

# 3次元地盤モデル解析による建設重機の加振力推定

## Estimation of Excitation Force of Construction Machine by 3D Ground Model Analysis

小林 真人<sup>\*1</sup>  
Masahito Kobayashi

岩根 康之<sup>\*1</sup>  
Yasuyuki Iwane

松本 泰尚<sup>\*2</sup>  
Yasunao Matumoto

### 【要旨】

地盤振動対策の詳細な検討には有限要素法や薄層要素法などの解析的手法が用いられる。ただし、解析に用いる加振力は十分に整備されていない。そこで、数値解析に供することを目的にバックホウとブルドーザを対象にして、3次元地盤モデルから求めた伝達関数と実測加速度から加振力を推定した。その結果、重機の動作や走行状態に応じた加振力特性が得られ、推定した加振力からの加速度解析値と実測値はほぼ一致する結果が得られた。

【キーワード】 建設重機 加振力 逆解析 薄層要素法

### 1. はじめに

振動規制法施行状況調査<sup>1)</sup>によれば、近年の建設作業に対する苦情は全体の60%以上を占めている。そのため、低振動な建設機械や施工技術の開発が行われるとともに、建設工事現場の周辺地盤へ伝搬する振動の予測も盛んに行われている。

振動の予測法として、地盤の幾何学的な広がりによる減衰と粘性などによる内部減衰が考慮された経験式<sup>2)</sup>があり、扱いが簡易なことによる利便性の高さから様々な振動源の伝搬予測に用いられている。しかしながら、この経験式は地盤の成層性や振動の波動性を考慮できないため、地盤振動対策の詳細な検討には有限要素法や薄層要素法<sup>3)</sup>などの解析的手法が用いられている。

本報では数値解析に供することを目的に、建設工事で一般的に使用され、かつ比較的大きな振動を発生するバックホウとブルドーザを対象に加振力を推定するとともに、重機の動作と加振力特性との関係について考察した。

### 2. 加振力の推定方法

建設重機の加振力を直接的に求めることは困難である。そこで、稼働時の地表面での振動加速度実測値と加速度を実測した地盤の3次元モデルによる伝達関数(振動源位置から受振点間)の解析値を用い加振力を逆算した。

#### 2.1 対象とした重機の諸元と動作

計測対象の振動源は表-1に示したバックホウ0.45m<sup>3</sup>級、同0.8m<sup>3</sup>級、ブルドーザ16ton級とした。振動源が移動しない場合の動作は、バックホウのアイドリング、ブーム煽り、バケット煽り、バケットによる地面の叩き(以下、移動しない場合)とした。振動源が移動す

る場合の動作は、バックホウとブルドーザの走行(Low, highの2段階)(以下、移動する場合)とした。

#### 2.2 地表面での振動加速度の計測

##### (1) 移動しない場合

バックホウのアイドリング、ブーム煽り、など本体が移動しない場合は、図-1に示すように振動源位置から6mと12mの地表面でX,Y,Z方向の加速度を計測した。ただし、バケットによる地面の叩きではバケットの落下点が振動源位置となるように配置し、それ以外の動作では測点側のキャタピラの中心が振動源位置になるように配置した。

##### (2) 移動する場合

移動しない場合と同様に図-1に示した測点で計測した。このとき重機の走行方向はY方向として、機体の中

表-1 振動源の諸元

|                | バックホウ                |                     | ブルドーザ  |
|----------------|----------------------|---------------------|--------|
|                | 0.45m <sup>3</sup> 級 | 0.8m <sup>3</sup> 級 |        |
| 機体重量 (kg)      | 13,500               | 20,300              | 15,990 |
| シュー枚数 (枚)      | 43                   | 44                  | 49     |
| 履帯の回転数 (回/min) | Low                  | 3.8                 | 2.6    |
|                | High                 | 10.9                | 10.1   |
| 走行速度 (m/s)     | Low                  | 0.5                 | 0.4    |
|                | High                 | 1.4                 | 1.7    |

