

津波災害の変遷と対策上の問題点

首 藤 伸 夫*

1. はじめに

わが国の津波対策は、1960年のチリ津波を境として大きく異なっている。それ以前は、高地移転、緊急避難が主体であり、防災施設が建設された場所は限られていた。チリ津波対策として建造された防潮堤は、伊勢湾台風後の高潮対策、あるいは侵食対策事業による海岸堤防などと相俟って、中規模津波ならほぼ完全に防ぎ得る基準で整備された。その良い例が1968年の十勝沖地震津波である。完成後間もない津波防災施設が効果を発揮し、被害は軽少にとどめられた。その反面、巨大津波を知らない人々の間に、津波はもう恐ろしくないとの考えが生まれつつある。

一方、沿岸地域の昭和30年代以降の変貌は大きく、可燃物や木材の大量貯蔵、漁船数の増加など、津波災害を大きくする要因の規模は過去に例を見ない程になっている。このまま経過すると、次の大津波時には、再び大災害が生じかねない。その規模の想定は可能であるか、対処する方法としては何があるか、また新しい災害としてどんな形態が有り得るか、の推定が求められている。

この様に、過去の例に学ぶ事も勿論であるが、今後生じ得る災害を想定して、早めに対処して置く事が求められている。

2. 人命被害

地方、村といった大きな単位ではなく、各集落毎という小さな単位で、津波時の家屋被害と人命被害の関係を見てみよう。図-1は明治以前、図-2は明治三陸大津波、図-3は昭和三陸大津波の結果である。図-2の根拠としては、最近発掘された山奈宗真の記録を使用している。図-1、3は、同程度のばらつきであるのに比べ、図-2での相関の良さが目を引くであろう。

この特殊性は、次のような事情に起因している。

明治29年6月15日(旧暦5月5日)には、何度か地震があった。津波を起こした地震は、夕刻に発生し、これもそれほど大きくはなく、ゆっくりと揺れるのみで、震害は発生していない。そのため警戒されず、端午の節

句を屋内で祝う人々は、早期避難を殆どしなかった。場所によっては30mを越える大津波に、当時の家屋は容易に流され、それとともに人命にも大きな被害が生じたのである。

これと昭和三陸大津波の場合とを比べてみよう。昭和8年3月3日の明け方、今度は烈しい地震の後で、また津波が襲来した。出漁の準備をしていた漁師からの連絡などが避難の契機となり、しかも明るくなる時刻であった事が幸いして、被害は軽減した。しかし、相変わらずかなりの死者が出たのには、それなりの原因がある。

