津波の河川遡上解析の手引き（案）

平成 19 年 5 月

(財)国土技術研究センター

はじめに

近年、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及びそれに伴う津波に関する検討結果が公表されるなど、地震・津波に対する社会の関心が高まってきており、地震・津波に関する防災対策の推進が急務となっている。

このため、国土交通省では河川構造物の耐震設計の高度化を目指し、「河川構造物の耐震性能照査指針（案）・同解説」を取りまとめたが、ここで、河川構造物の耐震性能の照査に当たり、地震の発生に伴い津波の遡上が予想される場合には、照査外水位として津波高を考慮することとしている。

本手引き（案）は、河川における津波の挙動の解析手法について、調査・検討を行った結果をとりまとめたものである。

本手引き（案）の趣旨が正しく理解され、河川構造物の質の高い整備が一層推進されることを期待するものである。

津波の河川遡上解析の手引き（案）

目　次

1. 総論 1
1.1　適用の範囲 1
1.2　対象津波 2
1.3　用語の定義 3
2. 解析の基本方針 4
2.1　解析手法 4
2.2　基本方程式 5
2.3　解析事項 7
3. 解析の方法 10
3.1　解析対象範囲の設定 10
3.2　資料の収集・整理 11
3.3　格子間隔の設定 12
3.4　地形データの作成 13
3.5　構造物データの作成 14
3.6　津波諸元の設定 15
3.7　境界条件の設定 16
3.8　諸条件の設定 17
3.9　再現計算 19
3.10　予測計算 20

【参考資料】
1. 非線形分散長波理論に関する資料
2. 簡易推定手法
3. 米代川の再現計算（昭和 58 年日本海中部地震津波における米代川の津波遡上再現計算）
4. 十勝川の再現計算（平成 15 年十勝沖地震津波における十勝川の津波遡上再現計算）

1. 総論

1.1 適用の範囲

本手引き（案）は、河川構造物の耐震性能の照査において考慮する外水位としての津波の挙動を解析する場合に適用する。

【解　　説】

本手引き（案）の適用の範囲を明らかにしたものである。

河川構造物の耐震性能の照査に当たっては、「河川構造物の耐震性能照査指針（案）・同解説」（平成 19 年 3 月）(以下「耐震性能照査指針（案)」という。）において、「河口部付近では、平常時の最高水位として朔望平均満潮位及び波浪の影響を考慮するものとし、また、地震の発生に伴い津波の遡上が予想される場合には津波高についても考慮するものとする。」と規定されており、一般に波浪の影響より津波高が高い場合に津波高を考慮する必要がある。

なお、本手引き（案）では可能な限り最新の知見を取り入れているが、一方、現時点では津波の挙動に関し十分に解明されていない事項があることも事実である。このため、得られた予測計算の結果よりも大きな津波が発生する可能性があることに留意しなければならない。

1.2　対象津波

本手引き（案）による解析は、日本近海の大規模な地震によって発生する津波を対象として行うものとする。

【解　　説】

津波は、日本近海で発生した地震により日本沿岸に津波が来襲する近地津波と、昭和 35 年チリ地震津波のように遠地で発生した地震により日本沿岸に津波が来襲する遠地津波に大別されるが、「耐震性能照査指針（案）」においては、地震動によって河川構造物が被災した後に河川に津波が来襲することを想定していることから、本手引き（案）では、図 1.2.1 に示すようなプレート境界付近、日本海東縁部及び海域活断層等の大規模な地震に伴って発生する近地津波を対象として解析を行うこととした。

なお、津波諸元は、中央防災会議、地方自治体等において、大規模な近地津波に関する研究等が進められているところであり、これらの研究等の結果を用いるとよい。

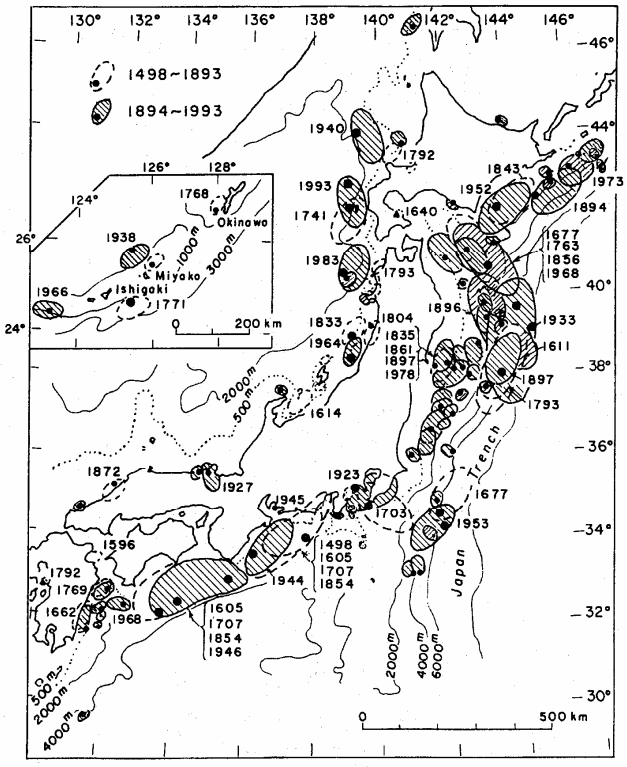


図 1.2.1　1498 年～1993 年に日本近海で発生した津波の波源域分布（羽鳥（1994））

1.3　用語の定義

本手引き（案）に用いる用語の定義は、次のとおりとする。

（1）　ソリトン分裂

津波が水深の浅い海域を伝播するのに伴い、波形や水深等の条件によっては、津波が周期の短い複数の波に分裂し波高が増幅する現象。

（2）　非線形長波理論

水深の浅い海域における津波高の増大や波形の前傾化等の非線形性を表現できる波の伝播に関する理論。

（3）　非線形分散長波理論

非線形長波理論に加えてソリトン分裂を表現できる波の伝播に関する理論。

（4）　河川域

河川内の範囲を指し、縦断的には河口から上流、横断的には河道及び左右岸の堤防天端までの範囲。

（5）　基本モデル

実績津波を対象とする計算条件によって、波源から沿岸部に伝播し河川を遡上する津波高を推定するための平面 2 次元津波計算モデル。

（6）　解析モデル

基本モデルをもとに予測しようとする津波を対象とする計算条件によって、波源から沿岸部に伝播し河川を遡上する津波高を推定するための平面 2 次元津波計算モデル。

（7）　再現計算

基本モデルの妥当性を検証及び評価するために実施する計算。

（8）　予測計算

解析モデルを用いて実施する計算。

（9）　格子間隔

平面 2 次元解析によって津波計算を行う場合に設定する計算メッシュの間隔。

（１０）領域

同じ格子間隔を持つ解析範囲。

【解　　説】

(1) ソリトン分裂

津波が水深の浅い海域を伝播するのに伴い、波形や水深等の条件によっては、波の峰が前傾化する非線形効果と周期の短い波が波本体から後方に取り残される分散効果の相乗作用により、津波本体が周期の短い複数の波に分裂し波高が増幅する。このような現象をソリトン分裂という。ソリトン分裂の詳細については参考資料-1 を参照されたい。

2. 解析の基本方針

2.1 解析手法

解析に当たっては、原則として平面２次元解析を用いるものとする。

【解　　説】

解析に当たっては、原則として平面 2 次元解析を用いるものとする。

一部の自治体においては、津波防災計画の検討に当たって、すでに本手引き（案）に示す手法に準ずるような平面 2 次元解析によって津波の挙動を解析している事例があり、こうしたものについては、それらの結果を用いてもよい。

ただし、津波高、遡上距離の概略を推定する場合には、河口周辺に特異な地形がないことや河川形状が複雑でないこと等の適用条件を考慮の上、簡易推定手法によることができる。簡易推定手法については参考資料-2 を参照されたい。

2.2　基本方程式

解析に当たっては、原則として非線形長波理論に基づく方程式を用いるものとする。
ただし、ソリトン分裂の影響を考慮する場合は、非線形分散長波理論に基づく方程式を用いてもよい。

【解　　説】

本手引き（案）においては、原則として、津波の非線形性を考慮した非線形長波理論に基づく方程式を基本方程式として用いることとした。

また、河口において概ね以下の２つの条件を満たす場合には、ソリトン分裂の影響を考慮し、非線形分散長波理論に基づく方程式を基本方程式として用いてもよい。

①津波が遠浅の場所が続く区間を遡上する場合

②津波高と水深の比が 0.83 程度よりも小さい場所

＜非線形長波理論式＞

本手引き（案）において基本方程式として用いる非線形長波理論式を式（2.2.1）～（2.2.3）に示す。

・連続の式

$$\frac{\partial \eta}{\partial t}+\frac{\partial M}{\partial x}+\frac{\partial N}{\partial y}=0 \qquad \text{----------} \qquad (2.2.1)$$

・運動方程式

$$\frac{\partial M}{\partial t}+\frac{\partial}{\partial x}\left(\frac{M^2}{D}\right)+\frac{\partial}{\partial y}\left(\frac{MN}{D}\right)+gD\frac{\partial \eta}{\partial x}+\frac{gn^2}{D^{7/3}}M\sqrt{M^2+N^2}=0 \qquad \text{----------} \qquad (2.2.2)$$

$$\frac{\partial N}{\partial t}+\frac{\partial}{\partial x}\left(\frac{MN}{D}\right)+\frac{\partial}{\partial y}\left(\frac{N^2}{D}\right)+gD\frac{\partial \eta}{\partial y}+\frac{gn^2}{D^{7/3}}N\sqrt{M^2+N^2}=0 \qquad \text{----------} \qquad (2.2.3)$$

ここに、

η	:	水位(m)
$M,\ N$	:	x 及び y 方向の流量フラックス（又は線流量、$m^3/s/m$）
h	:	初期状態の水深(m)
D	:	全水深(m)
G	:	重力加速度(=9.8m/s²)
n	:	マニングの粗度係数($m^{-1/3}s$)

＜非線形分散長波理論式＞

ソリトン分裂の影響を考慮した非線形分散長波理論式を式（2.2.4）～（2.2.6）に示す。

・連続の式

$$\frac{\partial \eta}{\partial t}+\frac{\partial M}{\partial x}+\frac{\partial N}{\partial y}=0 \qquad \text{---------- (2.2.4)}$$

・運動方程式

$$\frac{\partial M}{\partial t}+\frac{\partial}{\partial x}\left(\frac{M^2}{D}\right)+\frac{\partial}{\partial y}\left(\frac{MN}{D}\right)+gD\frac{\partial \eta}{\partial x}+\frac{gn^2}{D^{7/3}}M\sqrt{M^2+N^2}$$

$$=\frac{D^2}{3}\frac{\partial}{\partial t}\left(\frac{\partial^2 M}{\partial x^2}+\frac{\partial^2 N}{\partial x \partial y}\right)+\nu\left(\frac{\partial^2 M}{\partial x^2}+\frac{\partial^2 M}{\partial y^2}\right) \qquad \text{---------- (2.2.5)}$$

$$\frac{\partial N}{\partial t}+\frac{\partial}{\partial x}\left(\frac{MN}{D}\right)+\frac{\partial}{\partial y}\left(\frac{N^2}{D}\right)+gD\frac{\partial \eta}{\partial y}+\frac{gn^2}{D^{7/3}}N\sqrt{M^2+N^2}$$

$$=\frac{D^2}{3}\frac{\partial}{\partial t}\left(\frac{\partial^2 M}{\partial x \partial y}+\frac{\partial^2 N}{\partial y^2}\right)+\nu\left(\frac{\partial^2 N}{\partial x^2}+\frac{\partial^2 N}{\partial y^2}\right) \qquad \text{---------- (2.2.6)}$$

ここに、

η	:	水位(m)
$M,\ N$	:	x 及び y 方向の流量フラックス（又は線流量、$m^3/s/m$）
h	:	初期状態の水深(m)
D	:	全水深(m)
g	:	重力加速度(=9.8m/s^2)
n	:	マニングの粗度係数($m^{-1/3}s$)
ν	:	渦動粘性係数(m^2/s)

2.3　解析事項

解析に当たっては、次の事項を適切に実施するものとする。

（１）　解析対象範囲の設定
（２）　資料の収集・整理
（３）　格子間隔の設定
（４）　地形データの作成
（５）　構造物データの作成
（６）　境界条件の設定
（７）　津波諸元の設定
（８）　諸条件の設定
（９）　再現計算
（１０）予測計算

【解　　説】

解析は、図 2.3.1 により行うものとする。

再現計算は、一般に図 2.3.2 に示す手順で実施するものとする。

予測計算は、一般に図 2.3.3 に示す手順で実施するものとする。

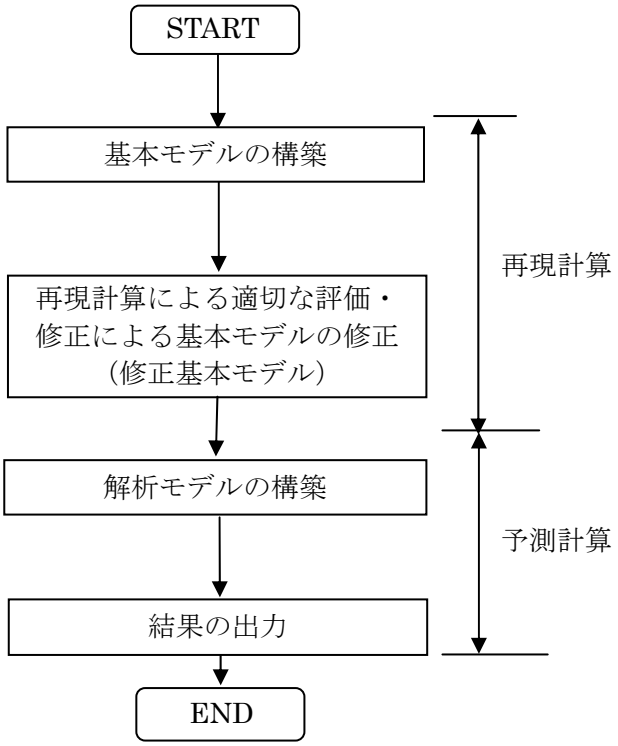


図 2.3.1　河川における津波の解析手順

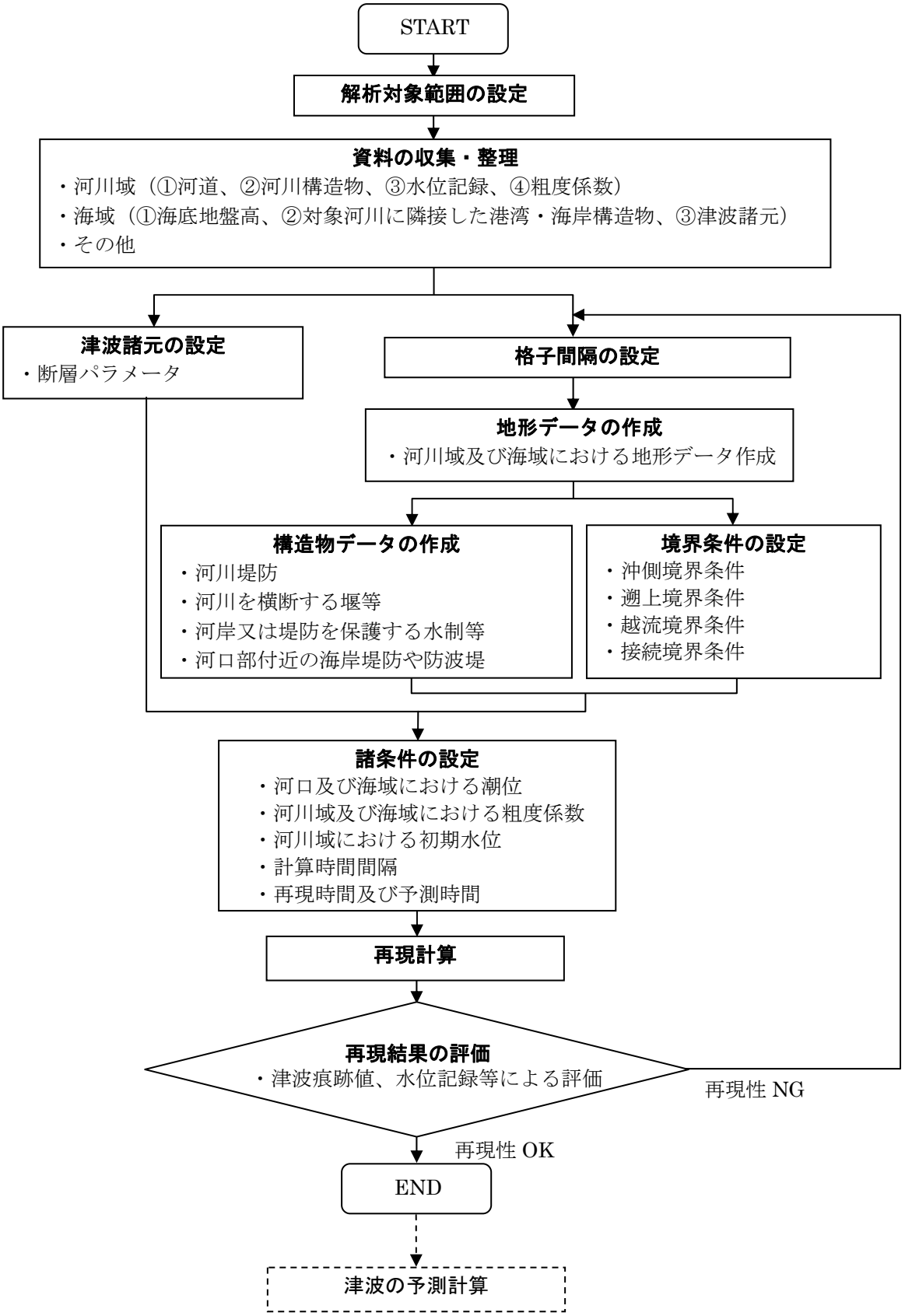


図 2.3.2　再現計算の手順

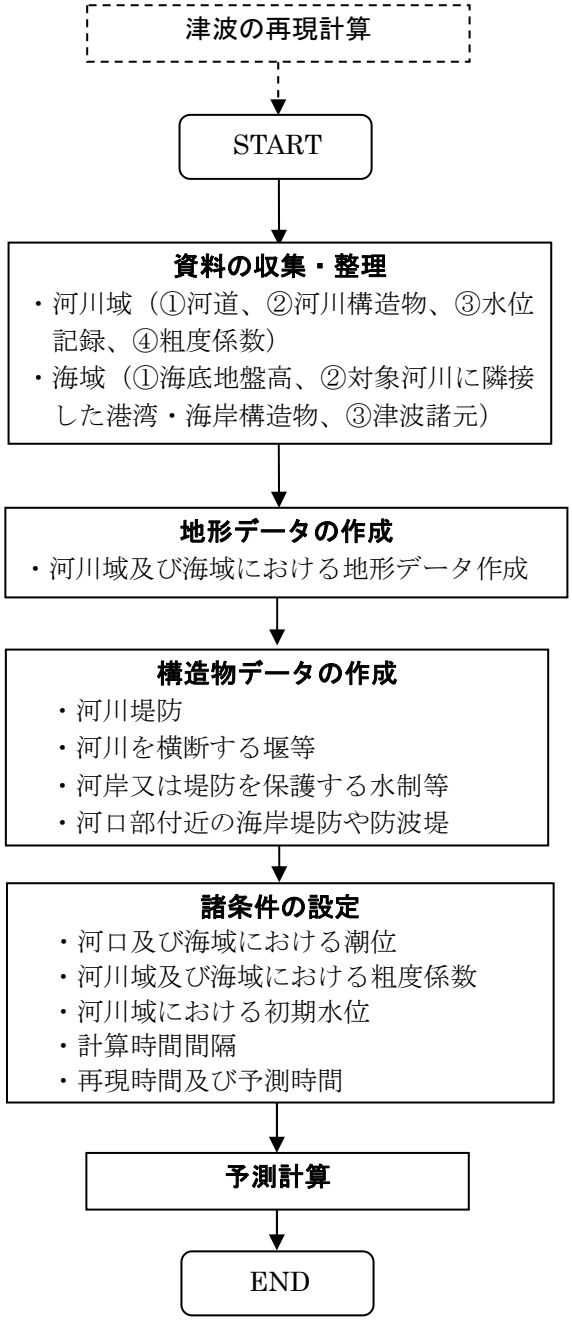


図 2.3.3　予測計算の手順

3. 解析の方法

3.1 解析対象範囲の設定

解析に当たっては、津波の挙動を適切に表現できるよう解析対象範囲を設定するものとする。

【解　　説】

解析に当たっては、津波波源から沿岸及び河川へ伝播する津波の挙動を適切に表現する必要があるため、図 3.1.1 及び図 3.1.2 に示すように河川域と波源域を含む海域からなる解析対象範囲を設定するものとする。

解析対象範囲における各範囲は以下のように分類される。

河川域　　：河川内の範囲を指し、縦断的には河口から上流、横断的には河道及び左右岸の堤防天端までの範囲。

海域　　：波源から河口までの範囲で深海域と浅海域からなる。解析における深海域と浅海域の境界は一般に水深が 50～200m 程度とされていることが多い。

波源域　　：津波を発生させる地震の断層範囲。

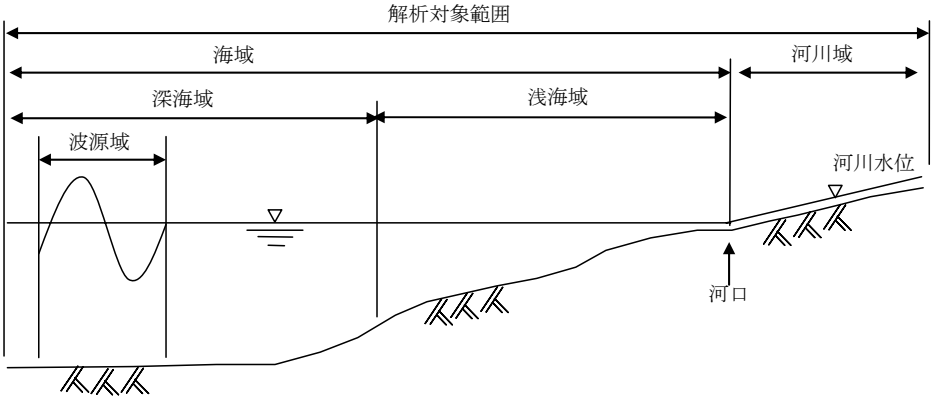


図 3.1.1　解析対象範囲（縦断略図）

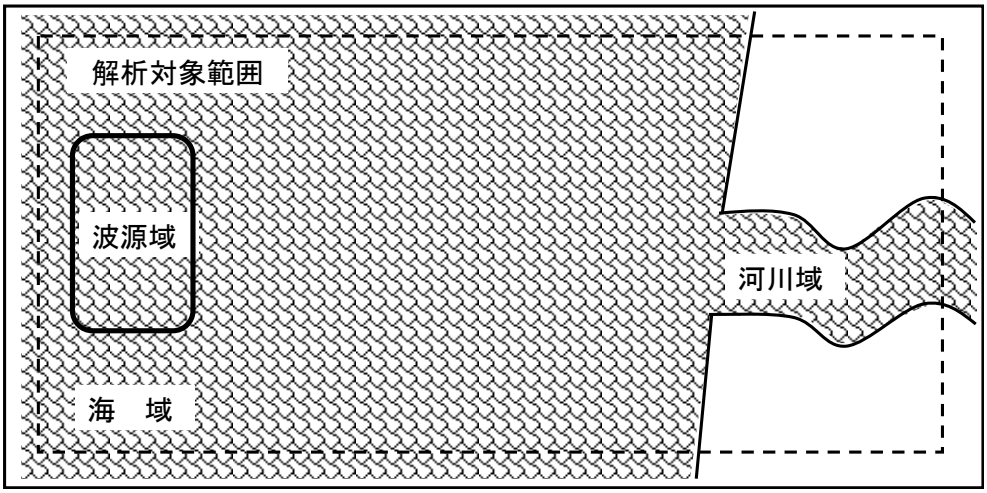


図 3.1.2　解析対象範囲（平面略図）

3.2　資料の収集・整理

解析に当たっては、再現計算及び予測計算に必要となる資料を収集・整理するものとする。

【解　　説】

解析を行う場合は、再現計算及び予測計算ができるように、次に示す資料を収集し、必要な諸データを整理する必要がある。これらの収集資料をもとに、平面 2 次元計算による解析モデルを構築する。解析を行う場合に必要となる主なデータは、表 3.2.1 及び表 3.2.2 に示すとおりである。

なお、予測計算においては、解析の目的に応じて、現状又は将来計画に関する資料を収集するものとする。

表 3.2.1　再現計算において収集・整理が必要な資料一覧

領　域	資料の分類	資料の詳細
河川域	①河道	河川定期横断・縦断測量結果、深浅測量結果、航空測量結果等
	②河川構造物	河川構造物施設台帳及び施設台帳平面図等
	③再現時点の水位記録	流量ハイドログラフ、水位記録、航空測量写真等の検証データ等
	④粗度係数	現況粗度係数
海　域	①海底地盤高	海図、深浅測量結果等
	②対象河川に隣接した港湾・海岸構造物	防波堤、防潮堤、護岸に関する施設台帳及び施設台帳平面図等
	③津波諸元	断層パラメータ、初期水位分布
その他	関連実績データ	津波遡上痕跡値等

表 3.2.2　予測計算において収集・整理が必要な資料一覧

領　域	資料の分類	資料の詳細
河川域	①河道	河川定期横断・縦断測量結果、深浅測量結果、航空測量結果等
	②河川構造物	河川構造物施設台帳及び施設台帳平面図等
	③水位記録	流量ハイドログラフ、水位記録、航空測量写真等の検証データ等
	④粗度係数	現況粗度係数又は計画粗度係数
海　域	①海底地盤高	海図、深浅測量結果等
	②対象河川に隣接した港湾・海岸構造物	防波堤、防潮堤、護岸に関する施設台帳及び施設台帳平面図等
	③津波諸元	断層パラメータ、初期水位分布

3.3　格子間隔の設定

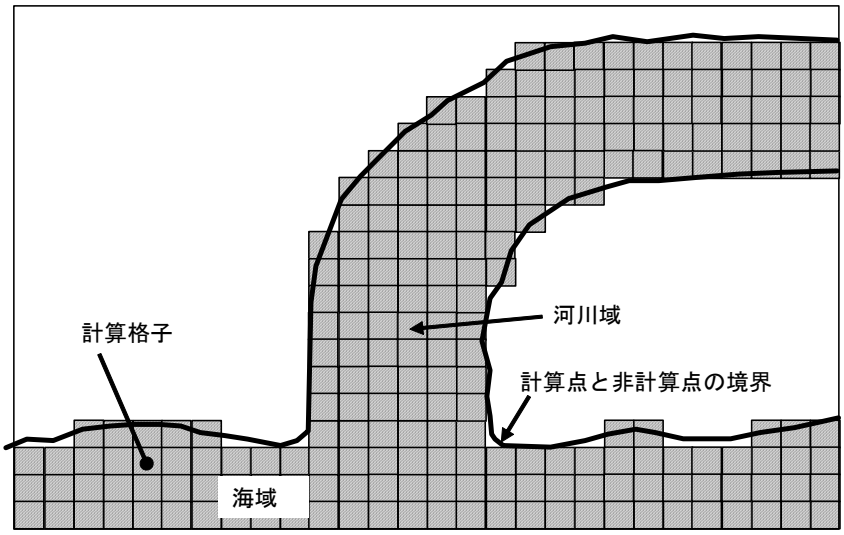
解析に当たっては、津波の挙動を適切に表現できるよう地形及び波長等を考慮して格子間隔を設定するものとする。

【解　　説】

津波の伝播過程においては、深海域では津波の波長が長く、水深が浅くなるにつれて波長が短くなるため、波長の変化に応じて格子間隔を適切に設定するものとする。

一定の精度が確保できる最小格子間隔の条件は、既往研究成果によると深海域で津波 1 波長の 1/20 以下、浅海域で津波 1 波長の 1/100 以下とされており、それらを目安に最小格子間隔を設定するものとする。このように一般に深海域における格子間隔は広く、浅海域及び河川域における格子間隔は狭く設定するものとする。

本手引き（案）は、河川域を遡上する津波の解析を対象とするため、河川域の格子間隔の設定においては、蛇行部などの形状を適切に再現できるよう河道の横断方向に 5 格子程度以上を確保するとともに、河川構造物が再現できる適切な格子間隔とするものとする。



※図中のハッチ部分 ▨ は、津波の計算点となる格子を表す。

図 3.3.1　格子間隔の設定イメージ

3.4　地形データの作成

解析に当たっては、津波の挙動を適切に表現できるよう解析対象範囲における地形データを作成するものとする。

【解　　説】

(1) 河川域における地形データの作成方法

河川域においては、定期横断測量結果等をもとに各格子点の地形データを作成する。再現計算においては、対象としている津波が発生した当時の状況を考慮したデータを使用するものとする。

ただし、津波来襲時点における地形データの作成において、津波来襲前後の定期横断測量結果が得られていない場合は、河床変動の大小等を考慮し、適切な地形データを使用することができる。

なお、河口部の砂州の形状は、河口から河川域に入射する津波の挙動を大きく左右する要因の一つと考えられる。このことから、洪水や融雪出水による砂州形状の変動を整理、分析し、砂州がフラッシュされ易い場合には砂州を除去した地形データを作成するものとする。河口部の砂州に関する地形データの作成にあたっては、縦横断測量、汀線測量、航空写真等を参照するものとする。

(2) 海域における地形データの作成方法

海域のデータは、海上保安庁発行の海図や港湾・漁港を所管する機関が管理する深浅測量結果等を基に各格子点のデータを作成するものとする。

3.5　構造物データの作成

解析に当たっては、津波の挙動を適切に表現できるよう河川構造物、河口部付近の海岸堤防及び防波堤等に関する構造物データを作成するものとする。

【解　　説】

(1) 河川堤防

河川堤防に関するデータの作成に当たっては、対象となる河川堤防の位置及び天端高を適切に反映するものとする。

なお、水門や樋門については、水の流出入を考慮しなくてもよい。

(2) 河川を横断する堰等

河川を横断する堰等に関するデータの作成に当たっては、開口幅、高さ及び開口部水深を適切に反映するものとする。

(3) 河岸又は堤防を保護する水制等

河岸又は堤防を保護する水制等に関するデータの作成に当たっては、河積を阻害する構造物の幅や高さを適切に反映するものとする。

(4) 河口部付近の海岸堤防や防波堤

河口部付近の海岸堤防や防波堤は、河川域における津波の挙動に影響を及ぼすため、構造物の形状を適切に反映するものとする。

3.6　津波諸元の設定

解析に当たっては、津波の挙動を適切に表現できるよう海底面における断層の鉛直変位の分布を海面の初期水位分布として与え、津波諸元を設定するものとする。

【解　　説】

津波諸元の設定に当たっては、中央防災会議、地方自治体等において、大規模な近地津波に関する研究等が進められているところであり、これらの研究等の結果を用いるとよい。

津波諸元は、断層の幅、長さ、傾斜角などのパラメータをもとに求められる地盤変動量をそのまま海面の初期水位分布として与えてもよい。図 3.6.1 に断層の動きと地盤変位の概念を示す。