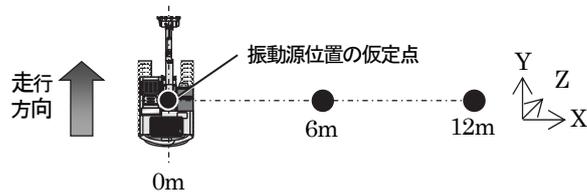


図-1 加速度の計測位置

心が0m点を通過するようにした。

### 2.3 加振力の逆算

加振力の逆算には振動源位置と受振点間の伝達関数が必要である。伝達関数は薄層要素法によるSuperFLUSH/3DSを用いて求めたが、SuperFLUSH/3DSは点加振問題のみ扱うため、走行する場合には加振点の定義が必要である。以下に振動源が移動しない場合と移動する場合の加振力逆算方法を示す。

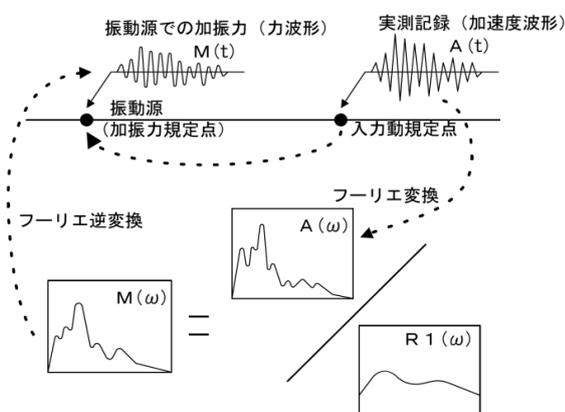
#### (1) 移動しない場合

図-2に示した加振力逆算の概念に基づいて計算の手順を以下に示す。

- ① 加速度を実測した地盤を3次元薄層要素法で成層地盤としてモデル化する(寸法:31m×31m×229.8m)。GL-19.8mまでは表層として扱い、現地のボーリングデータに基づき層厚を設定する。GL-19.8m以深は層厚210mの支持層とし、下端は半無限性を仮定し粘性境界とした。ここで、せん断弾性係数GはN値からS波伝搬速度 $V_s$ を推定し、 $V_s^2$ と土質密度の積から求めた<sup>3)</sup>。ポアソン比 $\nu$ は0.45、減衰定数 $h$ は1.0%と仮定した。表-2に地盤モデルの物性値を示す。
- ② 振動源位置を加振源と仮定した点加振解析を実施し、受振点(6m点)におけるX、Y、Z方向の伝達関数を取得する。ここで、加振信号は調和加振力として1Hz~50Hzの範囲で与えた。なお、サンプリング点数は512個、周波数分解能は0.25Hzとした。
- ③ 受振点における伝達関数と入力規定点における実測の加速度波形を用い、振動源位置におけるX、Y、Z方向の加振力を逆算する。

#### (2) 移動する場合

移動する場合には、重機の移動範囲を等分割し、分割した時間幅の中心位置を代表点とした応答解析を行い、最終的に全応答を足し合わせることで走行する振動源の応答とみなした。図-3に示した加振力逆算の概念に基づいて計算の手順を以下に示す。ここで、地盤モデルは



$M(\omega) = A(\omega) / R1(\omega)$   
 $R1(\omega)$ : 振動源 (加振力規定点) の単位力に対する  
 入力規定点の応答倍率 (伝達関数)

図-2 移動しない振動源の加振力逆算の概念

移動しない場合と同様とした。

- ① 6m点での加速度時刻歴から有意な応答が得られる範囲として、重機が測定ラインに到達する前7秒間、通過後9秒間の合計16秒間の応答 ( $A_{16s,6m}$ ) を切出す。
- ② 16秒間の走行距離を8等分し、2秒間の走行位置に対応した代表点 (P1:0~2sec, P2:2~4sec, ..., P8:14~16sec) をモデル上に設置する。
- ③ 伝達関数 $H_i$ を計算する。伝達関数は振動源位置に上限64Hzで0.0625Hz (サンプリング点数1024個) ごとに調和加振力を与えX、Y、Z方向について求めた。
- ④  $A_{16s,6m}$ と $H_i$ から各代表点における逆算加振力 ( $F_{P1}$ ,  $F_{P2}$ , ...,  $F_{P8}$ ) を求める。ただし、代表点で分割した時間幅に対応した加振力のみ抜き出す。

