

平成 22 年 3 月 31 日現在

研究種目：基盤研究（B）
 研究期間：2007～2009
 課題番号：19360109
 研究課題名（和文）大規模非線形系に対する高性能振動解析システムおよび最適モデルの実験的推定法の開発
 研究課題名（英文）Development of high-performance system of vibration analysis and experimental estimation method of optimal model for large scale nonlinear systems
 研究代表者
 近藤 孝広（KONDOU TAKAHIRO）
 九州大学・大学院工学研究院・教授
 研究者番号：80136522

研究成果の概要（和文）：省エネ化・省資源化の実現に向けた限界設計の追求という最近の技術動向のもとで、設計段階における振動解析の必要性と重要性がより一層増大している。そのためには、より精密で実機に近い大規模自由度モデルに対する高精度の解析が不可欠である。そこで、拘束モードを利用する低次元化法を基盤として、システム内に不可避免的に含まれる多種多様な非線形性をも考慮できる実用的な振動解析システムの開発を行った。

研究成果の概要（英文）：The necessity and importance of the vibration analysis at the design stage increase further more under a recent technological trend such as the limit design for the energy saving and resource saving. Therefore, high-accuracy analysis is required for a large-scale degree of freedom model similar to an actual machine. Then, based on a dimensional reduction method by using the constrained modes, a practical system of vibration analysis applicable to various nonlinearities was developed.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2007年度	6,400,000	1,920,000	8,320,000
2008年度	5,100,000	1,530,000	6,630,000
2009年度	3,000,000	900,000	3,900,000
年度			
年度			
総計	14,500,000	4,350,000	18,850,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：機械工学・機械力学・制御

キーワード：振動解析，非線形振動，安定解析，モード解析，低次元化法，計算機援用解析

1. 研究開始当初の背景

省エネ化・省資源化の実現に向けた限界設計の追求という最近の技術動向のもとで、設計段階における振動解析の必要性と重要性が従来にも増して強く認識されるようになって来た。限界設計の実現のためには、より精密で実機に近い大規模自由度モデルに対

する高精度の解析が不可欠である。線形系に対しては非常に高性能な汎用ソフトウェアが市販されており、設計に供することのできる高精度の振動解析が可能な状況になっているが、大規模非線形系に対しては、実用的な振動解析システムは皆無に等しい。市販の汎用ソフトウェアの中には非線形系への対

応を謳っているものもあるが、単に非線形性を考慮した時刻歴応答を計算できるだけのものがほとんどであり、その程度の解析では大規模非線形系に対して設計資料として利用することのできるような結果を得るのは不可能である。なぜなら、機械システム内に不可避免的に含まれている非線形特性は多種多様であり、発生する現象も複雑多岐にわたるので、設計に供することのできる振動解析結果を得るためには、それらを網羅的に求めるとともに、得られた解の安定判別を行うことが最低限必要だからである。特に、大規模非線形系の場合にはモード間の連成により多種多様な分岐現象や二次的な共振現象が現れるのが特徴であり、これらを高精度に解析することは数学的にも数値解析的にも非常に困難な問題である。したがって、このような問題にも十分に対処し得る高性能な振動解析手法を開発し、大規模非線形系に対して線形系に対する場合と同レベルの設計環境を提供することが、振動解析の分野に残された最も大きな課題の一つであるといえる。

2. 研究の目的

上述の研究背景に基づいて、研究代表者らは、大規模非線形系の定常周期振動を高速かつ高精度で解析し得る増分伝達影響係数法および増分伝達剛性係数法を開発するとともに、得られた周期解の安定性を高速かつ高精度に解析できる低次元化判別法を提案して来た。これらの手法は、初期モデル化誤差を除けば非常に高精度な解析結果が得られる特長を有する反面、適用対象がやや限定されること、周期解しか求められないこと、解析対象によっては比較的多数のモードを用いないと高精度の安定判別を行えない場合があること等の欠点を有している。

一方、少数のモードによる低次元モデルを用いて高精度の解析を行うための研究が国内外で精力的に行われているが、非線形性の影響を適切に反映した低次元モデルの構成法が見出されていないため、解決には至っていない。低次元モデルの構成に関する問題点としては、非線形性の影響の大きなモードを適切に選択しないと、非線形系に特有のモード間の連成によって解析の精度（とりわけ安定判別と分岐現象の精度）が著しく悪化することが挙げられる。研究代表者は、様々な試行錯誤と考察の結果、高精度の低次元化法の確立こそが大規模非線形系に対する解析手法として決定打になり得ると確信し、その実現に向けて本研究課題に取り組んだ。