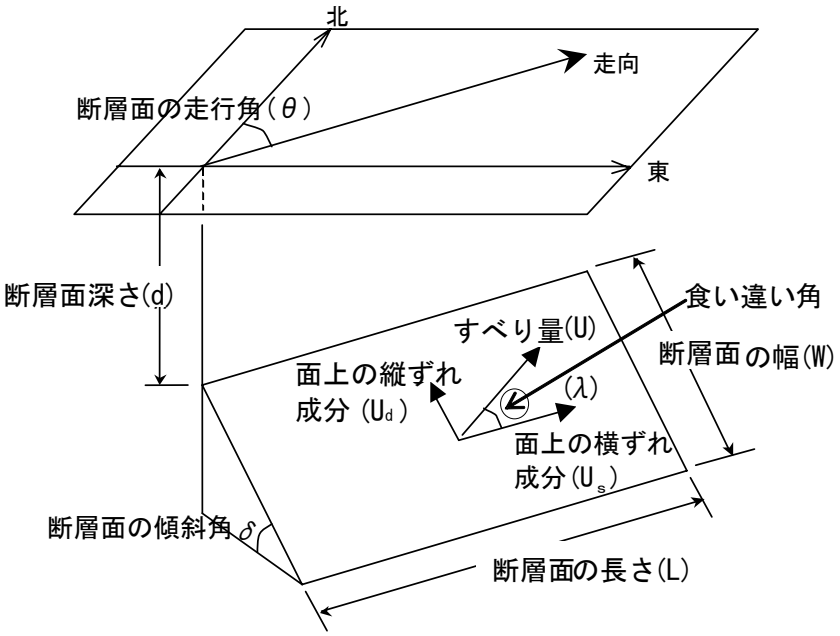


図 3.6.1　断層の動きと地盤変位の概念図

3.7　境界条件の設定

解析に当たっては、津波の挙動を適切に表現できるよう地形、構造物等の影響を考慮して、境界条件を設定するものとする。

【解　　説】

解析に当たっては、津波の挙動を適切に表現できるよう地形、構造物等の影響を考慮して、図3.7.1 に示す沖側境界条件、遡上境界条件、越流境界条件及び接続境界条件を設定するものとする。

(1) 沖側境界条件

解析対象範囲内の海域と解析対象範囲外の海域との境界条件。

(2) 遡上境界条件

津波先端と陸上との境界条件。

(3) 越流境界条件

河川堤防や海岸堤防と陸側との境界条件。

(4) 接続境界条件

異なる格子間隔の領域を接続する境界条件。

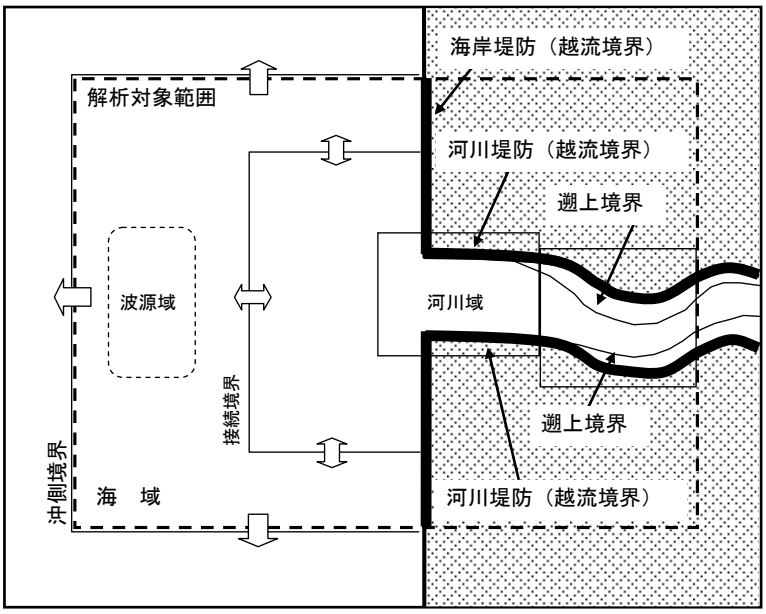


図 3.7.1　境界条件の概略図

3.8　諸条件の設定

解析に当たっては、次の諸条件を適切に設定するものとする。

（１）　河口及び海域における潮位

（２）　河川域及び海域における粗度係数

（３）　河川域における初期水位

（４）　計算時間間隔

（５）　再現時間及び予測時間

【解　　説】

(1) 河口及び海域における潮位

解析に用いる河口及び海域における潮位は、次のとおりとする。

①　再現計算　：　津波来襲時の潮位

②　予測計算　：　朔望平均満潮位

再現計算に用いる河口及び海域における潮位は、津波来襲時の潮位とする。

予測計算に用いる河口及び海域における潮位は、①「耐震性能照査指針(案)」において、平常時の最高水位として、河口付近では、朔望平均満潮位及び波浪の影響を考慮するものとしていること、②中央防災会議等で沿岸の津波高を算出する際に設定されている潮位が朔望平均満潮位であること等を考慮して朔望平均満潮位とする。

(2) 河川域及び海域における粗度係数

河川域の粗度係数は、原則として、以下に示すように、再現計算及び予測計算において適切な粗度係数を用いることとする。また、海域の粗度係数は n=0.025 としてもよい。

①　再現計算　：　再現時点の粗度係数を設定するものとする。

②　予測計算　：　予測しようとする条件を反映した粗度係数を設定するものとする。

(3) 河川域における初期水位

河川域における初期水位は、河口における潮位を出発水位として、不等流計算によって得られた水位を設定するものとする。

① 再現計算 ： 津波が来襲した時点の河川流量により算出した河川水位とする。

② 予測計算 ： 平水流量（185 日/365 日）により算出した河川水位とする。

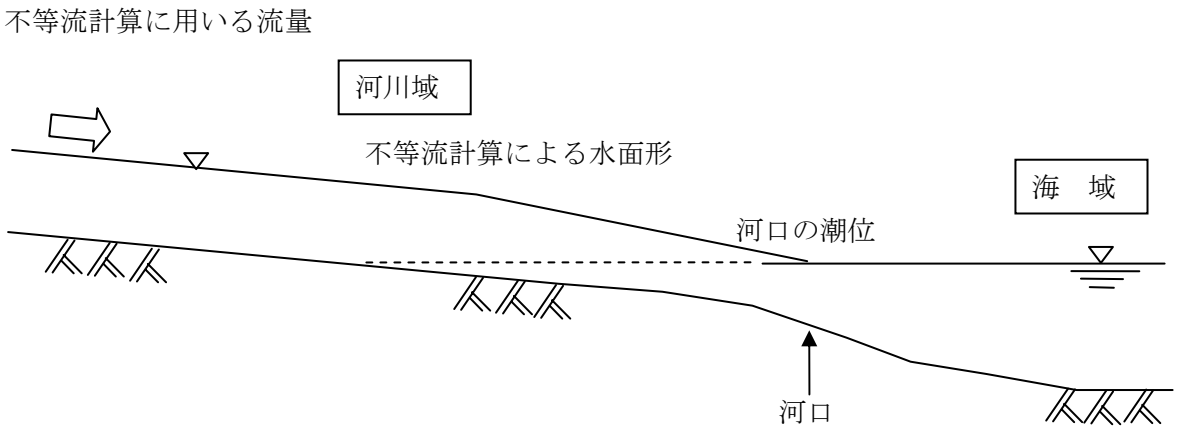


図 3.8.1 河川域及び河口の初期水位

(4) 計算時間間隔

解析における計算 1 ステップあたりの計算時間間隔（Δt）は、格子間隔に対して、計算が安定となる条件（Courant-Friedrichs-Lewy condition、いわゆる C.F.L.条件）を満たすように適切に設定するものとする。解析は、異なる格子間隔の領域を接続して、全領域で同一の計算時間間隔で計算を行うため、各領域で C.F.L.条件を満足する計算時間間隔を求め、最小の時間間隔を全領域における計算 1 ステップあたりの時間間隔とする。

$$\frac{\Delta s}{\Delta t} > \sqrt{2gh_{\max}} \quad 、 \quad \Delta t < \frac{\Delta s}{\sqrt{2gh_{\max}}}$$

ここに、Δs は各計算領域の格子間隔（m）、$h_{\max}$ は各計算領域における最大水深（m）

例えば、10m 格子間隔で最大水深が 200m の場合、0.1 秒（≒$10/\sqrt{2\times9.8\times200}$）よりも短い時間間隔で計算する必要がある。

(5) 再現時間及び予測時間

解析の再現時間及び予測時間は、津波の特性、地形条件等を考慮して適切に設定するものとする。津波は第一波で最大津波高が発生するとは限らず、初期水位分布や対象地点及び周辺の地形等によって、最大津波高が発生する時刻は変わる場合がある。例えば、湾内の固有振動が励起される場合や、対岸からの第一波の反射波と後続の津波が重なり合うような場合には、数波目以降に最大津波高を生じることもあり、これらを捉えることのできる十分な再現時間及び予測時間を設定するものとする。

3.9　再現計算

再現計算は、津波が来襲した時点の計算条件をもとに構築した基本モデルを用いて適切に実施するものとする。

また、再現計算の結果と津波痕跡値及び水位記録とを比較すること等により基本モデルの検証及び評価を行い、必要に応じて基本モデルを修正して修正基本モデルを作成するものとする。

【解　　説】

再現計算は、対象とする過去の実績津波が来襲した時点における地形条件や初期条件等を適切に設定した基本モデルを用いて行うものとする。また、再現計算においては、河川域及び海域における潮位、水位記録、津波痕跡値等をもとに基本モデルの検証と評価を行い、必要に応じて基本モデルの修正を行うものとする。

再現した津波は、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（式(3.9.1)）及び対数幾何標準偏差κ値（式(3.9.2)）の算出により定量的に評価を行うものとする。これは、対象河川における基本モデルが過去の実績津波の挙動を適切に再現できることを確認することで基本モデルの妥当性を評価するものである。

再現計算において計算値と痕跡値に差異がある場合は、地形データや初期条件等を確認し、必要に応じて修正を行うものとする。地形データや初期条件等の修正によっても計算値と痕跡値に差異がある場合は、波源における初期水位分布に補正係数（増幅係数）を乗じることによって修正を行うものとする。

$$\log K = \frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}\log\left(\frac{R_i}{\eta_i}\right) \qquad \text{(3.9.1)}$$

$$\log \kappa = \left[\frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}\left\{\log\left(\frac{R_i}{\eta_i}\right)^2 - \{\log K\}^2\right\}\right]^{1/2} \qquad \text{(3.9.2)}$$

ここで、R_iは痕跡高、η_iは計算水位、Nは比較地点数を意味する。

式（3.9.2）において、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値である。既往文献によれば、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。

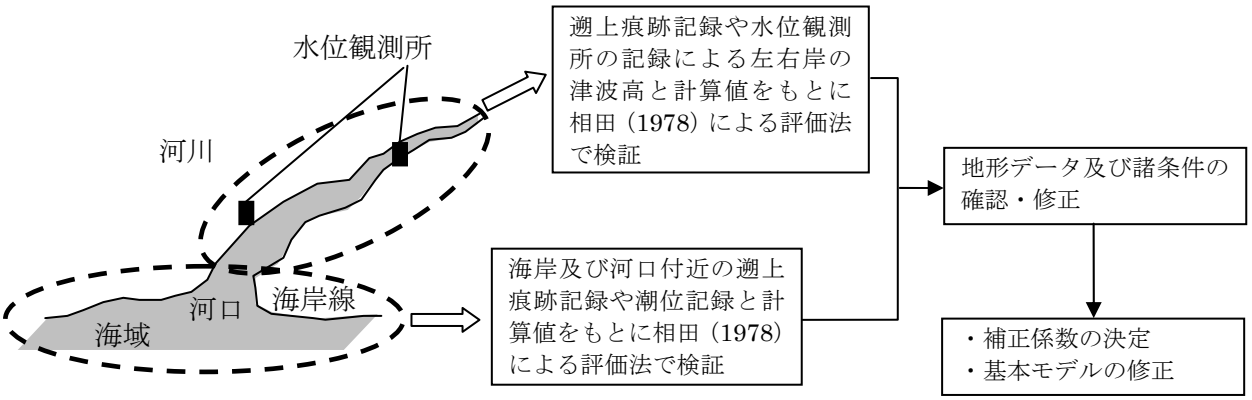


図 3.9.1　基本モデルの評価・修正の概要

3.10　予測計算

予測計算は、基本モデル又は修正基本モデルに予測しようとする条件を反映した解析モデルを用いて適切に実施するものとする。

【解　　説】

津波の予測計算は、再現計算によって妥当性が評価された修正基本モデルに、予測しようとする地形条件、水理条件、初期条件等を適切に設定した解析モデルを用いて行うものとする。

【参考文献】

・「津波・高潮ハザードマップマニュアル」（平成 16 年 3 月）内閣府（防災担当）・農林水産省農村振興局・農林水産省水産庁・国土交通省河川局・国土交通省港湾局
・「地域防災計画における津波対策強化の手引き」国土庁・農林水産省構造改善局・農林水産省水産庁・運輸省・気象庁・建設省・消防庁
・「原子力発電所の津波評価技術」（平成 14 年 2 月）社団法人　土木学会　原子力土木委員会、津波評価部会
・海岸工学：岩垣雄一・椹木　亨共著、共立出版株式会社.
・日本の断層パラメータハンドブック：佐藤良輔編著、鹿島出版会.
・建設省河川砂防技術基準（案）同解説・調査編：建設省河川局監修、山海堂.
・港湾構造物の耐波設計：合田良賓著，鹿島出版会.
・東北大学工学部津波工学研究室ホームページ.

参考資料-1

非線形分散長波理論に関する資料

目　　次

1.　津波の伝播に伴う諸効果 1-1
1.1　深海での分散効果（線形） 1-2
1.2　非線形長波 1-3
1.3　非線形分散長波 1-4
1.4　ソリトン分裂の発生・発達過程 1-5
2.　非線形分散長波理論に基づく解析における留意点 1-6
2.1　格子間隔 1-6
2.2　計算時間間隔 1-6
2.3　解析時間 1-6

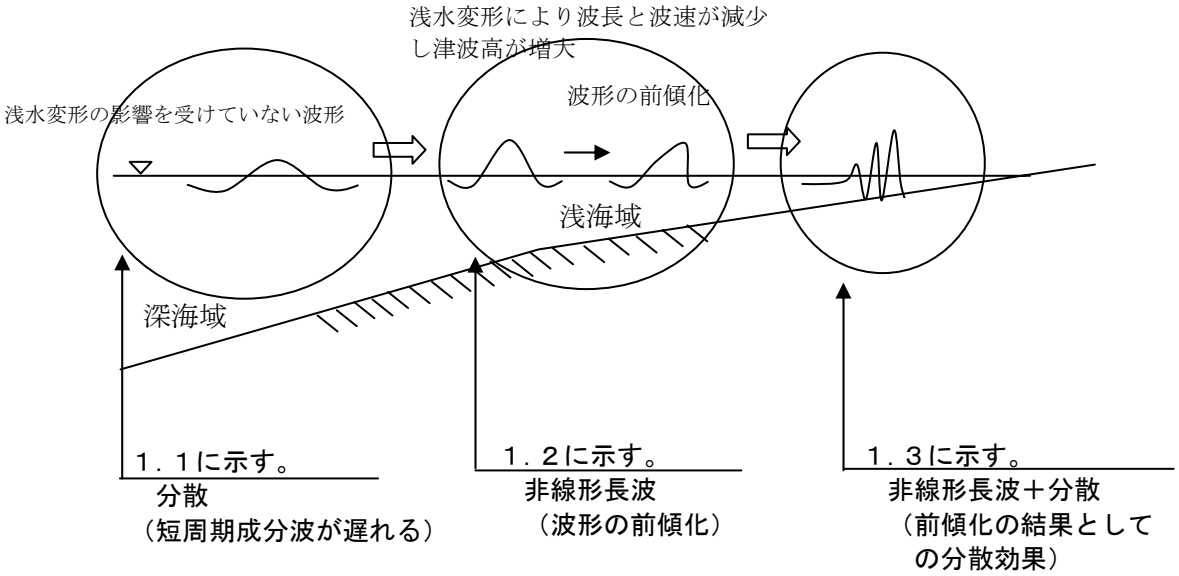
1. 津波の伝播に伴う諸効果

津波は、伝播する過程において以下に示すような特徴的な３つの現象に伴う効果を呈することが知られている。（図―1.1）

① 深海で発生した津波は、線形の分散効果を呈しながら浅海域へと進行する。

② 浅海域での津波は、波高水深比が次第に大きくなる海域を進行することによって非線形効果を呈して波の峰が高くなると共に、波全面勾配が急峻となる. これを前傾化と云う。

③さらに波高水深比が大きい遠浅の海域や河川域へと進行する津波は、波形や水深等の条件によっては非線形効果に分散現象が加わってソリトン分裂のような波状段波を形成することもある。



図―1.1　津波伝播過程における諸効果の模式図

以下に上記各現象と効果の概要について紹介する。

1.1　深海での分散効果（線形）

水深の波長に対する比が極めて小さい津波のような長波は、波形の曲率が小さく鉛直方向の加速度が無視できるため、長波理論によって表現することができる。深海では線形長波理論が適用できる。だが，初期波形に短周期成分が含まれる場合、および遠地津波のように伝播距離が長い場合には、この小さい曲率の影響を無視できない事がある。

曲率の影響は一般に分散効果と呼ばれるが、周期の短い波ほど長い波に比べて伝播速度が遅くなるのがその一つの現れである。異なった周期を持つ多様な波によって形成されている津波は、**図** 1.1.1 に示すように、その伝播に伴って周期の短い波が津波本体から次第に後方に取り残されて、波のエネルギーが広い範囲に分布し、津波の水位を低く、周期を長くするように作用する。これが線形津波の分散効果である。

高周波成分を多く含む海底変位によって発生した津波であるほど、伝播過程での分散効果の発現が著しくなる。(**図** 1.1.2 参照)。

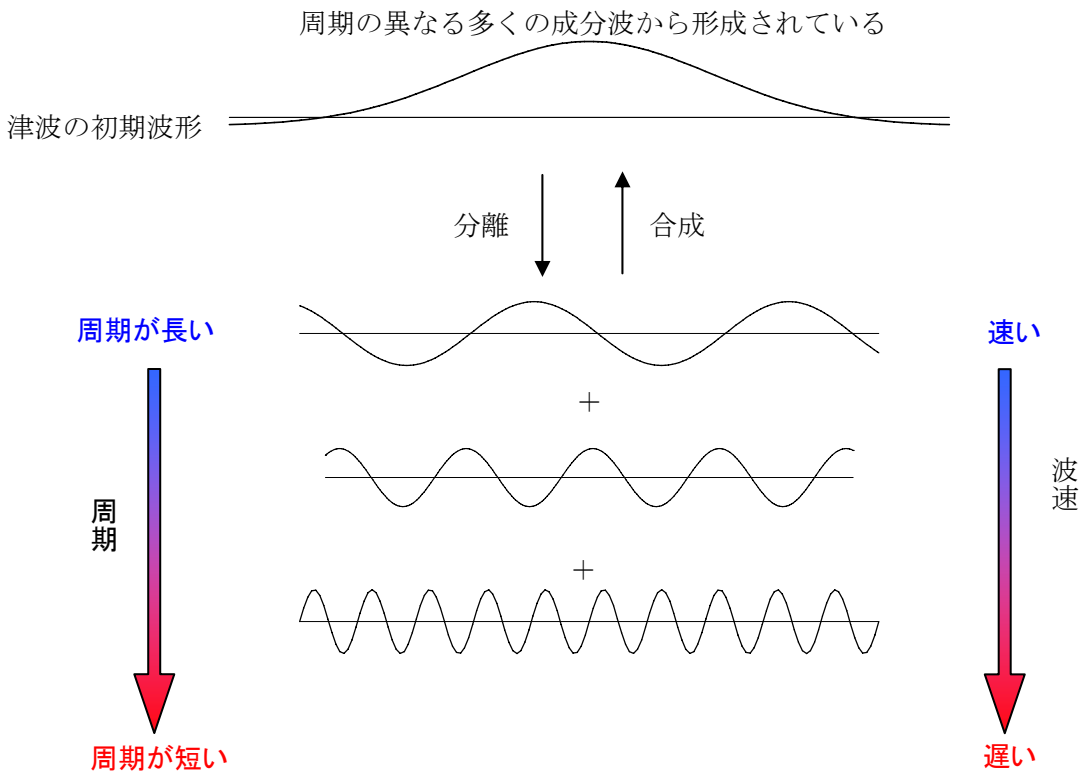


図 1.1.1　津波を形成している波の成分と伝播特性の模式図

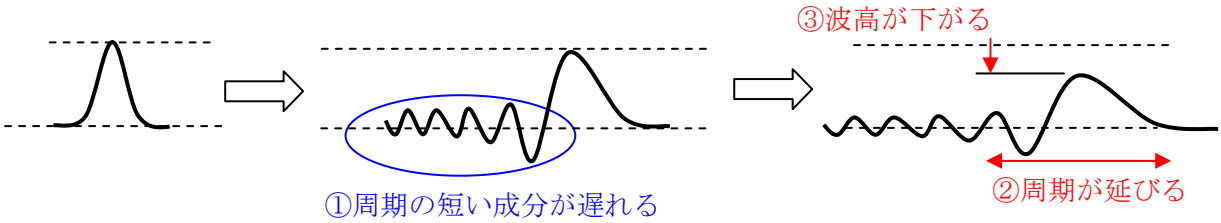


図 1.1.2　分散効果による津波変形の模式図

1.2　非線形長波

津波は浅海域や河川域において、波高水深比が深海域に比べて大きくなるため、水深の変化に伴う浅水変形によって波長、波速が減少するとともに津波高が高くなる。浅水変形によって津波高が高くなり、水位の高い部分の水面形と水位の低い部分の水面形との移動速度差が大きくなることで波の峰が前傾化することを非線形効果という。このような現象は非線形長波理論によって表現することができる（**図**1.2.1参照）。

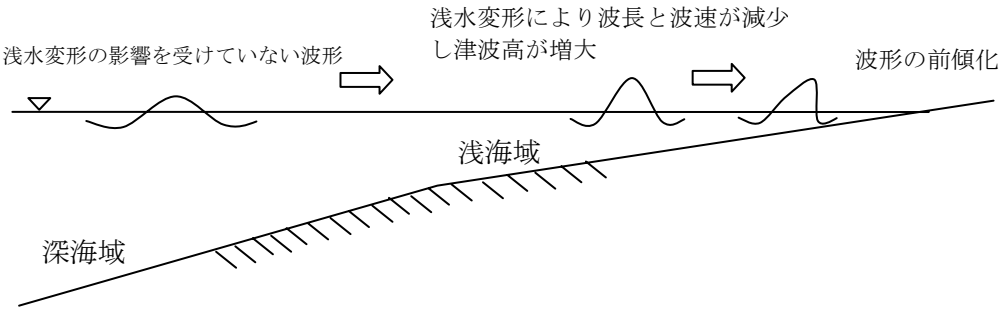


図 1.2.1　非線形長波理論による津波波形の変化

1.3　非線形分散長波

津波が遠浅の海域や河川を伝播するのに伴い、波形や水深等の条件によっては、周期の短い複数の波に分裂し波高が増幅する。このような現象をソリトン分裂といい、非線形分散長波理論によって表現することができる（**図** 1.3.1 参照）。ソリトン分裂のような波状段波は、津波が遠浅の場所を遡上する場合に発生しやすく、かつ、その後も遠浅の場所が続く区間を遡上するのに伴い、さらにソリトン分裂が進行するとされている。

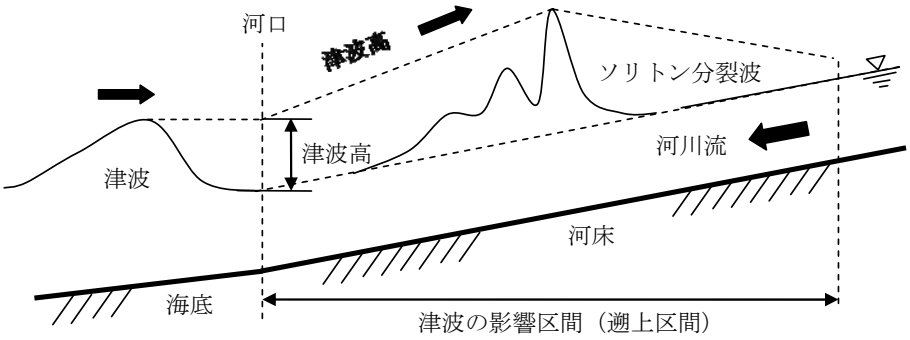


図 1.3.1　非線形分散長波理論による津波高の変化

なお、津波先端部の形状には、津波が水深の浅い海域を伝播するのに伴い、**図** 1.3.2 に示すようにソリトン分裂による波状段波が形成される場合やソリトン分裂が発生しないで減衰していく砕波段波を形成する場合等がある。

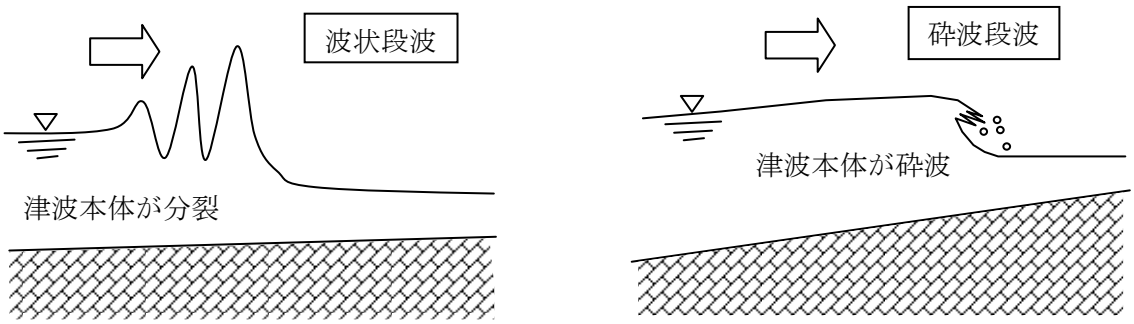


図 1.3.2　波状段波と砕波段波

1.4　ソリトン分裂の発生・発達過程

ソリトン分裂の発生・発達過程の概要を以下に記述し、**図** 1.4.1 にソリトン分裂のメカニズムと波形の変形の概念図を示した。

- 浅海域における非線形効果により津波は前傾化し、その波形前面で周期の短い成分が全体の中で卓越するようになる。
- 周期の短い成分が卓越すると波形が後方に延びようとする分散効果も発現する。
- 砕波条件に至るまでに十分な時間があると、分散効果と非線形効果の相乗作用により、周期の短い分裂波が発生する。これをソリトン分裂と呼んでいる。
- ソリトン分裂によって生じた分裂波の波長は津波本体に比べて極めて短く、波形の曲率半径が小さいため、鉛直方向の加速度成分が大きくなる。
- 鉛直方向の加速度成分が増加することに伴って、峰は上昇し、谷は下降する。

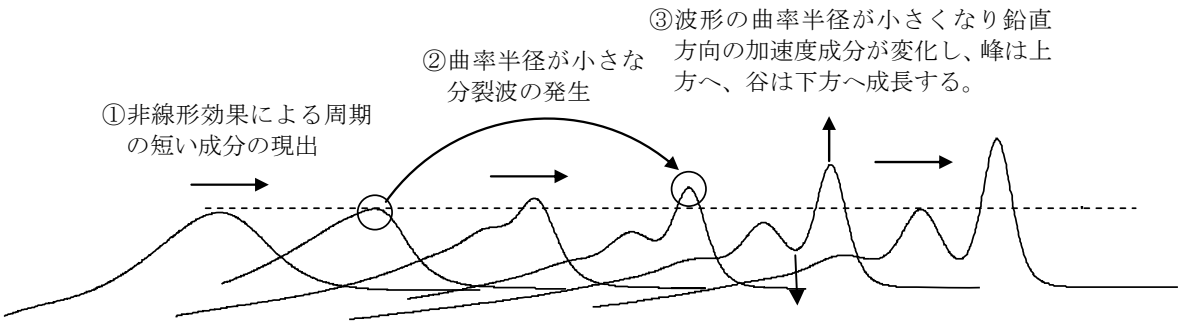


図 1.4.1　ソリトン分裂のメカニズムと波形の変形の概念図

2. 非線形分散長波理論に基づく解析における留意点

2.1 格子間隔

一番外側の格子の大きい領域に始まり、岸に近づくにつれて次第に格子の小さな領域２、３、４・・・へと接続して計算を行う。この時、非線形分散長波理論を用いた解析では、対象となる津波が伝播していく過程で周期の短い波に分裂して波状段波が形成される。

このため、表 2.3.2 でわかるとおり、非線形長波理論なら最小格子間隔は 10mでよい（領域６、領域７）が、非線形分散長波理論を用いる場合は、領域７に２m間隔の細かい格子を設定する必要が生ずる。

2.2 計算時間間隔

格子間隔を小さく設定することに伴い、計算時間間隔を短くする必要がある。

2.3 解析時間

非線形分散長波理論を用いた解析では、格子数の増加、計算時間間隔の短縮及び分散項の計算により、計算時間が長くなる。

米代川の再現計算を対象として、非線形長波理論を用いた場合と非線形分散長波理論を用いた場合の計算時間の違いを**表** 2.3.1 に示し、計算領域の格子数を**表** 2.3.2 に示す（図 2.3.1 参照）。非線形長波の格子間隔と計算時間間隔を同一にする場合、非線形分散長波理論を用いた場合では、非線形長波理論を用いた場合の約 4 倍の時間を要する。最小格子間隔を 10m とする非線形長波理論を用いた場合に比べると、約 80 倍の時間を要する。

表 2.3.1 「非線形分散長波理論」と「非線形長波理論」の計算時間の比較（米代川の解析例）

<table>
<tr><th colspan="2">解析条件</th><th>最小格子間隔</th><th>計算時間間隔</th><th>1 時間の再現に要する時間</th></tr>
<tr><td>①</td><td>非線形分散長波理論</td><td rowspan="2">2m</td><td rowspan="2">0.05 秒</td><td>約 150 時間(6 日 6 時間)</td></tr>
<tr><td>②</td><td rowspan="2">非線形長波理論</td><td>約 40 時間(1 日 16 時間)</td></tr>
<tr><td>③</td><td>10m</td><td>0.20 秒</td><td>約 2 時間</td></tr>
</table>

・演算時間の算出に使用したコンピュータの CPU は「Intel-Pentimum4 3.8GHz」

表 2.3.2　「非線形長波理論」と「非線形分散長波理論」の計算格子数の比較（米代川の解析例）

領域	格子間隔	計算領域の格子数	
		非線形長波理論	非線形分散長波理論
1	1,200m	40,000	40,000
2	600m	25,600	25,600
3	200m	108,900	108,900
4	100m	144,400	144,400
5	50m	360,000	360,000
6	10m	760,196	760,196
7	10m	258,204	0
	2m	0	6,455,100
合計		1,697,300	7,894,196
格子数合計の比率		1 ： 4.7	

