

津波による漂流物の挙動予測手法に関する研究

Numerical and Experimental Study on Drift due to Tsunami for Several Drifting Bodies

安野浩一朗¹・西畑剛²・森屋陽一³

Koichirou ANNO, Takeshi NISHIHATA, Yoichi MORIYA

In order to predict the behavior of floating body under tsunami flood appropriately, it is significant to evaluate the drag force exerted on the float shape when reproducing the dynamics with drift. So, 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 car's drag force coefficient as a function of every current angle. And we report the application of the drift simulation method by comparing the drift motion from the experiment in a 2-dimensional plane water tank with that of the simulation result.

1. はじめに

巨大地震津波により、浸水被害、津波波力による家屋や構造物の損傷、流出、人的被害などの発生が予想されるとともに、船舶や車等の漂流物による衝突災害の発生が指摘されている。漂流物による衝突被害軽減のためには、漂流物の挙動を予測し対策をとることが重要である。挙動予測手法としては、コンテナなどを対象に拡張個別要素法（目黒ら，1988）を用いた研究（熊谷ら，2006）や、矩形船舶を対象とした衝突力の研究（池谷ら，2006）が行われているものの、拡張個別要素法を用いた場合、浮体全体系の特性は各要素間の連結方法や粘性ダッシュボットの設定値に依存するため、解析結果はそれらの設定値に大きく影響される。したがって、複雑な形状や複数の材質からなる漂流物を対象とした場合、漂流物の浮体特性を考慮したモデル化は困難である。また、浮体を構成する各要素同士の微小時間当たりの反力を随時計算しなければならないため、計算負荷が非常に大きい。本研究では広領域で複数の漂流物を対象とした長時間解析を行うことを念頭に、個別要素法をベースに外力を抗力として考慮して浮体全体系の動揺を 6 自由度で解析する計算負荷のより小さい手法を構築する。さらに、コンテナと自動車を対称とした水理模型実験を行い、構築した手法の妥当性を検証する。

2. シミュレーション手法の概要

(1) 概要

漂流物の挙動予測を実施するにあたって重要となるのは、漂流物の特性および津波伝播計算を高精度で再現す

ることである。本研究では、漂流物の特性を容易に考慮可能とすることを特徴としたシミュレーション手法を構築する。

本手法の基本方程式は、式（1）を用いる。

$$M\ddot{X}_G = \sum_{n=1}^k (F_G + F_F + F_C + F_D) \dots\dots\dots (1)$$

ここに、 M は質量、 k は漂流物の構成要素数、 $\ddot{X}_G$ は重心位置の加速度、 F_G は重力、 F_F は流体力、 F_C は接触力、 F_D は粘性減衰力を表す。漂流物の 3 次元的な挙動は、重心位置の並進および回転に関する 6 自由度の運動方程式により求める。

流体力は、藤井ら（2005）と同様に流速成分から X 方向を例として、次式に示すモリソン式を適用する。なお式（2）における抗力係数は、次項において表記する Yaw 角度別の抗力係数を用いて漂流物毎に設定する。

$$F_x = \frac{1}{2} C_{Dx} \rho u |u| A_x + C_M \rho \frac{\partial u}{\partial t} V \dots\dots\dots (2)$$

ここに、 ρ は水の密度、 C_{Dx} は X 方向の抗力係数（水理模型実験により算出）、 u は X 方向の相対流速、 A_x は X 方向の投影面積、 C_M は慣性力係数（1.0）、 V は水中部分の体積を表す。

粘性減衰力は、減衰係数 C_{Dd} と水線面積 A を用いて評価し、本稿では上下運動（Heave）のみ $C_{Dd} = 0.1$ として考慮する。

$$F_D = \frac{1}{2} C_{Dd} \rho (\dot{X}_G - \bar{U}) |\dot{X}_G - \bar{U}| A \dots\dots\dots (3)$$

