

# 監視カメラの記録動画の解析による令和6年能登半島地震発生時の地盤振動の推定

熊 曦<sup>1</sup>, 小林俊一<sup>1</sup>, 阪田義隆<sup>1</sup>, 吉田 望<sup>2</sup>

1 金沢大学理工研究域

2 関東学院大学工学総合研究所

## 1. はじめに

2024年1月1日16時10分、石川県能登地方においてM7.6の地震が発生し、石川県の志賀町（しかまち）および輪島市で震度7を観測したほか、能登地方の広範囲で震度6以上の強い揺れが記録された。今回の地震では、石川・富山・新潟・福井県を含む、日本海沿岸部の広い地域において液状化現象が発生した<sup>1)</sup>。液状化による地盤の沈下や流動（側方流動）は、地震時の地盤災害の一つとしてよく知られている。地盤の沈下や流動は液状化が発生した後に発生する。しかし、このような現象には目撃情報が少なく、その詳細な挙動は十分に解明されているとは言い難い。たとえば、流動に関しては文献<sup>2)</sup>では3例が示されているだけであり、地震後1分程度から30分程度までかなりの差がある。また、2011年東北地方太平洋沖地震ではYoutubeなどで多くの液状化の映像が公開されているが、それらは研究者や専門家が撮影しているとは限らず、経時変化を把握できるような記録は、筆者らの知る限り存在しない。現在、液状化以後の挙動は固体として解析することが一般的であるが、液体として挙動しているという見解もある<sup>2)</sup>。液状化後の挙動予測の精度を上げるには、液状化以後の挙動を把握することは重要である。令和6年能登半島地震で激しい液状化と流動が発生した石川県内灘町西荒屋（うちなだまち にしあらや）地区の宮前建設に設置されていた3台の監視カメラには地震発生前後の映像撮影されていた。本研究はこの映像を画像解析することで、液状化以後の挙動、特に液状化の発生と流動の発生に着目して整理するものである。

## 2. 宮前建設とその周辺の被害状況

内灘町は震源から南西約100 kmに位置し、干拓地を含む河北潟と日本海の間に発達した砂丘上に立地している<sup>3)</sup>。内灘町における観測震度は5弱（気象庁の内灘町大学観測点）であり<sup>4)</sup>、奥能登地域と比較して地震動の規模は小さかったものの、砂丘背後地盤で大規模な地盤の液状化による流動（側方流動）が発生し、これに伴い、建物や埋設管等に甚大な被害が生じた<sup>5)</sup>。特に、西荒屋地区では、発生した側方流動の面積が他地域よりも顕著に大きかった<sup>3)</sup>。

図1に、内灘町西荒屋地区の全体図を示す。図には地盤改変の履歴も示されているが、宮前建設の位置は改変されていないが道路を隔てた砂丘側の地盤は昭和40年代に切土されており、農地になった後、宅地化されている。また、図2には宮前建設の平面図を示す。本震時には、建物前の石川県道8号松任宇ノ気線沿いの歩道において、舗装の破損や局所的な浮き上がりが確認された。また、宮前建設のバックヤードでは、地盤が大きく上下に変位し、それに伴って地表面には多数の亀裂が発生した。その後、道路およびバックヤードの地面からは噴砂現象が確認された。

2025年6月に実施した手動式スクリーウエイト貫入試験（SWS）の結果を図3に示す。試験は、図2に示すように、宮前建設のバックヤード（SWS1）および歩道付近（SWS2）の各1箇所で行った。ここで、 $W_{sw}$ は載荷荷重、 $N_{sw}$ はSWS試験における貫入量1.00 m当たりの半回転数、 $N$ は換算N値を示す。地下水位面の深さには、ロード表面に付着した土の湿潤状態に基づき簡易的に判断した。標高が約0.5 m低い<sup>7)</sup>SWS1地点では、SWS2地点と比較して地下水位面が約0.5 m浅い。両地点とも、深さ約2.0~3.5 mにかけて軟らかい地層が分布している。液状化したのはこれらの層であると考えられる。なお、換算N値については、粘性土では稲田<sup>8)</sup>の方法に基づき、砂質土では大島<sup>9)</sup>に基づき算出した。

