

太平洋の想定反射体と津波反射波の走時

阿部 邦昭・岡田 正実

1. はじめに

2011 年東北地方太平洋沖地震に伴う津波は太平洋全域に広がり、所によっては発生から 60 時間以上にわたって海水面を振動させ、検潮所で記録された。このような長時間の津波では島や陸の存在によって発生する反射波が多く含まれていると考えなければならない。津波の検潮記録は島や陸地の海岸付近で得られているものなので、振幅の大きい場所はそれ自身が反射波の波源になっているはずである。そこでこの津波の振幅の大きい所やこれまでの報告などを参考に太平洋上で反射波源を 21 箇所想定し、そこからの津波(線形長波)の伝搬図を作成した。伝搬図から所用時間を読み取ることで観測された検潮記録で反射波を特定する根拠とすることができる。

2. 方法

津波は地球の弾性を無視した線形長波として伝わるものと仮定する。この時の走時は線形長波速度であり水深のみの関数なので、伝搬に要する時間は水深分布図から計算することができる。今回使用した Okada (1988) の方法では、小区域内の海底を傾斜した平面であるとして伝搬時間を計算し、ホイヘンスの原理で 2 次元に広げている。一方、津波は伝搬の過程で大陸や島などの陸地に到達すると反射波が発生する。反射波も線形長波であるから同じ方法で走時を求めることができる。ここでは反射体を楕円形で近似し、反射体波源から同時に全方向に反射波が発せると想定している。反射波が別の反射体に達するとそこで 2 次的な反射波が発生するがそれについては考慮しない。

伝搬時間は太平洋全域の水深データを用意

して数値計算を行い、想定した反射体に対して 0.5 時間ごとに波面を描いた太平洋全域の伝搬図を作成する。太平洋に面する任意の点での伝搬時間はこの図から読み取ることで求める。正確な伝搬時間の決定には、地球の弾性を考慮しない浅水長波ではなく弾性効果を考慮した速度にする必要がある(例えば Inazu and Saito, 2013)。これを考慮すると浅水長波速度は実際より 1% 程小さくなる。ここでの作図は浅水長波の式に基づいたものなので、伝搬時間として評価する段階で 1% 大きくするように補正する。

3. 結果

本報告で反射体と見なした 21 箇所と主な検潮所の位置を図 1 に示す。この中には検潮所の存在しないもの(マリアナ, キンメイ, 東太平洋海膨, チリ海膨)が 4 カ所含まれているが、それらは海底地形の影響で津波の反射が予想される場所であるからである(例えば Koshimura et al., 2008)。各反射体はその地形を反映させた楕円で近似している。楕円の中心位置, 長軸の長さ, 短軸の長さ, 参照した検潮所は表 1 に掲載してある。反射体ごとに番号をつけて, 図と表を対応させている。島の場合はそれほど問題ないが, 大陸や海膨に対する楕円の長軸長さにはかなりの任意性がある。各反射体に対して描いた伝搬図を図 2 から図 19 に示している。アダック(No.6), ハワイ諸島(No.10), カナダ(No.14)は阿部他(2017)と同じなので省略している。球面で求めて, 平面に描写した関係で高緯度では間隔が粗くなっているが速度が大きいわけではない。同時波面が同心円状に表現された場所は海底が平たんであることを意味している。これに対してオーストラリア, ニュー

