

漂流物挙動解析による衝突速度の定量的評価手法の検討

A study on quantitative evaluation method of collision speed based on analysis of drifting behavior

中央大学大学院理工学研究科都市人間環境学専攻18N3100033E 村瀬 史弥
Department of Civil Engineering, Chuo University, Fumiya MURASE

1. はじめに

巨大津波発生時には浸水被害だけでなく、発生した流れが漂流物になり、移動、衝突する被害が広域にわたり発生する。そこで津波防災の観点から、漂流物に対する避難施設の安全性の確保が重要になる。一方で、日本原子力委員会で、津波によって引き起こされる施設の機能損傷リスクを確率論的に評価する手法として津波PRAがある。しかし、津波PRAは津波漂流物が施設へ衝突する被害を考慮しておらず、漂流物が施設へ衝突する影響を評価するため施設への衝突確率・衝突力を検討することが重要になる。

一方で、津波漂流物の衝突力の評価手法について実験結果に基づき、いくつか提案されている。例えば松富¹⁾は質量係数に基づく評価式、池野ら²⁾は漂流物の形状を考慮した評価式、水谷らは³⁾小規模実験を実施し衝突時間をパラメータとした評価式、有川らは⁴⁾大規模実験を実施しHertzの算定式に基づいた評価式を提案した。さらにFEMA⁵⁾は漂流物の衝突力は漂流速度の最大に比例するとして評価式を提案している。いずれの評価式においても、被衝突体への衝突速度が重要な要素になるため、漂流物の衝突に伴う被衝突体の被害リスクを検討する際には、漂流物の衝突確率・衝突速度が重要なパラメータになってくる。また、甲斐田ら⁶⁾は、反射壁により発生する反射波が緩衝材になるため、衝突速度を評価する際に、反射波の影響を考慮する必要があることを示した。

そこで本研究では、断面実験を用いて被衝突体前面部で発生する反射波が漂流物の衝突確率・衝突速度に与える影響を検討した。

2. 研究手法

断面実験は、図-1に示す断面水槽を使用し、陸上模型は長さ2.0 m、高さ0.2 mとした。造波条件は静水深0.19 m、波高0.055 mの孤立波とする。水位データは汀線より沖側

に0.1 m離れた位置WG1で計測した。

(2) 漂流物模型および解析手法

漂流物模型は3Dプリンターで作成し、一辺が4 cmの密度0.8 g/cm³、と密度1.1 g/cm³の2ケースを対象とした。本研究の実験・数値計算の施行ケースを表-1に示す。なお、水理実験は各ケース10回ずつとする。ここで、漂流物の反射波への突入速度、反射壁への衝突速度、反射波に突入時の漂流物重心位置から反射壁までの距離である反射波の厚みはハイスピードカメラ(nac製、MEMRECAM Q1m)で撮影した画像を解析した(1000fps)。

(3) 数値計算の概要

本研究では、実験から推定式を推定し、数値計算を用い推定式の有用性を確認することを目的とする。

a) 片方向連成モデルSTOC-DM

流体計算には富田ら⁷⁾が開発したSTOC-IC、漂流計算には本多ら⁸⁾が開発したSTOC-DM(以下:DM)を使用した。DMは流体側の水位・流速の情報から、モリソン式を拡張した池谷ら⁹⁾のモデルに基づき、抗力を算出している。

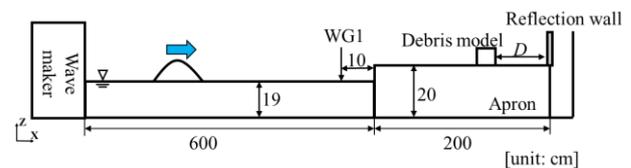


図-1 水理実験概要

(WG1:波高計, D:漂流物重心から反射壁の初期距離)

