

CO-007

## 地震波形による高層建築物内の食器類に関する物理シミュレーション Physical simulation of tableware in high-rise buildings using seismic waveforms

佐藤 綾音<sup>†</sup>  
Ayane Sato

檀 裕也<sup>‡</sup>  
Yuya Dan

### 1. はじめに

長周期地震動とは、周期が 1 秒以上の比較的ゆっくりとした揺れであり、主に軟弱地盤や盆地構造を通じて遠方まで伝わる特徴を持つ。人が感じにくい場合もある一方で、周期が一致した構造物には大きな影響を及ぼす。特に超高層ビルなどの大型構造物は、固有振動数が低く、長周期地震動と共振しやすいため、構造的被害や設備の損傷が発生しやすい。また、固有振動数とは、建築物が自然に振動する周期のことであり、その周期は高さや構造によって異なる。一般的に、建築物が高くなるほど固有振動数は小さくなる傾向にあり、地震発生時に長周期地震動の影響を受けやすい。2024 年 1 月 1 日に発生した能登半島地震では、石川県能登で長周期地震動最大階級である、階級 4 が観測された。[1]長周期地震動階級 4 は「立っていることができず、はわないと動くことができない。揺れにほんろうされる。」[2]とされている。また、2016 年 4 月 16 日に発生した熊本地震においても長周期地震動階級 4 を観測している[3]。

本研究では、もし能登半島地震と同じ規模の長周期地震動が高層建築物を襲った場合、高層建築物にはどのような被害がもたらされるのか、反実仮想的にシミュレーションを行った。本研究を通して人々に視覚的に地震の影響を認識させることで、防災意識の向上を目指すことを目的としている。

### 2. 積分計算による変位波形の生成

#### 2.1 実行環境

気象庁が公開している強震観測データをもとに、Google Collaboratory 上で地震による変位データを計算するプログラムを作成した。使用したプログラミング言語は Python であり、NumPy および Matplotlib のモジュールを使用した。

#### 2.2 計算手法

前述のとおり、気象庁が公開している強震観測データの加速度波形から変位を求める計算を行った。本研究では、2024 年 1 月 1 日に発生した能登半島地震の観測地点の中から、最大加速度が最も大きかった石川県珠洲市三崎町のデータ[4]を用いた。この地点では震度 6 強を記録しており、加速度グラフは図 1 に示すとおりである。サンプリング間隔は 0.01 秒であった。

加速度から変位を求める手法としては、多項式による補正法[5]やトレンド除去による補正法[6]が提案されている。林ら[7]によると、加速度データを直接積分して変位を求める方法では、異常に大きな最大値が含まれることが多い。

