

津波

Tsunami

羽鳥 徳太郎*

Tokutaro Hatori

1. はじめに

自然災害は多岐にわたって社会生活を破壊し¹⁾、なかでも津波災害は上位にランクされ、広域に多大な影響を与えてきた²⁾。104名の犠牲者を出した、1983年日本海中部地震から10年が経過したが、当時テレビで放映された津波の来襲状況は、いまでも強く記憶されていることであろう。1992年9月の中米ニカラグア津波に次いで、同年12月にはインドネシア東部のフローレス島近海で発生した。地震津波の最大波高は26mに達し、死者2080人の半数は津波によるものである。改めて、津波の猛威を思い知らされた。

1993年1月15日、マグニチュード $M=7.8$ の地震が釧路沖で起こり、久しぶりに釧路が震度6の烈震に見舞われた。幸い震源が100kmを超える深い地震であったので津波を免れたが、海溝付近には地震の空白域が残存する。本文では、津波の発生からエネルギーの分布、陸上での挙動など全般にわたり、多くの調査観測データをもとに津波の特性を解説しよう。

2. 発生のメカニズム

津波の原因は、地震に伴うものが最も多く、まれに海底火山の爆発、海岸付近の山体が崩壊して発生するもの、海底の地すべりなどがある。山体の大崩壊による津波例としては長崎県島原の津波が知られている。いま雲仙・普賢岳の火山活動が注目されているが、寛政4(1792)年5月の火山地震で眉山が大崩壊した。大量の土砂が海へ流れこみ、20mを超える津波が島原と対岸の熊本県沿岸を襲い、全体で15,000人の死者を出した。このような山体の崩壊による津波は、局地的に高い波高に達するが、短周期波で減衰が大きいのであまり遠方まで波及しない。

さて、海底下で断層運動が起こると地震が発生し、

広い範囲に海底が隆起または沈降する。その結果、海面が同じ形で上下に変動し、これが津波となって四方へ伝わる。これが一般的な発生のメカニズムである。1964年アラスカ地震と1964年新潟地震の前後に海底の測深が行われ、断層にそって海底の鉛直変動が立証された。しかし、このような地震を挟む海底の測地データは少ない。近年では、地震波と津波の観測データをもとに、断層モデルが数値解析され、波源域の変動量が推定されている。例えば、日本海中部地震津波では、波源域の海底の鉛直変動量は、平均約1mであった³⁾。この津波が海岸へすすむにつれて増幅され、峰浜村では砂丘をのり越え、標高14.2mの地点に達した。

津波の増幅作用は、伝播の課程で主に水深の変化、屈折効果および港湾での共振作用に起因する。波源付近の洋上では、水位変動が小さく波長が長いので、ショク的な海震を感じても津波は分からないらしい。1933年三陸津波のとき、出漁中の漁民が村へ帰ってから、大津波に襲われたことを初めて知った実話がある。

岩手県沿岸のようなリアス式海岸では、湾奥で津波のエネルギーが濃縮され、湾の固有周期との共振作用が加わり、2~3波目に最大波になることが多い。とくにV字型の湾奥ではこの現象が顕著であり、20mを超える波高に達している。しかし、遠浅の直線状の砂丘海岸も津波の安全地帯ではない。日本海中部地震のとき、峰浜村の砂丘海岸では防潮林をなぎ倒して津波が遡上し、海岸から700mも離れた地点で農作業中の人が水死した。もし町があったら、大惨事になったであろう。元禄16(1703)年の関東地震津波のとき、千葉県九十九里浜では2,000人にのぼる水死者が出ている。当時建てられた犠牲者の供養碑が、いまでも10数箇所集落にあり、津波の猛威をしのばせる。

3. 津波のマグニチュード

最大波高がどこどこで何メートルといっても、津波の規模ははっきりしない。規模が大きくなれば、影響

* 元東京大学地震研究所講師

〒332 埼玉県川口市末広2-3-13

を受ける範囲は当然のことながら広域になる。地震では、震源での規模を示すマグニチュード M と、ある場所での震度の強さを区別しているが、津波にもマグニチュード $[m]$ で表す規模階級がある。一般に普及していないが、有史以来の各津波の規模スケールが理科年表に表示されている。