それを列挙すると、次の通りである²⁾。

1) 他県人であったため、津波の経験がなく避難しなかったため、多数の死亡者を出した

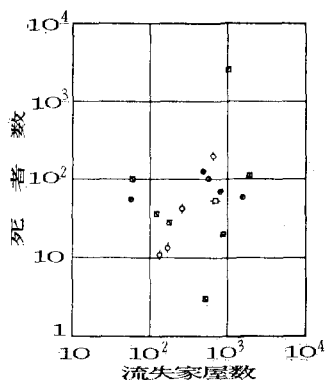


図-1 流失家屋数と死者数
明治以前

○: 正平, □: 慶長, ○: 延宝,
⊙: 元禄, -□: 宝永, ⊠: 明和,
○: 安政 1, ⊠: 安政 2

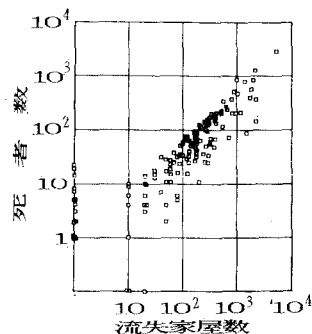


図-2 流失家屋数と死者数
明治29年三陸大津波

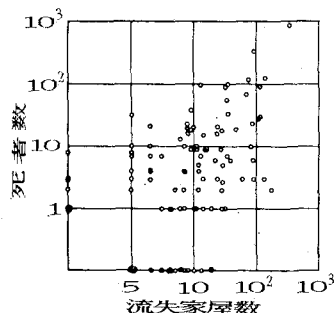


図-3 流失家屋数と死者数
昭和8年三陸大津波

* 正会員 工博 東北大学教授 工学部土木工学科

(釜石海岸通り)。

- 2) 岩手県のある場所では、前年から津波が来ると頻繁に言い伝えられ、地震のある度に警戒していたが、中にはいつもの事の様に思って油断してしまった。
- 3) 明治の津波は地震後 30 分で来たが、今度はこれを過ぎて来ないので、もう安心と思って家に帰り寝た所を、地震後 40 分できた津波が襲った。
- 4) 明治 30 年に宮城県では大きな地震があり、津波が無かったので、地震が(明治 29 年のように)小さいと津波が大きい、地震が大きいと津波は小さいと云う言伝えができた。
- 5) 不確かな言伝えを鵜呑みにして行動した。例えば、「青菜の頃には津波はない」、「冬には津波がない」、「暗れていれば津波はない」、「津波は夜にはない」等である。
- 6) 貴重品を取り出すのに時間がかかり逃げ遅れた。あるいは避難途上で貴重品を取りに戻り遭難した。
- 7) 明治の津波痕跡を最大津波高と考えて高地移転していたが、その地点だけは昭和の津波の方が大きかった(宮城県十五浜村荒)。
- 8) 明治に集落が全滅し、後を継いだ人々にその経験が伝わっていなかった。
- 9) 海岸に沿って集落があり、道路も海岸に平行であった、高所へ通ずるものが無かったため、逃げ遅れた。

3. 家屋の被害

家屋を破壊流失させる原因は、浸水による浮力、形状抵抗、流水の衝撃力、漂流物の衝撃力、である。

昭和三陸大津波時の調査³⁾では、津波の早さが 10 m/s 以下の時、

- 1) 地上 1~1.5 m の浸水で家はだいたい半壊する。
- 2) 1.5 m の浸水で土台に固定していない家は浮き出す。
- 3) 地上 2 階以上になると、1 階は倒壊して 2 階は地上に落ち、平屋や構造の弱い家は殆ど破損する、

事が判明した。しかし、崖を背にした場所では、反射波の為に流速が落ちるから、水深 2.5 m までは倒壊しない。

浮力が効き始めるのは、1 階家なら天井迄水に没かり、2 階家なら 1 階が水没してしまった時である。チリ津波時の経験では、土台にボルトで緊結した家屋でも、2 階の床上 30 cm くらいの水位で、土台毎抜け出して流出した。

明治、昭和、チリの津波による家屋破壊率と浸水深の関係は、既に羽鳥⁴⁾によって調べられている。家屋破壊率は、浸水以上の被害を受けた家屋総数に対する、流失・全壊家屋、半壊家屋(比重 0.5)の家屋数の比で定義されている。ここで、山奈文書による被害を使用し、

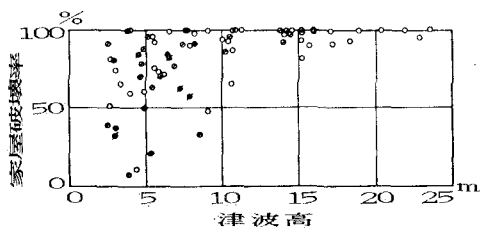


図-4 (a) 津波高と家屋破壊率——明治 29 年三陸大津波

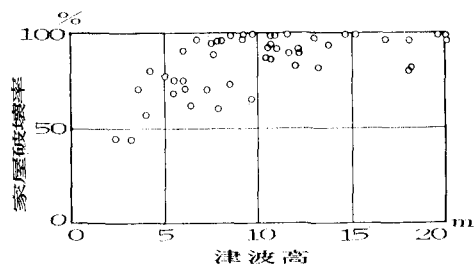


図-4 (b) 津波高と家屋破壊率——明治 29 年三陸大津波(羽鳥)

