

東海・東南海・南海地震の発生特性による広域津波の変化

河田 恵昭*・鈴木 進吾**・高橋 智幸***

我が国の太平洋岸南西部では東海・東南海・南海地震による津波防災対策が進められている。しかし、歴史的にはこれらの地震が同時に発生した例もあり、次の地震も同時あるいは連続的に発生する可能性がある。この場合、複数の波源からの津波が同時に沿岸に到達し津波高が単独発生時より増幅されると考えられるが、その最悪のシナリオは明らかになっていない。本研究では、重ね合わせの原理を用いて地域に到達する津波に及ぼす地震発生シナリオの影響を評価した。その結果、同時または連続的に発生した場合、地域に到達する津波高が最大 1~2 m, ところによっては 2 m 以上増大することが分かった。また最も危険となる地震発生シナリオが求められた。

1. はじめに

南海トラフではこれまで 90 年から 150 年の間隔で東海・東南海・南海地震と呼ばれる巨大地震が繰り返し発生してきた。南海トラフで発生した歴史巨大地震の中には 1707 年の宝永地震や、1605 年の慶長津波、32 時間差で東海・南海地震が連続的に発生した 1854 年の安政東海地震・安政南海地震など、巨大地震が同時発生あるいは短時間において連続的に発生した例もあり、次の地震もトラフ全域で同時あるいは連続的に発生する可能性を否定できない。

このような発生パターンでは被災地域が短時間に拡大するため、政府主導の災害応急対策のみによる被害軽減には限界があり、救援をあてにした地域防災計画は危険となる。また地震の発生の順序やタイミングによっては、複数の波源からの津波が同時に沿岸に到達し、津波の重なり合いによって津波高さが単独発生時より増大することがある。津波が沿岸に到達する時刻は地域によって異なるので、自治体によって津波被害が大きくなる地震発生シナリオが異なる。以上のようなことから、南海トラフ全域にわたって巨大地震が発生した時には自治体独自の災害対応計画が重要となる。

そこで自治体に到達する津波に及ぼす地震発生の順序とタイミングの影響を評価し、最悪のシナリオを求めることを目的として、数値解析による考察を行った。

2. 本研究の手法

本研究では、東海・東南海・南海地震を、南海トラフで発生する一続きの巨大地震と考える。この巨大地震がどの領域から破壊しはじめ、どのように相互作用し、どのように全体が破壊するのかが地震学の分野でも明確になっていない。しかし、短時間内に連続的に地震が発生すると津波の危険度が増幅される恐れがあるため、危機

管理の観点から考えるパターン全ての解析を行うておくことが重要である。

(1) 重ね合わせの原理

本研究では様々な地震発生シナリオでの津波の特性を計算し、最悪のシナリオを解明する。しかしシナリオごとに数値計算を行うことは計算量が膨大であり現実的でない。そこで計算負荷を軽減するため、セグメント単位で地震が発生した場合の津波伝播計算を実施し、その結果を重ね合わせる方法を用いた。支配方程式が線形であれば数値計算の結果は重ね合わせることができる。この方法を用いると、あらかじめ各セグメントのみで発生した地震による津波の伝播計算を行い、沿岸地点における水位変動を記憶しておけば、あるシナリオでセグメントが破壊した場合のその地点の津波は、記憶しておいた水位変動をシナリオに従って時間軸方向にずらして全セグメント分重ね合わせることで求められる。

(2) 津波伝播計算

津波伝播計算は地球座標系線型長波理論を用い、リーブログ法により差分化を行った。計算領域は日本の全ての沿岸域を含む領域を空間格子間隔 36 秒で離散化し、時間間隔は 2 秒に設定し、8 時間を再現した。本計算に用いた地形条件を図-1 に示す。なお計算の安定のため打ち切り水深を 10 m に設定してある。

南海トラフの地震の断層モデルは、過去に同時あるいは比較的短時間に全域で発生し、南海トラフ全域で断層パラメータが求められている 1707 年宝永地震及び 1854 年安政東海・南海地震の相田 (1981 a, 1981 b) モデルを用いた。モデルに従ってそれぞれ 5, 4 セグメントに分け、宝永モデルでは東より H-1 から H-5, 安政モデルでは東より A-1 から A-4 とし、Mansinha-Smylie (1971) の方法を用いて各セグメントの断層運動による初期波形を計算した。南海トラフ沿いのセグメントの配置を図-2 に示す。

