

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成25年 5月31日現在

機関番号：34315

研究種目：基盤研究（C）

研究期間：2010～2012

課題番号：22500214

研究課題名（和文） カオスガスタービンの力学系と応用に関する研究

研究課題名（英文） Study on chaotic gas turbine and its applications

研究代表者

宮野 尚哉 (MIYANO TAKAYA)

立命館大学・理工学部・教授

研究者番号：10312480

研究成果の概要（和文）：不規則に回転方向を反転するカオスガスタービンを設計し、実際に製作した。このタービンの回転運動を支配する運動方程式は、角速度を表す変数を共有しつつ多数のローレンツ方程式が星形に結合したネットワークとして表現され、乱流状態にある高レイリー数の熱対流の速度場変動をモデル化する。また、この運動方程式が生み出すカオス信号を疑似乱数として利用することによって、通信文の新しい暗号化システムが実現可能である。

研究成果の概要（英文）：We have designed and manufactured a chaotic gas turbine that whimsically switches its sense of rotation, clockwise and counterclockwise. The equations of motion governing the rotational motion of our turbine is found to be represented by a star network of many Lorenz subsystems sharing the variable representing the angular velocity of the rotor as the central node. Our equations of motion are capable of modeling turbulent thermal convection with high Rayleigh numbers and are applicable to cryptosystems when using the chaotic signal generated by the equations as pseudo random numbers.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2010年度	1,300,000	390,000	1,690,000
2011年度	1,000,000	300,000	1,300,000
2012年度	700,000	210,000	910,000
年度			
年度			
総計	3,000,000	900,000	3,900,000

研究分野：情報学

科研費の分科・細目：情報学・感性情報学・ソフトコンピューティング

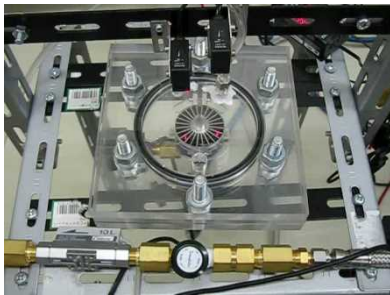
キーワード：カオス

1. 研究開始当初の背景

(1) 2つの境界面に挟まれた流体を下から加熱すると、境界面間の温度差の増大とともに、流体は静止状態から、Rayleigh-Bénard 対流を経て、乱流状態へと遷移する。Lorenz は、Boussinesq 方程式の振動解析に基づいて、流体の運動状態の複雑化を3変数の連立非線形常微分方程式でモデル化し、気象現象の長期予測不可能性がカオスに起因する可能性を論じた。カオス状態が簡単な非線形方程式から生成されることは驚異的な事実であり、Lorenz の研究は、カオスの再発見の名の下に現在に至るまでに高く評価されている。Lorenz 方程式が実現するカオスの回転運動を水車の回転運動として視覚化できることを発見したのが Malkus である。カオス水車の運動方程式は Lorenz 方程式と等価である。

(2) 研究代表者らは、カオス水車を、複雑な運動を生成するアクチュエータであると見なし、この機械を様々な応用で使用しやすいようにガスタービンとして実現することを着想し、本研究に申請する以前の2年間、カオスガスタービンの構造と運動方程式を探索してきた。その結果、本研究に着手する以前においては事実かどうか未だ明らかではなかったが、カオスガスタービンの運動方程式は、カオス水車とは異なり、 $2N+1$ 次元に拡張された Lorenz 方程式($N \rightarrow \infty$)と等価であり、3次元よりもはるかに高次元のカオス運動を実現する可能性のあることを見出していた。そして、この暫定的な運動方程式に基づいて、ガスタービンを実際に設計し、試作した(図1)。

図1 カオスガスタービンの試作例



(3) このガスタービンは、直径4cmの金属製ロータがアクリル板に挟まれた構造をもち、吸入口から流入する空気流がタービン翼に作用する抗力(aerodynamic drag)によって駆動される。ロータの回転運動は、一見、カオス的ではあるが、当時の測定システムでは一定時間ごとに角速度を測定できないため、運動方程式の数値解との比較が困難であり、この運動方程式が正しいかどうか評価できなかった。また、申請者らの理論的解析が正しいとしても、カオスガスタービンの工学的

