

環太平洋でのリアルタイム津波データを使用した波源推定法の提案

樋渡 康子*・今村 文彦*

1. はじめに

津波予警報は主に地震波解析からの結果をもとに発令されるが、その信頼性や精度については不十分であることが多い。気象庁では1999年4月から津波数値計算を用いた量的津波予報を導入しているが、あらかじめ想定断層で計算された結果をデータベース化しているため(館畑, 1998)、面的広がりをもつ波源域や波源の位置の推定で問題が残る。一方、近年では衛星を利用したGPS津波計(加藤・他, 1998)が開発されており、発生した津波そのものの情報を得ることが期待されている。そこで本研究では、従来用いられた地震波解析からの情報に環太平洋に仮想的に設置した津波計から得られた情報を加え、波源推定や解析に時間的余裕がある遠地津波を対象とした精度の高いリアルタイム波源推定法を提案する。さらに津波到達時間からみた適切な波源推定を選択し、正確性と迅速性をそなえた津波予警報の可能性について検討を行う。

2. 対象領域

地震津波が発生する場所として環太平洋全域を選び、あらかじめ93個の想定断層を設定する(図-1)。各断層パラメータは石田(2000)が設定したものをを用いており、これらの断層は環太平洋の沈み込み帯で発生する地震の特徴を反映したものである。また、計算にはアリューシャン沖の断層($M_w 8.5$)とチリ地震

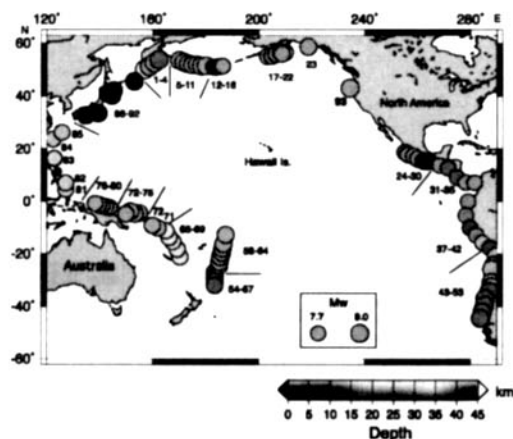


図-1 対象地域における93個の想定断層の位置

断層($M_w 9.5$)を用いた。これら2つの断層で波源推定を行うことにより、推定する断層に対する陸地の影響についても検討することができる。

3. 波源域のリアルタイム推定

—基本型の提案—

3.1 推定するパラメータ

波源推定するパラメータは断層の長さ L 、幅 W 、すべり量 D 、断層の走向 θ 、傾斜角 δ 、すべり角 λ 、断層位置 P および断層の深さ Z_0 である。これらのパラメータのうち、地震波解析からは震源要素(震央、深さ、マグニチュード)とメカニズム解($\theta_1, \delta_1, \lambda_1$)($\theta_2, \delta_2, \lambda_2$)が得られる(川勝, 1991)。ここで断層の深さ Z_0 は地震の深さと等しいとし、残りの $L, W, D, (\theta_1, \delta_1, \lambda_1)$ および P を推定する必要がある。

*東北大学大学院工学研究科附属災害制御研究センター

3.2 波源推定の手順

図-2に示すように推定方法を3つのステップに分け、地震波解析からの情報に津波波形からの情報を付け加える手法を提案した。3つのステップのうち、面的広がりである波源域を推定する逆伝播法(石田・他, 1998)が最も重要となるため、以下、逆伝播法による波源推定について述べる。

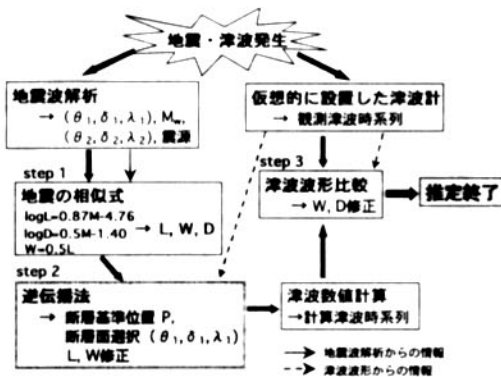


図-2 波源推定法の手順

3.3 逆伝播法

逆伝播法とは波向線法を用いて2つの津波計から観測された津波の第一波の最高水位点およびゼロクロス点に対する波峰線を描き、波の源点、つまり交点を決定することで波源域を推定する方法である。交点は目視で判断することができる。ここで波源域を正確に推定するためには津波計が断層の周辺に複数必要であり、2個1組(以下、ペアの津波計と呼ぶ)で設置しなければならない。仮想的に設置する津波計の位置により推定される波源と真値である断層との比較を行うため、まずは津波計を断層の近くに弧を描くように設置した。具体的な津波計の位置と個数を図-3に示す。

