

研究種目：若手研究（スタートアップ）

研究期間：2007～2008

課題番号：19860018

研究課題名（和文） 機械システムにおける自己同期現象の発生メカニズム

研究課題名（英文） On the Mechanism of Self-Synchronized Phenomena in a Mechanical System

研究代表者

森 博輝 (MORI HIROKI)

埼玉大学・理工学研究科・助教

研究者番号：50451737

研究成果の概要：本研究では、電圧を印加することで振り子型および回転型の両方の運動を作り出せる自励振動子を用いた実験装置により、2個の振動子間に生じる自己同期現象の特性を明らかにした。また、実験装置に対応する系の非線形ノーマルモードを求め、実験結果と比較した結果、実験で発生した現象の特性は、等価な力学的エネルギーをもつ非線形ノーマルモードの特性とほぼ一致することが確認された。

交付額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2007年度	1,360,000	0	1,360,000
2008年度	1,180,000	354,000	1,534,000
年度			
年度			
年度			
総計	2,540,000	354,000	2,894,000

研究分野：機械振動学

科研費の分科・細目：機械工学・機械力学・制御

キーワード：自己同期現象，非線形振動，自励振動

1. 研究開始当初の背景

固有のリズムを刻みながら持続的に周期振動する複数の振動子（自励振動子）が結合されると、自動的な同調が生じて系全体が特定の振動パターンに引き込まれることがある。この現象は自己同期現象と呼ばれ、近年では多岐にわたる分野でその特性や発生メカニズムが注目されている。

機械系における研究では、Blekhman が不平衡ロータの自己同期現象を有効利用した複数のシステムを示している (I. I. Blekhman,

Synchronization in Science and Technology, ASME Press, 1988)。国内においても、基礎研究として2台のメトロノームの自己同期現象が取り扱われているほか（佐藤勇一ら，振動系の同期現象，日本機械学会論文集 C 編，2000），速度フィードバックによる同期制御を用いて振動搬送機の高効率化が可能であることが示されている（栗田裕ら，分散制御された自励振動機械の協調による振動搬送，日本機械学会論文集 C 編，2003）。生命科学分野では，生物の歩行や走行などといった効

率的な動作は CPG (Central Pattern Generator) の自己同期現象によって生成されるという説が注目されている。このように、自己同期現象を利用すれば効率的で環境の変化 (パラメータの変化) に対しても柔軟に対応できるシステムを開発できる可能性が高い。

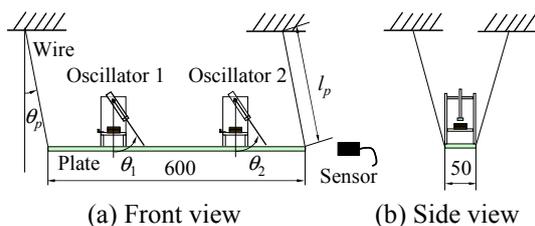
2. 研究の目的

本研究では、振り子型および回転型という 2 種類の周期的な運動形態を同一の自励振動子で作出し、そのような振動子が 2 個結合された系で生じる自己同期現象を系の非線形ノーマルモード (非線形不減衰系の周期的な運動モード) と比較する。このように、いずれの運動形態の自己同期現象についても、非線形ノーマルモードに基づく現象として包括的に捉えることで、現状では不明な点が多い現象の発生メカニズムを非線形ノーマルモードの観点から説明できるようになるとともに、系の設計時に現象の特性を予測できるようになることが期待できる。

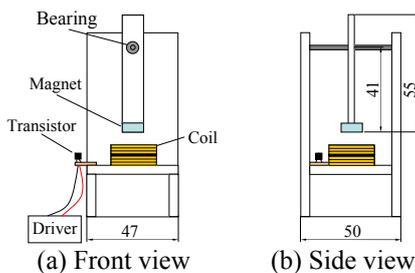
3. 研究の方法

本研究で用いた実験装置の概要を図 1 に示す。2 個の振動子 (振動子 1 および振動子 2) を固定した水平な台 (板) が 4 本のワイヤによって水平に吊るされている。図のように、ワイヤには奥行き方向の傾斜が設けられており、左右方向にのみ振動しやすい構造になっている。

