

海域活断層に想定される津波の波源モデル設定法

木場正信* ・安中正**・稲垣和男***
田中寛好****・曾良岡 宏*****

1. 緒 論

海岸域の津波防災等の検討に際し、津波の数値計算が用いられることが多い。その際、既往津波に加え、将来発生する津波を想定した計算の実施が近年試みられているが、どのような波源を想定するかが防災上重要な問題である。なかでも、高い安全性が要求される沿岸施設等の設計に際しては、プレート境界部に発生する津波だけでなく、海域活断層による津波を合理的に予測しておく必要がある。

太平洋側のプレート境界部等、過去に津波を伴う大地震が発生している海域では、既往地震を説明する断層パラメータが多数提案されており、これらをもとに、将来起こり得る津波（想定津波）の発生様式を推定することが可能である。一方、活断層に想定する津波の断層モデル設定法に関する既往研究例はほとんどない。一般に活断層の活動間隔は数千年と長いと、個々の活断層について過去の地震や津波の発生様式を参考とすることはできない。しかし、海域活断層に関して通常得られる情報は位置、走向、長さにすぎないため、他のパラメータを適切に想定する方法が必要である。そこで本検討では、断層モデル設定上の不確定性を低減し合理的な設定方法を構築するため、海域活断層に想定する津波の断層モデルの設定方法を提案する。

さらに、同じ考え方に基づけば、近年大規模な津波が発生している日本海東縁部に適用可能な想定津波の断層モデル設定法が構築できることを示す。

2. 海域活断層に想定する津波の断層パラメータ設定法の提案

2.1 検討方針

海域活断層の位置・走向・長さの情報が得られている場合について、津波の数値シミュレーションに必要な静的断層パラメータを推定する方法を検討する。

沿岸から遠く離れた海洋地殻は比較的安定で、過去にほとんど大地震を発生していない。一方、比較的沿岸に近い海域では、過去に大地震を含む地震活動が報告されており、今後も活動する可能性がある。本検討では、沿岸に影響を与える津波の発生原因として、比較的沿岸に近い海域の活断層に発生する上部地殻内地震を対象とする。近海の実地では、地殻構造が陸域と似た構造を持ち、震源分布や応力場も陸域と連続していると考えられるため、内陸地震に関する知見やデータを活用することにより、想定津波の波源モデルを設定できるものとする。

2.2 内陸地殻内地震の発生様式を考慮した断層パラメータ設定法

a) 断層幅

地震の規模とともに断層面の幅は増大するが、場所により一定の幅で頭打ちとなることが指摘されている。浅い地震の破壊領域は「地震発生層 (seismogenic layer)」に限定され、断層幅の頭打ち前後で断層パラメータのスケール則が変化する。

破壊が地震発生層厚さ H_e の全層にわたっているとき、断層幅 W は傾斜角 δ に応じて一定の値をとり、次式で表せる。

$$W = H_e / \sin \delta \cdots \cdots \cdots (1)$$

伊藤ら (1995) による震源深さ分布の分析によれば、近畿地方北部海域における地震発生層厚さは 16 km 前後である。また、福岡管区気象台 (1998) に示された震源分布図によれば、中国・四国・九州地方の地殻内地震の震源は最大 15~20 km までの深さに集中している。

b) 断層パラメータのスケール則

武村 (1998) は、1885~1995 年に日本内陸で発生したマグニチュード 4~8 の地殻内地震の断層モデルを分析し、断層幅の上限を考慮した各種パラメータ間の関係式を導いている。本検討では、それらのうち、断層長さや地震規模の関係を表す以下の関係式を適用する。

i) 断層幅が上限に達しているとき

$$\log L(\text{km}) = 0.75 M_w - 3.77, L \propto D, W = \text{const.} \cdots \cdots (2)$$

ii) 断層幅が上限に達していないとき

$$W = 2/3 L, L \propto W \propto D \cdots \cdots (3)$$

* 工修 (株)三菱総合研究所 科学技術研究本部
** 正会員 理修 東電設計(株) 地震技術部
*** (株)ユニック 環境水理解析研究室
**** 正会員 工博 (財)電力中央研究所 水理部
***** 正会員 工修 東京電力(株) 原子力技術部土木調査グループ