3.4 波源域の推定

図-3に示す津波計を用いて360°すべての方向に1°間隔で波向線を放出させ逆伝播を行った。その結果、アリューシャン沖の断層

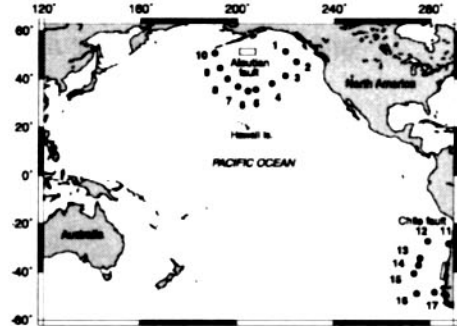


図-3 津波計の位置(アリューシャン沖とチリ地震断層の場合)

では津波計1から6において目視による交点の判断ができたが、その他の津波計からの波峰線は多くの箇所で重複してしまい、交点の判断はできなかった。また、チリ地震断層では断層が陸地にかかっているため、すべての津波計からのゼロクロス点に対する波峰線は描けず、交点の判断ができなかった。以上から、交点の判断ができた津波計のみを用いて波源域の長さおよび幅を求め断層面を選択し、ステップ3である津波波形比較を行った。

3.5 誤差の評価

推定されたパラメータと真値との誤差を評価するために以下の式を用いた。

$$\text{誤差 (\%)} = ((\text{推定値} - \text{真値}) / \text{真値}) \times 100$$

ここで誤差の評価は、断層パラメータそのものの値であるL, W, およびDに対して(以下、誤差1と呼ぶ)と、波源域(初期水位)における波源の長さL', 幅W', および最高水位U'に対して(以下、誤差2と呼ぶ)行う。最終的には断層パラメータを推定することが重要であるため誤差1のみを評価すればよいが、実際に波源推定している値は初期水位であるため、誤差2も評価した。推定されたパラメータの誤差評価を表-1に示す。表-1より、チリ地震断層の幅およびすべり量の修正は十分ではないものの、ステップ数の増加にしたがって、アリューシャン沖の断層に対してはL(-13.7→7.6%), W(-28.1→7.7

表-1.1 推定された断層パラメータの誤差評価 (アリューシャン沖の断層)

津波計	波向線 間隔	波源推定の ステップ	誤差 1 (%)			誤差 2 (%)		
			L	W	D	L'	W'	U'
(図-3) 1-10	1°	step 1	-13.7	-28.1	189.8			
		step 2	7.6	-37.4	189.8	-9.3	-49.5	191.0
		step 3	7.6	7.7	13.5	-9.3	-13.1	14.0
(図-4) 1-10	1°	step 2	33.3	38.8	189.8	12.4	11.9	191.0
		step 3	33.3	20.3	-17.2	12.4	3.0	17.0
		step 2	15.2	56.3	189.8	-2.9	26.0	191.0
(図-9) 1-14	0.5°	step 3	15.2	22.3	-24.6	-2.9	1.3	-22.0
		step 2	19.8	82.7	189.8	1.0	47.3	191.0
		step 3	19.8	3.7	-10.2	1.0	16.3	-15.0

表-1.2 推定された断層パラメータの誤差評価 (チリ地震断層)

津波計	波向線 間隔	波源推定の ステップ	誤差 1 (%)			誤差 2 (%)		
			L	W	D	L'	W'	U'
(図-3) 1-10	1°	step 1	295.2	690.0	-7.1			
		step 2	-19.5	?	-7.1	-29.4	?	-16.7
		step 3	-19.5	515.0	27.9	-29.4	439.0	28.3
(図-4) 11-17	1°	step 2	24.7	?	-17.1	9.2	?	-16.7
		step 2	17.5	?	-17.1	3.0	?	-16.7
(図-9) 1-14	0.5°	step 2	-20.0	?	-17.1	-29.9	?	-16.7

%), D (189.9→13.5%), チリ地震断層に対してはL (-295.2→-19.5%)と修正されていることが分かった。したがって図-2に示した波源推定の手順および津波計の位置は適切であるといえる。

