

津波増幅特性に及ぼす地震の規模の影響

Effects of Earthquake Magnitude on Tsunami Height

奥村与志弘¹・河田恵昭²

Yoshihiro OKUMURA and Yoshiaki KAWATA

It is thought that the Tonankai-Nankai Eq. occurs with certainly in the first half of this century. There is a possibility that we have higher tsunamis than the current estimation when next earthquake has bigger magnitude than the current estimation. Also, we found that some local tsunamis become much higher in the case of bigger magnitude earthquake. This is a result given by case study of Hokaido Tokachi off Eq. In this study, we try to find out relation between earthquake magnitude and tsunami height, and we try to be clarified why tsunamis due to a bigger magnitude eq. become much higher locally. Also we try to suggest social response in the next Nankai Eq. in consideration on locality of tsunami amplification by earthquake magnitude.

1. 緒論

東南海・南海地震は、巨大津波を伴って、今世紀前半に発生することが確実視されている。一般に地方自治体の計画津波は、既往最大の津波が採用されているが、将来の地震の規模によっては、想定を超える津波が来襲する可能性がある。想定以上の規模で地震が発生した場合、情報が十分に把握できない情報空白期に、早期に被害甚大地域を特定することが、その後の災害対応の成否を左右する。

そのような中、著者らは、同一地域で発生する地震でも、その規模が巨大化すれば、地域間の津波高の差が顕著となり、津波が特異に増幅される場合があることを確認した。これは、北海道十勝沖で発生しう様な様々な規模の地震を想定し、津波数値計算を用いて仮想の津波を発生させ、それらを分析することで明らかにしたものである。

このことは、防災上重要な問題である。想定以上の規模の地震が発生した場合は、もちろん計画津波を超える津波が来襲する覚悟をしなければならないが、このことは、地域によっては増幅特性の特異性から他地域と同等の覚悟では不十分で、被害が想定を大きく上回る可能性があることを示唆しているからである。東南海・南海地震のように被災地が広域になる広域災害であれば、このような地域が多数発生し、早期に被害の全体像を把握することは一層困難になることが懸念される。

以上を踏まえ、本研究の目的は以下の2点とする。まず津波数値計算を用いて、地震の規模と津波増幅特性の関係を整理し、増幅特性の局所性の発生機構を明らかにすること、次に、南海地震における地域毎の防災戦略を

踏まえ、こうした津波増幅の局所性を踏まえた災害対応のあり方を提案することである。

2. 震源断層モデルの作成手法

著者らは様々な規模の地震を想定する。そこで、まず本研究における地震の規模の考え方で、規模の異なる震源断層モデルの作成手法について述べる。作成手法は、基準となる震源断層モデルの有無により2通りを考える。

(1) 地震の規模の考え方

地震の規模には、多数の定義が存在する。表面波マグニチュード M_s や実体波マグニチュード m_B 、気象庁マグニチュード M_J は、「大きい地震ほど一定震央距離での地震動の振幅、或いは震度が大きい」という考えに基づき考案されたものである。他にも、「大きい地震ほど面積の大きい断層を形成し、そのすべり量も大きい」という考えに基づき考案されたモーメントマグニチュード M_w がある (Kanamori, 1977)。

$$M_w = (\log M_0 [Nm] - 9.1) / 1.5 \dots\dots\dots (1)$$

$$M_0 = \mu \cdot S \cdot U \dots\dots\dots (2)$$

ここで、 M_0 は地震モーメント、 μ は地盤の剛性率、 S は断層の面積、 U は断層のすべり量である。

津波の発生を予測する上では、モーメントマグニチュードが他のマグニチュードよりも扱いやすい。それは、地震の規模を断層の面積とすべり量で規定できるこの定義を用いれば、地震の規模と津波の初期波源を関連づけられるからである。本研究では、地震の規模にモーメントマグニチュード M_w を用いる。

(2) 基準無しの場合の震源断層モデル作成手法 (手法A)