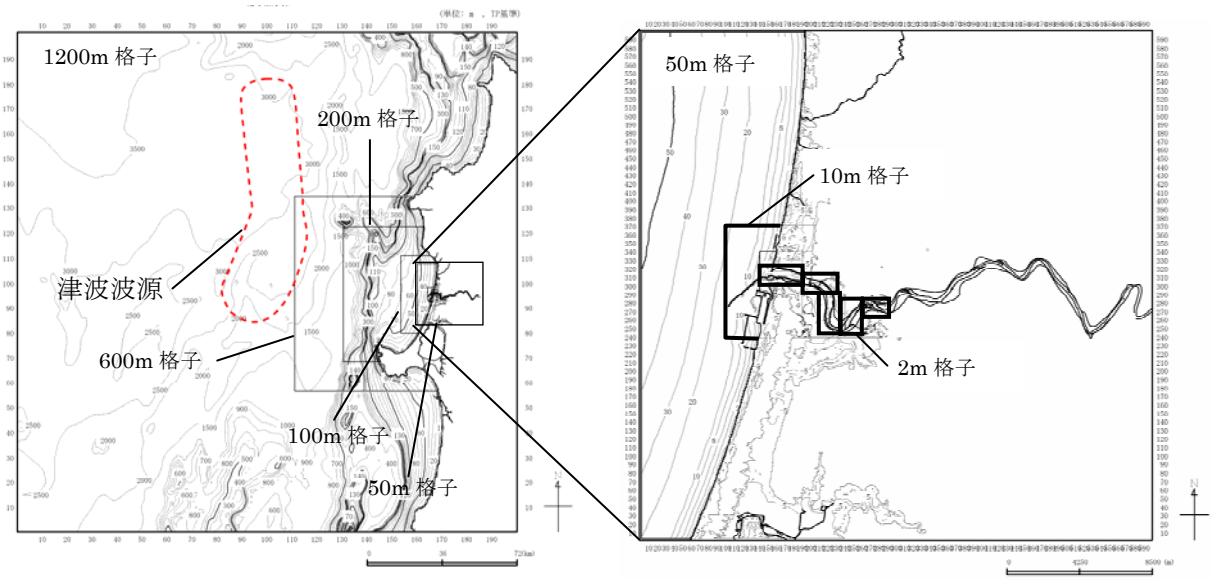


図 2.3.1　解析対象範囲における各格子領域

参考資料-2

簡易推定手法

目　　次

1.　簡易推定手法の適用条件 2-1
2.　ソリトン分裂の影響 2-1
3.　簡易推定手法により津波高・遡上距離の概略を推定する手順 2-1
3.1　資料収集・整理 2-2
3.2　計算条件の設定 2-2
3.3　ソリトン分裂の影響を考慮しない場合の推定式と推定津波高の求め方 2-3
3.4　ソリトン分裂の影響を考慮する場合の推定式と推定津波高の求め方 2-5

1. 簡易推定手法の適用条件

簡易推定手法は、河口水深（h_0）、河床勾配（i）及び河口における津波高（H_0）※) を与条件として、河川を遡上する津波高、遡上距離の概略を推定するものである。

簡易推定手法は、津波の遡上が想定される範囲の河川条件が、概ね次の場合に適用できる。

※)：津波高（H_0）は風波波高の定義とは異なることに注意。

（1） 河口周辺区域に津波の挙動に影響を及ぼす特異な地形や施設がない河川（リアス式海岸や防波堤等がないこと）
（2） 河道が海岸線に対してほぼ直角となっている河川
（3） 河道がほぼ直線である河川
（4） 河道の横断形状が単断面の河川
（5） 河道幅がほぼ一定の河川
（6） 河床勾配がほぼ一定の河川
（7） 河口部が砂州により埋塞していない河川

2. ソリトン分裂の影響

簡易推定手法は、原則として「3.3 ソリトン分裂の影響を考慮しない場合の推定式と推定津波高の求め方」によるものとする。ただし、河口において概ね以下の２つの条件を満たす場合には、ソリトン分裂の影響を考慮してもよく、この場合には「3.4 ソリトン分裂の影響を考慮する場合の推定式と推定津波高の求め方」によってもよい。

①津波が遠浅の場所が続く区間を遡上する場合
②津波高(H_0)と水深(h_0)の比が 0.83 程度よりも小さい場所

3. 簡易推定手法により津波高・遡上距離の概略を推定する手順

簡易推定手法により河川を遡上する津波高、遡上距離の概略を推定する手順は、図 3.1.1 に示すとおりとする。

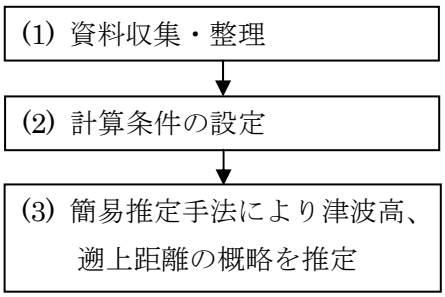


図 3.1.1 簡易推定手法により津波高・遡上距離の概略を推定する手順

3.1　資料収集・整理

表 3.1.1 に示す資料を収集・整理する。

表 3.1.1　収集・整理する資料

領　域	資料の詳細
河川域	河川縦横断図
海　域	河口における予想津波高に関する資料

3.2　計算条件の設定

河口水深（h_0）、河床勾配（i）及び河口における津波高（H_0）をもとに河川における津波の遡上距離と津波高の概略を推定するため、収集・整理した資料をもとに計算条件を以下のとおり設定するものとする。

（1）河口水深（h_0）

河口における朔望平均満潮位から平均河床までの水深

（2）河床勾配（i）

河口付近における平均河床勾配

（3）河口における津波高（H_0）

中央防災会議や地方自治体の既往研究等から得られる、河口付近における予想津波高

ただし、河川の流れは全区間で等流と仮定して、河口での朔望平均満潮位から上流に向けて河床と平行に河川水位を設定するものとする。

3.3　ソリトン分裂の影響を考慮しない場合の推定式と推定津波高の求め方

3.3.1　推定式

ソリトン分裂の影響を考慮しない場合の河川内における最高津波高（$H_{\max-s}$）及び津波高が河口における最大津波高の 2 割の高さとなるまで減衰する地点の河口からの距離（l_s）は、式（3.3.1）及び（3.3.2）によって推定するものとする。

（1）河川内における最高津波高（$H_{\max-s}$）の推定式

$$H_{\max-s} = H_0 \qquad \text{----------(3.3.1)}$$

（2）津波高が河口における津波高の 2 割の高さとなるまで減衰した地点の河口からの距離（l_s）の推定式

$$l_s = 1.2 \times l_0 \times (H_0 / h_0)^{-1/3} \qquad \text{----------(3.3.2)}$$

ここに、

h_0　：河口水深（m）

H_0　：河口における津波高(m)

$H_{\max-s}$　：河川内における最高津波高(m)

l_0　：河口における河床から $h_0 + H_0$ の高さの点 P1 から上流に向け水平な直線を引き、河川水位との交点に至るまでの距離(m)

l_s　：津波高が河口における津波高の 2 割の高さとなるまで減衰した地点の河口からの距離(m)

i　：河床勾配（例：1/5,000 など）

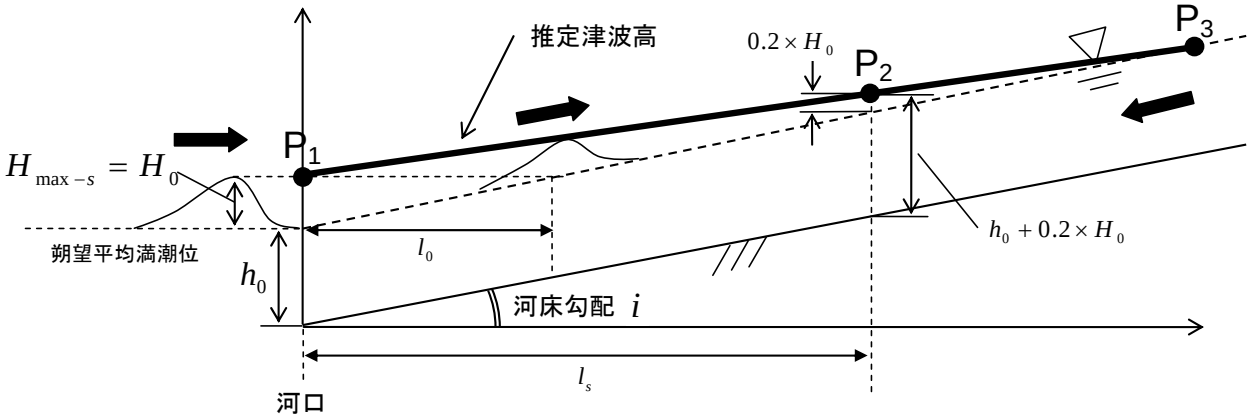


図 3.3.1　ソリトン分裂の影響を考慮しない場合の推定式より求められる推定津波高の概念図

3.3.2　推定津波高の求め方

推定津波高は、推定式によって得られた値を用いて、以下の手順で求めるものとする。

（1）式(3.3.2)により（l_s）を求める。

（2）l_s 地点における河床から $h_0 + 0.2 \times H_0$ の高さの点を P2 とする。

（3）P1 から P2 までを直線で結び、その延長線と河川水位が交わる点を P3 とする。

（4）P1－P2－P3 の各点を直線で結んだ線を推定津波高とする。

3.4　ソリトン分裂の影響を考慮する場合の推定式と推定津波高の求め方

3.4.1　推定式

ソリトン分裂の影響を考慮する場合の河川内における最高津波高（$H_{\max-d}$）及び津波高が河口における最大津波高の 2 割の高さとなるまで減衰した地点の河口からの距離（l_d）は式（3.4.1）及び（3.4.2）によって推定するものとする。

（1）河川内における最高津波高（$H_{\max-d}$）の推定式

$$H_{\max-d} = 1.1 \times H_0 \times \left(H_0 / h_0\right)^{100i-1/2} \qquad \text{----------(3.4.1)}$$

（2）津波高が河口における津波高の 2 割の高さとなるまで減衰した地点の河口からの距離（l_d）の推定式

$$l_d = 1.5 \times l_0 \times \left(H_0 / h_0\right)^{-1/3} \qquad \text{----------(3.4.2)}$$

ここに、

h_0　：河口水深（m）

H_0　：河口における津波高（m）

$H_{\max-d}$　：河川内における最高津波高（m）

l_0　：河口における河床から $h_0 + H_0$ の高さの点から上流に向け水平な直線を引き、河川水位との交点に至るまでの距離(m)

l_d　：津波高が河口における津波高の 2 割の高さとなるまで減衰した地点の河口からの距離(m)

i　：河床勾配（例：1/5,000 など）

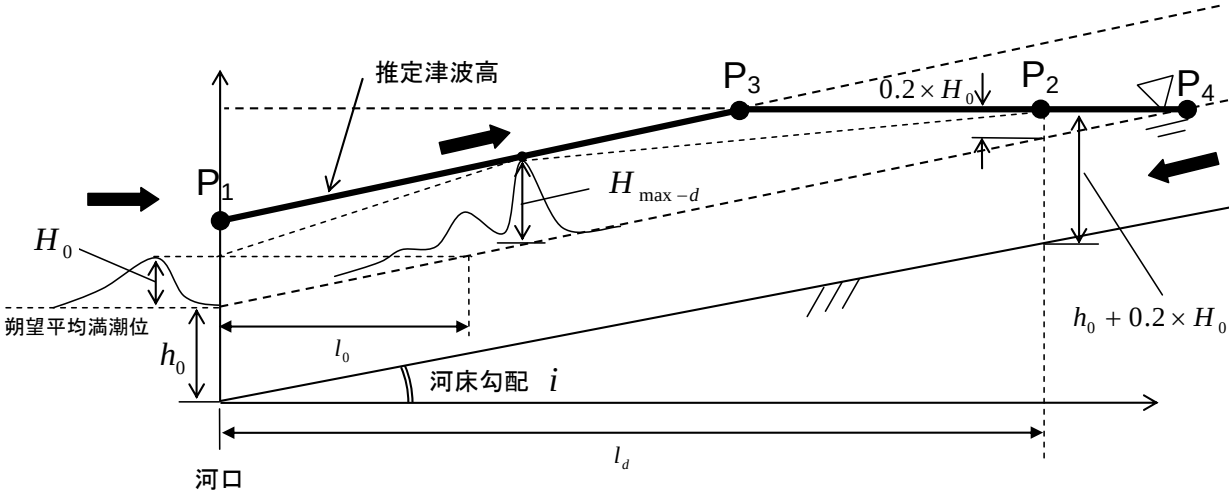


図 3.4.1　ソリトン分裂の影響を考慮する場合の推定式より求められる推定津波高の概念図

3.4.2　推定津波高の求め方

推定津波高は、推定式によって得られた値を用いて、以下の手順で求めるものとする。

（1）式(3.4.1)により求めた（$H_{\max-d}$）を用いて、河口における河床から$h_0 + H_{\max-d}$の高さの点を P1 とする。

（2）式(3.4.2)により（l_d）を求める。

（3）l_d地点における河床から$h_0 + 0.2 \times H_0$の高さの点を P2 とする。

（4）P1 から上流へ向け河床と平行な直線を引き、次に P2 から下流に向け水平な直線を引き、その交点を P3 とする。

（5）P3 から上流に向け水平な直線を引き、河川水位と交わる点を P4 とする。

（6）P1－P3－P2－P4 の各点を直線で結んだ線を推定津波高とする。

参考資料-3

米代川の再現計算

（昭和 58 年日本海中部地震津波における米代川の津波遡上再現計算）

目　次

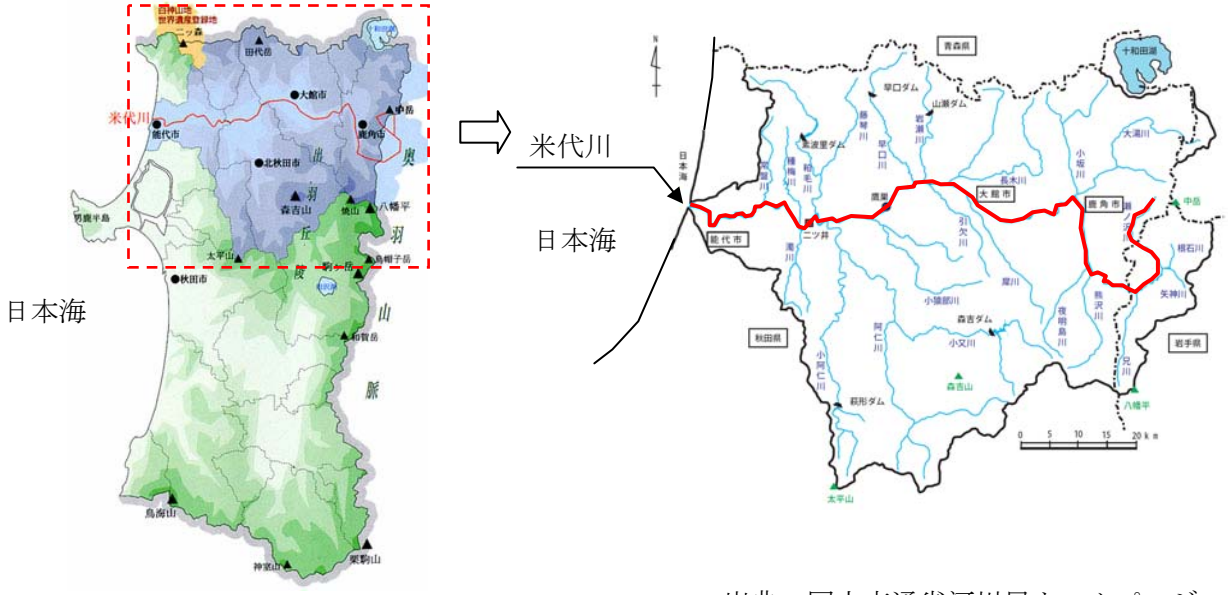
1.　津波解析の概要 3-1
1.1　米代川の概要 3-1
1.2　解析モデル 3-2
1.3　解析の概要 3-3
2.　再現・検証計算 3-4
2.1　検討フロー 3-4
2.2　再現計算と解析モデルの検証 3-5
2.2.1　解析対象範囲の設定 3-5
2.2.2　資料の収集・整理 3-6
2.2.3　格子間隔の設定 3-7
2.2.4　地形データの作成 3-8
2.2.5　構造物データの作成 3-14
2.2.6　津波諸元の設定 3-18
2.2.7　境界条件の設定 3-18
2.2.8　諸条件の設定 3-19
2.2.9　再現計算 3-23

1.　津波解析の概要

1.1　米代川の概要

本検討の対象河川である米代川は、秋田県、青森県、岩手県の 3 県に跨り、幹川流路延長 136km、流域面積 4,100km² を有する一級河川であり、秋田県能代市において日本海に注ぐ。

米代川では、昭和 58 年 5 月 26 日（11 時 59 分）に日本海で発生した「昭和 58 年日本海中部地震」に伴う津波が米代川を遡上したことが記録として残されている（写真 1.1.2 参照）。写真 1.1.1 は、河口から上流約 16km 地点までの米代川の航空写真である。本検討では、津波痕跡高が確認されている河口から 7km までを津波解析の対象とした。



出典：国土交通省河川局ホームページ

図 1.1.1　米代川の位置図

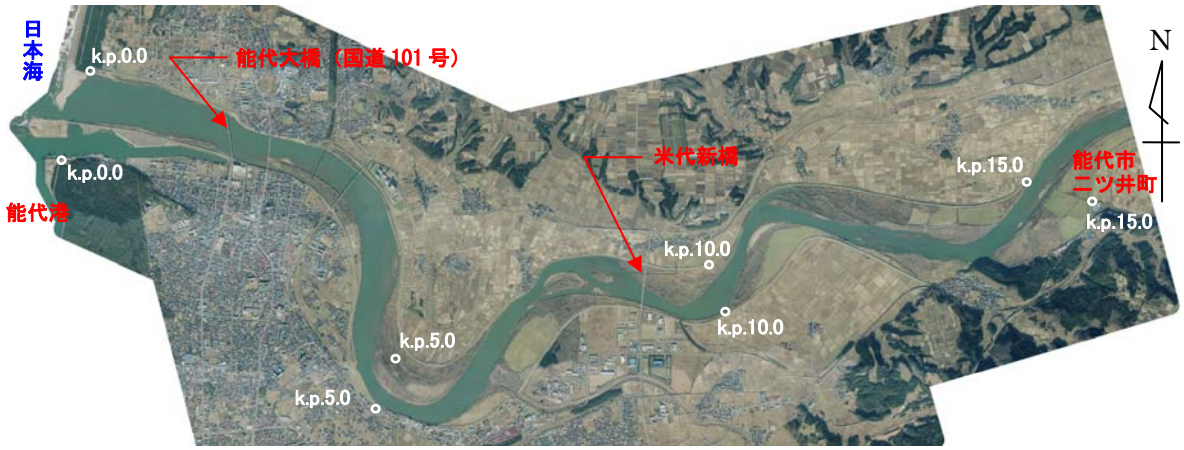


写真 1.1.1　米代川の河口から上流 16km 地点付近までの航空写真

出典：首藤伸夫（1984）：秋田県北部海岸における日本海中部地震津波，東北大学工学部，津波防災実験所研究報告第 1 号，pp.12-26.

写真 1.1.2　米代川を遡上する津波

1.2　解析モデル

分散効果を含まない津波の検討では非線形長波理論式（以下「分散項なしモデル」という）、分散効果を含む津波の検討では非線形分散長波理論式（以下「分散項ありモデル」という）を基本方程式とし、波源を含む海域から河川域までの計算が可能なモデルを構築した。

なお、解析においては、解析対象範囲の原点座標が公共測量における 10 系（東経 140 度 50 分 0 秒、北緯 40 度 0 分 0 秒）となる平面直交座標系を採用し、格子形状は正方格子とした。

1.3　解析の概要

本検討は、昭和 58 年 5 月 26 日（11 時 59 分）に日本海で発生した「昭和 58 年日本海中部地震」を対象に再現計算と解析モデルの検証を行ったものである。表 1.3.1 に解析における作業項目と作業概要を示す。

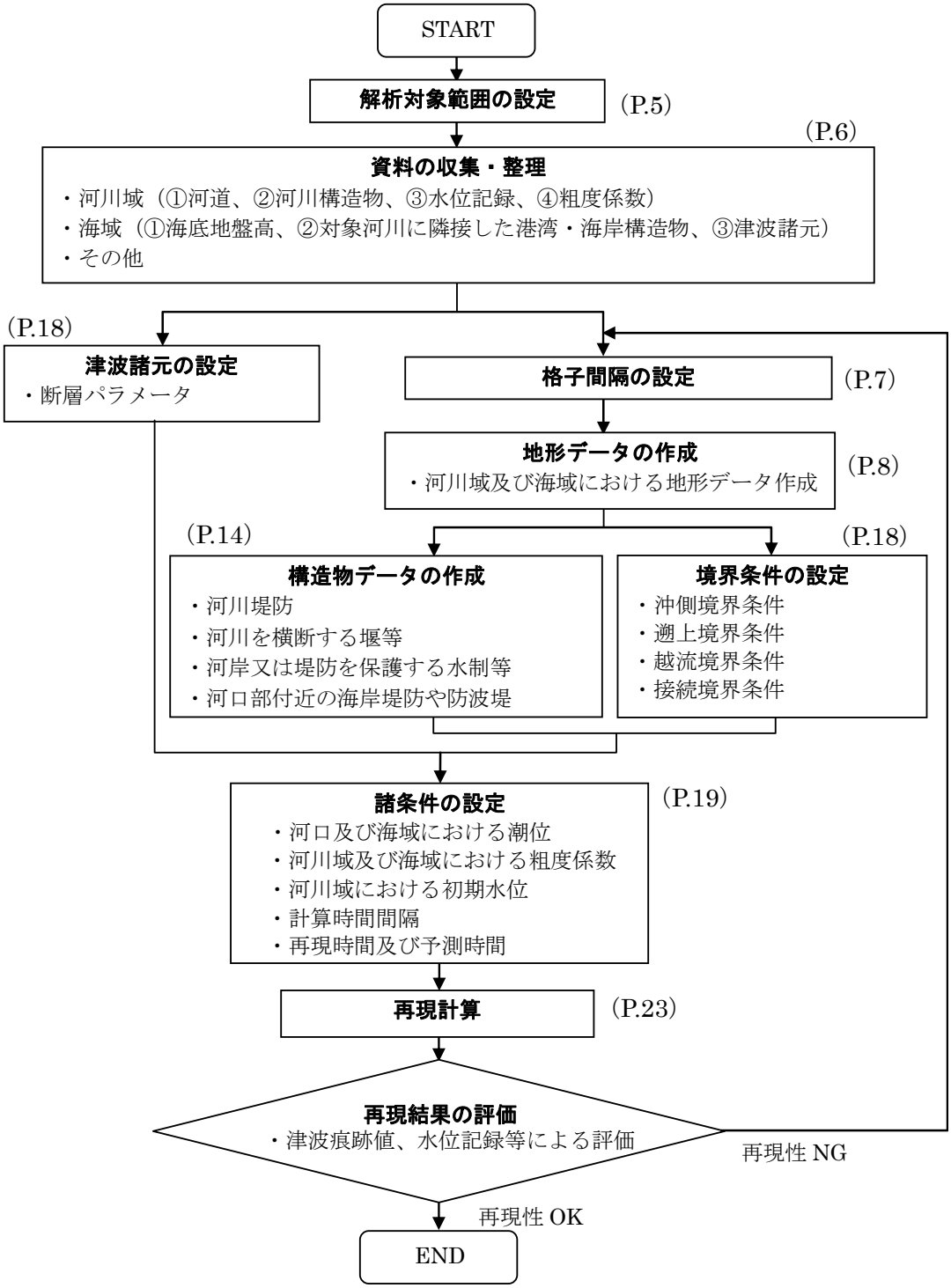
表 1.3.1　解析における作業項目と概要

作業項目		概要
(1)	解析対象範囲	昭和 58 年日本海中部地震に伴う津波の河川遡上範囲を参考に、対象波源を含む海域と河口から上流の約 7km 付近までとした。
(2)	津波波源	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。
(3)	解析モデル	・非線形長波理論式　：　分散項なしモデル ・非線形分散長波理論式　：　分散項ありモデル
(4)	諸条件	①河口及び海域における潮位 津波来襲時の潮位 T.P.+0.24m を設定。 ②河川域及び海域における粗度係数 現況の粗度については定められていないため河川整備基本方針による粗度を設定。 ・河川域：　低水路を 0.022、高水敷を 0.050 として設定。 ・海域　：　全域を 0.025 として設定。 ③河川域における初期水位 富根水位観測所の観測記録に久喜沢川及び常磐川の流量を加えた 151.80m^3/s として不等流計算から求めた。 ④計算時間間隔 C.F.L.条件を満たすために格子間隔と最大水深の関係から 0.05 秒とした。 ⑤再現時間 最大津波高の発生が第 1 波目であったことを確認し、津波の到達時間、河川における遡上等を考慮して津波（地震）発生から 3 時間とした。
(5)	再現計算	津波痕跡高と計算結果の比較から、補正係数を 1.25（相田の K 値と κ 値がそれぞれ 1.13 と 1.22）とした。
(6)	比較検討	①沿岸部における津波痕跡高と計算値の比較結果 分散項ありモデル：K 値=1.17、κ 値=1.22 分散項なしモデル：K 値=1.24、κ 値=1.20 ②河川内の津波痕跡高と計算値の比較結果 分散項ありモデル：K 値=1.20、κ 値=1.25（全データ） 分散項なしモデル：K 値=1.20、κ 値=1.29（全データ）

2. 再現・検証計算

2.1 検討フロー

津波高の解析は、図 2.1.1 に示すフローに従い作業を実施した。



※フロー枠横の数字は、ページ番号を示す。

図 2.1.1　米代川を対象とした再現計算の作業フロー図

2.2　再現計算と解析モデルの検証

2.2.1　解析対象範囲の設定

解析対象範囲は、昭和 58 年日本海中部地震に伴う津波の河川遡上範囲を参考に、対象波源を含む海域と河口から上流の約 7km 付近までとした。解析対象範囲を図 2.2.1 に示す。

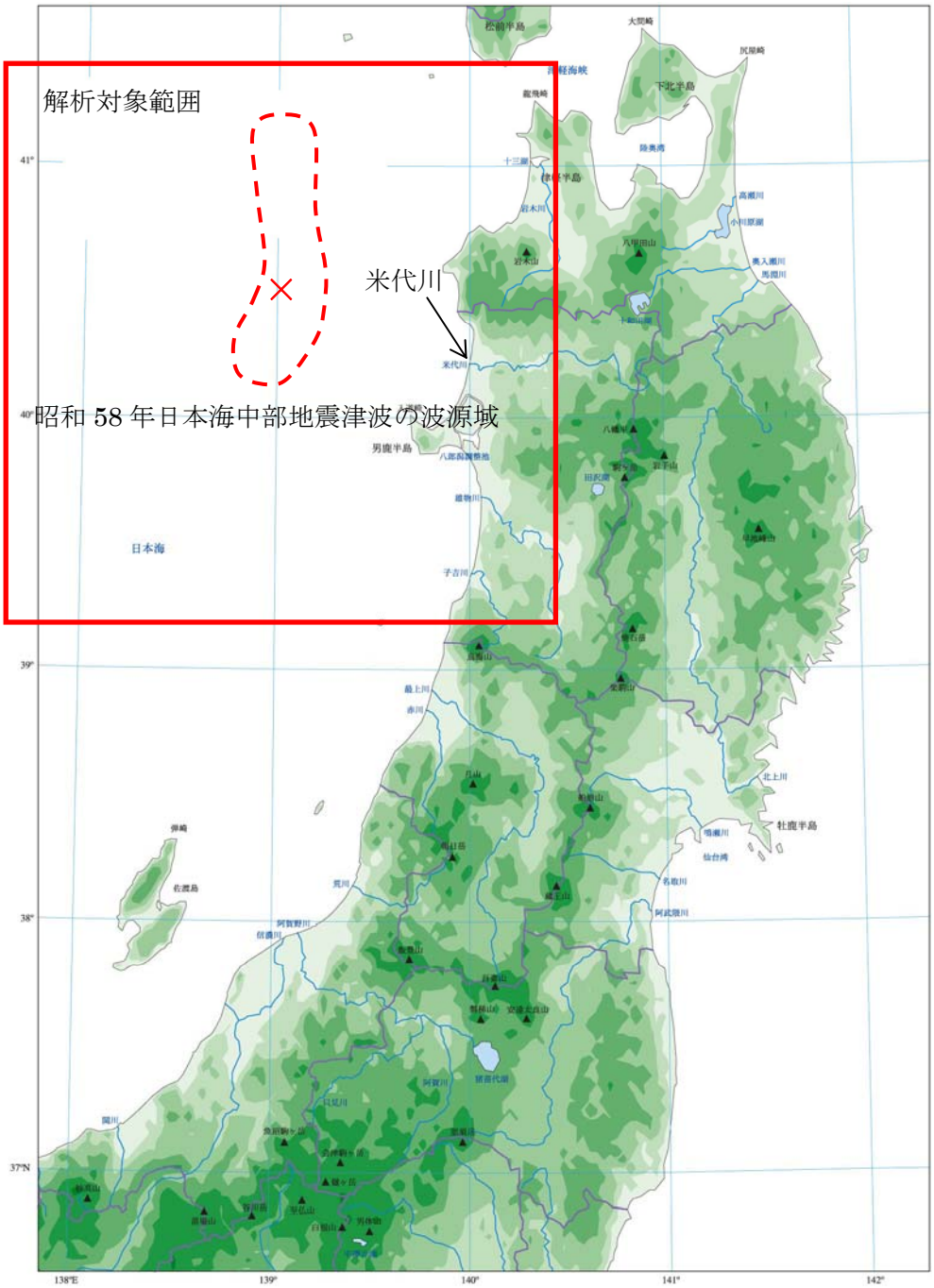


図 2.2.1　解析対象範囲

2.2.2　資料の収集・整理

本検討では、地形データや構造物データ、波源諸元等の設定に必要な情報として、表 2.2.1 に示す資料を収集した。

表 2.2.1　米代川の再現計算における収集資料一覧

分類	資料名称	縮尺	所管機関	発行年	データ内容
河川域	米代川河川横断測量結果		能代工事事務所	S58-12	河床高（1km毎）
	米代川河川横断測量結果		能代河川国道事務所	H10-2	河床高（200m毎）
	航空レーザー測量結果	2mメッシュ	能代河川国道事務所	H16-12	標高点
	航空写真		能代河川国道事務所	H16-12	地形形状・土地利用状況
	汀線測量図		能代工事事務所	S58-5	河口砂州形状
	米代川平面図	1/2,500	能代工事事務所	S58-12	地形形状・土地利用状況
	河川構造物台帳		能代河川国道事務所	不明	河川構造物
	流量観測記録		能代河川国道事務所	H12	流量(富根)
	流量観測記録		能代河川国道事務所	H17	流量(久喜沢川・常磐川)
	水位観測所記録		能代河川国道事務所	S58	水位（向能代・榊・富根）
	米代川水系河川整備基本方針		国土交通省河川局	H14-4	河道内粗度
海域	大陸棚の海の基本図(南西日本)	1/1,000,000	海上保安庁	S55-7	等深線
	大陸棚の海の基本図(西津軽海盆)	1/200,000	海上保安庁	S49-3	等深線
	大陸棚の海の基本図(秋田西方)	1/200,000	海上保安庁	S44-3	等深線
	大陸棚の海の基本図(最上碓付近)	1/200,000	海上保安庁	S44-4	等深線
	海図(能代港)	1/10,000	海上保安庁	H5-6	等深線・地形形状
	能代港港湾計画図		秋田港工事事務所	H8	等深線・地形形状
	能代港港湾構造物		秋田港工事事務所	不明	港湾構造物
	日本海中部地震津波による能代港被災記録		東北大学工学部	S59-12	
	日本の地震断層パラメータ・ハンドブック		鹿島出版会	H9	津波波源
その他	国土地理院数値地図	50mメッシュ	国土地理院	H9-7	標高点
	気象(アメダス)情報		気象庁	S58	雨量・風向
	土木研究所報告/第2編津波(宇多)		土木研究所	S58	津波痕跡値
	1983年日本海中部地震津波の実態と二・三の考察(谷本ら)		港湾技術研究所	S58	潮位記録・津波痕跡値
	1983年日本海中部地震津波の痕跡高(首藤・卯花)		東北大学工学部	S58	津波痕跡値
	目撃された大津波(ビデオ)		NHKサービスセンター	H2	津波到達時間

