

2009年8月11日の駿河湾地震における海底地すべり津波の 数値解析

Numerical simulation of submarine landslide tsunami in the Suruga Bay Earthquake on August 11, 2009

阿部 郁男

ABE Ikuo

1. はじめに

2009年8月11日に発生した駿河湾地震では、焼津港で0.6mの津波が観測されている。しかし、地震波形の解析から求められた地震断層モデルを用いた津波伝播シミュレーションから推定される津波の高さはせいぜい数cm程度であったため、津波が大きくなった要因として海底地すべりの影響が考えられていた。このような海底地すべりに起因する津波はしばしば発生していると考えられるものの、駿河湾地震のように、地震断層モデルを用いた津波伝播シミュレーションによって求められた津波の来襲状況と、実際の津波の観測データや被害状況が異なる場合にのみ、その可能性が議論されていることが現状である。例えば、1994年に発生した北海道東方沖地震では津波到達予報時刻よりも50～60分も早く、オホーツク海沿岸の宇登呂への津波到達が報告されており¹⁾、2007年3月に発生した能登半島地震では、地震断層から求められた津波が到達する前に富山湾で異常な潮位変動が確認され、漁船から釣り人が転落する事故も発生している²⁾。また、2018年9月28日にインドネシアのスラウェシ島で発生した津波災害も海底地すべり津波が原因であると考えられている³⁾。このような海底地すべり津波は、駿河湾でも多数発生していた可能性があり、明応地震⁴⁾や永長地震⁵⁾で発生した可能性が指摘されているが、その発生には不確定性が伴うため防災対策の基準となる被害想定には反映されておらず、さらには海底地すべり津波の発生状況を分析できるデータが希少であるため、どのような環境下で海底地すべりが発生し、発生した地すべりによって、どのように津波が伝播してゆくのかという一連の過程については十分な知見が得られていない状況である。

そこで、海底地すべりによる津波発生希少な津波観測データが得られている2009年の駿河湾地震に着目し、その津波伝播状況を改めて分析をすることにより、海底地すべり津波の発生過程の理解に有益な知見が得られるのではないかと考えて、今回、津波伝播シミュレーションをベースとした解析を試みることにした。まず初めに、地震断層モデルだけで発生した津波ではないことを確認し、次に海底地すべりによる津波発生を想定した津波伝播シミュレーションを行うことにした。これまでの海底地すべりによる津波伝播シミュレーションでは、海底の地形変化から津波の初期値を推定する方法が行われて

いるが⁶⁾、今回の研究では海底での地形変化には着目せずに、波源の条件設定と水位変化の関係だけに着目し、条件を変更しながら試行錯誤的に解析を行っている。

2. 駿河湾地震の概況

2009年8月11日に発生した駿河湾地震はマグニチュード6.5の横ずれ断層型、最大震度は6弱の地震であり、地震発生のおよそ3分後の5時10分に伊豆諸島および静岡県に津波注意報が発表され、焼津では5時13分に引きの第一波0.6m、最大波は5時26分に+0.3m、御前崎では5時22分に引きの第一波0.3m、最大波は5時46分に+0.4mが確認されている⁷⁾。

その後、観測された地殻変動を再現する地震断層モデルが国土地理院から公表され⁸⁾、この地震断層モデルを用いた津波伝播シミュレーションを行ったが、この地震断層モデルを用いて求められた津波の水位変動の大きさはせいぜい数cm程度であった。このことから、駿河湾地震が発生した際に、地震動によって海底地すべりが発生し、それによって津波が増幅された可能性が早くから指摘され、その後、JAMSTEC（国立研究開発法人 海洋研究開発機構）による海底調査から海底地すべりが発生していた痕跡が報告されている⁹⁾。

3. 数値シミュレーションの条件

観測された津波の規模は最大でも0.6m程度であり、防波堤などの影響を大きく受ける可能性がある。つまり津波伝播シミュレーションの実施においては、これらの形状をできるだけ正確に再現できている必要があるため、防波堤の形状、特に津波観測が行われた港湾部での防波堤の開口部が十分に再現できるように図1の矩形で示す範囲において30mメッシュの地形データを作成した。

地形データの作成においては、中央防災会議から提供されている南海トラフの30mメッシュの地形データをベースとして、30mメッシュの地形データがカバーしていない深海部については90mメッシュの地形データを線形補間することで駿河湾全体を30mメッシュで再現している。

