

浮体特性を考慮した 漂流シミュレーションの適用性に関する研究

NUMERICAL AND EXPERIMENTAL STUDY ON DRIFT DUE TO TSUNAMI CONSIDERING THE DRAG FORCE COEFFICIENT AS A FUNCTION OF CURRENT ANGLE

安野浩一朗¹・西畑 剛²・森屋陽一³
Koichirou ANNO, Takeshi NISHIHATA, Yoichi MORIYA

¹正会員 五洋建設(株)技術研究所(〒329-2746 栃木県那須塩原市四区町1534-1)

²正会員 修(工)五洋建設(株)技術研究所(〒329-2746 栃木県那須塩原市四区町1534-1)

³正会員 博(工)(財)沿岸技術研究センター(〒102-0092 東京都千代田区隼町3-16)

In order to predict the behavior of floating body under tsunami flood appropriately, numerical simulation is effective to reproduce the dynamics with drift. As analyzing the movement of flotsam, it is significant to evaluate the drag force exerted on the float shape.

We prepared the drift simulation model based on the Distinct Element Method (DEM). In the simulation, every flotsam shape was expressed by an assembly of individual sphere elements and current velocity field generated by tsunami was given from the result of the tsunami propagation simulation computed in advance.

This paper shows experimental results of container's drag force coefficient as a function of every current angle. And we refer the application of a drift simulation method considering the drag force by comparing the drift motion obtained from the experiment in a 2-dimensional plane water tank with that of the simulation result for above-mentioned float model.

Key Words : *Drift, tsunami, drag coefficient, distinct element method*

1. はじめに

巨大地震津波による災害は、浸水被害、津波波力による家屋や構造物の損傷、流出、人的被害などが考えられる。これらの内、船舶や車等の漂流物による衝突災害の危険性(例えば、図-1)が以前から指摘されている。

津波時の漂流物による被害推定を行う目的で、漂流シミュレーション手法に関する研究が進められている。例えば藤井ら¹⁾は拡張個別要素法²⁾を用いる手法を提案し、船舶を対象に津波に対する複雑な挙動を数値解析によって再現可能であるとし、また、漂流物への作用流体力は抗力係数を用いることによって概ね評価可能であると結論付けている。また、熊谷ら³⁾は、コンテナを対象とした漂流物の挙動に関する研究を行い同様の結論に至っている。しかし

ながら、これらの研究における漂流物は単純に球要素の集合体として評価されており、浮体特性が十分に考慮された検証となっていない。また、流体力の評価は、抗力係数の流向に対する変化を漂流物の形状に準じて考慮せずに各個別の球要素が独立しているものとみなされた一定値として検証しており、漂流物の形状についても十分に考慮された検証となっていない。さらには、漂流物は単体のみを扱っており複数の浮体同士の衝突や座礁現象に関する適用性についてまでは十分に検証されていない。

そこで本研究ではコンテナを対象に流向別の抗力係数を実験的に算出するとともに、流向別の抗力係数と浮体特性を考慮した漂流シミュレーションを行って、複数のコンテナの挙動、衝突及び座礁位置に関する漂流シミュレーション手法の適用性について検証した。

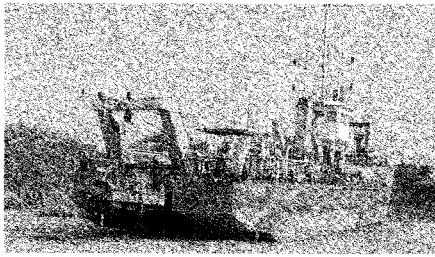


図-1 津波による船舶座礁被害の一例

2. 漂流シミュレーションの概要

本研究における漂流シミュレーション手法の特徴は、①漂流物は複数の球体から構成される個別要素法を用いて再現し、要素同士の連結は間隙バネによる拡張個別要素法²⁾を用いるのではなく、完全剛体と仮定して重心位置における6自由度の運動方程式を解いて漂流物の挙動を解析する点。②漂流物の形状と流体の作用方向から決定される抗力特性を流向別に評価して解析を行う点、である。

