

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

盆子原 康博^{a)}・近藤 孝広^{b)}・濱畑 貴之^{c)}・井上 大地^{d)}・松浦 快太^{e)}

Development of a Tamping Rammer for Decreasing the Risk of Hand-Arm Vibration Syndrome

Yasuhiro BONKOBARA, Takahiro KONDOU, Takayuki HAMAHATA

Daichi INOUE, Kaita MATSUURA

Abstract

Hand-arm vibration syndrome characterized by the Raynaud's phenomena is known as a health disorder to cause by the long-term use of the hand-held vibrating tools and by excessive exposure to hand-arm vibrations. 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. In this paper, the prototype experimental apparatus with a generation mechanism of synchronous vibration suitable for a tamping rammer is developed based on the mechanism of the impact model with two oscillators developed in the previous report. The availability of the synchronous vibration generated in the prototype experimental apparatus is investigated based on sand compaction tests and numerical computations using the shooting method. 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. 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.

Keywords: Nonlinear Vibration, Self-Excited Vibration, Synchronization, Vibration Control

1. はじめに

現在、我が国では手腕振動障害の発症を予防するために、労働基準局が示したチェーンソー以外の振動工具の取扱業務に係る振動障害予防対策指針（基発 0710 第 2 号）に基づいて、低振動工具の選定や防振手袋の使用などといった対策が講じられている^{1,2)}。しかしながら、削岩機などのような振動利用を目的とした工具では、内蔵された振動体の励振力やピストンによる打撃力によって把持部に大きな振動が不可避的に発生するため、人体への振動伝播を完全に防止することは困難である。このため、工具に生じる振動加速度レベルに応じて 1 日あたりの振動ばく露の限界時間が定められ、作業者の連続作業時間を制限している状況にある。もし、手腕振動障害の発症リスクを低減することができれば、作業効率や生産性の向上に大いに貢献できるため、手持ち振動工具の低振動化に取り組むことは非常に重要な課題である。

このような状況を踏まえて、本研究では、非線形力学系で発生する自己同期現象³⁾に着目して、工具把持部の低振動化を実現する同期振動発生機構の開発を目指している。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定常周期振動状態に引き込まれる現象であり、振動利用の観点から工学的に有用な特長を有している。先行研究⁴⁾では、代表的な手持ち振動工具である振動ランマを対象として同期振動発生機構を開発するとともに、制振と励振とを同時に実現し得る最適な同期振動が発生することを示した。本報では、開発した同期振動発生機構の有効性について検証するため、その機構に基づいて振動ランマの試作機を開発した。さらに、砂の締め固め試験を実施して、手腕振動加速度や打撃力を測定し、試作機の機械的性能について調べた。

2. 振動ランマの試作機

振動ランマとは、エンジンで駆動するピストンや偏心モータなどを加振源として利用して、地面の締め固めを行う手持ち振動工具である。一般的な振動ランマでは、上部ブロックに加振源とハンドル（把持部）を有し、その下にコイルばねで結合した打撃板がある。この打撃板を上述の加

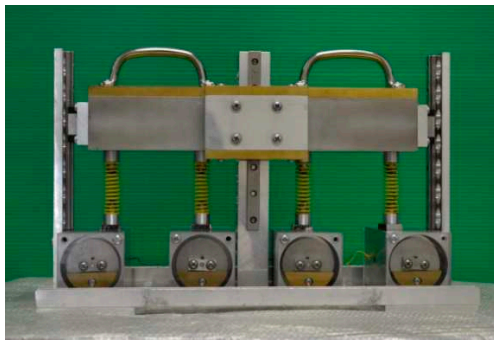
a)機械設計システム工学科准教授

b)九州大学大学院工学研究院機械工学部門教授

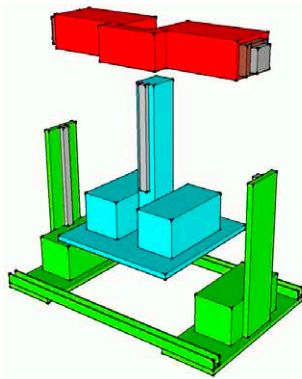
c) 教育研究支援センター技術職員

d)機械システム工学専攻大学院生（現 京セラ株式会社技術員）

e)機械システム工学専攻大学院生



(a) 外観図.



