

津波の浸水深、流速と家屋被害

松 富 英 夫*・首 藤 伸 夫**

1. ま え が き

北海道南西沖地震津波における被害の特徴の一つは、津波そのものや漂流物による家屋被害が目立ったことである。例えば、奥尻島青苗五区では津波により家屋群が全て破壊され、青苗漁港の臨港地区では漁船や箱型作業船が漂流して家屋群を破壊した。地震・津波の予想される東海地方沿岸には、全国有数の規模を持つ漁港や貯木場(松富ら, 1993)が複数存在し、青苗で起こったような津波災害が大規模に生じる可能性がある。

津波を考慮しなければならない地域での津波浸水深のデータは比較的多い。また、現在では、沿岸各地の浸水深は、波源での初期波形が決まれば、数値計算によりかなり正確に推定できる。よって、浸水深と流速、浸水深と家屋の被害程度との関係を明らかにすれば、沿岸毎の津波流体力、漂流物の移動速度(ひいては、漂流物の衝突力)や家屋被害が定量的に評価できることになる。

そこで、本研究は、現地調査データに基づいて、津波の浸水深と流速、浸水深または流速と家屋の被害程度との関係を論じるものである。

主たる現地調査津波は北海道南西沖地震津波である。調査項目は、①家屋の前面と背面での浸水位と浸水深及び家屋の平面形状とその諸元、②浸水深と家屋の造り別の被害程度の2項目である。②については、既往の津波資料の調査も行う。

2. 津波の浸水深と流速

津波の流速データの収集及び流速と浸水深の関係の検討は、以下の理由で有意義である。

①津波の形態として、段波やサージが考えられる。これ等の場合は、衝撃波力や浸水深と流速の自乗の積に比例する抗力が主体となり、それ等の推定には流速を必要とする。

②漂流物の衝突力を議論する場合も、その移動速度を推定する必要があることから、流速を必要とする。

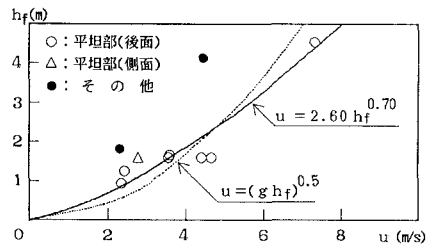
③家屋等の被害程度は浸水深や津波高と関係づけられ

て論じられる(首藤, 1990, 1993; Shuto, 1993)。本来ならば、流速と関係づけたいのだが、流速データが無いからである。ただし、それには、浸水深や津波高のデータは比較的多く、家屋被害だけでなく、沿岸での津波形態、集落被害、防潮林の効果、漁船・養殖筏の被害、津波の音等といったことも統一的に議論できて、非常に便利という側面もある。

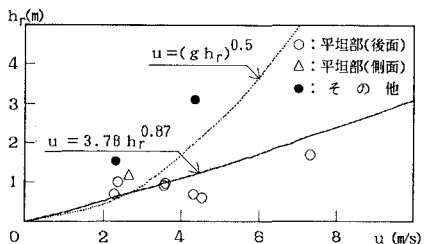
④津波高や検潮記録だけでなく、流速も津波の実態把握や数値計算結果の検証のための好資料となり得る。

これまでに津波の浸水深と流速の関係が検討されたことがない(例えば, Ishimoto et al., 1934; Hatori, 1964)。しかし、両者が共に実津波の実測より推定された場合の関係はこれまでにない。長波理論からは、流速は浸水深の平方根に比例し、流体力は自乗に比例すると推察される(Shuto, 1993)。段波の衝撃波力については、その成立が確認されている(松富, 1991)。