図 2 は振動子の概要を示したものである。振動子は軽量の棒と永久磁石で構成されており、振り子の先端が最下点を通過する際に駆動装置の電磁石から力を作用させて駆動する。駆動装置は 2 個のコイル (検出コイル



(a) Front view (b) Side view
Fig. 1 Experimental apparatus



(a) Front view (b) Side view
Fig. 2 Oscillator

および駆動コイル) およびトランジスタで構成されている。振動子先端の磁石が検出コイル上を通過する際に検出コイルに誘起される電流が増幅されて駆動コイルに流れる。これにより、振動子を駆動するための磁界が形成される仕組みになっている。増幅に用いる電圧を調整することで、振動子に振り子運動と回転運動の両方を作り出すことができる。なお、振動子 1 および振動子 2 の線形固有振動数は 2.545 Hz および 2.558 Hz であった。

台および両振動子の変位の測定には、レーザー変位計および高速度カメラを用いた。レーザー変位計からの出力を FFT アナライザに取り込むことにより、リアルタイムで周波数解析を行い、その結果から同期の有無を判断した。

4. 研究成果

4. 1. 振動子の特性

図 3 に各振動子を単体で駆動した場合の電圧と振動数 (回転数) の関係を示す。印は振動子 1、○は振動子 2 の測定結果である。図のように、印加電圧が高くなると、振動子の運動は振り子運動から回転運動へと変化する。また、振動子には個体差があるため、同一の電圧を印加した場合でも両振動子の振動数は異なっている。

4. 2. 実験結果

両振動子に同一の電圧を印加しながら同期の有無を調べたところ、振り子運動時に 3 パターンの自己同期現象が、回転運動時に 1 パターンの自己同期現象が発生した。それぞれの自己同期時における振動波形を図 4 (振り子運動) および図 5 (回転運動) に示す。図 4 では、振り子運動時の 3 種類の自己同期パターンをパターン 1, パターン 2 およびパターン 3 と区別している。図中の細実線、細点線および太線はそれぞれ振動子 1 の角変位 θ_1 , 振動子 2 の角変位 θ_2 , および台の角変位 θ_p を表す。また、 $f_p (= \sqrt{g/l_p} / 2\pi)$ は台の線形固有振動数、 f_s は自己同期時の振動数を示している。各図に記された電圧値は、両振動

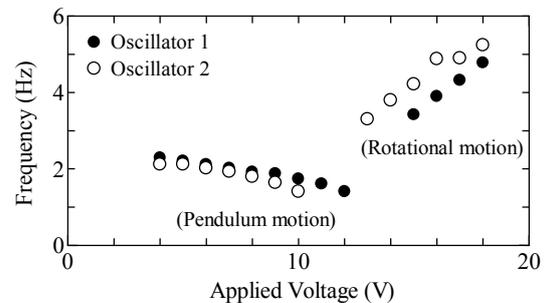
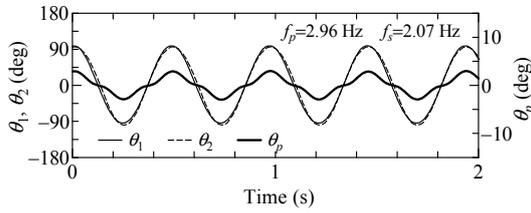


