

J A E R I - M

93-137

NSRRにおける非線形出力振動の
時系列解析

1993年7月

鈴木 知明

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。

入手の間合わせは、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、お申しこみください。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

NSRRにおける非線形出力振動の時系列解析

日本原子力研究所東海研究所原子炉工学部

鈴木 知明

(1993年6月8日受理)

改良前のNSRRで起きた出力振動を解析した。解析手法としては従来型の線形動力学的手法を用いず、物理現象に合致した非線形動力学的手法を用いた。これにより、NSRRの出力振動の性質が明らかになり、非線形動力学的な炉雑音解析手法の有効性が示された。

Time-series Analysis of
Nonlinear Power Oscillation in NSRR

Tomoaki SUZUDO

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

(Received June 8, 1993)

The power oscillation in NSRR occurred before its recent modification is analyzed. In this study, the method based on nonlinear dynamic theory, which is suitable for the oscillatory phenomenon, is used instead of the conventional one based on linear dynamic theory. The results clarify the essential property of the power oscillation, and verify the applicability of the method to reactor noise analysis.

Keywords: NSRR, Power Oscillation, Nonlinear Dynamic Theory,
Time-series Data, Reactor Noise Analysis

目 次

1. はじめに	1
2. NSRR の異常出力振動に関する予備知識	1
3. NSRR の出力振動の決定論的運動の同定	3
4. 出力振動と制御棒自励振動の周波数ロッキング現象	5
5. ま と め	7
謝 辞	7
参考文献	8

Contents

1. Introduction	1
2. Historical Summary of the Anomalous Power Oscillation in NSRR ...	1
3. Identifying the Deterministic Motion of the NSRR Power Oscillation	3
4. Frequency Locking between the Power Oscillation and the Control-rod Self-sustained Oscillation	5
5. Conclusions	7
Acknowledgements	7
References	8

1. はじめに

炉雑音解析の分野ではARモデルやパワースペクトル密度関数に代表されるような線形的かつ確率的な手法が支配的である。線形的な手法を使うかぎり系の不規則な挙動は安定な固定点周りでの確率的な運動であると仮定され決定論的な運動を表現できない。同様に、振動のパワーの確率分布すなわちパワースペクトル密度関数はそこに現われたピークの大小によってその周波数の振動が起こる確率（頻度）を示すに留まり、決定論的な情報は与えない。

しかしながら原子炉の出力振動の発生には非線形的な効果が重要な役割を果たしている。また原子炉内で異常振動しているものは出力振動とは無関係ではいられず非線形的な振動モードの結合が存在する。これらの現象は必ずしも確率的ではなく決定論的要素も含んでいる。現在、非線形および決定論的な運動に対しても、線形および確率的解析法が用いられており、それらの結果を拡大解釈して決定論的な非線形動特性を推論している。よってこれらの現象をより正確に解析するための手法を探すことが急務であると考えられる。

カオス理論に象徴されるように、最近の非線形動力学理論から様々な新しい概念や物理量が生まれている。そしてその新しい理論や概念に基づくデータ処理法は、時系列データの解析に新しい分野を開拓しつつある。しかしながら、原子炉の動特性解析の分野にそれらの理論が応用された例は世界的に見てもあまりない。本章ではそのような試みの第一段階として非線形動力学の諸概念に基づいて、NSRRの出力振動の解析を試みた。

2. NSRRの異常出力振動に関する予備知識

NSRR (Nuclear Safety Research Reactor) は燃料安全工学上の実験を行う目的で日本原子力研究所東海研究所に導入されたTRIGAタイプの研究用原子炉である。この原子炉の大きな特徴の1つに定常出力運転に加えてパルス出力運転が可能であることがあげられる。1975年に運転が開始されて以来、パルス出力による様々な燃料破損実験が行われてきた。NSRRの概要については参考文献1)および2)で述べられているため本稿では割愛する。

定常出力モードの出力調整のための自動制御系はおおまかにFig.1のように構成されている。まず、出

1. はじめに

炉雑音解析の分野ではARモデルやパワースペクトル密度関数に代表されるような線形的かつ確率的な手法が支配的である。線形的な手法を使うかぎり系の不規則な挙動は安定な固定点周りでの確率的な運動であると仮定され決定論的な運動を表現できない。同様に、振動のパワーの確率分布すなわちパワースペクトル密度関数はそこに現われたピークの大小によってその周波数の振動が起こる確率（頻度）を示すに留まり、決定論的な情報は与えない。

しかしながら原子炉の出力振動の発生には非線形的な効果が重要な役割を果たしている。また原子炉内で異常振動しているものは出力振動とは無関係ではいられず非線形的な振動モードの結合が存在する。これらの現象は必ずしも確率的ではなく決定論的要素も含んでいる。現在、非線形および決定論的な運動に対しても、線形および確率的解析法が用いられており、それらの結果を拡大解釈して決定論的な非線形動特性を推論している。よってこれらの現象をより正確に解析するための手法を探ることがが急務であると考えられる。

カオス理論に象徴されるように、最近の非線形動力学理論から様々な新しい概念や物理量が生まれている。そしてその新しい理論や概念に基づくデータ処理法は、時系列データの解析に新しい分野を開拓しつつある。しかしながら、原子炉の動特性解析の分野にそれらの理論が応用された例は世界的に見てもあまりない。本章ではそのような試みの第一段階として非線形動力学の諸概念に基づいて、NSRRの出力振動の解析を試みた。

2. NSRRの異常出力振動に関する予備知識

NSRR (Nuclear Safety Research Reactor) は燃料安全工学上の実験を行う目的で日本原子力研究所東海研究所に導入されたTRIGAタイプの研究用原子炉である。この原子炉の大きな特徴の1つに定常出力運転に加えてパルス出力運転が可能であることがあげられる。1975年に運転が開始されて以来、パルス出力による様々な燃料破損実験が行われてきた。NSRRの概要については参考文献1)および2)で述べられているため本稿では割愛する。

定常出力モードの出力調整のための自動制御系はおおまかにFig.1のように構成されている。まず、出

カレベルは中性子検出器（補償型電離箱）で測定され出力目標（設定値）と比較される。検出された出力レベルと設定された出力レベルの差（誤差信号）はマスター・サーボ・システムに入力される。マスター・サーボ・システム内では、ポテンショ・メータに連結されたマスター・サーボ・モータが誤差信号に比例したぶんだけ駆動される。このポテンショ・メータの位置の変化はそれぞれの調整棒に付随したスレーブ・サーボ・システムの入力信号となる。それぞれのスレーブ・サーボ・システムでは入力信号に比例したぶんだけモータがまわされ、ラック・アンド・ピニオン機構を経て最終的に出力レベルが設定値に近づくように6本の調整棒が同時に駆動される。