以下にその他の概要を示す。

①数値波動水路⁴⁾(CADMAS-SURF, ver4.0)による段波再現結果の水位と流速及び実験結果を用いて漂流物への作用力を求める。作用力を求める際の抗力係数は本研究の実験結果から得られた流向別の数値を用い、慣性力係数は藤井ら¹⁾と同様に1.0とする。②本研究においては、160個の球要素を用いてコンテナのモデル化を行う。図-2にコンテナのモデル図を示す。③コンテナのZ方向重心位置は模型の実測結果と同じ位置とする。④動揺に対する非線形減衰力は抗力を用いる手法により評価し、本研究ではコンテナの挙動に最も影響を与えと考えられる、Heave(上下運動)方向のみ抗力係数0.1として設定する。⑤水線面積はコンテナの各要素における水位を積分して時系列的に変動させる。⑥漂流物同士および地形との接触時に作用する摩擦は実験において使用した材料の摩擦特性から決定する。⑦コンテナの要素及び粘性バネは、模型材料のヤング率を元に材料自体の単位体積質量とコンテナ全体系としての比重から決定する。⑧漂流時に材質の異なるもの同士(地面とコンテナ)が接触した場合には並列的に合成バネ値を算定しそれぞれの物体に作用させる。

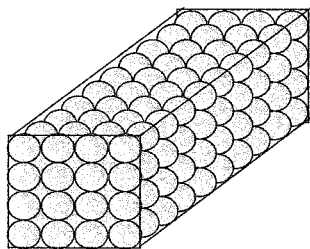


図-2 コンテナのモデル図

3. 水理模型実験

(1) 実験概要

本研究では、断面水槽に一樣流を発生させてコンテナの流向別の抗力係数を計測する実験(以下、抗力実験)および、空荷状態の単独もしくは複数のコンテナを配置した矩形水槽に段波を発生させて、その挙動を計測する実験(以下、漂流実験)についてそれぞれ実施した。模型はフルードの相似則に従い、20フィートコンテナの規格に対し縮尺1/15で実施した。表-1に実験に用いたコンテナの諸元を示す。

表-1 コンテナの諸元

名 称	数 量	単 位	摘 要
長さ	0.4	(m)	
幅	0.17	(m)	
高さ	0.17	(m)	
質量	0.65	(kg)	空荷時

(2) 抗力実験

抗力実験は、コンテナを分力計に固定した状態で一樣流を作用させて流体力の計測を行った。コンテナの向き、流速および喫水を変化させた実験を行った。図-3に抗力実験の模式図を、図-4に抗力係数の計測状況を示す。また、表-2に実験ケース一覧を示す。抗力係数は、分力計による計測結果を平均流速の2乗およびコンテナの投影面積で除して算出した。分力計および流速計のサンプリング間隔は20Hzとし、水路内の流速が安定した後の2分間計測した。

