

平成 30 年度原子力規制庁委託成果報告書

放射性物質の海洋拡散抑制モデルの整備

国立研究開発法人日本原子力研究開発機構

平成 31 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。

<<< 規制庁事業の具体的内容と報告書対応表 >>>

規制庁が指示する事業内容 3.	詳細項目	報告書対応箇所
<p>(1)シルトフェンス複数枚構造の設置条件(1-1)(1-2)における変動動作に係るモデルの開発と検証</p> <p>※(1-1):何枚ものシートをくみ上げたシルトフェンス ※(1-2):シルトフェンス1重敷設のケースと2重敷設以上のケース</p>	<p>①(1-1)及び(1-2)の設置条件における動変動動作「ふかれ」について数値モデルを開発し、水槽実験を実施してその検証を行う。 ②2重設置によるシルトフェンスそれぞれの「ふかれ」発生に及ぼす相互影響を比較検証する。 ③簡易な水槽(大きさとしては、0.5m(幅)×0.5m(高さ)×10m(長さ)程度)に、一定流量の着色水を流入させた実験をすることによって、シルトフェンス内側懸濁物質(以下「SS」という。)濃度と外側 SS 濃度との混濁度の時空間変化等のデータを取得する。 ④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、着色水等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。 ⑤なお、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)、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。</p>	<p>①シルトフェンス設置条件(1-1)(1-2)に対する「ふかれ」の数値モデル開発一般は4章にて詳述。具体的に(1-1)については、4章3節(数値モデル開発)及び6章3節(水槽実験)にて報告。 (1-2)については、4章(数値モデル開発)、5章4、5、6節(水槽実験)にて報告。 ②5章4.5.6節にて水槽実験によるシミュレーションの検証について詳述。 ③5章13節にて取得したデータについて詳述。 ④6章3節、7章1、5節にて個別ケース毎の観察結果を詳述。 ⑤垂下式の採用や原発港湾敷設シルトフェンスモデルの設定については2章及び3章にて詳述。</p>
<p>(2)取水口の有無におけるシルトフェンスの鉛直・水平方向変動動作に係るモデル開発と検証</p>	<p>①原子力発電所における実港湾環境を模擬するため、取水口の設置が無い場合、取水口が一つ、及び取水口が二つ設置の場合に対し、シルトフェンス複数枚(横方向に複数枚連結を模擬)を設置した条件において、水槽実験を実施してその検証を行う。 ②簡易な水槽(大きさとしては、0.5m(幅)×0.5m(高さ)×10m(長さ)程度)に、一定流量の着色水を流入させた実験をすることによって、シルトフェンス内側 SS 濃度と外側 SS 濃度との混濁度の時空間変化等のデータを取得する。 ③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、着色水等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。 ④なお、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)、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。</p>	<p>①取水口の設置がない場合は、単純水路での水槽実験に対応し検証結果は5章にて詳述(5章4.5.6節が水槽実験に対応)。取水口が一つの場合は、取水口1つを模擬し、連結模型での水槽実験による検証結果を6章にて詳述(6章3節が水槽実験に対応)。取水口が二つの場合は、実港湾模型(I)(II)での水槽実験に対応し、その検証結果は7章にて詳述(7章1、5節が水槽実験に対応)。 ②5章13節、7章1、5節にて取得したデータについて詳述。 ③7章1、5節にて個別ケース毎の観察結果を詳述。 ④垂下式の採用や原発港湾敷設シルトフェンスモデルの設定については2章及び3章にて詳述。</p>
<p>(3)港湾出口付近設置環境下でのシルトフェンスの鉛直・水平方向変動動作に係るモデル開発と検証</p>	<p>①シルトフェンスの設置場所においては、大多数の発電所では排水溝付近や取水口近傍に設置が計画されているが、一部の発電所では、港湾出口付近に設置を計画している。シルトフェンス付近の海水の流速、塩分濃度、海水温、外洋の影響等々が異なることが考えられる。ここでは、港湾出口付近にシルトフェンス複数枚を設置した条件において、(2)と同様の複数枚連結したシルトフェンスを用いて、これら複合環境下における水槽実験を実施して港湾出口付近設置の検証を行う。 ②シルトフェンス鉛直・水平方向変動動作を記述可能とするモデルを考案したシミュレーションコードとして実装する。 ③簡易な水槽(大きさとしては、1m(幅)×1m(高さ)×15m(長さ)程度)に、一定流量の着色水を流入させた実験をすることによって、シルトフェンス内側 SS 濃度と外側 SS 濃度との混濁度の時空間変化等のデータを取得する。 ④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、着色水等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。 ⑤なお、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)、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。</p>	<p>①については、7章5節にて港湾出口付近のシルトフェンス複数枚の設置条件でのシミュレーションと水槽実験による検証について詳述。 ②5、6章にて水槽実験を基に検証し、そのモデリングを実港湾コードに実装。その結果を7章全体に渡って詳述。 ③7章5節にて取得したデータについて詳述。 ④7章1、5節にて個別ケース毎の観察結果を詳述。 ⑤垂下式の採用や原発港湾敷設シルトフェンスモデルの設定については2章及び3章にて詳述。</p>
<p>(4) 実港湾を模擬した本格水槽実験可能な既存水槽の調査を実施する。</p>	<p>調査目標は、1/2 スケール～1/3 スケールが望ましい。</p>	<p>8章にて調査結果を表として報告(特に水槽スケールを各機関の所有水槽毎に詳述)。</p>

目次

■ 1章 本受託事業の目的及び事業実施概要	1
■ 2章 本事業にて対象とするシルトフェンスとその解析条件	3
2.1 原発港湾内でのシルトフェンスフェンス敷設による放射性核種海洋拡散抑制	3
2.2 本事業での実施体系（シミュレーションと水槽実験を実施する体系）	6
■ 3章 シルトフェンスの基本変形動作	8
3.1 シルトフェンス主要変形動作「ふかれ」及び「たわみ」	8
3.2 シルトフェンス2重敷設による「ふかれ」の抑制	8
3.3 取水口部等でのシルトフェンスの変形動作	9
3.4 港湾内でのシルトフェンス複合ユニットの変形動作	9
3.5 シルトフェンス主要変形動作「ふかれ」及び「たわみ」の理論	9
■ 4章 シルトフェンス変形動作モデリングとシミュレーション手法	15
4.1 シミュレーション手法（金山らの方法及びその改良法）	15
4.2 最急降下法による節点位置の補正	17
4.3 シルトフェンスの連結と複数ユニット連結シルトフェンスのモデリング	19
4.4 シミュレーション（テスト計算）	20
4.5 単純矩形水路体系での検証	22
■ 5章 矩形水路敷設2重シルトフェンスの変形動作と放射性核種拡散抑制効果	25
5.1 計算体系（計算領域）	25
5.2 小田の推定式との比較	29
5.3 膜間距離と「ふかれ」の度合い（ β ）	31
5.4 水槽実験結果との比較（可視化図）	32
5.5 水槽実験結果との比較（有効膜高さ）	33
5.6 結果の比較（小田の推定式を利用）	34
5.7 放射性物質の拡散抑制効果	41
5.8 放射性核種溶存成分の挙動	44
5.9 放射性核種懸濁体成分（砂）の挙動	45
5.10 放射性核種懸濁体成分（シルト）の挙動	47
5.11 放射性核種の外部流出の評価	49
5.12 放射性核種の沈降の評価	59
5.13 懸濁体挙動の水槽実験による検証	74
■ 6章 取水口敷設シルトフェンスの変形動作と放射性核種拡散抑制効果	78
6.1 シミュレーション体系	78
6.2 シミュレーション結果（「たわみ」と「ふかれ」）	80
6.3 シミュレーションと水槽実験との比較	82
6.4 放射性物質の拡散抑制効果	90
■ 7章 実港湾多重敷設シルトフェンスの変形動作と放射性核種拡散抑制効果	98
7.1 実港湾模型（I）でのシミュレーションの検証	98
7.2 放射性核種の拡散抑制効果（実港湾模型（I））	104

7.3	計算条件（放射性物質の諸元）	105
7.4	シミュレーション結果（放射性物質の溶存成分の流出及び懸濁体成分の沈降と流出）	105
7.5	実港湾模型（II）でのシミュレーションの検証	114
7.6	放射性核種の拡散抑制効果（実港湾模型（II））	121
■	8章 水槽実験施設調査報告	131
■	9章 まとめと結論	138

■ 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。本事業で取得・整備する知見及びデータの対象は、放射性物質拡散抑制に係る解析が実施可能なモデル（理論及び解析的方法をも含む）及びそれらを実装したシミュレーションコードを用いてシミュレーションした結果と水槽実験によるモデル及びシミュレーションの検証結果、そしてそれら全てを系統的に評価できる知見である。

現在、各原子力発電所において、放射性核種を含む汚濁水の流出による海洋拡散を抑制するため、シルトフェンスの敷設が提案されている。本事業では、上記の状況に対し、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（以下1F）にて公開されている港湾や放水路等の情報及び各電力会社が公開しているシビアアクシデント対策の情報を基に、複数の原子炉の取水口等に、シルトフェンスを敷設した場合の放射性核種の拡散抑制効果について分析する。

分析方法としては、これまでに公开发表されているシルトフェンスの文献を基に、数値シミュレーション可能なシルトフェンス変形動作モデリングを検討し、実際の原発港湾環境を模擬する様々な系においても、シミュレーション可能とすべく、モデリングに必要な改良等を施す。その後、実際に動作するモデリングを港湾内海水流動シミュレーションコード（規制庁が指示する仕様項目 3. 港湾解析コードの要件 (a-f) を満たすコード）に実装し、種々の状況（放射性核種を含む汚濁水が流出する状況）を模擬した数値シミュレーションを行い、シルトフェンス敷設（規制庁が指示する仕様項目 3. (1)(1-1)及び(1-2)を満たす敷設状況）の効果を評価する。敷設効果の評価に当たっては、シルトフェンス敷設無しと敷設した場合の放射性核種流出状況を比較する。また、実装したモデリングを検証するため、水槽実験を実施し、実験結果との比較を行い、モデリング及びシミュレーションの妥当性を評価する。

モデリングすべきシルトフェンスの主要な変形動作は二つある。一つ目は鉛直方向の変形動作であり、「ふかれ」と呼ばれる。二つ目は水平方向の変形動作であり、「たわみ」と呼ばれる。本事業では、その両方に対し、過去の文献等を基に最適なモデリングを行う。尚、「ふかれ」については、シルトフェンスは2重に敷設されることが一般的であることから、2重敷設状況での1枚目と2枚目の「ふかれ」について分析し、水槽実験との比較を行い、モデリングの妥当性を確認する。一方、「たわみ」については「たわみ」変形動作を許すモデリングの妥当性を確認するため、「ふかれ」と同様に水槽実験結果との比較を行う。以上、「ふかれ」と「たわみ」について基本的な変形動作モデリングの妥当性を取水口模型（規制庁が指示する仕様項目 3. (2)を満たす敷設状況）にて確認した後は、実際の原発港湾内での敷設状況（規制庁が指示する仕様項目 3. (3)を満たす敷設状況）を模擬し、シミュレーションを行い、実港湾模型の水槽実験と比較検証を行うことで、原発港湾内敷設シルトフェンスのモデリングの妥当性を確認する。いずれのケースにおいても、妥当性を確認した後、放射性核種を含む汚濁水（放射性核種としては溶存成分と懸濁体成分を考える。尚、懸濁体成分は砂からシルトに分類される粒径の系を取り扱う）のシルトフェンス敷設による拡散抑制効果をシミュレーションにより論じる。

以下、本報告書の構成を記す。次章（2章）では、本事業で解析対象とする原発実港湾環境において敷設されるシルトフェンスの敷設状況について記し、それらの状況を代表化する模擬環境について記す。3章では、主要なシルトフェンスの基本変形動作について記し、実港湾環境でのシルトフェンス敷設状況に基づき、モデリングすべきシルトフェンスの変形動作の詳細を記す。4章では、3章で記した基本変形動作についてのモデリング及びシミュレーションコードに実装する際のアルゴリズムを示し、簡単

な矩形水路にシルトフェンスを垂下させたケースのテストシミュレーション結果を記す。5章では、4章にて詳述したシミュレーション手法を実装したコードを用いて、2重シルトフェンス環境における「ふかれ」についてのシミュレーション結果と水槽実験による検証結果を記す。更に「ふかれ」に伴い生じる懸濁体濃度のシルトフェンス付近での分布等についてもシミュレーションと水槽実験を比較し、懸濁体成分の挙動についても検証する。それらの検証結果を受け、放射性核種（溶存成分と懸濁体成分の両方）の2重シルトフェンスによる拡散抑制効果についてシミュレーションした結果を示し、シルトフェンスの効能を論じる。6章は、実港湾にて、特に取水口等に敷設される際の「たわみ」について着目し、シミュレーションにより得られた「たわみ」と連動して得られる「ふかれ」について、シミュレーション結果と水槽実験を比較し、シミュレーションの妥当性を評価する。7章は、5、6章で妥当性を評価したシミュレーションコードを実港湾模型に適用し、実港湾内流れ場の水槽実験による比較検証と放射性核種のシルトフェンスによる拡散抑制についてシミュレーション結果を記す。7章の主眼は、原発実港湾環境にて、重層的なシルトフェンス敷設により得られる放射性核種の拡散抑制効果である。8章は、実スケールに対し1/2~1/3程度のスケールの本格水槽実験によるモデリングの検証が考えられるが、それと関連し、日本国内の各機関（民間から大学及び研究機関）が有する大規模実験水槽についての諸元を取りまとめた結果 （規制庁が指示する仕様項目 3. (4)） を記す。最終章9章は、本事業報告書のまとめと結論を記す。

■ 2章 本事業にて対象とするシルトフェンスとその解析条件

本2章では、原発港湾環境とシルトフェンスの敷設計画について、電力会社の公開資料を調査する。調査結果を基にシルトフェンスの敷設形態を類型化し、本事業で実施するシルトフェンスモデリングの開発方針を定めると同時に、モデリングの検証を行う水槽実験計画を定める。

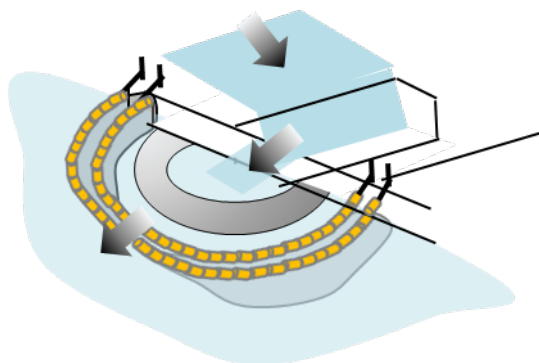


図 2-1 原発港湾取水口への敷設模式図（資料[2-1]より複製）

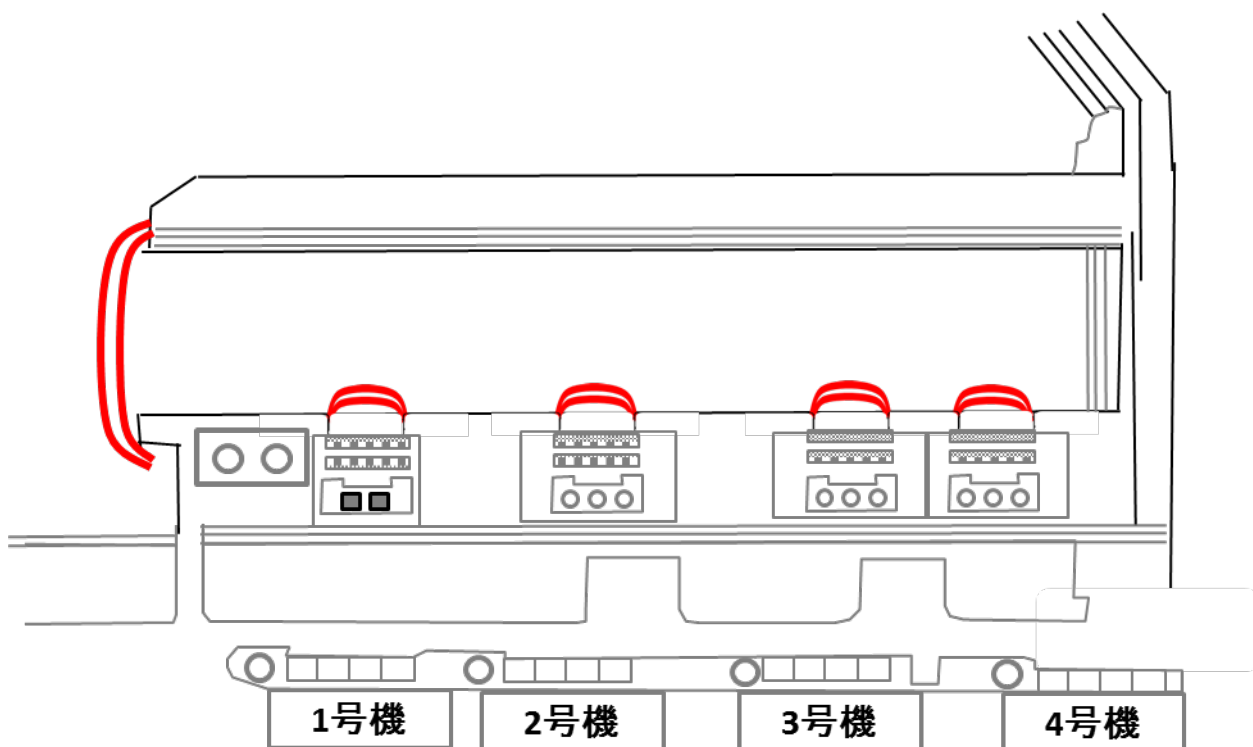


図 2-2 福島第一原子力発電所港湾での取水口及び開渠口での敷設模式図（資料[2-2]より複製）

2.1 原発港湾内でのシルトフェンス敷設による放射性核種海洋拡散抑制

本節では、原発内排水路等から放射性核種を含む汚濁水が流れ込むことを想定した際のシルトフェンスの敷設計画について調査する。関西電力資料[2-1]に従うと、取水口（排水する水路と取水する水路が共通であり排水が流出する口でもある）から排水される際、排水に含まれる放射性物質の拡散を抑制する目的でシルトフェンスを設置するとしている(図 2-1 参照)。

一方、既に設置されている 1F においては、事故当初は、取水口奥からの汚染水の流出が問題となったため、各号機の取水口を覆う形でシルトフェンスが設置された他、複数の取水口が集まる共通の開水路である開渠部口にもシルトフェンスが設置され、重層的な拡散抑制対策が取られた（図 2-2 参照）。一方、中部電力資料[2-3]では港湾から原子炉ユニットへと導く取水槽（取水路）内において、放水によって参集した汚染水が流れ込む領域を設けており、その流れ即ち放射性物質の拡散を抑制する形でシルトフェンスを設置するとしている（図 2-3 参照）。これは、凡そ矩形状の開水路内にてシルトフェンスを敷設する状況と等しい。その他、東北電力資料[2-4]では、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 2-4 参照）。以上の資料から、シルトフェンスは排水の水路吐口や取水口の及び港湾内での開渠口や外洋との境界域である港湾口まで様々な地点に敷設される可能性がある。

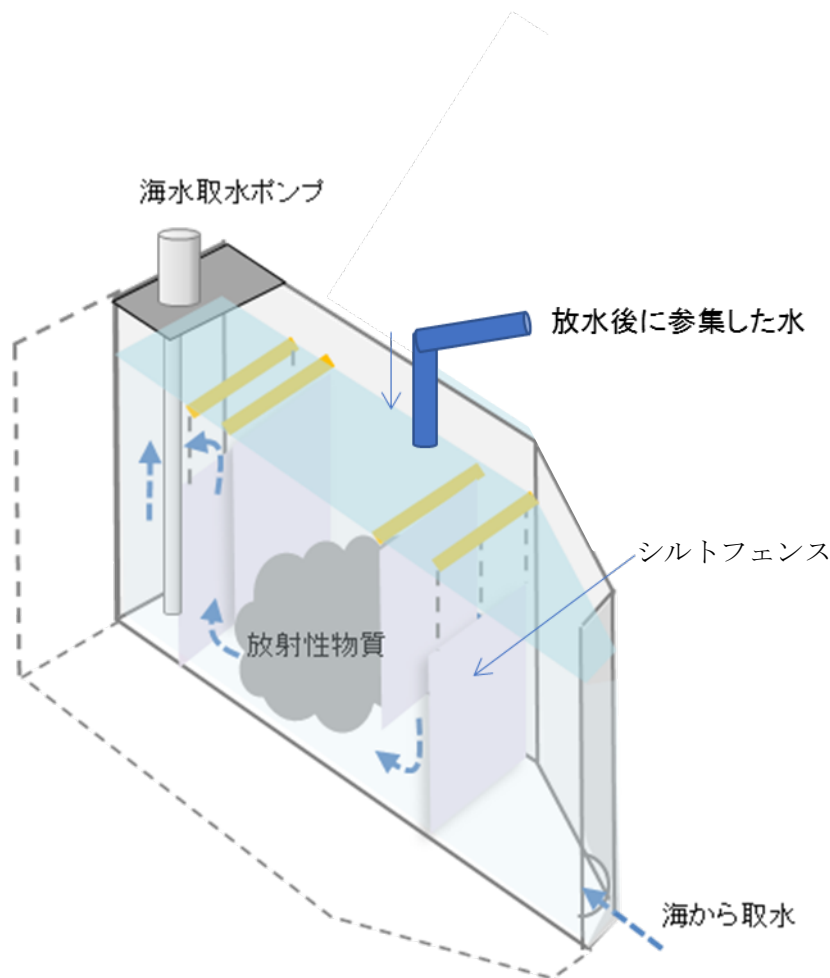


図 2-3 中部電力資料によるシルトフェンス設置案（資料[2-3]を基に模式図作成）

一般にシルトフェンスは、敷設方式により大きく 2 つに分類される（図 2-5 参照）。一つは垂下型と呼ばれ、海水面にフロートを、下端に重錘を付け、海水面から天幕を吊るすようなタイプであり、二つ目は、自立型と呼ばれ、海底面に固定されると同時に上端にはフロートをつけ、天幕を下から上方へフロートの浮力を利用し浮上させた状態にするタイプである。敷設に当たっては、垂下型は地上から容易に敷設することができる一方、自立型は一旦、海底に固定する必要等があり、敷設作業は垂下型と比べて敷設に時間がかかる。従って、緊急時対応や長期的敷設を実施しない場合は、垂下型シルトフェンスの設置が現実的である。本事業では規制庁の指示に従い、垂下型シルトフェンスのみの変形動作と放射性核種拡散抑制効果を論じる。

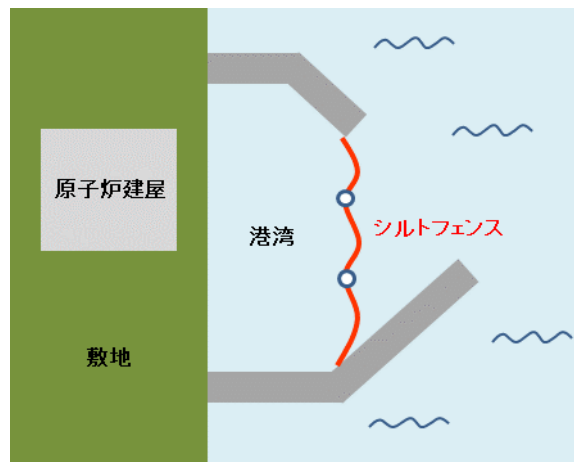


図 2-4 東北電力資料によるシルトフェンス設置案（資料[2-4]を基に模式図作成）

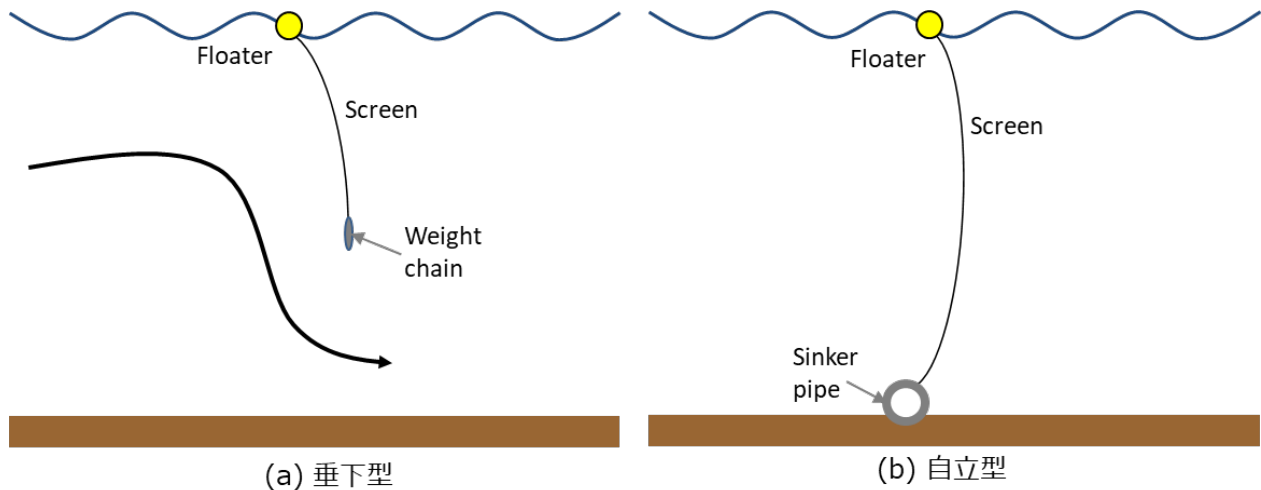


図 2-5 シルトフェンスの主要な 2 つのタイプの敷設方式（垂下型および自立型）

シルトフェンスを設置する際、係留上の安全性を考慮し、最大で 1.0m/sec 程度の定常流が発生する可能性を念頭に置き敷設方法を検討する。従って、1.2m/sec 程度の定常流を最大流速として、シルトフェンスの変形動作と放射性核種拡散抑制効果を本事業では論じることとした。但し、1.2m/sec は、実際の敷設環境では、極めて速い流れに分類され、シルトフェンスは大きく「ふかれ」ることが想定され、拡散抑制効果としての働きは減じられることが予想される。本事業では、そのような最大流速から低速領域も含め、シルトフェンスの変形動作と放射性核種の拡散抑制効果を系統的に調査する。

一般に、垂下型シルトフェンスは、一様な流速場から成る流れを遮り、鉛直下方への流れと底面付近での速い流れを発生させる（図 2-5(a)参照）。この効果により、放射性核種の溶存成分は、シルトフェンスより上流側の upper layer に一部滞留させられる一方、懸濁体に吸着した放射性核種は発生する下方への流れにより、沈降する機会が増え、シルトフェンス近傍に堆積する割合が増えるものと考えられる。しかし、必ずシルトフェンスと底面の間には海水が自由に流動する部分があり、上記の滞留効果と沈降効果は完全ではなく、限定的となるが、その度合いはシルトフェンスの「ふかれ」等の変形動作に依存することが分かる。

本事業では、垂下型シルトフェンスにおいて発生する変形動作「ふかれ」及び「たわみ」をシミュレ

ーション可能とするモデリング技術を構築し、水槽実験による妥当性の検証を経た後、放射性核種溶存成分の滞留効果そして懸濁体成分の沈降効果等について評価する。

次に、図 2-2 のような開渠口や図 2-4 のような港湾と外洋の境界域である港湾口等にシルトフェンスを敷設するケースを論じる。一般に通常のシルトフェンスのユニットは 30m 単位であり、原発実港湾を想定した場合、開渠口や港湾口の差し渡しは 30m 以上に達すると考えられ、その場合は複数ユニットのシルトフェンスを貼り合わせ敷設する。尚、緊急時に敷設する際は、既に貼り合わせた複数ユニットのシルトフェンスを用意し、主に陸上から敷設することが想定されている。

シルトフェンスの貼り合わせは、フェンス端部域の貼り合わせ用の穴をあわせて繋ぐことで行われる。海水は貼り合わせ部分を透過するが、その透過量は十分に少なく、特殊なモデリングの必要性はなく、透過係数等の変化を反映できれば十分と考えられる。但し、複数ユニットを張り合わせたことで、両端の固定のみだけでなく、中央部での固定も必要になると考えられ、モデリングとしては、「たわみ」変形の自由度を持ち、両端だけでなく中央部での固定も考慮し、複雑な変形動作をも再現可能とする必要がある。本事業では、複数枚を貼り合わせたシルトフェンスのモデリングも行き、シミュレーションを実施すると同時に、水槽実験による検証では、模擬シルトフェンス織布を実際に張り合わせ、複数ユニットからなる状況を再現し、そのモデリングを検証することとした。

2.2 本事業での実施体系（シミュレーションと水槽実験を実施する体系）

開渠口や港湾口に敷設されるシルトフェンスの場合、着目する点は付近の海水流動が一様ではないという点である。排水路等のように水路内に敷設される場合は、開水路を一様な定常流が上流から流れる中のシルトフェンスの垂下という想定が十分に成立するが、開渠口や港湾口では、港湾環境特有の流れがあるため、シルトフェンスには一様な定常流が印可されるのではなく、非一様な港湾環境特有の流れに相對することを考える必要がある。従って、本事業では、典型的な港湾環境を模擬し、その環境内での非一様な流動場を再現した上で放射性核種を含む汚濁水の流れをシミュレーションし、且つ、水槽実験により検証することとした。開渠口や港湾口において、垂下型シルトフェンスを連結し敷設した場合、「ふかれ」が発生するが、流れが一部に集中するような場合は、その部分の「ふかれ」のみが大きくなることに注意すべきである。本事業では、敷設状況により様々なケースが考えられるが、上記のように、開渠口と港湾口という二つのケースについて論じることで、港湾内でのシルトフェンス利用状況を代表できると考える。

以上、本事業にて実施する原発港湾内でのシルトフェンス状況を反映した敷設状況の模擬体系としては図 2-7 とした。2 ユニットから成る原発を想定し、2 つの取水口があり、排水はその取水路を流れるものとした（取水と排水は同じ開水路を流れる場合が多く、排水が卓越した状況にて、排水に含まれる放射性物質の拡散抑制効果の調査が主眼となる）。図 2-7 のように 2 つの取水口にシルトフェンスが設置されると同時に、開渠口と港湾口に設置される重層的対策について調査する。尚、港湾口等では複数ユニットから成るシルトフェンスが敷設されるとした。本事業では、上記の状況において、シルトフェンスを敷設した場合と、敷設しない場合の放射性核種を含む汚濁水の流れ（溶存成分の滞留や懸濁成分の沈降）について論じる。尚、シルトフェンスは 2 重に敷設することが一般的であり、2 重の効果については図 2-8 に示したような矩形の開水路を考え、詳細にその効果を論じることとする。

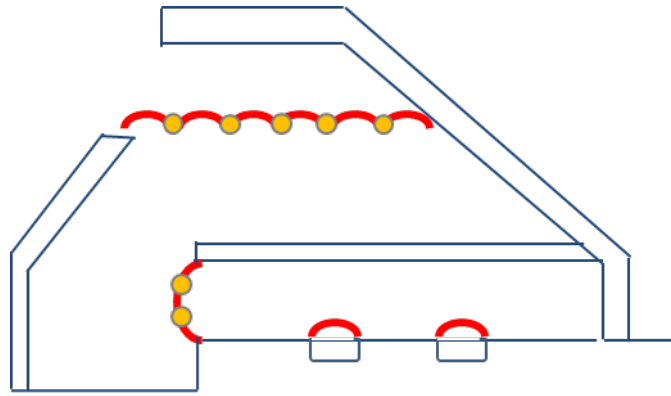


図 2-7 原発港湾の模型とシルトフェンス（赤曲線がフェンス、朱色点は複数ユニット貼合せ点）敷設状況

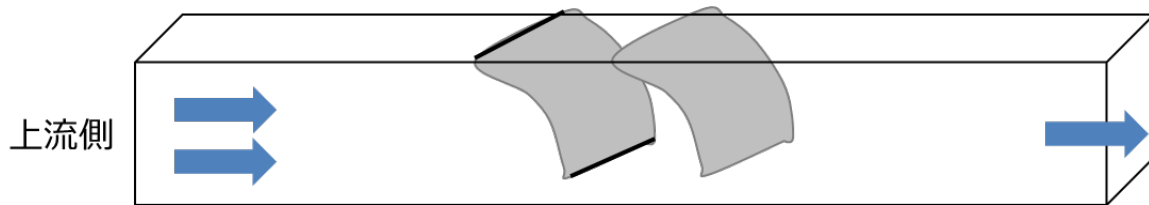


図 2-8 矩形水路に垂下した 2 重シルトフェンスの模式図

参考文献

- [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] 3 号機スクリーン室前面シルトフェンス交換作業（平成 24 年 12 月 3 日 東京電力株式会社）
- [2-3] 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）
- [2-4] 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）

■ 3章 シルトフェンスの基本変形動作

3.1 シルトフェンス主要変形動作「ふかれ」及び「たわみ」

シルトフェンスの主要な変形動作としては「ふかれ」と「たわみ」がある。「ふかれ」及び「たわみ」は、各々、鉛直及び水平方向の変形動作である。流速が大きくなると、シルトフェンスの「ふかれ」は大きくなり、流速の大きな極限では、ほぼ水平に「ふかれ」ることで、流体に与える影響は無視できるようになる。一方、流速が小さい場合、「ふかれ」は小さく、流体に対する抵抗は無視できない（流れに抗する板を垂下したと同等）。流れは鉛直下方向に押し下げられ、底面から「ふかれ」たシルトフェンス端の間に流体の動きは限定される。その際、シルトフェンス上流側と下流側に一部（特に表層付近）、流体の滞留域が現れる一方、流体の押し下げは懸濁体の沈降を促すと考えられている。従って、シルトフェンスを設置することにより、放射性核種の溶存成分の流出の遅延及び懸濁体に付着した放射性核種の拡散の抑制が期待できると考えられる。しかし、シルトフェンス端と底面間を通過する流体の速度は速くなるため、懸濁体成分は巻き上がることも考えられ、懸濁体成分の拡散抑制は沈降促進と巻き上げの相反する効果が働き、どのような場合に拡散抑制効果が最も機能するかを予測することは簡単ではない。このような理由から、計算機シミュレーションが拡散抑制効果を調べる上で重要な役割を果たすことが分かる。

シルトフェンスを敷設する際、係留の安全性を保つため、水平方向の変形動作の自由度である「たわみ」を持たせる必要がある。通常、流れを抑制する水路の差し渡しを 19.5 とした場合、シルトフェンスの長さは 20.0 として余裕を持たせて敷設する。「たわみ」が発生する場合、流体はシルトフェンスに垂直に入射するのではなく、両側を通過する流れが卓越し、相対的に中央部の「ふかれ」が抑制されることが想定される。こうした流れの変化についても、理論的に予測することは難しく、シミュレーションが「たわみ」の自由度も含めて変形動作と放射性核種の拡散抑制効果を論じる上で必須なツールとなる。

3.2 シルトフェンス 2重敷設による「ふかれ」の抑制

原発港湾の取水口等にシルトフェンスを敷設する場合、2重に敷設されることが一般的である。汚濁水が流れてくる上流側に敷設された1枚目の「ふかれ」は、1枚単独での「ふかれ」と同じとなるが、2枚目は「ふかれ」が1枚目より抑制されることから汚濁物質の滞留特性が向上すると考えられてきた。これは1枚目により、流れが底面近くに集中するため、2枚目にかかる流体からの実効力は弱まるためである。従って、2重に敷設することで、汚濁物質の拡散が抑制されることが経験的に知られている。実際、油状物質が流出した際に用いられるオイルフェンスでは、図 3.1 のように、2重フェンスの間に滞留することが可能となり、拡散抑制効果があることが知られてきた。事実、1F 港湾においても、取水口に対し、シルトフェンスが2重に敷設された（その後、取水口前に海側遮水壁が建立され、取水口は埋め立てられたため、2重シルトフェンスは撤去された）。しかし、放射性物質（溶存成分と懸濁成分とに分類されると想定）の場合、垂下式2重シルトフェンスの効果については、直接の文献はなく、系統的な知見は殆どない（2重シルトフェンスの「ふかれ」を試行実験した報告が一つあるだけである）。こうした背景下、本事業では、一般的に用いられる敷設方法である2重シルトフェンスの効能をシミュレーションすると共に、水槽実験を通してモデリングの検証を行い、放射性核種の拡散抑制効果について、得られた知見を報告する。



図 3.1 2 枚のフェンスを用いた油状物質等の滞留。http://www.nihonsolid.co.jp/14-oilfen02.html を基に複製（一部修正）

3.3 取水口部等でのシルトフェンスの変形動作

前節にて、シルトフェンスの主要な変形動作として「ふかれ」及び「たわみ」と、シルトフェンスの 2 重敷設について記したが、実際の港湾環境において、シルトフェンスは矩形の一様な水路状構造下で垂下されるだけでなく、取水口等の開口部等にて垂下される場合も多い。このような状況では、流動様態が複雑になるケースも想定され、流れの複雑さに対応し、形状が「たわみ」を持ち複雑な形状になる場合が起こり得る。このような場合、放射性核種拡散抑制に影響を与える「ふかれ」も併せて複雑な変化を示すと考えられ、数値シミュレーションと水槽実験が唯一の知見を入手できる手段になると考えられる。尚、取水口の開口部に敷設した場合、流れは排水路からだけでなく、隣接する取水口からの流れもあるため、シルトフェンスに及ぼす力は更に複雑になるケースも考えられる。本事業では、シミュレーションと水槽実験による比較検証を行い、シルトフェンス・モデリングの妥当性を評価し、放射性核種の拡散抑制に係る知見及びデータを、シミュレーションを活用して取得する。

3.4 港湾内でのシルトフェンス複合ユニットの変形動作

実際の実験港湾では、取水口等にシルトフェンスの敷設が考えられている。取水口の差し渡しはシルトフェンス 1 ユニット（30m 程度）程度であり、取水口を覆う場合には、複数ユニットを貼り合わせた状態で敷設することもある。また、実験港湾は防波堤により複雑な形状になっており、特に、取水口付近は、外洋の影響を可能な限り受けない静謐な環境とするため、外洋からの波浪等を遮るような開渠環境となっていることが多い。従って、取水口等に敷設する以外にも、その効果が有効と考えられる地点に敷設するケースがある。その効果については、シミュレーション及び水槽実験の両方を用いて論じることとする。本事業では、取水口等での敷設に加え、複数の取水口をカバーする開渠部端へ敷設する場合や東北電力が検討している港湾口等に敷設する場合についても、シミュレーションと水槽実験を併用し、シミュレーションにより得られる流れ場を検証すると同時に、放射性核種に対する拡散抑制効果を論じる。

3.5 シルトフェンス主要変形動作「ふかれ」及び「たわみ」の理論

本 3 章の最終節に、これまで提唱されてきた「ふかれ」及び「たわみ」の理論についてまとめる。いずれも簡便な評価をする際は便利であり利用価値は高い。また、モデリングやシミュレーションの検証にも用いることができる。

「ふかれ」の理論

1980～90年代中頃、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、様々な場面上においてその検証が行われてきた。文献[3-1]はその代表となる論文であり、図3-2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 $y=f(x)$ と表した場合、膜単位長さ当たりの流体力を σ としたときの膜面に働く力は微分方程式

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

で表現できる。尚、実際の膜面は3次元膜ではあるが、 $x-y$ 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。ここで、 W は膜要素に働く張力となるが、張力はどの部分でも釣り合い、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解として

$$y = \frac{W}{\sigma} \left\{ 1 - \sqrt{1 - \left(\frac{\sigma}{W} \right)^2 x^2} \right\} \quad (3-2)$$

が得られる。この式(3-2)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分かる。流体からの応力 σ は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。

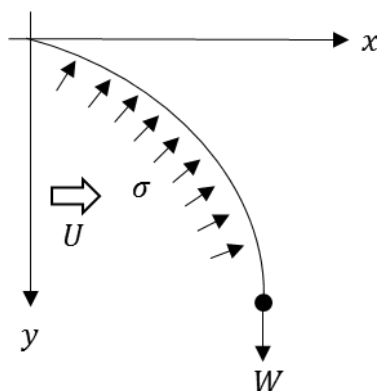


図3-2 垂下式シルトフェンスの「ふかれ」の形状、 U :流体が持つ定常流速、 σ :流体からの応力、 W :重錘による水中重力である。

上記の式(3-2)を用いることで、膜の長さ d は

$$d = \int_0^{d_e} \sqrt{1 + y'^2} dx = \frac{W}{\sigma} \sin^{-1} \left(\frac{\sigma d_e}{W} \right) \quad (3-3)$$

と与えられる。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：「ふかれ」を表す）は下式のようになる。

$$d_e = \frac{W}{\sigma} \sin \left(\frac{\sigma d}{W} \right) \quad (3-4)$$

ここで、膜単位長さ当たりの流体力 σ は

$$\sigma = \beta \frac{1}{2} \rho \left(\frac{Uh}{h - d_e} \right)^2 \quad (3-5)$$

で表せることを利用する[3-1]。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、膜体や対象とする体系によって変化するが、凡そ 0.8～1.5 程度の範囲にあることが知られている。後に詳述するシミュレーションでは主に 1.5 として、モデル及び水槽実験との比較を行う。尚、 $\beta = 1.5$ 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確認できる。更に式(3-4)を用いて、流速と実効的膜高さの関係、即ち流速と「ふかれ」の関係が得られるが、それをプロットしたのが図 3-3 である。図 3-3 の横軸： $0.5\rho U^2 d/W$ は無次元量となり、体系（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、つまり、このプロットにより次元に依らない関係が得られる（例えば、実矩形水路、水槽実験共に $\beta = 1.5$ とすることで、重錘のスケール比が一致する場合、得られる曲線はほぼ一致する）。図 3-3 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。本報告では、2 章にて議論したように、1.2m/sec 程度の高速流れの下でも「ふかれ」の発達について調べるが、重錘が軽く（図 3-3 参照）、速度が大きい場合には「ふかれ」は概ね飽和して行く様子が確認できる。

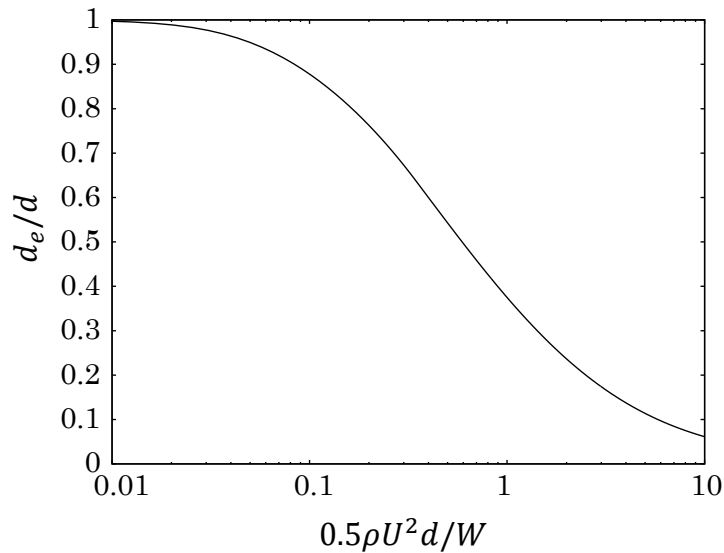


図 3.3 小田らの推定式[3-1]による無次元「流速」vs「ふかれ」度合いの関係。

「たわみ」の理論

シルトフェンスは敷設時、流れを抑制する水路の差し渡しよりもシルトフェンスの長さを長くする。従って、水平方向の変形動作の自由度として、「たわみ」が発生し、シルトフェンス上部の展張ワイヤーに展張力がかかる。文献[3-2]は「たわみ」に関する代表論文であり、その論文中では、次の仮定の下、展張力 T_e の算定式を以下の手順で導く。

仮定 1 展張ワイヤーの鉛直方向の変位は水平方向の変位に比べて小さく、展張力 T_e は、流れによってシルトフェンスに生ずる圧力により、シルトフェンスの単位長さ当たりの張力の水平方向成分 F_c によって決定される

仮定 2 F_c はシルトフェンスの垂直方向の流速成分 $u_\theta = u \cos \theta$ (ここで、 θ は図 3.4 に示す流れに直角方向と展張ワイヤーのなす角) によって決定され

$$F_c = C_d \cdot \frac{1}{2} \rho_w u^2 \cos^2 \theta \cdot d \quad (3-6)$$

で与えられる。ここで、 C_d , ρ_w , u , d はそれぞれ、抵抗係数、水の密度、流速、シルトフェンスの深さである。

以上の仮定の下、Milgram らの手法[3-3]により、展張力 T_e を求める。ここで図 3.4 に示すように幅 B の区間に張られた長さ l のワイヤーを考える。座標原点 O をワイヤー中央にとり、図 3.4 のように x 、 y 軸を定める。流れは y 軸正方向から y 軸に平行に流れるとすると、ワイヤーにはせん断力は働かず、直応力 F_c (単位幅当たりの力) が作用し、展張ワイヤーの張力は至るところ一定であるとする。ここで、ワイヤーの描く曲線の関数を $y=f(x)$ とすると、ワイヤーの微小部分に関する法線方向の力の釣り合いより

$$F_c = T_c \frac{f''(x)}{\{1 + f'(x)^2\}^{3/2}} \quad (3-7)$$

を得る (式 5-1 参照)。ここでシルトフェンスの中央部の力を

$$\sigma_c = C_d \frac{1}{2} \rho_w u^2 d \quad (3-8)$$

とし、 $f'(x) = \tan\theta$ であることを考慮すると、式(3-6)は

$$F_c = \sigma_c \cos^2\theta = \sigma_c \frac{1}{1 + \tan^2\theta} = \frac{\sigma_c}{1 + f'(x)^2} \quad (3-9)$$

と表せる。式(3-9)を式(3-7)に代入すると微分方程式

$$T_c f''(x) - \sigma_c \{1 + f'(x)^2\}^{1/2} = 0 \quad (3-10)$$

を得る。この方程式を $f(0) = f'(0) = 0$ の条件で計算すると、解は

$$f(x) = \frac{T_c}{\sigma_c} \left(\cosh \frac{\sigma_c x}{T_c} - 1 \right) \quad (3-11)$$

になる。このことから、シルトフェンス上部のワイヤーはカタナリー曲線を描くことが分かる。

また、 $x = -B/2$ から $x = B/2$ までのワイヤー長は l であるから

$$l = \int_{-B/2}^{B/2} \sqrt{1 + f'(x)^2} dx \quad (3-12)$$

を満足する。ここで式(3-10)から、

$$\sqrt{1 + f'(x)^2} = \frac{T_c}{\sigma_c} f''(x) \quad (3-13)$$

であること、および式(3-11)から

$$f'(x) = \sinh \frac{\sigma_c x}{T_c} \quad (3-14)$$

であることを考慮すると式(3-12)は具体的に積分でき

$$l = \int_{-B/2}^{B/2} \sqrt{1 + f'(x)^2} dx = \int_{-B/2}^{B/2} \frac{T_c}{\sigma_c} f''(x) dx = \frac{T_c}{\sigma_c} [f'(x)]_{-B/2}^{B/2} = \frac{T_c}{\sigma_c} \left[\sinh \frac{\sigma_c x}{T_c} \right]_{-B/2}^{B/2} = \frac{2T_c}{\sigma_c} \sinh \frac{\sigma_c B}{2T_c} \quad (3-15)$$

となる。ここで、tension parameter τ_c および gap ratio R_{gc} をそれぞれ

$$\tau_c = T_c / \sigma_c l \quad (3-16)$$

$$R_{gc} = B/l \quad (3-17)$$

とすると、式 (3-15) は

$$\tau_c \sinh \frac{R_{gc}}{2\tau_c} = \frac{1}{2} \quad (3-18)$$

と変形できる。そのため R_{gc} を与えることで、 τ_c を求めることができる。つまり、水路の差し渡しとシルトフェンスの長さの比率から tension parameter τ_c を決定できる。また、抵抗係数 C_d を実験等から決定できれば、式(3-9)からシルトフェンス中央部の力 σ_c が決定され、式(3-18)からシルトフェンスの展張力 T_c を計算することができる。

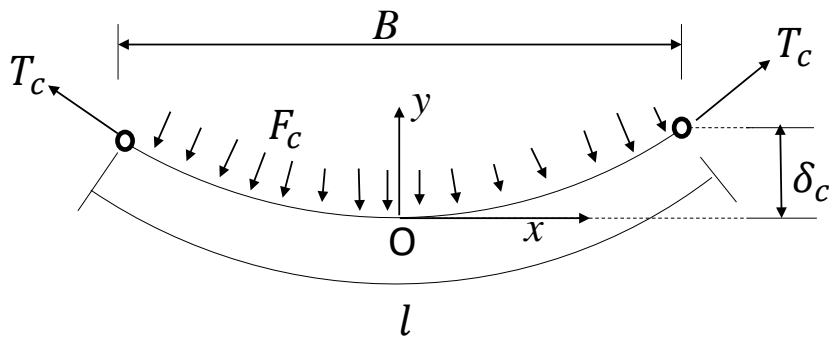


図 3.4 シルトフェンスの上部展張ワイヤーにかかる力と座標系

参考文献

- [3-1] 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, 43 巻, pp.1151-1155 (1996)
- [3-2] 榎木 亨, 青木 伸一, 流れの中に張られた汚濁拡散防止膜に及ぼす流体力と有効深さの計算法について, 海洋開発論文集, pp. 203-208 (1987).
- [3-3] Jerome H. Milgram. "Forces and Motions of a Flexible Floating Barrier", Journal of Hydronautics, Vol. 5, No. 2, pp.41-51 (1971).

■ 4章 シルトフェンス変形動作モデリングとシミュレーション手法

4章では、シミュレーションによるシルトフェンス変形動作について論じる。まず、シミュレーションを行う上で必須となるシルトフェンス変形動作のモデリングについて記す。シルトフェンスの変形動作モデリングとしては、金山らによるモデリング[4-1]があるが、本事業ではそのモデルを基に改良を加え、様々な港湾環境においても適用可能なモデリングへと拡張した。本4章ではその基本モデリング技術とその改良法について述べる。一般にシルトフェンスは30m単位で一ユニットとするため、一ユニットでの利用の他、広い範囲で汚濁物質の拡散抑制を検討する必要がある場合は、複数のユニットを連結して利用する(2章文献[2.4]参照)。従って、モデリングとしては、ユニット単位と複数ユニットの連結したケースについて論じる。次に、そのモデリングを流体シミュレーションコードに実装し、簡単な矩形水路に対して実施したシミュレーション結果について報告する。

4.1 シミュレーション手法(金山らの手法及びその改良手法)

汚濁物質が発生する水中での工事に対し、汚濁物質の拡散抑制のため、シルトフェンス(汚濁防止膜とも呼ばれる)が用いられ、これまでにその効果を調べるための様々な研究が行われてきた。しかし、シルトフェンスを膜体構造物と見立て、流れ場への影響のみを調べた研究は多数あるもの、流れ場に依り膜体の変形動作すると同時にその膜体から流れ場へ反作用が生じ、流れ場への影響をも同時に解くものは少ない。多くの研究は、一様な流れに抗する板を垂下させシミュレーションするか、理論式を基に定常状態(変形形状)を計算し、その形状を用いて流れ場の評価を行う等の研究が殆どであった。従って、港湾等の複雑な流れ場の下、シルトフェンスの変形動作と流れ場が相互に影響し合う系をシミュレーションする手法はなく、その上、更に複数のシルトフェンスを実港湾のような複雑な流れ場下で敷設するような場合についての詳細な知見は殆どない。

そこで、本事業では、流れ場に合わせて動的にシルトフェンスが変形且つ移動し、それに合わせて流れ場が変化するモデルを開発する。このようなモデリングの試みは、これまで金山らにより、膜体を図4.1のように回転自由の節点と長さが変わらない斜体で構成される骨組みを有するモデルで表現する方法が提案されている[4-1]。尚、本手法では、シルトフェンスを格子点の位置を考慮して適切に分割し、シルトフェンスの形状を節点群で表現する。しかし、提案された当該アルゴリズムでは斜体の長さが固定であるという条件を用いて節点位置の補正を行うため、斜め方向の節点間隔は固定されるが、膜の横方向の長さに制限がないため、条件によっては、その長さが非現実的なものとなる可能性がある。特に、港湾内等のようにシルトフェンスの設置場所によっては、シルトフェンス周辺の流れ場が一様ではなく、複雑なものとなった場合に計算が破綻してしまうことが多いことが判明した。そこで、本事業では、節点間の横方向の長さを限定するため、最急降下法を用いた補正手法を考案した。

以下では、既存手法である金山らの手法を説明すると共に、その問題点の指摘と、改良法として最急降下法を用いたアルゴリズムを考案し、金山らの手法と比較する。

金山らによって、図4.1に示すような節点が自由に回転し、長さ変わらない斜材で構成された膜体(シルトフェンス)の流れによる変形モデルが提案された[4-1]。当該モデルは、図4.2のように、ある節点Oに対し、その節点に対応する膜体および重錘の重量の和である W 及び結合している下方の節点C及びDから働く力(F_c および F_d)が作用するとし、これらの合計の力 $W + F_c + F_d$ が節点Oに働く力の一部であるとする。この力を膜体が流れに与える抵抗力 F と2つの上方の節点A及びBの結合方向の力(F_a および F_b)に釣り合うとして、それら3方向の力に分配する。ここで、抵抗力 F の方向 \vec{f}_0 は節点

O が対応する膜体の鉛直方向と仮定し、

$$\vec{f}_o = (\vec{OA} \times \vec{OD} + \vec{OB} \times \vec{OA} + \vec{OC} \times \vec{OB} + \vec{OD} \times \vec{OC}) \quad (4-1)$$

で定義する。尚、節点 O が最下層の場合、下方の節点 C および D は存在しないため、その力は考慮しない。以上、下方の節点による力 (F_c および F_d) が既知とすれば、力の釣り合いの方程式として、未知数 3 に対して 3 つの一次方程式が作成可能となり、この 3 元連立一次方程式を計算することで、膜体の鉛直方向 (F) に生じる力及び上方の節点に働く力 (F_a および F_b) が求められる。従って、最下層の節点から上方の節点に向かって計算を進めることで膜体が流れ場に与える力を求めることができる。この得られた力を膜体による流れ場への抵抗として、流体の方程式に反映させることで、膜体の影響を考慮した流れ場を計算することができる。

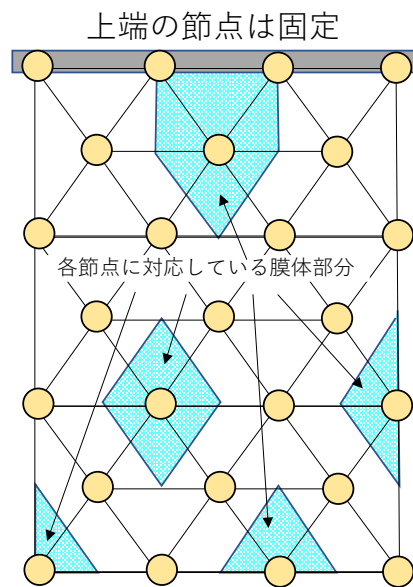


図 4.1 節点を用いたシルトフェンスのモデリング

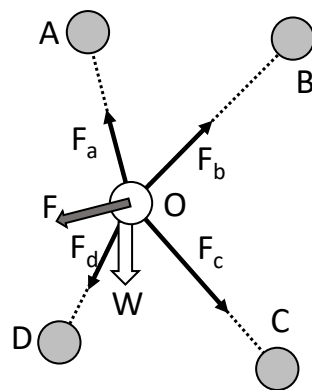


図 4.2 節点 O における力のバランス

その後、この流れ場の計算により得られた流れ場の情報を利用し、固定されている最上層以外の節点を移流させるが、単純に移流させただけでは、節点間の距離が実際のものとは異なる。従って、斜め方向

の節点との距離を基に位置の補正を行う。補正する1つの節点と、それと結合し位置の補正済みの2つの節点で構成される平面上で節点間の距離が条件を満足するように節点を移動させる。この方法では、固定されている上層の節点から下方に向かって順次補正していく（図 4.3 参照）。尚、本手法は、2次方程式を解くことで補正位置が求められるため、計算は容易である。しかし、横方向の節点距離を考慮しないため、計算条件によっては節点で構成される菱形が横に潰れ、横方向の節点間の距離が想定以上に長くなることが確認されている。また、この方法では斜め方向の節点間隔は常に固定されるため、実際のシルトフェンスのように節点間隔が短くなる場合を再現できないという問題があることも分かる。

4.2 最急降下法による節点位置の補正

本事業では、横方向の節点間の距離を考慮した補正を行うため、横方向を含む周囲の節点との距離と本来の距離の差を用いた評価関数を作成し、その評価関数を最急降下法により最小化することで補正点を計算する手法を考案した。

まず、評価関数の作成方法について説明する。節点 j は節点 i と斜め方向または横方向で結合している節点とする。このとき

$$d_{i,j} = \sqrt{(x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2 + (z_i - z_j)^2} \quad (4-2)$$

は節点 i, j 間の距離である。この距離が本来の距離 $D_{i,j}$ よりも大きければ、その差を評価関数の値として用いれば良い。その一方、考案したモデルでは、シルトフェンスの節点間隔が本来の距離よりも短くなることも許す必要があるため、本来の距離よりも短い場合に、評価関数値を 0 にすることが考えられるが、節点がある一点に集まってしまう可能性がある。従って、本来の距離よりも小さい場合は、その差にある小さいパラメータ μ を掛けた評価値を用いることで、ある程度以上節点同士が近づかないようにする。また、距離の差をそのまま用いると、最急降下法の際の補正量が本来の距離との乖離によらず同じになるため、本来の距離との乖離が大きいほど、変化する量を大きくすることとした。従って、以下のように距離の差の 2 乗を評価関数に用いることにする。

$$F_{i,j} = \begin{cases} (d_{i,j} - D_{i,j})^2 & , d_{i,j} \geq D_{i,j} \\ \mu(D_{i,j} - d_{i,j})^2 & , d_{i,j} < D_{i,j} \end{cases} \quad (4-3)$$

しかし、この評価関数を用いたとしても、任意の評価値になる節点の組み合わせは無数にある（一例として、最上層を直線的に固定している状態のシルトフェンスに対して、最上層の軸に対して回転させても、節点位置は変化するが評価値は変化しない）ことが分かる。従って、節点の補正量を評価関数に加え、それを最小化することで、流れ場に基づき移動した形状に近い形になる補正位置が求められることが分かる。

つまり、評価関数として

$$d = \sum_i \left[\sum_j F_{i,j} + \lambda(\Delta x_i^2 + \Delta y_i^2 + \Delta z_i^2) \right] \quad (4-4)$$

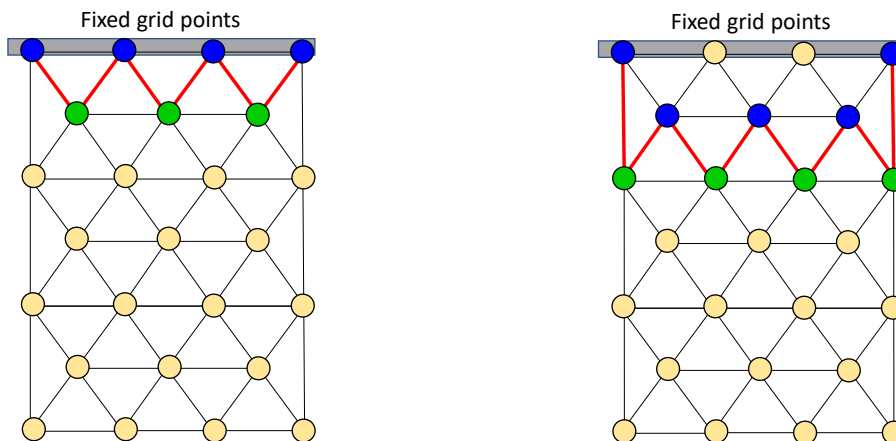
を採用し、この評価関数を最急降下法により最小化する節点を求めることで、シルトフェンスの形状を計算する。但し、補正量を評価関数に含むため、若干の節点間隔の誤差が許され、 $\lambda = 0.01$ とした後述の数値実験では1%未満ではあるが節点間隔が本来の間隔よりも長くなることが確認される。ここで、 $\Delta x_i, \Delta y_i, \Delta z_i$ は節点*i*のx, y, z方向の移動量である。

次に、補正のアルゴリズムについて記す。金山らは、図4.3のように固定端である最上段から下方向に一段毎に補正を行う方法を提案している。ここで、青い節点が基準になる固定された節点、緑の点が位置を補正する節点、赤線が補正の際に利用する距離である。この方法は、節点を補正する際、基準とする節点との距離情報のみを利用して補正を行う。通常、基準になる青い節点は一段上に存在しているが、図4.3(b)に示すように奇数段目の左右両端の節点だけは二段上の節点との距離も考慮する必要がある。

一方、本考案手法では、前項で考案した評価関数を用いた最急降下法を用いるが、節点の修正は図4.4のように二段毎に補正する方法を採用する。この場合、金山らの手法とは異なり、赤い線で接続している緑の点同士の距離も修正に用いる。後述の数値計算では、評価関数のパラメータとして

$$\mu = \begin{cases} 0.01 & \text{縦および斜め方向} \\ 0 & \text{横方向} \end{cases} \quad (4-5)$$

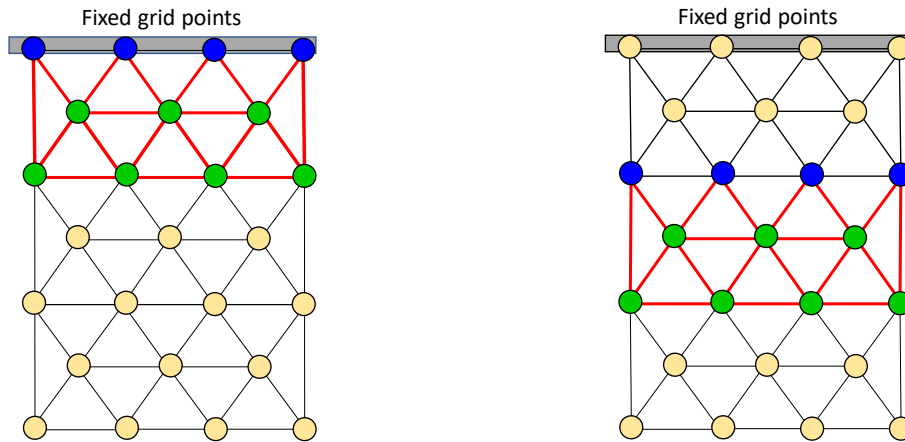
を用いた。ただし、このパラメータを利用した補正では、短くなった場合の反発力がないため、節点間の距離が必要以上に短くなる可能性があると共に、局所的な補正を実施するため、シルトフェンスが不自然な形になる可能性もある。そこで、上記の二段毎の修正を行った後、すべての節点を考慮した補正を行う。この補正では、本来の長さよりも短くなった区間に若干の反発力を与え、すべての方向の区間に対して $\mu = 0.001$ とした最急降下法を用いて再補正を行う。但し、この再補正においても、固定端である最上段から下方に向かって補正するため、ある節点の補正量を計算する際には、それ自身よりも上方および同じ段の節点の影響しか受けない（下方の節点の影響は受けない）。



(a)最初のステップ (2 段目) の修正方法

(b) 2 ステップ目 (3 段目) の修正方法

図 4.3 金山らの手法による修正する節点と基準とする節点の関係(赤い線の距離を参考にして、緑の節点を修正する)。



(a) 最初のステップ (2, 3 段目) の修正方法 (b) 2 ステップ目 (4, 5 段目) の修正方法

図 4.4 考案手法による修正させる節点と参考にする節点の関係(赤い線の距離を参考にして、緑の節点を修正する。この時、青い点との距離だけでなく、赤い線で接続している緑の点同士の距離も参考にして修正する)。

4.3 シルトフェンスの連結と複数ユニット連結シルトフェンスのモデリング

シルトフェンスは一般に横幅 30m 単位が 1 ユニットとなるため、それ以上の横幅を持つ領域に対して汚濁物質の拡散抑制を図る場合には、複数ユニットを連結し敷設することとなる。図 4.5 は連結部分を模式的に示した。図 4.5(a)左端の朱色部分はフロートで、連結部分は縫製により強化されていると同時に連結のための穴が複数開けられている。この穴同士を貼り合わせ連結した様子が図 4.5(b)である。

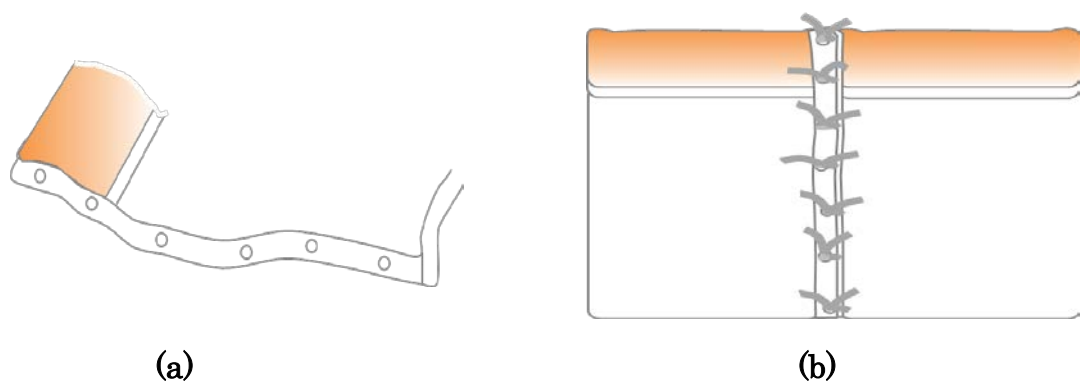


図 4.5 シルトフェンス連結の模式図 (a)連結するシルトフェンス端 (b) シルトフェンスの連結

図 4.5(b)から分かるように連結部の透水性はあるが、隙間は殆どなく、流体としての動きは殆ど抑制されると見てよい。また、膜の自重は他の部分と異なるがその影響も殆どないと判断できる。従って、

連結部も含めて凡そ一体のシルトフェンスと見ることができる。但し、フロート部分は連結部で折れ曲がる自由度を持つため、連結シルトフェンスをモデリングする際は、その自由度の存在が重要となる。本事業では、多数のフロート断片を持つシルトフェンスを作成し、水槽実験を行った（例：図 6-7, 図 6-10, 図 6-13, 図 6-16：約 10 個のフロート断片から成る）結果、その系の「たわみ」については、6 章にて示すように一枚のシルトフェンスモデルと凡そ同等になるとの結果を得たため、特に連結部を意識するモデリングについては行わないこととした。寧ろ、長大な幅を有する連結シルトフェンスの場合、両端だけでなく、中央部での固定も実施することから、その固定についてのモデル化が重要となる。これについては、7 章の港湾口で敷設するシルトフェンスにおいて、固定点を両端以外に複数持つようなケースに対し、実際に水槽実験及びシミュレーションを行った。その結果については 7 章にて記す。

4.4 シミュレーション（テスト計算）

今回考案したシルトフェンスの変形計算の有効性を確認するため、シルトフェンスのある節点を移動させ、金山らの手法と今回考案した手法でシルトフェンスを補正した際の形状の比較を行う。

本節では、図 4.6 に示した縦横とも 1m 間隔の節点で表現できるシルトフェンスを計算対象とする。このモデルに対して、A 点及び B 点をそれぞれ膜に対し鉛直方向に 0.1m 移動させ、それぞれの手法で補正を行った際の各方向の節点間の距離と本来の距離の偏差を表 4.1 に示す（金山らの手法では、斜め方向及び鉛直方向の節点間隔は固定しているため、間隔の違いは数値計算誤差によるものしかない。従って、この表では省略している）。ここでの横方向、斜め方向、鉛直方向それぞれの基準の長さは、1m、 $\sqrt{1^2 + 0.5^2} (\approx 1.118)\text{m}$ 、2m である。ここで、考案手法を計算する際の最急降下法のステップ幅は、パラメータを $\alpha = 0.00001$ 、 $\beta = 0.5$ としたアルミホのルール[4-2]に基づき計算する。この結果から、金山らの手法は横方向の節点間の距離のみを変化させているため、距離の違いの最大量は、すべての方向の距離を変化可能な考案手法よりも大きいことが分かる。また、考案手法は本来の距離よりも長くなることに制限をかけているため、長くなる量は金山らの手法の 10 分の 1 程度であることが確認できる。

次に、図 4.7 に節点ごとの変化量を示す。この結果から、金山らの手法は、移動した節点の斜め下方の節点が多く補正されているが、他の節点は変動していないことが確認できる。一方、考案手法では斜め下方の節点の変動が大きいですが、同じ高さの節点も変動していることが確認できる。

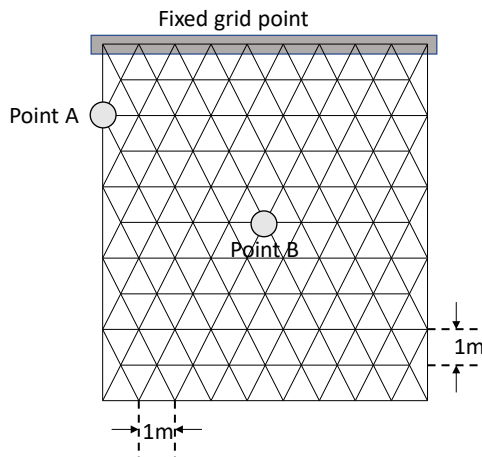


図 4.6 計算対象のシルトフェンス形状

表 4.1 基準の節点間隔と計算による節点間隔のずれの区間 (シルトフェンスが縮むのは想定しているため、計算による節点間隔が短くなり、ずれの量が負になるのは問題ない。一方、ずれの量が正になるのは、節点間隔が基準よりも広がっていることを示しており、シルトフェンスが伸びない想定に反していることになるが、考案手法によるその量は金山らの手法に比べて 10 分の 1 程度であることが確認できる)。

移動点	節点間隔のずれの区間 (m)			
	金山らの手法	考案手法		
	横方向	横方向	斜め方向	鉛直方向
Point A	[0.0000:0.0049]	[-0.0013:0.0003]	[-0.0044:0.0006]	[-0.0007:0.0000]
Point B	[-0.0196:0.0098]	[-0.0029:0.0008]	[-0.0064:0.0006]	[-0.0010:0.0000]