応用方法も解明すべき課題として残されていた。

2. 研究の目的

(1) このような背景のもと、本研究では、Rayleigh-Bénard 対流をロータの回転運動としてモデル化するカオスガスタービンの力学系を理論と実験の両面から明らかにし、その工学的応用方法を開発することを目的とする。

(2) 工学的応用として、①カオス同期に基づく秘話通信への応用、および、②発電への応用について研究を行う。

3. 研究の方法

(1) 力学系の研究においては、Rayleigh 数と Prandtl 数を無次元分岐パラメータとする角速度の分岐構造、および、角速度と流入空気圧に関する各次数のフーリエ係数に関する位相ポートレート観点から、実際の角速度がどのような時間的変動を示すか予測し、現在保有している角速度計測システムを改良して一定時間間隔で角速度の変動を観測し、観測結果と理論的予測とを比較することにより、カオスガスタービンの力学系を解明する。次に、観測された角速度の時間変動の統計的性質を、 10^6 を超える高 Rayleigh 数の乱流熱対流において実際に観測された速度場の時間変動に関する統計的性質の文献値(K. R. Sreenivasan, A. Bershadskii, J. J. Niemela, Physical Review E, vol. 65, 056306, 2001)と比較し、乱流熱対流モデルとしての可能性を評価する。

(2) カオスタービンの運動方程式と Lorenz 方程式との理論的関係を明らかにするために、カオスガスタービンの運動方程式を無次元化する。Sreenivasan らによる先行研究(K. R. Sreenivasan, A. Bershadskii, J. J. Niemela, Physical Review E, vol. 65, 056306, 2001)では、乱流熱対流の速度場の不規則な反転は確率共鳴過程によって生じると予想されている。カオスタービンの無次元化方程式が、確率共鳴過程としてのタービンロータの反転を生み出すことができるかどうか理論的に明らかにする。

(3) カオスタービンの無次元化運動方程式に従う2個の非線形振動子がカオス同期可能かどうか、理論と数値実験の両面から調べる。工学的応用として、Cuomo と Oppenheim によって発見された結合振動子系のカオス同期に基づくカオス暗号化法(K. M. Cuomo, A. V. Oppenheim, Physical Review Letters,

vol.71, 65-68, 1993)、即ち、chaotic masking による秘話通信法が直接に本研究に適用可能かどうか検討する。これと並行して、カオスガスタービンの運動エネルギーの電力変換への応用方法を探索する。

4. 研究成果

(1) カオスガスタービンの運動方程式の妥当性を検証した。本研究に着手する以前の予備研究では、非対称位置に設置された2つの光電センサを用いてカオスガスタービンのロータの回転を計測していた。しかしながら、この計測方法では、一定の時間間隔で角速度を観測できなかった。そのため、運動時方程式の数値解と実験データとの直接の比較が困難であった。そこで、ロータの回転運動を動画像として記録し、動画像から 33msec ごとに等時間間隔で角速度変動を計算する計測システムを開発した。改良した計測方法で観測した角速度データを図 2 上図に、また、図 2 下図に対応する数値計算結果を示す。両者の一致は良い。

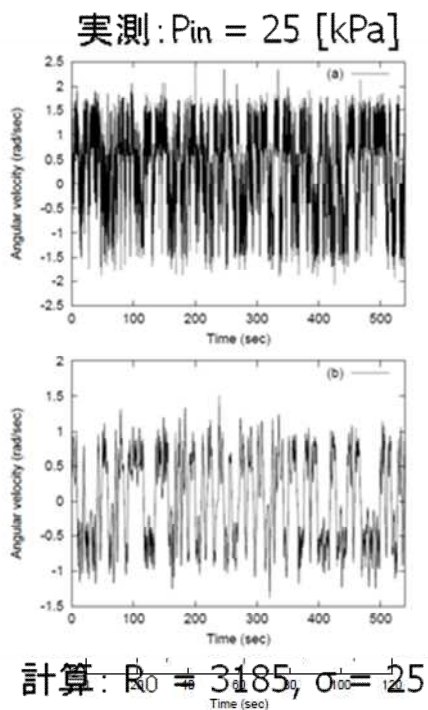


図 2 上図：観測された角速度の時間変動，吸気圧 = 25[kPa]，下図：運動方程式に基づく数値計算結果 (5. 発表論文等 [雑誌論文] の文献①より引用)