津波高としては伊木常誠、岩手県、東北大学、の調査結果、及び数値シミュレーション結果を使って作り直すと、図-4 (a) の様になる。黒丸は津波高から地盤高を差し引いて津波浸水深としたもの、白丸は最高津波痕跡高を使用したもの、斜線は計算値によるものである。図-4 (b) は羽鳥のもので、両者は似通っているが、新資料による方が、小さい津波高での被害が大きく出ている。何れにせよ、津波高 2 m 位から被害が出始め、4 m 前後で急激に被害が増大する。ところが、浸水深が 4 m 前後でも破壊率が 10% 程度の場合がある。これは、岩手県高田町長砂の場合であるが、平坦な地形のため、陸地上がった津波が急速に広がり、全体としての浸水深が軽減されたからであろう。この様に、被害率を問題とするときに、最大津波高のみで議論をすると、大きな誤差の生ずる可能性のあることに注意して置かなければならない。

形状抵抗を考慮して家屋破壊率を説明しようとしたのには、羽鳥⁵⁾の研究がある。浸水深で射影面積を代表し、これと流速の自乗との積が家屋に働く抗力を示すと考え

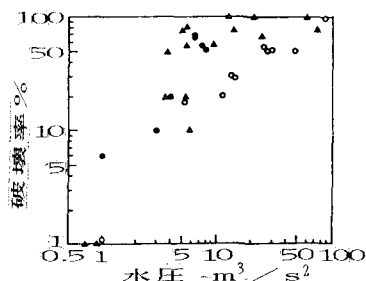


図-5 津波による水圧と家屋破壊率

ている。実際には、流速は測定できないので、数値計算結果を使用している。こうした表現の一例を図-5に示す⁹⁾。白丸は相田・羽鳥が東南海地震津波（尾鷲）やチリ津波（大船渡）に対して数値計算の結果を使用したもの、三角は羽鳥がチリ津波に於ける実測値によって示したもの、黒丸は筆者らが日本海中部地震津波に対し数値計算結果から得たもの、である。これを元にして被害程度を推定する事も可能である様に見えるが、実際の被害には漂流物の衝突の効果が大きい場合が多く、流水圧のみで判断する事は必ずしも正しくない事に注意して置かなくてはならない。

チリ津波時の宮城県志津川町の経験では、直径 60～100 cm の材木が衝突すると家屋が倒壊した。倒壊した家屋は、流されて、破壊力に変わる。貯木場からの木材、大量の漁船、路上の自動車が破壊力の元となる。こうした破壊力の推定はまだ精度良く出来るようにはなっていない。

また、津波自体の衝撃力も無視できない。極端な例は、1946 年アリュンジャンの Unimak 島に見られる。30 m もの高さの津波が島を襲い、一撃で燈台を破壊してしまった。この様な津波は加速度に起因する衝撃力が強い。その大きさは、波形と密接に関係しており、現在では波形そのものの推定も確実にはなされない。

漂流物の衝撃力、碎波の生ずる位置やその波圧の詳細は、解決を急がれる問題である。

4. 漁船の被害

山奈宗真の報告に基づいて、漁船の破壊率と津波高の関係を調べた結果を、図-6 に示す。日本型船舶と記載されて居るもののみを、対象としている。おそらく、当

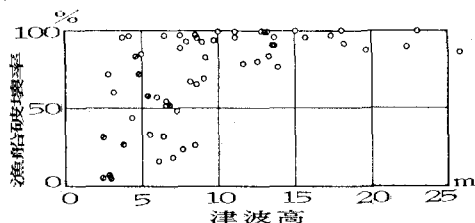


図-6 津波高と漁船破壊率——明治 29 年三陸大津波（日本形船舶）

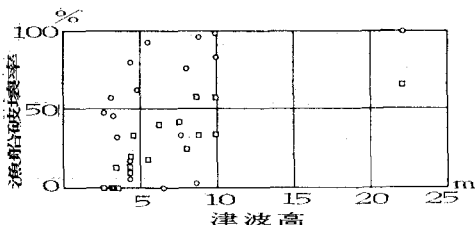


図-7 津波高と漁船破壊率——昭和 8 年三陸大津波（在来船○と動力船□）

時の事であるから、無動力の小型船であると見なしてはば間違いは無いであろう。また、破壊の程度についての説明が与えられていないので、破壊率としては、流失船舶数 (a)、破壊船舶数 (b) の和を、残存船舶数 (c) まで含めた総船舶数で割って百分率として表現した。図中の丸印に斜線のあるものは、津波高として数値計算結果を使用したものである。津波高 2.5 m くらいから被害が出始め、被害率が 100% に及ぶのは、波高 5 m くらいからである。

