

津波によるコンテナの漂流・衝突シミュレーションと衝突力の評価

Simulation Model for Drift Behavior of Container due to Tsunami and Collision Force

熊谷兼太郎¹・小田勝也²・藤井直樹³

Kentaro KUMAGAI, Katsuya ODA and Naoki FUJII

There are high risks that tsunamis may cause containers stored in ports to drift into sea/land areas. In this study, a simulation model for container drift behavior was constructed to enable accurate prediction of the drift behavior of containers and its collision force. The applicability of the model was confirmed by calculations reproducing previous container drift experiments. The results showed that it is possible to reproduce the collision force when containers drift and collide with walls at the back of the container storage area due to differences in the container weight, container length and rigidity of the wall for the supercritical flows on an apron.

1. はじめに

港湾は、津波により漂流する危険性の高いコンテナ等の貨物を多数、蔵置している。津波によりコンテナは陸域方向または海域方向に漂流する。例えば、ふ頭のエプロン上に蔵置されたコンテナが陸域方向に漂流し、港湾と背後地域との境界にある防潮施設に衝突し破壊した場合に大きな被害が発生する。こうした津波漂流物対策のため、津波によるコンテナの漂流・衝突シミュレーションを行い、コンテナが防潮施設等へ与える衝突力を的確に評価する必要がある。さらにその結果をふまえ、津波による浸水の影響の小さい場所への貨物蔵置、流出防止柵の設計・設置、防潮施設の補強等を講じる必要がある。

そこで、本研究では、津波によるコンテナの漂流・衝突シミュレーションモデルについて検討するとともに、同モデルを用いてエプロン上のコンテナの漂流・衝突シミュレーションを行い、衝突力を試算して、既往の実験結果との比較により評価を行った。

漂流物の挙動に関する既往の検討は、解析的手法としては、平面 2 次元場の流れによる抗力及び慣性力を考慮した既往の船舶及び流木に関する検討が多数ある。コンテナを対象としたものでは、Daniel ら (2002) により広領域の海洋における風を外力として漂流するコンテナについての検討があるが、津波時の流れを対象にしたものではなく、また、海洋に接触物がない条件であり接触計算は行っていない。漂流物と構造物、あるいは、漂流物同士の接触という点については、山口 (2001) が海氷について接触や衝突を考慮し個別要素法 (DEM: Distinct Element Method) とのハイブリッドモデルを提案

している手法が参考となる。

実験的手法としては、水谷ら (2005, 2006) が模型水槽により港湾ふ頭のエプロンに蔵置されたコンテナの漂流挙動・衝突力について詳細に実験を行っている。

そこで、著者ら (2006) はこれまで、水深方向に積分した非線形長波理論式及び非線形分散波理論式により海域から遡上域までの津波計算を行い、個別要素法を用いてコンテナを表現し、コンテナに作用する抗力、慣性力等を算定して、コンテナの漂流挙動のシミュレーションを実施してきた。その際、固定壁にコンテナが衝突する場合の衝突力についても試算した。しかし実際には、被衝突物 (防潮施設) の材質・変形によっても衝突力は変化する。そこで今回、コンテナだけでなく被衝突物についても個別要素法で表現し (図-1)、被衝突物の材質・変形を考慮したコンテナの漂流・衝突に関する既往の実験の再現計算を行った。そして、実験と比較することにより、被衝突物の材質・変形が衝突力の大きさや衝突継続時間 (衝突から衝突力が最大値までの時間) に及ぼす

