

日本海中部地震における津波

On the Tsunami caused by the Nihonkai-Chubu earthquake

いわ 崎 とし お*
岩 崎 敏 夫*

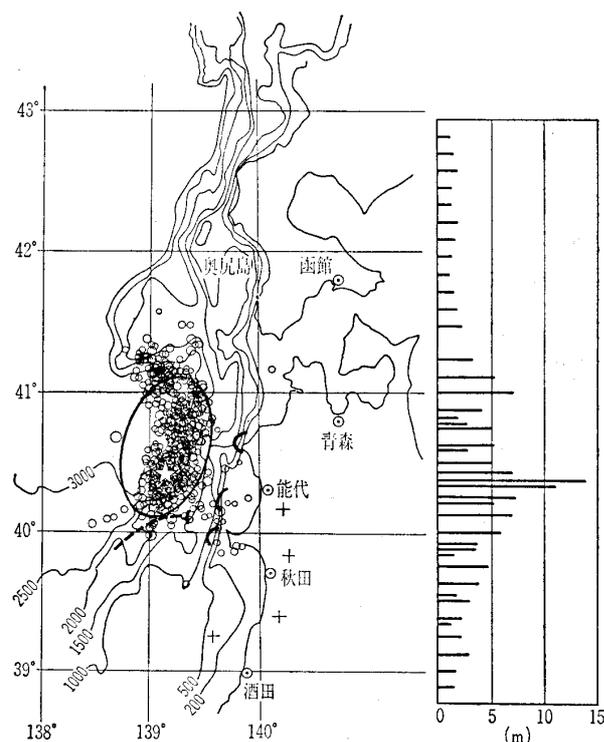
昭和58年5月26日12時に、秋田県能代沖にマグニチュード $M=7.7$ の地震が発生した。震源位置は気象庁において当初 $40^{\circ}21'N$, $139^{\circ}05'E$, 深さ 14 km と発表され、当日夕刻 $40^{\circ}24'N$, $138^{\circ}54'E$, 深さ 5 km と訂正された。東北大学理学部では $40^{\circ}41'N$, $139^{\circ}08'E$, 深さ 15 km と求めている。

地震に伴って発生する津波の機構は、断層運動に伴う地表面（海底面）の静変位によって水が運動することにある。そこで津波の推算を行うには、まず第一に、断層面とその運動を仮定せねばならない。しかるのち、地層を地表面を水平面とする半無限弾性体と仮定して、上述の断層運動に伴う地表面変位を求めておく。そして求めた地表面変位分布を境界初期条件として、こんどは重力長波の連続および運動方程式を数値積分することにより、津波の発生、伝播、陸上そ上などが計算される。

以上津波推算のあら筋を述べたが、この場合断層面をいかなる場所に設定するかが問題である。地震発生直後に津波が発生する範囲を波源域といい、津波を起こした地震ごとに、大略求められている。その方法の一つは波源域がほぼ余震楕円に一致すると考えて、余震々源を詳細に追って行って確定する方法と、他の一つは逆伝播図の方法によって津波記録より求める。後者は津波到達時刻から、地震発生時刻を差し引いた時間々隔における津波の伝播距離を、伝播速度から求めておき、その半径で各地の津波観測点を中心とする円弧をえがき、それらの円弧を包絡する曲線をもって波源域とするのである。発震機構は地震計記録の解析より、今日は余程精細に決定されるようになっており、地震モーメントによって断層成分も得られるようになってきた。さらに断層面のずれの成分を数種類仮定して、津波の計算を行い、沿岸での痕跡高やその分布と比較することによって最も確からしいずれ成分が求められれば、津波の計算は発震機構研究上も重要な一面を担うこととなる。逆に後者の研究の発展に、津波の計算の精度が大きく依存しているのである。

過去の多くの地震津波の検討が積重ねられて、地震のマグニチュード M と、波源楕円の焦点間距離、離心率、長軸長、短軸長などの関係を与える経験式がえられており、 M によって容易に波源楕円の寸法の推算が行える。図一1

