

沖縄県沿岸域における流況シミュレーション
ガイドライン

平成 27 年 3 月

沖縄県環境部

はじめに

本県は、日本列島の最西部に位置し、東西約 1,000km、南北約 400km に広がる海域に点在する大小 160 の島々からなる島嶼県である。また、本県の周辺には黒潮が流れ、その影響により、年間を通して温暖な亜熱帯性海洋性気候となっている。このような気候は、そこに生息・生育する生物にも影響を及ぼし、独特の生態系が形成されている。

本県の沿岸域においては、多様な種のサンゴ類が生息しており、その多様なサンゴ類から成るサンゴ群集、浅く波が穏やかで、砂や礫が覆う範囲に広がる海草・海藻藻場、陸に近い河口などでみられるマングローブ林などが存在し、それぞれが特徴的な生態系をつくりだしている。

近年では、県民全体で共有する沖縄の将来像を描いた「沖縄 21 世紀ビジョン」においては、めざすべき将来像の一つとして、「沖縄らしい自然と歴史、伝統、文化を大切にす島」を掲げており、その実現を図り、沖縄の自然環境を次世代に引き継いでいく取り組みが必要である。

一方、本県においては、復帰後の大規模な公共工事に伴い、埋め立てや港湾工事、護岸整備などが数多く実施され、現在においても、このような沿岸域での開発事業は進められている。

沿岸域での開発事業の実施に際しては、流況シミュレーションを基に環境への影響が予測されているが、沖縄県の沿岸域は外洋の流れの影響を受けやすく、また、サンゴ礁地形により複雑な流れが形成されるなど、本県の沿岸域の地形特性により流れが特徴付けられている。

本県の沿岸域の環境を適切に保全する上では、上述の流れの特性を踏まえた上で、沿岸域での開発事業等に伴う流況の変化を精度良く予測することが必要であり、その基本的な考え方を示すものとして、「沖縄県沿岸域における流況シミュレーションガイドライン」を策定した。

本ガイドラインでは、本県の沿岸域の流れの特性を踏まえた上で、精度よく流況を予測するにあたっての、流況シミュレーションの基本的な考え方を示している。

本ガイドラインが、埋め立て等の沿岸域での開発事業を実施する際に活用され、本県の沿岸域の環境保全に資することを期待している。

沖縄県環境部

「サンゴ礁地形に適した潮流シミュレーションモデル検討委員会」

本ガイドラインの策定にあたっては、沖縄県が委託する「サンゴ礁地形に適した潮流シミュレーションモデル構築事業委託業務」において設置している「サンゴ礁地形に適した潮流シミュレーションモデル検討委員会」の委員から指導及び助言を得た。

「サンゴ礁地形に適した潮流シミュレーションモデル検討委員会」 委員名簿

氏名	所属	専門分野
津嘉山 正光 (委員長)	琉球大学名誉教授	海岸・海洋工学、水工水理学、水産学
灘岡 和夫 (副委員長)	東京工業大学教授	水圏環境学、海岸・海洋工学、海域シミュレーション 等
仲座 栄三	琉球大学教授	水工水理学、流体工学、海岸工学、沿岸環境学 等
磯辺 篤彦	九州大学教授	水圏環境学、海洋物理学、海域シミュレーション 等

目 次

第1章	ガイドラインの概要	P. 1
1. 1	ガイドラインの目的	P. 1
1. 2	ガイドラインを適用する沿岸域	P. 2
第2章	沖縄県沿岸域に存在する流れ	P. 3
第3章	沖縄県沿岸域における流況シミュレーションの実施	P. 11
3. 1	流況シミュレーションの再現・予測対象	P. 11
3. 2	流況シミュレーションの基本的な手順	P. 12
第4章	流況シミュレーションの実施方針	P. 13
4. 1	流況シミュレーションの実施計画の策定	P. 14
4. 2	現地調査結果の解析	P. 23
4. 3	流況シミュレーションモデルの設定	P. 27
4. 4	流況再現シミュレーションの実施	P. 36
4. 5	流況予測シミュレーションの実施	P. 43
第5章	その他留意事項	P. 46
5. 1	流況シミュレーションの不確実性	P. 46
5. 2	流況シミュレーションの応用	P. 47
第6章	用語の説明	P. 48
第7章	参考文献	P. 56

第1章 ガイドラインの概要

1. 1. ガイドラインの目的

本ガイドラインは、沖縄県沿岸域で実施される埋立てをはじめとした開発事業に係る環境影響評価等を行うにあたって、沖縄県沿岸域に存在する流れの特性を踏まえた流況シミュレーションを実施するための基本的な考え方を示すものである。

【解説】

沿岸域において実施される埋立てをはじめとした開発事業（以下「沿岸域開発事業」という。）に係る環境影響評価においては、沿岸域の環境への影響を予測する手法として、流況シミュレーションが実施される。

しかしながら、外洋に面し、急峻なリーフ斜面を有することが多いサンゴ礁に囲まれた沖縄県沿岸域においては、海浜流や潮流など、サンゴ礁内やその近傍で顕著になる流れだけでなく海流の影響もサンゴ礁近くまで有意に及んでくるという特徴を有している（第2章で解説）。そのため、沖縄県沿岸域における流況シミュレーションの精度を高めるためには、このような沖縄県沿岸域の流れの特徴を考慮した上で、流況シミュレーションの実施方針を決定することが必要である。

本ガイドラインは、事業者が沿岸域開発事業に係る環境影響評価等を行うにあたって、沖縄県沿岸域に存在する流れの特性を踏まえた流況シミュレーションを実施するための基本的な考え方を示すものである。

1. 2. ガイドラインを適用する沿岸域

本ガイドラインで示す流況シミュレーションの基本的な考え方は、沖縄県沿岸域を対象とした流況シミュレーションに適用するものである。

【解説】

沖縄海域は、沖縄本島を中心とする多数の島嶼部とその周辺海域で構成されており、その沿岸域には、港湾、漁港及びサンゴ礁により形成された海岸が存在する。

本ガイドラインは、図1. 1に示す沖縄県沿岸域を対象とした流況シミュレーションに適用するものである。

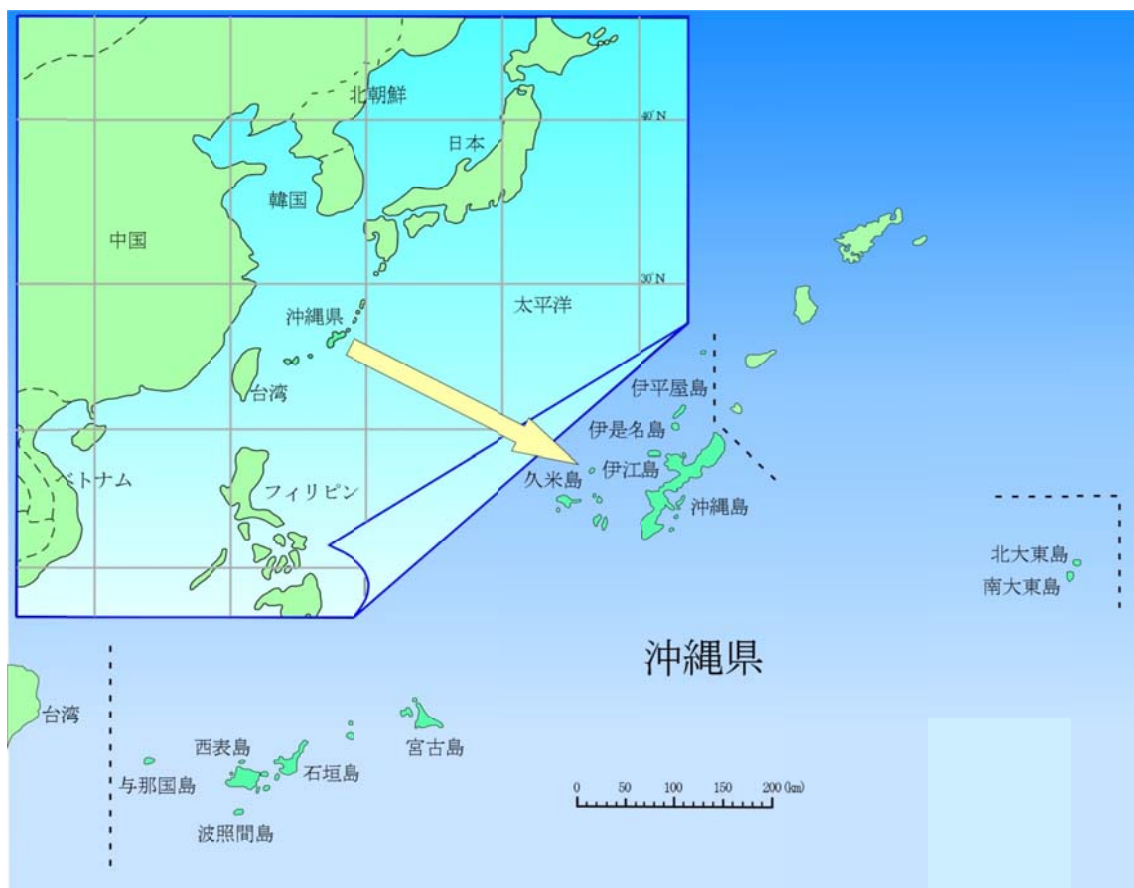


図1. 1 ガイドラインを適用する沿岸域

第2章 沖縄県沿岸域に存在する流れ

沖縄県沿岸域では、複数の流れ成分が混在して流れが形成されており、個々の流れはその駆動力に影響する気象条件（台風、低気圧）等の要因と密接に関係している。

本章では、沖縄海域の地形特性等を踏まえ、その沿岸域に存在する流れについて解説する。

【解説】

沖縄海域には、沖縄本島から西端の与那国島まで複数の島嶼が点在しており、外洋に面した地形であることから、黒潮等の海流、台風及び低気圧による波浪の影響を強く受ける。

また、各島の海岸では、多くの場合、図2.1に示すような裾礁型と呼ばれるサンゴ礁地形が発達しており、海岸近傍のサンゴ礁の礁原（以下「リーフ内」という。）においては、極浅い水深の地形が広がる。礁縁外から沖合にかけての礁斜面は、急峻な海底勾配となっており、それが外洋まで続いている。さらに、潮汐に伴う海面の上昇と下降により、礁池や礁嶺部等が干出と水没を繰り返している。

《沖縄海域の地形特性等》

- ・ 礁縁は、外洋に面しているため、海流や高波等の影響を強く受けることがある。
- ・ 礁縁外から沖合にかけての礁斜面は、海底勾配が急峻で、大水深帯へと続いている。
- ・ サンゴ礁は、浅い水深帯となっており、潮の干満により海底が干出と水没を繰り返している。
- ・ 小規模な河川が海域に流れ込んでいる。

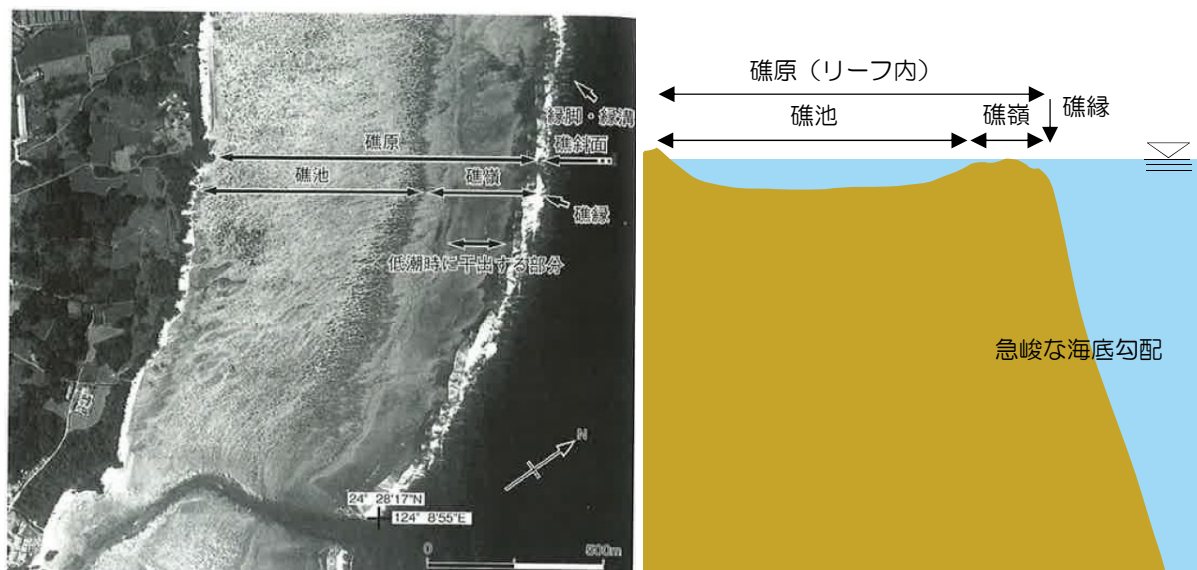


図 2.1 サンゴ礁の地形特性

(左写真：サンゴ礁学 2011年 日本サンゴ礁学会編東海大学出版会)

沖縄県沿岸域では、6つの流れが存在する。それぞれの流れの一般的な特徴と、上述の地形特性による沖縄県沿岸域の特徴を、以下にまとめる。

(1) 潮流

○一般的な特徴

潮流は、潮汐に伴って生じる流れであり、浅海域ではより顕著にみられる。開放的な沿岸域では、満潮時と干潮時に、+-の最大流速の発生時刻がほぼ一致する傾向にある。一方、閉鎖的な内湾域では、満潮時と干潮時は、流れが弱くなり、流向が変化する（転流）。上げ潮最大流速の発生時刻は、干潮から満潮に至る時間帯に生じ、下げ潮最大流速の発生時刻は、満潮から干潮に至る時間帯に生じる。

○沖縄県沿岸域の特徴

下げ潮により潮位が低下し、リーフが干出する際には、リーフクレスト（リーフの礁嶺部）で外海とリーフ内が分断され、リーフチャンネル（リーフの切れ間、リーフギャップとも言う）において、リーフ内から外海へと向かう強い流れが局所的に生じる。

一方、上げ潮により潮位が上昇するとともに、リーフチャンネルでは、外海からリーフ内へと向かう流れが発生し、流速が急激に増加する傾向がある。潮位がリーフクレストの地盤高を越える満潮の際には、リーフ全体で外海からリーフ内へと向かう流れが発生する。また、リーフ外の沿岸域では、満潮時と干潮時に、+-の最大流速の発生時刻がほぼ一致する開放的な沿岸域の特徴を示す。

(2) 潮汐残差流

○一般的な特徴

潮汐残差流は、図2. 2に示すような潮流が往復する海域において、島、岬及び防波堤等の人工構造物が存在する地形の周辺海域に生じる一定方向の流れ（平均的な流れ）として定義され、片潮と呼ばれることもある。

潮汐残差流は、海岸地形や水深の起伏によって渦度（流体粒子の自転速度を表す量）が発生し、この渦度が集積し、規模を拡大して発達することにより生じる。大潮から小潮の15日間程度の潮流の変動に準じて、流れの強さが変動し、上層から下層まで一様な流向・流速となる場合が多い。