4. リアルタイム高精度推定の改良

図-3で設置した津波計はアリューシャン沖の断層およびチリ地震断層を推定するため

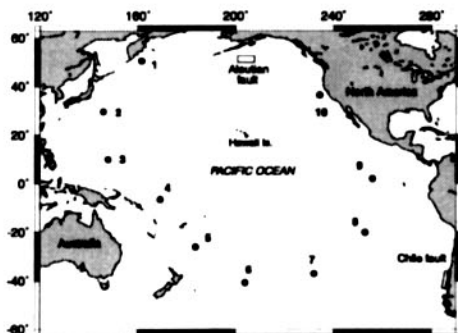


図-4 新しい津波計の位置 (環太平洋)

に設置したものであり、本研究では環太平洋全域を考慮した津波計を設置する必要がある。そこで図-3と同様に新たに93個の想定断層に対して弧を描くように10個設置した(図-4)。この津波計を用いて逆伝播を行ったところ、ほとんどすべての津波計において波峰が複雑に交差してしまい、目視による交点の判断ができないことが分かった(図-5)。

4.1 交点の求め方の改良方法

新たな交点の判定法として、波向線上の最終地点である点の集合から交点を算出する方法を検討した。図-6は津波計AとBを用いて交点を求める場合を示している。ここでQが交点となるためには距離D2, D3が他の距離D1に比べて最も小さくなるはずであり、D2, D3がゼロとなった点が交点Qといえる。そこで、計算により2点間の距離を求め小さい順に出力し、最小距離D2をなす2点A2とB2の平均を交点と定義した。さらに適切な交点を得るために最小距離をなす2点が震源から

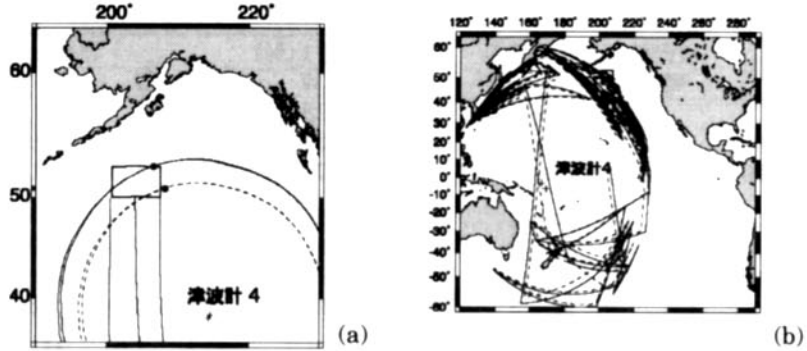


図-5 波峰線の様子。(a) 右図, 図-3の津波計4からの波峰線はなめらか。
(b) 左図, 図-4の津波計4からの波峰線は複雑に交差。

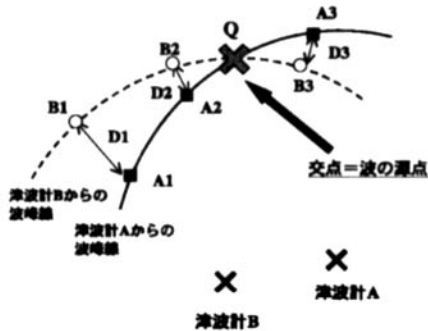


図-6 交点の求め方の概念図

およそ $\pm 10^\circ$ 以内に存在するという条件を与えた。波向線間隔を 1° および 0.5° で計算したペアの津波計での交点の分布を図-7に示す。

図-7より、 1° の波向線間隔では得られなかった津波計5から7の交点が、波向線間隔を 0.5° と小さくすることにより得られ、かつ実際の断層の位置よりずれていることが分

かった。そこで津波計5から7の交点を精度の低いものとして取り除き波源推定したところ、断層位置および断層の長さに対する精度が上がった。したがって、今後は波向線間隔を 0.5° として逆伝播を行うこととした。

4.2 ハワイ諸島周辺への津波計の追加

4.1で精度の低いデータを取り除くことは波源推定に用いるデータ数が減少することであり、高い精度の波源推定は期待できない。そこで津波計5から7の精度が低くなる原因を調べるため、アリューシャン沖の断層から 360° の方向すべてに 10° 間隔で波向線を描いた(図-8)。