この状況は、図-7 に示す昭和 8 年三陸大津波時の結果と類似している。岩手県綾里湾より山田湾大沢迄の資料である。この時の船の分類は、手漕ぎの在来船、動力船となっており、前者が明治の小型船に対応していると考えられる。この小型船に関しては、被害の出方は明治三陸大津波の場合と殆んど同じである。発動機船は被害の出始める条件はほぼ同様であるが、一体に故障にいく事がうかがわれる。

図-8 は、昭和 58 年日本海中部地震津波の場合の被害率を示している。被害率の定義は、流失 (a)、大破 (b) は比重 1、中破 (c) は比重 0.5、小破 (d) は比重 0.25 として加重した数を、無傷 (e) を含む船舶総数で割り、百分率で示している。この時の船舶の分類は、無動船、船外機船、5 トン未満、5 トン以上 10 トン未満、などとなっている。前二者が、昭和 8 年三陸大津波での小型船、後二者が同じく動力船に対応しているものと考えて処理した。被害が出始める津波高が 2 m 近辺であることは、過去の例と同じであるが、大型の方がかえって被害が大きくなっている傾向がある。

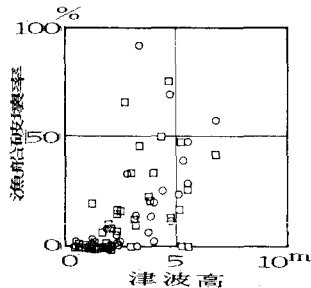


図-8 津波高と漁船破壊率——昭和 58 年日本海中部地震津波（無動船及び船外機船○と 10 トン未満□）

この点について詳しくみるために、大型船小型船とも 10 隻以上在港した漁港を選び、両者の被害率を比べたのが図-9 である。ほとんどの港で、大型船の方が被害を受け易かった事が判る。近年、漁港の整備が進み、防波堤や係船岸が建設された結果、港内

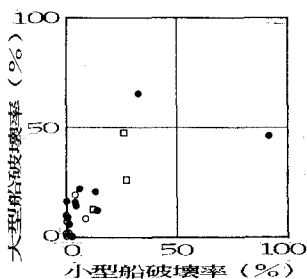


図-9 昭和 58 年日本海中部地震津波時の漁船破壊率と船型（○津波高 2 m 以下、● 2～4 m、□ 4 m 以上）

の自然海浜が失われ、内部での水の流動が複雑となった。また、狭い港内での大型船の繰船が難しく、固いコンクリート構造物と衝突する機会が増えた為であろう。

なお、FRP 船が増えたため、小破であっても修復が出来難い。過去の木造船が小破であれば容易に修理して使用可能となったのに比べ、事情が変わってきた。小破も、その後の使用という観点からは、大破と同じと考える必要がある。

FRP の廃船は、焼却処分もされず、持ち主不明のまま放置される例が多く、津波時に漂流して破壊力に変わる危険が増大している。

5. 津波時の火災

津波時の火災には、過去に幾つかの例がある。

昭和8年には、流出家屋の炊事の火から出火して焼死者40数名(田老)、津波が来て滞水中に原因不明の出火があり海岸通りの198軒が焼失(釜石)、道路の上に押し上げられた大型発動機船が発火して半焼(大船渡)、等が報告されている⁹⁾。

チリ津波時には、石巻において最大波により船舶が岸壁や内海橋に激突、船火事が発生した⁷⁾。

昭和43年十勝沖地震津波では、釜石の或保管庫の中の移動用給油装置に鉄のシャッターを突き破って流木が衝突、転倒して発火したが、発見が早く大事に至らなかった⁹⁾。

石油が関連すると、規模が大きくなる。石油タンクやタンカーが、地震や津波で破壊され燃料がもれた例があり、これからもその機会が増えるものと考えられる。大きな火事になったのは、昭和39年(1964年)のアラスカ及び新潟の場合がある。アラスカ⁹⁾では、Seward, Valdez, Whittier の三つの町で地震と津波で石油タンクが破壊され、それに火がつき、次々と誘爆も生じ、大惨事となった。新潟¹⁰⁾でも、地震で壊れたパイプから油がもれ、地震で絞り出された地下水と津波による浸水との上を油が広がり、地震から時間後に発火して、火はこの油を伝わって広がった。以下に、これらについて若干の考察を行なう。