震源断層には相似性があると考えられており、これを地震の相似則と呼ぶ。佐藤 (1989) は、マグニチュード

1 正会員 博(情報)人と防災未来センター主任研究員
2 フェロー 工博 関西大学教授 工学部都市環境工学科

Mを独立変数として、以下の経験式を提案している。

$$\log S[km^2] = M - 4.07 \quad \dots\dots\dots (3)$$

$$\log U[cm] = 0.5M - 1.40 \quad \dots\dots\dots (4)$$

基準となる震源断層モデルが無い場合、本研究ではこれらの経験式を用いて平均的な断層モデルを作成する。まず、想定する地震の規模Mを決める。次に、断層の面積Sとすべり量Uを式(3)と式(4)を用いて算出する。さらに、断層を長さL、幅W(=L/2)の矩形で近似し、それぞれ算出する。その他の断層パラメータは、プレート境界面形状やプレートの沈み込み特性、過去の地震の事例などを参考にして決定する。

(3) 基準有りの場合の震源断層モデル作成手法 (手法B)

既に提案されている震源断層モデルが存在する場合には、以下の手順に従って規模の異なる地震の断層モデルを作成する。まず、想定する地震の規模Mを決める。次に、式(1)を用いて、基準となる地震と想定する地震の地震モーメントM₀を求める(それぞれM₀^S, M₀^Eとする)。さらに、地震モーメントの比R(=M₀^E/M₀^S)を求め、この値を用いて想定する地震の面積とすべり量を算出する。その他の断層パラメータは、手法Aと同様にして決定する。

3. 地震の規模による局所的な津波増幅

2003年9月26日北海道十勝沖でマグニチュードM_w8.0

表-1 十勝沖に想定した地震の断層パラメータ

地震規模 (M _w)	断層長 (km)	断層幅 (km)	すべり量 (cm)
7.8	104.7	52.4	230
8.0	131.8	65.9	290
8.2	166.0	83.0	365
8.4	208.9	104.5	459

断層面基準点 (N (° N), E (° E), d (km)) = (42.12, 144.55, 25.0)
(走向, 傾斜, すべり角) = (230, 20, 109)

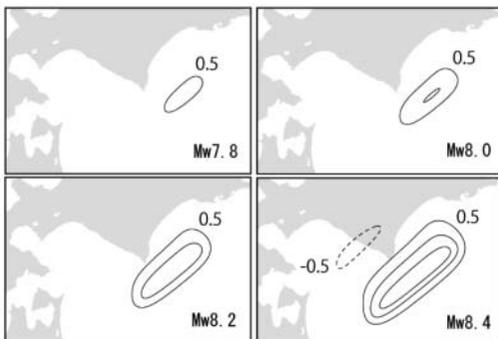


図-1 地盤変動分布。破線は沈降、実線は隆起。0.5m間隔。

の地震が発生した。この地震に伴い発生した津波による死者・行方不明者は2名である。

著者らは、十勝沖で発生する地震を対象に、地震の規模と津波高の関係を明らかにするため、マグニチュードM_wが0.2ずつ異なるM_w7.8~8.4までの4通りの地震を想定し、津波数値計算を実施した。断層パラメータは、2章で述べた手法Aに従い決定した(表-1)。津波初期水位分布は、この断層パラメータにMansinha and Smylie (1971)の方法を適用することで推定した(図-1)。津波数値計算は、非線形長波理論をstaggered格子を用いたleap-frogスキームで解いた。なお、空間格子間隔500m、時間間隔1.8s、再現時間6hr.とする。

図-2は、全ケースの津波の最大津波高の分布に、代表的な11検潮所における観測値をプロットしたものである。実地震と同じM_w8.0の場合の計算結果は、襟裳岬近傍の広尾における約3.5mの観測値をはじめ、釧路や厚岸、浦河や白老など各地の観測結果を概ね良好に再現している。なお、当時の津波の再現性の検討については河田ら(2004)に詳しい。