表-1 対象実験, 数値計算ケース

Exp: 水理実験, DM, STR: 数値計算

Method	Density[g/cm ³]	Angle [°]	Distance [cm]
Exp.	0.8	0	15,22.5,30,37.5,45,60,75,90,105,130
		45	15,22.5,30,37.5,45,60,75,90,105,130
	1.1	0	15,22.5,30,37.5,45
		45	15,22.5,30,37.5,45
DM	0.8	0	15,22.5,30,37.5,45,60
STR	0.8	0	15,22.5,30,37.5,45,60

b) 双方向連成モデルCADMAS-STR

CADMAS-STR (以下:STR)は有川ら¹⁰⁾によって提案された流体解析モデルCADMAS-SUR/3Dと構造物解析モデルSTRを連成した計算プログラムである。構造物表面に作用する圧力値より構造物に作用する力を評価する。

3. 水理実験および数値計算の比較検討

(1) 水理実験の結果について

a) 反射波の厚みについて

漂流物が反射波に突入した時の、漂流物重心位置から反射壁までの距離を反射波の厚みとする。図-2に漂流物の初期距離 $D = 30 \text{ cm}$ を対象に、遡上波が漂流物に衝突した直後の遡上波が広がる様子を示す。初期角度を 0 度に設置したケースでは遡上波が漂流物に衝突後、先端部の広がりが約 4 cm であるのに対し、 45 度で設置したケースでは約 10 cm の広がりを確認した。この遡上先端部の広がりは遡上波が反射壁に衝突した直後の漂流物前面部での反射波を生成開始を遅くする要因につながる。実際に図-3に漂流物の初期距離と反射波の厚みとの関係を整理したものを示す。遡上波の広がりが大きいケースの方が反射波の厚みが小さい傾向になる。これは先に述べた遡上波の広がりの他に遡上波が漂流物に衝突した時の投影面積が大きいこと、より大きな流体力を受けたと予想できる。詳細については次項に記載する。また、密度の増加により漂流速度が過少になり反射波の生成時間が長くなるため、反射波の厚みが大きくなる傾向にある。図-3から反射波の厚みは漂流物の初期位置からおおむね推定ができることを示した。

b) 反射波への突入速度について

漂流物が反射波に突入する直前の 0.01 秒間における平均漂流速度を反射波への突入速度とする。図-4に漂流物の突入速度を整理したものを示す。全体的に初期角度を 45 度に設置したケースの方が反射波への突入速度は大きくなるのが分かる。これは遡上波が漂流物に衝突した際に投影面積が影響している。密度 0.8 g/cm^3 を対象とし、図-5に遡上波が漂流物に衝突した時刻をTime: 0 秒とし、反射壁に漂流物が衝突するまでの重心の移動距離(流下方向)と漂流速度の軌跡を 0.05 秒ごとに 10 ケースの範囲を図示した。図-5から遡上波が漂流物に衝突後の漂流速度は 0 度に設置したケースでは約 $12.8 \text{ cm/s} \sim 15.5 \text{ cm/s}$ であ

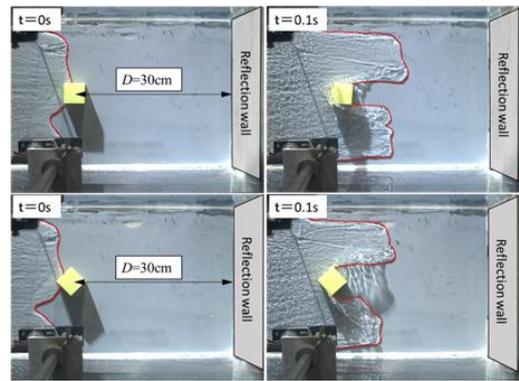


図-2 漂流物に衝突後の遡上波が広がる様子($D=30 \text{ cm}$)

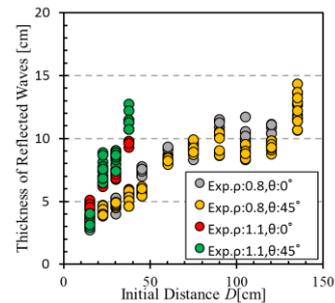


図-3 反射波の厚み L_R と初期距離 D との関係

(ρ : 漂流物密度 $[\text{g/cm}^3]$, θ : 初期角度 $[\text{deg}]$)

