

津軽海峡から日本海に広がる津波の相関極大による追跡

阿部 邦昭

1. はじめに

日本海はユーラシア大陸の東に位置する縁海でいくつかの海峡を通じて外海と繋がっている。その中で津軽海峡は比較的に水深があって対馬海流の通り道になっていることなどから外海とのつながりが大きい。津軽海峡の太平洋側はプレート沈み込み帯になっているため地震にともなう津波がしばしば発生する。2011年に発生した東北地方太平洋沖地震(Mw9.0)はかつてない高さの津波を引き起こし、三陸沿岸部を中心に大きな被害をもたらした。このとき津軽海峡は日本海への通り道になり、函館で海面上 2.5m、竜飛で同じく 0.5m 水位が上昇したことが検潮記録で確認できる。しかしその後の動向については調べられていない。そこでその後の日本海での挙動について検潮記録上の波形を整理し、津軽海峡の出口である竜飛における波形のその後を系統的に調べた。方法は日本海での検潮記録から津波時の水位変化を取り出し、出口波形との相関関係に注目し、相関係数極大の発生時間と数値を追いかけるものである。2011年東北津波の他、1960年チリ津波、1968年十勝沖津波についても津軽海峡通過後の挙動を検討する。

方法

検潮記録から潮汐と短周期振動を除いて 1 分間隔の津波デジタル水位記録を用意する。潮汐水位は気象庁が発表している潮位曲線を使用し、短周期振動の除去は 9 分間の移動平均で平滑化することで行った。アナログ記録で提供されているものについてはマウスやデジタルイザを使ってデジタル化した後、内挿によって 1 分間隔データに変換している。

検潮記録の元データは 2011 年東北津波では気象庁 (2012)、1960 年チリ津波では国際文献社 (1960)、須賀他 (1986)、1968 年十勝沖津波では各検潮施設から提供されたものである。使用した検潮所は図 1-3 に示す 23, 7, 4 箇所である。出口波形として採用した竜飛 (2011, 1968) と福島 (1968) の波形と検潮所の位置を同じく図 1-3 に示している。各検潮所で得られた水位記録から既に述べた方法で潮汐、短周期振動を除き、1 分間隔のデジタル記録にしたものが図 4-6 である。波形相関は出口波形の時間長さと同じ長さの対象波形に対し、対象波形の読み取り開始点を 1 分間隔で後ろにずらしながら相関係数を求めるもので、その数値を読み取り開始点の相関係数とする。これにより相関係数は開始点の関数 (相関関数) の形で表現される。相関係数を求める対象となる全時間長さは 6 時間であるが基準波形の時間長さだけ相関係数をもとめられる時間は短くなる。対象とする時間の始まりは 2011 年東北沖の場合、3 月 11 日 14 時、1960 年チリの場合、5 月 24 日 4 時、1968 年十勝沖の場合、5 月 16 日 10 時 (いずれも日本時間) とした。なお観測点の位置による伝搬時間の遅れを考慮して、1, 2 時間開始時間をずらしたり、全時間を 6 時間より長くとしている場合がある。図 7 は基準波形と対象波形の相関係数の値と両波形の間の時間的關係を示したものである。時系列で得られる相関係数が相関関数であるが、その極大値が出口波形の到来の候補である。極大が短時間で複数ある場合は相関係数の大きさや時間的連続性をもとにして 1 個を選ぶ。注目する波の到来を相関関数の極大で決めることはこれまでも使われていることである (例えば阿部・岡田 (2017))。得られた結果の中で相関極大の出現時間、相関係数の大きさに注目

