

津波による漂流物挙動の変動性に関する実験と評価方法の提案

Experimental Study on Variability in Drifting Behavior Due to Tsunami and Its Evaluation Method

藤井直樹¹・福山貴子²・稲垣 聡²・池谷 毅³・柳沢 賢⁴・大森政則¹

Naoki FUJII, Takako FUKUYAMA, Satoshi INAGAKI, Tsuyoshi IKEYA, Ken YANAGISAWA and Masanori OHMORI

It is important to evaluate the damage on structures due to the drifting bodies with tsunami. However drifting behavior is very sensitive to tsunami velocity and its force. The purpose of the present study is to investigate the variability in the drifting bodies due to tsunami. First, experimental tests are carried out. As a result, tsunami turbulent diffusivity that occurred by breaking waves was related to variability in drifting behavior. Second, calculation is carried out using the diffusion coefficient provided by the experiment. Finally, an evaluation method is proposed which can predict the behavior of drifting bodies by tsunami.

1. はじめに

津波による災害の1つとして、船舶や木材などの漂流物が構造物へ衝突することによる被害が指摘されている。津波による漂流物の挙動に関する研究は、津波による構造物の被害を考える上で重要であり、正確な評価が求められる。これまでに実施した漂流物の挙動と衝突力に関する研究から、漂流挙動の解析が可能になってきたが、同時に漂流挙動は、実験毎にその挙動が異なり、変動性が大きいことが明らかになった。そこで、本研究では、上記の漂流挙動の変動原因の追究と変動の程度を評価することを目的として、水理模型実験を実施し、その結果を反映させた数値計算を行なった。そして漂流物挙動の評価方法を提案する。

2. 水理模型実験

これまでの結果から、津波による漂流物の挙動の変動に影響を及ぼす因子として、①津波の場の変動、②漂流物の初期条件の変動、③漂流物と水との相互作用力の変動が考えられる。本研究では、実験方法を工夫し②をなるべく小さくすることにより、現象に本質的に関わると考えられる①と③に着目して実験を実施した。

(1) 実験水路および実験方法

a) 津波の場の再現性に関する実験

実験では、図-1に示す大型水路を用いた。水路内には斜面・陸上部を設置し、津波を繰り返し発生させ、斜面上および陸上の複数点で水位変動・流速変動を計測した。また、実験の縮尺は、フルード則に従い1/100とし

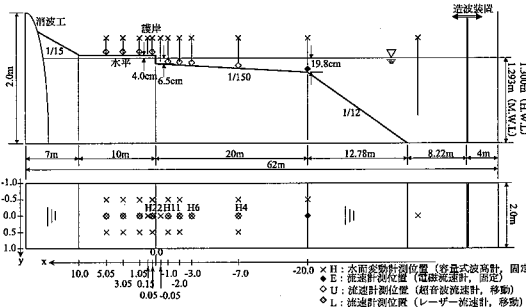


図-1 実験水路および水理量計測地点

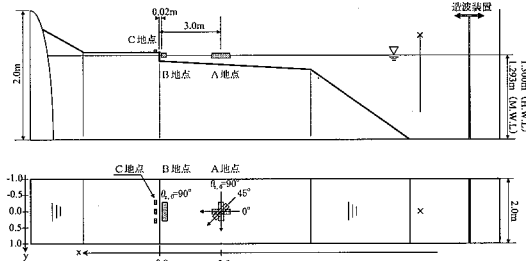


図-2 漂流物の初期設置位置

表-1 津波条件

波名称	波高(cm)	周期(s)	初動位相
Wave1	5.0	60	押し
Wave2	5.0	60	引き
Wave3	7.5	30	押し
Wave4	7.5	30	引き

た。表-1に用いた4波の津波条件を示す。

b) 漂流物挙動の変動に関する実験

図-2に示すように、船舶模型をA地点およびB地点に、車両をC地点に設置して、非接触3次元動的変位

1 正会員 東電設計(株) 社会基盤推進部
2 正会員 工修 鹿島建設(株) 技術研究所
3 フェロー 工博 鹿島建設(株) 技術研究所
4 正会員 工修 東京電力(株) 原子力設備管理部

計測システムにより漂流挙動を計測した。また、A地点では波向に対して0°, 45°, 90°の角度、B地点、C地点では90°の角度で漂流物を設置した。

船舶模型としては、500 G.T.クラスのタンカー船を参考に、形状を単純化した船首尾方向に対称な箱型浮体構造とした。船体模型の寸法は、長さ0.544 m、幅0.115 m、高さ0.054 mであり、船舶模型に重錘を載せることにより吃水を0.022 mとした。車両模型の寸法は、長さ0.07 m、幅0.02 m、高さ0.027 m、タイヤの高さを0.022 mとした。