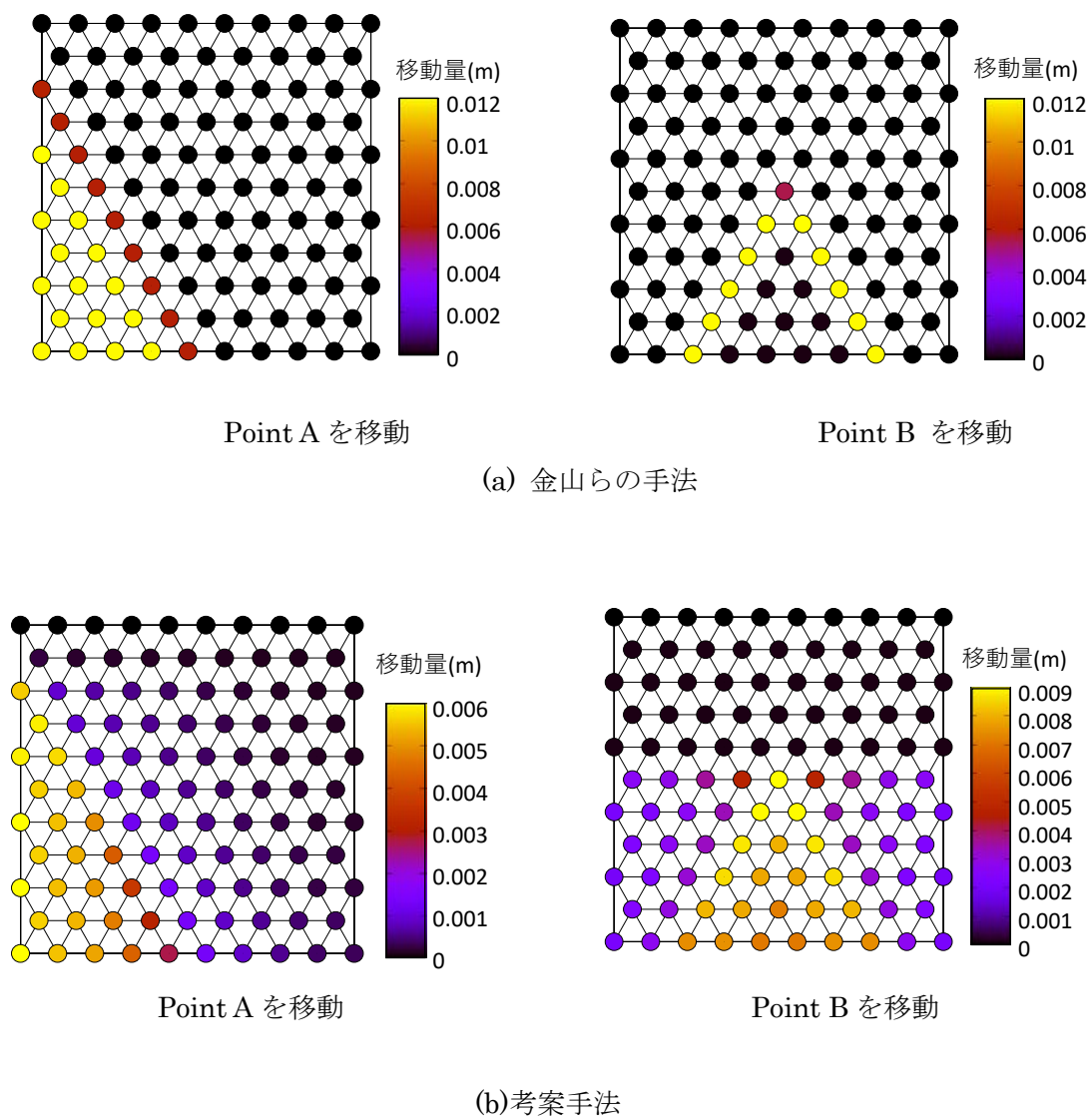


図 4.7 金山らの手法と考案手法による節点の移動距離の比較

4.5 単純矩形水路体系での検証

本節では、水深 h が 15m、横幅が 22m、長さが 200m の水路（現地スケール）において、境界の流速を 0.1m/秒から 1.0m/秒まで 0.1m/秒刻みで変化させ、金山らの手法と考案手法によるシルトフェンスの変形計算を行う。流体計算には SMAC 法を利用し、格子間隔は $1\text{m} \times 1\text{m} \times 1\text{m}$ としている。更に、水路の壁面での流れは non-slip 条件とし、動粘性係数は $1.0 \times 10^{-6} \text{m}^2/\text{s}$ 、渦粘性係数は係数 $C_s=0.173$ としたスマゴリンスキーモデルで与える。一方、シルトフェンスの条件として、膜丈長 d を 10m、重錘の単位幅水中重量 W を $1980\text{N/m}=(200\text{kgf/m})$ とし、モデル化のための節点間隔は縦 1m、横 1m とし、上流端から 7.5m の位置に最上段を固定して設置した。この条件の下、時間刻み dt を 0.01 秒とし、30,000 ステップ（実時間で 300 秒）のシミュレーションを実施した。また考案手法によるシルトフェンスの変形計算のための最急降下法のステップ幅はパラメータを $\alpha = 0.00001$ 、 $\beta = 0.5$ としたアルミホのルールに基づいて計算する[4-2]。また、どちらの補正方法でも、計算で得られた補正点が水路外になった場合は、各軸に平行に強制移動させ、水路内に存在するように再補正する。

この条件の下、シミュレーションにより得られた下層の中央部分の「ふかれ」量と小田ら[4-3] により提案された推定式

$$d_e = \frac{W}{\sigma} \sin\left(\frac{\sigma d}{W}\right) \quad (4-6)$$

$$\sigma = B \frac{1}{2} \rho \left(\frac{Uh}{h - d_e} \right) \quad (4-7)$$

による「ふかれ」量の比較を図 4.8 に示す。ここで、 U は無限遠での平均流速、 d_e は流れの影響を受けた状態での膜の有効深さ、 σ は膜の単位長さあたりの流体力、 B （通常は β と表記：本章以外は β ）は実験定数、 h は膜の設置位置での水深である。なお、式(1)の適用範囲は $2\pi/d \leq d_e$ であり、 d_e がこの範囲よりも小さい場合は他の先行研究と同様に、式(1)の \sin の値を 1 とする。この結果から、考案手法による結果は、金山らの手法の結果とほぼ一致していると共に、 $B=1.5$ とした小田らの推定式とも整合している。

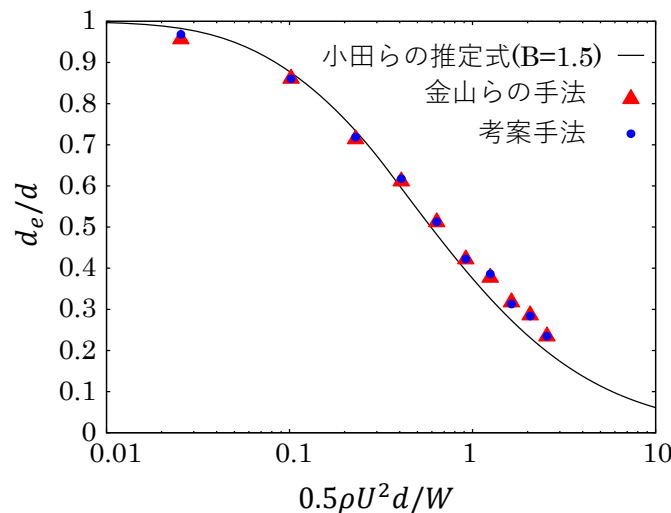


図 4.8 小田らの推定式とシミュレーションによるふかれ量の比較

次に、金山らの手法と考案手法を用いた際の流速が 0.6m/s の 300 秒後のシルトフェンスの形状と水路中心での流れの横断面を図 4.9 に、2 つの手法によるシルトフェンスを下流正面から見た図を重ねたものを図 4.10 に示す。図 4.9 の可視化結果からは、どちらの手法を用いても流れ場はほぼ同じであるように見える。しかし、図 4.10 から、中央付近の形状は一致しているが、端でのズレが大きいことが確認できる。また、流速ごとの各方向の基準節点間隔と計算による節点間隔のずれの区間を表 4.2 に示す。

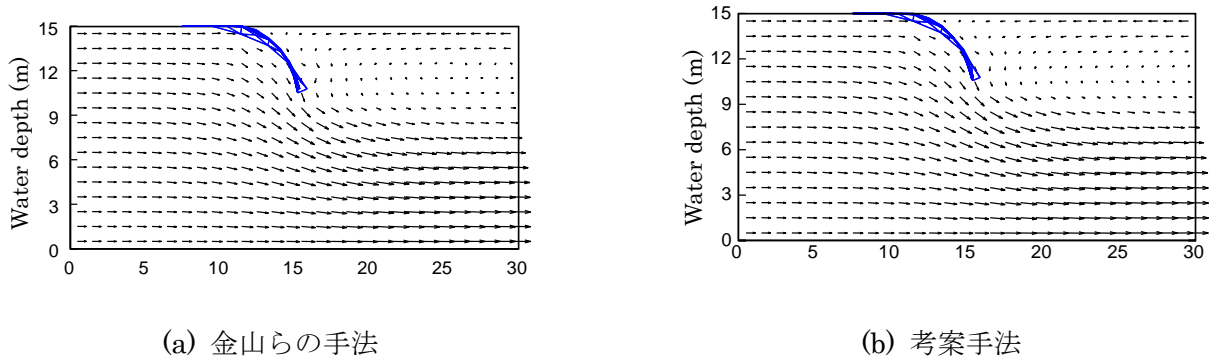


図 4.9 金山らの手法と考案手法によるシルトフェンスの変形形状と水路中央の流れ場

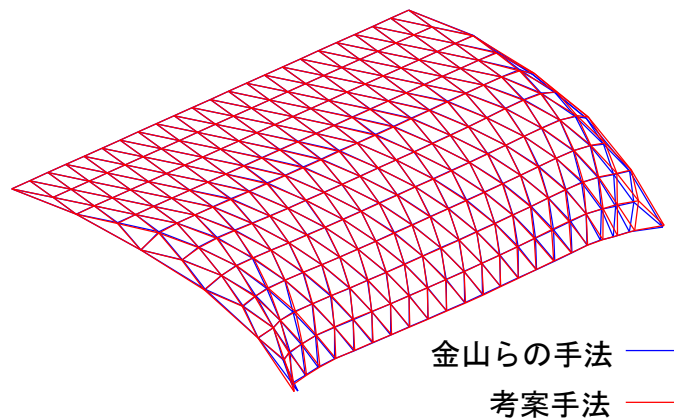


図 4.10 金山らの手法と考案手法によるシルトフェンスの変形形状の比較

ここで、横方向、斜め方向、鉛直方向それぞれの基準の長さは、 1m 、 $\sqrt{1^2 + 0.5^2} (\approx 1.118)\text{m}$ 、 2m である。この結果から、考案手法では、シルトフェンスを表現する節点の斜めおよび縦方向の距離が変化しないため、横方向の節点距離を伸縮させることでその形状を再現している。しかし、本研究で対象にしているシルトフェンスは縮むが、伸びないとしているにも関わらず、基準になる距離と比較し、最大で 10%程度長くなることが確認できる。一方、考案手法を用いた場合、すべての方向の間隔を変化させることで、その形状を再現する。この際、間隔の伸縮に関しては、縮む方向には大きく変化するが、伸びる方向には最大でも 0.3%程度、長くなるだけである。

表 4.2 基準の節点間隔と計算による節点間隔のずれ

流速 (m/秒)	節点間隔のずれの区間 (m)			
	金山らの手法	考案手法		
	横方向	横方向	斜め方向	鉛直方向
0.1	[-0.347, 0.209]	[-0.172, 0.001]	[-0.042, 0.001]	[-0.049, 0.000]
0.2	[-0.396, 0.253]	[-0.365, 0.002]	[-0.084, 0.001]	[-0.074, 0.000]
0.3	[-0.298, 0.055]	[-0.460, 0.001]	[-0.133, 0.001]	[-0.081, 0.000]
0.4	[-0.270, 0.043]	[-0.327, 0.001]	[-0.068, 0.001]	[-0.083, 0.000]
0.5	[-0.335, 0.041]	[-0.290, 0.001]	[-0.039, 0.001]	[-0.023, 0.000]
0.6	[-0.370, 0.026]	[-0.289, 0.002]	[-0.017, 0.001]	[-0.008, 0.000]
0.7	[-0.242, 0.054]	[-0.243, 0.001]	[-0.064, 0.000]	[-0.006, 0.000]
0.8	[-0.514, 0.101]	[-0.328, 0.001]	[-0.040, 0.001]	[-0.001, 0.000]
0.9	[-0.227, 0.015]	[-0.198, 0.002]	[-0.015, 0.001]	[-0.004, 0.000]
1	[-0.325, 0.044]	[-0.187, 0.003]	[-0.052, 0.001]	[-0.003, 0.000]

以上、本章では、水路内に設置されたシルトフェンスの振る舞いをシミュレーションするため、最急降下法を用いたモデリングを行った。金山らの手法では、シルトフェンスを節点群で表現し、斜め方向の節点間の距離を固定するようにシルトフェンスを移動させていたため、一部で横方向の節点間隔が本来の間隔よりも広がる不自然な形状になった。一方、考案手法は横方向の間隔も考慮した最急降下法を利用するため、金山らの手法よりも多くの計算量を必要とするが、その形状をより自然に再現できた。この考案手法により、原発港湾内の様々なシルトフェンスの敷設条件に対して、その「ふかれ」や「たわみ」がシミュレーション可能となった。特に、本考案手法は流れが一樣でない場合でも安定にシミュレーション可能である他、複数枚のシルトフェンスが連結されている場合等もシミュレーションが可能であり、高い適応力を備えている。

参考文献

- [4-1] 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.
- [4-2] Larry Armijo, Minimization of functions having Lipschitz continuous first partial derivatives, Pacific J. Math., Volume 16, Number 1, pp. 1-3 (1966)
- [4-3] 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、pp.1151-1155, 1996.

■ 5章 矩形水路敷設 2重シルトフェンスの変形動作と放射性核種拡散抑制

効果

本節では、2重シルトフェンス敷設時の「ふかれ」についてのシミュレーション結果を示すと同時に水槽実験によるシミュレーションの検証と放射性核種拡散抑制効果についてシミュレーションを行った結果を報告する。

一般に、原発港湾においては、取水口にシルトフェンスが敷設されることが想定されているが、2重に敷設することで拡散抑制効果が増すと考えられている。実際、1F港湾においても、事故初期より取水口にて2重に敷設された他、開渠口においても2重に敷設された。こうした背景の下、本節では、定常流下、2重シルトフェンスのその変形動作「ふかれ」とその効能について論じる。始めに、計算体系（検証実験に用いる実験水槽と同じとする）を記し、シミュレーション手法を簡単に記した後、シミュレーション結果を示す。その後、該当する水槽実験との比較により、シミュレーション（シルトフェンス・モデリングや流動シミュレーション）の検証を行う。更に、放射性核種の拡散抑制効果を調べる数値シミュレーション（溶存体及び懸濁体成分の移流拡散を追跡する）を実施し、一部、水槽実験との比較を行う他、流速や懸濁体粒径を変え、様々な条件でのシミュレーション結果をまとめ、2重シルトフェンスの放射性核種の拡散抑制効果に対する系統的知見を取得する。

5.1 計算体系（計算領域）

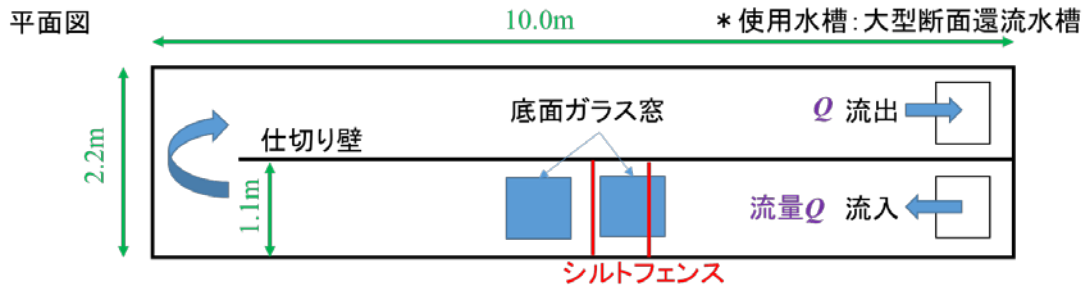
先ず、シミュレーションする計算体系（計算領域）について記す。シミュレーションする計算対象としては、シミュレーションの検証のため、水槽実験で用いる水槽と同じ体系とする。つまり、水槽実験結果の再現計算を行うことでシミュレーションの妥当性を検証する。

一般に、水槽実験ではレイノルズ数を現地換算スケールと同じにすることは不可能だが、フルード数を同等とすることは可能であり、流動の様態については、ほぼ同様の条件とすることができる（同時に両数を一致させることは不可能であり、乱流の詳細構造の再現ではなく流動の様態を一致させる）。従って、本事業でも、フルード数を同じとする水槽実験体系においてシミュレーションと水槽実験を行い、流れの様態及びシルトフェンスモデリング等の検証を行う。これにより、水槽レベルでの流動及びシルトフェンスモデリングが検証される一方、現地レベルでのシミュレーションの妥当性もレイノルズ数以外は担保されることとなる。

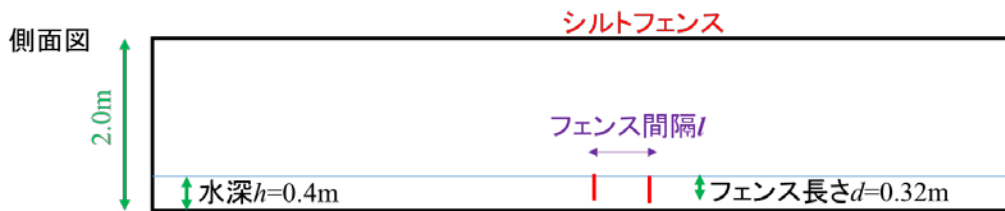
表 5-1 に用いる水槽実験系の諸元を記す。現地水深 6mの開水路を現実の体系とし、現地鉛直方向フェンス長は 4.8mとする。この体系に対し、実験水槽の水深は 0.4m とするためスケール比は 1/15 となり、鉛直フェンス長は 0.32mとなる。これにより、フルード数を一致させるため、流速比や重錘比が決定される。

表 5-1 対象領域

	水深 h[m]	フェンス長さ d[m]	差渡し B[m]	スケール比 [-]	重錘 [kg/m]
現地	6.0	4.8	16.5		118.4
実験	0.4	0.32	1.1	1:15	0.53



(a) 平面図



(b) 側面図

図 5-1 実験水槽の模式図: (a)平面図,(b)側面図

実施する実験体系の諸元は表 5-2 に記した通りとし、最大流速を現地スケールで 1.467m/s とした。これは 2 章において設定した想定最大流速 1.2m/s を十分に越す流速値となっている。実験では、この最大流速値（水槽では 0.379m/s ）を実現するため、4 つのポンプを直列に連結する（4 つのポンプの連結が最大）。従って、1 つのポンプのみを使う場合はその $1/4$ の流速となり、実験流速の最小値となる。尚、実験では 4 つのポンプを on-off することで、表 4-2 のような流速が実現できる。シミュレーションでも、その 4 流速にて実施し、水槽実験との比較検証を行った後、実験では得られない低流速でも数値シミュレーションを行う。尚、数値シミュレーションでは任意の流速が実現可能であることから、放射性核種の拡散抑制効果を論じるためのシミュレーションでは、十分な低速領域にも注意を払い、シミュレーション結果を示す。これは、高速領域では「ふかれ」が発達し、シルトフェンスの拡散抑制効果は大きく減退するためである。中高速領域では、「ふかれ」度合いを中心にシミュレーションと実験の詳細を比較し妥当性を確認し、実験が困難な低速域についてはシミュレーション結果のみ示すこととする。但し、低速域であるほど、数値シミュレーションによる再現精度や信頼性は高くなると考えられることから、中高速域で、実験との比較により妥当性が評価された場合、十分に精度ある結果が得られると判断できる（即ち、シミュレーション結果を示すだけで十分と判断できる）。尚、2 重シルトフェンス敷設条件では、一つの重要な制御パラメータとしてフェンス間隔がある。これについては、一般の敷設条件として、衝突が避けられることから、フェンス長（鉛直方向長さ）程度以上とすることが知られており、フェンス間隔 < フェンス長の条件を 1 ケースとし、フェンス間隔 > フェンス長を 6 ケースとして数値シミュレーションと水槽実験を行った。

表 5-2 実施される水槽実験の条件

	現地			実験		
	Q[m ³ /min]	Q[m ³ /s]	U[m/s]	Q[m ³ /min]	Q[m ³ /s]	U[m/s]
1	2178.6	36.31	0.367	2.5	0.0417	0.0947
2	4357.1	72.62	0.734	5.0	0.0833	0.1894
3	6535.7	108.93	1.100	7.5	0.1250	0.2841
4	8714.2	145.24	1.467	10.0	0.1667	0.3788

フェンス間隔 L[m]							
0.25	0.32	0.50	1.0	1.5	2.0	2.5	3.0

代表的なシミュレーション結果を可視化する（図 5-2 参照）。本可視化結果から、1 枚目のシルトフェンスの影響により、2 枚目のシルトフェンスの「ふかれ」が抑制されていることが明らかに分かる。本結果が得られた流速域は最大設定流速の 0.35 倍であり、最大流速領域では 2 枚とも大きく「ふかれ」ており、2 枚目の「ふかれ」抑制は図のように低中速域で顕著に見て取ることができる。

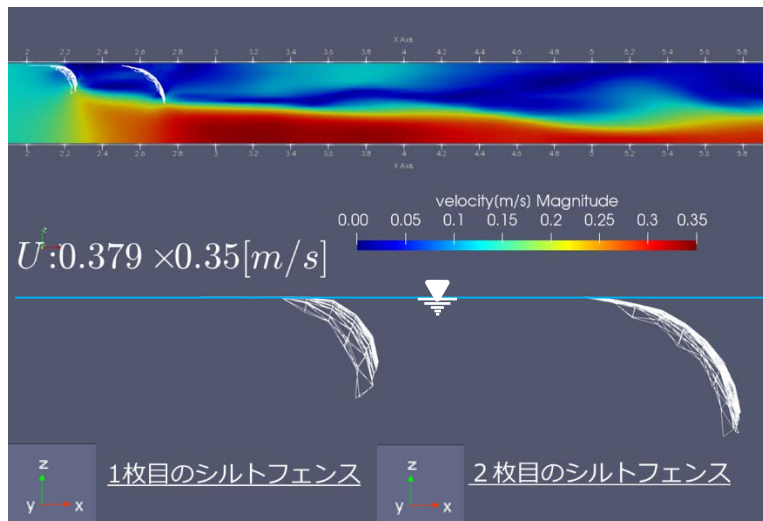


図 5-2 シミュレーションの可視化結果（シルトフェンスの「ふかれ」と流速の鉛直分布：2 枚目シルトフェンスの「ふかれ」の抑制が分かる）

また、流速分布の中央部断面での可視化結果（図 5-3 参照）より、1 枚目と 2 枚目のフェンスの間に滞留域が現れることが明らかに分かる。上流から流れてくる放射性核種の一部（溶存成分）はこの領域に滞留されることが期待できる。一方、懸濁体成分は、この部分で希薄になると考えられる。尚、溶存成分が海水より十分に密度が低い油成分のような場合、この滞留効果は極めて有効となる。このような効果はオイルフェンス等にて見られる。しかし、密度差がない場合は溶存成分の滞留性については長期的に継続されるものではないことを注意する。これについては本章後節について詳述する。

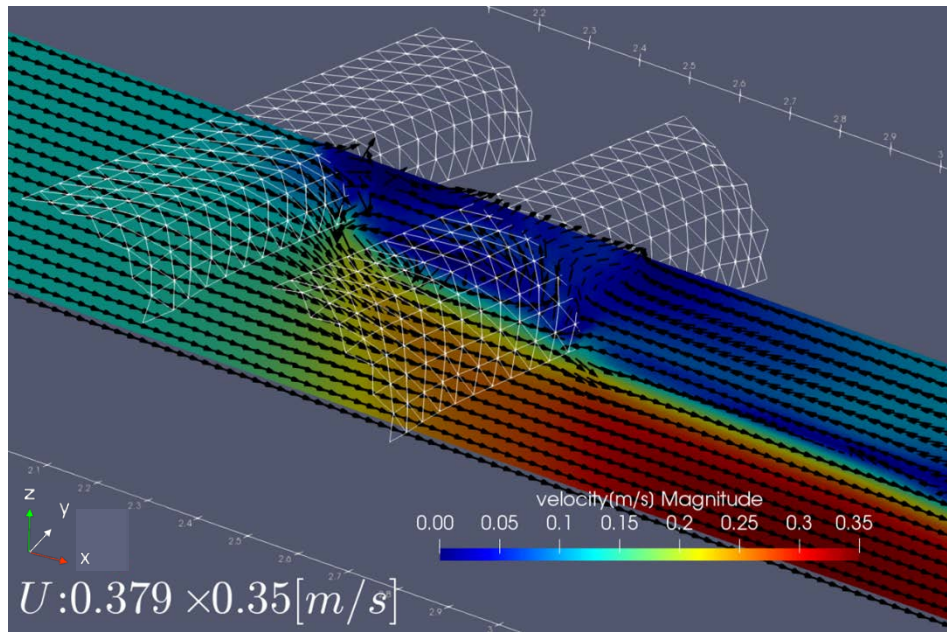


図 5-3 シミュレーションの可視化結果（シルトフェンス中央部付近の断面での流速分布：シルトフェンス間に流速が減衰した滞留域が現れる）

5.2 小田らの推定式との比較

シルトフェンスを一枚敷設した際の「ふかれ」による有効膜高さ d_e は小田の推定式によって理論的に予測可能である（水平方向のシルトフェンス変形自由度が無視できる場合）。この理論式と実験と数値シミュレーションの結果を比較すると、理論式が有する実験定数 β の値は通常 $\beta = 1.2 \sim 1.5$ と与えられることが知られている。実験定数 β とは、流体中を抗する物体が存在する際、流体がどれほど抵抗力を受けるかにより決まる定数であり、流体を遮る有効な断面積等に依存することが知られている。従って、一枚目については、十分に様な流動を遮る抵抗として働くことから、 β は単独一枚で観測される値と同様に決定できるが、二枚目については、一枚目によって非様な流速分布となり、流体から抵抗を受ける断面積は実質的に小さくなることから、抵抗力は弱まり、その分、「ふかれ」の度合いは小さくなることが想定される。しかし、一枚目の影響が十分に減衰し、流速分布が殆ど一様に回復すれば、二枚目も一枚目と同等の状況となり、「ふかれ」の度合いは一枚目と同じになることが想定される。従って、2枚目の実験定数 β は、フェンス間距離に依存し、近い場合は通常値より小さくなる一方、十分な距離を隔てた状況では通常値に回復すると推定できる。

尚、従来の研究にて、2枚目のシルトフェンスがふかれた際の有効膜高さ d_e を推定する理論はなく、実験も断片的に行われた文献のみであり、本報告が初めての系統的なシミュレーション結果（実験による比較検証結果も後節にて示される）となる。本報告では、2枚目の「ふかれ」も小田の推定式にプロットし、その実験定数 β の値をシミュレーション結果から逆推定する。

小田の推定式は次のように与えられる。

$$d_e = \frac{W}{\sigma} \sin\left(\frac{\sigma d}{W}\right) \quad (5-1)$$

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

ただし、 σ は膜の単位長さ当たりの流体力とし、 W は重錘の単位長さ当たりの重量とする。 β は実験定数である。

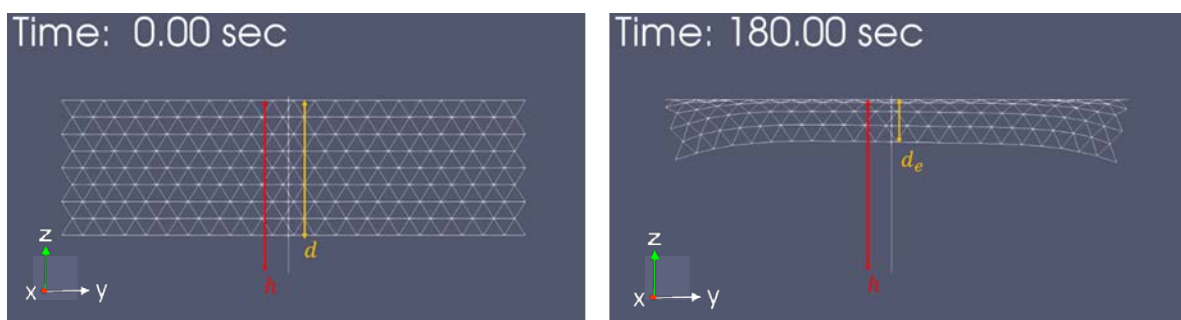


図 5-4 上：小田の推定式と式中量の定義式。下：初期の膜高さ d [m] と「ふかれ」時の有効膜高さ d_e [m] の定義（ h :水深）

まず、2枚のシルトフェンスを敷設した場合の、1枚目のフェンス中央部での「ふかれ」の計算結果を図5-5に示す。小田の推定式に対し、5つの流速（高速から低速域まで）結果が概ね式($\beta=1.5$)上に載ることがわかる。

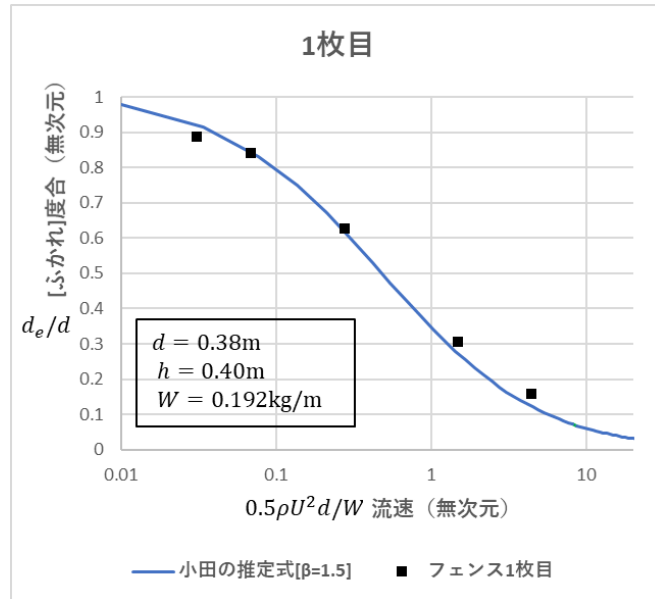


図 5-5 1枚目のフェンスのふかれ (2枚敷設の結果)

次に、2枚のシルトフェンスを敷設した場合の2枚目のフェンス中央部の「ふかれ」の計算結果を図5-6と図5-7に示す。膜間距離 L を $L=0.5m$ としたときの結果が図5-6であり、 $L=4.0m$ としたときの結果が図5-7である。

この場合、2枚目のフェンスに対する実験定数 β の値は、膜間距離 $L=0.5m$ の場合が $\beta=0.42$ と推定されたのに対し、膜間距離 $L=4.0m$ の場合は $\beta=0.84$ と推定された。これは、2枚目の位置が1枚目より離れると「ふかれ」の抑制が低減することを意味している。

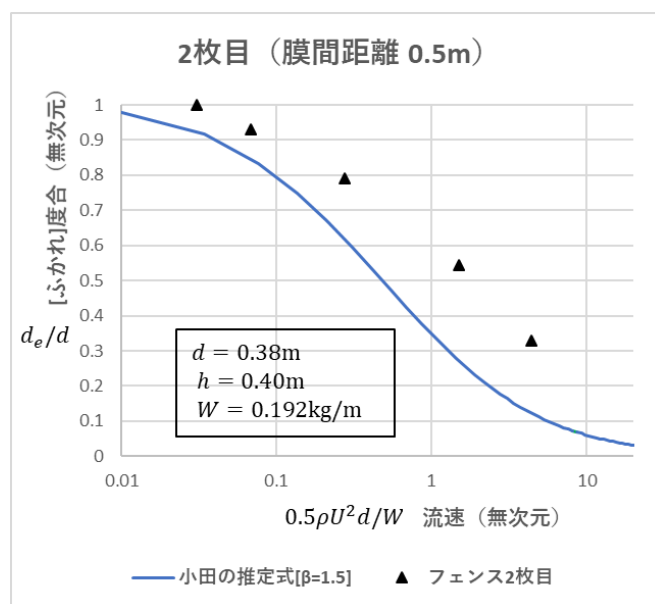


図 5-6 2枚目のフェンスのふかれ (膜間距離 $L=0.5m$ の場合)

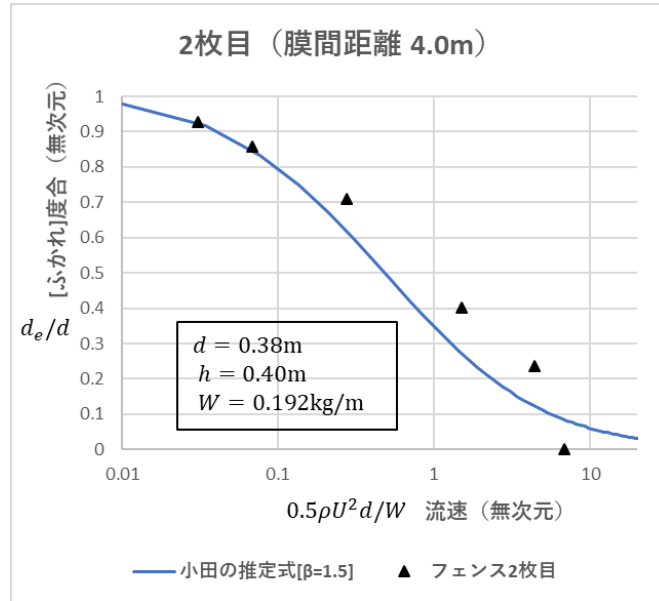


図 5-7 2枚目のフェンスのふかれ (膜間距離 $L=4.0\text{m}$ の場合)

5.3 膜間距離と「ふかれ」の度合い (β)

2枚目のフェンスに対する実験定数 β を膜間距離を変えてシミュレーションから求め、実験定数 β と膜間距離との関係を図5-8に示した。膜間距離が大きくなるほど、実験定数 β は一枚目の膜の実験定数 $\beta=1.5$ に接近することが分かる。これは膜間距離が大きくなると、2枚目のシルトフェンスに対し、1枚目のシルトフェンスからの影響が減少することを意味する。

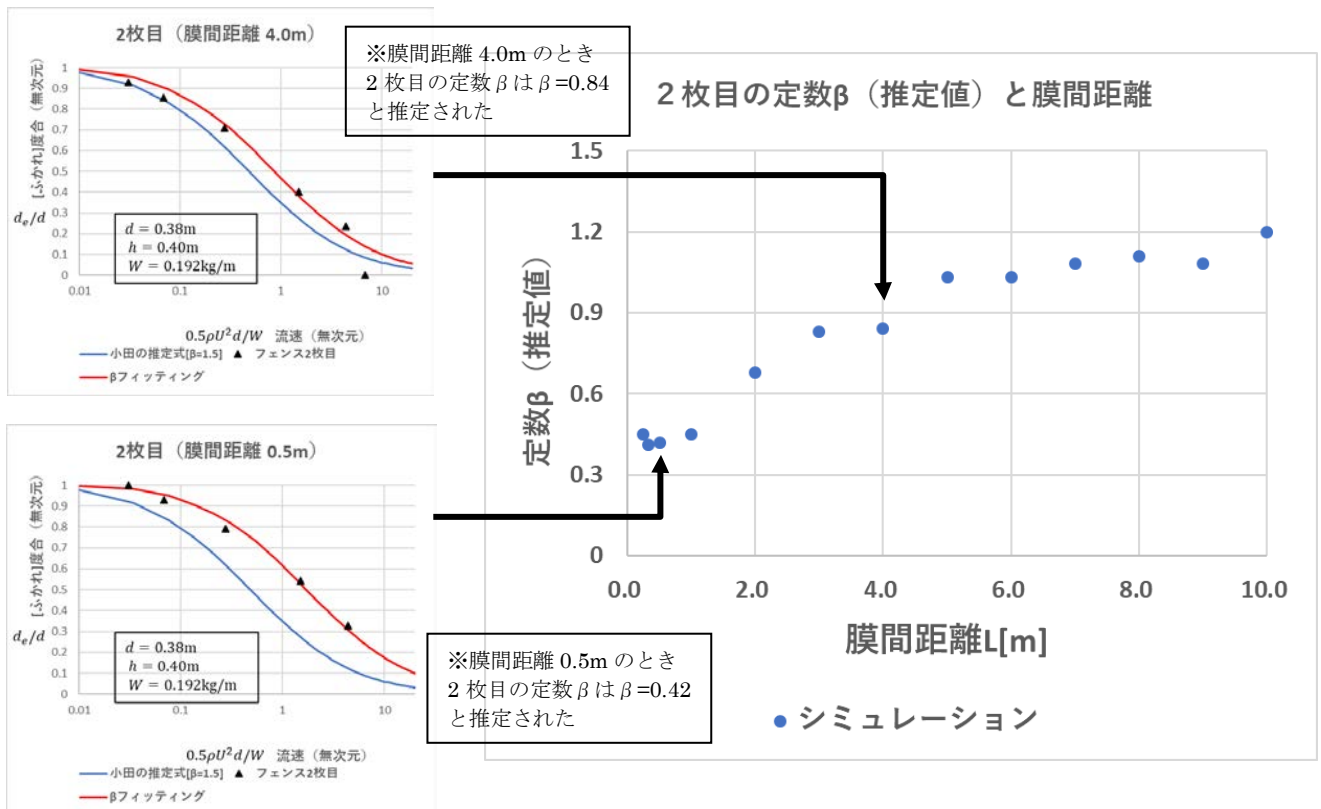


図 5-8 膜間距離と2枚目のフェンスに対する実験定数 β との関係

5.4 水槽実験結果との比較（可視化図）

シルトフェンス 2 重敷設条件下において、シミュレーションと水槽実験結果を比較しよう。まず、設定流量を $Q=2.5\text{m}^3/\text{min}$ （流速： 0.0947m/s ）とした場合の、2 枚目のフェンスの「ふかれ」の様子をシミュレーションと実験で比較する（図 5-9 はシミュレーション結果で図 5-10 が実験結果である。可視化画像と撮影画像の並びは同じ。）。その結果から、凡そ計算結果と実験結果が一致することが明らかに分かる（見た目で一貫する様子が分かる。定量的比較は後述）。

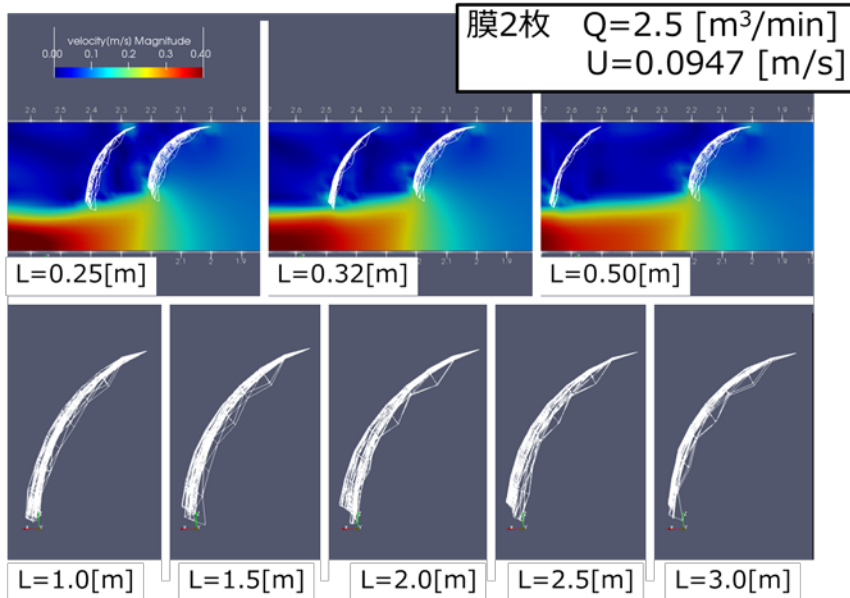


図 5-9 シミュレーション結果（「ふかれ」の膜間距離依存性）

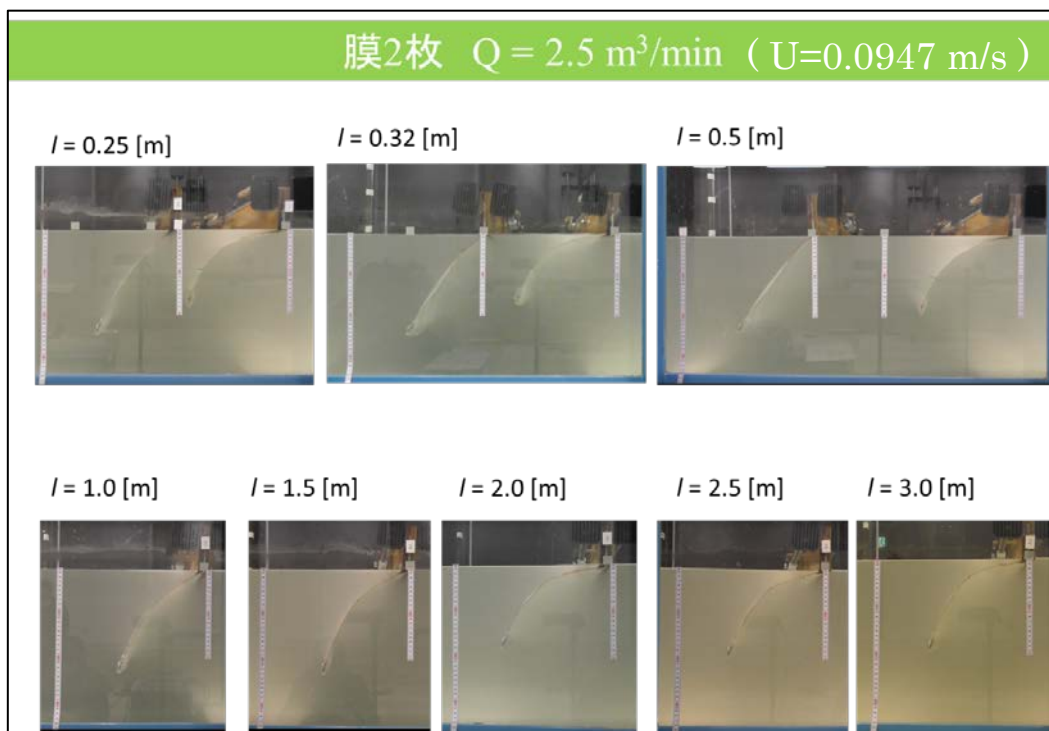


図 5-10 実験結果（水槽実験における「ふかれ」の膜間距離依存性）

5.5 水槽実験結果との比較（有効膜高さ）

シミュレーションと実験の各々に対し、設定流量と膜間距離を変更した際の有効膜高さ d_e を比較する。表 5.3 は種々の条件下でのシミュレーション結果であり、表 5-4 は対応する各条件下での有効膜高さ d_e の水槽実験結果である。

表 5.3 シミュレーション結果（条件毎の有効膜高さ d_e ）

1 枚目の有効膜高さ d_e [m]		膜間距離 L[m]							
		0.25	0.32	0.50	1.00	1.50	2.00	2.50	3.00
Q[m ³ /min] (V[m/s])	2.5 (0.0947)	0.201	0.201	0.201	0.201	0.201	0.201	0.201	0.200
	5.0 (0.1894)	0.115	0.115	0.115	0.117	0.116	0.114	0.119	0.119
	7.5 (0.2841)	0.073	0.073	0.072	0.066	×	0.066	0.065	0.066
	10.0 (0.3788)	×	0.051	0.049	0.044	0.044	0.044	0.044	0.044

2 枚目の有効膜高さ d_e [m]		膜間距離 L[m]							
		0.25	0.32	0.50	1.00	1.50	2.00	2.50	3.00
Q[m ³ /min] (V[m/s])	2.5 (0.0947)	0.251	0.253	0.255	0.249	0.235	0.228	0.226	0.226
	5.0 (0.1894)	0.185	0.194	0.194	0.185	0.177	0.158	0.164	0.160
	7.5 (0.2841)	0.134	0.132	0.140	0.128	×	0.120	0.117	0.108
	10.0 (0.3788)	×	0.100	0.106	0.094	0.091	0.088	0.082	0.080

※ × は計算が不安定化したケース

表 5-4 実験結果（条件毎の有効膜高さ d_e ）

有効膜高さ d_e [m]

1枚目		膜間距離 l [m]							
		0.25	0.32	0.50	1.0	1.5	2.0	2.5	3.0
Q [m ³ /min]	2.5	0.182	0.173	0.194	0.183	0.180	0.182	0.178	0.190
	5.0	0.100	0.108	0.102	0.107	0.107	0.110	0.105	0.098
	7.5	0.069	0.077	0.076	0.079	0.073	0.067	0.071	0.068
	10.0	0.052	0.050	0.048	0.045	0.053	0.051	0.046	0.050
2枚目		膜間距離 l [m]							
		0.25	0.32	0.50	1.0	1.5	2.0	2.5	3.0
Q [m ³ /min]	2.5	0.245	0.250	0.237	0.232	0.230	0.188	0.195	0.190
	5.0	0.184	0.180	0.184	0.150	0.125	0.118	0.123	0.129
	7.5	0.120	0.132	0.130	0.098	0.093	0.085	0.087	0.090
	10.0	0.087	0.068	0.062	0.066	0.073	0.067	0.065	0.070

5.6 結果の比較（小田の推定式を利用）

シミュレーション結果と実験結果をあわせて、1枚目と2枚目のフェンス中央部の「ふかれ」高さを各々プロットしグラフ化した。以降、その2枚のフェンスの膜間距離を $L=0.25\text{m}$, 0.32m , 0.50m , 2.00m , 3.00m と変化させたときの両者の比較結果を示す。

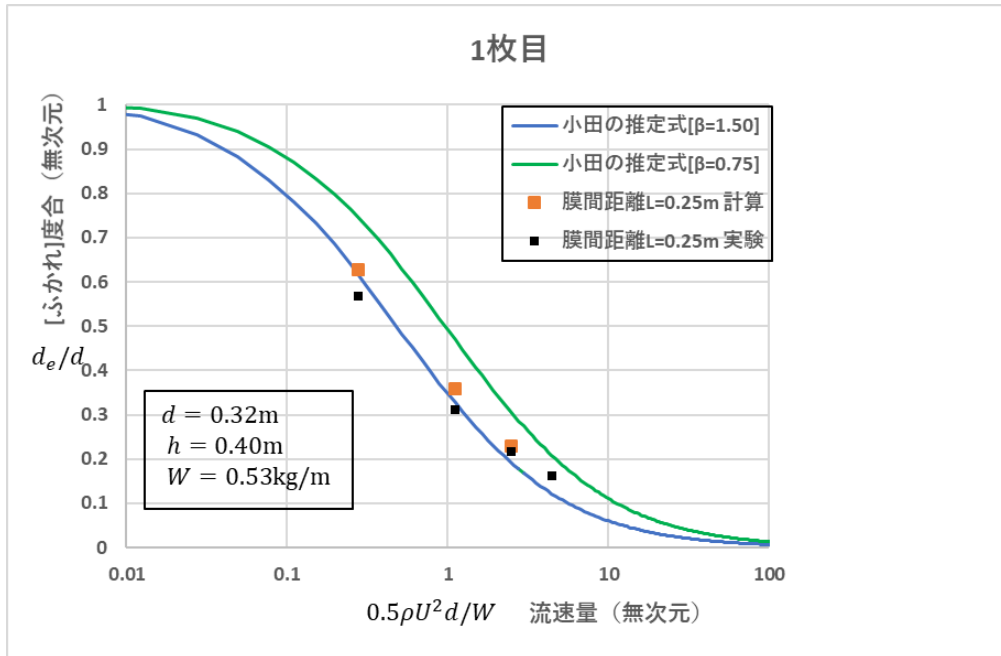


図 5-11(a) 1枚目フェンスの無次元化有効膜高さ と無次元流速との関係(膜間距離 $L=0.25\text{m}$)

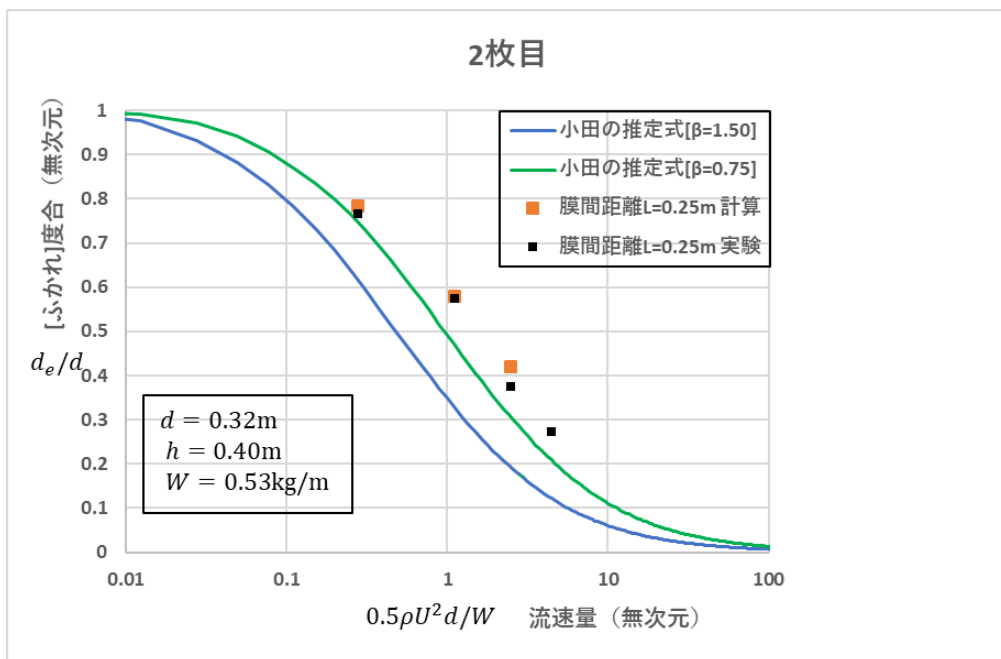


図 5-11(b) 2枚目フェンスの無次元化有効膜高さ と無次元流速との関係(膜間距離 $L=0.25\text{m}$)

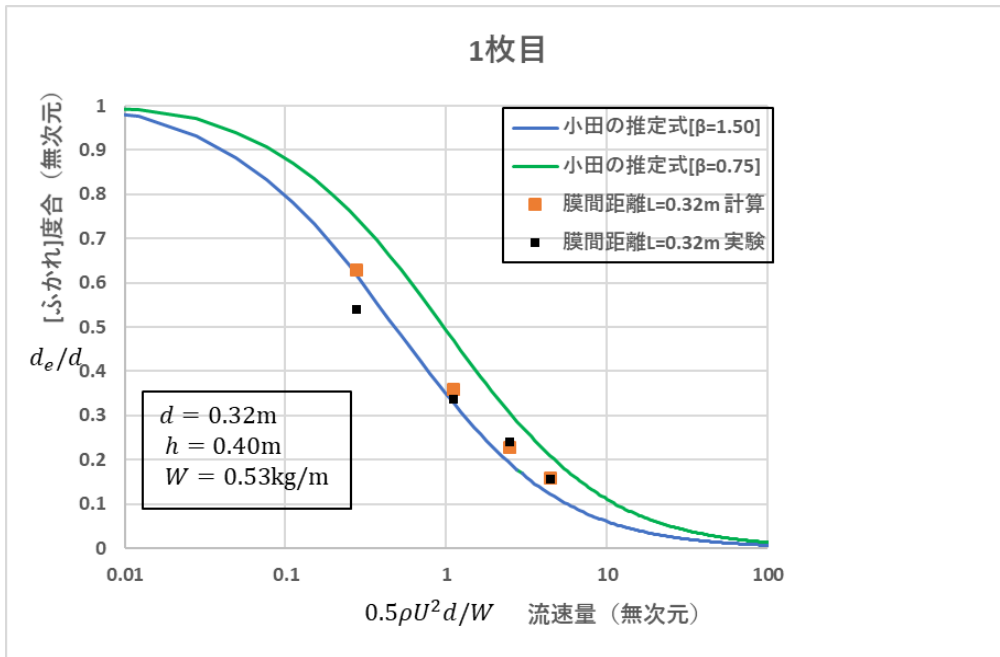


図 5-12(a) 1 枚目フェンスの無次元化有効膜高さとの無次元流速との関係(膜間距離 $L=0.32m$)

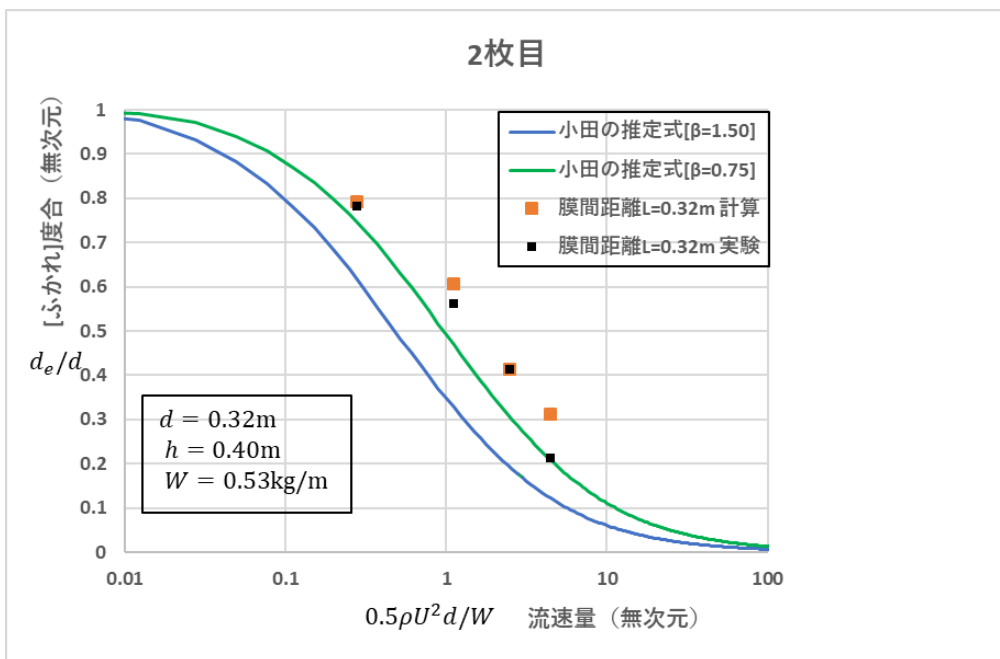


図 5-12(b) 2 枚目フェンスの無次元化有効膜高さとの無次元流速との関係(膜間距離 $L=0.32m$)

図 5-11(膜間距離 $L=0.25m$)、図 5-12(膜間距離 $L=0.32m$)の 2 ケースを比較した場合、実験とシミュレーションの一致は良く、シミュレーションが凡そ水槽実験結果を再現できていることが分かる。但し、 $L=0.32m$ のケースの流速量が多いケースにおいて、2 枚目に対する「ずれ」が生じていることが分かる。1 枚目以降は、一般に流れが底面と「ふかれ」端に集中し、其の後、一様な流れへと回復する際、微細な渦の剥離等の乱流構造が顕著に現れるため、十分に実験の「ふかれ」が再現できていない可能性が考えられる。こうした「ずれ」については、シミュレーションの解像度を十分に上げることで、解決できる可能性がある。

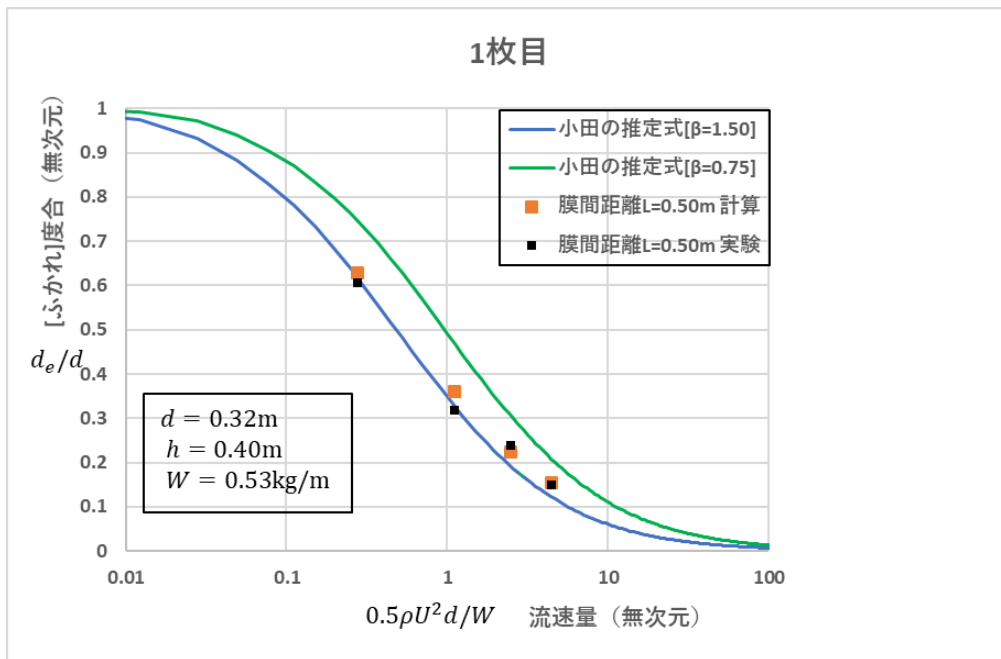


図 5-13(a) 1 枚目フェンスの無次元化有効膜高さ と無次元流速との関係(膜間距離 $L=0.50\text{m}$)

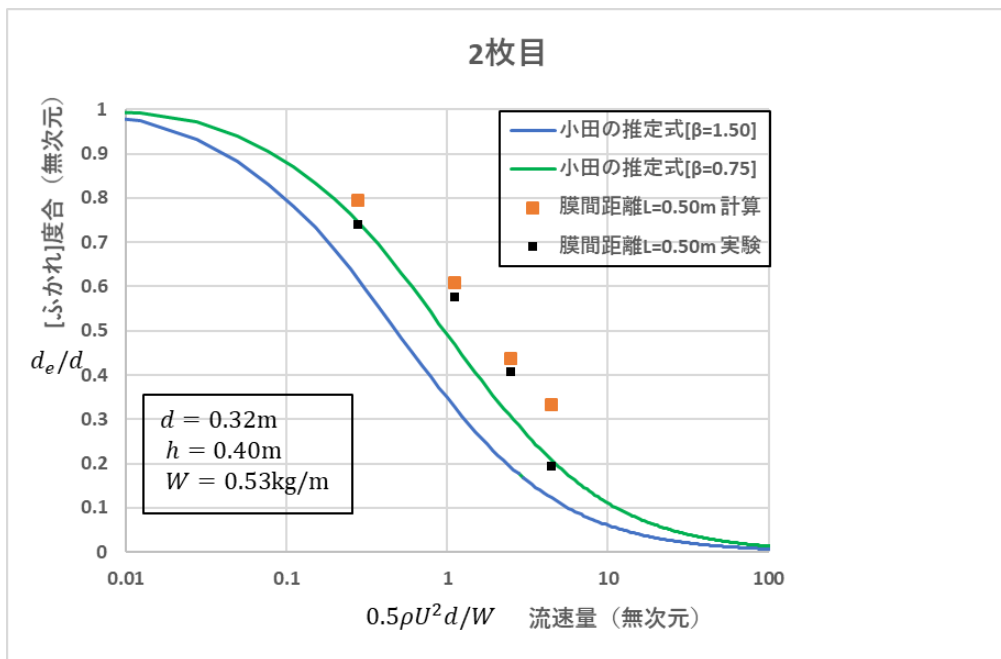


図 5-13(b) 2 枚目フェンスの無次元化有効膜高さ と無次元流速との関係(膜間距離 $L=0.50\text{m}$)

図 5-13(膜間距離 $L=0.50\text{m}$)の場合においても、1 枚目と 2 枚目の中低速域における実験とシミュレーションの一致は良く、シルトフェンスの変形動作をほぼ再現できていることが分かる。しかし、高速域での 2 枚目の「ふかれ」のずれについては図 5-12(膜間距離 $L=0.32\text{m}$)より拡大している傾向が見て取れる。

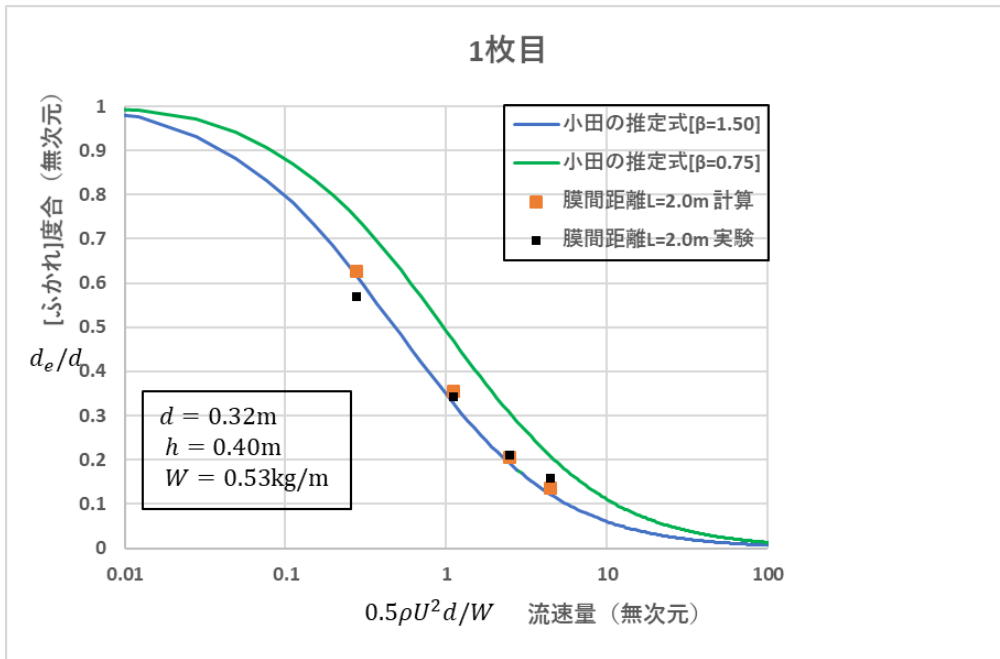


図 5-14(a) 1 枚目フェンスの無次元化有効膜高さ と無次元流速との関係(膜間距離 $L=2.00m$)

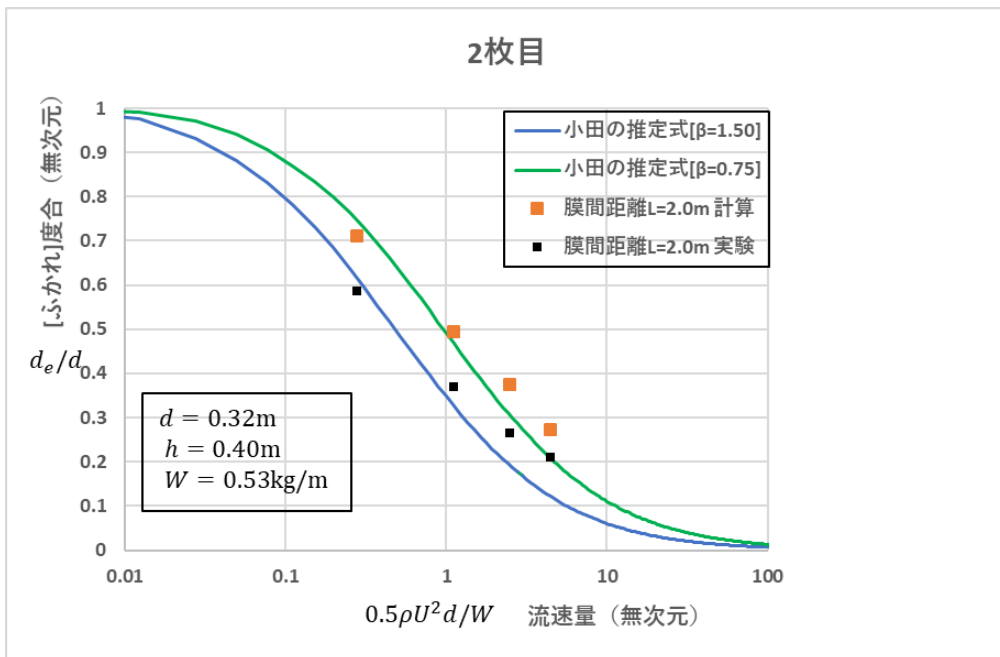


図 5-14(b) 2 枚目フェンスの無次元化有効膜高さ と無次元流速との関係(膜間距離 $L=2.00m$)

図 5-14(膜間距離 $L=2.00m$)においては、1 枚目については、実験とシミュレーションは良く一致するも、2 枚目については、中低速域での「ずれ」が少し大きくなっていることが分かる。これも 1 枚目の「ふかれ」の後の後流の乱れを十分に捉えられていない可能性が考えられる。この「ずれ」も解像度を十分高くしたシミュレーションを実行することで、再現できる可能性が高い。

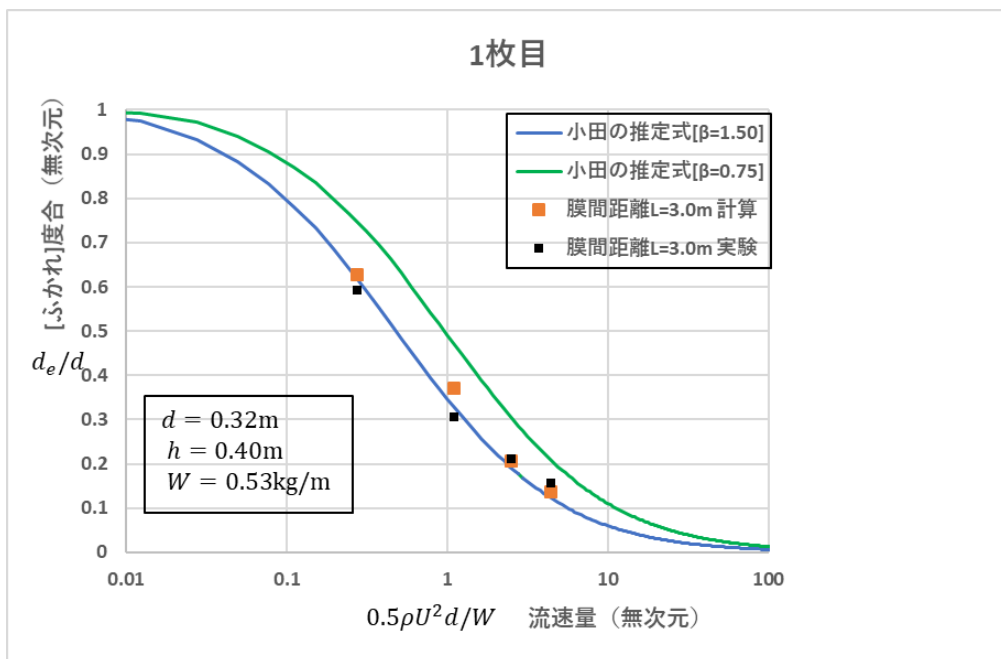


図 5-15(a) 1 枚目フェンスの無次元化有効膜高さと無次元流速との関係(膜間距離 $L=3.00\text{m}$)

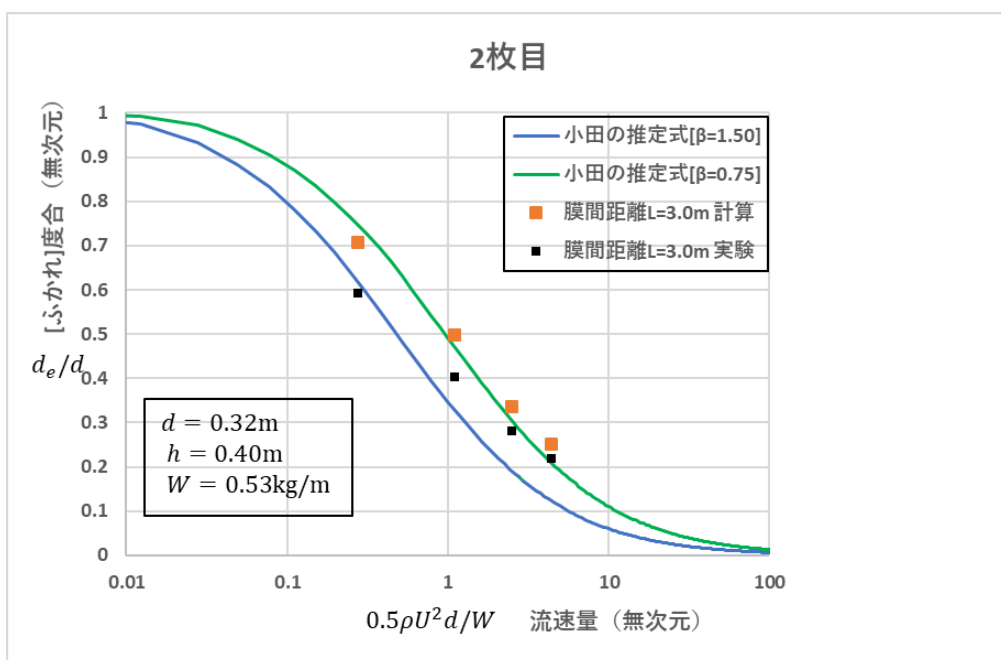


図 5-15(b) 2 枚目フェンスの無次元化有効膜高さと無次元流速との関係(膜間距離 $L=3.00\text{m}$)

その一方、図 5-15(膜間距離 $L=3.00\text{m}$)では、2 枚目の実験とシミュレーションの一致が回復している様子が伺える。これは、1 枚目の後流の複雑な流れが十分に発達し、逆に一樣な流れに戻りつつあるためと考えることができる。特に、高速域での一致が良くなってきたことは、その考察を裏付ける結果と言える。