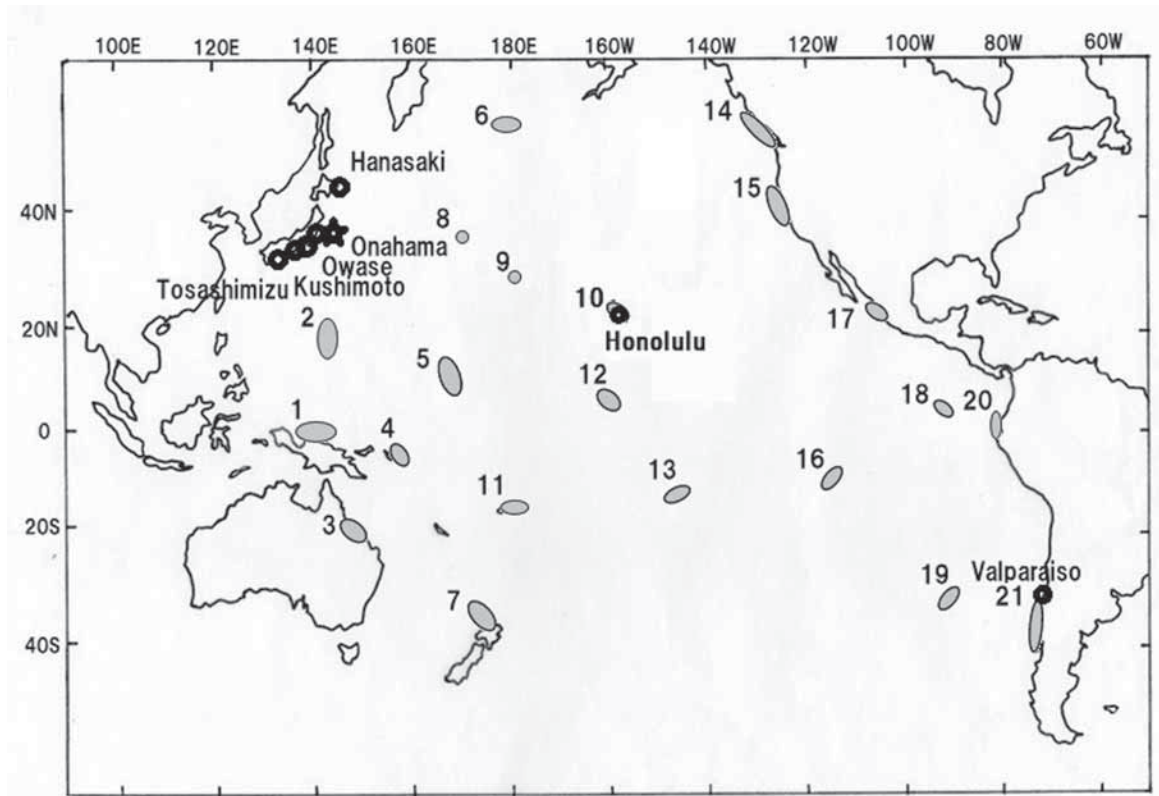


図1 想定反射体(○) の地理分布と引用した検潮所(○)及び震央(★)

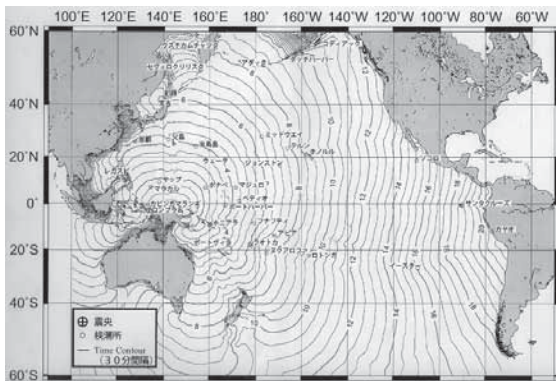


図2 反射伝搬図 パプアニューギニア(No1)

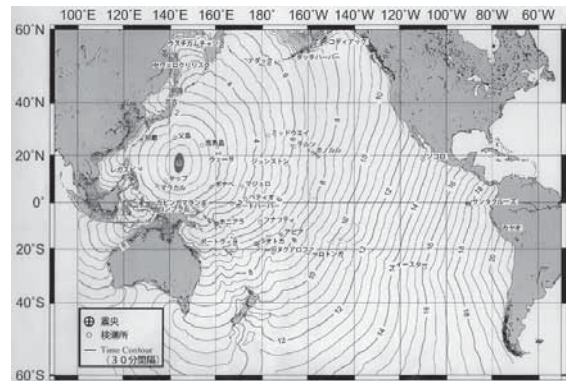


図3 反射伝搬図 マリアナ(No2)

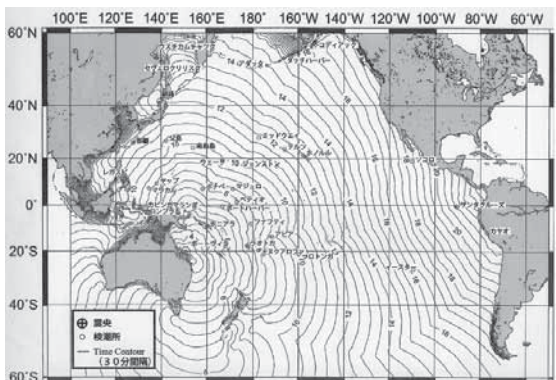


図4 反射伝搬図 オーストラリア(No3)