2.2.3　格子間隔の設定

記録として残されている米代川を遡上する津波先端部の波状段波を表現するためには、波形を表現できる十分細かい解像度（格子点数）が必要となる。

本検討では、昭和 58 年日本海中部地震津波の来襲に伴う周期の短い波状段波を河川域内で再現するために、最小格子幅を 2m と設定した。また、津波の波長をもとに、河川域から浅海域の範囲は 1:2～1:5 の接続比率となるよう 2m、10m、50m 格子間隔とし、波源を含む深海域から浅海域の範囲は 1:2～1:3 の接続比率となるよう、それぞれ 50m、100m、200m、600m、1200m 格子間隔として設定した。

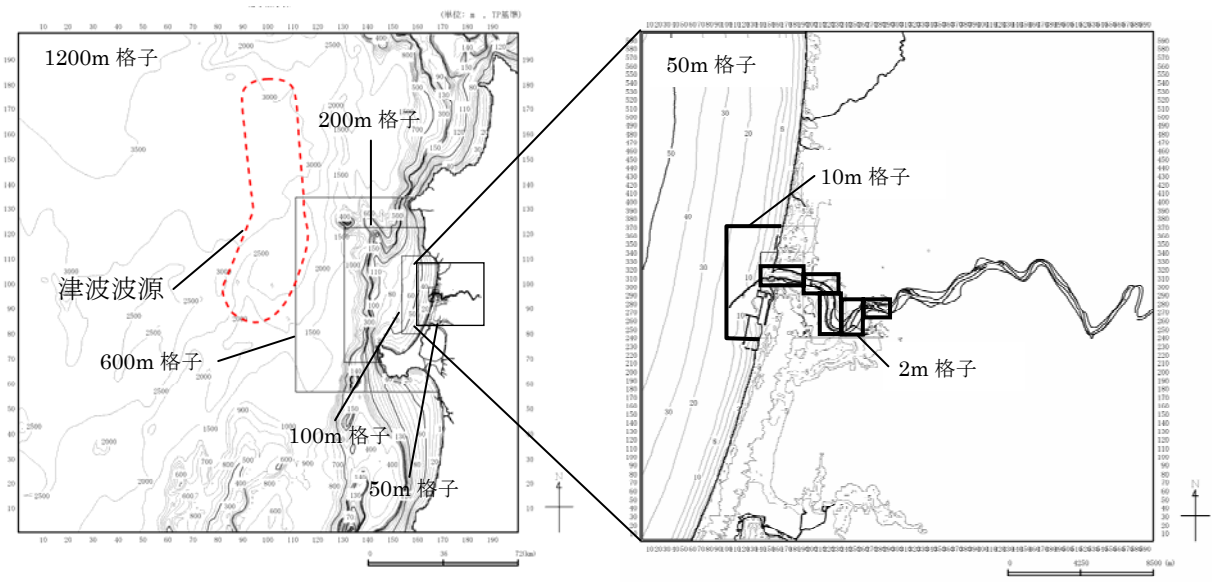


図 2.2.2　解析対象範囲における各格子領域

2.2.4　地形データの作成

波源を含む深海域から河川域においては、以下に示すように各領域の地形データを作成した。

(1) 河川域における地形データの作成

河床高データの作成においては､航空レーザー測量成果や平成 10 年 2 月に実施された 200m 毎の定期横断測量成果を用いた。

なお、平成 10 年 2 月に実施された 200m 毎の定期横断測量成果を用いるにあたっては、昭和 58 年以降の測量データから河床変動が小さいことを確認した。

定期横断測量成果を用いたデータ作成においては、200m 毎の一定間隔で定められた右岸及び左岸を結ぶ距離標間のデータをもとに縦断方向に河床高の等高線を描き、デジタイザで読み取ったデータをもとに補間法により河床高データを補った。

また、河口部の地形形状は昭和 58 年 5 月 4 日の汀線測量成果を用いた。

＜平成 9 年度（平成 10 年 2 月）の定期横断測量成果利用における確認＞

図 2.2.3～図 2.2.4 は、昭和 58 年度（昭和 58 年 11 月）、昭和 59 年度（昭和 59 年 9 月）、平成 4 年度（平成 4 年 10 月）及び平成 9 年度（平成 10 年 2 月）の 0km から 7km 間における 1km 毎の横断面を比較したものである。この区間では、横断形状がほぼ一致しており、河床変動は小さいものと判断した。

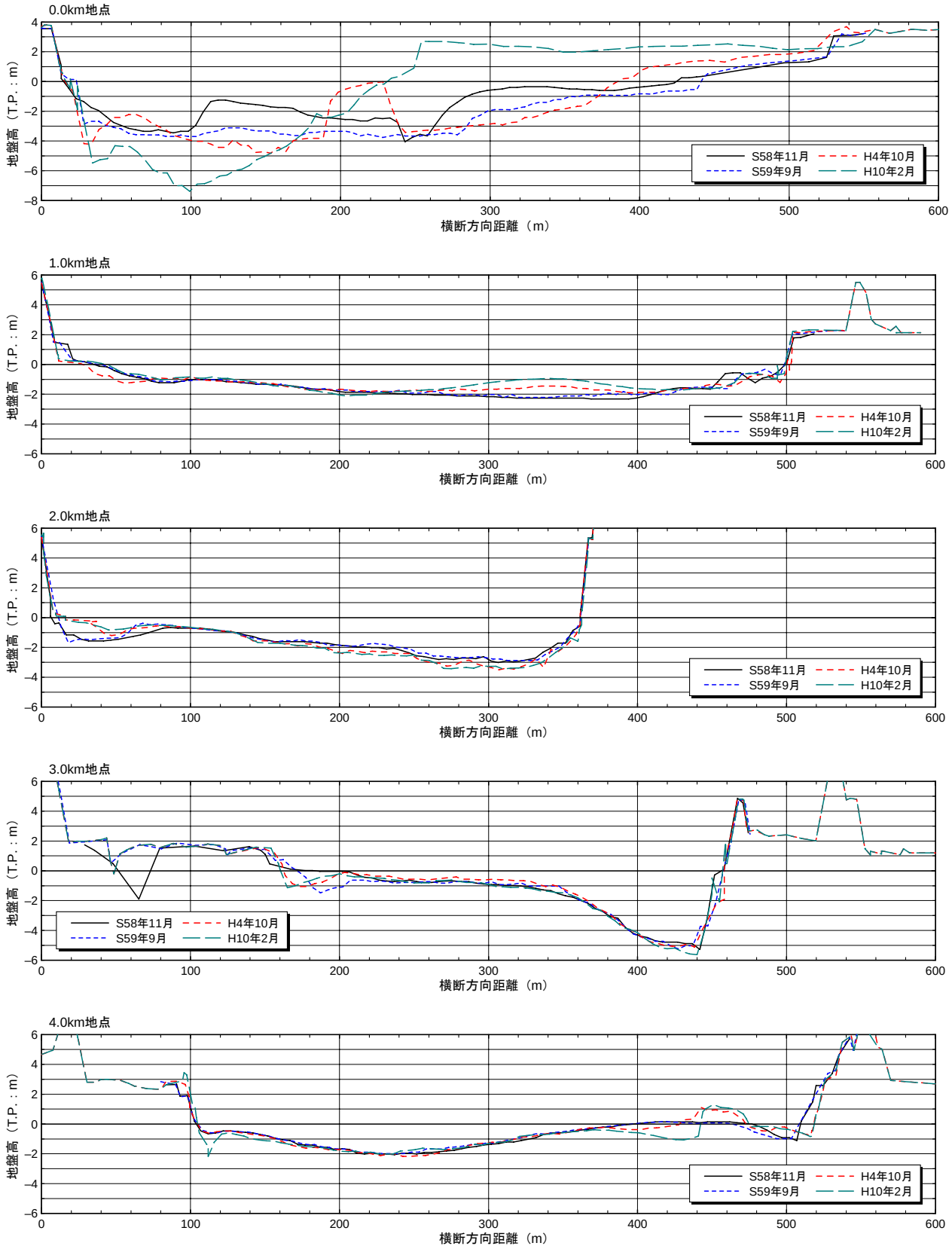


図 2.2.3　1km 毎の横断面測量成果の比較（0km～4km の区間）

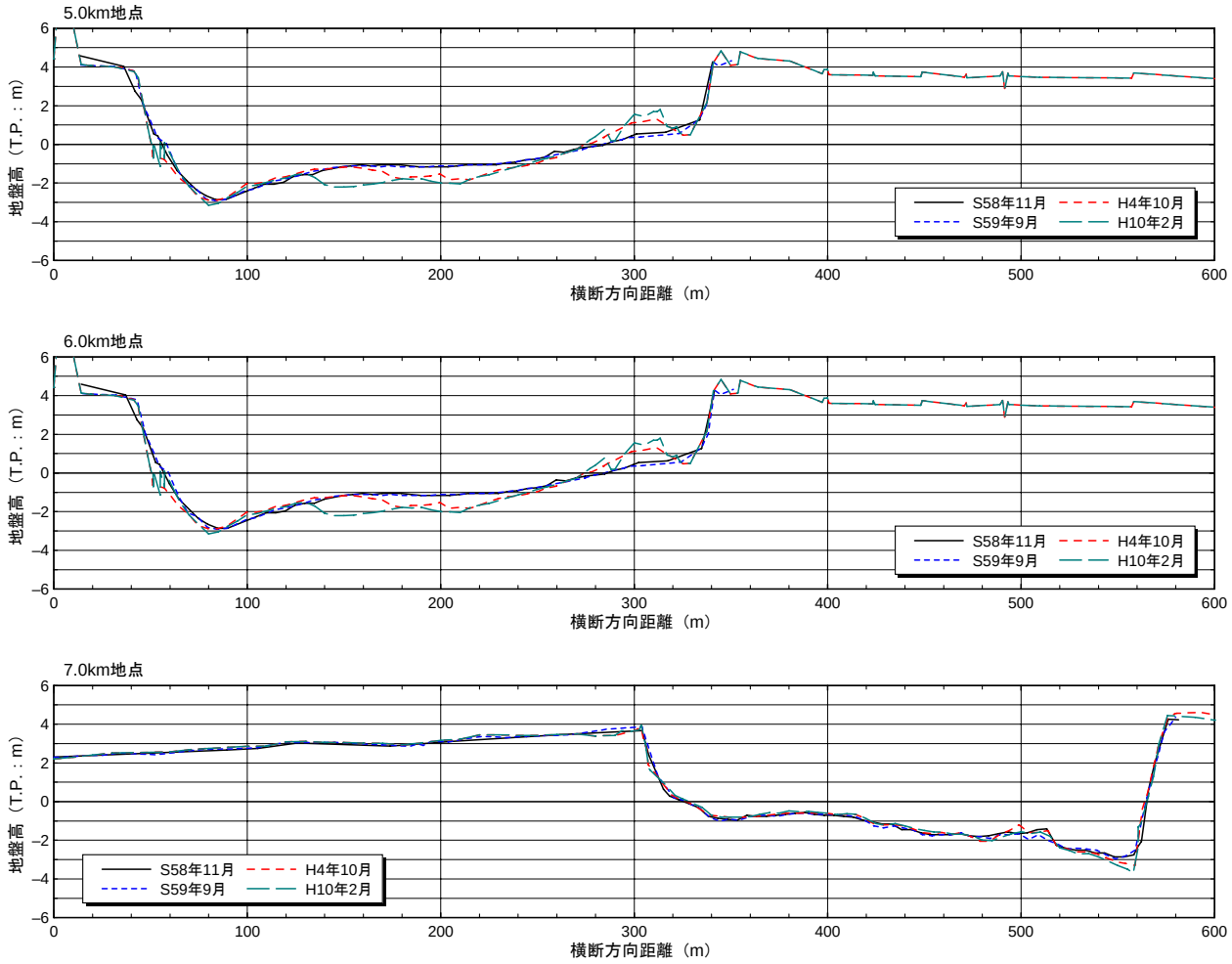


図 2.2.4　1km 毎の横断面測量成果の比較（5km～7km の区間）

＜河口部の砂州の地形＞

河口部の砂州については、津波来襲後の測量成果や航空写真による確認とともに河川流量や波浪による砂州への影響を検討し、津波来襲時に最も近い時期の河口砂州形状を再現するものとした。

1983 年日本海中部地震津波（昭和 58 年 5 月 26 日 12:00）に関する米代川河口部の被災前後の資料は、以下の資料が存在する。

① 昭和 58 年度米代川河口調査測量報告書（能代工事事務所）

→第 1 回測量：昭和 58 年 5 月 4 日、第 2 回測量：昭和 58 年 6 月 23 日

② 昭和 58 年 5 月 26 日の米代川航空写真（アジア航測）

→15:20 頃の撮影

図 2.2.5 は、2 回実施された横断測量成果を比較したものであり、写真 2.2.1 は、汀線測量成果と航空写真を重ね合わせたものである。

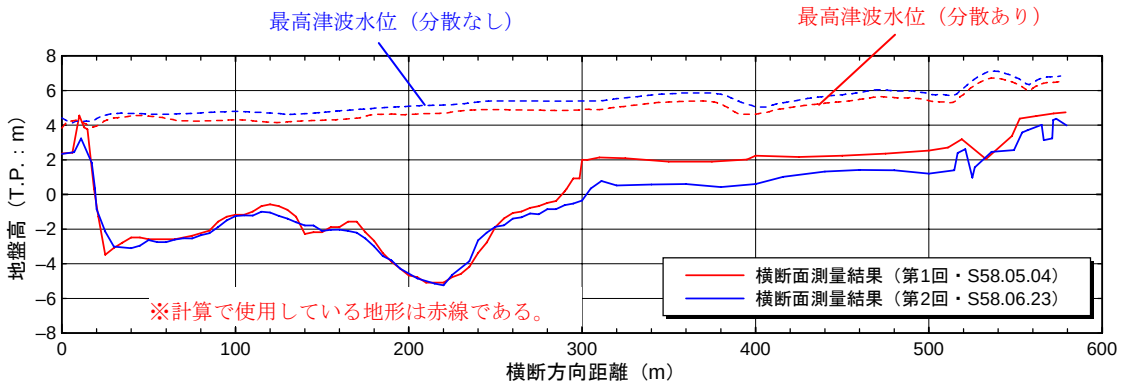
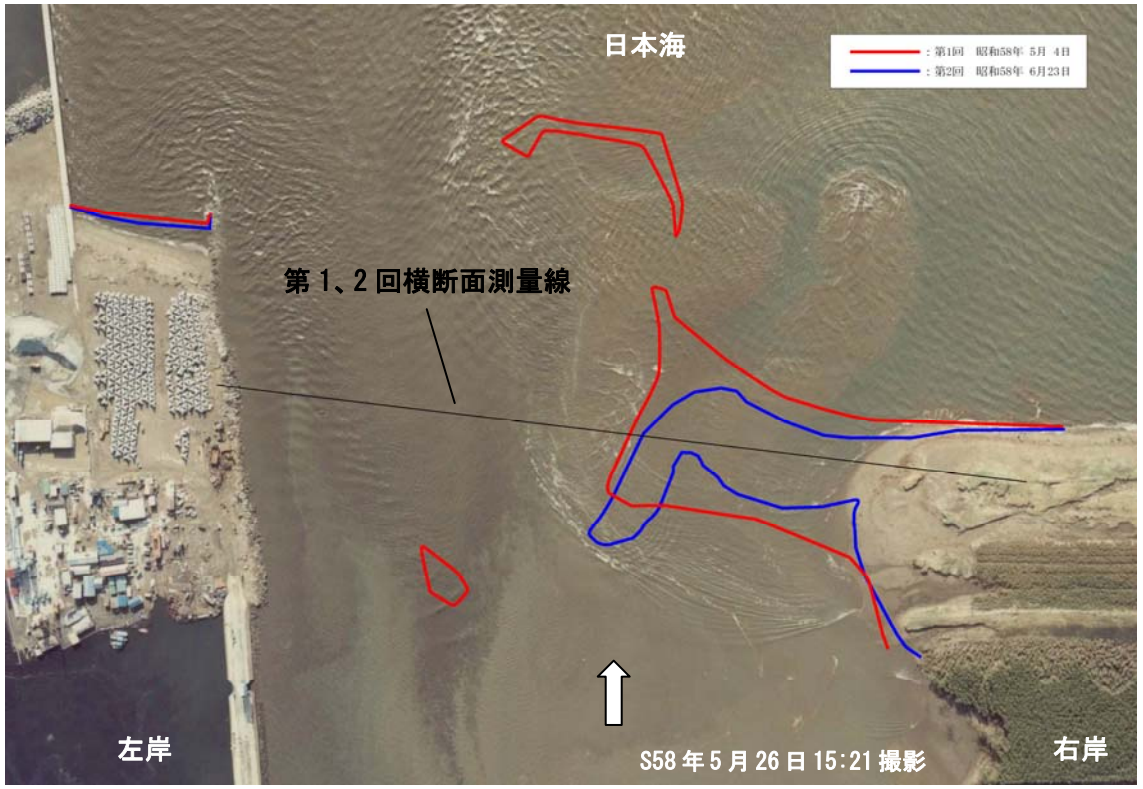
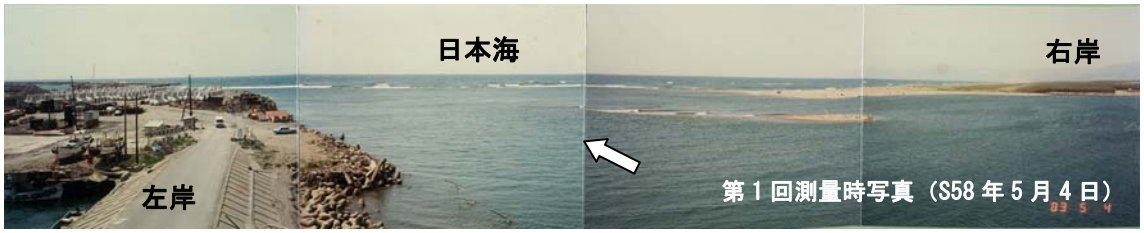


図 2.2.5 汀線測量時の横断測量成果





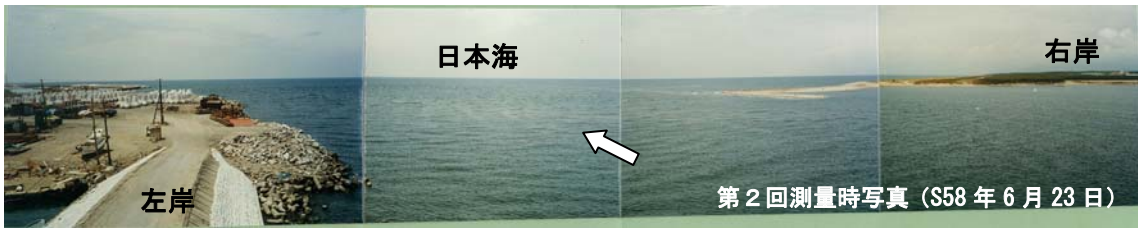


写真 2.2.1　汀線測量時の汀線形状と被災直後の航空写真の比較

汀線測量の第 1 回（昭和 58 年 5 月 4 日）と第 2 回（昭和 58 年 6 月 23 日）の間において、河口部砂州の形状に影響を与える津波以外の外力は、河川流量と波浪が考えられる。このため、当該期間における河川流量と高波について確認を行った。

昭和 58 年 5 月～6 月の河川流量(流量年表)と降水量(気象庁アメダスデータ)の関係を図 2.2.6 に示す。豊水（昭和 31 年～平成 14 年）を越える流量が発生した日は昭和 58 年 5 月 17～19 日の期間であり、466.47m³/s の流量が観測されている。また、昭和 58 年 6 月 14 日にも豊水相当の流量が発生している。

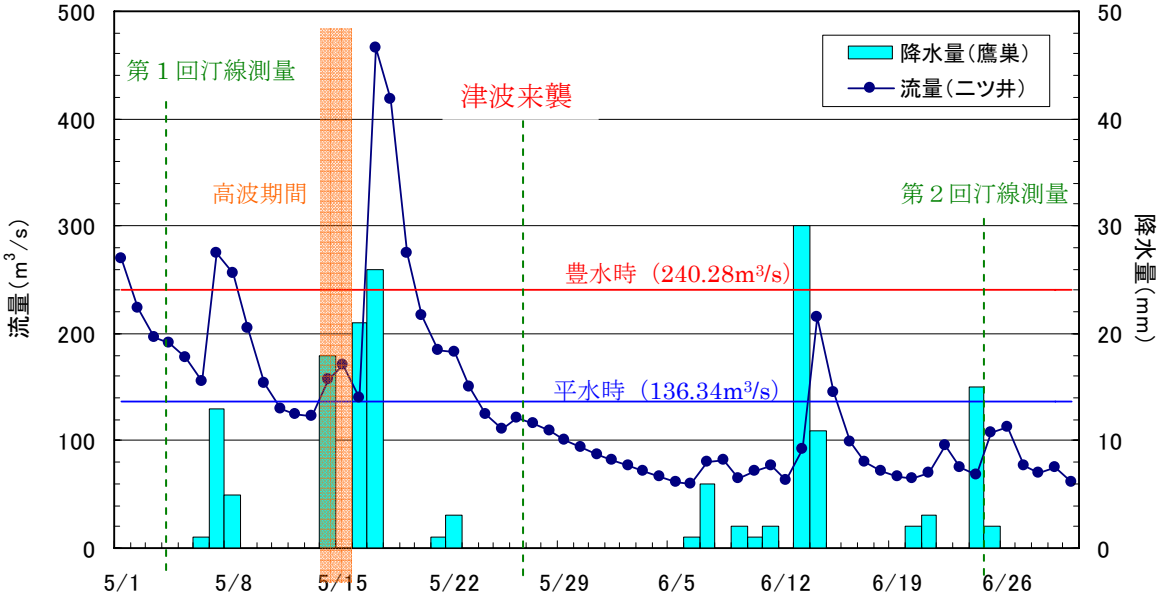


図 2.2.6　昭和 58 年 5 月～6 月における米代川の流量と降水量の関係

一方、波浪は、昭和 58 年 5 月 14 日～15 日の期間に高波（冬型気圧配置）として秋田港（有義波：$H_{1/3}$=3.48m、最高波：H_{max}=5.76m）及び深浦港（有義波：$H_{1/3}$=4.04m、最高波：H_{max}=6.63m）が記録されている。

表 2.2.2　昭和 58 年 5 月～6 月における高波の記録

港湾名	発生期間	有義波		最高波		気象要因
		$H_{1/3}$	$T_{1/3}$	H_{max}	T_{max}	
秋田港	5/14 12 時 ｜ 5/15 12 時	3.48	7.7	5.76	8.7	冬型気圧配置
深浦港	5/14 12 時 ｜ 5/15 12 時	4.04	7.5	6.63	7.7	冬型気圧配置

※菅原他：沿岸波浪観測年報（昭和 58 年）、港湾技研資料、No.517、1985 より引用。

第 1 回横断測量成果（昭和 58 年 5 月 4 日）と第 2 回横断測量成果（昭和 58 年 6 月 23 日）では、第 1 回横断測量の後に高波と豊水を越える出水による影響を受けており、第 2 回横断測量の前に豊水を越える出水による影響を受けている。しかし、図 2.2.5 より T.P.±0.0m 以下の地盤高は、第 1 回横断測量成果及び第 2 回横断測量成果ともに変化が小さく、砂州の長さもほぼ同じであるため、高波や出水による砂州への影響は小さいものと判断される。

以上より、第 1 回横断測量成果（昭和 58 年 5 月 4 日）をもとに津波来襲時点の砂州の地形を再現した。

(2) 海域における地形データの作成

海域データの作成には、海上保安庁が発行する海の基本図及び海図と秋田港工事事務所が作成した資料にある港湾計画図を用いた。

データの作成においては、次に示す資料からデジタイザによって水深値を読み取り、各領域の格子間隔に合わせて補間法を用いて作成した。

- **海上保安庁発行の海の基本図（1/200,000）**
- **海上保安庁発行の海図（1/250,000～1/10,000）**
- **秋田港工事事務所資料による港湾計画図**

2.2.5　構造物データの作成

(1) 河川堤防

河川堤防の形状に津波来襲時から大きな変更がない場合は、航空レーザー測量成果を用いて堤防データを作成した。ただし、河川改修工事により、河川堤防の形状に変更がある場合には、定期横断測量成果及び河川台帳をもとに、現地調査結果及び河川改修等工事履歴を反映させることで津波来襲時の天端高に修正した（図 2.2.7 参照）。また、特殊堤やパラペット等で構造物の天端幅が狭く、航空レーザー測量でその存在を把握することが難しいと考えられる場合は、河川台帳をもとに修正を行った。

以上の方法で作成した各データは、図 2.2.8 に示す手順によって再現地形データとして合成した。

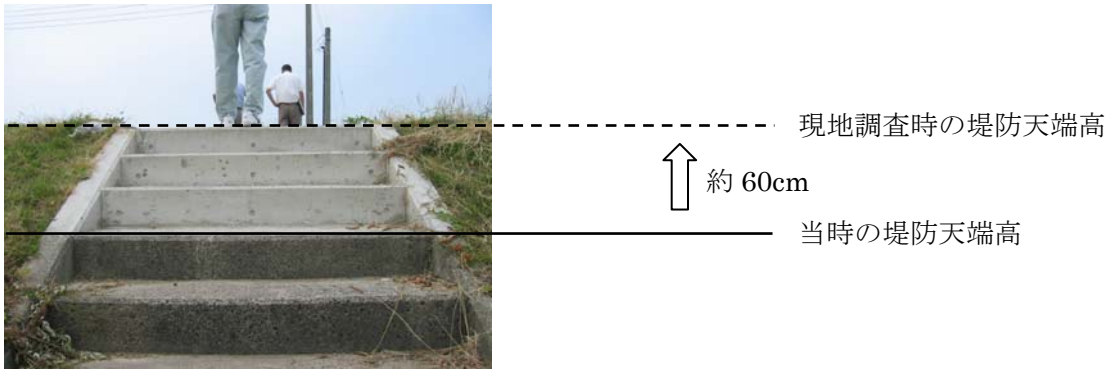


図 2.2.7　右岸河口部堤防と堤防天端高の処理方法

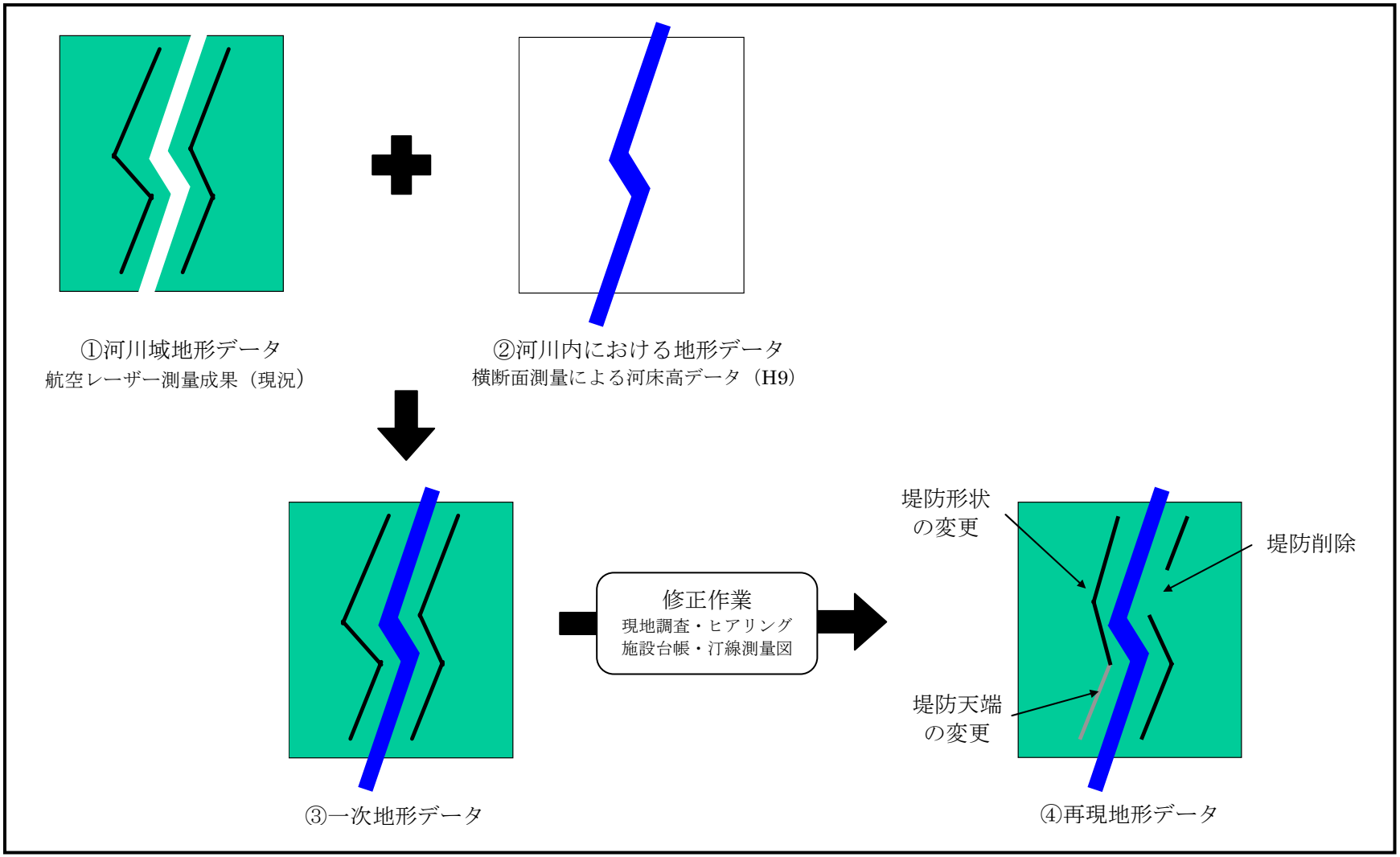


図 2.2.8　再現地形データ作成の作業手順

(2) 河川を横断する堰等

解析対象範囲において、河川を横断する堰等は確認されなかったため、データの作成は行っていない。

(3) 河岸又は堤防を保護する水制等

解析対象範囲において、河岸又は堤防を保護する水制等は確認されなかったため、データの作成は行っていない。

(4) 河口部付近の海岸堤防や防波堤

米代川の河口部左岸に位置する能代港の港湾構造物は、以下の資料を参考に津波来襲当時の地形を図 2.2.9 のようにデータを作成した。

・日本海中部地震津波による能代港被災記録、東北大学工学部津波防災研究所、昭和 59 年 12 月

・一級河川米代川に隣接する防波堤等の整備状況について、秋田県能代港湾事務所

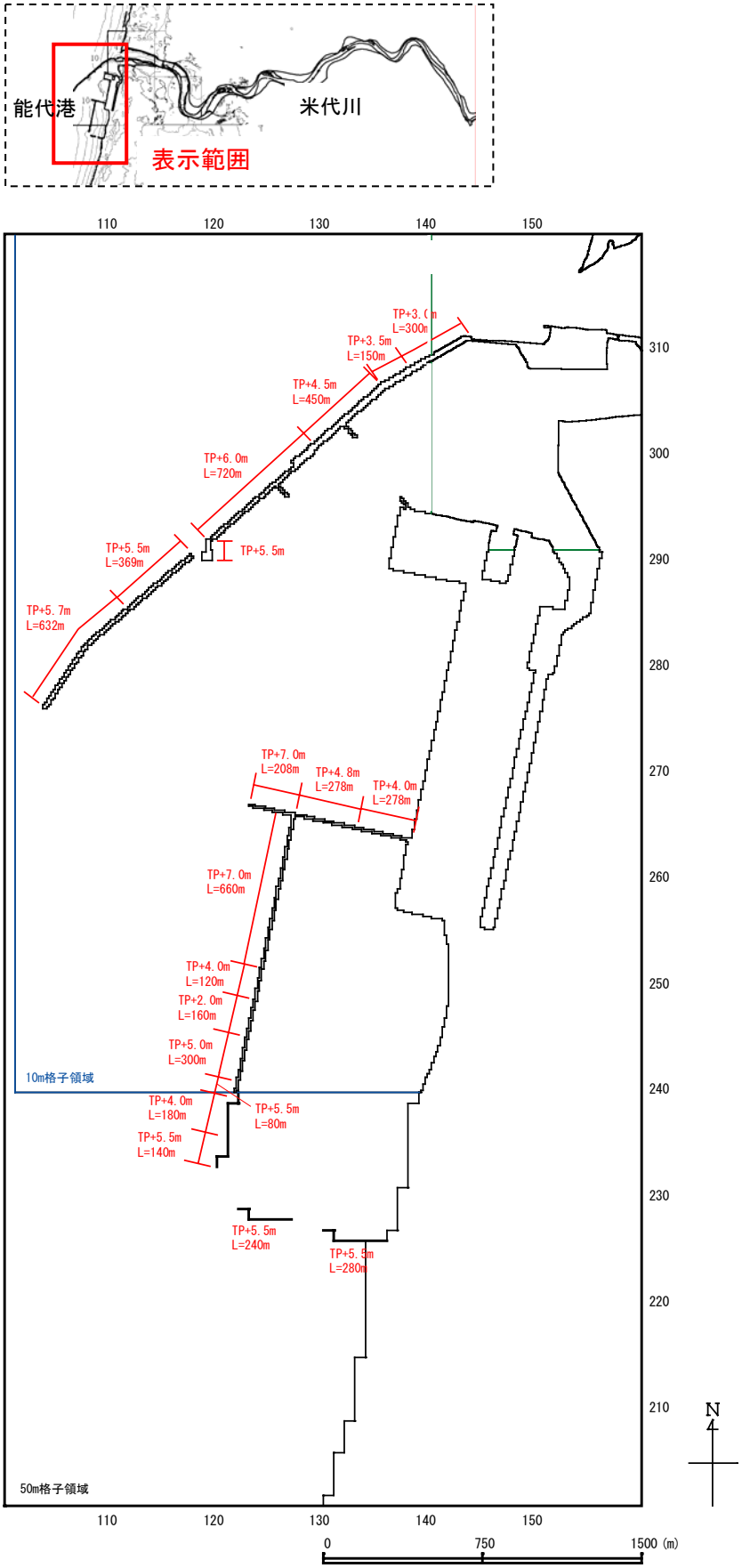


図 2.2.9　能代港の港湾構造物の設定

2.2.6　津波諸元の設定

波源の設定に用いた日本海中部地震の断層モデルは、相田（1986）のモデル（AIDA10）を採用した。断層モデルの平面図を図 2.2.10、断層パラメータを表 2.2.3 に示す。

