

## 衝突条件の違いによる津波漂流物の挙動\*

秋田大学工学部

太田 賢文

秋田大学大学院理工学研究科 齋藤 憲寿・渡辺 一也

### 1. はじめに

2011年に発生した東日本大震災は、津波により東北地方を中心に甚大な被害をもたらした。この地震ではコンテナや家屋の一部、流木などが津波漂流物として流出<sup>1)</sup>し、被害の悪化につながった。今後も想定される南海トラフ地震においても津波災害が発生する可能性が指摘されており、被害を軽減するためコンテナ模型が洋上風力発電施設の模型に衝突を想定した実験<sup>2)</sup>が行われた。

秋田港にはコンテナ群や陸上風力発電施設の他に、令和5年1月に4.2 MW×13基の商業運転が開始された洋上風力発電施設が存在<sup>3)</sup>し、今後、大地震により津波が発生し、コンテナが津波漂流物として各種風力発電施設に衝突する可能性があると考えられる。

既往研究として著者ら<sup>2)</sup>は洋上風力発電施設にコンテナが衝突した際の衝突力を算出し、タワーに作用する衝突力の評価を行った。しかし、想定された津波条件が少なかった。また、池野ら<sup>4)</sup>は流木の衝突実験を行い、角度による衝突力の変化を実験していた。本研究では、より多様な津波パターンを設定し、風力発電施設のタワー模型とコンテナ模型の衝突実験を行った。また、コンテナの回転によって挙動や衝突力にどのような影響が起こるのかを評価した。

### 2. 実験概要

図-1にタワー模型（以降タワー）、図-2にコンテナ模型（以降コンテナ）の概要を示す。模型の縮尺は1/25に設定されており、タワーは塩ビパイプで作製し、コンテナはPLA樹脂を材料とした3Dプリンタで作製した。コンテナの上面には画像解析に用いる3色の球を取り付けた。画像解析には画像処理・画像解析ライブラリであるHSV OpenCV<sup>5)</sup>使用しており、撮影した動画を1フレームずつ読み込ませ、コンテナ模型上の赤、緑、黄の3点だけを抽出し、軌跡として描画し、1フレームごとの時間で割ることによって速度、加速度の算出を行った。実験装置の概略は図-3に示す。実験水路は幅0.30 m、

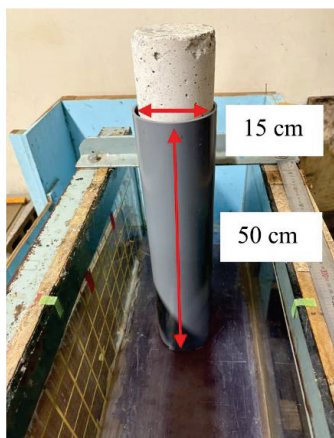


図-1 タワー模型

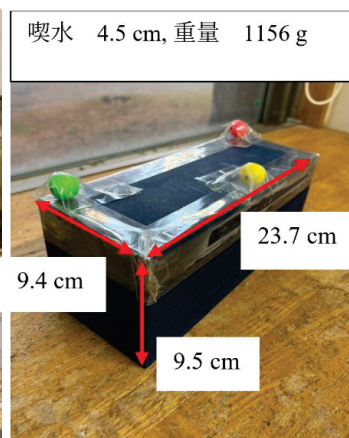


図-2 コンテナ模型

\*Behavior of Tsunami Debris under Different Impact Conditions by Kenya OTA, Noritoshi SAITO and Kazuya WATANABE

