

平成 29 年度原子力規制庁委託成果報告書

原子力施設等防災対策等委託費
(放射性物質の海洋拡散抑制モデルの整備)
事業

国立研究開発法人 日本原子力研究開発機構

安全研究センター

平成 29 年 3 月

本報告書は、原子力規制委員会原子力規制庁からの委託により実施した業務の成果をとりまとめたものです。

本報告書に関する問い合わせは、原子力規制庁までお願いします。

目次

■ 1章	本受託事業の目的及び事業実施概要	1
■ 2章	放水砲による散水と発生する放水路流についての分析	2
2.1	放水砲対策により発生する水量の推定	3
2.2	放水砲対策とシルトフェンス上流域流速の推定	4
2.3	シルトフェンスによる抑制効果についての考察	7
■ 3章	海水流動場及び放射性核種動態シミュレーション体系	11
3.1	3次元 Dual- σ 座標系モデルの概略	12
3.2	モデルの支配方程式	13
3.3	Dual- σ 座標系モデルのシミュレーションへの実装方法およびテスト計算	22
3.4	風および日射による影響	31
3.5	堤防およびシルトフェンスのモデル化及びその効果	40
■ 4章	シルトフェンスの変形動作（モデル及び水槽実験）	49
4.1	理論モデル	50
4.2	膜状物体の変形のモデル化	54
4.3	水面固定条件下での膜体変形シミュレーション	57
4.4	実開渠体系での計算条件と計算結果	58
4.5	開水路計算手法	60
4.6	シルトフェンスモデル検証のための水槽実験	62
■ 5章	シルトフェンス動作コードと港湾コードとの接続	86
5.1	シルトフェンス変形動作を組み込んだ非静水圧コードの静水圧近似コードへの接続	86
5.2	ネスティング接続技術を組み込んだ海洋・港湾シミュレーションコード	87
5.3	非静水圧3次元詳細流体シミュレーションコードとの接続	88
5.4	検証対象と動作の検証例	89
■ 6章	本事業のまとめ	93

■ 1章 本受託事業の目的及び事業実施概要

本受託事業の目的は、原子炉施設からの放射性物質の海洋拡散抑制のための対策の一つとして設置が検討されているシルトフェンスに対し、放射性物質拡散抑制に係る知見及びデータ等を取得・整備することである。本事業にて取得・整備する対象は、放射性物質抑制に係りシルトフェンスに対し妥当な解析を実施可能とするモデル（理論及び解析方法を含む）とそれらを実装したシミュレーション体系及び水槽実験による検証結果である。

以下、本報告書の構成を記す。2章では、原子力発電所事故時におけるシルトフェンス運用時の状況を推定した後、シルトフェンスによる拡散抑制効果に対して港湾やシルトフェンス敷設環境を基に定性的な考察を示す。

3章では、上記2章の分析結果を踏まえ、本事業の仕様に従い、原子力発電所港湾レベルのスケールに対して、海水流動場とそれにより移流・拡散する放射性物質の動態をシミュレーションするコードについて必要なモデル（理論及び実装法）等を記し、更に理論及びシミュレーションにより自明且つ簡単な検証例等について記す。3章で詳述するシミュレーション手法は、静水圧近似を施した多重 σ モデルを採用している。これらの手法は3次元の海水流動場を比較的大きなスケールで記述する際に必須な手法であり、長年に渡る様々な海洋シミュレーション研究の蓄積の下、開発されてきた。本事業ではこの枠組みを原子力発電所港湾レベルの解析に適用した。3章ではそのシミュレーションの枠組みについて詳述し、更に簡単な検証例等も付記する。

4章では、本事業の中心となるシルトフェンス変形動作についての理論及びシミュレーションモデルとコードへの実装法等を詳述し、シミュレーションの検証に用いる水槽実験との比較検証結果について記す。理論については、これまでに提唱されてきたシルトフェンスの鉛直方向の変形動作（「ふかれ」と呼ばれる）を記述する理論をレビューし、今日の見地からその汎用性を指摘する。つまり、「ふかれ」を記述する理論が、本事業の目的であるシルトフェンスの放射性核種拡散抑制に対する一つの評価法として、適用範囲に注意すれば十分に利用可能であることを示す。次に、シミュレーションモデルとして、最近提案された流体と相互作用し変形動作する膜体シミュレーションモデルを示し、シミュレーションコードへの実装と、実際の港湾環境に対応し、矩形の開水路を対象として得られる「ふかれ」と流速その他の量との関係を示す。4章の後半にて報告する水槽実験は、矩形形状水槽を用い、矩形開水路内での定常的な流動を記述する3次元流体コードとそれと共に動作するシルトフェンス変形動作モデルの検証を行うため実施する。複数のポンプを用いて流速の異なる開水路定常流を準備し、その後、アクリル薄板やシルトフェンス材（主にシルトフェンス実物片だが比較のため一部模擬材も使用）をその定常流に対し垂直に垂下し、流動を抑制した時の効果（流動に応答し「ふかれ」た状況）を検証する。

5章は、4章にて詳述し検証したシルトフェンス変形動作モデルを組み込んだ3次元の非静水圧詳細流体コードと3章で詳述した港湾領域で海水流動場及び放射性核種の動態をシミュレーションする静水圧近似3次元コードとの接続技術とシミュレーションによる簡単な検証結果について記す。

6章は2～5章までに記した研究内容、開発した技術、シミュレーション結果及び実験検証結果等のまとめである。

■ 2章 放水砲による散水と発生する放水路流についての分析

原子力発電所事故において、放射性物質の環境中への放出に至る事象を抑止するため、幾重もの抑止対策が準備されている。その最終手段として、原子炉建屋から外部大気環境へと放出される放射性物質の拡散を抑止するため、放水砲による液状物質の散布が検討されている。電力事業者の計画では、ポンプ車により原発港湾内の海水をくみ上げ、放水砲による散布によって、放射性物質を散布液滴内に捕獲し降下させ、発電所内港湾に設置したシルトフェンスにより放射性物質の海洋拡散を抑制するとある。図 2-1 は、その抑制対策の模式図であり、各事業者が公開している対策資料を基に作成したイメージ図である。このような抑止対策を提案・準備している事業者と WEB 上で取得可能な資料の入手先一覧を表 2-1 にまとめた。

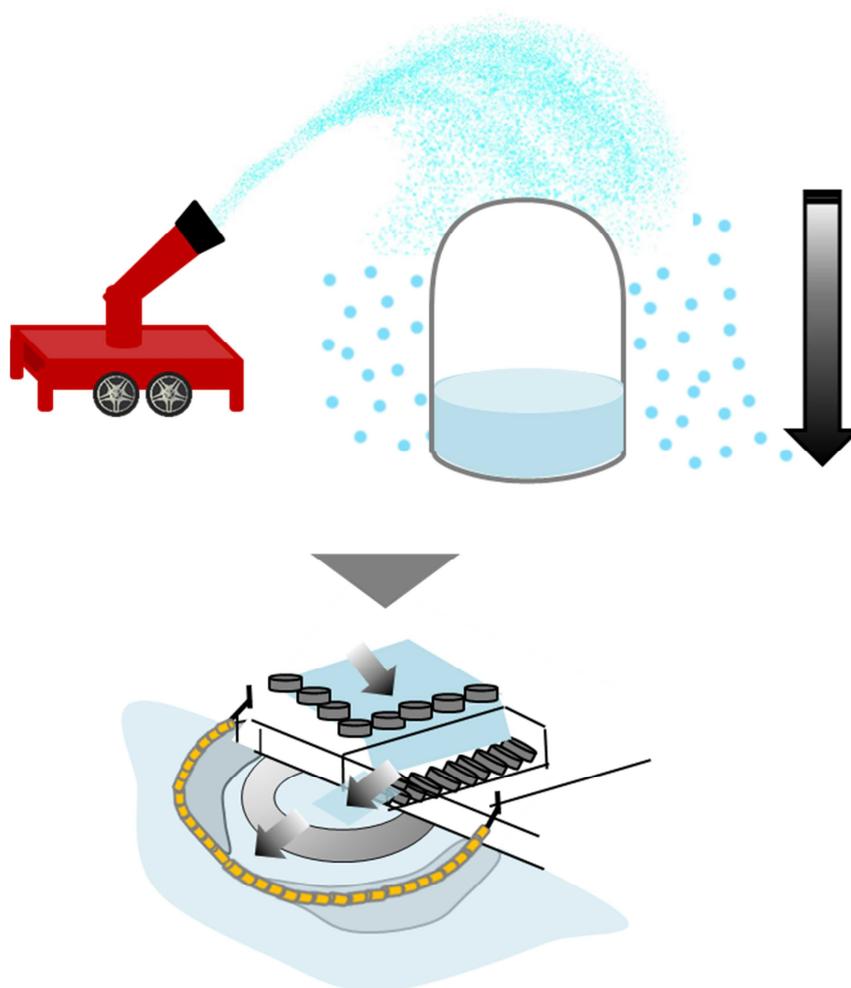


図 2-1 海洋拡散抑制対策の模式図

表 2-1 放水砲等による抑止対策を提案・準備している事業者と WEB 上で取得可能な資料の一覧

九州電力	https://www.jsme.or.jp/pes/Research/A-TS08-08/03/10kyuden.pdf
東北電力	https://www.tohoku-epco.co.jp/electr/genshi/safety/safety/pdf/20131128.pdf
中部電力	https://www.chuden.co.jp/corporate/publicity/pub_release/press/_icsFiles/afieldfile/2014/03/04/0214_02.pdf
九州電力 データブック	http://www.kyuden.co.jp/library/pdf/company/data_book/data_book_2014_4.pdf
関西電力	http://www.atom.pref.fukui.jp/senmon/dai80kai/ref1.pdf
北海道電力	http://www.pref.hokkaido.lg.jp/sm/gat/kankyuu/advisor1-shiryuu2.pdf
四国電力	http://www.yonden.co.jp/press/re1710/data/pr014.pdf
東京電力	http://www.tepco.co.jp/kk-np/data/publication/pdf/2015/27070902.pdf
中国電力 (放水砲のみ)	http://www.energia.co.jp/pr/pamph/pdf/shimane-atom_anzen.pdf

2.1 放水砲対策により発生する水量の推定

表 2-1 に示されている資料及び関連資料に従うと、図 2-1 のような放水砲で散布される液状物質の量は、準備されている放水砲のスペックに従い 1 台当たり最大で 2 万 l/分となっており、その使用する放水砲分の放射性物質を含む液状物質が原子炉建屋壁面や地表面に降下し、放水路及び排水路へと至り、原発港湾へと流れ込むと考えられる（関西電力資料[2-1]）。もし、複数の原子炉を有する原子力発電所にて、隣接する原子炉においても同様の事故が同時発生した場合を考えると、この放水路に流れ込む液状物質の量は 10 万 l/分に及ぶことが考えられ、そうした極限的状況についても考慮する必要がある。

以下では、表 2-1 の資料やその他の資料に従い、水路に流れこむ液状物質の量についての見積もりについて記す。まず、原子力規制委員会の実用発電用原子炉の審査基準に関する内規における「実用発電用原子炉及びその附属施設の技術基準に関する規則の解釈」[2-2]に従うと、「放水設備は、複数の発電用原子炉施設の同時使用を想定し、工場等内発電用原子炉施設基数の半数以上を配備すること」とあり、原子炉 2 基当たり 1 台以上の放水砲を準備する必要がある。この考え方に立ち、各電力会社の配備や運用方針に係る資料[2-3,2-4,2-5,2-6,2-7]を参考とし、4 基の原子炉を有する発電所を例にとると、2 基当たり 1 台の放水砲が稼働し、計 2 台の放水砲による放水が同時に発生する可能性を考える必要があることが分かる。この場合、4 万 l/分の汚染水が集水されることが想定される。こうして、本事業では、上記の極限的状況を含め、その 3 倍の 12 万 l/分の液状物質の流れが放水路及び排水路に集中した場合を最大として考察する（十分な条件）。上記の想定は実際の配備台数や使用時の想定を遥かに超える設定

となっていることを注意するが、極限的条件でのシルトフェンスの変形動作をも評価することを目標とし範囲を設定した。

2.2 放水砲対策とシルトフェンス上流域流速の推定

2.1 にて想定した状況において、事故時に集水された汚染水がシルトフェンス付近でどのような流速値に成り得るかを推定する。図 2-2 は東京電力ホールディングス株式会社・福島第一原子力発電所（1F）の各号機からの放水路の敷設域の模式図であり[2-8]、1Fにおいて、各号機同時に発生する事故を想定し、上記のような放水砲による抑制対策が実施された場合を考えると、各号機から数 100m 程度の長さとなる放水路から海洋へと上記の量の液状物質が流れると想定される。図 2-3 は排水路の断面の模式図であり、凡そ数m長の幅及び高さから成り、断面積を仮に 10m² 平方とした場合、上記の量の液状物質が 1つの水路をフルに満たし流動すると想定すると、1分間に 12 万ℓ（120m³）の液状物質が流れることで、0.2m/sec（120m³/60sec/10m²）の速度で液状物質が海洋(港湾)へと流れ込むことが分かる。

次に、放水路から液状物質が流れ込む港湾環境について考察する。関西電力資料[2-1]に従うと、取水口をカバーする形で、排水路からの放射性物質を含む液状物質の拡散抑制を目的としてシルトフェンスを設置するとしている(図 2-1 参照)。一方、中部電力資料[2-9]では港湾から原子炉ユニットへと導く取水槽内において、放水によって集水された液状物質が流れ込む領域を設けており、それを挟みこむ形でシルトフェンスを設置するとしている(図 2-4 参照)。また、東北電力資料[2-10]では、取水口から離れ、凡そ港湾口にて外洋との境界域にシルトフェンスを設置するとしている(図 2-5 参照)。以上の資料から、シルトフェンスは排水路吐口直後の港湾域や取水層内の排水口近く及び港湾内での外洋との境界域まで様々な領域に設置される可能性があることが分かる。

排水路吐口直後の港湾域での設置状況に対しては、上記にて見積もったように、最大で凡そ 120m³分の液状物質が流れこむとした場合、シルトフェンス設置域では、凡そ最大で 0.2m/sec の速度程度の定常流動場が発生すると想定される。しかし、その状況（港湾内の比較的静謐な領域ではあることを想定）でも、暴風雨等の外的極限的状況での事故も想定した場合、最大で 1.0m/sec 程度の定常流が発生する可能性を考えておく必要があると考えられる（陸域への降雨その他の排水も含め、それらも排水路に集中した場合も想定する必要がある）。また、港湾と外洋の境界域に設置するケースに対しても、暴風雨等の極限状況を想定した場合、上記と同様、最大で 1.0m/sec 程度の定常流を想定しておく必要がある。

従来、シルトフェンスの係留力を推定するため、安全性評価の観点から様々な海水流動場下でシルトフェンスに働く抗力を考察対象としてきたが、凡そ最大で 1.0m/sec 程度の定常流速下での抗力を考察しており、上記の 1.0m/sec は自然環境下で最大程度の条件に匹敵し、事故時に発生する放水により生じた液状物質の流動を加味しない十分条件と見做すことができる。また、放水により泡沫状に散水された場合、集水される液状物質については、気泡を含むため海水より密度が小さくなる場合が考えられる他、上に記したように降雨時等に事故が発生し放水があった場合、液状物質の密度は海水より小さくなるとも考えられ、取水口等より港湾に流出した場合、更に流速が増加することも考えられる。従って、1.0m/sec と 0.2m/sec の和として 1.2m/sec 程度を最大として、シルトフェンスの変形動作を本報告書では調査することとする。本事業では、シルトフェンス鉛直方向の変形動作である「ふかれ」にのみ着目し、その変形動作のモデリング及びシミュレーションコードへの実装と水槽実験による検証を行う。本事業にて実施する水槽実験では、最大で 0.28m/sec 程度の流速を得る（5 章参照）ことが可能であり、

モデルのスケールが実物比 1/20（水深 5m の港湾矩形開渠部に対し水槽水深は 25cm との対比となる）程度であると想定すると、最大速度は、凡そ実環境下で 1.26m/sec（ $\sim\sqrt{20}$ 倍）程度の条件に当たり、上記の範囲をカバーできることが分かる。従って本事業では、その流速域（ $\sim 1.2\text{m/sec}$ ）において、構築したモデリング及び実装コードの検証を、水槽実験を通して実施し、シルトフェンスの鉛直方向における変形動作、即ち「ふかれ」についての定量的検証を行うこととする。

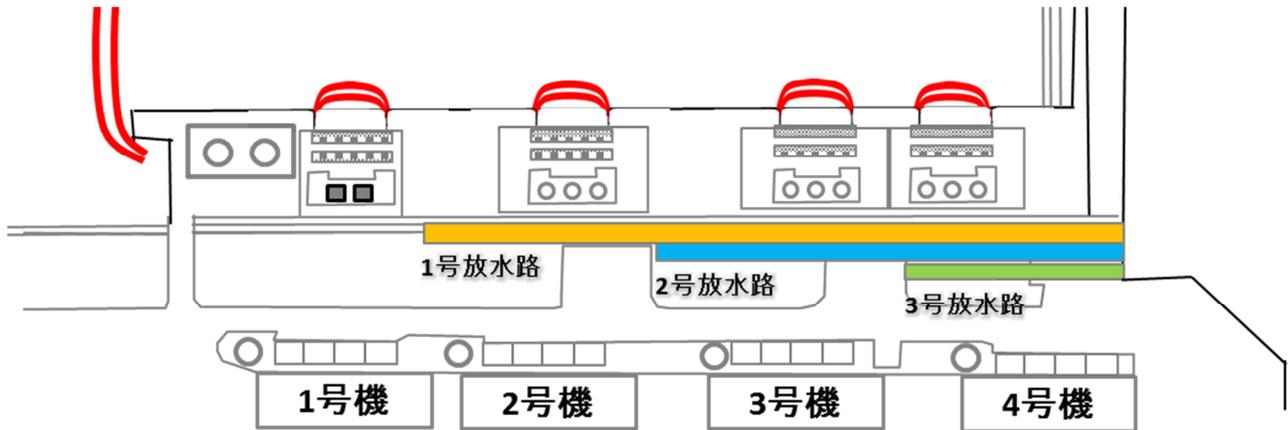


図 2-2 1F での各号機からの放水路の敷設域模式図[2-2]

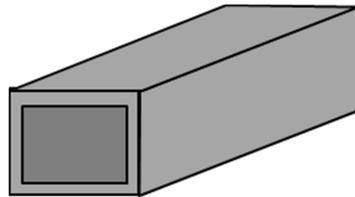


図 2-3 典型的排水路の断面

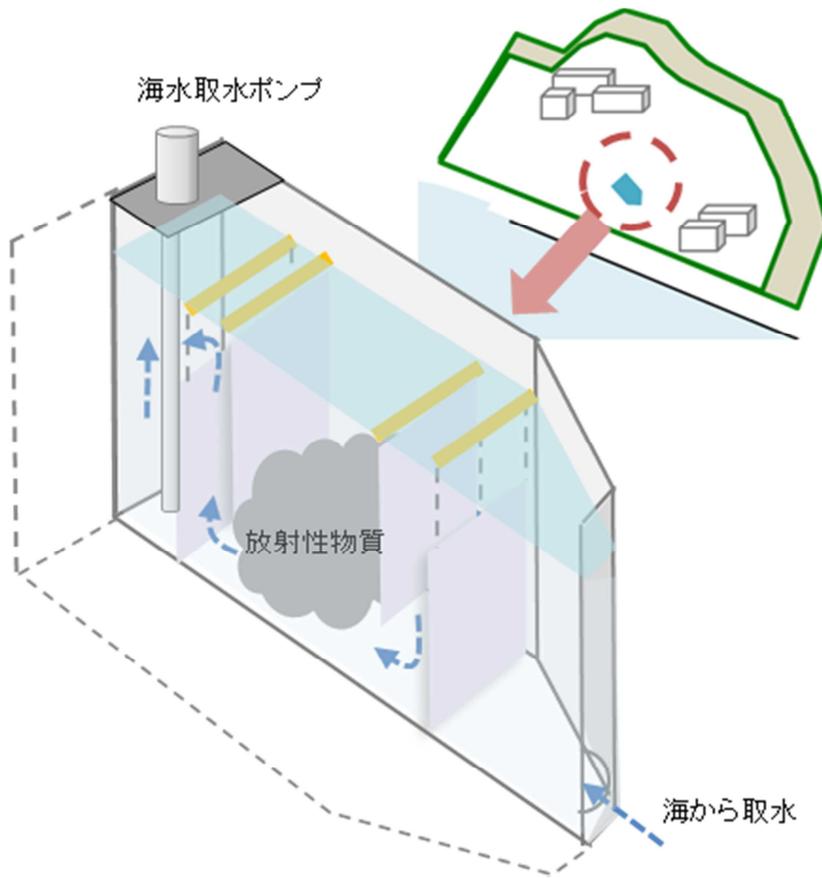


図 2-4 中部電力資料によるシルトフェンス設置案（資料[2-9]を基に模式図作成）

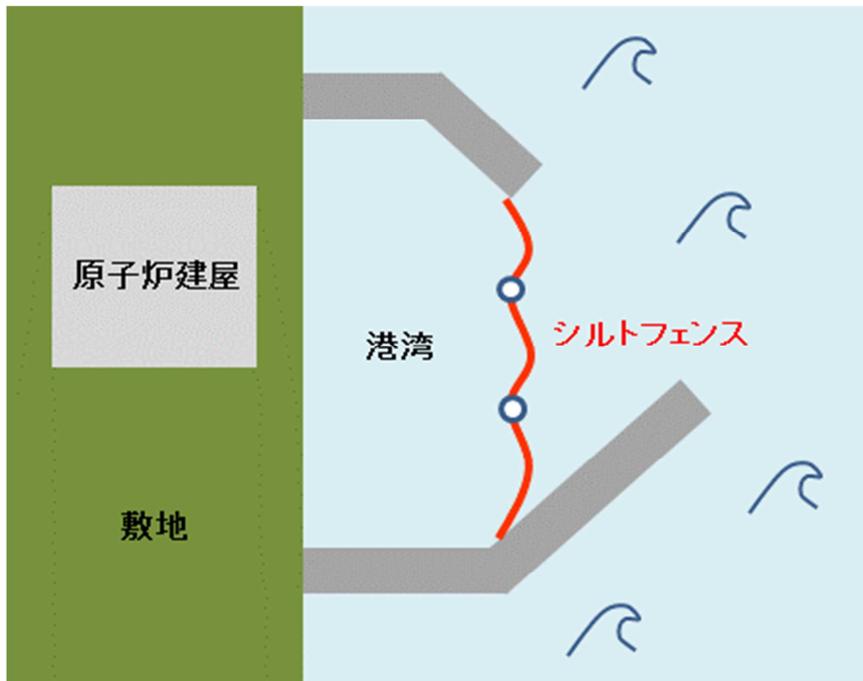


図 2-5 東北電力資料によるシルトフェンス設置案（資料[2-10]を基に模式図作成）

- [2-1] 福島第一原子力発電所事故を踏まえた安全性向上対策の実施状況等について（平成 27 年 5 月 7 日関西電力株式会社）
- [2-2] 原子力規制委員会 実用発電用原子炉の審査基準に関する内規 「実用発電用原子炉及びその附属施設の技術基準に関する規則の解釈」
- [2-3] 関西電力高浜 3, 4 号機の安全性向上対策の取り組みについて（平成 27 年 3 月 26 日関西電力株式会社）
- [2-4] 美浜 3 号炉 設置許可基準規則等への適合性について（重大事故等対処設備）－抜粋（第 5 5 条 工場等外への放射性物質の拡散を抑制するための設備）－（平成 2 8 年 4 月関西電力株式会社）
- [2-5] 九州電力の更なる安全性・信頼性向上への取り組みについて（平成 25 年 5 月 30 日九州電力株式会社）
- [2-6] 玄海原子力発電所 3 号炉及び 4 号炉 設置許可基準等への適合性について（重大事故等対処設備）＜抜粋＞（平成 2 8 年 6 月九州電力株式会社）
- [2-7] 柏崎刈羽原子力発電所における大容量放水設備の配備について（2015 年 7 月 9 日 東京電力株式会社 柏崎刈羽原子力発電所）
- [2-8] 福島第一原子力発電所 1～3 号機放水路の水質調査状況について（平成 26 年 10 月 30 日東京電力株式会社）
- [2-9] 浜岡原子力発電所 4 号機に係る新規制基準への適合性確認審査のための申請について（平成 26 年 2 月 14 日中部電力株式会社）
- [2-10] 原子力発電所の安全性向上に向けて（平成 25 年 11 月東北電力株式会社）

2.3 シルトフェンスによる抑制効果についての考察

シルトフェンスの抑制効果は、原理的に海水流動場に依って生じるシルトフェンスの変形動作により決まり、その変形動作は海水流動場がシルトフェンスに及ぼす力で決まるため、海水流動場の再現と海水流動場により発生するシルトフェンスの変形動作をシミュレーション可能とする必要がある。

以下では、海水流動場を決定する因子と、考えられるシルトフェンスの変形動作について考察し、抑制効果がどのような機構により生じるかについて定性的な議論をする。まず港湾内における海水流動場を決定する主要因を考える。外洋との接続を持つ港湾内では、潮汐が流動を発生させる主要因子であると考えられる（風により発生する波浪の場合、一定の流動場を生成するには十分な空間スケールが必要であり、港湾内等のそれと比べ局所的な領域である）。潮汐については近隣の観測点のデータが公開されており、それらを用いることで十分に潮位変動が予測可能である）、シミュレーションにより、凡そ海水流動場を再現することが可能である。従って、その海水流動場と相互作用するシルトフェンスの変形動作が正しく再現できれば、上記のデータの詳細な分析が可能になると考えられる。その一方、シルトフェンスの変形動作については、鉛直方向で「ふかれ」と呼ばれる特徴的な変形動作が起こる一方、水平方向にも海水から応力を受け変形が起こるため、変形動作は本来 3 次元的である。本報告では、主に鉛直方向にて起こる「ふかれ」を再現する力学理論・数値モデル・シミュレーション実装技術とシミュレーション結果について 4 章にて詳述し、水槽実験による検証の結果について記す。

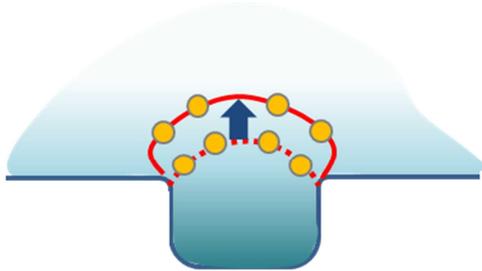
シルトフェンスによる放射性核種抑制効果を調べるためには、シルトフェンス変形動作のシミュレー

ション技術の開発が鍵となることを記してきたが、その技術開発については章を改めて説明する一方、以下では、シルトフェンスの変形動作機構を簡単に論じ、それにより生じる拡散抑制効果について定性的考察を行う。

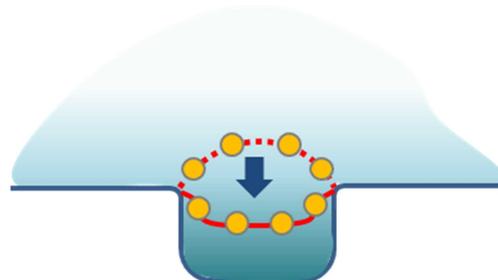
まず、既に記したが、港湾での海水流動場は主に潮汐により周期的な流れが発生する。その他の要因も存在するが、年間を通して常に周期的に流動場に変動を与える要因は潮汐のみであり、最も重要な因子であることが分かる。こうした、周期的に変動する交替流動場がある他、汚染水の流出による流動場もそれに付加されると考えられる。もちろん、風等による流動要因もあるが、定常的流動を引き起こすためには十分な空間スケールが必要である他、風向の変化は潮汐と異なり非周期的であるため、長時間の平均化で概ねその影響は相殺できると考えられる。従って、凡そ潮汐による交替流動場の下、汚染水の流動による流出が付加すると仮定することが現実的であることが分かる。

この仮定の下、干潮時は比較的高濃度の汚染水を含む海水が内側からシルトフェンス外側へと移動する一方、満潮時はより低濃度の海水が外側からシルトフェンス内側へと流れると想定される。その際、シルトフェンスの変形は次のように起こる。干潮時は、内側から外側へと向かう流れが発生するため、その流れにより外向きに変形する（図 2-6(a)参照）。一方、満潮時は、シルトフェンス外側から内側に向かう流れが発生するため、シルトフェンスは内向きに変形する（図 2-6(b)参照）。従って、干潮時はシルトフェンスがカバーする海表面積が増大する一方、満潮時その面積は減少することが分かる。このシルトフェンスのフレキシビリティによるカバーする海表面積の変化は、シルトフェンス内側の海水の一部を常に滞留させることとなる。この事象を簡単に説明すると、例えば干潮時、シルトフェンス内の海水はシルトフェンスが無い場合には潮位変動により港湾内に発生する流れに乗って外側へと自由に移流してしまうが、シルトフェンスがある場合は、増加する水面積×変動後の水深（水深は潮位変動により変動する：干潮時は海水面が下がることから水深は減少する一方、満潮時は海水面が上昇することから水深は増大する）に当たる容積分の海水については、シルトフェンス内に凡そ滞留されることが分かる（図 2.6(c)参照）。つまり、シルトフェンスにより、内側の濃度の高い海水の自由な移流拡散がシルトフェンスの存在により抑制されることが理解できる。これは、シルトフェンスの存在によって水の自由な動きに対し抵抗が生じるからである。その一方、満潮時には、低濃度な海水が外側から流入し、シルトフェンスへと押し寄せ、シルトフェンスは内側へと移動するが、低濃度な海水はシルトフェンスによる抵抗を受けるため、内側への自由な移流が抑制されてしまい、外側に留まることが分かる（図 2.7(d)参照）。このような機構により、内側から汚染水が流出するとした場合、シルトフェンス内側が高濃度となる一方、外側は低濃度となる。つまり内側と外側で濃度差が明確に現れる。但し、潮汐によりシルトフェンス内外の移動する海水量(図 2-6(c-d)水色の斜線領域)と変形による容積変化量(図 2-6(c-d)薄緑色の斜線領域)の関係が重要であることが分かる。つまり、シルトフェンスが変形移動することで発生する容積変化量より遥かに大量の海水が潮汐等で移動してしまう場合(水色の斜線領域容量>>薄緑色の斜線領域)は、シルトフェンスによる海水滞留効果の多くが失われる。これは、そのような場合、殆どの海水が内と外で交換されてしまうためである（「ふかれ」たシルトフェンスの下を通過して交換するため）。図 2-6 に示したようなケースにて、深さ 5m 程度の領域で 1m 程度の潮位変動があるとすると、移動する海水の量はシルトフェンス内の容積の 1/5 程度であり、シルトフェンス変形による容積変化量と凡そ同じ程度（図 2-6(c-d)の薄緑色と水色の斜線でハッチングした部分に相当する）となれば、海水の滞留効果が効果的に働き拡散抑制効果が十分に現れることが分かる。

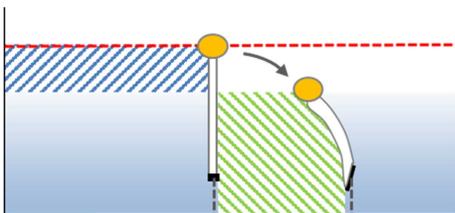
(a) 干潮時



(b) 満潮時



(c) 干潮時



(d) 満潮時

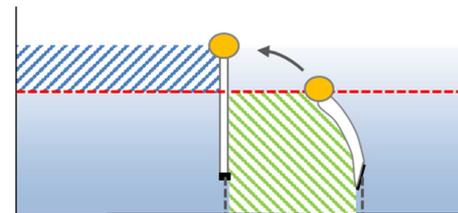


図 2-6 (a-b) 港湾に設置されたシルトフェンスの潮汐に伴う変形動作 (本文参照)。(c-d) それらを鉛直方向から見た模式図 (シルトフェンスの移動方向は矢印にて示した。矢印の方向にシルトフェンスのフロートが移動する。その他については本文参照)。斜線にてハッチングした領域間では、一部の海水が移動しあう。

このようにシルトフェンスが海水流動場 (潮汐交替流動場) により変形する効果と、海水の自由な移流・拡散がシルトフェンスに抑制されることで、シルトフェンス内の容量より十分少ない汚染水が流出している場合、内側の濃度と外側の濃度に明確な差が生じることが分かる。つまり、シルトフェンスの変形と自由な海水流動の抑制により生じるシルトフェンス内の海水滞留により、内側はより高濃度に、外側がより低濃度となる。しかし、定常的にシルトフェンス外に出ていく汚染物質量はトータルとしては、シルトフェンスが無い場合と同じであることに注意する必要がある。これは以下のように説明できる。干潮時にシルトフェンス内側から移流する海水の量は、シルトフェンスが無い場合より抑制され、シルトフェンスの内側が高濃度となるが、結果的には、海水排出量×濃度(内側)で表される移動する汚染物質総量は変わらないからである (常にシルトフェンス内に放出される放射性核種量が一定とした場合、内側濃度が定常状態に達した場合は、シルトフェンス内に放出された分と同じ量の放射性核種量が出ていく必要があるからである)。もし上記のバランスが取れていない場合は、シルトフェンス内の濃度は上昇し続けるか、或いは減少し続けることとなる。従って、シルトフェンス内を高濃度に維持し汚染物質を滞留させるその間に、汚染物質を吸着材等でシルトフェンス内にて回収することができれば、海洋汚染の絶対的抑制効果が期待できることが分かる。また、汚染物質を凝集させシルトフェンス内に沈殿させることができれば、同様に外洋への絶対量の拡散抑制効果が期待できる。しかし、そのような

回収や沈殿等の海水からの除去が無い限り、外洋への流出については、環境に依存した遅延効果はあるが、その殆どが、いずれ流出してしまうことに注意する必要がある。もちろん、上記の議論は、常に汚染物質が流出し続け、海水の流動に伴い移流拡散する溶存成分から成る汚染物質の場合であり、シルトフェンスの本来の目的である懸濁（凝集）成分の抑制と言う観点に立った場合、シルトフェンスは海水を滞留させることから、沈降を促進させ、絶対量の抑制も可能と言える。また、事故時のように当事業で想定しているケースにて十分短時間で流出が止まる場合も上記の議論は当てはまらないことを注意する。

以上、海水流動場によるシルトフェンスの変形動作が、汚染物質の滞留そして自由な移流拡散の抑制に対し重要な役割を果たすことを考察した。こうした機構による効能を定量的に示すためには、種々の環境下にて評価可能なシミュレーション技術を開発することが重要であることが分かる。従って、汎用的なシミュレーションモデルの構築とシミュレーション技術の開発が最終目標となるが、本報告では代表的なシルトフェンスの鉛直方向における変形動作である「ふかれ」の効果を再現可能とする本格的シミュレーション技術の開発とその検証について実施し、その結果を4章にて詳述する。その一方、3章ではシルトフェンスの変形動作の簡易モデル（港湾全体の比較的スケールの大きい流動場の中で、海水流動場に与える抵抗と変形を簡易計算できる3次元のモデル）についても簡単に記す。

■ 3章 海水流動場及び放射性核種動態シミュレーション体系

本3章では、シルトフェンスの汚染物質拡散抑制効果を評価するために必要となる海水流動場とそれに伴い移流・拡散する放射性核種をシミュレーション可能とするシミュレーション体系が満たすべき理論及びモデリングについて詳述し、実際にそれらを実装したシミュレーションコードに果たすシミュレーション条件と簡単な検証例（シミュレーションのみで実施可能である例）等について記す。本事業の主たる目的は、シルトフェンスの動作モデルを構築し、水槽実験を行うことで、そのモデルの検証を実施することであるが、そのためにはシルトフェンスと相互作用する海水流動場を与える3次元（3D）港湾解析コードが必要となる。以下では、港湾内海水流動場を得るため、必要となる3D港湾解析に対し、理論及びモデルの実装法と実際のシミュレーションによる検証例等を記す。尚、港湾解析コードが満たすべき仕様については、原子力規制庁の担当者との協議の上、以下のように決定した。本3章では、規制庁担当者が指示した項目（港湾コードとして必須なモデルを基に、その理論及び実装法や検証例等）を記す。規制庁よりの指示項目は太字としてある一方、青字は受託者側の追加事項である。

- (1) 既存の港湾内での懸濁物質（以下SSと呼ぶ）濃度の時空間変化等を定量評価する解析コード（以下港湾コードと呼ぶ）を調査する。解析コードは以下の性能を満たすこととする。尚、以下(a)-(g)の性能を満たすコードが無い場合、受託者側にて各性能を満たすコードを開発するか既存コードに追加する。
 - (a) 3次元Dual- σ 座標系を用い、観測潮位を境界条件として利用できること。
 - (b) 港湾内海水流動をシミュレーション可能なコードであり、塩分濃度や異なる物性を有する水（淡水）等の流入シミュレーションが可能であること。
 - (c) 放射性物質についてもイオン態及び懸濁態（無機及び有機懸濁態も含めて）移流、拡散挙動が追跡できること。
 - (d) 風の効果や日射による伝熱影響を考慮可能なこと。
 - (e) 港湾内を適切な空間解像度で詳細シミュレーションの解析に適用が見込まれる解析コードであること。
 - (f) 港湾構造物については、堤防等に対し海水透過が考慮可能であること。
 - (g) シルトフェンスについて水平方向への潮位による移動や海水の滞留効果が考慮できること。

