

## 数値シミュレーションによる1741年（寛保元年）津波の 波源モデルに関する考察

伴 一彦\*・高岡 一章\*・山木 滋\*\*

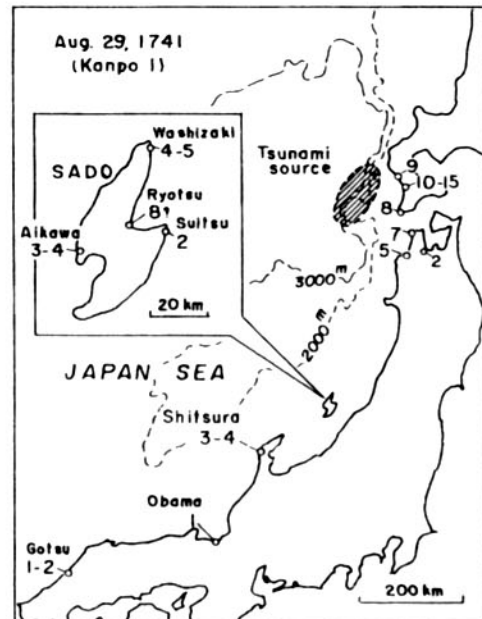
### 1. はじめに

1741年8月29日（寛保元年7月19日）、北海道渡島半島沿岸を襲った津波は、日本海沿岸の各地に大きな被害をもたらした。津波の高さは渡島半島西岸で10m以上に達し〔図-1〕、これらの地域で1,467人の死者が記録されている〔羽鳥, 1984〕。この津波は、1983年（昭和58年）日本海中部地震津波、1993年（平成5年）北海道南西沖地震津波と並んで、日本海で発生した最大級の規模の津波であるが、津波の発生原因に関しては、渡島大島の火山噴火とほぼ同時に発生していることと、地震動に関する明確な記録が残されていないことから、地震によるものか、火山噴火に伴うものか、定説がないのが現状である。

これまでの研究では、地震に伴う海底地殻変動の観点から検討したのものとして、羽鳥・片山（1977）、羽鳥（1984）、建設省（1985）などがある。羽鳥・片山（1977）、羽鳥（1984）は、津波の波源域に関する検討を行い、波源域が相当の広がりを持たないと沿岸での津波高を説明できないとして、津波の発生原因が地震に伴う海底地殻変動によることを示唆している。建設省（1985）は、断層モデルを用いた数値シミュレーションを実施し、水深200mの等深線上における津波の振幅を基に羽鳥（1984）による痕跡高と比較して、地震断層モデルによってもこの津波を説明できるとしている。

一方、火山噴火に伴う山体崩壊の観点から、崩壊土砂等が海面に突入することにより

津波が発生したと考えて数値シミュレーションを実施したものとして、相田（1984）、松本・他（1998）、佐竹・加藤（2000）がある。相田（1984）は、北海道防災会議（1977）により推定された渡島大島崩壊前の海面上の推定地形を考慮した数値シミュレーションを行い、計算値は渡島半島沿岸の痕跡高の1/3~1/4にしかならないとしている。松本・他（1998）は、土石流のような発生過程を考え、二層流モデルを用いた数値シミュレーションを行った結果、計算値は痕跡高を下回るものの相田（1984）よりは良好な結果が得られたとしている。佐竹・加藤（2000）は、近年の詳細な海底地形調査によって得られた渡島大島周辺の海底地形を考慮し、大規模な山体崩壊が海



数字は古記録から推定される津波の高さ(単位: m)

(羽鳥(1984)を引用)

\*電源開発株式会社原子力部土木計画グループ  
\*\*有限会社シーマス

図-1 1741年津波における各地の津波の高さ

底まで達していたと考えて数値シミュレーションを行い、日本海全域での津波高の分布を説明できるとしている。

本稿では、1741年津波による北海道・青森県沿岸の痕跡高の分布を再現する目的で実施した、断層モデルを波源とした数値シミュレーション結果について述べる。本検討では、以下の3点を勘案し、津波波源として断層モデルを用い、津波遡上計算による津波高と痕跡高とを直接比較することにより、津波高の再現を試みた。

1) 地震断層モデルを用いた建設省 (1985) は、水深200mの等深線上における津波の振幅に係数を乗じて痕跡高と間接的な比較をしているが、津波高の計算値と痕跡高との直接の比較は行っていない。

2) 近年、今村・松本 (1998) などにより渡島半島沿岸における精度の高い痕跡高の記録が整理された。

3) 自治体などによる津波高の検討には、一般に断層モデルを波源とした数値シミュレーションが用いられている。

## 2. 検討手法

### 2.1 計算領域

計算領域は、図-2に示すように、日本海のほぼ全域を対象とした範囲とし、直交座標系を用いた。計算格子は沖合で5kmの格子から2.5km(=5km/2)、833m(=2.5km/3)と細分化し、沿岸全体では278m(=2.5km/9)、主な海岸では93m(=2.5km/27)の計算格子を設定した。

