

能登半島地震における液状化被害の一要因

浜松市立高等学校 自然科学部
2年 折川 梗

1 研究の動機

(1) 石川県河北郡内灘町で起きた液状化現象の要因に対する強い関心

2024年1月1日、能登半島地震が発生した。最大震度7（輪島市及び羽咋郡志賀町）の大地震である。その日滞在中の石川県で被災した私は、震災被害の甚大さとその多様さに圧倒された。

その後、石川県内各所で被害状況の調査を繰り返す中で興味をもったのが液状化現象であった。能登半島地震において液状化の被害を受けた地区は富山県や新潟県も含めて数カ所確認されているが、特に液状化が激しかったのは石川県河北郡内灘町である。内灘町は金沢市に隣接する自治体であり、震災当日は震度5強の金沢市に迫る揺れ（震度5弱）に見舞われている。

日本海に面した内灘町【図1】は、砂丘を背にした形で街が形成されているため、液状化現象が発生しやすい場所である。能登半島地震においては、液状化によって以下のような被害【写真1】が確認されている。



図1 内灘町の位置



写真1 液状化の被害を受けた内灘町の様子

しかし言うまでもなく、内灘町において発生した地震は2024年1月1日が史上初というわけではない。これまでも有感・無感の様々な揺れを経験してきたはずである。では、今回はなぜ、あのような大規模な液状化が起きたのか。また、隣接する金沢市には液状化の被害がほぼ見られず、なぜ内灘町に集中したのか。それらの点に強く興味をもち、本研究をスタートさせた。

(2) 現在取り組んでいる総合的な調査研究

現在、自身に取り組んでいる地震の調査研究は総合的なもので、大きく二つの研究から成っている。一つは、前の項でも少し触れた自然地理学的な道筋である。能登半島全体を視野に入れて、地形的な特徴と被害状況を現地調査と地図上での照合によって捉えていこうとするものである。この研究は2024年12月現在も継続しているが本論では取り上げない。もう一つは、地学・物理学的な研究である。液状化実験や内灘町の噴砂の粒子観察等を行い、液状化が生じた要因を科学的に探っていくものである。本論においては、この二つ目の地学・物理学的な研究を取り上げ、その実験の過程と結果を整理していく。

なお、地学・物理学的な研究の遂行に当たっては、静岡理科大学の中澤博志教授（地盤工学）の指導を受けている。

(3) 本研究における「問い」

- 【Q1】内灘町の液状化の発生はどのような条件があったからか。単に、「砂地である」「これまででない大きな揺れ」という二つの条件が重なったことで、内灘町の液状化が発生したのか。
- 【Q2】地震の際の液状化の可能性は浜松市にもある。振動（強弱や時間）と液状化の発生に関して、内灘町と浜松市とでは、どのようなところに共通点・相違点が確認できるか。

(4) 本研究の独自性と工夫

液状化現象をテーマとする高校生による研究は珍しくない。例えば、石川県立七尾高等学校や愛媛県立宇和島東高等学校のチームが取り組んだ研究^{1) 2)}は、どちらも液状化の発生条件の解明に関するものであり、SSHの指定校らしく、振動中の沈降過程や砂の粒子の動きが丁寧に整理されている。しかしながら、実験に用いている土砂の採取場所やその粒子の形状等が考慮されておらず、また振動を起こす際に電動マッサージ器を使用する³⁾など、地震の実情とはかけ離れた条件下での実験となっている部分も含んでいる。

そこで本研究では、内灘町役場等の許可を得て、【表1】に示した4地点で採取した砂を用いて実験を行っていく。「No.3中田島砂丘」及び「No.4 天竜川河原」については、浜松市が作成した「液状化可能性マップ」⁴⁾を参考にして採取場所を選定し、土砂を採取している。また、振動数については、能登半島全体や内灘町付近の発生震度を踏まえて、その範囲内で設定する。これらの点を踏まえることで、先行研究の知見を土台にしつつ、実際に液状化現象が発生した土地（砂）の状況や砂の特性、地震の揺れを考慮した実験を行うことができると考えており、その結果には独自性があると捉えている。