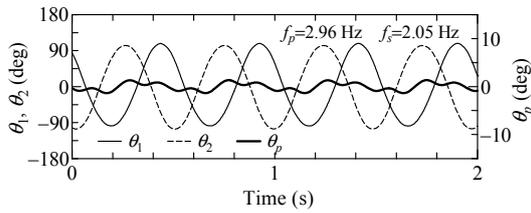
Fig. 3 Frequency of oscillators

子への印加電圧であり、両振動子の印加電圧は同一の値に設定している。

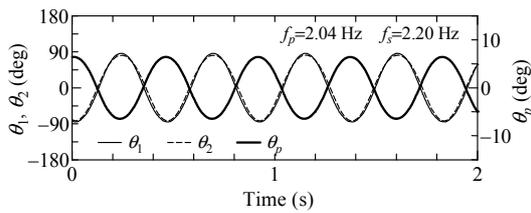
図 4(a)に示したパターン 1 では、両振動子および台がすべて同位相になっている。図 4(b)のパターン 2 では、両振動子は逆位相に近く、台の振幅は小さい。図 4(c)のパターン 3 では振動子間と同位相であり、振動子と台とは逆位相になっている。これらの位相関係は台を質点振り子、両振動子を剛体振り子とした系における線形の 1 次、2 次および 3 次の固有モードの位相関係に対応する。また、図 5 の回転運動時の波形では、両振動子が逆位相の関係であり、台はほとんど振動していない。図 4(b)および図 5 における台の振幅が小さいのは、両振動子が逆位相の関係にあるために、振動子から台に作用する合力が小さくなるためであると考えられる。



(a) Pattern 1



(b) Pattern 2



(c) Pattern 3

Fig. 4 Synchronized pattern (Pendulum, 7V)

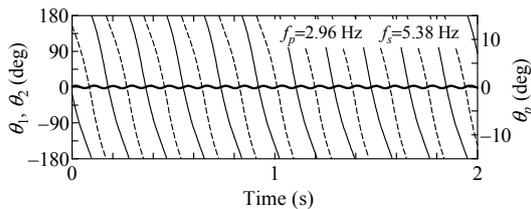


Fig. 5 Synchronized pattern (Rotation, 18V)

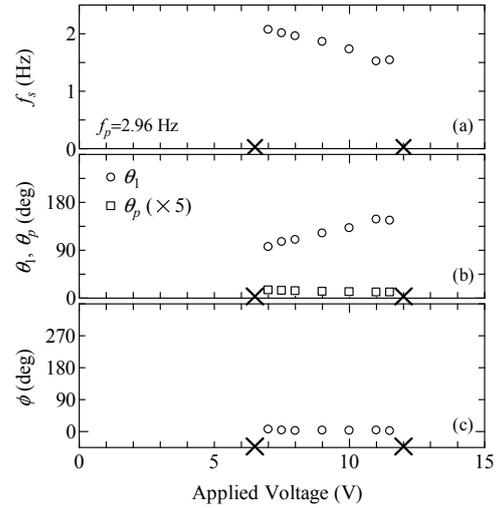


Fig. 6(a) Experimental results (Pattern 1)

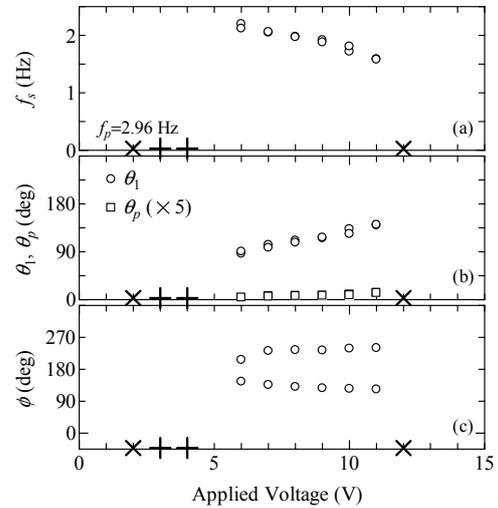


Fig. 6(b) Experimental results (Pattern 2)