○沖縄県沿岸域の特徴

沖縄県沿岸域のリーフ内では、満潮時にリーフ内へ流入し、干潮時にリーフチャネルのみから速い流速で流出する等、リーフ地形により制約された一方向の潮流（片潮）が生じる。このような流れは、リーフ地形に影響を受けて発生する潮汐残差流に分類される。ただし、このようなリーフ内の流動パターンは、(4) 海浜流の項に記述するメカニズムによるものがほとんどであり、潮汐残差流としての成分は比較的小さいことが多い。

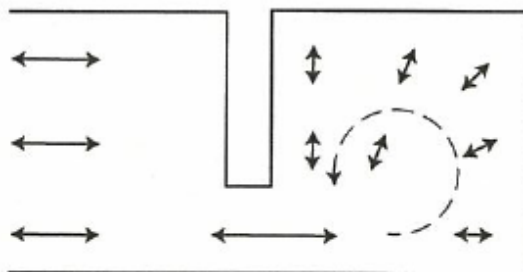


図2. 2 潮流（実線）と潮汐残差流（破線）の概念図
（引用 沿岸海洋学 ー海の中でものはどう動くかー、柳哲雄著）

(3) 海流

○一般的な特徴

図2. 3に示す黒潮及びその分枝流により生じる外洋から沿岸域にかけての流れであり、風応力等により変動する。周辺海域に黒潮等の海流が存在する場合、その分枝流が島の周辺に近づくと、沿岸域の流れに強く影響を与える。

また、外洋に存在する中規模渦は、北半球においては西方向に移動することが知られており、高気圧性の渦（時計回りの渦）と低気圧性の渦（反時計回りの渦）に分類される。外洋を移動する高気圧性の渦の中には暖水塊が、低気圧性の渦の中には冷水塊が存在し、この暖水塊と冷水塊が沿岸域を覆うと、島周辺の平均海面の上昇と低下をもたらすとともに、海域の水温を急激に上昇又は下降させる。このような現象は、外洋に面する沿岸域において発生しやすい。

○沖縄県沿岸域の特徴

沖縄県沿岸域は、多くの場合、外洋に直接接しており、しかも礁射面が急峻なために、リーフ外の流れは海流の影響を受けやすい。一方、リーフ内の流れは海流の影響をほとんど受けない。

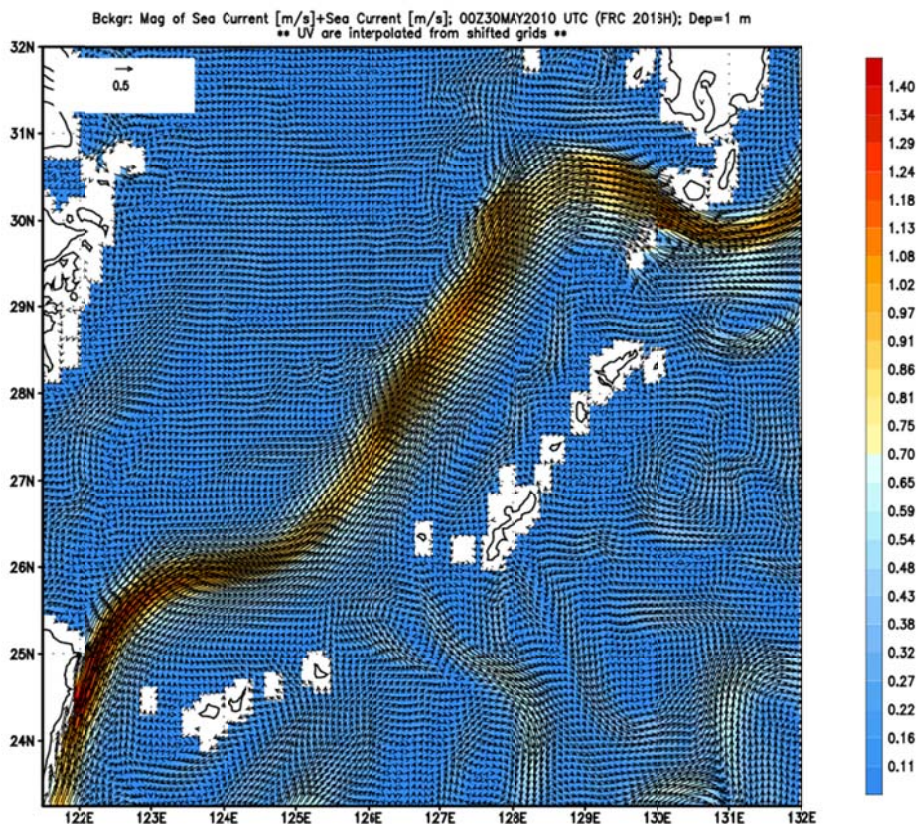


図2. 3 JCOPEによる2010年5月23日の海流の事例

(Miyazawa, Y, and T. Yamagata, 2003: The JCOPE ocean forecast system, First ARGO Science Workshop, November 12-14, 2003, Tokyo, Japan.

<http://www.jamstec.go.jp/frsgc/jcope/htdocs/topics/topics031112/poster031112.pdf>)

(4) 海浜流

○一般的な特徴

海浜流は波浪応力 (Radiation Stress) に起因する流れである。砕波点近傍では、波が砕けることにより波高が急減し、それに伴って波浪応力も大きく変化するため、波浪応力の空間勾配によって決まる正味の波浪応力が岸向きに大きく作用する。その結果、海岸近傍において平均水位の上昇 (Wave Set-up) が生じる。その上昇量は砕波高にほぼ比例するため、砕波高が沿岸方向に異なる状況では、平均水位の沿岸方向勾配が生じ、それが駆動力となって沿岸方向に海浜流が発生する。例えば、離岸堤等の人工構造物背後の遮蔽域では、砕波高が小さくなるため平均水位上昇量が周辺の非遮蔽域と比べて小さくなり、その結果、遮蔽域の海岸近傍に向かう平均水位の沿岸方向勾配が形成され、それが駆動力となって背後域に向かう海浜流が発生する。砕波高が沿岸方向に一様な場合でも、波が海岸に斜めに入射する場合には、砕波後の波浪場において沿岸方向への正味の波浪応力が生じ、それによって沿岸方向の海浜流 (沿岸流) が発生する。

図 2. 4 に海浜流の概念図を示す。

○沖縄県沿岸域の特徴

サンゴ礁地形では、沖合からリーフ外縁にかけて急峻な海底勾配となっており、低潮時に干出するほど浅い礁嶺部につながっていることから、外洋からの入射波はリーフ外縁に向けての急激な浅水変形を経て砕波し、礁嶺付近で急激な砕波減衰が生じる。そのため、上記の砕波減衰に伴う岸向きの正味の波浪応力が、砕波後の狭い空間で集中して作用する形になり、それに対応して、礁嶺付近において平均水位上昇がリーフ内に向けて急激に発生する形になる。一方、礁嶺部の切れ目であるリーフチャンネルでは、礁嶺付近での上記の急激な砕波減衰が生じないため、上記のメカニズムによるリーフ内の水位上昇量は小さくなる。そのため、礁嶺部のリーフ内からチャンネル部のリーフ内に向けて沿岸方向の水位勾配が生じ、それが駆動力となって、リーフチャンネルに向かう流れが形成される。礁嶺部からリーフ内奥部まで達するような大規模チャンネルの場合には、チャンネル部水深がかなり大きく、砕波しないことから、上記の平均水位上昇のコントラストがより明瞭になり、大規模チャンネルに向かう海浜流が、より広範囲に、より大きな流速で発生する形になる。



(引用 沿岸の海洋物理学、宇野木早苗著)

図2.4 海浜流の概念図

(5) 吹送流

○一般的な特徴

吹送流は海上風の風応力に起因する流れであり、海上風が海面を吹く際に海面の表層に作用するせん断応力により表層水が風下側に移動することにより生じる。

吹送流は、海面近傍において流速が強く、水深が深くなるとともに流速が弱くなる鉛直分布構造を有する。初期の吹送流の流向は、風向とほぼ一致する。海上風が一定時間継続的に作用すると、吹送流の流向は、地球の自転効果により徐々に変化し、北半球では水深とともに時計周りに変化する傾向にある。

○沖縄県沿岸域の特徴

沖縄県は、年数回の頻度で台風が来襲し、また、冬季には1週間に1度程度の頻度で移動性の低気圧が通過しており、これら気象擾乱に伴い、海上風が強くなることに併せて吹送流が強くなる。また、気象擾乱時(台風時、低気圧時)には、潮位偏差に起因する高潮による流れも、海上風の直接的な作用により生じる流れよりも弱いながら生じる。

(6) 密度流

○一般的な特徴

密度流は、密度差によって駆動される流れであり、密度差は水温や塩分の差により生じる。典型的なものとして、河口部の塩分差による密度流（河口密度流）が挙げられる。河川水が流入するような地形では、降雨時及び降雨後に河川から流出する淡水の量が増大し、沿岸域へ流出した淡水は、海域の表層で広がり、河口付近では密度成層が形成される。この場合、河口付近では表層は淡水が流出し、下層は外海水が流入するような密度流が生じる。

図2. 5は、淡水と外海水の混合が弱い場合の河口密度流の模式図を示す。

○沖縄県沿岸域の特徴

沖縄県沿岸域のように、流域面積の小さい河川が流入するような地形では、降雨時に河川から流出する淡水の量が短時間で急激に増大する。沿岸域へ流出した淡水は、海域の表面の薄い層で広がり、下層は外海水が流入し、河口付近では密度成層が形成される。

その他、水温差に起因する密度流も、相対的に流速は小さいながら生じる。

沖縄県沿岸域では、潮汐に伴い海面が下降することによりリーフが干出し、リーフ内の礁池のように浅い水深帯の水塊や、干出した地盤そのものが日射により温められることとなる。これらの水塊及び地盤は、満潮になる過程で水没し、熱源となって周辺の海水温を上昇させる。この水温上昇により、リーフ内および周辺域に海水温の空間的なコントラストが形成され、それが密度流の駆動力となることも考えられる。ただし、他の流れの駆動要因に比べると微弱と考えて良い。

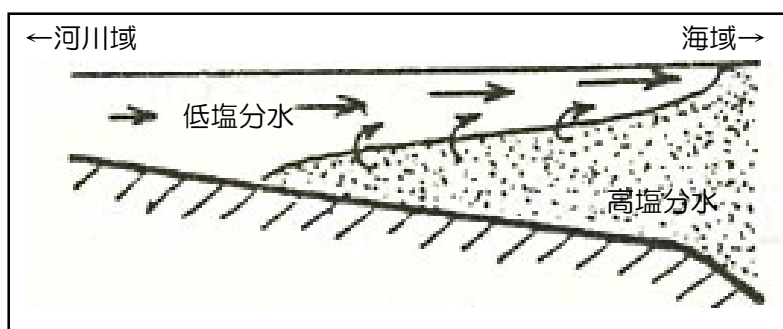


図2. 5 密度流の概念図

(引用 沿岸の海洋物理学、宇野木早苗著)

沖縄県沿岸域には、以上のように地形特性等により特徴付けられた流れが存在し、表2. 1及び図2. 6のとおりまとめられる。

表2. 1 沖縄県沿岸域に存在する流れ

流れ	説明
潮流	潮汐に伴い生じる流れ
潮汐残差流	潮流が海岸地形や水深の凹凸に影響を受けることにより生じる平均的な流れ
海流	黒潮（その分枝流を含む）、中規模渦等の外洋の流れの影響により生じる流れ
海浜流	波浪応力の空間勾配により生じる流れ
吹送流	風応力により海面の表層に生じる流れ
密度流	河川水の流入（淡水流入）等により生じる流れ

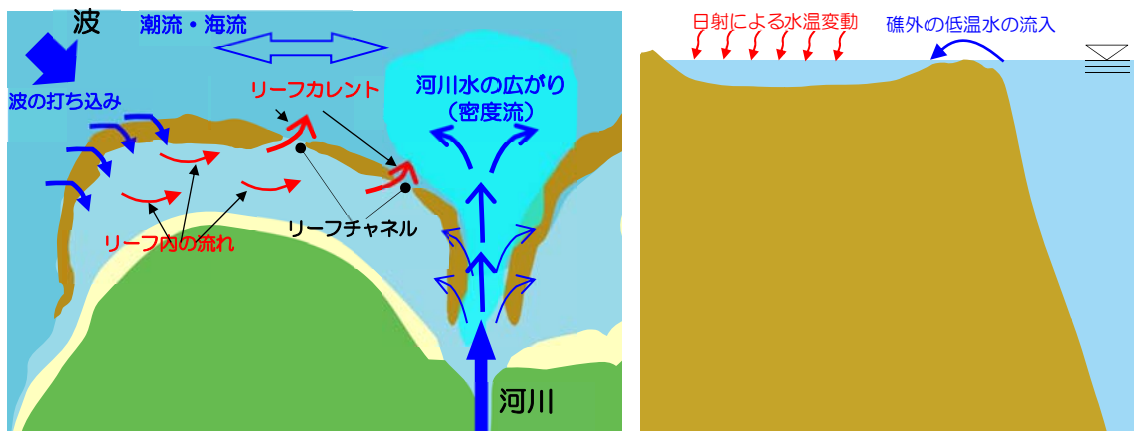


図2. 6 沖縄県沿岸域に存在する流れ

第3章 沖縄県沿岸域における流況シミュレーションの実施

3. 1 流況シミュレーションの再現・予測対象

本ガイドラインで解説する流況シミュレーションは、「潮流」、「潮汐残差流」、「海浜流」、「吹送流」、「密度流」、「海流」及び「水温・塩分」を再現・予測することを前提とする。

【解説】

沿岸域の流れは、潮汐に伴って生じる「潮流」及び「潮汐残差流」と、「海浜流」、「吹送流」、「密度流」、「海流」で構成されている（表3. 1）。

これらの流れを精度良く再現・予測するためには、対象沿岸域※の流況を構成する流れ成分を考慮した上で、再現・予測対象とする流れ成分を選定する必要がある。

※当該ガイドラインにおける「対象沿岸域」は、第4章において後述するシミュレーションの最小格子領域を指す（P. 27 参照）。

表3. 1 沿岸域の流れと駆動力の要因との関係

沖縄県沿岸域に存在する流れ (第2章参照)	駆動力の要因
潮流	起潮力
潮汐残差流※1	起潮力 地形や構造物の存在
海浜流	波浪応力 波による水位上昇
吹送流	海上風による風応力
密度流	海面熱収支（日射等）による水温密度差 淡水流入（河川流入等）による塩分密度差
海流 (黒潮等、中規模等)	海上風による風応力等※2

※1 潮汐残差流は、潮流成分のうち、25 時間移動平均等により残る成分である。

※2 流況シミュレーションでは、海流の情報を沖側境界に直接設定することで計算領域内に海流を取り込む。ただし、計算領域内における風応力等による海流の変動は計算する。

