

小規模漁港における長周期波と複雑な地形要因を
考慮した港内堆砂予測に関する研究

2023年1月

小泉 知義

目 次

第 1 章 緒論

1.1 研究の背景	1
1.2 海浜変形シミュレーションモデルの発展と開発	3
1.3 現行の数値シミュレーションモデルの概要	4
1.4 3次元海浜変形モデルにおける波浪場・流動場・漂砂量の計算	6
1.5 海浜変形シミュレーションモデルの将来の発展	9
1.6 研究の目的	9
1.7 論文の構成	14
参考文献	15

第 2 章 小規模漁港における漂砂事例と長周期波

2.1 概略	19
2.2 漁港における漂砂事例のヒアリング調査	19
2.2.1 ヒアリング調査対象漁港	19
2.2.2 ヒアリング結果	21
2.2.3 長周期波調査の対象漁港の選定	26
2.3 長周期波の現地観測	27
2.4 港内波高と流動観測結果	30
2.5 結語	38
参考文献	39

第 3 章 長周期流動を考慮した港内堆砂予測モデルの検討

3.1 概略	41
3.2 港内漂砂に係わる長周期成分波による港内流動	41
3.2.1 既往の平面 2次元流動モデル（既往流動モデル）	42
3.2.2 改良流動モデル	43
3.2.3 WENO 法による移流項の差分化	45
3.2.4 その他の項の差分化と時間積分	47
3.2.5 モデル地形に対する改良流動モデルの計算例	47
3.3 長周期流動の影響を組み込んだ港内堆砂予測モデルの概要	58
3.4 波浪場の計算	59
3.4.1 エネルギー平衡方程式	59

3.4.2 回折を考慮したエネルギー平衡方程式	59
3.5 海浜流場の計算	60
3.5.1 基礎方程式	60
3.5.2 沖側および側方の境界条件	62
3.5.3 摩擦項の評価	62
3.5.4 波の存在による radiation stresses(過剰運動フラックス)項	62
3.5.5 拡散項	63
3.6 漂砂量の計算	63
3.6.1 水深変化	64
3.6.2 漂砂量	64
3.7 モデル地形による検討	67
3.7.1 モデル計算	68
3.7.2 現地地形計算	76
3.7.3 任意のタイミングで抽出した長周期流動による計算	82
3.8 結語	92
3.8.1 モデル地形に対する計算結果	92
3.8.2 現地地形に対する計算結果	92
参考文献	94
第4章 漁港周囲の複雑な地形条件等の影響を考慮した港内堆砂予測モデル	
4.1 概略	97
4.2 漁港周囲の複雑な地形条件	97
4.3 数値モデル	99
4.3.1 岩礁帯を考慮した港内堆砂予測モデル	99
4.3.2 透過型の離岸堤等の構造物を考慮した堆砂予測モデル	103
4.4 現地地形による検証	105
4.4.1 現地地形変化	105
4.4.2 岩礁帯と離岸堤を考慮した堆砂予測モデル	106
4.5 結語	121
参考文献	123
第5章 結論	125
謝辞	130

第1章 緒論

1.1 研究の背景

我が国の国土は四方を海に囲まれた島嶼によって構成され、入り組んだ地形により海岸の総延長は約 34,415 km におよぶ。その様な国土ゆえ、古くから食料の確保、人材や物品の輸送、文化の交流等、社会基盤の多くを海に依存してきた。また、環太平洋造山帯に位置する島嶼ゆえの山がちな地形から、人口や資産、社会経済活動は海岸近傍の平坦な低地に集中している。そのため、沿岸域では、海運・物流、水産、工業、道路、鉄道、エネルギー基地、観光・リクリエーション、廃棄物の処分など多岐にわたる利用が高密度に展開している。しかしながら、沿岸域は台風や季節風、潮流など強力な外力に起因する暴風・高波・高潮・急潮が発生するとともに、地震等による津波や海岸侵食・土砂堆積等の大きな災害リスクを抱えているエリアである。

海の存在は多くの恵みと共に、上記のような高波・津波、高潮や塩害、海岸侵食等の多種多様な災いをもたらし、海との付き合いはそれら恩恵の確保と災害への対策の歴史といえる。特に近年では、地球温暖化の影響とされる災害の激甚化が一般市民にも認知され、実際に 2019 年の台風 19 号による各地の河川氾濫・高波被害や 2020 年の熊本県等で生じた線状降水帯による洪水・土砂災害など、場所を問わず大規模な被害が例年発生していることから、防災意識の向上と対策の必要性が高まっている。地球温暖化の原因と影響の過多については議論の余地があるが、災害の激甚化は顕著であり、沿岸域に限定しても高波浪や高潮による越波、海岸地形変化、海面上昇によって外力が既設構造物の想定設計から逸脱する可能性の増加など、先の大震災による津波等の被害抑制から温暖化リスクに対するものへと比重を移して国や各地方自治体、各研究機関等で検討が行われている。

上記の様な災害リスクの中に、漂砂現象による港湾施設（泊地や航路）の埋没がある。海岸の土砂が波や流れによって流出して海岸線が後退する海岸侵食の様に、発生した際に衆目にさらされる現象ではないために一般的な認知度は低いと考えられるが、埋没による港湾施設の機能喪失は、海の恩恵の多くは港湾を起点に得られることを考慮すれば、地域経済への影響は極めて大きい社会問題である。

近年の港湾に堆積する漂砂の供給源は、多くは近傍の海岸・砂浜の侵食によって生じたものである。海岸侵食は総じて何らかの土砂収支の不均衡に起因する。この不均衡は漂砂の供給源である河口あるいは海崖からの供給土砂量の減少や、突堤や港湾・漁港などの海岸構造物による沿岸漂砂の遮断によって引き起こされるが、実際には、

両者が複合している場合が多い。したがって、新たに海岸構造物を計画する際には、構造物建設が周辺海岸の海浜変形に及ぼす影響をあらかじめ適切に予測する必要がある。こうした構造物の建設に伴う予測は海岸環境の影響評価において基本的で重要な項目であり、海岸工学の主要な研究課題の 1 つとして多くの研究が先達によって実施されてきた。しかし、海浜変形のメカニズムは波、流れ、底質移動など構成要因の 1 つ 1 つが複雑な現象であるため、その解明とモデル化は非常に困難なものである。

そのため既往の研究では海浜変形の最も基本的な構成要因である漂砂の移動形態や濃度分布あるいは漂砂量公式の定式化の検討に重点が置かれ、それらの現地適用性の検討を目的に海浜変形モデル化が進められ、書籍としては「海岸環境工学」（堀川ら、1985）「新編海岸工学」（堀川、1991）「海岸波動」（土木学会、1994）等に集大成された。

前述したように、海浜変形・漂砂現象によって被る社会問題は海岸侵食と港湾施設の埋没が重要だが、我が国の代表的な港湾・航路埋没事例については、北海道の節婦漁港、九十九里浜の片貝漁港、飯岡漁港などが挙げられ、これまで多くの対策検討が実施されてきた。港湾施設の埋没原因としては、基本的に上手側の沿岸漂砂が港口部へ回り込み、堆砂するケースが多く見られる。先の事例は太平洋側の漁港であるが、日本海側の鳥取県や島根県等の港湾も古くから航路埋没に悩まされている。鳥取県内には約 20 の漁港が点在し、鳥取港・境港以外は小規模の漁港で、多くは近傍に岩礁帯と海浜に囲まれた複雑な地形になっている。こうした漁港は冬季における高波浪時には港口部が砕波帯内に位置することが多く、漂砂による港内堆砂が発生し漁船の航行に支障をきたし漁港の機能を果たさなくなることが多々ある。その中でも、船磯漁港、長和瀬漁港、酒津漁港、皆生漁港の埋没問題は深刻である。最近の事例でも、船磯漁港では毎年航路浚渫を実施しており、鳥取県（2021）の検討資料によれば 2018 年度に 11,500 m³、2019 年度に 5,200 m³、2020 年度に 14,434 m³ の土砂を港内から浚渫してサンドリサイクルに供している。島根県においても、2021 年度に大社漁港、仁万漁港、唐鐘漁港、油井漁港等にて航路・泊地の維持浚渫を実施している。なお、本研究では水産庁による指定区分が第 1 種漁港などで、港口が砕波帯内に位置する様な漁港を小規模漁港とした。

小規模の港湾の港内堆砂の既往研究には、速水（1950）の研究を先駆けとして、Ozaki（1964）や Noda（1966）による水理模型実験による研究、桜本ら（1979）、清水ら（1989）、黒岩ら（1993）の現地調査と数値モデルによる検討等が実施されてきた。海外においても、比較的大規模な港湾において Leeuwen（2015）による港口前面を通過する砂による港内航路への堆積予測の研究を始め、Sharaan ら（2017）や楠原ら（2020）など、多数の検討事例が確認でき、近年では Elnabwy ら（2022）による

AI 学習による予測研究も行われている。しかし、風波と海浜流を主な外力とした従来のモデルでは、港口前面での堆砂は説明できても、現実に港湾最奥部まで到達しうる堆砂についての説明は困難な場合が多い。

また、前述の様に小規模の漁港の多くは岩礁帯と砂帯が混在する海岸に整備されていることが多く、その様な地形では砂層下にある岩礁の露出や埋没などを考慮した海浜変形予測が必要となる。しかし、港湾施設の漂砂を対象とした検討は、岩礁帯では漂砂が生じない前提で周辺地形は漂砂供給元である海浜に隣接した状況を想定することが多く、岩礁帯を含む漂砂現象の解析については、池野ら（2001）、Hanson ら（2005）、小林ら（2007）、梅津ら（2010）による研究成果が紹介されている他は、Larson ら（2000）の断面計算および実験、黒岩ら（2011）による 3 次元海浜変形モデルの検討程度に留まる。

以上、我が国を取り巻く海岸に関する諸問題のうち、小規模港湾（漁港）に関する漂砂現象・港内堆積についての問題点について述べたが、未だに解明すべき現象と解決すべき課題は多い。小規模の漁港は、その管理が概ね地方自治体に委ねられ、問題が生じた際の費用や手段が限定されがちであるが、地域密着型の施設ゆえに地域住民の生活に与える影響は大きい。多数存在する小規模の漁港に対する、漂砂現象による港内堆砂の問題の検討には、底質輸送の駆動力となる風波・うねりや海浜流、また長周期波などの外力の検討と、漁港・港湾の外郭施設だけでなく、周辺海岸の条件、砂浜海岸、離岸堤などの海岸構造物、さらに砂層が岩礁帯に混在する様な複雑な海底条件などを考慮した波と流れによる 3 次元の海浜変形モデルの開発が港内堆砂予測精度の向上と効率化に資すると考えられる。

1.2 海浜変形シミュレーションモデルの発展と開発

港内堆砂予測は 3 次元海浜変形モデルをベースとして実施されている。前節で述べたように、我が国の経済的成長の副作用として生じた海岸における漂砂メカニズムの阻害による弊害に対し、ハードウェアによる対応として突堤や離岸堤等の構造物の設置が実施されたが、当時は漂砂メカニズムの知見が限られており、期待した効果に対して予想外の現象が多く発生することとなった。結果として、より高精度な予測評価手法の必要性が増し、漂砂メカニズムの調査・研究・解析が促進されることとなった。さらに、計算機技術の進歩により海浜変形シミュレーションモデルという形で予測手法の開発が進められるようになり、堀川ら（1085）により海浜変形予測の数値シミュレーションモデルを開発するためのフローが示され（図 1.1）、現在でも概ね踏襲されている。

現在では、過去に開発されてきたモデルに対し、波浪、海浜流、底質の挙動等の個々の現象について、理解が進捗した分を数式化して組み込むこと、計算機の技術の

進歩に合わせてモデルを拡充させることが主流といえる。

次節では、実用化されている数値シミュレーションモデルの現在の状況と、発展中の状況について述べる。

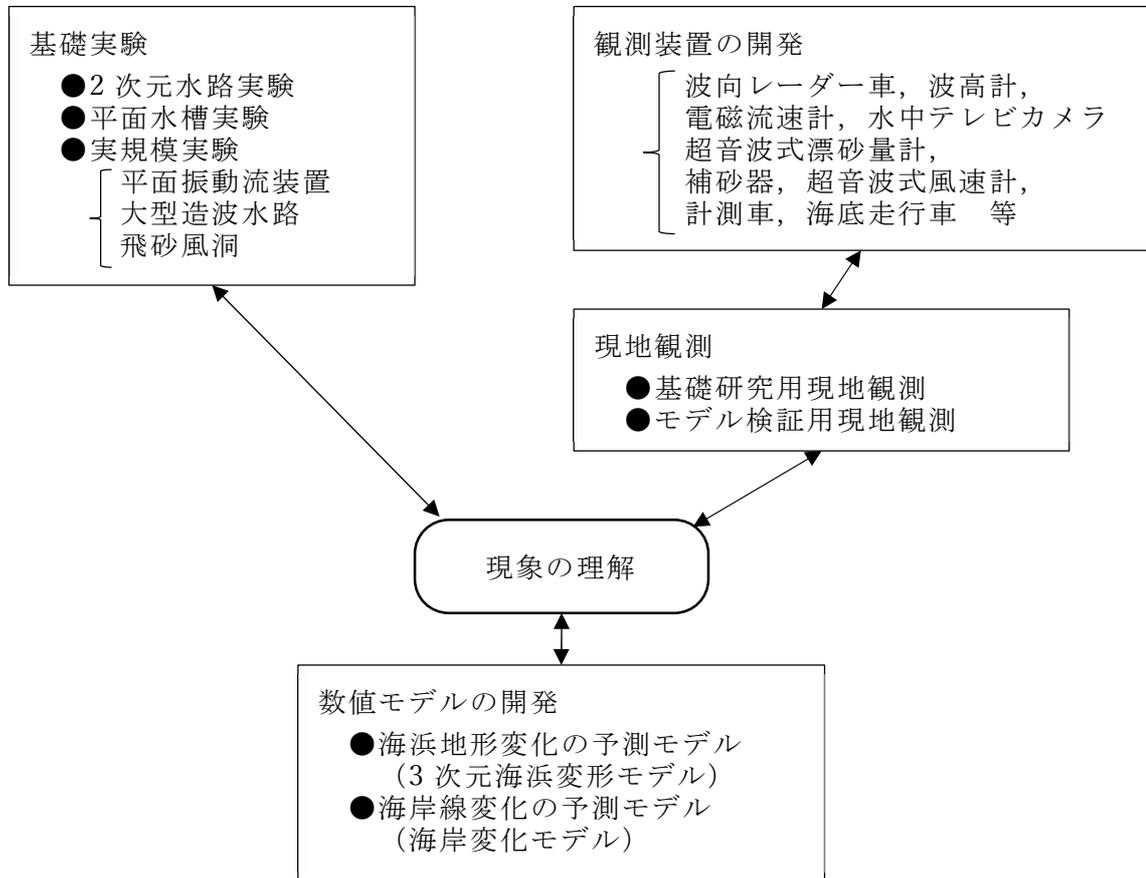


図 1.1 数値シミュレーションモデル開発フロー(堀川ら, 1985)

1.3 現行の数値シミュレーションモデルの概要

実務で使用されている海浜変形を対象とした数値シミュレーションモデルの概要をまとめた一覧表が水産庁漁港漁場整備部発行の「航路・泊地埋没対策ガイドライン(平成26年3月)」に記載されている(表1.1)。本ガイドラインは漁港における施設評価(費用対効果算定)のためのものだが、表にまとめられている内容は海岸侵食対策検討における数値シミュレーションモデルにも概ね適合している。

表1.1の各モデルを時空間的スケールで適用範囲を分類すると、図1.2のようになる(土木学会海岸工学委員会, 1997)。全ての状況で計算負荷が大きいモデルを使用することは計算機の性能等の制約により現実的ではないため、実務において地形変化の予測を行う際は、予測の目的、海域の範囲、予測期間、計算必要時間等によって使用するモデルを選別し、適切に使い分けなければならない。

表 1.1 漂砂シミュレーションモデルの概要

(水産庁(2014) 航路・泊地埋没対策ガイドライン)

	海岸変化モデル		3次元海浜変形モデル	
	汀線変化モデル	等深線変化モデル	長期予測モデル	短期予測モデル
目的	長期的・広範囲な汀線変化予測	長期的・広範囲な平面地形変化予測	中・長期的な構造物近傍海浜の平面地形変化予測	短期的な構造物近傍海浜の平面地形変化予測
適用範囲	～数十年，～数十 km	～10年，～10 km	1～5年，～数 km	一時化～1年，～数 km
対象砂移動	沿岸漂砂考慮 岸沖漂砂考慮せず	沿岸漂砂考慮 (岸沖分布考慮) 岸沖漂砂考慮せず	沿岸漂砂考慮 岸沖漂砂考慮せず	沿岸漂砂考慮 岸沖漂砂考慮
波浪場の計算	エネルギー平衡方程式等	エネルギー平衡方程式等	エネルギー平衡方程式等	ブシネスク方程式等
海浜流の計算	計算なし	計算なし(簡便法で評価する場合もある)	平面2次元モデル	平面2次元モデル
漂砂量の計算	全沿岸漂砂量式	全沿岸漂砂量	・海浜流による漂砂のみ考慮(掃流砂) ※浮遊砂の評価には別のモデルを組み合わせる	・時々刻々の流れと海浜流による漂砂 ・準3次元非平衡モデルで浮遊砂と掃流砂を評価
特徴	・計算時間が短い ・広範囲かつ長期間の予測が可能	・計算時間が比較的短い ・10年間程度の長期予測が可能	・計算時間が比較的長い ・構造物近傍の比較的短期間の地形変化予測に適用	・計算時間が膨大 ・高波浪時の地形変化も計算可能
問題点	・岸沖方向の砂移動を考慮できない	・岸沖方向の砂移動を考慮できない	・縦断地形変化を参考できない ・境界条件の設定やパラメータの同定がやや難しい	・計算時間が長く実用上の制約がある ・前浜の地形変化の計算精度に課題がある

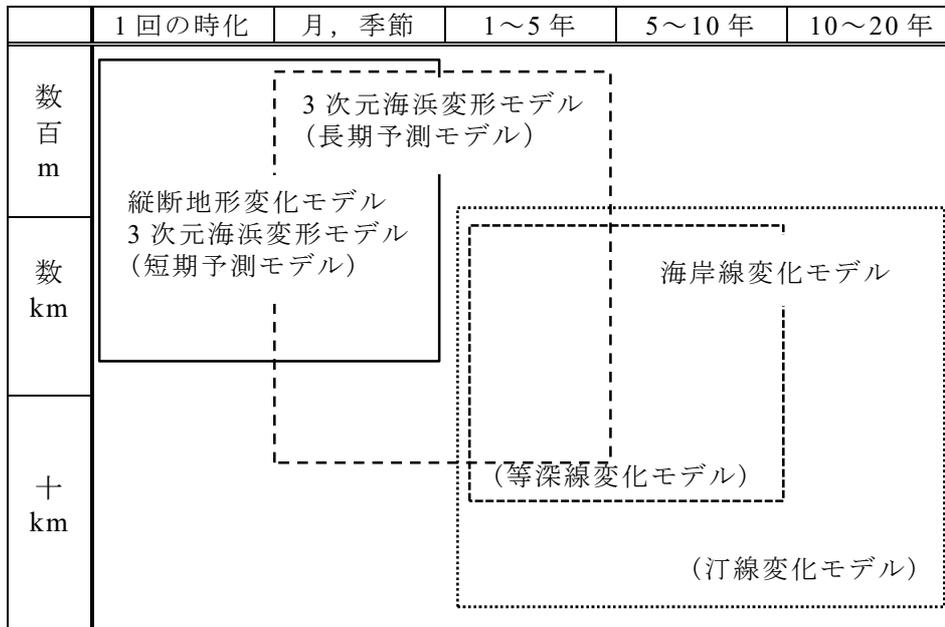


図 1.2 漂砂シミュレーションモデルの適用範囲

(土木学会海岸工学委員会，1997)

これらのモデルは外力である波浪場の計算，底質の輸送力である海浜流の計算，地形変化を決定する漂砂量の計算それぞれの計算手法の組み合わせによって別けられるが，海岸線変化モデルと3次元地形変化モデルでは計算手順に違いがある。

通常，地形変化を引き起こすための外力である波浪場について最初に計算し，その後計算の進捗によって変化する地形，海浜流の作用を波浪の計算にフィードバックして繰り返し計算が行われる。代表的な波浪場の計算方法と適用範囲を表1.2に示す。

表 1.2 波浪場の計算方法

方法	適用範囲
スネルの法則	平行等深線地形を仮定，屈折のみ計算
波向線法	複雑地形，屈折，浅水変形，波向線交差の場合に問題あり
エネルギー平衡方程式	複雑地形，屈折，浅水・砕波変形，(擬似的に回折が考慮可能)，不規則波
ブシネスク方程式	複雑地形，屈折，浅水・砕波変形，回折，不規則波

海岸線変化モデルでは，数十 km 単位の長大な範囲や数十年規模の計算を扱う際に，かつては比較的簡便なスネルの法則や波向線法といった波の変形計算によって，砕波点における波高・波向を求めることが一般的であった。近年では3次元海浜変形モデルと同様に平面波浪場を計算し，砕波諸元を求めることもある。これは，平面的に複雑な地形への対応や，波の屈折，浅水・砕波変形，構造物による回折等の計算が可能であり，不規則波への適用が可能であることによる。

また，海岸線変化モデルでは波高，波向等により総漂砂量が算定される。これは，基本的に沿岸方向の漂砂のみ考慮したモデルであるので，岸沖方向の漂砂は発生せず，漂砂量に応じて汀線等が岸沖方向に移動してもバームやトラフ等の地形変化は発生しないことを前提としている。

本研究の対象は漁港における航路・泊地の堆砂現象であり，漂砂の供給源としての砂浜や岩礁帯など周辺環境の影響や，構造物周辺の洗掘・堆積等の地形変化とその影響による漂砂量の変化等を加味した平面的な漂砂量を求める必要があるため，本研究における港内堆砂予測手法の検討においては3次元海浜変形モデルをベースとするため，次節では3次元海浜変形モデルについての概説と課題等について述べる。

1.4 3次元海浜変形モデルにおける波浪場・流動場・漂砂量の計算

3次元海浜変形モデルでは，図1.3のように1)波浪場，2)海浜流，3)漂砂量の順で計算を実施し，地形変化による波浪変形等を反映させるために1)に戻る繰り返し計算を行う。それぞれの計算手順について概説する。

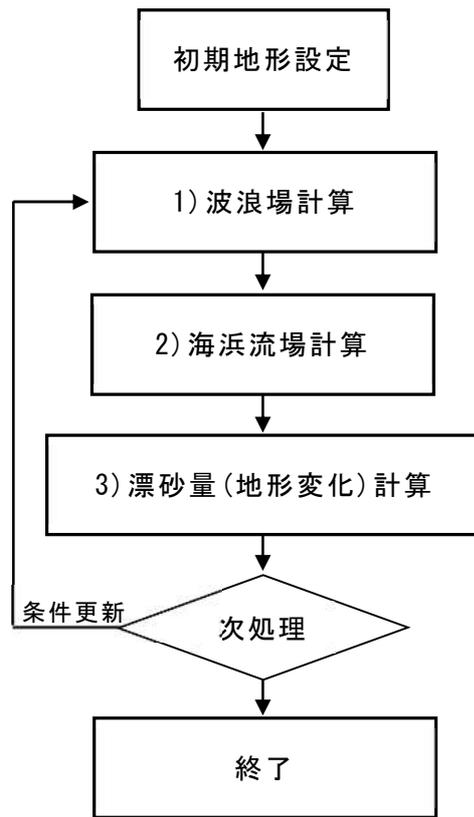


図 1.3 3次元海浜変形モデル処理フロー

1) 波浪場の計算

表 1.2 に示した波浪場の 4 種類の計算手法のうち，3次元海浜変形モデルは主に下段の 2 種類の手法が用いられることが多い。

3次元海浜変形モデルで比較的長期の変化，あるいは広域で用いられるエネルギー平衡方程式は波を位相平均し，エネルギーの連続を基本式として定常解を求めるモデルであり，波による水位の変化を直接解く訳ではないため比較的大きな格子間隔で計算可能であり，計算時間も短縮できる．本来は回折が考慮されていなかったが，間瀬ら(1999)や田中ら(2001)によって解決が図られている。

短期あるいは狭域の領域変化で用いられるブシネスク方程式は，弱非線形，弱分散性を有し波の回折，屈折，浅水変形，砕波などを同時に計算できるだけでなく，波の非線形性による波形の歪みもある程度推定できるモデルであり，極浅海域の防波堤まわりの平面波浪場の計算等に用いられる．平山ら(1998)は拡張ブシネスク方程式を元に ADI (Alternating Direction Implicit) 法を用いて差分化したモデル (NOWT-PARI) を公開しており，各研究者によって利用・改良されている．片山ら(2008)は修正ブシネスク方程式モデルと準 3次元非平衡浮遊砂輸送計算モデルをカップリングしたモデルを用いて三沢漁港の港内堆砂の検討を行っているが，方程式の改良による付加項の

増大により計算方法が複雑化し、計算機の能力が向上した昨今においても、実務に使用するにはハードルが高いモデルといえる。

2) 海浜流場の計算

波浪場の計算によって計算領域の波高，周期，波向等の分布が算出された後，波浪によって引き起こされる海浜流の計算が実施される．海浜流は底質の輸送を担う現象であり，漂砂量の算定に大きく付与するが，海岸線変化モデルでは通常，砕波点における波浪エネルギーフラックス，砕波波高，波向等により漂砂量が算定されるので，海浜流の計算は実施されない．

表 1.1 中では，3次元海浜変形モデルの海浜流の計算は，波の radiation stress に起因する断面平均流を算出する平面 2次元モデルが適用されている．これは，勾配の緩い海底地形の計算領域においては十分傾向を把握できると考えられるが，実際の海域における海浜流は鉛直方向に異なる分布を示し，上層と下層では流向が逆転する状況も発生しうる．この場合，断面平均流では流速が過小に評価され，漂砂量の算定に悪影響を及ぼす．

砕波帯内の乱流，戻り流れ，吹送流の鉛直変化，構造物周辺の乱流等の複雑な海浜流を精度よく再現するためには 3次元海浜流モデルが必要であり，黒岩（1999）等により長らく研究されている．しかしながら，実海域での複雑な海浜流の観測は非常に困難なことが多く，いまだ解明が不十分でモデル化されていない要素が多い．また底層付近の流れは底質による摩擦の影響を大きく受けるが，平面的な底質分布を計算に組み込む事や，底質の粒径の扱い等，議論を要する要素も多く，今後の研究が期待される．

3) 漂砂量の計算

3次元海浜変形モデルは波浪場計算による波による漂砂と海浜流計算による流れによる漂砂を合計したものが正味の漂砂量となる．波と流れの共存下においては，底質は掃流砂と浮遊砂，シートフローといった種々の形態をとり，それらの遷移過程を考慮して個別に算出することは極めて困難であることから，簡略化された式で評価されることが多い．この場合，計算海域の全体的な傾向の再現性は評価できても，砕波帯や構造物近傍といった箇所では再現性に劣る場合が多い．

底質の粒径も漂砂量の算出に大きく関与する要素であるが，河口域のように単一粒径として扱うには無理がある領域で計算を実施する場合，複数の粒径が混在する底質をどのように扱うかが問題となる．多くの場合，複数の粒径の底質に対し構成比率を考慮して個別に漂砂量の計算を行い，結果を合算することで漂砂量とすることが多いが，さらに平面的な分布の変化まで考慮すると非常に難易度が増すことになり，実務

面の必要性も含めて議論の余地があると思われる。

1.5 海浜変形シミュレーションモデルの将来の発展

前述した様に、海浜変形予測は実務面でも利用されているが、海浜変形計算における汀線や水深変化量は定性的に評価されているのがほとんどである。現象の再現性の精度評価においては課題が多い。

これは、再現性の評価に用いる観測データ等がもつ精度の問題を除くならば、海浜変形のメカニズムに対する理解がいまだ途上であり、シミュレーションモデルに反映されていない（できていない）要素、あるいは計算機の能力の関係でオミットされている要素があるためである。

計算機の能力制限に関しては、計算機そのものの性能向上や、並列計算処理技術の向上等によって解決されうる問題である。一方、海浜変形の要素については、日々研究者、実務者等が精力的に調査・研究と議論を続けており、段階を踏みつつ展開している状態である。数値波動水路や高精度 MPS (Moving Particle semi-implicit) 法、DEM (Digital Elevation Model) 等の計算手法の拡充、計算機の能力向上により、より複雑な計算が短いスパンで検討できる様になったほか、底質粒子の挙動を個別に計算することで底質移動への理解が進んでいる。

今後は、これらの個々の要素の理解を深化させるとともに、黒岩ら (2016) が計算を試みた様に、河川・海岸 (港湾) といった、現象としては連続しつつも別箇に扱われてきたフィールドを総合的に計算・評価する方向に向かうと予想される。

1.6 研究の目的

海岸工学分野における漂砂・海浜変形に関しては古くからメカニズムの解明、数値解析を用いた予測手法の研究開発など多くの既往研究があるにも関わらず、すべての現象に対して対応できるものとは言い難い。消波構造物周辺の大規模な局所的洗掘、航路・港湾奥泊地への堆砂問題、東日本大震災後の河口における新たな堆砂問題など、新たに多くの問題が発生している。

日本に数多く存在する中小規模漁港に関する問題に目を向けると、維持管理計画の一環として航路・泊地の維持が必要とされ、ガイドライン (水産庁, 2014) としてまとめられているが、そのような漁港は得てして予算が乏しく、維持・補修の対策に費やされ適切な評価・検討ができていないのが現状といえる。これまでは浚渫等による対症療法的な対策でも維持が可能であったが、今後は適切な予測評価を実施することで総合的な予算の縮小が求められると考えられ、そのため定量的に堆砂量、堆砂位置を適切に予測できるモデル開発が必要と思われる。

これを踏まえ、本研究では漁港の堆砂問題に焦点を当て、地方の中小規模漁港の維持管理に関する問題解決の一助とするための漂砂による堆砂予測システムの構築を目指すものであり、以下に述べる大きく2つの課題解決を目的としている。

1) 長周期波の考慮した堆砂予測モデルの構築

海浜変形の予測に対して一般的に使用される波・流れを考慮した漂砂シミュレーションモデルでは、主に観測結果に基づく有義波を外力とし、港周辺および港口周辺の漂砂現象は高い精度での再現性を有しているものの、港の奥側泊地での土砂堆積と港内流動を再現する事が難しい。これは、外力として周期数秒～十数秒程度の風波およびうねりのほかに、周期数十秒以上の長周期波成分が影響しているためではないかと考えられる。図 1.4 に示すように、海の波の相対的な振幅は風による風波・うねりが最も大きく、次いで潮汐振動であるが、30 s 以上の長周期の波も無視できない要因である。周期 30 s 以上の長周期波は風・気圧変化や低気圧等の気象擾乱、湾港の固有振動か津波などにより発生するが、特に 30 s～5 min 程度の長周期波は伝播した波の波群が持つエネルギーが砕波により解放されて発生するものがあり、高波浪時の活発な漂砂現象が生じる砕波帯内では、砕波による乱れや戻り流れとともに長周期波が底質輸送に影響を及ぼし、港湾内へ浮遊砂を輸送することが港内埋没の原因のひとつと考えられる。本研究では、このような長周期波を対象としている。

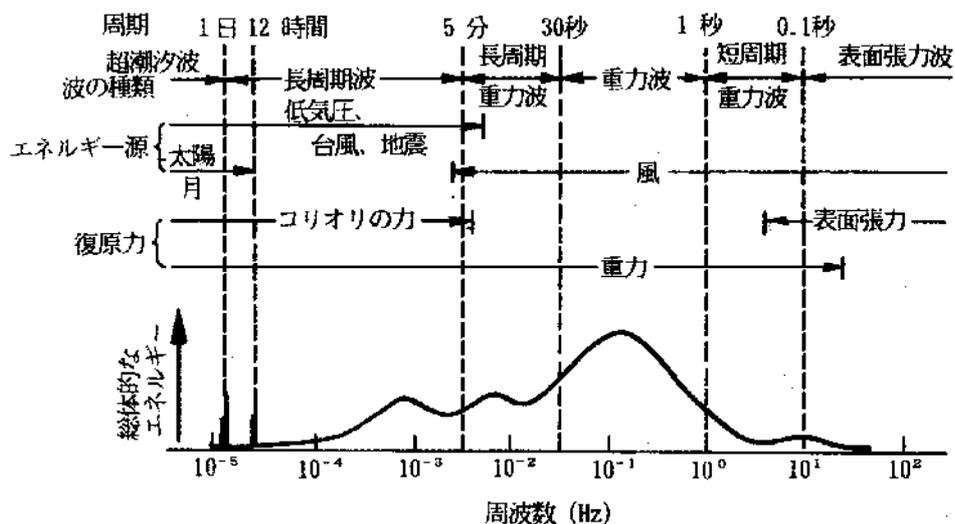


図 1.4 周期による海の波の分類 (W. H. Munk, 1951)

参考文献：磯崎一郎 (1990) 波浪概論, 財団法人日本気象協会

長周期波は沖合から汀線に近づくにつれて波高を増大するため、海岸の汀線付近では通常の波浪成分よりも支配的になり、沿岸の水理特性や漂砂・海浜変形に大きな影

響を及ぼす。この影響については佐藤ら（1990）、Roelvink（1993）などによる前浜の侵食や多段砂州の形成等の検討，断面地形変形に対する数値モデルの提案がなされている。また，長周期波の発達が沿岸漂砂に及ぼす影響とその海浜変形との相互作用について佐藤（2002）が新潟海岸を例に論述している。

一方，港湾における長周期波に着目した研究は，港内水面変動（船体動揺）に関しては評価手法と対策はマニュアルに整理されているが，港内流動と漂砂に関する研究は数が乏しく途上の分野といえる。太平洋岸の松岡ら（1991），北海道北部の三船ら（2001，2002）等が比較的大規模な漁港で行っているが，日本海西部の小規模漁港での研究はみられず港内の堆砂メカニズムに関する知見が乏しい。

そこで本研究では，将来的にモデルによる港内堆砂現象の再現計算の精度向上を念頭に置き，港内堆砂が問題となっている鳥取県内の漁港において，港奥の堆砂に対する長周期波の影響把握を目的とした調査と解析を行った。また，長周期流動を考慮した港内の流れ場の再現し，3次元海浜変形モデルへの長周期変動の組み込みを試みた。

2) 漁港周辺の地形条件を考慮した堆砂予測モデルの構築

小規模な漁港に多い問題として，従来の漁村から発展したゆえに地形等の改変を行わず整備された結果，港口が漂砂の発達する砕波帯内に位置するほか，岩礁帯と砂帯，さらに離岸堤等の構造物が混在する地形条件になっていることがある。そこで，このような複雑な地形条件における漂砂計算の研究を実施した。これは，従来の研究では岩礁帯は地形変化が生じない前提で漂砂エリアの対象外とすることが多いが，実際は高波浪時では岩礁帯の上も漂砂の通過あるいは堆積・再浮遊が生じており，現況再現計算の再現性低下の一因となっていると考えられるためである。

岩礁帯等の固定地盤を含む漂砂現象の解析については，Larsonら（2000）が珊瑚等の固い海底により海岸の砂の洗掘量が制限される状況に対する断面的な実験とSBEACH数値モデルを用いた検討を行っており，同様の方法論を用いてHansonら（2005）が2次元モデルによる河口と導流堤近傍の地形変化の検討を行っている。国内では池野ら（2001）が鉛直1次元移流拡散方程式による浮遊漂砂量・掃流漂砂量モデルを用いて岩礁帯や露岩による漂砂量の制限を組み込んだ検討と室内実験および青森県東通村での現地観測結果との比較検討を行っている。小林ら（2007）は八戸港近傍の恵比寿浜漁港を対象にした現地観測と，樺木の浮遊砂フラックスモデルに岩礁帯による侵食量制限を組み込んだ検討を行っている。梅津ら（2010）は苫小牧港を対象に，地層探査機等を用いた砂層厚の計測等を含む現地調査と，ビジネスモデルの流動場に二次元移流拡散方程式による浮遊砂モデルに岩礁域の砂質土の分布及び砂層厚を考慮した検討を行っている。また，黒岩ら（2011）は酒津漁港を対象に，準3次元海浜流モデルに樺木の浮遊砂フラックスモデルと池野らの手法を組み合わせ岩礁帯の影

響を考慮した検討を行っている。

また、砂れき海岸の防護施設として定番といえる離岸堤は、その多くは費用対効果などの観点から消波ブロックの積み上げ構造によって施工される。このような構造物は、多くは海岸保全施設技術研究会（2004）などでまとめられている基準によって設計されており、設計基準自体も予測手法の技術的進歩を受けて宇多ら（2011）などにより改善案の検討が行われている。こういった構造物は、本研究で対象としている地方の小規模漁港などでは、完工から年月の経過による破損・沈下・変形等が生じたり、景観上の問題やコストの問題で低天端の離岸堤が整備された結果、本来なら防げるはずの越波や流れ・漂砂の侵入等が発生して思わぬ被害を生じさせることがある。しかし、通常行われる海浜変形予測モデルによる検討は、構造物の種類と配置による影響は考慮するが、構造物の劣化を考慮した検討は劣化度合をモデル化することが難しく、研究事例としてもほぼ無い。

この様に、岩礁帯を考慮した海浜変形予測モデルの構築と検討は先人により複数実施された事例がある。しかし、現地砂層厚の把握の困難さ等の要因もあり、その数は限定的である。また、離岸堤等の構造物の性能劣化による影響も検討事例は乏しい。

以上の事から、本研究では前述の長周期波を考慮した数値モデル検討と並行して、漁港周辺に岩礁帯に想定砂層厚を与えて洗掘量を制限可能なモデルの構築と現地地形変化との比較による検討を行うとともに、漁港周辺施設の離岸堤の沈降等による越波や漁港外郭施設の波の透過を考慮した堆砂予測モデルの検討を行う。

なお、堆砂予測モデルの構築において本研究で留意した点は、将来的に実務で用いる場合の事を見越して極力簡便かつ実用に耐える精度を確保可能なモデルを選択して改良することである。実用に耐える精度とは、主に港内堆砂量に関する精度である。堆砂量は港形変更などの対策の費用対効果の検討に必須情報で、その精度向上は効果的な対策案の選定に重要であり、簡便なモデルについては、砕波と関連する長周期の影響は非線形性・不規則性を考慮したブシネスクモデル等を用いた手法があるが、前述のように計算に要する労力が非常に大きい。また、多数の要因を一元的にモデルに組み込むと処理コストのさらなる増大が想定され実務での使用に支障が発生する懸念がある。そこで、想定される要因によって処理を取捨選択することで比較的簡便な港内堆砂予測システムの構築を目指すこととした。構築する港内堆砂予測システムの処理イメージを図 1.5 に示すとおりであり、地形条件、波浪特性によって、長周期波のみ考量、岩礁、離岸堤などの地形条件のみ考慮という選択的に堆砂予測も可能となるものである。

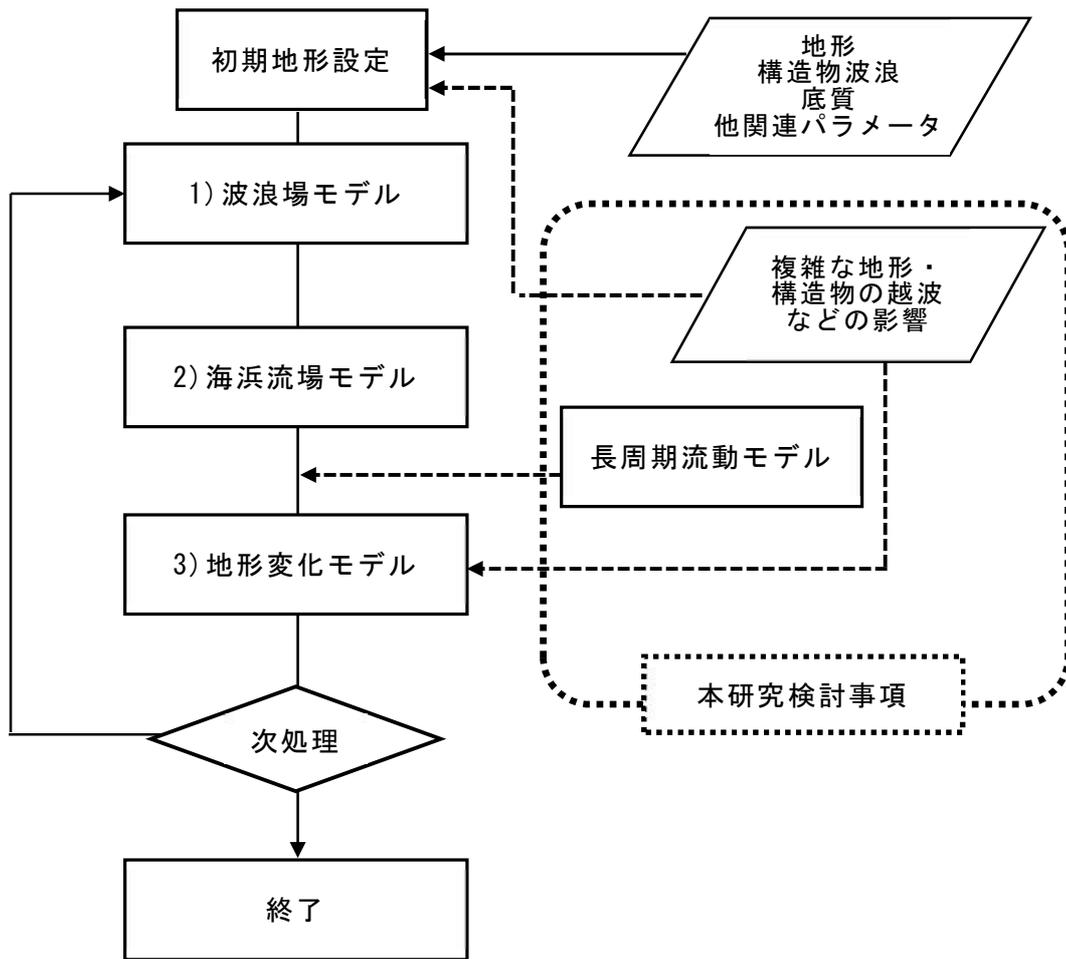


図 1.5 港内堆砂予測システム処理フローイメージ

1.7 論文の構成

本論文は、本章を含めて全体で 5 章から構成される。各章における内容は以下の通りである。

第 2 章では、実際の小規模漁港で発生している漂砂・港内堆砂現象について、ヒアリング調査による結果を整理するとともに、本論文のテーマの 1 つである長周期成分波について、現地調査結果から小規模漁港での実態と特徴を確認する。

第 3 章では、長周期成分波による港内流動を計算する 2 種類の流動モデルについて概説し、モデル地形による比較検討を実施する。さらに、検討した長周期成分流動モデルによる流動を海浜変形モデルに組み込みモデル地形にて地形変化計算を行いその適応性を確認する。また、第 2 章の現地調査にて得られた現地漁港の状況を、それぞれの漁港地形をモデル化した地形にて計算し、その適用性を確認・検討する。

第 4 章では、小規模漁港周辺の特徴的な地形として見られる岩礁帯や越波や透過が生じる離岸堤などの影響を含めた漁港堆砂予測モデルを構築し、実際に港内堆砂で問題となっている漁港を対象として、岩礁帯の存在が周辺地形変化や離岸堤の透過性が、港内堆砂予測に与える影響などを検討し、本研究で提案した堆砂予測モデルについて、現地への適用性を確認する。

第 5 章では、この研究を通して得られた主要な結果について述べるとともに、残された問題点と検討すべき課題について述べ結論とする。

参考文献

- 池野 正明・清水 隆夫・小林 英次・石井 敏雅，齊藤 知秀(2001)：露岩域を有する砂浜海岸に港湾を建設する場合の 3 次元海浜変形数値予測モデルの適用，海岸工学論文集，第 48 卷，pp.406-410.
- 鶴崎 賢一・栗山 善昭(2009)：潮流と海浜流による砂と凝集性土砂の底質輸送と干潟の地形変化に関する 3 次元数値モデルの開発と現地適用，港湾空港技術研究所報告，第 48 卷，第 2 号，pp.37-62.
- 宇多 高明・野志 保仁・星上 幸良(2011)：離岸堤の設計基準の改善策，土木学会論文集 B3，vol.67，No.2，pp.I-1087-I-1092.
- 海岸保全施設技術研究会編(2004)：海岸保全施設の技術上の基準・同解説.
- 海津 博行・平野 誠治・山下俊彦・中山哲巖・栗山善昭・佐藤寿彦・石黒一郎(2010)：岩礁域に囲まれた苫前漁港の漂砂特性，土木学会論文集 B2 (海岸工学)，Vol.66，No.1，pp.511-515.
- 片山 裕之・牧野 弘幸・鈴木 彰・中山 哲巖(2008)：三沢漁港の地形変化特性の検討，海岸工学論文集，第 55 卷，pp561-565.
- 楠原 啓石・Thi HA・水谷 聖・大仲 晋(2020)：ベトナム国ラックフェン港の航路増深後における埋没特性の検討，土木学会論文集 B2 (海岸工学)，Vol.76，No.2,pp.I-3300-I305.
- 黒岩 正光・野田 英明・高橋 正治(1993)：港内堆砂現象に関する数値実験，海岸工学論文集，第 40 卷，pp.501-505.
- 黒岩 正光・松原 雄平・長谷川 幸彦・市村 康・吉津 憲・小泉 知義・三納 正美・山本尚嗣(2011)：岩礁帯を考慮した 3 次元海浜変形予測モデルに関する研究，土木学会論文集 B2 (海岸工学)，Vol.67，No.2，pp.531-535.
- 小林 秀人・原田 久志・小野 信幸・伊藤 啓勝・黒木 敬司(2007)：恵比須浜漁港周辺の岩礁部における漂砂特性の検討，海岸工学論文集，第 54 卷，pp.551-555.
- 近藤 栞・大西 文雄・橋本 茂樹(2016)：苫小牧港西港区外港路における漂砂機構の検討について，北海道開発技術研究発表会，第 60 回.
- 桜本 弘・佐々木 民雄・西原口 隆(1979)：構造物周辺の流れと砂移動に関する現地観測，海岸工学論文集，第 26 卷，pp.200-204.
- 佐々木 崇之・氏井 健一・沼野 裕二・佐藤 勝弘(2001)：湖口部の地形変化に関する数値シミュレーション，漁村総研平成 13 年度調査研究報告，No.16，pp.666-670.
- 佐藤 慎司・光信 紀彦(1990)：不規則波による海浜断面地形変化の数値計算，海岸工学論文集，第 37 卷，pp309-313.

- 佐藤 慎司 (2002) : 長周期波と漂砂・海浜変形との相互作用について, 海洋開発論文集, 第 18 巻, pp161-166.
- 島根県農林水産部水産課 (2022), 令和 3 年度 漁港漁場整備等の実施箇所図, <https://www.pref.shimane.lg.jp/industry/suisan/gyokou/shiryo/zigyou-kasyo/index.data/itizu.pdf?site=sp>, (2022.10.1).
- 清水 琢三・野谷 斎・近藤 浩右・西 裕司・山本 正昭(1989) : 海浜変形予測手法の現地適用性に関する研究, 海岸工学論文集, 第 36 巻, pp.404-408.
- 水産庁漁港漁場整備部 : 航路・泊地埋没対策ガイドライン, 水産庁, 2014.3, pp.16-25.
- 田中 茂信・山本 幸次・鴨田 安行・柳町 俊章・小野松 輝美・後藤 英生 (1995) : 仙台湾南部海岸における土砂移動機構の観測, 海岸工学論文集, 第 42 巻, pp.666-670.
- 田中 良男, 平石哲也(2001) : 回折を考慮したエネルギー平衡方程式による波浪変形計算の適用性の検討, 港湾技術資料, No.1000, pp.4-19.
- 鳥取県県土整備部河川課 (2021) : 令和 3 年度鳥取沿岸土砂管理連絡調整会議 (東部地区), <https://www.pref.tottori.lg.jp/301824.htm>, (2022.10.21), 資料 6, p.1-84.
- 土木学会海岸工学委員会(1997) : 漂砂環境の創造にむけて, (社) 土木学会, pp.217-220.
- 速水 頌一郎(1950) : 泊港湾の漂砂に関する研究, 鳥取県漂砂対策調査報告書, pp.35-50.
- 平山 克也ら(2004) : ブシネスク研究会, 海洋研究領域波浪研究グループ, <http://www.pari.go.jp/unit/haro/bsnsq/>, (2022.5.21).
- 堀川 清司(1985) : 海岸環境工学, 東京大学出版会, pp.1-4.
- 間瀬 肇・高山 知司・国富 将嗣・三島 豊秋(1999) : 波の回折を考慮した多方向不規則波の変形計算モデルに関する研究, 土木学会論文集, No.628/II-48, pp.177-187.
- 松岡 道男・木下 勝尊・山本 正昭・森口 朗彦 (1991) : 長周期水理特性を考慮した港内堆砂モデルの適用性の検討, 海岸工学論文集, 第 38 巻, pp.416-420.
- 三船 修司・川口 勉・松本 英明・渡辺 博美・荒井 直人・山下 俊彦 (2001) : 北海道日本海沿岸の長周期波特性と漁港内の漂砂現象に関する現地観測, 海岸工学論文集, 第 48 巻, pp.546-550.
- 山口 圭太・橋本 茂樹・早川 篤 (2017) : 釧路港西港区における漂砂特性を踏まえた解析モデルの構築について, 北海道開発技術研究発表会, 第 61 回.
- Hanson,H. and A. Militello (2005) : Representation of nonerodible (hard) bottom in two-dimensional morphology change models, ERDC/CHL CHETN-IV-63, US Army Corps of Engineers.
- Mahmoud, Sharaan・Mona,G.,Ibrahim・Moheb,Iskander・Ali,Masria・Kazuo, Nadaoka (2018) : Analysis of sedimentation at the fishing harbor entrance, case study of El-Burullus,Egypt, Journal of Conservation (2018), 22, pp.1143-1156.
- Mohamed,T.E,Inabwy・Emad,Elbeltagi・Mahmoud,M.E,lBanna・Mohamed,Y.E,lsheikh・

- Ibrahim,Motawa • Jong,Wan,Hu • Mosbeh,R.,Kaloop (2022) : Conceptual prediction of harbor sedimentation quantities using AI approaches to support integrated coastal structures management, Journal of Ocean Engineering and Science, Volume 7, Issue 6, pp.1-11.
- Noda.H (1966) : Model study on the filling-up of a fishing harbor by drifting sand, 10th I.C.C.E., pp.323-345.
- Ozaki.A. (1964) : On the effect of an offshore breakwater on maintenance of a harbor constructed on a sandy beach., Proc.9th I.C.C.E., 323-345.
- Roelvink, J.A. (1993) :Surf beat and its effect on cross-shore profiles, Ph.D Thesis, Delft University of Tech., 150p.
- Van,Leeuwen,Y.B. (2015) : Port and channel sedimentation: A hybrid model for rapid assessments, Civil Engineering and Geosciences of Delft University of Technology.