ここに、 L は断層長さ、 D はすべり量である。また、 M_w はモーメント・マグニチュードで、以下の関係により断層パラメータと結びつけられる。

$$\log M_0(\text{N}\cdot\text{m})=1.5M_w+9.1 \quad (4)$$

$$D=M_0/\mu LW \quad (5)$$

ここに、 μ は剛性率である。

断層長さや地震発生層厚さが与えられた場合、断層幅が上限に達しているとき式(1)、(2)、(4)、(5)を、上限以下のとき式(3)、(4)、(5)を適用し、両領域の関係が連続的に繋がるとすれば、断層幅及びすべり量が算定できる。

c) 剛性率

媒質の剛性率 μ 、媒質密度 ρ 及びS波速度 V_s の間には、以下の理論的關係がある。

$$\mu=\rho V_s^2 \quad (6)$$

上部地殻の構造に関する既往研究をもとに ρ 及び V_s を見積もれば、西南日本～日本海東縁部の浅い地震に関し、 μ は 3.5×10^{10} (N/m²)程度が妥当と考えられる。

d) 傾斜角

気象庁地震月報に記載された発震機構解を用い、内陸地震の傾斜角について検討した。1973年から1998年8月に近畿～九州の西南日本内陸部で発生した、気象庁マグニチュード5.0以上、震源深さ20 km以下の地震34例(解析時点で気象庁データが未整備であった1995年11月～1997年9月を除く)を抽出した。

余震分布や震央付近の活断層の走向に基づき、2つの節面をもつダブルカップル解から、31例の破壊面を特定した。傾斜角の頻度分布は図-1のようであり、概ね高角(45～90°)で発生している。

e) すべり角

すべり角は、発震機構の原理に基づき、活断層周辺の応力場と走向・傾斜角から幾何学的に推定できる。主圧力軸(P軸)と主張力軸(T軸)は2枚の節面から45°の傾きをもち、スリップベクトルは補助面(実際の断層面でない節面)の法線方向に一致する。

応力場は、既往地震の発震機構の分析や日本各地の広域応力場を示した既往研究(例えば塚原, 1999)より得ることができる。

2.3 海域活断層に対する断層パラメータ設定法のまとめ

a) 断層パラメータ設定手順

2.2に述べた断層パラメータ設定法のフローを図-2に示す。浅い地震を想定して断層上縁深さは0としている。

b) 断層パラメータ設定法の評価

内陸活断層の地震に対し、従来耐震設計等に用いられてきた式として、松田(1975)による次式がある。

$$\log D(\text{m})=\log L(\text{km})-1.1 \quad (7)$$

いろいろな断層長さに対し、提案した方法を用いて算出したすべり量を、式(7)のすべり量と比較したのが表-1である。提案した方法によるすべり量は傾斜角に応じて変化し、式(7)を用いた推定値を包含する。このことから、提案した方法は、松田(1975)の関係をより詳細にみたものと解釈できる。

