

# 孤立波による漂流物の衝突実験に基づいた付加質量の評価手法に関する基礎的研究

澁谷 陽<sup>1</sup>・船木 尚己<sup>1</sup>・畑中 友<sup>2</sup>

## Fundamental study on evaluation of added mass based on impact test results of driftage by solitary waves

Akira SHIBUYA<sup>1</sup>, Naoki FUNAKI<sup>1</sup> and Tomoyuki HATANAKA<sup>2</sup>

### Abstract

The 2011 off the Pacific Coast of Tohoku Earthquake Tsunami affected the large areas of eastern and northern part of Japan. It is necessary to clarify external forces by tsunamis acting on structures as the refuge facility. In order to investigate fundamental characteristics of collision force by driftage due to tsunami, impact test using tsunami-drifted bodies under solitary wave was carried out.

This paper discusses the effect of collision force on added mass of driftage based on the obtained test results. The experimental results revealed that the added mass of driftage depends on colliding acceleration, colliding velocity and the rate of change of water elevation of driftage.

キーワード：津波，孤立波，漂流物，衝突力，付加質量

Key words： tsunami, solitary waves, impact force, driftage, added mass

### 1. はじめに

東北地方太平洋沖地震では、大きな揺れと共に広い範囲で津波が観測され、特に東北地方の太平洋沿岸各地に甚大な被害をもたらした。

この津波による被害について、筆者らがこれまでに実施してきた調査の結果<sup>1)</sup>によれば、遡上する津波の浸水深に関する減衰機構は、海岸線から

の距離に依存することが確認された。具体的には、海岸線から約1.2 kmの地点までの沿岸部と、その地点よりも内陸にある2つの領域で波高の減衰率が大きく変化し、沿岸部では、遡上した津波が1 km進行するごとに浸水深は2.5 m低下したのに対し、内陸部では1 km進行するごとに浸水深は1 mずつ低下したことを明らかにした。なお、

<sup>1</sup> 東北工業大学工学部建築学科  
Department of Architecture, Faculty of Engineering,  
Tohoku Institute of Technology

<sup>2</sup> 東北工業大学大学院工学研究科建築学専攻  
Graduate Department of Architecture, Graduate Schools,  
Tohoku Institute of Technology

調査対象とした仙台平野では、海岸線で津波の波高が約10 mであり、海岸線から約4 kmの地点まで津波が遡上していたことを確認した。

写真1に、海岸線から1.2 kmの地点での被害状況を示す。被害の状況から、多くの家屋が遡上した津波により倒壊し、また、沿岸から1 km以上も離れた地点にまで小型の船舶が流されていたことがわかる。これらを踏まえ、被害の拡大を防ぐために、海岸線から1.2 kmまでの領域には家屋などをできる限り建てないことが肝要であると考えられる。しかし、現実的には、地域の経済活動の安定化、生産拠点の確保等の観点から、沿岸の平野部は、港や工場などの産業施設が必要であり、それらの建物を利用する多くの人々が集まる場所となっている。そのため、人命保護を目的に、沿岸部では地震発生時に人々が速やかに避難できる避難タワーや津波避難ビルの建設が望まれる。

また、筆者らによる被害調査<sup>2)</sup>の結果から、ピロティ形式の建物が津波による被害を軽減するのに有効であることが確認されている。このことから、沿岸部の建物をピロティ形式とすることで、津波の浸水による建物の損傷だけでなく、財産の損失をも防ぐことが可能になると考えられる。

ピロティ形式の建物の津波に対する安全性を確保するために、建物に作用する津波外力の評価法の構築が必要である。津波外力には、津波自身の流体力と津波により運ばれてくる漂流物の衝突力の2つがある。津波自身の流体力については、例

えば池野ら<sup>3)</sup>が海岸の堤防についての段波津波の波圧を報告しており、遡上した津波によるサージフロント波圧については、飯塚ら<sup>4)</sup>が家屋に働く津波流体力を抗力の形で、また、有川ら<sup>5)</sup>が箱型構造物に働く波圧分布の形で報告している。漂流物の衝突力については、松富<sup>6)</sup>が遡上する津波による流木漂流物が開度の異なる壁に衝突する場合を調べ、藤井ら<sup>7)</sup>および池谷ら<sup>8)</sup>などはタンカーがエプロン上で漂流した場合の漂流挙動や衝突力を模型実験や数値解析により検討している。これらの多くは、津波自身の流体力や漂流物が衝突する対象を壁としていることから、避難タワーやピロティ形式の柱のように、津波から見て細い構造物に働く津波外力を改めて調べる必要がある。また、柱に作用する力が、津波流体力よりも津波による漂流物の衝突力が支配的である<sup>9)</sup>ことが報告されている。しかし、漂流物の衝突力は、漂流物の運動状態や漂流物、構造物(非衝突物)、津波の形状により変化するため、現状では衝突力を明確に評価する方法がない<sup>10)</sup>。