浸水深と流速の関係を直接的に意識して現地調査が行われた最初の津波は、1992年インドネシア・フローレス島沖地震津波と思われる(松富, 1993)。その津波と北海



(a) 前面水深を浸水深とした場合



(b) 背面水深を浸水深とした場合

図-1 実津波の浸水深と流速の関係

* 正会員 工博 秋田大学助手 鉱山学部土木環境工学科

** 正会員 工博 東北大学教授 工学部災害制御研究センター

表-1 現地調査データの一覧

測定場所	水深(m)		水位差(m)	流速(m/s)	平面形状	家屋の造り	記号	備考
	前面	背面						
Wuring (モスク)	1.56	0.91	0.65	3.57	正方形(17.7×17.7m)	煉瓦 モルタル	○ △	側面
	1.56	1.19	0.37	2.69	〃			
藻内	1.29	1.00	0.29	2.38	長方形(7×12m)	木造	○	
賽ノ河原	4.45	1.70	2.75	7.34	六角形(15.6×19.0m)	鉄筋コン	○	
青苗漁港 冷凍蔵施設	4.06	3.09	0.97	4.36	長方形(43.1×31.3m)	鉄筋コン	●	
稲穂小学校	1.60	0.65	0.95	4.32	長方形(36.3×29.3m)	木造 モルタル	○ ○ ○	海側 中間 陸側
	1.60	0.55	1.05	4.54	〃			
	1.60	0.94	0.66	3.60	〃			
江差港	0.94	0.67	0.27	2.30	長方形(14.5×48.0m)	鉄筋コン	○	引き波
大成町宮野	1.78	1.50	0.28	2.34	長方形(21.5×7.2m)	鉄筋コン	●	

道南西沖地震津波で得られた浸水深 h と流速 u の関係を図-1(a) と (b) に示す。それ等の測定場所、具体的な数値や家屋の平面形状等は表-1 に示す。ただし、流速は、流れ方向に見て、家屋等の前面と背面または側面に残された津波痕跡から水位差を割出し、Bernoulli の定理を用いて評価している。この評価法から、得られる関係は陸上の定常的な流れに適用できるものである。(a) と (b) の違いは、浸水深として各々前面と背面または側面のものを採用している点にある。図中の白丸は、ほぼ平坦か、周囲に比べてやや高所の頂部辺りに位置する家屋等から、つまり海水が滞留し難い所で得られたものである。三角は、低い方の浸水深として、側面のものを採用した場合である。黒丸は、すぐ背後が崖であったり、周囲が防波堤等で囲まれていて、海水が滞留し易い所で得られたものである。図より、黒丸が孤立していることが判断される。背面の浸水深に海水滞留の影響が現れたためであろう。(a) と (b) 中の実線は、黒丸を除いた場合の回帰曲線で、各々次式である。

$$u = 2.60h_f^{0.70} \dots\dots\dots (1a)$$

$$u = 3.78h_r^{0.87} \dots\dots\dots (1b)$$

ここで、添字 f と r は前面と背面の別を示す。両式共に h のべき指数が推定値の 0.5 より大きい。式 (1a) と (1b) は、データ数が少ない上、流速は津波波形や底面勾配等に強く依存するかもしれない、暫定的なものである。参考までに、式 (1a) のべき指数は Hatori (1964) が採用した Forchheimer の流速評価式のべき指数と同じであり、粗度係数として 0.023 を採用すると、本データでの陸上津波の平均的な水面勾配は約 1/280 ということになる。各図中の破線は Froude 数が 1 の流れを示す。海水の滞留性の弱い所での津波の流れは、限界流に近い射流であることが判断される。

式 (1a) の物理性は式 (1b) に比べて劣る。Bernoulli

の定理から推して、前面浸水深 h_f に真に対応する流速は零近くの筈だからである。とは言え、既往の津波被害に関する諸検討結果が最大浸水深と関係づけられていることを考えると、浸水深の流速への換算式としては、式 (1a) の方が便利だろう。

式 (1b) の使い道は存在する。家屋等への抗力を考える場合、浸水部分の投影面積の算定では、前面ではなく、背面での浸水深を用いる必要がある。それは、式 (1a) で推定された流速を、式 (1b) を変形した次式に代入して推定され得る。

$$h_r = 0.217u^{1.15} \dots\dots\dots (1c)$$

その他、式 (1b) は定常的な流れでの漂流物の移動速度としても用いられ得る。定常的な流れでは、漂流物の移動速度 = 流速と考えられるからである (松富ら, 1994)。

