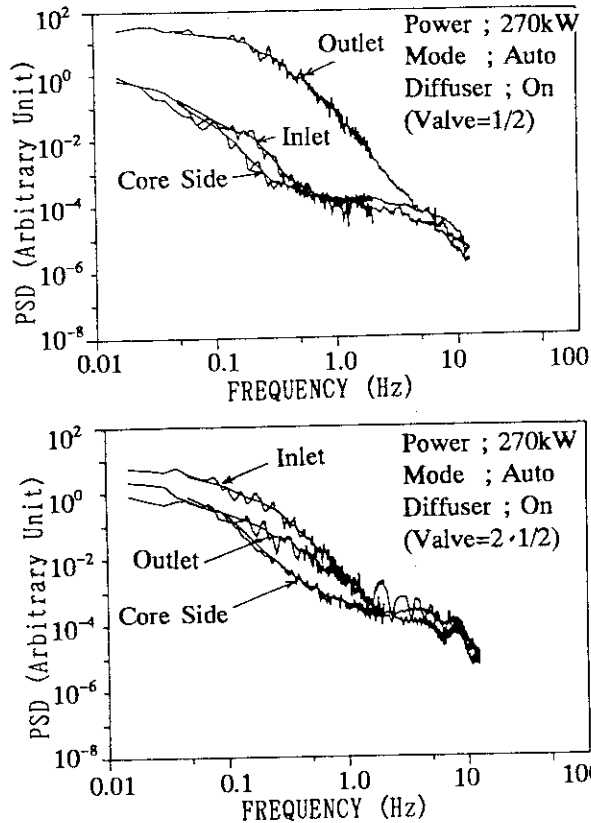


Fig. 6.15 冷却材温度ゆらぎのパワー・スペクトルの測定点の違いによる比較
((a)弁開度 $V=1/2$, (b) $V=2$)

このように、この逆転現象は明確に捉えることができる。ここで、ディフューザの弁開度毎に、各センサの温度ゆらぎスペクトルを比較して見る。

Fig. 6.15(a), (b)に、弁開度1/2および2.1/2の場合の各温度ゆらぎのパワー・スペクトルの比較を示す。開度1/2の場合、出口温度ゆらぎは他に比べて遙かに大きく、0.3Hz付近ではが入口温度ゆらぎと30dBの差がある。また入口温度ゆらぎは、炉心側面に比べて0.1~0.5Hzの周波数範囲で成分の増加が見られる。一方、開度2.1/2の場合、この関係が逆転し、はっきりと入口温度ゆらぎが出口側よりも大きくなっている。ただし、そのレベル差は10dB程度とわずかである。

これらの結果から、開度1/2の場合は冷却水のミキシング効果は主として出口(炉心上部)に集中するが、開度2以上の場合は全体的に広がる傾向を見せ、特に入口付近に集中することが分かる。ここでFig. 6.3~Fig. 6.5をもう一度見ると分かるように、ディフューザの3つのノズルは炉心上部に向って水を吹きつける構造になっている。一方、この原子炉の炉心冷却は自然循環に頼っている。このことから、ディフューザの運転が炉心内部の水流を乱し、大きな温度ゆらぎを持つ冷却水を炉心に送り込むことによって、制御系に外乱を供給しているものと考えられる。

6.4.4 自動制御系の特性

(1) 炉出力変動に対する寄与

先に、ディフューザの運転によって冷却水温度ゆらぎが増大し、これが自動制御系の外乱に

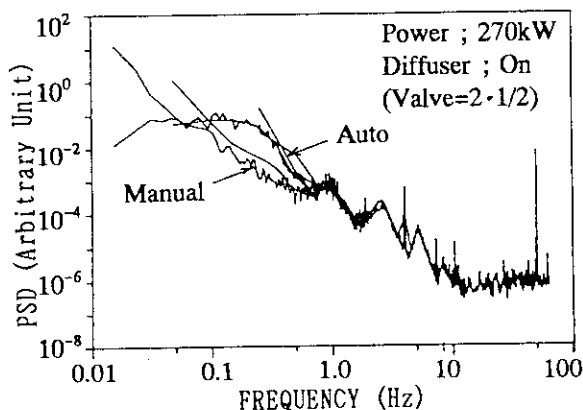


Fig. 6.16 自動制御運転時と手動運転時の炉出力変動のパワー・スペクトル

なると推定した。それでは、自動制御系はディフューザの運転によって発生した外乱にどのように応答し、どのように炉出力変動に影響を与えているのであろうか？

Fig. 6.16は、Phase-IIにおいて測定された、ディフューザ運転中の自動制御ならびに手動運転時の炉出力変動のスペクトルを比較したものである。この図から自動制御系は0.1Hz以下の変動を抑える効果を持つが、0.1~0.5Hzの変動を最大10dB程増やしてしまう効果を持っていることが分かる。

(2) 自動制御系の伝達関数

次に、自動制御系の伝達関数を検討してみる。Fig. 6.17は、Fig. 6.6の自動制御系のブロック・ダイアグラムを伝達関数に置き換えたものである。

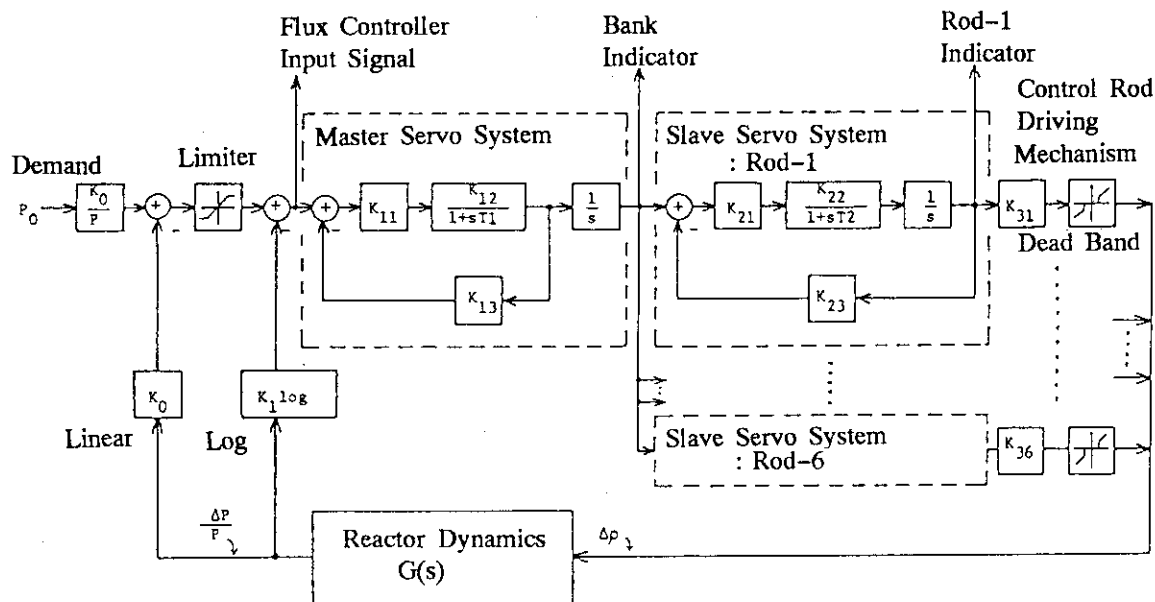


Fig. 6.17 伝達関数で表現した自動制御系

この制御系は、2つのサブシステム、すなわち中性子束信号から制御信号を作るマスター・サーボ系と、制御信号に従って制御棒を駆動するスレーブ・サーボ系で構成されている。これらのサブシステムの伝達関数Gm, Gsは、それぞれ次の1次遅れ要素を組み合わせた2次系および2次振動要素で表される。

$$G_m(s) = \frac{K_{11}K_{12}/T_1}{s + (1 + K_{11}K_{12}K_{13})/T_1} \cdot \frac{1}{s} \quad (6.1)$$

ここで、 K_{11} は駆動アンプのゲイン、 K_{12} は駆動モータのゲイン、 K_{13} はフィードバック・ゲイン、 T_1 は駆動モータ部の時定数。

$$G_s(s) = \frac{K_{21}K_{22}/T_2}{s^2 + s/T_2 + K_{21}K_{22}K_{23}/T_2} \quad (6.2)$$

ここで、 K_{21} は駆動アンプのゲイン、 K_{22} は駆動モータのゲイン、 K_{23} はフィードバック・ゲイン、 T_2 は駆動モータ部の時定数である。これはまた、次のように書き換えられる。

$$= \frac{1}{K_{23}} \cdot \frac{\omega_n^2}{s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2} \quad (6.2)'$$

ここで、 ω_n は固有周波数($=2\pi f_n$)、 ζ は減衰係数で

$$\omega_n^2 = K_{21}K_{22}K_{23}/T_2 \quad (6.3a)$$

$$2\zeta\omega_n = 1/T_2 \quad (6.3b)$$

各パラメータは、(6.3a)、(6.3b)式から、次のように求まる。

$$\omega_n = (K_{21}K_{22}K_{23}/T_2)^{1/2} \quad (6.4a)$$

$$\zeta = 1/(2\omega_n T_2) \quad (6.4b)$$

$$T_2 = 1/(2\omega_n \zeta) \quad (6.4c)$$

上式より、固有振動数 ω_n はゲイン調整に依存していること、減衰係数 ζ は、固有振動数 ω_n と駆動モータ部の時定数 T_2 に依存しており、 $\zeta < 1$ で出力が振動することなどが分かる。

マスターとスレーブの伝達関数は、ともに線形で安定な系であるが、スレーブ・サーボ系の伝達関数は、入力信号を受けた時に減衰振動的な応答を起こす形をしており、これらを原子炉と自動制御系から作られるフィードバック・ループの内部に置いて使用すると、パラメータ次第では不安定な状態になる可能性がある。

(3) スレーブ・サーボ系の同定

スレーブ・サーボ系の特性は、自動制御運転で重要となる周波数領域で出力信号が振動を起こす可能性を持っている。まず、これに注目し、炉出力振動の発生機構を説明しようとした。

BankとRod-1の間のスレーブ・サーボ系の周波数応答関数に関して、単純な1入力1出力系を仮定して、Phase-IIの観測データからの推定を試みた。その結果、ゲイン関数は比較的顕著なピークを持つ形状である事が推定され、固有周波数を0.3Hz、減衰係数 ζ を0.05~0.1とした場合、時定数 T_2 は5.13~2.57secと推定できた。しかし、この解析は原子炉伝達関数を通じてフィードバックする効果を無視している点に無理があり、さらに、スレーブ・サーボ系の応答にピークがあったとしても、これだけではPhase-Iで観測した様々な周期を持つ波形や非線形波形の発生については説明できないという難点があった。

(4) ゲイン変更による実験

次に、制御系のパラメータを変更して原子炉を運転し、炉出力変動の様子を探ってみた。

制御系内部の伝達関数の形状・パラメータはハードウェア構成や仕様によって決り、唯一変更可能なパラメータは、マスター・サーボ系の入力部にあるプリアンプのゲイン(K_{11})であった。これは、NSRRの臨界と特性試験の時に行われたステップ応答法による制御系の試験(石川ら(1976))の時にも使われている。そこで、Phase-IIIではこのゲイン K_{11} を変更し、その時の炉出力変動を測定する事にした。ゲイン K_{11} は、プリアンプ部分のプリント基板上の約12回転の可変抵抗器R6の値によって決定される(Fig. 6.17参照)。R6は目盛が無いので現在位置を基準に回転数(右回りを+)で読み、対応する相対的ゲイン・レベルをこれで表すことにした。

実験は、炉出力270kWにおいて一時中断していたディフューザを再び運転開始した時点から始め、まず基準レベル0の状態を測定した後、次々にレベルを変更し合計5つのレベル(0, +1, +2, +3, +5)について測定した。各レベルで観測した炉出力変動の一部をFig. 6.18に示す。

図から、レベル0に比較して、レベル+1は周期約4secの振動が現れる頻度が少なくなる。レベル+2では、さらに少なくなるがより低周波の成分が増える。レベル+3では、周期4sec程度の持続的な炉出力振動が生じ、レベル+5では完全な持続振動状態になることが分る。

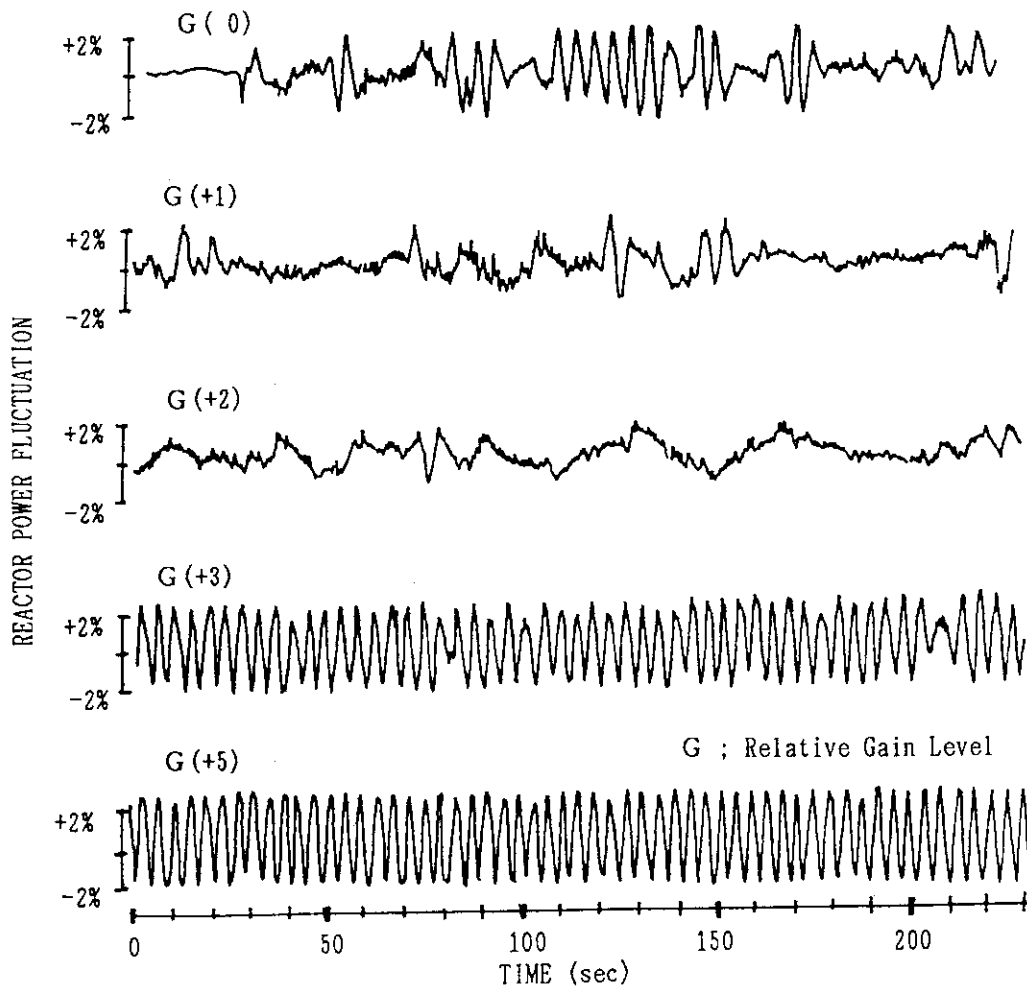


Fig. 6.18 自動制御系のゲイン係数 K_{11} を変更した場合の炉出力振動

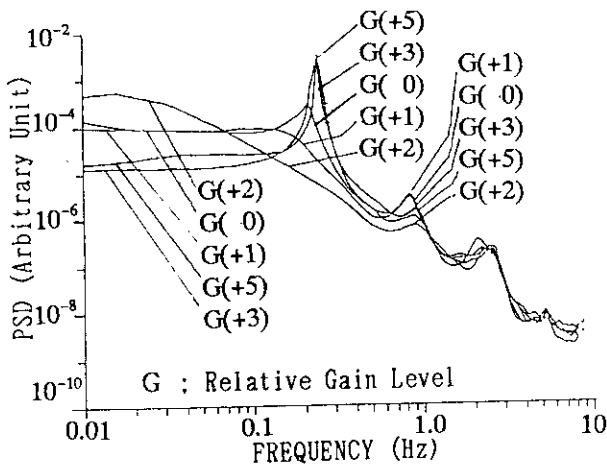


Fig. 6.19 炉出力変動の比較

(5) ゲイン変更時の炉出力変動

各ゲイン・レベルに対応する炉出力変動のパワー・スペクトルをFig. 6.19に示す。

まず、炉出力振動の主成分である0.2Hz付近のピーク成分についてであるが、ピーク周波数は、レベル 0,+3,+5の順に、0.18, 0.23, 0.24 Hzと高くなり、その形状も鋭くなる。またピーク高はレベル 0のスペクトルの裾を基準にして、4.1dB(1.6倍)、14.3dB(5.2倍)、15.4dB(5.8倍)であり、一度増大した後飽和し、完全な持続振動状態を表している。

レベル+1では時刻歴グラフ上で0.2Hz付近の振動成分が見えるが、スペクトル上にピークは現れない。スペクトルの低周波成分は、遮断周波数を0.16Hzとする不規則雑音から成立つと考えることができる。レベル+2では0.2Hz付近の成分が減衰し、代わりに0.015Hz付近に7.8dB(2.5倍)の大きな成分が発生している。これは時刻歴グラフ上の周期40sec前後の三角波に相当する。炉出力変動はレベル+1が最も安定であるといえる。

(6) スレーブ・サーボ系の動作

Phase-IIIでは、全ての制御棒(R1~R6)の位置信号を測定した。Fig. 6.20に180kW時の例を示す。各制御棒はBank信号に従って動作するが、Rod-2とRod-5は、方形波状の自己発振を示す。

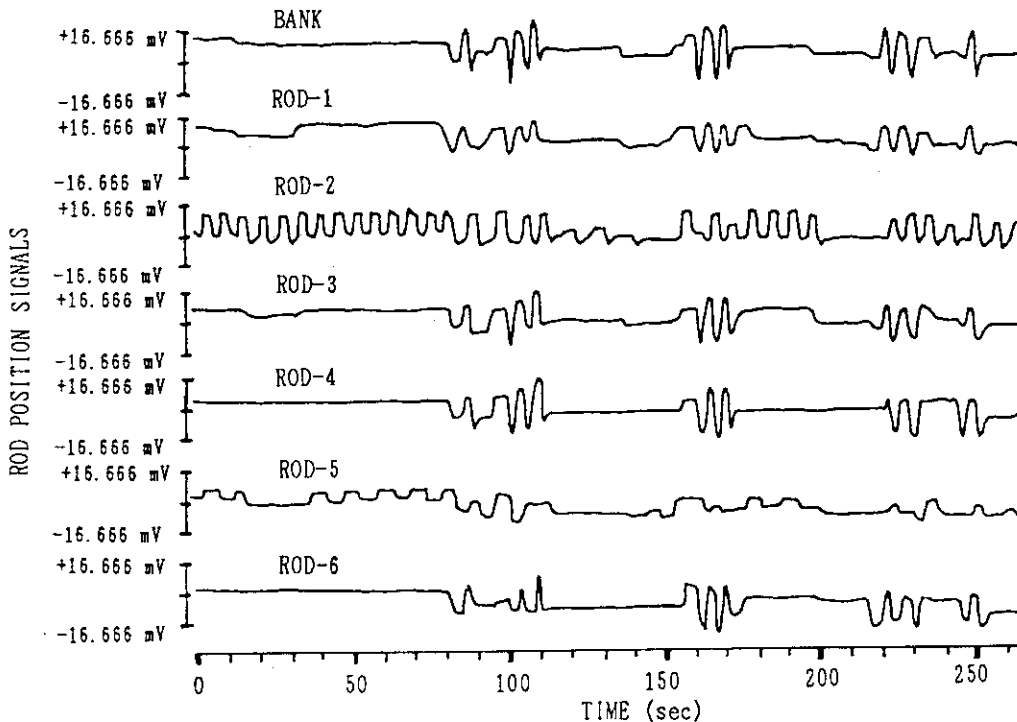


Fig. 6.20 Phase-III実験, 180kW運転時に観測された各Rod位置信号の記録

起こしているのが分かる。この自己発振は、Rod-2とRod-5だけに見られ、それぞれ独立に突然起こり突発止る性格のものである。また、これらの信号は、大局的にはBank信号の入力がある場合はそれに従い出力上昇や下降などは正常に動作するが、微視的には、この自己発振現象が重畳し、他の信号と比べて大きな位相遅れを生じる。この2つの制御棒は、NSRRの臨界と特性試験の時に行われた制御棒性能試験において、駆動速度が最も遅かった2つである。

一方、他の制御棒信号に目を移すと、それぞれ個性を持っており互に若干性格が異なるのが分かる。

Phase-IIIのレベル +5 における炉出力変動は持続振動状態となるが、この時のRod-2や-5の信号波形は、Fig. 6. 21に示す通りである。

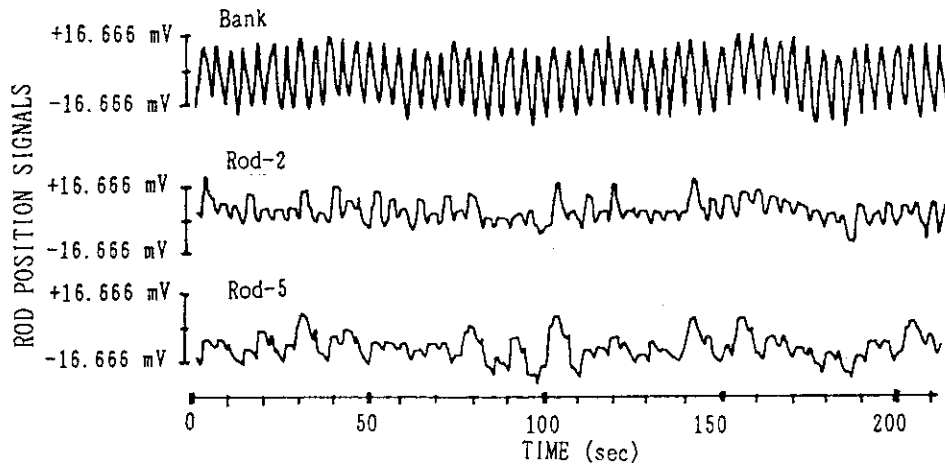


Fig. 6. 21 Phase-III実験, 270kW, レベル+5で観測されたRod位置信号の記録

以上、NSRRの自動制御系では6本の制御棒駆動機構のうちの2本の特性が他に比べて極端に悪いことが分かった。

しかし、偶発的に起きる自己発振などは、線形系では考えられぬことで、内部に閾値を持った非線形機構がなければならない。自己発振の見られない時に線形手法で観測データから、周波数応答関数を推定してみても、これらを見つけるのは困難である。

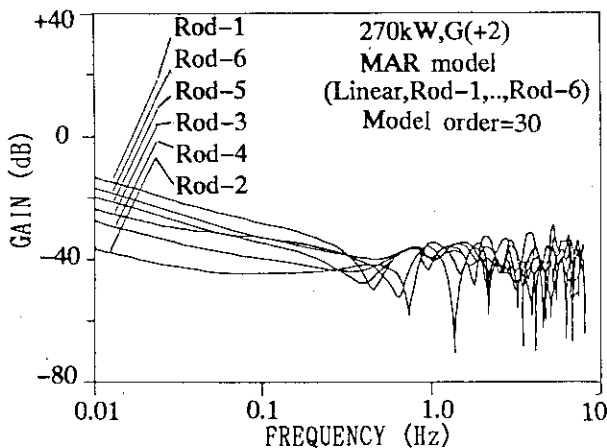


Fig. 6. 22 周波数応答関数(Linear→Rod-1~6)

フィードバック経路を考慮した多変数ARモデルを用いて、Phase-IIIの観測データのうち、0.3Hz付近の変動が最も少ないレベル +2 のデータから6つの制御棒位置(Rod-1~6)と炉出力の間の双方向の周波数応答関数を推定してみた。このモデルでは、Bank信号は炉出力から6つの制御棒位置に向う経路に含まれ、マスター側とスレーブ側の両伝達関数を合せた形の周波数応答関数が推定される。これをFig. 6. 22に示す。この結果、各スレーブ・サーボ系の伝達関数は特別なピークを持たないことが示されている。

この解析に使用したデータは、Rod-2に自己発振が見られ、Rod-5には見られなかった場合のものである。結果が意味を持つとすれば、Rod-2のゲインが他に比べて低くなっているという点であろう。しかし、各制御棒は不感帯を持つため、このケースではRod-4はRod-5に比べると低く推定されてしまっている。