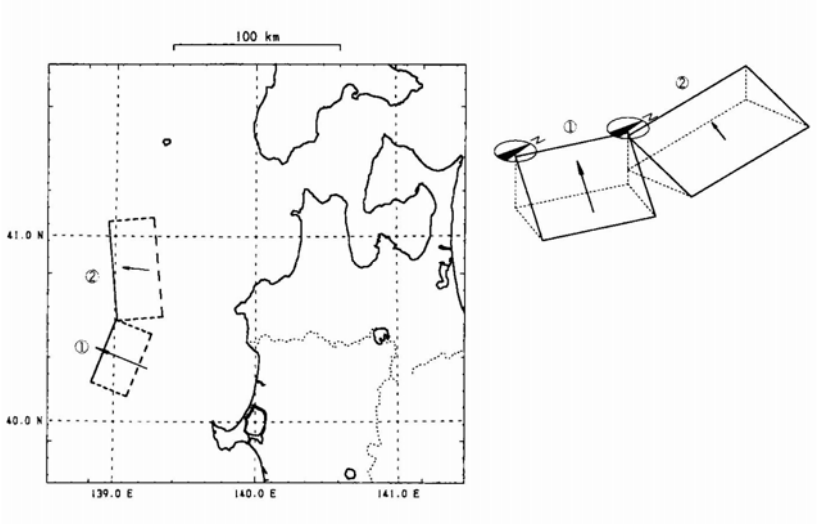


図 2.2.10　日本海中部地震の断層モデル（「日本の地震断層パラメータ・ハンドブック」より）

表 2.2.3　日本海中部地震の断層パラメータ

断層	d(km)	θ(°)	δ(°)	λ(°)	L(km)	W(km)	U(cm)
北側	3	355	25	80	60	30	305
南側	2	22	40	90	40	30	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

2.2.7　境界条件の設定

各領域の境界においては、津波の挙動が適切に再現できるよう沖側境界条件、遡上境界条件、越流境界条件及び接続境界条件を設定した。

(1) 沖側境界の条件設定

沖側境界は、津波が境界上で反射せずに透過できるような自由透過境界（開境界）を設定した。本検討では、一般的な津波計算で利用されている後藤・小川（1982）の方法を採用した。

(2) 遡上境界の条件設定

遡上境界は、一般的な津波計算で利用されている岩崎・真野（1979）の方法を採用した。

(3) 越流境界条件

計算領域内の防波堤・堤防等において、水位がその天端高を越える場合のモデルは、本間の公式を用いて単位幅当たりの越流量（$m^2/s/m$）を計算し、堤内地への越流を考慮した。

(4) 接続境界条件

接続境界においては、隣り合う領域で流量の受け渡しができるよう処理を行った。

2.2.8　諸条件の設定

(1)　河口及び海域における潮位

津波来襲時の潮位は、図 2.2.11 に示す能代港の検潮記録を参照し、読み取り値をもとに設定した。

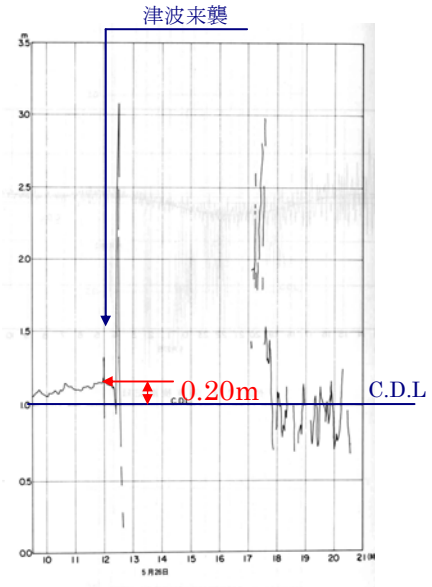


図 2.2.11　日本海中部地震来襲時の能代港の検潮記録

※「1983 年日本海中部地震津波の実体と二・三の考察（港研資料 470)」より引用

能代港における T.P.と潮位基準面（C.D.L.）の関係は、表 **2.2.4** に示すように C.D.L.＝T.P.＋0.04m であるため、図 2.2.11 より津波到達前の潮位を約 0.20m として、次のように設定した。

<u>設定潮位＝T.P.＋0.24m</u>

表 2.2.4　能代港の潮位

港湾における潮位　　地区名：(01)不明

潮位名称	潮位(m)	観測時	備考
概往最高潮位	+1.46	昭和５１年１０月２９日　２０時１０分	自記長期巻フース型（ＬＦＴ－Ｖ型）検
略最高高潮位	+0.74	平成１１年１月～平成１１年１２月	同上
叛望平均満潮面	+0.47	同上	同上
平均潮位	+0.20	同上	同上
東京湾平均海面	-0.04		
叛望平均潮面	-0.06	平成１１年１月～平成１１年１２月	自記長期巻フース型（ＬＦＴ－Ｖ型）検
工事用基準面	0.00	同上	同上
基本水準面	0.00	同上	同上
概往最低潮位	-0.18	昭和５１年２月２１日　１時００分	同上

検調器	管理者名	種類	所在地
	秋田県知事	浮標式	能代市能代町字下浜

(2) 河川域及び海域における粗度係数

①河川域における粗度係数

津波来襲時の粗度が不明であるため、河川整備基本方針における表 2.2.5 に示す粗度係数を設定した。

・低水路：0.022（0.0km-7.0km）
・高水敷：0.050（0.0km-7.0km）

表 2.2.5　米代川の計画における粗度係数

縦断距離（ｋｍ）	粗度係数 低水路	粗度係数 高水敷	セグメント	代表粒径 (mm)
0.0- 7.0	0.022	0.050	2-2	1.5
7.0-23.0	0.026	0.038	2-1	27.5
23.0-30.8	0.026	0.040	2-1	43.5
30.8-35.4	0.025	0.035	2-1	33.0
35.4-43.4	0.025	0.038	2-1	41.0
43.4-57.2	0.027	0.044	2-1	50.0
57.2-64.2	0.035	0.040	2-1	40.0
64.2-68.6	0.035	0.050	1	62.0

（出典：米代川水系河川整備基本方針）

②海域における粗度係数

海域の粗度係数は、「津波高潮ハザードマップマニュアル（財団法人沿岸開発技術研究センター、平成 16 年 4 月）」をもとに 0.025 とした。

(3)　河川域における初期水位

河川域における初期水位は、**図** 2.2.12 に示すように上流からの河川流量を潮位の影響が及ばない富根水位観測所（河口から 20ｋｍ）の流量に、支川のうち影響が大きいと考えられる右支川の常磐川と久喜沢川の流量を加えた流量をもとに不等流計算を実施し、結果として得られる水位を設定した。

上流境界の流量は、富根における流量と久喜沢川及び常磐川の流量を加えた以下の流量を設定した。

148.98 m³/s(米代川本川：富根)＋1.96 m³/s(久喜沢川)＋0.86 m³/s(常磐川)＝151.80m³/s

2.2.12　米代川流域図（河口部～二ツ井付近）

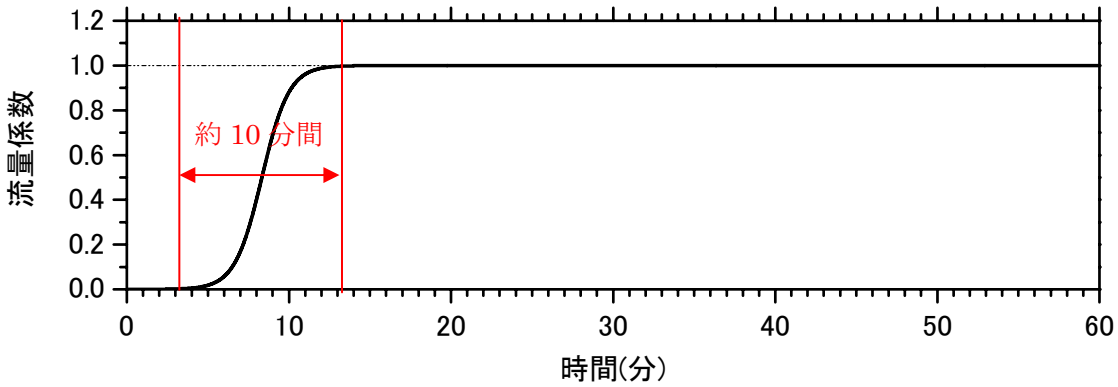


図 2.2.13　流量係数の曲線

不等流計算では、**図** 2.2.13 に示すように計算の安定性を考慮して所要流量に流量係数の曲線（本検討では、変化区間を約 10 分に設定）を乗じた。本検討では、双曲線正接（ハイパボリックタンジェント）関数を使用して目標流量まで変化するように設定して不等流計算を行った。

不等流計算における河川流量を入力するモデルの上流端は、図 2.2.14 及び図 2.2.15 に示すように計算プログラム上の流量の設定方法を容易にするため、実地形にスムーズに接続する緩和区間を設定した。矩形水路の幅は、接続する実地形の堤防間距離に、水深は実地形の最深河床高に合わせるように設定した。

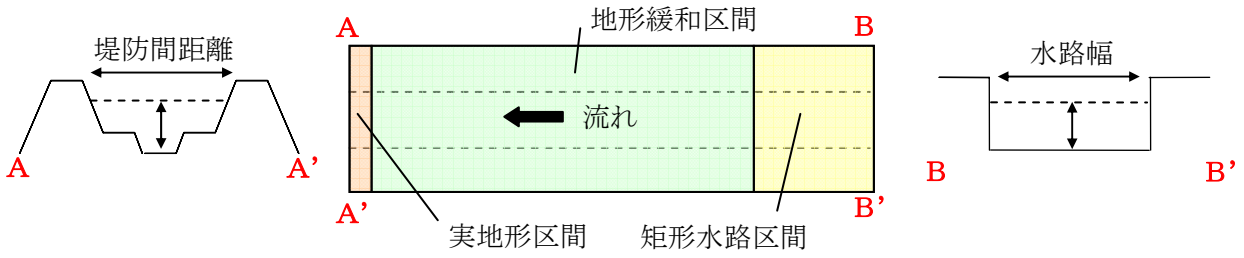


図 2.2.14　上流端地形のイメージ

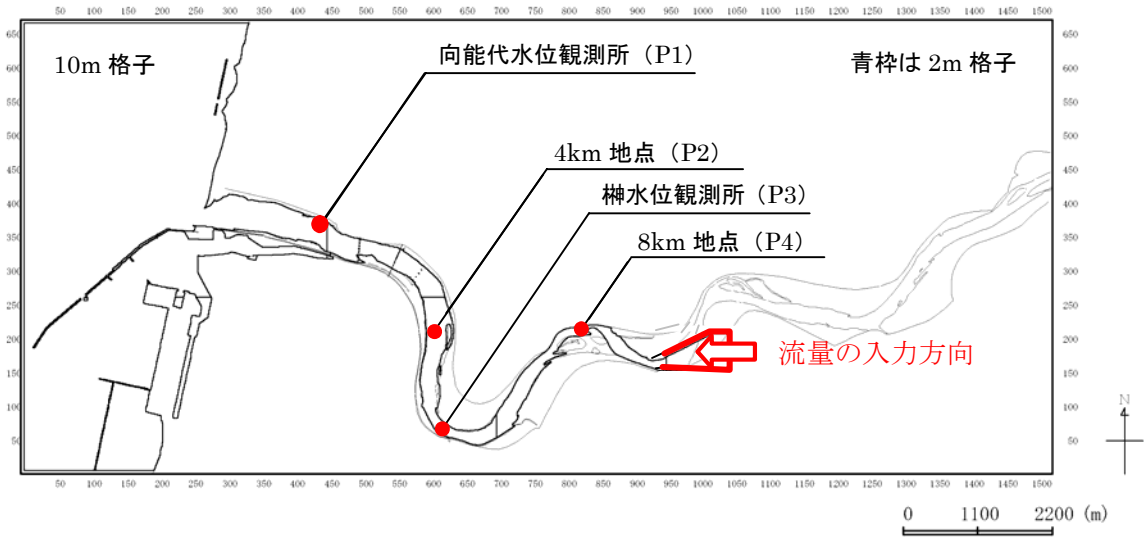


図 2.2.15　米代川における上流端地形の位置と形状

(4) 計算時間間隔

計算時間間隔の設定は、C.F.L.条件を満たすために、各領域における格子間隔と最大水深の関係から 0.05 秒とした。

(5) 再現時間

再現時間は、旧運輸省港湾技術研究所による日本海中部地震の調査結果から、最大津波高の発生が第 1 波目であったことを確認し、津波の到達時間、河川における遡上等を考慮して津波（地震）発生から 3 時間とした。

2.2.9　再現計算

(1) 再現計算の設定条件

米代川を対象とした昭和 58 年日本海中部地震津波の再現計算の設定条件を表 2.2.6 に示す。また、解析対象範囲において分割された領域と水深の関係を図 2.2.16 に示す。

表 2.2.6　米代川再現計算における計算条件

格子間隔	1200m	600m	200m	100m	50m	10m	2m	2m	2m	2m
時間ステップ	0.05 秒（C.F.L.条件から設定）									
基礎方程式	非線形長波式（分散項なしモデル）及び非線形分散長波式（分散項ありモデル）									
境界条件	自由透過	完全反射			遡上計算					遡上計算 河川流量入力
底面摩擦	津波・高潮ハザードマップマニュアル（財団法人沿岸開発技術研究センター、平成 16 年 4 月）」をもとに、海域全域を 0.025 とした。						低水路：0.022（0.0km-7.0km） 高水敷：0.050（0.0km-7.0km） ※米代川水系河川整備基本方針の値			
潮位条件	能代港検潮所記録から津波来襲直前の潮位として T.P.+0.24m を設定した。									
流量条件	富根水位観測所における津波来襲時の水位から流量（148.98m³/s）を推定し、下流部に位置する小河川（2.82m³/s）の流量を加えた流量の 151.80m³/s を設定する。									
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 を乗じた。									
計算時間	津波（地震）発生から 3 時間とした。									

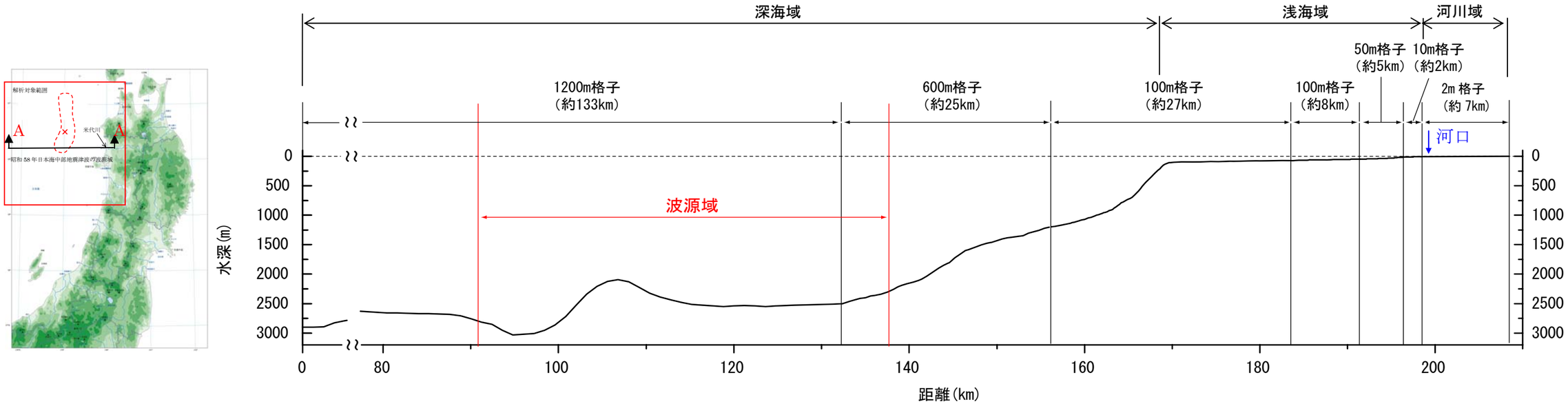


図 2.2.16　解析対象範囲において分割された領域と水深の関係(A-A 断面)

(2) 補正係数の検討

津波波源モデルの補正は、非線形長波理論式による計算結果と河口付近及び河川域における津波痕跡高との比較をもとに検討した。計算結果と津波痕跡高との比較結果を図 2.2.17、表 2.2.7 に示す。

表 2.2.7 から、比較対象範囲すべての比較では、補正係数 1.50 が津波痕跡高とよく一致する結果となるが、米代川河口周辺の津波高と津波痕跡高に着目すると過大評価となる。

このため、図 2.2.17 をもとに、河口部右岸における計算値と津波痕跡高の比較から、米代川へ進入する津波高としては補正係数を 1.25 と設定し、痕跡値にあわせることが妥当であると判断した。

なお、図 2.2.17 に示す津波痕跡高は、「土木研究所報告第 165 号」、「首藤伸夫・卯花政孝：1983 年日本海中部地震津波の痕跡高、東北大学工学部津波防災実験所研究報告、第 2 編調査資料、1983.」、「谷本ら：1983 年日本海中部地震津波の実態と二・三の考察、港湾技術研究所報告、No.470、1983.」をもとにプロットしたものである。

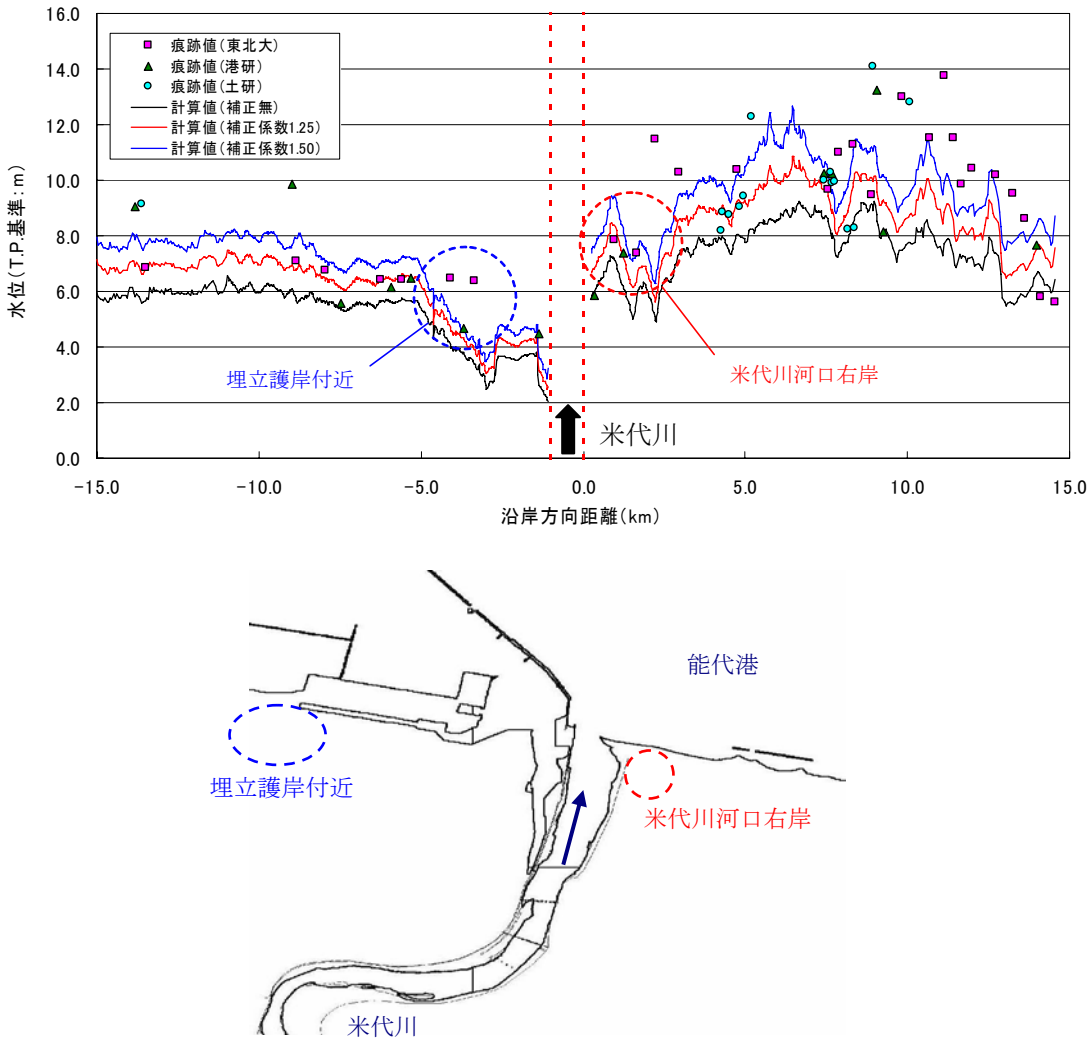


図 2.2.17　海岸線近傍の津波痕跡高と計算値の比較

表 2.2.7　相田のＫ値とκ値

波源水位の補正	Ｋ値	κ値
補正係数なし	1.31	1.23
補正係数 1.25	1.13	1.22
補正係数 1.50	1.02	1.22

※Ｋ値とκ値の目安：Ｋ値は 0.8～1.2、κ値は 1.6 以下が適当とされる。

(3)　分散効果を含めた再現性の検証

再現計算及び検証の結果を以下にまとめる。

1）沿岸部の津波痕跡高と計算値の比較

河口部を中心とした約 30km 範囲（図 2.2.18 を参照）の沿岸部における津波痕跡高（計 54 点）と計算値の比較を図 2.2.19 に示す。また、相田のＫ値（及びκ値）は表 2.2.8 のとおりである。

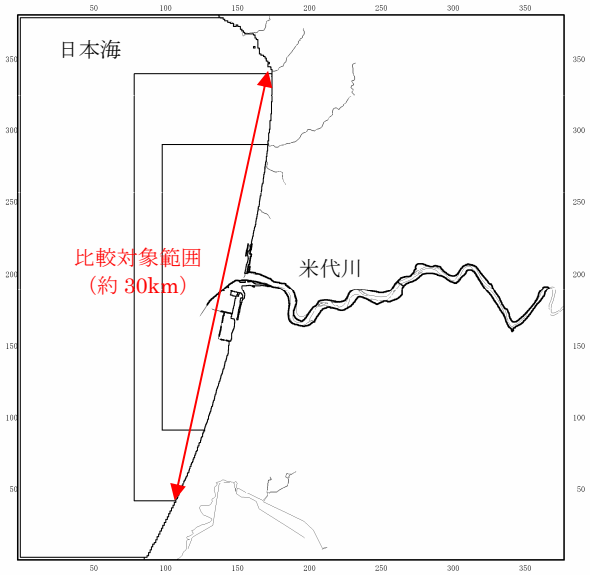


図 2.2.18　沿岸部における津波痕跡高と計算値の比較範囲

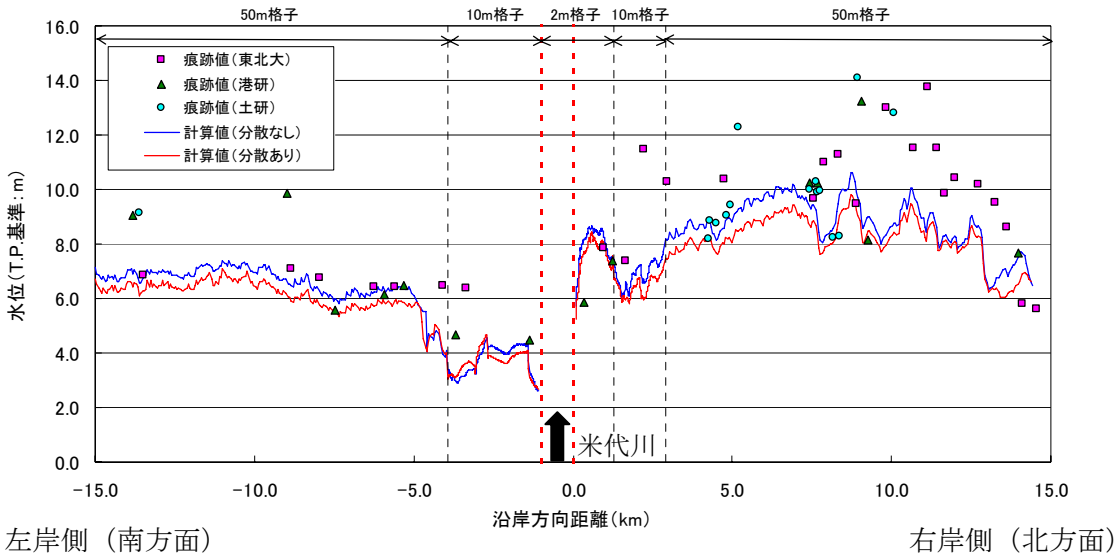


図 2.2.19　沿岸部における津波痕跡高と計算値の比較

表 2.2.8　沿岸部における津波痕跡高と計算値の比較（計 54 点）

計算のモデル	K値	κ値
分散項なしモデル	1.17	1.22
分散項ありモデル	1.24	1.20

※K値とκ値の目安：K値は 0.8～1.2、κ値は 1.6 以下が適当とされる。

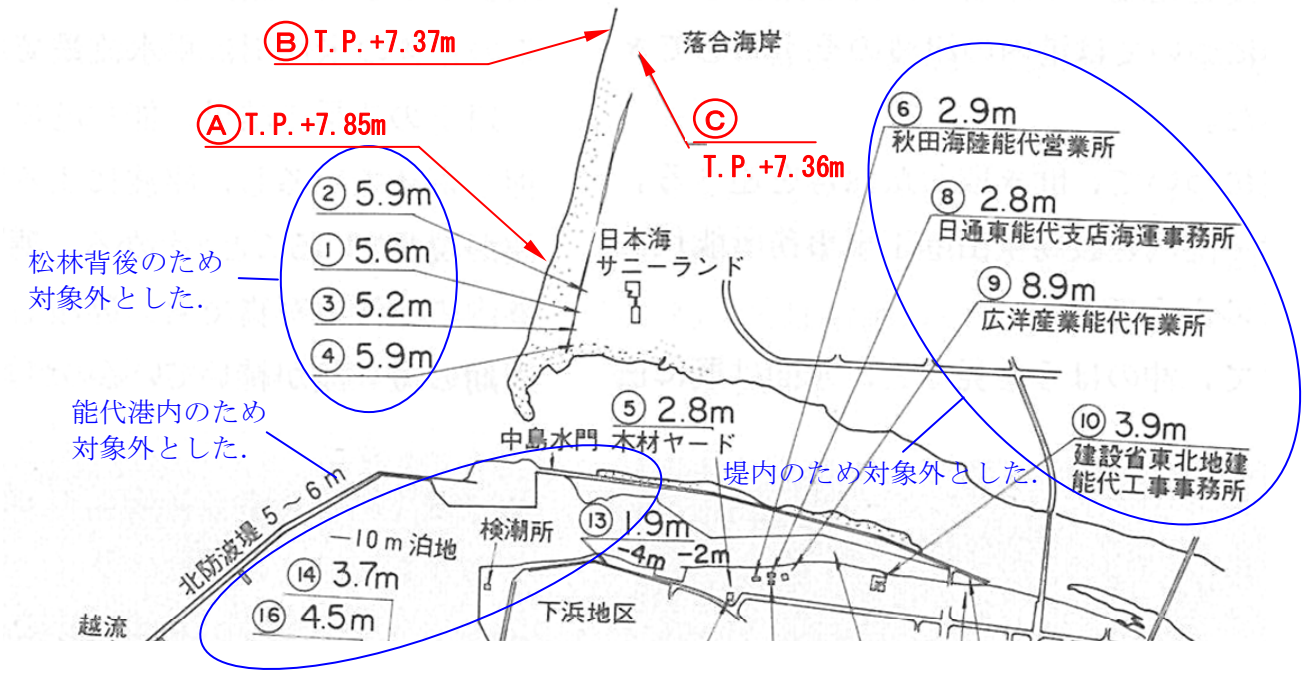
津波痕跡高に比べ分散項なしモデルの計算結果は低くなり、分散項ありモデルの計算結果ではさらに低くなる。分散項ありモデルの計算値が分散項なしモデルの計算結果に比べ小さくなった原因は、津波の波源域における分散効果によるものと考えられる。昭和 58 年日本海中部地震の地震断層幅は、太平洋側の代表的な地震断層幅に比べ相対的に短く、津波の初期水位に高周波成分を多く含んだものである。そのため、深海域において分散効果が無視できず、分散項ありモデルの計算ではその効果を受けて沿岸部へ来襲する津波高が低くなったものと推測される。

