

北上川水系河川整備基本方針
鳴瀬川水系河川整備基本方針
名取川水系河川整備基本方針
阿武隈川水系河川整備基本方針

河口部における施設計画上の津波水位の
設定等に関する資料

平成24年11月

国土交通省 水管理・国土保全局

目 次

1.	東北地方太平洋沖地震の概要	1
1. 1	北上川の被災状況	1
1. 2	鳴瀬川の被災状況	4
1. 3	名取川の被災状況	7
1. 4	阿武隈川の被災状況	10
2.	津波・高潮対策の考え方	13
3.	河口地点の堤防高	14
3. 1	地域海岸の堤防高の設定	14
3. 2	河口地点の施設画面上の津波水位の設定等	18
4.	河口部における縦断形の検討	23

1. 東北地方太平洋沖地震の概要

平成23年3月11日14時46分頃に発生した東北地方太平洋沖地震は、我が国の観測史上最大のマグニチュード9.0を記録し、岩手県から千葉県までの8県にわたって震度6弱以上の強い地震動が発生した。東日本の太平洋側では10メートルを超す大津波が襲来し、広範囲にわたる浸水等によって尊い人命が犠牲となった。

1. 1 北上川の被災状況

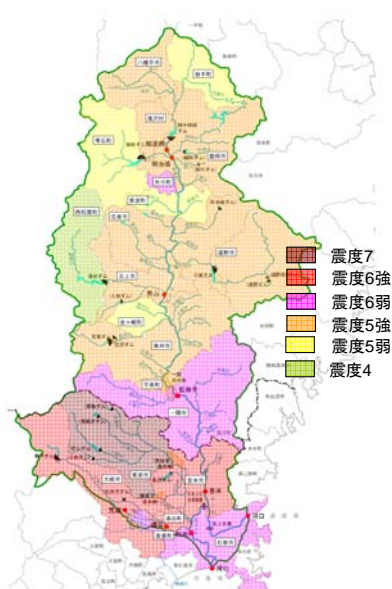
北上川流域においては、宮城県栗原市で震度7、宮城県登米市、涌谷町及び大崎市で震度6強を観測するなど、震度6弱～7を観測し、堤防等河川管理施設に大きな被害を与えた。また、河口部においては津波が何度も襲来するとともに堤防を越流し、広範囲に浸水被害が発生した。

北上川河口部で10m以上、旧北上川河口部で8m以上の津波が到達し、到達した津波は堤防を越えながら河川を遡上し、水位観測所のデータによると、大泉水位観測所（北上川河口から49km）で11cmを観測するなど、その遡上範囲は岩手県境付近にまで及んでいる。

東北地方太平洋沖地震により広域的な地盤沈下が生じており、最大で114cm（電子基準点：牡鹿）の沈下が確認されている。北上川、旧北上川の河口部においても、概ね60cm以上の地盤沈下が生じており、旧北上川河口部周辺では高潮時の浸水被害や大雨、洪水時の内水被害も発生している。

北上川水系における直轄河川管理施設の地震及び津波による被災箇所数は646箇所（うち北上川362箇所、旧北上川153箇所、江合川131箇所）に上る。北上川河口部付近においては、津波による堤防決壊や、水門等の施設被害も多数発生した。また、地震による堤体下部の液状化等により、江合川をはじめとする多くの堤防が被災した。

被災箇所のうち、特に被災規模の大きかった23箇所について緊急復旧工事を実施し、平成23年6月中にはすべての箇所を完了している。



震度	市町村名
7	栗原市
6強	登米市、大崎市、涌谷町
6弱	石巻市、美里町、一関市、矢巾町、滝沢村、藤沢町、花巻市、奥州市
5強	盛岡市、北上市、遠野市、平泉町、八幡平市
5弱	金ヶ崎町、紫波町、岩手町、雫石町
4	西和賀町

気象庁発表

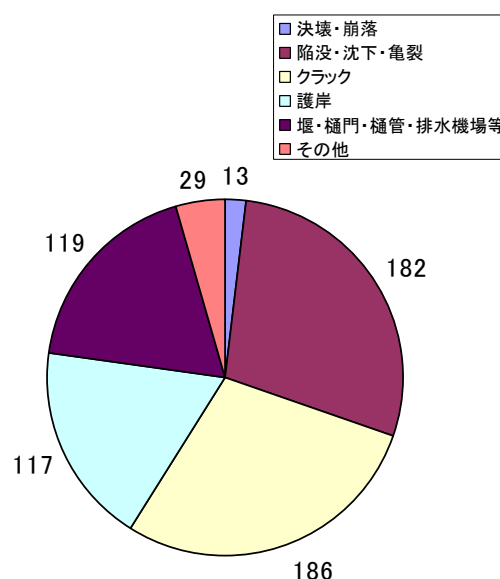


図1-2 河川施設の被災状況（北上川）

図1-1 各市町村の震度（北上川）



北上川右岸 4.0k 付近
(石巻市針岡地先)
※津波により堤防が流出



北上川右岸-0.2k 付近
(石巻市月浜地先)
※津波により堤防が流出



江合川左岸 27.6k 付近
(大崎市古川湊尻地先)
※地震により縦断クラック発生



江合川右岸 26.6k 付近
(大崎市古川福沼地先)
※地震により縦断クラック発生

図 1-3 主な堤防の被災状況 (北上川)

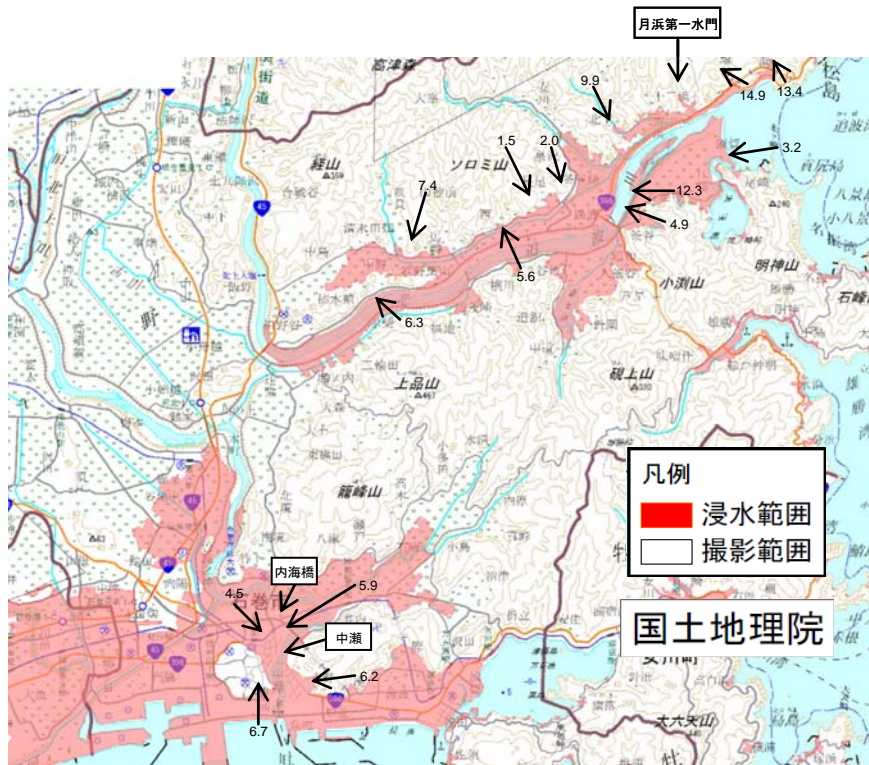


図 1-4 津波による浸水範囲 (北上川)



図 1-5 被災前後の比較（北上川河口部）



図 1-6 被災前後の比較（旧北上川河口部）



図 1-7 津波の観測データ（北上川）

1. 2 鳴瀬川の被災状況

鳴瀬川流域においては、宮城県大崎市で震度6強を観測するなど、震度5弱～6強を観測し、堤防等河川管理施設に大きな被害を与えた。また、河口部においては津波が何度も襲来するとともに堤防を越流し、広範囲に浸水被害が発生した。

鳴瀬川河口部で8m以上の津波が到達し、到達した津波は堤防を越えながら河川を遡上し、水位観測所のデータによると、鳴瀬川の河口から約17kmの竹谷水位観測所においても4cmの水位変動が確認されている。

鳴瀬川水系における直轄河川管理施設の地震及び津波による被災箇所数は364箇所（うち鳴瀬川173箇所、吉田川191箇所）に上る。鳴瀬川河口部付近においては、津波による堤防決壊や、水門等の施設被害も発生した。また、地震による堤体下部の液状化等により、多くの堤防が被災した。

被災箇所のうち、特に被災規模の大きかった9箇所について緊急復旧工事を実施し、平成23年6月中にはすべての箇所を完了している。

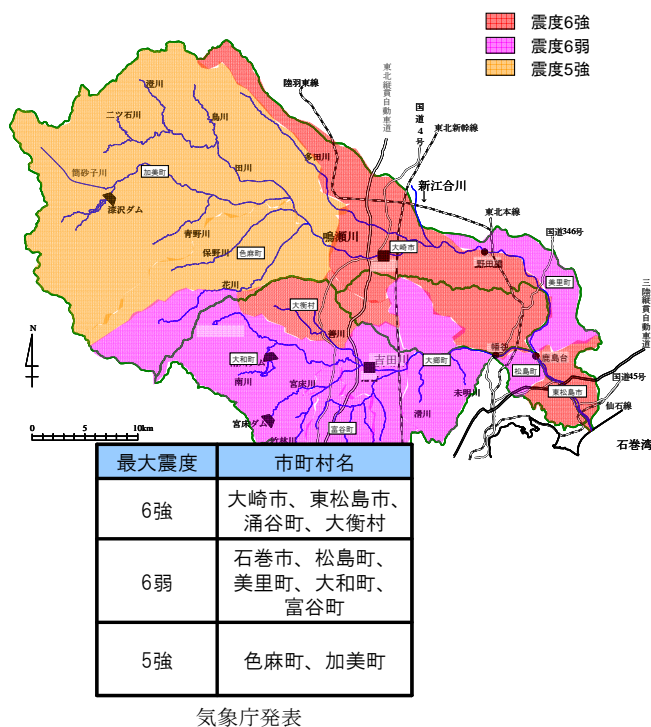


図1-8 各市町村の震度
(鳴瀬川)

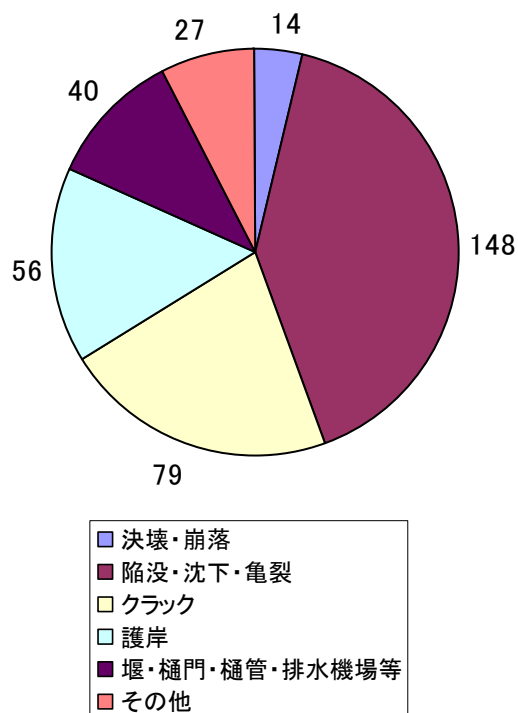


図1-9 河川施設の被災状況
(鳴瀬川)



鳴瀬川右岸 0.0k 付近
 (東松島市野蒜地先)
 ※津波により堤防が流出



鳴瀬川左岸 11.4k 付近
 (美里町二郷地先)
 ※地震により縦断クラック発生



鳴瀬川左岸 30.3k 付近
 (大崎市古川下中ノ目地先)
 ※地震により縦断クラック発生



吉田川左岸 14.7k 付近
 (大崎市鹿島台大迫地先)
 ※地震により縦断クラック発生

図 1-10 主な堤防の被災状況 (鳴瀬川)



図 1-11 津波による浸水範囲 (鳴瀬川)



図 1-12 被災前後の比較（鳴瀬川河口部）

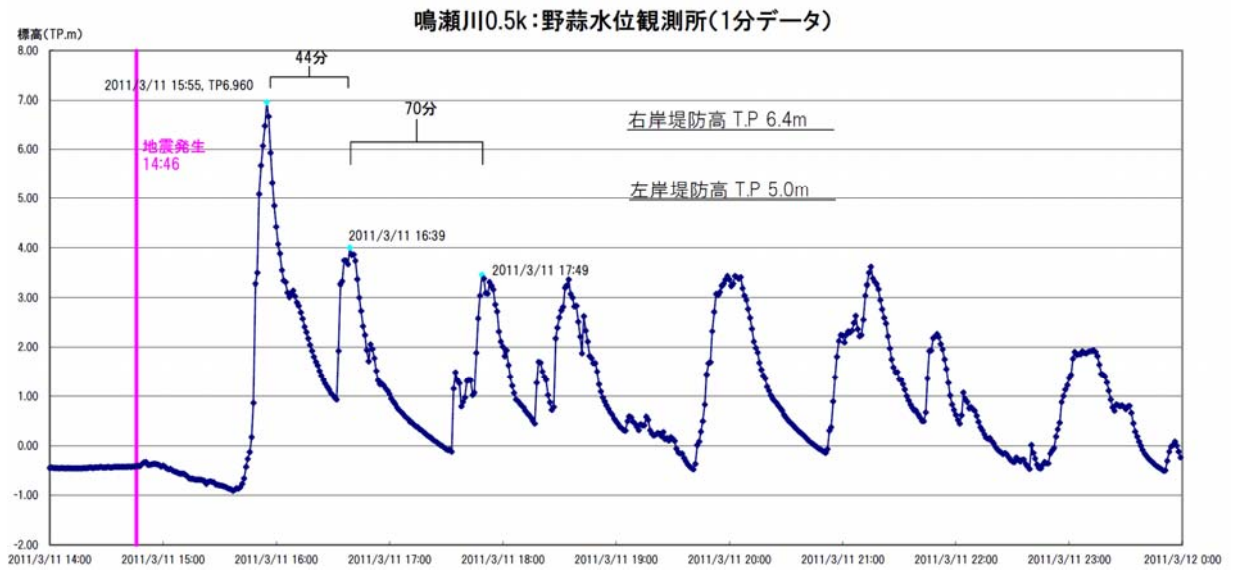


図 1-13 津波の観測データ（鳴瀬川）

1. 3 名取川の被災状況

名取川流域においては、宮城県名取市で震度6強を観測するなど、震度5強～6強を観測し、堤防等河川管理施設に大きな被害を与えた。また、河口部においては津波が何度も襲来するとともに堤防を越流し、広範囲に浸水被害が発生した。

名取川河口部で8m以上の津波が到達し、到達した津波は堤防を越えながら河川を遡上し、痕跡水位の調査結果によると、名取川の閑上大橋付近（名取川河口から0.8km）でT.P.+6.63m、また広瀬川の千代大橋付近（名取川合流点から1.9km）でT.P.+5.20mを観測するなど、その遡上範囲は、仙台市の中心市街地付近まで及んでいる。

東北地方太平洋沖地震により広域的な地盤沈下が生じており、最大で114cm（電子基準点：牡鹿）の沈下が確認されている。名取川の河口部においても、概ね20cm以上の地盤沈下が生じており、高潮時の浸水被害や大雨、洪水時の内水被害も発生している。

名取川水系における直轄河川管理施設の地震及び津波による被災箇所数は35箇所になる。名取川河口部付近においては、津波による堤防決壊や、水門等の施設被害も多数発生した。

被災箇所のうち、軽微な被災である14箇所はシート張り等の応急復旧を行い、その他11箇所で補修を完了させた。

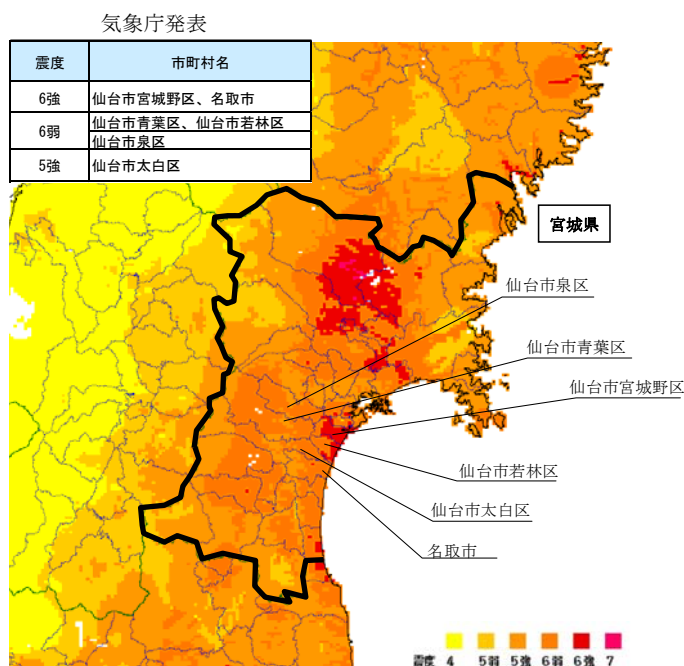
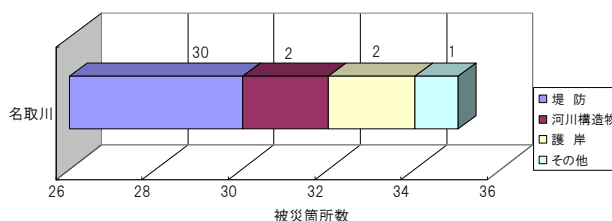


図1-14 各市町村の震度
(名取川)



河川	損傷区分				合計
	堤防	河川構造物	護岸	その他	
名取川	30	2	2	1	35

図1-15 河川施設の被災状況
(名取川)



名取川左岸 0.0k 付近
 (仙台市若林区藤塚地先)
 ※津波により堤防が流出



名取川右岸 0.2k 付近
 (名取市関上地先)
 ※津波により堤内地侵食

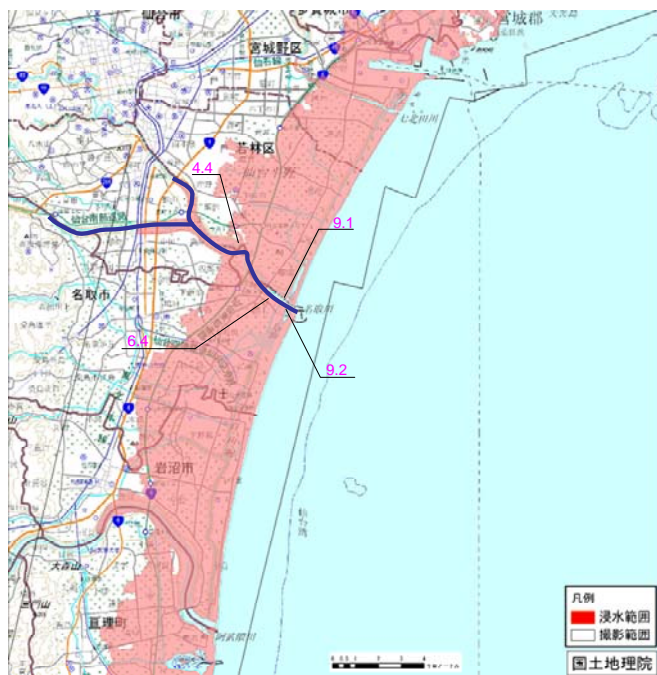


名取川左岸 0.3k 付近
 (仙台市若林区日辺地先)
 ※津波により堤防法面侵食



名取川左岸 2.9k 付近
 (仙台市若林区今泉地先)
 ※地震により横断クラック発生

図 1-16 主な堤防の被災状況 (名取川)



出典：国土地理院 HP

※図中の数字は津波痕跡水位 (T.P.m) まちづくりサポートマップより

図 1-17 津波による浸水範囲 (名取川)