ここでは、津波高の地域間差異に注目したい。図-2から、地震の規模が大きくなるに連れて地域間差異が拡大し、マグニチュードがM_w8.2を超えると、いくつかの地域で津波が局所的に大きくなっていることが分かる。地震の規模が小さい場合の津波は、(計算領域内の)津波高の地域間の比率は2~3倍程度あるが、津波高が全体的に小さいため地域間の差異は小さく、目立たない。しかし、地震の規模が大きい場合の津波は、津波に対する

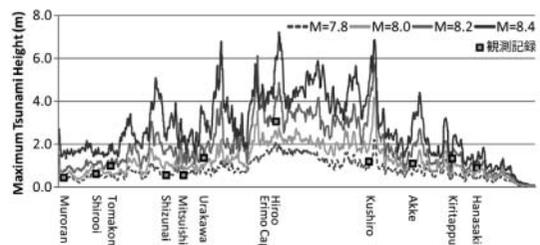


図-2 津波高の空間分布 (十勝沖の津波)

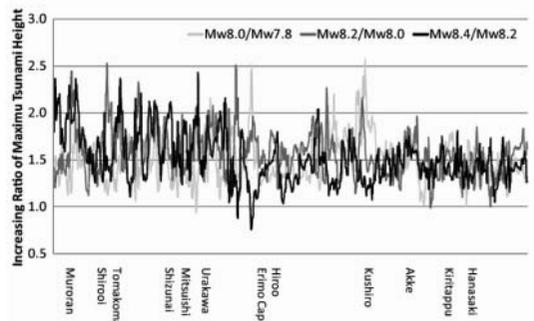


図-3 津波増幅率の空間分布 (十勝沖の津波)

地震の規模の影響度が地域ごとに異なること、津波高が全体的に大きくなることによって、津波高の地域間の差異が顕著になったと考えられる。

図-3は、マグニチュードが0.2だけ異なる2組の地震による津波の最大津波高の比を $M_w 7.8 \sim 8.4$ までの3ケースについて算出したものである。これは地震の規模を2倍にした時、津波がどれだけ増幅されるのかを意味する。この図を用いて、津波に対する地震の規模の影響度が地域ごとに異なる要因を検討する。

地震の規模が $M_w 8.0$ 以上の時、襟裳岬を挟む東西の沿岸で、津波高の増幅率に傾向の違いが現われている。全体的に1.5倍程度だが、局所的に2.0倍を超える地域があり、それは襟裳岬より西側の地域に偏っている。

このことは、襟裳岬の東西で津波増幅の要因が異なることを示唆している。本研究では、想定した4ケースの地震間で断層の南東端を同位置とし、ケース毎の震源域の違いは、南西方向、北西方向のみとした。また、震源域内に襟裳岬が突き出ているため、断層面積の拡大による影響が岬の東側沿岸に伝わらず、相対的に岬の西側に強く現れたと考えられる。すなわち、各ケースの震源域の広がりやの違いと襟裳岬の存在が要因で、津波に対する地震の規模の影響度が地域ごとに異なる結果となっていることが分かった。

4. 地震の規模による局所的な津波増幅の発生機構

前章で、様々な規模の北海道十勝沖の地震を想定し、海岸線が比較的単純な北海道太平洋沿岸に襲来する津波と地震の規模の関係を明らかにした。そして、地震の規模により局所的に津波が増幅される地域があることが分かった。本章では、近い将来の発生が確実視されている南海地震を対象に、地震の規模による沿岸の津波の増幅特性を、増幅の局所性に着目して明らかにする。また、地震の規模による局所的な津波増幅の発生機構を明らかにする。

著者らは、2枚の矩形断層で構成される相田(1981)による安政南海地震の断層モデル ($M_w 8.48$) を基に、マグニチュードが0.2ずつ異なる $M_w 8.0 \sim 8.6$ までの4通りの地震を、すべり量のみを変化させて作成したモデルと断層面積のみを変化させて作成したモデル、計8通りの地震を想定した。各ケースの断層パラメータは第2章で述べた手法Bに従い決定した(表-2, 表-3)。これら8通りの地震を対象に津波の数値計算を実施することで、沿岸の津波の増幅特性とその発生機構について分析した。津波初期水位分布の推定と津波数値計算は、前章と同様の方法を用いた(図-5)。計算諸元を図-4に示す。