2）河口における津波痕跡高と計算値の比較

米代川河口における津波痕跡高と計算値との比較結果を以下に示す。比較対象とした津波痕跡高は、図 2.2.20 に示す河口及び海岸線に近い 3 点とした。

表 2.2.9 は、津波痕跡高 3 点と分散項なしと分散項ありの計算結果を比較したものである。分散項なしモデルの計算結果では、B 点で約 1m 津波痕跡高に比べ低くなった。一方、分散項

ありモデルの計算結果では、津波痕跡高に比べＢ点で約 1.5m、Ｃ点で約 0.3m 低くなる。河口部に最も近いＡ点では、分散項ありモデルの計算結果の方が分散項なしモデルの計算結果に比べ津波痕跡高に近い値となっている。



出典：首藤伸夫・卯花政孝：1983 年日本海中部地震津波の痕跡高、東北大学工学部津波防災実験所研究報告、第 2 編調査資料、1983。

図 2. 2. 20　津波痕跡高位置図

表 2. 2. 9　河口右岸に隣接する津波痕跡高 3 点と分散項なしモデルによる計算値の比較

【単位：m、T.P.基準】

津波痕跡高（m）	計算による最高水位（m）	
	分散項なし	分散項あり
Ⓐ 7.85	8.26（+0.41）	7.92（+0.07）
Ⓑ 7.37	6.45（-0.92）	5.94（-1.43）
Ⓒ 7.36	7.44（+0.08）	7.12（-0.32）

※括弧内の数字は、（計算値－津波痕跡高）を意味する。

3）河川域における津波痕跡高と計算値の比較

河川域における左右岸の津波痕跡高と計算値の比較を図 2.2.21 に示す。また、K値（及びκ値）を表 2.2.10 に示す。

表 2.2.10　米代川における津波痕跡高と計算値の比較

計算結果（カッコ内はデータ数）		K値	κ値
分散項なしモデル	全データ（31）	1.20	1.25
	左岸（14）	1.11	1.30
	右岸（17）	1.27	1.18
分散項ありモデル	全データ（31）	1.20	1.29
	左岸（14）	1.12	1.33
	右岸（17）	1.27	1.23

※括弧内の数字は津波痕跡高の数を意味する。

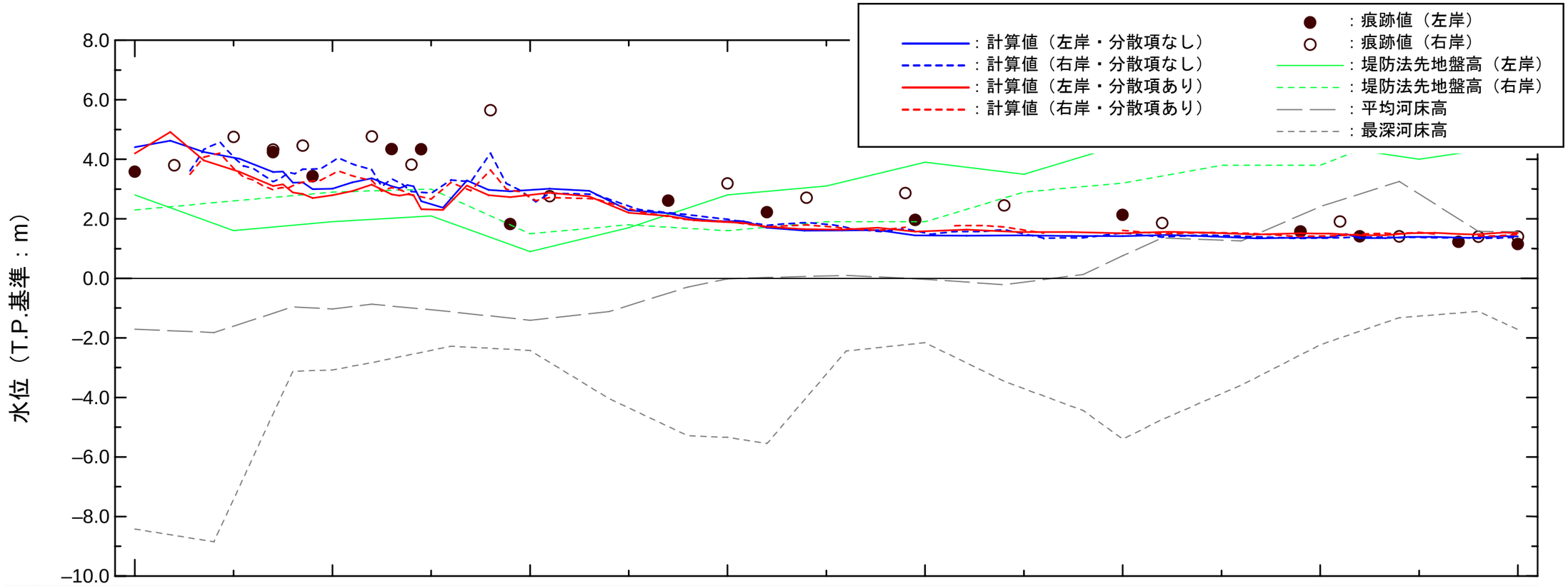
※K値とκ値の目安：K値は 0.8～1.2、κ値は 1.6 以下が適当とされている。

0km～2km 区間では、分散項なしモデルの計算結果は津波痕跡高に比べ低く、分散項ありモデルの計算結果は分散なしモデルの計算結果に比べさらに低い傾向にある（一部では分散項ありモデルの計算結果が分散項なしモデルの計算結果に比べ高くなる）。2km～5km の区間では、総じて計算値が津波痕跡高を下回る結果となっている。

4）検証の評価

今回、上述のように実施した再現性の検証は、河川域における再現性に重点をおいて実施してきたところである。

結果からは、図 2.2.20 及び表 2.2.9 に示したⒶ、Ⓑ、及びⒸの３点を含め、河川域における再現性もほぼ妥当であると判断できる。



左岸	痕跡値	3.58			4.24	3.43		4.34	4.33		1.82		2.61		2.22		1.96		2.13		1.57	1.41		1.22	1.15
	計算値（分散なし）	4.41 (0.83)			3.57 (−0.67)	3.00 (−0.43)		3.10 (−1.24)	2.59 (−1.74)		2.92 (1.10)		2.19 (−0.42)		1.70 (−0.52)		1.45 (−0.52)		1.42 (−0.71)		1.37 (−0.20)	1.35 (−0.06)		1.37 (0.15)	1.41 (0.26)
	計算値（分散あり）	4.20 (0.62)			3.10 (−1.14)	2.70 (−0.73)		2.82 (−1.52)	2.32 (−2.01)		2.73 (0.91)		2.10 (−0.52)		1.74 (−0.48)		1.57 (−0.39)		1.51 (−0.62)		1.51 (−0.06)	1.45 (0.04)		1.49 (0.27)	1.52 (0.38)
	分散あり－分散なし	−0.21			−0.47	−0.30		−0.27	−0.27		−0.19		−0.10		0.03		0.12		0.10		0.14	0.09		0.12	0.11
右岸	痕跡値		3.80	4.75	4.33	4.46	4.77		3.82	5.65		2.76		3.19		2.71	2.86	2.45		1.86			1.91	1.41	1.40	1.40
	計算値（分散なし）		3.33 (−0.47)	4.07 (−0.68)	3.25 (−1.08)	3.67 (−0.79)	3.65 (−1.12)		2.92 (−0.90)	4.20 (−1.45)		2.86 (0.10)		1.98 (−1.21)		1.88 (−0.83)	1.67 (−1.20)	1.63 (−0.82)		1.39 (−0.47)			1.36 (−0.55)	1.37 (−0.04)	1.34 (−0.06)	1.40 (−0.01)
	計算値（分散あり）		4.50 (0.70)	3.70 (−1.05)	2.98 (−1.35)	3.23 (−1.23)	3.29 (−1.48)		2.80 (−1.02)	3.64 (−2.01)		2.72 (−0.04)		1.91 (−1.28)		1.80 (−0.91)	1.72 (−1.14)	1.73 (−0.72)		1.50 (−0.36)			1.44 (−0.47)	1.50 (0.09)	1.42 (0.02)	1.48 (0.08)
	分散あり－分散なし		1.17	−0.38	−0.27	−0.44	−0.37		−0.12	−0.56		−0.15		−0.07		−0.08	0.05	0.09		0.11			0.08	0.13	0.08	−0.08

0.0　1.0　2.0　3.0　4.0　5.0　6.0　7.0

河口からの距離（km）

図 2.2.21　米代川再現計算における計算領域分割と水深の関係

参考資料-4

十勝川の再現計算

（平成 15 年十勝沖地震津波における十勝川の津波遡上再現計算）

目　　次

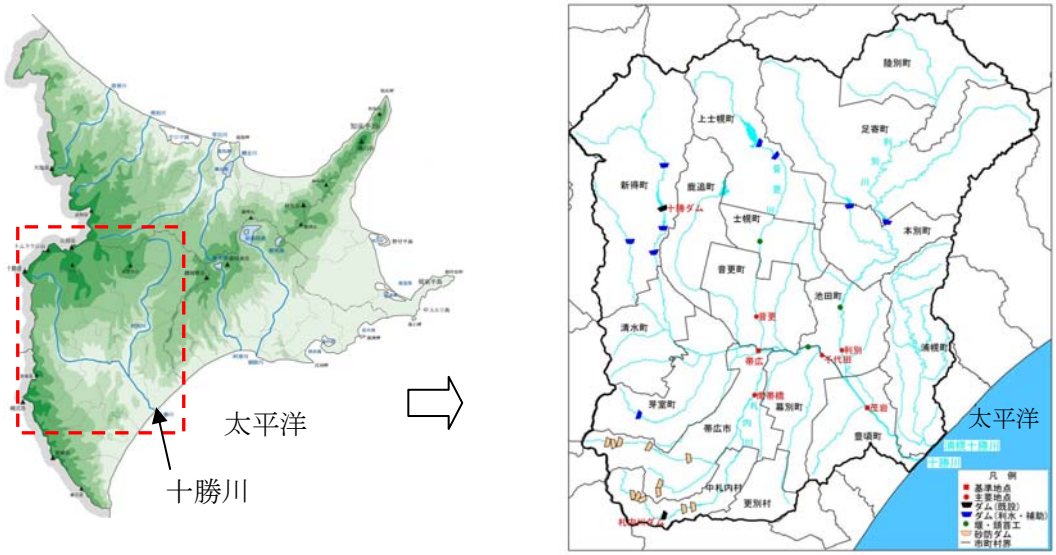
1.　十勝川における津波解析 4-1
1.1　十勝川の概要 4-1
1.2　解析モデル 4-2
1.3　解析の概要 4-3
2.　再現・検証計算 4-4
2.1　検討フロー 4-4
2.2　再現計算と解析モデルの検証 4-5
2.2.1　解析対象範囲の設定 4-5
2.2.2　資料の収集・整理 4-6
2.2.3　格子間隔の設定 4-7
2.2.4　地形データの作成 4-8
2.2.5　構造物データの作成 4-9
2.2.6　津波諸元の設定 4-9
2.2.7　境界条件の設定 4-12
2.2.8　諸条件の設定 4-13
2.2.9　再現計算 4-17

1.　十勝川における津波解析

1.1　十勝川の概要

本検討の対象河川である十勝川は、幹川流路延長約 156km、流域面積約 156km² を有する一級河川であり、北海道の十勝平野から太平洋に注ぐ。

十勝川では、平成 15 年 9 月 26 日（4 時 50 分）に北海道の南東の太平洋で発生した「平成 15 年十勝沖地震」に伴う津波が十勝川を遡上したことが記録として残されている（写真 1.1.1 参照）。図 1.1.2 は、河口から上流約 11km 地点までの十勝川の平面図である。本検討では、津波痕跡高が確認されている河口から上流約 11km 地点までを津波解析の対象とした。



出典：北海道開発局帯広開発建設部ホームページ

図 1.1.1　十勝川の位置図

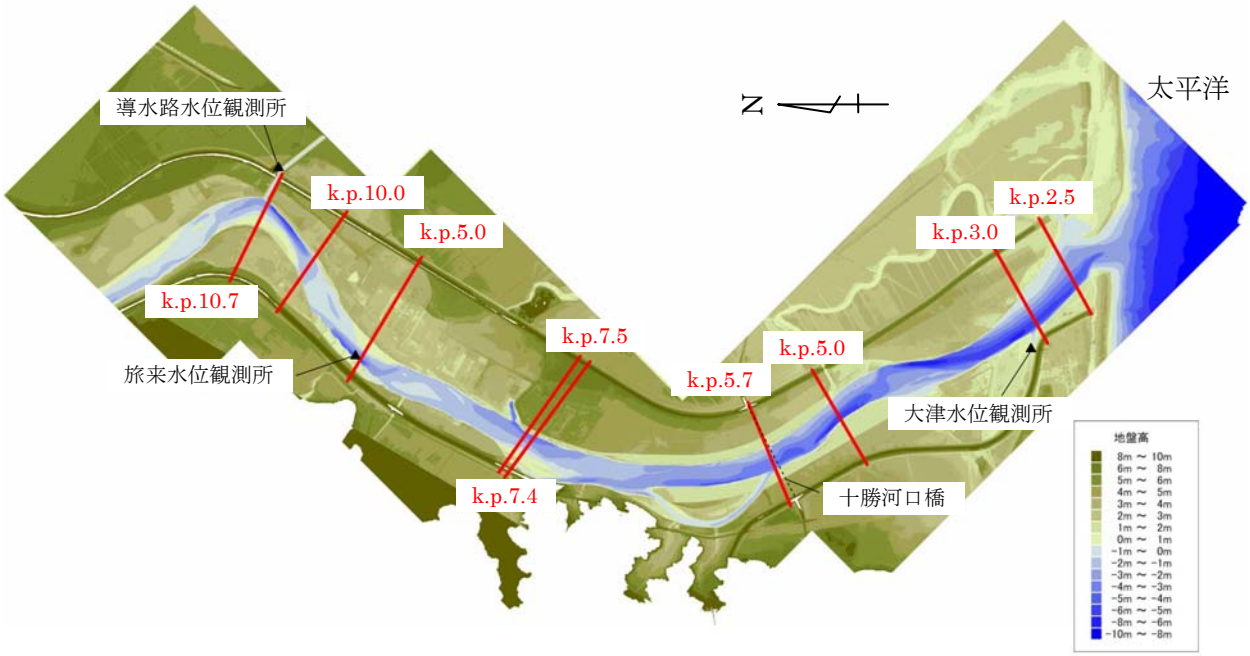


図 1.1.2　十勝川の河口から上流 11km 地点付近までの平面図

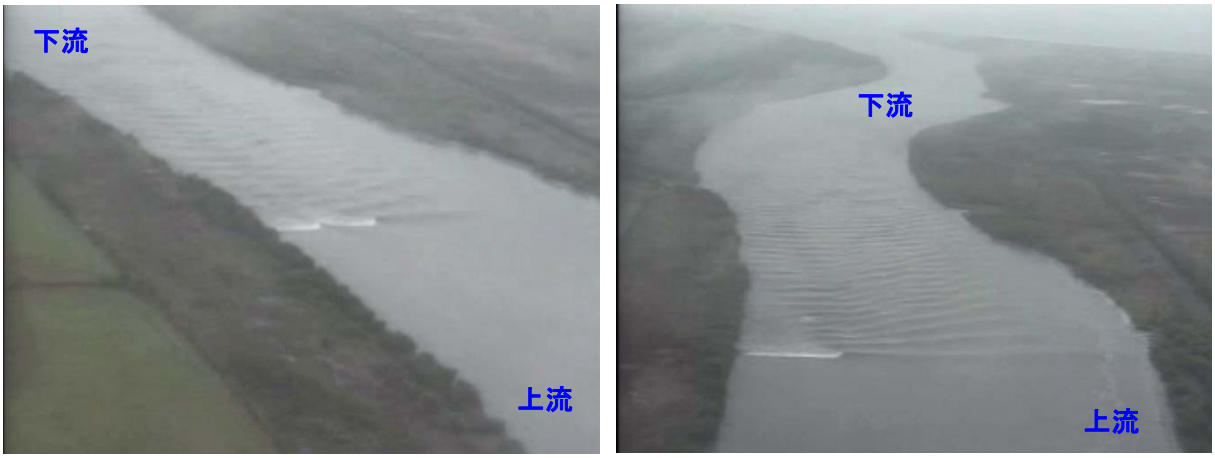


写真 1.1.1　十勝川を遡上する津波（陸上自衛隊撮影，平成 15 年）

1.2　解析モデル

分散効果を含まない津波の検討では非線形長波理論式（以下「分散項なしモデル」という）、分散効果を含む津波の検討では非線形分散長波理論式（以下「分散項ありモデル」という）を基本方程式とし、波源を含む海域から河川域までの計算が可能なモデルとした。

なお、地形データの格子形状は正方格子、座標系は平面直交座標系とし、原点座標は公共測量における 13 系（経度 144 度 15 分 0 秒、緯度 44 度 0 分 0 秒）とした。

1.3　解析の概要

本検討は、平成 15 年 9 月 26 日（4 時 50 分）に北海道の南東の太平洋で発生した「平成 15 年十勝沖地震」の再現計算と解析モデルの検証を行ったものである。表 1.3.1 に解析における作業項目と作業概要を示す。

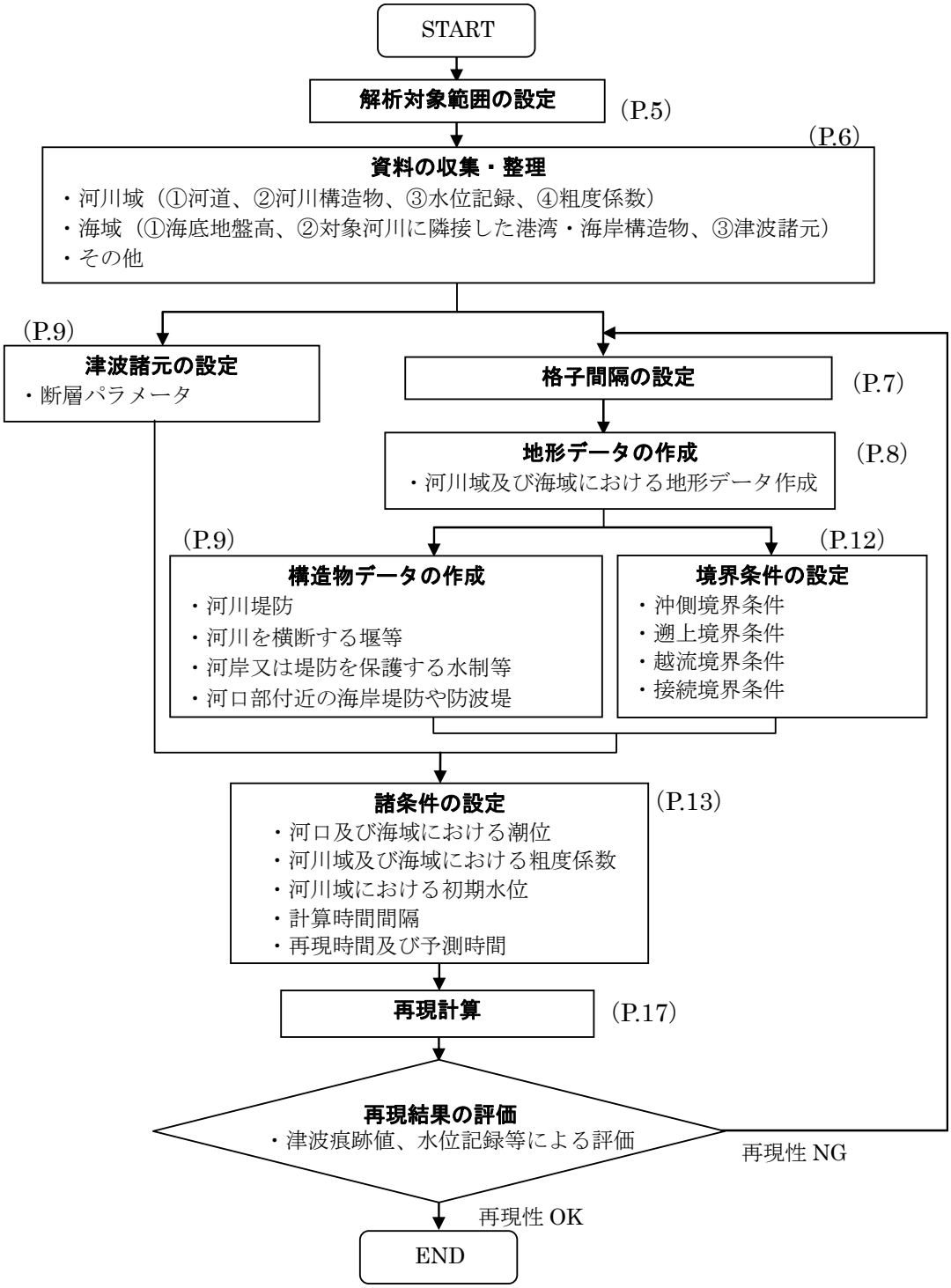
表 1.3.1　解析における作業項目と概要

作業項目		概要
(1)	解析対象範囲	平成 15 年十勝沖地震に伴う津波の河川遡上範囲を参考に、対象波源を含む海域と河口から上流の約 11km 付近までとした。
(2)	津波波源	東北大（大垣・今村）モデルの断層パラメータから算出された初期水位とした。
(3)	解析モデル	・非線形長波理論式　：　分散項なしモデル ・非線形分散長波理論式　：　分散項ありモデル
(4)	諸条件	①河口及び海域における潮位 津波来襲時の潮位 T.P.+0.59m を設定。 ②河川域及び海域における粗度係数 津波来襲時の粗度が不明であるため、十勝川の河川改修計画に関する検討資料により粗度を設定。 ・河川域：低水路を 0.025、中水敷を 0.035、高水敷を 0.045 として設定。 ・海域　：全域を 0.025 として設定。 ③河川域における初期水位 茂岩水位観測所における津波来襲時の水位から流量（234.46m^3/s）を推定し、下流部に位置する小河川（6.2m^3/s）の流量を加えた 240.66m^3/s として不等流計算から求めた。 ④計算時間間隔 C.F.L.条件を満たすために格子間隔と最大水深の関係から 0.05 秒とした。 ⑤再現時間 最大津波高の発生が第 1 波目であったことを確認し、津波の到達時間、河川における遡上等を考慮して津波（地震）発生から 3 時間とした。
(5)	再現計算	津波痕跡高と計算結果の比較から、補正係数は考慮しない（相田の K 値と κ 値がそれぞれ 0.92 と 1.23）ものとした。
(6)	比較検討	①沿岸部における津波痕跡高と計算値の比較結果 分散項ありモデル：K 値=1.00、κ 値=1.21 分散項なしモデル：K 値=0.87、κ 値=1.19 ②河川内の津波痕跡高と計算値の比較結果 分散項ありモデル：K 値=0.72、κ 値=1.33（全データ） 分散項なしモデル：K 値=0.73、κ 値=1.37（全データ）

2. 再現・検証計算

2.1 検討フロー

津波高の解析は、図 2.1.1 に示すフローに従い作業を実施した。



※フロー枠横の数字は、ページ番号を示す。

図 2.1.1　十勝川を対象とした再現計算の作業フロー図

2.2　再現計算と解析モデルの検証

2.2.1　解析対象範囲の設定

解析の対象範囲は、十勝沖地震に伴う津波の河川遡上が確認された範囲を考慮し、対象となる津波波源を含む深海域と十勝川河口から上流の約 11km 付近までとした。解析範囲を図 2.2.1 に示す。

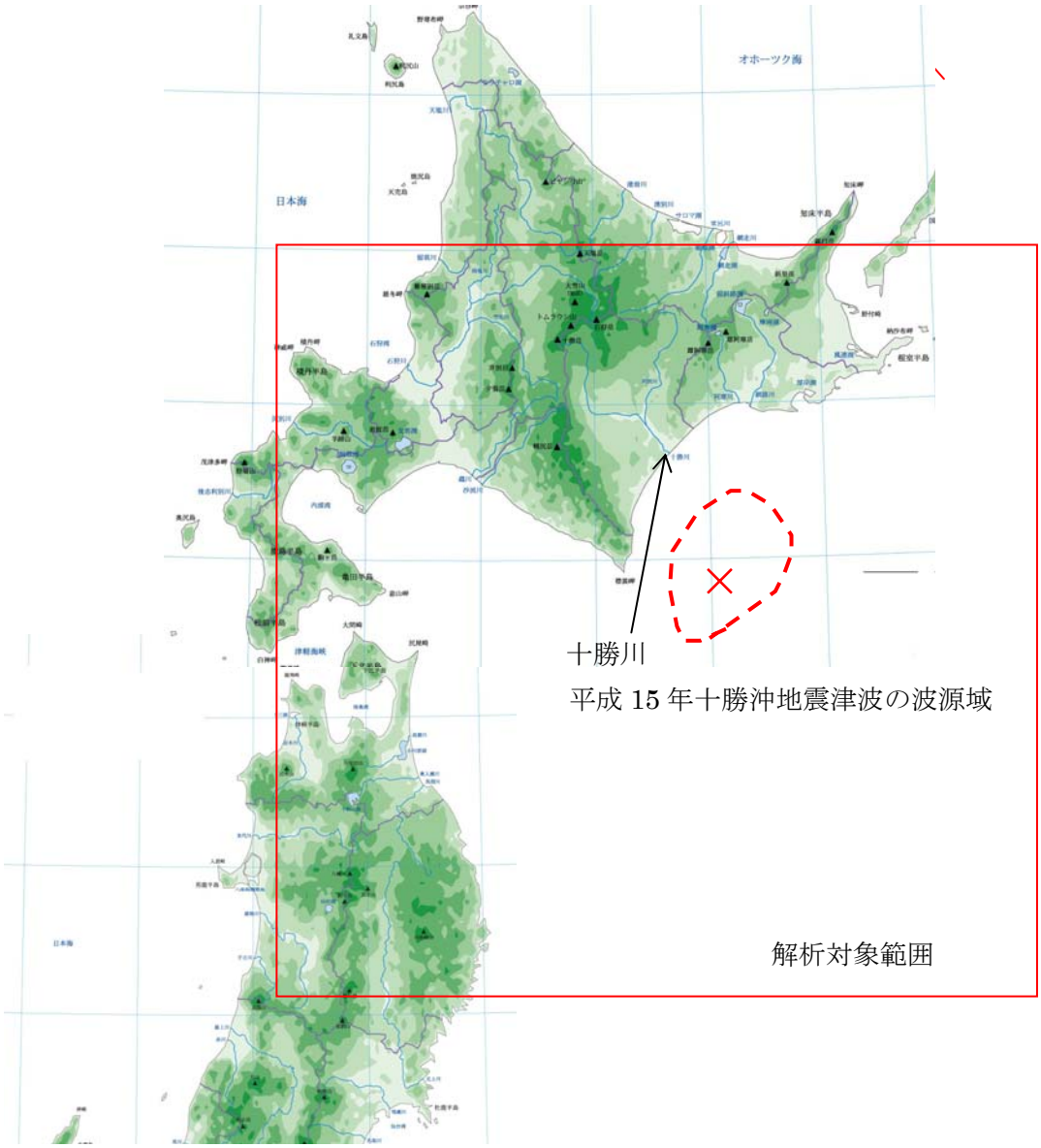


図 2.2.1　解析対象範囲

2.2.2　資料の収集・整理

本検討では、地形データや構造物データ、波源諸元等の設定に必要な情報として、表 2.2.1 に示す資料を収集した。

表 2.2.1　十勝川の再現計算における収集資料一覧

分類	資料名称	縮尺	所管機関	発行年	データ内容
河川域	十勝川河川横断測量成果		帯広開発建設部	H13-9	河床高(200m毎)
	航空レーザー測量成果	2mメッシュ	帯広開発建設部	H16-12	標高点
	航空写真		帯広開発建設部	H16-12	地形形状・土地利用状況
	十勝川平面図	1/2500	帯広開発建設部		地形形状・土地利用状況
	十勝川河口部深浅測量成果		帯広開発建設部	H10	河口周辺水深
	十勝川河口航空写真		帯広開発建設部	H15-10	河口砂州形状
	水位観測所		帯広開発建設部	H15-9	観測所位置
	水位観測記録		帯広開発建設部	H15-9	十勝川(大津・旅来・導水路)
	流量観測記録		帯広開発建設部	H15-9	十勝川(茂岩)
	陸上自衛隊撮影ビデオ		陸上自衛隊第五師団	H15-9	十勝川津波遡上
海域	日本近海海底地形図	1/3,000,000	海上保安庁	S41-7	等深線
	大陸棚の海の基本図	1/1,000,000	海上保安庁	S55-7	等深線
	大陸棚の海の基本図	1/1,000,000	海上保安庁	S55-7	等深線
	大陸棚の海の基本図	1/200,000	海上保安庁	S48-10	等深線
	大陸棚の海の基本図	1/200,000	海上保安庁	S49-11	等深線
	大陸棚の海の基本図	1/200,000	海上保安庁	S49-11	等深線
	大陸棚の海の基本図	1/200,000	海上保安庁	S49-11	等深線
	大陸棚の海の基本図	1/200,000	海上保安庁	S49-11	等深線
	大陸棚の海の基本図	1/200,000	海上保安庁	H10-3	等深線
	平成15年(2003年)十勝沖地震津波波形の特性(永井・小川)		港湾空港技術研究所	H16-3	水位・検潮記録
その他	国土地理院数値地図	50mメッシュ	国土地理院		
	気象(アメダス)情報		気象庁	H15-9	
	現地調査(2003年十勝沖地震津波)		秋田大学HP	H15-10	痕跡値
	2003年9月の十勝沖地震に伴い発生した津波の遡上解析(安田ら)		土木学会論文集	H16-9	痕跡値