(b) 構成図.

図1. 振動ランマの試作機.

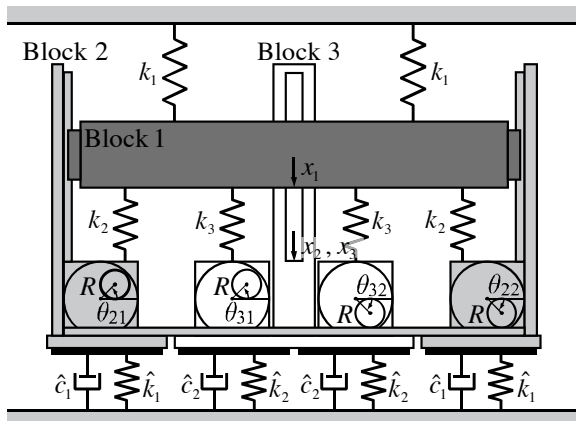


図2. 解析モデル.

振源によって励振することにより、地面を繰り返し打撃することができる。

本研究では、このような実機の機構と先行研究で開発した2振動子衝突モデル⁴⁾の機構に基づいて、図1に示すような振動ランマの試作機を開発した。この試作機は、主に上部ブロック(図1(b)の赤色のブロック)と2個の下部ブロック(図1(b)の緑色と青色のブロック)から構成されており、上部ブロックと下部ブロック間はコイルばねで結合している。上部ブロックには把持部が設置されており、下部ブロックには地面を打撃するための打撃板が設置され

ている。すなわち、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。下部ブロックには、DCモータの回転軸の両側に不釣り合いおもりを取り付けた回転型自励振動子(以下、振動子と呼ぶ)が下部ブロックの対称な位置にそれぞれ2個ずつ(合計4個)搭載されている。安全のため振動子の不釣り合いおもりの回転部分が露出しないように、振動子全体をブロックの中に設置している。振動子の不釣り合いおもりは、すべて同一面内で回転するように設置されており、個々に与えられる印加電圧によって独立して駆動することができる。また、下部ブロックは、上部ブロックに取り付けられたリニアガイドによって同一方向(鉛直方向)に運動するように拘束されている。なお、試作機を設計するにあたって、各ブロックの形状や振動子の設置位置を調整することにより、ブロックの重心がすべて中心軸上に位置するように設計している。これは、下部ブロックに生じた振動によってモーメントが生じて横揺れ振動が発生しないようにするためである。

試作機の全体の大きさは、幅0.39 m×高さ0.24 m×奥行き0.24 m、総重量は約12.9 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。振動子には、15 Wの出力を有するDCモータ(マクソン社製、A-max32、公称電圧12.0 V)を用い、下部ブロックにそれぞれ2個ずつ搭載している。両端の回転軸に設置した不釣り合い量は2.43 kg・mmである。その他、系パラメータについては後述する。