3. 研究の方法

(1) 大規模非線形系に対する実用的で汎用性の高い非線形振動解析システムを開発するための第一段階として、軸受や歯車の非線

形性が問題となる回転軸系や非線形支持された配管系等によく見られるような局所的に強い非線形性を有する大規模自由度系を対象に、拘束モードを利用した低次元化法の開発を目指した。その際、多種多様な非線形特性に対する効果的な処理方法を適用可能とすることによって、汎用性と実用性の高い振動解析システムを開発した。

(2) 系内の大部分を占める線形要素に関しても、現実的には振動が大きくなるにともなう非線形性の影響が無視できなくなる。そこで、非線形振動解析システム開発の第二段階として、非線形性が系内に広く分布する大規模自由度系にも適用できるように低次元化法を拡張した。

(3) 大規模非線形系に対して従来は高精度の解析が困難であったので、実験で発生する現象と解析結果との間に不一致が生じたときに、モデリングと解析のどちらに問題があるのか確定できないことが多かった。そこで、排気系内における流体の非線形性に起因する非線形圧力波を具体例に、多自由度系集中系へのモデル化による解析を行うとともに実験機を製作し、実験と解析の比較を通してモデリングの妥当性を検証し最適モデルを追求した。

4. 研究成果

本研究課題で開発した低次元化法および振動解析システムによって、従来は困難とされて来た大規模非線形系の振動解析が手軽に行えるようになり、機械設計の信頼性向上や限界設計の実現の可能性が高まった。今後は、本システムを利用してこれまで体系的に取扱われて来なかった大規模非線形系のモデリングの問題に実験と解析の両面から取り組むことにより、非線形振動研究の分野に新たな地平を切り拓くことが期待される。以下、本研究課題の成果を具体的に述べる。

(1) 拘束モードを利用した低次元化法

はじめに、本研究で開発された振動解析システムの基礎である低次元化法の基本概念の説明を行う。本低次元化法では、全系の状態量を非線形要素が存在する少数の非線形節点の状態量と存在しない大多数の線形節点の状態量に分離し、線形節点の状態量については非線形節点を固定することによって求められる拘束モードを利用してモード座標に変換する。その際、比例減衰系に対しては実拘束モードを、非比例減衰系に対しては複素拘束モードを利用する。次に、非線形性の影響度を評価して、影響の大きな少数のモード座標のみを抽出し、残りの影響の小さなモード座標については非線形連成の影響を表現できるように適切な近似を施して消去する。影響度の評価とモード座標の近似が本

低次元化法の特徴であり、これによって高精度の低次元モデルが構成される。

一部の限られたモデルに対しては、上述の低次元化法の有効性を確認済みであったが、本研究課題を通して、以下に示す適用範囲の拡大と計算効率の飛躍的な向上を実現した。

本手法の根幹である低次元化法を一部見直し、近似解計算・安定判別の両面で、従来よりも高精度の低次元化法を開発した。

非比例減衰系やジャイロ効果が作用する回転軸系に対しては、実拘束モードを用いて低次元化を行う場合、減衰行列の完全な対角化が不可能であるため、計算効率向上のために非対角項を無視する必要がある、これが解の精度低下の原因となっていた。そこで、複素拘束モードを利用する方法を提案し、より高精度な結果が得られることを確認した。

局所的な強非線形性に加え、大域的に比較的弱い非線形性が分布している系に対して、本低次元化法の適用を図り、その有効性を確認した。その際、モード座標と物理座標との変換手続きの効率化を実現することで、高速かつ高精度な解析が可能となった。

周波数応答解析において、低次元モデルの精度に対する影響の大きなモード座標を適切に選択する手法を開発した。これにより、本低次元化法の信頼性と計算効率の向上を実現することができた。

安定判別を含む定常周期振動の周波数応答解析および過渡応答解析を可能にした。また、定常周期振動に対しては、主共振だけでなく分数調波共振の解析をも可能にした。

非線形特性については、連続非線形性だけでなく、機械システムにしばしば現れる局所的に強い非線形性の代表例であるガタの取扱いを可能にした。

3次元樹状構造物のような特に自由度の大きな系においては、すべての固有振動数と固有モードを求めるのは一般に困難である。この問題を克服するために、全系の特性に及ぼす影響の大きい比較的少数の低次モードを用いて、それ以外の高次モードの影響を高精度で消去する方法を提案した。さらに、このようにして構成された低次モードのみからなるモデルに対して、上記の低次元化法を適用すると、必要最小限のモードのみを抽出することが可能となった。