<sup>†</sup> 松山大学経営学部情報コース

Matsuyama University, Course of Informatics

<sup>‡</sup> 松山大学情報学部

Matsuyama University, Faculty of Informatics

実際に、本研究においても単純な積分では、図 2 のような右上がりのグラフが得られた。

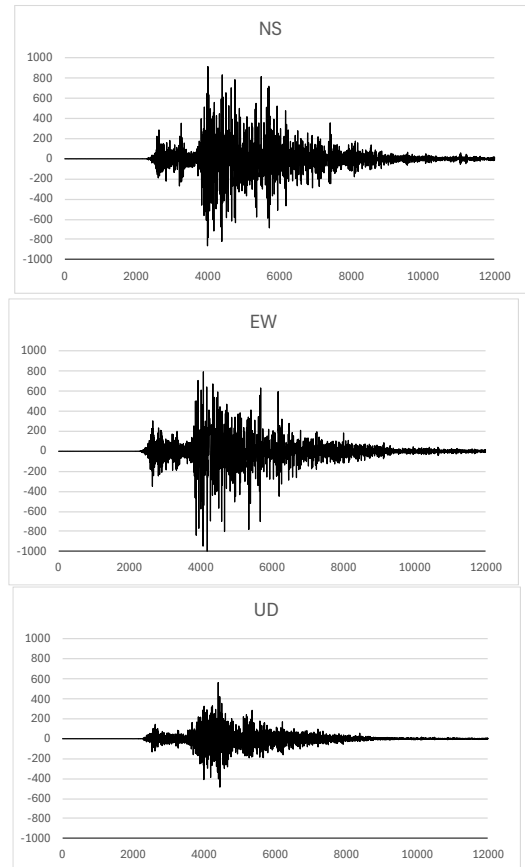


図 1 珠洲市三崎町の加速度グラフ (3 方向)

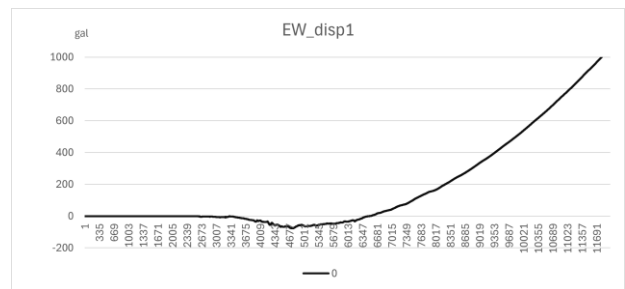


図 2 単純積分による変位グラフ

本研究では、以下の 3 つの補正手法を用いて加速度データの補正を行った。

まず、高速フーリエ変換 (FFT) を加速度波形に適用し、周波数領域に変換した後、0.15Hz のローカットフィルターおよび、20.0Hz のハイカットフィルターによるバンドパス

フィルタを適用した. 不要な周波数成分を除去したのち, 逆高速フーリエ変換によって時間領域に戻した.

$$A(f) = F[a(t)]$$

$$A_{\text{filtered}}(f) = \begin{cases} A(f), & f_{\text{low}} \leq |f| \leq f_{\text{high}} \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$a_{\text{filtered}}(t) = \mathcal{F}^{-1}[A_{\text{filtered}}(f)]$$

$a_{\text{filtered}}(t)$  に対して速度を計算し, その速度データに線形補正および 5 次多項式によるトレンド除去を行った.  $T$  は観測終了時間である.

求めた  $v_{\text{corr}}(t)$  に対して変位を計算し, 求めた変位データに対して上記と同様に線形補正及び 5 次多項式によるトレンド除去を適用した.

$$v_{\text{lin}}(t) = v(t) - \left[ v(0) + \frac{v(T) - v(0)}{T} \cdot t \right]$$

$$V(t) = \sum_{k=0}^5 a_k \left( \frac{t}{T} \right)^k$$

$$V_{\text{corr}}(t) = v_{\text{lin}}(t) - V(t)$$

各フィルターを適用し, 求めた変位グラフが図 3 である.