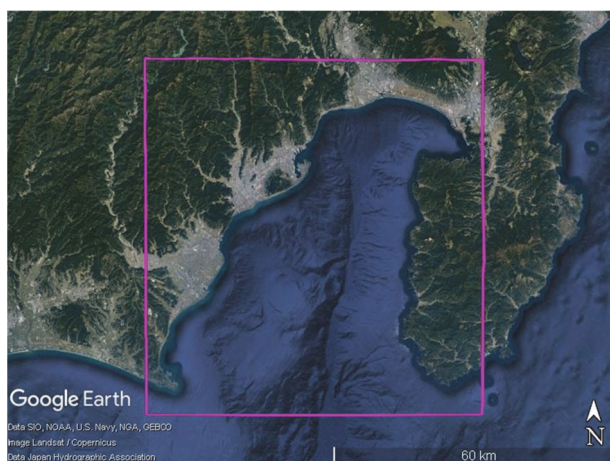


図1 地形データを作成した範囲

4. 津波到達時間差による津波発生状況の分析

まず、国土地理院により公表された地震断層モデル⁸⁾を用いた津波伝播シミュレーションの結果と実際に観測された津波水位変化の比較を図2に示した。焼津では地震発生後の経過時間774秒付近で水位が大きく低下する状況が観測されているが、その低下は地震断層モデルを用いた津波伝播シミュレーションでは再現することができていない。御前崎では、924秒付近に観測された僅かな水位上昇と1374

秒付近の水位の低下が階段のようになっている状況は、津波伝播シミュレーションの結果とタイミングがあっているように見えるので、これらの水位変化が地震断層によってもたらされた可能性がある。しかし、1674秒付近で観測された大きな水位の低下は、地震断層モデルによる津波伝播シミュレーションでは再現できていない。清水および内浦も同じような状況であり、水位が大きく低下するタイミングは、観測データとシミュレーション結果では異なる様相を示している。

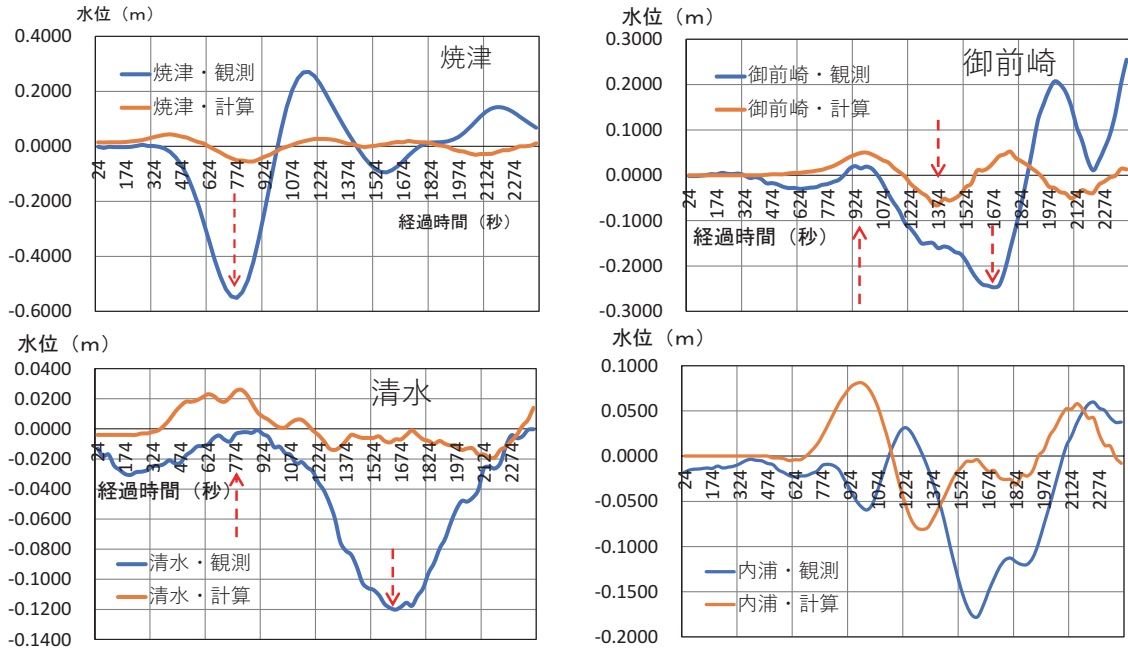


図2 地震断層モデルによる津波伝播シミュレーションの結果の比較

そこで、これらの水位が大きく低下した時間差に着目して津波が発生した海域を絞り込むことを試みた。発生海域の絞り込みにおいては、まず、図3に示すように、焼津を基準として御前崎、清水、内浦それぞれで最初に大きく水位が低下した時間との差を求めた。焼津での水位低下のピークを774秒と設定し、御前崎での水位低下のピークが1674秒であることから、読み取り誤差などを考えて前後1分の範囲、つまり840～960秒となる海域を津波伝播の逆解析によって抽出を行った。同様に、内浦との時間差が780～900秒、清水は810～930秒となる範囲を抽出した。結果として、焼津と清水、焼津と御前崎、焼津と内浦の時間差となる範囲を図4に示した。