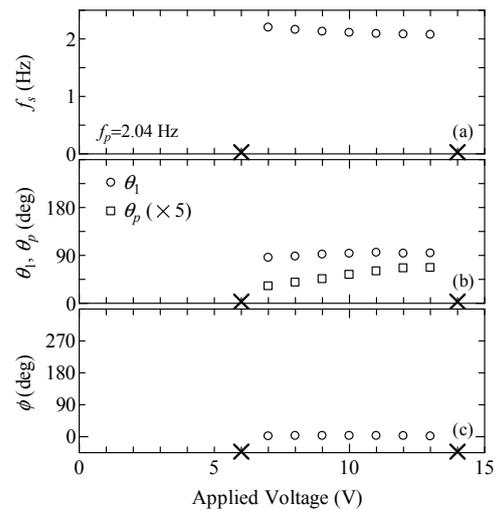


Fig. 6(c) Experimental results (Pattern 3)

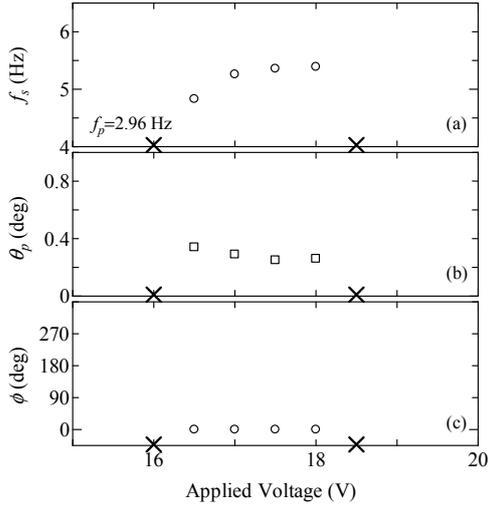


Fig. 7 Experimental results (Rotation)

両振動子の印加電圧を同時に変化させたときに発生した自己同期現象の(a) 同期振動数 f_s , (b) 振動子 1 および台の振幅 θ_1, θ_p , (c) 振動子 1 と振動子 2 の位相差 ϕ を、同期パターンごとに図 6 (振り子運動) および図 7 (回転運動) に示す. なお, 図 6 の実験条件における振動子 2 の振幅は, 振動子 1 とほぼ同じであった. また, 図の横軸に付された \times 印は, その電圧値において非同期振動が発生したことを示しており, $+$ 印は両振動子の平均振動数が一致する概周期振動が発生したことを示している. 図のように, 各同期パターンとも比較的広い電圧の範囲で発生することが確認された. 図 6(b) に示すように, 逆位相の同期パターンであるパターン 2 においては, 振動子間の位相差 ϕ が 180 deg よりも大きい場合と小さい場合の両方が見られた.

4. 3. 非線形ノーマルモードとの比較

上記の実験結果を系の非線形ノーマルモードと比較する. 台を質量 m_p および長さ l_p の質点振り子とし, 振動子 $i (=1, 2)$ を質量 m , 慣性モーメント J_i および腕の長さ l_i の剛体振り子として, 減衰および駆動力を無視した系の運動方程式は以下ようになる.

$$J_i \ddot{\theta}_i + mgl_i \sin \theta_i + ml_p l_i \{ \ddot{\theta}_p \cos(\theta_i - \theta_p) + \dot{\theta}_p^2 \sin(\theta_i - \theta_p) \} = 0 \quad (i=1, 2) \quad (1)$$

$$(m_p + 2m) l_p^2 \ddot{\theta}_p + (m_p + 2m) gl_p \sin \theta_p + \sum_{i=1}^2 ml_p l_i \{ \ddot{\theta}_i \cos(\theta_i - \theta_p) - \dot{\theta}_i^2 \sin(\theta_i - \theta_p) \} = 0 \quad (2)$$

この系の周期解を非線形ノーマルモードとみなし, これをシューティング法で求める. 計算にあたり, 以下のパラメータを導入する.

$$\left. \begin{aligned} \omega_i &= 2\pi f_i = \sqrt{mgl_i / J_i}, \\ \omega_p &= 2\pi f_p = \sqrt{g / l_p}, \quad \gamma = m / m_p \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