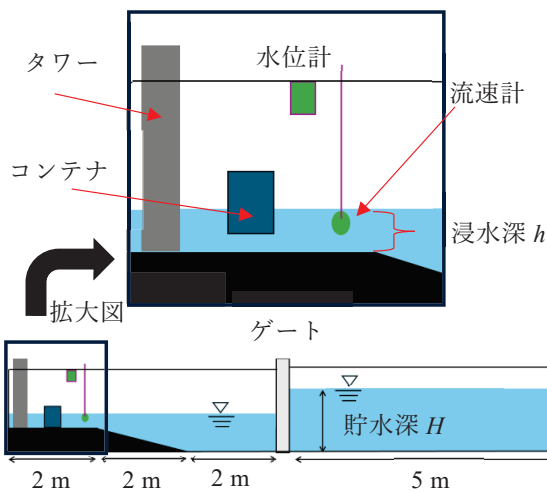


図-3 水槽の概略

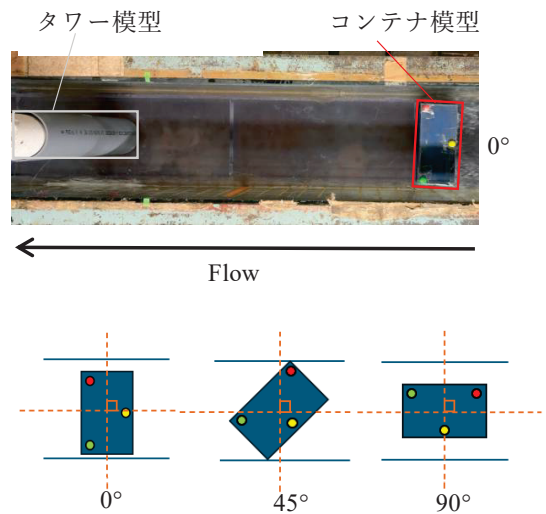


図-4 コンテナの設置角度

高さ 0.50 m、全長 11.0 m であり、右側が海側で長さ 5.0 m、左側が陸側で長さ 6.0 m で斜面勾配が 1/26 の鋼製矩形水路を使用した。その他に測定装置として超音波水位計とプロペラ流速計を設置した。プロペラ流速計は一点法で測定し、コンテナに津波が衝突する前から 20 秒間の流速を測定した。

カメラを水槽の上部と側面部に設置し、それぞれ 120 fps で撮影した。得られた画像と OpenCV を用いて画像解析を行い、コンテナ上部の 3 点の中心を重心と置き、その位置での速度と加速度を算出した。加速度を算出した後、コンテナとタワーの衝突によって起こった衝突力を式(1)により算出した。

$$F = ma \quad (1)$$

ここで、 $F$  : 力 (N) ,  $m$  : コンテナの質量 (kg) ,  $a$  : 重力加速度 ( $m/s^2$ ) である。

実験条件は貯水深  $H$  を 25 cm、浸水深  $h$  を 0 cm、7.5 cm (以降貯水深 25 cm :  $H=25$  cm、浸水深 0 cm :  $h=0$  cm、浸水深 7.5 cm :  $h=7.5$  cm とする) とし 2 パターンの水理条件で実験を行った。図-4 は実験を上から撮影した、コンテナの設置角度  $0^\circ$  (横向き) の状態を示している。水路の進行方向に対しコンテナを横向きに置いた状態を設置角度  $0^\circ$  とした。また、この状態から時計回りに  $45^\circ$  (斜め) ,  $90^\circ$  (縦向き) と置き、3 パターンの設置角度で津波を起こし実験を行った。これらの水理条件及び設置角度を組み合わせ、合計 6 パターンの実験条件で実験を行った。また、本研究では実験条件ごとに 3 回ずつ実験を行い、今回示すデータは代表の 1 つを用いている。図-5 に津波の流速と水位の経時変化を示す。流速、水位ともに同じような波形を示しているため、同じ実験ができていることが確認された。

