

氏 名	くろ だ まさ はる 黒 田 雅 治
学位の種類	博 士 (工 学)
学位記番号	論 工 博 第 3755 号
学位授与の日付	平 成 15 年 9 月 24 日
学位授与の要件	学 位 規 則 第 4 条 第 2 項 該 当
学位論文題目	衝突に起因する非線形性を有する機械振動系におけるカオスの生成消滅 と時空パターン形成に関する研究

論文調査委員 (主 査) 教 授 川 原 琢 治 教 授 永 田 雅 人 教 授 松 久 寛

論 文 内 容 の 要 旨

本論文は、衝突を伴う機械振動系におけるカオス現象を数値シミュレーションおよび実験によって考察した結果をまとめたものであり、7章から構成されている。第1章は序論であり、前半の第2章、第3章には1自由度強制振動系での分岐構造の数値シミュレーションによる解析結果が述べられている。後半の第4章から第6章には多自由度系でのカオスにおける空間パターンの形成の例として、多数の弾性棒（ロッド群）の流力弾性振動の挙動を実験的に観測した結果が示されている。第7章は結論に当てられている。

序論では、本論文で取り上げる1自由度強制振動系および多自由度系における非線形現象に関する背景が述べられている。

第2章では、かみ合い誤差を有する歯車の円周方向振動を記述する1自由度区分線形強制振動方程式について高分数調波振動の分岐現象とカオスの生成・消滅過程を数値シミュレーションによって調べた結果が述べられている。歯車の1次共振点以下の場合について、周期解から1バンド・カオスアトラクターへの分岐構造を詳細に検討し、カオスアトラクターがヒステリシス分岐を起こして位相平面上で全く異なる位置にある周期アトラクターに遷移して消滅することを明らかにしている。また、不変曲線の間にヘテロクリニック点が発生すると内部カタストロフィによりカオスアトラクターのサイズが急激に拡大すること、 n 周期解から周期倍分岐を経て1バンド・カオスアトラクターに移行する過程が2種存在することなどを示している。

第3章では、1次共振点以上における周期解と内部カタストロフィーとの関係について考察している。分岐図上で「窓」として現れる周期解は、解曲線においては連続した1つの族をなし、解曲線における分岐の回数によって2種類に分類できること、カオスアトラクター内部での内部カタストロフィのみならず n バンド・カオスアトラクターから1バンド・カオスアトラクターに遷移する過程においてもヘテロクリニック点の存在が不可欠であることを示している。また、その遷移過程における不安定不動点の役割を論じている。

本論文では、取り扱っている方程式の非線形項が区分線形であり厳密解が得られることを分岐現象の解析に利用し、正・逆不安定不動点、ヘテロクリニック点および不変曲線とカオス発生との関係を詳細に検討している。この結果は同様な遷移過程が期待されるが厳密解が未知の他の1自由度非線形強制振動系におけるカオス現象の解釈にも有効な指針を与えるものである。

第4章では、風洞内に配置され一様な横風を受ける90本鉄ロッド群の実験において発生する局所的パターンと全体的パターンの風速の増大に伴う変化を観測している。個々のロッドは局所的には瞬間的静止状態、直線の運動、楕円軌道運動を示すこと、およびロッド群の空間的振動パターンの観察を行なっている。また、ロッド振幅の風速による変化を確率密度関数によって表すことや全体的な時空カオスの振動の複雑さを記述する定量的指標として空間的エントロピーを導入することによって観測結果を評価している。

第5章では、時空パターンが階層的に形成されることを実験的に確認し、べき法則が存在することを示している。300本

(10×30)の鉄ロッド配列の実験により、低風速域でのロッドの単独運動、中風速域でのクラスター化（衝突により同位相で動くロッドの小集団の形成）、高風速域での鎖状に繋がったクラスターの波動運動という階層的な時空パターン形成過程を観測している。ロッドの衝突頻度と風速との間にフラクタル次元0.25のべき乗則で表されるスケール則が存在することを加速度計測による時系列データ解析によって導いている。

第6章においては、300本および1,000本のポリカーボネイト製ロッド群について、配列の行列数、ロッド間隔を変えて風速変化による大域的パターンを観測し、配列全体の時空パターンとして数種類の大域的な非線形モードが存在すること、ロッド配列の形状には対称モードと非対称モードがあり、両者間を時間的に遷移することを見出している。さらに、風速の上昇に伴って空間波長が長くなる波動運動が形成され一種の自己組織化現象が生じることを確認している。

以上第4章から第6章の結果は、衝突を含む複雑な力学系のカオスの挙動の中に時間空間的なパターンが形成されることを指摘している。複雑な力学系の各要素間の相互作用による自己組織化の現象を風洞中に置かれたロッド群という具体的な装置を用いて実験的に観測したものであり、流力弾性の挙動が関与する類似の状況（例えば、熱交換器から、稲などの作物と風の関係あるいは生物の気管における繊毛運動などに至るまで）における現象の考察に対しても有益な示唆を与えるものと考えられる。

第7章には、本論文で考察した結果の概要が結論として述べられている。

論 文 審 査 の 結 果 の 要 旨

本論文は、衝突を伴う機械振動系におけるカオス現象を数値シミュレーションおよび実験によって考察し、1自由度系でのカオスの分岐構造および多自由度系でのカオスにおける時間・空間パターンの形成を取り扱ったものであり、得られた主な成果は以下の通りである。

1. かみ合い誤差を有する歯車の円周方向振動を記述する1自由度強制振動方程式における高分数調波振動の分岐現象とカオスの生成・消滅を数値シミュレーションによって調べ、歯車の1次共振点以下における周期解から1バンド・カオスアトラクターへの分岐構造を詳細に検討している。
2. 1次共振点以上における周期解と内部カストロフィーの関係、内部カストロフィーおよびカオスアトラクター間の遷移におけるヘテロクリニック点、不安定不動点の役割を厳密解と対比して明らかにしている。
3. 多自由度系の問題として、風洞内に配置された多数のロッド群における流力弾性挙動を調べる実験を行い、局所的複雑挙動から大域的時空構造の形成過程を観測している。90本鉄ロッド配列による基礎実験により時空カオスの特徴を示すパターンの出現を確認するとともに、確率密度関数や空間的エントロピーなどを導入してカオスの定量的評価を行なっている。
4. 300本鉄ロッド配列実験によって風速増加に伴って生じる階層的な時空パターンの形成過程を観測し、ロッドの衝突頻度と風速との間にフラクタル次元0.25のべき乗スケール則が成立することを加速度の時系列データ解析により示している。
5. ポリカーボネイト・ロッド群（300本、1,000本）の実験により、大域的時空パターンとして数種類の非線形モードが存在すること、対称・非対称モード間を遷移する動的パターンが形成されることを明らかにしている。さらに、風速増加に伴ってより長波長の波動運動が形成され、階層的な自己組織化現象が存在し得ることを示している。

以上、要するに本論文は、衝突による非線形性を有する機械振動系におけるカオス現象を論じたものであり、複雑に相互作用する多自由度機械系のカオスにおいて階層的時空パターン形成および自己組織化が可能であることを実験的に指摘しており、学術上、實際上寄与するところが少なくない。よって本論文は博士（工学）の学位論文として価値あるものと認める。また、平成15年4月17日、論文内容とそれに関連した事項について試問を行った結果、合格と認めた。