### 2.2 基礎方程式と計算条件

計算の方法は、後藤・小川 (1982) とほぼ同様の方法であり、海底から水面までを鉛直方向に積分した形の浅水理論 (非線形長波の式) を用いたものである。海底摩擦はマンニグの粗度係数で表している。

連続式

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{\partial M}{\partial x} + \frac{\partial N}{\partial y} = 0$$

運動方程式

$$\begin{aligned} \frac{\partial M}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{M^2}{D} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \frac{MN}{D} \right) \\ + gD \frac{\partial \eta}{\partial x} + \frac{gn^2}{D^{7/3}} M \sqrt{M^2 + N^2} = 0 \\ \frac{\partial N}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{MN}{D} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \frac{N^2}{D} \right) \\ + gD \frac{\partial \eta}{\partial y} + \frac{gn^2}{D^{7/3}} N \sqrt{M^2 + N^2} = 0 \end{aligned}$$

ここに、 $x, y$ : 水平座標,  $h$ : 静水深,  $D$ : 全水深 (= 静水深 + 水位),  $\eta$ : 静水面からの水位,  $n$ : Manningの粗度係数,  $M, N$ :  $x, y$  方向の線流量, である。ただし、深海域では首藤 (1976) による検討をもとに、非線形項を無視した線形長波の式を用いている。

陸側境界については、278mよりも粗い格子では鉛直壁の条件 (ただし、海底の露出は考慮) とし、93m格子の領域では岩崎・真野 (1979) の条件により陸側への遡上を考慮している。93m格子の領域では、1741年津波発生当時の地形条件を極力再現することにより水深・標高データを作成している。なお、計算時間間隔は0.75秒である。

### 2.3 再現性の検証方法

計算津波高と比較する痕跡高の記録としては、基本的に今村・松本 (1998) の値を用いることとし、都司・他 (1996) または羽鳥 (1984) に痕跡高が示されている場合にはこれらの平均値を用いた。なお、青森県の津軽半島のように、今村・松本 (1998) に痕跡高が示されていない地点は羽鳥 (1984) の値を用いることとした。再現性の検証に用いた痕跡高の平均値 (地点数 $n=33$ ) を表-1に、痕跡高が記録された位置を図-3に示す。

再現性評価のための指標としては、相田 (1986) による痕跡高と計算津波高との比から求める幾何平均値 $K$ と、バラツキを表す指標 $\kappa$ を用いた。