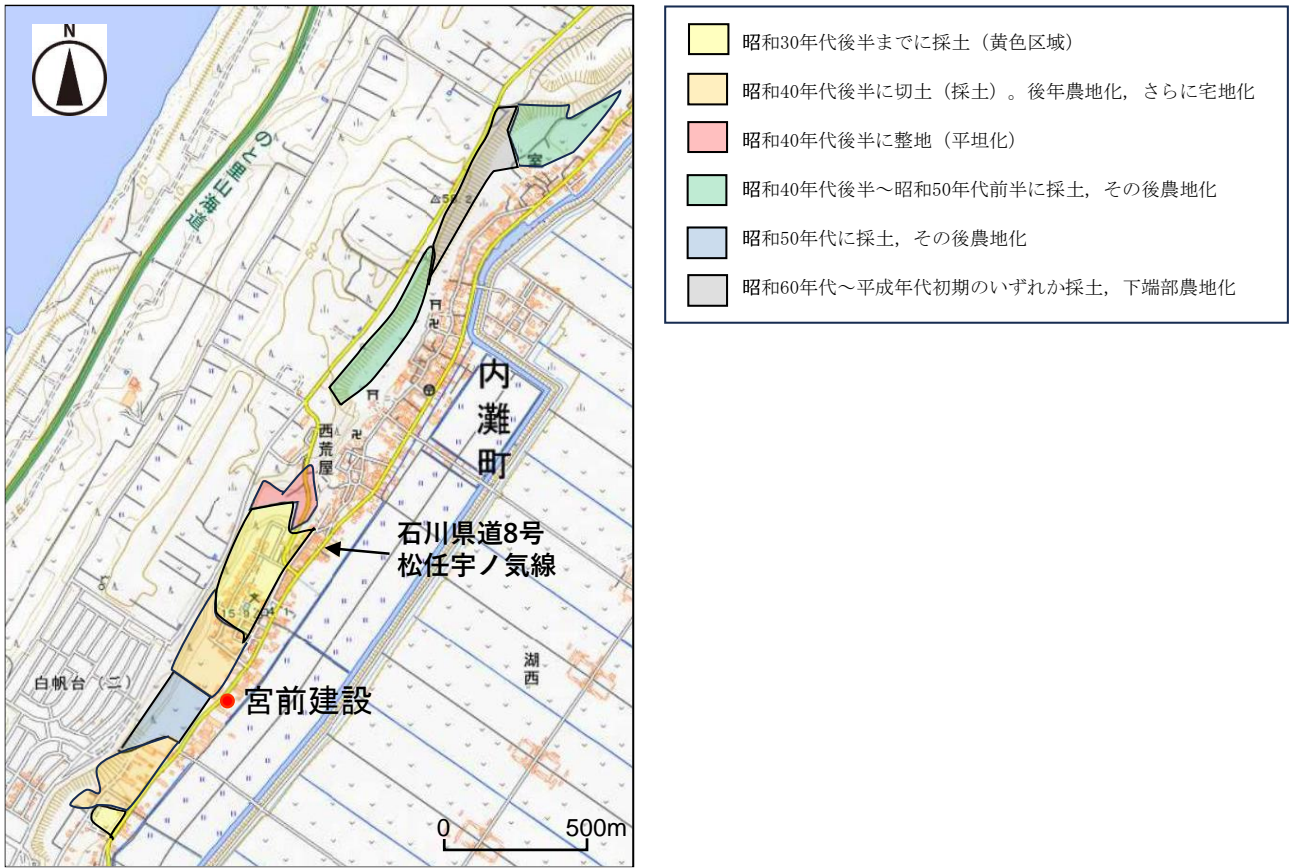


図1 内灘町西荒屋地区（文献6）に基づいて作成

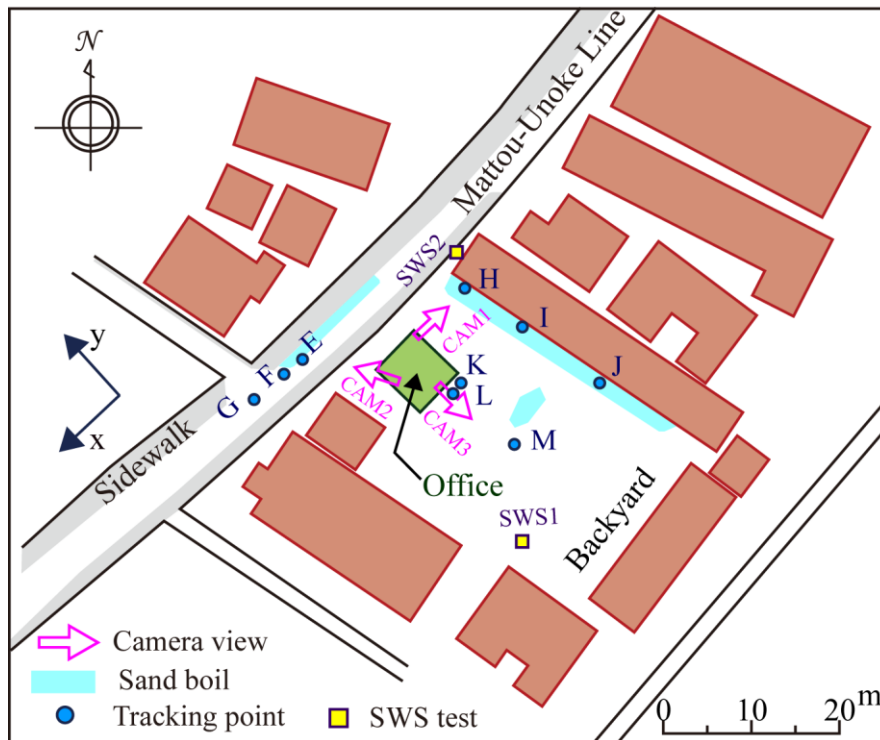


図2 宮前建設事務所とその周辺の平面図

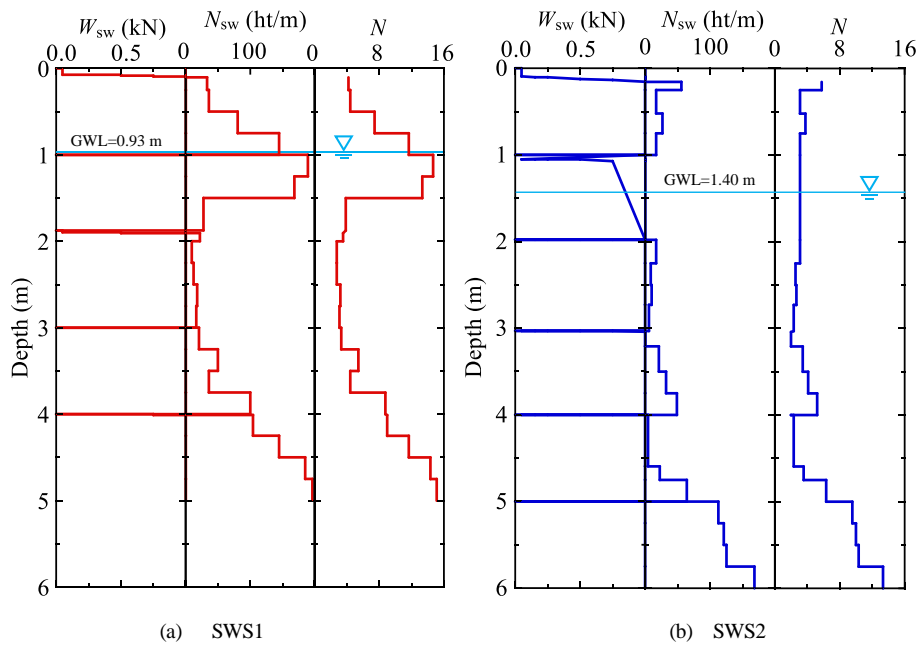


図 3 SWS 試験結果

### 3. 監視カメラの記録動画

本報告の解析に用いる動画は、宮前建設の2階建てプレハブ事務所に設置された三つの監視カメラ（写真 1(a), 2(a)）に記録されたものである。これらの監視カメラはティービーアイ製 SCO-6083RVPN/TE、解像度は 1920×1080 ピクセル、記録フレームレートは 1 秒あたり 5 コマ（5 fps）である。いずれも常時録画設定で運用されており、地震発生時の映像は自動的に保存されていた。なお、写真 1(b)に示すように、地震後に実測されたプレハブ事務所と地面との相対変位（道路の垂直方向）は約 20 cm である。

各カメラの設置方向は図 2 に示すとおり、Camera No.1 および No.3 はバックヤード方向を、Camera No.2 は県道方向を撮影している。監視カメラのスナップショットを写真 2(b)~(d)に示す。地震によって生じた道路および地面の亀裂や、噴砂の様子が確認される。なお、三つのカメラの時刻は同期されており、開始時間の日本標準時に対する誤差は 4 分程度である。誤差が 4 分とすると、後に示す時刻歴の始点は日本標準時間の 16 時 10 分 45 秒に相当する。



(a) プレハブ事務所（2025年6月）



(b) 地震による移動

写真 1 宮前建設のプレハブ事務所



(a) 監視カメラの設置状況例 (Camera No.2)



(b) Camera No.1



(c) Camera No.2



(d) Camera No.3

写真 2 監視カメラとビデオからスナップショット (2024年1月1日 16:14:55)

## 4. 画像の解析

監視カメラの記録動画には建物の振動特性の寄与が含まれるが、今回の着眼点は液状化発生である。建物の固有振動数は高く、液状化に伴う長周期の地盤変位に比べて短周期成分であるため、液状化挙動を議論する上ではその影響を無視できると仮定した。また、画像解析により得られた変位は、いずれも建物に対する相対変位である。

### 4.1 画像解析の方法

解析では、まず画像で検出可能な地盤表面上の特徴点を複数選定し、それらの位置を画像上で経時的に追跡して、ピクセル座標での変位（位置の変化）を把握した。特徴点の追跡には、Pythonの粒子解析パッケージ Trackpy<sup>10</sup>を使用した。次に、得られたピクセル座標での変位を実空間での変位に変換した。地震後、解析対象となる道路およびバックヤードの地面はそれぞれの位置では平面であると仮定し、その上に複数の標点を設定した。また、標点間の実際の距離を現地で測定した。これらの標点の画像上における座標および実距離をもとに、Pythonのアフィン変換パッケージ OpenCV<sup>11</sup>を適用することで、特徴点のピクセル変位を座標での変位へ換算した。なお、標点間の実距離の測定は、道路側では2024年1月23日、バックヤード側では2025年6月16日に実施した。いずれも地震後の測定ではあるが、ピクセル座標での変位を実空間での変位に変換するために必要な情報であることから、標点は可能な限り地震による変形の小さい構造物上に設置した。

Camera No.2 による画像解析の手順を例として以下に示す。まず、図4に示すように、地盤震動を把握するため、道路中央部に位置する3点 (E, F, G) を特徴点として選定し、それらの運動を時間の経過に沿って追跡した。これらの点を選定した理由は、複数の候補点の中で最も連続的な追跡が可能であったためである。次に、路面上の点 A, B, C (位置は図4参照) が同一平面上にあると仮定し、点 A, B, C のピクセル座標から透視変換行列を算出した。この変換行列は、画像内の平面を、現実の座標系 (x: 道路軸方向, y: その垂直方向) に写像するためのものであり、いわゆる透視変換を行う 3×3 行列である。この変換を用いて、特徴点 E, F, G のピクセル座標での変位を実空間における変位に換算した。変換前後の座標値は表1に示す。

なお、Camera No.1 および Camera No.3 についても同様の手法により、それぞれ地盤上の点 H, I, J および点 K, L, M の変位を追跡した (図2, 写真2)。ただし、これらのカメラに対応するバックヤードの区域では、標点間の実距離を測定する前に現場が整理されていたため、取得された変位データの誤差は Camera No.2 より大きいと考えられる。

本研究で用いた動画の解像度は 1920×1080 ピクセルであり、標点間距離 (約 4~8 m) を基準に座標変換を行った場合、

1ピクセルは概ね数 mm~1 cm に相当する。このため、変位の分解能はおおよそ 1 cm 程度と見積もられる。また、追跡誤差や透視変換に伴う誤差を考慮すると、変位絶対値には数 cm 程度の誤差を含む可能性がある。ただし、相対的な変位の傾向や方向性に関する誤差はより小さいと考えられる。