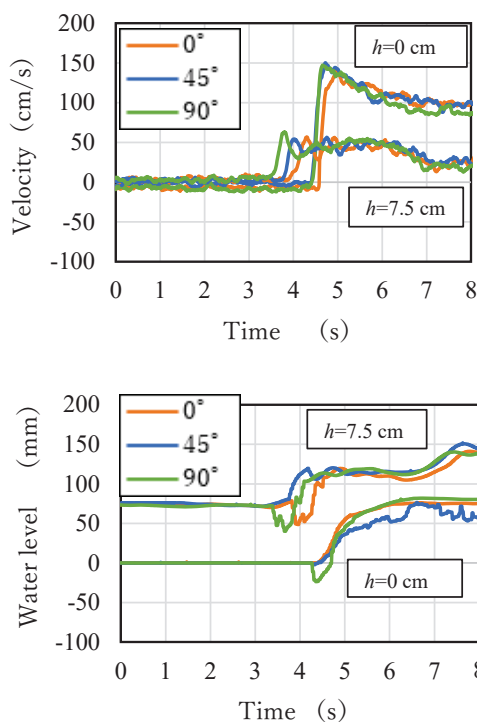
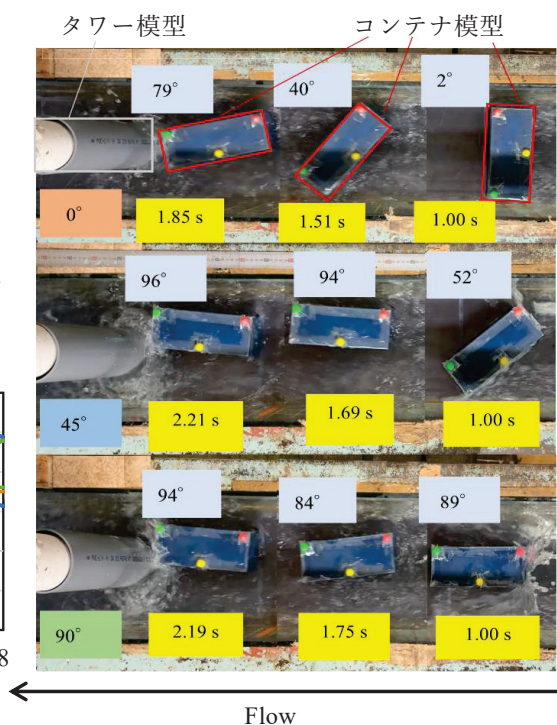


図-5 津波の流速および水位の経時変化

図-6 コンテナの挙動 ( $H=25$  cm,  $h=0$  cm)

### 3. 実験結果

#### (1) 浸水深 0 cm の場合

$H=25$  cm,  $h=0$  cm における設置角度  $0^\circ$ ,  $45^\circ$ ,  $90^\circ$  の結果を示す。図-6 に上から撮影したコンテナの挙動を示す。設置角度は上から順に  $0^\circ$ ,  $45^\circ$ ,  $90^\circ$  である。

$h=0$  cm の場合、コンテナは水路を滑るように移動し、設置角度の違いによって挙動が異なった。設置角度  $0^\circ$  では、コンテナは時計回りに回転し、縦の姿勢でタワーに衝突した。一方、設置角度  $45^\circ$  では、時計回りに回転しながら右方向へ移動した後、縦の姿勢となった。その後、水路の側面付近を通過する際に進行方向が左へ変化し、縦の姿勢のままコンテナに衝突した。これに対し、設置角度  $90^\circ$  では、姿勢の変化は小さく、ほぼ初期姿勢を保ったままタワーに衝突した。

図-7 に  $h=0$  cm における各設置角度のコンテナの角度経時変化を示す。設置角度  $0^\circ$  の場合、津波が衝突してからコンテナは回転し続けた。設置角度  $45^\circ$  では、津波に流される途中に回転した。これに対し、設置角度  $90^\circ$  では回転量は小さいことが確認できる。これらの結果から、コンテナが流れる際、 $90^\circ$  (縦向き) の姿勢をとろうとする傾向があると考えられる。設置角度  $0^\circ$ ,  $45^\circ$  の条件でコンテナが回転して縦向きに衝突した理由として、コンテナの面に対する水の押す力が働いていることが影響していると考えられる。コンテナ模型は流れの中で抵抗が小さくな