尚、シミュレーションにおいては、有効膜高さ d_e の変動割合について時間発展の値をモニタリングすることが容易に可能である。つまり、シミュレーションでは有効膜高さ d_e 値がどれほど時間と共に変動するか、即ち、上記グラフでプロットした点の分散値を評価できる。本評価については、ケース①：膜間距離 $L=0.32\text{m}$ ，設定流量 $Q=5.0[\text{m}^3/\text{min}]$ ($V=0.1894[\text{m/s}]$)とケース②膜間距離 $L=0.32\text{m}$ ，設定流量 $Q=10.0[\text{m}^3/\text{min}]$ ($V=0.3788 [\text{m/s}]$)の2ケースを代表としてその結果を示す。図 5-16(a)と図 5-16(b)は膜間距離 $L=0.32\text{m}$ のケースでの、1枚目と2枚目のフェンスの有効膜高さ d_e の時刻歴とシミュレーション時の変動幅について調べた結果である。その結果、変動幅は凡そ有効膜高さ d_e の1/10程度であり、その幅を考えると、シミュレーションと実験は極めて良く一致すると判断できる。

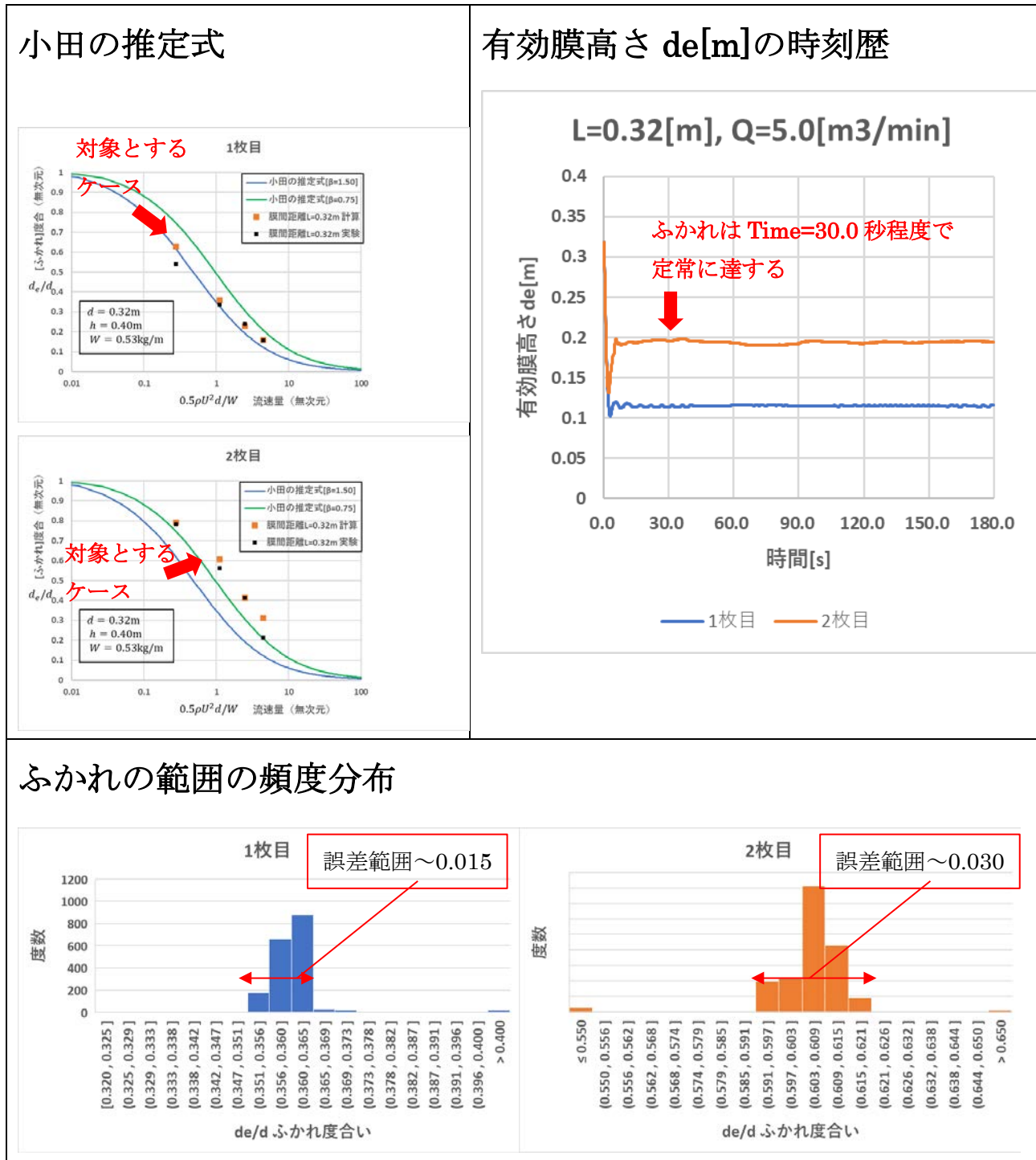
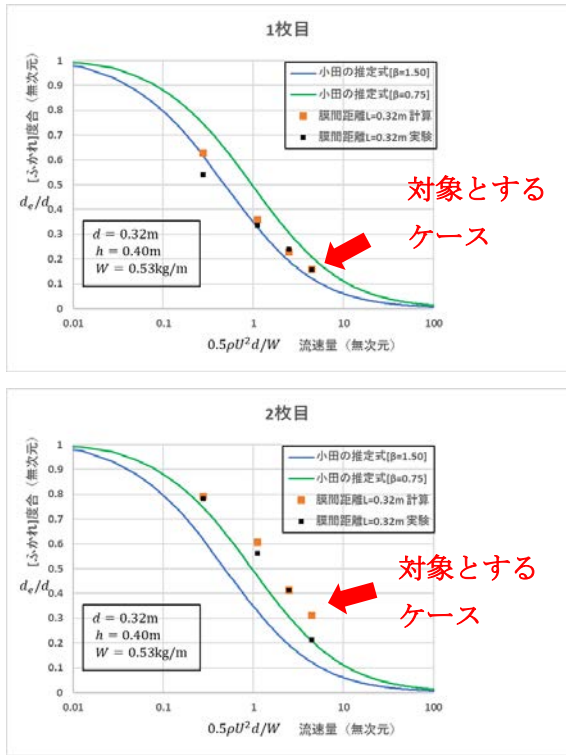
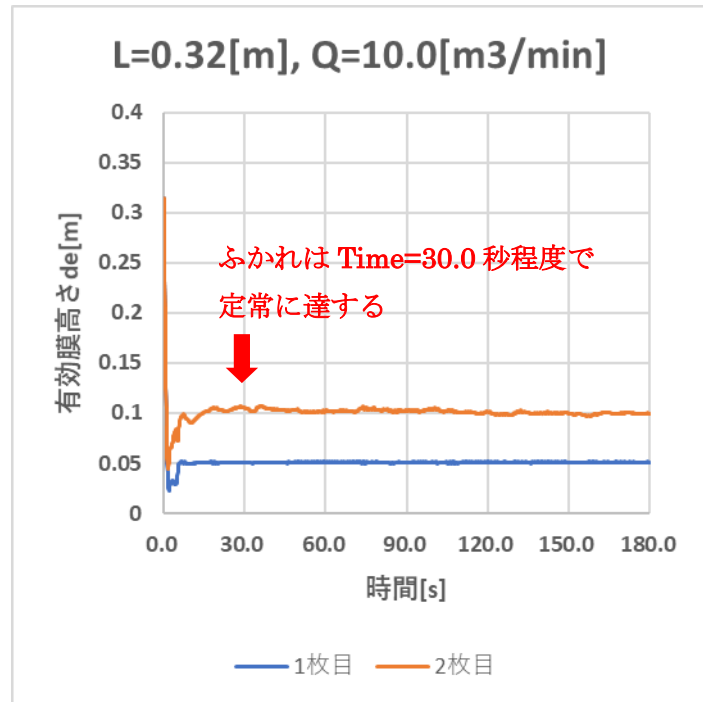


図 5-16(a) ケース①

小田の推定式



有効膜高さ $d_e[\text{m}]$ の時刻歴



ふかれの範囲の頻度分布

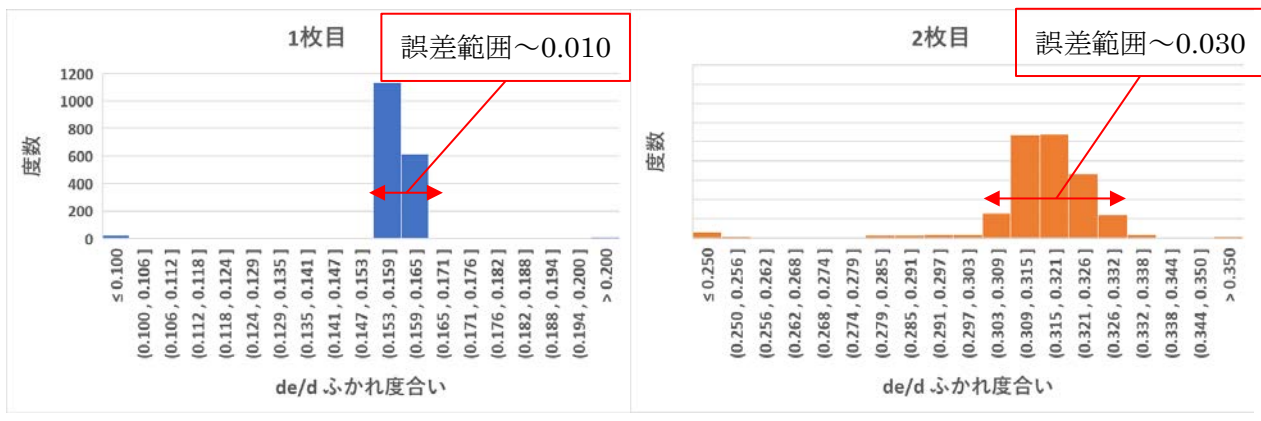


図 5-16(b) ケース②

以上の結果から、1枚目から発する後流（乱流）の影響による効果を適切に再現することができれば、シミュレーションと実験の一致は更に良くなると考えられ、シルトフェンスの変形動作のモデリングの妥当性については、ほぼ検証されたと言える。特に低中速域では、時間変動分を考慮しても、実験とシミュレーションの一致は極めて良い。この結果から、放射性物質の拡散抑制効果を、当該モデリングを用いて評価しても、高速域以外では十分に正しい結果を示すことができると結論づけられる。以降は、本シミュレーションを用いて放射性物質の拡散抑制効果について論じる。

5.7 放射性物質の拡散抑制効果

本節では、2重シルトフェンスにおける放射性物質の拡散抑制効果を調べるため、本章前半にて記したシミュレーションと同じ体系（表 5-5 及び図 5-17 参照）を用いる。計算領域も同等とする。即ち、前節で検証結果を記した際に用いた実験水槽の体系と同じ領域とする。

表 5-5 対象領域諸元

	水深 h[m]	フェンス長さ d[m]	差渡し B[m]	スケール比 [-]	流速比 [-]	重錘 [kg/m]
現地	6.0	4.8	16.5			118.4
実験	0.4	0.32	1.1	1:15	1:3.87	0.53

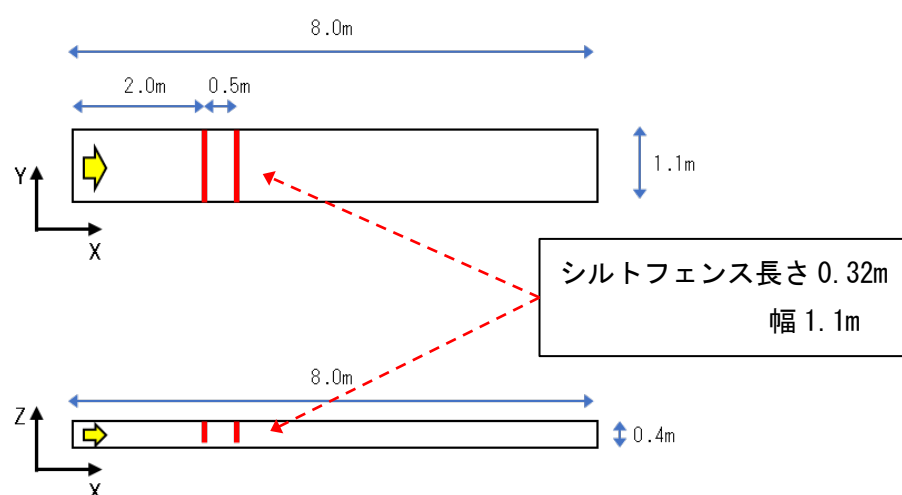


図 5-17 放射性物質拡散抑制効果の評価に用いるシミュレーション体系

尚、放射性核種の拡散抑制効果を調べるため、計算領域の上流端にて放射性核種を一定量流入させ、その流出量を下流端にて測定する。また、定めた計算領域における放射性核種量の時間発展をモニターし、流出する放射性核種量とのバランスを計算する。尚、放射性核種は溶存成分と懸濁体成分の二つとし、溶存成分に対しては、沈降効果はなく、移流・拡散方程式を解くことで、そのダイナミクスを追跡する一方、懸濁体成分に対しては、粒径及び粒密度に依存した沈降条件（ストークスの式）に従うとして、計算領域内での沈降量をモニターし、放射性核種流出量とのバランス等を見ることで、放射性核種の拡散抑制効果を評価する。

尚、図 5-18 はその計算領域と放射性核種の流入端と流出端について明示した図であり、境界条件の制御方法と共に放射性核種量の測定方法についても明記した。

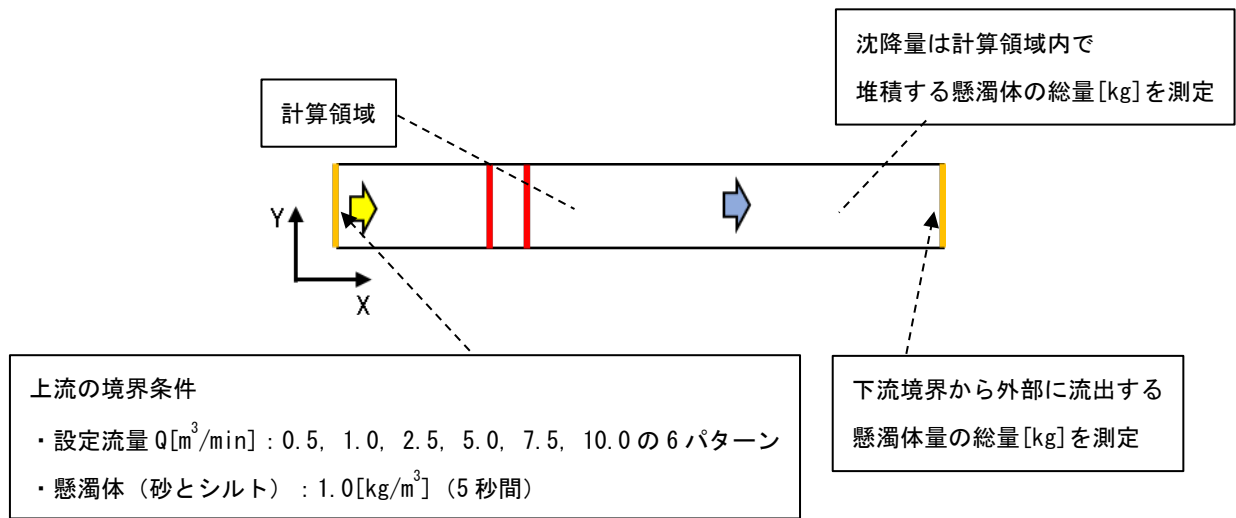


図 5-18 シミュレーション領域及び境界条件と放射性核種バランスの測定方法

上流から流入させる放射性物質は溶存成分と懸濁体成分とし、放射性核種の一部は懸濁体成分に不可逆的に吸着したものと仮定し、粒径により主に砂及びシルトの二つについて、その各々の成分の挙動を評価する。環境中で、それらのシミュレーションを行う際は、溶存成分と懸濁体成分の固液分配比を考慮し、両成分間で放射性核種の移行を考慮（即ち、懸濁体成分において吸脱着を考慮）する必要があるが、本領域等の小領域では、そのような効果を考慮する必要はない。本事業では、従って懸濁体成分については、懸濁体成分量をモニターすることで放射性核種量を追跡できるものとする。

尚、以下に示すシミュレーションで用いる砂とシルトの諸元は下表の通りである。尚、シルトについては、後に粒径を変えた場合の効果についても調べた結果を報告する。

表 5-6 放射性物質が吸着する懸濁体成分の諸元

種類	密度 ρ [kg/m ³]	粒径 d [m]	沈降速度 S_v [m/s]
溶存成分	1000.0	0.0E+0	0.0E+0
砂	2650.0	74.0E-6	-4.92E-03
シルト	2650.0	5.0E-6	-2.25E-05

また、本事業の範囲では、懸濁体成分の砂及びシルトについては、下記のストークスの式に従い沈降効果を付与する一方、一度沈降した懸濁成分の巻き上げの効果は考えないこととした。

$$S_v = \frac{1}{18} \left(\frac{\rho_s}{\rho_w} - 1 \right) \frac{gd^2}{\nu} \quad (5-3)$$

ただし、 ρ_s と d は粒子密度と粒径である。また、 ρ_w と ν は流体密度と動粘性係数である。流体密度は1000.0[kg/m³]とし、動粘性係数は1.0E-6[m²/s]として計算した。 g は重力加速度である。

本節では、まず設定流量 $Q=2.5\text{m}^3/\text{min}$ （流速： 0.0947 m/s ：水槽実験で実施される流量の一つ）で得られる流れ場と放射性物質の拡散・沈降の例を示す。比較のため、①シルトフェンスを敷設しない場合、②シルトフェンスを1枚敷設した場合、③シルトフェンスを2枚敷設した場合の3つのケースについて、2枚の膜間距離は 0.5m と固定し計算を行った。

まず、流れ場の鉛直断面のスナップショットを図5-19に示す。フェンス敷設により底面部での流速が大きくなることが分かるが、2重シルトフェンスのケースでは、その傾向がより顕著になることが分かる。前節にて示したように、2枚目のシルトフェンスの「ふかれ」度は1枚目と比べて小さく、2枚目を垂下した効果（2枚目の「ふかれ」が抑制される）が明瞭に現れていることが分かる。

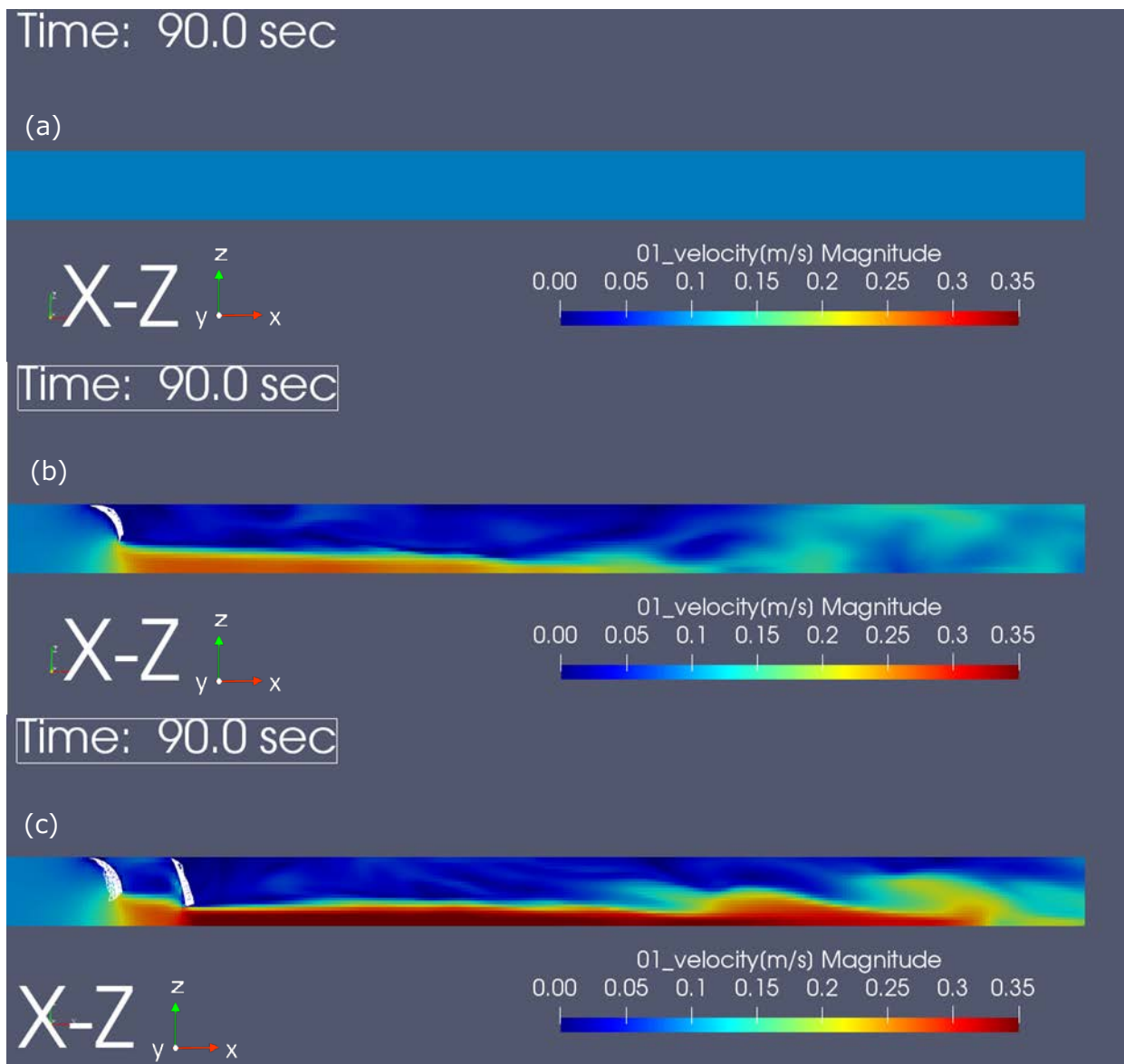


図 5-19 流動場分布（鉛直断面）(a)シルトフェンス敷設なし、(b)シルトフェンス1枚敷設、(c)シルトフェンス2枚敷設

5.8 放射性核種溶存成分の挙動

次に放射性核種溶存成分の分布の鉛直断面のスナップショットを図 5-20 に示す。本事業のシミュレーションでは、放射性核種を含む水塊の流入が起こるとし、その水塊の幅、高さについては、図 5-20(a)、即ち、シルトフェンスを垂下させていない場合に観察されるような分布（水路断面に対し、一様で流れ方向に一定の幅を持つ）とし、その移流拡散挙動を追跡することで、シルトフェンス敷設（1 枚及び 2 重）の効果を調べる。図 5-20(b),(c)の結果と(a)を比較することにより、シルトフェンス敷設により、底流部で溶存成分の移流・拡散が促進されていることが分かる。また、2 枚のフェンスを敷設した場合、膜間に一部の溶存成分が貯留される様子も分かる。溶存成分を含む水塊はシルトフェンスの無い場合、拡散しながらも水塊の形状を留めながら下流へ移流する一方、垂下型シルトフェンスが敷設された場合は、底面地近くで水塊が水平方向に引き伸ばされ、底面での流速が増大した効果で溶存成分の移動はシルトフェンスのない場合より先行することが分かる。

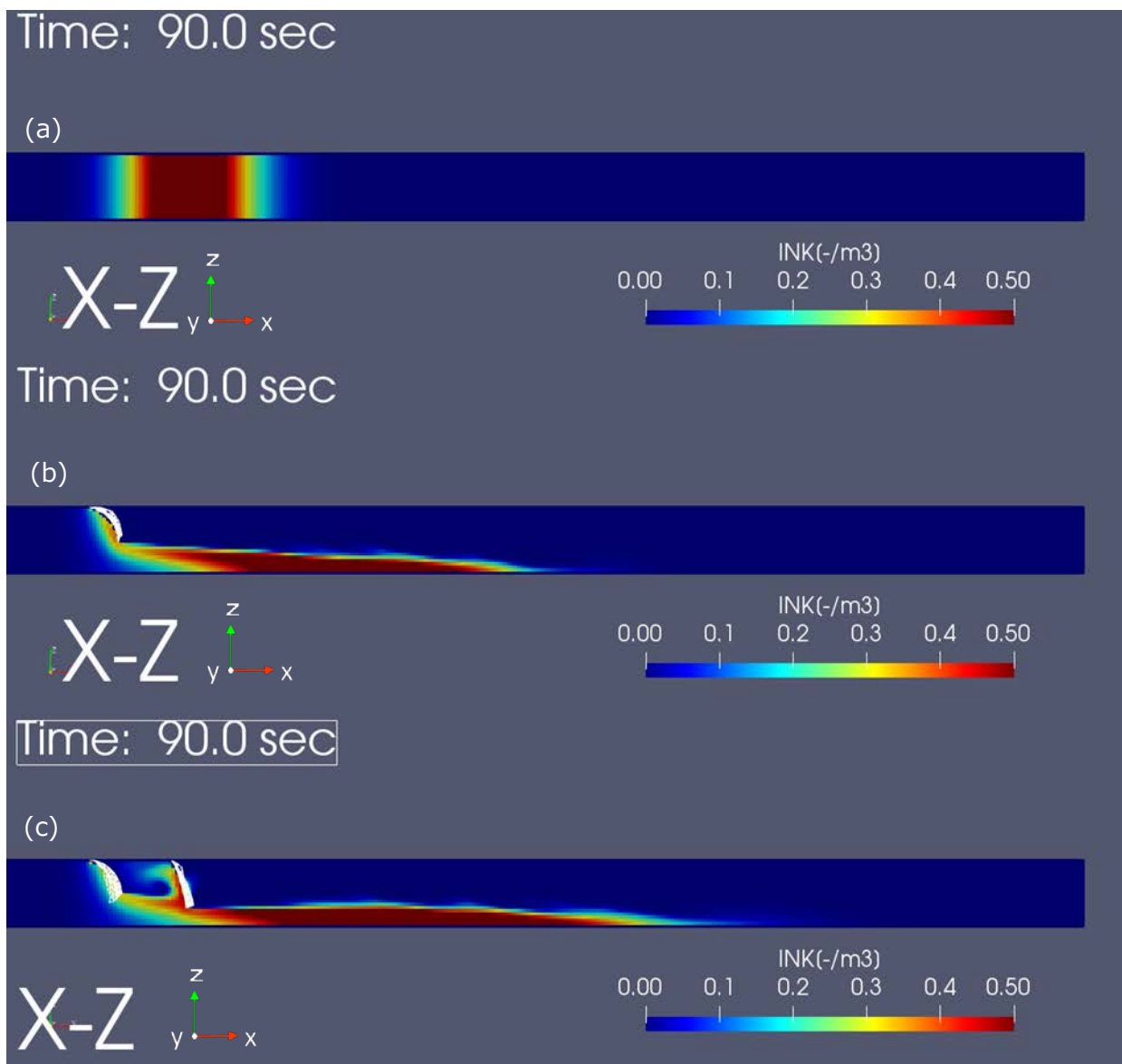
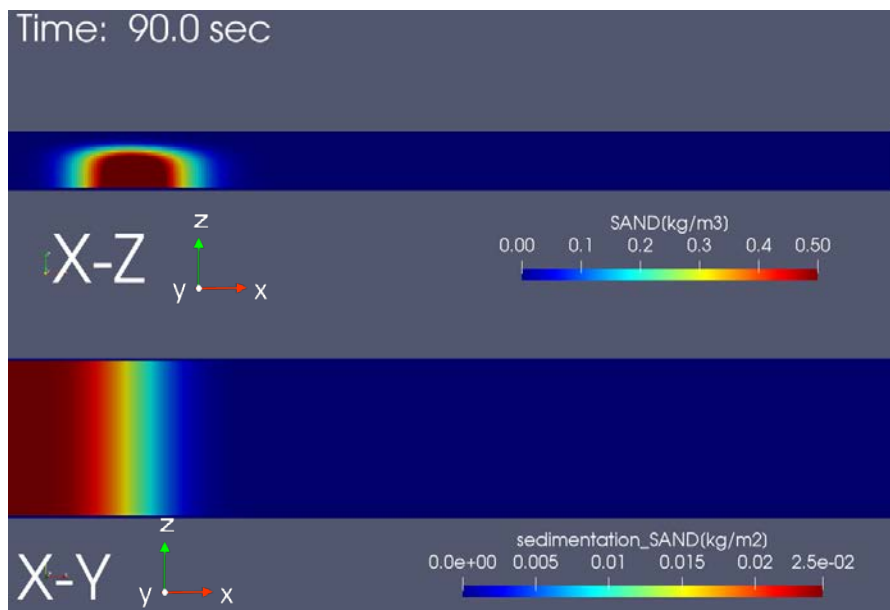


図 5-20 シミュレーションによる放射性核種溶存成分の移流拡散の様子（鉛直断面でのスナップショット）(a)シルトフェンスなし、(b)シルトフェンス（1枚）、(c)シルトフェンス（2枚）敷設。

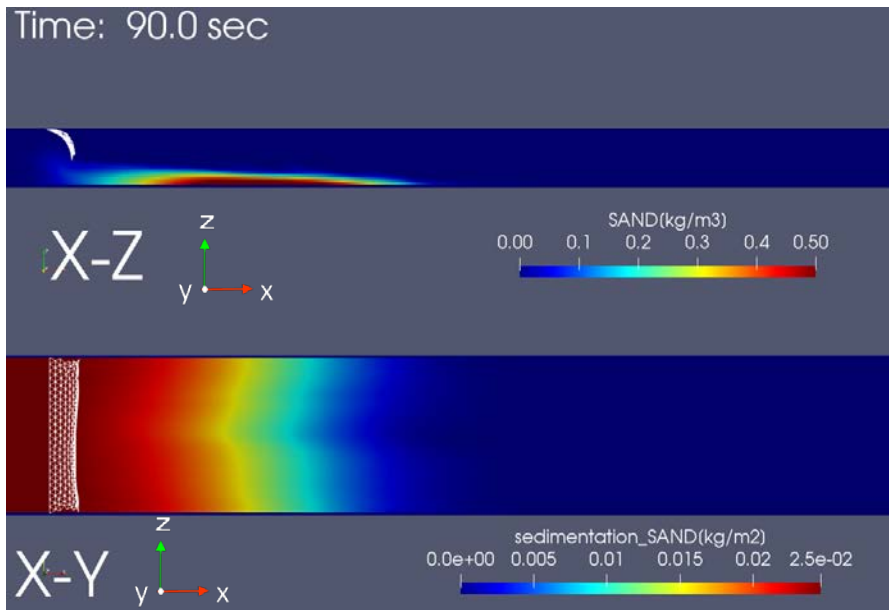
5.9 放射性核種懸濁体成分（砂）の挙動

次に、放射性核種が懸濁体成分に不可逆的に吸着したケース（砂）を考察し、シルトフェンスの敷設により懸濁体成分への沈降作用への影響を考える。図 5-21 は、水中での砂濃度分布 $[\text{kg}/\text{m}^3]$ のスナップショットを鉛直断面で示した図（X-Z 断面）であり、懸濁体成分の流入開始時刻から、そのスナップショットを取った時間までに底面部に沈降した砂の分布 $[\text{kg}/\text{m}^2]$ は X-Y 平面で示した。砂は、最初に一樣な水塊として溶存成分の場合と同様に与えたが、既に一部の沈降が起こっている様子がシルトフェンス敷設なしのケースから分かる（上部の濃度が消失する代わりに、その分の沈降が見られる（図 5-21(a)参照））。シルトフェンスを敷設すると、砂の濃度分布の水塊と同様に底面付近にて引き伸ばされるが、沈降はより促進されることが分かる。更に 2 枚のフェンスを敷設したケースが（図 5-21(c)参照）、最も砂の沈降が見られることがわかる。



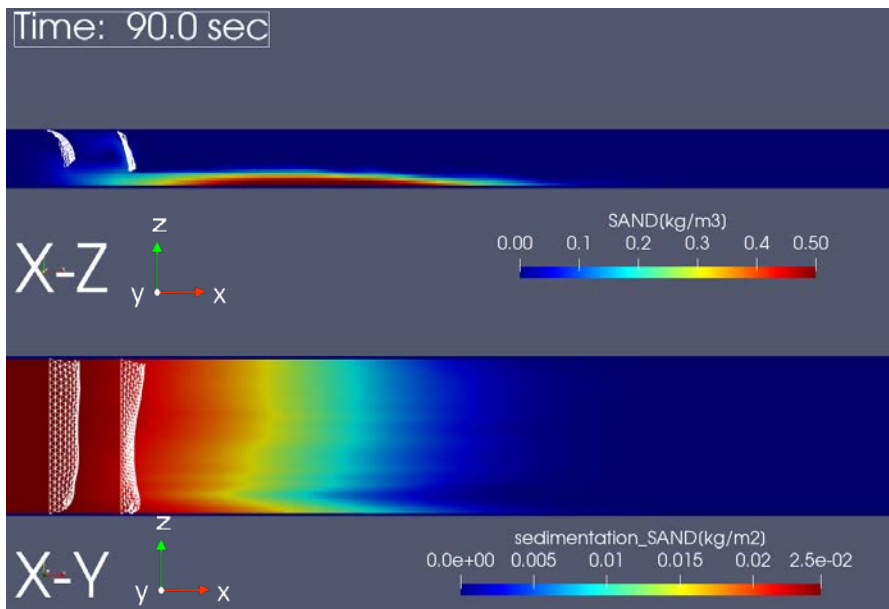
(a) シルトフェンス敷設なし

図 5-21 砂の水中拡散（X-Z 断面）と底面での沈降分布のスナップショット(X-Y 断面) (a)



(b) シルトフェンス敷設 (1重)

(c)

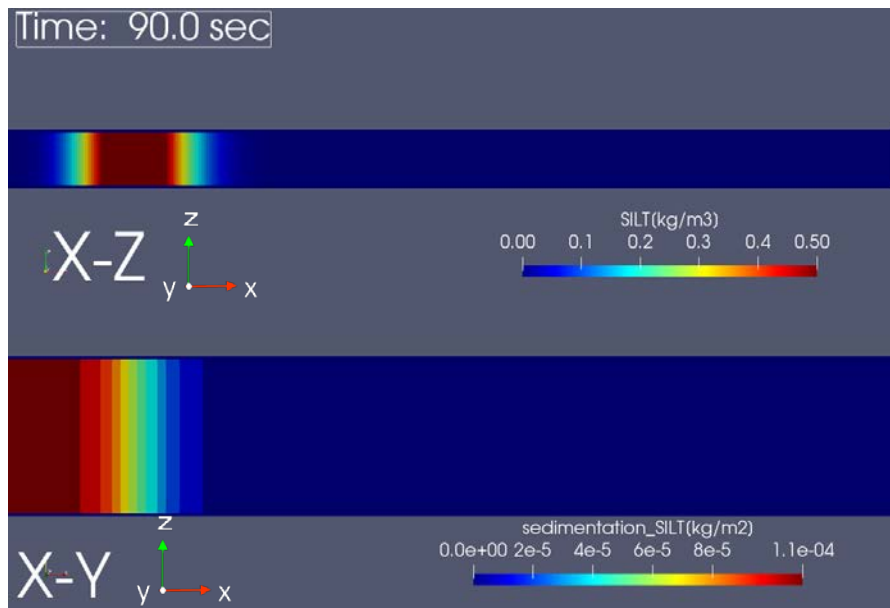


(c) シルトフェンス敷設 (2重)

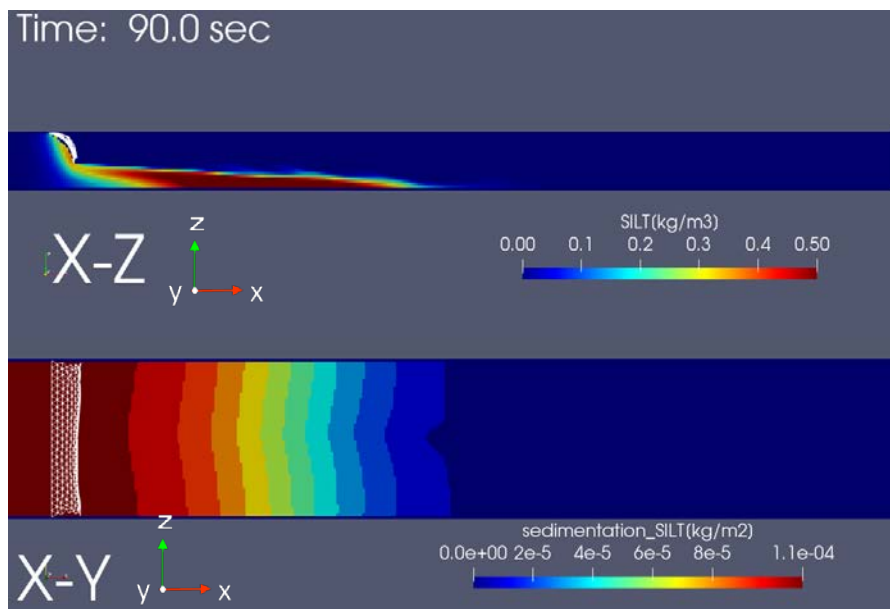
図 5-21 砂の水中拡散 (X-Z 断面) と底面での沈降分布のスナップショット(X-Y 断面)の続き (b)~(c)

5.10 放射性核種懸濁体成分（シルト）の挙動

次に、シルトフェンスの敷設条件が与える放射性核種懸濁体成分（シルト）への沈降作用への影響を調べる。砂と同様に、水中でのシルトの分布[kg/m^3]を鉛直断面（X-Z 断面）で示し、流入開始時刻からその時間までに底面に沈降したシルトの分布[kg/m^2]を水平断面（X-Y 断面）で示した。砂と比較し、その粒径は小さく、沈降量は少ない(沈降量のカラーバーの量は砂と比べて凡そ 1/100 であることに留意)。砂の場合と同様、2 枚のフェンスを敷設したケースが ((c)参照)、最もシルトの沈降が見られることがわかる。以上、放射性核種を含む水塊（懸濁体成分に吸着した）の大半が通過した際、シルトフェンスは確かに、懸濁体成分の沈降を促していることが分かる。

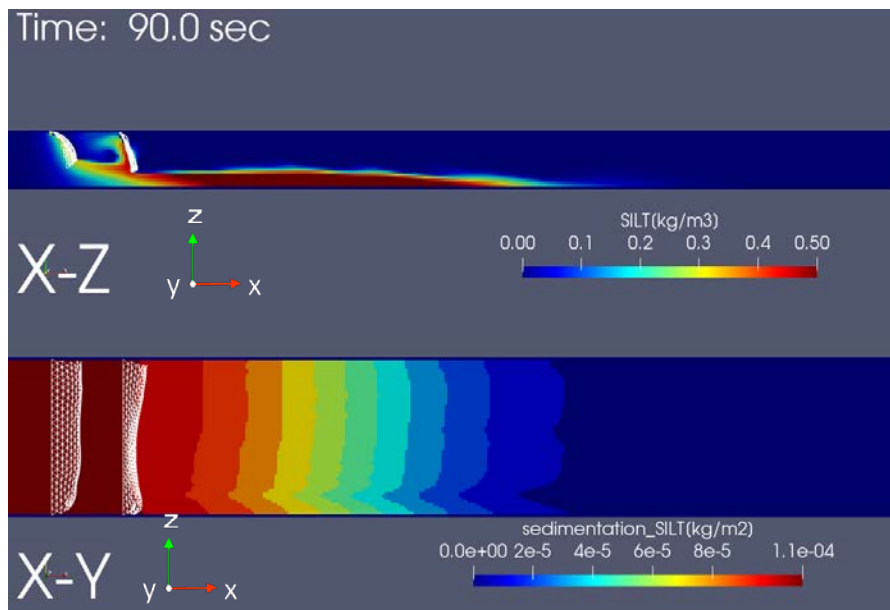


(a) シルトフェンス敷設なし



(b) シルトフェンス敷設（1重）

図 5-22 シルトの水中拡散（X-Z 断面）と底面での沈降分布のスナップショット(X-Y 断面) (a)~(b)



(c) シルトフェンス敷設 (2重)

図 5-22 シルトの水中拡散 (X-Z 断面) と底面での沈降分布のスナップショット(X-Y 断面)の続き (c)

5.11 放射性核種の外部流出の評価

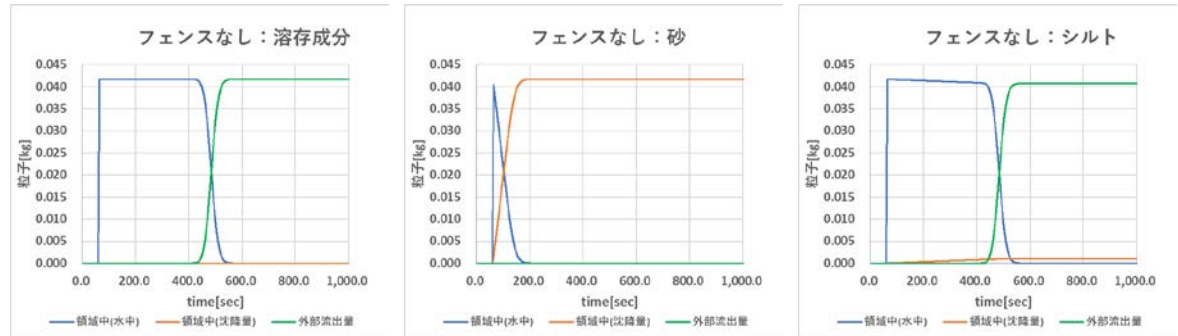
次に、上流から流し込む放射性核種を含む水塊に対し、放射性物質の外部流出の定量評価を行う。ここでは、各設定流量 ($Q=0.5, 1.0, 2.5, 5.0, 7.5, 10.0[\text{m}^3/\text{min}]$: 実験が行われるのは、その内、 $2.5, 5.0, 7.5, 10.0$ のみであることに注意) を付与する実験条件である。但し、実験において実施できない低流速条件での結果も示す。また、フェンス敷設条件 (フェンス敷設なし, フェンス1枚敷設, フェンス2枚敷設) と側壁及び底面の境界条件 (滑りあり, 滑りなし) を変更したときの結果の比較も行った。

まず、設定流量 Q を $0.5, 1.0, 2.5, 7.5[\text{m}^3/\text{min}]$ とし、即ち実験にて実施される4ケースの結果を示す。放射性物質は、溶存成分、懸濁体成分 (砂とシルトに不可逆的に吸着) の2つに分かれ、懸濁体成分は粒径及び粒密度に依存した沈降効果を有するとしたため、上流端から流入した放射性核種を含む水塊 (懸濁体を含む) は移流・拡散し、各々、計算領域の水中に分布する、底面部に沈降堆積する、計算領域の外部に流出という3種類の状態に分類できることが分かる (図5-23参照)。シミュレーション結果を概観すると、どの設定流量の場合についても、境界条件 (滑りあり, 滑りなし) による放射性核種の拡散への影響があることが分かるが、最終的な状態については両者ともあまり違いがない。これは単純に滑り無しの場合、滑り有りとは比べて放射性核種を含む水塊の移流が抑制されることを意味しているが、十分な時間が経った場合の変化は殆ど見られない。フェンス敷設による影響については、フェンスの敷設枚数を増やすほどに放射性核種の外部流出を遅らせる結果となった。この傾向は設定流量が遅いケース ($Q=0.5[\text{m}^3/\text{min}]$ のケース) ほど顕著であるが、これは流量が少ないほどフェンスの「ふかれ」が小さくなり、放射性核種溶存成分の滞留及び沈降効果が向上するからだと考えられる。

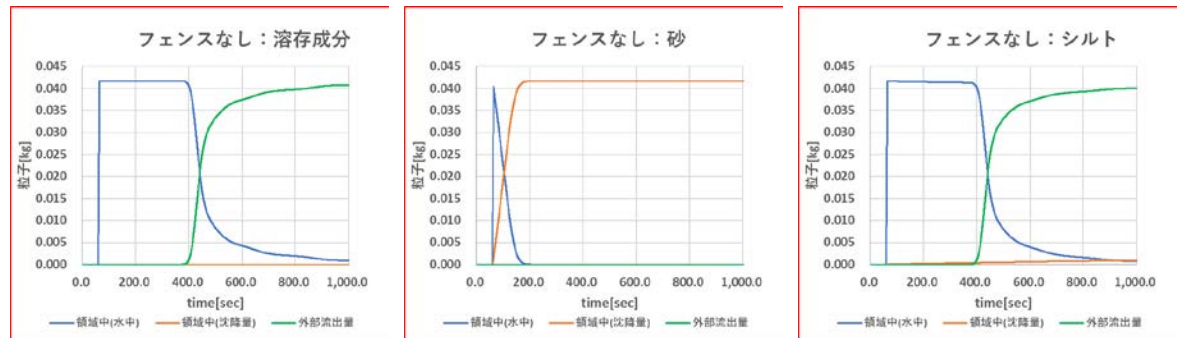
流量 $Q=0.5[m^3/min]$ のケース

放射性核種の滞留及び沈降効果： $Q=0.5m^3/min$ ($U=0.0189m/s$) シルトフェンス敷設なし

滑りあり



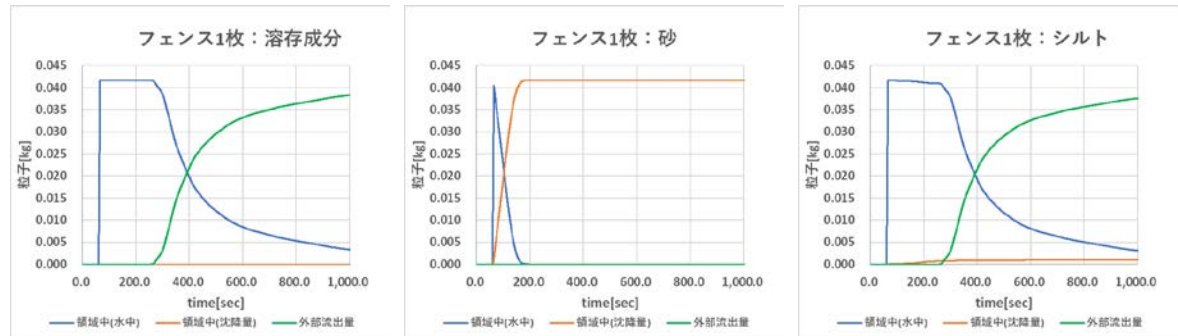
滑りなし



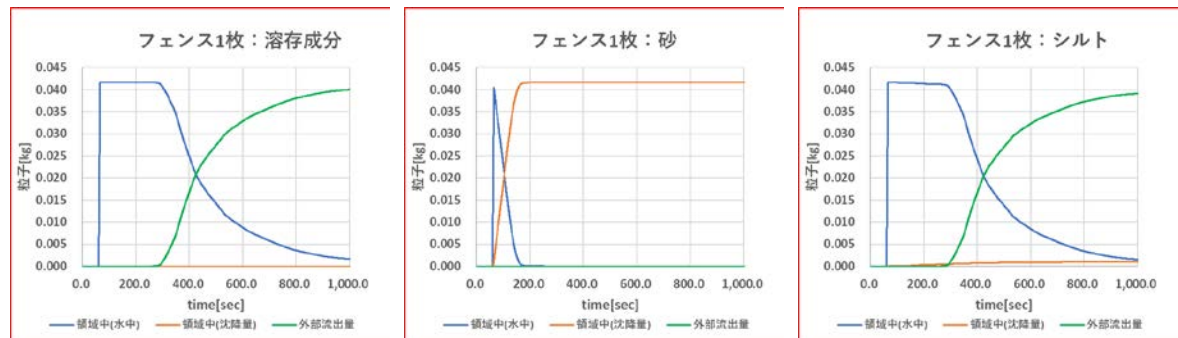
(a) シルトフェンス敷設なし

放射性核種の滞留及び沈降効果： $Q=0.5m^3/min$ ($U=0.0189m/s$) シルトフェンス敷設 (1重)

滑りあり



滑りなし

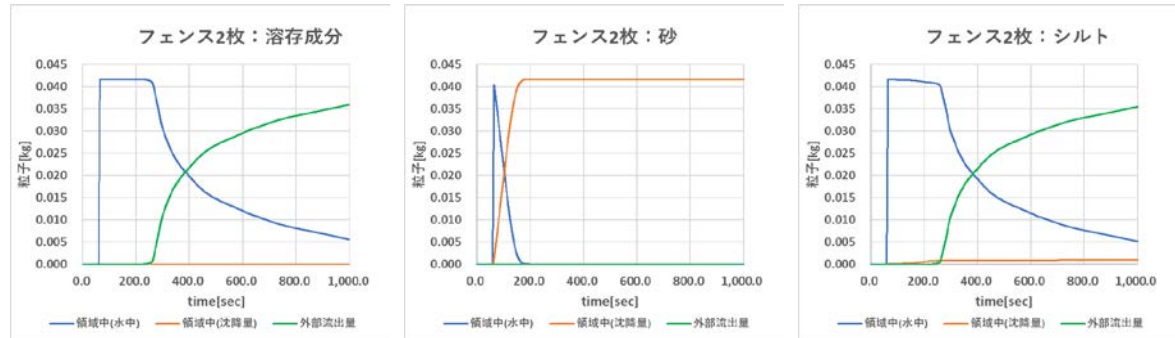


(b) シルトフェンス敷設 (1重)

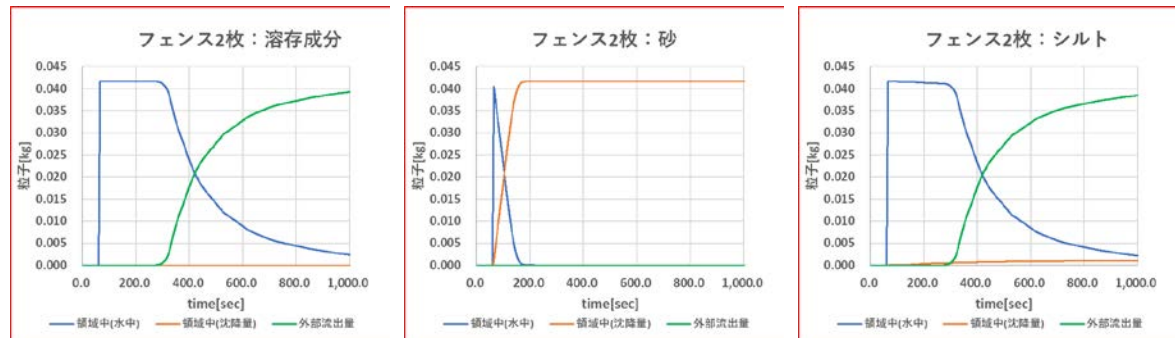
図 5-23 溶存成分の分布量 (水中、底面、流出) の時間発展 (a)~(b)

放射性核種の滞留及び沈降効果: $Q=0.5\text{m}^3/\text{min}$ ($U=0.0189\text{m/s}$) シルトフェンス敷設 (2重)

滑りあり



滑りなし



(c) シルトフェンス敷設 (2重)

図 5-23 溶存成分の分布量 (水中、底面、流出) の時間発展の続き (c)

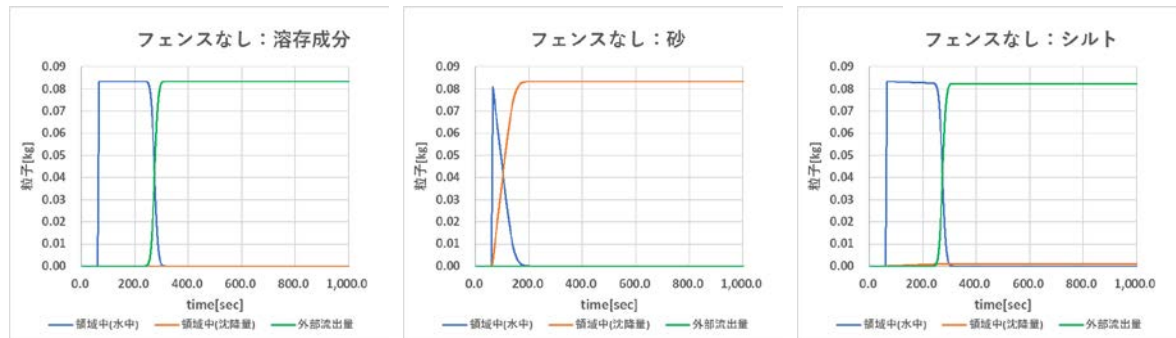
図 5-23 の(a)(b)(c)を比較することで、溶存成分の流出量はシルトフェンスを敷設すると明らかに遅延する様子が分かる。明らかに計算領域外への流出量の時間変化は、シルトフェンスを敷設したケースで緩慢となっていることで分かる。また、シルトはこのケースでは、殆ど溶存成分と同じ振る舞いをしてることが分かる (つまり、この時間スケールでは殆ど沈降しない)。即ち溶存成分と挙動はほぼ一致する (僅かな量は沈降することに注意)。その一方、砂は直ぐに全量が領域内に沈降することが分かる (流出量がほぼ常にゼロである)。

図 5-24, 図 5-25, 図 5-26 は、各々、 $Q=1.0\text{m}^3/\text{min}$ ($U=0.03788\text{m/s}$)、 $Q=2.5\text{m}^3/\text{min}$ ($U=0.09470\text{m/s}$)、 $Q=7.5\text{m}^3/\text{min}$ ($U=0.2841\text{m/s}$)の条件で得られた結果である。流速が大きくなるにつれ、シルトフェンス敷設の効果が見られなくなることが分かる。

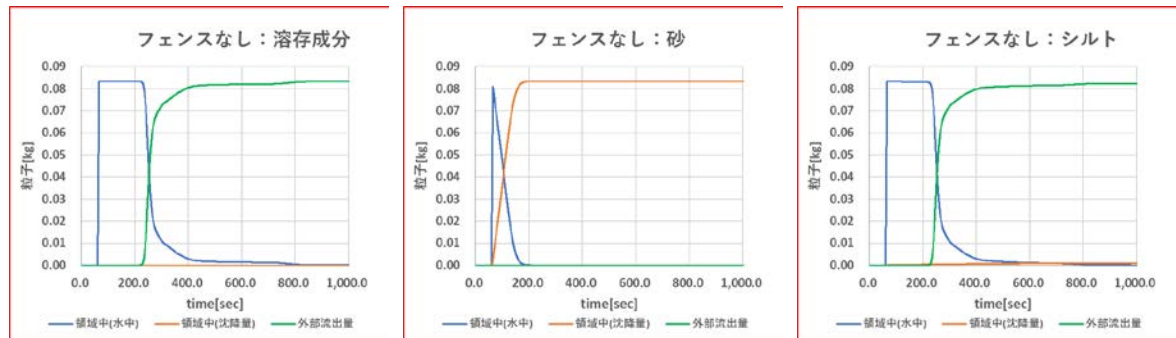
流量 $Q=1.0[m^3/min]$ のケース

放射性核種の滞留及び沈降効果： $Q=1.0m^3/min$ ($U=0.03788m/s$)シルトフェンス敷設なし

滑りあり



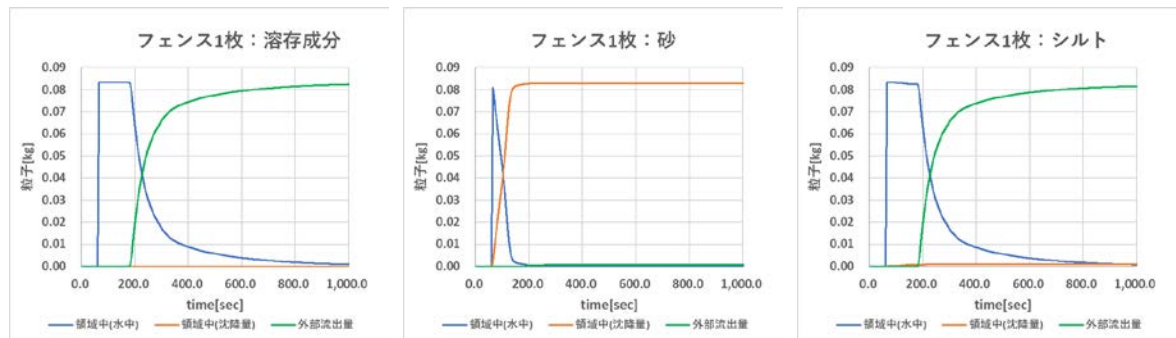
滑りなし



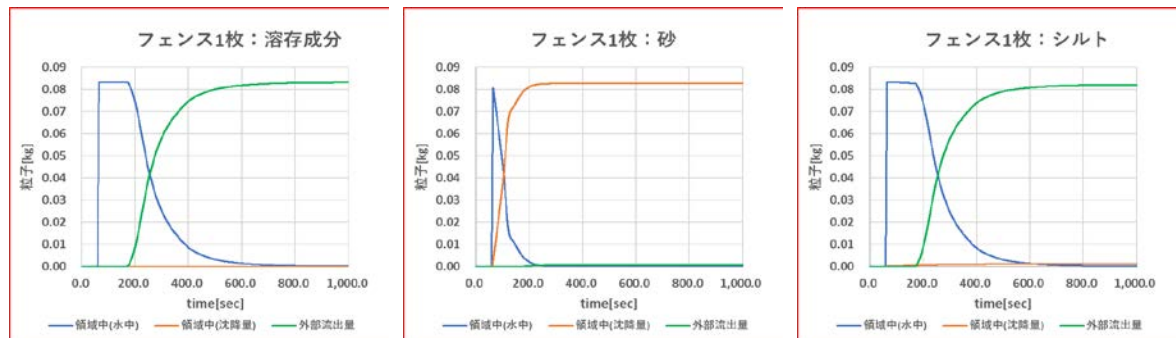
(a) シルトフェンス敷設なし

放射性核種の滞留及び沈降効果： $Q=1.0m^3/min$ ($U=0.03788m/s$)シルトフェンス敷設 (1重)

滑りあり



滑りなし

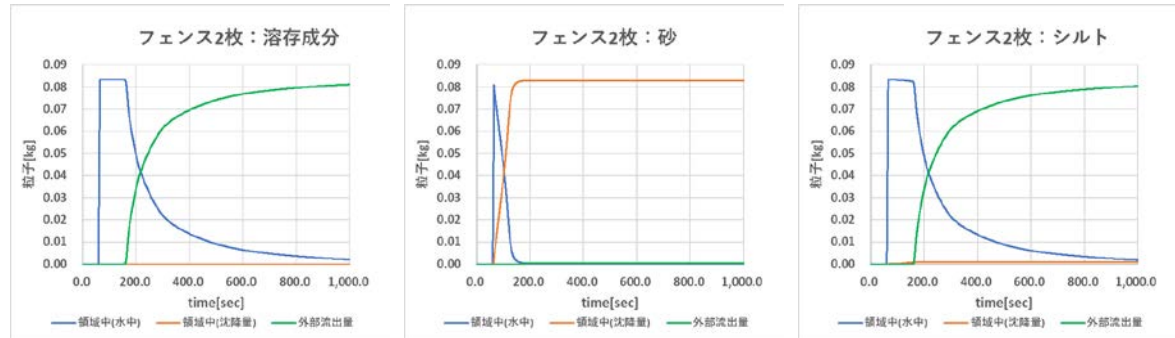


(b) シルトフェンス敷設 (1重)

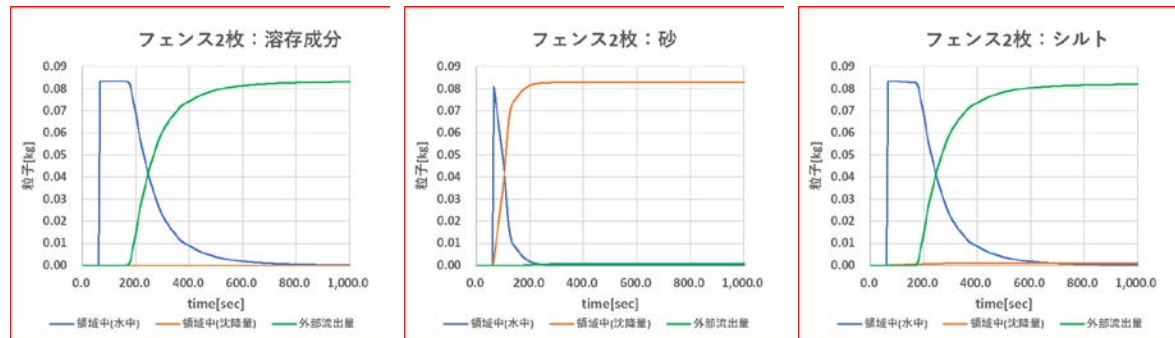
図 5-24 溶存成分の分布量 (水中、底面、流出) の時間発展 (a)~(b)

放射性核種の滞留及び沈降効果： $Q=1.0\text{m}^3/\text{min}$ ($U=0.03788\text{m/s}$) シルトフェンス敷設（2重）

滑りあり



滑りなし



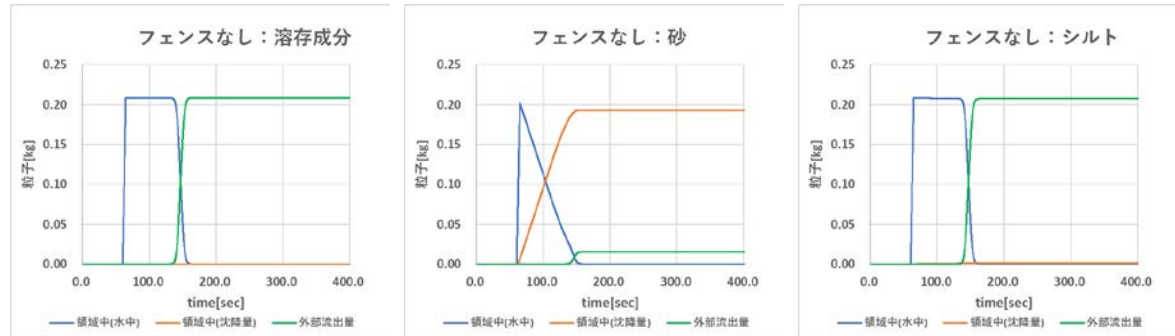
(c) シルトフェンス敷設（2重）

図 5-24 溶存成分の分布量（水中、底面、流出）の時間発展の続き (c)

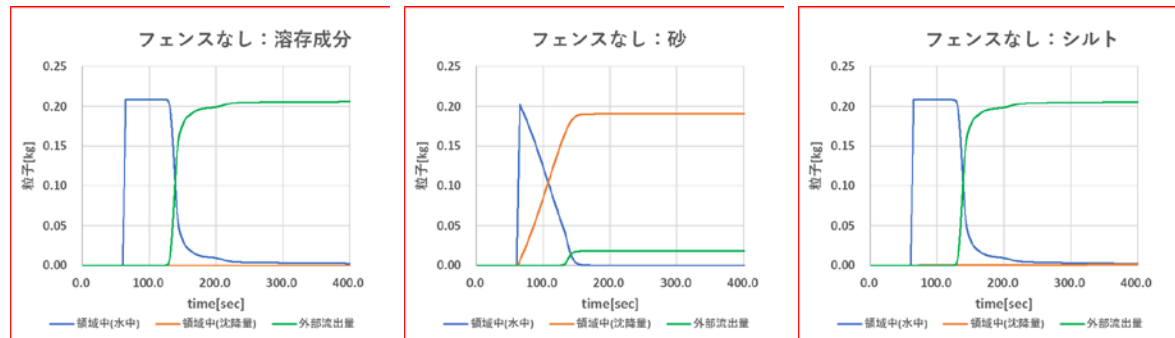
流量 $Q=2.5[m^3/min]$ のケース

放射性核種の滞留及び沈降効果： $Q=2.5m^3/min$ ($U=0.09470m/s$)シルトフェンス敷設なし

滑りあり



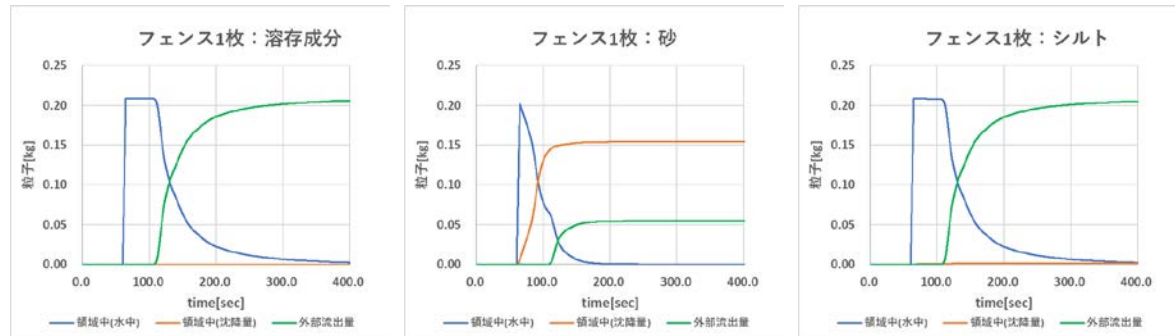
滑りなし



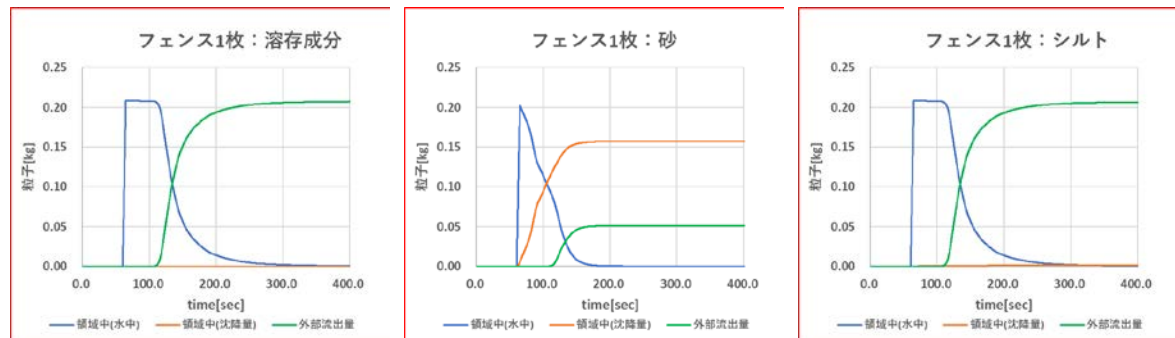
(a) シルトフェンス敷設なし

放射性核種の滞留及び沈降効果： $Q=2.5m^3/min$ ($U=0.09470m/s$)シルトフェンス敷設 (1重)

滑りあり



滑りなし

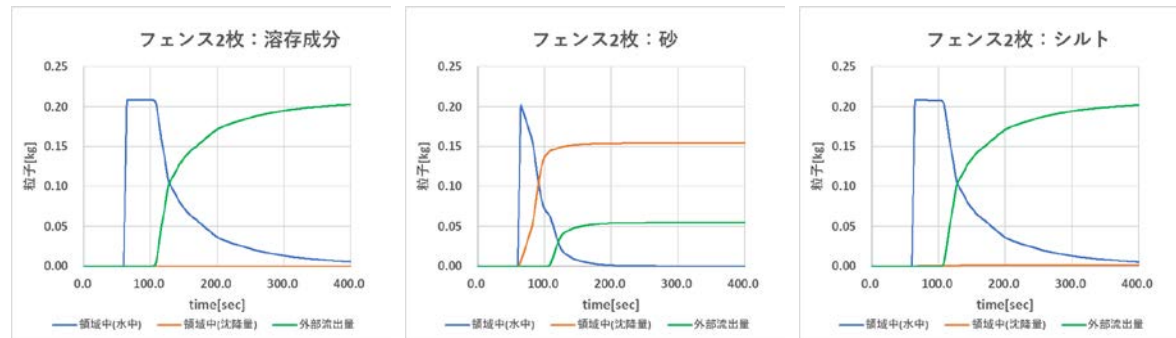


(b) シルトフェンス敷設 (1重)

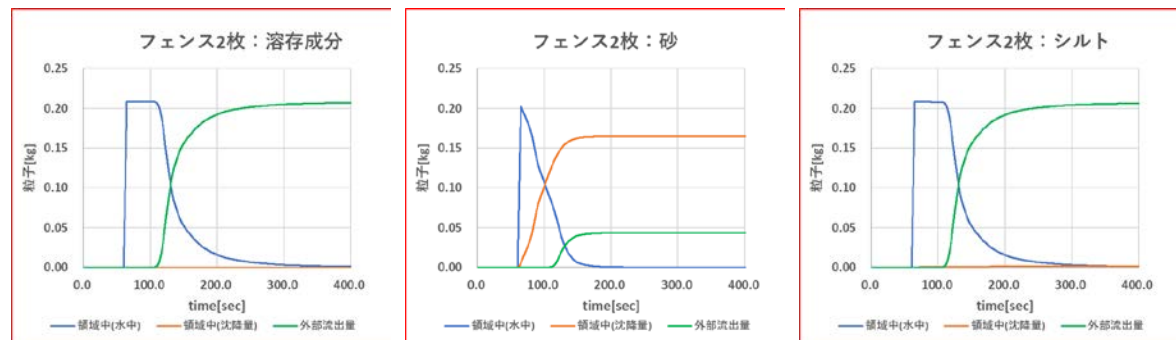
図 5-25 溶存成分の分布量 (水中、底面、流出) の時間発展 (a)~(b)

放射性核種の滞留及び沈降効果： $Q=2.5\text{m}^3/\text{min}$ ($U=0.09470\text{m/s}$) シルトフェンス敷設（2重）

滑りあり



滑りなし



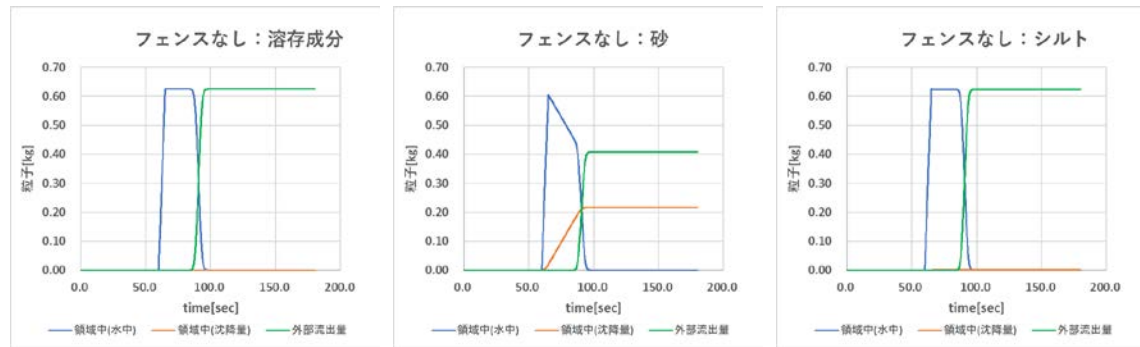
(c) シルトフェンス敷設（2重）

図 5-25 溶存成分の分布量（水中、底面、流出）の時間発展の続き (c)