(7) 外乱源の炉出力に与える効果

制御棒駆動機構の自己発振は、線形手法のARモデルによる解析では外乱源の発生と捉える。Phase-IIIのレベル+1の観測データを用いて、炉出力とBank信号から成る2変数フィードバック・システムを同定し、有色雑音源からフィードバック・システムへの閉ループ周波数応答関数を推定したものが、Fig. 6.23に示してある⁴⁾。これによると、炉出力の振動周波数0.3Hz付近に+3dB程度のピークがあり、(冷却材温度ゆらぎなどの)反応度外乱あるいは制御棒駆動機構の自己発振などによる外乱が、このフィードバック・システムに印加されると、0.3Hz付近の成分は、ループを巡ることによって増幅されることを意味している。

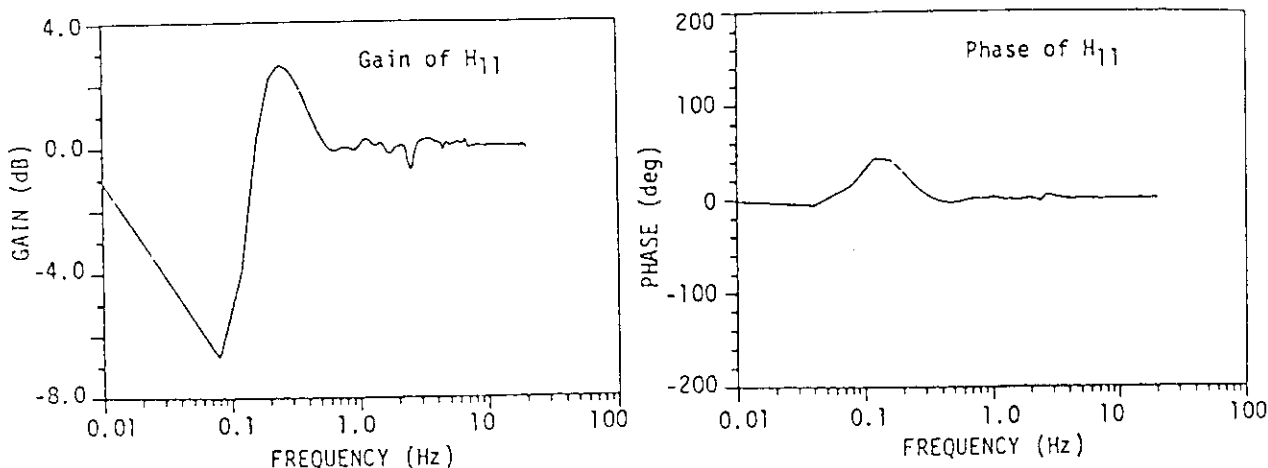


Fig. 6.23 炉出力信号またはBank位置信号の雑音源からの閉ループ周波数応答関数 (ゲイン関数と位相関数)

6.4.5 制御棒の振動

ディフューザ運転時に炉出力ゆらぎに周期1sec以下の細かい振動成分(Fig. 6.7参照)が現れ、

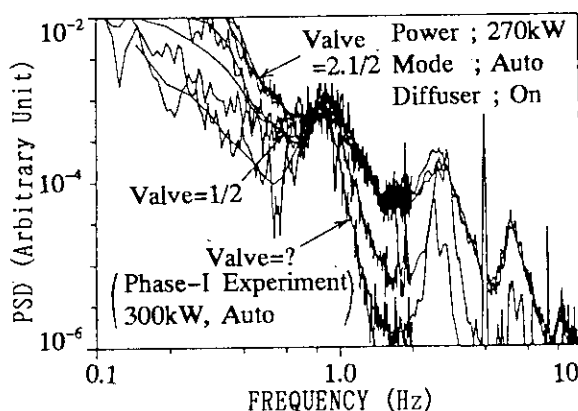


Fig. 6.24 0.8Hz付近のピーク成分の拡大図

それらは、約0.8Hzの基本周波数およびその奇数倍(3, 5, 7)高調波成分からなり、ディフューザとの因果関係が明確な現象であることは、6.4.1に述べた。ここでは、この成分について検討する。

ディフューザ運転時の炉出力ゆらぎのパワー・スペクトルを0.8Hz付近の周波数範囲について拡大したのがFig. 6.24である。Phase-IIの270kW時における水量調整弁開度(1/2, 2, 2.1/2)の場合、Phase-Iの300kWにおける微開の場

合が比較してある。これによると、基本波のピークの形状は弁開度が小さい場合は鋭く、大きくすると次第に裾を広げることが分る。これらの特徴から、ディフューザの運転によって作られる水流によって、炉心構成要素の何かが機械振動を起こしているものと考えられる。この成因については、しかしPhase-IIまでの実験解析では特定できなかった。

このため、Phase-IIIの実験では、NSRRの炉心監視用水中TVカメラを用いて、炉心上部グリッド板付近、特に3つあるうちの1つのディフューザ・ノズルと、それに対面するRod-3, Rod-4付近をが位置する部分をズーム・アップし、視覚による振動源調査を行った。その結果、Rod-3がディフューザによる噴出水によって周期約1secで水平方向に振動しているのが確認できた。

6.5 炉出力振動のメカニズムの研究

6.5.1 解析的手法に基づく現象論的モデル

NSRRの炉出力振動の発生機構は、自動制御系の不安定性に関する非線形機構が主役である。この意味で、原子炉を1点炉近似+非線形性モデルで表現するならば、将にBWRの現象論的非線形モデル(Konno(1986)⁶⁾やMarch-Leuba(1986)⁷⁾と同じ取り扱いが可能となる。この視点から、NSRRの振動現象を説明するモデルを研究しはじめた。

温度あるいは自動制御系の遅れを考慮したフィードバック型非線形原子炉モデルを対象に、安定性や不安定時の出力波形を調べている。しかし、本研究論文の範囲を越えるのでここでは詳細には述べない。詳しくはKonnoおよび筆者ら(1990)とその続報^{7, 8)}に注目されたい。

6.5.2 カオス・フラクタル理論に基づく安定性の評価

NSRRの炉出力振動現象は、同一の発生機構であるにも関わらず、単なる正弦波振動に留らず様々な波形を現す。このような現象の説明には従来の確率過程を前提とした従来の炉雑音理論を越えている。最近、確定系から作り出される不規則振動が注目されている。カオスやフラクタルと呼ばれるこの領域の研究は始ったばかりである。しかも、悪いことには、NSRRの振動現象を説明するには、カオス的機構+確率過程のアプローチが必要である。

この研究も、すでにNSRRの観測データを基にして始められた。これについてはSuzudoおよび筆者ら(1991)⁹⁾とその続報に述べられている。

6.6 むすび

NSRRの炉出力振動の原因を探るため、炉雑音解析の観点から炉雑音測定実験と解析を行

いった。

(1) 炉出力振動とそのパターン

観測の結果、従来、高出力かつディフューザ運転時にNSRRの運転用出力指示計に現れていた変動は高振幅の炉出力振動であることを明らかにした。これらは(a)鋸波状、(b)正弦波状、(c)方形波状など、通常の炉には見られない変動波形を持ち、それらの主成分は0.1~0.3Hzにある事、さらに運転条件によっては、Phase-1(2)の観測例のように、高調波成分を含む非線形的な振動を生じることなどを明らかにした。

(2) 原因

炉出力振動に空間依存性は無く、また炉出力が高振幅で振動する時には燃料中心温度や制御棒位置信号にも振動が観測できることなどから、出力振動の原因は、炉心構造物の異常ではなく原子炉伝達関数と制御系が作るフィードバック・ループの特性にある事を明らかにした。

さらに、自動制御系に関する実験と解析を行い、6つのスレーブ・サーボ系のうち、Rod-2とRod-5の応答特性が特に悪く、また時々非線形性に起因した自励振動を起こしている事を明らかにした。また自動制御系の入力ゲインを変えた実験を行い、これまでに観測された正弦波振動と同様の周波数で炉出力が持続的に自励振動を起こすことを明らかにした。これらの結果から、炉出力振動の原因は、自動制御系の特性の悪さにあることが結論された。

(3) 外乱源とその効果

制御系の特性を乱す外乱源として、炉水を攪拌するディフューザの炉出力変動に対する効果を調べた。この結果、ディフューザの使用は炉心入口付近の温度ゆらぎを大幅に増大させること、また、この時に自動制御運転を行うと、炉出力に0.1~0.5Hzの成分を増加させてしまうことなどから、これが制御系に対する外乱源になっていることを明らかにした。さらに、多変数自己回帰モデルを用いて、制御棒位置Bankと原子炉出力からなるシステムに対する雑音源からの閉ループ周波数応答関数を推定し、0.3Hz付近のゲインにピークがあり、外乱が入力されるとこの付近の成分が増幅されることを明らかにした。

(4) 制御棒振動

ディフューザ運転時に、炉出力に0.8Hzを基本波とする高調波成分が現れることを見つけた。このスペクトル・ピークの形状は、ディフューザの噴出水量により変化し、炉出力振動とは直接の関係は無いが、炉内構造物の非線形振動と考えられ、炉心監視用TVカメラによる観察により、制御棒の1本が振動を起こしていることを明らかにした。

以上のように、炉雑音測定実験と解析を通じて、炉出力振動の原因は制御系の特性の悪さとディフューザ運転による冷却水温度外乱の発生にあることが分かり、実験後、制御系のゲインを比較的安定だったレベル+1に変更し、また出力運転時にはディフューザの水量調整弁開度を制限するなどの対策を取り、運転は安定化した。根本的な対策は、制御系の改造が必要であったが、その後、パルス運転モードの変更に伴う改造が1990年に実施された。

7. 瞬時ARスペクトルによる 非定常炉雑音解析

7.1 はじめに

原子炉の起動運転や停止運転など過渡運転時に観測される炉雑音信号は非定常となるが、これらは原子炉システムの診断に重要で有益な情報を多く含んでいる。しかしながら、炉雑音解析の分野では、非定常信号の解析を行うことは稀である。何故ならば、非定常炉雑音解析のために確立された効果的な手法が無く、また過渡運転中の炉雑音測定は定常運転時よりも一層難しいからである。

非定常データの解析には、信号の持つ非定常的特性を取り扱える手法を必要とする。特性の変化が緩慢な場合で、かつデータが局所定常と見なせる時、通常のFFTスペクトルを用いた周波数-時間スペクトルが適用されている¹⁾。しかしながら、FFTの場合は、解析にある程度のサンプル数を必要とし、時間軸の分解能は粗くなる。一方、最小2乗AR法は、原理的には従来の推定法よりも少ないデータ・サンプル数で十分な推定ができることから、これを用いれば、時間分解能の向上が期待できるが、少数サンプル時には、周波数-時間スペクトルのパターン変化が、真の非定常特性によるものなのか、推定法の誤差なのか、さらには確率的な不確定性によるものなのかを特定する指針が無く、精度的には曖昧さが残る。

本章では、原子炉状態の追跡、監視、異常診断に役立つ非定常炉雑音解析手法の確立を目的として行った瞬時ARスペクトルによる周波数-時間スペクトル法に関する研究について述べる。始めに、局所定常を仮定した瞬時の統計量、瞬時のARスペクトル、4つのARモデルの計算法について概説する。次に少数サンプル時におけるARスペクトルの推定誤差に関して行った数値計算による評価と、その結果に基づいて構成した周波数-時間スペクトルの模擬非定常データによる評価について述べ、ARスペクトルの推定精度の曖昧さを排除することによって分あるいは秒単位の時間分解能で非定常炉雑音データの解析が実現できることを示す。最後に、本方法によるBolsssele炉の停止運転時に収録された非定常データの解析例を示す。

7.2 非定常データの瞬時スペクトル解析

7.2.1 瞬時の2乗平均

定常信号 $x(t)$ に対して、2乗平均値は無限な観測時間の場合の時間平均の極限として次のよ

うに定義される。

$$\Psi x^2 = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T x(t)^2 dt \quad (7.1)$$

非常に短い時間間隔($t, \Delta T$)の場合、式(1)は瞬時の2乗平均

$$\Psi x^2(t, \Delta T) = \frac{1}{\Delta T} \int_0^{\Delta T} x(t)^2 dt \quad (7.2)$$

で置き換えられる。(7.1)および(7.2)式の両推定値は、信号が非定常の時偏り誤差を持つ。しかしながら、時間区間($t, \Delta T$)の信号が局所定常に限定されている場合には、分散誤差は増加するが、(7.2)式は不偏推定を与える。

7.2.2 瞬時ARモデル

定常過程 $x(t)$ のARモデルは

$$x(t) = \sum_{m=1}^M a(m) x(t-m) + n(t) \quad (7.3)$$

によって与えられる。非常に短い時間間隔($t, \Delta T$)で局所定常な過程の場合、 k 番目の時間区間の瞬時ARモデルは

$$x(t) = \sum_{m=1}^{M(k)} a(m, M(k), k) x(t-m) + n(t, k) \quad (7.4)$$

と表現できる²⁾。ここで、 $\{a(m, M(k), k)\}$ はAR係数、 $n(t, k)$ は平均0、分散 $\sigma^2(k)$ のガウス型白色雑音、 $M(k)$ はARモデルの次数である。式(7.4)は定常ARモデルと等価であり、 $\Delta T \rightarrow \infty$ の時、両者は一致する。

ある非定常特性を系統的に表現する時変ARモデル³⁾の場合、白色雑音の項は $n(t)$ によって表され、時変ARモデルの係数は式(7.4)の係数とは違ったものとなる。本解析では、式(7.4)を用いる。

7.2.3 瞬時スペクトル

瞬時ARモデルを用いて、 k 番目の区間の瞬時のスペクトル $P(f, k)$ が

$$P(f, k) = \frac{\sigma^2(k) \Delta t}{|1 - a(f, M(k), k)|^2} \quad (7.5)$$

によって求められる。ここで、 Δt はサンプリング間隔、 $a(f, M(k), k)$ は $a(m, M(k), k)$ のFourier変換で、

$$a(f, M(k), k) = \sum_{m=1}^{M(k)} a(m, M(k), k) \exp(-2\pi f m \Delta t) \quad (7.6)$$

によって決められる。

7.2.4 ARモデル・フィッティング法

ARモデル・フィッティングは、観測データ $\{x(t); t=1, \dots, N\}$ に基づいて、次数 M 、係数 $\{a(m); m=1, \dots, M\}$ およびガウス型白色雑音を特徴付ける分散 σ^2 を決定する過程であり、 $(M+2)$ 個の未知パラメータを決める問題である。

観測データから各ARパラメータを決定するための計算アルゴリズムは種々のものがあるが、ここでは、後節の数値計算実験で比較を試みた4つの代表的な計算アルゴリズムを概説する。

(1) Yule-Walker法

式(7.3)に $x(t)$ を掛け期待値を取ることにより、Yule-Walker正規方程式と呼ばれる下記の線形方程式が導出される。

$$R_M A_M = \Sigma_M \quad (7.7)$$

ここで、

$$R_M = \begin{pmatrix} R(0) & R(-1) & \dots & R(-M) \\ R(1) & R(0) & \dots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ R(M) & \dots & \dots & R(0) \end{pmatrix}, \quad A_M = \begin{pmatrix} 1 \\ a(M,1) \\ \vdots \\ a(M,M) \end{pmatrix}, \quad \Sigma_M = \begin{pmatrix} \sigma^2 \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \end{pmatrix}$$

また、式(7.7)は、ARモデルを線形予測フィルタと見なした場合の予測値の2乗平均誤差を最小化する係数を導出することによっても得られる。 M 個のAR係数と1個の共分散から成る $(M+1)$ 個の未知パラメータは、相関関数 $\{R(k); k=1, \dots, M\}$ をデータから推定し、これを式(7.7)に代入することにより求められる。より高次のモデルの解は、一旦 $M=1$ の場合のAR係数が決められると、Levinsonの逐次アルゴリズムを用いて効率的に計算できる。この論文では、便宜上、この計算法をYule-Walker法と呼ぶことにする。最後の未知パラメータである最適モデル次数 M はAICを用いて決定される。

この方法によるモデル・フィッティングの成否は、推定される相関関数の精度に依存している。データのサンプル数が小さい場合、相関行列 R_M の正定性を保証するために、相関関数の推定には、偏り誤差の在る推定式を用いるのが普通である。しかしながら、サンプル数が小さくなると、ARモデルのフィッティング誤差は大きくなる。

(2) Burg法

MEMとも呼ばれるBurgの方法(筆者ら(1982)³⁾を参照)は、Yule-Walker法の修正型で、欠点であった相関推定値の偏り誤差を抑えるために、AR係数の決定に限定された最小2乗法が適用されている。最後のAR係数 $a(M, M)$ 、すなわち反射係数は、順方向と逆方向の線形予測エネルギーの和を最小化することにより、サンプル・データから直接的に推定される。理論的に導出されたBurgの公式がこの計算に使用されている。もし、サンプル・データの分散 $R(0)$ と $a(1, 1)$ が既知であると、式(7.7)から $R(1)$ と σ^2 が得られる。 $\{R(k); k=1, \dots, M\}$ と高次のモデルにおける $a(M, M)$ を除くARパラメータもまたLevinsonの式を用いて得られる。

この方法によるモデル・フィッティングの成否は、 $R(0)$ の推定精度だけに依存している。したがって、この手法のフィッティング誤差はYule-Walker法よりも小さい。

(3) Marple法

Marple法(Marple(1980)⁵⁾、筆者(1984)⁶⁾)は、Burg法のアイデアを拡張した改良型アルゴリズムである。基本的なアイデアは反射係数だけでなく他の全てのAR係数の決定に厳密な最小2乗法を適用することにある。このアイデアから、下式が導出される。

$$R_M A_M = E_M \tag{7.8}$$

ここで、

$$R_M = \begin{pmatrix} r(0,0) & \dots & r(0,M) \\ \vdots & & \vdots \\ r(M,0) & \dots & r(M,M) \end{pmatrix}, \quad A_M = \begin{pmatrix} 1 \\ a(M,1) \\ \vdots \\ a(M,M) \end{pmatrix}, \quad E_M = \begin{pmatrix} e_M \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \end{pmatrix}$$

$$r(i,j) = \sum_{t=1}^{N-M} (x(t+M-j)x(t+M-i) + x(t+j)x(t+i)) \tag{7.9}$$

式(7.9)は、時間平均操作を除いた順方向と逆方向の相関関数の和として定義される関数である。ARパラメータは式(7.8)の解として得られる。式(7.8)を解くために、Levinsonの逐次アルゴリズムを使うのは不可能である。というのは、式(7.8)の R_M はToeplitz行列ではないからである。しかしながら、Levinsonアルゴリズムに代って、複雑ではあるが効率的に計算できる、式(7.8)の解のための逐次アルゴリズムが存在する。さらに、もし $M=1$ での式(7.9)の初期値が得られれば、高次モデルの場合の(7.9)式は逐次的な関係を用いることにより効率的に計算できる。

(4) Kitagawa-Akaike法

Kitagawa-Akaike法(Kitagawa(1979)³⁾、筆者(1984)⁶⁾)は、Marple法におけるのと同様に厳密な最小2乗法を用いたアルゴリズムである。AR係数は順方向あるいは逆方向のどちらかの予測誤差の和を最小化することにより決定される。予測誤差を最小化してAR係数を決定する問題は、下記の $(N-M)$ 同次線形方程式を解くことになる。

$$X^t X A = X^t Y \tag{7.10}$$

ここで

$$X = \begin{pmatrix} x(M) & x(M-1) & \dots & x(1) \\ x(M+1) & x(M) & \dots & x(2) \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ x(N-1) & x(N-2) & \dots & x(N-M) \end{pmatrix}, \quad Y = \begin{pmatrix} x(M+1) \\ x(M+2) \\ \vdots \\ x(N) \end{pmatrix}, \quad A = \begin{pmatrix} a(1) \\ a(2) \\ \vdots \\ a(M) \end{pmatrix}$$

Q を直交系のカラム・ベクトルから成る $(N-M) \times M$ 正則行列、 R を上側三角行列とする時、正則行列のQR分解

$$X = Q R \tag{7.11}$$

を用いて、式(7.10)は

$$R A = Q^t Y \quad (7.12)$$

と書き直せ、逆方向の代入だけで解ける。このQR分解はHouseholder変換行列の使用により実現される。

この方法では、解は最大次数Mmaxだけでなく他の低い次数の場合もMmaxの1回の計算で得られる。しかしながら、1回の計算による多数の次数の同時フィッティングは、サンプル数が小さい場合には適当でない。というのは、フィッティングに使用されるデータ・サンプルの数は最高次数に合わせて(N-Mmax)に固定されるから、これと一緒に算出される低次のモデルは、N個のサンプル全部を使用した結果ではなくなるからである。

7.3 シミュレーション研究

7.3.1 4つのフィッティング法の試験

従来、局所定常を仮定した瞬時スペクトル解析には、時間分解能を向上させようとする、スペクトル変化の原因、すなわち、真の非定常的性質、少数サンプル化にともなう推定誤差、確率過程の不確定性のいずれかに特定する決め手が無いという問題があった。これらの問題を解決するため、先に概説したARモデルの4つのフィッティング法を対象に、少数サンプル時の推定誤差を評価した(筆者ら(1982), (1984), (1988)^{4, 6, 7})。

スペクトル解析では、サンプリング時間間隔 Δt によって最高周波数 $f_{\max}(=1/(2\Delta t))$ が決定される。今、N個のデータ・サンプルがあると、これに含まれる成分の最低周波数は $f_{\min}(=f_{\max}/N)$ である。例えば、 $\Delta t=0.01\text{sec}$ 、 $N=128$ の場合、データ長は1.28secとなり、 $f_{\max}=50\text{Hz}$ 、 $f_{\min}=0.39\text{Hz}$ (周期 $T=2.56\text{sec}$)である。統計的見地からすれば、このデータから推定されるスペクトルにおける f_{\max} の成分は64周期分の平均操作がなされているが、 f_{\min} の成分はわずか半周期分に過ぎず、統計的推定誤差は周波数の減少とともに下がっていくことが分かる。最高周波数の1/10である $f=5\text{Hz}$ では、わずか6.4周期分の成分を含むだけとなる。

この様に、少数サンプルに対するスペクトル解析では、低周波域において統計的平均不足による不確定性の問題が生じるが、さらに悪いことに、ARスペクトルの推定では少数サンプル時には、周期成分の位相角や波長によっても、スペクトル・ピークの周波数ずれやピーク高さの変動が起きることが知られている。これらは、ARモデルの推定アルゴリズムに深く関わっており、アルゴリズムによってその性質が異なる。

もし、スペクトルずれが無視できる計算条件が整えば、残されたスペクトル変化の原因は、真の非定常的性質か、確率過程の不確定性かのいずれかに特定できる。これらは、周波数-時間スペクトルの変化パターンを追うことにより、ある程度はめぼしを付けることが可能である。不確定性の場合には、基本的には不規則であり、サンプル数を大きくしていくと収束する。一

方、非定常的性質は、局所定常を仮定できるような緩慢な変化の場合には、その変化は系統的に現れる。したがって、局所定常を仮定した瞬時スペクトル解析にARスペクトルを適用する場合には、ARスペクトル固有のスペクトルずれの問題を明らかにしておく必要がある。

このため、約半周期から数周期の長さの周期成分に対するARスペクトルの推定比較を行った。試験データは、周波数1.5Hz、振幅2.5のアナログ正弦波から時間間隔0.061secでサンプルしたものをを用いた。約12サンプルが1周期に相当する。信号スペクトルが線スペクトル成分を含む時、一般に白色雑音源を仮定するARフィッティングは難しくなる。しかしながら、この試験では、条件は真の正弦波のデータの場合よりもわずかに良い。というのは、ある量子化誤差がAD変換器を通じて導入されるからである。

(1) 約半周期の周期成分の解析

Fig. 7.1とFig. 7.2は、それぞれモデル次数 $M=2$ と $M=3$ の場合の各方法によって推定されたARスペクトルを示す。データ・サンプル数 N は6あるいは7である。もとのデータから取られたデータ区間の総数は99である。この解析では、各データ区間は $N-1$ サンプルだけ重複している、すなわち、更新される部分の長さは1である。

これらの図から、推定したスペクトル曲線は、データ区間が異なる毎に異なり、またフィッティング法が異なる毎に異なるということが分かった。これは以下の理由によって説明できる。データ区間が正弦波信号の周期以下の長さで取られる時、切取られた各正弦波データは外見上非定常特性を持つため、平均値と分散値は正確に推定できない。これらの事情は、データ区間

