

海底地すべり津波の発生リスクに関する研究

高知工科大学 システム工学群

建築・都市デザイン専攻 海岸工学研究室

1250147 保科晃希

指導教員：佐藤慎司

1. 研究背景と目的

2024年1月1日の能登半島地震によって津波が発生し、能登地方を中心に各地で浸水などの被害を受けた。図1は気象庁の報告[1]によるもので、地震発生時刻と各地の津波の到達時刻が示されている。震央から離れた富山湾では地震発生からわずか3分で津波が到達したことがわかる。



図1：地震発生時刻と津波の到達時間

地震発生後に海底調査を行った結果、富山沖の海底谷で斜面崩壊の痕跡が確認された。このことから、地震が原因で海底地すべりが発生し、その地すべりが波源となって短時間で津波が観測されたと推測される。

海底地すべりとは地震や波浪によって海底斜面の一部が崩落することである。そして海水の移動によって円筒型の波が津波となって押し寄せてくるという仕組みとなっている。このような地すべりが海岸付近で発生することで巨大地震の断層運動による津波より早く到達する恐れがあり、発生リスクが高い場所を特定することができれば、効果的な防災対策に繋がると考えられる。また、これにより将来発生が懸念されている南海トラフ地震の被害想定にも役立つと思われる。本研究では海底地すべり津波が起きやすい条件や発リスクの高い場所を明確化することを目的とする。

2. 過去の事例分析

海海底地すべりは直接観察することが難しく、専用の機器や調査技術を使わなければ詳細な記録を残すことができない。そのため本研究では崩落跡の画像データや海底地すべり津波による水位変化といった詳細な情報が残っている二つの事例のみを扱うことにした。一つ目は能登半島地震に伴う富山沖の海底地すべりで、深さ40m、長さ500mの規模で崩落跡が発見された。二つ目は2009年8月11日に発生した駿河湾地震による焼津沖の海底地すべりで、こちらでは深さ15m、長さ450mの地すべり跡が発見された[2]。

これら二つの事例を分析した結果、海底地すべりに共通する要素として、「海岸からの距離や傾斜角度」、「周辺に大規模な河川が存在する」の二つが挙げられた。これらの要素を詳しく分析し、海底地すべり津波の影響を受けやすい場所を特定することを目指した。

3. 海岸からの距離、傾斜角度

(1) 海岸からの距離

地理情報システム (GIS) を用いて海岸から海底地すべり跡までの距離を計測した。計測するにあたって参考文献[1][2]の資料内にある崩落跡に記載された座標を使用し、GIS内にマークした。結果、富山湾では約4.8km、駿河湾では約4.9kmとなり、両地域でほぼ5kmの距離であることが確認できた。距離がほぼ一致した理由として海底地すべりは距離に関係なく発生するが、近距離でないと被害を受けないのではないかとこの考察を立てた。

(2) 傾斜角度

GISを用いて富山湾と駿河湾の傾斜図を表示させた。傾斜図を作成するには海底の水深を示したメッシュデータが必要であり、今回は「海洋データセンター500mメッシュ」[3]を使用した。図2は傾斜図と地すべり発生場所における傾斜角度を示したものである。

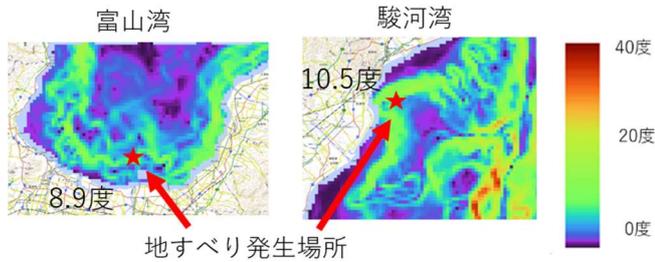


図2：傾斜図と地すべり場所の傾斜角度

地すべり発生場所の傾斜角度は富山湾で8.9度、駿河湾では10.5度とおおよそ10度で共通しており、必ずしも最も急傾斜の場所で発生しているわけではないことがわかった。

(3) 全国マップ作成

(2)の結果から富山湾と駿河湾が全国的に見ても急傾斜地であるのかという疑問が浮上した。この疑問を解消するために日本全体で傾斜図を作成し、全国マップをとてまとめた。作成方法は(2)と同じだが投影座標系で傾斜図を表示させているため、日本を13分割し、つなぎ合わせたものを図3に表示させた。また(1)の結果から地すべりの被害を受ける距離として10km以内と仮定し、海岸から赤線を引いた。