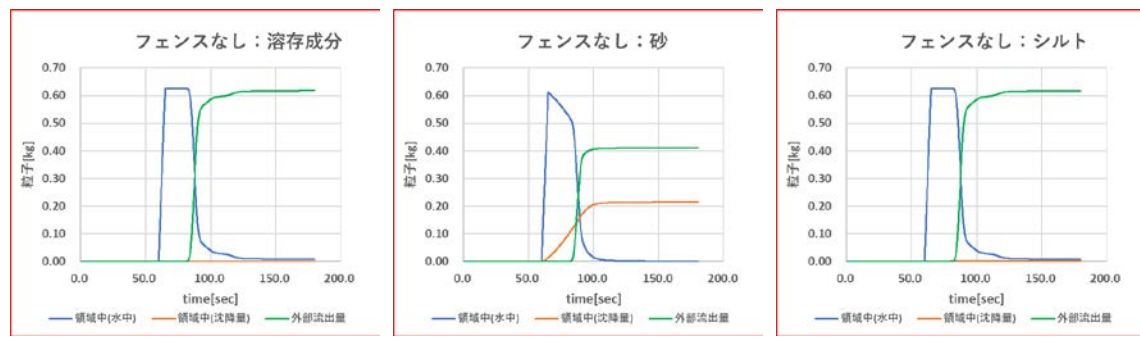
流量 $Q=7.5[m^3/min]$ のケース

放射性核種の滞留及び沈降効果： $Q=7.5m^3/min$ ($U=0.2841 m/s$) シルトフェンス敷設なし

滑りあり



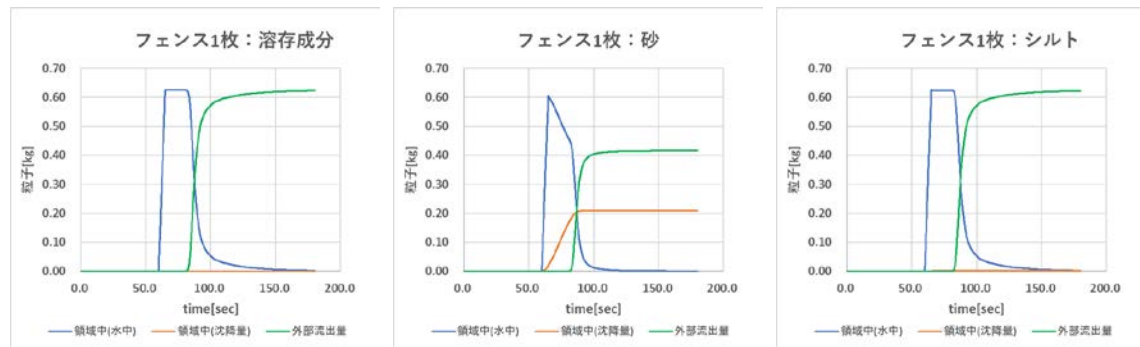
滑りなし



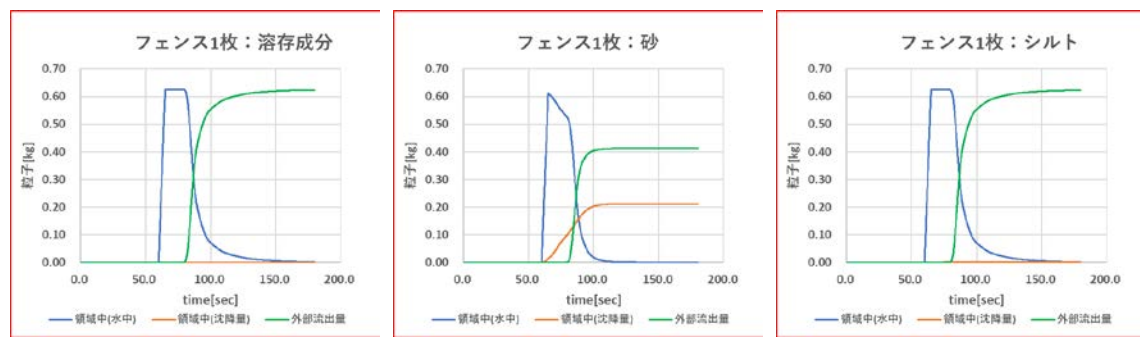
(a) シルトフェンス敷設なし

放射性核種の滞留及び沈降効果： $Q=7.5m^3/min$ ($U=0.2841 m/s$) シルトフェンス敷設 (1重)

滑りあり



滑りなし

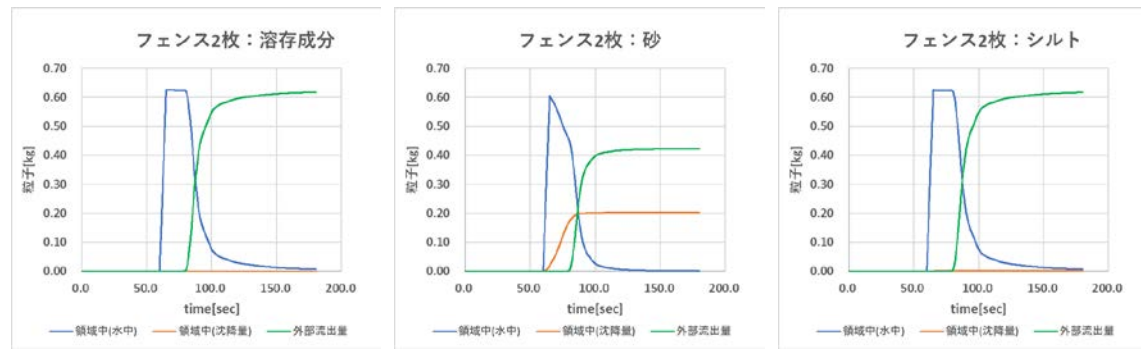


(b) シルトフェンス敷設 (1重)

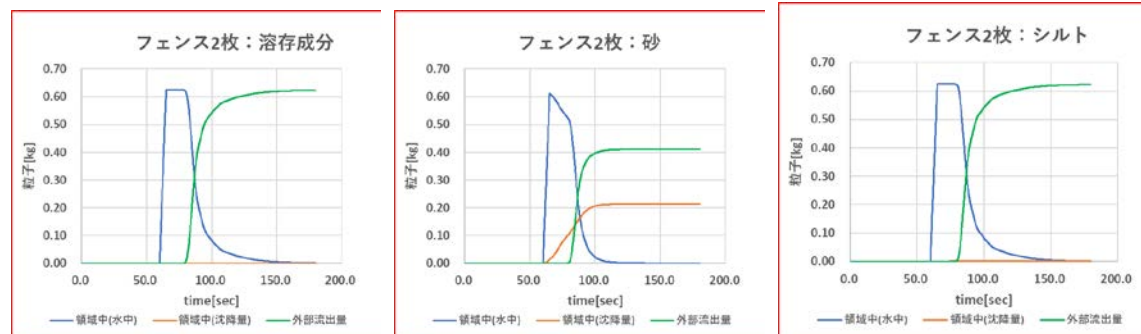
図 5-26 溶存成分の分布量 (水中、底面、流出) の時間発展 (a)~(b)

放射性核種の滞留及び沈降効果： $Q=7.5\text{m}^3/\text{min}$ ($U=0.2841\text{ m/s}$) シルトフェンス敷設 (2重)

滑りあり



滑りなし



(c) シルトフェンス敷設 (2重)

図 5-26 溶存成分の分布量 (水中、底面、流出) の時間発展の続き (c)

以上の結果をまとめると、シルトフェンス敷設の効果敷設無しの場合と併せて比較評価可能な図を図 5-27 に記す。図 5-27(a)は、シルトフェンス敷設なしと敷設あり (1 枚) の比較結果であり、図 5-27(b)はシルトフェンス敷設枚数の比較結果である。

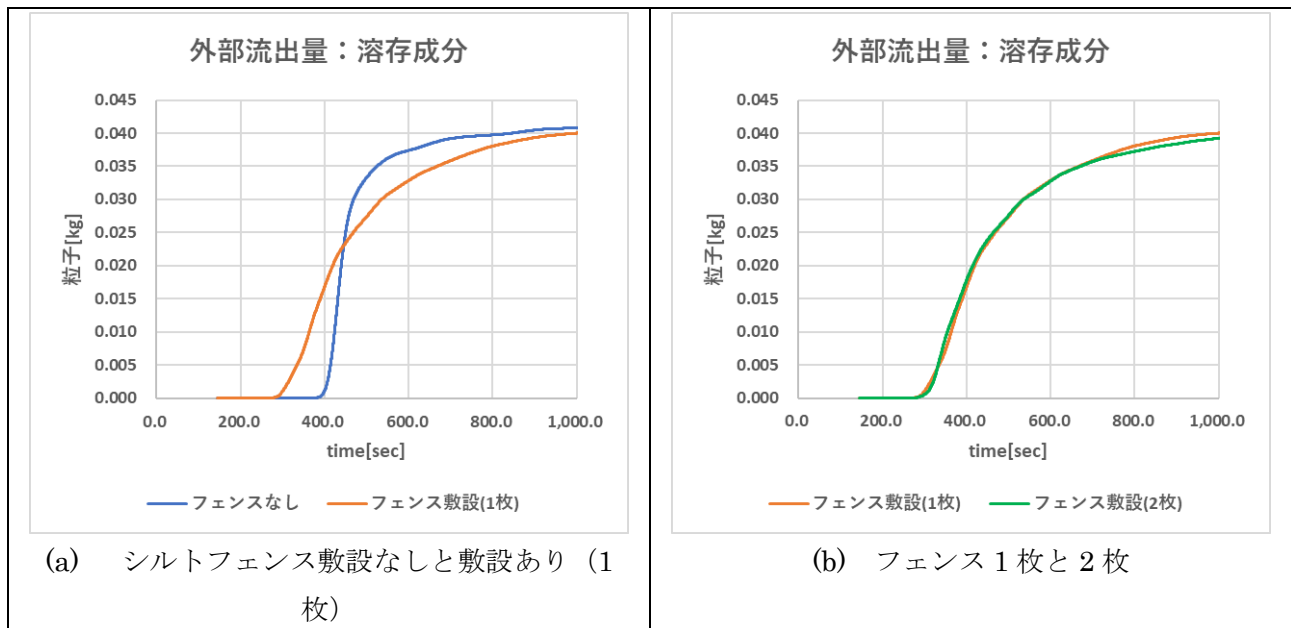


図 5-27 溶存成分の流出遅延効果 $Q=0.5\text{m}^3/\text{min}$ ($U=0.0189\text{m/s}$)

以上から、放射性核種の溶存成分については、低速域において、シルトフェンスによる流出の遅延効果が確認できた。遅延効果は、流速が遅い程、顕著になるが、流速が速い場合は殆ど失われてしまうことが分かる。これは、流速が十分に大きく、シルトフェンスが顕著に「ふかれ」と、流体に対する抵抗体としてシルトフェンスが殆ど機能しなくなるからだと推測される。一方、懸濁体成分については、砂のような粒径が大きく沈降が早い場合、シルトフェンスは沈降を促進させることが分かった。これについても流速が遅い程、顕著であり、流速が大きいケースでは、その効果の大半が失われてしまうことが分かった。一方、シルトについては、この数値シミュレーションにて用いた粒径では最も小さい領域に属するため、本計算領域の範囲では、殆ど溶存成分と同様の振る舞いをする事が分かった。

5.12 放射性核種の沈降の評価

次に、上流から流し込む放射性核種を含む水塊に対し、放射性物質の沈降の定量評価を行う。ここでは、各設定流量 ($Q=0.1, 0.5, 1.0, 2.5, 5.0, 7.5, 10.0$ [m^3/min]: 尚、水槽実験が行われるのは、その内、 $2.5, 5.0, 7.5, 10.0$ のみであることを注意) を付与する条件である。但し、実験において実施できない低流速条件での結果も示す。また、フェンス敷設条件 (フェンス敷設なし, フェンス 1 枚敷設, フェンス 2 枚敷設) を変更したときの結果の比較も行った。側壁及び底面の境界条件は滑りありとする。

尚、図 5-28 はその計算領域と放射性核種の流入端と流出端について明示した図であり、境界条件の制御方法と共に放射性核種量の測定方法についても明記した。

フェンス敷設による懸濁体成分の沈降量に対する影響を評価するために、流出端から外部に流出する懸濁体成分の総量をモニターし、その量を一様に流入断面に再度付与する。従って、懸濁体成分は粒径及び粒密度に依存した沈降効果を有するとしたため、各々、計算領域の水中に分布するか、底面部に沈降堆積するかの 2 種類の状態のいずれかを取る。

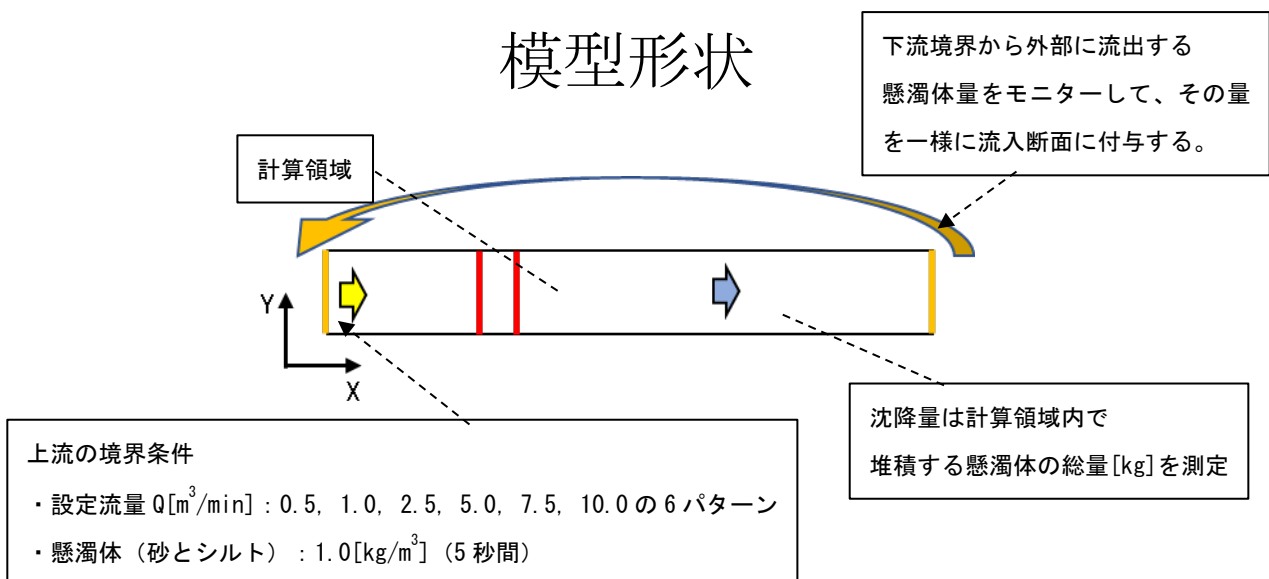


図 5-28 シミュレーション領域及び境界条件と放射性物質核種の測定方法

放射性物質は、溶存成分、懸濁体成分（砂とシルトに不可逆的に吸着）の2つに分かれるが、今回は沈降のない溶存成分は対象とせず、懸濁体成分だけを対象とする。また、シルトについては5種類の粒径を想定し（表 5-7 参照）、沈降結果の粒径依存性を調査した。

表 5-7 放射性物質が吸着する懸濁体成分の諸元

種類	密度 ρ [kg/m ³]	粒径 d [m]	沈降速度 S_v [m/s]
砂	2650.0	74.0E-6	-4.92E-03
シルト 60	2650.0	60.0E-6	-3.23E-03
シルト 40	2650.0	40.0E-6	-1.44E-03
シルト 20	2650.0	20.0E-6	-3.59E-04
シルト 10	2650.0	10.0E-6	-8.98E-05
シルト 5	2650.0	5.0E-6	-2.25E-05

また、本事業の範囲では、懸濁体成分の砂及びシルトについては、下記のストークスの式に従い沈降効果を付与する一方、一度沈降した懸濁成分の巻き上げの効果は考えないこととした。

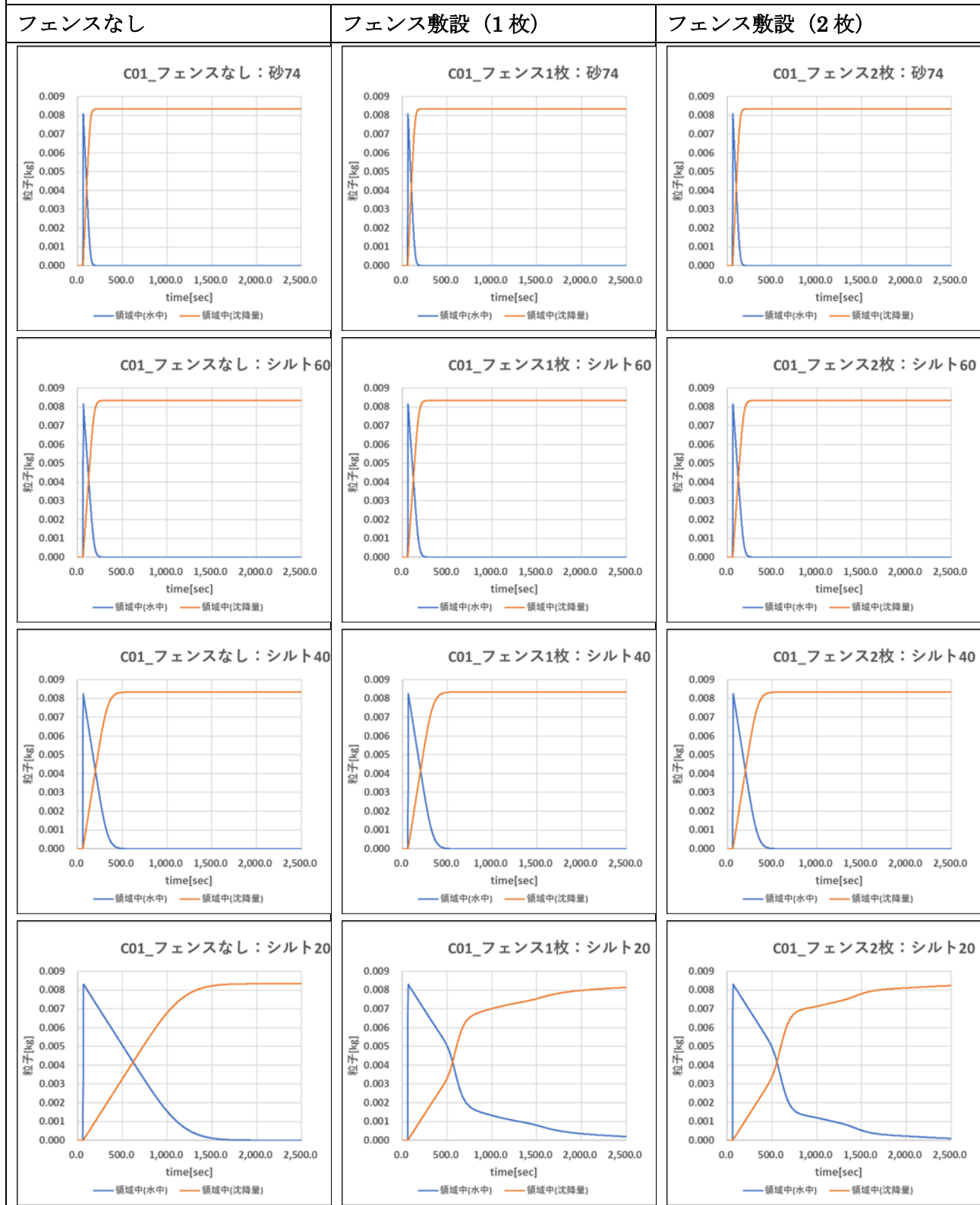
$$S_v = \frac{1}{18} \left(\frac{\rho_s}{\rho_w} - 1 \right) \frac{gd^2}{\nu} \quad (5-4)$$

ただし、 ρ_s と d は粒子密度と粒径である。また、 ρ_w と ν は流体密度と動粘性係数である。流体密度は1000.0[kg/m³]とし、動粘性係数は1.0E-6[m²/s]として計算した。 g は重力加速度である。

まず、設定流量 Q を 0.1, 0.5, 1.0, 2.5, 5.0[m³/min]とした、低流速条件における5ケースの結果を以降のページで示す。どの流量のケースについても、粒径が大きく沈降が速い粒子（砂 74 及びシルト 60）では、シルトフェンスの敷設条件に依らず直ぐに全量が底面に沈降する。一方で、粒径が小さく沈降が遅い粒子（シルト 5～10）では計算時間が短いために、フェンスの敷設条件による沈降への影響が見えづらい結果となった。しかし、シルト 20～40 の中間的な沈降速度を持つ懸濁体成分については、シルトフェンスの敷設条件による沈降への影響が明瞭に表れたシミュレーション結果となり、シルトフェンスの敷設枚数に応じた懸濁体成分の沈降促進効果が確認できた。詳細はまとめて論ずる。

流量 $Q=0.1[m^3/min]$ のケース

放射性核種の沈降効果： $Q=0.1m^3/min$ ($U=0.003788m/s$) 粒径の大きい懸濁体成分

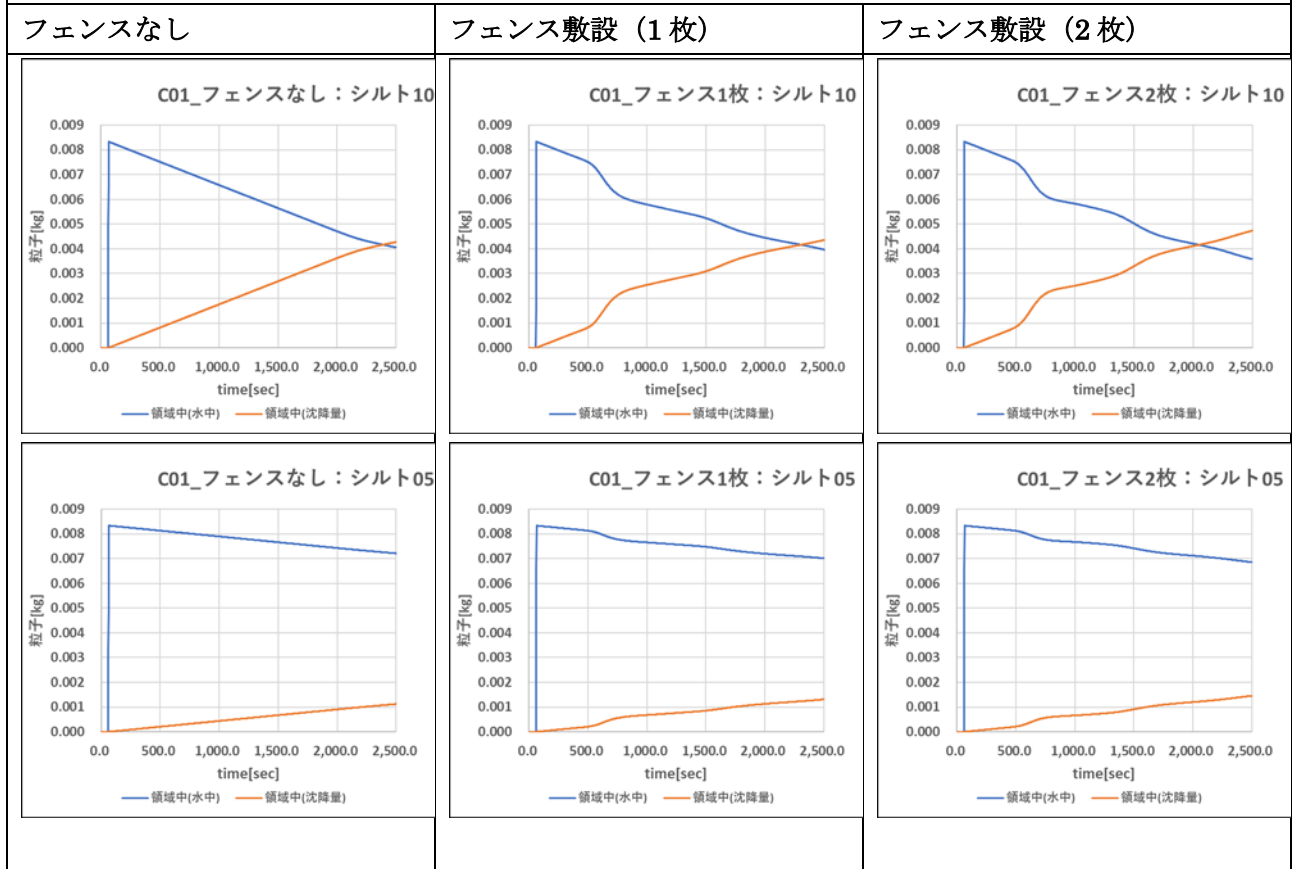


(a)砂 74 およびシルト 60~20 の粒径の大きい成分

図 5-29 懸濁体成分の分布量 (水中、底面) の時間発展 (a)

放射性核種の沈降効果： $Q=0.1\text{m}^3/\text{min}$ ($U=0.003788\text{m/s}$)
分

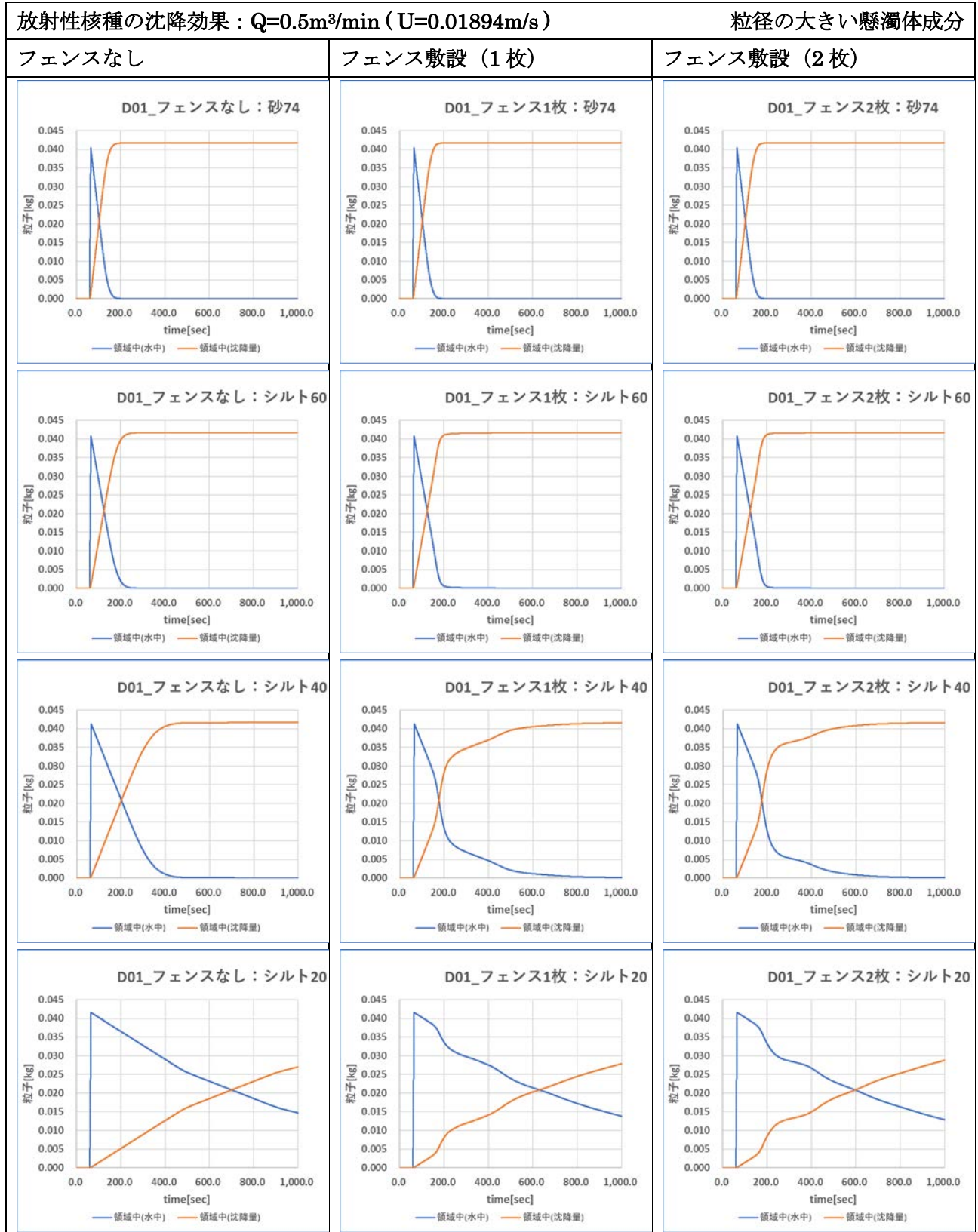
粒径の小さい懸濁体成



(b)シルト 10~5 の粒径の小さい成分

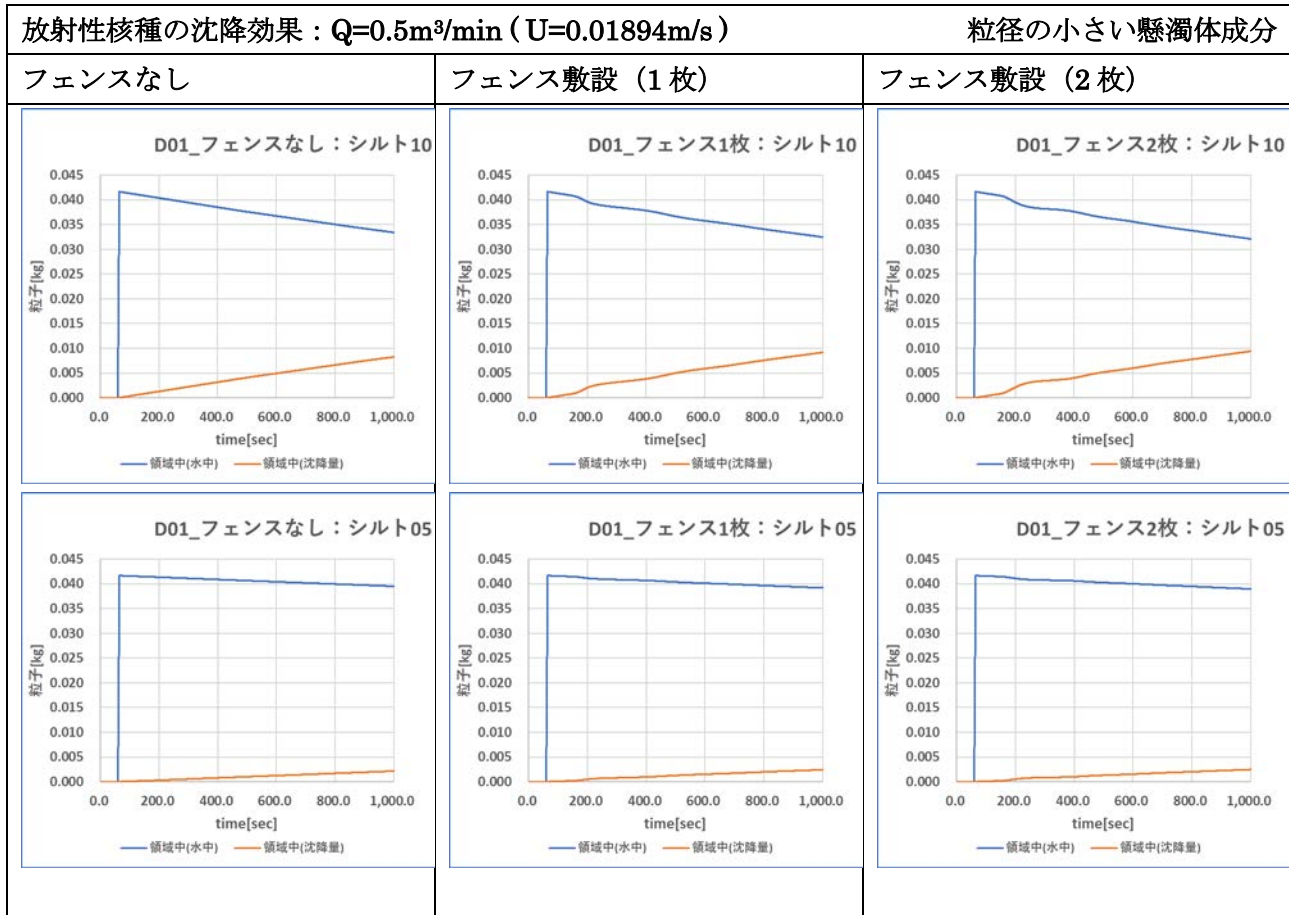
図 5-29 懸濁体成分の分布量 (水中、底面) の時間発展の続き (c)

流量 $Q=0.5[m^3/min]$ のケース



(a) 砂 74 およびシルト 60~20 の粒径の大きい成分

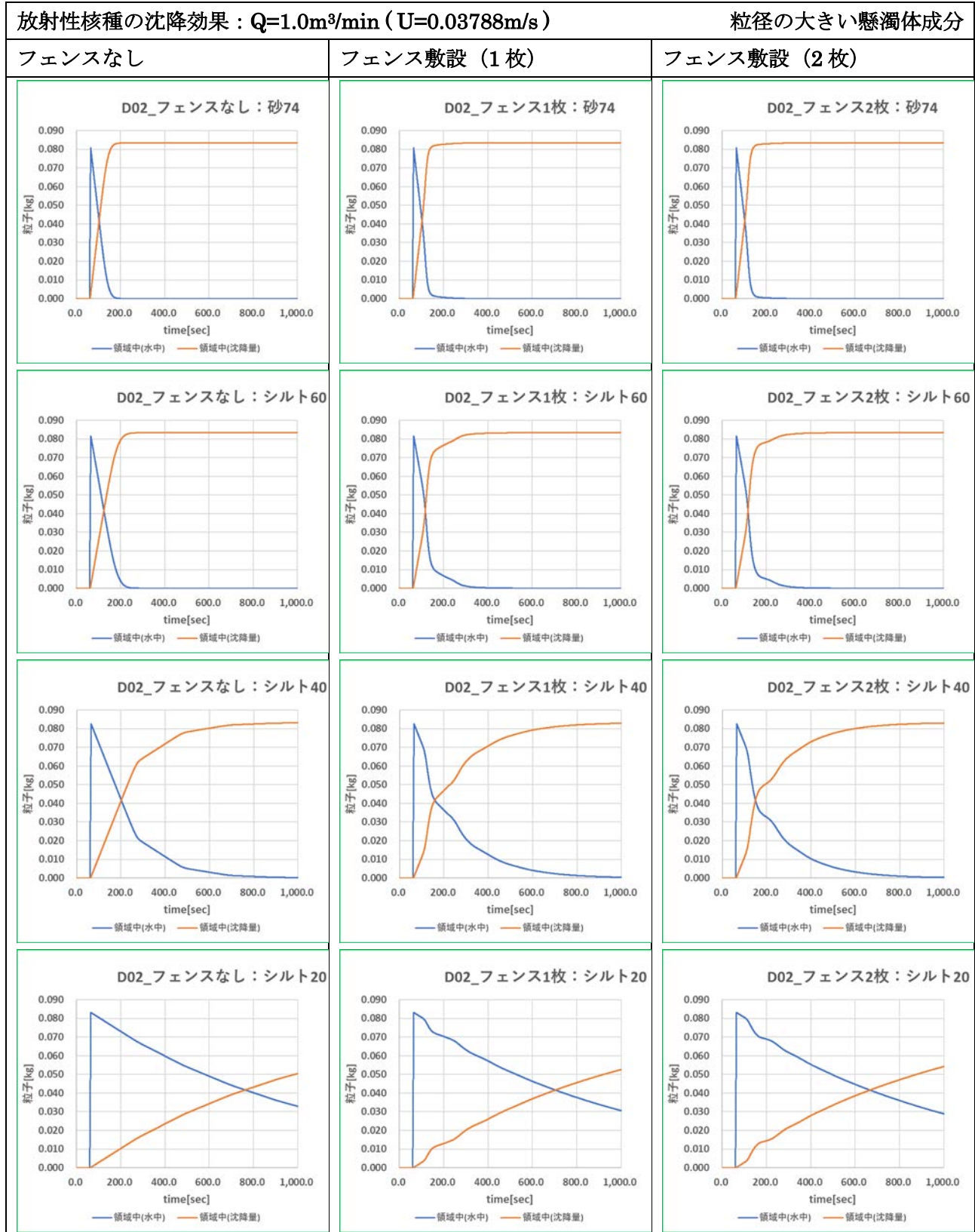
図 5-30 懸濁体成分の分布量 (水中、底面) の時間発展 (a)



(b)シルト 10~5 の粒径の小さい成分

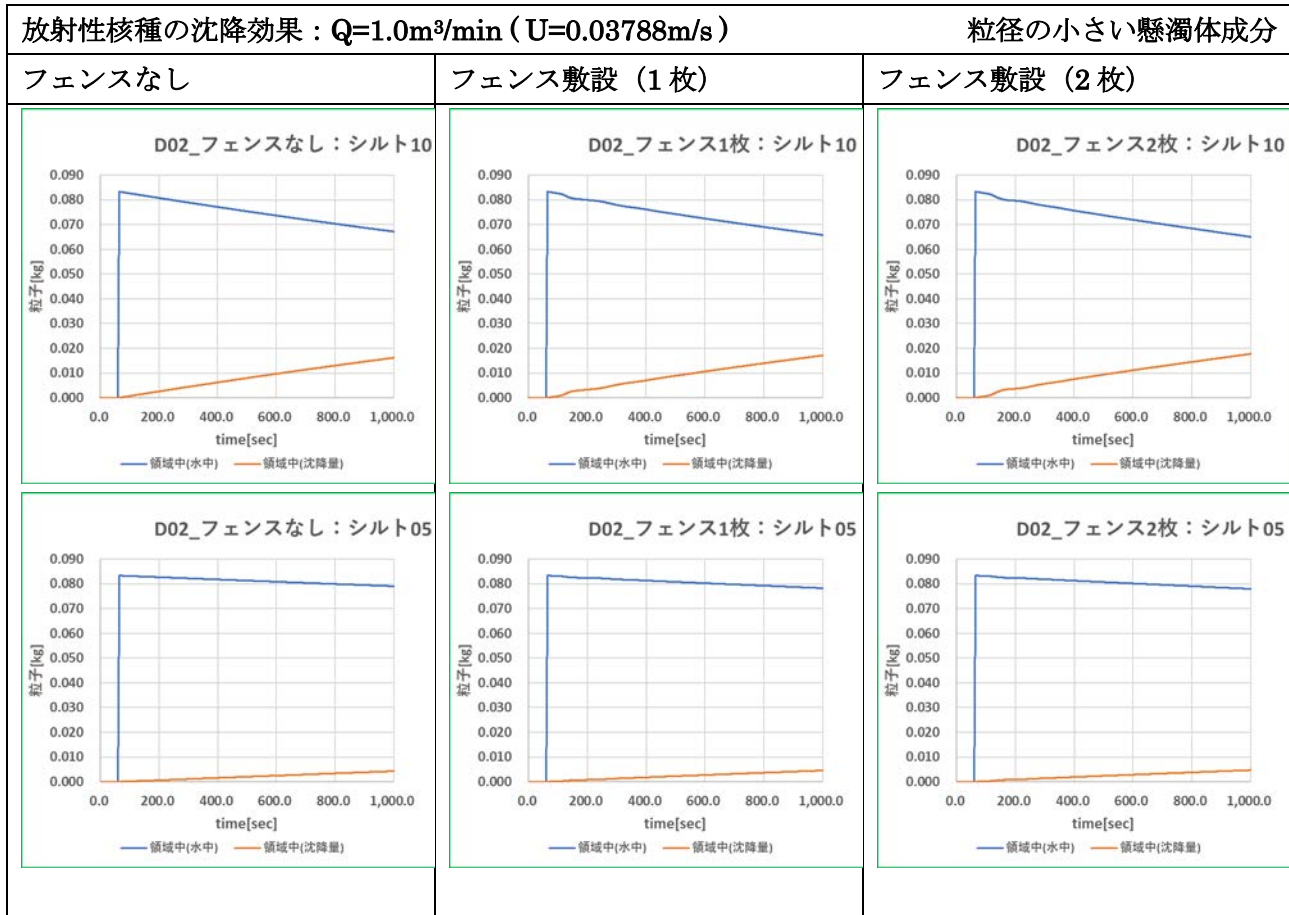
図 5-30 懸濁体成分の分布量 (水中、底面) の時間発展の続き (b)

流量 $Q=1.0[m^3/min]$ のケース



(a)砂 74 およびシルト 60~20 の粒径の大きい成分

図 5-31 懸濁体成分の分布量 (水中、底面) の時間発展 (a)

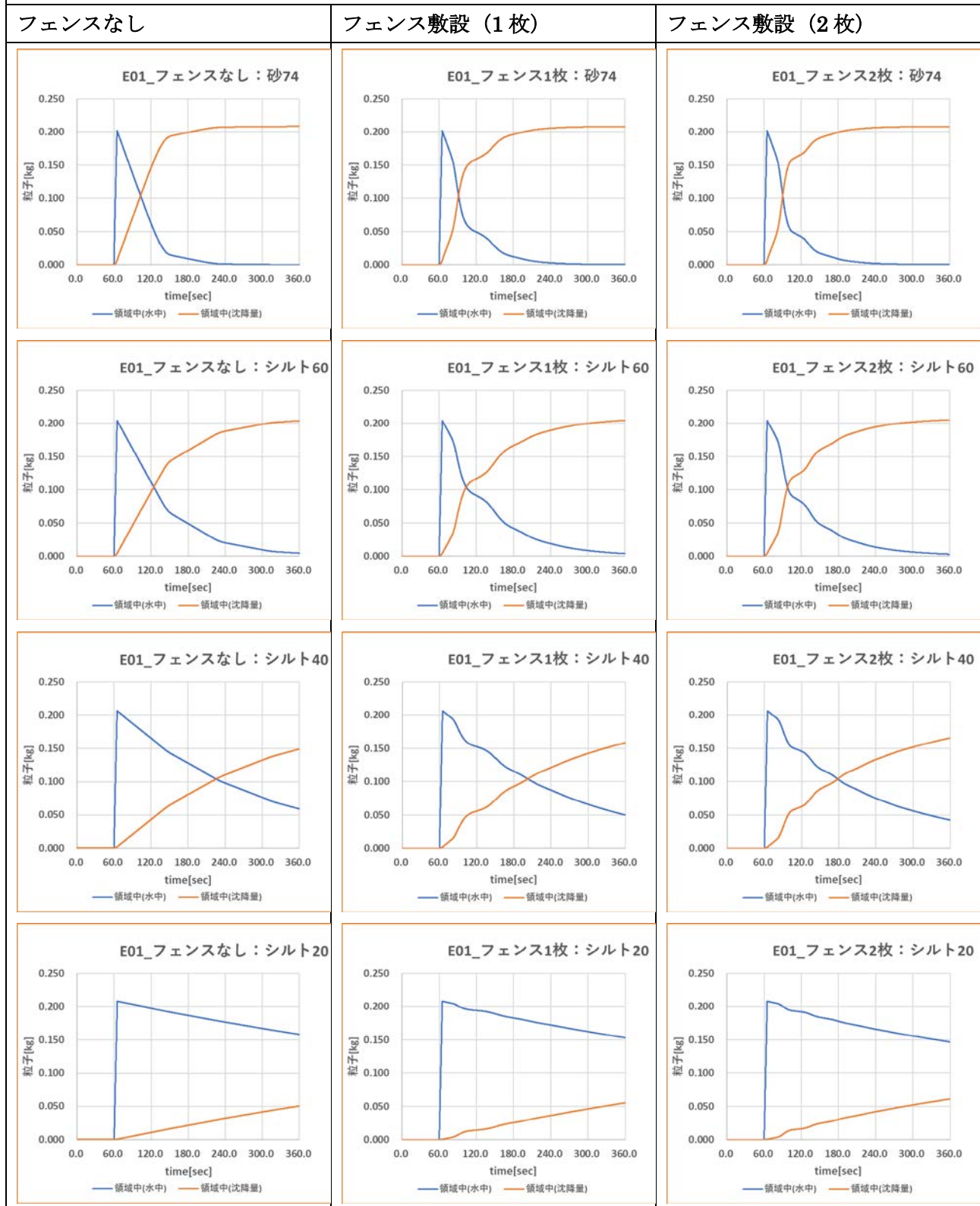


(b)シルト 10~5 の粒径の小さい成分

図 5-31 懸濁体成分の分布量 (水中、底面) の時間発展の続き (b)

流量 $Q=2.5[m^3/min]$ のケース

放射性核種の沈降効果： $Q=2.5m^3/min$ ($U=0.0417m/s$) 粒径の大きい懸濁体成分

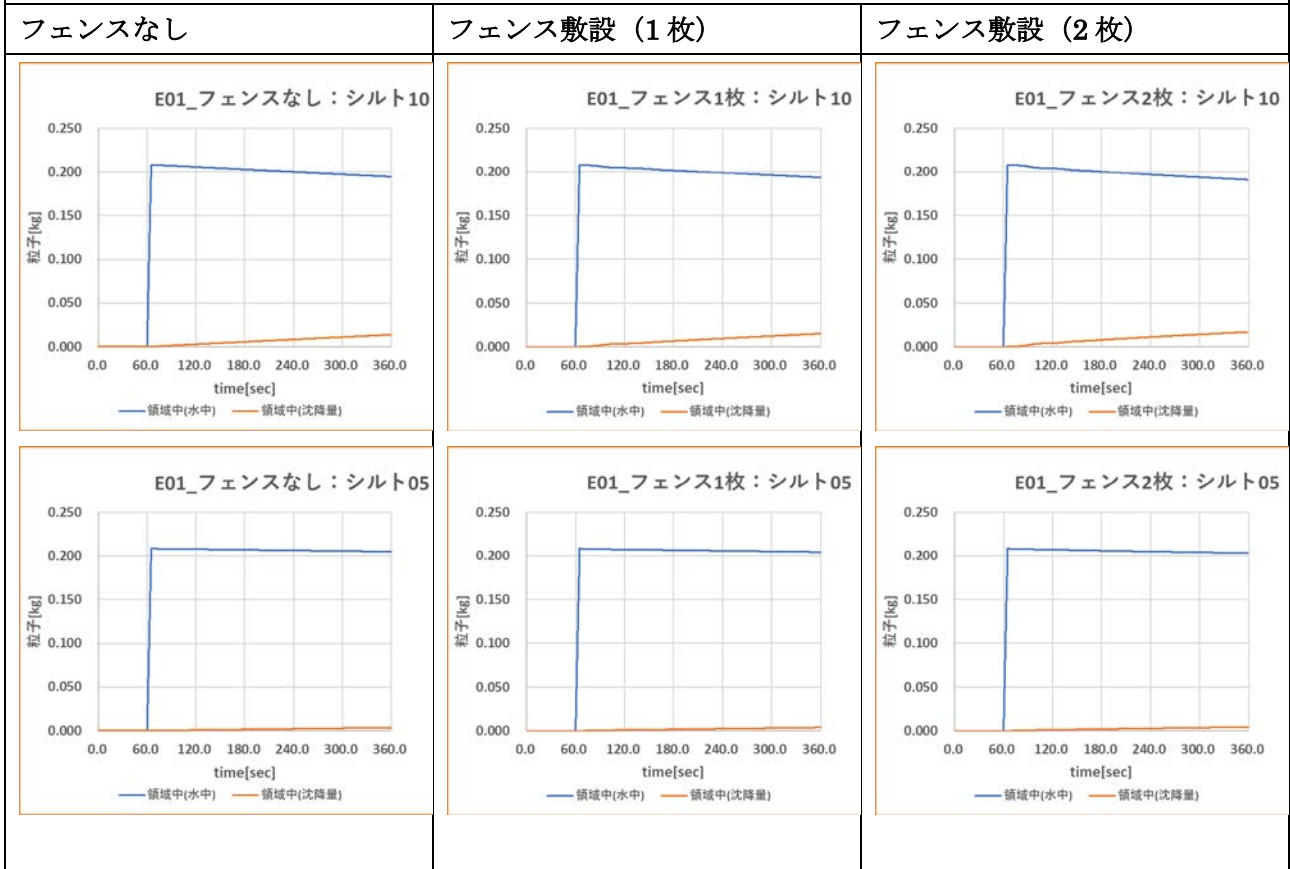


(a)砂 74 およびシルト 60~20 の粒径の大きい成分

図 5-32 懸濁体成分の分布量 (水中、底面) の時間発展の続き (a)

放射性核種の沈降効果： $Q=2.5\text{m}^3/\text{min}$ ($U=0.0417\text{m/s}$)
分

粒径の小さい懸濁体成分

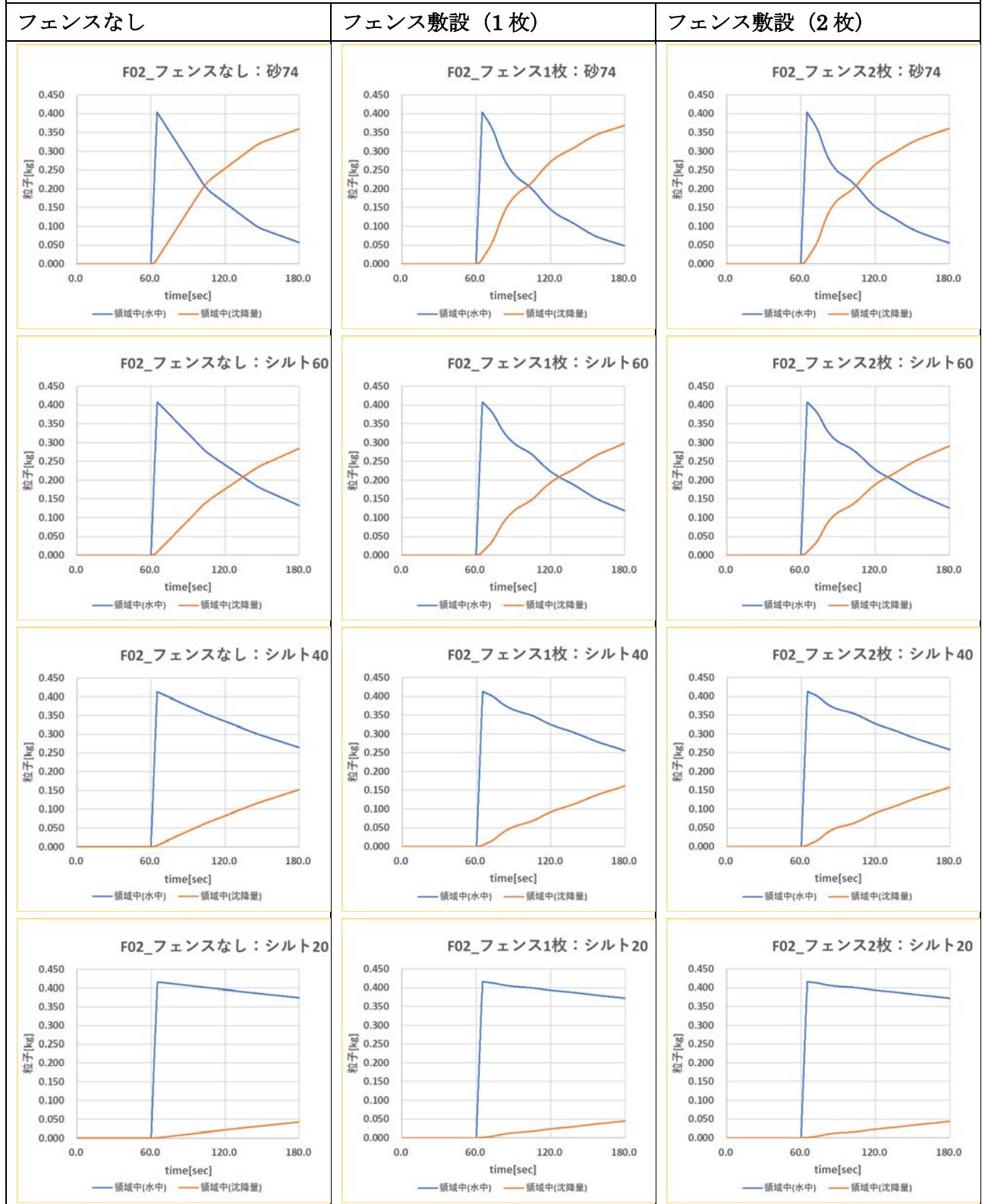


(b)シルト 10～5 の粒径の小さい成分

図 5-32 懸濁体成分の分布量（水中、底面）の時間発展の続き (b)

流量 $Q=5.0[m^3/min]$ のケース

放射性核種の沈降効果： $Q=5.0m^3/min$ ($U=0.0833m/s$) 粒径の大きい懸濁体成分



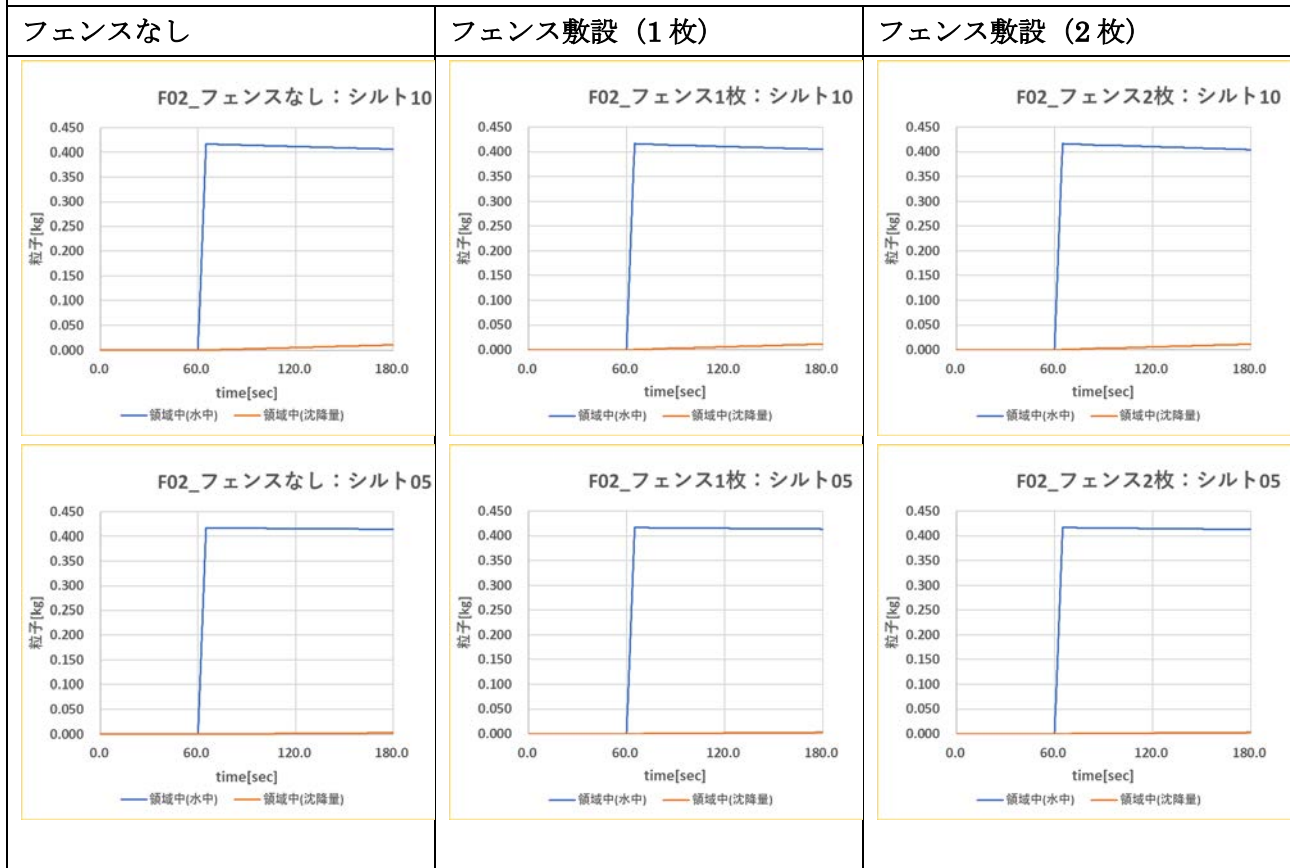
(a)砂 74 およびシルト 60~20 の粒径の大きい成分

図 5-33 懸濁体成分の分布量 (水中、底面) の時間発展 (a)

放射性核種の沈降効果：Q=5.0m³/min（U=0.0833m/s）

粒径の小さい懸濁体成分

分



(b)シルト 10～5 の粒径の小さい成分

図 5-33 懸濁体成分の分布量（水中、底面）の時間発展の続き(b)

以上の結果をまとめると、シルトフェンス敷設の効果を敷設無しのケースと併せて比較評価可能な図を図 5-34 から図 5-38 に記す。それぞれの図はシルトフェンスの敷設枚数に応じた沈降量の時刻歴を、粒径が 10 μm から 40 μm のシルトに対して表示したものである。設定する流量によってグラフの様相は異なるが、シルトフェンスの敷設枚数が多いほど懸濁態成分の沈降量が増加していることがわかる。ただし、流速が速い場合は結果の差異は小さい (図 5-38 参照)。これは、流速が十分に大きく、シルトフェンスが顕著に「ふかれ」と、流体に対する抵抗体として殆ど機能しなくなるからだと推測される。

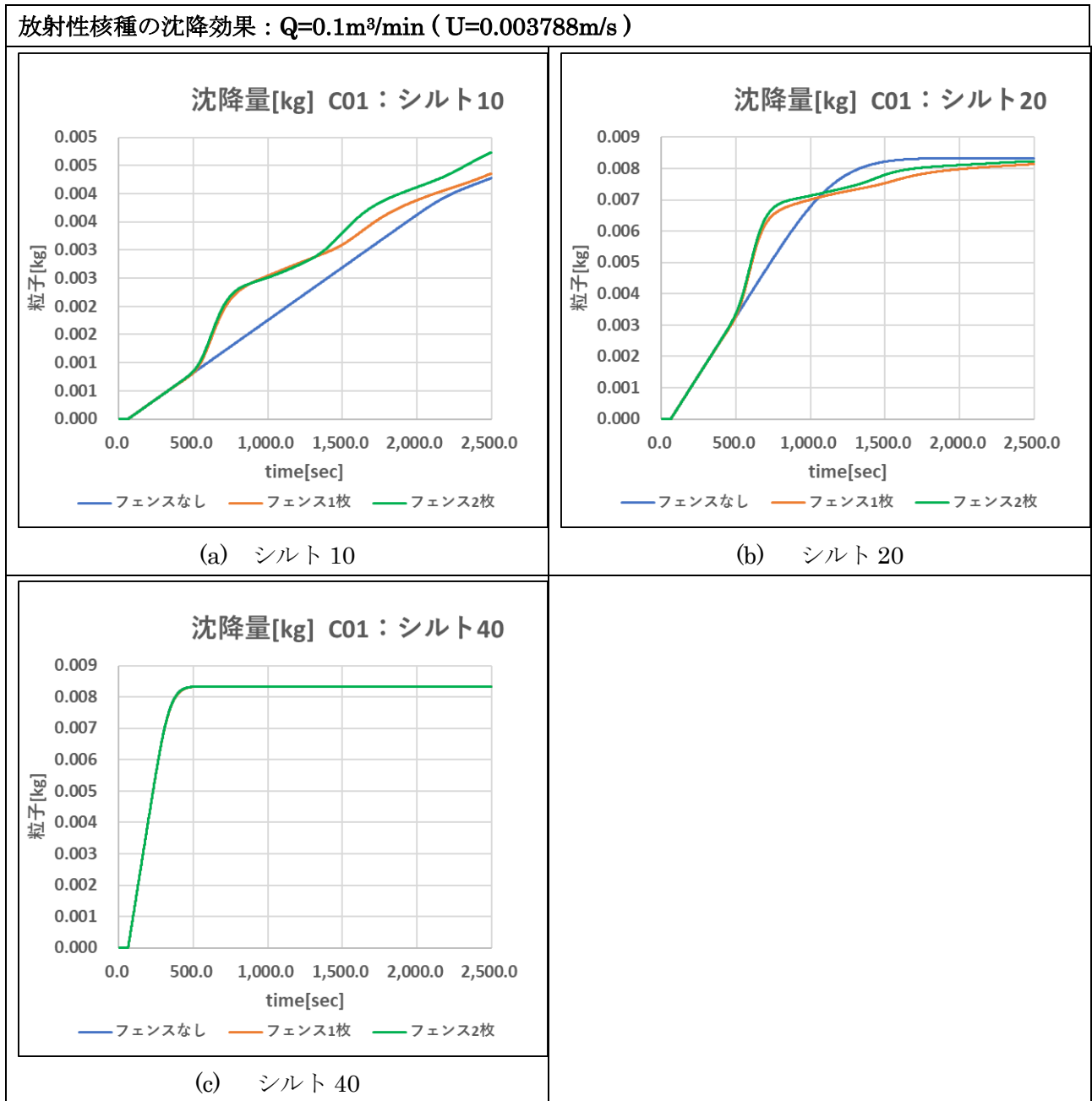


図 5-34 懸濁体成分の沈降促進効果 $Q=0.1\text{m}^3/\text{min}$ ($U=0.003788\text{m/s}$)

放射性核種の沈降効果： $Q=0.5\text{m}^3/\text{min}$ ($U=0.01894\text{m/s}$)

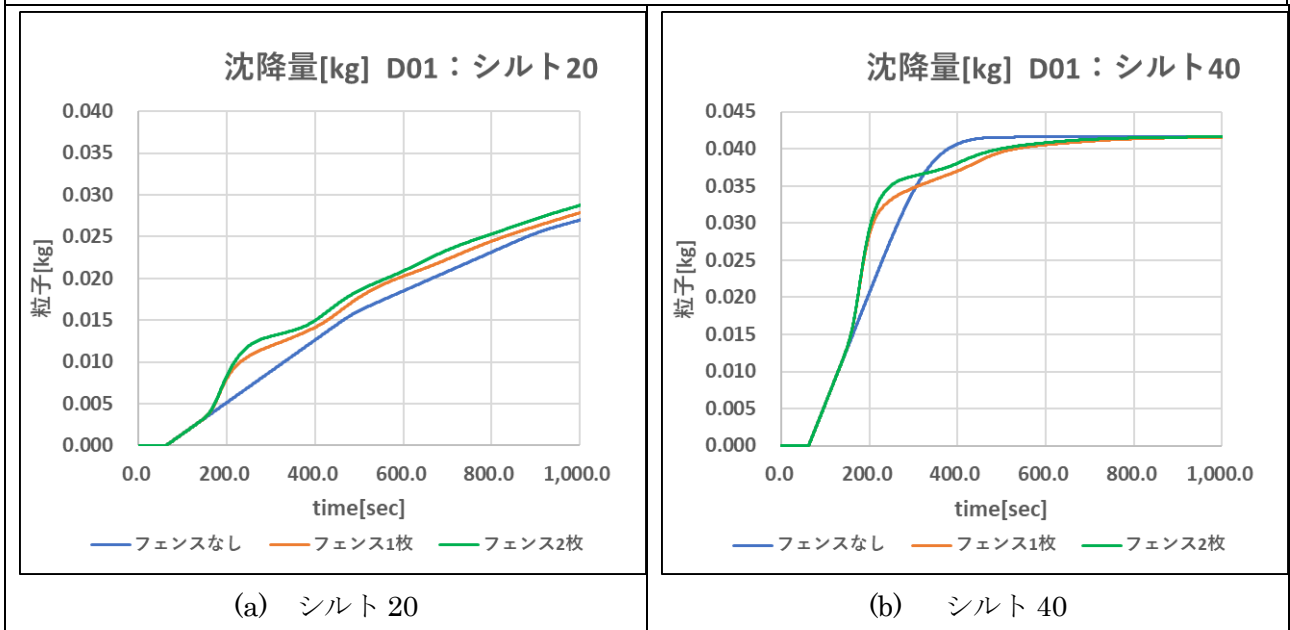


図 5-35 懸濁体成分の沈降促進効果 $Q=0.5\text{m}^3/\text{min}$ ($U=0.01894\text{m/s}$)

放射性核種の沈降効果： $Q=1.0\text{m}^3/\text{min}$ ($U=0.03788\text{m/s}$)

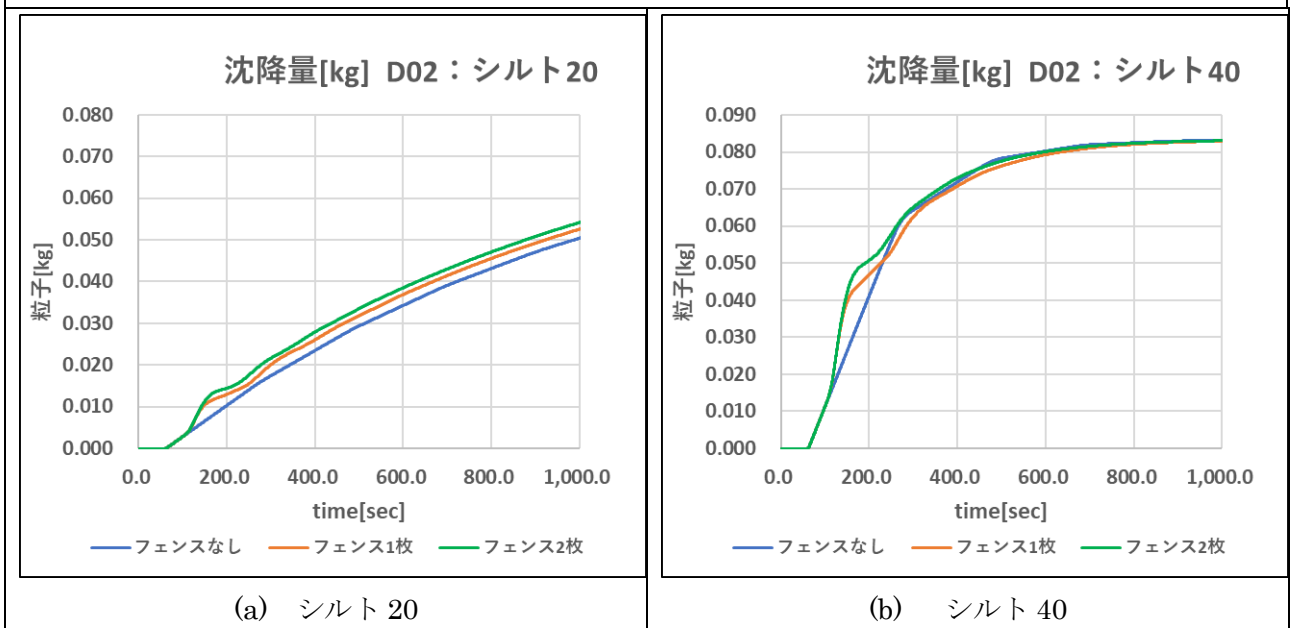


図 5-36 懸濁体成分の沈降促進効果 $Q=1.0\text{m}^3/\text{min}$ ($U=0.03788\text{m/s}$)

放射性核種の沈降効果： $Q=2.5\text{m}^3/\text{min}$ ($U=0.0417\text{m/s}$)

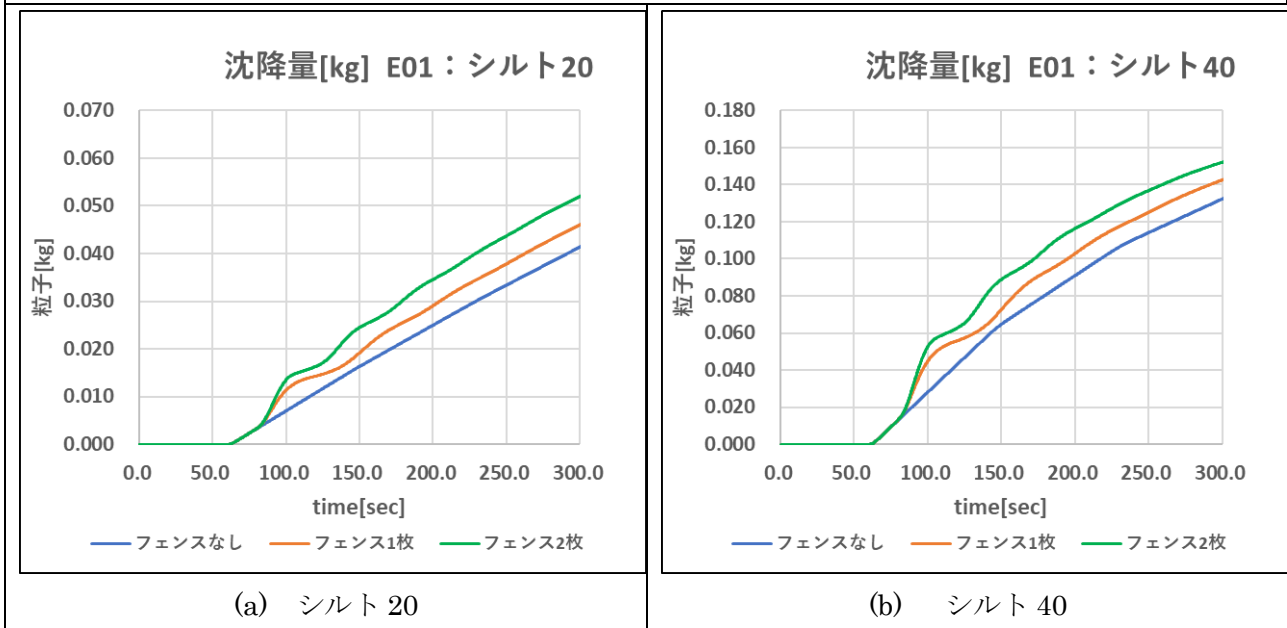


図 5-37 懸濁体成分の沈降促進効果 $Q=2.5\text{m}^3/\text{min}$ ($U=0.0417\text{m/s}$)