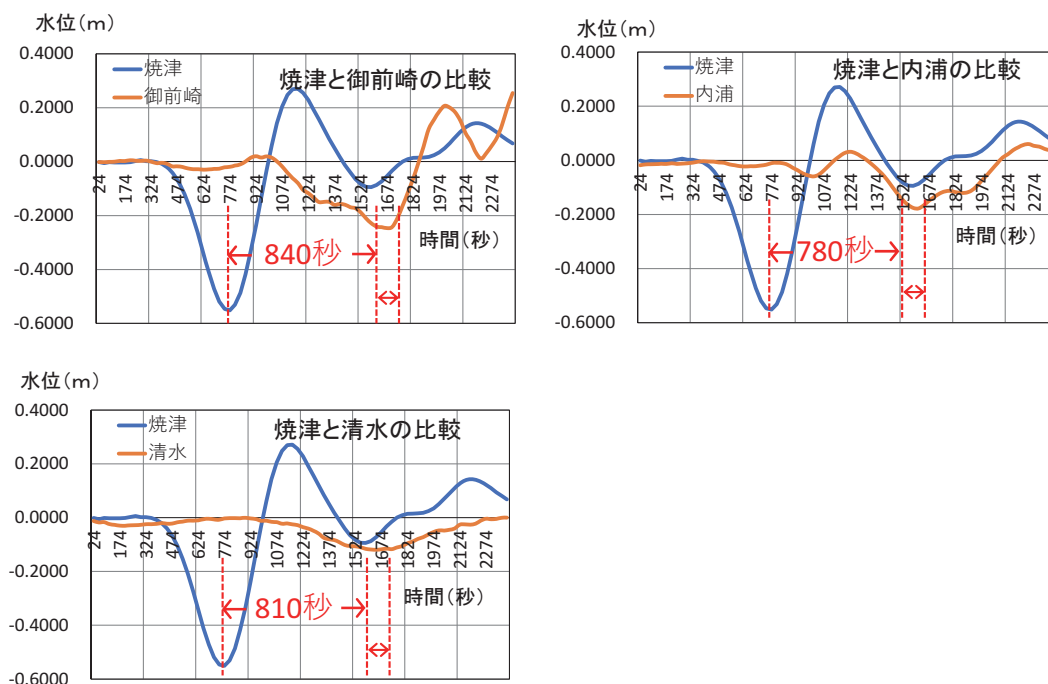


図3 焼津と各観測場所での水位変動の比較と時間差

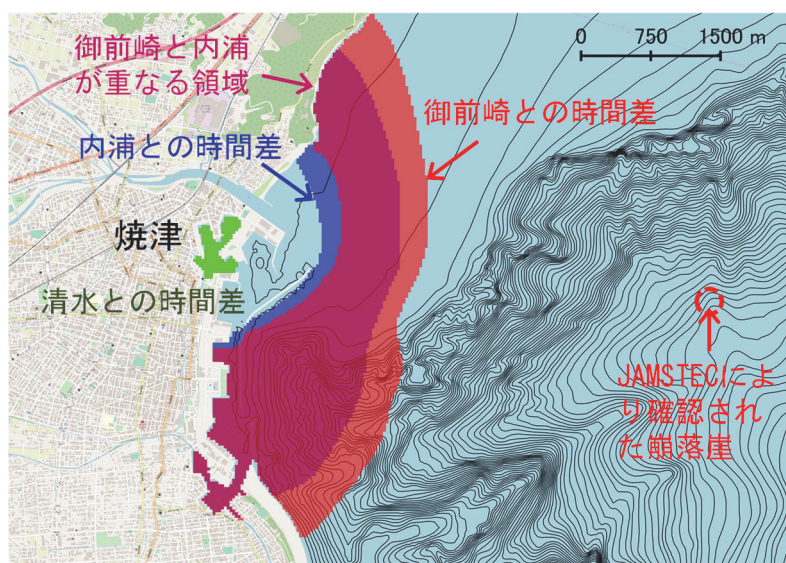


図4 焼津と各観測場所での水位変動の時間差が示す海域

焼津と清水の時間差が示す海域は焼津港内に限定されたが、焼津と内浦、焼津と御前崎の時間差が示す海域が焼津港の僅か沖合で重なることが抽出された。つまり、この場所で津波が発生した場合には、図3で示す時間差で焼津、御前崎、内浦に津波が到達することとなる。しかし、図4に示したように、この解析によって示された海域は、JAMSTECによる海底調査によって崩落崖が確認された場所⁹⁾とは異なる場所であることが明らかとなった。

5. 崩落崖の場所に着目した津波伝播状況

逆伝播解析により抽出された津波発生海域とは異なる場所ではあるものの、はじめに JAMSTEC の調査によって示された海底の崩落崖⁹⁾での津波伝播状況の解析を試みることにした。