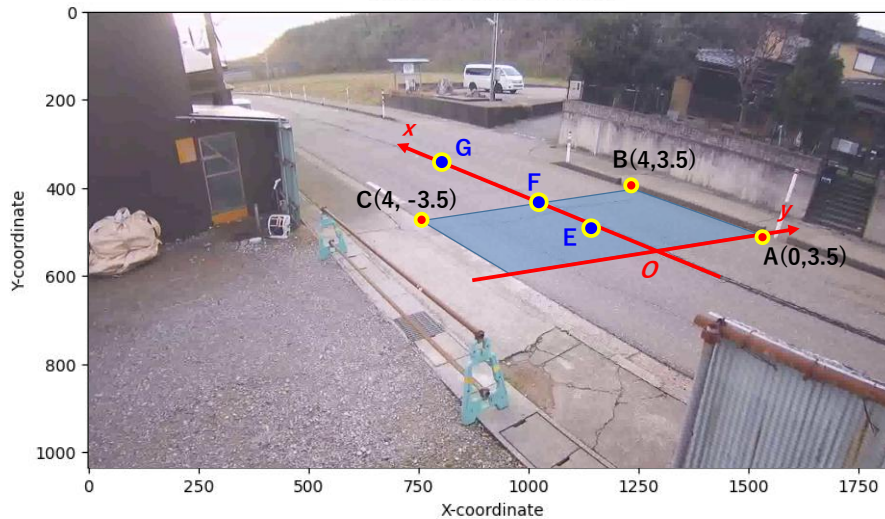


図 4 座標変換の設定 (括弧内は xy 座標系の座標, 単位: m,  $t=0$  s, 2024.1.1 16:10:45)

表 1 座標変換

Points	Pixel coordinates	xy coordinates
A	(1526.9, 500.0)	(0.00, 3.50)
B	(1238.4, 399.3)	(4.00, 3.50)
C	(763.4, 476.6)	(4.00, -3.50)
E	(1249.6, 514.9)	(1.68, 0.03)
F	(1005.4, 420.5)	(3.73, 0.06)
G	(762.3, 326.2)	(7.96, 0.07)

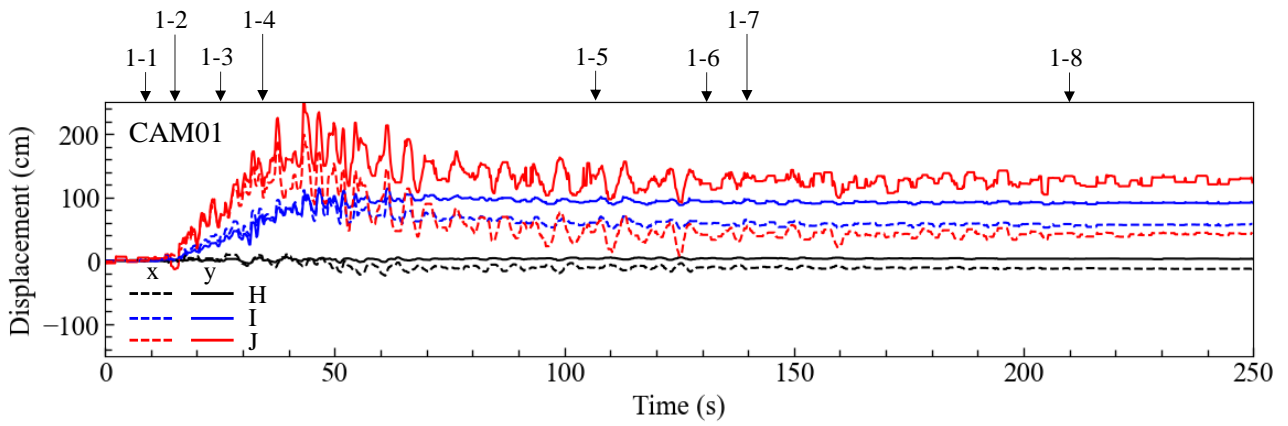
## 4.2 時刻歴波形

### (1) 変位時刻歴

各点の変位時刻歴を図 5~7 に示す。図には、動画より観察されるイベントなどの時刻も合わせて示している。全ての点において、地盤の振動は  $t=5$  s 付近で開始し、 $t=200$  s 付近でおおよそゼロに収束した。また、この地震動の継続時間は、気象庁内灘町大学観測点の記録<sup>4)</sup>とほぼ一致している。

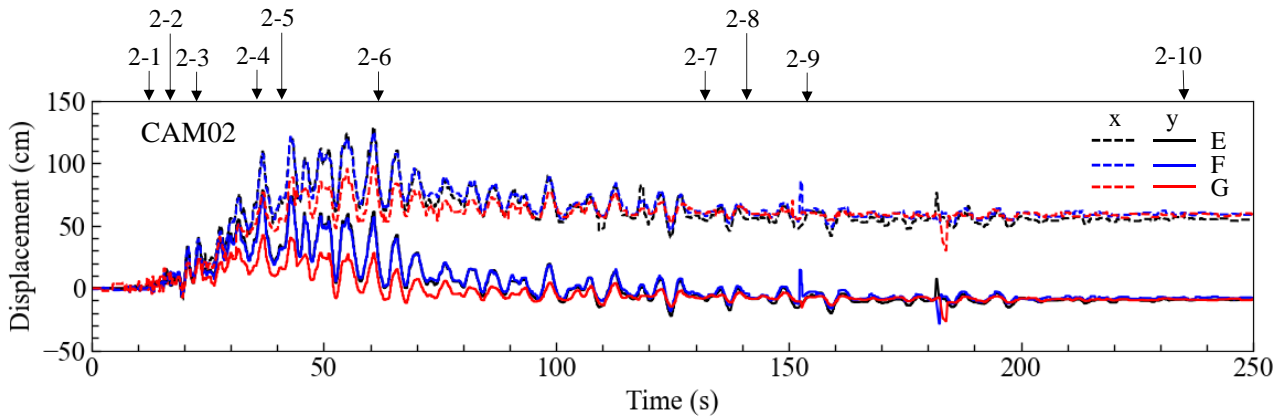
図 6 では、道路軸方向とそれに垂直な方向の振動幅の差はかなり大きい。時間  $t=38$  s 時、y 方向の振動幅が最大となり、写真 2(c) に示す歩道の浮き上がり時点と一致している。地盤振動が収束した後、x, y 方向にそれぞれ約 0.5, -0.1 m の変位が残っていた。x 方向の変位は、図 8 に示す構造物の位置変化からも確認できる。①は左の建物の右端、②は奥の建物の壁の左端の地震前の位置で線を引いている。点 E, F, G の変位量と比較して、①では地震前後にわずかな変位が見られたが、②では x 方向に大きく移動した。また、③の歩道縁石も x 方向に変位しており、②よりやや小さい移動量であった。y 方向の変位は明確に観察できなかったことから、これらの位置変化は主に x 方向で生じたと考えられ、特に手前の歩道付近で大きなずれが生じたと推察される。地震発生後、約  $t=154$  s 付近で道路舗装面と歩道の境目から噴砂が発生した。また時刻  $t=155$  s, 185 s, 自動車が通過した後で、道路路面が振動している様子が観察できた。地盤振動がほぼ収束しても、過剰間隙水圧はまだ完全に消散していないと考えられる。

バックヤードの地盤振動を、図 5, 図 7 に示す。図 6 と同様、各点の変位は道路軸方向 (x 方向) およびそれに垂直な方向 (y 方向) に変換した。監視カメラの映像からは、 $t=25$  s 以降に振動幅が大きくなるのに伴って、地面に亀裂が発生・拡大する様子が見られる。また、近傍地点でも残留変位に差があることから、地盤の変位は局所的に変わっていることが分かる。噴砂は、地震発生後の  $t=100$  s 付近に点 I 周辺で発生し、その後、 $t=120$  s 以降にはさらに奥側の地面からも新たに噴砂が発生した。なお、点 H, I, K, L の振動が視認しにくい、ピクセル座標では周期的な動きが確認されており、振動していたと考えられる。振動幅が小さいため、実空間上では波形として明瞭に現れなかったものと推察される。



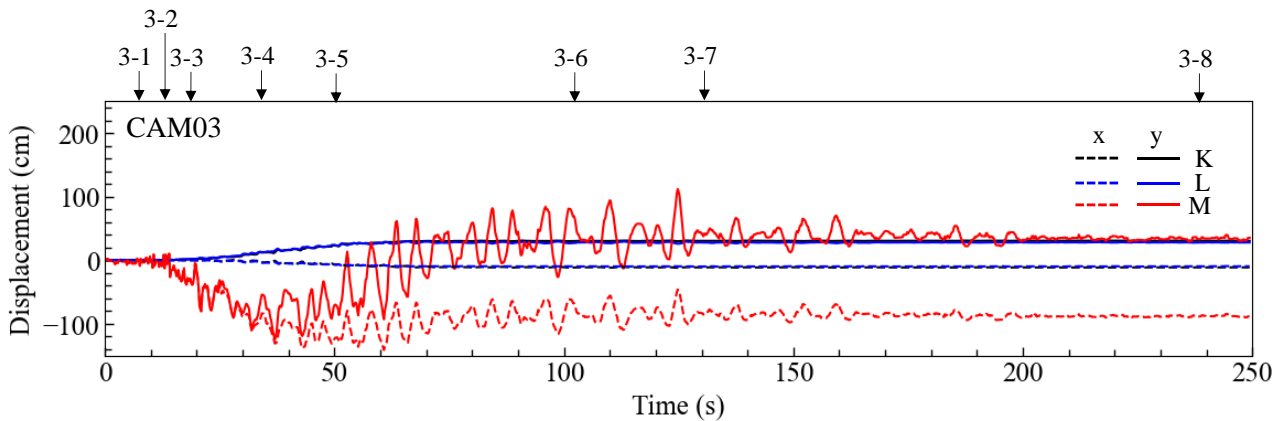
- |          |              |           |               |
|----------|--------------|-----------|---------------|
| 1-1 9 s  | 揺れはじめ 上下動    | 1-5 67 s  | 点 I 付近の地面から噴砂 |
| 1-2 16 s | 横揺れはじめ       | 1-6 131 s | 揺れ上下動ほぼとまる    |
| 1-3 25 s | 大きな上下動 地面に亀裂 | 1-7 140 s | 奥の地面から噴砂      |
| 1-4 34 s | 地面の亀裂が大きく    | 1-8 210 s | 全面噴砂          |

