

アスペリティに起因する南海地震津波の波源不均一性に関する研究

河田 恵 昭*・奥村与志弘**・高橋 智 幸***・鈴木 進 吾****

2001 年 12 月に地震調査研究推進本部より発表された想定南海・東南海地震モデルにはアスペリティが導入され、地震動の不均質性が考慮されている。津波波源においても不均一領域が生じると考えられるが、従来十分に検討されてこなかった。そこで、本研究ではアスペリティに起因した波源不均一性を導入するための簡易手法を提案すると共に、南海地震津波に適用して津波数値計算を行い従来モデルとの比較を行った。さらに、様々なシナリオを想定し、各シナリオに応じて沿岸部に来襲する津波がどのような挙動を示すのかを考察し、その結果を防災上どのように活用すべきか検討した。

1. はじめに

2001 年 12 月政府の地震調査研究推進本部（以下、推本）地震調査委員会の強震動評価部会は「南海トラフの地震を想定した強震動評価手法について（中間報告）」（推本, 2001）を発表した。この中で推本は南海・東南海地震を対象に強震動評価手法を検討し、従来とは異なりこれらの想定地震のモデルにアスペリティを導入している（図-1）。アスペリティとは断層面上での強度の大きい部分を意味し、常時では断層面へ働いているずり応力に抵抗している部分である。ところが、断層運動が発生すると、周辺より大きな加速度を生じる原因となる。

このような不均一性は津波波源にも発生すると予想されるが、従来の研究では十分に検討されてこなかった。しかし、南海トラフなどのように陸域が近く、震源域に沿岸部が含まれる条件では、三陸沖などと比較して、アスペリティに起因する津波波源不均一性の影響が大きく現れることは容易に想像できる。そこで、本研究では南海地震の場合を例に、推本の断層モデル（以下、推本モデル）を基にして波源に不均一性を導入する手法を提案するとともに、その不均一性が沿岸部に来襲する津波に与える影響を検討した。また、その影響を防災上どう取り扱うべきかの考察も行った。

2. 波源不均一性を考慮した既往の研究

1993 年北海道南西沖で発生した地震は大津波を伴い、奥尻島西岸で局所的ではあるが 31.7 m という打ち上げ高を記録した。この津波を引き起こした断層運動に関して、地震発生当初は種々の断層パラメータが公表されたが、いずれのモデルも大きく異なるなど、この断層運動の詳細についての定説がなかった。

そこで、津波を説明することを主目的に、どのような断層運動が望ましいかを高橋ら（1994）は検討した。当初、2 枚断層のモデルから出発したが、改良を重ねて北、中

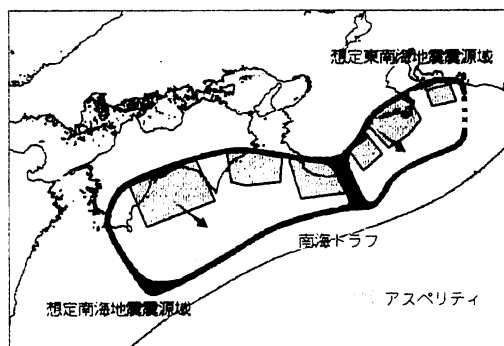


図-1 推本(2001)による想定南海・東南海地震の震源域

央、南の 3 枚の断層からなるモデルにたどり着いている。そして、北断層の改良の余地は残しながらも、奥尻島に関しては、かなり満足のできる計算結果を得ている。高橋ら（1994）は、波源域を 3 つの領域に分割し、それぞれの領域に対応する小断層の断層パラメータを調整することで、この津波を説明することに成功している。これは、この津波が従来の断層モデルのように一枚の矩形断層では説明できない事例であったことを示している。

同様に南海地震の場合も、波源域に不均一性が現れ、従来の断層モデルでは説明できないような津波を伴う可能性がある。本研究は、推本が公表しているアスペリティを導入したモデルを足がかりに、高橋らのモデルを参考にして波源不均一性を評価できるモデルを作成し、波源の不均一性を検討するものである。