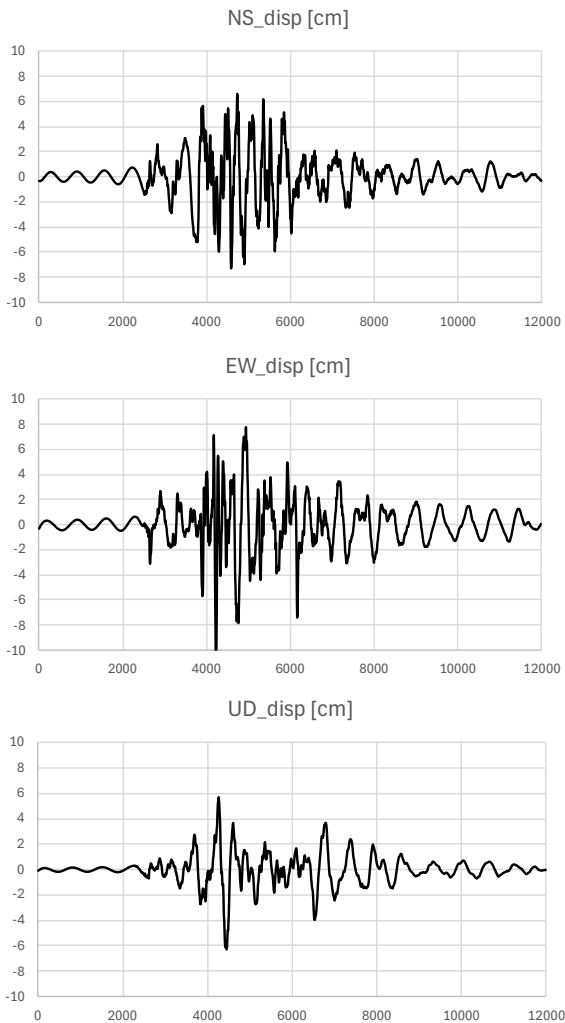


図 3 フィルター適用後の変位グラフ (3 方向)

このグラフは, 強震観測データに公開されている変位グラフ[4]と比較したときにも, 高い再現性が認められると考える.

### 3. blender を使用した地震動の再現

#### 3.1 実行環境

花田ら[8]は, 長周期地震動の再現にリアルタイム開発プラットフォームである Unity を使用している. Unity に搭載されている物理演算機能は高い精度を持ち, 先行研究においても有効であるとされている. しかし, 開発エンジンに搭載された物理演算を使用する研究では, 演算精度や挙動にばらつきが生じることも少なくない.

本研究では, 物体のモデリングに加えて物理演算や距離制限が適用可能であり, より幅広い環境を想定した地震動の再現が可能であると考え, 3DCG 制作ソフトウェアである Blender を使用した.

#### 3.2 Blender の物理演算を使用したシミュレーションの検討

シミュレーションの初期段階では, 地面を模した直方体オブジェクト (以下, 地面オブジェクト) と, 建築物を模した立方体オブジェクト (以下, 建築物オブジェクト) を Blender 上に配置した. 両オブジェクトに衝突判定 (コリジョン) および剛体 (リジッドボディ) の設定を行い, 地面オブジェクトには事前に求めた変位データを読み込ませて, 地震動の再現を試みた.

その結果, 地面オブジェクトには揺れが正しく反映されたものの, 建築物オブジェクトには揺れの影響が十分に伝わらなかった. その要因として, 地面オブジェクトにタイムライン上のキーフレームごとに直接変位を設定したことにより, フレーム間の動きが滑らかに連続せず, 物理演算が正しく適用されなかった可能性が考えられる.

また, 位置制限や距離制限といった Blender 標準機能を活用した場合でも, オブジェクトがフレームごとに不安定な動作を繰り返すなど, 再現性の高いシミュレーションには至らなかった. 以上の理由から, 本研究では Blender における標準的物理演算機能の使用を断念した.

#### 3.3 ばねモデルを使用した計算方法

建築物の揺れを再現する手法として, ばねモデルを使用したシミュレーションを採用した. ばねモデルは, 複雑な構造を単純化して再現できるため, 計算の簡略化と高精度な挙動の両立が可能である. 特に, Blender 上での軽量な計算処理が必要である本研究の開発環境に適している.

本研究では, 建築物の各階を立方体オブジェクトとし, それぞれにばねモデルを適用することで, 地面オブジェクトの変位と連動した動きを再現した. この手法は, 多重ばねモデルとして構築され, 変位による復元力から加速度が生じることを前提としている. 使用したばねモデルはフックの法則で記述される以下の通りである.

$$M \frac{d^2 p}{dt^2} = f = -kr$$

また、各階の変位が半径 0.25m を超えないよう制限を設け、倒壊を防止する構造とした。簡素化のため、鉛直方向における下階からの加速度は考慮せず（鉛直方向の変位は度外視する。）、そのばね定数は 0 とした。これらの条件のもとで図 4 のように Blender 上にシミュレーションを実装した。