3. 2 流況シミュレーションの基本的な手順

本節では、流況シミュレーションの基本的な手順を示す。

【解説】

流況シミュレーションの基本的な手順は図3. 2のとおりである。

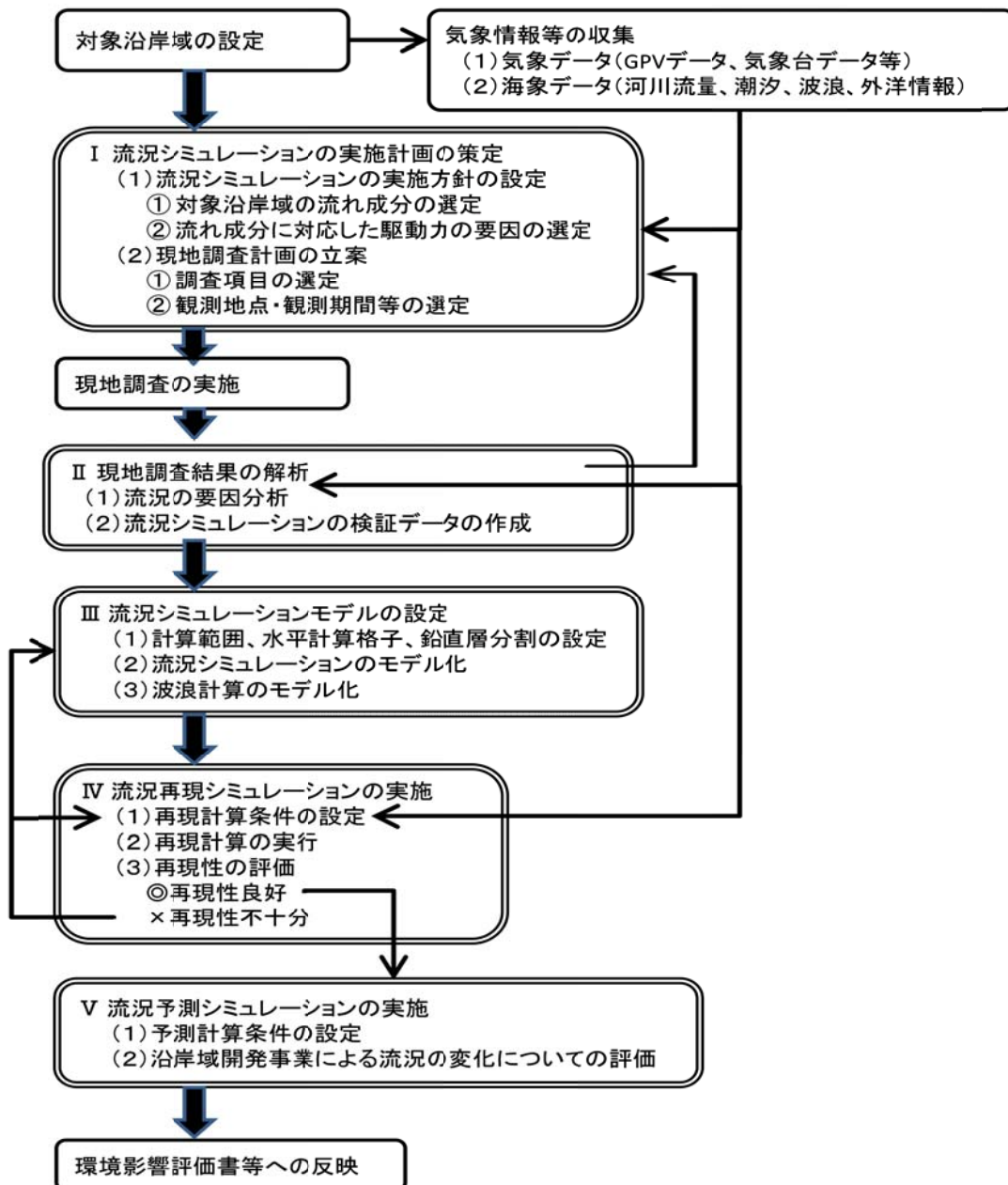


図3. 2 流況シミュレーションの基本的な手順

第4章 流況シミュレーションの実施方針

本章では第3章で示した流況シミュレーションの基本的な手順に従い、個別の手順について解説する。

- | | |
|------------------------|--------------------|
| I 「流況シミュレーションの実施計画の策定」 | ⇒ 4. 1 (P. 14) で解説 |
| II 「現地調査結果の解析」 | ⇒ 4. 2 (P. 23) で解説 |
| III 「流況シミュレーションモデルの設定」 | ⇒ 4. 3 (P. 27) で解説 |
| IV 「流況再現シミュレーションの実施」 | ⇒ 4. 4 (P. 36) で解説 |
| V 「流況予測シミュレーションの実施」 | ⇒ 4. 5 (P. 43) で解説 |

4. 1 流況シミュレーションの実施計画の策定

本節では、流況シミュレーションの実施計画の策定にあたっての基本的な考え方について解説する。流況シミュレーションの実施計画の策定に際しては、以下の2つの項目について検討する。

(1) 流況シミュレーションの実施方針の設定

対象沿岸域の流れ成分の選定、流れ成分に対応した駆動力の要因の選定

(2) 現地調査計画の立案

調査項目の選定、観測地点・観測期間等の選定

【解説】

(1) 流況シミュレーションの実施方針の設定

第2章で述べたように、沿岸域に存在する流れは、沖縄海域の地形特性等により特徴付けられている。そのため、流況シミュレーションで対象沿岸域の流況を精度よく再現・予測するためには、対象沿岸域及びその周辺域の地形等を把握した上で、対象沿岸域において再現・予測対象とすべき主要な流れ成分（通常、複数成分）を事前の検討によってある程度選定しておき、各流れ成分の駆動要因の対応関係を十分理解しておくことが必要である。

これらの選定結果を踏まえ、現地調査計画を立案していく。

(2) 現地調査計画の立案

現地調査については、(1)において選定した各流れ成分の流況やその駆動力の要因に関する情報が適切に把握できるよう、調査計画を立案する必要がある。そのためには、「流動や駆動要因の空間的な分布構造の特徴を把握する上で十分な観測地点配置とすること」、「対象とする各流れ成分の変動過程を十分把握できるように連続観測期間を確保すること」、「流況シミュレーションの目的に応じた現地調査計画を立案すること」が重要である。

以下1)～5)に現地調査計画の立案の方針を示す。これらの方針を踏まえ、現実的に実施可能な範囲で、調査期間、調査項目、調査地点等を設定し、調査計画を策定する。なお、現地調査の解析結果によっては、調査計画の見直しもあり得る。

1) 調査項目

対象沿岸域では、「水位」、「流況」、「水温」、「塩分」、「波浪」及び「海上風」を調査し、対象沿岸域に流入する河川がある場合には、「河川流量」を調査する。

また、サンゴ礁や干潟等の極浅海域では、既往の地形データ（水深データ）がない場合があり、必要に応じて「水深・地盤高」を測量する。

2) 調査時期

高温期や低温期および台風・低気圧等の気象擾乱期の流況の変化を把握するため、夏季、冬季、気象擾乱期等の代表時期において現地調査を実施する。

3) 観測期間

潮汐及び潮流については、15 昼夜の変動（小潮～大潮～小潮）を把握できるよう観測期間を設定する。

海流については、外洋の流れの変動周期を把握できるよう観測期間を設定する（数週間程度の観測期間が考えられる。）

海浜流については、気象擾乱時（台風及び低気圧）の高波に伴う流れの変動を把握できるよう観測期間を設定する（例えば、1 ヶ月程度の観測期間が考えられる）。

吹送流については、低気圧の移動に伴う海上風の変化による影響を把握できるよう観測期間を設定する（例えば、1 週間程度の観測期間が考えられる）。

密度流については、出水時の影響を把握できるよう観測期間を設定する（例えば、1 ヶ月程度の観測期間が考えられる）。

※計画した観測期間中に必ずしも台風等の影響を捉えることができるとは限らない。その場合、既往の現地調査結果で代用することも手段の一つである。

4) 観測地点

対象沿岸域の代表的な流況を捉えられるよう観測地点を設定する。

例えば、地形形状、礁内水位分布、季節風、流況、河川、波浪、外洋の影響等を鑑み、代表的な観測地点を設定する。

また、対象沿岸域の海流及び海浜流を把握するには、外洋における流況調査及び波浪調査を実施する。

5) 観測層

流況観測は多層を基本とし、浅海域では海底設置型流速計によって底面近傍で観測する。

また、日射や海流により生じる水温成層構造を把握するため、水温及び塩分について鉛直方向に多層観測を行う。

河口部付近においては、河川から淡水が流出し、海域の表面に広がることにより密度流が生じるため、上層における流況、水温及び塩分を把握できるよう観測層を設定する。

表4. 1 (1) に現地調査計画の立案において考慮する事例をまとめる。

表4. 1 (1) 現地調査計画の立案において考慮する事例

項目	内容
①現地調査範囲の設定	沿岸域から沖側海域までの範囲について、一体的に現地調査を実施する。
②測点の設定について	沿岸域の流況は、局所的な地形の影響を強く受けるため、流速計の設置位置は、局所的な地形による影響を受けにくい代表的な位置とする。
③水深データの測量範囲について	サンゴ礁のような複雑な地形では、地形データの精度が流況シミュレーションの精度に大きく影響するため、必要に応じて深浅測量等を行う。その際、対象沿岸域のリーフチャネル（リーフの切れ間、外洋と繋がる部分）付近の地形を把握できるように、測量範囲を広く設定する。
④深浅測量の測定点について	深浅測量に際しては、測定位置及び測定時刻と水深値を関連付ける。また、リーフエッジ、リーフチャネル（外洋と繋がる部分）、ワタンジ（岸から礁嶺に続く干潮時に干出する浅い地形）等については、流況の再現に重要な地形であるため、十分に留意する。
⑤礁外の波浪観測について	礁外からの入射波浪が礁内の波浪や流動に影響するため、礁内のみを対象とするシミュレーションであっても、礁内だけでなく礁外においても波浪観測を行い、シミュレーションの計算結果の妥当性を確認することが望ましい。
⑥大水深の流況観測について	水深が数 10m 以上でダイバーが潜れない水深帯の流況観測では、切り離し装置等を使用することが考えられる。また、ADCP を使用する場合、観測地点の水深に応じた測定分解能を有しているか確認する。
⑦航行式の流況観測について	礁外の流況観測では、定点観測とともに、ADCP 等を装着した船を用いた航行式の観測により平面的な流況観測も並行して行うことも有用である。これにより、平面的な流況を確認することができる。
⑧航行式の流況観測の測線について	航行式の流況観測では、想定される主要な流れに直交する形に測線を配置するパターンを中心に測線設定を行う。
⑨河川の定点流況観測について	出水時の河川流量を把握するため、河口付近及び潮汐変動の影響が顕著でない地点において定点流況調査を行う。また、観測期間は出水時を含むよう設定する。
⑩河口部の航行式の流況観測について	河口部付近の航行式の流況観測では、河川からの淡水流入に伴う密度流を観測するため、測線に留意する。測線例として、河口から沖向きに測線とそれに直交する測線を組合せた T 字状の地点を設定する。

⑪ 河川流量の推定方法について※	河川の定点流況調査では、水位計と電磁流速計を用いて H-Q 曲線を作成する。これにより、水位 H に対する流量 Q を推定することができる。
⑫ 河川流量への潮汐の影響について※	河川流量の測定は、潮位変動が影響する感潮域よりも上流で行うことが考えられる。ただし、それよりも下流区間での流入流量を含めて河川流量全体を把握するために感潮域で測定を行う場合、出水後に短時間で河川流量が減少し、潮流の影響により流量が大きく変化することを鑑み、順流と逆流を断面的に分類できる計測機器を用い、出水前後の流量の変化を測定する。
⑬ リーフ内の水位観測のサンプリング間隔について	リーフ内の水位は、複数地点において観測し、リーフ内の流れの主要因である平均水位勾配を解析する。波浪による水位の細かい変動を除去した数分程度の水位変動が確認できるようにサンプリング間隔を設定する。
⑭ リーフ内の水位観測の精度について	リーフ内の水位観測では、波高計を用いることで、水位の短周期の変動も測定することが可能となる。また、簡易水位計を用いる場合でも、可能な限り測定時間の間隔を短くする。
⑮ 基準高さの測定について	水位観測の基準面については、必要に応じ基準点測量を行い、水位観測結果の精度を担保する。
⑯ 水温鉛直分布の観測について	外洋からの海水の移動と、内部波、内部潮汐等により、下層において水温が急変する現象（例えば、数分から潮汐周期で水温が数℃昇降する）がしばしば起こる。その現象の有無の確認や要因分析のために係留式による水温鉛直分布の連続観測（15 日～1 か月程度）を行うことが望ましい。
⑰ 水温鉛直分布の観測精度について	水温の鉛直分布を連続観測するために水温係留系を設置する際には、係留系の傾きの影響を把握するため、係留系の上層部分に水圧計を設置し、水深を確認する。
⑱ 塩分測器の維持管理について	塩分の時系列の測定にあたっては、測定機器への生物付着に注意し、必要に応じて、センサーの清掃等のメンテナンスを行う（例えば、1～2週間以程度に1回以上の頻度）。特に、水質があまり良くない海域や生物活動が活発になる夏季はメンテナンス間隔を短くすることが望ましい。

※河川流量の測定では、河川横断面内の流速分布の非一様性のゆえに点計測流速値によって断面内の流速を代表させることには困難が伴ううえ、感潮部では、そもそも、水位 H と流量 Q の間に 1 対 1 対応が成り立たないという問題がある。計測の計画立案に当たってはこれらの点に十分留意する必要がある。

⑱ 波浪の観測地点について	波浪観測地点の選定においては、周辺地形による波の遮蔽の影響を回避できる地点において実施する。特に外洋からのサンゴ礁への入射波の観測をリーフ斜面で行う際、圧力式波高計を用いる場合には、波の短周期成分の水深方向の減衰効果を考慮して、10 数 m の水深を目安に観測地点を設定する（10m 以浅の地点だと台風等の大時化の際に測器亡失のリスクがかなり高くなる）。超音波式波高計を用いる際には、高波浪時の砕波に伴う多量の気泡混入に起因する欠測を避けるため、やや沖側の水深 20～30m 地点を目安に観測地点を設定する。
⑳ 海上風の観測について	対象沿岸域における海上風（特に、陸地に近い海域の風向・風速）の推定精度を高めるため、対象沿岸域周辺における気象観測所の風データを収集する。観測所は、流況シミュレーションに入力する海上風として適すると考えられる地点を選定する。（ある程度内陸に位置する観測所のデータは、海上風に比べて風速がやや小さくなる傾向にあることに注意する必要がある。）なお、複数地点のデータが得られる場合、空間補間によって海上風の分布を考慮できる。海域近傍に観測所が無く、海上風に適するデータがない場合、対象沿岸域の海上風を現地で観測することも手段の一つとなる。海上風の観測結果は、流況シミュレーションに直接利用することができる。

（1）、（2）の内容及び表4. 1（1）の考慮する事例を踏まえ、表4. 1（2）に調査項目の設定例を、表4. 1（3）に観測地点の設定方針例を示す。また、図4. 1に観測地点及び観測層の設定例を示す。