海底地すべり津波による、津波伝播シミュレーションの手法としては、原子力発電所の安全評価⁶⁾で取り入れられているように、Watts ほかにによる簡易予測式を用いた方法や海底地すべり発生前後の地形変化を用いて津波の初期値を推定する方法が行われているが、今回の研究では海底での地形変化には着目せず、現象をシンプルに捉え、観測された水位変化を再現することだけに着目して、どのような波源を設定すれば観測された津波を再現することが可能であるかという点に絞り込んで検討を行った。

JAMSTEC による調査結果の図面⁹⁾から、崩落した土砂の流下方向は方位角でおよそ 145 度、直径は約 450m 程度の円形で近似可能と読図できたので、この場所に図 5 に示すように半径 8 メッシュ、つまり直径 480m の円形の簡易的な波源を設定し、その中心のピークを -1m とし中心からの距離に応じて sin 関数で算出される水位を求め、焼津での水位変化の開始と一致するように 90 ~ 570 秒の間に継続的に水位変化を与えることとした。津波観測データとの比較は、顕著な水位変化が見られた焼津と御前崎に着目し、波源が移動する方向、移動速度により津波来襲状況がどのように変化するかについて、実際に観測されたデータとの比較を行うこととした。設定した移動方向と速度の条件を表 1 に、津波伝播シミュレーションによって求められた水位変化の状況を図 6 ~ 図 8 に示す。

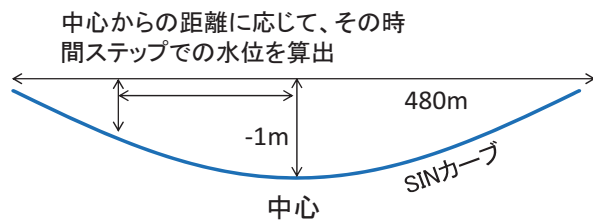


図 5 波源として与えたの水位変化の概況

表 1 波源の移動方向と速度

		移動速度 (m/s)		
		0	6	12
移動方向 (方位)	0	case0100	—	—
	120	—	case0131	case0132
	135	—	case0121	case0122
	150	—	case0111	case0112

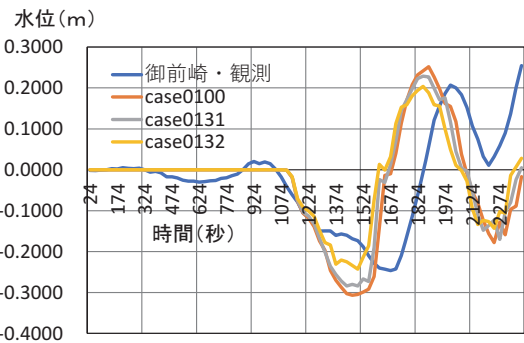
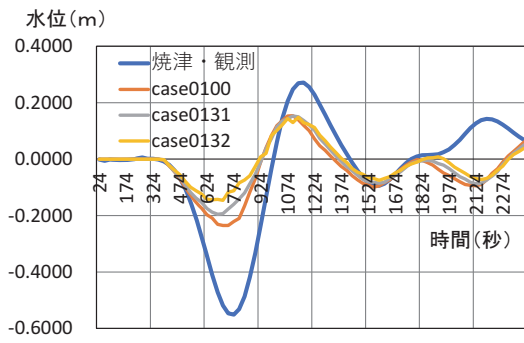


図6 焼津・御前崎での観測データとの比較（方位120度）のケース

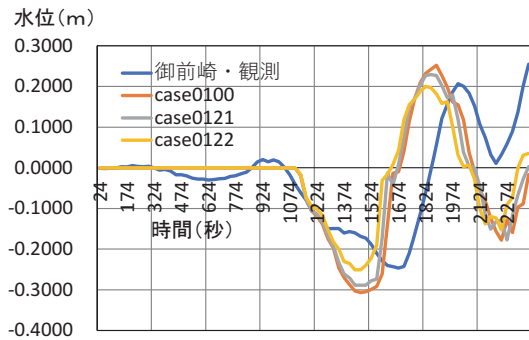
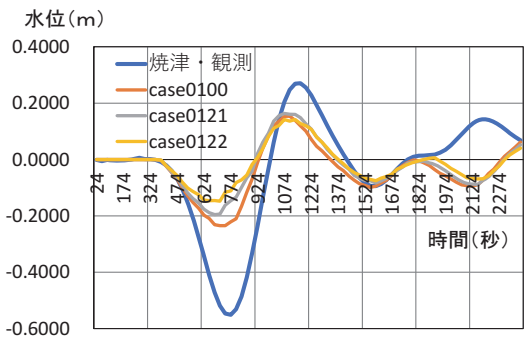