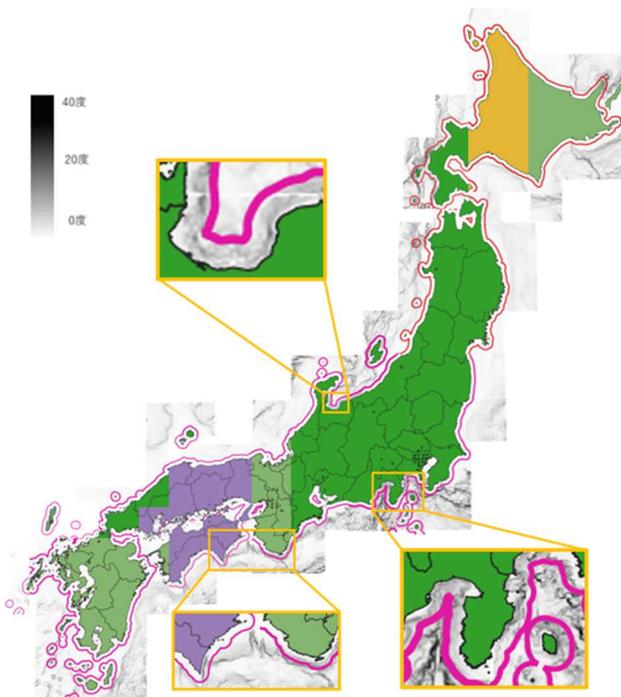


図3：傾斜図の全国マップ

この図から富山湾と駿河湾は10km以内に比較的急な勾配が多く、全国と比較して海底地すべりが起きやすい地域であると言える。その他の場所(土佐湾や相模湾、紀伊半島南部など)も急傾斜地が存在することが分かった。

4. 大規模な河川からの土砂供給

過去の事例の共通点として地すべり跡の近くで大規模な河川があることを発見した。富山湾の地すべり跡から約4.7kmの距離に神通川、駿河湾の地すべり跡から約7.0kmの距離に安倍川がある。

一方で前項の(2)より10度程度の勾配で海底地すべりが起こり得るのかという疑問が浮上した。

これらの共通点や疑問点を総括し、海底地すべりが発生する原因の一つに洪水時に河川から大量の土砂が放出され、堆積した堆積層が地すべりを引き起こすのではないかと仮説を立てた。この仮説を検証するために土粒子の粒径に着目し、土粒子の沈降モデルを作成した。

(1) 土粒子の粒径の定義

土粒子には粒径の大きさで4つに区分分けができる[4]。粒径が2mm以上を「礫」、2mm~0.075mmを「砂」、0.075mm~0.005mmを「シルト」、0.005mm未満を「粘土」と呼ぶ。このうち「粘土」と「シルト」で構成されており、隙間に多くの水を含んでいる地盤を軟弱地盤という。よって洪水時に0.075mm以下の土粒子が堆積することが証明できれば海底地すべりが起きやすい場所だと判断できると考えた。

(2) 土粒子の沈降モデル

土粒子の沈降モデルによって洪水時に堆積した土粒子の粒径を求めることができる。この数理モデルを作成するにあたって沈降速度は一定という仮定が必要になる。沈降速度とは粒子が流体中を落下するとき最終的に到達する水深方向の速度を示したものである。ストークスの式を使って次式で求められる。

$$w_0 = \frac{2 \times g \times d^2 \times (\rho_p - \rho_f)}{9 \times \eta}$$

ここで、 w_0 :沈降速度[cm/s]、 g :重力加速度[cm/s²]、 d :粒径[cm]、 ρ_p :粒子密度[g/cm³]、 ρ_f :海水密度[g/cm³]、 η :海水の粘性係数[g/cm/s]である。

d について整理すると

$$d = \sqrt{\frac{9\eta w_0}{2g(\rho_p - \rho_f)}} \quad \text{①}$$

となり、土粒子の粒径を求めることができる。しかし、式中の沈降速度 w_0 について別途算出する必要がある。そのため図4の(a)のように土粒子の移動の鉛直方向で検討した。

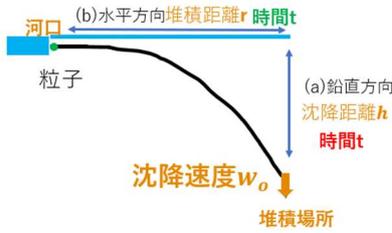


図4：土粒子の動きの流れ

深さは沈降速度×時間より次のようになる。

$$h = w_0 t \quad (2)$$

ここで、 h :沈降距離[m]、 t :堆積するまでの時間[s]である。しかし、 t が未知であるので図4の(b)のように土粒子の移動の水平方向についても検討を行った。