## 3. 加振力の推定結果

### 3.1 加振力特性の検討

#### (1) 移動しない場合

図-4に加振力の1/3オクターブバンド周波数分析結果をバケット容量と振動の方向別に示す。

バックホウの動作で加振力特性を比較すると、バケットの容量や振動の方向によらず、バケットによる地面の叩きとバケットの煽りが他の動作に比べて大きくなることが判る。地面へ力を直接加える叩きの加振力が最も大

表-2 地盤モデルの物性値

| 深度<br>G.L. (-m) | 土質             | ポアソン比<br>$\nu$ | 単位体積重量<br>$\gamma$ (tf/m <sup>3</sup> ) | せん断弾性係数<br>G (tf/m <sup>2</sup> ) | 減衰定数<br>h (%) |
|-----------------|----------------|----------------|---|-----------------------------------|---------------|
| 0.0~6.8         | 盛土             | 0.45           | 1.68                                    | 4007.76                           | 1.00          |
| 6.8~10.3        | 礫混じり<br>砂質シルト  | 0.45           | 1.81                                    | 4056.07                           | 1.00          |
| 10.3~15.5       | 有機質粘土          | 0.45           | 1.19                                    | 3253.93                           | 1.00          |
| 15.5~17.8       | 有機質粘土<br>混じり細砂 | 0.45           | 1.79                                    | 3862.44                           | 1.00          |
| 17.8~18.8       | 中砂             | 0.45           | 1.97                                    | 8253.89                           | 1.00          |
| 18.8~19.8       | 中砂             | 0.45           | 1.97                                    | 11223.08                          | 1.00          |
| 19.8~229.8      | -              | 0.45           | 1.97                                    | 28060.51                          | 1.00          |

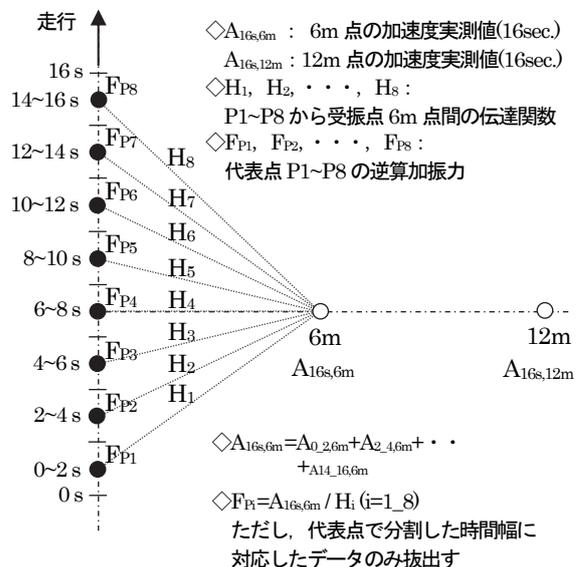


図-3 移動する振動源の加振力逆算の概念

きくなることは容易に予想されるものである。煽る動作については、バケットがブームの先端に接続されベースマシンから離れたところで動くことから、加振力が大きくなるのが予想できる。

バケットの容量で比較するとバケットによる地面の叩きでは、 $0.45\text{m}^3$ と $0.8\text{m}^3$ の加振力特性に大きな違いは無いようである。アイドリングにおいてもエンジンの回転数に起因すると思われる $20\text{Hz}$ 付近の卓越周波数に差異があるものの、 $0.8\text{m}^3$ 級のY方向が $0.45\text{m}^3$ に比べて $20\text{dB}$ ほど小さくなっていることを除けば、ほぼ同等のレベルとなっている。バケットとブームの煽りについては全ての方向で $0.8\text{m}^3$ の加振力が $0.45\text{m}^3$ に比べて小さいことが判る。これは、キャタピラの地面への設置長さが $0.8\text{m}^3$ で $3.3\text{m}$ 、 $0.45\text{m}^3$ では $2.8\text{m}$ であること、機体重量が $20.3\text{ton}$ と $13.5\text{ton}$ であるため、 $0.8\text{m}^3$ ではブームの動きに応じたベースマシンの動きが小さくなり、 $0.45\text{m}^3$ に比べて地面へ入力される力も小さくなったためと考える。

