



Title	港湾における津波によるコンテナの流動とそれに伴う被害の評価手法に関する研究
Author(s)	熊谷, 兼太郎
Citation	大阪大学, 2010, 博士論文
Version Type	VoR
URL	https://hdl.handle.net/11094/23472
rights	
Note	

The University of Osaka Institutional Knowledge Archive : OUKA

<https://ir.library.osaka-u.ac.jp/>

The University of Osaka

工 9603

港湾における津波によるコンテナの流動とそれに伴う被害の
評価手法に関する研究

平成 21 年 12 月

熊 谷 兼 太 郎

2
6
21

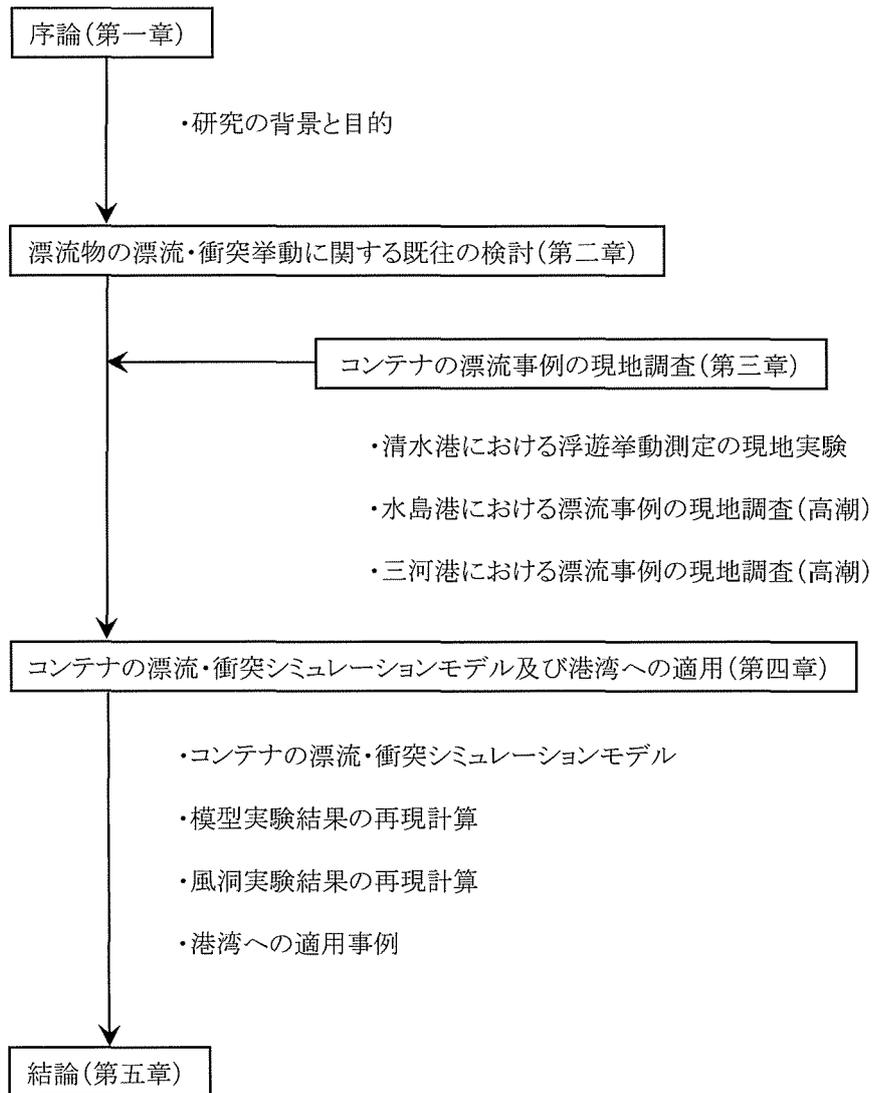
港湾における津波によるコンテナの流動とそれに伴う被害の
評価手法に関する研究

平成 21 年 12 月

熊 谷 兼 太 郎

研究のフロー

(港湾における津波によるコンテナの流動とそれに伴う被害の評価手法に関する研究)



目 次

1. 序論

1. 1	津波の発生状況	1
1. 2	港湾における津波被害	2
1. 2. 1	港湾における津波被害	2
1. 2. 2	港湾における津波対策の現状	3
1. 3	津波被害の推定手法	3
1. 3. 1	地震断層による海面の初期変位量の推定	3
1. 3. 2	津波計算	4
1. 3. 3	地域の資産額と津波被害額の推計	6
1. 3. 4	津波対策	7
1. 4	本研究の目的	8
1. 5	研究の構成	9
	1章の参考文献	9

2. 漂流物の漂流・衝突挙動に関する既往の検討

2. 1	漂流物の漂流挙動に関する既往の検討	11
2. 1. 1	流木の漂流挙動	11
2. 1. 2	船舶・浮体構造物の漂流挙動	11
2. 1. 3	コンテナの漂流挙動	11
2. 2	津波漂流物の衝突挙動に関する既往の検討	12
2. 2. 1	衝撃解析コード	12
2. 2. 2	衝突力を測定する実験	14
2. 3	漂流物の漂流・衝突挙動の解析における課題	14
2. 4	本章のまとめ	15
	2章の参考文献	15

3. コンテナ漂流事例の現地調査

3. 1	清水港におけるコンテナ浮遊挙動測定の実験	17
3. 1. 1	背景と目的	17
3. 1. 2	実験概要と測定方法	17
3. 1. 3	実験結果	18

3. 2	水島港におけるコンテナ漂流事例の現地調査	21
3. 2. 1	漂流挙動	21
3. 2. 2	衝突挙動	22
3. 2. 3	回収方法	22
3. 3	三河港におけるコンテナ漂流事例の現地調査	23
3. 3. 1	漂流挙動	23
3. 3. 2	衝突挙動	25
3. 3	本章のまとめ	25
	3章の参考文献	25

4. コンテナの漂流・衝突シミュレーションモデル及び港湾への適用

4. 1	コンテナの漂流・衝突シミュレーションモデルの検討	26
4. 1. 1	拡張個別要素法	26
4. 1. 2	基礎としたプログラム	27
4. 1. 3	本研究で行ったプログラムの修正・拡張	27
4. 1. 4	コンテナの漂流・衝突シミュレーションモデル	30
4. 2	模型実験の結果の再現計算	32
4. 2. 1	対象とした実験	32
4. 2. 2	再現計算	33
4. 2. 3	結果の検討	38
4. 3	港湾におけるコンテナ漂流・衝突のシミュレーション	39
4. 3. 1	津波計算	39
4. 3. 2	漂流計算（標準ケース）	44
4. 3. 3	漂流計算（多段積みケース）	53
4. 3. 4	風洞実験と漂流計算（風ありケース）	57
4. 3. 5	衝突力の評価	71
4. 3. 6	計算に必要な時間	78
4. 3. 7	今後の課題	78
4. 4	本章のまとめ	79
	4章の参考文献	79

5. 結論

5. 1	結論	81
5. 2	今後の課題	82

附 錄

謝 辭

1. 序論

1. 1 津波の発生状況

わが国において過去に発生した津波は、国立天文台（2008）の「日本付近の主な被害地震年代表」及び渡辺（1998）の「日本被害津波総覧」により総覧できる。

表-1.1.1 に、わが国において昭和（1925 年）以降に発生した主な津波の被害を示す。これは、Iida（1958）による「津波の規模階級」が 2 以上である事象について、国立天文台の表より抽出し、被害について主として渡辺（1998）を参考として整理したものである。それによると、被害階級 2 以上の津波は、過去約 80 年間に 13 回発生している。これは、約 6 年に 1 回の発生頻度である。なお、規模階級とは、沿岸での津波高さ、津波が影響した地理的範囲、被害等に基づき-1～4 の 6 段階で定義されているもので、例えば、規模階級 2 は、海岸での津波高さ（平均海面からの振幅）が 4～6m で被害程度は「若干の内陸までの被害や人的損失」となっており、比較的規模の大きな津波である。被害として、人的被害に加えて多数の家屋や船舶が津波により流出・破損する被害等が発生している。

それぞれの津波の詳細は、自治体が編纂した津波誌（例えば、海南町（1986））、個人の日記（例えば、田井（2006））、研究者による被害調査報告、郷土史家の著作（例えば、千葉県郷土史研究連絡協議会（1984））等として記録が残されている。

表-1.1.1 わが国において昭和以降に発生した主な津波の被害

No.	津波を引き起こした地震の名称	年	津波の規模階級 *1	最大震度	死者・行方不明者数(人) *2	流失家屋(棟)	浸水家屋(棟)	流失・破損船舶(艘)	被害の出典
1	三陸沖地震	1933	3	5	3,064	4,034	4,018	8,078	渡辺(1998)
2	積丹半島沖地震	1940	2	4	10	20	-	1,256	渡辺(1998)
3	東南海地震	1944	3	6	1,223	3,129	-	-	国立天文台(2007)
4	南海地震	1946	3	5	1,432	1,451	33,093	2,991	渡辺(1998)
5	十勝沖地震	1952	2	5	33	328	-	451	渡辺(1998)
6	チリ地震	1960	4	-	142	1,259	38,503	2,280	渡辺(1998)
7	択捉島における地震	1963	2	-	-	-	-	-	渡辺(1998)
8	新潟地震	1964	2	5	26	-	15,297	29	渡辺(1998)
9	1968年十勝沖地震	1968	2	5	52	-	529	253	渡辺(1998)
10	昭和58年日本海中部地震	1983	2～3	5	104	52	1,040	1,893	渡辺(1998), 国立天文台(2007)
11	平成5年北海道南西沖地震	1993	3	5	230	-	455	1,729	渡辺(1998)
12	平成6年北海道東方沖地震	1994	2	6	10	-	189	104	渡辺(1998)
13	平成15年十勝沖地震	2003	2	6弱	2	-	-	-	国立天文台(2007)

*1 「津波の規模階級」はIida(1958)によるもの。

*2 死者・行方不明者数には、備考欄に特に明記したものを以外は、津波の被害だけでなく地震の被害を含んでいる。

地震調査研究推進本部地震調査委員会の予測（2008）によれば、2008 年以後 30 年間の予想した地震規模の地震発生確率が 50%を越えているものは千島海溝沿いの地震、三陸沖から房総沖にかけての地震、相模トラフ沿いの地震、南海トラフの地震（東海地震、東南海地震及び南海地震）、日向灘の地震である。このように、大規模地震及びそれに伴う津波発生は、特に北海道から九州東岸にかけての太平洋側の地域で懸念されているといえる。

1. 2 港湾における津波被害

1. 2. 1 港湾における津波被害

戦後（1945年以降）に発生した各地域で代表的な1津波を対象として、港湾と背後地域の津波被害を整理した。対象は、表-1.1.1の津波のうち、No.4, 8, 10, 11及び13の計5津波である。図-1.2.1.1に、各地震の震源の位置図を示す。

表-1.2.1.1に、5津波による主な津波被害を港湾地域及び背後地域に分けて示す。被害は「浸水被害」、「流出被害」、「土木構造物の被害」、「人的被害」（以上を津波による直接被害とする）及び「間接被害」に区分した。

「浸水被害」は、上屋等の港湾施設、漁港施設、家屋、工場等が津波で浸水することに伴う被害である。

「流出被害」は、原木、船舶、コンテナ、危険物等が海域または陸域へ流出し失われることと、それらが漂流・衝突することに伴う被害である。

「土木構造物の被害」は防波堤、海岸堤防、護岸等の堤体が衝撃的な波力で損壊する被害である。

「人的被害」は、港湾労働者、来訪者、住民等が津波による浸水で死傷する被害である。

「間接被害」とは、港湾施設の損壊、漂流物除去作業等で人流・物流が途絶することによる操業停止や遠隔地の代替港湾を經由する横持ち輸送等により発生する費用である。

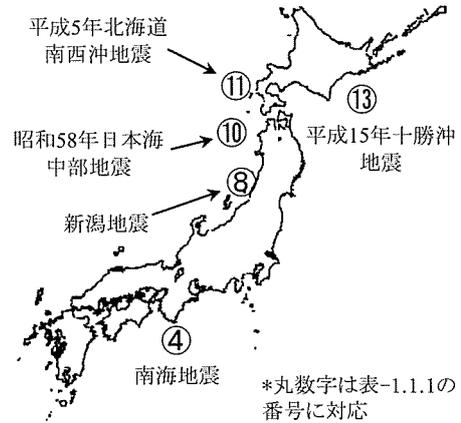


表-1.2.1.1 港湾における主な津波被害

名称	港湾地域の被害	背後地域の被害
昭和南海地震津波		【流出被害】 漁船の漂流による家屋の被害
新潟地震津波	【浸水被害】 上屋の浸水 排水ポンプ機能停止による浸水被害の拡大 【流出被害】 原木の流出 石油の流出 【間接被害】 漂流物除去作業、深浅測量 入港禁止措置による物流機能等への影響	【浸水被害】 市街地の湛水 【間接被害】 低地事業所の長期浸水による操業停止 生産能力の低下
日本海中部地震津波	【浸水被害】 漁業共同利用施設の浸水 【流出被害】 原木の流出 漁船、漁具、養殖施設の流出・漂流・衝突 【土木構造物の被害】 護岸、波除堤及び導流堤の損壊 【人的被害】 港湾労働者、来訪者等の死亡・傷害 【間接被害】 漂流物除去作業 入港禁止措置による物流機能等への影響	【浸水被害】 臨海部工場の浸水 住居の浸水
平成5年北海道南西沖地震津波	【浸水被害】 フェリーターミナルの浸水 漁業共同利用施設の破壊 【流出被害】 自動車の流出・転落 漁船、漁具及び漁網の流出・打上げ・破損 家屋残骸物の海域・泊地への流出 【土木構造物の被害】 防波堤ケーソンの飛散、防潮堤の倒壊 護岸堤体の移動 【人的被害】 漁業者等の死亡・傷害 【間接被害】 漂流物によるフェリー岸壁等の使用不能	【浸水被害】 家屋等の火災の発生 【流出被害】 漁船、箱型作業船等の漂流による家屋の破壊 【人的被害】 住民の死亡・傷害
平成15年十勝沖地震津波	【浸水被害】 フェリーターミナル、港湾管理事務所、漁協事務所及び港運事務所の浸水 倉庫及び荷役機械の浸水 セメント圧送パイプの浸水・荷役停止 【流出被害】 自動車、空コンテナ及びゴミのふ頭用地への流出及び泊地への流出・漂流 漁船の打上げ	

表より、昭和南海地震津波を除いて、港湾地域では浸水被害及び流出・漂流被害が主として報告されている。また、津波波力による施設被害、人的被害及び間接被害は、生じている場合と生じていない場合とがある。

1. 2. 2 港湾における津波対策の現状

港湾は、海上交通と陸上交通をつなぐ物流及び人流の結節点であり、港湾及びその背後地域には人口及び資産が集積している。また、災害時は、基幹的な陸上交通が途絶した場合にも大量の物資・人員を被災地に搬入・蓄積できる防災空間である。このように、港湾は平常時及び災害時のどちらにおいても、その果たす役割が期待されている。一方、港湾は、荷役の利便性の観点から津波対策がこれまでほとんど講じられていない。すなわち、港湾施設、労働者等を保全するための対策がこれまでほとんどなされていないのが現状である。港湾の陸側には海岸保全施設があるが、あくまで背後地域の家屋、人命等を保全することが主な目的となっている。

したがって、津波被害を予測しそれを低減する対策を講じることにより、災害時の港湾機能の維持を図ることが必要である。そうした観点から、海岸行政を所管する国土交通省河川局及び港湾局では、津波対策検討委員会（委員長：河田恵昭京都大学防災研究所教授（当時））の提言（国土交通省（2005））として、緊急的及び中長期的にわが国の海岸において必要な津波対策についてまとめている。また、国土交通省港湾局（2005）は、「新たな津波防災検討委員会」（委員長：高山知司京都大学防災研究所教授（当時））を開催し、わが国の港湾における津波被害の特性及び対策についてまとめている。

1. 3 津波被害の推定手法

本節では、津波発生から被害推定までの手法、すなわち、地震断層による海面の初期変位の推定方法、津波計算（津波の沿岸域への伝搬と遡上）、沿岸域における浸水被害の算定方法について既往の手法を記述する。

1. 3. 1 地震断層による海面の初期変位量の推定

海底地盤の変動等に起因して生じる津波の発生をモデル化するには、地震による地盤運動を量的に表現する必要がある。これには、一般に断層モデルが用いられる。断層モデルを表現する方法としては、幾何学的特長をあらわす静的パラメータと断層破壊過程をあらわす動的パラメータがあり、これらは地震波の観測結果から推定される。通常、断層の動的影響は津波伝播に与える影響は小さく、静的パラメータから求めた海底地盤の鉛直変動量を水位の鉛直方向の初期変位として与えることが多い。海底地盤の鉛直変動量、すなわち海面の鉛直方向の初期変位 $u(x, y)$ は以下のとおり計算される（多部田（1998））。なお、本項以外では u は流速を表す記号として用いているが、本項では引用文献の記述を参考に変位を表す記号として用いている。

$$u(x, y) = f(x, p) - f(x, p - W) - f(f - L, p) + f(x - L, p - W) \quad (1.3.1.1)$$

$$f(\xi, \eta) = u_{zs} + u_{zd} \quad (1.3.1.2)$$

$$u_{zs} = -\frac{U_s}{2\pi} \left[\frac{\tilde{d}q}{R(R+\eta)} + \frac{q \sin \delta}{R+\eta} + I_1 \sin \delta \right] \quad : \text{strike-slip} \quad (1.3.1.3)$$

$$u_{zd} = -\frac{U_d}{2\pi} \left[\frac{\tilde{d}q}{R(R+\xi)} + \sin \delta \tan^{-1} \frac{\xi \eta}{qR} - I_2 \sin \delta \cos \delta \right] \quad : \text{dip-slip} \quad (1.3.1.4)$$

$$I_1 = \frac{\mu}{\lambda + \mu \cos \delta} \frac{1}{\cos \delta} \left[\ln(R + \tilde{d}) - \sin \delta \ln(R + \eta) \right] \quad (1.3.1.5)$$

$$I_2 = \frac{\mu}{\lambda + \mu \cos \delta} \frac{2}{\cos \delta} \cdot \tan^{-1} \frac{\eta(X + q \cos \delta) + X(R + X) \sin \delta}{\xi(R + X) \cos \delta} \quad (1.3.1.6)$$

ここで、 U_s : 断層面で走向に平行な滑り量、 U_d : 断層面で走向に垂直な滑り量、 δ : 断層面の傾き、 L : 断層面の走向の長さ、 W : 断層面の走向に垂直な長さである。また、

$$p = y \cos \delta + d \sin \delta \quad (1.3.1.7)$$

$$q = y \sin \delta - d \sin \delta \quad (1.3.1.8)$$

$$\tilde{d} = \eta \sin \delta - q \cos \delta \quad (1.3.1.9)$$

$$\tilde{y} = \eta \cos \delta + q \sin \delta \quad (1.3.1.10)$$

$$R^2 = \xi^2 + \tilde{y}^2 + \tilde{d}^2 \quad (1.3.1.11)$$

$$X^2 = \xi^2 + q^2 \quad (1.3.1.12)$$

1. 3. 2 津波計算

ここでは、運輸省港湾技術研究所のプログラムマニュアル (1998)、柴木 (2004) 等を参考に津波計算の手法について簡単に述べる。

・基礎方程式

津波の支配方程式は、連続式と Navier-Stokes の運動方程式である。まず、連続式は、

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (1.3.2.1)$$

ここで、 (x,y,z) は x,y が水平面、 z は平均海面を基準に鉛直上向きの座標軸、 (u,v,w) はそれぞれ (x,y,z) 方向の速度成分である。つぎに、運動方程式は、

$$\frac{du}{dt} = fu - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + A_v \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} + A_h \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) \quad (1.3.2.2)$$

$$\frac{dv}{dt} = -fv - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} + A_v \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} + A_h \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right) \quad (1.3.2.3)$$

$$\frac{dw}{dt} = -g - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} \quad (1.3.2.4)$$

ここで、 ρ は流体の密度、 p は圧力、 f はコリオリ係数（ $f = 2\omega \sin \phi$ 、 ω は地球自転の角速度、 ϕ は緯度）、 A_h 及び A_v 及び A_h はそれぞれ鉛直及び水平渦動粘性係数である。式-1.3.2.1～1.3.2.4を海底 $z=-h$ から海面 $z=\eta$ まで積分すると、水深方向に積分された連続式ならびに運動方程式が得られる。

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{\partial M}{\partial x} + \frac{\partial N}{\partial y} = 0 \quad (1.3.2.5)$$

$$\begin{aligned} & \frac{\partial M}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{M^2}{D} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{MN}{D} \right) \\ & = fM - gD \frac{\partial \eta}{\partial x} - \frac{D}{\rho} \frac{\partial p_0}{\partial x} + \frac{1}{\rho} (\tau_{sx} - \tau_{bx}) + A_h \left(\frac{\partial^2 M}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 M}{\partial y^2} \right) \end{aligned} \quad (1.3.2.6)$$

$$\begin{aligned} & \frac{\partial N}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{MN}{D} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{N^2}{D} \right) \\ & = -fN - gD \frac{\partial \eta}{\partial y} - \frac{D}{\rho} \frac{\partial p_0}{\partial y} + \frac{1}{\rho} (\tau_{sy} - \tau_{by}) + A_h \left(\frac{\partial^2 N}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 N}{\partial y^2} \right) \end{aligned} \quad (1.3.2.7)$$

ここで、 M, N はそれぞれ x, y 方向の流量、 D は $D=h+\eta$ で表わされる全水深、 p_0 は海面の気圧、 τ_s, τ_b はそれぞれ海面せん断応力、底面せん断応力（ x, y の添字は方向を示す）である。なお、導出の詳細は附録-1に示す。

・海面せん断応力及び底面せん断応力

底面せん断応力は、 ρ ：海水の密度（ $1,030 \text{ kg/m}^3$ ）、 g ：重力加速度、 n ：マンニングの粗度係数として以下の式で算定できる。また、海面せん断応力 τ_s は津波計算においては考慮しない。

$$\tau_{bx} = \frac{\rho g n^2}{H^{7/3}} M \sqrt{M^2 + N^2} \quad (1.3.2.8)$$

$$\tau_{by} = \frac{\rho g n^2}{H^{7/3}} N \sqrt{M^2 + N^2} \quad (1.3.2.9)$$

・差分スキーム

線形長波方程式は、空間差分をスタッガード格子により、時間差分をリーブ・フロッグ法により差分化する。この方法の詳細は後藤ら（1982）に記述されており、これにならう。

・境界条件

計算領域の沖側境界から入射する津波については、進行性長波の特性曲線に基づく方法により津波を自由透過させる。外洋の津波伝搬計算と詳細な地形近似が行われる内湾津波計算とに分離して行う場合に、概要の津波伝搬計算の入射波成分を内湾津波計算の沖側境界条件として与え、特性曲線法を用いて、湾内からの反射波を自由透過するような境界処理を行う必要がある。沖側境界で波を強制入力すると、計算領域内からの反射波が沖側境界を自由透過することができなくなるため、強制入力した波形とは異なる別のモードの振動が新たに発生してしまう（入射波のみを考慮する強制境界）。

・遡上境界条件

陸上への遡上は、岩崎ら（1979）の方法を用いる。これは、波先端部での地形を階段状に考え、陸側格子点の地盤高よりも海側格子点の水位が高い場合に、その差を実水深として流

量計算を行う方法である。

- ・越流境界条件

計算領域内の防波堤、堤防等において水位がその天端高を越えた場合は、本間公式を用いて単位幅当たりの越流量を計算する。

- ・計算上の他領域との接続境界条件

津波数値計算プログラムでは、沖合から対象地点沿岸にかけて順次細分化した計算領域を結合して計算を行う。計算格子間隔の細分化は、2分割法と3分割法を用いることができるが、計算格子間隔の異なる領域で水深、水位、及び流量結合して計算する際には、①大格子領域で計算された流量を補完して小領域に与える。②小格子領域で計算された水位のうち大格子領域の中心に相当する位置の値をそのまま大格子領域に与える。位置が一致しない場合は補完して与える、という処理を行う。

1. 3. 3 地域の資産額と津波による被害額の推計

港湾地域の資産額と、津波計算の結果を用いた浸水被害の推計手法の概要を述べる。なお、この手法は国土交通省のマニュアル（案）（2005）の手法を基本的に用い、推計の詳細は国土交通省の調査報告書（2005）及び筆者ら（2005、2006）で示している。

- ・「資産額」の推計

対象とする港湾地域の資産額を推計する。資産額は公共部門と民間部門に分ける。

まず、公共部門は、各施設の建設費や建築年数を個別に把握することが可能なので、各施設の「建設費×残存価格率」（または「施設面積×単位面積あたり建設単価×残存価格率」）の式により個別に算定し、合計する。例えば、ある防波堤の計算時点の資産額は「建設費×残存価格率」として求められる。

次に、民間部門は、対象数が多数で個人情報に属するものもあることから、各家屋や資産の建設費や建築年数を個別に把握することは困難である。そこで、市街地を矩形のメッシュに切り分けて各メッシュの延床面積等をデータ化しているメッシュ統計資料を用い推計する。家屋資産、償却資産及び在庫資産に区分し、計算に必要なデータは港湾施設台帳データベース、港湾統計年報、延床面積100mメッシュデータ、関税統計等から抽出して使用する。

- ・「被害額」の推計

被害は、1. 2. 1項の直接被害と間接被害から構成されるものとする。

まず、直接被害のうち、ここでは浸水被害及び流出被害だけを対象とする。浸水被害が想定される資産と、流出被害が想定される資産とに分類し、それぞれ被害額を計上し、合計金額を直接被害額とした。浸水被害額は、施設位置の浸水深2m未満の場合が0.5、浸水深2m以上の場合が1.0という被害率を設定して、「浸水被害額＝資産額×被害率」とする。流出被害額は、船舶等の海域に係留されている資産については港内水位から被害率を設定し、コンテナ、野積貨物等の陸域に蔵置されている貨物は浸水深が少しでも生じると1.0、自動車は浸水深0.5mで1.0という被害率を設定して、「流出被害額＝資産額×被害率」で算出する。

次に、間接被害額は、陸上輸送費の増加、産業の操業停止、漂流物の回収・処理、レクリエーション施設利用者の減少に要する費用を計上する。

・清水港を対象とした推計事例

清水港を対象とした推計事例（港湾計画で土地利用を定める範囲内が対象，平成16年時点）では，資産額が3,673億円に対して，被害額は1,201億円となった．資産額に対する被害額は32.7%となり，浸水被害，流出被害及び間接被害だけであったも資産の約1/3が津波による被害を受けることとなる．これに，津波波力による構造物被害，人的被害が加わる．

表-1.3.3.1に，資産額と被害額の推定値を示す．被害額の内訳は，直接被害額1,099億円（被害額全体に対し91.5%），うち浸水被害額が1,072億円（全体額の89.3%），流出被害額が27億円（同2.2%）となった．間接被害額は102億円（同8.5%）である．

直接被害のうち流出被害が被害全体に占める比率は比較的小さいが，蔵置・係留貨物の流出が生じると港湾機能が停止，間接被害（陸上輸送費の増加，産業の操業停止，漂流物の回収・処理）の発生という連関が想定されるため，漂流物の流出後の挙動予測が必要である．

表-1.3.3.1 資産額と被害額の推定値

資産額 (億円)	被害額			
	項目	(億円)	構成比(%)	
3,673	直接被害	浸水被害	1,072	89.3
		流出被害	27	2.2
		土木構造物の被害	—	—
		人的被害	—	—
		(小計)	1,099	(91.5)
	間接被害	陸上輸送費の増加	16	1.3
		産業の操業停止	79	6.6
		漂流物の回収・処理	2	0.2
		レクリエーション施設利用者の減少	5	0.4
		(小計)	102	(8.5)
		(計)	1,201	100

・その他の被害推定手法

土木構造物の被害については，模型実験を行う実験的手法，構造設計計算，安定設計計算等が活用されている．人的被害については，津波避難行動シミュレーションが活用されている．また，その他の被害として土砂堆積に伴う航路・泊地埋没に伴う被害，油等の危険物の流出に伴う火災の被害，津波による心理的被害等が挙げられる．

1. 3. 4 津波対策

津波対策は，構造物により「津波エネルギーを減衰する手法」，津波の観測，水門の管理，避難等の「資産被害及び人的被害を減災する手法」，沿岸域の土地の計画的利用により「被害発生要因を除去する手法」，地球温暖化による海面上昇への適応策等の「中長期的な対策」等に分類できる．

構造物による津波エネルギーを減衰する手法としては，津波防波堤，防潮施設等の構造物を用いて津波エネルギーを減衰する対策がある．

資産被害及び人的被害を減災する手法としては，津波の早期観測システムの構築，収集さ

れた津波観測情報の伝達と警戒情報の発令システムの整備，津波発生から到達までの間に水門を閉鎖して浸水を抑制する等の管理体制の構築，避難経路と避難場所の整備，地域防災組織の形成，平常時における津波ハザードマップ作成と津波情報リテラシーを高める教育の実施，被害発生後の対応の事前検討等が対策として挙げられる。

被害発生要因を除去する手法としては，ふ頭貨物の蔵置・係留場所の計画的配置，家屋の耐震化・不燃化，倒壊危険物の改修・除去による避難経路の確保等が想定される。

中長期的な対策としては，先に述べた地球温暖化による海面上昇への対策，計画的手法により沿岸部の土地の利用計画を誘導する方法，保険制度を活用し浸水リスクを土地利用のコストに織り込む手法等が挙げられる。

1. 4 本研究の目的

わが国では，発生する地域に偏りがあるが，約6年に1回の頻度で津波が発生している（1. 1 節）。港湾は物流・人流の結節点であり災害時には復旧・復興活動の拠点としての役割が期待されているが，津波による被害は浸水被害，流出被害，土木構造物の被害，人的被害または間接被害といった被害が報告されている（1. 2 節）。こうした被害を引き起こす現象の解明が必要であるが，地震断層により海面が持ち上げられ，津波が伝搬・遡上し，沿岸域に発生する被害の推定手法を概観したとき，津波の伝搬・遡上の数値シミュレーションは比較的研究が進んでいる分野である。特に，水深方向に積分された連続式及び非線型長波式を用いた運動方程式による津波計算については比較的適用事例が多く，計算結果の妥当性についても検証されている事例が多い。また，近年の計算機能力の向上，航空レーザー測量による詳細な測量結果の導入等により，シミュレーションに用いる矩形格子のスケールが数メートル程度まで高精度化してきている。マクロ的な津波被害の推定では，流出被害が被害全体に占める比率は比較的小さいものの，蔵置・係留貨物の流出が生じると港湾機能の停止，間接被害の発生という連関が想定されるため，漂流物の流出後の挙動予測の必要性が指摘できる。また，土木構造物の被害，人的被害の推定については，各種の実験的手法，計算手法が既に活用されている。（1. 3 節）

漂流物の流出後の挙動予測は，上述のように津波の流れが比較的精度良く算定できること，また，流体中の物体に作用する力の研究は非常に多いことから，シミュレーションを比較的精度よく実施することは，十分に可能であろうと考えられる。この結果が得られれば，これまで講じられている津波対策（1. 4 節）の高度化，すなわち，防波堤の計画・設計，津波発生直後から遡上までの間に講じる流出防止対策の検討，蔵置・係留場所の計画的配置や漂流物の回収体制の事前計画等の津波対策に活用できると考えられる。

そこで，本研究の目的を以下のように定める。

港湾において津波により漂流物が被害を及ぼす現象を分析するため，津波による漂流物の流動とそれに伴う被害の評価手法の構築を行うとともに，津波の発生が懸念されている地域にその手法を適用して被害の評価を行うものである。

1. 5 研究の構成

前節の目的を達成するため、研究の構成は以下のようにする。まず、津波による漂流物の流動と衝突に関する既往の検討について整理し、対象とする現象と解析手法を抽出する。また、実物の漂流物を用いた現地実験を行うとともに、類似する被害の現地調査結果より、対象とする現象の特徴を把握する。次に、対象とする漂流物の流動を記述する漂流・衝突シミュレーションモデルを構築する。シミュレーションモデルを構築するにあたり、その適用性については、既往の模型実験の結果と本研究で新たに行う模型実験の結果とをそれぞれ再現計算を行って実験結果と計算結果とを比較することによって検証する。最後に、津波の発生が懸念されている地域において同手法を適用し、結論をまとめる。

1 章の参考文献

- 1) 渡辺偉夫：日本被害津波総覧（第2版），東京大学出版会，236p，1998.
- 2) 国立天文台：理科年表（平成20年），丸善株式会社，pp.704-735，2007.
- 3) Iida, K.: Magnitude and energy of earthquakes accomplished by tsunami, and tsunami energy, The Journal of Earthquake Sciences, Nagoya University, Vol.6, pp.101-112, 1958.
- 4) 海南町：南海地震津波の記録「宿命の浅川港」，114p，1986.
- 5) 田井晴代：阿波国宍喰浦地震・津波の記録 震潮記，113p，2006.
- 6) 千葉県郷土史研究連絡協議会：防災災害史一元禄の大地震と津波を中心に一，郷土研叢書IV，311p，1984.
- 7) 地震調査研究推進本部地震調査委員会：全国を概観した地震動予測地図 2008年版，文部科学省，94p，2008.
- 8) 国土交通省：津波対策検討委員会提言，国土交通省河川局・港湾局，12p，2005.
- 9) 国土交通省港湾局：第5回「新たな津波防災検討委員会」の開催（最終）について，国土交通省報道発表資料，http://www.mlit.go.jp/kisha/kisha05/05/050316_2_.html，2005.
- 10) 国土交通省河川局・国土交通省港湾局：津波対策検討委員会提言，12p，2005.
- 11) 多部田茂・井上義行・木村茂・牧野弘幸：超大型浮体構造物に作用する津波荷重の数値計算，日本造船学会論文集，第184号，pp.303-309，1998.
- 12) 運輸省港湾技術研究所：津波・高潮数値計算プログラムマニュアル，189p，1996.
- 13) 柴木秀之：波浪・高潮・津波の数値計算と沿岸防災支援システムへの応用に関する研究，158p，東京大学大学院工学系研究科社会基盤工学専攻博士論文，2004.
- 14) 国土交通省河川局：治水経済調査マニュアル（案），106p，2005
- 15) 国土交通省国土技術政策総合研究所：平成16年度新たな津波防災検討調査業務報告書，2005.
- 16) 熊谷兼太郎・小田勝也：港湾及び背後地域における津波被害の波及過程に係る検討，第60回年次学術講演会概要集，土木学会，No.2-177，pp.353-354，2005.

- 17) 岡本修・小田勝也・熊谷兼太郎：港湾と背後地域における間接被害を含めた津波被害波及過程及びその評価方法，国土技術政策総合研究所資料，No.306，23p，2006.

2. 漂流物の漂流・衝突挙動に関する既往の検討

2. 1 漂流物の漂流挙動に関する既往の検討

漂流物の漂流挙動に関して参考となる既往の数値解析，実験等をそれぞれ整理する。

2. 1. 1 流木の漂流挙動

流木の漂流挙動の解析として，後藤ら（1982, 1983）は津波で流出した流木，中川ら（1994, 2001）は洪水で湾内に流出した流木群を対象に検討しており参考となる。

いずれも，津波は，非線形長波方程式を用いて計算し流木の運動が津波の流れに影響しないものとしている。流木の運動は，後藤ら（1982）は抗力及び慣性力を作用力とした運動方程式を解いている。下に x 方向の運動方程式を示す：

$$M \frac{du}{dt} = \frac{\rho_w}{\rho_p} C'_M M \left(\frac{du_s}{dt} - \frac{du}{dt} \right) + \frac{1}{2} \rho_w C_x A_x (u_s - u) |u_s - u| \quad (2.1.1.1)$$

それに対し，中川ら（1994）は抗力及び慣性力に加え水面勾配による力を考慮している：

$$m_k (1 + C_M) \frac{du_k}{dt} = C_M \frac{dU_k}{dt} - \frac{1}{2} \rho C_D A_{kx} W_k (u_k - U_k) - m_k g \frac{\partial H_k}{\partial x} \quad (2.1.1.2)$$

式-2.1.1.2の右辺第三項が水面勾配による力である。

流木の拡散は，どちらも拡散係数を用いて与えている。流木の水平面内での回転運動は，後藤ら（1982）は乱数により定めているのに対し，中川ら（1994）は力学的に求めた角速度と確率論的に定めた角速度の和で与え流木同士の相互作用を表現しようとしている点が異なる。

後藤（1983）は，1968年十勝沖地震津波で貯木場から木材が流出した事例にこの解析手法を適用している。中川ら（2001）は，梅雨の集中豪雨で流木群が河川から海域に流出した場合の流動，河川において橋脚に堰止められる場合の流動等に適用している。

2. 1. 2 船舶・浮体構造物の漂流挙動

津波による浮体構造物の運動については，増田ら（1999）の検討がある。そこでは，鉛直2次元断面内について考え，流れは，境界条件として入射波として津波を孤立波で代替した「津波相当孤立波」を用い，浮体構造物も境界として考慮した流体運動を Laplace 方程式を解くことにより求めている。浮体構造物の運動は，慣性力，付加質量力，造波減衰力，静的復元力，粘性減衰力，係留力，津波波力を考慮して運動方程式を解くことにより算定する。

また，増田（2002）では，同様の検討を分散状態の津波を対象に実施し，水槽実験結果と N-S 方程式を基にした解析結果との比較をすることにより，津波を孤立波で代替しても係留索に作用する張力の最大値等だけを問題にするならば実用的であると指摘している。

2. 1. 3 コンテナの漂流挙動

コンテナについては，Daniel ら（2002）の広領域の海洋における風を外力として漂流するコン

テナに関する検討がある。ただし、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、漂流物と構造物あるいは漂流物同士の接触は考慮していない。

漂流物同士の接触については、山口(2001)が海水について接触や衝突を考慮し個別要素法 (DEM: Distinct Element Method) を用いており、参考となる。

川崎ら(2007)は、3次元固気液多相乱流数値モデルを用いて漂流物の動的解析を行っている。また、東野ら(2007)は津波の流れ、漂流物及び構造物の相互作用について移動境界を用いた精緻な解析を行っている。

実務的なアプローチとしては、港湾に蔵置・係留された貨物の津波による流出可能性の検討のため、国土交通省近畿地方整備局神戸港湾空港技術調査事務所の報告書(2007)において神戸港等の流出可能性の検討がある。また、中部地方整備局四日市港湾事務所の報告書(2008)においても四日市港を対象に流出可能性の検討を行っている。これらはいずれも、木材に関する後藤らの検討を参考に、コンテナを質点におきかえ、拡散の効果を考慮して予測を行うものである。

2. 2 漂流物の衝突挙動に関する既往の検討

2. 2. 1 衝撃解析コードと耐衝撃設計の考え方

a) 衝撃解析コード

衝撃的な挙動の解析コードとして、連続体力学の静的・動的問題に対する数値解析手法として発展してきた質点系モデル、有限要素法、有限差分法、個別要素法 (DEM) が利用されている。衝突問題に関する論文では LS-DYNA を使用している事例があり、RC 構造物を対象とした衝撃問題では比較的良好に用いられているコードである。その他、DEM が局部破壊問題へ頻繁に適用されている。

b) 耐衝撃設計の考え方

漂流物の衝突挙動に関しては、漂流物同士、または、漂流物と構造物とが衝突する場合が考えられる。以下、漂流物と構造物とが衝突する場合を想定して、国土交通省国土技術政策総合研究所の調査報告書(2004)を参考に、構造物の設計の際に用いられている考え方を整理して示す。設計では衝撃荷重を静的な荷重に置き換えて、許容応力度法により行うことが基本的な方法となっている。表-2.2.1.1 に、衝撃力に関する示方書等を示す。そのなかで、衝撃荷重の具体的な設定法が示されているものを以下に示す。

・流木：衝突力を水面位置に作用させる。P：衝突力 (KN)，W：流送物の重量 (kN)， v ：表面流速(m/s)として、

$$P=0.1 \times Wv \quad (2.2.1.1)$$

・船舶：前進運動の場合と横漂流の場合とを考え、前進運動の場合は、

$$E_0 = \frac{1}{2g} \alpha \Delta V^2 + \frac{1}{2g} \beta \Delta (r\omega)^2 \frac{1}{1 + \left(\frac{r}{l}\right)^2} \quad (2.2.1.2)$$

横漂流の場合は,

$$E_0 = \frac{1}{2g} \beta \Delta V^2 \frac{1 + \left(\frac{l}{r}\right) \cos^2 \gamma}{1 + \left(\frac{r}{l}\right)^2} \quad (2.2.1.3)$$

ここで、 E_0 : 衝突エネルギー(tf・m), g : 重力加速度 (m/s^2), α, β : 付加質量係数 ($\alpha = 1.1, \beta = 1.4$), Δ : 満載排水量(t), V : 衝突速度(m/s), ω : 衝突前の船舶の目頭速度(rad/s), l : 接触点からの船舶の重心までの距離(m), r : 水平面における船舶の重心まわりの慣性回転半径(m), γ : 重心と接触点を結ぶ線と衝突速度ベクトルのなす角度(deg)である。

・自動車 : 路面から 1.8m の高さに水平に働くものとする。車道方向については 1,000kN, 車道と直角方向については 500kN の荷重とする。トラックについては別に式が提案されており, 車両重量 25 トンのとき,

$$F = \kappa_f \frac{2(1 + e_v)}{L_w \sin \theta} + \left(\frac{W}{W_r} \right) I_s \cdot a \quad (2.2.1.4)$$

ここで、 F : 衝突荷重(kN), κ_f : 補正比例係数(=0.1), I_s : 衝撃度(kJ)=(1/2)・(W/g)・ $v^2 \sin \theta$, θ : 衝突角度=15度、 L_w : 車軸間隔(前後輪間隔:m)=6.455m, W : 車両重量(kN)=245kN, W_r : 後輪軸重量(kN)=181kN、 g : 重力加速度 (m/s^2)、 V : 衝突速度(m/s)、 e_v : 車両の反発係数=0.2、 a : 斜面低減係数=(K_t)²・ $b < 1.0$ 、 K_t : 理論低減係数= $\sin^2 \alpha$ 、 α : 車両斜面駆け上がり角度= $\tan^{-1}(\sin \theta / \tan \beta)$ 、 β : 鉛直面からの斜面角度、 b : 実験係数である。

表-2.2.1.1 衝撃力に関する示方書等

(国土交通省国土技術政策総合研究所の調査報告書(2004)より引用)

書名	発刊年月	編集	頁	構造物	衝突物	項目
道路橋示方書・同解説 I 共通編 IV 下部構造編	2002.3	(社) 日本道路協会	65-67	橋	自動車, 流木, 船舶	衝突荷重
落石対策便覧	2000.6	(社) 日本道路協会	20-24	落石防護工	落石	落石による衝撃力
道路防雪便覧	1990.5	(社) 日本道路協会	28-29	なだれ対策施設	なだれ	なだれの衝撃力
防護柵の設置基準・同解説	1998.11	(社) 日本道路協会	12-14	車両用防護柵	25tトラック	防護柵種別の設定
車両用防護柵標準仕様・同解説	1999.3	(社) 日本道路協会	111-112	車両用防護柵	25tトラック	衝突荷重
鋼製砂防構造物設計便覧	1987.1	(財) 砂防・地すべり技術センター	65-66	透過型ダム部材	礫	運動エネルギー
土木技術者のための振動便覧	1985.1	(社) 土木学会	503-530	防護施設	なだれ	衝撃力
				防護施設	雪塊	衝撃力
				防護施設	なだれ流先端	衝撃力
				防護施設	泥質土石流	衝撃力
				防護施設	土石流フロントの巨礫	衝撃力
				防護施設	落石	衝撃力
				緩衝工	船舶	衝突エネルギー
ガードレール	自動車	運動方程式				
多室型緩衝工の設計要領(案)	1980.3	本州四国連絡橋公団	-	橋梁緩衝工	船舶	衝突エネルギー
複合材緩衝工の設計要領(案)	1981.3	本州四国連絡橋公団	-	橋梁緩衝工	船舶	衝突エネルギー
飛来物の衝突に対するコンクリート構造物の耐衝撃設計手法	1991.7	電力中央研究所	-	原子力発電所	飛来物(飛行機等)	貫入深さ 貫通限界厚さ

2. 2. 2 衝突力を測定する実験

漂流物を想定し衝突力を測定した実験としては、運輸省第三港湾建設局神戸調査設計事務所(1982)による、実物流木の海岸堤防への衝突実験がある。実験は、米材(米松)及び南洋材(ラワン)の長さ6~8mの原木を海上で引きよせ、所定の速度で既設護岸に衝突させ、高速度カメラ、加速度計及び歪ゲージを用いて測定を行っている。その結果、反発係数、弾性波周期、衝撃力の作用時間、最大衝撃加速度、歪等が整理されている。これは、実物構造物を用いた衝撃力の測定事例として、貴重な事例である。

この他、久保ら(1986, 1988)は模型コンテナと実物コンテナを用いて、コンテナヤードや船倉にコンテナを積み込む際を想定し、釣り上げたコンテナをコンクリート面に着地させて鉛直方向の衝撃力を測定する実験を行っている。

また、有川(2007)らが1/5鋼製コンテナ模型を用いたコンクリート板への衝突力の測定を行っており参考になる。

2. 3 漂流物の漂流・衝突挙動の解析における課題

津波による漂流物の漂流・衝突挙動の解析の対象として、港湾に蔵置・係留されている流木、船舶・浮体構造物及びコンテナに着目して既往の検討を挙げた。その結果、流木、船舶については津波による流動に関する検討があったが、コンテナについては、津波による流動を解析する検討は少ないことが分かった。

流木、船舶・浮体構造物、コンテナ等はいずれも、多数が存在することが特徴のひとつである。個々の形状、密度、剛性等の特性を適切に反映しつつ、多数の漂流物が衝突しながら漂流する現象の計算手法が必要である。さらに、漂流物の運動は港湾程度の大きさの範囲に及ぶ。また、津波の流れによる影響は数時間程度という長さにも及ぶ。したがって、多数の漂流物の漂流・衝突挙動が解析できる、港湾程度の大きさで数時間程度の長さという時空間領域に適用できる実用的な計算手法が必要である。

漂流物の衝突挙動については、構造物の設計手法を参照して、衝撃荷重を静的問題に置き換える手法について衝突物別に荷重の具体的な設定法を整理した。

2. 4 本章のまとめ

本章をまとめると以下のとおりである。

- ・港湾における津波による漂流物として、流木、コンテナ及び船舶・浮体構造物について既往の検討を整理した。また、構造物の設計における衝撃荷重の設計手法について整理した。
- ・港湾の漂流物として、流木、船舶・浮体構造物及びコンテナに関する既往の検討を整理した。漂流物の個々の形状、密度、剛性等を適切に表現しつつ、相互に衝突しながら、港湾程度の大きさで数時間程度の長さという時空間領域を流動する漂流物の挙動に適用できる実用的な計算手法が必要である。

2章の参考文献

- 1) 後藤智明・佐々木順次・首藤伸夫：津波による木材の流動，海岸工学講演会論文集，土木学会，pp.491-495，1982.
- 2) 後藤智明：津波による木材の流出に関する計算，海岸工学講演会論文集，土木学会，pp.594-597，1983.
- 3) 中川一・井上和也・池口正晃・坪野考樹：流木群の流動と堰止めに関する研究，水工学論文集，土木学会，第38巻，pp.543-550，1994.
- 4) 中川一・高橋保：大野川から別府湾に流出した流木群の挙動解析，水工学論文集，土木学会，第45巻，pp.931-936，2001.
- 5) 増田光一・宮崎剛・大澤弘敬：津波作用下の浮体式海洋構造物の応答に関する研究，日本造船学会論文集，第186号，pp.269-275，1999.
- 6) 増田光一・居駒知樹・内田麻木・宮崎剛：津波による浅海域の浮体式海洋構造物の運動および係留力に関する研究，日本造船学会論文集，第192号，pp.325-330，2002.
- 7) Daniel P., J. Gwenaële, C. Fanch, Y. Landau and E. Loiseau: Drift Modeling of Cargo Containers, Spill Science & Technology Bulletin, Vol.7, No.5-6, pp.279-288, 2002.
- 8) 山口一：海氷変動の数値予測，ながれ，日本流体力学会，No.20，pp.295-303，2001.
- 9) 川崎浩司・袴田充哉：3次元固気液多相乱流数値モデル DOLPHIN-3D の開発と波作用下での漂流物の動的解析，海岸工学論文集，第54巻，pp.31-35，2007.
- 10) 東野洋司・富田孝史・有川太郎・本多和彦：漂流物解析のための移動境界を用いた流体と剛体の連成計算手法，第62回年次学術講演会講演概要集，土木学会，No.2-290，2007.
- 11) 石川健二・渡慶次賀則：津波による港湾貨物等の流出対策について，管内技術研究発表会資料，国土交通省近畿地方整備局，防災・保全部門 No.24，2007.
- 12) 国土交通省中部地方整備局：平成19年度四日市港及び津松阪港津波影響調査報告書，298p，2008.

