

平成 30 年 6 月 28 日現在

機関番号：17601

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2015～2017

課題番号：15K05868

研究課題名(和文) 手腕振動障害の発症率ゼロに挑む手持ち振動工具の実用化

研究課題名(英文) Practical Application of vibration hand held vibration tools 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) 3,400,000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、同期振動発生機構を搭載した振動ランマおよび電動ハンマの試作機を開発した。電動ハンマに関する研究では、砂の締め固め試験を実施して日振動ばく露量および打撃力の測定結果を行い、制振と励振とを同時に実現可能であることを実証した。より実用的な検討として、セメントレンガの破碎実験を実施し、まだ不十分であるが破碎に成功した。振動ランマに関する研究では、先行研究で開発した試作機の性能向上を図るため、出力の大きなモータを用いたし試作機を新たに開発した。そして、砂の締め固め試験を実施した結果、打撃力が大幅に増大したことを確認した。

研究成果の概要(英文)：In order to reduce vibration of tool handles which is known as an occurrence factor of the hand-arm vibration syndrome, the two types of very low-vibrational tools, electric hammer and tamping rammer, has been developed by using the generation mechanism of synchronous vibration. The availability of the synchronous vibration generated in the prototype experimental apparatus was investigated based on sand compaction tests and numerical computations. The results confirm that the stable synchronized vibrations which are able to achieve a good balance between vibration control and excitation could be generated by setting the system parameters appropriately. The fracturing experiment of a cement block using the prototype of electric hammer has been successful but it is still far from enough. In the tamping rammer, the prototype with high power motors has been developed and confirmed that impact force is significantly increased.

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 日振動ばく露量

1. 研究開始当初の背景

手持ち振動工具を使用する際、工具に発生した振動が手腕を介して人体に伝播することによって手腕振動障害と呼ばれる健康障害が発症することがある。近年でも、削岩機や電動ハンマなどを使用する建設業を中心に労災認定患者が多発している状況にある。研究代表者らは、この問題を抜本的に解決するために、非線形力学系で発生する自己同期現象に着目し、工具把持部の振動低減化と振動利用とを同時実現するための同期振動発生機構の開発に取り組んできた。自己同期現象とは、複数の非線形自励振動子が結合した系において振動子間の相互作用によって特定の周期振動状態に引き込まれる現象である。この現象を応用すれば、複雑な制御を施すことなく目的に適した振動パターンを自律的に発生させることができるので、手持ち振動工具の機構として利用できる可能性がある。

2. 研究の目的

本研究では、同期振動発生機構を導入した振動工具の実用化を図るために、各種振動工具に対する合理的な最適設計法の確立と、実規模モデルを開発することを目的とする。

(1) 電動ハンマの試作機の開発 電動ハンマは、ピストン内蔵工具の一種であり、打撃部と把持部とが一体構造であるため把持部に大きな振動が生じやすい。これに対して、先行研究で開発した同期振動発生機構では、ピストンクランク機構と DC モータからなる振動子を 2 個搭載し、両者を逆位相で自律的に同期回転させることで、把持部の振動を大幅に制振することができる。本研究では、この機構を搭載した電動ハンマを試作し、機械的性能について検証する。

(2) 実規模モデルの開発 先行研究では、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、その試作機を開発した。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同期振動を発生させることができる。本研究では、開発した試作機の機械的性能の向上を目指して、新たに実規模モデルの開発を行う。

3. 研究の方法

(1) 電動ハンマおよび振動ランマの試作機を設計するにあたり、シューティング法を基盤とする独自の数値解析ツールを用いて高精度かつ詳細なパラメータスタディを実施した。さらに、上述の数値解析に平行して、解析結果の妥当性と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。使

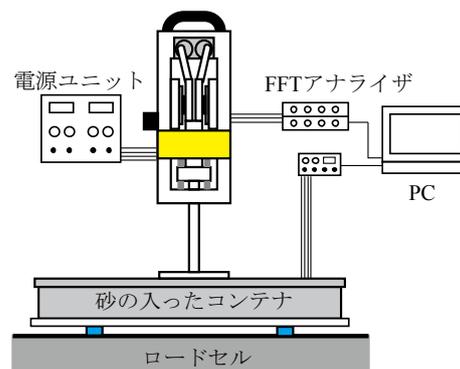


図1 砂の締め固め試験を行う実験システム

用した実験システムを図1に示す。このシステムでは、水平な基礎の上に打撃力を測定するためのロードセルを4個設置し、その上に平板と砂を入れたコンテナを置いている。実験では、砂面上に試作機を置き、振動子に印加電圧を与えて駆動させ、各ブロックの運動状態を調べるとともに手腕振動および打撃力を測定した。