表4. 1（2）においては、通常時に実施する調査、気象擾乱時（台風及び低気圧来襲時）に実施する調査及び出水時に実施する調査に分類している。

なお、現地調査計画の立案に際しては、再現・予測対象とする流れ成分に応じて、調査項目、調査地点等を選択する。

表4. 1 (2) 現地調査計画の立案における調査項目の設定例

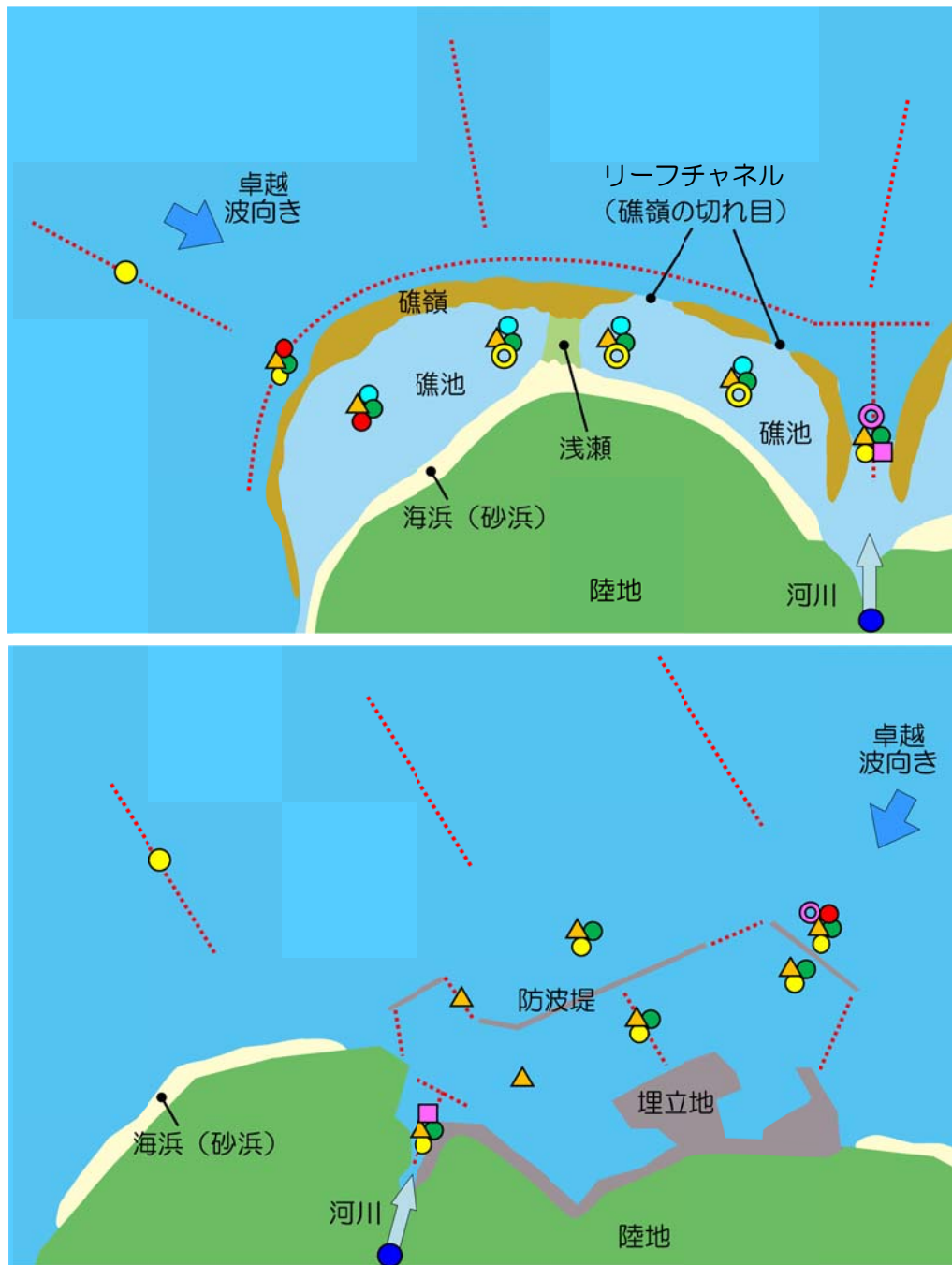
調査種類	調査項目	調査細目
深浅測量調査 (通常時)	水深・地盤高	<ul style="list-style-type: none"> 地形の変化を把握できる測量幅及び測点間隔 (例：礁内：50m、礁嶺等の形状が複雑な箇所：25m)
連続調査 (通常時・気象 擾乱時(出水時 含む))	沿岸域流況(定点)	<ul style="list-style-type: none"> 多層又は底層での連続観測(流向・流速)
	外洋流況(定点)	<ul style="list-style-type: none"> 外洋における多層連続観測(流向・流速)
	水位	<ul style="list-style-type: none"> リーフ内の複数地点で測定 水圧計、波高計による連続観測(水位)
	波浪	<ul style="list-style-type: none"> 波浪計による連続観測(波高・周期・波向)
	水温・塩分 (水温・塩分計を用 いた海域側の観測)	<ul style="list-style-type: none"> 上層、中層、下層での連続観測(水温・塩分)
	水温 (水温計を用いた多 層観測)	<ul style="list-style-type: none"> 水温計による多層観測(15 昼夜以上連続観測) 外洋の影響を受ける観測点 河川流の影響を受ける観測点
鉛直分布調査 (通常時)	水温・塩分 (水温・塩分計を用 いた河口部の観測)	<ul style="list-style-type: none"> 主要河川の河口部の連続観測(水温・塩分) 上層、下層(水深が大きい場合は中層も設定)
	水温・塩分 (吊り下げ式の水 温・塩分計を用いた 多層観測)	<ul style="list-style-type: none"> 吊り下げ式の水溫・塩分計(水質計)による海面から海底までの測定(0.1~0.5m 間隔) 連続調査の測器設置時、点検時、回収時に実施
流況航行調査 (通常時)	流況(測線)	<ul style="list-style-type: none"> 外洋、沿岸域の流況の空間分布観測
河川流量調査 (出水時)	河川流量	<ul style="list-style-type: none"> 主要河川を対象に実施 水位流速計による連続観測(水位・流速)
海上風調査 (通常時)(気象 擾乱時)	海上風	<ul style="list-style-type: none"> 対象沿岸域内の任意点で実施 風向・風速計による連続観測(例：10 分間平均値)

表4. 1 (3) 現地調査計画の立案における観測地点の設定方針例

調査種類	調査項目	観測地点の設定方針例
深浅測量調査	サンゴ礁域の水深・地盤高	<p>沿岸方向： リーフ内全域を対象に、浅瀬（例えば、ワタンジ）の高さ等についても実施する。</p> <p>岸沖方向： チャンネル等の深さが把握できる範囲で実施する。礁外における海図等のデータが存在する範囲まで実施することが望ましい。</p>
連続調査	沿岸域流況（定点）	リーフ内外及び対象沿岸域の代表的な水域と通水箇所複数の観測地点を設ける。また、防波堤、浅瀬、河口等の特徴的な地形の周辺にも観測地点を設け、観測地点の水深が浅い場合は底層のみの流速観測とする。
	外洋流況（定点）	対象沿岸域の沖合で、局所的な地形の影響を受けず外洋の潮流や海流が観測できる地点に設ける。観測地点の水深は、対象沿岸域の水深より大きくなるよう考慮することが望ましい（例えば、100m 程度の水深）。
	水位	Wave Set-up による水位上昇等、対象沿岸域の平均水位分布を確認できるよう、リーフ内の複数の観測地点を設ける。特に、浅瀬（例えば、ワタンジ）の周辺での平均水位勾配が確認できるように観測点を設ける。なお、波高計で水位も計測することができる。
	波浪	対象沿岸域に来襲する卓越波向の上手側で、沖側の水深は、観測される最大有義波高が砕波しない程度の地点が望ましい（例えば、超音波式波高計の場合は水深 20~30m 地点に、水圧式波高計の場合は 10 数 m 程度の水深帯に観測地点を設ける）。また、周辺地形による波の遮蔽の影響を回避する。
	水温・塩分 （水温・塩分計を用いた海域側の観測）	沿岸域流況の観測地点を含む複数地点が望ましい。なお、上層（海面下 1m 程度）・中層（水深の 1/2 程度）・下層（海底上 1m 程度）において観測する。
	水温 （水温計を用いた多層観測）	外洋や礁外の流況の影響を受ける地点において、多層の水温観測を行う。観測層の間隔は、水温成層及び外洋から沿岸域に移動する水塊の状況が確認可能となるよう設定する（例えば、2m 以下程度の間隔）。

	水温・塩分 (水温・塩分計を用いた河口部の観測)	対象沿岸域に流入する河川の河口部に設置する。観測は、流況観測と同時に実施し、上層(海面下0.5m程度)、下層(海底上1m程度)において観測する。
鉛直分布調査	水温・塩分 (吊り下げ式の水 温・塩分計を用いた 多層観測)	流況、水温、塩分の連続観測と同一地点を観測地点とする。観測層の間隔は、密度成層が表現できる程度とする(例えば、0.1~0.5m程度とする。)
流況航行調査	流況(測線)	外洋域は、対象沿岸域に平行する流れに直交する測線、リーフ地形に平行する測線、リーフ内及び対象沿岸域内と外洋が通じる海域の測線等を設定する。 測線長は、調査船の測定時の航行速度に、航行の継続時間に乗じた距離とする(継続時間は30分程度が考えられる)。また、河口部では、河川から淡水が放射状に流出する現象を確認できるように、河口から沖側に向かう測線及びそれに直交する測線を設定する。
河川流量調査	河川流量※	対象沿岸域周辺に流入する河川の低水路において、水位計及び流速計を設置する。観測地点は、潮汐の影響が顕著に及ばない地点に設置する。
海上風調査	海上風	対象沿岸域の海上風の観測に適する周囲に障害物のない地点とする。また、海面から適切な高度を確保する(例えば、10m以上の高度とする)。

※河川流量の測定では、河川横断面内の流速分布の非一様性のゆえに点計測流速値によって断面内の流速を代表させることには困難が伴ううえ、感潮部では、そもそも、水位Hと流量Qの間に1対1対応が成り立たないという問題がある。計測の計画立案に当たってはこれらの点に十分留意する必要がある。



<p>時系列調査</p> <ul style="list-style-type: none"> ●: 沿岸域・外洋流況 (定点多層) ●: 沿岸域流況 (定点下層) ●: 波浪 ●: 水温・塩分 (海域: 上層・中層・下層) ■: 水温・塩分 (河口部: 上層・下層) ○: 水位 (水圧計) ○: 水温 (多層: 鉛直 2m 間隔) 	<p>鉛直分布調査 (0.1~0.5m 間隔)</p> <ul style="list-style-type: none"> ▲: 水温、塩分 ●: 河川流量調査 <p>※時系列調査の測器設置時、点検時、回収時に実施</p> <p>..... 流況航行調査 ※潮時別に複数回実施</p>
--	---

図4. 1 現地調査計画の立案における観測地点及び観測層の設定例

4. 2 現地調査結果の解析

本節では、現地調査結果の解析にあたっての基本的な考え方について解説する。

現地調査結果の解析に際しては、以下の2つの項目について検討する。

(1) 流況の要因分析

(2) 流況シミュレーションの検証データの作成

【解説】

(1) 流況の要因分析

一般的に、対象沿岸域の流況の変動は、複数の流れ成分の流況の変動に起因していることから、変動の要因を特定することは容易ではない。しかしながら、現地調査により得られた流況の時系列データから変動傾向を抽出し、気象及び海象情報の変動との関連性を解析し、変動の要因を分析することは可能である。例えば、流況の変動と、気象及び海象情報の変動が同様の傾向を呈する場合は、それらの気象、海象変動が流況の変動要因であることがある程度推定できる。

表4. 2 (1) に、流況の要因分析において考慮する事例をまとめる。

表4. 2 (1) 流況の要因分析において考慮する事例

項目	内容
①リーフエッジの地盤高の精度について	砕波帯周辺で深浅測量が困難な箇所の地形形状が、リーフ内の水位変化や伝達波高に影響する可能性があるため、計測精度が担保されていない場合は、シミュレーションによりリーフエッジ等の浅い水深帯及びリーフクレスト周辺の地盤高の感度分析を行うことで、地形形状の影響を確認する。
②深浅測量結果の潮位補正の方法について	リーフ内の超音波式測深器による水深測量結果に潮位補正を行う場合、近隣の験潮所における潮位記録を基準にすると、水深値に誤差が生じる可能性がある。リーフ内の潮位を同時に計測し、測量結果と調査時間を基に潮位補正を行う。
③リーフ内の水深設定について	リーフ内にワタンジ等の浅瀬が存在する場合、潮位が低下する時間帯においては浅瀬を挟んで水位差が生じるため、ワタンジ周辺の水深の設定には注意を要する。
④鉛直水温変動の解析について	沖縄県沿岸域では、外洋の影響により、下層に水温変動が生じる可能性があるため、水温変動を時間的・空間的（鉛直方向も含む）に解析することで要因の分析を行う。
⑤鉛直水温変動の成分について	水温が時系列で急変する現象については、水温変動の半日及び日周期等の成分を分離し、要因を確認する。潮流や日射以外の比較的長い周期の水温変動がみられる場合、25 時間移動平均によりそのトレンドを抽出することができる。
⑥密度の変動の解析について	密度の変動だけでなく、水温、塩分の変動を別々に解析することも必要である。これにより、水塊の移動が外洋からの影響で生じているのか、潮汐による影響か、河川流量等による影響により生じているのかを推定することができる。
⑦河川流量の推定について	河川流量の現地調査が実施できない場合は、降雨一流出モデル等を利用し、降水量から河川流量を推定する。また、既往の調査資料がある場合、それを参考に河川流量を設定することも考えられる。
⑧波浪観測の解析について	観測波浪は、複数の波向成分が混在しており、波向の時系列変化が滑らかでないことがある。方向スペクトル解析等を行い、外洋からの入射波と、対象沿岸域とその沖側間での発生波の成分を分離する等の解析により、観測波浪をより詳細に把握する。

<p>⑨平均水位の解析方法について</p>	<p>観測地点間の平均水位差を把握するにあたり、水位計による 1 分間程度の時間間隔の観測を行った場合、観測結果は波の影響により段差を持った記録となることがある。波高計による 0.5 秒間隔の水位データと比較し、水位計による測定値を平均水位として扱うことの妥当性を確認する。</p>
<p>⑩沿岸域の波浪特性について</p>	<p>リーフ内の波浪について、外洋からの入射波の影響が強ければ周期は長く、局所的な風波の影響が強ければ周期は短くなるため、周期を確認することで波浪の発生要因を把握することができる。</p>
<p>⑪リーフ内の波浪周期について</p>	<p>リーフエッジ及びリーフクレストの冠水時と干出時では、リーフ内に伝播する波浪周期に差異がある。リーフ内の観測波浪の解析においては、潮位変化と観測波浪の周期の変化を比較する。</p>
<p>⑫リーフ内の波高解析について</p>	<p>リーフ内の波高を解析する場合、長周期の水位変動の発生状況に留意する。必要に応じて長周期の水位変動を除去して波高を求める必要がある。</p>
<p>⑬海上風の観測について</p>	<p>観測風の測定高度は 10m 以上で観測を行う。陸上の観測データは、高度補正を行うとともに、観測風は海上風よりも低い傾向にあることに注意する。</p>

(2) 流況シミュレーションの検証データの作成

流況シミュレーションモデルの設定に先立ち、対象沿岸域の流況の再現性を評価するために、流況の要因の分析結果を踏まえた上で現地調査結果を取りまとめ、検証データを作成する。