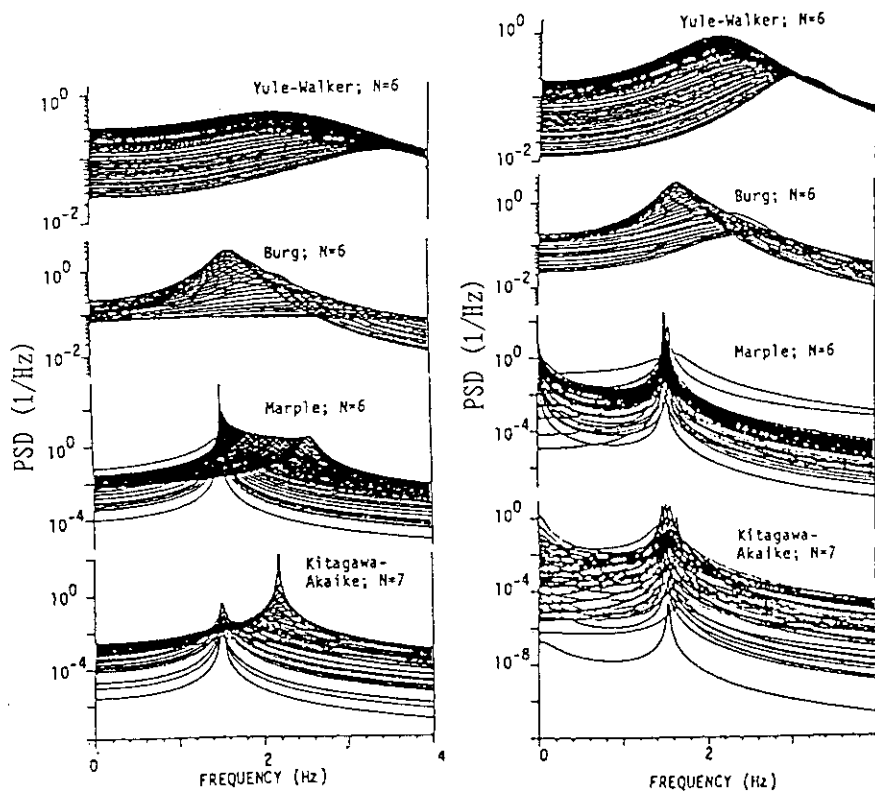


Fig. 7.1 ARスペクトルの比較(M=2) Fig. 7.2 ARスペクトルの比較(M=3)

が周期成分の周期何倍であろうとも同様である。データの長さが周期の整数倍以外の場合、必ず切取られた正弦波の部分が存在する。これらの影響は、データ長が周期長に比べて十分大きくなれば、平均効果によって次第に無視できるようになるが、確定的な周期成分の場合は、また確率過程の不確定性とは違った意味で、サンプル数が大きくても厳密な推定はできない。

(2) 推定誤差の波長依存性

次に、ARスペクトルの推定誤差の波長依存性を評価した例を示す。データ長を半周期から2周期にわたって変えた場合のスペクトル・ピークの周波数と高さをFig. 7.3とFig. 7.4に示す。結果はデータ・サンプル数よりは周期に依存していることに注意。その結果、ピーク周波数の推定に関しては、厳密な最小2乗法に基づいたMarple法とKitagawa-Akaikeの両方法が他の方法よりも優れ、それらの方法を用いた場合、サンプル長は周期成分の波長の数倍以上あれば、満足な結果が得られることを示した。一方、ピークの高さの推定に関しては、どの方法も満足な結果が得られなかった。これはARモデリングに要求される定常の仮定によるもので、通常の統計的なパラメータ、例えば平均や分散の推定の場合と同様に、定常と見なせる十分な数のサンプル・データが必要であることを意味している。

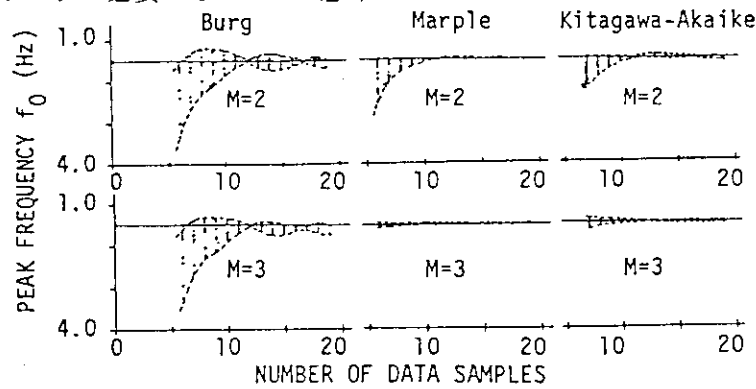


Fig. 7.3 各ARスペクトルのピーク周波数の偏り誤差

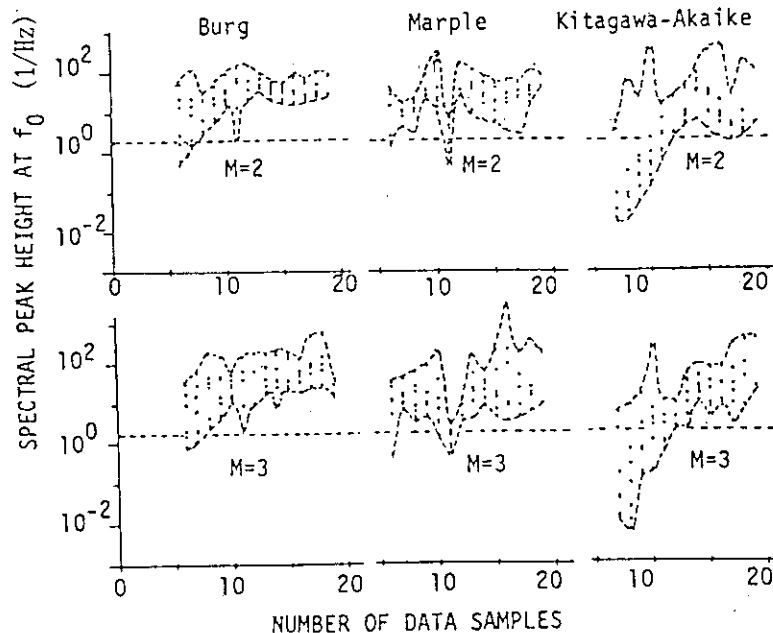


Fig. 7.4 各ARスペクトルのピーク高の偏り誤差

7.3.2 Marple法に基づく周波数-時間スペクトル解析法の模擬非定常データによる試験

前節の試験の結果、少数サンプル時のARスペクトル推定では、周期成分のスペクトルの高

さに関しては、いずれの方法も有意な結果を示さなかったが、ピーク周波数の推定に関しては、Marple法およびKitagawa-Akaikeの両方法が、データ長が周期の数倍以上あれば満足な結果をもたらすことが分かった。この両方法を計算処理の複雑さ、所用時間、計算プログラムの記憶容量などから比較すると、Marple法が有利である。そこで、本研究では、Marple法を瞬時ARスペクトルの計算アルゴリズムとして採用することにし、これに基づく周波数-時間スペクトル解析法を、確率的特性が緩慢に変化する模擬非定常雑音データを用いて試験した⁷⁾。

非定常模擬データは、Fig. 7.5に示す発生システムによりアナログ的に作り、これをサンプルしたものを使用した。使用した3つの信号源は、白色雑音、8Hzを基本周波数とする三角波ならびに100secの間に基本周波数が直線的に15Hz~26Hzの間で変動する三角波である。発生システムでは、始めにこれらの信号を混合し、次に減衰定数0.05、遮断周波数5Hzの2次系の形成フィルタを通して非定常出力信号を作り、これを時間間隔0.01secでサンプルした。データ・サンプルの総数は4096で全区間の時間長は40.96secである。

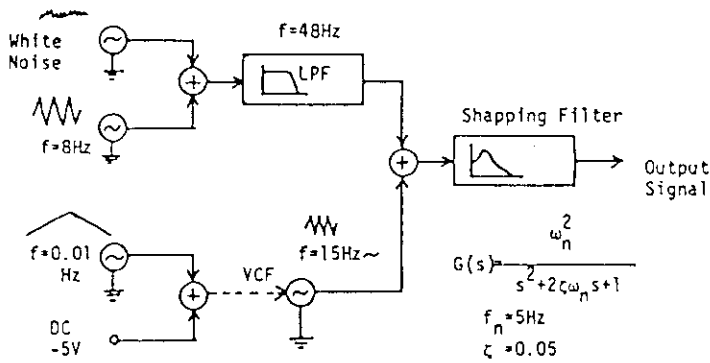


Fig. 7.5 非定常雑音発生システムのブロック・ダイアグラム

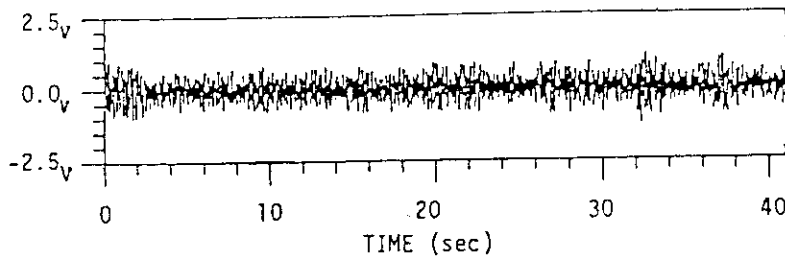


Fig. 7.6 人工非定常雑音信号

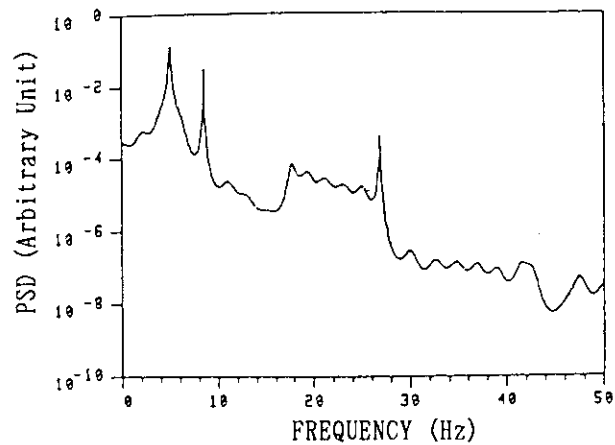


Fig. 7.7 人工非定常雑音のパワー・スペクトル(N=4096, M=50)

成フィルタを通して非定常出力信号を作り、これを時間間隔0.01secでサンプルした。データ・サンプルの総数は4096で全区間の時間長は40.96secである。Fig. 7.6はサンプルされたデータの記録を示す。

始めに全データ区間40.96secを一括して解析した通常のパワー・スペクトルをFig. 7.7に示す。5, 8.5, 26.5Hzの3つの顕著なピークと17Hzから26Hzの間に台形状の成分が見られる。

次に、同じデータに周波数-時間スペクトル解析を適用した結果をFig. 7.8に示す。ここでは、1回の推定に使用するデータ・サンプル数(小区間長)を1024(時間分解能は10.24sec)に設定した。また、サンプル数Nの長いデータ区間をサンプル数nの小区間に分割する方法としては、

- (a)連続型; n個ずつ独立に取る, 区間数=N/n,
- (b)重複型; 区間の一部(n_d 個)を隣の区間と重複させる, 区間数=(N-n+n_d)/n_d,
- (c)スキップ型; n個取った後, n_s個スキップしてから次のn個を取る, 区間数=N/(n+n_s)

3つあるが、ここでは(b)の重複型を使用し、64サンプルだけを更新し、960サンプルを前の区間と重複させた。

Fig. 7.8の上図は、周波数-時間スペクトルで、下図は各データ区間のパワー・スペクトルである。上図から、27Hzの線スペクトル成分が始めの13区間で観測され、14番目の区間以降の8.33secから18.56secまでの時間領域でこの成分の形状と位置が変化するの分かる。

Fig. 7.9は小区間長を128に設定した場合(時間分解能は1.28sec)の結果である。データ区間の分割法は(a)の連続型を使用した。スペクトルの形状はラフに推定されたが、3つの主ピーク成分はきれいに現れた。実際、先の解析に現れた台形状の成分は周波数ずれを持つ線スペクトルの残像であることが明確に分かる。周波数変化の開始点は14番目の区間である。この区間番号は先の解析と同じであるが、分解能が高いため、変化が起き始めた時間を、16.65secから17.92secの間と特定できる。

上の結果から、本解析法を適用することにより、炉雑音解析で重要な周波数範囲(0.1~50Hz)の場合、非定常スペクトル解析の時間分解能を数secから数10secまで向上できること、非定常的变化が速い現象を時間分解能の低い方法で解析すると、スペクトル成分の大きさは減少しスペクトルの分布が広がってしまうことなどが明らかになった。

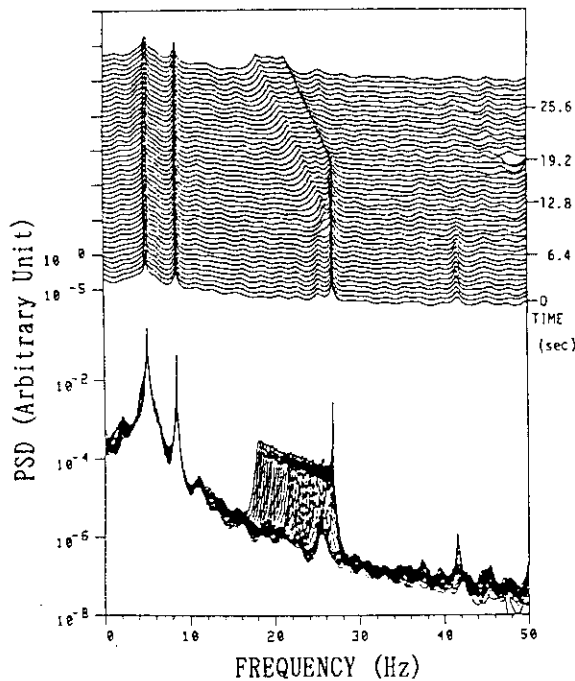


Fig. 7.8 人工非定常雑音の周波数-時間スペクトル(N=1024, M=50)

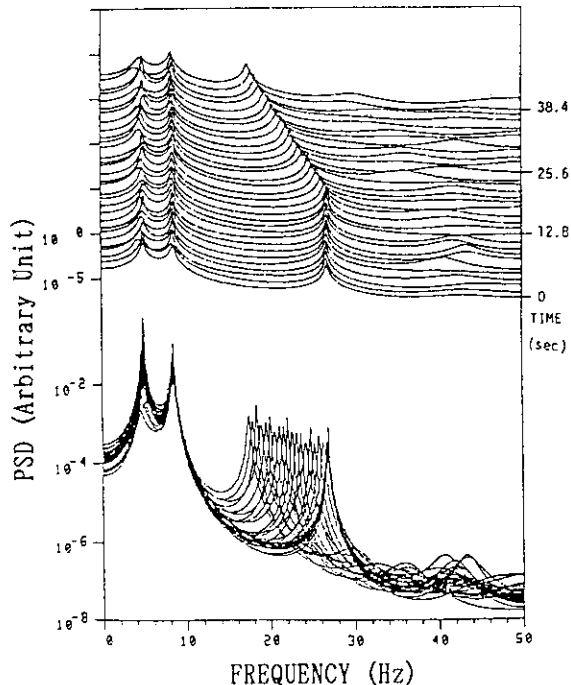


Fig. 7.9 人工非定常雑音の周波数-時間スペクトル(N=128, M=10)

7.4 PWR停止運転時の解析への応用

Borssele炉における1次系ループ圧力信号と1次系冷却ポンプの軸方向振動のパワー・スペクトルにおけるパターン変化に関して、通常のFFTスペクトルを用いた解析が既に報告されている(Turkcan(1985)⁹⁾)。解析は、大きなデータ・サンプルを必要とするFFTスペクトルの使用にもかかわらずパターン変化にうまく追従できた。というのは、これらの信号のパターン変化は非常にゆっくりしていたからである。しかし、非定常特性に関する精密な測定を行うためには、FFTなど従来のスペクトル推定法は時間分解能の点から不利である。さらに、Borssele炉のデータ解析に関しては、タービン・トリップ時の過渡現象解析に、Housholder変換に基づく時変ARスペクトル解析⁹⁾を適用し、全256secの過渡応答データを12.8sec毎に解析した例も報告されている(Turkcanら(1985))¹⁰⁾。これは、急激な過渡現象の特性を大雑把に推定することを試みた例で、スペクトル変化を連続的に精密に測定する目的のものとは異なる。

ここでは、前節に述べたMarple法に基づく周波数-時間スペクトル解析法を、Borssele炉の停止運転時に観測された非定常炉雑音データに適用した結果について報告する。

7.4.1 Borssele炉雑音データ

ここでは、第11燃焼サイクル末の停止運転時に測定された4つの信号、1次系ループ圧力(YA01.P002)、炉心出口の冷却材温度(XQ33.T01)、差動ポンプ圧力(YA01.P003)および1次系ポンプの半径方向の振動(YD01.V003)を解析した。これらのデータは、最大記録時間の制約から2巻の磁気テープに分けて収録され、B11-243とB11-244の2つのファイルに分けられている。B11-244の収録は、B11-243の終りの6min後に開始された。

各ファイルのDC信号の記録をFig. 7.10(a), (b)に示す。B11-243の場合、冷却材温度とループ圧力の両者は、始め一定で、21300sec以降、それぞれ150から85ataおよび262から210度Cへと減少する。差動ポンプ圧力は5.9から6.35ataへと上昇する。ポンプ振動信号は変化しない。

7.4.2 2乗平均系列

Fig. 7.11(a), (b)は、DC信号が大きな変動を示す時間区間16000~24992 sec(B11-243)および1~8192 sec(B11-244)における瞬時の2乗平均系列の解析結果を示す。小区間サンプル数は128、時間分解能は2secである。

Fig. 7.11(a)の結果は、1次系ループ圧力の振動成分が21,300sec以降で一度上昇し、その後ゆっくりと再び減少することを示している。ポンプ振動の平均成分は同じ時間点以降に上昇し、冷却材温度は周期1000secの超低周波を持つ。

Fig. 7.11(b)の結果は、ループ圧力の分散成分が徐々に大きくなることを示している。ポンプ振動の平均成分の増加は圧力のDC信号が一定になる4000secで止る。冷却材温度に現れる超低周波成分の周期は、時間点3000sec以降で1000secから2000secへと変化する。

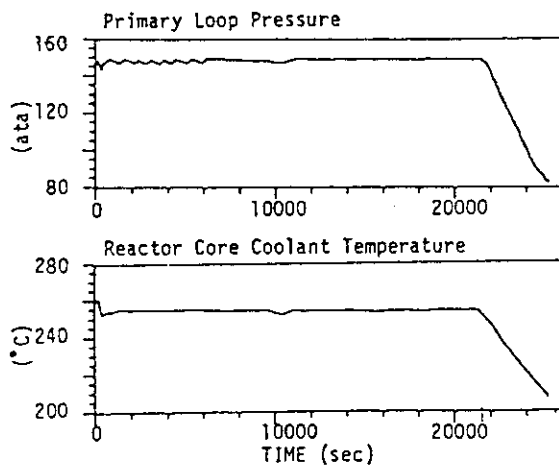


Fig. 7.10(a) 1次系圧力と炉心温度のDC信号の記録(B11-243)

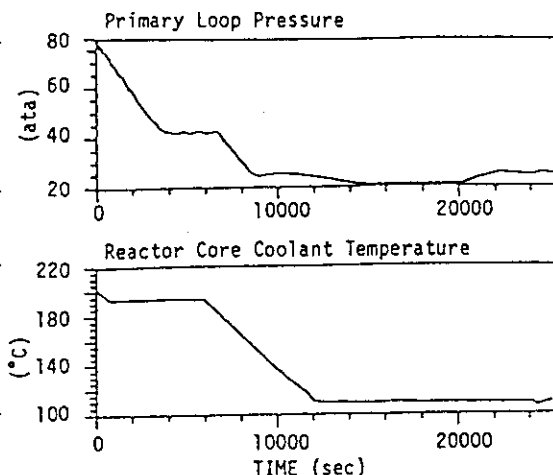


Fig. 7.10(b) 1次系圧力と炉心温度のDC信号の記録(B11-244)

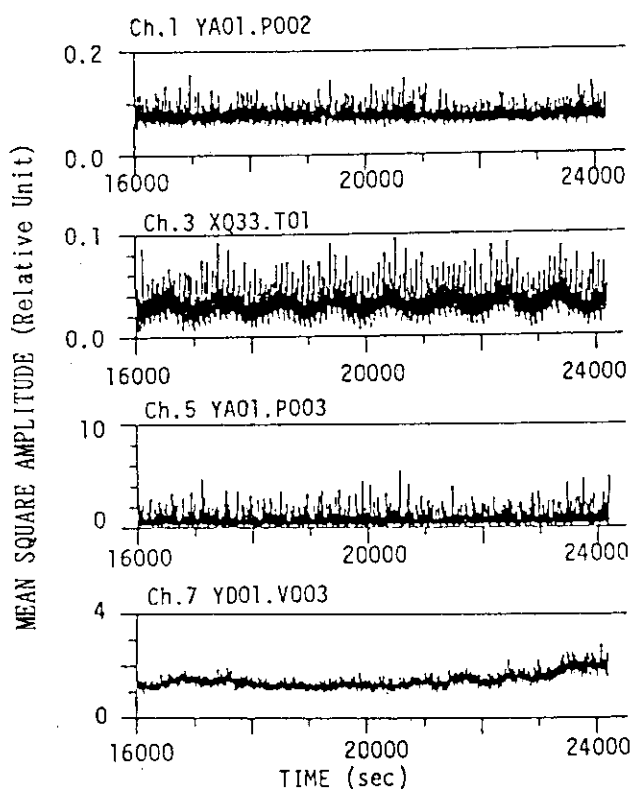


Fig. 7.11(a) 瞬時の2乗平均系列 (B11-243後半)

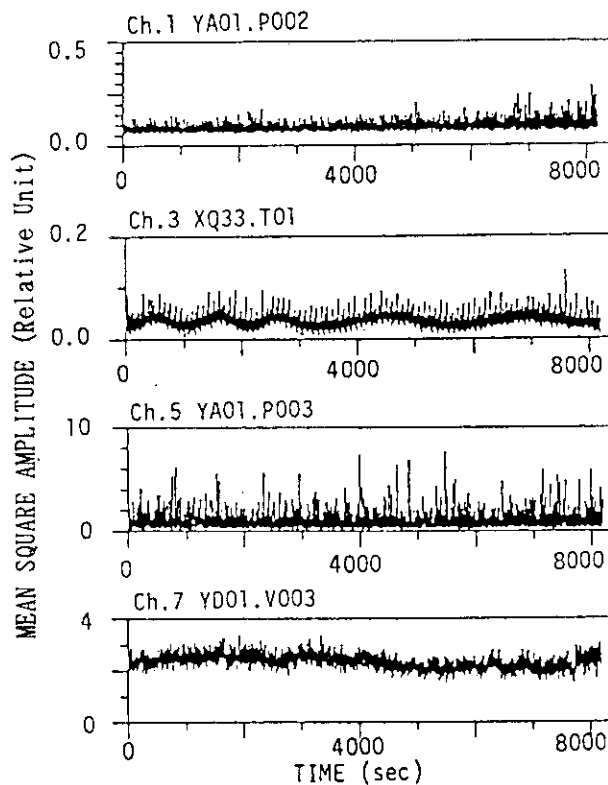


Fig. 7.11(b) 瞬時の2乗平均系列 (B11-244前半)

7.4.3 周波数-時間スペクトル

周波数-時間スペクトルの推定結果をFig. 7.12からFig. 7.15に示す。各図の下図(a)は、B11-243の時間区間(15800~25008sec)の結果であり、また上図(b)はB11-244の(5200~14208sec)の結果である。先の瞬時の2乗平均系列解析から、信号の非定常性は非常に緩慢であることが分る。そこで、小データ区間は、サンプル数1024(時間分解能8sec)に設定し、分割法はスキップ型を適用した。スキップ時間は192sec、すなわち200sec間隔で始めの8secだけを解析した。

1次系ループ圧力のスペクトルFig. 7.12(a)では、初期の区間において顕著なピークが1.5, 6.8, 14, 16.5Hzで見られる。先に述べた様にDC成分が変化し始める時、6.8Hzと14Hzの2つのピーク周波数は高域側にずれ始める。上図(b)の始めの区間では、1.5, 8, 11.5, 16.5Hzのピークが見られた。8Hzのピークは下図(a)の6.5Hzのピークがずれた結果である。11.5Hzのピークは(a)で目立たなかった9Hzのピークからきたものである。(a)の14Hzからずれた15.5Hzのピークは16.5Hzの大きい成分と混ざっている。これらの周波数は時間点5900secに再びずれはじめ、12000secで止る。これらの時間点は冷却材温度の減少の始まりと終りに一致する。ピーク周波数のずれの線は9850secでループ圧力の減少の停止により曲げられているのが分かる。