(2) 具体的な実験方法は次の通りである。制振対象のブロックと励振対象のブロックにそれぞれ加速度センサを設置する。そして、計測された加速度応答に対して FFT アナライザにより周波数分析を行い、自己同期振動の発生の有無を判定する。目的の同期振動が発生した場合には、発生振動数やブロック毎の振動加速度を計測するとともに、コンテナの下に設置したロードセルによって打撃力応答を測定する。さらに、手腕振動を定量的に評価するために、国際規格に基づいて日振動ばく露量を測定する。日振動ばく露量は、手持ち振動工具の手腕部の振動を定量的に評価するものであり、周波数補正された把持部の振動加速度実効値（3軸合成値）と1日の振動ばく露時間とから求められる。本研究では、ばく露時間を2時間とした場合に、日振動ばく露量が 2.5 m/s^2 以下となることを制振性能の目標値とした。

4. 研究成果

(1) 電動ハンマを対象として、2 個の振動子を有する同期振動発生機構を搭載した試作機を開発した。この試作機に対して砂の締め固め試験による性能評価を実施するとともに、初期クランク角および押し付け力が打撃力や日振動ばく露量に及ぼす影響について調べた。さらに、試作機にはつり専用の工具を取り付けてセメントレンガの破碎実験を行い、試作機の有効性を検証した。具体的な研究成果は以下の通りである。

① 本研究で開発した電動ハンマの試作機を図2に示す。この試作機は、主に上部ブロック、2 個の下部ブロックおよびロッドから構成されている。上部ブロックは把持部を有し

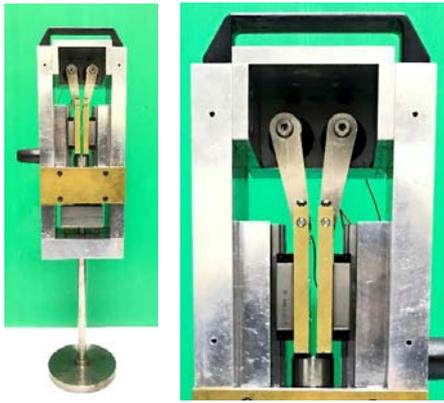


図2 電動ハンマの試作機

ており、内部に下部ブロックとロッドからなる機構を搭載している。下部ブロックは、それぞれ並列に往復運動するように上部ブロックの内壁に設置したリニアガイドに拘束され、ロッドの上端面の左側と右側に下部ブロックが衝突するように配置している。さらに、上部ブロックとロッドとは4個のコイルばねで結合しており、これによって上部ブロックの自重を支えている。

砂の締め固め試験を行う場合には、ロッドの下端には打撃板を取り付けている。この装置では、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。試作機に印加電圧を与えて駆動すると、2個の下部ブロックが逆位相で振動してロッドを打撃する最適な同期振動が発生する。

② 本実験では、試作機を把持する際に鉛直方向に押し付ける力(押し付け力) F_{press} とそれによって生じるクランク軸の回転角(初期クランク角度) θ_0 を変更しながら実験を行った。押し付け力は、実験者が体重計の上に乗って実験を行い、体重の変動量から測定した。初期クランク角については、クランクピンが鉛直位置にある時を原点として角度計を用いて測定した。

③ 押し付け力を加えない状態 ($F_{press} = 0\text{ N}$) で初期クランク角度 $\theta_0 = 10\text{ deg}$ に設定し、印加電圧 e を 5 V から 10 V の範囲で変化させながら発生する運動を測定した。図3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。図中の横軸は印加電圧 e であり、縦軸は上から同期振動数 f_{syn} 、上部ブロックの振動加速度実効値 a_u 、打撃力 F_{impact} をとっている。数値計算で得られた安定解を実線、不安定解を破線で示し、実験で目的の同期振動パターンが発生した点を◎印で示している。