(2) 実験結果

a) 津波の場の再現性に関する実験

図-3にWave1, 図-4にWave4の水位変動とその標本分散の時系列波形を示す。同一条件の実験を12回繰り返して得られた水位変動データに対して平均値を求め、式(1)により標本分散 s^2 の時系列波形を算出した。

$$s^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \dots\dots\dots (1)$$

Wave1の非碎波、非分裂の状態で押し波が伝播するケースでは、1波目の海域部の水位変動にはほとんどばらつきがなく、標本分散の値もほぼ0で推移している。陸上に遡上してからもほとんどばらつきはない。

Wave4の引き波のあとの押し波が碎波しているケー

スでは、押し波が通過する瞬間から標本分散の値が大きくなっており、その後の分裂波でもばらつきが大きい。

これらのことから、非碎波、非分裂の状態では水位変動のばらつきは小さく、分裂の状態でも通過する瞬間に標本分散が最も大きくなるものの、その後のばらつきは小さくなる。ばらつきが大きくなるのは、碎波した波が通過する場合であることが分かった。

b) 漂流挙動の変動に関する実験

船舶の漂流挙動として、X方向変位、Y方向変位を実験ケース毎に重ね合わせて描いた結果を図-5、図-6に示す。これらの図中には、後述する標本分散も併せて示している。また、船舶の漂流挙動を1秒毎の軌跡で描いた結果の一例を図-7、図-8に示す。

海域を漂流する船舶は、変位量がケースで異なるものの、X方向変位、Y方向変位が概ね同時刻でばらつきが大きくなることが確認できる。また、津波横断方向のY方向変位について着目すると、漂流挙動のばらつきが、非常に小さい状態から、急激に大きくなるタイミングがあることが分かる。

なお、船舶が海域部を漂流した後、陸上部に乗り上げるケースでは、海域部を漂流するケースよりもばらつきが小さかった。

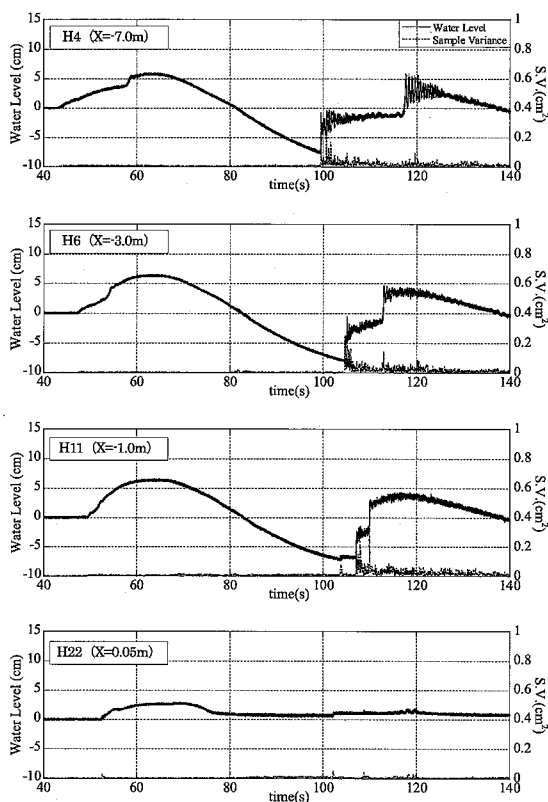


図-3 再現性実験結果 (Wave1, HWL)