炉心出口温度のスペクトルFig. 7.13から、冷却材温度は12と25Hzの2つの鋭いピーク成分を持つ有色雑音から成り、周波数ずれのピークを持たないことが分かる。一方、低周波のスペクトル成分の周期的な変動が見られる。これは2乗平均解析によって検出された周期1000secの超低周波振動を示している。

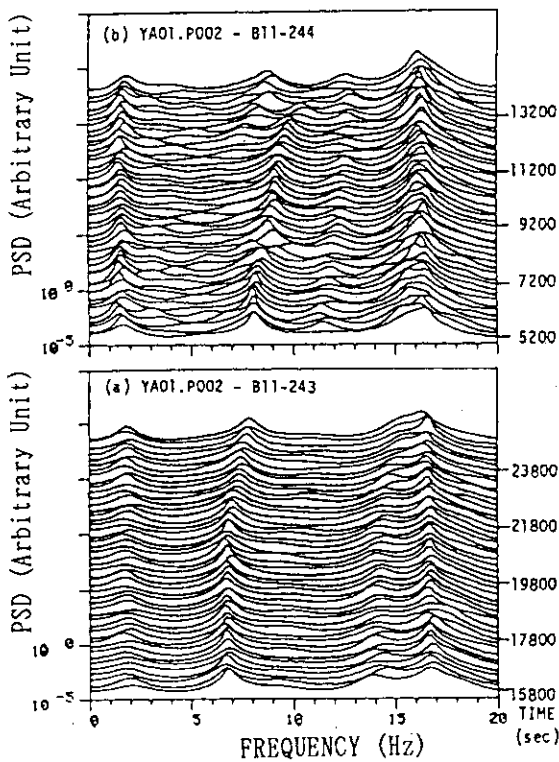


Fig. 7.12 1次系圧力(YA01.P002)の周波数-時間スペクトル(M=20)

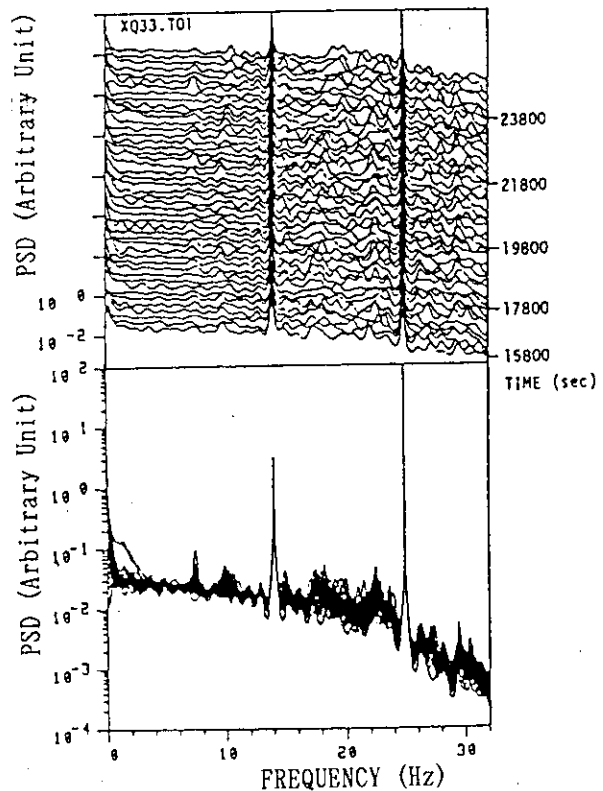


Fig. 7.13 炉心出口温度(XQ33.T01)の周波数-時間スペクトル(M=63)

Fig. 7.14(a)の差動ポンプ圧力は11と17.5Hzに顕著なピークを持ち、9.6Hzに弱いピークを持つ。温度と圧力が変化し始める時、9.6Hzのピークはずれはじめ、11Hzの大きなピーク成分に重なる。17.5Hzのピークは同時に見えなくなる。Fig. 7.14(b)において、もともと9.6Hzからずれた周波数成分は温度または圧力が変化する時でも明確には現れない。

Fig. 7.15(a)のポンプ振動は多くの顕著なピークを持つ。これらは2.7, 3.8, 7.4, 14, 18Hzである。温度や圧力が変化する時、9.5と18Hzの2つのピークが高い周波数に向ってずれはじめる。Fig. 7.15(b)において、8Hzのピークは周波数のずれる成分として新たに現れる。これらのピークはループ圧力スペクトルと同じ方法でずれる。

以上の様に、本周波数-時間スペクトル解析により、炉心出口温度信号を除く3つの信号に現れるピーク成分の幾つかが、冷却材温度やループ圧力の減少とともに変化していく様子を、高分解能で解析できることを示した。さらに、ARスペクトルに基づく周波数-時間スペクトルと時間情報関数、すなわち、DC信号記録と瞬時2乗平均を組合せて使用することにより、時間軸に関する非定常データの精密な解析が可能になることを示した。

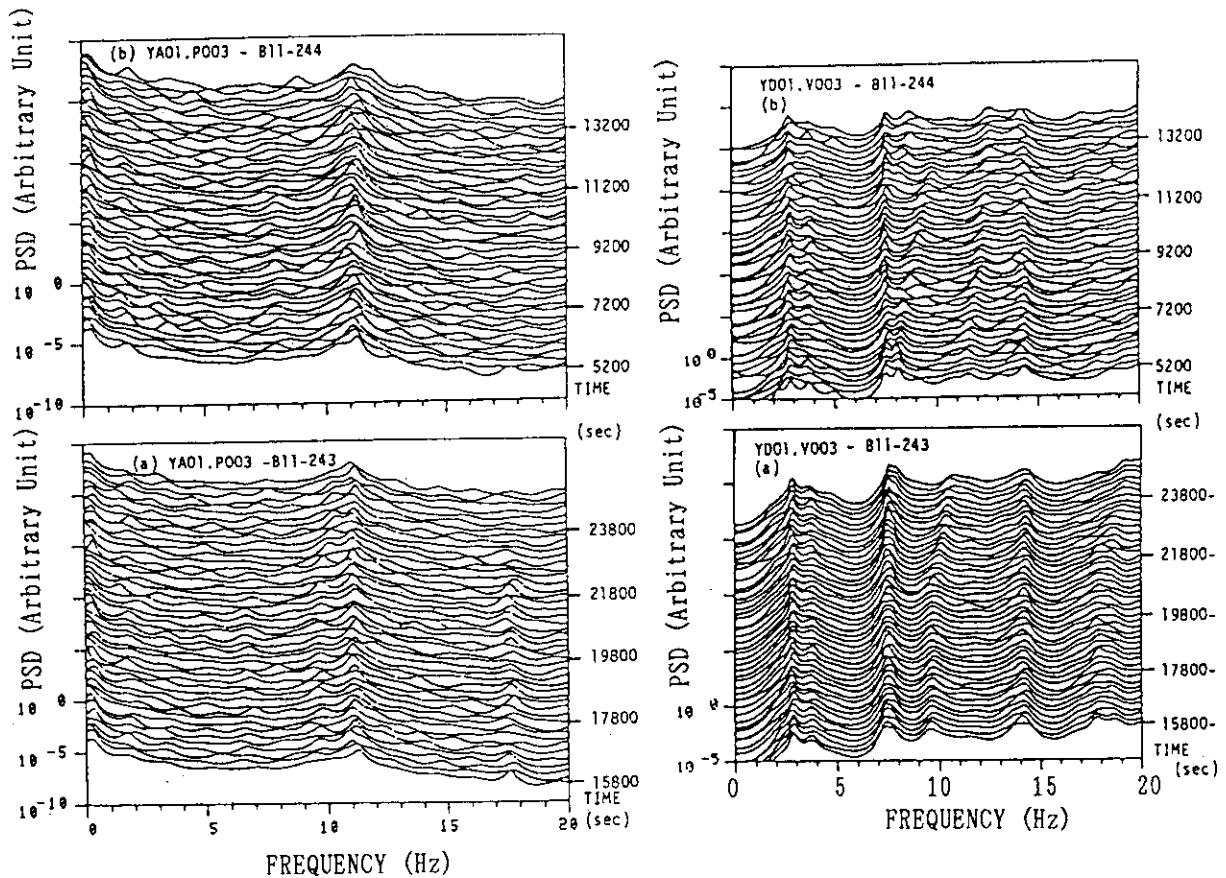


Fig. 7.14 差動ポンプ圧力(YA01.P003)の周波数-時間スペクトル(M=50)

Fig. 7.15 1次系ポンプ振動(YD01.V003)の周波数-時間スペクトル(M=50)

7.5 むすび

原子炉状態の追跡、監視、異常診断を目的とした非定常炉雑音解析手法として、瞬時ARスペクトルによる周波数-時間スペクトル法を研究した。

始めに、局所定常を仮定した瞬時スペクトル解析法の時間分解能の向上に障害となっていた少数サンプル時のARスペクトルの推定精度の曖昧さを解消するために、典型的な4つのARモデル・フィッティング法を対象に、少数サンプル時の推定誤差を評価した。

その結果、スペクトル・ピークの周波数ずれ誤差に関しては、MarpleとKitagawa-Akaike法が他の方法に比べて精度が良く、正弦波状の確定的成分の推定の場合、必要なサンプル数は周期長の数倍以上あれば良いことを明らかにした。また、ピーク高の分散誤差に関しては、どの方法も、一般の統計量推定と同じく十分なサンプル数を必要とすることを明らかにした。

次に、Marple法を採用し上の指針を基に構成した周波数-時間スペクトル解析法の時間分解能に関する試験を行った。スペクトル成分のピーク周波数が緩慢に変化する模擬非定常データを作成し解析した。この結果、炉雑音解析で重要な周波数範囲(0.1~50Hz)の場合、非定常スペクトル解析の時間分解能は1~2secにまで向上できること、非定常的变化が速い現象を時間分解能の低い方法で解析すると、スペクトル成分の大きさは真の値よりも低く推定されてしまうことなどを示した。

最後に、Borsselle炉で原子炉停止運転時に測定された実際の非定常データの解析に本方法を適用した。1次系ループ圧力、炉心出口温度、差動ポンプ圧力、1次系ポンプ半径方向の振動の4つの信号の解析を行った結果、炉心出口温度信号を除く3つの信号に現れるピーク成分の幾つかは、冷却材温度やループ圧力の減少とともに変化していく様子を、高分解能で捕えることができた。さらに、ARスペクトルに基づく周波数-時間スペクトルと時間情報関数、すなわち、DC信号記録と瞬時2乗平均を組合せて使用することにより、時間軸に関する非定常データの精密な解析が可能になることを示した。

ここでは、サンプル数1024点、分解能を8secに設定し、200sec間隔で実施した解析であり、十分な統計精度と計算時間の余裕を持っていることから、実際には更に25倍(200/8)にスペクトルの点数を増やすことができる。また、Marple法の計算所用時間は数secであることから、実時間オンライン推定は問題なく実現できる。したがって、本方法は、原子炉状態の追跡、監視、異常診断を目的とした非定常炉雑音解析手法として、十分実用になろう。

本研究に前後して、Kuroda(1988)らは、KitagawaらのBayes型のARモデル^{11, 12)}により、Borsselle炉の炉外中性子束信号、1次系ループ圧力ゆらぎ、Phenix炉の炉外中性子束信号、1次系ポンプ流量ゆらぎの解析を試みている¹³⁾。本研究では、理解と応用のしやすさから、局所定常を仮定した通常のARスペクトルを取り上げたが、今後、この種のロバスト性を備えた時変ARモデルに基づく瞬時スペクトルの研究を進め、実用化する必要がある。

8. 非定常炉雑音データ収録用 前処理システムの開発

8.1 はじめに

原子炉プラントのプロセス信号に重畳するゆらぎ成分、いわゆる炉雑音信号は、プラント動特性や内部の状態に関する様々な情報を豊富に含んでいる。これを利用すればプラント特性のより詳細な情報を得ることができ、さらにはその変化や異常の兆候を高感度で早期に捕えることも可能になることから、炉雑音解析に基づく運転監視や異常診断の研究が行われている。

炉雑音解析は、従来は定常不規則過程を対象とした統計的解析手法を利用して行うのが一般的であり、また炉雑音データも定常運転時には比較的容易に測定できる。このため、その適用範囲はこれまで定常運転時の原子炉プラントだけに限定されてきたが、運転監視や異常診断の観点からすれば、起動から停止までの全運転範囲に対して炉雑音を常時収録する必要がある。これは特に、今後商業用炉が負荷追従運転されるようになると一層重要となる。

ところが、原子炉の起動、停止、出力変更といった過渡運転時には、炉雑音信号は非定常となるため、従来の炉雑音解析手法はそのままでは適用できず、また炉雑音データの測定も定常運転時に比べて難しくなるといった問題が生じる。

非定常炉雑音データの解析手法は、現在のところほとんど未開拓であるが、非定常性が弱く、ある短い時間区間だけを取ると定常と見なせるような場合には、局所定常性を仮定することにより、従来の統計的解析手法が適用できることが知られている¹⁾。また、特性変化や異常生起の検知を目的に定常時の解析結果と相対的な比較を行う手法は、入力データが非定常であっても適用は可能である。

一方、炉雑音データの測定には、計装信号中の直流(DC)バイアス成分の分離、ゆらぎ成分のフィルタリングや増幅などの信号前処理技術、さらに多チャンネル化、オンライン化にともなう収録系のリモート制御、データ伝送に関する技術が必要である。このうち、オンライン技術に関しては、Turkcanら(1984)²⁾によって既に実用化され、また信号前処理器のリモート制御も既に実用化されている。しかし、こと非定常炉雑音の前処理技術は未だ開発されていないのが実情である。

非定常炉雑音信号の収録には信号前処理に関する幾つかの技術的な問題点が残っており、筆者らの経験^{3, 4)}によれば、特に下記の2点を解決する必要がある。

- (1) ゆらぎ成分とDC成分との分離
- (2) 最適なゲインによるゆらぎ信号の増幅

(1)に関連した技術としては、最近になって、DC成分の推定だけを目的とした過渡追従型デジタル・フィルタ(佐野(1987)⁶⁾)やデータ収録システムに既に取り込まれたデータを対象とした前処理用非線形デジタル・フィルタ(馬場(1988)⁶⁾)が研究されているが、炉雑音信号の収録を目的とした、アナログ信号レベルでの前処理技術とは異なる。そこで、筆者はこれらに関する技術開発を試み、以下の2つの新しい信号前処理装置を開発した⁷⁻⁹⁾。

- (1) 超低周波バイアス成分の自動分離装置、
- (2) 最適ゲイン選択機能付きフィルタ・アンプ

本章では、これら2つの装置の概要、ならびに原子炉における実地試験について報告する。

8.2 DCバイアス分離方法

8.2.1 DCバイアス分離処理の目的

一般に、計装信号に含まれるゆらぎ成分は、DC成分に比べると微弱である。例えば、中性子束信号の場合、ゆらぎ成分が最も大きくなる100%出力時でさえ、その振幅レベルはDC成分の高々数%に過ぎない。燃料や冷却材などの温度信号の場合は、さらに1桁小さいのが普通である。このように微弱な信号成分をデータ収録装置で記録する場合、信号対雑音比(S/N比)を如何に確保するかが問題となる。

ゆらぎ成分とDC成分が混在する計装信号をそのままデータ収録装置に入力する場合には、その入力レベルはDC成分の値によって決定される。いま、DC成分に対するゆらぎ成分の相対レベルを1%(-40dB)とし、前置アンプのレベル設定に要する余裕を10~20dBとすれば、ゆらぎ成分の入力レベルは収録システムの最大入力レベルに対して-50~-60dBとなる。一方、収録システムのダイナミック・レンジは、

Table 8.1 収録系のダイナミック・レンジ

	S/N	Frequencies
Analog FM IMB Data Recorder	50 dB 80 dB*	(1kHz) (0.01~50 Hz)
Digital A/D converter; 12 bits	72 dB	
; 14 bits	84 dB	
; 16 bits	96 dB	

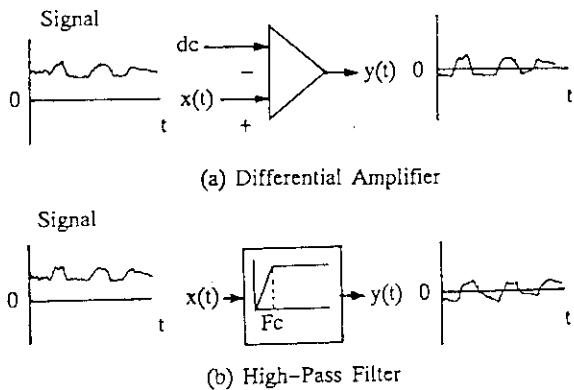
* Estimated by spectral analysis

Table 8.1に示すように、アナログ記録で80dB程度、またデジタル記録の場合A/Dコンバータのbit数にもよるが72dBから96dB程度である。したがって、相対レベル1%のゆらぎ成分のS/N比は、アナログ記録で30~20dB、デジタル記録12bitの場合22~12dB、14bitの場合34~24dBと悪化し、このままでは満足なゆらぎ成分の収録は期待できないことが分る。十分なS/N比を確保する方法として、デジタル記録の場合にはA/Dコンバ

一タのbit数を大きくするのも1つの対処手段ではあるが、より一般的には、収録前にアナログ信号の段階で、計装信号中のDC成分を除去または低減し、適当な大きさにまで増幅するという前処理を行うのが普通である。

8.2.2 従来の方法と非定常信号に対する問題点

従来、DCバイアス分離処理には、差動アンプとハイ・パス・フィルタの2つの方法が用いられてきた。以下にこれらの方法を概観し、非定常信号に対する問題点を検討する。



(1) 差動アンプ

この方法は、Fig. 8.1(a)のように、差動アンプに一定の逆バイアス電圧を加えて、信号中のDC成分を打ち消す方法である。入力を $x(t)$ 、出力を $y(t)$ 、逆バイアス電圧を dc と記せば、この方法の入出力関係は

$$y(t) = x(t) - dc \quad (8.1)$$

Fig. 8.1 従来の雑音信号分離法

と表せる。この方法は、通過する交流成分に全く影響を及ぼさないため、信号が定常な場合には、事前に信号のバイアス電圧 dc を測定し調整しておきさえすれば、安定した質の高いゆらぎ成分の分離処理が可能で、極めて有効な方法である。

しかし、DC成分が時間とともに変化するような非定常信号の場合には、この方法はバイアス電圧の調整そのものが困難となる。適当な時刻毎に調整を繰返しDC成分の変化に無理やり追従させたとしても、その出力信号は調整点毎に不連続点を生じるようになる。さらに、多チャンネルの収録の場合は一層調整作業が困難になる。

(2) ハイ・パス・フィルタ

この方法は、Fig. 8.1(b)に示すように、DCを含む超低周波成分を減衰させる方法である。ハイ・パス・フィルタの入出力関係は、ロー・パス・フィルタによる等価表現を用いると次のように書ける。

$$y(t) = x(t) - dc(t) \quad (8.2a)$$

ただし、

$$dc(t) = \int_0^{\infty} h_L(\tau) x(t-\tau) d\tau \quad (8.2b)$$

ここで、 h_L はロー・パス・フィルタのインパルス応答、 $dc(t)$ はその出力である。この方法は、

フィルタの群遅延特性に応じて出力信号に位相の乱れを生じるという欠点はあるが、バイアス電圧を自動的に調整する機能を持っている。このため、事前にフィルタの遮断周波数を設定しておきさえすれば、DC成分や遮断周波数以下の低周波成分を無調整で取り除くことができることから、信号が定常な場合はもちろんのこと、DC成分が遮断周波数に比べてゆっくと変化するような非定常信号の場合には、極めて有効な方法である。

ところが、DC成分がステップ状に変化する場合には、フィルタの過渡応答特性が出力信号に現れるという問題を生じる。

この過渡成分は、簡単な1次遅れ型フィルタの場合は指数型の単調減衰曲線となるが、減衰特性が急峻な高次のフィルタの場合には、遮断周波数 f_c で決まる周期 $T=1/f_c$ で減衰振動する事が多い。したがって、微小なゆらぎ成分に対してDC成分の変化幅が著しく大きいと、後段のアンプが飽和する等のかなりの悪影響を生じ、これが実用的なレベルまで整定するには、フィルタ周期 T の数10倍から数100倍の時間を要する。

8.2.3 デジタル・フィルタの応用

デジタル・フィルタは、アナログ素子では実現不可能な任意の伝達特性を実現でき、またデジタル化により次のような利点を生じる。

- ・ 複数の推定アルゴリズムを使用できる。
- ・ 動作中にパラメータや推定アルゴリズムの変更ができる。変更は滑らかにできる。
- ・ 演算の停止や強制的なリセットが行える。
- ・ フィルタ・プログラムの更新が後から簡単にできる。

したがって、これを非定常信号のDCバイアス分離に応用すれば、従来の方法に見られる追従性や過渡応答の問題を改善した、より柔軟で優れた処理が期待できる。原研JMTR(材料試験炉)の軽水炉燃料照射用水ループOWL-1(大洗水ループ1)の漏水検出用に筆者ら(1980)が開発した漏水監視器も一種のデジタル・フィルタの応用であった^{10, 11)}。

一方、デジタル・フィルタをアナログ信号の前処理に応用するためには、入力信号をA/Dコンバータでデジタル化し、フィルタ演算後、出力信号をD/Aコンバータで再びアナログ化するという手順が必要であり、以下のハードウェア上の制約が課せられる。

- ・ フィルタ演算や入出力データのサンプリングは実時間で行う必要がある。
- ・ 出力信号のS/N比や周波数帯域を確保するためには、入出力データのサンプリングにおける振幅軸や時間軸の分解能が十分高い必要がある。

このため、限られたハードウェアの性能仕様のもとでは、できるだけ演算処理の負担を軽くする必要がある。以下に、デジタル・フィルタの応用を具体化するために必要なハードウェア構成とフィルタ計算アルゴリズムを検討する。

(1) ハイブリッド構成

検討すべき問題の1つは、デジタル・フィルタをどの部分に適用するかである。これによってハードウェアの構成形式とそれに要求される性能仕様が決り、実現可能か否かが決る。DCバイアスの分離処理において、デジタル・フィルタの適用範囲は次の2通りが考えられる。

- (a) 入力信号に含まれるDC成分の推定計算
- (b) (a)の計算および入力信号との加減算

これらを前節のハイ・パス・フィルタの例に当てはめてみると、(a)の形式は、DC値を推定する等価ロー・パス・フィルタ(8.2b)式だけをデジタル化し、加減計算(8.2a)式はアナログ差動アンプで行うことに相当する。すなわち、その構成はFig. 8.2のように、ハイブリッド型のハイ・パス・フィルタとなる。また(b)の形式は、ハイ・パス・フィルタ全体をデジタル化することに相当する。

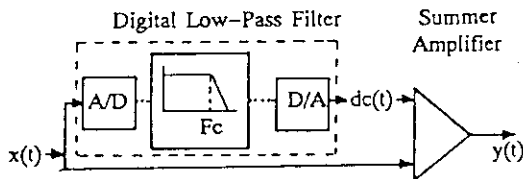


Fig. 8.2 ハイブリッド型ハイ・パス・フィルタ

フィルタ演算の負担をできるだけ軽減するという観点から両形式を検討すると、(a)の場合、ロー・パス・フィルタの通過成分はDCおよび遮断周波数以下の超低周波成分に限られるため、演算処理の負担は比較的軽い。しかし、(b)の場合、ゆらぎ成分全体をフィルタに通過させる必要があるため、要求される負担は遙かに重くなり実現性に乏しいことが分る。

したがって、DCバイアス分離処理にデジタル・フィルタを適用するとすれば、(a)の形式のハイブリッド構成が有利である。

(2) フィルタ切り替え方式

検討すべき問題点の2番目は、信号中のDC成分を如何に推定するかである。

信号が定常の場合、DC成分の推定にはロー・パス・フィルタが使用できる。しかし、これによって形成されるハイブリッド型のハイ・パス・フィルタは、非定常時にはアナログ・フィルタと同様に過渡応答特性の問題に出くわす。何故ならこの過渡応答特性はフィルタ固有の問題であり、アナログ、デジタルといった表現形式には依存しないからである。したがって、アナログ・フィルタの単純なデジタル化では問題の解決にはならず、何等かの対策が必要である。

非定常信号の場合に、ハイ・パス・フィルタがDCバイアスをうまく分離できない原因は、DC成分の変化に伴って生じる大振幅の過渡的な周波数成分がフィルタの遮断周波数を越えて通過帯域にまで入り込むためである。したがって、非定常時には、過渡変動の主成分に合せて遮断周波数を変更できれば良い。デジタル・フィルタを使用する場合には、