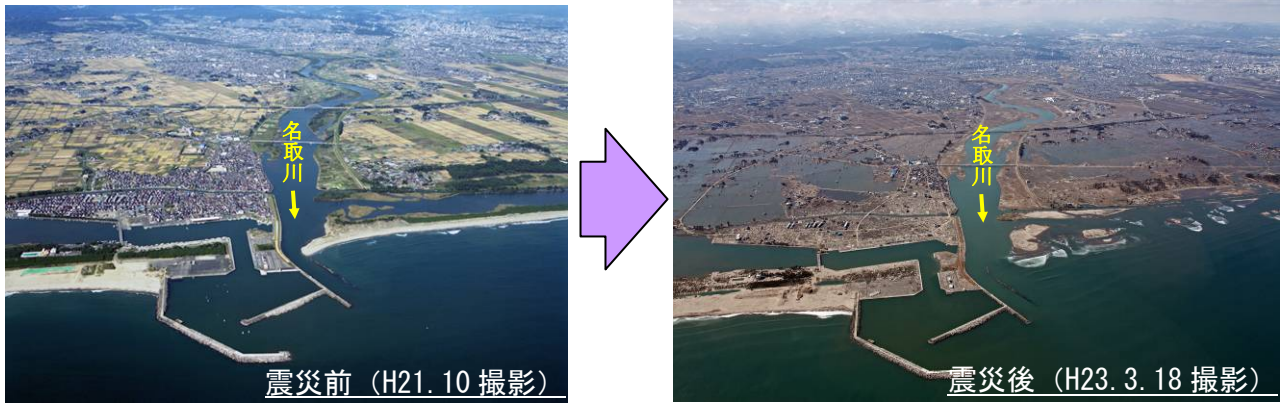


図 1-18 被災前後の比較（名取川河口部）

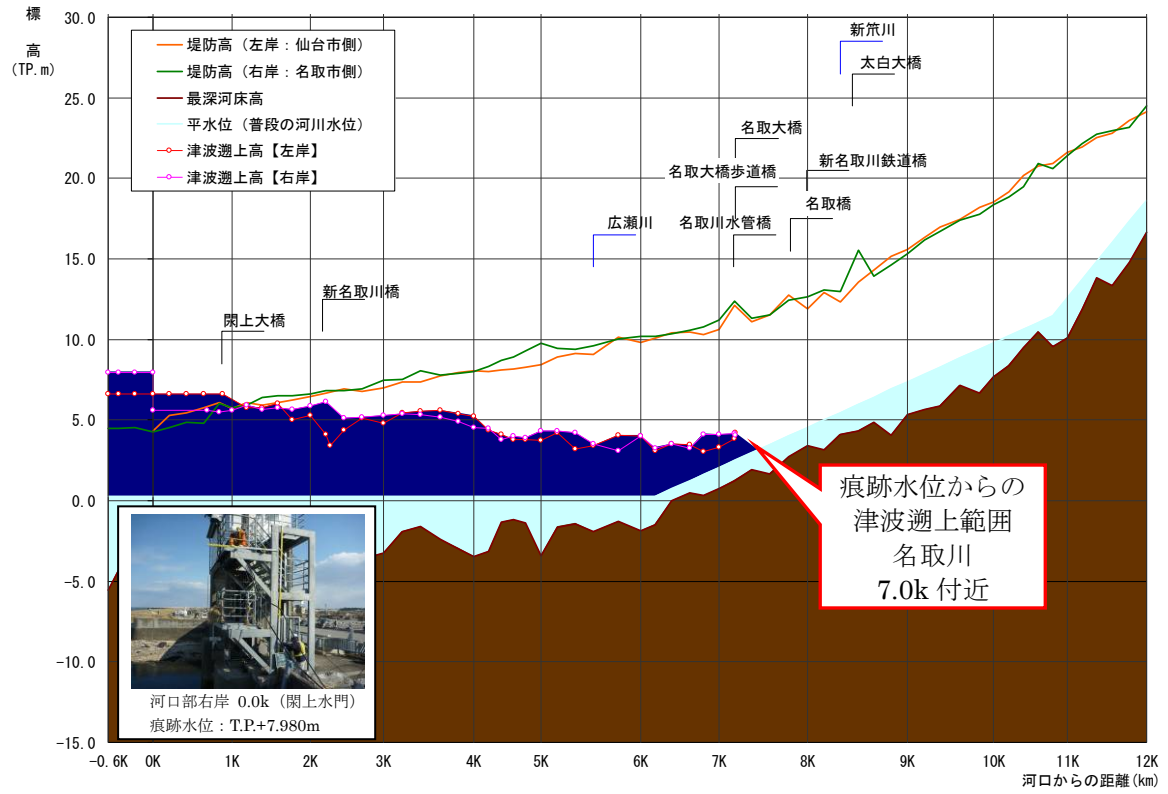


図 1-19 津波の痕跡水位（名取川）

1. 4 阿武隈川の被災状況

阿武隈川流域においては、宮城県岩沼市、亶理町及び角田市で震度6弱、柴田町、丸森町で5強を観測するなど、震度5強～6弱を観測し、堤防等河川管理施設に大きな被害を与えた。また、河口部においては津波が何度も襲来するとともに堤防を越流し、広範囲に浸水被害が発生した。

阿武隈川では、河口部で10m程度の津波が到達し、到達した津波は堤防を越えながら河川を遡上し、阿武隈大堰（阿武隈川河口から10km）付近まで到達している。

阿武隈川における直轄河川管理施設の地震及び津波による被災箇所数は137箇所（うち宮城県区間58箇所、福島県区間79箇所）に上る。阿武隈川河口部付近においては、津波による堤防決壊や、水門等の施設被害も多数発生した。また、地震による堤体下部の液状化等により、多くの堤防が被災した。

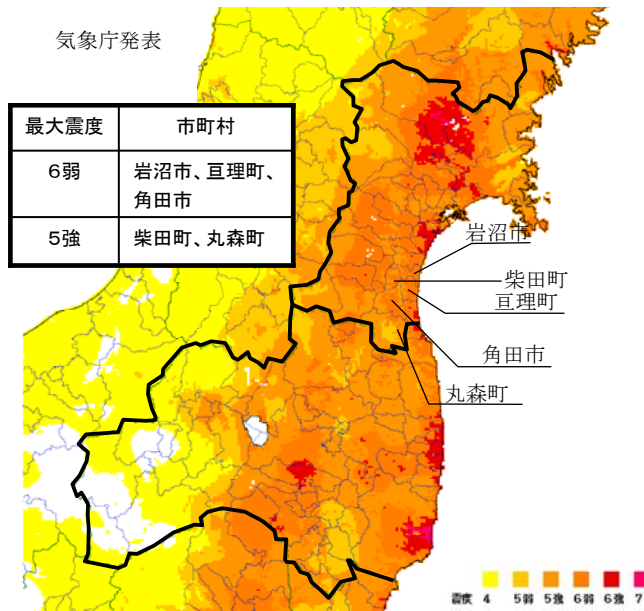
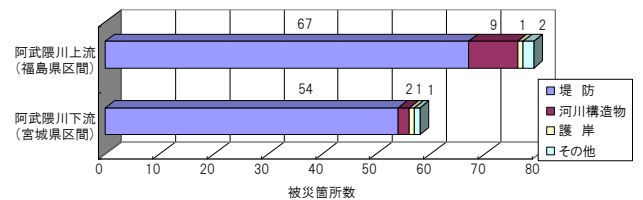


図 1-20 各市町村の震度
(阿武隈川)



河川	損傷区分				合計
	堤防	河川構造物	護岸	その他	
阿武隈川下流(宮城県区間)	54	2	1	1	58
阿武隈川上流(福島県区間)	67	9	1	2	79

図 1-21 河川施設の被災状況
(阿武隈川)



阿武隈川右岸 22.0k 付近
(角田市坂津田地先)
※地震による堤防沈下



阿武隈川右岸 31.0k 付近
(角田市枝野地先)
※地震による堤防沈下



阿武隈川右岸 33.0k 付近
(丸森町小齊地先)
※地震による堤防亀裂



阿武隈川右岸 61.0k 付近
(東根川地先)
※地震による護岸破壊

図 1-22 主な堤防の被災状況 (阿武隈川)



出典：国土地理院 HP

※図中の数字は津波痕跡水位 (T.P.m) まちづくりサポートマップより

図 1-23 津波による浸水範囲 (阿武隈川)



【被災前 2010年10月2日 仙台河川国道事務所撮影】



【被災後 2011年3月23日 仙台河川国道事務所撮影】

図 1-24 被災前後の比較（阿武隈川河口部）

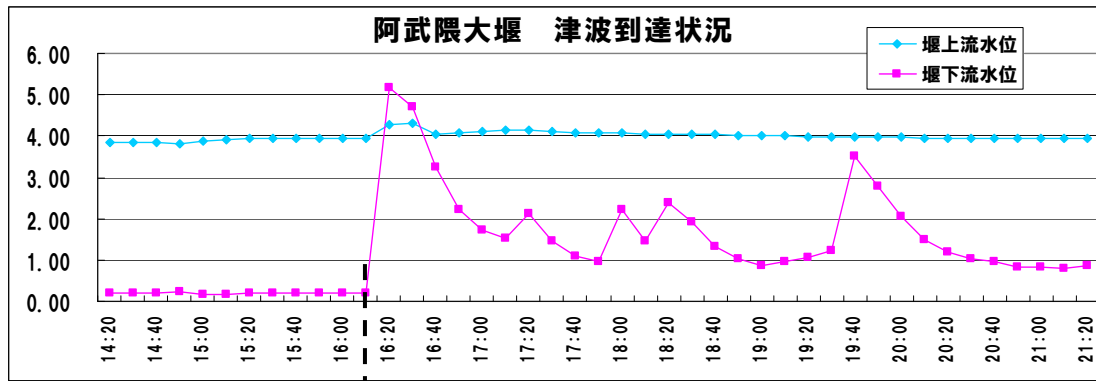


図 1-25 津波の観測データ（阿武隈川）

2. 津波・高潮対策の考え方

東北地方太平洋沖地震では河川を遡上し、又は流下した津波（以下、「河川津波」という。）が河川堤防を越えて沿岸地域に甚大な被害をもたらした。沿岸域における津波防災を考える上で、海岸での防御と一体となった河川津波への対策が重要である。

そのため、河川津波は、洪水、高潮と並んで計画的に防御対策を検討する対象として位置づけ、河川管理においても海岸管理と一体として計画的に津波に対応するものとする。

今後の河川津波対策に当たっては、発生頻度は極めて低いものの、発生すれば甚大な被害をもたらす「最大クラスの津波」は施設対応を超過する事象として扱い、津波防災まちづくり等と一体となって減災を目指す事象と考えていくとともに、最大クラスの津波に比べて発生頻度は高く、津波高は低いものの、大きな被害をもたらす「施設計画上の津波」に対しては、海岸における防御と一体となって河川堤防等により津波災害を防御するものとする。

また、東北地方太平洋沖地震に伴う地殻変動により広域的な地盤沈下が発生するとともに、津波による侵食のため、河口周辺や河川堤防前面の地形が変化していることから、高潮対策についても検討を行う。

なお、現行の堤防へのすりつけを含めた堤防の縦断形は、河道の地形特性、波浪の挙動等を考慮して検討を行い、橋梁等の構造物や堤内地の地形、道路計画等を勘案して検討していく。

(1) 津波対策

施設計画上の津波は、河口が位置する地域海岸（沿岸域を「湾の形状や山付け等の自然条件」等から、同一の津波外力を設定しうると判断される一連の海岸線に分割したもの）の設計津波と同一の津波を用いる。

施設計画上の津波水位は沿岸域から津波遡上区間までを一連の計算として津波シミュレーションにより算定することを基本とし、河口の位置する地域海岸の設計津波の水位を勘案して設定する。

堤防の高さについては、施設計画上の津波水位に必要と認められる高さを加えて設定するものとし、隣接する海岸堤防の高さとの整合等を勘案して設定する。

なお、地形条件については、東北地方太平洋沖地震による広域的な地盤沈下や津波による侵食を反映した地形を基に、あらかじめ地震に伴う地盤の沈下を見込んだ地形を用いる。

(2) 高潮対策

高潮については、海岸堤防計画において設定している外力と同一のものを用いて検討を行う。

高潮対策に必要な堤防高は、計画高潮位に波の打上げ高を加えた高さを基にして設定するものとし、隣接する海岸堤防の高さとの整合を図る。

なお、地形条件については、東北地方太平洋沖地震による広域的な地盤沈下や津波による侵食を反映した地形を用いる。

3. 河口地点の堤防高

河口地点の堤防高は、洪水、高潮、津波（「施設画上的津波」）に対して必要とされる堤防高のうち最も高いものとし、海岸堤防高との整合を図って設定する。

3. 1 地域海岸の堤防高の設定

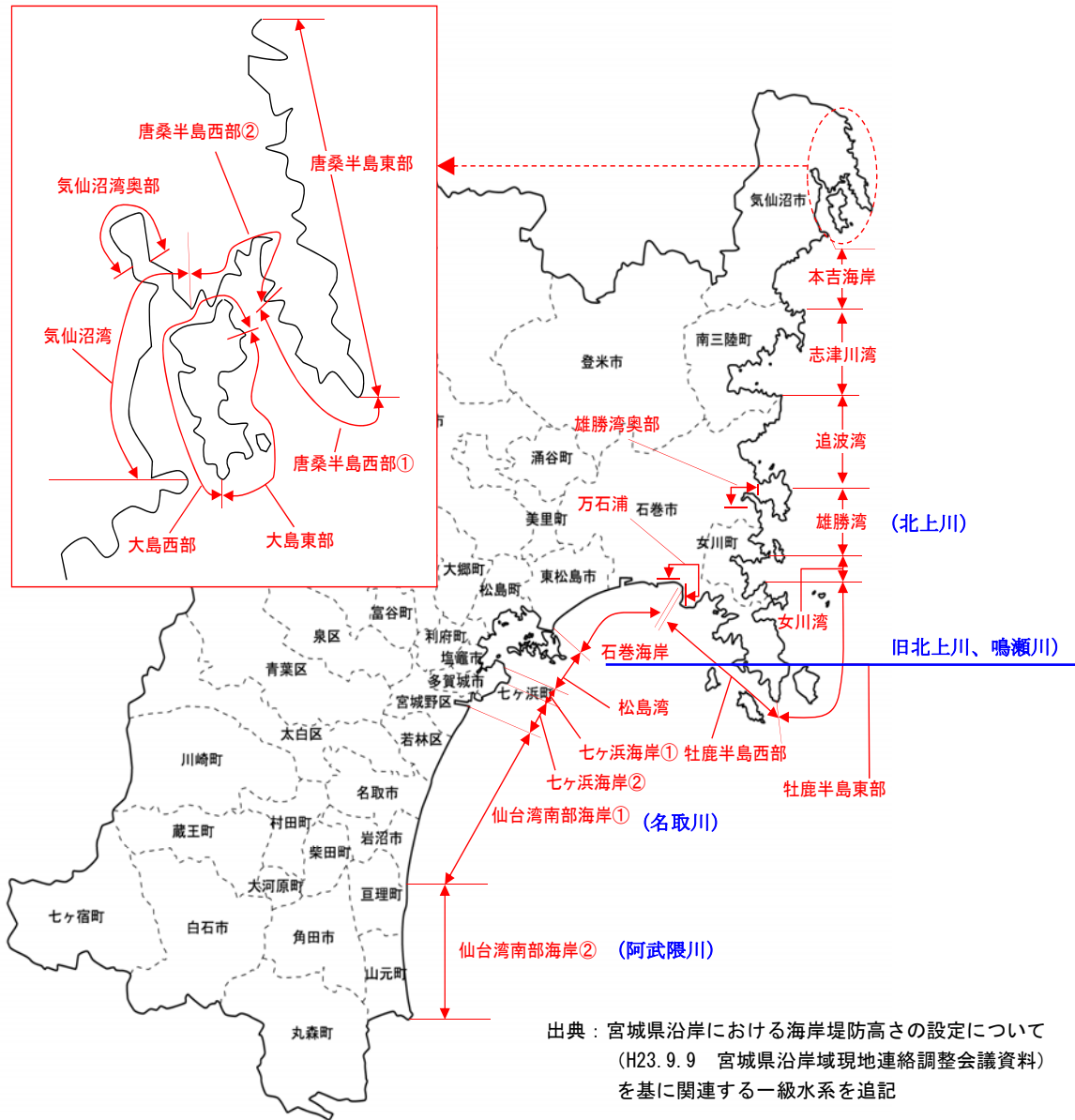
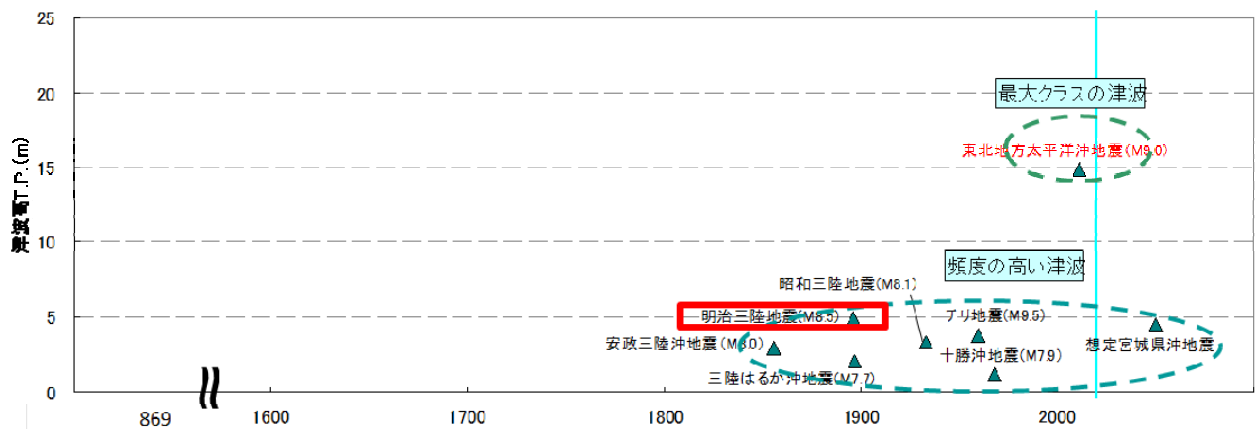


図 3-1 宮城県沿岸の地域海岸分割図

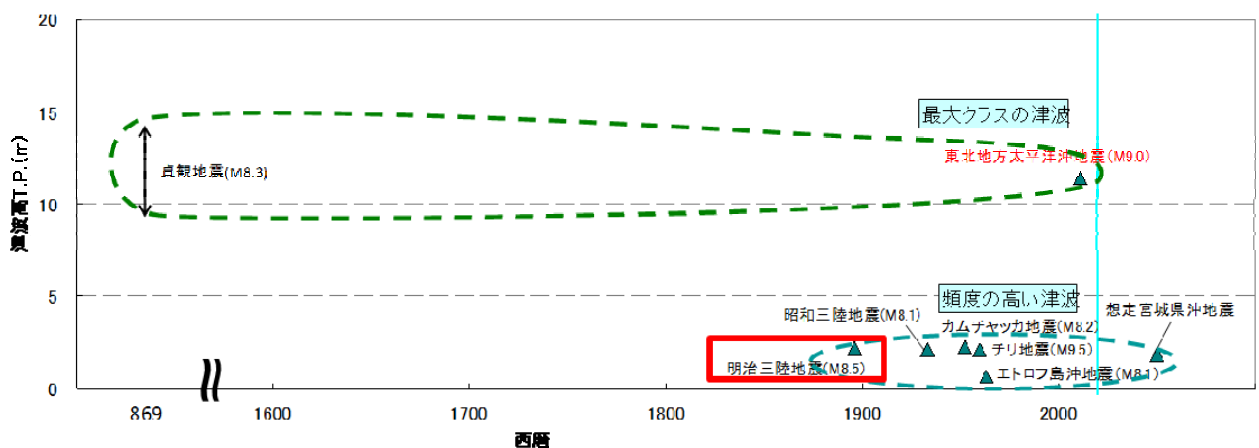
北上川水系等4水系の河口が位置する地域海岸の海岸堤防高については、対象津波群の津波を対象に、海岸堤防によるせり上がりを考慮して算出した設計津波の水位と、設計高潮位に波浪の打上げ高を加えた水位のいずれか高い方を設計水位と設定し、この水位を前提に、海岸の利用や環境、景観、経済性、維持管理の容易性などを総合的に考慮して堤防高を設定することとしている。

その結果、北上川水系等4水系の河口が位置する地域海岸の設計津波は全てにおいて、「明治三陸津波」となり、海岸堤防高の設定案は表3-1のとおりとされている。



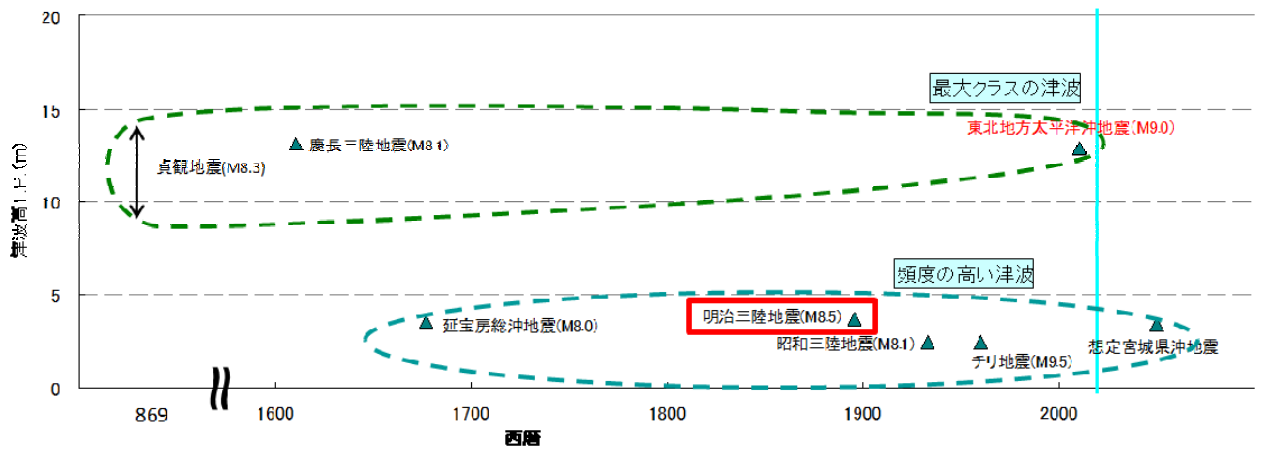
出典：宮城県沿岸における海岸堤防高さの設定について (H23.9.9 宮城県沿岸域現地連絡調整会議資料)