3. 解析モデルおよび運動方程式

試作機の開発にあたり、把持部の制振と打撃部の励振とを同時に実現可能な同期振動を発生させるために、図2に示すような解析モデルを対象として数値計算による最適設計を行った。このモデルでは、上部ブロックをブロック1、外側の振動子を搭載した下部ブロックをブロック2、内側の振動子を搭載した下部ブロックをブロック3と呼ぶ。また、振動子の不釣り合いおもりを左側から順におもり21、おもり31、おもり32、おもり22と呼ぶ。解析にあたり、各ブロックは剛体として取り扱い、ブロック1の質量を M_1 、ブロック2およびブロック3の質量をそれぞれ M_2 、 M_3 (DCモータの質量も含む)とする。不釣り合いおもりはすべて質量 m 、不釣り合い長さ R の質点として取り扱う。各ブロック間を連結するスライドガイドのブロックとレール間には粘性減衰力が作用するものと仮定して、それぞれの粘性減衰係数を c_1 および c_2 、 c_3 とする。ブロック1とブロック2およびブロック3を結合するコイルばねのばね定数をそれぞれ k_2 、 k_3 とする。また、装置を把持する影響を考慮するため、ブロック1はばね定数 k_1 のコイルばねを介して基礎と結合している。さらに、ブロックが地面と衝突する影響を考慮するため、ブロック2とブロック3の下面に断片線形ばね(ばね定数 \hat{k}_1 、 \hat{k}_2)および

断片線形ダッシュポット（粘性減衰係数 \hat{c}_1, \hat{c}_2 ）を設置している。

各ブロックは鉛直方向（下向きを正とする）にのみ運動するものとし、ブロック間のコイルばねおよび断片線形ばねが自然長となる位置からの変位をそれぞれ x_1, x_2, x_3 とする。不釣り合いおもりについては、DC モータの回転軸まわりに対しておもり 21 とおもり 31 は反時計方向に、おもり 22 とおもり 32 は時計方向に回転するものとし、角変位をそれぞれ $\theta_{21}, \theta_{22}, \theta_{31}, \theta_{32}$ とする。このとき、各要素の運動方程式は次のように求められる。

ブロック 1:

$$\left. \begin{aligned} M_1 \ddot{x}_1 + c_1 \dot{x}_1 + 2k_1(x_1 - \hat{x}) \\ + \sum_{i=2}^3 \{c_i(\dot{x}_1 - \dot{x}_i) + 2k_i(x_1 - x_i)\} = M_1 g \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

ブロック 2:

$$\left. \begin{aligned} M_2^* \ddot{x}_2 + c_2(\dot{x}_2 - \dot{x}_1) + 2k_2(x_2 - x_1) \\ + 2\hat{c}_1 \dot{x}_2 u(x_2) + 2\hat{k}_1 x_2 u(x_2) \\ = M_2^* g + mR \sum_{j=1}^2 (\ddot{\theta}_{2j} \cos \theta_{2j} - \dot{\theta}_{2j}^2 \sin \theta_{2j}) \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

ブロック 3:

$$\left. \begin{aligned} M_3^* \ddot{x}_3 + c_3(\dot{x}_3 - \dot{x}_1) + 2k_3(x_3 - x_1) \\ + 2\hat{c}_2 \dot{x}_3 u(x_3) + 2\hat{k}_2 x_3 u(x_3) \\ = M_3^* g + mR \sum_{j=1}^2 (\ddot{\theta}_{3j} \cos \theta_{3j} - \dot{\theta}_{3j}^2 \sin \theta_{3j}) \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

おもり 21:

$$J^* \ddot{\theta}_{21} + B \dot{\theta}_{21} + mgR \cos \theta_{21} = Ae_{21} + mR \ddot{x}_2 \cos \theta_{21} \quad (4)$$

おもり 22:

$$J^* \ddot{\theta}_{22} + B \dot{\theta}_{22} + mgR \cos \theta_{22} = Ae_{22} + mR \ddot{x}_2 \cos \theta_{22} \quad (5)$$

おもり 31:

$$J^* \ddot{\theta}_{31} + B \dot{\theta}_{31} + mgR \cos \theta_{31} = Ae_{31} + mR \ddot{x}_3 \cos \theta_{31} \quad (6)$$

おもり 32:

$$J^* \ddot{\theta}_{32} + B \dot{\theta}_{32} + mgR \cos \theta_{32} = Ae_{32} + mR \ddot{x}_3 \cos \theta_{32} \quad (7)$$

ここに、

$$\left. \begin{aligned} M_1^* &= M_1 + M_2^* + M_3^* \\ M_2^* &= M_2 + 2m, \quad M_3^* = M_3 + 2m \\ J^* &= J_a + J_p + mR^2 \\ \hat{x} &= \frac{M_1 g}{2k_2 + 2k_3} + \frac{M_1^* g}{2(\hat{k}_1 + \hat{k}_2)} \\ A &= \frac{K_t}{r_a}, \quad B = \frac{K_t K_E}{r_a} \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

表 1. 試作機の系パラメータ.