(3) 地震の発生パターン

地震発生パターンは 1707 年宝永地震、1605 年慶長津波のように全セグメントで地震が同時に発生するパター

* フェロー 工 博 京都大学教授防災研究所
** 学生会員 修(工) 京都大学大学院情報学研究所社会情報学専攻
*** 正 会 員 博(工) 秋田大学助教授工学資源学部土木環境工学科

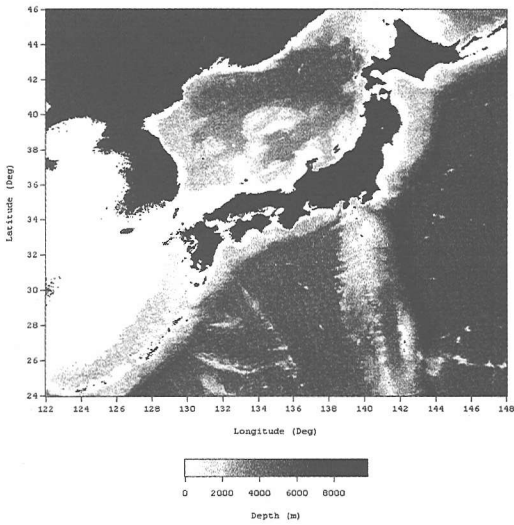


図-1 対象領域

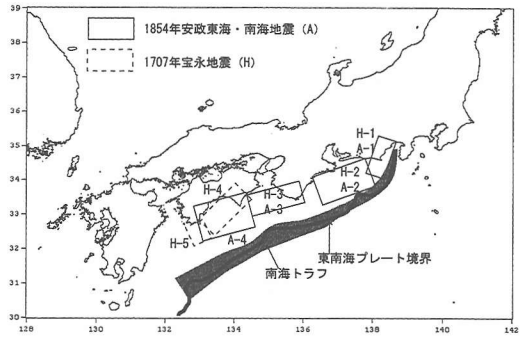


図-2 南海トラフのセグメント配置

表-1 本計算による再現誤差

断層モデル	K	κ
1854年安政東海地震	1.16	1.22
1854年安政南海地震	1.06	1.45
1707年宝永地震	0.90	1.55

ン、1854年安政東海・南海地震のように東側のセグメントから連鎖的に地震が発生するパターン、また必ずしも東側から発生するとは断定できないため西側のセグメントから地震が発生するパターン、さらに地震発生順序に方向性がなく短時間内にランダムに発生するパターンを考えた。本研究で検討した地震発生パターンは以下のとおりである。

- A. 全領域で地震が同時に発生する
- B. 各領域の地震が短時間でランダムに発生する
- C-1. 東側の領域から西側へ地震が連鎖的に発生する
- C-2. 西側の領域から東側へ地震が連鎖的に発生する

(4) 津波の危険度を評価する指標

本研究では地震の発生パターンによって沿岸における津波危険度がどの程度増幅されるかを求める。

地震の発生シナリオは最初の地震の発生から8時間以内に全セグメントで地震が発生するとした。津波の危険度を評価する指標としては2種類の指標を用いた。一つは従来的手法でよく用いられている津波高、もう一つは本研究で提案している危険水位時間積分値である。この指標は、危険水位が継続する時間も地域への津波の浸水危険性を評価するために重要であるため、最初の地震発生から8時間後までの沿岸地点における水位がしきい値以上となる水位の時間積分をとったものである。ここでは津波注意報が発令されるレベルである0.5mをしきい値として用いた。

本研究は対象地点を、被災が予想される海域を代表する静岡、浜松、名古屋、熊野、和歌山、大阪、岡山、福山、高知、佐伯の10地点とし、これらの地点で地震発生シナリオによる津波危険度の変化を調べる。