- 13) 松富英夫：水の緩衝機能を考慮した弾性波理論に基づく流木衝突力の評価，津波工学研究報告，東北大学工学部災害制御研究センター，第9号，pp.171-183，1992.
- 14) 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，土木学会，第50巻，pp.721-725，2003.
- 15) 宇佐美敦浩・白石和睦・水谷法美・宮島正悟・富田孝史：エプロン上への遡上津波によるコンテナの作用波力に関する実験的考察，土木学会第61回年次学術講演会概要集，土木学会，Vol.61，No.2-084，pp.165-166，2006.
- 16) 水谷法美・白石和睦・宇佐美敦浩・宮島正悟・富田孝史：エプロン上のコンテナへの津波作用と漂流衝突力に関する実験的研究，海岸工学論文集，土木学会，第53巻，pp.791-795，2006.
- 17) 白石和睦・宇佐美敦浩・水谷法美・宮島正悟・富田孝史：津波漂流物対策としての鉛直壁の有用性に関する研究—コンテナを対象として—，土木学会第62回年次学術講演会概要集，土木学会，Vol.62，No.2-293，pp.585-586，2007.
- 18) 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，土木学会，第21巻，pp.127-132，2005.
- 19) 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，土木学会，第52巻，pp.761-765，2005.
- 20) 運輸省第三港湾建設局神戸調査設計事務所：木材の衝撃力調査報告書，179p，1982.
- 21) 久保雅義・浅木健司・坂本欣二：コンテナ積み込み時の上下方向衝撃力の緩衝に関する基礎的研究，日本航海学会論文集，75号，pp.79-86，1986.
- 22) 久保雅義・浅木健司・下田直克・岡本俊策：コンテナ着地時の上下方向衝撃力の緩衝に関する実証実験，日本航海学会論文集，79号，pp.117-124，1988.
- 23) 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，土木学会，第54巻，pp.846-850，2007.
- 24) 安野浩一朗・西畑剛・森屋陽一：津波による漂流物の挙動予測手法に関する研究，海岸工学論文集，土木学会，第54巻，pp.866-870，2007.

3. コンテナ漂流事例の現地調査

3. 1 清水港におけるコンテナ浮遊挙動測定の現地実験

3. 1. 1 背景と目的

コンテナの漂流挙動を適切に推計するためには、流れ、風、重力、浮力等のコンテナへの作用力を適切に推算する必要がある。そのうち流れ抗力及び慣性力を推算するためには、それぞれ水中部分で流れに直交する投影面積及び水中部分の体積がパラメータとする方法がある。したがって、いずれも水中沈下部分の大きさが関係するパラメータの一つとなっている。また、風抗力を考慮する場合には、気中にある部分の大きさが関係する。このように、海上に流出したコンテナの浮遊挙動について把握する必要がある。

しかし、既往の漂流事例等はいずれも断片的な情報にとどまっており、浮遊限界時間及びその経過を詳細に把握したものは少ない。仏・水の汚染事故に関する研究センター（2001）は、一般的な空コンテナは、海上に転落してから20～30分で内部に浸水し沈没するとしている。一方、海上を航行中のコンテナ船から転落したコンテナの漂流事例では、数日以上漂流した事例が観察されている。このように、これまでに報告されている浮遊時間は数十分～数日以上でばらつきが大きい。

そこで、中部地方整備局港湾空港・防災危機管理課が実施した実験に、名古屋港湾空港技術調査事務所技術開発課とともに参加し、コンテナの沈没挙動の観察、海上浮遊限界時間の把握することを目的とした。

3. 1. 2 実験概要と測定方法

a) 実験概要

実験は、2007年5月21日（月）から24日（木）に、清水港内の折戸地区波除堤湾口側水域で実施した。同水域は静穏な泊地で、波及び流れがほとんどない。

長さ40フィートの標準的な国際海上コンテナ2個を用い、コンテナの扉を通常の方法で閉じ、クレーンでコンテナを吊り上げ、海面上に水平に静かに浮遊させた。その結果、質量7,740kgのコンテナは急激に沈没することなく浮遊し、沈没深さは概ね一定に増加し、浮遊開始から24.15時間で海面下に完全に沈没した。海面下に完全に沈没したコンテナは、比較的短時間で海底に着底した。また、この結果はこのタイプのコンテナの特性として一般的に適用できる可能性があることが分かった。

b) 実験ケース及び供試コンテナ

港運会社より通常使用しているコンテナを入手し使用した。表-3.1.2.1に、実験ケースを示す。写真-3.1.2.1に、供試コンテナの外観を示す。また、写真-3.1.2.2に、模擬貨物を積載したNo.1

表-3.1.2.1 実験ケース

外法寸法(m)	高さ2.591×幅2.438×長さ12.192
質量(kg)	No.1 7,740(自重3,740+模擬貨物4,000) No.2 3,740
材料	鋼(床板のみ木材)

の供試コンテナの内部を示す。模擬貨物は、質量 200 kg, 大きさ 0.4 m×0.4 m×1.0 m の鋼製山留材を 20 個用い、床面の長さ方向中心軸上にワイヤーで固定した。実験中にこの模擬貨物の位置がずれることはなかった。

c) 事前準備

・ 標尺の取り付け

供試コンテナの側面に、測量用の標尺を溶接して取り付けた。これにより、海面浮遊時のコンテナの沈没深さを目視で読み取ることができる。図-3.1.2.1 に、標尺の取り付け位置を示す。計 10 箇所に取り付けしている。

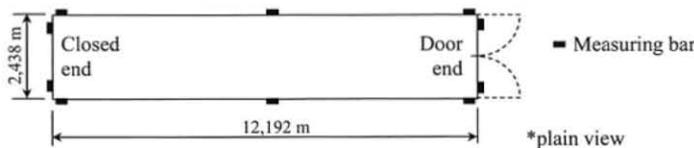


図-3.1.2.1 標尺の取り付け位置



写真-3.1.2.1 外観



写真-3.1.2.2 No.1 の内部

・ 気密性及び風雨密性の確認

コンテナの気密性及び風雨密性は、コンテナが海上に流出した場合の浮遊時間、挙動等に影響する。

気密性は、コンテナ内部に人が入り扉を閉め内部から光漏れがないことを目視することにより確認した。風雨密性は、日本工業規格(1994)の漏水試験に準じた方法で確認した。写真-3.1.2.3 に、漏水試験の状況を示す。その結果、供試コンテナはいずれも破損箇所はなく、気密性及び風雨密性が規定の性能を満たす状態にあるとみなした。



写真-3.1.2.3 漏水試験

d) 測定方法

浮遊開始直後は 5 分間隔、その後は 10 分間隔でコンテナ四隅の標尺位置で沈没深さを読み取って記録した。天井部分には標尺を取り付けていないため、天井部分に水面が達した場合はビデオで記録しておき、画像を解析することにより沈没深さを求めた。なお、夜間は安全確保のため測定を休止して欠測とした。

3. 1. 3 実験結果

a) 浮遊開始から沈没までの経過

写真-3.1.3.1 に、浮遊開始から沈没までの実験状況を示す。浮遊開始直後は海面上に正立した。海面下の部分が増大するとともに、長軸まわりに Starboard side (扉から奥側に向かって

左舷側) にゆっくりと回転した。その後、海面下の部分がさらに増大するとともに長軸まわりに回転がゆっくりと小さくなり、6 時間後にはほぼ正立した。正立したまま全体的に海面下の部分が増大し、海面から露出しているコンテナ天面の高さが小さくなった。その後、扉部付近にコンテナ内部の空気が集まるように急激に回転した (pitching 方向)。そのまま海面下の部分が増大するように沈没し、24 時間 9 分後にコンテナ内部に残っていた空気を扉部から激しく噴出しながら、海面下に完全に沈没した。



(1) 浮遊開始前



(2) 浮遊開始直後



(3) 2 時間 35 分後



(4) 6 時間後



(5) 21 時間 45 分後



(6) 海面下に沈没する直前

写真-3.1.3.1 浮遊開始から沈没までの経過

b) 平均沈没深さの算定

コンテナの浮遊状態は、図-3.1.3.1 に示す二種類があった。すなわち、(a)天井が完全に気中に出た状態、及び、(b)天井の一部だけが気中に出た状態、である。そこで、沈没の進行状態を表現するために、コンテナ内部の推定海水量は変えずに水平に正立した状態での浮遊を仮定したときの沈没深さである「平均沈没深さ」を測定結果より算定することとした。なお実験では駆体に若干のねじれが生じていたが、完全な直方体型とみなして算定した。

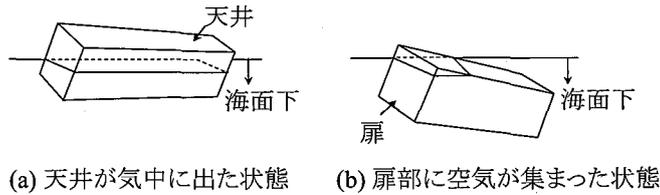


図-3.1.3.1 コンテナの浮遊状態

c) 平均沈没深さの時間変化

図-3.1.3.2 に、平均沈没深さの時間変化を示す。浮遊開始直後及び水面下に沈没する直前の段階を除き、ほぼ一定速度で沈没しているので、コンテナの初期質量、内部の海水浸入量によらず、コンテナ内部への単位時間あたりの海水浸入量はほぼ同じであると考えられる。また、線形近似を行うことにより平均沈没深さ y (m) と経過時間 x (時間) に関して以下の式を得た。

$$y = 0.0806x + 0.59 \quad (3.2.3.1)$$

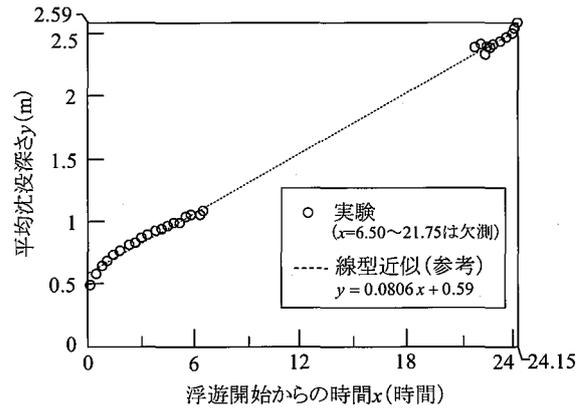


図-3.1.3.2 平均沈没深さの時間変化

d) 長軸まわりの回転角度の時間変化

図-3.1.3.3 に、長軸まわりの回転角度の時間変化を示す。浮遊開始から約 4 時間は長軸まわりに回転し、図に示した回転角度が最大で 25.6 度となった。その後、正立状態に戻りはじめ、約 6.5 時間後には回転角度はほぼゼロとなった。

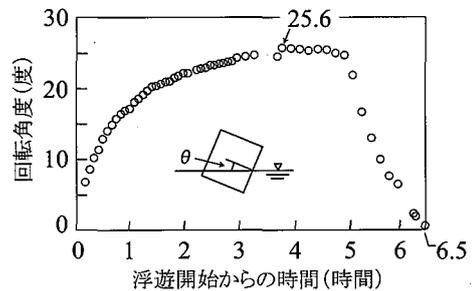


図-3.1.3.3 回転角度

e) 実験結果の適用性に関する考察

上記の実験に加えて、供試コンテナを表-3.1.2.1 の No.2 のコンテナに換えて第二回目の実験を行った。図-3.1.3.4 に、第一回目及び第二回目の平均沈没深さの時間変化を示す。第一回目については、図-3.1.3.2 で示したもののうち浮遊開始から 2 時間までを拡大したものである。第一回実験及び第二回実験の平均沈没深さの時間変化は、浮遊開始から 2 時間経過後までは概ね勾配が等しくなった。これは、事例数は少ないものの、今回の実験結果をこの型式のコンテナの特性として一般的に適用できる可能性があることを示唆する。

なお、コンテナが劣化していた場合の影響、波・流れが及ぼす影響等についての詳細は不明である。また、浮遊開始から同時間が経過したときの平均沈没深さは、第二回実験に比べ第一回実験が約 0.19~0.26 m の範囲で大きい。第一回実験のコンテナは模擬貨物 4,000 kg を積載している。模擬貨物質量を底面積と海水密度で割って、模擬貨物による沈没深さ増加分を算出すると約 0.13m となった。実験で測定された差は、これよりもやや大きい。この原因

として、二つのコンテナの土台部分の通水性の違い、床板の材質が完全に同一でないことから生じる影響等が考えられるが、詳細は不明である。

f) コンテナの引き揚げ時の様子

まず、ダイバーによる水没状態の確認を行い完全に海底に着底していることが分かった。続いて、台船上への引き揚げを行った。扉部以外に水漏れは発生しておらず、沈没に際して扉部からのみ浸水したと考えられる。また、コンテナの天板及び構造部材の一部に変形が見られたものの、沈没によるコンテナ躯体の大きな変形は生じていなかった。

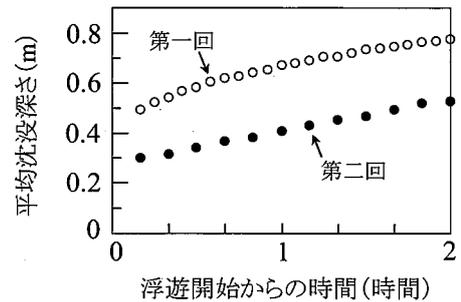


図-3.1.3.4 第一回目と第二回目の比較

3. 2 水島港におけるコンテナ漂流事例の現地調査

2004年8月30日から31日の間に、台風16号に伴い瀬戸内海沿岸の各地で高潮が発生した。水島港では、ふ頭近くに蔵置されていたコンテナが海域に流出する被害が発生した。

3. 2. 1 漂流挙動

図-3.2.1.1に、台風の経路と水島港位置図を示す。台風は山口県防府市に上陸し、水島港はその東側約200kmの位置にある。図-3.2.1.2に、岡山県による潮位測定値の台風の上陸前後の時間変化を示す。最大潮位はT.P.+3.22m、最大潮位偏差は1.56mとなった。

図-3.2.1.3に、水島港の周辺図および拡大図を示す。拡大図で示した玉島地区の外貿一号ふ頭北側には、図(2)aの位置に、図-3.2.1.4の配置で20フィートの空コンテナ18個が蔵置されていた。コンテナはそれぞれ、台風に合わせて水際線から11.5m以上離れた陸側にピラミッド状に積み、ワイヤーでラッシングされるか、または、ブリッジフィッティングと呼ばれる金属製固定具で相互に固定されていた。潮位の上昇、波、風等の効果により岸壁から越流して、18本のうち15本のコンテナが海域に流出した。波の影響を示唆する情報として、未舗装の蔵置場所の地盤が被災後にえぐられているのが目撃されている。

コンテナは図-3.2.1.3(2)のaの領域から流出し、bの領域またはカーテンウォール式防波堤を乗り越えたcの領域に到達し

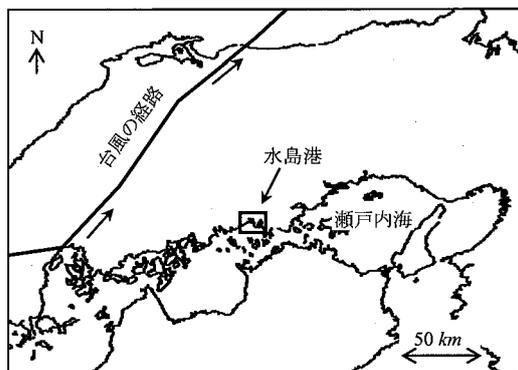


図-3.2.1.1 台風の経路と水島港位置図

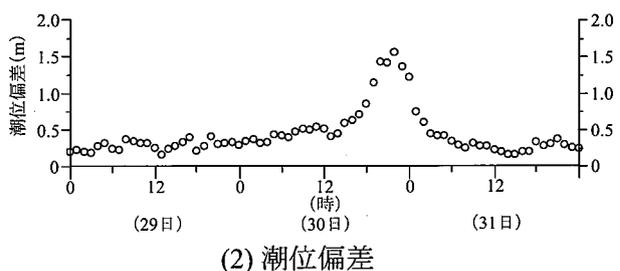
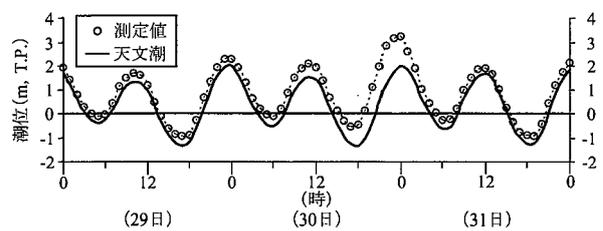
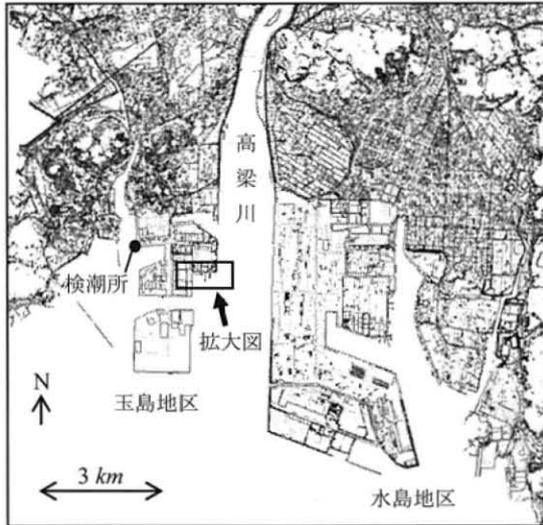
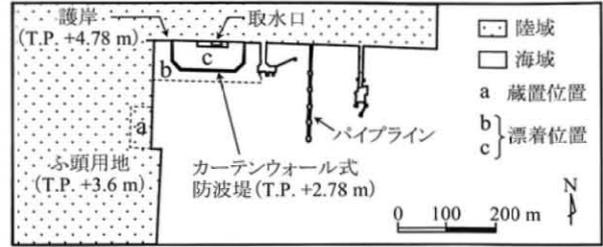


図-3.2.1.2 水島港の潮位



(1) 周辺図

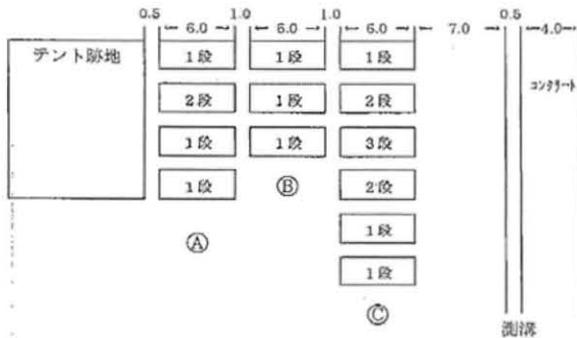


(2) 拡大図

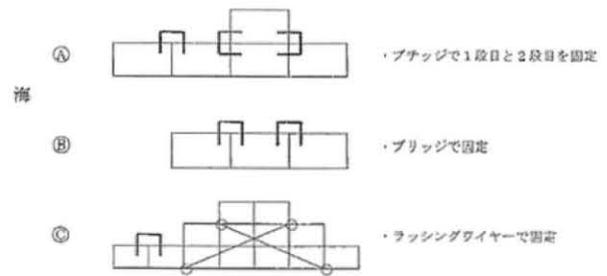


(3) 蔵置位置より漂着位置を望む写真

図-3.2.1.3 水島港の周辺図及び拡大図



(1) 平面配置図 (長さの単位は m)



(2) 立面配置図

図 3.2.1.4 コンテナの配置図

た. c の領域に到達したコンテナの一部は海面下に沈没した. 残りは護岸付近の浅場等に浮かんだり, 漂着したりしていた.

3. 2. 2 衝突挙動

発電所の取水口を取り囲むカーテンウォール式防波堤 (図-3.2.2.1) は一部が損傷した. その原因は波浪による被害またはコンテナ衝突による損傷が考えられる. このほか, 一般の人の立ち入り防止のための鉄製金網が破損した. なお, 防波堤の東側にあるパイプラインは損傷がなかった.

3. 2. 3 回収方法

目視できたコンテナは, 流出確認後天候の回復をまって, すぐに 50t クレーン車によって 13 本が回収された. 水没した 2 本は, 潜水士により探索して, 翌日 (8/31) の 13 時までには全て回収された.

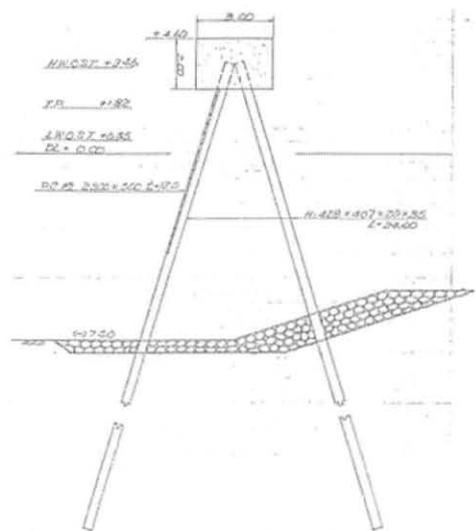


図-3.2.2.1 カーテンウォール式防波堤断面図

3. 3 三河港におけるコンテナ漂流事例の現地調査

2009年10月8日、台風18号台風は知多半島付近に上陸し、それに伴い三河港神野地区では高潮で岸壁背後のヤードに蔵置されていたコンテナが内陸方向に向かって流出した。

3. 3. 1 漂流挙動

図-3.3.1.1に、台風の経路と三河港神野地区位置図を示す。同地区は台風の上陸地点の東側約25kmの位置にある。図-3.3.1.2に、中部地方整備局による潮位測定値の台風の上陸前後の時間変化を示す。6:20に最高潮位がD.L.+4.40m、潮位偏差が2.60mとなった。なお、検潮所はコンテナが流出したふ頭からみて東側約1kmの位置にある。

図-3.3.1.3に、コンテナの蔵置位置を示す。コンテナは7号岸壁及び8号岸壁の背後に、それぞれ724個と163個が蔵置されていた（個数は愛知県三河港務所調べ）。コンテナは台風に向けて2段積み（a、b区域）や1段積み（c区域の一部）にされていた。さらに、写真-3.3.1.1に示すように、2段積みのコンテナはブーメラン型金具を用いて上段のコンテナと下段のコンテナを相互に固定していた。



写真-3.3.1.1

ブーメラン型金具

8号岸壁の地盤高はD.L.+4.11~4.16mで、そこから東側にむかって緩やかに上って最高点でD.L.+4.34mとなる。そこから緩やかにD.L.+4m程度まで下ってあとはほぼ平坦である。従って、波と風の影響を除外したふ頭の浸水深は0.1~0.4m程度と考えられる。一般に、コンテナ下部にはトンネルリセス（トレーラ積載用の窪み）等で約0.15mの嵩上げ部分があり、それを考慮すると、40フィート空コンテナは平積みで約0.27m、二段積みで約0.39mの高さの浸水で浮遊すると考えられる。従って、同地区の一部の場所では二段積みコンテナも浮遊する浸水深に達していたと考えられる。ふ頭を囲むフェンス（地盤高D.L.+4m）には、波と風の影響が加わり、高さ0.7~0.9mの位置に流された草が絡まっていた。

写真-3.3.1.2及び写真-3.3.1.3に、海上保安庁による被災直後の航空写真を示す。写真中で矢印は漂流方向を示し、破線で囲った部分がコンテナの主な到達位置である。図-3.3.1.4に、そ

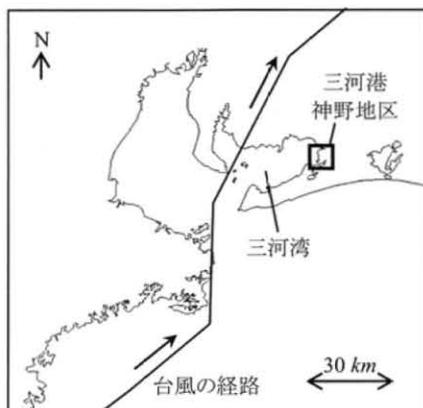
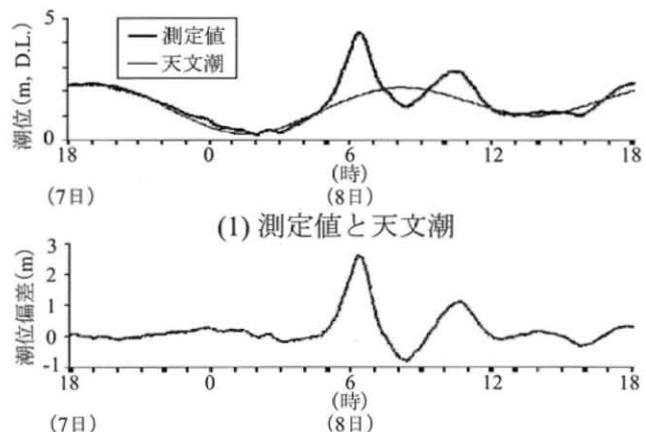


図-3.3.1.1 台風の経路と
三河港神野地区位置図



(1) 測定値と天文潮
図-3.3.1.2 三河港の潮位

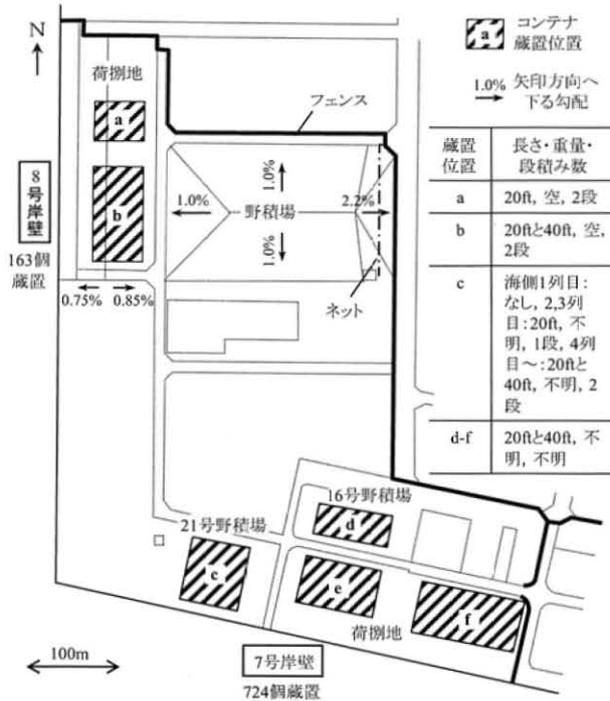


図-3.3.1.3 コンテナの蔵置位置

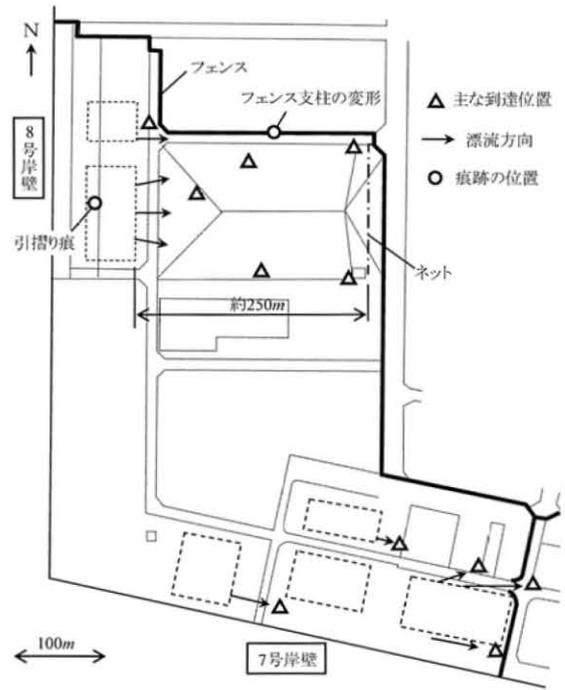


図-3.3.1.4 被害の発生位置



写真-3.3.1.2 8号岸壁背後



写真-3.3.1.3 7号岸壁背後

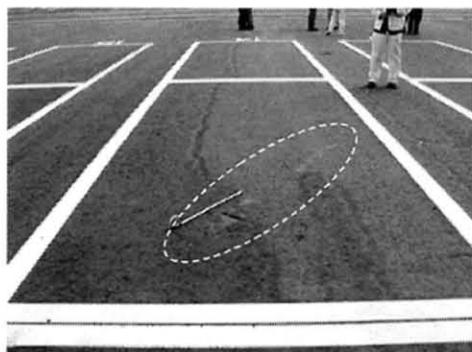


写真-3.3.1.4 引摺り痕



写真-3.3.2.1 フェンスの支柱

これらの被害の発生位置を平面図に示す。移動距離は直線で最大約 250 m である。また、図中に丸印で示した地盤の最高点付近には、写真-3.3.1.4 の引摺り痕が確認された。その付近には同様の引摺り痕があった。すなわち、コンテナは完全に浮遊したものもあったが、一部は完

全に浮遊した状態ではなくヤードに接触しながら引き摺られるように移動したことが分かった。目撃者からのヒアリングにより、一斉に動き出したのではなく少しずつ動き出したこと、水平に笹舟のようにゆらりゆらりと回転しながら流されていたこと、2段積みのまま流されているものもあったこと等の証言が得られた。

3. 3. 2 衝突挙動

写真-3.3.2.1に、ふ頭を囲む金属製フェンスの支柱がコンテナの衝突で変形している状況を示す。この支柱は直径約6cmで、衝突痕は高さ0.5m及び0.9mの二か所にあった。ただし、フェンス全体が倒れるような被害は生じていなかった。

3. 4 本章のまとめ

本章をまとめると以下のとおりである。

- ・コンテナがふ頭から海上に流出した場合の挙動を把握するため、実物のコンテナを海上に浮遊させる実験を行った。その結果、長さ40フィート、質量7,740kgのコンテナは急激に沈没することなく海上を浮遊し、沈没深さが時間とともに概ね一定に増加していき、浮遊開始から24.15時間で海面下に完全に沈没した。また、この結果はこの型式のコンテナの特性として一般的に適用できる可能性があることが分かった。
- ・津波によるコンテナの流出と類似した現象として、台風に伴う高潮によりコンテナが流出した被害事例である2004年の水島港における被害及び2009年の三河港における被害の現地調査を行い、それぞれ流出したコンテナの漂流挙動に関する情報、衝突挙動に関する情報を整理して示した。

3章の参考文献

- 1) Centre of Documentation, Research and Experimentation on Accidental Water Pollutions (CEDRE) : Containers and packages lost at sea: OPERATIONAL GUIDE, pp.82, 2001.
- 2) 田辺海上保安部: コンテナ流出情報(2006年4月13日), 第五管区海上保安本部, 1p, 2006.
- 3) 日本工業標準調査会: 国際一般貨物コンテナ, JIS Z 1618, 日本規格協会, p.7, 1994.

4. コンテナの漂流・衝突シミュレーションモデル及び港湾への適用

4. 1 コンテナの漂流・衝突シミュレーションモデルの検討

4. 1. 1 拡張個別要素法

ここでは、拡張個別要素法について簡単に整理する。コンクリート構造は礫とモルタルで構成され、礫同士が接触する場合に力を伝達するだけでなくモルタルを介して力を伝達していることから、非連続体である地盤とは異なる性状を示す。そこで、主として地盤の解析に適用されてきた Cundall (1971) の個別要素法 (Distinct Element Method, DEM) をコンクリート構造に適用するため、目黒ら(1988)は、改良個別要素法 (Modified Distinct Element Method, MDEM) を提案した。MDEM は、DEM の要素バネと独立した間隙バネ及びそれと並列な粘性ダッシュポッドを導入してモルタルをモデル化している。図-4.1.1.1に、MDEMによるコンクリート構造のモデルを示す (目黒ら (1988) より引用)。

図中で、(a)の法線方向の二つの弾性バネのうち右側がDEMの要素バネであり、左側がMDEMで導入された間隙バネである。要素バネ及び間隙バネには、それぞれ並列して粘性ダッシュポッドが配置されている。=印は、要素バネは要素の接触時にのみ力の伝達を行うと仮定しているためノーテンションジョイントを示す。×印は、間隙バネには破壊基準が設定されていることを示す。(b)の接線方向にも、弾性バネ及び粘性ダッシュポッドがそれぞれ二つずつ配置されている。上の弾性バネは要素バネであるが、ノーテンションジョイントに加えて、ある一定以上の力が加わると力を伝達しないスライダが配置されている。

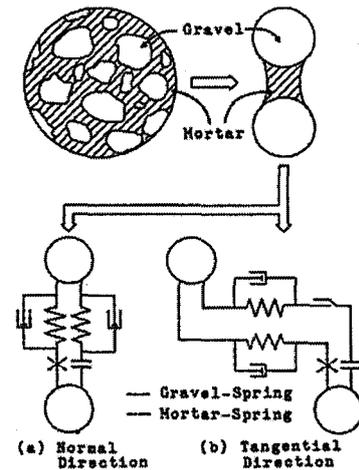


図-4.1.1.1 改良個別要素法

以下、伯野 (2004) が要素 i, j の間の要素バネ、間隙バネ、粘性ダッシュポッド等を定式化しているものを示す。

時刻 t の法線方向に作用する要素バネの弾性抗力 $[e_{en}]_t$ とダッシュポッドの粘性抗力 $[d_{en}]_t$ は、

$$[e_{en}]_t = [e_{en}]_{t-\Delta t} + \Delta e_{en} \quad (4.1.1.1)$$

$$[d_{en}]_t = \Delta d_{en} \quad (4.1.1.2)$$

ただし、 Δe_{en} は変位増分に比例した抗力増分、 Δd_{en} は相対変位速度に比例した抗力増分である。また、要素バネは要素の接触時にのみ力の伝達を行うと仮定しているため、式-4.1.2.1及び式-4.1.2.2には以下の条件が付加される：

$$[e_{en}]_t < 0 \text{ のとき } [e_{en}]_t = [d_{en}]_t = 0 \quad (4.1.1.3)$$

時刻 t における要素バネに作用する法線方向の力 $[f_{en}]_t$ は、

$$[f_{en}]_t = [e_{en}]_t + [d_{en}]_t \quad (4.1.1.4)$$

こうして得られた要素バネ、間隙バネ、粘性ダッシュポッドによる作用力を考慮することに

より、時刻 $t + \Delta t$ の各要素の位置と運動を逐次的に求めることができる。なお、伯野は上の「改良個別要素法」を「拡張個別要素法」と呼んでいるので、以下、「拡張個別要素法」と呼ぶ。

4. 1. 2 基礎としたプログラム

拡張個別要素法をコンテナの漂流・衝突挙動の解析に適用するため、京都大学防災研究所・澤田純男教授が作成し財団法人地域地盤環境研究所（旧：財団法人大阪土質試験所）が管理する拡張個別要素法プログラムである DEMS（Version4.2：2次元最終版，Version5.5：3次元球要素最終版，及び，Version6.0：3次元回転楕円体要素版）の Fortran プログラムを基礎として、数値シミュレーションモデルを構築した。表-4.1.2.1 に、基礎としたプログラムの作成・修正者を示す。澤田純男教授が個別要素法のプログラムを作成し、中瀬仁博士（東電設計株式会社）が間隙要素を導入するプログラムの追加を行い、藤井直樹博士（東電設計株式会社）が流体力を導入するプログラムの追加等を行ったものである。

表-4.1.2.1 基礎としたプログラムの作成・修正者

作成・修正者	内容	時期
澤田純男 教授	個別要素法プログラムの作成	1988～1994年
中瀬 仁 博士	間隙要素を導入するプログラムの追加	
藤井直樹 博士	流体力を導入するプログラム(wave_to_e.f)の追加 可視化プログラム(show.f)の削除	

上のものに、本研究で以下の点についてプログラムの修正・拡張を行った：

- 1) 球形要素の質量の低減
- 2) 慣性力の上限の設定
- 3) 風抗力の追加
- 4) 沈没挙動の追加
- 5) コンテナ内部の空洞のモデル化
- 6) その他の修正

この 1)～6) について、以下の 4. 1. 3 項で述べる。

4. 1. 3 本研究で行ったプログラムの修正・拡張

a) 球形要素の質量の低減

矩形の連続体であるコンテナを球形要素の集合体で表現すると、矩形の場合に比較して浮力が過小になる。最も単純な場合として、一辺の長さが 1 の正方形を直径 1 の球形要素が内接している（球形要素で表現している）場合を例に考える（図-4.1.3.1）。球形要素の半径 r は 0.5 なので、球形要素の体積は $(4/3)\pi r^3 = \pi/6 \approx 0.524$ となり、水中に完全に没しているとした場合には本来生じる浮力

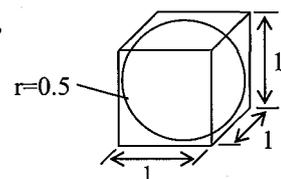


図-4.1.3.1 正方形と球

の約 5 割しか浮力が生じないことになる。また、流れ抗力、慣性力及び風抗力についても、投影面積、水中体積から算定する場合はそれぞれ $\pi r^2 : 1 \doteq 0.785 : 1$ 、 $\pi r^3 : 1 \doteq 0.524 : 1$ となり、過小になる。

そこで、球形要素の質量を、本来割り当てられた質量（正方形または矩形部分としての質量）を $\pi/6$ 倍して低減した。そのうえで、適切な流れ抗力係数 C_D 、慣性力係数 C_M 及び風抗力係数 C_a を、模型実験の再現計算を行って定めることとした（4.2.2 及び 4.3.4 参照）。

なお、質量を低減する代わりに、球形要素ではなく正方形（または矩形）要素を用いる手法も考えられる。しかし、その場合は要素の接触判定が複雑になること、また、流れ抗力及び風抗力の算定にあたって面の向きを考慮する必要が新たに生じるため、採用しなかった。

b) 慣性力の上限の設定

鋼構造等の剛性が比較的大きい、または、質量が比較的小さい物体について個別要素法を適用すると、計算時間ステップを小さくする必要がある（式-4.1.3.3）。その際、加速度が大きくなり、球形要素が計算領域外に飛び出す等で計算が発散する場合がある。そこで、算定された加速度が重力加速度 g よりも大きくなる場合は、重力加速度を上限として与え、慣性力の算定を行った。

c) 風抗力の追加

漂流挙動に風の影響が無視できない場合を考慮して、風抗力を追加した（4.3.4 参照）。

d) 沈没挙動の追加

海上を浮遊するコンテナは、内部に浸水して時間経過とともに沈没する。そこで、コンテナが浮遊を開始するとコンテナ全体の質量を時間的に増加させるようにモデルの改良を行った。単位時間あたりのコンテナ質量の増加 w_t は、

$$w_t = \{V_0 \cdot \rho_w - (W_0 + W_c)\} / t_s \quad (4.1.3.1)$$

ここで、 V_0 ：コンテナ体積、 ρ_w ：海水密度、 W_0 ：コンテナ自体の質量、 W_c ：積載貨物質量、 t_s ：コンテナの浮遊限界時間である。この式を、4.1.3 a) の球形要素の質量の低減に対応させて修正すると、

$$w_t' = \left\{ V_0' \cdot \rho_w - (W_0 + W_c) \cdot \frac{\pi}{8} \right\} / t_s \quad (4.1.3.2)$$