規模階級は、無被害のものから大津波まで、6階級($m: -1 \sim 4$)に波高と影響範囲で区分され、表1に最近筆者⁴⁾が一部補足改訂のものを示した。このスケールは、波高を2.24倍の刻み、エネルギーにして5倍ごとに1ランク変わる。また、各階級の津波エネルギーは、数値実験から求めた波源域での水位変動のポテンシャル・エネルギーを表す。最大のマグニチュード $m=4$ のエネルギーは、 10^{21} エルグのオーダーになる。最近では、各地の検潮記録を用い、波高と伝播距離の関係図から、0.5の刻みでマグニチュードが判定されている。以上のように、津波マグニチュードがエネルギー量で格付けられたことから、歴史津波についても断層モデルの解析と併せ、定量的な議論ができるようになった。

地震と津波のマグニチュードとの統計によれば、平

表1 津波の規模階級 $[m]$

$[m]$	記 事	エネルギー (エルグ)
$[-1]$	波高50cm以下。検潮器で観測される程度で無被害。	2.5×10^{18}
$[0]$	波高1m前後で、漁船・水産施設に被害がでる。100kmの範囲で波高50~80cm。	1.3×10^{19}
$[1]$	波高2~3mで、海岸の低地にある家屋が浸水被害を受け、船舶が流される。200kmの範囲で1m程度の波高がある。	6.4×10^{19}
$[2]$	波高4~6mで、多数の家屋が流出・浸水し、死者がでる。300kmの範囲で1.5m程度の波高がある。	3.2×10^{20}
$[3]$	波高10m前後、局地的に15~20mに達する。400kmの範囲で2.5m程度の波高があり、顕著な被害がでる。	1.6×10^{21}
$[4]$	波高20m前後、局地的に30mに達する。500kmの範囲で約4mの波高があり、甚大な被害がでる。	8×10^{21}

均的な津波は $M7.0$ の地震では $m=0$ 程度で陸上に影響が出ない。 $M7.5$ の地震は $m=1$ に対応し、家屋の浸水や船舶が被害を受ける。しかし、地震の深さをはじめ断層運動は走向、断層面の傾き、断層の長さ、すべり量および継続時間などが多様であるので、平均から外れる津波がある。とくに $M7.5$ 前後の地震では、津波マグニチュードが3階級(波高にして11倍)も偏差が出ることもあり、津波予報が最も難しい。例えば、大太平洋側の地震は、断層の傾斜角が 20° ぐらいの低角逆断層タイプのものが一般的であるが、日本海側の地震では 50° 前後の高角断層のものが多い。したがって、同程度のマグニチュードをもつ太平洋側の地震と比べ、断層の鉛直変位が大きくなり、波高が2倍ほど上回っている。

4. 津波の波源域

津波の速度 c は水深 h のみに依存し、 $c = \sqrt{gh}$ で表せる。例えば、水深4,000mの深海域では時速はおおよそ700km、200mの浅海域でも160kmあり、新幹線の速度に近い。

波源域の推定はこの原理を応用したもので、発震時から各地の津波到達時間をもとに、海図上で観測点から逆伝播図を作図し(またはコンピュータ処理)、最終波面に囲まれた海域が津波の発生源とみなされる。言い換えれば、海底が変動した領域であり、地震観測による余震域とほぼ合致する地殻の破壊域である。日本海中部地震の震央が、沿岸から80kmも沖合にあったのに、津波が7分後に来襲して多くの犠牲者を出した。波源域が南北140km、幅90kmもあって、海底の変動域が沿岸近くまで広がっていたのである。

多くの観測例によれば、波源域の大きさは地震のマグニチュード M に比例するので、 M 値から予想がつく。例えば、 $M8$ の巨大地震で長さ200km、 $M7.5$ の地震で100km、 $M7$ 程度の地震では50kmぐらいになる。また波源域の形は、 $M7$ 以下の地震では円形に近く、 $M7.5$ 以上になると断層方向に楕円状に伸び、径比が2~3になる。

各地の検潮所で観測された津波の波形をみると、初動が押し波か、または引き波で始まっている。これは、波源での海底変動の情報を示すもので、押し波の場合は海底の隆起域から伝わった波、引き波は沈降域からの波を示唆する。逆断層の地震が多いので、陸側の海底が沈降して引き波から始まることになる。しかし、正断層の場合があり、また断層の傾きが東向きか、西