図-6, 図-7は、マグニチュードが0.2だけ異なる2組の地震による津波の最大津波高の比を $M_w 8.0 \sim 8.6$ までの3

表-2 南海道沖に想定した地震の断層パラメータ (断層の面積のみ変化させるモデル)

地震規模 (Mw)	基準点 X (km)	基準点 Y (km)	断層長 (km)	断層幅 (km)	すべり量 (cm)
8.0	3617.7	475.6	65.21	52.17	630
	3667.1	536.9	65.21	30.43	470
8.2	3617.7	475.6	92.10	73.68	630
	3676.6	562.1	92.10	42.98	470
8.4	3617.7	475.6	130.08	104.06	630
	3690.0	597.6	130.08	60.70	470
8.6	3617.7	475.6	183.83	147.07	630
	3709.0	647.9	183.83	85.79	470

UTM53帯, (北緯0度, 東経135度)が原点 (0km,500km)

表-3 南海道沖に想定した地震の断層パラメータ (すべり量のみ変化させるモデル)

地震規模 (Mw)	基準点 X (km)	基準点 Y (km)	断層長 (km)	断層幅 (km)	すべり量 (cm)
8.0	3617.7	475.6	150.00	120.00	119
	3697.1	616.2	150.00	70.00	89
8.2	3617.7	475.6	150.00	120.00	238
	3697.1	616.2	150.00	70.00	177
8.4	3617.7	475.6	150.00	120.00	474
	3697.1	616.2	150.00	70.00	353
8.6	3617.7	475.6	150.00	120.00	946
	3697.1	616.2	150.00	70.00	706

UTM53帯, (北緯0度, 東経135度)が原点 (0km,500km)



図-4 津波数値計算の計算諸元

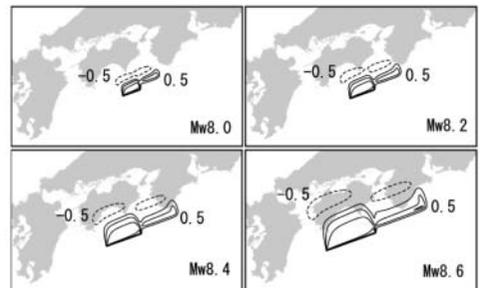


図-5 地盤変動分布 (断層面積を変化させて地震の規模を変化させた場合) 破線は沈降, 実線は隆起. 0.5m間隔.

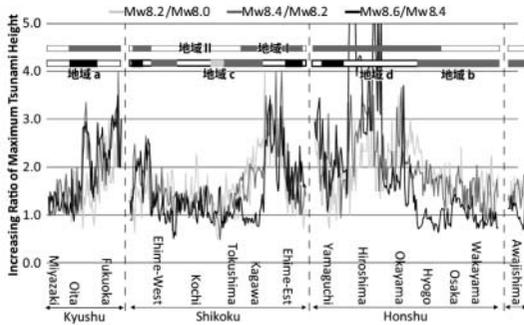


図-6 津波増幅率の空間分布 (断層の面積のみ変化させた場合)

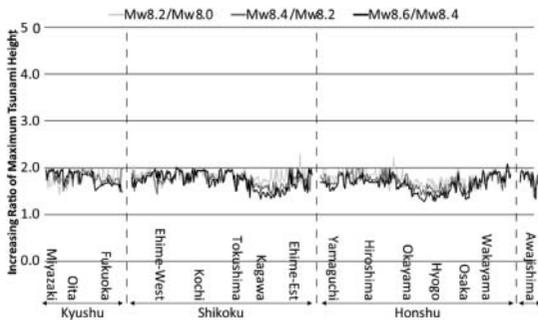


図-7 津波増幅率の空間分布 (すべり量のみ変化させた場合)