5.1 アラスカ Whittier の場合

津波による石油の広がりの数値シミュレーションは後藤の手法¹¹⁾によって行なう事が出来る。また、広がり面積丈を問題にするならば、主要な因子を基にした概算法も存在する¹²⁾。図-10に、後藤の計算結果を、概算法の曲線と比較している。広がりの初めは、初期条件として想定した面積が効いているので、両者はやや違っているが、そのうち次第に同じ様な経過を辿ることが判る。そこで、概算法を採用して、アラスカ Whittier での状況を図にしたのが、図-11である。資料から、流出した油の総量は 2.8×10^4 kl であることが判ってい

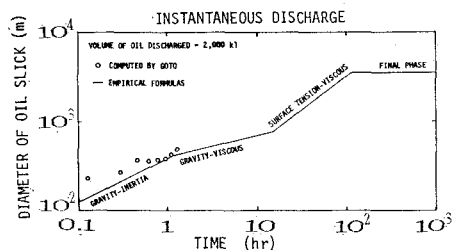


図-10

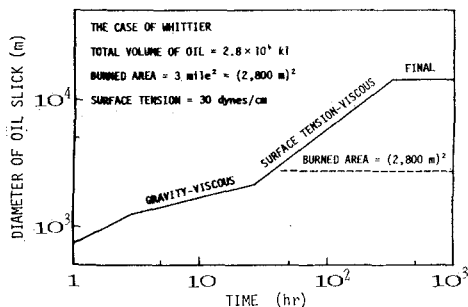


図-11

る。なお、油の種類はディーゼル油、ジェット燃料等々であるが、ここでは表面張力を 30 dyne/cm としている。一方、火事によって焼けた面積は、同じ資料により 3 mile^2 と与えられているので、これを換算して図に示すと点線の通りであり、代表的な長さとしては $2,800 \text{ m}$ である。ところで、流出した石油を広げる力は、初期は重力、後期は表面張力である。しかし、流出直後に火がついたとすると、表面張力が重要な役割を果たす前に、石油が燃えきってしまうというのはいさうな事である。焼失面積が、重力粘性力領域と表面張力粘性力領域の境界(この場合、 $2,200 \text{ m}$)付近の値を取る事は、偶然とは言えないであろう。

瞬間放出を仮定すると、この境界値の代表的な長さ l_B は次式で与えられる。

$$l_B = k_0^{3/2} k_1^{-1/2} (\Delta g v^2)^{1/4} \sigma^{-1/4} \rho_w^{1/4} \quad \dots\dots\dots (1)$$

この l_B 値が、タンク破壊による焼失面積の良い推定値を与えられと考えられる。係数の意味やその値、及び文字の表わす量等については、参考文献12)を参照されたい。

5.2 新潟の場合

石油の放出に関しては、連続放出であった。二次元的な連続放出の代表寸法は、重力慣性力領域、重力粘性力領域、表面張力粘性力領域の順に、次の様になる¹³⁾。

$$\left. \begin{aligned} l &= C_1 (\Delta g)^{1/4} Q^{1/4} t^{3/4} \\ &= C_0 v_w^{-1/12} (\Delta g)^{1/6} Q^{1/8} t^{7/12} \\ &= C_2 \sigma^{1/2} \rho_w^{-1/8} v_w^{-1/4} t^{3/4} \end{aligned} \right\} \quad \dots\dots\dots (2)$$