## (2) 移動する場合

図-5に加振力の1/3オクターブバンド周波数分析結果をLow、Highと重機の種類別に示す。

全ての重機について加振力レベルを比較すると、High走行時のレベルが相対的に大きく特定の周波数でピークになることが判る。シュープレートが地面に接することで入力が生じていると考えられるので、シュープレートの接触によるHigh走行時の入力周波数は表-1に示した履帯の回転数とシュープ枚数から、 $0.45\text{m}^3$ では $7.8\text{Hz}$ ( $=10.9 \times 43 / 60$ )となる。同様に $0.8\text{m}^3$ で $7.4\text{Hz}$ 、ブルドーザでは $11.8\text{Hz}$ である。図-5 a) バックホウ  $0.45\text{m}^3$  Highでは $8\text{Hz}$ 帯域とその倍の $16\text{Hz}$ 帯域にピークがあり、同 c) ブルドーザ Highでは $10\text{Hz}$ 帯域から $12.5\text{Hz}$ 帯域にピークがあることからシュープレートの接触が加振力に寄与することが示唆される。 $0.8\text{m}^3$ については $7.4\text{Hz}$ よりやや低い $6.3\text{Hz}$ 帯域にピークが生じているので、シュープレートの接触以外に $0.45\text{m}^3$ より大型なバケットやブームの揺れも2次的な振動源となっていた可能性がある。

High走行について振動方向で比較するとY方向の加振力が大きくなる傾向が確認できる。Y方向は重機の走行方向と一致しているためと考えられるので、重機の走行時には水平方向の振動にも注意が必要であることを示す結果となった。

## 3.2 加速度の比較

### (1) 移動しない場合

図-6に推定した加振力から求めた加速度と実測した加速度の1/3オクターブバンドレベルの比較例として、加振力が最も大きくなった $0.8\text{m}^3$ のバケットによる地面叩きの結果を示す。叩きで生じる $16\text{Hz}$ 帯域~ $25\text{Hz}$ 帯域のピークが $6\text{m}$ 地点と $12\text{m}$ 地点でほぼ一致していること

から、図-4に示した加振力はおおむね良好に求められていることが判る。

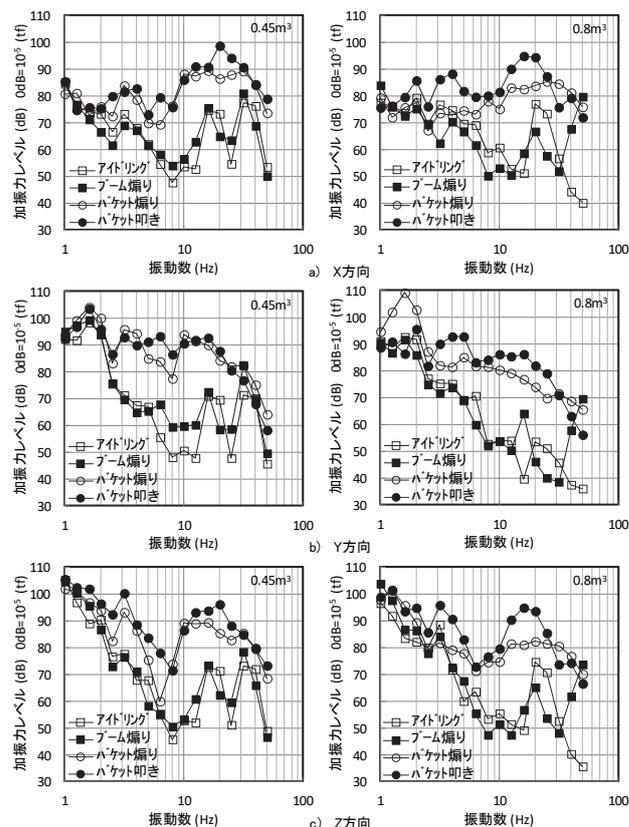


図-4 加振力レベルの推定結果 (移動しない場合)