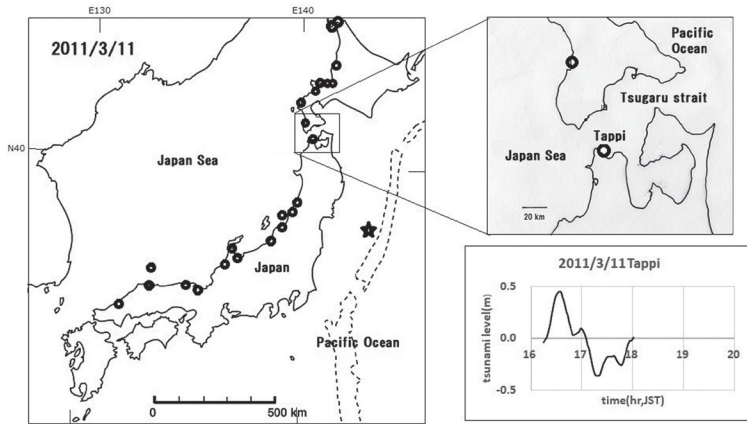


図 1 2011年東北津波で調べた検潮所(○), 地震の震央(★) (左図) と津軽海峡詳細図および竜飛検潮所(右上図) 右下の図は竜飛で観測された津波初動部分で関連の基準波形としたもの

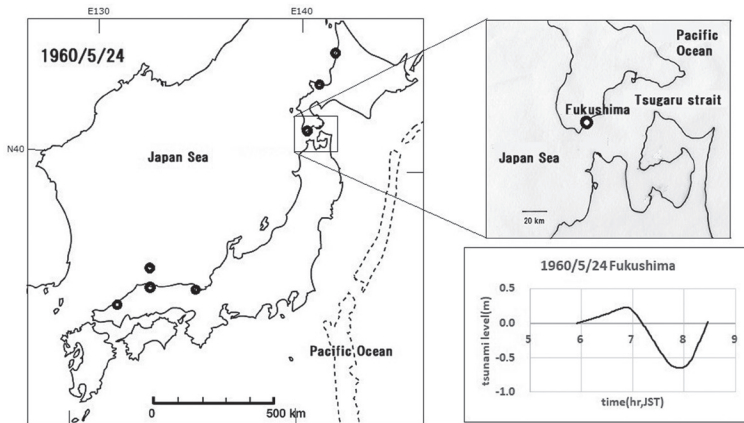


図 2 1960年チリ津波で調べた検潮所(○) (左図) と津軽海峡詳細図および福島検潮所(右上図), 右下の図は福島で観測された津波初動部分で関連の基準波形としたもの

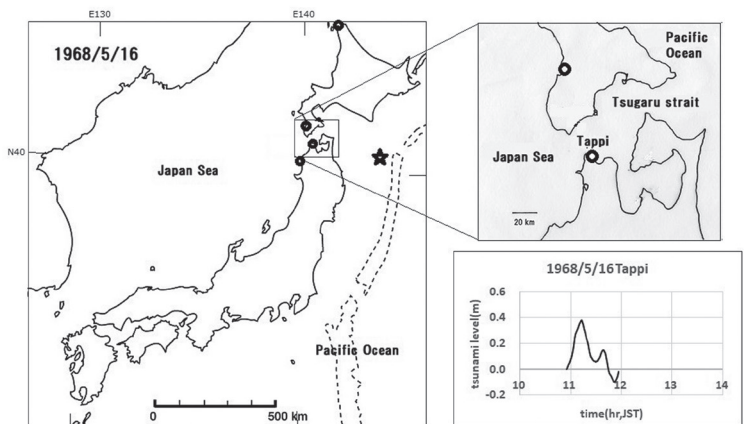


図 3 1968年十勝沖津波で調べた検潮所(○), 地震の震央(★) (左図) と津軽海峡詳細図および竜飛検潮所(右上図) 右下の図は竜飛で観測された津波初動部分で関連の基準波形としたもの