図 4 高層建築物シミュレーションの様子

### 3.4 比較

上記の計算手法を用いて地震動による構造物の応答をシミュレーションした結果を図 5 に示す。

図 5 は、1 階・5 階・10 階における各階の変位を示したものであり、それぞれの階における揺れの特性を視覚的に比較することができる。

グラフの比較から明らかなように、階数が高くなるにつれて揺れの開始時刻が遅延する傾向が確認され、同時に最大変位量も増大していることがわかる。この傾向は、ばねモデルにおいて上層階ほど慣性の影響を受けやすく、変形が大きくなるという理論的な挙動と一致しており、モデルが適切に機能していることを示している。

さらに、1 階および 10 階における加速度を高速フーリエ変換し、それぞれの周波数スペクトルを解析した。その結果を図 6、図 7 に示す。

主に分散が異なるなど各階で周波数成分に差異が見られ、建築物の層構造による振動特性の違いが周波数領域においても顕著に表れていることが確認される。

### 3.5 10 階部分の計測震度の計算

3.4 節に関連して、10 階の計測震度を計算した。気象庁 [9]によると、計測震度は以下のように計算している。

- ・ デジタル加速度記録 3 成分（水平動 2 成分、上下動 1 成分）のそれぞれのフーリエ変換を求める。
- ・ 地震波の周期による影響を補正するフィルターを掛ける。
- ・ 逆フーリエ変換を行い、時刻歴の波形にもどす。
- ・ 得られたフィルター処理済みの 3 成分の波形をベクトル的に合成する。