低電圧域の安定解は下部ブロックが同位相で振動する同期解であり、高電圧域の安定解は下部ブロックが逆位相で振動する目的

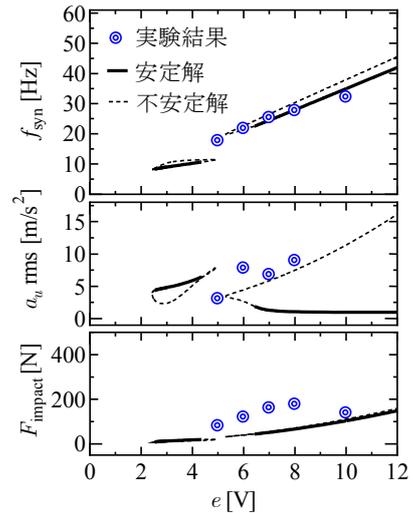
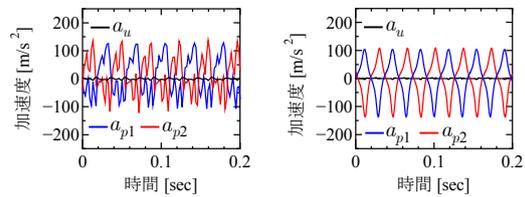


図3 実験結果と数値計算結果の比較



(a) 実験結果

(b) 計算結果

図4 時刻歴波形 ($e = 8.0\text{ V}$)

の同期解である。図4は、両振動子に印加電圧 $e = 8.0\text{ V}$ を与えて稼働させて目的の同期振動が発生させたときの振動加速度の時刻歴応答 (a_u : 上部ブロック, a_{p1}, a_{p2} : 下部ブロック) である。この結果から、励振対象である下部ブロックが逆位相で振動しつつ、上部ブロックの加速度は非常に小さくなっていることが確認できる。

④ 押し付け力 F_{press} および初期クランク角 θ_0 が打撃力や日振動ばく露量に及ぼす影響について調べた。本実験では、押し付け力 F_{press} を $0\text{ N}, 5\text{ N}, 10\text{ N}$ の3種類、初期クランク角 θ_0 を $10\text{ deg}, 30\text{ deg}, 60\text{ deg}$ の3種類にとり、条件を変更しながら実験を行った。実験は同条件で3回ずつ行い、最適な振動パターンが発生したときには、打撃力 F_{impact} および日振動ばく露量 $A(8)$ を測定した。

日振動ばく露量 $A(8)$ の測定結果を図5に示す。図中の横軸は押し付け力 F_{press} であり、縦軸は日振動ばく露量 $A(8)$ をとっている。印加電圧 $e = 8.0\text{ V}$ の結果を白丸印、 $e = 10.0\text{ V}$ の結果を黒丸印でプロットしている。得られた結果を見ると、印加電圧や押し付け力および初期クランク角によらず、日振動ばく露量は目標とした対策値 2.5 m/s^2 以下に抑えられており、高い制振効果が確認できる。また、押し付け力および初期クランク角が日振動ば