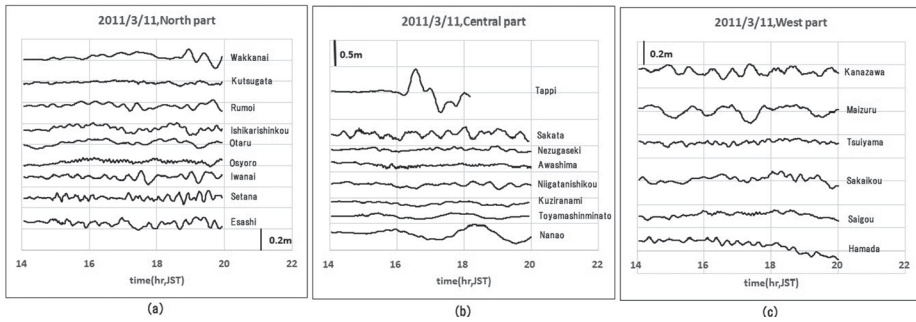


図4 2011年東北津波での津波波形 左から北部(a), 中部(b), 西部(c)と地域分けして表示

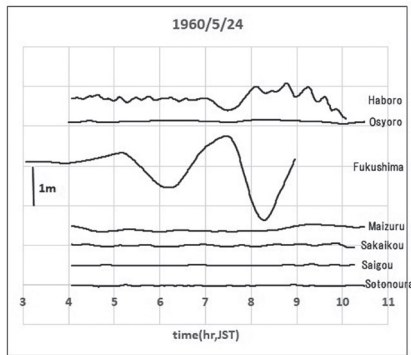


図5 1960年チリ津波での津波波形

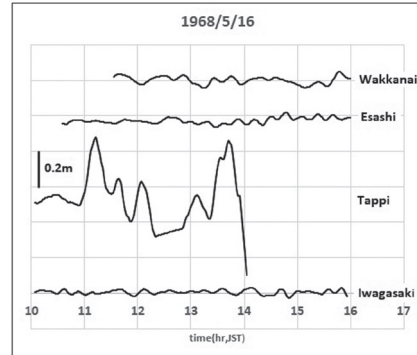


図6 1968年十勝沖津波での津波波形

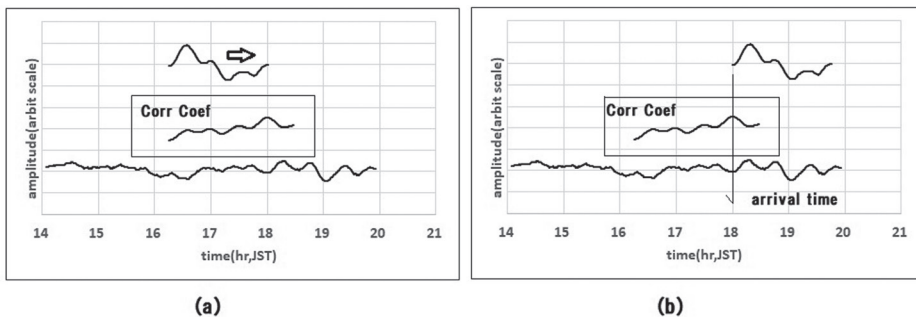


図7 上に示した基準波形と下に示した対象波形の間で相関関数を求める過程(a)と求められたその最大値の時刻に合わせて表示した基準波形(b)

する。極大の出現時間と基準波形地点距離の関係を1993年北海道南西沖地震津波, 1983年日本海中部地震津波の走時と比較するため, これら津波の検潮記録及び谷本他(1983)を使って初動到達時刻の読み取りを行った。震央距離, 基準波採用地点からの距離の算出には国土地理院の測量計算サイトを利用している。

結果

求めた相関関数を2011年東北沖, 1960年チリ, 1968年十勝沖の順に図8-10に示す。図中のダイヤモンドマークは得られた相関の極大値を示したものである。対象波形の観測点は北を上, 南を下にとっている。これを見ると, 津軽海峡から遠ざかるにつれてマークの位置が右つまり時間の経つ方向に移動し

