

風洞水槽におけるコンテナ模型の流動に関する 基礎的実験

BASIC EXPERIMENTS ON CONTAINER MODEL DRIFTED
BY WIND AND WIND-DRIVEN CURRENT IN WIND-WAVE CHANNEL

熊谷兼太郎¹・鈴木武²
Kentaro KUMAGAI and Takeshi SUZUKI

¹正会員 博(工) 国土交通省 国土技術政策総合研究所 (〒239-0826 神奈川県横須賀市長瀬3-1-1)

²正会員 博(工) 国土交通省 国土技術政策総合研究所 (〒239-0826 神奈川県横須賀市長瀬3-1-1)

Basic experiments were conducted on container model drifted by wind, wind-driven current and wave in a wind-wave channel. The channel is 28.5 meter in length, 1.3 meter in height and 1.5 meter in width. The container model is 610 mm in length, 130 mm in height and 122 mm in width, that is, 40 feet container on 1/20 scale.

The wind blown into the channel drives the wind-driven current and wave. At the middle of the channel, the container model is floated on the surface of the water and is stilled at the position by a mechanical arm. When the measurement starts, the container is released softly and drifted to the leeward direction. The container's drift behavior is recorded by a high-speed camera system. In the experiments, it is observed that the container of which long axis was set parallel, 0 degrees, to the wind direction was rotated horizontally. By contrast, the container set at 90 degrees to the wind direction drifted with no horizontal rotation.

Key Words : Container model, wind-driven current, wind-wave channel,

1. 研究の背景と目的

2004年8月, 水島港で台風第16号に伴う高潮によりコンテナがふ頭から流出する被害が発生した。流出したのは15個の空コンテナで, いずれも港湾内を漂流して約300 m離れた場所に到達した。その場所にあった防波堤の一部は損傷しており, 損傷の原因の一つとしてコンテナ衝突の可能性があると考えられている。このような, 港湾に蔵置された貨物が流出し海上を漂流する挙動について, 被害を予測し対策を検討する必要がある。

検討対象として, 海上貨物輸送に汎用的に用いられ, 港湾に多数が蔵置されている国際貨物コンテナ(以下, 単に「コンテナ」という。)を考える。

コンテナの流出については, 本田・堀¹⁾が実物コンテナを用いて引張り試験を実施しアスファルト面に対する摩擦係数を測定するとともに, 縮尺1/20の模型コンテナを用いて風洞内に設置したコンテナに作用する風圧力の詳細な分布を測定している。また, 流れの中の物体に作用する抗力及び波力については既往の研究があり, これらの結果と, 過去に発生した高潮による流出事例の調査結果²⁾を参考にすれば, ふ頭上に静止しているコンテナの移動限界条件はある程度の精度で想定できると考えられる。

コンテナの漂流については, 仏ブルターニュ地方

の西部海域で実物コンテナを数時間漂流させる実験が行われている³⁾。また, Daniel et al.⁴⁾は海上に浮遊するコンテナに作用する風及び流れによる力の定式化を行うとともに, 1993年に発生した海難事故でコンテナが数日間漂流した事例と比較することにより適用性の検討を行っている。これらのコンテナの漂流に関する実験または事例には, 複雑に変化する気象や海流の及ぼす影響が含まれている。それに対して, 実験室で環境を制御した実験を行い, 風, 流れ及び波がコンテナの漂流に及ぼす影響について検討を行うことは有用と考えられる。

そこで本研究では, 風洞水槽において水面上に浮遊するコンテナ模型を静止状態から解放し動き出して漂流させる実験を行い, 海域に流出したコンテナの流動の基礎的な特性を把握することとした。

2. 実験の条件と方法

(1) 実験水路

実験は, 2009年12月～翌2月に国土技術政策総合研究所の風洞水槽で行った。図-1は, この水槽の見取図である。測定部は長さ28.5 m, 高さ1.3 m, 幅1.5 mの一樣断面で, 本研究では水深 $h_0=0.4$ mまで湛水した。すなわち, 静水面上の空気部分の高さは0.9 mである。測定部の上流側には送風機が接続さ