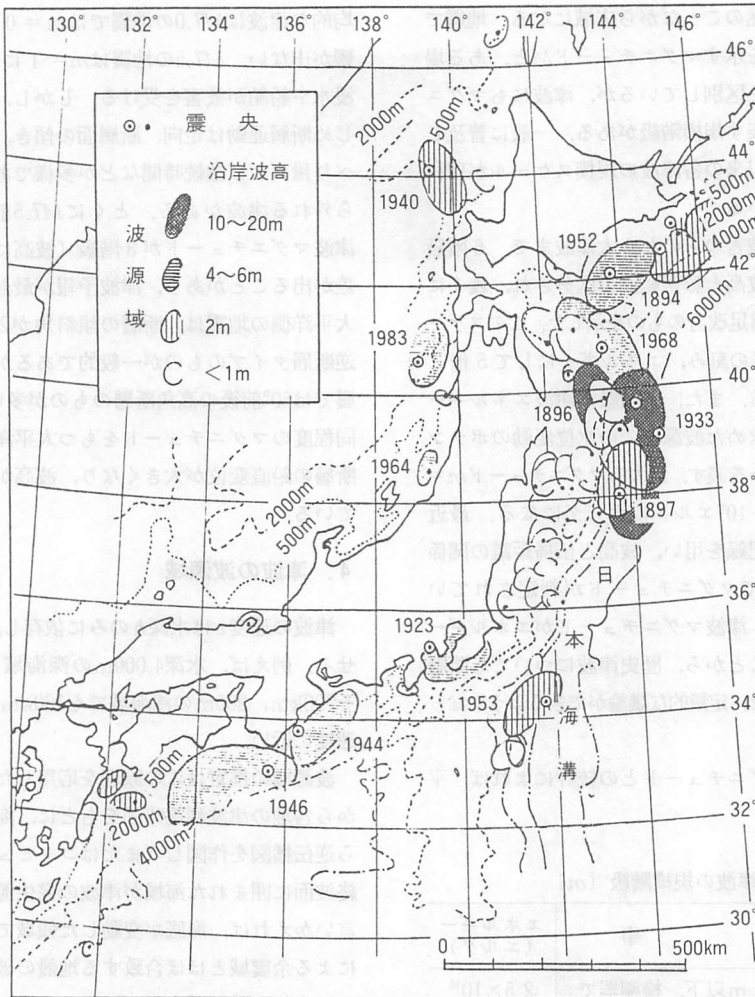


図-1 過去99年間（1894～1992）に日本近海で起きた津波の波源域分布

向きかで津波初動の押し引きが左右される。津波が来る前に、井戸水が枯れるという伝説があるが、押し波で始まる場合があるので過信してはならない。

世界の地震数の1割が日本周辺で発生すると言われており、津波回数も最多である。過去99年間（1894～1992）に発生した津波の波源域分布をみると、図-1のようになる。各波源域は、検潮記録をもとに逆伝播図の方法で推定されたものである。日本海側の津波と比べ、太平洋側が多く、とくに宮城県～茨城県近海の波源が目立つ。しかし、いずれも50cm前後の小津波であった。大津波はプレートがもぐりこむ海溝付近に発生し、沿岸には地震から20～30分後に来襲している。それに対し、関東から東海・南海道では、大津波の波源域は沿岸にまたがって横たわり、津波は5分前後に押しよせる。

一方、日本海側では、波源域が近海に並び、地震と津波の複合災害をもたらすのが特徴的である。また、鰹ヶ沢・象潟地震のような海岸が隆起するタイプのものがあり、100kmぐらいの範囲に被害津波を伴う。北陸～山陰間では、遠方から伝わってくる津波に見舞われるが、近海で起こるものは少ない。しかし、活断層が沿岸の内陸側にあり、福井・丹後・鳥取地震（M 7.3～7.5）では1,000～3,700人の圧死・焼死者を出している。

5. 歴史津波

16年前に東海地震説が提唱されてから、明治以前の歴史地震・津波を見直す気運が高まり、全国の自治体をはじめ大学・研究機関によって、精力的に史料収集がすすめられてきた。それらの史料は、“新収日本地

震史料”(東大地震研究所編、(株)日本電気協会刊行)全5巻に収録され、別巻・補遺を合せると膨大な頁数にのぼっている。一方、筆者は全国の津波被災地で犠牲者を葬った供養碑を調査し、史料を手掛かりに波高の測定、浸水域などの現地調査を繰り返して、歴史津波の全体像が復元されつつある^{5,6)}。

歴史津波は、100~150年の間隔で基本的には同じようなメカニズムで繰り返されている。しかし、近年の津波と比べて、震度・津波分布が異なるものがある。波源域のずれから、地震の空白域が浮び上がり、長期的な地震予知のデータになる。また、200年以上も静穏期が続く津波の被災地はつい忘れがちになるが、波高の調査データは防災対策に強力な手掛かりになろう。ここでは、地域別に主な問題点を挙げてみる。