(5) 既往津波の再現

本計算による誤差を評価するために、渡辺(1998)を参考に、相田によって提案された評価指標 K (対数幾何平均) 及び κ (対数幾何標準偏差) を算出した。その結果を表-1に示す。1854年安政南海地震と1707年宝永地震のモデルで実測値と計算値の差がばらつく傾向にあるが、いずれも再現計算に必要とされる範囲 ($0.8 \leq K \leq 1.2$, $\kappa \leq 1.6$) には収まっていた。また、1854年安政南海地震の相田モデルを用いた場合の実測値と計算値を比較した結果、約1km(36秒)というメッシュでは再現できないような地形においては差が出たが、実測値と計算値の傾向はおおむね一致した。1854年安政東海地震および1707年宝永地震も同様であった。

3. 連動による広域津波の変化

(1) 同時発生(パターンA)

1707年宝永地震のように南海トラフの全セグメントで地震が同時に発生したケースを考える。このケースはパターンが少ないので、全領域で同時に地震が発生したとして津波数値計算を行って沿岸全域の津波高分布を得ることができる。

1707年宝永地震が発生した場合の津波高分布と1854年安政東海地震および安政南海地震が同時に発生した場合の津波高分布の比較を図-3に示す。図-3からほぼ全域で宝永のモデルの方が安政のモデルで同時発生した場合よりも津波高が大きくなることわかる。

また安政モデルの同時発生時と1854年安政東海地震の単独発生時、および1854年安政南海地震の単独発生時の津波高の比較を図-4に示す。図-4より安政のモデル

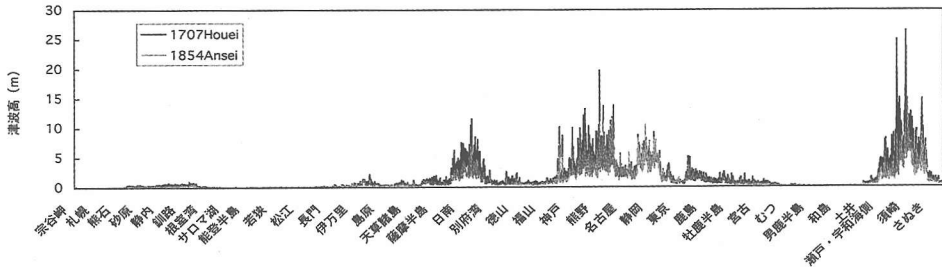


図-3 1707年宝永モデルと1854年安政モデルの同時発生時の津波高の比較

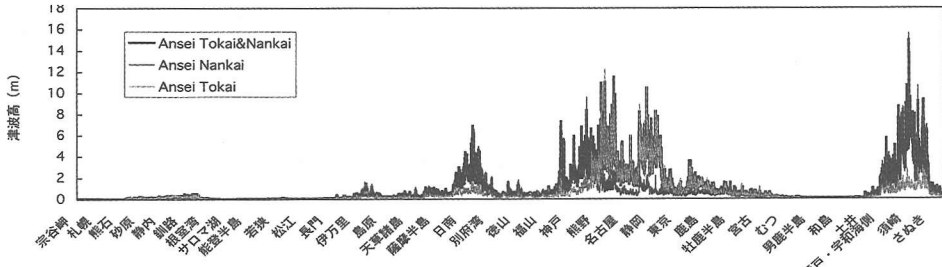


図-4 1854年安政モデルの同時発生時と東海地震・南海地震単独発生時の津波高の比較

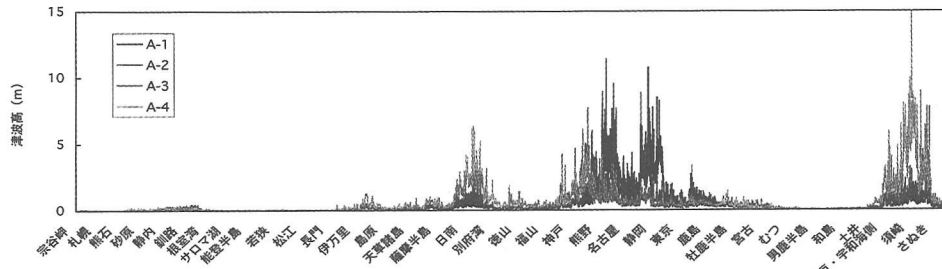


図-5 各セグメントのみで地震が発生した場合の津波高 (1854年安政モデル)