第2章 小規模漁港における漂砂事例と長周期波

2.1 概略

緒論にて述べたように，港湾内で発生する堆砂等の港内漂砂メカニズムの一因として長周期波による流動はかねてより研究されており，松岡ら（1991）や三船ら（2001, 2002）が現地調査結果を踏まえた検討を行っている．しかし，これらの事例は比較的大規模な漁港での検討であり，本研究で対象としている小規模漁港での長周期波の情報は非常に不足している．また，検討された漁港も北海道や太平洋沿岸に位置したもので，日本海側や西日本での検討事例はみられない．

そこで本研究では，港内堆砂予測モデルの構築に先立ち，港内堆砂が問題となっている小規模漁港を対象に港内の長周期波の有無とその特徴を現地観測によって把握することとした．小規模漁港における港内堆砂等の漂砂現象の実態と，現地での長周期波の有無とその特徴を確認するために，鳥取県内の港内堆砂が問題となっている複数の漁港にて港内堆砂に関するヒアリング調査を実施した．その中から現地調査に適すると判断した漁港に対し港内長周期波に関する現地観測調査を実施し，その結果を解析し取りまとめた．

2.2 漁港における漂砂事例のヒアリング調査

2.2.1 ヒアリング調査対象漁港

現地調査に先立ち，鳥取県内において港内堆砂が顕著で問題となっている複数の漁協等へのヒアリング調査を実施し，各漁港の港内堆砂状況の概要の把握と研究対象とする漁港の選定を行った．ヒアリング調査は西側から順に泊漁港，長和瀬漁港，夏泊漁港，船磯漁港，酒津漁港の5漁港である．図2.1にヒアリング調査を実施した漁港の位置と漁港形状を示す．

これらの漁港はその利用範囲が地元の漁業を主とする第1種漁港に分類される漁港である．いずれも岩礁帯と砂浜が隣接する地形条件となっている．戦後の社会・経済発展と共に漁港と関連施設を拡充してきたが，主に冬季の高波浪によって生じる漂砂により，砂が港内へ堆積して漁船が通行不能になる等，漁業活動に重大な支障をきたしている．そのため，サンドポケットの設置や3年毎の補修浚渫など，様々な対策が行われている．漁港関係者からのヒアリングにより，漁港で発生する港内堆砂現象の具体的な情報を得ることができた．

各漁港に対するヒアリングの結果を次項に示す．



図 2.1 ヒアリング調査漁港の位置および漁港形状

2.2.2 ヒアリング結果

1) 泊漁港

泊漁港に対するヒアリングは平成 29 年 6 月 16 日（金）10：30～11：20 に実施した。以下にヒアリング結果を列挙する。また図 2.2 にそのヒアリング結果を基に図化した港内堆砂メカニズムのイメージを示す。

【ヒアリング結果】

- ・ 沖防波堤の周囲を消波ブロックで囲ってから、沖防波堤内側の堆砂が進行した。
- ・ 西側突堤の付け根の潮抜き通路は、堆砂のためにあまり機能していない。
- ・ 港西側の砂浜の砂が、園川の流れによって沖に運搬され、西側突堤を回って港内に侵入する（別に離岸流が存在すると考えられる）。
- ・ 浚渫量は年間 3,000～5,000 m³ ほどである（県の記録では H28 年度 14,619 m³）。
- ・ 堆砂は冬季のみ発生する。
- ・ 夏季は台風等で沖側に輸送される。
- ・ サンドリサイクルで港の東側に覆砂したら悪化した印象を受ける。
- ・ 3～4 月の大潮期には干満差で突堤周辺に渦ができることもある。

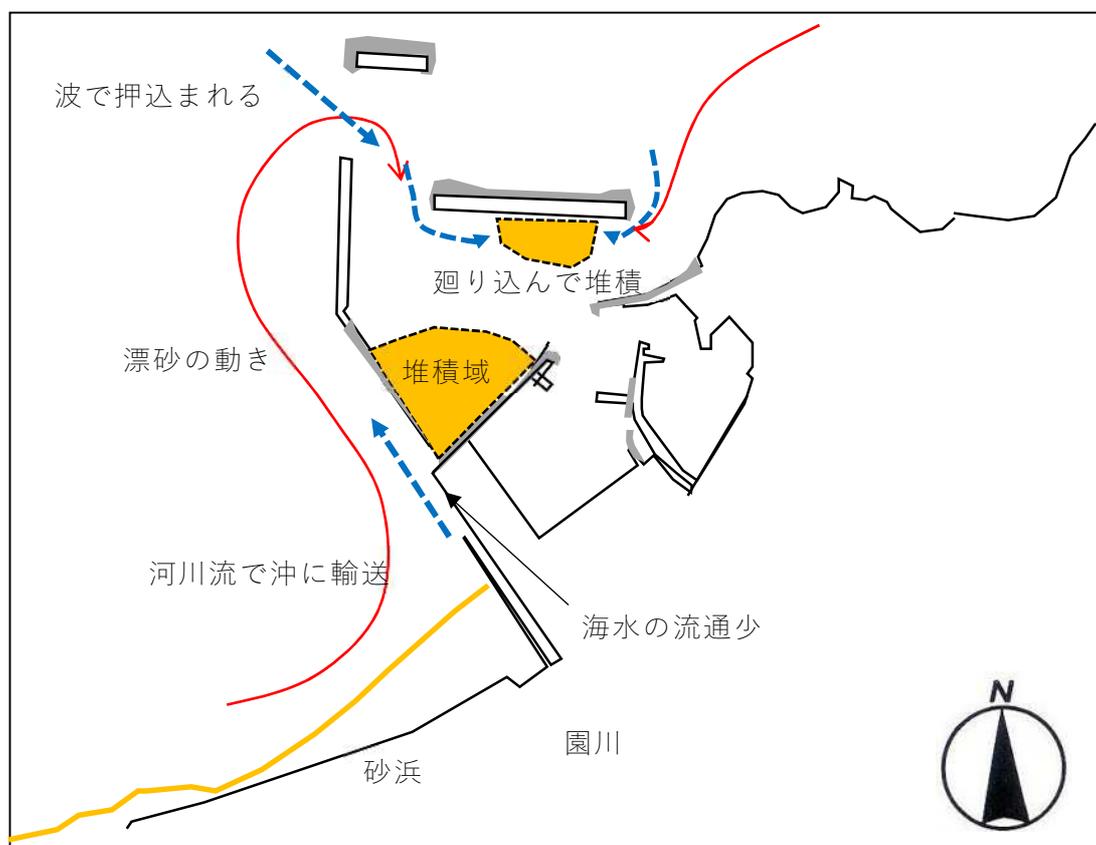


図 2.2 泊漁港における港内堆砂メカニズムイメージ

2) 長和瀬漁港

長和瀬漁港に対するヒアリングは平成 29 年 6 月 22 日（木）10：00～11：00 に実施した。同様にヒアリング結果と図 2.3 に港内堆砂メカニズムのイメージを示す。

【ヒアリング結果】

- ・堆砂は局所に溜まるわけではなく、港（とその周辺）の全体的に進行しているイメージがある。
- ・港口外側周辺に特に堆砂する。その結果、1.5～2 m 程度の波で港口が砕波帯となり、通行不能となる（近隣の漁港が操業している時でも不能な日がある）。
- ・港の西側はもともとカキ・アワビ・サザエ等の磯漁場であったが、すっかり砂浜になってしまった。
- ・西側の砂止め突堤の沖側はブロック堤なため、そこから砂が港内に透過する。
- ・東側の突堤も透過性なため、砂が透過する。
- ・港内の小河川からも砂が供給される。
- ・港形が北からの波浪を防がない形状なので、船溜りまで高波浪が侵入する。
- ・東沖防波堤の延長は予算の都合で停止したままの状態である。
- ・漁民としては、西側の砂を（砂浜ごと）移動してほしい（磯場を復活させたい）。

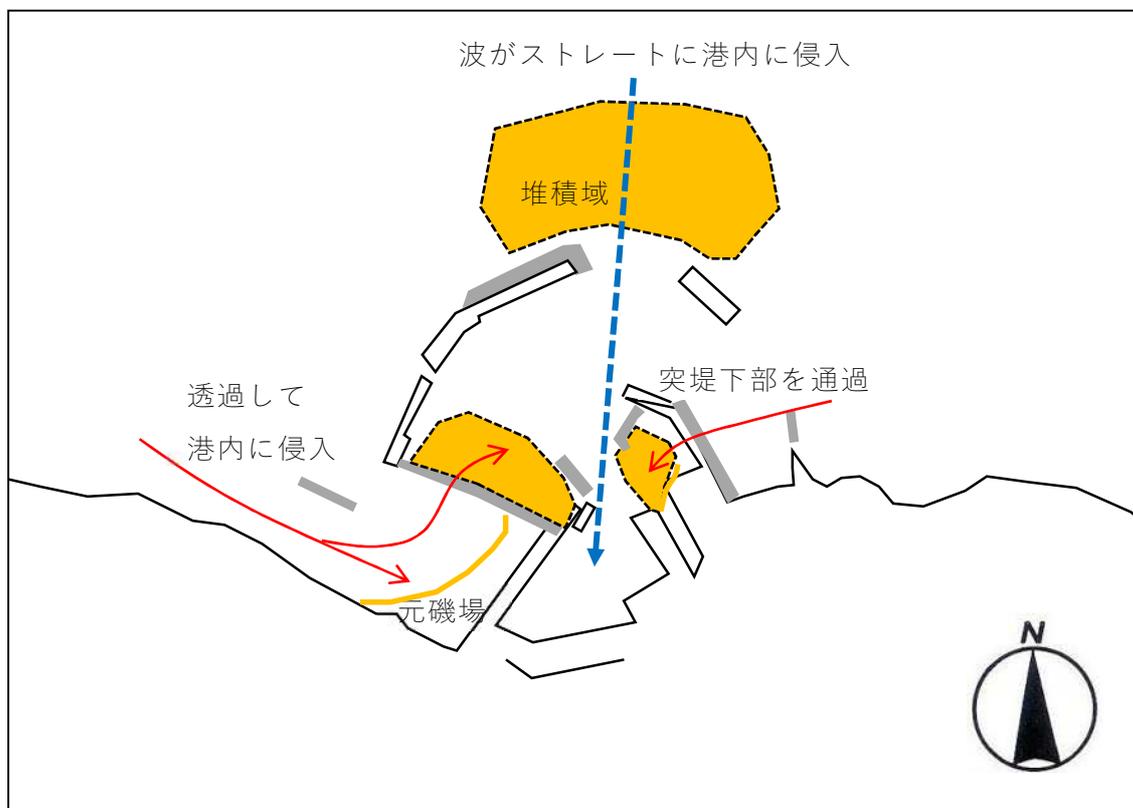


図 2.3 長和瀬漁港における港内堆砂メカニズム

3) 夏泊漁港

夏泊漁港に対するヒアリングは平成 29 年 7 月 7 日（金）14：00～15：00 に実施した。以下にヒアリング結果と図 2.4 に港内堆砂メカニズムのイメージ図を示す。

【ヒアリング結果】

- ・ 冬季に 1 回の高波浪で出港が不能になるほど港口に堆積した（平成 28 年）。また、一番奥側まで堆積したので、バックフォーによる浚渫を実施した。
- ・ 港口外側は急激に水深が増すが、その手前の棚状の箇所に堆積する。
- ・ 北側突堤ケーソンの隙間から侵入する波・砂で、突堤に沿って山状に砂が堆積していたが、隙間を塞いだら改善した。
- ・ 西側の砂浜は季節により堆積・侵食を繰り返す。
- ・ 北側の離岸堤を延長してほしい。高波浪時には波濤が堤防を越波して港内も荒れることがある。

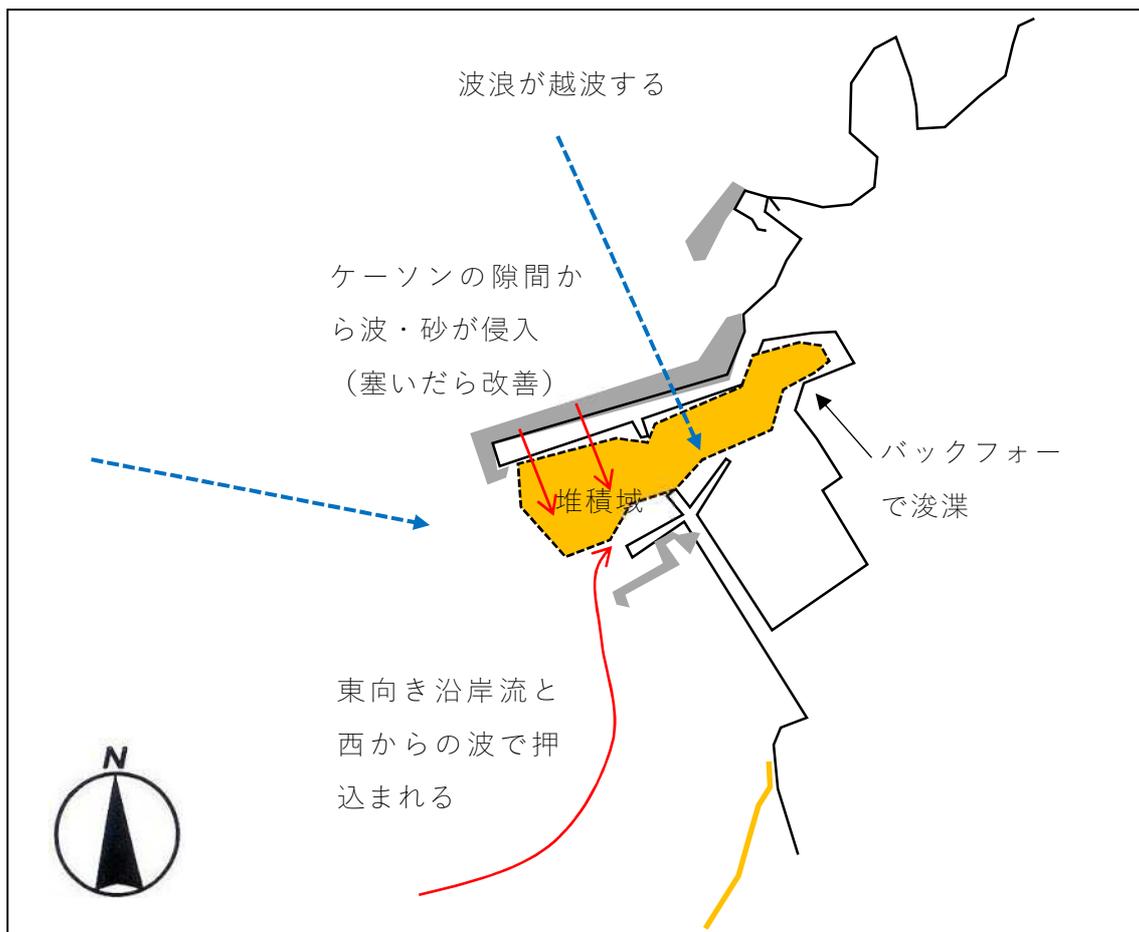


図 2.4 夏泊漁港における港内堆砂メカニズム

4) 船磯漁港

船磯漁港に対するヒアリングは平成 29 年 6 月 30 日（金）14：00～15：00 に実施した。ヒアリング結果と図 2.5 に港内堆砂メカニズムのイメージを示す。

【ヒアリング結果】

- ・港形を変更（現在の旧港入口を閉鎖し，港奥側に入口を新設するなど）して堆砂の影響を小さくする方法もあるのではないか。
- ・港内の堆砂を浚渫（4,000 m³）するためのグラブ船が，港口が浅すぎて侵入できず，港口から航路を浚渫（5,000 m³）することになった。さらに追加で港奥の 3,000 m³ 浚渫することになった。
- ・外防波堤はケーソンが割れて中込砂が流失した結果，波がぶつかる大きな騒音・振動を発生するようになったため，消波ブロックで覆っている。
- ・消波ブロックを設置してから，堤防後背部は返って波が高くなった。反射波による打消し効果が弱くなったためという印象がある。
- ・外防波堤の両脇から波が侵入することから，防波堤後背で三角波が発生し，外の波高があまり無い時でも通行が困難になることがある。

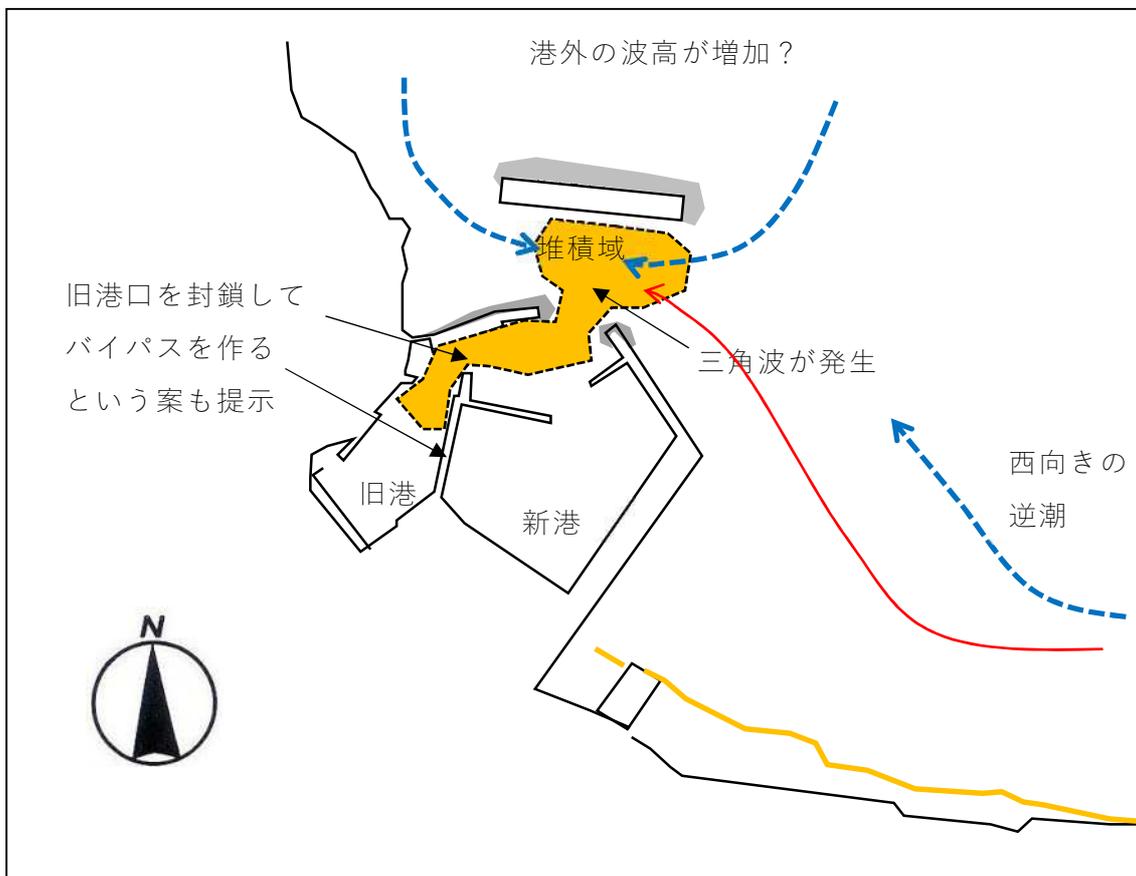


図 2.5 船磯漁港 港内堆砂メカニズム

5) 酒津漁港

酒津漁港に対するヒアリングは平成 29 年 6 月 30 日（金）16:00～17:00 に実施した。以下にヒアリング結果と図 2.6 に港内堆砂イメージの概要を示す。

【ヒアリング結果】

- ・ 東側の岩礁帯は、冬季には（砂・礫で削られて）表面が滑らかになることから、ある程度は高波浪時に砂が通過していると思われる。
- ・ 港内護岸・突堤等の周辺に砂が堆積している。護岸に沿って小波が伝播し、それと共に砂が移動している。
- ・ 護岸の下部が水を通す構造（ドラム缶形状のパイプ）のため、最奥部にも砂が侵入して堆積している。
- ・ 基本的に冬季に砂が港内に侵入する。
- ・ 港外の西側の砂が大きく移動しているため、水深がかなり変化する。
- ・ 数年前に実施したサンドポケットは非常に良かった（20,000 m³ 相当）。3～4 年程度、港内の航路を維持したので、同様の規模のサンドポケットを実施して欲しい。
- ・ サンドポケットによって、護岸周辺に堆積していた砂が無くなった。全部サンドポケットに落ちたと考えられる。

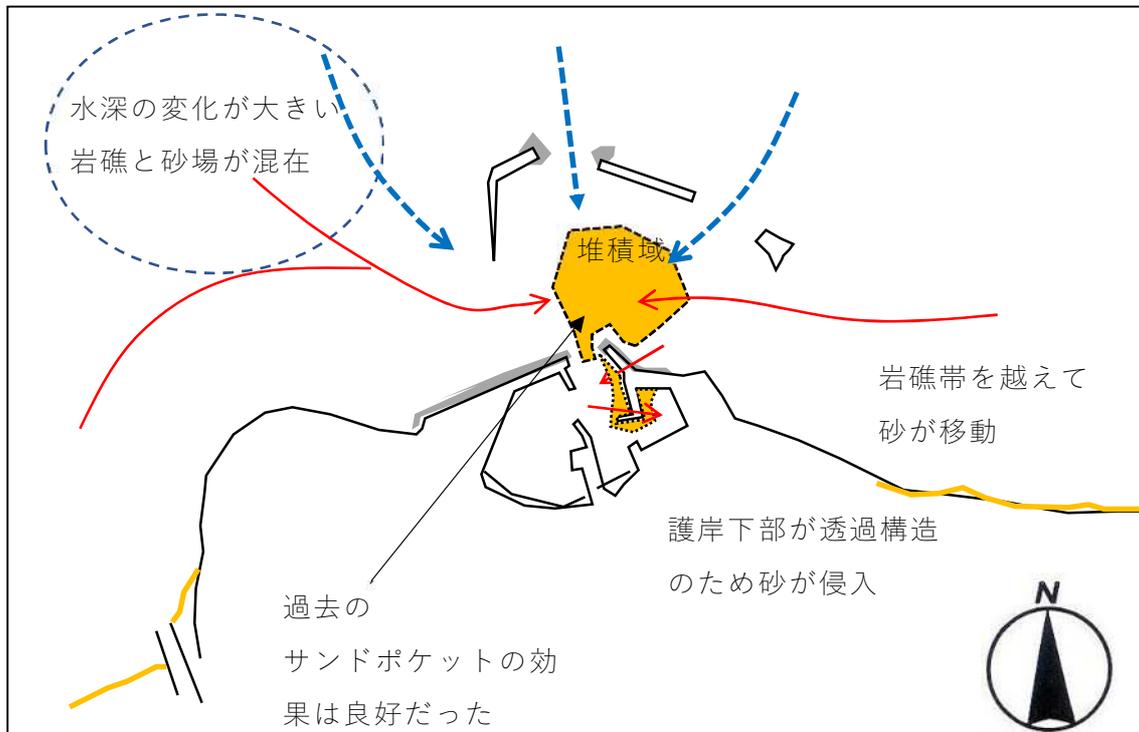


図 2.6 酒津漁港における港内堆砂メカニズム

以上の各漁港のヒアリング調査結果によると、規模の大小はあるが全ての漁港で航

路・港内の堆砂が生じていることが明らかである。また、防波堤に囲まれた形状であっても通水等が発生して波・砂が侵入するケースも散見された。

2.2.3 長周期波調査の対象漁港の選定

ヒアリング結果を踏まえ、現地調査対象を浚渫港口以外に通水部が無く明確な港奥の堆砂が例年生じている船磯漁港と、漁港の左右を岩礁帯に囲まれているにも関わらず大規模な港内堆砂が生じる酒津漁港とした。

なお、船磯漁港と酒津漁港は距離が近く類似した現象となる可能性を考慮し、ヒアリング調査は実施していないが、鳥取県と同じく山陰地方であり、冬季波浪特性が同等である島根県大田市にある久手港においても長周期波の観測を実施した。同港では、2018年に大規模な港内埋没が発生しており、現在対策案が検討されている。図2.7に各港の位置と港型を示す。

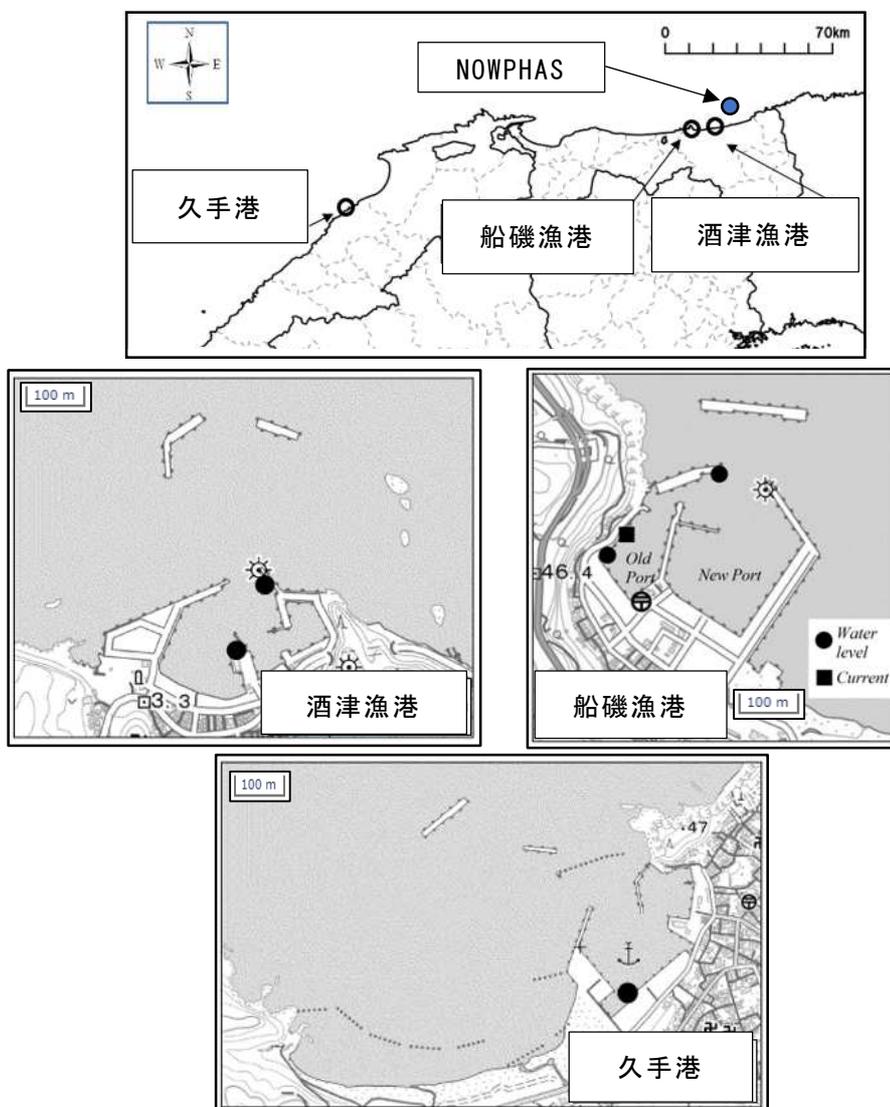


図 2.7 調査漁港位置および港型等

2.3 長周期波の現地観測

鳥取県内の多くの漁港が単年～数年で浚渫工事が必要になるほど港内・航路の堆砂が生じており，今回調査対象とした船磯漁港は，旧港と呼称する港奥の岸壁近傍に堆砂が進行している(図 2.8)．船磯漁港の現地調査は 2018 年および 2019 年の冬季に実施したが，2018 年度に 11,500 m³，2019 年度に 5,200 m³，2020 年度に 14,434 m³の港内浚渫実績がある．同様に，久手港でも堤防後背部に堆砂が卓越する場合があり，特に 2018 年に大規模な浚渫を要する事態となった．また 2021 年にも同様な堆砂が発生している(図 2.9)．

現地調査にあたり，最初に実施したのは船磯漁港である．堆砂が卓越する場所が主として旧港側のみであり，港湾形状が他の漁港と比較して単純で，港口以外からの波浪や海水流入が無いと考えられる等，本研究における堆砂予測モデルの検証の適地であると判断したためである．その後，船磯漁港において観測された結果が特有の現象かどうかを確認するために，船磯漁港と同様に港内堆砂が問題となっている酒津漁港と久手港でも水位計による調査を実施した．



図 2.8 船磯漁港 港内堆砂状況

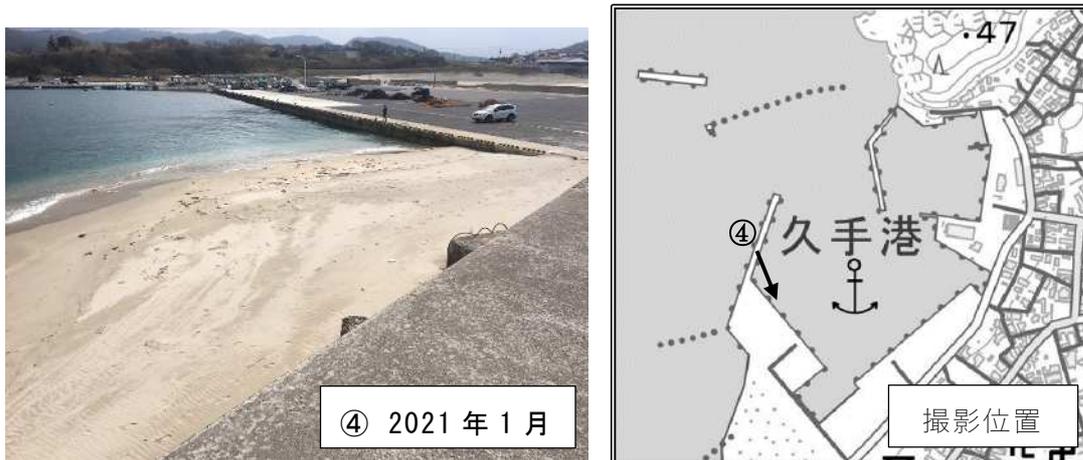


図 2.9 久手港 港内堆砂状況

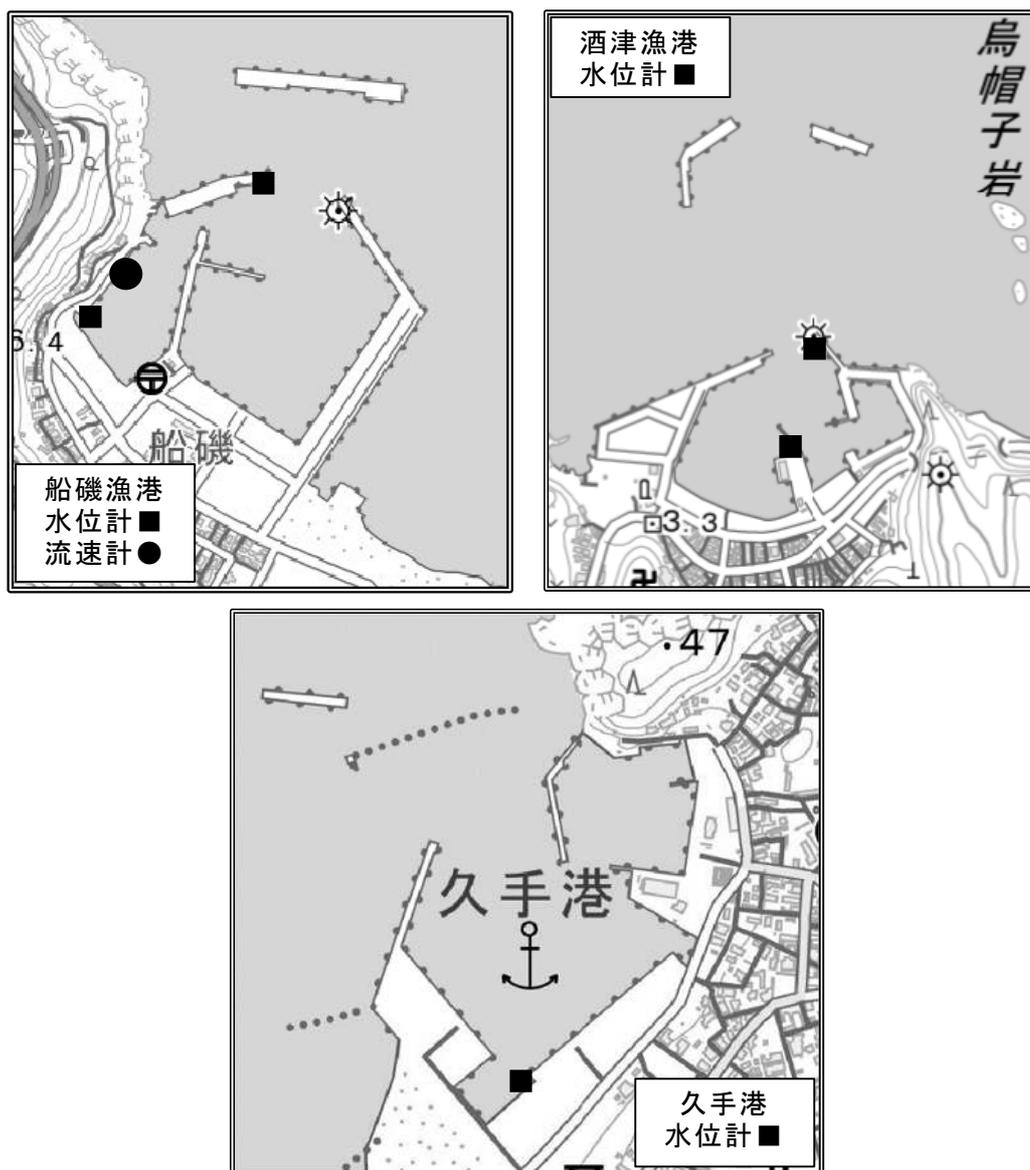
表 2.1 に現地調査で使用した計測機器の仕様を、図 2.10 に調査位置をそれぞれ示す。船磯漁港は、港口と港奥（旧港）に水位計を、中間の海底に電磁流速計を設置し観測間隔 1.0 s の連続観測を実施した。観測期間は水位計が 2018 年 2 月 10 日～2 月 22 日と 2019 年 2 月 1 日～2 月 12 日、流速計が 2019 年 2 月 1 日～2 月 12 日の期間である。

酒津漁港は、港口と港中央に水位計を設置し、2020 年 3 月 3 日～3 月 20 日と 3 月 1 日～4 月 6 日の期間観測間隔 1.0 s の連続観測を行った。

久手港は、港奥に水位計を設置し、2020 年 12 月 21 日～12 月 25 日の期間観測間隔 1.0 s の連続観測を行った。

表 2.1 現地調査計測機器

水位計測	小型メモリー圧力計 DEFI2-D 等 (JFE アトバンテック社製)	
	分解能/精度：0.01 m/1.0 %FS	
	計測間隔：1.0 s	
	設置位置：船磯漁港（港口，港奥） 酒津漁港（港口，港奥） 久手港（港奥）	
流速計測	電磁流速計 Compact-EM (JFE アトバンテック社製)	
	分解能/精度：0.01 cm/s / 1 cm/s or 2 %FS	
	計測間隔：1.0 s・海底上 0.5 m	
	設置位置：船磯漁港（港奥）海底上 0.5 m	



漁港名	観測期間
船磯漁港	2018年2月10日～2月22日 (水位) 2019年2月1日～2月12日 (水位・流速)
酒津漁港	2020年3月3日～3月20日 (水位) 2020年3月28日～4月6日 (水位)
久手港	2020年12月21日～12月25日 (水位)

図 2.10 現地調査使用機器および調査位置と観測期間

2.4 港内波高と流動観測結果

船磯漁港では 2018 年 2 月に港口と港奥の護岸際に水位計を、2019 年 2 月に水位計に加えて流速計を設置して測定した。酒津漁港は 2020 年 3 月に、久手港は 2020 年 12 月にそれぞれ水位計を設置して変動を測定した。

図 2.11～図 2.15 に、測定した結果のうち 2019 年に船磯漁港にて計測した水位・流速時系列データ例を示す。

図 2.11 は観測期間を含む鳥取県沖合で観測された NOWPHAS（全国港湾海洋波浪情報網 Nationwide Ocean Wave information network for Ports and HarborS）による 2019 年 2 月 1 日～2019 年 2 月 12 日までの波の時間的变化で、有義波高 $H_{1/3}$ 、有義波周期 $T_{1/3}$ を示す。図 2.12 は船磯漁港の港口部に設置した水位計から算出した長周期波の波高 H_L 、周期 T_L を示す。算出方法は黒岩ら（1990）の数値フィルター法にならい、0.05 Hz より高周波数の成分を除去する数値フィルターを用い、長周期波成分を算出した。このとき、図 1.4 では周期 30 s（0.033 Hz）以上の波を長周期波と定義しているが、今回のフィルターでは余裕を持たせている。図中の欠測は水位計交換によるものである。これらの図より、波浪では波高 1.0～3.0 m、周期 6.0～9.0 s の波を、長周期波では、波高 0.05～0.3 m、周期 30～600 s の変動が確認された。また、波浪の波高と周期の関係をみると、波高が大きくなるにつれ、周期も長くなる傾向がみられるのに対し、長周期波の周期 600 s 以下では、波高が大きくなるにつれ周期が短くなり、波高が小さくなるにつれ周期は長くなっていることがわかる。図 2.13 は波浪と長周期波の波高を比較したもので、図 2.14 は周期を比較したものである。この図から明らかなように、長周期波の周期 600 s 以上の部分を除くと、波浪の波高が大きくなるにつれ長周期波の波高も大きくなっており、変動特性は両波似た傾向を示している。周期については、長周期波の周期は波浪の周期が短くなると長周期波の周期が長くなる傾向があるとわかる。

表 2.2 に波高 0.5 m 毎に階級分けし、整理したものを示す。この表からも波高 3 m 以上の時の長周期波周期を除くと、波高・周期についての傾向が今まで示した傾向と同様の傾向を示していることがわかる。

また、周期 600 s 以上の長周期波成分については、「気象性長周期波」と呼ばれ、波浪と関連が深い周期 600 s 以下の成分とは異なる原因で発生すると仲井ら（2009）によって報告されており、周期 600 s 以上の成分波高と気圧変動が関係が深いとしている。2019 年 2 月 6 日 12 時頃～2019 年 2 月 7 日 12 時頃にかけての周期 600 s 以上の長周期波に関しては、発生した原因は不明であるが、気象によるものを含め宇野木（1959）が整理した様な様々な要因が複数関連している可能性の考えられる。

表 2.2 波高別データ（階級分け）

	NOWPHAS		長周期波		発生時間 (h)	発生率 (%)
	波高 $H_{1/3}$ (m)	周期 $T_{1/3}$ (s)	波高 H_{LW} (m)	周期 T_{LW} (s)		
0~0.50 m	0.39	6.13	0.13	605.70	24	8
0.51~1.00 m	0.73	6.32	0.08	235.98	56	19
1.01~1.50 m	1.29	6.64	0.10	141.79	53	18
1.51~2.00 m	1.74	7.17	0.16	91.33	71	25
2.01~2.50 m	2.21	7.42	0.19	90.52	54	19
2.51~3.00 m	2.72	7.22	0.20	87.98	23	8
3.01~3.50 m	3.29	7.80	0.21	92.86	7	2

図 2.15 に船磯漁港の 2019 年 2 月 1 日～2 月 12 日の計測期間中で長周期波が長時間継続した期間中の 2019 年 2 月 8 日 6 時 30 分～7 時 00 分の時系列例を示す。青線が観測データ，赤線が 30 s 以上の波を取り出した長周期，黄線が 600 s 以上の波を取り出した長周期を示している。港口部付近の観測データからは，波高 0.4～0.6 m・周期 10 s 程度の変動が卓越する以外に，波高 0.15m～0.30m 程度，港奥は波高 0.10～0.15 m 程度の周期 90～100 s の長周期波を確認することができた。

電磁流速計による流速変動は，平均流が北向きに約 0.01 m/s でほぼ一定であったが，長周期波変動は周期 100 s，流速 0.05～0.1 m/s 程度が卓越しており，高波浪時の港内流況における長周期成分の影響が大きいことが推測される。

図 2.16 に酒津漁港，図 2.17 に久手港の水位計測期間中で浜田港の NOWPHAS で観測された有義波高が最も高い波高を記録した期間の時系列を示す。青線が観測データ，赤線が 30 s 以上の波を取り出した長周期を示している。酒津漁港港口部付近の観測データからは，波高 0.3～0.4 m・周期 10～20 s 程度の変動が卓越する以外に，波高 0.1 m 程度，港奥は波高 0.10 m 程度の周期 60～100 s の長周期波を確認できた。久手港の港奥では波高 0.10～0.15 m 程度，周期 100～150 s の長周期波を確認できた。

参考までに，観測期間が異なるデータであるが，図 2.18 に久手港沖側の有義波高 5.4 m・周期 10.2 s を記録した期間のデータ波高観測結果のデータを示す。

観測期間における水位の周波数スペクトルおよび流速の周波数スペクトル例を図 2.19 に，参考として久手港沖の波高計による波高の周波数スペクトル例を図 2.20 にそれぞれ示す。

観測期間における水位の周波数スペクトルおよび流速の周波数スペクトルは，港口，港奥共に周期 10 s 程度の冬季波浪に起因すると考えられる変動が卓越する以外に，周期 90～100 s 程度の長周期のほか，周期 10～15 分程度の長周期にもエネルギーピークが認められた。この時の沖波は有義波高約 3 m・周期約 8 s であった。

酒津漁港と久手港においても，有義波とみられる 7～8 s の周期とは別に，80～100 s 付近の周期にエネルギーピークが認められ，日本海西部沿岸の漁港においては港奥

へ到達して港内部の流動に影響を与える長周期変動が存在するとみられた。

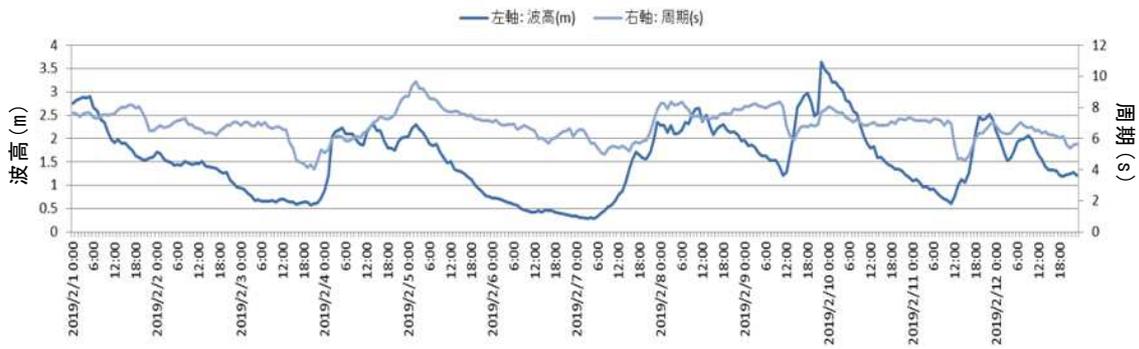


図 2.11 波浪（鳥取港 NOWPHAS）

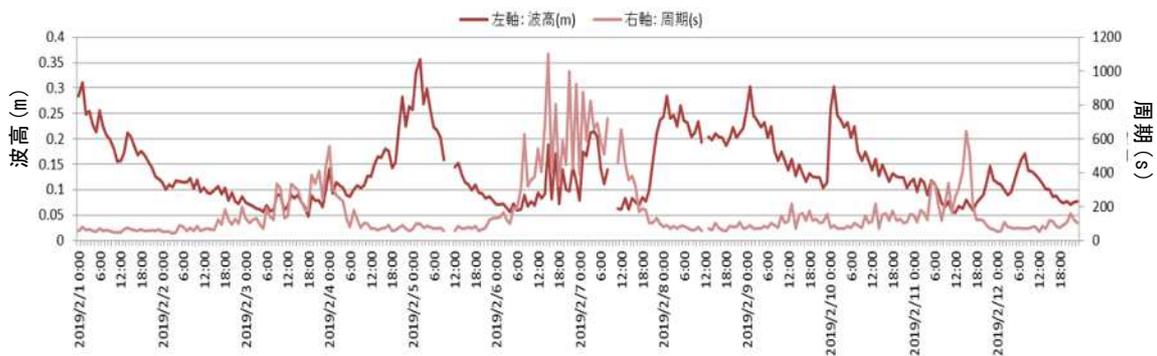


図 2.12 長周期波（船磯漁港港口）

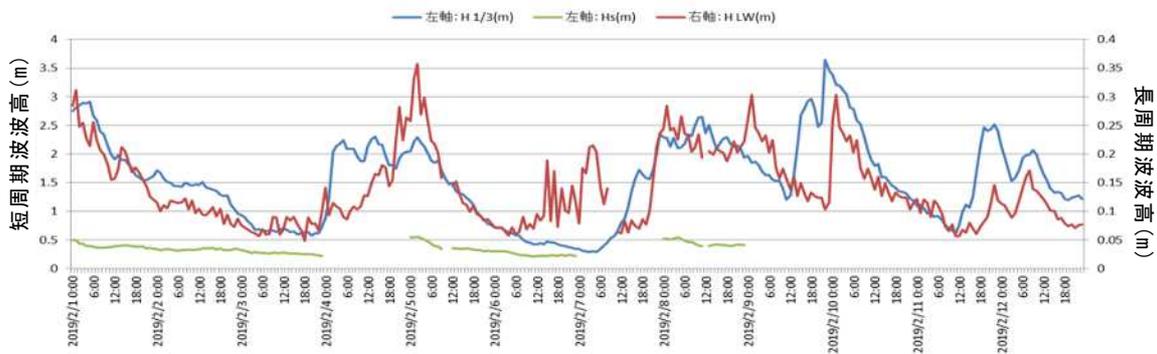


図 2.13 波高の比較（青：鳥取港，緑：船磯漁港（短周期），赤：船磯漁港（長周期））

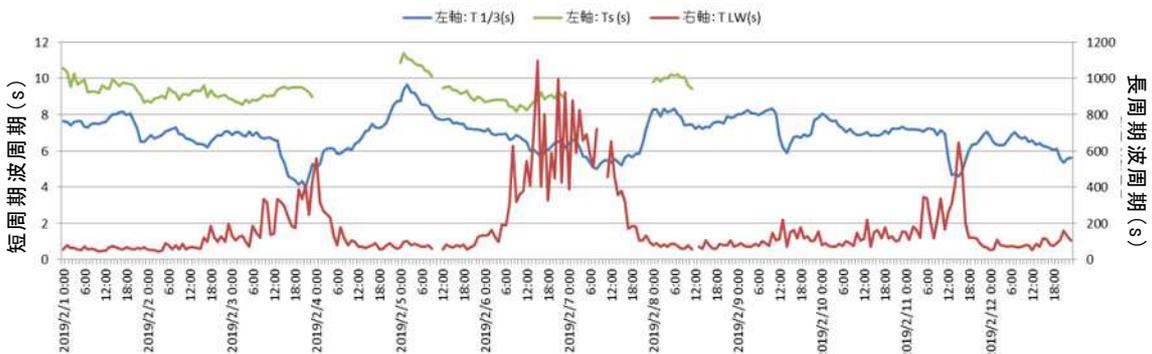


図 2.14 周期の比較（青：鳥取港，緑：船磯漁港（短周期），赤：船磯漁港（長周期））

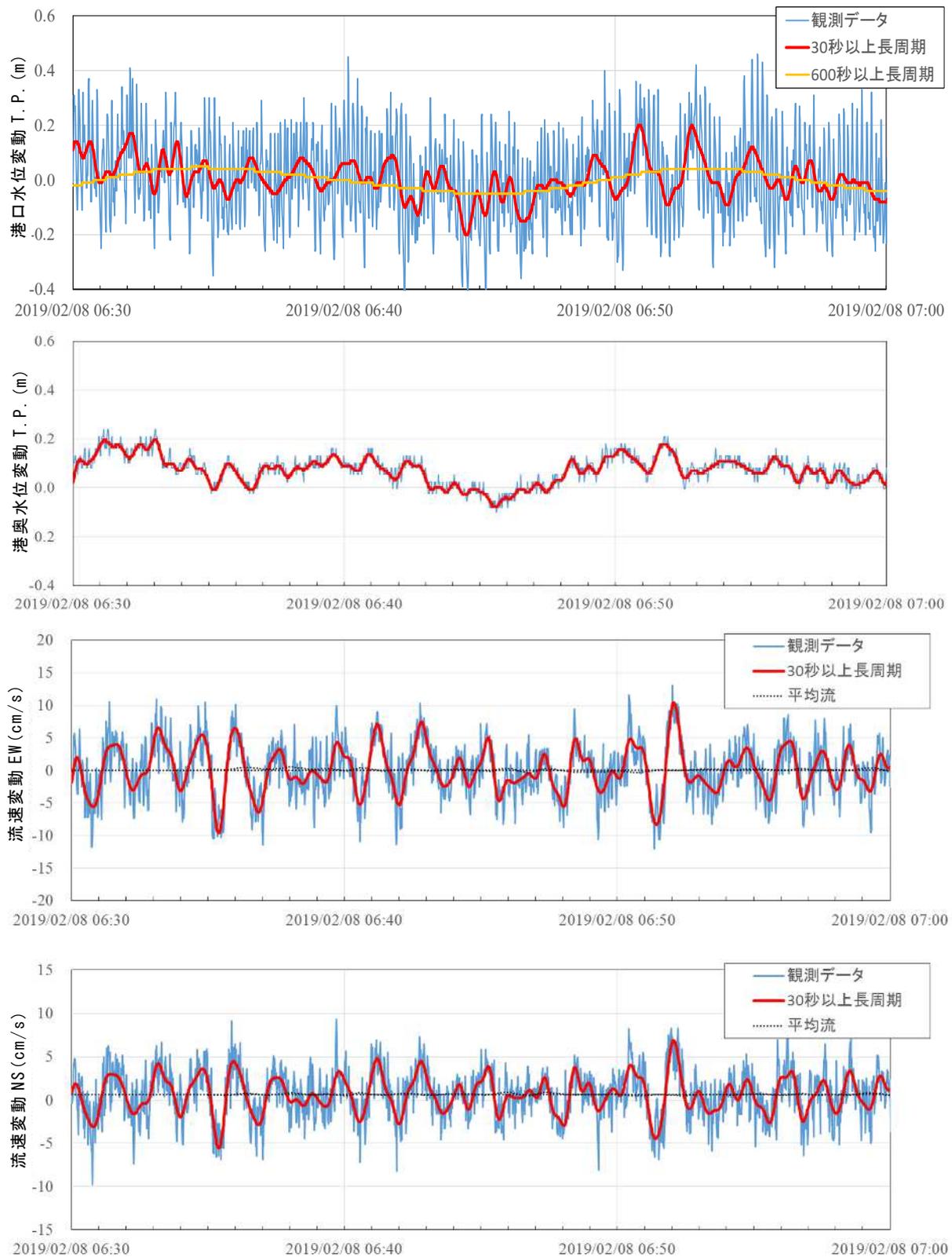


図 2.15 長周期波発達時の時系列例
 (船磯漁港 2019 年 2 月 8 日 6:30~7:00 水位・流速)