図3-2 設計津波の選定 三陸南沿岸 追波湾（北上川）



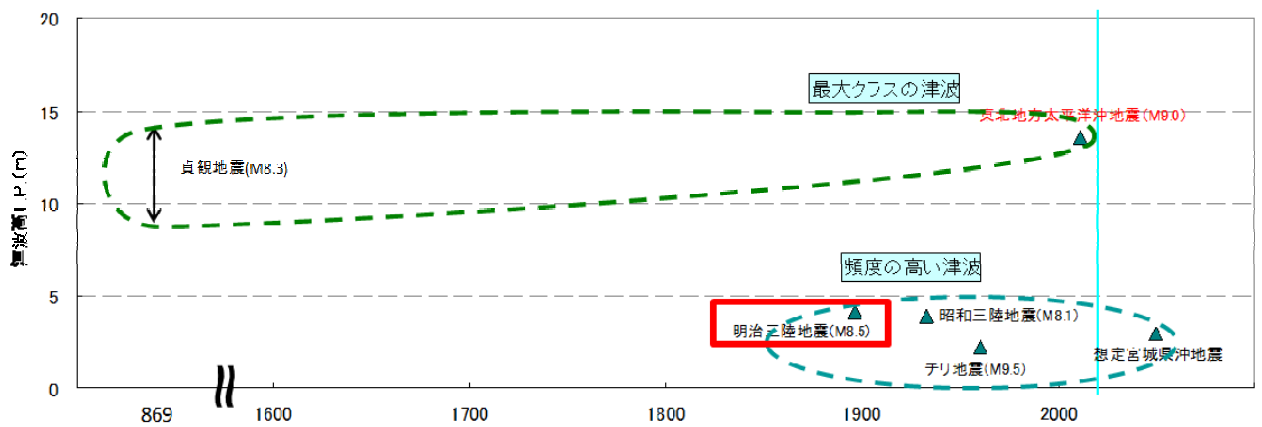
出典：宮城県沿岸における海岸堤防高さの設定について (H23.9.9 宮城県沿岸域現地連絡調整会議資料)

図3-3 設計津波の選定 仙台湾沿岸 石巻海岸（旧北上川、鳴瀬川）



出典：宮城県沿岸における海岸堤防高さの設定について
(H23. 9. 9 宮城県沿岸域現地連絡調整会議資料)

図 3-4 設計津波の選定 仙台湾沿岸 仙台湾南部海岸① (名取川)



出典：宮城県沿岸における海岸堤防高さの設定について
(H23. 9. 9 宮城県沿岸域現地連絡調整会議資料)

図 3-5 設計津波の選定 仙台湾沿岸 仙台湾南部海岸② (阿武隈川)

宮城県沿岸の海岸堤防高の設定(案)

単位:m(T. P.)

地域海岸名 ※1	今次津波 痕跡高	設計津波		設計津波 から求めた 必要堤防高 ※2	津波>高潮 のチェック ※3	新計画堤防高 ※4	被災前 現況堤防高
		対象地震	設計津波の 水位 ※2				
唐桑半島東部	14.4	明治三陸地震	10.3	11.3	○	11.3	4.5~6.1
唐桑半島西部①	24.0	明治三陸地震	10.2	11.2	○	11.2	4.0~4.5
唐桑半島西部②	13.8	明治三陸地震	8.9	9.9	○	9.9	2.5~3.2
気仙沼湾	14.6	明治三陸地震	6.2	7.2	○	7.2	2.8~4.5
気仙沼湾奥部	8.9	明治三陸地震	4.0	5.0	○	5.0	2.8~4.5
大島東部	12.1	明治三陸地震	10.8	11.8	○	11.8	1.8~4.5
大島西部	12.1	明治三陸地震	6.0	7.0	○	7.0	2.5~5.1
本吉海岸	18.8	明治三陸地震	8.8	9.8	○	9.8	2.5~5.5
志津川湾	20.5	想定宮城県沖 地震	7.7	8.7	○	8.7	3.6~5.1
(北上川) 追波湾	14.9	明治三陸地震	7.4	8.4	○	8.4	2.6~4.5
雄勝湾	16.3	明治三陸地震	5.4	6.4	○	6.4	3.1~5.9
雄勝湾奥部	16.3	明治三陸地震	8.7	9.7	○	9.7	4.1~5.9
女川湾	18.0	明治三陸地震	5.6	6.6	○	6.6	3.2~5.8
牡鹿半島東部	20.9	明治三陸地震	5.9	6.9	○	6.9	4.4~5.1
牡鹿半島西部	10.5	チリ地震	5.0	6.0	○	6.0	2.9~4.6
(旧北上川) (鳴瀬川) 万石浦	2.4	チリ地震	1.5	2.5	○	2.6	2.6
石巻海岸	11.4	明治三陸地震	3.4	4.4	高潮にて決定	7.2	4.5~6.2
松島湾	4.8	チリ地震	3.3	4.3	○	4.3	2.1~3.1
七ヶ浜海岸①	8.9	明治三陸地震	4.4	5.4	○	5.4	3.1~5.0
七ヶ浜海岸②	11.6	明治三陸地震	5.8	6.8	○	6.8	5.0~6.2
(名取川) 仙台湾南部海岸①	12.9	明治三陸地震	5.3	6.3	高潮にて決定	7.2	5.2~7.2
(阿武隈川) 仙台湾南部海岸②	13.6	明治三陸地震	5.2	6.2	高潮にて決定	7.2	6.2~7.2

※1 地域海岸とは「湾の形状や山付け等の自然条件」、「文献や被災履歴等の過去に発生した津波の実績津波高さ及びシミュレーションの津波高さ」から同一の津波外力を設定しようと判断される一連の海岸線に分割したもの。

※2 一の地域海岸に対しては、一の設計津波の水位を設定することを基本とするが、設計津波の水位が当該地域海岸内の海岸線に沿って著しく異なる場合、地域海岸を分割して複数の設計津波の水位を定めたため、必要堤防高の設定が異なる場合がある。

※3 津波による堤防高設定が高潮による設定よりも大きくなる場合は「○」、小さくなる場合は「高潮にて決定」。

※4 新計画堤防高は、環境保全、周辺景観との調和、経済性、維持管理の容易性、施工性、公衆の利用等を総合的に考慮して、海岸保全基本計画に定めるものである。整備段階における海岸堤防高さは、計画堤防高の範囲内で暫定的な高さとする場合がある。

出典：宮城県沿岸における海岸堤防高さの設定について

(H23.9.9 宮城県沿岸域現地連絡調整会議資料) を基に関連する一級水系を追記

表 3-1 宮城県沿岸の海岸堤防高の設定 (案)

3. 2 河口地点の施設画上的津波水位の設定等

河川整備基本方針に規定する河口地点の水位については、堤防高の決定に際して支配的な要因について、その基準となる水位（洪水：計画高水位、高潮：計画高潮位、津波：施設画上的津波水位）を規定する。

（北上川）

河口が位置する追波湾の堤防高は、津波対策により設定することとされている。北上川河口地点の堤防高は河口が位置する追波湾において設定することとされている堤防高との整合を図り、T.P. +8.4m とすることとし、北上川水系河川整備基本方針において、河口地点における施設画上的津波水位 T.P. +7.4m を規定する。

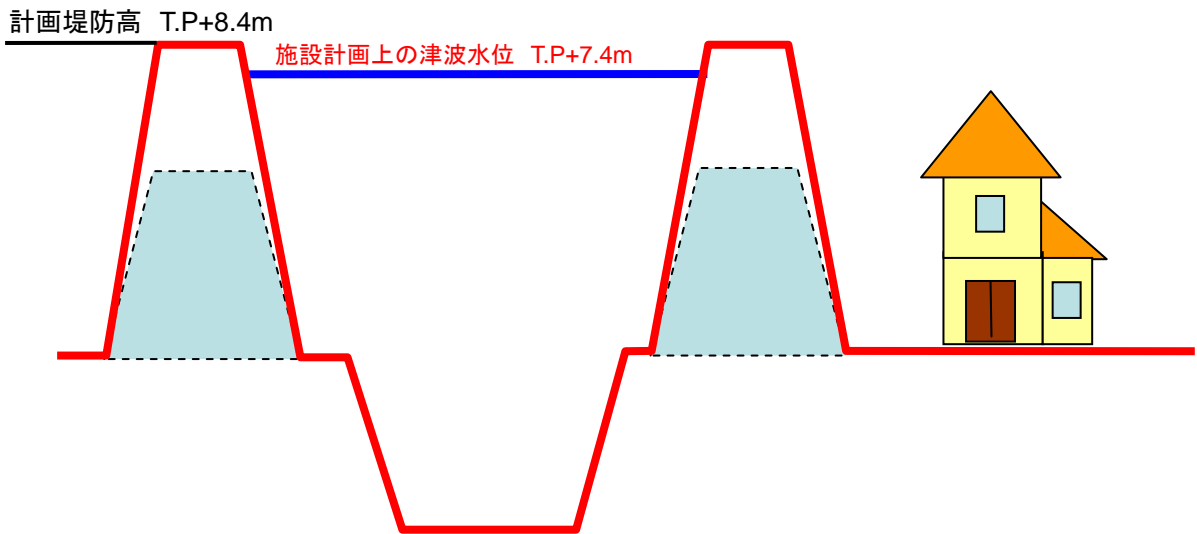


図 3-6 北上川における河口地点の水位の規定

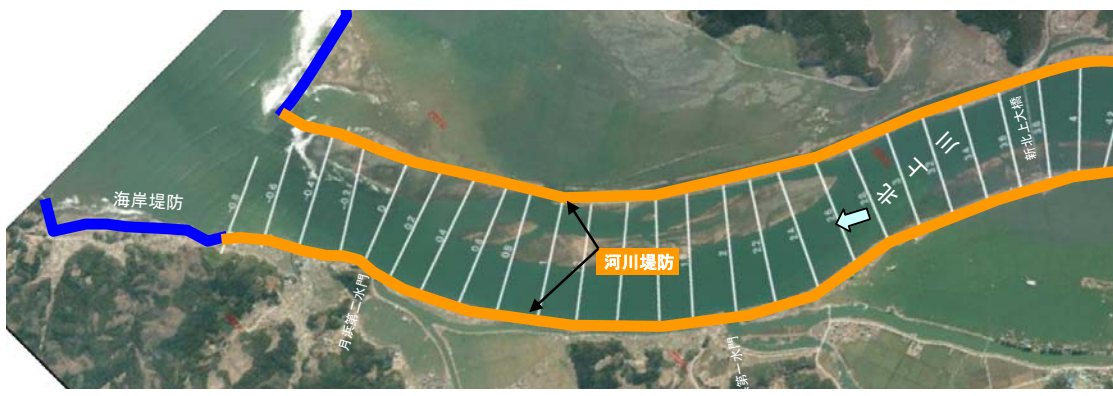


図 3-7 北上川 河口周辺の状況

(旧北上川)

河口が位置する石巻海岸の堤防高は高潮対策により設定することとされている。旧北上川河口地点の堤防高は、河口が位置する石巻海岸において設定することとされている堤防高との整合を図り、T.P.+7.2m とすることとし、北上川水系河川整備基本方針において、河口地点における計画高潮位 T.P.+1.63m を規定する。

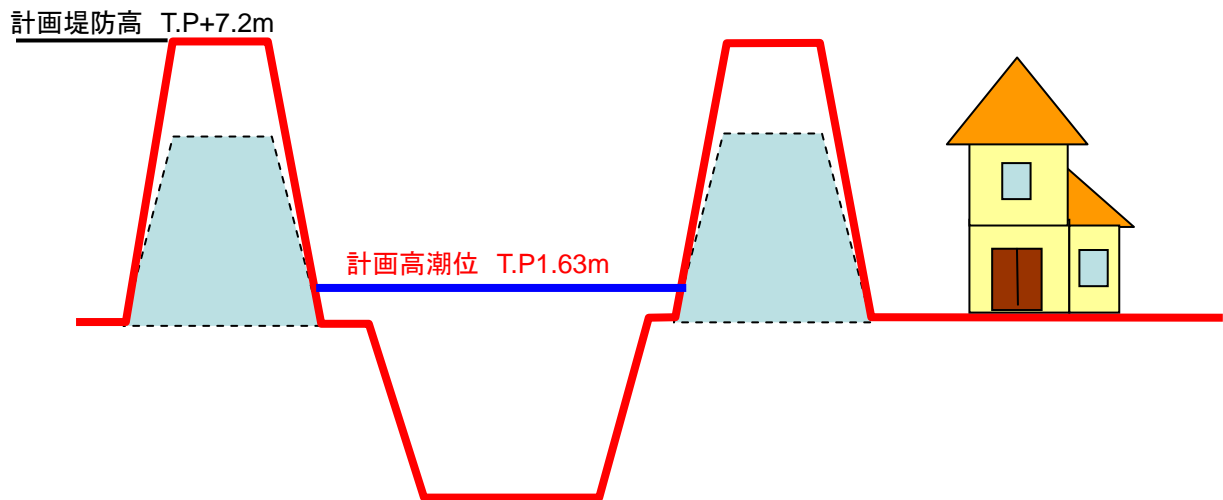


図 3-8 旧北上川における河口地点の水位の規定

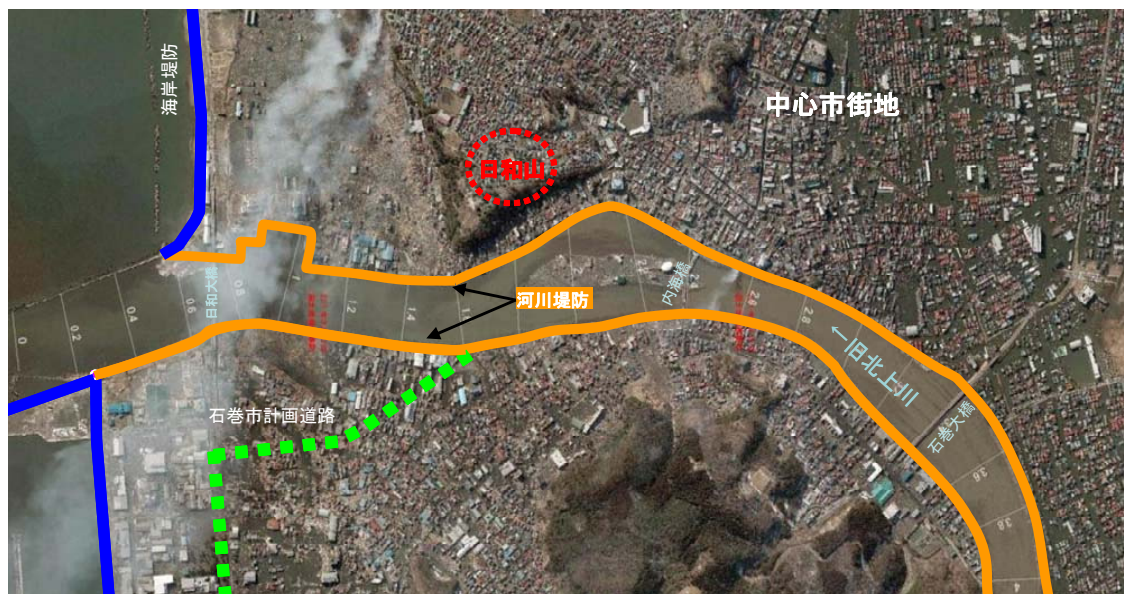


図 3-9 旧北上川 河口周辺の状況

(鳴瀬川)

河口が位置する石巻海岸の堤防高は高潮対策により設定することとされている。鳴瀬川河口地点の堤防高は、河口が位置する石巻海岸において設定することとされている堤防高との整合を図り、T.P.+7.2m とすることとし、鳴瀬川水系河川整備基本方針において、河口地点における計画高潮位 T.P.+1.54m を規定する。

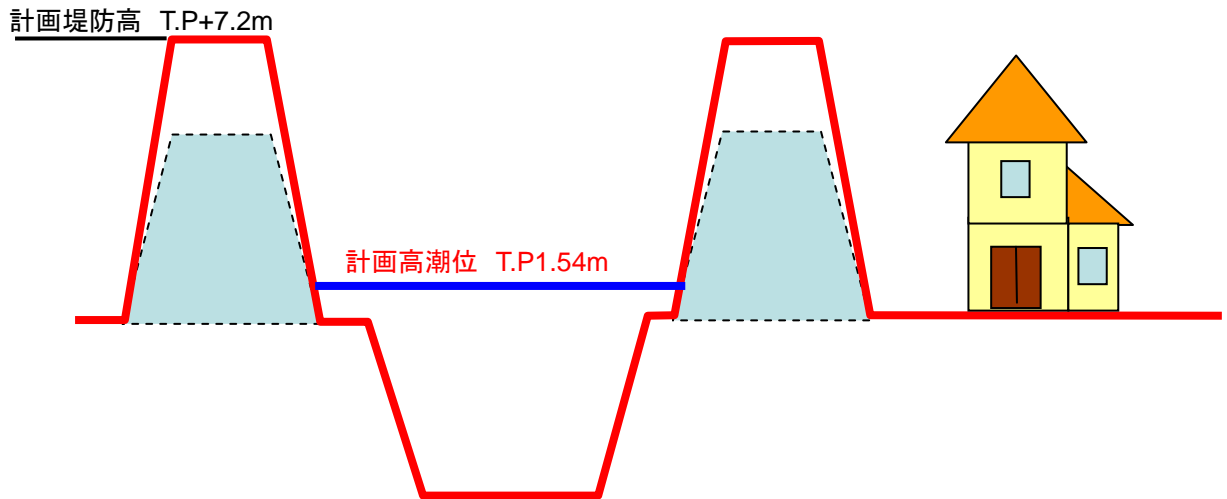


図 3-10 鳴瀬川における河口地点の水位の規定

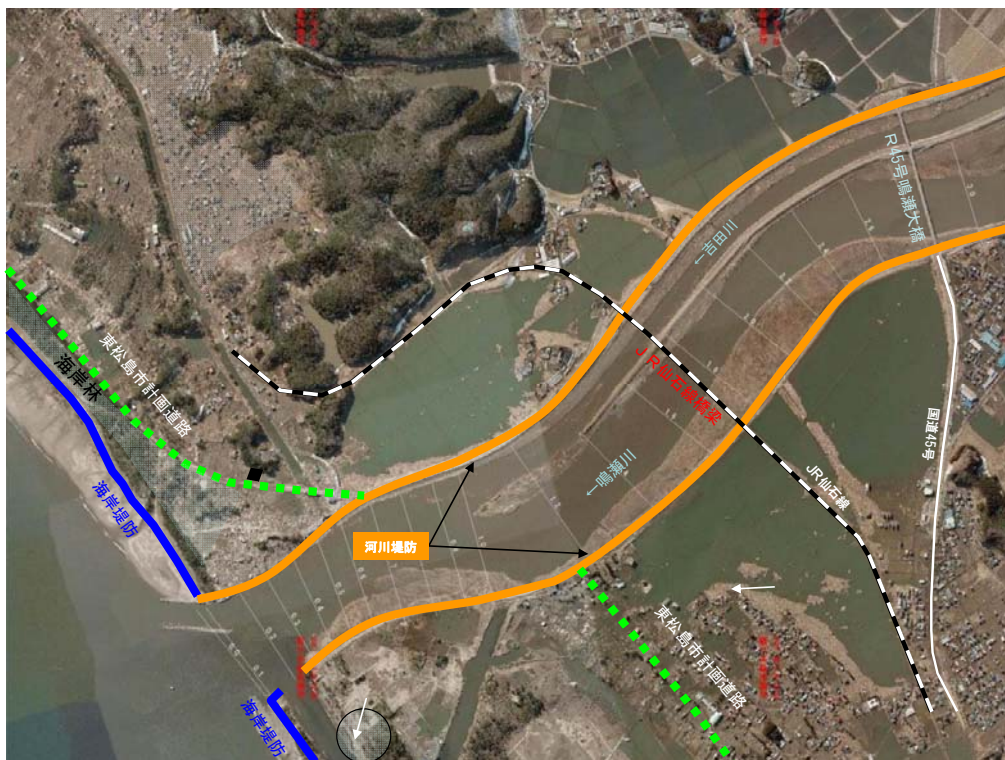


図 3-11 鳴瀬川 河口周辺の状況

(名取川)