筆者らは、前報<sup>11)</sup>において、漂流物の衝突力は、漂流物の実質量だけではなく、漂流物周辺の水塊の質量の影響(以降、付加質量とする。)を大きく受けることから、孤立波を用いた漂流物の衝突実験に基づき考察している。そこでは、漂流物が構造物に衝突する瞬間の速度は、孤立波の流速に等しいとみなし、衝突力を検証した。しかしながら、漂流物の衝突速度は孤立波の流速と異なることが実験の結果から確認された。本報は、前報の結果に基づき、実験条件および計測手法を再検討して実施した孤立波による衝突実験の結果を示し、それらの結果から、漂流物の運動状態の違いが付加質量に与える影響について明らかにすることを主な目的とする。

## 2. 漂流物の衝突実験

実験装置の概要を図1に示す。ここでは、想定する津波の波高を10 mとして、水槽の造波性能を考慮し、実験の縮尺を1/100とした。陸上の建物を対象とした場合、一般的には内陸を遡上する津波を想定するが、ここでは、漂流物が構造物に



写真1 仙台平野部の家屋被害状況

衝突する際の付加質量に関する基本的な特性を調べるため、実験では乱れの少ない孤立波を使用した。実験で使用した孤立波の波高  $\eta$  は 5 cm, 8 cm である。安定した孤立波を発生させるために水深  $h$  は 20 cm とした。実験で使用した造波機は、造波板を左右に移動させ孤立波を発生させる仕組みとなっている。この造波板の動きを制御するために下記に示す (1) 式を用い、目標とする波高を持つ孤立波を発生させるために、実験装置を微調整し造波した。

$$c = \sqrt{g(\eta_{max} + h)} \quad (1)$$

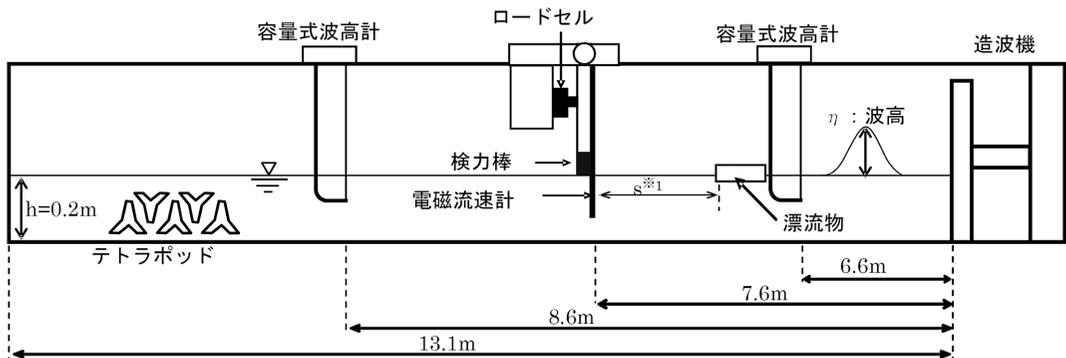
ここで、(1) 式の  $c$  は波の形状が伝わる速度である波速、 $g$  は重力加速度、 $\eta_{max}$  は最大波高、 $h$  は水深である。実験は、漂流物を水面上に浮かせた後、造波機で孤立波を発生させ、構造物を想定した検力棒に漂流物を衝突させる方法で行った。その際、漂流物が検力棒に衝突する時の位相を変えて実験を行うため、漂流物と検力棒との距離  $s$  を調整した。漂流物の衝突前後で孤立波の波高を計測する必要があるため、図示のとおり波高計を検力装置の前後に設置した。図 2 に示すように検力棒 (断面寸 2 cm × 0.3 cm) の位置に電磁流速計を配置した。検力棒およびロードセル (LMA-A 型小型圧縮型) は漂流物の衝突力、電磁流速計は孤立波の流速、容量式波高計は孤立波の波高をそれぞれ計測するものである。波高計、電磁流速計、ロードセルのデータサンプリング間隔は 5 msec