- (a) 推定アルゴリズムの種類、遮断周波数や減衰量などのパラメータが異なる複数個のフィ

ルタを入力信号の特性に合わせて切り換える

(b) パラメータ連続可変型のフィルタを使用し、入力信号に合わせてパラメータを逐次変更するなどの方法で対応が可能である。

(b)の方法は、入力信号に応じてパラメータを連続的に変化させていくために追従性に優れているが、遮断周波数が逐次変化するために、ゆらぎの有効周波数帯域が一定ではなく、またフィルタ・アルゴリズムの開発も容易ではない。一方、(a)の方法はフィルタ切り換え操作が必要であり、(b)の方法に比べDC変動に対する追従性は劣るが、遮断周波数などのパラメータが一定であるため、ゆらぎの有効周波数帯域が明確である。さらに、推定アルゴリズムとしては、移動平均型やバターワース型など従来から良く知られている通常のフィルタが利用できる利点がある。

したがって、追従性だけに力点を置けば(b)の方式が優れているが、信号収録後に行うデータ解析の事を考慮すると(a)の方式が有利である。

(3) フィルタ・アルゴリズム

最後に、DC成分の推定にフィルタ切り換え方式を採用する場合に用いるべきフィルタについて検討する。

フィルタ・アルゴリズムは、実時間演算ならびに多チャンネル並列処理を考慮すると、演算式はできる限り簡単である必要がある。また、フィルタ・アルゴリズムに通常の線形フィルタを使用した場合、ステップ入力直後の過渡応答は避けられないが、この影響を後々まで持続するか否かは、フィルタの種類によって異なり、フィルタ内部の記憶作用の有無で決まる。したがって、非定常時には過去の変動を記憶しない形式のものが望ましい。

(a) バターワース型ロー・パス・フィルタ

巡回型関数を含むフィルタは、一般に急峻な特性を低次元の式で実現できるため、定常過程の処理には最適である。

この種のフィルタにはバターワース型、チェビシェフ型とその変種、ベッセル型などが知られているが、それぞれ、通過域のゲイン、位相、遅延特性が異なる。通過域のゲイン平坦特性はバターワース、チェビシェフ、ベッセルの順に良く、急峻な減衰特性はチェビシェフ、バターワース、ベッセルの順、また遅延特性は、その逆の順に良い。信号中のDC成分の推定には、いずれの特性も重要であるため、中庸をいくバターワース型が適している。

バターワース型フィルタの入出力関係は、中間変数 w を用いた形式の場合、

$$dc_t = \sum_{i=0}^{m_1} h_{N_i} w_{t-i} \quad (8.3a)$$

$$w_t = \sum_{i=0}^{m_2} h_{D_i} w_{t-i} + x_t \quad (8.3b)$$

と書ける¹²⁾。ここで、 $\{h_{N_i}\}$ 、 $\{h_{D_i}\}$ は、離散化した有理型インパルス応答関数の分子式、分

母式である。このフィルタは内部にフィードバック・ループを持つため、過渡応答の場合の影響は長時間に及ぶ。また、群遅延特性が一様でないため、信号の位相を乱す。ただし、ハイブリッド型のハイ・パス・フィルタに適用する場合には、この位相の乱れはゆらぎ成分の帯域外となる。

(b) 移動平均型ロー・パス・フィルタ

非巡回型フィルタは内部にフィードバック・ループを持たないため、過渡応答の影響は最小限に抑えられる。非巡回型の関数単独で構成するフィルタの最も簡単なものは、入力データの小区間毎の単純平均、すなわち、1次の移動平均型ロー・パス・フィルタである。

$$dc_t = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_{t-i} \quad (8.4)$$

この場合、ステップ入力の影響は、サンプル平均時間だけで納る。遮断周波数は $f=1/N\Delta t$ 、減衰特性は1次のため緩やかで -6dB/oct 、また信号の位相には何の影響も与えない。

以上の検討から、フィルタの候補としては、定常時にはバターワース型が、また非定常時には移動平均型が挙げられる。

8.3 ゲイン設定法

8.3.1 従来のゲイン設定法と問題点

増幅器のゲインやフィルタの遮断周波数等の調整は、収録開始前に、事前情報に基づいて行うのが一般的である。したがって、原子炉が定常運転にあり十分な時間的余裕がある場合、あるいは特定の原子炉の特定の運転条件下で行う定期的な測定であって、十分な経験がある場合、調整作業は問題なく実施できる。

ところが、経験の無い原子炉での測定では調整には十分な時間が必要であるし、起動運転、停止運転といった過渡運転時の測定では、ゆらぎ信号の大きさが大幅に変化するため、信号レベルに合わせてゲインを段階的に設定し直す必要があり、しかも調整作業は短時間で行う必要があるため、困難を究める。多チャンネルの収録では尚更である。

8.3.2 最適ゲインの自動探索

増幅器の最適ゲインは、ゆらぎ信号の最大振幅の電圧 V_f と収録システムの最大入力電圧 V_r の比で決る。

$$G_{opt} \leq \frac{V_r}{V_f} \quad (8.5)$$

一般に、収録システムの最大入力電圧 V_r は固定である。したがって、最適ゲインの探索は、ゆらぎ信号の最大振幅電圧 V_f の探索に他ならない。

ゆらぎ信号は確率過程であるため、その振幅値は時刻とともに変動する。このため、最大振幅値の探索のためには、ゆらぎ信号の変動幅をある適当な時間観測する必要がある。収録チャンネル数が少なく、時間的に十分余裕がある場合は、オシロスコープや電圧計による探索も可能であるが、最大振幅成分が長周期(例えば100sec)の場合には探索に相当の時間を要することからも、多チャンネルかつ時間的余裕が無い時には、探索の自動化により、効率化を図る必要がある。

前段のDCバイアス分離処理により、ゆらぎ信号の超低周波成分は減衰し、遮断周波数 f_c 以上(周期 $T=1/f_c$ 以下)の成分だけが残っている。したがって、時間 T だけ観測すれば、ゆらぎ信号に含まれる最大長の周期成分についても一応の評価が可能となる。

増幅器のゲインは通常、(8.6a)式のような離散値を取る。これらに対応する増幅器の最大入力電圧は(8.6b)式となる。

$$\{G_1, \dots, G_7\} = x(1, 2, 5, 10, 20, 50, 100) \quad (8.6a)$$

$$\{V_1, \dots, V_7\} = (10, 5, 2, 1, 0.5, 0.2, 0.1)V \quad (8.6b)$$

いま、時間区間 $[t-T, t]$ で観測されたゆらぎ信号の最大振幅値を $V_{f_{max}}(t-T, t)$ とすると、次式を満足する入力電圧 V_i が最大振幅値と見なせる。

$$V_i \geq \frac{2\alpha}{100} V_{f_{max}}(t-T, t) \geq V_{i+1} \quad (8.7)$$

ここで、 α はゲイン設定に対する余裕で最大100%とする。このとき最適ゲインは、次の最適ゲイン G_i となる。

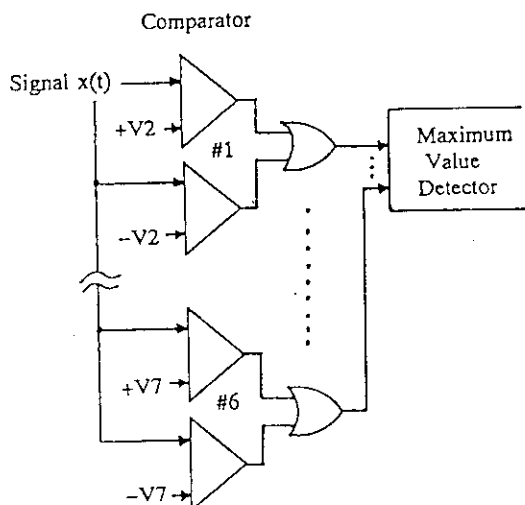


Fig. 8.3 最適ゲイン探索器

$$G_i \leq \frac{V_r}{V_i} \quad (8.8)$$

以上の探索は、Fig. 8.3のように、アナログ・コンパレータとロジック回路を用いてハードウェア的に簡単に実現できる。したがって、各入力チャンネル毎に実時間で最適ゲインの探索を持続的に実行させておき、これらの探索値を用いて収録開始前にゲイン設定することができ、また非定常性のために、ゆらぎの振幅が大幅に変化していく場合には、収録途中であっても、その都度、その時に合ったゲイン値に瞬時に設定し直すことが可能となる。

8.4 バイアス分離装置の開発

軽水炉や研究用熱中性子炉の計装信号の前処理を目的として、8.2.3に述べたデジタル・フィルタを応用したDCバイアス分離装置の設計と製作を行った。後述のフィルタ・アンプも含めてまとめた前処理システムの系統図をFig. 8.4に示す。

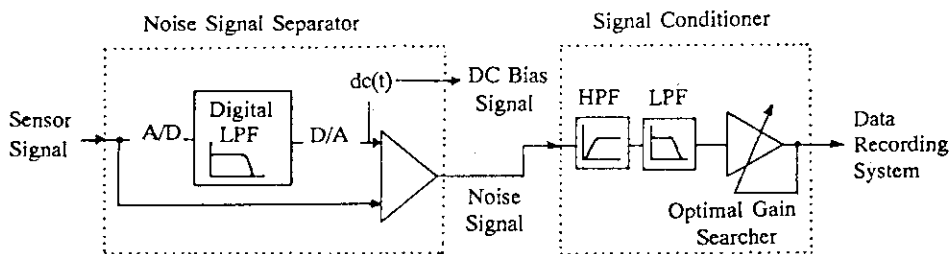


Fig. 8.4 前処理システムの系統図

8.4.1 装置の概要

軽水炉や研究用熱中性子炉を対象とした炉雑音解析では、炉や制御系の動特性、熱水力的現象、機械振動現象などの観点から、おおよそ0.1~10Hzの周波数帯域が最も重要であり、一般には0.01~50Hzの範囲での測定と解析が多く行われている。そこで、本装置では、DCバイアス成分の分離は、定常時の場合0.01Hz、また非定常時の場合は約0.1Hzまでの成分を対象とし、

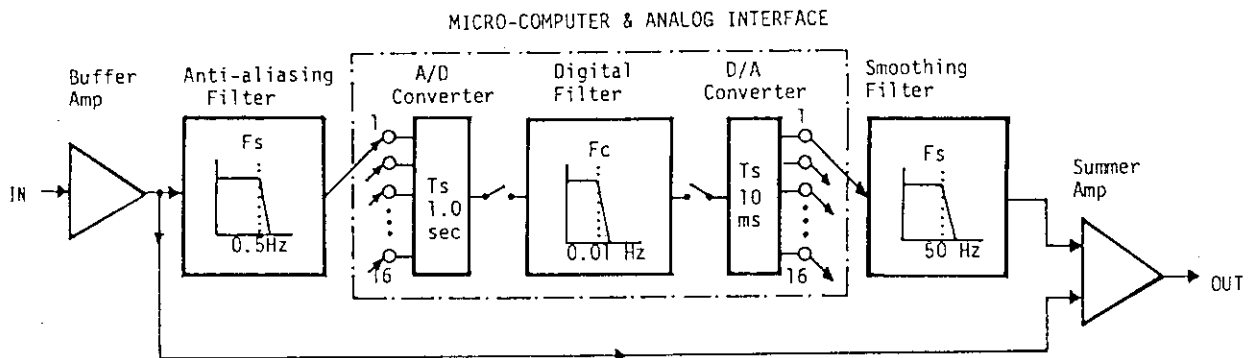


Fig. 8.5 DCバイアス分離装置のブロック・ダイアグラム

Table 8.2 DC バイアス分離装置の仕様

Number of channels	16
Input and output	±10V
Filter type	Hybrid high-pass filter
(1) Input	
Buffer Amp.	±10V, Gain=1
(2) Analog Input	
Anti-aliasing LPF	Butterworth -24dB/oct fc=0.5, 1, 2, 4, 8 Hz
A/D Converter	±10V, 12 bits, 1 Hz, DMA
(3) Digital Filter	
Computer	16 bits, V30 with 8087, 10MHz RAM 640kB, RAM Disk 2 MB
OS, Language	MS-DOS, C
Digital LPF	16 bits, 1 Hz
	fc(Hz) T(sec) dB/oct
Moving Average-1	0.125 8 -6
Moving Average-2	0.0625 16 -6
Moving Average-3	0.03125 32 -6
Moving Average-4	0.015625 64 -6
Moving Average-5	0.0078125 128 -6
Butterworth	0.01 100 -12
Extrapolation	Linear, 16 bits, 100 Hz
(4) Digital Output	
D/A Converter	±10V, 16 bits, 100 Hz
Smoothing LPF	Chebyshev -60dB/oct, fc=10, 20, 50 Hz
(5) Output	
Summer Amplifier	±10V, Gain=1, 3, 10, 30

ゆらぎ成分の通過帯域の上限は50Hzに定めた。

信号処理の過程は、Fig. 8.5のブロック線図に示すとおりで、信号の流れの順に下記の7つの要素で行われる。

- (1) 入力バッファ・アンプ
- (2) アンチ・エイリアシング用ロー・パス・フィルタ
- (3) A/Dコンバータ
- (4) デジタル・フィルタ
- (5) D/Aコンバータ
- (6) スムージング用ロー・パス・フィルタ
- (7) 加算出力アンプ

全体および各部の性能仕様の詳細をTable 8.2に示す。

各部の動作は以下の通り。入力信号は、バッファ・アンプを通り、アンチ・エイリアシング用ロー・パス・フィルタで処理された後、A/Dコンバータでデジタル化される。パーソナルコンピュータに取り込まれたデータは、実時間処理され、ロー・パス・フィルタの計算、補間計算を

経て、D/Aコンバータでアナログ化される。この出力信号は、平滑用ロー・パス・フィルタで処理され、DCバイアス信号となる。差動アンプでは元の信号からこれが差引かれ、ゆらぎ信号が出力される。

8.4.2 ハードウェアの構成

ハードウェアは、アナログ処理部とデジタル処理部から成る。アナログ処理部は、上記の(1), (2), (6), (7)の回路をチャンネル毎に1枚の基板にまとめ、これを1つの筐体に入れたものを設計、製作した。デジタル処理部は、市販の16bitパーソナル・コンピュータとA/D, D/Aインターフェース基板を用いて組み上げたもので、計算機本体、I/O拡張ボックス、キーボード、ディスプレイ、フィルタ切り換え用のスイッチ・ボックスから成る。後述のフィルタ・アンプも含めてまとめた前処理システムの概観をFig. 8.6に示す。

8.4.3 ソフトウェアの構成

ソフトウェアは、OSがシングル・ジョブ用のため1プログラムであるが、機能的にはインタ

ーフェース制御部とデジタル・フィルタ演算部に分けられる。本装置では、DCバイアスの推定には複数のフィルタを用意し、パネル・コマンドによりこれを切り換える方式を採用した。



Fig. 8.6 前処理装置の概観

フィルタ演算部は、Fig. 8.7に示すように、ロー・パス・フィルタと直線補間の計算プログラムから成る。2次バターワース型と平均時間の異なる5つの1次移動平均型フィルタを用意、信号の状態に合わせて切り換えることができる。それぞれの遮断周波数、減衰特性は、Table 8.2に示す通りで、演算は(8.3a)、(8.3b)式または(8.4)式で行う。定常時には、バターワース型フィル

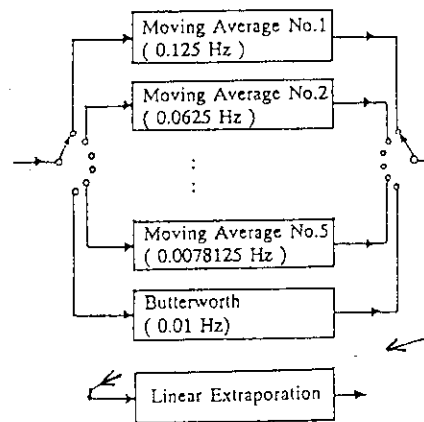


Fig. 8.7 デジタル演算部の構成

タまたは移動平均型の遮断周波数の低いフィルタを使用し、出力変更運転などの非定常時には、その程度に応じて移動平均型の遮断周波数の高いフィルタを使用する。インターフェース制御部は、A/D、D/Aコンバータの制御の他、フィルタ形式切り換えスイッチによるハードウェア割込みの検出、デジタル・フィルタの出力値のRAMディスクへの保存等を行う。

8.4.4 デジタル・フィルタの動作と設計上の問題点

フィルタ演算の結果はD/A変換の後、アナログ加算器で元の信号と混合される。このため本装置では、D/Aコンバータ出力の量子化歪と時間歪が問題となる。振幅の量子化歪はD/Aコンバータの有効bit数に依存するため、できるだけbit数を大きくする必要がある。ここでは16bitsのものを使用した。また時間歪はD/Aコンバータのサンプリング時間間隔 Δt_s に依存し、遮断周波数 $f_c=1/(2\Delta t_s)$ がゆらぎ信号の帯域外になるように決めねばならない。本装置では、ゆらぎ信号の収録最高周波数を50Hzと決めていることから、ここでは、 $\Delta t_s=10\text{msec}$ 、 $f_c=50\text{ Hz}$ とした。

一方、A/Dコンバータのサンプリング時間間隔とロー・パス・フィルタの演算時間間隔は、

本来 Δt_2 の値に合わせるべきであるが、この値を使うと、バイアス分離の遮断周波数が0.01~0.125Hz(周期100~8sec)の場合には取り扱うサンプル・データ数が膨大になり、さらに16チャンネル分の実時間演算をする必要があるため、1台の計算機に掛かる負担が非常に重くなる。この対策として、A/Dコンバータのサンプリング時間間隔とロー・パス・フィルタの演算の時間間隔 Δt_1 を Δt_2 に比べて大きくとり、ロー・パス・フィルタの出力 $\{y_t\}$ を(8.9)式により、 Δt_2 毎に直線補間処理する方法を採用し、計算機の負担を軽減することとした。

$$dct_2 = y_{t-1} + (y_t - y_{t-1})t_2/n \quad (8.9)$$

ここで、 $t_2=1, \dots, n$, $n=\Delta t_1/\Delta t_2$

ただし、この補間処理によりDC成分が大きく変動する場合には周波数 $1/(2\Delta t_1)$ 以下の帯域で若干の歪を生ずることは避けられない。またデジタル・フィルタを実時間で使用する場合には、少なくとも計算時間ステップ1回分(Δt_1)の遅れは避けられない。これはDCバイアス信号の位相遅れとして現れ、バイアス分離性能を悪化させる。このように、計算負荷の軽減とゆらぎ信号に与える歪や分離性能の悪化は排反的關係にあるため、両者のバランスを考慮して、本装置では、 Δt_1 を1secに決定した。

本装置におけるデジタル演算のタイム・スケジュールをFig. 8.8に示す。A/D変換は1sec毎に行い、160 μ sec(変換時間10 μ sec x16チャンネル)を費やす。フィルタ演算は、次のA/D変換までの1sec間に、D/A変換の間を縫って行う。D/A変換は、フィルタ演算が終わった1sec後から開始し、10msec毎に行い、1回毎に9.6 μ sec(変換時間0.6 μ sec x16チャンネル)を費やす。したがって、D/A変換の時間間隔は10msecであるが、出力の遅れは1secとなる。

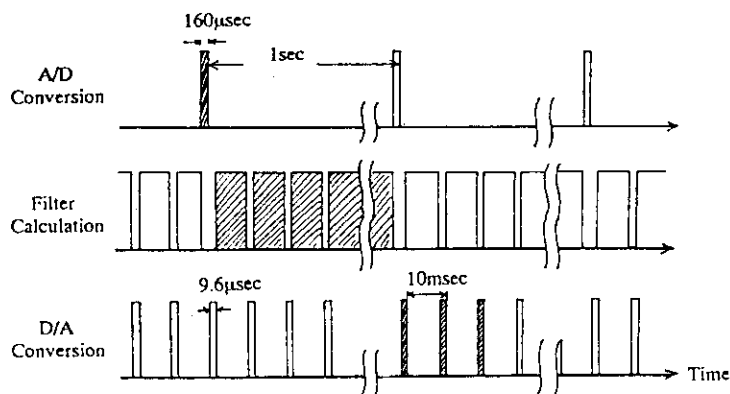


Fig. 8.8 デジタル・フィルタ演算の時間スケジュール

8.5 新しいフィルタ・アンプの開発

8.3.2に述べた最適ゲイン探索機能を持つ信号前処理用フィルタ・アンプを設計、製作した。

8.5.1 装置の概要

本装置は、ゆらぎ信号を収録システムの入力レベルにまで増幅する前処理用のフィルタ・アンプである。ただし、アンチ・エリアシング・フィルタは含んでいない。信号前処理は、Fig. 8.9のブロック・ダイアグラムに示す通り、信号の流れの順に下記の6つの要素で行われる。

- (1) バッファ・アンプ
- (2) ハイ・パス・フィルタ
- (3) ロー・パス・フィルタ
- (4) アンプ
- (5) アッテネータ
- (6) ゲイン・コントローラ

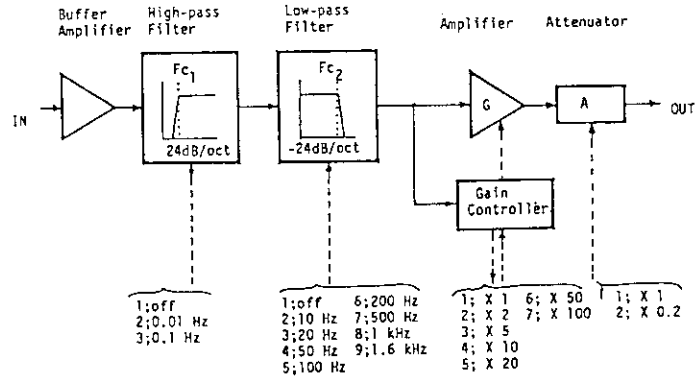


Fig. 8.9 フィルタ・アンプのブロック・ダイアグラム

Table 8.3 フィルタ・アンプの仕様

(1) Signal processing part	
Number of channels	16
Input and output	±10V
High-pass filter	Butterworth, 24dB/oct fc= off, 0.01, 0.1 Hz
Low-pass filter	Butterworth, -24dB/oct fc= off, 10, 20, 50, 100, 200, 500, 1k, 1.6kHz
DC Amplifier	Gain= 1, 2, 5, 10, 20, 50, 100
Attenuator	Coef. = 1, 0.2
Gain controller	(Time const.)=1, 10, 100sec Range= 5, 2, 1, 0.5, 0.2, 0.1 (+100%)
(2) Control part	
Microprocessor	8-bits cpu 6809
Interface	IEEE-488 (GP-IB)
Parallel port	

全体および各部の性能仕様の詳細をTable 8.3に示す。本装置は機能的にみて、信号処理部と制御部から構成される。信号処理部は、上記の(1)~(6)の回路をチャンネル毎に1枚の基板にまとめ、これを1つの筐体に入れたものを設計、製作した。また、制御部は、制御用マイクロプロセッサ、通信用インターフェース、スイッチ用インターフェースから成り、市販のボード・コンピュータを用いて組み上げられ、信号処理部と同じ筐体に納められている。

信号処理部の各種パラメータは、(2)~(5)の回路にプログラマブル素子を用いて、手動設定(Local mode)ならびに外部計算機によるリモート設定(Remote mode)が可能のように設計した。

手動設定はパネル面のスイッチにより、またリモート設定は制御部の8-bits cpuとIEEE-488インターフェースを通じて外部計算機から行われる。リモート設定は、調整作業に要する時間が短縮でき、パラメータの設定、変更等の記録も計算機側で管理できることから、非定常信号の収録や多チャンネルの収録の場合には効果的である。

8.5.2 ゲイン・コントローラ

本装置が従来の信号前処理器と異なる点は、最適ゲインの自動探索機能を持ったゲイン・コントローラを装備している点にある。6組のアナログ・コンパレータによって、ゆらぎ信号とTable 8.3に示す6種の電圧と比較し、ある一定の時間内に見つかった最大値に対応するゲイ

ン値を最適ゲインとするものである。探索された最適ゲイン値は、パネル面に表示される他、インターフェースを通じて外部のリモート計算機にも供給される。

ゲインの設定は、探索されたこの最適ゲイン値を用いる自動モード(Auto mode)、この機能を用いず任意に設定するスレーブ・モード(Slave mode)の2種類が可能である。スレーブ・モードのゲイン設定は、パネル・スイッチ(Local mode)または外部計算機(Remote mode)でゲイン値を変更した時に指定の値に設定される。一方、自動モードのゲイン設定は、パネル・スイッチまたは外部計算機から「設定開始の命令」によって、最適ゲインの探索が開始され、「設定終了の命令」によって、設定がなされる。

8.6 試験

8.6.1 DCバイアス分離特性の評価

Fig. 8.10は、遮断周波数を $f_c=0.01\text{Hz}$ にした場合のバターワース型および移動平均型のDCバイアス分離装置の周波数応答で、シミュレーション計算で得た結果である。デジタル・フィルタの演算ステップ(1sec)の遅れによる位相歪により、2種類のフィルタのどちらも数dBの