1990年に行なわれた改造の前のNSRRの炉心では定常出力モードにおいて出力が周期約0.3Hzで異常振動したことが確認されている。この異常振動の原因を探るための実験がPhase-I、Phase-IIと2度にわたって行なわれた¹⁾²⁾。これらの実験においては、運転パラメータを変化させ様々な角度から炉雑音が収録された。その結果以下の知見が得られている。

- 1) 異常振動は比較的高出力運転時に起こる。
 - 2) 異常振動は自動制御系を切り離すとおさまる。
 - 3) 出力振動を上記の3方向の中性子検出器で測定したところそれぞれの中性子束信号の振動に位相差はない。
- 1) の知見はBWRのそれと一致する。2) より、異常振動は自動制御系に深く関わっていることは明らかである。また3) の結果は空間的な振動のモードは存在しないことを意味している。

異常振動の詳細な原因はまだ明らかにされていないが、1984年に行われたPhase-IIIの実験³⁾において収録されたデータのなかにBWRの炉心振動とのアナロジーにおいて興味ある結果が得られている。その実験においては最適なフィードバックゲインを探るためにマスター・サーボ・システムのゲイン段階を替えて中性子束その他の炉雑音が測定されている。この時の運転状態は、出力270kWで比較的高出力であった。ゲイン段階を4段階、即ちゲイン段階1からゲイン段階4まで変化させたときの中性子束振動の変化をFig.2に示す。このデータは測定されたアナログ・データを適当に規格化したあと直流成分を除き0.0625sの周期でサンプリングして得られた時系列データである。実験よりゲイン段階があるしきい値を越えたとき約4sの周期で連続的な振動が得られることが解かった。この振動の原因は炉出力への過剰なフィードバックによるものと解釈することができる。BWRの出力振動は高出力、低流量時に発生する。低流量によってボイドフィードバック効果が大きくなり振動にいたっていることは周知の事実である。すなわちNSRRの出力振動はBWRの出力振動の場合のボイドフィードバックが制御棒によるフィードバックに置き変わったものにすぎない。商業炉のデータが豊富でない現状から考えればNSRRのデータは出力振動の理論的な研究にとって貴重なデータといえる。

3. NSRRの出力振動の決定論的運動の同定

非線形動力学系を時間発展させて得られる軌道が位相空間内の有界な領域にある場合、位相空間内のその漸近的な軌道はアトラクターと呼ばれる。アトラクターを解析することによりその系の決定論的運動を同定することができる。計算機内で実現された系ではアトラクターを容易に得ることができるが、実際の系ではすべての独立変数を計測することが不可能なため1次元時系列データから埋め込み法⁴⁾を用いてアトラクターを再構成しなくてはならない。

まずFig.2のゲイン段階4の時系列データを2次元空間に埋め込んでみる。周期は約4sであるので埋め込まれたデータが円形に近くなるように埋め込みの遅れ時間を振動周期の約1/4の1sに選んだ。埋め込まれた軌道(Fig.3)より振動は単純な閉軌道ではなくかなり揺らいでいることがわかる。この揺らぎは確率論的な(すなわち無限自由度の)運動なのか決定論的な(すなわち有限自由度の)運動なのかはこの2次元軌道からでは判断できない。

この判断には運動の情報次元 D_1 を測定することが有効である。 d 次元に埋め込まれた軌道上の点 x_i^d の相関関数の積分

$$C_d(r) = \frac{1}{N} \{\text{number of pairs } (i, j) \text{ whose distance } |x_j^d - x_i^d| \text{ is less than } r\} \quad (2.1)$$

を両対数グラフにプロットしたときの傾き

$$v(r) = \frac{d(\log C_d(r))}{d(\log r)} \quad (2.2)$$

を相関積分の傾き(Slope of Correlation Integral: SOCI)と呼ぶことにする。ただし、 N は (x_i^d, x_j^d) のペアの総数である。 d が十分大きいところで測定されたSOCIは D_1 に等しい。ただしこの方法には実用上、少々注意すべき点がある。それは r が小さい場合 D_1 は確率的雑音の影響を大きく受けてしまう。例えば、軌道上の点が直線上に一様に分布している場合 $D_1=1$ であるが、確率的雑音が存在する場合、アトラクターはある幅を持った直線になり、 $r \rightarrow 0$ では D_1 は1より大きな値になってしまう。一方アトラクターが位相空間に無限に広がっている図形ならばその特徴は r によらず、雑音の影響のなくなるような大きな r で $v(r)$ を測定すればよい。しかし実際のアトラクターの大きさは有限でありあまり r を大きく取れない。よって我々は雑音の影響が小さくかつアトラクターの大きさによる影響も小さな r を選択して、その時の $v(r)$ を測定しなくては

ならない。

Fig.3の埋め込み例では系の運動の特徴的な時間が既知と考へて埋め込みの遅れ時間 $1s$ に取ったが、一般には特徴的な時間が未知として取り扱ふべきである。そのためにはまず遅れ時間を十分に小さくとり、時系列データを d 次元に埋め込む。このとき d の値は最低次の2から十分大きい値まで変化させる。このような方法をとることにより、注目する特徴的時間の範囲を広く取ることができ⁹⁾。得られたそれぞれの多次元時系列データより(2.2)式を計算してSOC_Iを求めることができる。

実際の処理では、遅れ時間を最小のサンプリング周期 $\tau=0.0625s$ にとり、埋め込み次元は特に上限を設定せず、SOC_Iの収束値が現われるまで徐々に大きくした。 $d=2\sim 20$ でのSOC_Iの計算結果をFig.4に示す。ここで r は埋め込まれた軌道のなかで最も大きい直径で規格化されている。この規格化によってどのような大きさの振幅をもった時系列データもプログラムの変更なしに扱える。グラフの特徴をあげれば、まず r が比較的小さい所では $v(r)$ は d を増やしていったとき発散傾向にある。この傾向は r が小さくなればなるほど顕著である。また r が比較的大きい所では $v(r)$ は d を増やしていったとき収束傾向にある。この部分でのグラフは平坦になっている。この平坦部をプラトーと呼ぶことにする。またグラフの右端にピークが観測される。