ここで、 V_0' ：全球形要素の体積、 $\pi/8$ は球形要素の質量の低減に用いる係数（正方形と球形の体積比）である。40 フィートコンテナを球形要素（半径 $r=0.64775 \text{ m}$ ）40 個で表す場合は、

$$V_0' = (0.64775)^3 \times \pi \times 40 \doteq 34.153 \text{ m}^3$$

$\rho_w = 1,030 \text{ kg/m}^3$ 、3.1 節の実験から $W_0 + W_c = 3,740 + 4,000 = 7,740 \text{ kg}$ 、 $t_s = 24.15 \text{ h}$ を式-4.1.3.2 に代入すると、 $w_t' = 0.01082 \text{ kgm}^{-3}\text{h}^{-1}$ となる。

e) コンテナ内部の空洞のモデル化

・球形要素の大きさ

球形要素を小さくしていけば、より詳細な実物に近い形状が表現できることは自明である。図-4.1.3.2に、コンテナ高さ h の $1/2$, $1/3$, $1/4$, $1/5$ 及び $1/10$ を直径とした場合の40フィートコンテナのイメージをそれぞれ示す。一方、球形要素の分割数は計算時間ステップの大きさに影響する。伯野(2004)は、物体の波動伝播速度を考慮した計算時間ステップ Δt を推定する目安として、式-4.1.3.3を示している。

$$\Delta t < 2\sqrt{\frac{m}{k}} \quad (4.1.3.3)$$

ここで、 m は代表質量、 k は代表ばね係数である。

表-4.1.3.1に、40フィートコンテナ・空載の場合の $h/2$, $h/3$, $h/4$, $h/5$ 及び $h/10$ に対する $\sqrt{m/k}$ を示す。ここで、 k は 1.0×10^6 N/mとした。 $h/2$ を球直径とした場合、時間ステップは0.0097秒以下にすればよいことになるが、実際にはさらにこの $1/10$ 程度の時間ステップで計算する必要があるので、0.001秒のオーダーとなる。現時点で汎用的な計算機 (Intel Xeon Processor X5272 (3.4GHz, 1600MHz-FSB, Dual core) $\times 2$, Core数4のWS) を使い、100個の漂流物を対象に、実時間で数時間の漂流計算を0.001秒ステップで行うと、数日～半月程度を要する。

$h/3$ を球直径とした場合は0.0005秒のオーダーとなり、 $h/2$ のときの2倍程度の計算時間が必要となるので、実用上の観点から $h/2$ に分割することとした。以下、 $h/2$ を直径とした球形要素を用いる。

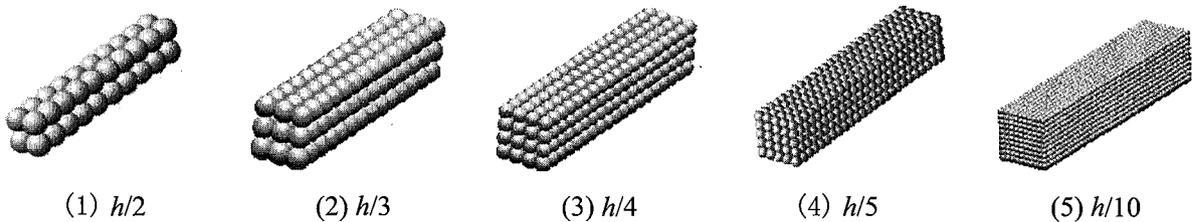


図-4.1.3.2 球形要素の大きさ

表-4.1.3.1 球形要素の大きさと $\sqrt{m/k}$ の関係

球形要素の直径	$h/2$	$h/3$	$h/4$	$h/5$	$h/10$
球形要素の数	40	112	236	402	1856
コンテナ質量(kg)	3,740	3,740	3,740	3,740	3,740
球形要素1個あたり質量 m (kg)	93.5	33.4	15.8	9.3	2.0
代表バネ係数 k (N/m)	1.0×10^6				
$\text{sqrt}(m/k)$	0.0097	0.0058	0.004	0.0031	0.0014

・コンテナ内部の空洞のモデル化

コンテナは貨物を積載するため内部が空洞となっている。その構造上の特性を、間隙バネによる接続関係で表現する。

表-4.1.3.2に、20フィートコンテナの球形要素間のバネによる接続関係を示す。左列は対象とする球形要素の番号、右列はそれが接続する要素の番号である。なお、表では要素No.1からNo.2へ、No.2からNo.1の接続関係を示しているが、同じバネを重複して記載している（バネ数は1本）。また、図-4.1.3.3に、要素No.1の接続関係を模式図で示す。1番の球形要素は2, 3, 4, 5, 6及び7の球形要素と接続しているが、対角線上に位置するNo.8の球形要素とは接続していない。

表-4.1.3.2 球形要素の接続関係

要素No.	接続する要素No.
1	2 3 4 5 6 7
2	1 3 4 5 6 8
3	1 2 4 5 7 8
4	1 2 3 6 7 8
5	1 2 3 6 7 9 10 11
6	1 2 4 5 8 9 10 12
7	1 3 4 5 8 9 11 12
8	2 3 4 6 7 10 11 12
9	5 6 7 10 11 13 14 15
10	5 6 8 9 12 13 14 16
11	5 7 8 9 12 13 15 16
12	6 7 8 10 11 14 15 16
13	9 10 11 14 15 17 18 19
14	9 10 11 13 16 17 18 20
15	9 11 12 13 16 17 19 20
16	10 11 12 14 15 18 19 20
17	13 14 15 18 19 20
18	13 14 16 17 19 20
19	13 15 16 17 18 20
20	14 15 16 17 18 19

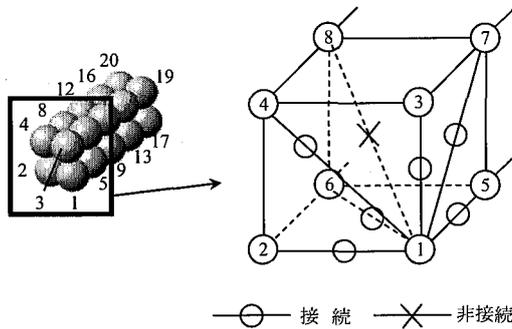


図-4.1.3.3 要素 No.1 の接続関係

f) その他の修正

4. 1. 2 項の基礎としたプログラムでは、バネ係数、減衰係数、摩擦角度、要素半径及び密度を全ての要素について一括設定していた。これを、要素ごとに設定するよう修正した。これにより、漂流物と被衝突物、あるいは漂流物ごとに、異なる剛性を与えることを可能とした。

4. 1. 4 コンテナの漂流・衝突シミュレーションモデル

構築したモデルのフローを図-4.1.4.1に示す。まず、平面2次元津波数値シミュレーションをEDEMとは独立して実施し、水深及び流速を算定する。続いてEDEMによる漂流・衝突計算を行う。初期条件を設定したのち、接触判定を行う。接触している場合は要素中心と接触要素（他の球形要素、境界要素等）との相対的な位置関係から、要素間に作用する法線方向及び接線方向の力を計算する。接触のない場合は、要素間の力はゼロである。続いて、漂流物の浮遊状態の判定を行い、浮遊している場合は沈没速度を考慮して設定した質量増加を浮遊要素に接続している全要素について行う。浮遊していない場合は質量の変化はない。さらに、計算の発散を防ぐため、極端に大きい加速度が慣性力の算定に用いられないように上限が重力加速度 g を超えないように修正にする。流れ抗力及び慣性力の合力 F についてはモリソン式

$$F = \frac{1}{2} C_D \rho_w u_d^2 A + C_M \rho_w V \frac{\partial u}{\partial t} \quad (4.1.4.1)$$

により評価する。ここで、 C_D は流れ抗力係数、 ρ_w は流体密度、 u_d は流速と漂流物移動速度との相対速度、 A は流れに直行する漂流物の水中部分の投影面積である。また、 C_M は慣性力係数、 V は漂流物の水中部分の体積である。風抗力 F_a については、

$$F_a = \frac{1}{2} C_a \rho_a u_a^2 A_a \quad (4.1.4.2)$$

により評価する。ここで、 C_a は風抗力係数、 ρ_a は空気の密度、 u_a は風速と漂流物移動速度との相対速度、 A_a は風方向に直行する漂流物の海上部分の投影面積である。要素ごとに力の各方向成分及びモーメントを算定し、球形要素ごとに運動方程式を解くことにより、各要素の加速度を計算し、計算ステップ終了まで逐次的に各要素の速度、位置を求めていくものである。

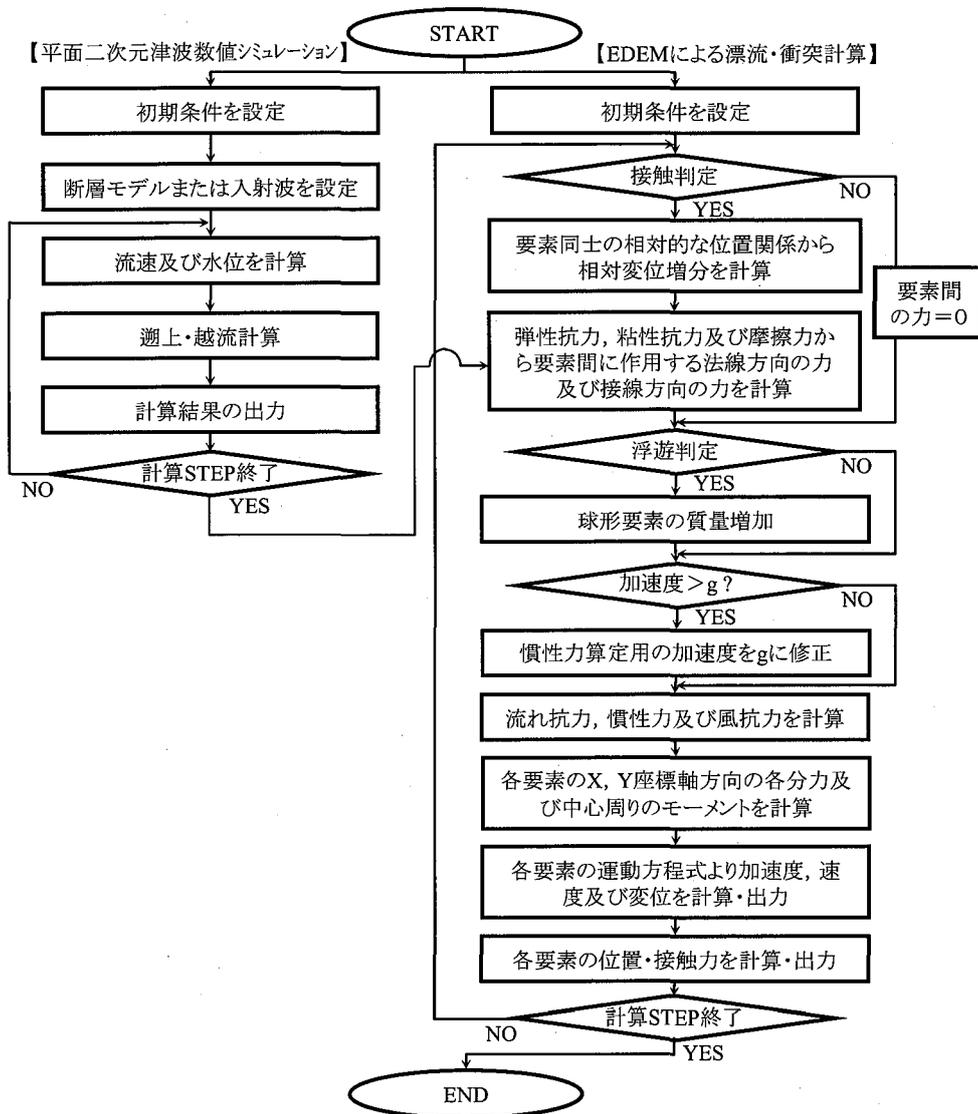


図-4.1.4.1 コンテナの漂流・衝突シミュレーションモデル

4. 2 模型実験の結果の再現計算

4. 2. 1 対象とした実験

水谷ら (2005) が行ったふ頭上のコンテナの漂流模型実験の結果について、4. 1 節の漂流・衝突シミュレーションモデルによる再現計算を行い、流れ抗力係数 C_D 、慣性力係数 C_M の値を定めた。なお、水谷ら (2005) の論文に記載されていないケースの実験結果については、国土交通省中部地方整備局の調査結果 (2006) を入手してデータを補足した。

図-4.2.1.1に、実験水路を示す (水谷ら (2005) より引用)。全長 28m, 有効幅 8m, 高さ 0.8m の平面波浪水槽を用い、ピストン型造波装置で孤立波を発生させる。水深は 22 cm である。実験では、周期・波高を変えて CASE1~CASE8 の 8 種類の実験が行われているが、再現計算の対象としたのは CASE 7 (周期 $T=2.0$ s, 波高 $H=0.050$ m) である。ここで、波高 H は造波板から 3 m の位置における値である。

ふ頭上の水位は図-4.2.1.1 右図で示す位置 (エプロン端を x 軸原点として, $x=0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5$ m) で容量式波高計を用いて測定している。また、遡上流速を、ふ頭上のピット (ふ頭に設けられた窪み) でプロペラ流速計を用いて水位とほぼ同位置で測定している。

漂流実験では、20 フィートコンテナ模型 (アクリル製, 縮尺 1/75) の重量を 6 種類 (G1~G6) に変化させて、初期位置 $x=10.5, 30.5, 50.5$ cm に設置して漂流軌跡をビデオ撮影し測定している。図-4.2.1.2に、実験に用いられた 20 フィートコンテナ模型の寸法図を示す。また、表-4.2.1.1 に、G1~G6 のコンテナの重量について示す。G1 が空載コンテナ, G5 が満載コンテナの重量に相当する。

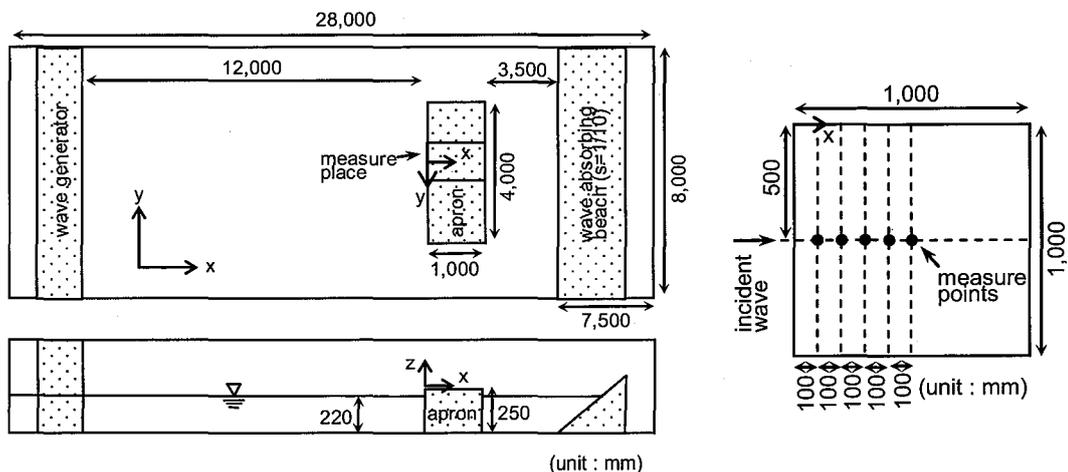


図-4.2.1.1 実験水路

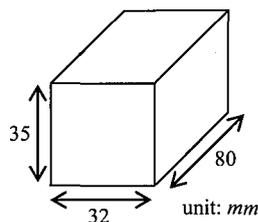


図-4.2.1.2 20 フィートコンテナ模型

表-4.2.1.1 模型の重量

名称	G1	G2	G3	G4	G5	G6
重量 (N)	0.15	0.23	0.30	0.39	0.51	0.82

4. 2. 2 再現計算

a) 遡上水位及び流速の計算

津波計算は、水路を模擬し x 方向に海域 9 m + エプロン上 1 m + エプロン背後の海域 3 m = 13 m で水路幅 1 m を対象区間にして、非線形長波理論方程式を用いた。

$$\text{(連続式)} \quad \frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{\partial M}{\partial x} + \frac{\partial N}{\partial y} = 0 \quad (4.2.2.1)$$

(運動方程式)

$$\frac{\partial M}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{M^2}{D} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{MN}{D} \right) + gD \frac{\partial \eta}{\partial x} + \frac{gn^2}{D^{7/3}} M \sqrt{M^2 + N^2} = 0 \quad (4.2.2.2)$$

$$\frac{\partial N}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{MN}{D} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{N^2}{D} \right) + gD \frac{\partial \eta}{\partial y} + \frac{gn^2}{D^{7/3}} N \sqrt{M^2 + N^2} = 0 \quad (4.2.2.3)$$

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,

海域において分裂や砕波が観察された場合、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。津波が遡上すると、リーブフロッグ法により計算した。

$$\text{(連続式)} \quad \frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{\partial M}{\partial x} + \frac{\partial N}{\partial y} = 0 \quad (4.2.2.4)$$

(運動方程式)

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial M}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{M^2}{D} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{MN}{D} \right) + gD \frac{\partial \eta}{\partial x} + \frac{gn^2}{D^{7/3}} M \sqrt{M^2 + N^2} \\ = \frac{h^2}{3} \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\partial^2 M}{\partial t \partial x} + \frac{\partial^2 N}{\partial t \partial y} \right) \end{aligned} \right\} \quad (4.2.2.5)$$

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial N}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{NM}{D} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{N^2}{D} \right) + gD \frac{\partial \eta}{\partial y} + \frac{gn^2}{D^{7/3}} N \sqrt{M^2 + N^2} \\ = \frac{h^2}{3} \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{\partial^2 M}{\partial t \partial x} + \frac{\partial^2 N}{\partial t \partial y} \right) \end{aligned} \right\} \quad (4.2.2.6)$$

入射波形は、造波板から 3 m 離れた地点で計測されている水位データを用い、計算格子間隔は $\Delta x = \Delta y = 0.1\text{ m}$ で、計算時間間隔は 0.01 s である。 Manning の粗度係数は $0.01\text{ m}^{-1/3/\text{s}}$ (海域, 遡上域で同じ), 護岸では堰の越流公式を用いた。遡上条件は岩崎・真野の方法を用いた。砕波条件は佐藤 (1995) による手法であり、波速と水粒子速度比の限界値 $\lambda = 0.6$ とした。ただし,

$$u_s = \bar{u} - \left(\frac{D^2}{2} - \frac{h^2}{6} \right) \frac{\partial \bar{u}}{\partial x^2} = \frac{M}{D} - \left(\frac{D^2}{2} - \frac{h^2}{6} \right) \frac{1}{D} \frac{\partial M}{\partial x^2} \quad (4.2.2.7)$$

$$c = \sqrt{gD}$$

図-4.2.2.1 に、CASE 7 の遡上水位の時間波形の計算結果と実験結果とを示す。なお、時間

軸の原点は、造波板から 9 m 離れた地点に入射波が到達した時間がゼロである。コンテナの初期位置に近い $x=30$ cm, 50 cm の計算結果と実験結果とを比較すると、到達時刻は計算結果の方がやや早い。第一波の継続時間は同じ程度の長さになっている。また、水位は計算結果の方がやや大きい。また、 $x=30$ cm から 50 cm にかけての水位低下の傾向は再現できている。また、計算結果の $x=50$ cm について、 $t=13$ s 以降に比較的大きな浸水深が表れているが、実験で漂流軌跡の測定は移動開始から 2 秒程度の間なので、浸水開始から 2 秒程度を対象にすれば、 $t=13$ s 以降の比較的大きな浸水深の影響を除外できる。

図-4.2.2.2 に、最大流速の計算結果と実験結果を示す。計算結果は実験結果よりも全般にやや大きく、 $x=10$ cm ~ 30 cm まで計算結果が大きくなっているが、 $x=40$ cm, 50 cm では差が小さくなっている。また、 $x=20$ cm にピークがあるような最大流速の分布の特徴を再現できている。

以上から、計算結果は、水位及び流速について実験結果と若干の差異があるものの、概ね実験における遡上波の流況を再現しているものと考え、漂流シミュレーションに用いた。

b) コンテナ漂流計算

a) の遡上計算結果を用い、コンテナの漂流計算を実施した。図-4.2.2.3 に 20 フィートコンテナ模型を $2 \times 2 \times 5$ 個の球形要素でモデル化したものを示す。球形要素の半径 $r=0.00875$ m, 上下方向の球形要素間の中心間隔は 0.0175 m, 長軸方向及び幅方向の球形要素間の中心間隔はそれぞれ 0.015625 m 及び 0.0145 m である。表-4.2.2.1 に、計算条件をまとめて示す。

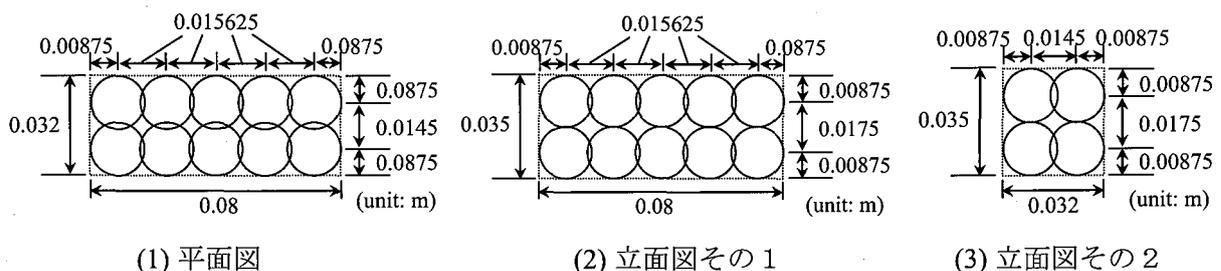
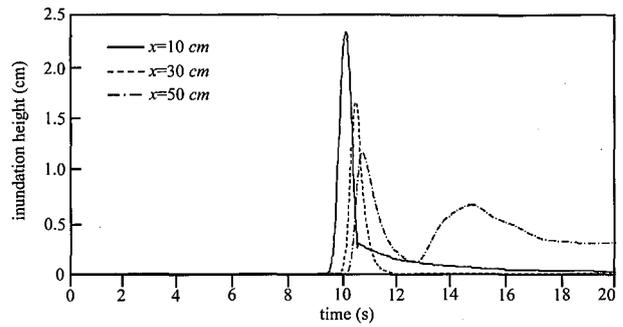
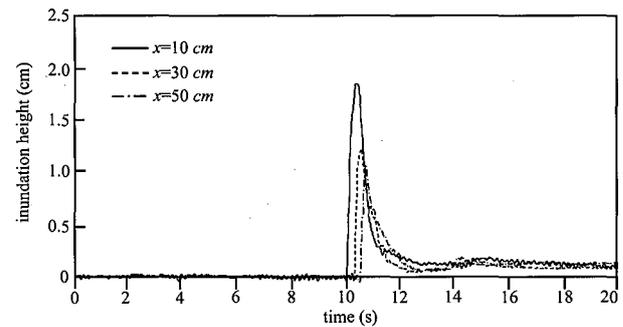


図-4.2.2.3 20 フィートコンテナ模型



(1) 計算結果



(2) 実験結果

図-4.2.2.1 遡上水位の時間波形 (Case7)

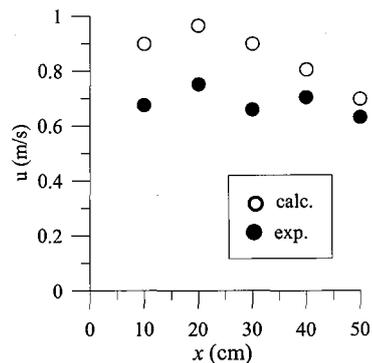


図-4.2.2.2 最大流速 (Case7)

表-4.2.2.1 計算条件

流れ	模型実験の再現計算結果	
計算の対象	コンテナ蔵置位置・本数	$x=30.5\text{ cm}$ または 50.5 cm , 1個
	時間	$t=0\sim 12\text{ s}$ ($\Delta t=0.0000005\text{ s}$)
コンテナの特性	形状・重量	20フィート一般コンテナ, $0.15\sim 0.81\text{ N}$
	球形要素数・半径・密度	20個 ($2\times 2\times 5$), 0.00875 m , 107.0 kg/m^3
	バネ係数	(法線方向) 1.0×10^5 , (接線方向) 2.5×10^4
	減衰係数	(法線方向) 3.58×10^2 , (接線方向) 1.79×10^2
	静止摩擦係数 μ ・動摩擦係数 μ'	0.776, 0.776
	沈没	なし
作用力に係る定数	流れ抗力係数 C_D ・慣性力係数 C_M	別表
	風抗力係数 C_a ・風向風速	0.0, 風なし
	流体の密度	$1,000\text{ kg/m}^3$

表-4.2.2.2 に、流れ抗力係数 C_D と慣性力係数 C_M の組合せを示す。 C_D は 0.5, 1.0, 1.5, C_M は 1.0, 1.5, 2.0 の三段階に変化させて、図中に○を印した5つの組合せで計算した。

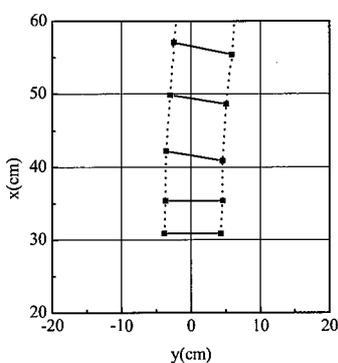
表-4.2.2.2 C_D と C_M

		C_D		
		0.5	1.0	1.5
C_M	1.0	-	○	-
	1.5	○	○	○
	2.0	-	○	-

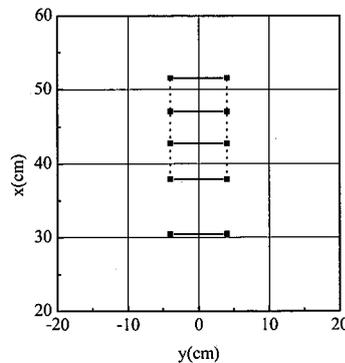
図-4.2.2.4(1)に、初期位置 $x=30.5\text{ cm}$, 重量 $G1$ のときの実験結果を示す。図中の直線はコンテナ模型の軸の位置を表し、図の下側から上側に向かって津波が浸水してくるときの、移動開始から 0.4 秒までの軌跡が 0.1 秒間隔で描かれている。

0.4 秒後には、 $x=56\text{ cm}$ 付近に到達した。図-4.2.2.4(2)~(6)は計算結果であり、 C_D と C_M の値は図タイトル位置に示した。なお、実験結果の移動開始の瞬間と、計算結果の移動開始の瞬間を完全に一致させることは困難であった。そこで、実験結果の静止位置からはじめに動いた時点(図(1)の $x=36\text{ cm}$ 付近に描かれている軌跡)の時刻と、計算結果で最も近傍にあった軌跡の時刻とを同期させた。計算結果は、そこから 0.1 秒間隔で描いている。以下、他のケースも同様である。

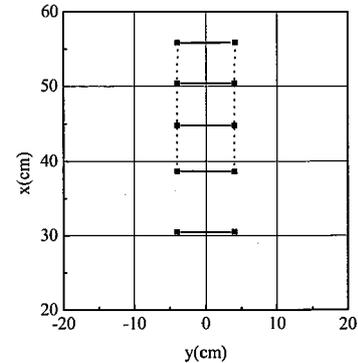
C_M を固定し C_D を変化させた(2)~(4)では、 $C_D=0.5$ のとき $x=51.6\text{ cm}$, $C_D=1.5$ のとき $x=59.8\text{ cm}$ の位置にありその違いは 8.2 cm となって、実験結果は $C_D=0.5$ から 1.5 の範囲に収まった。また、(3)に対し C_M を変化させた(5), (6)では、 C_M を 1.0~2.0 まで変化させた場合、 $C_M=1.0$ のとき $x=55.7\text{ cm}$, $C_M=2.0$ のとき $x=55.8\text{ cm}$ の位置にあり、その違いは 0.1 cm となった。



(1) 実験結果

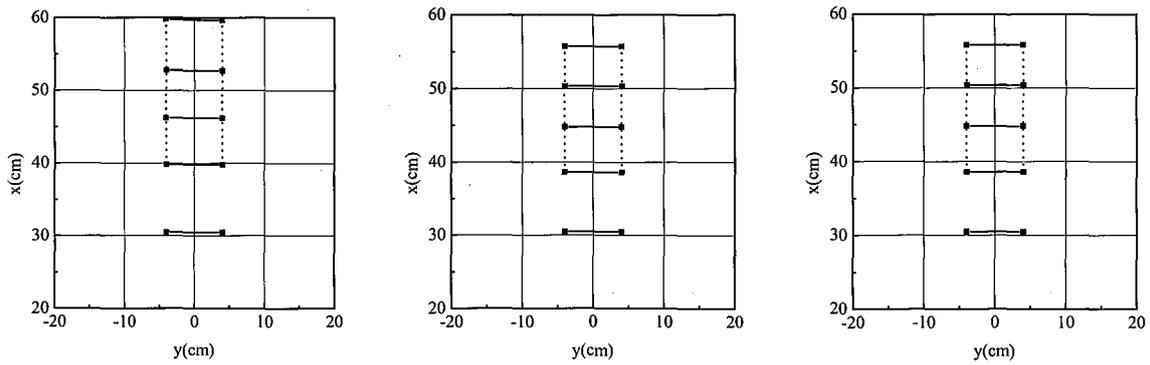


(2) 計算結果 $C_D=0.5, C_M=1.5$



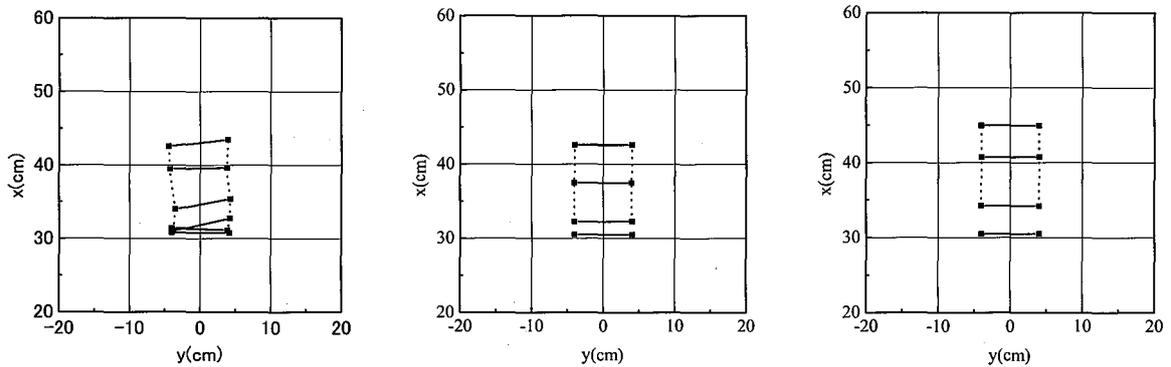
(3) 計算結果 $C_D=1.0, C_M=1.5$

図-4.2.2.4 漂流軌跡 (重量 $G1$, 初期位置 $x=30.5\text{ cm}$)

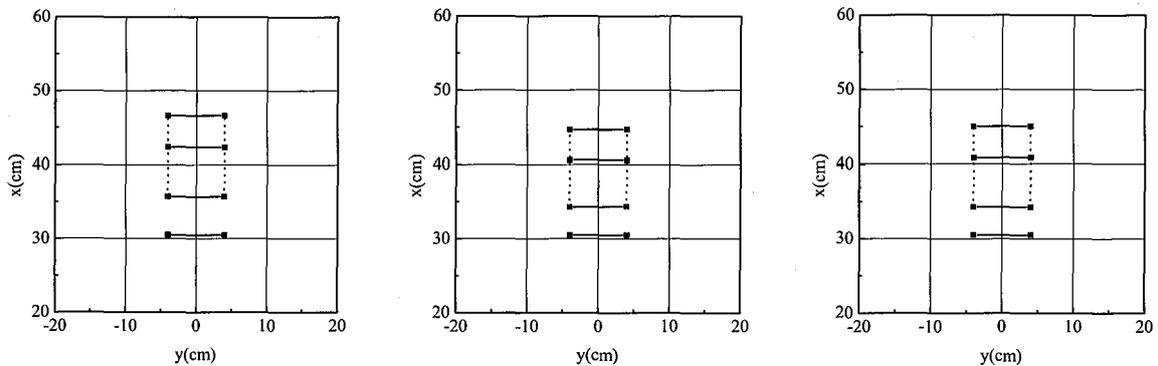


(4)計算結果 $C_D=1.5, C_M=1.5$ (5)計算結果 $C_D=1.0, C_M=1.0$ (6)計算結果 $C_D=1.0, C_M=2.0$
 図-4.2.2.4 漂流軌跡 (重量 G1, 初期位置 $x=30.5$ cm)

図-4.2.2.5(1)に、重量G5の実験結果を示す。移動開始から 0.5 秒後に、 $x=43$ cm付近に到達した。 C_M を固定し C_D を変化させた(2)~(4)では、 $C_D=0.5$ のとき $x=42.6$ cm, $C_D=1.5$ のとき $x=46.6$ cmの位置にありその違いは 4.0 cmとなって、実験結果は $C_D=0.5$ から 1.5 の範囲に収まった。また、 C_M を変化させた場合、 $C_M=1.0$ のとき $x=44.7$ cm, $C_M=2.0$ のとき $x=45.0$ cmの位置にあり、その違いは 0.3 cmとなった。



(1) 実験結果 (2)計算結果 $C_D=0.5, C_M=1.5$ (3)計算結果 $C_D=1.0, C_M=1.5$



(4)計算結果 $C_D=1.5, C_M=1.5$ (5)計算結果 $C_D=1.0, C_M=1.0$ (6)計算結果 $C_D=1.0, C_M=2.0$
 図-4.2.2.5 漂流軌跡 (重量 G5, 初期位置 $x=30.5$ cm)

図-4.2.2.6(1)に、初期位置 $x=51.5$ cm, 重量G1の実験結果を示す. 移動開始から0.6秒後に,
 $x=80$ cm付近に到達した. C_M を固定し C_D を変化させた(2)~(4)では, $C_D=0.5$ のとき $x=68.5$ cm,
 $C_D=1.5$ のとき $x=82.5$ cmの位置にありその違いは14.0 cmとなって, 実験結果は $C_D=0.5$ から1.5
 の範囲に収まった. また C_M を1.0~2.0まで変化させた場合, $C_M=1.0$ のとき $x=81.3$ cm, $C_M=2.0$
 のとき $x=81.5$ cmの位置にあり, その違いは約0.2 cmとなった.

初期位置 $x=51.5$ cm, 重量G5の実験結果は, 水平面内で回転していたため検証対象から除
 外した. そこで, 代わりに重量G6のケースを対象とした. 図-4.2.2.7(1)に, 実験結果を示す.
 移動開始から0.5秒後に, $x=58$ cm付近に到達した. C_M を固定し C_D を変化させた(2)~(4)では,
 $C_D=0.5$ のとき $x=55.7$ cm, $C_D=1.5$ のとき $x=60.0$ cmの位置にありその違いは4.3 cmとなって,
 実験結果は $C_D=0.5$ から1.5の範囲に収まった. また C_M を1.0~2.0まで変化させた場合, $C_M=1.0$
 のとき $x=60.0$ cm, $C_M=2.0$ のとき $x=60.1$ cmの位置にあり, その違いは約0.1 cmとなった.

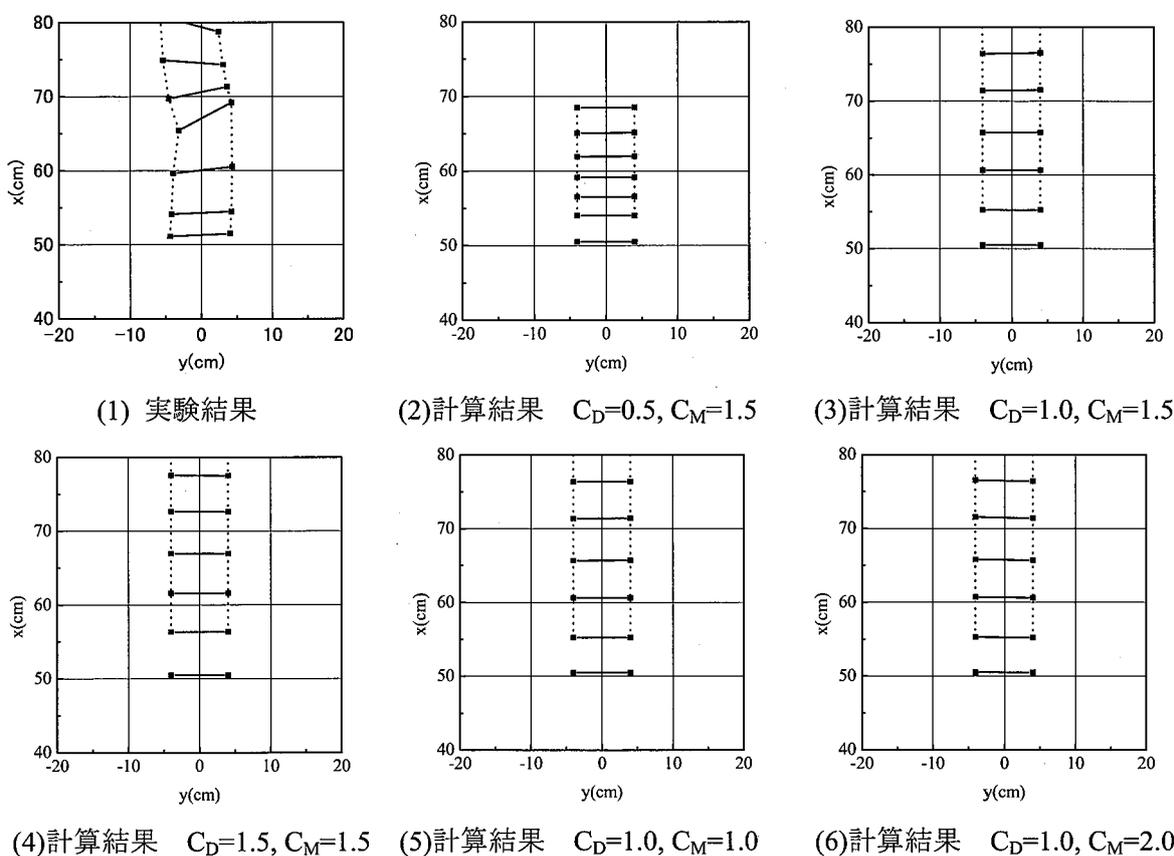


図-4.2.2.6 漂流軌跡 (重量 G1, 初期位置 $x=50.5$ cm)

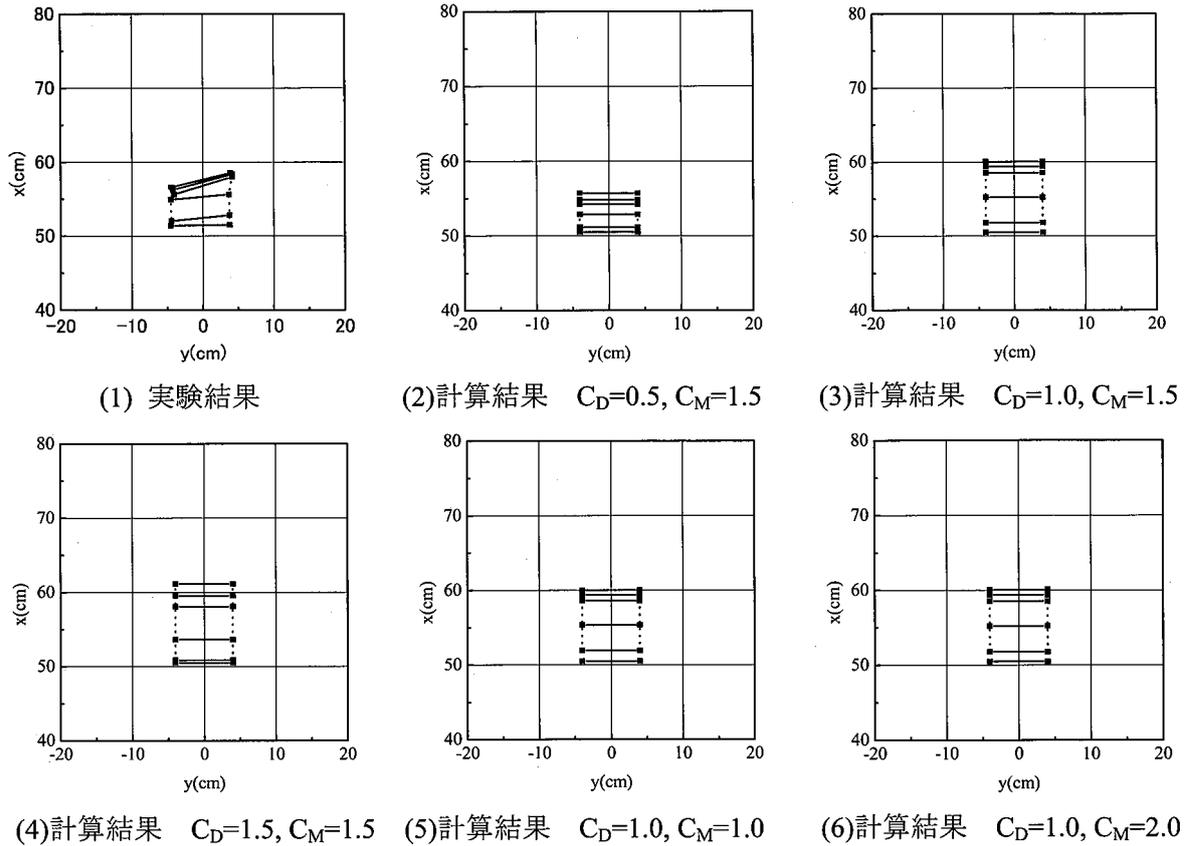


図-4.2.2.7 漂流軌跡 (重量 G6, 初期位置 $x=50.5 \text{ cm}$)

4. 2. 3 結果の検討

コンテナ模型の漂流挙動の再現計算を行い、実験結果はいずれも慣性力係数 $C_M=1.5$ 、流れ抗力係数 $C_D=0.5\sim 1.5$ で変化させた範囲内となった。ただし、そのなかで $C_D=0.5$ とした方が再現性がよい場合(図-4.2.2.5(2))、 $C_D=1.0$ または 1.5 とした方が再現性がよい場合(図-4.2.2.6(3), (4))があり、ばらつきがあった。

移動開始から $0.4\sim 0.6$ 秒程度の挙動を対象として、 C_D を $0.5\sim 1.5$ まで変化させると移動距離は $4.0\sim 14.0 \text{ cm}$ の範囲で変化した。模型重量が大きい場合と比べ、模型重量が小さいと移動距離の変化は小さくなった。

同じ挙動を対象として、 C_M を $1.0\sim 2.0$ まで変化させると移動距離は $0.1\sim 0.3 \text{ cm}$ の範囲で変化した。これは、 C_D を $0.5\sim 1.5$ まで変化させた場合と比べると小さい。

津波計算の精度が漂流挙動の再現性に影響するため、 C_D を確定的に定めるのは難しいが、以後の計算では流れ抗力係数 C_D は 1.0 を用いる。これは、 $0.5\sim 1.5$ の中央値であることと、また、 $C_D=1.0$ としたときに再現性が比較的良好な場合が複数(図-4.2.2.4(3)及び図-4.2.2.6(3))あったためである。また、慣性力係数 C_M は、 $1.0\sim 2.0$ の範囲で変化させても移動距離の変化が小さいこと、また、Stelson et al. (1955)が単体の球について 1.5 を提案していることから、以後の計算では 1.5 を用いる。