放射性核種の沈降効果： $Q=5.0\text{m}^3/\text{min}$ ($U=0.0833\text{m/s}$)

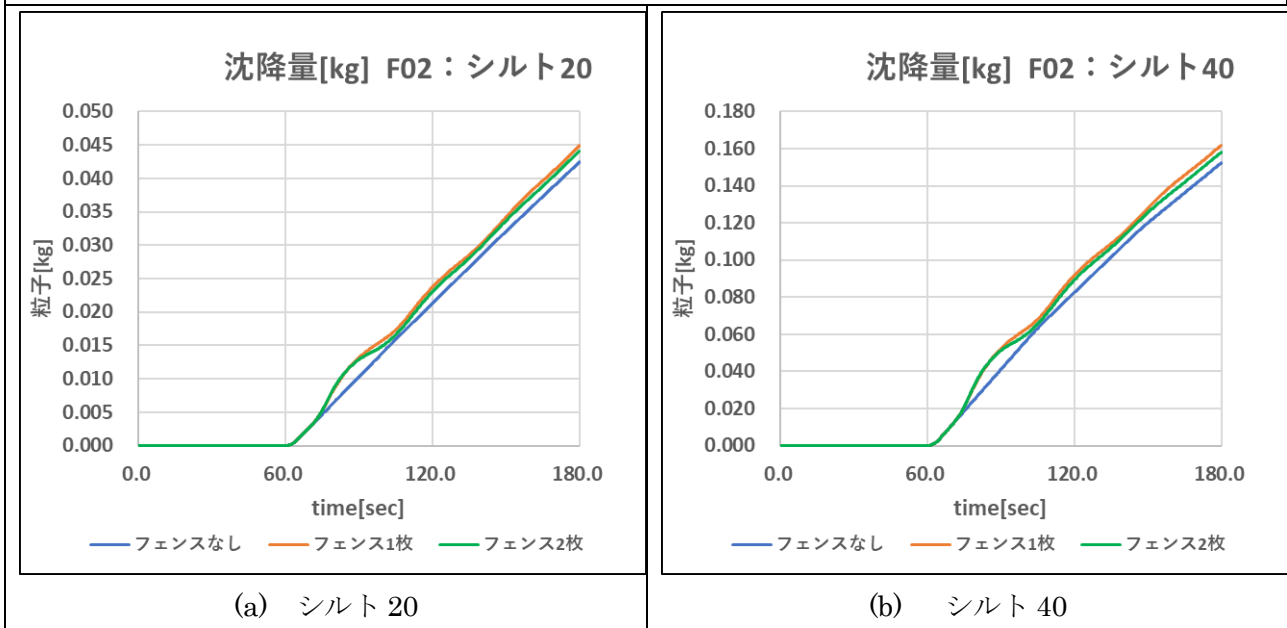


図 5-38 懸濁体成分の沈降促進効果 $Q=5.0\text{m}^3/\text{min}$ ($U=0.0833\text{m/s}$)

5.13 懸濁体挙動の水槽実験による検証

本節では、懸濁体の挙動についてのシミュレーション結果を水槽実験結果と比較検証する。水槽実験にて懸濁体を取り扱うことは容易ではなく、本事業では、懸濁体として市販の白土（シルト）製品（粒径は $10\mu\text{m}$ 以下を 65%、 $10\sim 15\mu\text{m}$ を 16% 程度含み、粒子密度は 2.30kg/m^3 の試料で、以下、シルト質試料と呼ぶ）を用いて水槽実験を行った結果と、実験と同様の条件を模擬してシミュレーションした結果と比較し、懸濁体の挙動シミュレーションの検証を行う。用いる水槽は、本章で用いた水槽と同じであり、懸濁体の濃度については、実験を撮影した画像から特徴ある複数の点で明度を算出し、それらとシミュレーションにより得られる同じ地点の濃度とを比較することで、シミュレーション結果の検証を行う。尚、懸濁体の挙動については、実験では下記の方法を用いて調べた。

①懸濁体を水槽領域に流入させるが、ポンプで何度も循環させるため、定常流動条件では、水槽内にほぼ一様な濃度で分布することとなる（シルトフェンスのない場合）。

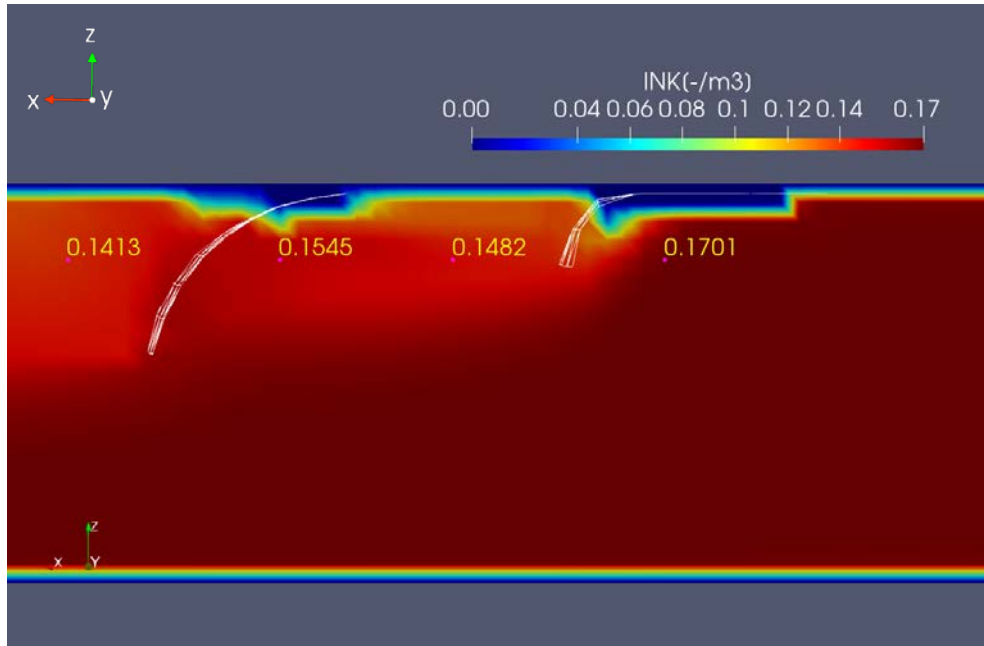
②シルト質試料が一様に分布した定常流に対し、シルトフェンス 2 枚を一定の間隔で敷設する。尚、実験する体系では、水槽内の水をポンプで循環させるため、ポンプの循環域に入った段階で、懸濁体の分布は一様となることを確認している。

③垂下したシルトフェンス前後（上流及び下流側）の懸濁体濃度を調べるため、シルトフェンス前後の地点の撮影画像から各代表地点の明度を取得する。明度は懸濁体濃度が高い程、高い値を取ることから、それらの値のシルトフェンス前後の分布により、シルトフェンスの拡散抑制効果が判明する。

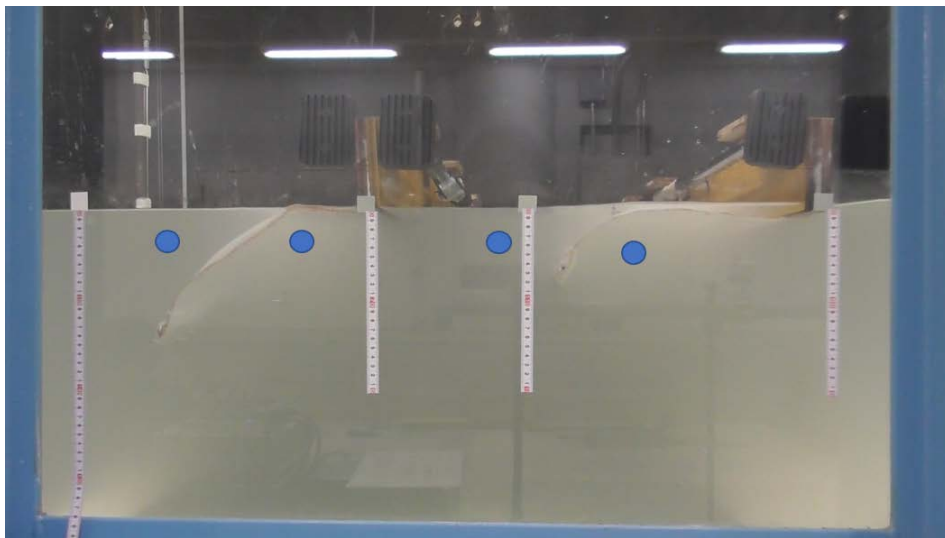
水槽実験では、2 枚のシルトフェンスを垂下し、膜間距離を 0.5m とした場合において、シミュレーションにより得られた濃度分布と水槽実験により得られた明度を用いて比較する（膜長= 0.32m であることから凡そ現地での敷設条件とも一致する）。尚、シミュレーションも実験と全く同様に実施する（シミュレーションでは、流出断面から流出したシルト量をモニターし、その量を一様に流入断面に付与することで、ポンプによる循環を模擬した）。

以下、シミュレーションにより得られた濃度分布と同等の条件で得られた水槽実験（撮影写真）の結果を示す。図 5.39、図 5.40 は各々流量 $Q=7.5[\text{m}^3/\text{min}]$ （流速= $0.2841\text{m}/\text{sec}$ ）、流量 $Q10.0[\text{m}^3/\text{min}]$ （流速= $0.3788\text{m}/\text{sec}$ ）での比較結果である。各々、上図はシミュレーション結果で下図は水槽実験でのスナップショットである。

膜間距離 $L=0.50\text{m}$, 流量 $Q=7.5[\text{m}^3/\text{min}]$



(a) シミュレーション

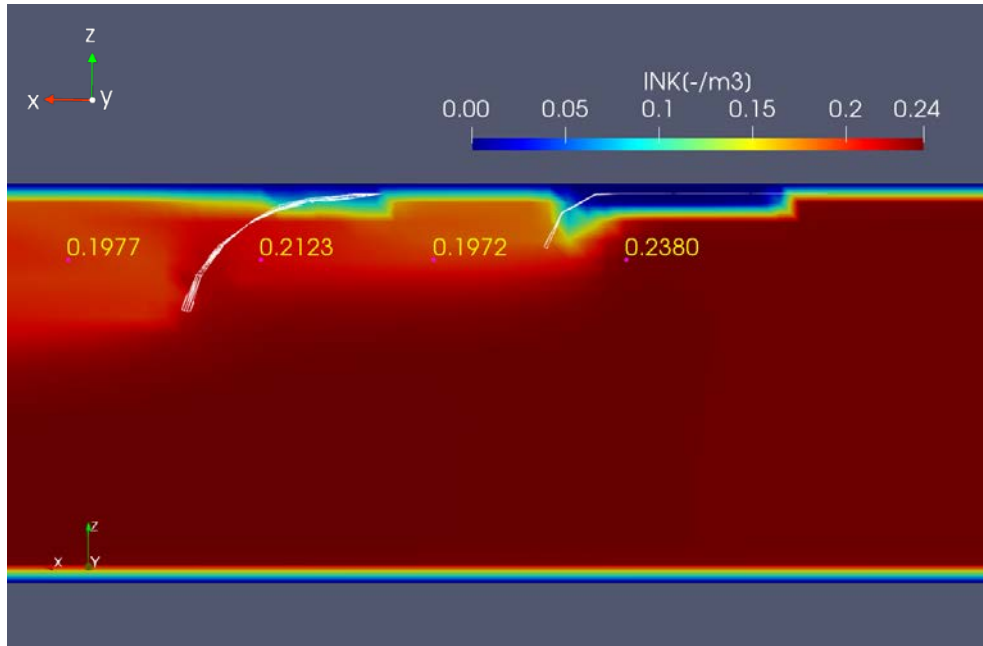


色相 29	色相 28	色相 37	色相 29
彩度 12	彩度 24	彩度 14	彩度 26
明度 132	明度 144	明度 132	明度 146

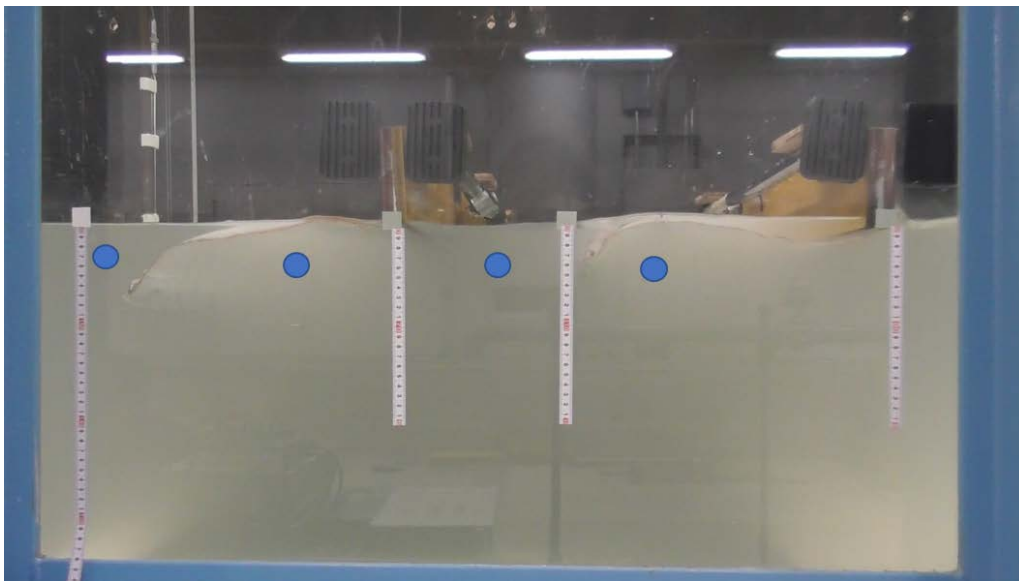
(b) 水槽実験

図 5-39 (a) シミュレーションにより得られた濃度分布 (b) 水槽実験のスナップショット画像 (青いドット地点にて色相、彩度、明度を測定し下に記載)。流速及びシルトフェンス間距離は各々 $U=0.2841[\text{m/s}]$ 及び $L=0.50[\text{m}]$ である。

膜間距離 $L=0.50\text{m}$, 流量 $Q=10.0[\text{m}^3/\text{min}]$



(a) シミュレーション



色相 30	色相 33	色相 25	色相 28
彩度 12	彩度 20	彩度 16	彩度 29
明度 130	明度 139	明度 129	明度 150

(b) 水槽実験

図 5-40 (a) シミュレーションにより得られた濃度分布 (b) 水槽実験のスナップショット画像 (青いドット地点にて色相、彩度、明度を測定し下に記載)。流速及びシルトフェンス間距離は各々 $U=0.3788[\text{m/s}]$ 及び $L=0.50[\text{m}]$ である。

図 5-39 と図 5-40 より、シルトフェンスの上流側は濃度が高く、下流側が低くなることから分かる一方、最も高い上流側と下流側（2 枚目）の濃度比は、シミュレーション、水槽実験において各々、10%程度の違いはあるものの傾向は殆ど一致していることが分かる。

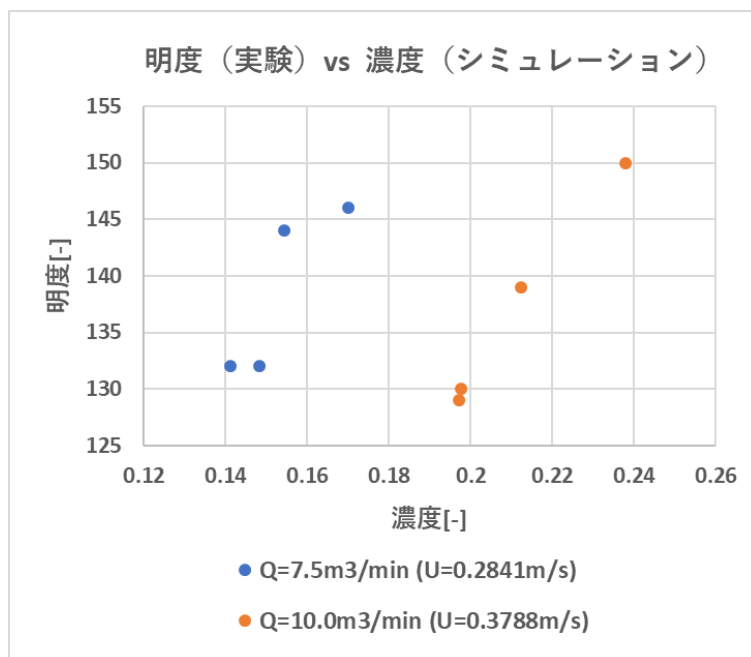


図 5-41 明度（実験） vs 濃度（シミュレーション）

図 5-41 は、明度（実験）を縦軸に濃度（シミュレーション）を横軸として上記 2 つのケースをプロットした。明度（実験）と濃度（シミュレーション）の相関がはっきりと見て取れる。以上より、シミュレーションの懸濁体成分輸送のモデリングは妥当と検証された。また、本実験より、2 重シルトフェンスでは、濃度比が前後で凡そ 1.10（流速=0.2841m/s）と 1.15（流速=0.3788m/s）程度生じることが分かる。この値は定常的条件にて得られる濃度比であり、2 重シルトフェンスの定常流速状態において拡散抑制効果を論じる際の性能指標になる量と考えられる。

以上、本評価により、シミュレーションのシルトフェンス前後での懸濁体成分の輸送モデリングが検証されたことから、以降の取水口モデルや実港湾形状モデルにおいては、シミュレーションにより放射性核種の拡散抑制効果を推定する。

■ 6章 取水口敷設シルトフェンスの変形動作と放射性核種拡散抑制効果

本章では、シルトフェンスの水平方向の変形動作「たわみ」のシミュレーションについて記す。図 6-1 の模式図に示したように、原発港湾の取水口にシルトフェンスが敷設されるケースが想定されるが、本章では、1つの取水口とその周囲に敷設されるシルトフェンスに着目する。その際、取水口の差し渡しと比較し、シルトフェンスの横幅を幾分長くすることで、取水口から定常流が流れ出る場合、シルトフェンスは「たわみ」を形成する（たわむ）ことが期待される。その際、水路の差し渡し：シルトフェンス横幅の比は 19.5:20.0 と、シルトフェンス係留の安全上の観点から取られることが一般的で、緊急時等で取水口に垂下されるシルトフェンスも凡そ、その関係を満たすものと想定される。本事業では、当初、その比が大きい場合についてもシミュレーションと水槽実験を行ったが、「たわみ」の自由度が高く、定常状態の再現性が悪いことから、上記の比（19.5：20.0）にて評価を行う（この場合は、繰り返し実験したがほぼ同一の「たわみ」と「ふかれ」を示す）。尚、7章にて記す港湾口等で、複数ユニットのシルトフェンスを用いる場合も同じ比とする。

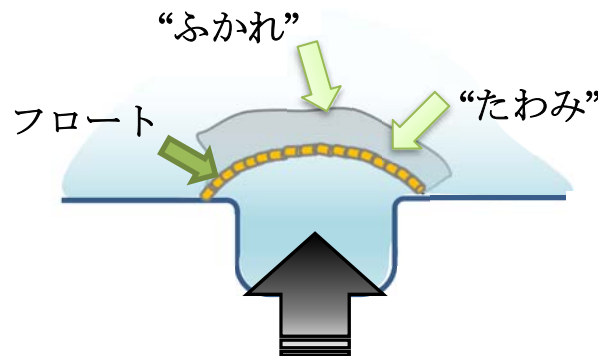


図 6.1 模式図：原発港湾内取水口にシルトフェンスを敷設した際の「たわみ」

6.1 シミュレーション体系

シルトフェンスの「たわみ」をシミュレーションする計算領域を示す。計算対象領域の諸元は表 6-1 の通りである。尚、シミュレーションは水槽実験にて用いる体系と同じ条件で実施する。

表 6-1 シミュレーション及び水槽実験の対象領域（現地と実験水槽とのスケール比含む）

	水深 h[m]	フェンス長 d[m]	差渡し B[m]	スケール比 [-]	流速比 [-]	重錘 [kg/m]
現地	6.0	4.8	12.0	-	-	118.4
実験	0.4	0.32	0.8	1/15	1/3.87	0.53

取水口及びシルトフェンス敷設模型形状

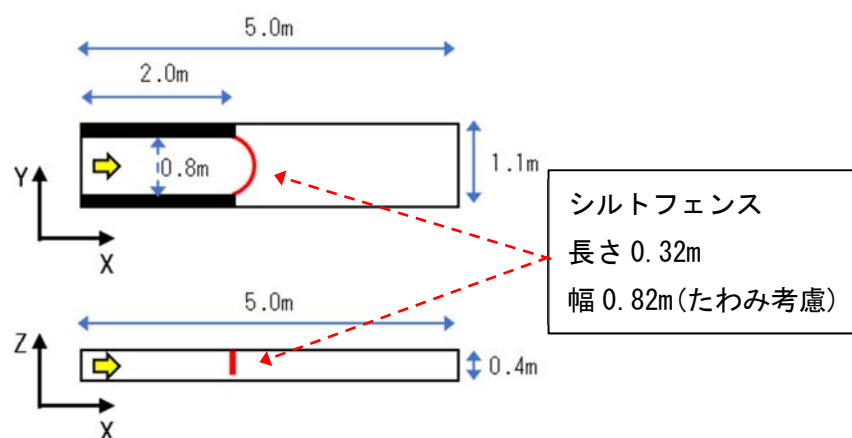


図 6-2 模型形状（「たわみ」検証用）と各寸法

シミュレーションを行う取水口模型の形状と各寸法を図 6.2 に記す。尚、水槽実験も同形状（寸法）にて実施する。フェンス横幅は当初、表 6-2 の 2 通りで実験した。(1)大きな「たわみ」を示す半円状になるケースと(2) 取水口の差し渡し：シルトフェンス横幅＝19.5:20.0 のケースと(3)全く「たわみ」のないケース。しかし、(1)の場合、「たわみ」の形成に際し、中央部が大きく折れる等の複雑な振る舞いを示し、実験毎の再現性が悪いことが分かった。また、シミュレーションも同様であり、このような状況は実際の敷設条件として好ましくないと考えられる。一方、敷設時の通常の場合(2)のケースでは、実験及びシミュレーションは常にほぼ同じ「たわみ」を示す結果が得られた。

表 6-2 シミュレーション及び水槽実験で用いるシルトフェンス横幅及び取水口の差し渡し（水路幅と一致）

ケース	フェンス横幅 [m]	備考
(1) 半円	1.26	差し渡し：フェンス横幅＝8.0:12.6
(2) 現地設置比率	0.82	差し渡し：フェンス横幅＝19.5:20.0
(3) 直線	0.80	「たわみ」なし

6.2 シミュレーション結果（「たわみ」と「ふかれ」）

シミュレーションと水槽実験で実施した流量と流速等、条件の諸元を表 6-3 に記す。

表 6-3 シミュレーション及び水槽実験を行う条件（流量（Q）と流速(U)、現地とのスケール比含む）

ケース	現地			実験		
	Q[m ³ /min]	Q[m ³ /s]	U[m/s]	Q[m ³ /min]	Q[m ³ /s]	U[m/s]
1	2178.6	36.31	0.367	2.5	0.0417	0.0947
2	4357.1	72.62	0.734	5.0	0.0833	0.1894
3	6535.7	108.93	1.100	7.5	0.1250	0.2841
4	8714.2	145.24	1.467	10.0	0.1667	0.3788

まず、ケース 1（設定流量 $Q=2.5$ [m³/min]、設定流速として 0.25×0.3788 [m/s] を上流から付与）の場合、「たわみ」がある場合と「たわみ」がない場合を比較するため、シミュレーションした。その際の各々のシルトフェンスの形状は図 6-3 と図 6-4 のような形状となる。

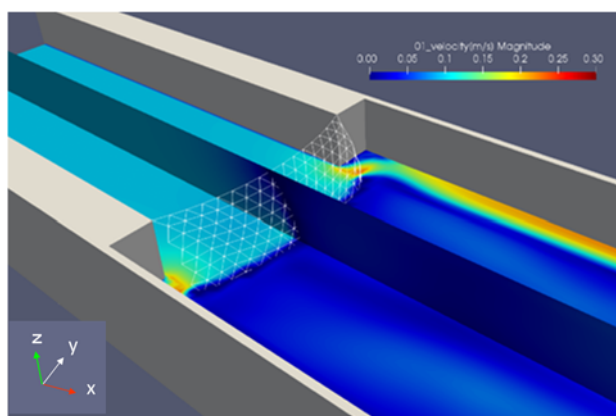


図 6-3 シミュレーション結果（「たわみ」あり）

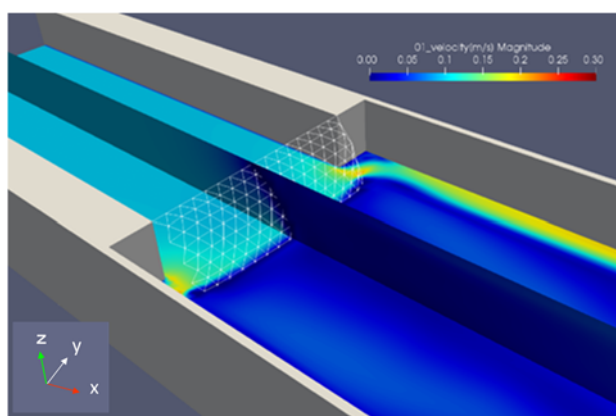


図 6-4 シミュレーション結果（「たわみ」なし）

次に、シルトフェンス中央部での「ふかれ」の様子を小田の推定式と比較した。その結果が図 6-5 である。取水口模型（図 6-2 参照）では、シルトフェンス敷設位置で流路幅が拡大するため、中央部の流速は低下し、小田らの推定式が与える理論値よりも「ふかれ」は減少する（有効膜高さ d_e が大きい）。また、シルトフェンスに「たわみ」を考慮することで、たわまない場合に比べると、さらに「ふかれ」は減少することがわかる。

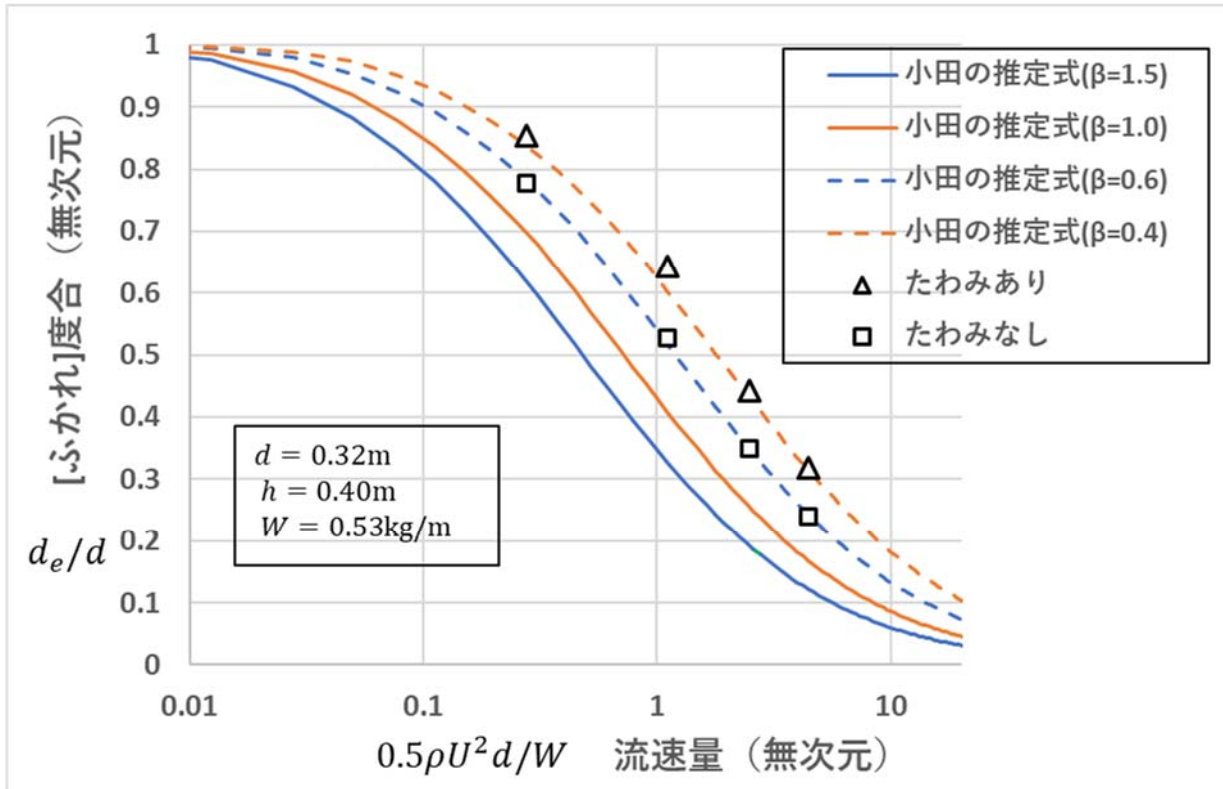


図 6-5 シミュレーション結果（「たわみ」の有無による「ふかれ」の自由度について）

図 6-5 では、青色の実線が小田らの推定式 ($\beta=1.5$) であり、「たわみ」なしの場合でも、流路が変化していることから、推定式とは一致せず、「ふかれ」は抑制されていることが分かる。その一方、「たわみ」をありとすると、更に「ふかれ」は抑制されることが分かった。この主たる要因は、図 6-2 のような模型形状において、水はシルトフェンスの両端を強く流れる傾向が強く、一様な流れによる「ふかれ」の理論（水平方向は一様と仮定）を当てはめることができないことが分かった。従って、本章での目的「たわみ」と「ふかれ」の変形動作については、シミュレーションと実験とで、定常状態でのスナップショットを比較し、シミュレーションの妥当性を検証する。

6.3 シミュレーションと水槽実験との比較

本節では、シルトフェンスの「たわみ」と「ふかれ」の形状に注目し、表 6-4 に示す設定流速でシミュレーションおよび水槽実験を行い、得られた定常的スナップショットと対応するシミュレーション結果との比較を行う。結果については、どの設定流速のケースについても、変形形状については概ね一致することが示される。

表 6-4 シミュレーション及び水槽実験を行うケース毎の流速 U （備考には最大流速:0.3788m/s との比を記す。）

ケース	U [m/s]	備考
1	0.0947	0.25×0.3788
2	0.1894	0.50×0.3788
3	0.2841	0.75×0.3788
4	0.3788	最大流速

ケース 1 : 流速 $U=0.0947$ [m/s] ($U = 0.25 \times 0.3788$ [m/s])

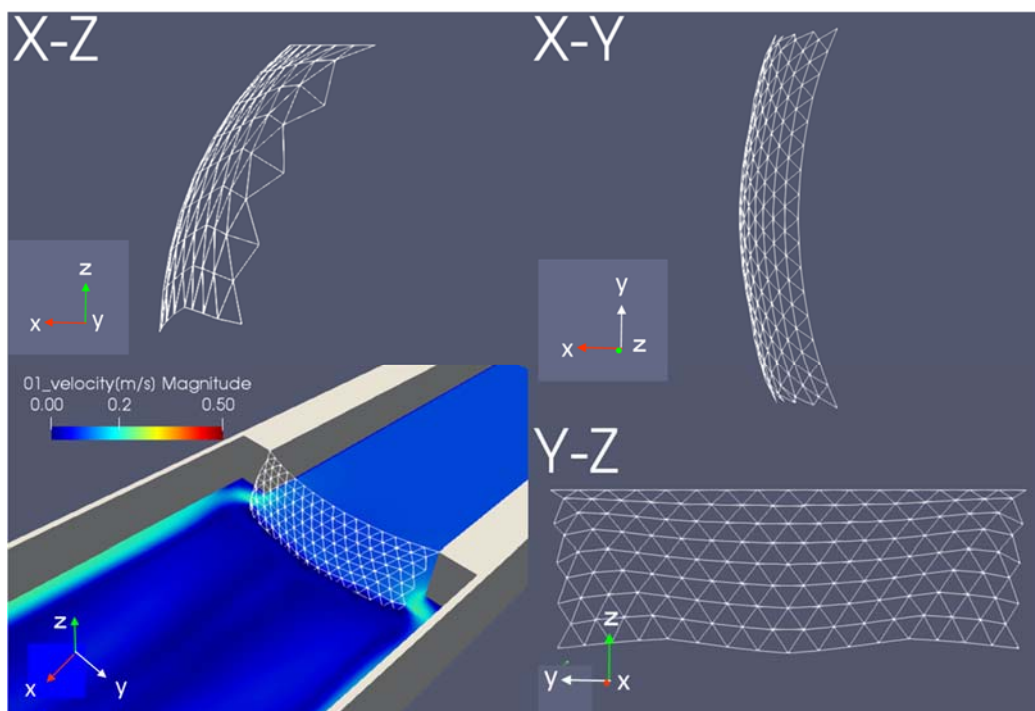


図 6-6 シミュレーション結果（3方向から見たシルトフェンス形状（射影））

図 6-6 は、シミュレーションにより得られたシルトフェンスの形状である。これに対し、該当する水槽実験において、同じ方向から撮影した写真（図 6-7、図 6-8）と直接、重ね合わせを行い、比較した。図 6-7、図 6-8 において、白い膜はシルトフェンスであり、赤い網がシミュレーションにより得られたシルトフェンスである。これらを比較すると、「たわみ」の形はほぼ一致していることが分かる。但し、「ふかれ」については、シルトフェンス両端の下端のみ、水槽実験の方がより「ふかれ」ていることが分かる。これは、シミュレーションの速度分布（図 6-6 参照）から分かるように、シルトフェンスの両端の下端に比較的強い流れが発生しており、この流れに沿って乱流が発達しているためと考えられる。

これは、2重シルトフェンスの場合でも観察された結果と同様で、シミュレーションの解像度を上げることで、改善されるものと考えられる。その一方、両端の下端以外の形状は、ほぼ一致していることが分かる。

ケース1：流速 $U=0.0947[\text{m/s}]$ ($U = 0.25 \times 0.3788[\text{m/s}]$)

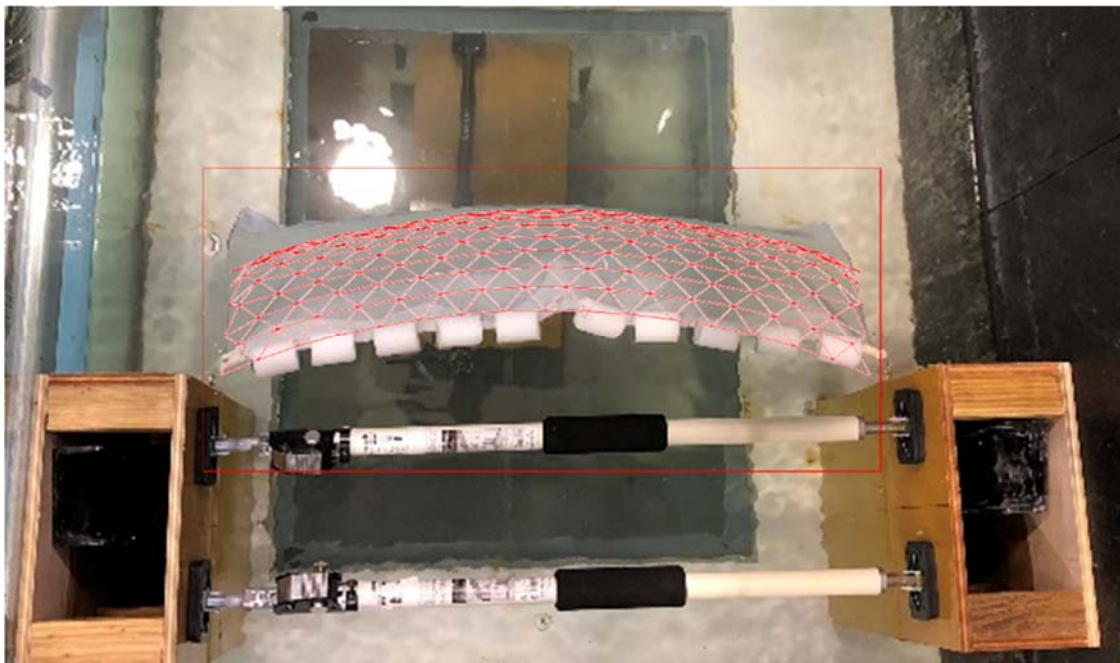


図 6-7 シミュレーション結果と水槽実験結果の比較（水平方向フェンス形状：X-Y 射影）

ケース1：流速 $U=0.0947[\text{m/s}]$ ($U = 0.25 \times 0.3788[\text{m/s}]$)

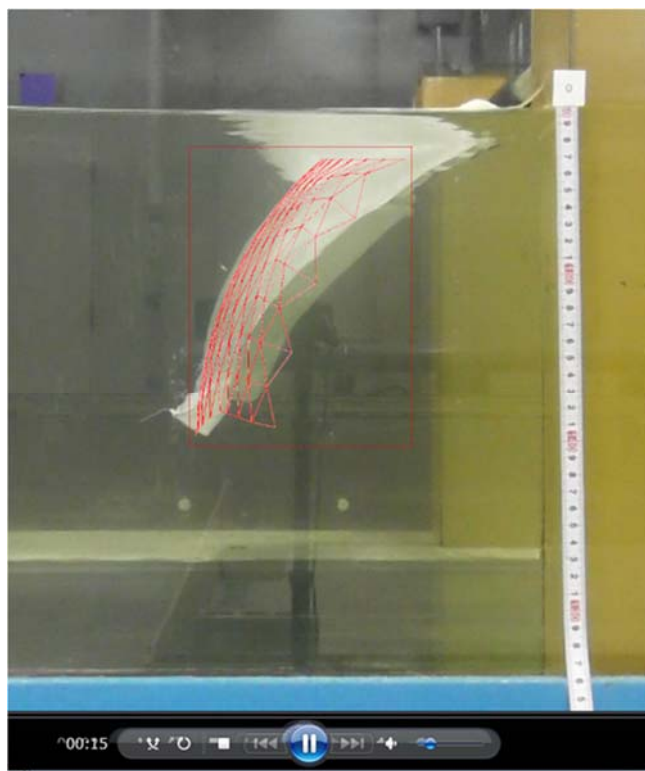


図 6-8 シミュレーション結果と水槽実験結果の比較（鉛直方向フェンス形状：X-Z 射影）

ケース 2 : 流速 $U=0.1894[\text{m/s}]$ ($U = 0.50 \times 0.3788[\text{m/s}]$)

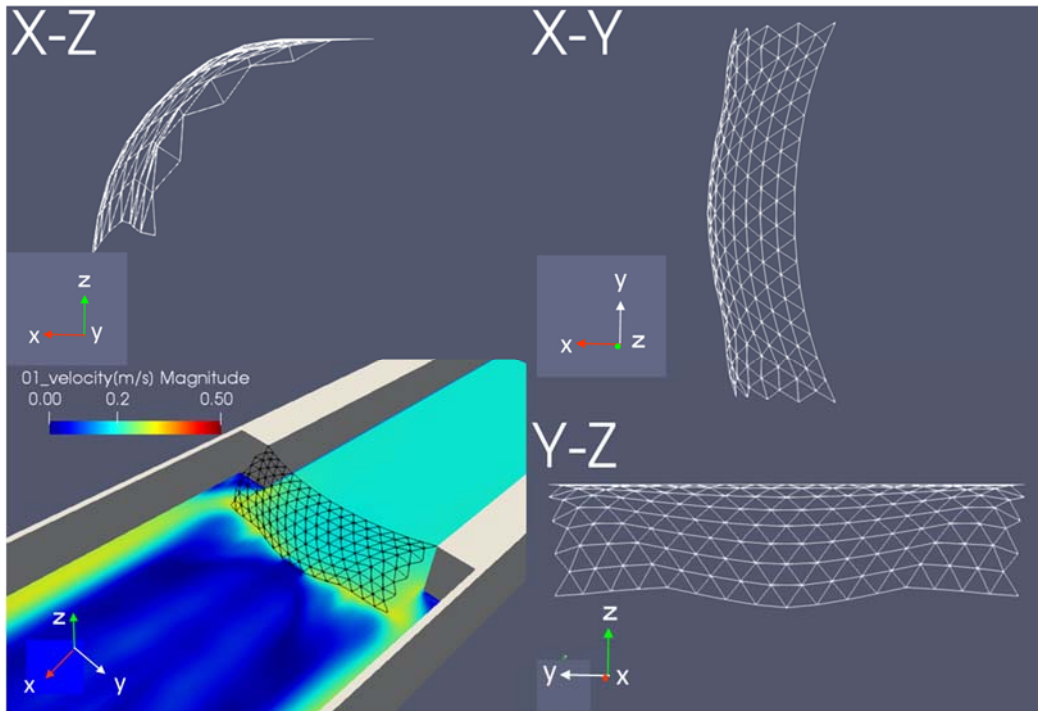


図 6-9 シミュレーション結果 (3 方向から見た (射影) シルトフェンス形状)

ケース 2 : 流速 $U=0.1894[\text{m/s}]$ ($U = 0.50 \times 0.3788[\text{m/s}]$)

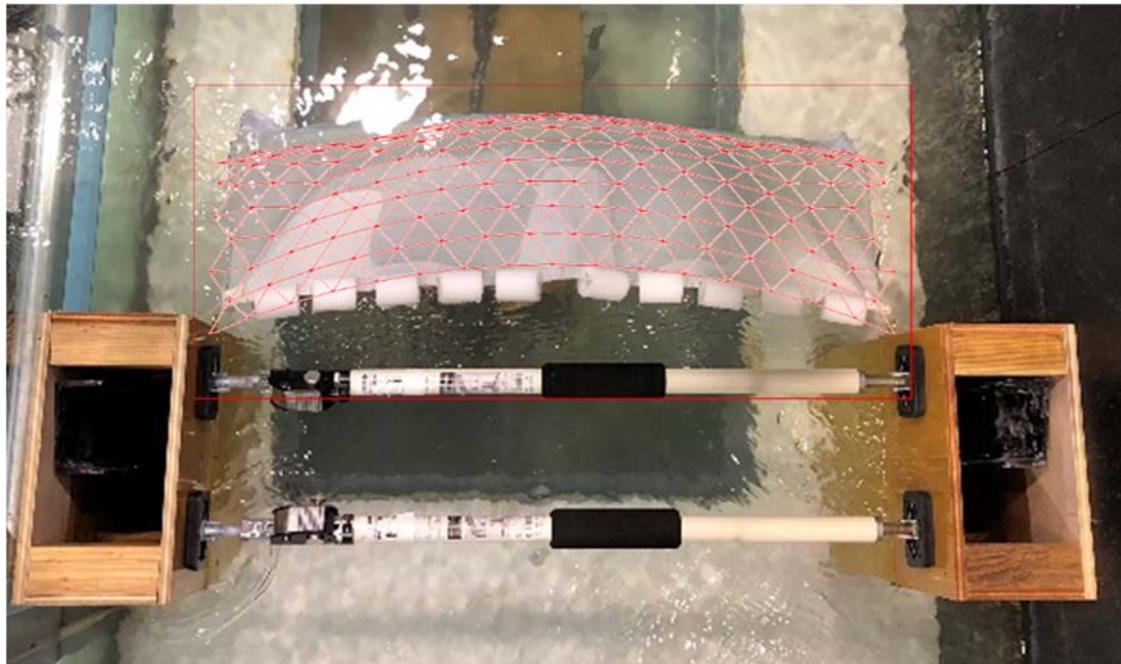


図 6-10 シミュレーション結果と水槽実験結果の比較 (水平方向フェンス形状 : X-Y 射影)

ケース 2 : 流速 $U=0.1894[\text{m/s}]$ ($U = 0.50 \times 0.3788[\text{m/s}]$)

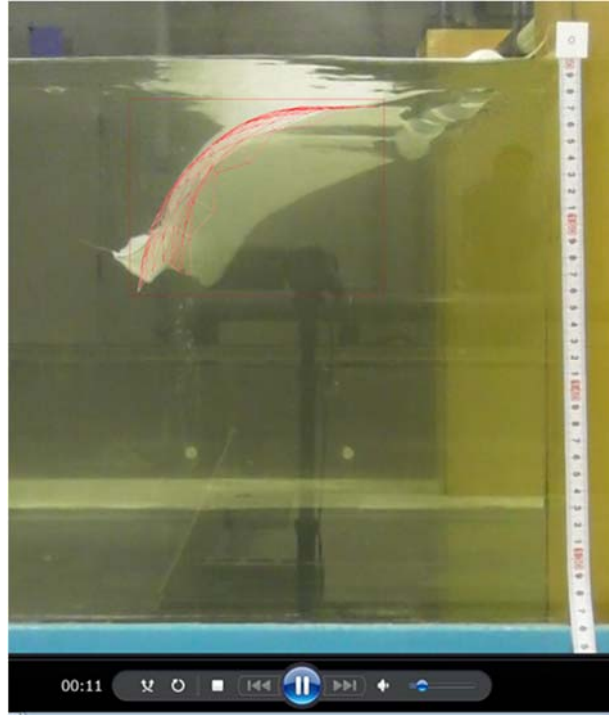


図 6-11 シミュレーション結果と水槽実験結果の比較（鉛直方向フェンス形状：X-Z 射影）

図 6-9 は、図 6-6 と同じく、シミュレーションにより得られたシルトフェンスの形状である。但し、流速は 2 倍である。この流速においても、図 6-10、図 6-11 から分かるように、「たわみ」及び「ふかれ」の形状は、シルトフェンスの両端の下端以外はほぼ一致していることが分かる。更に流速を早くしたケースについても比較する。流速を 3 倍（図 6-12、図 6-13、図 6-14）及び 4 倍（最大流速）（図 6-15、図 6-16、図 6-17）にしたケースを見ると、フェンスの「たわみ」の形状は、ほぼ一致していることが分かる一方、「ふかれ」については、上記と同様にシルトフェンス両端の下端のみの「ふかれ」に、「ずれ」があることが分かる。しかし、その「ずれ」もシルトフェンス全体の僅かに一部だけであり、全体として「たわみ」及び「ふかれ」は再現している。以上、シルトフェンスの取水口模型における水平方向の「たわみ」を伴う変形動作についても、モデリング及びシミュレーションに対し検証できたと判断する。従って、本章の後半では、検証済みのシミュレーションコードを用いて放射性核種の拡散抑制効果について論じる。

ケース 3 : 流速 $U=0.2841[\text{m/s}]$ ($U = 0.75 \times 0.3788[\text{m/s}]$)

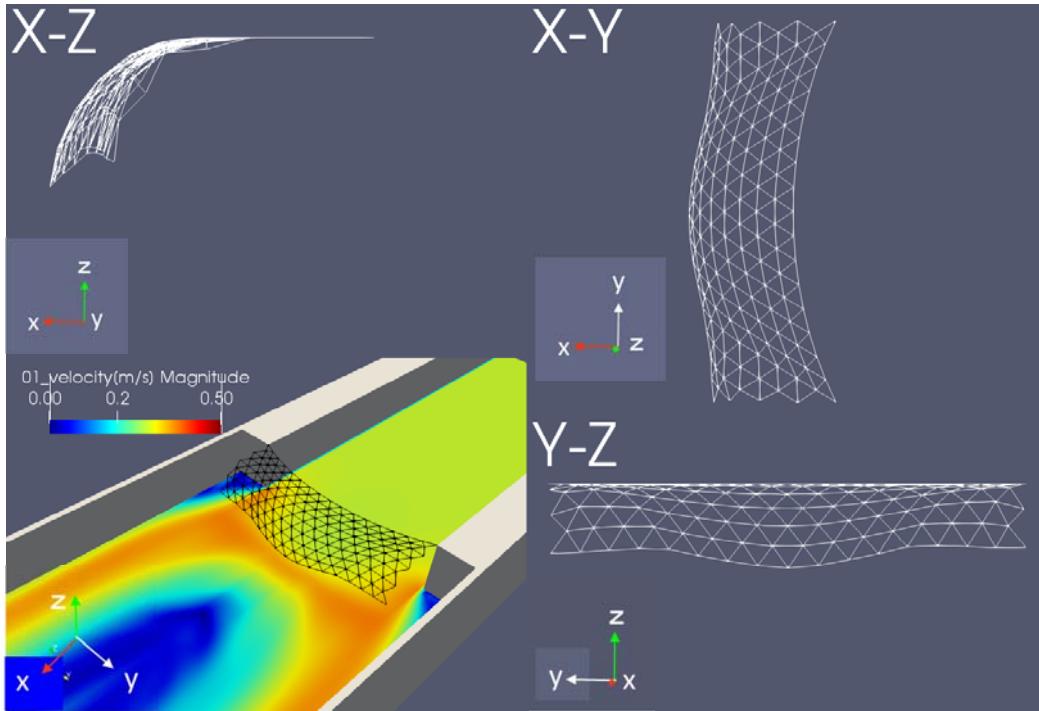


図 6-12 シミュレーション結果 (3 方向から見た (射影) シルトフェンス形状)

ケース 3 : 流速 $U=0.2841[\text{m/s}]$ ($U = 0.75 \times 0.3788[\text{m/s}]$)

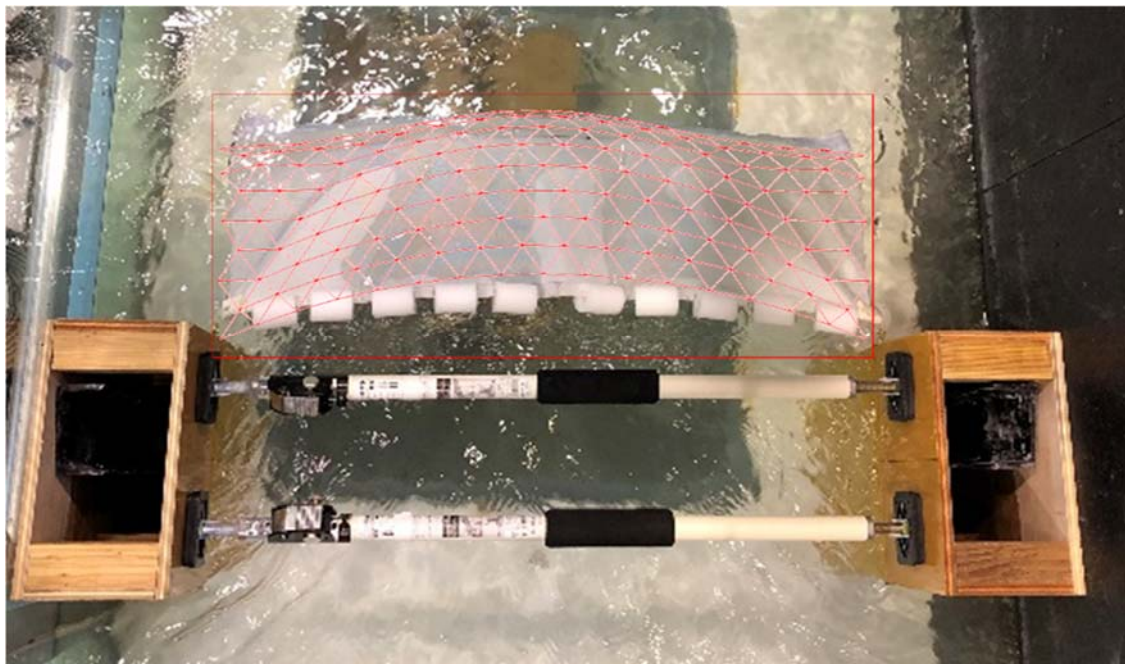


図 6-13 シミュレーション結果と水槽実験結果の比較 (水平方向フェンス形状 : X-Y 射影)

ケース 3 : 流速 $U=0.2841[\text{m/s}]$ ($U = 0.75 \times 0.3788[\text{m/s}]$)



図 6-14 シミュレーション結果と水槽実験結果の比較 (鉛直方向フェンス形状 : X-Z 射影)

ケース 4 : 流速 $U=0.3788[\text{m/s}]$ ($U = 1.00 \times 0.3788[\text{m/s}]$)

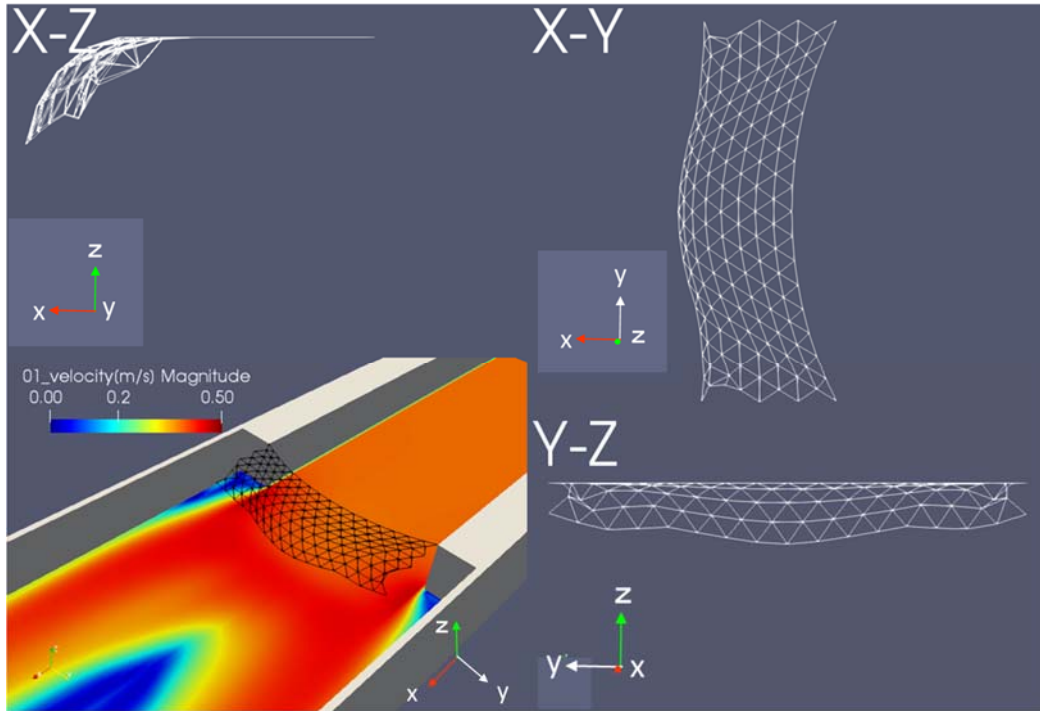


図 6-15 シミュレーション結果 (3 方向から見た (射影) シルトフェンス形状)

ケース 4 : 流速 $U=0.3788[\text{m/s}]$ ($U = 1.00 \times 0.3788[\text{m/s}]$)

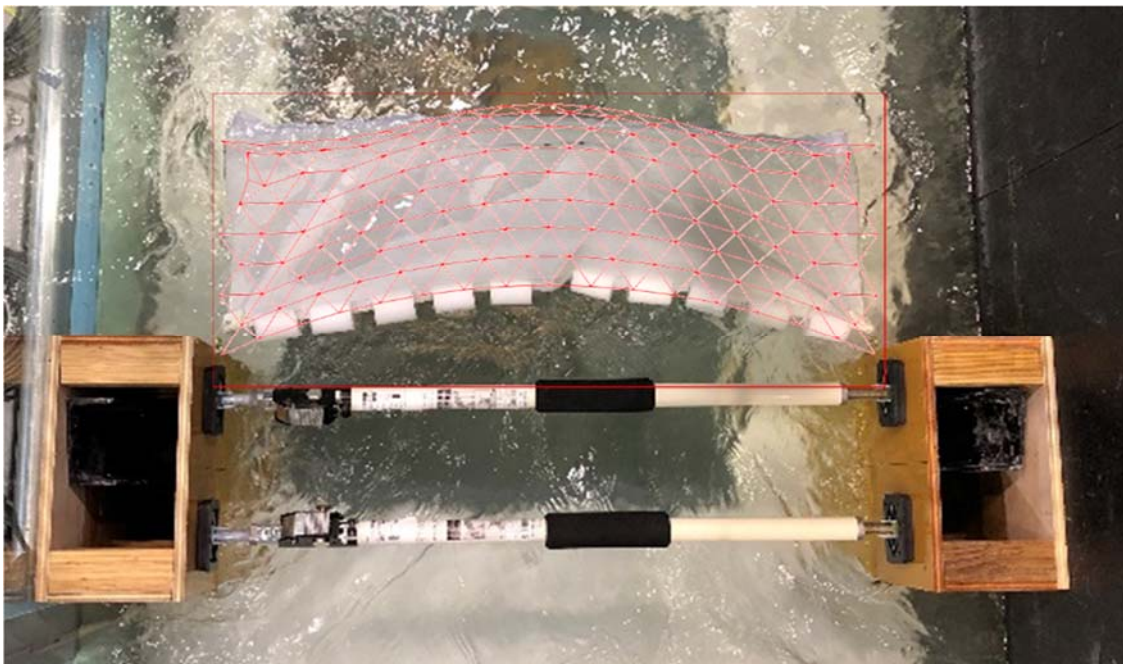


図 6-16 シミュレーション結果と水槽実験結果の比較 (鉛直方向フェンス形状 : X-Y 射影)

ケース 4 : 流速 $U=0.3788[\text{m/s}]$ ($U = 1.00 \times 0.3788[\text{m/s}]$)

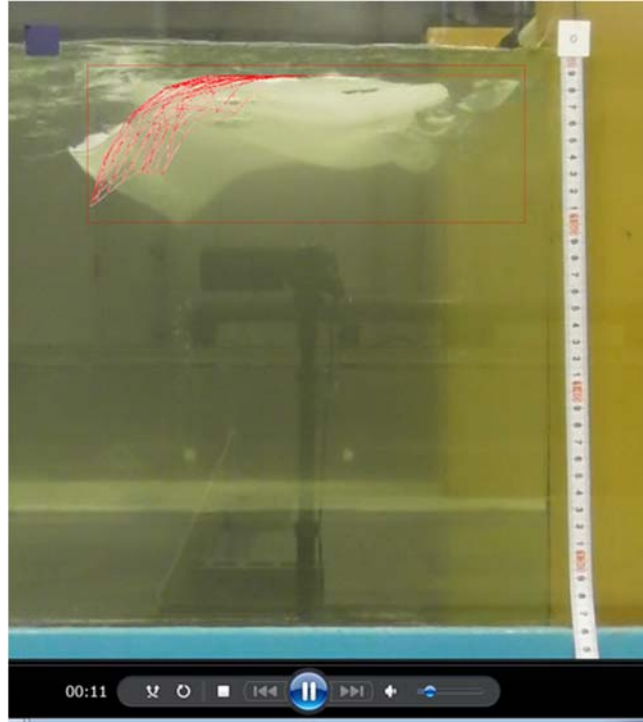


図 6-17 シミュレーション結果と水槽実験結果の比較 (鉛直方向フェンス形状 : X-Z 射影)

6.4 放射性物質の拡散抑制効果

本節では、水平方向の変形動作「たわみ」と「ふかれ」を有する取水口模型において、シルトフェンスの放射性物質の拡散抑制効果を論じる。シミュレーションする体系は本章前半にて記した系と同じである。(図 6-2 参照)。即ち、前節で検証結果を記した際に用いた実験水槽の体系と同じ領域とする。

放射性核種の拡散抑制効果を調べるため、計算領域の上流端にて放射性核種を一定量流入させ、その流出量を下流端にて測定する。また、定めた計算領域における放射性核種量の時間発展をモニターし、流出する放射性核種量とのバランスを計算する。尚、放射性核種は溶存成分と懸濁体成分の二つとし、溶存成分に対しては、沈降効果はなく、移流・拡散方程式を解くことで、そのダイナミクスを追跡する一方、懸濁体成分に対しては、粒径及び粒密度に依存した沈降条件(ストークスの式)に従うとして、計算領域内での沈降量をモニターし、放射性核種流出量とのバランス等を見ることで、放射性核種の拡散抑制効果を評価する。

図 6-18 は計算領域と放射性核種の流入端と流出端について明示した図であり、境界条件の制御方法と共に放射性核種量の測定方法についても明記した。5 章にて記したように、上流から流入させる放射性物質は溶存成分と懸濁体成分とし、放射性核種の一部は懸濁体成分に不可逆的に吸着したものと仮定し、砂及びシルトの二つについて、その各々の成分の挙動を評価する。

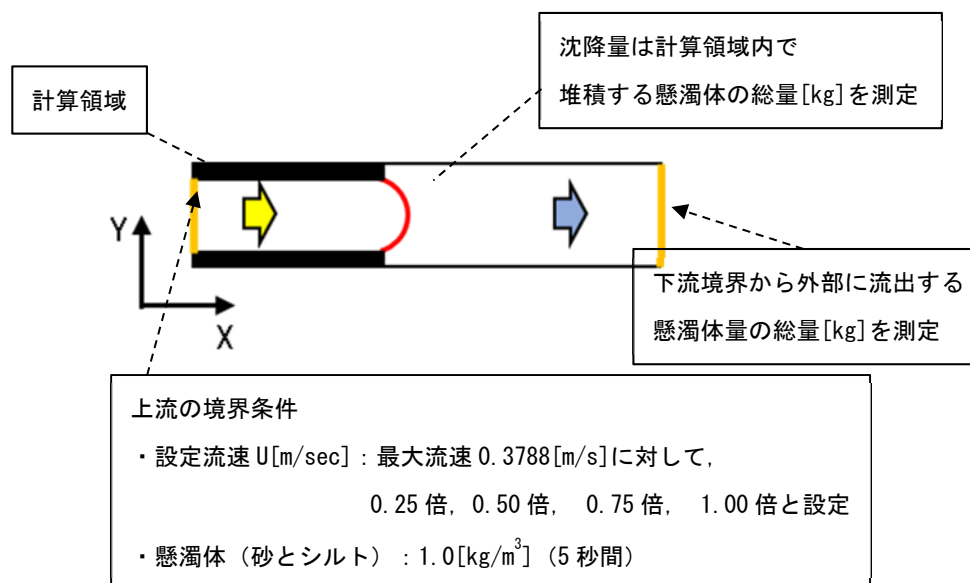


図 6-18 シミュレーションの境界条件と放射性核種の測定方法

本節のシミュレーションにて用いる懸濁体成分（砂とシルト）の諸元を表 6-5 に示す。

表 6-5 懸濁体成分（砂とシルト）の諸元

種類	密度 ρ [kg/m ³]	粒径 d [m]	沈降速度 Sv [m/s]
溶存成分	1000.0	0.0E+0	0.0E+0
砂	2650.0	74.0E-6	-4.92E-03
シルト	2650.0	60.0E-6	-3.23E-03

また、本事業の範囲では、懸濁体成分の砂及びシルトについては、下記のストークスの式に従い沈降効果を付与する一方、一度沈降した懸濁成分の再浮遊の効果は考えないこととした。

$$S_v = \frac{1}{18} \left(\frac{\rho_s}{\rho_w} - 1 \right) \frac{gd^2}{\nu} \quad (6-1)$$

尚、 ρ_s と d は粒子密度と粒径である。また、 ρ_w と ν は流体密度と動粘性係数である。流体密度は1000.0[kg/m³]とし、動粘性係数は1.0E-6[m²/s]として計算した。 g は重力加速度である。

図 6-19、図 6-20、図 6-21 に、流速 $U=0.3788 \times 0.50$ [m/s]のケースにおける流速分布のスナップショットを示した。図 6-22、図 6-23、図 6-24 は放射性物質懸濁体成分（砂）の移行の様子を示し、図 6-25、図 6-26、図 6-27 は底面への堆積分布を示した。次の図 6-28、図 6-29、図 6-30、図 6-31 は溶存成分の収支バランスの時間発展の流速依存性、図 6-32、図 6-33、図 6-34、図 6-35 は懸濁体成分（砂）の収支バランスの時間発展の流速依存性、図 6-36、図 6-37、図 6-38、図 6-39 は同じくシルトの収支バランスの時間発展の流速依存性を記した。溶存成分については、低速域でシルトフェンスによる外部流出の遅延効果が見られる一方、砂について沈降促進効果が見られる。また、シルトについては、溶存成分と同様に外部流出の遅延効果が見られる。