上記の理論的検討に基づき、汎用性と拡張性の高い振動解析システムの実現を目指して、多種多様な解析モデルに適用可能な共通性の高いメインプログラムを作成した。

直線はり構造物を具体例に、本低次元化法の有効性を検証した結果を示す。

図1はその解析モデルであり、全長9m、外径0.3m、内径0.2mの鋼製一様中空軸の両端および左端から6mの位置を、非線形要素

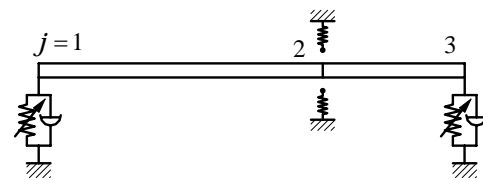


図1 解析モデル

素によって基礎に支持したものである。両端の非線形要素の特性は同一で、並進に関する粘性減衰と漸硬型非線形ばね(1次+3次ばね)とから構成されている。また、非線形節点2の基礎支持要素の復元力は、並進に関する断片線形ばね特性(ガタ)であるとした。

軸に関しては、一様線形はりともみなして全体を30の要素に等分割し、各要素は両端に等分した等価集中円板を質量のない線形はりで結合する集中系としてモデル化した。したがって、このモデルの自由度は、線形節点が56、非線形節点が6の計62である。また、軸の減衰は比例減衰であるものとした。

外力については、非線形節点2に一定荷重と調和外力の和が横方向に作用するものとした。さらに、一様軸に対しては自重を考慮するとともに、分布調和外力が横方向に作用するものとした。

シューティング法を利用して外力と同じ基本周期を持つ定常周期振動(基本調波振動)の周波数応答と安定判別を求めた結果を図2および図3に示す。図2は低次元化を行わないときの結果であり、図3は精度に対する影響の大きいモード座標を適切に抽出した低次元モデルの結果である。両図ともに断片線形ばね特性を持つ非線形節点2における変位の変動成分のノルムを描いたものであり、図中の実線は安定解、破線は不安定解を表す。また、安定・不安定境界上の印はサドル・ノード分岐点、印は周期倍分岐点、印はホップ分岐点を示している。図4は図3中のA点とB点で示したサドル・ノード分岐点間で抽出されたモード座標の個数を示している。図4の太線は安定解に、細線は不安定解に対応している。このときに抽出されたモード座標の個数は図示の振動数の全領域において最大2個であった。図2および図3を比較すると、非線形特性への影響が大きい少数のモード座標を抽出するだけで、周波数応答および安定判別ともに低次元化を行わないときとほぼ一致している。

基本調波振動の周期倍分岐点からは、基本周期が外力の周期の2倍である1/2次分数調波振動が分岐して発生する。図5に2次の主共振領域の周期倍分岐点から発生する1/2次分数調波振動の周波数応答を太線で示す。図中の細線は基本調波振動である。この分数調波振動に対しては比較的多くのモード座標が影響するようであり、低次元化を行わない