なお、実験結果は $0.4\sim 0.6$ 秒間の比較的短い時間内のコンテナ模型の移動を測定したものである。また、いずれも水平面内でやや回転しながら移動している。今後、 C_D 及び C_M の値を精査するためには、それらの点に留意しつつ再現計算等を行う必要がある。

4. 3 港湾におけるコンテナ漂流・衝突のシミュレーション

4. 3. 1 津波計算

a) 津波伝搬・遡上モデル

津波計算の基礎方程式として、1.3.2節の非線形長波方程式及び連続式を用いた。

b) 計算格子と差分法

計算格子は、大領域から小領域まで6つの領域に分割した。表-4.3.1.1に各領域における格子サイズ、格子数の一覧を示す。格子サイズは1,350m~12.5m、格子数は最少格子サイズの領域6で東西方向に510、南北方向に660である。メッシュデータの座標系はUTM座標系とし、原点座標は東経138度0分0秒、北緯39度0分0秒である。

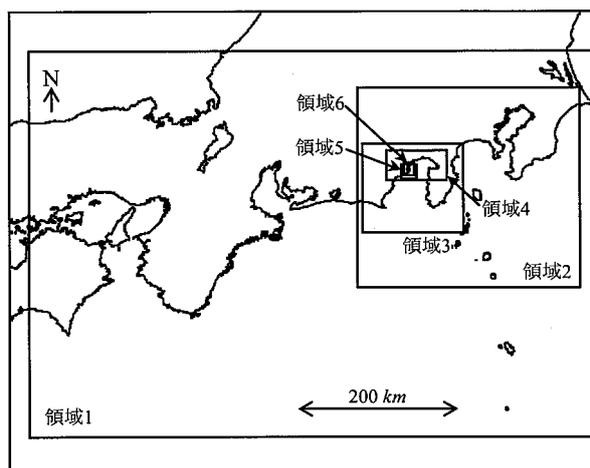


図-4.3.1.1 領域の位置

c) 地形条件

津波計算の地形は平成19年度末の現況地形を用いた。すなわち、陸上は新興津ふ頭の既設岸壁（水深-15m、延長350m）、その背後の既設ふ頭用地（7.8ha）及び港湾関連用地（3.9ha）を含めた地形とし、防波堤は平成19年度末の延伸完了部分まで（三保防波堤330m、外港防波堤1,300m、新興津防波堤270m）とした。

表-4.3.1.1 計算格子

領域	格子サイズ (m)	格子数	
		I方向	J方向
1	1,350	500	340
2	450	570	540
3	150	537	507
4	50	150	180
5	25	270	340
6	12.5	510	660

d) 初期水位分布及び潮位

初期水位分布（波源）は、中央防災会議による想定震源域に付加領域としてその東側及び南側に位置するA、B及びDを加えた。潮位は朔望平均満潮位（H.W.L.）のT.P.+0.86mとした。潮位は津波計算時間あいだH.W.L.で一定とした。

e) 総計算時間及びデータの出力間隔

領域6の全ての格子について、地震発生から6時間後まで1秒間隔で流速2成分及び水位を出力した。

f) 津波計算結果

・最大流速ベクトルの分布

図-4.3.1.2に、領域6について最大流速ベクトル及び最大浸水域を示す。これによると、清水港では内陸に最大で約1km程度浸水が生じ、北側の新興津ふ頭で最大約5m/s程度の流速が生じている。

・最大浸水深の分布

図-4.3.1.3に、最大浸水深の分布を示す。これによると、新興津ふ頭では0~0.8m、興津第二ふ頭では0~0.4m、袖師第一ふ頭では0~0.7mの浸水深が生じている。



図-4.3.1.2 最大流速及び最大浸水範囲

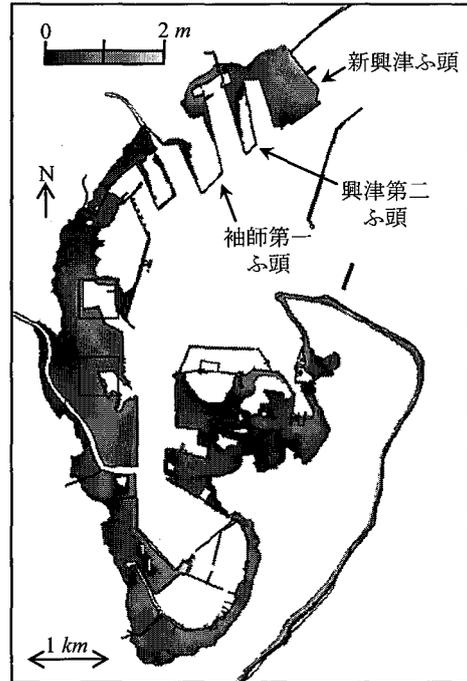


図-4.3.1.3 最大浸水深

・港内の水位及び流速

図-4.3.1.4 に示す港内の主要点の水位及び流速（3分間の平均流速）を出力した。出力した地点数は、海域9点（No.1～9）、陸域9点（No.11～18）である。なお、附録-2に各点の格子番号を示した。図-4.3.1.5及び図-4.3.1.6は、それぞれ各点の水位及び流速である。水位については、水位ゼロ（朔望平均満潮位 H.W.L., T.P.+0.86 m）からの変動を示している。海域（No.1～9）は、周期 10 分程度の周期の短い波を含んでいるものの、約 1 時間程度の周期で最大 2.5m 程度の振幅で振動している。陸域（No.11～18）は、地震発生後 1,800 秒（30 分間）までに第一波が遡上し、最大浸水深は、数十 cm から 1m 程度である。地点によって 3,600 秒（1 時間）前後に第二波が遡上しているところもある。そのあとの平坦な部分はその場所の標高とほぼ一致している。

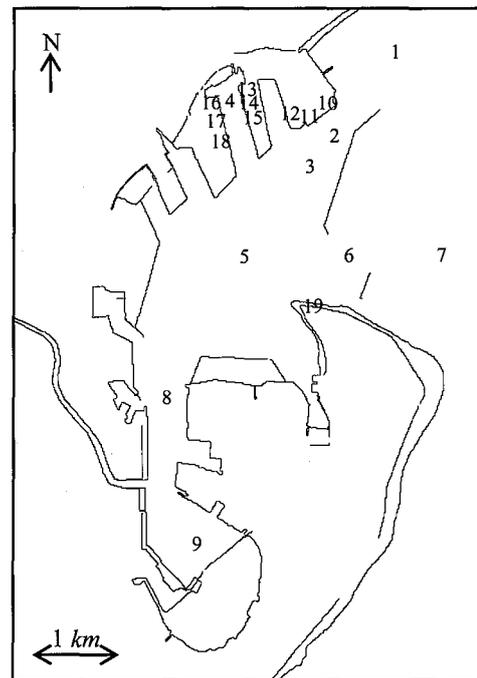
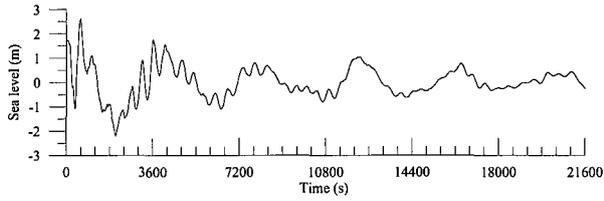
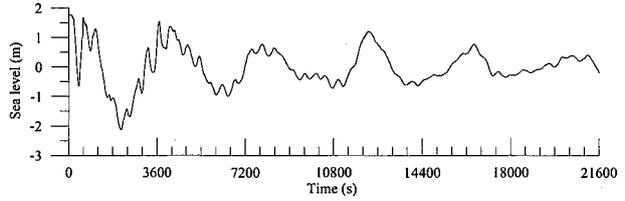


図-4.3.1.4 水位及び流速の出力点

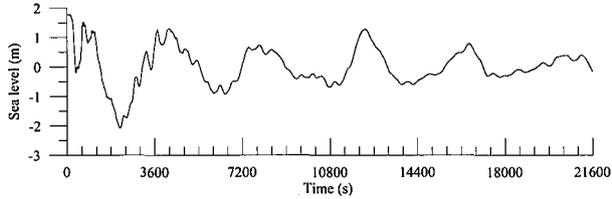
流速は、No.2, 6 及び 8（防波堤開口部または水路狭窄部）であり、3分間の平均流速で最大 1.5 m/s を超える比較的強い流れが発生している。また、No.2, 6 及び 8 は 3,600 s（地震発生から 1 時間）以降も最大 0.5 m/s 程度の周期的な流れが生じているが、他の地点の流速は、3,600～7,200 s 以降は比較的小さくなっている。



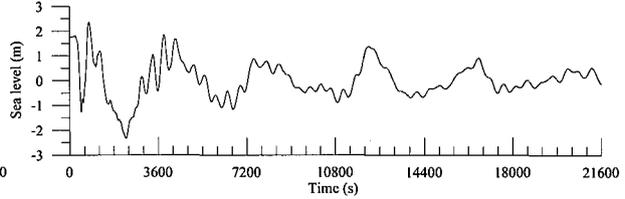
(1) 地点 No.1



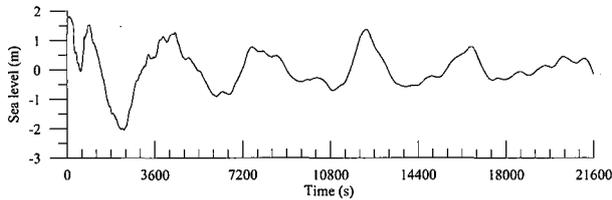
(2) 地点 No.2



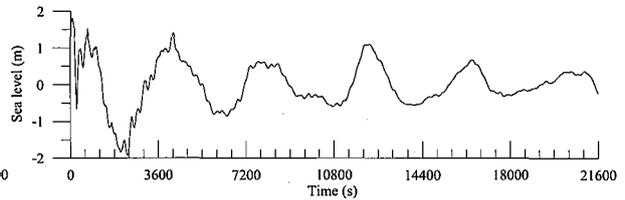
(3) 地点 No.3



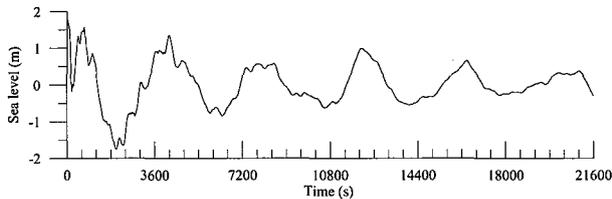
(4) 地点 No.4



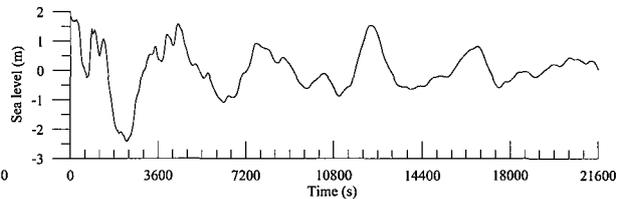
(5) 地点 No.5



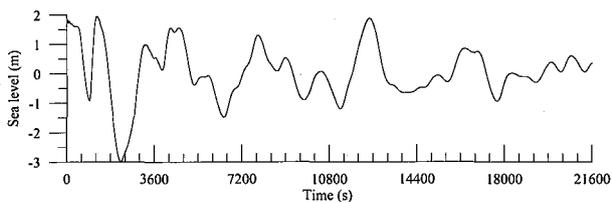
(6) 地点 No.6



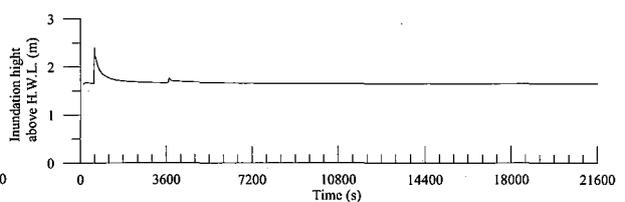
(7) 地点 No.7



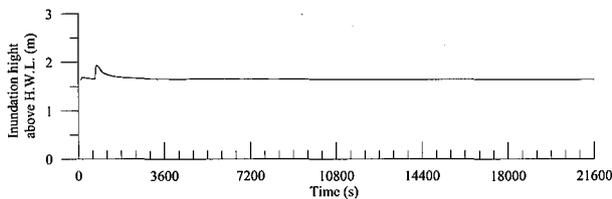
(8) 地点 No.8



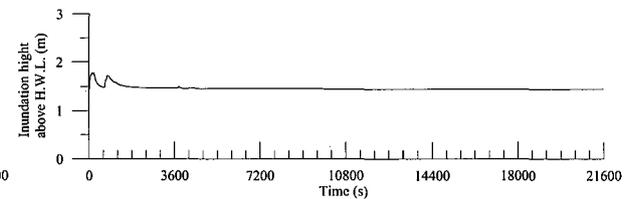
(9) 地点 No.9



(10) 地点 No.10

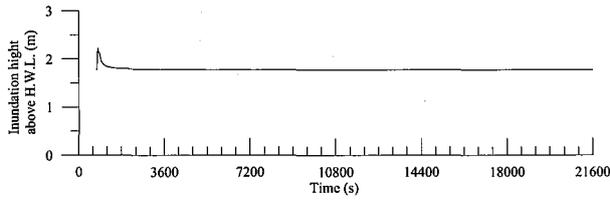


(11) 地点 No.11

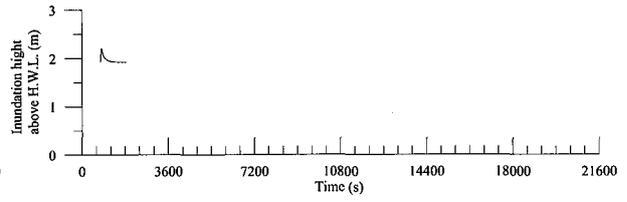


(12) 地点 No.12

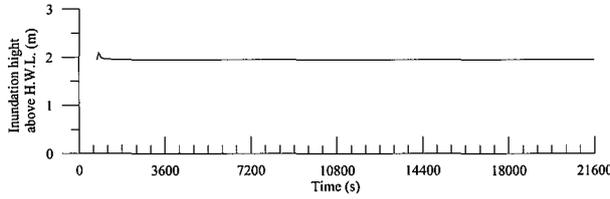
図-4.3.1.5 水位の時間変化



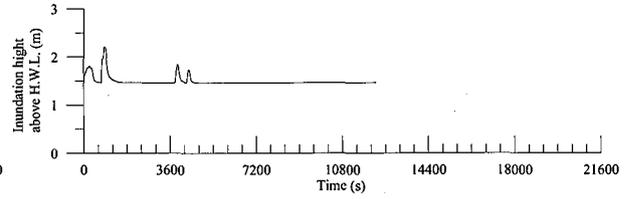
(13) 地点 No.13



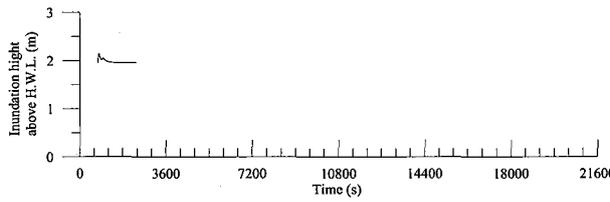
(14) 地点 No.14



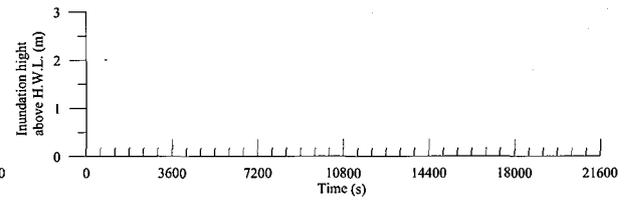
(15) 地点 No.15



(16) 地点 No.16

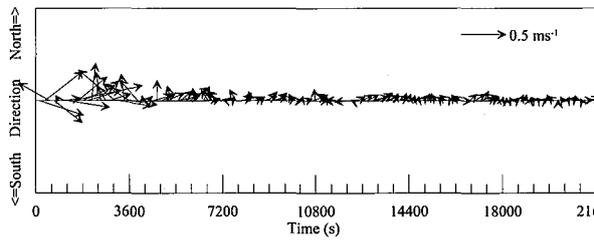


(17) 地点 No.17

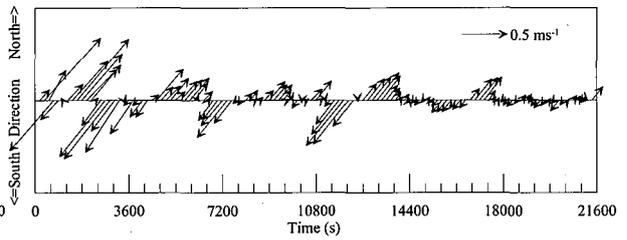


(18) 地点 No.18

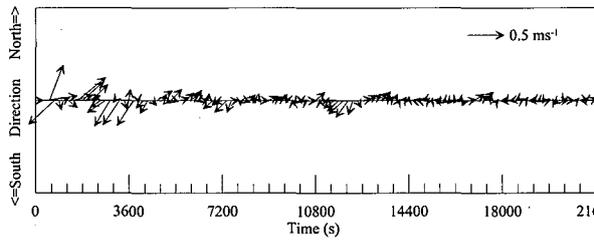
図-4.3.1.5 水位の時間変化



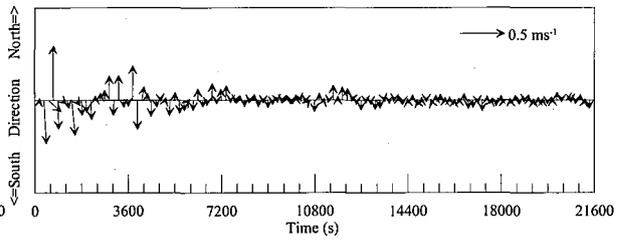
(1) 地点 No.1



(2) 地点 No.2

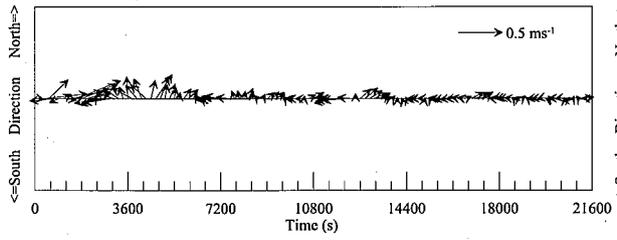


(3) 地点 No.3

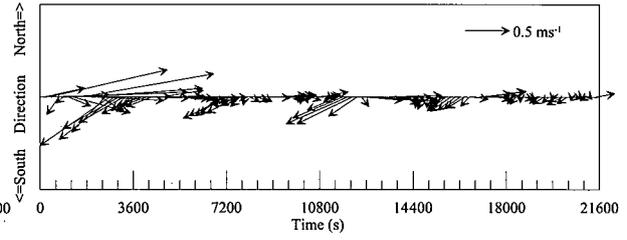


(4) 地点 No.4

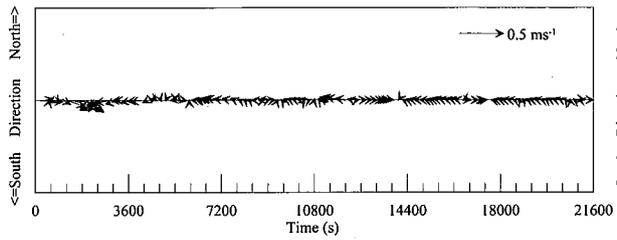
図-4.3.1.6 流速の時間変化



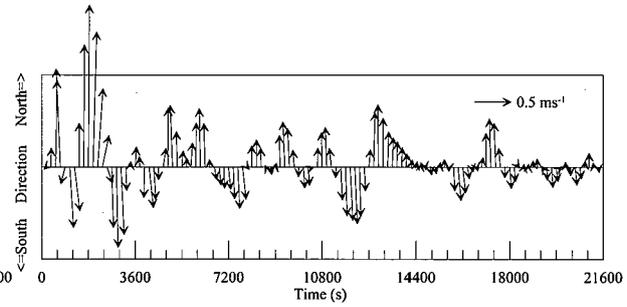
(5) 地点 No.5



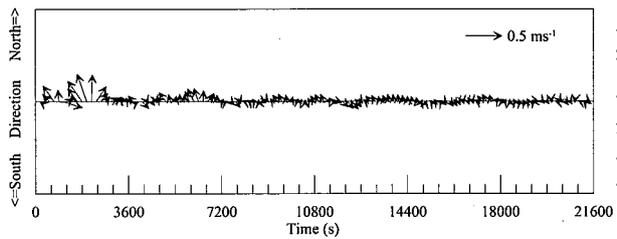
(6) 地点 No.6



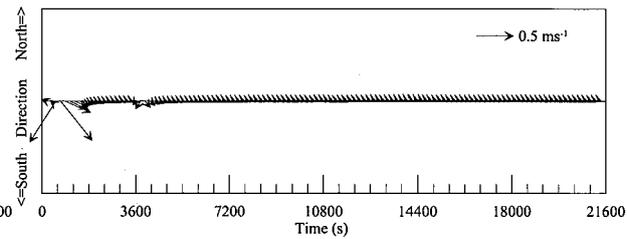
(7) 地点 No.7



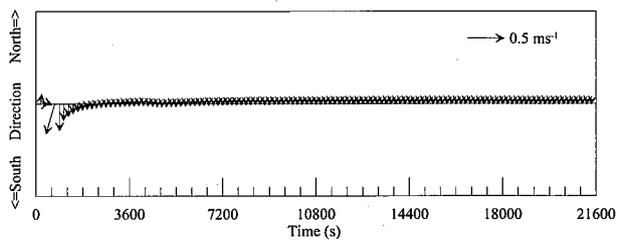
(8) 地点 No.8



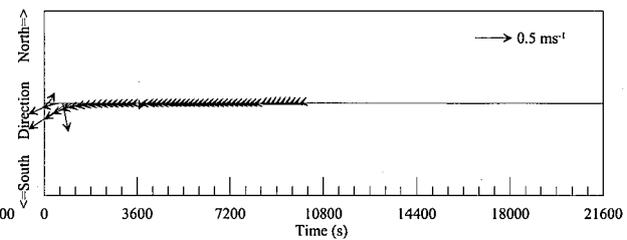
(9) 地点 No.9



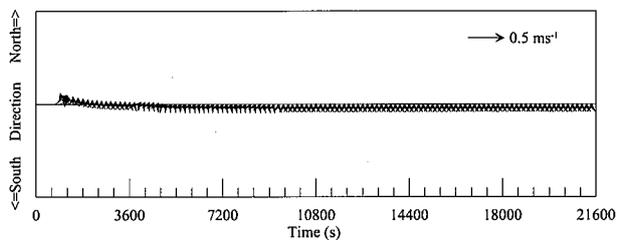
(10) 地点 No.10



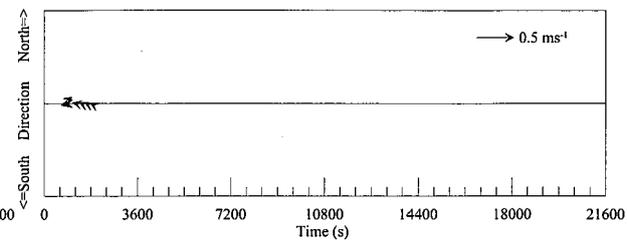
(11) 地点 No.11



(12) 地点 No.12

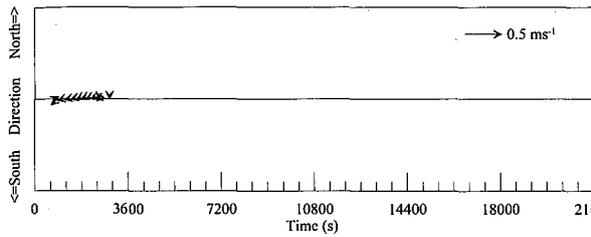


(13) 地点 No.13

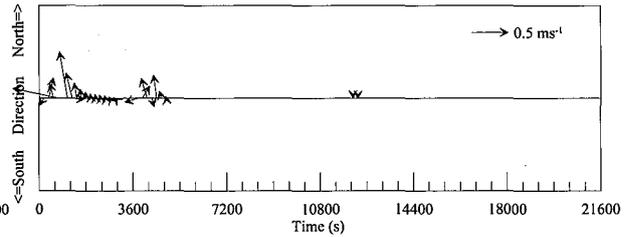


(14) 地点 No.14

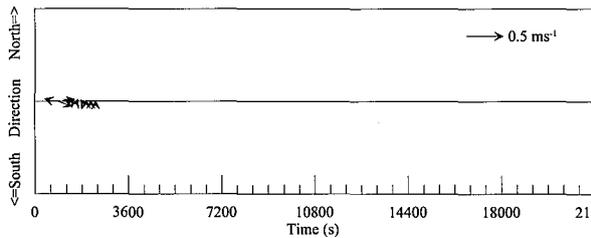
図-4.3.1.6 流速の時間変化



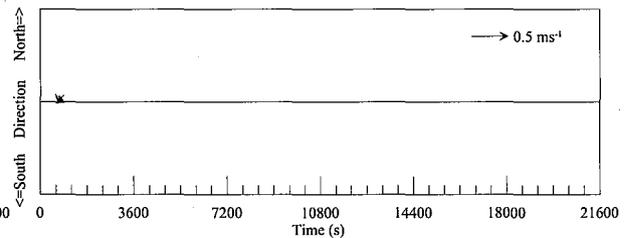
(15) 地点 No.15



(16) 地点 No.16



(17) 地点 No.17



(18) 地点 No.18

図-4.3.1.6 流速の時間変化

図-4.3.1.5(12), (16)では、地震発生直後 ($t=0\sim 500$ s) に最大 0.3 m 程度の浸水深が生じているが、これは計算条件の初期設定で設定した、地震直後の地盤沈下を考慮した地盤高と海面水位の影響によるものであり、実際には生じない。したがって、4. 3. 2 項以下の漂流計算では、 $t=0\sim 500$ s の間の水位変化はゼロして計算した。

4. 3. 2 漂流計算 (標準ケース)

a) 個数及び初期位置

清水港のふ頭のうちコンテナが蔵置されているのは主に、新興津ふ頭、興津第二ふ頭、袖師第一ふ頭である (位置は図-4.3.1.3 を参照)。それぞれのふ頭について、航空写真からコンテナの形状、蔵置向き、個数等を判読し、計算に用いるコンテナの個数及び初期位置を設定した。

・新興津ふ頭

図-4.3.2.1 の左に、蔵置状況を示す。コンテナはふ頭南側に蔵置されており、形状は長さ 40 フィートのコンテナが主体であった。蔵置向きは岸壁と平行方向に置かれているものと直角方向に置かれているものがあった。

計算では、東側から a, b, c 及び d の 4 つの部分に分け、それぞれ 156 個 (26×6 列)、18 個 (3×6 列)、11 個 (1×6 列)、60 個 (10×6 列) の計 245 個の 40 フィートコンテナを 1 段積みで配置した。このとき、コンテナの蔵置間隔は、東京港品川ふ頭におけるコンテナスロットの大きさに関する調査結果 (井上ら (1979)) を参考に、現地の蔵置状況を考慮して、図-4.3.2.2 のように配置した。コンテナ 1 個あたりの専有スペースの大きさは 13.4×3 m である。

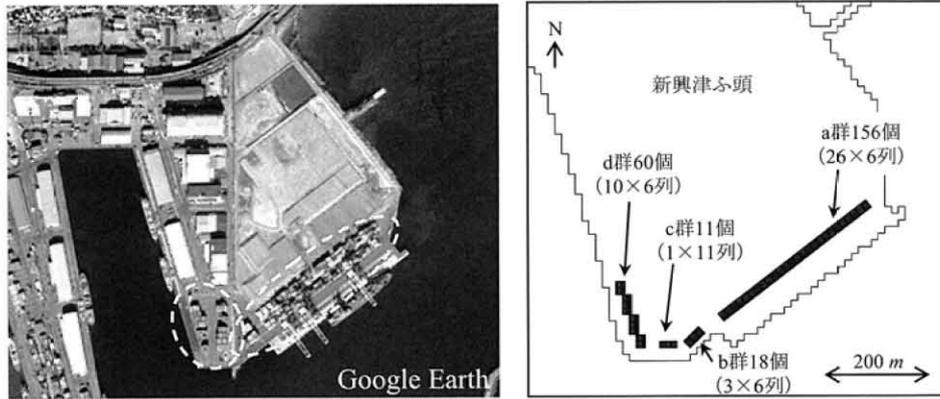


図-4.3.2.1 新興津ふ頭のコンテナ蔵置状況（左）及び計算の初期位置（右）

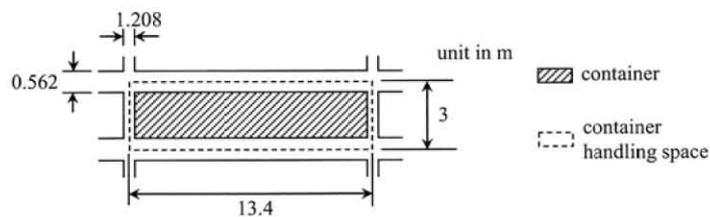


図-4.3.2.2 40 フィートコンテナの蔵置間隔

・興津第二ふ頭

図-4.3.2.3の左に、蔵置状況を示す。コンテナはふ頭西側に北端から南端まで蔵置されており、形状は長さ40フィートのコンテナが主体であった。蔵置向きは岸壁と平行方向である。また、コンテナの蔵置場所の東側に隣接して上屋が4棟ある。

図-4.3.1.2によれば、興津第二ふ頭は北側が浸水し南側はほとんど浸水しない。そこで、計算では、ふ頭北寄りに144個(24×6列)の40フィートコンテナを岸壁と平行に1段積みで配置した。

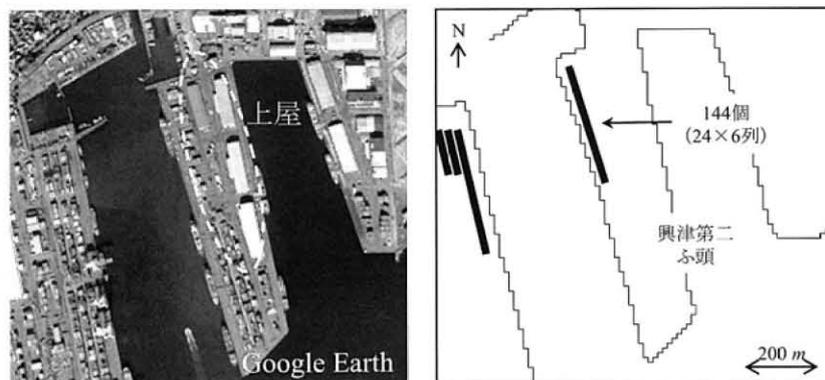


図-4.3.2.3 興津第二ふ頭のコンテナ蔵置状況（左）及び計算の初期位置（右）

・袖師第一ふ頭

図-4.3.2.4の左に、蔵置状況を示す。コンテナは主としてふ頭西側に蔵置されており、形状は長さ40フィートのコンテナが主体であった。蔵置向きは岸壁と平行方向に置かれていた。

図-4.3.1.2の津波計算の結果によれば、袖師第一ふ頭は北側が浸水し南側はほとんど浸水しない。そこで、計算では、ふ頭北側に258個（ 25×6 列+ 9×6 列+ 9×6 列）の40フィートコンテナを岸壁と平行に1段積みで配置した。

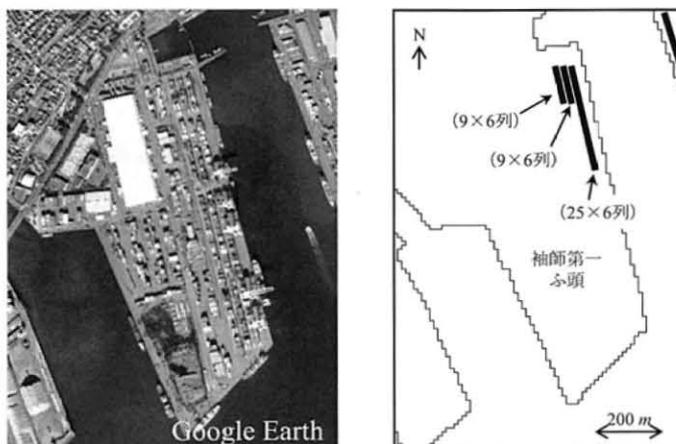


図-4.3.2.4 袖師第一ふ頭のコンテナ蔵置状況（左）及び計算の初期位置（右）

b) 質量

ふ頭に蔵置されているコンテナの質量はまちまちである。40フィートコンテナの場合、日本工業標準調査会（1996）により満載のときの総質量（空の質量と積載貨物質量との和）は30,480 kgと規定されている。空の質量の規定はなく、約4,000 kgである。

図-4.3.2.5は、柴崎ら（2004）による、我が国のある中核国際港湾で調べた外貿コンテナの質量ごとのシェアをコンテナ形状（20フィート、40フィート及び40フィート背高コンテナ）別に示している（柴崎ら（2004）から引用）。横軸は質量、縦軸は個数ベースのシェアである。これによれば、40フィートコンテナは輸出では6,000~8,000 kgが最も多く、輸入では4,000~6,000 kgが最も多い。そこで、40フィートコンテナの総質量は6,000 kgとした。

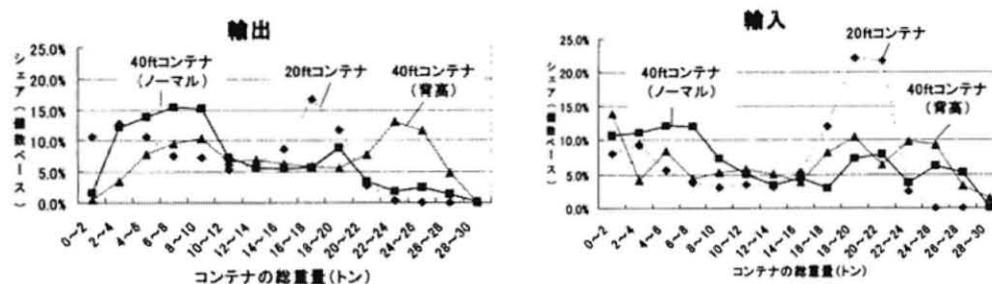


図-4.3.2.5 コンテナのタイプ別貨物積載量

c) バネ係数及び減衰係数

中村ら(2000)は、実物20フィートコンテナの面内せん断（ラッキング）剛性を実験により測定している。図-4.3.2.6に、実験状況を示す（中村ら（2000）から引用）。実験は、コンテナ船の船倉最下段に積載されたコンテナを想定して、コンテナ下端を固定し、反力壁とコ

テナ上端との間に油圧ジャッキを設置し、水平方向に 20 kNごとに最大 140 kNまで荷重を加え、加重点の水平変位を測定している。図-4.3.2.7の左にDoor end (扉がある面)の結果を、右にClosed end (扉がない面)の結果を示す(中村ら(2000)から引用)。その結果、Door end及びClosed endの面内せん断剛性をそれぞれ 6.72×10^6 N/m及び 2.49×10^7 N/mとしている。

実験対象は20フィートコンテナであるが、20フィートコンテナと40フィートコンテナは、骨組部分の剛性は同等と考えられる。そこで、計算対象の40フィートコンテナについて、計算の安定性を考慮して、要素間の法線方向のバネ係数は 1.00×10^6 N/mとした。接線方向のバネ係数、法線方向の減衰係数及び接線方向の減衰係数は、4。2節と同様に、それぞれ 2.5×10^5 N/m (法線方向の1/4)、 1.13×10^3 Ns/m及び 5.66×10^2 N/m (法線方向の1/2)とした。

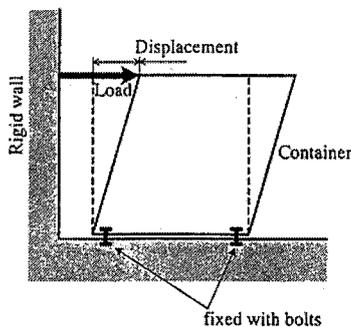


図-4.3.2.6 面内せん断剛性の測定

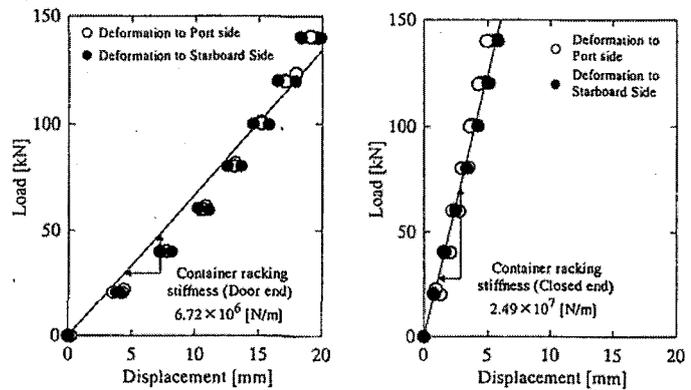


図-4.3.2.7 コンテナの荷重—変位関係

d) 静止摩擦係数

本田ら(1980)は、旧関東郵船運輸(現株式会社ユニエックス)本牧ふ頭 A-7 バース及び日本コンテナ・ターミナル株式会社大井コンテナメンテナンス場において、実物コンテナとアスファルト面、実物コンテナと実物コンテナとの間の静止摩擦係数をそれぞれ測定した。その結果、コンテナとアスファルト面との間の静止摩擦係数は乾燥状態で $\mu=0.56$ 、湿潤状態で $\mu=0.53$ であり、コンテナとコンテナとの間の静止摩擦係数は乾燥状態で $\mu=0.45$ 、湿潤状態で $\mu=0.375$ と報告している。そこで、コンテナとふ頭地面との間の静止摩擦係数 $\mu=0.53$ とした。 μ と摩擦角 θ の関係は、

$$\mu = \tan \theta \quad (4.3.2.1)$$

であり、 $\mu=0.53$ のとき $\theta=27.9$ deg となる。また、動摩擦係数の値は情報がないため、静止摩擦係数と同じとした。

e) 流れ抵抗力係数及び慣性力係数

4. 2節の結果より、流れ抵抗力係数 $C_D=1.0$ 、慣性力係数 $C_M=1.5$ を用いた。

f) 計算結果

表-4.3.2.1に、a) ~ e) で述べた計算条件をまとめて示す。図-4.3.2.8に、コンテナ蔵置位置の全体図を示す。

表-4.3.2.1 計算条件

流れ	想定東海地震津波	
計算の対象	コンテナ蔵置位置・本数	新興津ふ頭・245個(26×6列+3×6列+1×11列+10×6列, 1段積み) 興津第二ふ頭・144個(24×6列, 1段積み) 袖師第一ふ頭・258個(25×6列+9×6列+9×6列, 1段積み) (計)647個
	時間	地震発生～6時間($\Delta t=0.0025$ s)
コンテナの特性	形状・質量	40フィート一般コンテナ, 6,000 kg
	球形要素数・半径・密度	40個(2×2×10), 0.64775 m, 51.742 kg/m ³
	バネ係数	(法線方向)1.0×10 ⁶ , (接線方向)2.5×10 ⁵
	減衰係数	(法線方向)1.13×10 ³ , (接線方向)5.66×10 ²
	静止摩擦係数 μ ・動摩擦係数 μ'	0.53, 0.53
	沈没	あり(密度増加0.0108 kg/m ³ /s)
作用力に係る定数	流れ抗力係数 C_D ・慣性力係数 C_M	1.0, 1.5
	風抗力係数 C_a ・風向風速	0.0, 風なし
	流体の密度・空気密度	1,030 kg/m ³ , 1.219 kg/m ³ (16.6°C・1気圧)

図-4.3.2.9に、地震発生後から $t=1,800$ s (30分後)まで、新興津ふ頭について計算結果を拡大して示す。a群のコンテナの南側は、大型の国際コンテナ船がコンテナの積み下ろしを行う水深-15mの岸壁である。また、岸壁と岸壁の南東の海上にある防波堤までの海域は泊地であり、着岸する船舶がここで操船、時間調整等を行う場所である。 $t=550$ s頃からふ頭上は浸水する。a及びb群のコンテナは相互に衝突しながら全体的に南側に移動する。 $t=1,800$ sまでは海域には流出せず、ふ頭上にとどまっている。c及びd群も同様に南側に移動し、そのうち2個が岸壁前面の海域を西から東の方向に漂流している。その移動距離は $t=1,500$ s～ $t=1,800$ sの5分間で約200mである。

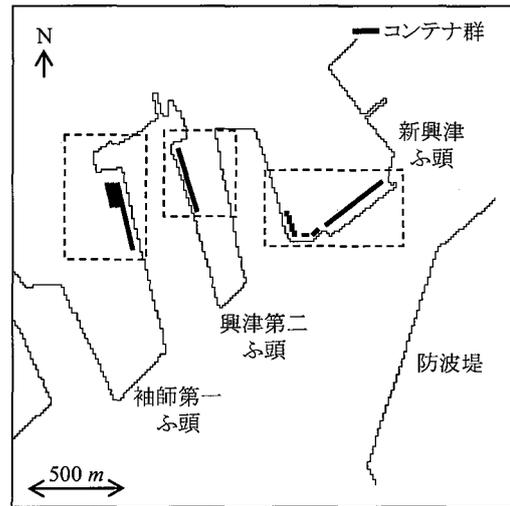


図-4.3.2.8 コンテナ蔵置位置

図-4.3.2.10(1)～(9)に、 $t=1,800$ s以降の計算結果を示す。新興津ふ頭から流出した3個はいずれもふ頭南側の海域にある。なお、図中の25, 186及び187という数字は各コンテナに割り当てた番号である。図-4.3.2.11に、それから90分間の $t=1,800\sim 7,200$ sの位置を10分おきにプロットした軌跡を示す。3個のコンテナはふ頭と防波堤の間の水路狭窄部を往復運動している。図-4.3.2.10(9)の $t=21,600$ sの時点では、3個のコンテナのうち2個はふ頭南側にあるが残りの1個は東側海域にありばらついている。水路狭窄部の流速が局所的に大きい等、流速分布が一樣でないことから、このようなばらつきが生じたものと考えられる。

図-4.3.2.12に、興津第二ふ頭の計算結果を示す。浸水が西側から東側に向かって生じ、コンテナは相互に衝突しながら全体的に東側に向かって移動し、ふ頭上で止まっている。