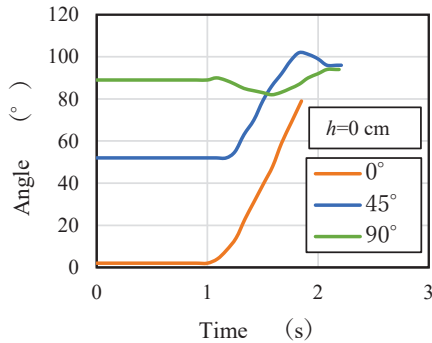


図-7 コンテナの角度経時変化 ( $h=0$  cm)

るように動き、最も抵抗が小さいと考えられる面積の一番小さい面を流れの向きに対して正面にすることがコンテナにとって流れやすい姿勢だったのではないかと考える。

図-8 は  $H=25$  cm,  $h=0$  cm における速度及び加速度の経時変化を示すグラフである。コンテナが津波に衝突した瞬間を 1.00 s とし、

タワーにコンテナが衝突した瞬間を×で示している。速度のグラフを確認すると、グラフの波形は角度によって違うことが分かる。これはコンテナに津波が当たるときの面が違うということが関係しているのではないかと考える。

設置角度  $0^\circ$  の場合、コンテナの速度は一番大きく、グラフの傾き方も大きいため、姿勢が横向きの際の速度が大きいことを示している。一方、設置角度  $90^\circ$  では、コンテナが津波に衝突した瞬間のグラフの傾きは緩やかで、タワーに衝突する瞬間が一番大きな速度となっている。これに対し、設置角度  $45^\circ$  では、コンテナが津波に当たる瞬間のグラフの傾きは緩やかで、その後タワーに衝突するまでの速度変化は小さい。これはコンテナが右方向に進行した後、左方向に蛇行している部分であり、速度のベクトルが水路の進行方向に対してまっすぐではなかったからと考える。

## (2) 浸水深 7.5 cm の場合

$H=25$  cm,  $h=7.5$  cm における設置角度  $0^\circ$ ,  $45^\circ$ ,  $90^\circ$  の結果を示す。図-9 に上部から撮影したコンテナの挙動を示す。設置角度は上から順に  $0^\circ$ ,  $45^\circ$ ,  $90^\circ$  である。また、図-10 に設置角度  $0^\circ$  における側面から撮影したコンテナの挙動を示す。側面の角度の測定は、コンテナの上面が水路に対し平行な状態を  $0^\circ$  とし、反時計回りの回転を正として定義した。 $h=7.5$  cm の場合、コンテナは波に乗りながら移動し、設置角度から大きく変化することなくタワーに衝突した。タワーへの衝突面はそれぞれの設置角度の姿勢で平行移動した状態に近かった。また、時間経過

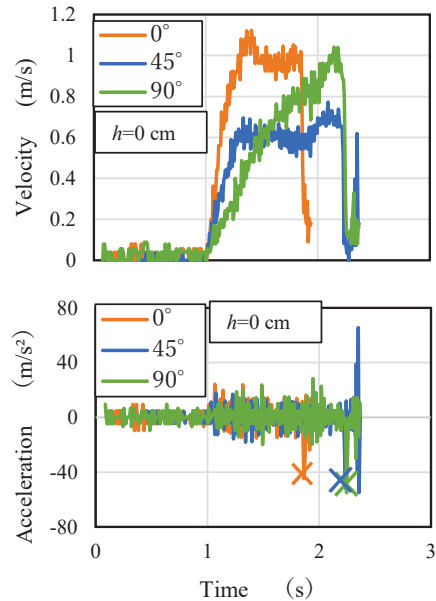


図-8 コンテナの速度及び加速度の経時変化 ( $h=0$  cm)

