津波の河川遡上に関する研究



折敷秀雄 調査第一部 研究主幹



研究の背景と目的

平成16年12月26日にスマトラ島北西部沖で発生した 地震に伴う津波によって甚大な被害が引き起こされた。 また、国内では中央防災会議等において、東海地震や東南 海・南海地震等の大規模地震に伴う海岸の津波想定高さ等 が公表され、津波防災対策が急務となっている。

河川を遡上する津波は、陸上部を遡上する津波に比べ て、速く、かつ、遡上距離も長くなる特性がある。このた め、河川では、津波の高速流による構造物の被災や図-1 に示すような沿岸から陸上部を遡上しては到達し得ない場 所に、河川から越水した津波による浸水の可能性がある。 既往津波においても河川沿いの内陸部で上述のような被害 発生事例が記録されている。



図-1 河川を遡上した津波による主な被害

しかし、河川における津波対策を検討する上で必要な津 波の河川遡上解析は、現在までのところ散発的な検討がな されているだけであり、標準的な手法は確立されていない 現状にある。 **綿貫布征** _{調査第一部 _{次長}}



小野寺正樹 調査第一部 主任研究員

そこで、本研究は、河川における津波防災対策の高度化 に資するため、津波の河川遡上解析手法を検討し、「津波 の河川遡上解析の手引き」を作成して普及を図ろうとする ものである。

調査内容及び結果

本研究の特性

本研究における検討の特性は以下のとおりである。

- ・基本方程式として従来の津波解析手法で用いられてい る非線形長波理論式に加えてソリトン分裂現象を表現 できる非線形分散長波理論式を検討
- ・解析結果で得られた津波高と実績津波の痕跡値を比
 較・検証
- ・レーザープロファイラ測量による詳細な地形データの 把握

本稿では昭和58年5月26日に発生した日本海中部地震 において、米代川を遡上した津波を対象として津波解析手 法を検討した概要を中心に紹介する。

日本海中部地震・津波の概要
 2-1 地震・津波の概要

- · 発生日時:昭和58年5月26日12時00分
- ·震源地:秋田県西方沖約100km
- ・マグニチュード:7.7
- ・死者:104人(うち100人は津波による死者)

2-2 米代川に来襲した津波

米代川を遡上した津波については、痕跡調査が行われて おり、その結果は図-2のとおりである。河口から1km付 近右岸の痕跡値をみるとTP+4.8であり、津波来襲時の潮 位がTP+0.24であったことを踏まえると図-3に示すと おり、約4.5mの水位上昇があったと推測される。また、 この津波により、当時の能代工事事務所では約1mの浸水 が発生したほか、河川内の被害としては、護岸天端保護工 のめくれ等が記録されている。(写真-1)



図-2 米代川における津波痕跡値



図-3 1Km地点の津波による水位上昇量



写真-1 津波によりめくれた護岸天端保護工

🤇 解析対象範囲と解析モデルの概要

3-1 解析対象範囲

解析の対象範囲は、図-2に示した津波の河川遡上が確認された範囲を考慮し、対象波源を含む海域と米代川河口から上流の約7km付近までとした。

3-2 解析モデル

(1) 従来の津波解析手法

従来は海域における津波解析手法として、一般的に水深 が深い領域で線形長波理論式、浅い領域で非線形長波理論 式が用いられている。両者は主に以下の現象を表現するこ とが可能である。

①線形長波理論式

津波のような長波の波速は水深に支配され、図-4に示 すように、津波進行域の水深が浅い領域では波速は小さ く、水深が深い領域では波速が大きい。その結果、伝播過 程で波長は次第に短くなり水位は高くなる。こうした現象 は、線形長波理論式で表現することができる。



図-4 津波の浅水変形イメージ

②非線形長波理論式

津波が水深の浅い領域に進入すると、波高く水深の比が 無視できなくなり、波の上部では波速が大きく、波の下部 では波速が小さくなり、図-5に示すように波形は次第に 前傾し尖ってくる。

非線形長波理論式では、線形長波理論式で表現できる現 象に加えて、こうした現象を表現することができる。



図-5 非線形効果による波の変形

(2) 津波の伝播に伴うソリトン分裂現象

遠浅の海域や緩勾配の河道内を伝播する津波の先端で は、時として波高が増幅するソリトン分裂現象が顕著化す ることが知られている。しかしながら、線形長波理論式、 非線形長波理論式では、この現象を表現することができ ない。

この現象を解析するためには、基本方程式として非線形 分散長波式を用い、これに対応する数値解析プログラムと 急激な変形を伴うソリトン分裂波を表現できる細かな計算 格子間隔の設定などが必要となる。

本研究においては、非線形長波理論式に加えて、ソリト ン分裂を表現できる非線形分散長波理論式についても検討 し適用性を確認した。

以下にソリトン分裂現象が発生するメカニズムを示す。 (図-7)