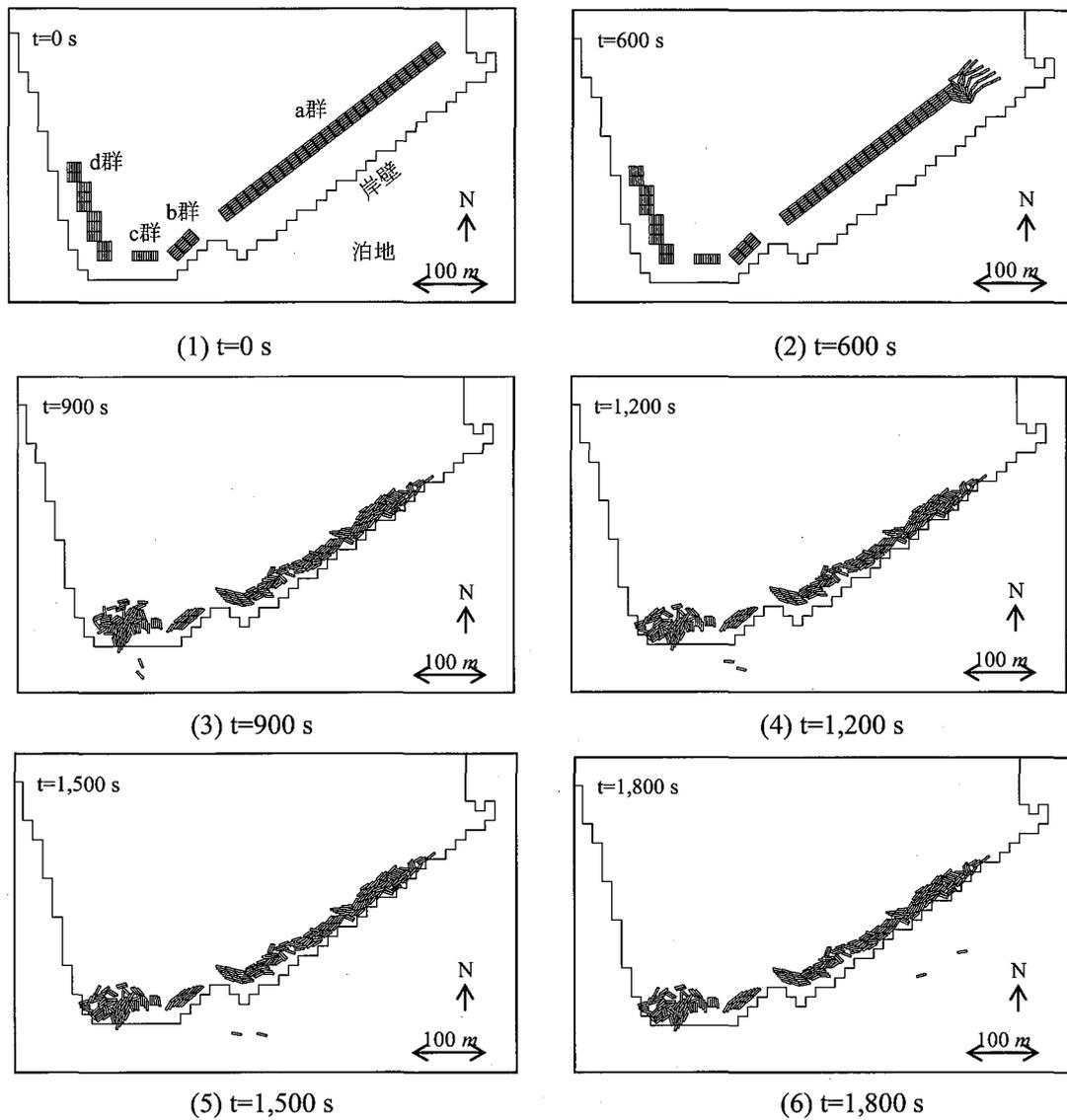


図-4.3.2.9 コンテナ位置の計算結果

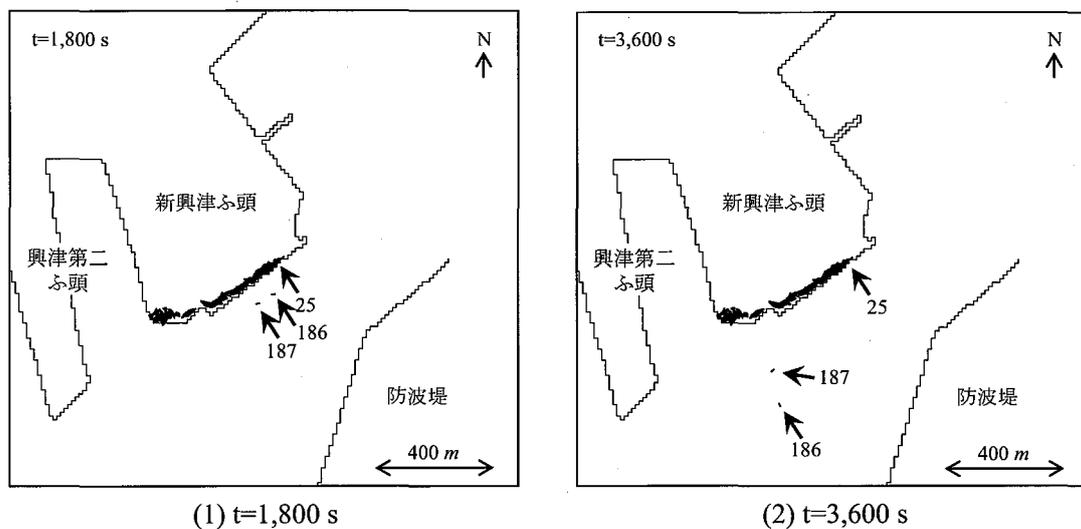


図-4.3.2.10 コンテナ位置の計算結果

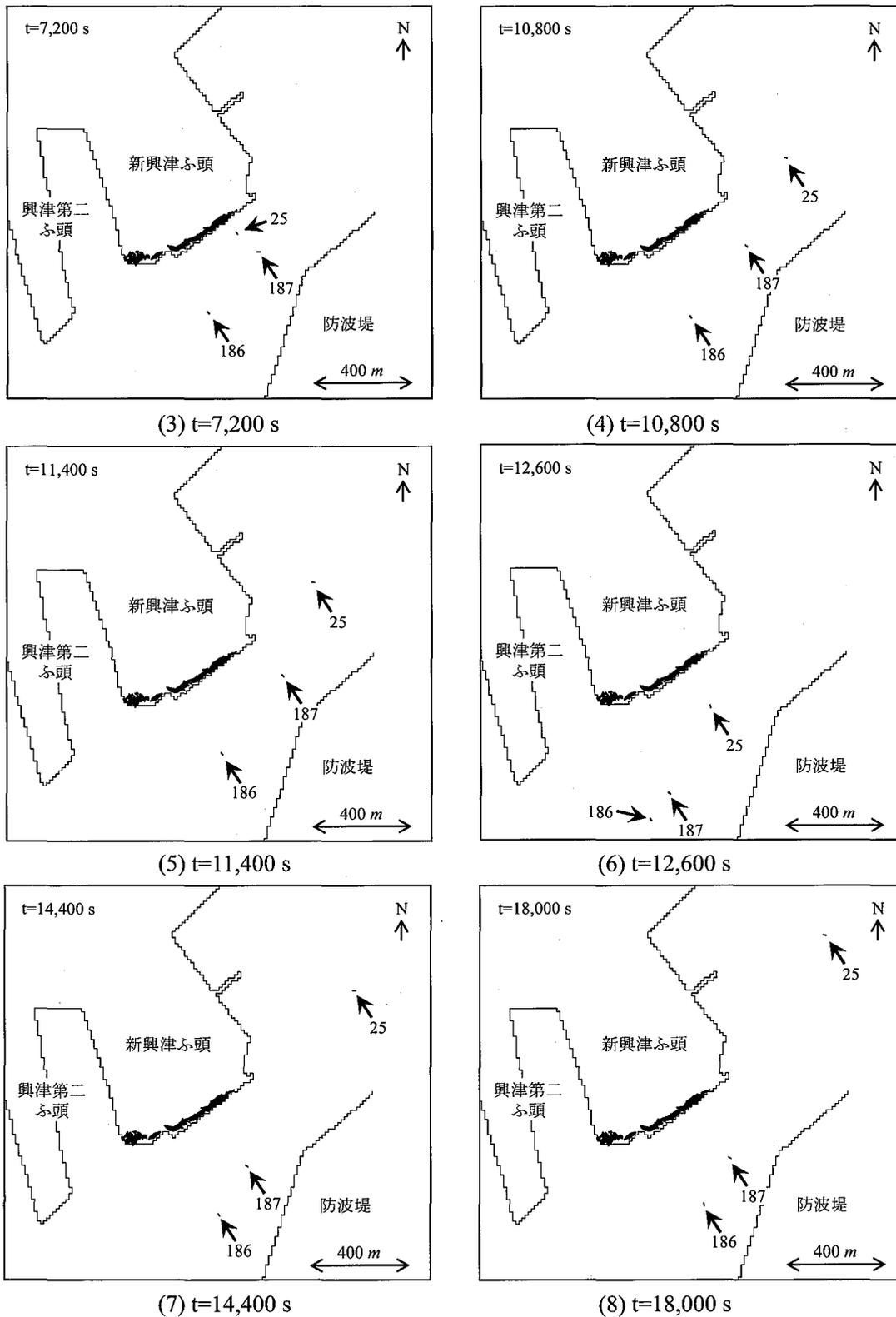
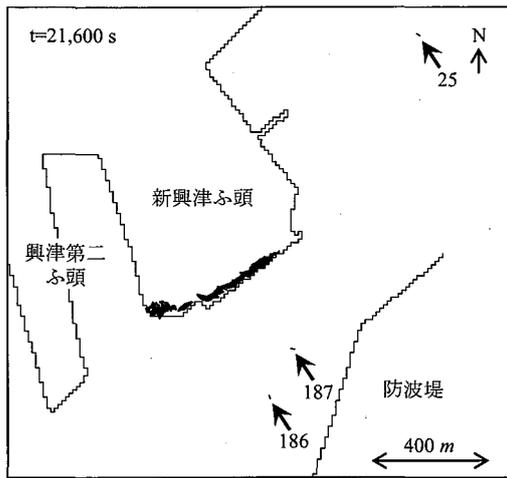


図-4.3.2.10 コンテナ位置の計算結果



(9) $t=21,600$ s

図-4.3.2.10 コンテナ位置の計算結果

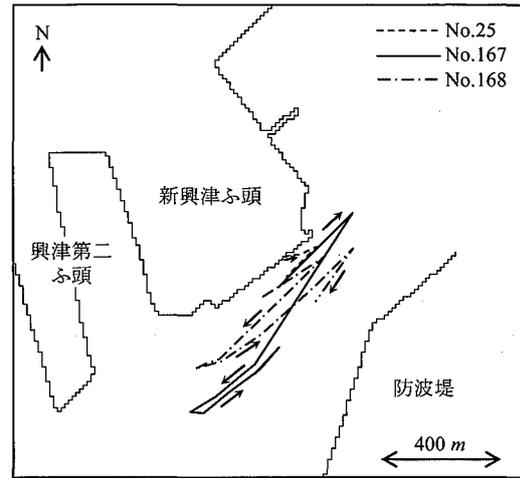
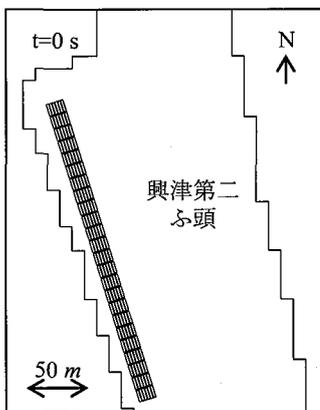
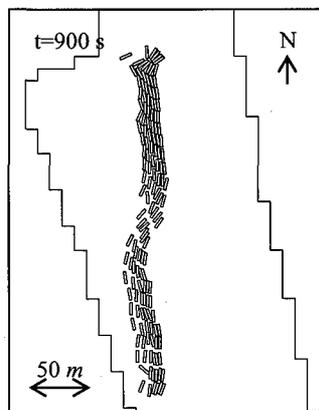


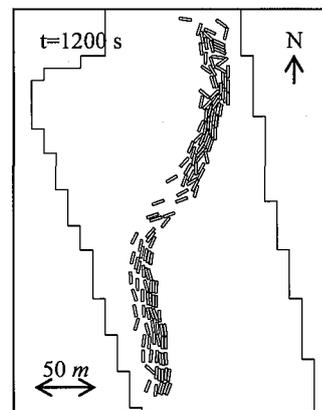
図-4.3.2.11 漂流軌跡 ($t=1,800\sim 7,200$ s)



(1) $t=0$ s

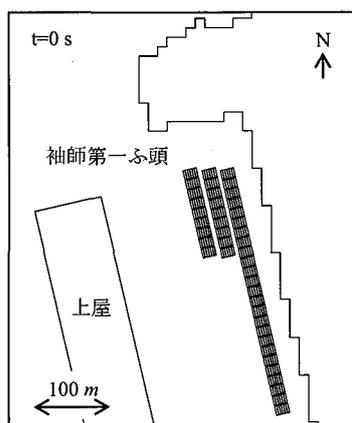


(2) $t=900$ s

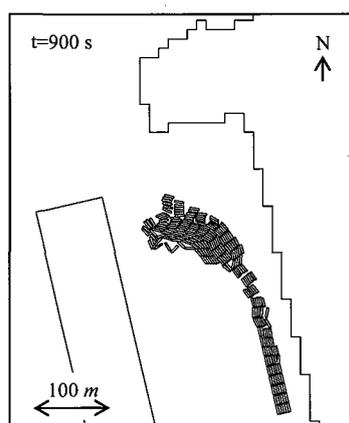


(3) $t=1,200$ s

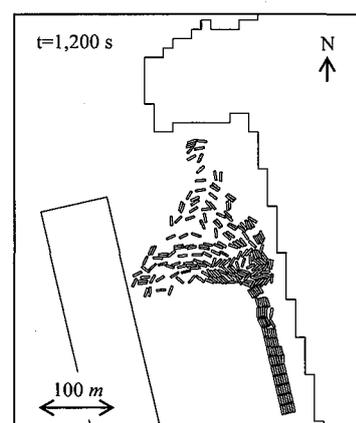
図-4.3.2.12 コンテナ位置の計算結果



(1) $t=0$ s



(2) $t=900$ s



(3) $t=1,200$ s

図-4.3.2.13 コンテナ位置の計算結果

図-4.3.2.13に、袖師第一ふ頭の計算結果を示す。浸水が東側から西側に向かって生じ、一部のコンテナが西側に向かって移動する。その後、 $t=1,200$ sでは海側にあるコンテナを中心に戻る向きに動き、そのうち8本のコンテナがふ頭北側の海域に流出している。なお、コンテナ群西側にある上屋に衝突したコンテナはなかった。

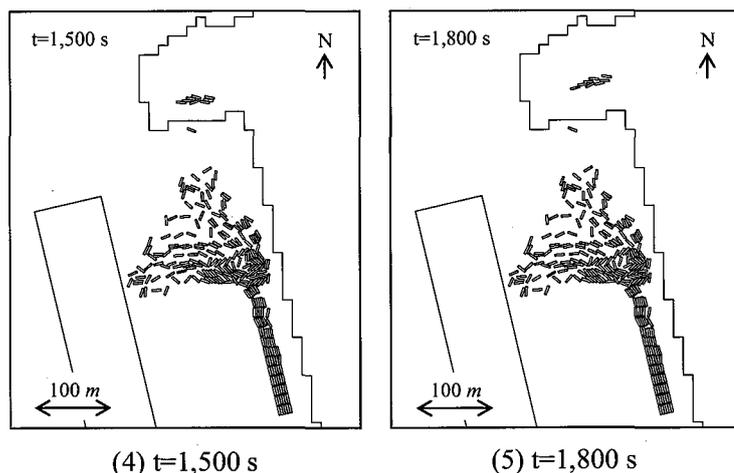


図-4.3.2.13 コンテナ位置の計算結果

図-4.3.2.14に、表-4.3.2.1の質量を満載 (30,480 kg) とした場合の計算結果を示す。図(1)と(2)に示すとおり新興津ふ頭に蔵置されたコンテナは移動しなかった。図(3)と(4)に示す興津第二ふ頭に蔵置されたコンテナも同様である。図(5)と(6)に示す袖師第一ふ頭に蔵置されたコンテナは最も北側の3列目までのコンテナが若干西側に移動したが、大きく移動することはない。袖師第一ふ頭 (図-4.3.1.4の地点No.16) の浸水深は最大0.748 mであり、そのときの流速は0.667 m/sであった。コンテナが完全に矩形としたとき、満載コンテナが浮力で浮き上がる時の浸水深は、海水の密度 $1,030 \text{ kg/m}^3$ 、コンテナの幅 2.438 m 及び長さ 12.192 m を用いて $30,480 \text{ kg} \div 1,030 \text{ kg/m}^3 \div 2.438 \text{ m} \div 12.192 \text{ m} \approx 0.996 \text{ m}$ である。袖師第一ふ頭の最大浸水深はこれを下回るのので、完全に浮いたのではなく、引きずられるように移動している。

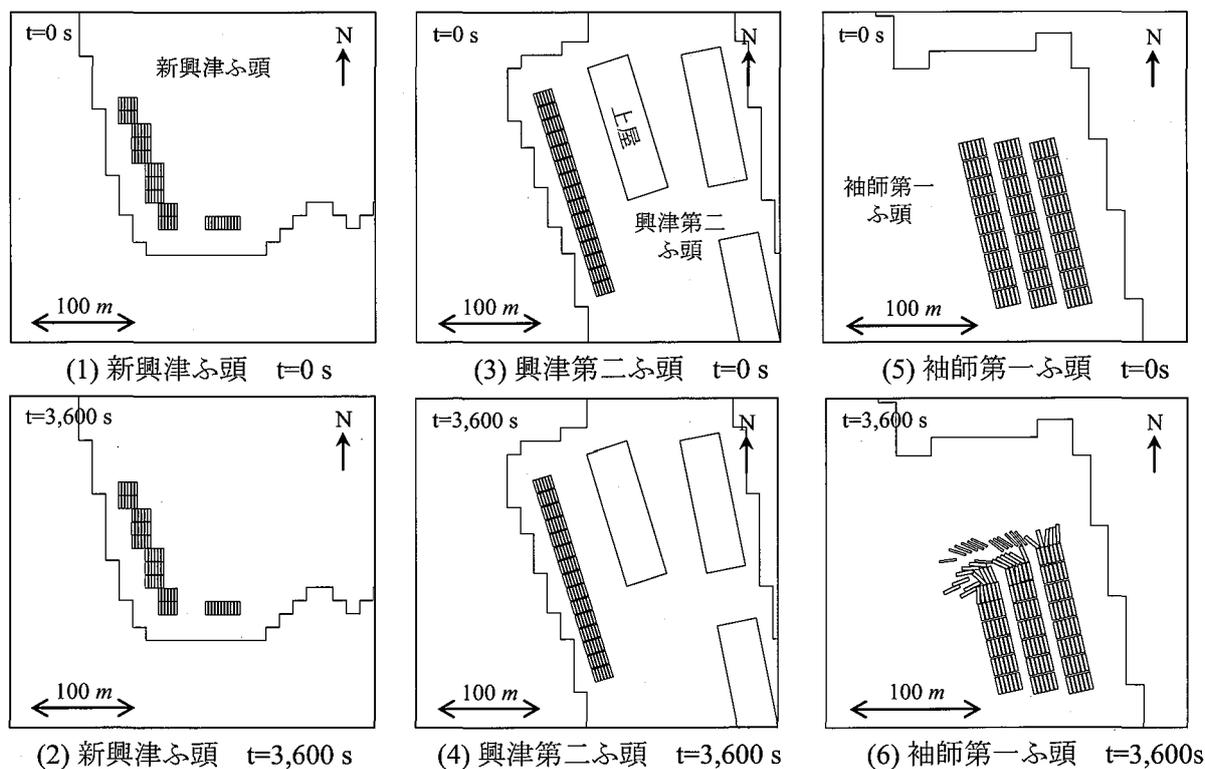


図-4.3.2.14 コンテナ位置の計算結果

4. 3. 3 漂流計算 (多段積みケース)

a) 計算条件

コンテナふ頭においては、ふ頭の効率的利用の観点から、2段以上に多段積みされて蔵置されることも一般的である。そこで、全てのコンテナが整然と2段積みまたは3段積みされている場合について検討する。ただし、ここでは2段目と3段目のコンテナは単に下の段の直上に配置することとし、コンテナ同士を接続する金具、ワイヤー等に相当する拘束力は設定していない。表-4.3.3.1に、計算条件を示す。

表-4.3.3.1 計算条件

流れ	想定東海地震津波	
計算の対象	コンテナ蔵置位置・本数	新興津ふ頭, 120個(10×6列, 2段積み) または180個(10×6列, 3段積み)
	時間	地震発生～6時間($dt=0.0025$ s)
コンテナの特性	形状・質量	40フィート一般コンテナ, 6,000 kg
	球形要素数・半径・密度	40個(2×2×10), 0.64775 m, 51.742 kg/m ³
	バネ係数	(法線方向) 1.0×10^6 , (接線方向) 2.5×10^5
	減衰係数	(法線方向) 1.13×10^3 , (接線方向) 5.66×10^2
	静止摩擦係数 μ ・動摩擦係数 μ'	0.53, 0.53
	沈没	あり(密度増加0.0108 kg/m ³ /s)
作用力に係る定数	流れ抗力係数 C_D ・慣性力係数 C_M	0.5, 1.5
	風抗力係数 C_a ・風向風速	0.0, 風なし
	流体の密度・空気の密度	1,030 kg/m ³ , 1.219 kg/m ³ (16.6°C・1気圧)

b) 2段積みの場合

図-4.3.3.1に、2段積みの場合の計算結果を示す。一部のコンテナが崩れ、海上に流出するものが発生した。ただし、1段積みの場合のように全部のコンテナが動くことはなく、2段積みそのまま動かないものもあった。

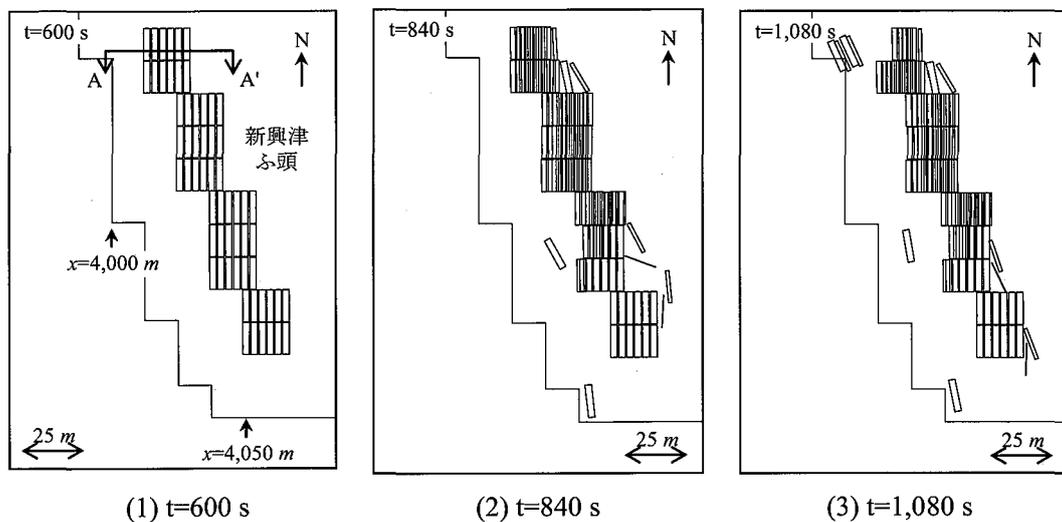


図-4.3.3.1 計算結果

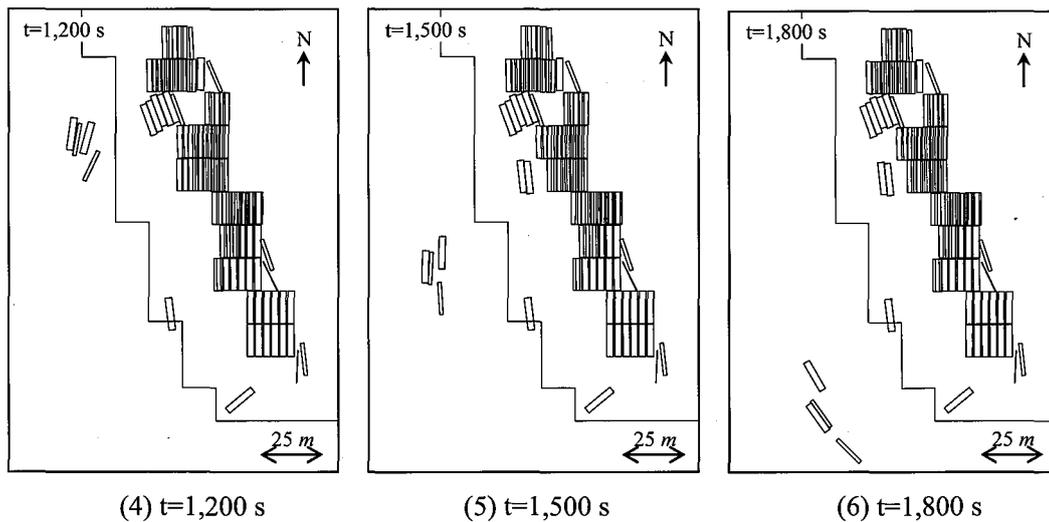


図-4.3.3.1 計算結果

図-4.3.3.1(1)の断面 A-A'でみたコンテナの移動状況を、図-4.3.3.2に $t=660\sim 1,080\text{ s}$ について 1 分間隔で示す。なお、図中では左上隅のコンテナを破線で囲って外形を示した。また、(2)以降は下段の要素二つだけを示す（以下同じ）。まず東（ x の正方向）に全体が倒れるように動いたのち、ほとんどのコンテナの段積みが崩れ、一部が西に流されている。

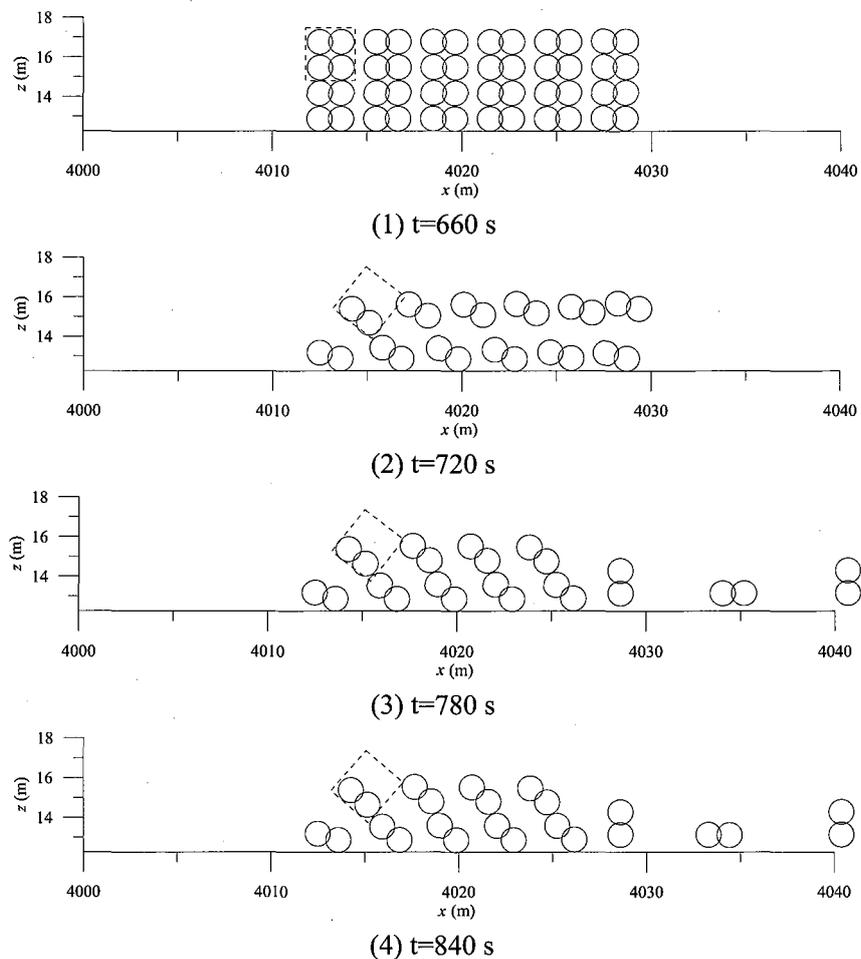


図-4.3.3.2 2 段積みコンテナの移動状況 (A—A'断面)

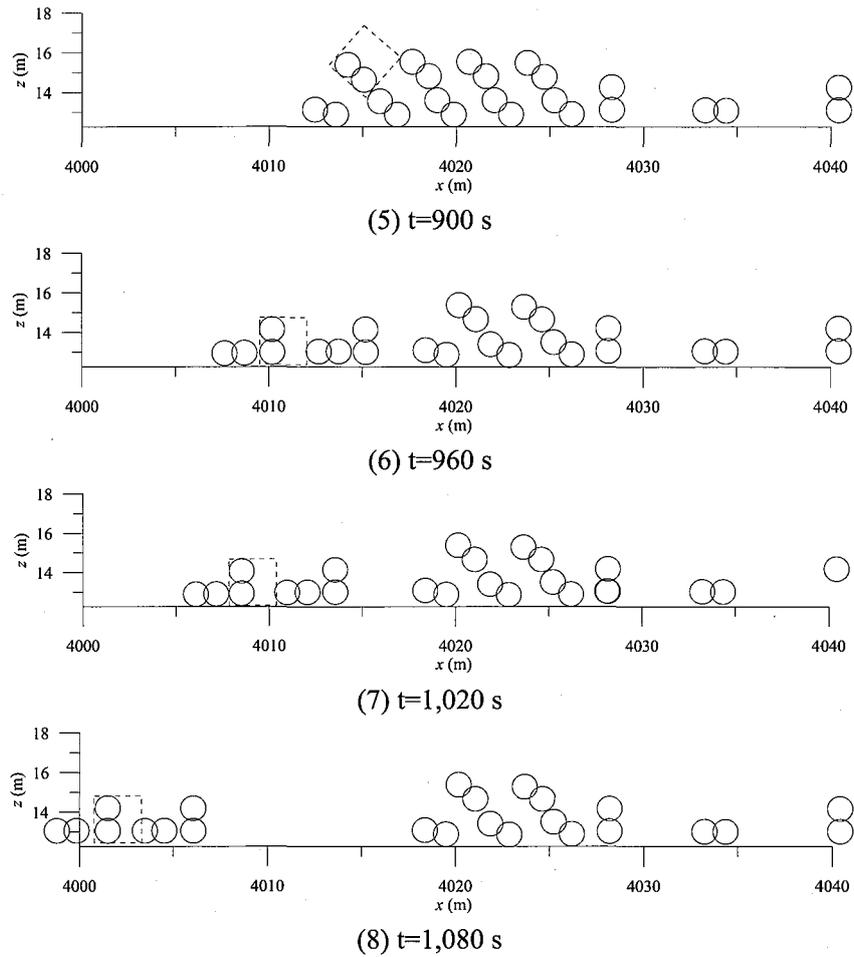


図-4.3.3.2 2段積みコンテナの移動状況 (A—A'断面)

b) 3段積みの場合

図-4.3.3.3に、3段積みの場合の計算結果を示す。コンテナはほとんど動かず、3本だけ移動し、そのうち1本が海上に流出した。図-4.3.3.3(1)の断面 B-B'でみたコンテナの移動状況を、図-4.3.3.4に $t=690\sim 705$ sについて5秒間隔で示す。最も西側の3個が崩れ、上から1段目に積んであったコンテナが回転しながら西側へと流されている。

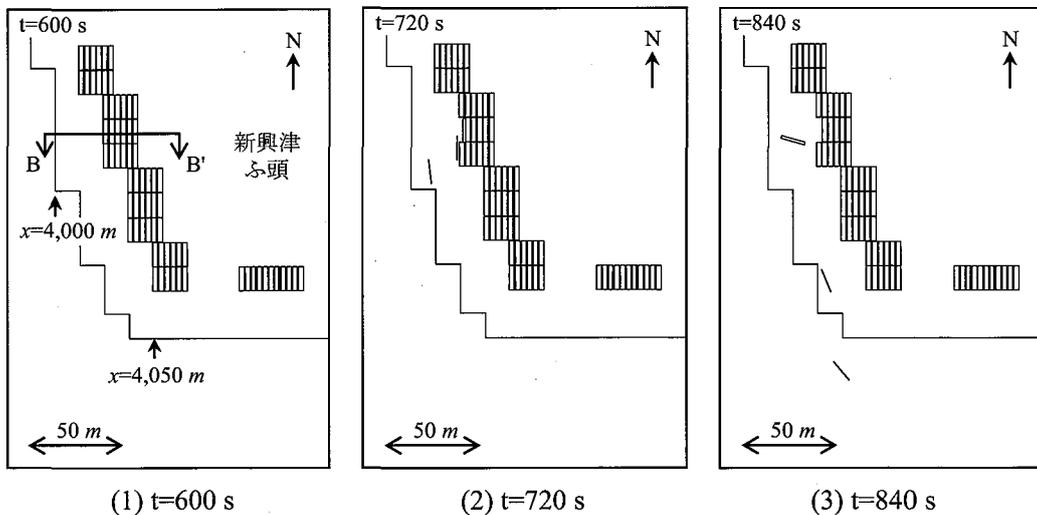


図-4.3.3.3 計算結果

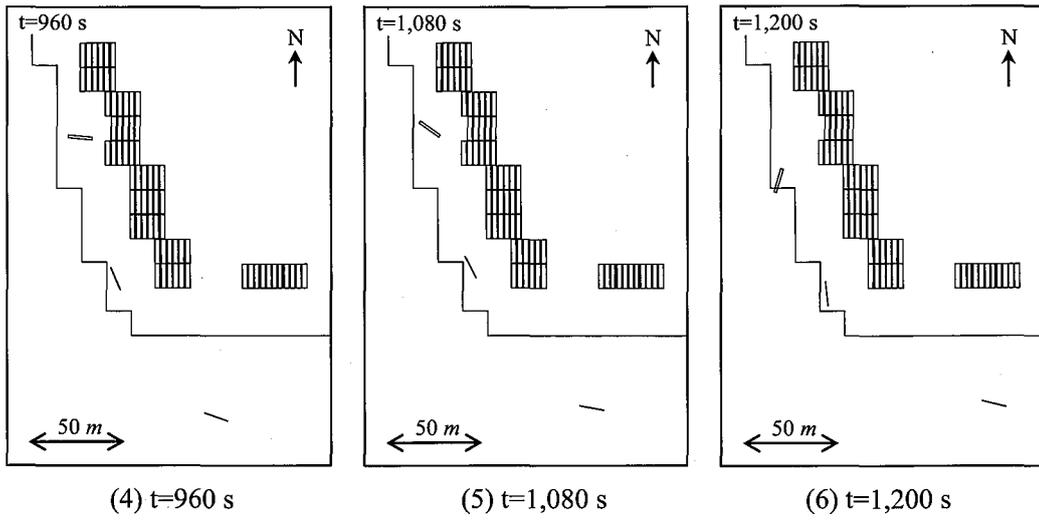


図-4.3.3.3 計算結果

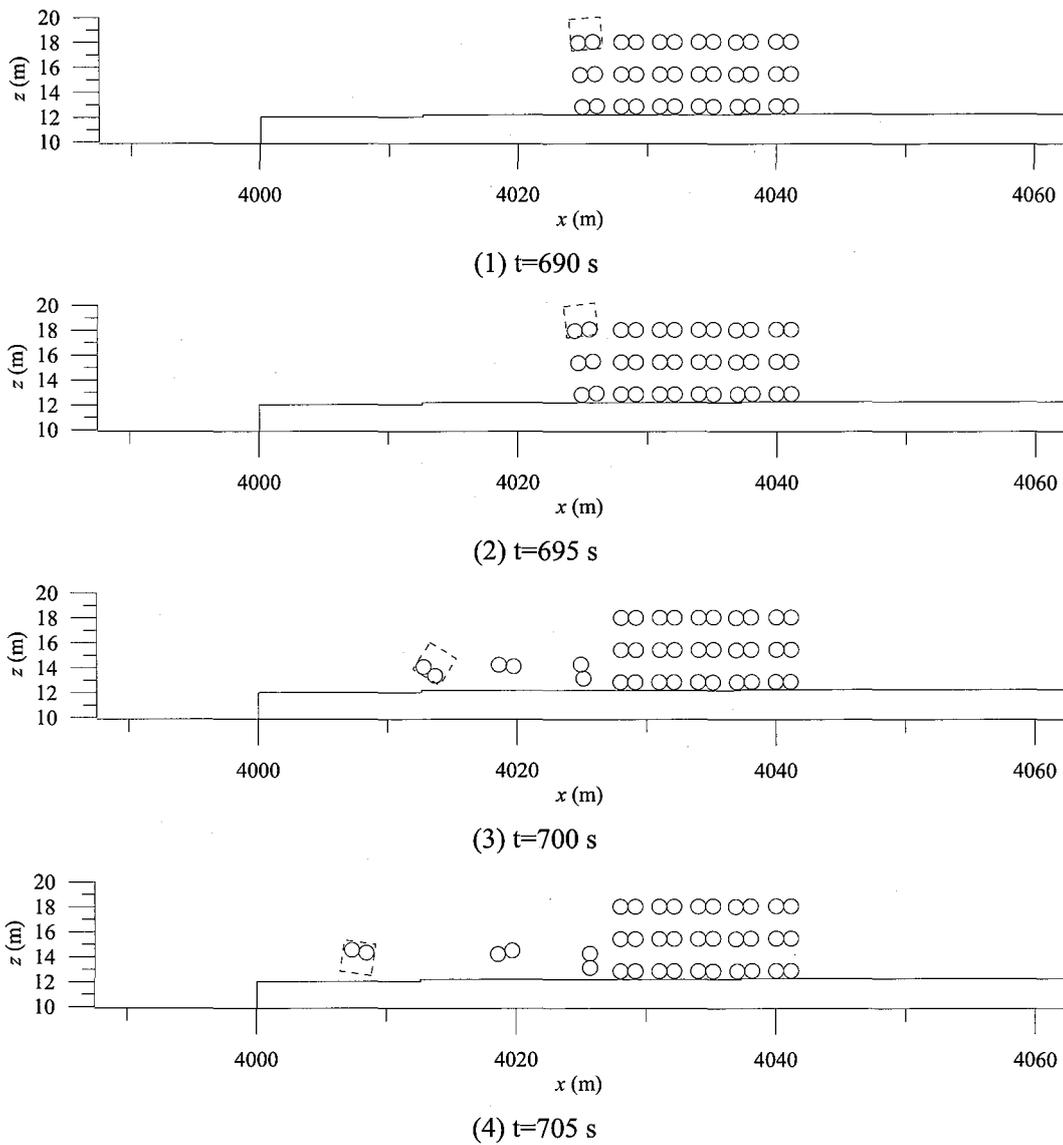


図-4.3.3.4 3段積みコンテナの移動状況 (B-B'断面)

4. 3. 4 風洞実験と漂流計算 (風ありケース)

a) 風抗力のモデル化

風抗力が駆動力として漂流物に作用する現象を考慮するため、漂流物に作用する風抗力を推算する。風抗力 F_a (N) については、4. 1. 4項で示した形の式が提案されている。その式を再掲すると

$$F_a = \frac{1}{2} C_a \rho_a u_a^2 A_a \quad (4.1.4.2)$$

ここで、 ρ_a は空気の密度 (kg/m^3) であり、理科年表より1気圧、摂氏20度の空気の密度として 1.205 kg/m^3 を用いる。 C_a は風抗力係数であり、この設定方法については後述する。 A_a は風の吹く方向からみた漂流物の海上部分の投影面積 (m^2) である。 u_a は風速と漂流物移動速度との相対速度 (ms^{-1}) である。

相対速度を算定するために必要な風速は、一般に、海面上10mで測定した値を用いることが多い。風速の観測位置の鉛直高さは観測場所によって異なるため、観測値を高さ10mでの値に補正する必要がある。表面の影響が比較的大きい表面から数十mまでの気層について、大気の安定度が中立である場合は、表面の粗さを示す粗度係数 z_0 を導入し、 $(u)_{z=z_0} = 0$ という条件を考慮して対数分布則が適用できる。

$$u(z) = \frac{u_*}{\kappa} \log \frac{z}{z_0} \quad (4.3.4.1)$$

ここで、 u_* は摩擦速度、 κ はカルマン定数 (=0.4) である。二つの高さにおける測定値が得られている場合、すなわち、 $z=z_1$ における風速 $u(z_1)$ と、 $z=z_2$ における風速 $u(z_2)$ が得られている場合、式4.3.4.1のなかの未知数二つ (u_* と z_0) に対して二つの式が得られるので、 u_* と z_0 をそれぞれ求めることができる。すなわち、

$$u(z_1) = \frac{u_*}{\kappa} \log \frac{z_1}{z_0}$$

$$u(z_2) = \frac{u_*}{\kappa} \log \frac{z_2}{z_0}$$

これを u_* と z_0 についてそれぞれ解くと、

$$z_0 = 10^a \quad (4.3.4.2)$$

$$\text{ここで、 } a = (u(z_1) \log z_2 - u(z_2) \log z_1) / (u(z_1) - u(z_2))$$

$$u_* = \kappa \cdot u(z_1) / \log \frac{z_1}{z_0} \quad (4.3.4.3)$$

が得られる。つぎに、一つの高さにおける測定値しか得られていない場合を考える。これは、現地の気象観測結果は1点の高さ z_1 で1点の風速測定値 $u(z_1)$ しかないことが多いことを想定したものである。福島ら(2006)は、ある高さの風速の推定方法として二つの方法を挙げている。一つ目は、式4.3.4.2において日高孝次の研究結果を参考に海面上の z_0 として $z_0=0.006m$ を与える方法であり、

$$u(z_1) = \frac{u_*}{\kappa} \log \frac{z_1}{0.006}$$

$$u(z) = \frac{u_*}{\kappa} \log \frac{z}{0.006}$$

$$u(10) = u(z_1) \cdot \frac{\log(1 + \frac{10}{0.006})}{\log(1 + \frac{z_1}{0.006})} \quad (4.3.4.4)$$

二つ目は海上風の経験則としてべき乗の形で表した式（1/7乗則）を用いる方法であり，福島ら（2006）は，式4.3.4.4と式4.3.4.6の $u(10)$ を比較し両者の差が小さいと指摘している．

$$\frac{u(z)}{z^{1/7}} = Const. \quad (4.3.4.5)$$

$$u(10) = u(z) \cdot \left(\frac{10}{z}\right)^{1/7} \quad (4.3.4.6)$$

b) 風洞実験

・目的と実験水路の概要

コンテナの漂流・衝突シミュレーションに必要な風抗力係数 C_a を設定するための検証データを収集することを目的として，風の吹く海上を模擬した風洞水槽においてコンテナ模型を漂流させて漂流挙動を記録する実験を行った．実験には，国土交通省国土技術政策総合研究所（神奈川県横須賀市）の台風防災実験水路を用いた．

図-4.3.4.1に，実験水路の概要を示す．上流側に設置されている送風機は回転数（最高400rpmまで）を制御することにより，送風量を調整することが可能である．測定部の大きさは，長さ28.5m，高さ130cm，幅150cmであり，最大で水深50cmまで湛水することができる．下流端には消波装置が置かれている．写真-4.3.4.1は，実験水路の状況である．

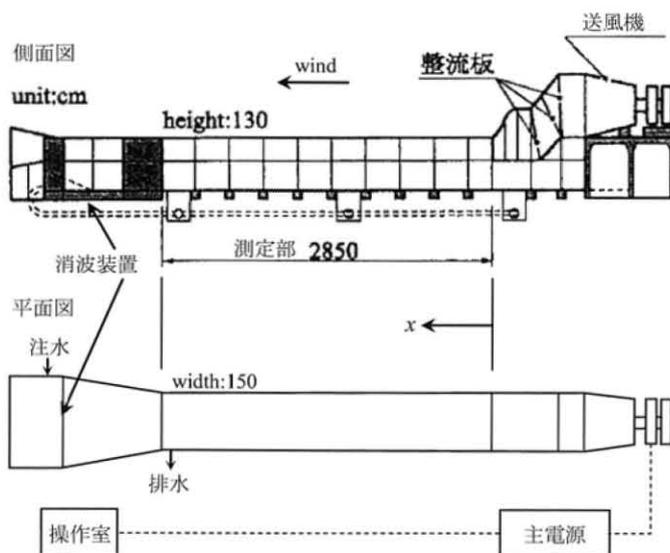


写真-4.3.4.1 台風防災実験水路
(下流側から上流側を望む)

図-4.3.4.1 台風防災実験水路の概要

・実験ケース

まず、水深を 40 cm、送風装置の回転数を 200rpm または 300rpm のときの水路内の風速、流速及び波高を測定した。水路上流端からの距離 x が 19, 21, 23m となる位置で測定した (図-4.3.4.2)。図は、上流端が右側、下流端が左側であり、風は右から左へ向かって吹くように描かれている。x 軸は水路上流端を原点に水平方向に右から左にとり、y 軸は水平方向に紙面奥から手前向き、z 軸は鉛直方向に上向きである。