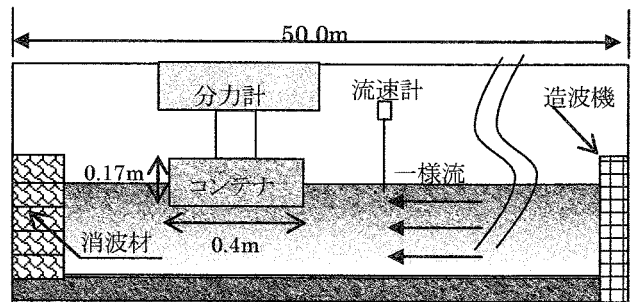


図-3 抗力実験の模式図

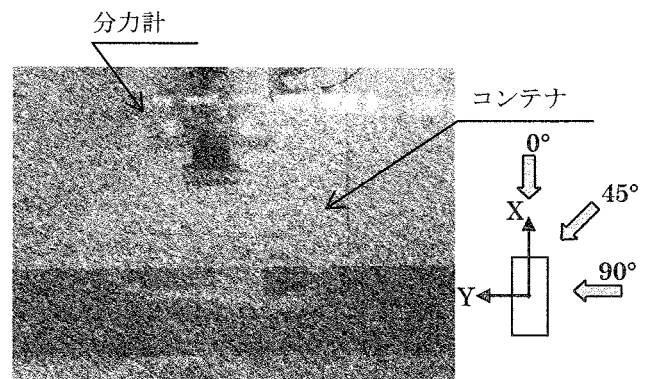


図-4 抗力係数の計測状況(流向45度、喫水0.08m)

表-2 実験ケース一覧（抗力実験）

流向	平均流速	コンテナの喫水
0°	0.3m/s	0.04m
22.5°		
45.0°		
67.5°	0.4m/s	0.08m
90.0°	0.5m/s	0.12m

(3) 漂流実験

図-5 に漂流実験装置の模式図を示す。段波は図-5 中のゲートを開放することで発生させた。水槽内には、2つの斜面を有する陸地を設置することで、コンテナの斜面への衝突や、陸地での座礁の発生を促した。陸地側の水位は 0.05m に固定しておき、ゲート内部側の水位差を変化させたケースについて実験を行った。

実験時には、コンテナに2点のマーカをつけておき、それを4台のビデオカメラで撮影し、3自由度の変位を解析することで段波に対する単独及び複数のコンテナの挙動や座礁位置及び衝突状況を把握した。動画解析におけるサンプリング間隔は 10Hz とした。また、図-5 中の No.1 から No.4 の表記は水位計および流速計の設置位置を示しており、サンプリング間隔は 20Hz にてそれぞれ計測した。

実験を行う際のコンテナの初期配置は、陸地水平部における中央位置に設置し、設置角度を変化させた実験および2つのコンテナを同時に配置した実験を実施した。コンテナ模型の質量はカタログ値とほぼ同等となるように調整を行った。表-3 に漂流実験における実験ケースを示す。