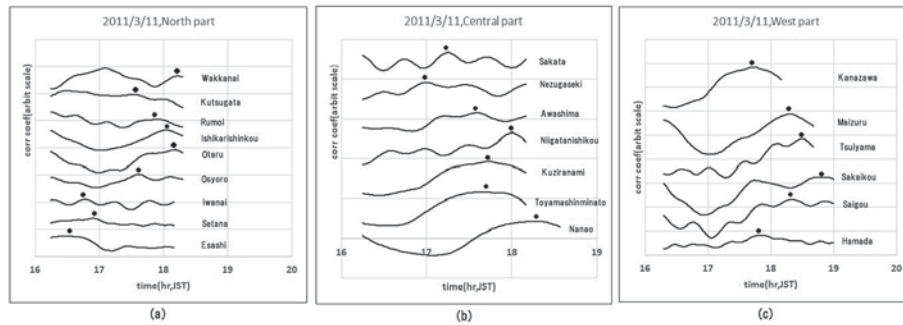


図 8 2011年東北津波で求められた相関関数 左から北部(a), 中部(b), 西部(c) で波の到達と見なした極大にはダイヤモンドをつけて標示

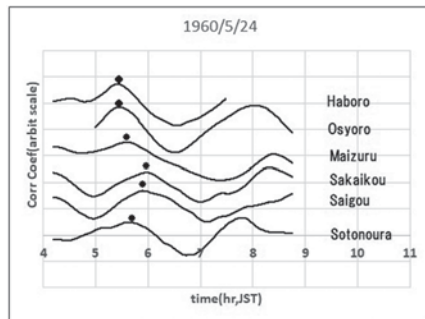


図 9 1960年チリ津波で求められた相関関数, ダイヤマークの意味は図 8と同じ

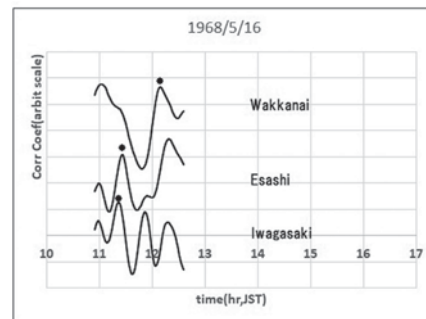


図 10 1968年十勝沖津波で求められた相関関数, ダイヤマークの意味は図 8と同じ

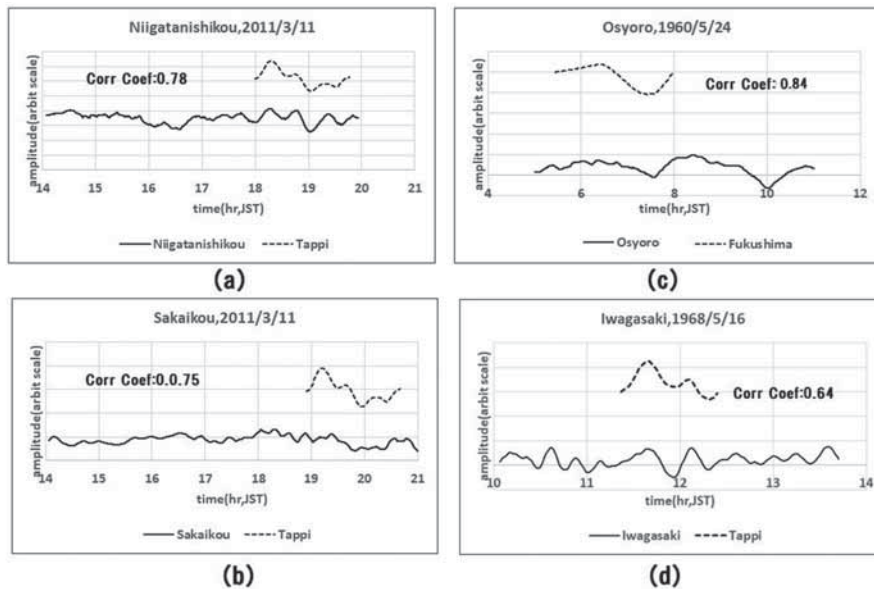


図 11 相関関数最大に対して得られた基準波形と対象波形の関係の例 2011年東北津波の新潟西港(a) 境港(b), 1960年チリ津波の忍路(c), 1968年十勝沖津波の岩が崎(d) の場合 相関係数は図中に表示

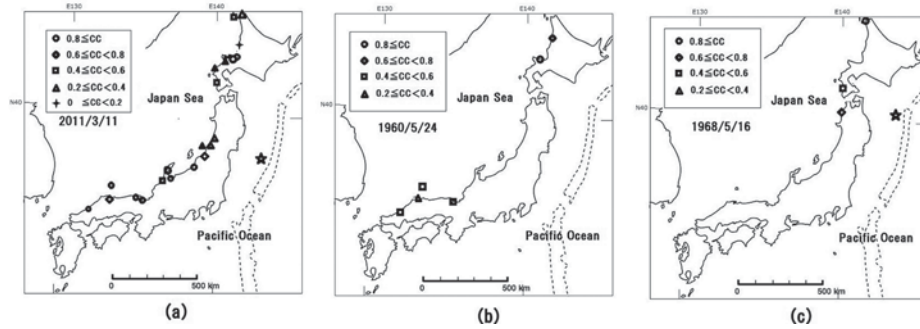


図 12 求められた最大相関係数を対象波形地点の位置に津波ごとに階級分けして表示 2011年東北津波(a), 1960年チリ津波(b), 1968年十勝沖津波(c)