図 5 xy 方向の変位時刻歴 (Camera No.1)



- |          |                  |            |                    |
|----------|------------------|------------|--------------------|
| 2-1 9 s  | 揺れはじめ 上下動        | 2-7 131 s  | 揺れ上下動とまる           |
| 2-2 14 s | 横揺れはじめ           | 2-8 140 s  | 前の家で人が横切る          |
| 2-3 20 s | 大きな上下動           | 2-9 154 s  | 車が通る 道路直交方向の亀裂から噴砂 |
| 2-4 33 s | 手前の舗装ずれ 横の道路にも亀裂 | 2-10 235 s | 奥の歩道の横の道路から噴砂      |
| 2-5 38 s | 奥の歩道浮き上がり        | 2-11 312 s | 道路全体に噴砂            |
| 2-6 59 s | 横の道路の亀裂が大きく      | 2-12 360 s | 全面的に噴砂             |

図 6 xy 方向の変位時刻歴 (Camera No.2)



- |          |           |           |                     |
|----------|-----------|-----------|---------------------|
| 3-1 8 s  | 揺れはじめ 上下動 | 3-6 103 s | 点 I 付近の地面から噴砂       |
| 3-2 11 s | 横揺れはじめ    | 3-7 131 s | 奥の地面から噴砂 揺れ上下動ほぼとまる |
| 3-3 19 s | 大きな上下動    | 3-8 238 s | 噴砂拡大                |
| 3-4 35 s | 地面に亀裂     | 3-9 798 s | 全面的に噴砂              |
| 3-5 51 s | 地面の亀裂が大きく |           |                     |

図 7 xy 方向の変位時刻歴 (Camera No.3)

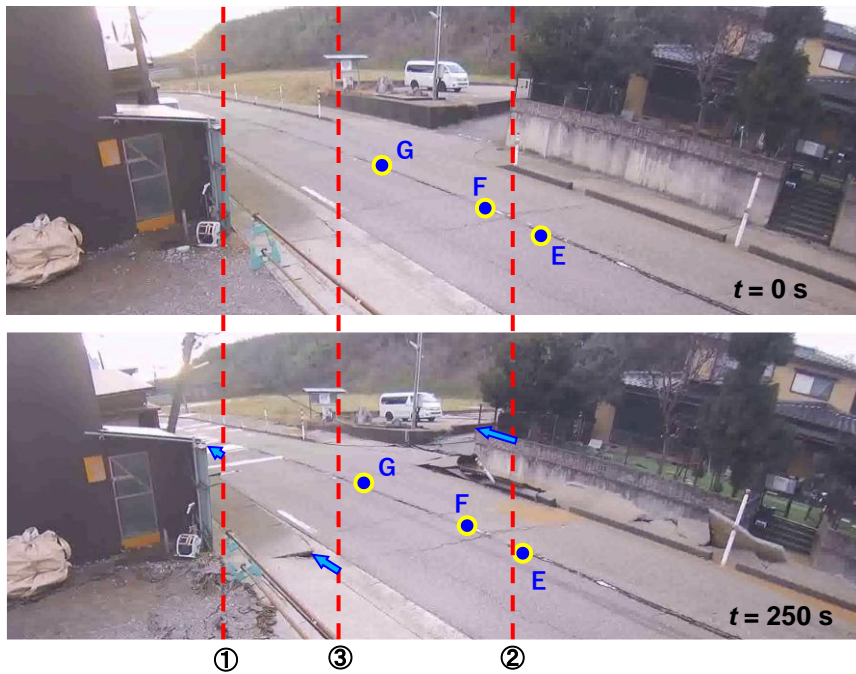


図 8 変位量の比較 (Camera No.2)

## (2) 軌跡 (Orbit)

図 9 に各点の変位波形より Orbit を示す。点 E, F, G が類似した位置履歴を示したのは、これらの点がコンクリート舗装上にあり、舗装の剛性が高いことに加え、三点間の距離が比較的短かったためであると考えられる。図 8 にも示されているように、道路は全体として平行に移動している、主な変位は道路と宮前建設の間で生じている。一方、バックヤードに位置する点 H, I, J および点 K, L, M については、軌跡は位置ごとになっており、変位の発生は局所的である。なお、前述のように標点の計測方法がことなるため、変位の大きさの絶対値の精度は E, F, G に比べて落ちているかも知れないが、方向は正しい。ただし、図 10 では残留変位を示しているが、点 L と点 K の変位は最終的にはほぼ道路に垂直な方向 (y 方向) を向いており、その移動量は約 25 cm であるが、地震後に実測されたプレハブ事務所と地面との相対変位 (y 方向) も約 20 cm であり (写真 1(b))、バックヤードの変位も概ね正しいと考えられる。これらの結果から、地盤の変位は局所的に大きく変化して、事務所周辺の地盤は地震動の影響により道路方向へと押し出され、その過程で歩道の舗装が破壊されたと推定される (写真 2(c))。

なお、画像解析で得られた変位は、いずれも建物に対する相対変位である。検討対象付近の地盤は干拓地側に向かって標高が低下しているが、図 10 に示した変位ベクトルの一部は傾斜方向と一致していない。これは、液状化後の変位が必ずしも地形勾配のみに従うのではなく、他の要因の影響を受けている可能性を示しているが、現段階では詳細な要因の特定は困難であり、今後の検討課題とする。

## (3) 速度時刻歴

Camera No.2 における各点の x および y 方向の速度時刻歴を図 11 に示す。速度時刻歴の計算について、まず変位時刻歴に対して 0.1~1 Hz (周期 1~10 s) のバンドパスフィルターをかけ、その後、Fourier 級数展開を用いて数値微分した。点 E, F, G の最大速度は 40-60 cm/s で、村松<sup>12)</sup>の最大速度と震度の関係よれば、現地の震度 5 弱にほぼ対応している。速度時刻歴で、振動周期が時間の経過とともに徐々に増加し、特に  $t=19$  s 付近で急激に長周期化している。