では同時発生した場合でも、沿岸の津波高は熊野灘以東では1854年安政東海地震の津波高と同程度、以西では1854年安政南海地震の津波高と同程度である。

これらのことから1707年宝永地震の再現と想定津波への適用が重要であると考えられる。

(2) 各領域の地震が短時間でランダムに発生する (パターンB)

次に各セグメントの地震がその他のセグメントの地震発生に関係なくランダムに発生する場合の各地点の最大の津波高を求める。この最大の津波高は、地震の発生に関する制約条件が最も少なくなるので、地震が短時間のうちに全領域で発生する場合の、各地点に到達し得る最大の津波高を表す。これは、各セグメントのみで地震が単独発生した場合の沿岸の最大水位を求め、単純に全セグメント足しあわせることで得られる。各セグメントのみで地震が単独発生した場合の沿岸の最大水位分布を図

5に、これを縦軸方向に足しあわせ、各地点に到達する最大の津波高を求めたものを図-6に示す。図-5から駿河湾周辺にはセグメントA-1、紀伊半島東岸から遠州灘にかけてはA-2、大阪湾および紀伊半島西岸ではA-3、九州および四国ではA-4での地震による津波が最も高いことがわかる。

また図-6から沿岸に到達しうる最大の津波高は同時発生時に比べて九州東岸、四国西岸、大阪湾、伊勢湾、駿河湾で平均2m、紀伊半島沿岸、遠州灘で平均2~4m、土佐湾沿岸で平均4~8m増大することがわかる。

(3) 東側の領域から西側の領域へ地震が連鎖的に発生する場合 (パターンC-1)

a) 津波高が最も増大するシナリオ
東側のセグメントから地震が発生し、その後西側のセグメントへ地震が連鎖的に発生する場合の、沿岸での津波高が最も高くなるような地震発生のタイミングを求め

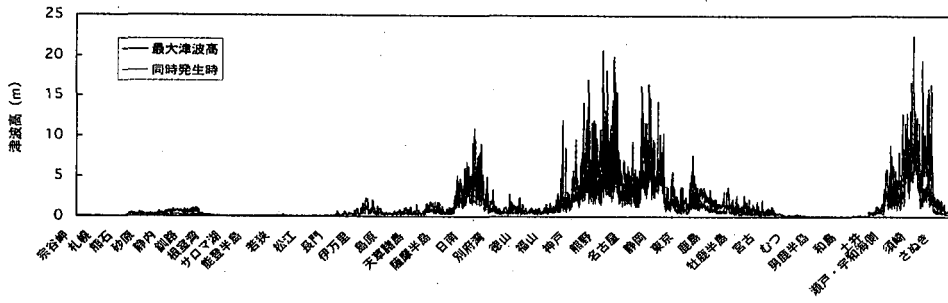


図-6 短時間で地震が連続発生した場合の各地点に到達し得る最大津波高 (1854 年安政モデル)

た。まず各セグメントのみで地震が発生したときの沿岸のある地点での地震発生からの水位変動を記録し、これらを西側のセグメントほど地震発生が遅れる条件で時間軸方向にずらして重ね合わせる。その重ね合わせ方のうち津波高が最も大きくなるものを最悪のシナリオとして求めた。1854 年安政モデルを用いた場合の対象 10 地点で最も津波高が大きくなる地震発生のタイミングを表-2 に示す。表中の時刻は A-1 のセグメントで地震が発生してから各セグメントで地震が発生するまでの経過時間を示している。

表-2 から各地点で最大の津波高となる地震発生シナリオは大きく異なることが分かる。東海側から地震が発生すると最悪の場合、名古屋、和歌山、大阪、佐伯では津波高が 1~2 m 程度、浜松、熊野では 2 m 以上同時発生時より高くなる。また岡山では同時発生時 0.69 m であるが、最悪 1.21 m に達する可能性があるなど津波高が低いと予想されている地域でも注意が必要である。