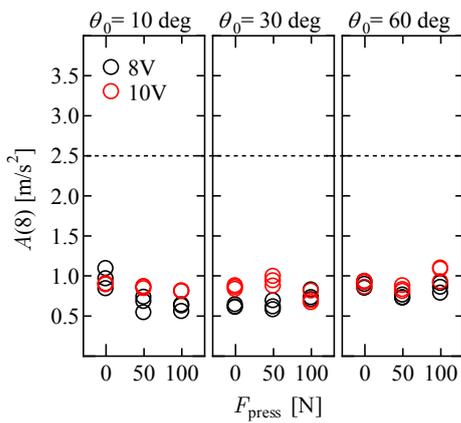


図5 日振動ばく露量の測定結果

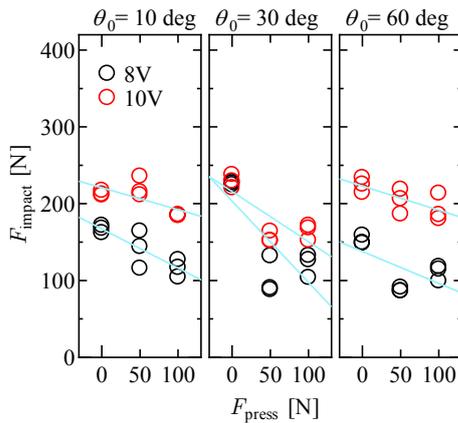


図6 打撃力の測定結果

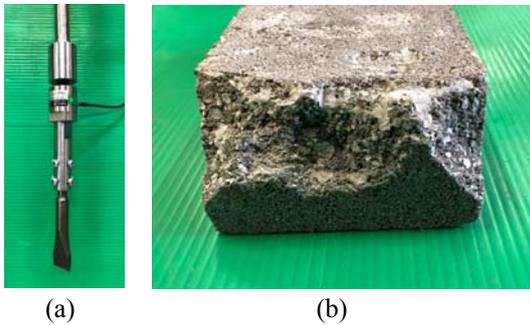


図7 破碎実験結果

く露量に与える影響は小さいことがわかる。なお、 $\theta_0 = 90 \text{ deg}$ 以上になるとモータが安定して回転することができなかった。

次に、打撃力 F_{impact} の測定結果を図6に示す。図6の表記方法は図5と同様である。表示した打撃力は、押し付け力および自重分を差し引いた値を示しており、破線は実験結果の近似直線である。得られた結果を見ると、打撃力は印加電圧が高いほど大きくなっていることがわかる。また、押し付け力が大きくなるに伴い、打撃力が低下する傾向が確認できる。初期クランク角の違いによっては、打撃力はあまり変化していない。このことより押し付け力や初期クランク角が打撃力に与える影響は小さいと言える。

⑤ 試作機の破碎能力を確認するため、図7(a)に示すようにロッドの下端にコールドチゼルを取り付け、セメントレンガを対象として破碎実験を行った。この実験では、図7(a)に示すように試作機とコールドチゼルの間にロードセルを取り付けて、打撃力の測定を行った。実験では、実験者が試作機をセメントレンガの上に設置して、押し付け力を100 N加えた状態で印加電圧10 Vを与えて駆動した。その結果、目的の同期振動パターンの発生を確認することができ、およそ10秒後にはセメントレンガを破碎することができた。破碎後のセメントレンガの写真を図7(b)に示す。このときの打撃力は200 N程度、日振動ばく露量 $A(8)$ は 2.0 m/s^2 程度であった。砂の締め固め試験結果と比べて打撃力が大きくなったものの、破碎を行うにはまだ十分ではない。今後、打撃性能を向上するためには、モータの出力を大きくする必要がある。

(2) 振動ランマを対象として、4個の振動子を有する同期振動発生機構を搭載した試作機を開発した。その中で、先行研究で製作した試作機の実用化に向けた更なる性能向上を図るために、系パラメータの再設計を行った。また、振動子による加振力を増加させた際にモータ軸が破損することがあったため、振動子の構造について改良を行った。具体的な研究成果は、以下の通りである。

① 本研究で開発した振動ランマの試作機を図8に示す。この試作機は、制振対象である1個の上部ブロックと励振対象である2個の下部ブロックからなっている。上部ブロックと下部ブロックは4つのコイルばねによって結合されており、下部ブロックは、それぞれ上部ブロックの左右および中央部に取り付けたりニアガイドに沿って上下方向のみ運動するよう拘束されている。また、下部ブロックには、各下部ブロックに2個ずつ、計4つの回転型自励振動子(以下、振動子と呼ぶ)が搭載されている。この振動子には90 Wの出力を有するDCモータを取り付けており、印加電圧を与えてDCモータを駆動する。なお、安全のために振動子の不釣り合いおもりの



図8 振動ランマの試作機

回転部分が露出しないように、振動子はそれぞれブロックの内部に設置されている。各下部ブロックの振動子が逆位相で回転することにより、工具把持部を制振し、同時に打撃部が励振するような目的の同期振動を発生させることができる。

② 試作機の系パラメータの選定を行うために、表1に示すような9種類の実験条件で砂の締め固め試験を行った。対象としたパラメータは上部ブロックの質量 M_1 と結合ばねのばね定数 k であり、それぞれ3種類用意した。本実験では、DCモータが耐えうる負荷の上限から各振動子の印加電圧42Vを上限として、24Vから42Vまで2V刻みで印加電圧を変化させながら目的の同期振動パターン発生を確認を行った。

図9に各条件で測定した日振動ばく露量を示す。横軸は印加電圧であり、縦軸は日振動ばく露量をとっている。図9では目的の同期振動以外の実験結果もプロットしており、目的の同期振動が確認されたのは灰色で塗られた領域である。

表1 系パラメータの組み合わせ

$k \backslash M_1$	9.1 kg	14.1 kg	19.1 kg
	39,590 N/m	条件①	条件②
49,490 N/m	条件④	条件⑤	条件⑥
68,530 N/m	条件⑦	条件⑧	条件⑨