上記二つの考えに従い、式 (1a) と (1c) を用いて、抗力 F_D を家屋等の前面での浸水深のみで表現すれば、次式となる。

$$F_D = \rho C_D u^2 A / 2 \\ = 2.20 \gamma C_D h_f^{2.15} B / g \dots\dots\dots (2)$$

ここで、 ρ は流体の密度、 γ は流体の単位体積重量、 C_D は抗力係数、 A と B は各々浸水部分の投影面積と幅、 g は重力加速度である。抗力は浸水深のほぼ 2 乗に比例しており、長波理論からの推察 (Shuto, 1993) と合致している。抗力係数をパラメータに、式 (2) の計算例を図-2 に示す。ただし、流体の単位体積重量は 1.03 tf/m³、幅は単位幅を考えている。

式 (1a) と (2) を用いて、実際場での流速と抗力の推定例を示そう。1992 年インドネシア・フローレス島沖地震津波に襲われた Wuring 地区では、比較的详细な津波高と浸水深の調査が行われた。その結果を図-3(a) に示す (松富, 1993)。括弧内が浸水深である。Wuring 地区は細長く、650 m 程度海に突き出た低平地である。本地区

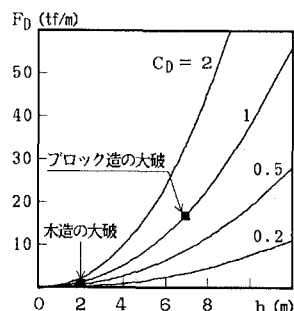
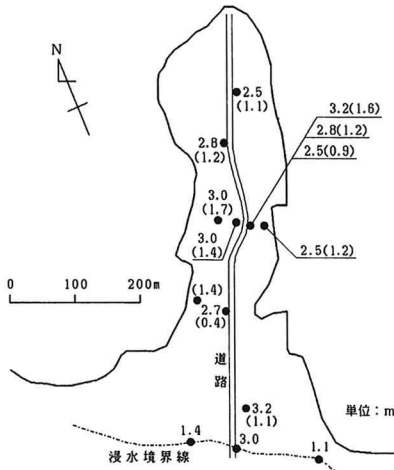
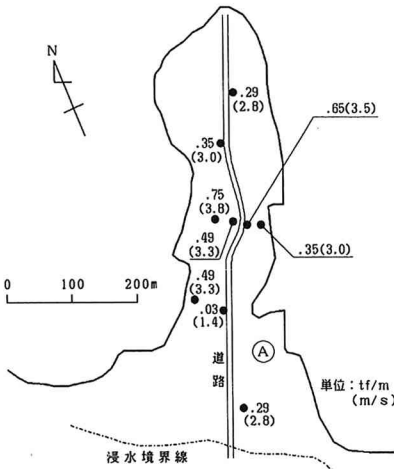


図-2 抗力と浸水深の関係



(a) 浸水域，津波高と浸水深（実測）



(b) 抗力と流速（推定）

図-3 抗力と流速の推定例（Wuring 地区）

の中心を道路が走っており，道路上が本地区の高い所と思えばよい。その地盤高は1.3~2.1mと低い。津波は本地区を南東方向に流れて行った。図-3(a)の浸水深より，流速と抗力を計算した結果を図-3(b)に示す。括弧内が流速，抗力は単位幅当たりのもので，抗力係数 C_b は1を採用している。図より，流速と抗力は本地区の先端部やA点付近で小さいことが判断される。同じことは，斜め写真だが，写真-1からも見て取れる。この写真は1993年1月6日の干潮時に撮影された本地区の空中写真で，先端部とA点付近に家屋が多く残っていることが判る。