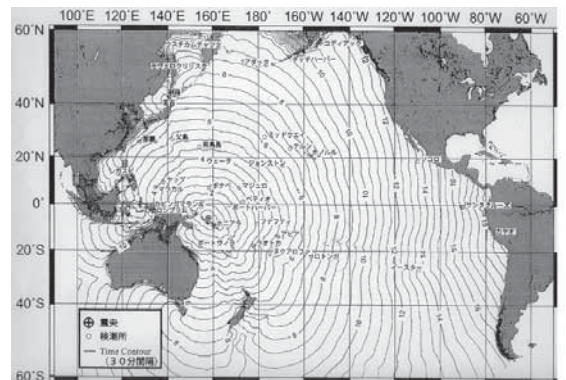


図5 反射伝搬図 ソロモン(No4)

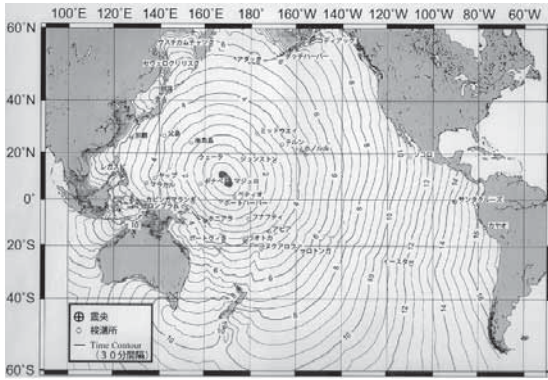


図6 反射伝搬図 マーシャル(No5)

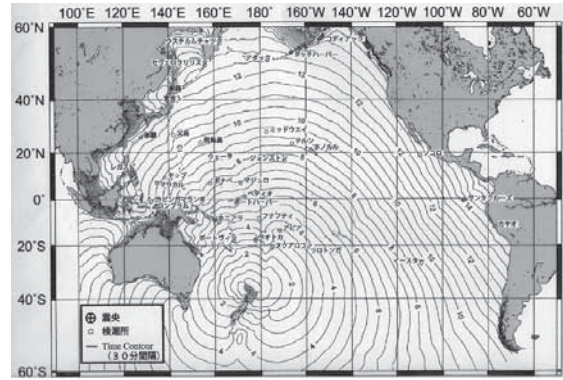


図7 反射伝搬図 ニュージーランド(No7)

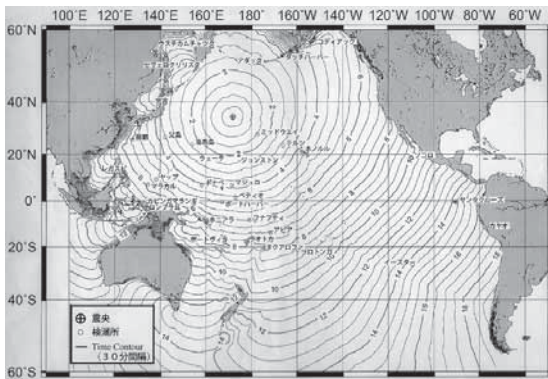


図8 反射伝搬図 キンメイ(No8)

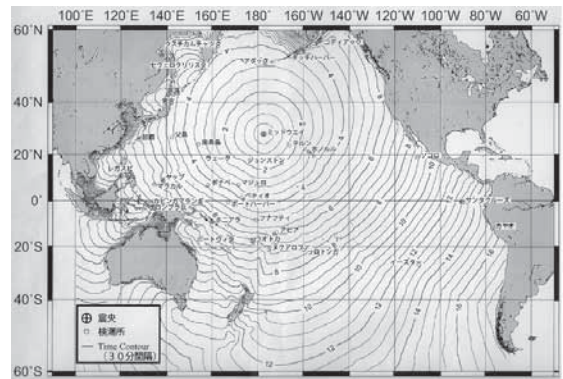


図9 反射伝搬図 ミッドウェイ(No9)

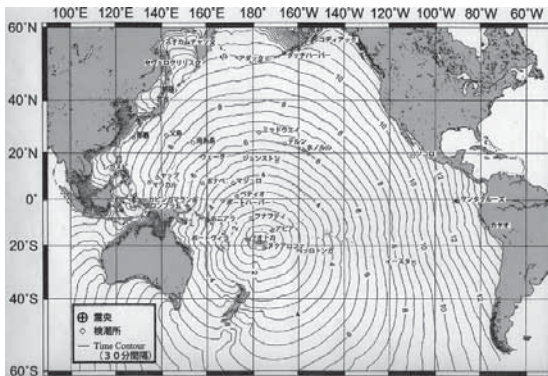


図10 反射伝搬図 フィジー(No11)