ここに、 $\dot{X}_G$ は重心位置の速度、 $\bar{U}$ は水線部の流速の平均値を表す。

回転モーメントは、要素同士および壁との接触に対しては接触力および接触点から重心までの距離（アーム長）を用いて算出する。また、流体力、浮力および重力による回転モーメントは各構成要素の中心点に作用する

1 正会員 五洋建設株式会社 技術研究所
2 正会員 修(工) 五洋建設株式会社 技術研究所
3 正会員 博(工) 沿岸技術研究センター

力と重心までの距離を用いてそれぞれ算出する。

流体力を評価する際の水位・流速は別途に解析を行い、その解析結果の時系列データを用いて漂流シミュレーションを実施する。なお、本研究における段波再現計算は安野ら（2007）と同様の手法で行った。したがって、本手法では漂流物による波浪場への影響は考慮していない。

本手法の特徴は、実験結果に基づく流向毎の抗力特性を漂流物へ反映できる点、内部摩擦の生じない完全剛体として漂流物をモデル化しており、漂流物自体が壁などに接触する前後以外は波と同等な時間間隔での解析が可能である点、既往の研究を参照して漂流物の粘性減衰係数を設定すれば実験等との合わせこみを必要とするパラメタがない点である。

3. 水理模型実験

(1) 実験概要

本研究では、まず自動車を対象に安野ら（2007）と同様に断面水槽に一樣流を作用させて漂流物の流向別の抗力係数を計測する実験（以下、抗力実験）を実施した。次に単独もしくは複数の漂流物（自動車およびコンテナ）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）を実施した。実験はフルード則にしたがって縮尺 1/15 とし、自動車模型は一般的な小型自動車のプラモデルを用いて再現した。表-1 に自動車の諸元を、写真-1 に自動車模型の写真を示す。

図-1 に漂流実験の模式図を示す。なお、図中の No. 1 から No. 4 は、波高計および流速計の設置位置を示している。段波は図-1 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し

て、漂流物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 0.05 m に固定しておいてゲート内部側の水位差を変化させた実験を行った。実験時には漂流物に 2 点のマーカーをつけ、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漂流物の挙動および衝突状況を把握した。

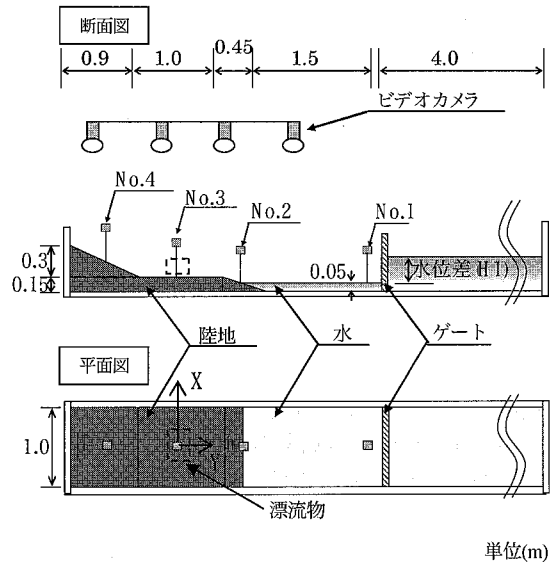


図-1 漂流実験の模式図

4. 抗力実験結果

図-2 および図-3 に、抗力実験により自動車の抗力係数を流向別に算出した結果を示す。図中のプロットは、喫水および流速を変化させた実験結果の角度毎の平均値を、曲線は 6 次の近似線をそれぞれ示したものである。自動車の X 方向の抗力係数は、真正面よりもややずれた角度において最大値をとる。また、Y 方向は 62.5° から 112.5° にかけてほぼ一定の最大値をとる傾向を示している。これらの原因としては自動車自体の形状特性によるものと考えられる。