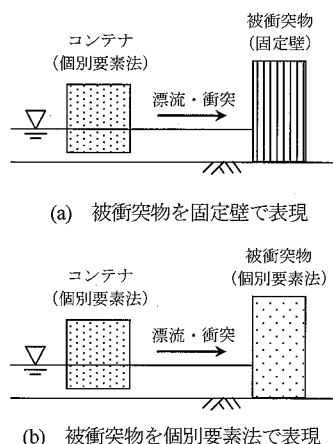


図-1 被撞物の表現方法

1 正会員 工修 国土交通省国土技術政策総合研究所
2 正会員 工修 国土交通省国土技術政策総合研究所
3 正会員 東電設計株式会社

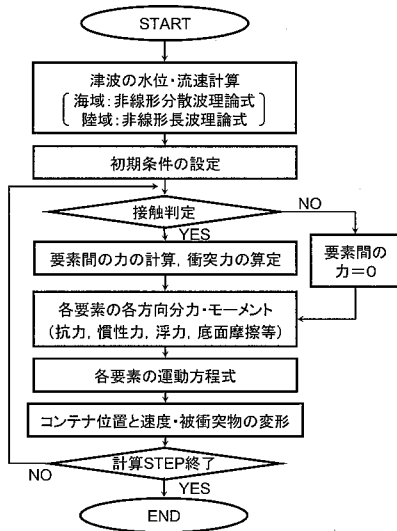


図-2 シミュレーションモデルの概要

影響を検討した。図-2 にシミュレーションモデルの概要を示す。

2. 漂流・衝突シミュレーションと衝突力の評価

(1) 対象とする実験

水谷ら (2006) による、港湾ふ頭を想定した平面波浪水槽に設置したエプロン模型の水理模型実験（縮尺 1/75）を対象に、再現計算を行った。水槽・エプロン模型の形状及び波浪条件をそれぞれ図-3 及び表-1 に示す。

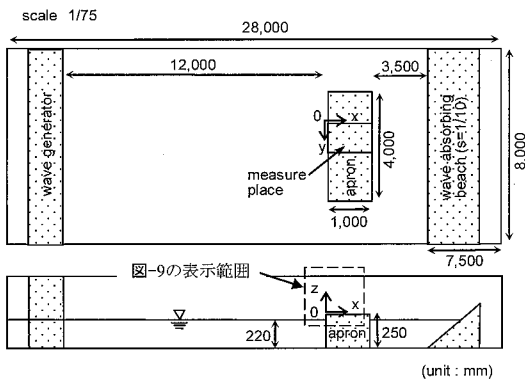
図-3 水槽・エプロン模型の形状
(水谷ら(2006)をもとに作成)

表-1 実験波浪条件

No.	波 形	T(s)	H(m)	gT^2 (m)
Case2	孤立波	3.0	0.038	88.2
Case5	孤立波	2.0	0.068	39.2
Case6	孤立波	2.0	0.060	39.2
Case7	孤立波	2.0	0.050	39.2

(2) 遡上波の計算

a) 津波計算モデル

津波計算は解析対象領域を遡上域と海域とに分け実施した。津波遡上計算は、後藤・小川 (1982) と同様の非線形長波理論方程式を用いた。基礎方程式を式 (1) ~ (3) に示す。

$$(\text{連続式}) \quad \frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{\partial M}{\partial x} + \frac{\partial N}{\partial y} = 0 \quad (1)$$

(運動方程式)

$$\frac{\partial M}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{M^2}{D} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{MN}{D} \right) + gD \frac{\partial \eta}{\partial x} + \frac{gn^2}{D^{7/3}} M \sqrt{M^2 + N^2} = 0 \quad (2)$$

$$\frac{\partial N}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{MN}{D} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{N^2}{D} \right) + gD \frac{\partial \eta}{\partial y} + \frac{gn^2}{D^{7/3}} N \sqrt{M^2 + N^2} = 0 \quad (3)$$

海域を対象とした津波計算は以下に示す Peregrine 形式の分散項を考慮した基礎方程式により行った。非線形分散波理論式を解く手法は、ADI法を用いた。そして、津波が遡上すると、リーブフロッグ法により行った。

$$(\text{連続式}) \quad \frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{\partial M}{\partial x} + \frac{\partial N}{\partial y} = 0 \quad (4)$$

(運動方程式)

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial M}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{M^2}{D} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{MN}{D} \right) + gD \frac{\partial \eta}{\partial x} + \frac{gn^2}{D^{7/3}} M \sqrt{M^2 + N^2} &= \frac{h^2}{3} \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{\partial^2 M}{\partial t \partial x} + \frac{\partial^2 N}{\partial t \partial y} \right) \\ M \sqrt{M^2 + N^2} &= \frac{h^2}{3} \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{\partial^2 M}{\partial t \partial x} + \frac{\partial^2 N}{\partial t \partial y} \right) \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial N}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{NM}{D} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{N^2}{D} \right) + gD \frac{\partial \eta}{\partial y} + \frac{gn^2}{D^{7/3}} N \sqrt{M^2 + N^2} &= \frac{h^2}{3} \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{\partial^2 M}{\partial t \partial x} + \frac{\partial^2 N}{\partial t \partial y} \right) \\ N \sqrt{M^2 + N^2} &= \frac{h^2}{3} \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{\partial^2 M}{\partial t \partial x} + \frac{\partial^2 N}{\partial t \partial y} \right) \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