流量の式より以下の式が得られる。

$$Q = A \times v = A_0 \times v_0$$

ここで、 Q :流量[m³/s]、 A :河口中心を基準に、堆積場所までの半径での水の断面積[m²]、 v :堆積場所での水平流速[m/s]、 A_0 :河口半円の断面積[m²]、 v_0 :河口半円の水平流速[m/s]、である。 A と A_0 は図5の平面図で示した場所である。同時に図6に、 A_0 の断面図を表示させた。

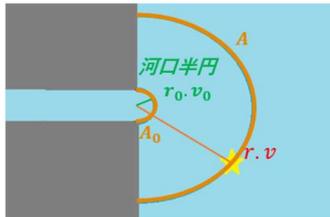


図5：平面図

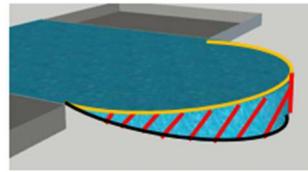


図6： A_0 の断面図

断面を展開すると図7の左側のように円弧状の図形になる。このとき、 h, h_0 よりも $\pi r, \pi r_0$ の方が十分大きいので図7の右側のように三角形に近似できる。

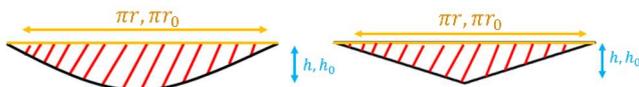


図7：河口半円の表面積の展開図と近似した図

よって、 A と A_0 は次のようになる。

$$A = \frac{1}{2} \pi r h \quad A_0 = \frac{1}{2} \pi r_0 h_0$$

このとき、 r :河口中心を基準に、堆積場所までの半径[m]、 r_0 :河口半円の半径[m]、 h_0 :河口半円までの沈降距離[m]である。これらを流量の式に代入し整理すると以下の数式が得られる。

$$r h v = r_0 h_0 v_0$$

ここで式中の、 v は、 $\frac{dr}{dt}$ とも言い換えることができるので整理すると、次のような式が得られる。

$$\frac{dr}{dt} = v = \frac{r_0 h_0 v_0}{r h}$$

さらに、この式を変形すると次のようになる。

$$r \times dr = \frac{h_0}{h} \times r_0 \times v_0 \times dt$$

この式を積分すると

$$\frac{1}{2} r^2 = \frac{h}{h_0} r_0 v_0 t + C \quad (C \text{ は積分定数})$$

となる。このとき初期条件について $t = 0$ のとき $r = r_0$ であるため、積分定数は $C = \frac{r_0^2}{2}$ となる。よって以下の式が得られる。

$$\frac{1}{2} r^2 = \frac{h}{h_0} r_0 v_0 t + \frac{r_0^2}{2} \quad (3)$$

②と③より鉛直方向と水平方向の堆積時間は等しいのでまとめることができる。まとめた後に w_0 について整理すると以下の数式が得られる。

$$w_0 = \frac{2 r_0 v_0 h_0}{(r^2 - r_0^2)}$$

この数式を①に代入する。このとき式中の、 v_0 は流量の式より $v_0 = \frac{Q}{A_0} = \frac{2Q}{\pi r_0 h_0}$ となる。結果として以下の粒径に関する数式が成り立つ。

$$d = \sqrt{\frac{18 \eta Q}{\pi g (\rho_p - \rho_f) (r^2 - r_0^2)}}$$

このとき、 Q は河川の高水流量から仮定することができる。この数式を使用することで洪水時に流出した土粒子の粒径が地点ごとに調べることができる。また、式変形をすることで次のようになる。

$$r = \sqrt{\frac{18 \eta Q}{\pi g d^2 (\rho_p - \rho_f)} + r_0^2}$$

この数式によって洪水時に流出した土粒子の沈降位置を粒径ごとに調べることができる。

(3) 調査場所

海洋上の一点と指定した河川をセットで調査する。調査場所は過去の事例である富山湾の地すべり場所と神通川、駿河湾の地すべり場所と安倍川、そして参考として土佐湾の安芸沖で7.4度の勾配がある地点と奈半利川の三か所で行う。

(4) 仮定した値

場所ごとに仮定した値を以下の表1にまとめた。

表 1 : 調査場所でそれぞれ仮定した値

	富山湾	駿河湾	土佐湾
Q[m ³ /s]	5000 ~1000	9700 ~1000	4200 ~1000
r ₀ [m]	350	210	120
r[m]	7000	4700	9500