表1 砂の採取情報

No.	名称	採取地（自治体・座標）		採取日	写真
1	電柱下	内灘町	県道162号沿い 36.675210, 136.665246	2024.8.13	写真2
2	某工場前歩道	内灘町	県道162号沿い 36.673785, 136.663988	2024.8.13	写真3
3	中田島砂丘	浜松市	西島町 34.653040, 137.763910	2024.8.21	写真4
4	天竜川河原	浜松市	鶴見町 34.709162, 137.798439	2024.8.21	写真5



写真2 電柱下



写真3 某工場前歩道



写真4 中田島砂丘



写真5 天竜川河原

2 研究の方法

4地点において採取した砂を、設定した条件下で振動させ、液状化の有無を確認していく。実験に影響を与える可能性が考えられるので、砂の表面に構造物を置き、その変化を見る等を行わない。また、ここでは「液状化」を「水分の滲出が確認できる状態」と定義し、地盤沈下とはあえて分けて扱うこととする。実験は、以下の①から⑦の手順・条件で行う。

- ① 編み目が異なる3種類の^{ふるい}篩^{ふるい}を利用し、小石や木片、ごみなどの不純物を取り除き、砂を抽出する。
- ② 水を入れた4つのビーカーの中に、各地点の砂（200g）を少しずつ落とし、堆積させていく（水中落下法）。砂の表面ぎりぎりまで満たすように、スポイトで水量を調節する（砂の特性に合わせて加える水量が異なる）。【写真6】
- ③ 縦30cm、横70cmの長方形の木板の上に、ビーカーをガムテープで固定する。【写真7】
- ④ 木の板の底に「ころ」を2本渡し【写真8】、板を手動で振幅5センチで揺らし、水平に規則正しく往復させる。
- ⑤ 振動数は、1Hz、2Hz、3Hzの3種類を設定する。
- ⑥ 振動時間は、20秒、40秒、60秒の3種類を設定する。
- ⑦ 計9種類のデータを「5回」取り、各ビーカーの状態を目視して3段階に分類する。また、定規で沈下量を計測する。

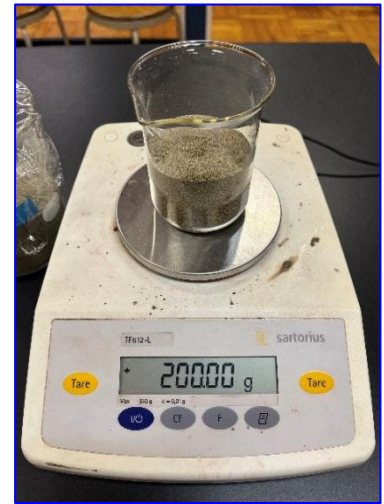


写真6 砂と水をセット



写真7 木の板の上に固定



写真8 板の下に「ころ」を置く

振動数を1Hz、2Hz、3Hzの3種類設定したのは、能登半島地震における実際の揺れの状況を踏まえて実験を行うためである。1Hz、2Hz、3Hzの各振動について、下式に基づいて加速度を算出し、ガルに変換すると40Gal、160Gal、360Galとなる。それらは、震度4、震度5、震度6程度の揺れにおよそ当てはまる。⁵⁾

$$x = \frac{1}{2}at^2$$

$$\left[\begin{array}{l} x = \text{移動距離} \quad (m) \\ a = \text{加速度} \quad (m/s^2) \\ t = \text{時間} \quad (s) \end{array} \right.$$

例えば、1Hzの場合は静岡県袋井市や愛知県名古屋市などで発生した揺れに近いことになる。また、2Hzの場合は石川県金沢市や石川県内灘町など、3Hzの場合は石川県の輪島市や珠洲市などの揺れに近い。

木の板を往復させる時間を、20秒、40秒、60秒と3段階に設定したのは、地震の揺れの長さの影響を確認するためである。中澤教授によると「能登半島地震の揺れは長かった」とのことである。被災地点によって異なるが、30～60秒間程度揺れが継続したようである。⁶⁾ そうした能登半島地震の揺れの状況に近づけるために、各振動数で振動時間を最大60秒に設定した。

