

米代川における1983年日本海中部地震津波の再現計算と解析上の課題

Numerical simulation of Tsunami Run-up on the Yoneshiro River by the 1983 Nihonkai-chubu Earthquake

折敷秀雄¹・千葉周二²・岩瀬浩之³・藤間功司⁴・松井幸一⁵

Hideo OSHIKI, Syuui CHIBA, Hiroyuki IWASE, Koji FUJIMA and Kouichi MATUI

It is important to establish a method to analyze the behavior of tsunami runup in river, because the effect of tsunami should be considered in the examination on earthquake-resistant performance of river structure. Thus, the numerical simulations of 1983 event in the Yoneshiro River were conducted using both dispersive and non-dispersive nonlinear long wave equations. The simulation with previous one reproduced an undular bore which was observed in 1983. However, both of them provided the similar maximum tsunami heights in the river, and the computed heights agreed with the measured heights well.

1. はじめに

一般に、河川を遡上する津波には、以下のような特徴があることが知られている。

- ・河口部に隣接した沿岸から陸上を遡上して行く津波に比べて到達時間が速く、遡上する距離が長い
- ・河川流の影響や比較的浅い水深の領域が連続しているため津波の波頭部が段波を呈することが多い
- ・入射する津波諸元と河川条件によっては波状段波となって津波高が急に増大する場合がある

しかしながら、実績津波の痕跡値や詳細な河川地形データが少ない事に加え、分散効果を再現できる計算格子間隔を設定した極度に短い計算間隔の計算を行う作業が煩雑であること等から河川における上記現象を解析・検証した事例はほとんどない。

そこで本稿では、1983年に波状段波が河川を遡上した記録のある米代川で日本海中部地震津波を非線形長波式と非線形分散長波式に基づく平面2次元解析によって再現計算し、その検討経緯と解析を通じて得られた留意事項や課題等について論じる。

なお、本研究は、河川構造物の耐震性能照査を行う場合の外水位として河川の津波高を推算する手法を確立するために検討した内容の一部を活用してとりまとめたものである。

2. 米代川における日本海中部地震津波による被害

表-1に日本海中部地震津波の概要を示した。

写真-1は、地震発生約3時間20分後の空中写真で、波

表-1 日本海中部地震津波の概要

地震	発生 1983年5月26日正午, 震源 北秋田沖約90km, マグニチュード7.7
津波	秋田県・青森県など日本海沿岸で高い津波発生 秋田県峰浜村でT.P.+15mの遡上高 米代川河口・能代港で津波高T.P.+4m~8m程度
被害	死者 100人 外に公共土木施設・一般被害激甚

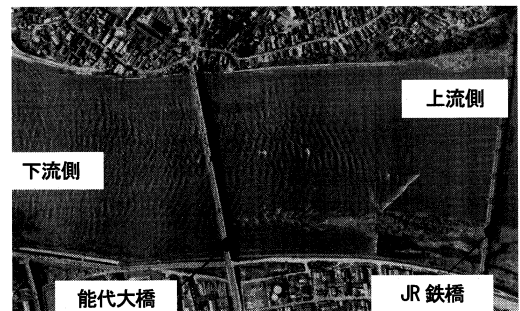


写真-1 波状段波を呈し米代川を遡上する津波（右側が上流）

状段波を呈して遡上する津波が確認できる。この津波では沿岸部で波頭部の波状段波を多くの人が目撃し、報告している。

また、(財)国土開発技術研究センター(1983)および橋本ら(1985)によれば、米代川では地震で堤防、樋門、高水・低水護岸等の構造物にも被害が発生した。この内、右岸河口から約1.5kmの区間では低水護岸天端保護工の連節ブロック、コンクリート張り護岸が津波の遡上で損壊した。また、米代川の北側に位置する水沢川、塙川および竹生川では、堤防や護岸が津波の遡上によって流失又は破堤した被害が報告されている。