とした。また、漂流物衝突時の衝突速度と吃水の変化を計測するためにハイスピード CCD カメラ (Photron IDP-Express) を使用した。フレームレートは 250 Hz である。漂流物が検力棒に衝突した時点の位相の違いによる衝突力の差異を確認するため、図 3 に示すように孤立波を 4 分割した 5 つの点を位相として定めた。本報中の位相の名称は図 3 に示すとおりである。実験で使用した漂流物模型の形状寸法を図 4 に示す。漂流物模型は木製の厚板で、質量は 92 g である。

### 3. 実験結果

#### 3.1 孤立波の流速と衝突力

実験で得られた孤立波の流速と衝突力の時刻歴波形を図 5 に示す。今回使用した漂流物模型の場合、漂流物が front0 から front1/2 までの波の前面にある場合、漂流物が検力装置に複数回衝突していることがわかる。これは、漂流物が 1 回目の衝突後、その反動により検力棒から離れるが、後ろから来る波に押されて再び衝突するためである。この実験では、複数回衝突する場合には、1 回目の衝突を対象とした。図 5 に示すように、漂流物の衝突回数は、位相が front0 の点で最も多く、top から back0 になるほど減少する。衝突力のピーク値は、front0 から top になるほど大きく、top で最大となり、top から back0 になるほど小さくなる。



※1 : S は検力棒-漂流物間距離

図 1 実験に用いた水槽と計測機器の配置状況

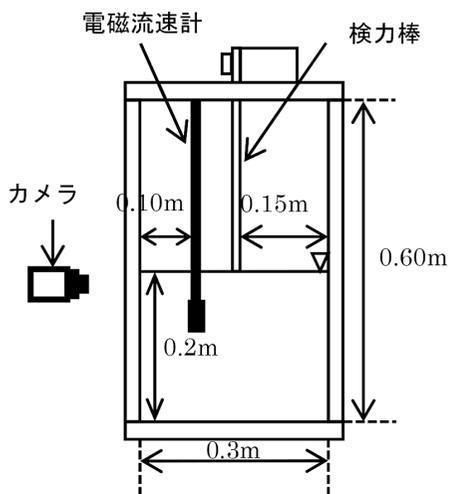


図2 水槽(断面図)