流況シミュレーションモデルを設定し、流況再現シミュレーションを実施する際には、当該検証データを再現することを目標とする。

表4. 2 (2) に、流況シミュレーションの検証データの作成において考慮する事例をまとめる。

表4. 2 (2) 流況シミュレーションの検証データの作成において考慮する事例

項目	内容
①潮流の成分解析について	潮流の解析は調和分解により、複数の分潮流に分離し、主要な分潮の潮流楕円を求めることが基本となる。
②平均流の駆動力の解析について	平均流の解析においては、流況の鉛直分布により、流れ成分を分類する。例えば、吹送流は下層よりも上層が大きく、リーフ内の海浜流は上層から下層まで概ね同程度となる（ただし、下層の流速が海底摩擦の影響を受ける場合は海浜流であっても上層よりも下層の方が流速が小さくなる）。海上風及び波浪と、流れの相関解析により、流れの駆動力を明らかにする。
③潮汐残差流の抽出について	平均流のうち潮汐残差流が卓越する場合、流向が一方向に偏る傾向がある。また、流速が大潮で大きく、小潮で小さくなる時系列変動となる傾向がある。
④海流の影響について	沖縄県の沿岸域は解放的な海域であるため、海流等の影響を受けることがある。対象沿岸域の沖側外洋の海流情報は、例えば、JCOPE2（用語説明参照）等を参考にすることができる。
⑤海流の局所的な影響について	対象沿岸域の観測地点が比較的近接しており、地点間の距離が外洋の海流の空間スケールに比べて短い場合、両地点では海流の影響を同程度に受ける。ただし、近接した地点においても、その間が防波堤等により切り離される場合、地点間で海流の影響の程度が異なることがある。

4. 3 流況シミュレーションモデルの設定

本節では、流況シミュレーションの設定にあたっての基本的な考え方について解説する。流況シミュレーションの設定に際しては、以下の3つの項目について検討する。

- (1) 計算範囲、水平計算格子、鉛直層分割の設定
- (2) 流況シミュレーションのモデル化
- (3) 波浪計算のモデル化

【解説】

(1) 計算範囲、水平計算格子、鉛直層分割の設定

流況シミュレーションモデルの設定にあたっては、対象沿岸域及びその周辺の地形条件等を鑑み、計算範囲を設定する。

また、対象沿岸域の地形を適切に表現できる水平計算格子を設定し、海底の起伏、密度の鉛直分布（水温・塩分の鉛直分布）、河川水の流入に伴う流れ及び流況の鉛直分布（流向・流速分布）を再現できるよう鉛直層分割を行う。

以下、1)～3)に計算範囲、水平計算格子、鉛直層分割の設定にあたっての留意事項を記載する。

1) 計算範囲

計算範囲の設定には次の点に留意する。

➤ 海流等の影響を考慮する場合

リーフ外など外洋に面した領域を対象沿岸域に設定する場合、海流の影響を考慮することが望ましい。この場合、計算範囲を外洋までの広範囲に設定する（黒潮等の海流が含まれるように設定することが望ましい）。また、潮汐境界を設定するにあたり、海底地形が複雑な箇所を設定すると、潮汐の再現性が低くなる可能性がある。海底の地形が複雑でない箇所を開境界とする。

➤ 海流等の影響を考慮しない場合

リーフ内で実施される沿岸域開発事業で、リーフ内に対象沿岸域を設定する場合、海流の影響の程度が小さいことが考えられる。この場合、計算範囲は黒潮を含むまでの広範囲に設定する必要性は低く、潮流、海浜流、吹送流等の沿岸域の流況の再現性が十分に確保できる程度の範囲を設定する。

比較的広い範囲を計算範囲として設定する場合には、対象沿岸域の水平計算格子間隔を最も小さくし、その外側に格子間隔がより大きな領域を接続して、それら多段階領域を同時に計算する方法（多段階領域結合計算法）が効率的である。図4.3(1)及び図4.3(2)に多段階領域結合計算法における領域設定の概念図を示す。

※広範囲を対象とするシミュレーションとして他の手法を採用しているモデルもある。本ガイドラインでは、手法の一つとして多段階領域結合計算法を挙げる。

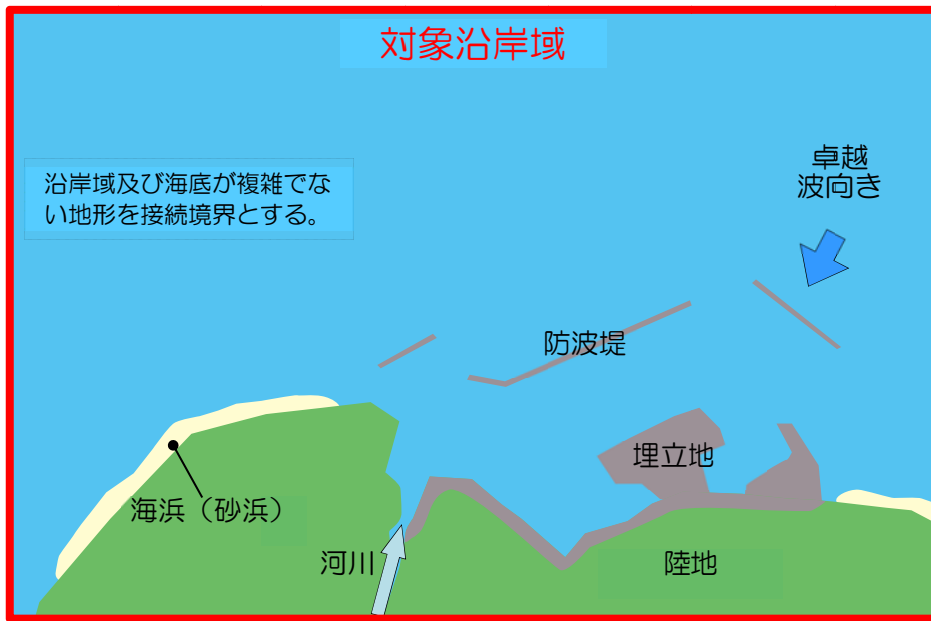


図4. 3 (1) 最小領域の概念図

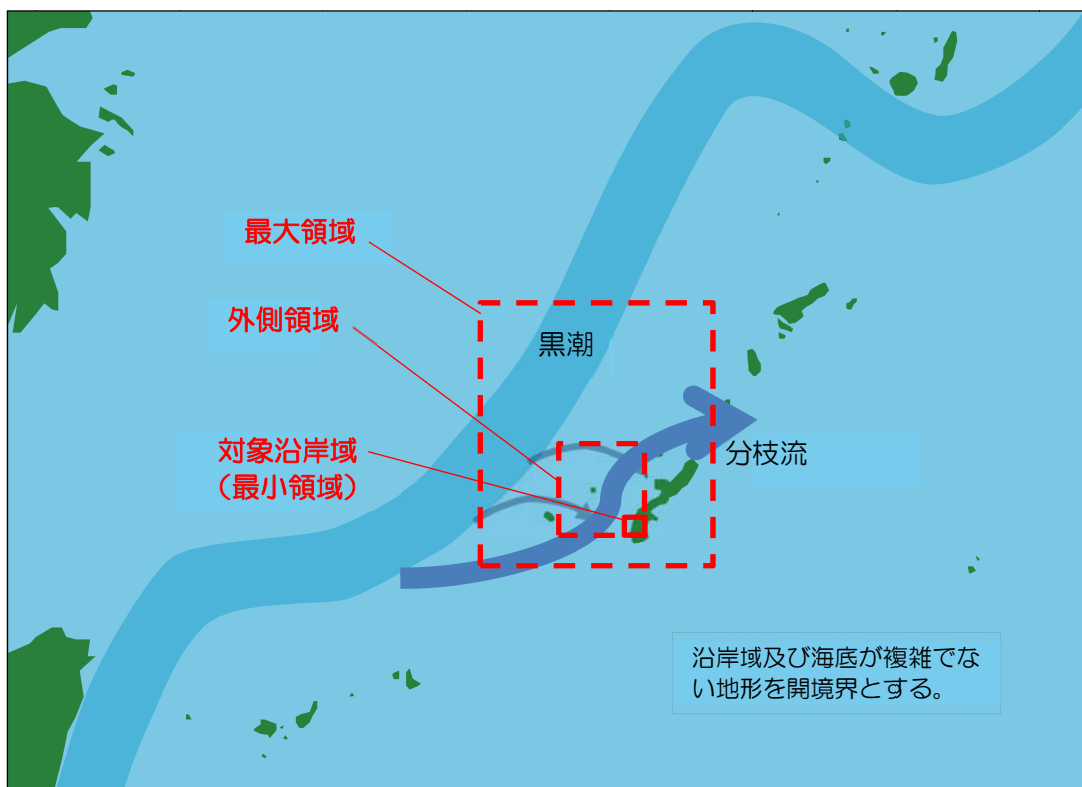


図4. 3 (2) 計算範囲の設定概念図 (海流の影響を考慮する場合)

2) 水平計算格子

流況シミュレーションの結果に影響する海底地形及び人工構造物等の形状が表現できる水平計算格子間隔を設定する。

また、多段階領域結合計算を行う場合、領域間の水位・流向・流速・水温・塩分の接続において、計算が破綻しないように水平格子間隔の比率を設定することが望ましい。例えば、最小領域の格子間隔が50m程度、その外側領域の格子間隔で500m程度と、領域間の格子間隔に大きな差がある場合、計算する水位、流速或いは水深が不連続となり計算が破綻する可能性がある。

3) 鉛直層分割

対象沿岸域における水温、塩分等の鉛直分布、流況の鉛直分布（流向・流速の鉛直分布）を踏まえ、表層・下層の層厚、密度成層が発達する水深帯の層厚を考慮して鉛直層分割を行う。また、河口部の密度流を精度良く計算するためには、表層厚が淡水の流出層を表現できる程度に設定する。

表4. 3(1)に、計算範囲、水平計算格子、鉛直層分割の設定において考慮する事例をまとめる。

表4. 3 (1) 計算範囲、水平計算格子、鉛直層分割の設定において考慮する事例

項目	内容
①計算対象範囲の再現について	海流等の外洋の影響を考慮するシミュレーションを実施する場合、多段階領域を設定し、外洋の波浪及び流れの条件を接続する領域を設定することが効率的である。また、リーフ内のみを対象とするシミュレーションであっても、表4. 1 (1) ⑤ (P. 16) に示したようにリーフ外の影響を受ける場合がある。その場合、沿岸域における流況の再現性を向上させるには、リーフ外の海域についても再現対象とすることが望ましい。
②流況シミュレーションの水平格子間隔について	静水圧近似を用いた流況シミュレーションでは、水平格子間隔を小さくしすぎると、水平流が顕著に卓越する流況の計算が不安定になる可能性がある。
③海浜流の地形解像度について	海浜流のように、地形形状に依存する流れの再現のためには、必要に応じて計算が不安定にならない程度に水平格子間隔を小さくして、地形の近似精度を向上させる。
④沖縄周辺の海底地形の設定について	水路部や起伏の激しい特殊な海底地形の水深データを作成する場合、元にする水深データ間隔が粗いとデータの補間等により水深勾配が平滑化され、実際的水深とのずれが大きくなる可能性がある。作成した水深データと、データ間隔が比較的密な海図等に記載された水深値を比較することで妥当性を確認する。
⑤域の接続境界について	多段階領域を設定する場合、領域間の接続境界にリーフ等の局所的な地形の起伏があると、接続境界で流れ及び波浪の変化が生じるため、結果として領域間の接続が不連続になる可能性がある。接続境界は地形の起伏が小さい箇所に設定する。
⑥領域の側方境界の設定について	領域の側方境界をリーフ内に設定する必要がある場合、岬や半島のような突出した箇所に側方境界を設定することにより、水位・流向・流速の不自然な状況を回避することができる。
⑦リーフ内の潮位設定について	流況シミュレーションの精度は、設定する地形の測定精度に大きく依存するため、特に浅瀬の地形を挟んでの水位差については、観測値と計算値との比較を行い、観測値を再現するために浅瀬の地形の測定精度をあげる努力をする。
⑧河口部の鉛直層分割の設定について	河川からの淡水の流出は表面の薄い層で生じるため、流況シミュレーションでは、淡水の流出を精度良く表現できるよう層分割数及び層厚を設定する。

(2) 流況シミュレーションのモデル化

流況シミュレーションのモデル化にあたっては、以下の1)～2)の2つの項目について検討する。

1) 流れ成分及び駆動力の要因の選定

再現性の検証を行う流れ成分は、対象沿岸域での流況シミュレーションの目的に応じて選定する。対象とする流れ成分毎に、「3. 1 流況シミュレーションの再現・予測対象」で述べた、流れの駆動力の要因を選定する。

2) 計算条件の設定手法

選定した流れ成分の流況を再現するため、各流れ成分の外力や地形等の要因を開境界条件、閉境界条件（海陸境界条件）、海面境界条件及び河川境界条件として設定する。

表4. 3 (2) に流況シミュレーションのモデル化における流れ成分及び駆動力の要因と境界条件の関係を整理し、図4. 3 (2) に関係図としてまとめる。また、表4. 3 (3) に流況シミュレーションのモデル化においての考慮する事例をまとめる。

表4. 3 (2) 流れ成分及び駆動力の要因と境界条件の関係

駆動力の要因	流れ成分	境界の種類	計算条件の設定例
1 起潮力	潮汐・潮流の再現・予測	開境界	全球潮汐モデルより、潮汐境界における主要な潮汐成分の調和定数（振幅・遅角）を与える。
2 潮流と地形	潮汐残差流の再現・予測	閉境界（海陸境界）	海岸地形及び人工構造物の背後で生じる渦流を表現できる水平計算格子を設定する。
3 外洋の水位・流速・水温・塩分・風応力	海流の再現・予測	開境界 海面境界	海流情報（例：JCOPEデータ）を境界条件として設定する。
4 波浪応力	海浜流の再現・予測	海面境界	波浪推算値、波高計データ等沖波の境界条件とする波浪変形計算等を行い、波浪応力を推定する。
5 風応力	吹送流の再現・予測	海面境界	気象庁等の風データ観測値、GPVデータ等を用い、海上風としての特徴（風向・風速）を考慮した設定を行う。
6 密度差	密度流の再現・予測		計算範囲における水温・塩分の空間分布及び時系列を与える。
6-1 海面熱収支（日射等）	水温変動の再現・予測	海面境界	海面境界における気象庁などの観測情報（全天日射量等）を与える。
6-2 河川水流入（淡水流入）	水温・塩分変動の再現・予測	河川境界	対象沿岸域に流入する河川流量・水温・塩分を与える。

駆動力の要因

- 開境界 : 起潮力、外洋の水温・塩分・流況
- 閉境界 : 地形や構造物の制約
- 海面境界 : 海上風による風応力（気象擾乱時を含む）、波浪応力、波による水位上昇、気象擾乱による潮位偏差、海面熱収支による水温密度差
- 河川境界 : 河川流入等による密度差
※密度差は、水温差及び塩分差により生じる。

