



光双安定系におけるStochastic Resonance

御園, 雅俊

(Degree)

博士 (理学)

(Date of Degree)

1999-03-31

(Date of Publication)

2008-05-28

(Resource Type)

doctoral thesis

(Report Number)

甲1912

(JaLCD0I)

<https://doi.org/10.11501/3156313>

(URL)

<https://hdl.handle.net/20.500.14094/D1001912>

※ 当コンテンツは神戸大学の学術成果です。無断複製・不正使用等を禁じます。著作権法で認められている範囲内で、適切にご利用ください。



氏名・（本籍）	御園雅俊 ^{み その まさ とし} （千葉県）
博士の専攻分野の名称	博士（理学）
学位記番号	博い第109号
学位授与の要件	学位規則第4条第1項該当
学位授与の日付	平成11年3月31日
学位論文題目	光双安定系における Stochastic Resonance

審査委員	主査 教授 福田 行 男	教授 伊藤 敬 祐	教授 土屋 禎 三
------	--------------	-----------	-----------

論文内容の要旨

Stochastic Resonance (SR, 確率共鳴) とは, ある種の非線形系において, コヒーレントは信号と雑音との協力効果により系の信号伝達が共鳴的に増大する現象である。入力雑音の強度を最適化することによって系の信号伝達は極大となる。SR は, その奇妙な振舞いにも関わらず, 様々な系において起こることが知られている。

この現象は, 氷河期の周期の研究において1980年代初頭に初めて報告された。その後, ニューロンや感覚神経における信号伝達などの生命現象や, 様々な物理系において見いだされ, 理論的研究も盛んに行われてきた。

本研究では, SR の基本的性質の解明およびその信号処理への応用を目的とし, 光双安定系を用いた実験および計算機シミュレーションを行った。光双安定系を用いることによって, 気象や生命現象で起こっている SR を実験室で再現でき, 人為的にパラメーターを制御できるので, SR の基本的性質の解明に有利となる。光双安定性は良く研究されており, その成果を利用できることも有利な点である。また, 光双安定系は光伝送系や信号処理系への応用にも適している。

実験は2種の hybrid 型光双安定系を用いて行った。これらの径は小さな光強度で広い光波長範囲にわたって動作可能であり, 高速化, 小型化, 集積化が可能という特長がある。これらの系を用いて SR の実験を行い, いずれの系においても SR に特有の共鳴が得られることを示した。

まず, この2種の光双安定系を用いて, 入力信号を正弦波, 入力雑音を Gauss 型の振幅分布と有限のカットオフ周波数を持つ雑音とした実験を行った。信号伝達の尺度としては, 従来から SR の研究において良く用いられる SN 比, すなわち, スペクトル中の信号周波数におけるピークの大きさを採用した。この系の出力 SN 比は SR に特有の共鳴を示すことがわかった。雑音振幅を適当な値とすると, 信号周期に近い周期で光双安定系の二つの安定状態間の変化が起こり, SN 比は極大値をとった。また, 簡単な双安定ポテンシャルを用いて, 正弦波入力の場合の計算機シミュレーションを行ったところシミュレーション結果は実験結果を良く再現した。

雑音の帯域が SR に与える影響についても研究を行った。これは, SR の基本的な性質についての

興味からだけでなく、伝送路や雑音発生器、増幅器などの帯域は通常は有限であるため、実際の観点からも重要な問題である。本研究では、コンピューターで雑音を作成することによって帯域などのパラメーターを制御した。実験およびシミュレーション結果から、広帯域の雑音ほど SR に有利であることがわかった。とくに、雑音のカットオフ周波数 f_c が信号周波数よりも大きいことには双安定系出力は顕著な共鳴を示すが、小さいときには目立った共鳴は示さないことがわかった。

また、正弦波を入力信号とする場合には、いずれの f_c の値の場合でも出力 SN 比は常に入力 SN 比よりも小さく、信号伝達の利得は得られないことがわかった。

また、本研究では、有限の情報を持つ信号を入力した場合の SR について研究した。High と low の二つの状態をとりうる 2 進ビット列と、上で述べた実験で用いた雑音と同様の性質を持つ雑音が双安定系に入力している場合の系の振る舞いについて、光双安定系を用いた実験および計算機シミュレーションを行った。情報伝達の尺度としては mutual information (MI) を採用した。

実験、シミュレーションいずれの結果においても、双安定系出力の MI は SR に特有の共鳴を示すことがわかった。また、出力 MI が入力 MI よりも大きな値をとる、すなわち、双安定系を通過させることによって情報の利得が得られることを示した。雑音振幅あるいは強度を適当な値とすると、出力ビット列は入力ビット列をほぼ忠実に再現できることを示した。双安定系が挿入された伝送路は、双安定系を持たない伝送路と比較してより多くの情報を伝達することが可能であることがわかった。

本研究のシミュレーションで用いた双安定モデルは双安定性の本質的な部分のみを表す簡単なものなので、このシミュレーションで得られた結果は双安定系を含む伝送路に広く適用することができる。さらに、このシミュレーションのような計算機を用いた数値的な処理自体も信号処理に対して有効である。

MI は 2 進ビット列による情報伝達の尺度として有効なものであり、しきい値モデルを用いたニューロンにおける情報伝達の研究において活用されてきたものである。本研究においては、MI を双安定系における情報伝達の尺度として利用し、この系においても有効な尺度であることを示した。

この系に対する雑音の帯域の影響についても、実験および計算機シミュレーションによる研究を行った。この場合の SR についても同様に広帯域の雑音が有利であることがわかった。 f_c の大きい雑音を用いた場合ほど、双安定系出力 MI は顕著な共鳴を示し、情報の利得の極大値は大きくなることがわかった。 f_c が信号速度と比較して小さくなると情報の利得はほとんどなくなり、SR の信号処理に対する有用性は無くなることがわかった。