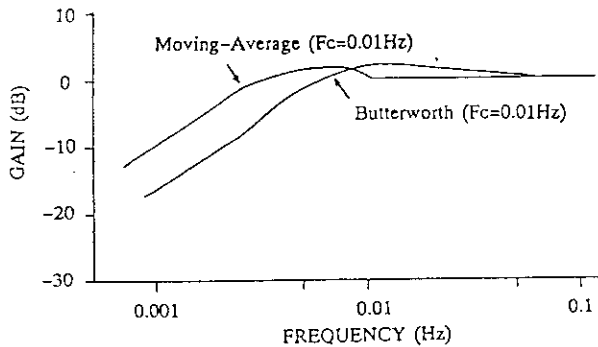


Fig. 8.10 数値計算で評価したDCバイアス分離装置の周波数応答関数

増加部分が見られる。この歪を最悪の場合で3dB以下とすると、振幅の増加は40%程度となる。しかし、移動平均型の場合、この歪は帯域外(0.01Hz以下)に生じ、ゆらぎの通過帯域には影響を及ぼさないため、ゆらぎ信号の解析には支障ない。一方、バターワース型の場合、この歪は0.01~0.06Hzの帯域に現れ、ゆらぎ信号に重畳することになる。しかしながら、この歪の効果は、定常時の測定には余り支障が無く、また超低周波域に強い成分が出現する非定常時は、追従性の問題から移動平均型を使用するために問題とはならない。

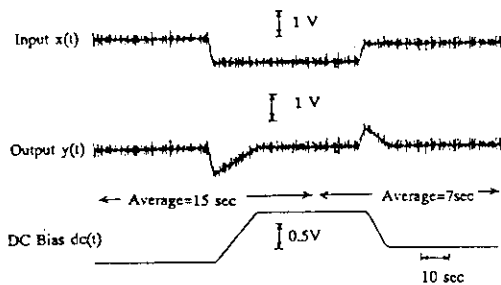


Fig. 8.11 ステップ入力時の出力信号の応答

8.6.2 シミュレーション試験

DC信号に白色雑音を重畳させ人工的に作った信号を用いて、DCバイアス分離装置の動作を確認するための簡単な動作試験を行った。

Fig. 8.11に、信号のDC値が急激に変化した場合の例で、上から順に、もとの信号 $x(t)$ 、分

離装置の出力信号 $y(t)$, 分離装置で推定したDC信号 $dc(t)$ を示す。デジタル・フィルタには移動平均型を使用した。

信号 $x(t)$ のDC値の最初の変動は, 2sec間で1Vから0Vへ下降(-0.5V/sec), 2番目の変動は2sec間で0Vから0.7Vへ上昇(+0.35V/sec)である。これに対して, フィルタの平均時間は, 最初の変動時には $T=15\text{sec}$, 2番目の変動時には $T=7\text{sec}$ に切り替えて処理した。

いずれの場合も, 始めに過渡応答が現れ, これがフィルタの平均時間 T だけ持続するが, その後綺麗に整定することを示している。また, 平均時間 T に比較してDC変化の持続時間 T_{dc} が短いため, 過渡応答の最大振幅はDC変化量と一致したものとなっている。これらは, DC値がステップ状に変化する最悪の状態を想定して行った試験の結果であり, 本装置の追従性の限界を示すものである。しかし, 実際の炉雑音測定では, このような例はセンサーのレンジ切り換えなどの場合以外には見られない。DC変化の持続時間がフィルタの平均時間より長くなる場合($T_{dc} > T$)には, その時間比率に応じて過渡応答の最大振幅も小さくなり, 過渡応答の悪影響も小さくなる。

それでも過渡応答の最大振幅の絶対値が大きい場合には, 後段のアンプには飽和が生じたり, アナログ・データ・レコーダの場合には窒息状態が生じる。これを回避するには, 出力回路にリミッタ回路を挿入する方法もあるが, そのような事態が予想されるような場合には, 本装置の場合には, デジタル・フィルタの演算内容をスイッチで強制的にリセットし, 直ちに過渡応答の状態から脱することも可能である。

平均時間が100secの場合DC変動終了後100sec間過渡応答が持続するが, リセット操作を行った結果, わずか2secで復帰できることが確認できた。

8.6.3 原子炉での収録試験

ここでは, 原研の小型研究炉の1つであるNSRR(原子炉安全性研究炉)において行った収録試験について述べる。

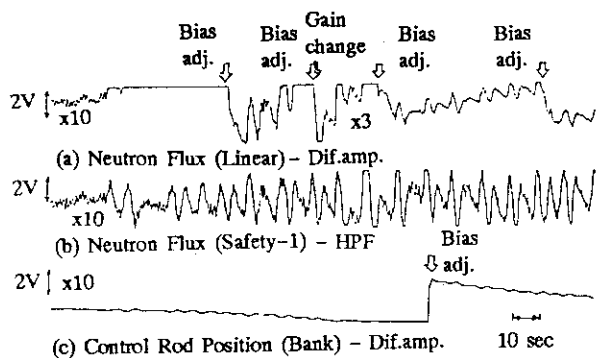


Fig. 8.12 従来の方法で測定したNSRRの出力
上昇時の炉雑音信号

(1) 従来の測定例

比較のため, まず従来の方法の収録結果を Fig. 8.12に示す。これは, NSRRの異常診断実験 Phase-IIIで収録されたデータのうち, 出力上昇運転時(180kWから270kW)の一部を抽出したもので, 典型的な応答を見せた3つの信号を示している。信号は上から順に(a)中性子束信号 Linear, (b)同Safety-1, (c)制御棒位置信号 Bankである。

中性子束信号Linearは, DCバイアス分離処理に差動アンプを用いた。180kW定出力運転時にはDCバイアス調整がなされゲイン10倍で安定に収録できていたが, 出力上昇と共にDC成

分が増加したため飽和した。炉出力変更終了後、自動制御系が掛けられ数分後に炉出力が安定化するまでに要した調整は、DCバイアスの調整が4回、ゲイン変更(10倍から3倍)が1回であった。

中性子束信号Safety-1は、DCバイアス分離処理にハイ・パス・フィルタ($f_c=0.01\text{Hz}$, 48dB/oct)が用いられた。この例では、DC成分の増加にともないフィルタの動作は過渡状態に入り、またゲインが10倍に固定されていたこともあり、信号のピーク部分に飽和を起こした。

制御棒位置信号(Bank)は、DCバイアス分離処理に差動アンプを用いた。ゲインは10倍である。原子炉が自動制御で運転されているため、この信号のDC成分は、炉出力変更後も燃料温度が定常になるまでのかなり長い時間変化し続ける。この例では、中性子束信号に比べて2倍以上の時間にわたり、頻繁にバイアスを調整しなければならなかった。

以上のように、従来の方法による過渡応答時の収録では、バイアス、ゲインなどの調整による不連続点や信号の飽和部分を生じるため、解析に役立つデータを得ることは難しい。

(2) 本装置を使った収録例

次に、本章の前半に述べたDCバイアス分離装置ならびにフィルタ・アンプを用いて行った炉雑音収録の結果について述べる。

Fig. 8.13は、Phase-IV-3実験で、50kWから270kWに出力上昇した時の例を示している。信号は、上から順に、(a)中性子束Linearの前処理を行う前のもの、(b)前処理後のLinear、(c)同Safety-1、(d)燃料温度TF1、(e)制御棒位置Bankである。バイアス分離装置のデジタル・フィルタはバターワース型を使用した。

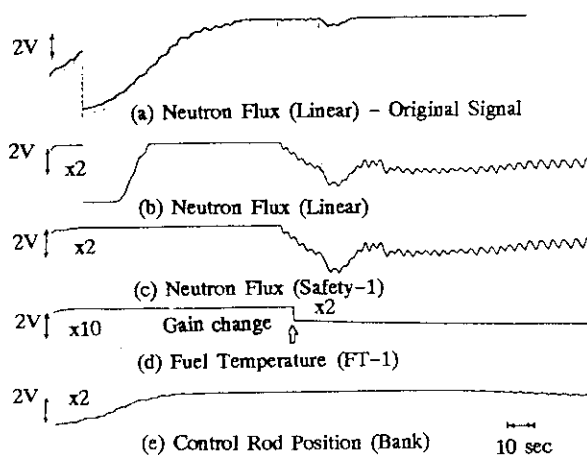


Fig. 8.13 新しい前処理システムで測定したNSRRの炉出力上昇時の炉雑音信号

中性子束Linearは、原子炉運転側でレンジ切り換えを行ったため急激なDC変化を起こしているにもかかわらず、出力達成後、すぐに収録可能となっている。燃料温度TF1は、出力変更によって時定数の非常に長い大振幅の変動を引き起こすため、従来の方法ではその変動にほとんど追従できなかったが、DCバイアス分離の効果とゲイン変更操作により一応収録できるようになった。

制御棒位置Bankは、変動振幅が大きいため170sec程度の収録不能区間を生じたが、従来の方法に比べてこの区間は遙かに短縮された。

以上のように、本装置の使用により、無調整で実用的な収録ができるようになった。

8.7 むすび

非定常炉雑音データの収録に必要な2つの前処理技術、すなわち、ゆらぎ成分とDC成分の分離および最適なゲインによるゆらぎ信号の増幅に関して技術開発を試みた。

DC成分の分離技術に関しては、デジタル・フィルタを応用した分離装置を開発し、従来の方法で問題になっていた非定常時の過渡応答特性を改善した。またゆらぎ信号の増幅に関しては、振幅レベルから最適ゲインを自動探索する機能を持つフィルタ・アンプを開発し、調整作業の自動化を図った。

シミュレーション信号や原子炉での実際の収録を通じて、これらの装置の有効性を検証した。この結果、非定常信号の収録では、DC成分の変動が比較的ゆっくりな場合にはほとんど問題無く収録できること、また変動幅が大きく急な場合でも、実用的に収録できることが分かった。

その後、これらの前処理装置と同じ設計の装置を原子力船「むつ」のデータ収録システムにも組み込み、現在使用している。

9. 結論

本論文では、(1) 原子炉システムの非線形機構やその特性の解析に役立つ非線形炉雑音解析手法の開発、(2) 炉出力変動の観測結果の解明、(3) 非定常炉雑音の解析手法とデータ収録法の確立を行った。

(1)の目的に関して、まず第2章で従来の非線形スペクトルの1つであるバイスペクトル解析法をJPDR-IIおよびBorssele炉の炉雑音解析に適用し、この手法が炉雑音信号に埋れた非線形性の特徴、特に高調波成分間の干渉の証拠を捕えるのに有効な手法であることを示した。しかし、この手法から信号発生機構などに関する直接的な情報は得られないため、非線形原子炉動特性に裏付けされたスペクトル理論が未開拓な現状では、非線形性の有無の存在の証明などに限定して用いるのが妥当であると結論された。

次に、第3章から第5章では、従来の非線形スペクトルに代る解析手法として、GMDHに基づく階層型モデリング手法による非線形炉雑音解析法を開発し、その有効性を示した。

まず、第3章では、従来明確でなかった基礎関数の統計的意味、線形階層モデルと線形自己回帰モデルとの関係を理論的に明らかにした。次に、従来、階層型構造ゆえに非線形階層型モデルの物理的解釈が困難であり、その応用が「ブラック・ボックス」的な使用法に限られていた状況を打開するため、非線形自己回帰型階層モデルに基づく非線形インパルス応答関数、非線形周波数応答関数ならびに非線形パワー・スペクトルの推定法を提案し、スペクトル解析や非線形機構の解析に応用する道を拓いた。

第4章は、GMDHに基づく階層モデリング手法の応用の1つとして、PWRにおける異常炉心槽振動を2つの井戸型ポテンシャルを持つ確率ダフニング方程式で表現したモデルを用いて模擬データを作成し、非線形自己回帰型階層モデルによるシステム同定試験を行った。その結果、1次と3次の項を用いた基礎関数を用いた非線形自己回帰型階層モデルにより、この非線形データが時系列モデル化でき、さらに、先に提案した手法を適用した結果、もとのシステムのパラメータや信号レベルが跳躍するメカニズムに関する解釈が実現できることを明らかにし、その有効性を示した。

第5章は、第2の応用例としてBWRの炉出力振動を取り上げた。BWRではシステムが不安定になる安定限界付近では、原子炉固有の振動周波数を基本波とする高調波を発生することが知られており、これが感度良く検知できれば、従来の線形手法に基づく安定性監視法では成し得なかったこの領域での監視が可能になる。そこで、簡単な確率BWRモデルを用いて安定限界付近の模擬データを作成し、非線形自己回帰型階層モデルに基づく非線形スペクトル解析をこの問題に適用した。この結果、この高調波成分の発生を微小な段階で捕えることができ、本手法を適用した新しい監視方法が安定限界付近での監視に有効であることを示した。

(2)の目的に関して、第6章では、研究炉NSRRを対象に炉出力振動の観測と解析を行っ

た。小型研究炉はBWRのようなボイド・フィードバック効果が無く、通常は安定であるが、NSRRでは不安定性が見られ、観測の結果、炉出力が通常の研究炉では見られない種々のパターンで振動しており、時に非線形性に起因する高振幅の波形になることを発見した。実験と従来の炉雑音解析手法を用いて、炉出力振動の原因は自動制御系の特性の悪さにあり、非線形メカニズムに起因する不安定性を持っていること、プール水を攪拌するシステムの運転により生じる温度ゆらぎが外乱源になっていることなどを明らかにし、その後の原子炉の運転の安定化に寄与した。

(3)の目的に関して、第7章では、瞬時の自己回帰スペクトルの非定常炉雑音解析への応用について研究し、従来から知られる時間一周波数スペクトル推定にこれを適用すると時間軸分解能を向上でき、原子炉状態の追跡や異常診断に応用できることを示した。始めに、自己回帰スペクトルで問題になる少数サンプル時の推定誤差に関して、4種の計算法の実験的評価を行い、Marple法が優れており、スペクトル・ピーク周波数の推定問題における最小サンプル数は対象とする周波数成分の数周期分あれば十分であることを明らかにした。次に、これを時間一周波数スペクトルの推定に応用し、模擬データやPWR停止運転時の特性解析に適用した。その結果、本手法の適用は、時間分解能を十分高くできるため、原子炉状態の追跡や異常診断に役立つ精密な非定常炉雑音解析が可能であることを示した。

第8章では、非定常炉雑音データ収録用前処理システムを開発した。従来、過渡応答時には信号中のDCバイアス成分は大きく変動するため、これを分離してゆらぎ成分だけを測定するのが困難であったが、デジタル・フィルタを応用した分離方法を開発し、実用レベルでの測定を可能にした。また後段の増幅器のゲイン設定法に関しても最適ゲインの自動探索機能を付加え、収録性能の向上を図った。これに関する装置を製作し、模擬試験や原子炉での測定試験を行い、実用性についてもこの有効性を実証した。これらの装置は原子力船「むつ」においても役立てられた。

以上のように各課題に対して成果をあげることができた。今後、各課題に対して次のようなものが考えられる。

(1)に関しては、開発した非線形自己回帰型階層モデルに基づく解析法を様々な実炉データに適用し非線形現象の解明に役立てるとともに、その普及を図る必要がある。これらは、最近になり本研究が認められBWRの実測データが入手できたこともあり、その解析を進めている。

(2)に関しては、NSRRを対象に実験と線形手法に基づく解析を進め、その現象に非線形機構が関与していることを明らかにしたが、現在、これらの測定データは数少ない非線形性を含む実測データとして、確率微分方程式による現象論的非線形動特性モデルやカオス・フラクタル理論の研究に役立てられている。さらに、非線形階層モデリング手法を適用した解析も始められた。今後の成果が期待される。

(3)の解析手法に関しては、今後、原子炉のオンライン監視システムに組み込み、状態監視や異常診断に役立てさせる必要がある。また、前処理システムに関しては、より広い意味での非定常信号にも対応できるように、フィルタのソフトウェアに工夫をこらし、さらにDC成分変化への追従性を向上させる必要がある。

謝 辞

本研究の遂行にあたり、筆者が所属する原子炉制御研究室の篠原慶邦室長に一貫して御指導頂いた。かつて研究室の上司で現スウェーデンEuroSim ABの尾熊律雄氏には、研究初期に御指導頂いた。筑波大学物質工学系の金野秀敏講師には非線形炉雑音の研究で大変お世話になった。原子炉制御研究室の熊谷昭雄氏(現、リンクコンセプト)には、バイアス分離装置のソフトウェア開発に当り多大な協力を得た。NSRR運転管理室の堀木欧一郎室長(当時)ほか運転グループの皆さんには、実験に多大なる協力を得た。オランダECNのDr. TurkcanにはBorssele炉雑音解析で多大なる支援を頂いた。原子炉制御研究室の各室員には研究計画、実験、計算処理、ハードウェア開発等で多大なる助言と協力を頂いた。ここに謝意を表します。

また、本論文をまとめるに当り、東海大学工学部の黒田義輝教授(現、同大学名誉教授)、清瀬量平教授、飯田昌盛教授、川路 昭教授、佐光興亜教授、別府護郎教授、安 成弘教授、阪元重康教授、利根川豊助教授ならびに早稲田大学理工学部の秋月影雄教授に御指導を仰いだ。深く感謝の意を表します。

参考文献

第1章

- 1) 黒田義輝 (1968) 原子炉雑音解析における相関技術, 磯部孝(編)相関関数とスペクトル, 222/239, 東京大学出版会
- 2) 斎藤慶一 (1975) 原子炉雑音解析とその診断技術への応用, 応用物理, 44-9, 989/999.
- 3) 須田信英 (1979) 原子炉雑音解析, 計測と制御, 18-4, 312/322.
- 4) 黒田義輝, 他 (1973) 原子炉診断技術の現状, 日本原子力学会誌, 15-12, 792/808.
- 5) 斎藤慶一, 他 (1976) 最近の炉雑音解析の動向, 日本原子力学会誌, 18-4, 208/216.
- 6) 松原邦彦 (1981) ゆらぎ信号による原子炉プラントの異常診断研究の現状, 日本原子力学会誌, 23-9, 657/665.
- 7) Suda, N. et al. (1989) Reactor noise analysis recent research activities in Japan, J. Nucl. Sci. Technol., 26-1, 39/51.
- 8) 赤池弘次, 他 (1971) 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
- 9) Fukunishi, K. et al. (1976) Dynamical analysis of a boiling water reactor by Multi-variable autoregressive model, J. Nucl. Sci. Technol., 13-3, 139/140. (Short Note).
- 10) Fukunishi, K. (1977) Diagnostic analysis of a nuclear power plant using multi-variate autoregressive processes, Nucl. Sci. Eng., 62, 215/225.
- 11) Matsubara, K. et al. (1977) Experimental studies of core flow fluctuations and neutron noise in a BWR, Prog. Nucl. Energy, 1-2/4, 137/149.
- 12) 林 光二, 他 (1981) 統計的解析手法に基づく原子炉システムの動特性解析および異常診断コード: S T A R, JAERI-M 9761.
- 13) Hoogenboom, J. E. et al. (1988) Summary of the benchmark test on artificial noise data, Prog. Nucl. Energy, 21, 815/824.
- 14) Hayashi, K. et al. (1988) Study of the goodness of system identification using multivariate AR modeling, Prog. Nucl. Energy, 21, 697/706.
- 15) Thie, J. A. (1963), Reactor noise, Rowman and Littlefield, Inc.
- 16) Williams, M. M. R. (1971) Random process in nuclear reactors, Pergamon Press.
- 17) Kuroda, Y. and Hayashi, K. (1979) At-power noise and third order spectra, IMORN-12.
- 18) 黒田義輝 (1980) 雑音信号における成分波干渉の検出, 原子炉における統計現象 短期研究会報告, KURRI-TR-203, 21/30.
- 19) 林 光二 (1980) 高出力炉における固有雑音と人工雑音—その3次スペクトルによる解析, 東海大学大学院工学研究科 昭和54年度修士論文
- 20) Van der Hagen, T. H. J. J et al. (1988) Application of noise analyses to stability determination of a natural-circulation cooled BWR, Prog. Nucl. Energy, 21, 753/761.
- 21) Vath, W. (1979) Criss power spectral density - A method for correlating signal components from different frequency ranges, KfK 2794.
- 22) Konno, H. et al., (1988) Characterization of chaotic nonstationary time series and its application to early detection of anomalies in nuclear reactor, Prog. Nucl. Energy, 21, 661/670.
- 23) Konno, H., Hayashi, K. et al. (1988) Analysis of pressure fluctuations in the Borssele nuclear reactor based on bispectrum and higher order moments, Ann. Nucl. Energy, 15-10/11, 487/500.

- 24) Pineyro, et al. (1989) Bispectrum estimation using overlapped segments, Munoz-Cobo, J. L. et al. (ed.), Noise and Nonlinear Phenomena in nuclear systems, NATO ASI Series B: Physics 192, 275/286.
- 25) Behringer, K. et al. (1990) Application of the Wiener-Hermite functional method to point kinetics driven by random reactivity fluctuations, Ann. Nucl. Energy, 17-12, 643/656.
- 26) Thie, J.A. (1975), Theoretical considerations and their application to experimental data in the determination of reactor internals' motion from stochastic signals, Ann. Nucl. Energy, 2, 253/259.
- 27) Fry, D.N. et al. (1974) Analysis of neutron-density oscillations resulting from core barrel motion in the Parisades nuclear power plant, ORNL-TM-4570.
- 28) Konno, H. (1986) The stochastic process of non-linear random vibration - Reactor-noise analysis of hump phenomena in a time domain, Ann. Nucl. Energy, 13-4, 185/201.
- 29) Liewers, P. et al. (1988) Detection of core barrel motion at WWER-440-type reactors, Prog. Nucl. Energy, 21, 89/96.
- 30) Liewers, P. et al., (1989) Abbildung anomaler Reaktorschachtschwingungen in externen Neutronenflußschwankungen, Kernenergie, 32-8, 338/343.
- 31) Konno, H. et al. (1989) The Stochastic theory of nonlinear vibration for 1-D and 3-D beams and its application to anomalous core barrel motion in nuclear reactors, Ann. Nucl. Energy, 16-4, 173/188.
- 32) 横溝修 (1990) BWRの安定性, 日本原子力学会, 第22回炉物理夏期セミナー・テキスト, 77/95.
- 33) Gialdi, E. et al. (1985) Core stability in operating BWR: Operational experience, Prog. Nucl. Energy, 15, 447/459.
- 34) March-Leuba, J. et al. (1986) Nonlinear dynamics and stability of boiling water reactors: Part-1 - Qualitative analysis, Nucl. Sci. Eng., 93, 111/123.
- 35) March-Leuba, J. et al. (1986) Nonlinear dynamics and stability of boiling water reactors: Part-2 - Quantitative analysis, Nucl. Sci. Eng., 93, 124/136.
- 36) Murphy, G.A. (1988) Selected safety-related events - Summary of AEOD special report S803: Power oscillation at LaSalle 2, Nuclear Safety, 29-3, 356/362.
- 37) Oguma, R. et al. (1988) Investigation of BWR stability in Forsmark 2 based on multi-variable noise analysis, STUDEVIK/NI-88/3.
- 38) Bergdahl, B. et al. (1988) BWR-stability investigation at Forsmark-1, STUDEVIK/NI-88/12.
- 39) Bergdahl, B. et al. (1990) BWR stability investigation in Ringhals 1 : Measurement Data from October 26, 1989, STUDEVIK/NI-90/17.
- 40) 林 光二, 他 (1984) 炉雑音解析法を用いたNSRRの異常診断(I), JAERI-M 84-056.
- 41) 林 光二, 他 (1984) 炉雑音解析法を用いたNSRRの異常診断(II), JAERI-M 84-137.
- 42) Konno, H., Hayashi, K. et al. (1990) On the origins of power oscillation in the NSRR, Ann. Nucl. Energy, 17-6, 317/337.
- 43) Konno, H., Hayashi, K. et al. (1992) Nonlinear dynamics of reactor with time delay in automatic control system and temperature effect, J. Nucl. Sci. Technol., 29-6, 530/546
- 44) Suzudo, T. and Hayashi, K. (1991) Search for chaotic character of the time series of reactor signals, Proc. of SMORN-VI; A Symposium on Nuclear Reactor Surveillance and Diagnostics, Gatlingburg, USA, 1, 29.01/29.12.