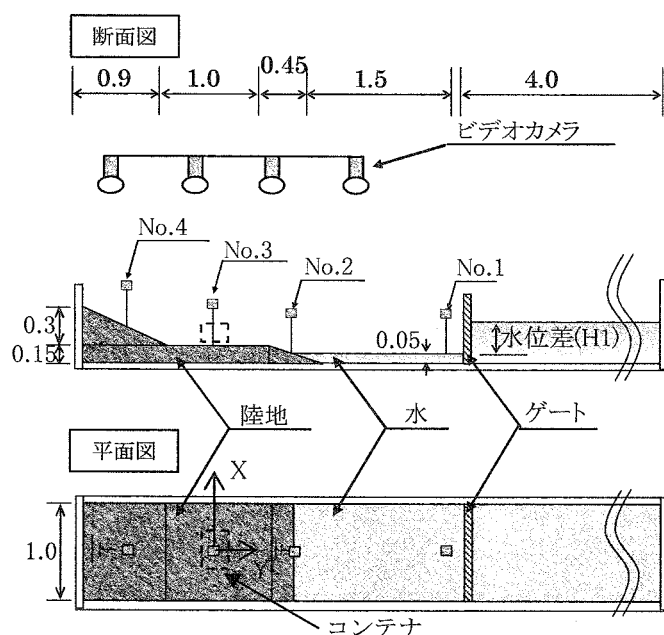


図-5 漂流実験装置の模式図（単位：m）

表-3 実験ケース（漂流実験）

コンテナの配置数	コンテナの初期配置	水位差 (H1)
単独	0°	0.1m
	45°	0.2m
	90°	0.3m
2つ配置	並列, 直列, 斜め	0.2m

4. 実験結果および解析結果

(1) 抗力実験結果

図-6 および図-7 に抗力係数の算出結果を示す。図中の計測結果は、流速および喫水を変化させた実験結果より算出した抗力係数の平均値を流向毎にプロットしたものであり、曲線は、計測結果の 0°と 90°における抗力係数の最大値、および既往の研究成果⁹⁾をもとに構築した結果（式(1)および式(2)）を示している。なお、同じ流向条件下で、喫水や流速が異なる場合の抗力係数の算出結果を比較した場合、同じ流向でも流速や喫水条件が異なると抗力係数にややばらつきが生じていた。しかしながら、流向が異なる場合における結果ほど大きなばらつきではなかった。よって、本研究では、平均値を用いて整理することとした。両者は、流向によってはややばらつきが見られるものの概ね一致する傾向を示しており、コンテナの流向別の抗力係数は式(1)および(2)を用いて評価できるものと考えられる。

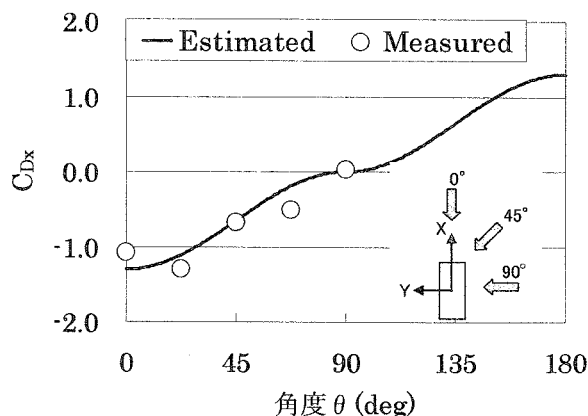


図-6 抗力係数算定結果（X方向）

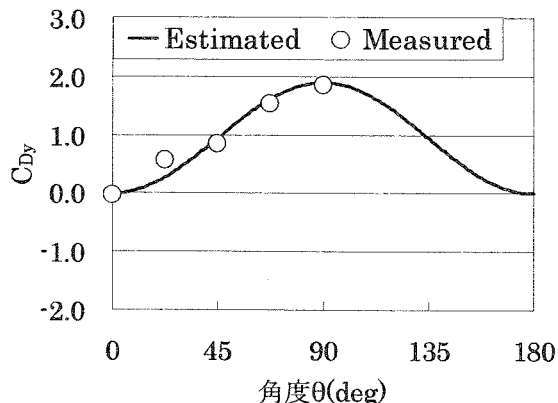


図-7 抗力係数算定結果（Y方向）

$$C_{DX} = 1.3(1 - \sin^2 \theta) \quad (1)$$

$$C_{DY} = 1.9 \sin^2 \theta \quad (2)$$

ここに,

C_{DX} : コンテナの短手方向の抗力係数

C_{DY} : コンテナの長手方向の抗力係数

θ : 流向 (deg)

(2) 段波再現計算結果

矩形水槽 (図-5) は, X 方向に対し一様に構築しているため, 漂流シミュレーションの実施にあたり必要となる段波再現計算は数値波動水路を用いて行った. 計算モデルは, 高橋ら⁶⁾と同様に, ゲート開放後の状態を模擬した階段状の初期水面を初期条件として与える手法を用いた. 図-8 に水位差 0.3m のケースにおける No.1 地点の水位の実験結果と解析結果の比較結果を, 図-9 に同地点における流速の比較結果を示す. ピーク周辺において水位・流速ともに解析結果の方が大きくなる傾向を示しているものの, 両者は概ね一致していると言える.

数値波動水路による再現計算の出力結果のうち, 水位と Y 方向流速の時系列波形を取り出して漂流シミュレーションを行う際に用いた.