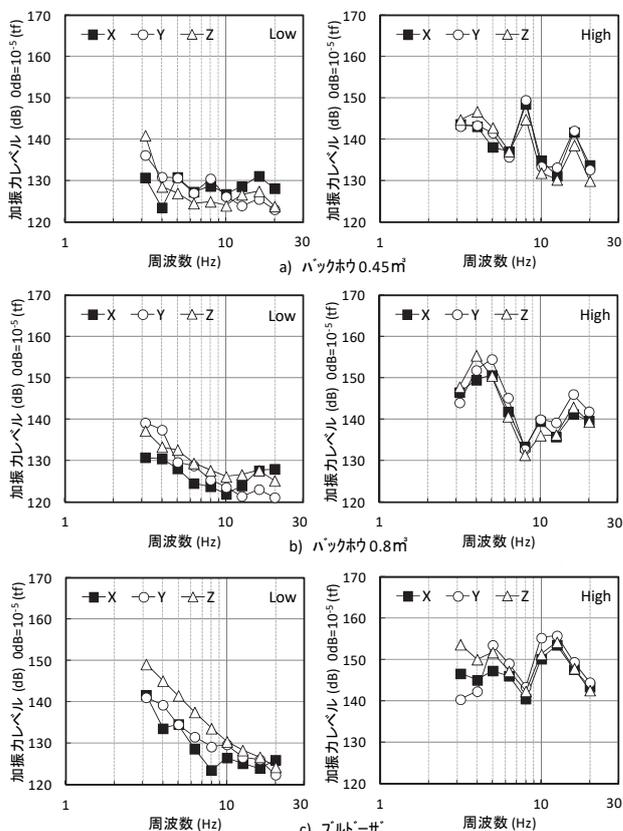


図-5 加振力レベルの推定結果 (移動する場合)

## (2) 移動する場合

同様に、図-7に加速度の比較例として0.45m<sup>3</sup>のHigh走行の結果を示す。6mと12mともに推定した加振力の周波数特性に対応した結果が得られている。また、主要な8Hz帯域と16Hz帯域の応答もほぼ一致していることから、加振力が正常に得られていることが判る。

ただし、Z方向の12mでは周波数特性は再現しているものの、解析値が実測値より5dB~10dB大きくなる結果となった。移動しない場合においても主要な周波数を中心とした応答が同様の結果となっていることから、移動する振動源のモデル化による問題ではないと考える。c) Z方向の6mと12mを比較すると解析値の距離減衰は見られないが、実測値では倍距離8dB~10dBの距離減衰が確認できるので、地盤モデルの鉛直方向の応答に寄与するパラメータ(層厚, 減衰など)設定に関して検討の余地がある。

## 4. まとめ

数値解析に供することを目的にバックホウとブルドーザの加振力を推定した。重機の動作や走行状態に応じた

加振力特性が得られ、推定した加振力からの加速度の解析値と実測値はほぼ一致する結果が得られた。ただし、振動の入力規定点から離れた地点での加速度を求める場合には、評価対象地盤のモデル化の程度によって答えが異なるので、詳細なボーリング調査によって地盤の状態を明らかにするなどの配慮が必要である。

謝辞：重機による地盤振動の計測にあたりUR大宮西部作業所(高橋 勝 所長)の御協力を得た。本研究はJSPS科研費15K06281の助成を受けたものである。

なお、本報は土木学会年次学術講演会(71回, 72回)発表原稿を再編集したものである。

### 【参考文献】

- 1) 環境省：平成27年度振動規制法施行状況調査, 2017.
- 2) G. Bornitz : Uber die Ausbreitung der von Grosskolbenmaschinen erzeugten Bodenschwingungen in die Tiefe, J.Springer (Berlin), 1931.
- 3) 日本建築学会：入門・建物と地盤との動的相互作用, pp.161-174, 1999.