河口が位置する仙台湾南部海岸①の堤防高は高潮対策により設定することとされている。名取川河口地点の堤防高は、河口が位置する仙台湾南部海岸①において設定することとされている堤防高との整合を図り、T.P.+7.2m とすることとし、名取川水系河川整備基本方針において、河口地点における計画高潮位 T.P.+1.70m を規定する。

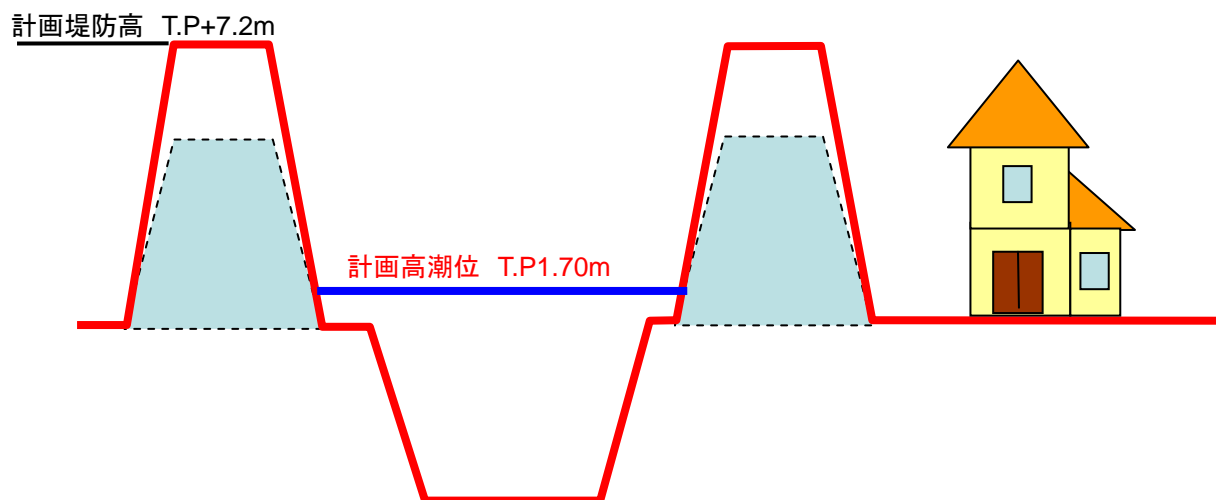


図 3-12 名取川における河口地点の水位の規定



図 3-13 名取川 河口周辺の状況

(阿武隈川)

河口が位置する仙台湾南部海岸②の堤防高は高潮対策により設定することとされている。阿武隈川河口地点の堤防高は、河口が位置する仙台湾南部海岸②において設定することとされている堤防高との整合を図り、T.P. +7.2m とすることとし、阿武隈川水系河川整備基本方針において、河口地点における計画高潮位 T.P. +1.60m を規定する。

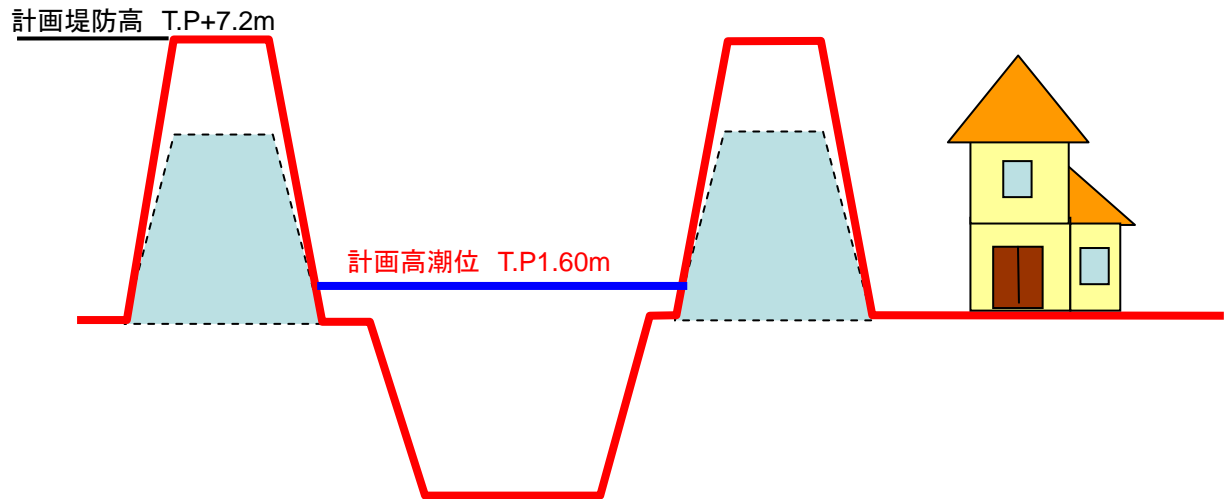


図 3-14 阿武隈川における河口地点の水位の規定



図 3-15 阿武隈川 河口周辺の状況

4. 河口部における縦断形の検討

現行の堤防へのすりつけを含めた堤防の縦断形は、河道の地形特性、波浪の挙動等を考慮して検討を行い、橋梁等の構造物や堤内地の地形、道路計画等を勘案して検討していく。以下に、主な検討手法を示す。

【津波対策】

津波対策に関しては、津波シミュレーションを行い検討する。

(1) 施設画上的津波及び断層モデルの設定

施設画上的津波については、河口が位置する地域海岸において設定されている「明治三陸地震」を対象として断層モデルを設定する。

断層モデルの概要を次ページ以降に示す。

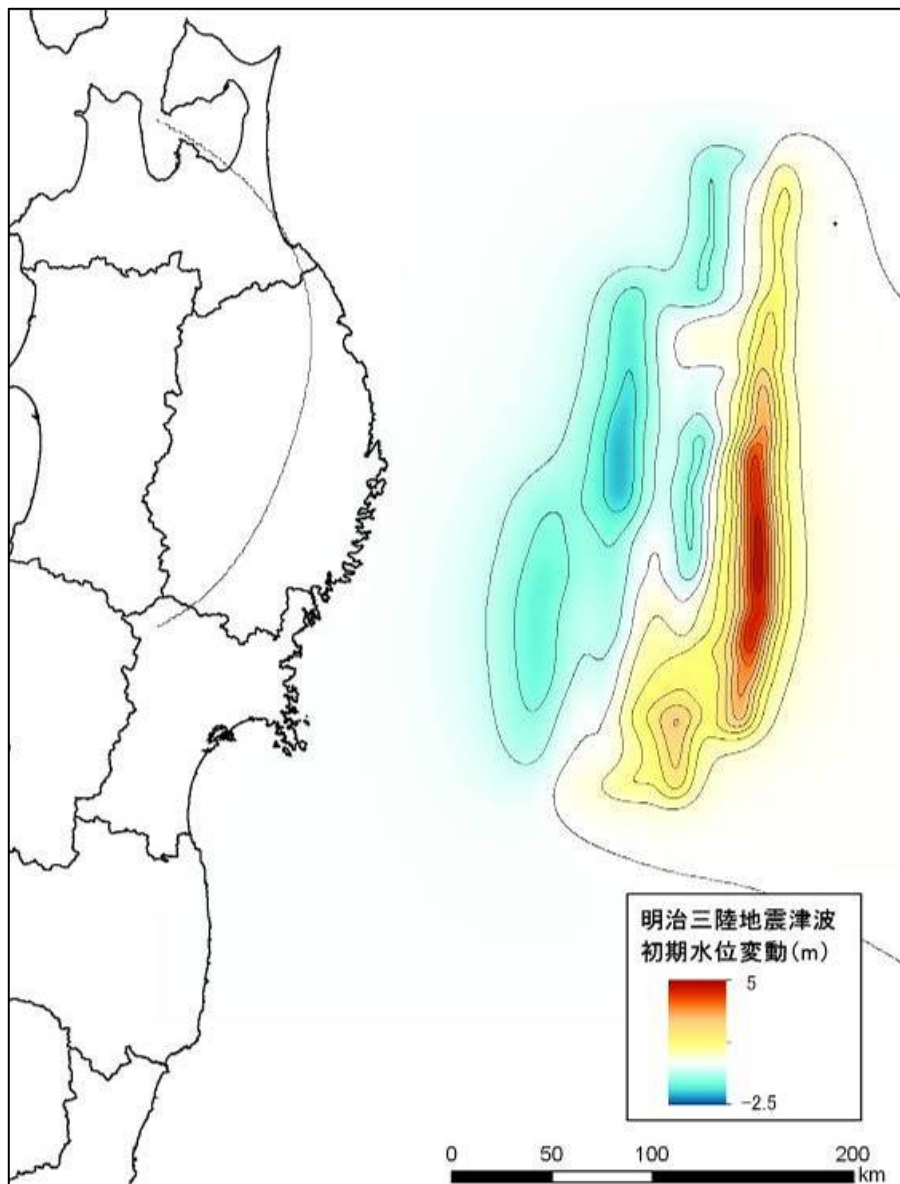


図 4-1 検討対象地震（明治三陸地震）での初期潮位変動量

明治三陸地震（M8.5）は1896年に三陸沖の海溝寄りで発生した地震であり、規模の割に揺れは小さく、巨大な津波が発生した、いわゆる津波地震である。1611年慶長三陸地震は、明治三陸地震の震源域を含んだ領域で発生したものと推定されることから、明治三陸地震の震源域の領域は、このタイプの津波地震が繰り返し発生する領域と考えられる。津波シミュレーションに当たっては、中央防災会議「日本海溝・千島海溝周辺海溝型地震に関する専門調査会」により推定された断層諸元を用いる。

以下に、中央防災会議による推定結果の概要を示す。

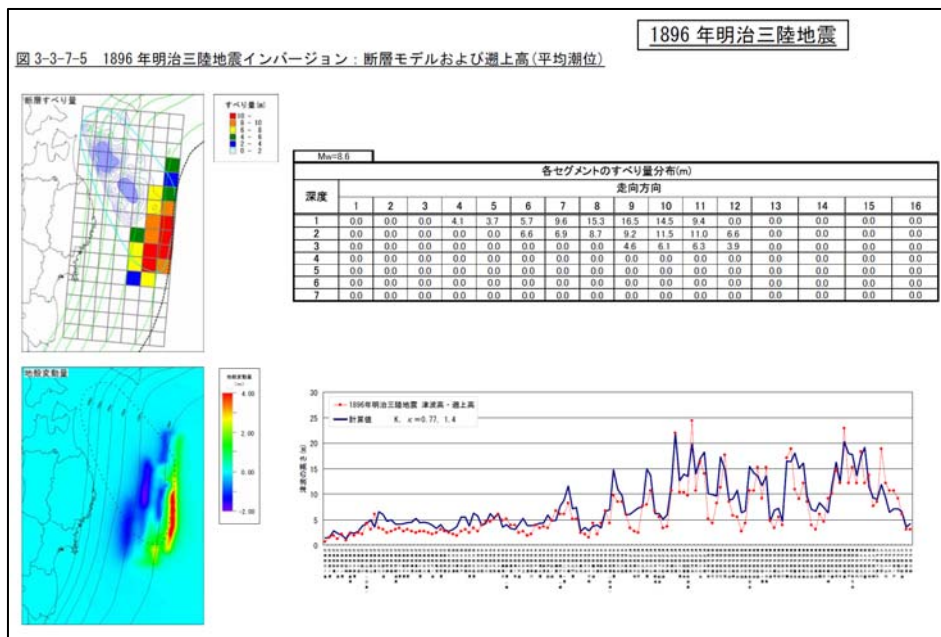
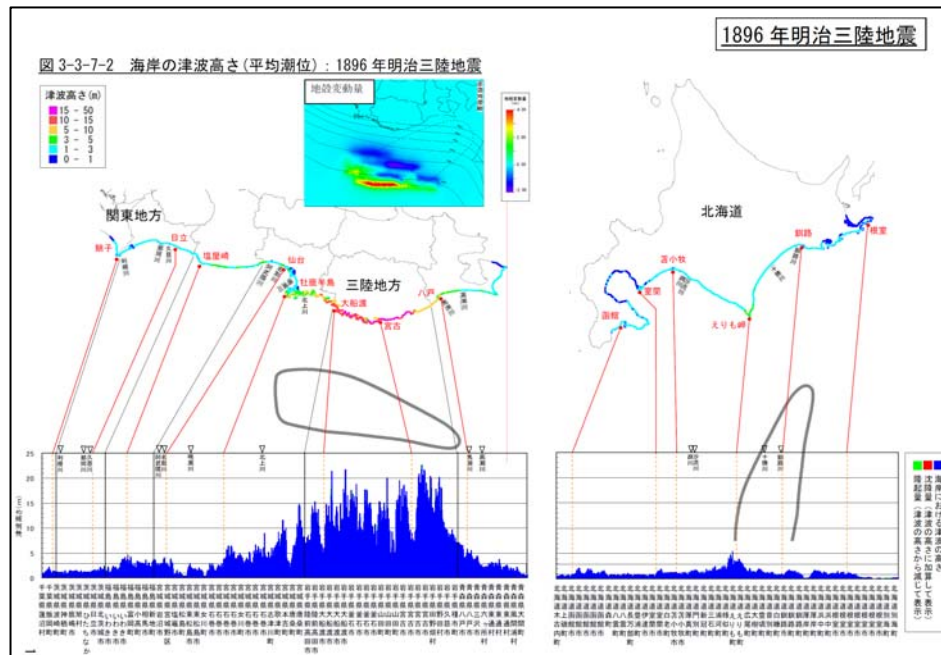


図 4-2：明治三陸地震の断層推定図

出典：日本海溝・千島海溝周辺海溝型地震に関する専門調査会（第10回）
 URL：<http://www.bousai.go.jp/jishin/nihonkaikou/10/index.html>

(2) 地形データの作成

① 海域の地形データ

宮城県沖の海域の地形データについては、「海底地形デジタルデータ M7000 シリーズ (財団法人 日本水路協会海洋情報研究センター)」の「M7005:三陸沖」を用いる。

以下に、同データの整備範囲及び宮城県沖の等深線図を示す。

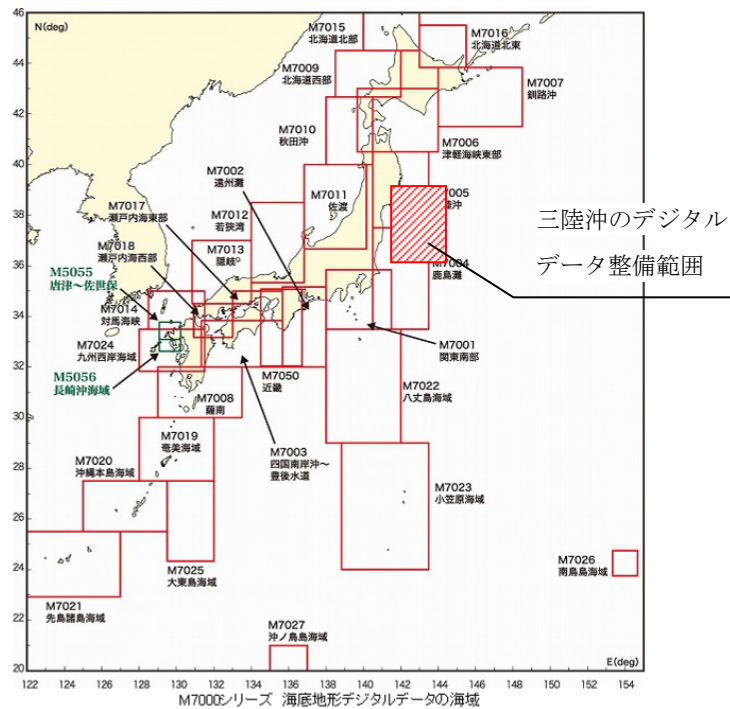


図 4-3 : 海底地形デジタルデータの整備範囲

出典 : 財団法人 日本水路協会ホームページ

URL : <http://www.jha.or.jp/jp/shop/products/btdd/index.html>

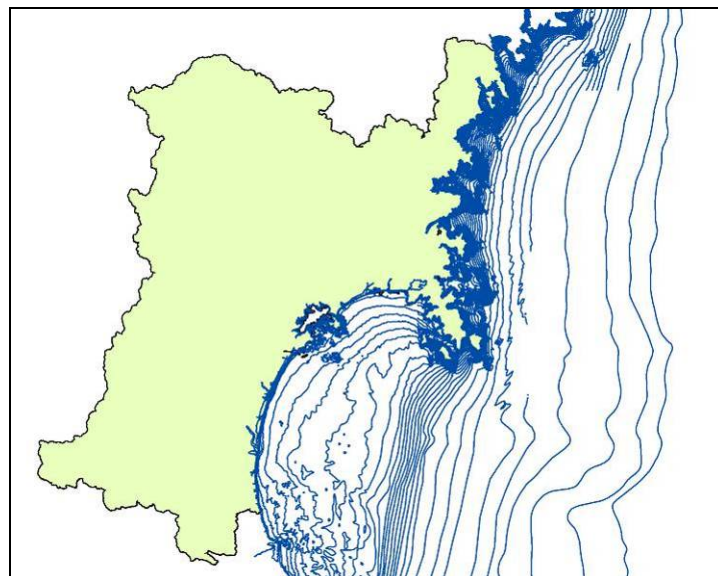


図 4-4 : 海底地形デジタルデータによる宮城県沖の等深線図 (水深 5m 間隔で出力)

②陸域の地形データ

陸域の地形データについては、東北地方太平洋沖地震発生後に国土地理院が作成した5mメッシュレーザー測量データをフィルタリング処理（建物等）したものをを用いる。

③計算領域の設定

波源域を含む東北地方太平洋側の広域を450mメッシュで表現し、陸域に近づくにつれて順次メッシュサイズを小さくするように設定する。

表 4-1：メッシュサイズ及び計算時間間隔（北上川の例）

	メッシュサイズ	メッシュ分割数	計算時間間隔	備考
第1領域	450m×450m	縦1609×横1051	0.90 sec	波源域
第2領域	150m×150m	縦808×横508	0.30 sec	
第3領域	50m×50m	縦1348×横845	0.10 sec	
第4領域	10m×10m	縦901×横1576	0.10 sec	陸域・河川域

表 4-2：メッシュ座標（北上川の例）

	第1領域		第2領域		第3領域		第4領域-北上川	
	経度	緯度	経度	緯度	経度	緯度	経度	緯度
左上	140.100	41.320	141.237	39.227	141.277	38.805	141.291	38.587
右上	145.700	41.220	143.164	39.204	141.763	38.802	141.472	38.586
左下	140.200	34.800	141.231	38.136	141.274	38.198	141.291	38.506
右下	145.300	34.720	143.129	38.114	141.756	38.195	141.471	38.505

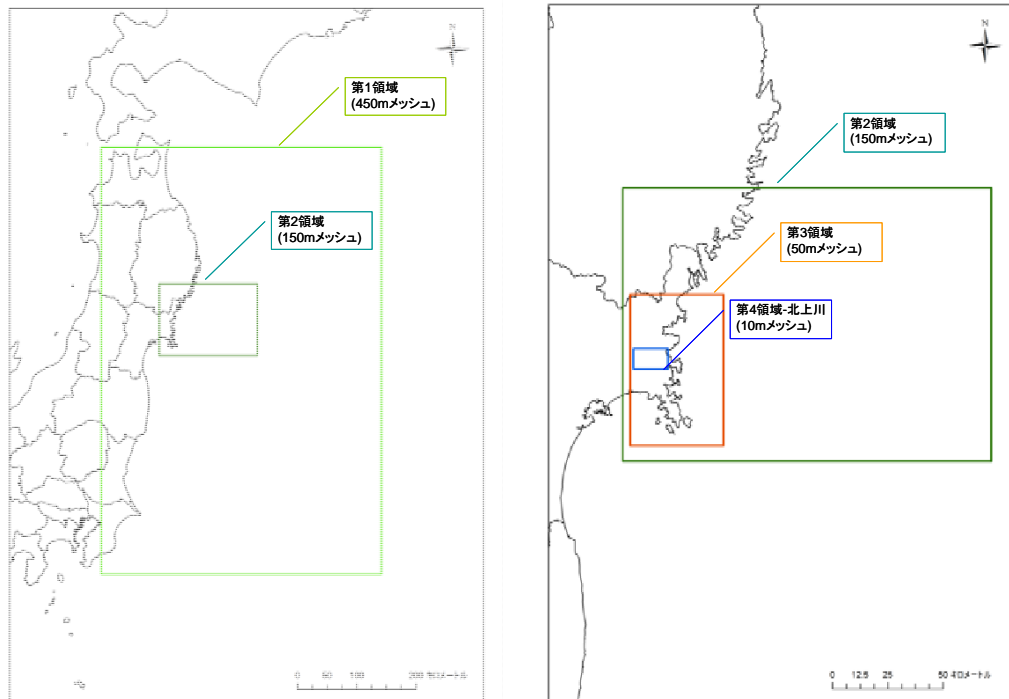


図 4-5：メッシュ接続位置図（北上川の例）

④河川域の地形データ

河川遡上を検討する第4領域（10m メッシュ）については、平成 23 年度測量の河道（以下、「河道（ケース 1）」という。）の断面データ、現行の河川整備基本方針に対応する河道（以下、「河道（ケース 2）」という。）の断面データにより河道内の地盤高を作成する。