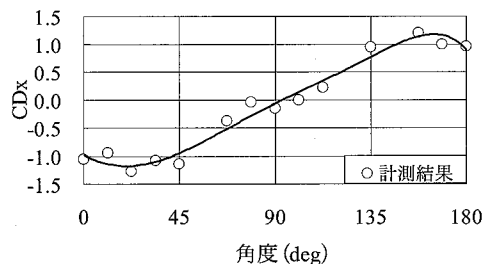


図-2 抗力係数計測結果（自動車，X 方向）

表-1 自動車の諸元

名 称	数 量	単 位
長 さ	0.24	(m)
幅	0.115	(m)
高 さ	0.08	(m)
質 量	0.417	(kg)

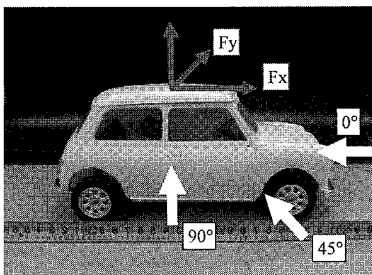


写真-1 自動車模型および外力作用方向の定義

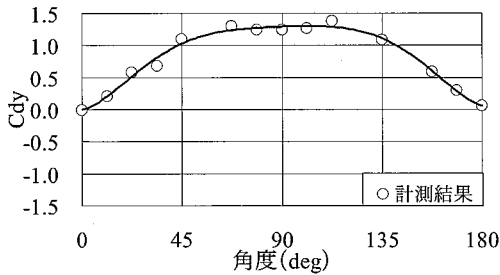


図-3 抗力係数計測結果 (自動車, Y 方向)

角度によっては、抗力係数に多少のばらつきはあるものの、自動車の抗力特性は図中の近似曲線を用いて概ね評価できるものと考えられる。漂流シミュレーションにおいては、この近似曲線を用いて流体力の評価を行うこととする。また、コンテナの流向別の抗力係数は安野ら(2007)の計測結果を用いることとした。

5. 漂流実験結果および解析結果

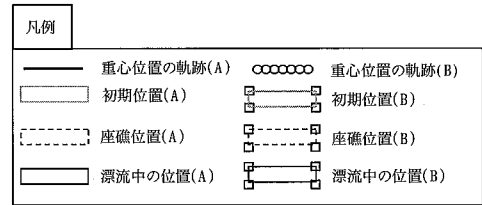
実験の再現計算は、本研究において提案した計測結果に基づく流向別の抗力係数を用いた完全剛体モデルによる手法(本手法)および拡張個別要素法による2手法について行い、実験結果と比較した。拡張個別要素法においては、モデルの要素構成(コンテナは160個/基、自動車は204個/台の球の集合体)を本手法と同様に設定し、要素間の結合を完全剛体ではなく間隙バネを用いて解析を行った。なお、計算を実施する際には目黒ら(1988)の手法を参考に、モデル全体の安定化が得られる範囲で間隙バネに減衰定数を与えた。

(1) コンテナ (2基同時配置)

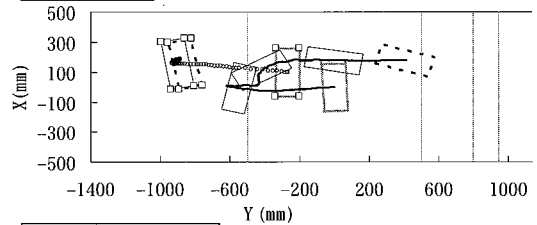
図-4に、コンテナを2基同時に配置した場合の段波に対するコンテナ軌跡の計測結果、および手法毎の解析結果をそれぞれ示す。段波は水位差 $H1=0.2\text{ m}$ のケースで、ゲート開放後から第2波(ゲート内部からの反射波)が到達するまでの約12sを解析対象とした。

実験結果において、コンテナAはまず押波時に斜面を遡上し、次いで引波の影響を受けて沖側に移動し斜面法肩付近に座礁した。一方、コンテナBは、引波時に沖側へ移動せずに陸側斜面上に座礁した。実験結果と解析結果を比較すると、コンテナBの座礁位置は拡張個別要素法の解析結果よりも本手法の方が実験結果との整合性が良好である。一方で、コンテナAの座礁位置は、拡張個別要素法の結果の方が実験結果と良好に対応している。