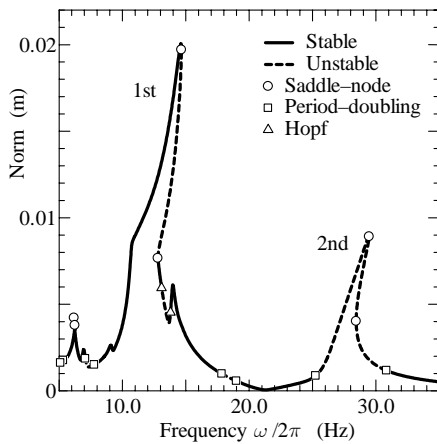


図2 周波数応答（低次元化なし）

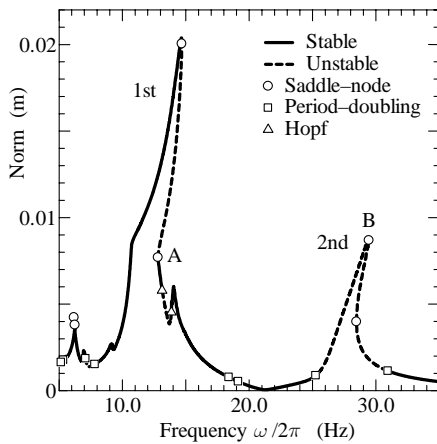


図3 周波数応答（低次元モデル）

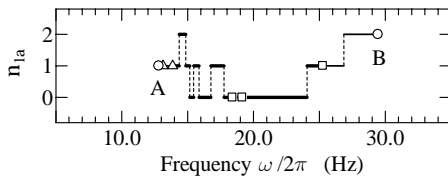


図4 抽出モード個数

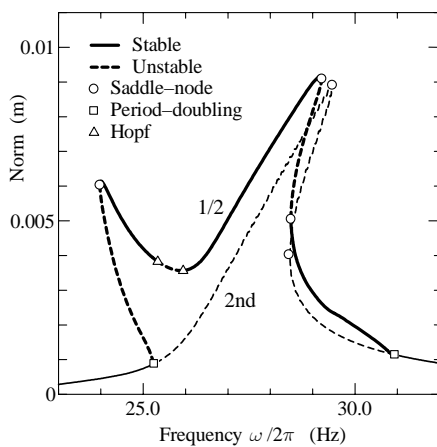


図5 周波数応答（1/2次分数調波振動）

場合とほぼ一致する結果を得るには、4~7個のモード座標を抽出する必要であった。ただし、1個のモードを抽出するだけで、29 Hz付近のピーク値の存在領域が僅かに異なることを除けば、十分に高精度の結果が得られることを確認している。

以上のことから、非線形特性への影響の小さなモード座標に対する近似とそれに基づく非線形特性への影響の大きなモードの抽出法および低次元化法は、断片線形のように強い非線形性を有する場合をも含めて、定常周期振動の周波数応答解析に対して適切に機能していることがわかる。

次に、過渡応答の計算結果を図6に示す。これは、外力の振動数が28 Hzのときの非線形節点2の変位の変動成分を描いたものである。図中の実線は低次元化を行わないときの結果、印は低次元モデル（抽出モード数1個）の結果である。このように、過渡応答に関しても少数のモード座標を抽出するだけで十分高精度の解析が可能であることが明らかになった。さらに、図2および図3の結果によると、基本調波振動は不安定で、安定な1/2次分数調波振動が発生する。これに対応して、図6でも1/2次分数調波振動が成長する様子が見て取れる。これは、抽出モード数1個で1/2次分数調波振動の周波数応答が十分高精度に求められると述べた事実に対応している。

一方、ホップ分岐点に挟まれた不安定領域では、概周期振動が発生することが多い。概周期振動に対しても、基本調波振動と比較すると多くのモード座標を抽出する必要があるが、4個程度のモード座標を抽出することで高精度な結果が得られることを確認している。

以上のように、本研究で提案した低次元化法は、定常周期振動だけでなく、過渡応答や概周期振動に対しても十分に高精度であることが確認された。

具体例として取り上げたモデルは比例減衰を有する直線はり構造物の曲げ振動のみであるが、非比例減衰系、ジャイロ効果が作用する回転軸系、局所的に強い非線形性と大域的に弱い非線形性を有する系、3次元樹状

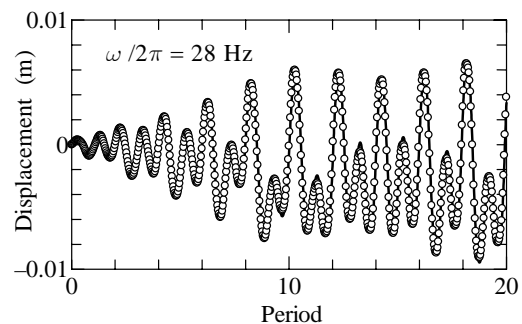


図6 過渡応答

構造物のような特に自由度の大きな系に対しても同様の検討を行っており、本低次元化法の有効性が確認できた。これにより、実際の機械システムで現れる代表的な大規模非線形系モデルの取り扱いが可能となった。

(2) 最適モデル推定法と実験的検証

管内流体の非線形性に起因する非線形圧力波を対象として、一様断面円筒管内の非線形圧力波を具体例に、多自由度集中系へのモデル化による最適モデル推定法の検証を解析および実験の両面から行った。

非線形圧力波の対策法として用いられるサイドブランチ型消音器と膨張型消音器を有する配管系に対しても、多自由度集中系へのモデル化を拡張し、その妥当性を確認するとともに、消音器の最適設計法を提案した。