M_1 [kg]	5.20	R [m]	0.0135
M_2 [kg]	3.48	r_a [Ω]	3.02
M_3 [kg]	3.45	J_a [kg·m ²]	4.33×10 ⁻⁷
m [kg]	0.179	J_p [kg·m ²]	1.94×10 ⁻⁶
k_2 [N/m]	34 000	K_t [N·m/A]	24.1×10 ⁻³
k_3 [N/m]	34 000	K_E [V·s/rad]	24.1×10 ⁻³

であり、 J_a は電機子の慣性モーメント、 J_p はおもりを取り付けた円板の慣性モーメント、 e_{ij} ($ij=21, 22, 31, 32$) はモータ印加電圧、 K_t はトルク定数、 K_E は誘起電圧定数、 r_a は電機子の抵抗、 g は重力加速度、 $u(*)$ は単位ステップ関数を表す。 \hat{x} はコイルばね k_1 を外した状態でのブロック 1 の静的平衡点である。なお、各モータの特性は印加電圧 e_{ij} を除いて共通であるものとする。

試作機を設計する際、目的とする同期振動解が広範に存在するように、数値計算により最適な系パラメータを同定した。表 1 は、数値計算結果に基づいて製作した試作機の系パラメータである。数値計算では、DC モータが一回転（不釣り合いおもり $\theta_{21}, \theta_{22}, \theta_{31}, \theta_{32}$ の角変位が 2π だけ変化）したときに他の変数の変化量がすべて零となるような周期解を自己同期解（以下、同期解と呼ぶ）とみなし、上述の運動方程式にシューティング法⁵⁾を適用して同期解を高精度に求めた。その際、シューティング法の数値積分には RKG 法を利用し、1 周期あたりの分割数を 2 048、収束判定誤差を 10^{-12} 以下として倍精度計算を行った。

4. 実験方法

本実験では、試作機を用いて砂の締め固め試験を実施して、目的の同期振動の発生の有無を調べるとともに、打撃力および手腕振動の測定を行った。使用した実験システムを図3に示す。このシステムでは、打撃力を測定するために水平な基礎の上にロードセルを4個設置し、その上に剛な平板を置いて水平に支持している。そして、その平板の上に川砂等を入れたコンテナを設置し、実験時にはその砂面上に試作機を置いて駆動させる。その際、ロードセルの位置に対して試作機の打撃板が図4に示すような位置となるように設置する。また、駆動時に発生した運動状態を調べるために、各ブロックに加速度センサを設置している。今回は、図5に示すように、川砂、腐葉土、砂利の3種類を打撃対象として実験を行った。

具体的な実験方法は次の通りである。まず、試作機を砂面上に設置して、ハンドルをなるべく一定の力で把持する。次に、4個の振動子に同じ大きさの印加電圧 e を与え、試

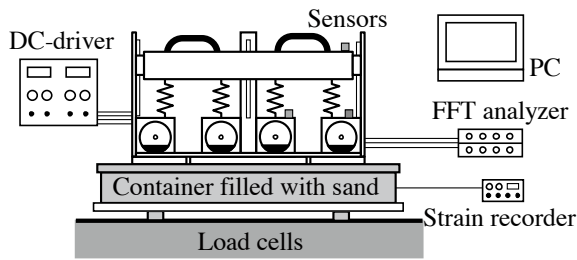


図3. 実験システム.