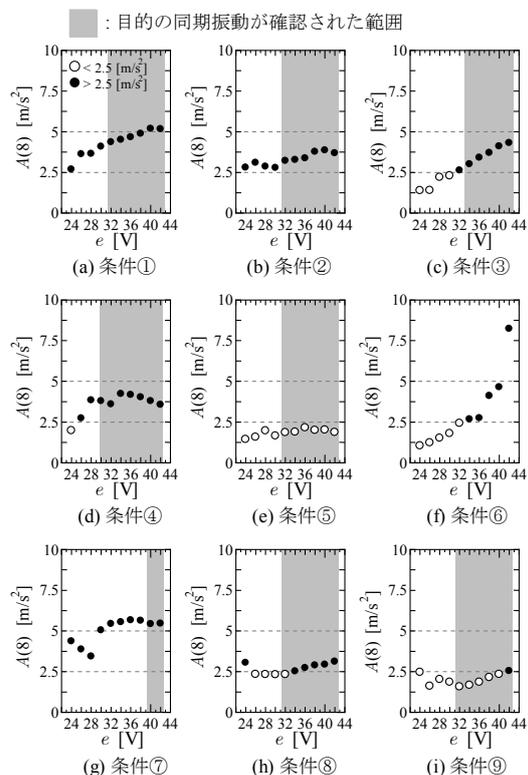


図9 同期振動の発生領域および日振動暴露量

図9(a), (b), (c)から確認できるように、ばね定数が39,590 N/mの場合、目的とする同期振動の発生は確認されたが、日振動ばく露量が全ての印加電圧で目標値である 2.5 m/s^2 を超える結果となった。図9(d), (e), (f) (ばね定数が49,490 N/mの場合) では、目的の同期振動が確認されたものの、図9(d)の条件④では日振動ばく露量が 2.5 m/s^2 を越えていた。図9(e)の条件⑤では、同期振動が発生したすべての印加電圧において日振動ばく露量が 2.5 m/s^2 以下となった。また、図9(f)の条件⑥では、印加電圧を42Vとしたときに目的の同期振動が確認できなかった。その上、目的の同期振動ではない同期振動が発生し、急激に日振動ばく露量が増加した。図9(g), (h), (i) (ばね定数が68,530 N/mの場合) でも目的の同期振動が確認された。ただし、図9(g)の条件⑦では、目的の同期振動する範囲が狭くかつ対策値を超える結果となった。図9(h)の条件⑧では、印加電圧が34V以降で 2.5 m/s^2 を超える結果となった。図9(i)の条件⑨では、印加電圧が40V時まで対策値以下となったが、最も打撃力のある42V時には目標値を超える結果となった。以上の結果から、条件⑤を最適な系パラメータとした。

③ 図10は、条件⑤に設定したときの試作機において、印加電圧42Vを与えて各ブロックに生じる振動加速度を測定した時刻暦波形である。比較のため同条件で数値計算により求めた時刻暦波形も示す。この結果を見ると、把持部の制振と打撃部の励振とを同時に実現できる最適な同期振動の発生が確認できる。実験結果と数値計算結果の振動加速度振幅を比較すると、上部ブロック、下部ブロックともに定量的に差異が生じていることがわかる。このような打撃力や下部ブロックの振動加速度の差異については、測定機器の分解能と数値計算の精度との相違が影響していると考えられる。

④ 詳細な同期振動の発生範囲を調べるために印加電圧を24Vから42Vまで1V刻みで変動させながら砂の締め固め試験を行った。図11に実験結果を示す。図中の横軸は印加電圧であり、縦軸は図11(a)が打撃力で図11(b)が日振動ばく露量である。この結果を見ると、印加電圧33V以上から目的とする同期振動の発生が確認され、全ての印加電圧で日振動ばく露量が 2.5 m/s^2 以下となった。また、打撃力は印加電圧が42V時に最大1,054Nであった。この値は先行研究の試作機と比べると増大しているが、実際の振動ランマは打撃力が数kN程度であるため、機械的性能に関してはまだ不十分といえる。

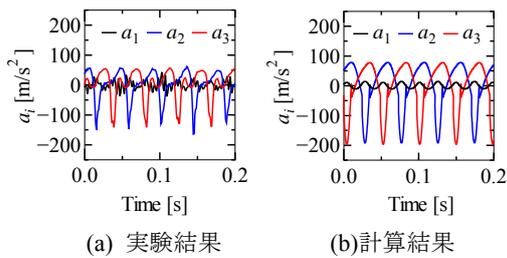


図 10 時刻歴波形

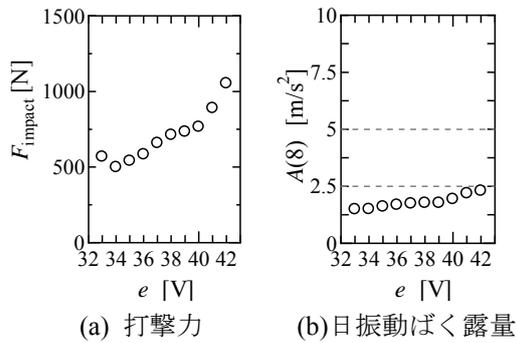


図 11 試作機の性能検証

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 3 件)