*東北大学名誉教授、足利工業大学教授



図一1 日本海中部地震における余震震央分布と推定津波波源域および痕跡高分布

は日本海中部地震に関するいままでの資料をまとめたものである。図中のたくさんの白丸は東北大地震観測所による昭和58年5月26日より31日までの余震々央である。また楕円は $M=7.7$ に対応する経験式による波源楕円であり、さらにこれにほぼ外接したり、切り込んでいる破線は各地津波記録中、押波開始時点より求めた逆伝播波源フロントである。深浦、能代、男鹿を中心とする太い実線の小円弧は引波開始時点より求めた波源フロントである。これより、ほぼ 2000m 等深線に沿う境界より西側で海底面は上昇し、2000m 等深線より 200m 等深線に至る傾斜面において下降が生じたものということがいえる。さらに今回の地震では、余震域はもっと北西方向に伸びていて逆くの字形であり、いままでの波源楕円の考え方に一致しない。

したがって水平面を境界とする半無限弾性体を想定するのではなく、このような島弧斜面を境界にもつ弾性体として理論を精密化することが望まれる。

ちなみに 図一1 の楕円は長軸長 105 km, 短軸長 73 km

論 説

であるが、地震学者の推定は長軸長 120km, 短軸長 40km 程度で、傾斜角 $20^{\circ} \sim 30^{\circ}$ の低角逆断層とされている。

つぎに海底が上述のような分布の変位をおこなった場合、いかなる津波々形を生じるかという問題についてのべる。地表変位はある有限時間内に進行して完了するものであるから変位完了までの時間を Δt とする。これに対し波源域半幅を津波が伝播するに要する時間を津波のタイムスケールと考えて ΔT とする。 Δt は通常 ΔT に比して著しく小さく、そしてその場合には発生津波の波形は、地表変位の形状に一致することが明らかにされている。したがって図 1 より日本海中部地震津波が、我が国に襲撃した場合、最初は一谷の引波、ついで一山の押波が波源域で発生したことが容易に推論される。

発生した津波が島弧斜面上を押し上ってくる場合、一部は斜面で反射し、残りは透過して陸棚上を走ってくる。長い時間スケールで考えた場合には、津波は陸岸に衝突して閉反射し、島弧陸棚縁で開反射し、陸棚波やエッジ波を発生して繰返し波形を生ずる。また日本海をわたって、沿海州や朝鮮半島で反射してくる津波も生じる。さらに半島や島周辺では屈折、回折、微地形反射、湾内振動などが加わる。こうして津波は最初の一谷一山から複雑な波形に変化してゆき、波形スペクトルが形成されてくるのであるが、これらの現象はすべて線形波動現象に属するものである。

南三陸地方には大小さまざまな湾が多数存在する。これらの湾の湾水振動は、その固有周期に一致した周期の津波で最も大きく励起されるという共振作用が、津波の災害を研究する時に重要な問題とされてきた。ついで重要な津波の作用は、集中作用である。これは同じ波高の津波が襲撃した時、湾奥の津波高を湾形ごとに比較すると、長方形湾、梯形湾と、湾奥での集中度が大きくなるほど、津波の浸水高さは高くなり、三角形湾が最も高い水位になると説明されてきた。

ところが今回の日本海中部地震においては平坦な海岸線が大部分であり、港は小規模であって共振作用を起こすほどの周期を持っていない。それなのになぜ大きい津波が発生したのか。このことが、津波の研究に携わる者にとって最も大きい驚異であるとともに研究の意欲をそそられたのである。極めて貴重であったことは、カメラやビデオによって従来に比し格段に豊富な津波の記録が各地でえられたことである。それによって明らかになったことは、能代海岸には周期が 10 秒～20 秒の波が幾重にも連なって襲撃したことで、これらの波の周期は風波のそれであった。なお普通、津波の周期は 5 分ないし数十分といわれている。これら短い周期で、高い波高の波が襲撃した理由は、さきに述べた線形波動現象では説明がつかず、実は分散現象として説明すべきものであったのである。