以下では、上記各項目に従い、理論・モデルとシミュレーションへの実装技術と簡単な検証結果等について記す。

3.1 3次元 Dual- σ 座標系モデルの概略

上記項目に従い、港湾を含む沿岸一般を計算対象として、計算する領域を多重 (Dual : 即ち 2 重以上を多重とする) に σ 座標系化する理論モデルの概略を記す。 σ 座標系は鉛直方向をあらかじめ設定した格子点数で均等に分割する方法であり、海底面の変化を適切に (滑らかに) 表現することが可能な座標系である。しかし、水深が浅いところでは格子間隔が小さくなるため計算が不安定になることが知られている。そのため、鉛直方向をいくつかの層に分割し、それぞれの層で σ 座標系を用いる多重 σ 座標系が提案されている [3-1]。その多重 σ 座標系を沿岸海洋環境にて実装する際のイメージを図 3-1 に記した。図 3-1 に示したように、沿岸近傍での海底の比較的急峻な変化については、下層と定義した計算格子の領域がその変化を σ 座標系を用いることで吸収する一方、上層と定義した領域については、図 3-1 のように水位変化を σ 座標系を用いることで調節する。

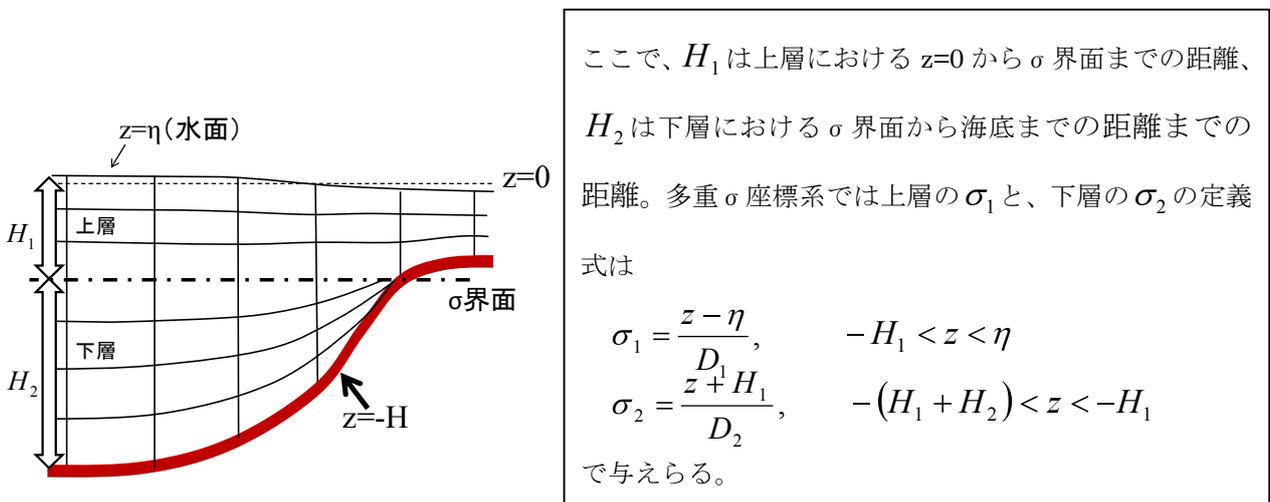


図 3-1 (左図) 多重 σ 座標の沿岸への適用イメージと (右枠) 各式の定義及びその説明

尚、上層及び下層領域の計算格子の厚さとなる D_1 および D_2 は、それぞれ $D_1 = H_1 + \eta$ 、 $D_2 = H_2$ であり、各層の定式化については、通常の σ 座標系モデルとする。但し、上層及び下層の σ 界面での鉛直方向の流速は、

$$w_1^* \Big|_{\sigma_1=-1} = w_2^* \Big|_{\sigma_2=0}$$

を満たす。ここで、上層の鉛直流速 w_1^* と下層の鉛直流速 w_2^* は、

$$w_1^* = w + D_1 \left(\frac{\partial \sigma_1}{\partial t} + u \frac{\partial \sigma_1}{\partial x} + v \frac{\partial \sigma_1}{\partial y} \right), \quad w_2^* = w + D_2 \left(\frac{\partial \sigma_2}{\partial t} + u \frac{\partial \sigma_2}{\partial x} + v \frac{\partial \sigma_2}{\partial y} \right)$$

で与えられる。尚、 u および v は、各々、 x および y 方向の流速である。以上はデカルト座標系のシミ

ュレーションを多重 (Dual) σ 座標系化した場合のモデリングについて記したが、水面位置は $z=0$ に限定せず、水面標高 (z_{surf}) 海底標高 (z_{bottom})、多重 σ の分割標高 (z_{sepa}) の3つを設定し、その変動を追跡可能とする。これにより、水位変動に合わせて上層の計算格子を適切に変化させることができるため、変動する観測潮位を境界条件として利用することができる。

[3-1] 「沿岸海水流動数値計算法の高度化のための Dual- σ 座標系の提案」 土木学会論文集 No.656/II-52,183-192,2000.8 灘岡和夫、吉野忠和、二瓶泰雄

3.2 モデルの支配方程式

3.2.1 水温及び塩分濃度変化を考慮する xyz 直交座標系モデルの流動場の支配方程式

以下にて、基本となる海水流動場とその他の必須な支配方程式 (①~⑥) を記す。まず、xyz 軸直交座標系を用いて基本となる方程式を記し、後に Dual- σ 座標系を用いて得られる方程式を記す。

①海水量保存の方程式

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (3-1)$$

②運動量保存の方程式

$$\frac{\partial u}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(u^2) + \frac{\partial}{\partial y}(uv) + \frac{\partial}{\partial z}(uw) - fv = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} \left(A_x \frac{\partial u}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(A_y \frac{\partial u}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(A_z \frac{\partial u}{\partial z} \right) \quad (3-2)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(uv) + \frac{\partial}{\partial y}(v^2) + \frac{\partial}{\partial z}(vw) + fu = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial x} \left(A_x \frac{\partial v}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(A_y \frac{\partial v}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(A_z \frac{\partial v}{\partial z} \right) \quad (3-3)$$

ここで、 u, v, w は x, y, z 方向の流速(m/s)、 p は圧力(N/m²)、 H は水深(m)、 ρ は密度(kg/m³)、 A_x, A_y, A_z は x, y, z 方向渦動粘性係数(m²/s)、 f はコリオリパラメータである。

③水温の方程式

$$\frac{\partial T}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(uT) + \frac{\partial}{\partial y}(vT) + \frac{\partial}{\partial z}(wT) = \frac{\partial}{\partial x} \left(K_x \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_y \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_z \frac{\partial T}{\partial z} \right) \quad (3-4)$$

ここで、 T は水温であり、 K_x, K_y, K_z は x, y, z 方向渦動拡散係数(m²/s)である。

④塩分濃度の方程式

$$\frac{\partial S}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(uS) + \frac{\partial}{\partial y}(vS) + \frac{\partial}{\partial z}(wS) = \frac{\partial}{\partial x} \left(K_x \frac{\partial S}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_y \frac{\partial S}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_z \frac{\partial S}{\partial z} \right) \quad (3-5)$$

ここで、 S は塩分濃度である。

⑤海表面条件

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} + \left(\frac{\partial}{\partial x}(u\zeta) + \frac{\partial}{\partial y}(v\zeta) - w \right)_{z=\zeta} = 0 \quad (3-6)$$

ここで、 ζ はコントロールボリュームである。

⑥静水圧式、状態方程式

$$P_z = -g \int_z^{\zeta} \rho dz \quad (3-7)$$

$$\rho = f(T, S, P) \quad (3-8)$$

ここで、状態方程式（密度 ρ ）は UNESCO 式を用いて計算する。

3.2.2 水温及び塩分濃度変化を考慮する Dual- σ 座標系モデルの流動場の支配方程式

上記の方程式系に対し、多重（本報告では一例として Dual 系） σ 座標を用いた場合の海水流動場の支配方程式（①'~⑥'）を以下に記す。

①' 海水量保存の式

$$\frac{\partial D_1}{\partial t} + \frac{\partial(D_1 u_1)}{\partial x} + \frac{\partial(D_1 v_1)}{\partial y} + \frac{\partial w_1^*}{\partial \sigma_1} = 0 \quad (\text{上層}) \quad \frac{\partial(D_2 u_2)}{\partial x} + \frac{\partial(D_2 v_2)}{\partial y} + \frac{\partial w_2^*}{\partial \sigma_2} = 0 \quad (\text{下層}) \quad (3-9)$$

ここで、 D_1, D_2 は上層及び下層の水深であり、全体の水深 D は $D=D_1+D_2$ となる。また、以下で開発したプログラムでは下層の水深 D_2 は時間変化しないものとしている。

②' 海水（流体）の運動方程式（上層・下層）

上層についての運動方程式は以下の通りである。

$$\begin{aligned} \frac{\partial(D_1 u_1)}{\partial t} + \frac{\partial(D_1 u_1^2)}{\partial x} + \frac{\partial(D_1 v_1 u_1)}{\partial y} + \frac{\partial(w_1^* u_1)}{\partial \sigma_1} - f v_1 D_1 = -D_1 \left\{ \frac{1}{\rho} \frac{\partial p_1}{\partial x} + g \left((1 + \sigma_1) \frac{\partial D_1}{\partial x} - \frac{\partial H_1}{\partial x} \right) \right\} \\ + \frac{\partial}{\partial x} \left(A_x D_1 \frac{\partial u_1}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(A_y D_1 \frac{\partial u_1}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial \sigma_1} \left(\frac{A_z}{D_1} \frac{\partial u_1}{\partial \sigma_1} \right) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial(D_1 v_1)}{\partial t} + \frac{\partial(D_1 u_1 v_1)}{\partial x} + \frac{\partial(D_1 v_1^2)}{\partial y} + \frac{\partial(w_1^* v_1)}{\partial \sigma_1} + f u_1 D_1 = -D_1 \left\{ \frac{1}{\rho} \frac{\partial p_1}{\partial y} + g \left((1 + \sigma_1) \frac{\partial D_1}{\partial y} - \frac{\partial H_1}{\partial y} \right) \right\} \\ + \frac{\partial}{\partial x} \left(A_x D_1 \frac{\partial v_1}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(A_y D_1 \frac{\partial v_1}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial \sigma_1} \left(\frac{A_z}{D_1} \frac{\partial v_1}{\partial \sigma_1} \right) \end{aligned}$$

(3-10)

下層についての運動方程式は以下の通りである。

$$\begin{aligned} \frac{\partial(D_2 u_2)}{\partial t} + \frac{\partial(D_2 u_2^2)}{\partial x} + \frac{\partial(D_2 v_2 u_2)}{\partial y} + \frac{\partial(w_2^* u_2)}{\partial \sigma_2} - f v_2 D_2 = -D_2 \left\{ \frac{1}{\rho} \frac{\partial p_2}{\partial x} + g \left((1 + \sigma_1) \frac{\partial D_2}{\partial x} - \frac{\partial H_2}{\partial x} \right) \right\} \\ + \frac{\partial}{\partial x} \left(A_x D_2 \frac{\partial u_2}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(A_y D_2 \frac{\partial u_2}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial \sigma_2} \left(\frac{A_z}{D_2} \frac{\partial u_2}{\partial \sigma_2} \right) \\ \frac{\partial(D_2 v_2)}{\partial t} + \frac{\partial(D_2 u_2 v_2)}{\partial x} + \frac{\partial(D_2 v_2^2)}{\partial y} + \frac{\partial(w_2^* v_2)}{\partial \sigma_2} + f u_2 D_2 = -D_2 \left\{ \frac{1}{\rho} \frac{\partial p_2}{\partial y} + g \left((1 + \sigma_2) \frac{\partial D_2}{\partial y} - \frac{\partial H_2}{\partial y} \right) \right\} \\ + \frac{\partial}{\partial x} \left(A_x D_2 \frac{\partial v_2}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(A_y D_2 \frac{\partial v_2}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial \sigma_2} \left(\frac{A_z}{D_2} \frac{\partial v_2}{\partial \sigma_2} \right) \end{aligned} \quad (3-11)$$

ここで、 u, v, w^* は x, y, σ 方向流速(m/s)、 P は圧力(N/m²)、 H は水深(m)、 ρ は密度(kg/m³)、 A_x, A_y, A_z は x, y, z 方向渦動粘性係数(m²/s)、 g は重力加速度(m/s²)、 f はコリオリパラメータである。また、下付きの 1 及び 2 は上層及び下層を示している。

一般に沿岸近傍での海水流動場シミュレーションでは、計算量が膨大となるのを避けるため静水圧近似を使用する。以下、その簡単な補足説明について記す。静水圧近似により、圧力は下式のように表される。

$$\begin{aligned} 0 &= -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p_1}{\partial \sigma_1} - g D_1 \\ 0 &= -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p_2}{\partial \sigma_2} - g D_2 \end{aligned}$$

これらの方程式の解として圧力が下式のように与えられる。

$$\begin{aligned} p_1 &= -\int_{\sigma_1}^0 \rho g D_1 d\sigma \\ p_2 &= -\int_{-1}^0 \rho g D_1 d\sigma - \int_{\sigma_2}^0 \rho g D_2 d\sigma \end{aligned}$$

静水圧近似の下では、これらの圧力を運動方程式に代入し、水平方向の流速を解く。一般に水平方向に対して、急峻な変動がある場合、密度を定数として上層の圧力項は次式のように表される。

$$\begin{aligned} \frac{1}{\rho} \frac{\partial p_1}{\partial x} + g \left((1 + \sigma_1) \frac{\partial D_1}{\partial x} - \frac{\partial H_1}{\partial x} \right) &= -\sigma_1 g \frac{\partial D_1}{\partial x} + g \left((1 + \sigma_1) \frac{\partial D_1}{\partial x} - \frac{\partial H_1}{\partial x} \right) \\ &= g \frac{\partial \eta}{\partial x} \end{aligned}$$

ここで、上式の右辺は水位勾配を意味する。下層の圧力項についても、同様に下式が導出できる。

$$\begin{aligned} \frac{1}{\rho} \frac{\partial p_2}{\partial x} + g \left((1 + \sigma_2) \frac{\partial D_2}{\partial x} - \frac{\partial H_2}{\partial x} \right) &= g \frac{\partial (D_1 - \sigma_2 D_2)}{\partial x} + g \left((1 + \sigma_2) \frac{\partial D_2}{\partial x} - \frac{\partial H_2}{\partial x} \right) \\ &= g \frac{\partial (D_1 + D_2 - H_2)}{\partial x} \\ &= g \frac{\partial \eta}{\partial x} \end{aligned}$$

以上、水位勾配が流れの駆動力となることが分かる。次に連続式を鉛直方向に積分したものを合計すると下式のように与えられる。

$$\frac{\partial D}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\int_{-1}^0 D_1 u_1 d\sigma + \int_{-1}^0 D_2 u_2 d\sigma \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\int_{-1}^0 D_1 v_1 d\sigma + \int_{-1}^0 D_2 v_2 d\sigma \right) = 0$$

上式から全水深 D が求まり、最後に鉛直流速は、連続の式を下層から順に積分し、下層より、

$$w_2^* = -\frac{\partial}{\partial x} \int_{-1}^{\sigma_2} (D_2 u_2) d\sigma - \frac{\partial}{\partial y} \int_{-1}^{\sigma_2} (D_2 v_2) d\sigma$$

となる。上層については、

$$w_1^* = w_2^* |_{\sigma_2=0} - \frac{\partial}{\partial x} \int_{-1}^{\sigma_1} (D_1 u_1) d\sigma - \frac{\partial}{\partial y} \int_{-1}^{\sigma_1} (D_1 v_1) d\sigma - \int_{-1}^{\sigma_1} \frac{\partial D_1}{\partial t} d\sigma$$

と与えられる。上記のように多重 σ 座標系の表記は、上層と下層の二つの σ 座標系を結合するものであり、表記は通常の σ 座標系と同じである。以下では、その表記に従い、水温、塩分、懸濁態、放射性物質の基礎方程式の σ 座標系版を以下に示す。尚、 σ 座標系で用いられる添字*を省略して記す。また、計算領域は2層（上層と下層）とし、上層は自由表面で風の影響や熱収支を、下層は海底巻上げ、沈降を扱う層とする。（尚、海岸付近で上層でも底面と接する格子に関しては、海底巻上げ、沈降を扱う。）

③' 水温の方程式

$$\frac{\partial TD}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} (uTD) + \frac{\partial}{\partial y} (vTD) + \frac{\partial}{\partial \sigma} (wT) = \frac{\partial}{\partial x} \left(DK_x \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(DK_y \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial \sigma} \left(\frac{K_z}{D} \frac{\partial T}{\partial \sigma} \right) \quad (3-12)$$

ここで、 T は水温であり、 K_x, K_y, K_z は x, y, z 方向渦動拡散係数 (m^2/s) である。

④' 塩分濃度の方程式

$$\frac{\partial SD}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(uSD) + \frac{\partial}{\partial y}(vSD) + \frac{\partial}{\partial \sigma}(wS) = \frac{\partial}{\partial x}\left(DK_x \frac{\partial S}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(DK_y \frac{\partial S}{\partial y}\right) + \frac{\partial}{\partial \sigma}\left(\frac{K_z}{D} \frac{\partial S}{\partial \sigma}\right) \quad (3-13)$$

ここで、Sは塩分濃度である。

⑤' 海表面条件

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} + \left(\frac{\partial}{\partial x}(u\zeta) + \frac{\partial}{\partial y}(v\zeta) - w \right)_{z=\zeta} = 0 \quad (3-14)$$

ここで、 ζ はコントロールボリュームである。

⑥' 静水圧式、状態方程式

$$-\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial \sigma} = gD \quad (3-15)$$

$$\rho = f(T, S, P) \quad (3-16)$$

ここで、状態方程式（密度 ρ ）は UNESCO 式を用いて計算する。

3.2.3 懸濁態等の移流拡散の支配方程式

⑥' 各種懸濁態（シルト・砂成分の粒径が異なる有機・無機懸濁態、放射性物質）の移流・拡散方程式については、 σ 座標系にてシルト成分（2種： R_s, R_l ）を以下の式で記述する。

⑦' 無機懸濁態（シルト成分： R_s, R_l ）の移流・拡散方程式

$$\begin{aligned} \frac{\partial R_s D}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(uR_s D) + \frac{\partial}{\partial y}(vR_s D) + \frac{\partial}{\partial \sigma}(wR_s) = \\ \frac{\partial}{\partial x}\left(DK_x \frac{\partial R_s}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(DK_y \frac{\partial R_s}{\partial y}\right) + \frac{\partial}{\partial \sigma}\left(\frac{K_z}{D} \frac{\partial R_s}{\partial \sigma}\right) - S_v \frac{\partial R_s}{\partial \sigma} + DR_{ms} \end{aligned} \quad (3-17)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial R_l D}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(uR_l D) + \frac{\partial}{\partial y}(vR_l D) + \frac{\partial}{\partial \sigma}(wR_l) = \\ \frac{\partial}{\partial x}\left(DK_x \frac{\partial R_l}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(DK_y \frac{\partial R_l}{\partial y}\right) + \frac{\partial}{\partial \sigma}\left(\frac{K_z}{D} \frac{\partial R_l}{\partial \sigma}\right) - S_v \frac{\partial R_l}{\partial \sigma} + DR_{ml} \end{aligned} \quad (3-18)$$

⑧' 砂成分（ R_{sd} ）の移流・拡散の方程式

$$\begin{aligned} \frac{\partial R_{sd} D}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(uR_{sd} D) + \frac{\partial}{\partial y}(vR_{sd} D) + \frac{\partial}{\partial \sigma}(wR_{sd}) = \\ \frac{\partial}{\partial x}\left(DK_x \frac{\partial R_{sd}}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(DK_y \frac{\partial R_{sd}}{\partial y}\right) + \frac{\partial}{\partial \sigma}\left(\frac{K_z}{D} \frac{\partial R_{sd}}{\partial \sigma}\right) - S_v \frac{\partial R_{sd}}{\partial \sigma} + DR_{msd} \end{aligned} \quad (3-19)$$

ここで、 R_{ms} , R_{ml} , R_{msd} はシルト 2 種と砂の単位時間あたりの流入量であり、その位置と量を境界条件として設定する。また、各成分の種数は任意指定が可能である。これにより、任意の種類が無機懸濁態の動態がシミュレーション可能となる。また、 S_v は沈降速度であり、以下の Stokes の法則を用いて設定する。（厳密には、座標変換が必要だが煩雑なため、省略する。）

$$S_v = \frac{1}{18} \left(\frac{\rho_s}{\rho_w} - 1 \right) \frac{gd^2}{\nu}$$

ここで、上記式の記号の定義は以下の通りである。

g : 重力加速度(m/s ²)	ρ_s : 粒子密度(kg/m ³)
ρ_w : 海水密度(kg/m ³)	ν : 海水の動粘性係数(m ² /s)
d : 粒子の平均直径(m)	

⑨'粘土成分 (C_c) の移流・拡散方程式

$$\begin{aligned} \frac{\partial C_c D}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} (u C_c D) + \frac{\partial}{\partial y} (v C_c D) + \frac{\partial}{\partial \sigma} (w C_c) &= D (C_s k_{-l} - C_c k + \gamma (C_l + C_s)) \\ + \frac{\partial}{\partial x} \left(DK_x \frac{\partial C_c}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(DK_y \frac{\partial C_c}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial \sigma} \left(\frac{K_z}{D} \frac{\partial C_c}{\partial \sigma} \right) - S_v \frac{\partial C_c}{\partial \sigma} + DR_{cs} \end{aligned} \quad (3-20)$$

ここで、 R_{cs} は粘土の単位時間あたりの流入量である。位置と量を境界条件として設定することで、任意の地点からの流入をシミュレーションすることが可能である。尚、粘土の凝集・分解は $C_s k_{-l} - C_c k + \gamma (C_l + C_s)$ の項で記述し、 $C_s k_{-l}$ が小粒子態から粘土成分への分解、 $C_c k$ が粘土成分の小粒子態への凝集、 $\gamma (C_l + C_s)$ が大粒子態、小粒子態から粘土成分への分解を表し、 k : 凝集率、 γ : 分解率とし各々係数として設定する。

⑩'各凝集懸濁態 (粒径が異なる 2 種 : C_s, C_l) の移流・拡散方程式

$$\begin{aligned} \frac{\partial C_s D}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} (u C_s D) + \frac{\partial}{\partial y} (v C_s D) + \frac{\partial}{\partial \sigma} (w C_s) &= D (C_l r_{-l} + C_c k - C_s (\gamma + r + k_{-l})) \\ + \frac{\partial}{\partial x} \left(DK_x \frac{\partial C_s}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(DK_y \frac{\partial C_s}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial \sigma} \left(\frac{K_z}{D} \frac{\partial C_s}{\partial \sigma} \right) - S_v \frac{\partial C_s}{\partial \sigma} \end{aligned} \quad (3-21)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial C_l D}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} (u C_l D) + \frac{\partial}{\partial y} (v C_l D) + \frac{\partial}{\partial \sigma} (w C_l) &= D (C_s r - C_l (\gamma + r_{-l})) \\ + \frac{\partial}{\partial x} \left(DK_x \frac{\partial C_l}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(DK_y \frac{\partial C_l}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial \sigma} \left(\frac{K_z}{D} \frac{\partial C_l}{\partial \sigma} \right) - S_v \frac{\partial C_l}{\partial \sigma} \end{aligned} \quad (3-22)$$

γ : 分解率 (大粒子態、小粒子態 \Rightarrow 粘土成分)

k : 凝集率 (粘土成分 \Rightarrow 小粒子態)

r : 凝集崩壊率 (小粒子態 \Leftrightarrow 大粒子態)

各凝集懸濁態の凝集・分解は、 $C_l r_{-l} + C_c k - C_s (\gamma + r)$ 、 $C_s r - C_l (\gamma + r_{-l})$ の項で表す。 $C_l r_{-l}$ は大粒子態から小粒子態への崩壊、 $C_c k$ は粘土成分から小粒子態への凝集、 $C_s (\gamma + r)$ は小粒子態から大粒子

態への凝集と小粒子態から粘土成分への分解を、 $C_s r$ は小粒子態から大粒子態への凝集、 $C_l(\gamma + r_l)$ は大粒子態から粘土成分への分解と大粒子態から小粒子態への崩壊を表す。つまり、 r : 凝集崩壊率、 k : 凝集率、 γ : 分解率とし、各々は係数として設定する。

⑪'各有機懸濁態（粒径が異なる2種： P_s, P_l ）の移流・拡散方程式

$$\begin{aligned} \frac{\partial P_s D}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(u P_s D) + \frac{\partial}{\partial y}(v P_s D) + \frac{\partial}{\partial \sigma}(w P_s) = \\ D(P_r - P_s(\gamma + r) + r_l P_l) + \frac{\partial}{\partial x}\left(DK_x \frac{\partial P_s}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(DK_y \frac{\partial P_s}{\partial y}\right) + \frac{\partial}{\partial \sigma}\left(\frac{K_z}{D} \frac{\partial P_s}{\partial \sigma}\right) \end{aligned} \quad (3-23)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial P_l D}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(u P_l D) + \frac{\partial}{\partial y}(v P_l D) + \frac{\partial}{\partial \sigma}(w P_l) = \\ D(P_s r - P_l(\gamma + r_l)) + \frac{\partial}{\partial x}\left(DK_x \frac{\partial P_l}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(DK_y \frac{\partial P_l}{\partial y}\right) + \frac{\partial}{\partial \sigma}\left(\frac{K_z}{D} \frac{\partial P_l}{\partial \sigma}\right) - S_v \frac{\partial P_l}{\partial \sigma} \end{aligned} \quad (3-24)$$

ここで、各記号は以下の通りである。

- P_r : 生物生産による有機小粒子態生成 ($P_r = \alpha \cdot T(t - tl)$)、 α : 係数、 tl : 遅れ時間
係数 (α) と遅れ時間 (tl) はパラメータとして設定する。
- γ : 分解 (有機大粒子態、有機小粒子態 \Rightarrow 溶存)
- r : 凝集崩壊 (有機小粒子態 \Leftrightarrow 有機大粒子態)

⑫'放射性物質の移流・拡散方程式

放射性物質の吸脱着モデルを以下に記す。粒子に吸着した放射性物質濃度 C_i (i はすべての粒子態の種類) と溶存濃度 W の時間発展方程式は以下の通りとする。

$$\frac{dC_i}{dt} = R_i(K_d(i) \cdot S_i \cdot W - C_i) + C_{i_in} \quad (3-25)$$

$$\frac{dW}{dt} = \sum_i R_i(C_i - K_d(i) \cdot S_i \cdot W) + W_{in} \quad (3-26)$$

ここで、各記号の定義は以下の通りであり、具体的な値はパラメータとして設定する。

- R_i : タイプ i は粒子態の吸脱着の時定数 (1/秒)
- $K_d(i)$: タイプ i は粒子態の分配係数 (10~1000 のオーダー : 大は粒子への吸着が大)
- S_i : タイプ i の粒子態の土砂、各懸濁態濃度
- C_{i_in} : 粒子に吸着した放射性物質の単位時間あたりの放出量。位置と量を設定。
- W_{in} : 溶存態放射性物質の単位時間あたりの放出量。位置と量を設定。

尚、ここで、これらの変数は以下の方程式に従う。

$$\frac{dDC_i}{dt} = \frac{\partial C_i D}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(u C_i D) + \frac{\partial}{\partial y}(v C_i D) + \frac{\partial}{\partial \sigma}(w C_i) \quad (3-27)$$

$$\frac{dDW}{dt} = \frac{\partial WD}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(uWD) + \frac{\partial}{\partial y}(vWD) + \frac{\partial}{\partial \sigma}(wW) \quad (3-28)$$

⑬ 浮遊砂の沈降と海底土の巻き上げ

海底土については堆積粒子による堆積量（鉛直方向の厚さ）の変化を記録するが、地形変化は考慮しない。巻き上げ効果についても考慮するが、厚みの変化は計算に反映させない。沈降、巻き上げについては以下の通りとする。

沈降および巻き上げ：

タイプ i の土砂: S_i (kg/m^3)（密度 ρ_i (kg/m^3)) が一平方メートル当たり、1 タイムステップ (Δt の間に M_i (kg/m^2) 沈降・堆積する。巻き上げ量については、一定の割合を仮定する。

■ 沈降時

沈降限界せん断応力 τ_{drop} を基準に沈降量を以下のように算定する。（ Sv :沈降速度）

$$\tau \geq \tau_{drop} \quad M_i = 0.0 \quad \text{海底面で } Sv = 0 \text{ とし、土砂は海中に漂う。}$$

$$\tau < \tau_{drop} \quad M_i = |Sv| \cdot S_i \times \Delta t \quad \text{土砂は海中から海底に堆積する。}$$

■ 巻き上げ時

巻き上げ限界せん断応力 τ_{raise} を基準に、巻き上げ量を以下のように算定する。

$$\tau \geq \tau_{raise} \quad M_i = Rate \cdot (\tau / \tau_{raise} - 1) \cdot \Delta t \quad \text{土砂は海底から海中へ浮遊する。}$$

$$\tau < \tau_{raise} \quad M_i = 0.0$$

ここで、 $Rate$ は Surface erosion rate というパラメータで、ROMS（公開されている Regional Ocean Modeling System(ROMS)海洋コード：<https://www.myroms.org/>参照）と同じ $Rate = 10^{-4}(\text{kg/m}^2/\text{s})$ とする。また、限界せん断応力は粒径に応じて異なると考えられるが、本モデルではROMSと同様に $\tau_{rais} = 0.1(N/m^2)$ 、 $\tau_{drop} = 0.02(N/m^2)$ とする。尚、海底面のせん断応力 τ は、底面に隣接するメッシュの流速成分を u, v とすると、

$$\tau = \rho \cdot C_b \cdot (u^2 + v^2) \quad (\text{ここに、} C_b \text{ は海底摩擦係数で } C_b = 0.0026 \text{ と設定})$$

として評価する。簡単のため、有機懸濁態の巻き上げ、沈降はないとしている。また、海底土の土砂がなくなった場合の巻き上げもないものとしている。

海底土砂の厚みの変化：

ある時点の海底土砂層の厚さを d^n (m) とすると、1 タイムステップ後 ($n \rightarrow n+1$) の厚さは

$$d^{n+1} = d^n + \sum_i M_i / \rho_i \quad (3-29)$$

と計算できる。ここで、 M_i は、

$$\begin{aligned} \tau < \tau_{drop} \quad (\text{沈降時}) & \quad M_i = |Sv| \cdot Si \times \Delta t, \\ \tau_{drop} < \tau < \tau_{raise} & \quad M_i = 0.0 \\ \tau \geq \tau_{raise} \quad (\text{巻き上げ時}) & \quad M_i = -R \cdot (\tau / \tau_{raise} - 1) \cdot \Delta t \end{aligned}$$

で決定する。

海底での放射性物質の移動：

放射性物質を吸着した土砂が海底に堆積するとした場合、海底土の放射性物質濃度 B_i が変化する。また、堆積した土砂が海底から巻き上げられると海中の土砂に吸着した放射性物質濃度 C_i が変化する。

■ 沈降時

放射性物質の付着した土砂の沈降により、 $M_i C_i / S_i$ (Bq/m²) の放射性物質が堆積し、海底土砂の厚さは d^n から d^{n+1} に増加したとする。ここで、 C_i は海中の土砂に吸着した放射性物質濃度、 S_i は土砂濃度を示している。この時、タイプ i の海底土砂に吸着した放射性物質濃度 B_i は、沈降により

$$B_i^{n+1} = B_i^n \cdot d^n / d^{n+1} + M_i C_i^n / S_i^{n+1} / d^{n+1} \quad (3-30)$$

と変化する。

また、海底に接している一番下の海水部の 3 次元グリッドセルの土砂タイプ i に吸着した放射性物質濃度 C_i は、沈降により以下のように減少する。(Sv: 沈降速度は負、 Δz : 鉛直メッシュ幅)

$$C_i^{n+1} = C_i^n + (Sv \cdot C_i^n / \Delta z) \times \Delta t \quad (3-31)$$

ここで、 C_i は海底に接している一番下のセルにおける放射性物質濃度 (Bq/m³) である。

■ 巻き上げ時

巻き上げも沈降時と同様に考えると、タイプ i の土砂に吸着した放射性物質濃度 B_i は、厚さ Δd_i ($\Delta d = \sum_i M_i / \rho_i$) だけ、巻き上げられるので、 $B_i \cdot \Delta d$ (Bq/m²) の放射性物質が d (m) の領域から減少するため、

$$B_i^{n+1} = B_i^n \cdot d^n / d^{n+1} + B_i^n \cdot \Delta d / d^{n+1} \quad (3-32)$$

となるが、 $\Delta d = d^{n+1} - d^n$ により、 $B_i^{n+1} = B_i^n \cdot$ となり、巻き上げが発生しても、海底土砂タイプ i に吸着した放射性物質濃度 B_i (Bq/m^3) は変化しないことが分かる。一方、海底に接している一番下の海水部の3次元グリッドセルの土砂タイプ i に吸着した放射性物質濃度 C_i は、以下のように変化する。

$$C_i^{n+1} = C_i^n + \Delta d \cdot \text{Area} \cdot B_i^n / \text{Vol} \quad (3-33)$$

ここで、 Vol : 該当グリッドセルの体積(m^3)、 Area : 該当グリッドセルの水平面積(m^2)である。尚、土砂タイプ i が海底にない場合、海底の $B_i^{n+1} = 0 \cdot$ となるため、 C_i は変化しない。

3.3 Dual- σ 座標系モデルのシミュレーションへの実装方法およびテスト計算

3.3.1 方程式の離散化方法

離散化は標準的なスタガードメッシュを用い、物理量の配置も同じとする。解法としては、時間方向に陽解法、移流項に対しては上流差分、粘性・拡散項は中心差分とする。尚、 σ 座標化に伴い、浅い沿岸近傍で鉛直方向メッシュ間隔が非常に小さくなる可能性がある。そこで、鉛直方向の離散化に対しては半陰解法に変更する。

① x 方向の運動方程式の離散化

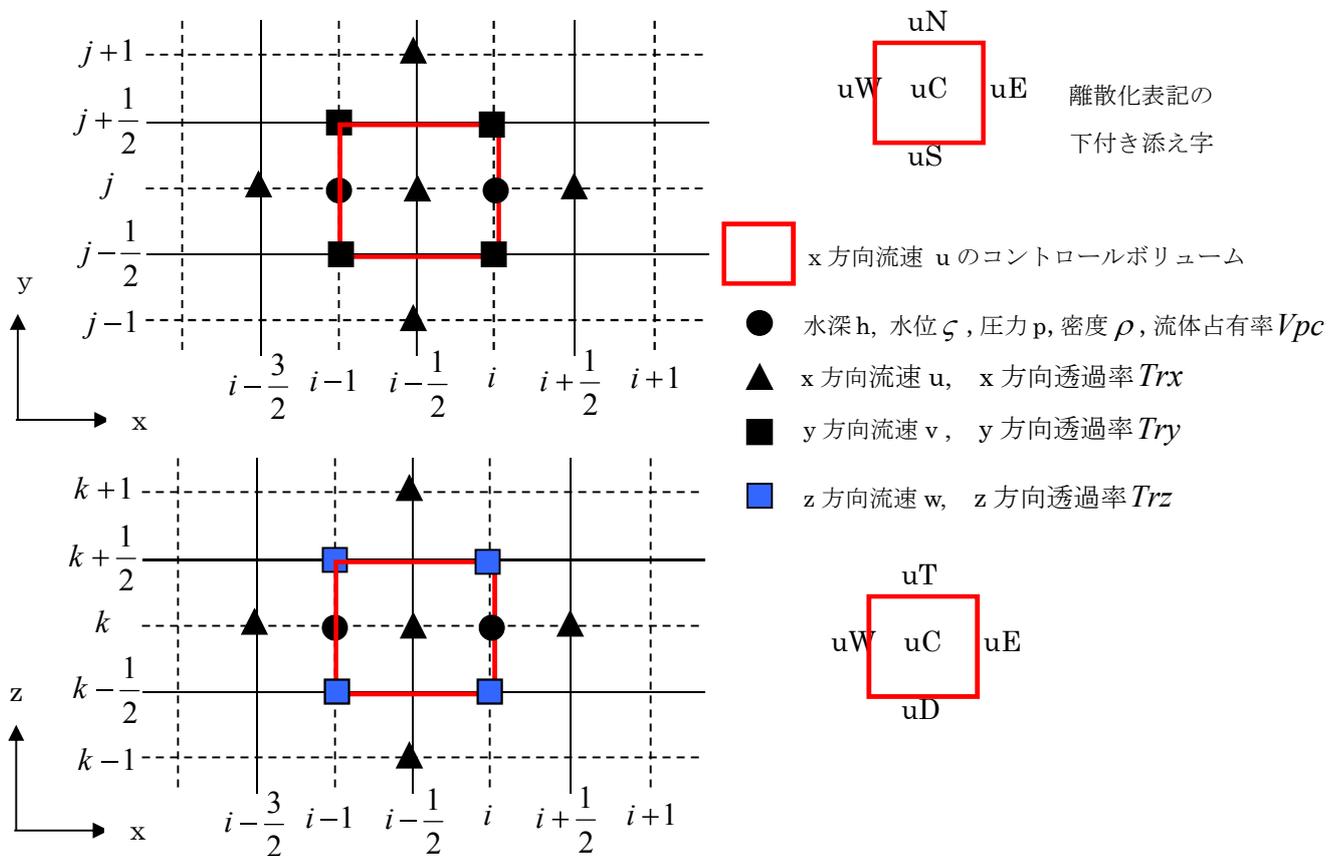


図 3-2 x 方向の流速のコントロールボリューム

離散化式は以下の通り。

$$Vpc_{uc} \frac{u_{i-\frac{1}{2},j,k}^{n+1} - u_{i-\frac{1}{2},j,k}^n}{\Delta t} + dxuu + dyuv + dzuw - Vpc_{uc} fv = - \frac{Vpc_{uc}}{\rho_{i,j,k}} \frac{p_{i+1,j,k}^n - p_{i,j,k}^n}{\Delta x} + viscu \quad (3-34)$$