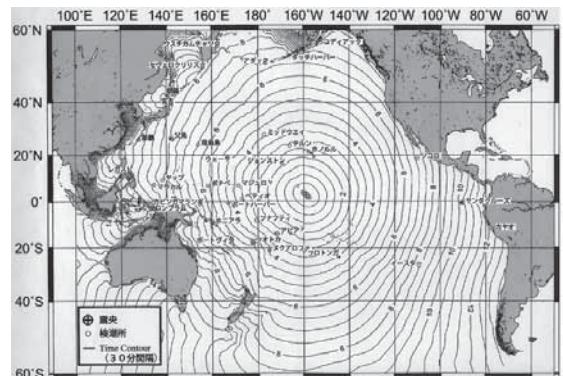


図11 反射伝搬図 クリスマス(No12)

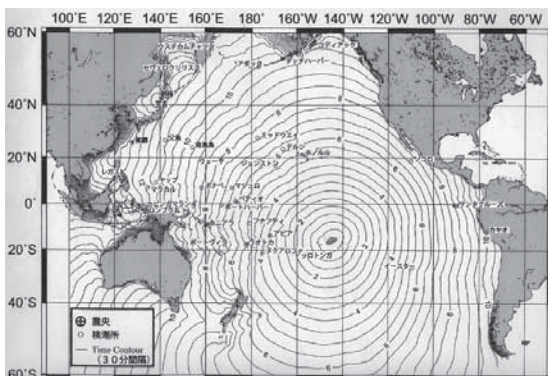


図12 反射伝搬図 ツアモツ(No13)

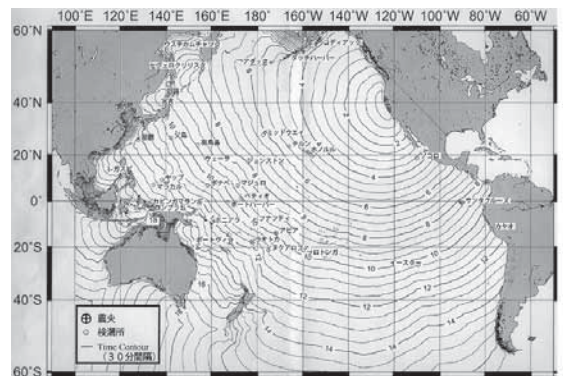


図13 反射伝搬図 カリフォルニア(No15)

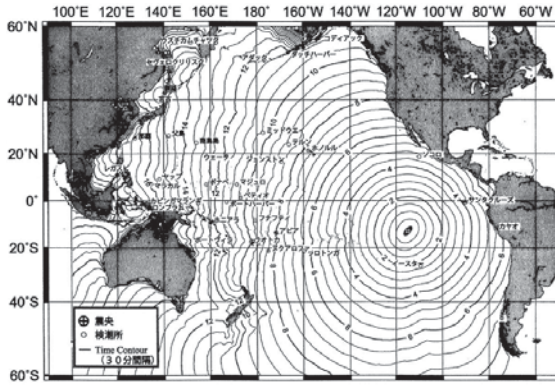


図 14 反射伝搬図 東太平洋海膨 (No16)

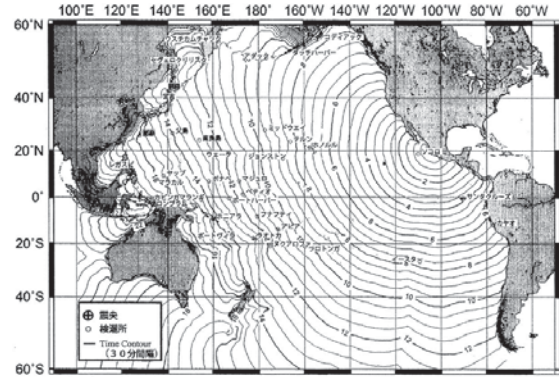


図 15 反射伝搬図 メキシコ (No17)

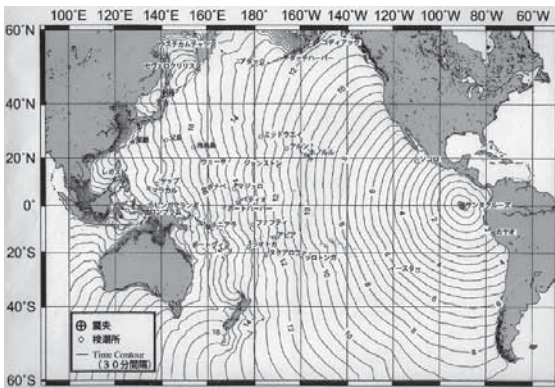


図 16 反射伝搬図 ガラパゴス (No18)