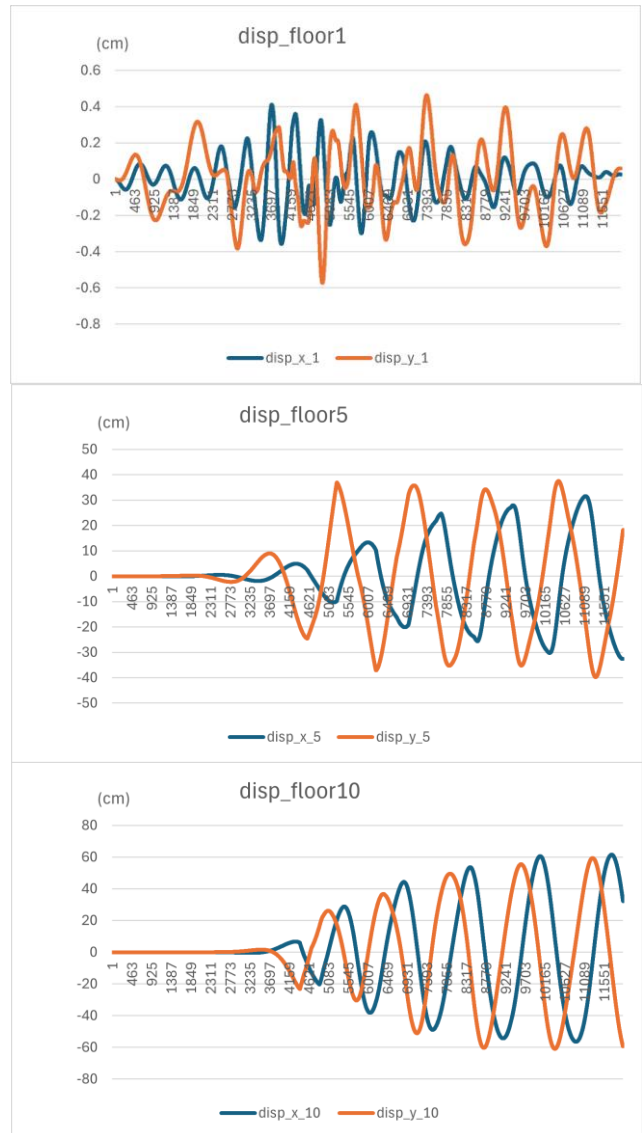


図 5 1 階・5 階・10 階における変位グラフ（3 方向）

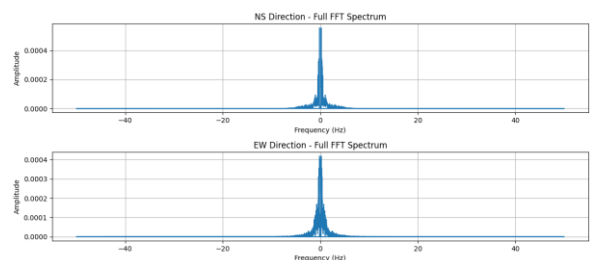


図 6 1 階における周波数スペクトルのグラフ

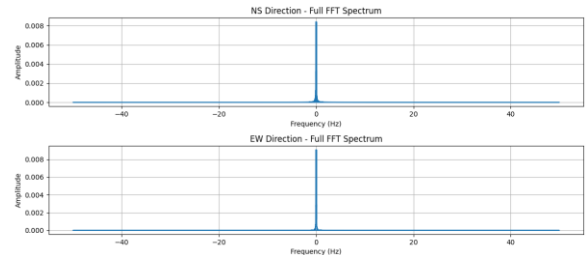


図 7 10 階における周波数スペクトルのグラフ

- ベクトル波形の絶対値がある値  $a$  以上となる時間の合計を計算したとき、これがちょうど 0.3 秒となるような  $a$  を求める。
- $a$  を、 $I = 2 \log a + 0.94$  により計測震度  $I$  を計算する。計算された  $I$  の小数第 3 位を四捨五入し、小数第 2 位を切り捨てたものを計測震度とする。

また、地震波の周期による影響を補正するフィルターは、以下のように定められている。

ローカットフィルター

$$F_L(f) = \left[ 1 - \exp \left\{ - \left( \frac{f}{0.5} \right)^3 \right\} \right]^{\frac{1}{2}}$$

ハイカットフィルター

$$F_H(f) = (1 + 0.694y^2 + 0.241y^4 + 0.0557y^6 + 0.009664y^8 + 0.00134y^{10} + 0.000155y^{12})^{-\frac{1}{2}}$$

ここで、 $y$  は  $f$  に 10 分の 1 を乗じた値とする

周期の効果を表すフィルター

$$FF = \left( \frac{1}{f} \right)^{\frac{1}{2}}$$

これに沿って、3.3 節で計算した 10 階の加速度データから計測震度を算出した。その結果、計測震度は 3.48 であった。地表の計測震度が 6.07 であったことから、計算上は揺れが小さいと評価された。しかし、変位データを見ると、地表よりも 10 階の揺れ幅の方が大きい傾向が見られたため、この震度の算出方法には問題があると考えられる。計測震度は主に地表の加速度記録に基づいて算出されるため、高層階特有の建築物応答や振動特性、固有周期の影響が反映されにくい。その結果、高層階における震度評価には補正が必要となる場合があり、高層階で算出された震度が、実際の地表震度よりも低く見積もられることがあるのではないかと考えられる。

### 3.6 変位データを使用した食器の揺れの再現

建築物を揺らす際に使用したばねモデルを用いて、食器の揺れを再現した。このモデルでは、食器の質量や摩擦、および動ける範囲の制約を広げることで、より現実的な挙動を再現している。飛び散り方を確認した結果、図 8 のような分布となった。

