

津波氾濫流の被害想定

飯塚 秀 則*・松 富 英 夫**

1. はじめに

北海道南西沖地震や阪神・淡路大震災以降, 国や多くの自治体で, 地震はもとより津波による被害想定の見直しが行われてきたが, 波源や津波到達時間, 沿岸津波高, 浸水域, 浸水深, 打ち上げ高の見直し程度で, 家屋等に対する具体的な被害想定には立ち入れない状態にある。その要因に, 津波陸上氾濫流速の評価が難しいこと, 漂流物衝突力の評価方法が確立していないこと, 津波の流体力と家屋被害程度の関係が判っていないこと, などが挙げられる。

以上のようなことからこれまでに, ①津波陸上流速と浸水深の関係 (松富・飯塚, 1998), ②流木漂流速度と衝突力の関係 (松富, 1999), ③津波浸水深と家屋被害程度 (松富・首藤, 1994), などが検討されている。

これらから, 数値計算などによって津波浸水深が推定されれば, 陸上氾濫流の流体力や漂流物を代表する流木の衝突力を推定し, 家屋等の破壊に対する被害想定に結びつけることが出来る。

以上より, 本研究は数値計算による推定浸水深より氾濫流の流体力や流木の衝突力を推定し, 家屋等に対する具体的な被害想定を行うことを目的としている。

2. 浸水深と陸上流速

これまでに, 津波の浸水深と陸上流速の関係についての検討を行ってきており (松富・飯塚, 1998), 理論と実験および現地津波調査データから, 津波先端部背後の定常的な部分における津波氾濫流の陸上流速評価式として次式を得ている。

$$\frac{u}{\sqrt{gR}} \doteq \sqrt{\frac{2C_v^2 F_r^2}{F_r^2 + 2C_v^2}} \sqrt{\frac{h_f}{R}} \dots\dots\dots (1a)$$

$$\frac{u}{\sqrt{gR}} \doteq F_r \sqrt{\frac{h_f}{R}} \dots\dots\dots (1b)$$

ここで, u は陸上流速, g は重力加速度, R は対象地点付近の津波高, C_v は流速係数, F_r はフルード数, h_f , h_r は流れ方向に見て家屋等の前面と背面での浸水深であ

る。また, これまでの実験や現地データから, $C_v=0.9$, $F_r=2.0$ を採用し, 危険側を想定したときの簡便な陸上流速推定式として次式を得る。

$$\frac{u}{\sqrt{gR}} \doteq 1.1 \sqrt{\frac{h_f}{R}} \dots\dots\dots (2a)$$

$$\frac{u}{\sqrt{gR}} \doteq 2.0 \sqrt{\frac{h_f}{R}} \dots\dots\dots (2b)$$

この式 (2a), (2b) により浸水深より推定された陸上流速 (以下, 推定流速) と, 数値計算では得にくい家屋等の前面浸水深を得ることが可能である。

3. 浸水深と流木衝突力

これまでに, 水路実験, 空中での大規模実験と衝突力の式形の理論的な考察に基づいて, 次の流木衝突力評価式が提案されている (松富, 1999)。

$$\frac{F_m}{\gamma_b D^2 L} \doteq 1.6 C_{MA} \left(\frac{v_{A0}}{\sqrt{gD}} \right)^{1.2} \left(\frac{\sigma_f}{\gamma_b L} \right)^{0.4} \dots\dots\dots (3)$$

ここで, F_m は流木衝突力, γ_b は流木の単位重量, D は流木径, L は流木長, C_{MA} は見かけの質量係数, v_{A0} は衝突速度, σ_f は流木の降伏応力である。剛な構造物へ衝突するときに適用されるもので, C_{MA} は開度 (=100×(1-家屋幅/流域幅)) が大きい時や段波やサージに伴う場合は 1.7, それら背後の定常的な流れに伴う場合は 1.9 である (松富, 1999)。また, 式 (3) と (2b) から衝突力を浸水深 h_r の関数の形で表すと, 定常的な津波氾濫流に伴う流木の簡便な衝突力評価式として次式を得る。

$$\frac{F_m}{\gamma_b D^2 L} \doteq 7.0 \left(\frac{h_f}{D} \right)^{0.6} \left(\frac{\sigma_f}{\gamma_b L} \right)^{0.4} \dots\dots\dots (4)$$

ただし, 流木の衝突速度 v_{A0} は氾濫流の流速 u と等しいとして, 危険側を考えている。式 (3) は数値計算により陸上流速も推定できる場合に, 式 (4) は何らかの原因により陸上流速が推定できず, 浸水深のみ推定可能な場合などに適している。