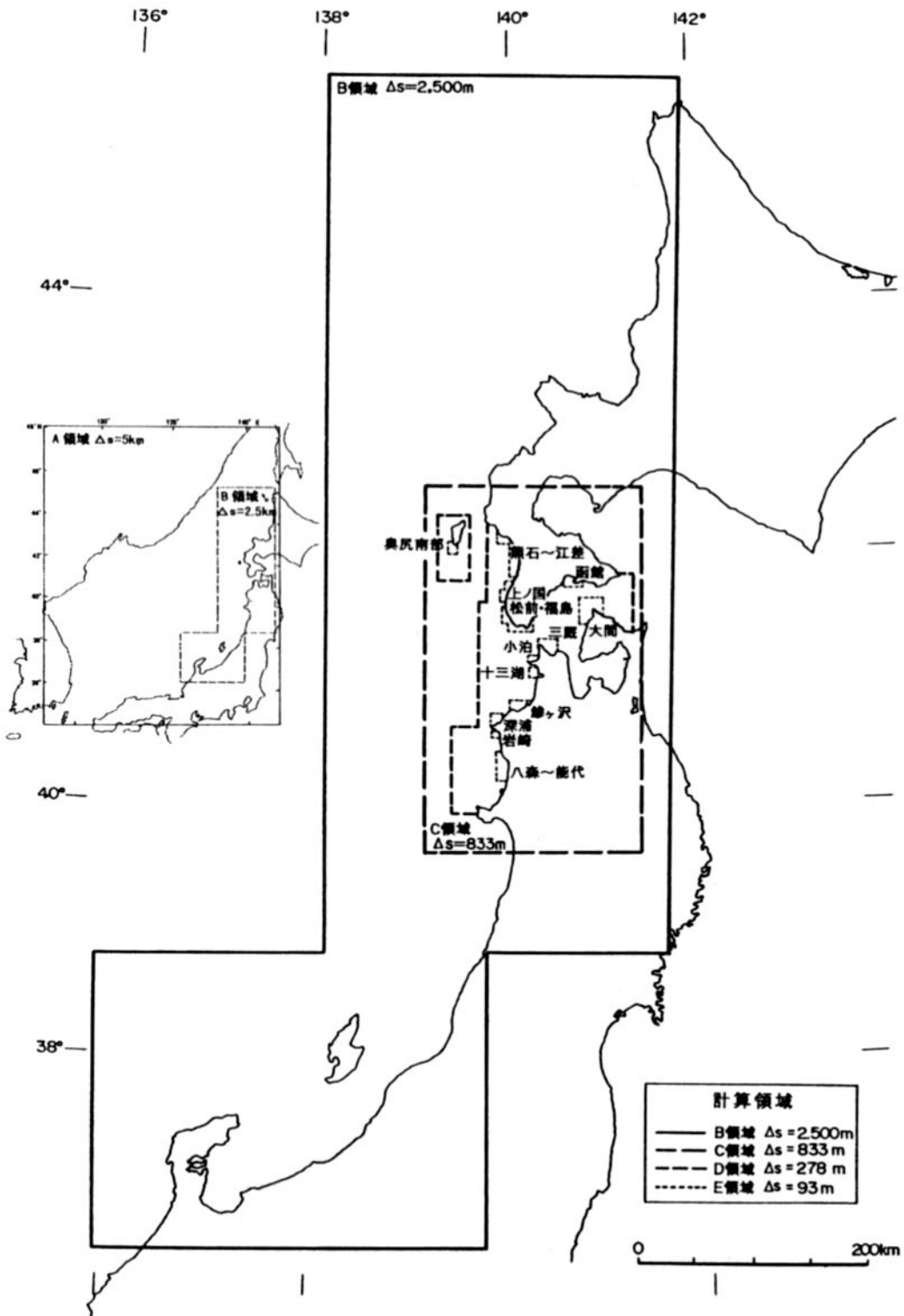


図-2 計算領域

表-1 痕跡高一覧

地点, 地域名		痕跡高 (m)			
		今村・松本 (1998)	都司・他 <sup>※1)</sup> (1996)	羽鳥 <sup>※2)</sup> (1984)	平均値 R
北海道側	鳴神	11.2	10.5		10.85
	熊石	11.5	13	9	11.17
	相沼	11.1	12	11	11.37
	豊浜	10.3			10.30
	栄浜	4.0			4.00
	鳥山	6.2			6.20
	乙部	8.0	7.8	12.5	9.43
	伏木戸	10.5	8		9.25
	泊	7.3	10		8.65
	江差	2.4	4	7	4.47
	江差南浜町	5.1	6		5.55
	原歌	8.3	10		9.15
	木ノ子	7.4	7		7.20
	扇石	8.2	8		8.10
	汐吹	9.6	11	9	9.87
	石崎	11.5			11.50
	小砂子			12	12.00
	原口	9.0			9.00
	江良	14.5		10	12.25
	清部	11.1			11.10
茂草	7.4	10.6	7	8.33	
静浦	6.9	7		6.95	
赤神	5.1	5		5.05	
館浜	4.8	6.6		5.70	
福山	5.8	5.8	8	6.53	
吉岡	3.6	2		2.80	
福島	6.3	3		4.65	
青森県側	油川			2	2.00
	三厩			5	5.00
	小泊			7	7.00
	十三			5	5.00
	鯉ヶ沢			4	4.00
	金ヶ沢			5	5.00

※1) 都司・他(1996)の痕跡高は、今村・松本(1998)による都司Iの値を示した。

※2) 羽鳥(1984)で、痕跡高に幅が示されている場合は、中央値を示した。

### 3. 検討結果

検討に用いた5ケースの波源モデルの位置を図-4に、断層パラメータを表-2に示す。また、各ケースの数値シミュレーション結果として、痕跡高と計算津波高との比較を図-5に、K値及び $\kappa$ 値の算出結果を表-3に示す。

波源モデルとして、まず、建設省(1985)

に示されたモデル(ケース①)と、農林水産省・他(1996)に示されている日本海東縁部における震源断層の相以則を基に断層パラメータを設定し、断層を奥尻海脚西側から西津軽海盆西側にかけて連続する急傾斜地形に沿った位置に置いたモデル(ケース②)を用いて検討した。なお、ケース②の断層面の傾斜方向は東北東方向とした。ケース①の結果は、静浦より北方の渡島半島西岸における大