つぎに、幾何縮尺 20 分の一の 40 フィートコンテナを模したアクリル製模型 (詳細は後述) を漂流させた。模型向きが水路軸に対して直角 (90°) または平行 (0°) になるようにして水面に浮かべ、模型を 2 本の細いひもでつないで $x=20m$ の位置に浮かべておく。測定開始とともにひもを静かに離し、その後の漂流挙動を測定した。

表-4.3.4.1 に、実験ケースを示す。実験条件は 3 種類 (「回転数 200rpm で初期の模型向き 90° 」, 「200rpm で 0° 」及び「300rpm で 0° 」) で、各条件でそれぞれ 3 回行った。

表-4.3.4.1 実験ケース

ケース No.	送風機回転数 (rpm)	初期の模型向き	備考
1-1	200	90°	1回目
1-2			2回目
1-3			3回目
2-1	200	0°	1回目
2-2			2回目
2-3			3回目
3-1	300	0°	1回目
3-2			2回目
3-3			3回目

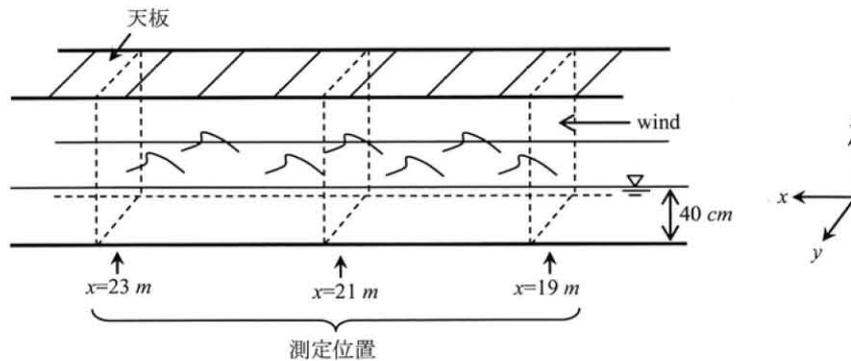


図-4.3.4.2 風速、流速及び波高の測定位置

・風速、流速及び波高の測定方法

風速は、熱線式風速計 (本体部: Model1560, 検出部: 0965-03, 日本カノマックス) を用いて、横断方向は水路中央で測定し、鉛直方向は風速対数分布則を考慮して水面付近で密になるように配置した 8 点 (静水面から 0.05, 0.07, 0.10, 0.15, 0.21, 0.30, 0.45, 0.70 m の高さ) の平均風速を測定した。応答周波数は 10Hz である。

流速は、電磁流速計 (本体部: VM-706H, 検出部: VMT-2-200-08P, 株式会社ケネック) を用いて、横断方向は水路中央、鉛直方向は静水面下 0.038m (3.8cm) の一点で、水路流下方向 (x 方向) と横断方向 (y 方向) の二成分を測定した。応答周波数は 20Hz である。

波高は、容量式波高計 (本体部: CH-601, 検出部:

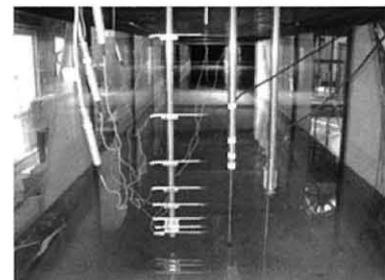


写真-4.3.4.2 測器の設置状況

CHT6-30, 株式会社ケネック) を用いて横断方向は水路中央で測定した。応答周波数は 10Hz である。写真-4.3.4.2 に, 風速計, 流速計及び波高計の設置状況を示す。写真左から風速計, 流速計及び波高計の順である。

・ 模型の漂流挙動の測定方法

コンテナ模型は, 40 フィートコンテナを模して厚さ 2mm のアクリル板を用いて幾何縮尺 20 分の一で作成した。図-4.3.4.3 及び写真-4.3.4.3 に, 模型の模式図を示す。大きさは長さ 0.610m, 高さ 0.130m, 幅 0.122m である。上部の四隅には発光ダイオードを取付け, 画像解析で追跡するためのマーカーとしている。模型全体の質量は 0.927kg であり, 真水で浮遊させると水面から 0.0125m (模型高さに対して約 9.62%) 沈んで浮遊する。この高さに対する沈下深さの割合は実物空コンテナの沈下深さにほぼ相当する。

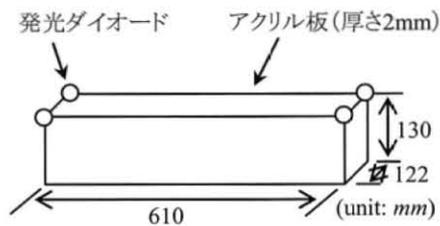


図-4.3.4.3 模型の模式図

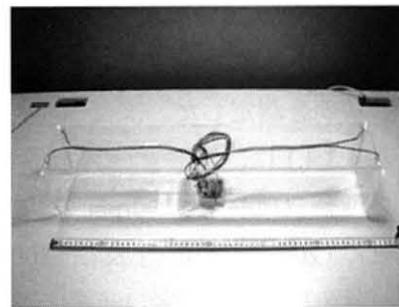


写真-4.3.4.3 40 フィートコンテナ模型

模型の漂流挙動を, 2 台の高速度カメラ (HAS-500M, 株式会社ディテクト) を同期させて 100fps で左右 2 方向から立体撮影した。

図-4.3.4.4 に, 立体撮影による位置計測の原理を示す。2 台のカメラを用いて, 測定範囲が両方のカメラの撮影範囲に含まれるように撮影する。また, 撮影範囲には位置座標を幾何補正するためのキャリブレーションポイントを写し込んでおく。そのうえで, 画像解析により, 得られた画像の位置を補正するキャリブレーションを行い, 測定範囲内で捉えられた対象物の位置座標を決定する。画像解析は 3D 画像解析ソフトウェア (DIPP-MotionPRO, 株式会社ディテクト) を用いた。写真-4.3.4.4 に, 同時刻の浮遊状況を二方向から立体撮影した画像の例を示す。左側の写真は水路に向かって左側に設置したカメラ (図-4.3.4.4 のカメラ No.1) の画像, 右側の写真は水路に向かって右側に設置したカメラ (同 No.2) の画像である。

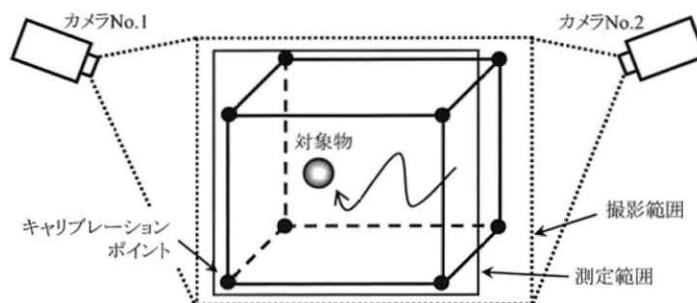


図-4.3.4.4 立体撮影による位置計測の原理

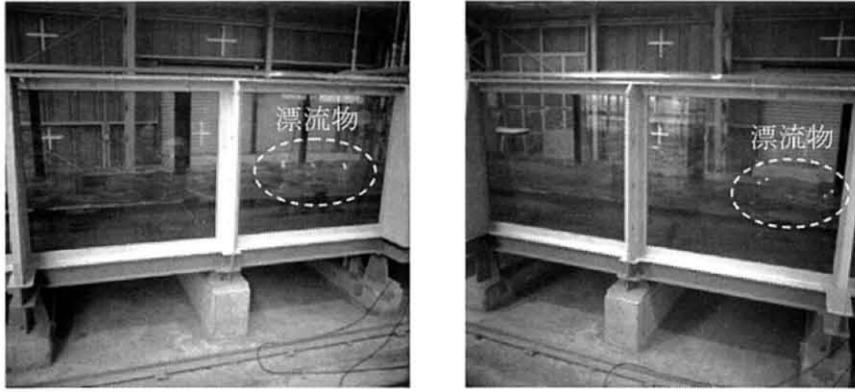


写真-4.3.4.4 立体撮影の画像組合せ例（二台のカメラで撮影した同時刻の画像）

・実験結果

図-4.3.4.5 に、 $x=19m$ の位置での風速の測定結果を示す。横軸は風速、縦軸は静水面からの高さを対数で表示している。200rpm, 300rpm とともに、静水面からの高さが 0.2 m 程度までは対数則が適応できることが分かった。図中の直線は高さ 0.05 m と 0.21 m の測定値を直線をつないだものである。それ以上の高さの測定値は直線から外れて大きくなっている。この現象は、同じ水路を用いた水谷ら（2004）の実験でも報告されている。附録-3 に、 $x=21, 23m$ の位置での風速の測定結果を参考として示す。

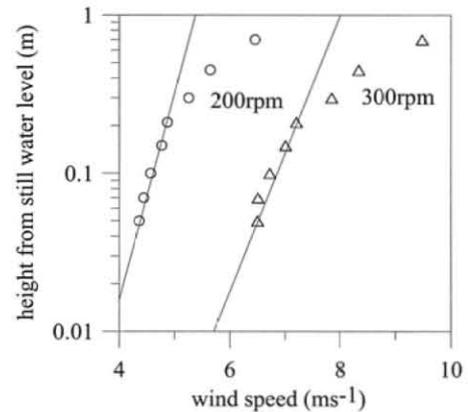


図-4.3.4.5 風速の鉛直分布 ($x=19m$)

図-4.3.4.6(1)に、200rpm で $x=19 m$ の位置での流速の測定結果を示す。図は横軸に時間、縦軸に流速をとっているが、風波によって生じる水粒子の楕円運動の影響で振動している（図-4.3.4.6(2)）。そこで、高速フーリエ変換（Fast Fourier Transform）による周波数解析を行い、高周波成分を除去した。解析は、周波数解析ソフトウェア（Auto Signal ver1.7, SYSTAT Software Inc.）を用いた。図-4.3.4.6(3)に、フーリエスペクトルの分布を示す。横軸は周波数を取り、縦軸はスペクトル強さが最大の周波数 2.27Hz の成分に対する相対スペクトル強さ（dB）で示している。なお、ある基準強さ（ここでは、周波数 2.27Hz の成分の強さ）A に対する、各周波数成分の強さ B の相対強さ L dB は以下の関係がある：

$$L = 10 \cdot \log_{10} \frac{B}{A} \quad (4.3.4.7)$$

周波数 1 Hz 以上の成分を除去すると、図-4.3.4.6(4)の結果を得る。このように、風波によって生じる水粒子の楕円運動の影響を除外して、漂流物の運動に影響すると考えられる比較的長い周期の成分を抽出した。

図-4.3.4.7に、上の処理を行った流速の x 成分と y 成分をそれぞれ示す。x 成分は、図-4.3.4.6(4)の再掲である。(1)は x 方向であり、測定開始から 50 s 程度の間は 0.01~0.02 m/s の負方向（風と逆向き）の流れが生じ、その後 150 s 程度まで同程度の大きさの正方向の流れが生じている。(2)は y 方向である。0.01~0.02 m/s 程度の正方向と負方向の流れが 100~150s 程度の周期で生

じている。

図-4.3.4.8に、300rpmのときの流速の測定結果を示す。(1)の x 方向は、測定開始から130s程度の間は0.02 m/s程度の負方向の流れが生じ、その後比較的短い時間に正方向の流れが生じ、以後繰り返している。(2)の y 方向は、測定開始から250s程度の間は0.02 m/s程度の正方向の流れが生じており、その後は負方向の流れが生じている。附録-3に、 $x=21, 23m$ の位置での流速の測定結果を参考として示す。

波高は、 $x=19m$ の位置において200rpmで平均周期0.40秒、有義波高2.58cm、300rpmで平均周期0.47秒、有義波高4.23cmの波が生じていた。周期及び波高はゼロアップクロス法により定義した。附録-3に、波高の測定結果を参考として示す。

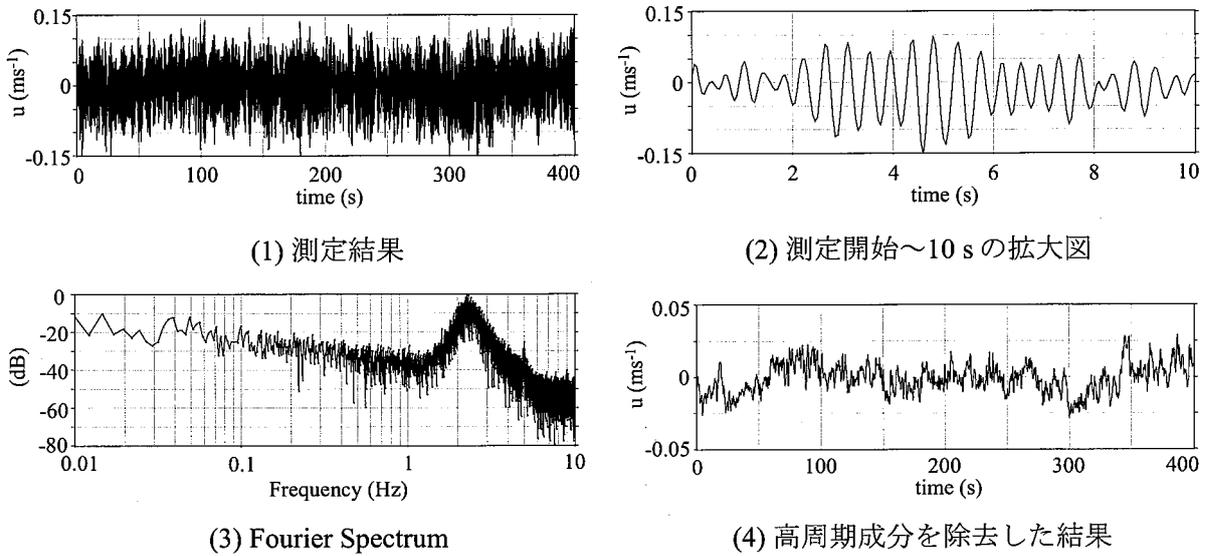


図-4.3.4.6 流速の測定結果 (200rpm, $x=19m$, x 成分)

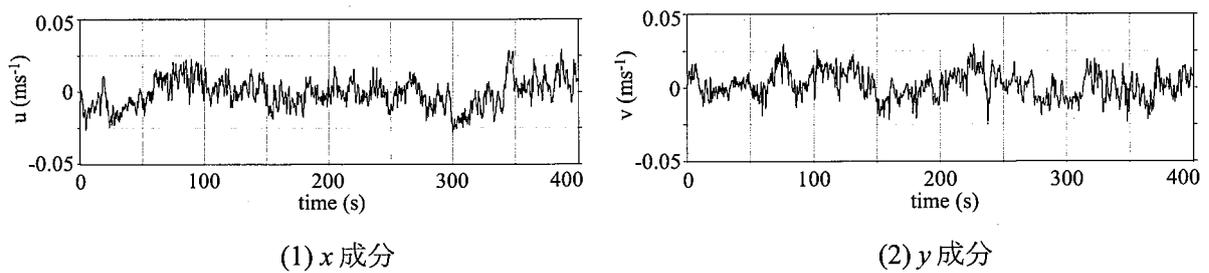


図-4.3.4.7 流速 (200rpm, $x=19m$)

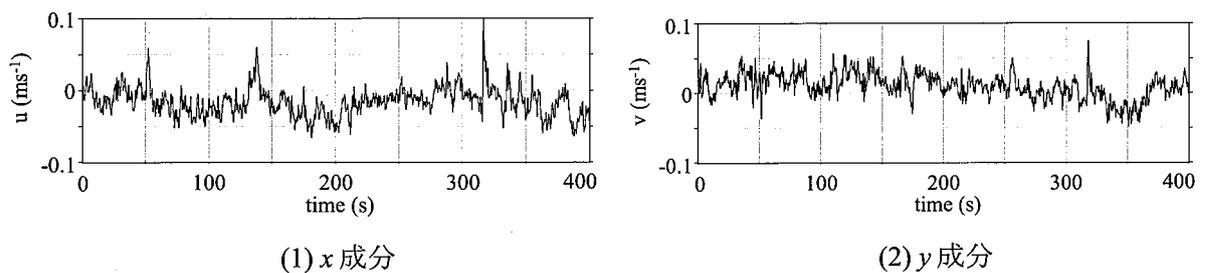


図-4.3.4.8 流速 (300rpm, $x=19m$)

図-4.3.4.9 に、Case 1-1~1-3 のコンテナ模型の水平面内の漂流軌跡を示す。コンテナ模型は回転することなく漂流し、 $t=8.5\text{ s}$ で $x=22.8\sim 23.0\text{ m}$ の位置に達した。x 方向の移動距離はそれぞれ 2.661 m 、 2.615 m 、 2.749 m であり、実験結果のばらつきは比較的小さかった。

図-4.3.4.10 に、Case 2-1~2-3 の漂流軌跡を示す。いずれのケースも漂流開始後すぐに水平に回転し、最終的には風向に対して 90° の向きとなって移動した。

図-4.2.4.11 に、Case 3-1~3-3 の漂流軌跡をを示す。図-4.3.4.9 のケースと同様に 90° の向きに回転しながら移動するものと、完全に 90° にはならないで漂流するものがあった。

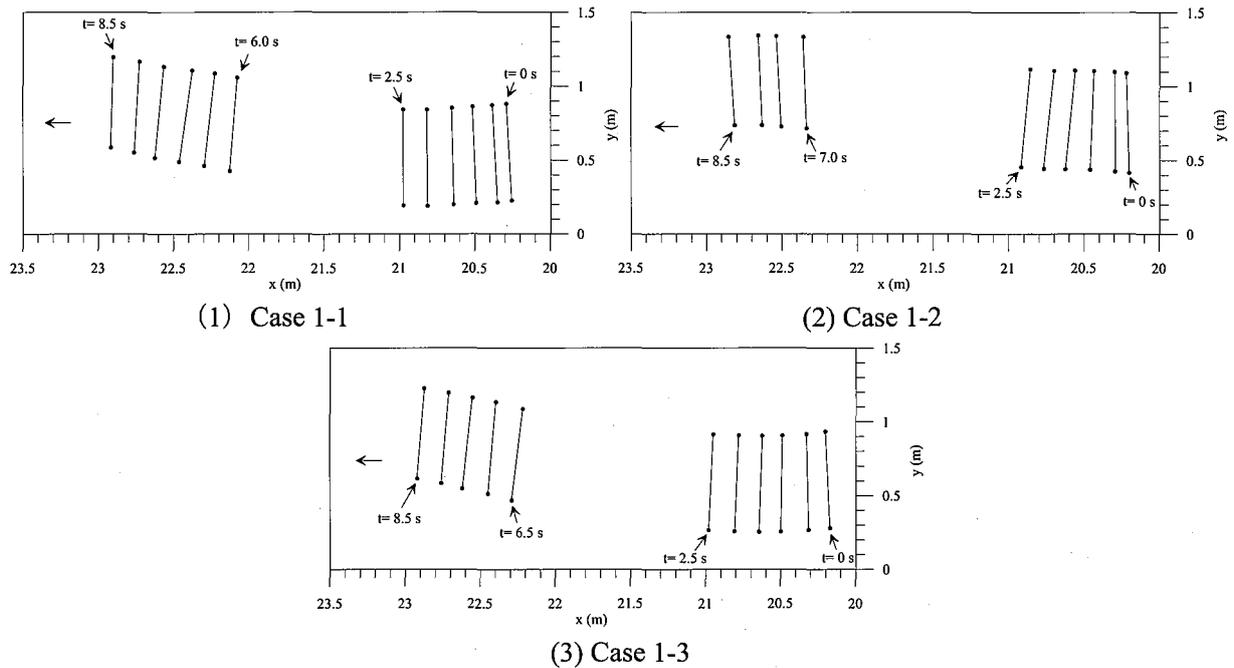


図-4.3.4.9 水平面内の漂流軌跡 (初期模型向き 90° , 送風機回転数 200rpm)

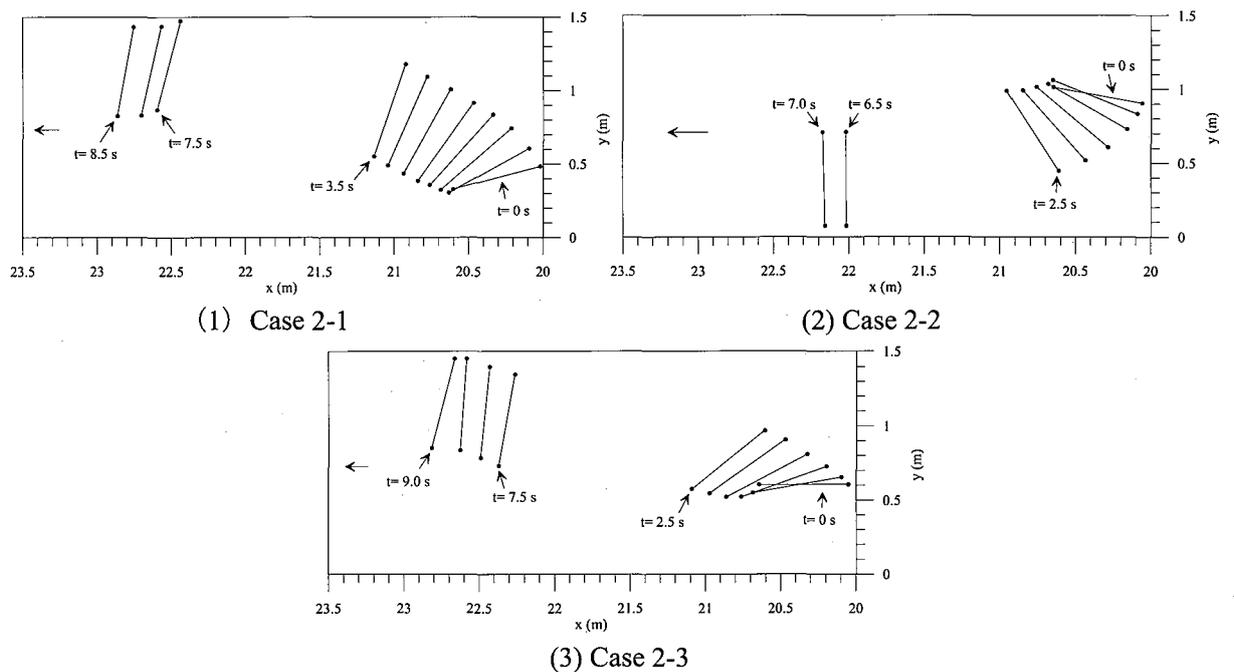


図-4.3.4.10 水平面内の漂流軌跡 (初期模型向き 0° , 送風機回転数 200rpm)

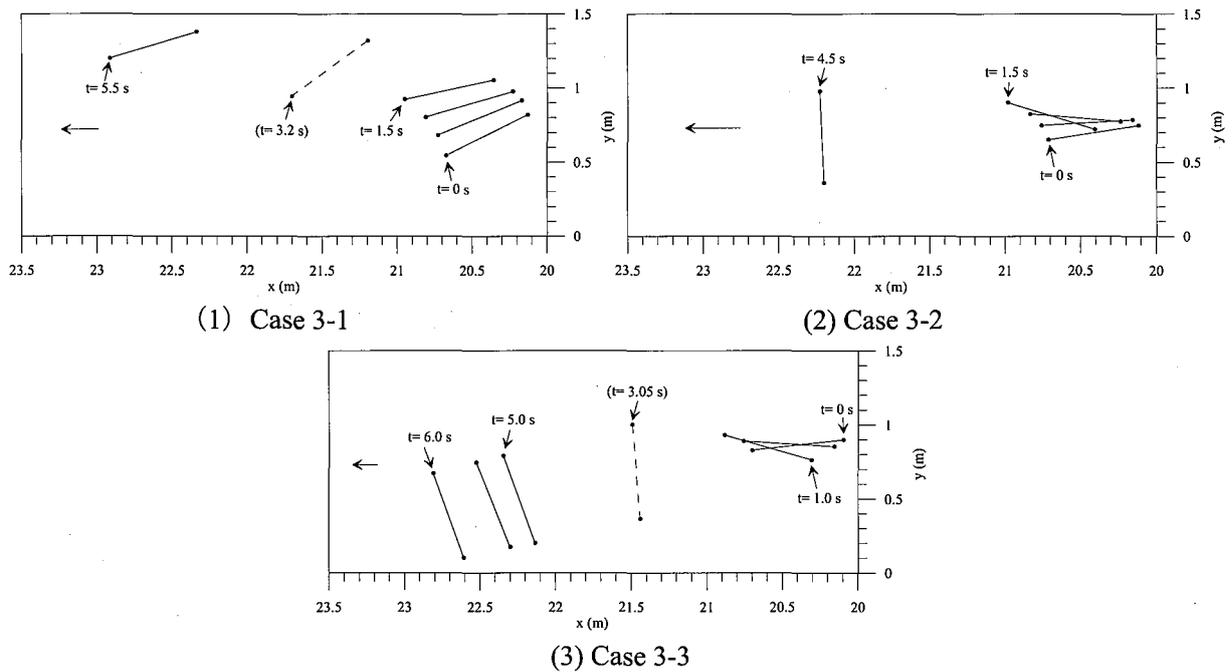


図-4.3.4.11 水平面内の漂流軌跡（初期模型向き 0° ，送風機回転数 300rpm）

c) 再現計算

実験結果の再現計算を行うことにより，風抗力係数 C_a を定める。

風速は，静水面からの高さ 0.05 m と 0.21 m の測定値を用いて，式-4.3.4.2 及び式-4.3.4.3 より摩擦速度と粗度係数を求めた。つぎに，静水面上 50cm 高さ（幾何縮尺は 1/20 なので実際の海面上 10m の高さに対応する）の風速を算定した。その結果，200rpm の場合は 5.18 m/s，300rpm の場合は 7.64 m/s とした。それらを風速として与え，式-4.1.4.2 で必要な u_a を算定した。表-4.3.4.2 に，計算条件を示す。

流速は，図-4.3.4.7 及び図-4.3.4.8 の定常的な成分を考慮し，①流速なしとした場合，②流下方向に 0.02 m/s の流れを与えた場合，③流下方向と逆向きに 0.02 m/s の流れを与えた場合をそれぞれ計算した。横断方向の流れと波による影響は考慮しなかった。

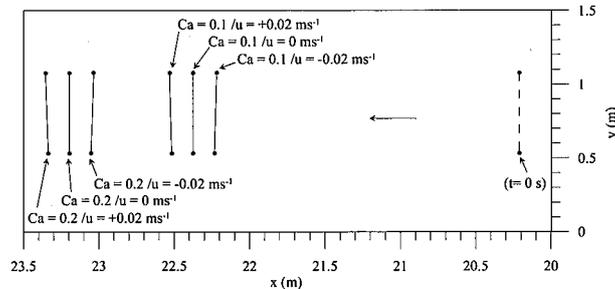
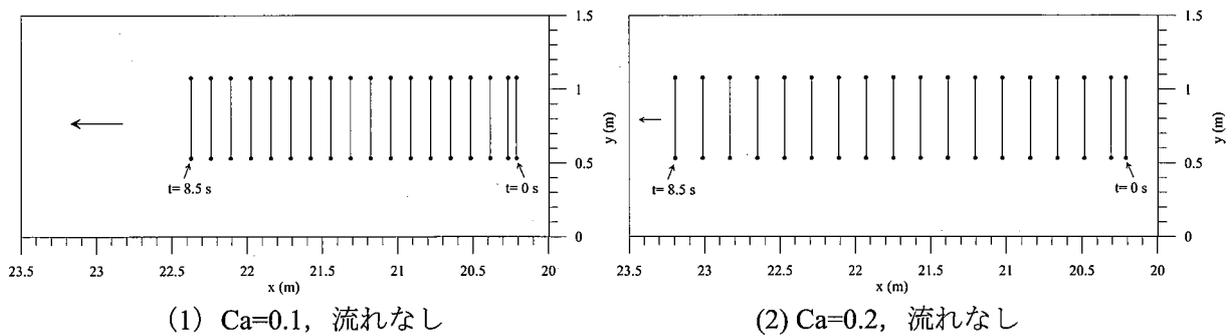
表-4.3.4.2 計算条件

流れ	定常流れ ($u=+0.02$ m/s, 0 m/s, -0.02 m/s, $v=0$ m/s)	
計算の対象	コンテナ初期位置・本数	Case1: $x=20.21$ m, Case2: $x=20.0477$ m, Case3: $x=20.1277$ m, 1個
	時間	$t=0 \sim 10$ s ($dt=0.0000005$ s)
コンテナの特性	形状・質量	40フィート一般コンテナ, 0.927 kg
	球形要素数・半径・密度	40個 ($2 \times 2 \times 10$), 0.0325 m, 84.3878 kg/m ³
	バネ係数	(法線方向) 1.0×10^5 , (接線方向) 2.5×10^4
	減衰係数	(法線方向) 3.58×10^2 , (接線方向) 1.79×10^2
	静止摩擦係数 μ ・動摩擦係数 μ'	0.776, 0.776
	沈没	なし
作用力に係る定数	流れ抗力係数 C_D ・慣性力係数 C_M	$C_D=1.0$, $C_M=1.5$
	風抗力係数 C_a ・風向風速	0.1または0.2 Case1: 5.18 m/s, Case2・Case3: 7.64 m/s
	流体の密度・気体の密度	1,000 kg/m ³ , 1.205 kg/m ³ (気温摂氏20°)

図-4.3.4.12に、初期模型向き 90° ，送風機回転数 200rpm相当の風速を与えた場合の計算結果を示す。図(1)は $C_a=0.1$ の場合で、8.5sの時点で $x=22.37\text{ m}$ の位置にあった。図(2)は $C_a=0.2$ の場合で、8.5sの時点で $x=23.19\text{ m}$ の位置にあった。図(3)は C_a を固定し、流速を変化させた場合である。 $u=+0.02\text{ m/s}$ とした場合と $u=-0.02\text{ m/s}$ とした場合とで 0.3 m 程度の到達位置のばらつきが生じた。実験結果と計算結果とを比較すると、実験では 8.5 sの時点で $x=22.8\sim 23.0\text{ m}$ の位置にあり (図-4.3.4.9)， $C_a=0.1$ の場合と $C_a=0.2$ の場合の計算結果の範囲内になった。

図-4.3.4.13に、初期模型向き 0° ，送風機回転数 200rpm相当の風速を与えた場合の計算結果を示す。実験結果 (図-4.3.4.10) は3回とも水平面内で回転しているの、その影響が比較的小さい $t=0\sim 2.5\text{ s}$ までの挙動を再現計算の対象とした。実験結果と計算結果を比較すると、実験では 2.5 sの時点で $x=20.61\text{ m}$ の位置にあり (図-4.3.4.10(3))，実験結果の到達位置は、概ね $C_a=0.1$ の場合と $C_a=0.2$ の場合の計算結果の範囲内にあった。

図-4.3.4.14に、初期模型向き 0° ，送風機回転数 300rpm相当の風速を与えた場合の計算結果を示す。実験結果のうち水平面内の回転が比較的小さいCase3-1 (図-4.3.4.11(1)) と比較すると、 $t=5.5\text{ s}$ 時点での到達位置は $C_a=0.1$ の場合と $C_a=0.2$ の場合の計算結果の範囲内にあった。



(3) 流れありの場合との比較 ($t=8.5\text{ s}$ 時点)

図-4.3.4.12 計算結果 (90° ，200rpm 相当)

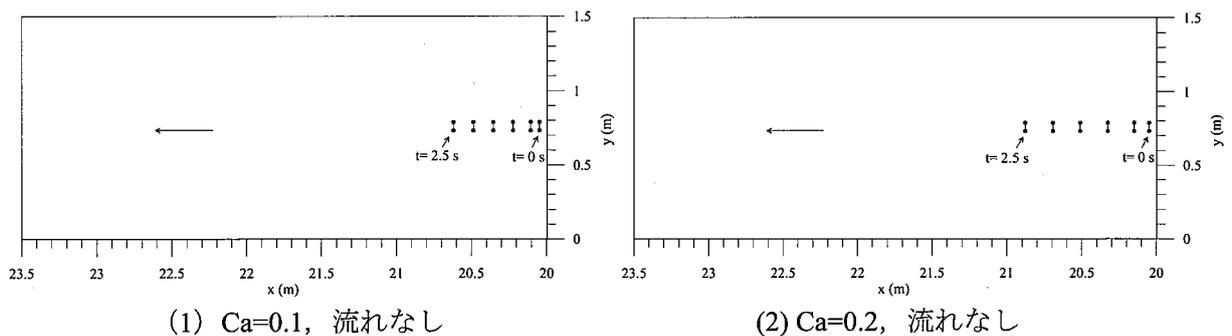
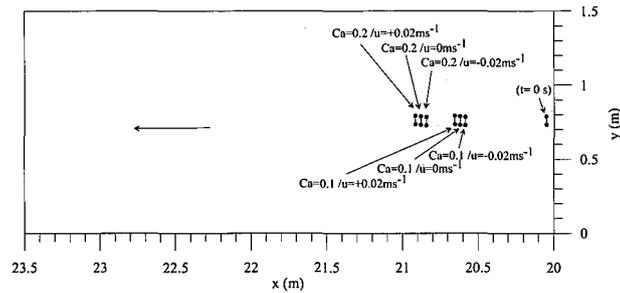
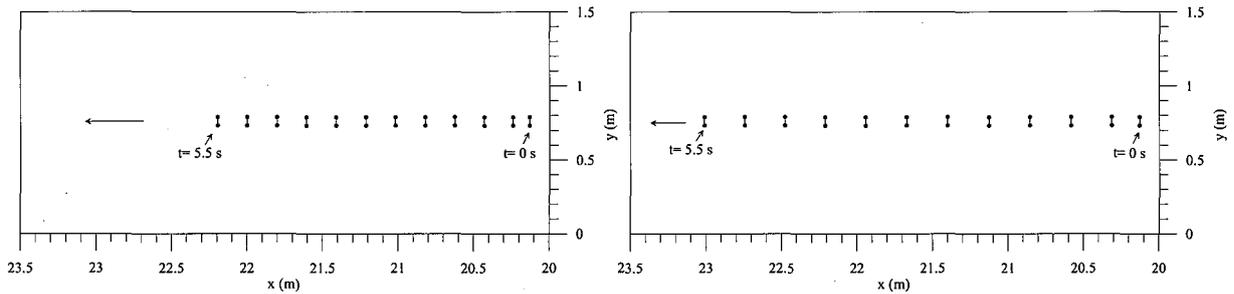


図-4.3.4.13 計算結果 (0° ，200rpm 相当)



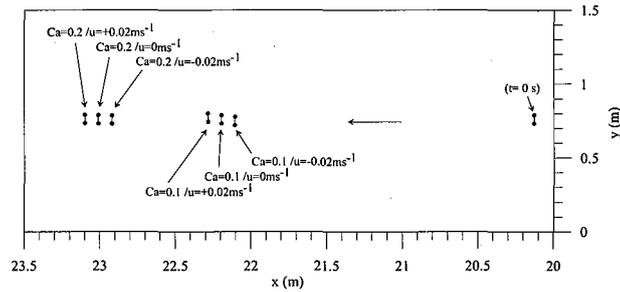
(3) 流れありの場合との比較 (t=2.5 s 時点)

図-4.3.4.13 計算結果 (0°, 200rpm 相当)



(1) Ca=0.1, 流れなし

(2) Ca=0.2, 流れなし



(3) 流れありの場合との比較 (t=5.5 s 時点)

図-4.3.4.14 計算結果 (0°, 300rpm 相当)

d) 清水港での漂流挙動の計算

b) の風洞実験の結果が適用できる範囲を検討する。相似則としてレイノルズの相似則が成立すると考えると、実験室での代表長さ (L_m)、代表速度 (U_m) 及び動粘性係数 (ν_m) で算定されるレイノルズ数と、実際に生じる現象の代表長さ (L_p)、代表速度 (U_p) 及び動粘性係数 (ν_p) で算定されるレイノルズ数が同等となる範囲に対して適用できる (式-4.3.4.8)。

$$L_m U_m / \nu_m = L_p U_p / \nu_p \quad (4.3.4.8)$$

実験室の気温を 15°C、1 気圧とすると、理科年表より空気の密度は 1.226 kg/m^3 である。理科年表には 1 気圧のもとでの 0°C と 25°C の空気の粘性係数が示されているので、0°C と 25°C の間で粘性係数が温度に対して線形的に変化すると仮定して 15°C での粘性係数は $17.76 \times 10^{-6} \text{ Pa} \cdot \text{s}$ とする。一方、気象台の観測結果によると、清水港の 2008 年の平均気温は 16.6°C であり、1 気圧とすると理科年表より空気の密度は 1.219 kg/m^3 である。また、粘性係数を上と

同様に $17.83 \times 10^6 \text{ Pa} \cdot \text{s}$ とする。その結果、 $v_p/v_m \doteq 1.01$ である。幾何縮尺より $L_p/L_m=20$ である。実験について 300rpm の場合の静水面上 50cm 高さの風速 7.64 m/s を代表速度 U_m に用いると、式-4.3.4.8 を変形した

$$U_p = U_m \cdot \frac{L_m}{L_p} \cdot \frac{v_p}{v_m} \quad (4.3.4.9)$$

に代入することにより、実際に生じる現象では $U_p=0.386 \text{ m/s}$ が適用範囲の限界になる。

そこで、H.W.L. 上 10 m の高さの風速が 0.386 m/s、風向は 2008 年最多風向の観測結果である北向きとして、コンテナの流動の計算を行った。表-4.3.4.3 に、計算条件をまとめて示す。計算は新興津ふ頭のコンテナの一部を対象に行い、c) の再現計算の結果から C_a を 0.1 または 0.2 としてそれぞれ計算した。

図-4.3.4.15 に、 $C_a=0.1$ の場合の計算結果を示す。最初に 2 個のコンテナが海上に流出し、風と流れによりふ頭の東側を漂流する結果となった。また、(4)以降ではさらに 1 個のコンテナが海上に流出してふ頭のごく近くを漂う結果となった。図-4.3.4.16 に、 $C_a=0.2$ の場合の計算結果を示す。最初から海上に 3 個のコンテナが流出する結果となった。風がない場合の計算結果である図-4.3.2.10(2), (3), (4)及び(5)の 2 個のコンテナ (186 番及び 187 番) と比較すると、与えた風速が比較的小さいため、到達範囲の違いは小さいが、風抗力を与えたためふ頭から海上に流出するコンテナの数は増える結果となった。

表-4.3.4.3 計算条件

流れ	想定東海地震津波	
計算の対象	コンテナ蔵置位置・本数	新興津ふ頭, 71個(10×6列+1×11列, 1段積み)
	時間	地震発生～6時間($dt=0.0025 \text{ s}$)
コンテナの特性	形状・質量	40フィート一般コンテナ, 6,000 kg
	球形要素数・半径・密度	40個(2×2×10), 0.64775 m, 51.742 kg/m ³
	バネ係数	(法線方向) 1.0×10^6 , (接線方向) 2.5×10^5
	減衰係数	(法線方向) 1.13×10^3 , (接線方向) 5.66×10^2
	静止摩擦係数 μ ・動摩擦係数 μ'	0.53, 0.53
	沈没	あり(密度増加 $0.0108 \text{ kg/m}^3/\text{s}$)
作用力に係る定数	流れ抗力係数 C_D ・慣性力係数 C_M	$C_D=1.0$, $C_M=1.5$
	風抗力係数 C_a ・風向風速	0.1または0.2, 北風0.386m/s(H.W.L.上10 m)
	流体の密度・空気の密度	1,030 kg/m ³ , 1.219 kg/m ³ (16.6°C・1気圧)

気象台の観測結果によると清水港の2008年の平均風速は 2.1 m/s (風速計の設置高さ T.P. +8.5 m = H.W.L. +7.64 m)、最多風向は北である。式-4.3.4.5 に $z_1=7.64 \text{ m}$, $u(z_1)=2.1 \text{ m/s}$ を代入すると、H.W.L. 上 10 m の高さの風速は 2.18 m/s となる。この風速は b) の風洞実験の結果の適用範囲外にあるが、参考として、この風速を与えて $C_a=0.1$ 及び 0.2 の場合について、コンテナの流動の計算を行った。表-4.3.4.4 に、計算条件をまとめて示す。表-4.3.4.3 と表-4.3.4.4 との違い

は、風速を変化させている点である。

図-4.3.4.17 に、 $C_a=0.1$ の場合の計算結果を示す。海上に 4 個のコンテナが流出し、風と流れにより南側に流され、外港防波堤に衝突する。その後、外港防波堤と三保防波堤の間の主航路を通過して、防波堤開口部の近くの港外の海域を漂流する結果となった。図-4.3.4.18 に、 $C_a=0.2$ の場合の計算結果を示す。海上に 5 個のコンテナが流出し、風と流れにより南側に流され、外港防波堤に衝突する。その後、3 個のコンテナは主航路を通過して、防波堤開口部の近くの港外の海域を漂流する結果となった。風を考慮しない場合、流出したコンテナは主として新興津ふ頭と防波堤の間の水路狭窄部の海域にあった(図-4.3.2.10(5)の 186 番と 187 番のコンテナ)。それと比較すると、風洞実験の結果の適用範囲外にあるため参考ではあるが、平均的に観測される北風を考慮した場合は、流出するコンテナ個数が増加し、また、到達範囲が全体としてふ頭の南側の水域になって、防波堤へ衝突し、外洋への開口部にあたる主航路付近を漂流する結果となった。

表-4.3.4.4 計算条件

流れ	想定東海地震津波	
計算の対象	コンテナ蔵置位置・本数	新興津ふ頭, 71個(10×6列+1×11列, 1段積み)
	時間	地震発生～6時間($dt=0.0025$ s)
コンテナの特性	形状・質量	40フィート一般コンテナ, 6,000 kg
	球形要素数・半径・密度	40個(2×2×10), 0.64775 m, 51.742 kg/m ³
	バネ係数	(法線方向) 1.0×10^6 , (接線方向) 2.5×10^5
	減衰係数	(法線方向) 1.13×10^3 , (接線方向) 5.66×10^2
	静止摩擦係数 μ ・動摩擦係数 μ'	0.53, 0.53
	沈没	あり(密度増加0.0108 kg/m ³ /s)
作用力に係る定数	流れ抗力係数 C_D ・慣性力係数 C_M	$C_D=1.0$, $C_M=1.5$
	風抗力係数 C_a ・風向風速	0.1または0.2, 北風2.18m/s(H.W.L.上10 m)
	流体の密度・空気の密度	1,030 kg/m ³ , 1.219 kg/m ³ (16.6°C・1気圧)