- 45) Hasselmann, K. et al. (1961) Bispectra of ocean waves, Rosenblatt M. (ed.), Proc. of Symp. on Time Series Analysis, 125-139, John Wiley & Son (1963).
- 46) Rosenblatt, M. et al. (1965) Estimation of bispectrum, Ann. Math. Stat. 36, 1120/1136.
- 47) Van Ness, J.W. (1966) Asymptotic normality of bispectral estimates, Ann. Math. Stat., 37, 1257/1272.
- 48) Brillinger, D.R. (1965) An introduction to polyspectra, Ann. Math. Stat. 36, 1351/1374.
- 49) Brillinger, D.R. (1967) Asymptotic theory of estimates of K-th Order Spectra, Harris, B. (ed.), Spectral Analysis of Time Series, 153/188, John Wiley & Son.
- 50) Brillinger, D.R. (1967) Computation and Interpretation of K-th Order Spectra, Harris, B. (ed.), Spectral Analysis of Time Series, 189/234, John Wiley & Son.
- 51) Lii, K. S. (1982) Non-Gaussian ARMA model identification and estimation, Proc. Bus. and Econ. Statistics (ASA), 135/141
- 52) Lii, K. S. et al. (1982) Deconvolution and estimation of transfer function phase and coefficients for non-Gaussian linear process", Ann. Statist., 10, 1195/1208.
- 53) Nikias, C. L., et al. (1985) Mixed-phase wavelet estimation via autoregressive bispectrum, in Proc. 1985 Int. Geosc. Remote Sensing Symp., 1. Amherst, MA:U. Mass Press, Oct. 1985, 66/71.
- 54) 相良節夫 (1983), 非線形システムの同定, 計測自動制御学会編 自動制御ハンドブック, オーム社, 576/584
- 55) Volterra, V. (1959) Theory of functionals and of integral and integrodifferential equations, New York, Dover.
- 56) Van Trees H. L. (1962) Synthesis of optimum nonlinear control systems, The MIT Press.
- 57) Roy, R. J. et al. (1967) A Learning technique for Volterra series representation, IEEE Trans., Automatic Control, 12-12, 761/764.
- 58) 渡辺 敦, 他 (1986) Karhunen-Loeve展開を応用したVolterra核の測定, 計測自動制御学会論文集, 22-6, 610/615.
- 59) 横山 誠, 他 (1987) 非白色正規性入力を受ける非線形システムの直交汎関数級数表現, 計測自動制御学会論文集, 23-11, 1151/1157.
- 60) 横山 誠, 他 (1989) 非定常非白色正規性入力による非線形システムの同定, 計測自動制御学会論文集, 25-7, 765/770.
- 61) 市川 哲 (1990) ボルテラ級数による非線形システムの解析 (解説), システム・制御・情報, 34-9, 524/530.
- 62) Gyftopoulos, E. P. et al. (1964) Signals for transfer-function measurements in non-linear systems, Uhrig R. E. (ed.), Noise analysis in nuclear systems, US-AEC TID-7679, 335/345.
- 63) Ivakhnenko, A. G. (1970) Heuristic self-organization in problems of engineering cybernetics, Automatica, 6, 207/219.
- 64) Ivakhnenko, A. G. (1971) Polynomial theory of complex systems, IEEE Trans., System, Man and Cybernetics, SMC-1, 364/378.
- 65) Rosenblatt, F. (1958) The perceptron: A probabilistic model for information storage and organization in the brain. Psychol. Rev. 65-6, 386/408.
- 66) Minsky, M. et al. (1969), Perceptrons, The MIT Press, USA. 斎藤正男(訳)(1971) パーセプトロン-パターン認識理論への道, 東大出版会.
- 67) 池田三郎, 他 (1975) GMDH(発見的自己組織化法)と複雑な系の同定・予測 (解説), 計測と制御, 14-2, 185/195.

- 68) 田村担之 (1978) GMDHの方法論と応用に関する最近の動向, 電子通信学会誌, 61-3, 258/260
- 69) 池田三郎, 他 (1979-1980) GMDH(変数組合せ計算法)の基礎と応用—発見的自己組織化による複雑なシステムのモデリング—I~VIII (講義), システムと制御, 23-12~24-7.
- 70) 近藤正, 他 (1979) 情報量基準AICを用いて中間表現式を自己選択する改良形GMDH, 計測自動制御学会論文集, 15-4, 466/471.
- 71) 田村担之, 他 (1979) 改良形GMDHによる大気汚染のモデリングと短期予測, 計測自動制御学会論文集, 15-5, 622/627.
- 72) 斎藤肅, 他 (1981) 水需要のモデリングと予測—情報量基準AICを統一的規範とするGMDHの適用—, 計測自動制御学会論文集, 17-5, 537/544.
- 73) Akaike, H. (1974) A new look at the statistical model identification, IEEE Trans., AC-19-6, 716/723.
- 74) 赤池弘次 (1976), 情報量基準AICとは何か, 数理科学, 153, 5/11.
- 75) 池田秀松, 他 (1987) パルサーフィーダー型パルスカラムにおける軸方向ホールドアップ, (II) GMDHによるモデル化と分析, 日本原子力学会誌, 29-2, 141/150.
- 76) Shinohara, Y. et al. (1977) Application of GMDH to reactor dynamics identification, Private Communication.
- 77) 篠原慶邦 (1977) 計算機プログラム—GMDH—, 私信.
- 78) 林 光二, 他 (1989) 炉雑音信号に対するGMDHに基づく階層モデル JAERI-M 89-175.
- 79) Hayashi, K et al. (1991) Study of a modeling method for nonlinear reactor noise, Proc. of SMORN-VI ; Symposium on Nuclear Reactor Surveillance and Diagnostics, Gatlinburg Tennessee, USA, 1, 27. 01/27. 12.
- 80) 林 光二, 他 (1992) GMDHに基づく非線形自己回帰モデルの同定とスペクトル解析, 計測自動制御学会論文集, 28-10, 1216/1223.
- 81) Priestley, M. B. (1982) On the fitting of general non-linear time series models, Anderson, O. D. (ed.), Time Series Analysis ; Theory and Practice 1, 717/731, North-Holland.
- 82) Priestley, M. B. (1988) Non-linear non-stationary time series analysis, Academic Press.
- 83) Ozaki, T. (1985), Nonlinear time series models and dynamical systems, Hanna, E. J. et al. (ed.), Handbook of Statistics, 5, 25/83, North-Holland
- 84) 尾崎 統 (1991) 非線形系の統計的システム同定とその河川流量予測への応用 (解説), システム・制御・情報, 35-6, 331/341.
- 85) 李(Lee, M. C.), 他 (1989) 非線形を含む系の信号圧縮法による同定とその評価, 計測自動制御学会論文集, 25-7, 729/736.
- 86) Türkan, E. (1985) Physical benchmark test Borssele (PWR) - Noise data, Bernard P. et al. (ed.), Report of the SMORN IV Physical Benchmark, NEACRP-L-282, 252/263,
- 87) 日野幹雄 (1977) スペクトル解析, 朝倉書店
- 88) Ozaki, T. et al. (1975) On the fitting of non-stationary autoregressive models in time series analysis, Proc. of the 8-th Hawaii International Conference on System Science, Western Periodical Company.
- 89) Kitagawa, G. et al. (1979) A Procedure for the modeling of non-stationary time series, Ann. Inst. Statist. Math., 30, Part B, 351.
- 90) Kitagawa, G. et al. (1985) A Smoothness period time-varying AR coefficient modeling of non-stationary covariance time series, IEEE trans. Automatic Control, AC-30-1, 48/56.

- 91) 北川源四郎 (1986) スペクトル解析の動向 (解説), 計測と制御, 25-12, 1074/1081.
- 92) Albrecht, R.W. et al. (1982) Measurement of two phase flow properties using the nuclear reactor instrument, Prog. Nucl. Energy, 9, 37/50.
- 93) Van Der Veer, J.H.C. et al. (1982) Noise analysis of the Dodewaard boiling water reactor : Characteristics and time history, Prog. Nucl. Energy, 9, 607/618.
- 94) Valko, J. et al. (1985) Experiences with noise analysis at Paks nuclear power plant, Prog. Nucl. Energy, 15, 403/412.
- 95) Mullens, J.A. et al. (1985) On-line noise monitoring at the fast test facility, Prog. Nucl. Energy, 15, 147/153.
- 96) Le Guillou, G. et al. (1985) Le bruit neutronique sur les reacteurs a neutrons rapides francais: Bilan et perspectives apres dix annees d'experience sur le reacteur Phenix, Prog. Nucl. Energy, 15, 491/500.
- 97) Dach, K. et al. (1985) The experiences of using neutron noise analysis for vibration behavior of internal structures, Prog. Nucl. Energy, 15, 243/250.
- 98) Aberle, J. et al. (1985) Noise measurement during the in-pile blockage experiment MOL 7C/4, Prog. Nucl. Energy, 15, 147/153.
- 99) Wehling, H. J. et al. (1985) The influence of thermohydraulic parameters on the dynamic behavior of KWU-PWR's, Prog. Nucl. Energy, 15, 273/282.
- 100) Türkcan, E. (1985) On-line monitoring of a PWR for Plant surveillance by noise analysis, Prog. Nucl. Energy, 15, 365/378.
- 101) 林 光二, 他 (1982) Burgのアルゴリズムに基づくARモデルの同定とその原子炉異常診断への応用, JAERI-M 82-009.
- 102) Marple, L. (1980) A new autoregressive spectrum analysis algorithm, IEEE, ASSP-28, 441.
- 103) 林 光二 (1984) 最小2乗法に基づくARモデル・フィッティング・アルゴリズムの評価, JAERI-M 84-127.
- 104) Hayashi, K. et al. (1988) A method of nonstationary noise analysis using instantaneous AR spectrum and its application to Borssele reactor noise analysis, Prog. Nucl. Energy, 21, 707/716.
- 105) Kitamura, M. et al. (1985) Development of methods for analyzing time-varying characteristics of power reactor noise, Prog. Nucl. Energy 15, 57/68.
- 106) Türkcan, E. et al. (1985) Analysis of time-varying characteristics of signals from Borssele reactor, Prog. Nucl. Energy, 15, 853/861.
- 107) Kuroda, Y. et al. (1988) Some aspects of reactor noise analysis from the Bayesian viewpoint, Prog. Nucl. Energy, 21, 717/723.
- 108) 尾熊律雄, 林 光二, 他 (1980) OWL-1キュービクルにおける露点計記録データの統計的解析と冷却水漏洩早期検出への応用, JAERI-M 9237.
- 109) Oguma, R., Hayashi, K. et al. (1981) On-line leak detection method for OWL-1 loop by ARX modeling using dewpoint signals, J. Nucl. Sci. Technology, 18-10, 756/765.
- 110) Türkcan, E. et al. (1984) On-line reactor monitoring system for the Borssele power plant (PWR), IAEA-SR-105/11.
- 111) 佐野健一, 他 (1987) 過渡追従型デジタル・フィルタの開発, 原子力学会秋の大会B43.
- 112) 馬場俊光, 他 (1988) 炉雑音前処理への非線形フィルタリング応用, 原子力学会年会A3.
- 113) 林 光二, 他 (1988) 非定常炉雑音データ収録システムの開発 (I), 原子力学会年会A5.
- 114) 林 光二, 他 (1988) 非定常炉雑音データ収録システムの開発 (II), 原子力学会秋の大会A28.
- 115) 林 光二 (1992) 非定常炉雑音データ収録用前処理システムの開発, 日本原子力学会誌, 34-10, 971/983

第2章

- 1) Hasselmann, K. et al. (1961) Bispectra of ocean waves, Rosenblatt M. (ed.), Proc. of Symp. on Time Series Analysis, 125-139, John Wiley & Son (1963).
- 2) 北村政晴, 他 (1978) J P D R-IIの動特性同定実験—自己回帰モデリングの適用—, JAERI-M 7580.
- 3) Kuroda, Y. and Hayashi, K. (1979) At-power noise and third order spectra, IMORN-12.
- 4) 黒田義輝 (1980) 雑音信号における成分波干渉の検出, 原子炉における統計現象 短期研究会報告, KURRI-TR-203, 21/30.
- 5) 林 光二 (1980) 高出力炉における固有雑音と人工雑音—その3次スペクトルによる解析, 東海大学大学院工学研究科 昭和54年度修士論文
- 6) Van der Hagen, T. H. J. J et al. (1988) Application of noise analyses to stability determination of a natural-circulation cooled BWR, Prog. Nucl. Energy, 21, 753/761.
- 7) Konno, H. et al., (1988) Characterization of chaotic nonstationary time series and its application to early detection of anomalies in nuclear reactor, Prog. Nucl. Energy, 21, 661/670.
- 8) Konno, H., Hayashi, K. et al. (1988) Analysis of pressure fluctuations in the Borssele nuclear reactor based on bispectrum and higher order moments, Ann. Nucl. Energy, 15-10/11, 487/500.
- 9) Dragt, J. B. et al. (1977) Borssele PWR noise measurements, analysis and interpretation, Prog. Nucl. Energy, 1, 293/307.
- 10) Türkcan, E. (1982) Review of Borssele PWR noise experiments, Analysis and Instrumentation, Nucl. Energy, 9, 437/452.
- 11) Oguma, R. et al. (1985) Application of an improved multivariable noise analysis method to investigation of PWR noise : Signal transmission path analysis, Prog. Nucl. Energy, 15, 863/874.
- 12) Türkcan, E. (1985) Physical benchmark test Borssele (PWR) - Noise data, Bernard P. et al. (ed.), Report of the SMORN IV Physical Benchmark, NEACRP-L-282, 252/263.
- 13) 上野敏行, 他 (1976) (総合報告) バイスpekトルの測定とその応用, 応用物理, 45, 384/396.

第3章

- 1) Ivakhnenko, A. G. (1970) Heuristic self-organization in problems of engineering cybernetics, Automatica, 6, 207/219.
- 2) Ivakhnenko, A. G. (1971) Polynomial theory of complex systems, IEEE Trans., System, Man and Cybernetics, SMC-1, 364/378.
- 3) 麻生英樹 (1988) ニューラルネットワーク情報処理—コネクショニズム入門あるいは柔らかな記号に向けて—, 産業図書
- 4) Rosenblatt, F. (1958) The perceptron : A probabilistic model for information storage and organization in the brain. Psychol. Rev. 65-6, 386/408.
- 5) Minsky, M. et al. (1969), Perceptrons, The MIT Press, USA. 斎藤正男(訳) (1971) パーセプトロン—パターン認識理論への道, 東大出版会.
- 6) 池田三郎, 他 (1975) GMDH(発見的自己組織化法)と複雑な系の同定・予測 (解説), 計測と制御, 14-2, 185/195.
- 7) 池田三郎, 他 (1979-1980) GMDH(変数組合せ計算法)の基礎と応用—発見的自己組織化によ

- る複雑なシステムのモデリング—I～VIII (講義), システムと制御, 23-12~24-7.
- 8) 田村担之 (1978) GMDHの方法論と応用に関する最近の動向, 電子通信学会誌, 61-3, 258/260
 - 9) 近藤正, 他 (1979) 情報量基準AICを用いて中間表現式を自己選択する改良形GMDH, 計測自動制御学会論文集, 15-4, 466/471.
 - 10) 田村担之, 他 (1979) 改良形GMDHによる大気汚染のモデリングと短期予測, 計測自動制御学会論文集, 15-5, 622/627.
 - 11) 斎藤肅, 他 (1981) 水需要のモデリングと予測—情報量基準AICを統一的規範とするGMDHの適用—, 計測自動制御学会論文集, 17-5, 537/544.
 - 12) Akaike, H. (1974) A new look at the statistical model identification, IEEE Trans., AC-19-6, 716/723.
 - 13) 赤池弘次 (1976), 情報量基準AICとは何か, 数理科学, 153, 5/11.
 - 14) Shinohara, Y. et al. (1977) Application of GMDH to reactor dynamics identification, Private Communication.
 - 15) 篠原慶邦 (1977) 計算機プログラム—GMDH—, 私信.
 - 16) 池田秀松, 他 (1987) パルサーフィーダー型パルスカラムにおける軸方向ホールドアップ, (II) GMDHによるモデル化と分析, 日本原子力学会誌, 29-2, 141/150.
 - 17) Volterra, V. (1959) Theory of functionals and of integral and integrodifferential equations, New York, Dover.
 - 18) Van Trees H. L. (1962) Synthesis of optimum nonlinear control systems, The MIT Press.
 - 19) Roy, R. J. et al. (1967) A Learning technique for Volterra series representation, IEEE Trans., Automatic Control, 12-12, 761/764
 - 20) 林 光二, 他 (1989) 炉雑音信号に対するGMDHに基づく階層モデル JAERI-M 89-175.
 - 21) Hayashi, K et al. (1991) Study of a modeling method for nonlinear reactor noise, Proc. of SMORN-VI ; Symposium on Nuclear Reactor Surveillance and Diagnostics, Gatlinburg Tennessee, USA, 1, 27.01/27.12.
 - 22) 林 光二, 他 (1992) GMDHに基づく非線形自己回帰モデルの同定とスペクトル解析, 計測自動制御学会論文集, 28-10, 1216/1223.
 - 23) 赤池弘次, 他 (1971) 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

第4章

- 1) Fry, D. N. et al. (1974) Analysis of neutron-density oscillations resulting from core barrel motion in the Parisades nuclear power plant, ORNL-TM-4570.
- 2) Konno, H. (1986) The stochastic process of non-linear random vibration - Reactor-noise analysis of hump phenomena in a time domain, Ann. Nucl. Energy, 13-4, 185/201.
- 3) Konno, H. et al. (1989) The Stochastic theory of nonlinear vibration for 1-D and 3-D beams and its application to anomalous core barrel motion in nuclear reactors, Ann. Nucl. Energy, 16-4, 173/188.
- 4) Thie, J. A. (1975), Theoretical considerations and their application to experimental data in the determination of reactor internals' motion from stochastic signals, Ann. Nucl. Energy, 2, 253/259.
- 5) Liewers, P. et al. (1988) Detection of core barrel motion at WWER-440-type reactors, Prog. Nucl. Energy, 21, 89/96.
- 6) Liewers, P. et al., (1989) Abbildung anomaler Reaktorschachtschwingungen in externen Neutronenflußschwankungen, Kernenergie, 32-8, 338/343.

- 7) 林 光二, 他 (1992) GMDHに基づく非線形自己回帰モデルの同定とスペクトル解析, 計測自動制御学会論文集, 28-10, 1216/1223.

第5章

- 1) Murphy, G. A. (1988) Selected safety-related events - Summary of AEOD special report S803: Power oscillation at LaSalle 2, Nuclear Safety, 29-3, 356/362.
- 2) Thie, J. A. (1963), Reactor noise, Rowman and Littlefield, Inc.
- 3) 横溝修 (1990) BWRの安定性, 日本原子力学会, 第22回炉物理夏期セミナー・テキスト, 77/95.
- 4) Gialdi, E. et al. (1985) Core stability in operating BWR: Operational experience, Prog. Nucl. Energy, 15, 447/459.
- 5) Takigawa, Y. et al. (1989) A study of regional oscillation with TOSDYN-2, presented at 1989 Stability Symposium, Idaho Falls, Idaho, U. S. A., August 10-11, 1989.
- 6) Yokomizo, O. et al. (1990) Examination of nuclear thermal hydraulic oscillation modes in BWR core, Presented at the International Workshop on Boiling Water Stability, Holtsville, 17-19, 1990.
- 7) Araya, F. et al. (1991) Analysis of a neutron flux oscillation event at LaSalle-2, Nucl. Technol., 93, 82/91.
- 8) Tunoda, T. et al. (1978), NAIG Ann. Rev., 21/24.
- 9) Upadhyaya, B. R. et al. (1979) Monitoring BWR stability using time series analysis of neutron noise, Trans. Am. Nucl. Soc., 33, 342-343.
- 10) Upadhyaya, B. R. et al. (1980) Time series modeling techniques to evaluate nuclear reactor data, Proc. of the 4-th Power Plant Dynamics, Control and Testing Symposium, Gatlinburg, Tennessee, U. S. A., March 17-19, 1980, 18-1/18-23.
- 11) Tunoyama, S. et al. (1980) Trans. A. Nucl. Soc., 35, 589/-.
- 12) Upadhyaya, B. R. et al. (1982) Application of noise analysis methods to monitor stability of boiling water reactors, Prog. Nucl. Energy, 9, 619/630.
- 13) March-Leuba, J. et al. (1984) Universality and aperiodic behavior of nuclear reactors, Nucl. Sci. Eng., 86, 401/404.
- 14) March-Leuba, J. et al. (1985) Development of an automated diagnostic system for boiling water reactor stability measurements, Prog. Nucl. Energy, 15, 27/35.
- 15) Oguma, R. et al. (1988) Investigation of BWR stability in Forsmark 2 based on multivariable noise analysis, STUDSVIK/NI-88/3.
- 16) Bergdahl, B. et al. (1988) BWR-stability investigation at Forsmark-1, STUDSVIK/NI-88/12.
- 17) Bergdahl, B. et al. (1990) BWR stability investigation in Ringhals 1 : Measurement Data from October 26, 1989, STUDSVIK/NI-90/17.
- 18) Oguma, R. (1982) Coherence analysis of systems with feedback and its application to a BWR noise investigation, Prog. Nucl. Energy, 9, 137/148.
- 19) Konno, H. (1986) Studies of the origins of random burst and anomalous fluctuation based on the non-linear dynamical power-reactor model, Prog. Nucl. Energy, 15, 209/216.
- 20) March-Leuba, J. et al. (1986) Nonlinear dynamics and stability of boiling water reactors: Part-1 - Qualitative analysis, Nucl. Sci. Eng., 93, 111/123.
- 21) March-Leuba, J. et al. (1986) Nonlinear dynamics and stability of boiling water

- reactors: Part-2 - Quantitative analysis, Nucl. Sci. Eng., 93, 124/136.
- 22) Nomura, T. (1986) Method of monitoring system state by state space trajectory pattern, J. Nucl. Sci. Technol., 23-10, 931/934.
 - 23) Nomura, T. et al. (1988) Method of monitoring system by state space trajectory pattern, Prog. Nucl. Energy, 21, 299/307.
 - 24) Suzudo, T. and Hayashi, K. (1991) Search for chaotic character of the time series of reactor signals, Proc. of SMORN-VI ; A Symposium on Nuclear Reactor Surveillance and Diagnostics, Gatlingburg, USA, 1, 29.01/29.12.
 - 25) Vath, W. (1979) Criss power spectral density - A method for correlating signal components from different frequency ranges, KfK 2794.
 - 26) Hayashi, K. et al. (1991) Study of a modeling method for nonlinear reactor noise, Proc. of SMORN-VI ; Symposium on Nuclear Reactor Surveillance and Diagnostics, Gatlingburg Tennessee, USA, 1, 27.01/27.12.

第6章

- 1) 石川迪夫, 他 (1976) NSRR臨界および特性試験報告, JAERI M-6791 (第I~IV分冊).
- 2) 林 光二, 他 (1984) 炉雑音解析法を用いたNSRRの異常診断(I), JAERI-M 84-056.
- 3) 林 光二, 他 (1984) 炉雑音解析法を用いたNSRRの異常診断(II), JAERI-M 84-137.
- 4) Hayashi, K. et al. (1988) Study of the goodness of system identification using multivariate AR modeling, Prog. Nucl. Energy, 21, 697/706.
- 5) Konno, H. (1986) Studies of the origins of random burst and anomalous fluctuation based on the non-linear dynamical power-reactor model, Prog. Nucl. Energy, 15, 209/216.
- 6) March-Leuba, J. et al. (1986) Nonlinear dynamics and stability of boiling water reactors: Part-i - Qualitative analysis, Nucl. Sci. Eng., 93, 111/123.
- 7) Konno, H., Hayashi, K. et al. (1990) On the origins of power oscillation in the NSRR, Ann. Nucl. Energy, 17-6, 317/337.
- 8) Konno, H., Hayashi, K. et al. (1992) Nonlinear dynamics of reactor with time delay in automatic control system and temperature effect, J. Nucl. Sci. Technol., 29-6, 530/546.
- 9) Suzudo, T. and Hayashi, K. (1991) Search for chaotic character of the time series of reactor signals, Proc. of SMORN-VI ; A Symposium on Nuclear Reactor Surveillance and Diagnostics, Gatlingburg, USA, 1, 29.01/29.12.

第7章

- 1) Bendat, J. S. et al. (1971) Random Data : Analysis and Measurement Procedures, John Wiley & Sons, Ins.
- 2) Ozaki, T. et al. (1975) On the fitting of non-stationary autoregressive models in time series analysis, Proc. of the 8-th Hawaii International Conference on System Science, Western Periodical Company.
- 3) Kitagawa, G. et al. (1979) A Procedure for the modeling of non-stationary time series, Ann. Inst. Statist. Math., 30, Part B, 351.