3. 数値計算モデルと計算条件

(1) 数計算領域の設定

再現計算のモデル作成範囲は、痕跡記録等を考慮して図-1に示すように波源を含む海域と米代川の9km付近までとし、計算は、河口から上流約7km付近までを対象に

1 正会員	工博	(財)国土技術研究センター 調査第一部 研究主幹
2		(財)国土技術研究センター 調査第一部 主任研究員
3 正会員	博(工)	(株)エコー 防災・水工部 主任
4 正会員	工博	防衛大学校教授 システム工学群建設環境工学科
5		前 国土交通省東北地方整備局 能代河川国道事務所副所長

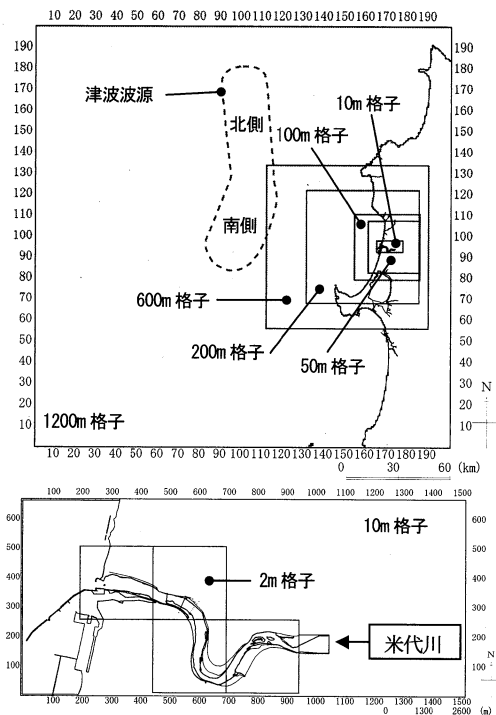


図-1 計算領域・格子間隔図

実施した。計算格子間隔は、外洋から沿岸部そして河川域へと順次小さく設定した。特に、河川領域では津波波頭部の波状段波の現象を再現するため2m間隔とした。

(2) 地形データの作成

海域の水深は、海上保安庁の海図、陸上の標高は、国土地理院の50mメッシュデータから補間して作成した。

河川域地形は当時とほぼ同じであり、河川沿いの堤内地盤、堤防形状・天端高および高水敷標高は、2mメッシュの航空レーザー測量値(平成16年)を使用した。なお、右岸河口付近の堤防高は、津波後に60~70cm高上げされた施工履歴を反映した。低水路については、津波被災6ヶ月後の横断(1km毎)と平成10年2月の横断(200m毎)を比較し、両者の各断面が近似しているの、当該区間の河床形状は安定していると見なし、平成10年2月の資料から地形データを作成した。

河口砂州の形状は、季節により変化していることを踏まえ、1つのケースでは津波来襲の直前(昭和58年5月4日)の横断面図・汀線図から地形データを作成した(以下砂州ありという)。さらに津波発生約3時間20分後に撮影された砂州がフラッシュされている空中写真を参考として、砂州ありに修正を加えた別の1ケース(以下砂州なしという)の、併せて2ケースにより河口の砂州地形が河川内の津波高に及ぼす影響を評価した。

ただし、本研究に用いたモデルでは、いずれの計算でも津波イベント中の河道の地形変化は考慮されていない。

表-2 断層パラメータ(相田, 1984)

断層	$d(\text{km})$	$\theta(^{\circ})$	$\delta(^{\circ})$	$\lambda(^{\circ})$	$L(\text{km})$	$W(\text{km})$	$U(\text{cm})$
北側	3	355	25	80	60	30	305
南側	3	22	25	90	40	30	760

(3) 波源モデルの検討

波源モデルは、AIDA-10(相田, 1985)モデルとし、表-2に示した断層パラメータを使用した。(深さ d 、走向 θ 、傾斜角 δ 、すべり角 λ 、断層長さ L 、断層幅 W 、すべり量 U)。この断層パラメータを用いてMansinhaら(1971)の方法で海底地盤の変動量分布を算出し、津波の初期水位分布を与えた。