また、このようなシナリオは、各波源から各地域に到達する津波のうちその地域にもっとも高い水位を及ぼす津波の顕著なピークを重ね合わせたものであることが多い。このことから図-5 をもちいて、自治体に到達する津波はどの波源からのものが大きいかを調べ、その波源からの津波による水位変動をみて、ピークを重ね合わせることで簡単に評価できる。

b) 危険水位時間積分値が最も増大するシナリオ

津波の危険性を評価する指標として、危険水位時間積分値を用いた場合の最悪のシナリオを表-3 に示す。危険水位時間積分値は危険水位が継続する時間を考慮に入れて浸水危険度を評価する指標であるが、この値は静岡、浜松、熊野、大阪、高知で大きい。また、最悪のシナリオは津波高を用いた場合と異なるので、この指標を用いることも危機管理上重要であると考えられる。この場合の増大量は熊野、高知、佐伯で大きく、佐伯では同時発生時に比べ 94% の増大となった。また和歌山、名古屋では 64~70% と増大率が大きくなっている。

表-2 対象地点において最も津波高が大きくなる地震発生のタイミング (C-1, 1854 年安政モデル)

地点	地震発生時刻 (A-1 地震発生からの時間)				津波高 (m)	同時発生時 (m)
	A-1	A-2	A-3	A-4		
静岡	0:00	0:35	1:15	1:37	5.86	5.29
浜松	0:00	3:28	4:59	6:41	7.20	4.98
名古屋	0:00	0:23	0:56	1:07	2.99	1.93
熊野	0:00	0:19	0:33	0:55	5.28	2.79
和歌山	0:00	0:30	0:32	2:51	3.81	2.18
大阪	0:00	0:34	0:50	1:33	3.94	2.73
岡山	0:00	0:40	2:59	3:52	1.21	0.69
福山	0:00	0:38	0:57	2:41	0.60	0.57
高知	0:00	1:32	2:30	4:03	7.74	6.83
佐伯	0:00	1:49	3:55	4:11	4.21	2.39

表-3 対象地点において最も危険水位積分値が大きくなる地震発生のタイミング (C-1, 1854 年安政モデル)

地点	地震発生時刻 (A-1 地震発生からの時間)				積分値 (m・s)	同時発生時 (m・s)
	A-1	A-2	A-3	A-4		
静岡	0:00	0:36	1:31	2:16	14,004	11,779
浜松	0:00	0:00	2:06	2:19	12,647	11,030
名古屋	0:00	1:35	2:09	3:09	3,453	2,103
熊野	0:00	0:18	1:00	1:06	10,656	7,182
和歌山	0:00	0:32	0:57	1:35	6,512	3,839
大阪	0:00	0:00	0:13	0:51	8,512	6,588
岡山	0:00	0:40	0:59	1:47	1,289	143
福山	0:00	0:36	0:56	0:56	137	30
高知	0:00	0:13	0:37	0:48	20,232	16,298
佐伯	0:00	0:19	0:38	0:58	6,770	3,494

(4) 西側の領域から東側の領域へ地震が連鎖的に発生する場合 (パターン C-2)

a) 津波高が最も増大するシナリオ

西側のセグメントから地震が発生し、その後東側のセ

表-4 対象地点において最も津波高が大きくなる地震発生
のタイミング (C-2, 1854年安政モデル)

地点	地震発生時刻 (A-4 地震発生からの時間)				津波高 (m)	東側から 発生時 (m)
	A-1	A-2	A-3	A-4		
静岡	4:07	2:44	1:14	0:00	7.53	5.86
浜松	5:21	2:25	2:21	0:00	7.84	7.20
名古屋	4:08	2:21	0:59	0:00	2.75	2.99
熊野	4:14	0:38	0:32	0:00	5.37	5.28
和歌山	0:44	0:34	0:06	0:00	4.03	3.81
大阪	3:14	2:52	0:11	0:00	3.79	3.94
岡山	1:25	0:54	0:11	0:00	0.96	1.21
福山	1:03	0:40	0:03	0:00	0.65	0.60
高知	1:45	0:34	0:31	0:00	7.07	7.74
佐伯	4:31	1:40	0:36	0:00	3.98	4.21