図7 焼津・御前崎での観測データとの比較（方位135度）のケース

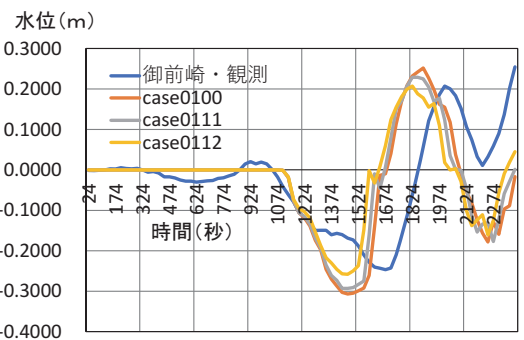
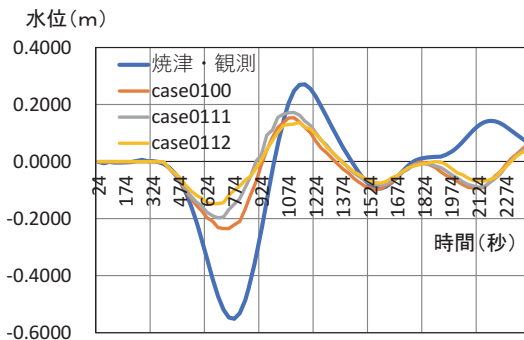


図8 焼津・御前崎での観測データとの比較（方位150度）のケース

波源を移動させないケース（case0100）であっても、移動させたケースであっても、焼津と御前崎で観測された水位の変化を再現できないことが明らかとなった。水位変化を与えるタイミングを焼津での津波観測データに合わせているため、変動開始時間は一致しているものの、焼津では観測された津波よりも水位変化が小さく、御前崎では水位変化が大きくなり、これは波源の移動方向や速度を変更した場合でも同じ傾向を示すことが分かった。つまり、焼津で観測された水位変化に合わせるためには、発生させる津波を2倍程度に大きくする必要があるが、そうすると御前崎での水位変化が大きくなってしまい、観測結果から大きく乖離してしまう。これらのことから、JAMSTECにより確認された崩落崖の場所⁹⁾で生じる津波だけでは、津波の伝播状況を再現できないことが示されたと考えている。

6. 津波到達の時間差から示された場所に着目した津波伝播状況

JAMSTECによって確認された場所⁹⁾だけに着目して津波波源を設定した場合には、焼津および御前崎で観測された津波を再現することができなかった。そこで、次に、焼津と御前崎、焼津と内浦での津波到達時間の差が示す領域で津波が発生したケースに着目して津波伝播シミュレーションを行うこととした。津波の波源を設定した場所は図9に示す通りである。

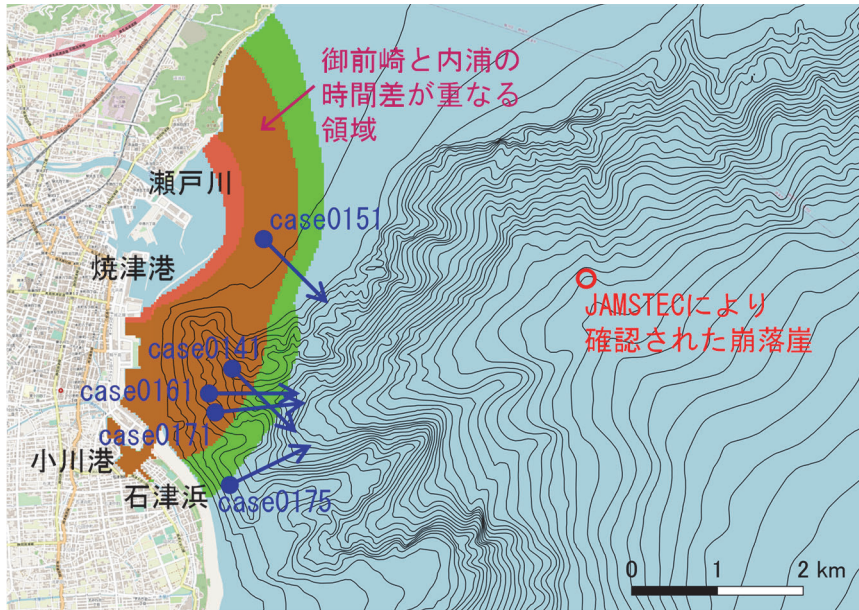


図9 時間差が示す領域で設定した津波の波源と移動方向

case0141は焼津港沖で南東方向に向かう海底谷、case0161およびcase0171は小川港沖から東方向に向かう海底谷、case0175は石津浜沖から東北東に向かう海底谷、case0151は瀬戸川の河口沖に広がっている河口堆積物が流れ下るケースをイメージして設定している。これらの場所に津波の波源を設定し、その波源を移動させる条件で津波伝播シミュレーションを行った結果を図10に示す。