ここに、 t : 時間、 x, y : 平面座標、 η : 静水面から鉛直上方にとった水位変動量、 M : x 方向の線流量、 N : y 方向の線流量、 h : 静水深、 D : 全水深 ($D = h + \eta$)、 g : 重力加速度、 n : マニングの粗度係数である。

b) 遡上水位及び流速の計算結果

実験において造波板から 6 m 離れた地点の海域で計測された水位データを、計算の沖側境界の入射波形とし、

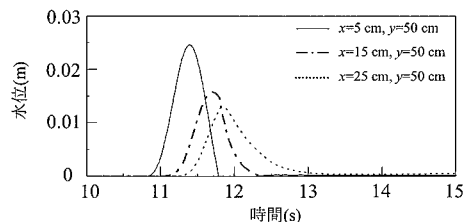


図-4 遡上水位の計算結果 (case2)

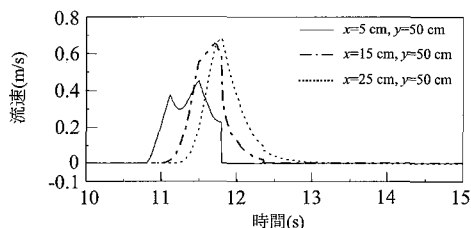


図-5 流速の計算結果 (case2)

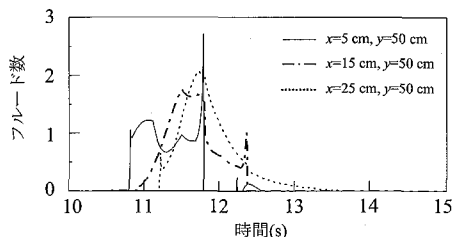


図-6 フルード数の計算結果 (case2)

沖側境界からエプロン上流側端までの海域 6 m とエプロン上 1 m を対象に計算した。図-4、図-5 及び図-6 に、Case2 の遡上水位、流速の x 方向成分及びフルード数の計算結果をそれぞれ示す。なお、フルード数は水深平均流速を用いて算定した。また、図中の時間は沖側境界に津波が到達した時刻以後の経過時間である（以後同じ）。

遡上水位は最大で 13 ~ 25 mm 程度となった。流速の x 方向成分は、最大で 0.5 ~ 0.7 m/s 程度となった。遡上水位が十分に大きいときのフルード数は 1 ~ 2 程度となった。

(3) コンテナ及び被衝突物（受圧板）のモデルと漂流・衝突の計算手法

コンテナは、個別要素法により球形要素及びそれらをつなぐバネ、ダッシュポッド等により縮尺 1/75 で表現する。20 フィートコンテナ、40 フィートコンテナをそれぞれ $2 \times 2 \times 5$ 個、 $2 \times 2 \times 10$ 個の球形要素で表現した（図-7）。球形要素の半径はいずれも 8.75 mm である。形状及び重量は、実験で用いたものにあわせて空コンテナと満載コンテナを設定した。表-2 に示す。

コンテナの蔵置位置（初期位置）は、エプロンの上流

表-2 コンテナの諸元

名称	重量(N)	長さ(m)	幅(m)	高さ(m)
20 フィート空コンテナ	0.15	0.080	0.032	0.035
20 フィート満載コンテナ	0.51	0.080	0.032	0.035
40 フィート空コンテナ	0.29	0.163	0.032	0.035
40 フィート満載コンテナ	0.76	0.163	0.032	0.035