- ・浅海域を伝播する津波が非線形効果(図-5)によって 前傾化し、その波形前面で高周波成分が卓越することに なる。
- ・高周波成分が卓越すると分散効果(図-6)も効き始め、 非線形効果と分散効果の相互干渉により波が分裂する。
- ・分裂した波の波長は短くなり、その波形曲率効果により
 水粒子の鉛直方向加速度が重力加速度に抗するようになるため、分裂後の津波水位は急激に上昇する。





(3) ソリトン分裂現象を表現できる非線形分散長波理論式

ソリトン分裂現象を再現できる非線形分散長波理論式を 式(A)~(C)に示す。ここで、右辺第1項が分散項、 第2項が砕波項を表している。

・連続の式

$\frac{\partial \eta}{\partial \eta}$	∂M	$+\frac{\partial N}{\partial N}=0$	\cdots (A)
∂t	∂x	$\partial y = 0$	

・運動方程式

砕波については、未解明な部分が多く、流量や勾配等が ある条件における現象を表現できるモデルは定まっていな い。本研究では、渦動粘性係数 ν を用いた拡散型の減衰項 を考慮し、流速・波速比0.59を砕波条件とする砕波モデル を設定した。βは水平床を伝播する孤立波の分裂砕波を対 象とした水理実験から得られた値を設定した。

マニングの粗度係数

渦動粘性係数

:

n

$$v = \beta \sqrt{gD} \cdot \eta \quad (\beta = 0.23) \quad \cdots \quad (D)$$

ここで、gは重力加速度、Dは全水深、ηは水位(ただ しη>O範囲のみ)である。



4-1 領域分割と格子間隔

(1) 領域分割

計算領域は、対象河川である米代川や海域の形状を考慮 して計算領域を最小限カバーできるように設定した。

本研究では、図-8~10に示すとおり、計算効率等を 考慮して、波源を含む海域(格子間隔1200m)から浅海 域(格子間隔50m)までの領域を1:2または1:3の比率で 結合し、浅海域(格子間隔50m)から河川域(格子間隔 2m)までの領域を1:5の比率で結合した。

(2) 格子間隔

ソリトン分裂に伴う波状段波を表現するためには、その 波形を表現できる格子間隔の設定が必要となる。本研究で は、日本海中部地震津波が映像として記録されているもの から、周期の短い波状段波を再現するために、最小解析単 位2mを格子間隔として設定した。

4-2 波源条件の設定

日本海中部地震津波の断層モデルは、多くの津波関連論 文において参考とされている相田(1986)による断層モ デル(AIDA10)を採用した。この断層モデルは、12種 類の断層モデルから得られる津波の数値計算結果と津波記 録とを比較し、余震域の形状と位置に最も合致したものが 採用されている。この断層モデルのパラメータを表-1に 示す。

表-1	日本海中部地震の断層パラメ	ータ
-----	---------------	----

	NIE	dland	103	101	474	Liked	Wilson	Ulem	
T	北刺	3	325	25	80	60	30	305	
1	HERE	2	22	40	90	48	20	760	
d	:深さ	:, θ:	走行角、	δ :傾	斜角、	λ:食い	違い角、	L:断層	

長、W:断層幅、U:すべり量



図-8 計算領域の接続(全体図)





JICE REPORT vol.11/07.03 • 25

4-3 地形データの作成

海域及び河川域のうち水面下の地形データは津波来襲時 の地形を再現するため、津波来襲時に近い測量データを用 いて作成した。また、2m格子間隔の領域における陸域の 地形データは航空レーザー測量によるデータを用いて作成 した。ただし、この地形や構造物のデータは平成16年度 のものであり、津波来襲以後に実施した河川工事の履歴や 航空写真等を参照して、できる限り当時の状況に近くなる よう修正を加えた。

4-4 計算条件の設定

計算条件は表-2に示すとおり設定した。

解析モデルの検証

主な解析モデルの検証事項を以下に示す。

5-1 **津波波源の補正**

波源条件に用いた断層モデル(AIDA10)は、広範囲の 沿岸線上に残る津波痕跡と計算値の比較から推定されたも のである。本研究では米代川を遡上した津波の再現を目的 としているため、河口付近の沿岸に存在する複数箇所の痕 跡値と計算値が一致するよう波源の補正を行った。

5-2 河口部の砂州

河口部砂州は津波来襲前後の汀線測量結果と津波来襲数時間後の航空写真を用いて当時の砂州形状が適正になるよう設定した。

解析結果

6-1 河川内痕跡値と解析結果の比較

解析結果を図-11に示す。Okm~2km区間では、非線 形長波理論式の計算結果は痕跡値に比べ40cm程度低く、 非線形分散長波理論式の計算結果は非線形長波理論式の計 算結果に比べさらに30cm程度低い傾向にある。2km~ 5kmの区間では、総じて計算値が痕跡値を30cm程度下 回る結果となった。