さてこの結果を解釈するために情報次元の定義に使われた(2.1)式に戻ることにする。 x_i^d を固定して考えると、(2.1)式によって軌道上の点は半径 r の球の内側と外側に分離される。すなわちこれは半径 r 内に存在する全ての点は空間内で同じ場所に存在していると見なすような粗視化の処理であり、 r は空間に散らばった点の位置を計測するさいの解像度である。我々が一般生活において物体を詳細に観察したいとき、すなわち解像度を上げたい場合には物体を目に近付けて見ればよい。よって、 r が小さい場合は埋め込まれた軌道上の点を至近距離から見た場合、そして r が大きい場合は遠くから眺めた場合と考え方を置き換えても差しつかえない。埋め込まれた軌道上の点の集合(例えばFig.3)を至近距離から見た場合には確率的雑音のためそれらはただの無秩序な点の並びとしか見えない。SOC_Iは運動の次元であるのでこのことがSOC_Iが発散している原因である。我々の視点を徐々に図から遠ざけていくと点の集合にはある軌道に沿っていることが見えてくる。すなわち運動の自由度が低次元になりSOC_Iは有限値になる。さらに r を大きくしていくと、すなわち我々の視点ををより遠くへ移動させると今度は軌道が周期的であることがわかってくる。軌道が周期的である場合、その軌道の直径だけ離れた点の組が非常に多くなるので $C_d(r)$ の定義(2.1)式よりSOC_Iのグラフにピークがあらわれる。最後に我々の視点は図から非常に遠くに置くとそれは単に点として認識されるので次元は0になってしまう。以上のように r によって図形の次元は違って見え、それがFig.4の曲線群に集約されている。

ここで我々の欲しい物理量は決定論的運動の次元であるので確率論的雑音の影響を排除しなくてはいけ

ない。また、同時にアトラクターは有限の大きさをもつためなるべく小さな r において次元を測定しなくてはならない。すなわちプラトー付近でのSOCIを測ればそれが出力振動の決定論的運動の次元に最も近い値が得られる。この例の場合、その値は約1.3になっている。決定論的な連続系の運動では1次元と2次元の間には非整数次元は許されない。ところがプラトー付近で測定される次元は確率的雑音によって実際よりも少々大きくなることがわかっている⁹⁾。よってこの確率論的な運動に隠された決定論的な運動の次元は1であり、NSRRの出力振動はカオス的でも準周期的でもなく単に雑音で汚れた周期運動であると考えられる。ただしカオスの性質が全く存在しないとは断言できない。というのは高次元のカオスに対するプラトーを検出するためにはかなり長時間の時系列データが必要であるからである。現在手元にそのような長いデータがないためこのような解析は不可能であるが、経験的には仮にここで用いたデータの10倍以上長いデータがあったとしても原子炉は非常に雑音の多い系であるためカオスの性質の同定は非常に困難であると予想される。また雑音が無視できるくらい大きな振幅の振動であれば短時間のデータでもカオス運動の同定の可能性は高くなるが、そのような危険な状態で原子炉を運転し続けることは安全性の観点から許されない。このように見てくると原子炉の出力振動からカオスの性質を、仮に存在しても、同定するのは非常に困難であると言わざるを得ない。

”揺らいだ”周期運動に規則性があるかどうかを見るのに別の方法がある。まず振動のピーク時の値を時系列データから順番にピックアップすることにより新しい時系列データを作る。この操作は周期の位相が等しいデータを集めることであるので、ポアンカレ写像をとることと原理的に等価である。Fig.5はこのようなして得られた時系列データのポアンカレ写像である。仮にこの振動の揺らぎが決定論的であるとすればポアンカレ写像に規則性が見えるはずである。図にはそのような規則性は全く見られず、SOCIによる解析結果が支持されている。

4. 出力振動と制御棒自励振動の周波数ロッキング現象

Phase-IIIの実験においては中性子束のみならず自動制御系 (Fig.1) の各所、例えばマスター・サーボ・システムおよび各スレーブ・サーボ・システムからの出力信号も同時に収録した。前節では非線形動力学を応用した解析によりNSRRの出力振動の決定論的な性質をつかむことができたが、本節ではより局所的信号に非線形現象特有の解析をほどこし、その有効性を示したい。

Fig.6はゲイン段階を2に設定した時に得られたスレーブ・サーボ・システム2 (Fig.6a) およびスレーブ・サーボ・システム3 (Fig.6b) からの出力信号と同時に測定された中性子束信号 (Fig.6c) である。スレー

ない。また、同時にアトラクターは有限の大きさをもつためなるべく小さな r において次元を測定しなくてはならない。すなわちプラトー付近でのSOCCIを測ればそれが出力振動の決定論的運動の次元に最も近い値が得られる。この例の場合、その値は約1.3になっている。決定論的な連続系の運動では1次元と2次元の間には非整数次元は許されない。ところがプラトー付近で測定される次元は確率的雑音によって実際よりも少々大きくなることがわかっている⁹⁾。よってこの確率論的な運動に隠された決定論的な運動の次元は1であり、NSRRの出力振動はカオス的でも準周期的でもなく単に雑音で汚れた周期運動であると考えられる。ただしカオスの性質が全く存在しないとは断言できない。というのは高次元のカオスに対するプラトーを検出するためにはかなり長時間の時系列データが必要であるからである。現在手元にそのような長いデータがないためこのような解析は不可能であるが、経験的には仮にここで用いたデータの10倍以上長いデータがあったとしても原子炉は非常に雑音の多い系であるためカオスの性質の同定は非常に困難であると予想される。また雑音が無視できるくらい大きな振幅の振動であれば短時間のデータでもカオス運動の同定の可能性は高くなるが、そのような危険な状態で原子炉を運転し続けることは安全性の観点から許されない。このように見てくると原子炉の出力振動からカオスの性質を、仮に存在しても、同定するのは非常に困難であると言わざるを得ない。

”揺らいだ”周期運動に規則性があるかどうかを見るのに別の方法がある。まず振動のピーク時の値を時系列データから順番にピックアップすることにより新しい時系列データを作る。この操作は周期の位相が等しいデータを集めることであるので、ポアンカレ写像をとることと原理的に等価である。Fig.5はこのようなして得られた時系列データのポアンカレ写像である。仮にこの振動の揺らぎが決定論的であるとすればポアンカレ写像に規則性が見えるはずである。図にはそのような規則性は全く見られず、SOCCIによる解析結果が支持されている。

4. 出力振動と制御棒自励振動の周波数ロッキング現象

Phase-IIIの実験においては中性子束のみならず自動制御系 (Fig.1) の各所、例えばマスター・サーボ・システムおよび各スレーブ・サーボ・システムからの出力信号も同時に収録した。前節では非線形動力学を応用した解析によりNSRRの出力振動の決定論的な性質をつかむことができたが、本節ではより局所的信号に非線形現象特有の解析をほどこし、その有効性を示したい。