本研究では米代川の河川内の津波高の再現性に焦点を絞り、河口兩岸の沿岸に存在する計55点の痕跡値と計算値の比較・検証を繰り返し行い、初期水位分布の鉛直成分に補正係数1.25を乗じたものを設定した。上記に関する再現性は、米代川河口部周辺を25mの格子間隔で近似した地形データを使用し、痕跡値と計算値(ただし、浅水理論モデル)を比較し、相田の評価指標で K 値1.13、 κ 値1.22であった。ここに、相田の評価指標である K 値は1に近いほど痕跡値と計算値が一致することを意味し、 κ 値は痕跡値と計算値のバラツキ具合を示している。一般に、 K 値は0.8~1.2程度、 κ 値は1.6以下であれば適当であるとされる。

(4) 計算モデルの構築

計算モデルは、非線形長波理論に基づく計算モデル(以下分散なしという)と非線形分散長波理論に基づく計算モデル(以下分散ありという)の2つを使用した。分散ありで使用した支配方程式を式(1)、(2)及び(3)に示した。なお、式(2)、(3)の両式において、右辺第1項は分散項を、同第2項は砕波による波高減衰項を、それぞれ表しており、分散なしは式(2)および式(3)の右辺第1項をゼロと置いた式となる。

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{\partial M}{\partial x} + \frac{\partial N}{\partial y} = 0 \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial M}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{M^2}{D} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{MN}{D} \right) + gD \frac{\partial \eta}{\partial x} + f \frac{M}{D^2} \sqrt{M^2 + N^2} \\ = \frac{h^2}{3} \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\partial^2 M}{\partial t \partial x} + \frac{\partial^2 N}{\partial t \partial y} \right) + \nu \left(\frac{\partial^2 M}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 M}{\partial y^2} \right) \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial N}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{MN}{D} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{N^2}{D} \right) + gD \frac{\partial \eta}{\partial y} + f \frac{N}{D^2} \sqrt{M^2 + N^2} \\ = \frac{h^2}{3} \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{\partial^2 M}{\partial t \partial x} + \frac{\partial^2 N}{\partial t \partial y} \right) + \nu \left(\frac{\partial^2 N}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 N}{\partial y^2} \right) \end{aligned} \quad (3)$$

ここで、 η は水位、 M および N は x 及び y 方向の線流量、 h は河川域を含む初期水深、 D は全水深、 g は重力加速度、 f は摩擦損失係数($=n^2g/D^{1/3}$ 、 n はマンニングの粗度係数)、 ν は渦動粘性係数である。

計算手法は、スタガード・リープフロッグ法による2段階の混合差分法(岩瀬ら, 2002b)を利用し陸上部への津波氾濫を含めた手法を用いた。ただし、移流項の差分は、計算の安定性を考慮して1次精度の風上差分を採用している。また、砕波による波高減衰項の砕波条件および渦動粘性係数の判定と算出は岩瀬ら(2005)の方法に従って、波峰(波形ピーク)点における波高・水深比0.83(ただし計算上では流速・波速比が0.59相当)を超える条件で砕波と判定し、波形ピーク点前後の波谷までの区間に対して渦動粘性係数 $\nu = 0.25\sqrt{gD} \cdot \eta$ を算出する手法を用いた。