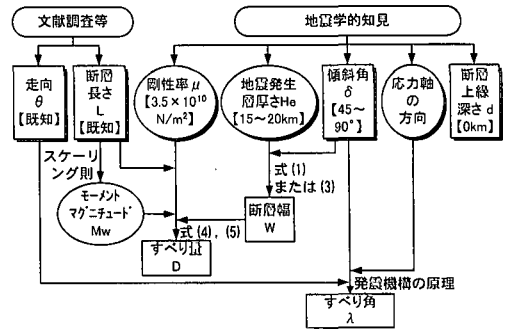


図-2 海域活断層に想定する津波の断層パラメータ設定フロー

表-1 活断層のすべり量推定値の比較

断層長さ (km)	すべり量 (m)			
	本検討			松田 (1975)
	δ=45°	δ=67.5°	δ=90°	
15	0.88	1.15	1.25	1.19
20	1.18	1.54	1.66	1.59
25	1.47	1.92	2.08	1.99
30	1.76	2.30	2.49	2.38
35	2.06	2.69	2.91	2.78
40	2.35	3.07	3.33	3.18
45	2.65	3.46	3.74	3.57
50	2.94	3.84	4.16	3.97
55	3.23	4.22	4.57	4.37
60	3.53	4.61	4.99	4.77

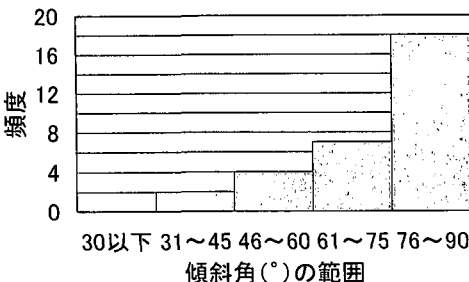


図-1 西南日本に発生した浅い内陸地震の傾斜角の頻度分布

3. 日本海東縁部への適用可能性の検討

3.1 検討方針

太平洋側のように明確なプレート境界面が形成されていない日本海東縁部では、地震の発生様式に関して海域活断層との共通点が多いと考えられる。そこで本章では、前章で提案したパラメータ設定法を日本海東縁部に応用する方法を検討する。日本海東縁部では既往津波の明確な痕跡高が得られているため、これにより、既往津波高と想定津波高との比較の観点からパラメータ設定法の妥当性を検証することが可能となる。

日本海東縁部では、マグニチュード7.5クラス以上の地震は、南北に連なる狭い幅の領域で発生している。こうした大地震の発生領域では、活断層の位置から予想される破壊領域と過去に発生した地震の震源域が一致しないことが多いため、海域活断層に想定する津波の予測手法をそのまま適用することは困難である。したがって、本章では、モーメントマグニチュードを先に与えた場合に、想定津波の各種断層パラメータを設定する方法につ

いて検討する。その際、既往地震の発震機構や既往津波の痕跡高を説明できる断層モデルを考慮する。

3.2 日本海東縁部の既往津波の断層モデル

日本海東縁部に発生した既往津波の断層モデルを表2に示す。これらは主に痕跡高を説明することを重視し、必要に応じて既往断層モデルを修正している。表中、モデル M_w は剛性率を 3.5×10^{10} (N/m²) として断層パラメータより算出したモーメントマグニチュードである。 K 及び κ は相田による適合度指標であり、いずれも本検討で実施した津波計算結果である。なお、1833年天保山形沖地震は、津波の再現性からは位置を特定できないため、2モデルを併記した。各モデルの位置を図-3に示す。

3.3 日本海東縁部に想定する津波の断層モデル設定方法

a) 断層幅

ハーバード CMT 解より、1976年1月～2000年1月に発生した M_w 5.0以上、深さ60 km以下の地震を抽出し、深さをプロットすると図-4のようになる。これらは概