3. 浸水深と家屋の被害程度

津波高や浸水深の実データは比較的多く，沿岸での津

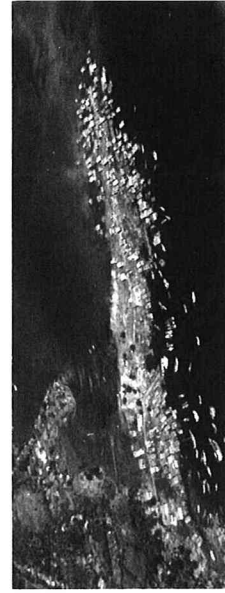


写真-1 Wuring 地区の空中写真（1993年1月6日撮影）

波形態，家屋被害，集落被害，防潮林の効果，漁船・養殖筏の被害，津波の音等との関係が著者らの一人により詳細に論じられている（首藤，1990，1993；Shuto，1993）。前章で示したように，浸水深は流速に換算可能であり，これ等の津波高や浸水深での議論は物理的に有意である。本研究では，家屋被害に的を絞って，北海道南西沖地震津波で得られたデータを加えて，その被害程度と浸水深の関係や被害程度の時間的変遷について論じることにする。

前章の図-1で示したように，同じ浸水深でも，海水の滞留性が強い所とそうでない所では，流体力が違う可能性がある。家屋の被害程度を浸水深で議論する時は，この場所区分を行ってする必要がある。また，家屋の被害程度はその造りによって大きく異なる。造り別に議論せねばならない。

図-4は浸水深と家屋の造り別の被害程度の関係を示す。黒塗りは北海道南西沖地震津波で得られたデータ，白抜きはそれ以外の津波で得られたデータであることを示す。家屋の被害程度は次のように分類している。

- 全壊：柱も全て破壊されている。
- 大破：壁はもちろん，柱のかなりの部分が折れるかわれている。
- 中破：柱は残っている。壁の一部は破壊されている。
- 小破：窓等は破壊されても，壁は残っている。
- 浸水：機械的損傷はない。

ただし，全壊と大破は，何れにしても修復不可能である

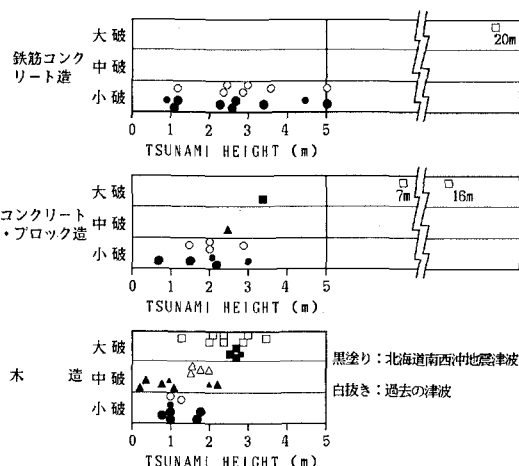


図-4 津波浸水深と家屋の造り別の被害程度の関係

から、これをまとめて大破とし、中破は、柱や壁の一部が被害を受けたが、柱の補強・付け替えも可能で、修復可能な被害程度をいい、小破と浸水は、僅かな補修で利用可能であるから、これをまとめて小破とする。

上段は鉄筋コンクリート造の家屋である。浸水深5mでも、被害はほとんど生じない。北海道南西沖地震津波と過去の津波の被害傾向に違いはない。

中段は石、煉瓦やコンクリート・ブロック造の家屋である。データ数が少なくて明言はできないが、浸水深が3mを超えると中破以上の被害が開始、7mを超えると大破に至るようである。過去の傾向との目立った違いは見られない。

下段は木造家屋である。浸水深が1.5mを超えると中破に至り、2mを超えると大破に至るようである。過去の傾向との違いは中破で見られる。北海道南西沖地震津波では、高々0.25mの浸水深で中破に至っている。最近では、土壁が減り、薄板の間に防音材や断熱材を入れた家屋が増え、強度的に弱体化したため、漂流物の衝突に耐えきれなかったのであろう。