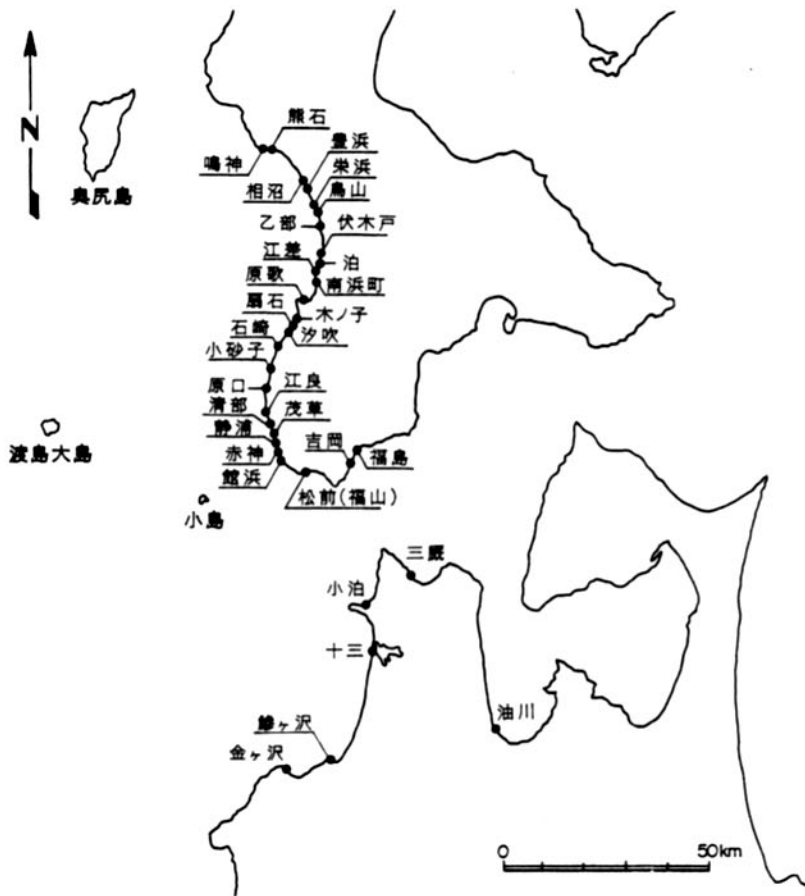


図-3 痕跡高の確認位置

半の地点では計算津波高が痕跡高を下回っており、 $K=1.28$ 、 $\kappa=1.51$ でバラツキが大きい。また、ケース②も、全ての地点で計算津波高が痕跡高を下回り、 $K=2.37$ 、 $\kappa=1.56$ でバラツキが大きい結果となった。

これら既存の波源モデルを用いた数値シミュレーションでは良好な再現性が得られなかったことから、次のように断層パラメータを修正した上で数値シミュレーションを順次実施し、痕跡高を良好に再現する波源モデルを検討した。

ケース①、ケース②では断層の長さ・幅が大きいことから津波のエネルギーが分散したため、計算津波高が全般に低くなったと考えられることから、ケース③として、ケース②の断層長さと同幅を各々1/2とすると共にすべり

量を4倍とする波源モデルを設定（地震モーメント $M_0$ が一定となるように考慮）した。断層の中心位置はケース②と同様の位置とし、断層面の傾斜は東北東方向とした。計算津波高は、吉岡から小砂子にかけては痕跡高を上回り、豊浜より北方においては痕跡高を下回っているものの、全体的な沿岸の津波高分布は痕跡高と似た傾向を示している。 $K=1.01$ で平均的な津波高はほぼ一致したが、 $\kappa=1.57$ でバラツキが大きい結果である。

更にケース④として、ケース③で計算津波高が低かった豊浜より北方に津波が集中するように、ケース③を北方へ移動した奥尻海盆の西側に波源モデルを設定した。断層の長さ、幅、すべり量はケース③と同じであるが、断層面の傾斜は西方向とした。計算津波高は、