ここで、 $Vpc_{uc} = \frac{1}{2}(Vpc_{i-1,j,k} + Vpc_{i,j,k})$ である。

・移流項 ($dxuu, dyuv, dzuw$)

$$dxuu = \frac{\partial}{\partial x}(u^2) = \frac{Trx_{uE} u_{uE}(u_{uE}^* - u_{i-\frac{1}{2},j,k}^n) - Trx_{uW} u_{uW}(u_{uW}^* - u_{i-\frac{1}{2},j,k}^n)}{\Delta x} \quad (3-35)$$

$$dyuv = \frac{\partial}{\partial y}(uv) = \frac{Try_{uN} v_{uN}(u_{uN}^* - u_{i-\frac{1}{2},j,k}^n) - Try_{uS} v_{uS}(u_{uS}^* - u_{i-\frac{1}{2},j,k}^n)}{\Delta y} \quad (3-36)$$

$$dyuw = \frac{\partial}{\partial z}(uw) = \frac{Trz_{uT} w_{uT}(u_{uT}^* - u_{i-\frac{1}{2},j,k}^n) - Trz_{uD} w_{uD}(u_{uD}^* - u_{i-\frac{1}{2},j,k}^n)}{\Delta z} \quad (3-37)$$

ここで、

$$Trx_{uE} = \frac{1}{2} \left(Trx_{i-\frac{1}{2},j,k} + Trx_{i+\frac{1}{2},j,k} \right), \quad Trx_{uW} = \frac{1}{2} \left(Trx_{i-\frac{3}{2},j,k} + Trx_{i-\frac{1}{2},j,k} \right)$$

$$Try_{uN} = \frac{1}{2} \left(Try_{i-1,j+\frac{1}{2},k} + Try_{i,j+\frac{1}{2},k} \right), \quad Try_{uS} = \frac{1}{2} \left(Try_{i-1,j-\frac{1}{2},k} + Try_{i,j-\frac{1}{2},k} \right)$$

$$Trz_{uT} = \frac{1}{2} \left(Trz_{i-1,j,k+\frac{1}{2}} + Trz_{i,j,k+\frac{1}{2}} \right), \quad Trz_{uD} = \frac{1}{2} \left(Trz_{i-1,j,k-\frac{1}{2}} + Trz_{i,j,k-\frac{1}{2}} \right)$$

$$u_{uE} = \frac{1}{2} \left(u_{i-\frac{1}{2},j,k}^n + u_{i+\frac{1}{2},j,k}^n \right), \quad u_{uW} = \frac{1}{2} \left(u_{i-\frac{3}{2},j,k}^n + u_{i-\frac{1}{2},j,k}^n \right)$$

$$v_{uN} = \frac{1}{2} \left(v_{i-1,j+\frac{1}{2},k}^n + v_{i,j+\frac{1}{2},k}^n \right), \quad v_{uS} = \frac{1}{2} \left(v_{i-1,j-\frac{1}{2},k}^n + v_{i,j-\frac{1}{2},k}^n \right)$$

$$w_{uT} = \frac{1}{2} \left(w_{i-1,j,k+\frac{1}{2}}^n + w_{i,j,k+\frac{1}{2}}^n \right), \quad w_{uD} = \frac{1}{2} \left(w_{i-1,j,k-\frac{1}{2}}^n + w_{i,j,k-\frac{1}{2}}^n \right)$$

である。また、移流項は中心差分を用いて下式で表される。

$$u_{uE}^* = \frac{1}{2} \left(u_{i-\frac{1}{2},j,k}^n + u_{i+\frac{1}{2},j,k}^n \right), \quad u_{uW}^* = \frac{1}{2} \left(u_{i-\frac{3}{2},j,k}^n + u_{i-\frac{1}{2},j,k}^n \right)$$

$$u_{uN}^* = \frac{1}{2} \left(u_{i-\frac{1}{2},j,k}^n + u_{i-\frac{1}{2},j+1,k}^n \right), \quad u_{uS}^* = \frac{1}{2} \left(u_{i-\frac{1}{2},j-1,k}^n + u_{i-\frac{1}{2},j,k}^n \right)$$

$$u_{uT}^* = \frac{1}{2} \left(u_{i-\frac{1}{2},j,k}^n + u_{i-\frac{1}{2},j,k+1}^n \right), \quad u_{uD}^* = \frac{1}{2} \left(u_{i-\frac{1}{2},j,k-1}^n + u_{i-\frac{1}{2},j,k}^n \right)$$

・コリオリ項 (fv)

$$fv = f \cdot \frac{1}{4} \left(v_{i,j-\frac{1}{2},k}^n + v_{i-1,j-\frac{1}{2},k}^n + v_{i,j+\frac{1}{2},k}^n + v_{i-1,j+\frac{1}{2},k}^n \right) \quad (3-38)$$

・粘性項 ($viscu$)

$$\begin{aligned} viscu = \frac{1}{\Delta x} & \left(Trx_{uE} Ax_{i,j,k} \frac{u_{i+\frac{1}{2},j,k}^n - u_{i-\frac{1}{2},j,k}^n}{\Delta x} - Trx_{uW} Ax_{i-1,j,k} \frac{u_{i-\frac{1}{2},j,k}^n - u_{i-\frac{3}{2},j,k}^n}{\Delta x} \right) \\ & + \frac{1}{\Delta y} \left(Try_{uN} Ay_{uN} \frac{u_{i-\frac{1}{2},j+1,k}^n - u_{i-\frac{1}{2},j,k}^n}{\Delta y} - Try_{uS} Ay_{uS} \frac{u_{i-\frac{1}{2},j,k}^n - u_{i-\frac{1}{2},j-1,k}^n}{\Delta y} \right) \\ & + \frac{1}{\Delta z} \left(Trz_{uT} Az_{uT} \frac{u_{i-\frac{1}{2},j,k+1}^n - u_{i-\frac{1}{2},j,k}^n}{\Delta z} - Trz_{uD} Az_{uD} \frac{u_{i-\frac{1}{2},j,k}^n - u_{i-\frac{1}{2},j,k-1}^n}{\Delta z} \right) \end{aligned} \quad (3-39)$$

以下では、実際にシミュレーションに必要な海底摩擦について詳述する。

■ 海底摩擦項の扱い

海底は水平であるとして、 x, y 方向の摩擦力を S_x, S_y をとして、以下のマンングの公式から算出する。

$$S_x = g \frac{n^2 u h \sqrt{u^2 + v^2}}{h^{4/3}}, \quad S_y = g \frac{n^2 v h \sqrt{u^2 + v^2}}{h^{4/3}} \quad n \text{ はマンングの粗度係数}$$

3次元化に伴って以下の扱いとする。

$$\left. \frac{\partial}{\partial z} \left(A_z \frac{\partial u}{\partial z} \right) \right|_{\text{海底面付近}} = \frac{1}{\Delta z} \left(A_z \frac{\Delta u}{\Delta z} - fb_x \right), \quad fb_x = C_b u \sqrt{u^2 + v^2}$$

$$\left. \frac{\partial}{\partial z} \left(A_z \frac{\partial v}{\partial z} \right) \right|_{\text{海底面付近}} = \frac{1}{\Delta z} \left(A_z \frac{\Delta v}{\Delta z} - fb_y \right), \quad fb_y = C_b v \sqrt{u^2 + v^2}$$

ここで、 C_b は海底摩擦係数であり $C_b = 0.0026$ とする。

② y 方向の運動方程式の離散化

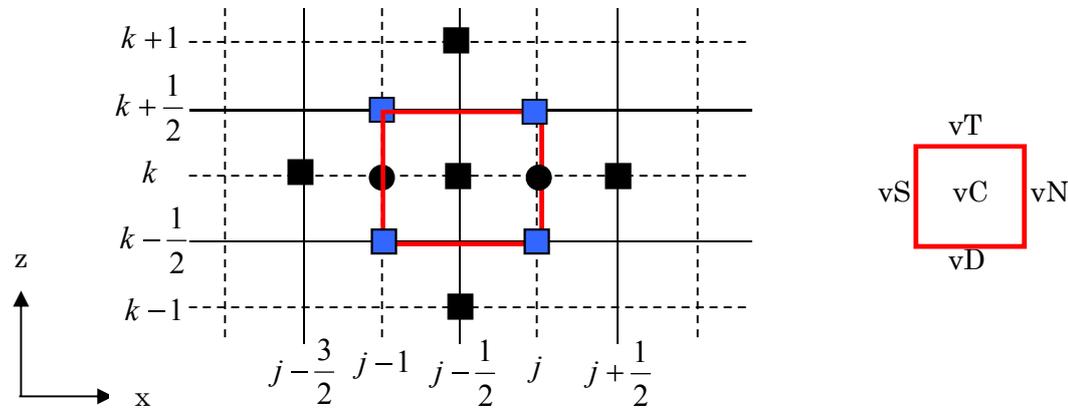
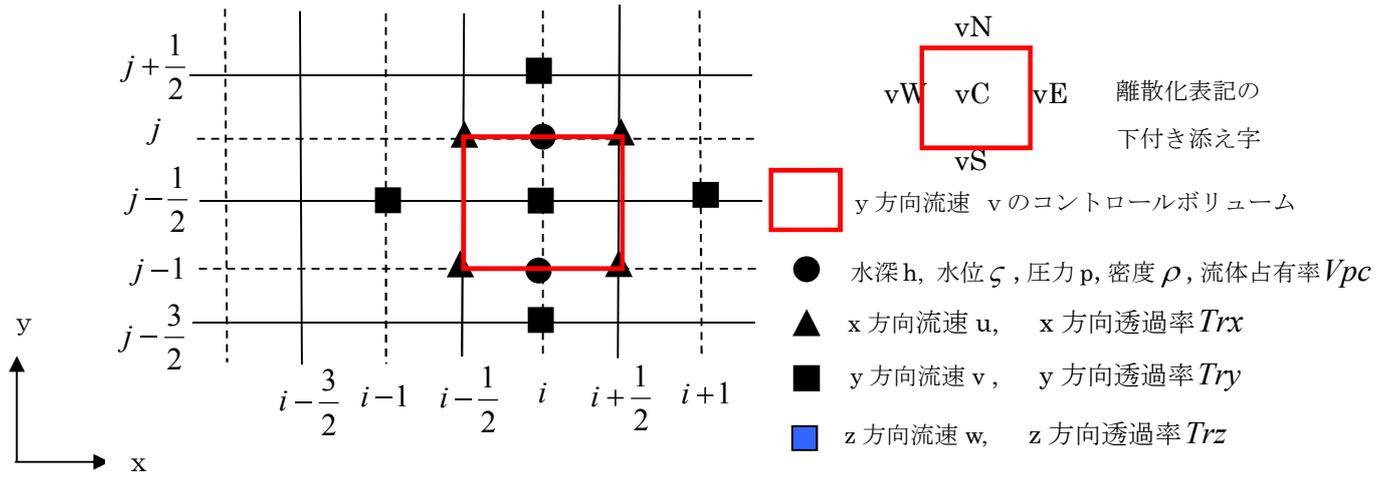


図 3-3 y 方向の流速のコントロールボリューム

y 方向についての離散化は x 方向と同様のため、記載は省略する。

③鉛直流速の算定の離散化

海水量保存の方程式 $\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0$ を以下のように離散化し、実装する。

$$\frac{Trx_{i+\frac{1}{2},j,k} u_{i+\frac{1}{2},j,k}^n - Trx_{i-\frac{1}{2},j,k} u_{i-\frac{1}{2},j,k}^n}{\Delta x} + \frac{Try_{i,j+\frac{1}{2},k} v_{i,j+\frac{1}{2},k}^n - Try_{i,j-\frac{1}{2},k} v_{i,j-\frac{1}{2},k}^n}{\Delta y} + \frac{Trz_{i,j,k+\frac{1}{2}} w_{i,j,k+\frac{1}{2}}^n - Trz_{i,j,k-\frac{1}{2}} w_{i,j,k-\frac{1}{2}}^n}{\Delta z} = 0$$

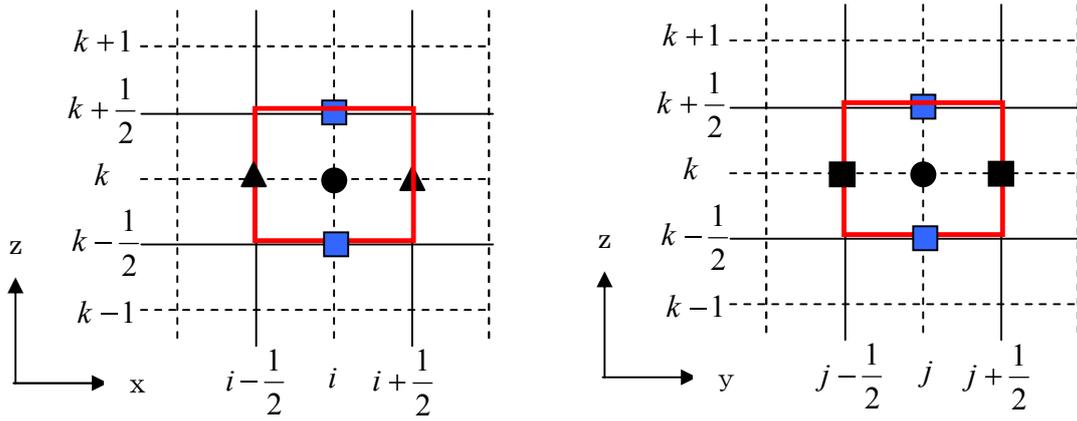


図 3-4 z 方向の流速のコントロールボリューム

④海表面条件

$\frac{\partial \zeta}{\partial t} + \left(\frac{\partial}{\partial x}(u\zeta) + \frac{\partial}{\partial y}(v\zeta) - w \right)_{z=\zeta} = 0$ を以下のコントロールボリュームで離散化する。

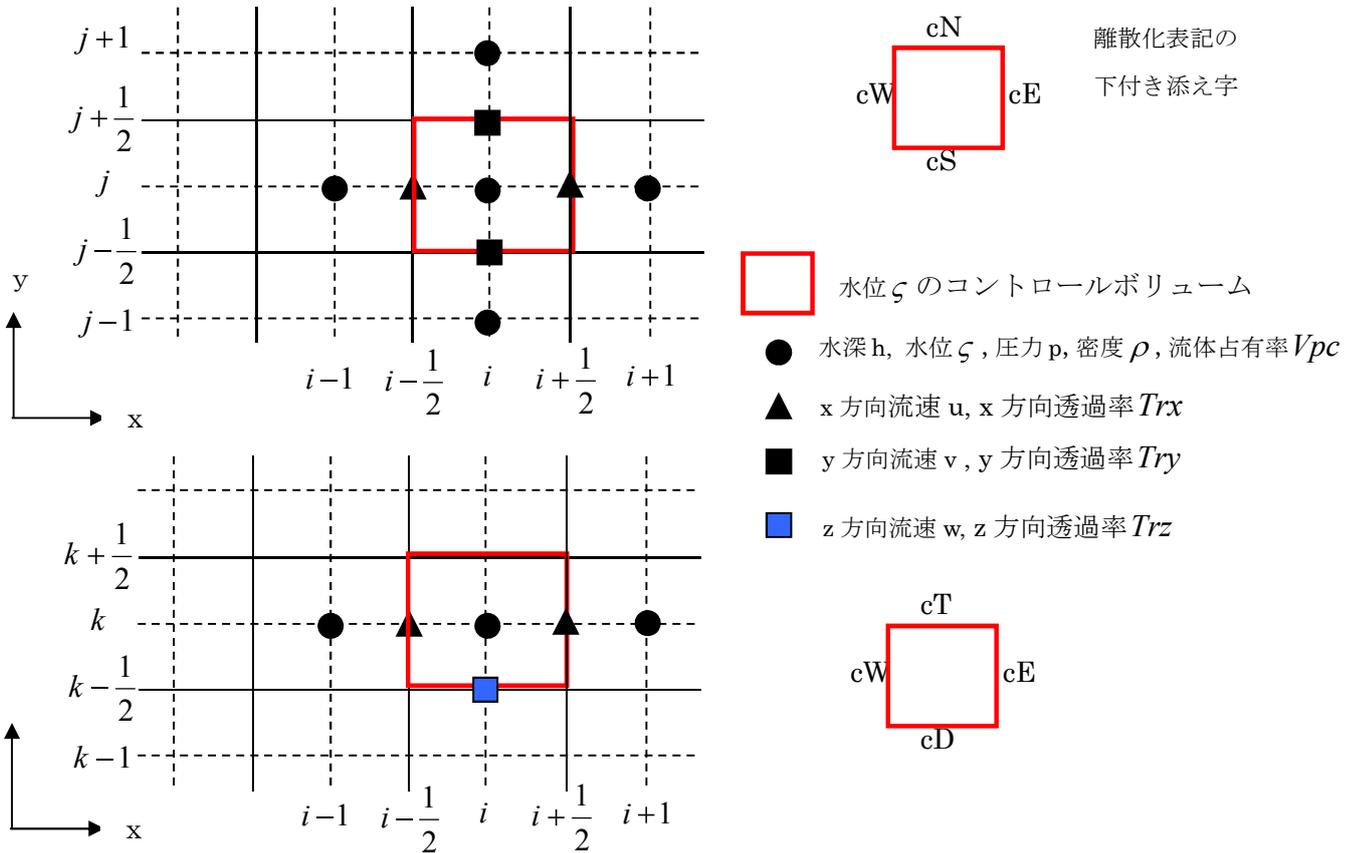


図 3-5 水位のコントロールボリューム (鉛直メッシュ番号 k を表面メッシュ)

$$\frac{\zeta_{i,j,k}^{n+1} - \zeta_{i,j,k}^n}{\Delta t} + dxu\zeta + dyv\zeta - w_{i,j,k-\frac{1}{2}} = 0 \quad (3-40)$$

$$dxu\zeta = \frac{\partial}{\partial x}(u\zeta) = \frac{1}{\Delta x} \left(\text{Tr}x_{i+\frac{1}{2},j,k} u_{i+\frac{1}{2},j,k}^{n+1} \zeta_{cE}^* - \text{Tr}x_{i-\frac{1}{2},j,k} u_{i-\frac{1}{2},j,k}^{n+1} \zeta_{cW}^* \right) \quad (3-41)$$

$$dyv\zeta = \frac{\partial}{\partial y}(v\zeta) = \frac{1}{\Delta y} \left(\text{Tr}y_{i,j+\frac{1}{2},k} v_{i,j+\frac{1}{2},k}^{n+1} \zeta_{cN}^* - \text{Tr}y_{i,j-\frac{1}{2},k} v_{i,j-\frac{1}{2},k}^{n+1} \zeta_{cS}^* \right) \quad (3-42)$$

ここで、移流項は一次精度上流差分を用いて評価する。具体的には以下のように流速を考慮して水位のコントロールボリューム ζ^* を決定する。

$$\zeta_{cE}^* = \zeta_{i,j,k}^n \quad (u_{i+\frac{1}{2},j,k}^{n+1} \geq 0), \quad \zeta_{cE}^* = \zeta_{i+1,j,k}^n \quad (u_{i+\frac{1}{2},j,k}^{n+1} < 0)$$

$$\zeta_{cW}^* = \zeta_{i-1,j,k}^n \quad (u_{i-\frac{1}{2},j,k}^{n+1} \geq 0), \quad \zeta_{cW}^* = \zeta_{i,j,k}^n \quad (u_{i-\frac{1}{2},j,k}^{n+1} < 0)$$

$$\zeta_{cN}^* = \zeta_{i,j,k}^n \quad (v_{i,j+\frac{1}{2},k}^{n+1} \geq 0), \quad \zeta_{cN}^* = \zeta_{i,j+1,k}^n \quad (v_{i,j+\frac{1}{2},k}^{n+1} < 0)$$

$$\zeta_{cS}^* = \zeta_{i,j-1,k}^n \quad (v_{i,j-\frac{1}{2},k}^{n+1} \geq 0), \quad \zeta_{cS}^* = \zeta_{i,j,k}^n \quad (v_{i,j-\frac{1}{2},k}^{n+1} < 0)$$

⑤水温の方程式の離散化

$$\frac{\partial T}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(uT) + \frac{\partial}{\partial y}(vT) + \frac{\partial}{\partial z}(wT) = \frac{\partial}{\partial x} \left(K_x \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_y \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_z \frac{\partial T}{\partial z} \right) \quad (3-43)$$

を離散化する。

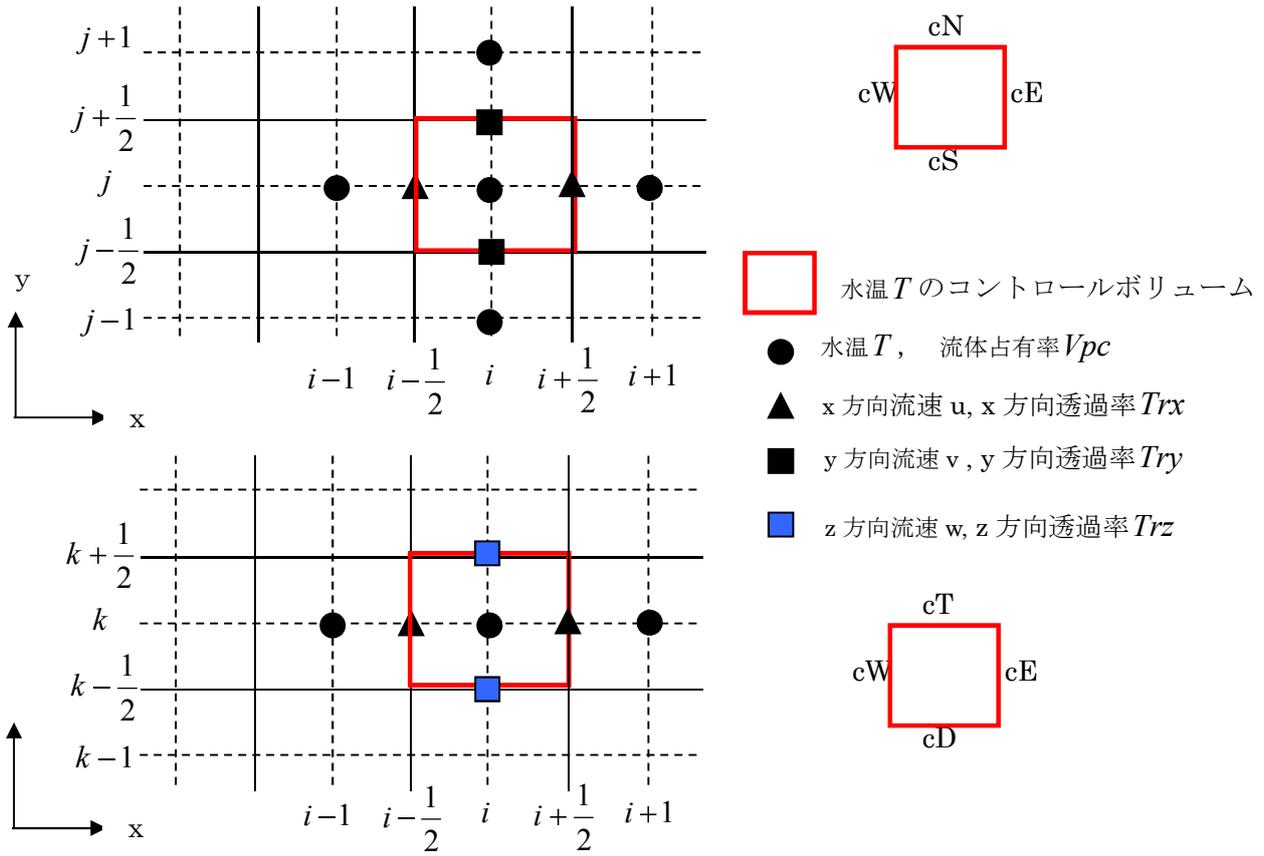


図 3-6 水温のコントロールボリューム

$$Vpc_{i,j,k} \frac{T_{i,j,k}^{n+1} - T_{i,j,k}^n}{\Delta t} + dxuT + dyvT + dzwT = difT \quad (3-44)$$

■ 移流項 ($dxuT, dyvT, dzwT$)

$$dxuT = \frac{\partial}{\partial x}(uT) = \frac{1}{\Delta x} \left(Trx_{i+\frac{1}{2},j,k} u_{i+\frac{1}{2},j,k}^{n+1} T_{cE}^* - Trx_{i-\frac{1}{2},j,k} u_{i-\frac{1}{2},j,k}^{n+1} T_{cW}^* \right) \quad (3-45)$$

$$dyvT = \frac{\partial}{\partial y}(vT) = \frac{1}{\Delta y} \left(Try_{i,j+\frac{1}{2},k} v_{i,j+\frac{1}{2},k}^{n+1} T_{cN}^* - Try_{i,j-\frac{1}{2},k} v_{i,j-\frac{1}{2},k}^{n+1} T_{cS}^* \right) \quad (3-46)$$

$$dywT = \frac{\partial}{\partial z}(wT) = \frac{1}{\Delta z} \left(Trz_{i,j,k+\frac{1}{2}} w_{i,j,k+\frac{1}{2}}^{n+1} T_{cT}^* - Trz_{i,j,k-\frac{1}{2}} w_{i,j,k-\frac{1}{2}}^{n+1} T_{cD}^* \right) \quad (3-47)$$

ここで、移流項は一次精度上流差分で離散化して評価する。具体的には以下のように流速を考慮して下式で計算する。

$$\begin{aligned}
T_{cE}^* &= T_{i,j,k}^n \quad (u_{i+\frac{1}{2},j,k}^{n+1} \geq 0), & T_{cE}^* &= T_{i+1,j,k}^n \quad (u_{i+\frac{1}{2},j,k}^{n+1} < 0) \\
T_{cW}^* &= T_{i,j,k}^n \quad (u_{i-\frac{1}{2},j,k}^{n+1} \geq 0), & T_{cW}^* &= T_{i,j,k}^n \quad (u_{i-\frac{1}{2},j,k}^{n+1} < 0) \\
T_{cN}^* &= T_{i,j,k}^n \quad (v_{i,j+\frac{1}{2},k}^{n+1} \geq 0), & T_{cN}^* &= T_{i,j+1,k}^n \quad (v_{i,j+\frac{1}{2},k}^{n+1} < 0) \\
T_{cS}^* &= T_{i,j,k}^n \quad (v_{i,j-\frac{1}{2},k}^{n+1} \geq 0), & T_{cS}^* &= T_{i,j,k}^n \quad (v_{i,j-\frac{1}{2},k}^{n+1} < 0) \\
T_{cT}^* &= T_{i,j,k}^n \quad (w_{i,j,k+\frac{1}{2}}^{n+1} \geq 0), & T_{cT}^* &= T_{i,j,k+1}^n \quad (w_{i,j,k+\frac{1}{2}}^{n+1} < 0) \\
T_{cD}^* &= T_{i,j,k-1}^n \quad (w_{i,j,k-\frac{1}{2}}^{n+1} \geq 0), & T_{cD}^* &= T_{i,j,k}^n \quad (w_{i,j,k-\frac{1}{2}}^{n+1} < 0)
\end{aligned}$$

■ 拡散項 ($difT$)

$$\begin{aligned}
difT &= \frac{1}{\Delta x} \left(Trx_{i+\frac{1}{2},j,k} Kx_{uE} \frac{T_{i+1,j,k}^n - T_{i,j,k}^n}{\Delta x} - Trx_{i-\frac{1}{2},j,k} Kx_{uW} \frac{T_{i,j,k}^n - T_{i-1,j,k}^n}{\Delta x} \right) \\
&+ \frac{1}{\Delta y} \left(Try_{i,j+\frac{1}{2},k} Ky_{uN} \frac{T_{i,j+1,k}^n - T_{i,j,k}^n}{\Delta y} - Try_{i,j-\frac{1}{2},k} Ky_{uS} \frac{T_{i,j,k}^n - T_{i,j-1,k}^n}{\Delta y} \right) \\
&+ \frac{1}{\Delta z} \left(Trz_{i,j,k+\frac{1}{2}} Kz_{uT} \frac{T_{i,j,k+1}^n - T_{i,j,k}^n}{\Delta z} - Trz_{i,j,k-\frac{1}{2}} Kz_{uD} \frac{T_{i,j,k}^n - T_{i,j,k-1}^n}{\Delta z} \right)
\end{aligned} \tag{3-48}$$

ここで、

$$\begin{aligned}
Kx_{uE} &= \frac{1}{2} (Kx_{i+1,j,k} + Kx_{i,j,k}), & Kx_{uW} &= \frac{1}{2} (Kx_{i-1,j,k} + Kx_{i,j,k}) \\
Ky_{uN} &= \frac{1}{2} (Ky_{i,j+1,k} + Ky_{i,j,k}), & Ky_{uS} &= \frac{1}{2} (Ky_{i,j-1,k} + Ky_{i,j,k}) \\
Kz_{uT} &= \frac{1}{2} (Kz_{i,j,k+1} + Kz_{i,j,k}), & Kz_{uD} &= \frac{1}{2} (Kz_{i,j,k-1} + Kz_{i,j,k})
\end{aligned}$$

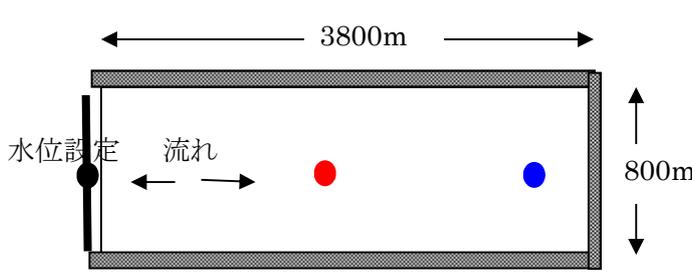
である。

塩分濃度の離散化も同様とである (T を S 置き換える)。

3.3.2 テスト計算

単純な港湾内を想定したテスト計算の結果を記す。ここでのモデルは以下に示す 3 辺が囲まれた水路であり、残りの 1 辺で潮位変動に合わせて水位を設定している。

■ テスト計算範囲



メッシュ幅 ($\Delta x = \Delta y$) 100m
 水深 (h) 4m
 水位振幅 (ζ) 0.5m
 M2 潮 周期時間 12.42 時間
 渦動粘性係数(A_x, A_z) $1\text{m}^2/\text{s}$ と $10\text{cm}^2/\text{s}$
 なお、鉛直方向のメッシュ幅 1m

ここで、以下の 4 ケースを

- ①tst3-1 コリオリ項なし ②tst3-2 コリオリ項あり
 ③tst3-3 コリオリ項なし ④tst3-4 コリオリ項あり (奥行き y 方向の場合)

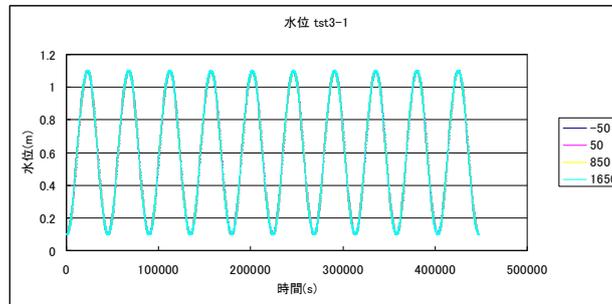


図 3-7 付与する水位の時間変化(基準水位+0.1m) (凡例は y 座標)

- ①tst3-1 コリオリ項なし ②tst3-2 コリオリ項あり 流動比較

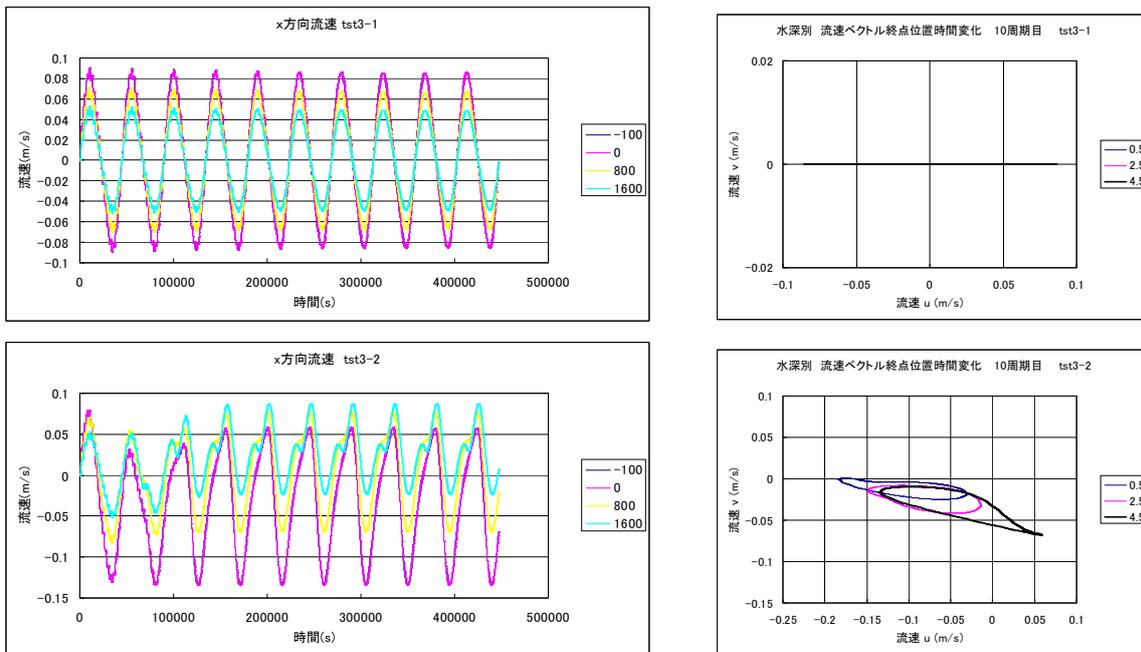


図 3-8 流速の時間変化 (凡例は x 座標) と 流速ベクトル方向の時間変化 (凡例は水深)

③tst3-3 コリオリ項なし ④tst3-4 コリオリ項あり (奥行き y 方向の場合)

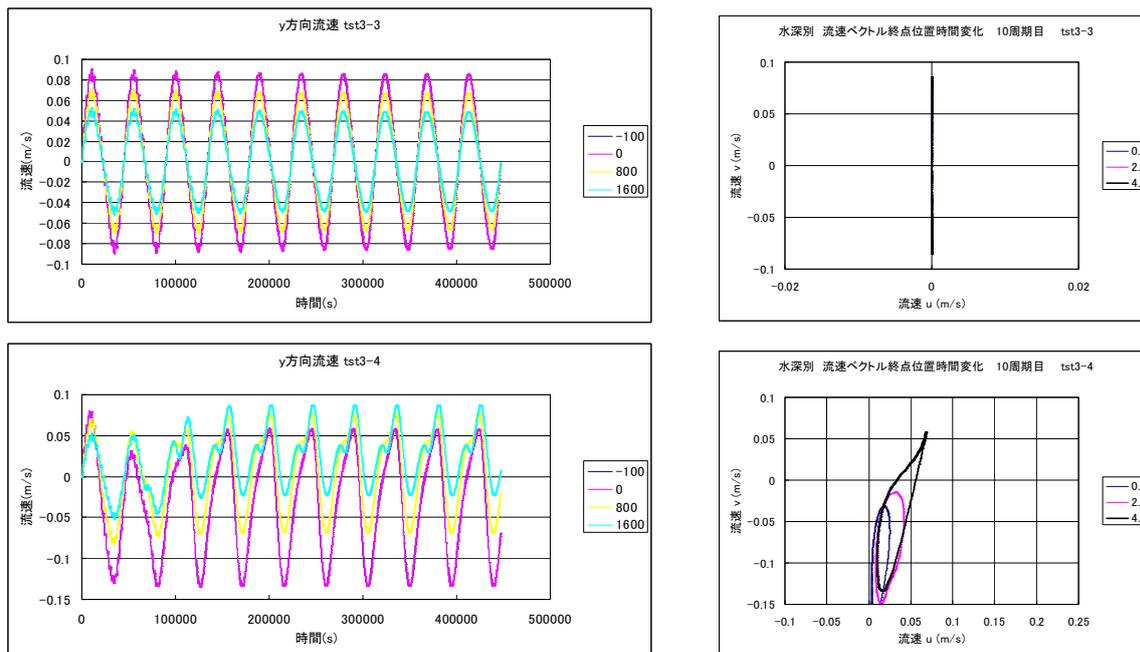


図 3-9 流速の時間変化（凡例は y 座標）と流速ベクトル方向の時間変化（凡例は水深）

以上、単純な港湾内を想定した潮汐流計算結果から、開発コードを用いることで

- ・港内の周期的な流動が安定に計算できる。
- ・コリオリ項を考慮した場合の流動場は、各水深で流向が異なり定性的に問題ない。
- ・港内奥行きが y 方向の場合も x 方向と同様に計算でき、設定機能上問題ない。