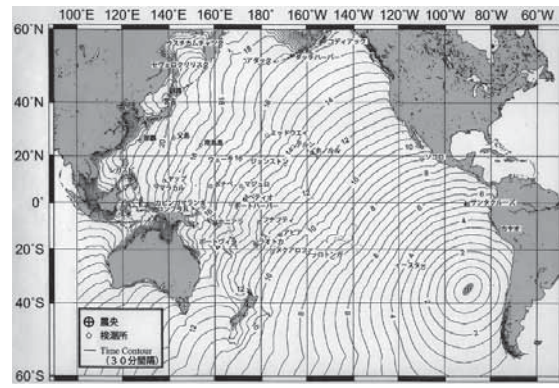


図 17 反射伝搬図 チリ海膨 (No19)

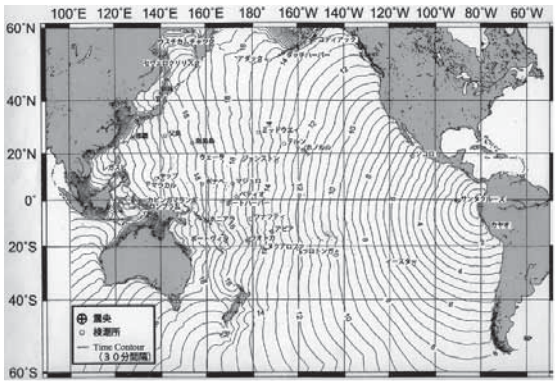


図 18 反射伝搬図 エクアドル (No20)

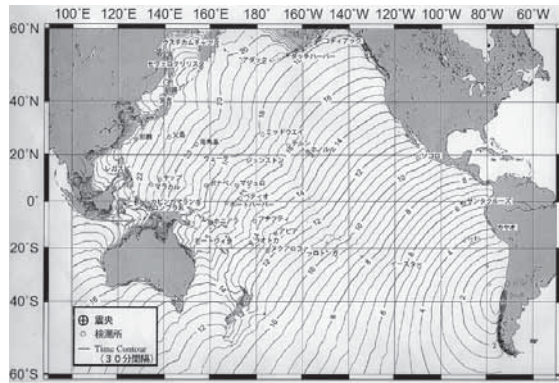


図 19 反射伝搬図 チリ (No21)

ジーランドから出発した波面は凹凸が激しく複雑な海底地形・海陸分布を反映したものになっている。

4. 考察

日本の土佐清水, 串本, 尾鷲, 小名浜, 花咲の 5 点, ハワイ諸島のホノルルに対する反射波走時を各伝搬図から読み取って求めた (表 2)。各検潮所の位置は図 1 に示した。

日本の各点の走時をみると反射波源が南にあれば南方の検潮所に, 北にあれば北方の検潮所に早く届くことが確認できる。日本とホノルルの走時を比べると, チリからの反射波の届く時間はホノルルは日本より 7-8 時間短い。日本の 5 点で平均走時を各反射体に対して示したものが図 20 である。最も早く到着するのがマリアナで 2.9 時間, 最も遅いのがチリからのもので 23.1 時間であり, 両者の間には 20 時間を超す差がある。ハワイ諸