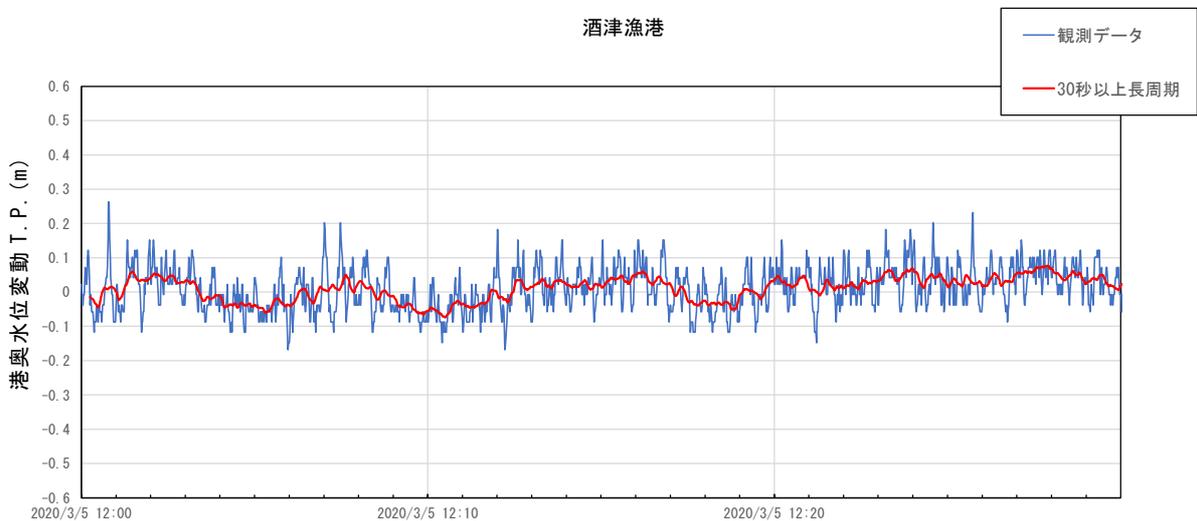
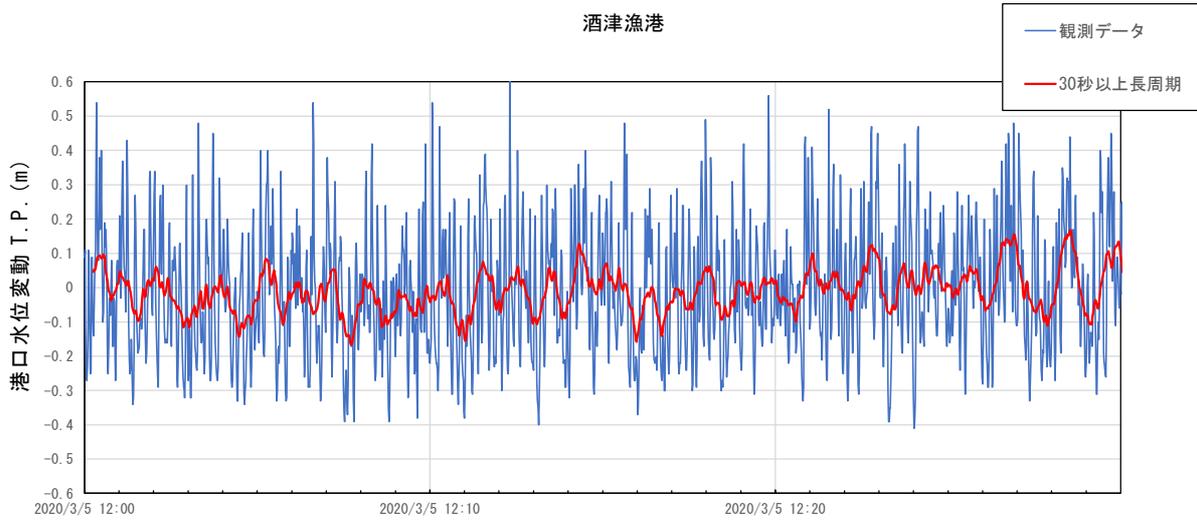


図 2.16 計測結果時系列例（酒津漁港 2020 年 水位）

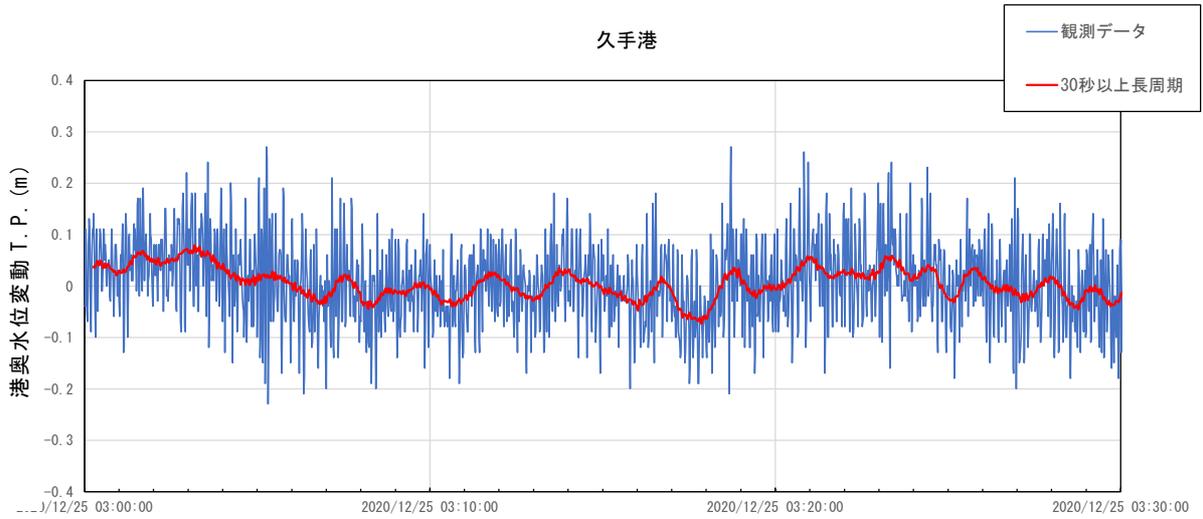


図 2.17 計測結果時系列例（水位・久手港 2020 年水位）

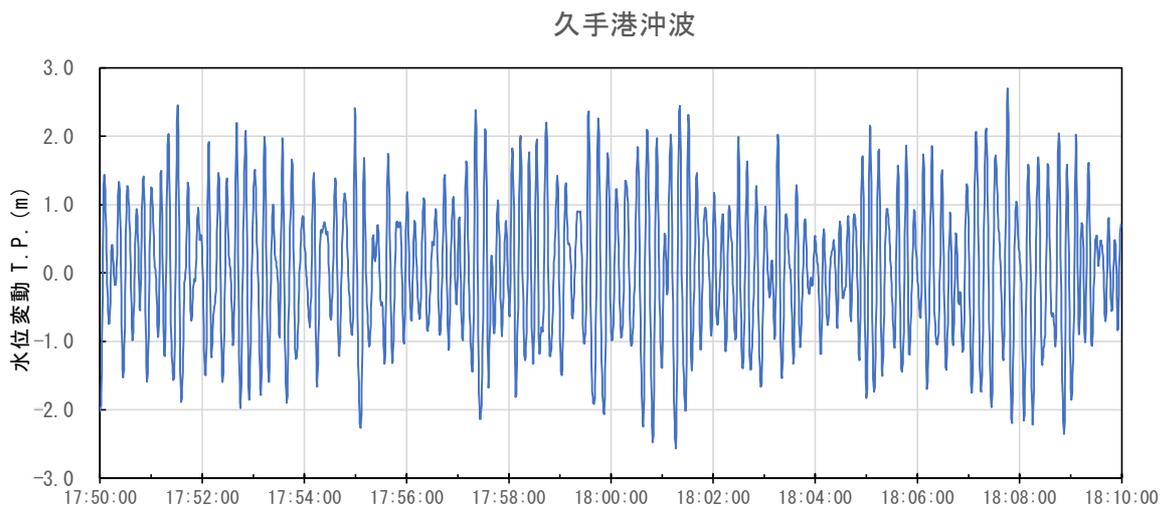


図 2.18 計測結果時系列例（久手港 2020 年 12 月 30 日沖波水位）

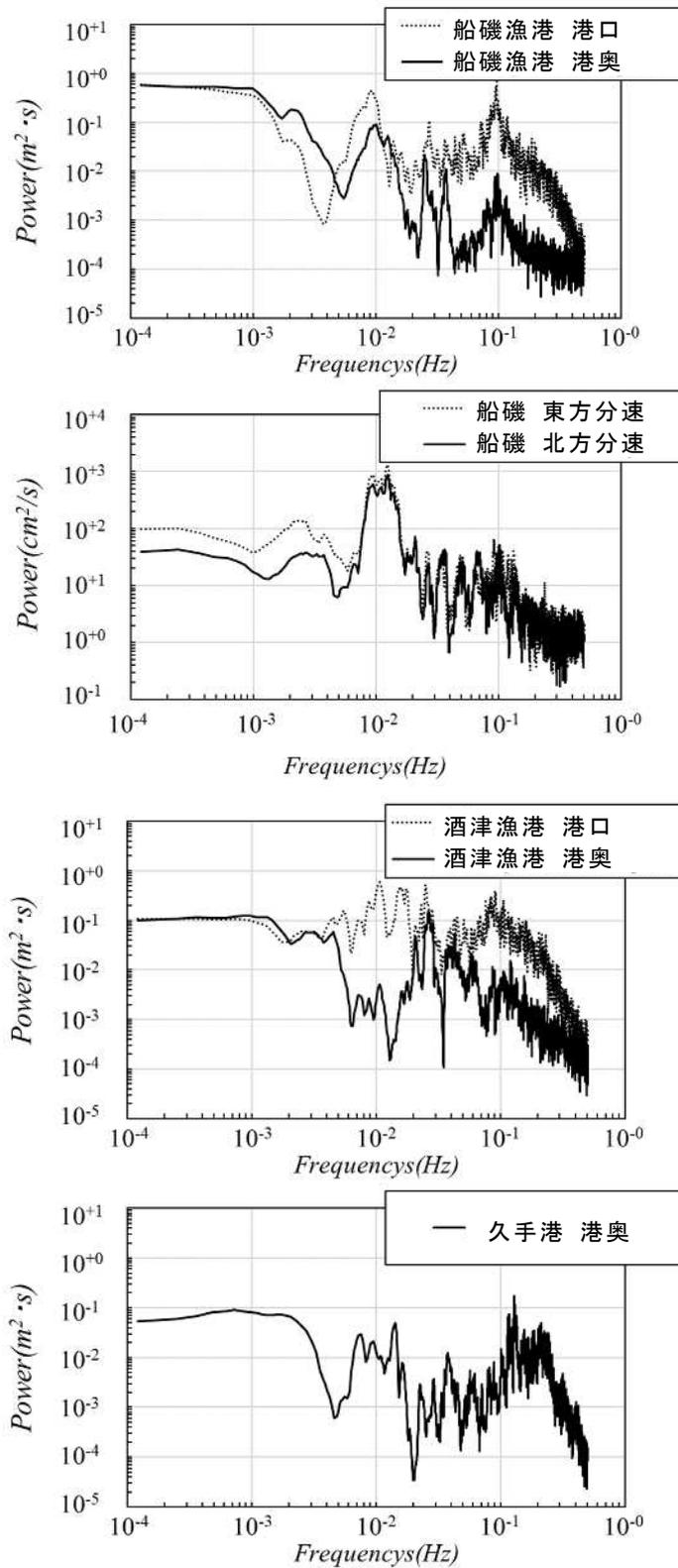


図 2.19 各漁港の水位・流速等計測値の周波数スペクトル

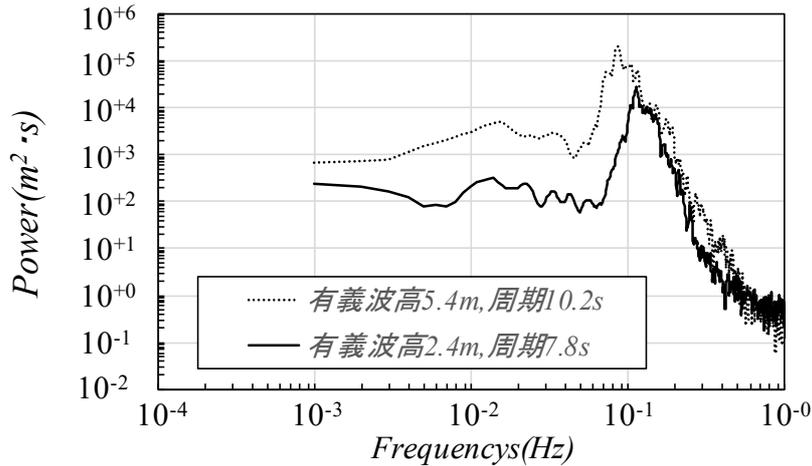


図 2.20 久手港沖側の波高計測値の周波数スペクトル

港湾・漁港内に発生する長周期の発生要因として、港湾等の周囲が閉じられた海域では、波浪と潮汐の中間領域の長周期の水位振動の中に、港湾特有の固有振動に起因する副振動（セイシュ）がみられ、前述のように宇野木（1959）によって観測記録に基づいて実態整理がなされている。これは本研究で対象とする、砕波によって発生し港外から港内に伝達する進行波とは別の現象であり、港外が高波浪時で漂砂が卓越する状況でも直接的には発達しない（逆に、港外が静穏でも発達する場合がある）ために区別する必要があるが、進行波を成因として港湾特有の振動として現れる。セイシュは一方向が解放されている港湾においては港奥が腹、港口が節をなし、定常振動なので港形等に著しい変化がなければ周期は変化しないために、その周期は式(2.1)により概略的に算出できる。

$$T_n = \frac{4l}{(2n-1)\sqrt{gh}} \quad (2.1)$$

ここに、 T_n ：各モードの周期、 l ：港湾の代表長さ、 n ：モード（1,2,3・・・）、 g ：重力加速度、 h ：港湾の代表水深である。この式で求まる船磯漁港（旧港）と久手港の振動周期は表 2.3 になる。この式によれば、船磯漁港と久手港の港内セイシュの周期は現地計測結果から求めたスペクトルピークである 90 s とはズレがあり、振動の主要な成因として別である可能性が高い。もちろん、式(2.1)は概算で求まる周期である。例えば松岡（1995）は銚子港を対象に Chen ら（1974）の手法を用いて数値計算による検討を行い、実際の振動は複雑な港形や細かな地形変化によってスペクトルの構造を形成し広範囲に変動することを求めたが、ある程度の目安にはなる。

以上の考察も含め、船磯漁港や久手港で観測された長周期成分は、波浪に起因するものであったと考えられる。

表 2.3 港内振動（セイシュ）の周期

漁港	船磯漁港(旧港)	久手港
代表長さ	300 m	280 m
代表水深	3.5 m	3.5 m
モード	周期(s)	周期(s)
1	204.9	191.2
2	68.3	63.7
3	41.0	38.2
4	29.3	27.3

2.5 結語

本章では，鳥取県内の漁港における港内堆砂の実態把握を目的にヒアリング調査を実施した．ヒアリング結果から長周期波に関する現地調査対象として船磯漁港と酒津漁港を選定した．また鳥取沿岸と波浪特性が類似している島根県久手港も長周期波調査対象とした．現地調査では，長周期波の存在を確認するために水位変動を主とした観測を実施し，測得した水位変動データによる長周期波成分の抽出を行い，解析結果を整理した．主要な結論は以下に示すとおりである．

- (1)各漁港でのヒアリングの結果，状況に応じて砂の堆積が港奥に達することが例年発生し，対応として維持浚渫やサンドポケットの施工等が実施されている．また，夏泊漁港での越波や長和瀬漁港や酒津漁港での防波堤構造物下部の通水などにより，構造物を超えての漂砂侵入が発生する事例もあることがわかった．
- (2)船磯漁港では港口，港奥共に周期 10 s 程度の冬季波浪に起因すると考えられる高波浪時における波の変動が卓越する以外に，周期 90～100 s 程度の長周期波が確認された．また，周期 10～15 分程度の長周期にもエネルギーピークが認められた．なお，この時の沖波は有義波高約 3 m・周期約 8 s であった．冬季波浪の波高が高くなるに従い長周期波の波高も高くなることがわかった．
- (3)上記における長周期成分の水位変動の振幅は 0.2 m 前後，流速変動は振幅 0.2 m/s 前後であった．
- (4)酒津漁港と久手港においても，冬季波浪の影響とみられる 7～8 s の周期とは別に，80～100 s 付近の周期にエネルギーピークが認められ，日本海西部沿岸の漁港においては港奥へ到達して港内部の流動に影響を与える長周期変動が存在することがわかった．

参考文献

- ナウファス（全国港湾海洋波浪情報網 NOWPHAS ; Nationwide Ocean Wave information network for Ports and HarborS）：<https://www.mlit.go.jp/kowan/nowphas/>, (2021.6.10).
- 宇野木 早苗（1959）：港湾のセイシュと長周期波について，第 6 回海岸工学講演会講演集，pp.1-11.
- 黒岩正光・林浩志・野田英明（1990）：中小漁港の埋没調査，海岸工学論文集，第 37 巻，pp.419-423.
- 鳥取県県土整備部河川課（2021）：令和 3 年度鳥取沿岸土砂管理連絡調整会議（東部地区），<https://www.pref.tottori.lg.jp/301824.htm>，資料 6，p.1-84.，(2021.8.15).
- 仲井圭二・橋本典明（2009）：周期 10 分以上の水位変動と気圧変動との関係，土木学会論文集 B2（海岸工学），Vol.B2-65,No.1,pp226-230.
- 松岡 道男・木下 勝尊・山本 正昭・森口 朗彦（1991）：長周期水理特性を考慮した港内堆砂モデルの適用性の検討，海岸工学論文集，第 38 巻，pp.416-420.
- 松岡道男（1995）：中小港湾の港内埋没に及ぼす長周期波の影響に関する研究，<http://hdl.handle.net/11094/39348>，pp.47-51，(2019.4.15) .
- 三船 修司・川口 勉・松本 英明・渡辺 博美・荒井 直人・山下 俊彦（2001）：北海道日本海沿岸の長周期波特性と漁港内の漂砂現象に関する現地観測，海岸工学論文集，第 48 巻，pp.546-550.

第3章 長周期流動を考慮した港内堆砂予測モデルの検討

3.1 概略

本章では、長周期波を考慮した港内堆砂予測モデルを構築するために、浅水方程式を用いた長周期流動モデルについて検討する。従来、長周期流動モデルは潮汐等の非常に長い周期の波による流動を計算するのに多用されるが、直行格子により離散化され、詳細な地形や構造物の影響に対して考慮されておらず、振幅の変化などが平滑化される等の問題が考えられる。そこで、直行格子であっても、構造物境界や地形境界に沿うスムーズな処理を実行可能である Hirt ら (1985) の FAVOR (Fractional Area/Volume Obstacle Representation) 法と、移流項における数値粘性の影響を極力抑えることのできる WENO (Weighted Essentially Non-Oscillatory scheme) 法を用いた長周期流動モデル (以下改良流動モデルとする) を導入し、新たな港内堆砂予測モデルの構築を行った。構築したモデルの妥当性を、一般的な港湾・漁港形状を有するモデル地形を用いて評価を行った。

また、確認した改良流動モデルに現地観測から得られた長周期波を適用し、出力された港内流動を海浜変化モデルに組み込むことで港内堆砂の再現性向上が可能か検討した。モデル地形による評価を行った後、鳥取県船磯漁港の現地の地形に対しても適用し、検討を行った。

3.2 港内漂砂に係わる長周期成分波による港内流動

第1章にて述べた漂砂に関する研究途上要因のうち、本研究では、風浪に起因する海浜流による浮遊砂の輸送では港内における底質輸送が限定的であることに着目し、長周期波に起因する港内流動による影響を検討する。漂砂現象における長周期変動による流動を考慮する数値モデルは、例えば海津ら (2010) がブシネスク方程式を用いて実施している。しかし、ブシネスク方程式による計算は波向き等条件の設定と修正が難しい場合があり扱う技術者の高い能力を要するほか、計算負荷が大きく検討すべき条件の数が多い実務などで使用するには簡便な手法とは言い難い。

そこで、港内堆砂予測モデルによる検討を行う際に、長周期波の流動計算を行い、別途港内堆砂予測シミュレーションの海浜流場に組み込むことで疑似的に風波と長周期波の重複波浪場下の流れ場を算出することを試みた。長周期波の流動を求めるモデルは、後の港内堆砂予測シミュレーションの海浜流場計算結果に容易に統合可能な手法を念頭に置いた。

長周期波による水位変動に対して水平方向の水理量の変化が卓越すると考え、数値モデルには平面2次元単層モデルを選択した。しかし、研究フィールドとして小規模

漁港を対象とする場合，港の規模に対して細かな構造物の配置がなされる可能性が高いことから，一般的な流動モデルでは急激な水深変化や構造物近傍の形状に対応しきれない可能性が考えられた．有限要素法等を用いた非構造格子を用いたモデルならば，微細な構造物配置にも有効であるが，後に検討する漂砂モデルへの計算結果の組み込みに手間がかかり，計算コストが増加すると考えられた．そこで，等間隔の構造格子の境界条件であっても，座標軸に対して斜めに構造物など滑らかに表現することができる FAVOR 法を基礎方程式に導入し，また，運動方程式の移流項の数値拡散を低減させることのできる WENO 法を用いて低コストでかつ複雑な境界形状でも高精度な解析手法を加えた平面 2 次元浅水流モデル（以下，改良流動モデル）を用いる．

ここで，一般に用いられる平面 2 次元流動モデル（以下，既往流動モデル）と改良流動モデルの概要を以下に説明する．また，モデル地形での計算結果の比較を行った．

3.2.1 既往の平面 2 次元流動モデル（既往流動モデル）

潮流等の長周期変動に起因する海流を予測する際に一般的に用いられるモデル（国土交通省港湾局，2004 など 以下，既往流動モデルとする）は，基本方程式としてナビエーストクスの運動方程式と連続の式を用いている．解法は差分陽解法（Leap-Frog 法）である．

図 3.1 に示す直行座標系において，海面から海底面まで深さ方向に積分し，平均化された流動を計算するための基礎方程式は以下のように表される．

・自由表面の式：

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} = \frac{\partial M}{\partial x} - \frac{\partial N}{\partial y} \quad (3.1)$$

・運動方程式：

[x 方向]

$$\frac{\partial M}{\partial t} = -g(h + \zeta) \frac{\partial \zeta}{\partial x} - \gamma^2 u \sqrt{u^2 + v^2} - \left\{ \frac{\partial Mu}{\partial x} + \frac{\partial Mv}{\partial y} \right\} + A \left\{ \frac{\partial^2 M}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 M}{\partial y^2} \right\} - fN \quad (3.2)$$

[y 方向]

$$\frac{\partial N}{\partial t} = -g(h + \zeta) \frac{\partial \zeta}{\partial y} - \gamma^2 v \sqrt{u^2 + v^2} - \left\{ \frac{\partial Nu}{\partial x} + \frac{\partial Nv}{\partial y} \right\} + A \left\{ \frac{\partial^2 N}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 N}{\partial y^2} \right\} - fM \quad (3.3)$$

ここで、 M : x 方向の線流量、 N : y 方向の線流量で、以下で求める。

$$M = \int_{-H}^{\zeta} u dz \quad (3.4)$$

$$N = \int_{-H}^{\zeta} v dz \quad (3.5)$$

u, v : x, y 方向の流速、 h : 水深、 ζ : 平均水面から自由水面までの変位、 f : コリオリ係数、 g : 重力加速度 (9.8 m/s^2)、 A : 渦動粘性係数 ($5.0 \text{ m}^2/\text{s}$)、 γ^2 : 海底摩擦係数である。

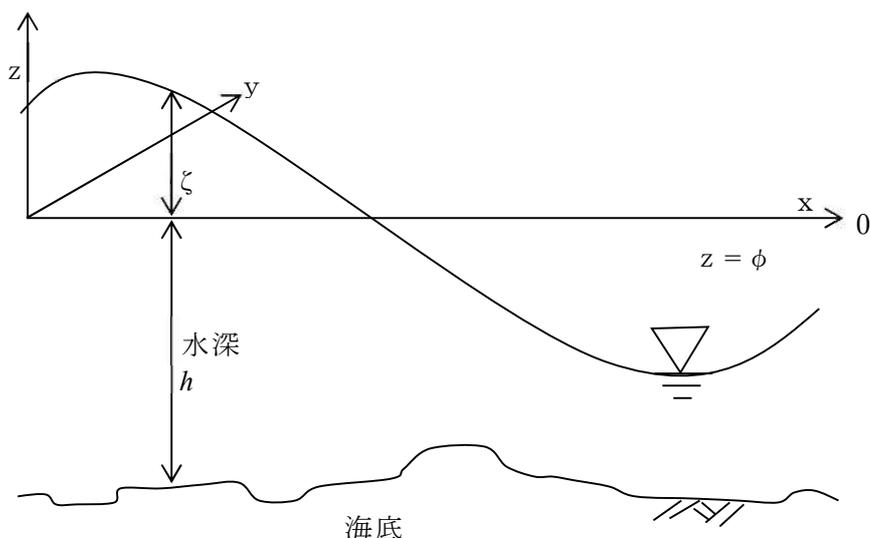


図 3.1 直交直線座標系

既往流動モデルは湾や潮流等の時空間的に大スケールでの流動計算の際は問題ないが、微小な時間変動や地形変化の影響を求める際に数値の変化が吸収されて平滑化される等が生じる。また、正方格子の境界に対して構造物が斜めに配置される場合は段差が生じ、境界に正対する流れの値などは 0 となって斜めの変化が過少に出力されたり、逆に変化量が積算されて拡大し発散するなどの恐れがあり、これを防ぐために計算時間間隔を細かくすると計算に要する実時間が増大して繰り返し検討を行う際に支障が生じる。

3.2.2 改良流動モデル

運動方程式等は前項のモデルに準じる。複雑境界形状へ対応する工夫として、基礎方程式に FAVOR 法を導入した。式(3.6)は、数学上完全な保存形式 (Xing Y. et.al, 2005, Sun, G.C. et.al,2012) ではないが、FAVOR 法の導入、及びプログラミングが容易とされる。

$$\frac{\partial U}{\partial t} + \frac{1}{V} \left(\frac{\partial A_x E}{\partial x} + \frac{\partial A_y F}{\partial y} \right) = C \quad (3.6)$$

ここに,

$$U = \begin{bmatrix} h \\ M \\ N \end{bmatrix}, E = \begin{bmatrix} M \\ uM \\ uN \end{bmatrix}, F = \begin{bmatrix} N \\ vM \\ vN \end{bmatrix}, \quad (3.7)$$

$$C = \begin{bmatrix} 0 \\ -gh \frac{\partial H}{\partial x} - \frac{\tau_{bx}}{\rho} + \frac{1}{V} \left\{ \frac{\partial}{\partial x} (A_x \cdot -\overline{u'^2} h) + \frac{\partial}{\partial y} (A_y \cdot -\overline{u'v' h}) \right\} + fN \\ -gh \frac{\partial H}{\partial y} - \frac{\tau_{by}}{\rho} + \frac{1}{V} \left\{ \frac{\partial}{\partial x} (A_x \cdot -\overline{u'v' h}) + \frac{\partial}{\partial y} (A_y \cdot -\overline{v'^2} h) \right\} - fM \end{bmatrix} \quad (3.8)$$

ここに, t : 時間, (x, y) : 空間座標, V : 体積率, (A_x, A_y) : それぞれ (x, y) 方向の面積率, (u, v) : それぞれ (x, y) 方向の水深平均流速, (M, N) : (x, y) 方向の流速フラックス, g : 重力加速度, h : 水深, H : 水位 ($= h + z_b$), z_b : 海底床, (τ_{bx}, τ_{by}) : それぞれ (x, y) 方向の底面せん断応力, $(-\overline{u'^2}, -\overline{u'v'}, -\overline{v'^2})$: 水深平均レイノルズ応力, ρ : 流体の密度である.

水深平均レイノルズ応力は次式で算出する.

$$-\overline{u'^2} = 2A \left(\frac{\partial u}{\partial x} \right) - \frac{2}{3} k \quad (3.9)$$

$$-\overline{u'v'} = A \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) \quad (3.10)$$

$$-\overline{v'^2} = 2A \left(\frac{\partial v}{\partial y} \right) - \frac{2}{3} k \quad (3.11)$$

$$2D_h = \frac{1}{6} \kappa h u_* \quad (3.12)$$

$$k = 2.07 u_*^2 \quad (3.13)$$

ここに, k : 水深平均乱れエネルギー, κ : カルマン定数 ($=0.41$), u_* : 摩擦速度である.

底面せん断応力は以下のマニング則により算出する.

$$\tau_{bx} = \frac{\rho g n^2 u \sqrt{u^2 + v^2}}{h^{1/3}}, \tau_{by} = \frac{\rho g n^2 v \sqrt{u^2 + v^2}}{h^{1/3}} \quad (3.14)$$

ここに, n : マニングの粗度係数である.

3.2.3 WENO 法による移流項の差分化

移流項の差分に 5 次精度差分法版 WENO 法 (Jiang, G.-S.et.al, 1996, Chi-Wang Shu, 2001, Xing Y. et.al, 2005) を適用した. 図 3.2 に計算諸量の配置図を示す. 以下は計算格子の x 方向のみについて, 移流項の差分化について述べる.

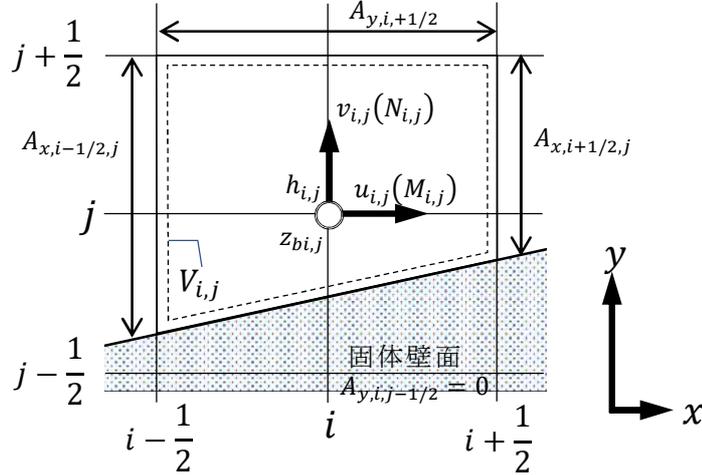


図 3.2 計算格子と各計算諸量の配置図

$$\frac{1}{V} \frac{\partial A_x E}{\partial x} = \frac{A_{x,i+1/2} \widetilde{E}_{i+1/2} - A_{x,i-1/2} \widetilde{E}_{i-1/2}}{V_i \cdot \Delta x} + O(\Delta x^5) \quad (3.15)$$

まず, 各格子点で E_i を E_i^+ と E_i^- に分離する. 分離手法には修正 Lax-Friedrich 分離を用いている.

$$E_i = E_i^+ + E_i^- \quad (3.16)$$

$$E_i^+ = \frac{1}{2} \left[\begin{pmatrix} M \\ uM \\ uN \end{pmatrix}_i \pm \alpha \begin{pmatrix} h + z_b \\ M \\ N \end{pmatrix}_i \right] \quad (3.17)$$

$$\alpha = \max_u |\partial E / \partial U| \quad (3.18)$$

ここで, 式(3.17)に示される連続式の E_i の分離に h ではなく $h + z_b$ を用いているが, これは, 複雑な地形起伏を有する流れ場への適用を可能にするための修正である.

次に各格子点上の E_i^+ から $\widetilde{E}_{i+1/2}^+$ と $\widetilde{E}_{i+1/2}^-$ を求め, これらを合計することにより格子境界の数値流束 $\widetilde{E}_{i+1/2}$ を得る. 以下に $\widetilde{E}_{i+1/2}^+$ の算定方法について示す. 図 3.3(a)に示すように, 3つのステンシルを使用して $\widetilde{E}_{i+1/2,s}^+$ を3つ作る.

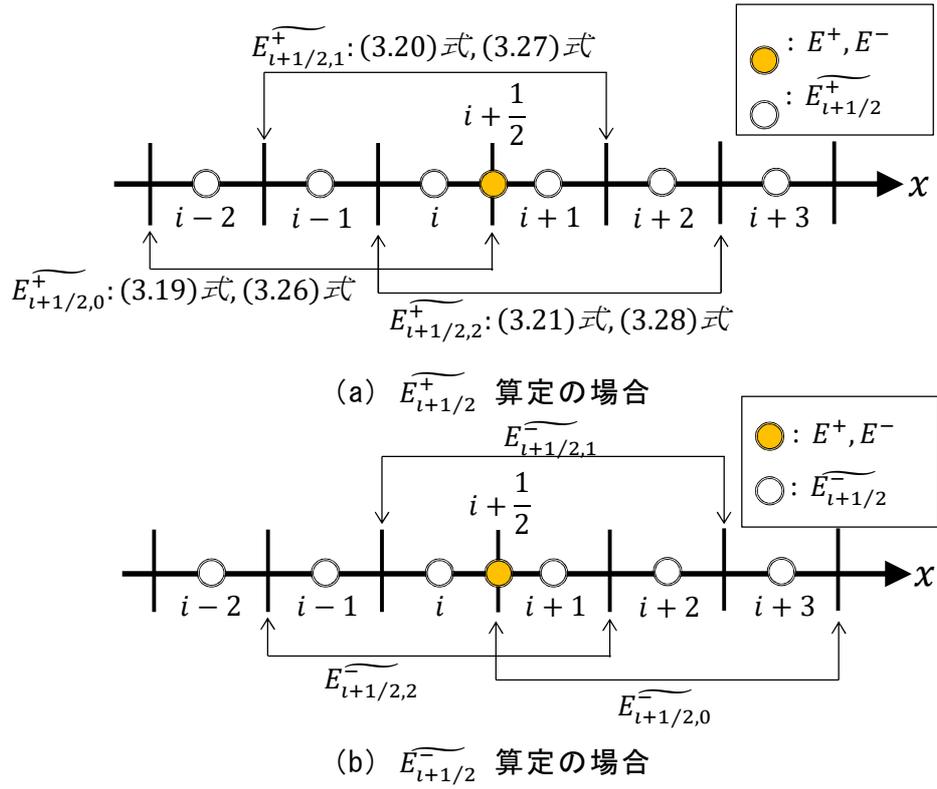


図 3.3 WENO 法による数値流束算定の概略図

$$\widetilde{E}_{i+1/2,0}^+ = \frac{1}{3}E_{i-2}^+ - \frac{7}{6}E_{i-1}^+ + \frac{11}{6}E_i^+ \quad (3.19)$$

$$\widetilde{E}_{i+1/2,1}^+ = -\frac{1}{6}E_{i-1}^+ + \frac{5}{6}E_i^+ + \frac{1}{3}E_{i+1}^+ \quad (3.20)$$

$$\widetilde{E}_{i+1/2,2}^+ = \frac{1}{3}E_i^+ + \frac{5}{6}E_{i+1}^+ - \frac{1}{6}E_{i+2}^+ \quad (3.21)$$

$$\widetilde{E}_{i+1/2}^+ = \sum_{s=0}^2 \omega_s \widetilde{E}_{i+1/2,s}^+ \quad (3.22)$$

式(3.22)に示されるように、式(3.19)～(3.21)を重み ω_s で線形結合することで $\widetilde{E}_{i+1/2}^+$ を得る。 ω_s は次式のように表される。

$$\omega_s = \alpha_s / \sum_{k=0}^2 \alpha_k \quad (s = 0,1,2) \quad (3.23)$$

$$\alpha_k = d_k / (\varepsilon + \beta_k)^2 \quad (k = 0,1,2) \quad (3.24)$$

$$d_0 = 0.1, \quad d_1 = 0.6, \quad d_2 = 0.3 \quad (3.25)$$

ここに、 ε は0割りを防ぐための係数あり、 $\varepsilon = 10^{-6}$ としている。また、 β_k はスムーズインジケータであり、以下のように表される。

$$\beta_0 = \frac{13}{12}(E_{i-2}^+ - 2E_{i-1}^+ + E_i^+)^2 + \frac{1}{4}(E_{i-2}^+ - 4E_{i-1}^+ + 3E_i^+)^2 \quad (3.26)$$

$$\beta_1 = \frac{13}{12}(E_{i-1}^+ - 2E_i^+ + E_{i+1}^+)^2 + \frac{1}{4}(E_{i-1}^+ - E_{i+1}^+)^2 \quad (3.27)$$

$$\beta_2 = \frac{13}{12}(E_i^+ - 2E_{i+1}^+ + E_{i+2}^+)^2 + \frac{1}{4}(3E_i^+ - 4E_{i+1}^+ + E_{i+2}^+)^2 \quad (3.28)$$

同様にして $\widetilde{E_{i+1/2}^-}$ を求める。 $\widetilde{E_{i+1/2}^-}$ については図 3.3(b)を参照し、 $\widetilde{E_{i+1/2}^+}$ と対称に求める。以上の $\widetilde{E_{i+1/2}^+}$ と $\widetilde{E_{i+1/2}^-}$ を合計することで、数値流束 $\widetilde{E_{i+1/2}}$ を得る。

$$\widetilde{E_{i+1/2}} = \widetilde{E_{i+1/2}^+} + \widetilde{E_{i+1/2}^-} \quad (3.29)$$

y 方向の移流項についても同様である。

3.2.4 その他の項の差分化と時間積分

梶川ら (2013) と同様に、粘性項には2次精度中央差分を使用し、圧力項には以下の4次精度中央差分を使用している。

$$-gh \frac{\partial H}{\partial x} = -gh_{i,j}^n \frac{-H_{i+2,j}^n + 8H_{i+1,j}^n - 8H_{i-1,j}^n + H_{i-2,j}^n}{12\Delta x} \quad (3.30)$$

$$-gh \frac{\partial H}{\partial y} = -gh_{i,j}^n \frac{-H_{i,j+2}^n + 8H_{i,j+1}^n - 8H_{i,j-1}^n + H_{i,j-2}^n}{12\Delta y} \quad (3.31)$$

また、時間積分については、式(3.33)～(3.35)に示される3次精度 TVD Runge-Kutta法を使用している。ただし、連続式については1次精度 Euler法を用いている。

$$\frac{\partial U}{\partial t} = L(U) = -\frac{1}{V} \left(\frac{\partial A_x E}{\partial x} + \frac{\partial A_y F}{\partial y} \right) + C \quad (3.32)$$

$$U^{(1)} = U^n + \Delta t \cdot L(U^n) \quad (3.33)$$

$$U^{(2)} = \frac{3}{4}U^n + \frac{1}{4}\{U^{(1)} + \Delta t \cdot L(U^{(1)})\} \quad (3.34)$$

$$U^{n+1} = \frac{1}{3}U^n + \frac{2}{3}\{U^{(2)} + \Delta t \cdot L(U^{(2)})\} \quad (3.35)$$

ここに、 Δt ：計算時間間隔である。

3.2.5 モデル地形に対する改良流動モデルの計算例

1) 計算条件

流動モデルと改良流動モデルの計算結果の特徴を比較するために、モデル地形による計算を実施した。航路・泊地埋没対策ガイドラインでは、漁港の埋没パターンを図 3.4 に示すケースに分別している。

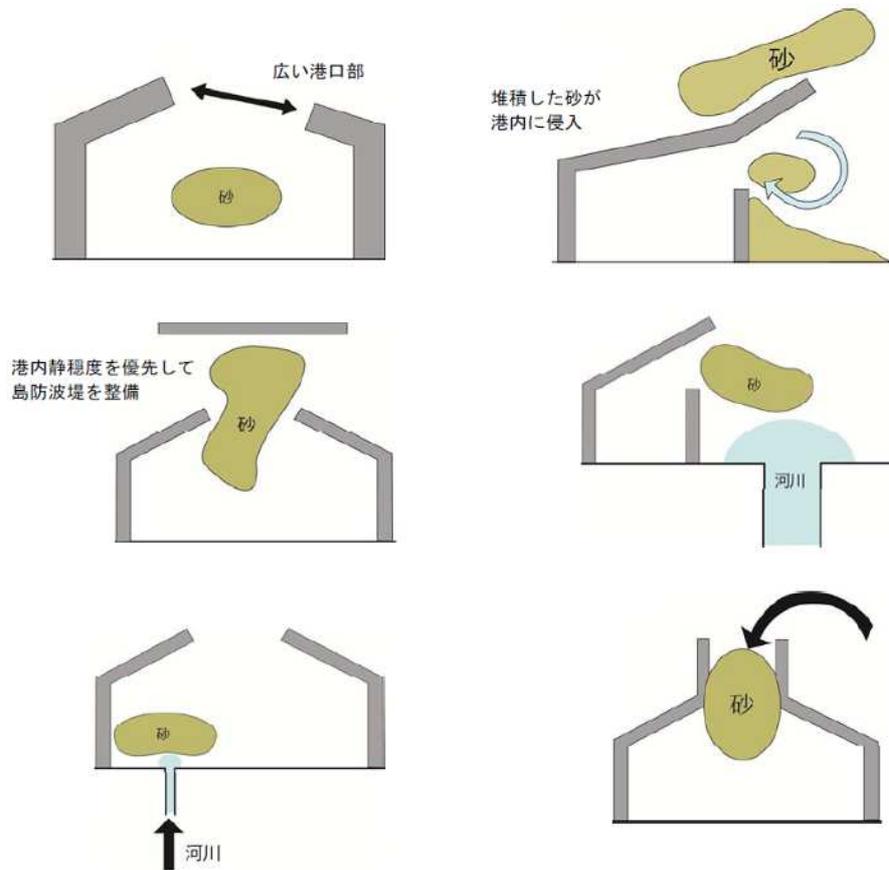


図 3.4 想定される埋没パターン(水産庁, 2014)

本研究では、一様勾配地形と共に、鳥取県内の漁港に近い地形 2 ケースを選択して 3 パターンのモデル地形を作成した。

TYPE-A : 一様勾配 (勾配 1/10)

TYPE-B : TYPE-A の地形にモデル港型の構造物を配置(非対称)

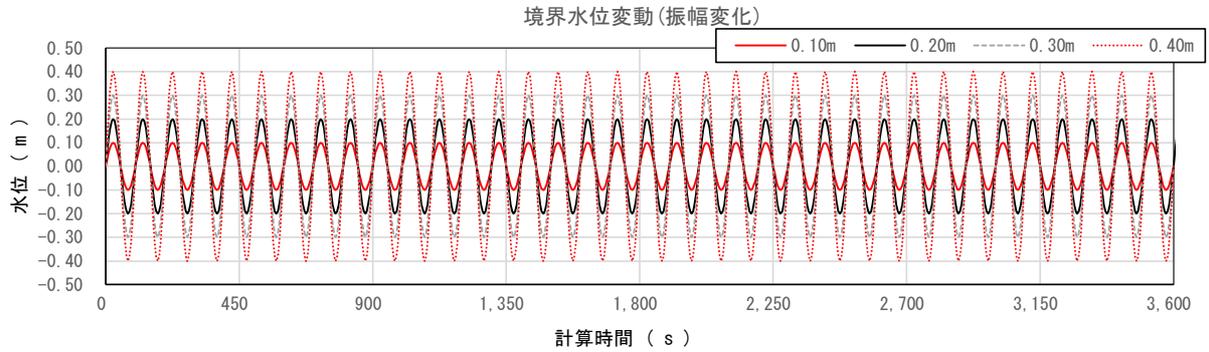
TYPE-C : TYPE-A の地形にモデル港型および沖防波堤構造物を配置(対称)

TYPE-A は、沖から伝播した長周期波が、水深が浅くなるに従いどの様に変形するかを確認する。TYPE-B, C は TYPE-A の地形にそれぞれ港口が片側に寄った港形のモデル港湾と、港口が中央にありその沖合に離岸堤を配置した港形のモデル港湾とし、構造物近傍の計算傾向の差異を確認する。

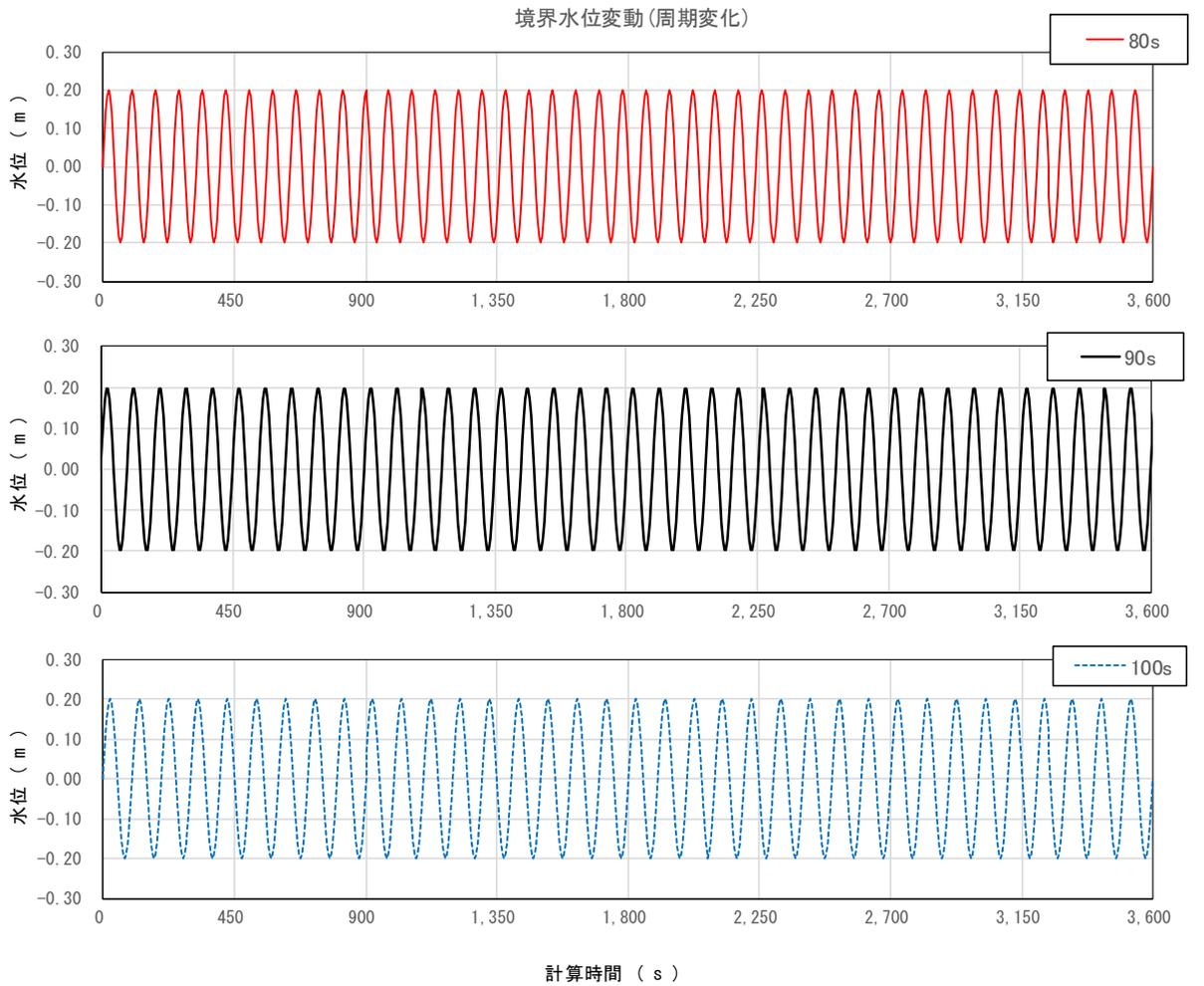
沖合境界に与えた長周期水位変動の種類と波形をそれぞれ表 3.1 と図 3.5 に示す。また計算地形と計算条件を表 3.2 と図 3.6 に示す。

表 3.1 水位変動種類

変動の振幅	0.1 m ・ 0.2 m ・ 0.3 m ・ 0.4 m
周期	80 s ・ 90 s ・ 100 s



(a) 振幅変化



(b) 周期変化

図 3.5 境界水位振動

表 3.2 水位変動種類

領域境界	沖側：水位変動付与 両側：閉鎖
海底勾配	1/10
格子サイズ	10 m×10 m
計算時間間隔	0.1 s
反射率	100 %
マニング粗度係数	0.020
変動の振幅	0.2 m
計算時間	3,600 s (90 s・40 周期)

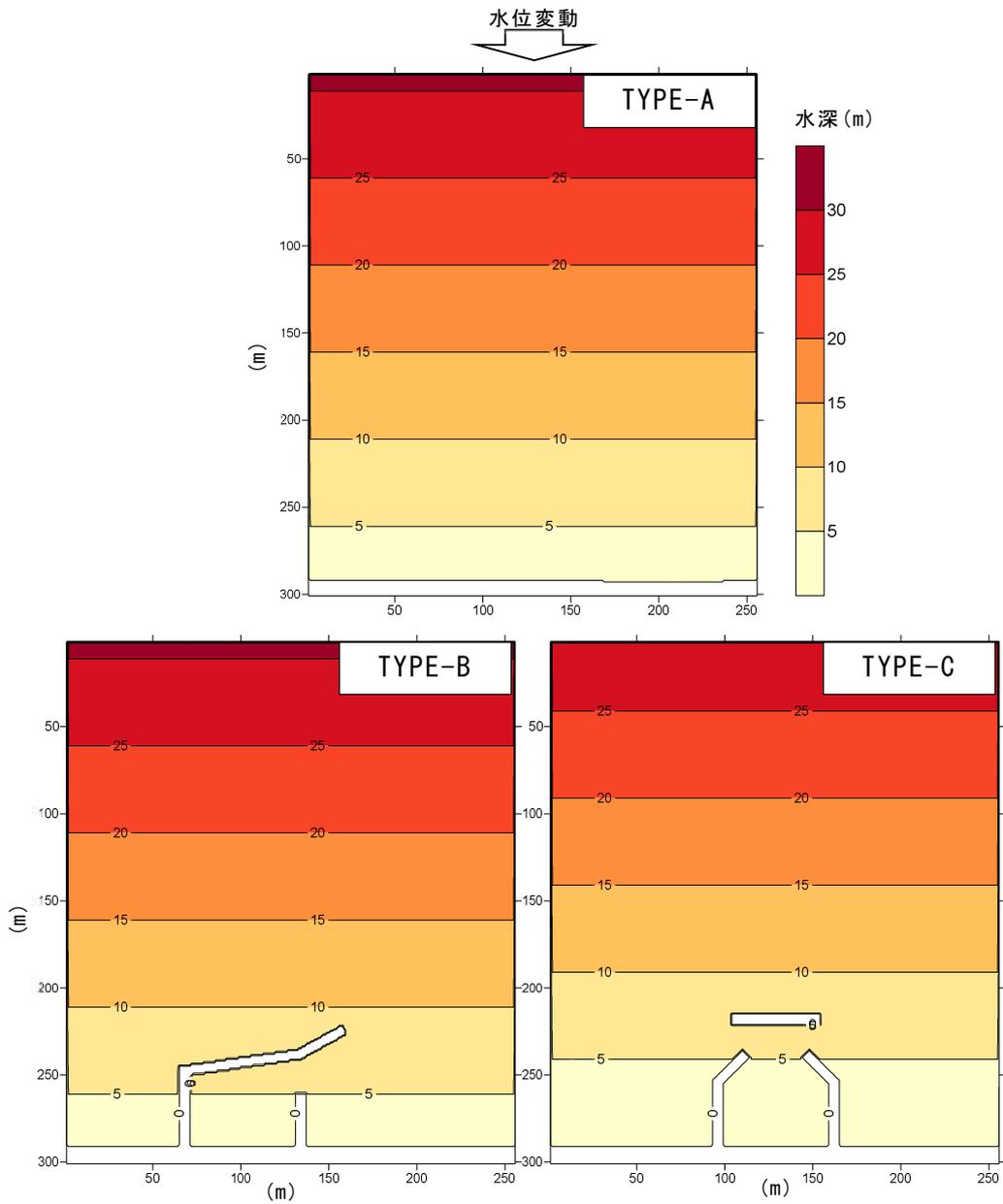


図 3.6 モデル地形と共通設定

2) 計算結果 (TYPE-A)

TYPE-A における, 2 種類の流動モデルそれぞれの計算領域中央部岸沖方向測線の水位変動の振幅の rms (root mean square : 二乗平均平方根) 値を図 3.7 (周期を 3 パターンに変更), 図 3.8 (振幅を 4 パターンに変更) に示す.

図 3.7 は振幅を 0.2 m に固定し, 周期を 80 s・90 s・100 s の 3 種類を与えた結果である. 流動モデル 2 種類ともに沖から汀線に向けて振動の節と腹を成し, 周期の差異による波長の差が計算されており, 大まかな波形は同様である. 図 3.8 は周期を 90 s に固定し, 振幅を 0.1m・0.2m・0.3m・0.4m の 4 種類を与えた結果である. 振動の節・腹の位置は変化せず, 振幅の差異による変化が出力されている. なお, 既往流動モデルは振幅 0.3 m, 0.4 m のケースにて計算途中で発散し, 最終結果が得られなかった. 計算設定を変更することで回避できるが, 構造物周辺などの計算格子間での変化が大きいと想定される個所などを含む場合, 梶川らの手法を用いた改良流動モデルの方が発散を起こさずに計算を終了することが可能であり, 計算に要する時間などを低減できると想定された.