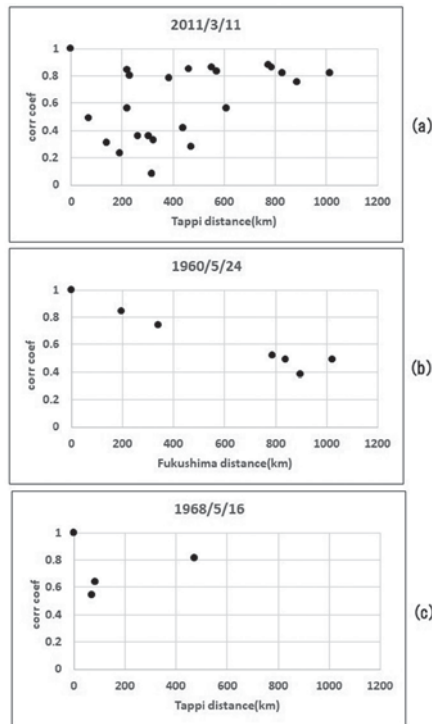


図 13 最大相関係数における基準波形地点からの距離による変化 2011年東北津波(a), 1960年チリ津波(b), 1968年十勝沖津波(c)

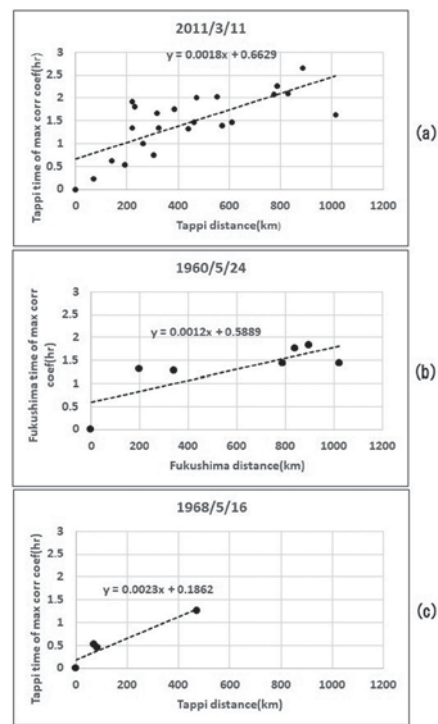


図 14 最大相関係数の出現に対し、基準波形地点からの距離と基準波形出発時刻からの経過時間の関係、2011年東北津波(a), 1960年チリ津波(b), 1968年十勝沖津波(c) 図中点線は最小自乗法を適用して得た一次式

ていく様子がわかる。その中で逆転する場合が何カ所がある。図 11 は相関極大が得られた時間に合わせて基準波形と相関係数の大きさを 4 例について示したものである。相関係数は基準波形の時間長さの間での波形全体の類似性を示すものなので、到達時の鋭い立

ち上がりが見えない中で津波が到達したとされる場合がある (図中の b, c の場合)。図 12 は得られた極大相関係数の値を階級に分けて記号で示したものである。2011 年東北沖津波の場合、新潟以西で相関係数が 0.7 以上で大きいのにに対し、より近い点では係数が

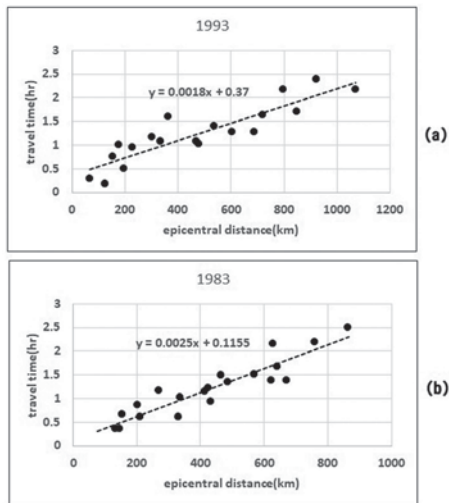


図 15 日本海で発生した津波の走時曲線，点線は最小自乗法を適用して得た一次式で，1993年北海道南西沖地震津波 (a) と 1983年日本海中部地震津波 (b)