一様断面円筒管内の非線形圧力波を対象に検証した結果を示す。

図7は、一様断面円筒直管内の流体に生じる1次元非線形圧力波動現象を、質量、非線形ばね、結合粘性減衰、基礎支持粘性減衰からなる集中系で表した解析モデルである。管内流体を適切な個数の要素に等分割して、分割点(節点)に質量を集中させる。各節点の質量および各要素の平衡状態における長さは同一とする。質量と基礎支持減衰に関しては、流体の粘性と流速の半径方向分布を考慮することによって等価質量と等価減衰係数を導出している。また、結合非線形ばね特性は流体(気体)の断熱変化から、結合減衰係数は流体の法線方向応力からそれぞれ導出している。ただし、このモデル化において、一定流速の定常流は無視した。

図8に示すような、一様円筒断面を持つ音響管を対象とした実験装置を製作し、非線形

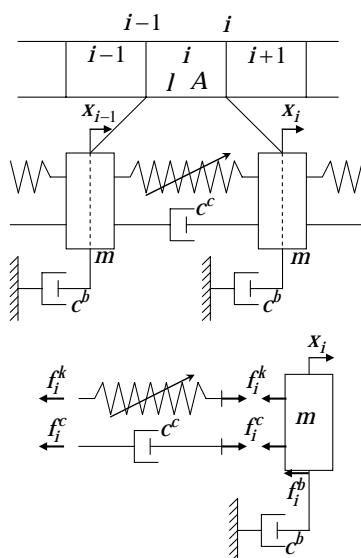


図7 集中系モデル

圧力波を発生させてモデル化の妥当性を検討した。実験装置は、左端がピストン加振され、右端は固定端となっている。ピストンは加振器によって励振され、加速度振幅を一定とする。また、右端固定端には圧力センサーを取り付けており、この位置における圧力変動量を測定する。配管には、外形38mm、肉厚2.0mmのステンレス鋼管を使用した。

図9と図10は、集中系モデルによる数値計算結果と実験結果を比較した結果である。図9はピストンの加振振動数を変化させたときの周波数応答を、固定端における圧力の両振幅値により示している。実線が数値計算結果、○が実験結果である。これより、直管において、数値計算結果と実験結果が非常によく一致していることが分かる。図10は、共振振動数における右端固定端の圧力変動量の時系列波形を示したものであり、左側が数値計算結果、右側が実験結果である。このように、両者の結果は定性的にも定量的にも非常によく一致しており、しかも共振振動数において波形が切立つ衝撃波が発生していることが分かる。同様の結果は、サイドブランチ型消音器と膨張型消音器を有する配管系でも得られており、提案した集中系モデルの妥当性が確認された。

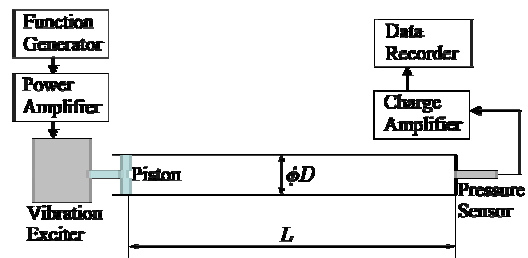


図8 実験装置概要

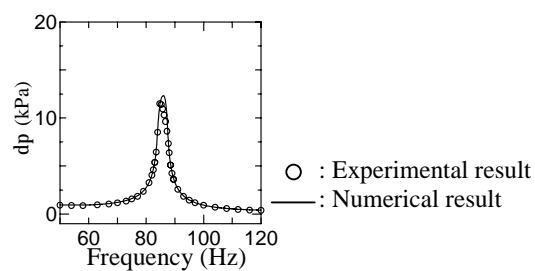


図9 周波数応答

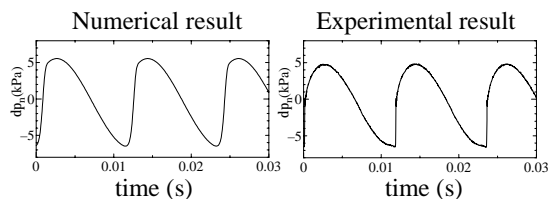


図10 非線形圧力波

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文](計19件)

