

**科学研究費助成事業 研究成果報告書**

平成 27 年 6 月 8 日現在

機関番号：17601

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2012～2014

課題番号：24560262

研究課題名(和文) 手腕振動障害の発症リスク低減を目的とし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 Decreasing the Risk of Hand-Arm Vibration Syndrome

研究代表者

盆子原 康博 (BONKOBARA, YASUHIRO)

宮崎大学・工学部・准教授

研究者番号：10294886

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,000,000円

研究成果の概要(和文)：手腕振動障害の発症要因である振動工具の把持部の振動の低減化を実現するため、振動ランマおよび電動ハンマへの応用に向けて開発した同期振動発生機構の有効性について検証した。振動ランマに関する研究では、手持ち型の試作機の最適設計を行うとともに、砂の締め固め試験による日振動曝露量および打撃力の測定結果から試作機の有効性を実証した。また、電動ハンマに関する研究では、2個の振動子を搭載した同期振動発生機構を提案し、一般的な工具のようにカウンターウェイトを用いて制振するよりも、同期振動を利用した方が高い制振効果が得られることが確認された。

研究成果の概要(英文)：The purpose of this study is to develop a very low-vibrational tool using self-synchronization phenomena in order to decrease the risk of the hand-arm vibration syndrome. Firstly, the prototype experimental apparatus with a generation mechanism of synchronous vibration suitable for a tamping rammer was developed based on the mechanism of the impact model with four oscillators. The availability of the synchronous vibration generated in the prototype experimental apparatus was investigated based on sand compaction tests and numerical computations. In addition, the experiment for measuring the daily vibration exposure values and the compaction forces was conducted to estimate the performance of a vibration control and a compaction. Secondly, an elementally model with a generation mechanism of synchronous vibration suitable for a electric drill was developed, and the effectiveness of the present model was confirmed by comparing the experimental and numerical computational results.

研究分野：機械力学

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) 手腕振動障害とは、動力源を有する手持ち工具を使用する際、人体が過度の振動ばく露を受け続けることによって発症する健康障害である。とくに、振動利用を目的とした手持ち振動工具では、把持部に大きな振動が不可避的に発生するため、障害を発症するリスクが非常に高い。このため、手持ち振動工具を使用する際には、防振手袋を着用することはもとより、工具に生じる振動加速度レベルに応じて連続作業時間を制限するなど、様々な対策が講じられている。しかし、人体への振動ばく露を完全に防止することは難しく、近年でも建設業を中心に労災認定患者が多く発生している状況にある。

(2) 研究代表者らは、手腕振動障害の問題の抜本的な解決を目指して、非線形現象の一種である自己同期現象に着目し、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を行ってきた。その中で、振動ランマへの応用に向けた4振動子衝突モデルを提案するとともに、試作機を開発した。この装置では、把持部を有する上部ブロックを十分に制振した状態で、2個の下部ブロックが地面を打撃しながら逆位相で振動する理想的な運動(同期振動)を発生させることができる。本研究では、この試作機の実用化を図るために、合理的な最適設計法の確立を図るとともに、削岩機や電動ハンマなどのピストン内蔵工具への応用に向けた同期振動発生機構についても模索し続けている。

## 2. 研究の目的

(1) 先行研究で開発した振動ランマの試作機を実用化するためには、実際の使用状況下において最適な同期振動を安定的に発生させることが必要である。この課題に対して研究代表者らは、振動子を搭載するブロックばね系の振動特性に関連する系パラメータを適切に設定することで、最適な同期振動の発生領域が拡大され、不適切な同期振動や概周期振動の発生を抑制できることを実証している。本研究では、このような知見に基づいてパラメータスタディを実施して試作機の改良を試みるとともに、試作機の機械的性能について実験的に検証する。さらには、4振動子衝突モデルの最適設計法の確立を目指す。

(2) 削岩機や電動ハンマなどのピストン内蔵工具では、把持部の振動加速度が非常に大きく、手腕振動障害の発症リスクが高い。研究代表者らは、これまで電動ハンマを対象として、把持部の制振とピストンによる打撃運動とを同時に実現するための同期振動発生機構の開発を行ってきた。そして、2個の振動子が搭載された基本モデル(2振動子衝突モデル)を提案した。本研究では、振動ランマに対する検討で得た知見に基づいて、2振動子衝突モデルの更なる改良を行い、電動ハンマへの応用に向けた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) 手持ち振動工具への応用に向けた同期振動発生機構とその最適設計法を確立するために、振動ランマの試作機および電動ハンマの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、おもにシューティング法を基盤とした独自の解析ツールを用い、高精度なパラメータスタディを実施した。また、システムの振動特性と同期振動パターンとの関係性や非線形ノーマルモードと同期解との関係性など、先行研究で得た自己同期現象の発生メカニズムに関わる重要な研究成果を積極的に活用することにより、合理的な同期振動発生機構の開発を実施した。