3. 計算条件

津波の波源（初期波形）は断層運動の海底鉛直変位量として与えられる。断層パラメータを決定したのち、断層運動による地盤の鉛直変位は、弾性理論により Mansinha・Smylie（1971）モデルを用いて求めている。伝播計算では、線形長波理論を staggered 格子を用いた leap-frog スキームで解いている。本研究で設定した計算領域は南西隅が東経 131.0° 北緯 31.0°、北東隅が東経 137.07° 北緯 35.01°、格子間隔が 405 m である。津波伝播計算は

* フェロー 工 博 京都大学教授防災研究所

** 学生会員 京都大学大学院工学研究科都市環境工学専攻

*** 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

**** 学生会員 修(工) 京都大学大学院情報学研究科社会情報学専攻

1秒間隔で6時間再現する。

安政南海地震は比較的多くの資料が残されており、また既往最大と考えることができるため、想定南海地震を設定するために取り上げられることが多い。この地震の断層モデルとしては Ando モデル (Ando, 1975) と Aida モデル (相田, 1981) がよく引用されている。提案モデルとの比較のため、この既往の断層モデルも本研究で取り上げた。

4. 不均一性を導入した波源の簡易推定法の提案

本研究では推本モデルを参考にして、不均一性を導入した波源の簡易推定法を提案した。ここで推本モデルの特徴として、地震の規模を表現するパラメータが明らかになったこと、断層面にアスペリティが導入されていること、断層面が曲面で表現されていることが主に挙げられる。そこで推本モデルの段階的考慮として、A. 地震の規模のみ、B. 規模とアスペリティ、C. 規模とアスペリティと断層の形状というように、その特徴を順次考慮に入れた3つのモデルを作成した。

(1) 地震の規模のみを考慮したモデル (model-A)

地震の規模を表すパラメータの1つである地震モーメント (剛性率と断層面積とすべり量の積で定義されている) を推本モデルと同じ値になるように、既往モデルを修正した。因みに、地震モーメントは推本モデルの方が Aida モデルよりも大きい。具体的には、まず剛性率を推本モデルと同じ値にし、次に断層の面積は変えないで2枚の矩形断層のすべり量を同じ割合で大きくして、地震モーメントを推本モデルと等しくした。model-A は作成時に修正した既往モデルに応じて、A-Ando と A-Aida の2通りがある。

(2) 規模とアスペリティを考慮したモデル (model-B)

アスペリティに起因する波源不均一性を導入した。波源不均一性を導入するために、推本が発表している断層の形状まで考慮する必要はない。推本モデルの断層の形状まで再現しようとする、数百個の小断層に分割して地盤変動を計算する必要があるが、そのために必要なパラメータが十分に明らかになっていないことと実際の防災業務での利用を重視し、本研究では簡易手法を提案する。その手法の概要は、波源域と震源域が一致するように設定した矩形断層内 (以下、背景断層) にアスペリティに模擬した副断層を重ねるというものである。矩形断層の設定では既往モデルを基に波源域を震源域に合わせていくため、Ando あるいは Aida モデルのどちらを用いても大きな違いは生じないが、ここでは前者を採用した。また全断層で傾斜角を一定にしたが、Ando は傾斜角が

東側矩形断層 25°、西側矩形断層 20° と異なるため、モデル B では傾斜角が 25° の場合と 20° の場合の2種類を設定した。以下、モデル作成の詳細を簡条書きにする。