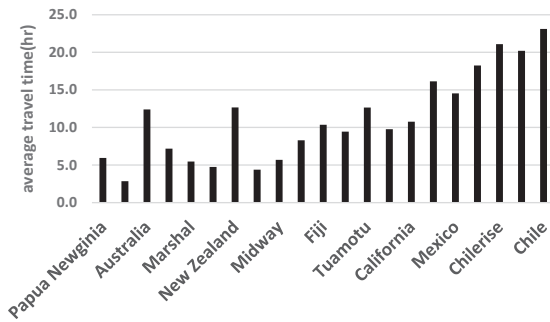


図 20 各反射波に対する日本の平均走時

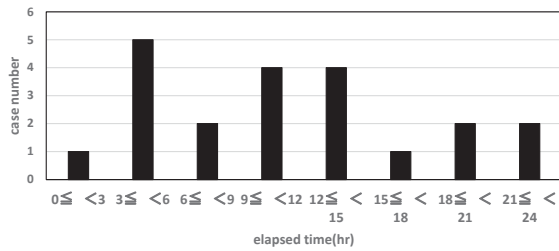


図 21 平均走時の度数分布

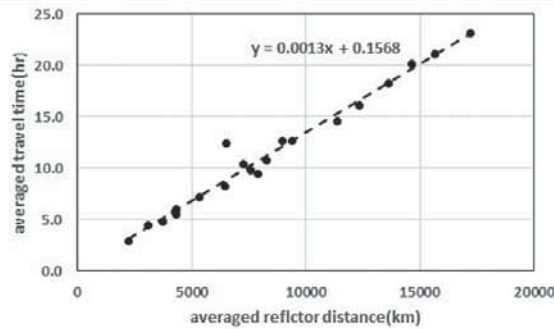


図 22 平均走時の反射体震央距離による変化, 点線は最適最小二乗法による回帰曲線

島からの反射波は 8.3 時間を要する。全反射体に対する日本の平均走時の度数分布が図 21 である。3 時間刻みで個数を集計してある。最も多いグループが 3 時間以上 6 時間未満のグループで、パプアニューギニア、マーシャル、アダック、キンメイ、ミッドウエイ反射波がこれに属する。

日本の 5 点に対する平均走時と反射体までの平均距離の関係をグラフにしたのが図 22 である。1 か所（オーストラリア）を除き、ほぼ直線的に分布する。全データから最小 2 乗法で求めた回帰直線の傾き $\alpha = 0.0013\text{hr/km}$ であり、津波の伝搬速度は $v=214\text{m/s}$ で

ある。この値に 1.01 を乗じて地球弾性効果を補正し、浅海長波速度に換算すると $vL=216\text{m/s}$ となる。重力加速度を $g=9.8\text{m/s}^2$ として平均水深を計算すると $H=4761\text{m}$ になる。なお、オーストラリアの走時がほかに比べて大きいのは反射体の前面に珊瑚礁からなる浅瀬や島々があることに由来している。

最後にこの予測される反射波と 2011 年太平洋東北沖津波の関係について本報告で調べた結果を紹介する。図 23 は日本の 5 検潮所における津波検潮記録（気象庁, 2011）から潮汐を除いた津波波形である。これに反射体の最大波が到達する時刻を反射体すべてについて記入してある。その中の一つであるチリ反射体の出発反射波（バルパライソの波形, (NOAA, 2011)）とその最大波出現時間を図 24 に示す。波形の上に付した点が最大波の時刻で、その時間は津波発生から 28.18 時間後である。この時間に、土佐清水、串本、尾鷲、小名浜、花咲までの走時 23.4, 23.1, 23.4, 22.7, 22.8 時間を加えたものが、チリからの反射波の到達時間になり、50.9 ~ 51.6 時間である。これらは図 23 で 5 点ともに最も遅く到達している。小名浜では振幅の増加がこの時間によく対応するのにに対し、尾鷲では最大波の到達より 1 時間ほど前から増加している。バルパライソの波形を見ると最大波の到達する 3 時間以上前から最大波に匹敵する水位の波が観測されているので、その伝搬の影響が考えられる。

チリ以外の反射体に対する反射体の参照検潮所も表 1 に示してある。先に述べた検潮所が近くでない 4 点に関しては近くの島の検潮所を参照検潮所にし、最大波の時刻を伝搬時間だけずらして予測し使用している。それぞれの参照検潮所で得られた最大波の時間と走時を組み合わせ、チリの場合と同じ操作をすることで反射波の到達時間を求めることができる。こうして決めた反射波到達時間が図 23 で表示された到達時間（黒点）である。日本に最も早期に到達する反射波はマリアナ、マーシャル、キンメイ、ミッドウエイからの

