

氏 名 (本 籍)	千 葉 慎 二	( 宮 城 県 )
学 位 の 種 類	博 士 ( 情 報 科 学 )	
学 位 記 番 号	情 博 第 27 号	
学 位 授 与 年 月 日	平 成 8 年 3 月 26 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	東 北 大 学 大 学 院 情 報 科 学 研 究 科 ( 博 士 課 程 ) シ ス テ ム 情 報 科 学 専 攻	
学 位 論 文 題 目	荷 電 回 転 子 系 の 非 線 形 力 学 の 研 究	
論 文 審 査 委 員	( 主 査 )	
	東 北 大 学 教 授 澤 田 康 次	東 北 大 学 教 授 海 老 澤 丕 道
	東 北 大 学 教 授 高 安 秀 樹	東 北 大 学 教 授 中 島 康 治 ( 工 学 研 究 科 )

## 論 文 内 容 要 旨

振動子集団は、結合の仕方や強さによって、その集団的な挙動に多量平衡状態、高次カオス、位相乱流等複雑な振舞いが数値シミュレーションによって示されている。このような協同現象は、生体における神経回路網においても類似の現象が見られており、情報処理システムとして見た場合に振動子集団の研究の将来的な有用性を期待させるものである。

結合振動子集団の研究については、数値シミュレーションにおいては活発に研究されている。しかしながら、実験的には結合振動子集団の数理モデルを仮定できるような複雑な系の測定は行われているが、結合振動子集団として詳細な測定を行える系がこれまで存在していなかった。

本論文は、実験的に結合振動子集団としての詳細な測定の可能な系を考案、開発し、その実験結果を述べると共に、本実験系に対する数理モデルの提案、数値計算結果をまとめたものである。以下、本論文の各章についての概要を述べる。

### 第 1 章 「序 章」

多くの自然現象に見られる自己組織化、パターン形成等の理解には還元主義的方法のみでは理解できず、現象に関わる要素間の相互作用が重要であり、結合振動子集団はそのような複雑系研究の有効な手法であることを述べた。本研究は、情報处理的見地からも有用性の期待できる、非局所的な相互作用をする結合振動子集団の詳細な実験を可能とする考案、開発を目的としている。これまで、非局所的相互作用結合振動子集団の詳細な測定のできる現実的系は存在していなかったという点からも本研究の意味があり、また本研究の応用として、現在までにこの分野で培われた理論を具現化できる可能性がある、という点からも重要である。

### 第 2 章 「非線形振動子集団」

非線形振動子の基本方程式であるギンズブルグ・ランダウ方程式による結合振動子集団の振舞いに関する最近の数理研究に関して述べると共に、現実的結合振動子集団の例として、生体の神経回を網に関する研究結果をいくつか述べた。

### 第 3 章 「ニードル回転子」

本研究で考案した現実的非局所的結合振動子集団を構成しうるニードル回転子について述べた。ニードル回転子は、

全てが導体によって構成された非常にシンプルな構造の回転子である。強電界中において、ニードル回転子はその局所部分での放電による帯電電荷と電界とのクーロン相互作用によって運動し、かつ、ニードル回転子の回転運動に伴う放電による帯電電荷の極性の変化で、この回転子は持続的な非線形回転運動を行うことが可能となる。また、ニードル回転子の帯電電荷の変動は、回転運動中のこの回転子の局所的な部分での放電によるものであるため、時空間的に一様な強電界中での持続的な回転運動が可能であり、このような場の中であれば任意の個数のニードル回転子を任意の位置に配置させた状態での複数ニードル回転子の運動も可能である。複数のニードル回転子が運動している場合、個々の回転子の帯電電荷間のクーロン力による非局所的相互作用が働くことになるので、このニードル回転子を系の構成要素とした非局所的相互作用結合振動子集団が実現するのである。

ニードル回転子による結合振動子系の測定方としては、本研究においては、導体である個々の回転子に導細線によって接続された直列接続したコンデンサの分圧電位の測定と、CCDカメラによる回転子運動の撮影を行った。これらの測定から、系を構成する全ての回転子の回転運動時の帯電電荷の変化、回転位相等を測定することができるので、振動子集団の相互ダイナミクスを詳細に解析することが可能となった。

## 第4章「実験結果」

時空間的に一様な強電場におけるニードル回転子を構成要素とした結合振動子系についての基礎的な実験結果について述べた。

まず、単一のニードル回転子のダイナミクスについては、外部電界の増加と共に回転子の回転周期の減少、帯電電荷の増加の特性を示した。また、この回転子の定常的な運動状態として、本研究の測定範囲内においては、非線形回転運動と静止という双安定な状態であることを実験的に確認した。