図4. 3 (3) 流れ成分及び駆動力の要因と境界条件の関係図

表4. 3 (3) 流況シミュレーションのモデル化において考慮する事例

項目	内容
①沖側の開境界(潮汐)の精度について	<p>全球潮汐モデル等から得られる調和定数を潮汐境界条件に用いる場合、沿岸域等の水深の比較的浅い箇所に境界を設定すると、全球潮汐モデルの地形精度(水平格子サイズ)が十分でないため、潮汐境界に与える振幅や遅角に誤差が生じる可能性がある。そのため、海底地形が複雑でない外洋海域に境界を設定する。</p>
②開境界の平均水位条件について	<p>一般的に、流れと波浪を同時に計算することが困難な場合、波浪変形計算に用いる開境界の水位条件は、潮汐による水位変動並びに外洋の影響による水位の上昇及び下降を考慮する。</p>
③外洋の計算条件の与え方について	<p>外洋における日射や降水等による影響は、主に海面に及ぶため、JCOPE 2のデータ等を用いて、海面の水温・塩分値を直接与えることで、日射や降水等による影響を考慮する。なお、計算助走期間を適切に設定することで安定した計算が可能となる。</p>
④リーフ内の海面熱収支の条件設定について	<p>リーフ内の海面の熱収支計算において、海上風、潜熱輸送及び顕熱輸送の設定は重要である。対象沿岸域における気象の観測値がない場合は、近隣の気象情報を使用することが一般的である。</p>
⑤海面抵抗の設定について	<p>台風等の高潮時の潮位偏差及び吹送流の計算において、海面抵抗係数の設定は重要である。また、強風時に、海面の抵抗が急に低下することが既往研究¹⁾で報告されており、高潮時の潮位偏差計算にも適用されている。 ※第7章 参考文献1)を参照</p>
⑥海面抵抗の精度について	<p>波浪推算及び高潮時の潮位偏差の推算において、海面抵抗係数を適切に設定するため、複数の抵抗係数の条件を設定した上で、感度分析等を行い、推算精度を確認する。</p>
⑦リーフエッジの鉛直渦動粘性について	<p>リーフエッジのような極めて浅い水深では、鉛直渦動粘性係数等のパラメータが流速シア、密度勾配等に依存していない可能性がある。そのような箇所では、鉛直渦動粘性係数等は全水深で一様な数値となるような設定を行うことも手法の一つである。</p>
⑧リーフ内の流況再現について	<p>リーフ内においてサンゴ群集が海底にある場合、底面摩擦応力が通常よりも大きくなることが考えられる。安定した計算を行うため、浅瀬では、局所的に海底摩擦係数を通常の3.5倍に設定した既往研究²⁾がある。 ※第7章 参考文献2)を参照</p>
⑨河川水の流出の設定について	<p>任意時刻の塩分分布を再現する場合、河川流量の時系列変化を考慮したシミュレーションを行う。</p>

⑩鉛直水温変動の再現について	内部波や内部潮汐による水温の急変といった複雑な水理現象を再現対象とする場合、シミュレーションにより再現できる限界を考慮する必要がある。例えば、水温の大局的な変動傾向やトレンド等のみを再現対象とすることが考えられる。
----------------	---

(3) 波浪計算のモデル化

流況シミュレーションにおいて考慮する流れ成分のうち、波浪応力に起因する流れ（海浜流）を計算する場合は、対象沿岸域の波浪計算を行い、波浪応力を求める。なお、波浪計算は、次の1)～2)の計算に分類される。

- 1) 外洋から沿岸域までの対象海域において発生する波浪の計算
- 2) 対象とする沿岸域における波浪変形計算

表4. 3(4)に、波浪計算のモデル化において考慮する事例をまとめる。

表4. 3(4) 波浪計算のモデル化において考慮する事例

項目	内容
①GPV データの利用について	外洋および沿岸域の波浪推算において、GPV データ(用語集参照)を補完・補正して使用できる。GPV データは計算による予報値であるが、観測データによる補正を行った予報値であり、陸上の影響も含まれているため実用上は問題ない。ただし、データの提供が3時間及び6時間毎であるため、特に台風のように、短時間に気圧場や風場が変化する擾乱に対しては、適切な時間的・空間的な補間を行うことが望ましい。
②沿岸域の海上風の設定について	対象沿岸域の海上風の設定にあたっては、観測値と計算値の相関から経験的な補正法等により精度向上を図る(例えば、陸から海に吹く海上風は、陸上風の1.5倍以上の風速となり、海から陸に吹く海上風は、海上風とほぼ同等になる)。
③沿岸域の海上風の補正について	対象沿岸域の海上風の再現性が良好でない場合、海岸近傍の流れの再現性は低下する。GPV データは、解像度(5km)以下の陸上地形の影響を受けた海上風の分布を表現出来ないため、風向及び風速を地形に準じて補正することも手段の一つとなる。
④スプレー効果について	外洋の波浪推算において、強風時の過大な波高計算結果を避けるため、必要に応じてスプレー効果(白波砕波による海面抵抗の上限値を持つ特性)を考慮した海面抵抗係数を設定する。

<p>⑤砕波モデルの選定について</p>	<p>リーフ周辺の波浪変形計算において、エネルギー平衡方程式系の計算を適用する場合、砕波モデルは位相平均型のモデルが適する。既往研究事例³⁾を参考に、砕波モデルの適用性に関する確認を行う。 ※第7章 参考文献3)を参照</p>
<p>⑥砕波モデルの入力情報について</p>	<p>人工構造物等が存在する場合の波浪変形計算では、多様な変形(屈折、回折、反射)が生じるため、砕波モデルには局所的な波高の使用が考えられる。</p>

4. 4 流況再現シミュレーションの実施

本節では、流況再現シミュレーションの実施にあたっての基本的な考え方について解説する。

流況再現シミュレーションの実施に際しては、以下の3つの項目について検討する。

- (1) 再現計算条件の設定
- (2) 再現計算の実行
- (3) 再現性の評価

【解説】

(1) 再現計算条件の設定

流況の再現シミュレーションにおいては、「4. 2 現地調査結果の解析」で作成した検証データを再現することを目標として、「4. 3 流況シミュレーションモデルの設定」において設定した流況シミュレーションモデルにより再現計算を実施する。

流況の再現シミュレーションの手順は、「(1) 再現計算条件の設定」、「(2) 再現計算の実行」、「(3) 再現性の評価」となり、再現性が良好と評価される場合は、「4. 5 流況予測シミュレーションの実施」に進み、再現性が不十分と評価される場合は、「(1) 再現計算条件の設定」又は「4. 3 流況シミュレーションモデルの設定」に立ち戻る。

表4. 4 (1) に、再現計算条件の設定において考慮する事例まとめる。また、表4. 4 (2) に流況再現シミュレーションにおける条件設定の例をまとめる。

表4. 4 (1) 流況の再現シミュレーションの条件設定において考慮する事例

項 目	内 容
①流況再現の条件について	流況の再現性が良好でない場合、その要因を明らかにすることが重要である。再現対象とする流れの基本的な特性を整理し、再現計算の諸条件を設定することが重要である。
②広域計算の初期条件について	沿岸域から外洋までの広域のシミュレーションを行う際には、初期条件は、水温・塩分の設定とともに、水位・流速も初期条件として設定することにより計算の収束時間が短くなる。なお、水位・流速のデータとしては、JCOPE2の利用等が考えられる。
③広域計算の安定性について	広域のシミュレーションにおいて、振動（慣性振動）が発生する場合は、初期の水平渦動粘性項を高め設定する等の処理を行い、試行計算等により、振動の有無を確認する。
④気象条件の設定について	海面熱収支の計算で使用する気象条件は、対象沿岸域内における観測値がない場合には、隣接する気象台等の観測値を設定する。一方、外洋海域における気温は対象沿岸域の値と異なるため、NCEP（用語集参照）等で提供される再解析データを用いることが考えられる。
⑤波浪計算の地形条件について	波浪の推算値と観測値を比較した結果、海岸近くでは、推算波高と観測波高の差が大きい場合がある。観測される波高は、砕波限界水深に依存するため、観測地点の水深とシミュレーションで設定した水深に差が無いかを確認する。また、必要に応じて対象沿岸域以外の観測値との比較を行う。

表4. 4 (2) 流況再現シミュレーションの条件設定の例

項目	内容
使用モデル	<p>【モデルの例】</p> <ul style="list-style-type: none"> ・非圧縮、静水圧近似を用いた3次元モデル ・2種の鉛直座標系を用いたハイブリッド座標モデル (シグマ座標系+Z座標系) ・広域と狭域を同時計算する多段階領域結合計算法 ・礁縁部等の冠水・干出を考慮した移動境界計算法 ・水平渦動粘性・渦拡散係数：スマゴリンスキー型 ・鉛直渦動粘性・渦拡散係数：リチャードソン数依存型 ・サンゴ礁域の海底摩擦係数を3.5倍²⁾
計算範囲	対象沿岸域を中心とした範囲
水平格子	例：最小格子間隔を50mとする正方格子 (計算格子間隔1,000m-200m-50mの多段階領域における2-wayネスティング)
鉛直層分割	例：シグマ座標(5層)+Z座標(25層)の計30層 海面6m以浅：シグマ座標5層(等間隔) 海面6m以深：Z座標25層
地形条件	海図、JODC(用語集参照)データ、既往の深浅測量結果を基に地形データを作成
再現期間	現地調査における調査時期(例：15昼夜連続期間)
気象条件	現地調査における観測期間の気象条件 ※気象条件は、気圧・海上風・日射・気温等) ※海上風のみは、後述するGPVデータを与える。
対象流れ成分	例：潮流・潮汐残差流・吹送流・密度流・海浜流・海流
潮汐成分	主要4分潮(M_2 , S_2 , K_1 , O_1) 或いは N_2 , K_2 , P_1 を加えた7分潮等
海上風	例：GPVデータを使用
河川条件	例：対象沿岸域への流入する河川の流量の観測値等 (河川流量の観測値がない場合は推定値を用いる。)
波浪条件	例1：GPVデータ等の風データを外力として与える。 例2：現地調査における観測期間の波浪情報を直接的に外力として与える。
海流条件	例：JCOPEデータを境界条件として使用

(2) 再現計算の実行

流況の再現シミュレーションを実施にあたっては、(1)において記述した再現計算条件の設定を行い、再現計算を実行する。

表4. 4(3)に、再現計算の実行において考慮する事例にまとめる。

表4. 4 (3) 再現計算の実行において考慮する事例

項目	内容
①海浜流成分について	リーフ海岸では、潮流と併せて海浜流が支配的であるため、潮流の再現性のみで評価することには問題がある。また、流況の観測値は、平均水位に比べると、局所的な地形の影響を強く受けるため、再現性の検証においては、観測地点周辺の地形等の状況を確認する。
②流況の成分分離について	流況シミュレーションの再現性の向上を図る上で、観測値において卓越する成分（例えば、潮流、潮汐残差流、吹送流、密度流等）の再現性を個別に確認することが効率的である。その際、シミュレーションによる感度分析が有用である。
③波浪と流況の再現について	リーフ海岸の流況及び波浪の再現においては、局所的な観測データの再現を行うことが難しい。局所的な情報のみで、パラメータの調整を行うのではなく、流況及び波浪の両方をバランス良く再現することを目指す。
④リーフ内の海浜流の再現について	リーフ内の波浪応力による流れ（海浜流）が、観測値と大きく異なる場合、Wave Set-up による水位勾配も含め、リーフ内の波浪、平均水位分布、波浪応力について再現性を確認する。
⑤鉛直水温変動の再現について	鉛直方向に見られる水温変動は、内部潮汐による周期変動と、数時間の短周期変動が重なる。この短周期変動は、内部境界面の非線形性（ソリトン分裂波等：用語集参照）や周辺地形からの反射が重なっているため、十分な精度で再現することは困難である可能性がある。例えば、卓越周期のみに着目した検証といったことが必要となる。
⑥海上風の再現について	陸上の観測所で測定される風速は、周囲の障害物等の影響により海上風よりも小さい可能性がある。その観測値を計算条件として設定すると、海上風を過少評価することになるため、その場合は補正して風速を大きくすることも一般的な手法である。
⑦リーフ内の波高の精度について	リーフ内の波高の観測値と計算値で大きな誤差がある場合、リーフエッジ周辺における砕波の計算精度が低いことが考えられるため、外洋の平均水位、入射波高、リーフクレストの地盤高等、砕波の計算の誤差の要因を分析する。
⑧リーフ内の水位と流況について	リーフ内における水位勾配及び流況の再現では、波浪変形計算の精度が重要となる。計算結果の検証として、干潮時と満潮時のリーフ外縁の水深の違いによる砕波波高の違いや、それに起因するリーフ内の波高の違いを確認することが望ましい。

(3) 再現性の評価

対象沿岸域の流況の再現性の評価に際しては、4. 2で作成した検証データとの比較を行う。

再現性の検証方法及び検証結果の評価については次のような手法等が挙げられる。

- 潮流の主要分潮の潮流楕円、潮流成分の時系列、25 時間移動平均流の時系列、水温・塩分の鉛直分布及び水温・塩分の時系列について、検証データと計算結果との比較を行う。ただし、リーフ内は、水深が浅いため、表層の水温・塩分が検証データとなる。なお、25 時間移動平均流については、平均流を構成する各流れ成分について再現性を確認する。
- 海流については、外洋における流速観測値の 25 時間移動平均等による平均流成分と比較する。ただし、この平均流成分には、潮汐残差流や吹送流等の成分が含まれることに留意が必要である。
- 波浪による流れについては、沖波及び対象海域の波浪の観測値の再現性を確認するとともに、海浜流の再現性を確認する。なお、高潮時には海浜流、吹送流が流れの主成分になることから、その再現が重要となる。
- 密度流の駆動力の要因となる水温変動については、昼間の日射による海面水温の上昇と夜間の海面冷却に伴う日周変動、外洋からの海水流入による水温の急変現象に関する再現性を確認する。また、同じく密度流の駆動力の要因である塩分変動については、河川からの淡水流出の影響が大きいため、河口付近での塩分の観測値の再現性を確認する。

以上を踏まえ検証した結果、再現性が不十分と判断される場合は、当該検証結果を解析し、「4. 3 流況シミュレーションモデルの設定」又は「4. 4 (1) 流況の再現シミュレーションの計算条件の設定」に立ち戻り、見直しを行う。

表4. 4 (4) に再現性の評価において考慮する事例をまとめる。

表4. 4 (4) 再現性の評価において考慮する事例

項目	内容
①流況シミュレーションの精度の評価について	流況シミュレーションの誤差の程度を明示し、評価を行う。例えば、潮流及び平均流の誤差を明示し、予測計算結果の利用に際して、留意すべき点を明確にすることが考えられる。
②流況シミュレーションの計算精度について	流況シミュレーションの結果の評価については、観測値の比較が可能な方法を用いる。例えば、潮流楕円との比較、平均流の時系列との比較等が考えられる。
③平均潮位の誤差の要因について	平均潮位において、計算値と観測値に差がある場合は、台風の接近に伴う強風の風向・風速及び気圧低下の影響（気象擾乱の影響）、沖縄周辺の暖水塊や冷水塊による平均水位の昇降等について検討し、計算値と観測値の差の要因を分析する。
④予報潮汐の計算誤差について	潮汐振動において、計算値と観測値に差がある場合、潮汐分潮数の不足について確認する（例えば、卓越する主要4分潮或いは7分潮程度が基本となる）。また、験潮所の潮汐調和定数の算出年次が古いことによる誤差も考えられる。
⑤高潮時の潮位偏差の計算誤差について	潮位偏差の計算にあたっては、低気圧による吸い上げと海上風による吹き寄せの効果について評価を行う。対象沿岸域周辺の卓越風向が異なる複数の潮位観測点のデータを利用し、吹き寄せの影響について確認することができる。
⑥リーフ海岸の潮位偏差の要因について	リーフ海岸における潮位偏差の発生要因は、気圧による吸い上げ、海上風による吹き寄せ及び Wave Set-up が混在しているため、観測風及び観測波浪の相関解析等により判断する。