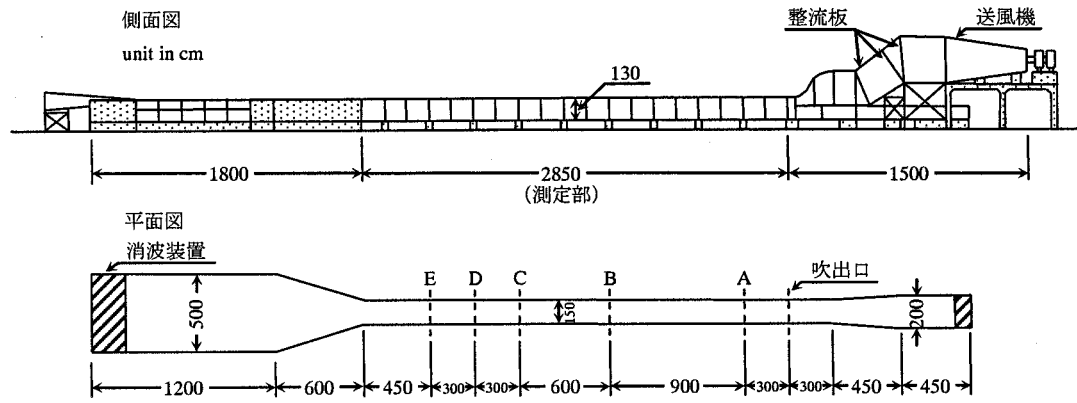


図-1 風洞水槽の見取図

れており、送風機によって起こされた風は整流板、金網等により大きな乱れや不均一が生じないようにしたうえで、吹出口より測定部に送り込まれる。送風量は送風機の回転数を制御し調整する。本研究では回転数を200 rpm、300 rpmの2段階で変化させた。コンテナを漂流させる実験は断面C～Dの間で行った。

(2) 風速の測定

風速の測定は、熱式風速計（日本カノマックス株式会社製多点風速計MODEL1560、温度補償式プローブ0965-03）を用いた。風速計の応答時間は0.1 sであり乱流成分は測定できないが、一定時間（約3分間）の測定値を平均することにより平均風速 u_a を求めた。測定位置は図-1の断面A～Eの横断方向中央位置で、鉛直方向に高さを変えて測定した。

図-2は吹出口に最も近い断面Aの風速分布で、 z は静水位 h_0 からの高さである。風速（境界層外側の乱流域の平均風速）は、回転数200 rpmの場合が約4.7 m/s、300 rpmの場合が約7.0 m/sとなった。

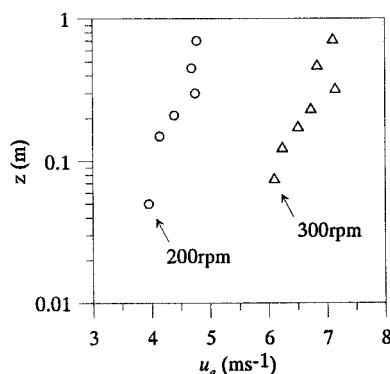


図-2 風速分布（断面A）

図-3は、断面Cの風速分布（300 rpmの場合）である。断面Aの風速分布（図-2の△印）では境界層が $z=0.3$ m程度までと考えられるのに対し、断面Cではさらに境界層が発達している。ここで、水がない固定壁面の場合と同様に、波立った水面上の境界層の内部領域には壁面からの距離に関して風速が対数的に変化する対数分布則が適用できると仮定する。また、fully roughな状態にあると仮定して、 u_a に以

下の対数分布則を適用する：

$$\frac{u_a}{u_*} = \frac{1}{\kappa} \ln \frac{z}{z_0} \quad (1)$$

ここで、 u_* は摩擦速度、 κ はKarman定数で0.4とする。 z_0 は壁面の粗度を表すパラメータである。なお、上の仮定については議論が必要であるが、ここでは加藤・武村⁵⁾と同様に式(1)が成立するものとして考える。図-3の測定点のうち水面に近い4点（ $z=0.095 \sim 0.235$ m）について、内部領域にあって式(1)が成立すると考えて近似すると、 $u_* = 0.34$ m/sとなった。図中の実線は、その近似線を示す。ただし、このときの z_0 は非常に小さくなったので、水面近傍（ $z=0.095$ mよりも水面に近い位置）での測定をより詳細に行う等の精度向上が今後必要である。

風速の測定は気温9～17℃、水温9～12℃、気圧1013～1039 hPaの範囲で行った。

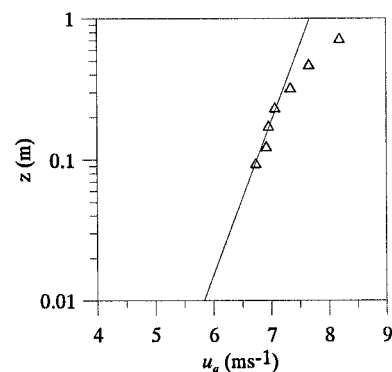


図-3 風速分布（断面C、300rpm）

(3) 波高及び流速の測定

波高の測定は、容量式波高計（株式会社ケネック製CH604、検出部CHT6-60、応答時間0.1 s）を用いた。風が吹き始めると水槽内の平均水位は最初の静水面から次第に変化する。図-4は、300 rpmで送風開始後20分～30分の10分間の平均水位 $\bar{h}$ の分布を示す。吹出口（fetch=0 m）付近では h_0 よりも約0.3 cm低下し、測定部末端では約0.2 cm上昇する水面形となった。また、これ以後は送風を続けても $\bar{h}$ の変