- ① 既往モデルの傾斜角を 25° または 20° にする。
- ② 次に、すべり量を推本モデルの背景領域のすべり量と同じ値にする。
- ③ さらに、断層面基準点、断層の長さ及び幅を初期波形の海面隆起領域が推本の震源域に重なるように設定する。但し、断層の長さとは断層面積が推本モデルの震源断層面積と等しくなるように設定する。
- ④ 各アスペリティ (図-1 参照) を模擬した副断層のすべり量を推本モデルのアスペリティのすべり量から背景領域のすべり量を引いた値にする。
- ⑤ 副断層の断層面基準点、幅及び長さを③と同様にして初期波形の海面隆起領域が推本のアスペリティ領域に重なるように決定する。
- ⑥ 副断層の深さは、その断層面基準点の位置における矩形断層の深さに設定した。

(3) 規模とアスペリティと断層の形状を考慮したモデル (model-C)

断層の南端が深さ 10 km、北端が深さ 30 km としている推本モデルの断層の形状 (より詳細な形状は明確でない) を考慮して再現した。再現にあたり用いた手法は、先述した断層の深さに合うように推本の震源域を東西方向に3枚の矩形断層で近似的に表現し、model-B で用いた手法でアスペリティを考慮した。

5. 本研究で想定したシナリオ

推本は震源域の西側、中央、東側にアスペリティを3つ想定し、西側のアスペリティの規模を最大、残り2つのアスペリティは同規模であるとしている。しかし、アスペリティに関しては地震学においても十分な知見が得られてはいない。そこで、推本が想定しているシナリオ以外に2つのシナリオを想定した。それらは、規模の大きなアスペリティが中央にあるシナリオと東側にあるシナリオである。さらに、推本は大きめの揺れを予測するシナリオとして、震源断層の面積に占めるアスペリティの面積の割合を小さめに設定した場合 (ケース2) も検討しているため、これも検討の対象とした。本研究で検討したモデルを図-2 にまとめる。

本研究で検討したシナリオを表現する断層モデルを作成するにあたり、留意した点を以下に簡条書きする。

- ① アスペリティの面積とすべり量を変更して、その規模の設定を変える際、断層の面積とすべり量に相関があるとされていることを考慮した。つまり、アスペリティの面積をある値に決定すると、それに対応するすべり量に変更する必要がある、その対応は推

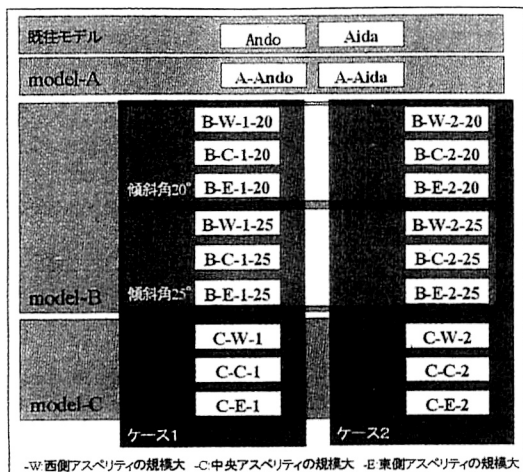


図-2 検討対象とした全断層モデルのまとめ

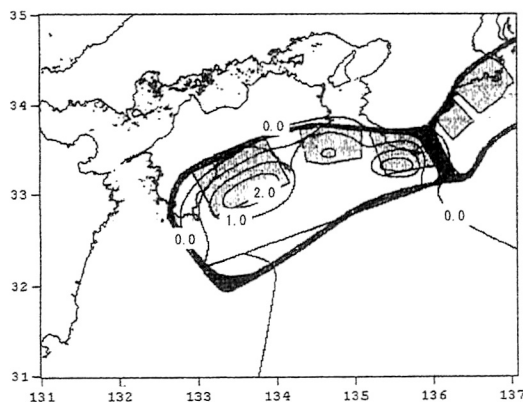


図-3 B-W-1-25 から計算された津波初期波形 (実線: 隆起, 1.0 m 間隔)