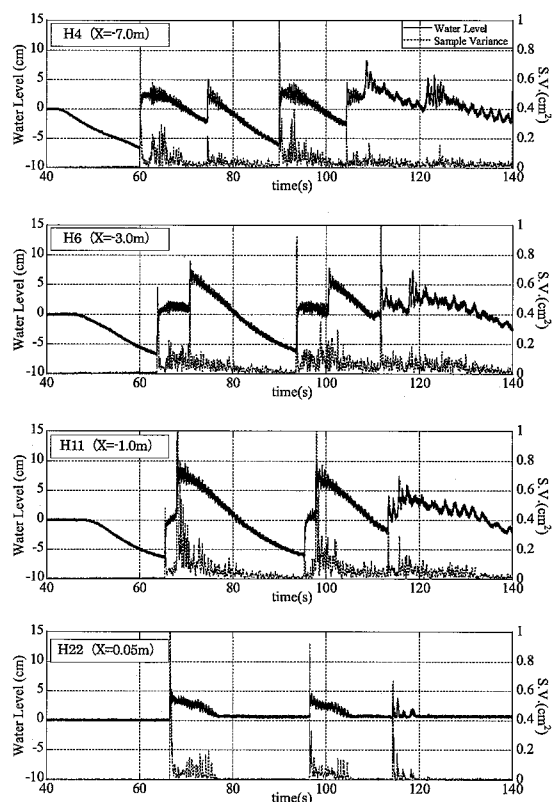


図-4 再現性実験結果 (Wave4, MWL)

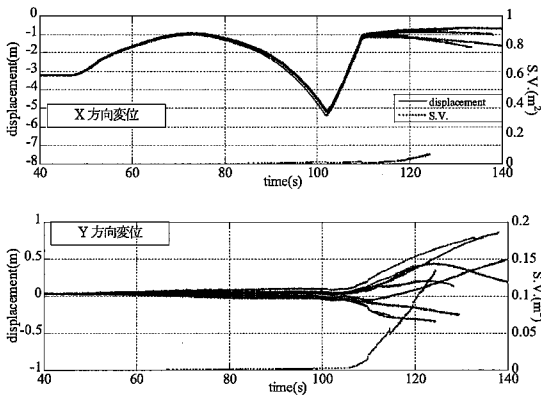


図-5 漂流挙動実験結果 (Wave1, 初期 A, 0°)

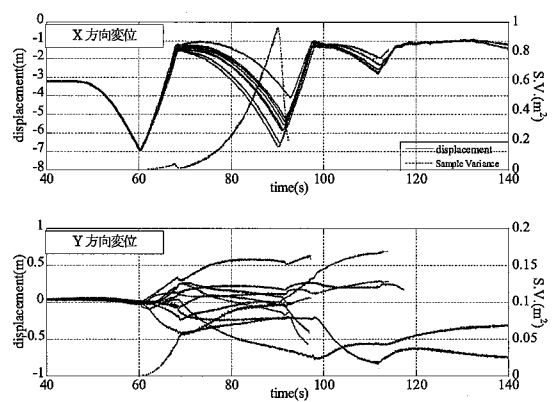


図-6 漂流挙動実験結果 (Wave4, 初期 A, 0°)

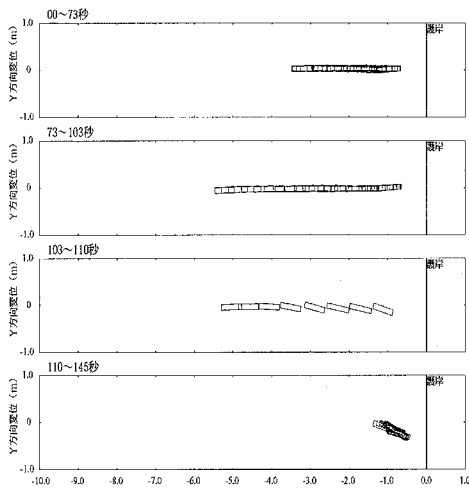


図-7 船舶の漂流挙動一例 (Wave1, 初期 A, 0°)

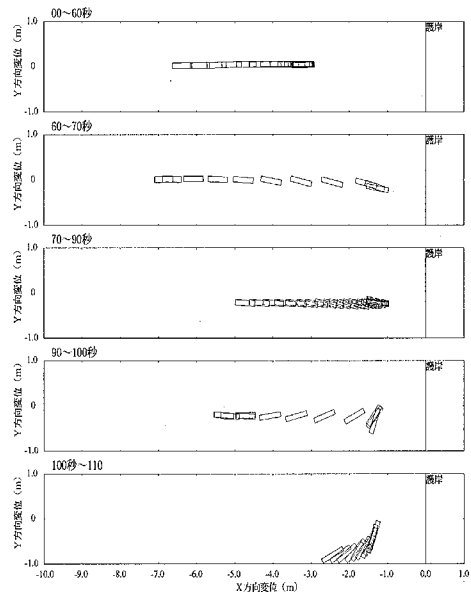


図-8 船舶の漂流挙動一例 (Wave4, 初期 A, 0°)

c) 水理量と漂流挙動の関係について

船舶が海域部を漂流するケースでは、津波条件により漂流挙動のばらつき度合いに違いが見られた。そこで、水位変動波形と漂流挙動のデータから、水理量と漂流挙動の関係について考察を行った。