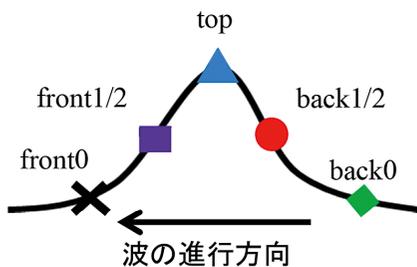


図3 衝突の位相

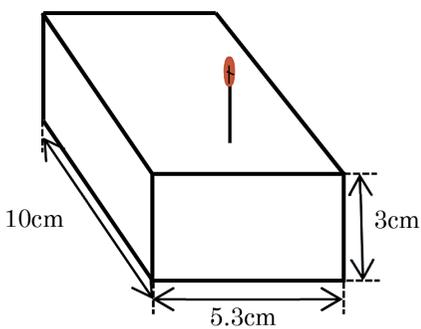


図4 漂流物模型詳細

### 3.2 漂流物の衝突速度と位相

漂流物の衝突速度と位相の関係を図6に示す。図中には、孤立波の流速と位相の関係を合わせて

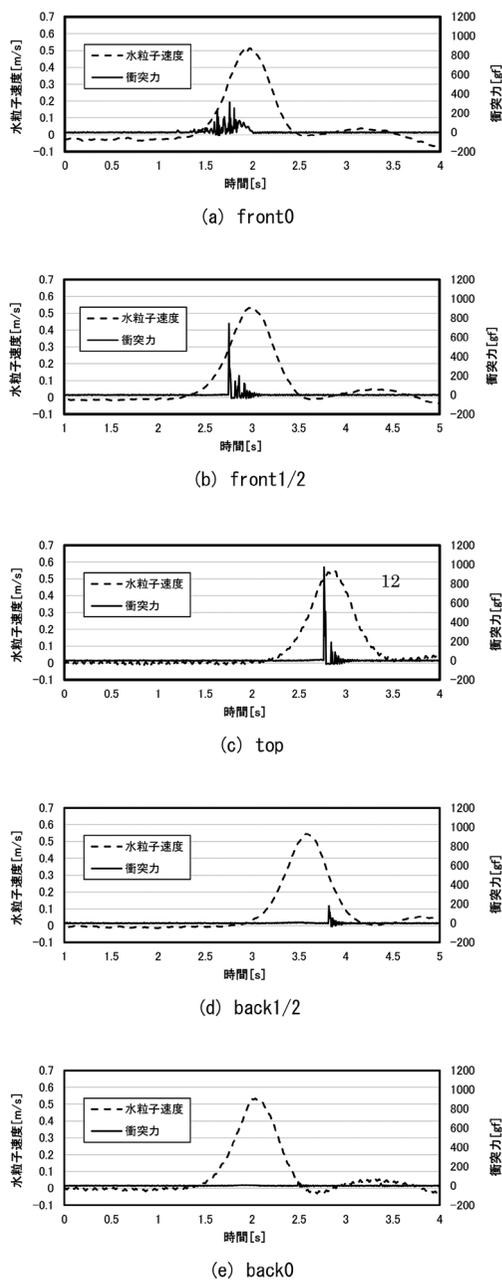
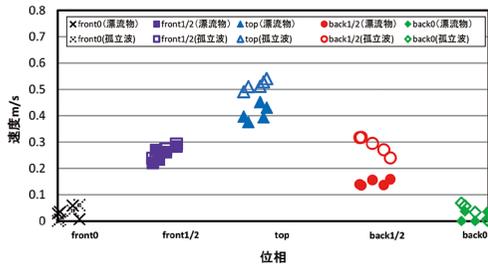
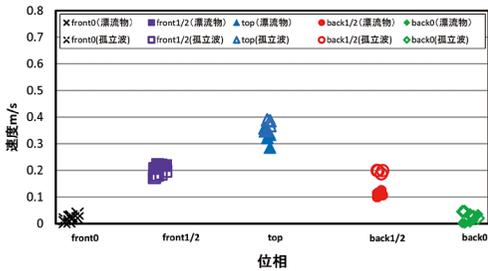


図5 孤立波の流速と衝突力の時刻歴波形 ( $\eta = 8\text{ cm}$ )

示している。なお、位相は、漂流物が検力棒に衝突した瞬間の孤立波の流速を、流速の最大値で除して求めたものである。これらの結果、今回使用した漂流物模型の場合、波高の違いにかかわら



(a)  $\eta = 8 \text{ cm}$



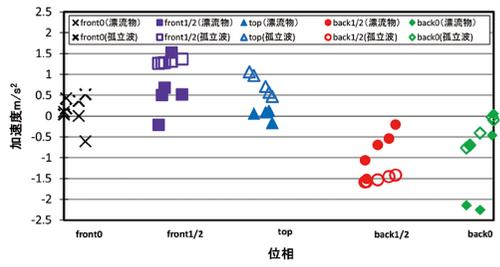
(b)  $\eta = 5 \text{ cm}$

図6 漂流物の衝突速度と位相の関係

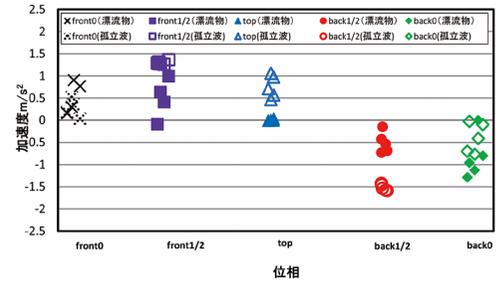
ず, front0から top にかけて漂流物の衝突速度は増加し, top から back0にかけて減少する傾向を示すことが確認された。衝突速度は, front0から front1/2で流速とほぼ同じ値を示しているが, top から back0の領域では, 流速よりも小さい値となった。

### 3.3 漂流物の衝突加速度と位相

漂流物の衝突加速度と位相の関係を図7に示す。孤立波の加速度および漂流物の衝突加速度は, それぞれの流速および衝突速度を, 時間で微分したものである。位相は, 前述と同様の方法で求めた。漂流物の衝突加速度の向きは, 流れ方向に対して正, その逆方向を負とする。なお, 加速度が正の場合は, 漂流物加速しながら, 負の場合は減速しながら衝突することを示している。図中には, 孤立波の加速度と位相の関係を重ね合わせている。これらの結果, 今回使用した漂流物模型の場合, 波高の違いにかかわらず, 衝突加速度は, front1/2で最大値を示し, front0, top および back0で0, back1/2で最小となる。位相の違いに