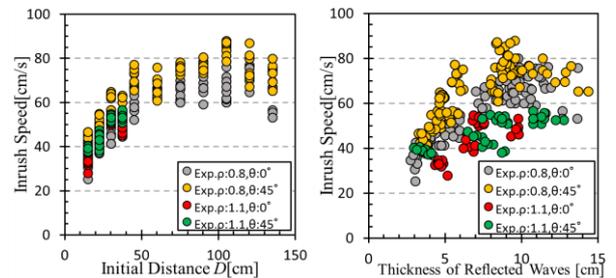


図-4 突入速度の比較

(左: 初期距離で, 右: 反射波の厚みで比較)

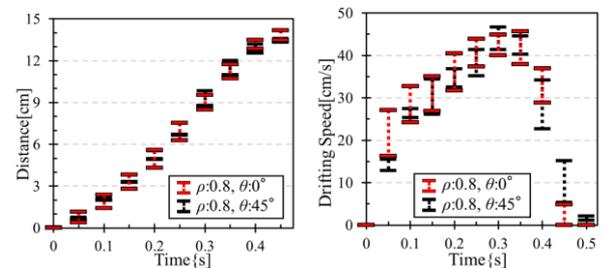


図-5 遡上波が漂流物に衝突後の漂流挙動($D=15 \text{ cm}$)

(左: 重心の移動距離, 右: 漂流速度)

るのに対し、 45 度のケースでは約 $16.8 \text{ cm/s} \sim 27.1 \text{ cm/s}$ であった。このことから、図-4に示すように漂流速度は、遡上波を受ける際の投影面積が大きくなるため、より大きな流体力が作用したと推定できる。次に突入速度と反射波の厚みとの関係を検討する。反射波の厚みが大きくなるほど突入速度が大きくなる傾向がある。これは、池

末ら¹²⁾と同様の漂流特性を示しており、反射波の厚みが小さいケースでは図-3より初期距離が短くなり、漂流速度が加速領域で反射波に衝突していることがわかる。その後、反射波の厚みの増加とともに漂流特性が定速領域に位置し反射波に突入していることを示した。

c) 衝突確率および衝突速度について

次に反射壁への衝突確率の結果を図-6に示す。密度の大きさに関わらず、漂流物の初期距離に従い、衝突確率が減少する傾向が分かる。しかし、密度が0.8 g/cm³のケースでは、初期距離が90 cm~120 cmにおいて衝突確率が上昇している。これは、反射波に突入するまでの漂流挙動中に回転運動が生じ投影面積が小さい状況で反射波に突入したことによることが推測できる。また、0度に設置したケースでは漂流物が反射波中において、漂いながら反射壁に衝突するケースが見受けられた。反射波中の詳細な漂流挙動については今後の課題とする。つまり既往の研究⁹⁾¹¹⁾が示すように反射波が漂流速度、衝突確率に影響を与えることが確認できた。

次に衝突力の推定にあたり重要な情報である衝突速度について検討する。まず、反射壁への衝突速度と漂流物の初期距離、反射波の厚みとの関係を示したものを図-7に示す。漂流物の密度、初期角度に関係なくどのケースにおいても全体的に初期距離が遠くなるに従い衝突速度の減少傾向が見受けられる。これは、図-3で示したように初期距離が遠くなるに従い反射波の厚みが大きくなり、反射波中で漂流速度が減少し衝突速度の減少に繋がった。実際に図-7より、反射波の厚みが大きくなるに従い衝突速度も減少している。つまり、反射波が緩衝材の役割になり衝突速度を減少させており、衝突速度の推定にあたり反射波の厚みが重要な要素になることを示した。

(2) 数値計算の結果について

a) 計算条件

表-2にDM, STRで使用した計算条件を示す。

b) 水理実験との比較

図-8に汀線より沖側に10 cmに位置するWG1で測定した時系列水位データを水理実験、数値計算で比較したものを示す。また図-8に遡上波が漂流物に衝突した時刻を0秒とし、0.05秒ずつ重心位置を比較した。両モデルともに実験の範囲内に収束することが分かり、数値計算の妥当性を示した。