本モデルが与えているものを利用した。

- ② 断層の幅と長さを変更して、面積を大きくする際、基本的にこれらのパラメータを同じ割合で変更し、さらに断層の重心がずれないように断層面基準点も変えた。但し、model-C の中央と東側のアスベリティに関しては、その下に重なっている矩形断層をはみ出ることのないように断層の幅のみ変更した。
- ③ アスベリティの断層の深さは、その断層面基準点の位置における矩形断層の深さに設定した。
- ④ C-E-2 は規模の大きなアスベリティの面積の方が東側矩形断層の面積より大きくなる。そこで、このシナリオの東側断層は、矩形断層の面積を変えず、すべり量を大きくして、本来規模の大きなアスベリティが持つべき地震モーメントになるようにした。

本研究では、図-2 に示すように、22 通りの断層モデルを作成した。そして、これらの断層パラメータを用いて

津波初期波形を計算した。例として、B-W(-C, -E)-1-25 の断層パラメータを表-1 に、B-W-1-25 から計算される津波初期波形を図-3 に示す

6. 津波の波源不均一性の影響

(1) 津波伝播計算

5 章で計算された初期波形を外力条件として津波伝播計算を行った。計算された汀線沿いの津波高はグリーンの式を用いて水深 10 m での値に変換した。本研究で行ったモデル間の比較は、このようにして得られた津波高分布を用いて行った。

(2) 各モデルの評価

a) Ando と Aida の比較

これらの比較の結果、大きな差異はないことが分かった。

b) model-A の評価

Ando と A-Ando, Aida と A-Aida の比較を行った。そして、南海地震が推本モデルの発表している規模であるとする、安政の時よりも Aida モデルで平均 25%、Ando モデルで平均 36% 津波高が増加することが分かった。このことから、model-A は推本モデルの規模を評価できていることが分かる。よって、推本モデルを参照する場合、地震の規模を評価する必要がある。

c) model-B の評価

A-Ando と B-W-1-25 を比較し、アスベリティを考慮することで、地域によっては数十%も津波高が高くなることが分かった。このことから、model-B でアスベリティの影響が評価できていると考えられる。よって、アスベリティに起因する波源不均一性を評価する必要がある。また、B-W-1-25 と B-W-1-20 を比較し、傾斜角に関してはどちらを想定しておくべきという結論は出せなかった。それは、本モデルでは傾斜角を変えると副断層の深さも変わるためだと考えられる。

d) model-C の評価

B-W-1-25 と C-W-1 を比較したところ、後者の方が全体的に平均 16% 津波高が減少することが分かった。これは、このモデル作成に用いた手法では傾斜角が小さくなるためと考えられる。よって、model-C を用いて推本モデルの断層の形状を考慮すると、津波高を低く見積もる可能性があり、防災上危険である。従って、断層の形状を考慮するために model-C を使用するべきではない。

e) まとめ

以上より、推本モデルを参考にして、アスベリティに起因する波源不均一性の影響を踏まえた津波高予測をする場合、model-B を用いるのが適当である。但し、傾斜角に関しては 20° の場合と 25° の場合の両方を計算しておくべきである。また推本モデルの形状まで考慮したい

表-1 B-W(-C, -E)-1-25の断層パラメータ

		N (°N)	E (°E)	d (km)	θ (°)	δ (°)	λ (°)	L (km)	W (km)	U (cm)
a-1		135.86	33.07	1.00	250	25	177	70.00	82.43	328
a-2		135.15	32.85	1.00	250	25	117	210.00	143.00	328
B-W-1-25	b-1	134.04	33.11	29.77	250	25	117	93.41	57.20	1008
	b-2	135.05	33.48	32.51	270	25	97	65.49	40.80	617
	b-3	135.80	33.30	13.07	270	25	97	52.39	51.00	617
B-C-1-25	b-1	133.87	33.13	33.26	250	25	117	66.05	40.45	617
	b-2	135.20	33.41	27.08	270	25	97	92.62	57.70	1008
	b-3	135.80	33.30	13.07	270	25	97	52.39	51.00	617
B-E-1-25	b-1	133.87	33.13	33.26	250	25	117	66.05	40.45	617
	b-2	135.05	33.48	32.51	270	25	97	65.49	40.80	617
	b-3	135.92	33.214	7.24	270	25	97	74.09	72.12	1008