ことが確認できた。

3.4 風および日射による影響

3.4.1 風による影響

風による海面の流れを考慮する。海表面による風応力の x, y 成分 $\langle wu(0) \rangle, \langle wv(0) \rangle$ は

$$\langle wu(0) \rangle, \langle wv(0) \rangle = \rho_a C_D \sqrt{W_x^2 + W_y^2} (W_x, W_y) \quad (3-49)$$

で与える（詳細は[3-2]の 81 ページ参照）。ここで ρ_a は空気の密度、 W_x, W_y は風速の x, y 成分、 C_D はバルク定数である。また、風速・風向のデータは計算メッシュよりも荒い間隔での 3 時間ごとのデータを想定する。そのため、各メッシュ点で利用するデータを補間によって作成する。入力データは、海表面の熱収支モデルの気象データの入力と合わせて行うため、詳細は 3.4.2 に記載する。

海表面での風によるせん断応力の扱い方については Kondo のモデルを用いる。

■ 表層風(風による剪断応力)の扱い

$$\left. \frac{\partial}{\partial z} \left(A_z \frac{\partial u}{\partial z} \right) \right|_{\text{海表面付近}} = \frac{1}{\Delta z} \left(\frac{\tau_s^x}{\rho} - A_z \frac{\Delta u}{\Delta z} \right), \quad \tau_s^x = \rho_a C_D W_x \sqrt{W_x^2 + W_y^2} \quad (3-50)$$

$$\left. \frac{\partial}{\partial z} \left(A_z \frac{\partial v}{\partial z} \right) \right|_{\text{海表面付近}} = \frac{1}{\Delta z} \left(\frac{\tau_s^y}{\rho} - A_z \frac{\Delta v}{\Delta z} \right), \quad \tau_s^y = \rho_a C_D W_y \sqrt{W_x^2 + W_y^2} \quad (3-51)$$

ここで、各記号の定義は以下の通りである。

ρ_a : 大気の密度 (1.2kg/m³)

C_D : 抗力係数 (注1)

W_x, W_y : 海面上 10m の x, y 方向の風速

(注1) 本多・光易 則配下の通り。

$C_D = (1.290 - 0.024U_{10}) \times 10^{-3}$ (U_{10} : 風速 ≤ 8 m/s)

$C_D = (0.581 + 0.063U_{10}) \times 10^{-3}$ (U_{10} : 風速 > 8 m/s)

([3-2]の 82 ページ) に記載の Kondo のモデルによるバルク定数 C_D は W は風速(m/s)として、

$$C_D = (1.08W^{-0.15}) \times 10^{-3} \quad (0.3 < W \leq 2.2 \text{m/s})$$

$$C_D = (0.771 + 0.0858W) \times 10^{-3} \quad (2.2 < W \leq 5.0 \text{m/s})$$

$$C_D = (0.867 + 0.0667W) \times 10^{-3} \quad (5.0 < W \leq 8.0 \text{m/s})$$

$$C_D = (1.2 + 0.025W) \times 10^{-3} \quad (8.0 < W \leq 25.0 \text{m/s})$$

$$C_D = (0.073W) \times 10^{-3} \quad (25.0 < W \leq 50.0 \text{m/s})$$

とする。尚、風速が 5m/s の場合、本多・光易モデルで $C_D = 1.41 \times 10^{-3}$ 、Kondo のモデルによる $C_D = 1.2 \times 10^{-3}$ となる。多重 σ 座標化にともない、表層風(風による剪断応力)の扱いは以下のよう
に設定する ([3-2]参照)。

$$\left. \frac{\partial}{\partial \sigma} \left(\frac{A_z}{D} \frac{\partial u}{\partial \sigma} \right) \right|_{\text{海表面付近}} = \frac{1}{\Delta \sigma} \left(\frac{\tau_s^x}{\rho} - \frac{A_z}{D} \frac{\Delta u}{\Delta \sigma} \right), \quad \tau_s^x = \rho_a C_D W_x \sqrt{W_x^2 + W_y^2} \quad (3-52)$$

$$\left. \frac{\partial}{\partial \sigma} \left(\frac{A_z}{D} \frac{\partial v}{\partial \sigma} \right) \right|_{\text{海表面付近}} = \frac{1}{\Delta \sigma} \left(\frac{\tau_s^y}{\rho} - \frac{A_z}{D} \frac{\Delta v}{\Delta \sigma} \right), \quad \tau_s^y = \rho_a C_D W_y \sqrt{W_x^2 + W_y^2} \quad (3-53)$$

なお、風の影響は上層の σ 座標についてのみ考慮する。

3.4.2 日射による影響

■ 海表面の熱収支モデル

海表面の熱収支モデルとして、表層の熱を flux として組み込む ([3-2]第 9 章)。海水中への日射の透過は考慮せず、表面層のみでの熱収支過程を以下のように組み込む。

$$\frac{\partial}{\partial \sigma} \left(\frac{K_z}{D} \frac{\partial T}{\partial z} \right)_{\text{海表面付近}} = \frac{1}{\Delta \sigma} \left(\frac{Q}{\rho C_p} - \frac{K_z}{D} \frac{\Delta T}{\Delta \sigma} \right) \quad (3-54)$$

ここで、水面と大気との単位時間当たりの熱交換熱量 Q (W/m^2)、 C_p は定圧比熱で、 $1.03 \text{J}/\text{g}/^\circ\text{C}$ 熱交換熱量 Q は、図 3-10 に示す水表面での放射収支 (短波・長波放射と顕熱量、潜熱量のバランス) で決まる。

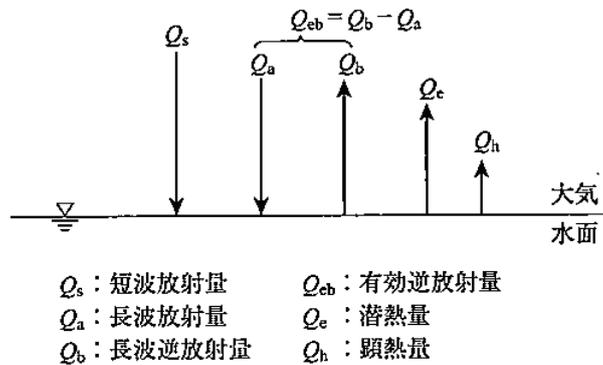


図 3-10 水面における熱収支 ([3-2] 図 II 9-1 の転載)

この時、水表面熱収支式は以下ようになる。

$$Q = Q_s - (Q_{eb} + Q_h + Q_e) \quad (3-55)$$

ここで

Q_s : 短波放射量 ← 日射 (短波放射による海表面温度が上がる)

Q_{eb} : 有効逆波放射量 ← 下向きと上向き長波放射の差 (長波放射により海表面から逃げる熱)

Q_h : 顕熱量 ← 風による乱流熱輸送 (伝導拡散による熱移動)

Q_e : 蒸発に伴う潜熱量 ← 水の蒸発による熱輸送

である。これらの各量は以下のように与える。

- Q_s (短波放射量) は入力データとして観測日射をベースに反射など考慮した正味の入射短波放射を与える。
- Q_{eb} (有効逆波放射量) は下向きと上向き長波放射の差で以下の式で算出。

$$Q_{eb} = \varepsilon' \sigma T_{a,K}^4 (0.39 - 0.05\sqrt{e})(1 - 0.6823c^2) + 4\varepsilon' \sigma T_{a,K}^3 (T_{s,K} - T_{a,K}) \quad (3-56)$$

ここで、放射率 $\varepsilon' = 0.98$ 、ステファン・ボルツマン定数 $\sigma = 5.670373 \times 10^{-8} \text{W/m}^2/\text{K}^4$ 、 $T_{a,K}$ $T_{s,K}$ は、単位：K で表される海面の水温と大気温度、e は水蒸気圧、c は雲量。

水蒸気圧 (e) は飽和水蒸気圧 (e_{sat}) に相対湿度 (RH) を乗じて求める。ここで、

$$\log_{10} e_{sat} = \frac{0.7859 + 0.3477T_a}{1 + 0.00412T_a}$$

$$e = e_{sat} \cdot RH$$

であり、 T_a は℃で表される大気温度である。 (T_a, RH) は気象データを基にデータとして用いる

- Q_h (顕熱フラックス) は次式で算出。

$$Q_h = \rho_a C_p C_H |W| (T_s - T_a) \quad (3-57)$$

- Q_e (蒸発に伴う潜熱フラックス) は次式で算出。

$$Q_e = \rho_a L C_E |W| (q_{sat} - q_a) \quad (3-58)$$

ここで、 ρ_a は空気の密度、 T_a は水面の温度 (単位: °C)、 C_p は定圧比熱で、 $1.03 \times 10^3 \text{J/kg/}^\circ\text{C}$ 、L は蒸発潜熱で $2.51 \times 10^6 \text{J/kg}$ 、W は風速 ([3-2]の u_0)、 C_H は顕熱輸送係数、 C_E は潜熱輸送係数でバルク定数と呼ばれ、風速により変化する。また、q は大気中の比湿、 q_{sat} は海面上での比湿であり、飽和比湿とする。この比湿 (q) は以下の式で算出する。

$$q = \frac{0.622(e/p)}{1-0.378(e/p)} \approx 0.622 \frac{e}{p} \quad \rightarrow \quad q = q_{sat} \cdot RH \quad (3-59)$$

以下にバルク定数 (C_H : 顕熱輸送係数、 C_E : 潜熱輸送係数) の設定を示す。

顕熱輸送係数 (C_H)

$$\begin{aligned} C_H &= (1.185W^{-0.16}) \times 10^{-3} && (W \leq 2.2 \text{ m/s}) \\ C_H &= (0.927 + 0.0546W) \times 10^{-3} && (2.2 \text{ m/s} < W \leq 5.0 \text{ m/s}) \\ C_H &= (1.15 + 0.01W) \times 10^{-3} && (5.0 \text{ m/s} < W \leq 8.0 \text{ m/s}) \\ C_H &= (1.170 + 0.0075W - 0.0004(W-8)^2) \times 10^{-3} && (8.0 \text{ m/s} < W) \end{aligned}$$

潜熱輸送係数 (C_E)

$$\begin{aligned} C_E &= (1.23W^{-0.16}) \times 10^{-3} && (W \leq 2.2 \text{ m/s}) \\ C_E &= (0.969 + 0.0521W) \times 10^{-3} && (2.2 \text{ m/s} < W \leq 5.0 \text{ m/s}) \\ C_E &= (1.18 + 0.01W) \times 10^{-3} && (5.0 \text{ m/s} < W \leq 8.0 \text{ m/s}) \\ C_E &= (1.196 + 0.0075W - 0.0004(W-8)^2) \times 10^{-3} && (8.0 \text{ m/s} < W) \end{aligned}$$

尚、今回の海表面の熱収支モデルに必要な気象データは、風速、日射量、気温、湿度、雲量の5つであり、矩形の計算領域の4点での気象データを時系列データとして入力ファイルとして準備する必要がある。以下に1例を示す。

入力気象データの例

時間	p1=(x0,y0)気象データ					p2=(x1,y0)気象データ					p3=(x0,y1)気象データ					p4=(x1,y1)気象データ								
	Xwind(m/s)	Ywind(m/s)	日射(W/m)	気温(°C)	湿度(%)	雲量(0-1)	Xwind(m/s)	Ywind(m/s)	日射(W/m)	気温(°C)	湿度(%)	雲量(0-1)	Xwind(m/s)	Ywind(m/s)	日射(W/m)	気温(°C)	湿度(%)	雲量(0-1)	Xwind(m/s)	Ywind(m/s)	日射(W/m)	気温(°C)	湿度(%)	雲量(0-1)
0	0.71	0.71	0	28.5	72	0	0.71	0.71	0	29	72	0	0.71	0.71	0	29	72	0	0.71	0.71	0	29	72	0
3600	0.92	2.22	0	27.1	76	0	0.92	2.22	0	27	76	0	0.92	2.22	0	27	76	0	0.92	2.22	0	27	76	0
7200	1.27	1.27	0	26.5	79	0	1.27	1.27	0	27	79	0	1.27	1.27	0	27	79	0	1.27	1.27	0	27	79	0
10800	1.27	1.27	0	26	82	0	1.27	1.27	0	26	82	0	1.27	1.27	0	26	82	0	1.27	1.27	0	26	82	0
14400	0.99	0.99	0	25.6	84	0	0.99	0.99	0	26	84	0	0.99	0.99	0	26	84	0	0.99	0.99	0	26	84	0
18000	1.2	0.5	0	25.4	85	0	1.2	0.5	0	25	85	0	1.2	0.5	0	25	85	0	1.2	0.5	0	25	85	0
21600	1.2	0.5	63.89	25.2	86	0	1.2	0.5	64	25	86	0	1.2	0.5	64	25	86	0	1.2	0.5	64	25	86	0
25200	1.41	1.41	227.78	26.9	79	0	1.41	1.41	228	27	79	0	1.41	1.41	228	27	79	0	1.41	1.41	228	27	79	0
28800	-0.88	2.12	391.67	28.5	74	0	-0.88	2.12	392	29	74	0	-0.88	2.12	392	29	74	0	-0.88	2.12	392	29	74	0
32400	0.65	1.57	569.44	30.3	68	0	0.65	1.57	569	30	68	0	0.65	1.57	569	30	68	0	0.65	1.57	569	30	68	0
36000	-1.39	0.57	716.67	32.7	57	0	-1.39	0.57	717	33	57	0	-1.39	0.57	717	33	57	0	-1.39	0.57	717	33	57	0
39600	-0.69	1.66	772.22	34.6	52	0	-0.69	1.66	772	35	52	0	-0.69	1.66	772	35	52	0	-0.69	1.66	772	35	52	0
43200	2.59	1.07	858.33	36.6	42	0	2.59	1.07	858	37	42	0	2.59	1.07	858	37	42	0	2.59	1.07	858	37	42	0
46800	2.77	1.15	869.44	37.7	39	0	2.77	1.15	869	38	39	0	2.77	1.15	869	38	39	0	2.77	1.15	869	38	39	0

3.4.3 テスト計算

簡単な条件でのテスト計算を行い、風および日射による影響を考慮したモデルをテストした結果を記す。

■ チェック計算 (I)

熱収支モデルの組み込みのチェック計算を実施。

○計算条件

100m 四方、水深 10m 一定の貯水池を想定し、計算条件は以下の通り。

風速 : 10m/s 大気温 : 25°C、湿度 : 80%、雲量 : 0.5

初期水温 : 20°C、静止水、水平粘性・拡散係数 : 1m²s、鉛直粘性・拡散係数 : 0.001m²s

尚、側面、底面はすべて断熱条件とした。

メッシュ分割を図 3-11 に、計算条件を表 3-1 に示す。

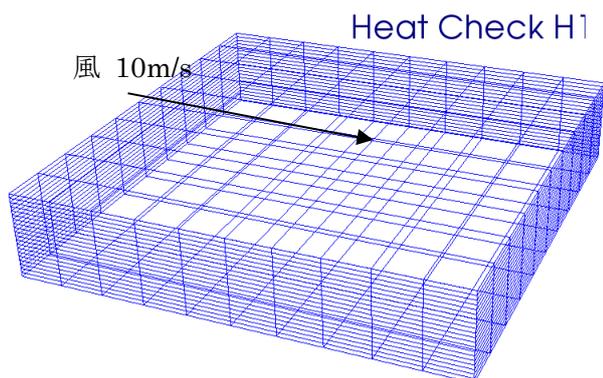


表 3-1 計算条件

ケース名	条件
Check H1	熱収支モデルなし
Check H2	日射 10W/m ²
Check H3	日射 100W/m ²

図 3-11 メッシュ分割 (10×10×20)

■ 計算結果 (I)

Check H1 熱収支モデルなしの条件では、図 3-12 に示すように、吹送流が計算され、水量一定、水温一定の計算結果となることが分かる。

日射量の差異の比較を図 3-13 と図 3-14 に示す。

Check H2 冷却想定では、表層の水温が低下、風下側に低温域が移動する。吹送流による鉛直循環により、下層では高温域が風上側へ移動、厚くなる。

Check H3 加熱想定では、冷却想定と逆に、表層の水温が上昇、風下側に高温域が移動する。吹送流による鉛直循環により、下層では低温域が風上側へ移動、厚くなる。

以上のチェック計算で、熱収支モデルの基本的な扱いに問題がないことが確認できる。

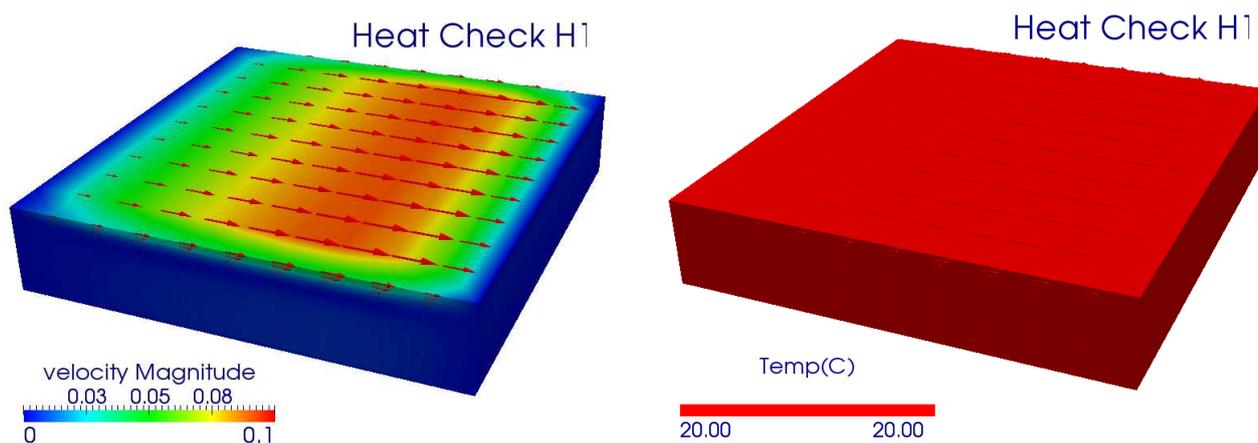


図 3-12 Check H1 熱収支モデルなし (左：流速、右：水温 48h 後)

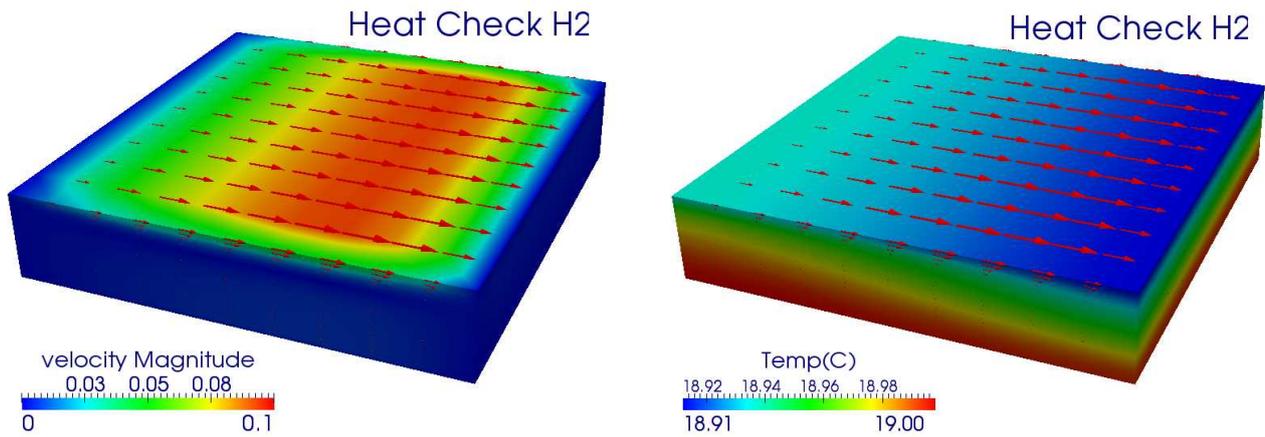


図 3-13 Check H2 日射 10W/m² (左：流速、右：水温 48h 後)

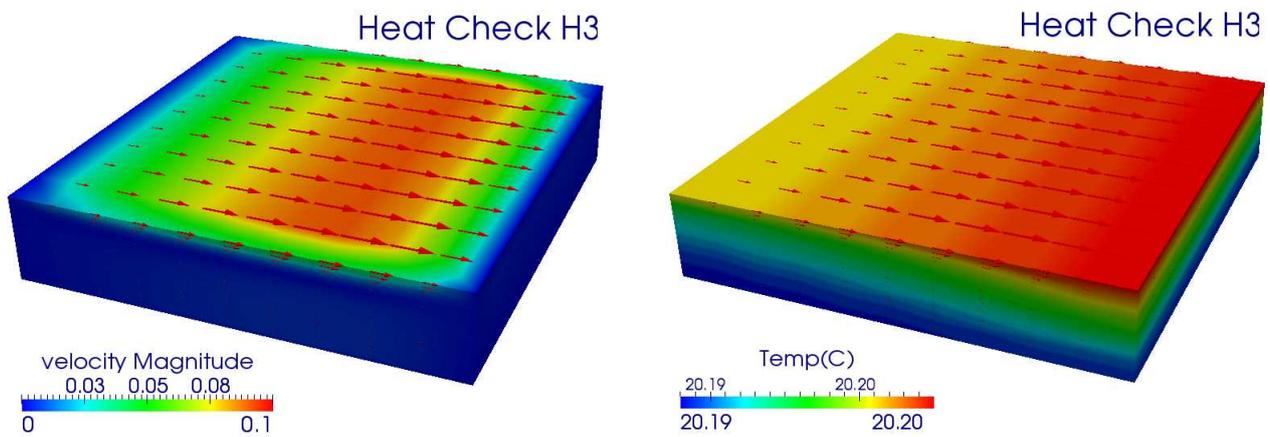


図 3-14 Check H3 日射 100W/m² (左：流速、右：水温 48h 後)

■ チェック計算 (II)

熱収支モデルの入力データの時間空間の内挿についてチェック計算を実施する。気象データファイルを具体的なデータを基に作成するが、本計算に用いた 2015 年 8 月 5 日の福島県の気象庁データを図 3-15 に示す。また、海表面の熱収支モデルの気象データは、風速、日射量、気温、湿度、雲量の 5 つであり、時系列データを図 3-16 に示す。実際の計算に用いる気象データファイルは表 3-2 のような形式となる。

国土交通省
気象庁
Japan Meteorological Agency

ホーム 防災情報 各種データ資料 知識解説 気象庁について 案内/申請

ホーム > 各種データ資料 > 過去の気象データ検索 > 1時間ごとの値

1時間ごとの値

一覧表 グラフ 見出しの固定 メニューに戻る

前年 前月 前日 翌日 翌月 翌年 日ごとの値 1時間ごとの値 10分ごとの値

福島 2015年8月5日 (1時間ごとの値)

時	気圧(hPa)		降水量(mm)	気温(°C)		露点温度(°C)	蒸気圧(hPa)	湿度(%)	風向・風速(m/s)		日照時間(h)	全天日射量(MJ/m ²)	雪(cm)		天気	曇量	視程(km)
	現地	海面		風速	風向				降雪	積雪							
1	1002.1	1009.9	--	27.1	22.5	27.3	76	2.4	南南西								
2	1002.0	1009.9	--	26.5	22.6	27.4	79	1.8	南西								
3	1001.9	1009.8	--	26.0	22.7	27.6	82	1.8	南西						○	0	10.0
4	1002.0	1009.9	--	25.6	22.7	27.6	84	1.4	南西								
5	1002.2	1010.1	--	25.4	22.7	27.6	85	1.3	西南西	0.0	0.00						
6	1002.2	1010.1	--	25.2	22.7	27.6	86	1.3	西南西	0.6	0.23						
7	1002.2	1010.0	--	26.9	23.0	28.0	79	2.0	南西	1.0	0.82						
8	1002.1	1009.9	--	28.5	23.4	28.8	74	2.3	南南東	1.0	1.41						
9	1001.8	1009.6	--	30.3	23.7	29.4	68	1.7	南南西	1.0	2.05				○	0+	20.0
10	1001.3	1009.0	--	32.7	23.1	28.2	57	1.5	東南東	1.0	2.58						
11	1001.0	1008.6	--	34.6	23.3	28.6	52	1.8	南南東	1.0	2.78						
12	1000.7	1008.3	--	36.6	21.6	25.8	42	2.8	西南西	1.0	3.08						
13	1000.4	1008.0	--	37.7	21.4	25.4	39	3.0	西南西	1.0	3.13						
14	1000.1	1007.6	--	38.5	20.8	24.5	36	3.5	西北西	1.0	2.94						
15	1000.0	1007.6	--	37.7	20.5	24.1	37	4.8	西北西	1.0	2.49				⊕	2	15.0
16	1000.1	1007.7	--	37.3	20.6	24.3	38	3.3	北西	1.0	1.71						
17	1000.4	1008.0	--	35.9	23.5	29.0	49	2.9	北北東	0.5	0.72						
18	1001.0	1008.6	--	34.3	23.0	28.1	52	1.4	北北西	0.2	0.24						
19	1001.3	1009.0	--	33.0	24.5	30.7	61	1.8	北東	0.0	0.02						
20	1002.0	1009.7	--	31.0	23.7	29.2	65	1.9	南南東		0.00						
21	1002.4	1010.1	--	31.2	23.1	28.2	62	1.1	南南東						⊕	2	10.0
22	1002.6	1010.4	--	30.3	23.0	28.1	65	1.7	南西								
23	1002.9	1010.7	--	29.5	23.0	28.0	68	1.9	南南西								
24	1002.8	1010.6	--	28.5	23.0	28.0	72	1.0	南西								

図 3-15 福島の 2015 年 8 月 5 日気象庁データ

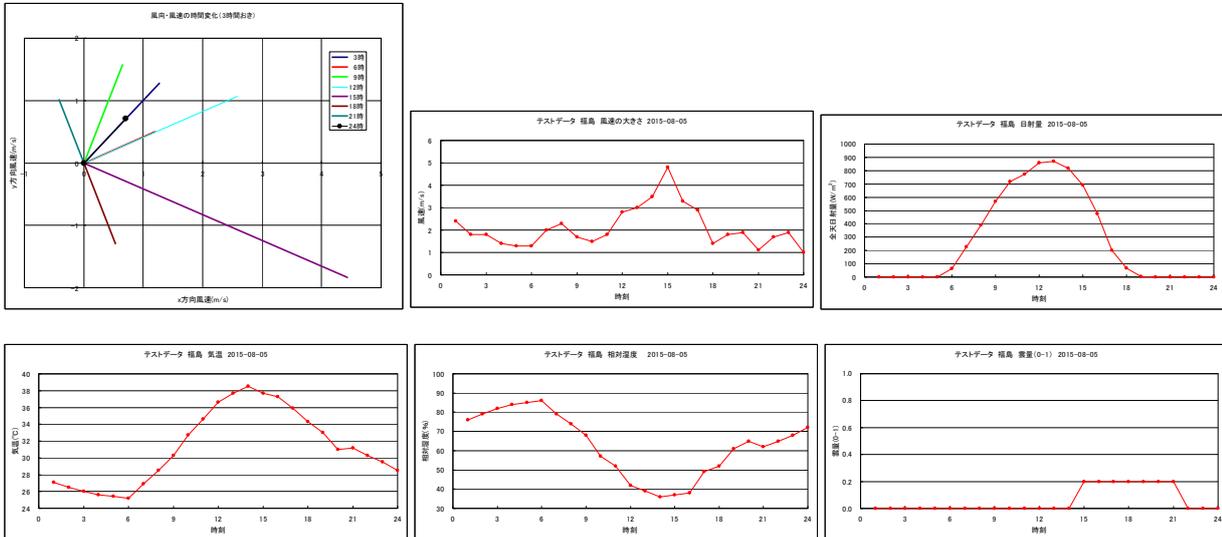


図 3-16 風速と風速の大きさ、日射量、気温、湿度、曇量の時系列データ(観測値：風向・風速→x,y 方向成分に変更、曇量は 0-10 → 0-1 に変更)

表 3-2 作成した気象データファイル

sample_kishyouD.csv (矩形の計算領域の4点での値は同じものを設定)

時間	p1=(x0,y0)気象データ						p2=(x1,y0)気象データ						p3=(x0,y1)気象データ						p4=(x1,y1)気象データ					
	Xwind(m/s)	Ywind(m/s)	日射(W/m)	気温(°C)	湿度(%)	雲量(0-1)	Xwind(m/s)	Ywind(m/s)	日射(W/m)	気温(°C)	湿度(%)	雲量(0-1)	Xwind(m/s)	Ywind(m/s)	日射(W/m)	気温(°C)	湿度(%)	雲量(0-1)	Xwind(m/s)	Ywind(m/s)	日射(W/m)	気温(°C)	湿度(%)	雲量(0-1)
0	0.71	0.71	0	28.5	72	0	0.71	0.71	0	29	72	0	0.71	0.71	0	29	72	0	0.71	0.71	0	29	72	0
3600	0.92	2.22	0	27.1	76	0	0.92	2.22	0	27	76	0	0.92	2.22	0	27	76	0	0.92	2.22	0	27	76	0
7200	1.27	1.27	0	26.5	79	0	1.27	1.27	0	27	79	0	1.27	1.27	0	27	79	0	1.27	1.27	0	27	79	0
10800	1.27	1.27	0	26	82	0	1.27	1.27	0	26	82	0	1.27	1.27	0	26	82	0	1.27	1.27	0	26	82	0
14400	0.99	0.99	0	25.6	84	0	0.99	0.99	0	26	84	0	0.99	0.99	0	26	84	0	0.99	0.99	0	26	84	0
18000	1.2	0.5	0	25.4	85	0	1.2	0.5	0	25	85	0	1.2	0.5	0	25	85	0	1.2	0.5	0	25	85	0
21600	1.2	0.5	63.89	25.2	86	0	1.2	0.5	64	25	86	0	1.2	0.5	64	25	86	0	1.2	0.5	64	25	86	0
25200	1.41	1.41	227.78	26.9	79	0	1.41	1.41	228	27	79	0	1.41	1.41	228	27	79	0	1.41	1.41	228	27	79	0
28800	-0.88	2.12	391.67	28.5	74	0	-0.88	2.12	392	29	74	0	-0.88	2.12	392	29	74	0	-0.88	2.12	392	29	74	0
32400	0.65	1.57	569.44	30.3	68	0	0.65	1.57	569	30	68	0	0.65	1.57	569	30	68	0	0.65	1.57	569	30	68	0
36000	-1.39	0.57	716.67	32.7	57	0	-1.39	0.57	717	33	57	0	-1.39	0.57	717	33	57	0	-1.39	0.57	717	33	57	0
39600	-0.69	1.66	772.22	34.6	52	0	-0.69	1.66	772	35	52	0	-0.69	1.66	772	35	52	0	-0.69	1.66	772	35	52	0
43200	2.59	1.07	858.33	36.6	42	0	2.59	1.07	858	37	42	0	2.59	1.07	858	37	42	0	2.59	1.07	858	37	42	0
46800	2.77	1.15	869.44	37.7	39	0	2.77	1.15	869	38	39	0	2.77	1.15	869	38	39	0	2.77	1.15	869	38	39	0

尚、観測雲量は 0-10 であるが、入力データでは雲量を 0.0 から 1.0 の範囲で表現する。

○計算条件 (夏期を想定)

100m 四方、水深 20m 一定の貯水池を想定し、計算条件は以下の通り。

初期水温：31°C、静止水、水平粘性・拡散係数：1m²/s、鉛直粘性・拡散係数：0.001m²/s

気象データは上記で作成した夏期想定 (1 日分の同じデータが 2 日繰り返す想定)

尚、メッシュ分割 (10×10×40)、側面、底面はすべて断熱条件。

■ 計算結果 (II)

図 3-17 と図 3-18 に流速と水温の 15 時間後と 21 時間後の鳥瞰図を示す。風向の変化にともない吹送流も変化している。また、水温も時間経過に伴って変化していることも確認できる。図 3-19 に代表的な水深の水温時間変化と代表的な時刻の水温鉛直分布を示す。計算結果を見る限り、熱収支モデルが概ね正常に機能していると推測できる。但し、閉じられた水域での計算で熱が蓄積され、時間と共に下層の水温も上昇し、その結果として、表層の水温もだんだん高くなる。長時間の再現計算に当たっては詳細な条件設定に工夫が必要であることが分かる。

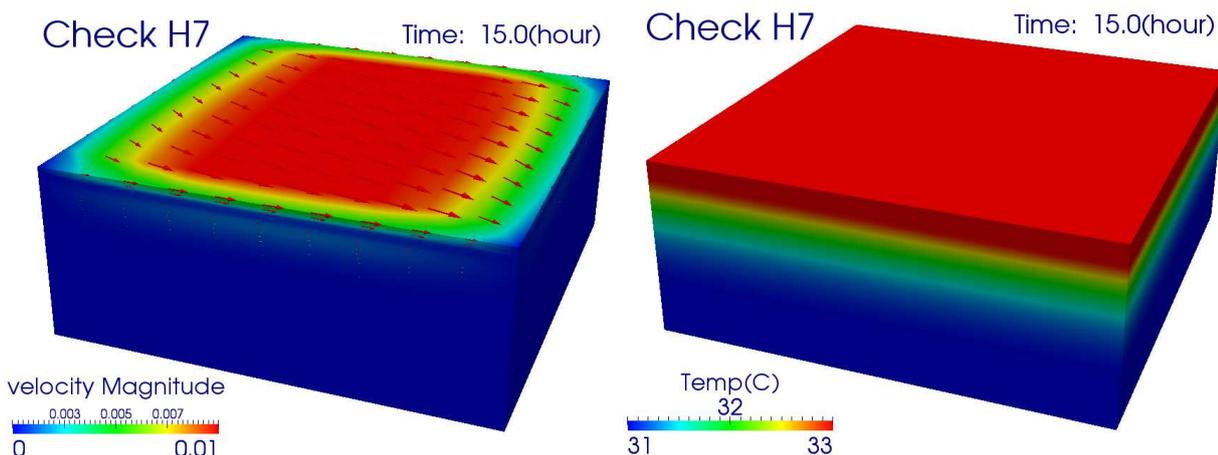


図 3-17 Check H7 夏期想定 (左：流速、右：水温 15h 後)

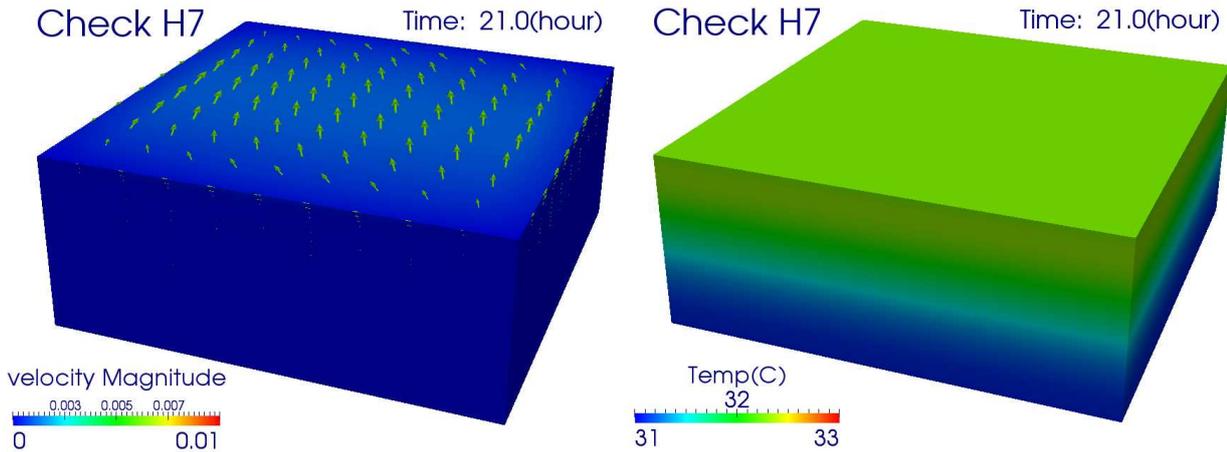


図 3-18 Check H7 夏期想定 (左：流速、右：水温 21h 後)

