

## 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24年4月21日現在

機関番号：17102

研究種目：若手研究（B）

研究期間：2010～2011

課題番号：22760173

研究課題名（和文） 手持ち振動工具への応用に向けた同期振動発生機構の開発

研究課題名（英文） Development of Synchronous Vibration Mechanism for Hand-Held Vibrating Tools

研究代表者

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

研究成果の概要（和文）：手腕振動障害の発症防止を目指して、振動ランマへの応用に向けた同期振動発生機構の開発を行った。まず、基本モデルを対象として、把持部の制振と打撃板の励振とを同時に実現可能な自己同期振動が発生することを確認した。さらに、より実用的な手持型実験装置を開発するとともに、砂の締め固め試験を行った。その結果、把持部の振動が目標より大きくなったものの、最適な同期振動を発生させることができ、砂の締め固めに成功した。

研究成果の概要（英文）：The purpose of the present research is to develop a new mechanism for a tamping rammer using self-synchronization phenomena in order to address the problem of the hand-arm vibration syndrome. It was proven that suitable synchronous vibration could be generated in the elementary model, and that the existence region of these synchronized solutions can be expanded by setting the system parameters appropriately. In addition, the prototype has been developed based on the mechanism of the impact model with four oscillators. After conducting the sand compaction test, it was confirmed that the suitable synchronized vibration can be generated continually.

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	500,000	150,000	650,000
総計	1,800,000	540,000	2,340,000

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：非線形振動，自励振動，自己同期現象，振動制御，建設機械，衝突振動，シューティング法，安定判別

## 1. 研究開始当初の背景

(1) 現在、産業界では、手腕振動障害の発症を予防するために、低振動工具の選択、防振手袋の使用、作業時間の制御などの対策が奨励されている。しかしながら、工具の種類によっては十分な対策が難しく、近年でも建設業では罹患者数が増加傾向にある。手腕振動の問題を抜本的に解決するためには、その主要因である工具の手腕支持部の振動を抑え

るために工具の改良に取り組むことが重要である。工具の低振動化が実現できれば、障害発症を予防できるだけでなく、作業時間の制限が緩和されるので、作業効率や生産性の向上にも大いに貢献できる。

(2) 研究代表者は、これまで様々な非線形力学系を対象として自己同期現象のメカニズムの解明と機械システムへの応用を目指した研究を行って来た。そして、発生可能な同

期振動パターンとその発生領域が、振動子の非線形特性と振動子間を結合する系の振動特性（固有振動数および固有モード）によって決定されることを解明した。この性質を利用すれば、複雑な制御を施すことなく、自律的に目的に適した振動パターンを発生させることができるので、手持ち振動工具の振動発生機構として応用できる可能性がある。このような着想に基づいて、研究代表者は、手持ち振動工具の一種である振動ランマを対象として、新しい同期振動発生機構の開発を試みている。

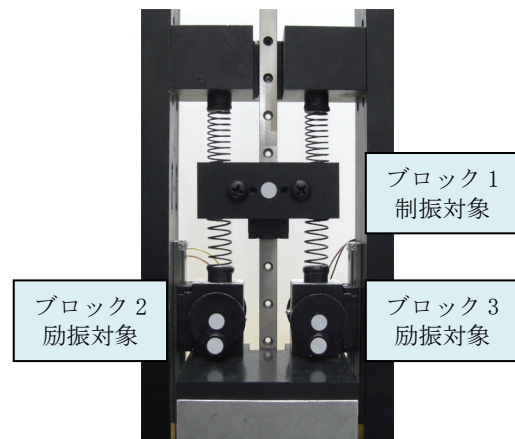
## 2. 研究の目的

(1) 本研究で開発した同期振動発生機構の基本モデルを図1に示す。このモデルは、3個のブロックがコイルばねで結合しており、ブロック1が制振対象、ブロック2およびブロック3が励振対象に相当する。ブロック2とブロック3には、それぞれ回転型自励振動子が1個ずつ搭載されており、それらが同期回転することにより、制振と励振とを同時に実現する振動パターンを発生させることができる。この機構の実用化を図るためには、不適切な同期振動や概周期振動の発生を抑えるとともに、最適な同期振動を安定的に発生させる必要がある。そこで本研究では、基本モデルを対象としてパラメータスタディや実験的検証を行い、最適な同期振動発生機構の開発とその最適設計法の確立を目指す。