3 結果

(1) 振動実験の結果

実験の結果を整理すると【表2】から【表5】のようになった。液状化の状態は目視によって確認し、下の3段階で分類している。

- 1・・・液状化が全く確認できない
- 2・・・液状化の兆候が見られる
- 3・・・明らかに液状化している

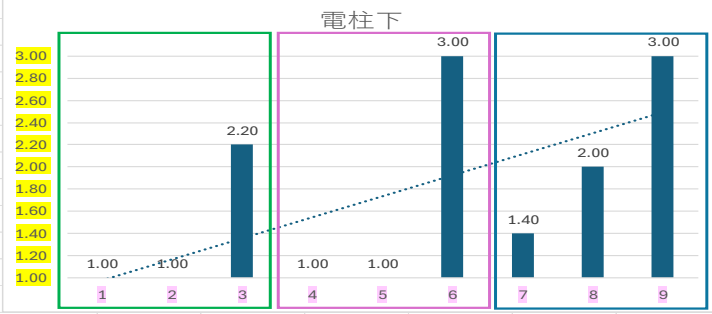
7)

液状化の程度を分類して付した上記の「1~3」は、「1回目」から「5回目」までの各回の実験結果として【表2】から【表5】に整理した。

また、地盤沈下の程度についても、定規によって測定した。

表2 No.1電柱下 (内灘町) の結果

	振動数 Hz	振動時間 秒	電柱下 (内灘町)					Ave.
			1回目	2回目	3回目	4回目	5回目	
1	1	20	1	1	1	1	1	1.00
2	2	20	1	1	1	1	1	1.00
3	3	20	2	2	2	2	3	2.20
4	1	40	1	1	1	1	1	1.00
5	2	40	1	1	1	1	1	1.00
6	3	40	3	3	3	3	3	3.00
7	1	60	2	2	1	1	1	1.40
8	2	60	1	2	2	2	3	2.00
9	3	60	3	3	3	3	3	3.00



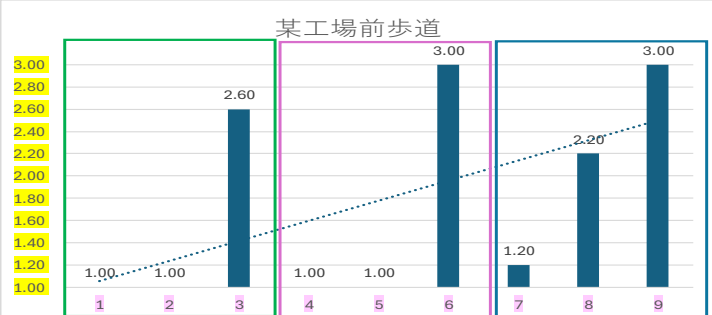
■「No.1電柱下」の砂は、3Hzの振動で液状化が発現する。

■振動数が高く、振動時間が長くなれば、液状化が起こりやすくなる。振動時間が20秒であったとしても、3Hzであれば、液状化の兆候が見られる。

■1Hzと2Hzで、振動時間が20秒及び40秒の場合には液状化は確認できなかった。

表3 No.2某工場前歩道 (内灘町) の結果

	振動数 Hz	振動時間 秒	某工場前歩道 (内灘町)					Ave.
			1回目	2回目	3回目	4回目	5回目	
1	1	20	1	1	1	1	1	1.00
2	2	20	1	1	1	1	1	1.00
3	3	20	2	3	3	2	3	2.60
4	1	40	1	1	1	1	1	1.00
5	2	40	1	1	1	1	1	1.00
6	3	40	3	3	3	3	3	3.00
7	1	60	2	1	1	1	1	1.20
8	2	60	2	2	2	2	3	2.20
9	3	60	3	3	3	3	3	3.00



■「No.2某工場前歩道」の砂は、「No.1電柱下」と同じ様な結果となった。

■3Hzの振動で液状化が発現し、振動時間が20秒であっても、液状化の兆候が見られた。

■1Hzと2Hzで、振動時間が20秒及び40秒の場合には液状化は確認できなかった。

表4 No. 3中田島砂丘（浜松市）の結果

	振動数 Hz	振動時間 秒	中田島砂丘（浜松市）					Ave.
			1回目	2回目	3回目	4回目	5回目	
1	1	20	1	1	1	1	1	1.00
2	2	20	1	1	1	1	1	1.00
3	3	20	1	1	2	2	2	1.60
4	1	40	1	1	1	1	1	1.00
5	2	40	2	2	2	2	2	2.00
6	3	40	3	3	3	3	3	2.80
7	1	60	2	1	2	2	1	1.60
8	2	60	2	2	2	2	3	2.20
9	3	60	3	3	3	3	3	3.00