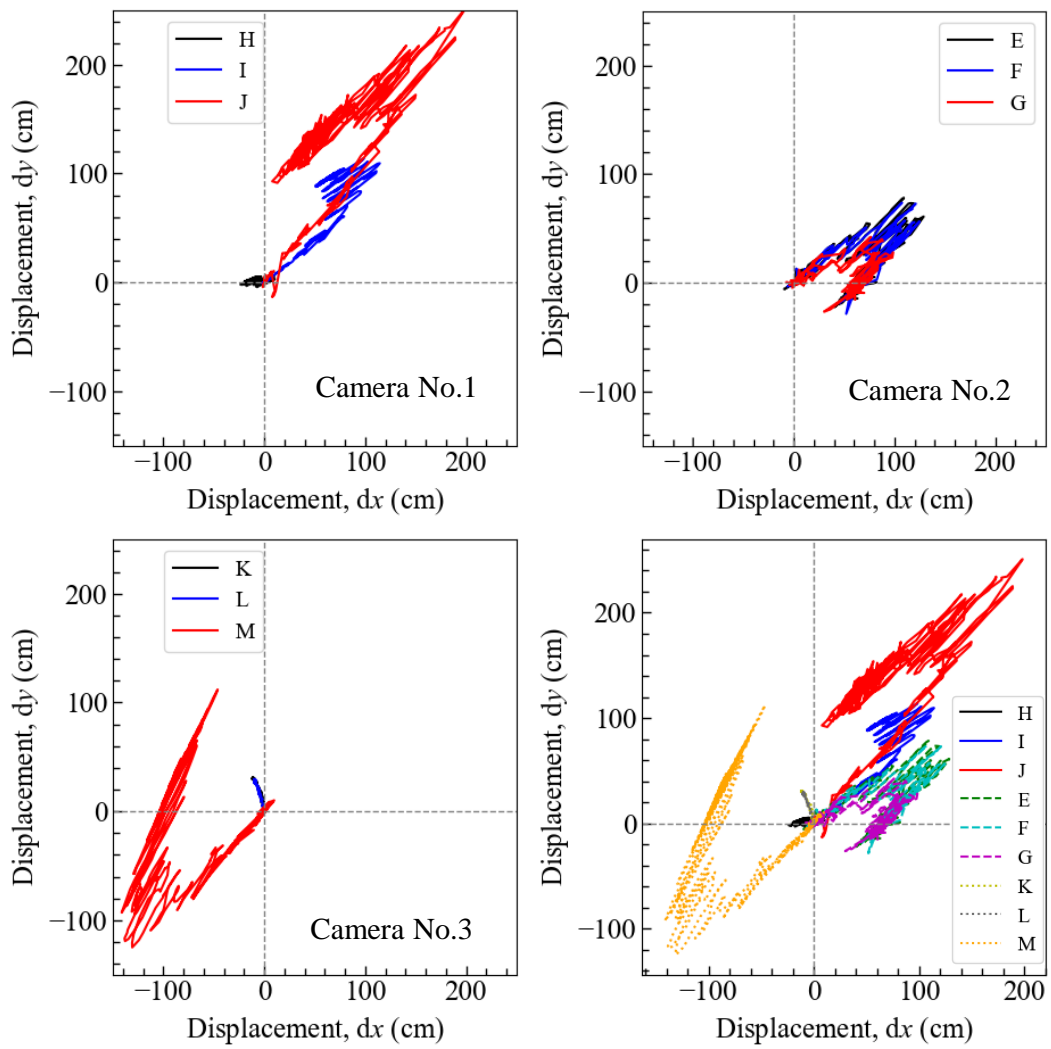


図9 変位波形より軌跡

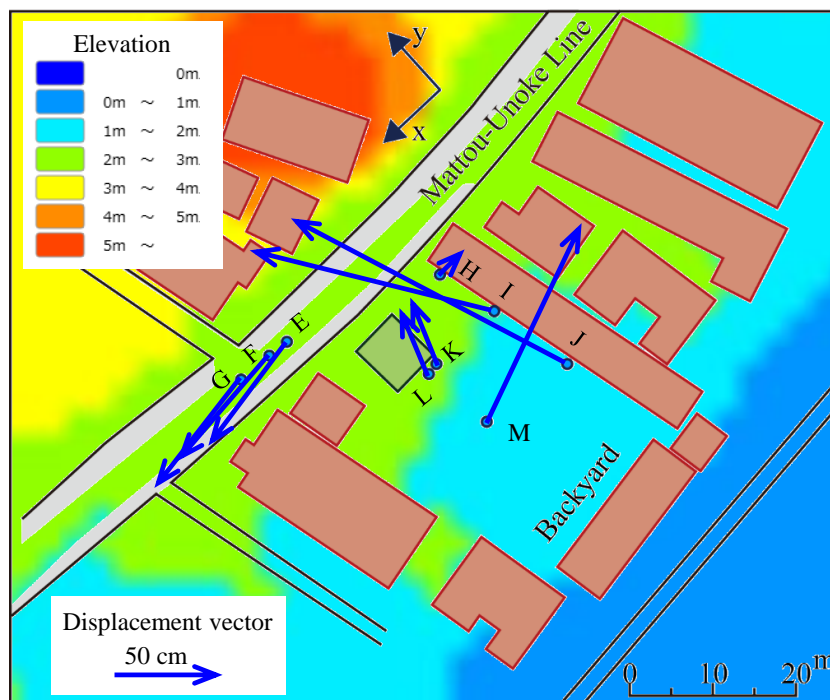


図10 残留変位ベクトルおよび標高図 (文献7)に基づいて作成)

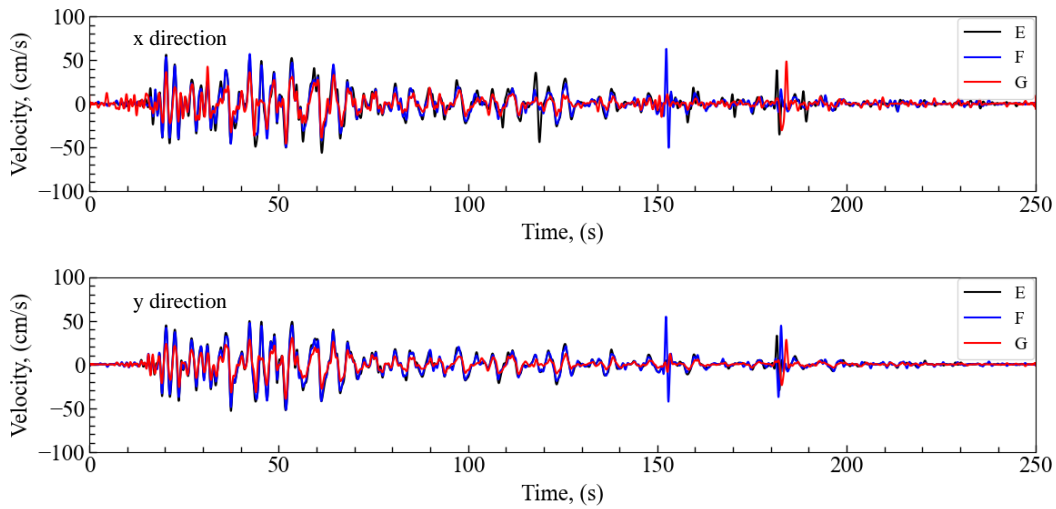


図 11 xy 方向の速度時刻歴 (Camera No.2)

#### 4.3 非定常スペクトル

Camera No.2 における各点 E, F, G に対して非定常スペクトル解析を実施した。本解析には、神山<sup>13)</sup>が提案した手法を用いた。なお、砂丘の上であり液状化とは関係ない気象庁内灘町大学の記録で周期約 5 秒の長周期成分が卓越している<sup>4)</sup>が、これは基本的には深部構造によるサイト特性である。そこで、非定常スペクトル解析に用いるデータには周期 4 秒以上の長周期成分をハイパスフィルターで削除した波形を用いる。図 12～図 15 に解析結果を示す。

点 G における変位および速度の波形に基づく x 方向の非定常スペクトルには、 $t=10$  s に周期 1 秒よりやや長い成分にピークがあり、このピークは、内灘町西荒屋地区に固有のピーク周期であると考えられる<sup>14)</sup>。その後、 $t=20$  s には周期 2 秒に、 $t=40$  s には周期 3 秒付近にそれぞれスペクトルのピークが現れ、 $t=55$  s までその状態が継続した。すなわち、 $t=10$  s 付近より過剰間隙水圧があがりはじめ、 $t=40$  s で完全に液状化したと考えられる。同様な時間的变化は、点 E および点 F の非定常スペクトルにおいても観察される。これらのピークの変化時期は、図 5～図 7 に示される振幅の増加や、地面あるいは道路における亀裂の発生時期と一致している。また、 $t=155$  s および  $t=185$  s に周期 1～3 秒付近に現れるピークは、自動車の通過による振動と考えられる。なお、本研究で用いた監視カメラの記録フレームレートは 5 fps であり、サンプリング周波数は 5 Hz に相当する。したがって、ナイキスト周波数は 2.5 Hz (周期 0.4 s) であり、周期 0.4 s 未満の短周期成分を明瞭に捉えることはできない。一方で、液状化に伴う地盤挙動の主要成分は周期 1 s 以上であることから、本解析の目的に対しては十分な分解能を有している。

#### 4.4 気象庁内灘町大学との比較

気象庁内灘町大学の加速度記録は、砂丘上に位置する内灘町役場における震度計による観測値である。内灘町西荒屋地区からは直線距離でわずか 3 km にあるが、西荒屋地区とは異なり、砂丘頂部にあることから内灘町役場周辺では明確な液状化被害は確認されていない。そこで比較検討を行うため、気象庁内灘町大学の加速度記録を用いて非定常スペクトル解析を実施した。

気象庁内灘町大学の速度時刻歴に、0.1～10 Hz (周期 0.1～10 s) のバンドパスフィルターをかけたものを以下の計算に用いた。図 16 に示すように、気象庁内灘町大学での最大速度は約 25 cm/s であり、点 E, F, G における最大速度 (図 11) と比較するとやや小さい。先に述べたように、周期数秒の長周期成分が確認されたので、地震動データには、周期 4 秒以上の長周期成分を先と同様除いて解析している。