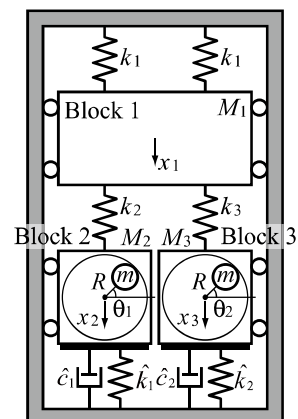
(2) 図2は、基本モデルの機構を基にして開発した手持ち型実験装置（4振動子衝突モデル）の試作機である。この機構では、地面を打撃する2個のブロックにそれぞれ2個ずつ振動子が搭載されている。この装置をスポンジ上で駆動させた場合には、ブロックを把持した状態でも最適な振動パターンを発生させることができる。しかしながら、砂などの堅い地面の上で駆動させた場合には、最適な同期振動は発生するものの、それを安定的に維持できない。そこで、上記(1)で開発する最適設計法に基づいて、手持ち型実験装置の改良を行うことによって、実用的かつ合理的な同期振動発生機構の開発を目指す。

## 3. 研究の方法

(1) 本研究では、同期振動発生機構の最適設計法を開発するために、図1に示した基本モデルを対象として数値解析と実験の両面から検討を行った。数値解析では、衝突振動系を取り扱うために独自に開発した数値計算プログラムを用いるとともに、分岐理論などの力学系理論を導入して効果的に研究を遂行した。実験では、リアルタイム振動解析システムや画像解析システムを用いて発生した同期振動を測定した。その際、手腕振動の



(a) 実験装置



(b) 解析モデル

図1 基本モデル

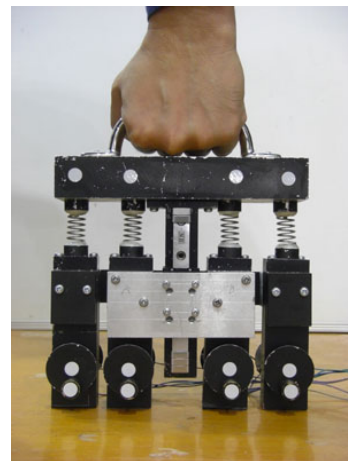


図2 手持ち型実験装置

国際規格に照らし合わせて把持部の加速度を測定することにより、開発した機構の有効性をなるべく定量的に検証できるように工夫した。

(2) 基本モデルを対象として得た最適設計法に関する知見に基づいて、図2に示した手持ち型実験装置の改良を試みた。また、砂の締

め固め試験を行って、実用性の観点から開発した試作機の有効性を検証した。

#### 4. 研究成果

(1) 基本モデルで発生する同期振動の種類、所期の目的にかなう同期振動の発生の有無、および最適な系パラメータの設定法について数値計算と実験の両面から検討を行った。得られた結果は次の通りである。

①まず、図1(b)に示した解析モデルおよび数値計算方法の妥当性について検証した。得られた同期解の数値計算結果および実験結果の一例を図3に示す。横軸は振動子の印加電圧  $e$  であり、縦軸には上から同期振動数  $f_{syn}$ 、制振対象であるブロック1の両振幅値  $Amp_{x_1}$ 、および励振対象であるブロック2の両振幅値  $Amp_{x_2}$  をとっている。図中の黒色の実線および破線はそれぞれ数値計算で求められた安定解および不安定解であり、◎印は実験結果である。ただし、安全のため、実験では印加電圧を3.0 Vまでとしている。また、図4は  $e = 2.6$  Vにおける同期解の時刻歴波形（変位波形）である。これらの結果から、同期振動の発生領域に差異があることを除いて、実験で得られた同期振動パターンの特徴は数値計算結果と定量的に十分良く一致していることから、解析モデルの妥当性がある程度確認できたものと考えられる。

②次に、印加電圧を変動パラメータにとって数値計算を行った。その結果、得られた同期解分枝の中に振動パターンが異なる4種類の安定領域 ( $SR_1$ ,  $SR_2$ ,  $SR_3$ ,  $SR_4$ ) が存在した。図5は、それぞれの同期解における時刻歴波形の一例である。それぞれの同期解の特徴や同期解の存在領域について比較した結果、制振と励振とを同時に実現するという目的に対しては  $SR_2$  の振動パターンが最も適していることを確認した。