■「中田島砂丘」の砂は、振動数と振動時間が増えると液状化が発現しやすくなる性質が確認できた。

■振動時間を20秒とした場合、振動数3Hzであっても、液状化の兆候は2/5回において液状化の兆候を確認できなかった。しかし、振動時間が40秒になると2Hzであっても、全ての実験回において液状化の兆候が見られた。

表5 No. 4天竜川河原（浜松市）の結果

	振動数 Hz	振動時間 秒	天竜川河原（浜松市）					Ave.
			1回目	2回目	3回目	4回目	5回目	
1	1	20	1	1	1	1	1	1.00
2	2	20	1	1	1	1	1	1.00
3	3	20	1	2	2	2	1	1.60
4	1	40	1	1	2	1	1	1.20
5	2	40	1	2	2	2	2	1.80
6	3	40	2	2	3	2	3	2.40
7	1	60	2	2	2	2	2	2.00
8	2	60	3	2	3	2	3	2.60
9	3	60	3	3	3	3	3	3.00

■「天竜川河原」の砂は、振動時間が増えるにつれて、液状化率が高まるのが確認できた。

■「中田島砂丘」の砂と似たような特徴をもっているが、「中田島砂丘」の砂よりも、振動時間が液状化の発現を大きく左右している様子が浮かび上がった。

■内灘町で採取した砂とは異なり、振動数の影響は受けにくい性質をもっている。

地盤沈下の程度は、振動を与える前と5回の振動を与えた後で、土の水準を定規で測定（写真9、写真10）し、それを記録した。



写真9 振動前・No.1電柱下



写真10 振動後・No.1電柱下

測定の結果は（表6、表7）の通りである。

地盤沈下は、4地点全てにおいて見られた。興味深いのは、「液状化が全く確認できない」（水分が浸出していない）という状態であっても、地盤沈下が発生していることである（地盤沈下も液状化現象の一つであるが、ここではあえて切り離して考えることとする）。これは、砂の保水力の差が影響しているのかもしれない。

表6 振動時の地盤沈下量（単位cm）

No.	名称	場所	振動前	振動後	沈下量
1	電柱下	内灘町	4.8	4.0	0.8
2	某工場前歩道	内灘町	4.7	3.9	0.8
3	中田島砂丘	浜松市	4.5	4.0	0.5
4	天竜川河原	浜松市	5.5	4.5	1.0

表7 地盤沈下の詳細（単位cm）

No.	名称	場所	振動時間	沈下量（5回の積算）		
				1Hz	2Hz	3Hz
1	電柱下	内灘町	20	0.0	0.0	0.6
			40	0.1	0.2	0.1
			60	0.5	0.0	0.1
2	某工場前歩道	内灘町	20	0.0	0.1	0.5
			40	0.1	0.2	0.2
			60	0.7	0.0	0.1
3	中田島砂丘	浜松市	20	0.0	0.0	0.3
			40	0.1	0.2	0.1
			60	0.3	0.1	0.1
4	天竜川河原	浜松市	20	0.0	0.0	0.7
			40	0.1	0.7	0.2
			60	0.8	0.2	0.1

■ は沈下が0.50cm以上の場合であり、■ は沈下が0.50cm未満の場合である。

（2）砂の粒子観察

液状化の発現状況と沈下測定の結果から、砂の保水力の差が結果に影響を与えたのではないかと予想できた。そこで、砂の粒子にどのような違いがあるか、顕微鏡で確認をすることにした。

撮影にあたって使用したのは、スマートフォン用に市販されている顕微鏡（写真11、写真12）である。倍率は500倍に設定した。



写真11 スマートフォン用顕微鏡



写真12 スマートフォン用顕微鏡

採光の条件等を揃えて、4地点で採取した砂を撮影したところ、以下のようになった。



写真13 電柱下

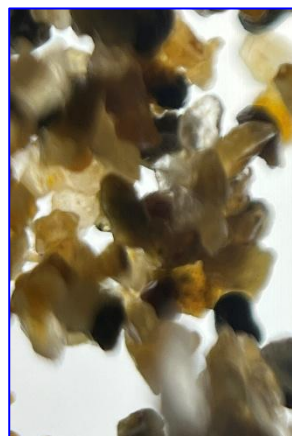


写真14 某工場前歩道



写真15 中田島砂丘



写真16 天竜川河原

【写真13】及び【写真14】は内灘町の砂であり、【写真15】は中田島砂丘で採取した砂である。どちらも砂丘に関係した土地の砂であるが、内灘町のは茶色、また中田島砂丘のものは白色の粒子が多いことが分かる。どちらも石英によって構成されているように見える。