2.2.3　格子間隔の設定

記録として残されている十勝川を遡上する津波先端部の波状段波を表現するためには、波形を表現できる十分細かい解像度（格子点数）が必要となる。

本検討では、平成 15 年十勝沖地震津波の来襲に伴う周期の短い波状段波を河川域内で再現するために、最小格子間隔を 2m と設定した。また、津波の波長をもとに、河川域から浅海域の範囲は 1:2～1:5 の接続比率となるように 2m、10m、50m となる格子間隔とし、波源を含む深海域から浅海域の範囲は 1:2～1:3 の接続比率となるよう、それぞれ 50m、100m、200m、600m、1200m となる格子間隔として設定した。

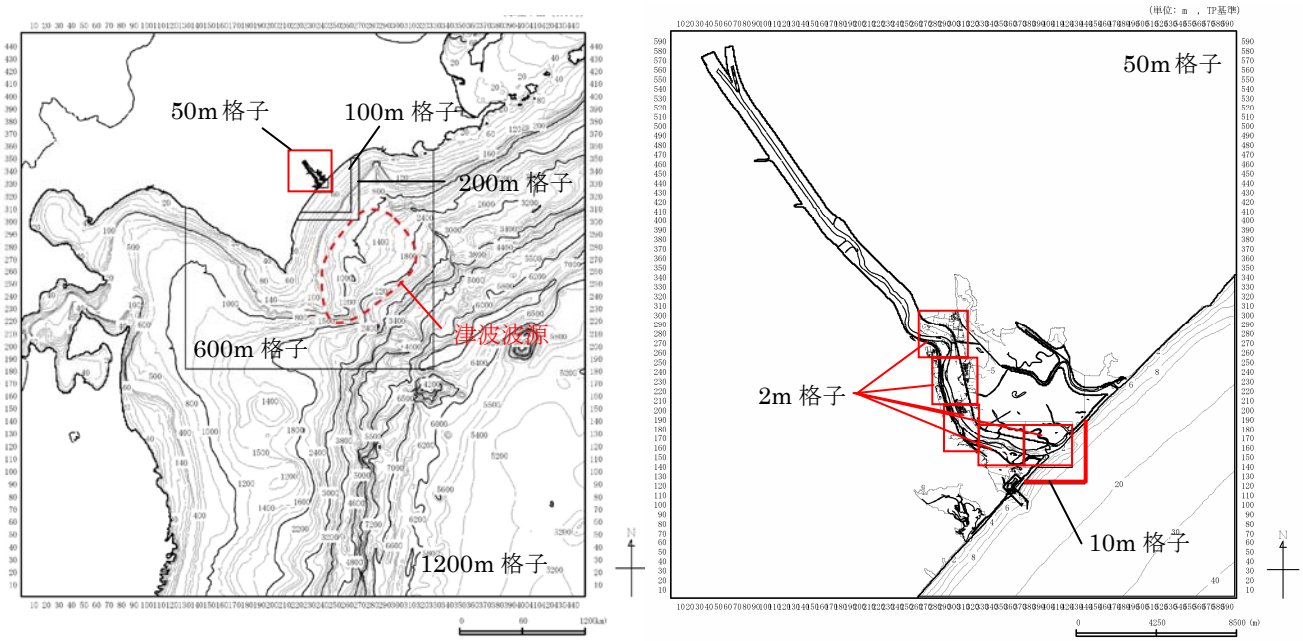


図 2.2.2　解析対象範囲における各格子領域

2.2.4　地形データの作成

波源を含む深海域から河川域においては、以下に示すように各領域の地形データを作成した。

(1) 河川域における地形データの作成

河床高データの作成においては､航空レーザー測量成果と平成 13 年 9 月に実施された 200m 毎の定期横断測量成果を用いた。

なお、平成 13 年 9 月に実施された 200m 毎の定期横断測量成果を用いるにあたっては、平成 13 年以降の測量データから河床変動が小さいことを確認した。

定期横断測量成果を用いたデータ作成においては、200m 毎の一定間隔で定められた右岸及び左岸を結ぶ距離標間のデータを設定するとともに、縦断方向に河床高の等高線を描き、デジタイザで読み取ったデータをもとに補間法により河床高データを補った。

また、河口部の砂州については、津波来襲時に最も近い時期の河口砂州形状を再現するものとした。

再現にあたっては、平成 15 年 10 月 7 日に撮影された河口部の航空写真から河口部砂州の形状をトレースして地形データに反映した。砂州標高については、航空レーザー測量による砂州標高の値を使用した。

(2) 海域における地形データの作成

海域の地形データ作成には、海上保安庁が発行する海の基本図及び海図を用いた。

データの作成においては、次に示す資料からデジタイザによって水深値を読み取り、各領域の格子間隔に合わせて補間法を用いて作成した。

- 海上保安庁発行の海の基本図（1/200,000）
- 海上保安庁発行の海図（1/250,000～1/10,000）

2.2.5　構造物データの作成

(1) 河川堤防

河川堤防の形状及び天端高データの作成においては、航空レーザー測量成果及び河川台帳図を利用した。

(2) 河川を横断する堰等

解析対象範囲において、河川を横断する堰等は確認されていなかったため、データの作成は行っていない。

(3) 河岸又は堤防を保護する水制等

解析対象範囲において、河岸又は堤防を保護する水制等は確認されなかったため、データの作成は行っていない。

(4) 河口付近の海岸堤防や防波堤

解析対象範囲において、河口付近の海岸堤防や防波堤は確認されなかったため、データの作成は行っていない。

2.2.6　津波諸元の設定

十勝沖地震津波の断層モデルは、以下に示す 3 ケースの断層モデルを対象に予備計算を行い、十勝港沖海象計の水位記録と津波痕跡高に最も良く一致する東北大学の断層モデルを採用した。

断層パラメータを表 2.2.2 に示す。

表 2.2.2　平成 15 年十勝沖地震の断層パラメータ

断層パラメータ	東大地震研※1	国土地理院※2	東北大学※3
緯度(deg)	41.78	42.12	42.05
経度(deg)	144.097	144.55	144.64
長さ(km)	90	85.7	92
幅(km)	70	83	90
深さ(km)	25	19.7	15.7
走向(deg)	230	231	230
傾斜角(deg)	20	21	23
すべり角(deg)	109	110	114
すべり量(m)	2.6(mean)	5.19	4.1

※1　http://wwweic.eri.u-tokyo.ac.jp/EIC/EIC_News/030926.html

※2　http://www.gsi.go.jp/WNEW/PRESS-RELEASE/2003/0926-2.htm

※3　大垣・今村：現地データを利用した 2003 年十勝沖地震津波の数値解析と特徴の把握、海岸工学論文集、第 51 巻、pp.271-275、2004.

断層モデルの検討は、最小格子（十勝川河口部周辺）を 25m とする非線形長波式による 5 時間の再現計算結果と十勝港沖海象計の観測記録、十勝港、釧路港の潮位記録及び津波痕跡高との比較をもとに検討した。

十勝港沖海象計、十勝港、釧路港の位置と津波の水位記録との比較結果を図 2.2.3 及び図 2.2.4～図 2.2.6 に示す。

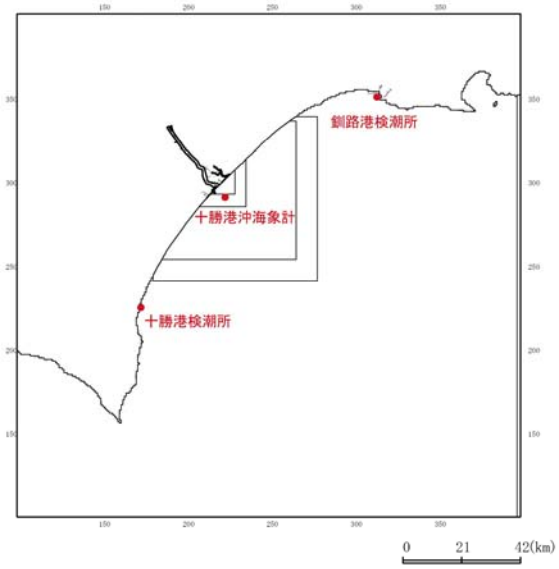


図 2.2.3　十勝港沖海象計、十勝港及び釧路港の位置

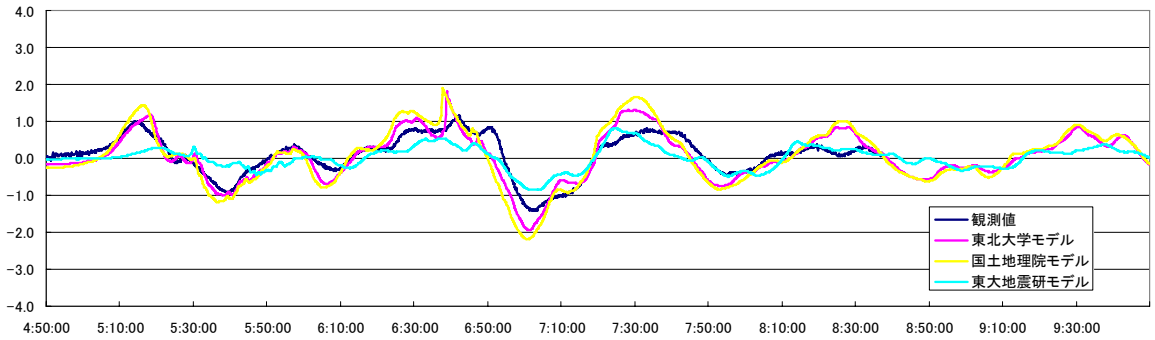


図 2.2.4　十勝港沖海象計の水位記録と計算結果の比較

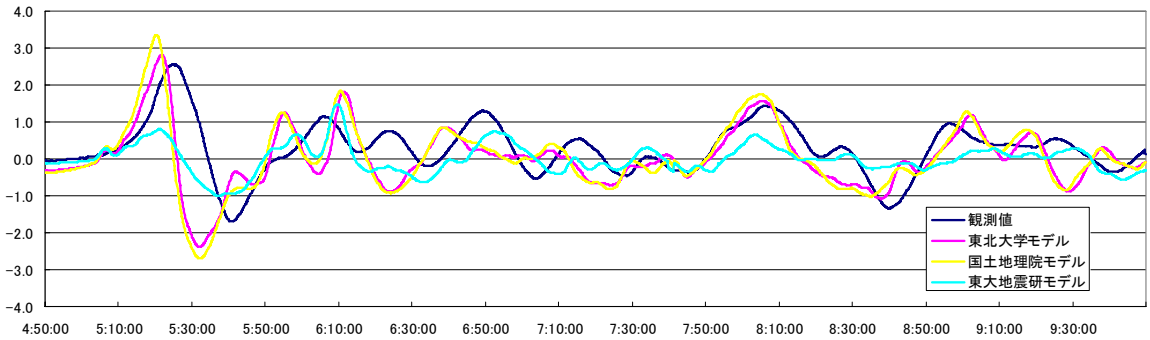


図 2.2.5　十勝港検潮所の水位記録と計算結果の比較

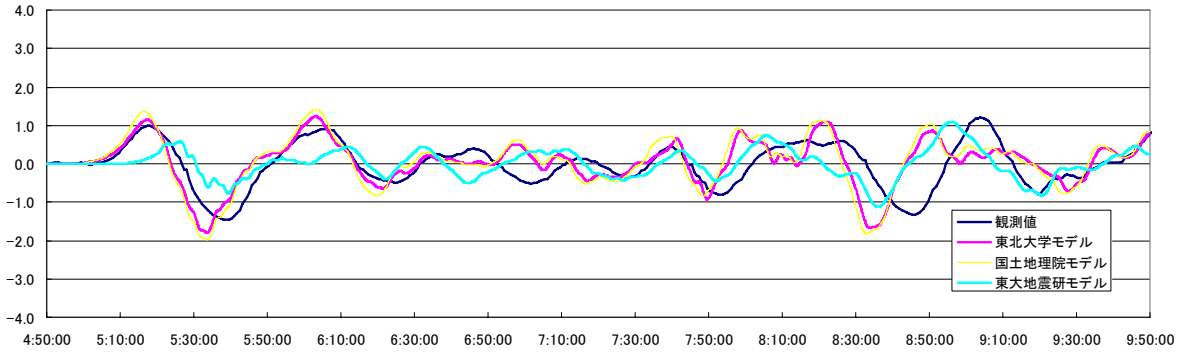


図 2.2.6　釧路港の検潮記録と計算結果の比較

計算結果と水位記録との比較より、以下の結果が得られる。

・東大地震研モデルは、いずれの観測点でも津波高が過小評価となり位相も遅れる。

・国土地理院モデルと東北大モデルは、ほぼ一致した傾向にある。

・十勝港沖の比較より、国土地理院モデルの方が東北大モデルよりも波高が僅かに過大評価となる。

よって、本検討では、平成 15 年十勝沖地震の断層モデルとして東北大モデルを採用する。

2.2.7　境界条件の設定

各領域の境界においては、津波の挙動が適切に再現できるよう沖側境界条件、遡上境界条件、越流境界条件及び接続境界条件を設定した。

(1) 沖側境界の条件設定

沖側境界は、津波が境界上で反射せずに透過できるような自由透過境界（開境界）を設定する。本調査では、一般的な津波計算で利用されている後藤・小川の方法による自由透過境界を採用した。

(2) 遡上境界の条件設定

遡上境界は、一般的な津波計算で利用されている岩崎・真野の方法を採用した。

(3) 越流境界条件

計算領域内の防波堤・堤防等において、水位がその天端高を越える場合のモデルは、本間の公式を用いて単位幅当たりの越流量（$m^2/s/m$）を計算し、堤内地への越流を考慮した。

(4) 接続境界条件

接続境界においては、隣り合う領域で流量の受け渡しができるよう処理を行った。

2.2.8　諸条件の設定

(1)　河口及び海域における潮位

津波来襲時の潮位は、図 2.2.7 に示す大津水位観測所の水位記録を参照し、読み取り値をもとに設定した。

設定潮位＝T.P.＋0.59m

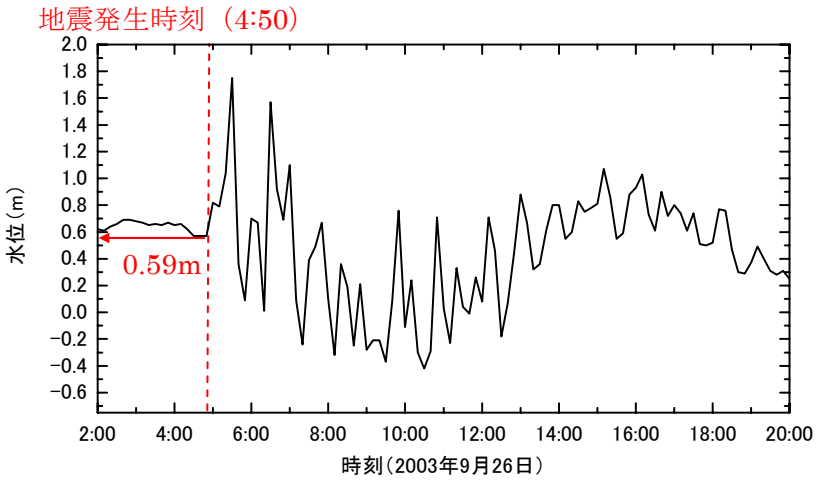


図 2.2.7　平成 15 年十勝沖地震津波来襲時の大津水位観測所の水位記録

(2) 河川域及び海域における粗度係数

①河川域における粗度係数

津波来襲時の粗度が不明であるため、十勝川の河川改修計画に関する検討資料より表 2.2.3 に示す粗度係数を設定した。

表 2.2.3　十勝川の粗度係数

区間	粗度係数		
河口～11km	低水路	中水敷	高水敷
	0.025	0.035	0.045

②海域における粗度係数

海域の粗度係数は、「津波高潮ハザードマップマニュアル（財団法人沿岸開発技術研究センター、平成 16 年 4 月）」をもとに 0.025 とした。

(3)　河川域における初期水位

河川域における初期水位は、図 2.2.8 に示すように上流からの河川流量を潮位の影響が及ばない茂岩水位観測所（河口から 20ｋｍ）の流量に支川の流量を加えた流量をもとに不等流計算を実施し、その結果として得られる水位を設定した。

上流境界の流量は、茂岩における流量と支川の流量を加えた以下の流量を設定した。

234.46 m³/s(十勝川本線：茂岩)＋6.2 m³/s(支川)＝<u>240.66m³/s</u>

図 2.2.8　十勝川流域図（河口部～茂岩付近）

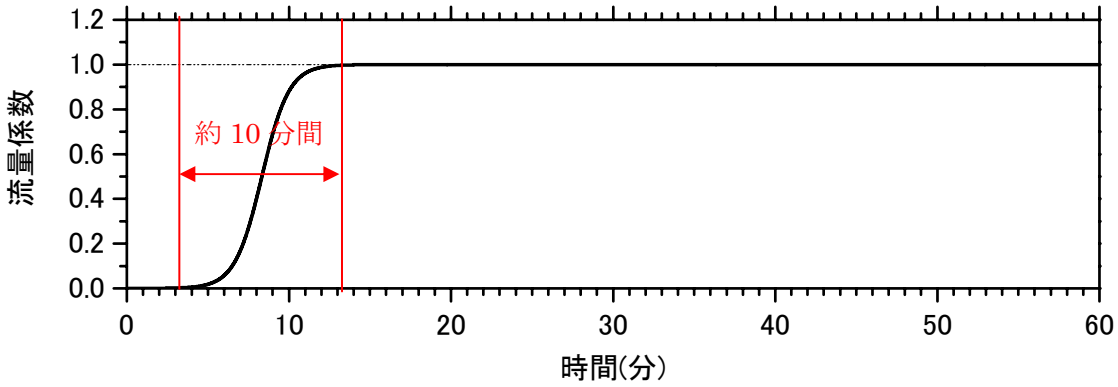


図 2.2.9　流量係数の曲線

不等流計算では、図 2.2.9 に示すように計算の安定性を考慮して所定流量に以下のような流量係数の曲線（本調査では、変化区間を約 10 分に設定）を乗じた。本検討では、双曲線正接（ハイパボリックタンジェント）関数を使用して目標流量まで変化するように設定して不等流計算を行った。

不等流計算における河川流量を入力するモデルの上流端は、図 2.2.10 及び図 2.2.11 に示すように計算プログラム上の流量の設定方法を容易にするため、実地形にスムーズに接続する緩和区間を設定した。矩形水路の幅は、接続する実地形の堤防間距離に、水深は実地形の最深河床高に合わせるように設定した。

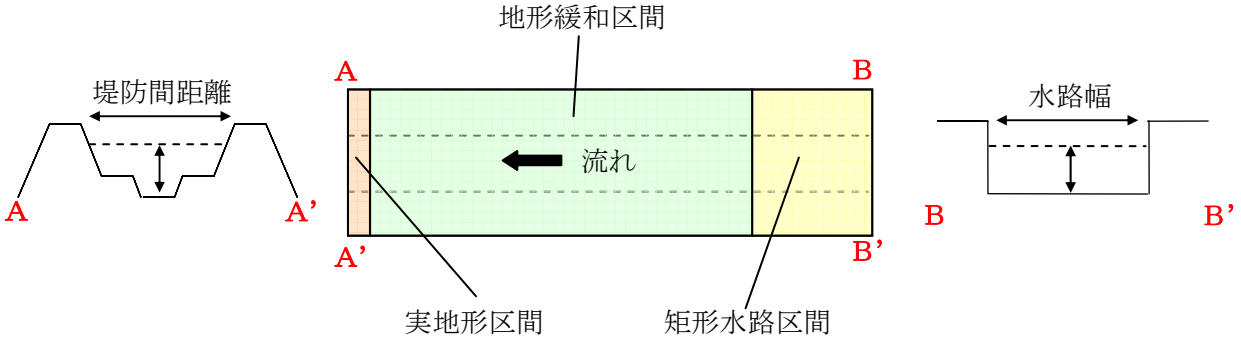


図 2.2.10　上流端地形のイメージ

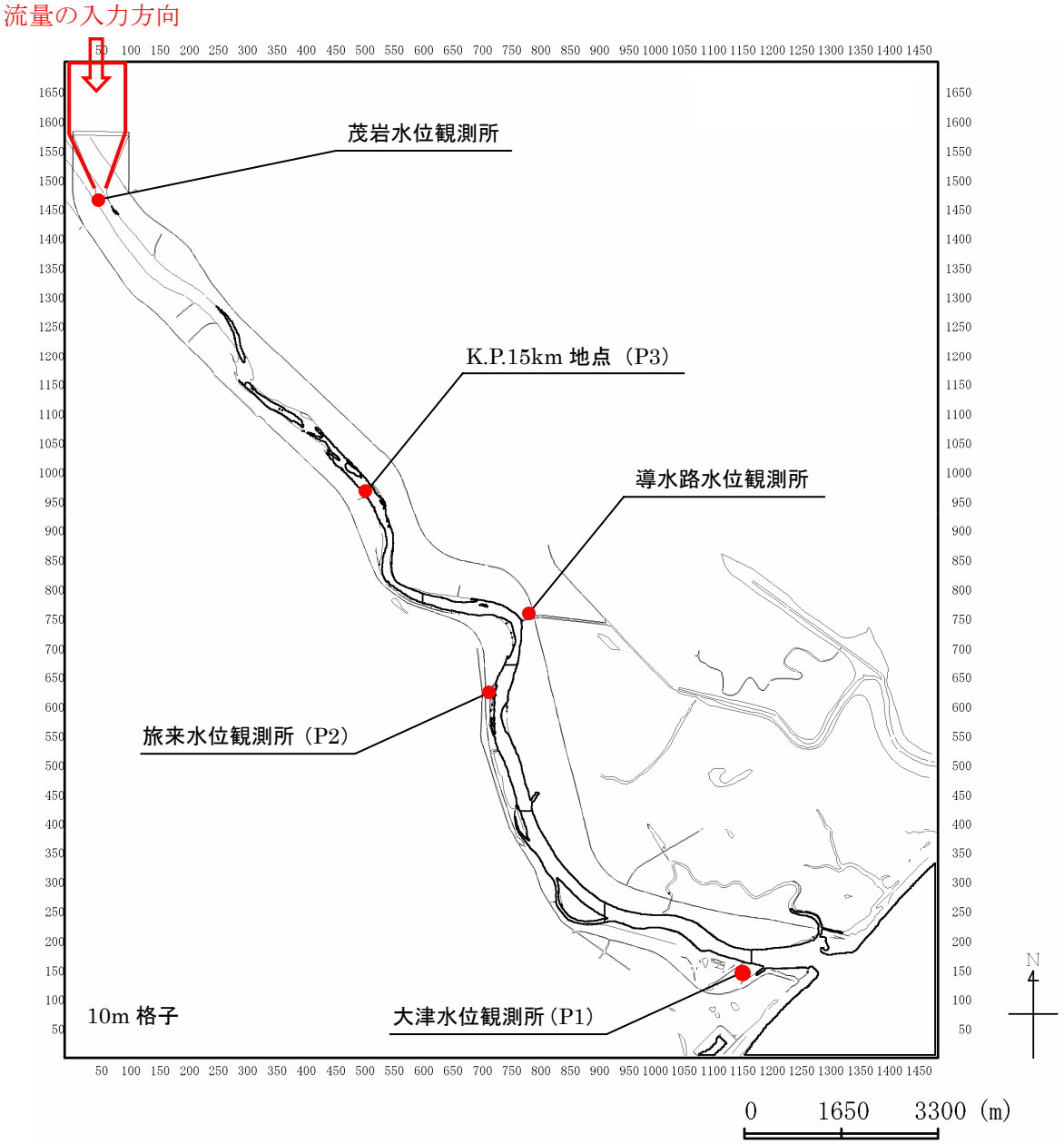


図 2.2.11　十勝川における上流端地形の位置と形状

(4) 計算時間間隔

計算時間間隔の設定は、C.F.L.条件を満たすために、各領域における格子間隔と最大水深の関係から 0.05 秒とした。

(5) 再現時間

再現時間は、大津水位観測所の記録から、最大津波高の発生が第 1 波目であったことを確認し、津波の到達時間、河川における遡上時間等を考慮して津波（地震）発生から 3 時間とした。

2.2.9　再現計算

(1) 再現計算の設定条件

十勝川を対象とした平成 15 年十勝沖地震津波の再現計算の設定条件をに示す。また、解析対象範囲において分割された領域と水深の関係を図 2.2.12 に示す。

表 2.2.4　十勝川再現計算における計算条件

格子間隔	1200m	600m	200m	100m	50m	10m	2m	2m	2m	2m	2m
時間ステップ	0.05 秒（C.F.L.条件から設定）										
基礎方程式	非線形長波式（分散項なしモデル）及び非線形分散長波式（分散項ありモデル）										
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（財団法人沿岸開発技術研究センター、平成 16 年 4 月）」をもとに、海域全域を 0.025 とした。						低水路：0.025（0.0km-11.0km） 中水敷：0.025（0.0km-11.0km） 高水敷：0.025（0.0km-11.0km） 十勝川の河川改修計画に関する検討資料の値				
潮位条件	大津水位観測所の水位記録から津波来襲直前の潮位として T.P.+0.6m を設定した。										
流量条件	茂岩水位観測所における津波来襲時の水位から流量（234.46m³/s）を推定し、下流部に位置する小河川（6.2m³/s）の流量を加えた流量の 240.66m³/s を設定した。										
津波波源	東北大モデル（大垣・今村モデルの断層）のパラメータから算出された初期水位とし、補正係数は乗じていない。										
計算時間	津波（地震）発生から 3 時間とした。										

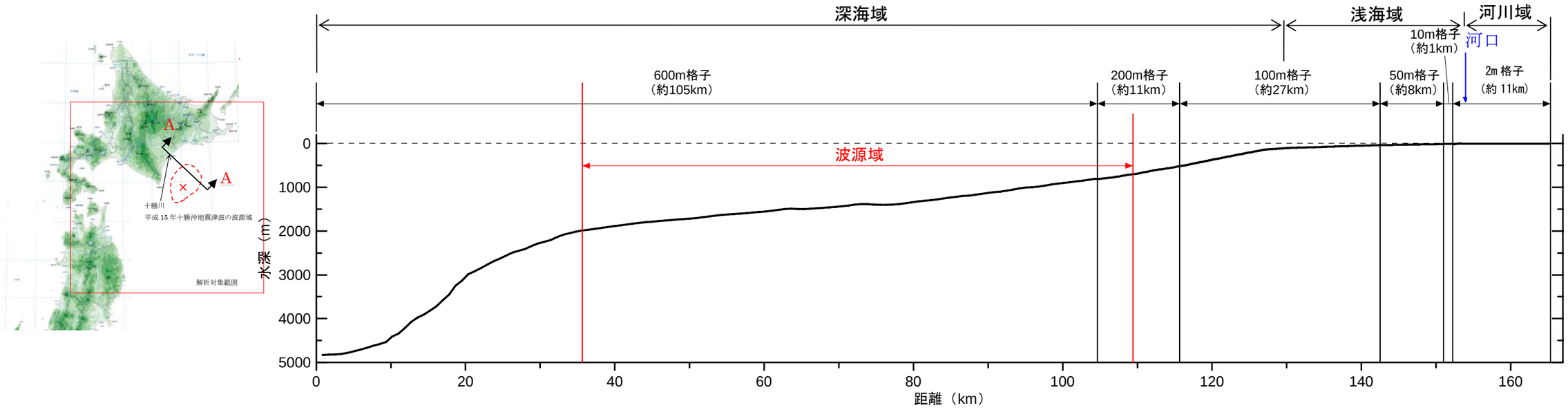


図 2.2.12　解析対象範囲において分割された分割と水深の関係（A-A 断面）

(2)　補正係数の検討

東北大学の断層モデルによる計算結果と津波痕跡高との比較結果を図 2.2.13、表 2.2.5 に示す。

表 2.2.5 から、解析対象範囲すべての比較では、補正係数 0.90 が津波痕跡高とよく一致する結果となるが、十勝川河口周辺の津波高と津波痕跡高に着目すると過大評価となる。しかし、十勝川に関しては、河口部周辺の海岸線近傍における津波痕跡高が少ないことや十勝港沖海象計との十勝川の河川域以外の津波記録よりも河川域内の津波記録の方が数多いことから、現時点では波源の補正係数は考慮しない設定することが妥当であると判断した。

なお、沿岸方向距離が-10.0km 付近から南西側で見られる計算値の分布間隔の違いは、河口付近の格子間隔(2m)よりも広い格子間隔（100m）の結果であるため、計算結果が格子間隔に応じた分布間隔となる影響によるものである。