次に、パラメータの異なる2つのニードル回転子を外部電界方向に、ある間隔で配置した場合の相互ダイナミクスについての測定を行った。外部電界の強度を変化させることで回転子間の結合強度を変化させた場合の測定結果として、電界強度の増加と共に、回転子の平均回転周期比に2:1, 3:2, 1:1の安定な引込状態を測定した。また、電界強度の増減に対して平均回転周期比にヒステリシス現象の存在を確認した。さらには、測定された回転子の電位波形のフーリエスペクトル等から、非ロッキング状態でのカオスの存在を明らかにした。

結合振動子集団の基礎的な実験として、6つまでニードル回転子を外部電界方向に垂直な方向に、ある一定間隔で配置した場合の相互ダイナミクスを測定した。個々の回転子のパラメータは、回転子作成時の精度の問題上、ある程度のばらつきのあるものであった。測定は系を構成する回転子数を2, 3, 4, 5, 6つの場合について行った。測定結果としては全ての測定条件においてみられた特長として、ある位相関係で系を構成する全回転子の回転周期が同一となる同期状態を測定した。また、系を構成する回転子数が5つ以上の場合に、同期状態において時折異なる位相関係に移ることが測定された。

## 第5章「ニードル回転子のダイナミクス」

実験的に観測された現象をさらに理論的に解析するために、ニードル回転子系のダイナミクスをシュミレーションするためのモデルを提案し、数値解析を試みた。本研究で提案したモデルは、現実的には導体であるニードル回転子表面に2次元的に分布している帯電電荷を回転子をL字型の1次元的な線分として、帯電電荷を1次元的な分布に近似して計算するものである。

モデルによる数値計算結果としては以下のものを得た。まず、単一のニードル回転子ダイナミクスの数値計算では、外部電界に対する回転周期特性や、定常運動時の非線形回転運動、静止という双安定な振る舞いが計算され、これは実験結果の特長をよく示しているといえる。

パラメータの異なる2つのニードル回転子の相互ダイナミクスの数値計算結果では、実験において測定された相互作用特性である2つの回転子の平均回転周期比の外部電界変化に対するロッキング現象を数値計算で再現した。

すべて同一のパラメータを持つ複数(6つまで)のニードル回転子による相互ダイナミクスの数値計算により、ある位相関係で全てが同一周期で回転する同期状態を確認し、この同期状態はいくつかの位相関係で安定に存在できる多重安定系であることを数値計算によって示した。

本研究での数値計算では、実験で測定されたヒステリシスや、2:1, 1:1 ロッキング等、一切の実験結果に完全に一致した計算結果を得ることはできなかった。パラメータの設定によってこの問題は解決できるかもしれないが、場合によってはモデルそのものの改善も必要である。

## 第6章「考察，検討」

まず、本研究で考案したニードル回転子系による相互作用が、個々の回転子の帯電電荷間のクーロン相互作用であるかの検討を行うためのいくつかの実験結果を述べた。これら乱れからくる電場の揺らぎを介した相互作用、回転子の放電によって発生した電離気体による流体的効果の相互作用への影響を不定する結果となり、回転子帯電電荷間のクーロン相互作用がこの系の相互ダイナミクスの振る舞いを支配していることが実証された。

実験結果に関する考察では、単一のニードル回転子における双安定状態の理由として、ニードル回転子の外部電界方向に対する位相角によって変化する回転子帯電電荷の分布によって、位相角によっては外部電界とのクーロン相互作用によるトルク方向が回転方向とは逆方向に働くことがあり、持続的回転運動はこの逆トルクを回転子の慣性力でのりきることによって実現することを述べた。

2つのニードル回転子実験結果に関しては、カオスの存在について述べ、また、平均回転周期比のロッキング状態における回転子間の位相差がロッキングの比率によってある範囲に限られることを、1:1 ロッキング状態の場合を例としてその理由を検討した。これは、回転子帯電電荷間のクーロン相互作用による各回転子に働くトルク方向が、回転子間の位相差の状態によって同一方向に働くか否かがほぼ決まると考え、このためにロッキング状態での存在できる位相差の範囲が生じるとした。ヒステリシス現象に関しては、ロッキング状態の安定性、ニードル回転子の慣性力、放電の時定数等が関係していると考えた。