可視化図：流速分布（時刻歴）

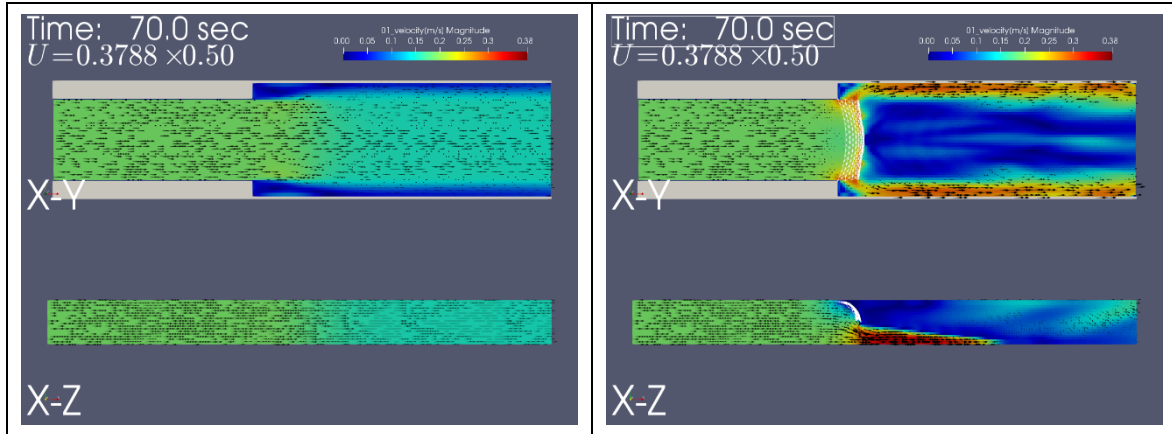


図 6-19 流速分布（流速 $U=0.3788 \times 0.50$ [m/s] のケース：Time=70.0sec）

※左：フェンスなし， 右：フェンス敷設（「たわみ」あり）

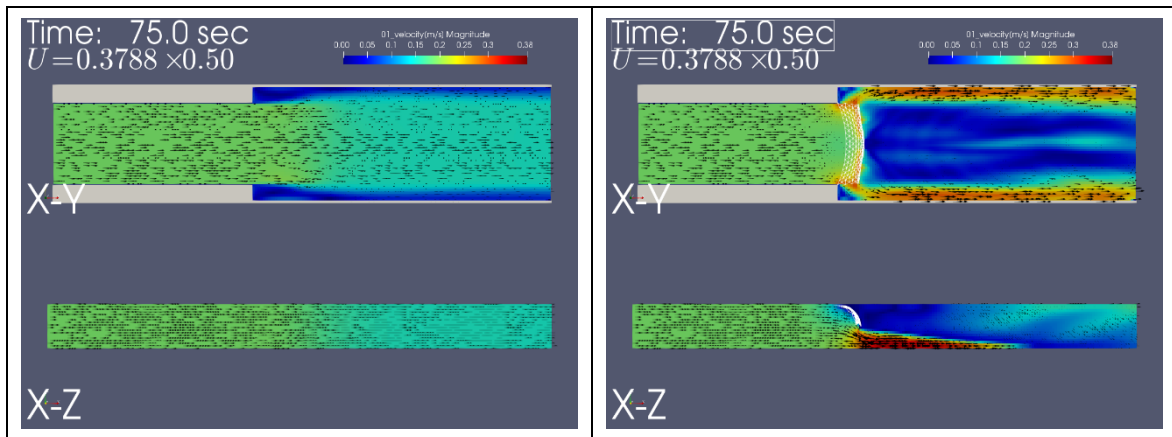


図 6-20 流速分布（流速 $U=0.3788 \times 0.50$ [m/s] のケース：Time=75.0sec）

※左：フェンスなし， 右：フェンス敷設（「たわみ」あり）

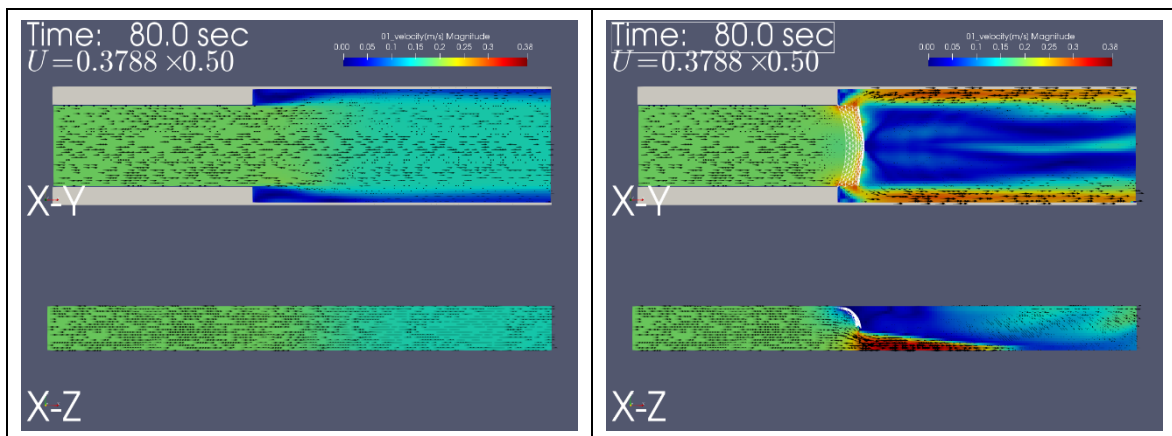


図 6-21 流速分布（流速 $U=0.3788 \times 0.50$ [m/s] のケース：Time=80.0sec）

※左：フェンスなし， 右：フェンス敷設（「たわみ」あり）

可視化図：砂の水中分布（時刻歴）

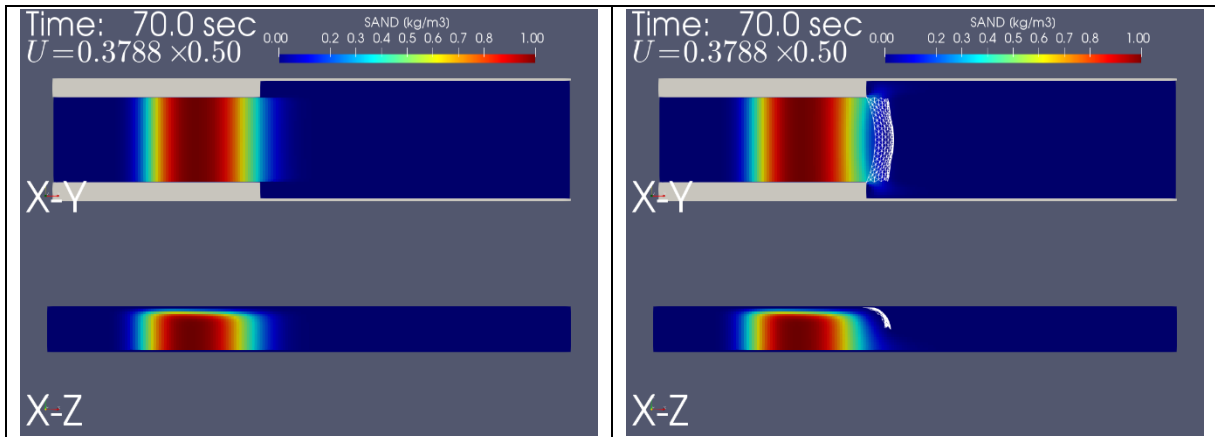


図 6-22 砂の分布（流速 $U=0.3788 \times 0.50$ [m/s] のケース：Time=70.0sec）

※左：フェンスなし， 右：フェンス敷設（たわみあり）

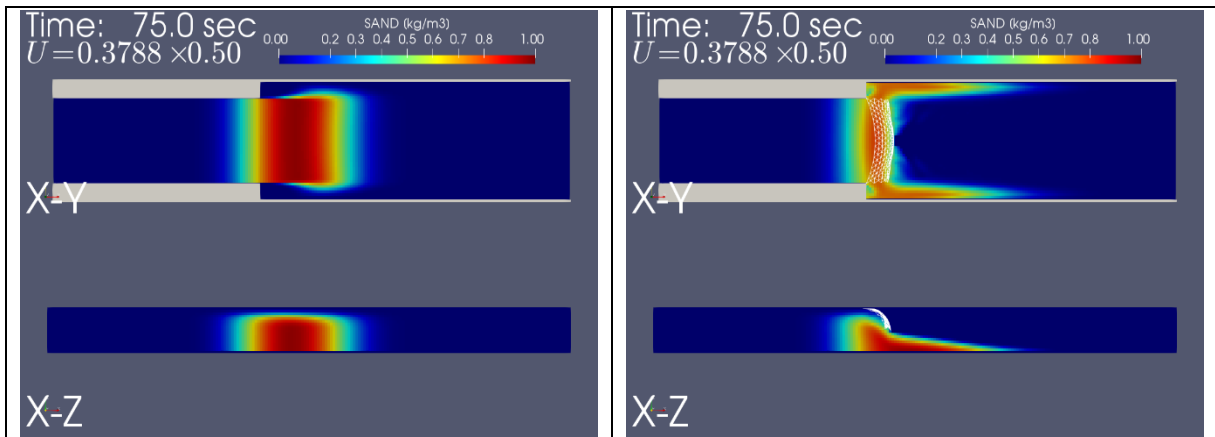


図 6-23 砂の分布（流速 $U=0.3788 \times 0.50$ [m/s] のケース：Time=75.0sec）

※左：フェンスなし， 右：フェンス敷設（たわみあり）

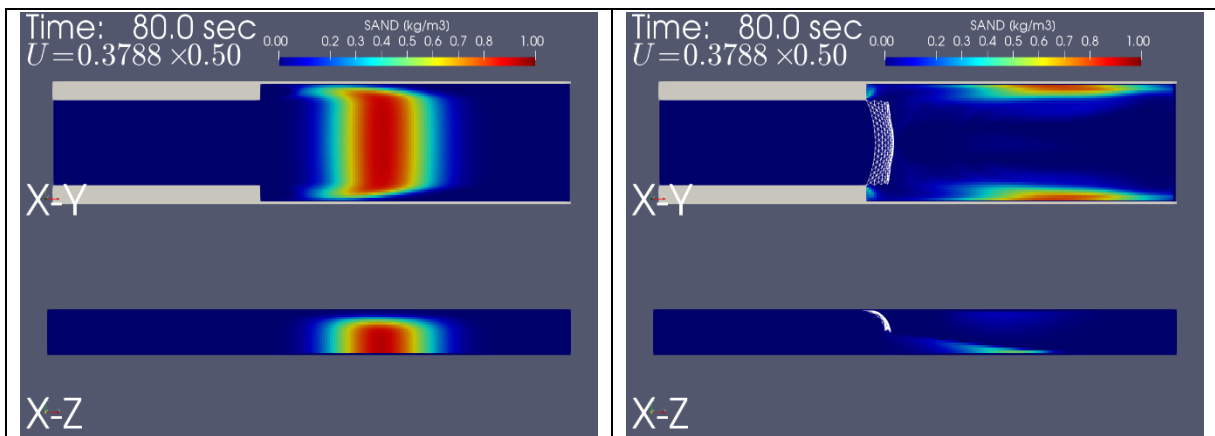


図 6-24 砂の分布（流速 $U=0.3788 \times 0.50$ [m/s] のケース：Time=80.0sec）

※左：フェンスなし， 右：フェンス敷設（たわみあり）

可視化図：砂の堆積分布（時刻歴）

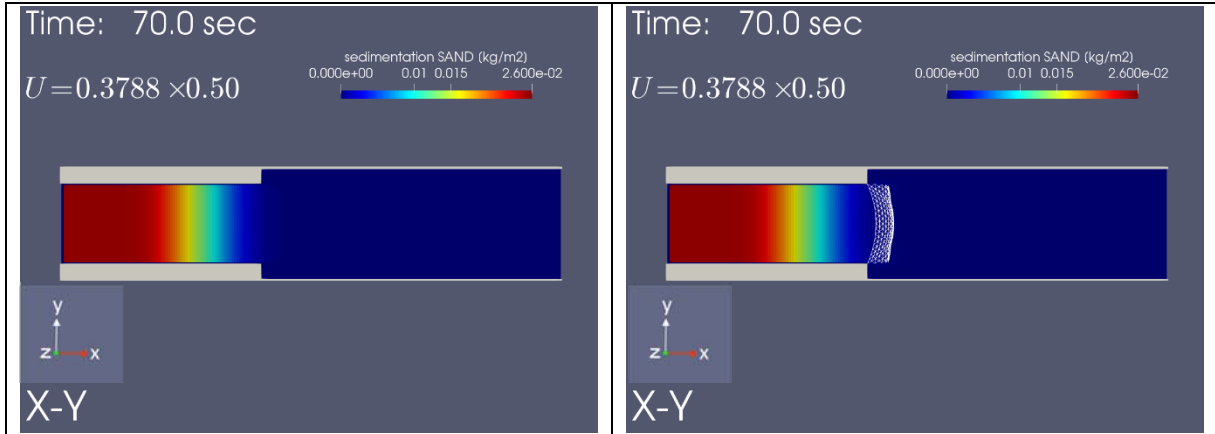


図 6-25 砂の堆積分布（流速 $U=0.3788 \times 0.50$ [m/s] のケース：Time=70.0sec）

※左：フェンスなし， 右：フェンス敷設（たわみあり）

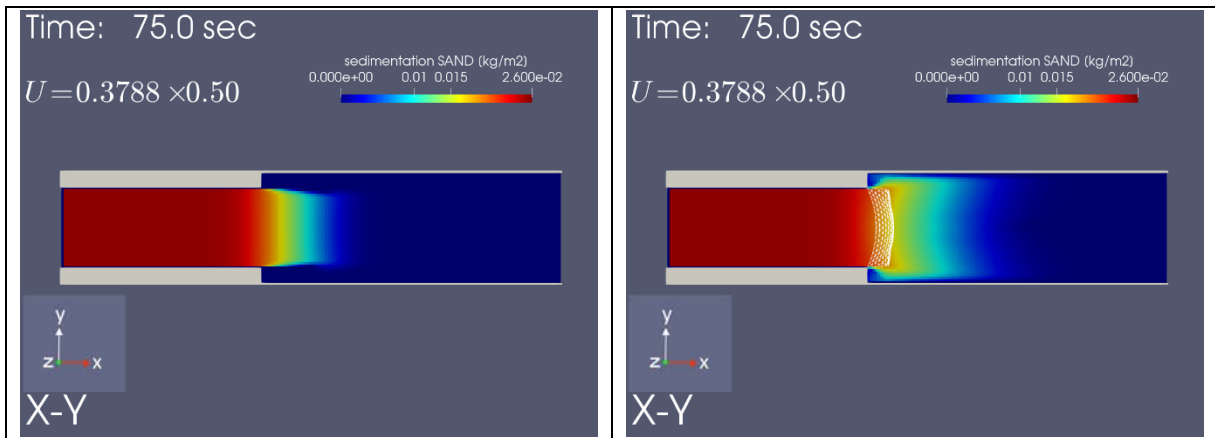


図 6-26 砂の堆積分布（流速 $U=0.3788 \times 0.50$ [m/s] のケース：Time=75.0sec）

※左：フェンスなし， 右：フェンス敷設（たわみあり）

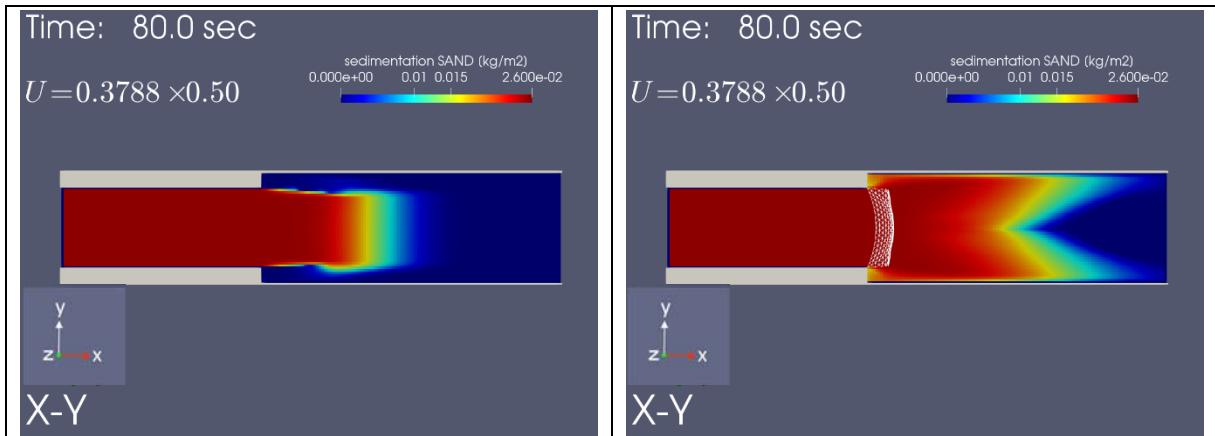


図 6-27 砂の堆積分布（流速 $U=0.3788 \times 0.50$ [m/s] のケース：Time=80.0sec）

※左：フェンスなし， 右：フェンス敷設（たわみあり）

沈降量と外部流出量の収支

溶存成分の外部流出

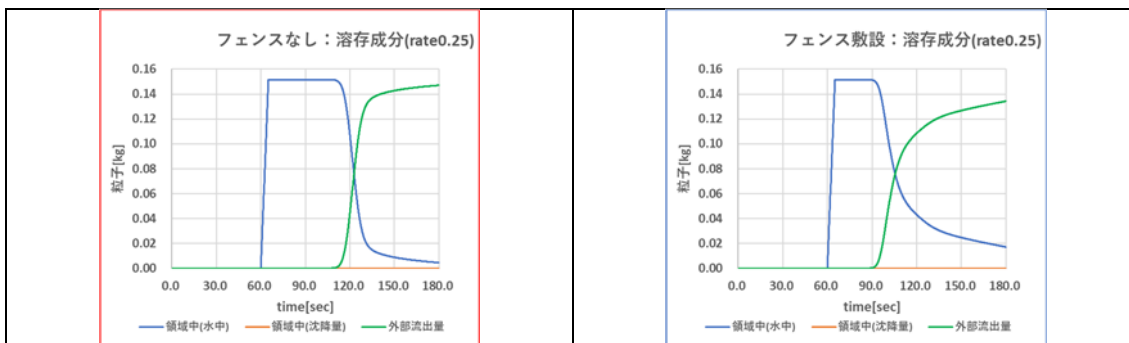


図 6-28 流速 $U=0.3788 \times 0.25$ [m/s] (左：フェンスなし, 右：フェンス敷設)

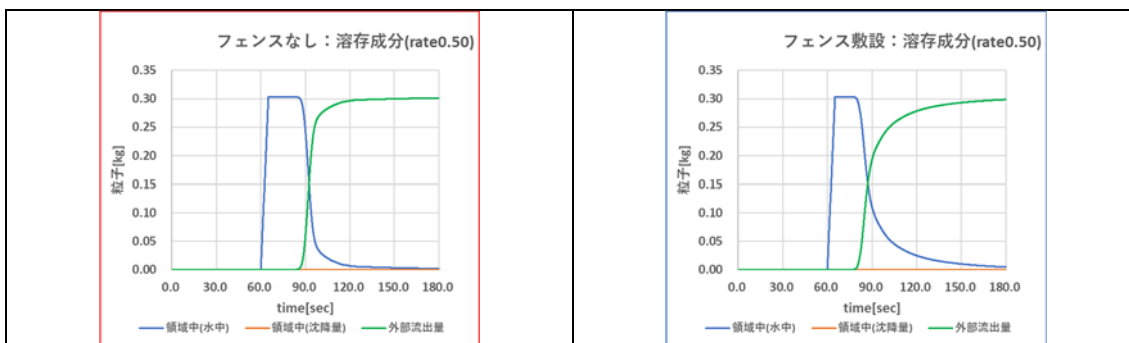


図 6-29 流速 $U=0.3788 \times 0.50$ [m/s] (左：フェンスなし, 右：フェンス敷設)

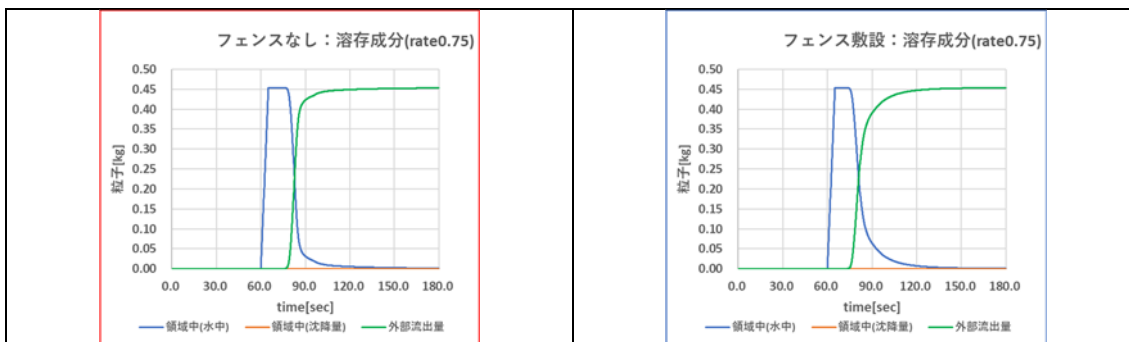


図 6-30 流速 $U=0.3788 \times 0.75$ [m/s] (左：フェンスなし, 右：フェンス敷設)

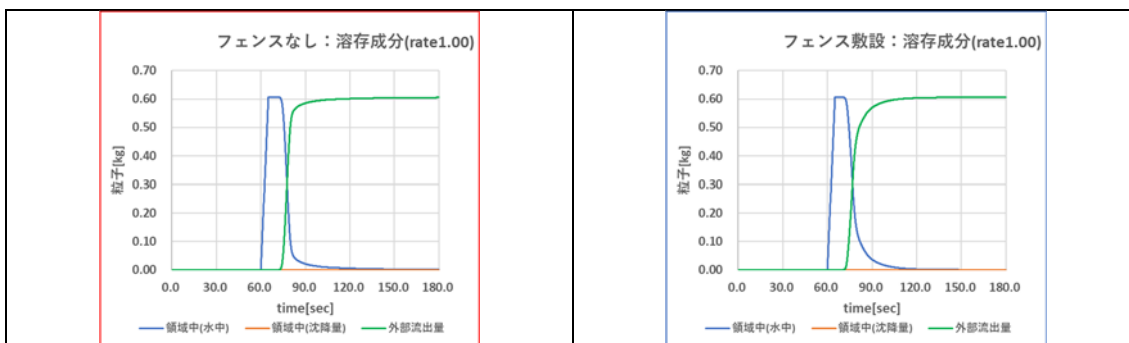


図 6-31 流速 $U=0.3788 \times 1.00$ [m/s] (左：フェンスなし, 右：フェンス敷設)

砂の沈降と外部流出

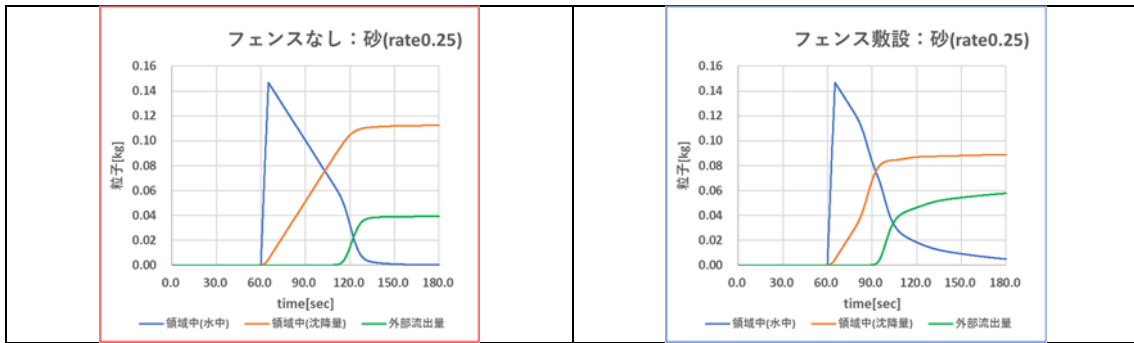


図 6-32 流速 $U=0.3788 \times 0.25$ [m/s] (左：フェンスなし, 右：フェンス敷設)

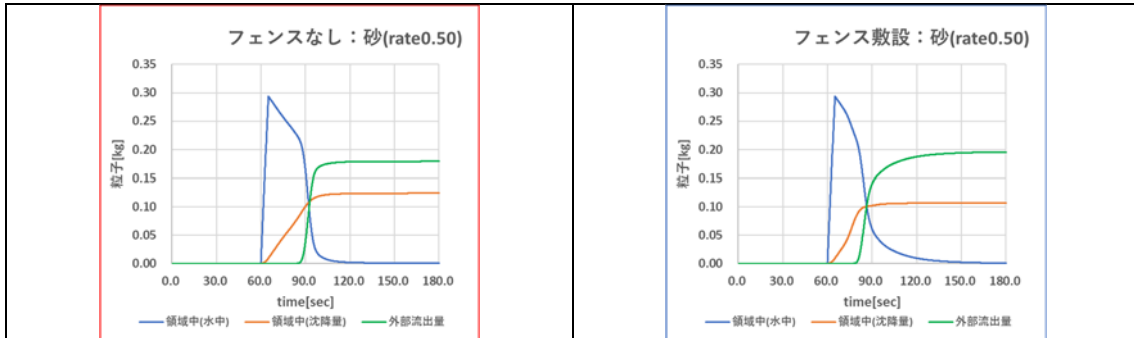


図 6-33 流速 $U=0.3788 \times 0.50$ [m/s] (左：フェンスなし, 右：フェンス敷設)

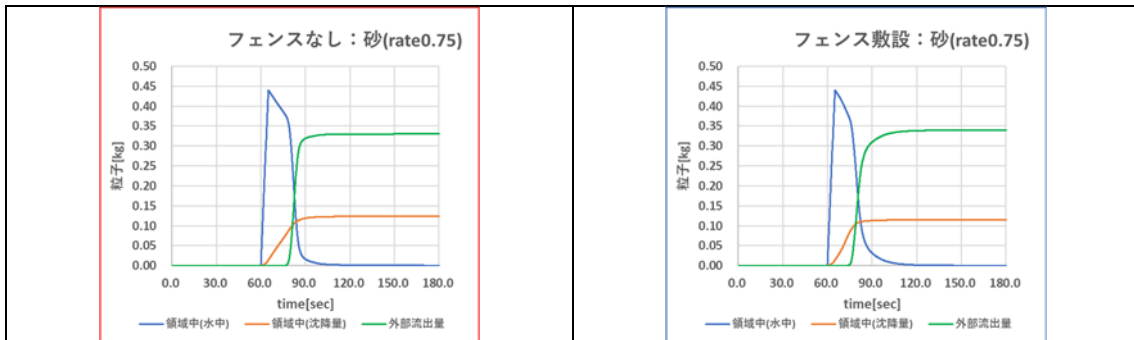


図 6-34 流速 $U=0.3788 \times 0.75$ [m/s] (左：フェンスなし, 右：フェンス敷設)

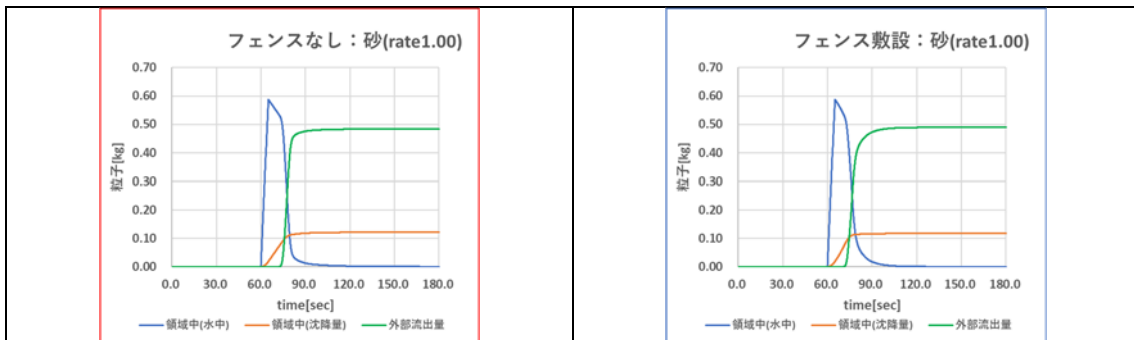


図 6-35 流速 $U=0.3788 \times 1.00$ [m/s] (左：フェンスなし, 右：フェンス敷設)

シルトの沈降と外部流出

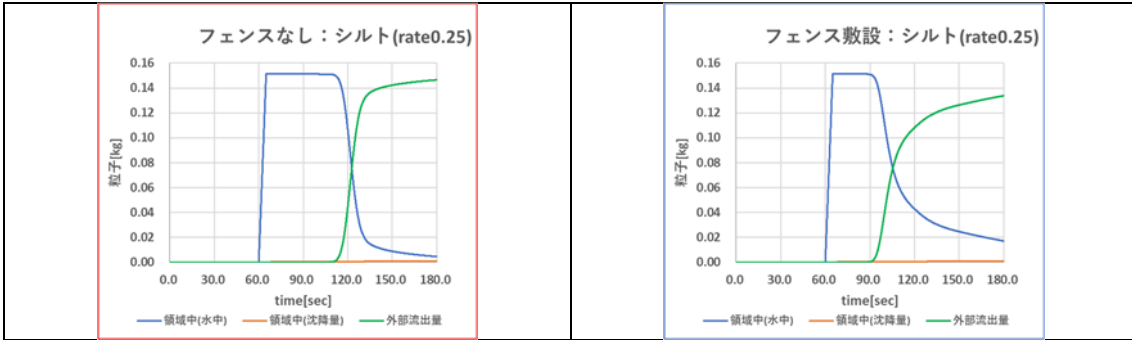


図 6-36 流速 $U=0.3788 \times 0.25$ [m/s] (左：フェンスなし, 右：フェンス敷設)

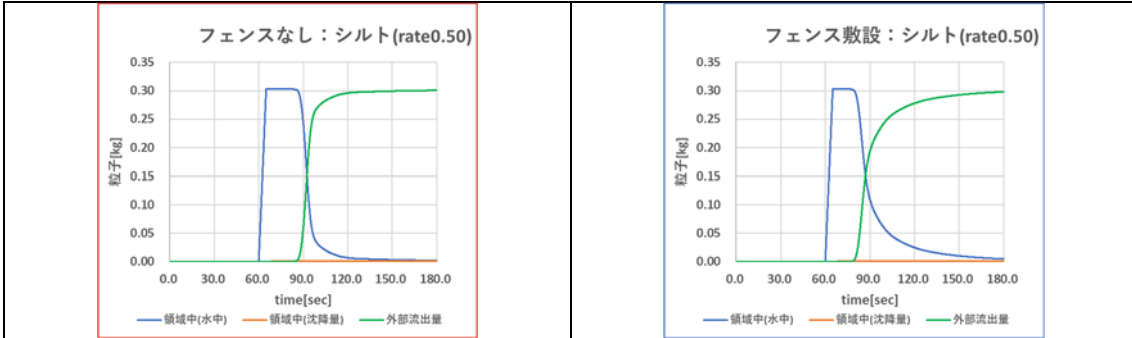


図 6-37 流速 $U=0.3788 \times 0.50$ [m/s] (左：フェンスなし, 右：フェンス敷設)

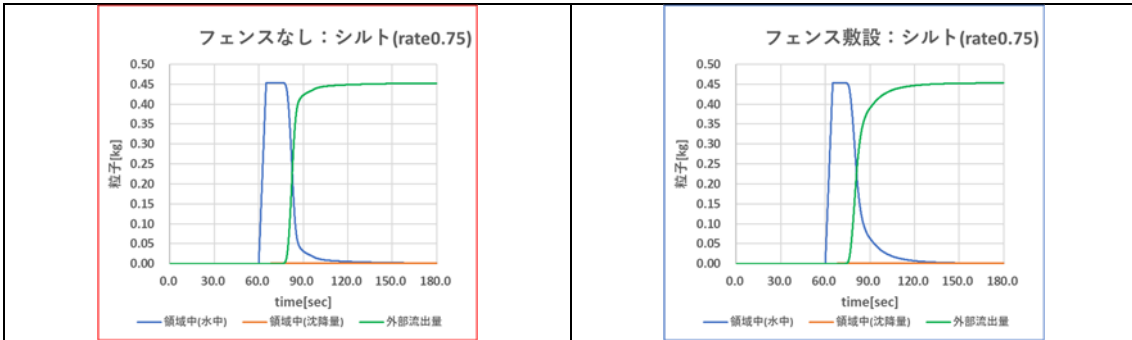


図 6-38 流速 $U=0.3788 \times 0.75$ [m/s] (左：フェンスなし, 右：フェンス敷設)

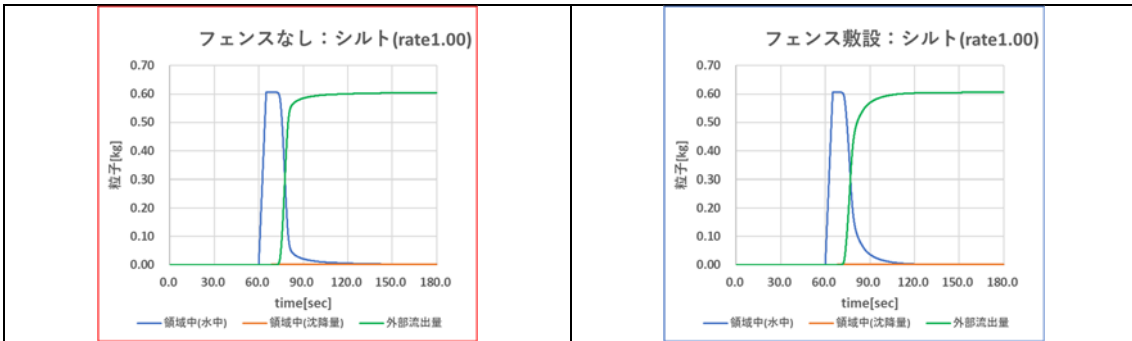


図 6-39 流速 $U=0.3788 \times 1.00$ [m/s] (左：フェンスなし, 右：フェンス敷設)

■ 7章 実港湾多重敷設シルトフェンスの変形動作と放射性核種拡散抑制効果

本章では、5,6章にて検証したシルトフェンスの水平方向の変形動作「ふかれ」及び「たわみ」のモデリングを実装したシミュレーションコードを用いて、実港湾環境モデルのシルトフェンスの変形動作と放射性核種拡散抑制効果について論じる。本章で扱う体系は2つある。一つ目は、図7-1の模式図に示すように、2つの取水口が隣接する開渠部（矩形の水路）があり、取水口にシルトフェンスが敷設される他、開渠口にもシルトフェンスが敷設され、多重の放射性核種の拡散抑制効果が期待できるケースである。二つ目は、図7-2の模式図に示したように、図7-1で示した状況に加えて、港湾口を付加し、港湾全体をモデル化する。その際、港湾口付近には、シルトフェンスユニットを複数貼り合わせて敷設し、多重の拡散抑制効果を更に期待するケースである。前章で明らかにしたように、取水口のシルトフェンスは放射性核種の溶存成分に対して流出の遅延効果を示す一方、懸濁体成分については、シルトフェンス近傍にて沈降を促進することで、放射性核種の拡散抑制が可能と考えられる。この効果に併せて、更に本章では、港湾全体にてシルトフェンスを多重に敷設することで、放射性核種の拡散抑制がより効果的に働くかについて論じる。

7.1 実港湾模型 (I) でのシミュレーションの検証

本節で論じる実港湾とその模型のスケール比等については、表7-1に記す。実港湾の水深は一定とし、6mとする一方、模型の水深は0.15mとなるため、スケール比は模型：実港湾=1：40となる。

表7-1 現地(原発港湾)と模型(実港湾模型 (I))との対比(スケール比含む)

	水深 h[m]	フェンス長さ d[m]	取水口 差渡し B[m]	差渡し:フェンス横幅	スケール比 [-]	流速比 [-]	重錘 [kg/m]
現地	6.0	4.8	12, 20	19.5 : 20.0	-	-	118.4
模型	0.15	0.12	0.3, 0.5	19.5 : 20.0	1/40	1/6.34	0.074

実港湾模型 (I) のシミュレーション対象領域（水槽実験を行う領域と一致）を図7-1に記す。水槽実験では、図7-1に示したように、左端は越流堰とする。これは、模型内で一様に水位がある状況を再現するために必須である。その状況において、取水口奥（図7-1：上向き矢印（黄色）位置）から水を注入し、その注入量に相当する水量が模型内を流れ越流堰から越流することで、実港湾模型における放射性核種を含む汚濁水の流れが模擬できる。尚、越流した水はポンプを用いて、取水口奥に戻すという操作を繰り返し、模型内の水位を一定に保つ。しかし、実港湾では越流堰は存在しないため、シミュレーションと水槽実験にて越流堰のあるケースでの比較検証を行い、検証されたシミュレーションを用いてあらためて越流堰のない系の挙動を予測する。従って、本章では先ず、越流堰のあるケースにて発生する流動場をシミュレーションし、水槽実験と比較検証後、越流堰のないケースで放射性核種の拡散抑制効果をシミュレーションし、その効果を評価する。

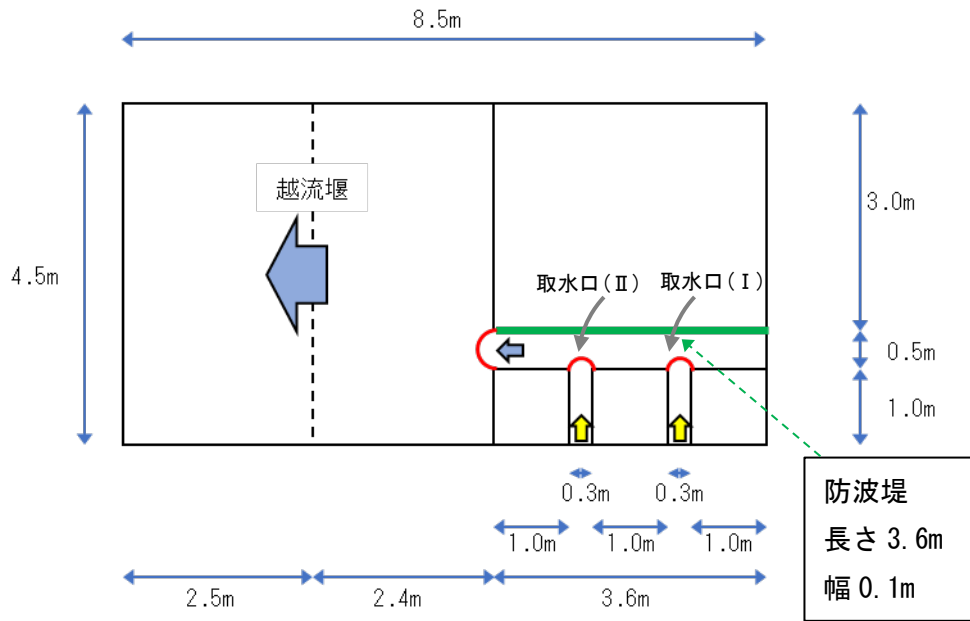


図 7-1 実港湾模型 (I) : シミュレーション及び水槽実験の対象領域と各寸法

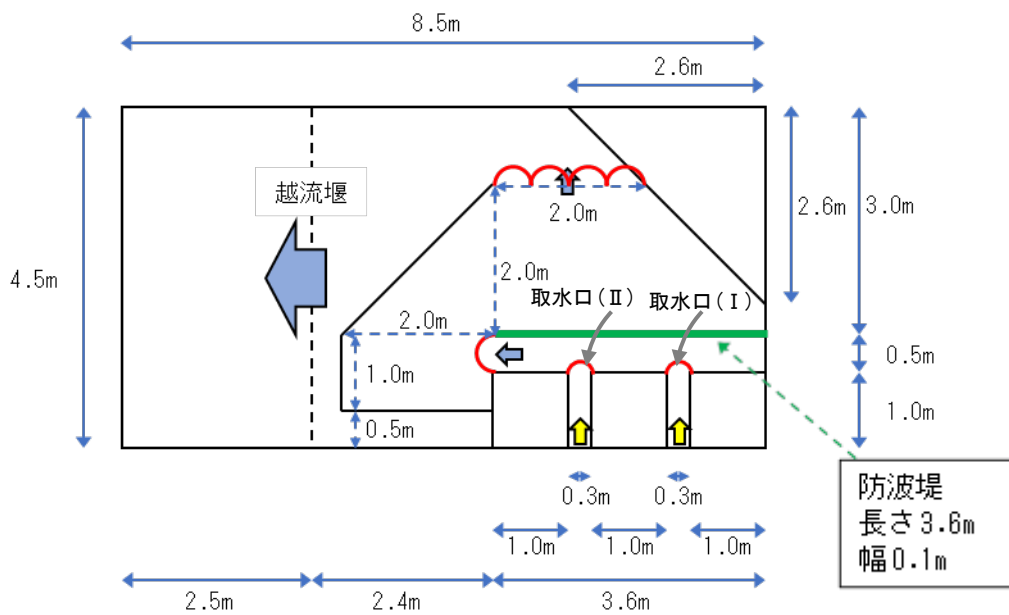


図 7-2 実港湾模型 (II) : シミュレーション及び水槽実験の対象領域と各寸法

図 7-1 を対象とする実港湾模型 (I) に対する水槽実験結果を示す。水槽実験は平面水槽を用いるため、下方や断面方向の状況を測定することが難しく、照明を切り、取水口 (I) 或いは (II) の奥に蛍光染料を投入し、染料を含む水塊を上方から観察することで、流れ場を観測する (図 7-3 に実験のイメージ図を示す。実験はセッティングの都合のため、図 7-1 の上下を反転させ行った。流れ場は上下を反転させたものと同じであり、染料は流れ場を反映して時間と共に移動する。図 7-4 に水槽実験における塗料投入後の時間発展結果 (投入直後、2 秒後、4 秒後、6 秒後の撮影画像) を記す。図 7-4 (a)(撮影画像)より、取水口奥付近の流動場の特徴として、水塊が取水口を出る際、シルトフェンスの影響を受け水平に拡がりながら、開渠口へと向かうことが分かる。また、図 7-4 (b) (撮影画像)から、取水口 (II) 付近の流れ場は、シルトフェンスの影響を受けるが、開渠口へ流れる流れ場の影響を受け、比較的、水平拡散せず、開渠口に向かうことが分かる。また、開渠口では、シルトフェンスの影響を受け、水塊が下方へと押し下げられると同時に水平方向に大きく拡散する様子が分かる。尚、シルトフェンスの一部は蛍光塗料を塗布しており蛍光色を示している。

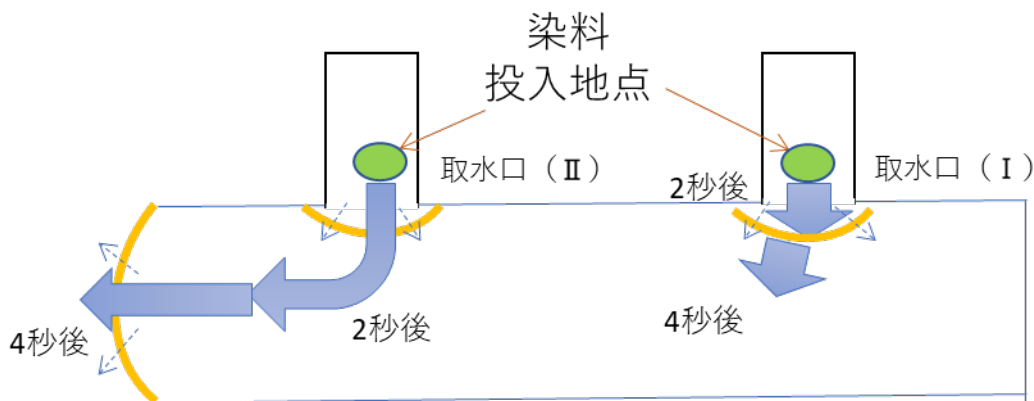
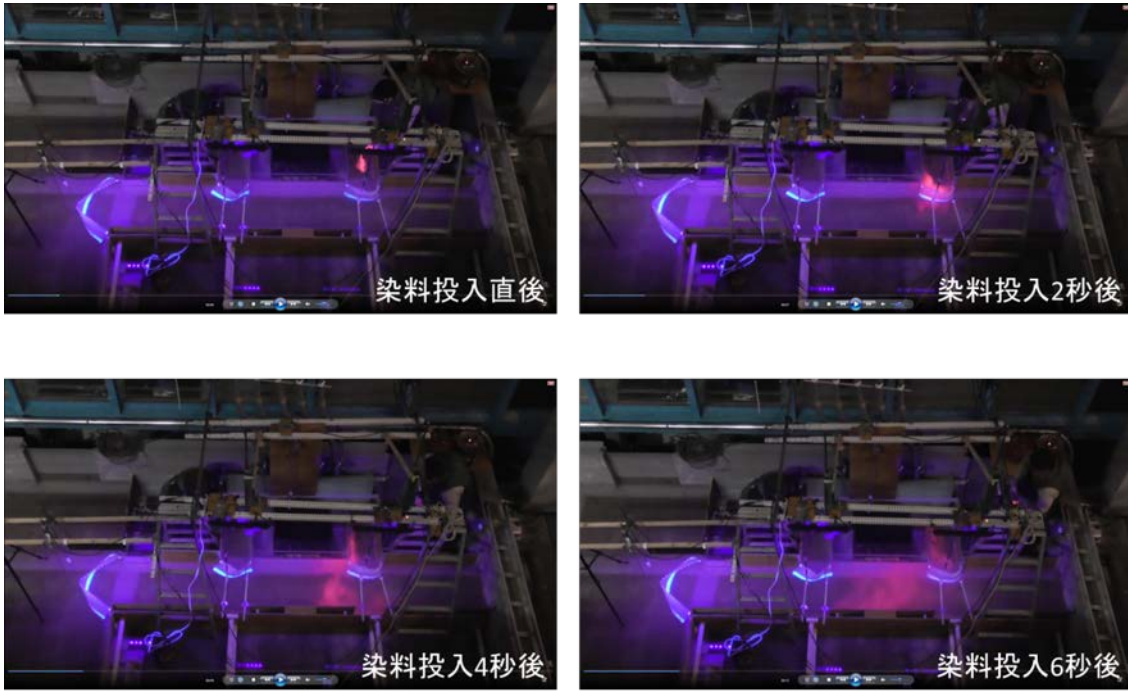
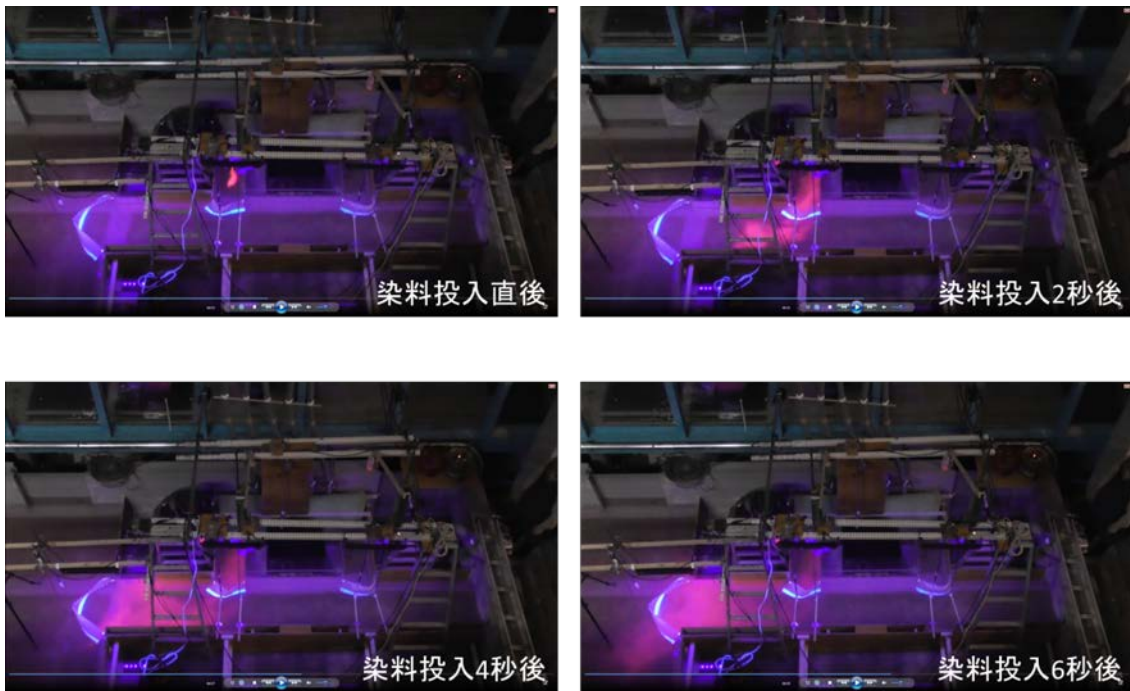


図 7-3 実港湾模型 (I) での水槽実験のイメージ図。取水口(I)と (II) のシルトフェンス内側 (緑の丸点) に染料を投入し、その後の時間発展を追跡する。青の太矢印はシミュレーション結果より観測が期待される流れ場の方向を模式的に示した。尚、図 7-1 模式図に対し上下が反転していることに注意 (実験の都合上、上下反転形状で水槽実験を実施)。



(a) 取水口 (I) 付近の流動場の観察結果 (水槽実験：ポンプ 4 台稼働)



(b) 取水口 (II) 付近と開渠口付近の流動場の観察結果 (水槽実験：ポンプ 4 台稼働)

図 7-4 実港湾模型 (I) での水槽実験結果 (撮影画像) (a) 取水口(I)のシルトフェンス内側に染料を投入後の時間発展の結果と(b)取水口 (II) のシルトフェンス内側に染料を投入後の時間発展の結果を明示 (実験の都合上、図 7-1 と上下が反転していることに注意、即ち取水口は上部に位置する)。

以上の水槽実験から得られた流れ場（観測）の特徴に対し、同等の条件でのシミュレーション結果を図 7-5 に示す。シミュレーションは十分に時間を取り、定常的な流れ場となった時点で、図 7-5 の流れ場の様子を得た。

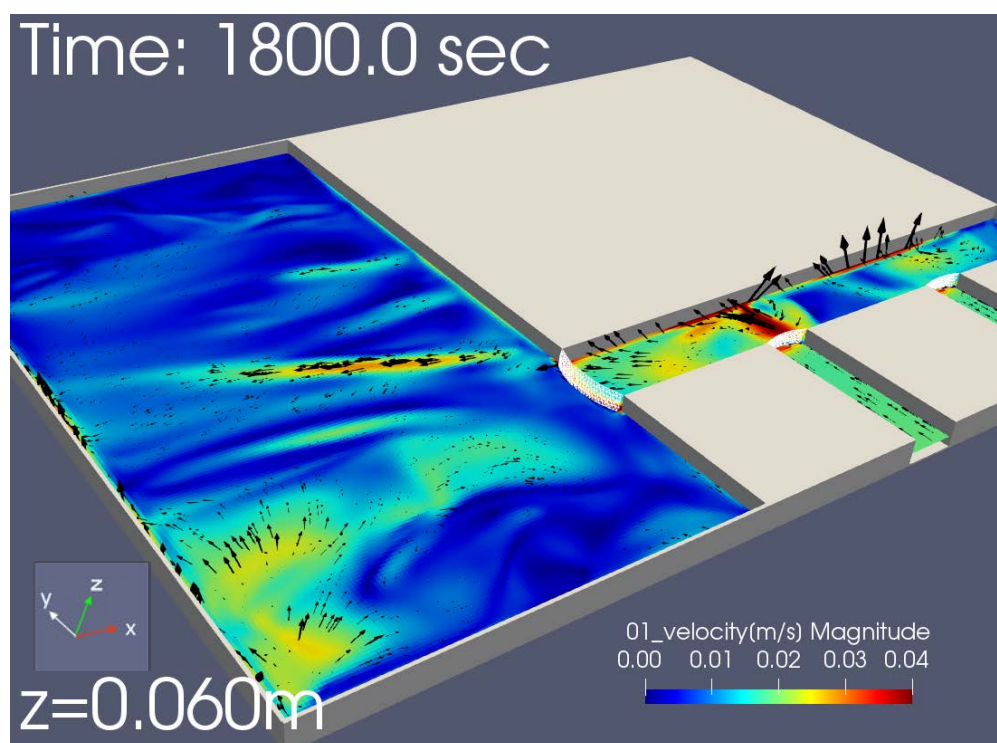


図 7-5 シミュレーションにより得られた実港湾模型 (I) (越流堰あり) 全領域での流れ場 (流速分布)。

図 7-5 は、越流堰を左端に設けた状態での全領域での定常流速分布を示しており、染料を取水口奥から投入した場合は、この流れ場に従って移流・拡散すると考えられる。従って、染料の動く速度はこの流れ場により決まることから、シミュレーション結果の比較検証が可能である。

シミュレーションと実験結果を比較する。まず、シミュレーション結果 (図 7-5 参照) から取水口 (I) 付近の流れ場は、取水口 (II) 付近と比べて、強い流れ場が形成されていないことが分かる。これは、水槽実験の結果と良く一致する。つまり、取水口 (I) 奥と (II) 奥に投入した染料の投入後 2 秒後の結果 (図 7.4 参照) を比較すると、取水口 (II) の方が素早く開渠口に向かって流れている様子が分かる (図 7-3 でも模式的にその状況を示す)。また、開渠口でも、水平方向への拡散により、強い流れ場がシルトフェンスにより抑制されたことが分かる結果となっている。従って、開渠内の流れ場の特徴をシミュレーションは、ほぼ正しく捉えていることが分かる。この検証結果に基づき、以下では、シミュレーションのみを用いて、越流堰のない実港湾模型 (I) での放射性核種抑制効果について論じる。尚、上記のシミュレーションにより得られた流れ場に対し、越流堰を取り外した場合の流れ場を図 7-6 に示す。両図を比較すると、取水口や開渠口付近の違いは殆ど観察されないが、越流堰付近の流れ場は、明らかに堰の存在のため、複雑となっていること (図 7-6 参照) が見て取れる。また、更に比較のため、シルトフェンスを全て取り外した場合のシミュレーション結果を図 7-7 に示す。シルトフェンスが敷設されていない場合、取水口から出る水塊は直接、開渠口を通過し、港湾外

へと向かって殆ど拡散することなく流れることが分かる。これらの結果から、シルトフェンスは明らかに高濃度の放射性核種を含む水塊の流れを分散させていることが分かる。このような流れ場の違いは、現地スケールにおいても詳細な乱流構造を除けば殆ど再現されると考えられる。

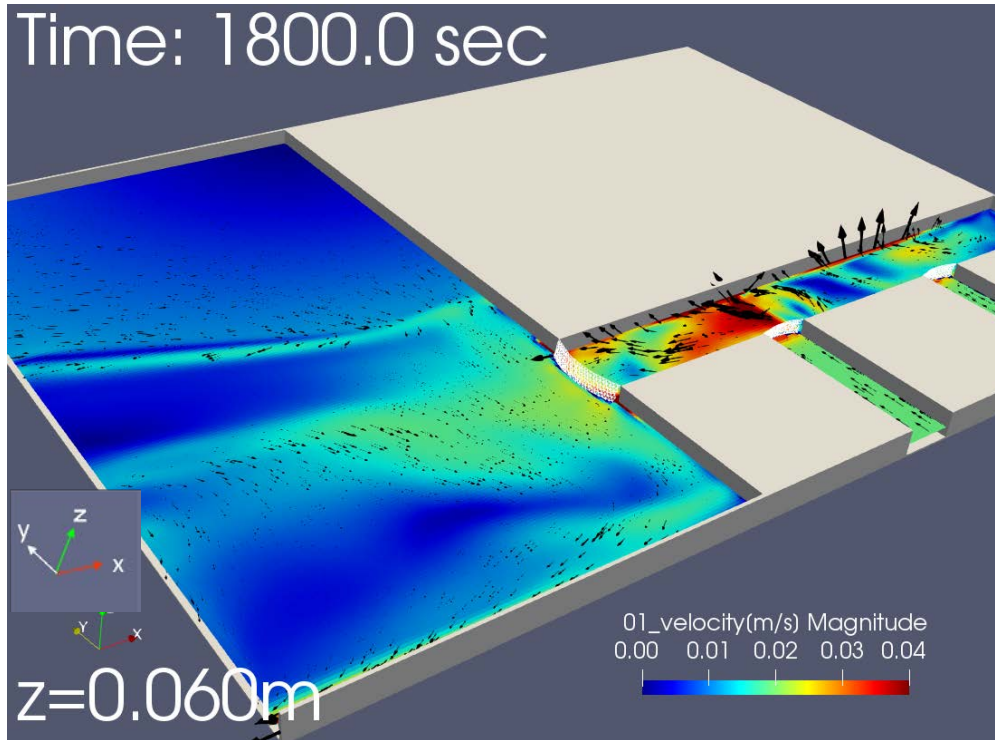


図 7-6 シミュレーションにより得られた実港湾模型 (I) (越流堰なし) 全領域での流速分布 (シルトフェンス有)

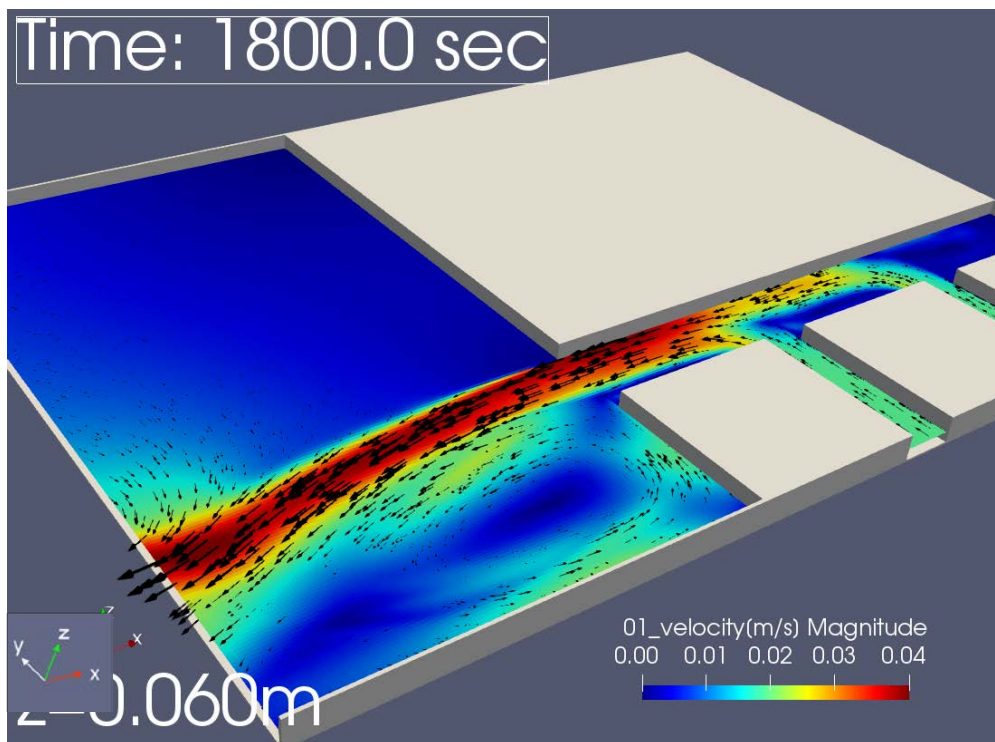


図 7-7 シミュレーションにより得られた実港湾模型 (I) (越流堰なし) 全領域でシルトフェンスを取り外した場合に得られる流速分布 (比較のためシルトフェンス敷設なし)

7.2 放射性核種の拡散抑制効果（実港湾模型（I））

本節では、前節にて検証したシミュレーションを用いて、実港湾模型（I）において、放射性核種の拡散抑制効果について論じる。シミュレーションする体系は実港湾模型（I）であり、図 7-8 に記したように、放射性核種を含む水塊の流入口は取水口奥（上方を向く黄色矢印）とする。その際、一様な分布をした放射性核種（溶存成分と懸濁体成分）流入を仮定し、流出をモニターする場所は越流堰を設定した場所での断面とする。

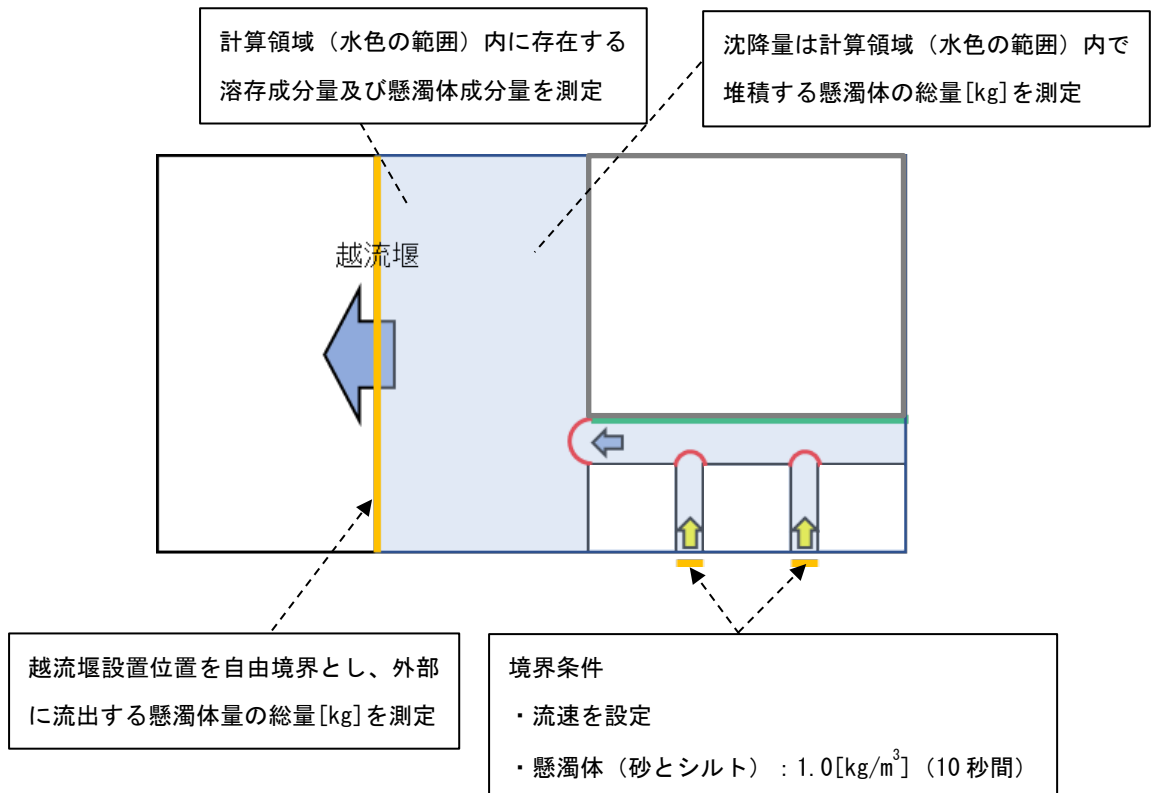


図 7-8 実港湾模型（I）における境界条件と放射性物質の流出量及び滞留量測定の様式図。水が定常水位で存在する部分は水色で表示。放射性核種（溶存成分及び懸濁体成分）は各々、上向き黄色矢印位置から流入する。模型の寸法等の詳細は図 7-1 参照。赤い曲線はシルトフェンスの設置位置。

尚、放射性核種流出のシミュレーションでは、取水口奥にて付与する流速 U は $U=0.189737 \times 0.1$ [m/s] とする。

7.3 計算条件（放射性物質の諸元）

取水口（奥）にてインプットする放射性物質としては、溶存成分と懸濁体成分（放射性物質は砂、シルトに不可逆的に吸着を仮定する。従って、砂、シルト量の分布を追跡することで放射性物質量を計算可能とする。それ故、簡単のため砂・シルト量の分布を観察する）の二つを与える。尚、表 7-2 に用いた砂とシルトの諸元を示す。

表 7-2 放射性物質の諸元(種類、密度、粒径、沈降速度)

種類	密度 ρ [kg/m ³]	粒径 d [m]	沈降速度 S_v [m/s]
溶存成分	1000.0	0.0E+0	0.0E+0
砂	2650.0	74.0E-6	-4.92E-03
シルト 60	2650.0	60.0E-6	-3.23E-03
シルト 40	2650.0	40.0E-6	-1.44E-03
シルト 20	2650.0	20.0E-6	-3.59E-04
シルト 10	2650.0	10.0E-6	-8.98E-05
シルト 5	2650.0	5.0E-6	-2.25E-05

尚、表 7-2 の沈降速度 S_v は Stokes の式を用いて計算した（下式参照）。

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

その際、流体密度は $\rho = 1000.0$ [kg/m³] とし、動粘性係数は $\nu = 1.0E-6$ [m²/s] として与えた。

7.4 シミュレーション結果（放射性物質の溶存成分の流出及び懸濁体成分の沈降と流出）

放射性物質量のバランスの時間発展を測定したシミュレーション結果を図 7-9 に記す（左側はシルトフェンス敷設なし、右側はシルトフェンス敷設あり）。まず、溶存成分については、シルトフェンス敷設により明らかに流出（緑色の曲線が外部流出量を表す）の遅延効果が見られる。一方、懸濁体の場合、シルト 40（例：40 とはシルトの粒径 40 μ m を指す）までは、砂のケースとほぼ同様の振る舞いを示し、外部に流出する以前に計算領域内で沈降し、シルトフェンスの敷設如何に拘わらず、全て領域内に沈降することが分かる。一方、シルト 20 からシルト 10 については、シルトフェンス敷設により流出量に大きな違いが生じることが分かる。これは、シルトフェンスによって沈降が促進されたため生じたと見る事ができる。つまり、シルトフェンスにより流出量が減少した分が、計算領域内の沈降量としてバランスされていることから、明らかにその理解が正しいことが分かる。特に、シルト 20 のケースでは、シルトフェンス敷設による流出量は敷設なしと比べ 50% 程度となった。一方、シルト 5 については、溶存成分と同様、シルトフェンスにより、流出の遅延効果が主たる効果となる（但し、沈降効果も十分に見られる）ことが分かった。この結果より、流速が更に小さい場合は、シルト 5 についても沈降効果がクリアに見えてくるとも考えられる。これまで、垂下型シルトフェンスの効能については、外部への流出に関し、殆ど効果がないとの議論もあり、5 章の 2 重シルトフェンスのケースでも、シルト粒径にてはっきりと表れる効果は遅延効果のみであったが、港湾スケールの模型の場合、はっきりと流出量が抑

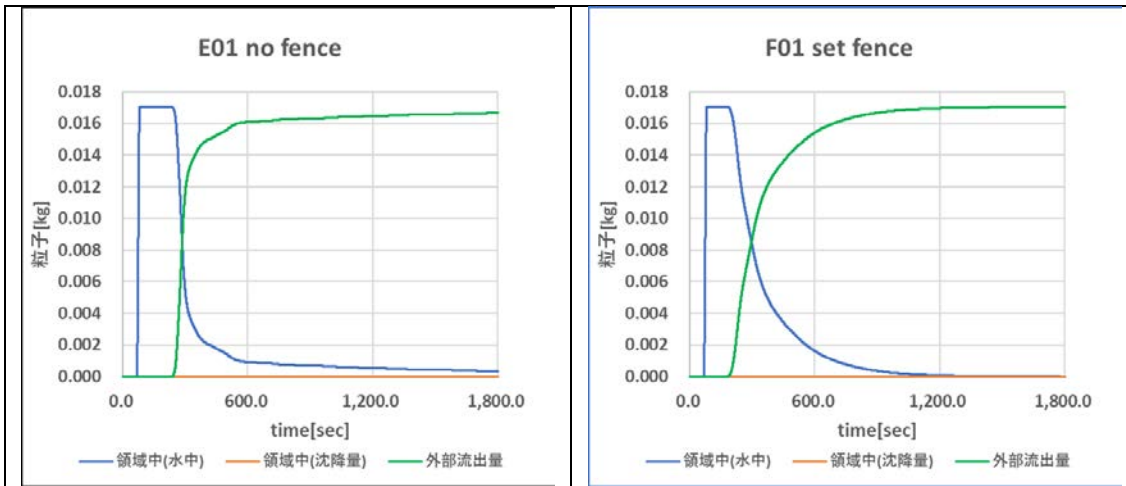
制されることが示された。

以下では、この流出量が抑制されたケースに対し、懸濁体成分が水中でどのような分布で港湾モデル内を流動したか、そして領域のどこでどのように沈降したか、その分布を明らかにする。つまり、なぜシルト成分がシルトフェンスにより外部流出が抑制されるのか、その機構を考察する。

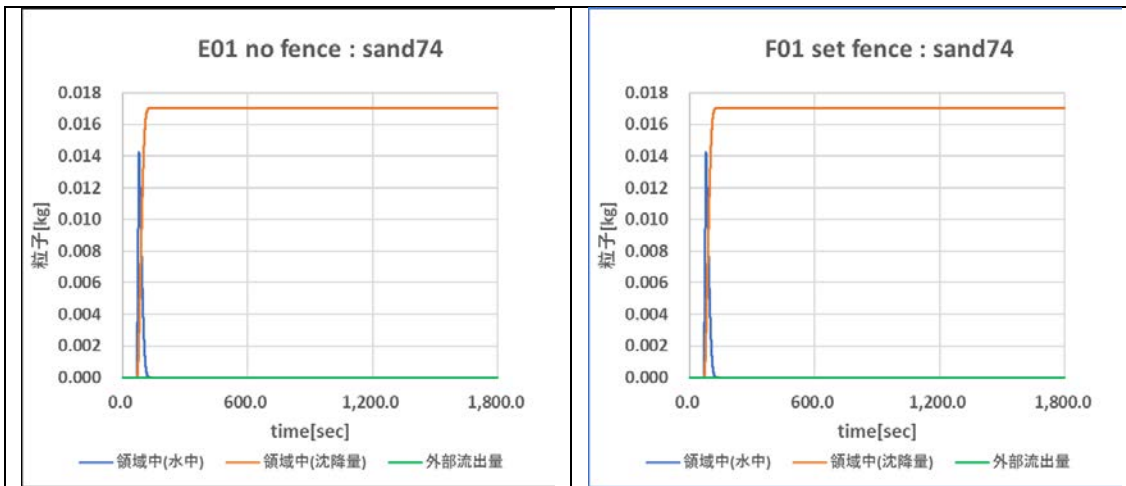
図 7-10、図 7-11、図 7-12 は、シミュレーションにより得られたシルト 10 の水平方向の濃度分布（指定する一定の水深断面での水平方向の分布である。上層、中層、下層の 3 水深の分布）の時刻歴である。図 7-10（初期の分布）からは、取水口内にてシルト 10 の分布は鉛直方向に一様であることが分かる。次の図 7-11 では、シルトフェンスの影響により、シルトフェンス敷設ケースでは下層のみが、敷設なしのケースと比べて先に開渠口から開渠外へと流出したが、その後、下層のみで広範囲に広がったことが分かる。図 7-13 は、最終時刻（1800 秒後）での水底での沈降量の水平方向の分布だが、シルトフェンスが敷設されたケースでは、下層で広がったシルト 10 は比較的広く港湾に拡散し沈降したことが分かる。一方、敷設なしのケースでは、一部は沈降したが、多くが流れにのり流出していった様子が分かる。つまり、シルトフェンスは、シルト 10 を下層に移行させ、流出以前に沈降させていることが、外部流出量の減少に繋がったと言える。

以上の結果から、実港湾模型 (I) のように、水平方向が水深より十分に大きいケースにおいては、水平方向に移流・拡散する距離が十分に長く、沈降する時間が確保される場合は、シルトフェンスは懸濁体成分を水底近くの下層へと導くため、より早くに沈降を促すことから、外部への流出量を抑制できることが分かる。従来の模型研究では、実港湾スケール模型に対する研究は皆無であり、シルトフェンスの拡散抑制効果に疑問が投げかけられていたが、実際はシルトフェンス近傍だけでなく、広範囲に沈降しうることを考慮した場合にシルトの拡散抑制効果が現れることが分かった。この事実から、水平方向のスケールが十分に大きい港湾を模擬した本実港湾模型 (I) のように、シルトフェンスを重層的に敷設することで、港湾外への流出抑制が可能であることが分かる。

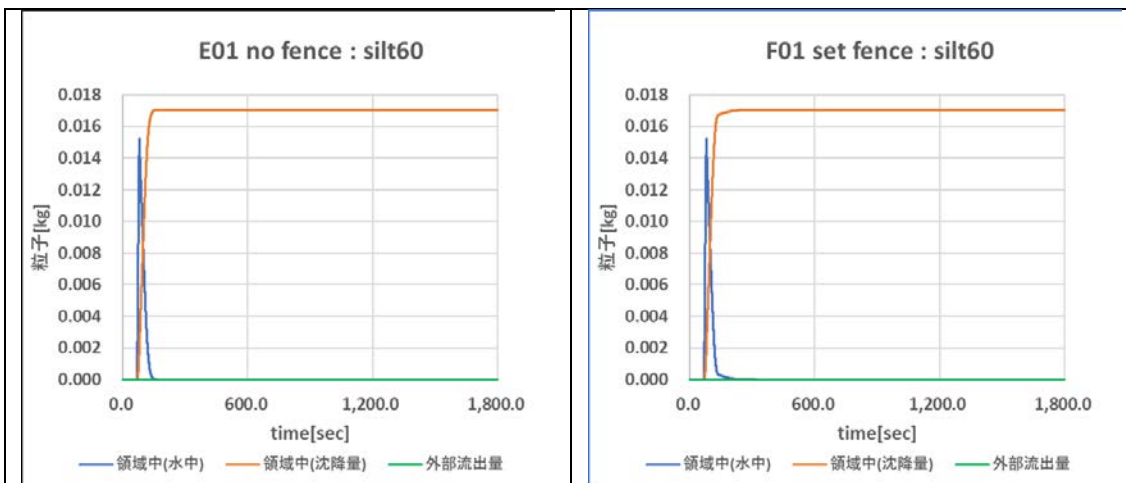
(設定流速 $V=0.1897 \times 0.1$ [m/s])



(a) 溶存成分 (左: フェンスなし, 右: フェンス敷設)

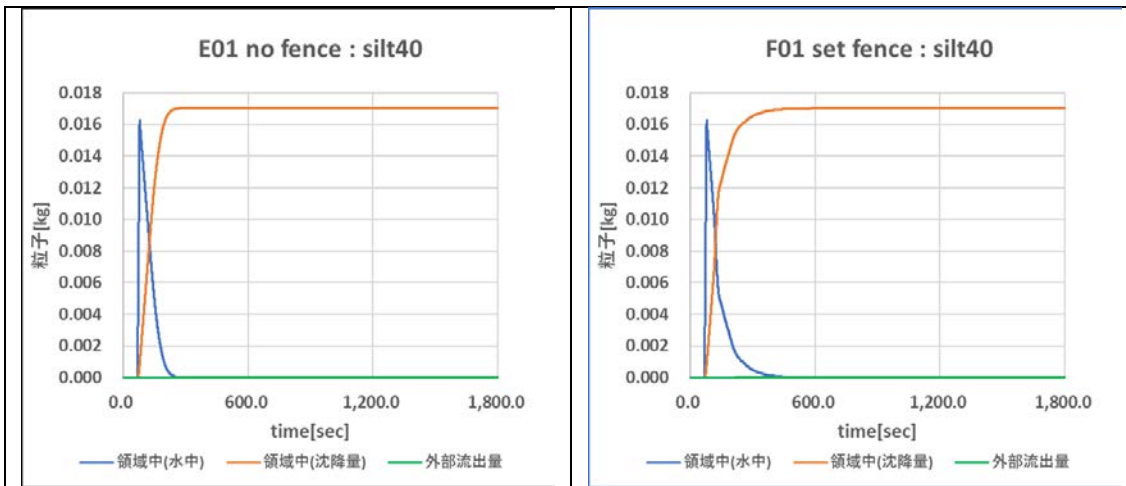


(b) 砂 (左: フェンスなし, 右: フェンス敷設)