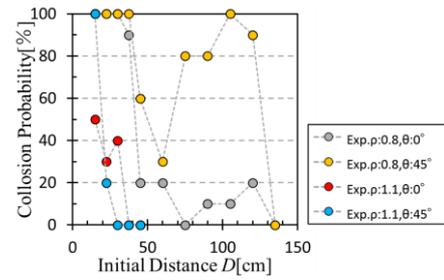


図-6 反射壁への衝突確率

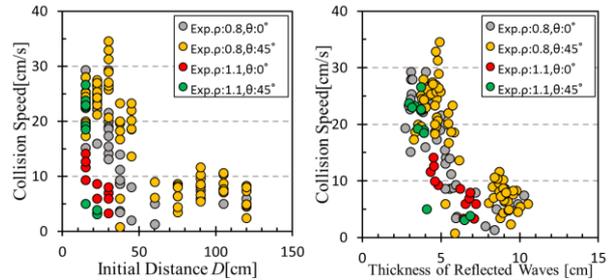


図-7 反射壁への衝突確率

(左：初期距離で、右：反射波の厚みで比較)

表-2 数値計算条件

(a) : STOC, b) : CADMAS, c) : STR 物性値)

a)				b)			
Direction	Range [m]	Grid Size [m]	Number of Grid	Direction	Range [m]	Grid Size [m]	Number of Grid
X	0~8.05	0.01	805	X	0~5.8	0.02	290
Y	0~0.3	0.01	30		5.8~5.95	0.01	15
Z	0~0.36	0.01	36		5.95~6.05	0.005	20
c)				Y	6.05~8	0.02	195
Elastic Modulus	2.35E-10	2.35E-10	2.35E-10		8~8.06	0.02	3
Poisson	0.333	0.333	0.29		0~0.3	0.02	15
Density[kg/m ³]	2000	2000	800	Z	0~0.2	0.01	20
Porosity		1.00E-04			0.2~0.28	0.008	10
Permeability[m/s]		7.14E-04			0.28~0.36	0.01	8

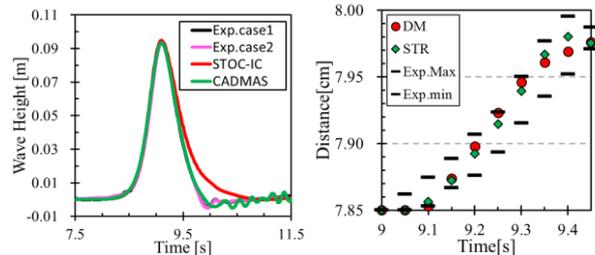


図-8 数値計算の妥当性の検証

(左：時系列水位データ、右：漂流挙動)

なお、本数値計算では漂流物が反射壁に衝突したケース(D=60 cm)までを対象とした。

4. 衝突速度の定量的評価

衝突速度を定量的に評価する為に、衝突速度を突入速度で除した漂流速度の維持率(以下：RSS)反射波の厚みを漂流物の長さで除した相対厚み(以下：RLT)との関係を図-8に示す。ここで示すRLTの最小値は0.5であり、これは反射波に突入せずに反射壁に0度の角度で漂流物が接し

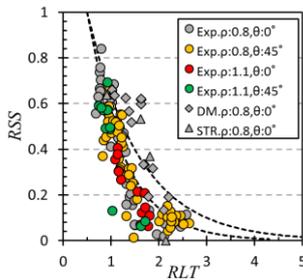


図-9 衝突速度の定量的評価

ていることを示している。また、図中の破線は反射壁前面での漂流速度減衰を考慮した理論式であり、傾きが緩やかな破線は反射波からの流体力を0度で、また傾きが急な破線は45度で反射波より流体力を受けた時を仮定している。上記2つの破線間に実験値が収まるのが理想である。流体の流れに沿って漂流する漂流物の移動速度の減衰について、流速0を仮定した流体に漂流物が突入した際の漂流速度の減少は以下の式から推定ができる。

$$M_p \frac{du_p}{dt} = -\frac{1}{2} \rho_w C_D u_p^2 A \quad (1)$$

ここで添え字の p , w はそれぞれ漂流物、流体を示し、 M :質量, u :漂流速度, t :時間, C_D :抗力係数, A :投影面積である。(1)式より反射波の内部を移動する漂流物の漂流速度変化は(2)式, 移動距離は(3)式のように示すことができる。

$$u_p = \frac{u_{p0}}{\frac{1}{2} \frac{\rho_w A C_D}{M_p} u_{p0} t + 1} \quad (2)$$

$$X_p = \frac{1}{\frac{1}{2} \frac{\rho_w A C_D}{M_p}} \log \left(\frac{1}{2} \frac{\rho_w A C_D}{M_p} u_{p0} t + 1 \right) \quad (3)$$