仮定するにあたって[5][6][7]の文献を参考にした。

(5) 分析結果

各地点で堆積した粒子の大きさを表 2 にまとめた。

表 2 : 地点ごとの堆積粒径

	粒径(mm)
富山湾	0.01mm~0.02mm
駿河湾	0.02mm~0.04mm
土佐湾	0.01mm~0.015mm

これらの結果から、調査した全ての場所で洪水時に 0.075mm 以下の土粒子が堆積しており、軟弱地盤であることがわかった。次にシルト粒子(0.075mm~0.005mm)の粒径が堆積している距離の範囲を図 8 に示した。このときの流量は、Q=2000と仮定した。

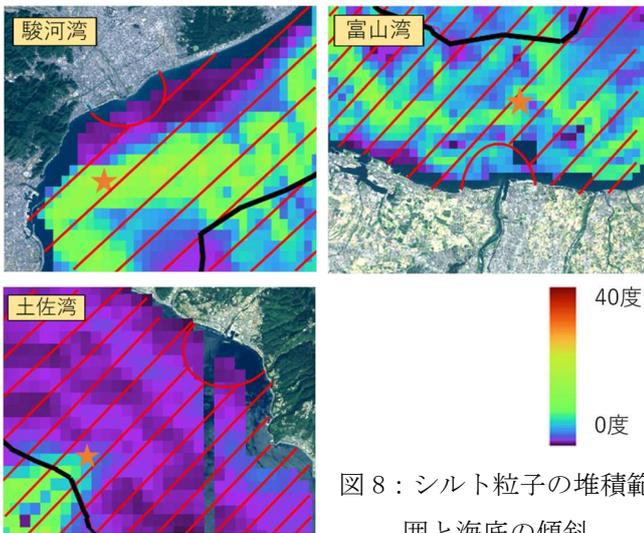


図 8 : シルト粒子の堆積範囲と海底の傾斜

シルト粒子が堆積した距離は安倍川(駿河湾)で 1340m~1.9 万 m、神通川(富山湾)で 1311m~1.9 万 m、奈半利川で 1299m~1.9 万 m の範囲である。これらの範囲は図 8 中の斜線部分にあたる。つまり、河口近くではシルトより大きい砂や礫が堆積し、沖に進むにつれて粒径が小さくなることが確認された。

また、図 8 における星印は調査地点を示しており、黒線は海岸から 10km の位置に引かれた線である。この結果から、海底地すべり津波の被害を受ける可能性が高い場所は黒線より内陸側で斜線部分があ

り、勾配が約 10 度以上の場所であることがわかった。

5. 結論

(1) 海底地すべり津波の発生リスクがあるのは「海岸から 5km 以内」、「約 10 度以上の勾配」、「大規模な河川の河口から数キロ離れた場所」といった条件があることがわかった。

(2) 土粒子の沈降モデルを作成し、洪水時の流出土砂の海底への堆積場所を粒径ごとに検討した。

(3) その結果、海底地すべりが起きた場所が洪水時に堆積した土砂から構成された軟弱地盤であることを見出した。

(4) 全国の海底地形を網羅的に分析したところ、リスクの高い地域として、富山湾、駿河湾、土佐湾が抽出された。

参考文献

- [1] 令和 6 年 2 月 9 日地震調査研究推進本部地震調査委員会「令和 6 年能登半島地震の評価」
https://www.static.jishin.go.jp/resource/monthly/2024/20240101_noto_3.pdf
- [2] 2010 年 5 月 25 日独立行政法人海洋研究開発機構
https://www.jamstec.go.jp/j/about/press_release/archiv/e/2010/20100525.pdf
- [3] 海洋データセンター 500m メッシュ
https://www.jodc.go.jp/jodcweb/JDOSS/infoJEGG_j.html
- [4] 知っておいてほしい地盤のはなし「地盤リスクとの付き合い方」
<https://jgs-tohoku.org/academic/risk/>
- [5] 「安倍川水系河川整備基本方針」
https://www.mlit.go.jp/river/shinngikai_blog/shaseishi/n/kasenbunkakai/shouiinkai/kihonhoushin/040416/pdf/s5-1.pdf
- [6] 「神通川流域の概要と 河川整備基本方針の概要について」
https://www.hrr.mlit.go.jp/toyama/common/old/k004siryo/plan/jinzuu/07_ryuikinogaiyou.pdf
- [7] 「奈半利川水系河川整備計画 - 高知県」
https://www.pref.kochi.lg.jp/doc/kasen-keikaku-housinkeikaku/file_contents/H2907nahari_keikaku.pdf