佐藤ら(1990) は通常波浪成分は汀線付近で砕波により波高を減衰させるのに対し, 長周期波は波高を増大させることを実験および数値計算により示しており, 今回用いた 2 種類のモデルでも沖から伝播した長周期の振幅は汀線付近で増加を示したが, 改良流動モデルがより大きな増幅率を示した.

また, 上述と同じ測線での, 振幅 0.2 m, 周期 90 s のパターンの平均水位を図 3.9 に示す. 風波等の砕波によって海岸付近の平均水位が上昇する現象に wave setup があり, 状況によっては 1 m 以上の水位上昇が発生して沿岸流速と沿岸漂砂に影響を与える(合田, 2007). wave setup は砕波点付近で水位が下降した後に急激な上昇をもたらすが(近澤, 2015), 今回用いたモデルは砕波等によるエネルギーの解放は考慮していないため, 計算結果にも反映されていない. しかしながら, 改良流動モデルでは汀線に接近するに従い最大 0.02 m 程度の水位上昇がみられた. これは上述の wave setup とは別で, 海底の影響を受けるなどで往復流に偏差が生じた結果が反映されていると考えられる.

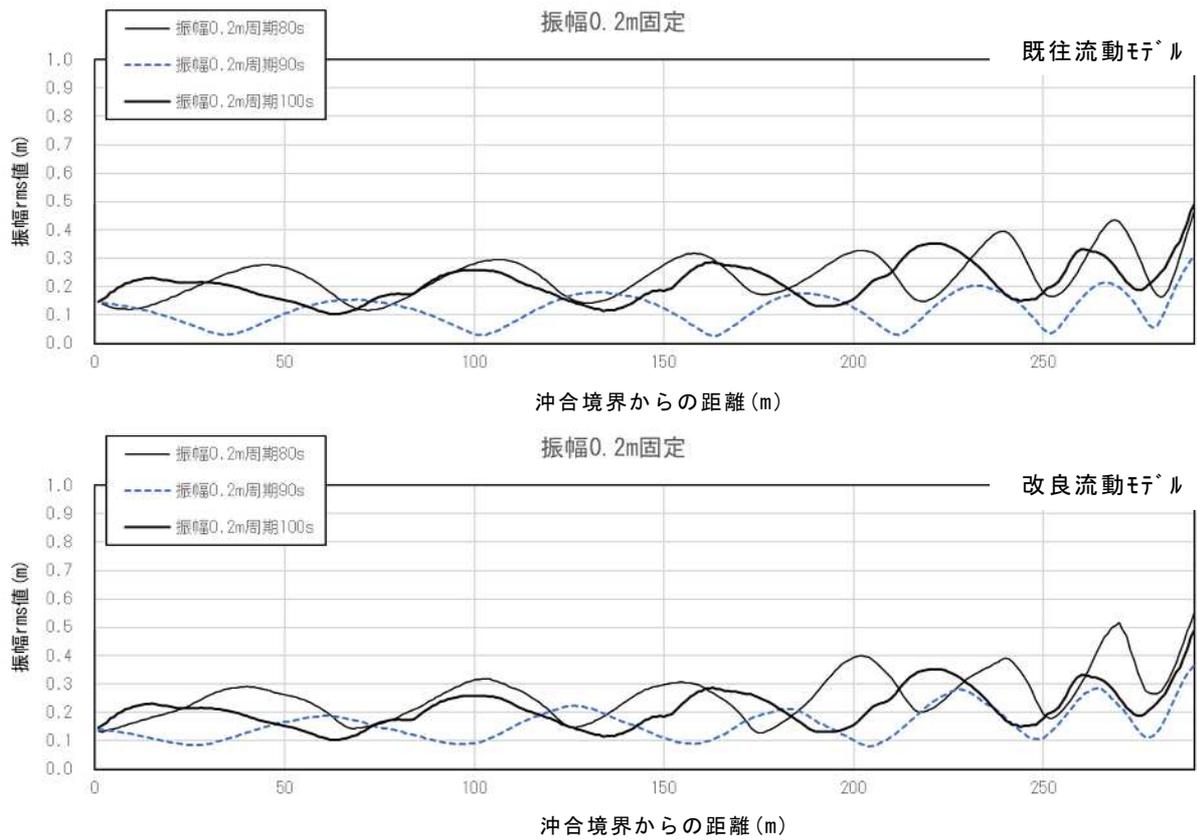


図 3.7 水位変動の振幅の rms 値の岸沖分布（周期変更）

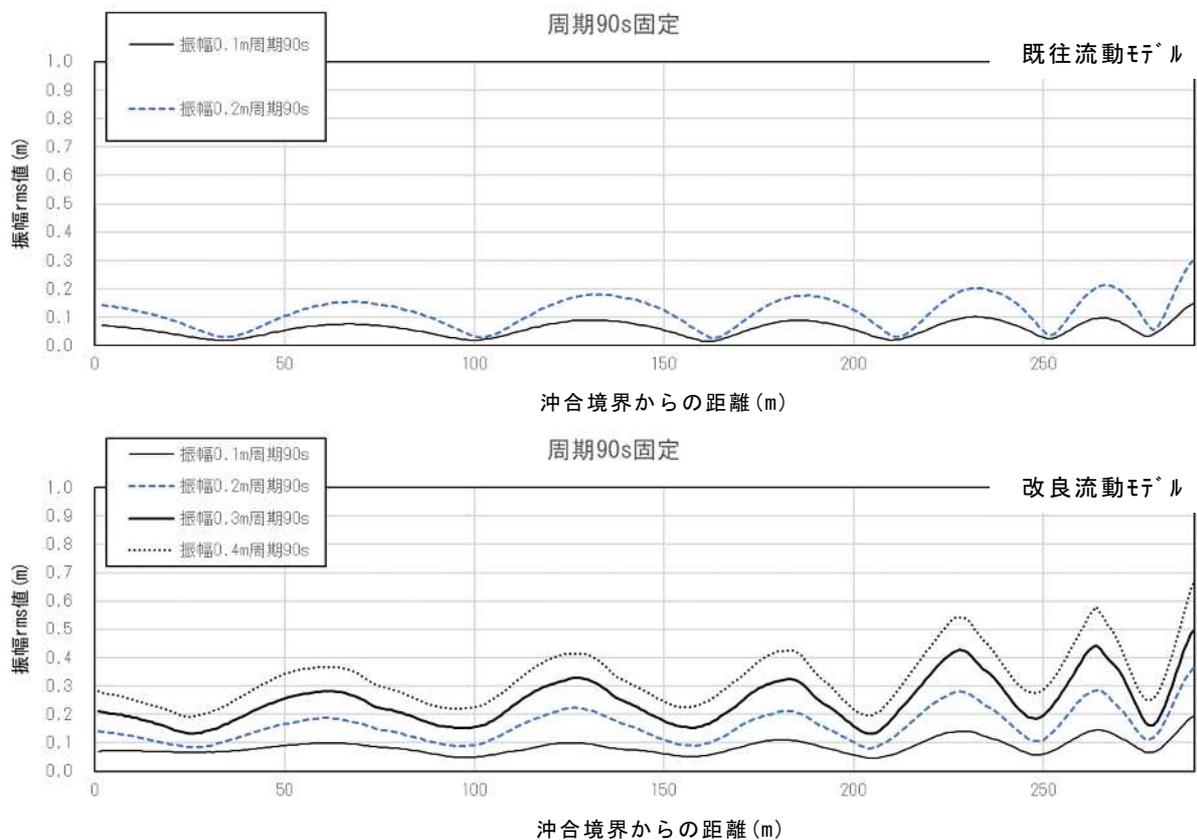


図 3.8 水位変動の振幅の rms 値の岸沖分布（振幅変更）

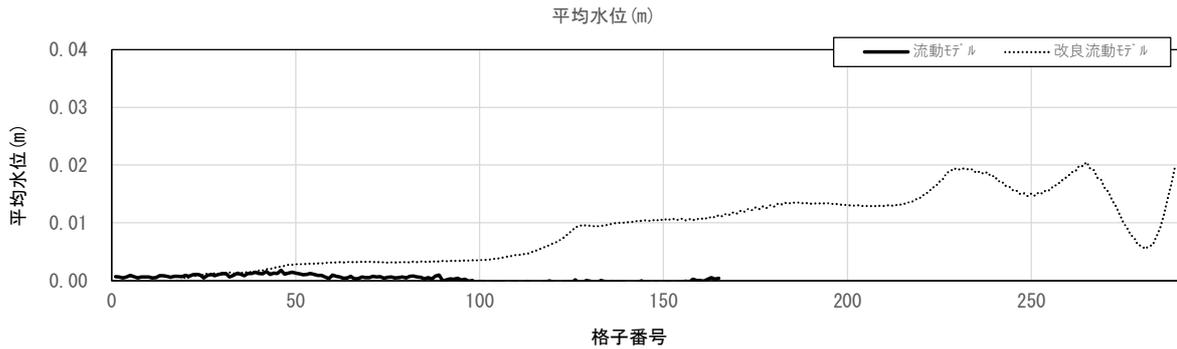


図 3.9 平均水位の比較

3) 計算結果 (TYPE-B, C)

港湾構造物による流動の計算傾向を確認するために、TYPE-B、TYPE-C それぞれについて、港口の流れが港内向き・港外向きの時点を抽出した平面流動ベクトルを図 3.10～図 3.13 に示す。なお、港湾構造物周辺を拡大したものを掲載している。なお、水位変動は振幅 0.2 m、周期 90 s のものである。

既往流動モデルに対し、改良流動モデルは構造物による反射波の影響が強く、港内の複雑な水位分布によって流動も変化が激しい計算結果となっている。そこで 1 変動周期の平均流速を算出すると、最下段の状況となる。TYPE-B (図 3.10) は、既往流動モデルは港口から汀線にかけての浅い海域で冲向きの流れが過大に残り、港内は逆に卓越する流動は現れない。改良流動モデル (図 3.11) は港口で渦を巻く港内向きの 0.1 m/s 程度の流れがあり、減衰しつつ港中央付近まで達している。TYPE-C における既往流動モデル (図 3.12) は港型と地形が左右対称なこともあり汀線付近以外の平均流は往復流が相殺され全体的に見られなくなる。改良流動モデル (図 3.13) も同様であるが、既往流動モデルほど平坦にならず、沖防波堤周辺などで渦状の残差流が発生している。

基本的に、沖合から汀線に接近した際の長周期振動の増加率は改良流動モデルが大きいため、港湾地形近傍での流動は改良流動モデルの方が大きく、港内の狭隘部などで顕著である。突堤等の突起物周辺の長周期波に起因する流れは松岡 (1995) の現地観測でも記述されており、こうした流れが港内の洗掘・堆積の一因であると指摘している。また、1 周期平均した流れも改良流動モデルの方が卓越している。

本研究では港内での長周期波に起因する流動が港内漂砂に与える影響を考慮することが目的であるため、より影響が強く出力されるモデルが後の展開に繋げやすい。2 章での現地観測による現象確認の結果を踏まえて、改良流動モデルをベースに展開することとした。

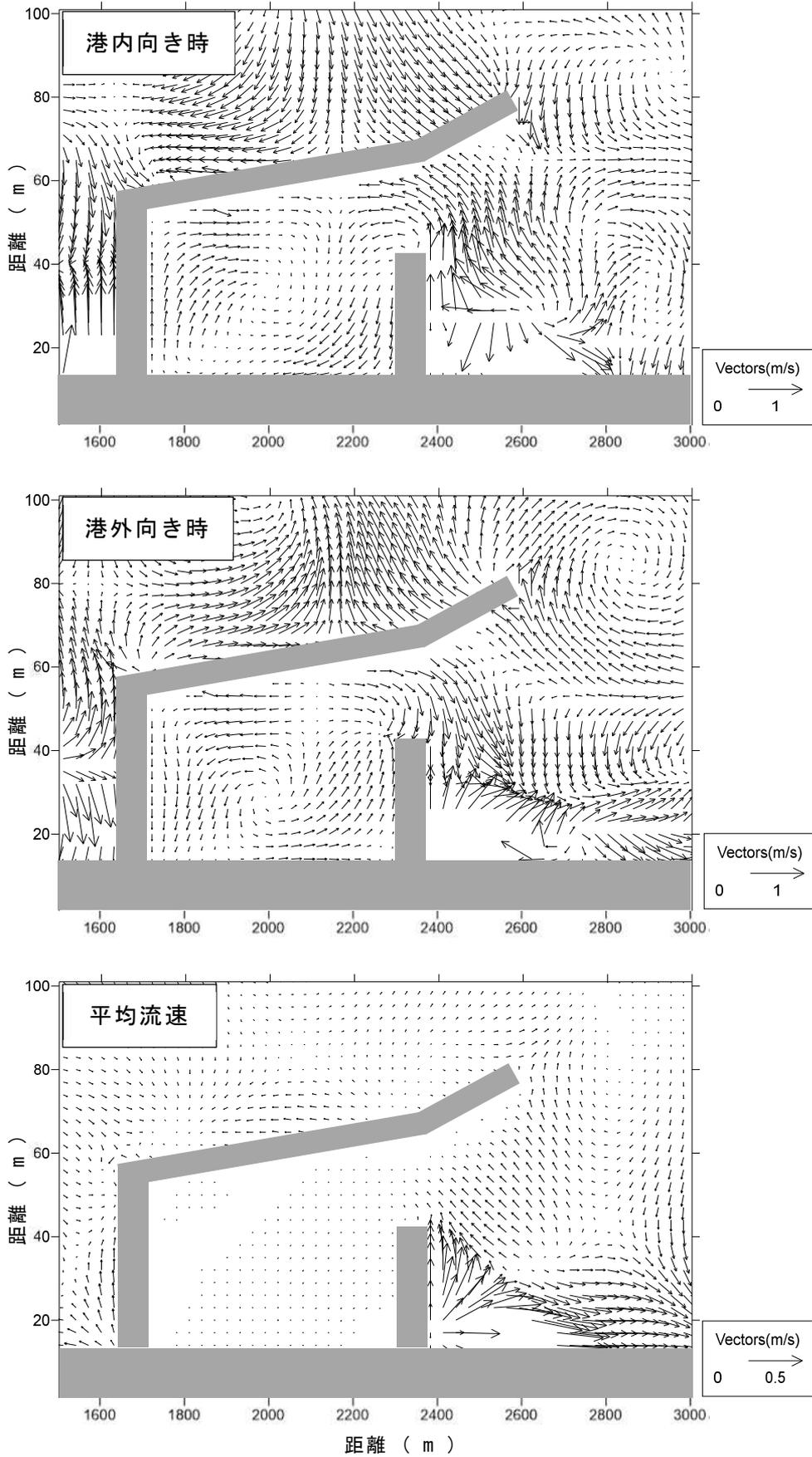


図 3.10 TYPE-B 流速ベクトル (既往流動モデル)

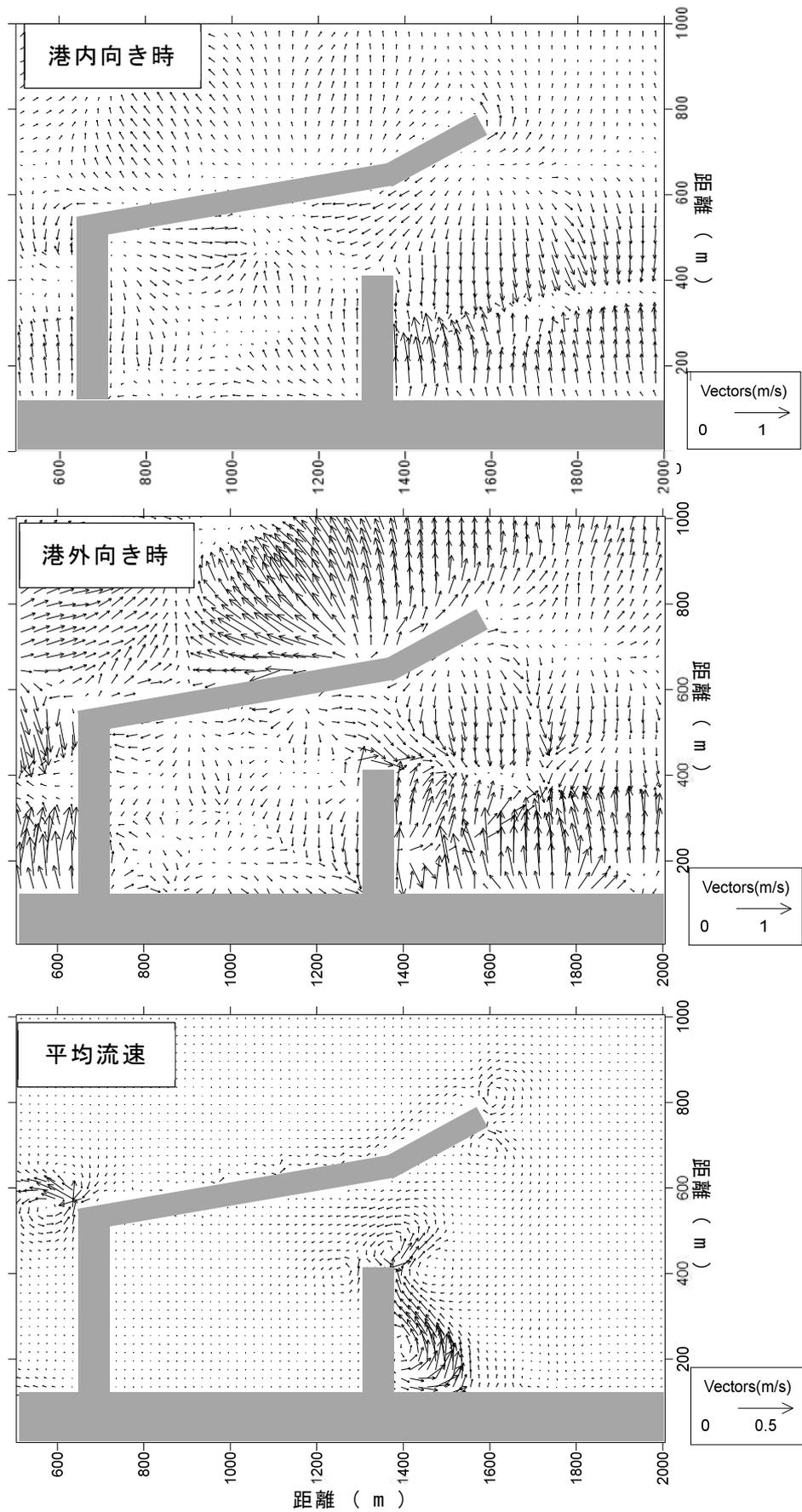


図 3.11 TYPE-B 流速ベクトル (改良流動モデル)

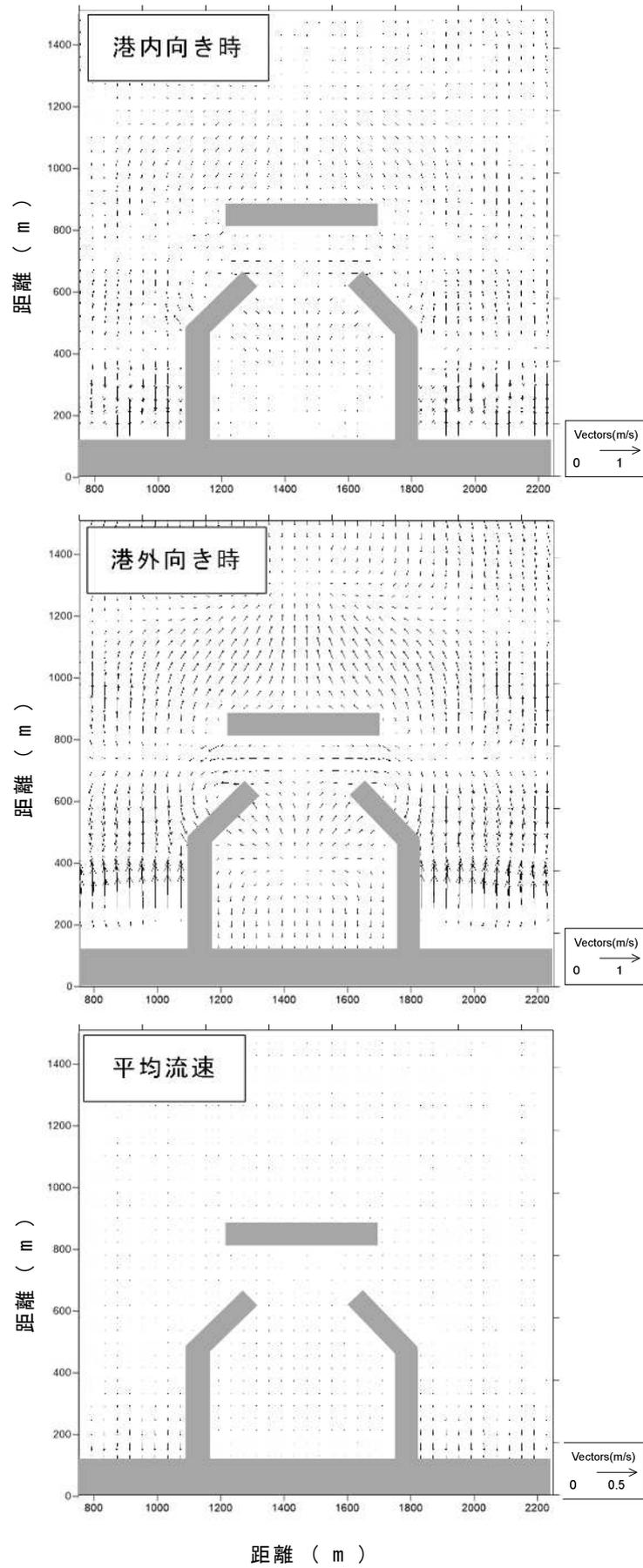


図 3.12 TYPE-C 流速ベクトル (既往流動モデル)

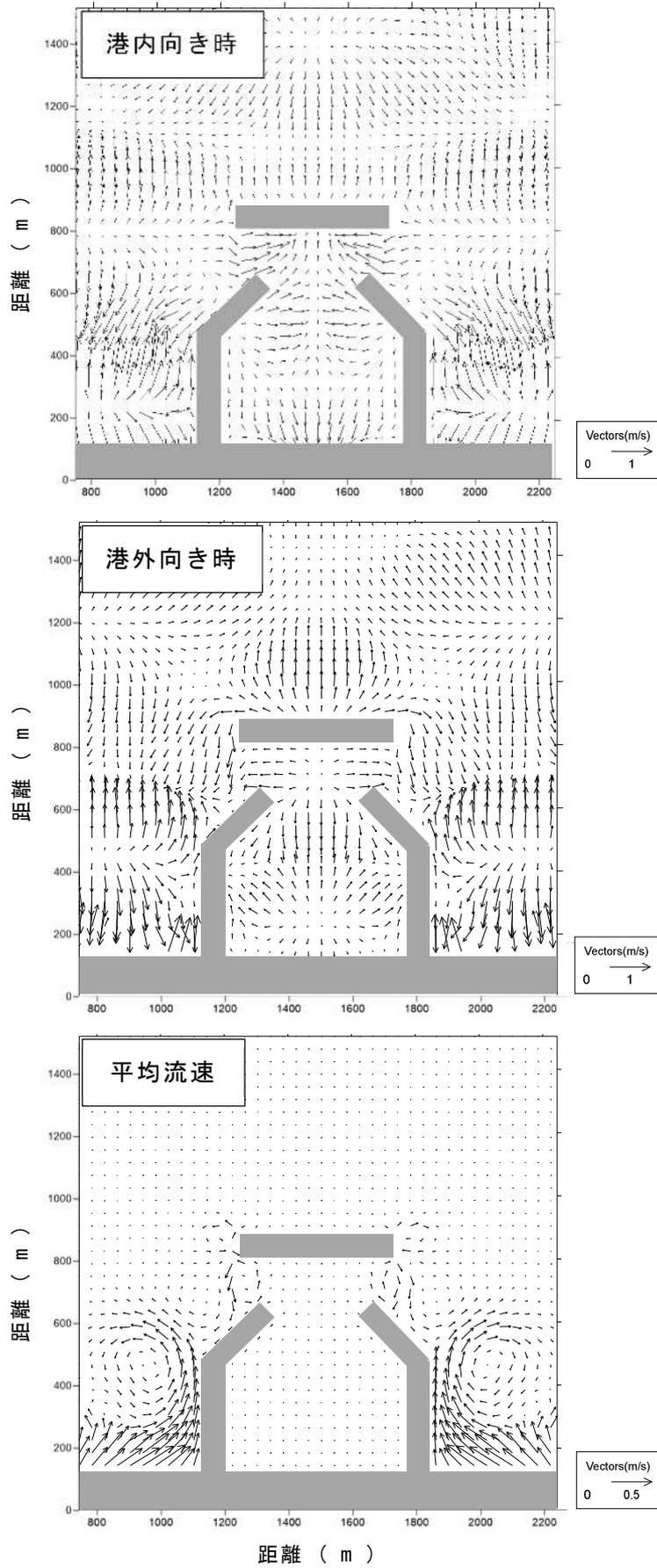


図 3.13 TYPE-C 流速ベクトル (改良流動モデル)

3.3 長周期流動の影響を組み込んだ港内堆砂予測モデルの概要

本研究では、実務においても使用されている波と流れを考慮した 3 次元海浜変形モデルの計算手法をベースとする。このモデルは単純な突堤や離岸堤、人工リーフなどの構造物配置を有する海域への適用においては、漂砂・海浜変形現象の再現性は比較的良い結果を得ることができるが（例えば、渡辺ら，1984，黒岩，1999，清水ら，1995，黒岩ら，2002），港内堆砂予測，特に港の奥側泊地での土砂堆積と港内流動の再現性には課題を残している。そこで，波浪場，海浜流場，漂砂量および地形変化計算の 3 つのサブモデルによる一連の流れに長周期変動流場を組み込む処理を行った。その際，既存のモデルの内部に長周期変動の計算の組み込みを行うと海浜流と並列に処理するために実時間で計算すると負荷が大きく，多数の検討を行う際に支障が生じると考えられた。そこで，時間軸上の課題を解決する 1 つの方法として，前節で検討した改良流動モデルを用いて現地調査にて計測された長周期波を外力とした長周期変動流場を求める計算を行い，その出力結果を海底地形変化計算のフローに読み込む処理を行った。処理フローを図 3.14 に示す。また，各サブモデルの概要を以下に示す。

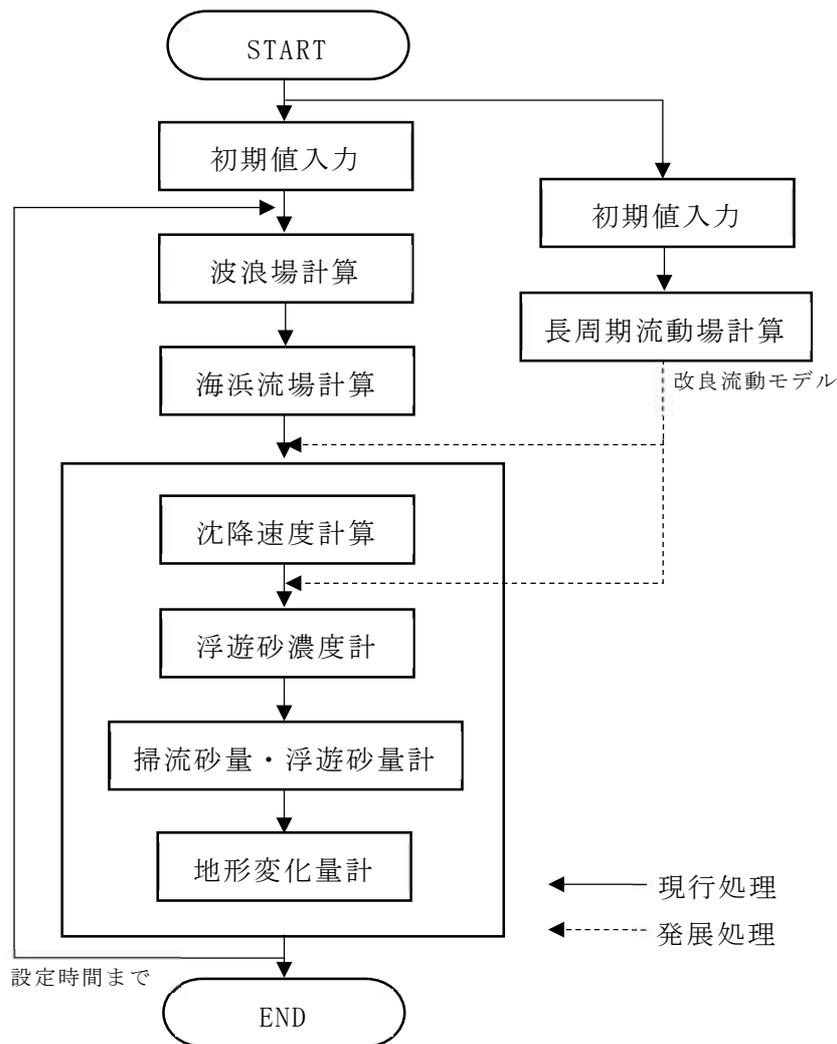


図 3.14 処理フローチャート

3.4 波浪場の計算

3.4.1 エネルギー平衡方程式

沿岸の浅海域から汀線にかけては波や流れの作用が最も著しい領域であり、海底の砂礫が常に移動している。海上あるいは海岸で目にする沿岸での現象のほとんどの原因は波浪であり、波浪条件や海浜流場がそれぞれ変化し、それらが相まって漂砂の量や方向を変化させ、海浜地形の変動となって現れる。沖合から伝播してきた波は、浅海域に入ると屈折や浅水変形し、防波堤や突堤などの構造物があれば反射や回折などを生じる。最終的には砕波を経て、汀線に達すると大部分のエネルギーを失う。このような条件の下で波の変形を計算することは、海浜地形の変化過程の予測に際して非常に重要で不可欠である。波浪場予測については、現在様々なモデルが提案されており、単一進行波のみの計算、反射波や回折による重合波を考慮し、不規則性や多方向性などを考慮する計算、さらには非線形性や分散性も考慮する計算など様々なものがある。しかし、3次元海浜変形予測においては、図 3.14 に示したように波と流れの計算から漂砂量と地形変化の計算、さらに地形更新後に波と流れの計算にフィードバックするため、できるだけ計算負荷の少ないモデルが要求される。本研究では、間瀬ら(1999)の回折を考慮したエネルギー平衡方程式の数値モデルを使用し、その際の砕波減衰項は高山ら(1991)のモデルを用いた。

エネルギー平衡方程式は、位相的に平均化された諸量の一つである波エネルギーの変化を、平面上の格子点で求めるものである。実際の適用にあたっては、計算対象領域を x 、 y 方向それぞれに間隔 Δx 、 Δy の格子に分割し、各格子点上での諸量に対する差分式を解くことになる。位相平均量の変化を対象とするので、格子間隔を大きくとることができ、大領域における波浪変形を計算することが可能である。また、多方向不規則波の屈折、浅水変形、さらには砕波変形を解くことができる。そのため、実用的にも大領域の波浪変形計算モデルとして盛んに用いられている。

3.4.2 回折を考慮したエネルギー平衡方程式

エネルギー平衡方程式では、波の回折効果が考慮されていないので、構造物による波の反射や回折がある場合には適用することができない。しかし、間瀬ら(1999)によって、波の回折効果を考慮したエネルギー平衡方程式が開発されている。このエネルギー平衡方程式は、他にも波浪の不規則性、多方向性、浅水変形、反射、屈折、回折及び砕波を考慮することができ、波浪スペクトルの空間変化を未知量とする位相平均型波浪変形モデルの一つであり、主に WAM (the WAVE Modelling group) や SWAN (Simulating WAVes Nearshore) などの波浪推算モデル等に用いられている。

間瀬らは放物型波動方程式を基にして回折項を定式化し、エネルギー平衡方程式に導入することを考え、以下のように導いている。

$$\frac{\partial(sv_x)}{\partial x} + \frac{\partial(sv_y)}{\partial y} + \frac{\partial(sv_\theta)}{\partial \theta} = \frac{\kappa}{2\theta} \left\{ (CC_g \cos^2 \theta S_y)_y - \frac{1}{2} CC_g \cos^2 \theta S_{yy} \right\} - \varepsilon'_b S \quad (3.36)$$

ここに、 S は波の方向スペクトル、 (x, y) は水平座標 (x 軸は沖から岸向きを正)、 v_x, v_y, v_θ はそれぞれ波のエネルギー輸送速度、 θ は x 軸の正方向から反時計回りの波向角、 C は波速度、 C_g は群速度である。 S_y および S_{yy} の添え字 y はそれぞれ 1 階微分および 2 階微分を表す。 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し、砕波減衰項は高山ら (1991) のモデルを用いる。 κ は回析項に関する影響係数であり、この影響係数により回析項を調整する。

3.5 海浜流場の計算

3.5.1 基礎方程式

海浜流とは、沿岸流や離岸流等の波によって発生する局所的な流れを総称するものである。まず、与えられた条件下で波浪場を計算し、radiation stress を外力項として持つ運動方程式と連続式を解くことによって求める。海浜流場は独立したものとは限らず、前段階にある波浪場の計算及び後続する漂砂量、地形変化の計算にも関連する。得られた波と流れを漂砂量ならびに海浜地形変化の計算における外力として利用する場合、再び波と流れの分布に影響するので、さらに大きなループが構成される。したがって、この海浜流場の計算では、複雑な波と地形条件に対しても安定であること、計算所要時間が過大でないことの 2 つの要件が重要となっている。

海浜流場の計算は、従来から水深方向に断面平均された平面 2 次元モデル (2DH モデル) が用いられており、なかでも西村ら (1984) のモデルが代表的である。しかし最近では、海浜流場の 3 次元性が重要になってきており、近年では計算手法の発展により黒岩ら (2002) 等による準 3 次元流動場の計算等も行われており、港湾構造物や人工リーフ等の周辺における漂砂現象の再現性向上が図られている。

本研究では過大な計算負荷を軽減する目的と極力平易な手法によるモデル改良を目的の一つとしている点から海浜流場の計算では平面 2 次元 (2DH) モデルを適用した。

図 3.15 に示す座標系において、運動方程式は 3 次元空間における N-S 方程式を鉛直方向に積分することによって導かれ、以下のように表される。

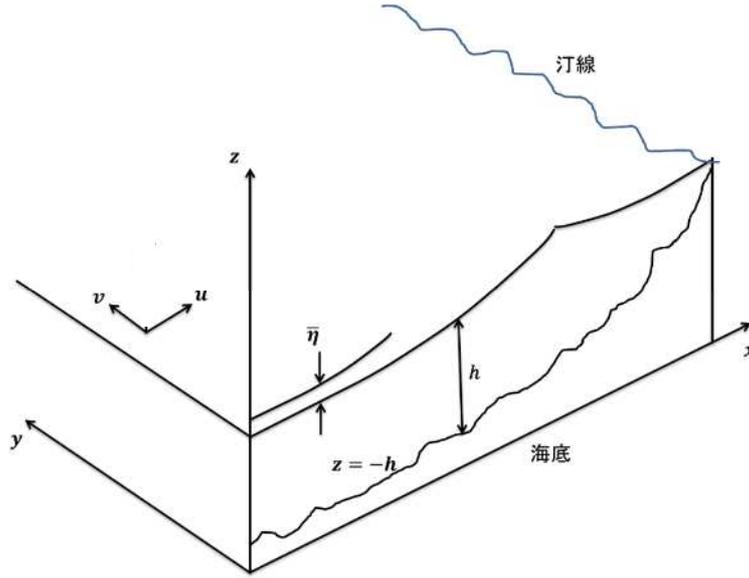


図 3.15 座標系

$$\frac{\partial U}{\partial t} + U \frac{\partial U}{\partial x} + V \frac{\partial U}{\partial y} = -g \frac{\partial \bar{\eta}}{\partial x} - F_x + M_x - R_x \quad (3.37)$$

$$M_x = \frac{\partial}{\partial x} \left(v_h \frac{\partial U}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(v_h \frac{\partial U}{\partial y} \right) \quad (3.38)$$

$$R_x = \frac{1}{\rho(h+\bar{\eta})} \left(\frac{\partial S_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial S_{xy}}{\partial y} \right) \quad (3.39)$$

$$F_x = \frac{c_f}{h+\bar{\eta}} \overline{(U + u_b) \sqrt{(U + u_b)^2 + (V + v_b)^2}} \quad (3.40)$$

および,

$$\frac{\partial V}{\partial t} + U \frac{\partial V}{\partial x} + V \frac{\partial V}{\partial y} = -g \frac{\partial \bar{\eta}}{\partial y} - F_y + M_y - R_y \quad (3.41)$$

$$M_y = \frac{\partial}{\partial x} \left(v_h \frac{\partial V}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(v_h \frac{\partial V}{\partial y} \right) \quad (3.42)$$

$$R_y = \frac{1}{\rho(h+\bar{\eta})} \left(\frac{\partial S_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial S_{yy}}{\partial y} \right) \quad (3.43)$$

$$F_y = \frac{c_f}{h+\bar{\eta}} \overline{(V + v_b) \sqrt{(U + u_b)^2 + (V + v_b)^2}} \quad (3.44)$$

であり, 連続式は,

$$\frac{\partial \bar{\eta}}{\partial t} + \frac{\partial U(h+\bar{\eta})}{\partial x} + \frac{\partial V(h+\bar{\eta})}{\partial y} = 0 \quad (3.45)$$

である. ここに, 式 (3.37), (3.41) 中の右辺第 4 項 R_x および R_y は波の存在による radiation stress 項であり, 右辺第 3 項 M_x および M_y は渦動粘性項である. 詳細について

は後述する。 U および V は x 方向、 y 方向の断面平均流速で、 u_b および v_b は底面における流速、 h は水深、 $\bar{\eta}$ は平均水位、 ρ は海水の密度である。長周期波による影響を考慮する場合に海浜流場の方程式内に長周期流動成分を算出する式を組み込む手法もあると考えられるが、計算コスト増加を極力避ける趣旨であるため本研究では漂砂量算定にて組み込む。 C_f は底面摩擦係数であり、一般的に 0.01 (清水ら, 1995) としている。

3.5.2 沖側および側方の境界条件

沖側では、計算領域を水深の十分大きい領域まで広げ、そこでは流れは存在せず、沖からの流入もないと仮定する。さらに水位については、計算領域内の平均水位の変化を規定するために、沖側端において平均水位の上昇量を 0 とする。

側方については沿岸流の卓越する長い海岸線を考慮する場合、正味の対象となる水域の外側に側方境界を設定し、設定した側方境界付近では水位・流速ともに沿岸方向に一様とする。このとき、境界近傍では岸沖方向の流れが存在しないため、外力の岸沖方向成分は水位の勾配とつり合うことになる。

3.5.3 摩擦項の評価： F_x, F_y

単一進行波の場合、微小振幅波理論によれば、

$$\begin{cases} u_b = \frac{\pi}{2} w_b \cos\theta \cos\sigma t \\ v_b = \frac{\pi}{2} w_b \sin\theta \cos\sigma t \end{cases} \quad (3.46)$$

ここに、式 (4.45) 中の w_b は底面における絶対流速の平均値であり、次式で表される。

$$w_b = \frac{\sigma H}{\{\pi \sinh k(h+\bar{\eta})\}} \quad (3.47)$$

また、 H は波高、 σ は角周波数、 k は波数、 θ は波の進行方向が x 軸に対してなす角である。

3.5.4 波の存在による radiation stresses (過剰運動フラックス) 項： R_x, R_y

基礎方程式 (3.37) および (3.41) の右辺第 4 項が radiation stress の勾配に相当する項であり、微分演算子の中を鉛直方向の積分したものと密度 ρ との積が radiation stress そのものに相当する。 S_{xx}, S_{yy} および S_{xy} は波に伴う radiation stress である。

いま、 x 軸に平行に進行する微小振幅波を考えると、 radiation stress は、次式のとおりとなる。

$$S_{xx} = E \left(\frac{2kh}{\sinh 2kh} + \frac{1}{2} \right) = E \left(\frac{2C_g}{c} - \frac{1}{2} \right) \quad (3.48)$$

ここに、 E : 単位表面積あたりの波の全エネルギー (= $\rho g H^2 / 8$)、 k : 波数 ($2\pi/L$)、 c 及

び c_g はそれぞれ波速及び群速度である。

波向線と x 軸とのなす角度を θ とすると、 $k_1 = k\cos\theta$ および $k_2 = k\sin\theta$ と表されることにより、radiation stress テンソルは、以下のとおりとなる。

$$S_{ij} = E \begin{bmatrix} \frac{c_g}{c} \cos^2\theta + \frac{c_g}{c} - \frac{1}{2} & \frac{c_g}{c} \cos\theta \sin\theta \\ C_g \cos\theta \sin\theta & \frac{c_g}{c} \sin^2\theta + \frac{c_g}{c} - \frac{1}{2} \end{bmatrix} \quad (3.49)$$

3.5.5 拡散項： M_x, M_y

1) 水平渦動粘性係数： ν_h

式(3.37)および(3.41)中の右辺第3項は、流速の擾乱成分に起因する渦動粘性項であり、次式のとおりである。

$$\begin{cases} M_x = \frac{\partial}{\partial x} \left(\nu_h \frac{\partial U}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\nu_h \frac{\partial U}{\partial y} \right) \\ M_y = \frac{\partial}{\partial x} \left(\nu_h \frac{\partial V}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\nu_h \frac{\partial V}{\partial y} \right) \end{cases} \quad (3.50)$$

ここに、 ν_h および ν_v はそれぞれ水平渦動粘性係数、鉛直渦動粘性係数である。

流れ場における乱れの効果は渦動粘性係数に集約され、海浜流場の計算において重要なパラメータとなっていることが黒岩ら(2009)により示されている。本研究では、渦動粘性係数の設定について Longuet-Higgins(1970)モデルを用いる。

Longuet-Higgins は、代表流速 U 、代表渦径を l とすると、水平渦動粘性係数 ν_h がその積 $U \cdot l$ と同じ次元であることからこれを求める。すなわち、代表流速として実水深 $(h + \bar{\eta})$ を用いた長波の波速を用い、以下のように設定する。

$$\nu_h = N_{x'} \sqrt{g(h + \bar{\eta})} \quad (3.51)$$

ここに、 N ：無次元定数で、 $0 < N < 0.016$ の値をとるものとされ、一般的には、0.01程度の値が用いられる。 x' は離岸距離であるが、平均海底勾配 $\tan\beta$ を用いれば、式(3.51)は、次式で表される。

$$\nu_h = N \frac{(h + \bar{\eta})}{\tan\beta} \sqrt{g(h + \bar{\eta})} \quad (3.52)$$

3.6 漂砂量の計算

一般的に漂砂量は、波によるものと流れによるものの2種類に分類される。波による漂砂量の場合は、掃流砂、浮遊砂の移動形態別に分けられ、流れによる漂砂量は、断面2次元モデルを用いて求められる。しかし、戻り流れが著しく発生する場合、低層の流れと、断面平均流速とでは、流速及び流れの向きが大きく異なる。また、砕波

帯内で水面からの乱れによる高濃度の浮遊砂雲が形成されると、地形変化に大きな影響を与えるため、浮遊砂の巻き上げや移流、沈降過程などを考慮し、浮遊砂を正確に算定しなければならない。そこで、本モデルでは、航路や港内へ多くの浮遊砂を持ち込む輸送外力となる長周期波を考慮し、黒岩ら（1999）の局所的漂砂量（ q_x, q_y ）を平均流寄与分と波の作用に直接起因する漂砂とに分離して扱い、導いた全漂砂量の式を用いて地形変化の計算を行った。なお、前述のとおり、本モデルとは別途実施した長周期波による流動成分流速を、以下に示す漂砂量算定式に組み込む。この際、長周期波による流速は計算コスト削減のために、1周期分の2方向平均流速を定常流速としてモデル内の流速に加算することで、疑似的に海浜流速と長周期成分流速が重合する流れ場を作り出す。

3.6.1 水深変化

漂砂の連続式は次式で表される。

$$\frac{\partial h}{\partial t} = \frac{1}{1-\lambda} \left(\frac{\partial q_x}{\partial x} + \frac{\partial q_y}{\partial y} \right) \quad (3.53)$$

ここに、岸沖および沿岸方向の漂砂量をそれぞれ q_x, q_y とする。 h は静水深、 t は時間、 λ は砂の間隙率を表す。漂砂量の算定式は、いずれも海底勾配の影響を直接には含まない。したがって、底質の質量保存式（3.53）によって静水深 h の変化量を計算し、それを時間的に積み上げて海底地形を計算した場合に、極端な地形の凹凸や安息角以上の底勾配を生じてもそれを抑えることができない。

実際の現象には、海底勾配が局所的に急になった場合には、重力の効果により勾配方向に底質が移動しやすくなると思われる。しかも、その効果は、そこでの底勾配の大きさ、および底勾配の影響を無視したときの底質移動の程度に応じて増減すると考えるのが妥当である。

よってこのような底勾配の効果を最も簡単に表現するには、式（3.53）に変えて次式を水深変化の計算に用いる。

$$\frac{\partial h}{\partial t} = \frac{1}{1-\lambda} \left\{ \frac{\partial}{\partial x} \left(q_x + \varepsilon_s |q_x| \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(q_y + \varepsilon_s |q_y| \frac{\partial h}{\partial y} \right) \right\} \quad (3.54)$$

ここに、 ε_s ：底勾配の影響を与えるための正の定数であり、渡辺ら（1984）を参考に10とする。

3.6.2 漂砂量： q

全掃流漂砂量 q_x および q_y は、波による掃流砂 q_{wb} 、流れ（海浜流）による掃流砂 q_{cbx} 、波と流れによる浮遊漂砂量 q_s の総和として定義すると次式となる。

$$(q_x, q_y) = (q_{wbx}, q_{wby}) + (q_{cbx}, q_{cby}) + (q_{sx}, q_{sy}) \quad (3.55)$$

1) 波による漂砂量： q_{wb}

波による掃流漂砂量は渡辺ら（1984）のモデルを参考とし，次式で評価する．

$$q_{wbx} = A_w Q \hat{u}_{wb} \cos \alpha \quad , \quad q_{wby} = A_w Q \hat{u}_{wb} \sin \alpha \quad (3.56)$$

$$Q = (u_*^2 - u_{*c}^2)/g \quad (3.57)$$

ここで， u_* ：底面摩擦速度， u_{*c} ：移動限界摩擦速度， \hat{u}_{wb} ：底面軌道流速の振幅で， α は波向が x 軸となす角である． A_w は掃流漂砂量係数であり，清水ら（1996）を参考に粒径の影響を考慮するため，次式により評価される．

$$B_w = C_w 19.55 \left(\frac{\sqrt{d}}{w_f} \right)^3 \quad (3.58)$$

$$A_w/B_w = w_f \sqrt{0.5 f_{cw}} / \{(1 - \lambda) s \sqrt{sgd}\} \quad (3.59)$$

ここに， f_{cw} は波と流れの共存場における底面摩擦係数である．また， w_f は沈降速度， λ は空隙率， s は底質の水中比重， d は底質の粒径， C_w は無次元係数で， C_w は漂砂量係数 19.55 の補正值である．沈降速度 w_f は Rubey の式を用いられ，次式となる．

$$w_f = \sqrt{sgD_{50}} \left(\sqrt{\frac{2}{3} + \frac{36+0.01^2}{sgD_{50}^3}} - \sqrt{\frac{36+0.01^2}{sgD_{50}^3}} \right) \quad (3.60)$$

ここに D_{50} は底質の中央粒径である．

2) 流れによる掃流漂砂量： q_{cb}

渡辺ら（1984）の提案した沿岸漂砂量を一般の海浜流場に拡張しさらに移動限界摩擦応力を考慮した流れによる漂砂フラックス（ q_{cx}, q_{cy} ）の算定式を参考にして，次のように表す．また，本研究では漂砂量算定に用いる流速に長周期波による影響を考慮するため，式(3.61)によって流速を定義する．

$$U' = U + U_L \quad , \quad V' = V + V_L \quad (3.61)$$

$$q_{cbx} = A_c Q(U') \quad , \quad q_{cby} = A_c Q(V') \quad (3.62)$$

$$Q = (u_*^2 - u_{*c}^2)/g \quad (3.63)$$

ここに， U' および V' は岸沖および沿岸方向の断面平均流速 U ， V に第3.2節で検討した改良流動モデルによる長周期波の流速 U_L ， V_L を加算した流速である．ここで長周期波による流速は平均流速を与えている．これは，海浜流が定常流速であるため，加

算する長周期流速も往復流を除いた残渣流としたためである。 A_c は流れによる掃流漂砂量係数で波による掃流漂砂量係数 A_w の定数倍とする。

$$A_c = \beta_c A_w \quad (3.64)$$

β_c は無次元係数である。

u_{*c} は全面移動に相当する移動限界摩擦速度で、次式となる。

$$u_{*c} = \sqrt{sgd\phi_c} \quad (3.65)$$

ϕ_c : 限界シールズ数で、細かい砂の場合 $\phi_c = 0.11$, 粗い砂の場合 $\phi_c = 0.06$ とされる。

u_* は波と流れの共存場であり、榎木ら (1984) モデルを用いて、

$$u_*^2 = \frac{1}{2} f_w F_b^2 \quad (3.66)$$

$$F_b^2 = \frac{1}{2} \hat{u}_w^2 + \frac{2}{\pi} \hat{u}_w^2 \{ |U' \cos \theta| + |V' \sin \theta| \} + \frac{(U'^2 + V'^2)}{4} \quad (3.67)$$

とする。ここで、 f_w は波による摩擦係数であり、 $f_w = 0.02$ とする。

3) 浮遊漂砂量 : q_{sx}, q_{sy}

浮遊砂濃度と海浜流との積を底面から水面まで積分することによって浮遊砂に関する局所漂砂量として次式より算定する。

$$q_{sx} = \int_{-h}^{\bar{\eta}} \bar{c}(x, y) U'(x, y) dz \quad (3.68)$$

$$q_{sy} = \int_{-h}^{\bar{\eta}} \bar{c}(x, y) V'(x, y) dz \quad (3.69)$$

ここに、 \bar{c} は定常状態における浮遊砂濃度である。

本モデルでは海浜流場の計算を平面 2 次元、また、浮遊砂濃度は 2 次元移流拡散方程式を用いて計算しているため、浮遊砂量も 2 次元で求める。よって、流速 U', V' は断面平均されたものを用い、浮遊砂量は、

$$q_{sx} = c(x, y) \bar{U}'(h + \bar{\eta}) \quad (3.70)$$

$$q_{sy} = c(x, y) \bar{V}'(h + \bar{\eta}) \quad (3.71)$$

で求められる。

浮遊砂濃度 c は 2 次元移流拡散方程式、

$$\frac{\partial c}{\partial t} + U' \frac{\partial c}{\partial x} + V' \frac{\partial c}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\varepsilon_x \frac{\partial c}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\varepsilon_y \frac{\partial c}{\partial y} \right) + \frac{1}{h} (F_z - C_b w_f) \quad (3.72)$$

で求める。 U', V' : x, y 方向の流速, $\varepsilon_x, \varepsilon_y$: x, y 方向の拡散係数, h : 水深, w_f : 沈降速度, F_z : 巻き上げ量である。沈降速度は式 (3.60) を用いる。

巻き上げ量は榎木ら（1984）による移動床実験より得られた浮遊砂基準濃度を用いて、

$$F_z = (1 - \gamma)c_0 w_f \left(\frac{u_*}{w_f} - 1 \right) \quad (3.73)$$

で求める．ここに、 $u_* > w_f$ で $\gamma = 0$ 、 $u_* < w_f$ で $\gamma = 1$ であり、浮遊砂基準面濃度 c_0 は移動床実験より得られた次式を用いる．

$$c_0 = 0.347 N_c^{1.77} \quad (3.74)$$

$$N_c = \frac{0.688 u_0^2}{1.13(\rho_s/\rho - 1) g w_f T} \quad (3.75)$$

ここに、 u_0 ：底面流速の最大値、 ρ_s ：砂粒子の密度、 T ：波の周期である．

拡散係数は波による拡散係数と流れによる拡散係数が存在し、Murray (1968) の実験結果を参照して

$$\varepsilon_x = u_* / 2h + 0.15 U' h \quad , \quad \varepsilon_y = u_* / 2h + 0.15 V' h \quad (3.76)$$