ケースについて算出したものであり、それぞれ断層の面積のみを変化させた地震の場合とすべり量のみを変化させた地震の場合である。

まず、相田の断層モデルを基準に、地震のすべり量のみを変化させて想定した、規模の異なる4通りの地震に注目する。マグニチュードを0.2だけ大きくした時(地震の規模は2倍)の最大津波高の増幅特性は、地域間で大きな差異は見られず、概ね1.8から2.0倍の範囲であることが分かる(図-7)。よって、津波に対する断層のすべり量の影響度は地域によらずほぼ一定であると言える。

一方、津波に対する断層面積の影響度は地域によって大きく異なることが分かる(図-6)。その特徴を以下に述べる。まず、(地域I)豊後水道や紀伊水道を通過した津波が来襲する地域と、(地域II)波源から直接津波が来襲する地域とに大別できる。地域Iは、マグニチュードが0.2だけ大きくなった場合に津波高が1.8倍以上大きくなる可能性がある。大分県北部、福岡県、山口県、広島県、岡山県、兵庫県、香川県、愛媛県北部が含まれる。一方、地域IIの津波高の増幅は、せいぜい1.8倍程度である。大分県南部、愛媛県西部、高知県、徳島県、和歌山県、大阪府が含まれる。

次に、マグニチュードを8.0から8.6へ0.2ずつ大きくした場合の津波高の増幅の仕方によって4つの地域に分けられることが分かる。(地域a)地震の規模が小さいうち

は津波が増幅されない地域、(地域b)地震の規模が大きくなると津波が増幅されなくなる地域、(地域c)地震の規模を大きくしても津波が増幅されない地域、(地域d)常に津波が増幅される地域である。

地域aは、波源が高知県東部沖、和歌山県沖を基準に小さく拡大している段階では、その影響が及ばない地域である。豊後水道北部の狭窄部以北100km程度の範囲にある大分、山口、愛媛の各県沿岸および愛媛県北西部沿岸が含まれる。地域bは、ある程度以上の波源の拡大で影響が頭打ちになる地域である。香川県、徳島県、岡山県東部、兵庫県、大阪府、和歌山県の各沿岸は、マグニチュード M_w 8.4以上で波源域が紀伊半島を包み込むため、地震の規模がこれ以上大きくなっても(断層面積がこれ以上大きくなっても)紀伊水道に侵入する津波のエネルギーは変わらず、津波増幅が頭打ちになると考えられる。愛媛県南西部沿岸は、マグニチュードが M_w 8.4以上にして波源域を拡大しても、海底地形による波の指向性により拡大した波源域の津波のエネルギーは到達しないと考えられる。地域cは、徳島と高知の県境の沿岸で、断層面積が異なる4通りの地震のいずれについても最大の海面変動を生じている波源の海域からの影響が強く、波源の拡大部分の影響は小さいと考えられる。地域dは、地域a, b, cのような特別な条件を持たない地域で、宮崎県、大分県南部、高知県及び広島県、岡山県、愛媛県の一部などの沿岸が含まれる。

ここまでで、地震の規模による津波の増幅特性を、南海地震を事例に整理してきた。その結果を踏まえて、十勝沖地震での検討で明らかになった地震の規模による局所的な津波増幅について、その発生機構を検討する。

まず、地震の規模が小さい場合は、津波高が全体的に小さいため、地域間の津波高の差異も小さい。しかし、地震の規模が大きくなると、津波が局所的に増幅されなくても、津波高が全体的に大きくなるため、津波高の地域間差異は大きくなる。地震の規模が大きくても、断層のすべり量が大きいだけであれば、このようにして地域間の津波高の差が大きくなるだけである。それに対し、断層の面積の拡大は、局所的な津波増幅の要因となる。局所的な津波の増幅は津波高の地域間の差異を極めて大きくする。このようにして、本研究での十勝沖の地震による津波は、断層の面積とすべり量の両パラメータが大きくなり地震の規模が大きくなるにつれて、局所的に大きな津波が現われたと解釈できる。

5. 南海地震時の津波増幅の局所性を踏まえた災害対応のあり方

これまでの検討を踏まえ、想定以上の規模で南海地震が発生した場合の災害対応のあり方について提案する。

このような場合には、まず計画津波を上回る津波の来襲を覚悟しなければならない。しかし、地域によっては増幅特性の特異性から他の地域以上に特別な配慮が求められる。それは、波源域が想定以上の広がりを持っていた場合に、津波が大きく増幅されうる地域で、豊後水道や紀伊水道を通過した津波が来襲する瀬戸内海の沿岸地域などである。