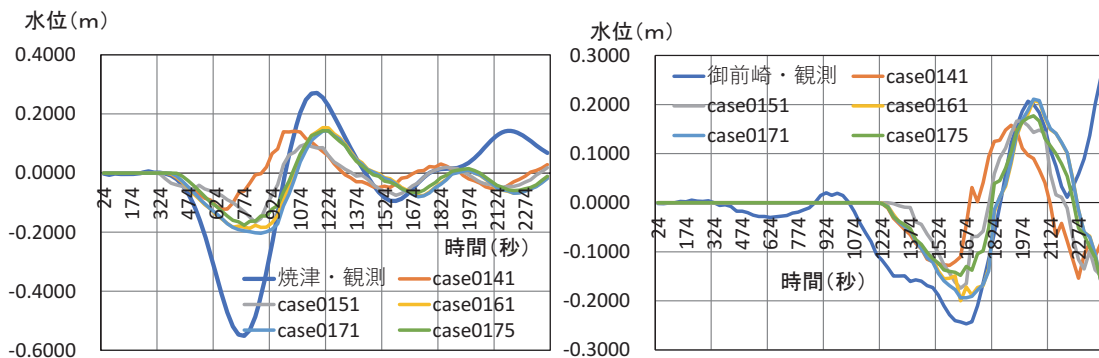


図10 時間差が示す領域の波源での観測データとの比較

図10の左が焼津、右が御前崎での比較であるが、今回の津波伝播シミュレーションで設定した条件においては何れのケースでも同じような特徴が見られ、焼津、御前崎ともに水位低下のピークは-0.1～-0.2mの範囲に収まる。観測された津波は、焼津で-0.57m、御前崎で-0.24mであるため、焼津で観測された水位変動に合わせる場合には、いずれのケースでも2倍以上の水位変動を設定することが必要となるが、仮にその規模の水位変動を与えた場合には御前崎での水位変動が観測よりも著しく大きくなってしまうため、観測値と大きく乖離するという矛盾が生じることとなる。つまり、時間差が示す領域から谷底方向に移動させる条件設定だけでは、駿河湾地震の際に観測された津波の再現は難しいことが示された。

7. 津波伝播の方向性と波源の移動特性に着目した分析

これまでに述べたように、JAMSTECによって確認された場所⁹⁾だけに着目して津波波源を設定したケースであっても、観測された津波の時間差に着目して波源を設定し、それを斜面に沿って移動させたケースであっても、単独では観測された津波と津波伝播シミュレーションの結果が合致しない。これらの要因としては、複数の地すべりが発生した影響が考えられるが、今回の検討では、津波伝播と波源の移動の関係による影響の分析を試してみた。

図11の略式図で示したように、津波は波源から周辺に伝播してゆくが、津波の伝播に合わせて波源が移動してきた場合には、津波がより高くなる可能性がある。

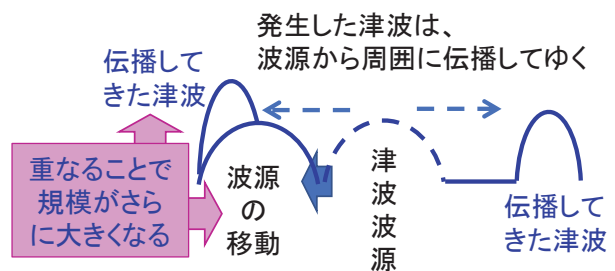


図11 津波の伝播と波源の移動の略式図

つまり、焼津方面に伝播する津波と御前崎方面に伝播する津波において、波源が焼津方面に向かうことによって、焼津での水位変動がより大きくなる可能性が考えられる。そこで、図12に示すように焼