(5) 初期条件の設定

a) 潮位

潮位は、隣接する能代港検潮所の記録から津波が来襲する直前の潮位 T.P.+0.24m を設定した。なお、計算中の潮位変動は考慮していない。

b) 粗度係数

河川内の粗度係数は、米代川水系河川整備基本方針に用いた計画粗度で、低水路0.022(0.0km-7.0km)及び0.026(7.0km-10.0km)、高水路0.050(0.0km-7.0km)及び0.038(7.0km-10.0km)を設定した。海域の粗度係数は、「津波・高潮ハザードマップマニュアル(財)沿岸開発技術研究センター,2004)」を参考にして0.025とした。

c) 河川流量および河川水位

河川流量は、津波来襲時の詳細な記録がないため、米代川20kmに位置する富根観測所の流量観測記録(平成12年7月12日および7月25日)を外挿した値と、富根から下流で流入している支川久喜沢川及び常磐川の各流量(平成17年6月29日)とその他小河川(平成17年6月20日に実施した現地踏査による目測)の合計流量として151.8m³/sを設定した。河川水位は、河口での計算出発水位として津波来襲直前の潮位を、上流から上記流量を与えて不等流計算を行い河道内の水位分布(および線流量分布)を算出して初期条件とした。

d) 時間間隔と再現時間

計算時間間隔は全領域で0.05秒とし、再現時間は地震発生から3時間とした。

4. 計算結果

(1) 津波水位分布

再現モデルの妥当性は、河口部周辺の汀線と河川内の2段階にわたり計算値と痕跡値とを以下のように比較し確認した。

a) 河口部周辺の汀線における津波水位

河口左右岸の沿岸には、広域にわたり多くの津波痕跡値がある。再現計算では沿岸55点の痕跡値と計算値の比較・検証を繰り返し行い、初期水位分布の鉛直成分を補

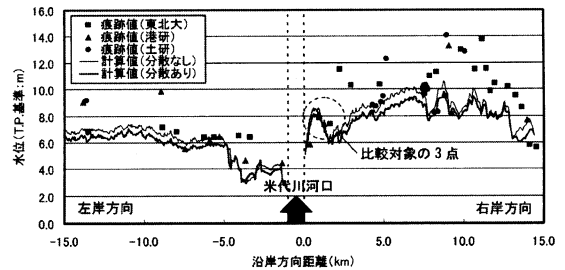


図-2 沿岸部の計算値と痕跡値の比較

表-3 河口右岸汀線での痕跡値と計算値の比較(T.P.基準)

痕跡値 (m)	計算値 (m)	
	分散なし	分散あり
① 7.85	8.26 (+0.41)	7.92 (+0.07)
② 7.36	7.44 (+0.08)	7.12 (-0.32)
③ 7.37	6.45 (-0.92)	5.94 (-1.43)

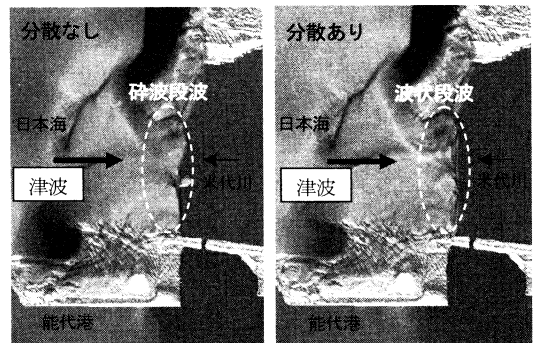


図-3 河口へ進入する津波波頭部の様子

正した後の比較を図-2に示した。次に、上記55点の痕跡値の内、河口に近接し、特異な地形や防波堤等の構造物の影響がなく、痕跡記録の精度が良いと判定されている表-3に示す河口右岸3点の痕跡値(谷本ら, 1983; 首藤・卯花, 1984)と計算値とを比較した。

上記3点は、いずれも汀線付近にあり、汀線背後にはT.P.+5.0m程度の防潮林(松林)に覆われた砂丘がある。上表で①および②の痕跡値と計算値は良く一致しているが、③では計算値が低くなっている。痕跡値③は、計算格子間隔2mの領域の外にある10m格子間隔内にあり、地形近似度が低い影響によるものと推測できる。