③次に、基本モデルを構成するブロックやコイルばねのパラメータ値が安定な同期解の存在領域に及ぼす影響について調べた。一例として、ブロック1の質量  $M_1$  を6種類に変更して、 $SR_2$  および  $SR_3$  の同期解の存在領域を求めた結果を図6に示す。図6(a)では、 $SR_2$  は印加電圧が小さい領域に存在しており、 $M_1$  が小さいほど存在領域が広がっている。一方、図6(b)では、 $SR_3$  は印加電圧が大きい領域に存在しており、 $M_1$  が小さくなるにつれて存在領域は印加電圧が大きい側に移動している。実験結果も、数値計算結果と同様の傾向が示されている。このように、 $SR_2$  と  $SR_3$  は存在領域が異なっており、 $e$  や  $M_1$  の値を適切に設定することで最適な振動パターンをもった  $SR_2$  の同期解のみを発生させることが可能であることが確認された。

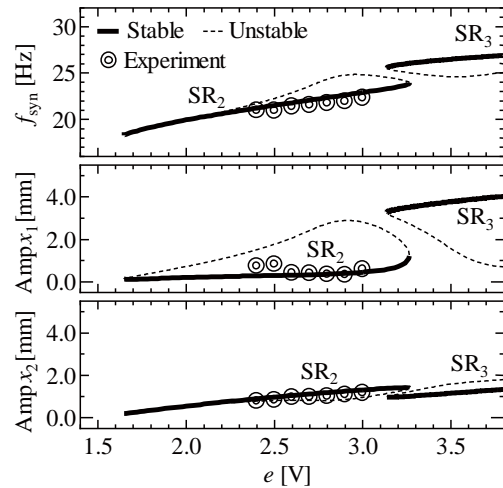


図3 基本モデルの同期解分枝

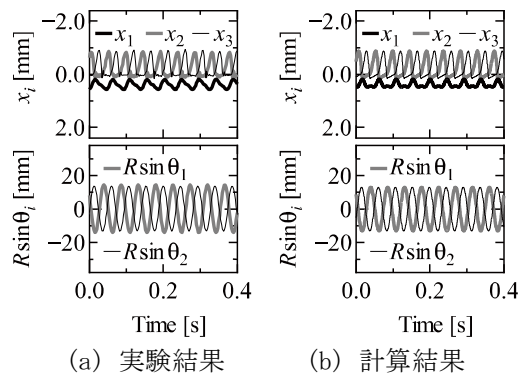


図4 同期解の時刻歴波形

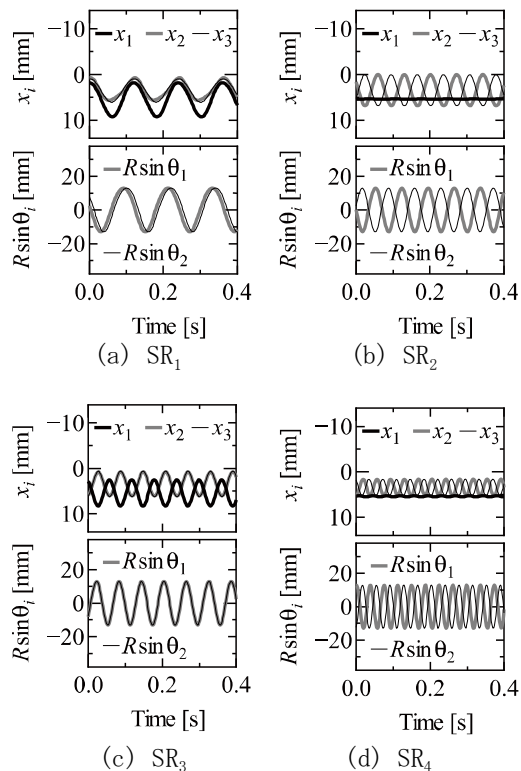
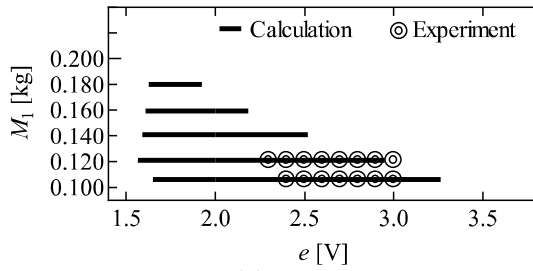
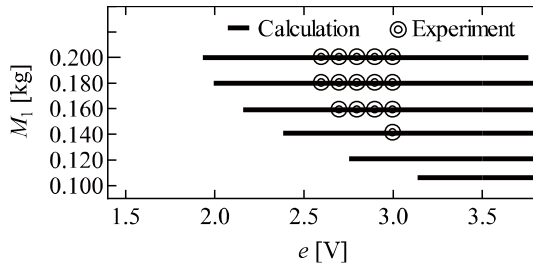