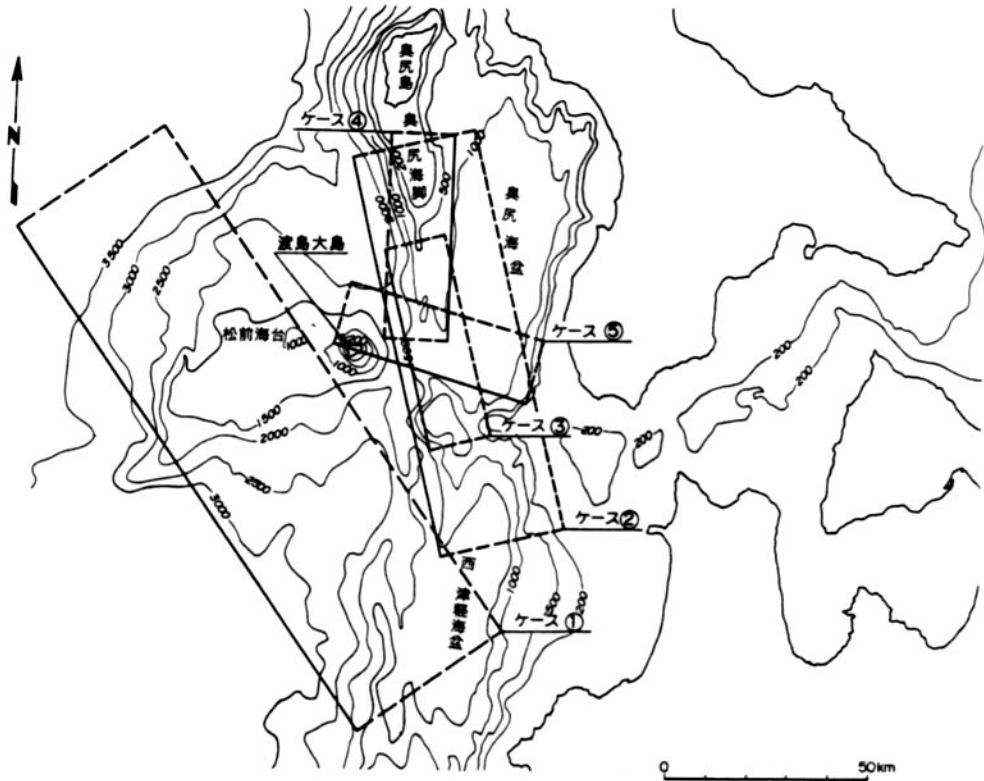


図-4 各検討ケースの波源モデルの位置

表-2 各検討ケースの断層パラメータ

検討ケース	長さ L (km)	幅 W (km)	すべり量 D (m)	走向 $\theta$ ( $^{\circ}$ )	傾斜角 $\delta$ ( $^{\circ}$ )	上縁深さ d (km)	すべり角 $\lambda$ ( $^{\circ}$ )
ケース①	150	50	6.6	324	30	2	90
ケース②	100	38	4.0	345	35	2	90
ケース③	50	19	16.0	345	35	2	90
ケース④	50	19	16.0	180	35	2	90
ケース⑤	50	19	16.0	285	35	2	90

豊浜より北方においては痕跡高とほぼ一致する傾向が見られるが、原口から伏木戸にかけては痕跡高をかなり上回っている。 $K=0.98$ で平均的な津波高はほぼ一致しているが、 $\kappa=1.65$ でバラツキが大きい結果である。

最後にケース⑤として、津波のエネルギーが集中する方向を変える目的（ケース③及び

ケース④の結果を勘案した）で、ケース③の断層の走向を反時計回りに $60^{\circ}$ 回転させた波源モデルを設定した。なお、断層の中心位置、長さ、幅、すべり量はケース③と同じである。計算津波高は全体的に痕跡高とほぼ一致しており、 $K=0.98$ 、 $\kappa=1.39$ でバラツキも小さいことから、良好な再現性が確認できた。