三陸沖では、1968年十勝沖津波タイプのものが過去3回、100年の間隔であったことが、史料調査で分かった。最近岩手県沖の群発地震で小津波が3回伴った。その南側は現在地震の空白域になっており、1793(寛政5)年の宮城沖津波($m=2.5$)の発生域であった。また、破壊が北方の下北半島沖へすすむ可能性もある。1901年八戸近海の群発地震($M7.2\sim7.4$)は小津波を伴い、沿岸域に甚大な地震災害をもたらした。

南関東では、元禄津波による相模湾の波高が大正(1923)の関東地震津波を上回り、九十九里浜の波高は3倍も高い。延宝5(1677)年の房総沖津波では、外房沿岸で波高が4~8mに達した記録がある。東海地震説は、静岡県東部の安政地震史料の発掘が契機になったが、東海沖津波は伊豆・南関東にも大きな影響を与えてきた。

慶長地震から現在に至る390年間に、東海地震とペアーの南海道地震が4回あり、そのつど和歌山・四国沿岸が地震・津波災害に見舞われたことは知られている。九州東部沿岸の被害も意外に大きい。近年、日向灘では小津波が多発しているが、最大級のは1662年(寛文2)外所地震($M=7.6$)がある。延岡~串間間で潰家3,800、死者200人、宮崎県沿岸に津波が上がった。また、青島で地盤が隆起し、大淀川河口付近が沈降し、集落を移転したところがある。最近、宮崎市郊外の広域に浸水を示す絵図が見出された。

一方、日本海側では、最大級の1741(寛保1)年北海道渡島大島津波も、忘れられた大津波($m=3.5$)の一つであろう。渡島沿岸域では15mの波高に達し、死者1,500人にのぼった。韓国東海岸にも、被災記録が見出された⁷⁾。また、津波歴からみて、新潟県南西沖

も監視すべき海域に挙げられる。小津波を伴った1993年能登半島沖地震は、前駆的な活動であろうか。

1991年1月以来、南西諸島の西表島で群発地震が続いている。津波歴は少ないが、1771(明和8)年の八重山津波では石垣島・宮古島で波高が20~30mに達した。全体で水死者12,000人を数え、死亡率が80~100%の集落がある。海岸へ打ち上げられた津波石の調査から、それ以前にも津波の痕跡があるという。

6. 津波エネルギーの分布

津波は深い海ほど速く伝わり、浅い海では遅くなるので、波面は同心円ですすまない。進行中に水深に左右されて屈折し、島・岬にエネルギーが集まってくる。この現象は、深海域で発生する10分ぐらいの短周期波の津波ほど顕著に現われる。

過去約400年間に日本近海で発生した近地津波と、外国で発生して日本へ伝わってきた遠地津波について、波高の2乗累積値の分布は図-2のようになる。波高の2乗値は、近似的に津波のエネルギーに比例し、累積値の大きさは危険度に対応する。

三陸沖と東海南海道沖で大津波の発生頻度が高いことを反映し、三陸沿岸と紀伊半島・四国沿岸の累積値が突出して大きい。日本海側でのエネルギー累積値は、北海道渡島半島・青森県沿岸が最大であり、三陸沿岸

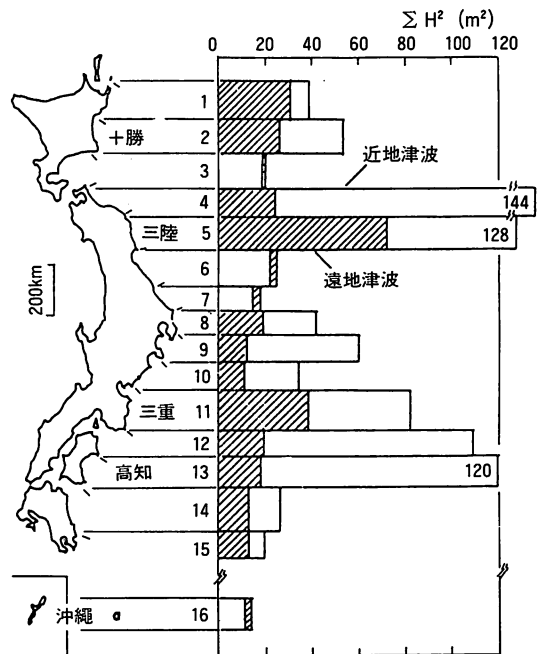


図-2 津波波高の2乗累積値(1586~1992)の分布

村の砂丘海岸では、北斎の絵のように巻き波が高くきり立って砕け、米代川の河口では5分ぐらいの間隔で、段波が次々と川へ遡上し、港では盛り上がり溢れている。

建てこんだ市街地では、流速は1~2 m/sec程度のことが多く、道路上を川のように流れ、ときにはマンホールの重い蓋をふき上げる。山ぎわでは定常波のように振る舞い、波高は高まるが流れは遅い。また傾斜地の市街では、局地的に上げ波より下げ波が速く、滝のように海へ流れ出る。河口付近の流速は3~6 m/secにもなり、津波を見てからでは逃げきれない。河川にそって浸水域が市内に伸び、材木などの漂流物が集まり、死者が多く出ている。