図 17 に気象庁内灘町大学における速度の非定常スペクトルを示す。非定常スペクトルは点 E, F, G の結果 (図 13 および図 15) とは異なる傾向を示している。特に、 $t=20$  s～ $t=55$  s にかけてピークが長周期側へ移行する傾向は見られなかった。すなわち、非線形化に伴う地盤剛性の低下は確認されていない。この結果は、内灘町役場周辺において明確な液状化被害が確認されていないという事実と矛盾しないものである。

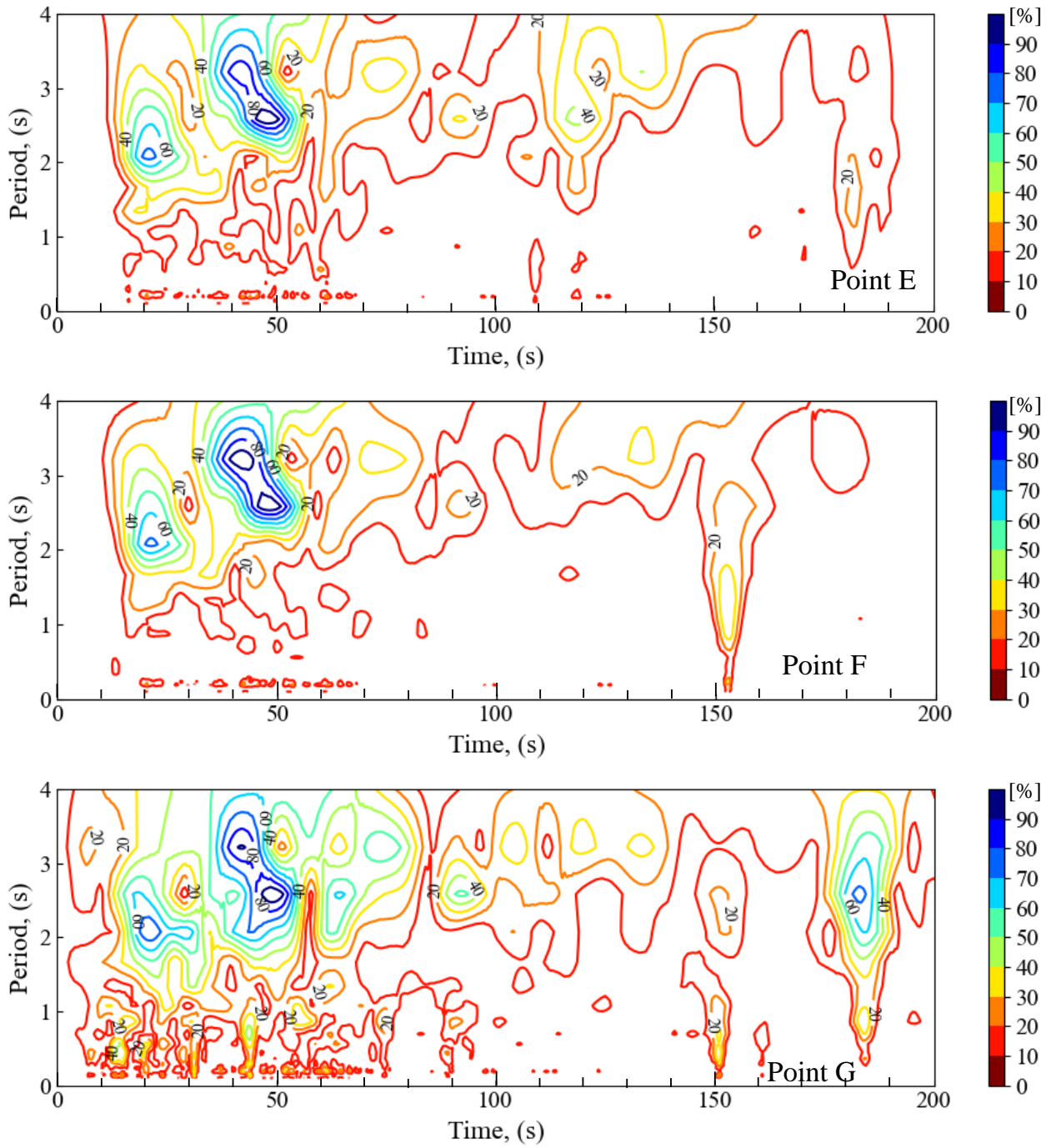


図 12 変位波形より x 方向の非定常スペクトル (Camera No.2)

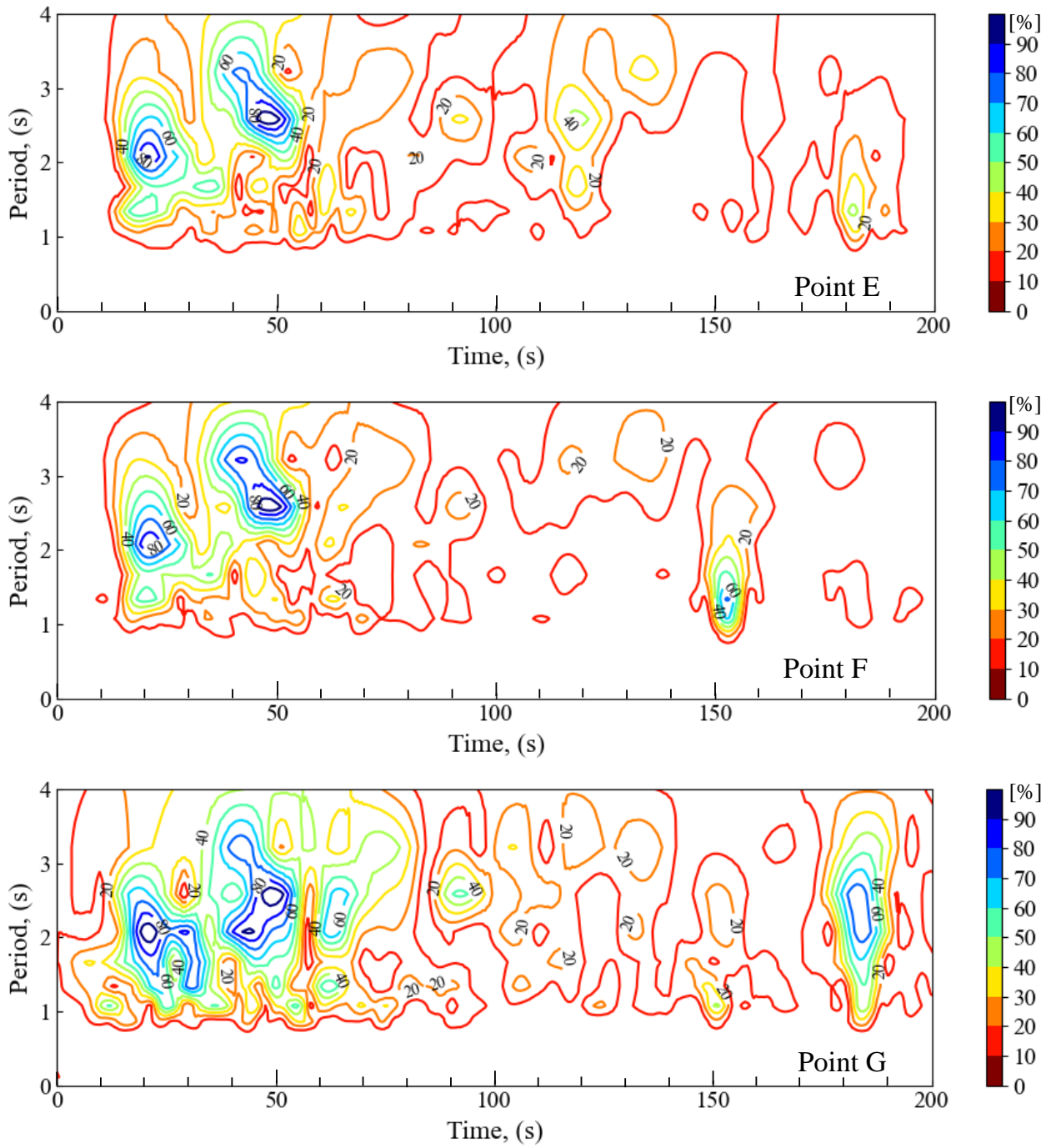


図 13 速度波形より x 方向の非定常スペクトル (Camera No.2)