一方、【写真16】の天竜川の砂は暗色で、色の様子は内灘とよく似ている。しかし、透明感がなく、粒子はかなり小さい。写真上で計測をしたところ、他の地点の砂の約1/10の大きさであった。

4 考察

(1) 【Q1】に対する考察

【Q1】内灘町の液状化の発生はどのような条件があったからか。単に、「砂地である」「これまでにない大きな揺れ」という二つの条件が重なったことで、内灘町の液状化が発生したのか。

内灘町の地盤は砂地であり、そこに能登半島地震では、およそ2Hzの揺れが発生した。

しかし、振動実験では、2Hzの揺れで振動時間が20秒及び40秒の場合には液状化は確認できなかった。水の滲出が確認できたのは、振動時間60秒の条件下であった。つまり、内灘町で発生した液状化現象は、揺れの大きさに加えて、揺れが比較的長い時間継続したことが原因になっていると思われる。実験では3Hzで60秒の振動が続けば、確実に液状化が発生していることから、能登半島地震の際に、内灘町において、もし3Hzの揺れが60秒間持続していたならば、町全体が確実に、またさらに大きな被害が発生していたと予想できる。

また、今回は考慮していないが、地震発生の前日（2023.12.31）の金沢市の気象は終日雨天であった。そのため、地下には大量の水分が含まれており、地下水の水位は高かったと予想できる。そうした状況も、内灘町の液状化被害を拡大したことに繋がったのかもしれない。

(2) 【Q2】に対する考察

【Q2】地震の際の液状化の可能性は浜松市にもある。振動（強弱や時間）と液状化の発生に関して、内灘町と浜松市とでは、どのようなところに共通点・相違点を確認できるか。

内灘町と浜松市は、振動数が大きく振動時間が長いという条件下で液状化が発生しているところが共通している。

しかし、内灘町においては、1Hz及び2Hzの、振動時間が短い場合は液状化が発生していないが、浜松市では1Hzや2Hzの揺れであっても振動時間に関係なく液状化が発生する可能性があると思われる。

また、沈下量の測定からは、水分が浸出していない状態であっても地盤沈下が発生していたが、その原因としては、砂の保水力の差が影響しているのではないかと考えられる。天竜川河原においては振動前と振動後の水準の差が大きかった。粒子が細かい天竜川河原の砂は、その隙間に他の地点より多量の水分が保持されているのかもしれない。振動が発生すると、砂の隙間で保持されていた水と砂自体に力が加わり、水と砂がズレ動くことで、沈下が一気に加速するのではないかと考えられる。

5 謝辞

本研究を進めるにあたり、静岡理工科大学教授の中澤博志先生には、多大なご指導と有益なご助言をいただいた。心から感謝申し上げます。

注釈、及び参考文献

- 1) 上林透也, 塚凜太郎, 政氏克善, 山道悠生「モデル実験を用いた液状化現象の発生条件の解明」『令和4年度七尾高校課題研究論文自然科学研究Ⅱ』2020, pp37-40
- 2) 上口涼平, 丹下翔太, 松浦淳「液状化現象の発生条件を探る」『平成28年度愛媛県立宇和島東高等学校課題研究論文集』2016, pp123-125
- 3) 液状化を発生させることを目的としており、実験自体に不都合はないが、実際の地震の揺れを考慮したものではないと思われる。
- 4) 静岡県第4次地震被害想定（平成25年度公表）に基づいた「震度分布(レベル2陸側ケース)・液状化可能性マップ」
https://www.city.hamamatsu.shizuoka.jp/kiki/hazard_map/bousaimap.html
- 5) 言うまでもなく、実際の地震波には多様な周期の波が含まれており、単純に震度と加速度とを対応させることはできない。
<https://www.data.jma.go.jp/eqev/data/kyoshin/kaisetsu/comp.html>
- 6) 石川県珠洲市など、半島の先端部では1～2分間程度揺れが継続したという報道もある。
<https://www.yomiuri.co.jp/science/20240130-0YT1T50055/>
- 7) この「1」「2」「3」の番号は分類整理のために便宜的に付したものであり、そこに意味はない。