(a)  $\eta = 8 \text{ cm}$



(b)  $\eta = 5 \text{ cm}$

図7 漂流物の衝突加速度と位相の関係

かかわらず, その数値がばらつく結果となったが, 概ね孤立波の加速度と同じ傾向を示した。

### 3.4 力積と漂流物の衝突速度

衝突力の力積と衝突速度の関係を図8に示す。力積は, 漂流物が検力棒に衝突する前後の運動量の変化量である。図5に示した衝突力の時刻歴波形より, 衝突力と時間関係で囲まれる面積を求め, これを力積とした。図8の横軸は, 漂流物の衝突速度  $v \text{ (m/s)}$  を, 波速  $c = \sqrt{g(\eta_{max} + h)}$  (波の形状が伝わる速度) により無次元化したものである。ここで,  $g \text{ (m/s}^2\text{)}$  は重力加速度,  $\eta_{max} \text{ (m)}$  は孤立波の最大波高,  $h \text{ (m)}$  は水深である。

今回使用した漂流物模型の場合, 実験結果から算出された力積は, 波高の違いにかかわらず, 位相が top の点で最大値を示す。また, front0から top にかけて衝突速度は増加するため, それにともない力積も増加している。一方, 衝突速度が減少する top から back0にかけて力積は減少傾向を示す。力積は衝突速度に比例することから, 衝突速度は力積を算出する上で重要な要素であること

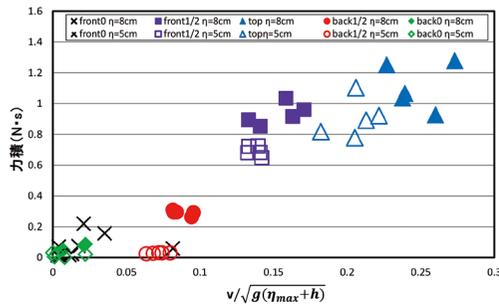


図8 力積と衝突速度の関係

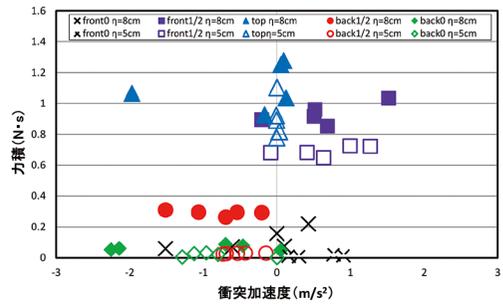


図9 力積と衝突加速度の関係

がわかる。

### 3.5 力積と漂流物の衝突加速度

衝突力の力積と漂流物の衝突加速度の関係を図9に示す。今回使用した漂流物模型の場合、孤立波の波高の違いにかかわらず、漂流物の衝突加速度はfront1/2で正方向に最大値を示した。front0およびtopで0付近に集中し、back1/2、back0では負の値を示す。これらの結果より、加速度が0となる点で力積は最大値を示すことが確認できた。また、漂流物が正の加速度で衝突するとき力積は大きく、負の加速度で衝突するとき力積は小さくなるのがわかる。

### 3.6 付加質量係数と漂流物の衝突速度

実験時、衝突後の漂流物は停止したことから、衝突後の速度が0になるとした場合、力積と運動量変化の関係式は

$$F\Delta t = (m_d + m_a)v \quad (2)$$

と表される。ここで、 $F\Delta t$ は衝突力の力積、 $m_d$ は漂流物の質量、 $m_a$ は付加質量、 $v$ は衝突速度である。力積( $F\Delta t$ )については、前述のように、衝突力の時刻歴波形の面積とした。(3)式について、 $m_a$ で整理すると、付加質量は

$$m_a = \frac{F\Delta t}{v} - m_d \quad (3)$$

となる。

付加質量係数と漂流物の衝突速度の関係を図10

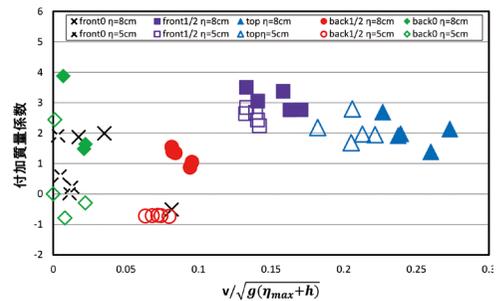


図10 付加質量係数と衝突速度の関係

に示す。ここで、付加質量係数とは、付加質量を漂流物の質量で除したものとする。横軸は、図8と同様に、衝突速度は波速  $c = \sqrt{g(\eta_{max} + h)}$  で無次元化したものである。