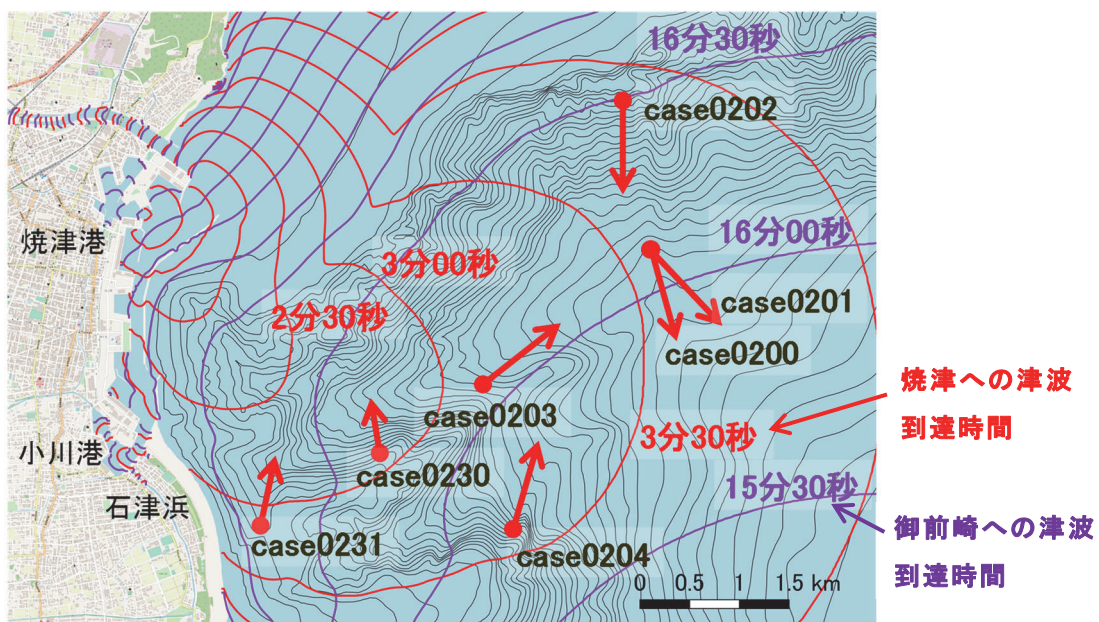


図12 焼津・御前崎への津波伝播時間と波源の位置関係

津と御前崎、それぞれへの津波伝播時間を考慮して波源と移動条件の設定を行い、津波伝播シミュレーションを実施して水位変動に与える影響についての解析を行った。

case0200 および case0201 は、波源の移動開始を JAMSTEC により崩落崖が確認された場所とした。case0201 は、波源を南東方向に移動させたが、波源の移動方向と焼津および御前崎への津波到達時間の関係性を分析するために、case0200 では焼津への津波到達時間が変化せずに御前崎への津波到達時間が早まる方向にも設定した。case0202 は、JAMSTEC による崩落崖の北側斜面から、焼津への津波到達時間も御前崎への津波到達時間も同程度に早くなる方向へ移動させたケースである。case0203 は焼津への津波到達時間は遅くなるが御前崎への津波到達時間は変わらない方向であり、case0204 と case0230 は焼津への津波到達時間が早くなるが御前崎への津波到達時間は遅くなる方向である。case0231 は、焼津への到達時間も御前崎への到達時間も早くなる方向である。この関係性を纏めたものが図 13 であり、図 13 の (A) 象限は焼津への到達時間も御前崎への到達時間も遅くなる領域、(B) 象限は焼津への到達時間は遅くなるが御前崎への到達時間は早くなる領域、(C) 象限は焼津への到達時間も御前崎への到達時間も早くなる領域、(D) 象限は焼津への到達時間は早くなるが御前崎への到達時間は遅くなる領域である。これらの波源移動の条件において、それぞれで移動に伴う水位と波源の面積をいくつか変更した条件でパラメータスタディを行い、それらの結果を図 14 および図 15 に示した。図 14 は焼津と御前崎でのピーク時の水位の関係であり、図 15 は焼津と御前崎でのピーク時の水位と時間の比較