表 4-3：地形設定条件（北上川の例）

河道地形条件	<ul style="list-style-type: none"> L 1 地震後推定河床高 ・河道（ケース 1）、河道（ケース 2） ※ L 1 地震時の推定地盤沈下量を考慮 ・推定地盤高変位量は、断層モデルのパラメータを入力値として、Mansinha & Smilye(1972)の手法により算定
粗度係数	小谷ら（1998）の方法に従い、土地利用に応じて設定
海岸堤防条件	<ul style="list-style-type: none"> ・平面配置：現位置に設定 ・堤防天端高 →T. P. +8. 4m ・破堤：なし
河川堤防条件	<ul style="list-style-type: none"> ・平面配置：現位置に設定 ・堤防天端高：無限大 ・破堤：なし

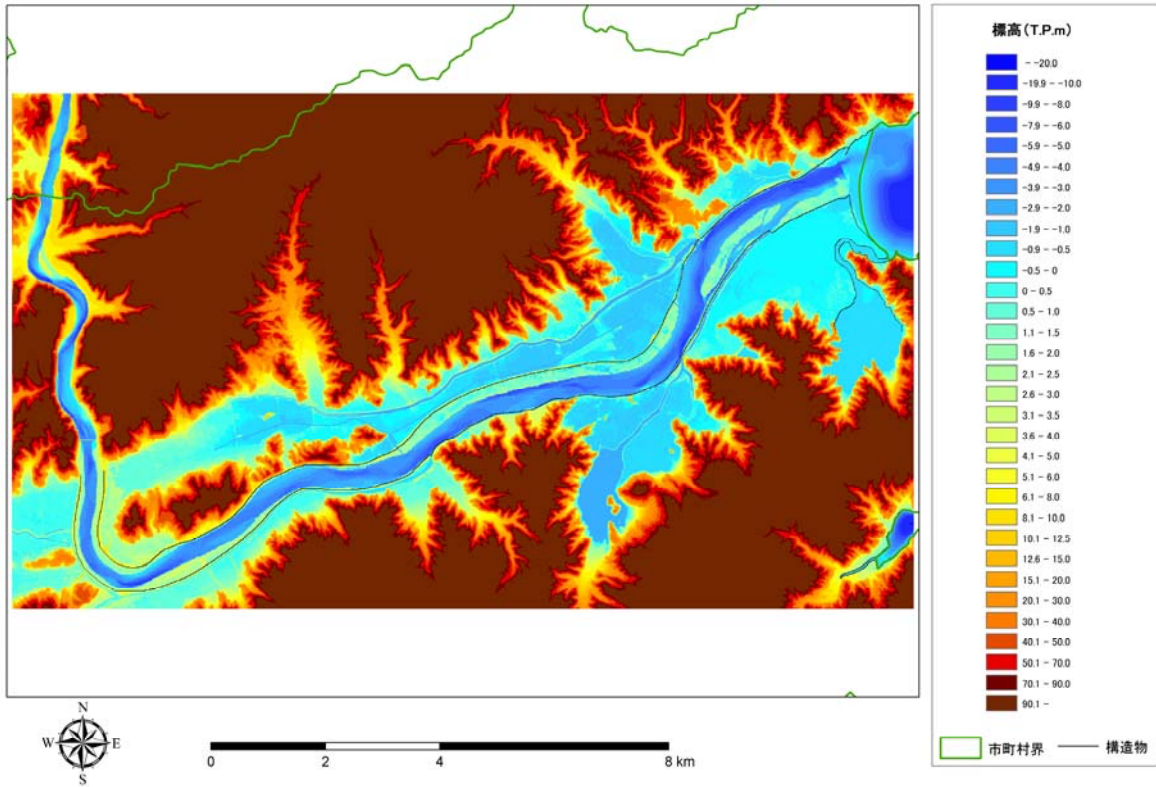


図 4-6 : 地盤高コンター図 (10m メッシュ : 河道 (ケース 1))
(北上川の例)

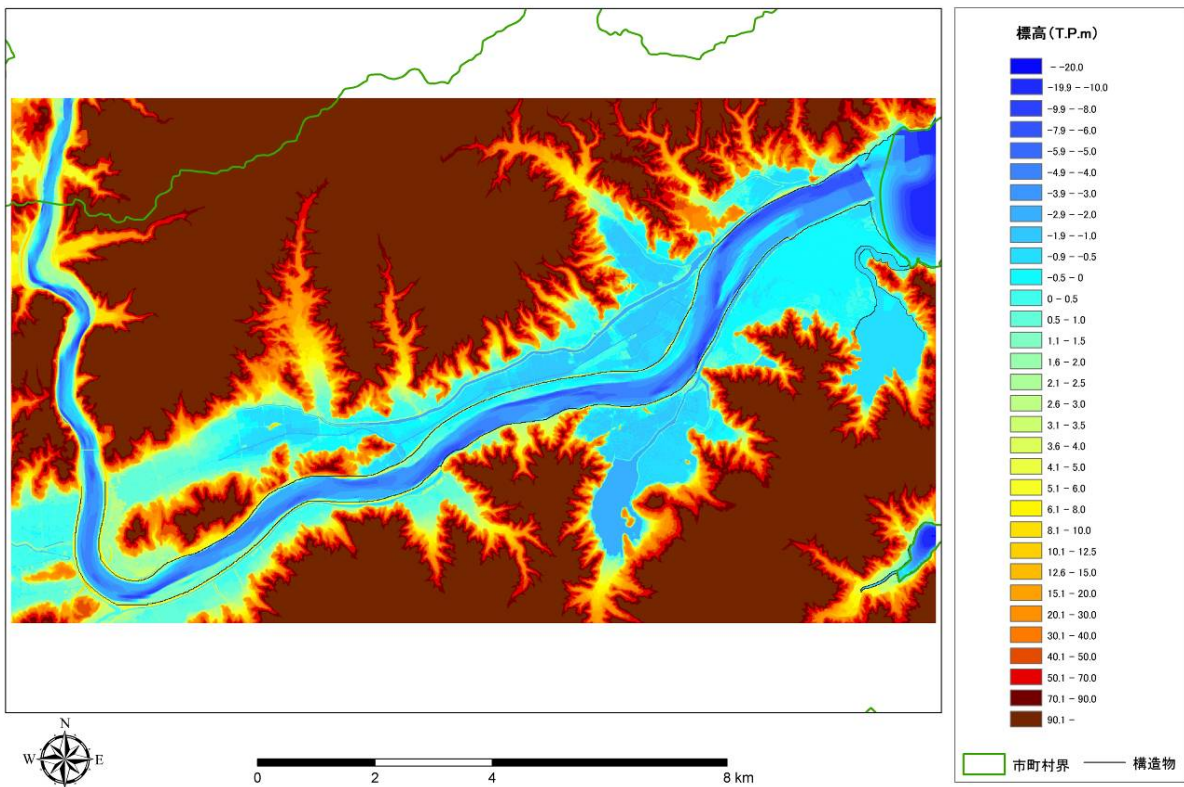


図 4-7 : 地盤高コンター図 (10m メッシュ : 河道 (ケース 2))
(北上川の例)

(3) 初期条件の設定

①初期水位

初期水位は、断層モデルによって計算される海底面の鉛直変位分布を海面に与えて設定する。

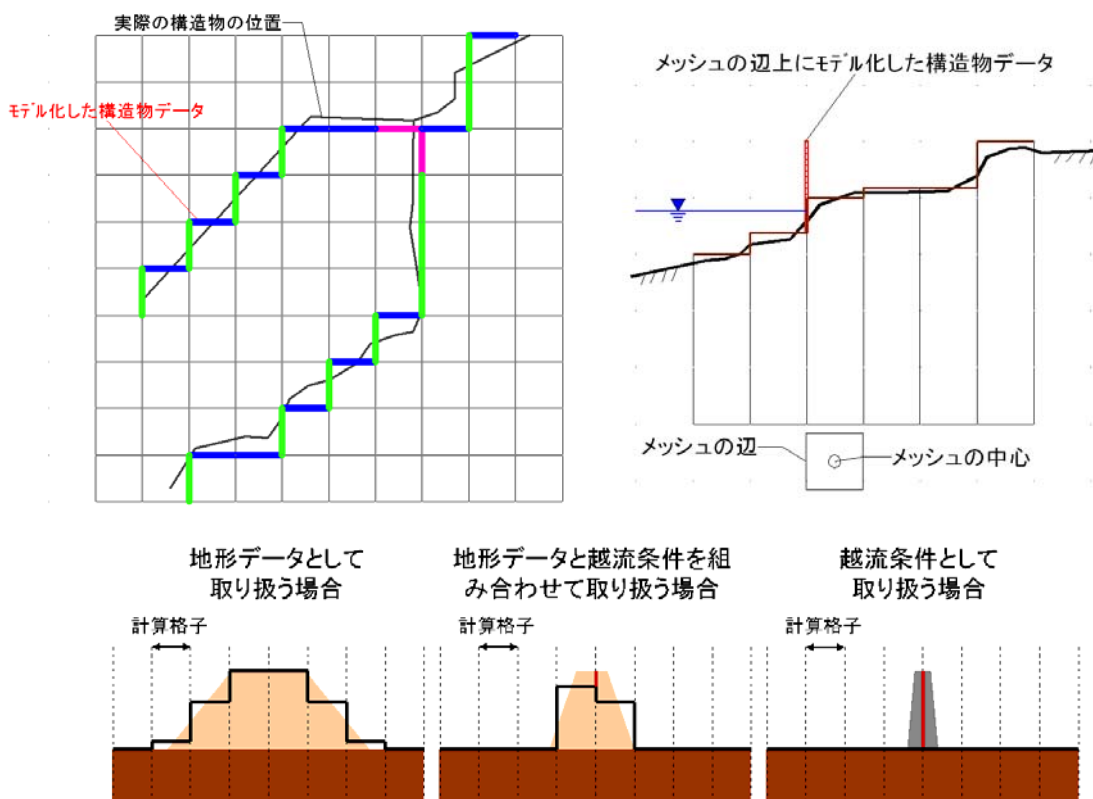
②潮位の設定

施設画上的津波と洪水との同期生起は極めてまれであるため、施設画上的津波が河川を遡上・流下する際の河口の水位は朔望平均満潮位とする。

③構造物

海岸・河川堤防等の構造物は、河川台帳・海岸保全施設台帳等に従い設定する。

なお、津波シミュレーション用の構造物データは、図 4-8 に示すように、計算メッシュの辺上に天端高情報を与えてモデル化する。天端高情報を与えたメッシュに隣接するメッシュでは、天端高情報を与えた辺に平行な速度成分は保存され、垂直な速度成分は 0 となる境界条件を設定する。



※出典：平成 23 年東北地方太平洋沖地震による津波の対策のための津波浸水シミュレーションの手引き、平成 23 年 7 月、国土交通省水管理・国土保全局海岸室、国土交通省国土技術政策総合研究所河川研究部海岸研究室

図 4-8：構造物データモデル化イメージ

④粗度係数

陸域等での摩擦損失抵抗として、メッシュの土地利用区分に応じてマンシングの粗度係数を与える。粗度係数は「小谷ら（1998）の方法」により、土地利用条件に従って設定する。

表 4-4：小谷ら（1998）による粗度係数の設定値

土地利用	粗度係数
住宅地	0.04
工場地等	0.04
農地	0.02
林地	0.03
水域	0.025
その他（空地、緑地）	0.025

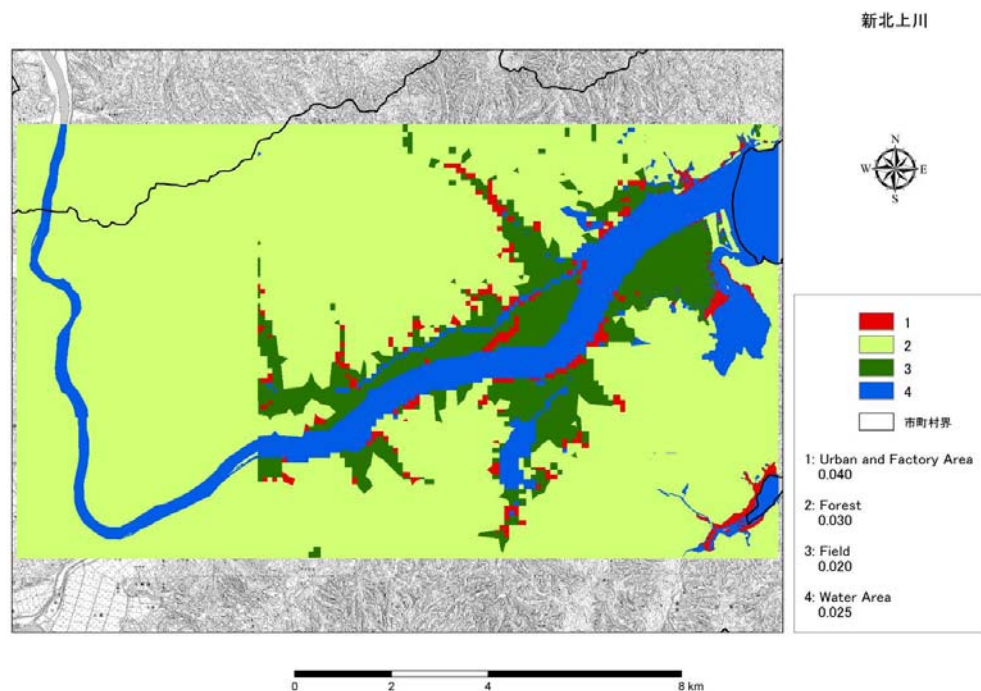


図 4-9：メッシュ粗度係数設定図（北上川の例）

(4) 津波シミュレーション

① 津波シミュレーションの基本的な流れ

津波シミュレーションは、津波波源で発生した波が陸域に伝播する過程を逐次追跡計算を行うものであり、その計算の基本的な流れを次に示す。

①-1 津波発生時

- ・ 想定される波源域において、断層モデルにより広域の海底地盤高を変化させることにより海面に水位差を発生させる。
- ・ このときの水面勾配を初期状態として、二次元非線形長波方程式に従い、津波の水位・流速を伝播させる。

①-2 海域での津波伝播

- ・ 津波波源で発生した津波を二次元非線形長波方程式に従い陸域に伝播させる。
- ・ 水深・波長が大きな海域は大メッシュで計算し、陸域に近づき水深が小さくかつ海底地形の影響を受けやすくなるのに従い小メッシュで計算できるよう、メッシュサイズを順次小さくしていく（ネスティング）。
- ・ 計算においては、各メッシュ間の水位差（水面勾配）、流速及び海底面の抵抗（粗度係数）を基に、隣接するメッシュに流量を伝えることにより、津波伝播を表現する。

①-3 陸域への津波到達及び河川遡上

- ・ 陸域及び河川域では、二次元非線形長波方程式に従い、津波の変形や反射・収束等の影響による波高増大を計算する。

②津波数値解析手法

②-1 支配方程式

津波を再現する支配方程式として二次元非線形長波方程式を用いる。

津波は、伝播する過程において1)～3)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。

通常津波解析では1)及び2)の効果を考慮した二次元非線形長波方程式で行われるのが一般的である。

3)に記した「ソリトン分裂」は、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残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という現象であるが、この効果については観測記録が少ないことや、膨大な計算時間を要するため実用的でないことから、ここでは考慮しない。

- 1) 深海部で発生した津波は、線形の分散効果を呈しながら浅海部へと進行する。
- 2) 浅海部での津波は、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ともに、波の前面勾配が急峻となる。これを波形の前傾化という。
- 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。

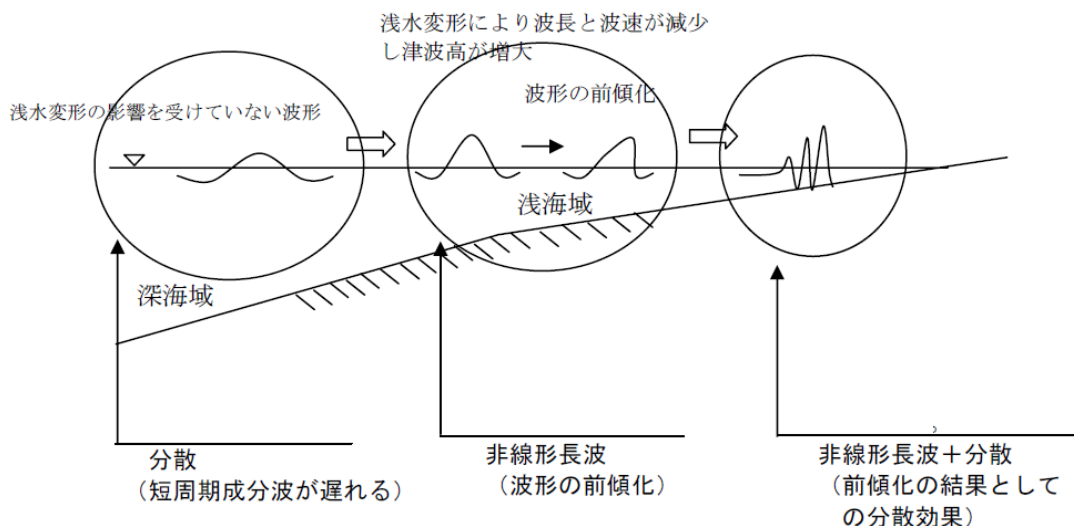


図 4-10：津波伝播過程における諸効果の模式図

主に地震により海底地形が変動することで発生する波である津波は、長波として記述される。長波の理論は、相対水深（水深と波長の比）が小さいときに用いられる近似で、後藤・小川（1982）¹によると以下のとおり。

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + u \frac{\partial \eta}{\partial x} + v \frac{\partial \eta}{\partial y} = 0 \dots\dots\dots (1)$$

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + g \frac{\partial \eta}{\partial x} + \frac{1}{2g} \frac{f}{D} u \sqrt{u^2 + v^2} = 0 \dots\dots\dots (2)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + g \frac{\partial \eta}{\partial y} + \frac{1}{2g} \frac{f}{D} v \sqrt{u^2 + v^2} = 0 \dots\dots\dots (3)$$

ここで、

x, y : 水平座標, t : 時間座標, h : 静水深, η : 静水面からの水位上昇量,
 u, v : (x, y) 方向の流速, g : 重力加速度, f : 摩擦係数, D : 全水深 (= $h + \eta$)

上記の式を海底から水表面まで積分した浅水理論として、ここでは式(4)～(6)に示す一般的な直交座標系での二次元非線形長波方程式を用い、海域の伝播から遡上計算までを一括して行う。なお、海域を伝播する津波の解析には、地球の丸みやコリオリ力を考慮した地球座標系を用いて計算を行う例もあるが、ここでは三陸沖の海溝から宮城県沿岸までを対象範囲とするため、全領域で直交座標系を適用して解析を行う。図 4-11 に各変数の定義を示す。

(連続式)

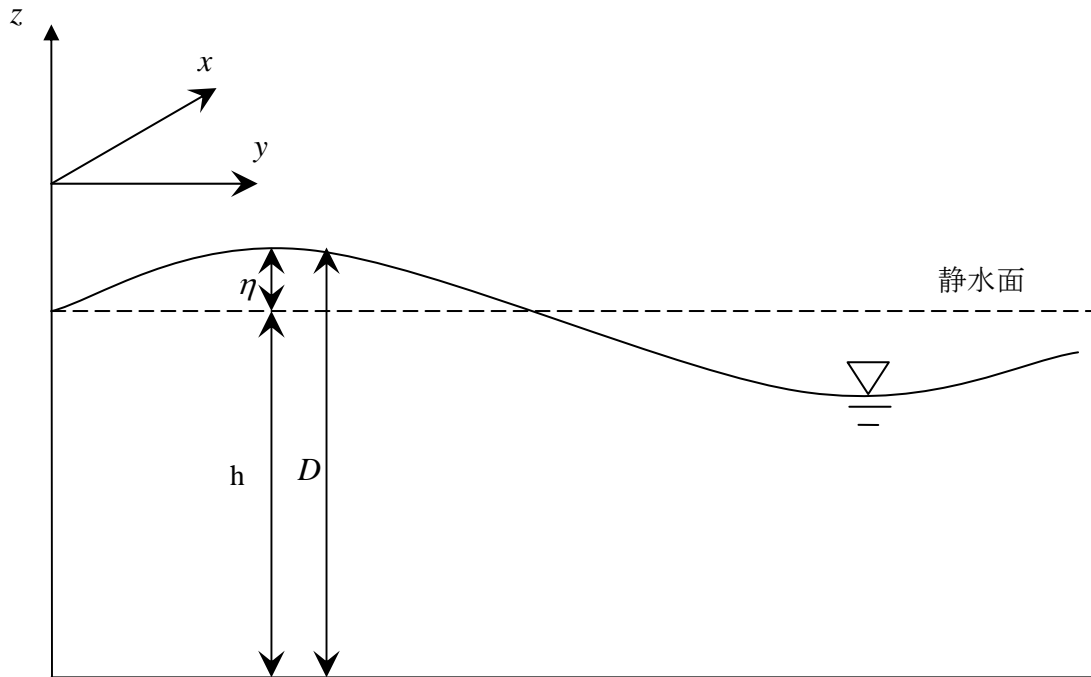
$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{\partial M}{\partial x} + \frac{\partial N}{\partial y} = 0 \dots\dots\dots (4)$$