波高の違いにかかわらず、算出された付加質量係数はfront1/2で最大値を示し、その値は約3.0となった。また、topでは約2.0となり、いずれも波高に関係なくほぼ一定の値を示した。これらの結果から、衝突速度が速くなるに従って付加質量係数は2.0に近づく傾向があると判断できる。front0、back0の付加質量係数が-1~4の間にばらついていることがわかる。これは付加質量を求めるために、衝突力の力積を衝突速度で除しており、位相がfront0およびback0付近では漂流物の衝突速度が小さいことに起因する。また、波高が5cm、位相がback1/2の場合に付加質量は負の値を示している。これは、衝突後の漂流物後方の波そのもの体積が少なく、流体の加速度と後述する吃水の変化量が負になる場合、流体から漂流

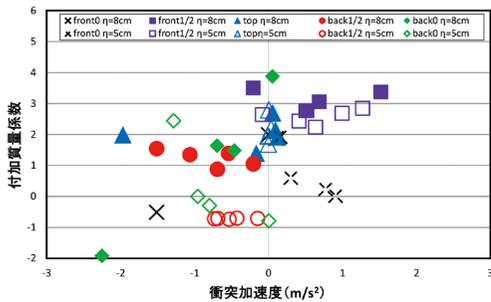


図11 付加質量係数と衝突加速度の関係

物への力の向きが衝突方向と逆向きとなることに起因する。

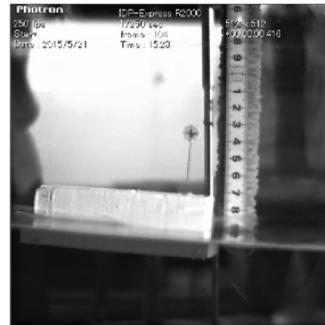
### 3.7 付加質量係数と漂流物の衝突加速度

付加質量係数を漂流物の衝突加速度で整理したものを図11に示す。今回使用した漂流物模型の場合、front0からfront1/2にかけて衝突加速度は増加傾向にあり、それに伴い付加質量係数も増加し、最大で約3.0となる。front1/2からtopにかけて加速度は減少しながら0に近づき、付加質量係数も約2.0まで減少する。また、topからback1/2にかけて加速度は減少し、負の領域に達する。同時に付加質量係数も減少する。back0では付加質量係数にばらつきはあるものの、加速度は大半が負の値であった。これらの結果より、付加質量係数は、加速度が正の領域で約2.0より大きくなり、加速度0で約2.0、負の領域では2.0よりも小さくなることが確認された。

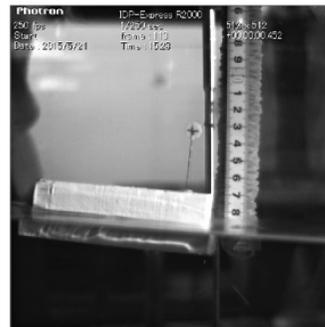
### 3.8 付加質量係数と吃水線下の漂流物の体積変化量

これまでに得られた結果から、漂流物の運動状態の変化に対する、力積と付加質量の関係は、互いに相関性がないことがわかった。そのため、付加質量係数と吃水線下の漂流物の体積変化量（以降、吃水の変化量）の関係について検証する。

写真2に、漂流物がfront1/2で検力棒に衝突した瞬間の様子を示す。写真2より、衝突の瞬間から離れるまでの間に、吃水が増加していることが確認された。同様に、写真3にback1/2での様子



(a) 衝突の瞬間



(b) 衝突の瞬間

写真2 衝突の様子 (front1/2)

を示す。front1/2の場合とは異なり、衝突前後で吃水が減少していることが確認された。

付加質量係数と吃水の変化の関係を図12に示す。吃水の変化とは、吃水線下の漂流物の体積の変化を表す。今回使用した漂流物模型の場合、吃水の変化が増加、または減少すると、付加質量係数も同様の变化を示す。また、吃水の変化が負の時、付加質量係数は2.0以下となり、正の時は2.0以上の値を示す傾向がある。