で求めている．ここに、 u_* は底面摩擦速度である．

また、沈降フラックスを表す項で用いる底面濃度 C_b は、黒木ら（1998）によって提案された非平衡浮遊砂濃度分布より平均濃度の関数として表示したものをを用いて評価した．

$$C(\zeta) = C_b \cdot \exp(-R\zeta) + R(C_b - C_0)\zeta \cdot \exp\{-(R+1)\zeta\} \quad (3.77)$$

ここで、

$$\zeta = \frac{(h+z)}{(h+\eta)} \quad (3.78)$$

$$R = \frac{w_f \cdot (h+\eta)}{K_z} \quad (3.79)$$

で求められる． C_0 ：浮遊砂基準面濃度、 K_z ：鉛直拡散係数であり、本研究では $K_z = 0.02$ とする．

3.7 モデル地形による検討

鳥取県や島根県に散在する小規模漁港は、砕波帯内に港口部が位置することが多く、高波浪時の漂砂による埋没が懸念される．大規模な港湾であっても、防波堤や遮蔽域によって形成される循環流によって、港口部付近に堆砂を生じる場合がある（漂砂環境の創造に向けて（1998））．また、港湾埋没の原因として 1) 風浪による港口からの

侵入漂砂，2) 防波堤の越波によって持ち込まれる漂砂，3) 捨石堤における透過漂砂，4) 浮遊砂の長周期波による侵入漂砂などが考えられ，第 2 章の漁港ヒアリング調査結果でも言及されている。

また，松岡ら（1991）の飯岡漁港における実測調査によると，港口部の流速のパワースペクトルには 10 秒，1～3 分付近，10～20 分の周波数帯に明瞭なピークが存在し，エネルギー的にも同程度の大きさを有していることが確認されている。第 2 章の現地調査においても，周期が 10 s，90～100 s 程度のエネルギーピークを有する振動を確認している。本章では，構築した数値モデルを用いて長周期波が浮遊砂を港内に運ぶ効果を把握するため，第 3.2.5 項で用いたモデル地形を用いての検討を行った。また，通常の波浪のみで計算を行った場合と比較し，長周期波が地形変化に及ぼす影響について検討した。

3.7.1 モデル計算

計算領域および初期地形は，長周期波による流動計算を実施した結果を反映させるために第 3.2.5 項の地形 TYPE-B と TYPE-C を用いた。計算格子は $\Delta x = \Delta y = 10$ m，海底勾配は 1/10 である。

計算諸条件は表 3.3 のとおりで，外力として与える有義波高は，第 2 章にて実施した現地調査期間に観測された鳥取港 NOWPHAS データを参考に，有義波高 3.9 m，有義波周期 8.4 s とし，波向を -20° ， 0° ， $+20^\circ$ に変化させた。長周期流動は 1 周期（90 s）の平均流を与えているが，その平均流は TYPE-B と TYPE-C の沖合境界に振幅を 0.3 m とし，1 s 毎に 4 周期分を出力した結果から平均流を算出している。

各 TYPE の波浪場，海浜流場，および地形変化の計算結果を図 3.15～図 3.20 に示す。なお，長周期流動モデルの有用性を確認するため，長周期流動無しの場合の計算結果も示している。また，海浜流場，地形変化はそれぞれ計算終了時のものである。

計算結果より，概ね以下のような特徴をもつことがわかった。

1) TYPE-B（図 3.15～図 3.17）

- (1) 港口が片側にある TYPE-B では，全てのケースにおいて波向きに関係なく波浪が堤防の影になる箇所で渦状の海浜流が発生している。これは，港口部の沖防波堤による波の遮蔽による影響で，波の入射方向によらず一方向の渦流が形成される。港口部付近において堆積傾向，その外側の堤防先端から岸にかけての範囲は侵食傾向となっている。
- (2) 長周期流動の有無の違いについてみると，長周期流動の流速値に対して波による海浜流速値の方が大きいいため，長周期流動の有無による流れの違いはあまり顕著な差はなく，地形変化の違いも小さいが，波向きが -20° の場合，長周期流

動を考慮した方が、港口部への堆積量が多い結果となっていることがわかる。

2) TYPE-C (図 3.18～図 3.20)

- (3) 左右対称である地形 TYPE-C では、長周期流動有無に関係なく、波向が 0° の場合は、中央沖側の防波堤の両端で渦流が生じ、波向が $20^\circ \cdot -20^\circ$ の場合は防波堤と港突堤の間の海域を上手から下手に向かう流れが生じることがわかる。
- (4) 港口部より浅い領域において、長周期流動を考慮した場合は、どの波向きの場合においても複雑な流れが発生していることがわかる。
- (5) 地形変化においては、長周期流動有りの方が顕著な地形変化が発生しているのが明らかである。

以上のことから TYPE-B, TYPE-C 両方とも、第 3.2.5 項で検討した様に、長周期波による振幅は水深が浅くなるに従い増幅し、それによる流動も増幅する。今回の検討はモデル地形であることから実際の地形による調査結果との整合性を想定していないが、汀線近傍は長周期変動が発達した結果漂砂による地形変化の度合いが増幅する結果となり、長周期流動モデルの導入が 3 次元の地形変化に影響を及ぼすことが確認できた。

表 3.3 計算諸条件 (モデル地形)

項目	数値
波浪場	
有義波高	3.9 m
有義波周期	8.4 s
波向	$-20^\circ, 0^\circ, 20^\circ$
作用期間	2 日
Smax	75
海浜流場	
計算時間間隔	0.02 s
計算ステップ	20,000
底面摩擦係数	0.01
漂砂量	
中央粒径	0.3 mm
長周期波流動	
長周期波高 (TYPE-B, C 沖境界)	0.3 m
長周期波周期 (TYPE-B, C 沖境界)	90 s
長周期波境界流向	0° (正面)

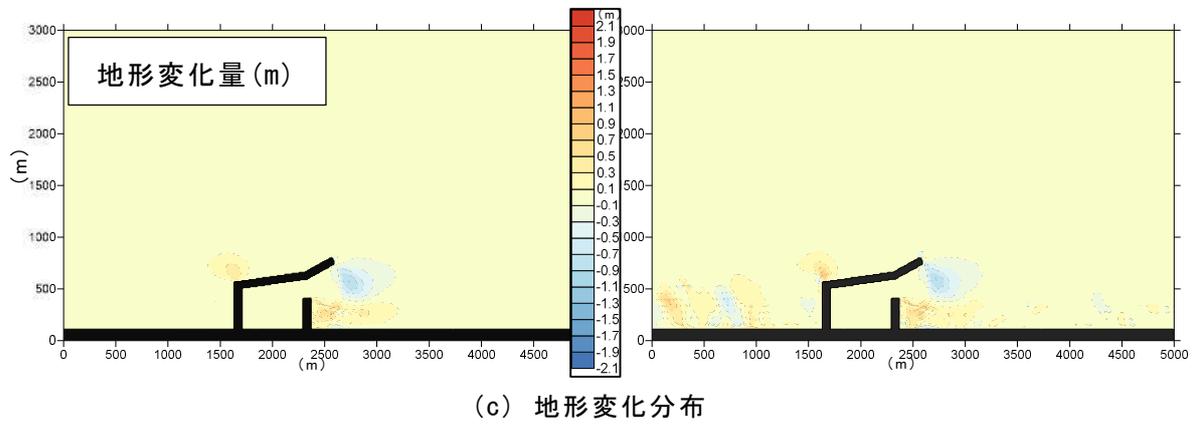
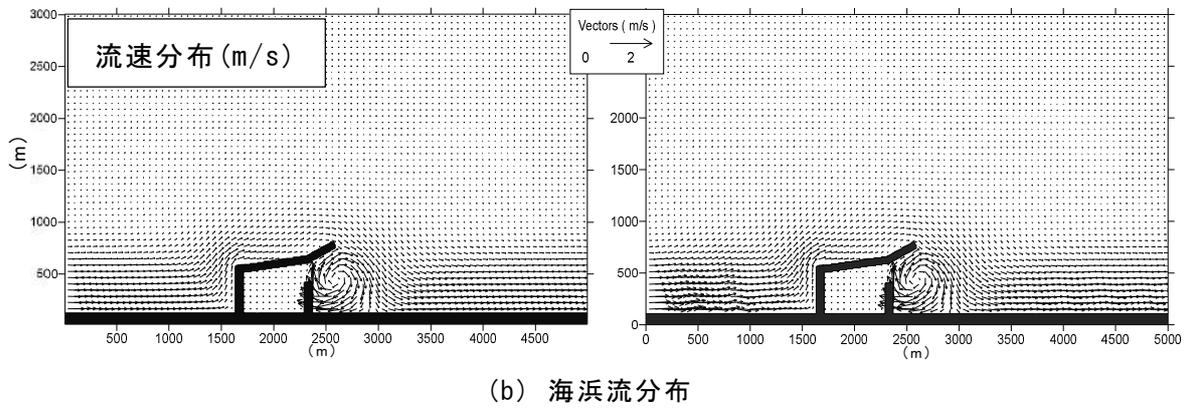
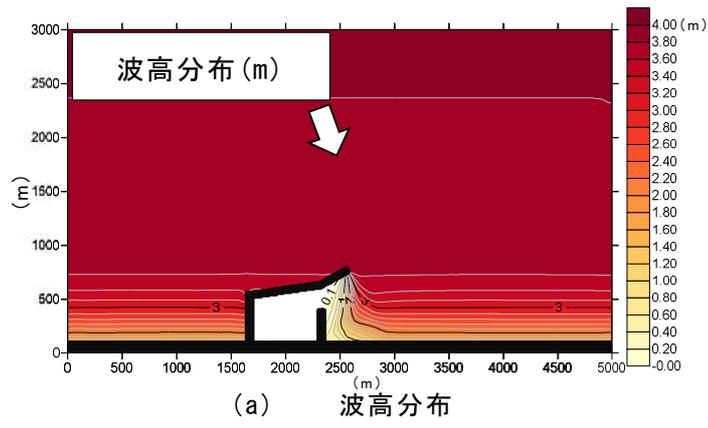
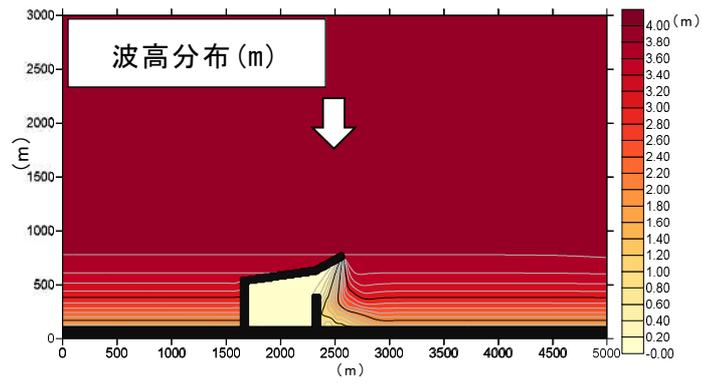
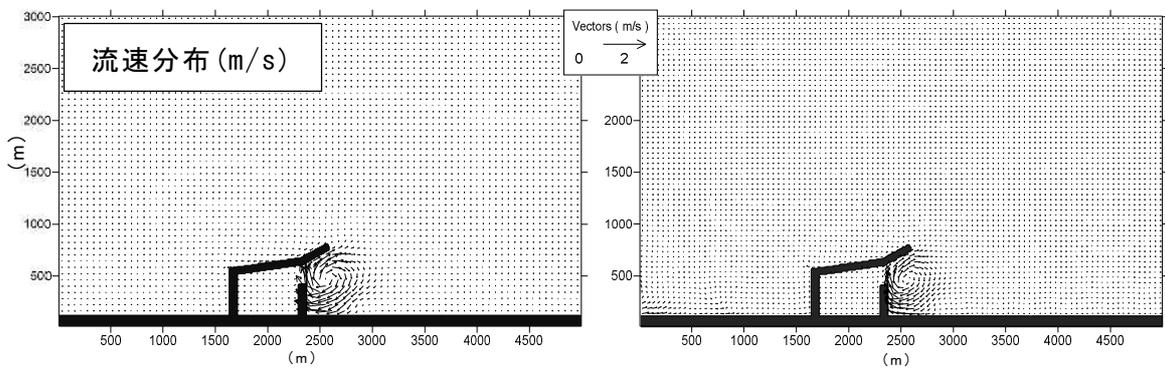


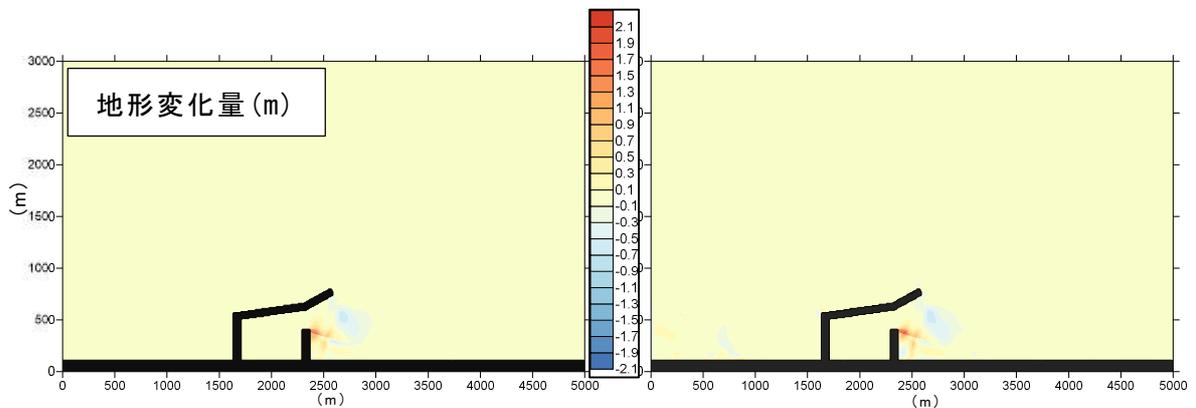
图 3.15 TYPE-B 波向 20° 計算結果 (左：長周期無し，右：長周期流動考慮)



(a) 波高分布



(b) 海浜流分布



(c) 地形変化分布

図 3.16 TYPE-B 波向 00° 計算結果 (左: 長周期無し, 右: 長周期流動考慮)

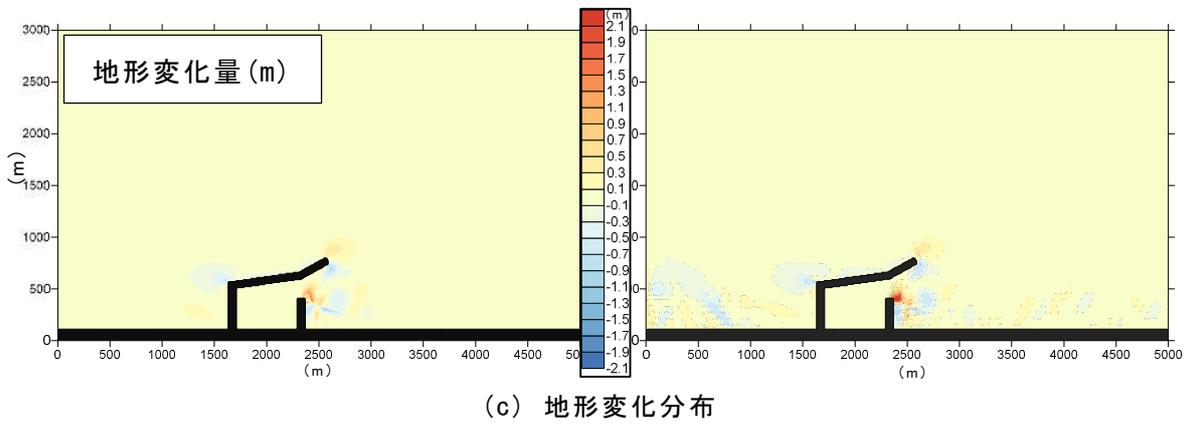
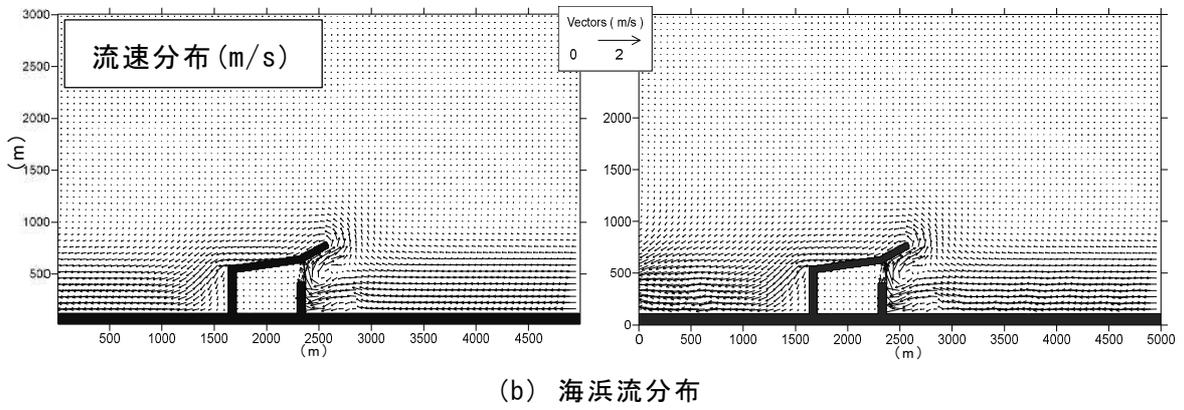
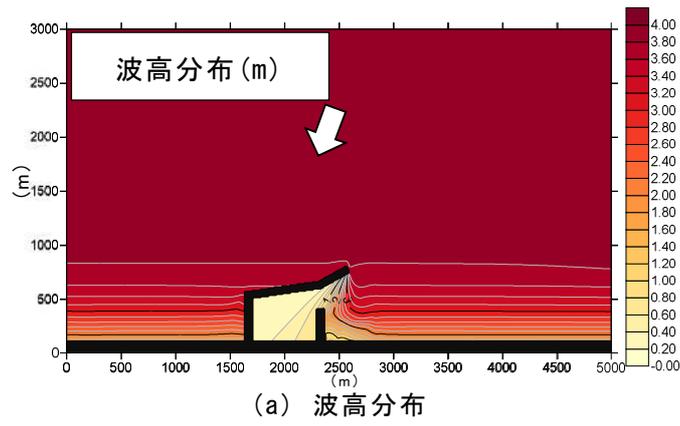
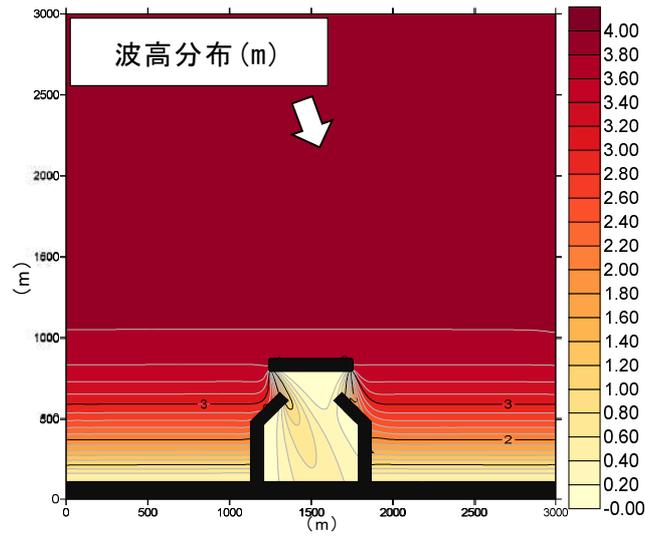
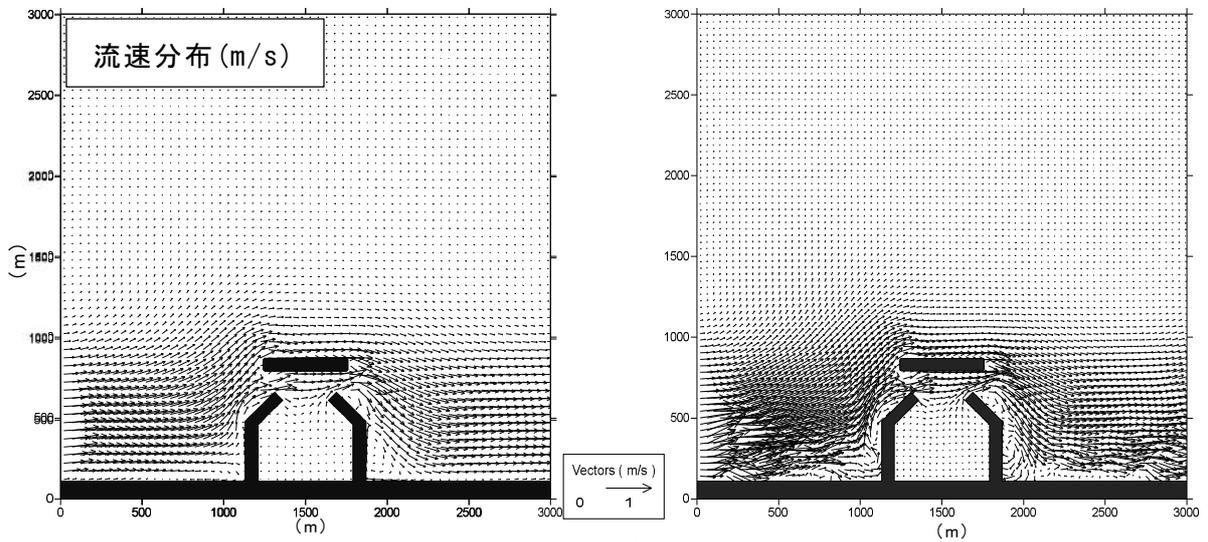


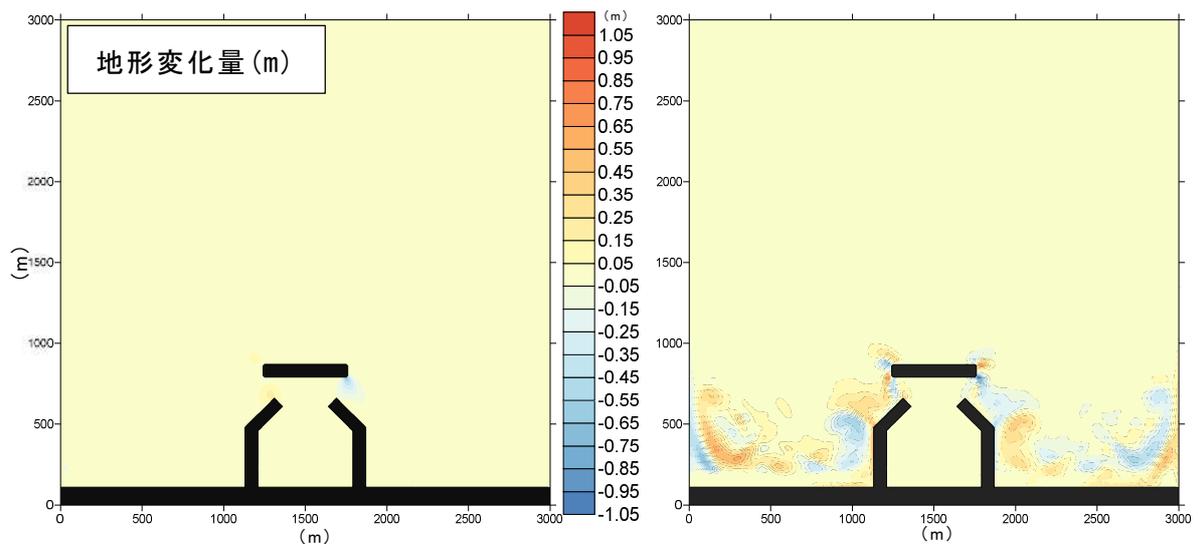
図 3.17 TYPE-B 波向 -20° 計算結果 (左 : 長周期無し, 右 : 長周期流動考慮)



(a) 波高分布

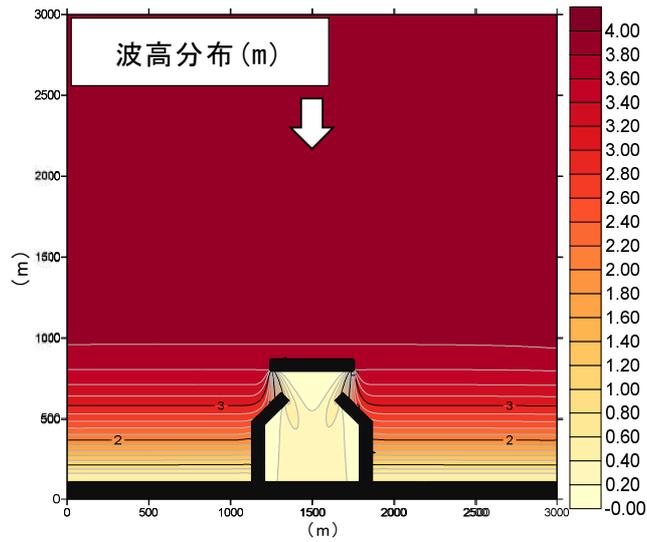


(b) 海浜流分布

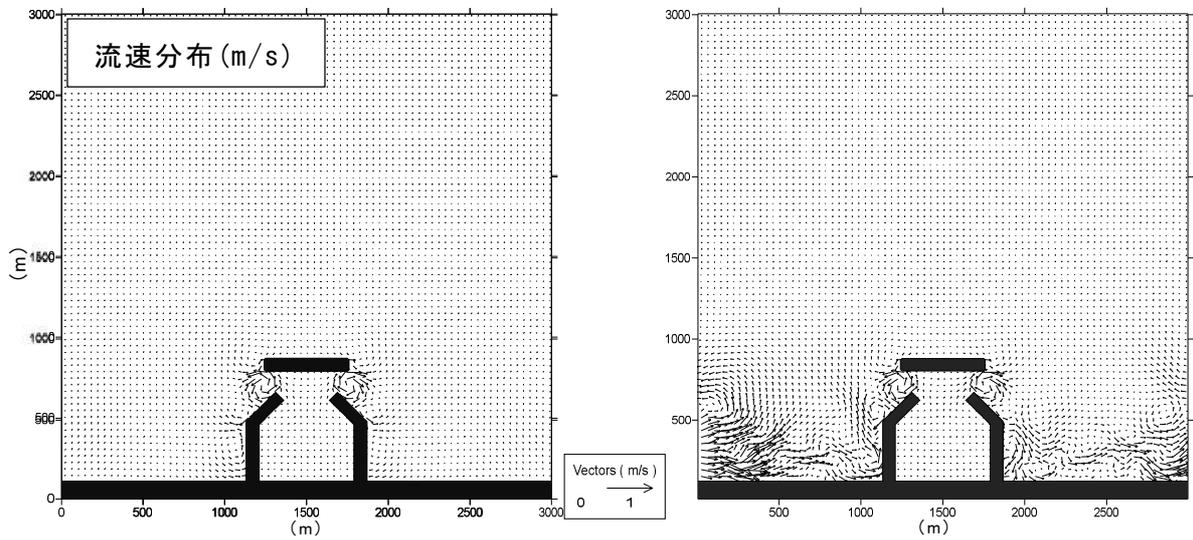


(c) 地形変化分布

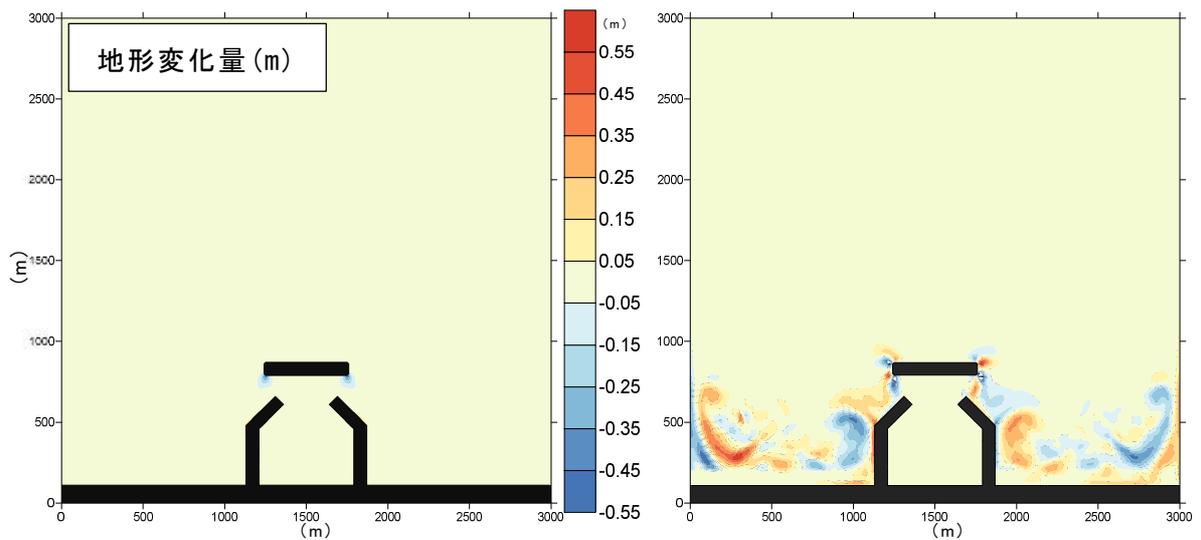
図 3.18 TYPE-C 波向 20° 計算結果 (左: 長周期無し, 右: 長周期流動考慮布)



(a) 波高分布

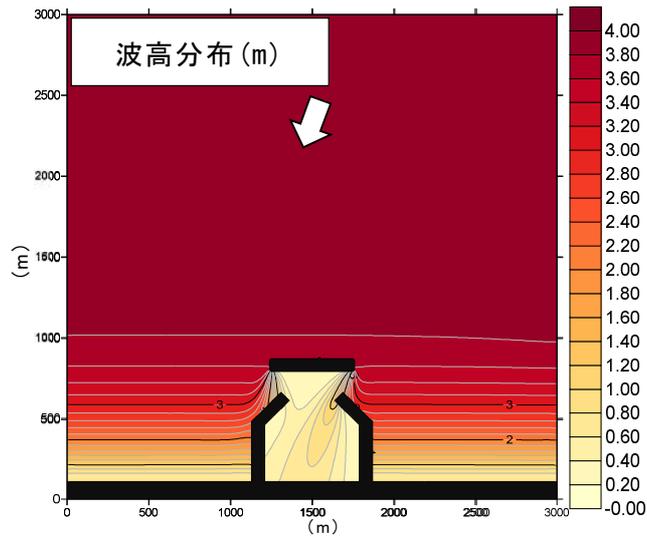


(b) 海浜流分布

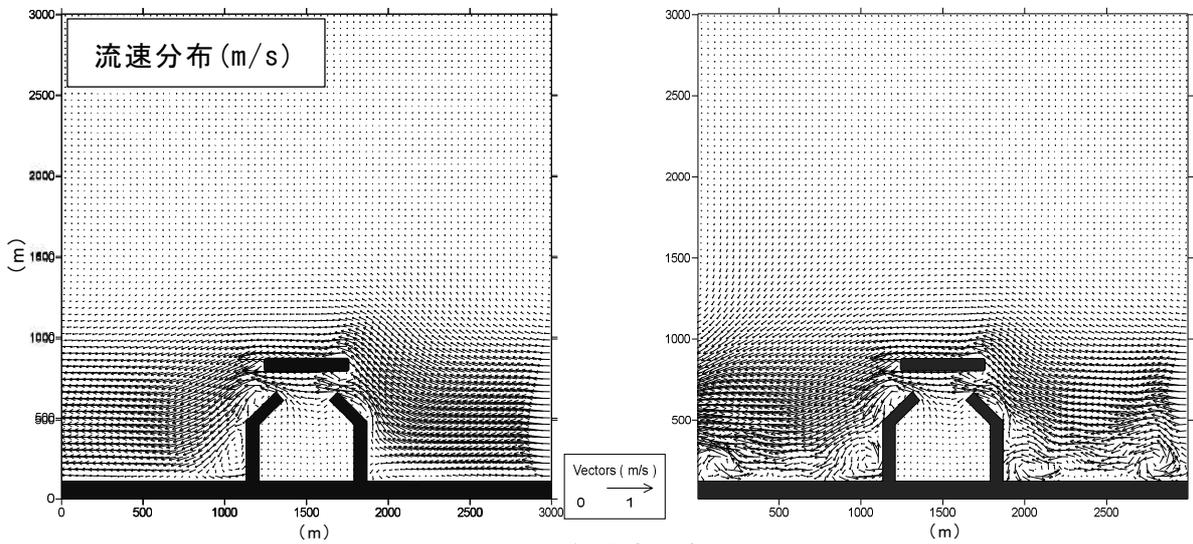


(c) 地形変化分布

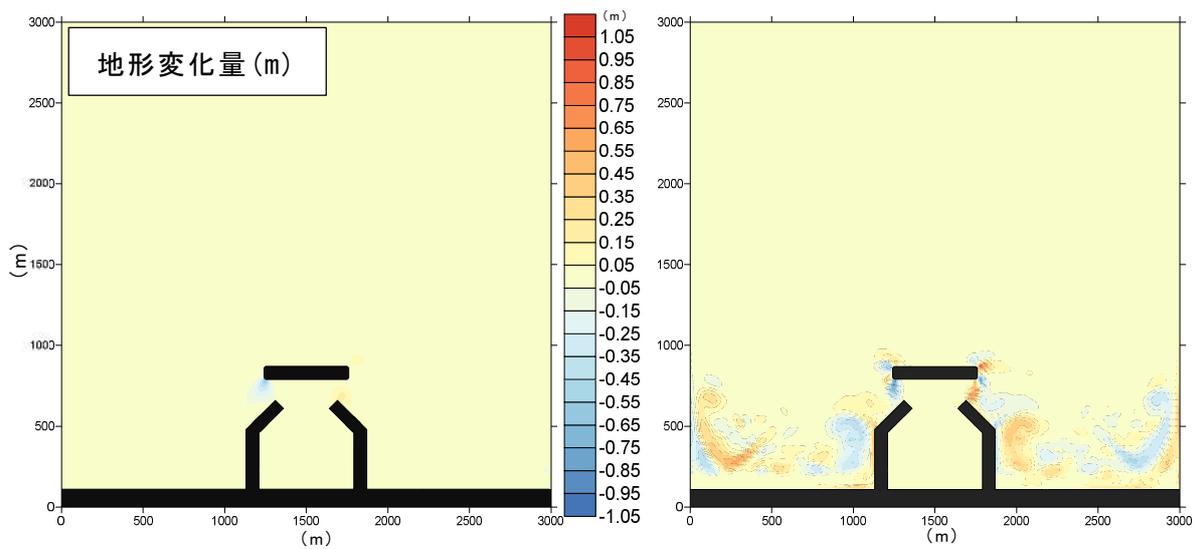
図 3.19 TYPE-C 波向 00° 計算結果 (左: 長周期無し, 右: 長周期流動考慮)



(a) 波高分布



(b) 海浜流分布



(b) 地形変化分布

図 3.20 TYPE-C 波向 -20° 計算結果 (左 : 長周期無し, 右 : 長周期流動考慮)

3.7.2 現地地形計算

モデル地形のような単純化された地形の場合，長周期波等の砕波などによる大きな変形を伴わない振動による往復流は，往復する流れの大きさに差があまり生じないために，ある方向に卓越する流れが発達しにくい．より長時間一方向の流れが継続する振動としては潮汐流等が存在するが，太平洋側などと比較して日本海側の潮汐振動は限定的であるため，本研究では考慮していない．

そこで，実際の地形，鳥取県東部の船磯漁港の現地適用性の検討対象として地形変化量を，第3.7.1項で行ったモデル地形と同様の設定で計算を行った．表3.5に計算諸条件を，図3.21に流動の外力となる水位変動（港口の計算水位変動が観測結果の長周期変動と同様になるように調整して与えている）を示す．図3.22に2019年1月から2月にかけて実施した深浅測量結果による海底地形変化量を示す．港口の水位変動は，冬季風浪の影響と考えられる短周期変動の実測値は波高0.5~0.7 m程度で推移していた．30 s以下の周期を除去した長周期変動は波高約0.3 m，周期約90 s程度の変動が認められ，長周期波による流動計算はこの長周期変動に合わせている．地形変化量は2019年1月~2月の変化で，沖防波堤背後の港口中央付近と旧港（港内左側の船溜り）に向かう水路の防波堤沿い堆積があり，水路防波堤沿いは最大1 m程度の堆積がみられた．

計算領域は船磯漁港を含む岸沖方向1.6 km，沿岸方向2 kmの範囲である（例えば図3.23(a)参照）．図3.23~3.25は波浪場，海浜流場および地形変化の計算結果を示したもので，モデル地形計算と同様に，比較のため長周期流動無しの場合の計算結果も示している．なお，各図に示される波浪場は計算領域全域の計算結果であり，海浜流場と地形変化の計算結果は船磯漁港とその周辺地形を抽出にしたものである．海浜流場，地形変化はそれぞれ計算終了時のものである．波浪場は，図3.21に示した短周期の水位変動に対して，計算結果は港内に侵入し辛い波向 20° で波高0.9 m程度，最も港内に侵入し易い波向 -20° で波高1 m程度となり，実測値に対しやや大きい値を示していた．

図3.23~図3.25より，以下のことがわかった．

- (1)船磯漁港を対象とした計算では，周辺の地形，特に漁港左側の岬によって，波向によらず沖防波堤と港口の間の海域は左から右へと抜ける海浜流が卓越していることがわかる．長周期流動の有無による流れの違いをみると，どの波向きに対しても沖防波堤背後の左から右に向かう流れが長周期流動有りの方が大きくなっている結果となっていることがわかる．
- (2)地形変化については，長周期波流動による港内への流れは往復流によって平均値が小さく見積もられていることから港内奥の地形変化は小さいが，沖防波堤

背後左側の航路では、長周期流動有りの方が顕著な堆積傾向となっている。

以上、長周期流動の平均流を用いた計算を行った。モデル地形での試計算、現地適用も試みた結果、長周期流動有無での違いは明らかであったが、港内奥への堆砂が見られなかった。そこで、港内堆砂予測手法のひとつとして長周期流動の平均値ではなく、港口あるいは港内奥向きのタイミングにおける長周期流動成分を抽出し、海浜流速へ重ね合わせた方法を試み次項で示す。

表 3.5 計算諸条件（船磯漁港）

項目	数値
波浪場	
有義波高	3.9 m
有義波周期	8.4 s
波向	-20°,0°,20°
作用期間	2 日
Smax	75
海浜流場	
計算時間間隔	0.02 s
計算ステップ	20,000
底面摩擦係数	0.01
漂砂量	
中央粒径	0.3 mm
長周期波流動	
長周期波高(港口)/周期(港口)	0.3 m/90 s
長周期波流向（沖境界）	0°(正面)

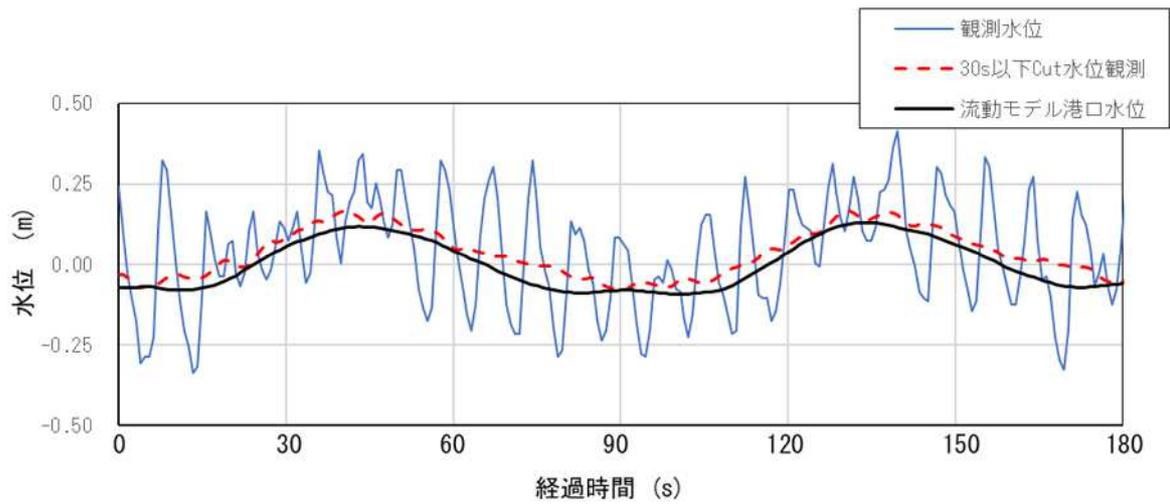


図 3.21 港口水位変動（抜粋）

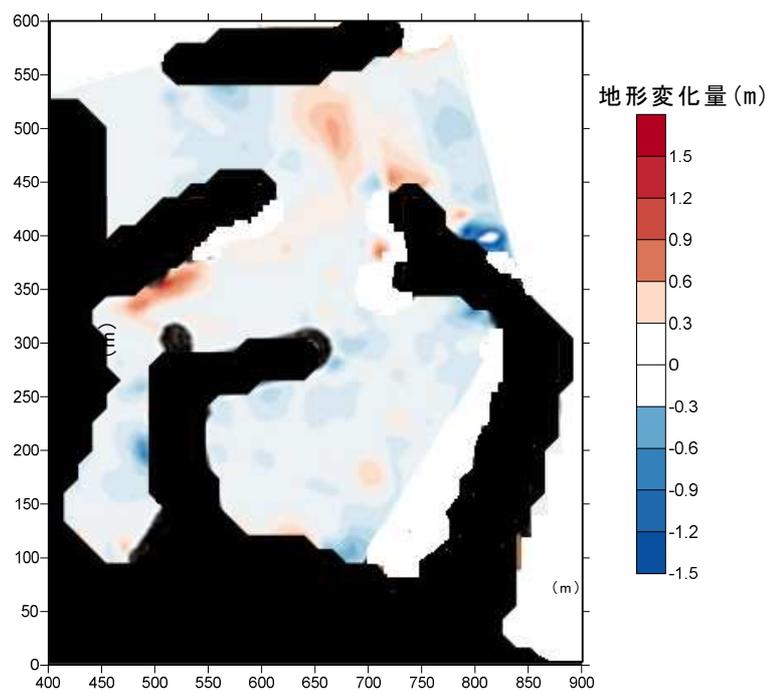
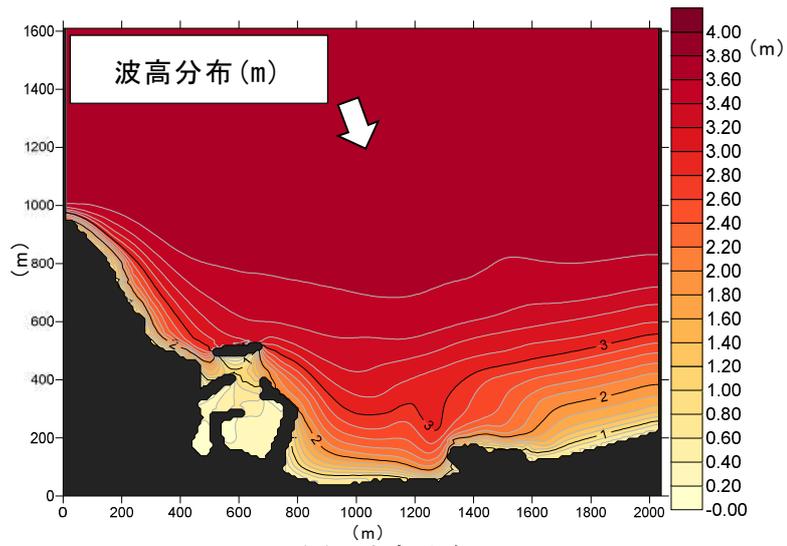
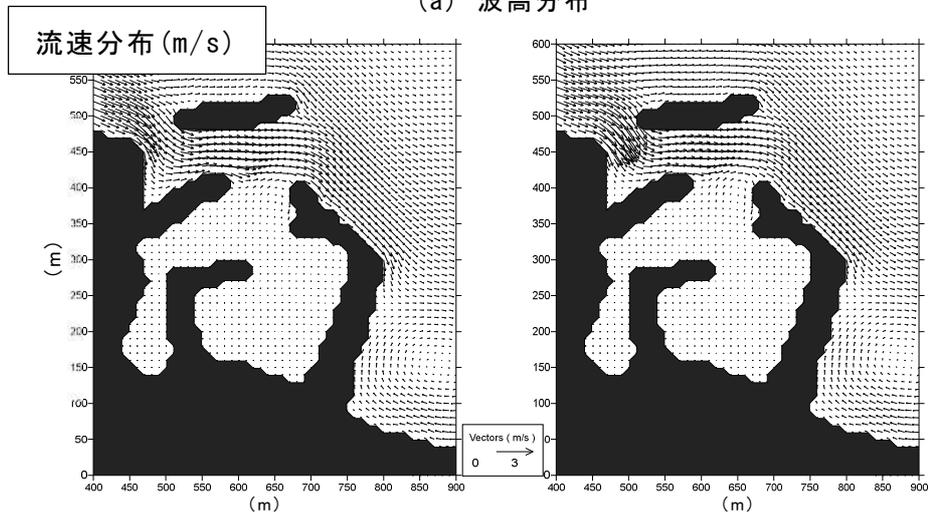


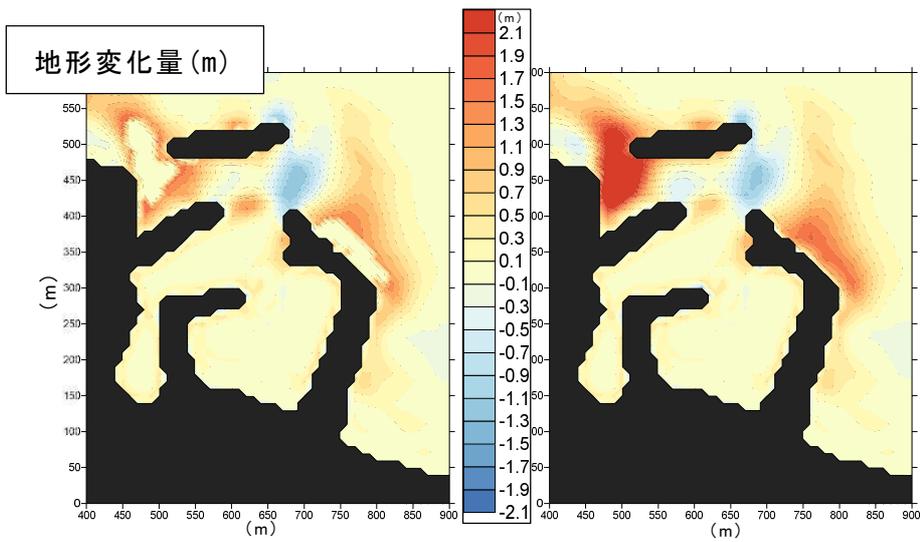
図 3.22 現地深浅測量による海底地形変化量（2019年01月～2019年02月）



(a) 波高分布

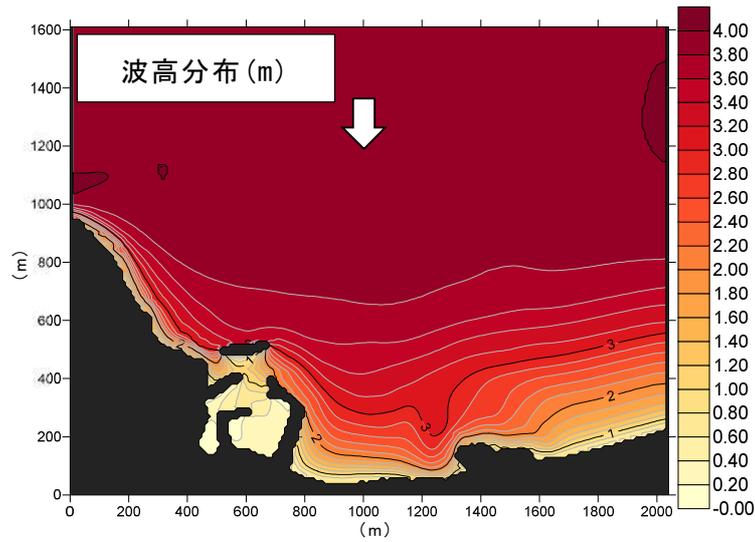


(b) 海浜流分布

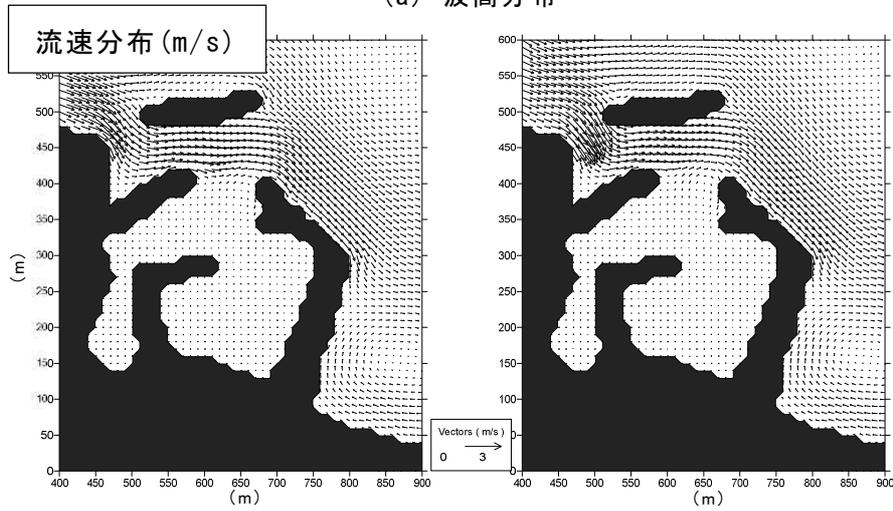


(c) 地形変化分布

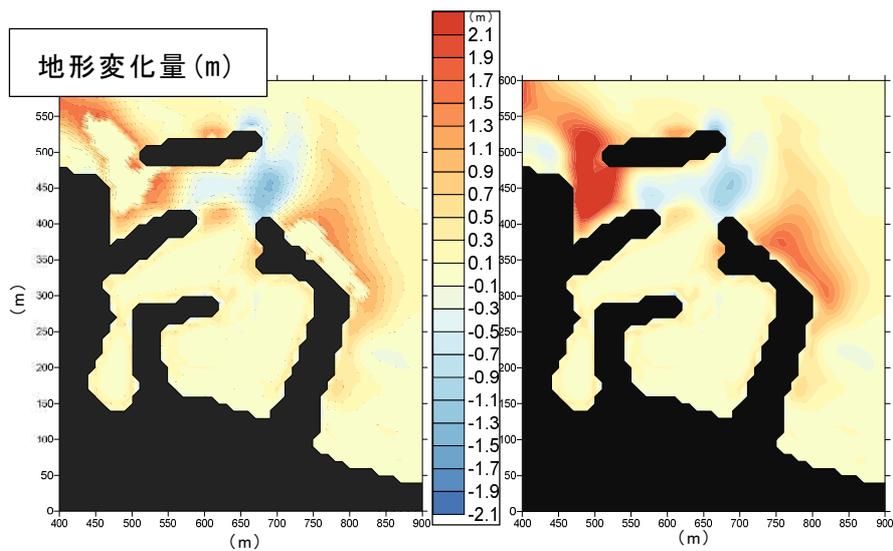
图 3.23 船磯漁港 波向 20° 計算結果 (左：長周期無し，右：長周期流動考慮)