図-8から、ハワイ諸島により波向線が停止あるいは蛇行しているため津波計5から7に到達する波向線は少ないことが分かった。つまりアリューシャン沖の断層に対してハワ

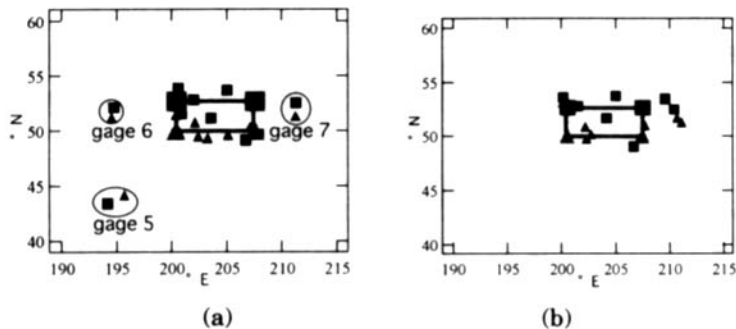


図-7 ペアの津波計での最高水位(▲)とゼロクロス(■)。
(a) 波向線間隔 0.5° (b) 波向線間隔 1° の場合。

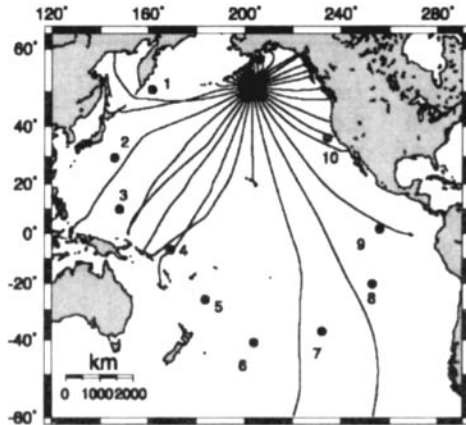


図-8 アリューシャン沖の断層からの波向線（波向線間隔10°）

ハワイ諸島を介して対称に位置する津波計からの波向線は、ハワイ諸島の影響でより複雑に交差あるいは停止する。その結果、擬似的に生じた交点が計算により選択されるため、その精度は低くなると考えられる。このような傾向はチリ地震断層にも認められるため、推定

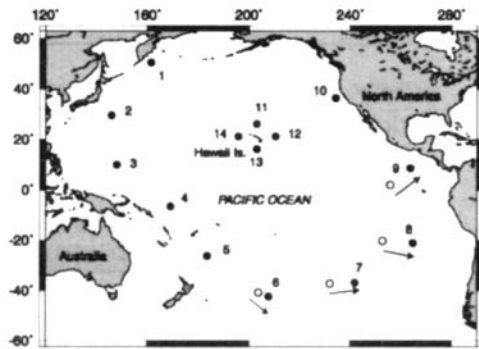


図-9 最終的な津波計の位置（黒丸印）

しようとする断層に対しハワイ諸島を介して対称に位置する津波計からのデータは精度の低いデータであるという判断ができる。この判断をふまえてハワイ諸島周辺に新たに津波計4個を追加し、最終的な津波計の位置と個数を図-9のように決定した。