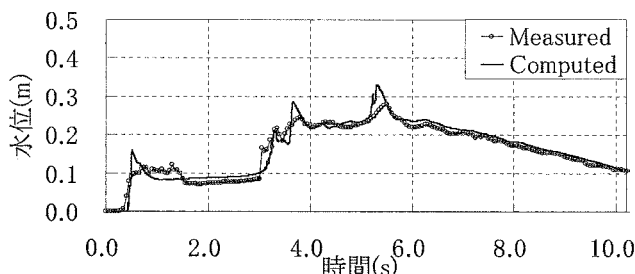


図-8 実験結果と解析結果の水位の比較
(波高計 No.1, 水位差 0.3m)

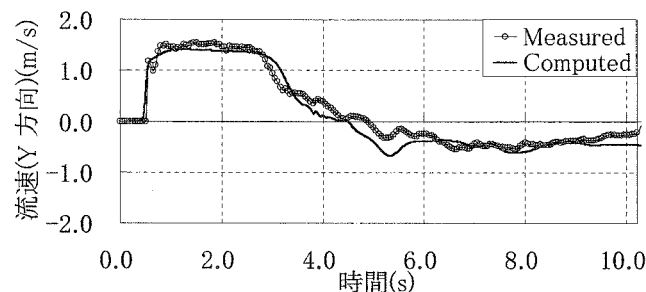


図-9 実験結果と解析結果の Y 方向流速の比較
(流速計 No.1, 水位差 0.3m)

実験時に計測された X 方向の流速値には, 微小な成分(最大流速 0.05m/s 程度)が検出されており, 同じ条件で 3 回実験を繰り返したところ, すべてほぼ同様の傾向を示していた. これは, 矩形水槽に微量の歪みが生じているために引き起こされる微振動であると考えられる. 本研究では, 4 点の X 方向流速の測定値を用いて, 空間的に補完することで流れ

場の三次元性を近似的に考慮した.

(3) 漂流シミュレーション結果と実験結果の比較 (抗力係数の評価手法別の比較)

算出した流向別抗力係数の妥当性を確認するために, コンテナを単独に配置した場合のコンテナの挙動について, 式(1)および式(2)を用いた漂流シミュレーションの結果 (流向別に変化) と抗力係数を一定とした場合の結果 (一定値) を, それぞれ実験結果と比較した. 図-10 にコンテナ重心位置の Y 方向の漂流軌跡とゲート開放からの時間の関係性を比較した結果を示す. なお, 一定値と表記したケースについては藤井ら¹⁾の手法と同様に抗力係数を 1.0 として一律に設定した上で, 漂流シミュレーションを実施した結果である.

実験におけるコンテナの挙動は, ゲート開放から約 2.0s 後に押し波の影響により漂流を開始し, 3.0s 付近で斜面法尻に衝突後, 斜面上を遡上していく. そして, 引き波の発生によりほぼ初期位置まで漂流し, 水位がコンテナの喫水を下回った時点で座礁する. 解析においては, 両者とも斜面法尻へ衝突した後の, 斜面への遡上速度が実験結果と異なる傾向を示しているが, 一定値のケースでは引き波時に斜面上に座礁しており, 流向別に変化のケースの方が座礁位置に関しては, 実験結果との整合がより良好である. よって, 本研究において実験的に算出した流向別の抗力係数を用いることで実験結果の漂流軌跡や座礁位置の再現性が向上すると考えられる. また, 解析結果においては, 斜面上の遡上が実験結果よりもやや大きくなる傾向を示している. これは, 数値波動水路による水位の再現計算結果が, ピーク周辺で実験結果よりも大きくなる傾向を示していたために, 漂流シミュレーションの結果へ多少の誤差を与えているものと考えられる.