Fig.6はゲイン段階を2に設定した時に得られたスレーブ・サーボ・システム2 (Fig.6a) およびスレーブ・サーボ・システム3 (Fig.6b) からの出力信号と同時に測定された中性子束信号 (Fig.6c) である。スレー

ブ・サーボ・システムからの出力は制御棒位置信号と考えることができる。Fig.6aの制御棒位置信号においてはFig.6cの中性子束信号に見られない断続的な振動が見られる。またFig.6bの制御棒位置信号でもパルス的な変動が見られるが、矢印で示したようにこの変動は中性子束信号においても確認できる。すなわち矢印で示した振動は制御棒駆動システム内部の欠陥ではなく、前節で議論した制御系全体の不安定性に起因した変動であることがわかる。このパルスの変動は自励振動しているスレーブ・サーボ・システムからの出力にも、自励振動との重ね合わせとして確認できる。よって明らかに異なる原因による2つの振動モードが存在する。また、Fig.6aで観測される制御棒自励振動は中性子束信号には直接的には影響を及ぼしておらず局所的な現象に留まっている。

さて次に、ゲイン段階4の時に計測された制御棒位置信号と中性子束信号(Fig.7)を比較することにする。異常なスレーブ・サーボ・システム2からは非常にランダムな振動が得られている (Fig.7a)。それに対して正常なスレーブ・サーボ・システム3からの制御棒位置信号 (Fig.7b) は中性子束の振動 (Fig.7c) とほぼ同様な振動をしており、位相が反転している。我々の興味はFig.7aのランダムな振動の解析にある。ゲイン段階2の時の解析から推察すれば、異常なスレーブ・サーボ・システムからの制御棒位置信号 (Fig.7a) は中性子束振動 (Fig.7c) と自励振動 (Fig.6a) の2種類の異なった振動の影響を受けているはずである。パワースペクトル密度関数(Fig.8)によってゲイン段階が変わったことによる振動の変化を見てみる。Fig.8のゲイン段階2に対応する曲線では1つの鋭いピークが0.15Hz付近に見える。これは明らかに自励振動に対するピークである。我々はすでにゲイン段階4の時の信号には2つの振動モードが存在していることを知っているが、そのパワースペクトル密度関数においては0.24Hzのみにピークが確認できこれは出力振動のモードである。残りのピークは一見したところ基本振動に対する高調波のようである。よってこの時系列データには1つの振動モードのみ現われており周波数ロック現象が起きていると推察とされる。

さてこのような推察を確信するためには以下の様なデータ処理をするとよい。Fig.9は出力振動で極大値になるような時刻の点を制御棒位置信号の中から選んでアスタリスクで示したものである。また、実線は制御棒位置信号であり図を見やすくするためロー・パス・フィルターを通してある。すなわちこのグラフによって2つの振動データの位相を比べることができる。一見ランダムに見える制御棒振動は出力振動の位相に強く依存してことがわかる。かつ、自励振動していないスレーブ・サーボ・システムとことなり中性子束振動と順相であることがわかる。制御棒自励振動による振動モードが出力振動モードと独立に存在する場合には、それらの位相変数は独立でなければならずアスタリスクの位置が振動の頂点に留まることは許されない。Fig.9で示された現象は位相ロック現象とよばれている。(ただしアスタリスクの位置のずれが間欠的に観測され、低調波が現われていることが確認できる。) 2つの振動の位相がロック

されれば、結果として周波数もロックされる。以上のような制御棒振動の解析結果から制御棒の自励振動は全体的な出力振動時には独立には存在しえず、全体的な出力振動に引き込まれてしまう現象すなわち周波数ロック現象が起きていることが確認できた。このように2つの振動の非線形的干渉を解析するには、上記のような振動解析法が有効である。

その他スレーブ・サーボ・システム5で類似した自励振動が見られるが、同様な解析法により周波数ロック現象が確認される。その詳細は上記の繰り返しになるため本稿では割愛する。

5. まとめ

本報告では非線形動力学の諸概念に基づいて、NSRRの出力振動の解析を試みた。その結果、

1) NSRR出力振動の決定論的な性質は、非常に長くかつ雑音の少ないデータを得ることができればカオスの性質が見えるかもしれないが、与えられたデータの範囲ではリミット・サイクル的であると結論された。

2) また出力振動と制御棒の自励振動は物理的には異なる現象であるが、それらが同時に起こった場合独立に存在できず振動が干渉し周波数ロック現象が起きていることがわかった。

このような解析を通してNSRRの出力振動の性質がわかっただけでなく、非線形振動現象にはそれに適した解析方法をとることにより線形的な解析では得られない有意義な結果が得られることがわかった。

謝辞

本研究を行なうにあたり、制御知能工学研究室長篠原慶邦氏に貴重な助言を頂きました。また、同研究室林光二氏よりNSRRの時系列データの提供を受けました。ここに深く謝意を表します。

されれば、結果として周波数もロックされる。以上ような制御棒振動の解析結果から制御棒の自励振動は全体的な出力振動時には独立には存在しえず、全体的な出力振動に引き込まれてしまう現象すなわち周波数ロック現象が起きていることが確認できた。このように2つの振動の非線形的干渉を解析するには、上記のような振動解析法が有効である。

その他スレーブ・サーボ・システム5で類似した自励振動が見られるが、同様な解析法により周波数ロック現象が確認される。その詳細は上記の繰り返しになるため本稿では割愛する。

5. まとめ

本報告では非線形力学の諸概念に基づいて、NSRRの出力振動の解析を試みた。その結果、

1) NSRR出力振動の決定論的な性質は、非常に長くかつ雑音の少ないデータを得ることができればカオスの性質が見えるかもしれないが、与えられたデータの範囲ではリミット・サイクル的であると結論された。

2) また出力振動と制御棒の自励振動は物理的には異なる現象であるが、それらが同時に起こった場合独立に存在できず振動が干渉し周波数ロック現象が起きていることがわかった。

このような解析を通してNSRRの出力振動の性質がわかっただけでなく、非線形振動現象にはそれに適した解析方法をとることにより線形的な解析では得られない有意義な結果が得られることがわかった。

謝辞

本研究を行なうにあたり、制御知能工学研究室長篠原慶邦氏に貴重な助言を頂きました。また、同研究室林光二氏よりNSRRの時系列データの提供を受けました。ここに深く謝意を表します。

されれば、結果として周波数もロックされる。以上ような制御棒振動の解析結果から制御棒の自励振動は全体的な出力振動時には独立には存在しえず、全体的な出力振動に引き込まれてしまう現象すなわち周波数ロック現象が起きていることが確認できた。このように2つの振動の非線形的干渉を解析するには、上記のような振動解析法が有効である。