0.3 前後と小さい。1960年チリ津波の場合は舞鶴以西において0.4-0.5で相関の度合いは2011年の場合ほど高くない。1968年十勝沖津波の場合は近くで小さく遠方の稚内で大きい。図13は極大相関係数を出口検潮所である竜飛または福島からの直線距離に対してプロットした結果を示したものである。これから1960年チリ津波の場合は減少が距離に比例して生じていると指摘できる。一方，2011年東北沖津波の場合は473kmを境に小さい値でばらつきも大きい津軽海峡近傍と，値が0.8前後でばらつきが小さい遠方領域に分けられる。1968年十勝沖津波の場合はデータ数が3と少ないが0.5-0.8に収まる。図14は横軸には図13と同じ基準点からの直線距離，縦軸にはそこを通過してからの経過時間を取ってプロットしたものである。これを直線で近似した場合の直線を点線で，その際の一次関係式を傍らに示してある。一次式の係数に着目するとそれぞれ0.0018, 0.0012, 0.0023となる。2011年の場合は200km付近でデータの分布に折れ曲がりが見られる。図15は日本海で過去に発生した2つの大規模な津波の初動の走時曲線である（津波の検潮記録からよみとったもの）。両者の勾配において

0.0007の差があり，違いが認められる。勾配の逆数が速度に対応する。

考察

相関係数の極大値の中で連続性にこだわった結果，距離と出現時間の間で順番通りに増加せず，走時に逆転が生じたところがある。例えば2011年の場合の瀬棚から岩内，小樽から石狩新港，酒田から鼠ヶ関，新潟西港から鯨波，境港から西郷，1960年の場合は西郷から外の浦に移る場合であるこの中で後者の場合，外の浦における相関関数で隣の極大とは1時間以上離れており，隣接する検潮所との距離の割に走時の時間差が大きく，隣の極大を選ぶ余地はない。前者の新潟西港から鯨波の場合もそうである。走時が逆転する理由に速度場の特殊性，つまり長波の速度が大きい深い海が存在があげられる。深い海を伝わった波が浅い海域を伝わった波に先行したため逆転が起こったのである。外の浦の場合は隠岐諸島の西に広がる深い海域，鯨波の場合は佐渡西方の富山湾に連なる深い海が存在がこれである。これから推定して他の逆転箇所も速度場の違いで説明できそうである。注目すべきは2011年の北海道の留萌，脊形，稚内である。ここでは選ばれた極大は最大のものではなく2-3番目に大きい極大値である。最大のもは波の伝搬としては時間的に速すぎる。これら3点に対し他の点は極大である他に最大値でもあり，解としての曖昧さがない。一方，3点では解の選び方に任意性つまり不確実性が生じる。これらの3点が北海道で最も遠い点であることを考えると，ここに到達した初動と引き続くフェーズの振幅が小さすぎて相関係数が大きくならなかったのではないかと推測される。

次に津波初動の走時との関係を議論する。今回取り上げた津軽海峡を通過して日本海に広がった津波の極大走時（図14）と日本海で発生した津波の走時（図15）を比較すると，走時曲線（直線）の勾配が似通っていることがいえる。2011年の0.0018は1993年の場

合の0.0018と同じであり、1968年の場合の0.0023は1983年の0.0025に近似する。1960年の場合の0.0012はデータに近距離のものが少ない中で得られていることを考慮すると、0.0018より小さい傾向は納得できる。ただ日本海で発生した津波は水深の深いところから出発しているのに対し、津軽海峡を通過した津波の場合は竜飛、福島という海岸での浅い海から出発していて伝搬経路に違いがあることは考慮しなければならない。その差は2011年と1960年のゼロ切片の大きなことに現れている。原点近くに速度の小さい観測点が多いと走時曲線の立ち上がり急勾配になり、速度が大きい遠方での値との間で不連続になり走時曲線の折れ曲がりが生じる。そのせいでゼロ切片が大きくなる。ゼロ切片に違いがあっても勾配が同じということは、折れ曲がり以前と以後では速度に大小の差があるが、全体を通してみると平均としておなじ速度になるということである。勾配0.0018は逆数をとって速度に換算すると154m/sになり、これを長波速度として対応する水深に直すと2430mになる。この水深は日本海の最大水深3796mより小さく平均水深1767mより大きい。従って勾配0.0018はかなり深い水深の海を伝わる長波速度に対応するものである。着目している津波の周期が長いので深い海を伝わることになったものと考えられる。