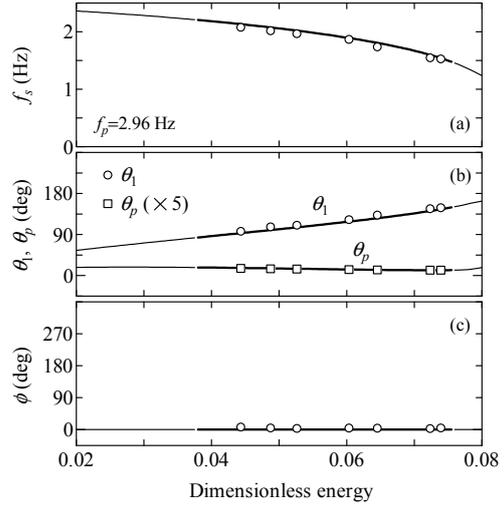


Fig. 8(a) Nonlinear normal mode (Pattern 1)

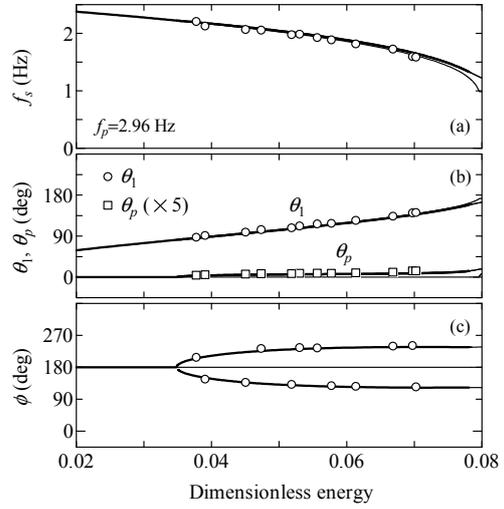


Fig. 8(b) Nonlinear normal mode (Pattern 2)

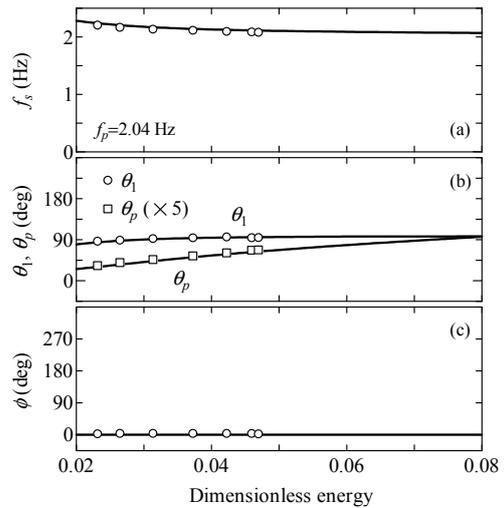


Fig. 8(c) Nonlinear normal mode (Pattern 3)

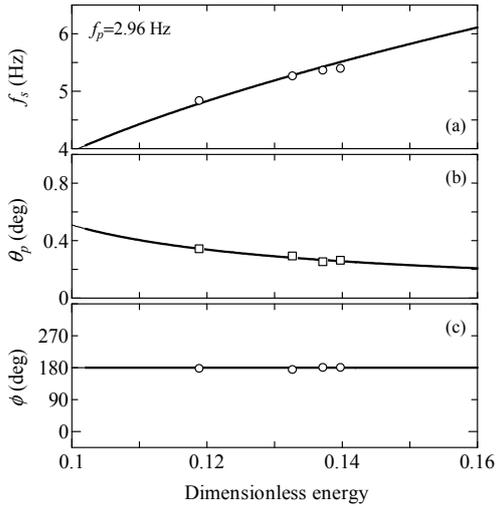


Fig. 9 Nonlinear normal mode (Rotation)

計算では、実験装置を元にパラメータを $f_1 = 2.545$ Hz, $f_2 = 2.558$ Hz, $l_1 = l_2 = 27$ mm, $\gamma = 0.021$ と設定した。