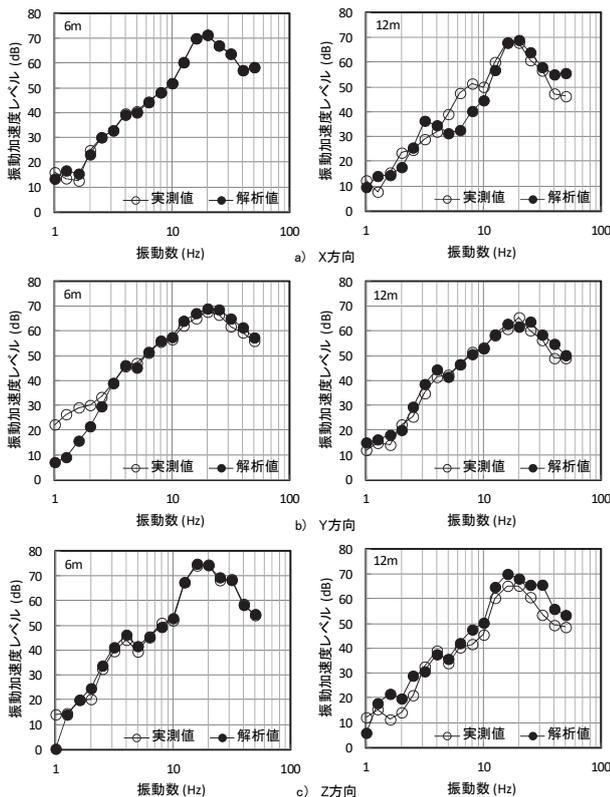


図-6 推定加振力による加速度解析値と実測値の比較 (0.8m<sup>3</sup>, 叩き)

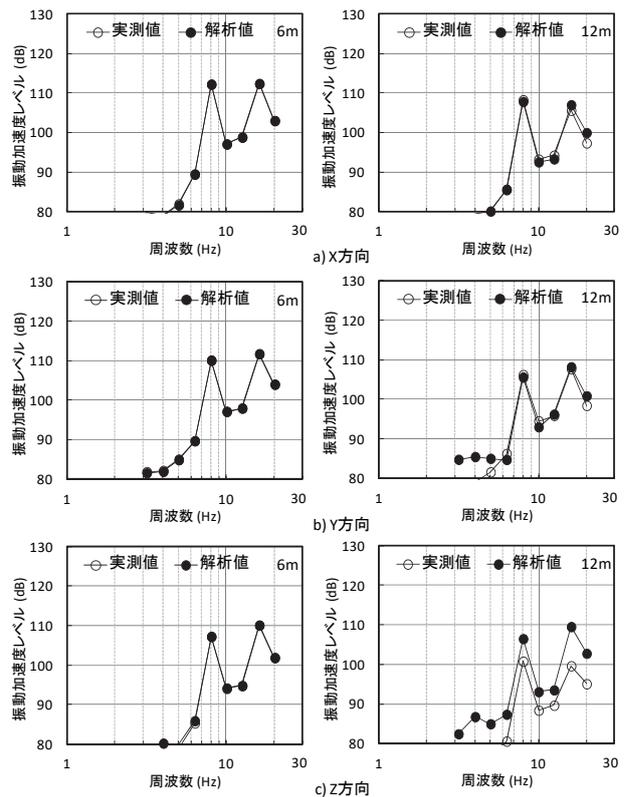


図-7 推定加振力による加速度解析値と実測値の比較 (0.45m<sup>3</sup>, High 走行)

**Summary** Analytical methods such as finite element method and thin-layer element method are used for detailed examination of ground vibration countermeasures. However, the excitation force used for analysis is not well developed. Therefore, for the purpose of providing numerical analysis, the excitation force of the backhoe and bulldozer was estimated from the transfer function obtained from the three dimensional ground model and the measured acceleration. As a result, we obtained the result that the exciting force characteristics according to the operation and running condition of the construction machine, the acceleration calculated from the estimated excitation force and the measured acceleration are almost the same.

**Key Words :** Construction Machine Vibration, Excitation Force, Inverse Analysis, Thin-Layer Element Method