(2) 図 3 は、カオスガスタービンのロータの角速度の時間依存性に関するパワースペクトルと確率密度関数である。実験結果と対応する計算結果の間で良い一致が得られた。

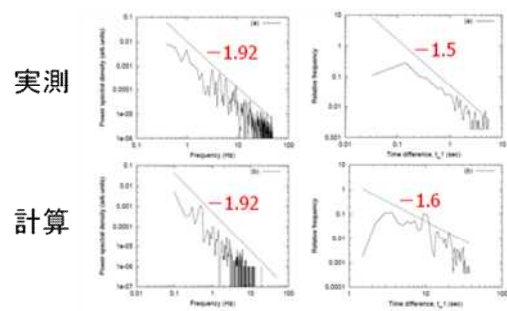


図 3 左上図：観測された角速度のパワースペクトル，左下図：角速度のパワースペクトルの数値計算結果，右上図：観測された角速度の確率密度関数，右下図：角速度の確率密度関数の数値計算結果 (5. 発表論文等 [雑誌論文] の文献①より引用)

(3) 運動方程式の数値解を対応する観測結果と比較し、本質的な一致を確認した。その結果、ガスタービン方程式はローレンツ方程式を $2N+1$ 次元の多次元に拡張した力学系に等価であるという当初の考え方の正しさが実証された。図 3 に示した結果は、Sreenivasanらが乱流熱対流の速度場の観測結果について求めた統計的性質とよく一致する。したがって、カオスガスタービンの運動方程式は、乱流熱対流の cessation model に対応すると考えられる。こうして、タービンロータの回転運動は、流体力学における無次元パラメータである Rayleigh 数、Prandtl 数、および、Reynolds 数によって特徴付けられる。これらは流体力学の分野における先行研究では報告されていない新しい知見である。

(4) カオスガスタービンの運動方程式の無次元化表現は、 N 個のローレンツ系が流体の速度場に対応する角速度変数を共有しながら星型ネットワークを構成することが明らかとなった (図 4)。これは、非線形動力学に関する先行研究では報告されていない新しい知見であり、この動力学モデルを拡張 Lorenz 方程式 (augmented Lorenz equations) と呼ぶ。

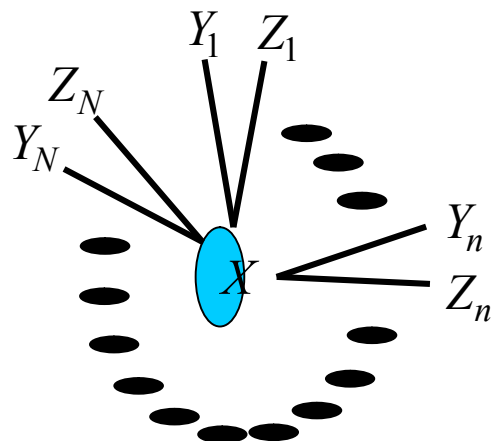


図4 星形ネットワークとしての拡張 Lorenz 方程式

(5) 拡張 Lorenz 方程式が生成する無次元速度場の時間変動のパワースペクトルを、この動力学モデルの規模を表す次元 N の関数として求めたものを図5に示す。