(a) 波高分布

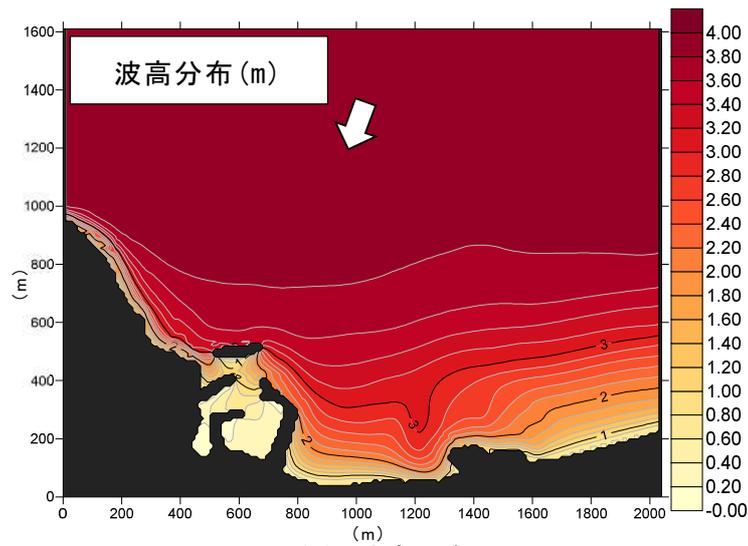


(b) 海浜流分布

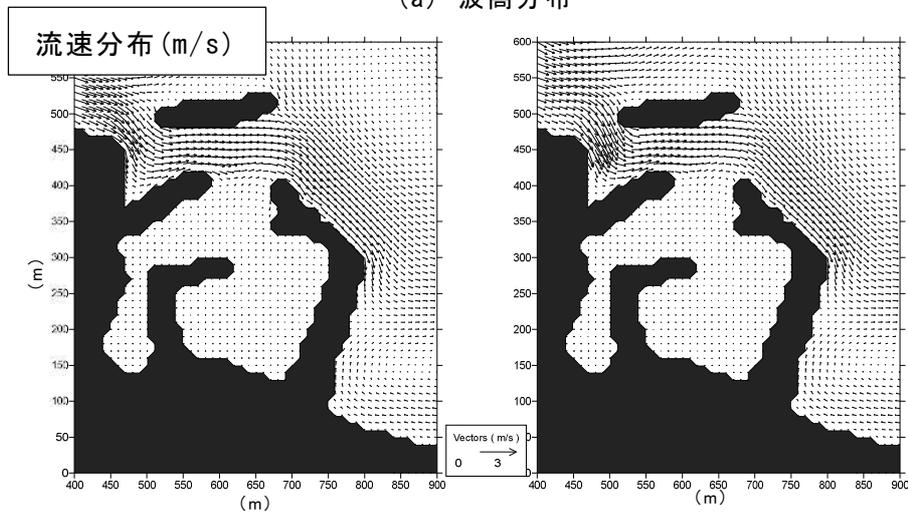


(c) 地形変化分布

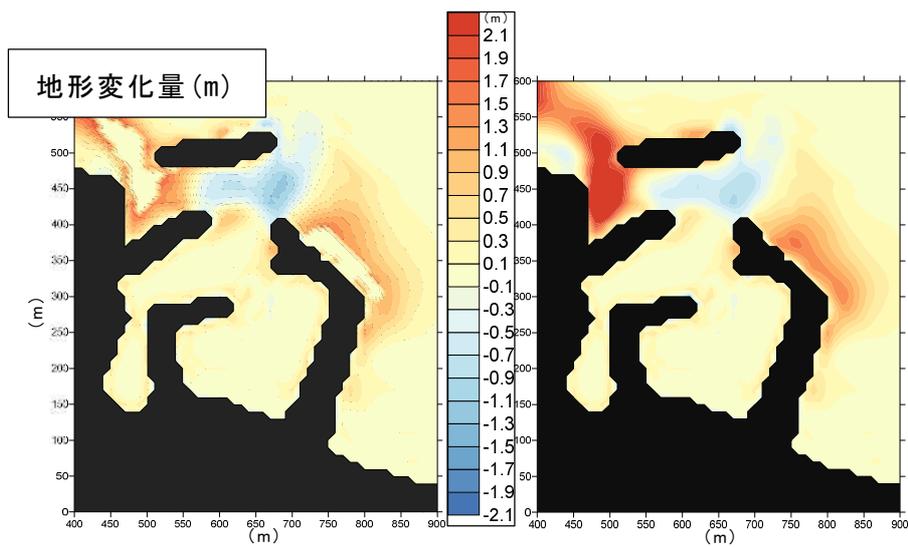
図 3.24 船磯漁港 波向 00° 計算結果 (左：長周期無し，右：長周期流動考慮)



(a) 波高分布



(b) 海浜流分布



(c) 地形変化分布

図 3.25 船磯漁港 波向 -20° 計算結果 (左: 長周期無し, 右: 長周期流動考慮)

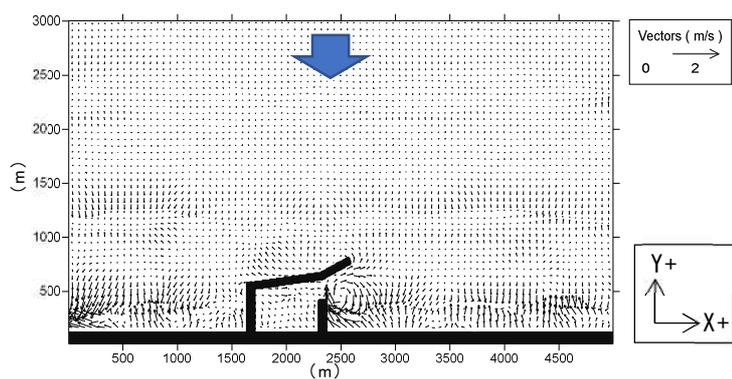
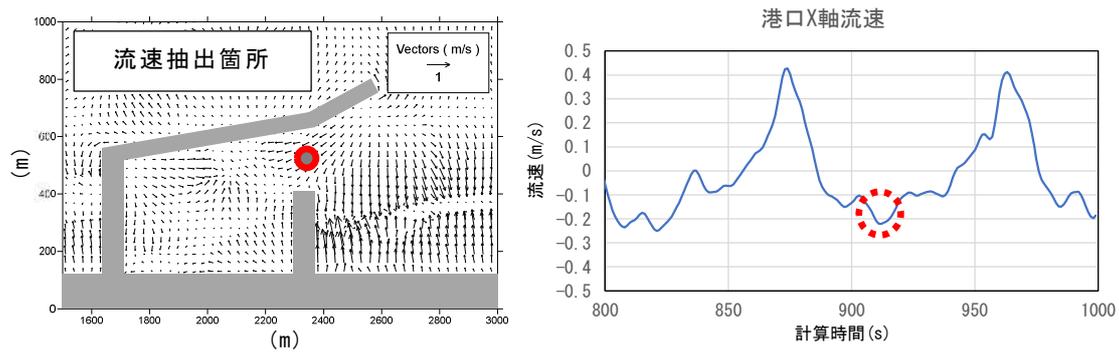
3.7.3 任意のタイミングで抽出した長周期流動による計算

前述したように、長周期波の平均流を組み込んだ計算では、全体の漂砂量は増加するものの、堆砂は港口に留まり港奥まで輸送するには至らない結果となった。そこで、港口における流動が港奥側に向かう流れとなるタイミングの流動場を抽出し、それを海浜流に組み込んだ地形変化計算を改めて試行した。図 3.26～図 3.28 に、地形 TYPE-B、TYPE-C および船磯漁港の港奥向き流動場を与えた場合の波向別の海浜流場を示す。ここで定義する港奥向きの流れは、港口の流速抽出箇所における TYPE-B と TYPE-C は X 軸流速がマイナス方向（図中左向き）、船磯漁港は Y 軸方向がマイナス方向（図中下向き）とした。また、図 3.29～図 3.31 に、地形変化計算結果をそれぞれ示す。海浜流場、地形変化はそれぞれ計算終了時のものである。

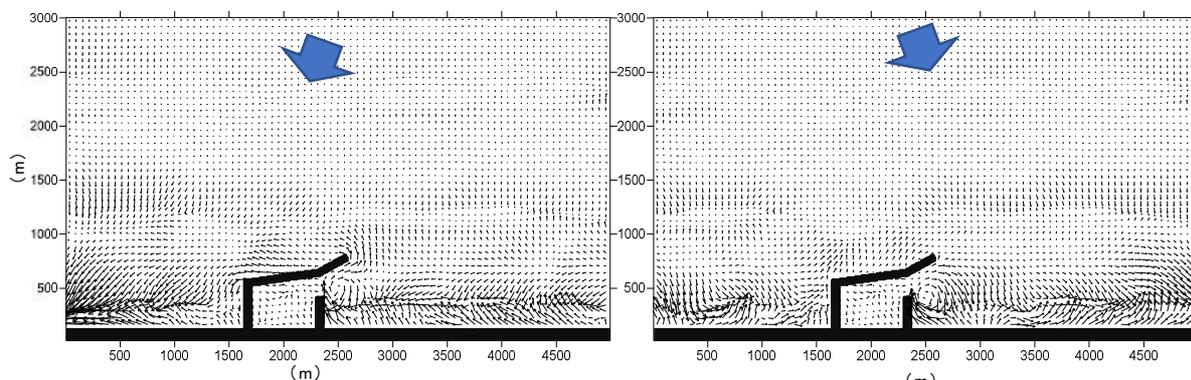
港口から港奥へと向かう流れが生じているタイミングを抽出した流動場を与えた結果、全体的に漂砂量が増加して地形変化が大きくなり、船磯漁港では港内左奥側の旧港内とそこに通じる航路にて、図 2.7 に示した実際の堆砂箇所に類似した堆砂傾向を示した。閉鎖された海域に向かう流れは、実際には一方的な流れになることは無いが、港内流動の与え方を検討することで港内堆砂の再現性を向上できる可能性が示唆された。

表 3.6 に、TYPE-B、TYPE-C および船磯漁港の港内の地形変化量の比較を示す。港内の設定範囲は図 3.32 のとおりである。

TYPE-B および船磯漁港は長周期を考慮しない結果と比較して長周期あり（平均流）、長周期あり（任意流速場）の順に港内の地形変化量が増大し、港内堆砂が進む傾向を示した。TYPE-C は傾向が異なり、長周期あり（任意流速場）において波向によって大幅に減少する結果となった。これは TYPE-C は港口が 2 箇所空いていることが関与していると考えられる。



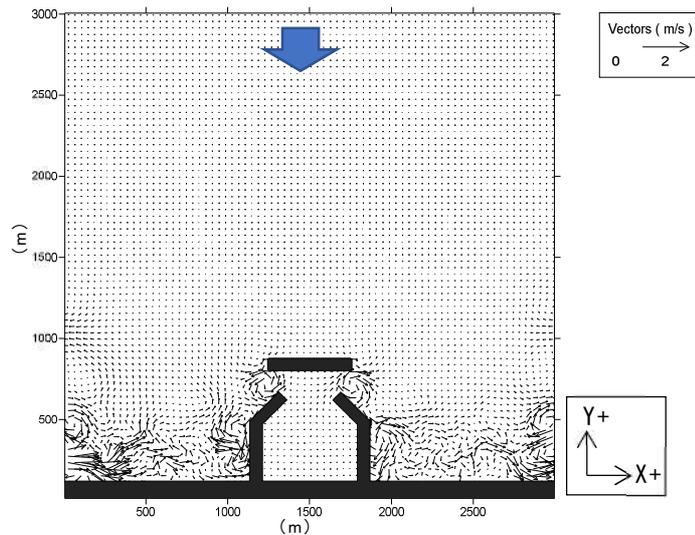
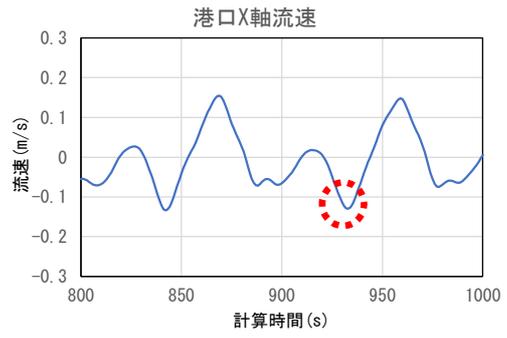
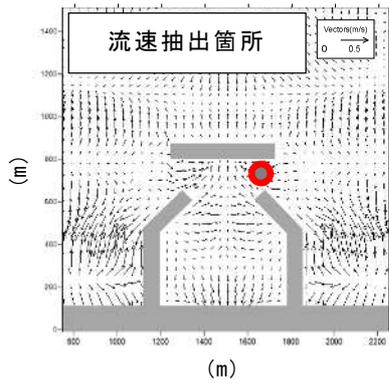
(a) 波向 0°



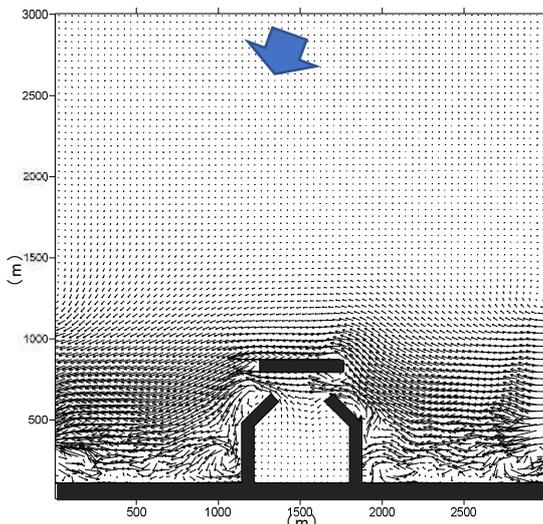
(b) 波向 -20°

(c) 波向 20°

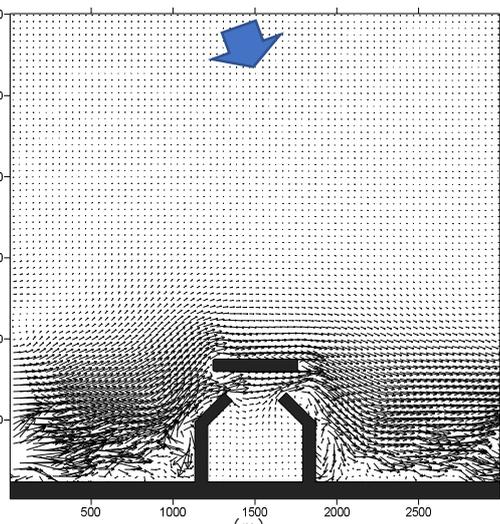
图 3.26 TYPE-B 流动场计算结果
(长周期流动 (流向奥向き抽出) 考虑)



(a) 波向 0°



(b) 波向 -20°



(c) 波向 20°

圖 3.27 TYPE-C 流動場計算結果
(長周期流動 (流向奥向き抽出) 考慮)

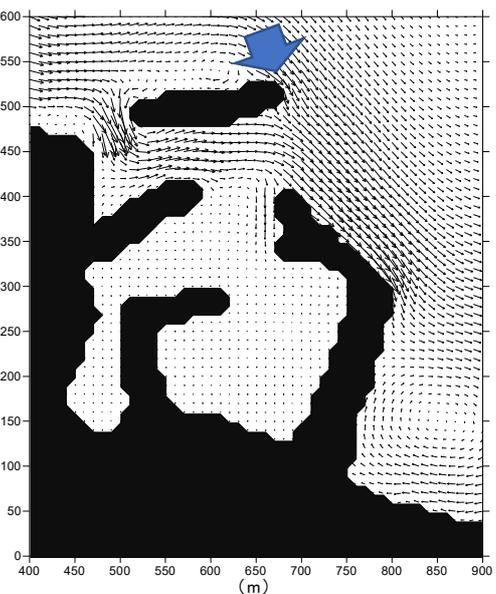
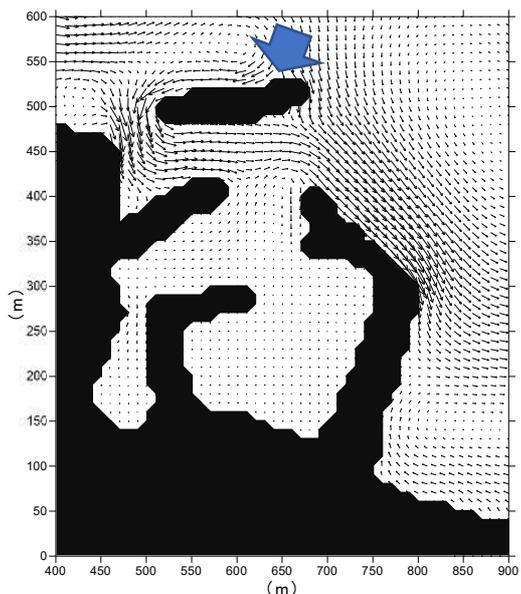
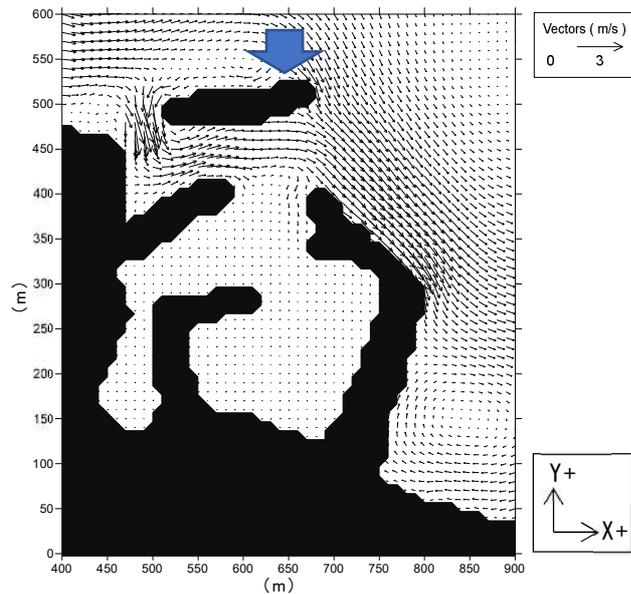
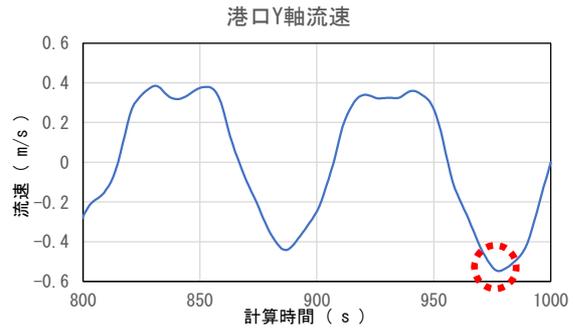
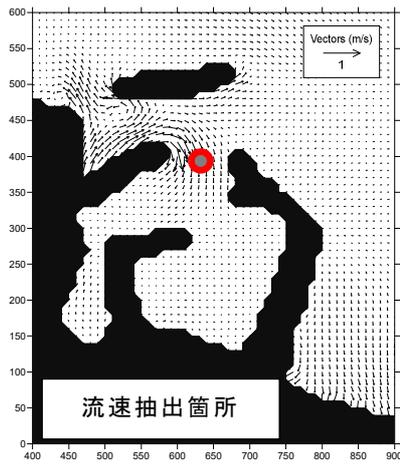


图 3.28 船磯漁港 流動場計算結果
(長周期流動 (流向奥向き抽出) 考慮)

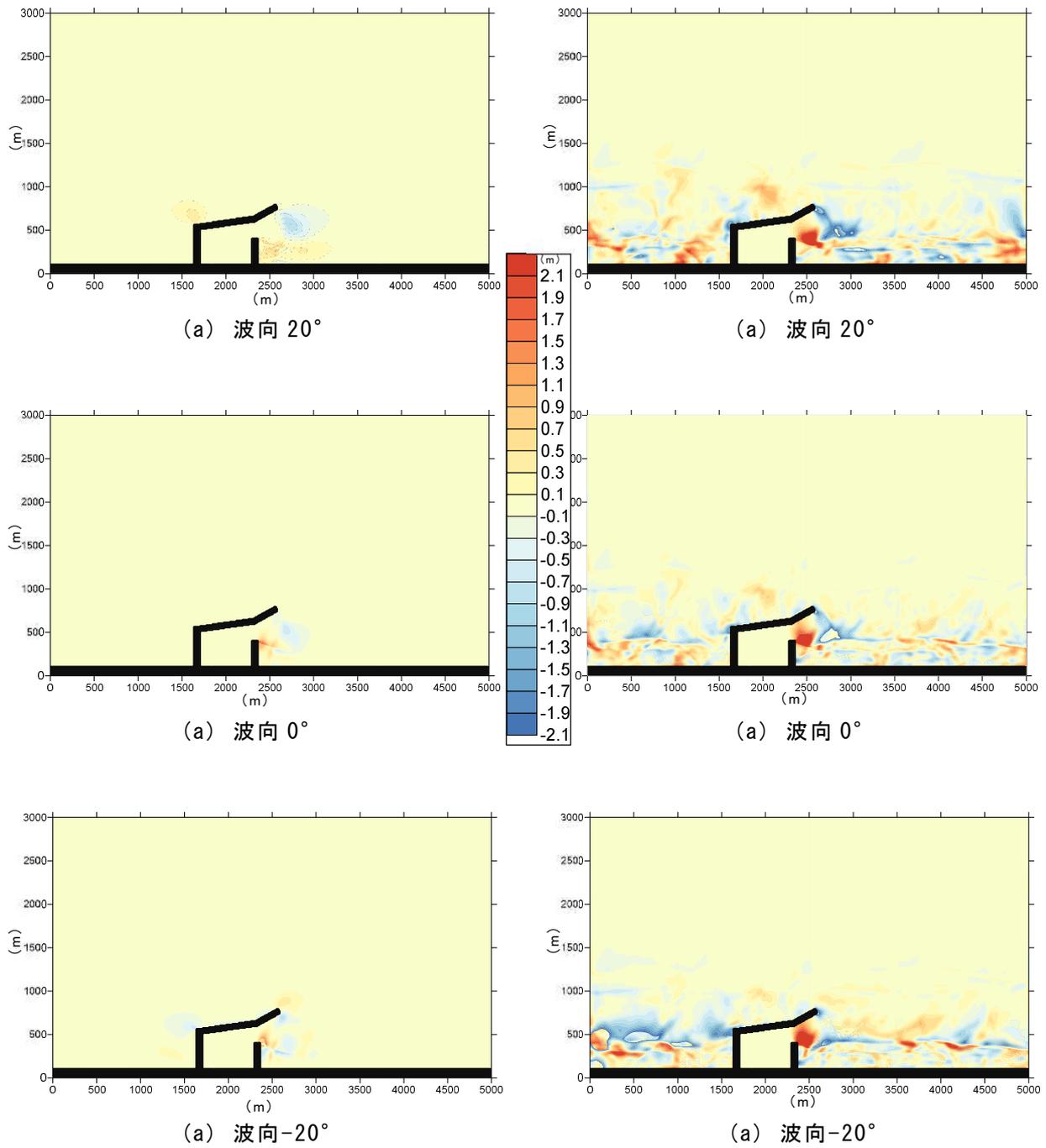


図 3.29 TYPE-B 地形変化計算結果

(左：長周期無し，右：長周期流動（流向奥向き抽出）考慮）

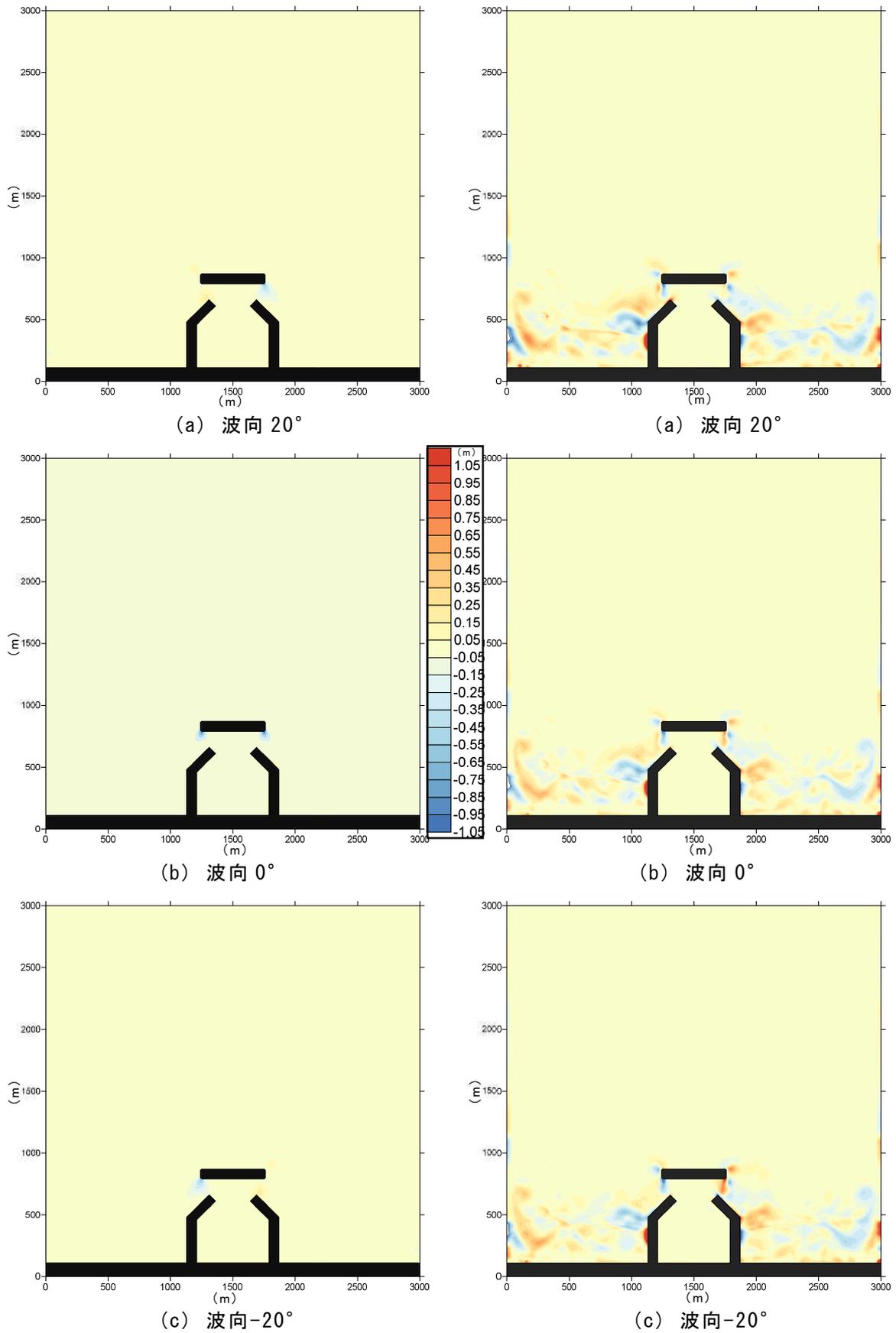


図 3.30 TYPE-C 地形変化計算結果

(左：長周期無し，右：長周期流動（流向奥向き抽出）考慮)

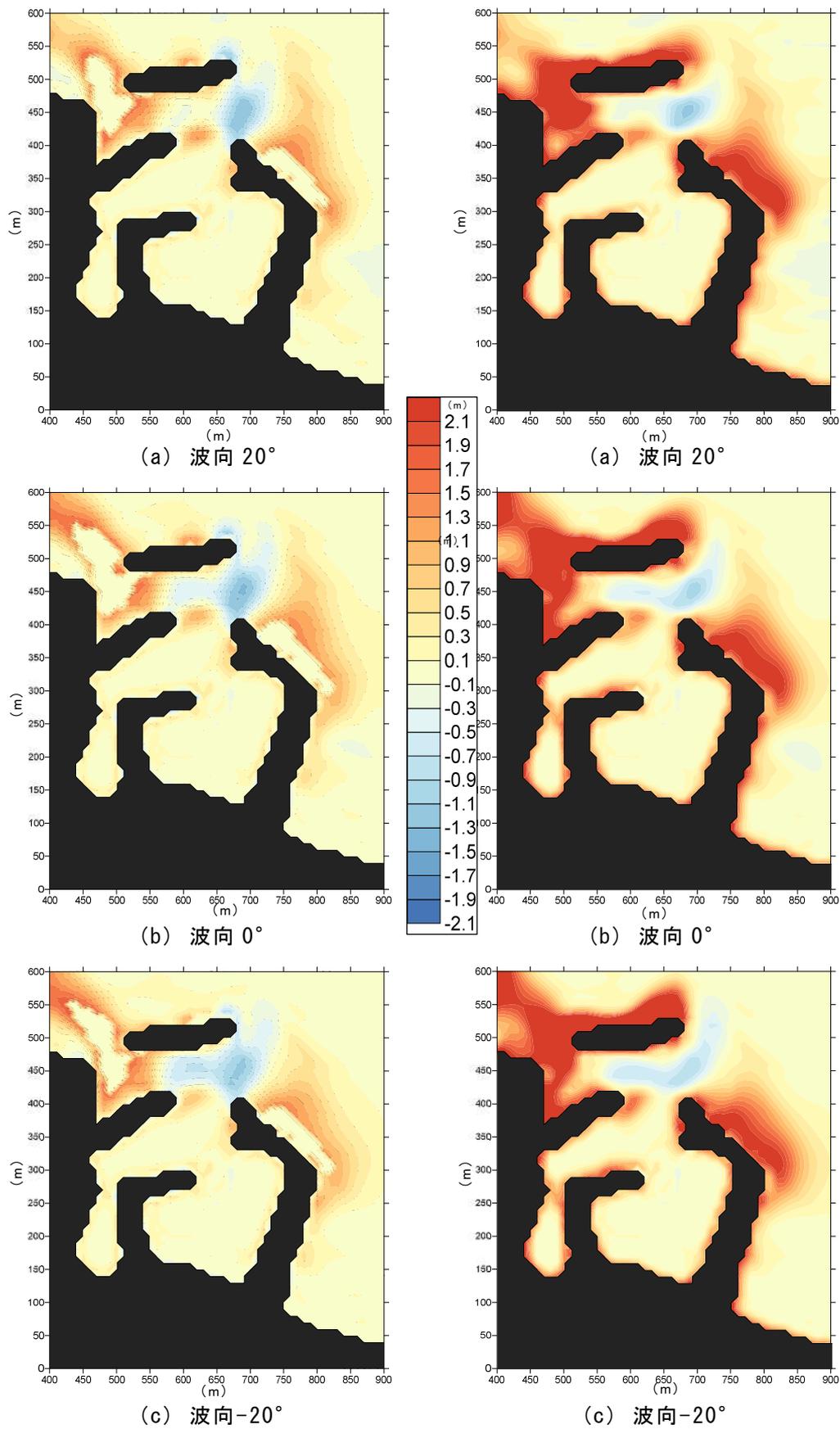


图 3.31 船磯漁港 地形変化計算結果

(左：長周期無し，右：長周期流動（流向奥向き抽出）考慮)

表 3.6 港内地形変化量比較

地形	長周期考慮	波向	地形変化量(m ³)
TYPE-B	無し	20°	+669
		0°	+669
		-20°	+667
	平均流場	20°	+669
		0°	+669
		-20°	+651
	任意流速場	20°	+736
		0°	+968
		-20°	+1,230
TYPE-C	無し	20°	+1,395
		0°	+1,367
		-20°	+1,392
	平均流場	20°	+1,402
		0°	+1,362
		-20°	+1,363
	任意流速場	20°	+1,378
		0°	+1,096
		-20°	+842
船磯漁港	無し	20°	+3,278
		0°	+3,245
		-20°	+3,359
	平均流場	20°	+10,252
		0°	+10,353
		-20°	+10,463
	任意流速場	20°	+10,484
		0°	+12,681
		-20°	+13,093

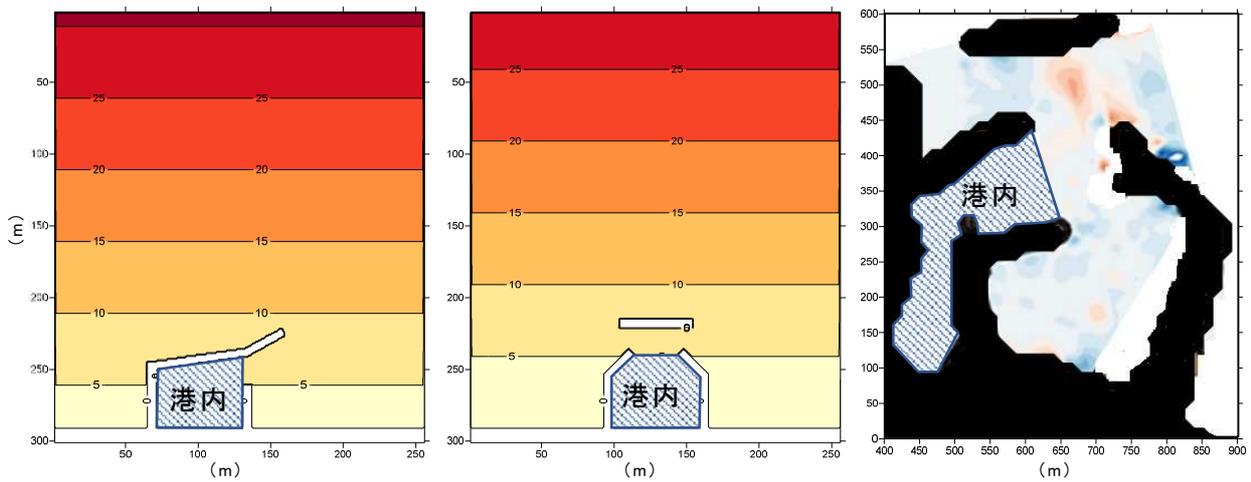


図 3.32 港内範囲設定

以上の検討は、長周期波による流動場は波向きに寄らず計算領域の沖側境界に振幅を与えることで求めている。計算モデルの構造の都合もあるが、長周期波の発生原因と発生領域を断定するのが困難であることも理由である。しかし、砕波等による波群の解放による長周期波の発生を考えた場合、波向による長周期波と流動の向きに影響が生じ、より港内に侵入し易い状況が生じることは十分予想される。

そこで、船磯漁港の計算地形を 20° 反時計回りに回転させ、沖側境界から有義波と長周期波を与えることで、実質 -20° 方向からの侵入による変化を試行した。地形以外の計算諸条件は表 3.5 と同一で、抽出した長周期波の流動データは港奥向きのタイミングである。

通常の計算結果と長周期波を考慮した計算結果を、図 3.33 に波高分布、図 3.34 に海浜流場、図 3.35 に地形変化量をそれぞれ示す。また、表 3.6 と同様の港内地形変化量を表 3.7 に示す。

海浜流場は、構造物周囲の流動変化が激しくなり、港口から港内へ向かう弱い流れが生じている。地平変化を確認すると、全体的に変化量が増加するほか、港内では旧港側の堆積が生じている。しかし、港内の状況は地形を回転させない計算と類似した状況となり、表 3.7 に示した港内地形変化量も同様となった。

船磯漁港での試行では長周期波の侵入方向を変化させても港内の地形変化に大きな変化は見られない結果となった。しかし、計算領域の両端で極端に地形が異なったり、何らかの理由により長周期波の発生源が明確な場合など、長周期波の侵入方向とその影響はさらに検討する余地があると考えられた。

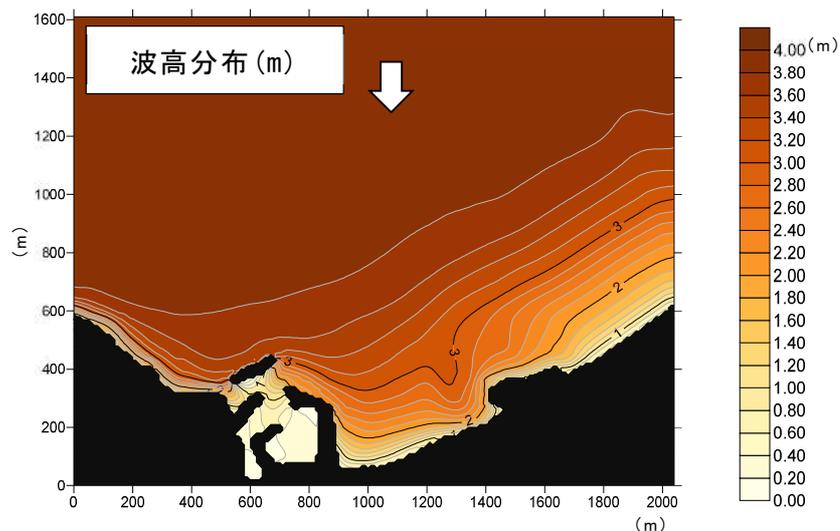


図 3.33 船磯漁港波高分布 (地形 20° 回転)

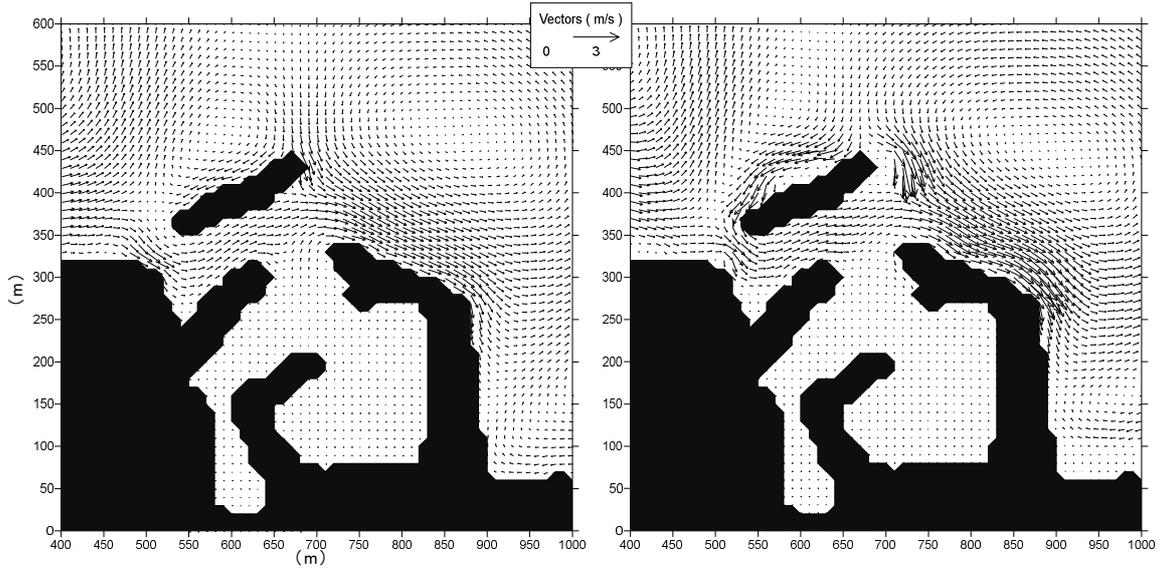


図 3.34 船磯漁港流速分布 (地形 20° 回転)
 (左 : 長周期無し, 右 : 長周期流動 (流向奥向き抽出) 考慮)

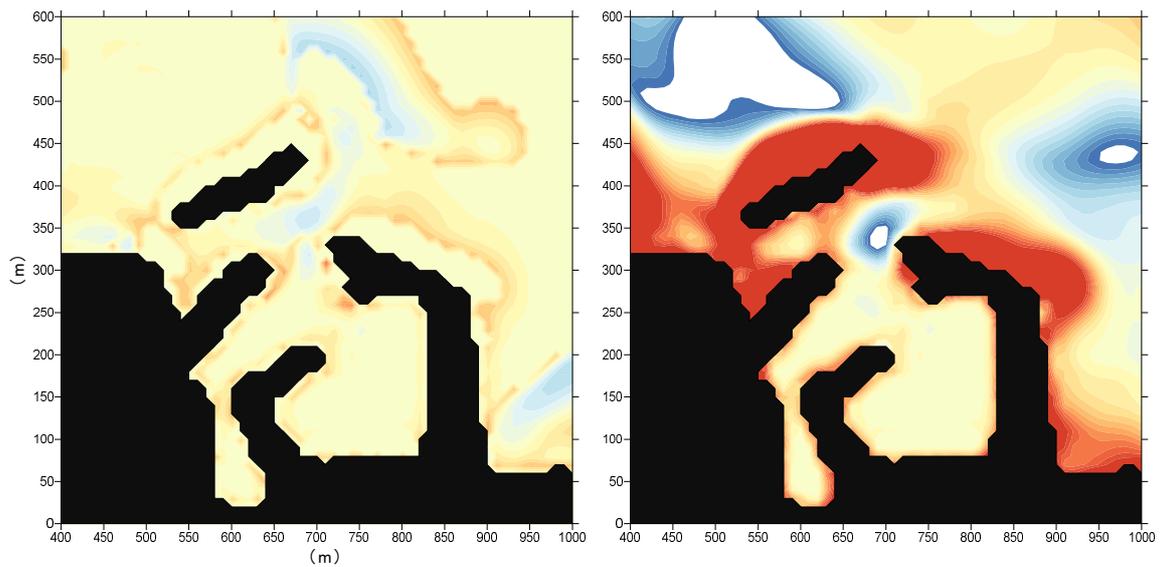


図 3.35 船磯漁港地形変化量 (地形 20° 回転)
 (左 : 長周期無し, 右 : 長周期流動 (流向奥向き抽出) 考慮)

表 3.7 港内地形変化量比較 (地形-20° 回転)

地形	長周期考慮	波向	地形変化量(m ³)
船磯漁港	無し	0°	+2,920
	任意流速場	0°	+11,356

3.8 結語

本章では，漁港内での長周期波による流動を漂砂モデルの海浜流場に組み込むことを念頭に置き，長周期波による流動計算モデルを導入した港内堆砂予測モデルについての検討を行った。

3.8.1 モデル地形に対する計算結果

まず，FAVOR法とWENO法を導入した長周期波の改良流動モデルの特性を調べるため，3種類のモデル地形を用いて既往の流動モデルとの比較を行った。また，起動力として振幅，周期も複数変更した長周期波を与えて計算を行い比較検討した。続いて検討した改良流動モデルによる長周期波流動場の算出とその長周期波を考慮した海浜変化モデルによる検討を行った。得られた結果を以下に列挙する。

- (1) 周期の長い計算において，既往流動モデルの計算では発散し不安定な計算となる条件においても，改良モデルでは，安定した計算結果が得られることが確認された。構造物周辺などの計算格子間での変化が大きいと想定される箇所などを含む場合，改良流動モデルの方が有効であることがわかった。
- (2) 既往流動モデルに対し，改良流動モデルは港内とその周辺において複雑な水位分布によって明瞭な残差流が計算された。特に，沖防波堤周辺などで渦状の残差流が再現されることが確認できた。
- (3) 基本的に，沖合から汀線に接近した際の長周期振動の増加率は改良流動モデルが大きいため，港湾地形近傍での流動は改良流動モデルが大きく，港内の狭隘部などで顕著となる。また，1周期平均した流れも改良流動モデルの方が顕著な流れが確認され，より浅海域での流動を表現できることがわかった。
- (4) 長周期波による振幅は水深が浅くなるに従い増幅し，それによる流動も増幅する。長周期流動の平均流速値は波による海浜流速値より小さいが，汀線近傍は長周期変動が発達した結果漂砂による地形変化の度合いが増幅する結果となり，長周期流動モデルの導入が3次元の地形変化に影響を及ぼすことが確認できた。

3.8.2 現地地形に対する計算結果

- (1) 船磯漁港を対象とした計算では，周辺の地形，特に漁港左側の岬によって，波向によらず沖防波堤と港口の間の海域は左から右へと抜ける海浜流が卓越した。長周期流動の有無による流れの違いをみると，どの波向きに対しても沖防波堤背後の左から右に向かう流れが長周期流動有りの方が大きくなっている結果となった。
- (2) 船磯漁港で前述の左から右へ抜ける海浜流に連行されて港口に時計回りの渦流

が生じた。波向が -20° からの場合は、弱い反時計回りの渦流が隣接して生じており、この流れは長周期波を組み込んだ計算が若干強い。しかしながら、港口に堆積した砂を旧港側へ押し込むほどのエネルギーは持っていないと考えられる。

- (3)地形変化については、長周期波流動による港内への流れは往復流によって平均値が小さく見積もられていることから港内奥の地形変化は小さいが、沖防波堤背後左側の航路では、長周期流動有りの方が顕著な堆積傾向となっている。
- (4)港内地形変化量を定量的に比較した場合、港口が1箇所の港型の地形では長周期波を考慮した地形変化モデルは港内堆砂が促進される結果を示した。港奥へと輸送する流れが明確に発生すれば、港奥堆砂の再現に繋がると考えられる。

長周期流動の平均流を用いてモデル地形での試計算と現地適用を試みた結果、長周期流動有無での違いは明らかであったが、港内奥への堆砂が見られなかった。そこで、港口における長周期流動が港奥側に向かう流れとなるタイミングの流速を抽出し、それを海浜流場に組み込んだ地形変化計算を改めて試行した。試行により得られた結果は以下のとおりである。

- (5)モデル地形、船磯漁港の地形のいずれも、平均流にすると打消し合う流れ場を継続する流れ場として、港口から港奥側に向かう流れを用いることによって、計算領域全体の漂砂量が増加するとともに、港口付近と港内における堆砂量が増加する傾向となった。
- (6)船磯漁港の地形では港内西側の旧港エリアの奥にまで堆砂が到達した。その堆砂量は既往の浚渫量と概ね同オーダーであり、堆砂予測モデルの有用性が確認された。
- (7)実際の現象よりも誇張された結果であると考えられるが、長周期波による流動の時間変動を海浜流場に組み入れることで、港内堆砂現象の再現に寄与する可能性が示唆された。しかし、単純に時間変動データを与えることは計算に要する時間の増加に繋がるため、今後は効率的に組み入れるロジックを検討する必要があると考えられた。

参考文献

- 海津 博行・平野 誠治・山下 俊彦・中山 哲巖・栗山 善昭・佐藤 寿彦・石黒 一郎
(2010) : 岩礁域に囲まれた苫前漁港の漂砂特性, 土木学会論文集 B2 (海岸工学),
Vol.66, No.1, pp.511-515.
- 梶川 勇樹・檜谷 治 (2013) : WENO 法を用いた平面 2 次元浅水流モデルの開発, 土木学
会論文集 B1 (水工学), Vol.69, No.4, pp.I_631- I_636.
- 黒岩 正光 (1999) : 準 3 次元海浜流数値モデルの開発とその適用性に関する研究, 鳥取大
学博士論文
- 黒岩 正光・松原 雄平・市村 康・丸毛 豊治・中野 伸太郎・津留秀臣 (2002) : 人工リ
ーフ開口部における地形変化に関する研究, 海岸工学講演会論文集, Vol.59, No2,
pp566-570.
- 黒岩 正光・高田 哲志・松原 雄平 (2009) : FAVOR 法を用いた海浜流モデルの開発と海
浜流場に与える計算格子と渦動粘性係数の影響に関する一考察, 第 25 巻海洋開発論文
集, pp.1239-1244.
- 黒岩 正光, 阿南 亮平, 渋谷 容子, 間瀬 肇, 松原 雄平 (2016) : 波と流れの相互干渉
を考慮した 3 次元河口砂州形成シミュレーション, 土木学会論文集 B2 (海岸工学),
Vol. 72, No. 2, pp. I_697-I_702.
- 黒木 幹夫・史 亜傑・岸 力 (1998) : 非平衡理論とその応用, 第 32 回水理講演会論文集
- 近澤 昌寿 (2015) : 波浪効果 (wave setup) 診断モデルの高度化及びその検証, 測 候
時報第, 82 巻特別号, pp.S7-S28.
- 合田 良実 (2007) : 方向スペクトル波浪による波寄せ高 (wave setup) と沿岸流速の計算
図表 (Version 2) a, ECOH/YG 技術論文, No.5, pp.1-20.
- 佐藤 慎司・光信 紀彦 (1990) : 不規則波による海岸断面地形変化の数値計算, 海岸工学
論文集, 37 巻, pp.309-313.
- 榎木 享・李 宗隻・出口 一郎 (1984) : 河口周辺の海浜流及び地形変動モデルに関する研
究, 海岸工学論文集, 第 31 巻, pp.411-415.
- 清水 琢三・山田 晶子・渡辺 晃 (1996) : 沿岸漂砂量の岸沖分布と漂砂量係数, 第 43 巻
海岸工学論文集, pp571-575.
- 清水琢三, 山田晶子, 山内一郎, 渡辺晃 (1995) : 汀線変化を考慮した 3 次元海浜変形モ
デルの現地適用性, 海岸工学論文集, 42 巻, pp.606-610.
- 土屋 義人・山下 隆男・植本 実 (1986) : 砕波帯における戻り流れについて, 第 33 回海
講論文集, pp.31-35.
- 土木学会海岸工学委員会・研究現況レビュー小委員会 (1998) : 漂砂環境の創造に向けて,

土木学会

- 西村 仁嗣・丸山 康樹・桜井 力 (1984) : 海浜流の数値計算法について, 第 31 回海岸工学講演会論文集, pp.396~400.
- 間瀬 肇・高山 知司・国富 将嗣・三島 豊秋 (1999) : 波の回折を考慮した多方向不規則波の変形計算モデルに関する研究, 土木学会論文集, 第 628 号, II-48, pp. 177-187 pp.43-50.
- 松岡 道男・木下 勝尊・山本 正昭・森口 朗彦 (1991) : 長周期波水理特性を考慮した港内堆砂モデルの適用性の検討, 海岸工学論文集, 第 38 卷, pp.416-420.
- 松岡道男 (1995) : 中小港湾の港内埋没に及ぼす長周期波の影響に関する研究, <http://hdl.handle.net/11094/39348>, pp.47-51.
- 渡辺 晃・丸山 康樹・清水 隆夫・榊山 勉 (1984) : 構造物設置に伴う三次元海浜変形の数値予測モデル, 第 31 卷海岸工学論文集, pp406-410.
- Chi-Wang Shu (2001) : High order Finite Difference and Finite Volume WENO Schemes and Discontinuous Galerkin Methods for CFD, NASA/CR-2001-210865, ICASE Report No. 2001-11.
- Jiang, G.-S. and Shu, C.-W. (1996) : Efficient Implementation of Weighted ENO Schemes, J. Comput. Phys., 126 (1) , pp.202-228.
- Hirt, C. W. and Sicilian, J. M. (1985) : A Porosity Technique for the Definition Obstacle in Rectangular Cell Meshes, Flow Science, Inc. Los Alamos, New Mexico, pp.450-469.
- Murray, S.P. (1968) : Simulation of horizontal turbulent diffusion of particle under waves, Proc. 10th Conf. Coastal Eng., pp.446~466.
- Sun, G.C., Wei, W.L., Liu, Y.L., Wang, X. and Liu, M. (2012) : Numerical Simulation of 2D Circular Dam-Break Flows with WENO Schemes, Advanced Materials Research, Vols. 468-471, pp.2201-2205.
- Xing, Y. and Shu, C.-W. (2005) : High order finite WENO schemes with the exact conservation property for the shallow water equations, J. Comput. Phys., 208, pp.206-227.