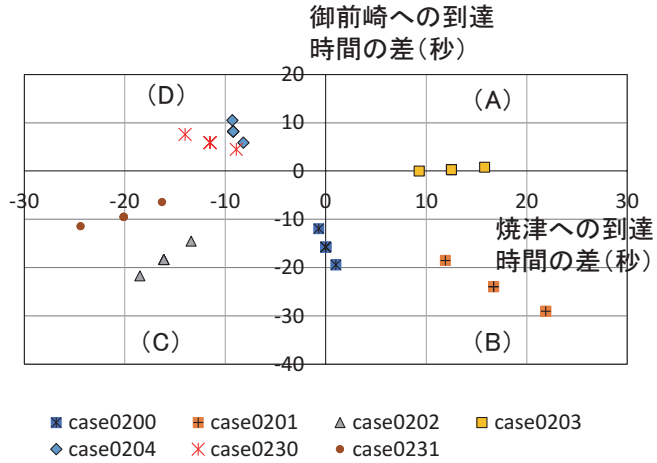


図 13 焼津・御前崎への津波到達時間の関係

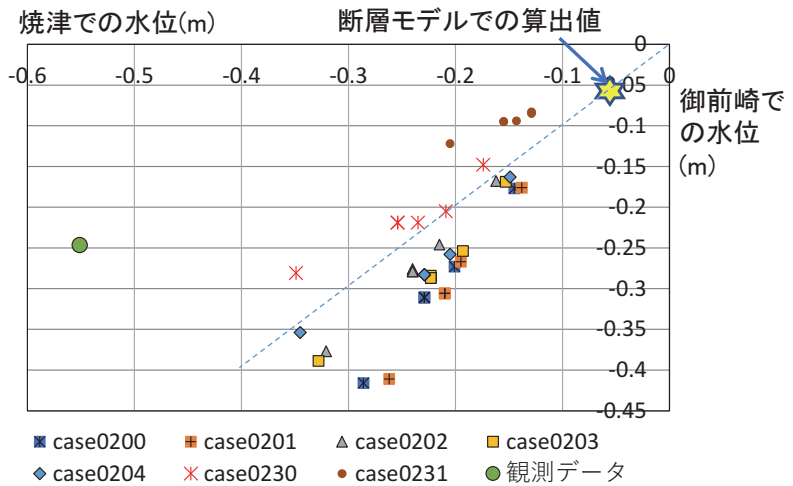


図 14 焼津・御前崎での水位の関係

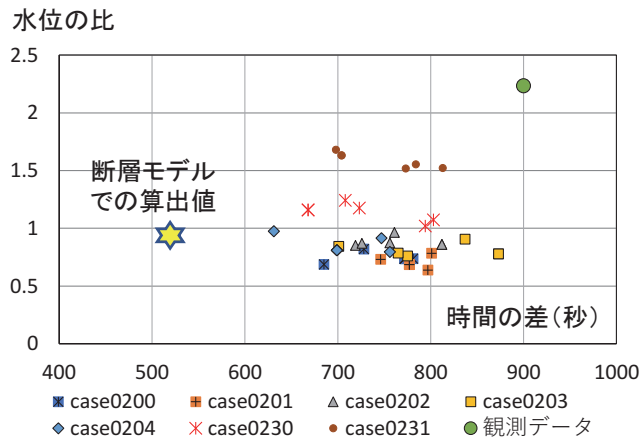


図 15 焼津・御前崎での水位と時間の比較

クの時間差と水位比である。また、これらの図には、観測値と地震断層モデルを用いた津波伝播シミュレーションによって算出された計算値も示している。

図 14 に見られる傾向として、焼津への到達時間が遅くなる case0201 や case0203 では、条件の設定によって御前崎の水位が大きくなりやすい。一方、焼津への到達時間が早くなる case0230 や case0231 では、御前崎よりも焼津の水位変化が大きくなる傾向にあり、特に case0231 の分布を延長した先が観測データに近い値となる様子が伺える。この傾向は、図 15 でも明瞭であり、水位の比と時間差の関係からも、他のケースよりも観測データに近い分布を示している。

8. まとめ

今回の分析では 2009 年の駿河湾地震の際に観測された津波を再現するには至らなかった。しかし、JAMSTEC の海底調査によって崩落崖が確認された場所⁹⁾ だけではなく、他の場所で海底地すべりが発生していた可能性を津波伝播シミュレーションの結果から明らかにすることができた。シミュレーションの条件設定については更なる検討が必要であるが、少なくとも焼津、御前崎で観測された津波を再現させるためには、焼津への到達時間が早くなり、御前崎への津波到達時間が遅くなる方向への波源の移動を検討する必要がある。

謝 辞

本研究は、2019 年度科学研究費助成事業「海底地すべり等による局所的津波発生過程の解明と津波対策への影響分析に関する研究（課題番号：19K04970）」および 2019 年度科学研究費助成事業「低未利用地の暫定利用による津波避難安全性向上手法のモデル構築に関する研究（課題番号：19K04955）」の一部として実施させていただきました。ここに記して深く感謝申し上げます。

参考文献

- 1) 岩淵洋、寄高三和子：北海道東岸の陸棚斜面の海底地形－海底地滑り検出の試み－，水路部技報，Vol.16，pp.78-84，1998.
- 2) Abe,I., K.Goto, F.Imamura, and K.Shimizu, Numerical simulation of the tsunami generated by the 2007 Noto Hanto Earthquake and implications for unusual tidal surges observed in Toyama Bay, Earth, Planets and Space, Vol.60(2), pp.133-138, 2008.
- 3) 阿部郁男, Anawat SUPPASRI, Kwanchai PAKOKSUNG, 今村文彦：2018 年スラウェシ島地震によるパル湾西部でのビデオ映像を用いた津波発生状況の分析，土木学会論文集 B2 (海岸工学)，No.73(2)，pp.I_301-I_306，2017.
- 4) 阿部郁男：駿河湾内の津波痕跡に着目した 1498 年の明応東海地震の津波波源の検討，土木学会論文集 B2 (海岸工学)，No.75(2)，pp.I_337-I_342，2019.
- 5) 静岡大学：過去 5000 年間の南海・駿河トラフ巨大地震による駿河湾の津波と海底地すべり，<https://www.shizuoka.ac.jp/news/detail.html?CN=6568>，参照 2021-09-01.

- 6) 中部電力：浜岡原子力発電所 地すべりの津波評価について, <https://www.nsr.go.jp/data/000171082.pdf>, 参照 2019-02-18.
- 7) 気象庁：2009年8月11日05時07分頃に駿河湾で発生した地震について, <https://www.jma.go.jp/jma/press/0908/11a/kaisetsu200908110645.pdf>, 参照 2009-08-11.
- 8) 国土地理院：震源断層モデルと地殻変動, https://www.jishin.go.jp/main/chousa/09sep_surugawan/p07.htm, 参照 2009-09-10.
- 9) JAMSTEC：深海探査機による精密調査で平成21年8月の駿河湾での地震に伴って発生した海底地すべりの痕跡を発見, http://www.jamstec.go.jp/j/about/press_release/20100525/, 参照 2020-11-13.