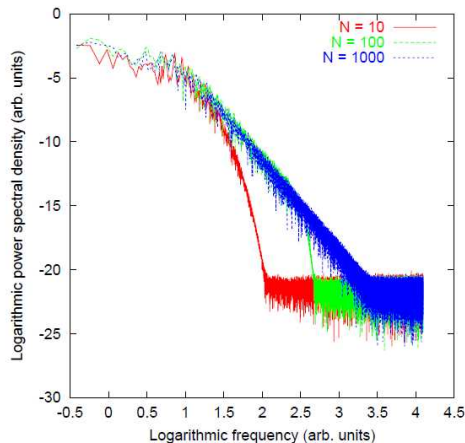


図5 拡張 Lorenz 方程式が生成する無次元速度場のパワースペクトル ($N=10, 100, 1000$) (5. 発表論文等〔雑誌論文〕の文献①より引用)

N の増加とともにパワースペクトル密度の高周波数成分が増加する。この事実に基づき、Kapitsa と Landau による強制振動子モデルを拡張 Lorenz 方程式に応用することによって、タービンロータの不規則な反転運動は、高周波数変動を摂動項とする確率共鳴過程に対応することを理論的に明らかにした。これによって、Sreenivan らの予想である確率共鳴過程としての乱流熱対流の速度場反転モデルを支持する知見を得た。

(6) 拡張 Lorenz 方程式は無次元動力学モデルであるので、これを一般の動力学モデルとみなすと、カオスガスタービンの物理機構の束縛から解放され、拡張 Lorenz モデルの幅広い応用への展開が開ける。本研究では、拡張 Lorenz 方程式のカオス暗号への応用について検討を行った。拡張 Lorenz 方程式が生成するカオス信号を疑似乱数として利用する。Cuomo-Oppenheim 法に基づくカオスマスキングへの応用可能性を明らかにするために、拡張 Lorenz 方程式に従う非線形振動子の直接結合系のカオス同期について、Lyapunov 関数に基づく理論的解析を行った。その結果、結合振動子系の同期多様体は漸近安定であり、カオス同期すること、および、振動子間のパラメータミスマッチの大きさ

に比例して同期誤差が増大することが明らかとなった。これらの結果も従来にない知見である。詳細は〔雑誌論文〕の文献③で述べられている。

(7) 拡張 Lorenz 方程式はカオスマスキングに応用可能であることが分かったが、暗号鍵空間の規模は暗号セキュリティの観点からは不十分であり、拡張 Lorenz 方程式によるカオスマスキングには実用性がないことが明らかとなった。また、カオス信号に微弱な通信文を付加した場合、結合振動子系の同期誤差は通信文の周波数に強く依存することも見出された。暗号鍵空間の拡大を可能にする重要な事実として、拡張 Lorenz 方程式を特徴付ける整数パラメータ行列を実数に一般化しても拡張 Lorenz 方程式からカオス信号が生成されることを発見した。この事実は、本研究開始直後に発見され、この発見に基づいて拡大された暗号鍵空間を有するカオスマスキング法に関する特許出願を行った（〔産業財産権〕参照）。

(8) しかしながら、拡張 Lorenz 方程式によるカオスマスキングは、通信ノイズに対して脆弱であることが Lyapunov 関数に基づく理論的解析によって明らかとなったため、現時点では、拡張 Lorenz 方程式に基づくカオス同期には依存しない新しいカオス暗号化法の研究を行っている。この暗号化は従来には例のない方法であり、第三者による暗号鍵の推定は技術的には非常に困難であると思われる。この研究成果は、将来、学術論文として公表する予定である。また、特許出願を検討中である。

(9) カオスガスタービンの発電への応用については、本研究の計画当初の予想に反して、発電効率の観点から実用的ではないことが明らかとなった。これは、カオスガスタービンが揚力 (aerodynamic lift) ではなく、抗力 (aerodynamic drag) によって駆動されることに起因する。しかしながら、拡張 Lorenz 方程式と乱流熱対流の関連を明らかにした研究に触発されて、現時点では、2次元乱流の自己組織化過程を利用した風力発電の可能性を検討する研究へと進展している。このような発電技術は前例のないものであり、今後、研究成果を公表する予定である。

5. 主な発表論文等 〔雑誌論文〕(計3件)