その他スレーブ・サーボ・システム5で類似した自励振動が見られるが、同様な解析法により周波数ロック現象が確認される。その詳細は上記の繰り返しになるため本稿では割愛する。

5. まとめ

本報告では非線形力学の諸概念に基づいて、NSRRの出力振動の解析を試みた。その結果、

1) NSRR出力振動の決定論的な性質は、非常に長くかつ雑音の少ないデータを得ることができればカオスの性質が見えるかもしれないが、与えられたデータの範囲ではリミット・サイクル的であると結論された。

2) また出力振動と制御棒の自励振動は物理的には異なる現象であるが、それらが同時に起こった場合独立に存在できず振動が干渉し周波数ロック現象が起きていることがわかった。

このような解析を通してNSRRの出力振動の性質がわかっただけでなく、非線形振動現象にはそれに適した解析方法をとることにより線形的な解析では得られない有意義な結果が得られることがわかった。

謝辞

本研究を行なうにあたり、制御知能工学研究室長篠原慶邦氏に貴重な助言を頂きました。また、同研究室林光二氏よりNSRRの時系列データの提供を受けました。ここに深く謝意を表します。

参考文献

- 1) 林 光二、他：炉雑音解析法を用いたNSRRの異常診断 (I)、JEARI-M、84-056、(1984).
- 2) 林 光二、他：炉雑音解析法を用いたNSRRの異常診断 (II)、JEARI-M、84-137、(1984).
- 3) 林 光二：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、JAERI-M、93-041、(1993).
- 4) Takens F.: Detecting Strange Attractors in Turbulence, Lect. Note in Mathematics, 898, 366(1981).
- 5) Suzudo T.: Reactor Noise Analysis Based on Nonlinear Dynamic Theory - Application to Power Oscillation, Nucl. Sci. Eng., 113, 145(1993).
- 6) Abraham N. B., et. al. : Calculating the Dimension of Attractors from Small Data Sets, Phys. Lett., 114A, 5, 217(1986).