側端から $x=115$ mm とする。実験では、コンテナの下流側 53 mm に、被衝突物として、上端が固定された板状の受圧板を設置し、下端にコンテナが衝突する際の衝突力を測定している。受圧板は剛性を変化させるため厚さを 2, 3, 4 mm としている。そこで、これを個別要素法により一列 $\times 6$ 個の球形要素で表現した（図-8、図-9）。受圧板は、コンテナと同様に、球形要素同士がばね、ダッシュポッド等で接続されている。受圧板の剛性の違いは、ばね定数及び減衰定数を少しずつ変化させたケースを設定し表現した（表-3）。こうして、(2) b) から得られる流れの計算結果を用いて、コンテナの各球形要素に作用する抗力及び慣性力を算定する。抗力及び慣性力は式 (7) に示すモリソン式を用いた。

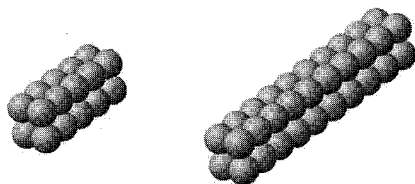


図-7 コンテナのモデル

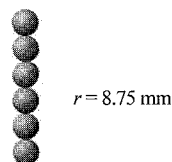


図-8 受圧板のモデル

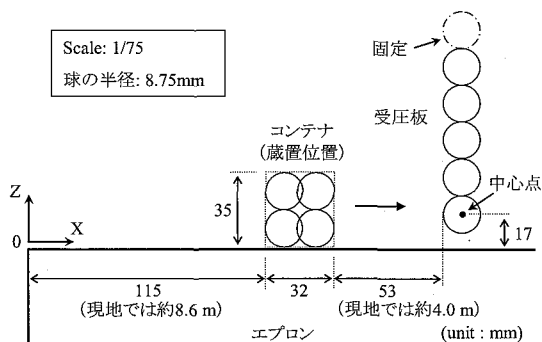


図-9 コンテナと受圧板の配置

表-3 ばね定数及び減衰定数

		設定 1	設定 2	設定 3	設定 4	設定 5
ばね定数 (N/m)	法線方向	1.0×10^3	1.0×10^4	1.0×10^5	1.0×10^6	1.0×10^7
	接線方向	2.5×10^2	2.5×10^3	2.5×10^4	2.5×10^5	2.5×10^6
減衰定数 (N·s/m)	法線方向	3.58×10	1.13×10^2	3.58×10^2	1.13×10^3	3.58×10^3
	接線方向	1.79×10	5.66×10	1.79×10^2	5.66×10^2	1.79×10^3

$$F = C_D \frac{1}{2} \rho A u |u| + C_M \rho V \frac{du}{dt} \dots\dots\dots (7)$$

ここで、 ρ は密度、 u は球形要素中心位置の流速、 C_D は抗力係数、 C_M は付加質量係数、 A 、 V はそれぞれ水中で占める投影面積及び体積である。さらに、浮力、底面との摩擦力等を考慮して各球形要素の運動方程式を解き、コンテナの変位を求めた。受圧板と接触すると、接触した球形要素同士に働く力を衝突力として求めた。

(4) 衝突力の計算結果

図-10 に、case2 で 20 フィート満載コンテナが受圧板の最下端に衝突した場合の、受圧板下端の x 座標の時間変化を示す。受圧板下端とは最下端の球形要素の中心点である（以後同じ）。受圧板の下端は x の正方向（コンテナが漂流する方向）に変位し、コンテナが受圧板と接触して止まるとそれ以上変位せず静止する。また、ばね定数及び減衰定数が最も小さい表-3 の設定 1 で大きく変位し、最も大きい設定 5 では変位が小さい。 y 方向及び z 方向の変位は x 方向と比較すると小さかった。

図-11 に、case7 で 20 フィート満載コンテナが衝突した場合の、受圧板下端の加速度の x 方向及び z 方向成分の時間変化を示す。コンテナと受圧板下端とが 10.245 s 前後に衝突し x 、 z の正方向の加速度が生じた後、値は小さいが x の負方向の加速度が 0.02 s 程度継続して生じている。その後、10.264 s 前後に継続時間が小さい x 、 z の正方向の加速度が現れているが、この原因はコンテナの軸方向の回転によるコンテナとエプロンとの接触の