- ① K. Yoshimoto, K. Cho, Y. Morita, T. Miyano, Synchronization of Coupled Augmented Lorenz Oscillators with Parameter Mismatch, Nonlinear Theory

and Its Applications, IEICE, 査読あり,
掲載決定 (印刷中)
<http://www.nolta.ieice.org/>

- ② K. Cho, T. Miyano, T. Toriyama, Chaotic gas turbine subject to augmented Lorenz equations, Physical Review E, 査読あり, Vol. 86, Issue 3, 2012, pp. 036308-1-036308-12
DOI: 10.1103/PhysRevE.86.036308
- ③ T. Miyano, K. Cho, Y. Okada, J. Tatsutani, T. Toriyama, Augmented Lorenz Equations as Physical Model for Chaotic Gas Turbine, Procedia IUTAM, 査読あり, Vol. 5, 2012, pp. 99-107
DOI:10.1016/j.piutam.2012.06.013

[学会発表] (計 15 件)

- ① 発表者名: K. Yoshimoto, K. Cho, Y. Morita, T. Miyano
発表題目: Bifurcation Structure of Augmented Lorenz Equations and Synchronizability of Coupled Augmented Lorenz Oscillators
学会名: 2012 International Symposium on Nonlinear Theory and its Applications
発表年月日: 2012年10月26日
発表場所: Palma, Majorca (Spain)
- ② 発表者名: T. Miyano, K. Cho, Y. Okada, J. Tatsutani, T. Toriyama
発表題目: Augmented Lorenz Equations as Physical Model for Chaotic Gas Turbine
学会名: 2011 International Union of Theoretical and Applied Mechanics Symposium on 50 Years of Chaos: Theoretical and Applied
発表年月日: 2011年11月29日
発表場所: 京都大学 (京都府)
- ③ 発表者名: K. Cho, J. Tatsutani, T. Miyano
発表題目: Chaotic Synchronization of Augmented Lorenz Systems
学会名: 2011 International Symposium on Nonlinear Theory and its Applications

発表年月日: 2011年9月6日
発表場所: 神戸市産業振興センター (兵庫県)

- ④ 発表者名: K. Cho, Y. Okada, J. Tatsutani, T. Toriyama, T. Miyano
発表題目: Chaotic Gas Turbine Simulating the Motion of Convective Heat Flow
学会名: 2011 International Symposium on Nonlinear Theory and its Applications
発表年月日: 2011年9月5日
発表場所: 神戸市産業振興センター (兵庫県)
- その他に電子情報通信学会非線形問題研究会にて5件、日本物理学会にて3件、電子情報通信学会にて2件、理論応用力学講演会にて1件の学会発表を行った。

研究業績の詳細は、

<http://www.ritsumei.ac.jp/se/~tmiyano/my13ppr.html>
に公表されている。

[産業財産権]

○出願状況 (計 1 件)

名称: 秘話通信方法、秘話通信システム、及び通信機

発明者: 宮野尚哉, 長憲一郎, 吉田雄輔

権利者: 学校法人立命館

種類: 特許

番号: 特願 2010-174170

出願年月日: 2010年8月3日

国内外の別: 国内

[その他]

カオスガスタービンの動画像を閲覧可能な URL

<http://www.ritsumei.ac.jp/se/~tmiyano/waterwheel09.html>

上記 URL の英語版

http://www.ritsumei.ac.jp/se/~tmiyano/waterwheel09_english.html

カオスガスタービンの設計図を閲覧可能な URL

http://www.ritsumei.ac.jp/se/~tmiyano/detailed_drawings.pdf

上記 URL の英語版

http://www.ritsumei.ac.jp/se/~tmiyano/detailed_drawings.pdf

6. 研究組織

(1) 研究代表者

宮野 尚哉 (MIYANO TAKAYA)

立命館大学・理工学部・教授

研究者番号：10312480

(2) 研究分担者

鳥山 寿之 (TORIYAMA TOSHIYUKI)

立命館大学・理工学部・教授

研究者番号：30227681