相関係数の地理的変化に言及する。図12は津軽海峡からの距離だけでなく地形による変化もあわせて表示したものとなっていると解釈することができる。特に2011年東北津波では北海道から本州全域にかけて万遍なく対象とされていることから、その変化を地形と対応させることができる。北海道や東北地方までは相関が低い状態であるが、新潟西港以遠で高くなり、境港や浜田など中国地方で0.8という高い相関を示す点が注目される。これを地形に結びつけると日本海の海岸線が北海道や東北では南北の直線に近い方向に延びているのに対し新潟以遠で凹型（あるいは下に凸）になっていて、相関の高まりが凹型の地形の始まりとよく対応することを指

摘できる。これを基準波形と関連づけると、基準波形が形を変えないで伝われば相関は高く維持され形を変えて伝われば相関が低くなることを認めた上で、伝搬のプロセスで波形を変える要素に北海道、東北地方と新潟以遠で違いがあったとするのである。1833年庄内地震津波、1993年北海道南西沖地震津波で輪島では震央距離の割に高い津波が観測された（渡辺、1985）がそのことと高い相関が新潟以遠で維持されたことは同じことが原因であると考えられる。津波が深い海を優先的に伝わり深い海に面する海岸で水位が高くなること、2000mの等水深線が北海道から能登半島沖合にまでひろがっていること（藤岡、1997）が総合されて相関係数が大きい状態が生まれたのである。

まとめ

津軽海峡から日本海に拡散した津波を、検潮記録の波形相関をもとに追跡した。太平洋で発生し、津軽海峡を通過した津波は日本海に伝わるが、出口付近に位置する竜飛、福島で観測した波形で日本海に拡散したとし、日本海沿岸で観測した津波波形との間で相関関係を調べた。検討の対象とした津波はおもに2011年東北沖津波で、これに1960年チリ津波、1968年十勝沖津波を加えた3津波である。出口での基準波形は竜飛（2011、1968）、福島（1960）の初動1周期分の時系列波形である。各地での相関関数の極大値に着目すると3津波とも過去に日本海で発生した津波の初動伝搬速度にほぼ等しい速度で極大が移動したことが確認できた。その相関係数の距離変化では2011年の場合近距離で0.2-0.5と小さく新潟以遠では例外もあるが0.8と大きな値を示した。1960年の場合はデータ数が少ないながら一様に減少する傾向になり、距離変化に違いが見られる。津軽海峡から日本海に伝わる津波は相関極大を調べると追跡できることが明らかになった。

謝辞

使用した検潮記録はすべて気象庁はじめ関係諸機関の提供によるものです。ここで厚意ある提供に対して感謝いたします。

参考文献

阿部邦昭・岡田正実, 時系列の相関関数極大を使用した2011年東北津波反射波の検出, 2018年地球惑星科学連合大会予稿集, HDS10-09, 2018
気象庁, 平成23年(2011年)東北地方太平洋沖地震調査報告, 気象庁技術報告, No.133, 2012

須賀盛典・南喜一郎・檜皮久義・灰野博三・稲童丸純・矢久保敏雄・山内義敬・宇津野忠・後藤和彦・及川太美夫・高山博之・鎌田靖宏・山岸晋, 北海道の地震津波, 札幌管区気象台, 1-189, 1986

谷本勝利・高山知司・村上和男・村田繁・鶴谷広一・高橋重雄・森川雅行・吉本靖俊・中野晋・平石哲也, 1983年日本海中部地震津波の実態と二・三の考察, 港湾技研資料, No.470, 5-299, 1983

チリ津波合同調査班, 1960年5月24日チリ地震津波に関する論文および報告, 国際文献社, 1-397, 1960

藤岡換太郎, 深海底の科学, NHKブックス, 1-249, 1997

渡辺偉夫, 日本被害津波総覧, 東大出版, 1-238, 1985