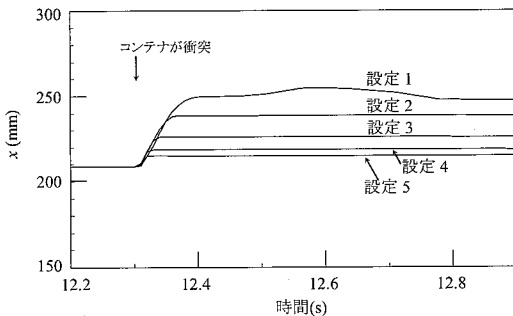


図-10 受圧板下端の x 座標の時間変化 (case2)

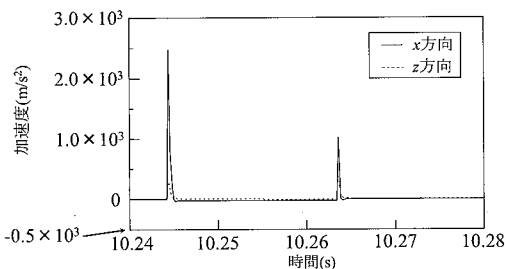


図-11 受圧板下端の加速度の時間変化 (case7)

影響、受圧板とコンテナの移動速度が異なるためいちど離れたコンテナと受圧板が再度衝突する現象による影響等の可能性が考えられ、今後詳細な検討が必要である。なお、 y 方向の加速度は小さかった。

ばね定数、減衰定数（要素間接線方向）が 2.5×10^5 N/m、 8.95×10^2 N・s/m の場合、 x 方向の最大変位量が 10.2 mm、衝突力の最大値が 3.15 N、衝突継続時間が 0.4×10^{-3} s となった。実験では、ほぼ同じ条件で衝突力の最大値は約 0.9 ～ 4.6 N の範囲であり、計算結果と同程度である。ただし、実験では、衝突継続時間は約 $0.7 \times 10^{-2} \sim 3.1 \times 10^{-2}$ s であり、それと比較するとこの場合の衝突継続時間の計算結果は小さい。今後、実験での受圧板の変形状況等をふまえ、ばね定数等の設定を詳細に検討する必要がある。このように、衝突継続時間はやや小さいが、被衝突物の材質・変形を考慮して衝突力の最大値について算定できることが分かった。

(5) 受圧板厚さ変化を形状剛性変化で表現する手法

伯野(1997)によれば、個別要素法を用いた数値シミュレーションを実施するにあたって、解析を安定させるため適切に計算時間ステップ Δt を設定する必要がある。物体中の波動伝搬速度を考慮して以下の決定法を示している。

$$\Delta t < 2\sqrt{m/k} \dots\dots\dots (8)$$

ただし、 m は各要素の代表質量、 k は代表ばね定数である。すなわち、コンテナまたは被衝突物が小さな部材であって形状を詳細に表現するために球形要素の半径が小さい場合、密度の小さい部材を表現する場合等は、計算時間ステップを小さくする必要があり、その結果、計算時間が非常に長くなることとなる。そこで、コンテナは個別要素法を用いて表現するが、受圧板は受圧板全体を一体の片持ち梁と考え、受圧板厚さの変化を梁の形状剛性の変化とする手法についても検討し計算を行った（図-12）。

受圧板の厚さ a を変化させると形状剛性のばね係数 k が変化するので、この系に対しコンテナを漂流・衝突させる計算を行った。表-4 に、計算による受圧板厚さと衝突力の最大値、衝突継続時間及び力積を示す。ただし、