第4章 漁港周囲の複雑な地形条件等の影響を考慮した 港内堆砂予測モデル

4.1 概略

前章において漁港の港内堆砂現象の再現性向上のために長周期波による影響について述べたが、漂砂現象の再現性を確保するには周囲の地形要因の検討も重要である。特に小規模な漁港は漂砂供給源となる砂浜の他に、周辺に岩礁帯の存在や、港湾構造物・砂浜の防護施設などが配置された複雑な地形条件の中にあることが多い。岩礁帯では、海域の漂砂に与える影響は大きい他、対象とする漁港の外郭施設や隣接する海浜における各種防護施設も設計段階とは異なる影響を与える場合も無視できない。岩礁上に砂層が存在する場合、通常の漂砂が生じ侵食され岩礁が露出する状況や、漂砂供給源の砂浜を防護する離岸堤の天端高低下などの機能低下によって高波浪時に越波が生じるなど、周辺の地形条件が港内堆砂に影響を及ぼすことが懸念される。そこで、周辺の様々な地形条件、すなわち、周辺の岩礁帯の影響と防波堤や離岸堤などの透過や越波を考慮した港内堆砂予測モデルの検討を行った。

なお、本研究では漁港堆砂の供給源となる周辺の複雑な地形条件を有する久手港を対象としてモデルの構築を行うこととする。

4.2 漁港周囲の複雑な地形条件

小規模な漁港の港口と航路は、荒天時に波浪が発達する砕波帯内に位置していることが多く、港口部や航路での砂の堆積が顕著である。本研究で対象として選定した久手港は、島根県の東部に位置し、日本海に面して冬季には高波浪が度々襲来するため、第2章で述べたように港口や航路の埋没が頻繁に発生し、特に2018年には港内に大規模な砂の堆積が発生した。久手港は図4.1、図4.2に示すように周囲を固い岩で囲まれた岩礁海岸と久手砂浜に隣接している。沖防波堤や防砂堤の延長などの対策が行われたが、それでも図4.1左下の様に港口部の堆積砂の浚渫工事が度々実施されている。また、主な漂砂供給源と考えられる久手砂浜には、汀線後退を防ぐことを目的として消波ブロックによる離岸堤が、砂浜と漁港の境界には防砂堤がそれぞれ設置されている。



图 4.1 久手港概要と浚渫作業



图 4.2 周辺施設

久手港の様に、周囲に岩礁帯が存在する環境での漂砂現象は、岩礁の存在に影響される可能性がある。そのため、漂砂のメカニズムを解明し、新たな土砂堆積対策が必要であり、海岸の3次元的な変化に関する調査や予測モデルの開発が必要である。海底表面の砂の下に、波浪等によって容易に洗掘されない固い岩盤等を有する砂浜の3次元海浜変形予測モデルは、池野ら（2002）、Hansonら（2005）、長谷川ら（2012）によっても提案されている。このように、先達により地形変化の検討に多くのモデルが提案されているが、岩礁などのエリアを有する漁港堆砂予測への適用性については十分な検討がなされていないのが実情である。そこで、本研究では、岩礁帯の影響を考慮した砂浜変形モデルを用いて、久手港を対象に港内堆砂予測モデルを構築し適用性を検討した。

4.3 数値モデル

4.3.1 岩礁帯を考慮した港内堆砂予測モデル

久手港は岩礁帯と離岸堤を備える砂浜に囲まれた複雑な地形となっており、岩礁帯と離岸堤背後の漂砂が海域の地形変化に与える影響は大きいと考えられる。このため、黒岩ら（2011）による岩礁域を考慮した海浜変形モデルをベースとし、高波浪時（有義波高4.5 m）の地形変化を計算した。

波浪場は間瀬ら（1999）による回折を考慮したエネルギー平衡方程式を用い、海浜流場は鉛直分布や砕波帯内における戻り流れを算定できる黒岩ら（2006）の準3次元モデル（Q3Dモデル）と平面2次元モデル（2DHモデル）のハイブリッド型モデルを適用した。これは、後述する構造物の越波等を考慮する際、平面2次元モデル単体だと構造物の透過などによる流れの変化が過小に評価される懸念があったためである。

次に、流れによる掃流漂砂量と波による掃流漂砂量は、埋没している岩礁域からの砂質の巻き上げや、露出している岩礁域への沈降を考慮するため、浮遊砂の計算に樫木ら（1984）の移流拡散方程式によるフラックスモデルを導入している。掃流漂砂は、渡辺ら（1984）のモデルをベースとし、池野ら（2001）を参考に岩礁上の層厚を考慮し算定した。

最終的な地形変化は浮遊砂の沈降フラックス $w_f C$ と巻き上げフラックス F_z の差 Q_s

$$\frac{\partial h}{\partial t} = \frac{1}{1-\lambda}(-Q_s) + \frac{1}{1-\lambda} \left\{ \frac{\partial}{\partial x} \left(q_{bx} + \varepsilon_s |q_{bx}| \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(q_{by} + \varepsilon_s |q_{by}| \frac{\partial h}{\partial y} \right) \right\} \quad (4.1)$$

より計算する。ここに、 x ：岸沖方向の距離、 y ：沿岸方向の距離、 h ：水深、 λ ：空隙率、 ε_s ：無次元係数で、 q_{bx}, q_{by} は掃流漂砂である。 Q_s は

$$Q_s = F_z - w_f C \quad (4.2)$$

$$F_z = \alpha(1 - \gamma)C_0 w_f \left(\frac{u_*}{w_f} - 1 \right), \quad \begin{cases} u_* \geq w_f : \gamma = 0 \\ u_* \leq w_f : \gamma = 1 \end{cases} \quad (4.3)$$

ここに、 α は無次元係数で0.001とし、 C_0 は基準点濃度、 w_f は砂の沈降速度でRubeyの式で計算した。 u_* は波と流れの共存場における摩擦速度である。 C は断面平均化された浮遊砂濃度で、平面2次元移流拡散方程式で計算される。

$$\frac{\partial C}{\partial t} + U \frac{\partial C}{\partial x} + V \frac{\partial C}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\varepsilon_x \frac{\partial C}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\varepsilon_y \frac{\partial C}{\partial y} \right) + \frac{Q_s}{\bar{\eta} + h} \quad (4.4)$$

ここに、 $\varepsilon_x, \varepsilon_y$ は拡散係数、 U, V は水深平均の定常流速、 $\bar{\eta}$ は平均水位上昇量である。

岩礁が露出している場合、式(4.2)において巻き上げフラックス F_z は生じないものとし、沈降フラックス $w_f C$ のみ考慮した。掃流砂は渡辺モデルをベースとした波と定常流速によるものと定義し、池野ら(2001)と同様に、図4.3に示すような砂層厚 h_{sd} を定義し、砂漣高 ζ との比を乗じた漂砂量の式を用いた。

$$\begin{cases} q_{bx} = \frac{h_{sd}}{\zeta/2} (q_{cx} + q_{wx}) \\ q_{by} = \frac{h_{sd}}{\zeta/2} (q_{cy} + q_{wy}) \end{cases} \quad (4.5)$$

ここに、 ζ は砂漣高とされているが、本研究では、10 cm程度と一定値を与え、 $h_{sd} < \zeta/2$ のとき $\frac{h_{sd}}{\zeta/2} = 1$ とした。 $h_{sd} = 0$ となったとき、漂砂量が0となり、岩礁が露出したことになる。ここに、 q_{cx}, q_{cy} は流れ(底面流速 U_b, V_b)による掃流漂砂、 q_{wx}, q_{wy} は波による掃流漂砂で、次式で表される。

$$\begin{cases} q_{cx} = A_c (u_*^2 - u_{c*}^2) U_b / g \\ q_{cy} = A_c (u_*^2 - u_{c*}^2) V_b / g \end{cases} \quad (4.6)$$

$$\begin{cases} q_{wx} = A_w (u_*^2 - u_{c*}^2) \hat{u}_{wx} / g \\ q_{wy} = A_w (u_*^2 - u_{c*}^2) \hat{u}_{wy} / g \end{cases} \quad (4.7)$$

ここに、 A_w および A_c は漂砂量係数で、清水ら(1996)によって次式で評価される。

$$B_w = C_w (\sqrt{d_{50}} / w_f)^3 \quad (4.8)$$

$$\frac{A_w}{B_w} = \frac{w_f \sqrt{0.5 f_{cw}}}{(1-\lambda) s \sqrt{s g d_{50}}} \quad (4.9)$$

ここに、 C_w は無次元係数、 d_{50} は底質の中央粒径、 s は底質の水中比重である。流

れによる掃流砂量係数 A_c は A_w の定数倍 ($A_c = \beta A_w$) として表され、清水らによると $\beta = 10$ とされている. f_{cw} は底面摩擦係数である.

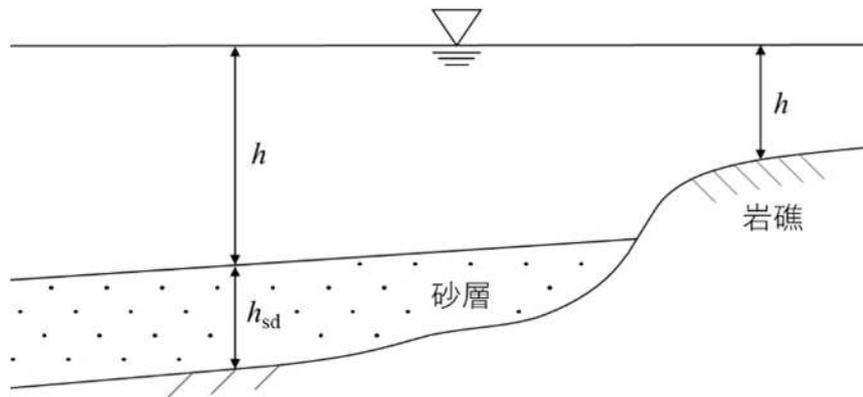


図 4.3 岩礁，水深，砂層厚の定義

砂層の下に岩礁帯を設定した効果について、モデル地形での検証を行った。地形 TYPE-C の海域右半分の汀線付近に岩礁帯を設定し、砂層厚を 0.0 m (岩礁が露出)，0.5 m，1.0 m の状況について地形変化計算を行い、図 5.4 にその結果を示す。計算条件は第 3 章で用いた条件と同様、波浪条件は有義波高 3.9 m，有義波周期 8.4 s，波向 0° (正面から入射)，海浜流場は時間間隔 0.02 s，安定するまでの繰返し計算 20,000 ステップ，漂砂量計算の底質粒径は 0.3 mm の条件を用いた。

表 4.1 モデル地形計算条件

波浪場	
有義波高	3.9 m
有義波周期	8.4 s
波向	0°
Smax	75
海浜流場	
計算時間間隔	0.02 s
計算ステップ数	20,000 回
漂砂量	
計算時間間隔	10 s
地形計算時間	10 時間
中央粒径	0.30 mm

海域左側の岩礁帯が無い領域は汀線付近で洗掘が生じ，その沖側で堆積が生じてい

る。岩礁帯が露出しているケース（砂層厚 0.0 m）では、岩礁帯は地形変化が生じず砂帯との境界で大きな洗掘が生じ、その沖側で堆積が生じている。洗掘深さは深い範囲が狭く全体としての地形変化量は海域左側よりも少ない。

砂層厚が増すにつれて岩礁帯と砂帯境界の深い洗掘範囲は減少し、岩礁帯が無い海域左側の地形変化に近づく。

この検討によって、岩礁帯による洗掘深度の制限と砂層厚の設定による漂砂量の調整が可能な事、岩礁帯が港口付近に存在する場合は洗掘と堆積の変化が狭い範囲で急速に起こり、海浜流の流向次第で航路に及ぼす影響が大きく変化する事などが考えられた。

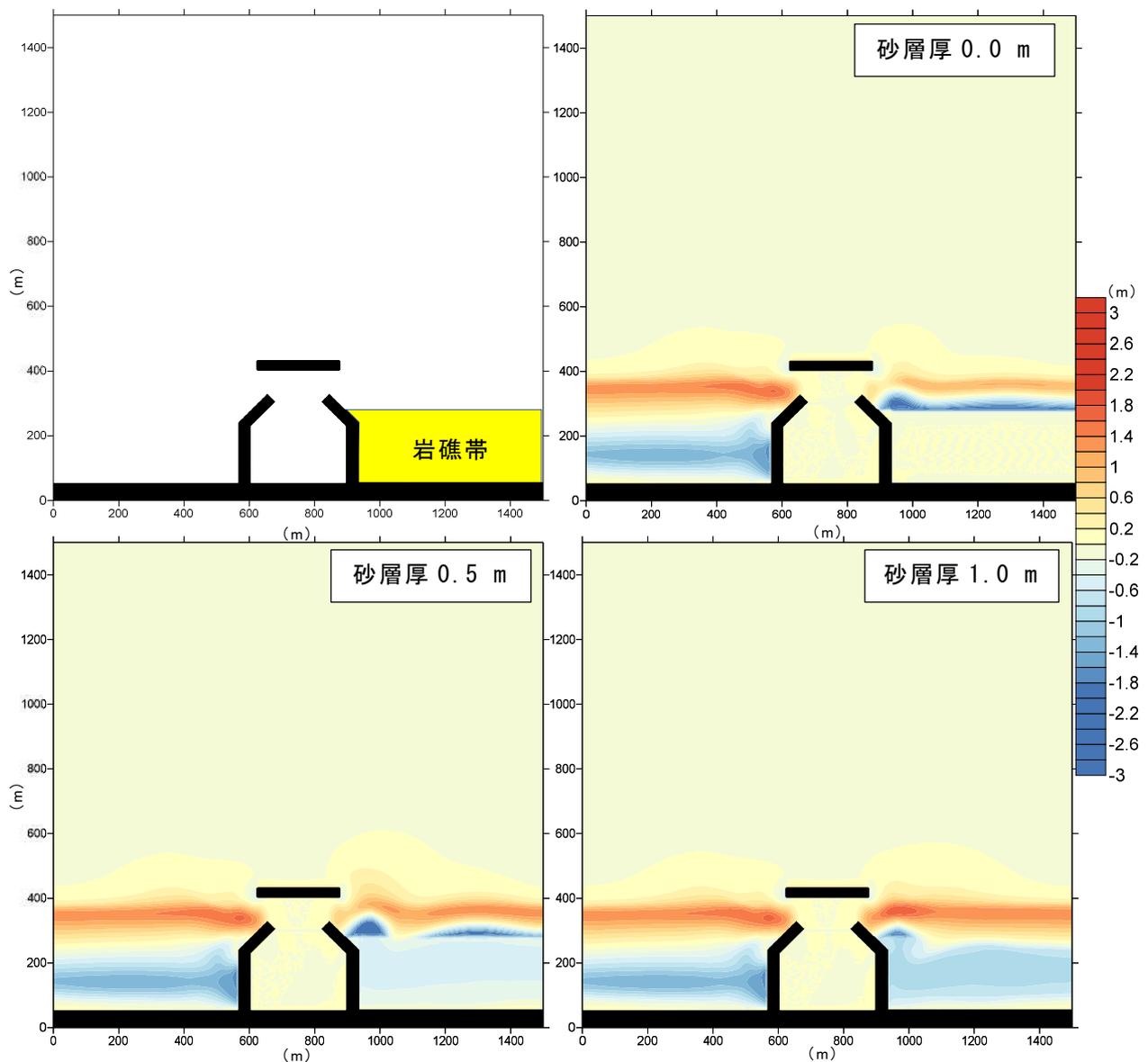


図 4.4 モデル地形 TYPE-C での岩礁帯を考慮した地形変化計算結果

4.3.2 透過型の離岸堤等の構造物を考慮した堆砂予測モデル

久手港に隣接する久手砂浜は、汀線の後退を防ぐ目的で消波ブロックによる離岸堤が整備されている。しかし、図 4.5 に示すように全体的に沈下して堤高が低くなっており、さほど荒天ではない状況下でも波頭が越波してしまう。また、防護対象の砂浜も段差 2 m 近い浜崖が形成されており、膨大な量の土砂が海に流出していると考えられる。

そこで、高波浪時の越波により離岸堤後背部の汀線付近まで到達する外力により輸送される浮遊砂の影響を地形変化計算に付与するため、波が構造物を越波できるよう扱い計算し、離岸堤背後に発生する海浜流計算の精度向上とともに地形変化への影響を検討した。



図 4.5 離岸堤の現況と形成された浜崖(2020年)

波が離岸堤を越波してすることで生じる後背部の流れは越波量と後背部の地形によって定められる。越波量は戦後直後の台風による海岸堤防被害から重要性は認識されており、古くは富永ら（1970）や高田ら（1979）による研究、近年でも姫野ら（2016）や高橋ら（2016）等の研究があるが、主に海岸堤防を主体としており、離岸堤と後背地の漂砂に関する知見は榎木ら（1971）や宇多ら（2011）等限られている。また、越波量は堤体の形状、高さ、前面水深、波高、周期、波長等によって求まるが、モデル内で逐一計算すると計算コストの増加につながる。

そこで、より簡便な手法で越波による離岸堤後背への波浪エネルギーの伝達を疑似的に再現するものとして、離岸堤を潜堤に置換する手法を試行する。

図 4.6 に示す様に、離岸堤を越波ないし通過する状況を代替する手法として、離岸堤を計算上潜堤として扱う。潜堤による水深の変化によって波エネルギーを減衰させることで、発生する海浜流を相応の大きさにすることを想定する。

この場合、離岸堤に該当する箇所の水深設定を潜堤天端水深とし、固定床で地形変化が発生しない設定にすることで、モデル内での処理を行う。

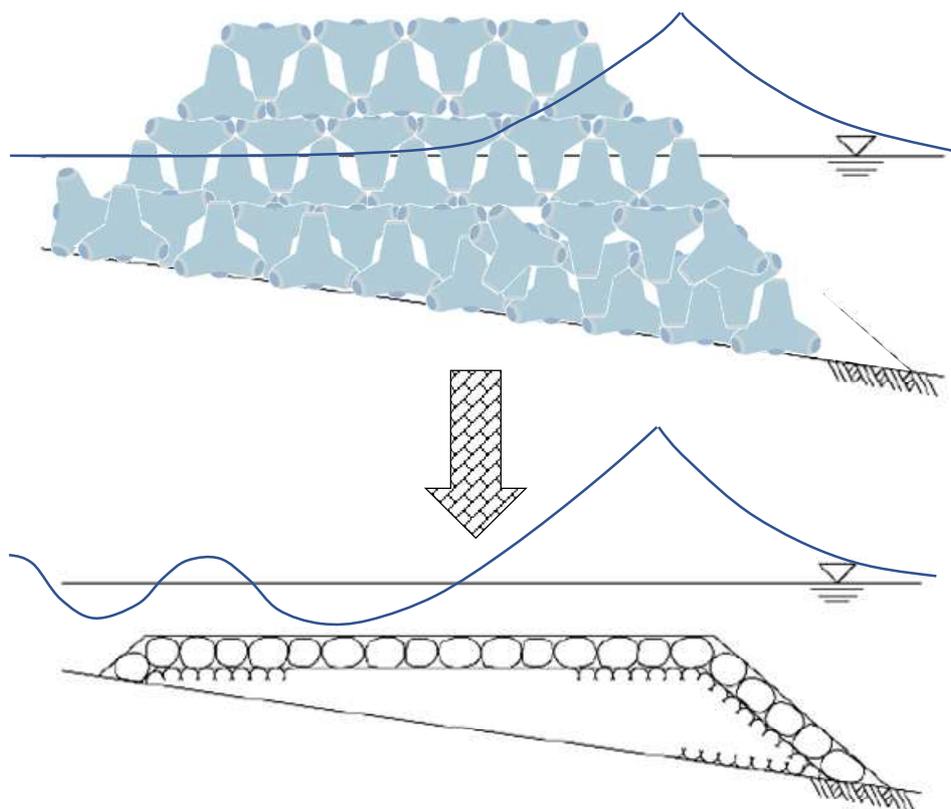


図 4.6 離岸堤の置換イメージ

4.4 現地地形による検証

4.4.1 現地地形変化

久手港および久手港海岸周辺の現地測量データによる地形変化量を図 4.7 に示す。現地測量は 2019 年 11 月から 2020 年 9 月までの期間において 3 回行なわれ、陸域は UAV および RTK-GNSS を用いた海浜測量，海域は測深器付きラジコンボートおよび魚群探知機（1, 2 回目），シングルビーム測深器（3 回目）による深浅測量が実施されている。

防波堤や崖海岸の境界付近で大きな地形変化が生じているが，これらの箇所は正確な測量が難しく，周囲の測線からデータを補間している距離が大きいため，量的なデータの信頼性は薄いと考える。沖防波堤裏から港内において冬季に堆積傾向，夏季に侵食傾向である事，また年間を通して離岸堤前面では堆積傾向，背後の海岸付近は侵食傾向にあることが分かる。一方で久手港内の地形変化は，測量期間では 3 月～9 月に港口付近の狭い範囲で堆砂が発生した他は，航路における顕著な堆砂はみられなかった。

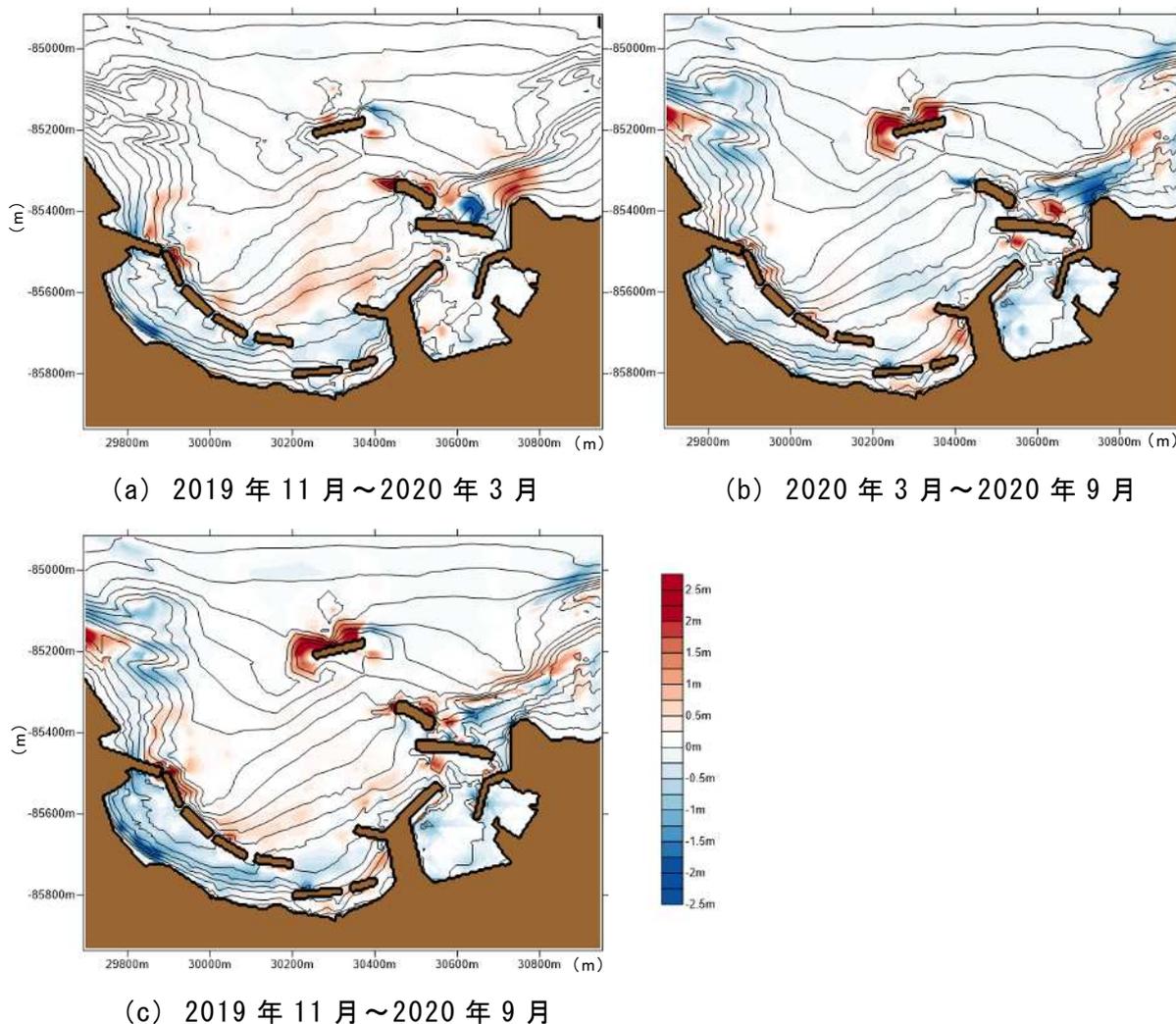


図 4.7 久手港周辺地形変化量（2019 年～2020 年）

4.4.2 岩礁帯と離岸堤を考慮した堆砂予測モデル

漁港周囲の岩礁帯の存在による影響を検討した。図 4.8(a), (b)に示すように、岩礁帯が存在する計算領域と存在しない計算領域の 2 種類を設定した。図 4.8(b)の岩礁帯（黄色い部分）は、岩礁の上に砂層があり、沈降と再浮上を繰り返しながら露出していると想定される。岩礁の範囲は航空写真を参考に設定した。また、消波ブロックで構成された透過型の堤の一部（図 4.8(b)の赤丸内）を潜堤として扱い計算し、地形変化への影響を検討する。加えて、岩礁上の砂層厚の違いによる地形変化への影響を検討する。

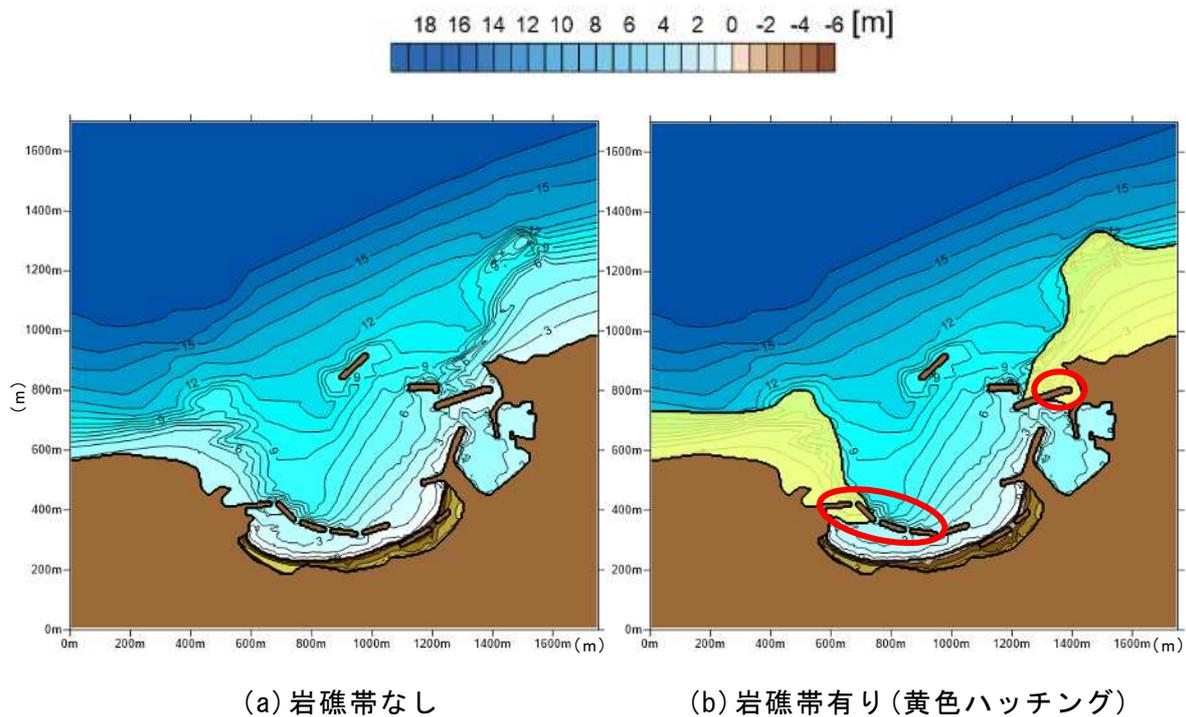


図 4.8 初期地形

計算条件と計算パターンを表 4.2, 表 4.3 に示す。現地の地形の特徴から、以下の 6 つのケースを検討した。計算対象としたケースは、岩礁帯の有無（岩礁の砂厚 0.0 m とそれ以外）、岩礁の砂厚 0.5 m, 1.0 m そして離岸堤を潜堤に代替えるか否かである。潜堤にした場合の天端水深は仮に 0.5 m とした。

計算領域は、沿岸方向に 1,750 m, 岸沖方向に 1,700 m の範囲である。計算格子間隔は $\Delta x = \Delta y = 5 \text{ m}$ とし、海浜流場の計算では時間間隔 0.02 s で計算が安定するまで 20,000 ステップの繰り返し計算を行った。

荒天時の港内堆積が非常に大きい状況を想定し、入射波は 2018 年に浜田港観測所にて計測された有義波高 4.5 m, 有義波周期 8.0 s で波向は岸沖方向から 20° (NNW 方向) とした。波浪の計算時間は、久手港における 2018 年の港内堆砂がほぼ 1 日で生じたことから 24 時間とし、24 時間後の水深の変化を算出した。底質の粒径 d_{50} は、現

地データに基づき 0.3 mm とした。なお，土砂輸送量算定式の無次元パラメータである A_w と A_c をそれぞれ 0.01 と 0.1 に設定した。

表 4.2 モデル地形計算条件

波浪場	
有義波高	4.5 m
有義波周期	8.0 s
波向	20°
Smax	75
海浜流場	
計算時間間隔	0.02 s
計算ステップ数	20,000 回
漂砂量	
計算時間間隔	10 s
地形計算時間	24 時間
中央粒径	0.3 mm

表 4.3 計算ケース

ケース	岩礁帯の有無	砂層厚	潜堤天端水深
1	無し	-	越波無し
2	有り	0.0m	越波無し
3	有り	0.5m	越波無し
4	有り	1.0m	越波無し
5	無し	-	0.5 m
6	有り	1.0m	0.5 m

1) 岩礁帯の有無による影響

まず岩礁帯の有無による影響について検討した（ケース 1, 2）。岩礁帯がない場合（全体が砂の海底）と岩礁帯がある場合の計算を行った。岩礁帯がある場合，該当箇所の海底は侵食されない。

図 4.9(a), (b)は波高分布と流速分布の計算結果である。岩礁帯を越える強い海浜流が発生し，港内や離岸堤背後への流れも発生していることがわかる。また，離岸堤背後では西向きの流れが発生している。図 4.10(a), (b)は，計算終了後（荒天 24 時間後）の水深を示したものである。岩礁帯がない場合，図 4.8(b)で示した黄色い部分の海底の変化が顕著であり，侵食と堆積が過大に評価されていることがわかる。また，地形変化量も過大に評価されている可能性がある。図 4.10(b)の岩礁域を考慮した場合の計算結果は，図 4.10(a)の岩礁域を考慮しない場合の計算結果と比較して，より現実的な侵食・堆積のパターンを示している。しかし，いずれの場合も離岸堤前面の水深変化が大きくなっており，これらの侵食・堆積パターンは，現地の地形とは異なるもの

である。

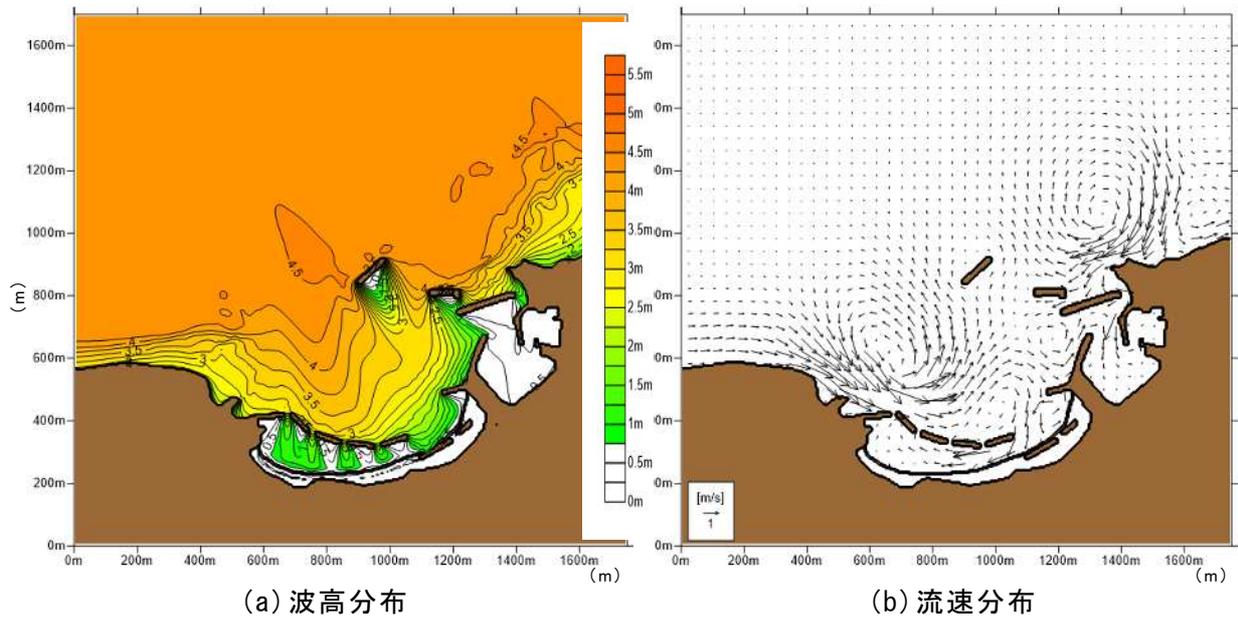


図 4.9 波高・流速分布

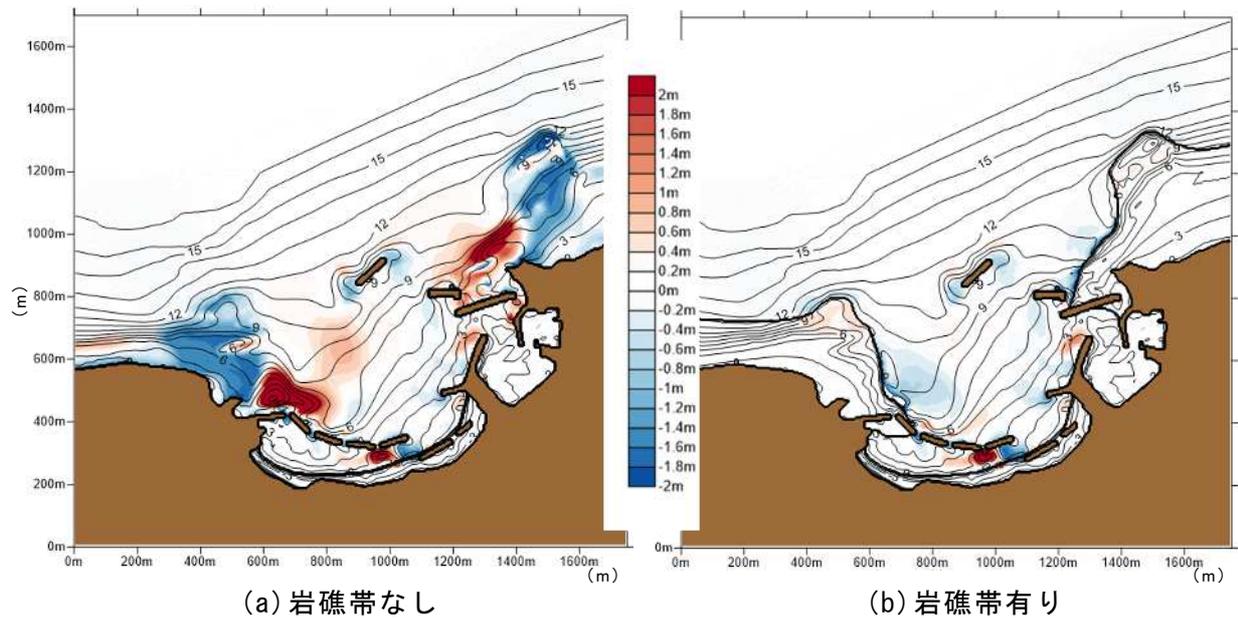


図 4.10 地形変化量

2) 岩礁帯上の砂層厚無による影響

図 4.11(1)~(3)は岩礁帯上の砂層厚が 0.0 m, 0.5 m と 1.0 m の地形変化量を示したものである (ケース 2, 3, 4)。変化量に差があり, 岩礁帯との境界付近での堆積が顕著であることがわかる。このことから, 岩礁帯の砂層厚が地形変化に影響を与えていることが確認された。図 4.10(a)のように地形変化量が過大に評価されていないことが

ら、実際の砂層厚データを反映させることができれば、より実現象に近づけることが可能であると考えられる。

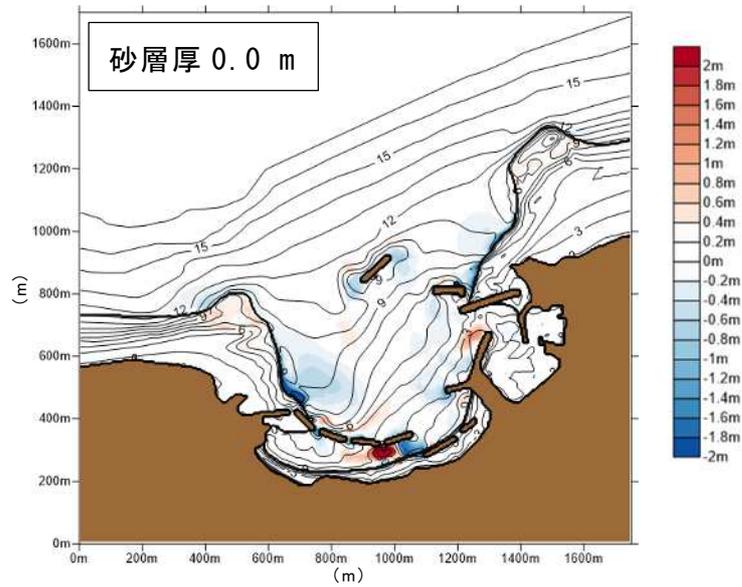


図 4.11(1) 地形変化量 (ケース 2)

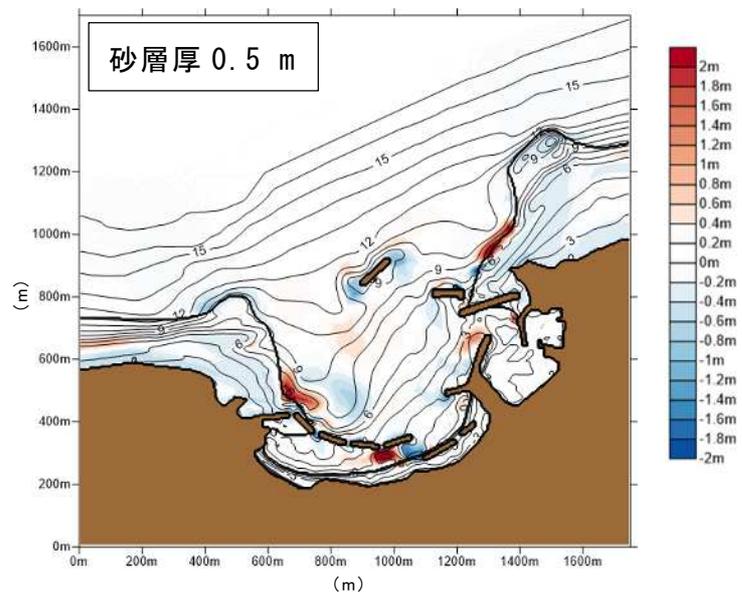


図 4.11(2) 地形変化量 (ケース 3)

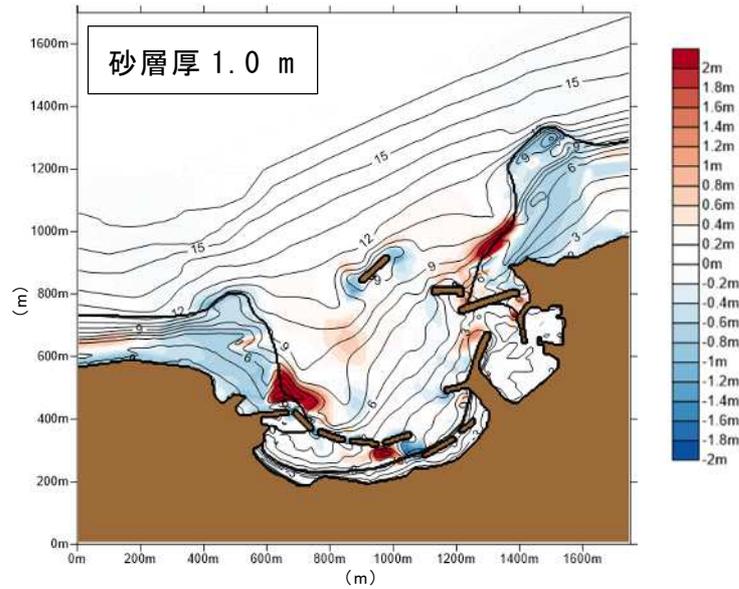


図 4.11(3) 地形変化量 (ケース 4)

3) 離岸堤を潜堤に置換した影響

図 4.12(a)～図 4.14(b)に、岩礁帯を考慮しない場合を基に、離岸堤を潜堤に置換して越波の影響を考慮した場合と考慮しない場合の計算結果を示す (ケース 1, 5)。

図中の破線四角で囲まれた領域の波高分布は、越波無しの場合には離岸堤の隙間から波浪が離岸堤背後に達しているが、越波ありの場合は全体的に到達しており、波高も高い。海浜流は、越波が無い場合は離岸堤背後の値は全体的に小さく、一部で西向きの流れが生じているために地形変化も堆積傾向となったが、越波有りの場合は総じて東向きの流れとなり全体的に浸食傾向となり、現地の砂の流失状況の再現により近づいたといえる。

また、図中の実線丸で囲まれた久手港港口付近も越波の影響を受け、堆積する傾向がみられた。このように、荒天時の越波は、沿岸流の発生や水深の変化に重要な役割を果たすことが確認された。

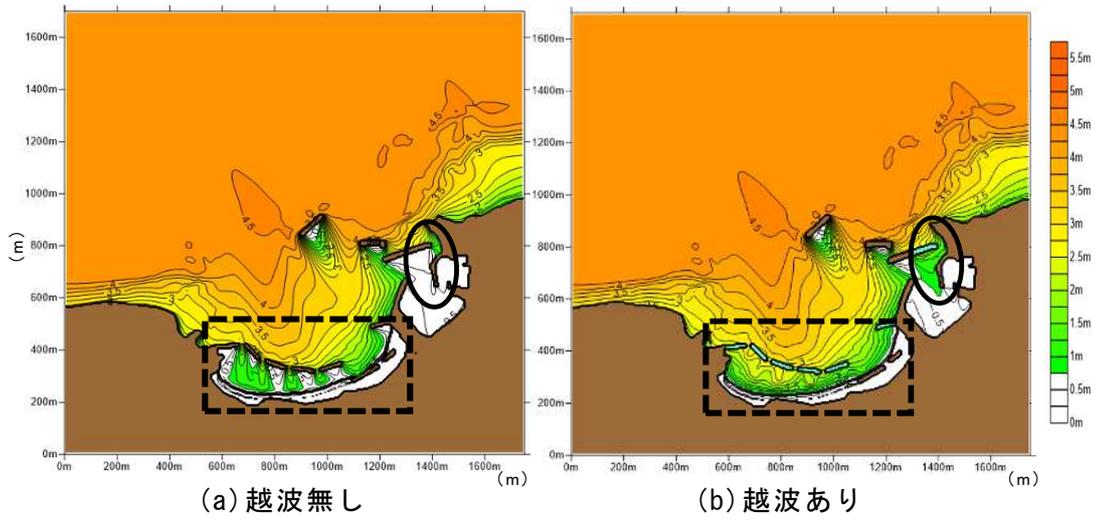


図 4.12 波高分布 (ケース 1, 5)

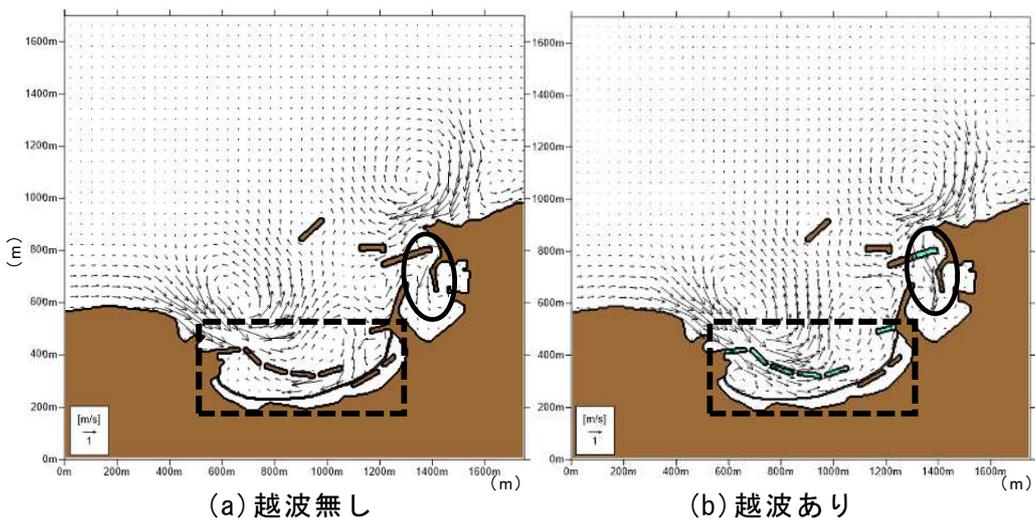


図 4.13 流速分布 (ケース 1, 5)

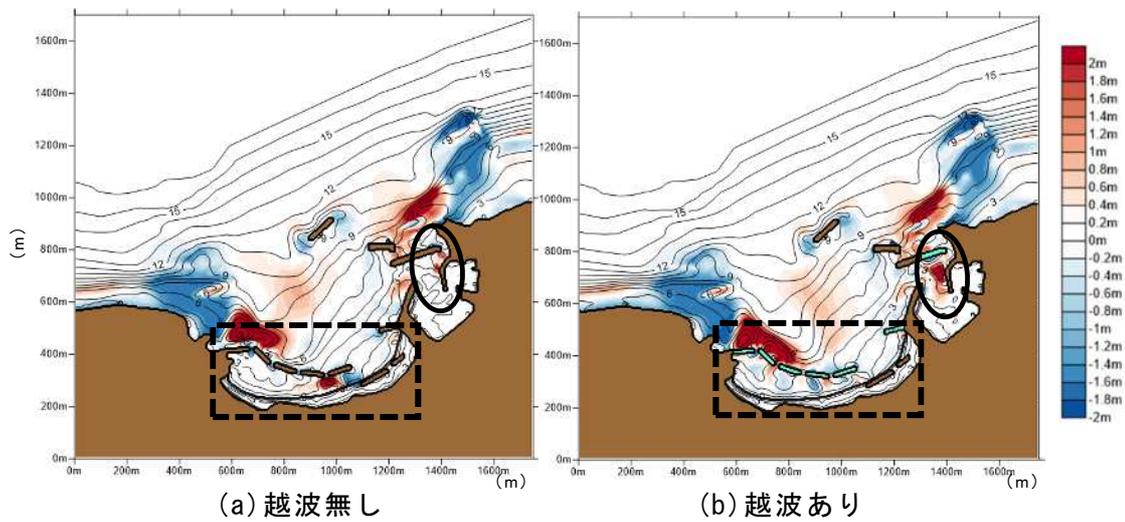


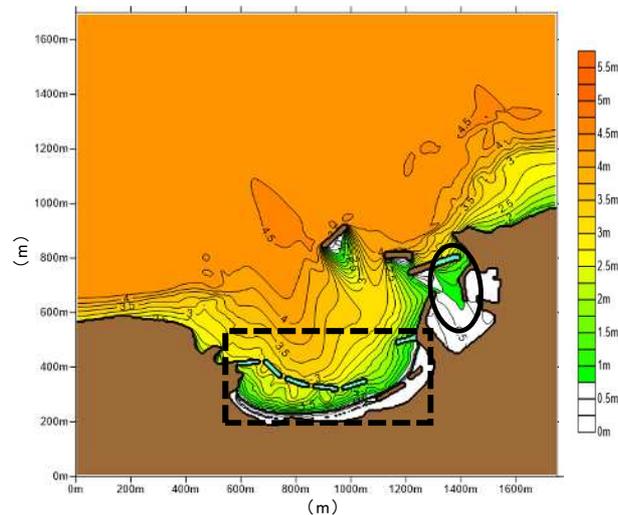
図 4.14 地形変化量 (ケース 1, 5)

4) 総合検討

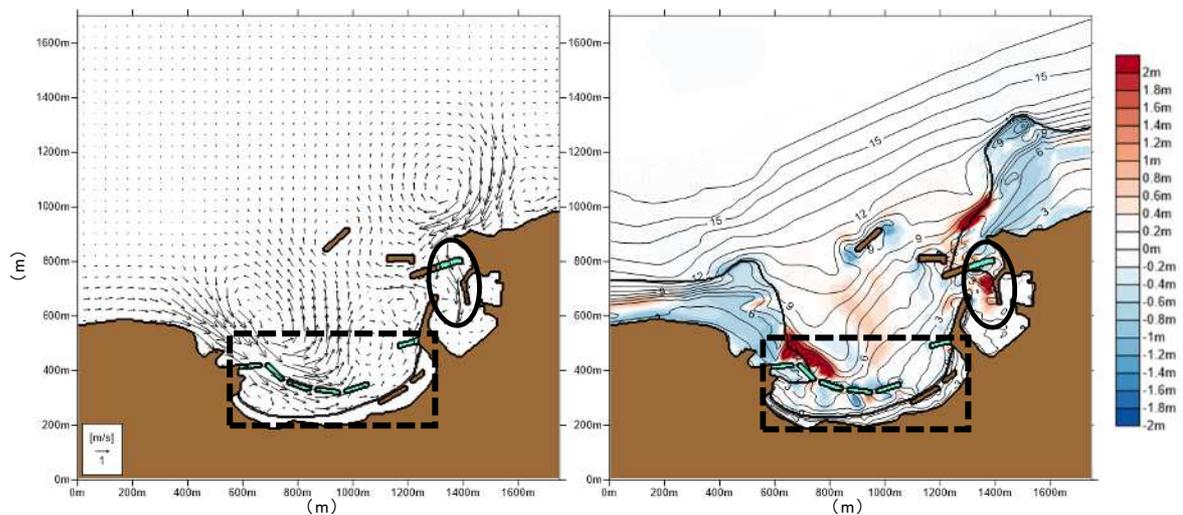
図 4.15 に、岩礁帯を考慮するとともに離岸堤を潜堤に置換して越波の影響を考慮した場合の計算結果を示す（ケース 6）。

図中の破線四角で囲まれた離岸堤背後の波高は減衰しつつ全体的に到達しており、汀線付近の砂を久手港側に輸送する方向の海浜流が計算されていることがわかる。また、実線丸で囲まれた港口付近は波高の久手港内部への到達をほぼ防いでいた状況も、越波することで港中央付近まで波が到達し、付随して港奥へ向かう流れが計算されている。

地形の変化は離岸堤背後の侵食が再現されるとともに、岩礁帯の浸食が制限されることで過度な浸食・堆積量が防がれている。また、港湾入口付近の堆積がより大きく算出されている。



(a) 波高分布



(b) 流速分布

(c) 地形変化量

図 4.15 岩礁帯と越波を考慮した計算結果（ケース 6）

5) 離岸堤を透過型離岸堤に置換した影響

前項で離岸堤の越波による影響を検討するために潜堤に置換して計算を実施したが、より単純に波浪のエネルギーや海浜流が離岸堤を超える（透過する）割合を調整することで後背地への影響を求める手法も可能である（図 4.16）。この手法は、下新川海岸や駿河海岸等に施工されている有脚式離岸堤などの影響検討への展開も想定し得る。有脚式離岸堤については百瀬ら（2017）が透過率を与える同様の手法による検討を行っているが、漂砂が全量通過する点で離岸堤等構造物を与える場合と状況が異なる。透過率を想定する場合は、模型実験やCFD等によってあらかじめ対象施設の透過率等を算出することが望ましいが、本研究ではモデル適応性の確認に留め、詳細な検討は今後の課題とする。