ここで、 u_{p0} は漂流物の反射波への突入速度である。本理論式の推定にあたり、 u_{p0} は図-4から推定した近似式から算出している。おおむね実測値は理論値の範囲に収まっており、 RSS は最大でも0.84となっている。また RSS は RLT の増加とともに減少し、 $RSS:0.1 \sim 0.2$ の間に収束する傾向がある。このことから、漂流物が反射壁に衝突する際の速度は反射波への突入速度の約8.4割を維持し衝突していると簡易的に推定することが可能である。

5. まとめ

下記に本研究の結論と課題を示す。

(1)漂流物の初期距離と反射波の厚み、突入速度との関係を示した。これにより、漂流物の初期距離から反射波の厚み、突入速度のおおよその推定が可能になる。

(2)上記(1)の結果と、 RSS を用いることで、反射壁への衝

突速度を簡易的に推定することを可能にした。

今後は漂流物の形状、大きさ、質量を変えた検討を行い、抗力、慣性力の影響についての検討を行っていく。

参考文献

- 1)松富英夫：流木衝突力の実用的な評価式と変化特性，土木学会論文集，No.621/II-47，pp.111-127，1999.
- 2)池野正明，田中寛好：陸上遡上津波と漂流物の衝突力に関する実験的研究，海岸工学論文集，第50巻，土木学会，pp.721-725，2003.
- 3)水谷 法美，高木 祐介，白石 和睦，宮島 正悟，富田 孝史：エブロン上のコンテナに作用する津波力と漂流衝突力に関する研究，海岸工学論文集，第52巻，土木学会，pp.741-745，2005.
- 4)有川 太郎，大坪 大輔，中野 史丈，下迫 健一郎，石川 信隆：遡上津波によるコンテナ漂流力に関する大規模実験，海岸工学論文集，第54巻，土木学会，pp.846-850，2007.
- 5)FEMA: Guidelines for Design of Structures for Vertical Evacuation from Tsunamis, 2012.
- 6)甲斐田秀樹，木原直人：陸上遡上津波中の漂流物挙動に関する研究，土木学会論文集B2(海岸工学)，Vol.72，No.2，pp.1159-1164，2016.
- 7)富田孝史，柿沼太郎：海水流動の3次元性を考慮した高潮・津波の数値シミュレータSTOCの開発と津波解析への適用，港湾空港技術研究所報告，Vol.44，No.2，June 2005.
- 8)本多和彦，富田孝史，西村大司，坂口章：多数の津波漂流物を解析する数値モデルの開発，土木学会論文集B3(海洋開発)，第25巻，pp.39-44，2009.
- 9)池谷毅，朝倉良介，藤井直樹，大森政則，武田智吉，柳沢賢：浮体に作用する津波波力の実験と評価方法の提案，海岸工学論文集第52巻，pp.761-765，2005.
- 10)有川 太郎，浜口 一博，北川 和士，鈴木 智憲：数値波動水槽と構造物変形計算との連成計算手法に関する研究，土木学会論文集B2(海岸工学)，Vol.65，No.1，pp.866-870，2009.
- 11)池田 剛，有川 太郎数値波動水槽とDEMの連成モデルを用いたコンテナ漂流挙動に関する検討，土木学会論文集B2(海岸工学)，Vol.70，No2，pp.331-335，2014.
- 12)池末 俊一，串岡 清則，平井 孝昌，三代川 栄一，皆川 祐輔，仲村 岳，奥田 幸彦，戸井田 隆行：被衝突物周りの流場を考慮した漂流物の衝突速度に関する検討，土木学会論文集B3(海洋開発)，Vol.73，No2，pp.486-491，2017.