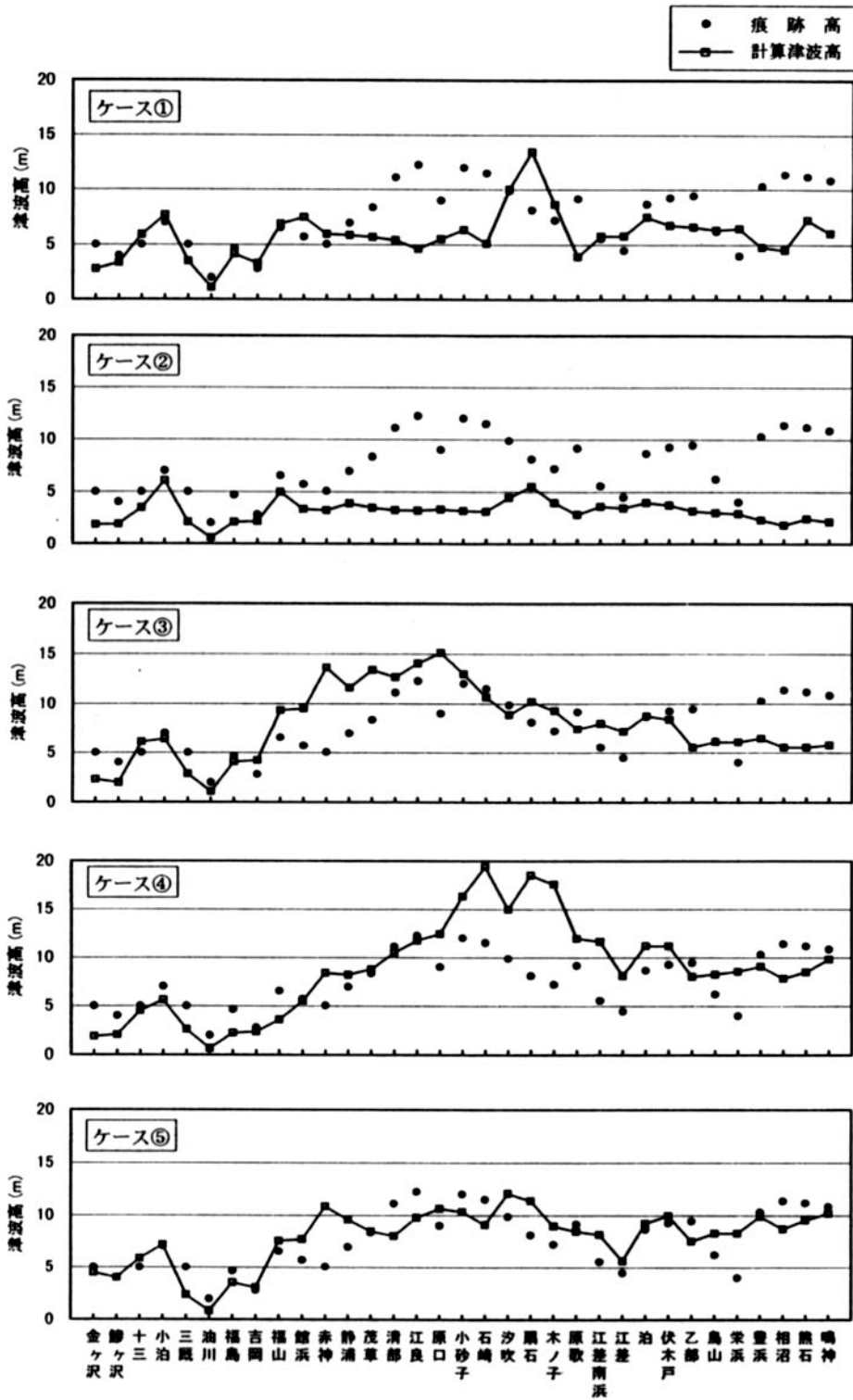


図-5 各検討ケースにおける痕跡高と計算津波高との比較

表-3 各ケースの検討結果

地点名	痕跡高 R	計算津波高 (Ci) , 及び痕跡高 (R) と計算津波高 (Ci) との比										
		ケース①		ケース②		ケース③		ケース④		ケース⑤		
		C1 (m)	R/C1	C2 (m)	R/C2	C3 (m)	R/C3	C4 (m)	R/C4	C5 (m)	R/C5	
北海道側	鳴神	10.85	6.02	1.80	2.11	5.14	5.76	1.88	9.80	1.11	10.18	1.07
	熊石	11.17	7.23	1.54	2.41	4.63	5.54	2.02	8.48	1.32	9.52	1.17
	相沼	11.37	4.49	2.53	1.79	6.35	5.54	2.05	7.83	1.45	8.69	1.31
	豊浜	10.30	4.76	2.16	2.30	4.48	6.46	1.59	9.06	1.14	9.89	1.04
	栄浜	4.00	6.45	0.62	2.90	1.38	6.07	0.66	8.53	0.47	8.28	0.48
	鳥山	6.20	6.33	0.98	2.99	2.07	6.09	1.02	8.25	0.75	8.27	0.75
	乙部	9.43	6.59	1.43	3.15	2.99	5.53	1.71	8.01	1.18	7.51	1.26
	伏木戸	9.25	6.75	1.37	3.71	2.49	8.40	1.10	11.15	0.83	9.94	0.93
	泊	8.65	7.47	1.16	3.96	2.18	8.73	0.99	11.18	0.77	9.23	0.94
	江差	4.47	5.78	0.77	3.43	1.30	7.15	0.62	8.10	0.55	5.62	0.79
	江差南浜町	5.55	5.76	0.96	3.58	1.55	7.98	0.70	11.60	0.48	8.15	0.68
	原歌	9.15	3.90	2.35	2.81	3.26	7.41	1.23	11.95	0.77	8.45	1.08
	木ノ子	7.20	8.62	0.84	3.95	1.82	9.27	0.78	17.59	0.41	8.96	0.80
	扇石	8.10	13.45	0.60	5.47	1.48	10.19	0.79	18.53	0.44	11.37	0.71
	汐吹	9.87	10.02	0.98	4.43	2.23	8.86	1.11	14.94	0.66	12.08	0.82
	石崎	11.50	5.11	2.25	3.09	3.72	10.65	1.08	19.41	0.59	9.08	1.27
	小砂子	12.00	6.32	1.90	3.16	3.80	12.98	0.92	16.33	0.73	10.31	1.16
	原口	9.00	5.50	1.64	3.30	2.73	15.12	0.60	12.43	0.72	10.62	0.85
	江良	12.25	4.63	2.65	3.19	3.84	14.04	0.87	11.72	1.05	9.78	1.25
	清部	11.10	5.39	2.06	3.22	3.45	12.65	0.88	10.47	1.06	8.02	1.38
	茂草	8.33	5.67	1.47	3.46	2.41	13.37	0.62	8.78	0.95	8.46	0.99
	静浦	6.95	5.85	1.19	3.87	1.80	11.58	0.60	8.20	0.85	9.57	0.73
	赤神	5.05	5.94	0.85	3.21	1.57	13.61	0.37	8.40	0.60	10.84	0.47
館浜	5.70	7.46	0.76	3.32	1.72	9.47	0.60	5.51	1.03	7.68	0.74	
福山	6.53	6.88	0.95	4.95	1.32	9.32	0.70	3.61	1.81	7.54	0.87	
吉岡	2.80	3.30	0.85	2.14	1.31	4.22	0.66	2.36	1.19	3.07	0.91	
福島	4.65	4.14	1.12	2.07	2.25	4.06	1.15	2.25	2.07	3.52	1.32	
青森県側	油川	2.00	1.10	1.82	0.58	3.45	1.09	1.83	0.67	2.99	0.86	2.33
	三厩	5.00	3.48	1.44	2.08	2.40	2.85	1.75	2.61	1.92	2.36	2.12
	小泊	7.00	7.65	0.92	6.03	1.16	6.37	1.10	5.60	1.25	7.16	0.98
	十三	5.00	5.89	0.85	3.46	1.45	6.10	0.82	4.54	1.10	5.85	0.85
	鯉ヶ沢	4.00	3.34	1.20	1.87	2.14	1.97	2.03	2.06	1.94	3.99	1.00
	金ヶ沢	5.00	2.77	1.81	1.82	2.75	2.30	2.17	1.89	2.65	4.47	1.12
地点数 n=33		K= 1.28 κ = 1.51	K= 2.37 κ = 1.56	K= 1.01 κ = 1.57	K= 0.98 κ = 1.65	K= 0.98 κ = 1.39						