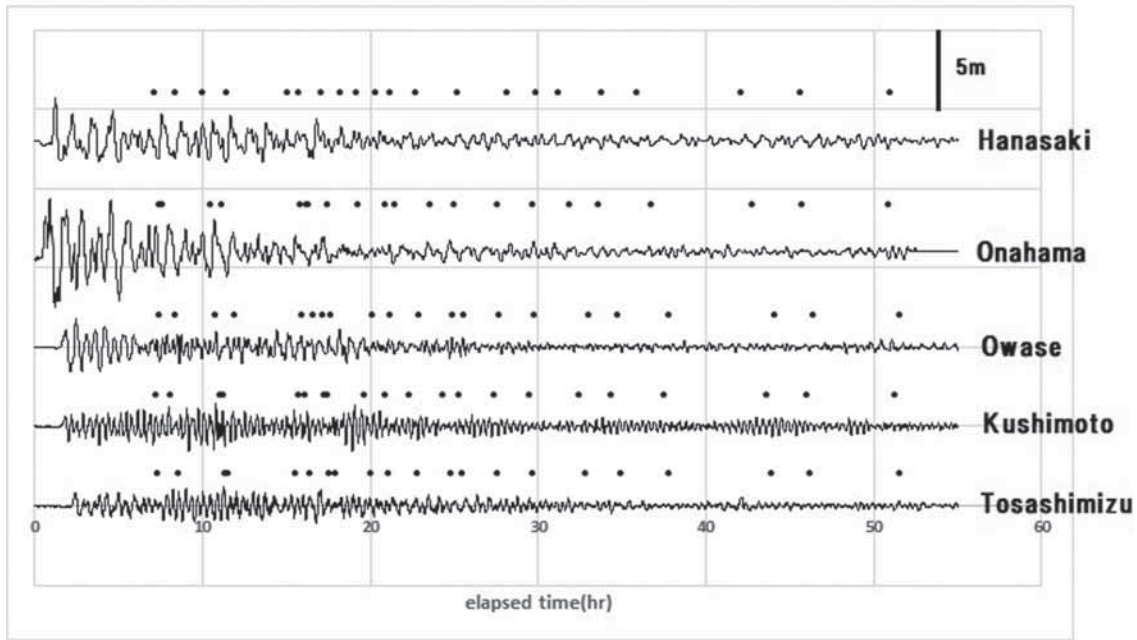


図 23 2011年東北沖津波における検潮記録(潮汐を除く)と予想される全反射波の到達時刻(黒点)

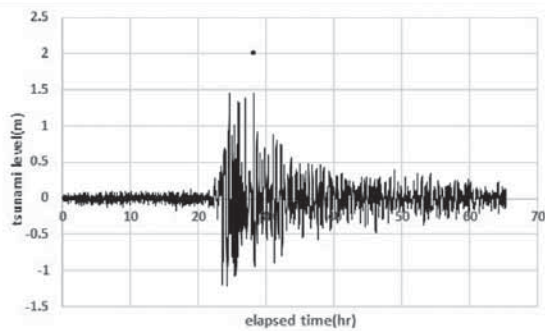


図 24 チリ反射波の波源とみなしたバルパライソの津波波形, 黒点が最大波で反射波出発時刻になる

ものであるが、小名浜、花咲ではこれらの反射波の到達と振幅の増加や周期の変化が良く対応している。また小名浜ではハワイ諸島の反射波の予測時間 15.8 時間に対応するとみられる 15.5 時間での振幅の増加が認められる。5 点全体でみると反射波が期待される時間での振幅の増加が対応していないところもあり、観測点の位置や地形、反射波のもとの波形などの影響が考えられる。このような検討は津波検潮記録が取れているところは日本に限らずどこに対しても行うことができるが、海膨など、長く伸びる方位で検討する場合は適用に限界があることに注意しなければならない。

5. 結論

津波の反射波が線形長波として伝わるとして、反射体からの伝搬図を作成して反射波の走時を求めた。想定した反射体は太平洋上の 21 箇所である。これに基づき日本の花咲、小名浜、尾鷲、串本、土佐清水、アメリカのホノルル検潮所までの走時を求め、日本の 5 点での平均走時と平均距離の関係などを調べた。平均走時の最短はマリアナの 2.8、最長はチリの 23.1 時間である。2011 年太平洋東北沖津波の検潮記録に対して、伝搬図に基づき想定した反射体から反射波の到達する時間と振幅変化の関係を調べたところ、反射波の到達する時間に振幅の増加が対応しているところが多数認められた。

参考文献

- 阿部邦昭, 岡田正実, 林 豊, 2017, 1964 年アラスカ津波の検潮記録で観測された反射波とその波源, 津波工学研究報告, 34, 53-57
- Okada, M., 1988, A computation program for producing tsunami travel chart in Japan, Proceedings, PACON88, 34-41