現地調査によれば、港付近の市街地では津波の高さが平均海面上2 m程度で床下浸水し、3 mになると床上浸水で家具が破損し、商品などが流される。そして4 mを超えると(地面上の浸水高約1.5 m)、木造家屋は破壊が激増する^{8,9)}。家屋の破壊率は、浸水高と流速に左右され、水流圧力(浸水高と流速の2乗値の積)に対応し、また数値実験による流速分布と被害分布がよく相関している。浸水高が1.5 mで流速が2 m/secのところ、破壊率が50%に達した例がある。

波高が10 mクラスになると、無防備であれば悲惨なことになる。1933年三陸津波のとき、岩手県田老では流失倒壊家屋が98.9%に達し、763人の死者を出した。このときの流速は、なんと13 m/secという試算がある。しかし、1~2 m程度の津波でも侮れない。船舶・水産関係に被害をもたらす、海岸で津波を気づかないと遭難者が出る。津波は風浪と異なり、海面だけの波でなく、海底を洗掘するほど流れが速いからだ。

8. 震度と津波の関係

津波のアンケート調査によれば、地震が発生したとき、沿岸住民は津波情報に注意しながらも、震度の強弱で判断して行動することが多い。過去98年間の北海道・東北地方沿岸の震度を調べると、震度4のときに津波の回数が最多になっている。しかし、小数ながら震度1~2(微震~軽震)のときに、被害をもたらした津波がある。地震のマグニチュードに不相応な大津波を伴うもので、津波地震(ヌルヌル地震)と呼ばれている。断層が粘弾性的に数分かけて変動するので、地震の揺れが小さく、震度から津波が判断できない。22,072人の死者を出した、1896(明治29)年の三陸津

波は、典型的な津波地震であった。また、1992年ニカラグア地震もこのタイプのもので、地震を気づかないうちに10 mの津波に襲われたという。

地震時に、管区気象台では自署と測候所からテレメータで入電した観測データを自動処理し、数分で震央を決めている。そして地震のマグニチュード、深さを基本に津波を判定するが、地震のメカニズムについては現在開発中で予報に組みこまれていない。また、沿岸付近の地震は、5分以内に津波が来襲する可能性があり、伝達の面でも技術的な課題をかかえている。

9. おわりに

日本近海で発生した津波を中心に、遠地津波についてくわえて概観した。それぞれの津波に共通性がある半面、個性が多彩である。近年、沿岸地域は都市化がすすみ港湾が拡張整備され、防潮堤・水門などの防災施設によって、津波の形態が変わってくる。

一方、被災歴がある自治体では、町内に津波の浸水面を示す標識を建て、ときには講演会を開き、避難訓練などで津波を風化させないように啓発している。また、広報手段が改善されつつあるが、被災者は地元住民だけとは限らない。日本海中部地震のとき、津波犠牲者の半数以上は、他所から来た学童・釣り客・工事関係者達であった。昨今、海岸地方に観光する機会が多くなり、誰も津波と無縁とはいえないだろう。無警戒がもっとも危険であり、早く津波情報を知るかが、明暗を分けている。

参考文献

- 1) 大矢雅彦ほか4名著；自然災害を知る・防ぐ(1987)、古今書院。
- 2) 渡辺偉夫；日本被害津波総覧(1985)、東京大学出版会。
- 3) 相田 勇；1983年日本海中部地震津波の波源モデル、月刊海洋科学、16巻、9号(1984)、527~537、海洋出版。
- 4) 羽鳥徳太郎；津波の規模階級の区分、東大地震研究所彙報、61号(1986)、503-515。
- 5) 羽鳥徳太郎；歴史津波—その挙動を探る、イルカぶっくす10(1977)、海洋出版。
- 6) 羽鳥徳太郎ほか11名；歴史津波—挙動とメカニズム、月刊地球、9巻、4号(1987)、海洋出版。
- 7) 都司嘉宣ほか3名；韓国東海岸を襲った地震海溢、月刊海洋科学、16巻、9号(1984)、527~537、海洋出版。
- 8) 羽鳥徳太郎；津波による家屋の破壊率、東大地震研究所彙報、59号(1984) 433~439。
- 9) 首藤伸夫；津波強度と被害、津波工学研究報告、東北大学工学部、9号(1992)、101~118。