4. 5 流況予測シミュレーションの実施

本節では、流況予測シミュレーションの実施にあたっての基本的な考え方について解説する。

流況予測シミュレーションの実施に際しては、大きく分けて以下の2つ項目について検討する。

- (1) 予測計算条件の設定
- (2) 沿岸域開発事業等による流況の変化についての評価

【解説】

(1) 予測計算条件の設定

流況予測シミュレーションを実施する際には、次の1)～5)の事項について設定する。

- 1) 計算範囲、水平計算格子、鉛直層分割の設定
- 2) 地形条件の設定（※地形改変等による将来の条件を設定する。）
- 3) 対象期間（季節）の設定
- 4) 気象条件の設定
- 5) 流れ成分の駆動要因に対応する条件の設定

※3)～5)は対象期間の平均的な条件、代表的な気象擾乱時及び出水時の条件（例えば、代表的な台風時）を設定する。

1)及び3)～5)の事項については、基本的には流況再現シミュレーションと同様の条件を設定する。なお、予測対象期間及び同期間の気象条件については、必要に応じて、新たに設定することとなる。

流況予測シミュレーションの条件設定例を表4. 5に整理する。

表4. 5 流況予測シミュレーションの条件設定例

項目	内容
使用モデル	(流況再現シミュレーションと同様)
計算範囲	(流況再現シミュレーションと同様)
水平格子	
鉛直層分割	
地形条件	地形改変後の地形データ
対象期間	対象海域の流況に影響する期間(例:夏季、冬季及び台風期)
気象条件	対象期間に対応する気象条件(例:夏季、冬季及び台風期) ※気象条件は、気圧・海上風・日射・気温等を設定する。 ※海上風のみは、後述する GPV データを与える。
予測対象の流れ成分	(流況再現シミュレーションと同様)
潮汐成分	対象期間に対応する潮汐成分 (例:主要4分潮或いは7分潮等) ※大潮・小潮を考慮した非定常な潮汐変動を入力すると、潮流の強さが15昼夜で変化するため、影響評価が煩雑になることがある。そのような場合、例えば平均大潮(振幅 M_2+S_2 、周期 12h) といった定常的な潮汐条件とすることも一般的である。
海上風	対象期間に対応する GPV データ
河川条件	対象沿岸域に流入する河川の平均流量及び代表出水時の流量等
波浪条件	対象期間に対応する平均波浪及び代表台風時の波浪 (波浪シミュレーションにより得られる波浪応力)
海流条件	対象期間に対応する海流等の情報

(2) 沿岸域開発事業等による流況の変化についての評価

流況予測シミュレーションの結果を基に、沿岸域開発事業等による流況の変化を評価するにあたっては、流況の現況シミュレーション（地形条件のみを現況とする予測シミュレーション）と予測シミュレーションの結果の差を分析し、次のような項目を明らかにする。

▶ 流況の変化範囲

流況が変化する範囲を、流速差図等を基に平面的に表示する。

▶ 代表点の潮流の変化

観測地点等の代表点における潮流の流向・流速の変化を、潮流楕円により表示する。

▶ 代表点の平均流の変化

観測地点等の代表点における平均流の流向・流速の変化を、ベクトル図により表示する。

▶ 水温・塩分の変化範囲

水温・塩分が変化する範囲を、差図等を基に平面的に表示する。

流況シミュレーションの結果を基に、沿岸域開発事業等による影響を評価するにあたっては、現況地形と地形改変後の地形の流況の差について、その要因を分析し、考察を行う。

第5章 その他留意事項

5. 1 流況シミュレーションの不確実性

第4章の方針を踏まえ、十分に検討した上で流況シミュレーションを実施したとしても、対象沿岸域の水理現象の再現には不確実性があり、流況シミュレーションの結果は誤差を含んでいる。

流況シミュレーションを実施する際には、結果に誤差が含まれることをあらかじめ考慮することが必要である。

【解説】

流況の予測シミュレーションの結果については、次の理由等により、実際に生じる水理現象と差異が生じることを、あらかじめ考慮する必要がある。

- 現地調査により把握できる対象沿岸域の流況、水温、鉛直分布等の水理現象は、空間的及び時間的な観測密度等に依存するため、現地調査により対象沿岸域の水理現象を完全に把握できていないこと。
- 流況再現シミュレーションによる現地調査結果の再現にはモデル化による近似誤差があり、当該再現シミュレーションモデルを用いた予測シミュレーション結果も同様に近似誤差を含むこと。

沿岸域開発事業に係る環境影響評価において流況シミュレーションを行った場合、事業完了後に事後調査を行い、予測シミュレーションの結果と現地で観測される流況等の水理現象との差異について、その要因を分析することが望ましい。

5. 2 流況シミュレーションの応用

本ガイドラインは、沖縄県沿岸域における沿岸域開発事業に伴う流況の変化を精度良く把握するための基本的な考え方を示すものであるが、地形改変を伴わない場合において、海域環境の種々の指標に関する予測に応用することも可能となる。

【解説】

本ガイドラインは、沖縄県沿岸域における流況シミュレーションを精度よく実施するための基本的な考え方を示すものであるが、沿岸域開発事業に伴う地形改変を伴わない場合において、海域の環境指標への影響の予測に応用することも可能になる。

以下、1)～3)に応用例を示す。

1) 赤土等の拡散

赤土等の粒子を表現するSS（懸濁粒子）の拡散シミュレーション

2) 漂流ごみの移動

漂流ごみの移動シミュレーション

3) 水質等の予測

水質（COD、濁り、窒素、リン、溶存酸素等）のシミュレーション

※生成・消費を考慮した移流・拡散シミュレーション（生態系シミュレーション）

1)～3)の応用例に示すシミュレーションは、流況シミュレーションにより出力される水位・流向・流速・水温・塩分を、拡散式中の入力条件とすることが可能となる。

また、拡散式の拡散係数等は、流況シミュレーションの渦動粘性係数と同じ値を与えることが考えられる。

第6章 用語の説明

50音順で記載

• いどうきょうかいはいきんほう 移動境界計算法

流況シミュレーションは、一般的に潮汐による潮位変動により駆動される流れ成分を計算する。リーフ海岸のように、リーフ内の海域で海底勾配が緩い場合（浅い水深帯が広がる場合）、潮位変動により海底が干出と水没を繰り返す現象が生じ、海岸線の後退と前進により移動が生じる。このような海岸線の移動を表現する方法として、移動境界法が適用される。移動境界法により、浅い水深帯が水没する時間帯においては、水位と流速が計算され、干出する時間帯においては、水位が0となり地盤高に置き換わり、流速は0として計算されない。

• いそうへいきんがた 位相平均型のモデル

エネルギー平衡方程式に基づく波浪モデルは位相平均型モデルの代表である。位相平均型モデルでは方向スペクトルの平均量としてのエネルギーの時間的・空間的変動を表現するため、不規則波を形成する個々の成分波の位相情報はなくなる。これに対し、プシネスクモデルに代表される位相分解型モデルでは波形変形を直接記述することから、位相情報を残したまま計算が行われる。位相平均型モデルは計算時間が短くて済み、広領域の波浪計算に向いており、多方向不規則波の変形も容易に取り扱うことができる利点を有している。

• へいこうほうていしきけい けいきん エネルギー平衡方程式系の計算

風波の時空間的なエネルギー変動は、エネルギー平衡方程式で記述できる。エネルギー平衡方程式では、外部からのエネルギーの出入りと平衡して、波のスペクトルエネルギーが時間的・空間的に変動することが表現される。ここで、外部からのエネルギーの出入りを表すエネルギー入出力関数 S は、 S_{in} 、 S_{ds} 、 S_{nl} の3つの和によって近似される。 S_{in} は風と波との相互作用によるエネルギーの出入りに対応し、 S_{ds} はさまざまな機構による波からのエネルギーの損失（主に砕波）に対応する。さらに S_{nl} は、波のスペクトルを構成する成分波間の非線形相互作用（成分波間の弱い非線形な相互干渉）によるエネルギーの出入りに対応する。

• えんちよくかどうねんせい うすかくきんけいすう すういぞんがた 鉛直渦動粘性・渦拡散係数：リチャードソン数依存型

海水中の運動量及び物質量は、水平方向と同様に、鉛直方向にも広がる特性がある。鉛直方向の物質の拡散を考える場合、鉛直方向の流速差（鉛直勾配）が大きいほど、物質量が拡大する効果を有するとともに、鉛直方向に密度勾配（密度差）が生じている場合は、浮力の効果により、下方に拡大しにくい傾向がある。この流速の鉛直勾配と、密度勾配の大小関係を示す特性数をリチャードソン数と定義する。リチャードソン数により、鉛直方向の物質量の広がる程度を制御する方法をリチャードソン数依存型と定義する。

・海面抵抗係数^{かいめんていこうけいすう}

海上で風が吹くと風波が発達し、表層の流れが引き起こされる。これは、波を起こし、表層に流れを作る力が海面に働いていることを示唆している。この、風波を発達させ、表層の流れを作る力が摩擦応力 τ （海面応力）である。この摩擦応力 τ は、摩擦速度 u_* の関数として表されるため、摩擦速度 u_* が求められると求めることができる。しかし、摩擦速度 u_* を求めるような測定はほとんど行われていないため、一般的には、ある高さ（一般的には 10m 高度を使用）の風速から摩擦応力を推定する方法が必要とされる。この時、海面抵抗係数 C_D を用いることで、ある高さの風速を摩擦速度に変換することが可能になり、この摩擦速度を用いて摩擦応力を算出することが可能となる。

・渦動粘性・渦拡散スキーム^{かどうねんせい うずかくさん}

物質の水平方向の拡散現象と鉛直方向の拡散現象を表す式を、水平及び鉛直の拡散式を定義する。この拡散式を、シミュレーション手法により計算するための式をスキームと呼ぶ。一般的に差分式として定義される。

・起潮力^{きちうりょく}

地球全体の海水面に作用し、潮汐を駆動する力を表す。この駆動力は、地球表面に作用する月及び太陽の引力であり、地球の自転により、地球上の任意の海面位置の経度に対して、月及び太陽の位置が経度上にある時（表側）と、 180° ずれた経度上にある時（裏側）の1日2回、引力が1日のうち最大となり、満潮となる。一方、任意の海面位置の経度に対して、 90° ずれた経度上にある時の1日2回、引力が1日のうち最小となり、干潮となる。このような潮汐の干満の考え方を静力学的潮汐と呼ぶ。実際の地球上は、陸地が存在し、全球が海面でおおわれておらず、月と太陽の引力の増減に伴って、海水が移動する時の障害となるため、必ずしも、月と太陽の位置のみで満潮と干潮の時刻は決まっていない。

・境界条件^{きょうがいじょうけん}

潮汐・水温・塩分等の計算範囲外からの諸条件を与えるために、対象海域からの一定の距離を確保した境界を設定する。これを境界条件と定義する。一定距離を確保した境界を設定するのは、境界付近において、計算上の誤差を生じやすいため、対象海域の計算結果に影響を与えないようにする処理である。また、海水面と大気が接する境界を、海面境界と呼び、海上風によるせん断応力、海面との熱の授受に関する条件（海面熱収支条件）を設定する。

・切り離し装置^{きりはなしそうち}

ダイバーによる流向・流速計等の計測器の回収ができない水深帯（40～50m 以深）で測定する場合に、洋上より計測器を回収するための装置である。例えば、フロート内部に流速計と切離装置を搭載したブイ形式の係留装置が例として挙げられる。フロートは耐圧機能を有しており、数 100～数 1000m の水深帯においても、計測が可能である。回収時は、船上局からリリース信号を送るだけで、アンカーを切離し、浮上、回収する事ができる。

• 驗潮所 (檢潮所)

気象庁、海上保安庁及び国土地理院が管理する、潮汐などによる海面の昇降を観測する施設。通常は海岸付近に驗潮小屋を建て、その中で潮汐を連続的に観測する。立地条件によっては海中に建てる場合もある。

• 顕熱輸送と潜熱輸送

地球上の海面においては、太陽からの放射エネルギーは、短波と長波に分類される。各々の放射エネルギーは、海中の進む量と、海面により反射して、大気中に戻る量がある。この海中へ進行する量と反射する量を差し引いた合計が、海面への正味の放射量となる。この正味の放射量は、一部が海水に吸収され、海水温を上昇させる熱流量となる。残りの熱エネルギーは、2種類の輸送機構により、大気または海水に移動する。2種類の輸送機構のうち、温度の高いところから低いところへ熱エネルギーが輸送されることを顕熱輸送と呼ぶ。一方、海面の水が暖められて蒸発し、水蒸気となる時、気化熱として海面が冷却されて、熱量が大気中に輸送される。この水蒸気は大気中の上層に輸送されて、冷却されると凝結が起り、蒸発時に海面から大気に奪った気化熱に相当する凝結熱を放出する。この凝結熱は海面から奪った熱を上層へ移動させたことになる。このような熱エネルギーの輸送を潜熱輸送と呼ぶ。顕熱輸送と潜熱輸送は、単位時間・単位面積当たりの熱量（熱量フラックス）として、海面熱収支の計算において考慮される。

• 降雨-流出モデル

河川流量を推定する場合に、流域内の降雨量から、河川流量を推定する計算方法を示す。降雨から河川流量になる時間的な遅れ、降雨が河川流量に反映する割合を表現することができる。

• 砕波限界水深

波が沖から岸へ伝播して浅い海域にやってくると、波峰が泡立ち、あるいは前方へ巻き込んで白波を立てるようになる。これが砕波現象であり、その発生場所（水深）と波の高さを知ることが必要となる。砕波が始まる水深（砕波水深）やその地点の波高（砕波波高）については数多くの実験によりデータが蓄積され、砕波指標として定式化されている。砕波指標は、一般的に砕波限界の波高 H_b と砕波開始地点の水深（砕波水深） h_b の比として表される。砕波限界水深は、これ以上浅くなると砕波が開始する水深の限界値を示す。

• 水平渦動粘性・渦拡散係数：スマゴリンスキー型

海水の運動量（流速の2乗により定義される）及び物質質量（例えば、水温・塩分・SS等）は、海水中の乱れにより空間的に広がる特性がある。これを拡散現象と定義する。この拡散現象は、物質質量が大きい箇所から小さい箇所に移動する効果を有しており、移動の程度は係数として大きさが表される。さらに、海域の流速の空間的な差（水平勾配）が大きいほど、物質質量は拡大しやすい効果を有しており、これをシア効果と呼ぶ。拡散現象が有する2つの特性を表現する方法を、スマゴリンスキー型の水平拡散式と呼ぶ。物質の拡散を表す係数は水平渦動粘性係数と定義され、運動量の拡散を表す係数は水平渦動粘性係数と定義される。