非線形分散長波理論式の計算値が非線形長波理論式の計 算結果に比べ小さくなった原因は、津波の波源域から河口 における分散効果によるものと考えられる。日本海中部地 震の地震断層幅は、太平洋側の代表的な地震断層幅に比べ 相対的に短く、津波の初期水位に高周波成分を多く含んだ ものである。そのため、深海域において分散効果が無視で きず、非線形分散長波理論式の計算ではその効果を受けて 沿岸部へ来襲する津波高が低くなったものと推測できる。

6-2 再現性の評価

津波の再現性の検討は、相田(1978)によって提案された津波痕跡高と計算値の対数幾何平均K値と対数幾何標 準偏差κ値の算出により定量的に評価を行った。その結果 を表-3に示す。(K値の値が1に近いほど痕跡値と計算 値が一致することを意味する。すなわち、K値が1より大 きい場合は、「痕跡値>計算値」であり、K値が1よりも

解析範囲	波源	大陸	藍棚	浅海域	沿岸部	河口部	河道内			
格子間隔	1200m	600m	200m	100m	50m	10m	2m	2m	2m	2m
時間ステップ	0.05秒									
基礎方程式	非線形長波式(分散なし)・非線形分散長波式(分散あり)									
境界条件	自由透過 完全反射 遡上計算					遡上計算・流 量入力				
底面摩擦	津波・高潮ハザードマップマニュアルを参考に0.025と設定 河川計画に用いられた粗度を参考に低水路0.02 0.050を設定 0.050を設定						.022・高水敷			
潮位条件	ーーーーーーーーーーーーーーーーーーーーーーーーーーーーーーーーーーーー									
流量条件	解析対象範囲の上流にある水位観測所における津波来襲時の流量(149m³/s)に その水位観測所から下流部に位置する支川(2.8m³/s)の流量を加えた151.8m³/sを設定									
津波波源	AIDA-10モデルの断層パラメータから算出された初期水位に補正係数1.25を乗じる。									
計算時間	津波(地震)発生から3時間									

表-2 米代川の再現計算における計算条件

小さい場合は「痕跡値<計算値」であることを意味する。 また、κ値は、痕跡値と計算値のバラツキ具合を示す指標 である。既往文献によれば、一般にK値が0.8から1.2程 度、κ値が1.6以下となる場合が適当とされている。)



図-11 米代川再現計算結果

表-3 河川内痕跡値と再現計算結果によって得られたK値・κ値

基本式	左右岸別痕跡值数	K值	κ値			
北纳亚	左岸(14)	1.05	1.29			
- 升脉//> - 毛油理会式	右岸(17)	1.20	1.17			
及彼垤哺氏	左右岸合計(31)	1.13	1.24			
北牟亚公勒	左岸(14)	1.08	1.31			
F 冰 理 論 式	右岸(17)	1.24	1.19			
及彼塔珊氏	左右岸合計(31)	1.17	1.26			
$()$ \rightarrow \rightarrow \rightarrow \rightarrow						

()内は痕跡値の数

おわりに

本研究では、津波の遡上に関する多くのデータが残され ている複数の実河川を対象にモデル化を行い、非線形長波 理論式、非線形分散長波理論式の2手法について解析を実 施し、実務上で必要となる適切な方法で解析できる見通し がついた。また、非線形分散長波理論式を用いた解析につ いては、ソリトン分裂現象を表現できるが、米代川におけ る3時間の再現計算では、非線形長波理論式に比べ約75 倍の計算時間を要するなどのデメリットも明らかになっ た。今後は、ソリトン分裂現象が顕著となる主な河川条件 を整理した上で、成果を津波の河川遡上解析の手引き書と して取りまとめることとしている。

なお、本研究は、「津波の河川遡上に関する検討会」 (座長 首藤伸夫 日本大学大学院教授)を設置し、学識 経験者等のご指導を頂きながら河川を遡上する津波の数値 解析手法について調査・検討を行い、その結果をとりまと めたものである。ここにご指導をいただいた関係者の皆様 に深甚なる謝意を表します。

参考文献

- 1) (財) 国土技術研究センター、昭和58年6月、「日本海中部地震による 被災」
- 2) 土木研究所報告、1985年3月、「1983年日本海中部地震災害調査報告」
- 3) 岩瀬浩之・深澤雅人・後藤智明、2001年、「ソリトン分裂波の砕波変 形に関する水理実験と数値計算」、海岸工学論文集第48巻
- 4) 相田勇、1984年、「1983年日本海中部地震津波の波源数値モデ ル」、地震研究所彙報Vol.59
- 5) Aida, I.、1978年、 [Reliability of a tsunami source model derived from fault parameters] 、 J. Phys. Earth, 26