化は概ね小さく安定していた。そこで、今回の実験では送風開始から20分以上経過してから全ての計測を行った。

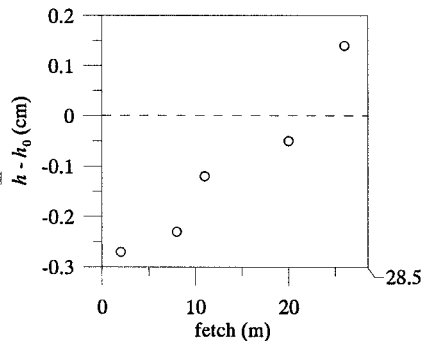


図-4 平均水位分布 (300 rpm)

断面A～Eの横断方向中央位置で波高計を用いて計測した180 sのデータから、ゼロアップクロス法により周期及び波高を求めた。表-1は、300 rpmの場合の断面A～Eの有義波高 $H_{1/3}$ 、最高波高 H_{max} 及び有義波周期 $T_{1/3}$ である。

今回は波長を測定していないが、ビデオ画像を参考にすると断面Cを通過したある波の波長 l は約50 cmであった。 $l=50$ cmの場合は $h_0=40$ cmより深海波である。この点は実験結果を港湾内の波浪に適用する場合に留意する必要がある。深海波の波速 c は式(2)で求められ (g : 重力加速度) ,

$$c = \frac{gT}{2\pi} \quad (2)$$

断面Cの位置では $T_{1/3}=0.48$ sより $c=0.75$ m/sである。 u_* で c を割った波齢は1よりも大きくなり、断面Cの位置で風波は十分に発達していたと考えられる。

表-1 波高の測定結果 (300rpm)

断面(fetch)	有義波高 $H_{1/3}$ (cm)	最高波高 H_{max} (cm)	有義波周期 $T_{1/3}$ (s)
A(3 m)	1.0	1.7	0.22
B(12 m)	3.2	4.8	0.41
C(18 m)	3.8	5.7	0.48
D(21 m)	4.5	6.5	0.53
E(24 m)	5.1	7.0	0.55

流速の測定は、電磁流速計 (株式会社ケネック製 VM706H, 直軸型検出部 VMT2-200-04P, 応答時間 0.05 s) を用いた。測定位置は断面A～Eの横断方向中央位置で、鉛直方向に高さを変えて測定した。得られたデータは値が振動していたので、高速フーリエ変換による周波数解析を行って1 Hz以上の成分を除去した。解析は周波数解析ソフトウェア (SYSTAT Software Inc. 製 Auto Signal ver1.7) を用いた。

図-5は、断面Cの水面下4 cmの位置での水平流速 u_f の時間変化である。 u_f の正值は風下方向の流れで

ある。計測開始から約60 sは0.02 m/s程度の風下方向の流れが生じ、その後は絶対値の小さい風上と風下方向の流れが繰り返す。150 s以降は主として風下方向の流れが生じている。このように、数十秒以上の周期をもった変動がみられた。図-6は、同じ断面Cで3分間の時間平均をした流速 $\bar{u}_f$ の鉛直方向の分布である。時間平均をとると、表層付近では吹送流による風下方向の流れ、底層付近ではそれを補償する風上方向の流れが生じている。

なお、波高及び流速の測定は気温、水温、気圧ともに(2)の風速の測定とほぼ同じ条件で行った。

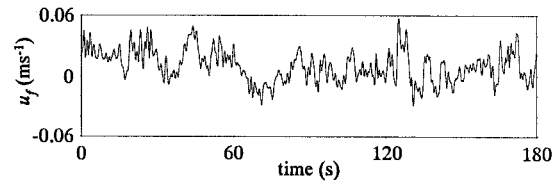


図-5 流速の時間変化 (断面C, 水面下4cm, 300rpm)

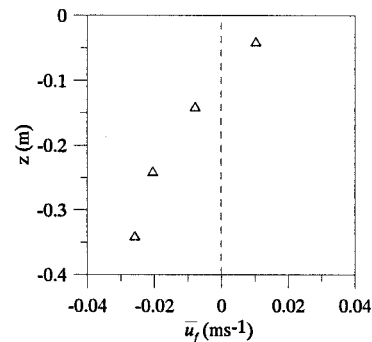


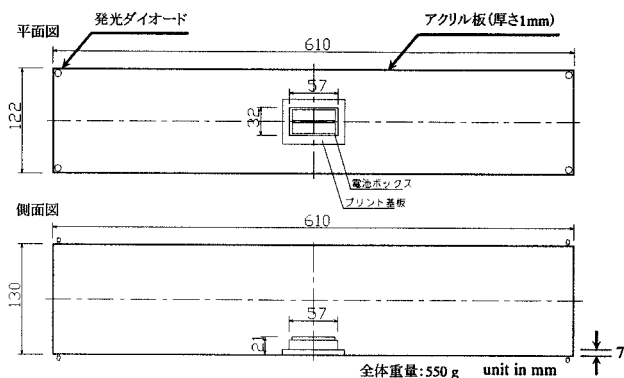
図-6 流速分布 (断面C, 300rpm)