前章の結果を用いて、家屋が大破する時の抗力の計算例を示そう。家屋として、畳6枚分の幅(≒10.8m)を有し、平面形状がほぼ正方形の木造家屋を考える。図-4によると、木造家屋は浸水深が2mを超えると大破に至る。よって、この時の流速は、式(1a)より、

$$u = 2.60 \times 2^{0.70} = 4.22 \text{ m/s} \dots\dots\dots (3)$$

上記の浸水深2mは家屋前面でのものと考えられる。背面での浸水深は、式(1c)より、

$$h_r = 0.217 \times (4.22)^{1.15} = 1.14 \text{ m} \dots\dots\dots (4)$$

家屋の平面形状より、抗力係数は1程度を採用すればよい。よって、家屋に働く抗力は、

表-2 家屋の造り別の大破に至る流速と抗力

家屋の種類	流速(m/s)	抗力(tf/m)
鉄筋コンクリート造	10.2以上	16.9以上
コンクリート・ブロック造	10.2	16.9
木造	4.2	1.06

$$F_D = 0.5 \times 1 \times 1.03 \times (4.22)^2 \times 1.14 \times 10.8 / 9.8 = 11.5 \text{ tf} \dots\dots\dots (5)$$

日本の木造家屋は流速4.2m/s以上か単位幅当たり1トン強以上の抗力で大破に至るようである。

表-2に家屋の造り別の大破に至る流速と単位幅当たりの抗力を示す。ただし、浸水深を除いて、計算条件は上記の計算例と同じである。抗力については、黒四角で図-2中にも示してある。

4. むすび

本研究で得られた主な結論は次の通りである。

①現地調査データに基づく津波の浸水深と流速、浸水深と抗力の関係式を得た。

②同じく、現地調査データに基づき、家屋の造り別の浸水深と被害程度の関係性を明らかにした。

③鉄筋コンクリート造のビルは、過去の津波でも北海道南西沖地震津波でも、5mの浸水深に耐え得ることが実証された。それ以上の津波に対し、波力、漂流物衝突力の両面からの検討を急ぎ、汀線近くへ築く防浪地区の設計指針を明らかにする必要がある。

④過去の津波と北海道南西沖地震津波の家屋被害では、木造の中破で顕著な差がみられた。

⑤日本の木造家屋は流速4.2m/s以上か単位幅当たり1トン強以上の抗力で大破に至るようである。

謝辞: 本調査を実施するに当たり、電力中央研究所の松山昌史氏、INA新土木研究所の山木 滋氏、東北大学の高橋智幸氏、東北大学と秋田大学の学生諸氏よりご協力を頂いた。本研究の一部は文部省科学研究費(代表: 北海道大学 石山祐二教授)により行われた。また、本論文の公表に当たり、小川記念基金の補助を受けた。記して感謝の意を表する。

参考文献

- 首藤伸夫 (1990): 津波発生及び来襲時の音響 一その1 明治三陸大津波時の分類一, 東北大学津波工学研究報告, 第7号, pp. 1-43.
- 首藤伸夫 (1993): 津波発生及び来襲時の音響 一その2 昭和三陸大津波による沿岸での音響発生条件一, 東北大学津波工学研究報告, 第10号, pp. 1-12.
- 松富英夫 (1991): 砕波段波衝突時の圧力分布と全波力, 海岸工学論文集, 第38巻, pp. 626-630.

- 松富英夫 (1993): フローレス島東部の津波とその被害, 月刊海洋, 海洋出版, Vol. 25, No. 12, pp. 756-761.
- 松富英夫・里中嘉樹・池田弘樹 (1993): 沿岸貯木場の実態について, 東北大学津波工学研究報告, 第10号, pp. 29-42.
- 松富英夫・白鳥雅之 (1994): サージ・フロントに伴う流木の最大衝撃力に関する実験的研究, 海岸工学論文集, 第41巻, pp. 811-815.
- Hatori, T. (1964): A study of the damage to houses due to a tsunami, Bull. Earthq. Res. Inst., Vol. 42, pp. 181-191.
- Ishimoto, M. and T. Hagiwara (1934): The tsunami considered as a phenomenon of sea water overflowing the land, Bull. Earthq. Res. Inst., Suppl. Vol. 1, pp. 17-24.
- Shuto, N. (1993): Tsunami intensity and disasters, Tsunamis in the world, pp. 197-216.
-