また、分散のありなしでは、分散ありの方が小さくなった。これは岩瀬ら(2002a)も報告しているが、波源域で既に分散効果が発現し、陸棚上でソリトン分裂して大きくなるが、沿岸付近で砕波減衰することにより、沿岸に到達した津波高は、分散なしの計算値に比べて小さくなったものである。

b) 河川内における津波水位

図-3の右側の破線部分に見られるように、分散ありのケースで計算開始28分後の第1波の波頭部が波状段波を呈して河川へ進入する状況が再現・確認できた。

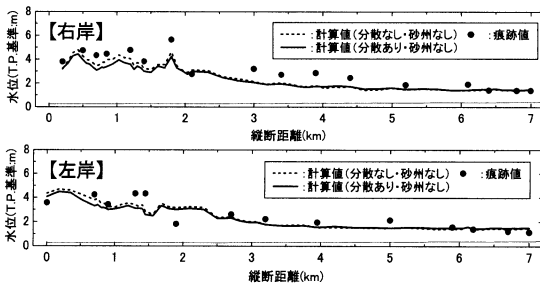


図-4 米代川における痕跡値と計算値の比較 (T.P.基準)

表-4 河川内におけるK値と κ 値 (砂州なし)

計算種別	データ種別	K 値	κ 値
分散なし	全データ	1.13	1.24
	左岸データ	1.05	1.29
	右岸データ	1.20	1.17
分散あり	全データ	1.17	1.26
	左岸データ	1.08	1.31
	右岸データ	1.21	1.19

図-4に砂州なしでの河道縦断方向の計算津波高と痕跡値 (宇多,1985) を示した. 表-4に同ケースのK値と κ 値を示した. 図-4における津波高は, 概略以下のようになっている.

○0km~2km の区間

概略, 分散あり計算値 < 分散なし計算値 < 痕跡値

○2km~5km の区間・・・総じて, 計算値 < 痕跡値

○5kmより上流の区間・・・3者は良く一致している.

○右岸2km 下流の河岸が局所的に流心方向に突出している場所にはT.P.+6m程度の痕跡値があるが再現できていない.

現地地形を見ても, 実際には当該箇所にも局所的に高い津波が発生したと推測できるが, 計算ではこの局所的な地形効果による津波高は再現できていない.

なお, 計算値で分散ありが分散なしに比較して低くなっている原因は, 前述したとおり, 分散ありではソリトン分裂の影響により沿岸域で波高が増幅し, 河川進入前の早い段階で砕波しているからである. ただし, 米代川河口付近では, 平均的な河川水深が約2mの場所に4~6mの高さの津波が進入しているため, 分散なしの場合でも砕波が生じており, 両者の違いはそれほど大きくない.

c) 河口部砂州が河川内の津波高に及ぼす影響の評価

写真-2は, 津波直後の5月26日16時20分撮影の写真に当初計算で設定した砂州あり(5月4日測量)と6月23日測量の砂州を併記したものである. この写真から, 津波イベント中に砂州はフラッシュされたものと推定した.

本研究では上記を踏まえ, 砂州ありとなしの2つのモデルで計算を行い, 砂州が河川内の津波高に及ぼす影響を評価した. 砂州なしのモデルにおける計算結果は, 上記図-4と表-4に示したとおりである. 砂州ありのモデル

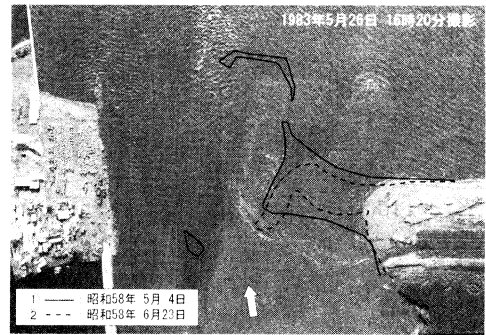


写真-2 米代川河口部における砂州形状の比較

表-5 河川内の津波目撃証言と計算による到達時刻

	目撃証言の内容				計算結果
	目撃位置	目撃時間	津波形態	記録形態	
①	2.0km 付近	12:19~12:24	第1波 砕波段波	写真	12:33
②	2.2km 付近	12:30 頃	第2波 砕波段波	ビデオ	12:47

計算: 分散なし, 砂州なし

における計算結果は, 紙面の都合で示していないが, 分散のありなしに関わらず, 砂州なしのモデルにおける計算結果が痕跡値とよく一致した.