(2) 解析結果の妥当性について調べるための検証実験を数値解析に平行して実施した。本実験では、リアルタイム動画解析システムや多チャンネル振動計測システムを利用して発生した同期振動の特徴を定量的に調べた。振動ランマに対する実験では、試作機による砂の締め固め試験を実施した。その際、把持部の振動加速度レベルを評価するために、ISO5349規格に準拠した方法で日振動ばく露量の計測を行った。さらに、衝撃用ロードセルを利用する方法で、地面に対する打撃力の測定を行った。以上の実験を通して、開発した実験装置の性能を定量的に評価した。

## 4. 研究成果

(1) 振動ランマの試作機の更なる性能向上を図るために、数値計算結果に基づいて試作機の改良を行った。さらに、砂(川砂)の締め固め試験を実施して、把持部の制振性能と打撃性能を定量的に評価した。具体的な研究成果は、以下の通りである。

図1は、試作機の解析モデルである。このモデルでは、上部ブロック(ブロック1)が制振対象であり、2個の下部ブロック(ブロック2およびブロック3)が励振対象に相当する。打撃対象である砂については、断片線形要素でモデル化することにより、打撃板が砂面に衝突する影響を考慮した。また、把持力の影響については、上部ブロックにコイルばねを取り付けることで考慮した。

砂の締め固め試験において、制振と励振とを同時に実現する同期振動を安定して発生させるために、上述の解析モデルを対象として、最適な系パラメータの同定解析を行った。この解析では、主に各ブロックの質量、ブロック間の結合ばねのばね定数、および振動子の不釣り合い量の最適値について検討した。その結果、把持部の制振効果が高く、目的の同期振動の発生領域を拡大できる最適な系パラメータを見いだすことに成功した。

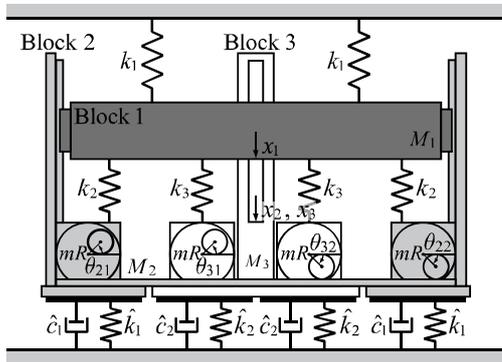


図1 試作機の解析モデル

上記で述べた検討結果に基づいて、試作機の再設計を行った。図2に新たに製作した試作機を示す。この新しい試作機の有効性を検証するために、砂の締め固め試験を実施した。図3に実験装置の構成を示す。本実験では、コンテナに入れた砂の上に試作機を設置して稼働させる。その際、把持部に3軸加速度ピックアップを設置して振動加速度を測定し、日振動ばく露量 $A(8)$ を求めた。また、コンテナの下面にロードセルを設置して砂面に対する打撃力を測定した。



図2 振動ランマの試作機

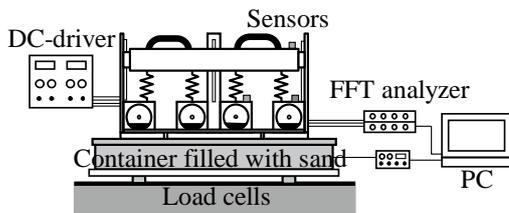


図3 実験装置の構成

まず、発生する同期振動パターンについて調べた。図4は、振動子であるDCモータにそれぞれ印加電圧 $e = 10 \text{ V}$ を与えて駆動させたときの、各ブロックの振動加速度 $a_1, a_2, a_3$ および打撃力 $F_{\text{sum}}$ の時刻歴応答である。発生した同期振動では、励振対象であるブロック2とブロック3が逆位相で振動して砂面を交互に打撃しており、両者の打撃力はほぼ同程度となっている。また、逆位相で振動することでブロック1に作用する反力が相殺されるため、ブロック1の振動加速度が抑制され