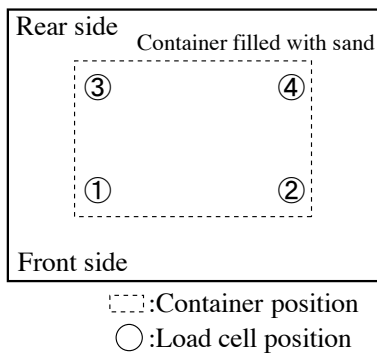


図4. ロードセルの配置.

作機を駆動する。そして、各ブロックの振動加速度信号を測定し、その周波数分析結果に基づいて目的の同期振動の発生の有無を判定するとともに、同期振動数や各ブロックの振動加速度振幅を求める。また、打撃力についても同時に測定し、その最大値の大きさから機械的性能を評価する。

手腕振動については、国際規格に基づいて周波数補正振動加速度実効値の3軸合成値により評価を行う²⁾。周波数補正振動加速度とは、ISO5349-1:2001およびJISB7761-3:2007で定められた周波数補正係数を用いて補正された振動加速度のことである。また、周波数補正係数とは、振動加速度が手腕に与える影響の強さを周波数に応じて定めた係数である。まず、振動工具の把持部に生じる3軸方向の周波数補正振動加速度 a_{hw_x} 、 a_{hw_y} 、 a_{hw_z} を同時に測定し、周波数補正振動加速度実効値の3軸合成値 a_{hv} を次式により求める。

$$a_{hv} = \sqrt{a_{hw_x}^2 + a_{hw_y}^2 + a_{hw_z}^2} \quad (9)$$

次に、周波数補正振動加速度実効値の3軸合成値から1日の8時間等価振動加速度実効値として、次式により日振動ばく露量 $A(8)$ を算出する。

$$A(8) = a_{hv} \times \sqrt{\frac{T}{8}} \quad (10)$$

ここに、 T は1日の振動ばく露時間であり、最大2時間までと定められている。



(a) 川砂.



(b) 腐葉土.



(c) 砂利.

図5. 打撃実験対象.

具体的な手腕振動の測定方法は次の通りである。まず、試作機のハンドル部を把持した状態で、上部ブロックに取り付けた3軸加速度ピックアップから加速度信号を10秒間測定する。次に、測定された加速度信号を1/3オクターブバンド量に変換した後、周波数補正振動加速度実効値の3軸合成値を求める。そして、式(10)により日振動ばく露量 $A(8)$ を求める。

振動工具を使用する際、日振動ばく露量 $A(8)$ が限界値の 5.0 m/s^2 を超える場合には、工具の使用時間の短縮、低振動の工具の選定等を行わなければならない。また、 $A(8)$ が限界値を超えない場合であっても、対策値の 2.5 m/s^2 を超える場合には、振動ばく露時間の抑制、低振動の工具の選定等に努める必要がある。本実験では、対策値 2.5 m/s^2 を制振の目標値として、測定した振動加速度レベルの評価を行った。

5. 実験結果

はじめに、図5(a)に示すような川砂を打撃対象として締め固め試験を行った。本実験では、各振動子に与える印加電圧 e (4個の振動子とも同値とする) を変化させながら

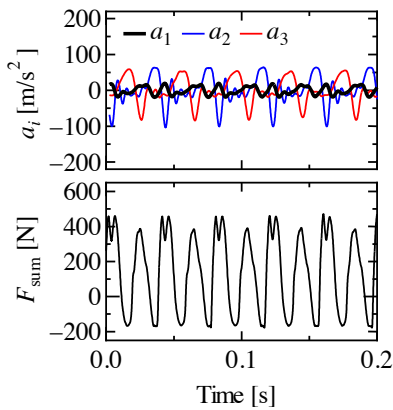


図6. 時刻歴応答の実験結果 ($e=10.0$ V).