- ① 盆子原康博, 近藤孝広, 濱畑貴之, 井上大地, 松浦快太, 手腕振動障害の発症リスク低減を目的とした振動ランマの開発, 宮崎大学工学部紀要, 査読無, 第 46 号, 2017, 71-76.
- ② 盆子原康博, 近藤孝広, 花内勇也, 濱畑貴之, ランキング形式による構造損傷評価法の提案, 宮崎大学工学部紀要, 査読無, 第 46 号, 2017, 77-84.
- ③ Myung-Soo Choi, Takahiro KONDOU, Yasuhiro BONKOBARA, Free Vibration Analysis of Straight-Line Beam Regarded as Distributed System by Combining Wittrick-Williams Algorithm and Transfer Dynamic Stiffness Coefficient Method, Journal of Mechanical Science and Technology, 査読有, Vol.30, No.3, 2016, 983-991.

〔学会発表〕(計 9 件)

- ① 花内勇也, 盆子原康博, 野田一輝, 中道康貴, 濱畑貴之, 近藤孝広, ランキング形式による構造損傷評価法に関する研究 (計算精度に与える曲げモーメントの影響について), 日本機械学会 2017 年度年次大会, 2017.9.4, 埼玉大学 (さいたま市)
- ② 梅村飛友歌, 盆子原康博, 入江美咲, 濱畑貴之, 近藤孝広, 自己同期現象を利用した電動ハンマの開発 (初期クランク角および押し付け力の影響について), 日本機械学会 2017 年度年次大会, 2017.9.4, 埼玉大学 (さいたま市)
- ③ 池美慧, 盆子原康博, 稲垣耕, 濱畑貴之, 近藤孝広, レシプロ圧縮機の振動抑制技

術に関する研究 (基本モデルに対する検討), 日本機械学会 2017 年度年次大会, 2017.9.4, 埼玉大学 (さいたま市)

- ④ 松浦快太, 盆子原康博, 井上大地, 梅村飛友歌, 濱畑貴之, 近藤孝広, 自己同期現象を利用した振動ランマの開発, 日本機械学会 2016 年度年次大会, 2016.9.12, 九州大学 (福岡市)
- ⑤ 盆子原康博, 梅村飛友歌, 川野芳宏, 小柳昭人, 濱畑貴之, 近藤孝広, 自己同期現象を利用した電動ハンマの開発, 日本機械学会 2016 年度年次大会, 2016.9.12, 九州大学 (福岡市)
- ⑥ 盆子原康博, 花内勇也, 今藤智輝, 倉永啓博, 近藤孝広, ランキング形式による構造損傷評価法に関する研究 (複数損傷に対する性能評価), 日本機械学会 2016 年度年次大会, 2016.9.12, 九州大学 (福岡市)
- ⑦ 藤井史成, 盆子原康博, 近藤孝広, 森博樹, 自己同期現象を利用した電動ハンマの最適設計に関する検討, 日本機械学会機械力学・計測制御部門講演会, 2016.8.23, 山口大学 (宇部市)
- ⑧ 盆子原康博, 手腕振動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, 第 24 回九州ダイナミクス&コントロール研究会, 2015.12.25, リファレンスビル (福岡市)
- ⑨ 藤井史成, 盆子原康博, 近藤孝広, 森博樹, 自己同期現象を利用した電動ハンマ (自己同期の有効性), 日本機械学会九州支部長崎講演会, 2015.9.25, 長崎大学 (長崎市)

〔産業財産権〕

○出願状況 (計 1 件)

名称: 密閉型圧縮機および冷凍装置

発明者: 稲垣耕, 近藤孝広, 盆子原康博

権利者: パナソニック(株)アプライアンス社

種類: 特許,

番号: 特願 2015-108138

出願年月日: 2015 年 5 月 28 日

国内外の別: 国内

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: 1 0 2 9 4 8 8 6

(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: 8 0 1 3 6 5 2 2

(3) 連携研究者

該当なし