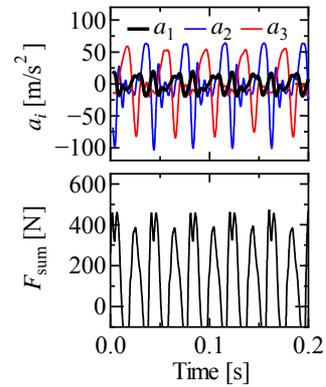


図4 時刻歴応答 ( $e = 10 \text{ V}$ )

ていることが確認できる。

次に、印加電圧を変化させて同期振動の発生領域を調べた。図5は、数値計算で求めた同期解の存在領域と実験で同期振動が発生した領域を比較した結果である。図中の縦軸は、上から同期振動数 $f_{\text{syn}}$  [Hz]、振動加速度実効値 $a_{\text{rms}}$  [ $\text{m/s}^2$ ]を示し、横軸は印加電圧 $e$  [V]を示す。また、印は実験結果を示す。数値計算結果から分かるように、同期解は非常に広い範囲に存在しており、実験結果においても印加電圧の上限値とした $10 \text{ V}$ まで同期振動が安定的に発生した。このように、系パラメータの最適化を図ったことで、振動抑制効果を維持したまま、同期振動の発生領域を大幅に拡大することができた。

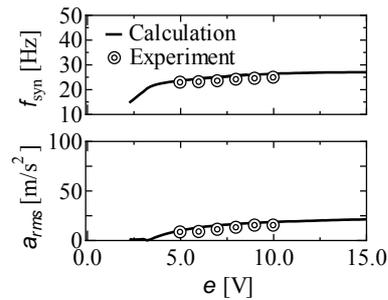


図5 同期振動の発生領域

次に、試作機の機械的性能について調べた。図6は、印加電圧を変更しながら打撃力と日振動ばく露量を測定した結果である。日振動ばく露量は、作業時間を最大の2時間として求めた。

図6(a)は打撃力の測定結果である。図中の印および印はそれぞれ打撃力の最大値および平均値を示す。打撃力の平均値は印加電圧が大きくなるにつれて増加しており、最大値としては約 $550 \text{ N}$ 程度の打撃力が測定された。一方、図6(b)は日振動ばく露量の測定結果である。日振動ばく露量には対策値として $2.5 \text{ m/s}^2$ 以下とする基準が定められている。図6(b)の結果では、いずれも対策値以下に抑

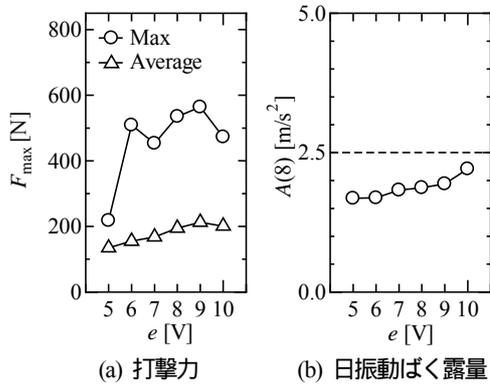


図6 打撃力および日振動ばく露量の測定結果(川砂)

えられており、把持部の制振効果が高いことが確認できる。

更なる検討として、川砂より粒径の大きな砂利と、柔らかい腐葉土とを打撃対象として締め固め試験を実施した。図7は、それぞれの条件で測定した日振動ばく露量の結果である。打撃対象の硬さなどの条件が変更された場合でも、日振動ばく露量が対策値以下に抑えられている上、広い範囲で同期振動が発生している。

以上の結果から、本研究で開発した試作機によれば、最適な同期振動を安定して発生させるとともに、把持部の振動を大幅に抑制することが可能であることが確認された。

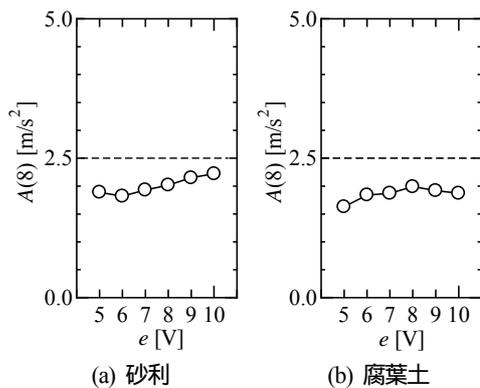
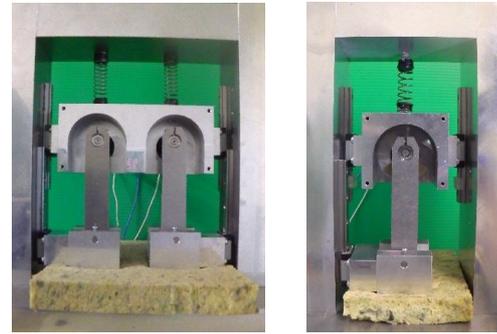