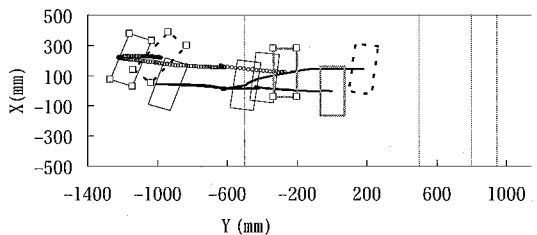
解析手法の違いによる結果の相違は、バネ値の設定方法の違いによるものと考えられる。すなわち、拡張個別要素法では各要素間で減衰を考慮しているため、コンテナ全体の剛性が少し小さくなるのに対し、本手法では要



実験結果



解析結果(本手法)



解析結果(拡張個別要素法)

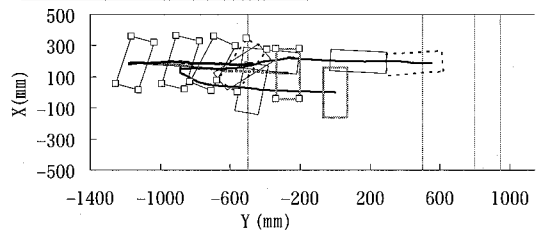


図-4 漂流軌跡の比較(コンテナ2基同時配置、並列)

素間の減衰を考慮しないため剛性が大きい。それが、コンテナ同士の衝突時の挙動に若干の差異を示している。

2つの解析結果は、座礁位置や回転特性について実験結果と若干の差異が認められるものの、段波の再現精度およびコンテナ同士の干渉による流れ場への影響に起因した相違等を考慮すると、2基のコンテナを同時に配置した場合における実験の再現精度は実用的にはともに十分な精度を有すると考えられる。

(2) 自動車 (単独配置)