都市機能をもつ兵庫県の沿岸は、少量の津波の流入でも大きな被害をもたらす可能性があるため、想定以上の規模の地震が確認された場合には、津波来襲までの時間的な余裕も味方につけながら、水門を閉めるなど市街地に海水を入れない通常通りの対応を確実に行うとともに、想定外も意識した避難行動が求められる。その他の瀬戸内海沿岸地域でも、津波による被害を出さないためには同様な避難行動が求められる。

国や自衛隊など広域的に被災地を支援する組織は、地震発生直後の情報空白期に、これらの地域で想定を上回る被害が発生している可能性を踏まえた初動期の体制作りが必要であると考えられる。

6. 結論

津波増幅特性に及ぼす地震の規模の影響を、断層の面積、すべり量、津波増幅の局所性に着目して明らかにするため、十勝沖や南海道沖の地震を事例に津波数値計算を用いて検討した。また、南海地震時の津波増幅の局所性を踏まえた災害対応のあり方を検討した。本研究で得られた結論を以下に列挙する。

- (1) 規模の異なる十勝沖の地震を4通り想定し、地震の規模によって、津波が局所的に大きくなることが分かった。地震の規模が0.2だけ大きくなった場合の津波の増幅率は、襟裳岬の東西で傾向に違いがあり、局所的に大きな増幅率になる地域は西側に偏っていることが分かった。
- (2) 断層のすべり量や面積の異なる8通りの南海地震を想定し、津波に対する断層のすべり量の影響度は地域によらずほぼ一定であるが、断層の面積の影響度は地域によって大きく異なることが分かった。
- (3) 断層面積の拡大による津波の増幅は、波源から直接津波が来襲する波源域近傍の沿岸地域と豊後水道や紀

伊水道を通過した津波が来襲する沿岸地域とで特徴が異なり、後者の地域において顕著な増幅となることが分かった。

- (4) 断層面積の拡大による津波の増幅を考えた場合、海底地形による津波の指向性や波源と海岸線の位置関係によって、地震の規模が小さいうちは増幅されない地域、地震の規模が大きくなると増幅されなくなる地域、地震の規模を大きくしても増幅されない地域、増幅されないことはない地域とに大別されることが分かった。
- (5) 地震の規模が増大することで局所的に津波が大きくなる現象を次のように解釈した。地域によらず均等に津波を増幅させる断層のすべり量の増大が、地震の規模が小さい場合には目立たない津波高の地域間差異を大きくするとともに、局所的に津波を増幅させる断層の面積の増大が津波高の地域間の比率を顕著にし、地域間差異を一層拡大させる。
- (6) 将来、南海地震が想定以上の規模で発生した場合、津波増幅の局所性を踏まえると、豊後水道や紀伊水道を通過した津波が来襲する瀬戸内海沿岸などは、想定外も意識した避難行動が求められるとともに、広域的に被災地支援をする国や自衛隊などの組織は、発災直後の情報空白期からこれらの地域で想定を上回る被害を予測し、対応を行う必要があることを提案した。

なお、本研究は、科学研究費補助金若手研究（スタートアップ）20810048および近畿建設協会研究助成による研究の一環で行ったものである。ここに記して謝意を表す。

参 考 文 献

- 相田勇 (1981) : 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.
- 河田恵昭・奥村与志弘・越村俊一・藤間功司・永井紀彦 (2004) : エッジ波の発生を考慮した津波予警報の改良に関する研究, 海岸工学論文集, 第51巻, pp.261-265.
- 佐藤良輔編著 (1989) : 日本の地震断層パラメーター・ハンドブック, 鹿島出版会, 390p.
- Kanamori, H. (1977) : The energy release in great earthquakes, *Journal of Geophysical Research*, Vol.82, pp.2981-2987.
- 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.