図7 日振動ばく露量の測定結果

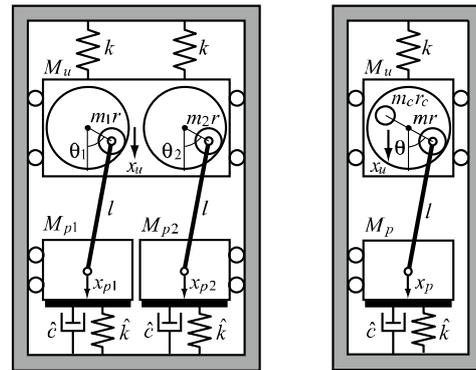
(2) 電動ハンマへの応用に向けて開発した同期振動発生機構の基本モデルである2振動子衝突モデルについて、その有効性を検証した。その際、比較対象として一般的な電動ハンマの機構に基づく1振動子衝突モデルも取扱い、数値計算と実験の両面から検討を行った。具体的な研究成果は、以下の通りである。

図8は、製作した実験装置である。両モデルとも、DCモータを搭載している要素(上部ブロック)とロッド(ノミやドリル)を打撃するピストンに相当する要素(下部ブロック)が、DCモータの回転軸に取り付けられ



(a) 2振動子衝突モデル (b) 1振動子衝突モデル

図8 電動ハンマの実験装置



(a) 2振動子衝突モデル (b) 1振動子衝突モデル

図9 電動ハンマの実験装置

た回転円板とコンロッドを介して結合している。このモデルでは、DCモータ、回転円板、コンロッドおよびピストンからなる構造を振動子と考える。各ブロックは、上下方向にのみ運動するようにスライドガイドによって剛フレームに拘束されている。また、ピストンの打撃対象にはスポンジを使用し、ピストンの下面部に設置している。

2振動子衝突モデルでは、2個の振動子が並列に搭載されており、それぞれのピストンを逆位相で同期振動させることで、反力を相殺し、上部ブロックの制振を図る。一方、1振動子衝突モデルでは、一般的な工具と同様に回転円板にカウンターウェイトを取り付けることによって、ピストンの運動に伴う反力を相殺することで上部ブロックの制振を図る。

図9は、解析モデルである。このモデルでは、ピストンがロッドに衝突する影響を考慮するため、ロッドを断片線形要素でモデル化し、ピストンの下面部に設けている。さらに、上部ブロックを把持することを考慮して、上部ブロックと固定壁とをコイルばねで結合している。なお、両モデルとも上部ブロックが制振対象であり、下部ブロックが励振対象である。

まず、発生する同期振動パターンについて調べた。図10および図11は、振動子であ

る DC モータにそれぞれ印加電圧  $e = 10 \text{ V}$  を与えて駆動させたときの、各ブロックの振動加速度  $a_u, a_{p1}, a_{p2}$  の時刻歴応答を求めた実験結果および数値計算結果である。ただし、1 振動子衝突モデルでは、印加電圧  $10 \text{ V}$  で駆動したときに上部ブロックの振動が最小となるように設計したカウンターウエイト (CW) を回転円板に設置している。両者の結果とも、振幅については定量的な差異があるものの、発生振動数や振動パターンの特徴は良好に一致している。2 振動子衝突モデルでは、2 個のピストンが逆位相で振動することによって、上部ブロックに作用する反力が相殺されて、上部ブロックの振動が抑制されている。これに対して、1 振動子衝突モデルでは、カウンターウエイトの効果によって、上部ブロックの振動が抑えられている。