4. 家屋等の被害判断基準

津波氾濫流による家屋等への被害想定をする上で必要となるのは, 氾濫流の抗力または漂流物の衝突力によってどの程度の被害が生じるかの判断基準である。これま

* 株式会社 飯塚土木

** 正会員 工博 秋田大学助教授 工学資源学部土木環境工学科

でに、主に北海道南西沖地震津波で得られた現地データより、陸上氾濫流による家屋等の前面浸水深と被害程度の関係が求められている(松富・首藤, 1994)(表-1参照)。これを用いて、家屋等の被害程度を浸水深ではなく抗力で評価し、被害判断基準とする。

家屋等に働く津波氾濫流の抗力 F_D は次式で評価される。

$$F_D = 0.5 \rho C_D u^2 A$$
$$= 0.5 \gamma_w C_D u^2 h_f B / g \dots\dots\dots (5a)$$
$$\approx 0.61 \gamma_w C_D h_f^2 B \quad (\text{N, m}) \dots\dots\dots (5b)$$

ここで、 F_D は抗力、 γ_w は海水の単位重量 (10.09 kN/m³)、 C_D は抗力係数、 u は陸上流速、 h_f は前面浸水深、 B は浸水部分の幅、 g は重力加速度である。投影面積 A には、津波の流体力に関する模型実験の結果(松富・大向, 1999) やこれまでの水理実験などにより蓄積されたデータの有効利用を考えて前面浸水深を用いており、また抗力係数 C_D は 1.1~2.0 を採用している。式 (5b) は式 (2a) より抗力を前面浸水深のみで表した、定常的な氾濫流における簡便な抗力評価式である。式 (5b) により計算した家屋の造り別被害判断基準を表-1 に示す。なお、流木の衝突については油タンクへの衝突推定例(松富, 1999) があるが、家屋等の被害程度との関係は判っておらず、被害判断基準の作成には至っていない。

5. 津波遡上計算例

5.1 対象領域と計算条件

実際の地形上での被害想定を行うために、秋田市沖約 90 km の沖合で M 7.7 の地震が発生したと想定して津

波遡上計算を行い、津波氾濫流の抗力と流木衝突力の推定を行った。基本式は摩擦を考慮した浅水理論で、計算方法はリープ・フロッグ法である(後藤・小川, 1982)。

計算領域は、図-1 に示すように、想定津波波源域全域を含む青森県南部から山形県までの東西 191.7 km, 南北 259.2 km の範囲とした。空間格子は図示したように A~D の 4 領域で表現し、その間隔は 1350 m, 450 m, 150 m, 50 m である。また、遡上計算領域(領域 D)は秋田港周辺の東西 5.9 km, 南北 9.4 km である。各領域の時間格子間隔は、領域 A, D で 3 秒, C, D で 1 秒とした。また、マンニングの粗度係数は陸域で 0.040, 水深 200 m 以下の浅海域で 0.025, その他の海域で 0.010 とした。

初期波形は表-2 に示す想定地震の断層パラメータ(秋田県, 1997) を用い、Mansinha & Smylie 法により図-2 のように与えた。

5.2 計算結果

秋田港周辺での時間波形例を図-3 に示す。モニタ領域は C 領域で計算時間は 2 時間である。また、陸上への遡上はさせず、陸・海の境界は完全反射である。図より

表-1 家屋の造り別被害判断基準 ($C_D=1.1\sim2.0$)

家屋の種類	中破			大破		
	h_f (m)	u (m/s)	F_D (kN/m)	h_f (m)	u (m/s)	F_D (kN/m)
鉄筋コンクリート造	—	—	—	7.0 以上	9.1 以上	332~ 603 以上
コンクリート・ブロック造	3.0	6.0	60.7~ 111	7.0	9.1	332~ 603
木造	1.5	4.2	15.6~ 27.4	2.0	4.9	27.4~ 49.0
被害程度	柱は残っているが、壁の一部が破壊される。			壁はもちろん、柱のかなりの部分が折れるか失われる。		

表-2 断層パラメータ

長さ (km)	幅 (km)	深さ (km)	滑り量 (cm)	傾斜角 (°)	滑り角 (°)	走向角 (°)	M
93	54	1	400	90	35	345	7.7