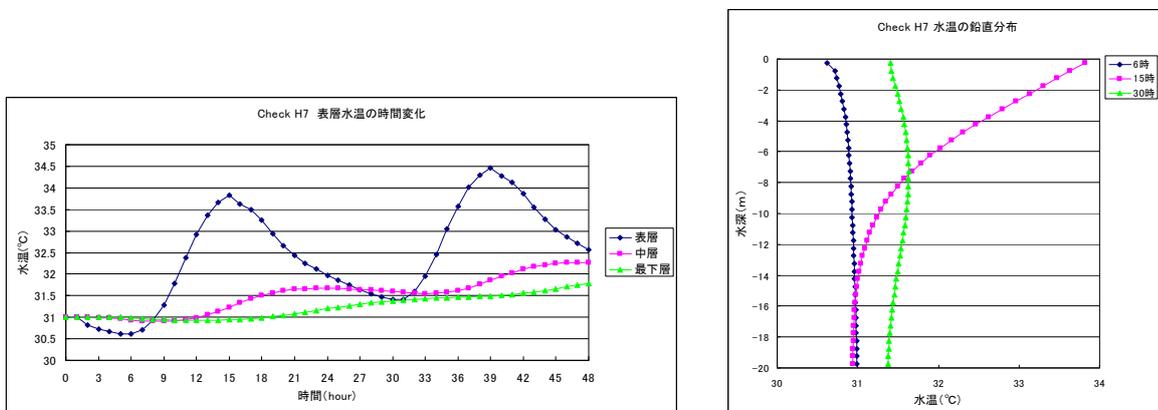


図 3-19 Check H7 夏期想定 (左：水温時間変化、右：水温鉛直分布)

[3-2] 和田明, 海洋環境水理学, 丸善, 2007

3.5 堤防およびシルトフェンスのモデル化及びその効果

3.5.1 堤防およびシルトフェンスのモデル化

港湾環境をシミュレーションするため、防波堤や護岸等の構造物壁の境界条件を現地の情報に併せて適切に変更可能とする必要がある。防波堤については、その透過性を堤防の材料の空隙率と面積透過率をパラメータとして与えることで防波堤による抵抗を計算し、以下のように、運動方程式の水平流 u, v に対して

$$\frac{du}{dt} \text{ の右辺に } -\lambda u(\alpha + \beta\lambda\sqrt{u^2 + v^2})\delta_{\text{浸透防波壁}}(x, y) \text{ を追加} \quad (3-60)$$

$$\frac{dv}{dt} \text{ の右辺に } -\lambda v(\alpha + \beta\lambda\sqrt{u^2 + v^2})\delta_{\text{浸透防波壁}}(x, y) \text{ を追加} \quad (3-61)$$

とする。ここで、

$$\alpha = \alpha_0 \frac{(1-\lambda)^3 \mu}{\lambda^2 d^2}$$

$$\beta = \beta_0 \frac{1 - \lambda}{\lambda^3} \frac{1}{d}$$

であり、 $\alpha_0 = 2100$, $\beta_0 = 2.2$, d はケイソン中央粒径、 μ は動粘性係数、 λ は空隙率、 $\delta_{\text{透過防波堤}}(x, y)$ は透過防波堤位置でのデルタ関数

$$\delta_{\text{透過防波堤}}(x, y) = \begin{cases} 1, & \text{透過防波堤位置} \\ 0, & \text{それ以外} \end{cases}$$

である。ケイソン中央粒径(d)、空隙率 (λ) は、入力データとして指定する。尚、深さ方向への依存性は簡単のため、無視する。モデル作成に当たっては、[3-3]を基にした。

シルトフェンスの処理については、次章以降で詳述し報告する鉛直方向の「ふかれ」と呼ばれる変形を無視し、水平方向のみ抵抗係数を与える最も簡単な簡易2次元モデルを次のように考案し、三次元港湾コードに導入した。その簡易水平変形モデルは、運動方程式の水平流 u, v に対して、

$$\frac{du}{dt} \text{ の右辺に } -C_d u \sqrt{u^2 + v^2} \delta_{\text{シルトフェンス}}(x, y) \text{ を追加} \quad (3-62)$$

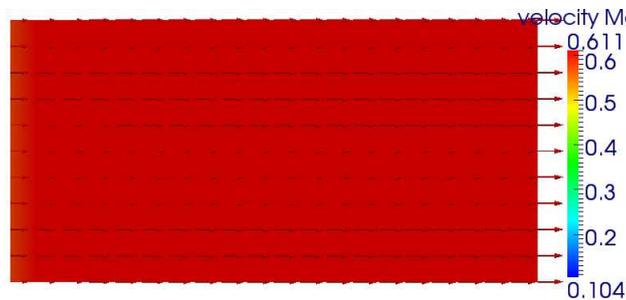
$$\frac{dv}{dt} \text{ の右辺に } -C_d v \sqrt{u^2 + v^2} \delta_{\text{シルトフェンス}}(x, y) \text{ を追加} \quad (3-63)$$

とする。

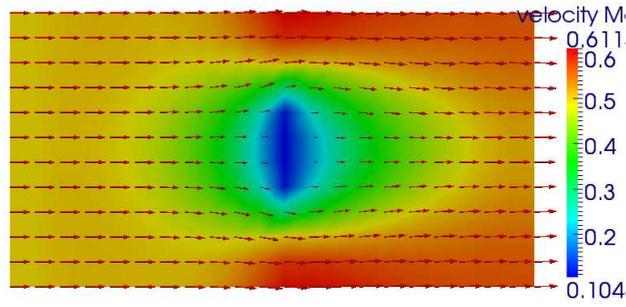
ここで、 C_d は、入力パラメータとして指定するシルトフェンスの抵抗係数であり、 $\delta_{\text{シルトフェンス}}(x, y)$ はシルトフェンス位置でのデルタ関数である。以下では、透過防波堤とシルトフェンス簡易水平変形モデルのテスト計算結果を示す。

3.5.2 テスト計算

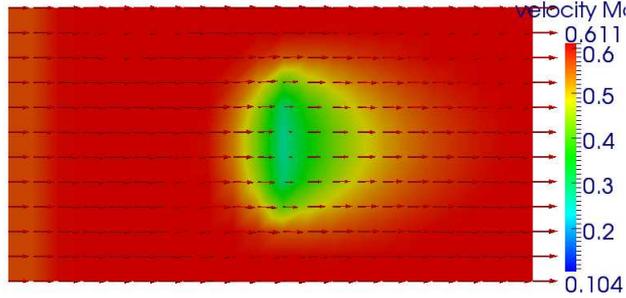
左側から右側に $100\text{m}^3/\text{s}$ の流水がある条件で、透過防波堤とシルトフェンスのテストを実施した結果を以下に示す。



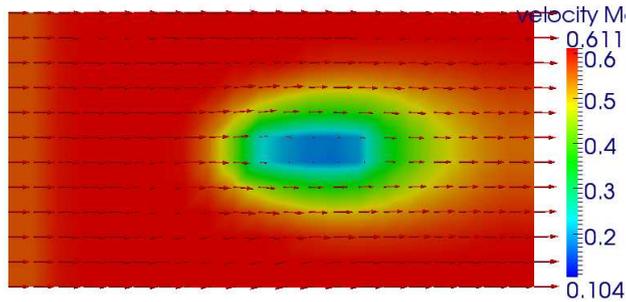
防波堤なし



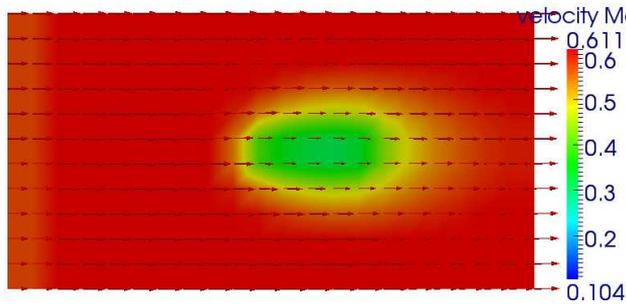
y 軸に平行な透過防波堤 (捨石粒径=0.4m,空隙率 0.5)



y 軸に平行なシルトフェンス (抵抗係数 0.3)



x 軸に平行な透過防波堤 (捨石粒径=0.4m,空隙率 0.5)



x 軸に平行なシルトフェンス (抵抗係数 0.3)

図 3-20 透過防波堤, シルトフェンス流動 (表層流速) 比較

3.5.3 シルトフェンスの移動のモデル化

上記で作成したシルトフェンスは、動きがなく、海水流動に対し抵抗を与えるという最も初歩的なモデルであるが、下記ではシルトフェンスを有限個の点で離散化し、それらが互いにばねのような復元力を持って相互作用しながら、流動場の影響により各点が移動する簡易モデルを下図のように構築した。本モデルでは、シルトフェンスの位置は以下の運動方程式を用いて計算する。

$$m \frac{\partial U_{fence}^i}{\partial t} = a(u - U_{fence}^i) + b(x_{fence,n}^{i+1} + x_{fence,n}^{i-1} - 3x_{fence,n}^i + x_{fence,0}^i) \quad (3-64)$$

$$m \frac{\partial V_{fence}^i}{\partial t} = a(v - V_{fence}^i) + b(y_{fence,n}^{i+1} + y_{fence,n}^{i-1} - 3y_{fence,n}^i + y_{fence,0}^i) \quad (3-65)$$

$$x_{fence,n+1}^i = x_{fence,n}^i + U_{fence}^i \Delta t$$

$$y_{fence,n+1}^i = y_{fence,n}^i + V_{fence}^i \Delta t$$

ここで、各記号の定義は以下の通りである。

- m : シルトフェンスの質量
- a : 水の流れによるシルトフェンスの移動パラメータ
- b : シルトフェンスが伸びるのに抵抗する係数
- Δt : 時間刻み
- u, v : 流動場（水平流速の x、y 方向成分）

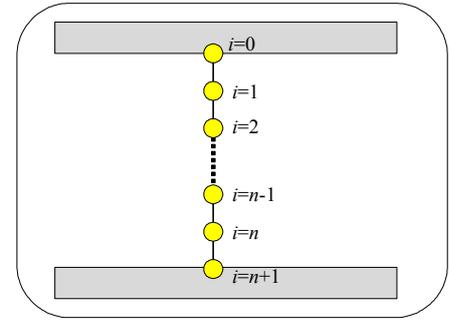


図3-21 シルトフェンスの模式図

i=0,n+1の点は固定

U_{fence}^i, V_{fence}^i : シルトフェンスの i 番目の点の移動速度の x、y 方向成分

$x_{fence,n}^i, y_{fence,n}^i$: n タイムステップ時のシルトフェンスの i 番目の点の位置

$x_{fence,0}^i, y_{fence,0}^i$: シルトフェンスの i 番目の点の初期位置（シルトフェンスの初期位置として i=0 および n+1 の地点間を最短になるように配置する）

例えば x 方向の右辺第 2 項は

$$b(x_{fence,n}^{i+1} + x_{fence,n}^{i-1} - 3x_{fence,n}^i + x_{fence,0}^i) = b(x_{fence,n}^{i+1} + x_{fence,n}^{i-1} - 2x_{fence,n}^i) - b(x_{fence,n}^i - x_{fence,0}^i)$$

シルトフェンスの隣接な平滑化とバネ抵抗

となる。また、シルトフェンスの合計の長さ $(l = \sum_{i=0}^n \sqrt{(x_{fence,n}^i - x_{fence,n}^{i+1})^2 + (y_{fence,n}^i - y_{fence,n}^{i+1})^2})$ があら

かじめ決めた長さの上限を超えた時には、 $x_{fence,n+1}^i = x_{fence,n}^i$ 、 $y_{fence,n+1}^i = y_{fence,n}^i$ すなわち

$$U_{fence}^i = V_{fence}^i = 0 \text{ とする。}$$

尚、上式の下記の3つのパラメータは、本来は単位を持つが、本モデルでは、シルトフェンスの移動現象を模擬することを目的とするため、単位は明示せず、テスト計算により適当な値を設定することとした。

m：シルトフェンスの質量 → 他のパラメータとの関係から、単なる時定数とみなせる。

a：水の流れによるシルトフェンスの移動パラメータ → bで代用する。

b：シルトフェンスが伸びるのに抵抗する係数

また、シルトフェンスによる流動場への影響は、上記で実装したシルトフェンスが移動しないコードと同様に、流体の運動方程式の水平流 u 、 v に対して以下のように項を付加する。

$$\frac{du}{dt} \text{ の右辺に } -C_d u \sqrt{u^2 + v^2} \delta_{\text{シルトフェンス}}(x, y) \text{ を追加}$$

$$\frac{dv}{dt} \text{ の右辺に } -C_d v \sqrt{u^2 + v^2} \delta_{\text{シルトフェンス}}(x, y) \text{ を追加}$$

ここで、 C_d はシルトフェンスの抵抗係数である。また、下図の $\delta_{\text{シルトフェンス}}(x, y)$ は座標 (x, y, z) におけるシルトフェンスの抵抗であり、格子とシルトフェンスの座標の距離を変数としたガウス関数で与える（図 3-22 参照）。

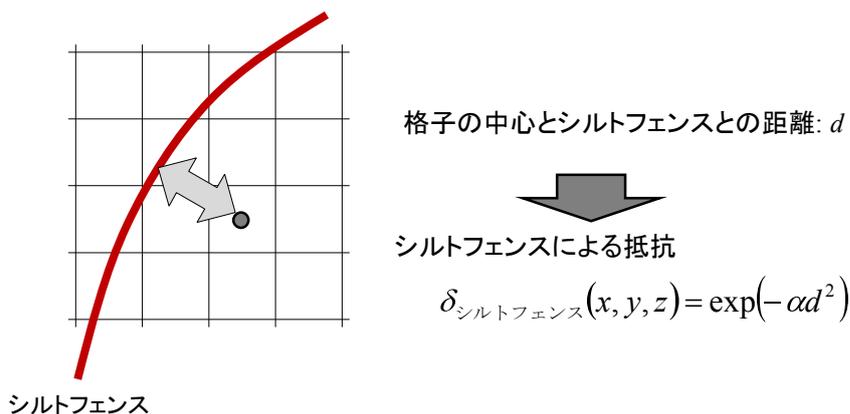


図 3-22 シルトフェンスの抵抗の求め方

上記のように、格子の中心からのシルトフェンスまでの距離を利用して計算を行う。 α はシルトフェンスによる抵抗の影響の範囲を決める定数であり、ある程度距離 d が大きくなれば抵抗は 0 になるように

$$C_d = \text{SiltF} \cdot \exp(-\alpha \cdot d^2)$$

とする。ここで、プログラムの入力制御パラメータとして

移動モデルのシルトフェンスが伸びるのに抵抗する係数 : b

流動へ抵抗影響のパラメータ : $SiltF$ と α

を設定する必要がある。

3.5.4 シルトフェンスの移動モデルのテスト計算

港湾の護岸付近のみを抽出して、多重 σ モデルにシルトフェンスの移動モデルの組み込みテスト計算を実施した。計算範囲を図 3-23 に、潮位設定、シルトフェンス位置を図 4-24 に示す。

"計算メッシュ点数" , 236, 51

"下層 $\sigma 1 z$ 方向始点-終点(分割標高)(m)-分割数",

-12.0,-2.0, 8,

"上層 $\sigma 2 z$ 方向始点-終点(初期水位)(m)-分割数",

-2.0, 0.0, 4,

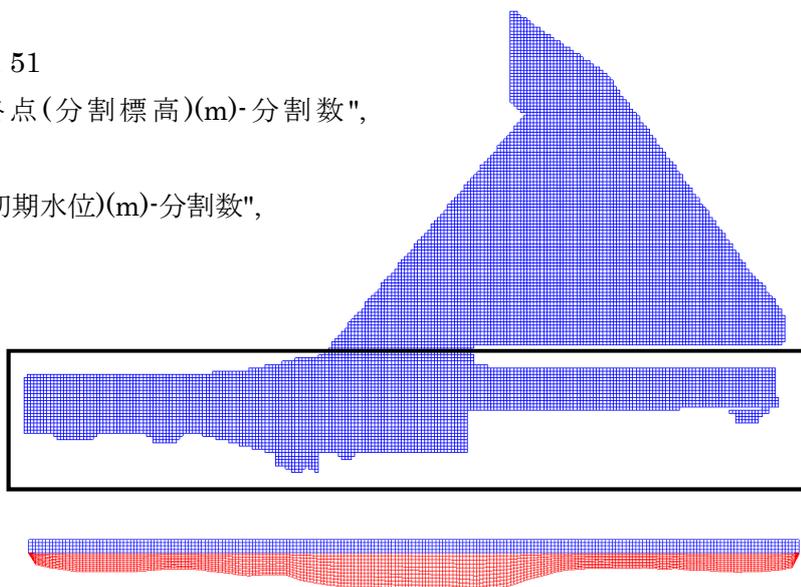


図 3-23 計算範囲 (黒枠部、上：水平、下：鉛直)

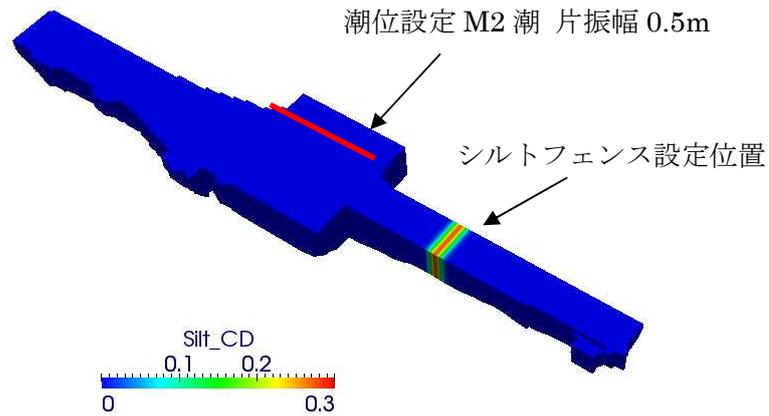


図 3-24 潮位設定、シルトフェンス位置 (斜め上空からの鳥瞰表示)

シルトフェンスの設定条件は

シルトフェンス最大長： 150m

シルトフェンス分割数： 20

シルトフェンスの移動パラメータは移動抵抗 (b) : 0.0001

シルトフェンスの流動抵抗 (Cd) : 0.3

シルトフェンスの流動抵抗分布の影響係数 (α) : 0.01

シルトフェンスの流動抵抗分布の設定範囲 flag : 0 ← 横断方向：フェンス外側影響なし

とする。この条件におけるシルトフェンスの位置と流速の時間変化を図 4-25 に示す。この結果から、潮位変動によりシルトフェンスが移動しているとともにシルトフェンス付近の流速が遅くなっていることが確認できる。

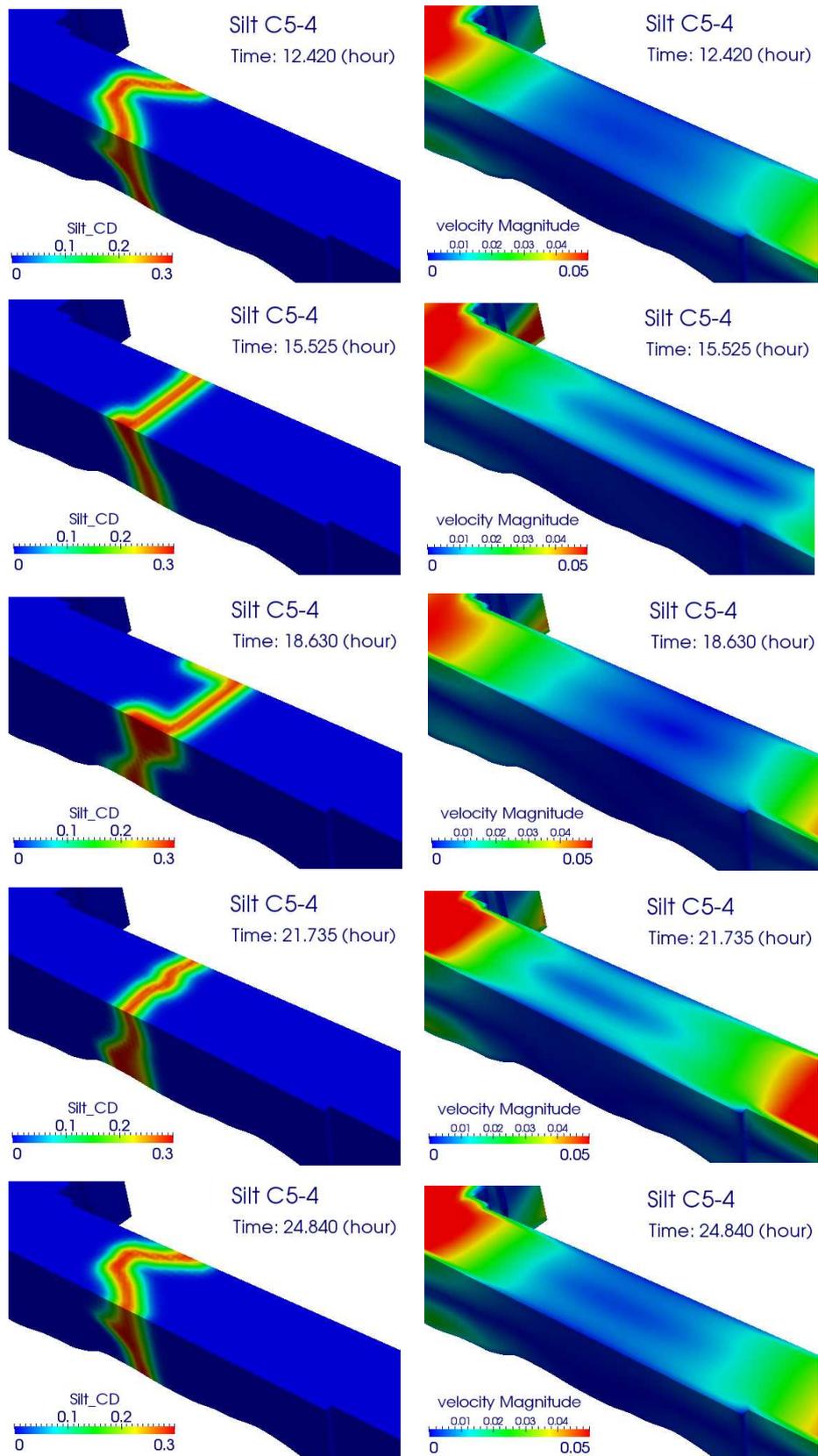


図 3-25 シルトフェンス位置と流速の大きさの時間変化 C5-4 (斜め上空からの鳥瞰表示：拡大)

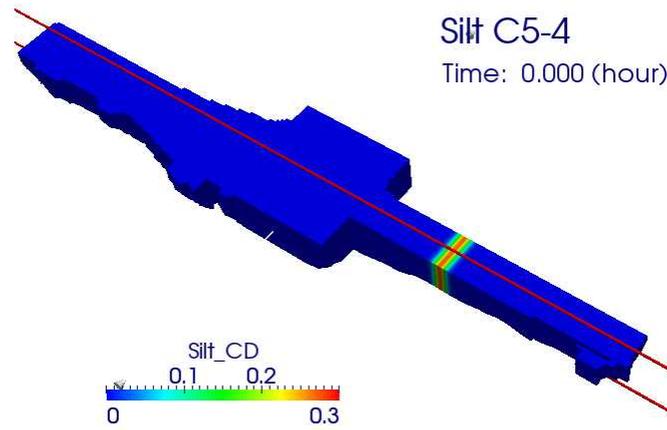


図 3-26 シルトフェンス位置 x-z 断面位置 (赤線)



図 3-27 シルトフェンス位置の時間変化 C5-4 (x-z 断面、y=135m)

[3-3] 平石, 奥野, 安藤, 砂礫層内における長周期の水流動に関する現地観測、港湾空港技術研究所資料 No.1130, 2006.

■ 4章 シルトフェンスの変形動作（理論・シミュレーションモデル及び水槽実験）

本4章では、シルトフェンス変形動作の理論・モデルと数値シミュレーションコードへの実装と計算、そして水槽実験による検証について記す。前半にて、過去の文献を調査した結果として提案されている理論と数値シミュレーション可能なモデルについて記し、そのモデルについては数値シミュレーションコードへの実装と実際の計算結果（理論の適用範囲での良い一致と適用範囲を超える結果）について記す。後半は水槽実験の実験条件、そして得られた結果（理論・シミュレーションとの良い一致と実験定数の決定）について記す。以下は、参考として規制庁担当者からの実施仕様項目(3章冒頭にて記した仕様項目の続き)を記す（※青字は仕様項目への受託者側追加事項）。

（2）簡易水槽による実験の実施

（1）にて選定する解析コードの検証のため、簡易水槽（大きさとしては、50 cm(幅) X50cm (高さ) X15m (長さ) 程度) に、一定流量の着色水を流入させる実験をすることで、シルトフェンス内側 SS 濃度と外側 SS 濃度との混濁時の時空間変化等のデータを取得する。尚、水槽実験では、サンプルフェンスを用い、様々な条件下での流動場及び懸濁態の移行挙動について数値モデルとの比較検証を行う。

(a) データ取得に当たり、具体的には、一方向に定常流を作りシルトフェンス（モデル）の「ふかれ」、シルトフェンス付近の乱流流動等を確認するため着色水の手法を使いビデオ撮影等を行い、シルトフェンス周辺の流動様態を観察する。

(b) 尚、水槽は、既存のものを用いるものとする。また、水槽内でのシルトフェンス設置に当たり、様式（垂下式、自立式等）、寸法等については、現在、原子力発電所に設置されているシルトフェンスを参考とする。

（3）「ふかれ」及び「発生乱流」の影響解析

（1）で選定した港湾解析コードを用いて以下(a)~(c)のとおり、解析を行う。また、解析結果と（2）水槽実験結果との比較検証を行う。尚、「ふかれ」及び「発生乱流」の挙動を解析するには、港湾コードで用いられている静水圧近似では解析が難しいことから、非静水圧近似を用いたコードを開発し、港湾コードにネスティング手法を用いて組み込むこととする。（※青字は仕様項目への受託者側追加事項）

(a) 実験の解析に適用するための初期及び境界条件データを作成する

(b) 水槽実験を用いた解析を行う。

(c) 解析結果からシルトフェンス内外の SS 濃度の時間変化を支配する要因を整理すると共にデータをとり纏める。

以上の仕様項目を念頭に必要な知見・データを取得するため、シルトフェンスの基本変形動作「ふかれ」に着目する。従って本4章にて対象とする体系は、シルトフェンスの水平方向への変形動作の自由度が無視できるような矩形の長軸方向に長い開水路とし、長軸方向に対し垂直な面において、シルトフェンスが垂下される系とする（図 4-1 参照）。本4章の理論及びモデルを記す前半では、まず、1980～90年代に提唱され利用されてきた、鉛直方向（膜に平行な一方向）にのみ着目した際の「ふかれ」の解析的理論について説明し、「ふかれ」と流速及びその他の量との関係について記す。その後、2010年以

降に提唱された膜体と流体の相互作用を記す理論モデルとその数値シミュレーションへの実装方法（本報告の主要な流体計算手法である LES 法への実装）、そして、そのシミュレーション結果について記す。シミュレーションでは、まず、実際のスケールの開渠構造の体系に対して実施し、「ふかれ」と流速その他の量との関係を示す。また、後半で示す水槽実験のスケールの体系についてもシミュレーションを実施し、水槽実験との比較を行う。水槽実験にて対象とするのは、1/20 スケールの図 4-1 に示されているような模型（矩形水槽）であり、その結果と実際の開渠構造との比較結果も示す。

以上、本 4 章では、理論、モデル、数値シミュレーション、水槽実験の 3 つの異なる側面から「ふかれ」の度合いに着目し、理論、数値シミュレーション、実験の 3 者が凡そ一致することが確かめられる。実際、理論の適用範囲では、数値シミュレーション及び水槽実験の結果は理論予測と良く一致し、シミュレーション技術の妥当性が検証される。この事実から逆に理論の適用範囲が広く、その評価における有用性についても指摘する。本 4 章の後半では、シミュレーションの妥当性を検証するため、水槽実験の結果との比較が行われる。水槽実験も理論の適用範囲では十分に理論式と一致しており、理論、シミュレーションの両者共に水槽実験によって検証できることを記す。

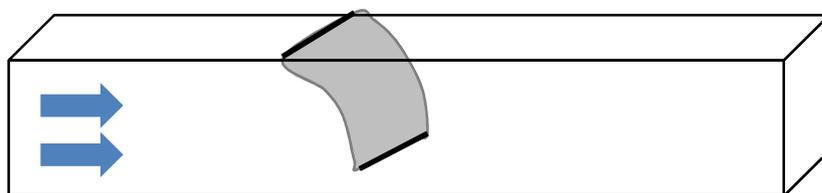


図 4-1 本章（4 章）にて対象とする体系（矩形開水路と垂下型シルトフェンス）の模式図

4.1 理論モデル

1980～90 年代中頃までに、シルトフェンスが一定の定常流下で示す「ふかれ」の理論が提唱され、様々な検証が行われてきた。文献[4-1]はその代表的論文であり、図 4-2 で模式的に記されているように、垂下型シルトフェンスの膜の形状を $y=f(x)$ と表し、膜単位長さ当たりの流体力を σ としたときの膜面の下記・微分方程式から理論がスタートする（方程式の導出については付録 I 参照）。尚、実際の膜面は 3 次元的膜ではあるが、 $x-y$ 面とする鉛直面内のみでの変形動作を考え、 z 軸方向の自由度は無視する。

$$W \frac{d^2 f}{dx^2} - \sigma \left\{ 1 + \left(\frac{df}{dx} \right)^2 \right\}^{\frac{3}{2}} = 0 \quad (4-1)$$

ここで、 W は膜要素に働く張力だが、どの部分でも張力は釣り合うため、膜が有する重錘の単位幅水中重量に相当する。膜体の重さは一般に無視できるものとするが、膜体の水中重量を考慮したモデルも容易に構築可能である。上記方程式に対し、膜体は滑らかに変形すると仮定し、変形の境界に対して $f(0)=f'(0)=0$ の条件を果たすことにより次式（解）が得られる（付録 4-I 参照）。

$$y = \frac{W}{\sigma} \left\{ 1 - \sqrt{1 - \left(\frac{\sigma}{W}\right)^2 x^2} \right\} \quad (4-2)$$

上式から、膜体は中心が $(0, W/\sigma)$ 、半径 W/σ の円弧の一部となっていることがわかる。これは、流体からの応力 σ が一様にシルトフェンスの断片に働くと仮定すると自動的に導出され、上記の解が得られることが分かる。

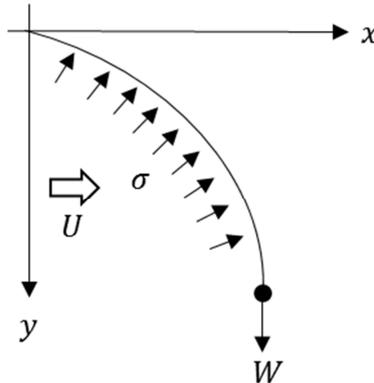


図 4-2 垂下式シルトフェンスの「ふかれ」形状、U:流体が持つ定常流速、 σ :流体からの応力、W:重錘による水中重力

上記の結果式 (4-2) を基に、膜の長さ d が下記式のように表されることで、次式が導出される。

$$d = \int_0^{d_e} \sqrt{1 + y'^2} dx \quad (4-3)$$

ここで、膜の有効高さ d_e (鉛直方向に射影される有効高さとして定義、即ち「ふかれ」を表す) は下式のように与えられる (付録 4-II 参照)。

$$d_e = \frac{W}{\sigma} \sin\left(\frac{\sigma d}{W}\right) \quad (4-4)$$

ここで、膜単位長さ当たりの流体力 σ は

$$\sigma = \beta \frac{1}{2} \rho \left(\frac{Uh}{h - d_e} \right)^2 \quad (4-5)$$

で表せることを利用する[4-1]。ここで、 h は水深、 U は“無限遠”（フェンスの影響を受けない十分に離れた位置）での平均流速であり、実験条件としては、負荷する定常流速に相当する。 ρ は水の密度である。また、 β は実験定数（「ふかれ」た膜と相互作用する流体の流動様態を反映する量と考えられる）、であり、後に詳述するシミュレーションでは 1.5 を用いるが、膜体や対象とする体系によって変化することが知られているが、凡そ 0.8~1.5 程度の範囲にあることが知られている。本報告では、1.5 として、数値モデル及び水槽実験との比較が行われる。尚、章の後半にて記すが、1.5 とすることで、理論、数値シミュレーション、水槽実験共に凡そ一致することが判明する。上式を用いて、流速と実効的膜高さの関係、即ち流速その他の量と「ふかれ」の関係が得られるが、それをプロットしたのが図 4-3 である。図 4-3 の横軸： $0.5\rho U^2 d/W$ は無次元量となり、体系のスケールに依らない量である。また、縦軸： d_e/d も無次元量であり「ふかれ」を代表する量である。つまり、このプロットによりスケールに依らない関係が得られる（例えば、実開渠体系、水槽実験系共に $\beta=1.5$ とすることで、重錘のスケール比が一致する場合、得られる曲線は両者で一致する）。図 4-3 から、明らかに流速が早くなると「ふかれ」が発生し実効高さは小さくなる。その一方、重錘が重くなると「ふかれ」による実効高さの減少は緩和される（図 4-4 及び図 4-5 と図 4-3 を比較参照）。本報告では、3 章にて議論したように、1.2m/sec 程度の定常高速流れの下でも「ふかれ」の発達について探査するが、重錘が軽く（図 4-3）、速度が大きい場合には「ふかれ」が概ね飽和して行く様子が分かる。尚、理論式の適用範囲を超えるような高速な流れの下でも、数値シミュレーションを用いると「ふかれ」の評価が可能となるが、殆ど飽和した領域（水面に張り付いた状態）となる。これらの領域も含めて、広い流速範囲でのシミュレーションと水槽実験による検証についても報告する。尚、図 4-6 は本章にて報告する水槽実験系での理論式を示した。実開渠部に対し 1/20 の模型（25 cm 水深、幅 10cm（実際は 20cm））の開水路を考えるため、速度比等は 1/4.47 倍となる。

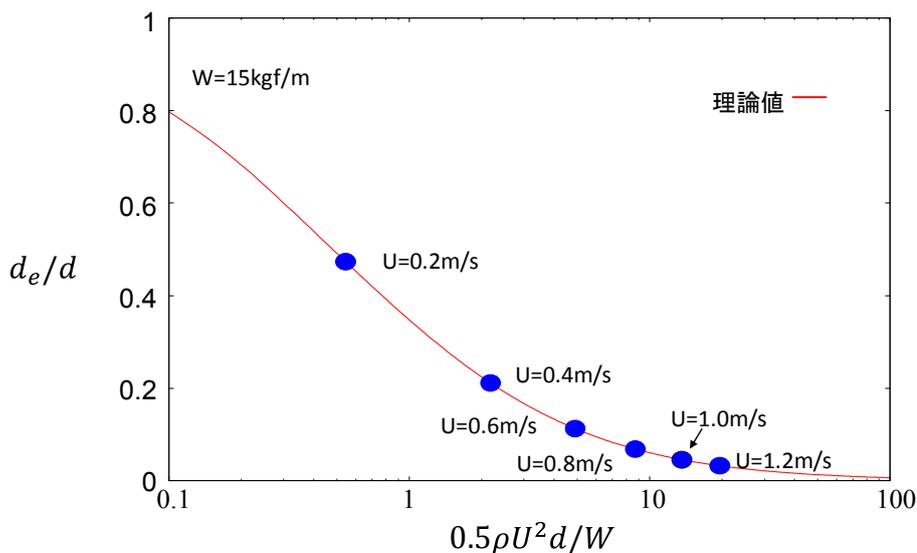


図 4-3 理論式から得られる実開渠体系(水深 5m、膜長 4m、重錘 $W=15\text{kgf/m}$)における有効シルトフェンス長 d_e/d 「ふかれ」と流速、重錘、フェンス長から成る無次元量との関係。青点は各々、印可流速 U ($=0.2, 0.4, 0.6, 0.8, 1.0, 1.2\text{m/s}$) に対する点を示す。

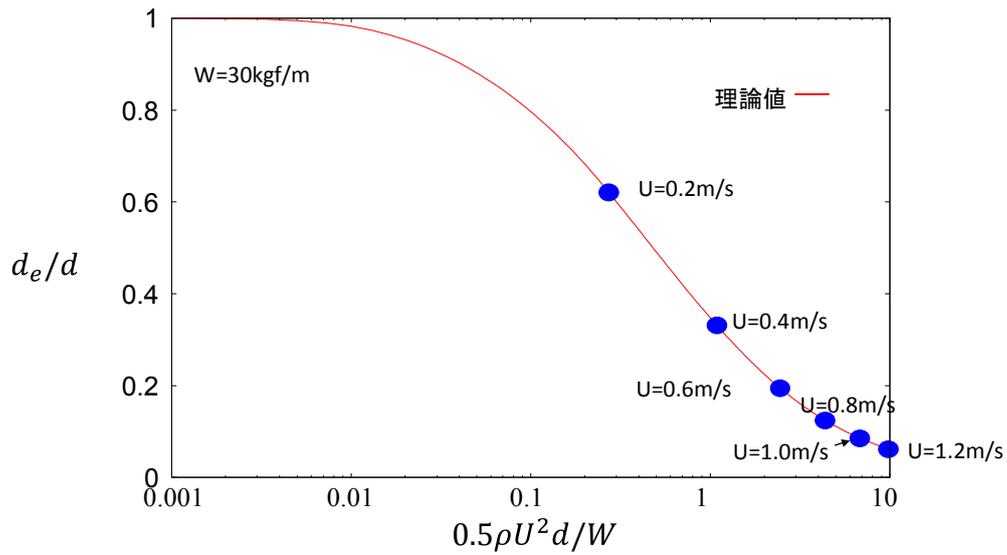


図 4-4 理論式から得られる実開渠体系(水深 5m, 膜長 4m, 重錘 $W=30\text{kgf/m}$)における有効シルトフェンス長 d_e 「ふかれ」と流速、重錘、フェンス長から成る無次元量との関係。青点は各々、印可流速 U ($=0.2, 0.4, 0.6, 0.8, 1.0, 1.2\text{m/s}$) に対する点を示す。

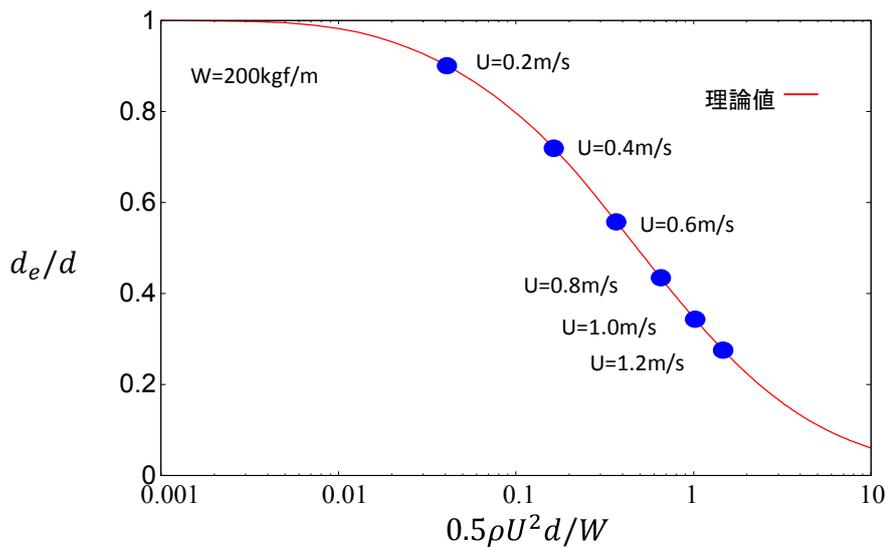


図 4-5 理論式から得られる実開渠体系(水深 5m, 膜長 4m, 重錘 $W=200\text{kgf/m}$)における有効シルトフェンス長 d_e 「ふかれ」と流速、重錘、フェンス長から成る無次元量との関係。青点は各々、印可流速 U ($=0.2, 0.4, 0.6, 0.8, 1.0, 1.2\text{m/s}$) に対する点を示す。

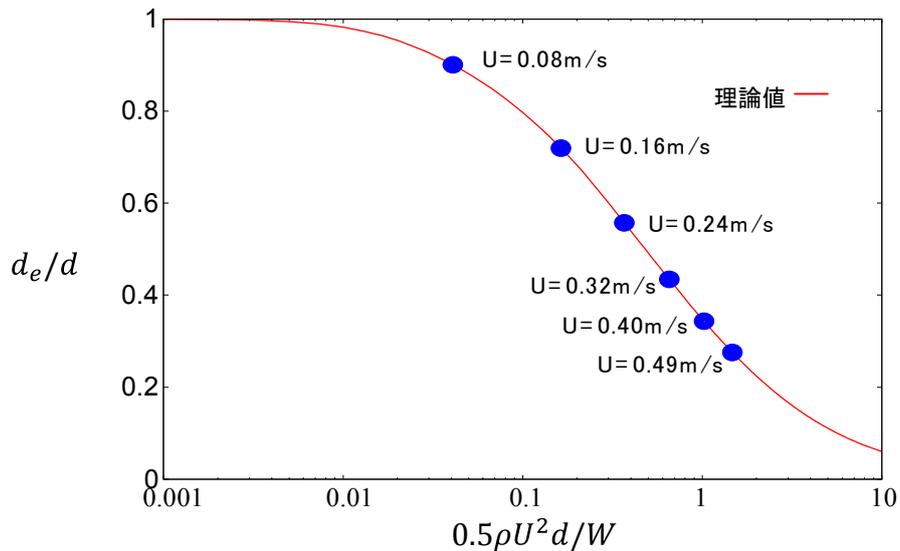


図 4-6 理論式から得られる水槽実験体系(水深 25m, 膜長 20cm 重錘 $W=0.5\text{kgf/m}$)における有効シルトフェンス長 d_e 「ふかれ」と流速、重錘、フェンス長から成る無次元量との関係。青点は各々、印可流速 U ($=0.08, 0.16, 0.24, 0.32, 0.40, 0.49\text{m/s}$) に対する点を示す。

[4-1]小田 一紀, 重松 孝昌, 野口 達矢, 武田 将英, 汚濁防止膜周辺の物質拡散の高精度予測手法に関する研究、海岸工学論文集、第 43 巻 (1996)、pp.1151-1158.