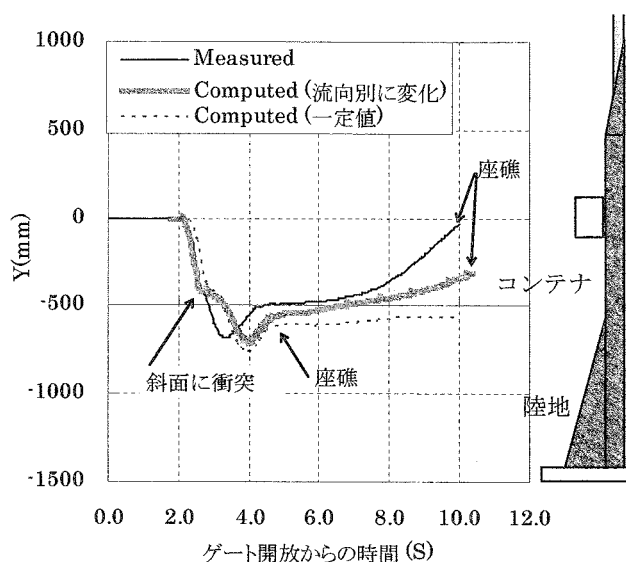
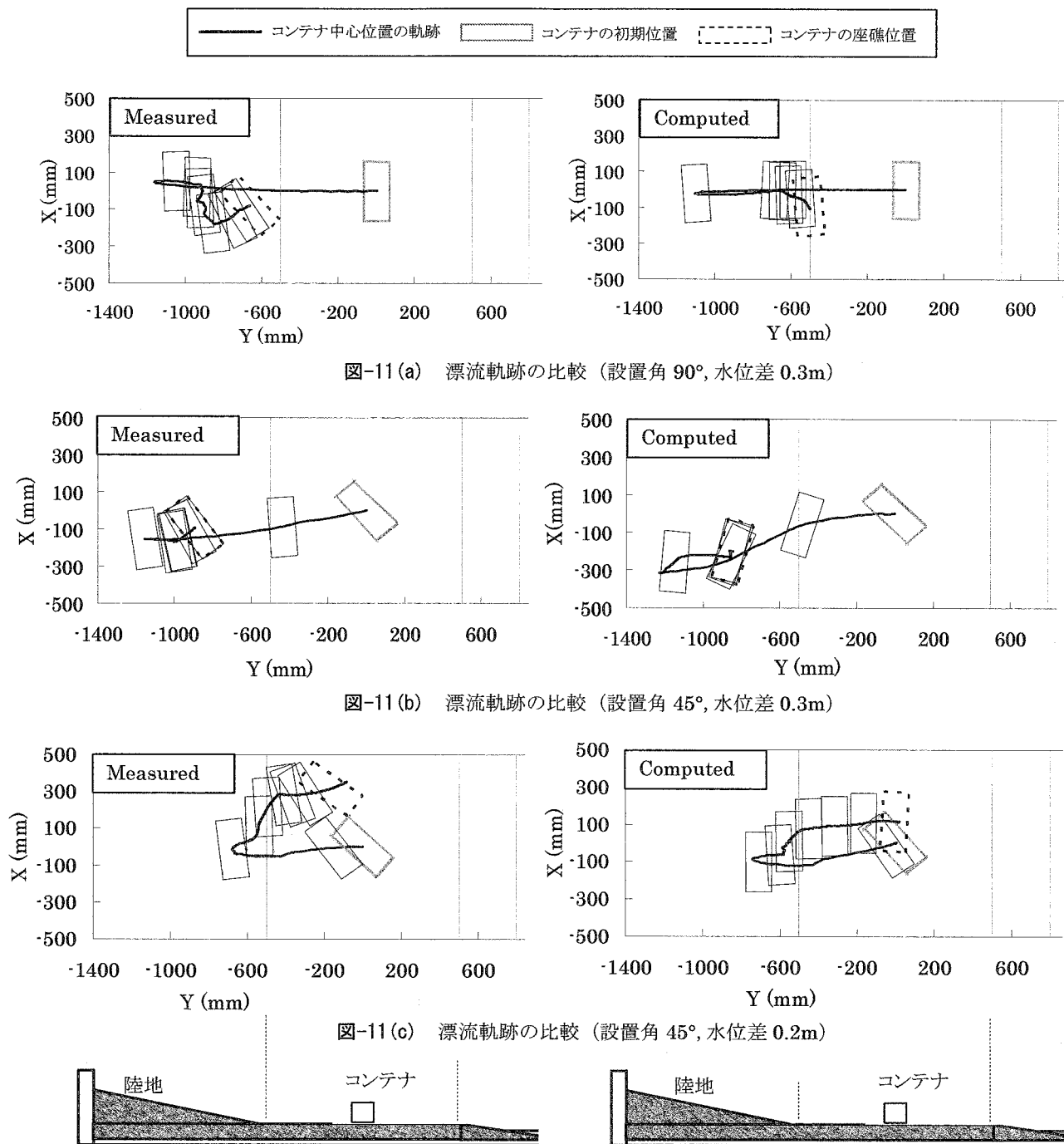