(運動方程式)

$$\frac{\partial M}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{M^2}{D} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{MN}{D} \right) + gD \frac{\partial \eta}{\partial x} - K_h \left(\frac{\partial^2 M}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 M}{\partial y^2} \right) + \gamma_b^2 \frac{M \sqrt{M^2 + N^2}}{D^2} = 0 \quad (5)$$

$$\frac{\partial N}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{MN}{D} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{N^2}{D} \right) + gD \frac{\partial \eta}{\partial y} - K_h \left(\frac{\partial^2 N}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 N}{\partial y^2} \right) + \gamma_b^2 \frac{N \sqrt{M^2 + N^2}}{D^2} = 0 \dots\dots\dots (6)$$

¹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資料，52pp



- ここで、
- M : x 方向の線流量
 - N : y 方向の線流量
 - γ_b^2 : 摩擦係数 ($=gn^2/D^{1/3}$, n : マニングの粗度係数)
 - h ; 底面から静水面までの距離
 - $h \geq 0$ で静水深 (海域)
 - $h < 0$ で地盤高 (陸域)
 - η ; 海域では静水面から自由水面までの距離
 - 陸域では地盤高から自由水面までの距離
 - D ; 全水深 ($= \eta + h$)

図 4-11 : 変数定義

②-2 伝播計算

津波の伝播計算は、Staggered leap-frog 法で支配方程式（運動方程式，連続の式）を差分化し、水位と流量を交互に数値計算する。図 4-12 に η, M, N の計算点を示す。

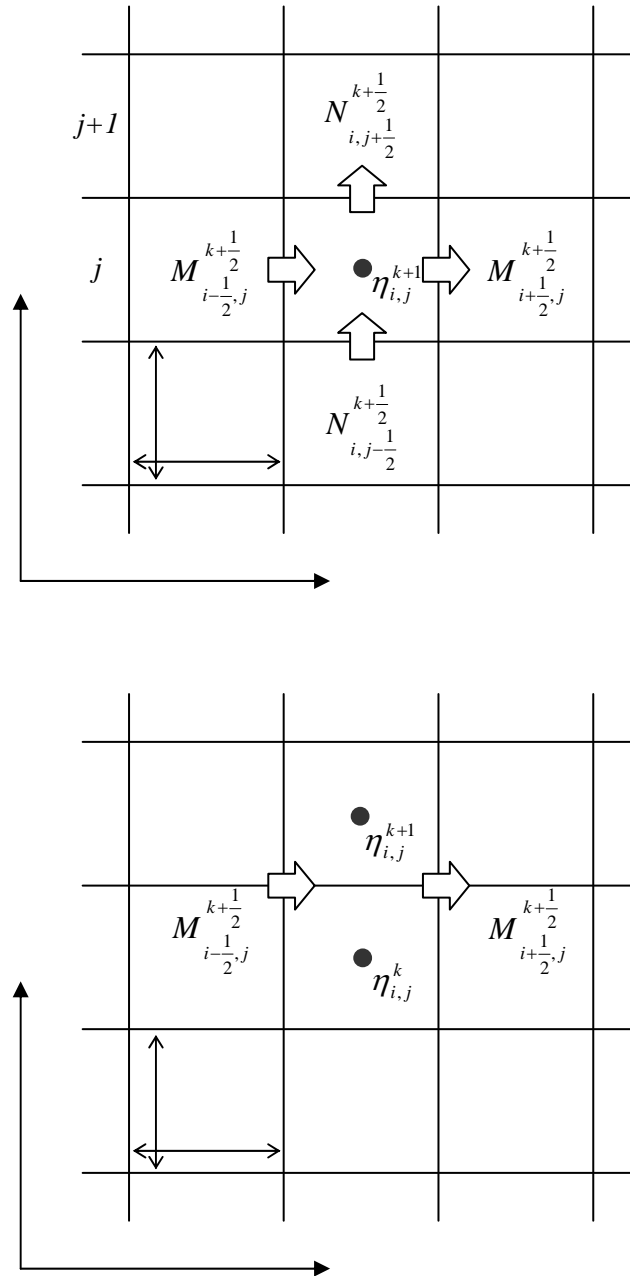


図 4-12 : Leap-frog 法の計算点の配置 (Staggered 格子)

②-3 接続計算

津波解析では、波源域から陸域まで一連で津波の伝播を計算する。その際には、水深の深い海域において空間格子を粗く設定し、陸域に近づくに従って空間解像度を細かくし地形特性を反映させる「接続計算手法（ネスティング）」を用いる。

接続計算空間では、格子間隔の異なる領域を接続するため、大領域と小領域で水位及び流量の受け渡しを行い、計算値に連続性を持たせる作業を行う必要がある。

ここでは、大領域と小領域の空間格子間隔の比率を 3:1 及び 5:1 となるように設定する。以下、3:1 接続の場合の考え方を示す。

なお、詳細な接続条件については、(2) 地形データの作成で整理する。

1) 水位の領域接続

図 4-12 に示した差分法の計算位置より、大格子と小格子の境界に位置する大格子の水位 ZX は図 4-13 のように周辺の小格子（9 メッシュ）の平均水位に置き換えられる。ただし、小格子の水深 $HY > 0$ （水深が存在）であるメッシュ数 L が過半数（5 メッシュ）を超えない場合は、大格子の水位は置き換えない。 $HY > 0$ である小格子が L 個あった場合の大格子の水位は以下の式で表す。

$$ZX = \frac{\sum_{i=1}^L ZY}{L} \quad (5 \leq L \leq 9) \quad (7)$$

ここで、 ZY は小格子の水位である。

2) 流量の領域接続

図 4-12 に示した差分法の計算位置より、大格子と小格子の境界に位置する小領域の値は大領域の値に置き換えられる。流量の置き換えは、1 つの大領域の流量から複数の小領域の流量を作成するため、空間的な補完が必要となる。図 4-14 に 1/3 空間接続を行った場合の小領域の流量の補完概念を示す。

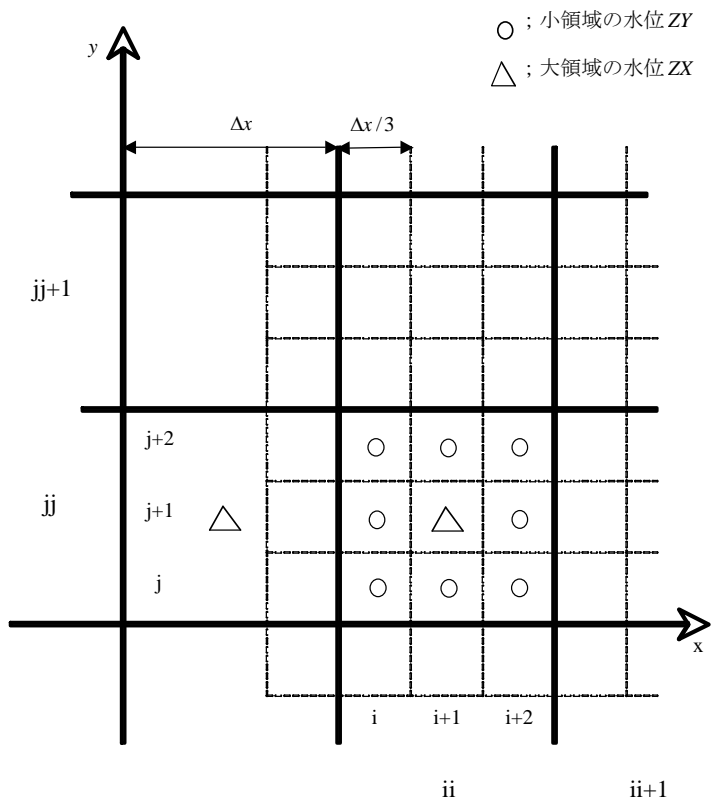


図 4-13 : 左端境界における水位接続の概要 (空間接続 1/3)

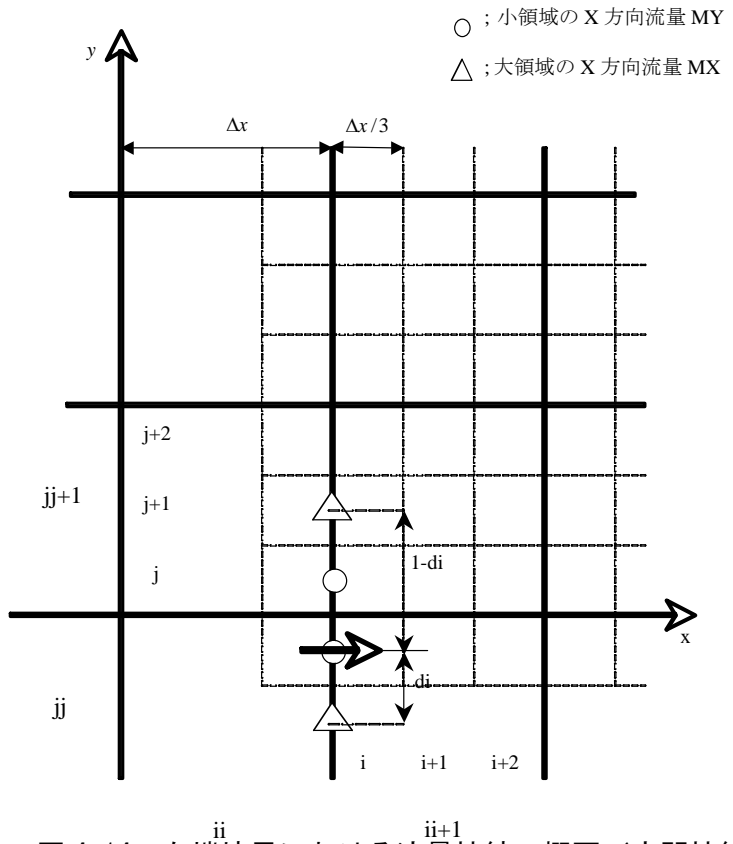


図 4-14 : 左端境界における流量接続の概要 (空間接続 1/3)

表 4-5 に津波シミュレーションの基本条件をまとめて示す。

表 4-5 : 津波シミュレーション 基本条件一覧 (1 / 2)
(北上川の例)

設定項目	設定内容
計算領域	波源域から評価対象海岸を含む陸域までを対象
支配方程式	二次元非線形長波方程式 ・運動方程式 (流量、流速を計算) ・連続方程式 (水位を計算)
伝播計算	有限差分法 (Leap-frog 法)
境界条件	沖側境界 : 自由透過境界 海域及び陸域 : 第 1~第 4 領域 移動境界 (遡上)
計算時間	助走時間 : 2 時間 (初期水面形設定) 津波遡上計算時間 : 地震発生から 3 時間
計算格子間隔 計算時間間隔	波源域より陸域に向けて格子サイズを縮小、 陸域で 10m メッシュに設定 計算時間間隔は、計算安定性・格子サイズに応じて設定 【計算格子間隔】 【計算時間間隔】 領域 1 : dx1=450m dt1=0.90 秒 (波源域) 領域 2 : dx2=150m dt2=0.30 秒 領域 3 : dx3=50m dt3=0.10 秒 領域 4 : dx4=10m dt4=0.10 秒 (陸域・河川域)
断層モデル	明治三陸地震 : 中央防災会議モデル
地盤変位量	明治三陸地震の断層モデルパラメータを用い、Mansinha & Smylie (1972) の手法により算定
初期潮位条件	T. P. +0.703m (鮎川観測所における H1~H20 の朔望平均満潮位)
陸域地形条件	L 1 地震後推定地盤高 (東日本太平洋沖地震後地盤高に対し、L 1 地震時の地盤変位量を考慮)
海域地形条件	L 1 地震後推定海底高 (東日本太平洋沖地震後地盤高に対し、L 1 地震時の地盤変位量を考慮)
地表面・海底面の抵抗 (粗度係数)	住宅地 : n=0.040、工場地 : n=0.040 農地 : n=0.020、林地 : n=0.030 水域 (河川域・海域) : n=0.025、その他 (空地、緑地) : n=0.025

表 4-5 : 津波シミュレーション 基本条件一覧 (2 / 2)
(北上川の例)

設定項目	設定内容
河道条件	<p>河道地形 : 河道 (ケース 1)・河道 (ケース 2) : (200m ピッチ) ※ L 1 地震時の推定地盤沈下量を考慮</p> <p>上流端流量 : 第 4 領域 (10m メッシュ) 近傍の柳津地点での 平水時水位 T. P. +3. 108m (H13~H22 の過去 10 年間)</p> <p>北上大堰堰高 : 定水 I 操作状態</p> <ul style="list-style-type: none"> ・メインゲート部 : K. P. +4. 35m-0. 6m (沈下分) T. P. +3. 4755m-0. 6m (沈下分) = T. P. +2. 8755m ・サイドゲート部 : K. P. +4. 60m-0. 6m (沈下分) T. P. +3. 7255m-0. 6m (沈下分) = T. P. +3. 1255m
堤防条件	<p>海岸堤防 : 平面配置 : 現位置に設定 堤防天端高 : L1 津波高→T. P. +8. 4m 破堤 : なし</p> <p>河川堤防 : 平面配置 : 現位置に設定 堤防天端高 : 無限大 破堤 : なし</p>

【高潮について】

高潮に関しては、エネルギー平衡方程式により波高を求めた上で、改良仮想勾配法により波の打上げ高を算出するなど、海域や河道の地形特性、波浪の挙動等を考慮して検討する。

(1) 計画高潮位の設定

計画高潮位については、東北地方太平洋沖地震による津波及び広域的な地盤沈下においても、潮位への影響はみられないため、既定計画と同じものを用いる。

(2) 計画沖波の設定

計画沖波は、河口が接続する海岸堤防の設計と整合を図るため、「三陸南沿岸海岸保全基本計画、仙台湾沿岸海岸保全基本計画(H15.10宮城県)」における計画沖波($H_o=7.7m$)を採用する。

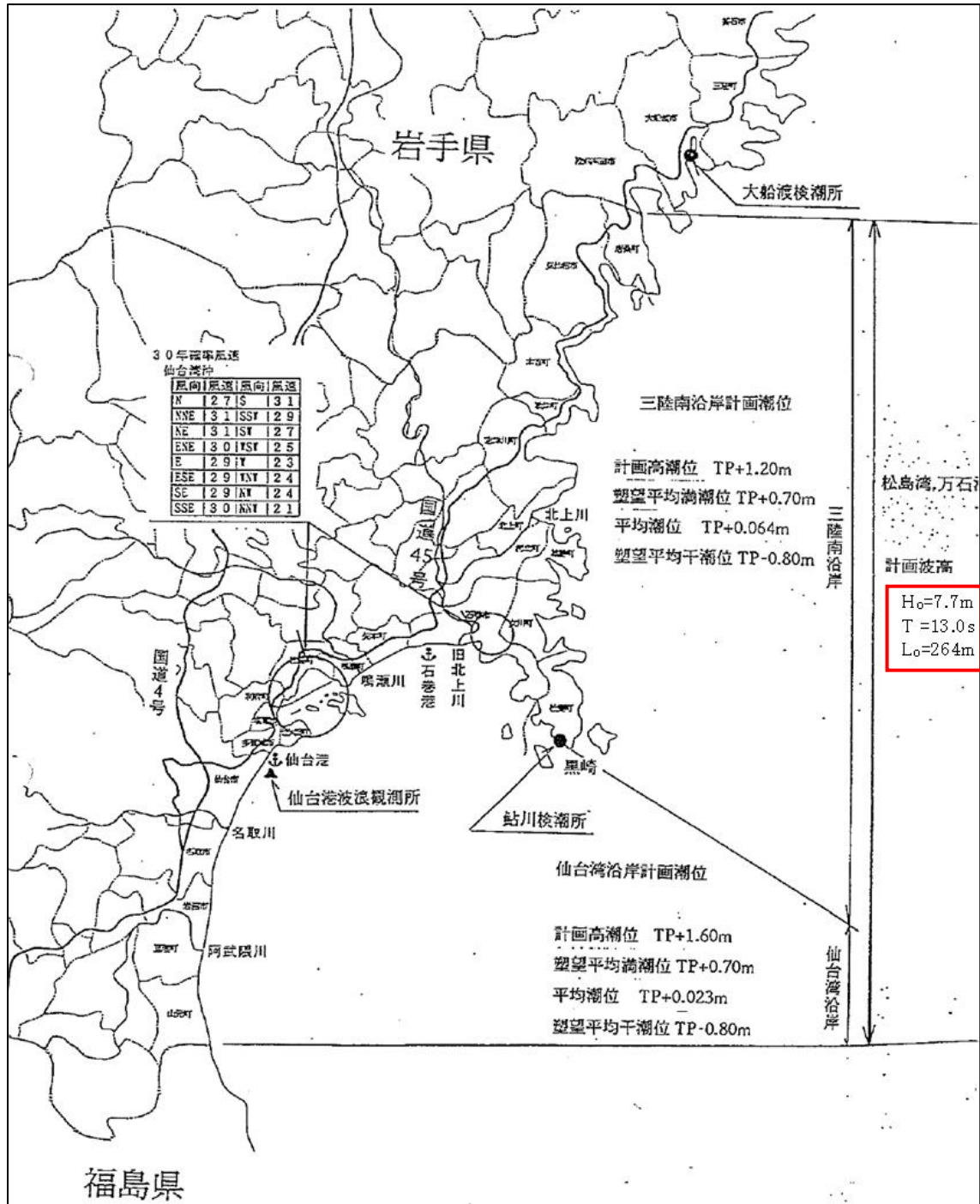


図 4-15: 宮城県の海岸保全基本計画での計画沖波

出典：宮城県における計画波浪・計画潮位概要書

(3) 深海部～河道内における波浪計算

沖波の浅海域における変形を適切に考慮するものとし、具体的には、浅海域の波向、波長及び波高は、水深変化に伴う波の浅水変形、屈折、砕波、構造物での回折等を考慮する。

数値計算手法として、「エネルギー平衡方程式」を示す。「エネルギー平衡方程式」は、深海部（水深約 200m）～浅海部（水深約 20m）においては、屈折による波高変化を考慮でき、大領域における波浪変形を計算することに適しており、また、浅海部での水深変化による屈折、浅水変形、砕波さらに構造物等による回折や反射による波浪変形が含まれる実用的な波浪変形モデル方程式である。

「エネルギー平衡方程式」では、深海部～河道内を同一手法で算定するが、深海部から浅海部（50m メッシュ）、浅海部～河道内（10m メッシュ）とメッシュサイズ等の違いにより分割して計算する。

また、計画沖波では波向が設定されていないため、過去の観測結果から卓越した波向、又は観測結果が無い場合は、河口形状及び海底地形を勘案し想定した波向を中心として 3 方向程度の波向を設定する。

表 4-6：波浪計算の数値モデル

モデル方程式	浅水変形	屈折	回折	反射	砕波モデル	任意水深	流れの影響	不規則性	非線形性	計算領域			備考
										広	中	狭	
波向線法	◎	◎	×			◎	○	○	△	○	○	○	波速に非線形性を含められる
エネルギー平衡方程式	◎	◎	▽	△	○	◎	○	◎	×	○	○	○	
ヘルムホルツ方程式	○	○	◎	◎	×	◎	×	○	×				領域ごとに一樣水深のみ
簡便法（高山法）			◎	◎	×	◎	×	◎	×				一樣水深のみ
緩勾配方程式	◎	◎	◎	◎	○	◎	○	○	△				
非定常緩勾配方程式	◎	◎	◎	◎	○	◎	○		×				砕波モデル・境界条件処理が容易
数値波動解析法	○	◎	◎	◎		◎			×				
緩勾配不規則波動方程式	◎	◎	◎	◎	○	◎		◎	×				
放物型波動方程式	◎	◎	◎	△	○	◎	○	○	△				
非線形長波方程式	◎	◎	◎	◎	○	×		◎	◎				極浅海域に限定される
ブシネスク方程式	◎	◎	◎	◎	○	○	○	◎	◎				原方程式は浅海域に限定される
強非線形分散性波動方程式	◎	◎	◎	◎		◎		◎	◎				