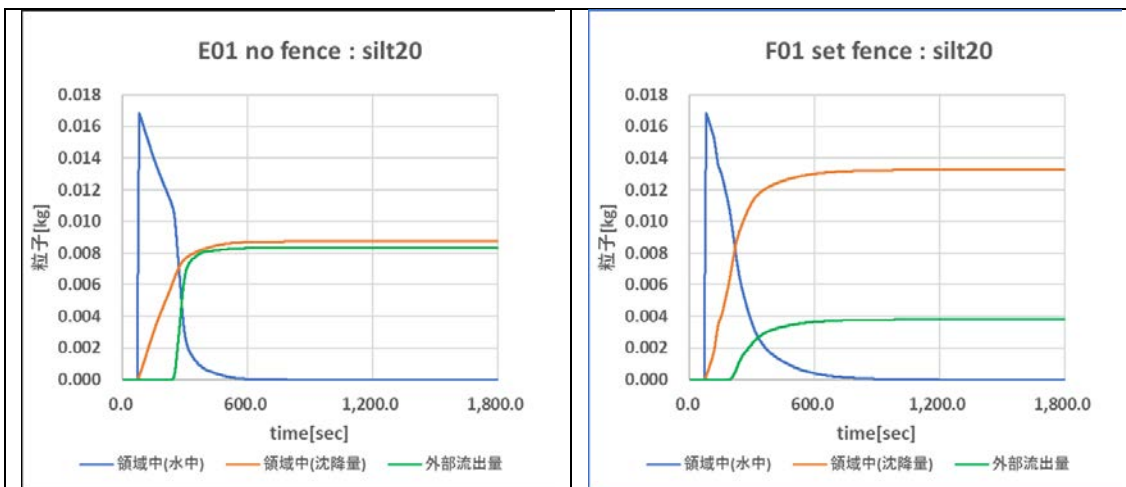


(c) シルト 60 (左: フェンスなし, 右: フェンス敷設)

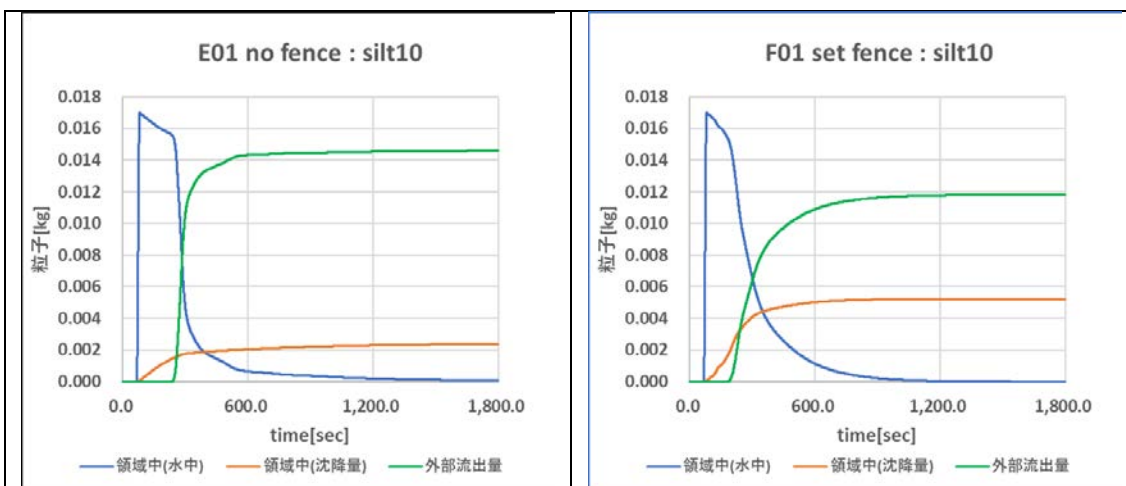
図 7-9 放射性物質 (溶存成分と懸濁体成分) の収支バランス (領域内滞留量・水底沈降量・外部流出量) の時間発展 (a)~(c)



(d) シルト 40 (左 : フェンスなし, 右 : フェンス敷設)

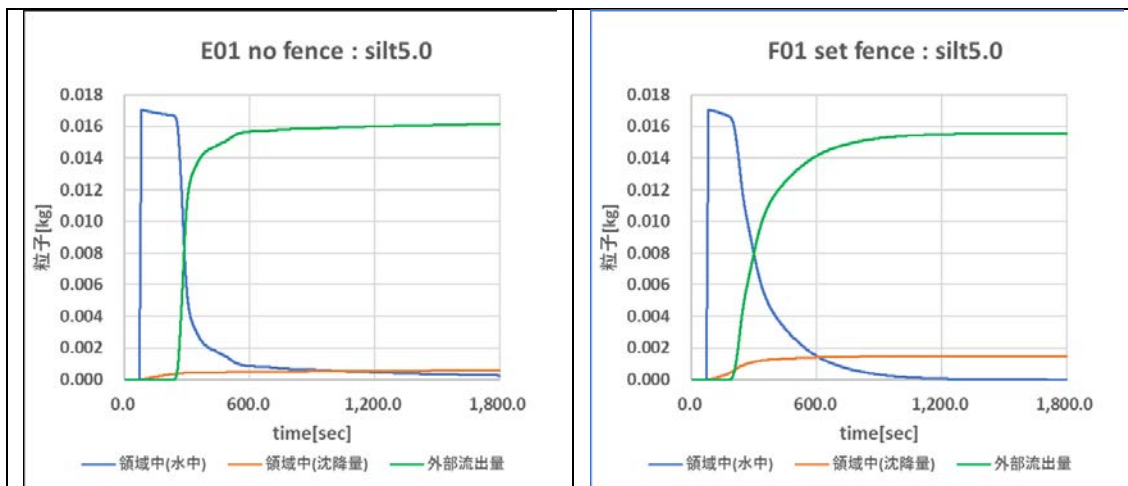


(e) シルト 20 (左 : フェンスなし, 右 : フェンス敷設)



(f) シルト 10 (左 : フェンスなし, 右 : フェンス敷設)

図 7-9 放射性物質 (溶存成分と懸濁体成分) の収支バランス (領域内滞留量・水底沈降水量・外部流出量) の時間発展の続き (d)~(f)

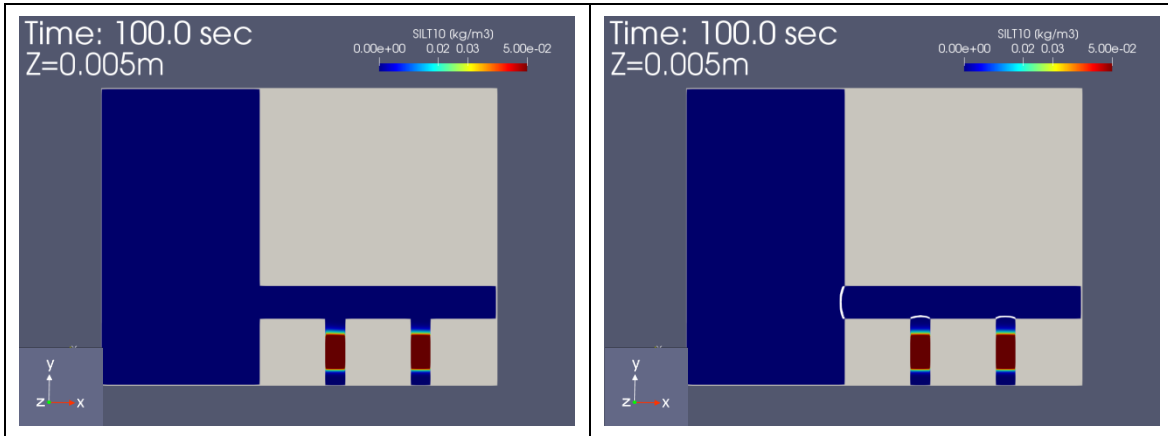


(g) シルト 5 (左：フェンスなし， 右：フェンス敷設)

図 7-9 放射性物質（溶存成分と懸濁体成分）の収支バランス（領域内滞留量・水底沈降量・外部流出量）の時間発展の続き (g)

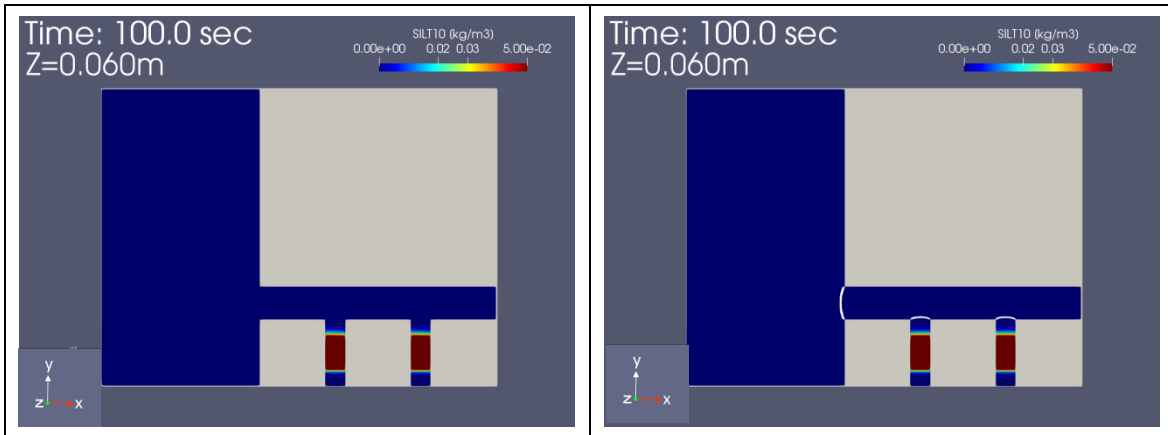
可視化結果 (シルト 10($10\mu\text{m}$) : 水平方向分布)

堰なし (設定流速 $V=0.1897\times 0.1[\text{m/s}]$) 水中分布の時刻歴



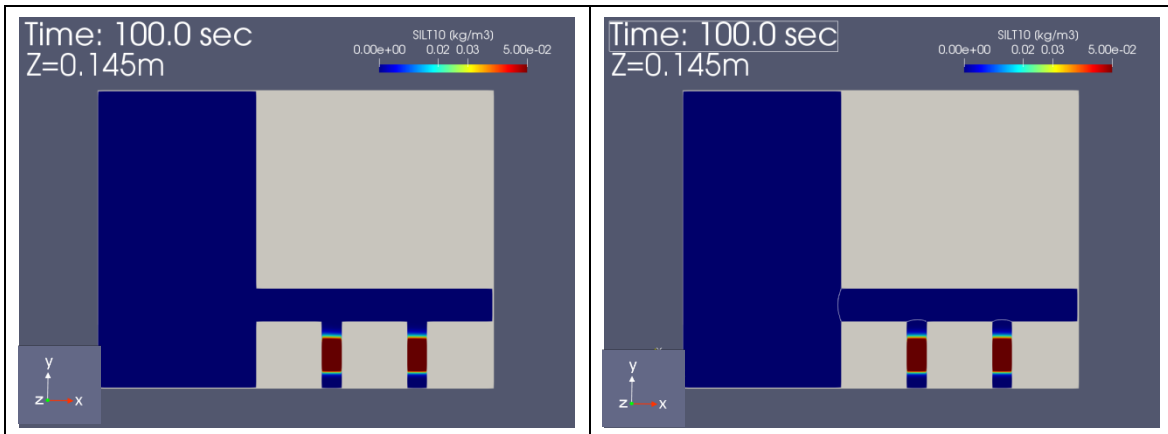
シルト 10 (左 : フェンスなし, 右 : フェンス敷設)

Time=100.0sec, 下層 (水中分布)



シルト 10 (左 : フェンスなし, 右 : フェンス敷設)

Time=100.0sec, 中層 (水中分布)

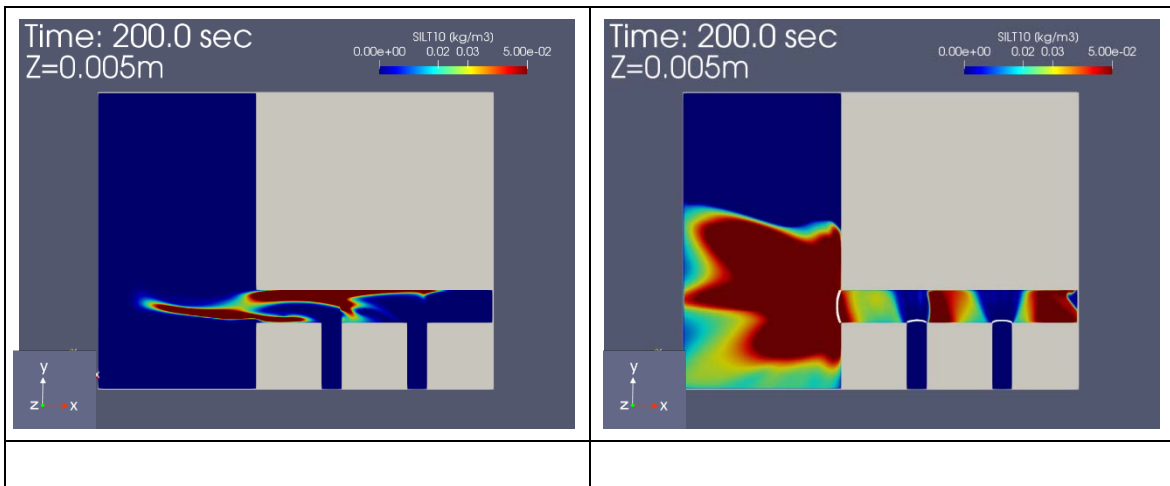


シルト 10 (左 : フェンスなし, 右 : フェンス敷設)

Time=100.0sec, 上層 (水中分布)

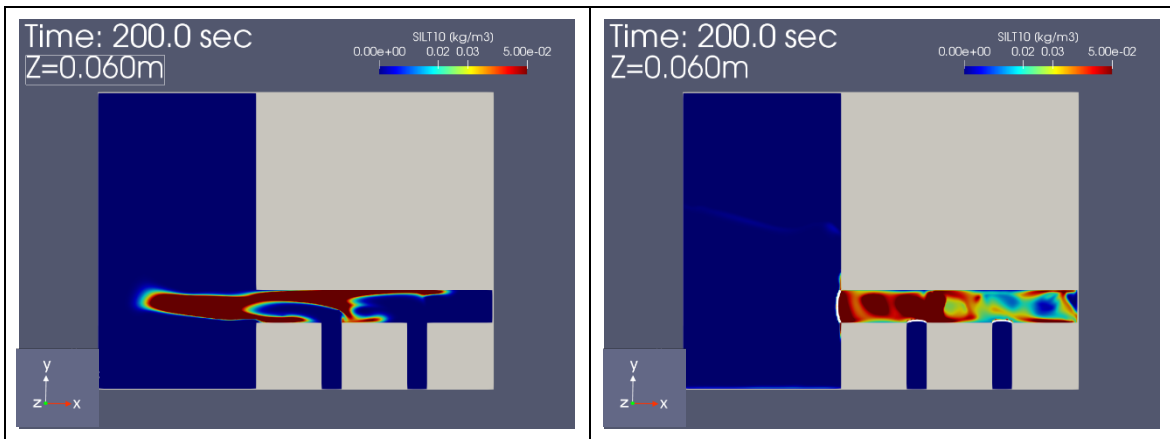
図 7-10 時刻 $t=100\text{sec}$ でのシルト 10 の濃度の水平方向分布 (上 : 下層、中 : 中層、下 : 上層)

可視化結果（シルト 10($10\mu\text{m}$)：水平方向分布)
 堰なし（設定流速 $V=0.1897\times 0.1[\text{m/s}]$ ） 水中分布の時刻歴



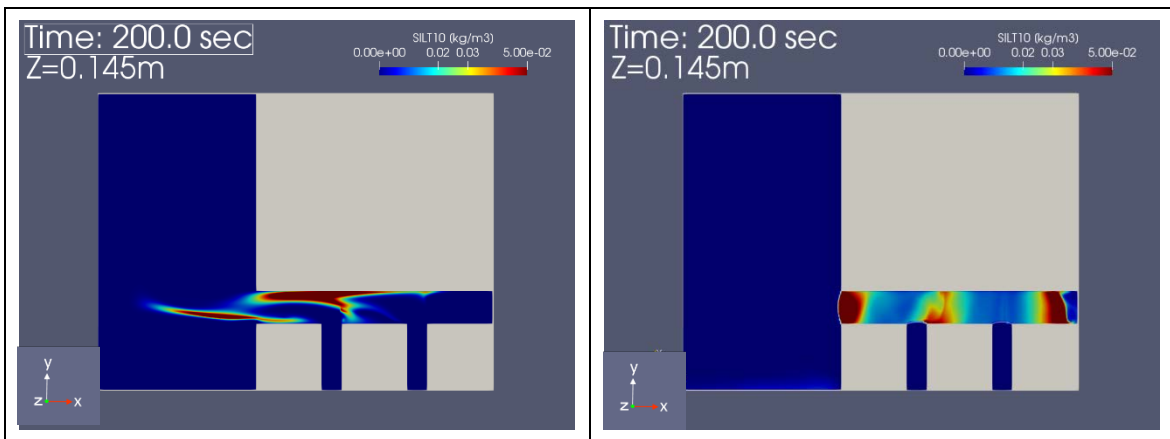
シルト 10（左：フェンスなし， 右：フェンス敷設）

Time=200.0sec, 下層（水中分布）



シルト 10（左：フェンスなし， 右：フェンス敷設）

Time=200.0sec, 中層（水中分布）



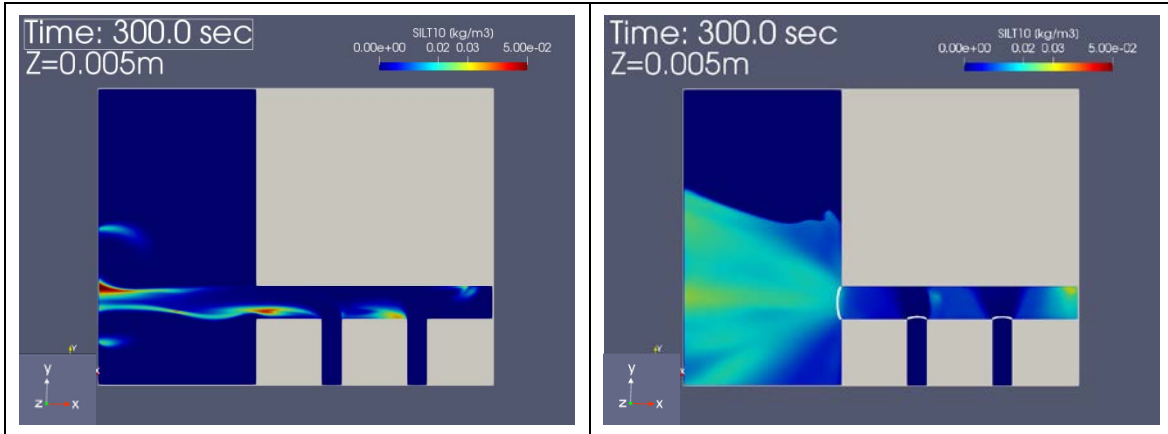
シルト 10(左：フェンスなし， 右：フェンス敷設)

Time=200.0sec, 上層（水中分布）

図 7-11 時刻 $t=200\text{sec}$ でのシルト 10 の濃度の水平方向分布（上：下層、中：中層、下：上層）

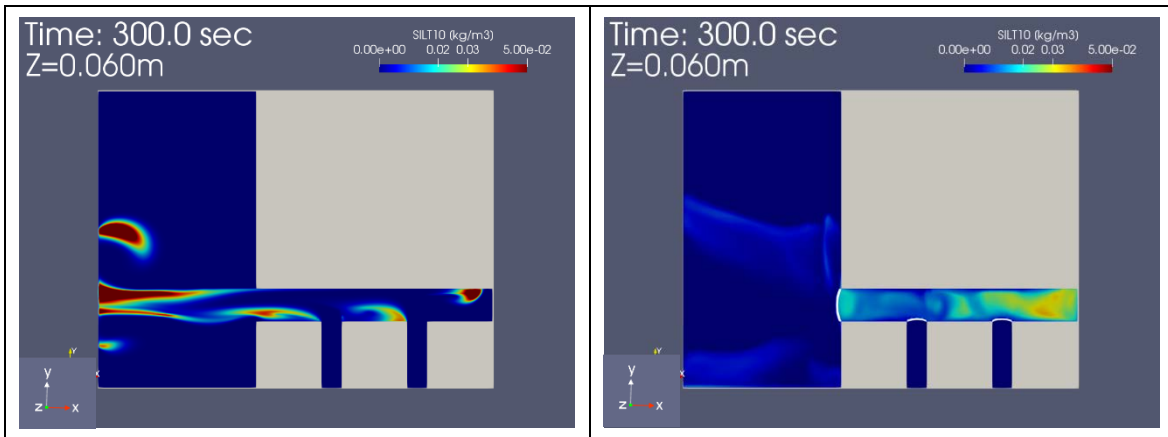
可視化結果 (シルト 10(10 μ m) : 水平方向分布)

堰なし (設定流速 $V=0.1897 \times 0.1$ [m/s]) 水中分布の時刻歴



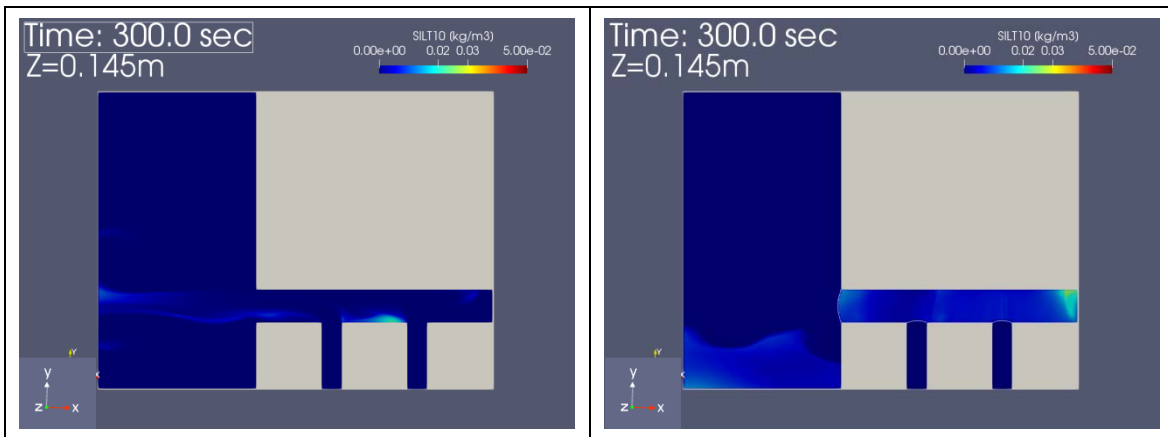
シルト 10 (左 : フェンスなし, 右 : フェンス敷設)

Time=300.0sec, 下層 (水中分布)



シルト 10 (左 : フェンスなし, 右 : フェンス敷設)

Time=300.0sec, 中層 (水中分布)

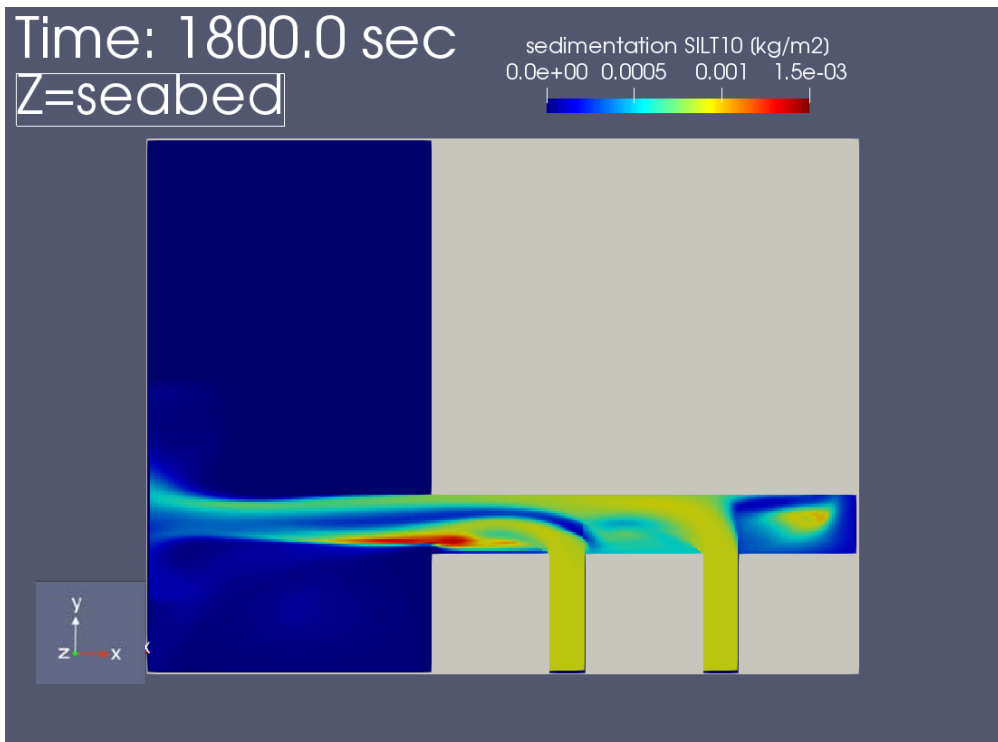


シルト 10 (左 : フェンスなし, 右 : フェンス敷設)

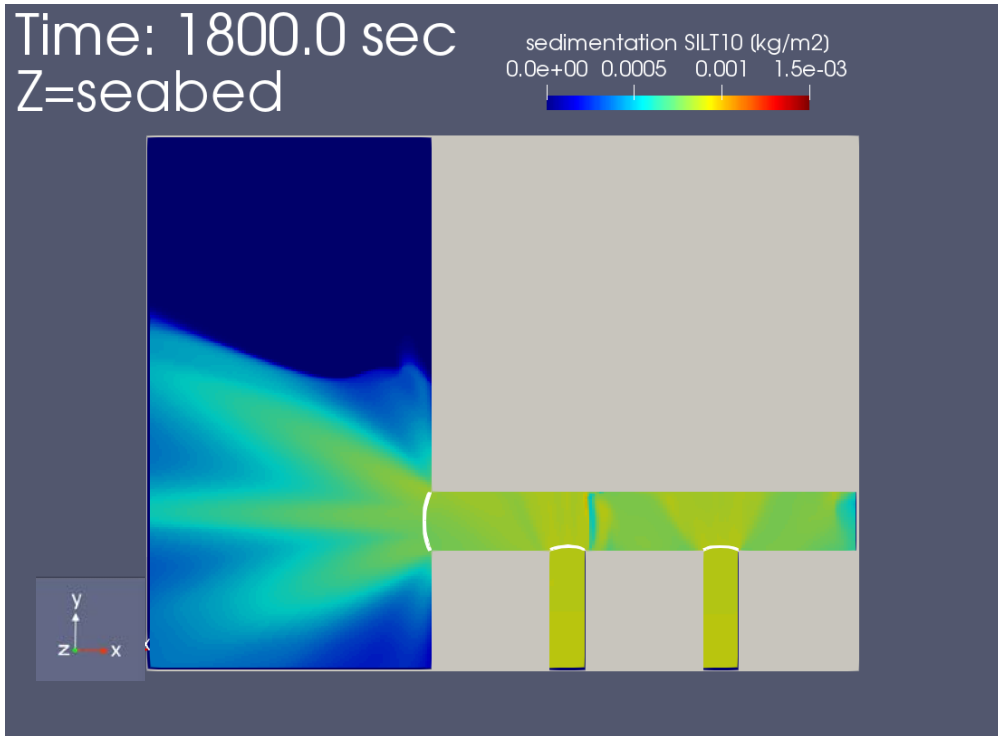
Time=300.0sec, 上層 (水中分布)

図 7-12 時刻 $t=300$ sec でのシルト 10 の濃度の水平方向分布 (上 : 下層、中 : 中層、下 : 上層)

可視化結果 (シルト $10\mu\text{m}$: 水平分布)
 堰なし (設定流速 $V=0.1897\times 0.1[\text{m/s}]$) 堆積分布 (最終時刻)



シルト 10 フェンスなし
 海底沈降量



シルト 10 フェンス敷設
 海底沈降量

図 7-13 最終時刻 (t=1800sec) での沈降シルト 10 の水平方向分布 (上:シルトフェンス敷設なし、
 下:シルトフェンス敷設)

7.5 実港湾模型 (II) でのシミュレーションの検証

本節では港湾口を含む港湾全体の模型において、シルトフェンス複数ユニットを 4 枚程張り合わせ、港湾口の大きなスケールで敷設するケースを含む実港湾模型 (II) について、シミュレーションを検証し、放射性核種（溶存成分と懸濁体成分）の拡散抑制効果について調べる。本模型 (II) に対する諸元を表 7-3 に記した他、本模型 (II) の形状及び各寸法の詳細を図 7-14 に記す。

表 7-3 現地(原発港湾)と模型 (実港湾模型 (II)) の対比等の諸元

	水深 h[m]	フェンス長さ d[m]	取水口 差渡し B[m]	差渡し:フェンス横幅	スケール比 [-]	流速比 [-]	重錘 [kg/m]
現地	6.0	4.8	12, 20	19.5 : 20.0	-	-	118.4
模型	0.15	0.12	0.3, 0.5	19.5 : 20.0	1:40	1.0:6.34	0.074

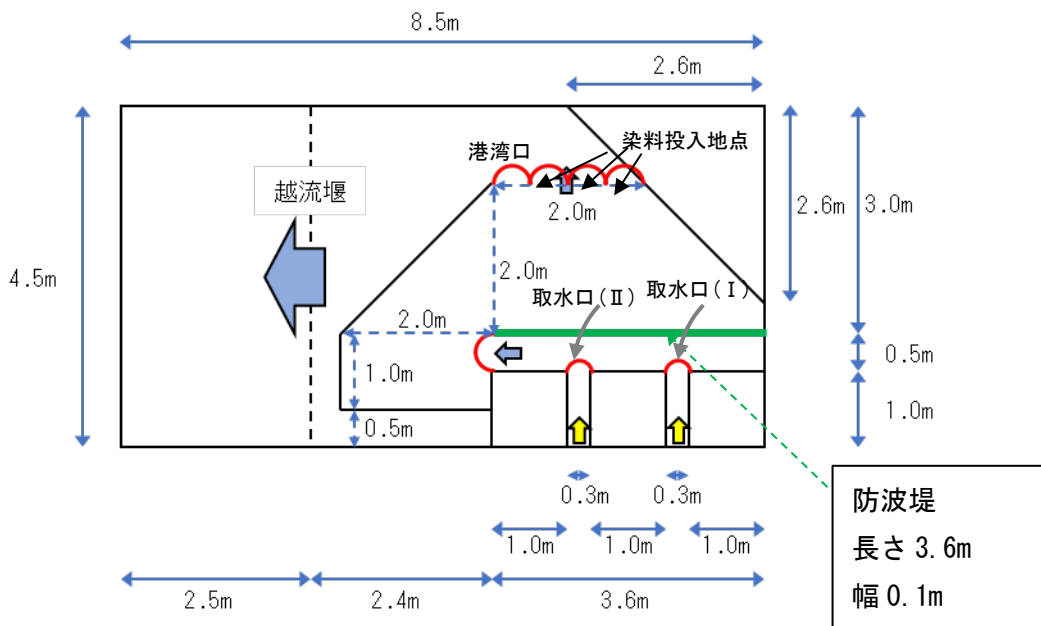
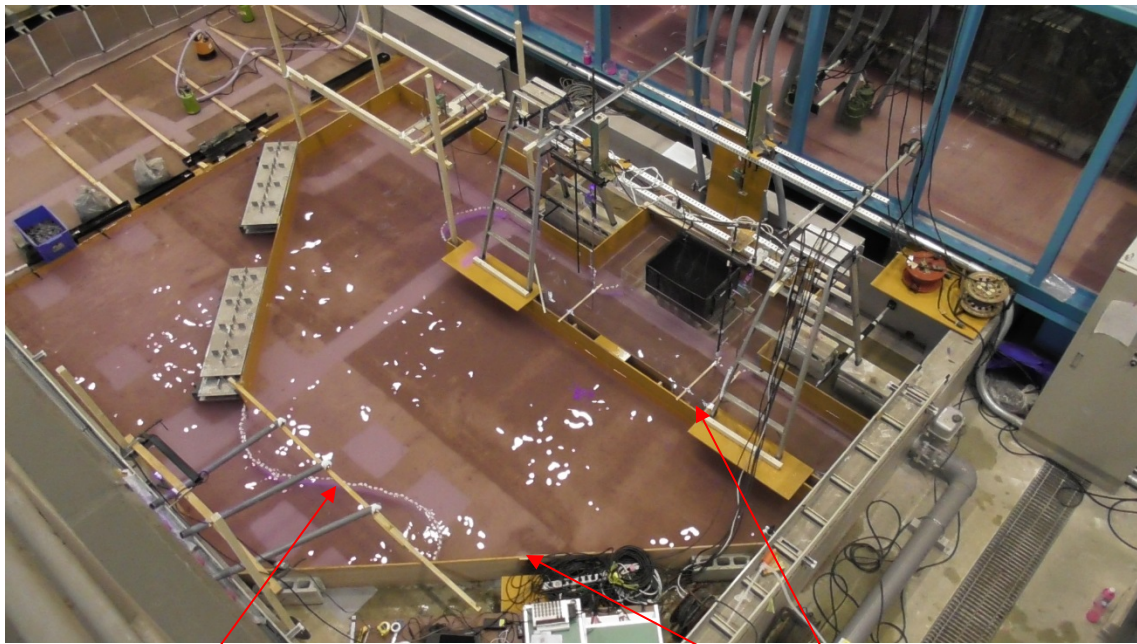


図 7-14 実港湾模型 (II) の形状及び各寸法。尚、以下の実験で使用した模型はそのセッティングの都合上、本図に対して上下が反転していることに注意。

本実港湾模型 (II) では、実港湾模型 (I) と比べた場合、形状が異なる他、港湾口に複数ユニットから成る横幅の大きいシルトフェンスが敷設されたという点異なる。本節では、その港湾口のシルトフェンス周囲の流れ場の分布と放射性核種の拡散抑制効果を調べるのが課題となる。作成した水槽実験模型の撮影画像を図 7-15 に示す。実際に作成した実験水槽の模型は、実験の都合上、図 7-14 に対し、上下が反転しているが、流れ場の上下が反転するだけであり、本質的な違いはない。尚、写真の図 7-15(c) は、港湾口の敷設したシルトフェンス模型を上から拡大した撮影画像である。その撮影画像から分かるように、染料投入棒が 3 本設置されており、その先端から染料が投入され、シルトフェンス内側及び外側の流れ場の観察に用いられる。複数ユニットシルトフェンス近くの流れ場については、水槽実験結果

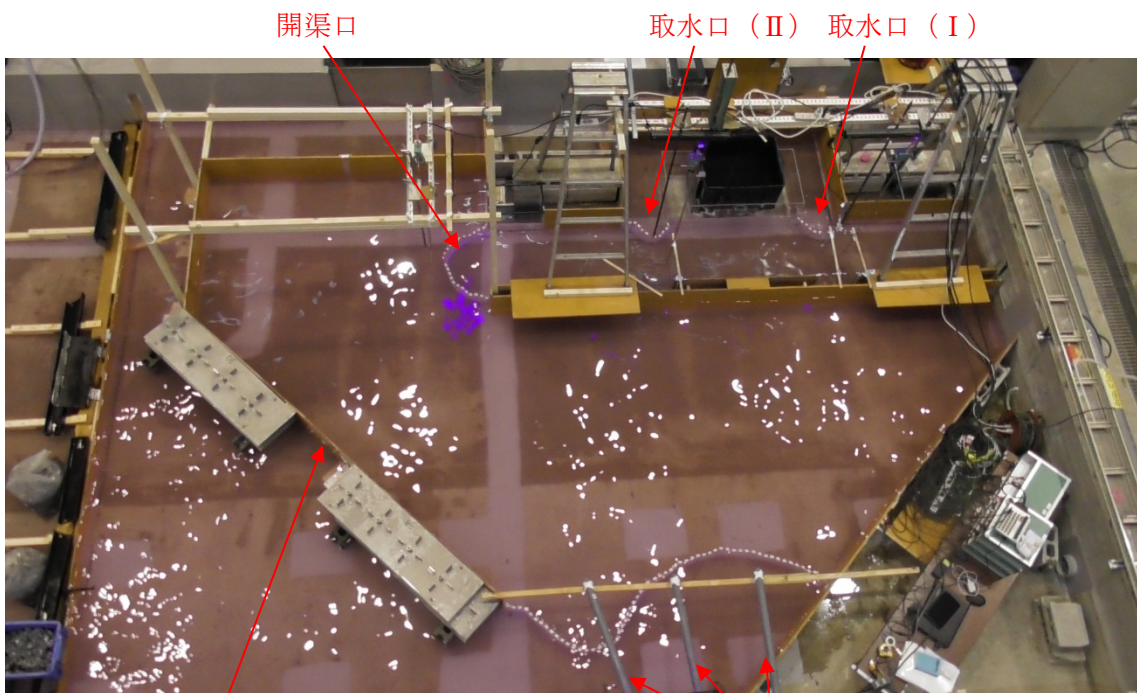
を基にシミュレーションを検証する。



港湾口シルトフェンス

(a) 全体図 (I)

防波堤



開渠口

取水口 (II)

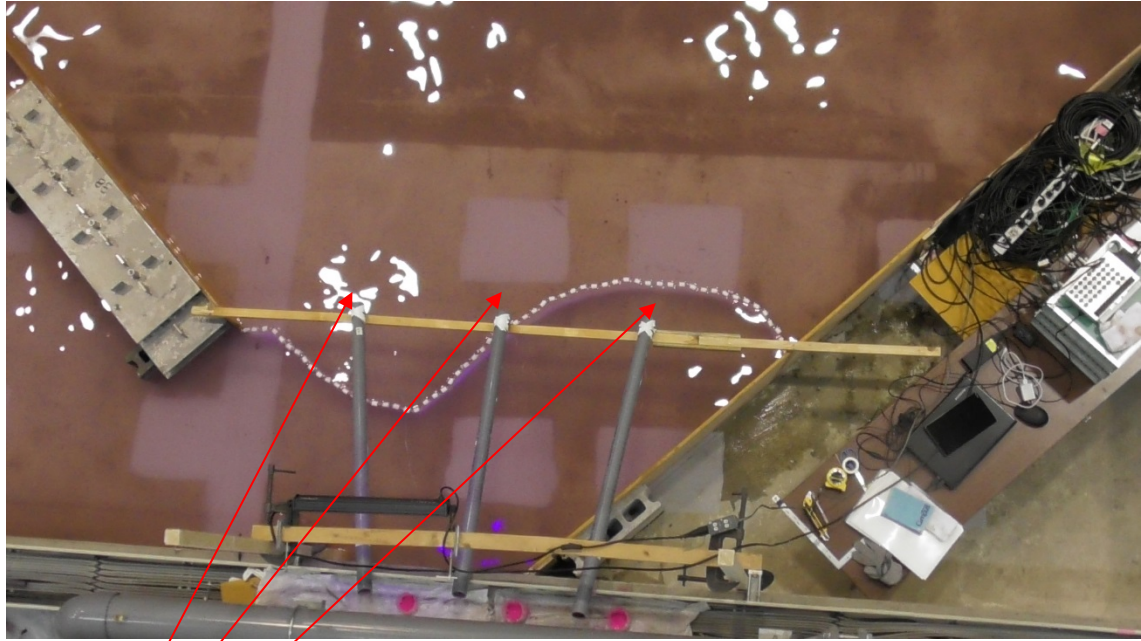
取水口 (I)

防波堤

(b) 全体図 (II)

染料投入棒

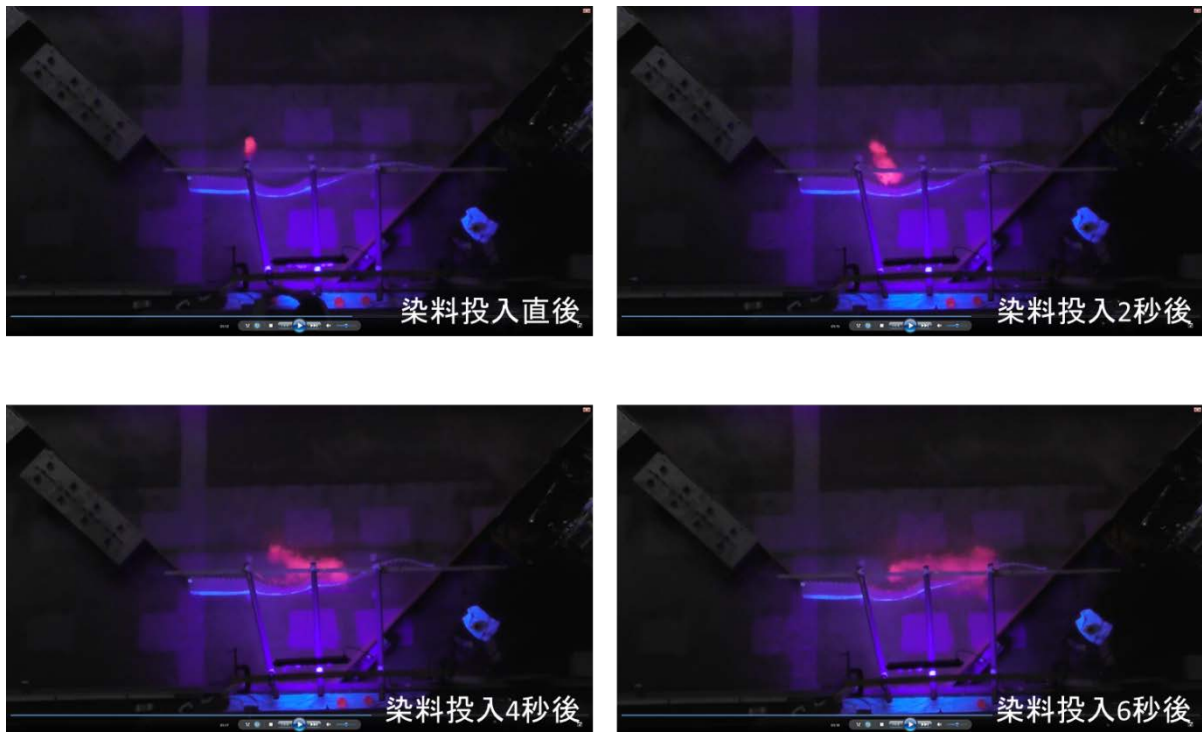
図 7-15 実験水槽中に構築した実港湾模型 (II) を上方から撮影した画像 (実験の都合上、図 7-14 と上下が反転していることに注意) (a)(b)



染料投入地点① ② ③

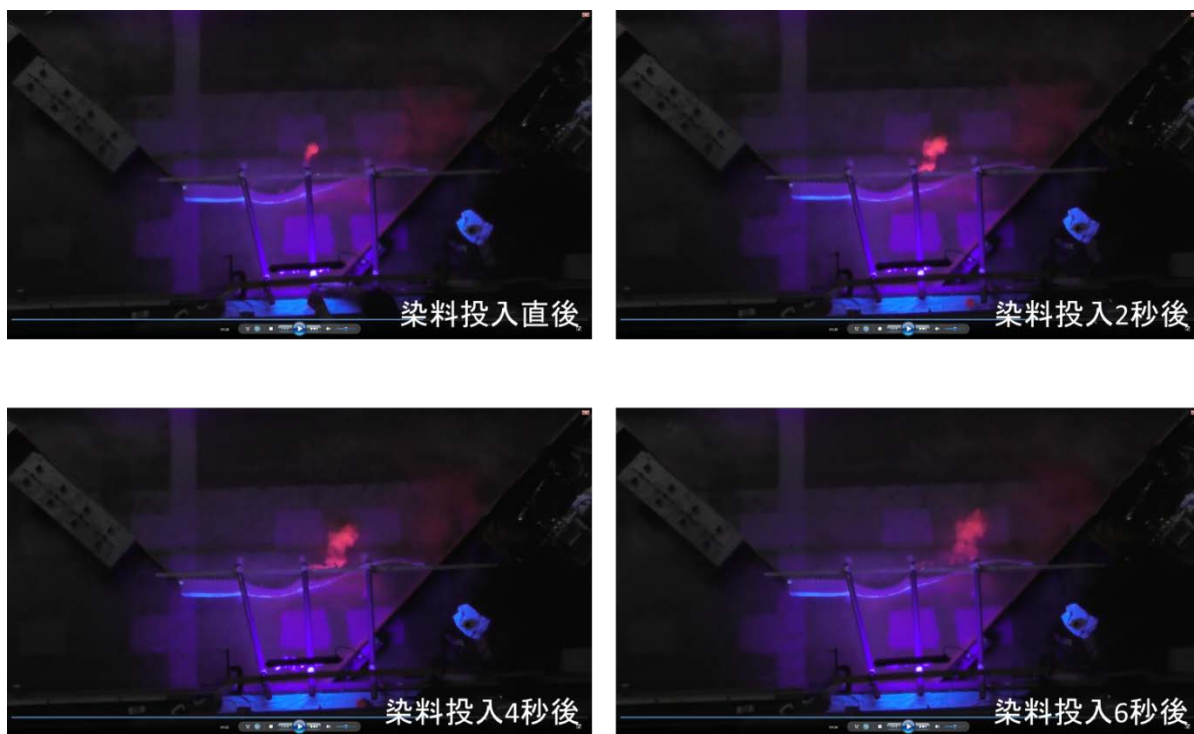
(c) 港湾口の拡大図

図 7-15 実験水槽中に構築した実港湾模型 (II) を上方から撮影した画像 (実験の都合上、図 7-14 と上下が反転していることに注意) の続き (c) 港湾口周囲を拡大

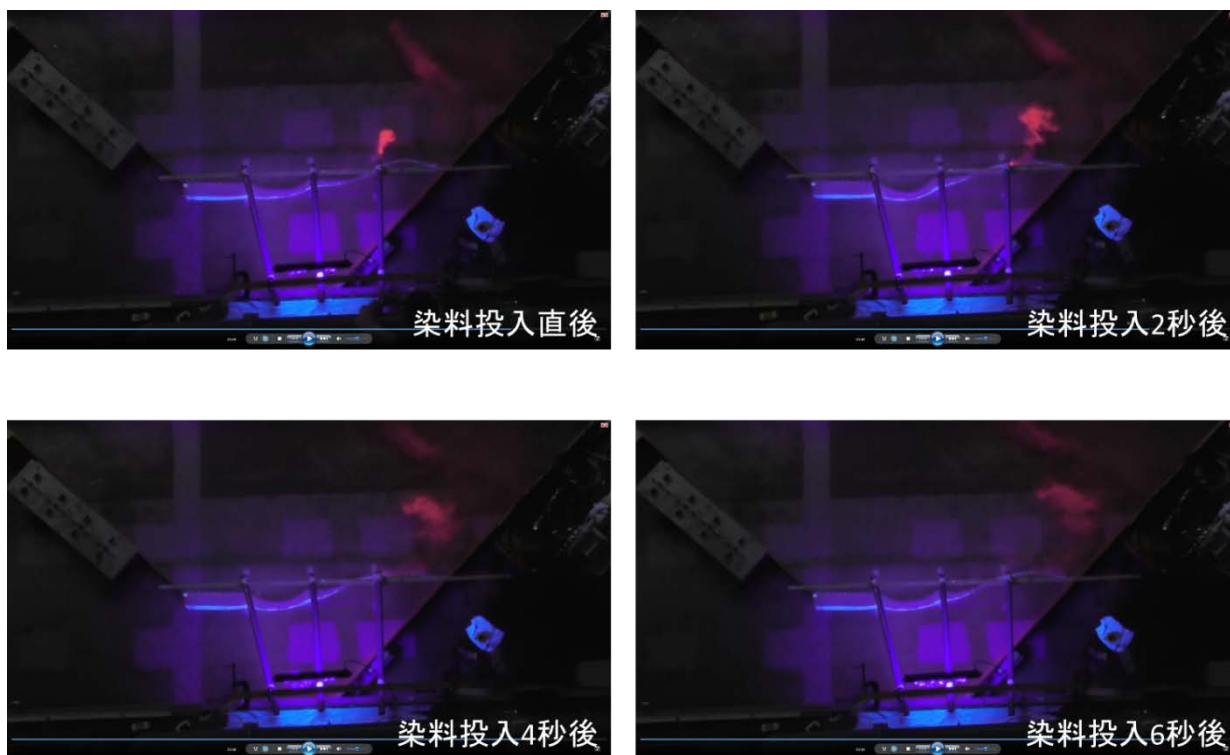


(a) 染料投入地点①

図 7-16 実港湾模型 (II) の水槽実験結果(各染料投入地点における染料投入後の時間発展) (実験の都合上、図 7-14 と上下が反転していることに注意) (a)



(b) 染料投入地点②



(c) 染料投入地点③

図 7-16 実港湾模型 (II) の水槽実験結果(各染料投入地点における染料投入後の時間発展の続き) (実験の都合上、図 7-14 と上下が反転していることに注意) (b)(c)

図 7-16 に、実港湾模型 (II) の水槽実験結果を示す。図 7-16(a)(b)(c)は染料投入地点①②③ (図 7-15(c)参照) 毎の結果であり、シルトフェンス近傍での流れ場が観測できる。水槽実験の可視化結果 (染料投入後の撮影画像の時間発展) からは、投入された染料は主にシルトフェンス内側に滞留し内側にて拡散する様子が分かる。図 7-17 (図 7-16 の結果を要約し模式的に示した) にまとめたように、シルトフェンスに沿う形で、①の染料投地点から右側に移流する流れ場が形成 (図 7-16(a)染料投入後 4 秒及び 6 秒後の撮影画像参照) されており、右端では港湾内に逆流する流れ (図 7-16(c)染料投入後 4 秒及び 6 秒後の撮影画像参照) が生じていること等が各撮影画像から分かる (流れ場の概略を図 7-17 の水色の太い矢印で示す)。これは、シルトフェンスにより上層の流動場は抑制され、下層のみが港湾外に向かうことを意味している。また、上層から下層へと流れ場が影響を受ける他、向かって左側の一部のみ、速く港湾外に流出する流れ場がある (図 7-17 の白抜き太い矢印で示した) ことが推測できる。これは、流れ場のバランスを考えた際、外側への流出地点が限定的となることで十分に推定できる。以上、このような詳細な流れ場がシミュレーションにより再現できるかが重要となる。図 7-18 にシミュレーションにより得られた流動場の分布図を示す。但し、2 つの取水口にて設定した流速 U [m/s] は $U=0.189737$ [m/s] である。

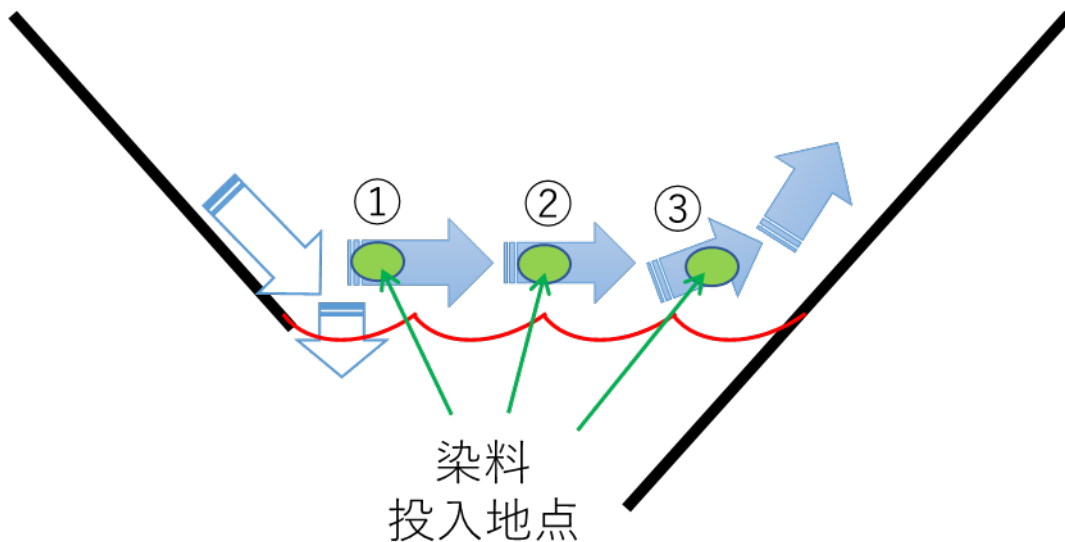
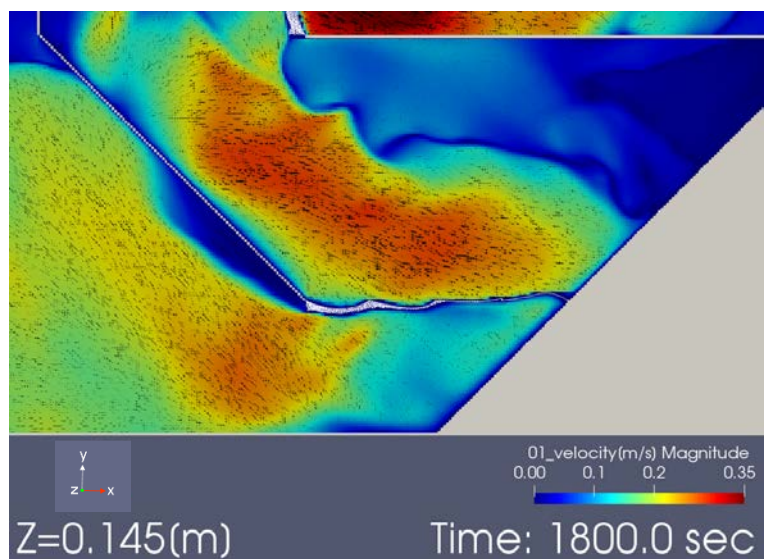
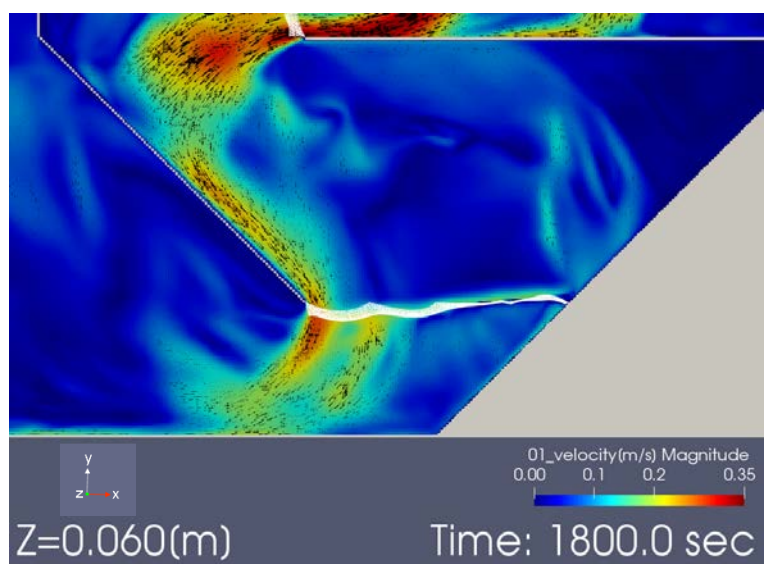


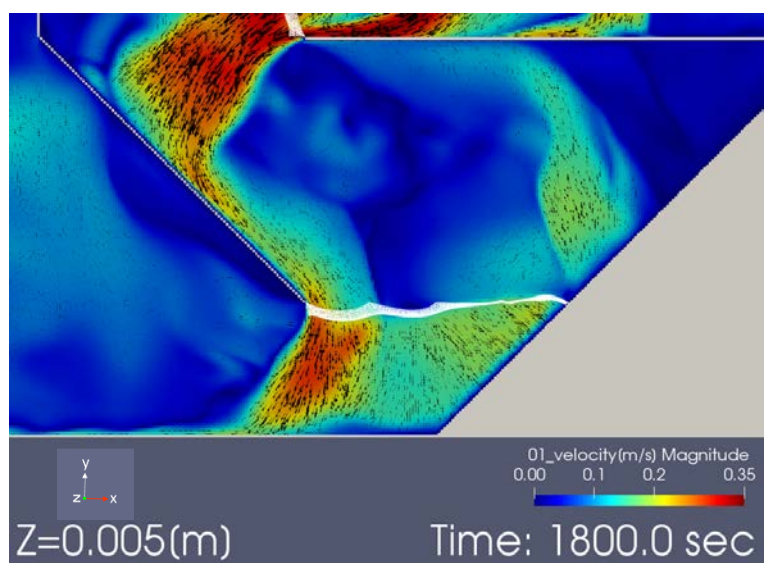
図 7-17 実港湾模型 (II) の水槽実験結果のまとめ (各染料投入地点において、観測された結果から分かった流れ場の様子を水色の矢印で示した他、観測されていない流れ場の様子については、白抜き矢印にて示す)。



(a) 流れ場の分布図 上層 : Z=0.145m



(b) 流れ場の分布図 中層 : Z=0.060m



(c) 流れ場の分布図 下層 : Z=0.005m

図 7-18 港湾口に敷設したシルトフェンス近傍の流れ場の分布 (シミュレーション結果)

図 7-18 はシミュレーションにより得られた流れ場であり、上層、中層、下層の各々の流速分布が示されている。この結果を見ると、図 7-16 及びそのまとめの図 7-17 で見た水槽実験の結果の比較から凡その流れ場がシミュレーションにより再現されていることが分かる。例えば、図 7-18(a)上層の結果からは、シルトフェンス内側（上側）にて、左から右へ流れる流れ場が形成されている一方、図 7-18(c)下層の結果からは、シルトフェンス右端で膜の内側（上側）へと向かう流れ場が形成されていることが分かる。このように、流れ場の概略は凡そ両者（シミュレーションと水槽実験）間で良い一致を示すことが確認された。これにより、シミュレーションの妥当性は概ね検証されたものと判断する。

以降は、シミュレーションにより、実港湾形状模型（II）において越流堰を取り除いた場合のシミュレーションを行い、シルトフェンスによる放射性核種の拡散抑制効果について論じる。

7.6 放射性核種の拡散抑制効果（実港湾模型（II））

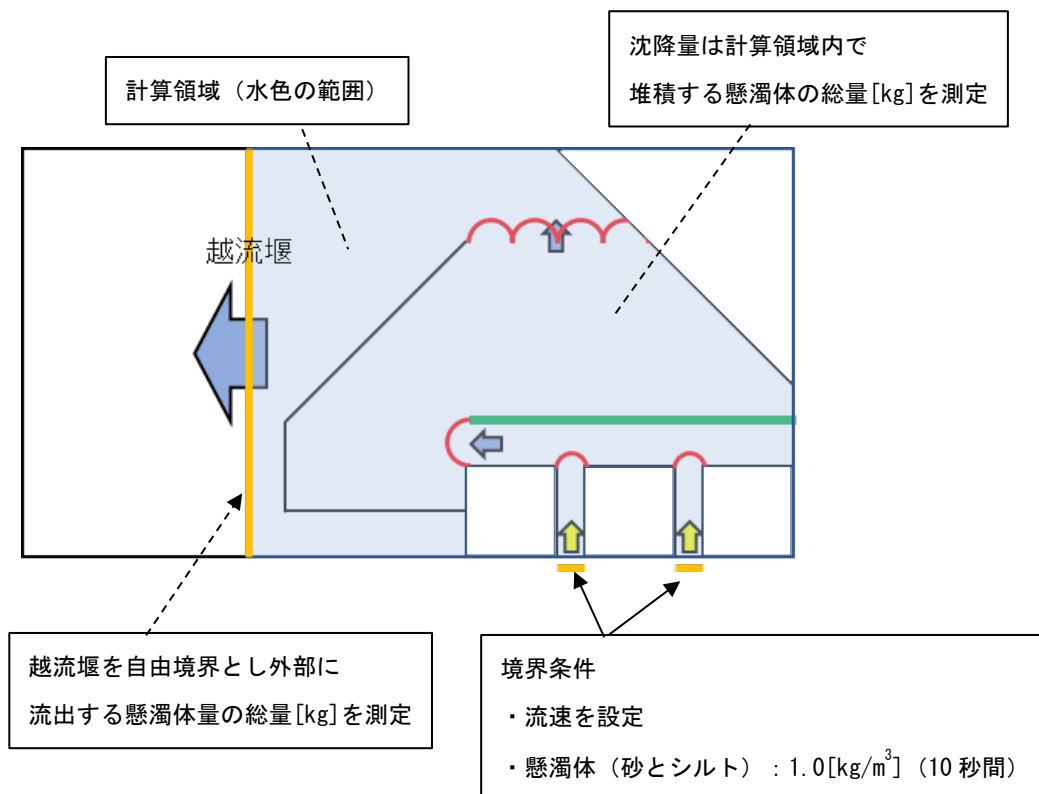
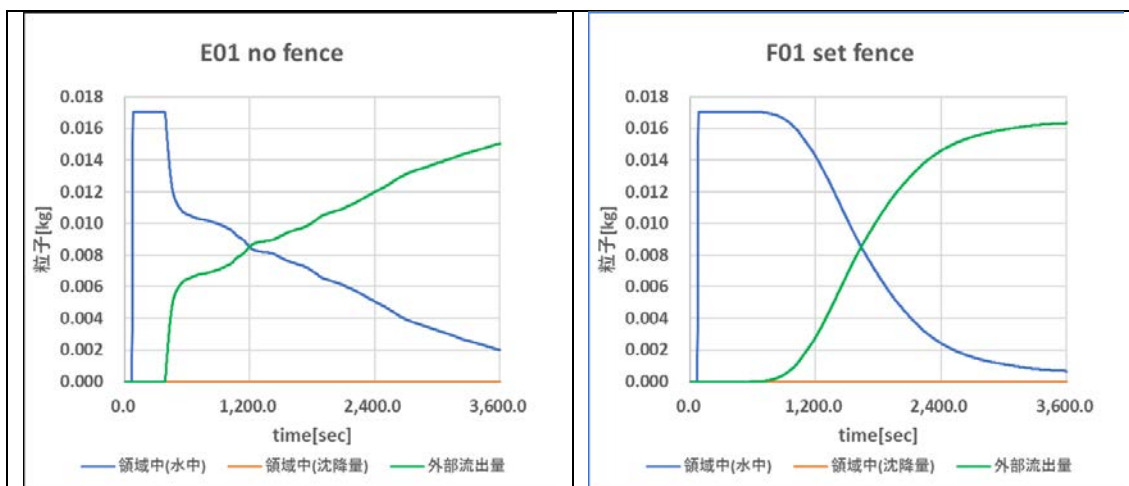


図 7-19 実港湾模型（II）における境界条件と放射性物質の流出量及び滞留量測定の様式図。水が定常水位で存在する部分は水色で表示。放射性核種（溶存成分及び懸濁体成分）は各々、上向き黄色矢印位置から流入する。模型の寸法等の詳細は図 7-2 参照。赤い曲線はシルトフェンスの設置位置。

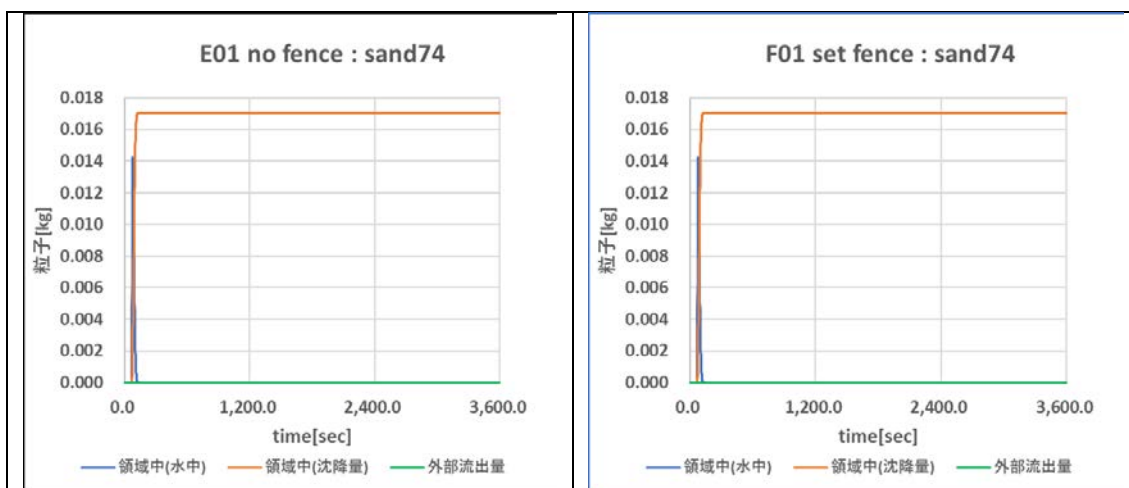
図 7-19 に、実港湾模型（II）において、放射性核種（溶存成分及び懸濁体成分）のシルトフェンスによる拡散抑制効果を論じる体系を示す。シミュレーションでは、越流堰を取り除き、自由境界条件を設定する。2つの取水口奥にて設定する流速 U [m/s] を $U=0.189737 \times 0.1$ [m/s] とし、シミュレーションを実施する。シミュレーションにて流入させる放射性核種についての諸元は、実港湾模型（I）において用いたものと同じであり、表 7-2 と同じである。表 7-2 に記されている基礎物性データについても実港湾模型（I）と同じである。シミュレーション結果を図 7-20 に示す。

シミュレーション結果（放射性物質の溶存成分の流出及び懸濁体成分の沈降）

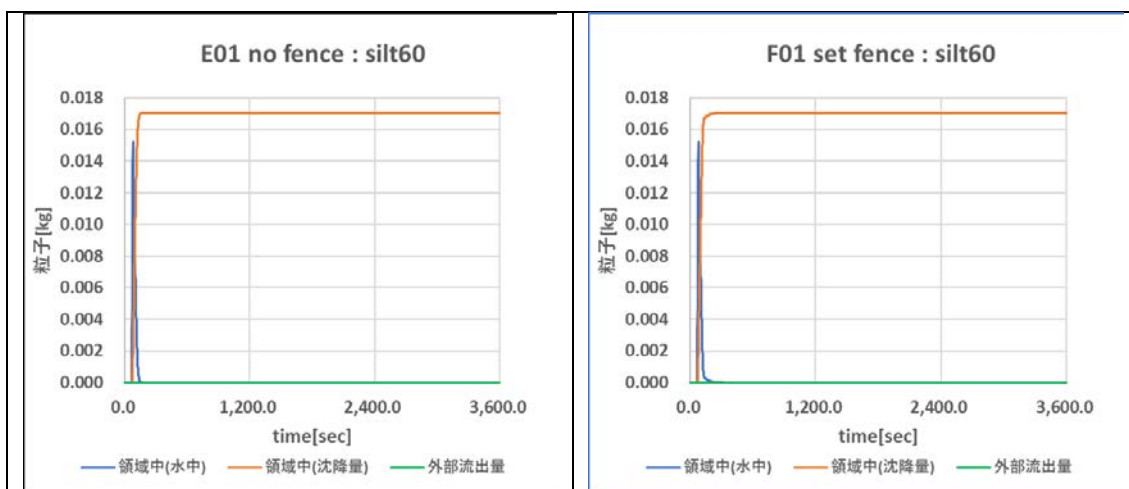
設定流速 $V=0.1897 \times 0.1$ [m/s]



(a) 溶存成分（左：フェンスなし， 右：フェンス敷設）

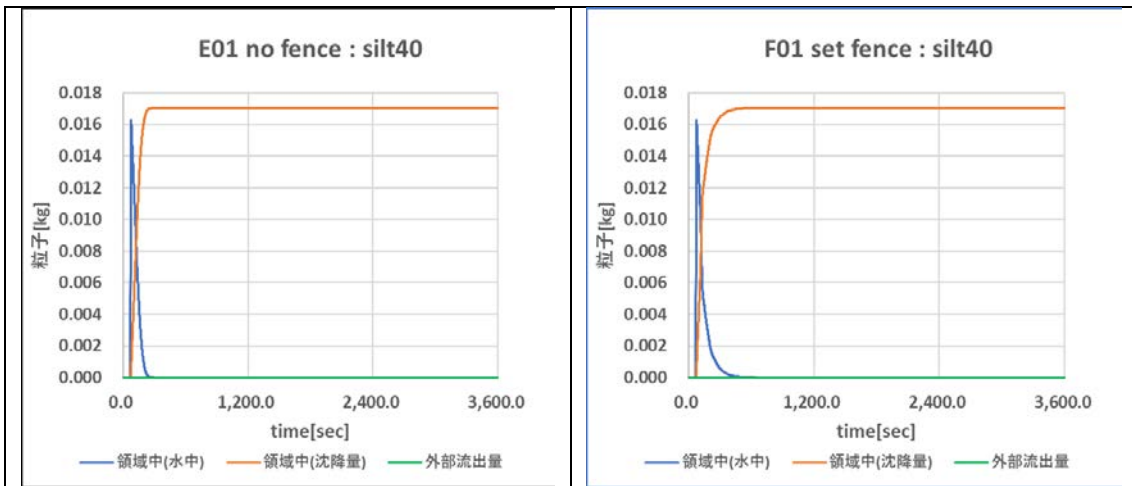


(b) 砂（左：フェンスなし， 右：フェンス敷設）

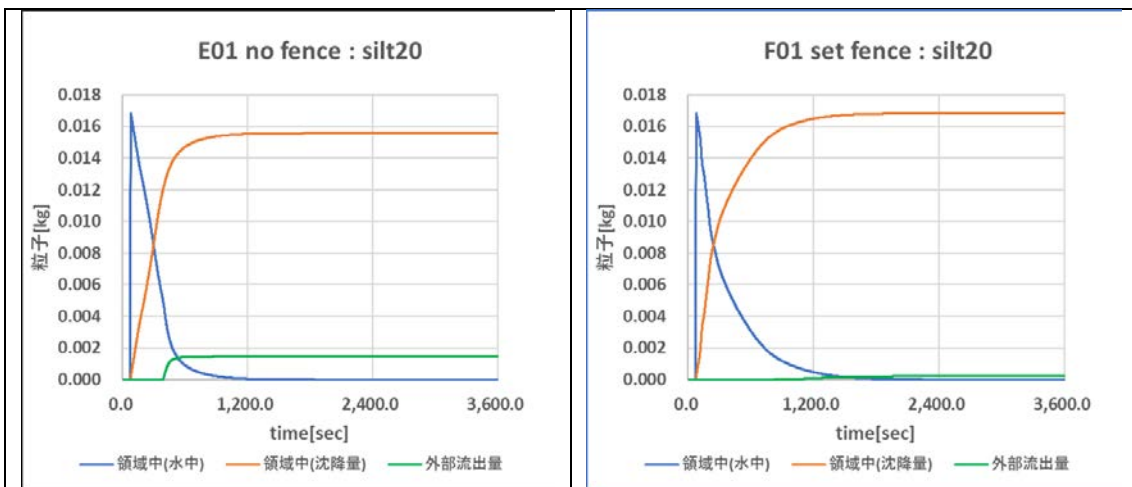


(c) シルト 60（左：フェンスなし， 右：フェンス敷設）

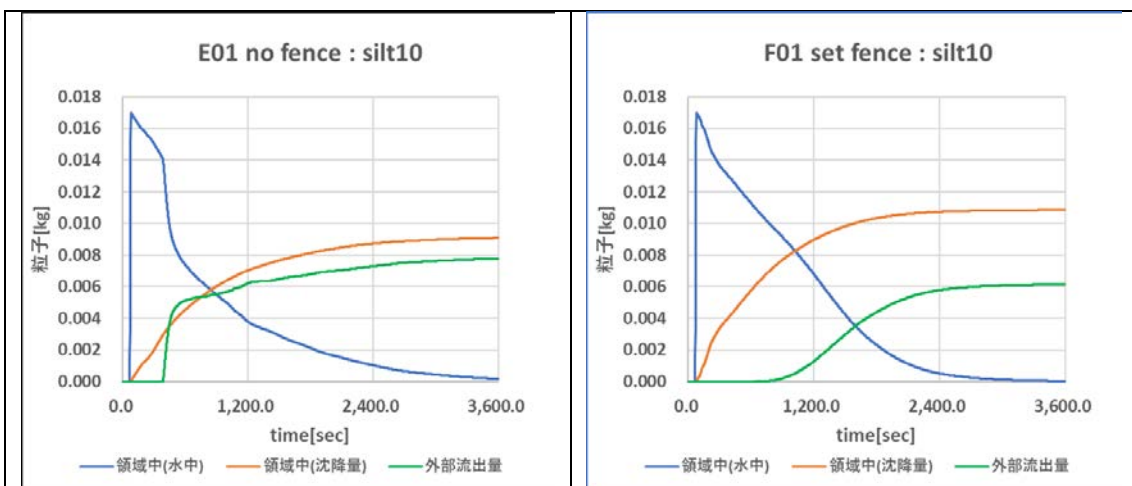
図 7-20 放射性物質（溶存成分と懸濁体成分）の収支バランス（領域内滞留量・水底沈降量・外部流出量）の時間発展 (a)~(c)