なお、ケース②～ケース④では、断層の走向をほぼ南北方向に、断層面の傾斜を東側傾斜または西側傾斜に設定しているが、これは日本海東縁部の活断層の走向がほぼ南北方向であること及び海底地形を考慮したものである。更に、日本海東縁部で発生した津波の断層モデル（1983年日本海中部地震津波のモデルD-2 [Satake, 1985], 1993年北海道南西沖地震津波のモデルDCRC-17a [高橋・他1994], 等）の走向がほぼ南北方向で、断層面の傾斜

が東傾斜、あるいは西側傾斜とされていることも併せて考慮した。

#### 4. 考察

1741年津波の痕跡高分布の特徴として、ピークが渡島大島に最も近い江良・石崎付近、及び渡島大島の北東側に位置する熊石・相沼付近に2つあることが挙げられる。しかし、先に述べた断層長さの大きなモデル（ケース



①) や、南北方向の走向を持つモデル(ケース②~④)では、この痕跡高分布の特徴をうまく再現できなかった。特に渡島大島の北東方に位置する熊石・相沼付近の痕跡高のピークを再現するためには、津波のエネルギーが大きくなる断層モデルの短軸方向をほぼ南北方向とするべきと考え、断層の走向をほぼ東西方向としたケース⑤を設定した。

ケース⑤の断層長さ、幅、すべり量の3つのパラメータは、痕跡高の再現性を考慮して、日本海東縁部における震源断層の相似則〔農林水産省・他、1996〕を基に設定したケース②の断層長さ・幅を小さく(1/2倍)、すべり量を大きく(4倍)設定したものである。更に、波源域の大きさに関しても、羽鳥(1984)では波源域の長さを150km程度としているが、ケース⑤では断層長さ(L=50km)、幅(W=19km)ともに非常に小さい。また、ケース⑤の断層の走向、長さ、幅は、1983年日本海中部地震津波及び1993年北海道南西沖地震津波のような日本海東縁部で発生した津波の断層モデルとは整合していない。なお、ケース⑤の地震規模として、モーメント・マグニチュード( $M_w$ )は7.8程度(地盤剛性率 $\mu = 4.0 \times 10^{11}$  dyne/cm<sup>2</sup>として算出した)である。

