

氏 名	にし かわ いく こ 西 川 郁 子
学位(専攻分野)	博 士 (理 学)
学位記番号	理 博 第 1429 号
学位授与の日付	平成 5 年 3 月 23 日
学位授与の要件	学位規則第 4 条第 1 項該当
研究科・専攻	理学研究科物理学第一専攻
学位論文題目	Dynamics of Macroscopic Order Formed by the Mutual Entrainment of Phase Oscillators (位相振動子の相互同期による巨視的秩序の動的性質)
論文調査委員	(主 査) 教授 蔵本由紀 教授 恒藤敏彦 教授 小貫 明

論 文 内 容 の 要 旨

本申請論文は、非平衡開放系に固有なリミットサイクル振動子が集団をつくるときに出現する巨視的秩序運動の理論的基礎を明らかにしようとするものである。リミットサイクル集団のモデルとしては、従来その有効性が広く認められている「位相モデル」を採用した。

主論文は内容的に二つの部分に分かれる。第一の部分においては、振動数分布をもち、かつ大域的に結合した位相振動子の集団における巨視的状態の安定性の解析がなされ、巨視的振動に対して適当に定義されたオーダーパラメータの緩和則が導出された。同じモデル系に対しては、オーダーパラメータの定常値に対するセルフコンシステントな閉じた方程式が知られており、その解から集団振動の発生に関する知見がすでに得られている。しかし、オーダーパラメータに対する閉じた方程式を運動方程式の形で導出することが困難であったために、定常解の安定性は不明であった。本論文は、臨界点近傍および定常状態近傍という条件のもとに、オーダーパラメータの運動方程式を導くことに成功したものである。上記のような条件下では、オーダーパラメータが微小振幅でかつ臨界減速しているために、ミクロな自由度から切り離され、閉じたダイナミクスを構成するのである。定常非振動状態については解析的に、また定常振動状態については数値的に安定性と線形緩和則の存在が立証された。解析によれば、集団振動発生に関する臨界点の前後で、マクロな非振動状態の安定性が交代する。このような結果は、熱力学的相転移の構造から通常予想されるものと一致するが、そのような巨視的状態の安定性を保障しているミクロな（すなわち、個別振動子の運動に基づいた）機構は決して自明ではない。マクロな緩和を支えるミクロな機構は、位相分布関数の時間発展を追跡することによって明らかになる。本研究によって明らかにされた重要な事実として、一見単純な指数減衰則に従うオーダーパラメータの緩和が、実は位相分布のきわめて異常な緩和過程によって可能となっていることの発見である。すなわち、オーダーパラメータに同期していない振動子グループがマクロな緩和に無関係な様な背景をなしているのではなく、きわめて緩慢な緩和を示すオーダーパラメータ成分と逆符号の寄与をなすことによって、見かけ上オーダーパラメータの緩和を早めている

るのである。したがって、オーダーパラメーターがすでに緩和を達成した後も非常に長い時間にわたって、位相分布はなお平衡から大きくずれているのである。

主論文の第二の部分は、位相モデルによる大域結合集団を、実験的に得られている現象との関連で解析したものである。具体的には、生体系に現れる周期的バースト現象のメカニズムをそのモデル化の立場から考察した。バースト現象にはいくつかの異なった機構が考えられているが、本研究においては、あるタイプのバーストに対して、複素変数によって記述される素子モデルを導入し、解析がなされた。自明な極限ではイジングスピンの on/off 素子となるこのモデルは、他の一極限（弱結合極限）あでは位相モデルに帰着する。したがって、既出の方法によって解析可能であり、これにもとづき、周期的バーストが集団的に同期にして集団振動を生じることが明らかとなり、さらに複雑な集団振動の可能性も数値解析から示唆された。

論文審査の結果の要旨

本申請論文の主要部分は、リミットサイクル振動子からなる大集団に対して、一つの統計力学的アプローチを試みたものである。すなわち、振動子をミクロな要素に対応させ、集団をマクロな系に対応させたとき、後者の性質、特に動的な性質が前者の力学運動を唯一の基礎としてどのように理解されるか、という問題意識に基づいたものである。いうまでもなく、リミットサイクル振動は非平衡系に特有の現象であり、伝統的な統計力学はこの問題において全く無力である。しかるに、現象から見るならば、リミットサイクル振動子集団はスピン系の相転移に対比されるべき相転移現象を示す。すなわち、個別振動が互いに同期する結果、振動子間結合が臨界結合強度を越えると突然マクロな集団的振動が発生するのである。このような、いわゆる「引き込み転移」現象に対しては、大域結合を持つ振動子の位相モデルに基づいて1967年以来多くの理論的研究がある。そこでは、集団振動を表すオーダーパラメーターに対するセルフコンシステントな閉じた方程式が導出され、その解から上記の転移現象は一応理解されている。しかし、それは定常な振動または非振動状態に限定されており、そのようなマクロな解の安定性の問題は、きわめて重要でありながら未解決の問題として久しく取り残されてきた。これは、マクロレベルの発展方程式が最初からあたえられている通常の分岐現象の理論とは本質的に異なり、そのようなマクロレベルで閉じた発展方程式自身をいかにしてミクロな発展方程式から導出するかという問題である。マクロ変数でダイナミックスがマルコフ的に閉じるためには、マクロな時間スケールがミクロなそれに比べて十分に長くなければならない。申請者は、通常の相転移におけると同様に集団振動の振幅の時間発展が臨界的近傍で異常減速するという数値シミュレーションの結果に注目し、その事実を用いて、線形の範囲ではあるがオーダーパラメーターに対する閉じた発展方程式を導出することに成功した。予想されたようにその自明解（非振動状態）の安定性は臨界点前後で交代し、転移点近傍で臨界減速が起こるというコンシステントな結果を得た。この研究において見いだされた意外な事実として、振動子の位相分布関数が示す異常な緩和過程がある。オーダーパラメーターの一見単純な指数減衰がむしろ分布関数の異常減衰によって可能となっているという申請者の発見はきわめて興味深く、それが集団引き込み転移一般に成立する普遍的性質であるかどうか、今後解明されるべき重要な問題を提起したと言えよう。

以上のような原理的問題とともに、申請論文においては振動子集団に対する位相モデルのニューラルネットワークへの応用が試みられている。申請者によって統計力学的立場から詳細に考察された大域結合振動子集団は、多数の振動ニューロンから構成される高次の局所的機能単位に対するモデルとして現実的意味をもちうると考えられる。そのような機能単位は、単に集団振動のみならず、より複雑な集団ダイナミックスを示すと期待される。位相モデルの範囲においてさえ、クラスター化現象等の複雑性が申請者により見いだされている。

よって本論文は博士（理学）の学位論文として価値あるものと認める。

なお、主論文および参考論文に報告されている研究業績を中心とし、これに関連した研究分野について試問した結果、合格と認めた。