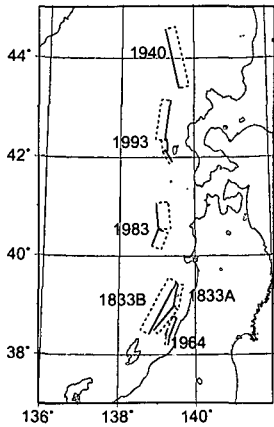


図-3 日本海東縁部の既往断層モデル位置

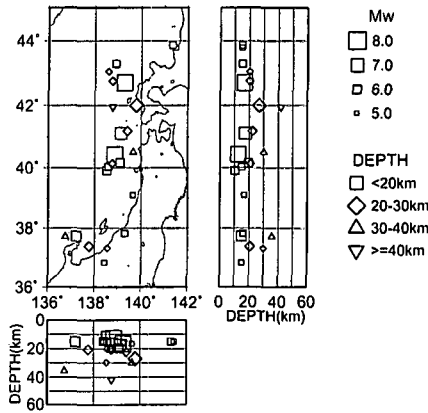
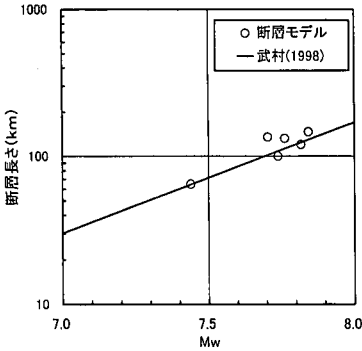


図-4 ハーバード CMT 解の深さ分布

表-2 日本海東縁部の既往津波の断層モデル

対象津波	モデル M_w	面積 (km ²)	L (km)	W (km)	D (m)	d (km)	θ (°)	δ (°)	λ (°)	データ 数	K	κ	備考
1833年天保山形沖(A)	7.82	1250	50	25	6.4	0	10	60	90	27	1.04	1.42	本検討 (相田, 1989を修正: 陸岸近く)
		1750	70	25	6.4	0	40	60	120				
1833年天保山形沖(B)	7.76	3960	132	30	4.0	0	208	45	90	27	1.17	1.28	本検討(沖合)
1940年根丹沖	7.70	4050	135	30	3.2	0	347	40	90	20	1.02	1.42	本検討(Satake, 1986を修正)
1964年新潟	7.35	900	45	20	3.3	1	202	60	90	検潮	—	—	Noguera & Ku. Abe (1992)
		300	20	15	3	1	189	60	90				
		813	32.5	25	5.3	0	200	60	90				
同上	7.51	813	32.5	25	2.9	0	200	60	90	検潮	—	—	加藤・安藤(1995)
		1200	40	30	7.6	0	22	40	90				
		1800	60	30	3.05	0	355	25	80				
1983年日本海中部	7.74	2250	90	25	5.71	10	188	35	80	218	1.12	1.46	相田(1984) Model-10
		650	26	25	4.00	5	175	60	105				
		458	30.5	15	12	5	150	60	105				
1993年北海道南西沖	7.84									249	0.96	1.51	高橋ら(1995) DCRC26モデル



図一5 日本海東縁部における既往津波の断層モデルの M_w と断層長さの関係

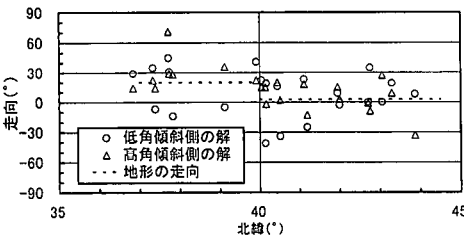
ね 15~20 km の浅い位置に集中しており、地震発生層厚さに上限があるとみられる。また、表-2 に示したように、断層幅が 30 km 以下のモデルで既往津波を説明できることから、地震発生層厚さは 15~20 km 程度と考えられる。

b) 断層パラメータのスケーリング則

表-2 の各モデルを、長さ合計・面積・モーメントマグニチュードが保存するよう 1 枚断層に換算した。さらに、新潟地震については 2 モデルの平均をとった。このとき M_w と断層長さの関係は図-5 のようになり、式 (2) の武村 (1998) の関係を日本海東縁部にも適用できることがわかった。