複数ニードル回転子実験結果に関しては、複数回転子の集団的な振る舞いである同期状態について述べた。また、5つ以上の回転子の同期状態では、時折異なる位相関係に遷移することが測定されたが、この遷移パターンが常にある回転子間を境に生じていることより、位相関係において2つのクラスタが生じていることを示した。

本研究で考案したニードル回転子系に対するモデルによる数値実験結果に関しては、単一ニードル回転子のダイナミクス、パラメータの異なる2つの回転子の相互ダイナミクスにおけるロッキング状態、複数ニードル回転子の同期状態等、実験結果に見られた特長をよく表していた。このことは、本研究の実験で使用したシンプルな構造のニードル回転子の場合には、数値計算において回転子上の詳細な電荷分布の計算をせずに、本研究のモデルのような1次元的な電荷分布に近似しても、その特長的なダイナミクスが計算できることを示している。本研究のモデルを用いることにより、今後より多数のニードル回転子による集団的振る舞いを数値計算する際に現実的な計算時間で行うことが可能となる。

## 第7章「結論」

本研究の結果、複数のニードル回転子によって構成された系が非局所的相互作用結合振動子集団の実験系となりえることがわかった。本研究では、ニードル回転子の配置は外部電界方向に垂直な方向に1次元的に配置した場合のみを考え、回転子の回転方向もすべて同一方向への回転運動のみについて考えていた。しかし、ニードル回転子の配置は一樣外部電界中に2次元的な配置が可能であり、回転方向も1つの回転子に対して2方向の回転方向が存在する。つまり、このニードル回転子系によって様々な条件での実験が可能であり、この系に固有の興味深い特性なども今後の研究の進展で明らかになっていくであろう。

## 審査結果の要旨

振動子・興奮子の集団は、相互作用の強さの違いによって、多重平衡状態、多重リミットサイクル、位相乱流、高次元カオス等複雑な振舞を示すことが、数値シミュレーションによって示されており、情報処理システムとしての有用性が期待されている。しかしながら相互作用の強度を任意に変化させることが可能な物體的集団はこれまで発見されていなかった。

著者は、強電界中で相互作用の強度が可変なニードル荷電回転子、を考案し、その集団回転モードと電位の時間変化を測定し、その非線形ダイナミクスを明らかにした。本論文はこれらの成果をまとめたもので全文7章よりなる。

第1章は序論で本論文の目的と構成について述べている。

第2章では、非線形振動子の基本方程式であるギンズブルグ・ランダウ方程式の集団の振舞について、最近のシミュレーションによる研究を概観し、本研究の動機を明らかにしている。

第3章では、高電界中の充放電によって回転する新しいニードル回転子を提案し、そのダイナミクスの測定法について述べている。

第4章では、単独回転子、2回転子及び6回転子のダイナミクスを測定した結果について述べている。まず、単独回転子の電位測定から回転状態が電極との充放電と回転子上の電荷と電界との相互作用によって持続することを明らかにしている。続いて、アーム長の異なる2個の回転子が電界強度の増大とともに2:1, 3:2, 4:3, 1:1, 等の安定な引き込み状態を示すこと、電界強度の増減に対してヒステリシスを示すこと等を明らかにした。

また、引き込み状態の間にカオスが存在することをフーリエスペクトルとサークルマップによって示している。さらに、同じアーム長を持つ6個の回転子アレイの電位の時間変化から、回転子間の位相差が間欠的に変動する位相不安定性を見いだしている。

これらは単純な物理系において初めて実証された興味ある非線形ダイナミクスであり高く評価される。

第5章では、ニードル回転子のアームと軸を離散化し、強電界中でのニードルアームと電極との放電のしきい値を仮定して回転上の電荷分布の回転角依存性を導出し、それをを用いて回転子の運動と電位変化を再現することに成功した。また、2個の回転子の引き込み状態、6個の回転子の回転状態に関しても、定性的に実験結果を再現し、回転子系の非線形ダイナミクスをほぼ正しく把握したことは評価できる。

第6章では、回転子間の相互作用が回転子の回転による流体の効果ではなく、また、放電による電界の変化によるものでもないことを示すデータを示し、回転子間の相互作用が回転子上の電荷のクーロン相互作用であることを実験的に確認している。

第7章は結論である。

以上、要するに、本論文は強電界中の充放電によって電荷分布を生じ、回転の持続と相互作用を可能にするニードル回転子を考察し、詳細な測定を数値シミュレーションによってその集団の非線形ダイナミクスに関する多くの新しい知見を得たもので、情報物理学の発展に寄与するところが少なくない。

よって、本論文は博上(情報科学)の学位論文として合格と認める。