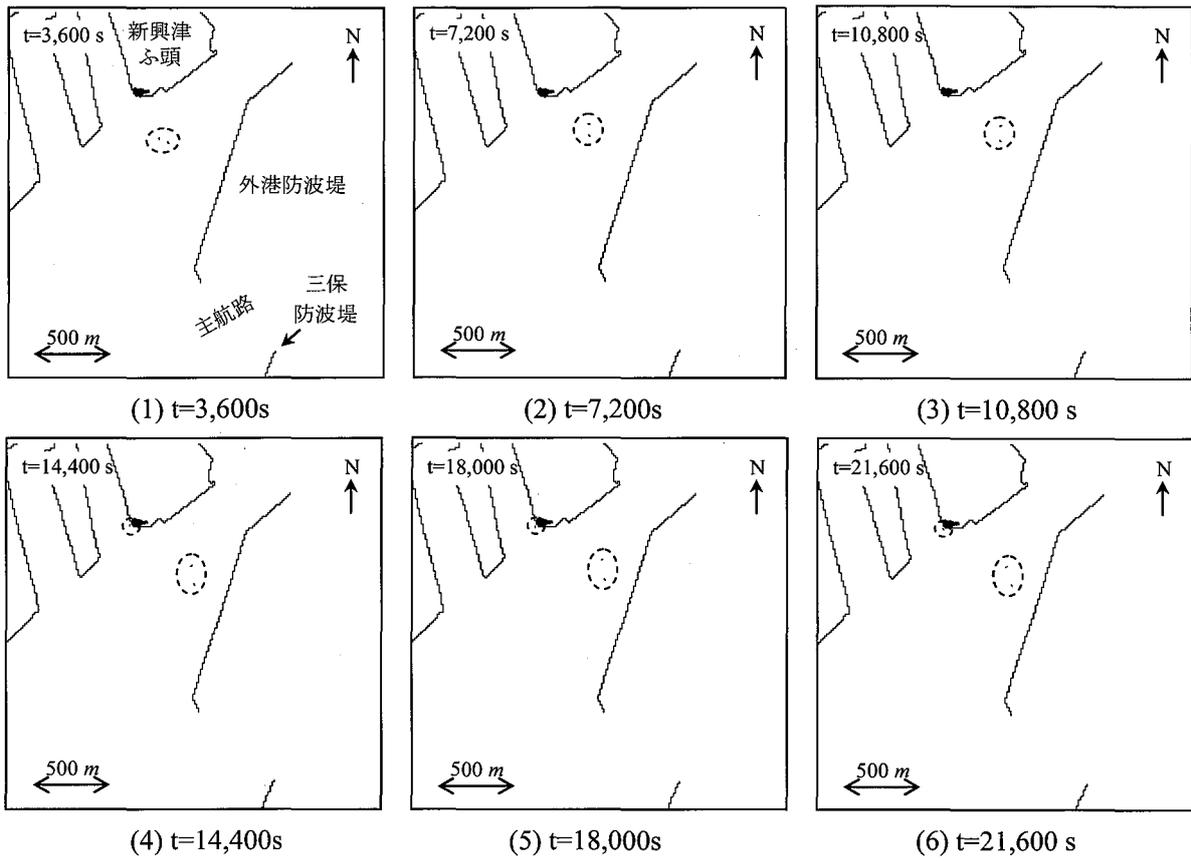


図-4.3.4.15 $C_a=0.1$ の計算結果

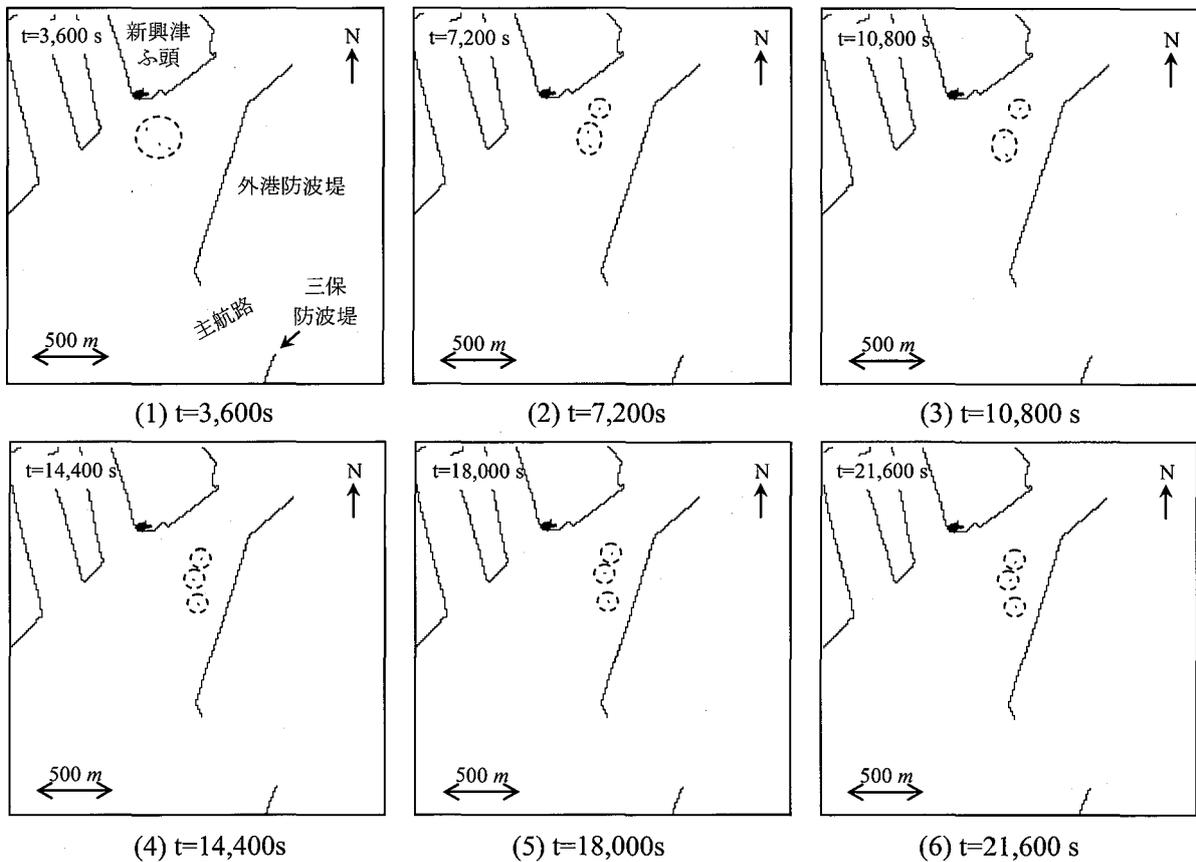
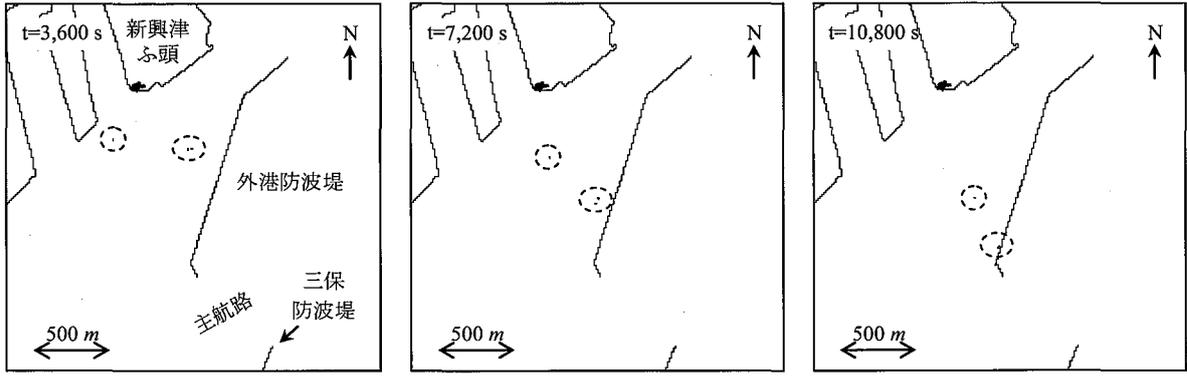


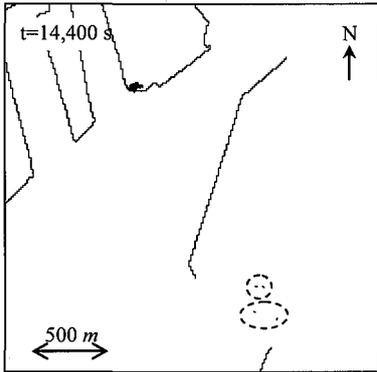
図-4.3.4.16 $C_a=0.2$ の計算結果



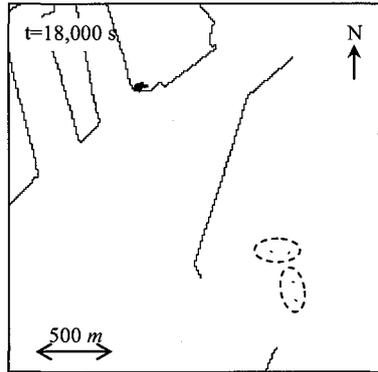
(1) $t=3,600s$

(2) $t=7,200s$

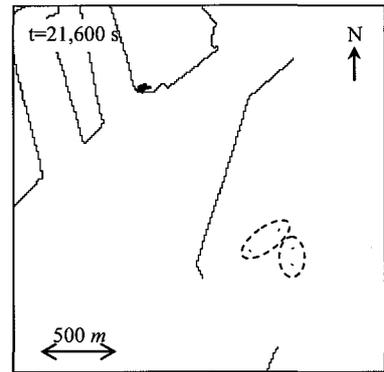
(3) $t=10,800s$



(4) $t=14,400s$

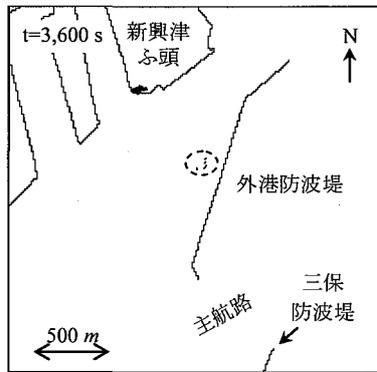


(5) $t=18,000s$



(6) $t=21,600s$

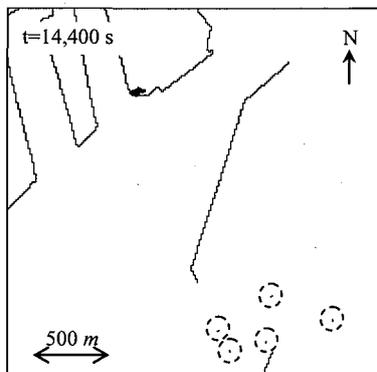
図-4.3.4.17 $C_a=0.1$ の計算結果



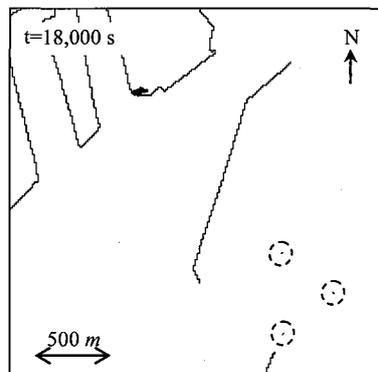
(1) $t=3,600s$

(2) $t=7,200s$

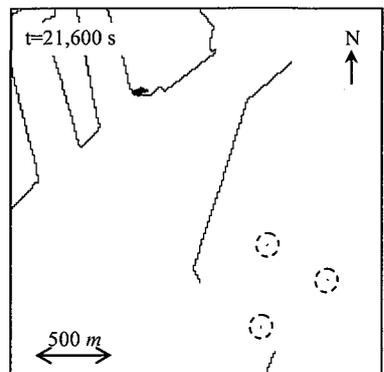
(3) $t=10,800s$



(4) $t=14,400s$



(5) $t=18,000s$



(6) $t=21,600s$

図-4.3.4.18 $C_a=0.2$ の計算結果

4. 3. 5 衝突力の評価

a) 上屋及び防波堤のモデル化

津波による漂流物は、陸域では上屋、海岸堤防等の防潮施設、海上では防波堤等に衝突する可能性がある。図-4.3.5.1に、清水港の上屋、防潮施設及び防波堤の位置を示す。コンテナの蔵置されている新興津ふ頭、興津第二ふ頭及び袖師第一ふ頭にそれぞれ上屋がある。北側（陸上）には防潮施設、南側（海上）には防波堤がある。

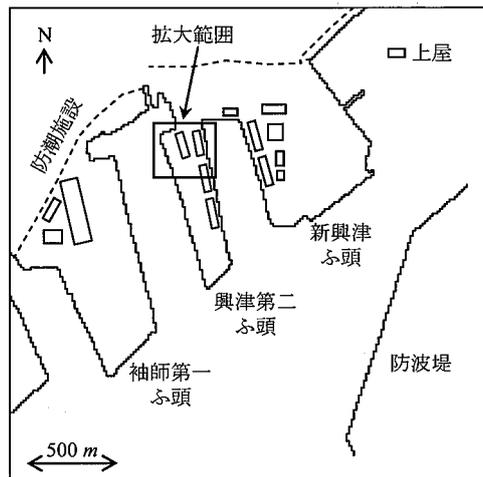


図-4.3.5.1 上屋、防潮施設及び防波堤の位置

以下、蔵置コンテナの漂流と上屋への衝突挙動の計算を行った。上屋は、上屋の壁四面の位置にそれぞれ十分に高い剛体壁をふ頭上に設置することにより表現した。個別要素法上では、一つの上屋について4枚の境界要素を用いてモデル化している。防波堤も同様に、十分に高い剛体壁を設置し、剛体壁は境界要素を用いてモデル化している（図-4.3.5.2）。

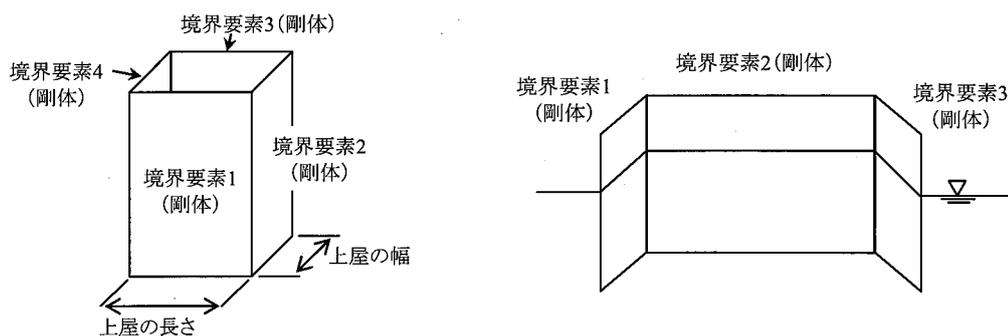


図-4.3.5.2 上屋（左）及び防波堤（右）のモデル化

b) 漂流・衝突計算

表-4.3.5.1に、計算条件を示す。興津第二ふ頭に蔵置されたコンテナ90本の地震発生後1時間の挙動を対象としており、その他の計算条件は4.3.2項の「標準ケース」と同じである。蔵置位置、衝突した上屋の周辺を拡大し（図-4.3.5.1の中でその範囲を示した）、図-4.3.5.3に、コンテナ漂流の計算結果を示す。護岸沿いに蔵置されたコンテナが密集した状態のまま東

表-4.3.5.1 計算条件

流れ	想定東海地震津波	
計算の対象	コンテナ蔵置位置・本数	興津第二ふ頭・90本(15×6列, 1段積み)
	時間	地震発生～1時間($\Delta t=0.001$ s)
コンテナの特性	形状・質量	40フィート一般コンテナ, 6,000 kg
	球形要素数・半径・密度	40個(2×2×10), 0.64775 m, 51.742 kg/m ³
	バネ係数	(法線方向)1.0×10 ⁶ , (接線方向)2.5×10 ⁵
	減衰係数	(法線方向)1.13×10 ³ , (接線方向)5.66×10 ²
	静止摩擦係数 μ ・動摩擦係数 μ'	0.53, 0.53
	沈没	あり(密度増加0.0108 kg/m ³ /s)
作用力に係る定数	流れ抗力係数 C_D ・慣性力係数 C_M	1.0, 1.5
	風抗力係数 C_a	0.0(風なし)
	流体の密度・空気の密度	1,030 kg/m ³ , 1.219 kg/m ³ (16.6°C・1気圧)

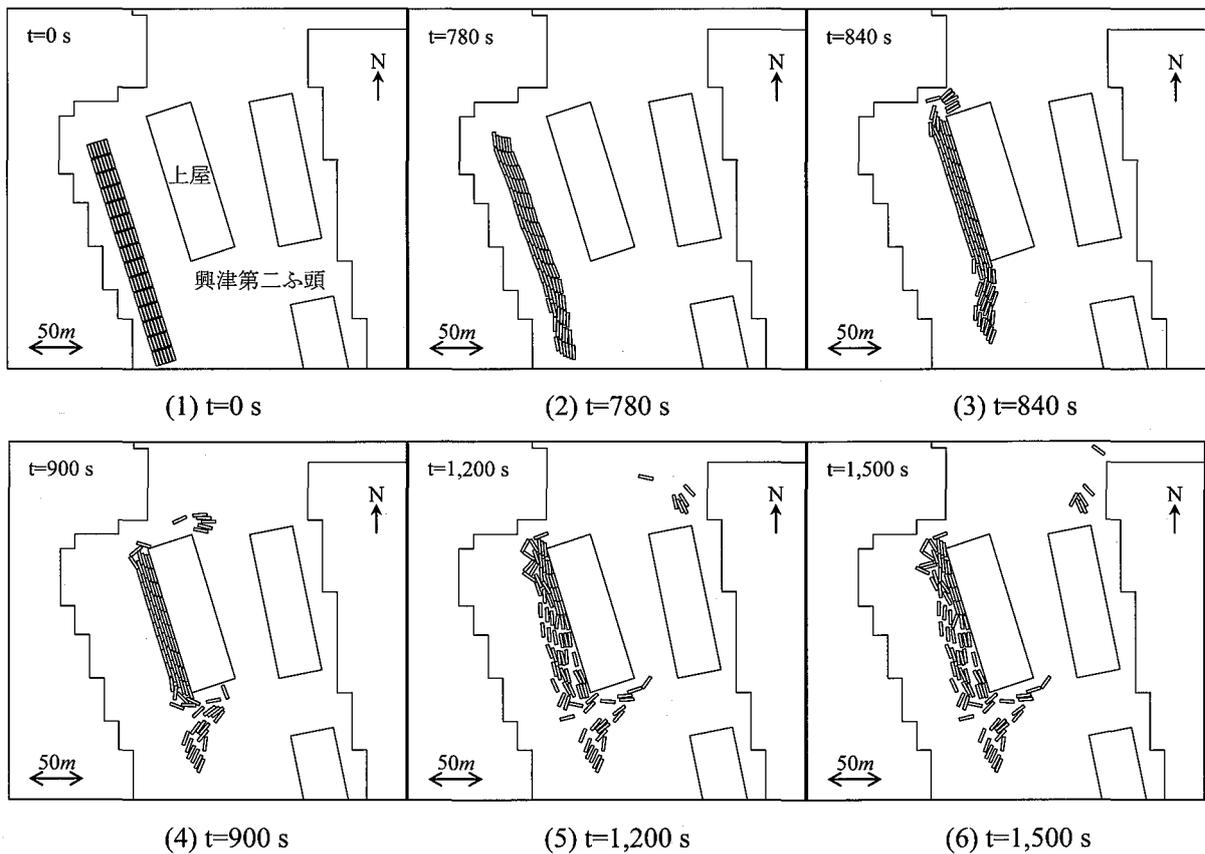


図-4.3.5.3 コンテナ位置の計算結果

側に流され、上屋に衝突し、多くのコンテナがそこで堰き止められている。一部のコンテナはさらに東へ漂流してから止まっている。

図-4.3.5.4に、t=830 sの計算結果を拡大し、上屋に直接衝突する主なコンテナについてコンテナ番号 (No.77, 80, 83及び86) を示した。図-4.3.5.5(1)に、上屋へ衝突するNo.77のコンテナへの作用力の計算結果を示す。なおここでは、コンテナ壁面が概ね y 軸と平行向きなので、壁面への衝突力のうち x 方向成分のみをとりあげることにする。図は横軸に地震発生後

の時間、縦軸に力をとっているが、計算結果は高周期で振動している。図(2)はそのうち $t=828 \sim 828.05$ s の拡大図である。これは、バネでつながれた球形要素でコンテナをモデル化しているため、高周期の振動が定常的に表れたものと考えられる。そこで、高速フーリエ変換による周波数解析を行い、高周波成分を除去した。解析は、周波数解析ソフトウェア (Auto Signal ver1.7, SYSTAT Software Inc.) を用いた。図(3)に、フーリエスペクトルの分布を示す。横軸は周波数を取り、縦軸はスペクトル強さを周波数 500Hz の成分の強さに対する相対強さ (dB) で示している。相対強さの考え方は、式-4.3.4.7 と同じである。

周波数 400 Hz 以上の成分を除去すると、図(4)の結果を得る。図ではコンテナへの作用力をあらわしているため、上屋への衝突力は反力として負の値で表されている。 $t=829.3$ s 付近に生じている下向きの力が上屋への衝突力である。

図-4.3.5.6 に、No.80, 83 及び 86 についても同様に処理してまとめて示す。No.77 については図-4.3.5.5(4)の再掲である。図より、例えばコンテナ No.77 による上屋への衝突力は約 8,900 N の大きさである。その後は、続いて流されてくるコンテナと上屋に相互に衝突するような複雑な挙動であった。そこで以下では、最初の負の波形だけを検討の対象とした。

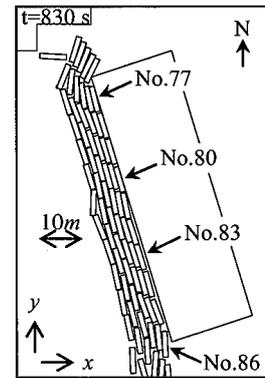


図-4.3.5.4 コンテナ番号

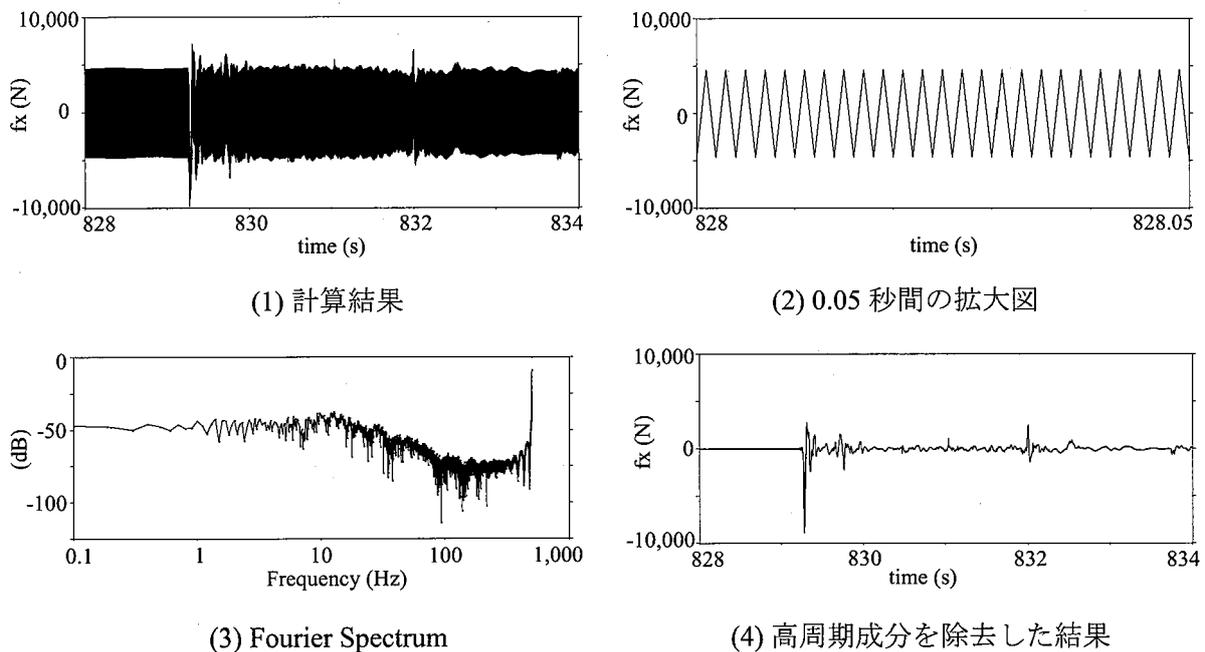


図-4.3.5.5 コンテナ (No.77) の衝突力

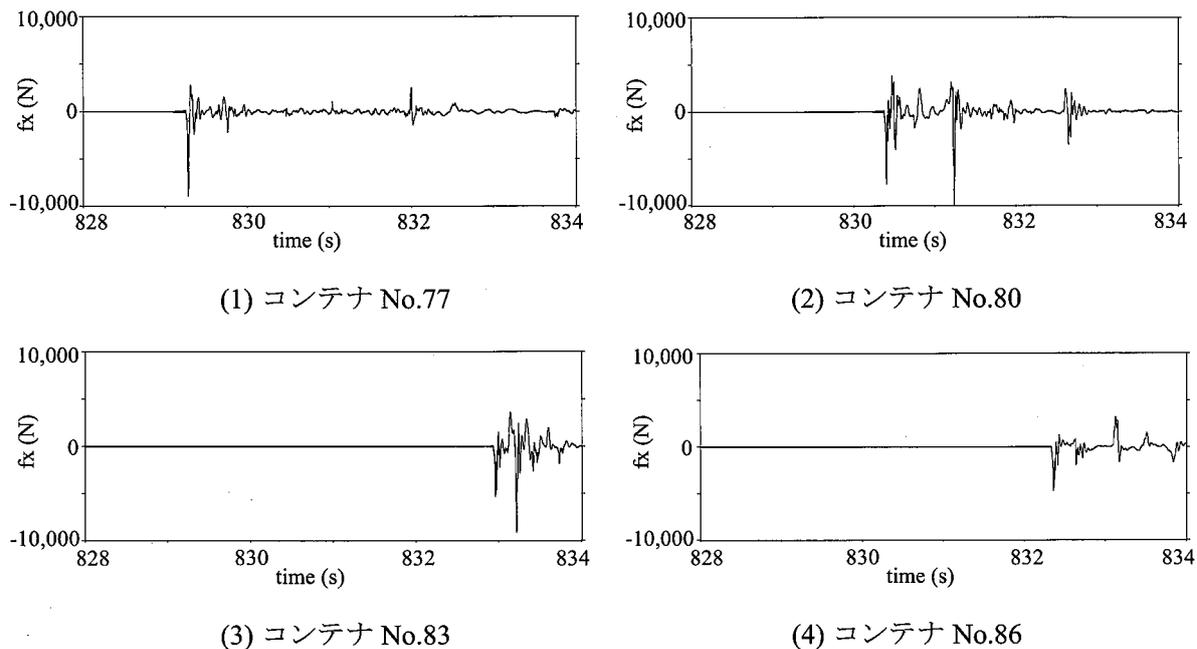


図-4.3.5.6 衝突力の計算結果

表-4.3.6.2 に、各コンテナの衝突力の最大値、継続時間及び力積を示す。なお、力積 I (Ns) は、衝突力の最大値 $F_{x_{max}}$ (N) 及び継続時間 Δt (s) より以下の式で求めた。

$$I = \frac{1}{2} F_{x_{max}} \cdot \Delta t \quad (4.3.5.1)$$

$F_{x_{max}}$ は約 4,700~8,900 N, Δt は 0.047~0.056 s となった。衝突力のばらつきに比較して継続時間のばらつきは小さく、衝突力の最大値と式-4.3.5.1 から求めた力積は概ね比例している。また、衝突力の最大値は衝突直前の移動速度に比例して大きくなった。

このように、 $F_{x_{max}}$ は数値シミュレーションにより解析的に求めることができるが、実用的には、浮遊状態のコンテナがある衝突速度で構造物に衝突した場合の衝突力の最大値を簡便に推定する方法を示しておくことは有用である。そのためには、反発係数、衝突の継続時間を与えることが必要である。

衝突直前の要素が持つ運動量 (=B) に対し、式-4.3.5.1 から算定した力積 (=A) の比は、 $A/B = 2.21 \sim 2.47$ となった (表-4.3.5.2)。この数値は、漂流物を質点で模擬した場合の反発係数に相当するものである。 A/B が 2 以上なのは流体が存在し慣性が作用することによるものである。以上より、剛体壁にコンテナが衝突したときの衝突力最大値を簡便的に推定するためには、コンテナの 1/40 の質量の質点を仮定し、反発係数は 2.2~2.5 程度を用い、衝突の継続時間は 0.05~0.06 s 程度を用いて算定すればよい結果となった。

表-4.3.5.2 衝突力の最大値，継続時間及び力積

コンテナ No.	衝突力の最大値 (N)	継続時間 (s)	力積 (Ns) (=A)	衝突直前の速度 (m/s)	要素質量 (kg)	運動量 (Ns) (=B)	A/B
77	8,915	0.047	209.5	0.754	112.5	84.8	2.47
80	7664	0.047	180.1	0.674	112.5	75.8	2.38
83	5,329	0.056	149.2	0.601	112.5	67.6	2.21
86	4,702	0.056	131.7	0.528	112.5	59.4	2.22

c) 構造解析による限界応力の照査

b) の衝突力の最大値を用い，上屋の構造解析により限界応力の照査を行った．図-4.3.5.7 に，上屋の構造概要図を示す．コンテナが衝突する西に面した壁の構造材は長さ 9.25 m の H 鋼の柱である．また，柱には，外壁材を取り付けるための胴縁が紙面垂直方向に配置されている．そこで，柱及び胴縁を対象とした．

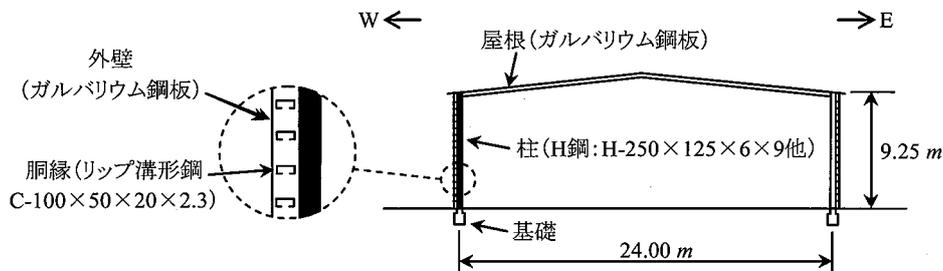


図-4.3.5.7 上屋の構造概要図

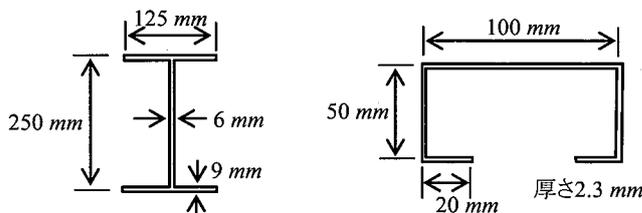


図-4.3.5.8 柱 (左) 及び胴縁 (右) の材料寸法

柱に荷重をかけたときの応力状態の解析は，図-4.3.5.9 に示すような，一端が固定，他端が支点の不静定はりに集中荷重 P が固定端から a の位置で作用する問題に置き換えることができる．高岡ら (2001) を参考に，仮想仕事の原理を利用してこのはりの解析を行う．

図(a)の支点反力 R_B を不静定力とすると，図(b)及び(d)の載荷状態に対する曲げモーメント図は図(c)及び(e)のようになる．せん断力を無視して弾性変形を計算すると

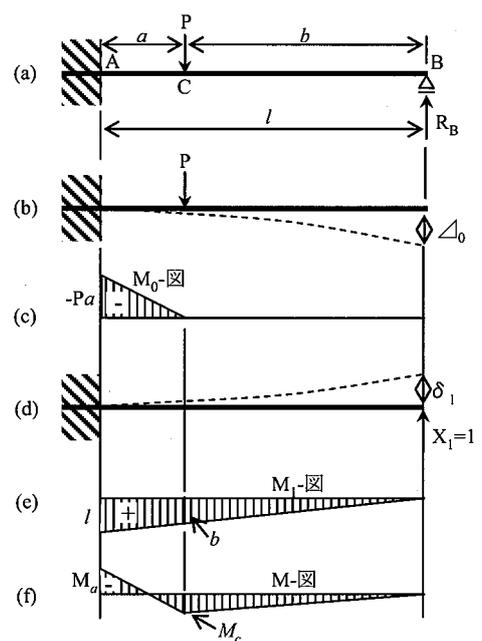


図-4.3.5.9 不静定はりの問題

$$\begin{aligned}\Delta_B &= \int_A^B \frac{M_1 M_0}{EI} dx \\ &= \frac{1}{EI} \left[(-Pa)(b+2l) \frac{a}{6} \right] = -\frac{Pa^2}{6EI} (2l+b)\end{aligned}\quad (4.3.5.2)$$

$$\delta_1 = \int_A^B \frac{M_1^2}{EI} dx = \frac{1}{EI} \left(l^2 \cdot \frac{l}{3} \right) = \frac{l^3}{EI}\quad (4.3.5.3)$$

ここで、点Bの不静定力 $X_1=1$ を作用させたときのたわみ δ_1 と支点反力 R_B によるたわみ Δ_1 の間には明らかに以下の関係がある：

$$\Delta_1 = \delta_1 X_1 \quad (4.3.5.4)$$

点Bが実際には移動しないということを考えると荷重Pによるたわみ Δ_0 と Δ_1 の関係は

$$\Delta_0 + \Delta_1 = \Delta_0 + \delta_1 X_1 = 0 \quad (4.3.5.5)$$

$$X_1 = -\frac{\Delta_0}{\delta_1} = \frac{Pa^2(2l+b)}{2l^3} \quad (4.3.5.6)$$

任意の断面における曲げモーメントMは

$$M = M_0 + M_1 X_1 \quad (4.3.5.7)$$

で与えられる。点A及び点Cの曲げモーメント M_a 及び M_c をそれぞれ計算すると、

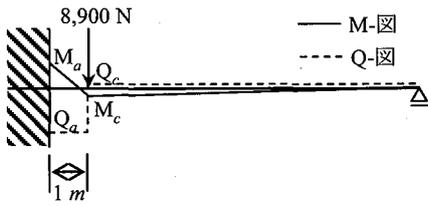
$$M_a = (-Pa) + l \cdot \frac{Pa^2(2l+b)}{2l^3} = -\frac{Pab}{2l^2} (l+b)$$

$$M_c = b \cdot \frac{Pa^2(2l+b)}{2l^3} = -\frac{Pa^2 b}{2l^3} (2l+b)$$

となり、曲げモーメント図は図(f)のようになる。

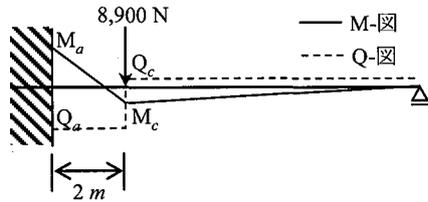
柱に用いられているH鋼 (H-250×125×6×9) の断面積、せん断有効面積、断面 2 次モーメント及び断面係数は日本工業標準調査会 (2008) で定められているので、柱の材質をSS400 (曲げ基準強さ：402 N/mm²、せん断基準強さ：314 N/mm²) と仮定すると、上屋の柱に生じる曲げモーメント及びせん断力を具体的に算定し、基準強さに対する安全率の算定を行うことができる。

図-4.3.5.10に、コンテナの衝突力 $P=8,900$ N、地面からの衝突高さ $h=1, 2, 3$ mとしたときの曲げモーメント図及びせん断力図をそれぞれ示す。図で、 SF_σ は曲げ応力 σ の曲げ基準強さ (402 N/mm²) に対する安全率である。また、 SF_τ はせん断応力 τ のせん断基準強さ (314 N/mm²) に対する安全率である。固定端 (位置a) での曲げ応力に対する安全率は 8.43～16.97、せん断応力に対する安全率は 132.7～151.8 となった。したがって、柱は想定した衝突力に対して安全であると評価できる。



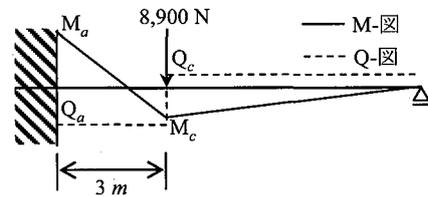
位置	M N/mm ²	σ N/mm ²	SF _{σ}	Q N	τ N/mm ²	SF _{τ}
a	-7,509,000	-23.69	16.97	8750	2.367	132.7
c	1,241,000	3.914	102.7	8750:-150	-2.367	132.7

(1) 地面からの衝突高さ $h=1\text{ m}$



位置	M N/mm ²	σ N/mm ²	SF _{σ}	Q N	τ N/mm ²	SF _{τ}
a	-12,440,000	-39.25	10.24	8321	2.251	139.5
c	4,199,000	13.24	30.35	8321:-579	-2.251	139.5

(2) 地面からの衝突高さ $h=2\text{ m}$



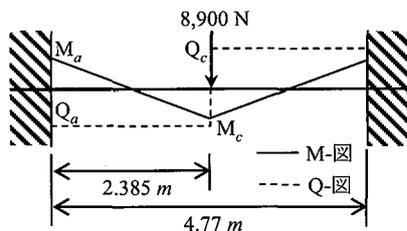
位置	M N/mm ²	σ N/mm ²	SF _{σ}	Q N	τ N/mm ²	SF _{τ}
a	-15,120,000	-47.68	8.43	7648	2.069	151.8
c	7,828,000	24.69	16.28	7648:-1252	-2.069	151.8

(3) 地面からの衝突高さ $h=3\text{ m}$

図-4.3.5.10 上屋の柱の曲げモーメント及びせん断力

次に、胴縁にコンテナが衝突した場合について検討する。胴縁は、柱と柱の間（間隔 4.77m）に渡されている。胴縁に荷重をかけたときの応力状態の解析は、図-4.3.5.11 に示すような、両端が固定の不静定はり集中荷重 P が作用する問題に置き換えることができる。上記と同様に、このはりを解析し照査を行った結果を示す。その結果、柱と柱の間に 8,900N の衝突力が作用したときの曲げ応力に対する安全率は 1.22、せん断応力に対する安全率は 36.5 となった。曲げについて、部材の許容応力の範囲ではあるものの安全率が小さくなった。

以上のように、今回の計算結果を用いた場合、衝突力に対して上屋の柱は安全であるが、胴縁は安全性が低い結果となった。



位置	M N/mm ²	σ N/mm ²	SF _{σ}	Q N	τ N/mm ²	SF _{τ}
a	-5,307,000	-329.6	1.22	4450	8.604	36.5
c	5,307,000	329.6	1.22	4450:-4450	-8.604	36.5

図-4.3.5.11 胴縁の曲げモーメント及びせん断力

4. 3. 6 計算に必要な時間

計算環境は、CPUが Intel Xeon Processor X5272 (3.4GHz, 1600MHz-FSB, Dual core) ×2, Core数は4のワークステーションを用いた。メモリは32GB, OSは Redhat Enterprise Linux 5 である。コンパイラーは Intel Fortran Compiler for Linux 11.1.056 (Intel64 対応版) である。

計算に必要な時間は、袖師第一ふ頭の9個×18列で一段積みされた40フィートコンテナ(コンテナ個数は162個, 球形要素数は $162 \times 40 = 6,480$ 個)を対象として実時間で3時間分の流動の計算に要する時間は、計算時間ステップを 2.5×10^{-3} s (0.0025s) として約180時間(7.5日間)であった。同様に、新興津ふ頭の71個の40フィートコンテナ(球形要素数は2,840個)を対象として実時間で3時間分の流動の計算に必要な時間は、同じ計算時間ステップで約72時間(3日間)であった。すなわち、計算対象の球形要素数が増加すると計算に必要な時間も増加する結果となった。

この原因のひとつは、拡張個別要素法では、運動方程式の計算及び要素間の接触判定の回数が要素の数に比例して増加するので(伯野(2004)), 球形要素の数を増加させると計算に必要な時間も増加している可能性が考えられる。従って、広範囲に多段積みされた、すなわち多数のコンテナを対象に計算を行う場合には、さらに多くの時間が必要となることが予想される。その対策として計算の高速化を図ることが挙げられる。具体的な手法としては、接触判定の探索範囲を可能な限り小さくすることを目的とした接触判定プログラムの改良、並列化コードの追加によるプログラムの並列処理の強化、クラスター型並列計算機の構築や画像処理演算装置の活用(GPGPU)による計算機の能力向上等が考えられる。

4. 3. 7 今後の課題

本節では、港湾のふ頭に蔵置されたコンテナの海域または陸域への漂流リスクを具体的事例について検討した。他の港湾についても同様に、この手法を用いてふ頭のコンテナの流出の被害想定ができると考えられるが、課題を挙げると以下のとおりである：

- ・風抗力について、風洞水槽の実験上の制約から適用できる風速の範囲が比較的小さいので、その範囲を広げるための追加実験等が必要である。また、波力がコンテナの流動に及ぼす影響についての検討も必要である。(4. 3. 4項)
- ・コンテナの構造物への衝突について、構造物の部材の静的限界応力の照査を行うことにより被害評価を行ったが、衝撃の継続時間等も考慮した動的応答解析による照査について検討する必要がある。(4. 3. 5項)
- ・計算に必要な時間を短縮するため、接触判定の探索範囲を可能な限り小さくすることを目的とした接触判定プログラムの改良、並列化コードの追加によるプログラムの並列処理の強化、クラスター型並列計算機の構築や画像処理演算装置の活用(GPGPU)による計算機の能力向上等が考えられる。(4. 3. 6項)

4. 4 本章のまとめ

本章をまとめると以下のとおりである。

- ・拡張個別要素法 DEMS に流体による抗力・慣性力を加えた，澤田・中瀬・藤井により開発されたプログラムを基礎として，プログラムの修正・追加を行うことにより，津波によるコンテナの流動をシミュレーションするプログラムを構築した。
- ・既往のコンテナ模型を用いた実験結果について，同プログラムによる再現計算を行うことにより，プログラムの適用性について検証し流れ抗力係数 C_D 及び慣性力係数 C_M を定めた。その結果，対象とした実験結果はいずれも C_M を1.5とし， C_D は0.5～1.5で変化させた計算結果の範囲内となった。ただし，そのなかで $C_D=0.5$ とすると再現性がよい場合， $C_D=1.0$ または1.5とすると再現性がよい場合とがあり，ばらつきがあった。
- ・風が作用する海上にコンテナが浮遊した状態を模擬して風洞水槽においてコンテナ模型を用いた実験を行うとともに，その実験結果について同プログラムによる再現計算を行った。それにより，プログラムの適用性について検証し風抗力係数 C_a を定めた。その結果，実験結果は C_a を0.1～0.2で変化させた計算結果の範囲内となった。
- ・構築したプログラムを用いて，清水港のふ頭に蔵置されたコンテナについて，想定東海地震に伴う津波によるコンテナの流動のシミュレーションを，コンテナ質量及び段積みの条件を変えて行った。また，風速の適用範囲に限界があるものの，風の影響を考慮したシミュレーションを行った。さらに，コンテナが流出して構造物に衝突する事例について，コンテナの衝突力と構造物の部材の静的限界応力とを比較することにより，構造物の被害評価を行った。

4章の参考文献

- 1) Cundall, P. A.: A Computer Model for simulating progressive, large-scale movements in blocky rock systems, Rock fracture Proceedings of the international Symposium on Rock Mechanics, Nancy, France, II-8, 1971.
- 2) Cundall, P. A.: Rational Design of Tunnel Supports - A Computer Model for Rock Mass Behavior Using Interactive Graphics for the Input and Output of Geometrical Data, Technical Report, Missouri River Division, U.S. Army Corps of Engineers, MRD-2-74, 1974.
- 3) Cundall, P. A.: Explicit Finite Difference Method in Geomechanics, Numerical Method in Geomechanics (edited by Desai, C. S.), Vol.1, pp.123-150, 1976.