(d)シルト 40 (左：フェンスなし, 右：フェンス敷設)

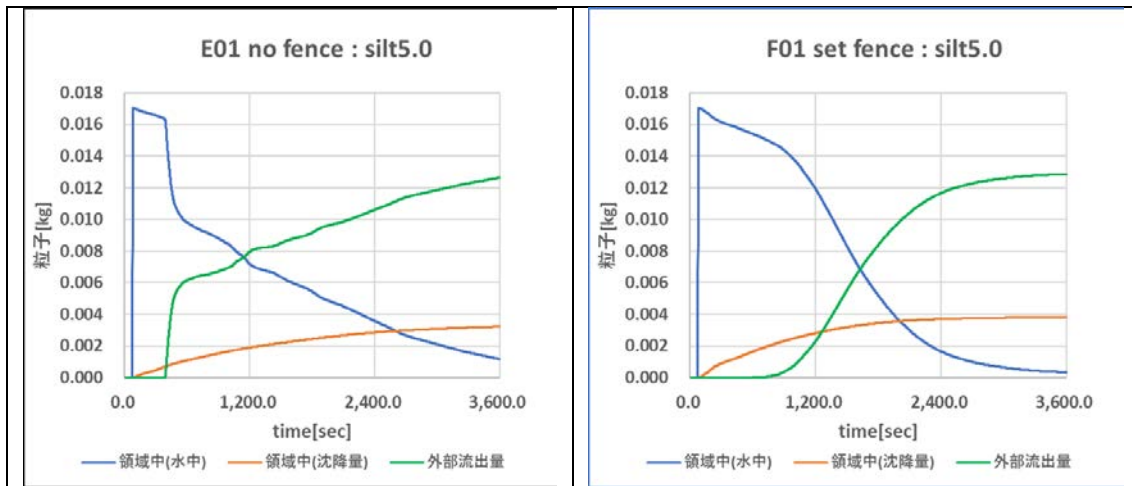


(e)シルト 20 (左：フェンスなし, 右：フェンス敷設)



(f)シルト 10 (左：フェンスなし, 右：フェンス敷設)

図 7-20 放射性物質（溶存成分と懸濁体成分）の収支バランス（領域内滞留量・水底沈降水量・外部流出量）の時間発展の続き (d)~(f)



(g) シルト 5 (左：フェンスなし， 右：フェンス敷設)

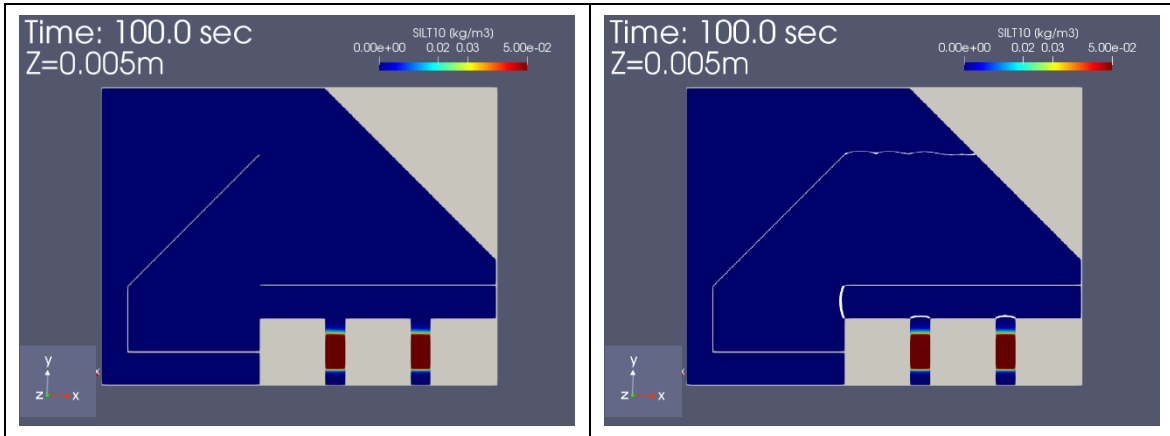
図 7-20 放射性物質（溶存成分と懸濁体成分）の収支バランス（領域内滞留量・水底沈降水量・外部流出量）の時間発展の続き (g)

図 7-20 のシミュレーション結果から、溶存成分については、シルトフェンスにより期待される流出の遅延効果ははっきりと見られない（これについては、詳しくは述べないがフェンスを敷設しない場合、開渠口と防波堤との間の領域での滞留効果がフェンス敷設なしの場合にのみ発達することが分かった。このような複雑な流れが港湾では発生することからシミュレーションによる評価が重要であることが分かる）。次に懸濁体の場合、シルト 40 までは、砂のケースとほぼ同様の振る舞いを示し、外部に流出する以前に港湾内に沈降するため、シルトフェンスの敷設如何に拘わらず、全て領域内に沈降することが分かる。一方、シルト 20 からシルト 10 については、シルトフェンス敷設により流出量に違いが生じる。これは、実港湾模型 (I) にて見た結果と同じく、シルトフェンスによって沈降が促進されたため生じたからである。実際、シルトフェンスにより流出量が減少した分が、計算領域内の沈降水量としてバランスされていることから、上記の港湾内での沈降促進は明らかに理解できる。特にシルト 20 では、外部流出はほぼ完全に抑制されている（シルトフェンス敷設なしのケースで流出があるのに対し、敷設のケースでは殆ど流出がない）。最も微細なシルト 5（シルト 10 も同様）では、溶存成分と同様、シルトフェンスにより、流出の遅延効果ははっきりと見られないが、沈降効果も大きいことが分かる。これは、実港湾模型 (I) では、あまりはっきりと見ることができない現象であるが、より水平方向のスケールが大きい実港湾模型 (II) でよりクリアに見られたものと理解できる。以上、港湾口を含む港湾全体の模型においても、シルトの粒径の小さい懸濁体に対し、シルトフェンスにより外部流出が抑制されることが示された。以下、この流出量が抑制されたケースに対し、懸濁体成分が水中で、どのように港湾模型内を移流拡散したか、そして領域のどこでどのように沈降したか、その分布を示す。図 7-21、図 7-22、図 7-23 は、シミュレーションにより得られたシルト 10 の水平方向の濃度分布（指定する一定の水深断面での水平方向の分布である）の時刻歴である。図 7-21 から、汚染水の投入直後は、取水口内にて、シルト 10 の分布は鉛直方向に一様であるが、次の図 7-22 では、シルトフェンスの影響により、シルトフェンス敷設ケースでは、下層のみ、先に開渠口から開渠外へと流出したが、その後、下層、中層、上層もシルトフェンスの影響により、ゆっくりと広範囲に広がったことが分かる。図 7-23 は最終時刻での水底での沈降水量の水平方向の分布だが、シルトフェンスが敷設されたケースでは、下層のみで広がったシルト 10 は、比較的広く拡散し港湾内（シルトフ

ェンス内側) に沈降したことが分かる。

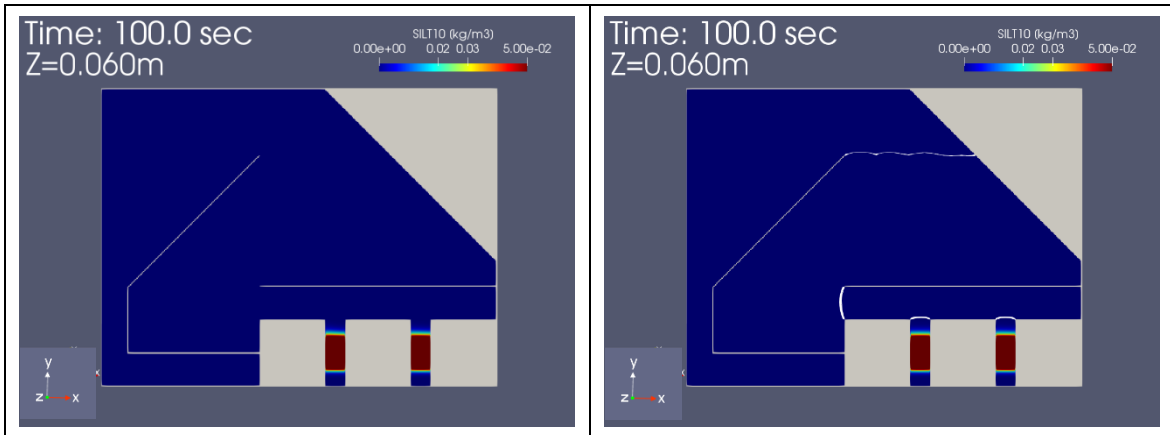
可視化結果 (シルト 10($10\mu\text{m}$) : 水平分布)

堰なし (設定流速 $V=0.1897 \times 0.1[\text{m/s}]$) 水中分布の時刻歴



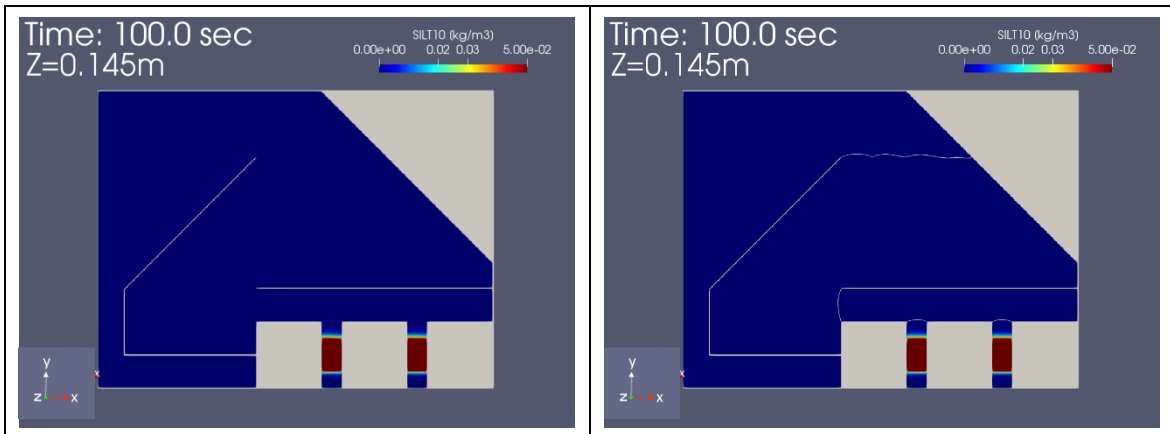
シルト 10 (左 : フェンスなし, 右 : フェンス敷設)

Time=100.0sec, 下層 (水中分布)



シルト 10 (左 : フェンスなし, 右 : フェンス敷設)

Time=100.0sec, 中層 (水中分布)



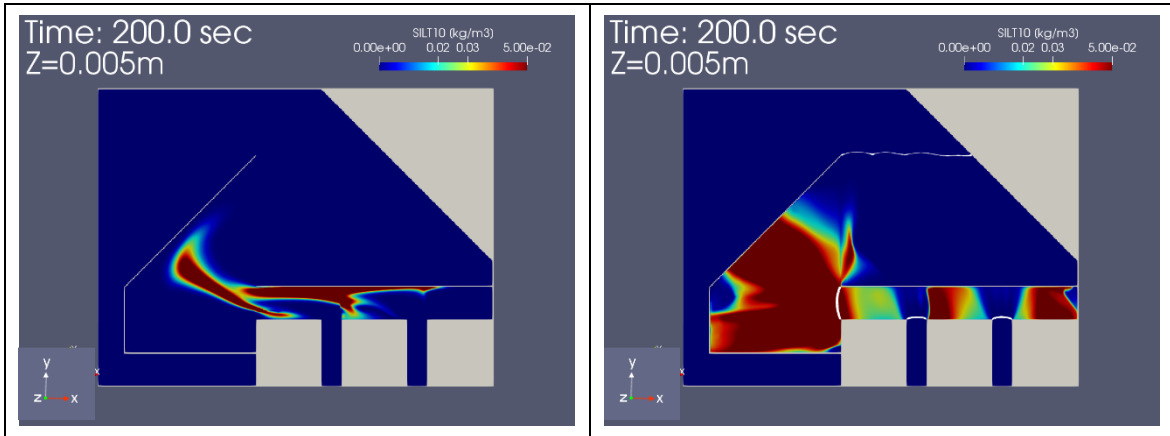
シルト 10 (左 : フェンスなし, 右 : フェンス敷設)

Time=100.0sec, 上層 (水中分布)

図 7-21 時刻 $t=100\text{sec}$ でのシルト 10 の濃度の水平方向分布 (上 : 下層、中 : 中層、下 : 上層)

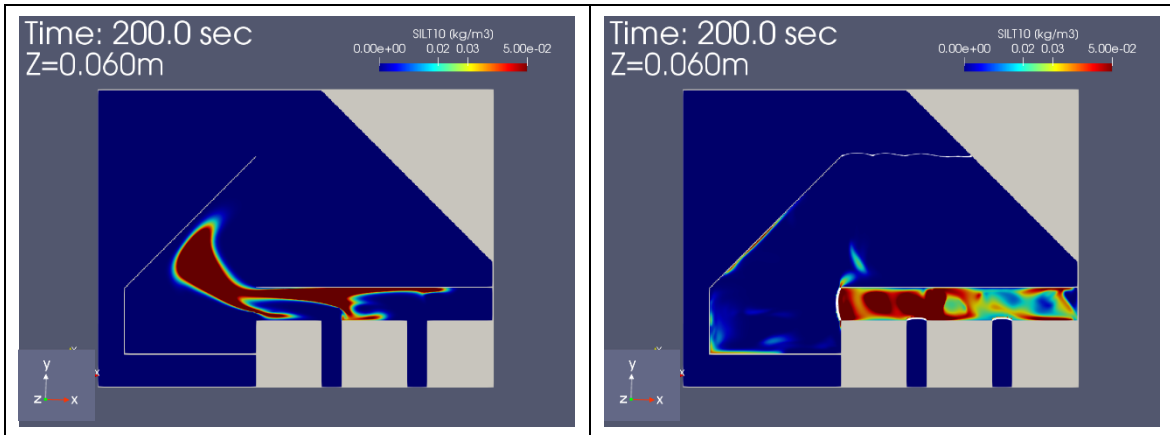
可視化結果 (シルト 10($10\mu\text{m}$): 水平分布)

堰なし (設定流速 $V=0.1897\times 0.1[\text{m/s}]$) 水中分布の時刻歴



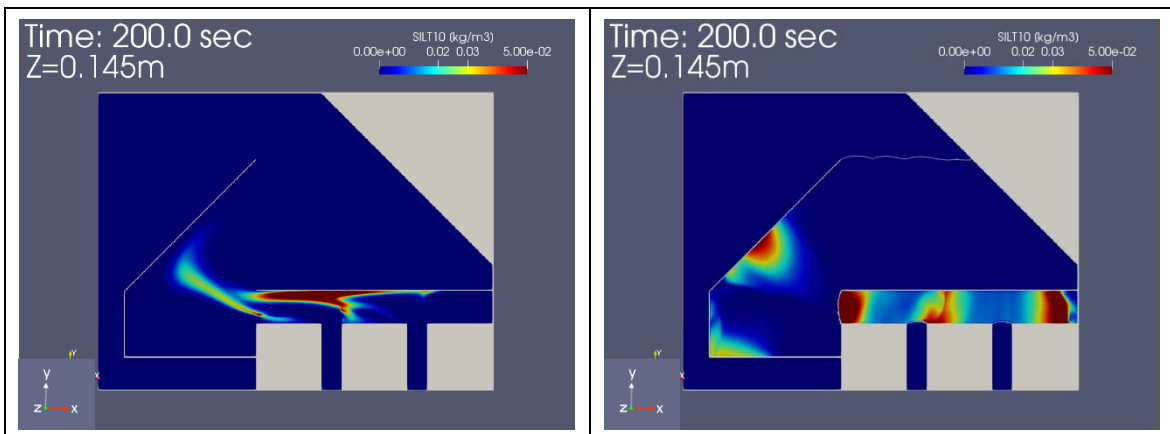
シルト 10 (左: フェンスなし, 右: フェンス敷設)

Time=200.0sec, 下層 (水中分布)



シルト 10 (左: フェンスなし, 右: フェンス敷設)

Time=200.0sec, 中層 (水中分布)



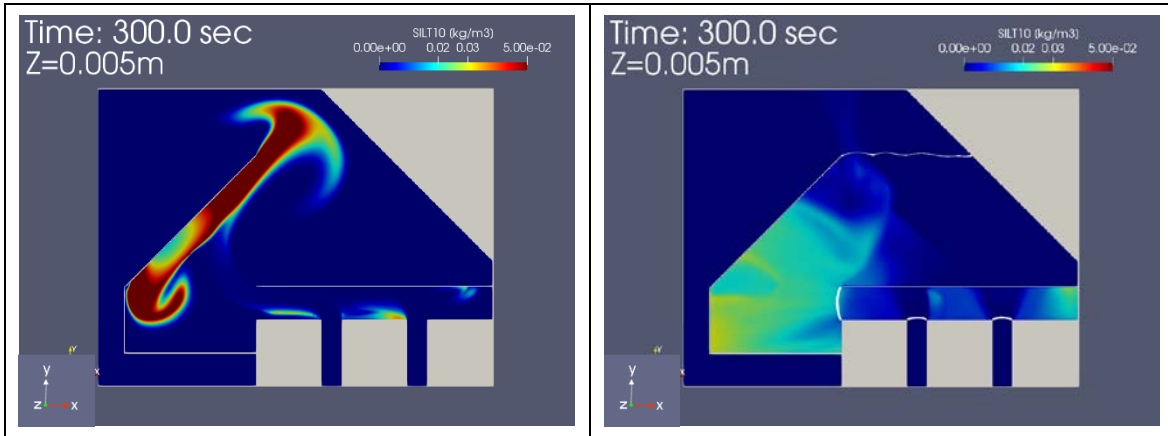
シルト 10 (左: フェンスなし, 右: フェンス敷設)

Time=200.0sec, 上層 (水中分布)

図 7-22 時刻 $t=200\text{sec}$ でのシルト 10 の濃度の水平方向分布 (上: 下層、中: 中層、下: 上層)

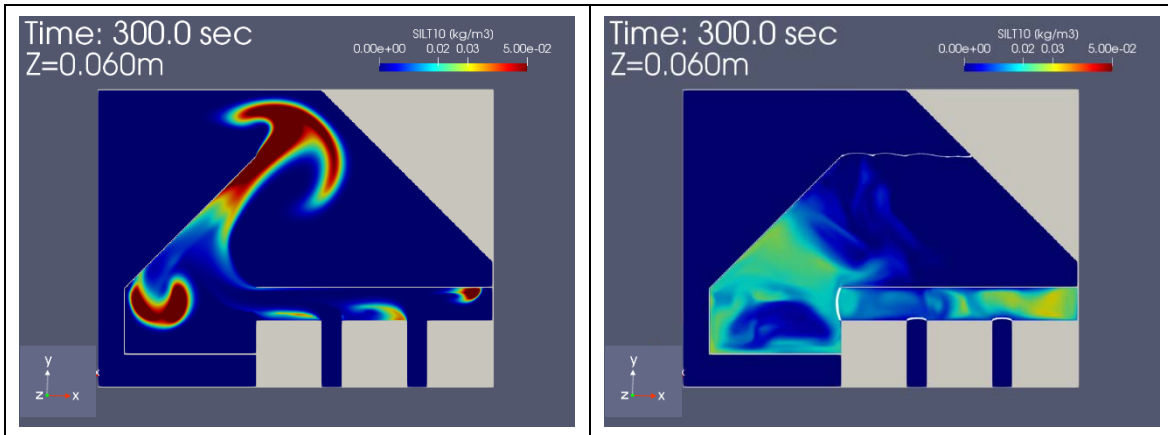
可視化結果 (シルト 10($10\mu\text{m}$) : 水平分布)

堰なし (設定流速 $V=0.1897\times 0.1[\text{m/s}]$) 水中分布の時刻歴



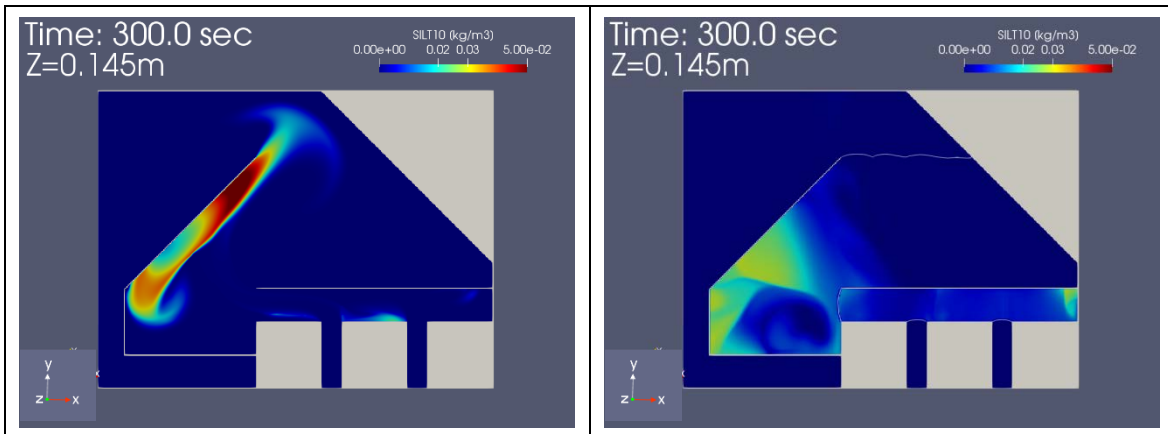
シルト 10 (左 : フェンスなし, 右 : フェンス敷設)

Time=300.0sec, 下層 (水中分布)



シルト 10 (左 : フェンスなし, 右 : フェンス敷設)

Time=300.0sec, 中層 (水中分布)



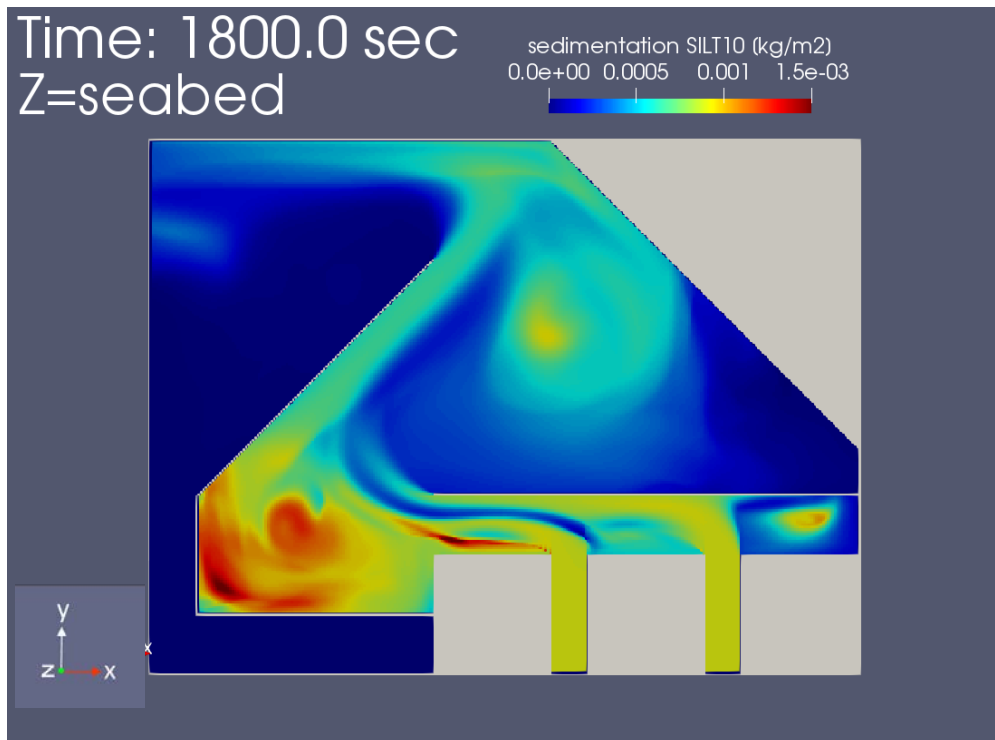
シルト 10 (左 : フェンスなし, 右 : フェンス敷設)

Time=300.0sec, 上層 (水中分布)

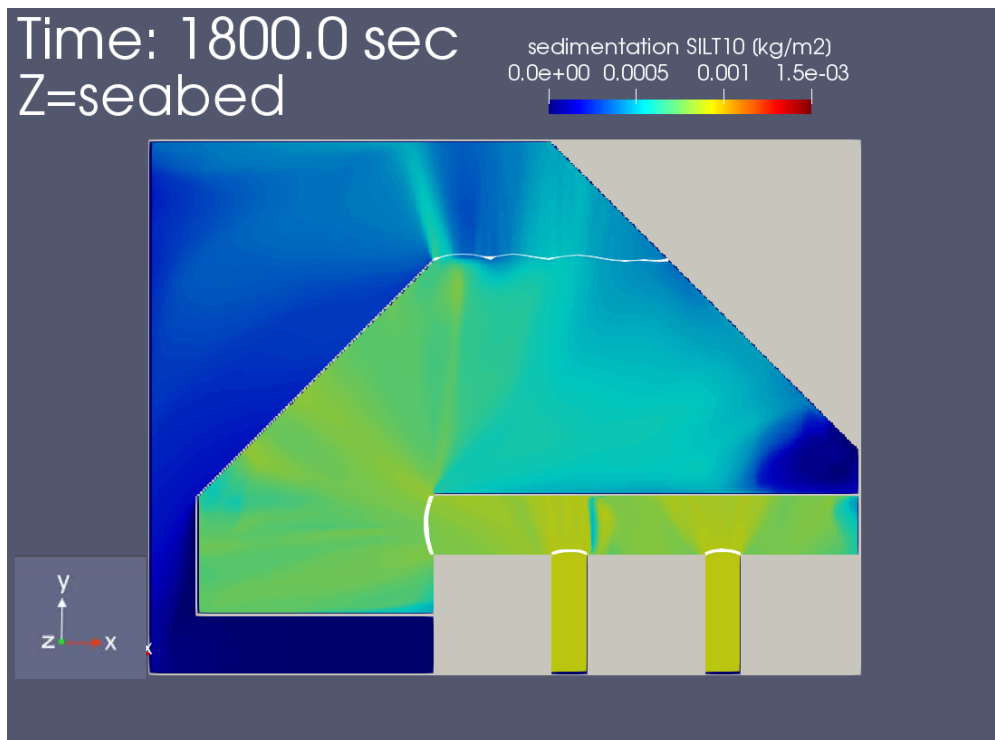
図 7-23 時刻 $t=200\text{sec}$ でのシルト 10 の濃度の水平方向分布 (上 : 下層、中 : 中層、下 : 上層)

可視化結果（シルト 10：水平分布）

堰なし（設定流速 $V=0.1897 \times 0.1$ [m/s]） 堆積分布（最終時刻 1800sec）



シルト 10 フェンスなし 海底沈降水量



シルト 10 フェンス敷設 海底沈降水量

図 7-24 最終時刻(1800sec)での沈降シルト 10 の水平方向分布（上：シルトフェンス敷設なし、下：シルトフェンス敷設）

図 7-24 の結果を考察すると、シルトフェンス敷設なしのケースでは、港湾形状による滞留域があり、その部分で集中的に沈降している一方、凡そ、流れの後に沿う形で少しずつ、堆積した様子が分かる。一方、シルトフェンスを敷設したケースでは、シルトフェンスが流れを低層へと向けさせると同時に、水平方向への拡がりを促すことから、より沈降するチャンスが増え、港湾内の広い領域に一樣に沈降していることが分かる。また、港湾口に敷設された複数ユニットからなるシルトフェンスにより、外部流出が抑制されていることも分かる。

■ 8章 水槽実験施設調査報告

本8章では、国内の民間も含めた大学及び研究機関の水槽実験施設について調査した結果を報告する。尚、報告に際してはシルトフェンスの水槽実験を実施できる施設そして現地スケールの1/2~1/3程度の本格水槽実験可能な施設を調査するという観点での報告とする。

まず、大学関連の大型水槽実験施設の一覧を表8-1に示す。現地スケールの1/2~1/3程度の本格水槽実験が可能という観点から考えると、5m程度の水深が必要であると判断する（水深の半分程度を利用可能とした場合）。従って、東大生産研の水槽施設が適切であることが分かる。次に、研究機関の大型水槽実験施設の一覧を表8-2に示す。国立研究開発法人・港湾空港技術研究所（PARI）を始めとして、該当する機関は複数存在しているが、利用形態が各研究機関により異なり、長期貸し出しが困難である等、機関により異なる制限がある。次に、民間の大型水槽実験施設を表8-3に記す。民間でも幾つかの候補があるが、船舶を意識した水槽実験施設となっている可能性が高い上、使用料が一般に高い可能性が考えられる。

	業者名	水槽			住所	連絡先	その他	URL
		種類	大きさ	特徴/用途				
1	神戸大学大学院 海事科学研究科 海事科学部	浅水槽 風浪水槽 回流水槽 アンカー水槽 砂水槽(×2)	60mL×6mW×2mD 最大水深1.5m 10mL×6mW×1mD 最大水深 15mL×5.4mW×2.8mH 16mL×2.5mW×1.2mD 底質土深 さ0.9m		神戸市東 灘区深江 南町5丁 目1-1	電話番号 078-431- 6200(大 代表)		http://www.maritime.kobe-u.ac.jp/study/facilities/sm_basin/index.html
2	九州大学 応用力学研究所	海洋環境シミュレーション水槽 風洞付内部波水槽 海中実験用ガラス張水槽 深海機器力学実験水槽	長さ54m, 幅1.5m, 高さ2m(標 準水深1.2m) 長さ17m, 幅0.6m, 高さ0.8m (標準水深0.35m) 長さ37m, 幅2.5m, 水深3.6m 長さ65m, 幅5m, 深さ7.5m(標 準水深7m)		福岡県春 日市春日 公園6丁 目1番地	電話: 092-583- 7701, 7702 FAX: 092-582- 4201		https://www.riam.kyushu-u.ac.jp/joint/offering_5.html
3	大阪大学大学院工 学研究科 地球総合工学専攻 船舶海洋工学部門	船舶海洋試験水槽	長さ:100m, 幅:7.8m, 水深: 4.35m	主として船舶の耐航性能、推進性能、操縦性能や海洋構造物の耐波性能を評価する試験を行います。	大阪府吹 田市山田 丘2-1	FAX:06- 6879- 7594 Email: jimu@nao e.eng.osak a-u.ac.jp		http://www.naoe.eng.osaka-u.ac.jp/research/facility.html
4	京都大学大学院 農学研究科 地域環境科学専攻 水資源利用工学	開水路実験装置 管水路実験装置 多目的大水槽	L=20m, B=60cm, H=50 L=20m, Φ=138mm 平面積2.374平方メートル	水の力学特性、物質分散、生態水理学的な問題に関する実験的研究を行う オープンタイプ管水路(固定勾配:1/100, 最大25L/s), 量水槽, 圧力自動測定	京都府舞 鶴市長浜 番外地			http://www.wre.kais.kyoto-u.ac.jp/exp_sta.html
5	東京大学 生産技術研究所	生産研水槽	長さ50m, 幅10m, 深さ5m	波、流れ、風による人工海面生成機能を備え、変動水面におけるマイクロ波散乱、大水深海洋構造物の挙動計測など、海洋空間利用、海洋環境計測、海洋資源開発に必要な要素技術の開発に関連する実験・観測を行う。	千葉県柏 市柏の葉 5-1-5	TEL:04- 7136- 6971 FAX:04- 7136- 6972		https://www.iis.u-tokyo.ac.jp/ja/about/facilities/chiba/rheem/
6	東京海洋大学	船舶運航性能実験水槽設備	長さ54m, 幅10m, 水深2mの水槽	船体の抵抗、推進、運動性能、操縦性能さらに海洋構造物や水産施設に関する実験を行なっています。長さ54m、幅10m、水深2mの水槽には曳航電車、造波機、消波装置、回流装置を備えています。本設備の他、垂直循環型回流水槽、風洞水槽、錨水槽も別に備えられています。	東京都江 東区越中 島2-1-6	TEL:03- 5245- 7300(代 表)		https://www.kaiyodai.ac.jp/overview/jointuse/jointuseequipment.html
7	横浜国立大学 海空制御システム 研究室	海洋波浪再現大型実験水槽 海洋波浪再現造波装置 造波機付きガラス水槽	長さ100m, 幅8m, 水深3.5m 全幅8m 長さ17m, 幅1m, 水深1.5m	建物の中に2800トンもの水をたたえた曳航水槽(大学としては世界最大級)があり、1/100位の模型を曳航し、働く力、運動を正確に計測することにより実際の船の性能も推定できるメガテクノロジーの開発に威力を発揮します。 水槽の端に設置された、人工的に波を発生させる造波装置です。24個のフロートで構成され、全幅8m、それぞれのフロートをコンピューター制御により独立に上下運動させ、希望する海洋波を人工的に作り出すことが出来ます。曳航水槽では世界初の設備です。 大型実験水槽では三次元模型を用いた実験を行います。本ガラス水槽は二次元浮体等の実験に使用します。側面がガラスなので、水中の様子を観察することが出来ます。	横浜市保 土ヶ谷区 常盤台 79-5 船 舶海洋実 験棟	TEL 045- 339-4100 FAX 045- 339-4100		http://www.sea-keeping.shp.ynu.ac.jp/facility.html
8	広島大学	曳航水槽 造波水槽	80m×8m×3.5m+20m× 10m×3.5m(長さ×幅×深 さ) 43m×1.2m×2.0m(長さ×幅 ×深さ)	性能の優れた船舶の開発、性能の推定、安全な海洋構造物の開発に利用されています。また、水槽の中央部には、昇降式の可動床があり、浅水域や水路での実験が行えるようになっています。河川を航行する船の性能把握、船の安全航行に関わる港湾・水路での水槽試験が可能です。 大型2次元造波水槽では、規則波・不規則波を忠実に再現できます。プランジャー式造波機を備え、実海域に相当する重力波はほぼ網羅できます。最近、可変式の海底勾配装置が新たに取り付けられ、浅海域から深海域の広範囲に亘る波浪実験が可能となりました。津波中での構造物、大波高時の海洋構造物、海洋エネルギー利用に関わる研究開発等に使用されています。	東広島市 鏡山一丁 目4番1号	TEL:082- 424- 7505/FA X:082- 422-7039		http://www.naoe.hiroshima-u.ac.jp/tank/facilities_j.html

		回流水槽	9.7m × 1.4m × 3.8m (長さ × 幅 × 高さ)	回流水槽では、一方方向に流れる水の中に模型を置き、流体现象を調べます。船型模型、付加物付き翼模型や自動車模型等を対象とした流体力計測に加え、レーザーシート光源と高速度カメラによる模型周囲流場の可視化計測が行われます。				
9	大阪工業大学 八幡光学実験場	不規則波造波水槽	長さ80 × 幅1.2 × 高さ1.5m	大学の水槽設備として有数の長さをもつこの二つの装置は、それぞれが、不規則波造波装置、不規則波信号発生処理解析装置および自動走行計測台車などにより構成されており、造波装置の駆動機構には、電気油圧サーボ式を採用しています。この造波水槽は、実際の海洋での不規則波を、二次元波として、1/10程度の縮尺で再現でき、その不規則波スペクトルは、任意に設定することができます。計測室は、両水槽の観測部に並行して移動できるよう設置されており、計測室の内部で、実験中の波浪現象を観察しながら、造波装置および計測台車の操作制御ならびに計測データの記録や解析などが、効率的に行えるようになっています。	京都府八幡市美濃山一ノ谷4番地	TEL:075-981-6204 (直通) FAX:075-981-3554		https://www.oit.ac.jp/japanese/yawata/facility/hydraulic.html
		不規則波造波水槽	長さ50 × 幅0.8 × 高さ1.2m					
10	名古屋大学 水工学講座	片面ガラス張り鋼製水路及び不規則波・津波発生装置	長さ30m × 幅0.7m × 高さ0.9m		愛知県名古屋千種区不老町			http://www.coast.civil.nagoya-u.ac.jp/wiki.cgi?page=%BC%C2%B8%B3%C0%DF%C8%F7
11	名城大学 水工システム系	可変勾配大型開水路	幅60cm, 長さ19m	基礎的な水理実験から、河床の土砂移動を調べる実験を行うのに用いられます。勾配が水平から急勾配まで設定できるため、土砂を敷いた水路に水を流すことで、土石流現象や河川地形の変化を再現することが可能です。平成21年に水路部が新しくなったため、全面ガラス張りで横から流れを観察することが可能です。	名古屋市天白区塩釜一丁目501番地	052-832-1151(代)		http://civil.meijo-u.ac.jp/intro/facilities/water.html
		二次元造波水槽	幅1m, 長さ30m	実際の海と同じように不規則な波を造波装置によって起こして、海岸での波の動き、海浜地形の変化を再現できます。				
		平面造波水槽	幅10m, 長さ18m	大型の造波装置によって規則的な波を起こし、海岸付近での波、流れを再現できます。これにより、テトラポットなどを設置した場合の消波効果や、砂の動き、ゴミの漂着現象について調べることができます。				
		沈降現象・オリフィス実験水槽		高さ約2mの大型実験水槽です。水槽に水をはり、上から物体を落とし、沈降速度を計測することで、その物体の抗力係数を求めることができます。また、この水槽は、側面に設けられたオリフィス(小孔)からの流出実験を行うこともできます。				
		可変急勾配開水路	幅45cm, 長さ8m	基礎的な流れや流砂の実験を行うのに用いられます。水平から急勾配まで様々な勾配を設定して、水の流れや土石流、流水中の砂の移動に関する実験を行うことができます。				

	業者名	水槽		住所	連絡先	その他	URL		
		種類	大きさ					特徴/用途	
1	国立研究開発法人 港湾空港技術研究所(PARI)	デュアルフェース サーベント水槽	短辺25m×長辺49m×深さ1.5m(外寸)	沖から岸に至る海底地形による波の変形を再現します。2つの側面に幅60cmの造波板を持つ100台の造波機を配置し、様々な方向へ進む不規則な波を発生させることができます。さらに、2つの側面をそれぞれ個別の多方向不規則波造波装置として制御すれば、それぞれ個別の方向へ進む2つの風波、風波とうねりあるいは長周期波、津波、極大波(一発大波)が重なった波を作り出すことができます。	神奈川県横須賀市長瀬3丁目1番1号	046(844)5010		https://www.pari.go.jp/about/facilities/	
		大型実験水路105m 堤体実験水路	長さ105.0m×幅3.0m×深さ2.5m	105m堤体実験水路は、昭和30年に整備した施設で、研究所が保有する施設のなかで、最も古い施設です。本施設では、防波堤や護岸等の海岸構造物について、中型模型実験により構造物の機能的な検討を行うことができます。また、波消ブロック、杭等に関する各種模型実験にも活用されています。			貸付要領に従って貸付を行います。	貸付要領 https://www.pari.go.jp/files/items/909/File/shisan_kashituke29.pdf	
		35m二次元水路	長さ35.0m×幅0.6m×高さ1.3m(強化ガラス張り)	海底地形により波が変形する実験の様子を断面的に見ることができる					
		海底流動実験水槽		海底での堆積物の巻き上げなどの移動現象を再現し、水質環境への影響を把握するためのものです。プロペラの回流装置や水槽両端に設置されたピストンアクチュエーターをコンピュータ制御することにより、波浪や潮流などによる沿岸域特有の海底での複雑な海水の動きを再現することができます。					
		環境インテリジェント水槽	主水槽 短辺29m×長辺40m×深さ1.3m(外寸) 周回水槽 長さ155m×幅2m	沿岸の複雑な自然環境(波・流れ場)を再現します。2つの側面とそのコーナー部に幅60cmの造波板を持つ94台の造波機を配置し、様々な方向へ進む不規則な波を発生させることができます。また、水槽の全周に幅1200mm、高さ100mmの流れ発生孔を78個有しており、沿岸の様々な流れを波と同時に再現することができます。					
		油回収実海域再現水槽	幅13、長さ32、高さ3.5	海上で実験を行う代わりに実際の重油を散布し、波、流速、海水温、そして時には風を与えて機器類の性能を試験することができます。					
		海底探査水槽	直径5m、深さ10.5m	海底や海中での作業、工事、調査等でのセンシングに必須な超音波等を用いた海洋音響機器の特性試験を行うこと 底部にはハッチが設けられ、また、上部にクレーンを設置し、音響機器が計測する対象物を設置して実験を行うことができます。また、深い水深と併置された水質浄化装置を利用し、浮沈式パイの試験や物質の拡散挙動の試験などを行うことができます。					
		水中作業環境再現水槽(水中ロボット水槽)	長さ30m×幅10m×水深6m、最大水深0.5m	実際の海中の状況を再現して水中作業実験を行うための水槽 水深、波高、周期等をそれぞれ独立して変えることができ、実規模の実験が実施可能な国内で唯一、世界でもまれな大型造波水槽					
		大規模波動地盤総合水路	長さ184m、幅3.5m、深さ12mで、深さ4m	世界最大の波、3.5mの風波と最大2.5m相当の津波を起こすことができる大型の水路で、世界的にも希な実験施設です。水路の大きさは、長さ184m、幅3.5m、深さ12mで、深さ4mの砂地盤層を持っていることも特徴です。					
総合沿岸防災実験施設	短辺10m×長辺50m×深さ m	長周期うねりの被害を精度良く再現するため、災害発生後における現地の被害状況等を高性能のコンピュータを活用した数値シミュレーションと大規模水理模型実験水槽による防波堤、護岸等施設の破壊、変形の過程を再現する実験との連動により、迅速なメカニズムの解明と対策を打ち出すことができる総合的な実験施設。							
2	国立研究開発法人 海上・港湾・航空技術研究所 海上技術安全研究所	400m試験水槽	長さ400m、幅18m、水深8m	商船用では国内最速の15m/秒(時速54km)の曳航速度を誇る水槽です。長さ50mの模型の実験も行ったことがあります。	東京都三鷹市新川6丁目38番1	0422-41-3005		https://www.nmri.go.jp/study/faci/facilities.html	
		中水槽	長さ150m、幅7.5m、水深3.5m	水深に対応できる造波機を備え、浅い水域での船の航行性能や各種実験ができます。	企画部業務室	Fax:0422-41-3258 E-mail: gyoumusitu@nmri.go.jp	施設利用は企画部業務室に連絡。		
		実海域再現水槽	長さ80m、幅40m、深さ4.5m	曳航台車、全周分割吸収造波装置、送風装置などを備えています。					
		海洋構造物試験水槽	長さ40m、幅27m、深さ2m	波や流れを発生させる装置のほか、構造物に働く力を計測するための固定副台車と模型の運動を追尾するための副台車を持つ大きな曳航台車を備えています。					
		深海水槽		水深4000mもの深海を想定した模型試験も可能な水槽です。					
		大型キャビテーション試験水槽		プロペラの性能低下や振動、それに騒音などの原因となるキャビテーション試験に用いる水槽です。					
		水海船舶試験水槽	長さ35m、幅6m、水深1.8m	砕氷船の航行性能、氷海で油の拡散などの実験を行う水槽です。					
	海洋工学総合実験棟	長さ60m、幅25m、深さ3.2m	・多分割式造波機によって海洋波とよく似た多方向不規則波の発生が可能。 ・X-Y曳引装置とターンテーブルによって曳航試験が可能。これらは複合的に動作させることにより任意の運動が可能。 ・水槽のすべての機能はコンピューターと光空間電送システムによって一人の研究者で制御することが可能。	茨城県神栖市波崎7620-7	TEL: 0479-44-5929 FAX: 0479-44-1875		http://nrife.fra.affrc.go.jp/system/system_index.html		

3	国立研究開発法人 水産研究・教育機構 水産工学研究所	回流水槽実験棟	7.5 × 2.8 × 1.4m	<ul style="list-style-type: none"> ・垂直循環型で、材質はステンレスです。 ・水槽の主要寸法、形状、循環路内の細部には流力性能の向上を最優先した設計が行われています。流力性能は世界一です。 ・測定部の寸法は長さ6 m、横幅2.8m、水深1.4mです。 ・流力性能の向上のため2-インペラードライビングシステム、水面流加速装置、水量自動調整装置等の特殊機械がインストールされています。運転・計測・解析はコンピュータによって行い、実験棟内には実験者が現象との対話に集注できる工夫がされています。 ・最大流速は機構上3 m/sまで可能です(高速流れの基本性質は十分に研究がされておらず、また高速時の実験法にも多くの研究課題を残していますので、機構上との正確な表現としておきます)。 				
		波浪平面水槽実験棟	60m × 40m × 深さ0.8m	広い水槽を使うことで波の動きを平面的に再現することができます。防波堤などの構造物の全体を再現した模型実験を行って波・流れの制御機能、漁船の出入港や係船が安全にできる漁港形状を調べます。				
		漁港水理実験棟	大型造波水路:長さ100m × 幅2m × 深さ2m 津波実験水路:長さ100m × 幅1m × 深さ1.5m	この実験施設には長さ100mの水路が2本あり、それぞれ大型造波水路、津波実験水路(H28年度改修)といえます。大型造波水路では、実海域で発生する不規則な波や津波を発生させて防波堤などの施設の安定性や機能を調べます。津波実験水路では津波を作用させて防波堤などの施設の安定性や機能を調べます。				
4	国立研究開発法人 海洋研究開発機構 横須賀本部	高圧実験水槽装置	本体水槽内有効寸法 内径:約1.4m × 高さ:約3m 試験体収納カゴ有効寸法 内径:約1.2m × 高さ:約2.7m	この設備は水深約14,000mに相当する圧力までの深海環境を再現し、各種深海機器、各種材料に対する疲労試験、耐圧試験および作動試験等の実験ができます。実験中の水槽内映像は、圧力100MPaまでは映像モニター装置(水中カメラ)により監視され、加圧試験中の映像画面を外部に出力して、試験中の映像画面を記録することができます。実験中の加減圧及び保持データは、計測装置により自動的に記録することができます。試験結果データを出力することもできます。	神奈川県横須賀市夏島町2番地15	TEL: 046-867-9902 FAX: 046-867-9025 E-mail: facilities@jamstec.go.jp	使用者は、施設・設備使用条件、使用期間及び使用料等を承諾の上、(様式1)「施設・設備使用申込書」(PDF)に必要事項を記載し、記名押印のうえ、使用開始の1週間前までに申し込んでください。また、使用料免除の適用を希望する場合には、機構が定める(様式2)「特定共用施設使用料の減免措置申請書」(PDF)に必要事項を記載し、記名押印のうえ「施設・設備使用申込書」と併せて申し込んでください。	http://www.jamstec.go.jp/j/about/equipment/yokosuka/index.html
		中型高圧実験水槽装置	本体水槽内有効寸法 内径:約0.6m × 高さ:約1.6m 試験体収納カゴ有効寸法 内径:	〃				
		超音波水槽装置	約9m × 幅:約9m × 深さ:約9m	計測機器(供試体)の計測を行う際に、計測機器の位置の制御および検出を行うことができ、位置情報はデジタル表示されます。				
		多目的実験水槽	長さ40m × 幅4m × 深さ2m(一部2.3m)	大型の水中機器等の開発や性能試験をするための施設です。鉄筋コンクリート製で片側側面に1m四方の観測窓5個を設け水中の実験模型の挙動を観測することができます。				
		多目的プール施設	21mL × 21mW × 1.5~3.3mD	潜水機器・水中機器の開発、性能試験、潜水技術者の訓練などを行うためのものです。多目的プールは、ほぼ正方形(八角形)で、深さは3.3mと1.5mに分かれていて、総水量は約1,000トンになります。また、深さ3.3m部分の周囲には、水面下を観察する観察窓が設けられています。プールサイドには、空気充填装置や、高所からの入水用の飛び込み台もありいろいろな訓練に使用できるようになっています。				
5	電力中央研究所 地球工学研究所	大型造波水路	長さ200m、幅3.4m、深さは最大6m	長さ205mの大型造波水路を用いて、津波を実際の大きさの1/100~1/200のスケールで再現できるものです。水平方向と鉛直方向との縮尺を同じにした「無ひずみ模型」で実験が可能な設備としては、国内外で最大規模のものです。	千葉県我孫子市我孫子1646	TEL: 04-7182-1181		https://criepi.denken.or.jp/jp/civil/tech/setubi.html
		風洞付き2次元造波水路	最大波高35cm、長77m、幅0.9m、高1.2m					
6	国立研究開発法人 土木研究所	ダム水理実験施設	ダムの洪水吐きや放流設備等の複雑な流れの解明や計測 ● トンネル洪水吐き内部の流れの安定に必要な空気連行現象やキャビテーションの研究 ● 効果的な魚道の設計手法の確立 ● 掃流砂と浮遊砂を対象とした排砂設備やウォッシュロードの設備の研究 ● 超流水脈の振動が引き起こす水理構造物周囲の騒音や低周波空気振動の対策研究		茨城県つくば市南原1番地6	029-879-6700	土木研究所の業務に支障のない範囲で、一定の基準の下に、外部の研究機関の利用に供しております。	https://www.pwri.go.jp/jpn/about/shisetsu-map/c.e2-3/index.htm
							貸付申請について	https://www.pwri.go.jp/jpn/about/lend/kit/ei.html

	業者名	水槽		住所	連絡先	その他	URL
		種類	大きさ				
1	鹿島建設 鹿島技術研究所	平面水槽	20m	海岸・海洋での構造物の計画・設計・施工のあらゆる段階で、技術課題の実証的な説明が可能			https://www.kajima.co.jp/tech/katri/research/fac.kaiyou/index.html
		マルチ造波水路	1.2m幅	マルチ造波水路には津波造波・環流装置が備わっており、水路内に津波や流れを発生できます。水路の側壁面には強化ガラスによる観測窓が設置されており、波の変形状況や構造物に波が作用する状況を詳細に観察可能です。			
		不規則波造波水路	1.2m	水路幅が2mと比較的広いので、小規模の構造物に対しては三次元的な水理実験を行うこともできます。さらに、造波板を変位制御でゆくりと動かすことにより、任意の長周期の波を造波することができるので、津波実験を実施することも可能です。			
2	東亜建設工業 技術研究開発センター	大型造波水路	長さ60.0m × 幅1.0m × 高さ2.0m	大型造波水路は、造波装置、循環装置を備え、多様な波浪、流れを起こすことができます。さらに、造波装置、循環装置、段波装置の単独利用はもちろん、各装置の連携によって、様々な任意波形の津波を起こすことができます。縮尺1/20程度の大型実験が可能で、港湾・海岸・海洋構造物、浮体、海岸侵食、津波防災などの技術開発に使用できます。	神奈川県横浜市 鶴見区安善町1-3	電話 045-503-3741 FAX 045-502-1206	https://www.toa-const.co.jp/trdc/facilities/
		施工実験水槽	幅11.4m × 奥行4.0m × 高さ5.0m	水中における施工状態を大スケールで再現するため、地下空間に整備された巨大水槽です。水中における各種の施工実験が可能であり、水中作業ロボットの作動実験などで活用できます。			
		大型環境水槽	幅3.5m × 奥行3.5m × 高さ2.5m	港湾工事などにおける濁りの発生や拡散状況の再現実験が可能です。また、大水深海域における捨石やコンクリートブロック投入時の堆積形状の再現、数値シミュレーションの検証データの取得が可能です。			
3	株式会社 不動テトラ	大型平面水槽	長さ50m × 幅40m × 高さ1.5m	巨大なプール状の水槽には、スネークタイプと呼ばれる多方向不規則波造波機が設備されており、現地の波浪状況を精度よく再現することができます。	茨城県土浦市東 中貫町2-7	029-831-7411	http://www.fudotetra.co.jp/technology/facilities.html
		断面水槽 (第一大型断面水 断面水槽 (第二大型断面水 断面水槽 (中型断面水槽) 断面水槽 (小型断面水槽)	長さ55m × 幅1.2m × 高さ1.5m 長さ50m × 幅1.0m × 高さ1.5m 長さ50m × 幅1.0m × 高さ1.3m 長さ29m × 幅0.5m × 高さ1.0m	不規則波造波機が設備されています。			
		断面水槽	長さ50m × 水路幅60cm × 高さ1.5m	規則波・不規則波のいずれにも対応可能 長周期波も造波可能 波・流れ共存場の実験が可能 砂を用いた移動床実験が可能			
		平面水槽		国内最大級の平面水槽実験装置 39枚の造波板によるスネーク型造波装置 規則波、単方向不規則波・多方向不規則波の実験が可能 砂を用いた移動床実験が可能			
		断面水槽	長さ50m × 水路幅60cm × 高さ1.5m	規則波・不規則波のいずれにも対応可能 長周期波も造波可能 波・流れ共存場の実験が可能 砂を用いた移動床実験が可能			
4	五洋建設株式会 社 技術研究所	断面水槽	長さ50m × 水路幅60cm × 高さ1.5m	規則波・不規則波のいずれにも対応可能 長周期波も造波可能 波・流れ共存場の実験が可能 砂を用いた移動床実験が可能	栃木県那須塩原 市四区町1534-1	電話 0287-39-2100 FAX 0287-39-2132	http://www.pentaocean-int.com/facility/suiri
		平面水槽		国内最大級の平面水槽実験装置 39枚の造波板によるスネーク型造波装置 規則波、単方向不規則波・多方向不規則波の実験が可能 砂を用いた移動床実験が可能			
5	株式会社三井造 船 昭島研究所	大水槽	長さ220m × 幅14m × 高さ6.5m (水深6m)	主として船舶・海洋機器の推進性能試験や波浪中試験に使用します。平水中の抵抗試験、自航試験、伴流試験、プロペラ単独試験などの定形的な標準試験は曳引車上に設置されたコンピューターによって運転制御、データ処理がすべて自動的に行われ、試験精度と能率の向上が図られています。	東京都昭島市つ つじが丘1-1-50	TEL 042-545-3111 FAX 042-546-3570	https://www.mes.co.jp/Akiken/shisetsu/
		小水槽	長さ100m × 幅5m × 高さ2.65m (水深2.15 ~ 0.2m)	船舶・海洋機器の運動性能試験やプロペラ関係の試験に主として使用しますが、基礎的研究用としても使いやすい水槽になっています。また水深を変えて浅水時の諸試験ができます。			
		潮流水槽	開水路長さ55m × 幅8m × 高さ3m (水深2.5 ~ 0.5m)	船舶・海洋機器の運動性能試験やプロペラ関係の試験に主として使用しますが、基礎的研究用としても使いやすい水槽になっています。また水深を変えて浅水時の諸試験ができます。			
		キャビテーション水槽	縦型回流式、長さ13.5m × 高さ7m	主として水槽内の流速、圧力等を制御して、船舶や海洋構造物のプロペラやスラスターのキャビテーション試験やキャビテーションノイズ計測試験に使用します。定形的な試験はパソコンによって処理されます。計測部は第1計測胴(ワイヤーメッシュ・スクリーン方式)と第2計測胴(ダム型模型船方式)の2組あり、試験目的に応じて選択することができます。			
		回流水槽	全長16.2m × 全幅4.2m × 全高6m 測定部長さ5.5m × 幅2m × 水深1.2m 測定部流速 最高 1.7m/s	主として水槽内の流速、圧力等を制御して、船舶や海洋構造物のプロペラやスラスターのキャビテーション試験やキャビテーションノイズ計測試験に使用します。定形的な試験はパソコンによって処理されます。計測部は第1計測胴(ワイヤーメッシュ・スクリーン方式)と第2計測胴(ダム型模型船方式)の2組あり、試験目的に応じて選択することができます。			
2次元水槽	長さ25m × 幅1.1m × 高さ1.4m、 最大波高0.15m、周期0.5 ~ 2秒	2次元物体の規則波中及び不規則波中の波力・運動計測試験・強制揺動試験などに使用します。模型からの反射波を打ち消しながら造波する吸収式造波機が装備されており効率のよい試験ができるのが特長です。					
6	大成建設 技術センター	沿岸海洋水槽・多方向造波装置		実際の海洋と同じ状況を創り出し、海洋構造物に対する潮汐・波・流れの影響を検証する実験水槽です。	神奈川県横浜市 戸塚区名瀬町 344-1	TEL 045-814-7221	https://www.taisei.co.jp/ss/tech_center/activity/research/07
		津波造波装置		防波堤や海岸堤防、あるいは建物等の陸上構造物に作用する津波波力や津波による遡上・浸水の状況を、屋内水理実験で再現するための装置です。東日本大震災時のような大規模津波の再現が可能であり、防波堤や建物に作用する力、建物周辺の津波の挙動等を高い精度で把握することが可能です。			
		2次元水槽		海洋構造物に対する波や流れの影響を2次元的に再現できる水槽です。			

7	安藤ハザマ 技術研究所	2次元造波水路	長さ50m、幅0.8m、深さ1.5m	最大波高30cmの規則波や不規則波、最大流量12m ³ /分の循環流を発生させることができます。 ・海洋構造物に働く波力、潮流力およびその応答 ・浮遊式海洋構造物の動揺 ・潮流、波浪による海洋構造物周辺の洗掘 ・密度成層流の混合拡散状況	茨城県つくば市 刈間515-1	TEL:029-858-8800(代表) FAX:029-858-8808(代表)	http://www.ad-hzm.co.jp/tr/giken/annai.html	
8	株式会社東京久栄	平面水槽	30m×18m×1m	拡散実験・構造実験等 【実験事例】 ・排水拡散実験 ・水中構造物に係る水理実験 ・河川・下水に係る水理実験	技術センター 埼玉県川口市芝 6906-10	電話:048-268-1600 FAX:048-268-8301	https://www.kyuei.co.jp/env_suirijikken.html	
		三次元水槽	3m×7m×2m	水深や高低差を必要とする実験 【実験事例】 ・水中構造物に係る水理実験 ・水質浄化に係る水理実験 ・各種水理実験	技術センター別館 埼玉県川口市芝 高木2-19-21	電話:048-262-7011 FAX:048-261-4397		
		二次元造波水槽	35m×1.5m×1.5m	様々な波浪条件を再現できる機能がある 【実験事例】 ・波力・構造安定水理実験 ・海岸等への浅海特性水理実験				
9	三省水工株式会社 技術研究所	二次元造波水路	長さ×幅×深さ = 30.0m×0.8m×1.2m		福岡県宗像市池田 965-2	TEL.0940-62-1491 FAX.0940-62-1491	http://www.sanshou-uiko.co.jp/Institute-of-Technology.html	
10	ジャパン マリン ユナイテッド株式会社	船型試験水槽	全長240m × 全幅18m × 水深8m	世界最大級	技術研究所(津) 三重県津市雲出 鋼管町1番地3	TEL:059-238-6400 FAX:059-238-6442	https://www.jmuc.co.jp/rd/technology/	
		運動性能水槽	全長70m × 全幅30m × 水深3m	これらの水槽はCFD(数値流体力学)ツールと共に強力な流体性能設計・開発ツールとして活躍しています。	技術研究所(横浜) 横浜市磯子区新 中原町1番地	TEL:045-759-2094 FAX:045-759-2107		
		キャピテーション水槽						
		水海水槽	全長20m × 全幅6m × 水深1.8m					

■ 9章 まとめと結論

本章では実施した事業のまとめと結論を記す。まず、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モデリング技術の開発成果について簡単にまとめ、その開発したモデリング技術を用いて得られた2重シルトフェンスの変形動作のシミュレーション結果とその水槽実験による検証結果、そして放射性核種の拡散抑制効果について得られた知見を記す。次に、実港湾を模擬し、そこで敷設されるシルトフェンス変形動作のシミュレーション結果と水槽実験による検証結果、更に実港湾模型において、シミュレーションにより得られる放射性核種の拡散抑制効果に関する知見についてまとめる。また、実施すべき本格水槽実験のため、国内の大学・民間・各研究機関の実験水槽の情報についても、まとめを記す。

本事業で実施した要件として最も基本となる成果は、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モデリングを構築できたことである。一般に、シルトフェンスは透水性が悪く、殆ど水は透過しないため、河川や沿岸等の自然環境下で用いた際は、発生する汚濁水の拡散を抑制するものと考えられてきたが、汚濁水の動きにあわせて変形動作を許しており、その変形動作をほぼ再現できることが、本事業の一つの要件となった。なぜなら、その変形動作を精度良くシミュレーションできない限り、シルトフェンスの有効性についての定量的議論が成り立たないからである。従って、本事業では、過去の文献から、シルトフェンスの変形動作を記述する最適なモデルを調査し、必要とあれば、その手法を改良し、本事業で目指す原発港湾内に敷設されたシルトフェンスの変形動作を再現可能とするモデルの構築を目指した。その結果、過去の多くの文献の中から、金山らの手法に着目し、当該手法が唯一、シルトフェンスの水流中での変形動作をシミュレーションできるものと判断し、その手法をシミュレーションコードとして実装することとした。しかし、金山らの手法は、水平方向の変形に際し、シルトフェンスの現実の変形動作を記述できない等の課題があり、報告者らはその改善法を考察した結果、様々な条件下でも、ほぼ安定に動作可能なアルゴリズムとして完成させることに成功した。これにより、2重シルトフェンス、そして原発港湾内に敷設予定の取水口への敷設や、複数の取水口からの流水が集水される開渠部端での複数枚のユニットから成るシルトフェンスの敷設、そして港湾口での複数シルトフェンス敷設時に見られる多数のユニットから成る比較的長いシルトフェンス敷設状況にも対応可能なシミュレーションモデリングを構築することに成功した。

次に、構築したモデリングを実際の流動シミュレーション内に実装し、主に以下の3つのシミュレーションを実施し、対応する水槽実験による比較検証を行った上で、放射性核種の拡散抑制効果について論じた。また、4)として国内の大型水槽実験施設の調査を実施した。

- 1) 1重(複数ユニットから成るケース含む)及び2重に敷設されるシルトフェンスの「ふかれ」
- 2) 原発港湾内の取水口等に敷設されるシルトフェンスの「たわみ」と「ふかれ」
- 3) 原発港湾内の開渠口や港湾口に敷設される複数のユニットからなるシルトフェンスの「たわみ」と「ふかれ」
- 4) 日本国内の大型水槽実験施設の調査

1)については、1重のケースにおいて複数ユニットからなるシルトフェンスモデルについての研究を進めたところ、ユニット間を透過する水の影響は殆どなく、透過係数を貼り合わせ部分で変動させるモデルで十分であることが分かった。その一方、複数ユニットからなる長いシルトフェンスの場合は、

両端以外の固定点もあることから、そのモデリングも実施した。これについては、原発港湾内の港湾口にて敷設されるケースにて、開発したモデルを反映させる。次に2重シルトフェンスのケースに対して、開発したモデリングを実装したシミュレーションを実施した所、1枚目については、29年度に得られた「ふかれ」と全く同じ状況になることを確かめ、2枚目については「ふかれ」が抑制され、その抑制度合いは1枚目からの距離に強く依存するという知見をシミュレーション結果として取得した。実際、2枚目の「ふかれ」度合いの距離に対する依存性については、水槽実験を行い、シミュレーションと水槽実験を比較した所、ほぼ一致した結果を取得することに成功した。この結果より、構築したシミュレーション(シルトフェンスの変形動作モデリングも含む)の妥当性検証に成功したと判断できるが、唯一、一致の悪いケースがあったことを付記する。そのケースとは、流速が早く且つ2枚のシルトフェンス間隔がフェンス長より長く(フェンス間隔>フェンス長)、1枚目により生成される後流の乱流の詳細構造の再現性が問題となる領域のみであった。従って、この領域では、乱流構造を解像できる大規模なシミュレーション(計算格子解像度を十分にするため超並列計算が必要になる)を実施することで、今後解決できると考えられる。また、2重シルトフェンス敷設状況において、懸濁体のシルトフェンス付近での定常濃度分布についてもシミュレーションを行い、対応する水槽実験結果と良い一致が得られることが確認できた。これにより、放射性核種の溶存成分(流動場が再現できれば十分に再現可能と判断)だけでなく、懸濁体成分についても、シミュレーションの検証に成功したと考えられる。こうして、種々のシルトフェンス敷設状況に対して、放射性核種の拡散抑制効果についてのシミュレーションによる評価が可能になったと判断する。

2)については、既に構築したシルトフェンス変形動作モデリングを、水平方向の変形動作自由度「たわみ」を有するケースの代表例として、原発港湾の取水口に敷設された状況をシミュレーションした。得られた結果は、相当する水槽実験のシルトフェンスの変形動作結果と比較することで、シミュレーションの妥当性を評価した。シミュレーションと水槽実験結果はほぼ一致していることが判明したが、一部、2重シルトフェンスと同様に、シルトフェンス両端の流速が早くなり、乱流構造が影響を与える両端の下端のみの再現性が課題となることが分かった(シミュレーションの方が「ふかれ」度合いが小さくなる傾向がある)。これも、大規模シミュレーション(計算格子解像度を十分にする)を実施することで今後、解決可能と考えられるが、シルトフェンスの概略の形状は一致しており、放射性核種の拡散抑制効果についてのシミュレーションによる評価は十分に妥当と判断する。

以上、1) 2)の水槽実験による検証により、ほぼ妥当なシルトフェンスのシミュレーションが実施可能と結論した上で、実港湾内の開渠部口や港湾口にて比較的規模の大きなシルトフェンス敷設状況についてもシミュレーションを行い、水槽実験との比較を行った。水槽実験では、開渠口のシルトフェンスの効能を調べるため、実港湾模型(I)(7章参照:2つの取水口模型を含む開渠部を有し、開渠部には複数枚ユニットから成るシルトフェンスを敷設する模型)を作成し、シミュレーションと水槽実験を比較した。その結果、シルトフェンス付近や開渠口、そして開渠口付近での流動場は凡そ、一致することが確かめられた。また、実港湾模型(II)(7章参照:実港湾模型(I)に加えて、外洋との連絡口となる港湾口を模擬する模型)を作成し、港湾口に敷設する複数ユニットからなる大規模シルトフェンスを敷設した状況での流動場の特性を調べた所、シミュレーションと水槽実験がほぼ一致することが確かめられた。

これらの検証結果を受け、放射性物質として溶存成分及び懸濁体成分のシルトフェンスによる拡散抑制効果を調べるため、実港湾模型(I・II)においてシミュレーションを行った。その結果、シルトフェンスにより、シルト成分の沈降が促進され、放射性核種の拡散抑制が実効的に働くことが確かめられた。

このような結果は、水平方向スケールの小さい模型（2重シルトフェンスの効果を調べた矩形水路：5章参照）では、殆ど取得不可能であり、従来からシルトフェンスの効能に懐疑的な目が向けられていたが、港湾形状という水平方向のスケールが十分に大きい系で初めて、シルト成分の沈降促進による懸濁体に付着した放射性核種の拡散抑制が、シルトフェンスにより実現できることが判明したと言える。つまり、シルトフェンスの放射性核種の拡散抑制の効果については、模型の範囲だが、シルトに吸着した放射性核種についての拡散抑制が可能であり、今後は実験による検証等が求められよう。上記の事実は、本事業で得られた一つの成果であり、更に検証を重ねる必要があると考えられる。

最後に、本事業では模型実験による検証を、最大でも 1/15 スケール比で行ったことから、可能な限り現地スケール（スケール比 1/3~1/2）に近い模型での水槽実験による検証が求められることを付記する。また、シミュレーションも可能な限り、空間格子解像度を向上させ、上記の検証に係る課題解決を実施する必要があることが分かる。

4）として、本事業では上記の観点に立ち、現地スケールに比する（スケール比 1/2-1/3）水槽実験が可能な研究機関についての情報を収集した（8章参照）。その結果、複数の機関の実験水槽が候補として挙げられる。しかし、懸濁体の挙動を扱うのは難しく、シルトフェンスの変形動作のみを検証した後、本事業を超えるスケールでの港湾模型実験を行うと同時に、大規模シミュレーションを通して更なるモデル検証（精度の高い検証）を実施し、シミュレーションを中心に知見取得を目指すことが現実的と考える。