• 水平渦動粘性項

運動方程式の中で、水平渦動粘性係数を含む、乱れによる運動量の空間的な広がりを表現する項を示す。

・スプレー^{ほうか}効果

強風下の波浪は、波頭が砕ける（砕波）ことにより飛沫（Spray）が発生する。台風域内等、風速が一定以上になる場所では、砕波や飛沫の発生（スプレー効果）により風から波へのエネルギー輸送がされにくくなるため、海面抵抗係数が減少傾向になり波浪の発達が抑制されるという提案もなされている。

・静水圧^{せいすいあつきんじ}近似

海水中に作用する圧力は、大気からの圧力（気圧）と海水からの圧力（水圧）に分けられる。水圧は、水深とともに増加する静水圧（任意の深さの水塊の上方に存在する水柱からの圧力）と、海水の流れにより作用する動水圧に分類される。海洋の流れは、一般的に流速が小さいことから、静水圧の割合が大きく、動水圧を無視しても、海水の運動を表現することができる。このような静水圧のみで、海水の運動を表現する方法を静水圧近似と定義する。

・生態系^{せいだいけい}シミュレーション

水質シミュレーションにおいて、有機懸濁態と有機溶存態及び無機溶存態の窒素及びリン、植物プランクトン、動物プランクトン、溶存酸素等の複数の水質を表現する指標を追跡するシミュレーションである。これにより、植物プランクトンの光合成やバクテリアの分解、海底からの溶出といった水質変化の要因となる生物・化学過程を考慮できる。動物プランクトンまでを対象とするものを低次生態系、さらに魚類を含めるものを高次生態系という。

なお、水質シミュレーションによる各水質指標から、環境基準に採用されている化学的酸素要求量（COD）を求めることができる。

・全球^{ぜんきゅうちようせき}潮汐モデル

潮汐は、主に月と太陽の地球上に作用する引力が、地球の自転と公転によって変化するのに伴い、海面の上昇と下降が繰り返される現象である。この水位変動は、地球表面を覆う海水面全体において生じる。この海水面において生じる潮汐変動を、地球全体で計算する方法を全球潮汐モデルと呼ぶ。全球潮汐モデルでは、地形全体の海域と陸域の形状を設定し、海水の動きを、連続式と運動方程式を支配する式により計算する。

※参考 URL : NAO.99b tidal prediction system

<http://www.miz.nao.ac.jp/staffs/nao99/index.html>

・ソリトン^{そりんとん}分裂波

波長の長い波の先端部が短周期の複数の波に分裂する現象をソリトン分裂という。ソリトン分裂によって生成される波がソリトン分裂波であり、津波のような波長の長い波が河川のような水深の浅い箇所を伝播する場合に発生することがある。ソリトン分裂を起こした波は分裂により波高が増幅することから、急激な砕波を伴う特徴がある。一方、成層場（塩水と淡水の存在や日射の影響により密度成層が発達）においても長周期の内部波がソリトン分裂を起こし、短周期、大振幅の内部ソリトン波が生成される場合がある。内部ソリトン波が地形の効果により砕波することで、底層の物質の巻き上げや密度界面下において発生する貫入現象を引き起こし、長期的な物質輸送が発生することが指摘されている。

• ただんかいりょういきけつごうけいさんぽう 多段階領域結合計算法

流況シミュレーションを行う場合、対象とする海域は、海岸地形及び人工構造物等の形状を表現するために、水平格子間隔を小さい値（例：50m 格子）とする。一方、外部との境界は一定の距離を設定することになるため、計算範囲は、対象海域よりも広く設定する。このような広い計算範囲の全体を対象海域に適用する計算格子間隔で地形近似すると、計算時間が膨大になる。

計算所要時間を節約し、計算の効率化を図る手段として、対象海域以外の地形近似は、水平格子間隔を大きい値（例：1,000m、500m、200m 等）の複数の領域に分割し、複数領域間の境界において水位・流速を接続することにより、複数領域の全てを同時に計算する方法を適用するのが一般的である。これを多段階領域同時結合計算（ネスティング法）という。

• ちゅうきぼう渦 中規模渦

外洋海域の流れは、黒潮に代表される帯状の流れと、多数の渦流により構成される。この多数の渦流が、中規模渦（地球流体力学ではロスビー波と定義され、大気の偏西風の蛇行現象に伴い現れる高気圧渦と低気圧渦と同じ力学現象である。）と呼ばれる。中規模渦は地衡流平衡（コリオリ力と水平の圧力勾配が釣り合う状態）の状態にあり、規模が大きいため、流れの観測からは海流の成分として記録される。北半球の中規模渦は、高気圧性渦（時計回り）、低気圧性渦（半時計回り）が交互に分布し、外洋を東から西方向に移動する。高気圧性渦流は暖水塊として、低気圧性渦流は冷水塊として、沿岸海域の数日～数 10 日の周期の水温の上昇・下降として観測される。また、高気圧性渦流は平均水位の上昇として、低気圧性渦流は平均水位の低下として、潮位記録においても現れる。

• ちやうわぶんかい ちやうわじやうすう 調和分解と調和定数

海洋における潮汐及び潮流は、周期が異なる複数の分潮によって構成される。代表的なものに M_2 分潮（月の引力による半日周潮、周期 12.42h）や S_2 分潮（太陽の引力による半日周潮、周期 12h）がある。潮汐の場合、検潮所の観測データ等から、その地点における各分潮の振幅、周期、遅角を算出することを潮汐調和分解（潮流の場合は、潮流調和分解）といい、算出される値を潮汐調和定数（潮流の場合は、潮流調和定数）という。潮汐調和定数がわかれば、その地点における任意時刻の潮位を推算することができる。また、潮流も同様に、潮汐と同じ分潮流成分の振幅と遅角を算出することを潮流調和分解と呼び、算出される値を潮流調和定数と呼ぶ。潮流の場合は、東西方向の成分（東方成分）と南北方向の成分（北方成分）の 2 方向に分類して調和解析を行い、2 方向別の調和定数を求める。調和定数がわかれば、その地点における任意時刻の潮流を推算することができる。

• ないぶちやうせき 内部潮汐

海洋において、様々な外力によって密度成層が揺り動かされる現象を内部波という。特に、海底の地形変化が比較的大きい場所で、その上を通過する潮汐流が密度成層を強制的に揺り動かす現象を内部潮汐という。内部潮汐の周期は、外力となる潮汐流の周期となり、一般的には半日や 1 日周期が卓越する。

• 波浪変形計算^{はろうへんけいけいさん}

一般的に用いられている波浪変形計算モデルは、エネルギー平衡方程式に基づく位相平均型モデルとブネスク方程式に基づく位相分解型モデルがある。波浪変形計算を行うことで、波の伝播に伴う屈折や浅水変形、防波堤や離岸堤による波の回折（位相分解型モデルのみ）を算定することが可能となる。実際の波浪変形計算では対象領域を平面格子状に分割し、各格子に水深情報を与えることで海底地形を表現した後、計算領域の境界部より沖波条件（波高、周期、波向）を与え、各格子点での方向スペクトルを差分式で解くことで各格子の波浪情報（波高、周期、波向）が得られる。

• ベストトラックデータ

台風をはじめとする熱帯低気圧の情報は非常に重要であり、世界の各気象関係機関は熱帯低気圧に関する詳細な記録を残している。この記録は一定時間（3時間～6時間）間隔の熱帯低気圧の中心位置や中心気圧・最大風速などを、専門家が後日に解析してまとめたもので、一般的にベストトラック（最終解析結果）と呼ばれる。気象庁台風ベストトラックデータは以下の場所で公表されている。

<http://www.jma.go.jp/jma/jma-eng/jma-center/rsmc-hp-pub-eg/trackarchives.html>

• 方向スペクトル解析^{ほうこう かいせき}

不規則な性質を示す波浪は、伝播方向（波向）、周波数（周期）、エネルギー（波高）が異なる無限に多くの成分波が不規則な位相で合成されたものであると考えることができる。このような海洋波の成分波別のエネルギー分布を与えるものが方向スペクトルである。方向スペクトルは、一般に、成分波の周波数別のエネルギー分布を与える周波数スペクトルと、各周波数成分の方向別のエネルギー分布を与える方向分布関数の積として表現される場合が多い。現地観測データを用いた方向スペクトル解析法としては、拡張最尤法（EMLM）、最大エントロピー原理法（MEP）、拡張最大エントロピー原理法（EMEP）、ベイズ型モデルによる方向スペクトル推定法（BDM）等が提案されている。

• 流速シア^{りゅうそく}

水平的あるいは鉛直的に隣接する流速間の流速差をいう。この流速差が大きいとその場の乱れが強くなり、物質や運動量が空間的に広がりやすくなる（渦拡散、渦動粘性が強くなる）。

• ADCP

超音波のドップラー効果を利用した多層流向流速計の総称であり、近年の多層流向・流速観測において広く利用されている。流速測定の方法は、水中に超音波パルスを送信し、水中を浮遊する散乱体（プランクトンや塵など）からの反射音波の周波数変化（ドップラーシフト）から、3成分（水平2成分、鉛直成分）の流向・流速を求めてものである。測定する水深帯により、超音波パルスの周波数が異なり、300kHzは165mの水深、600kHzは70mの水深、1,200kHzは24mの水深において適用される。流向・流速の計測は、海底に固定する方式、洋上ブイに固定する方式や航行する船舶に固定して移動しながら測定する方式と、複数の計測方式を選択することが可能である。

• GPV データ

大気の運動を3次元の連続式と運動方程式により計算し、この大気の計算(シミュレーション)から出力される結果(観測データとのデータ同化も採用)を一定の間隔(計算格子間隔)について保存し、データベースとして使用可能にしたものをGPV(Grid Point Value)データと呼ぶ。GPVデータでは、大気の諸元(気圧・風等)の一定時間間隔、一定空間間隔(計算格子点)の数値が一般に提供されている。日本周辺を対象とする場合用いることのできる最新のGPVデータは、①全球客観解析データ、②GSM(日本域)客観解析データ、③メソ客観解析データの3種類があり、①6時間毎、0.5度格子、②6時間毎、経度0.25度×緯度0.2度格子、③3時間毎、5km格子の分解能を有している。

• H-Q^{きょくせん}曲線

一定期間の計測された河川水位(Height)と河川流量(Quantity)から算出される、両者の関係を表す特性曲線と呼ぶ。一般的には二次曲線の形態をしている。河川の観測においては、流量を直接測定することが難しいため、河川水位とH-Q曲線を用いることで河川流量を推定することができる。

• JODC データ

海上保安庁海洋情報部が提供している海底地形、水深のデジタルデータである。データは、位置情報(緯度・経度)と水深値で構成されており、地点データ、等深線データ等に分類される。流況シミュレーションを行うにあたり、空間補間を行うことにより水平格子毎の数値として使用する。

• JCOPE データ

(独)海洋研究開発機構で開発・運営されている、水平格子サイズ $1/12^\circ$ (約10km)、鉛直層分割46層の流動モデルを使用した地球規模の高精度シミュレーション結果である。地球規模の海洋の運動(黒潮等の海流とその分枝流、暖水塊及び冷水塊と、それを形成する渦流(中規模渦))を3次元の連続式と運動方程式により計算し、海洋の水位、流速、水温、塩分の計算結果が一定時間間隔及び空間間隔で提供される。シミュレーションには、観測データを直接取り込み、計算精度を向上させる手法(データ同化手法)が用いられており、信頼性の高い情報となっている。JCOPEには複数のシミュレーションシステムがあり、潮汐なし、日平均データが公開されるJCOPE2の他に、潮汐ありの狭域データ($1/36^\circ$ 格子)が公開されるシステムもある。ここでは、それらのシステムを総じてJCOPEとしている。

※参考 URL : Miyazawa, Y., and T. Yamagata, 2003: The JCOPE ocean forecast system, First ARGO Science Workshop, November 12-14, 2003, Tokyo, Japan.
<http://www.jamstec.go.jp/frsgc/jcope/htdocs/topics/topics031112/poster031112.pdf>

• NCEP

NOAA 環境予測センター、米国大気研究センターで実施・管理されている再解析データ(観測データ、数値モデルによる再現データ)である。海洋の流動シミュレーションにおいて海面条件となる気圧や海面熱収支のデータが一定時間間隔及び空間間隔で公開されている。

※参考 URL : <http://www.esrl.noaa.gov/psd/data/reanalysis/reanalysis.shtml>

- Wave Set-up

波浪が沿岸に到達すると砕波が発生する。砕波が発生すると、砕波が生じた場所より岸側の海域では水位の上昇が発生する。これが Wave Set-up である。波浪が深海から浅海に進行して浅海効果により波高が増大すると、波高に応じた岸向き力が発生する。進行した波浪はある水深の場所で砕波し、それより岸側では徐々に波高が小さくなる。砕波が生じる場所より岸側では砕波が生じる場所に近いほど岸向き力が大きくなるため、全体として岸向きに海水を滞留させる力が生じ、沿岸部の水位を上昇させる。また、海底勾配（沖合の海底地形の変化の割合）が急であるほど、波形勾配（波長と波高の比）が小さいほど水位の上昇量は多くなるため、外洋に面して、沖合にかけて海底地形が急峻に変化している海域や波長の長い波浪が到達しやすい海域では水位の上昇が顕著になる。

- 2-way ネスティング

複数の領域の接続境界において、水位、流向、流速、水温、塩分を、大領域から小領域に受け渡すことと、小領域から大領域に受け渡すことを、同時に行う計算方法を示す。

第7章 参考文献

1) 強風時に海面抵抗が急に低下する (Spray 効果)

- Andreas, E. L, 2004: Spray stress revisited. *Journal of Physical Oceanography*, 34, 1429-1440.

2) サンゴ礁の浅瀬において海底摩擦係数を通常の3倍に設定

- 灘岡和夫・山本高大・有坂和真(2007)：裾礁型サンゴ礁海域における台風期の海水流動空間構造特性と形成メカニズムの解明，*海岸工学論文集*，pp.1066-1070.

3) 砕波モデルについての研究

- Dally, R. W, R. G. Dean and R. A. Dalrymple : Wave height variation across beaches of arbitrary profile, *Journal of Geophysical Research*, 90, C6, 11,917-11,927, November 20, 1985
- Tajima, Y., O.S. Madsen, 2002 Shoaling, breaking and broken wave characteristics. *Proceedings 28th International Conference on Coastal Engineering*, ASCE, Cardiff, 1:222-234.
- Battjes, J.A., 1972. Radiation stresses in short-crested waves. *J. Mar. Res.* 30, 56- 64. Bouws, E., Gunther, H., Rosenthal, W., Vincent
- 高山知司・池田直太・平石哲也(1991)：砕波および反射を考慮した波浪変形計算，*港湾技術研究所報告*，第30巻，第1号，pp.21~67.
- 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.658，II-48，pp.177~187.
- 合田良実(2003)：段階的砕波係数を用いた不規則波浪変形計算モデルの改良，*海洋開発論文集*，19，pp.141-146.
- 合田良実(2004)：不規則波による沿岸流速に及ぼす諸要因の影響検討(Version 4)^a，*ECOH/YG 技術論文 No.2*，2004年8月4日，24p.
- 合田良実(2007)：既往資料に基づく砕波に係る諸統計量の再整理(Version 2)，*ECOH/YG 技術論文 No.7*，2007年11月13日，22p.