c) 傾斜角・走向・すべり角

表-2 に示したように，既往津波の断層モデルの傾斜



図一6 ハーバード CMT 解による日本海東縁部の地震の走向と地形の関係

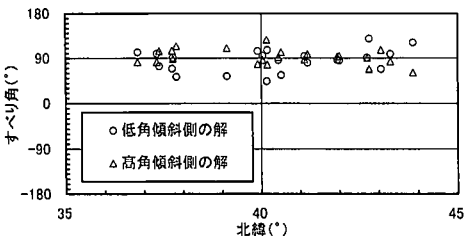


図-7 ハーバード CMT 解による日本海東縁部の地震のすべり角

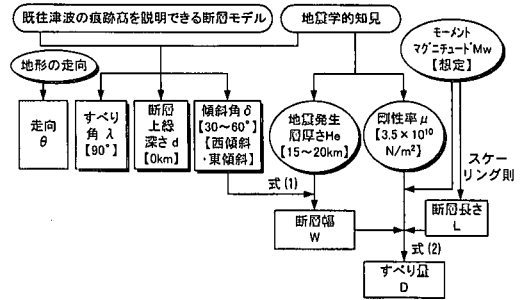


図-8 日本海東縁部に想定する津波の断層パラメータ設定フロー

角は概ね 30° ~ 60° の範囲であり、想定津波にもこれが適用できるものと考えられる。さらに、日本海東縁部では既往地震の断層傾斜方向が一定でないため、想定津波では西傾斜・東傾斜の双方を考慮する必要がある。

図-6 は、前述のハーバード CMT 解より得た走向をプロットしたものである。「地形の走向」は、活断層の走向を併せて考慮した等水深線の向きの近似的値であり、発震機構解はこれを中心に分布している。

表-2より既往津波の断層モデルのすべり角はいずれも90度に近く、図-7に示した発震機構解のすべり角データもこれを裏付けている。

3.4 日本海東縁部に想定する津波の断層パラメータ設定法のまとめ

3.3の検討から、断層パラメータ設定法のフローとして図-8が得られる。走向は、地形の走向を基本とすればよい。

4. 想定津波の試算

3章に示した方法を用いて想定津波の断層パラメータ

表-3 試計算に用いた想定津波のパラメータ

断層長さ (km)	傾斜角 (°)	断層幅 (km)	すべり量 (m)	上縁深さ (km)	すべり角 (°)
131.1	30	30.0	5.45	0	90
	60	17.3	9.44		

表-4 試計算に用いた計算モデルの概要

基礎方程式	非線形長波理論
移動境界	海底露出を考慮する 陸上遡上は考慮しない
計算領域	日本海全域
空間格子間隔	3200 m (沖合)~200 m (沿岸) 順次 1/2 サイズに細分化
時間格子間隔	1.5 秒
マンニングの粗度係数	0.03 ($\text{m}^{-1/3}\text{s}$)

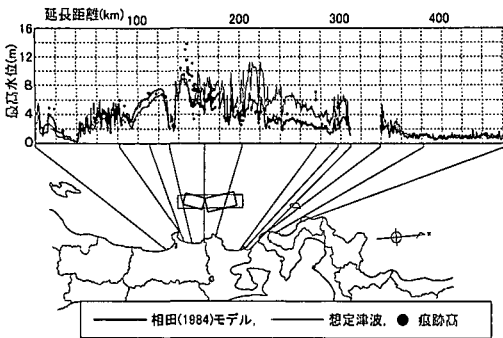


図-9 日本海中部地震の既往モデルと想定津波の比較

を表-3のように設定した。津波計算モデルの概要を表-4に示す。

まず、1983年日本海中部地震津波の既往津波計算、及びほぼ同位置に傾斜角 30° の想定津波波源を設定した津波計算を実施した。このとき、想定津波のすべり量は相田(1984)による南北2枚断層モデルの中間的な値となっている。計算結果を図-9に示す。想定津波高は痕跡高及び再現計算結果の分布をよく再現している。

次に、将来発生し得る地震の発生位置や傾斜角に含まれる不確実性を、設計等の基となる津波の想定高さに反映するための方策として、波源設定を合理的範囲内で変化させた複数の津波計算を実施した。傾斜角を 30° , 60° の両方とし、図-10のように南北15カ所に波源位置をずらして設定した。各位置では、さらに東西4カ所に西傾斜・東傾斜を考慮した波源を置いている。このとき、全120ケースの計算津波高の包絡線は図-10のようになり、概ね痕跡高を上回る。