図6および図7の自己同期現象に関する実験結果の横軸を1周期の力学的エネルギーの平均値に変更し、非線形ノーマルモードの一部と比較したものが、図8および図9である。図中の太線は安定な非線形ノーマルモードを示す。細線は不安定な非線形ノーマルモードを示す。これらの図より、実験で発生した自己同期現象には、特性が近い安定な非線形ノーマルモードが存在することがわかる。とくに、図8(b)では、エネルギー(横軸)がある程度大きな領域において、位相差 ϕ が 180 deg よりも大きい実験結果と小さい実験結果とが得られているが、いずれについても $\phi = 180$ deg の直線についてほぼ線対称な安定非線形ノーマルモードと対応していることがわかる。

最後に、振り子運動の自己同期現象について、振動子1の印加電圧を固定して振動子2の印加電圧のみを変化させた場合の実験結果と非線形ノーマルモードの計算結果を図10に示す。図中の e_1 は振動子1の印加電圧を示しており、振動子2の印加電圧については、パターン1(図10(a))では $e_2 = 4V \sim 10V$ 、パターン2(図10(b))では $e_2 = 3V \sim 10V$ 、パターン3(図10(c))では $e_2 = 2V \sim 13V$ の範囲で変化させた。なお、非線形ノーマルモードには印加電圧の影響は現れないため、図10の計算結果は図8と同じものを示している。

図10より、両振動子の印加電圧が異なる場合の自己同期現象の特性も、非線形ノーマルモードの特性に近いことがわかる。なお、図10(b)では $\phi = 180$ deg から上下に分かれた非線形ノーマルモードのうち、上側に対応する実験結果のみ得られているが、初期状態の与え方によっては、下側に対応する実験結果が得られる可能性もあると思われる。

以上の結果より、振り子運動時および回転

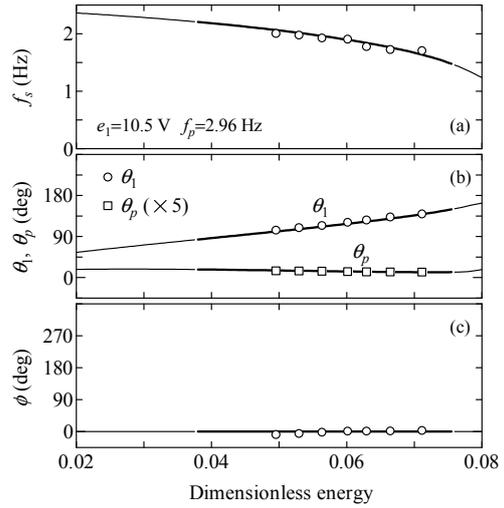


Fig. 10(a) Nonlinear normal mode (Pattern 1)

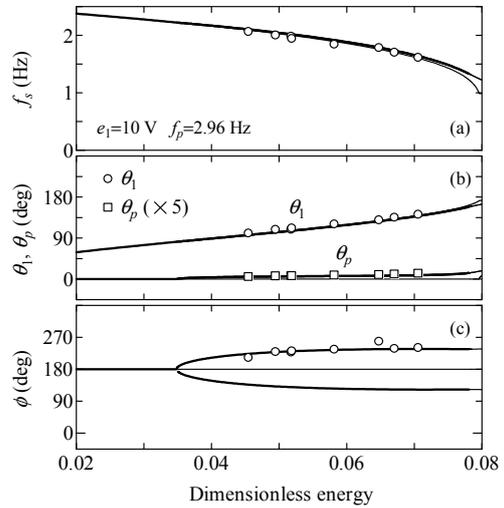


Fig. 10(b) Nonlinear normal mode (Pattern 2)