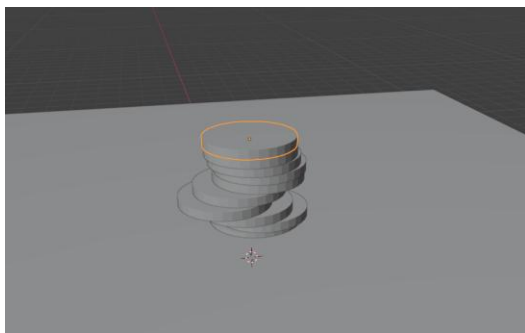


図 8 食器のシミュレーションの様子

## 4. おわりに

本研究では、長周期地震動が高層建築物や食器にどのような影響を及ぼすかについて、反実仮想的なシミュレーションを通じて検討した。シミュレーションに対する計算は、構成要素ひとつひとつを厳密に計算する必要があり、現在の計算資源では、その計算は複雑で難しいものであった。本研究で用いたばねモデルは、少ない計算量でより精密なシミュレーション結果に近づけたと考える。

長周期地震動は、強震時にはより大きな被害をもたらす可能性があり、特に首都圏のように高層ビルが密集する地域では、建築物同士の揺れの相互作用によって被害が拡大するおそれがある。このような長周期地震動の危険性や、地震による被害を視覚的に提示することは、防災意識の向上という観点からも非常に有効であると考えられる。

今後は、本研究で用いたばねモデルや、長周期地震動に対する計測震度の適用精度をさらに高めていく必要がある。摩擦や質量、建築物の固有振動特性などの要素をより詳細に反映させることで、より現実的かつ高精度な解析が可能となり、地震動の影響評価や被害予測の信頼性向上につながることを期待される。

### 謝辞

本研究では、気象庁の強震観測データを使用させていただきました。ここに感謝の意を表します。

### 参考文献

- 気象庁, “長周期地震動の観測結果”, [https://www.data.jma.go.jp/cew/data/ltpgm\\_explain/event.php?eventid=20240101161010&dir1=data/past&past=1](https://www.data.jma.go.jp/cew/data/ltpgm_explain/event.php?eventid=20240101161010&dir1=data/past&past=1)
- 気象庁, “長周期地震動階級および長周期地震動階級関連解説表について”, [https://www.jma.go.jp/jma/kishou/now/jishin/ltpgm\\_explain/about\\_level.html](https://www.jma.go.jp/jma/kishou/now/jishin/ltpgm_explain/about_level.html)
- 気象庁, “長周期地震動の観測結果”, [https://www.data.jma.go.jp/cew/data/ltpgm\\_explain/data/past/20160416012510/index.html](https://www.data.jma.go.jp/cew/data/ltpgm_explain/data/past/20160416012510/index.html)
- 気象庁, “強震観測データ 令和 6 年 (2024 年) 1 月 1 日 16 時 10 分 石川県能登地方の地震”, [https://www.data.jma.go.jp/eqev/data/kyoshin/jishin/2401011610\\_noto/index.html](https://www.data.jma.go.jp/eqev/data/kyoshin/jishin/2401011610_noto/index.html)
- 井合 進, 倉田 栄一, 土田 肇, “強震記録のデジタル化と補正”, <https://www.eq.pari.go.jp/kyosin/doc/hosei/00.htm>
- 本山 紘希, 室野 剛隆, “地震加速度記録の積分による変位波形の計算手法”, 土木学会論文集 A1 (構造・地震工学), Vol. 68, No. 4 (2012)
- 林 康裕, 勝倉 裕, 渡辺 孝英, 片岡 俊一, 横田 治彦, 田中 貞二, “デジタル強震計の加速度記録を積分して得られる変位の信頼性について”, 日本建築学会構造系論文報告集, No.419 (1991)
- 花田悠磨, 村尾 修, 目黒 公郎, “運動エネルギーを考慮した長周期パルス地震動によるオフィス家具の転倒危険性”, 日本建築学会計画系論文集, Vol.84 No.761 (2019)
- 気象庁, “計測震度の算出方法”, [https://www.jma.go.jp/jma/kishou/now/jishin/kyoshin/kaisetsu/calc\\_sindo.html#filter\\_wave](https://www.jma.go.jp/jma/kishou/now/jishin/kyoshin/kaisetsu/calc_sindo.html#filter_wave)

(URL は 2025 年 6 月 13 日に閲覧)