5. 結 論

本検討で得られた結論は以下のとおりである。

(1) 活断層に発生する地震の特性を踏まえ、海域活断層に想定する津波の断層モデル設定方法を構築できた。

(2) 同様の考え方に基づき、日本海東縁部に想定する津波の断層モデル設定方法を提案することができた。

(3) 日本海中部地震津波を例に、想定津波の断層モデルにより、既往津波の痕跡高分布が概ね再現できることを示した。

(4) 位置や傾斜角など、不確実性のあるパラメータを変動させることにより、防災に資する津波想定が行えることが示唆された。

将来的には、地震や津波に関する研究の進展やデータの蓄積に伴い、より不確実性を排したモデル設定が可能

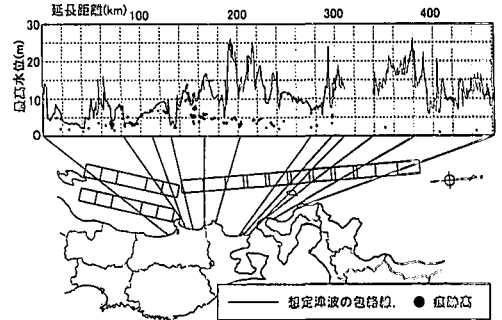


図-10 日本海中部地震の痕跡高と複数位置に波源を移動した想定津波高の包絡線の比較

になっていくものと考えられる。

謝辞：本研究は、電力9社と日本原子力発電(株)による電力共通研究の一部として実施した。

研究を進めるにあたり、土木学会原子力土木委員会津波評価部会(主査：首藤伸夫岩手県立大学教授)の委員の方々から貴重なご指導をいただきました。ここに厚く謝意を表します。

参 考 文 献

- 相田 勇 (1984): 1983年日本海中部地震津波の波源数値モデル, 東京大学地震研究所彙報, Vol. 59, pp. 93-104, 1984.
- 相田 勇 (1989): 第9章付 天保四年の庄内沖地震による津波に関する数値実験, 萩原尊禮編著, 続古地震, 東京大学出版会, pp. 204-214.
- 伊藤 潔・梅田康宏・大見士朗・大東明子・松村一男 (1995): 地震発生層の厚さ変化と1995年兵庫県南部地震, 日本地震学会講演予稿集, No. 2, A79.
- 加藤哲朗・安藤雅孝 (1995): 1964年新潟地震の断層モデルの再考, 日本地震学会講演予稿集, No. 2, B37.
- 高橋武之・高橋智幸・首藤伸夫 (1995): 津波数値計算による北海道南西沖地震の検討, 地球惑星科学関連学会1995年合同大会予稿集, F31-06.
- 武村雅之 (1998): 日本列島における地殻内地震のスケーリング則—地震断層の影響および地震被害との関連—, 地震第2輯, 第51巻, pp. 211-228.
- 塚原弘昭 (1999): 日本列島の現在の地震応力場, 月刊地球, Vol. 21, No. 10, pp. 660-666.
- 福岡管区気象台 (1998): 九州・山口県の地震・津波, 福岡管区気象台要報, 第53号, 435 p.
- 松田時彦 (1975): 活断層から発生する地震の規模と周期について, 地震第2輯, 第28巻, pp. 269-283.
- Noguera, E.・阿部邦昭 (1992): Numerical experiment of the 1964 Niigata earthquake tsunami on a fine grid space, 地震学会講演予稿集, No. 1, p. 81.
- Satake, K. (1986): Re-examination of the 1940 Shakotan-oki earthquake and the fault parameters of the earthquakes along the eastern margin of the Japan Sea, Physics of the Earth and Planetary Interiors, Vol. 43, pp. 137-147.