(a: 背景断層 b: アスペリティを模擬した副断層)

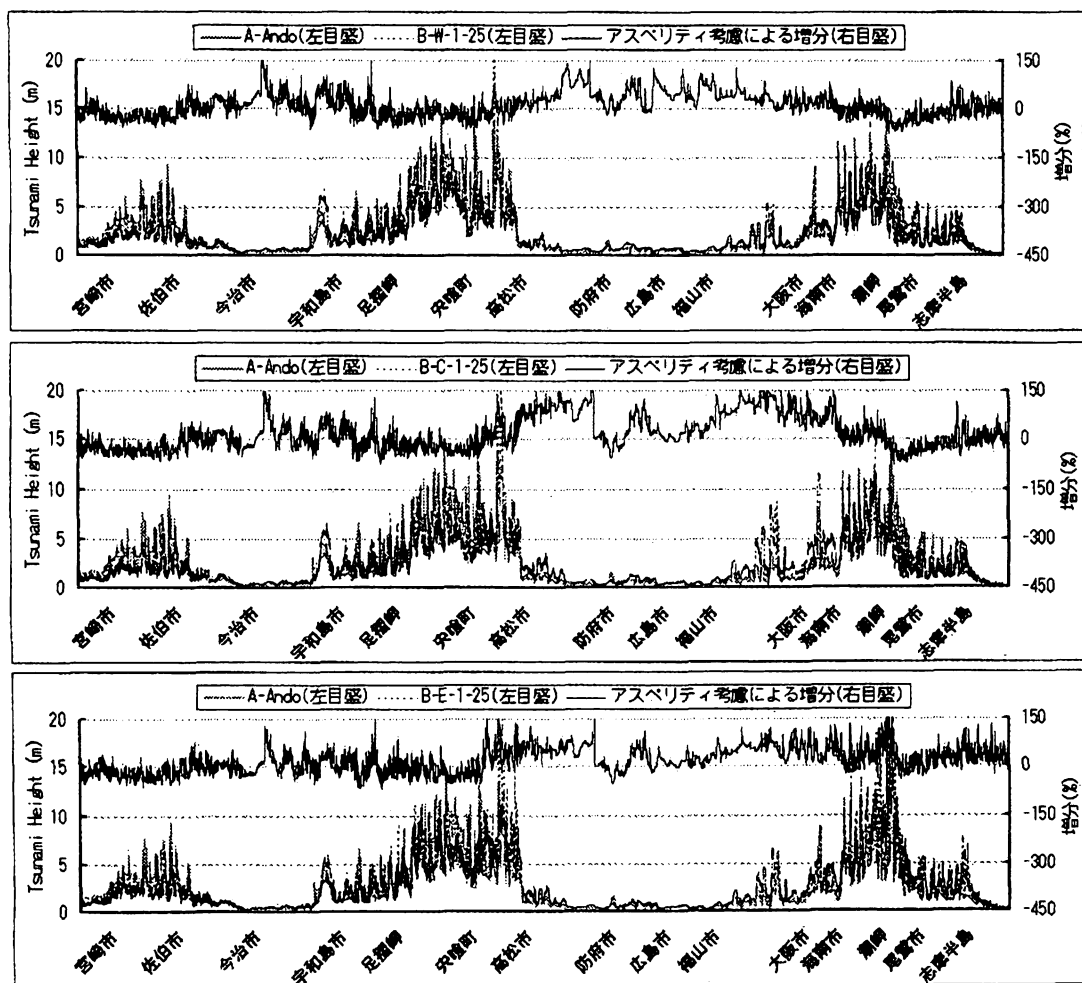


図-4 各シナリオにおける津波高分布

場合は、本研究で考えた model-C を南北方向にも分割して、細かく傾斜角の設定を行う必要があると考えられる。従って、実際の防災業務での利用を重視するなら、やはり model-B を用いるべきである。次節では、model-B を用いて本研究で想定したシナリオ及び推本が想定してい