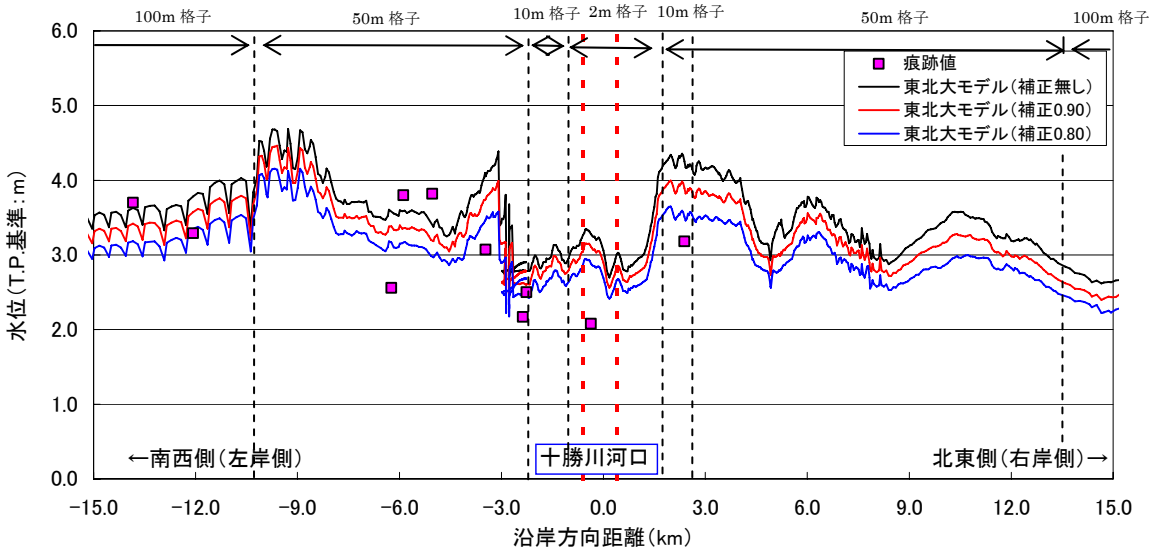


図 2.2.13　海岸線近傍の津波痕跡高と計算値の比較

表 2.2.5　相田のＫ値と κ 値

波源水位の補正	Ｋ値	κ 値
補正係数なし	0.92	1.23
補正係数 0.90	0.99	1.23
補正係数 0.80	1.07	1.23

※Ｋ値と κ 値の目安：Ｋ値は 0.8～1.2、κ 値は 1.6 以下が適当とされている。

(3)　分散効果を含めた再現性の検証

再現計算及び検証の結果を以下にまとめる。

1）十勝港沖海象計の観測記録との比較

十勝港沖海象計の観測記録と計算値の比較を図 2.2.14 に示す。また、十勝港及び釧路港の潮位記録と計算値の比較を図 2.2.15 に示す。

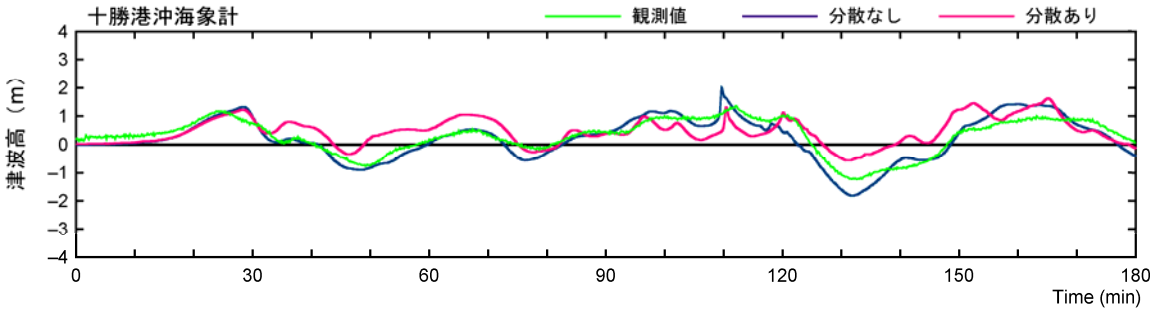


図 2.2.14　十勝港沖海象計の観測記録と計算値の比較

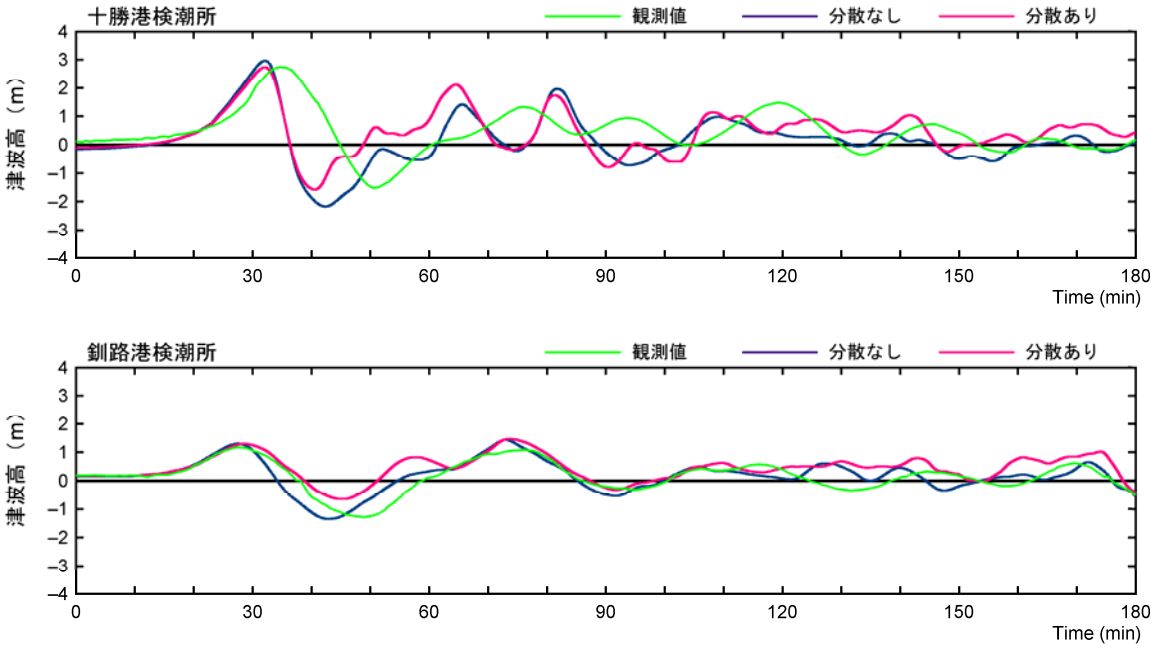


図 2.2.15　十勝港及び釧路港の潮位記録と計算値の比較

2）沿岸部の津波痕跡高と計算値の比較

河口部を中心とした約 30km 範囲（図 2.2.16 を参照）の沿岸部における津波痕跡高と計算値の比較を図 2.2.17 に示す。また、相田のK値（及びκ値）は表 2.2.6 のとおりである。

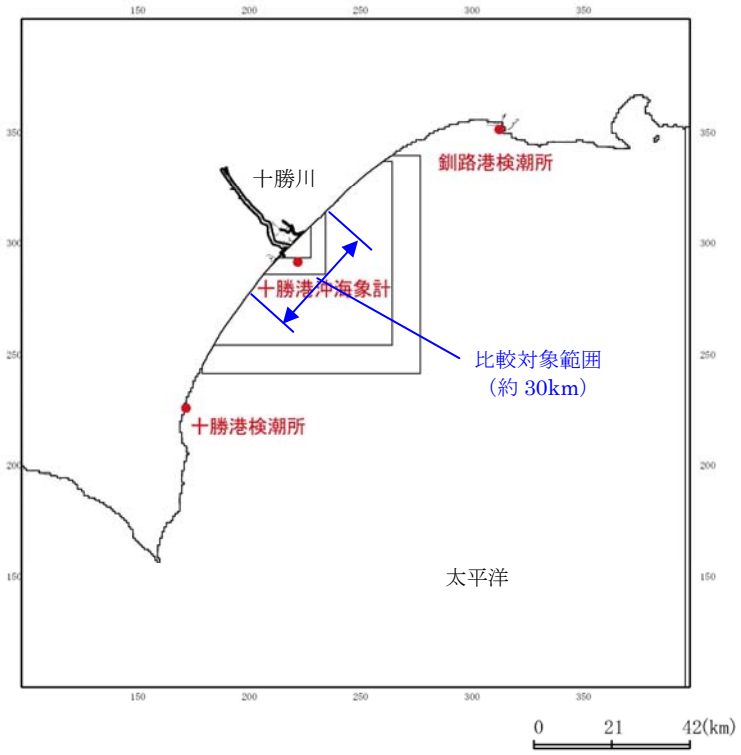
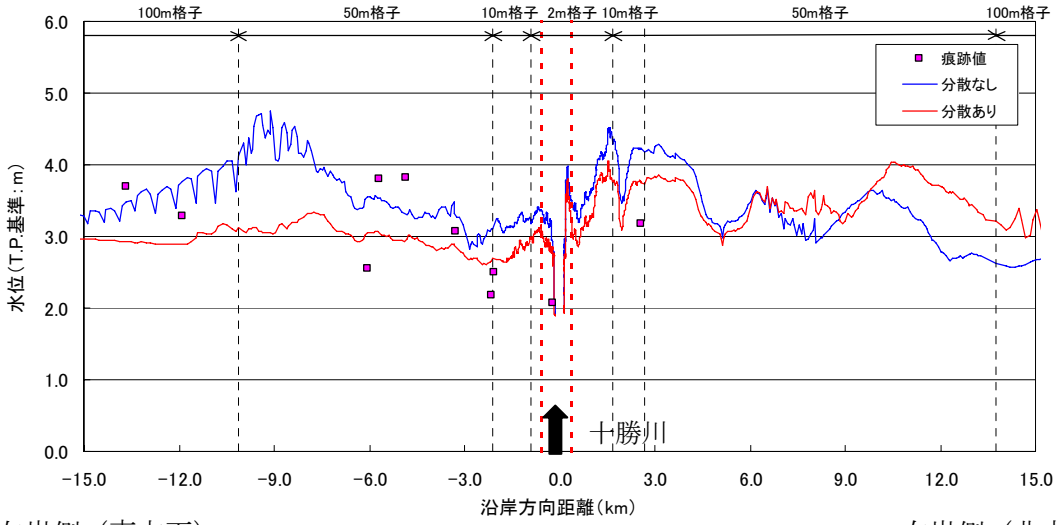


図 2.2.16　沿岸部における津波痕跡高と計算値の比較範囲



左岸側（南方面）　　右岸側（北方面）

図 2.2.17　沿岸部における津波痕跡高と計算値の比較

表 2.2.6　沿岸部における津波痕跡高と計算値の比較

計算のモデル	K値	κ値
分散項なしモデル	0.87	1.19
分散項ありモデル	1.00	1.21

※K値とκ値の目安：K値は 0.8～1.2、κ値は 1.6 以下が適当とされている。

津波痕跡高に比べ分散項なしモデルの計算結果は低くなり、さらに分散項なしモデルの計算結果に比べ分散項ありモデルの計算結果は低くなる。分散項ありモデルの計算値が分散項なしモデルの計算結果に比べ小さくなった原因は、津波の波源域における分散効果によるものと考えられる。平成 15 年十勝沖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、分散項ありモデル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される。

3）河川域水位観測所の観測値と計算値の比較

水位記録と計算値の比較を図 2.2.18 に示す。津波の位相（到達時間）に着目すると、津波の立ち上がりで計算値の方が水位記録に比べ若干速い傾向にあるが、全体的な傾向としては水位記録と計算値は良く一致していることが確認できる。分散項ありモデルの計算結果と観測値の大きな違いとしては、大津水位観測所の約 60 分後の波形形状（図中の赤丸部点線）が異なることが挙げられる。分散項ありモデルの計算値では津波水位の変化量が大きく、分散項なしモデルの計算値及び水位記録と異なる点である。この影響は、海域において分散項ありモデルの方が分散項なしモデルよりも津波が発達し水位が上昇する影響によるものと判断される。この点に関しては、分散項なしモデルの計算結果の方が観測結果に良く一致していると言える。

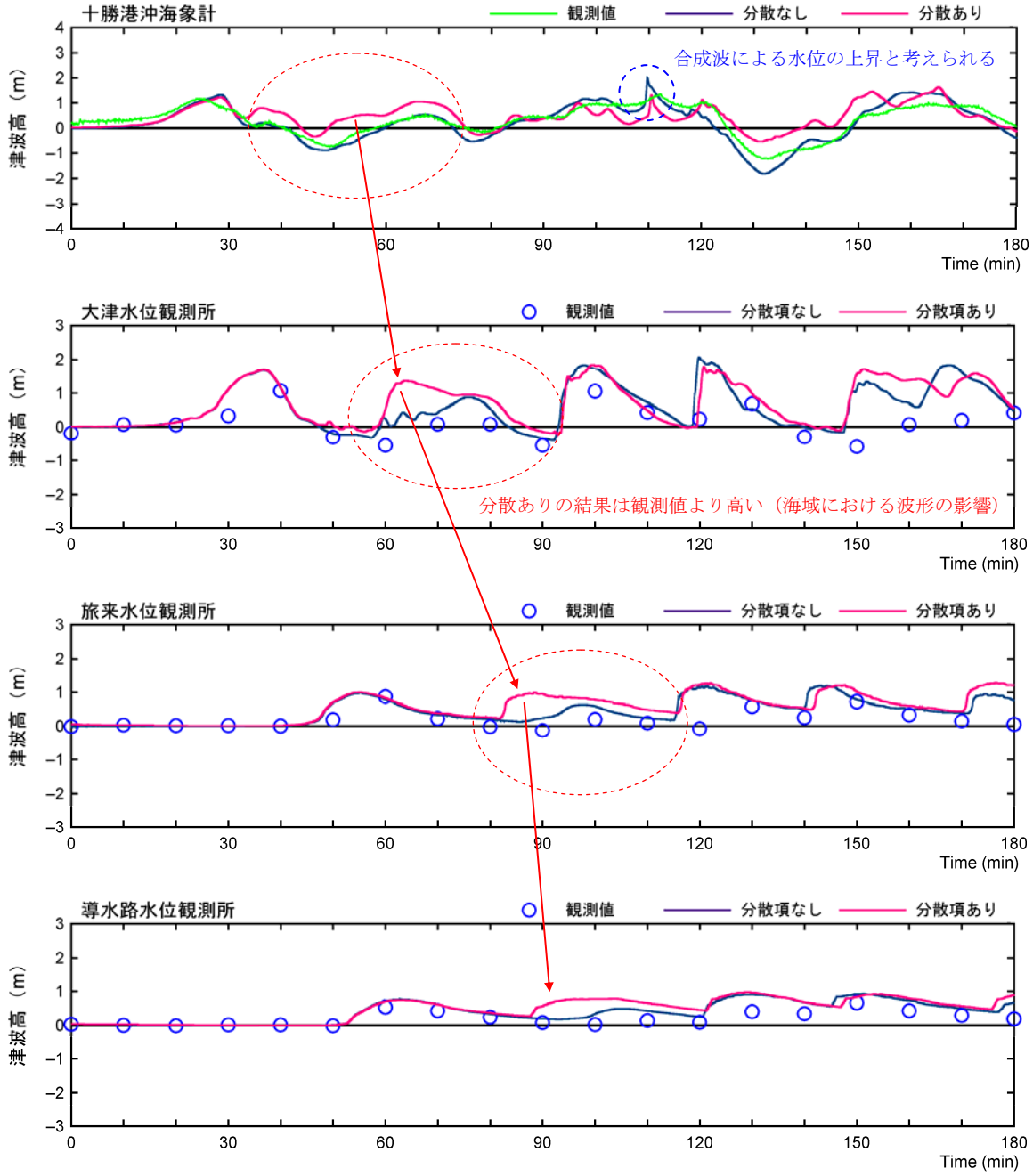


図 2.2.18　十勝港沖海象計と水位観測所における観測値と計算値の比較

4）河川内の津波痕跡高との比較

①横断面方向の比較

河川域における左右岸の津波痕跡高を表 2.2.7 に示す。出典先によれば、津波痕跡高の河川縦断方向の位置は不明なため津波痕跡高に相当する高さと一致する河川内の地盤高を津波痕跡高の縦断方向の位置とした。

表 2.2.7　十勝川の高水敷で見られた津波痕跡高の標高

左岸	痕跡標高(m)	痕跡物証
k.p 2.5	0.82	倒伏した植生群
k.p. 5.0	1.22	倒伏した植生群
k.p. 7.5	2.31	倒伏した笹群
k.p. 10.0	1.16	消波ブロック側面の連続線
k.p. 10.7	1.22	倒伏した植生群

右岸	痕跡標高(m)	痕跡物証
k.p 3.0	1.60	丘陵堤上の連続線状の流木片
k.p. 5.7	1.97	植物に絡みついたゴミ，泥
k.p. 7.4	1.82	植物に絡みついたゴミ，泥
k.p. 9.2	1.36	倒伏した植生群
k.p. 10.7	1.29	砂質高水敷上の連続線状流木片

なお、各断面における計算による最大水位は表 2.2.8 に示すとおり、分散項なしモデルの計算による最大水位の方が高くなる断面も存在していることが確認できる。

表 2.2.8　津波痕跡高が確認された横断面上での最大水位の比較（T.P.基準）

k.p.(km)	計算による最大水位（m）	
	分散なし	分散あり
2.5	2.41	2.43
3.0	2.72	2.30
5.0	2.28	2.09
5.7	2.02	1.95
7.4	2.02	1.92
7.5	1.93	1.93
9.2	1.95	1.91
10.0	2.10	1.92
10.7	1.85	1.89

十勝川の河床高分布と各津波痕跡高が位置する縦断距離の断面位置を図 2.2.19 に示すと共に、津波痕跡高と分散項なしモデルと分散項ありモデルの計算値の横断面比較をそれぞれ図 2.2.20 及

び図 2.2.21 に示す。5.7km 及び 7.4km の右岸の津波痕跡高と計算値はほぼ一致しているが、7.5km の左岸の津波痕跡高を除き、他の津波痕跡高では計算値の方が高い結果となる。

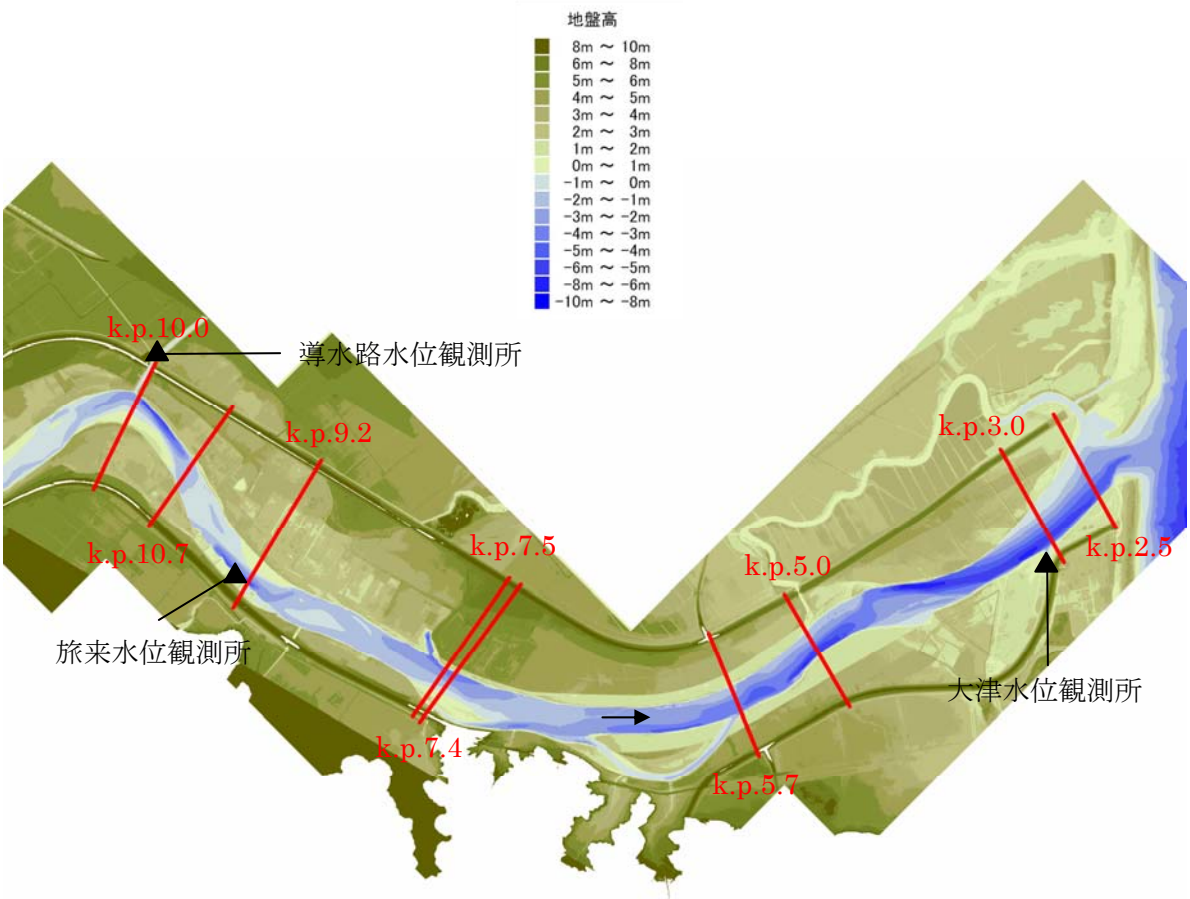


図 2.2.19　十勝川の河床高（標高値）と津波痕跡高の縦断距離

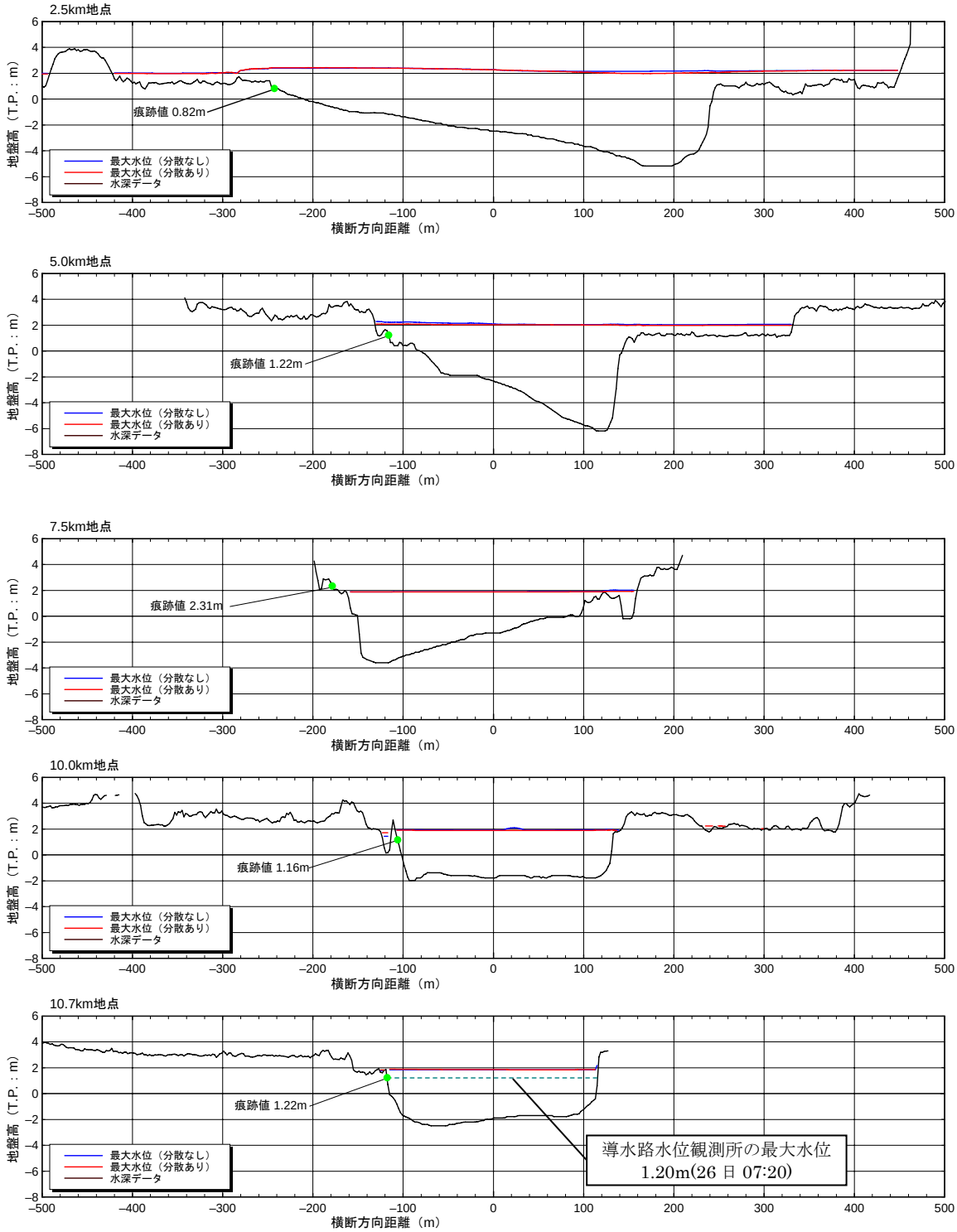


図 2.2.20　左岸の津波痕跡高と計算水位の比較

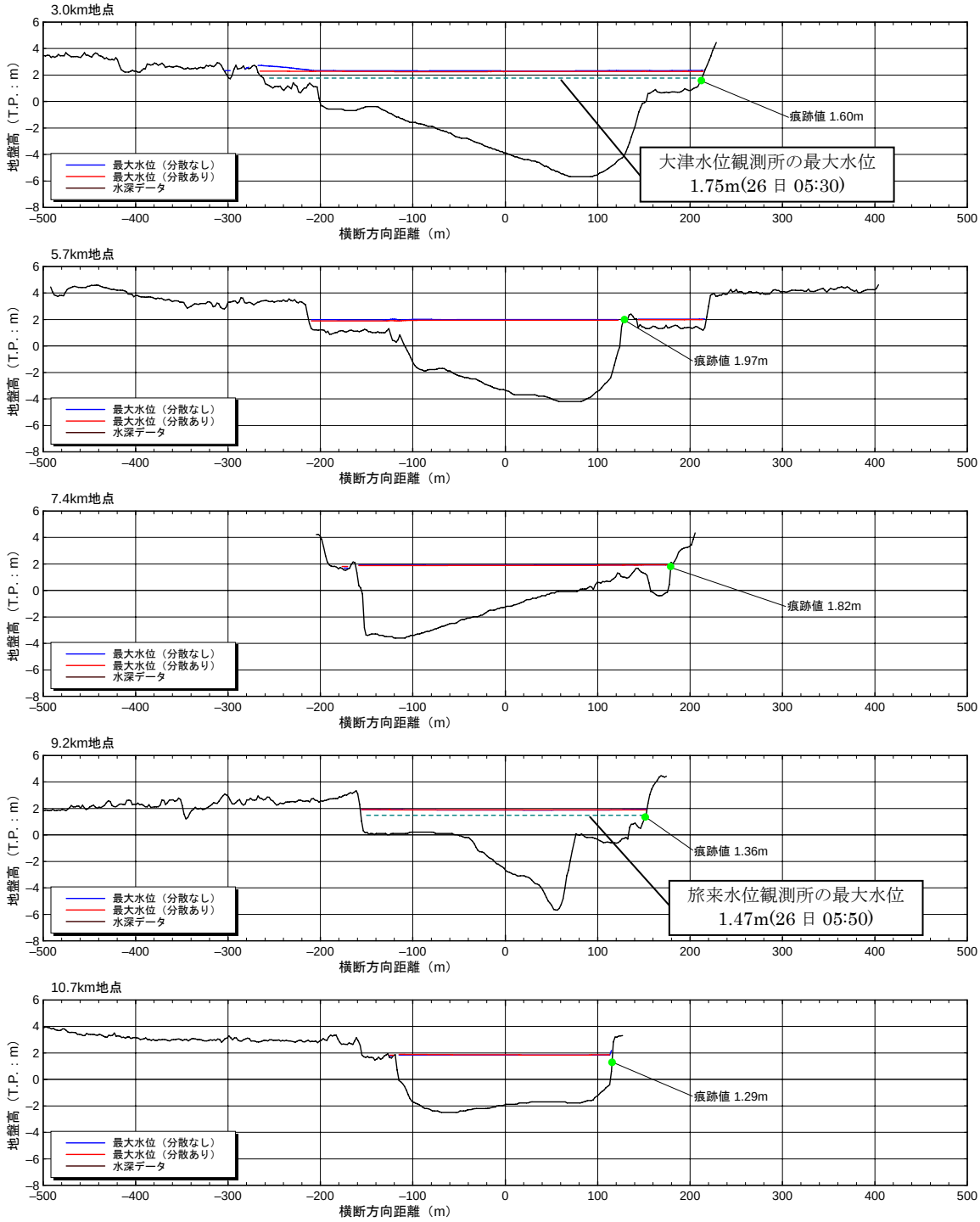


図 2.2.21　右岸の津波痕跡高と計算水位の比較

②縦断面方向の比較

図 2.2.22 は、縦断方向における計算の最高水位分布と津波痕跡高を比較したものである（T.P.基準)。縦断方向で分散項なしモデルの計算結果と分散項ありモデルの計算結果では局所的に大きさは逆転するが、差は小さい。表 2.2.9 は、左右岸の津波痕跡高に対する計算値のK値とκ値をまとめたものである。左右岸で計算値の方が津波痕跡高よりも高い値となり、特に左岸では津波痕跡高と計算値の差が大きい結果となった。

今回の計算では、十勝川河川内における分散効果は小さく、最大水位を対象とする限りでは、分散項なしモデルと分散項ありモデルで大きな差は無い。

表 2.2.9　十勝川における津波痕跡高と計算値の比較

計算結果		K値	κ値
分散項なしモデル	全データ（10）	0.73	1.37
	左岸（5）	0.64	1.43
	右岸（5）	0.79	1.16
分散項ありモデル	全データ（10）	0.72	1.33
	左岸（5）	0.65	1.42
	右岸（5）	0.80	1.16

※括弧内の数字は津波痕跡高の数を意味する。

5）検証の評価

今回、上述のように実施した再現性の検証は、河川域における再現性に重点をおいて実施してきたところである。

結果からは、河川域における津波の再現性は、ほぼ妥当であると判断できる。

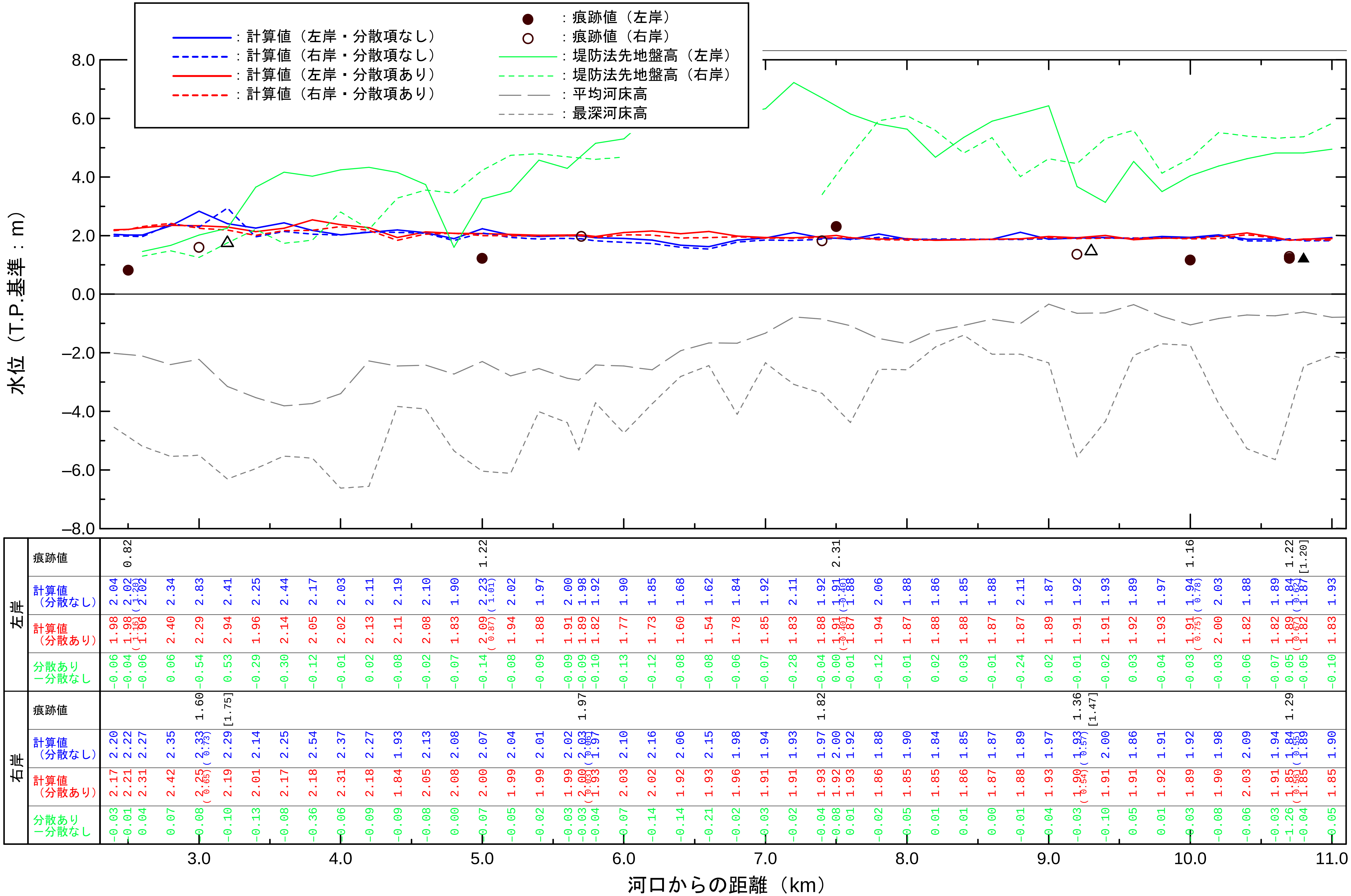


図 2.2.22　河川内の津波痕跡高と計算値（最高水位）の比較