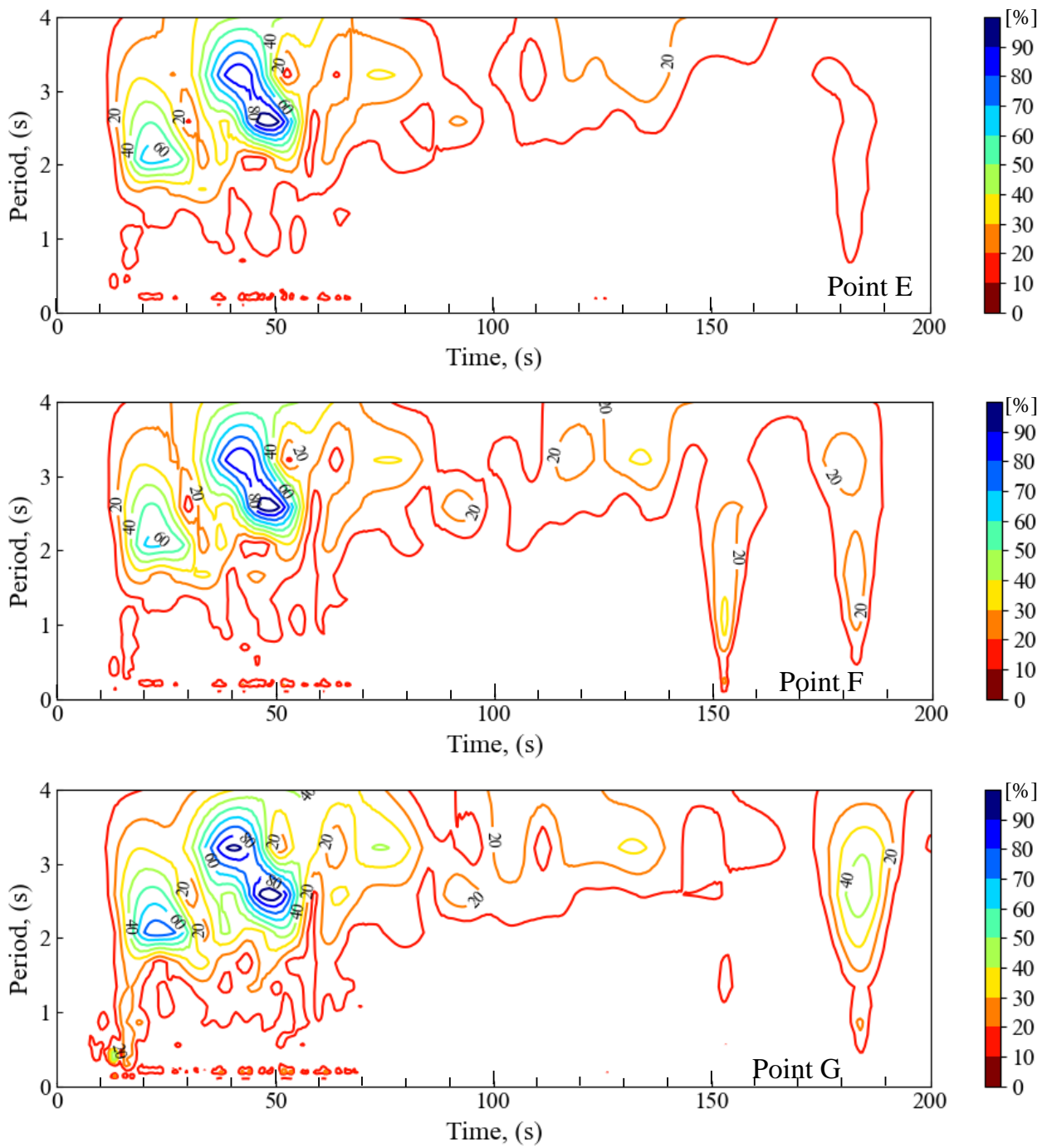


図 14 変位波形より y 方向の非定常スペクトル (Camera No.2)

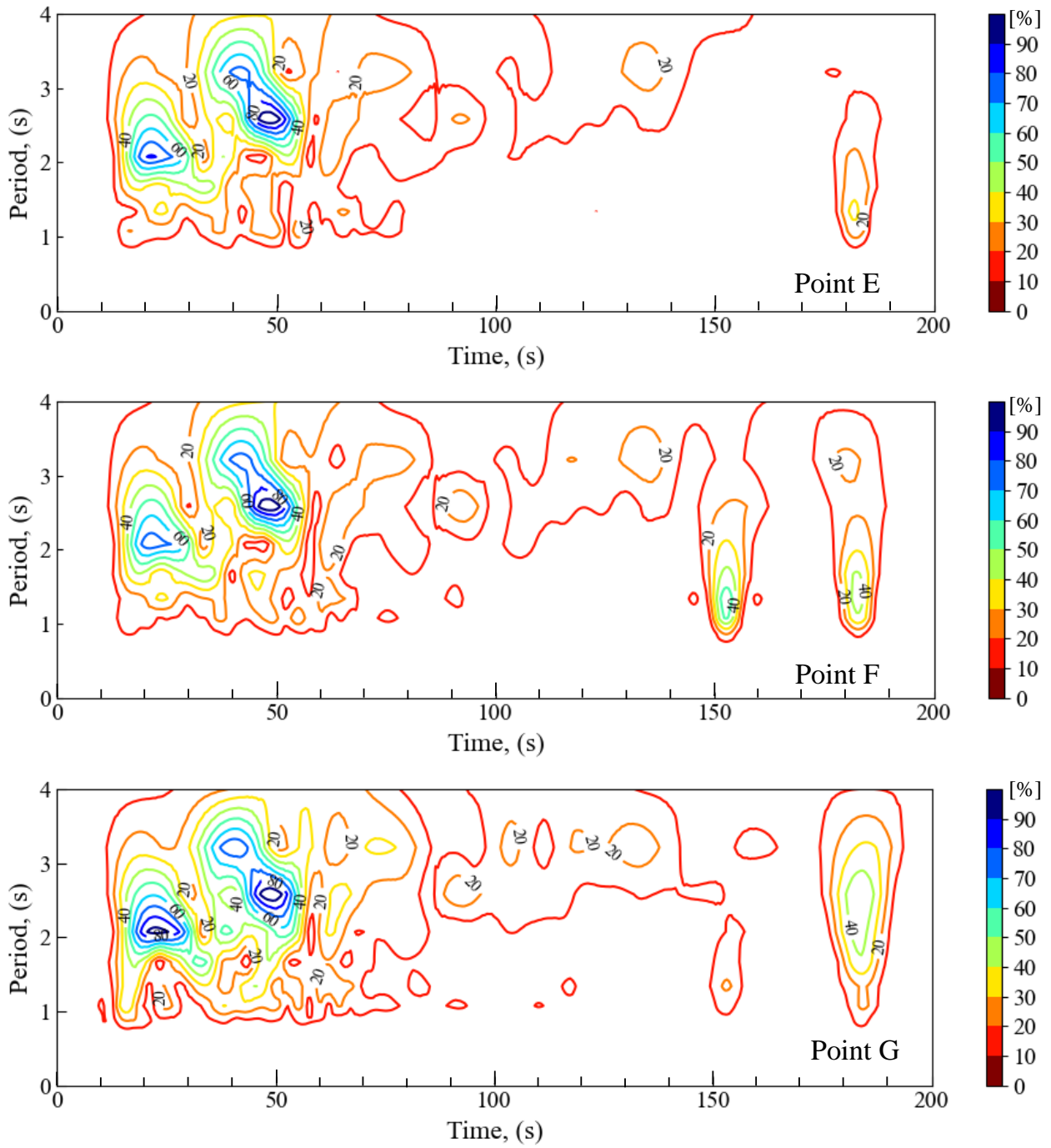


図 15 速度波形より y 方向の非定常スペクトル (Camera No.2)