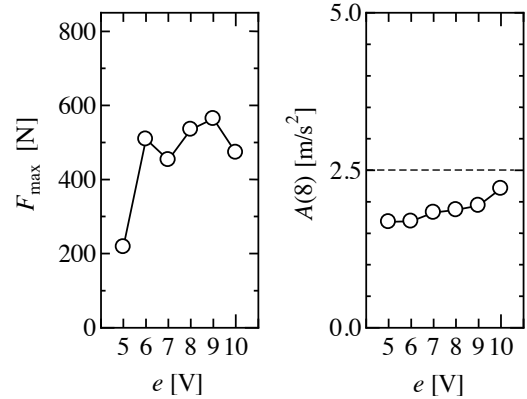


図9. 川砂を打撃対象とした場合の実験結果.

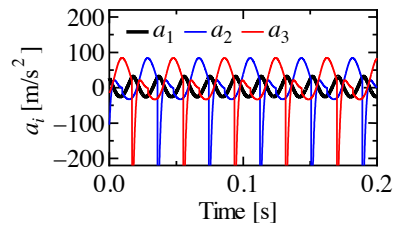


図7. 時刻歴応答の計算結果 ($e=10.0$ V).

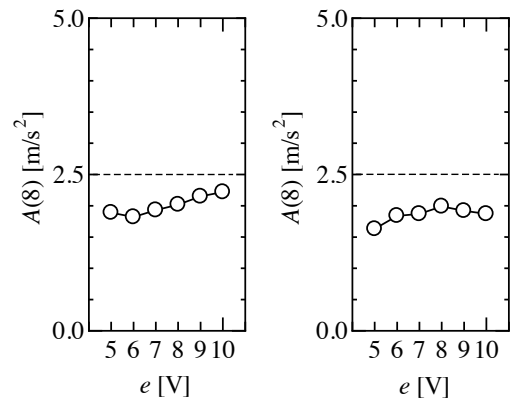


図10. 打撃力の測定結果.

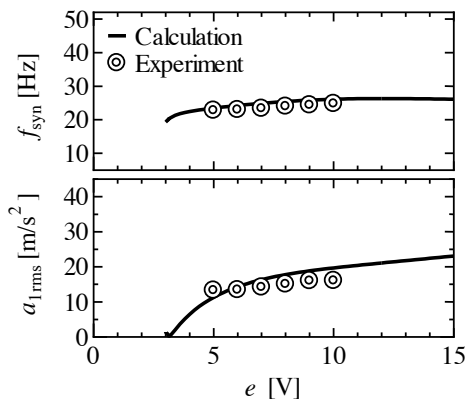


図8. 同期振動の発生領域と解分枝曲線の比較.

各ブロックの振動加速度を測定した。そして、同期振動発生時の運動状態（以下、同期振動パターンと呼ぶ）を確認して、目的の同期振動パターンであれば、打撃力および手腕振動の測定を行った。なお、安全のために印加電圧の上限値を10.0 Vまでとした。

まず、発生する同期振動パターンについて調べた。図6は、DCモータにそれぞれ印加電圧 $e=10.0$ 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 [m/s²] および打撃力 F_{sum} [N] (4個のロードセルの合計値) の測定結果である。比較のため、実験と同じ条件で各ブロックの時刻歴応答を数値計算により求めた結果を図7に示す。

図6の結果を見ると、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、制振対象であるブロック1の振動加速度が下部ブロックに比べて抑制されている。これは、2個の下部ブロックが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たことによるものである。この運動状態は、先行研究の2振動子衝突モデルでも確認された目的の同期振動パターンであり、4個の振動子が特定の位相差で同期回転することによって、制振と励振とを同時に実現している。一方、図7の数値計算結果では、衝突時に生じる下部ブロックの加速度が図6の実験結果と比べると非常に大きくなっているものの、同期振動パターンや振動数は概ね一致しているといえる。このことから、解析モデルの妥当性が確認された。