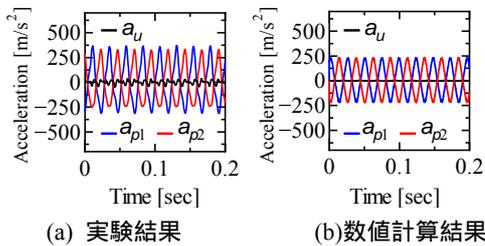


図 10 時刻歴応答

(2 振動子衝突モデル,  $e = 10 \text{ V}$ )

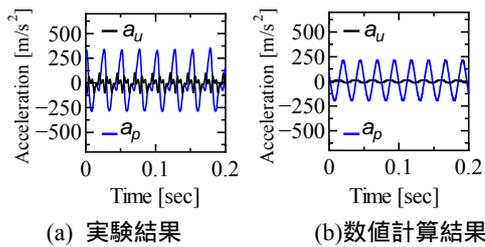


図 11 時刻歴応答

(1 振動子衝突モデル,  $e = 10 \text{ V}$ )

次に、印加電圧を変化させて同期振動 (1 振動子衝突モデルでは定常周期振動) の発生領域について調べた。図 12 および図 13 は、数値計算で求めた同期解の存在領域と実験で同期振動が発生した領域とを比較した結果である。図中の縦軸は、上から同期振動数  $f_{\text{syn}}$  [Hz], 上部ブロックの両振幅  $\text{Amp } x_u$  [mm], 下部ブロックの両振幅  $\text{Amp } x_p$  [mm] を示し、横軸は印加電圧  $e$  [V] を示す。また、印は実験結果を示す。この結果から、実験結果と数値計算結果は良好に一致していることが確認できる。同期振動の発生領域をみると、両モデルとも  $5 \text{ V}$  ぐらいから解分枝が存在しており、発生振動数や振幅についてもほぼ同等となっている。したがって、この結果からは、2 振動子衝突モデルの有効性を確認すること

はできない。

図 14 は、異なるカウンターウエイトを設置した 1 振動子衝突モデルと 2 振動子衝突モデルを対象として、印加電圧を変化させて上部ブロックの振幅を測定した実験結果である。1 振動子衝突モデルの場合、印加電圧に応じてカウンターウエイトの最適値は異なるため、印加電圧がその最適値から離れると上部ブロックの振幅が大きくなっている。これに対して 2 振動子衝突モデルでは、印加電圧の大きさに関わらず、上部ブロックの振幅が小さく抑えられている。

また、図 15 は印加電圧を  $10 \text{ V}$  とし、打撃対象である断片線形要素のばね定数を変化させたときの定常振動解の存在領域を求めた結果である。この結果から分かるように、1 振動子衝突モデルでは、打撃対象の剛性が大きくなると途端に解分枝が消滅しているのに対して、2 振動子衝突モデルでは、1 振動子衝突モデルよりも上部ブロックの制振効果が大きく、広い範囲に解分枝が存在している。以上の結果から、2 振動子衝突モデルを電動ハンマの機構として利用できる可能性は十分あると考えられる。

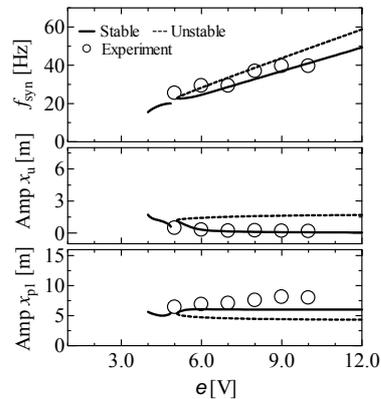


図 12 同期振動の発生領域 (2 振動子衝突モデル)

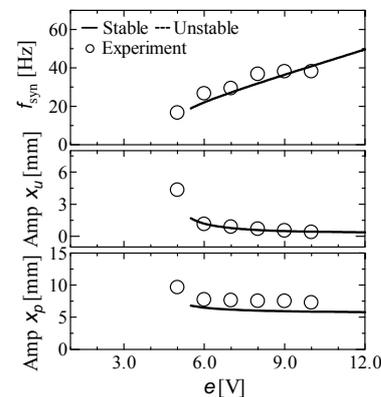


図 13 同期振動の発生領域 (1 振動子衝突モデル,  $10 \text{ V}$  用 CW 使用)