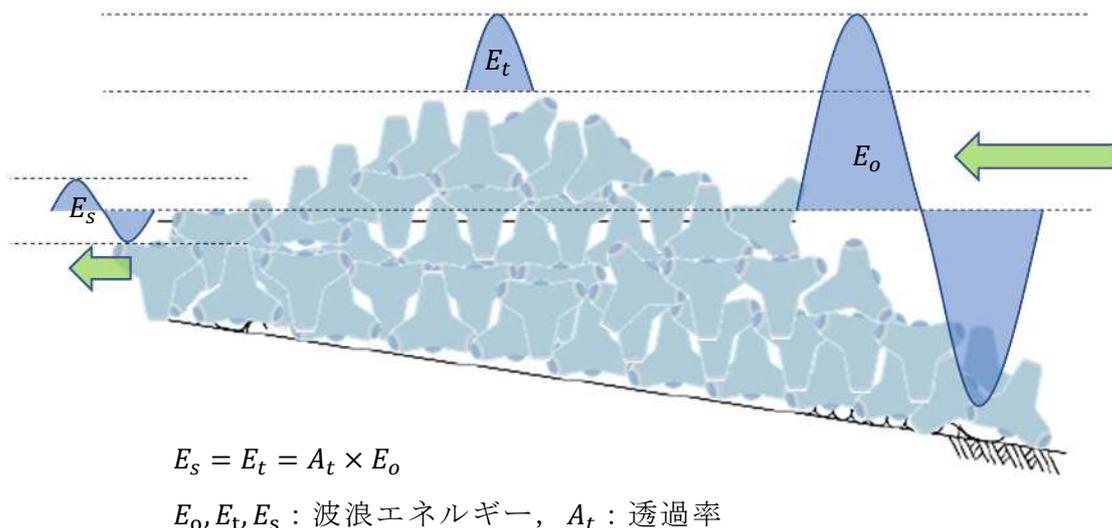


図 4.16 波浪エネルギーが離岸堤を通過するイメージ

モデル地形（TYPE-C）の港口沖に配置した離岸堤に波浪エネルギー透過率を与えた場合の計算を行った。表 4.4 に計算条件を示す。第 4.3.1 項で用いた条件と同様、有義波高 3.9 m、有義波周期 8.4 s、波向 0° （正面）の波を与え、離岸堤の波浪エネルギー透過率を 25%、50%、75% に設定して計算した。図 4.17～図 4.19 に計算結果を示す。各図の左側は離岸堤の透過率 0%（通常の離岸堤）の計算結果を比較のために示している。

通常の離岸堤の場合は、離岸堤から港口までの後背地では正面からの波浪を遮断して離岸堤端から回折した波が分布するのに対し、透過式離岸堤の場合は透過率に応じた波高が離岸堤を通過して港内に達する波浪場となった。海浜流場は港両側の渦が堤防に沿って沖側に向かう際、離岸堤の透過率によって流向を変化させる程度が変化し、

それに応じて地形変化も変化した。また、離岸堤沖側の洗掘は透過率が高いほど洗掘量が減少し、逆に港内では港内流動が増加した影響で洗掘が生じる結果となった。

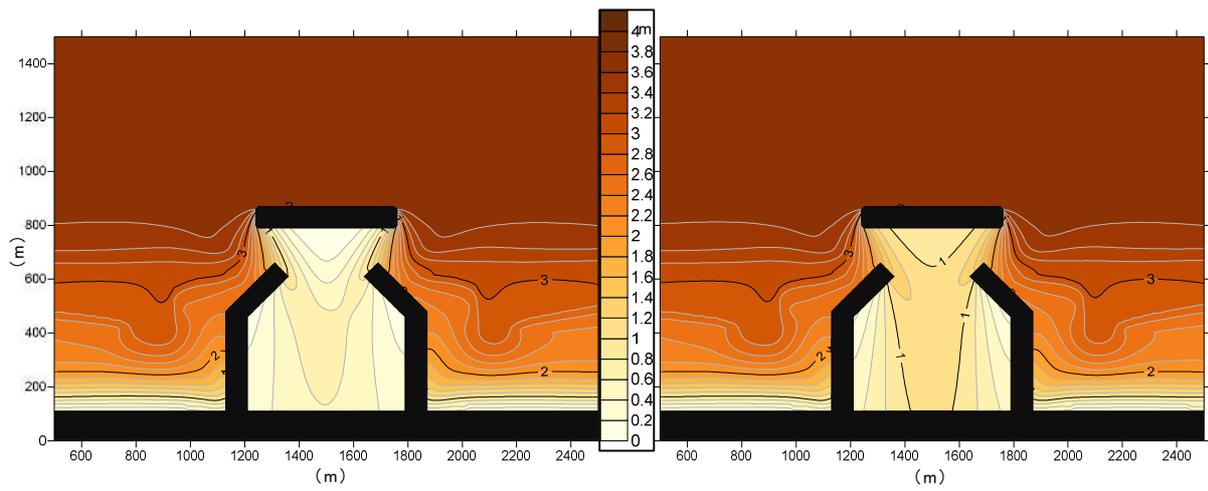
表 4.4 モデル地形計算条件

波浪場	
有義波高	3.9 m
有義波周期	8.4 s
波向	0°
Smax	75
海浜流場	
計算時間間隔	0.02 s
計算ステップ数	20,000 回
漂砂量	
計算時間間隔	10 s
地形計算時間	24 時間
中央粒径	0.3 mm

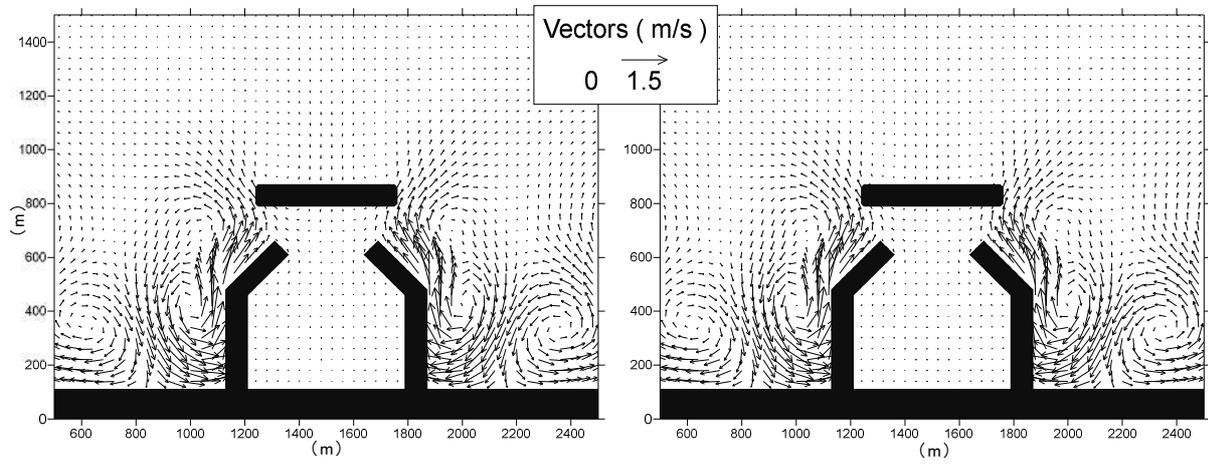
前項にて久手港を対象に行った計算と同様の条件で、潜堤に代替した離岸堤に透過率 50%の設定を与えて計算した結果を図 4.20 に示す。計算条件、波浪条件、地形条件、岩礁帯、砂層厚はケース 6 と同じである。

砂浜前面の離岸堤列周囲に注目すると、波高分布は潜堤代替の場合は潜堤中央付近の波高が増幅されて汀線に侵入するが、透過型の場合は離岸堤中央より離岸堤間から侵入する波高が卓越する。現実では水面より高い構造物が存在することを考慮すると、透過型が現実に近い現象を再現していると考えられる。海浜流場では潜堤代替の場合は東向きの流れが卓越して汀線との間で洗掘が生じていたが、透過型では砂浜西端では東向き、中央付近では西向きの流れが卓越し、流れが衝突した場所から沖側へ抜ける流れとなり、全体的に潜堤代替よりの流速は遅い。地形変化は、潜堤代替の場合は概ね洗掘傾向であったが、透過型では洗掘と堆積が混在しており変化量は潜堤より小さくなった。この離岸堤後背で生じた漂砂は、海浜流によって一度離岸堤の沖側に輸送され、その一部が東側の久手港側に輸送されて港口付近の航路に堆積していると考えられた。

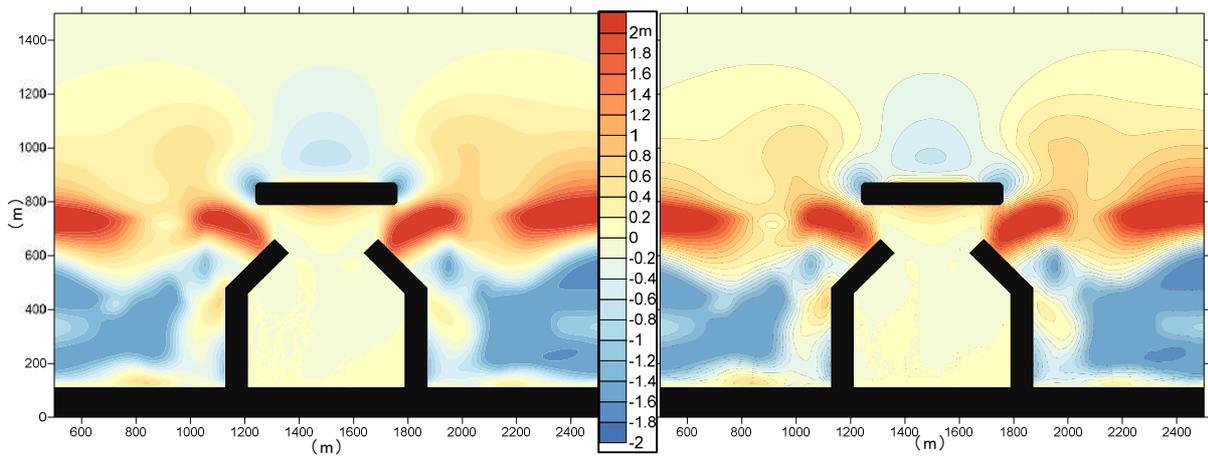
久手港港口付近に注目すると、潜堤代替と同様に波高と海浜流が港内奥まで侵入しており、港口沖離岸堤を超えた波浪によって輸送された漂砂が港内に堆積する流れとなっている。



(a) 波高分布

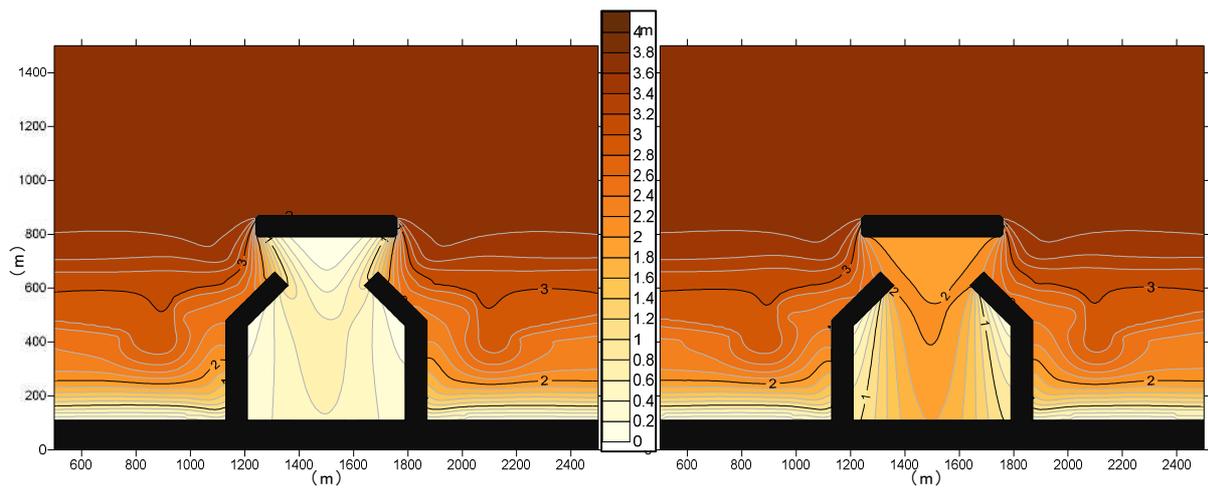


(b) 流速分布

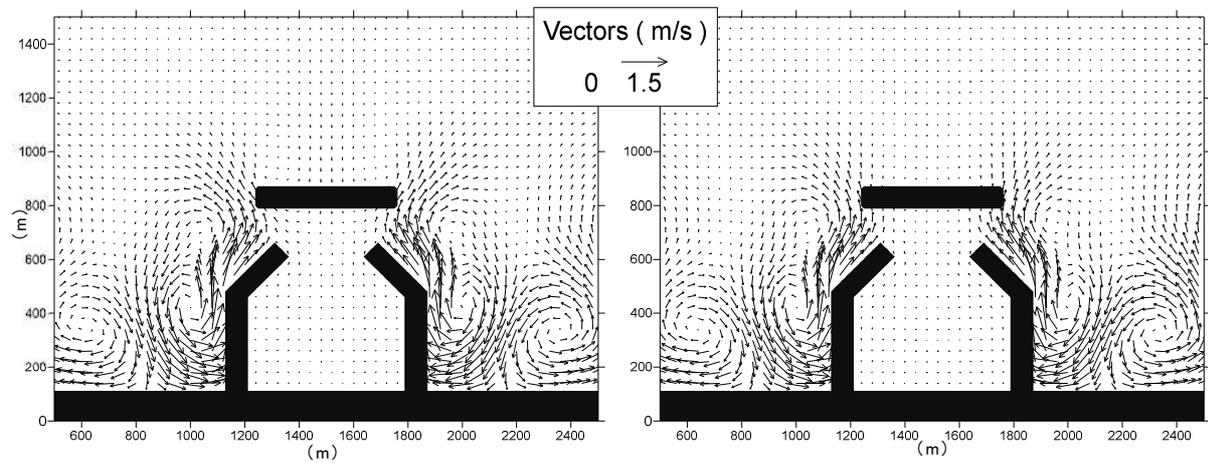


(c) 地形变化量

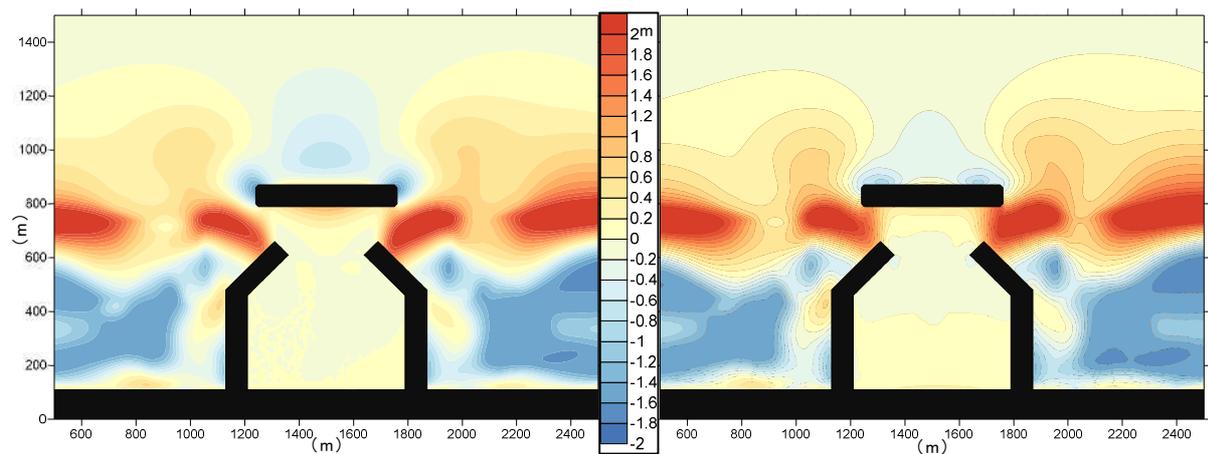
图 4.17 透過式離岸堤計算結果比較 (左: 透過無し, 右: 25%透過)



(a) 波高分布

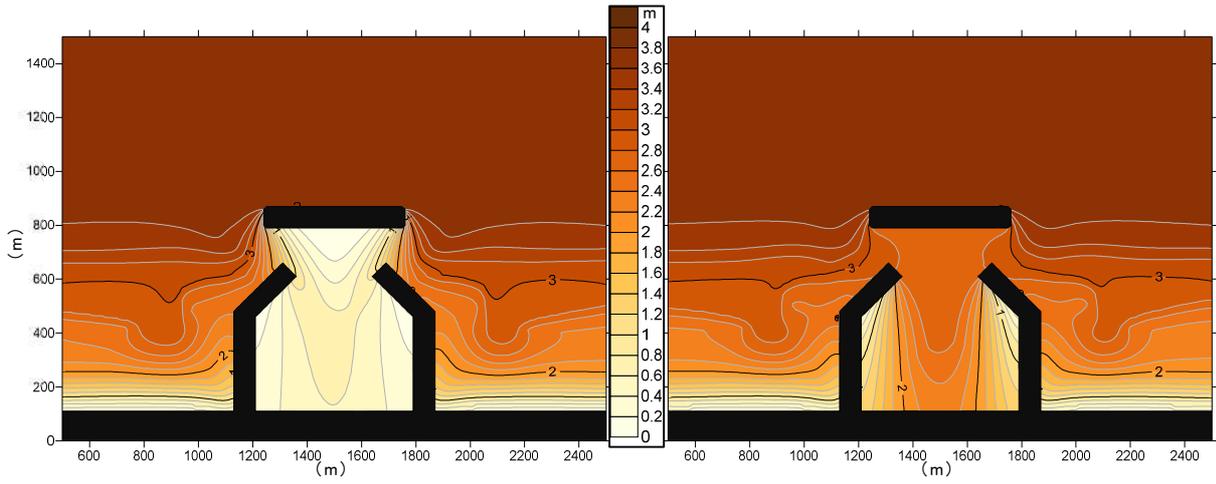


(b) 流速分布

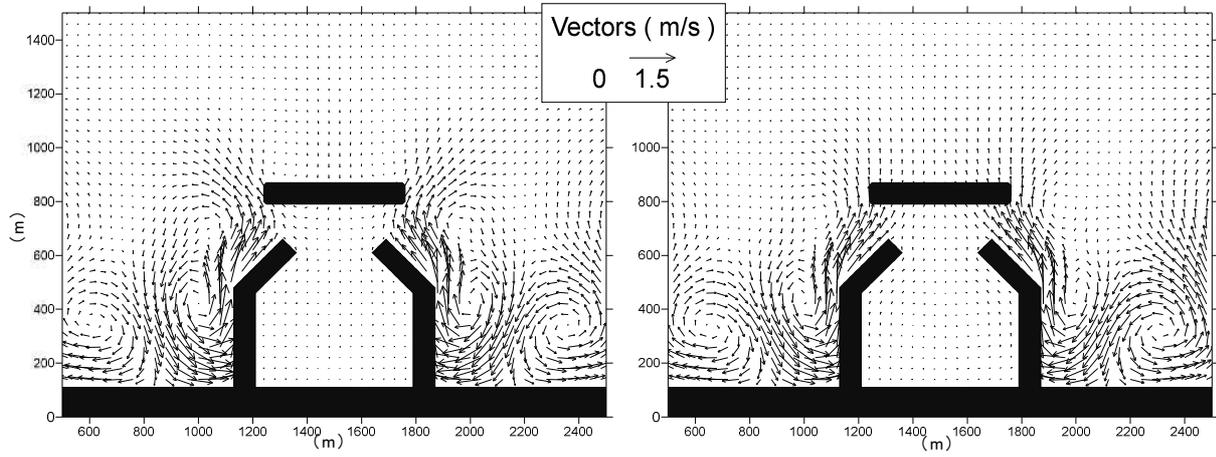


(c) 地形变化量

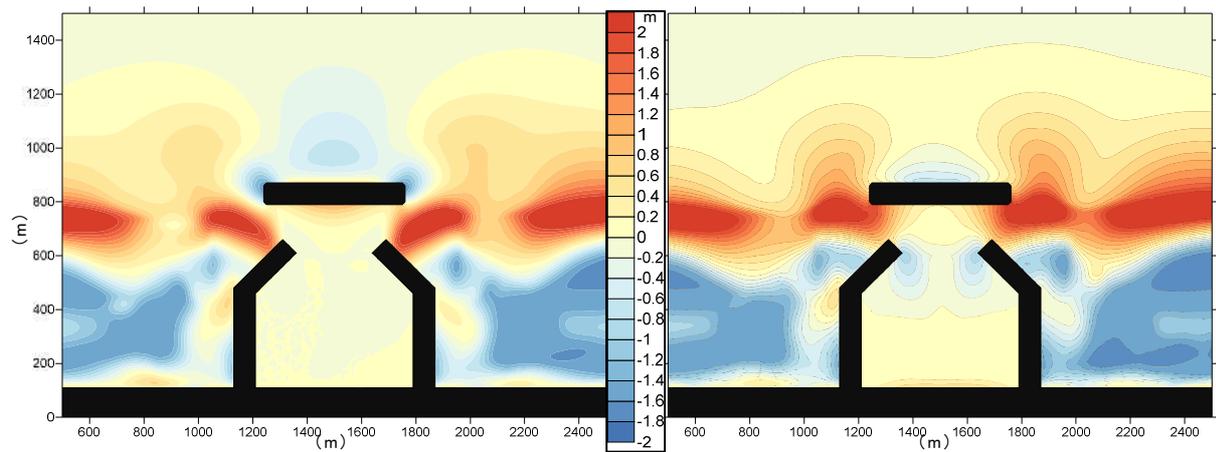
图 4.18 透過式離岸堤計算結果比較（左：透過無し，右：50%透過）



(a) 波高分布

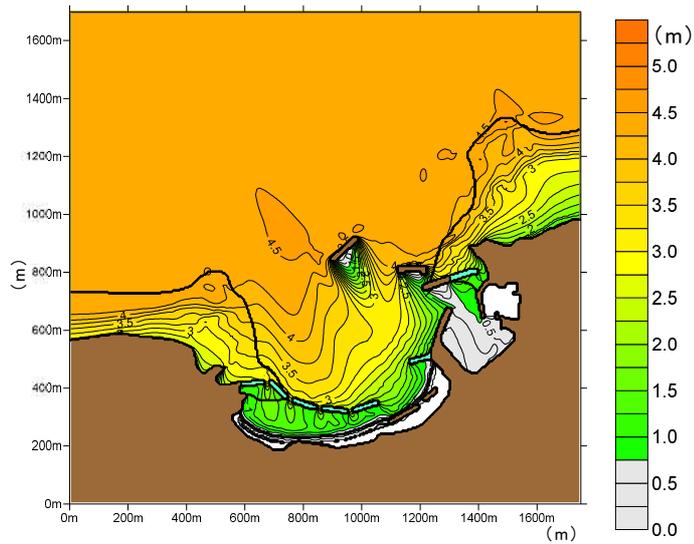


(b) 流速分布

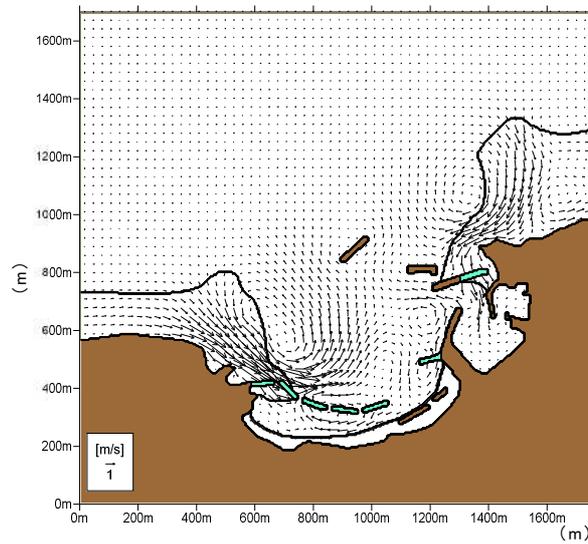


(c) 地形变化量

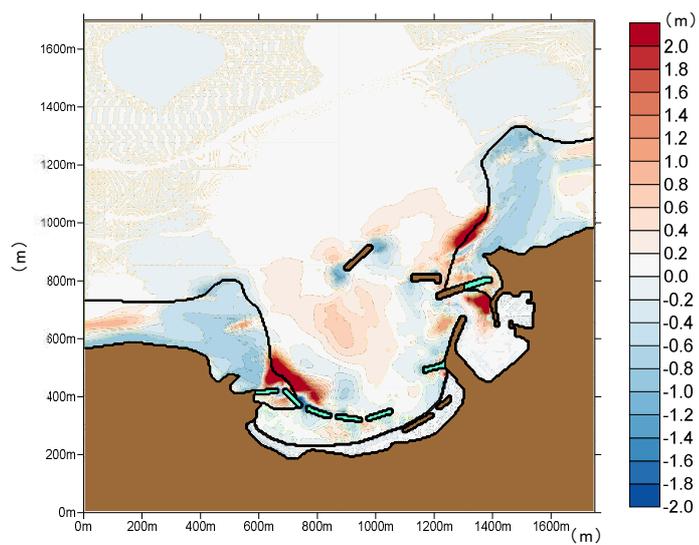
图 4.19 透過式離岸堤計算結果比較 (左: 透過無し, 右: 75%透過)



(a) 波高分布



(b) 流速分布



(c) 地形変化量

図 4.20 久手港における透過式離岸堤計算結果 (透過率 50%)

久手港におけるケース 1～6 および透過式離岸堤の透過率 50% で計算した場合の離岸堤背後と港内の地形変化量の比較を行った。離岸堤背後と港内の設定範囲は図 4.21 のとおりである。表 4.5 に各計算ケースの条件と地形変化量を示す。また、参考として平成 26 年度（2014 年度）～令和 3 年度（2021 年度）の久手港の航路・泊地における浚渫実績（量）を表 4.6 に示す。

離岸堤背後では、越波無しの条件では+5,333～+5,806 m³の堆積傾向、越波を設定すると-497～-5,647 m³の洗掘傾向となり、ケース 6 の-5,647 m³が最も砂が範囲外に輸送された結果となった。透過式は+2,384 m³の堆積傾向で、離岸堤近傍では洗掘されるがケース 6 程ではないことが影響したとみられる。久手港内では、離岸堤の越波無しは+3,255～+6,102 m³の堆積、越波有りは+11,817 m³および+14,184 m³、透過式は+14,647 m³で波浪を離岸堤背後まで影響させたケースは堆積傾向となった。

潜堤による越波ありのケースと透過式のケースでは、西側の岩礁帯境界付近で堆積した漂砂が一度沖側に向かう海浜流によって輸送された後港口方向に向かう流れに乗る状況になっているが、その動きは越波等がない場合よりも久手港に近くなっており、久手港港口に堆積し易い状況となっている。潜堤による越波ありのケースではそれに加え汀線付近を東に向かう海浜流によっても供給されていると考えられる。一方、港口沖側の堤防を越えて港内に侵入する波と流れにより沖側から漂砂が港内に侵入して堆積する影響も大きいと考えられた。

港内浚渫実績と比較すると、波浪条件や計算継続時間などが異なるが港内の浚渫実績平均 18,187 m³に最も近づいたのが透過式のケースだった。港内に堆積した砂は浚渫等で人為的に除去するまで堆積し続けるため、ケース 4 などを用いた条件が 2～3 回程度襲来した積算値と考えることもできる。しかし、平成 30 年、令和元年度の災害復旧事業による浚渫量はほぼ 1 高波浪によるものなので、災害認定される様な港内堆砂の再現性向上に離岸堤背後へ波浪に影響させる手法は有効であると考えられる。

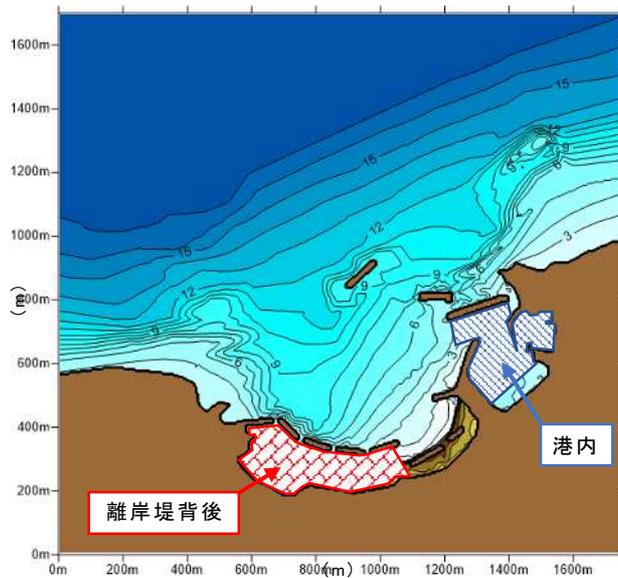


図 4.21 範囲設定

(赤ハッチング：離岸堤背後，青ハッチング：港内)

表 4.5 地形変化量比較

エリア	ケース	岩礁帯の有無	砂層厚 (m)	潜堤天端水深(m)	離岸堤透過率(%)	地形変化量(m ³)
離岸堤背後	1	無し	無し	越波無し	透過無し	5,333
	2	有り	0.0	越波無し	透過無し	5,422
	3	有り	0.5	越波無し	透過無し	5,806
	4	有り	1.0	越波無し	透過無し	5,604
	5	無し	無し	0.5	透過無し	-497
	6	有り	1.0	0.5	透過無し	-5,647
	透過	有り	1.0	越波無し	50	2,384
港内	1	無し	無し	越波無し	透過無し	6,102
	2	有り	0.0	越波無し	透過無し	3,255
	3	有り	0.5	越波無し	透過無し	4,988
	4	有り	1.0	越波無し	透過無し	5,866
	5	無し	無し	0.5	透過無し	14,184
	6	有り	1.0	0.5	透過無し	11,817
	透過	有り	1.0	越波無し	50	14,647

表 4.6 久手港浚渫実績

港内航路・泊地(-4.0m)	
年度	浚渫量 (m ³)
平成 26 年度(2014 年度)	15,700
平成 27 年度(2015 年度)	11,720
平成 28 年度(2016 年度)	13,700
平成 29 年度(2017 年度)	9,700
平成 30 年度(2018 年度)	22,100 (7,500)
令和元年度(2019 年度)	11,500 (37,500)
令和 2 年度(2020 年度)	3,309
令和 3 年度(2021 年度)	5,543
平均	18,187

(数値は県単修繕事業による実績。
H30, R1 の () 内の数値は災害復旧事業によるもの)

4.5 結語

本章では、小規模港湾に隣接する岩礁帯が漂砂現象に与える影響を予測する海浜変形モデルの検討を行った。海底地形の鉛直方向の変化可能量は、岩礁帯の固定床上の砂層の厚さに相当すると考えられ、この設定を組み入れた海浜変形モデルをモデル地形で検討した後に岩礁域に囲まれた島根県久手港周辺に適用した。

さらに、性能が低下した施設の例として離岸堤の荒天時の越波の影響を考慮したモデルの検討を行い、前述のモデルと合わせて久手港周辺に適用した。その結果、主に下記の結論が得られた。

- (1)岩礁帯の有無による海底地形変化の違いを比較した。海岸付近の浅瀬の碎波帯内は海浜流が発達する範囲であり、それによる漂砂輸送量の増加が海域全体の漂砂に大きな影響を与える。そこに位置する岩礁帯の砂層厚とそれによる漂砂量の制限を検討することで、地形変化計算の再現性を高めることができることが示された。
- (2)荒天時の離岸堤越波の影響を検討する代替手法として疑似的に潜堤を設定することで、越波によって離岸堤背後まで到達する波浪と海浜流による漂砂輸送が発生し、従来のモデルでは再現が困難な離岸堤背後部の地形変化の再現性が向上した。

- (3) 潜堤への代替の代わりに波浪エネルギーの透過率を与える手法も検討した結果、波高分布は潜堤代替よりも現実に近い状況を計算できたが、潜堤後背部の海浜流と地形変化量は潜堤代替よりも小さめの評価となった。
- (4) 離岸堤等の越波や波浪の透過により海域の海浜流の状況が変化し、それによる漂砂も変化する。対象領域の流れと漂砂輸送の変化が結果として港内堆砂量の増減に影響を与えていることが示された。その結果として、港内堆砂量の実績値に近づく結果が得られた。
- (5) 離岸堤の越波や岩礁帯・砂帯境界の適切な地形変化を考慮した本モデルにより漂砂供給源と輸送、航路・港内堆砂の再現性向上に繋がり、対象海域の総合的な土砂管理の検討に寄与すると考えられる。

以上、久手港の堆砂問題に対して、新たなモデルを構築し検討したが、越波を考慮しない場合の計算結果では、離岸堤背後の侵食・堆積の傾向が現地地形と大きく異なり、荒天時の離岸堤背後の海浜流の方向も不自然であった。この原因は、離岸堤への越波が考慮されていないことや、離岸堤の透過性が原因であると考えられる。冬期には、現地の久手海岸は離岸堤背後の汀線が後退し浜崖も形成されている。この汀線後退のメカニズムは、越波による波の侵入と強い海浜流の発生による砂の輸送である。

そのため本研究で提案し構築した堆砂予測モデルのように、離岸堤の越波や透過性を考慮することは非常に重要と考えられる。本研究では、越波を考慮するために潜堤の天端水深を 0.5 m としたが、さらなる計算精度向上、あるいは様々な状況に応じたフィッティングの検討が必要であろう。透過率を与える手法でも離岸堤背後の漂砂の発達や港内堆砂量の精度向上が認められたが、透過率設定量に対する根拠の確立等のさらなる検討が必要と考えられる。

また、離岸堤等の越波・波浪透過の反映は海域全体の海浜流と漂砂輸送に影響を与え、海域全体の土砂管理の検討に効果を発揮し得ると考えられる。

参考文献

- 池野 正明・清水 隆夫・小林 英次・石井 敏雅・斉藤 知秀 (2001) : 露岩域を有する砂浜海岸に港湾を建設する場合の 3 次元海浜変形数値予測モデルの適用, 海岸工学論文集, Vol. 48, pp.561-565.
- 宇多 高明・野志 保仁・星上 幸良 (2011) : 離岸堤の設計基準の改善策, 土木学会論文集 B3(海洋開発), Vol.67, No.2, pp.I_1087-I_1092.
- 黒岩 正光・口石 孝行・松原 雄平 (2006) : 平面 2 次元と準 3 次元海浜流モデルによるハイブリッド型 3 次元海浜変形予測システム, 海岸工学論文集, Vol.53, pp.486-49.
- 黒岩 正光・松原 雄平・長谷川 幸彦・市村 康・吉津 憲・小泉 知義・三納 正美・山本尚嗣 (2011) : 岩礁帯を考慮した 3 次元海浜変形予測モデルに関する研究, 海岸工学論文集, Vol. 67, No. 2, pp.531-535.
- 榎木 享・岩田 好一朗 (1971) : 堤防越波量に及ぼす離岸堤背後地形の効果に関する実験的研究, 第 18 回海岸工学講演会論文集, pp.269-273.
- 榎木 享・李 宗隻・出口 一郎 (1984) : 河口周辺の高浜流及び地形変動モデルに関する研究, 海岸工学論文集, 第 31 巻, pp.411-415.
- 清水 琢三・山田 晶子・渡辺 晃 (1996) : 沿岸漂砂量の岸沖分布と漂砂量係数, 第 43 巻海岸工学論文集, pp.571-575.
- 高田 彰・吉田 吉治・藤川 浩生 (1979) : 海岸堤防・護岸の断面形状と越波量との関係, 第 26 回海岸工学講演会論文集, pp.285-289.
- 高橋 信幸・川見 健二 (1996) : 消波ブロック腹付け潜堤護岸の越波特性に関する水理模型実験, 第 34 回 土木学会関東支部新潟会研究調査発表会発表資料.
- 富永 正照・佐久間 囊 (1970) : 海岸堤防の越波量について, 第 17 回海岸工学講演会論文集, pp.133-140.
- 姫野 一樹・竹下 哲也・五十嵐 竜行・小泉 知義・諏訪 義雄 (2016) : 傾斜堤における $h_c/H_0=0\sim 1$ の範囲での越波水理模型実験, 土木学会論文集 B2(海岸工学), Vol.72, No.2, pp.I_379-I_3842.
- 間瀬 肇・高山 知司・国富 将嗣・三島 豊秋 (1999) : 波の回折を考慮した多方向不規則波の変形計算モデルに関する研究, 土木学会論文集, 第 628 号, II-48, pp. 177-187 pp.43-50.
- 百瀬 尚士・鈴木 知陽・佐藤 雅史・山本 庸介・宇多 高明・石川 仁憲・芹沢 真澄・宮原 志帆 (2017) : 透過型有脚式離岸堤を用いた L 型突堤の漂砂制御機能の検討, 土木学会論文集 B3(海洋開発), Vol.73, No.2, pp.I_564-I_569.
- 渡辺 晃・丸山 康樹・清水 隆夫・榎山 勉 (1984) : 構造物設置に伴う三次元海浜変形の

数値予測モデル, 第 31 巻海岸工学論文集, pp.406-410.

Ikeno, M, Shimizu, T, Kobayashi, E, Ishii, T and Saito, T (2002) : Application of 3-D beach deformation numerical model to a field site of sandy beach including exposed rock area around a harbor, Proceedings of 28th International Conference on Coastal Engineering, pp.2994-3006.

Hanson, H and Militello, A (2005) : Representation of Non-Erodible (Hard) Bottom in Two-Dimensional Morphology Change Models, Technical Note ERDC/CHL CHETN-IV-63, US Army Engineer Research and Development Center, Coastal and Hydraulics Laboratory, Vicksburg, MS.

Hasegawa, Y, Kuroiwa, M, Matsubara, Y, Ichimura, Y and Nagaishi, Y (2012) : Three-dimensional Morphodynamic Model to Sandy Beach with Non-eroded Hard Bottom, Proceedings of 33th International Conference on Coastal Engineering, pp.794-774.

第5章 結論

漁港の維持管理計画を立案する上で、地方の中小規模の漁港は予算が乏しく維持・補修の対策に費やされ適切な評価・検討が困難な現状がある。これまでは浚渫等による対症療法的な対策でも維持が可能であったが、今後は少子高齢化による技術者・労働者不足による対策の遅れも予想されると共に予算の圧縮が求められる。そのため定量的に港内堆砂量、堆砂位置を適切に予測して予測評価と対策検討が可能な総合的なモデル開発が必要と思われる。

港内堆砂の予測に一般的に使用される海浜変形モデルは、港周辺および港口周辺の漂砂現象は高い精度での再現性を有するが、港の奥側泊地の堆積と港内流動を再現する事が難しい。これは、通常外力として与える風波およびうねりのほかに、周期数十秒以上の長周期波成分が影響していると考えられる。地方の小規模漁港の港口は荒天時に活発な漂砂現象が生じる砕波帯に位置することも多く、砕波による乱流とともに長周期波が底質輸送に影響を及ぼし、漁港内へ浮遊砂を輸送することが港内埋没の原因のひとつと考えられる。

また、地方の小規模漁港は元来の地形のまま汀線付近に整備された結果、岩礁帯や砂浜海岸・海岸防護施設が隣接する多様な地形に囲まれる場合が多く、結果として複雑な漂砂発生・輸送メカニズムとなり予測を困難にしている。岩礁帯等の影響を反映した数値モデルの研究事例は複数あるが発展途上といえる。離岸堤等の構造物は、経年劣化や想定以上の外力等によって性能が徐々に低下するが、地方の小規模漁港では予算不足等により改修がされず、結果として構造物背後の地形変化に影響が表れることがあり、この様な状況を考慮に入れた海浜変形モデルの研究は乏しい。

以上のことから、本研究は、小規模漁港を対象とし、実務での利用を念頭におき、漂砂の外力のひとつである長周期波による流動と、対象漁港周辺の複雑な地形条件を考慮した新たな港内堆砂予測モデルの開発を目的としたものである。本章では、本研究で得られた主要な成果を述べ、最後に今後の展望および課題について述べることにする。

第1章「緒論」では、研究の背景、港内堆砂予測モデル構築を行う上での、既往の3次元海浜変形モデルの概要と課題、港内堆砂予測に関する従来の研究について示し、本研究の目的について述べた。

第2章「小規模漁港における漂砂事例と長周期波」では、鳥取県東部における5つの小規模漁港（酒津漁港、船磯漁港、夏泊漁港、長和瀬漁港、泊漁港）における漂砂による堆砂事例を把握するために、ヒアリング調査を実施した。その調査に基づき、長周期波の現象を把握するために、鳥取県内2つの漁港（船磯漁港と酒津漁港）において現地観測を行った。またこれらとは別に、同じく山陰地方で港

内堆砂問題のある島根県久手港において現地観測を実施した。得られた主要な結論を簡潔に示す。

- (1) 各漁港でのヒアリングの結果，状況に応じて砂の堆積が港奥に達することが例年発生し，対応として維持浚渫やサンドポケット浚渫の施工等が実施されている。また，夏泊漁港での越波や長和瀬漁港や酒津漁港での防波堤構造物下部の通水などにより，構造物を超えての漂砂侵入が発生する事例もあることがわかった。
- (2) 船磯漁港では，長周期波に関して港内の水位と流速変動に関する現地観測結果より，有義波高3 mを超える高波浪時に周期80～100 s，振幅15～30 cm程度の長周期波の存在を確認した。また，流動についても周期は同程度で振幅10 cm程度の長周期振動流を確認した。冬季波浪の波高が高くなるに従い長周期波の波高も高くなることがわかった。
- (3) 酒津漁港と久手港においても，冬季波浪の影響とみられる7～8 sの周期とは別に，80～100 s付近の周期にエネルギーピークが認められ，日本海西部沿岸の漁港においては港奥へ到達して港内部の流動に影響を与える長周期変動が存在することがわかった。

第3章「長周期流動を考慮した港内堆砂予測モデルの検討」では，長周期流動を考慮した港内堆砂予測モデルの検討において，既往モデルの精度向上を図るため防波堤などの固定境界に沿う流れを滑らかにする FAVOR 法と，移流による数値拡散を防ぐ高次差分の WENO 法を導入した長周期流動モデルを構築した。さらに平面2次元海浜流モデルと流動モデルをカップリングした流動計算モデルを既往の3次元海浜変形モデルに導入した新たな港内堆砂モデルを構築した。構築した港内堆砂予測モデルの妥当性と現地適用性を検討した。得られた主要な結果を簡潔に示す。

- (1) 港のモデル地形を対象とした試計算において，改良流動モデルは，あらゆる条件において既往流動モデルよりも安定した計算結果が得られることが確認され，水深変化に伴う浅海域での振幅の増幅が明瞭に計算可能であることがわかった。
- (2) 既往流動モデルに対し，改良流動モデルは港内とその周辺において複雑な水位分布によって明瞭な残差流が計算された。特に，沖防波堤周辺などで渦状の残差流が再現されるなど，1周期平均した流れは改良モデルの方が既往モデルよりも大きく，顕著な流れを再現可能であることが確認できた。
- (3) 改良流動モデルを導入した港内堆砂モデルを用いて，モデル地形を用いた地

形変化計算を試みた結果，長周期流動の平均流速値は波による海浜流速値より小さいが，汀線近傍は長周期変動が発達した結果，漂砂による地形変化の度合いが増幅する結果となり，長周期流動モデルの導入が3次元の地形変化に影響を及ぼすことが確認できた。

- (4) 船磯漁港を対象とした計算では，長周期流動の有無による流れの違いはみられたが，港口部，港内の堆砂量が過小評価された。そこで，長周期流動の平均値ではなく，港口あるいは港内奥向きのタイミングにおける長周期流動成分を抽出し，海浜流速へ重ね合わせた方法を試みた。その結果，港口付近と港内における堆砂量が増加する傾向となり，特に船磯漁港では港内西側の旧港エリアの奥にまで堆砂が到達する結果が得られた。その堆砂量は既往の浚渫量と概ね同オーダーであり，堆砂予測モデルの有用性が確認された。

第4章「漁港周囲の複雑な地形条件等の影響を考慮した港内堆砂予測モデル」では，久手港とその周辺地形を対象として，漁港周辺の地形条件（岩礁帯や人工構造物）の影響を考慮した堆砂予測モデルを構築し，現地適用性を検討した。

得られた結果を要約すると以下のとおりである。

- (1) 岩礁帯を考慮することによって，海岸付近の浅海域において発達した海浜流による海底地形変化が制御され，海域全体の漂砂に大きな影響を与えることが確認された。すなわち，そこに位置する岩礁帯の砂層厚とそれによる漂砂量の制限を検討することで，地形変化計算の再現性を高めることができると明らかになった。
- (2) 荒天時の離岸堤越波の影響を検討する代替手法として潜堤を設定することで，越波によって離岸堤背後まで到達する波浪と海浜流が疑似的に計算されて漂砂が促進され，従来のモデルでは再現が困難な離岸堤背後部の地形変化の再現性がより向上した。
- (3) 離岸堤における波浪エネルギーの透過率を与える手法も検討した結果，離岸堤背後の海浜流と地形変化量は潜堤代替よりも小さめの評価となったが，これは潜堤天端の水深と透過率の設定次第と考えられる。
- (4) 対象とする漁港周辺の地形条件を考慮することにより，周辺の地形変化と漂砂輸送が適切に計算され，漁港を含む計算領域内の波と流れによる漂砂輸送の変化が結果として港内堆砂量の増減に影響を与え，港内堆砂の定量的な予測が可能となることが示された。
- (5) 離岸堤の越波や岩礁帯・砂帯境界の地形変化量の卓越は，これらを考慮したモデルにより漂砂供給源と輸送，航路・港内堆砂の再現性向上に繋がり，海

域の総合的な土砂管理の検討に寄与する。

以上、本研究では、長周期波による流動モデルを3次元海浜変形モデルに組み込み、また対象漁港周辺の岩礁帯や離岸堤などの構造物の地形条件を考慮した港内予測モデルを構築した。様々な検討結果から、本研究で提案した堆砂予測モデルは、簡便ながら予測精度向上に資するものであると考えられる。港内堆砂予測システムとして、図5.1に示す各要因を整理したフローを示しておく。

検討対象の漁港の状況を確認し、追加する要因を取捨選択することで処理コストの低減を図ることが重要である。また、図5.1に示した予測システムに基づいて、波浪の港内への侵入が確認できない漁港で港内堆砂が問題になっている場合は長周期波の要因を、漁港周囲に岩礁帯があり港内堆砂がある場合は岩礁帯の要因を、構造物の背後で大きな地形変化が生じている海域の場合は構造物の越波や透過等の要因を選択することにより、海域の漂砂原因の確認や計算の際の不要な労力の除去が可能となる。

最後に今後の課題として、本研究は実務に適した港内堆砂予測モデルの構築を目的としたものであり、その予測精度向上のためには

- (1) 港内流動に関連するデータおよび港内外の長周期波とその影響の情報の集積
- (2) 前項を基にした港内流動再現計算の精度向上
- (3) 岩礁帯とその砂層厚のモデル内の適切な数値の付与と現地計測技術の開発
- (4) 透過性構造物の種類、透過率などに関する適切なパラメータの与え方の検討

などが考えられる。現地計測による情報収集などは技術的に非常に困難と予想されるものもあるが、昨今のドローン空撮技術など、数年前には思いもよらぬ視点での技術開発と爆発的な進歩がみられる事例もあることから、今後、それらの技術情報の収集と更なる漂砂問題改善が必要であろう。

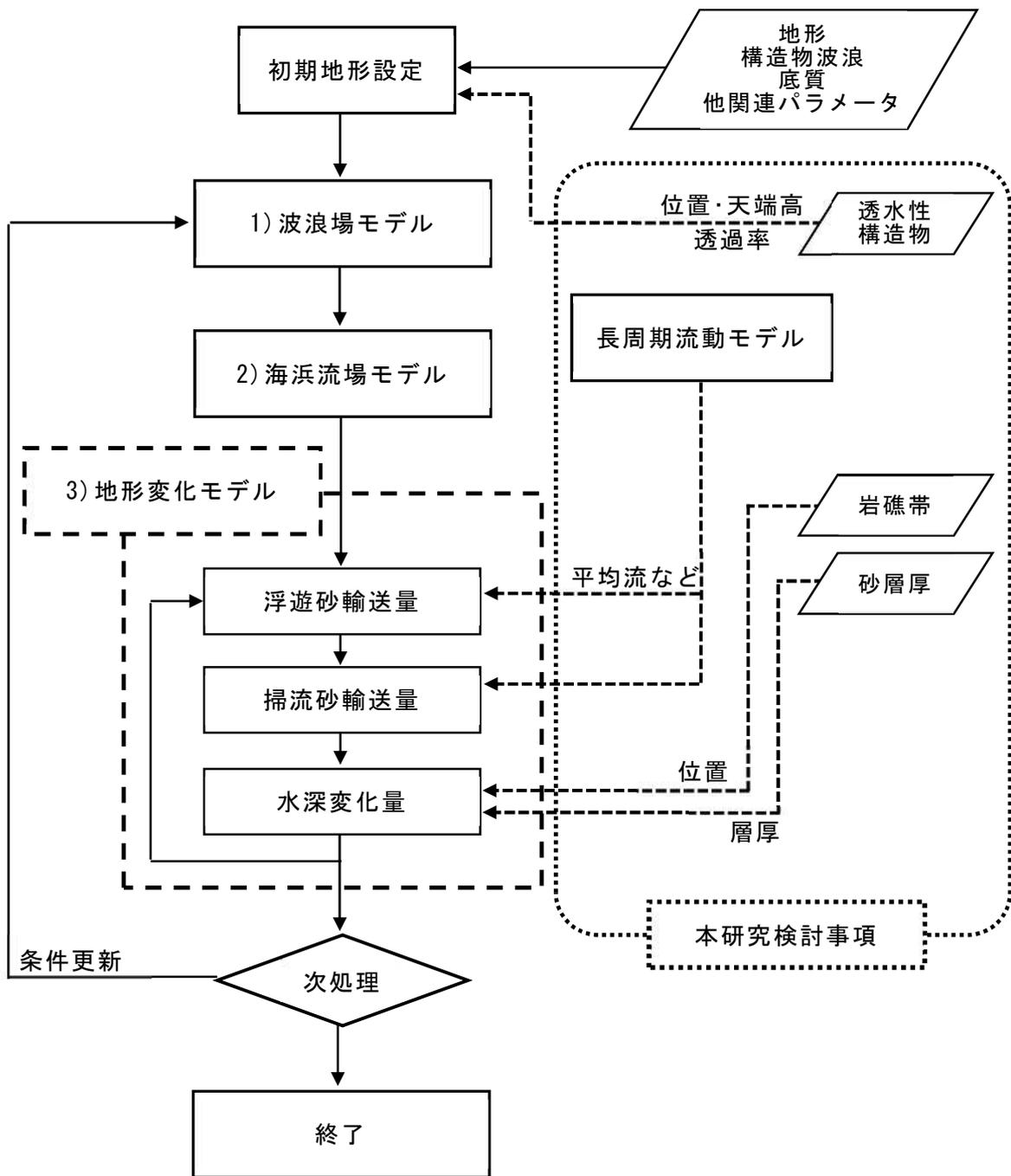


図 5.1 港内堆砂予測システムフロー

謝 辞

本研究をまとめるにあたり終始熱心にご指導を賜った鳥取大学 黒岩正光教授，太田隆夫教授ならびに梶川勇樹准教授に深甚の謝意を表します。

また，現地の状況を理解する機会を設けていただくと共に貴重なご意見やご教授を賜った鳥取県漁業協同組合各支部の皆様方，貴重なデータをご提供いただいた島根県土木部港湾空港課ならびに島根県県央県土整備事務所の皆様方に深謝の意を表します。

筆者が勤務する日本ミクニヤ株式会社の諸氏には本研究の遂行にあたり深いご理解とご助力を賜ると共に，貴重なご意見と共に終始にわたるご激励を賜りました。ここに記して深謝する次第です。

また，在学中に現地調査やデータ解析，数値計算など様々な面でご協力いただいた谷隆弘様，都倉幸太郎様に厚くお礼申し上げます。

令和5年1月