4.2 膜状物体の変形のモデル化

前 4.1 節では一様定常流下でのシルトフェンス変形動作の理論について記した。当該理論については、これまで、様々な定常流下において水槽実験や実証研究が行われ、その妥当性が検証されてきた。しかし、その適用範囲は定常流下であり水平方向の変動がない場合の、凡そ理想的な条件に限定される。原発事故時に起こる突発的な非定常流れに適用するのは難しく、今後の様々な系での評価へ向けた拡張性を考えると、数値シミュレーションモデルを構築し、そのプログラム実装が必要であることが分かる。また、上記の理論は一様な流れにのみ対応しており、事故時の流出が非一様な流れとなる可能性もある（排水路から港湾内に流入する環境によっては、非一様な流れが生じることも十分ある）ため、非一様な 3 次元詳細流れと相互作用しながら変形動作するシルトフェンス膜体モデルの構築が求められる。本事業では、非一様な 3 次元詳細流れを可能な限りシミュレーション可能とすべく、乱流等も含めて高い精度で計算可能な LES モデルを採用し、計算により得られる流体が及ぼす力で相互作用する膜体の運動を記述するモデルを構築することとした。以下では、上記の条件（流体と相互作用し変形動作する膜体を記述可能）を満たす 2012 年に提唱された膜体と流体の相互作用モデル[4-2]について記し、その理論及びシミュレーションの実装法とその計算結果を記す。

文献[4-2]に従うと、膜体は、節点と長さが変化しない（収縮せず重さのない）部材で構成されているものとし、最上部は移動しない固定点としている。最上部が移動可能な点とした場合は、原理的に水平方向の移動も取り入れることができるが、本事業では、最上部については移動しないモデルとして、一様な定常流下でのモデル開発・プログラム実装及び水槽実験との比較を行った。また、上記膜体モデルは、一般に網のモデルにも対応可能だが、透水性を考慮しない場合は、シルトフェンスのモデルとすることができる（網の場合は透水性が大きく、その影響は膜体の変形動作に重要な役割を果たすため、別途考慮する必要がある）。モデルの詳細を以下で説明しよう。まず、図 4-7 に示すように各節点（○で

示す) を定義し、図 4-7 にてハッチングで示す領域の膜要素を代表させる点とする。また膜の最下部には重錘がついているとする。

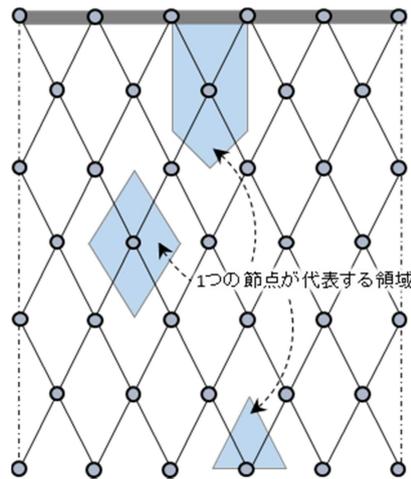


図 4-7 モデル化した膜体 (○：節点、ハッチング領域：各節点が代表する領域)

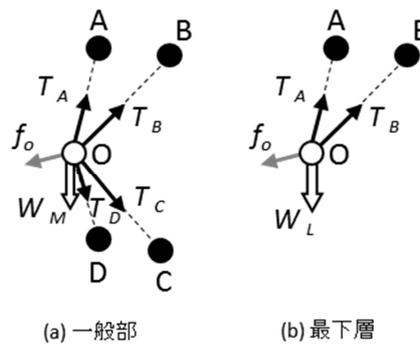


図 4-8 膜体・各節点での力の釣り合い

上記仮定の下、膜モデルの接点に対する力の釣り合いの模式図を図 4-8 に示す。節点 O には、部材応力 $T_A \sim T_D$ 、重錘重量の他に、膜体の法線方向に働く力 f_o が作用して膜体の変形を静的に支えていると仮定する。この節点における力 f_o の反力は膜体の復元力であり、流れの計算に反映させる。即ち、この反力による (i,j,k) 番目の格子セルへの影響を次式のように与えることで流体への反力とする。

$$R_{i,j,k} = -\frac{1}{\rho \Delta x \Delta y \Delta z} \sum_{o=1}^N r_o f_o \mathbf{n}_o \quad (4-6)$$

ここで、 ρ は水の密度、 $\Delta x, \Delta y, \Delta z$ は水平方向及び鉛直方向の格子間隔、 N は構成セル内にその全部及び一部が位置する膜要素の数、 \mathbf{n}_o は膜体の単位法線ベクトルである。また、 r_o は節点 O に代表される膜要素のセル内における存在確率であり、膜要素全体がセル内に収まっている場合は 1 となる。このようにして得られた $R_{(i,j,k)}$ を流体の運動方程式

$$\frac{Du_{i+\frac{1}{2},j,k}}{Dt} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + RX_{i,j,k} + RX_{i+1,j,k} \quad (4-7)$$

$$\frac{Dv_{i,j+\frac{1}{2},k}}{Dt} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} + RY_{i,j,k} + RY_{i,j+1,k} \quad (4-8)$$

$$\frac{Dw_{i,j,k+\frac{1}{2}}}{Dt} = -g - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} + RZ_{i,j,k} + RZ_{i,j,k+1} \quad (4-9)$$

に対し上式のように加えることで、膜体の復元力を流れ場に反映させることができる。ここで、(u, v, w) は鉛直上向きを z とする座標系 (x, y, z) の各流速成分、(RX, RY, RZ) は式(4-7),(4-8),(4-9)で与えられる加速度ベクトル $R_{i,j,k}$ の各成分、p は膜の影響が付加されていない状態での圧力、g は重力加速度である。膜体は水の流れに合わせて変形するため、固定点以外の接点を流れに合わせて移動させる。しかし、節点間の距離は一定であると仮定しているにも関わらず、単に流れに合わせてただでは、その距離は変動する。そのため、移動後の節点位置を補正することが必要となる。その振る舞いについては図 4-9 に示す。ここで、節点 A,B は既に補正済みの節点であるとし、節点 O' は補正前とする。この時、O'A および O'B の距離が本来の距離になるように、平面 AO'B 上で節点 O' を移動させることで、補正を行う。

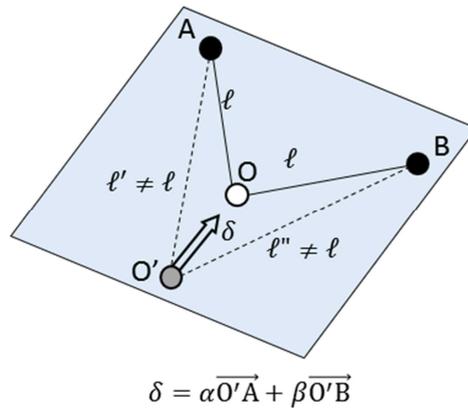


図 4-9 膜体の節点位置の補正

以上のモデルにより、膜体と流体が相互作用しながら膜体の変形動作の様子がシミュレーション可能となる。シルトフェンスの場合は透水性がないと仮定しても十分良い近似であることから、シルトフェンスのモデルとして有効である。以下では、全て透水性なしの膜体モデル（シルトフェンスモデル）を組み込んだ流体シミュレーションについて記す。シルトフェンスが定常流下にて変形動作する状態を考える際、水面が固定される流体モデルと固定されない自由水面を持つ流体モデルの二つが考えられる。自由水面モデルでのシミュレーションの方がより現実の開水路の状況を再現すると考えられるが、自由水面モデルで高速な流れをシミュレーションすることは、表面での乱れが大きくなり計算が難しいこと

が知られており、本報告では、自由水面モデルでなく、蓋をかぶせたような状況となる、水面位置（水位）固定で、自由な滑り面とするモデルでのシミュレーションを中心として実施した上、自由水面モデルの結果については実装技術のみ報告する。

[4-2] 金山進、安井章雄、古牧大樹、安野浩一郎、琴浦毅、膜と流体の連成解析のための簡便なアルゴリズム、土木学会論文集 B2（海岸工学）, Vol. 68, 2012、pp.I_811-I_815

4.3 水面固定条件下での膜体変形シミュレーション

水面を蓋のように固定し、水面にてすべり条件を果たすシミュレーションでは、水面の細かい変動を特に気にすることなくシミュレーションを容易に実行できるという特徴を有する。尚、シルトフェンス模型を用いた水槽実験においても、定常流と「ふかれ」が安定した状態では、水位変動は殆ど見られないことから、上記の仮定は十分であると判断できる。実際、過去の文献でも水面の自由変動を許した計算の報告例はない。以上より、本節ではその実行の容易さという点から、水面固定モデルにて下記のような計算条件において、シルトフェンスモデルの変形動作、即ち「ふかれ」と流速（定常流）との関係を調べた。計算体系は、図 4-10 に示すように、20m（長さ）×5m（横幅）×5m（深さ）の水路を仮定し、入り口から 5m の位置に水面から 4m のシルトフェンスを設置する数値実験を行った。この寸法は原子力発電所の放水路等とほぼ同様のスケールであり、放水路内の定常流に対して、シルトフェンスを垂下させた際、流体と相互作用し変形動作する様子のシミュレーションに相当する。

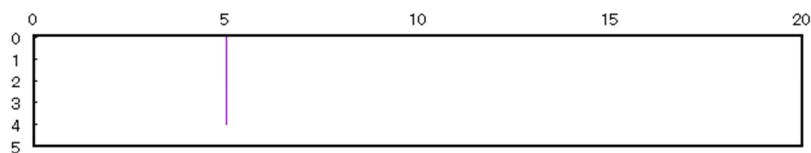


図 4-10 シミュレーション体系（横から見た水路）、横幅は 5、数値の単位は全て m

用いる膜体としてのシルトフェンスは、図 4-11 左図のような三角形を一つの格子として構成される。膜体要素は、実際のシルトフェンス部材の網目より大きいが、その格子間隔以下で起こる流体の流れ（乱流も含め）をモデル化し平滑化することで、その平均流体応力が個々の格子ユニットに働くため、十分に現実のシルトフェンスをモデル化できる。尚、現実のシルトフェンスは、目の細かい繊維（#300～500）であり、凡そ透水性を持たない布として扱うことが可能である。こうして、図 4-11 右模式図中の全ての節点に対し、流れに合わせて節点に掛かる力を計算することで節点を移動させる他、その反作用を流れの運動方程式に反映させる。こうして、シルトフェンスの「ふかれ」がシミュレーション可能となる。

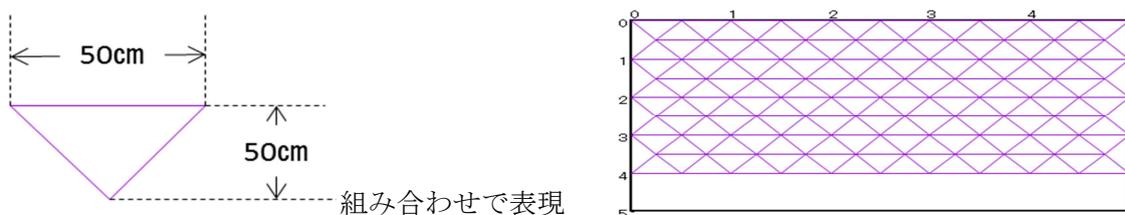


図 4-11 膜体モデルの要素（模式図）右図にて単位は m

4.4 実開渠体系での計算条件と計算結果

膜体が流体と相互作用し「ふかれ」が生じるシミュレーション結果（実開渠体系）の例を下に記す。計算格子としては、図 4-11 に示したように $0.5\text{m}\times 0.5\text{m}\times 0.5\text{m}$ のメッシュを用い、入り口には一様に 0.2m/sec , 0.4m/sec , 0.6m/sec , 0.8m/sec , 1.0m/sec , 1.2m/sec の流速を与え、重錘の水中重量は $200\text{kgf/m}(=1960\text{N/m})$ とした。各々のケースの膜体の変形動作「ふかれ」の流速その他の量との依存性についての結果は図 4-12 に示す。

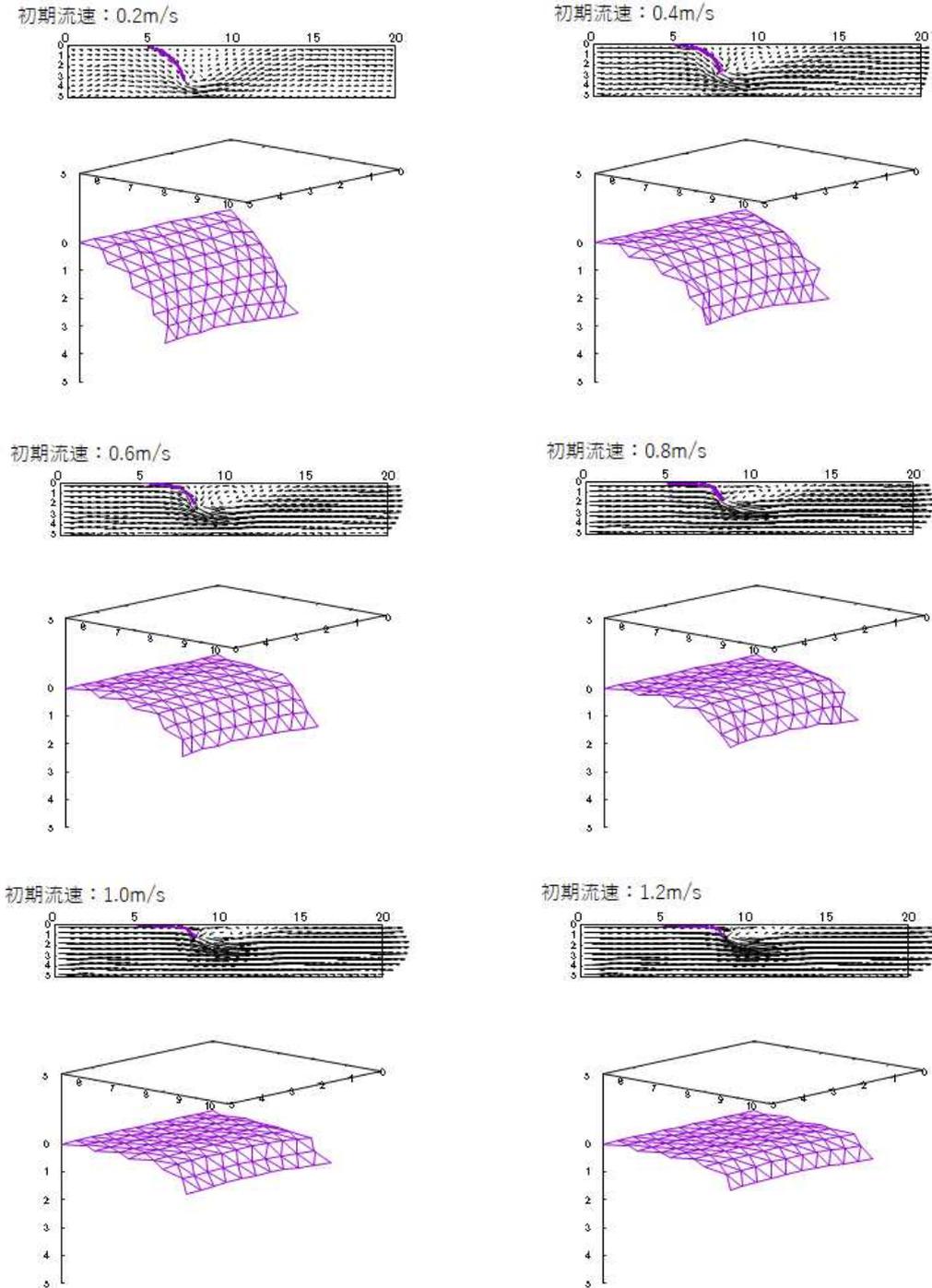


図 4-12 シミュレーションにより得られた実開渠体系での「ふかれ」形状の（定常）流速依存性

図 4-12 より、明らかに流速が遅い場合、「ふかれ」の変形度合いは小さいが、流速を上げると「ふかれ」の度合いが大きくなり、流速 1.0m/sec では、シルトフェンスの殆どが水平になることが分かる。これらの膜体・流体相互作用モデルから得られた流速依存性が妥当であるかどうかを検証するため、「ふかれ」の理論式と比較した。「ふかれ」の理論式は、4.1 節で記した小田らが提案した以下の推定式（2つの式を自己無撞着に計算し流れの影響を受けた状態での膜の深さ d_e を求める）である。

$$d_e = \frac{W}{\sigma} \sin\left(\frac{\sigma d}{W}\right) \quad (4-10)$$

$$\sigma = \beta \frac{1}{2} \rho \left(\frac{Uh}{h-d_e}\right) \quad (4-11)$$

ここで、式中記号は以下のように、シミュレーション条件（膜長 4 m、水深 5m、重錘の重量例：200 kgf/m）の下、以下のように定義され値が付与される。

d ：膜丈長（膜の長さ）（=4m）

d_e ：流れの影響を受けた状態での膜の深さ

W ：重錘の単位幅水中重量（=1960N/m=200kgf/m×9.8N/kg）

σ ：膜の単位長さ当たりの流体力

β ：実験定数(=1.5)

h ：膜の設置位置での水深（=5m）

U ：無限遠（フェンスの影響を受けないところでの）での平均流速

図 4-13 には、シミュレーション結果から得られるシルトフェンス実効長さと流速を含む無次元量の関係に対し理論式を同時に示した。図中、様々な重さの重錘を用いて得られたシミュレーション結果が重ねてプロットしてある。図 4-13 から分かるように計算結果は概ね理論式上に乗ることが分かるが、軽い重錘を用いた場合とそして重錘が軽く流速が速い場合に、理論式との一致が悪くなることが分かる。これは、重錘が軽い場合、理論式より「ふかれ」ることを意味しており、膜体が十分に安定せず、より「ふかれ」た状態も含めて平均化したためと考えられる。また、重錘が軽く流速が速い場合は、殆ど「ふかれ」が飽和し、且つ、シルトフェンスが殆ど水平（ $d_e/d \sim 0$ ）になるためである。このような結果は理論式の適用限界を超えており、数値シミュレーションにより初めて得られる結果に相当する。上記の結果から、開発・実装した膜体のモデルは、シルトフェンスの鉛直方向の「ふかれ」の理論式を凡そ再現することが分かった他、完全に「ふかれ」た状態をも表現できることが分かった。これは、実装したシルトフェンスモデルの基本的妥当性を示すものである一方、シミュレーションにより初めて明らかとなった現象でもあり、水槽実験及び実地での検証が必要である。また、模型体系（水深 0.25m、幅 0.20m で実開渠体系の 1/20）でのシミュレーション結果と理論式の比較結果を図 4-14 に示す。流速が大きくなり、「ふかれ」が飽和する領域が現れることは、実開渠体系のシミュレーション結果と全く同じであることが分かる。

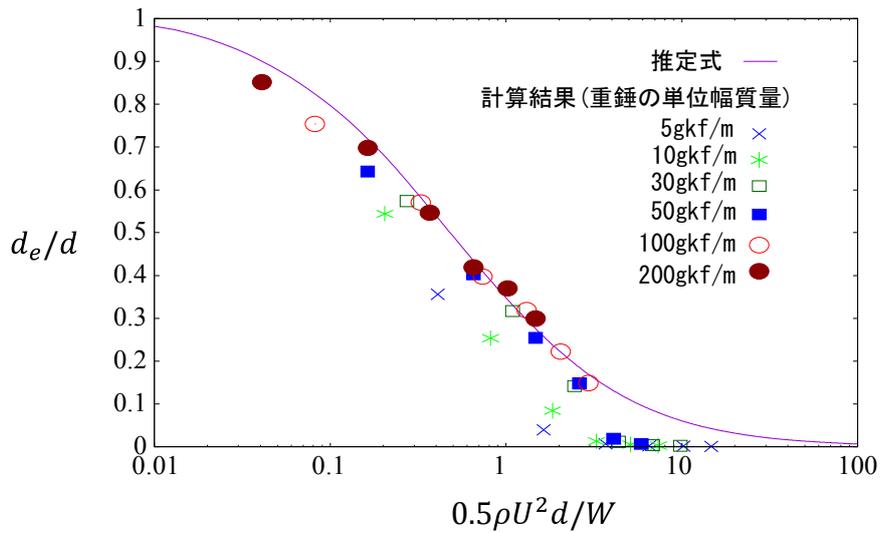


図 4-13 理論式とシミュレーション結果（各重錘の重量 (kgf/m) に対し、0.2m/s～1.2m/s(0.2m/s の間隔でプロット)の比較

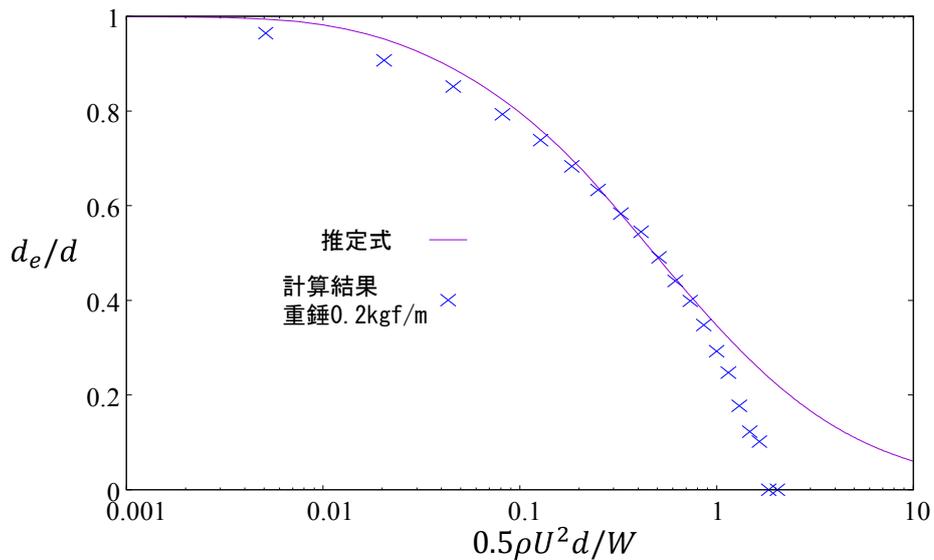


図 4-14 理論式と模型体系（水深 0.25m、膜長 0.20m、幅 0.20m）でのシミュレーション結果の比較

4.5 開水路計算手法

4.4 節で示した「ふかれ」のシミュレーションでは、上面に対し蓋をして自由すべり境界条件を果たしたが、現実の水路は開水路であり、より現実的なシミュレーションを行うためには、水位変動をもシミュレーション可能とすることが求められる。実際、検証実験に用いる水槽は開水路であり、開水路のシミュレーションに対し、厳密には水面変動の計算が必要となる。以上の要件を満たし、水面変動を含む流れ場のシミュレーションを実施するため、連続式を満たす解に対し、速度成分と圧力を反復修正することにより計算する HSMAC 法[4-3]を利用することとした。この際、図 4-15 に示すように、水面に対応しているセルの流入量・流出量から、水面の変動量 Δh を、次式を基に表し、

$$\Delta h = \frac{\partial u}{\partial x} \Delta z \Delta t + \frac{\partial v}{\partial y} \Delta z \Delta t + w \Delta t \quad (4-12)$$

水位を変動させる[4-4][4-5]。ここで、 u, v, w はそれぞれ x, y, z 方向の流速であり、 Δt はシミュレーションの時間刻みである。また、水面を移動させる際には、水面での圧力を 0 になるようにセルの中心の圧力を設定した。本報告書では、水位変動とシルトフェンスモデルを結合したシミュレーション結果については報告しない（高速流の下、シルトフェンスの変形動作と共に水面に複雑な動きが現れ計算が不安定になることが判明したためである）。

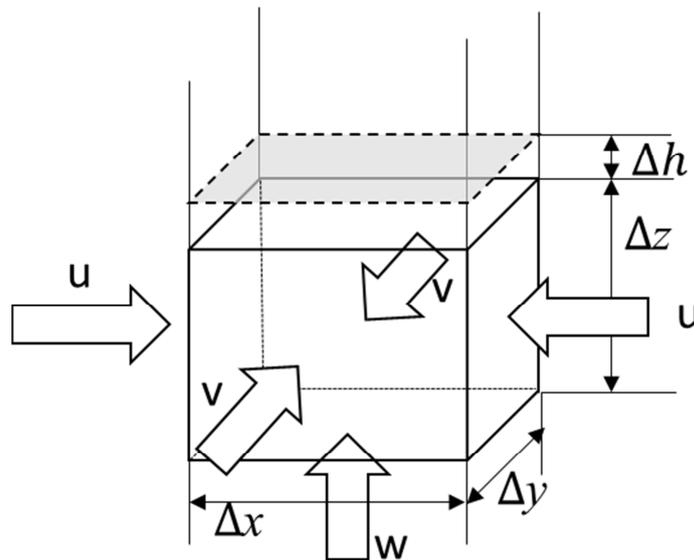


図 4-15 HSMAC 法を用いた水位変動シミュレーションにおける水位決定方法の模式図

HSMAC 法を用いた開水路のシミュレーション条件について記す。水槽実験では、凡そ 10m（長さ）×0.2m（横幅）×0.25m（深さ）の水槽を用いることから、左記の寸法での再現計算を行った。水位は 0.25m とし、入り口から 4m の位置にて、初期水面から 0.025m 上から 0.2m のシルトフェンスを設置する。計算格子間隔は 0.025m×0.025m×0.025m であり、入り口境界では、一様に 0.1m/秒、0.2m/秒、0.3m/秒の流速を与え、重錘の水中重量：0.735N/m (30kgf/m/400(20²) = 0.075kgf/m) とした。シミュレーション結果は本報告では省略する。

[4-3] Hirt, C.W. and Cook, J.L., Calculating three-dimensional flows around structures and over rough terrain, *J. Comput. Phys.*, 10(1972) 324-340.

[4-4] 中山昭彦、江田智行、松村友宏、修正 HSMAC 法による開水路乱流の LES、*水工学論文集*、第 49 卷 (2005)、PP.661-666.

[4-5] 野田博、中山昭彦、長谷川功、LES による水槽内のスロッシング現象の再現、*可視化情報*、Vol.25 (2005)、pp.17-18.

4.6 シルトフェンスモデル検証のための水槽実験

本節以降は、前節までに実装したシルトフェンスモデル（膜体と流体の相互作用モデル）を検証するための水槽実験の条件及び結果について記す。水槽実験は中央大学・理工学部・都市環境学科（主担当：関准教授）に再委託し実施した。本実験では、シルトフェンス鉛直方向の「ふかれ」変形動作を検証するため、開水路状の水槽を用い、定常の流れを、ポンプ複数台を作動させて生成する。ポンプは最大で4台用いる。表 4-1 はポンプ台数と発生する一分当たりの流量等について記した。尚、現地換算量についての変換等については、表 4-2 を参照のこと。

表 4-1 ポンプ台数と流量

ポンプ台数	断面平均流速 [m/s]	流量 [m ³ /s]	現地換算断面平均流速 [m/s]	現地換算流量 [m ³ /s]
1台	0.072	0.0036	0.322	6.440
2台	0.141	0.0071	0.631	12.611
3台	0.220	0.0110	0.984	19.677
4台	0.281	0.0141	1.257	25.133

用いる水槽の寸法及び形状を図 4-16 及び図 4-17 に示す。図 4-16 は真横から見た図（鉛直方向）であり、図 4-17 は直上から見た図である。ポンプにより定常流れを一方方向（x 方向）に生成し、流れを安定化させるため消波材を用い、シルトフェンス模型を中央にて図のように垂下させる。

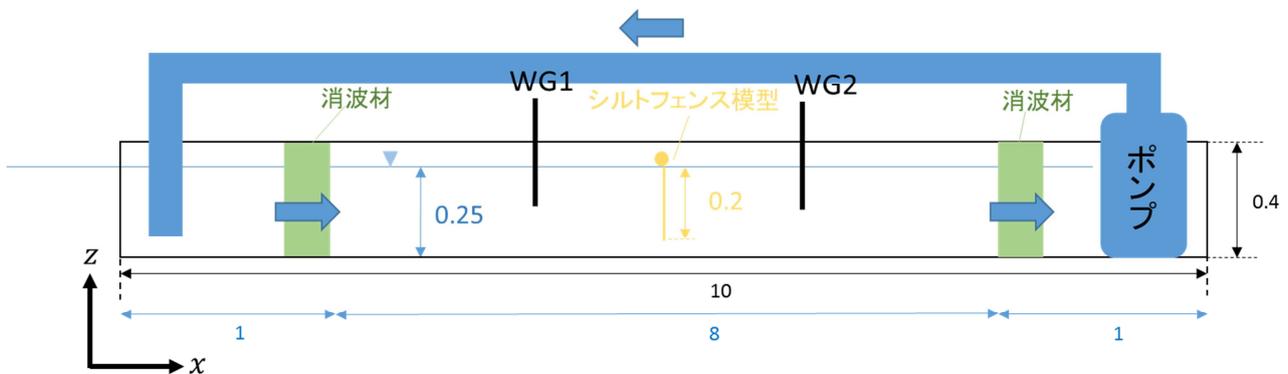


図 4-16 用いる水槽（模式図）：真横から見た様子(数字の単位はすべて[m])

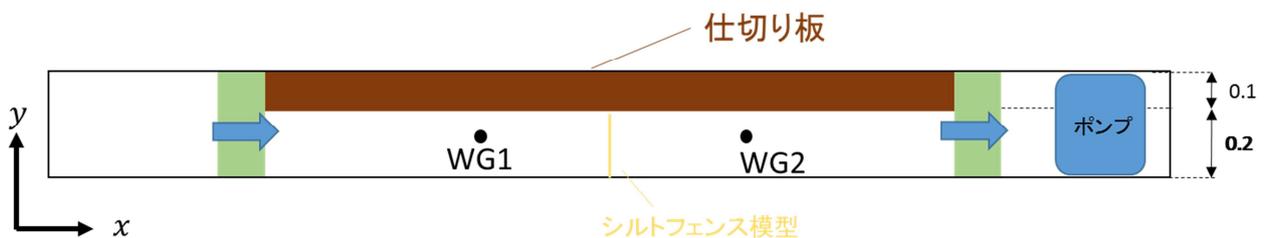


図 4-17 用いる水槽（模式図）：直上から見た様子(数字の単位はすべて[m])

直上から見た図 4-17 では、仕切り板を用いて定常流れを安定化させる。上記のように準備した実験水槽と実開渠水路との縮尺比率は 1:20（=実験水槽水深 0.25cm：実開渠水路水深 5m）であり、それに伴う各物性値の縮尺比率の対応関係を表 4-2 に記す。

表 4-2 実験水槽と実開渠水路との対応 (縮尺)

物理量	縮尺比率	1/20 模型の場合
長さ	N	20
流速	$N^{1/2}$	4.47
流量	$N^{5/2}$	1788.85
重量	N^3	8000

次に、シルトフェンス模型の設置について記す。まず、準備実験のため、本事業ではアクリル板を用いた実験を行った後、シルトフェンス実物片 (場合によっては布等の類似品) を使用し、水槽実験を行った。表 4-3 は垂下した実験材料について記す。

表 4-3 水槽実験で用いた垂下物等の特性

シルトフェンス模型		材質	単位幅質量	取り付け方法	d [m]
A	5mm 厚アクリル板	ポリメチルメタクリレート樹脂	0.600 [g/cm ²]	固定	0.20
					0.12
					0.04
B	実物片(#300)	ポリエステル	0.052 [g/cm ²]	可動	0.20
C	実物片(#500)	ポリエステル	0.080 [g/cm ²]	可動	0.20
D	実物片(#800)	ポリエステル	0.099 [g/cm ²]	可動	0.20
E	透水性布	トリコット	0.005 [g/cm ²]	可動	0.20