## 4. まとめ

本報では、孤立波による漂流物の衝突実験により得られた結果に基づき、漂流物の運動状態の違いが付加質量に与える影響について検証した結果、以下の知見を得た。

- ① front0からtopにかけて力積は上昇傾向にあり、top付近で最大値を示す。その後、力積は



(a) 衝突の瞬間



(b) 衝突の瞬間

写真3 衝突の様子 (back1/2)

back0にかけ減少傾向を示す。

- ②衝突速度が最大であるときに力積も最大値を示す。また、衝突速度の増減に比例し、力積も変化する。
- ③加速度が正の値にあるとき力積は大きな値を示し、負の値にあるとき力積は小さくなる。また、力積が最大値の top では加速度0付近となる。
- ④衝突力の力積が最大となる top では付加質量係数が約2.0となる。
- ⑤吃水の変化が増減すると付加質量係数も同様の变化を示す。

今後は、孤立波の波高や漂流物の種類を増やすとともに、孤立波での実験結果を参考に、遡上する津波を想定した漂流物の衝突実験を行い、実態に見合った漂流物の衝突力算定式の構築を目指す。

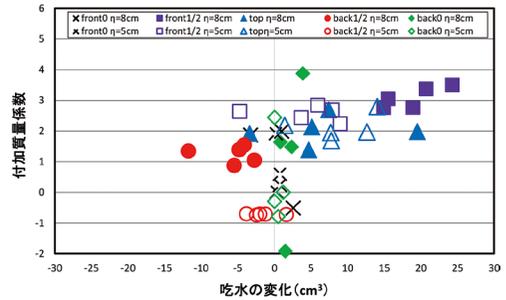


図12 付加質量係数と吃水の変化

## 謝辞

本研究を進める上で、東北工業大学工学部都市マネジメント学科の実験設備、計測機器を使用した。また、実験を行うにあたり、東北工業大学工学部建築学科船木研究室の学部生に協力頂いた。ここに感謝の意を表します。

## 参考文献

- 1) S. Arai, T. Takahashi, A. Aihara and A. Shibuya: Inundation and Damage by Run-up Tsunami of 2011 in the Sendai Plain, Japan, ISOP-2012, 2012, pp.36-41.
- 2) 日本建築学会：2011年東北地方太平洋沖地震被害調査速報，2011。
- 3) 池野正明・松山昌史・田中寛好：ソリトン分裂津波の大陸棚上での変形とその防波堤設計波圧に関する実験的研究，海岸工学論文集，Vol.45, pp.366-370, 1998.
- 4) 飯塚秀則・松富英夫：津波氾濫流の被害想定，海岸工学論文集47巻，pp.381-385, 2000.
- 5) 有川太郎・大坪大輔・中野史丈・下迫健一郎・高橋重雄・今村文彦・松富英夫：遡上津波力に関する大規模実験，海岸工学論文集53巻，pp.796-800, 2006.
- 6) 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.
- 7) 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，Vol.21, pp.127-132, 2005.
- 8) 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：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, Vol.53, pp.276-280, 2006.
- 9) 松富英夫: 碎波段波に伴う流木の最大衝撃力について, 土木学会論文集Ⅱ No.467, pp.19-28, 1994.
- 10) 国土交通省国土技術政策総合研究所・一般社団法人建築性能基準推進協会・協力独立行政法人建築研究所: 東日本大震災における津波による
- 建築物被害を踏まえた津波避難ビル等の構造上の要件に係る暫定指針, pp.I-36, 2014年2月.
- 11) 澁谷 陽・新井信一・高橋敏彦・相原昭洋: 孤立波による漂流物の衝突力と付加質量, 土木学会論文集 B3, Vol.67, No.2, pp.276-280, 2011.
- (投稿受理: 平成28年4月6日  
訂正稿受理: 平成28年7月11日)

## 要 旨

津波による人的被害を軽減するためには、津波避難タワー等の設置が有効である。避難タワーの柱のような細い構造体に作用する力は、津波の流体力よりも漂流物の衝突力の方が支配的であることから、本論文では、孤立波を用いた漂流物の衝突実験を行い、その実験結果から、衝突力を算出するさいに用いる付加質量について考察を行った。その結果、付加質量は漂流物の衝突速度、衝突加速度、漂流物の吃水の変化量に依存することを明らかにした。