図5 発生する振動パターンの種類



(a)  $SR_2$



(b)  $SR_3$

図6 同期解の存在領域

(2) 基本モデルを対象とした検討結果に基づいて、手持ち型実験装置（4 振動子衝突モデル）の開発を行った。得られた結果は次の通りである。

①図2は、最初に製作した4振動子衝突モデルの実験装置である。このモデルに対して、系パラメータに対する検討を行ったとともに装置の改良を行った。その結果、砂の締め固め試験において基本モデルと同様に制振と励振とを同時に実現できる同期振動の発生が確認された。しかしながら、把持方法や砂の状態によっては同期振動を安定して維持することができなかった。また、実験装置の規模が実際の振動ランマに比べると非常に小型であることや、構造的に大きな打撃板を設置することが難しいため、手腕支持による影響や打撃性能などを定量的に評価することが困難であった。

②そこで、4振動子衝突モデルの実用的な有効性について検討するために、振動ランマの試作機を新たに設計・製作した。図7に製作した試作機の外観を示す。この試作機は、図2の装置と同じく4振動子衝突モデルの機構に基づいており、手腕支持部を有する1個の上部ブロックと打撃板を有する2個の下部ブロックがコイルばねで結合している。ただし、打撃板の面積を大きくするためにガイドレールを下部ブロック側に設置するなど、各ブロックの構造を工夫している。全体の大きさは幅0.39 m×高さ0.24 m×奥行き0.24 m、総重量は約11.3 kgであり、内側の下部ブロックには大きさが0.2 m×0.2 mの打撃板を1枚、外側の下部ブロックには大きさが0.1 m×0.2 mの打撃板を2枚設置している。

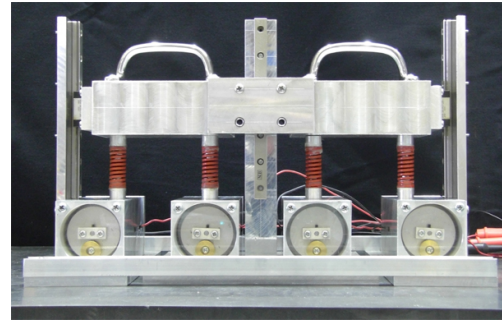


図7 開発した試作機

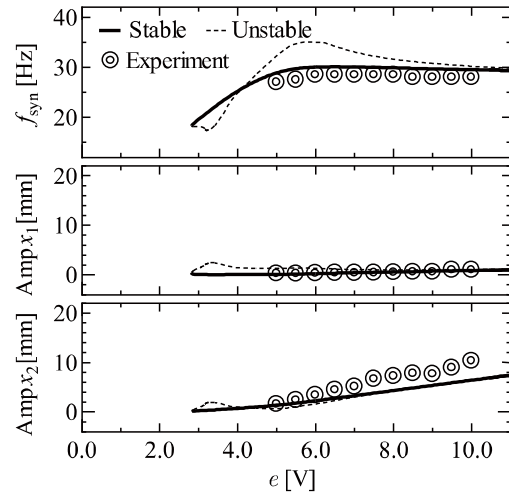
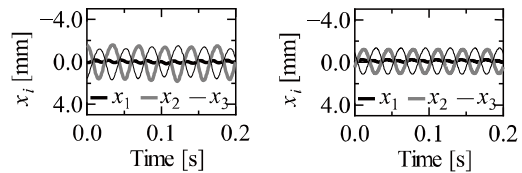


図8 基本モデルの同期解分枝



(a) 実験結果 (b) 計算結果

図9 同期解の時刻歴波形

③まず、開発した試作機で発生する自己同期現象について実験と数値計算の両面から調べた。検討の第1段階として、実験装置をスポンジ板の上に設置して実験を行った。図8は、印加電圧  $e$  を変化させて得られた実験結果および数値計算結果である。また、図9は、 $e = 6.0$  Vにおける同期解の時刻歴波形（変位波形）である。この同期解では、励振対象である2個の下部ブロックが逆相相で大きく振動し、制振対象である上部ブロックの振幅は比較的小さくなっている。ことから、発生した同期振動が目的に適した振動パターンを有していることが分かる。なお、数値計算結果では異なる種類の振動パターンが発生する同期解が存在していたが、実験では最適な振動パターン以外の同期振動が発生することは確認されなかった。