◎：基本形で適用可能 ○：応用形で一般的適用可能 △：応用形で部分的適用可能
 ▽：基本理論では考慮されていないが実用上可能 空白：研究により適用できる可能性あり ×：適用不可能
 計算領域＝広：深海から浅海を含む程度，中：構造物周辺の海域程度，狭：港内程度

出典：土木学会「海岸施設設計便覧[2000年版]」P57

① 計算手法（エネルギー平衡方程式）

エネルギー平衡方程式法(Karlsson, 1969)は、多方向不規則波の屈折及び浅水変形を同時に解くことができる手法である。同手法は、微小領域内に流入するエネルギーフラックスの連続と波の屈折による波向変化に伴うエネルギーフラックスを平面上の格子点で求めるものであり、従来から多くの研究者によって、その有用性が指摘されてきた(合田・鈴木, 1975. 丸山ら, 1984.)。このモデルは位相平均量の変化を対象とするため格子間隔を大きく取ることができ、大領域の波浪計算モデルとして頻りに用いられている。

(回折波と砕波によるエネルギー減衰を考慮したエネルギー平衡方程式)

モデルの座標系を図 4-16 に示す。図中の x は岸沖方向の座標であり、沖から岸方向にとっている。 y は沿岸方向に取った座標を表す。 θ は波向を表し、 x 軸から反時計回りを正に取ったものである。

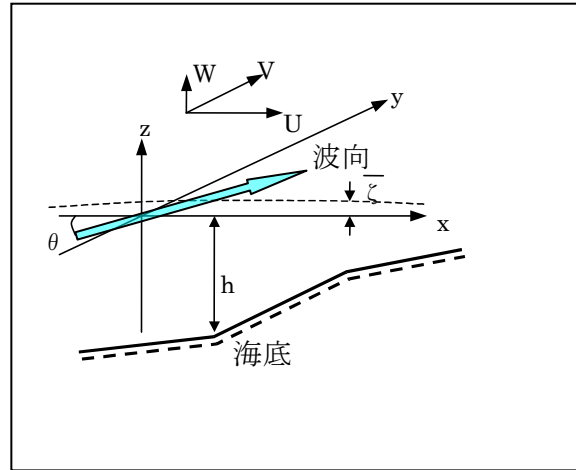


図 4-16 : モデルの座標系

間瀬ら(1999)の開発した回折波及び砕波による波浪エネルギーの減衰を考慮したエネルギー平衡方程式の基礎式は、以下のとおり。

$$\frac{\partial(Sv_x)}{\partial x} + \frac{\partial(Sv_y)}{\partial y} + \frac{\partial(Sv_\theta)}{\partial \theta} = \frac{\kappa}{2\omega} \left\{ (CC_g \cos^2 \theta S_y)_y - \frac{1}{2} CC_g \cos \theta S_{yy} \right\} - \varepsilon_b' S \quad (8)$$

なお、式(8)中の左辺第1項と第2項が浅水変形による波高変化を示し、第3項が屈折による波高変化を示す。また、左辺第1項は回折項であり、左辺第2項は砕波減衰項を表している。

ここで、 S 、 C 及び C_g は、波の方向スペクトル密度、波速及び波の群速度を示す。 ε_b' は、単位時間内に砕波によって失われるエネルギー散逸率を示す。 ε_b' の値としては、計算格子内に侵入した波が出るまでに要する平均時間に比例すると仮定する。

なお、 κ は回折項に関する影響係数であり、 ω は角周波数である。式(8)の右辺第1項は完全にゼロにはならないため、回折影響係数 κ で調整する。間瀬ら(1999)によれば、2.5~3.0の値であり、近年、この知見が一般的に採用されている。

ここでは、 $\kappa=2.5$ を採用する。この項は個別にはほぼゼロとなるが、差分化に際して左辺の S と連成するため、拡散項の役目を果たすことになる。ここでは、多方向不規則波の成分波のそれぞれに回折効果を取り入れる。それぞれの成分波の伝播方向

は x 軸と異なり、その分 $\cos \theta$ の重みがついている。

不規則波浪場における碎波減衰モデルについては、多くのものが提案されている。間瀬ら (1999) は高山ら (1991) のモデルを、沖ら (2004) は間瀬ら (1999) のエネルギー平衡方程式に Thornton・Guza (1983) のモデルを用いているが、複雑な地形を有する場での検討がなされていない。

ここでは、間瀬ら (1999) が適用した高山ら (1991) のモデルを採用する。モデルの概要を以下に述べる。

(高山ら (1991) のモデルの概要)

ε'_b は、単位時間内に碎波によって失われるエネルギー逸散率を示す。 ε'_b の値としては、計算格子内に侵入した波が出るまでに要する平均時間に比例すると仮定して、次式で与える。

$$\varepsilon'_b = \varepsilon_b C \sqrt{\delta x \delta y} \quad (9)$$

ここに、 δx 及び δy は、 x 、 y 方向の計算格子間隔である。計算では、 $\delta x = \delta y$ の正方格子を用いる。無次元量 ε_b は、格子内において碎波する波のエネルギーの割合を示す。碎波後であっても、波高はレイリー分布に近い分布形を示すと仮定すると、計算格子に入る時の碎波波高 H_{bi} と出る時の碎波波高 H_{bo} から、次式で求める。

$$\begin{aligned} \varepsilon_b &= \frac{\left[\int_0^{H_{bi}/H_{1/3}} p_E(H_s^*) dH_s^* - \int_0^{H_{bo}/H_{1/3}} p_E(H_s^*) dH_s^* \right]}{\int_0^{H_{bi}/H_{1/3}} p_E(H_s^*) dH_s^*} \\ &= 1 - \frac{1 - \left\{ 1 + \frac{\pi}{4} (\alpha H_{bo}/H_{1/3})^2 \right\} \exp\left[-\frac{\pi}{4} (\alpha H_{bo}/H_{1/3})^2 \right]}{1 - \left\{ 1 + \frac{\pi}{4} (\alpha H_{bi}/H_{1/3})^2 \right\} \exp\left[-\frac{\pi}{4} (\alpha H_{bi}/H_{1/3})^2 \right]} \end{aligned} \quad (10)$$

ここで、 $p_E(H_s^*)$ は、波のエネルギーの分布を表し、波高の 2 乗分布で与えられ、次式で示す。

$$p_E(H_s^*) = \frac{\pi^2}{8} \alpha^4 H_s^{*3} \exp\left[-\frac{\pi}{4} (\alpha H_s^*)^2 \right] \quad (11)$$

ここに、 $H_s^* = H/H_{1/3}$ 、 $\alpha = H_{1/3}/\bar{H}$ であり、 \bar{H} は平均波高である。碎波波高 H_{bo} 、 H_{bi} の算定に当たっては、次式の合田 (1970) の提案した碎波指標を用いる。

$$H_b = AL_0 \left[1 - \exp\left\{ -1.5 \frac{\pi \bar{h}}{L_0} (1 + 15\beta^{4/3}) \right\} \right] \quad (12)$$

式(12)中の A は無次元係数、 L_0 は沖波波長を示す。海底勾配 β としては、 x 軸の正方向から反時計回りに測った平均波向 $\bar{\theta}$ を用いて、次式で与える。

$$\beta = \beta_x \cos \bar{\theta} + \beta_y \sin \bar{\theta} \quad (13)$$

ここに、 β_x 、 β_y は x 軸、 y 軸方向の海底勾配であり、計算格子内では一様勾配とみなす。

また、式(13)中の \bar{h} は、計算格子内の平均水深であり、次式で計算する。

$$\bar{h} = (h_1 + h_2 + h_3 + h_4) / 4 \quad (14)$$

一方、碎波波高 H_b の算出に当たって、海底勾配 β が負になる場合には、次式を用いる。

$$H_b = AL_0 \left[1 - \exp \left\{ -1.5 \frac{\pi \bar{h}}{L_0} \right\} \right] \quad (\beta < 0) \quad (15)$$

波が距離 dl を進む間における碎波波高の変化率 dH_b / dl は、次式で求める。

$$dH_b / dl = -1.5\pi\beta A (1 + 15\beta^{4/3}) \times \exp \left\{ -1.5 \frac{\pi \bar{h}}{L_0} (1 + 15\beta^{4/3}) \right\} \quad (16)$$

ただし、海底勾配 β が負の場合は、次式とする。

$$dH_b / dl = 0 \quad (17)$$

計算格子内における平均伝播距離 dl としては、 $dl = \sqrt{\delta x \delta y} = \delta x$ とし、 H_{bo} 、 H_{bi} は次式で求める。

$$\begin{cases} H_{bo} = H_b + dH_b / 2 \\ H_{bi} = H_b - dH_b / 2 \end{cases} \quad (18)$$

(間瀬ら(1999)の数値計算法)

1) 差分化

図 4-17 には、格子点 (i, j) における格子内及び波向間での成分波エネルギーの流入を示す。ここに、 x 軸は沖から岸向きに取った座標を表し、 y 軸は沿岸方向に取った座標を表す。なお、波成分はすべて岸に向かって伝播するものとする。図 4-17(a) は式(8)の左辺第1項と第2項によって示されている格子内でのエネルギーの流入を表し、図 4-17(b) は同式内の左辺第3項によって示される波向間でのエネルギーの流出

入を表している。今、図 4-17 (b) に示す「○」印で示した微小領域内の波エネルギーと矢印で示した特性速度の定義点のもとで、式 (8) を差分化すると、次式が得られる。

$$A_1 S_n^{ijk} + A_2 S_n^{i(j-1)k} + A_3 S_n^{i(j+1)k} + A_4 S_n^{ij(k-1)} + A_5 S_n^{ij(k+1)} = B S_n^{(i-1)jk} \quad (19)$$

左辺の第 1 項から第 3 項及び右辺は主に格子内のエネルギーの流出を表現し、第 4 項、第 5 項は波向間のエネルギーの流入を表現している。ここで、 i 及び j はそれぞれ、 x 軸及び y 軸方向の格子番号、 n は周波数分割数に対する分割番号、 k は波向分割数に対する分割番号を表す。なお、 A_1 から A_5 及び B は次のとおりとする。

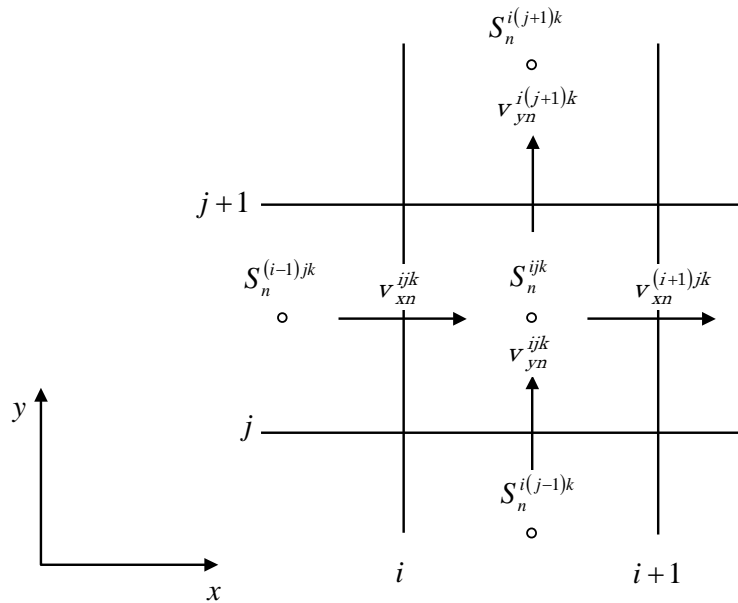


図 4-17 (a) : 格子内における成分波のエネルギーの流入出

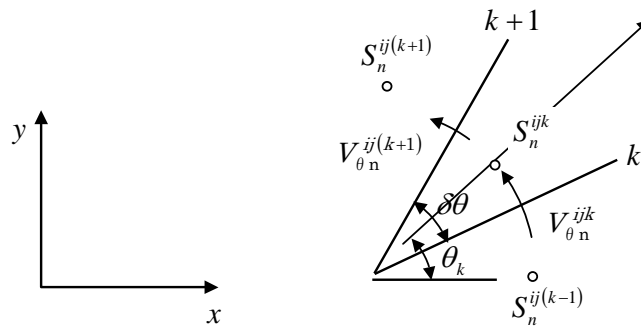


図 4-17 (b) : 波向間における成分波のエネルギーの流入出

$$\begin{aligned}
A_1 &= v_{xn}^{ijk} / \delta x + \varepsilon_{bn}^{ij} \\
&+ \frac{\kappa}{2\omega_n \delta y^2} \left\{ (CC_g)^{i(j+1)k} + (CC_g)^{ijk} - (CC_g)^{i(j+1/2)k} \right\} \\
&+ \begin{cases} v_{yn}^{i(j+1)k} / \delta y & (v_y \geq 0) \\ -y_{yn}^{ijk} / \delta y & (v_y < 0) \end{cases} \\
&+ \begin{cases} v_{\theta n}^{ij(k+1)} / \delta \theta & (v_{\theta n}^{ijk} \geq 0, v_{\theta n}^{ij(k+1)} \geq 0) \\ 0 & (v_{\theta n}^{ijk} \geq 0, v_{\theta n}^{ij(k+1)} < 0) \\ (v_{\theta n}^{ij(k+1)} - v_{\theta n}^{ijk}) / \delta \theta & (v_{\theta n}^{ijk} < 0, v_{\theta n}^{ij(k+1)} \geq 0) \\ -v_{\theta n}^{ijk} / \delta \theta & (v_{\theta n}^{ijk} < 0, v_{\theta n}^{ij(k+1)} < 0) \end{cases} \tag{20}
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
A_2 &= \frac{\kappa}{2\omega_n \delta y^2} \left\{ -(CC_g)^{ijk} + \frac{1}{2} (CC_g)^{i(j+1/2)k} \right\} \cos^2 \theta_k \\
&+ \begin{cases} v_{yn}^{ijk} / \delta y & (v_y \geq 0) \\ 0 & (v_y < 0) \end{cases} \tag{21}
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
A_3 &= \frac{\kappa}{2\omega_n \delta y^2} \left\{ -(CC_g)^{ijk} + \frac{1}{2} (CC_g)^{i(j+1/2)k} \right\} \cos^2 \theta_k \\
&+ \begin{cases} 0 & (v_y \geq 0) \\ v_{yn}^{i(j+1)k} / \delta y & (v_y < 0) \end{cases} \tag{22}
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
A_4 &= \begin{cases} -v_{\theta n}^{ijk} / \delta \theta & (v_{\theta n}^{ijk} \geq 0, v_{\theta n}^{ij(k+1)} \geq 0) \\ -v_{\theta n}^{ijk} / \delta \theta & (v_{\theta n}^{ijk} \geq 0, v_{\theta n}^{ij(k+1)} < 0) \\ 0 & (v_{\theta n}^{ijk} < 0, v_{\theta n}^{ij(k+1)} \geq 0) \\ 0 & (v_{\theta n}^{ijk} < 0, v_{\theta n}^{ij(k+1)} < 0) \end{cases} \tag{23}
\end{aligned}$$

$$A_5 = \begin{cases} 0 & (v_{\theta n}^{ijk} \geq 0, v_{\theta n}^{ij(k+1)} \geq 0) \\ v_{\theta n}^{ij(k+1)} / \delta\theta & (v_{\theta n}^{ijk} \geq 0, v_{\theta n}^{ij(k+1)} < 0) \\ 0 & (v_{\theta n}^{ijk} < 0, v_{\theta n}^{ij(k+1)} \geq 0) \\ v_{\theta n}^{ij(k+1)} / \delta\theta & (v_{\theta n}^{ijk} < 0, v_{\theta n}^{ij(k+1)} < 0) \end{cases} \quad (24)$$

$$B = -v_{xn}^{ijk} / \delta x \quad (25)$$

ここで、 δx 及び δy は、x 軸及び y 軸方向の格子間隔である。

式(19)の右辺の $S_n^{(i-1)jk}$ は既知であり、周波数成分 n に対して、 $j=1\sim J$ 、 $k=1\sim K$ の $J \times K$ 個の連立方程式を解くことによって、 S_n^{ijk} を求めることができる。すなわち、沖波条件として所定方向スペクトルを与え、境界条件を考慮して前進的に S_n^{ijk} を求める。

基礎式の差分法による離散化に当たって、高山ら(1991)のモデルの砕波減衰項は、式(27)に示す係数 A_1 に含めることができ、陰的に解くことが可能で計算上常に安定である。

2) 各諸量の計算

有義波高 $H_{1/3}$ 、有義波周期 $T_{1/3}$ 及び平均波向 $\bar{\theta}$ は得られたエネルギースペクトル S_n^{ijk} から次式を用いて算定する。

$$H_{1/3} = 4.0 \sqrt{m_0} \quad (26)$$

$$T_{1/3} = T_0 \sqrt{m_0 / m_2} / \bar{T}_0 \quad (27)$$

$$\bar{\theta} = \sum_{n=1}^N \sum_{k=1}^K \theta_k S_n^{ijk} / m_0 \quad (28)$$

ここに、

$$m_i = \sum_{n=1}^N \sum_{k=1}^K f_n^i S_n^{ijk} \quad (29)$$

である。なお、 T_0 は沖波の有義周期、 \bar{T}_0 は沖波の平均周期である。沖波の平均周期は、入力した沖波のスペクトル $S_0(f, \theta)$ を用いて、次式で計算する。

$$\bar{T}_0 = \left[\int_0^\infty \int_{-\pi/2}^{\pi/2} S_0(f, \theta) df d\theta / \int_0^\infty \int_{-\pi/2}^{\pi/2} f^2 S_0(f, \theta) df d\theta \right]^{1/2} \quad (30)$$

3) 沖波の条件

計算領域内の沖側境界で与える沖波は一様なスペクトルと仮定し、次式のように表す。

$$S_0(f, \theta - \theta_p) = S_0(f)G_0(\theta - \theta_p; f) \quad (31)$$

ここに、 $S_0(f)$ は周波数スペクトル、 $G_0(\theta - \theta_p; f)$ は方向関数、 θ_p は主波向を表す。沖から入射する波の周波数スペクトルは、次式で示される JONSWAP 型を用いる。

$$S_0(f) = \alpha_1 \frac{H_{1/3}^2}{T_p^4 f^5} \exp\left\{-\frac{1.25}{T_p^4 f^4}\right\} \gamma^{\exp\{-(T_p f - 1)/2q\}} \quad (32)$$

γ はスペクトルの先鋭度を示すパラメータであり、ここでは JONSWAP の観測で得られた 3.3 を用いる。ここに、

$$\alpha_1 = \frac{0.0624}{\left\{0.23 + 0.0336\gamma - 0.185(1.9 + \gamma)^{-1}\right\}} \quad (33)$$

である。

式 (32) の沖波スペクトルを図 4-18 に示すように等エネルギー分割して N 個の周波数成分波に分ける。成分波の周波数 f_n は、合田 (1977) の提案した次式を用いて計算する。 γ はスペクトルの先鋭度を示すパラメータであり、ここでは標準的な値として 3.3 を与える。

$$f_n = \left[\frac{b}{\ln\{2N/(2n-1)\}} \right]^{1/4} \quad (33)$$

ここで、 $b = 1.25/T_p^4$ であり、 T_p はスペクトルのピーク周期を表し、次式で与える。

$$T_p = \frac{T_{1/3}}{1 - 0.132(\gamma + 0.2)^{-0.559}} \quad (35)$$

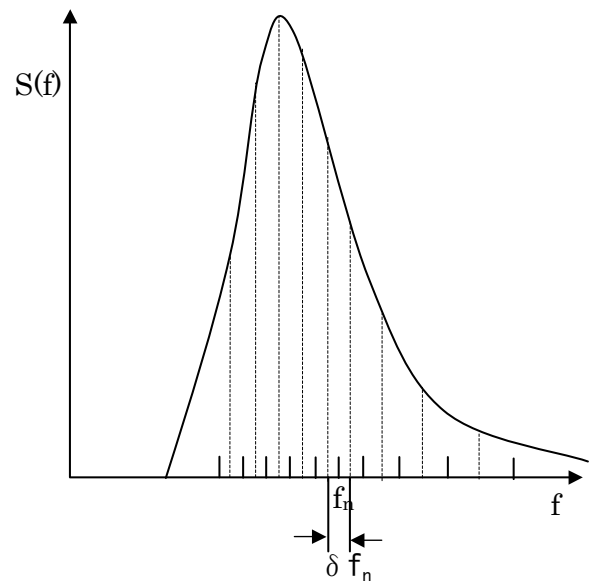


図 4-18 : 周波数スペクトルの分割

一方、式(32)中の q は次のとおり設定する。

$$q = \begin{cases} 0.07 : f \leq f_p \\ 0.09 : f \geq f_p \end{cases} \quad (36)$$