さらに、SR の信号処理への応用の可能性を示すため、ランダムなビット列に代えて、画像データ（これも 2 進のビット列である）を双安定系に入力した場合の計算機シミュレーションを行った。 f_c が信号速度と比較して大きいときは、出力画像の鮮明度が SR 的な振る舞いを示し、雑音強度を最適化することによって比較的鮮明な画像が得られることを示した。またこのとき、SR を利用することによって画像の鮮明度向上が可能であることを示した。 f_c が小さいときには共鳴的な振る舞いは起こらず、鮮明度向上も可能性であることを示した。以上のことから、広帯域の雑音を用いた SR は信号処理に対して有用であることがわかった。

論文審査の結果の要旨

本論文は、Stochastic resonance (SR, 確率共鳴) と呼ばれる現象の基礎と応用に関する研究成果の報告である。

Stochastic resonance とは、ある種の非線形系において、コヒーレントな信号と雑音との協力効果によって系の信号伝達の効率が共鳴的に増大する特異な非線形現象であり、1980年代初頭に初めて報告されたものである。

本研究では、SR の一般的かつ基本的性質の解明と信号処理への応用を目的とし、光双安定系を用いた実験と計算機シミュレーションによる詳細な研究を行っている。

人為的にパラメーターを自由に制御できる光双安定系を用いることは、気象や生命現象にも見られる SR を実験室で再現することにより、SR の基本的性質の詳細な研究を可能にすると同時に、光伝送系や光信号処理系への応用の道を拓く創造的アイデアである。

実験に用いている 2 種類の hybrid 型光双安定系は、小さな光強度で広い波長範囲で動作可能であり、高速化、小型化、集積化が可能という応用面での利点を持つ。

第 1 章（序論）では、研究の背景と目的及び論文の構成について述べ、第 2 章では、光双安定系の SR と閾値型の SR を解説し、本研究の基本事項をまとめている。

第 3 章では、光双安定性一般の基礎概念及び理論的な取り扱いと、hybrid 型光双安定系の基本的特性について詳細に述べ、また、本研究で考える双安定ポテンシャルをもつ系における SR の理論的モデルを提示している。

第 4 章では、光共振器を用いない hybrid 型光双安定系における SR の実験と計算機シミュレーションの結果をまとめている。正弦波信号入力に雑音を加えた場合について、まず、出力信号の SN 比（信号対雑音比）の雑音の振幅に対する依存性を実験的に調べ、有限の雑音振幅で出力信号の SN 比が極大値を示す SR の現象を確認している。この現象は、適当な雑音振幅で光双安定系の二つの安定状態間の信号周期に同期した遷移が最大になることに対応する。雑音としては、Gauss 型の振幅分布と有限のカットオフ周波数を持つ雑音を計算機で調製して用いている。さらに、雑音のカットオフ周波数が大きい程 SN 比の利得（出力 SN 比／入力 SN 比）の極大値は大きくなるが、カットオフ周波数が信号周波数を越える領域で SN 比利得の上昇は飽和傾向になり、SN 比利得は 1 を超えないことを明らかにし、簡単な双安定ポテンシャルをもつ光双安定系のモデルを用いた計算機シミュレーションによって実験結果がよく説明できることを確認している。

第 5 章では、光共振器を用いた hybrid 型光双安定系による第 4 章と同様の実験及び計算機シミュレーションの結果をもとめている。この系でも SR に特有の共鳴を観測し雑音スペクトルへの依存性を調べて、第 4 章と同様の結果を得ている。また、計算機シミュレーションにより実験結果を良く再現できることを示している。

雑音の帯域に対する依存性を調べた結果は、実用的観点からも非常に有用な新たな知見を与えている。

第 6 章では、有限の情報を持つ 2 進ビット列信号を入力した場合の SR についての研究結果を報告している。

正弦波信号の代わりに 2 進ビット列の信号と雑音が双安定系に入力する場合の系の振る舞いを、光双安定系を用いた実験および計算機シミュレーションによって調べている。ここでは、情報伝達の尺度としては、SN 比に代えて、より適切な Mutual Information (MI) を用いている。

実験とシミュレーションのいずれにおいても、双安定系出力の MI は SR に特有の共鳴を示すことを確認し、更に、出力 MI が入力 MI より大きな値をとりうること、すなわち、入力ビット列に適当な雑音を加えることによって情報の利得が得られる可能性を明らかにしている。

ここで用いた双安定系のモデルは双安定性の本質的な部分のみを表す簡単なものであるため、本研

究の結果は双安定系を含む伝送路に広く適用できること、さらに、このシミュレーションのような計算機を用いた数値的な処理自体も信号処理に対して有効であることを明らかにしている。また、雑音の帯域の影響についても、実験と計算機シミュレーションによる詳細な研究を行い、この場合も広帯域の雑音が有利であることを示している。

さらに、SR の信号処理への応用の可能性を具体的に示すため、ランダムなビット列に代えて、2 進のビット列の画像データを入力した場合の計算機シミュレーションを行い、出力画像の鮮明度が SR 的な振る舞いを示すこと、SR を利用することによって画像の鮮明度の顕著な改善が可能であることを実証している。

以上述べた通り、本研究は Stochastic Resonance の基本的特性について重要な知見を与え、また、情報処理への応用可能性を初めて明らかにした優れた研究であると認める。

よって、学位申請者御園雅俊は、博士（理学）の学位を得る資格があると認める。