垂下する膜模型を支持するため、水槽に支持部材を図 4-18 のように設置し、シルトフェンス模型を垂下した状態でふかれ形状変化を観測した。

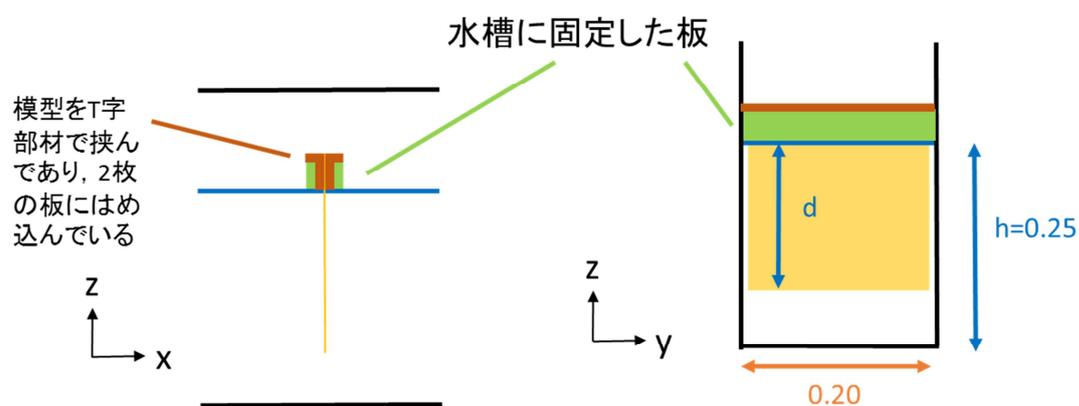


図 4-18 シルトフェンス実物 (模擬材) の固定法、左図：真横から見た垂下支持部、右図：長軸方向から見た垂下膜

(a)

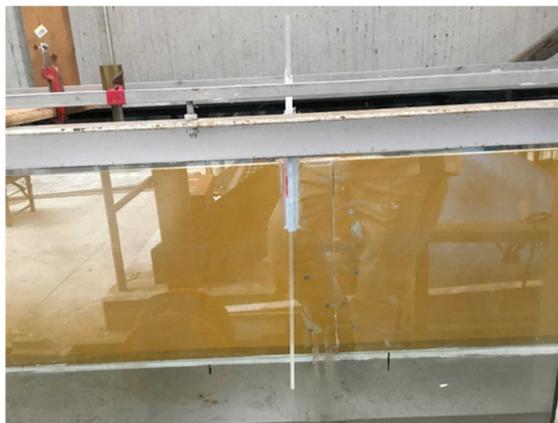


(b)



図 4-19 (a)アクリル板模型 (5mm 厚) (b)実物片 (#800)

図 4-19(a)は準備した水槽に対しシルトフェンス実物垂下実験の前準備としてアクリル板を垂下させた際の様子を示す。また、図 4-19(b)は垂下する前のシルトフェンス実物片のスナップショットである。



アクリル板設置状況



水中ポンプ設置状況

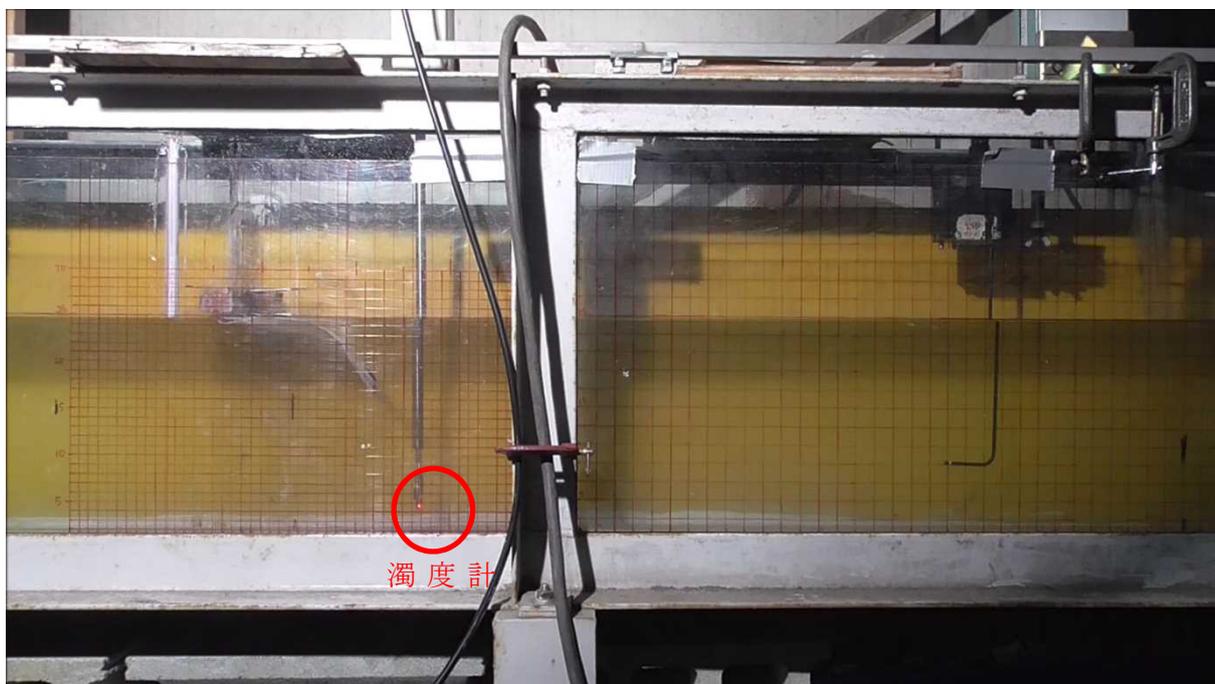


アクリル板実験時の染料の様子

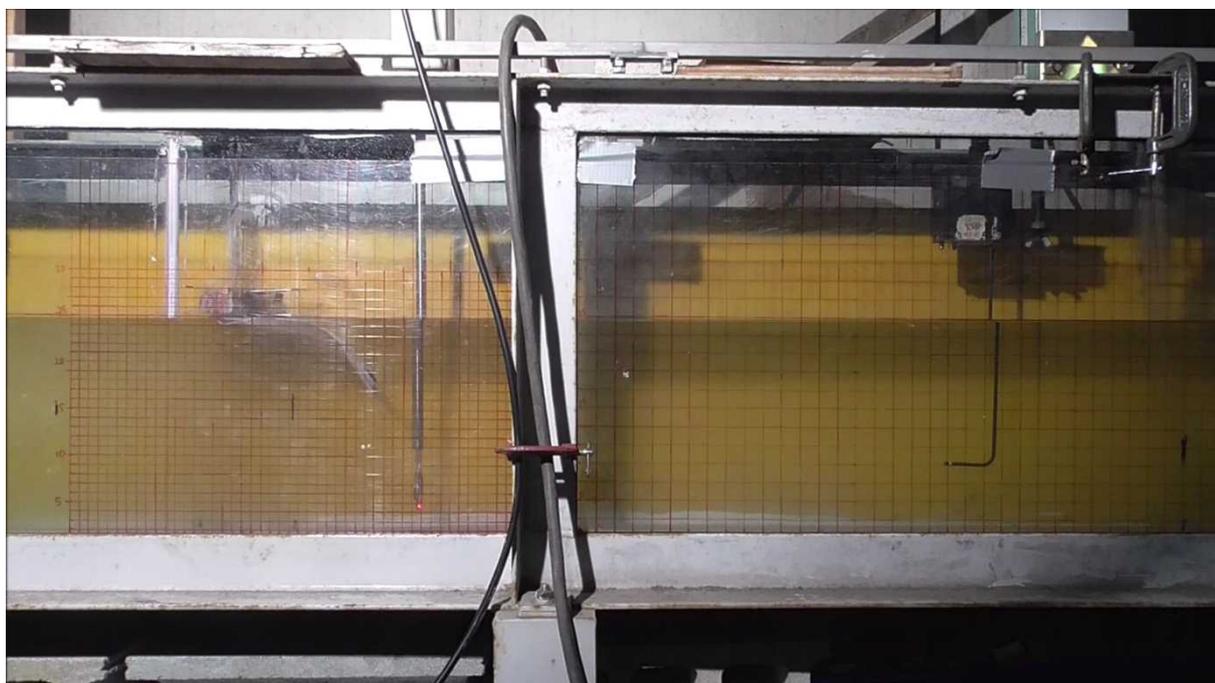
図 4-20 準備した水槽周囲のスナップショット

図 4-20 上図はアクリル板の設置状況を示すと同時に下図にポンプの設置状況を示し、下準備実験として実施したアクリル板垂下条件での染料垂下実験のスナップショット (1例) を示した。

次に、実際の実験状況について記す。図 4-21 は実シルトフェンス材を用い、水槽中で垂下した実験のスナップショットである。図 4-21(a)にて分かるように濁度計が設置され、本事業では、流況や懸濁物質の移流・拡散状況を確認するため、カオリン（粘土粉末）が用いられた。

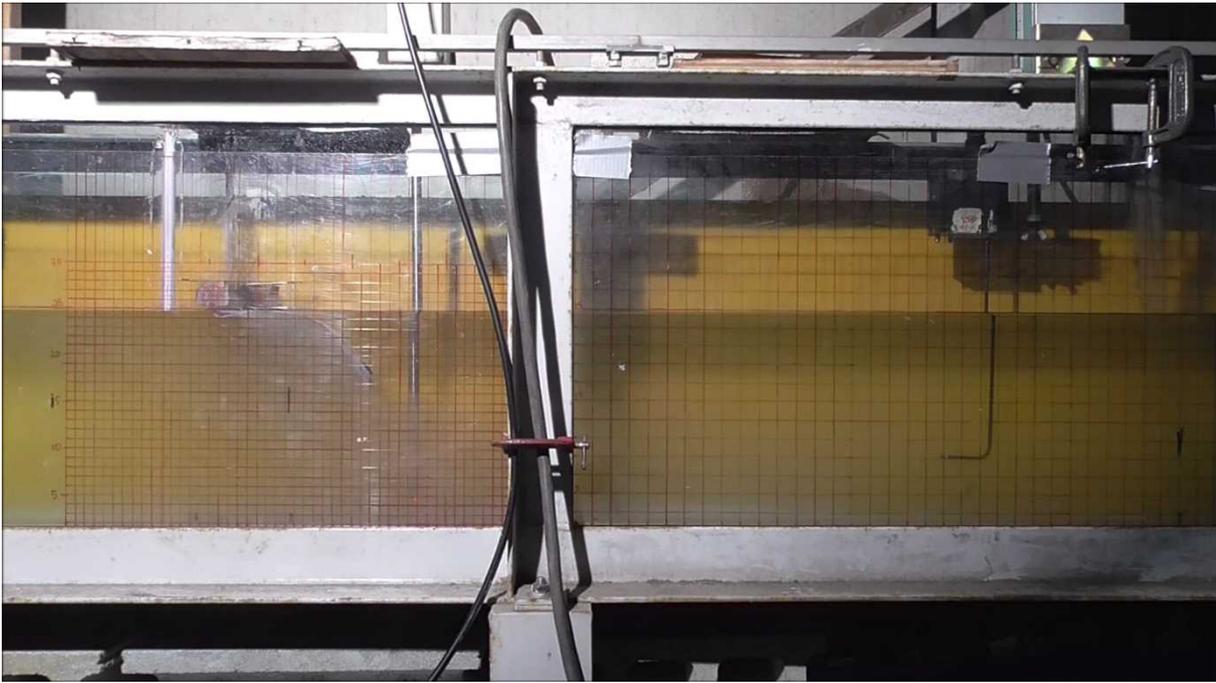


(a) 時刻 A 15s

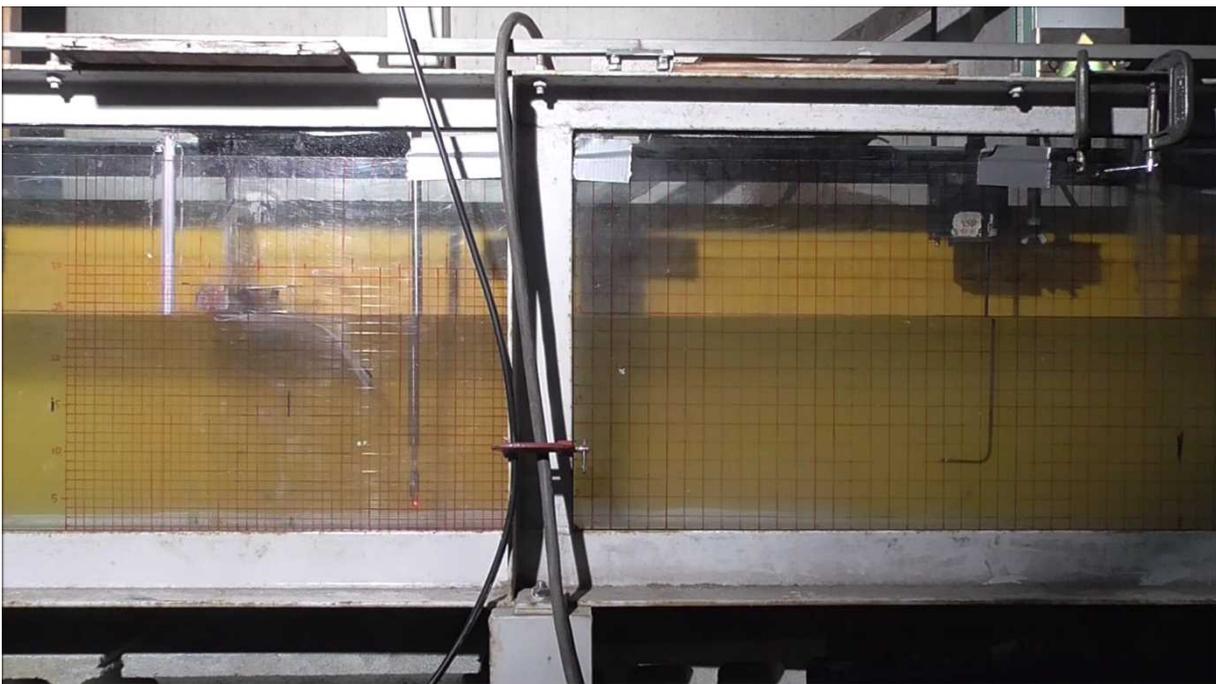


(b) 時刻 B 28.2s

図 4-21 実シルトフェンス材を用いた水槽実験のスナップショット（赤丸枠内にて濁度計設置）。時刻は流況や懸濁物質の移流・拡散状況を確認するため上流にてカオリンを散布した後の時刻



(c) 時刻 C 35.5s



(d) 時刻 D 50.0s

図 4-22 実シルトフェンス材を用いた水槽実験のスナップショット (図 4-21 の続き)

カオリンを垂下した時の経時変化については、ビデオ撮影による評価は困難であり、濁度計の結果を付録 4-III に示す (詳細は付録 4-III 参照)。次に流況を観測するため、染料を垂下した際の実験結果を図 4-23 に示す。染料は詳細な乱流構造を反映し、複雑な動きをすることが分かる。

CASE1：染料垂下（前半）

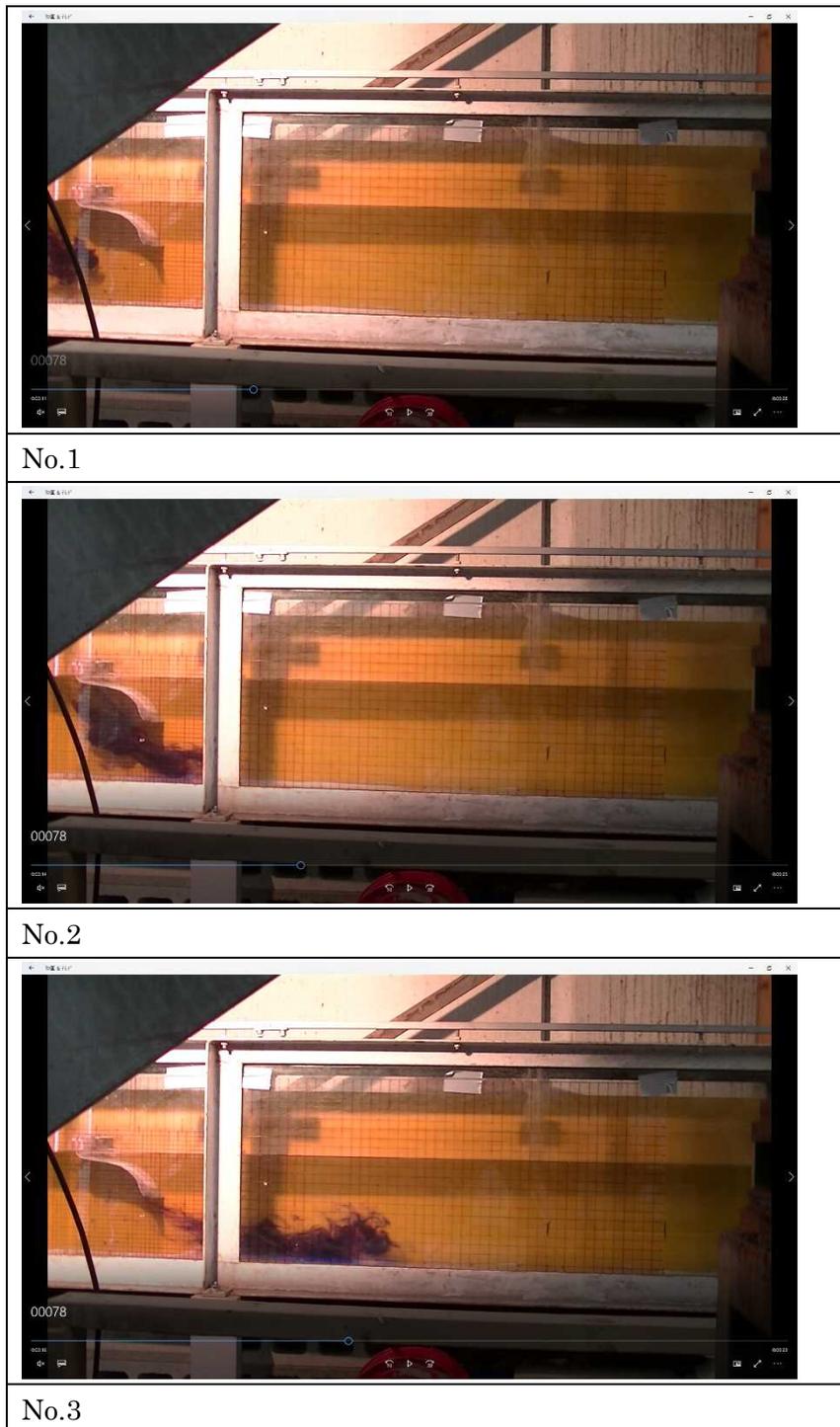


図 4-23 染料を垂下させた際の時系列スナップショット前半（シルトフェンス実物片を垂下させた場合、ポンプ一台稼働）

CASE1：染料垂下（後半）

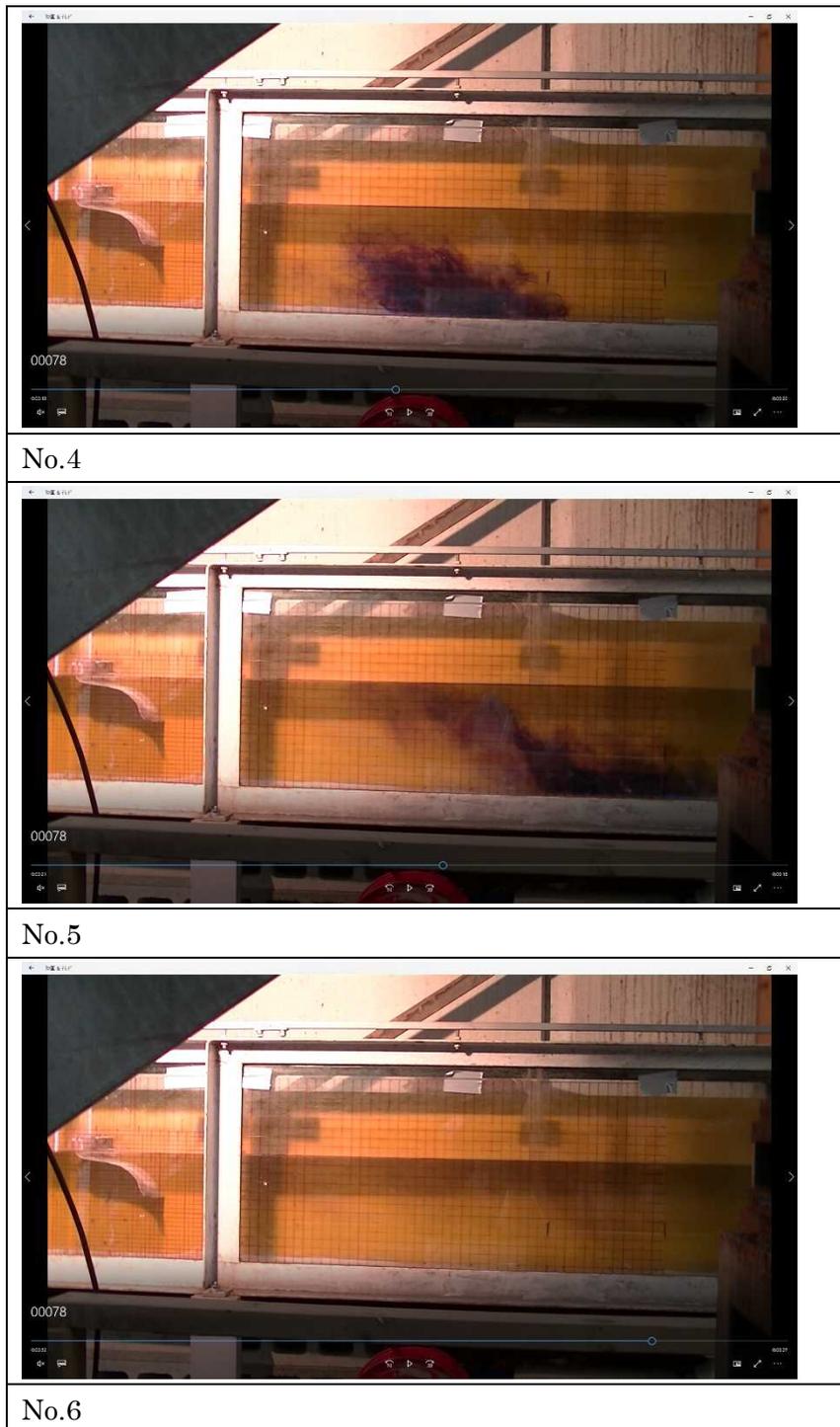


図 4-24 染料を垂下させた際の時系列スナップショット後半（シルトフェンス実物片を垂下させた場合、ポンプ一台稼働）

CASE2 : 染料垂下 シルトフェンス近傍 (前半)



No.1



No.2

図 4-25 染料を垂下させた際の時系列スナップショット前半 (シルトフェンス実物片を垂下させた場合、ポンプ一台稼働、シルトフェンス近傍にフォーカス)

CASE2 : 染料垂下 シルトフェンス近傍 (後半)



No.3



No.4

図 4-26 染料を垂下させた際の時系列スナップショット後半 (シルトフェンス実物片を垂下させた場合、ポンプ稼働、シルトフェンス近傍にフォーカス)

CASE3 : 染料をシルトフェンス後方から垂下 (前半)



No.1



No.2



No.3

図 4-27 染料を膜後方に垂下させた際の時系列スナップショット前半 (シルトフェンス実物片を垂下させ、ポンプ一台稼働)

CASE3 : 染料をシルトフェンス後方から垂下 (後半)



No.4



No.5



No.6

図 4-28 染料を膜後方に垂下させた際の時系列スナップショット後半 (シルトフェンス実物片を垂下させ、ポンプ一台稼働)

CASE4：染料を上流水面から垂下（前半）



No.1



No.2



No.3

図 4-29 染料を垂下させた際の時系列スナップショット前半（シルトフェンス実物片を垂下させ、ポンプ二台稼働）

CASE4：染料を上流水面から垂下（後半）



No.4



No.5



No.6

図 4-30 染料を垂下させた際の時系列スナップショット後半（シルトフェンス実物片を垂下させ、ポンプ二台稼働）



No.1



No.2



No.3

図 4-31 カオリンを垂下させた際の時系列スナップショット（シルトフェンス実物片を垂下させ、ポンプ一台稼働）。（ビデオ撮影画像では、濃度分布の変化を捉えることは難しいことに注意）



※ポンプ 1 台



※ポンプ 2 台

図 4-32 観測される「ふかれ」の稼働ポンプ数 (印可流速) 依存性 (シルトフェンス実物片を垂下させ、ポンプ 1/2 台稼働させた場合)

以上、水槽実験でのシルトフェンス実物片を垂下した際の「ふかれ」を観察したスナップショットを示してきた。水槽実験で得られたポイントは以下の通りである。

- ①シルトフェンス実物片は定常流下において「ふかれ」を示し、ポンプを増やし、流速を上げると「ふかれ」の度合いは大きくなる (実効的シルトフェンス長 d_e/d は短くなる)。

②上流側からの一様な流れは「ふかれ」たシルトフェンス実物片の下に潜る形で流れ、その流速は印可した流速よりも早く、「ふかれ」たシルトフェンスを通過した後は、渦状の剥離が鉛直上方に向かって起こることが分かる。付与した流速が大きい程、この剥離による水流の混合は大きい。このような乱れた流動様態はこれまでの研究でも観察されており、シルトフェンス付近で堆積した懸濁物質の巻上げを増強すると考えられている。

③染料を下流側の膜近くで水面より垂下した（図 4-27,28 参照）他、染料を上流側の膜近くで水面より垂下した（図 4-29, 30 参照）実験により、②の流動様態がよりクリアに確認できた。前者では、「ふかれ」た膜近くの下流で水面より垂下した染料の動きから、底面との混合がしばらく抑制されていることが分かった。これは底面近くを流れる速い流れと、水面近くの流れが幾分の間、分離しているためと考えられる。一方、後者では、上流側の膜近くで水面より垂下した染料の一部は「ふかれ」た膜の下部を潜航し、速い速度で膜下部を通過するが、染料の一部は膜の固定点近くの水面に滞留することが分かった。これは膜の固定点近くの水面近傍では流れが一部滞留する一方、膜の下を潜航する流れは強く加速されることを示している。

④カオリンを垂下させた場合の遠方からビデオ撮影した時系列変化を図 4-31 に示した。明確な画像を取ることは困難であったが、目視した範囲では凡そ染料と同様の振る舞いをしていることが分かった。

⑤ポンプ台数を変えた際の「ふかれ」の違いを図 4-32 に示した。「ふかれ」は明らかに流速依存性を示すことが分かる。

以上、得られた結果（「ふかれ」による実効膜長と流速その他の無次元量との関係を理論式上にプロットしたものが図 4-33 である。殆どのケースで理論式上にのることが分かる。また、水槽実験結果が最も一致する理論式の実験定数 $\beta=1.0$ であることが分かるが、 β の値による「ふかれ」の度合いは小さく、測定誤差の範囲にあると考えられる。この結果から、理論・シミュレーション・水槽実験の 3 者が実験定数 $\beta=1.5$ の直線上で凡そ一致することが分かったと結論できる。

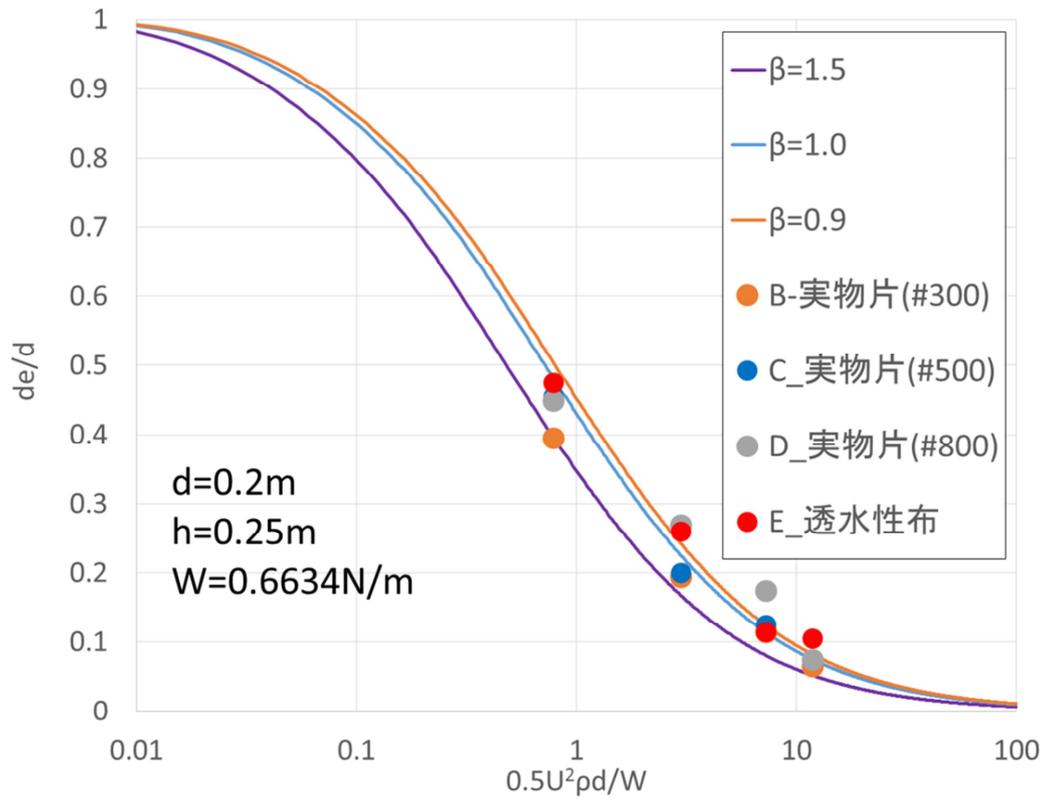


図 4-33 シルトフェンス実物片を用いて有効膜長を求めた実験結果（直線は実験定数 β の 3 ケースでの理論式）

付録 4-I 理論モデルの解法

$$W \frac{d^2 f}{dx^2} - \sigma \left\{ 1 + \left(\frac{df}{dx} \right)^2 \right\}^{\frac{3}{2}} = 0 \quad (4a-1)$$

の両辺に df/dx を掛けると、この式は $g=(df/dx)^2$ に対する式、

$$\frac{1}{2} \frac{dg}{dx} = \frac{\sigma}{W} g^{\frac{1}{2}} \{1 + g\}^{\frac{3}{2}} \quad (4a-2)$$

に変換される。 g に対する積分を行うと、

$$\int \frac{dg}{2g^{\frac{1}{2}} \{1 + g\}^{\frac{3}{2}}} = \sqrt{\frac{g}{1 + g}} = \frac{\sigma}{W} x + C_1 \quad (4a-3)$$

を得る。 C_1 は積分定数であるが、条件 $g(0)=(df(0)/dx)^2=0$ より $C_1=0$ となる。さらにこの式から、

$$\frac{df}{dx} = \frac{\sigma x}{W} \left[1 - \left(\frac{\sigma x}{W} \right)^2 \right]^{-\frac{1}{2}} \quad (4a-4)$$

が得られる。これを積分して、

$$f(x) = -\frac{W}{\sigma} \sqrt{1 - \left(\frac{\sigma x}{W} \right)^2} + C_2 \quad (4a-5)$$

となる。条件 $f(0)=0$ より $C_2=W/\sigma$ であるから $y=f(x)$ として、

$$y = \frac{W}{\sigma} \left(1 - \sqrt{1 - \left(\frac{\sigma x}{W} \right)^2} \right) \quad (4a-6)$$

が得られる。

付録 4-II 有効フェンス高さ(d_e)の導出

付録 4-I の結果から、

$$1 + \left(\frac{dy}{dx}\right)^2 = \left[1 - \left(\frac{\sigma x}{W}\right)^2\right]^{-1} \quad (4a-7)$$

となることがわかる。この関係式を使って、

$$d = \int_0^{d_e} \sqrt{1 + \left(\frac{dy}{dx}\right)^2} dx = \frac{W}{\sigma} \sin^{-1} \frac{\sigma d_e}{W} \quad (4a-8)$$

が得られる。これから、 d_e の表式が得られる。

付録 4-III カオリンを垂下させ濁度計を用いて測定した結果

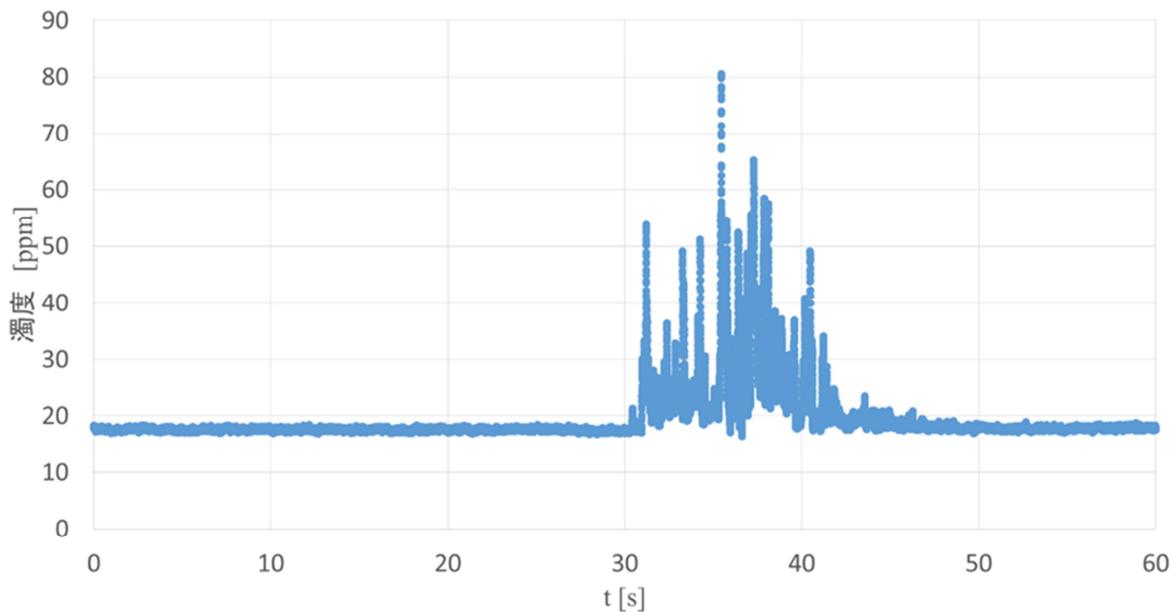
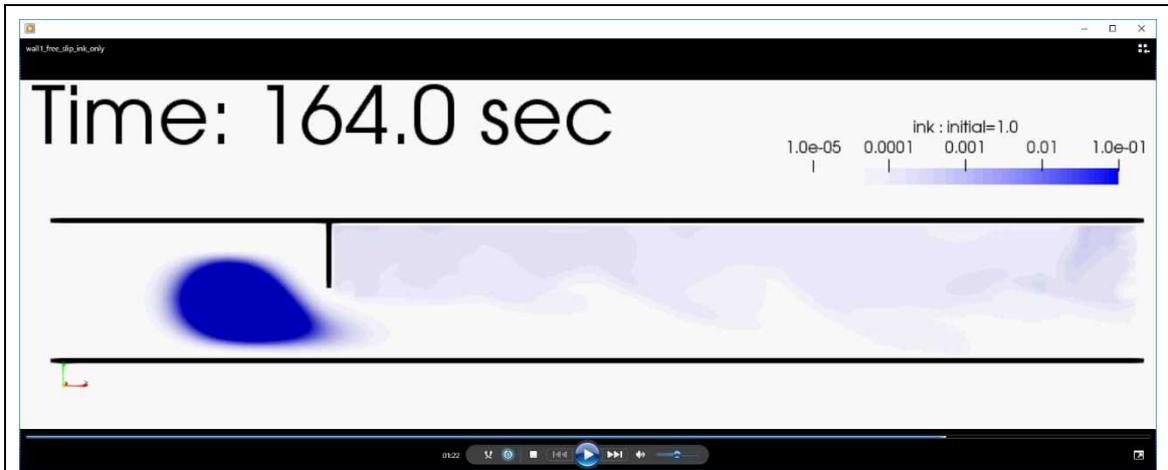


図 4-34.カオリンを、膜を垂下させた地点より上流側で垂らしたケースでの濁度計が観測した濁度の経時変化

カオリンを垂下後、白濁した流れが「ふかれ」た膜の下側を通過するため、通過直後の濁度計設置位置で大きなピークの連続構造が見られる。ピークは流れの時空間揺らぎと関係していると考えられる。ピーク前半では、スパイク状のピークが不連続に出現するが、後半では、そのピークの緩和過程が見て取れる。

付録 4-IV アクリル板垂下条件の数値シミュレーションと水槽実験との比較 (同じ条件設定の下、染料の動きによる比較評価)