- 4) 目黒公郎・伯野元彦：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，東京大学地震研究所，Vol.63，pp.409-468，1988.
- 5) 伯野元彦：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，p.49-51，2004.
- 6) 水谷法美・白石和睦・宇佐美敦浩・宮島正悟・富田孝史：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，土木学会，第 53 巻，pp.791-795，2006.
- 7) 国土交通省中部地方整備局名古屋港湾空港技術調査事務所・財団法人名古屋産業科学研究所：平成 17 年度津波による漂流物の港湾構造物影響調査報告書，251p，2006.
- 8) Stelson, T. E. and F. T. Mavis: Virtual mass and acceleration in fluids, Proc, ASCE., Vol. 81, Separate No. 670, pp.670-1-670-9, 1955.
- 9) 井上春夫・泉信也・石渡友夫：港湾計画概論，社団法人全日本建設技術協会，p.248-249，1979.
日本工業標準調査会：国際貨物コンテナー外のり寸法及び最大総質量，JIS Z 1614，1994.
- 10) 柴崎隆一・渡部富博・角野隆：国際海上コンテナ貨物の国内自動車輸送における通行上の制約と経済損失に関する分析，国土技術政策総合研究所研究報告，No.18，pp.3-4，2004.
- 11) 中村朋宏・安部浩二・坂本宗彦・太田進：コンテナの固縛評価手法の研究，日本航海学会論文集，102 号，pp.219-226，2000.
- 12) 本田啓之輔・堀富士男：コンテナの耐風に関する模型実験，日本航海学会論文集，63 号，pp.29-34，1980.
- 13) 伯野元彦：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，p.25-26，2004.
- 14) 国土交通省港湾局海岸・防災課，国土交通所河川局保全課海岸室：「ゼロメートル地帯の高潮対策検討会」提言，26p，2006.
- 15) 国土交通省交通政策審議会港湾分科会：第 4 回防災・保全部会中間報告（案），2008.
- 16) 本多忠夫・光易恒：水面に及ぼす風の作用に関する実験的研究，第 27 回海岸工学講演会論文集，土木学会，pp.90-93，1980.
- 17) 宇野木早苗・斎藤晃・小菅晋：海洋技術者のための流れ学，東海大学出版会，pp.120-122，1990.
- 18) 水谷夏樹・鈴木武：風波が発達する界面下の吹送流特性，国土技術政策総合研究所資料，No.172，p.3，2004.
- 19) 高岡宣善・白木渡：不静定構造力学（第 2 版），共立出版株式会社，pp.55-57，2001.
- 20) 日本工業標準調査会：熱間圧延形鋼の形状，寸法，質量及びその許容差，JIS G 3192，54p，2008.

5. 結論

5. 1 結論

本研究は、港湾において津波により漂流物が被害を及ぼす現象を分析するため、津波によるコンテナの流動とそれに伴う被害の評価手法の構築を行うとともに、津波の発生が懸念されている地域においてその手法を適用したものである。その結論は以下のとおりである。

- ・港湾の漂流物として、流木、船舶・浮体構造物及びコンテナに関する既往の検討を整理した。漂流物の個々の形状、密度、剛性等を適切に表現しつつ、相互に衝突しながら、港湾程度の大きさで数時間程度の長さという時空間領域を流動する漂流物の挙動に適用できる実用的な計算手法が必要である。
- ・衝撃荷重を設計上で考慮する際に用いられている既往の設計手法について、静的問題に置き換える手法を衝突物別に整理して示した。
- ・コンテナがふ頭から海上に流出した場合の挙動を把握するため、実物の国際海上コンテナを海上に浮遊させる実験を行った。その結果、長さ 40 フィート、質量 7,740 kg のコンテナは急激に沈没することなく海上を浮遊し、沈没深さが時間とともに概ね一定に増加していき、浮遊開始から 24.15 時間で海面下に完全に沈没した。また、この結果はこの型式のコンテナの特性として一般的に適用できる可能性があることが分かった。
- ・津波によるコンテナの流出と類似した現象として、台風に伴う高潮によりコンテナが流出した被害事例である 2004 年の水島港における被害及び 2009 年の三河港における被害の現地調査を行い、それぞれ流出したコンテナの漂流挙動に関する情報、衝突挙動に関する情報を整理して示した。
- ・拡張個別要素法 DEMS に流体による抗力・慣性力を加えた、澤田・中瀬・藤井により開発されたプログラムを基礎として、プログラムの修正・追加を行うことにより、津波によるコンテナの流動をシミュレーションするプログラムを構築した。
- ・既往のコンテナ模型を用いた実験結果について、同プログラムによる再現計算を行うことにより、プログラムの適用性について検証し流れ抗力係数 C_D 及び慣性力係数 C_M を定めた。その結果、対象とした実験結果はいずれも C_M を 1.5 とし、 C_D は 0.5~1.5 で変化させた計算結果の範囲内となった。ただし、そのなかで $C_D=0.5$ とすると再現性がよい場合、 $C_D=1.0$ または 1.5 とすると再現性がよい場合とがあり、ばらつきがあった。
- ・風が作用する海上にコンテナが浮遊した状態を模擬して風洞水槽においてコンテナ模型を用

いた実験を行うとともに、その実験結果について同プログラムによる再現計算を行った。それにより、プログラムの適用性について検証し風抗力係数 C_a を定めた。その結果、実験結果は C_a を0.1~0.2で変化させた計算結果の範囲内となった。

- ・構築したプログラムを用いて、清水港のふ頭に蔵置されたコンテナについて、想定東海地震に伴う津波によるコンテナの流動のシミュレーションを、コンテナ質量及び段積みの条件を変えて行った。また、風速の適用範囲に限界があるものの、風の影響を考慮したシミュレーションを行った。さらに、コンテナが流出して構造物に衝突する事例について、コンテナの衝突力と構造物の部材の静的限界応力とを比較することにより、構造物の被害評価を行った。

5. 2 今後の課題

今後の課題は以下のとおりである。なお、文末の括弧内は関連する章または節を示す。

- ・津波による実物のコンテナの流動は詳細に観察された事例が少なく、計算結果の検証が困難である。津波だけでなく類似の被害事例を参考にする等により、計算結果の検証や適用可能な範囲の詳細な検討が必要である。(3章)
- ・本研究で構築したプログラムをコンテナ以外の漂流物、例えば、流木、船舶、車両等へ適用するためには、模型実験等を行うことにより、適切な流れ抗力係数、慣性力係数、風抗力係数等をそれぞれ定める必要がある。(4. 1節)
- ・コンテナの流れ抗力係数及び慣性力係数は模型実験の再現計算から定めているが、それらの係数をさらに精度よく定めるためには、遡上波の再現計算の精度も影響するため、津波計算の精度向上についても検討する必要がある。(4. 2節)
- ・風抗力について、風洞水槽の実験上の制約から適用できる風速の範囲が比較的小さいので、その範囲を広げるための追加実験等が必要である。また、波力がコンテナの流動に及ぼす影響についての検討も必要である。(4. 3節)
- ・コンテナの構造物への衝突について、構造物の部材の静的限界応力の照査を行うことにより被害評価を行ったが、衝撃の継続時間等も考慮した動的応答解析による照査について検討する必要がある。(4. 3節)
- ・計算に必要な時間を短縮するため、接触判定の探索範囲を可能な限り小さくすることを目的とした接触判定プログラムの改良、並列化コードの追加によるプログラムの並列処理の強化、クラスター型並列計算機の構築や画像処理演算装置の活用(GPGPU)による計算機の能力向上等が考えられる。(4. 3節)

附録-1

・水深方向に積分された連続式ならびに運動方程式の導出

津波の支配方程式は、連続式と海水の摩擦を考慮した Navier-Stokes の運動方程式である。まず、連続式は、

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (\text{附 1.1})$$

ここで、 (x,y,z) は x,y が水平面、 z は平均海面を基準に鉛直上向きの座標軸、 (u,v,w) はそれぞれ (x,y,z) 方向の速度成分である。式-附 1.1 を海底 $z=-h$ から海面 $z=\eta$ まで積分する。

$$\int_{-h}^{\eta} \left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} \right) dz = 0$$

$$\int_{-h}^{\eta} \frac{\partial u}{\partial x} dz + \int_{-h}^{\eta} \frac{\partial v}{\partial y} dz = -(w_{z=\eta} - w_{z=-h}) \quad (\text{附 1.2})$$

ここで、 $\int_a^b \frac{d}{d\alpha} f(\alpha) d\alpha = f(\alpha) \Big|_a^b = f(b) - f(a)$ の関係を用いた (f は α の関数)。

Spiegel・氏家 (1985) の積分の微分に対するライプニッツの法則よれば、

$$\frac{d}{d\alpha} \int_{h(\alpha)}^{\phi_2(\alpha)} F(x, \alpha) dx = \int_{h(\alpha)}^{\phi_2(\alpha)} \frac{\partial F}{\partial \alpha} dx + F(\phi_2, \alpha) \frac{d\phi_2}{d\alpha} - F(\phi_1, \alpha) \frac{d\phi_1}{d\alpha}$$

であり、式-附 1.2 の左辺の各項はそれぞれ

$$\int_{-h}^{\eta} \frac{\partial u}{\partial x} dz = \frac{\partial}{\partial x} \int_{-h}^{\eta} u dz - u \frac{\partial \eta}{\partial x} - u \frac{\partial h}{\partial x} \quad (\text{附 1.3})$$

$$\int_{-h}^{\eta} \frac{\partial v}{\partial y} dz = \frac{\partial}{\partial y} \int_{-h}^{\eta} v dz - v \frac{\partial \eta}{\partial y} - v \frac{\partial h}{\partial y} \quad (\text{附 1.4})$$

ラグランジュ微分表示をオイラー微分表示で記述すると、時間変化項及び慣性項に分けられ、

$$\frac{dA}{dt} = \frac{\partial A}{\partial t} + \vec{v} \cdot \nabla A$$

ただし A はある関数、 $\vec{v} = (u, v, w)$ 、 $\nabla = \left(\frac{\partial}{\partial x}, \frac{\partial}{\partial y}, \frac{\partial}{\partial z} \right)$ である。

右辺第一項の水面における鉛直流速 w は、運動学的境界条件を考慮して

$$w_{z=\eta} = \frac{d\eta}{dt} = \frac{\partial \eta}{\partial t} + u \frac{\partial \eta}{\partial x} + v \frac{\partial \eta}{\partial y} + w \frac{\partial \eta}{\partial z}$$

$$= \frac{\partial \eta}{\partial t} + u \frac{\partial \eta}{\partial x} + v \frac{\partial \eta}{\partial y} \quad (\text{附 1.5})$$

右辺第二項の海底における w は、底面の条件を考慮して

$$w_{z=-h} = \frac{d(-h)}{dt} = -\frac{\partial h}{\partial t} - u \frac{\partial h}{\partial x} - v \frac{\partial h}{\partial y} - w \frac{\partial h}{\partial z}, \quad \text{かつ、} \quad \frac{\partial h}{\partial t} = 0$$

$$= -u \frac{\partial h}{\partial x} - v \frac{\partial h}{\partial y} \quad (\text{附 1.6})$$

式-附 1.3~附 1.6 を式-附 1.2 に代入する。

$$\begin{aligned}
& \frac{\partial}{\partial x} \int_{-h}^{\eta} u dz - u \frac{\partial \eta}{\partial x} - u \frac{\partial h}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial y} \int_{-h}^{\eta} v dz - v \frac{\partial \eta}{\partial y} - v \frac{\partial h}{\partial y} \\
&= -\frac{\partial \eta}{\partial t} - u \frac{\partial \eta}{\partial x} - v \frac{\partial \eta}{\partial y} - u \frac{\partial h}{\partial x} - v \frac{\partial h}{\partial y} \\
& \frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \int_{-h}^{\eta} u dz + \frac{\partial}{\partial y} \int_{-h}^{\eta} v dz = 0
\end{aligned} \tag{附 1.2'}$$

つぎに、流速 u , v の全水深 $D (=h+\eta)$ における平均値を U , V として、

$$\int_{-h}^{\eta} u dz = (h+\eta)U \equiv M \tag{附 1.7}$$

$$\int_{-h}^{\eta} v dz = (h+\eta)V \equiv N \tag{附 1.8}$$

これを式-附 1.2' に用いると

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{\partial M}{\partial x} + \frac{\partial N}{\partial y} = 0 \tag{附 1.9}$$

これが、鉛直方向に積分した連続式である。

つぎに、運動方程式は、

$$\frac{du}{dt} = fu - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + A_v \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} + A_h \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) \tag{附 1.10}$$

$$\frac{dv}{dt} = -fv - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} + A_v \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} + A_h \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right) \tag{附 1.11}$$

$$\frac{dw}{dt} = -g - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} \tag{附 1.12}$$

ここで、 p は圧力、 f はコリオリ係数 ($f = 2\omega \sin \phi$, ω は地球自転の角速度、 ϕ は緯度)、 A_h 及び A_v 及び A_h はそれぞれ鉛直及び水平渦動粘性係数である。

式-附 1.10 及び附 1.11 の左辺のラグランジュ微分表示は、一般的に、オイラー微分表示で記述して時間変化項及び慣性項に分けられる。

$$\frac{dA}{dt} = \frac{\partial A}{\partial t} + \vec{v} \cdot \nabla A \quad \text{ただし、} A \text{ はある関数、} \vec{v} = (u, v, w), \quad \nabla = \left(\frac{\partial}{\partial x}, \frac{\partial}{\partial y}, \frac{\partial}{\partial z} \right)$$

式-附 1.11 で dw/dt が他の項と比較して微小であることから省略し、 z 方向の運動方程式を水深方向に積分すると圧力 p は

$$p = -\rho g z + k(x, y)$$

のかたちとなる。 k は水平面内の位置 (x, y) による関数である。海面が平均海面上 η の高さにあり海面の気圧を p_0 とすると

$$\begin{aligned}
p &= -\rho g (z - \eta) + p_0 \\
p &= \rho g (\eta - z) + p_0
\end{aligned} \tag{附 1.13}$$

式-附 1.13 から $\frac{\partial p}{\partial x}$, $\frac{\partial p}{\partial y}$ を計算すると

$$\frac{\partial p}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial x} \{ \rho g (\eta - z) + p_0 \} = \rho g \frac{\partial \eta}{\partial x} + \frac{\partial p_0}{\partial x} \quad (\text{附 1.14})$$

$$\frac{\partial p}{\partial y} = \rho g \frac{\partial \eta}{\partial y} + \frac{\partial p_0}{\partial y} \quad (\text{附 1.15})$$

式-附 1.10 及び附 1.11 にそれぞれ代入すると,

$$\begin{aligned} & \frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} \\ &= fu - g \frac{\partial \eta}{\partial x} - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p_0}{\partial x} + A_v \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} + A_h \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) \end{aligned} \quad (\text{附 1.10'})$$

$$\begin{aligned} & \frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} \\ &= -fv - g \frac{\partial \eta}{\partial y} - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p_0}{\partial y} + A_v \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} + A_h \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right) \end{aligned} \quad (\text{附 1.11'})$$

式-附 1.10' の左辺は, 連続式すなわち式-附 1.1 を考慮して変形すると,

$$\begin{aligned} & \frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} \\ &= \frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} + u \left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} \right) \\ &= \frac{\partial u}{\partial t} + 2u \frac{\partial u}{\partial x} + \left(v \frac{\partial u}{\partial y} + u \frac{\partial v}{\partial y} \right) + \left(w \frac{\partial u}{\partial z} + u \frac{\partial w}{\partial z} \right) \\ &= \frac{\partial u}{\partial t} + \frac{\partial (u^2)}{\partial x} + \frac{\partial (uv)}{\partial y} + \frac{\partial (uw)}{\partial z} \end{aligned} \quad (\text{附 1.16})$$

式-附 1.11' の左辺については,

$$\begin{aligned} & \frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} \\ &= \frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} + v \left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} \right) \\ &= \frac{\partial v}{\partial t} + \left(u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial x} \right) + 2v \frac{\partial v}{\partial y} + \left(w \frac{\partial v}{\partial z} + v \frac{\partial w}{\partial z} \right) \\ &= \frac{\partial v}{\partial t} + \frac{\partial (uv)}{\partial x} + \frac{\partial (v^2)}{\partial y} + \frac{\partial (vw)}{\partial z} \end{aligned} \quad (\text{附 1.17})$$

式-附 1.16 の局所項及び慣性項をそれぞれ鉛直方向に積分すると, Spiegel・氏家 (1985) の積分の微分に対するライプニッツの法則により

$$\int_{-h}^{\eta} \frac{\partial u}{\partial t} dz = \frac{\partial}{\partial t} \int_{-h}^{\eta} u dz - u \frac{\partial \eta}{\partial t} - u \frac{\partial h}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial t} \int_{-h}^{\eta} u dz - u \frac{\partial \eta}{\partial t} \quad (\text{附 1.18})$$

$$\int_{-h}^{\eta} \frac{\partial(u^2)}{\partial x} dz = \frac{\partial}{\partial x} \int_{-h}^{\eta} u^2 dz - u^2 \frac{\partial \eta}{\partial x} - u^2 \frac{\partial h}{\partial x} \quad (\text{附 1.19})$$

$$\int_{-h}^{\eta} \frac{\partial(uv)}{\partial x} dz = \frac{\partial}{\partial y} \int_{-h}^{\eta} uv dz - uv \frac{\partial \eta}{\partial y} - uv \frac{\partial h}{\partial y} \quad (\text{附 1.20})$$

$$\begin{aligned} \int_{-h}^{\eta} \frac{\partial(uw)}{\partial x} dz &= (uw)_{z=\eta} - (uw)_{z=-h} \\ &= u \frac{d\eta}{dt} - u \frac{d(-h)}{dt} \\ &= u \left(\frac{\partial \eta}{\partial t} + u \frac{\partial \eta}{\partial x} + v \frac{\partial \eta}{\partial y} + w \frac{\partial \eta}{\partial z} \right) + u \left(\frac{\partial h}{\partial t} + u \frac{\partial h}{\partial x} + v \frac{\partial h}{\partial y} + w \frac{\partial h}{\partial z} \right) \\ &= u \left(\frac{\partial \eta}{\partial t} + u \frac{\partial \eta}{\partial x} + v \frac{\partial \eta}{\partial y} \right) + u \left(u \frac{\partial h}{\partial x} + v \frac{\partial h}{\partial y} \right) \end{aligned} \quad (\text{附 1.21})$$

式-附 1.17 についても同様に,

$$\int_{-h}^{\eta} \frac{\partial v}{\partial t} dz = \frac{\partial}{\partial t} \int_{-h}^{\eta} v dz - v \frac{\partial \eta}{\partial t} - v \frac{\partial h}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial t} \int_{-h}^{\eta} v dz - v \frac{\partial \eta}{\partial t} \quad (\text{附 1.22})$$

$$\int_{-h}^{\eta} \frac{\partial(uv)}{\partial x} dz = \frac{\partial}{\partial x} \int_{-h}^{\eta} uv dz - uv \frac{\partial \eta}{\partial x} - uv \frac{\partial h}{\partial x} \quad (\text{附 1.23})$$

$$\int_{-h}^{\eta} \frac{\partial v^2}{\partial x} dz = \frac{\partial}{\partial y} \int_{-h}^{\eta} v^2 dz - v^2 \frac{\partial \eta}{\partial y} - v^2 \frac{\partial h}{\partial y} \quad (\text{附 1.24})$$

$$\begin{aligned} \int_{-h}^{\eta} \frac{\partial(vw)}{\partial x} dz &= (vw)_{z=\eta} - (vw)_{z=-h} \\ &= v \frac{d\eta}{dt} - v \frac{d(-h)}{dt} \\ &= v \left(\frac{\partial \eta}{\partial t} + u \frac{\partial \eta}{\partial x} + v \frac{\partial \eta}{\partial y} + w \frac{\partial \eta}{\partial z} \right) + v \left(\frac{\partial h}{\partial t} + u \frac{\partial h}{\partial x} + v \frac{\partial h}{\partial y} + w \frac{\partial h}{\partial z} \right) \\ &= v \left(\frac{\partial \eta}{\partial t} + u \frac{\partial \eta}{\partial x} + v \frac{\partial \eta}{\partial y} \right) + v \left(u \frac{\partial h}{\partial x} + v \frac{\partial h}{\partial y} \right) \end{aligned} \quad (\text{附 1.25})$$

式-附 1.10' 及び 附 1.11' の右辺第四項の鉛直渦動粘性項を、鉛直方向に積分する。それぞれ、海面せん断応力 τ_s 、底面せん断応力 τ_b (x, y の添字は方向を示す) を用いて

$$A_v \int_{-h}^{\eta} \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} dz = A_v \left\{ \left(\frac{\partial u}{\partial z} \right)_{z=\eta} - \left(\frac{\partial u}{\partial z} \right)_{z=-h} \right\} = \frac{1}{\rho} (\tau_{sx} - \tau_{bx}) \quad (\text{附 1.26})$$

$$A_v \int_{-h}^{\eta} \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} dz = A_v \left\{ \left(\frac{\partial v}{\partial z} \right)_{z=\eta} - \left(\frac{\partial v}{\partial z} \right)_{z=-h} \right\} = \frac{1}{\rho} (\tau_{sy} - \tau_{by}) \quad (\text{附 1.27})$$

ここで、 $\int_a^b \frac{d}{d\alpha} f(\alpha) d\alpha = f(\alpha)|_a^b = f(b) - f(a)$ の関係を用いた (f は α の関数)。

式-附 1.10' 及び 附 1.11' を水深方向に積分する。式-附 1.16 ~ 附 1.27 を用いて、

$$\begin{aligned}
& \frac{\partial}{\partial t} \int_{-h}^{\eta} u dz - u \frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \int_{-h}^{\eta} u^2 dz - u^2 \frac{\partial \eta}{\partial x} - u^2 \frac{\partial h}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial y} \int_{-h}^{\eta} uv dz - uv \frac{\partial \eta}{\partial y} - uv \frac{\partial h}{\partial y} \\
& + u \left(\frac{\partial \eta}{\partial t} + u \frac{\partial \eta}{\partial x} + v \frac{\partial \eta}{\partial y} \right) + u \left(u \frac{\partial h}{\partial x} + v \frac{\partial h}{\partial y} \right) \\
& = f \int_{-h}^{\eta} u dz - \int_{-h}^{\eta} \left(g \frac{\partial \eta}{\partial x} \right) dz - \int_{-h}^{\eta} \left(\frac{1}{\rho} \frac{\partial p_0}{\partial x} \right) dz + \frac{1}{\rho} (\tau_{sx} - \tau_{bx}) + \int_{-h}^{\eta} A_h \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) dz \\
\therefore & \frac{\partial}{\partial t} \int_{-h}^{\eta} u dz + \frac{\partial}{\partial x} \int_{-h}^{\eta} u^2 dz + \frac{\partial}{\partial y} \int_{-h}^{\eta} uv dz \\
& = f \int_{-h}^{\eta} u dz - gD \frac{\partial \eta}{\partial x} - \frac{D}{\rho} \frac{\partial p_0}{\partial x} + \frac{1}{\rho} (\tau_{sx} - \tau_{bx}) + \int_{-h}^{\eta} A_h \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) dz \\
& \frac{\partial}{\partial t} \int_{-h}^{\eta} v dz - v \frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \int_{-h}^{\eta} uv dz - uv \frac{\partial \eta}{\partial x} - uv \frac{\partial h}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial y} \int_{-h}^{\eta} v^2 dz - v^2 \frac{\partial \eta}{\partial y} - v^2 \frac{\partial h}{\partial y} \\
& + v \left(\frac{\partial \eta}{\partial t} + u \frac{\partial \eta}{\partial x} + v \frac{\partial \eta}{\partial y} \right) + v \left(u \frac{\partial h}{\partial x} + v \frac{\partial h}{\partial y} \right) \\
& = -f \int_{-h}^{\eta} v dz - \int_{-h}^{\eta} \left(g \frac{\partial \eta}{\partial y} \right) dz - \int_{-h}^{\eta} \left(\frac{1}{\rho} \frac{\partial p_0}{\partial y} \right) dz + \frac{1}{\rho} (\tau_{sy} - \tau_{by}) + \int_{-h}^{\eta} A_h \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right) dz \\
\therefore & \frac{\partial}{\partial t} \int_{-h}^{\eta} v dz + \frac{\partial}{\partial x} \int_{-h}^{\eta} uv dz + \frac{\partial}{\partial y} \int_{-h}^{\eta} v^2 dz \\
& = f \int_{-h}^{\eta} v dz - gD \frac{\partial \eta}{\partial y} - \frac{D}{\rho} \frac{\partial p_0}{\partial y} + \frac{1}{\rho} (\tau_{sy} - \tau_{by}) + \int_{-h}^{\eta} A_h \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right) dz
\end{aligned}$$

式-附 1.7 及び附 1.8 で定義される流量 M , N を用いて, それぞれ,

$$\begin{aligned}
& \frac{\partial M}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{M^2}{D} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{MN}{D} \right) \\
& = fM - gD \frac{\partial \eta}{\partial x} - \frac{D}{\rho} \frac{\partial p_0}{\partial x} + \frac{1}{\rho} (\tau_{sx} - \tau_{bx}) + A_h \left(\frac{\partial^2 M}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 M}{\partial y^2} \right) \\
& \frac{\partial N}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{MN}{D} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{N^2}{D} \right) \\
& = -fN - gD \frac{\partial \eta}{\partial x} - \frac{D}{\rho} \frac{\partial p_0}{\partial x} + \frac{1}{\rho} (\tau_{sx} - \tau_{bx}) + A_h \left(\frac{\partial^2 N}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 N}{\partial y^2} \right)
\end{aligned}$$

以上より, 水深方向に積分された連続式ならびに運動方程式を示す.

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{\partial M}{\partial x} + \frac{\partial N}{\partial y} = 0 \quad (\text{附 1.28})$$

$$\begin{aligned} & \frac{\partial M}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{M^2}{D} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{MN}{D} \right) \\ & = fM - gD \frac{\partial \eta}{\partial x} - \frac{D}{\rho} \frac{\partial p_0}{\partial x} + \frac{1}{\rho} (\tau_{sx} - \tau_{bx}) + A_h \left(\frac{\partial^2 M}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 M}{\partial y^2} \right) \end{aligned} \quad (\text{附 1.29})$$

$$\begin{aligned} & \frac{\partial N}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{MN}{D} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{N^2}{D} \right) \\ & = -fN - gD \frac{\partial \eta}{\partial y} - \frac{D}{\rho} \frac{\partial p_0}{\partial y} + \frac{1}{\rho} (\tau_{sy} - \tau_{by}) + A_h \left(\frac{\partial^2 N}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 N}{\partial y^2} \right) \end{aligned} \quad (\text{附 1.30})$$

(参考文献)

運輸省港湾技術研究所：津波・高潮数値計算プログラムマニュアル，189p，1996.

柴木秀之：波浪・高潮・津波の数値計算と沿岸防災支援システムへの応用に関する研究，158p，
東京大学大学院工学系研究科社会基盤工学専攻博士論文，2004.

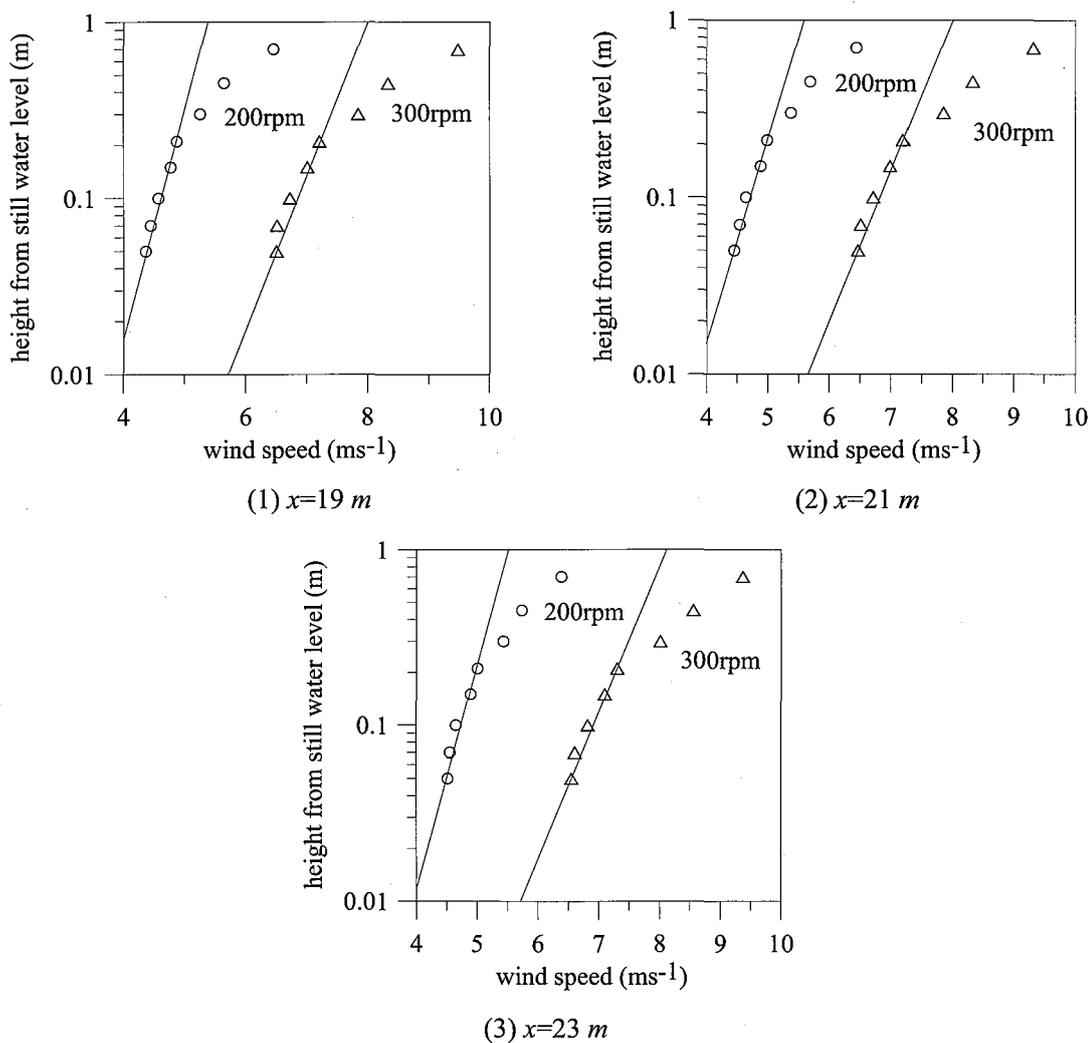
Murray R. Spiegel 著・氏家勝巳訳：マグローヒル 数学公式・数表ハンドブック，第1版，オーム社，p.95，1985.

附録-2

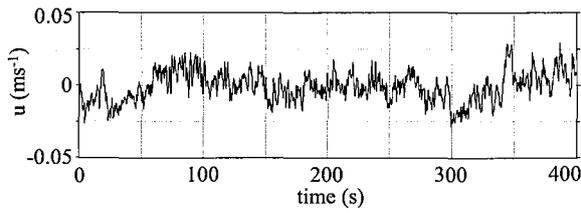
附表-2-1 水位及び流速の出力点の格子番号 (図-4.3.1.4 参照)

No.	1	2	3	4	5	6	7	8	9
格子i	410	360	340	270	280	370	460	215	240
格子j	610	540	510	570	430	430	430	300	170
No.	10	11	12	13	14	15	16	17	18
格子i	357	339	325	281	285	288	257	260	263
格子j	567	553	553	581	569	558	568	555	541

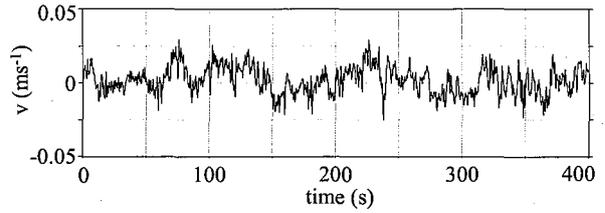
附録-3



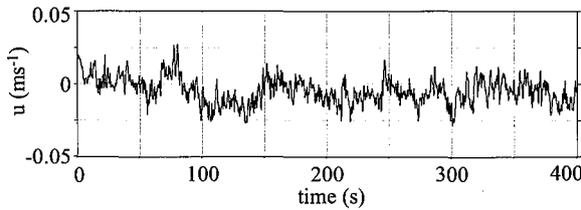
附図-3-1 風速の鉛直分布



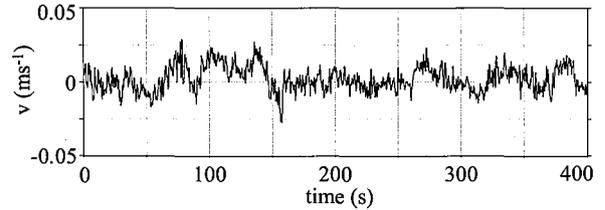
(1) $x=19\text{ m}$, x 成分



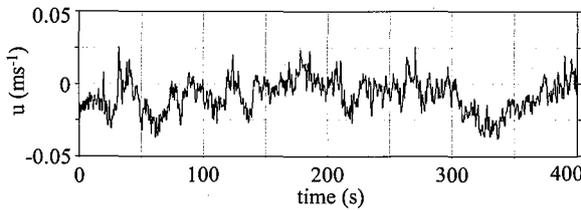
(2) $x=19\text{ m}$, y 成分



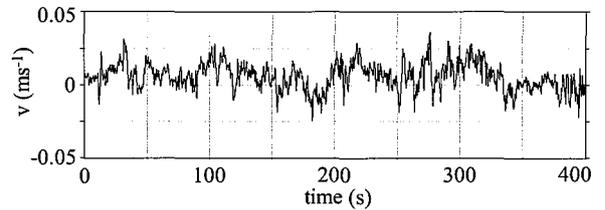
(3) $x=21\text{ m}$, x 成分



(4) $x=21\text{ m}$, y 成分

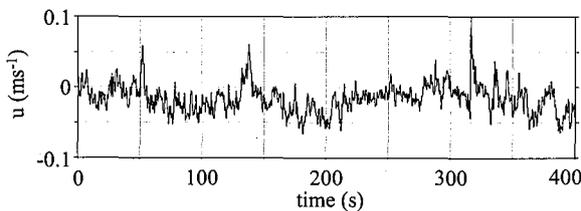


(5) $x=23\text{ m}$, x 成分

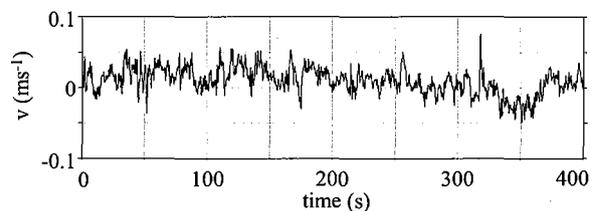


(6) $x=23\text{ m}$, y 成分

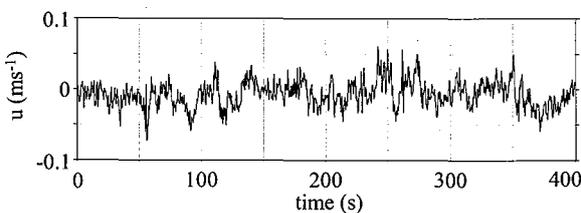
附図-3.2 風洞実験 流速の測定結果 (200rpm)



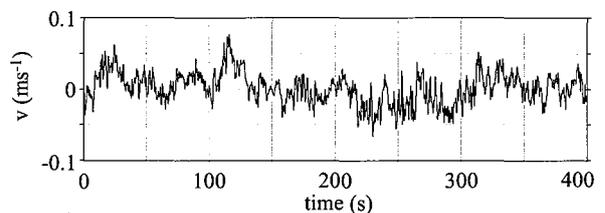
(1) $x=19\text{ m}$, x 成分



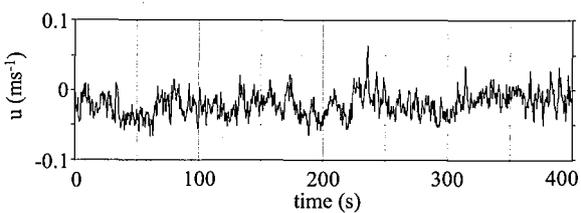
(2) $x=19\text{ m}$, y 成分



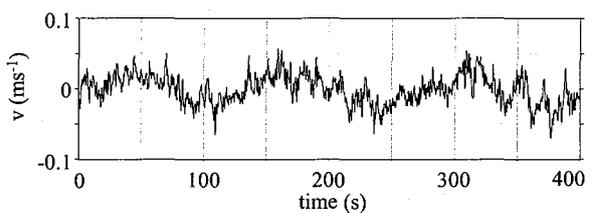
(3) $x=21\text{ m}$, x 成分



(4) $x=21\text{ m}$, y 成分



(5) $x=23\text{ m}$, x 成分



(6) $x=23\text{ m}$, y 成分

附図-3.3 風洞実験 流速の測定結果 (300rpm)

附表-3.1 風洞実験 波高の測定結果

(1) 200rpm

測定位置	測定時間 (s)	波数	平均周期 (s)	有義波高 (cm)	最高波高 (cm)	平均水位 (cm)
<i>x=19 m</i>	409.6	1,020	0.402	2.582	4.123	+0.002
<i>x=21 m</i>	409.6	904	0.453	2.779	4.009	+0.140
<i>x=23 m</i>	409.6	932	0.439	2.825	4.237	+0.375

(2) 300rpm

測定位置	測定時間 (s)	波数	平均周期 (s)	有義波高 (cm)	最高波高 (cm)	平均水位 (cm)
<i>x=19 m</i>	409.6	869	0.471	4.232	6.448	+0.035
<i>x=21 m</i>	409.6	827	0.495	4.637	6.268	+0.068
<i>x=23 m</i>	409.6	799	0.513	4.807	7.096	+0.426

*平均水位：送風時の平均水位と静水位との差

謝 辞

本研究は、大阪大学大学院工学研究科地球総合工学専攻の出口一郎教授のご指導によりまとめたものであります。

本研究を行うにあたり、出口教授には、終始丁寧なご指導とご鞭撻を賜りまた温かい励ましを頂きました。深く感謝の意を表し、心から御礼申し上げます。また、大阪大学大学院工学研究科地球総合工学専攻の西田修三教授、大阪大学大学院工学研究科地球総合工学専攻の加藤直三教授、大阪大学大学院工学研究科地球総合工学専攻の荒木進歩准教授には、本論文に対して貴重な助言を頂きました。ここに深く感謝申し上げます。

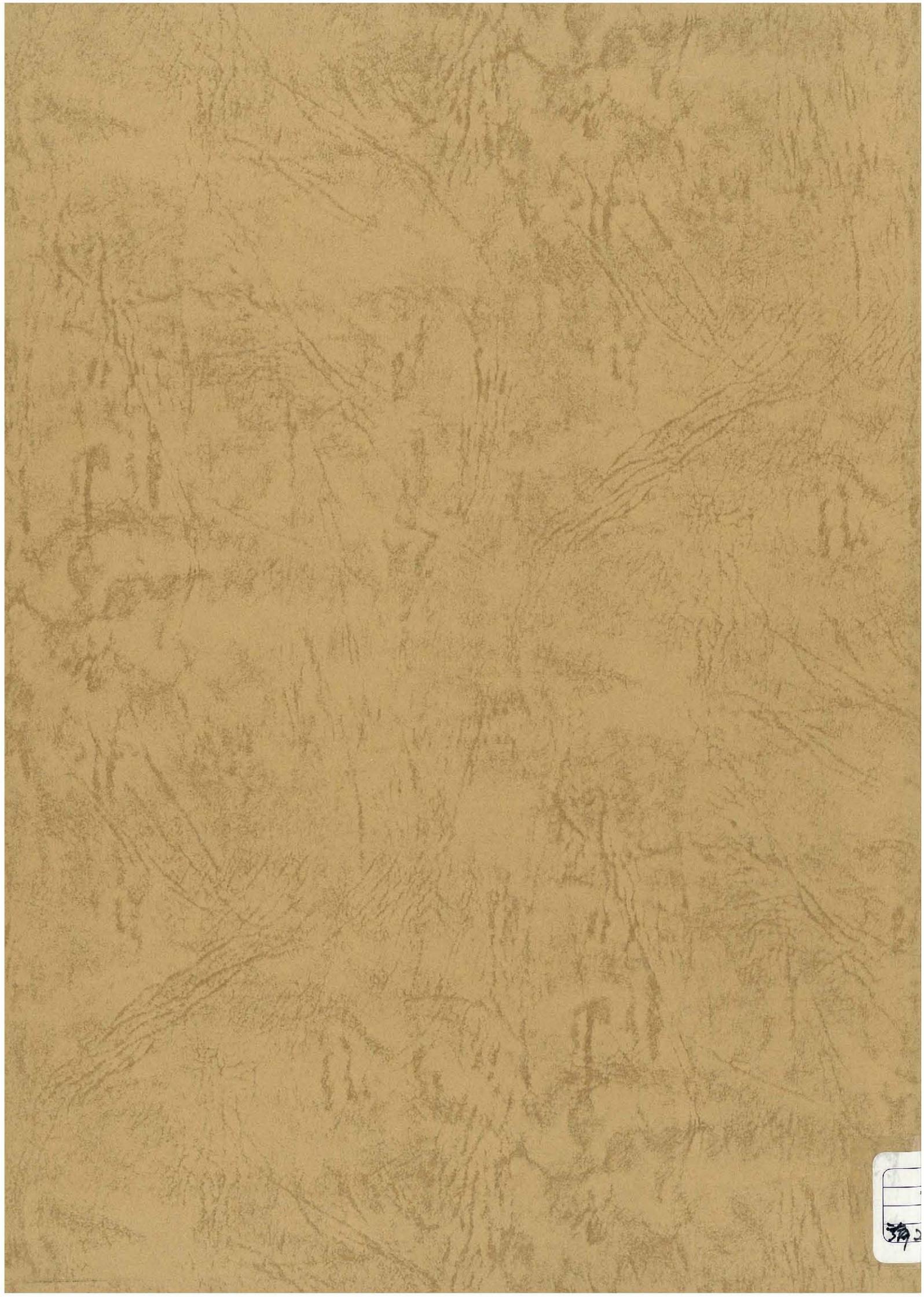
名古屋大学大学院工学研究科社会基盤工学専攻の水谷法美教授には、本研究において不可欠な貴重な実験データを提供して頂くとともに貴重な助言を頂きました。また、大阪産業大学工学部都市創造工学科水谷夏樹准教授には、風洞実験の実施と結果の解釈について貴重な助言を頂きました。深く感謝申し上げます。

本研究は、著者が、国土交通省国土技術政策総合研究所沿岸海洋研究部において行った研究をとりまとめたものです。国土技術政策総合研究所沿岸海洋研究部沿岸防災研究室の小田勝也前室長、鈴木武室長には、こうした研究の機会を与えて頂きましたほか、研究部のメンバーには、データ整理や台風防災実験水路における実験に関し、ご協力を頂きました。東電設計株式会社藤井直樹博士には、研究の初期段階から今日まで多くのご助言と多大なるご支援を賜りました。財団法人港湾空港建設技術サービスセンター広瀬宗一理事長には本論文をまとめるきっかけとなるご支援を頂きました。国土技術政策総合研究所山根隆行元副所長、松本清次副所長、沿岸海洋研究部の細川恭史元部長、小松明元部長、高垣泰男元部長、樋口嘉章元部長、数土勉部長には、本研究を進めるにあたり、研究に対するご配慮とご理解を頂きました。港湾研究部の高橋宏直部長にはコンテナ取扱いの実務について、貴重なご示唆を頂きました。鹿島建設株式会社技術研究所稲垣聡主任研究員には幾度も示唆に富んだご指摘を頂きました。また、独立行政法人港湾空港技術研究所津波防災研究センター富田孝史上席研究官をはじめ同センターの研究者の皆様には研究の折にふれご指摘を頂きました。ここに、深く感謝いたします。

現地調査では、中部地方整備局港湾空港部港湾空港防災・危機管理課恩田充港湾保安管理官、同名古屋港湾空港技術調査事務所西村大司所長、坂口章元技術開発課長、若杉利彦技術開発課長、同清水港湾事務所藤井敦前所長、奥田薫所長、中国地方整備局宇野港湾事務所豊田英男課長、中部地方整備局港湾空港部港湾計画課浅見靖伸課長補佐、同三河港湾事務所平井洋次所長をはじめ皆様方にお世話になりました。感謝を申し上げます。

土木学会地震工学委員会・海岸工学委員会津波被害ならびに軽減技術研究小委員会漂流物ワーキンググループの皆様には発表の機会を頂くとともにご指摘を頂きました。感謝を申し上げます。

最後に、お世話になりました関係者の皆様方に感謝を申し上げますとともに、ここにとりまとめた研究成果が得られましたことに対し、感謝を申し上げます。



395