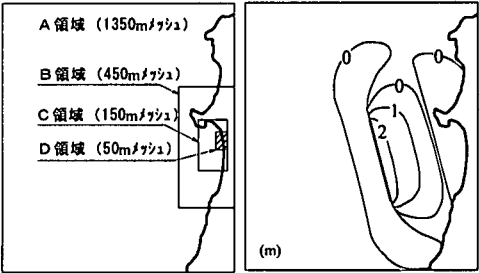


図-1 計算領域

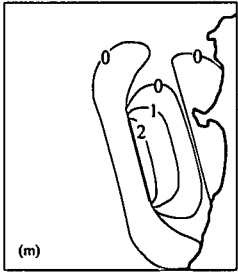


図-2 初期波形

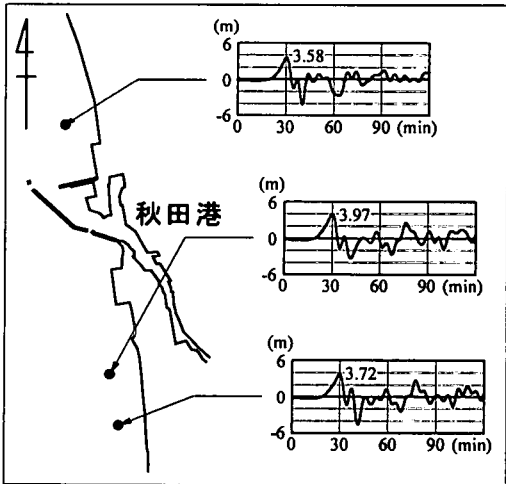


図-3 秋田港周辺での時間波形

秋田港周辺には津波発生後約 30 分で第 1 波が来襲し、それが最大波であることが判る。本研究での陸上流速推定法は波峰付近の定常的な部分を対象としているため、この第 1 波での最大浸水深時の値を用いる必要がある。

遡上域と最大浸水深分布を図-4 に示す。外海に面した所で大きな浸水深になっており、部分的に 4 m 弱に達している。また、秋田運河に面した地盤高の低い右岸側で広い遡上域が認められるが、浸水深は最大で 2 m 弱である。その詳細を図-5 に示す。

数値計算によって得られた流速（以下、計算流速）の分布を図-6 に示す。海に近いほど流速が大きく、北西から流れ込んだ氾濫流が地形に沿って北東方向に変化している様子が判る。ただし、値は各地点での最大浸水深時のもので、同一時間上のもではない。

最大浸水深時の氾濫流による抗力と流木 1 本当たりの衝突力を図-7(a), (b) に示す。流木諸元は秋田港での平均的な値である $D=0.6\text{ m}$, $L=11\text{ m}$, $\gamma_D=6.9\text{ kN/m}^3$ を用い、 σ_f として湿潤時の木材の平均的な静的圧縮強度 $\approx 19.6\text{ MPa}$ を採用した。津波陸上流速は計算流速を用いている。流木漂流速度は、過去の実験より概ね流木長の 20 倍（本ケースでは 220 m）以下の流下距離で津波陸上流速と等しくなることが判っており（松富・松本, 1998）、遡上域では流木の漂流速度 v_{A0} を陸上流速 u として計算している。図-7(a)を見ると、抗力は最大で 22.1 kN/m 程で、表-1 の被害判断基準に照らし合わせると、