Wave1 の非分裂・非砕波のケースでは、図-3、図-5 から1波目の押し波・引き波が作用しても漂流挙動にはほとんどばらつきが見られず、このときの水位変動にも乱れはほとんど見られないことがわかる。

Wave4 の分裂・砕波のケースでは、図-4、図-6 から引き波の後、60秒に砕波した押し波が作用しており、これ以降の漂流挙動には大きなばらつきが生じている。

以上のことから、漂流挙動に大きな変動性を与える要因としては、砕波した波の乱れ成分が大きく影響していると考えられる。

図-9に、船舶の漂流のばらつきに関する実験結果をWave4の場合を例として示す。xおよびy方向の頻度分布は10回繰り返して得られた実験値、実線は式(1)

の標本分散による正規分布である。両方向とも時間を経るに従い、ばらつく傾向が分かる。また、既往の研究同様、正規分布と表せそうである。しかし、頻度が少ないため今後データを蓄積して確認したい。

次に、船舶の軌跡から水位変動の場合と同様に、平均値と式(1)から標本分散の時系列波形を求めた。さらに、標本分散からxおよびy方向の拡散係数Kを式(2)により算出した。

$$K = \frac{1}{2} \frac{ds^2}{dt} \dots\dots\dots (2)$$

図-10、図-11に、求めた標本分散と拡散係数の時刻歴波形を示す。ばらつきが急激に大きくなるのは、砕波後の波が作用するときである。拡散係数 K_x および K_y の値はWave1とWave4で異なり、Wave4の方が大きい。砕波前後の拡散係数の算定結果を表-2に示す。砕波後の拡

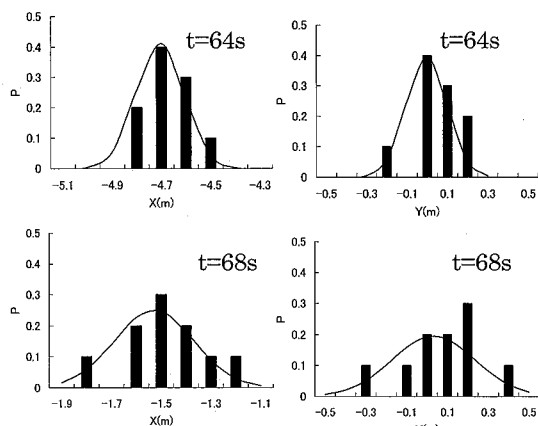


図-9 拡散に関する頻度分布(Wave4, 初期 A, 0°)

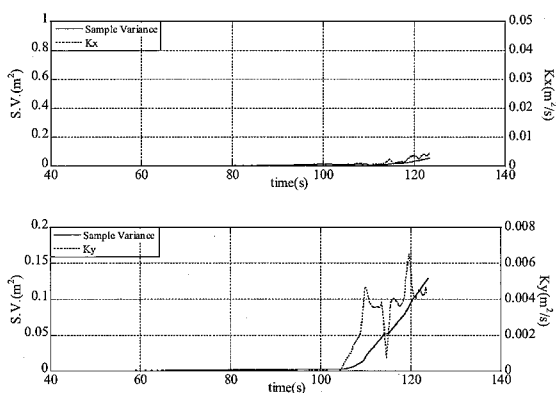


図-10 標本分散と拡散係数(Wave1, 初期 A, 0°)

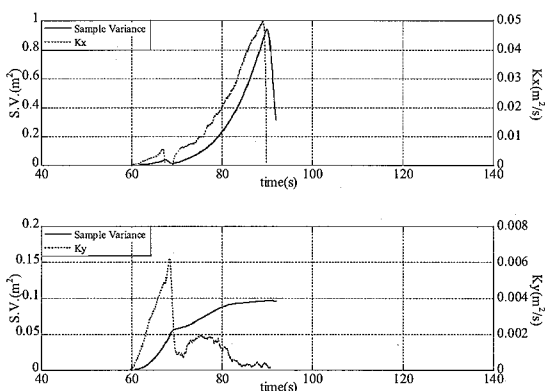


図-11 標本分散と拡散係数(Wave4, 初期 A, 0°)

散係数は、砕波後から反射波が来るまでの時間帯における最大値を抽出している。図-10のWave1の場合は109秒、図-11のWave4は68秒のときの値から抽出した。なお括弧書きの拡散係数は、漂流軌跡が途中までしか計測できなかったため、参考値と示した値である。砕波前の状態では砕波後の状態よりも2オーダー程度拡散係数が