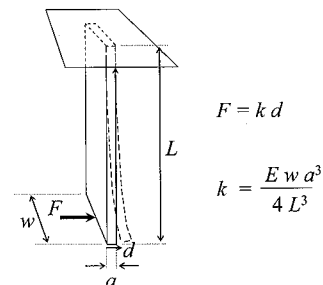


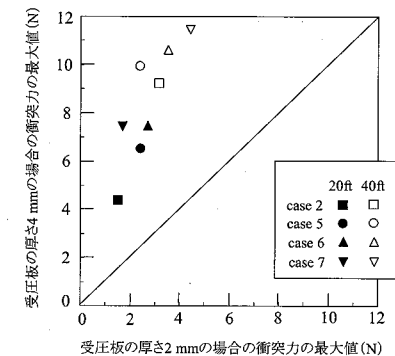
図-12 片持ち梁として考えた受圧板

モリソン式において、抗力係数 $C_D=1.0$ 、 C_M はゼロとした。受圧板厚さを大きくすると（形状剛性を大きくすると）、衝突力の最大値が大きくなる一方、衝突継続時間は短くなった。これは既往の実験結果の傾向が表現できている。そこで、コンテナ長さや波条件を変化させた漂流・衝突計算を8ケース行った。流れは表-1の4ケース、受圧板は厚さを2mm, 4mmに変化させた。図-13に、それぞれの衝突力及び力積（衝突力の最大値と衝突継続時間の積）の計算結果を示した。衝突力の最大値は、受圧板厚さ4mmの場合が2mmの場合よりも大きい。また、40フィートコンテナの場合が20フィートの場合よりも衝突力が大きくなった。力積は、ばらつきはあるものの、受圧板厚さの影響は少ない。また、40フィートコンテナの場合が20フィートの場合よりも力積が大きくなった。

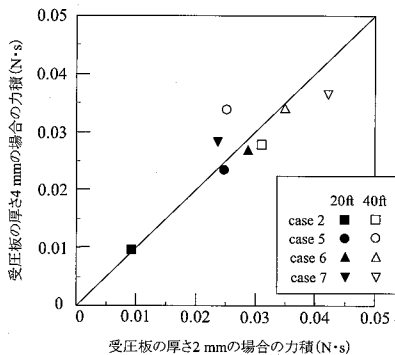
表-4 衝突力の最大値、衝突継続時間及び力積

$a(\text{mm})$	$k(\text{N/m})$	$F_{\max}(\text{N})$	$dt(\text{s})$	$F_{\max} dt(\text{N}\cdot\text{s})$
2	246.9	2.54	0.0106	2.69×10^{-2}
3	933.3	4.60	0.0054	2.48×10^{-2}
4	1975.3	6.98	0.0034	2.37×10^{-2}

* Container Length : 20 feet $T=6.0\text{ s}$ $H=6.9\text{ cm}$



(a) 衝突力の最大値



(b) 力積

図-13 受圧板厚さと衝突力・力積との関係

3. 本研究のまとめ

本研究の結論は以下のとおり。

- 1) 津波によるコンテナの漂流挙動シミュレーションのモデル化を行った。本モデルは、津波漂流物に作用する抗力及び慣性力を評価し、津波漂流物に関する運動方程式を解くことにより、漂流挙動を計算する。また、個別要素法 (DEM) を用いてコンテナ及び被衝突物 (防潮施設等の構造物) を表現しており、津波漂流物が構造物に衝突した場合等を想定した衝突力を計算できる。
- 2) 1) のモデルを利用して、エプロン上に蔵置されたコンテナについて、模型水路における既往の漂流実験の再現計算を行った。その結果、衝突継続時間 (衝突から衝突力が最大値までの時間) はやや小さいが、被衝突物の材質・変形を考慮しつつ、実験と同程度の衝突力の最大値を算定できた。
- 3) 被衝突物を一体の梁として考える手法について検討し、受圧板厚さの変化と衝突力の最大値、衝突継続時間の関係を表現した。

謝辞：本研究にあたり、名古屋大学大学院水谷法美教授、国土交通省中部地方整備局をはじめ各位のご協力を頂きました。ここに記して謝意を表します。

参考文献

- 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。
- 伯野元彦 (1997)：破壊のシミュレーションー拡張個別要素法で破壊を追うー，森北出版株式会社，pp. 50。
- 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。
- 水谷法美・白石和睦・宇佐美敦浩・宮島正悟・富田孝史 (2006)：エプロン上のコンテナへの津波の作用と漂流衝突力に関する実験的研究，海岸工学論文集，第53巻，pp. 791-795。
- 水谷法美・高木祐介・白石和睦・宮島正悟・富田孝史 (2005)：エプ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，pp. 741-745。
- 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。
- 山口 一 (2001)：海水変動の数値予測，ながれ，No. 20，pp. 295-303。
- Daniel P., J. Gwenaële, C. Fanch, Y. Landau and E. Loiseau (2002)：Drift Modeling of Cargo Containers, Spill Science & Technology Bulletin, Vol. 7, No. 5-6, pp. 279-288。