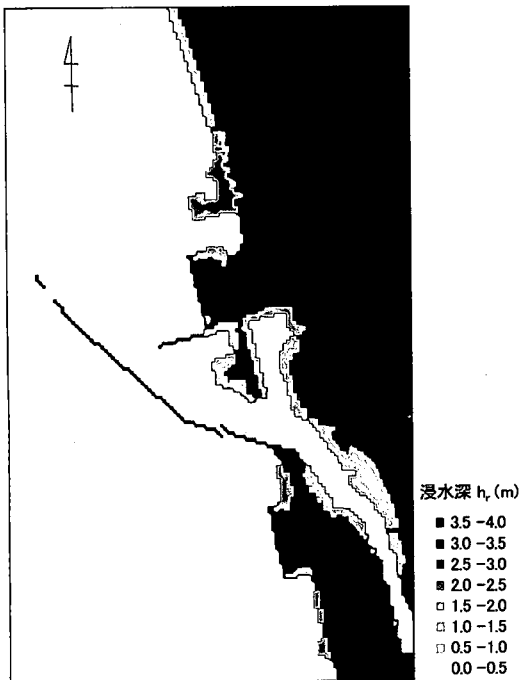


図-4 遡上域と最大浸水深分布

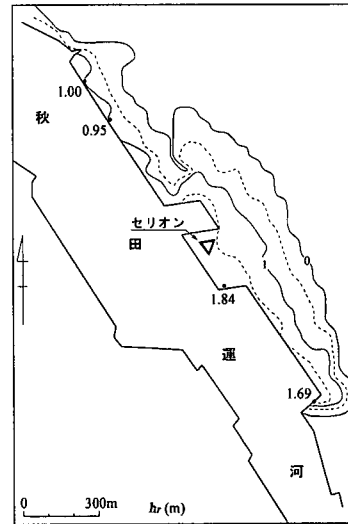


図-5 浸水深分布詳細

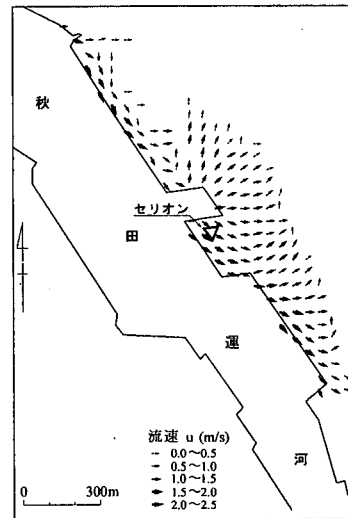
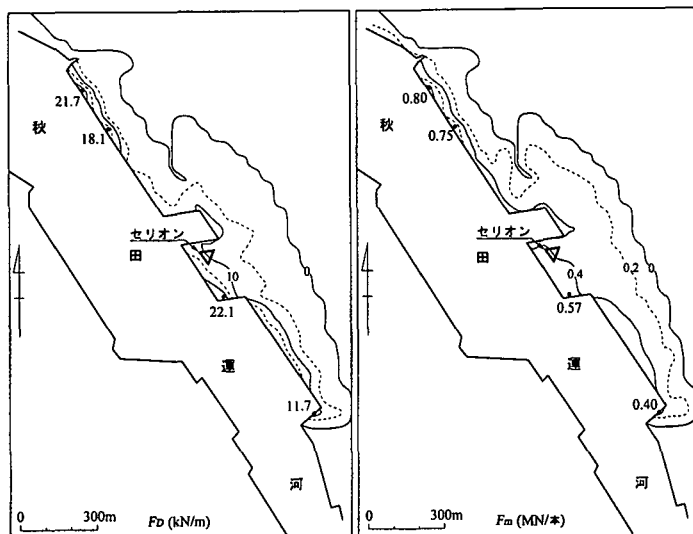


図-6 計算流速分布

この付近は木造家屋の大破には至らず、中破以下であることが予想される。図-7(b)を見ると、流木の衝突力は海側に近いほど大きく、部分的に 800 kN/本を越える所も見られる。最も危険側を考えているとはいえ、家屋等に大きな被害を与えると予想される。

また、何らかの理由で陸上流速を計算によって求められない場合は、式 (5b) や式 (4) を用いて浸水深より抗力や流木衝突力を推定する必要がある。浸水深により推定された抗力と流木衝突力の分布を図-8(a), (b) に示す。ちなみに、陸上流速推定式では流向を考慮することが不可能であるため、流向は家屋等の壁面に直角方向と仮定し、危険側を考えている。図を見ると、計算流速



(a) 抗力分布

(b) 流木衝突力分布

図-7 最大浸水深時の計算流速による抗力と流木衝突力

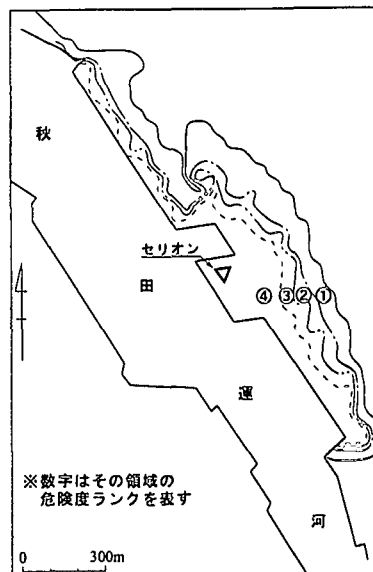
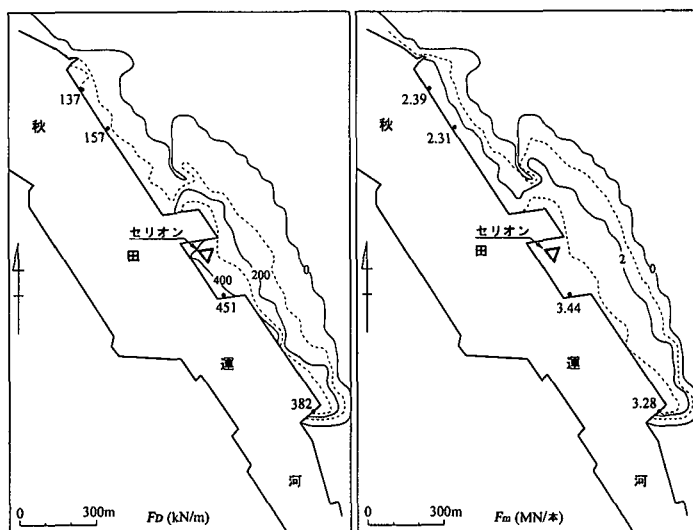