表-2 砕波前後の拡散係数

津波条件	角度	船舶ばらつきのタイミング	砕波前 $K_y(\text{m}^2/\text{s})$	砕波後 $K_y(\text{m}^2/\text{s})$	砕波前 $K_x(\text{m}^2/\text{s})$	砕波後 $K_x(\text{m}^2/\text{s})$
Wave1	0°	2波目の押し	0.00002	0.002	0.0006	0.0008
Wave2	0°	1波目の反射波	0.00004	0.0025	0.00015	0.0075
Wave1	45°	2波目の押し	0.00002	0.0028	0.001	0.005
Wave2	45°	1波目の反射波	0.00002	0.0007	0.00015	0.008
Wave1	90°	2波目の押し	0.00002	(0.0015)	0.0002	(0.0005)
Wave2	90°	1波目の反射波	0.00002	0.001	0.0004	(0.013)
Wave4	0°	1波目の押し	0.000005	0.006	0.00007	0.005
Wave4	45°	1波目の押し	0.0	(0.006)	0.00002	(0.13)
Wave4	90°	1波目の押し	0.00002	(0.0055)	0.00007	(0.004)

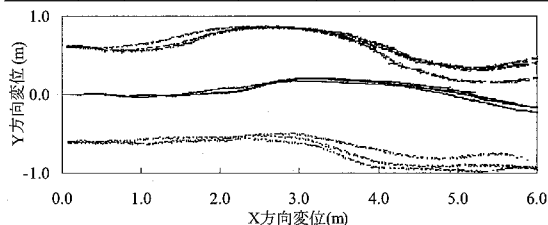


図-12 車両の漂流挙動の一例(Wave4, 初期 C)

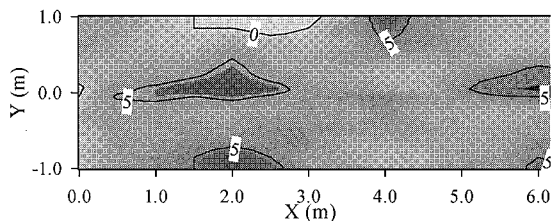


図-13 陸上域の測定結果 (mm)

小さく、 x 方向の拡散係数 K_x の方が、 y 方向 K_y よりも、船体の角度の影響を受けやすいことが分かる。

さらに、後藤ら(1982)と同様に、拡散係数 K を摩擦速度 u_* と水深 h で無次元化すると、 x 方向と y 方向の無次元化拡散係数 (K/u_*h)は、砕波前 0.001 ~ 0.01、砕波後 0.1 ~ 2.0 となった。後藤ら(1982)による 0.032、中川ら(1993)による 0.208 に比べ、本研究による砕波後の値がかなり大きい。流木と船舶の形状や重量の違い等が関係していると考えられるが、今後検討が必要である。

車両の漂流軌跡を図-12に示す。車両の漂流挙動に関しては、実験の観察から、ほぼ津波のフロントに追従して漂流しており、波条件による違いはほとんど見られなかった。これは、陸上域は図-13に示すような地形であり、津波の流れと漂流軌跡が一致したためと考えられる。

3. 漂流挙動計算

実験で得られた拡散係数を考慮した漂流再現計算を実施した。漂流物の挙動計算は藤井ら(2005)の解析手法同様、津波流速計算値からモリソン式による流体力を漂流物に作用させ、並進および回転に関する6自由度の運

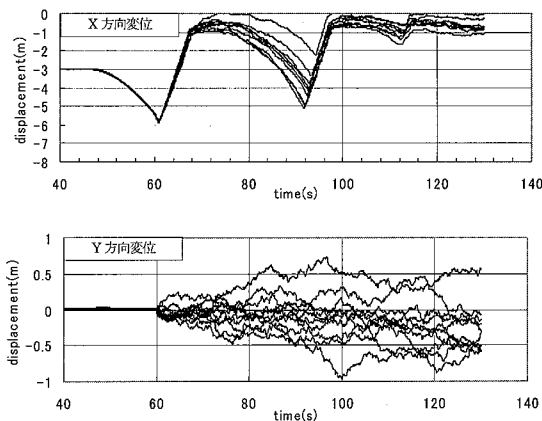


図-14 漂流挙動計算結果(Wave4, 初期 A, 0°)