一方、加藤(1997)は、渡島大島周辺海域の海底地質調査の結果から、渡島大島北方の斜面では、渡島大島陸上部の馬蹄型カルデラ壁から連続する崖が水深1,000m付近まで続き、さらにその下部には、山体崩壊堆積物から構成される斜面が扇状に広がっているとしている。更に、佐竹・加藤(2000)は、山体崩壊と同時に1741年の津波が発生し、海面下も含めた渡島大島の崩壊による欠損体積を3km<sup>3</sup>程度と算出している。

これらを勘案すると、ケース⑤は、断層の長さ・幅が小さく、すべり量の大きなモデルであり、火山噴火に伴う山体崩壊による津波のような、波源変動域が狭く一方向にエネルギーが集中する特性を併せて持った波源モデルといえる。

## 5. まとめ

1741年津波のように発生原因が明らかでない津波に対しても、一般的な断層パラメータを用いた波源モデル(ケース⑤)による数値シミュレーションにより、十分な精度の津波高を算出できることを確認した。本稿で紹介する波源モデルは、防災対策等の津波高の検討に、十分に資するものと考えられる。

また、本稿の波源モデルは、火山噴火に伴う山体崩壊による津波の波源特性を有したモデルであると考えられる。

## 謝 辞

本稿のとりまとめにあたっては、東北大学工学部今村教授のご指導・助言を頂いた。ここに記して謝意を表す。

## 参 考 文 献

- 相田 勇(1984):噴火により発生する津波の見積り—1741年渡島大島の場合—, 東京大学地震研究所彙報, Vol.59, pp.519-531.
- 相田 勇(1986):津波波源の推定, 水工学シリーズ86-B-2, 土木学会水理委員会, pp.1-17.
- 今村文彦・松本智裕(1998):1741年渡島大島火山津波の痕跡調査, 津波工学研究報告, 第15号, PP.85-105.
- 宇佐美龍夫(1996):新編日本被害地震総覧 [増補改訂版416-1995], 東京大学出版会, 493p.
- 岩崎敏夫・真野明(1979):オイラー座標による二次元津波遡上の数値計算, 第26回海岸工学講演会論文集, pp.70-74.
- 加藤幸弘(1997):渡島大島山体崩壊堆積物の地質と地形, JAMSTEC深海研究, 第13号, 海洋科学技術センター, pp.659-667.
- 建設省河川局(1985):対象津波の検討, 日本海中部地震津波対策調査報告書, 昭和60年3月, 286p.
- 後藤智明・小川由信(1982):Leap-frog法を

- 用いた津波の数値計算法, 東北大学工学部土木工学科, 20p.
- Satake, K. (1985): The mechanism of the 1983 Japan Sea earthquake as inferred from long-period surface waves and tsunamis, *Phys. Earth Planet. Interiors*, Vol.37, pp.249-260.
- 佐竹健治・加藤幸弘 (2000): 1741年渡島大島山体崩壊の体積と寛保津波の発生原因, 地球惑星科学関連学会2000年合同大会, Vb-020.
- 首藤伸夫 (1976): 津波の計算における非線形項と分散項の重要性, 第23回海岸工学講演会論文集, pp.432-436.
- 高橋智幸・首藤伸夫・今村文彦・Modesto Ortiz (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, 土木学会, 第41巻, pp.251-255.
- 都司嘉宣・西畑剛・佐藤貴史・佐藤一敏 (1996): 寛保元年 (1741) 渡島大島噴火津波の浸水高分布, 日本地震学会1996年度秋季大会予稿集, pp.81.
- 農林水産省構造改善局・農林水産省水産庁・運輸省港湾局・建設省河川局 (1996): 日本海東縁部地震津波防災施設整備計画調査報告書, 354p.
- 羽鳥徳太郎・片山通子 (1977): 日本海沿岸における歴史津波の挙動とその波源域, 東京大学地震研究所彙報, Vol.52, pp.49-70.
- 羽鳥徳太郎 (1984): 北海道渡島沖津波 (1741年) の挙動の再検討—1983年日本海中部地震津波との比較—, 東京大学地震研究所彙報, Vol.59, pp.115-125.
- 北海道防災会議 (1977): 渡島大島火山地質・噴火史・活動の現況および防災対策, 北海道における火山に関する研究報告書, 第6編, 82p.
- 松本智裕・橋和正・今村文彦・首藤伸夫 (1998): 土石流による津波発生・伝播モデルの開発, 海岸工学論文集, 土木学会, 第45巻, pp.346-350.
- 渡辺偉夫 (1998): 日本被害津波総覧【第2版】, 東京大学出版会, 238p.
- Mansinha, L. and Smylie, D.E. (1971): The displacement fields of inclined faults, *Bull. Seism. Soc. Am.*, Vol.61, No.5, pp.1433-1440.