図-9に示す津波計を用いて再度波源推定を行なった結果、アリューシャン沖の断層のL

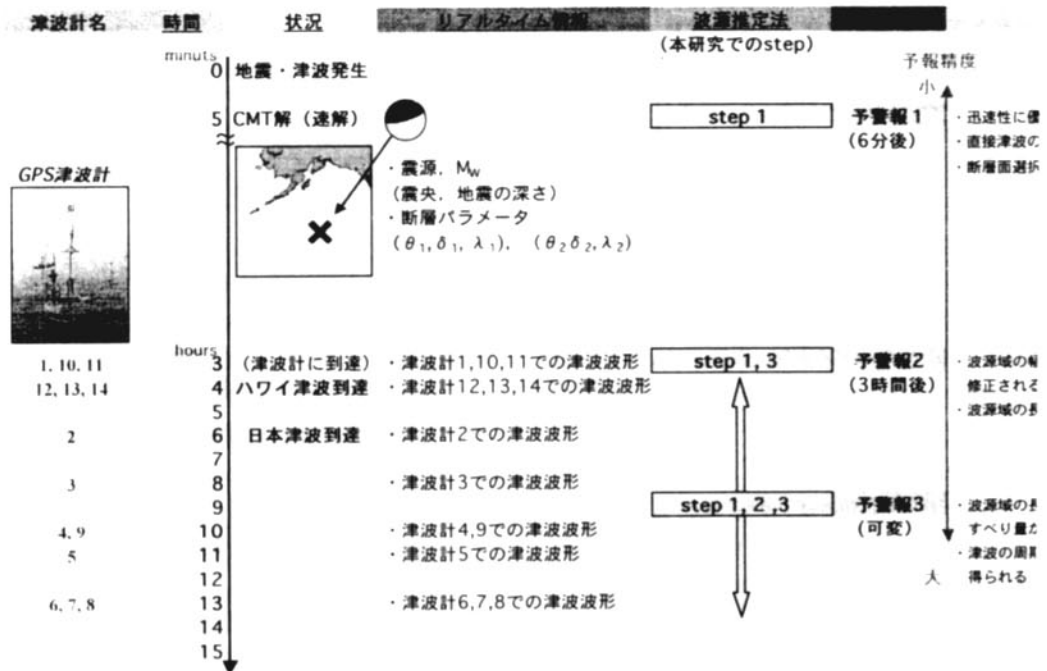


図-10 アリューシャン沖で地震津波が発生した場合の波源推定法と利用できるデータ(時系列表示)

注) 予警報3-1は対象国を日本とした場合。予警報3-2は対象国を特定しない場合。

表-2 津波予警報とその精度

予警報の段階	波源推定のステップ	L (km)	W (km)	D (m)	誤差 1 (%)		
					L'	W'	U'
(Aleution)	(真値)	500	300	2.44			
予警報 1	step 1	431.5	215.7	7.07	-13.7	-28.1	189.8
予警報 2	step 1+step 3	41.35	282.6	3.67	-13.7	-5.8	33.6
予警報 3-1	step 1+step 2+step 3	428.7	409.1	2.46	-14.3	36.4	0.8
予警報 3-2	step 1+step 2+step 3	598.8	311.1	2.19	19.8	3.7	-10.2

については19.8%と図-4の津波計を用いた結果より4%ほど誤差が大きくなってしまったが、Wは3.7%、Dは-10.2%と最も精度の高い推定ができることが分かった。しかし、チリ地震断層のように断層が陸地にかかっている場合や陸地に非常に近い位置にあるときは、特に波源の幅に対する推定が困難であり、step 3による波形比較を用いた手法でも十分な精度は期待できないことが分かった。

5. 迅速性からみたリアルタイム推定法

以上の結果から、地震発生後の波源推定の流れについて、アリューシャン沖で地震津波が発生した場合の時系列を図-10に示す。津波予警報の可能性としては以下の3つの方法が考えられるが、これらの予警報は推定された最終断層パラメータを用いて津波数値計算を行うことにより発令される情報であり、その精度は推定された波源の精度に左右される(表-2)。

予警報 1

地震波解析から得られた情報のみを用いた場合であり、最も迅速性に優れている。しかし直接に津波の波源域は推定できず、十分な正確性は期待できない。

予警報 2

津波計に津波が到達した直後に発令が可能である。波源域の幅およびすべり量の推定ができるが長さの推定ができず、精度も低い。

予警報 3

波源推定に用いる個数によって発令される時間が変化する。波源域の長さ、幅およびすべり量が推定でき、波源推定に用いる津波計の個数の増加とともに精度の向上が期待される。

6. 結 論

地震波解析からの情報を波源推定法の第1段階とし、環太平洋に仮想的に設置した津波計から得られた情報を用いた逆伝播手法を第2段階、津波波形比較を第3段階とする波源推定法を提案した。さらに逆伝播手法による交点の算出方法を改良することにより、地震津波発生の対象である環太平洋全域を考慮した津波計のもとでの波源推定を可能にした。その結果、最大でも20%以内の誤差で波源推定ができることが分かり、これらの波源推定法を組み合わせることによって3段階の津波予警報の可能性を示した。

参 考 文 献

- 館畑秀衛：津波数値計算技術の津波予報への応用，月刊海洋，号外No. 15，pp. 23-30，1998。
- 加藤照之・寺田幸博・木下正生・一色浩・横山昭：GPS津波計の開発，月刊海洋，号外No. 15，pp. 38-42，1998。
- 石田祐介：リアルタイム津波観測計の予警報システムへの利用，東北大学大学院工学研究科土木工学専攻修士論文，69pp.，2000。
- 川勝均：地震の大きさと同様性—Moment tensor inversionを中心として—，地震2，44，pp. 265-277，1991。
- 石田祐介・今中剛・今村文彦：三陸沖での新しい監視方法による津波情報提供の可能性，海岸工学論文集，第45巻，pp. 386-390，1998。