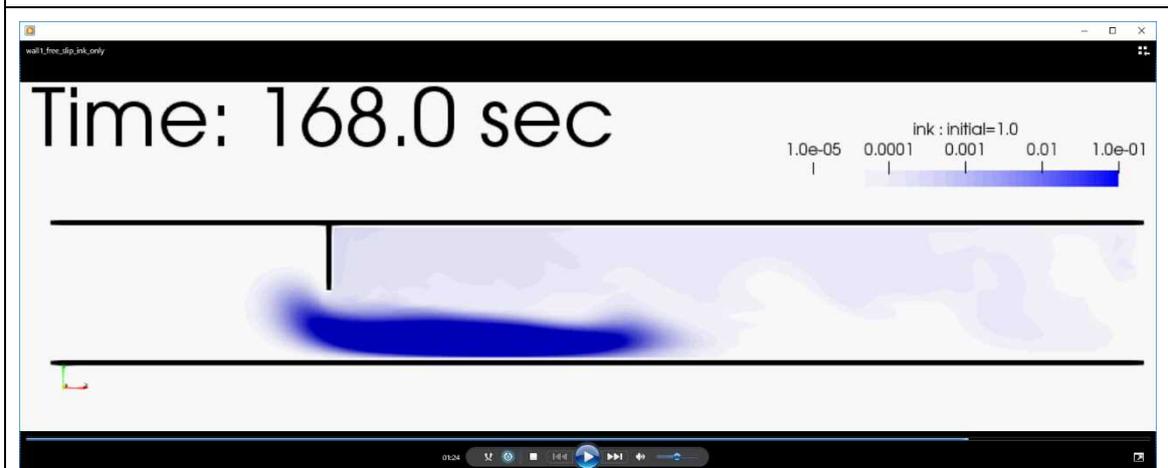
本付録 4-IVでは、アクリル板を垂下させた場合に観測される染料の動きとシミュレーションによる滴定染料の動きを比較する。以下の図はシミュレーション結果である。



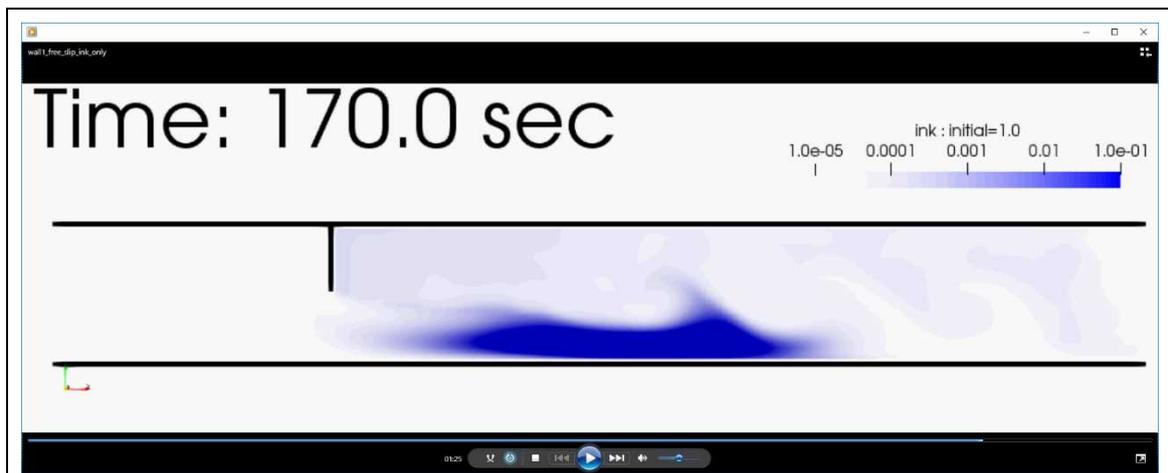
No.1



No.2



No.3



No.4



No.5



No.6

図 4-35 アクリル板を定常流下にて垂下した場合のシミュレーション結果の時系列変化のスナップショット。実験結果（図 4-36 参照）と凡そ同じ流速を付与したときのシミュレーションに相当する。

観測される染料の動きは、シルトフェンス実物片を垂下した場合と同様であり、速い潜航の様子とアクリル板通過後の鉛直上方への流れの剥離（乱れた流れ）が観測される。以下では、比較対象として染料を垂下させた際のスナップショットを示す（水槽実験）。凡そシミュレーションと水槽実験結果が一致していることが分かる。



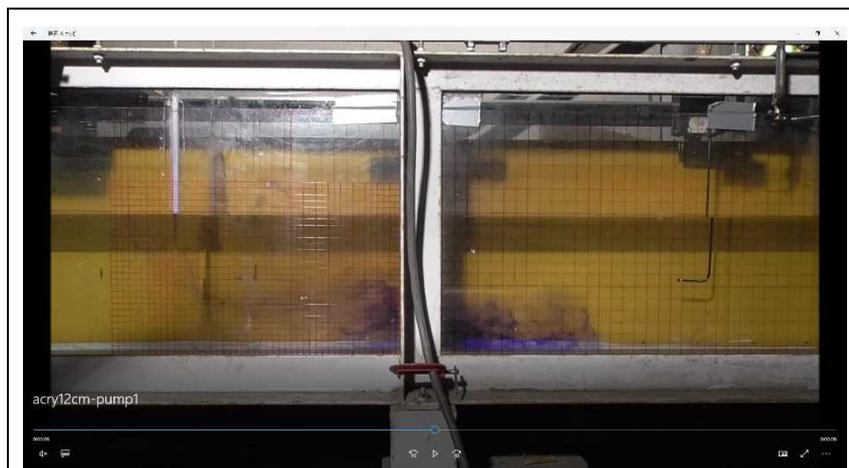
No.1



No.2



No.3



No.4



No.5



No.6

図 4-36 アクリル板を定常流下にて垂下した場合の水槽実験結果の時系列変化のスナップショット。同じ流速を付与したときのシミュレーション条件（図 4-35 参照）に相当する。

■ 5章 シルトフェンス動作コードと港湾コードとの接続

1F事故により放射性核種の環境中への漏洩が発生したが、本事故の特徴的事象として港湾内への高濃度汚染水の直接漏洩が挙げられる。このような高濃度汚染水の直接漏洩が短期間に集中して発生した例は少なく、その環境への影響度については詳細に評価する必要がある。しかし、港湾内での漏えい箇所は数m程度の流出点に過ぎない一方、その流出点から港湾内そして港湾外への移流・拡散は最終的に数千kmの範囲へと広がる。従って、このようなプルームの移流・拡散をできる限り正確に把握するためには、マルチスケールの数値シミュレーション技術を開発する必要があることが分かる。3章では、その一部となる港湾内スケールの海洋シミュレーション技術について詳述した。

1F事故後、放射性核種の大気放出を抑制するため、放射性物質の捕獲及び降下を目的として、放水砲を用いた液体散布による抑制対策が検討されているが、放射性核種を高濃度に含む液体が流れ着く先は原発港湾であり、シルトフェンスの設置が海洋への拡散抑制のための有効な手段と考えられている。本事業では、シルトフェンスの効能を評価する上で最も基本となる変形動作である「ふかれ」（鉛直方向のフェンスの変形動作）に着目し、その変形動作のシミュレーションコードの開発と水槽実験による検証を実施した（結果については4章に詳述）。

シルトフェンスの効能を精度良く評価するためには、その海水中でのフレキシブルな変形動作をモデル化し、シミュレーション可能とすることが望ましいが、その実装に際しては、3次元の非静水圧流体コード（海洋シミュレーションコードの殆どは静水圧近似を施した準2次元コード）をベースとしてシミュレーションコードを開発する必要があり、現在の計算機資源（スーパーコンピュータ）を用いても、シルトフェンスとその周辺の計算のみが計算対象となる。つまり、上記の詳細3次元流体シミュレーションコードを用いて沿岸環境あるいは港湾全体をシミュレーションすることは計算資源の観点から不可能であることを指摘する。従って、上記のシルトフェンス変形動作をシミュレーション可能とする詳細3次元コードと港湾・海洋の海水流動場を記述するコードとの接続を取って、シルトフェンスの変形動作を正確に記述した上で港湾スケールのシミュレーションを実施する必要があることが分かる。

一般に港湾・海洋のスケールで海水流動場をシミュレーションするコードは、3章にて記したように静水圧近似を用いて鉛直方向の流動場については、直接に運動方程式を解くのではなく、流体密度の連続の式より求めるという近似を取る。一方、4章にて記したように、シルトフェンス変形動作モデルと結合する詳細3次元シミュレーションコードでは、鉛直方向の速度場がシルトフェンスの「ふかれ」と共に重要な量となり、流体・シルトフェンス共に鉛直方向への運動が重要となるため、静水圧近似をせず、直接、鉛直方向の速度場の運動方程式を解くことから、3次元のフルな詳細流体シミュレーションとなる。

以上のモデリングの違いから、シルトフェンス変形モデルを組み込んだ詳細3次元流体シミュレーションは、静水圧近似を施したシミュレーションに対し、直接接続することができないため、接続する技術の開発が必要となる。本章では、その接続技術について詳述し、検証数値実験例を示す。

5.1 シルトフェンス変形動作を組み込んだ非静水圧コードの静水圧近似コードへの接続

上記のように、海水が3次元流動を示し、静水圧近似が適切でない領域に対しては、非静水圧の詳細3次元流体シミュレーションコード（本報告では、4章にてその仕様及び機能を記したシミュレーションコードに相当）が、その海水流動場をカバーし、それ以外の準2次元流動を示す領域については、

静水圧近似を施した 3 章にて詳述した機構が開発した港湾シミュレーションコードを用いる。その接続状況の一例を、1 F 港湾を対象に図 5-1 にて示す。

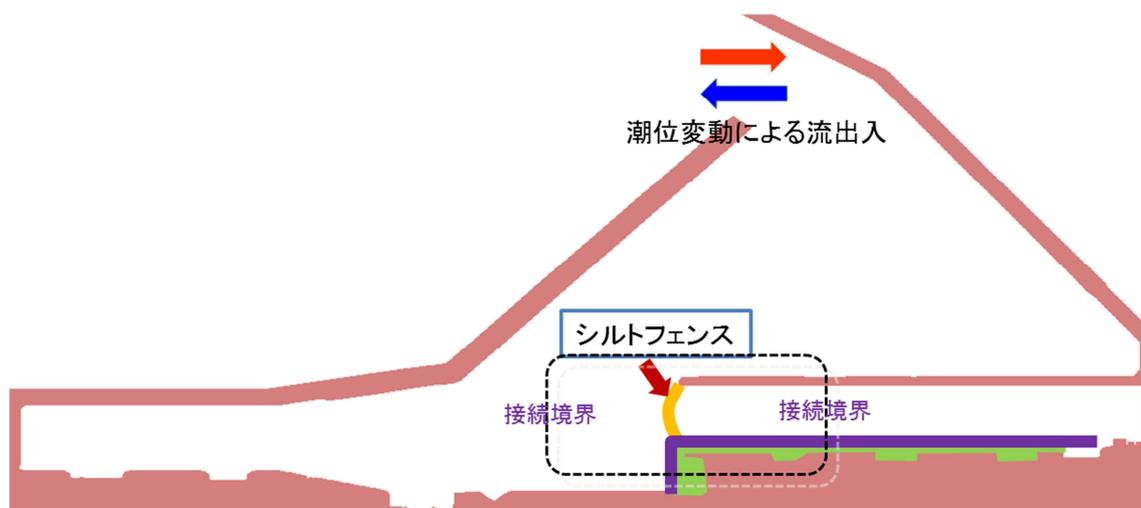


図 5-1 遮水壁（紫線）と埋め立て（緑塗域）後の 1 F 港湾内模式図（黄色線はシルトフェンス設置位置を示し、シルトフェンスから十分に離れた地点（点線囲み地点）で静水圧及び非静水圧コードを接続する。

図 5-1 は 1 F 港湾内を示しているが、現時点（2018 年 3 月 20 日）で、開渠部と呼ばれる事故を起こした原子炉建屋前の矩形の港湾領域と港湾内との接続部分にシルトフェンスが設置されている。従って、そのシルトフェンス付近の領域では詳細 3 次元流体シミュレーションコードが海水流動場とシルトフェンスの変形動作を計算する一方、その外側の港湾内領域では、静水圧近似を用いた 3 章にて詳述したシミュレーションコードが海水流動場を計算することで全体の正確なシミュレーションが可能となる。接続に当たっては、3 次元詳細流体シミュレーションにおいて、流動成分を非静水圧成分と静水圧成分とに分け、十分に非静水圧成分が消失した領域にて、二つのコードを **two-way** ネスト手法（ネスト手法の適用例については本章の付録にて記す）等を用いて接続する。本節では、非静水圧 3 次元詳細流体コードの港湾コード（非静水圧近似を採用した多重 σ 座標を用いた海水流動コード）への接続技術を記し、次節では、開発した組み込みコードの動作検証例を記す。

5.2 ネスティング接続技術を組み込んだ海洋・港湾シミュレーションコード

原子力機構では、これまでに、鉛直方向をデュアル（2 層）に分割し、その各々を、 σ 座標系を用いて分割する多重 σ 座標系シミュレーションコードを開発してきた(3 章にて詳述)。また、本コードを用いて、広範囲を粗いメッシュでシミュレーション可能とし、その結果を着目する小領域の細かいメッシュのシミュレーションの境界条件として利用可能とするネスティング技法（本章の付録参照）を開発し、利用可能としており、海流等の大きなスケールからの影響を考慮できる沿岸域のシミュレーションコードとして利用できる。一方、本事業では、港湾内に着目し、境界を接する粗い計算格子と細かい計算格子の領域同士のデータのやり取りを相互に行う技術として **two-way** ネスト法を採用することで、静水圧及び非静水圧コードの接続を行う。以下では、接続する外側（港湾及び外洋側）の方程式系について記す。

シミュレーションする方程式系：

海水流動の支配方程式

- 1) 運動量保存の方程式
- 2) 海水量保存の方程式
- 3) 温度場の方程式
- 4) 塩分濃度の方程式
- 5) 静水圧式、状態方程式
- 6) シルトフェンスの移動方程式

懸濁体、放射性物質移流拡散の支配方程式：

- 1) 無機懸濁体（シルト・砂成分の粒径が異なる種）の移流・拡散方程式
- 2) 粘土成分（Cc）の移流・拡散方程式
- 3) 各凝集懸濁体（粒径が異なる2種）の移流・拡散方程式
- 4) 各有機懸濁体（粒径が異なる2種）の移流・拡散方程式
- 5) 放射性物質
- 6) 海底との懸濁態、放射性物質の交換

また、風による影響および熱収支についてのモデルも含まれている。

5.3 非静水圧 3次元詳細流体シミュレーションコードとの接続

シルトフェンスモデルの変形動作を記述するモデルを組み込んだ開発済み非静水圧 3次元詳細流体シミュレーションコードを4章にて詳述した。本コードを開発済み港湾・沿岸ネスティング技術を実装した海水流動場シミュレーションコードへ接続する。以下はその具体的な手順である（手順のイメージが理解可能とするため実例を通した模式図を図5-2に示す）。

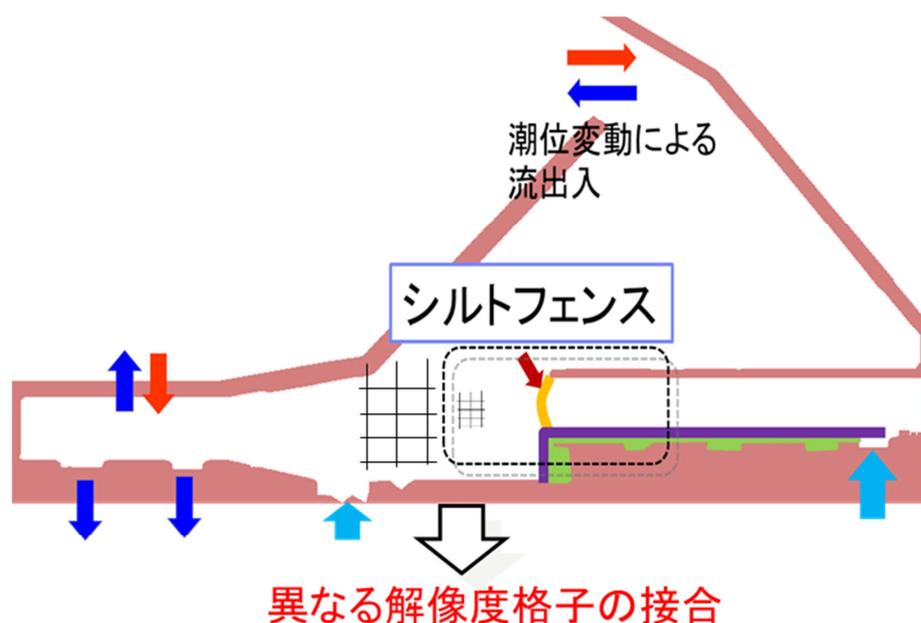


図5-2 1Fでの異なるモデル及びシミュレーションコードの接続イメージ（点線が接続地点であり、異なる計算格子間での接続が行われる）

1. あらかじめ、シルトフェンスの影響を受ける範囲（シルトフェンス範囲）を推定する。非静水圧 3 次元詳細流体シミュレーションコードにて、海水流動場を非静水圧成分と静水圧成分とに分離し、非静水圧成分が充分に無視できる領域を接続域とする。
2. 開発済みの港湾・沿岸ネスティングコードで全体の海水流動場を計算する（図 5-1 に示したように、例として 1F 港湾全体を考えた場合、港湾口等を境界条件として港湾内領域をシミュレーション対象とすることで 1F 港湾内の海水流動場についての計算結果を取得する）。
3. シルトフェンスの変形等により流動場が影響を受ける範囲内を非静水圧詳細 3 次元流体シミュレーションコードにて計算する。この際、計算に必要な境界における圧力及び速度のデータ等は、港湾・沿岸ネスティングコードで計算したデータを必要に合わせて補間して利用する。
4. 港湾・沿岸ネスティングコードで流動場を計算する。この際、シルトフェンス変形により海水流動場に影響が及ぶ範囲を含む領域の境界条件は非静水圧詳細 3 次元コードで計算したデータ（必要に合わせて補間等をおこなったもの）を利用し、シルトフェンスからの影響が及ぶ範囲内は計算しない。
5. 3.に戻る。

海水流動場を上記の手順に従い接続する一方、前節に示した物理量の接続も同様に追加する。これらの接続方法については、幾つかの文献報告[5-1, 5-2]があることを付記する。

[5-1] 富田孝史・柿沼太郎「海水流動の 3 次元性を考慮した高潮・津波数値シミュレータ STOC の開発と津波解析への適用」港湾空港技術研究所報告第 44 巻第 2 号（2005）

[5-2] 長谷部雅伸・多部田茂「海水流動モデルにおける静水圧・非静水圧領域の動的接続」土木学会論文誌 B2（海岸工学）Vol. B2-65, No.1, 426-430（2009）

5.4 検証対象と動作の検証例

上記技術を用いて開発した接続コードの検証対象は 1F 港湾とした。1F 港湾は、図 5-1 に示すように、凡そ、開渠部内と呼ばれ、シルトフェンスにより入口付近の海水流動が抑制されている部分とそれ以外の開渠部外と呼ばれる領域に分割される。こうして、港湾は、凡そシルトフェンスにより 2 つの領域に分かれ、フェンス両端にて放射性物質の海水濃度にギャップが生じることが知られており、シルトフェンスによる海水流動の抑制効果があることが分かる。しかし、その抑制効果を評価するには、流動現象が複雑であるため、数値シミュレーションによる評価が有効である。

開発接続コードを用いて、1F 港湾内の領域をシミュレーションする。開渠内と外の一部（シルトフェンス近くの領域）については、非静水圧コードを用いて計算を行う一方、十分外側は機構により開発済みの港湾コードを用いる。

接続技術を用いて計算した例を図 5-3 に示す。シルトフェンスは障害物として海面の流速が不連続となっているが、シルトフェンス近傍での接続により、速度は滑らかに接続されていることが分かる。このような計算により、シルトフェンス近傍については鉛直方向の運動を正確に記述し、且つ、港湾内の大きなスケールでの流動運動を追跡できることが分かる。

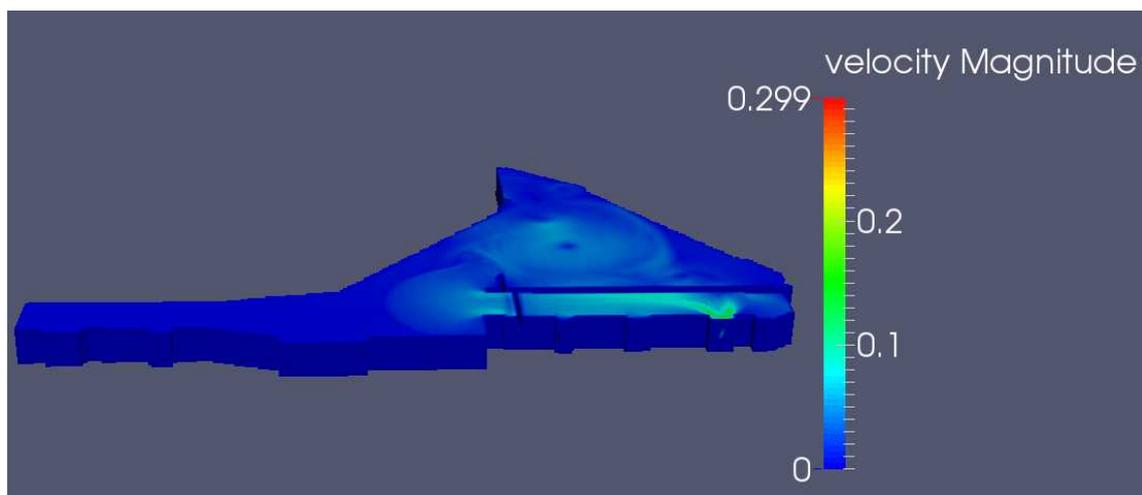


図 5-3 シルトフェンスモデルを開渠部境界内側に果たし、非静水圧近似と静水圧近似を用いたシミュレーションコードを接続計算した場合の計算結果例

付録 5-I ネスティングによる階層的海洋シミュレーション

本付録では、一般に大きなスケールの計算領域と小さいスケールの計算領域を階層的に配置し、異なるスケールの計算領域間でデータの受け渡しを行うことでマルチスケールシミュレーションを実現する方法について説明する。図 5-4 は、異なる階層構造として 5 段のネスト構造の場合の計算領域の設定例を示した。

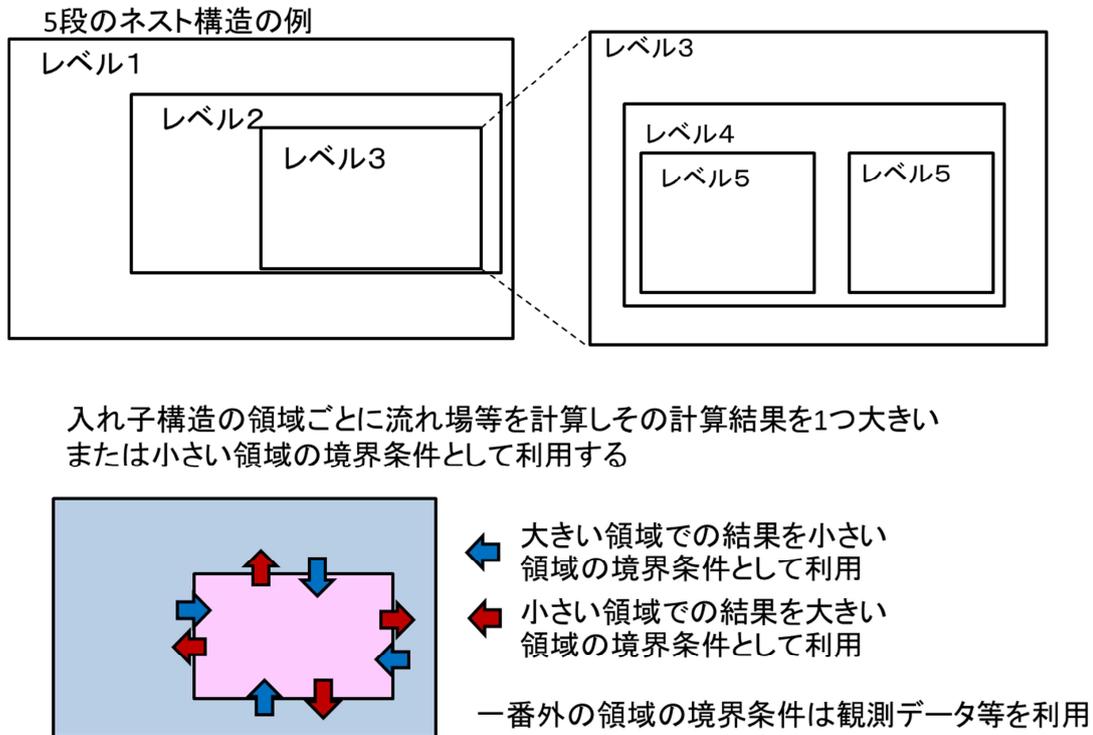


図 5-4 上：5 段のネスト構造の例 下：各領域間の境界でのデータの受け渡し

上記のようなネスト構造を実際に適用した例として、1 F 港湾内を含む 1 F 周囲の沿岸域のシミュレーション体系を図 5-5 に示す。このようなネスト構造を取り、1 つの領域内で適切な格子を定義することで、その領域のダイナミクスを時空間レベルで高精度に追跡することができる一方、適切に領域間で情報を受け渡すことで、港湾内取水口等での漏えい事象（数 m スケールで起こる）を十分な精度で追跡することができる。

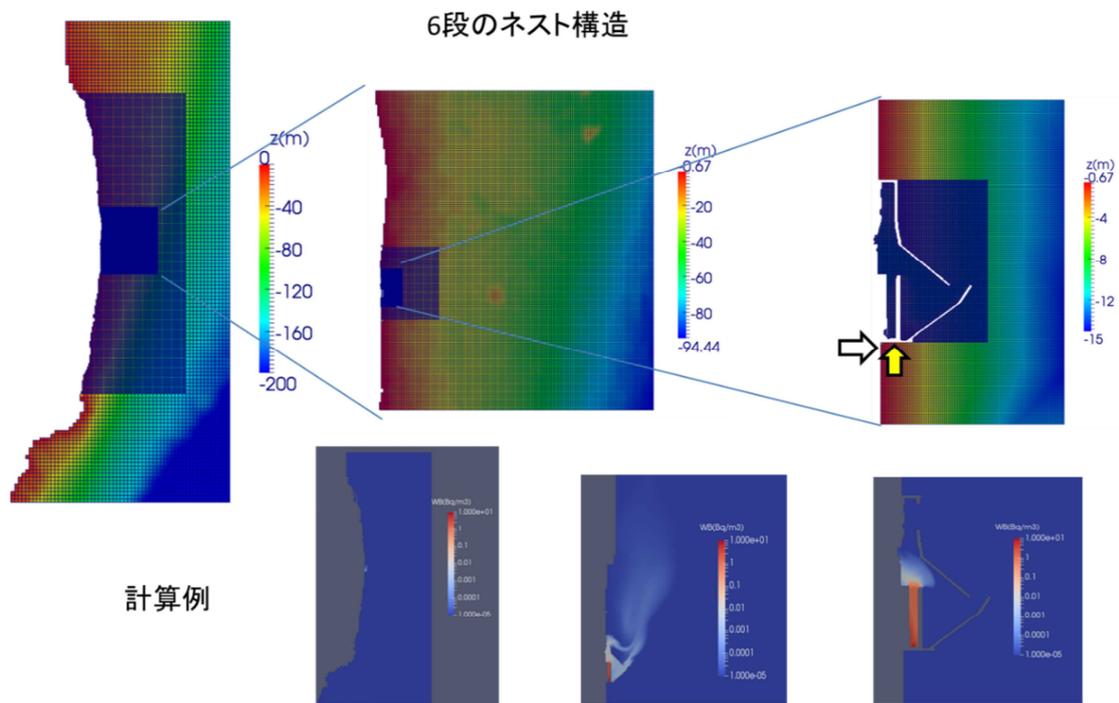


図 5-5 1 F 港湾から福島沿岸への 6 段のネスト構造の階層性 (上図) と本ネスト構造を利用した汚染物質の移流・拡散シミュレーション結果 (下図)。下図にて濃度はカラーの違いで与えられている。本シミュレーションでは 1 F 港湾開渠部口にてシルトフェンスが敷設されており、簡易シルトフェンスモデル (3 章参照) を用いてシミュレーションされた。

図 5-5 の下側の 3 つのパネルは、左側から福島県の太平洋沿岸域、1 F 港湾を含む北側の沿岸域、1 F 港湾内とその付近の汚染物質の濃度分布を示している。港湾内の分布からシルトフェンスが敷設された開渠部内は濃度が比較的高く、シルトフェンス内からの流出により汚染物質が港湾内に拡散し、それが港湾口と北側の放水口を通して港湾外に移流拡散している様子が分かる。

■ 6章 本事業のまとめ

原子力発電所では、事故対策として幾重にも亘る環境移行抑制手段が準備されているが、大気環境へと放出が懸念される際、最終の手段として、港湾内海水をポンプでくみ上げ、放水砲を用いて建屋の空気放出口等に散水することで、放射性核種を噴霧水滴内に捕獲し、建屋壁面や地表面へと滴下させることが検討されている。その際、放射性核種を高濃度に含むと想定される液状物質が放水路や排水路を通して港湾内に移行すると考えられ、その海洋拡散抑制を目的として、港湾内等にシルトフェンスの設置が準備されている。2章では、事業者が準備している放水砲のスペックと想定している事故時の放水砲運用方針を基にシルトフェンスの効能を調査する上で、想定される状況について分析した。その結果、事故時に集水される汚染水だけでなく、様々な外的環境も考慮する必要性も加味し、シルトフェンス効能を調査する上での定常流速の範囲を定め、その範囲にてシルトフェンスの主要な変形動作の一つである鉛直方向の「ふかれ」について、必要な知見・データ等を取得した(4章参照)。また、シルトフェンスの抑制効果が発現する機構を定性的に議論した。

以上、流出状況の推定と定性的考察を示した一方、本事業の目的である、事故時の評価を科学的立場から実施すべく、過去の文献や知見のサーベイ結果を基に、種々の状況に対し適用可能な数値シミュレーションモデルを構築し、水槽実験による検証を準備した。主たる実施項目は、シルトフェンスの主要な鉛直変形動作「ふかれ」に関する基礎理論、そのシミュレーションモデルと関連する必要な知見・データを取得することであり、取得したシミュレーションモデルや関連するデータ等の妥当性については、水槽実験結果を基に検証した。

シルトフェンスは本来、海洋(河川も含む)環境での様々な工事に伴い発生する懸濁物質の移行抑制に用いられる膜体形状をしたフェンスであるが、汚濁した海水(淡水も含む)移動を完全に抑制するものではなく、ある程度フレキシブルに変形動作することで、海水の移動抑制によって生じる水位差による発生圧力を一部解放し、自然環境中でも継続的に設置可能とすることで、懸濁物質等の自由な移流拡散を抑制することを目的とするものである。従って、汚濁海水移行の抑制度合いについては、シルトフェンスの変形動作に左右され変化しうるため、海水流動場とそれと相互作用するシルトフェンスモデルの構築が求められてきた。本事業ではシルトフェンスが持ちうる複雑な3次元変形動作の中でも、最も重要且つ基本となる鉛直方向の変形動作「ふかれ」をシミュレーション可能とするモデルの構築を具体的目標とした。

上記目標(「ふかれ」現象の理解及び評価)に対しては、まず、過去の文献を調査した。その結果、1980年代から1990年代前半において、「ふかれ」の解析理論は凡そ確立され、水槽実験や実地観察等も行われ、理論に含まれていた経験的パラメータ(実験定数 β :4章(4.5)式参照)が凡そ取得されていたことが分かった。しかし、それらの知見が取得された時期は古く、本格的な数値シミュレーションモデルとの比較検証に用いられた例はない。従って、本事業ではこの理論をレビューし、4章で示したようにシミュレーションモデルの妥当性検証に用いた他、その理論及び数値シミュレーション結果を水槽実験により再検証した。過去の文献では「ふかれ」に対して、LESモデルを用いるような精度の高い数値シミュレーションを用いた系統的实施例はなく、シミュレーション及び実験結果の両方が、理論式上にて、互いに良く一致することが確認できたのは初めてである。また、実際の現場での条件と水槽実験での条件も併せて数値シミュレーションし、理論、シミュレーション、実験の3者の結果の比較も実施した(このような系統的例子も初めてである)。

以上、上記のような3つの研究方法間の相互検証により、改めて理論式の適用性が広いことが再認識され、様々な状況（本報告2章に記した事故時状況の想定範囲）での評価に用いることが十分可能であるとの結論が得られた。しかし、理論式は水平方向の変形動作を無視している他、定常流下での解析であるため、事故時に非定常流が港湾へと瞬間的に押し寄せる状況での変形動作は対応していない等の課題があることは付記すべき事項である。

その一方、「ふかれ」の理論が予言する最も重要な量は、対象とするシルトフェンスの実効垂下長と定常流速・重錘重量等との関係である。これらの量をシミュレーションにより取得するためのシミュレーションモデルとして、本事業では2012年に金山らにより提案された海水流動場と膜体が相互作用し膜体の変形動作するシミュレーションモデルを採用し、シミュレーションコードとして実装した。しかし、水面の変動まで考慮する開水路乱流シミュレーションモデルに、上記膜体の変形動作を組み込むと、速い定常流の下、動作が不安定となることが分かり、水面には蓋をし、蓋面の境界条件は自由すべり面とするシミュレーションを実施することで、低速から高速流に対する「ふかれ」の変形動作の結果を得た。これは、流速を速めると、水面の動きが極めて複雑となり、水面変化モデルがその微細の変化を捉えきれないことが原因であるが、水槽実験にて「ふかれ」が伴うケースで、定常状態となった後は、フェンスの上流及び下流側で水位差は殆ど生じないと、水面の複雑な挙動も観測されないため、上記の近似は問題ないと判断できる。

原子力機構から中央大学に再委託した水槽実験では、深さ25cm、幅20cm、流れの方向に10m程度の水槽を用いて、アクリル板、不透水膜、実物のシルトフェンスカーテン材（#300、#500、#800の3種類であり、繊維の太さが異なるが、実験スケールではいずれも不透水膜とみなしてよい）及びその模擬材（実物より膜厚の薄い織布）を用いて「ふかれ」と「ふかれ」たシルトフェンス周囲の流速分布や流速の変化（乱流等）を計測すべく水槽実験を実施した。実験では、適当な各点にて流速を計測した他、着色水や濁水（カオリン）を添加することで、流れの可視化と濁度の変化も計測した。アクリル板を垂下した場合の流れ（乱流構造）については、数値シミュレーションと観測結果が良く一致しており（4章付録4・IV参照）、本事業で開発した3次元詳細流体シミュレーションコードの妥当性が検証された。変形動作するシルトフェンス実物片を用いた実験では、流速を変化させ「ふかれ」の系統的観測に成功し、ポンプ4台を用いる高速定常流下での実験（5m水深を持つ実開渠水路では、スケールを変換すると凡そ1.2m/s程度の速度に相当する）によると、「ふかれ」の度合いは極めて大きくなることが観測されている。それらの「ふかれ」度合いと流速・重錘等の関係は、理論式に良くフィットされ、唯一の経験パラメータである β も数値実験と同じく $\beta=1.0\sim 1.5$ 内にて良くフィットすることが明らかとなった（過去の文献の指摘と同様）。これにより、数値シミュレーション、水槽実験全てが、定常流速下では理論式に凡そ一致することが分かったが、非常に早い流れ及び重錘が軽く「ふかれ」やすい場合には、シルトフェンスは、ほぼ水面に「水平」になり、理論式とは異なる振る舞いが数値シミュレーションにおいて見て取れた。当然、理論そして水槽実験は模型であることから適用限界があり、それを補う形でシミュレーションがカバーできるという事が判明した。例えば、水槽実験でも、高速流での極めて大きな「ふかれ」、即ち水面を這うような状況を再現できないという課題があることが判明している。これは、模擬膜において、大きさや重錘の重さだけでなく、厚さと剛性等についても、スケールの異なる模型に対し変換して対応関係を考慮する必要がある。しかし、そのような変換と模擬材の選定は困難であり、実物片を用いることとしたため、膜の剛性が実環境中のそれよりも遥かに強く、水面にほぼ平行となる状況を高速流れの下で実現できていないことが分かった（実際、実物片より薄い布を用いた場合、

は「ふかれ」の度合いは高速流下で殆ど水面と平行になる)。このように、改めて当該分野におけるシミュレーションの重要性が認識された。その一方、軽い重錘を使用し、非常に速い高速流下以外では、鉛直方向のみの「ふかれ」度合いの評価に、理論解析式を適用することで十分であることも分かった。

以上、本事業を通して、事故時に設置されたシルトフェンスが受ける流速等の環境を推定し、シルトフェンスの効能について定性的考察を行い(2章参照)、その結果を受け、シルトフェンスが定常流下にて示す主要な変形動作である鉛直方向「ふかれ」に対して、定量評価するに当たり必要な理論とシミュレーションコード、そしてそれらを比較検証する水槽実験による検証結果を取得した(4章参照)。また、実港湾環境で評価を実施すべく、港湾コードの理論体系と簡単なシミュレーション検証例を本報告書で記した(3章参照)他、上記「ふかれ」のシミュレーションを可能とするシミュレーションコードとの接続技術の開発も実施した(5章参照)。本事業により、シルトフェンスの主要な基本変形動作である「ふかれ」に対する定量評価のための技術が構築され、その評価を港湾全体にて実施する体系についての整備も実施された。シルトフェンスの主要な変形動作である「ふかれ」については、理論・シミュレーション・水槽実験の3つの手段が凡そ一致することを、2章で推定した事故時を想定した極限的条件での最大流速までの範囲で確かめた(尚、上に記したように重錘が軽く流速が極めて高速な領域では、シミュレーションは理論及び水槽実験と解離し始めることを注意する)。