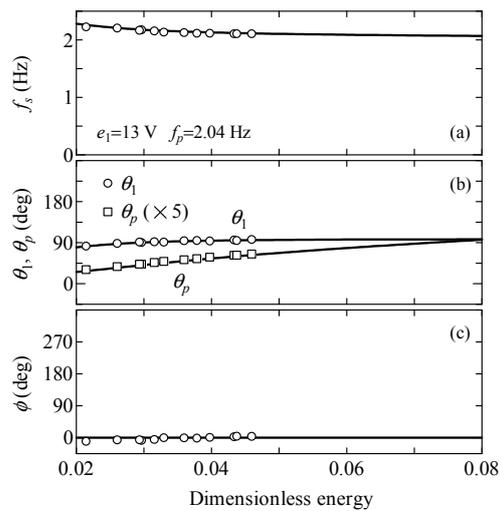


Fig. 10(c) Nonlinear normal mode (Pattern 3)

運動時の自己同期現象とともに、自己同期発生時の基本的な特性は系の非線形ノーマルモードによって説明できることがわかった。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計4件)

- (1) Yasuhiro BONKOBARA, Hiroki MORI, Takahiro KONDOU, Takashi AYABE, Self-Synchronized Phenomena Generated in Rotor-Type Oscillators: On the Influence of Coupling Condition between Oscillators, *Journal of System Design and Dynamics*, Vol.2, (2008), pp. 861-873. (査読有)
- (2) Hiroki MORI, Yasuhiro BONKOBARA, Takahiro KONDOU, Takashi AYABE, Self-Synchronized Phenomena Generated in Rotor-Type Oscillators: Investigation Using Nonlinear Normal Modes, *Journal of System Design and Dynamics*, Vol.2, (2008), pp. 874-885. (査読有)
- (3) 長嶺拓夫, 佐藤勇一, 森博輝, 複数振動子と支持系の連成振動, 日本機械学会論文集 (C編), 74巻, 739号, (2008), pp. 554-561. (査読有)
- (4) Hiroki MORI, Yasuhiro BONKOBARA, Takahiro KONDOU, On a Relationship between Self-Synchronized Phenomena and Nonlinear Normal Modes of Rotor-Type Oscillators, *Proceedings of the 12th Asia-Pacific Vibration Conference*, No.124, (2007), pp. 1-12. (査読有)

〔学会発表〕(計7件)

- (1) 茂木知之, 長嶺拓夫, 森博輝, 佐藤勇一, 同期現象による吊橋状構造物の振動, 日本機械学会第7回評価・診断に関するシンポジウム講演会, 2008年11月26日, 新都心ビジネス交流プラザ(さいたま市).
- (2) 長嶺拓夫, 森博輝, 茂木知之, 佐藤勇一, 複数振動子による吊橋振動, 日本機械学会 Dynamics and Design Conference 2008, 2008年9月3日, 慶応義塾大学.
- (3) 茂木知之, 長嶺拓夫, 森博輝, 佐藤勇一, 吊り橋上の自励振動子による水平方向振動, 日本機械学会関東支部第14期総会講演会, 2008年3月15日, 東京海洋大学.
- (4) 森博輝, 近藤孝広, 盆子原康博, 綾部隆, 非線形ノーマルモードを用いた自己同期現象の特性に関する検討, 日本機械学会平成19年度非線形振動研究会, 2008年3月8日, 筑波大学.
- (5) 伊藤美和, 盆子原康博, 近藤孝広, 森博輝, 永富雅義, 自己同期現象を利用した振動機械の開発, 日本機械学会 Dynamics and Design Conference 2007, 2007年9月25日, 広島大学.

- (6) 長嶺拓夫, 佐藤勇一, 森博輝, 茂木知之, 複数振動子と構造物の連成振動, 日本機械学会 Dynamics and Design Conference 2007, 2007年9月25日, 広島大学.
- (7) 茂木知之, 長嶺拓夫, 森博輝, 佐藤勇一, 複数振動子の引き込み現象による構造物の振動, 日本機械学会関東支部ブロック合同講演会 2007, 2007年9月22日, 埼玉大学.

6. 研究組織

- (1)研究代表者
森 博輝 (MORI HIROKI)
埼玉大学・理工学研究科・助教
研究者番号: 50451737
- (2)研究分担者
な し
- (3)連携研究者
な し