④次に、試作機を把持した状態で発生する同

期振動について実験により調べた。この検討では、次のような4種類の把持条件で実験を行った。

条件1: 軽く手を添える程度に把持した場合

条件2: 強く握って把持した場合

条件3: 実験装置を体重で押し付けるように力を加えた状態で強く把持した場合

条件4: 実験装置を軽く持ち上げるように力を加えた状態で強く把持した場合

それぞれの条件で実験装置を把持した状態で、DCモータに印加電圧  $e = 6.0 \text{ V}$  を与えて稼働させたところ、いずれの条件下においても最適な同期振動の発生を確認することができた。図10は、それぞれの実験で測定された各ブロックの時刻歴波形である。この結果から、把持方法によってブロックの振幅や同期振動数に違いが生じていることがわかる。これは、発生する同期振動が質量ばね系の振動特性に強く依存していることに起因しており、把持条件に応じて系の振動特性が変化したことによって、上記のような運動状態の変化が生じたものと推察される。

⑤次に、試作機の起動直後の運動状態について調べた。実験では、印加電圧  $e$  を  $1.0 \text{ V}$  から  $10.0 \text{ V}$  まで  $1.0 \text{ V}$  刻みで設定し、振動子のおもりは鉛直下向きの位置にある初期状態から起動させた。また、比較のため数値シミュレーション(数値積分)を行い、実験と同じ初期条件を与えて各ブロックの振動応答を求めた。実験結果および数値計算結果を表1に示す。表中の記号は起動直後に発生した振動状態を表しており、最適な同期振動が発生した場合には○印を、その他の同期振動が発生した場合には△印を、同期振動が発生しなかった場合には×印を示している。この結果から、最適な同期解が存在する領域においても、必ずしも最適な同期振動が発生するわけではないことがわかる。試作機を実際に利用することを考えた場合、起動してすぐに最適な同期振動が確実に発生しなければならない。したがって、試作機の実用化を図るためには、最適な同期解の存在領域を拡大するだけでなく、初期条件の影響を考慮した検討を行うことが必要であるといえる。

⑥最後に、試作機を砂上に設置して締め固め試験を実施した。しかしながら、砂上では、衝突時に散逸されるエネルギー量が多いことや、把持部が大きく振動する内部共振現象が発生することなどにより最適な同期振動の発生が困難であった。そこで、基本モデルで得られた知見に基づいて数値計算によるパラメータスタディを行い、最適な同期振動解が広く存在し得る系パラメータの同定を行った。同定結果に基づいて、振動子の不釣り合いおもりの質量、各ブロックの質量、および結合ばね定数を設定し直した結果、砂

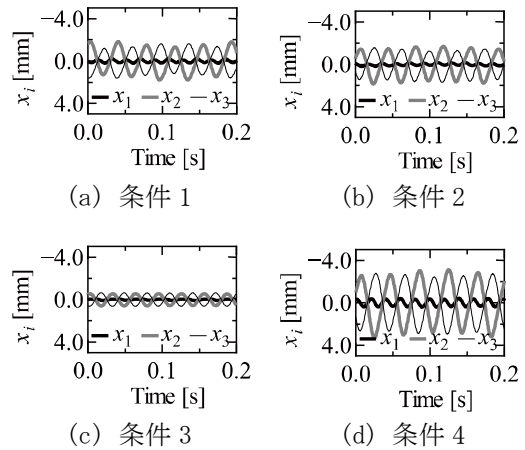


図10 異なる把持条件で発生する同期振動

表1 起動直後における同期振動発生の有無

$e$ [V]	1.0	2.0	3.0	4.0	5.0
実験結果	×	×	×	×	○
計算結果	△	△	△	○	○
$e$ [V]	6.0	7.0	8.0	9.0	10.0
実験結果	○	○	×	×	×
計算結果	○	○	△	△	△