るケース 2 を検討する。

(3) 本研究で想定したシナリオ及びケース 2 の評価
 本研究で想定した 3 つのシナリオやケース 2 の津波高分布の間にはどのような違いがあるのか考察した。ケース 2 については、B-W-1-25 と B-W-2-25 を比較し、こ

表-2 各地域が想定しておくべきシナリオ

	西側アスベリ ティの規模大	中央アスベリ ティの規模大	東側アスベリ ティの規模大
九州	大分県佐伯市以 北	なし	なし
本州 (東から 西へ)	広島県福山市ま で	広島県福山市か ら和歌山県海南 市まで	和歌山県海南市 から志摩半島ま で
四国 (半時計 周りに)	愛媛県今治市か ら同県宇和島市 まで	徳島県穴喰町か ら愛媛県今治市 まで	なし

のケースを想定することでより高い津波高になる地域はほとんど存在しないということが分かった。従って、津波防災を行う上ではケース1を想定しておけばよい。

次に、本研究で検討対象とした3つのシナリオについて図-4に津波高分布を示す。各シナリオを想定することでどの程度津波高の変化が生じているのか分かり易くするため、A-Andoとそれぞれのシナリオを想定することによる津波高の増分を百分率で表した。先にも述べたが、波源不均一性を考慮することで、最も高い津波高が発生するシナリオは地域ごとに存在することが示されている。津波防災を考える上では、地域ごとに最悪の事態を想定しておく必要がある。

一方、四国南部のように、どのシナリオを想定しても津波高を低く見積もることになる地域がある。これは津波初期波形の最大鉛直変位が発生している地点での水深が大きく影響していると考えられる。つまり、A-Andoに比べ各シナリオでの最大鉛直変位は水深の浅い地点で生じているため、四国南部の沿岸部に来襲する津波高はA-Andoの方が高くなると考えられる。

7. おわりに

本研究では、アスベリティに起因した波源不均一性の影響を評価した上で、防災上その結果をどのように活用するべきか検討した。その結果得られた成果を以下に示

す。

- アスベリティに起因する波源不均一性を考慮するための簡易手法を開発した。ここでは、モデル作成にあたり推本モデルを参照した。推本モデルの特徴を段階的に取り入れた3つのモデルを作成し、各モデルを評価した結果、推本モデルの規模とアスベリティを考慮したmodel-Bを用いるべきであるという結論を得た。ただし、傾斜角に関しては20°の場合と25°の場合の両方を検討しておく必要がある。どちらのモデルを用いた方が危険になるという結論が得られなかったからである。

- 想定し得るシナリオによって、各地域にとって最も高くなる津波高が変わってくるということが分かった。最悪の事態を想定しておくべきであるという防災の原則に則り、各地域が想定しておくべきシナリオは表-2のようにまとめられる。

また、今後の課題として、推本が想定しているアスベリティ以外についても検討する必要があると考えられる。

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

- 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報, Vol. 56, pp. 713-730.
- 地震調査研究推進本部地震調査委員会 (2001): 南海トラフの地震を想定した強震動評価手法について (中間報告), 平成13年12月7日.
- 高橋智幸・首藤伸夫・今村文彦 (1994): 津波を説明するための北海道南西沖地震断層モデル, 海岸工学論文集, 第41巻, pp. 251-255.
- Ando, M. (1975): Source mechanisms and tectonic significance of historical earthquakes along the Nankai Trough, Tectonophysics, Vol. 27, pp. 119-140.
- 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.