表 1 想定反射体および参照検潮所に関する定数

No	reflector	latitude	longitude	length	width	direction	epicentral distance	azimuth	reference tide station	latitude	longitude
		deg	deg	km	km	deg	km	deg		deg	deg
1	Papua Newginia	-2.5	143	950	285	90	4495	180	Manus	-2.0	147.4
2	Mariana	17	144	950	475	5	2341	177	Yap	9.5	138.1
3	Australia	-21.6	148.3	622	311	128	6638	174	Ferguson	-19.3	147.1
4	Solomon	-6	158	450	225	140	5126	159	Honiara	-9.4	160.0
5	Marshal	9.5	169	950	475	145	4105	134	Kwajalein	8.7	167.7
6	Adak	51.8	180	520	208	90	3252	50	Adak	51.9	-176.6
7	New Zealand	-37.1	175	711	355	138	8956	154	Tauranga	-37.6	176.2
8	Kinmei	34.8	171.8	45	45	0	2606	89	Midway	28.2	-177.4
9	Midway	28.4	-177.4	87	87	0	3821	94	Midway	28.2	-177.4
10	Hawaii Islands	20.5	-157.5	622	187	110	6003	91	Honolulu	21.3	-157.9
11	Fiji	-18	177	711	355	90	7160	144	Suva	-18.2	178.4
12	Christmas	3	-159	622	311	130	7050	108	Christmas	2.0	-157.5
13	Tuamotu	-16	-145	566	283	65	9601	113	Rangiroa	-15.0	-147.7
14	Canada	49.5	-126	680	171	135	6985	47	WinterHarbor	50.7	-128.3
15	California	39.3	-122.5	680	204	157	7802	55	CrescentCity	41.8	-124.2
16	East Pacific Rise	-13	-115	566	283	40	11946	93	Rikitea	-23.1	-135.0
17	Mexico	19.5	-104	566	283	125	10567	60	Manzanillo	19.1	-104.3
18	Galapagos	0	-90	622	311	128	13169	65	SantaCruz	-0.8	-90.3
19	ChileRise	-35	-89.6	622	311	40	15373	102	JuanFernandez	-33.6	-78.8
20	Ecuador	-3	-80.5	622	311	0	14143	59	LaLibertad	-2.2	-80.9
21	Chile	-40	-73.3	820	246	5	16904	105	Valparaiso	-33.0	-71.6

表 2 土佐清水, 串本, 尾鷲, 小名浜, 花咲およびホノルルの反射波走時

No	reflector	tide st	Tosashimizu	Kushimoto	Owase	Onahama	Hanasaki	Honolulu
			hr	hr	hr	hr	hr	hr
1	Papua Newginia		5.4	5.6	5.8	6.1	6.9	8.6
2	Mariana		2.6	2.5	2.7	2.9	3.6	7.3
3	Australia		12.3	12.1	12.4	12.3	12.8	12.6
4	Solomon		7.1	6.9	7.2	7	7.8	7.5
5	Marshal		5.6	5.3	6.0	5.1	5.5	4.4
6	Adak		5.8	5.3	5.1	4.1	3.6	4.9
7	New Zealand		12.6	12.4	12.7	12.7	12.8	8.6
8	Kinmei		5.1	4.6	4.8	3.9	3.5	4.5
9	Midway		6.3	6.0	5.8	5.5	4.9	2.8
10	Hawaii Islands		8.7	8.4	8.9	8.1	7.4	0.0
11	Fiji		10.4	10.2	10.5	10.2	10.5	6.2
12	Christmas		9.8	9.4	9.9	9.1	9.0	2.3
13	Tuamotu		12.8	12.6	12.9	12.3	12.5	5.5
14	Canada		10.5	10.0	10.6	9.3	8.4	5.7
15	California		11.6	11.1	11.7	10.3	9.1	4.9
16	East Pacific Rise		16.7	16.3	16.9	15.8	15.0	7.8
17	Mexico		15.4	14.8	15.2	14.1	13.2	7.5
18	Galapagos		18.9	18.6	18.9	17.8	17.1	10.3
19	ChileRise		21.3	21.1	21.5	20.8	20.7	12.9
20	Ecuador		20.8	20.5	21.0	19.7	19.0	12.4
21	Chile		23.4	23.1	23.4	22.7	22.8	15.4

- Inazu, D. and T.Saito, 2013, Simulation of distant propagation with a radial loading deformation effect, *Earth Planets Space*, 65, 835-842
- 気象庁, 2011, 東北地方太平洋沖地震調査報告, 気象庁技術報告、No.133, 2012
- Koshimura, S., Y.Hayashi, K.Munemoto and F.Imamura, 2008, Effect of the Emperor seamounts on trans-oceanic propagation of the 2006 Kuril Island earthquake tsunami, *Geophys.Res.Letters*, 35
- National Tsunami Warning Center, NOAA, 2011, Tsunami of 11 March, 2011, http://wcatwc.arh.noaa.gov/previous_events/03-11-11_Honshu/03-11-11.htm, 2014年3月19日閲覧