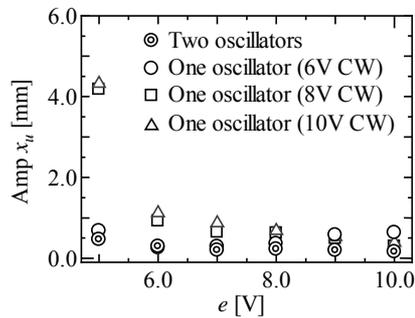


図 14 上部ブロックの振動低減効果の比較

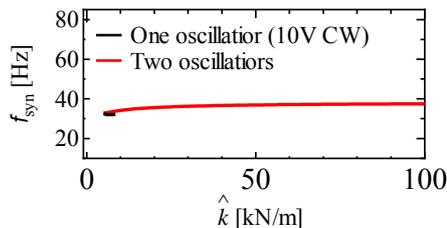


図 15 同期解の存在領域の比較

## 5. 主な発表論文等

### 〔雑誌論文〕(計 2 件)

小野友輝, 近藤孝広, 盆子原康博, スティック・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(同期の発生領域に対する振動子間の結合条件), 日本機械学会論文集(C編), 査読有, 79巻, 799号, 2013, 550-561

<http://dx.doi.org/10.1299/kikaic.79.550>

Tomoki ONO, Takahiro KONDOU and Yasuhiro BONKOBARA, Synchronization Generated in Coupled Self-Excited Oscillators with Stick-Slip Motion: Coupling Condition between Oscillators for Existence Regions of Synchronization, Journal of System Design and Dynamics, 査読有, Vol.7, No.4, 2013, 580-594

<http://dx.doi.org/10.1299/jsdd.7.580>

### 〔学会発表〕(計 10 件)

盆子原康博, 近藤孝広, 小野友輝, 日下部紘亮, 自己同期現象を利用した振動ランマの開発(砂の締め固め試験による検討), 日本機械学会 機械力学・計測制御部門講演会, 2012.9.18, 慶應義塾大学(神奈川県)

富永恭平, 盆子原康博, 近藤孝広, 小野友輝, 自己同期現象を利用した電動ハンマの開発(基本モデルの検討), 日本機械学会 機械力学・計測制御部門講演会, 2012.9.18, 慶應義塾大学(神奈川県)

盆子原康博, 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, バイオメカニクス研究センター&エレクトロニクス実装学会九州支部講演会, 2013.3.8, 九州大学(福岡県)

Tomoyuki TANIGUCHI, Yasuhiro BONKOBARA, Takahiro KONDOU and Yuichiro SAKAMOTO, The SA/GA Hybrid Optimization Method using a Procedure for Changing Mesh Size, 15th Asia Pacific Vibration Conference, 2013.6.3, Jeju, Korea  
Yasuhiro BONKOBARA, Takahiro KONDOU and Tomoki ONO, Validation of a Tamping Rammer using Self-Synchronization Phenomena by Sand Compaction Tests, 15th Asia Pacific Vibration Conference, 2013.6.5, Jeju, Korea  
Yasuhiro BONKOBARA and Takahiro KONDOU, Development of Synchronous Vibration Mechanism for a Tamping Rammer, International Joint Symposium on Applied Mechanics and Robotics, 2013.7.28, Miyazaki, Japan

岩本望, 濱田宏樹, 盆子原康博, 近藤孝広, 自己同期現象を利用した振動ランマの開発(手腕振動ばく露量の測定), 日本機械学会 機械力学・計測制御部門講演会, 2013.8.26, 九州産業大学(福岡県)

濱田宏樹, 盆子原康博, 近藤孝広, 永富恭平, 自己同期現象を利用した電動ハンマの開発(基本モデルによる実験的検証), 日本機械学会 機械力学・計測制御部門講演会, 2013.8.26, 九州産業大学(福岡県)

岩本望, 盆子原康博, 近藤孝広, 自己同期現象を利用した振動ランマの開発(試作機の性能評価), 日本機械学会 機械力学・計測制御部門講演会, 2014.8.26, 上智大学(東京都)

盆子原康博, 河室成悟, 井上大地, 近藤孝広, 岩本望, 自己同期現象を利用した振動ランマの開発(打撃力の測定実験), 日本機械学会九州支部大分講演会, 2014.9.20, ホルホート大分(大分県)

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

盆子原 康博(BONKOBARA YASUHIRO)

宮崎大学・工学部・准教授

研究者番号: 10294886

### (2) 研究分担者

近藤 孝広(KONDOU TAKAHIRO)

九州大学・工学研究院・教授

研究者番号: 80136522

### (3) 連携研究者

該当なし