表-5 対象地点において最も危険水位積分値が大きくなる
地震発生のタイミング (C-2, 1854年安政モデル)

地点	地震発生時刻 (A-4 地震発生からの時間)				積分値 (m・s)	東から 発生時 (m・s)
	A-1	A-2	A-3	A-4		
静岡	0:03	0:02	0:00	0:00	12,374	14,004
浜松	0:36	0:07	0:07	0:00	12,171	12,647
名古屋	1:06	0:38	0:20	0:00	4,134	3,453
熊野	2:51	0:53	0:46	0:00	10,926	10,656
和歌山	1:38	1:10	0:10	0:00	6,691	6,512
大阪	1:12	0:50	0:11	0:00	10,598	8,563
岡山	1:26	0:58	0:14	0:00	755	1,289
福山	2:10	1:37	0:05	0:00	100	137
高知	3:39	1:26	0:23	0:00	19,976	20,232
佐伯	3:40	2:22	0:28	0:00	6,602	6,770

グメントへ地震発生が連鎖的に継続する場合についてもパターンC-1と同様の方法で解析を行った。この場合の津波高が最も大きくなる地震発生のシナリオを表-4に示す。

表-4から、静岡、浜松および和歌山では西側から地震が発生する場合の方が、それぞれ1.7m、0.6m、0.2m東側から地震が発生する場合より津波高が大きくなった。逆に高知、名古屋および佐伯では西側から発生する場合の方が、それぞれ0.7m、0.2m、0.2m小さくなった。その他の地域ではあまり変化はなかった。

b) 危険水位時間積分値が最も増大するシナリオ

津波の危険性を評価する指標として、危険水位時間積

分値を用いた場合の最も危険である地震発生シナリオを表-5に示す。

静岡では、津波高を評価基準にした場合に西側から地震が発生する方が危険であったのに対し、危険水位時間積分値を用いた場合、その値は西から発生した場合の方が東から発生した場合の11%小さくなっており危険度の評価基準によってシナリオが大きくかわることが分かる。逆に名古屋や大阪では20~24%大きくなった。

4. 結 論

本研究の結論をまとめると以下の通りである。

1) 1854年安政の東海・南海地震が同時に発生した場合よりも、1707年宝永地震の場合の津波高の方が大きく、今後トラフ全領域での地震同時発生を考慮する上で1707年宝永地震の検討が重要である。

2) 地震が短い時間差を持って発生する場合、対象地点により最悪のシナリオは異なるが、重ね合わせの原理を用いて最も危険となるケースを想定することができる。また、この場合、同時発生時より津波高がはるかに大きくなることもある。さらに危険度を評価する指標として危険水位の時間積分値を用いた場合、津波高を指標とした場合と異なる結果がでるので、このような指標を考慮に入れることも重要である。

3) 対象地点での津波高はその近くに位置する波源の影響を強く受ける。この波源からの津波のピークとその他の波源からの津波の山が重なると最悪のシナリオとなりやすい。このことを用いてシナリオを全パターン計算することなく津波がどれだけ増幅される可能性があるかを求めることができる。

なお、本研究は文部科学省が推進している大都市大震災軽減化特別プロジェクトの一環として行ったものである。

参 考 文 献

- 渡辺偉夫(1998): 日本被害津波総覧(第2版), 東京大学出版会, 238 p.
- 相田 勇(1977): 三陸沖の古い津波シミュレーション, 東京大学地震研究所彙報, Vol. 52, pp. 71-101.
- 相田 勇(1981a): 東海道沖におこった歴史津波の数値実験, 東京大学地震研究所彙報, Vol. 56, pp. 367-390.
- 相田 勇(1981b): 南海道沖の津波の数値実験, 東京大学地震研究所彙報, Vol. 56, pp. 713-730.
- Mansinha, L. and D. E. Smylie (1971): The displacement fields of inclined faults, Bulletin of Seismological Society of America, Vol. 61, No. 5, pp. 1433-1440.