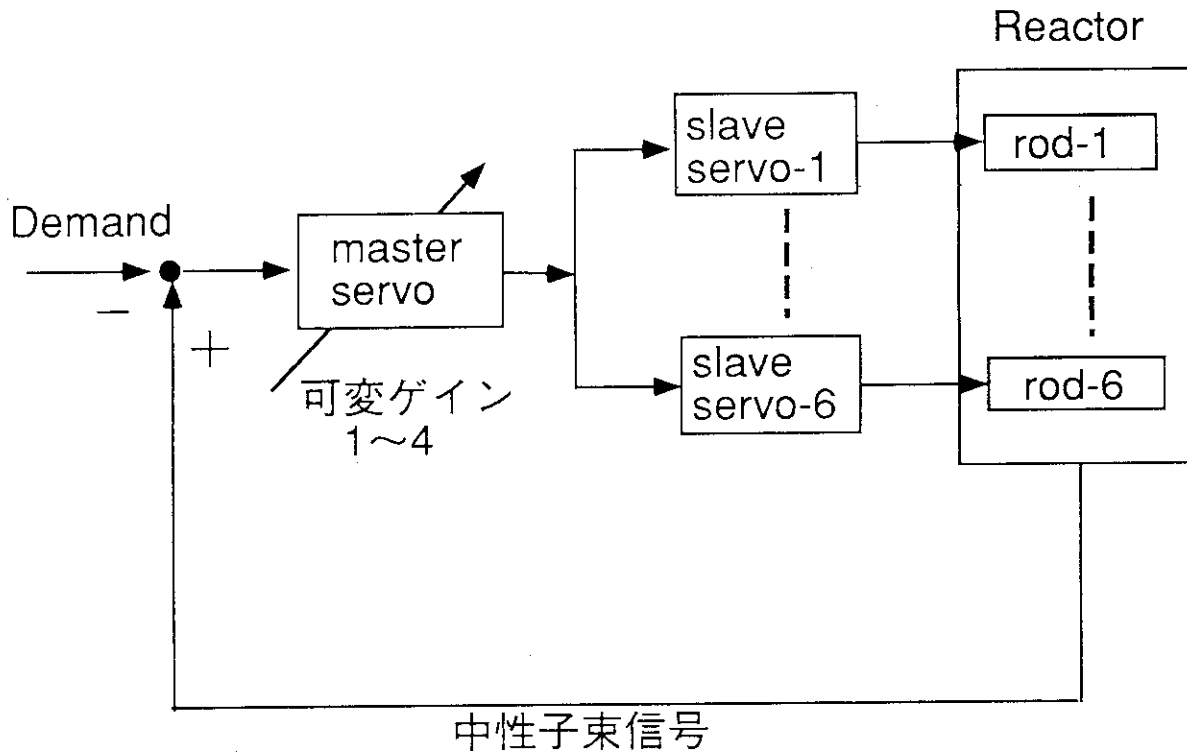


Fig. 1 Block diagram of the automatic control system in NSRR

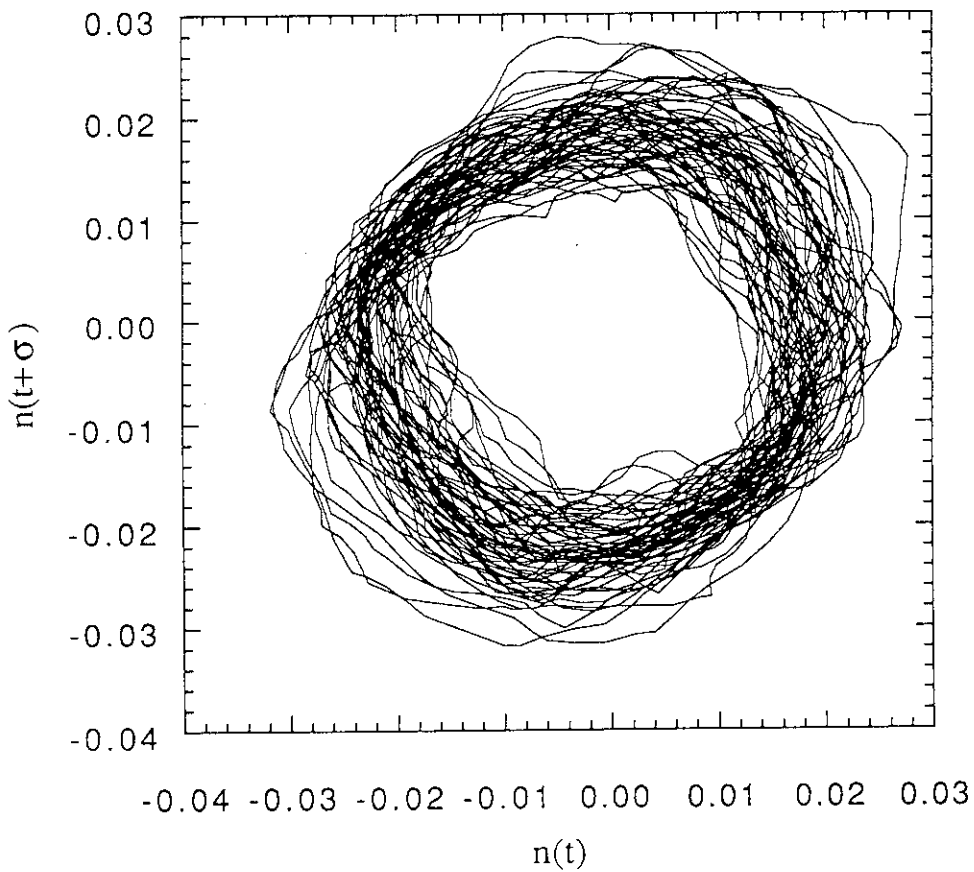


Fig. 3 Reconstructed trajectory by embedding the neutron-flux signal $n(t)$ into 2-dimensional space: time delay $\sigma=1s$

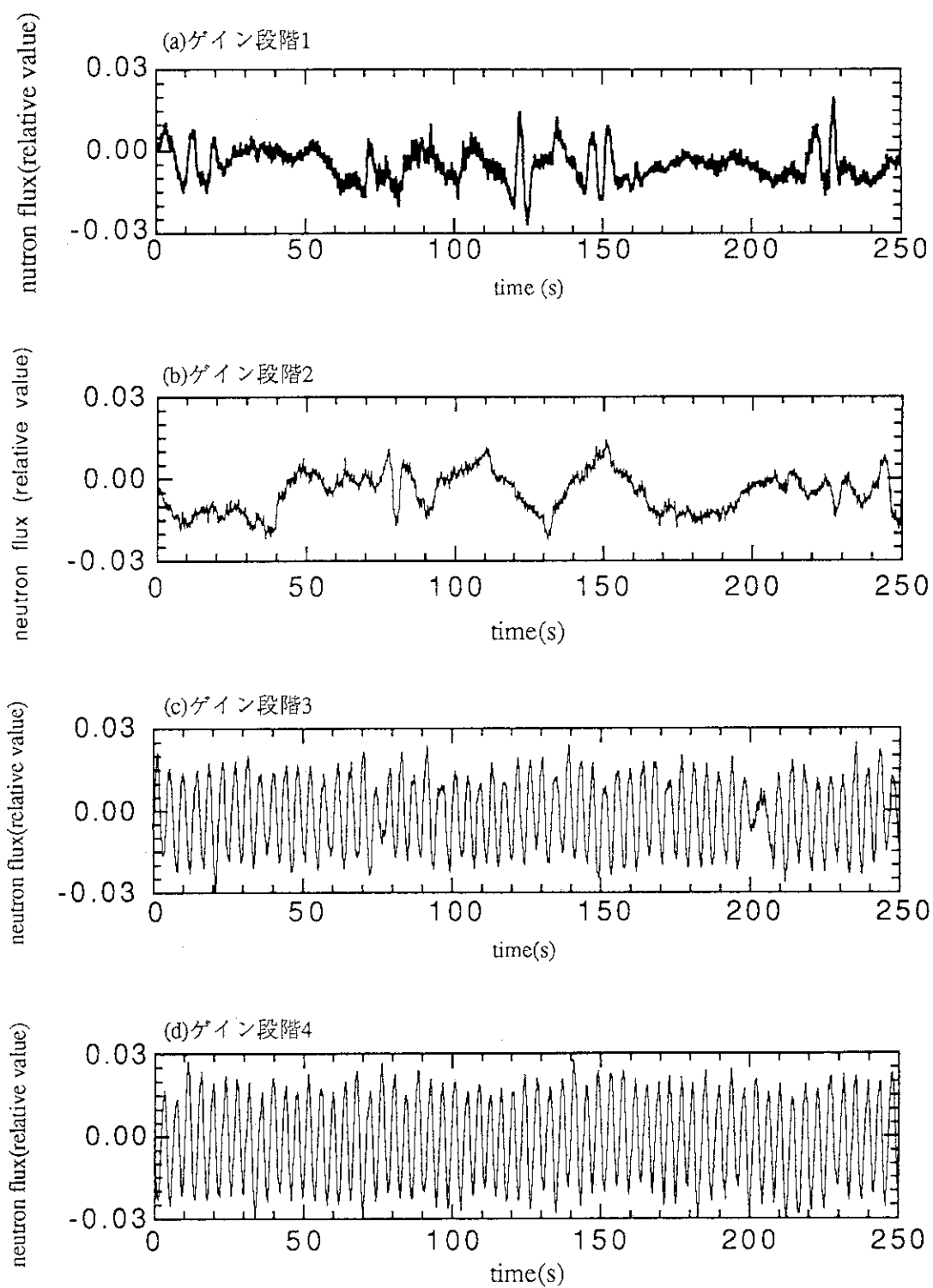


Fig. 2 Onset of the power oscillation in NSRR by the Gain Level change in Master Servo System