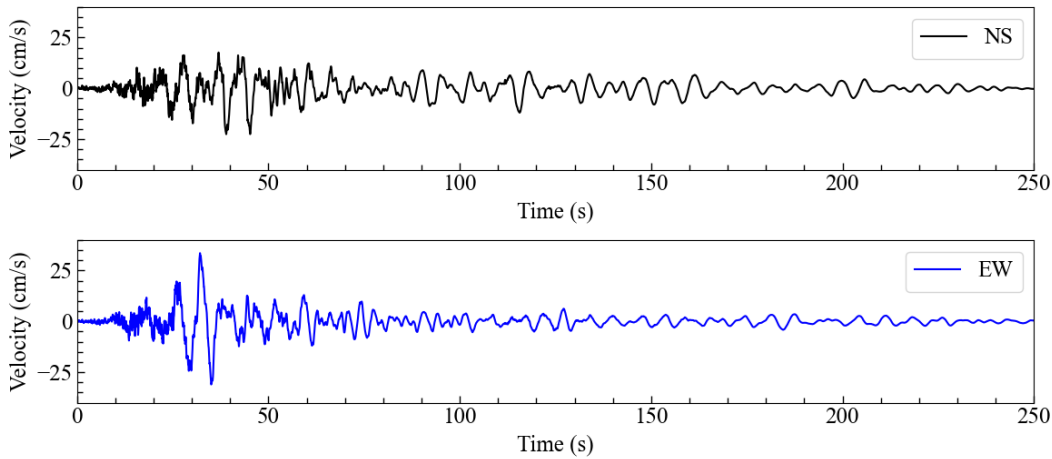


図 16 JMA 内灘町大学の速度時刻歴

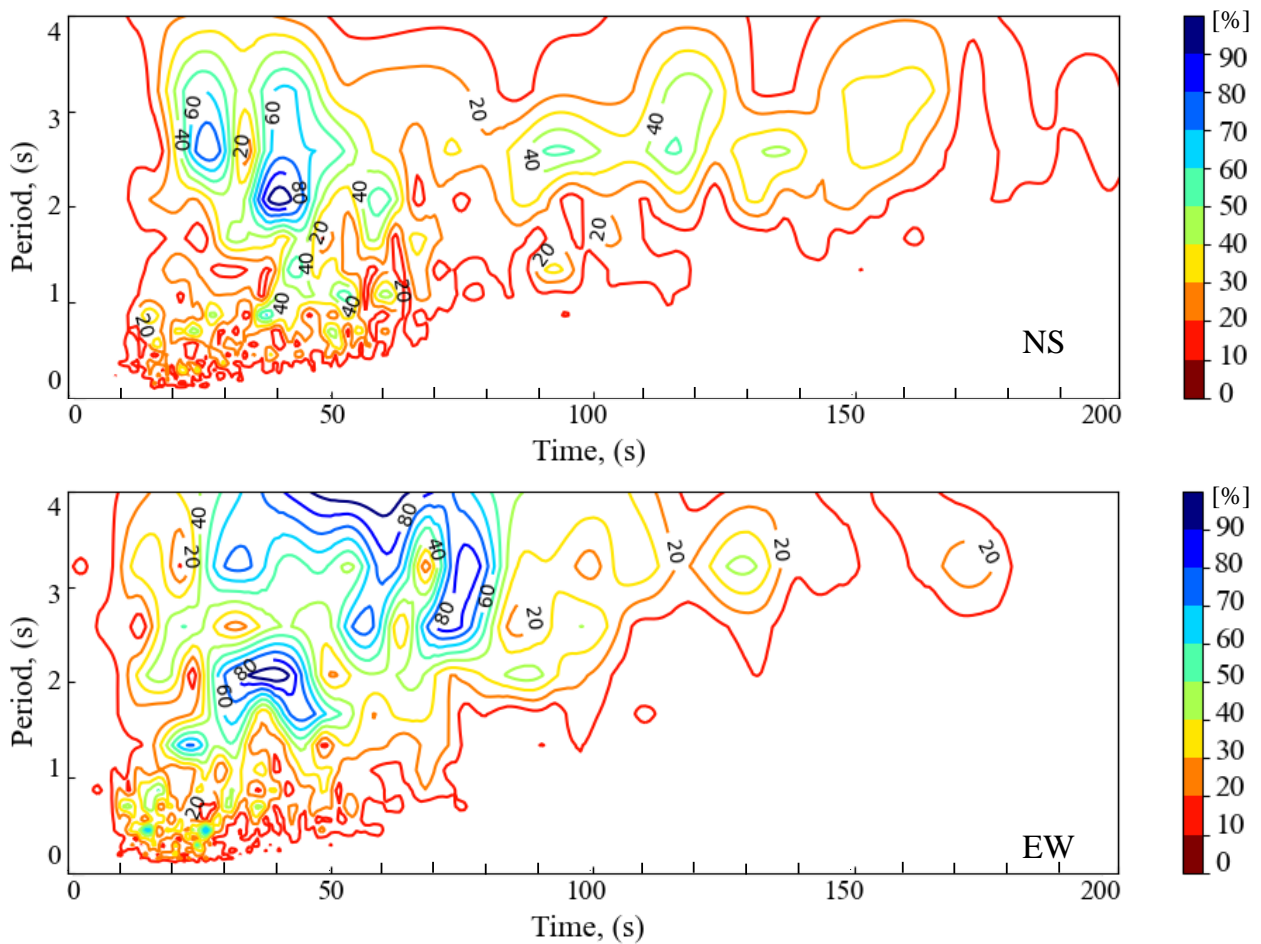


図 17 JMA 内灘町大学の速度の非定常スペクトル

## 5. 終わりに

本報告では、令和 6 年能登半島地震において激しい液状化と液状化に伴う流動が発生した内灘町西荒屋地区に設置された監視カメラ映像を用い、画像解析によって地震時の地盤振動特性の経時変化を検討した。その結果、次のような結論が得られた。

- 1) 画像解析により得られた地盤の変位は、歩道舗装の隆起やバックヤードにおける地表亀裂の発生・拡大など、監視カメラの記録動画で観察された変状と整合的であり、最大速度は気象庁内灘町大学における震度 5 弱の観測結果と整合する値であった。
- 2) 非定常スペクトル解析により、地震動のピーク周期が時間とともに変化することが把握され、液状化発生の経時的

な変化の追跡が可能であった。

- 3)  $t=10$  s から 55 s に渡って過剰間隙水圧の上昇が生じ、その時間内に地盤の変位（流動）が発生した。
- 4) 地盤振動がほぼ収束した後、自動車の通過に伴って再び地盤振動が生じたことから、過剰間隙水圧の消散にはかなり時間がかかっている。

以上に述べたように、液状化による局所的な地盤震動特性の急変を、既設の監視カメラ映像を活用した画像解析によって把握できた。この手法は、他の液状化被災地における映像記録への適用や、3次元的な変位の推定を通じて、地震時地盤挙動の把握に用いることができると考えられる。

## 謝辞

監視カメラ映像は宮前建設様（内灘町）にご提供いただいた。記して謝意を表します。

## 参 考 文 献

- 1) 内閣府防災情報：令和6年能登半島地震を踏まえた 災害対応の在り方について、[https://www.bousai.go.jp/jishin/oto/taisaku\\_wg\\_02/pdf/hokoku.pdf](https://www.bousai.go.jp/jishin/oto/taisaku_wg_02/pdf/hokoku.pdf), 2025年6月30日。
- 2) 吉田望：液状化現象 メカニズムから数値解析まで，森北出版，2020，372p.
- 3) 清田隆，栗間淳：2024年能登半島地震による内灘町の液状化流動被害，生産研究，Vol.76, No.4, pp.417-421, 2024.
- 4) 気象庁：強震観測データ，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](https://www.data.jma.go.jp/eqev/data/kyoshin/jishin/2401011610_noto), 2025年6月23日。
- 5) 地盤工学会：令和6年（2024年）能登半島地震 地震被害調査に関する情報，[https://www.jiban.or.jp/?page\\_id=21412](https://www.jiban.or.jp/?page_id=21412), 2025年6月18日。
- 6) 産業施設防災技術調査会：2024年能登半島地震 内灘町地盤変状および地盤変位の測定，2024。
- 7) 国土地理院：地理院地図，<https://maps.gsi.go.jp>, 2025年6月30日。
- 8) 稲田倍徳：スウェーデン式サウンディング試験結果の使用について，土と基礎，Vol.8, No.1, pp.13-18, 1960.
- 9) 大島昭彦：スウェーデン式サウンディング試験とN値，qu値との相関の再検討，第52回地盤工学研究発表会講演集，pp. 31-32, 2017.
- 10) Allan, D. B., Caswell, T., Keim, N. C., Van der Wel, C. M. and Verweij, R. W.: Trackpy v0.6.4. <https://doi.org/10.5281/zenodo.12708864> (30 March 2025, date last accessed).
- 11) Bradski, G.: The OpenCV Library. Dr. Dobb's Journal of Software Tools, Vol.120, pp.122-125, 2000.
- 12) 村松郁栄：震度分布と地震のマグニチュードとの関係，岐阜大学教育学部研究報告，Vol.4, No.3, 168-176, 1969.
- 13) 神山眞：強震地震動の非定常スペクトル特性とその波動論的考察，土木学会論文報告集，Vol.1979, pp.284: 35-48, 1979.
- 14) 後藤浩之，中辻綾香：令和6年能登半島地震被災地における地盤震動特性-輪島市および内灘町の検討事例，自然災害科学，Vol.43, No.3, pp.509-518, 2024.

(2025.7.2 受付)