- (1) Takumi SASAKI, Takahiro KONDOU, Kenichiro MATSUZAKI and Nobuyuki SOWA, Computational Efficiency and Accuracy of High-Performance Method of Vibration Analysis for a Large-Scale Nonlinear System Using the Method of Harmonic Balance, Proceedings of 13th Asia-Pacific Vibration Conference, Paper No. 21, 2009, 査読有.
- (2) Satoshi ISHIKAWA, Takahiro KONDOU and Kenichiro MATSUZAKI, Nonlinear Pressure Wave Analysis by Concentrated Mass Model (1st Report, Suggestion and Validity Verification of Analytic Model), Journal of System Design and Dynamics, 3-5, pp.827-840, 2009, 査読有.
- (3) 石川 諭, 近藤孝広, 松崎健一郎, 集中系モデルによる非線形圧力波の解析(第1報, 解析モデルの提案とその妥当性の検証), 日本機械学会論文集, C編, 第75巻, 第735号, pp.1436-1443, 2009, 査読有.
- (4) 近藤孝広, 松崎健一郎, 宗和伸行, 佐々木卓実, 大規模非線形系に対する高性能振動解析手法の開発(非線形支持された直線状はり構造物の曲げ振動への適用), 日本機械学会論文集, C編, 第74巻, 第747号, pp.2626-2633, 2008, 査読有.
- (5) 岡部匡, 近藤孝広, 渡邊裕文, Jacobiのcn関数とsn関数の和を母解とする楕円型平均法, 日本機械学会論文集, C編, 第74巻, 第744号, pp.1971-1978, 2008, 査読有.
- (6) Takahiro KONDOU and Takumi SASAKI, Forced Vibration Analysis of a Beam Structure with Nonlinear Support Elements (1st Report: Proposal of an Incremental Transfer Stiffness Coefficient Method and Application to a Straight-line Beam Structure), Journal of System Design and Dynamics, 2-3, pp.786-797, 2008, 査読有.

[学会発表](計29件)

- (1) 石川 諭, 近藤孝広, 松崎健一郎, 集中系モデルによる非線形圧力波の解析, 日本機械学会 Dynamics and Design Conference 2009, 2009.08.07, 札幌市.
- (2) 千代田昭三, 近藤孝広, 松崎健一郎, 宗和伸行, 佐々木卓実, 岩崎真人, 大規模非線形系に対する高性能振動解析手法

の開発(大域的非線形系への適用), 日本機械学会 Dynamics and Design Conference 2009, 2009.08.06, 札幌市.

- (3) 岩崎真人, 近藤孝広, 松崎健一郎, 宗和伸行, 佐々木卓実, 千代田昭三, 大規模非線形系に対する高性能振動解析手法の開発(非比例減衰系への適用), 日本機械学会 Dynamics and Design Conference 2009, 2009.08.06, 札幌市.
- (4) 佐々木卓実, 近藤孝広, 松崎健一郎, 宗和伸行, 大規模非線形系の高性能振動解析法に対する計算効率・計算精度の検討, 日本機械学会 Dynamics and Design Conference 2009, 2009.08.03, 札幌市.
- (5) 土村慎吾, 近藤孝広, 松崎健一郎, 宗和伸行, 佐々木卓実, 大規模非線形系に対する高性能振動解析手法の開発(非線形支持された回転軸系への適用), 日本機械学会 Dynamics and Design Conference 2008, 2008.09.03, 東京都.
- (6) 近藤大介, 近藤孝広, 松崎健一郎, 宗和伸行, 佐々木卓実, 土村慎吾, 大規模非線形系に対する高性能振動解析手法の開発, 日本機械学会 Dynamics and Design Conference 2008, 2007.09.25, 東広島市.

[図書](計1件)

- (1) 近藤孝広・他4名, コロナ社, 非線形のダイナミクス - 非線形現象の解析入門 -, 2007, 23-72.

[産業財産権]

- 出願状況(計0件)
取得状況(計0件)

6. 研究組織

(1) 研究代表者

近藤 孝広 (KONDOU TAKAHIRO)
九州大学・大学院工学研究院・教授
研究者番号: 80136522

(2) 研究分担者

松崎 健一郎 (MATSUZAKI KENICHIRO)
九州大学・大学院工学研究院・准教授
研究者番号: 80264068

宗和 伸行 (SOWA NOBUYUKI)
九州大学・大学院工学研究院・助教
研究者番号: 40304753

盆子原 康博 (BONKOBARA YASUHIRO)
九州大学・大学院工学研究院・助教
研究者番号: 10294886

佐々木 卓実 (SASAKI TAKUMI)
北九州市立大学・国際環境工学部・准教授
研究者番号: 80343432

(H19 H20: 連携研究者)