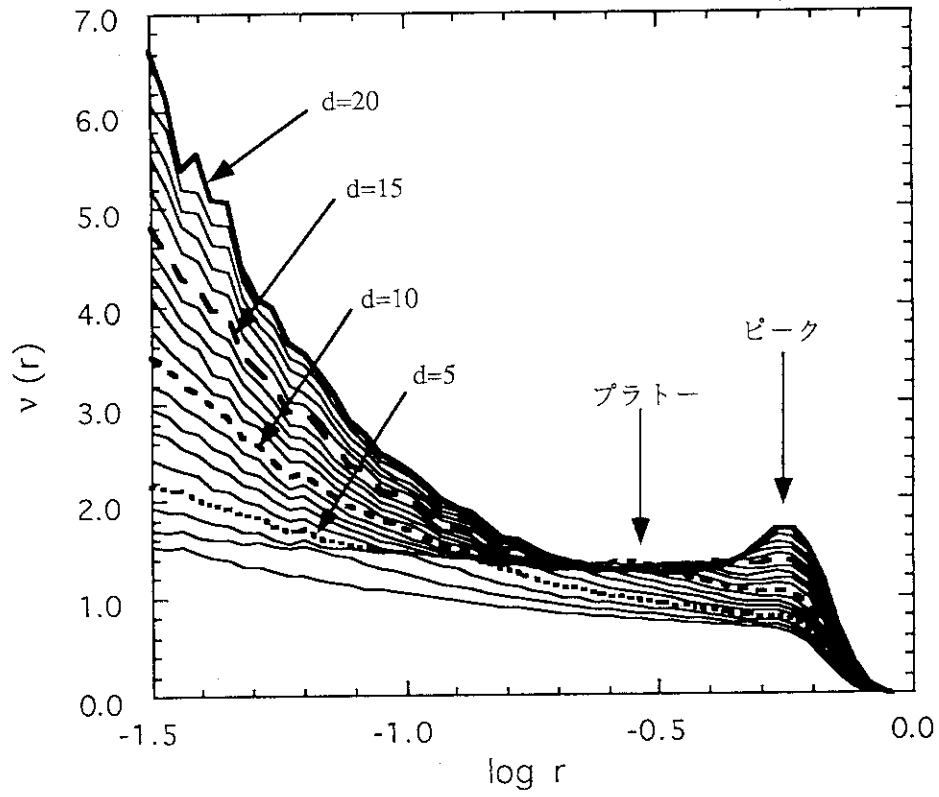


Fig. 4 Slope of correlation integral of the NSRR power oscillation : $d=2\sim 20$

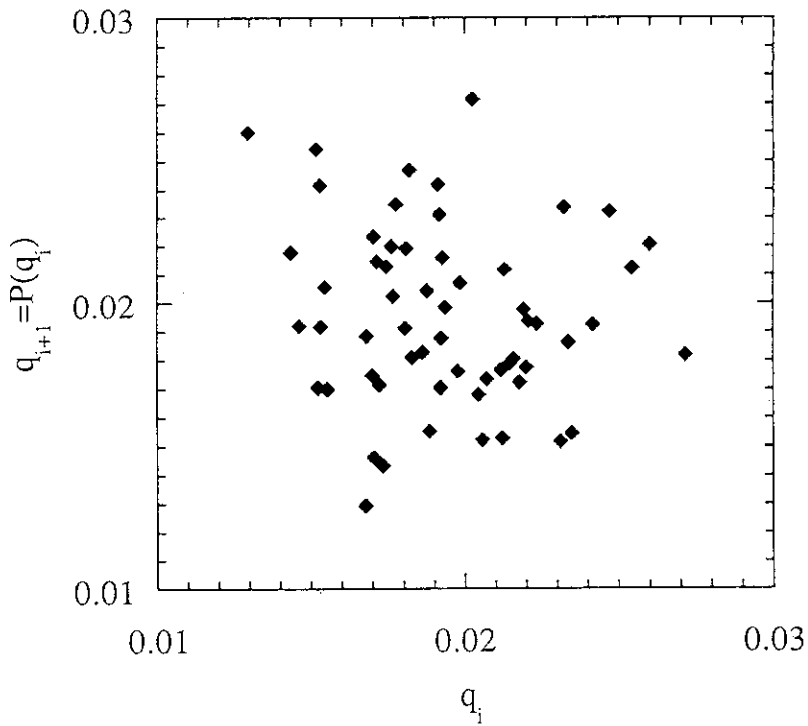


Fig. 5 Poincaré map P obtained from the NSRR power oscillation : q_i is the i -th peak value

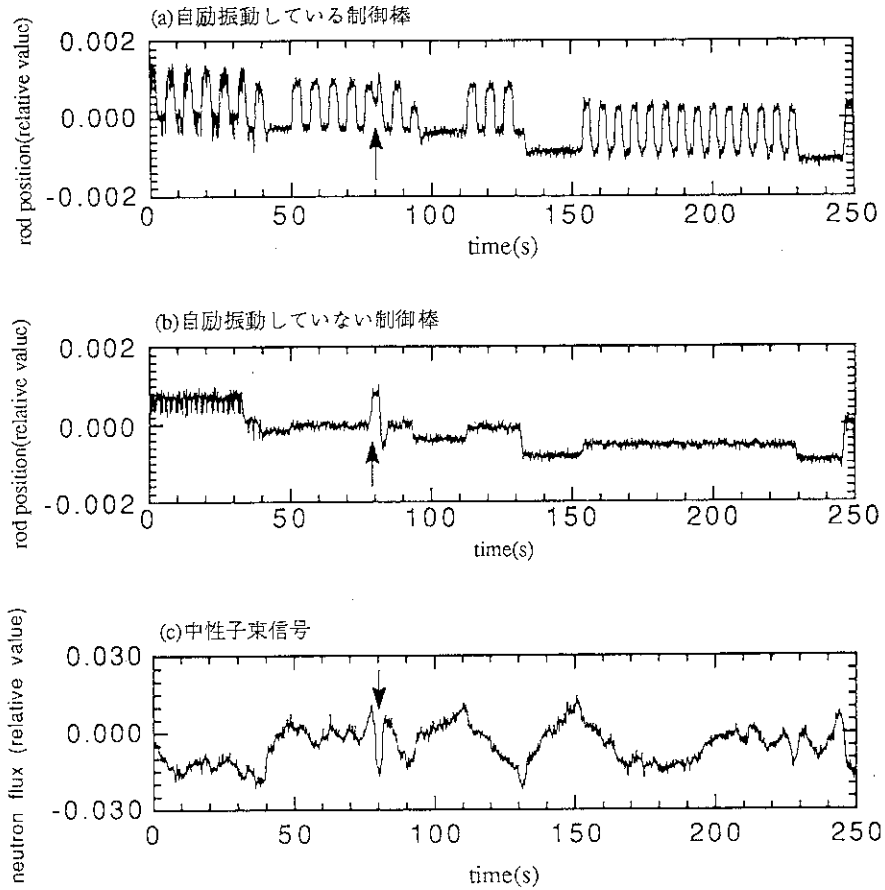


Fig. 6 Output signals from Slave Servo Systems and neutron-flux signal (Gain Level 2)