ここには、未定の常数が3個あるが、領域毎の境界で代表的な力が同じオーダーになるとの仮定をすれば、す

べて C_i によって表わされる。

$$C_0 = C_i^{2/3} K_i^{-2/3} k_v \dots\dots\dots (3)$$

$$C_i = C_i^2 k_i k_i^{-1} \dots\dots\dots (4)$$

C_i の値は、今までには与えられて居ないので、新潟での広がりについての報告（2例のみ）、パイプの亀裂とそこからの噴出の状況、1次元的な連続放出との類推、等から、推定する以外に方法が無かった。その結果、 C_i は0.4から0.5程度の値とするのが最も無理の無い値であることが判った。その結果を 図-12 に示す。

地震後、約5時間

たって発火し、油を

伝わって延焼した。

当時、4.3 m/s の風

が北北東から吹いて

いたが、これは延焼

区域の決定には全く

関係無かった。風下

にありながら、ほん

の僅か土地が高く、浸水

を免れた地域が焼けな

かった事からも、そのよう

に推定される。火の広が

りは、図-13 の通りで

あり、延焼面積 A (m^2)

は時間 t (hr) と比例し

ていた。

$$A = 1.4 \times 10^4 t \dots (5)$$

6. 結 論

巨大津波来襲時の人命被害をなくすには、時期を逸せぬ避難が最も有効である。早期避難が殆ど行なわれなかった明治三陸大津波時の、流出家屋と比例する死者数がこれを物語っている。

極度に切り立った水面を持つ波や漂流物の衝撃力が、近い将来の津波対策において、解決を迫られている重要

な問題である。これらに耐える鉄筋コンクリートの家屋を設計出来るか否かで、津波対策の基本的な方向が左右されるであろう。

沿岸地帯の変貌により、津波被害の形態や規模にも変化が生ずる。具体的な例として、漁船被害の変遷を示した。

大量の貯木、可燃性物質への対策は、緊急になされるべき問題である。石油の流出に伴う被害の一推定方法を、過去の例により示した。

謝 辞： 本研究の一部は、文部省科学研究費自然災害特別研究によって行われた。日本海中部地震津波時の漁船関連資料は、水産庁漁港部の御厚意によるものである。ここに記して謝意を表する。

参 考 文 献

- 1) たとえば、東北大学工学部津波防災実験所報告第4号、昭和62年、及び同第5号、昭和63年。
- 2) 昭和8年3月3日三陸沖強震及津波報告、驗震時報第7巻第2号、中央気象台、昭和8年。
- 3) Nasu, N.: Heights of tsunamis and damages to structures, 地震研究所彙報別冊第1号, pp. 218~227, 昭和8年。
- 4) 羽鳥徳太郎：歴史津波、イルカぶっくす, 125 p., 1977.
- 5) 羽鳥徳太郎：津波による家屋の破壊率、地震研究所彙報, Vol. 59, pp. 443~439, 1984.
- 6) 首藤伸夫ほか：日本海中部地震津波による家屋被害の解析、第41回年講, pp. 533~534, 昭和61年。
- 7) 気象庁：昭和35年5月24日チリ地震津波調査報告、気象庁技術報告第8号、1961.
- 8) 気象庁：1968年十勝沖地震調査報告、気象庁技術報告第68号、1968.
- 9) Committee on the Alaska Earthquake: The Great Alaska Earthquake of 1964, Oceanography and Coastal Engineering, National Academy of Sciences, 1972.
- 10) 消防庁：新潟地震火災に関する研究、昭和39年。
- 11) 後藤智明：津波による油の広がりに関する数値計算、土木学会論文集, 第357号, II-3, pp. 217~223, 1985.
- 12) 土木学会：水理公式集, 昭和60年版, pp. 591~592.
- 13) 首藤伸夫：海での石油の拡がり、第3回環境問題シンポジウム, 土木学会, pp. 82~93, 1975.

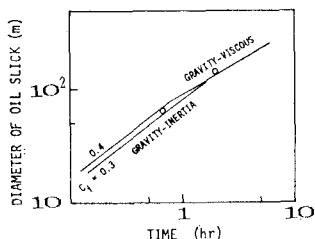


図-12

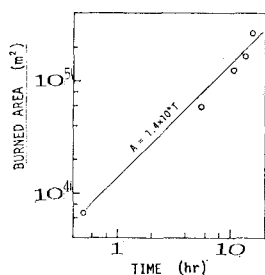


図-13