図-10 実験結果と解析結果の漂流軌跡の比較
(設置角 0°, 水位差 0.2m)



(4) 漂流シミュレーション結果と実験結果の比較 (コンテナ単独配置ケース)

図-11(a)および図-11(b)に水位差 0.3m でコンテナを単独で配置したケースにおける漂流軌跡の実験結果と解析結果との比較を示す。図-11(b)は、コンテナを段波の来襲方向に対し 45°傾けて配置した場合の結果を示している。なお、解析結果は式(1)および式(2)を用いる手法による結果を示している。実験における水位差 0.3m のケースでは、押し波時に斜面上を遡上し、引き波時には斜面上に座礁する結果であった。また、設置角 90°の場合は初期の受流面積が大きいことから、45°の場合よりも引き波時

の移

動量が多い。解析結果においては、座礁時のコンテナの向き、および X 方向の移動距離がやや実験結果と異なるものの、Y 方向の座礁位置については、ほぼ実験結果を再現できていると考えられる。また、実験結果において初期の設置角の違いにより、座礁位置に変化が生じる傾向も概ね一致していると考えられる。

図-11(c)に水位差 0.2m でコンテナの配置を 90°としたケースにおける漂流軌跡の実験結果と解析結果との比較を示す。実験における水位差 0.2m のケースは、0.3m のケースと比較して、斜面への遡

上距離が短く、その一方で引き波時に押し戻される距離が長い。そして、ほぼ初期設置位置付近で座礁する。解析結果においても、0.3m のケースと同様に概ね座礁位置や遡上する距離は一致している。以上から、コンテナを単独に配置した時の、段波によりコンテナが斜面を遡上する状況、および座礁位置に関する本漂流シミュレーションの適用性が確認されたと考えられる。

(5) 漂流シミュレーション結果と実験結果の比較 (コンテナ2つ配置ケース)

図-12 にコンテナを2つ並列に配置したケースにおける漂流軌跡の実験結果と解析結果との比較を示す。実験における A コンテナ (陸地中央に設置) は、B コンテナ (内陸側に設置) と衝突し、陸地法尻部付近にて停滞する。その後、引き波の影響により沖側まで移動する。一方の B コンテナは、A コンテナとの接触の影響により斜面を遡上し、引き波時に移動しないでその場に座礁する。

解析における A コンテナは、B コンテナと接触後も斜面を遡上し、引き波時に沖側まで移動する。座礁位置は実験結果と概ね一致している。一方の B

コンテナも同様に、A コンテナとの接触後に斜面を遡上するものの、遡上距離は実験結果よりも長い。そして、引き波時には、斜面上に座礁する。A コンテナについては、実験結果と解析結果との整合がやや低い。実験結果との整合が低くなった原因には、コンテナの影響による反射波の増加や、コンテナ同士が衝突した際に流速場へ生じる影響によるものが考えられる。

2 つのコンテナを同時に配置した場合は、A コンテナの軌跡についてはやや実験結果の再現性が低いものの、実用的には十分な精度を有すると考えられる。よって複数のコンテナ同士の衝突や座礁位置についても、概ね本漂流シミュレーションの適用性を確認できたものと考えられる。