図-5に自動車を単独で配置した場合における、漂流軌跡の実験結果と解析結果の比較図を示す。なお、実験

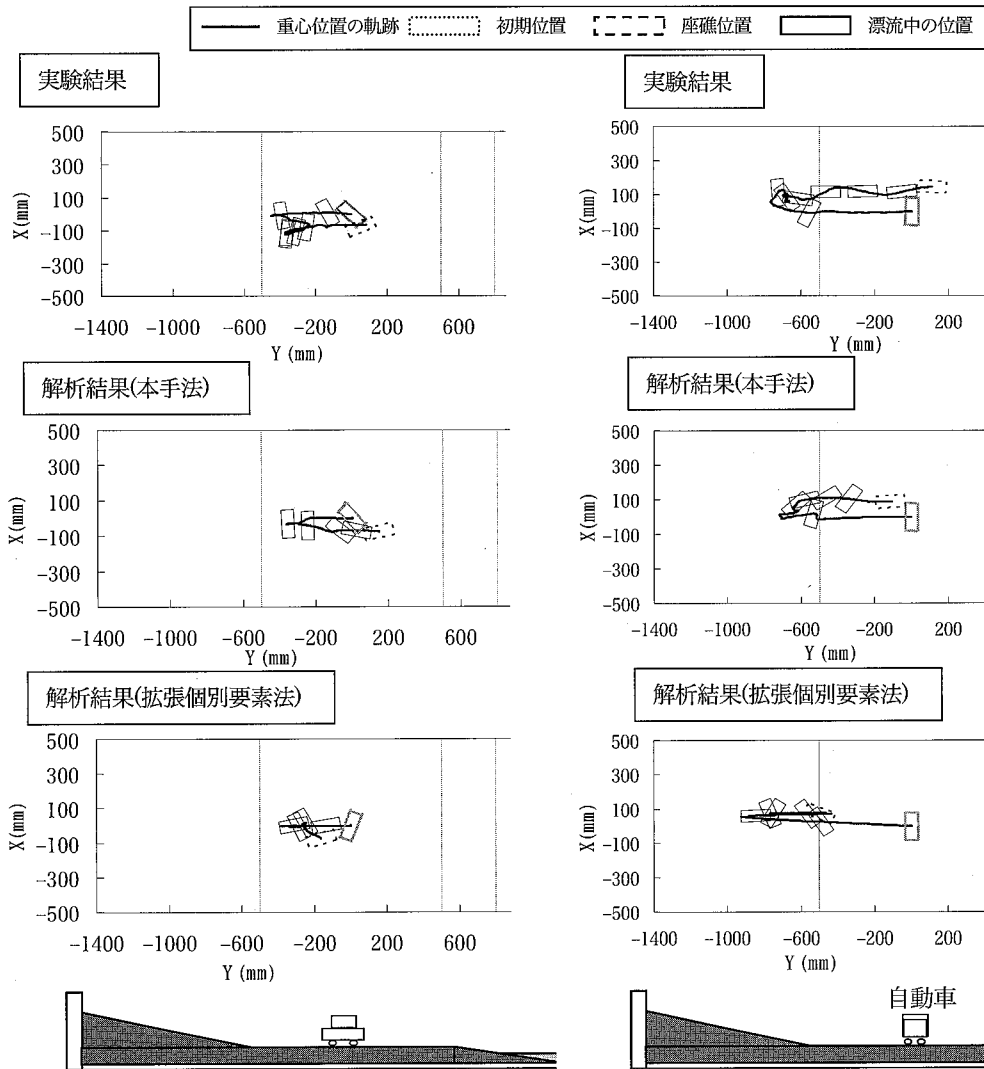


図-5(a) 漂流軌跡の比較(設置角 45°, 水位差 0.2m)

図-5(b) 漂流軌跡の比較(設置角 90°, 水位差 0.3m)

図-5 漂流軌跡の比較(自動車単独配置)

における自動車模型は、縮尺に合わせて質量調整を行い、内部浸水を防ぐため外周を密閉した上で用いた。

解析における自動車は 200 個の球要素を用いて本体を構築し、タイヤ部は模型の直径を一致させた 4 個の球(合計 204 個)により簡略的にモデル化を行った。なお、部材変化に伴う間隙パネの詳細設定などは行っていない。また、本手法の解析における重心位置は模型の重心位置に合わせて設定した。

自動車をを用いた実験結果では、コンテナを用いた結果と比較して段波に対する移動量が全体的に少ない。これはタイヤの存在により、段波作用初期の流体力(自動車底面の受流面積は小さい)が小さいので、移動開始に遅

れが生じるためである。2つの解析結果を比較すると、拡張個別要素法を用いた結果よりも本手法の方が実験結果との対応が良好であり、座礁位置に関して特に対応の差異が現れている。これは、流向毎の抗力係数を用いての抗力特性の評価および計測結果に基づく重心位置の設定による効果と考えられる。本研究では簡略的にモデル化を行った上での解析結果であり、拡張個別要素法については適用性が低いというのではなく、自動車などの異型漂流物に対しては、比重分布等を考慮した詳細なモデルの構築やそれに即した間隙パネの設定を行う必要性があることを示すものである。