ここに、 $f_p (= 1/T_p)$ はスペクトルのピーク周波数である。

方向関数 $G_0(\theta - \theta_p; f)$ は、図4-19に波向角の両端を $\delta\theta/2$ だけ取り除いた区間 $[-\pi/2 + \delta\theta/2 \sim (\pi/2 - \delta\theta/2)]$ の間を $\delta\theta = \pi/(K+1)$ の角度で分割する。境界で波が反射することを考えて、方向分割数 K は奇数値を与える。分割区間内における値 $G_0(\theta_k - \theta_p; f)$ は、一般的な光易型方向関数である次式を用いる。

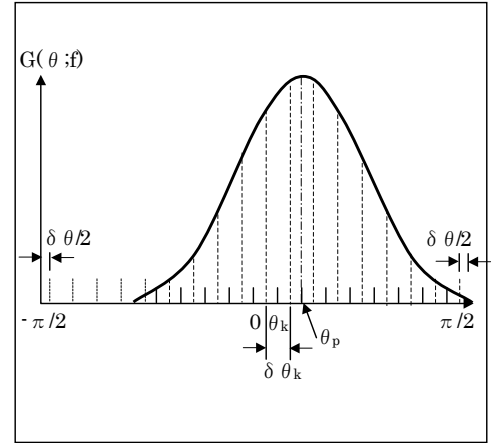


図4-19：波向の分割

$$G_0(\theta_k - \theta_p; f) = \bar{G} \cos^{2s} \{(\theta - \theta_p)/2\} \quad (37)$$

\bar{G} は補正係数である。ここに、

$$S = \begin{cases} S_{\max} \left(\frac{f}{f_p}\right)^{-2.5} & (f > f_p) \\ S_{\max} \left(\frac{f}{f_p}\right)^5 & (f < f_p) \end{cases} \quad (38)$$

である。 S_{\max} は、方向集中度を示すパラメータで、スペクトルのピーク周波数における S の値である。計算では、 S_{\max} と主波向 θ_p の値を入力値として与える。

4) 境界条件

式(19)を解くために、陸上境界や構造物等の境界条件を与える。ここでは、計算領域内の全ての格子に対して以下の数値を与え、計算格子内の計算条件を設定する。各数値の意味は次のとおりである。

・格子条件：「0」

「0」の値の格子は、海域を表し、式(19)がそのまま成り立つ計算格子である(図4-20の図-①参照)。

・ 格子条件 : 「1」

「1」の値の格子は、陸域を表し、基本的には計算を行わない格子とする(図 4-20 の図-②参照)。

・ 格子条件 : 「10」

「10」の値の格子は、構造物を表し、計算を行わない格子とする(図 4-20 の図-②と同様)。

・ 格子条件 : 「2」

「2」の値の格子は、側方境界における格子を表し、計算領域内外で同じスペクトル形になる条件を示している。「2」の値の格子では、次式の条件となる(図 4-20 の図-③参照)。

$$\begin{aligned} (i, 1) \text{ 格子} : S_n^{i0k} &= S_n^{i1k} \\ (i, j) \text{ 格子} : S_n^{i(j-1)k} &= S_n^{ijk} \end{aligned} \quad (39)$$

・ 格子条件 : 「4」

「4」の値の格子は、j 格子線が反射面になっており、波が岸方向に反射される。このとき、次式の条件となる(図 4-20 の図-④参照)。

$$V_{yn}^{ijk} > 0 : S_n^{i(j-1)k} = K_{Ry}^2 S_n^{ij(k+1-k)} \quad (40)$$

ここで、 K_{Ry} は反射率である。なお、反射条件が設定されていない場合、 $K_{Ry} = 0$ として設定する。

・ 格子条件 : 「5」

「5」の値の格子は、「4」の値の格子と逆に(j+1)格子線が反射面になり、波は「4」の値の格子と同様に岸方向に反射される。このとき、次式の条件とする(図 4-20 の図-⑤参照)。

$$V_{yn}^{ijk} < 0 : S_n^{i(j+1)k} = K_{Ry}^2 S_n^{ij(k+1-k)} \quad (41)$$

反射条件が設定されていない場合、 $K_{Ry} = 0$ として設定する。

ここでは、河岸の反射率として、護岸 : 0.7、砂浜 : 0.1 を設定する。

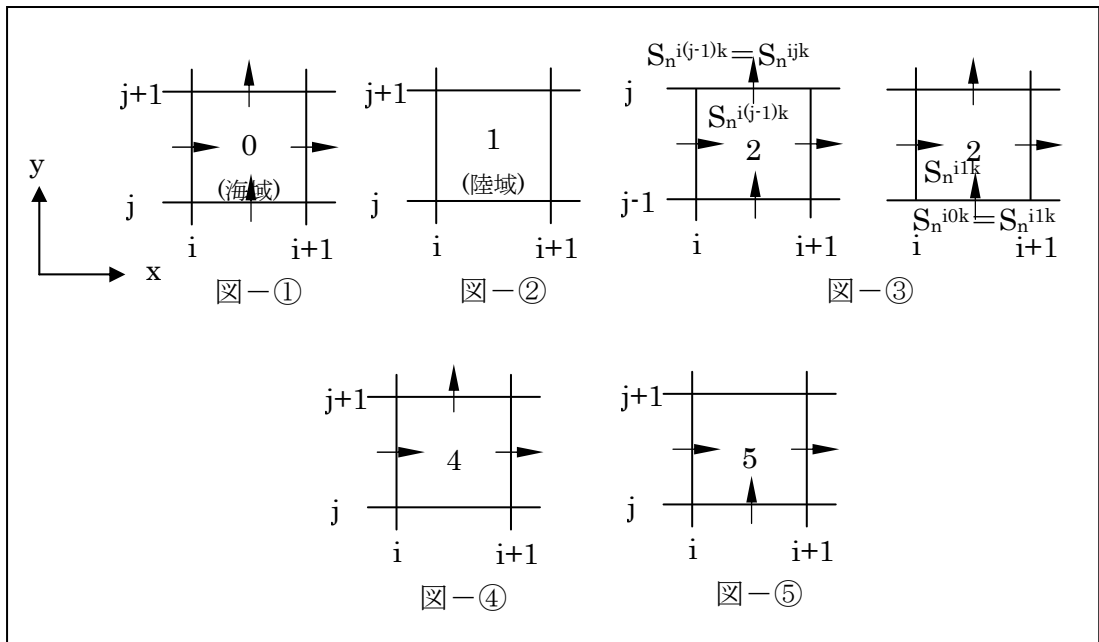


図 4-20 : 波向の分割

②計算モデル

深海部～河道内における波浪計算モデルの波の変化要素の考え方を以下に示す。

表 4-7 : 波の変化要素の考え方

要素	考え方
浅水変形	メッシュ間のエネルギー収支の計算（差分法）の中で計算。
屈折	メッシュ間のエネルギー収支の計算（差分法）の中で計算。
回折	基礎式右辺の第 1 項で考慮。 回折影響係数 κ （カッパ）で調整。 → 基礎式右辺第 1 項は完全にゼロにはならないため、回折影響係数 κ で調整。間瀬ら（1999）によれば、2.5～3.0 の値。近年、この知見が一般的に採用されている。ここでは、 $\kappa = 2.5$ を採用。
反射	メッシュ間のエネルギー収支の計算（差分法）の中で計算。 → 河岸に反射率（護岸：0.7、砂浜：0.1）を設定。
砕波	波の進行方向に対して、距離 dl 進む間の砕波波高（ H_b ）の変化率 dH_b/dl を算定。 砕波指標（合田（1975）らの実験などにより示された水深と砕波波高の関係式。現在最もよく用いられている手法）から、メッシュ毎に砕波の判定（砕波する or しない）を行い、砕波前、砕波後の波高変化を計算。
任意水深	メッシュ毎に水深を考慮して計算（浅水変形、屈折、解析、砕波）。
波の不規則性	JONSWAP 型のスペクトル形（式(31)～式(38)）を用いたスペクトル解析法により不規則性を表現。

③ 深海部から浅海部までの波浪計算

深海部から浅海部に到達する波高について、沖波で設定された各波向において最大となる波高を浅海部に到達する波高として算出する。

表 4-8 : 計算条件一覧 (旧北上川の例)

条件	設定値	備考
屈折計算【深海部(水深 100m 付近)→浅海部(河口沖側水深 20m 付近)】		
手法	エネルギー平衡方程式	
地形	海域：海上保安庁水路部所管データ	
計算領域	南北方向：112.5km (750 メッシュ) 東西方向：90km (600 メッシュ)	
格子間隔	$\Delta x = \Delta y = 50m$	
潮位	T. P. +1.63m	計画高潮位
方向集中度	$S_{max} = 25$	
波浪	<ul style="list-style-type: none"> ・ 波高 $H_0 = 7.7m$ ・ 周期 $T = 13.0s$ 	波高、周期は宮城県計画波浪 (30 年確率波) ※波向は設定されていない。

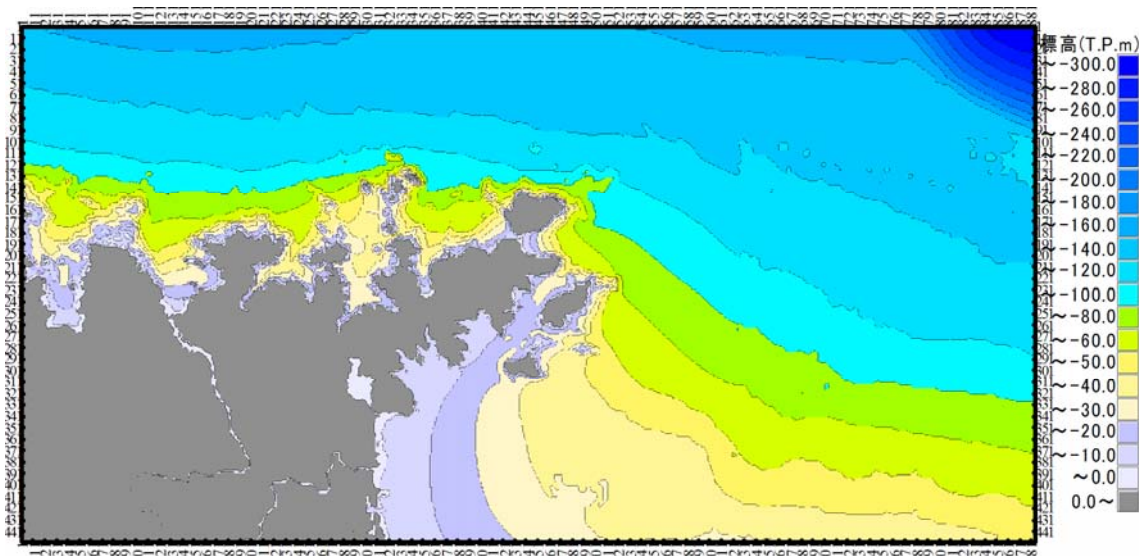


図 4-21 : 地形データ (旧北上川の例)

④浅海部から河道内における波浪計算

③の浅海部に到達する波高から、河道内へ進入する波の波高（以下、「河道内波高」という。）を波浪計算により算出する。なお、波向については③と同様の3方向とし、河道の形状は河道（ケース1）と河道（ケース2）で計算する。

表 4-9：波浪遡上計算条件一覧（旧北上川の例）

条 件	設 定 値	備 考
波浪計算【浅海部（河口沖側水深 20m 付近）→河道内】		
手 法	エネルギー平衡方程式	
差分スキーム	風上差分を用いた差分化	
地 形	海域：海上保安庁水路部所管データ 河川域：河道（ケース1） 河道（ケース2） ※河道（ケース1）＝河道（ケース2）	
計算領域	旧北上川（沿岸方向 8km、岸沖方向 8km）	旧北上川 (1,600メッシュ×1,600メッシュ)
格子間隔	$\Delta x = \Delta y = 5m$	
境界条件	海域 ・ 沖側境界：入射範囲 ・ 左右側境界：自由 陸域及び河川域 ・ 構造物（堤防、防波堤、導流堤）： 反射率 0.7 ・ 砂浜：反射率 0.1 河道上流端 ・ 自由境界（流量設定なし）	旧北上川は左側半島のため、 「0」境界 0.7：直立壁（天端静水面上） 0.1：自然海浜
潮 位	T. P. +1.63m	計画高潮位
波 浪	波浪計算 浅海部に到達する波高 波向：SE, SSE, S 方向集中度パラメータ：75 「減衰距離の長いうねり」の場合の 推奨値を採用	波浪計算：エネルギー平衡方程式 による計算結果を入力値として 設定した計算。 ※石巻港観測（H7～H20）の卓越 した波向

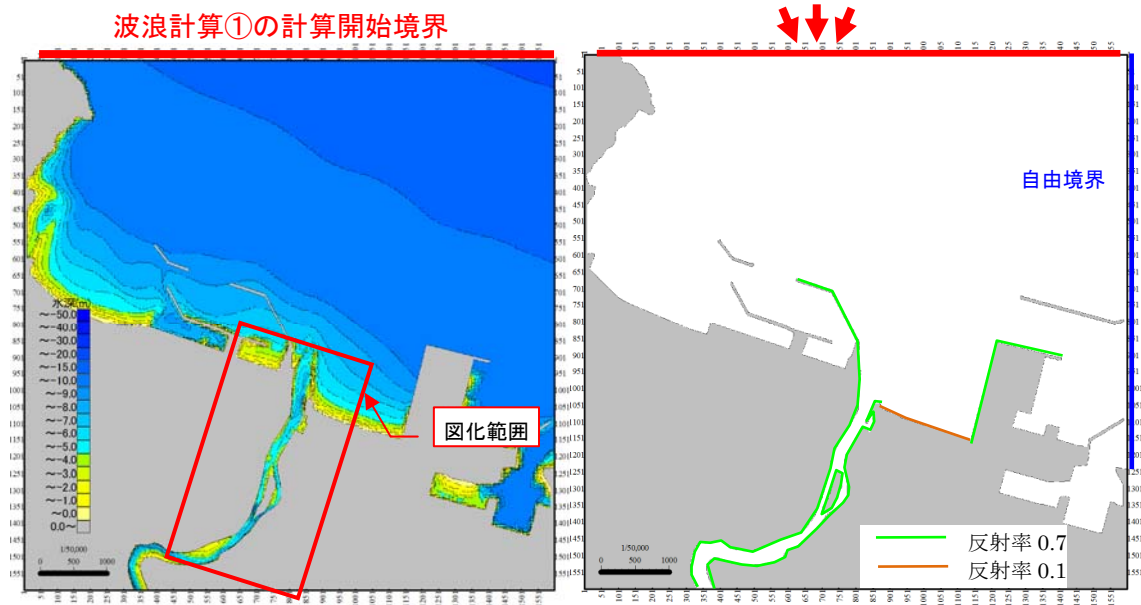


図 4-22 : 計算領域（旧北上川の例）

表 4-10 : 計算に用いる各種パラメータ及び入力値

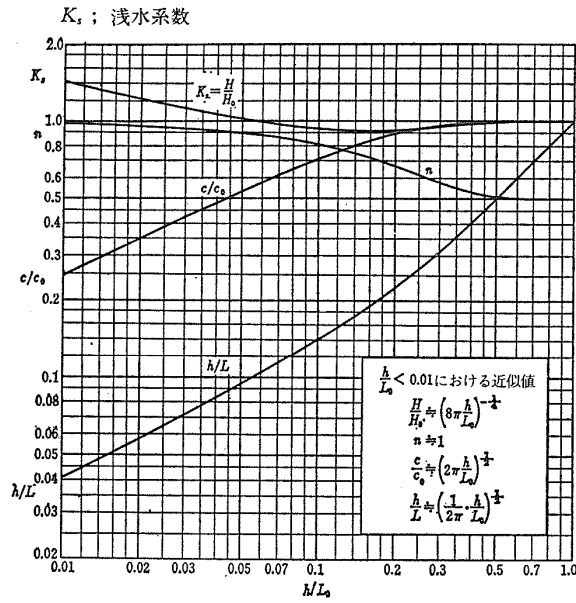
条件	入力パラメータ	設定値
地形	地盤高データ	50m メッシュの地盤高情報 (地盤沈下量分低く設定)
波浪	<ul style="list-style-type: none"> ・ 波高、周期、波向 ・ 方向集中度パラメータ ・ 計算時間間隔 	表 4-9 参照 75 (表 4-9 参照) 0.01s (河道上流端に波浪が到達した段階で計算終了)

(4) 打上げ高の算出

「改良仮想勾配法」は、複雑な海浜断面や堤防形状を有する海岸への波の打上げ高の算出に広く使われている。

河道内水位から打上げ高を算出する手順については、以下の1)から3)により、河道内波高 (H) から換算沖波波高 (Ho') を算出した上で、4)~7)により、打上げ高 (R) を仮定してトライアル計算を行い、打上げ高を算出する。

- 1) 計画高潮位と波高抽出地点の地盤高から水深 (h) を得る。なお、抽出に当たっては、各距離標の前後100mの範囲内を対象とする。
- 2) 水深 (h) と波長 (L) から図4-23を用いて浅水係数 (Ks) を求める。波長 (L) は、繰り返し計算により求める。
- 3) 浅水係数 (Ks) を用いて、河道内波高 (H) から換算沖波波高 (Ho') を求める。



H_0 : 沖波としての波高 (m)

K_s : 浅水係数

出典 : (社) 全国海岸協会 (1987) : 海岸保全施設築造基準解説

図4-23 : 浅海における波の特性の変化

- 4) 打上げ高算定図の H_0/L_0 を求める ($H_0=H_0'$ とする)。
- 5) 入力波に対して碎波水深 h_b を図4-24より求める。
- 6) 打上げ高 (R) を仮定すると、図4-25より $\cot \alpha$ と R/H_0 が計算される。
- 7) H_0/L_0 の線上で $\cot \alpha$ と R/H_0 を満足する打上げ高 (R) をトライアルで求める。

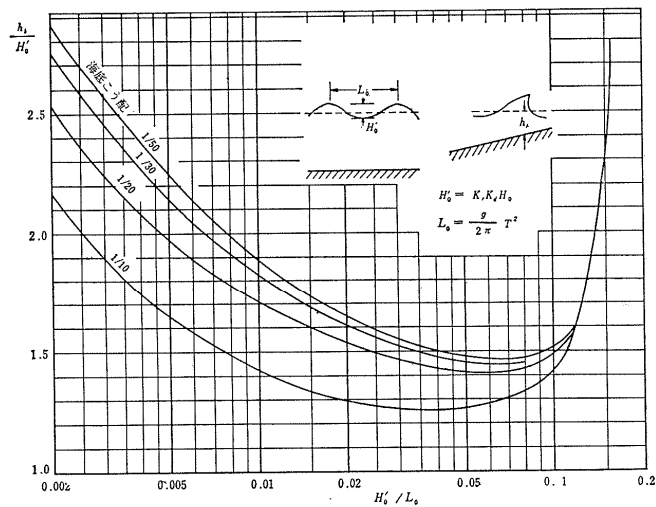
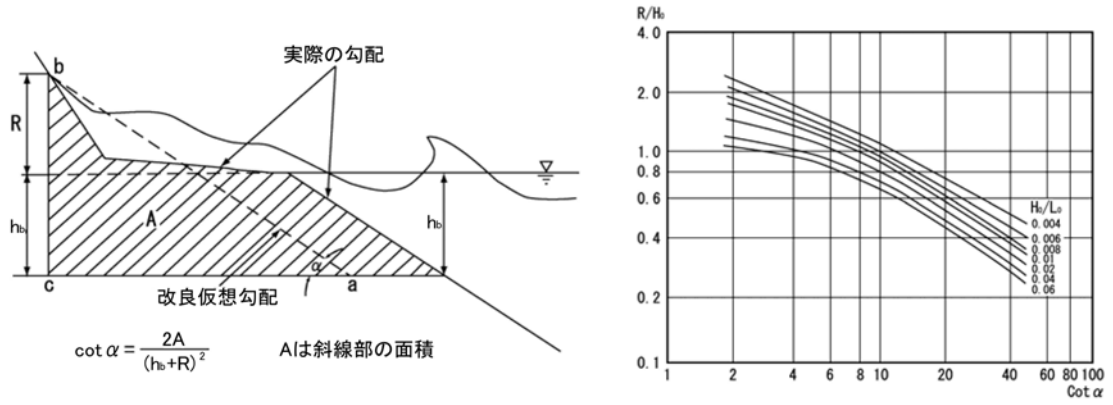


図-2.2.46 波形勾配と碎波水深との関係

出典 : (社) 全国海岸協会 (1987) : 海岸保全施設築造基準解説

図 4-24 : 波形勾配と碎波水深の関係



出典：海岸保全施設の技術上の基準・同解説（H16.6 海岸保全施設技術研究会）

図 4-25：改良仮想勾配法の定義と波の打上げ高算定図