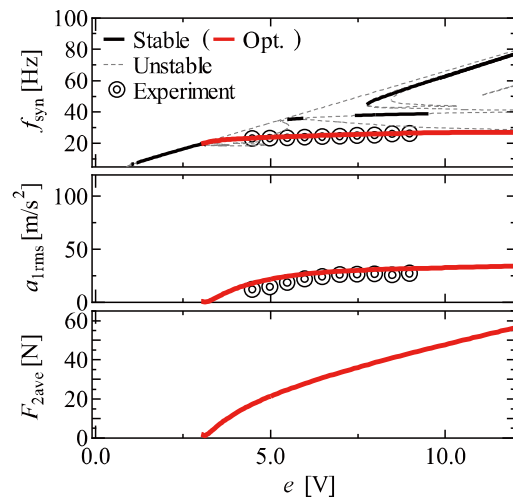


図11 試作機による砂の締め固め試験結果

上においても最適な同期振動を発生させることができ、砂を締め固めることに成功した。図11は、試作機を砂上に設置した場合を対象として得られた同期解の実験結果および数値計算結果である。横軸は振動子の印加電圧  $e$  であり、縦軸には上から同期振動数  $f_{\text{syn}}$ 、制振対象である上部ブロックの加速度の実効値  $a_{1,\text{rms}}$ 、地面に対する下部ブロックの平均打撃力  $F_{2,\text{ave}}$  をとっている。図中の赤色の実線が最適な同期解であり、印加電圧に対して比較的広く発生領域が存在していることが確認できる。ただし、印加電圧を大きくしすぎ

ると、把持部の振動加速度が目標とした数値よりも大きくなる結果となった。

#### 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4件)

- ① 盆子原康博, 小野友輝, 近藤孝広, 手持ち振動工具への応用に向けた同期振動発生機構の開発 (2振動子衝突モデルについての検討), 日本機械学会論文集 (C編), 査読有, 76巻, 772号, 2010, 3486-3494  
<http://ci.nii.ac.jp/naid/110008006859>
- ② 小野友輝, 近藤孝広, 盆子原康博, ステイク・スリップ振動をともなう結合自励振動子群に生じる自己同期現象, 日本機械学会論文集 (C編), 査読有, 77巻, 773号, 2011, 28-42  
<http://dx.doi.org/10.1299/kikaic.77.28>
- ③ Yasuhiro BONKOBARA, Tomoki ONO and Takahiro KONDOU, Development of a Generation Mechanism of Synchronous Vibration Suitable for Hand-Held Vibrating Tools: Investigation of an Impact Model with Two Oscillators, Journal of System Design and Dynamics, 査読有, Vol. 5, No. 6, 2011, 1361-1375  
DOI:10.1299/jsdd.5.1361
- ④ Myung-Soo CHOI, Takahiro KONDOU and Yasuhiro BONKOBARA, Development of Free Vibration Analysis Algorithm for Beam Structures by Combining Sylvester's Inertia Theorem and Transfer Stiffness Coefficient Method, Journal of Mechanical Science and Technology, 査読有, Vol.26, No.1, 2012, 11-19  
DOI:10.1007/s12206-011-0914-x

[学会発表] (計6件)

- ① 盆子原康博, 近藤孝広, 吉住寛, 小野友輝, 手持ち振動工具に向けた同期振動発生機構の開発 (2振動子衝突モデルによる実験的検討), 日本機械学会 機械力学・計測制御部門講演会, 2010.9.15, 同志社大学 (京都府)
- ② 上口将太, 盆子原康博, 近藤孝広, 小野友輝, 波越洋平, 手持ち振動工具に向けた同期振動発生機構の開発 (4振動子衝突モデルによる実験的検討), 日本機械学会 機械力学・計測制御部門講演会, 2010.9.15, 同志社大学 (京都府)
- ③ 盆子原康博, 近藤孝広, 上口将太, 公文知裕, 小野友輝, 自己同期現象を利用した振動ランマの試作, 日本機械学会 機械力学・計測制御部門講演会, 2011.09.05, 高知工科大学 (高知県)

④ 小野友輝, 近藤孝広, 盆子原康博, 自己同期現象における非線形自励振動子間の結合形態に関する検討, 日本機械学会 機械力学・計測制御部門講演会, 2011.09.05, 高知工科大学 (高知県)

⑤ Yasuhiro BONKOBARA, Takahiro KONDOU and Tomoki ONO, Development of a Tamping Rammer Using Self-Synchronization Phenomena, 14th Asia Pacific Vibration Conference, 2011.12.07, Hong Kong, China

⑥ Tomoki ONO, Takahiro KONDOU and Yasuhiro BONKOBARA, Synchronization in Coupled Nonlinear Self-Excited Oscillators with Stick-Slip Vibration, 14th Asia Pacific Vibration Conference, 2011.12.07, Hong Kong, China

#### 6. 研究組織

##### (1) 研究代表者

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

##### (2) 研究分担者

該当なし

##### (3) 連携研究者

該当なし