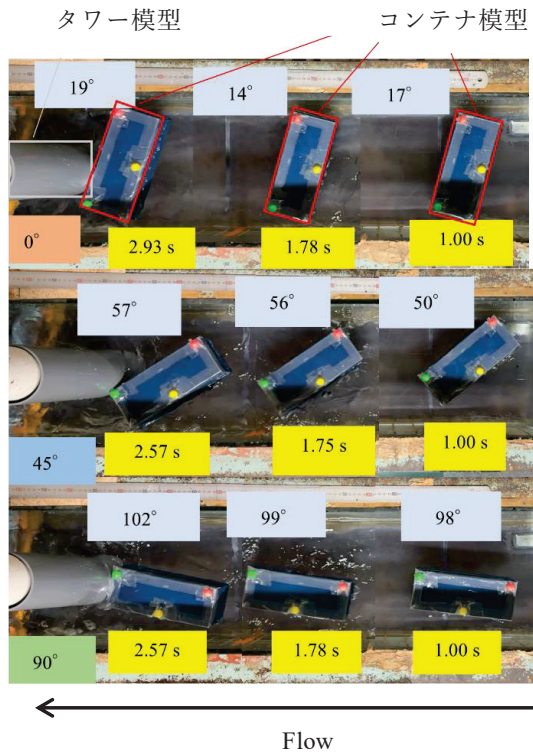


図-9 コンテナの挙動 ( $H=25$  cm,  $h=7.5$  cm)

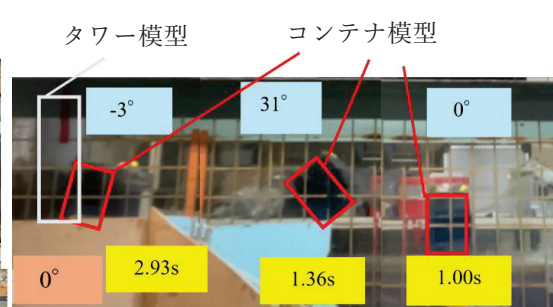


図-10 側面から撮影したコンテナの挙動 ( $h=7.5$  cm)

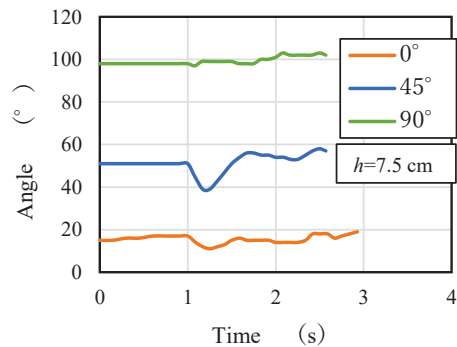


図-11 コンテナの角度経時変化( $h=7.5$  cm)

とともに振り子運動も小さくなり、コンテナの前面が衝突するケースと辺が衝突するケースの2つのパターンが確認された。

図-11に  $h=7.5$  cmにおける各設置角度のコンテナの角度経時変化を示す。 $H=25$  cm,  $h=0$  cmの条件と異なり、設置角度にかかわらず、顕著な回転は確認されなかった。コンテナが回転しなかった理由として、浸水深の存在が挙げられる。水の抵抗によりコンテナの動きが制限されるのではないかと考える。

図-12に速度及び加速度の経時変化を示す。速度のグラフは津波がコンテナにぶつかった瞬間に速度が大きく上昇し、途中で下降した後、再び上昇と下降を繰り返している。これは波の水面の上下動が関係していると考えられる。また、時間経過とともに速度は全体として減少する傾向を示した。側面から観察したコンテナの振り子運動も時間経過とともに減衰しており、コンテナの前後の傾きが速度に影響を与えるのではないかと考える。

図-13に衝突力と設置角度の比較を示す。これは各設置角度における衝突力の全18データの平均値と最大値、最小値を示したものである。衝突力は浸水深の有無によって大きく変化していることが確認された。これは既往研究<sup>26)</sup>に示す通りの結果となっている。一方、各設置角度における平均の衝突力は概ね同程度であり、設置角度による衝突力の変化は小さいといえる。