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8は、数値計算によって求めた最適な同期解の存在領域（安定な同期解分枝）と、実験において最適な同期振動が発生した点をプロットした結果である。図中の横軸は印加電圧 e [V] を示し、縦軸は上から同期振動数 f_{syn} [Hz]、上部ブロック（ブロック1）の振動加速度実効値 $a_{1\text{rms}}$ [m/s²] を示す。また、実線は数値計算結果であり、◎印は実験結

果を示す。図8の数値計算結果を見ると、非常に広い範囲に同期解が存在している。これは、数値計算により試作機的设计を行う際に、最適な同期振動の発生領域の拡大を目的として系パラメータを決定したことによる。一方、実験結果では、 $e=5.0\text{ V}$ から上限値である 10.0 V の範囲で同期振動が安定的に発生し、同期振動数や振動加速度実効値が数値計算結果と定量的によく一致することを確認した。なお、この他にも発生し得る同期振動パターンは存在するが、実験を行った範囲ではそれらの発生は確認できなかった。

次に、試作機の機械的性能について調べた。図9は、印加電圧を変更しながら打撃力の最大値 F_{\max} [N] と日振動ばく露量 $A(8)$ [m/s^2] を測定した結果である。日振動ばく露量については、式(10)において振動ばく露時間 T を最大の2時間として求めた。まず、図9(a)は打撃力の最大値 F_{\max} [N] をプロットした結果である。本実験では、約 560 N ($e=9.0\text{ V}$ 時)の打撃力が測定された。これは装置の自重(約 130 N)の4.3倍程度であり、実用的に十分であるとは言い難いものの、実験後の砂面の状態を見ると、砂の締め固めには成功していることを確認した。

一方、図9(b)は日振動ばく露量 $A(8)$ の測定結果である。前述したように、日振動ばく露量には対策値として 2.5 m/s^2 以下とする基準が定められているが、いずれの結果も対策値以下に抑えられており、把持部の制振効果が高いことが確認できる。

同様に、川砂より柔らかい腐葉土(図5(b))と粒径の大きな砂利(図5(c))とを打撃対象として、それぞれ締め固め試験を実施した。日振動ばく露量 $A(8)$ を測定した結果を図10に示す。この結果から、打撃対象の硬さなどが異なる条件においても、日振動ばく露量が対策値以下に抑えられている上、同期振動が広い範囲で発生していることが確認できる。

6. 結論

振動ランマを対象として、工具把持部の低減化を実現する同期振動発生機構を導入した試作機の開発を行った。そして、砂の締め固め試験を実施することにより、開発した試作機の有効性について検証した。その結果、把持部の制振と打撃部の励振とを同時に実現可能な同期振動の発生を確認した。また、日振動ばく露量についても対策値を下回る結果が得られた。打撃力については実用的なレベルではないものの、砂の締め固めるが可能であることを確認した。今後は、本報の結果を踏まえて、打撃力の増大を図るため、実用的な試作機の開発を行う予定である。

最後に、本研究は科学研究費補助金基盤研究(C)(課題番号24560262)、および同じく基盤研究(C)(課題番号15K05868)の援助のもとに実施したものである。ここに記して謝意を表する。

参考文献

- 1) 前田 節雄, 榊原 久孝, 原田 規章: 手腕振動障害(その疫学・病態から予防まで), pp. 5-11, 労働科学研究所出版部, 2004.
- 2) 建設業労働災害防止協会編: 振動工具取扱作業の知識(作業用テキスト), pp. 36-43, 2010.
- 3) A. Pikovsky, M. Rosenblum and J. Kurths, Synchronization (A Universal Concept in Nonlinear Sciences), Cambridge University Press, 2001.
- 4) 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, Vol. 76, No. 772, pp. 3486-3494, 2010.
- 5) 日本機械学会編: 機械工学便覧基礎編 $\alpha 2$, pp.79-81, 2004.