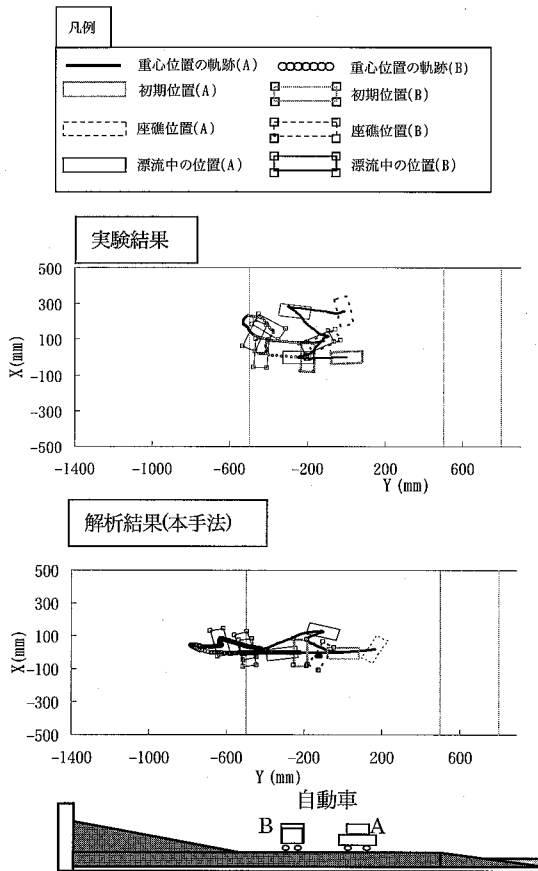


図-6 漂流軌跡の比較
(自動車2台同時配置, 水位差0.2m, 直角)

(3) 自動車 (2台同時配置)

図-6 に自動車を2台同時に配置した場合における漂流軌跡の実験結果と解析結果の比較を示す。実験結果では、押波時に2台の自動車は衝突し、引波時にはほぼ初期位置に近い場所に2台とも座礁した。一方、解析結果を見ると、自動車Bは押波時の遡上距離が実験結果よりも大きくなり、回転現象に関しても実験結果とやや異なる傾向を示していた。しかしながら、座礁位置については概ね実験結果を再現できていたと考えられる。

2台の自動車を同時に配置した場合は回転特性の再現性がやや低い傾向を示したものの、座礁位置については概ね実験結果と一致しており、複数の自動車を配置した場合についても本手法の妥当性が概ね確認されたと考えられる。

6. 結 論

本研究の結果得られた知見は以下のとおりである。

- (1) 流向別の抗力特性を評価した完全剛体漂流シミュレーション手法を提案した。
- (2) 抗力実験を行い、自動車の流向別の抗力特性を明らかにした。次に、それを考慮した漂流シミュレーションを行って、実験結果と比較することにより漂流物の軌跡および座礁位置が概ね再現可能であることを確認した。
- (3) 本手法と拡張個別要素法による解析結果を比較した結果、コンテナの挙動はともに実験結果を概ね再現できていたと考えられる。一方、自動車に対する実験は、本手法の方が拡張個別要素法を用いた場合よりも実験結果との整合性が良好であり、本手法の適用性は自動車などの異型漂流物に対して、より高い再現精度を期待できると考えられる。
- (4) 本手法を用いることで、衝突回数によりばらつきは生じるものの、漂流物同士や壁との接触のない状態での計算時間を大幅に短縮可能となる。本研究を例に挙げると、間隙バネを用いた拡張個別要素法においては、波動伝播速度および要素間の距離から決定される条件、 $\Delta t = 1 \times 10^{-5}$ (s) 以下に対し、本手法では波浪伝播解析と同程度の $\Delta t = 1 \times 10^{-2}$ まで広げることが可能となることが挙げられる。

参 考 文 献

- 目黒公郎・伯野元彦(1988): 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, pp. 409-468.
- 熊谷兼太郎・小田勝也・藤井直樹(2006): 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, pp. 241-245.
- 池谷毅・稲垣聡・朝倉良介・福山貴子・藤井直樹・大森政則・武田智吉・柳沢賢(2006): 津波による漂流物の衝突力の実験と評価方法の提案, 海岸工学論文集, 第53巻, pp. 276-280.
- 藤井直樹・大森政則・池谷毅・朝倉良介・入谷剛・柳沢賢(2005): 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, pp. 127-132.
- 安野浩一郎・西畑剛・森屋陽一・(2007): 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, 海洋開発論文集, 第23巻, (投稿中)