また, 2.(3)波源モデルの検討において既述した相田の評価指標K値と κ 値を用いて河川内の津波高の再現性を比較評価した結果, 表-4に示した砂州なしのモデルにおける計算結果に対して, 砂州ありのモデルにおける計算結果では, 分散なしの全データによるK値1.20, κ 値1.25, 同分散ありの計算でK値1.20, κ 値1.29となった. したがって, 相田のK値と κ 値を用いた評価でも砂州なしモデルの方が砂州ありモデルに比較して再現性が高いと整理できた.

上記検討から, 河口砂州の地形は, 潮位, 河川流量などと共に河川へ進入する津波に対する影響が大きく, 河口砂州の変動特性と河道改修履歴などを反映して適切に地形モデルを作成することが必要と考えられる.

(2) 津波到達時間

表-5は, 河川で津波が目撃された時刻と計算による津波到達時刻を比較したものである.

上表①では, 第1波の目撃記録に比べて計算が約10~15分遅く, 上表②では, 第2波の目撃記録に比べて計算が約17分遅い. なお, この到達時間の遅れについては, Shutoら(1993)も, AIDA-10モデルでは計算による津波到達時刻は目撃証言よりも遅くなり複断層の存在を考慮する必要があるとしている.

5. おわりに

本研究で得られた工学上の要点は以下のとおりである.

(1) 解析によって確認できた事項

- ・分散ありの再現計算を試み、第1波の波頭部に波状段波を呈して河川へ進入する現象が再現・確認できた。
- ・モデルの妥当性は、河口付近沿岸及び河道内の2段階で行い、河川内の痕跡値をほぼ再現することができた。
- ・分散ありでは波源域で分散効果が発現し、陸棚上でソリトン分裂して増高後、沿岸付近で碎波減衰する。
- ・上記から河口では分散なしの方が高く、河道内でも河口から2km 付近まで分散なしの方が少し高くなった。
- ・河道内の津波高には、当初想定していたほど分散のありなしに明確な差がなく、本事例では分散なしの計算で河川内の津波高を再現できる。

(2) 解析を通じて得られた計算上の留意事項・課題

- ・設計対象とするような大きな津波では、本事例と同様、分散あり・なしに関わらず河口部あるいは河川内で碎波が生じると考えられ、河川内における津波高に関して分散あり・なしで大きな差はないと考えられる。
- ・本事例では分散のあるなしで河川内の津波高に大きな差異がなかったものの、分散ありでは波源域で仮に中小規模の津波であっても緩勾配の河道内で急に津波高が増大する場合もあり、この点に留意する必要があると考えられる。
- ・河道内の構造物（橋梁および堰など）や漂流物などの影響に着目すれば波状段波の影響は無視できず、分散ありの計算に関するさらなる諸検討も必要である。
- ・一部河岸が流心方向に突出している右岸2km 下流付近の局所的に高い痕跡値は、計算で再現できなかった。
- ・河口部砂州の地形は、潮位、河川流量などと共に河川へ進入する津波に対する影響が大きく、計算では適切な地形モデルの作成に留意を要する。
- ・計算での津波到達時間が、目撃証言に比較して遅れる点については既往文献が指摘しているとおりの傾向となり、今後の課題となった。