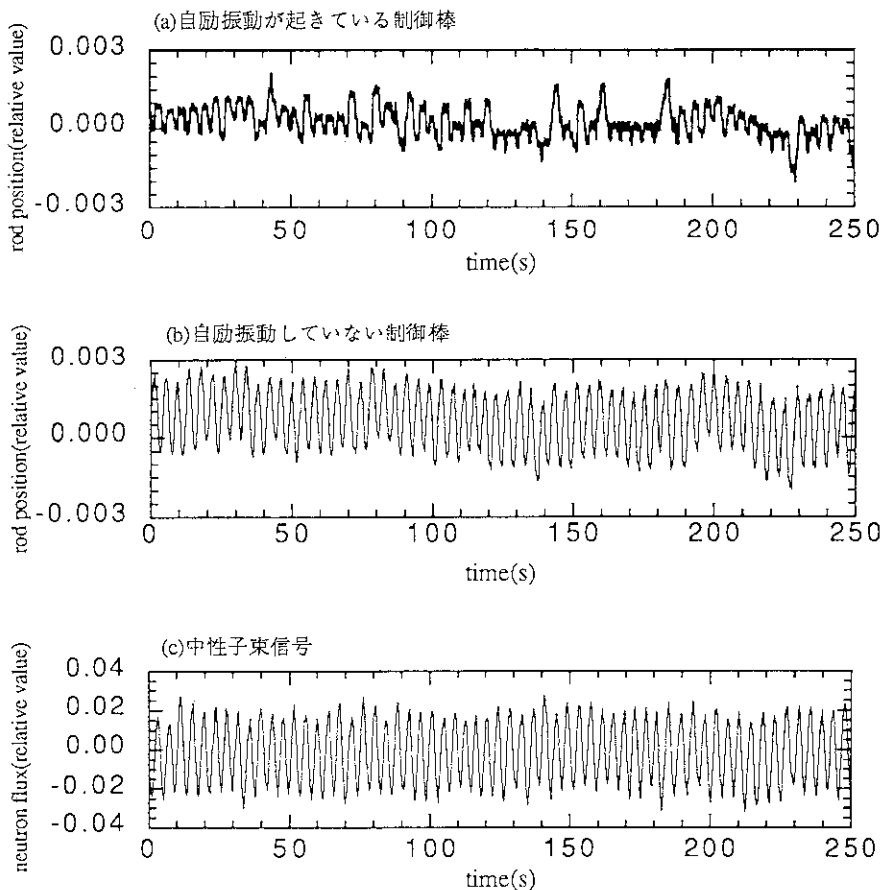


Fig. 7 Output signals from Slave Servo Systems and neutron-flux signal (Gain Level 4)

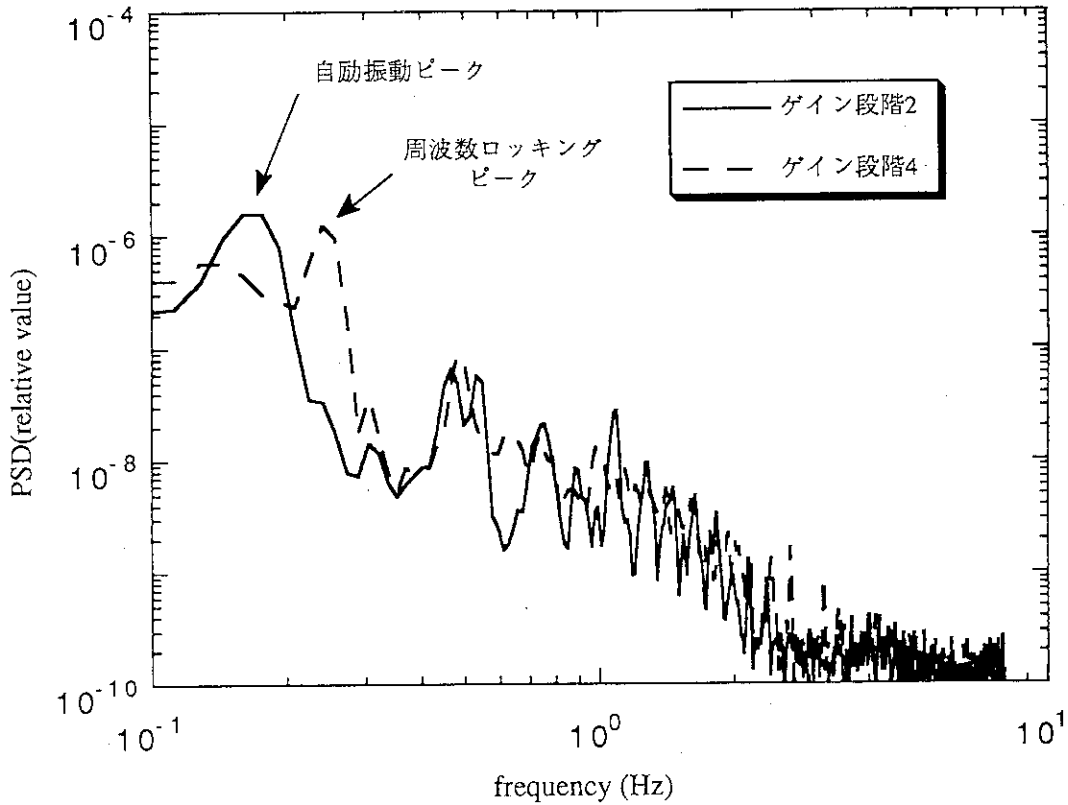


Fig. 8 Power spectral density of the output signal from the Slave Servo System with self-sustained oscillation

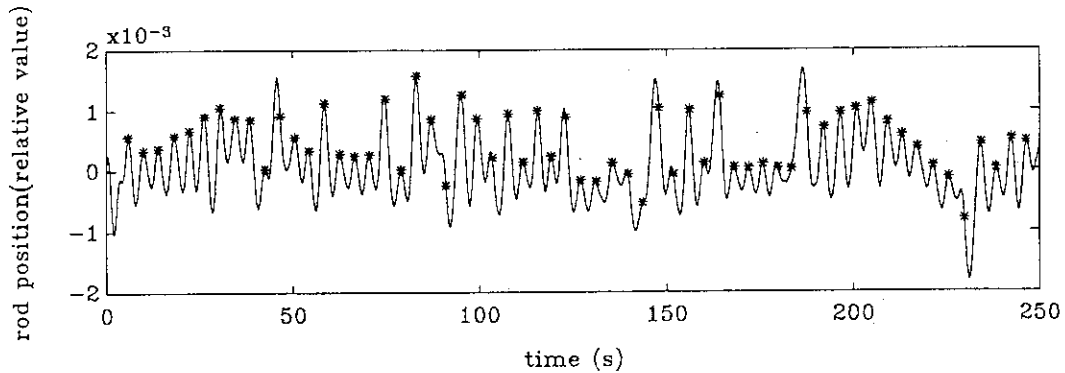


Fig. 9 Comparison in phase between the control-rod position oscillation and the power oscillation: The solid line indicates the control-rod position and the asterisks indicate the control-rod position at the time when the power oscillation signal has local maximum value.