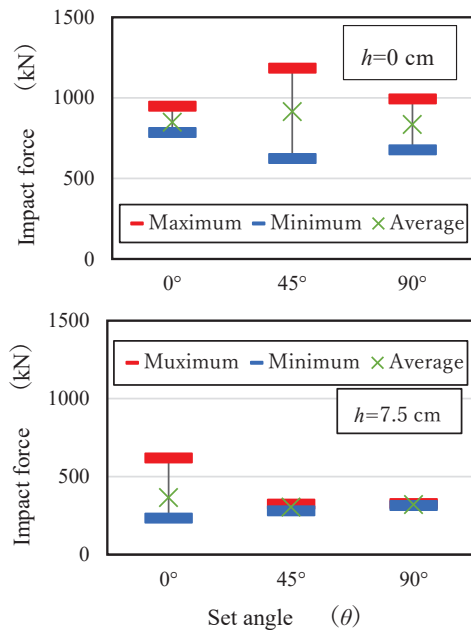
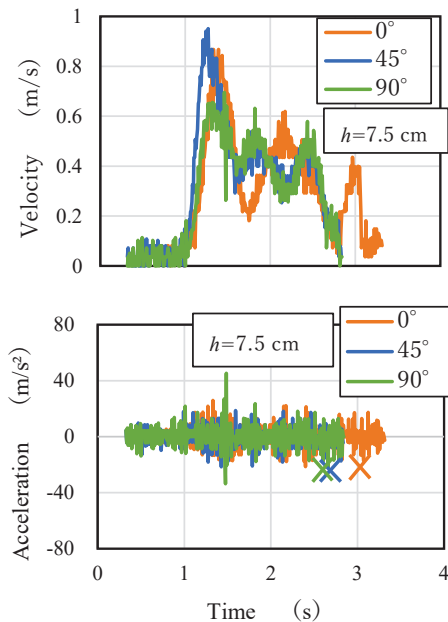


図-12 コンテナの速度及び加速度の経時変化 ( $h=7.5$  cm) 図-13 衝突力と設置角度の比較

#### 4. おわりに

本研究では  $H=25$  cm における  $h=0$  cm 及び  $h=7.5$  cm の 2 種類の水理条件を設定し、設置角度  $0^\circ$ ,  $45^\circ$ ,  $90^\circ$  のコンテナとタワーの衝突実験を行った。実験の結果、 $H=25$  cm,  $h=0$  cm における設置角度  $0^\circ$  及び  $45^\circ$  では、コンテナが回転し、タワーに縦向きに衝突した。一方、 $h=0$  cm における設置角度  $90^\circ$  と  $h=7.5$  cm の条件では、コンテナは顕著に回転せず、設置角度から大きく変化することなくタワーに衝突した。また、衝突力は浸水深の有無により大きく変化し、浸水深が存在すると衝突力が小さくなる傾向が確認された。この結果は、既往研究で報告されている知見と同じになった。一方、今回の結果からは設置角度によって衝突力に変化が出るとは言い切れないと考える。今後は、水の重さによってコンテナの見かけ上の重さが増える付加質量の現象や、側面から観察したコンテナの速度と姿勢の関係について詳細な検討を行う必要がある。

#### 参考文献

- 1) 海洋政策 内閣府：東日本大震災による洋上漂流物 Q&A, <[https://www8.cao.go.jp/ocean/policies/hyouryuu/q\\_and\\_a.html](https://www8.cao.go.jp/ocean/policies/hyouryuu/q_and_a.html)> (2025 年 12 月アクセス)
- 2) 齋藤憲寿・渡辺一也・池ヶ谷翼：港湾における着床式洋上風力発電施設と津波漂流物の衝突荷重に関する検討, 土木学会論文集 Vol.81, No18, 25-18056, 2025.
- 3) 国土交通省 東北地方整備局 港湾空港部：秋田県の港湾と空港, <<https://www.pa.thr.mlit.go.jp/s002/020/040/20200101113000.html>> (2025 年 12 月アクセス)
- 4) 池野正明・高島大輔・木原直人・甲斐田秀樹・宮川義範・柴山淳：津波・氾濫流水路を用いた流木衝突実験と衝突力推定式の改良, 土木学会論文集 (海岸工学) Vol.71, No.2, I\_1021-I\_1026, 2015.
- 5) OpenCV 公式サイト：<<https://opencv.org/>> (2025 年 12 月アクセス)
- 6) 齋藤憲寿・渡辺一也：洋上風力発電設備と津波漂流物の衝突に関する検討, 土木学会論文集, Vol.79, No18, 23-18095, 2023.