図-9 ハザードマップ



(a) 抗力分布

(b) 流木衝突力分布

図-8 推定流速による抗力と流木衝突力

を用いたときよりも抗力では20~30倍、衝突力で6~8倍と、かなり大きな値になっている。これは、①陸上流速推定式が現地データの最も危険側を考えたときのものであること、②陸上流速推定式は本来平坦な地形に適用することを前提としており、実地形では反射などの影響で流速の割に浸水深が大きくなるなど、流速を過大評価してしまう可能性があること、③遡上計算領域Dの空間メッシュが50mと荒く、比較的平坦な部分のメッシュ数が少ないこと、などが原因と考えられる。この結果を見ると、浸水域のほとんどの場所で木造家屋は大破に至り、運河に面したところではコンクリート・ブロック造も中破以上の被害を受ける危険性があるということが判る。

また、どちらの評価方法でも、津波氾濫流そのものの流体力よりそれに伴う漂流物が被害を大幅に拡大する可能性があることが判断された。構造物を設計する際には、津波氾濫流そのものに対する強度を考えるに加えて、流木などの漂流物に対する強度も考慮すること、もしくは漂流物の流下防止策が必要であると思われる。

表-1の被害判断基準ののっとり、津波氾濫流の家屋等に対する被害危険度ランクを表-3のように設けて作製したハザードマップを図-9に示す。抗力係数 C_D は危

表-3 被害危険度ランク ($C_D=2.0$)

ランク	抗力 F_D (kN/m)	家屋等の被害程度
①	$0 < F_D < 27.4$	木造家屋の小破または浸水
②	$27.4 \leq F_D < 49.0$	木造家屋の中破、コンクリート・ブロック造の小破
③	$49.0 \leq F_D < 111$	木造家屋の大破
④	$111 \leq F_D < 603$	コンクリート・ブロック造の中破
⑤	$603 \leq F_D$	コンクリート・ブロック造の大破、鉄筋コンクリート大破の危険性

険側を考慮して2.0を用いており、抗力分布は推定流速により計算されたものである。図より海に近い所でランク4の範囲が広く、海から離れた所でランク1の範囲が広く、ランク2、3の範囲は狭いことが判る。このことから、氾濫流そのものによる被害は遡上長によって極端に違ってくる、ということが予想される。

6. ま と め

本研究で得られた主な結論は以下の通りである。

① 陸上流速推定式を用いることにより、波先端部背後の定常的な津波氾濫流の抗力による家屋被害判断基準を算定し、浸水深ではなく抗力を用いた家屋被害想定の方法を提案した。

② 数値計算だけでは推定することが難しかった津波氾濫流の抗力やそれに伴う流木の衝突力を推定する一方法を示し、実地形での数値計算による被害想定例を示した。

③ 津波氾濫流そのものよりも、それに伴う流木などの漂流物が被害を大幅に拡大する可能性があることを示した。港湾などの海岸部では漂流物の流下防止策を十分

に取る必要がある。

謝辞：秋田沖の海底地形データを作成する上で、秋田県と東北大学災害制御研究センターの今村文彦先生から、津波初期波形の計算については京都大学巨大災害研究センターの高橋智幸先生からご助力を得た。ここに記して感謝の意を表する。

参 考 文 献

- 秋田県 (1997): 秋田県地震被害想定調査報告書, pp. 94-145.
後藤智明・小川由信 (1982): Leap-frog 法を用いた津波の数値計算法, 東北大学工学部土木工学科, p. 52.
松富英夫 (1999): 流木衝突力の実用的な評価式と変化特性, 土木学会論文集, No. 621/II-47, pp. 111-127.
松富英夫・飯塚秀則 (1998): 津波の陸上流速とその簡易推定法, 海岸工学論文集, 第45巻, pp. 361-365.
松富英夫・大向達也 (1999): 津波氾濫流の流体力に関する実験, 海岸工学論文集, 第46巻, pp. 336-340.
松富英夫・首藤伸夫 (1994): 津波の浸水深・流速と家屋被害, 海岸工学論文集, 第41巻, pp. 246-250.
松本光司・松富英夫 (1998): 流木の移動加速距離に関する実験的研究, 土木学会東北支部技術研究発表会講演概要, pp. 262-263.