- 4) 林 光二,他 (1982) Burgのアルゴリズムに基づくARモデルの同定とその原子炉異常診断への応用, JAERI-M 82-009.
- 5) Marple,L. (1980) A new autoregressive spectrum analysis algorithm, IEEE, ASSP-28, 441.
- 6) 林 光二 (1984) 最小2乗法に基づくARモデル・フィッティング・アルゴリズムの評価, JAERI-M 84-127.
- 7) Hayashi,K. et al. (1988) A method of nonstationary noise analysis using instantaneous AR spectrum and its application to Borssele reactor noise analysis, Prog. Nucl. Energy, 21, 707/716.
- 8) Turkcan, E. (1985) On-line monitoring of a PWR for Plant surveillance by noise analysis, Prog. Nucl. Energy, 15, 365/378.
- 9) Kitamura, M. et al. (1985) Development of methods for analyzing time-varying characteristics of power reactor noise, Prog. Nucl. Energy 15, 57/68.
- 10) Turkcan, E. et al. (1985) Analysis of time-varying characteristics of signals from Borssele reactor, Prog. Nucl. Energy, 15, 853/861.
- 11) Kitagawa, G. et al. (1985) A Smoothness period time-varying AR coefficient modeling of non-stationary covariance time series, IEEE trans. Automatic Control, AC-30-1, 48/56.
- 12) 北川源四郎 (1986) スペクトル解析の動向 (解説), 計測と制御, 25-12, 1074/1081.
- 13) Kuroda, Y. et al. (1988) Some aspects of reactor noise analysis from the Bayesian viewpoint, Prog. Nucl. Energy, 21, 717/723.

第8章

- 1) Hayashi, K. et al. (1988) A method of nonstationary noise analysis using instantaneous AR spectrum and its application to Borssele reactor noise analysis, Prog. Nucl. Energy, 21, 707/716.
- 2) Turkcan, E. et al. (1984) On-line reactor monitoring system for the Borssele power plant (PWR), IAEA-SR-105/11.
- 3) 林 光二,他 (1984) 炉雑音解析法を用いたNSRRの異常診断(I), JAERI-M 84-056.
- 4) 林 光二,他 (1984) 炉雑音解析法を用いたNSRRの異常診断(II), JAERI-M 84-137.
- 5) 佐野健一, 他 (1987) 過渡追従型デジタル・フィルタの開発, 原子力学会秋の大会B43.
- 6) 馬場俊光, 他 (1988) 炉雑音前処理への非線形フィルタリング応用, 原子力学会年会A3.
- 7) 林 光二, 他 (1988) 非定常炉雑音データ収録システムの開発(I), 原子力学会年会A5.
- 8) 林 光二, 他 (1988) 非定常炉雑音データ収録システムの開発(II), 原子力学会秋の大会A28.
- 9) 林 光二 (1992) 非定常炉雑音データ収録用前処理システムの開発, 日本原子力学会誌, 34-10, 971/983.
- 10) 尾熊律雄, 林 光二, 他 (1980) OWL-1キュービクルにおける露点計記録データの統計的解析と冷却水漏洩早期検出への応用, JAERI-M 9237.
- 11) Oguma, R., Hayashi, K. et al. (1981) On-line leak detection method for OWL-1 loop by ARX modeling using dewpoint signals, J. Nucl. Sci. Technology, 18-10, 756/765.
- 12) Rabiner, L. R. et al. (1975) Theory and application of digital signal processing, Prentice-Hall, Inc.

付録1. 参考文献(著者アルファベット順)

A

- Aberle, J. et al. (1985) Noise measurement during the in-pile blockage experiment
MOL 7C/4, Prog. Nucl. Energy, 15, 147/153.
- 赤池弘次, 他 (1971) 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
- Akaike, H. (1974) A new look at the statistical model identification, IEEE Trans.,
AC-19-6, 716/723.
- 赤池弘次 (1976), 情報量基準AICとは何か, 数理科学, 153, 5/11.
- Albrecht, R.W. et al. (1982) Measurement of two phase flow properties using the
nuclear reactor instrument, Prog. Nucl. Energy, 9, 37/50.
- Araya, F. et al. (1991) Analysis of a neutron flux oscillation event at LaSalle-2,
Nucl. Technol., 93, 82/91.
- 麻生英樹 (1988) ニューラルネットワーク情報処理 -コネクショニズム入門あるいは柔らかな記号に向けて-, 産業図書

B

- 馬場俊光, 他 (1988) 炉雑音前処理への非線形フィルタリング応用, 原子力学会年会A3.
- Behringer, K. et al. (1990) Application of the Wiener-Hermite functional method to
point kinetics driven by random reactivity fluctuations, Ann. Nucl. Energy, 17-12,
643/656.
- Bendat, J. S. et al. (1971) Random Data : Analysis and Measurement Procedures, John
Wiley & Sons, Ins.
- Bergdahl, B. et al. (1988) BWR-stability investigation at Forsmark-1, STUDEVIK/NI-88
/12.
- Bergdahl, B. et al. (1990) BWR stability investigation in Ringhals 1 : Measurement
Data from October 26, 1989, STUDEVIK/NI-90/17.
- Brillinger, D. R. (1965) An introduction to polyspectra, Ann. Math. Stat. 36, 1351/1374.
- Brillinger, D. R. (1967) Asymptotic theory of estimates of K-th Order Spectra, Harris,
B. (ed.), Spectral Analysis of Time Series, 153/188, John Wiley & Son.
- Brillinger, D. R. (1967) Computation and Interpretation of K-th Order Spectra, Harris,
B. (ed.), Spectral Analysis of Time Series, 189/234, John Wiley & Son.

C

D

- Dach, K. et al. (1985) The experiences of using neutron noise analysis for vibration
behavior of internal structures, Prog. Nucl. Energy, 15, 243/250.
- Dragt, J. B. et al. (1977) Borssele PWR noise measurements, analysis and
interpretation, Prog. Nucl. Energy, 1, 293/307.

E

F

- Fukunishi, K. et al. (1976) Dynamical analysis of a boiling water reactor by Multi-
variable autoregressive model, J. Nucl. Sci. Technol., 13-3, 139/140. (Short Note).
- Fukunishi, K. (1977) Diagnostic analysis of a nuclear power plant using multivariate
autoregressive processes, Nucl. Sci. Eng., 62, 215/225.
- Fry, D. N. et al. (1974) Analysis of neutron-density oscillations resulting from core
barrel motion in the Parisades nuclear power plant, ORNL-TM-4570.

G

- Gialdi, E. et al. (1985) Core stability in operating BWR: Operational experience, Prog. Nucl. Energy, 15, 447/459.
- Gyftopoulos, E. P. et al. (1964) Signals for transfer-function measurements in non-linear systems, Uhrig R. E. (ed.), Noise analysis in nuclear systems, US-AEC TID-7679, 335/345.

H

- Hasselmann, K. et al. (1961) Bispectra of ocean waves, Rosenblatt M. (ed.), Proc. of Symp. on Time Series Analysis, 125-139, John Wiley & Son (1963).
- 林 光二 (1980) 高出力炉における固有雑音と人工雑音—その3次スペクトルによる解析, 東海大学大学院工学研究科 昭和54年度修士論文
- 林 光二, 他 (1981) 統計的解析手法に基づく原子炉システムの動特性解析および異常診断コード: S T A R, JAERI-M 9761.
- 林 光二, 他 (1982) Burgのアルゴリズムに基づくARモデルの同定とその原子炉異常診断への応用, JAERI-M 82-009.
- 林 光二, 他 (1984) 炉雑音解析法を用いたNSRRの異常診断(I), JAERI-M 84-056.
- 林 光二, 他 (1984) 炉雑音解析法を用いたNSRRの異常診断(II), JAERI-M 84-137.
- 林 光二 (1984) 最小2乗法に基づくARモデル・フィッティング・アルゴリズムの評価, JAERI-M 84-127.
- Hayashi, K. et al. (1988) Study of the goodness of system identification using multivariate AR modeling, Prog. Nucl. Energy, 21, 697/706.
- Hayashi, K. et al. (1988) A method of nonstationary noise analysis using instantaneous AR spectrum and its application to Borssele reactor noise analysis, Prog. Nucl. Energy, 21, 707/716.
- 林 光二, 他 (1988) 非定常炉雑音データ収録システムの開発(I), 原子力学会年会A5.
- 林 光二, 他 (1988) 非定常炉雑音データ収録システムの開発(II), 原子力学会秋の大会A28.
- 林 光二, 他 (1989) 炉雑音信号に対するGMDHに基づく階層モデル JAERI-M 89-175.
- Hayashi, K. et al. (1991) Study of a modeling method for nonlinear reactor noise, Proc. of SMORN-VI ; Symposium on Nuclear Reactor Surveillance and Diagnostics, Gatlinburg Tennessee, USA, 1, 27.01/27.12.
- 林 光二, 他 (1992) GMDHに基づく非線形自己回帰モデルの同定とスペクトル解析, 計測自動制御学会論文集, 28-10, 1216/1223.
- 林 光二 (1992) 非定常炉雑音データ収録用前処理システムの開発, 日本原子力学会誌, 34-10, 971/983.
- 日野幹雄 (1977) スペクトル解析, 朝倉書店
- Hoogenboom, J. E. et al. (1988) Summary of the benchmark test on artificial noise data, Prog. Nucl. Energy, 21, 815/824.

I

- 市川 哲 (1990) ボルテラ級数による非線形システムの解析 (解説), システム・制御・情報, 34-9, 524/530.
- 池田三郎, 他 (1975) GMDH(発見的自己組織化法)と複雑な系の同定・予測 (解説), 計測と制御, 14-2, 185/195.
- 池田三郎, 他 (1979-1980) GMDH(変数組合せ計算法)の基礎と応用—発見的自己組織化による複雑なシステムのモデリング—I~VIII (講義), システムと制御, 23-12~24-7.
- 池田秀松, 他 (1987) パルサーフィーダー型パルスカラムにおける軸方向ホールドアップ, (II) GMDHによるモデル化と分析, 日本原子力学会誌, 29-2, 141/150.

- 石川迪夫, 他 (1976) NSRR臨界および特性試験報告, JAERI M-6791 (第I~IV分冊).
 Ivakhnenko, A. G. (1970) Heuristic self-organization in problems of engineering cybernetics, Automatica, 6, 207/219.
 Ivakhnenko, A. G. (1971) Polynomial theory of complex systems, IEEE Trans., System, Man and Cybernetics, SMC-1, 364/378.

J

K

- Kitagawa, G. et al. (1979) A Procedure for the modeling of non-stationary time series, Ann. Inst. Statist. Math., 30, Part B, 351.
 Kitagawa, G. et al. (1985) A Smoothness period time-varying AR coefficient modeling of non-stationary covariance time series, IEEE trans. Automatic Control, AC-30-1, 48/56.
 北川源四郎 (1986) スペクトル解析の動向 (解説), 計測と制御, 25-12, 1074/1081.
 北村政晴, 他 (1978) J P D R-IIの動特性同定実験-自己回帰モデリングの適用-, JAERI-M 7580.
 Kitamura, M. et al. (1985) Development of methods for analyzing time-varying characteristics of power reactor noise, Prog. Nucl. Energy 15, 57/68.
 黒田義輝 (1968) 原子炉雑音解析における相関技術, 磯部孝(編)相関関数とスペクトル, 222/239, 東京大学出版会
 黒田義輝, 他 (1973) 原子炉診断技術の現状, 日本原子力学会誌, 15-12, 792/808.
 Kuroda, Y. and Hayashi, K. (1979) At-power noise and third order spectra, IMORN-12.
 黒田義輝 (1980) 雑音信号における成分波干渉の検出, 原子炉における統計現象 短期研究会報告, KURRI-TR-203, 21/30.
 Kuroda, Y. et al. (1988) Some aspects of reactor noise analysis from the Bayesian viewpoint, Prog. Nucl. Energy, 21, 717/723.
 近藤正, 他 (1979) 情報量基準AICを用いて中間表現式を自己選択する改良形GMDH, 計測自動制御学会論文集, 15-4, 466/471.
 Konno, H. (1986) Studies of the origins of random burst and anomalous fluctuation based on the non-linear dynamical power-reactor model, Prog. Nucl. Energy, 15, 209/216.
 Konno, H. (1986) The stochastic process of non-linear random vibration - Reactor-noise analysis of hump phenomena in a time domain, Ann. Nucl. Energy, 13-4, 185/201.
 Konno, H. et al., (1988) Characterization of chaotic nonstationary time series and its application to early detection of anomalies in nuclear reactor, Prog. Nucl. Energy, 21, 661/670.
 Konno, H., Hayashi, K. et al. (1988) Analysis of pressure fluctuations in the Borssele nuclear reactor based on bispectrum and higher order moments, Ann. Nucl. Energy, 15-10/11, 487/500.
 Konno, H. et al. (1989) The Stochastic theory of nonlinear vibration for 1-D and 3-D beams and its application to anomalous core barrel motion in nuclear reactors, Ann. Nucl. Energy, 16-4, 173/188.
 Konno, H., Hayashi, K. et al. (1990) On the origins of power oscillation in the NSRR, Ann. Nucl. Energy, 17-6, 317/337.
 Konno, H., Hayashi, K. et al. (1992) Nonlinear dynamics in a reactor with time delay in automatic control system and temperature effect, J. Nucl. Sci. Technol., 29-6, 530/546.

L

- Le Guillou, G et al. (1985) Le bruit neutronique sur les reacteurs a neutrons rapides francais: Bilan et perspectives apres dix annees d'experience sur le reacteur Phenix, Prog. Nucl. Energy, 15, 491/500.
- 李 (Lee, M. C.), 他 (1989) 非線形を含む系の信号圧縮法による同定とその評価, 計測自動制御学会論文集, 25-7, 729/736.
- Liewers, P. et al. (1988) Detection of core barrel motion at WWER-440-type reactors, Prog. Nucl. Energy, 21, 89/96.
- Liewers, P. et al., (1989) Abbildung anomaler Reaktorschachtschwingungen in externen Neutronenflußschwankungen, Kernenergie, 32-8, 338/343.
- Lii, K. S. (1982) Non-Gaussian ARMA model identification and estimation, Proc. Bus. and Econ. Statistics (ASA), 135/141
- Lii, K. S. et al. (1982) Deconvolution and estimation of transfer function phase and coefficients for non-Gaussian linear process", Ann. Statist., 10, 1195/1208.

M

- March-Leuba, J. et al. (1985) Developement of an automated diagnostic system for boiling water reactor stability measurements, Prog. Nucl. Energy, 15, 27/35.
- March-Leuba, J. et al. (1984) Universality and aperiodic behavior of nuclear reactors, Nucl. Sci. Eng., 86, 401/404.
- March-Leuba, J. et al. (1986) Nonlinear dynamics and stability of boiling water reactors: Part-1 - Qualitative analysis, Nucl. Sci. Eng., 93, 111/123.
- March-Leuba, J. et al. (1986) Nonlinear dynamics and stability of boiling water reactors: Part-2 - Quantitative analysis, Nucl. Sci. Eng., 93, 124/136.
- March-Leuba, J. et al. (1991) A mechanism for out-of-phase power instabilities in boiling water reactors, Nucl. Sci. Eng., 107, 173/179.
- Marple, L. (1980) A new autoregressive spectrum analysis algorithm, IEEE, ASSP-28, 441.
- Matsubara, K. et al. (1977) Experimental studies of core flow fluctuations and neutron noise in a BWR, Prog. Nucl. Energy, 1-2/4, 137/149.
- 松原邦彦 (1981) ゆらぎ信号による原子炉プラントの異常診断研究の現状, 日本原子力学会誌, 23-9, 657/665.
- Minsky, M. et al. (1969), Perceptrons, The MIT Press, USA. 斎藤正男(訳)(1971) パーセプトロン-パターン認識理論への道, 東大出版会.
- Mullens, J. A. et al. (1985) On-line noise monitoring at the fast test facility, Prog. Nucl. Energy, 15, 147/153.
- Murphy, G. A. (1988) Selected safety-related events - Summary of AEOD special report S803: Power oscillation at LaSalle 2, Nuclear Safety, 29-3, 356/362.

N

- Nikias, C. L., et al. (1985) Mixed-phase wavelet estimation via autoregressive bispectrum, in Proc. 1985 Int. Geosc. Remote Sensing Symp., 1, Amherst, MA: U. Mass Press, Oct. 1985, 66/71.
- Nomura, T. (1986) Method of monitoring system state by state space trajectory pattern, J. Nucl. Sci. Technol., 23-10, 931/934.
- Nomura, T. et al. (1988) Method of monitoring system by state space trajectory pattern, Prog. Nucl. Energy, 21, 299/307.

O

- 尾熊律雄, 林 光二, 他 (1980) OWL-1キュービクルにおける露点計記録データの統計的解析と冷却水漏洩早期検出への応用, JAERI-M 9237.
- Oguma, R., Hayashi, K. et al. (1981) On-line leak detection method for OWL-1 loop by ARX modeling using dewpoint signals, J. Nucl. Sci. Technology, 18-10, 756/765.
- Oguma, R. (1982) Coherence analysis of systems with feedback and its application to a BWR noise investigation, Prog. Nucl. Energy, 9, 137/148.
- Oguma, R. et al. (1985) Application of an improved multivariable noise analysis method to investigation of PWR noise ; Signal transmission path analysis, Prog. Nucl. Energy, 15, 863/874.
- Oguma, R. et al. (1988) Investigation of BWR stability in Forsmark 2 based on multi-variable noise analysis, STUDEVIK/N1-88/3.
- Ozaki, T. et al. (1975) On the fitting of non-stationary autoregressive models in time series analysis, Proc. of the 8-th Hawaii International Conference on System Science, Western Periodical Company.
- Ozaki, T. (1985), Nonlinear time series models and dynamical systems, Hanna, E. J. et al. (ed.), Handbook of Statistics, 5, 25/83, North-Holland
- 尾崎 統 (1991) 非線形系の統計的システム同定とその河川流量予測への応用 (解説), システム・制御・情報, 35-6, 331/341.

P

- Pineyro, et al. (1989) Bispectrum estimation using overlapped segments, Munoz-Cobo, J. L. et al. (ed.), Noise and Nonlinear Phenomena in nuclear systems, NATO ASI Series B:Physics 192, 275/286.
- Priestley, M. B. (1982) On the fitting of general non-linear time series models, Anderson, O. D. (ed.), Time Series Analysis ; Theory and Practice 1, 717/731, North-Holland.
- Priestley, M. B. (1988) Non-linear non-stationary time series analysis, Academic Press.

Q

R

- Rabiner, L. R. et al. (1975) Theory and application of digital signal processing. Prentice-Hall, Inc.
- Rosenblatt, M. et al. (1965) Estimation of bispectrum, Ann. Math. Stat. 36, 1120/1136.
- Rosenblatt, F. (1958) The perceptron : A probabilistic model for information storage and organization in the brain. Psychol. Rev. 65-6, 386/408.
- Roy, R. J. et al. (1967) A Learning technique for Volterra series representation, IEEE Trans., Automatic Control, 12-12, 761/764.

S

- 斎藤慶一 (1975) 原子炉雑音解析とその診断技術への応用, 応用物理, 44-9, 989/999.
- 斎藤慶一, 他 (1976) 最近の炉雑音解析の動向, 日本原子力学会誌, 18-4, 208/216.
- 斎藤肅, 他 (1981) 水需要のモデリングと予測-情報量基準AICを統一的規範とするGMDHの適用-, 計測自動制御学会論文集, 17-5, 537/544.
- 相良節夫 (1983), 非線形システムの同定, 計測自動制御学会編 自動制御ハンドブック, オーム社, 576/584
- 佐野健一, 他 (1987) 過渡追従型デジタル・フィルタの開発, 原子力学会秋の大会B43.

- Shinohara, Y. et al. (1977) Application of GMDH to reactor dynamics identification, Private Communication.
- 篠原慶邦 (1977) 計算機プログラム-GMDH-, 私信.
- 須田信英 (1979) 原子炉雑音解析, 計測と制御, 18-4, 312/322.
- Suda, N. et al. (1989) Reactor noise analysis recent research activities in Japan, J. Nucl. Sci. Technol., 26-1, 39/51.
- Suzudo, T. and Hayashi, K. (1991) Search for chaotic character of the time series of reactor signals, Proc. of SMORN-VI ; A Symposium on Nuclear Reactor Surveillance and Diagnostics, Gatlingburg, USA, 1, 29.01/29.12.

T

- Takigawa, Y. et al. (1989) A study of regional oscillation with TOSDYN-2, presented at 1989 Stability Symposium, Idaho Falls, Idaho, U. S. A., August 10-11, 1989.
- 田村担之 (1978) GMDHの方法論と応用に関する最近の動向, 電子通信学会誌, 61-3, 258/260
- 田村担之, 他 (1979) 改良形GMDHによる大気汚染のモデリングと短期予測, 計測自動制御学会論文集, 15-5, 622/627.
- Thie, J. A. (1963), Reactor noise, Rowman and Littlefield, Inc.
- Thie, J. A. (1975), Theoretical considerations and their application to experimental data in the determination of reactor internals' motion from stochastic signals, Ann. Nucl. Energy, 2, 253/259.
- Tunoda, T. et al. (1978), NAIG Ann. Rev., 21/24.
- Tunoyama, S. et al. (1980) Trans. A., Nucl. Soc., 35, 589/-.
- Türkcan, E. (1982) Review of Borssele PWR noise experiments, Analysis and Instrumentation, Nucl. Energy, 9, 437/452.
- Türkcan, E. et al. (1984) On-line reactor monitoring system for the Borssele power plant (PWR), IAEA-SR-105/11.
- Türkcan, E. et al. (1985) Analysis of time-varying characteristics of signals from Borssele reactor, Prog. Nucl. Energy, 15, 853/861.
- Türkcan, E. (1985) On-line monitoring of a PWR for Plant surveillance by noise analysis, Prog. Nucl. Energy, 15, 365/378.
- Türkcan, E. (1985) Physical benchmark test Borssele (PWR) - Noise data, Bernard P. et al. (ed.), Report of the SMORN IV Physical Benchmark, NEACRP-L-282, 252/263.

U

- 上野敏行, 他 (1976) (総合報告) バイスpekトルの測定とその応用, 応用物理, 45, 384/396.
- Upadhyaya, B. R. et al. (1979) Monitoring BWR stability using time series analysis of neutron noise, Trans. Am. Nucl. Soc., 33, 342-343.
- Upadhyaya, B. R. et al. (1980) Time series modeling techniques to evaluate nuclear reactor data, Proc. of the 4-th Power Plant Dynamics, Control and Testing Symposium, Gatlinburg, Tennessee, U. S. A., March 17-19, 1980, 18-1/18-23.
- Upadhyaya, B. R. et al. (1982) Application of noise analysis methods to monitor stability of boiling water reactors, Prog. Nucl. Energy, 9, 619/630.

V

- Valko, J. et al. (1985) Experiences with noise analysis at Paks nuclear power plant, Prog. Nucl. Energy, 15, 403/412.
- Van der Hagen, T. H. J. J et al. (1988) Application of noise analyses to stability determination of a natural-circulation cooled BWR, Prog. Nucl. Energy, 21, 753/761.

- Van Der Veer, J.H.C. et al. (1982) Noise analysis of the Dodewaard boiling water reactor : Characteristics and time history, Prog. Nucl. Energy, 9, 607/618.
- Van Ness, J.W. (1966) Asymptotic normality of bispectral estimates, Ann. Math. Stat., 37, 1257/1272.
- Van Trees H.L. (1962) Synthesis of optimum nonlinear control systems, The MIT Press.
- Vath, W. (1979) Criss power spectral density - A method for correlating signal components from different frequency ranges, KfK 2794.
- Volterra, V. (1959) Theory of functionals and of integral and integrodifferential equations, New York, Dover.

W

- 渡辺 敦, 他 (1986) Karhunen-Loeve展開を応用したVolterra核の測定, 計測自動制御学会論文集, 22-6, 610/615.
- Wehling, H. J. et al. (1985) The influence of thermohydraulic parameters on the dynamic behavior of KWU-PWR's, Prog. Nucl. Energy, 15, 273/282.
- Williams, M.M.R. (1971) Random process in nuclear reactors, Pergamon Press.

Y

- Yokomizo, O. et al. (1990) Examination of nuclear thermal hydraulic oscillation modes in BWR core, Presented at the International Workshop on Boiling Water Stability, Holtsville, 17-19, 1990.
- 横溝修 (1990) BWRの安定性, 日本原子力学会, 第22回炉物理夏期セミナー・テキスト, 77/95.
- 横山 誠, 他 (1987) 非白色正規性入力を受ける非線形システムの直交汎関数級数表現, 計測自動制御学会論文集, 23-11, 1151/1157.
- 横山 誠, 他 (1989) 非定常非白色正規性入力による非線形システムの同定, 計測自動制御学会論文集, 25-7, 765/770.

Z