分散現象というのは、津波に限らず一般に複雑な波形をもつ重力波が伝播してゆくにつれて波形を変化させてゆく

現象をいう。水深が波高に比して大きい場合には、線形分散といって長周期波成分ほど早く伝わるので、洋上で台風が通過し、風波が起こったときは、遠い海岸にはうねりが早く現れる。また水深に比して波高が大きいと、波高が高い部分ほど早く伝わるので、河川などで、遡上する潮波では、時にポロロッカで知られるボア、段波を発生する。これは非線形分散という。しかし高次の非線形分散作用というのがあって、これは波形曲率が大きいほど遅く進む。海岸に近接した場合の波は、高い部分ほど曲率が大きくなっており、低い部分ほど曲率が小さく、ゆるやかな形状になっているのは、両者の非線形作用によって波形が変形したためである。こうして、最後に、安定な波形をうるが、これをソリトン波という。

日本海中部地震で発生した津波は波源域で小さな一谷と、大きな一山であった。山の発生した水深は 3000m であった。これが能代沖に来たときの水深は 100m だから、波高は発生域に比し、2.34 倍になっており、非線形分散作用が著しく作用したもののようである。こうして、津波の先端付近では数個のソリトン波の発生を見たものである。波頂付近で曲率が大きくなっていくということは、同じ体積なら波高が高くなることになる。このような現象は従来も河川では生じることが指摘され、実験も行われていたのであるが、平坦な海岸で実際見事に実現しているのであるから、これは誠に驚異的な現象というほかはない。どうもその主因は波源域における波高にあるらしく、筆者らの推算では波源域において 6～9 m の大きな波が発生していると考えられる。

日本海中部地震による被害報告として本号では噴砂現象が主体として取上げられているが、構造物に対する津波の作用をあげてみると、引潮時の残留間隙水圧による護岸や岸壁の海側への倒壊、同じく引潮時の、岸壁上に越流した水の落下による岸壁前面の深掘れ、港湾内^{みおすじ}に沿う高流速による洗掘、防波堤内外の水位差がもたらす静水圧による転倒で、これらは過去の津波では見られたが今回は著しくない。しかし捨石やマウンド方塊の高流速による掃流、転動のために海中で犠牲者を出したし、また峰浜村では砂丘洗掘防止のために汀線より陸側に設置された 4 t ブロックが最大 130m も陸側に流された。さらに能代港では幅 11 m, 高さ 8.5 m, 長さ 20 m, 水中重量 3000 tf のケーソンが最大 60 m も転倒、移動し、多数の犠牲者を出した。後者の場合、裏側に 5～15 cm の裏込め栗石が 1:1.2 ののり勾配で積まれて有義波高 5.8 m, 周期 14 秒の冬季風浪に耐えられる設計であった。襲撃ソリトンの推定値は、波高 11 m, 周期 14 秒で、裏込め栗石工完成断面では無傷であり、被害は未完成断面にのみ集中していることから、ソリトン波群に対する対策設計の見通しは一応たったといえるであろう。ここで興味のある事実をつけ加えるならば、巨大な 3000 tf ケーソンは移動したにもかかわらず、その前面に

保護のために積まれていた 30 tf の消波ブロックはほとんど位置を変えていない。峰浜村ブロックの場合には、ソリトンが 3 列になって来襲しており、戻り流れの不足のためにソリトンが砕波するごとに水位が上昇して、第 3 列目のソリトンは汀線直前で砕波し、高流速を生じたことが、東北大の実験で明らかにされた。津波の最大遡上高は 14~15 m, 砕波前波高は 7~7.5m と見積もられている。

津波のもたらす災害のうち、このような高流速に由来する動水圧によるものは、従来あまり学問的には重視されなかった。静的作用は長周期かつ線型的なために根拠のある議論が展開できたのであるが、動的作用にかかわる今回のような事象は、従来でも、八重山大津波とか北三陸津波な

どで、巨石が動いたなどと断片的に報告されてはいたが、しかし、ビデオなどの映像によって証明されたのは初めてである。

砂や礫より始まって、粗石、1 tf ないし数 tf のコンクリートブロック、30 tf の消波ブロック、3000 tf のケーソンとつらなる広義の粒状体構造物に対して、浸透水圧やせん断力の作用のみでなく、掃流、転動、移送などのような動的な水流の作用と、粒状体群の挙動が、研究テーマの一つとして重要であるということが、日本海中部地震津波の残した教訓として考えられるのである。

(原稿受理 1984.6.4)