5. まとめ

1. 断面実験によりコンテナの抗力係数を流向別に評価した。流向別の抗力係数を考慮した漂流シミュレーション手法は、考慮しない手法よりも段波に対するコンテナの挙動再現精度が向上可能であることを示した。
2. コンテナを単独に配置した場合におけるコンテナの挙動および座礁位置は、実験結果と解析結果とで概ね一致する傾向を示しており、本漂流シミュレーションの段波に対する挙動および座礁位置に関する適用性を確認できた。
3. コンテナを2つ同時に配置したケースは、内陸側に設置したコンテナの挙動について、実験結果との整合性が十分とは言えない部分もあるものの、座礁位置の整合は概ね良好であり、複数のコンテナ同士の衝突や、その後の座礁位置に関する本シミュレーション手法の適用性が確認されたと考えられる。

参考文献

- 1) 藤井直樹・大森政則・池谷毅・朝倉良介・入谷剛・柳沢賢：津波による漂流物の移動に関する基礎的研究，海洋開発論文集，第21巻，pp127-132，2005。
- 2) 目黒公郎・伯野元彦：粒状体シミュレーションによるコンクリート構造の破壊解析，地震研究所彙報，vol.63，東京大学地震研究所，pp409-468，1988。
- 3) 熊谷兼太郎・小田勝也・藤井直樹：津波によるコンテナの漂流挙動シミュレーションモデルの適用性，海岸工学論文集，第53巻，pp241-245，2006。
- 4) (財)沿岸開発技術研究センター：数値波動水路の研究・開発，平成13年10月。
- 5) 日本機械学会：機械工学便覧，p80，2006。
- 6) 高橋俊彦・藤間功司・朝倉良介・池谷毅：数値波動水路の段波実験への適用，海洋開発論文集，第17巻，pp.281-286，2001。

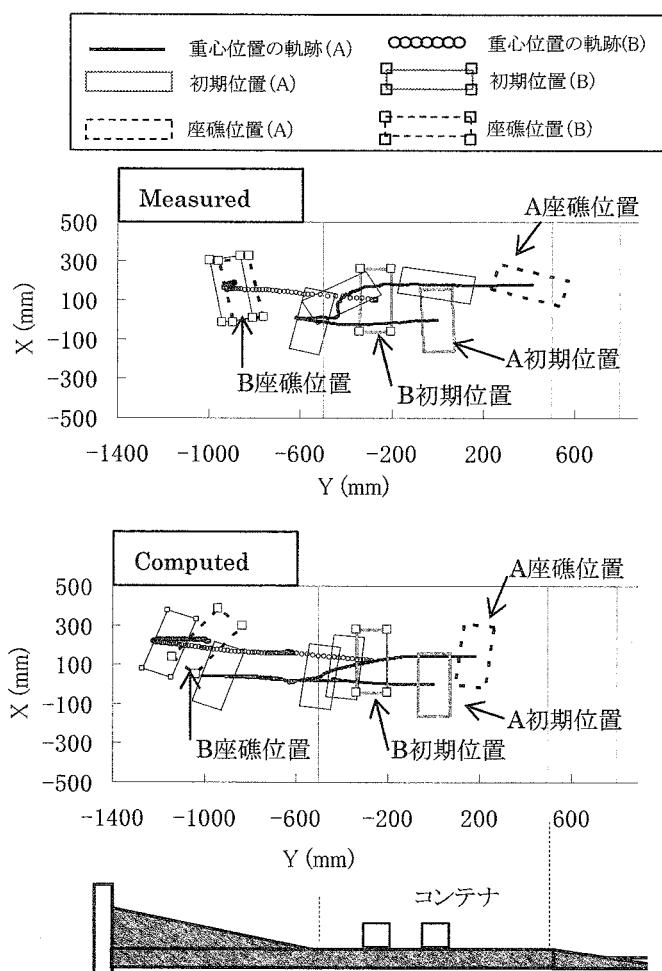


図-12 漂流軌跡の比較 (並列配置,水位差0.2m)