(3) 河川における津波解析の実務

本研究では、河川の津波計算を分散ありとなしの2つの手法で行い、両者の地形モデル作成や計算上の作業性と経済性、解析に必要な河川内の痕跡等の存在と精度、現時点での解析技術等について比較・評価した。この評価や全国河川の現状を勘案し、後掲の国土交通省河川局が設置した「津波の河川遡上に関する検討会」においては、河川構造物の耐震性能照査に用いる外水位として津波高を求める場合は、分散なしを原則とし、河口付近の波高・水深比、遡上区間の勾配によっては分散ありを用いてもよいとされた。

(4) 今後の河川における津波解析の精度向上に向けて

本研究では、多くの津波関係技術者の努力によって蓄積されていた実績津波の痕跡値や詳細な河川地形データ等の貴重な資料を利用させていただき、特に、河川を遡上した波状段波の目撃やビデオ等の記録が残っている米

代川において、既存文献にもほとんど事例がない海域から河川域における実績津波の再現計算を行い、波状段波の現象が再現できることを確認した。

しかしながら、津波が多発する我が国において、全国の諸河川には解析に供することができる津波記録は極めて少ない。また、河川内の津波挙動を観測・記録するシステムも整備されていないため、ほとんどの河川で本研究のような検証計算を実施することは困難である。今後、各河川においては、津波データの蓄積が可能となるような諸施策を講じて当該河川内の津波挙動の解明や計算精度の向上を図り、津波防災対策の一層の推進に資する必要があると思われる。

本研究の成果は、河川構造物の耐震性能照査において考慮する外水位として津波高を算出する場合の「津波の河川遡上解析の手引き(案)」に反映され、以下に示す(財)国土技術研究センターのホームページにおいて公開されている。<http://www.jice.or.jp/siryo/index.html>

謝辞：本研究は、国土交通省河川局治水課が(財)国土技術研究センターに設置した「津波の河川遡上に関する検討会」(座長：首藤伸夫 日本大学大学院総合科学研究科教授)において検討された成果の一部を活用してとりまとめたものであり、上記検討会の首藤座長をはじめ関係者には多くの貴重なデータの提供をいただくと共に、長期にわたり懇切な御指導をいただいた。ここに紙面を借りて深く謝意を表します。

参 考 文 献

- (財)国土開発技術研究センター (1983)：日本海中部地震における被災(河川施設を主として)，p. 118.
- (財)沿岸開発技術研究センター (2004)：津波・高潮ハザードマップマニュアル，pp.92.
- 相田 勇 (1983)：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，pp. 93-104.
- 岩瀬浩之・後藤智明・藤間功司・飯田邦彦 (2002a)：深海域における波数分散効果が近地津波に及ぼす影響に関する考察，土木学会論文集，No.705/II-59，pp. 101-114.
- 岩瀬浩之・藤間功司・見上敏文・柴木秀之・後藤智明 (2002b)：波数分散効果を考慮した日本海中部地震津波の遡上計算，海岸工学論文集，第49巻，pp. 266-270.
- 岩瀬浩之・今村文彦 (2005)：津波数値計算における碎波モデル，津波工学研究報告，第22号，pp. 15-22.
- 宇多高明 (1985)：第2編 津波，土木研究所報告，第165号，pp. 17-54.
- 首藤伸夫・卯花政孝 (1984)：1983年日本海中部地震津波の痕跡高，東北大学工学部津波災害実験所研究報告，第1号，pp. 88-267.
- 谷本勝利ほか (1983)：1983年日本海中部地震津波の実態と二・三の考察，港湾技研資料，No.470，pp. 147-207.
- 橋本 宏・佐々木康・松尾 修・松本秀應 (1985)：第8編 河川施設の被災，土木研究所報告，第165号，pp. 147-207.
- Mansinha L., Smylie D. E. (1971)：The displacement fields of included faults, Bull. Seism. Soc. Am., Vol.61, pp.1433-1440.
- Shuto N., K. Chida, F. Imamura (1993)：GENERATION MECHANISM OF THE 1983 NIHONKAI-CHUBU EARTHQUAKE TSUNAMI, Proceedings of the IUGG/IOC International Tsunami Symposium, pp.9-21.