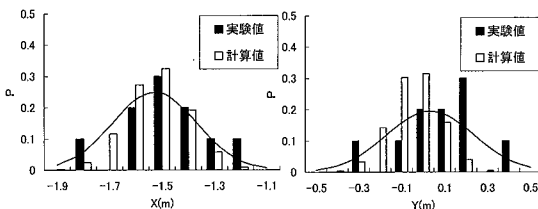


図-15 実験と計算の頻度分布の比較(Wave4, 初期 A, 0°)

動方程式により個別要素法 (DEM) を用いて船舶の漂流挙動を求めた。船舶は、200 個の球形要素を目黒ら (1998) の間隙パネで連結することによりモデル化した。

津波数値計算の支配方程式は、Madsen-Sorensen の式 (Madsen et al, 1992) とし、さらに砕波による運動量拡散項を導入した佐藤 (1995) のモデルを加えた。砕波判定には流速波速比を用い 0.7 とした。計算方法は、岩瀬ら (2001) のスタッガード格子による二段階混合差分法を用いた。

漂流物の移動位置は、DEM による漂流物の確定論的な位置と後藤ら (1982) と同様に拡散による変動量との和として評価した。x 方向と y 方向の拡散係数は同じとし、砕波前の無次元拡散係数を 0.001、砕波後の無次元拡散係数を 0.8 とした。乱数発生により拡散を考慮した漂流計算結果 (10 回試行) を図-14 に示す。60 ~ 68 秒では x 方向に比べ y 方向のばらつきが大きく、その後さらにばらつく様子が再現できている。

図-9 の 68 秒の図に漂流計算結果を追加した頻度分布の比較を図-15 に示す。ただし、x 方向の漂流平均値は実験が -1.5 m、計算が -0.6 m と計算の方が大きく漂流しているため、計算の平均を実験に合わせて分布を図化した。計算のばらつきが小さい傾向であるが、分布の傾向は表せている。ただし、計算と実験の x 方向の漂流平均値が異なるため、決定論的モデルに対する検討も必要と考える。

4. 漂流挙動の評価

本研究およびこれまでの著者らの検討結果を踏まえ、津波による漂流物挙動の評価方法およびその手順をまとめて以下に示す。

- ① 検討地点に対して支配的な影響を与える津波を選定する。
- ② 漂流挙動の数値計算には藤井ら (2005) の解析手法を用いる。
- ③ 砕波判定を行い、砕波前は流況場に従うとともに、砕波後は本検討で得られた拡散係数を与えることにより漂流挙動変動性を評価する。
- ④ 漂流物による衝突力は池谷ら (2006) が提案した手法を用いて評価する。

5. おわりに

漂流挙動の変動程度を評価することを目的として、津波の場の再現性に関する実験と漂流挙動の変動性に関する実験を実施した。その結果、漂流挙動に大きな変動性を与える要因としては、砕波した波の乱れ成分が大きく影響していることがわかった。また、砕波前後の拡散係数を算出し、それを考慮した漂流数値計算を行なった。そして、漂流物挙動を評価するための一通りの手順を提案した。

しかし、今回の実験では頻度が少ないこと、漂流物の初期条件 (初期角度、初期位置) の変動性、回転に対するばらつき、他の漂流物への適用等、今後現地へ適用していく上で取り組むべき課題も多く残されている。これらについては今後の課題として検討を進めていきたい。

参考文献

- 岩瀬浩之・深澤雅人・後藤智明 (2001): ソリトン分裂波の砕波変形に関する水理実験と数値計算, 海岸工学論文集, 第 48 巻, pp. 306-310.
- 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.
- 後藤智明・佐々木順次・首藤伸夫 (1982): 津波による木材の流動, 第 29 回海岸工学講演会論文集, pp. 491-495.
- 佐藤慎司 (1995): 波の分裂と砕波を考慮した津波の数値計算, 海岸工学論文集, 第 42 巻, pp. 376-380.
- 中川 一・高橋 保・池口正晃 (1993): 洪水氾濫に伴う流木群の拡散に関する研究, 水工学論文集, 第 37 巻, pp. 379-384.
- 藤井直樹・大森政則・池谷 毅・朝倉良介・武田智吉・柳沢賢 (2005): 港湾における津波漂流物の数値解析, 海岸工学論文集, 第 52 巻, pp. 296-300.
- 目黒公郎 (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, pp. 409-468.
- Madsen, P. A. and Sorensen O. R. (1992): A new form of the Boussinesq equations with improved linear dispersion characteristics, Part 2, A slowly-varying bathymetry, Coastal Eng., Vol. 18, pp. 183-204.