(4) コンテナ模型と模型位置の測定

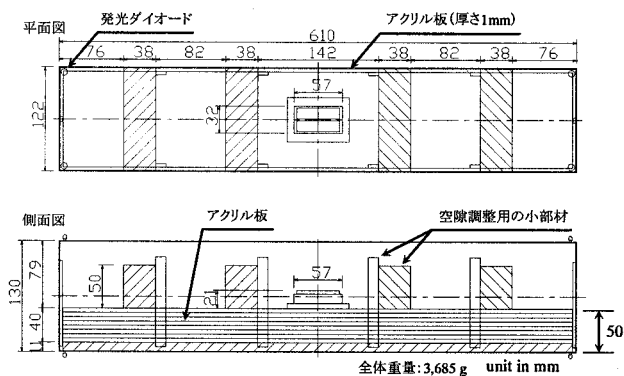
実物コンテナの形状は、日本規格協会の発行する日本工業規格⁶⁾により規定されている。図-7は、実験に用いた縮尺 $s=1/20$ の40フィートコンテナ模型の諸元である。躯体はアクリル板 (厚さ1 mm, 密度1.19 g/cm³) を接合して作られている。上下面の角の計8点には発光ダイオードが後述する画像解析のために取付けられ、模型内部に設置された電池ボックスと細くて軽いコードでつながれている。

満載コンテナ模型は、アクリル板8枚と空隙調整用の小部材を空載コンテナ模型に追加して質量を調整した。以下、模型質量の設定方法を述べる。実物コンテナの満載質量は、先に述べた日本工業規格⁶⁾により規定されていて、30,480 kgである。空載質量 (自重) は規定がなく、現地調査結果⁷⁾より3,740 kgとした。模型の喫水が、実物コンテナの海上での喫水に対して1/20になるように質量を調整した。すなわち、空載のとき喫水0.7 cm, 満載のとき喫水5.0 cmになるよう質量をそれぞれ550 g, 3,685 gとした。

模型の初期状態として、コンテナの長軸が風向に対して直行 ($\theta_0=90$ 度) 及び平行 ($\theta_0=0$ 度) の場合を設定した。実験ではまず、切離し装置を用いて、



(1) 空載



(2) 満載

図-7 コンテナ模型の見取図

断面C付近に喫水の位置で模型を固定しておく。写真-1は、切離し装置の外観である。風洞水槽の天井から鋼製棒で吊下げられていて、2個の部材を組み合わせた鉄のような形状をしている。風下側の先端にはそれぞれL字型金具が取付けられており、ここに模型を挟んで締付け、ちょうど喫水高さまで模型を沈める。写真-2は、コンテナ模型を $\theta_0=90^\circ$ で固定して沈めて風下側から見た状態である。風洞水槽の外からケーブルを引っ張るとトリガーが外れ、鉄を開くように下側のL字型金具が下向きに動く。すると模型が静止状態から解放されて、写真-2の左手

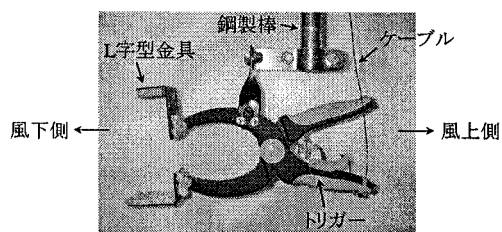


写真-1 切離し装置



写真-2 コンテナ模型を固定した状態

手前側の方向に静かに動き出す仕組みになっている。

移動する模型を、2台の高速度カメラ（株式会社ディテクト製HAS-500、ペンタックス製レンズB1214D-2）を用いて100 fpsで立体撮影した。撮影した画像を、画像解析ソフトウェア（株式会社ディテクト製DIPP-MotionPRO ver.2.2）を用いて解析することにより模型の3次元座標を取得した。図-8は、高速度カメラの設置位置である。風洞水槽の手前側の壁から2.7 m離して2台のカメラを設置し、断面Cと断面Dの間を撮影区間に収めた。コンテナ模型は切離し装置で静止状態から解放されて、図中の右から左の方向に移動する。

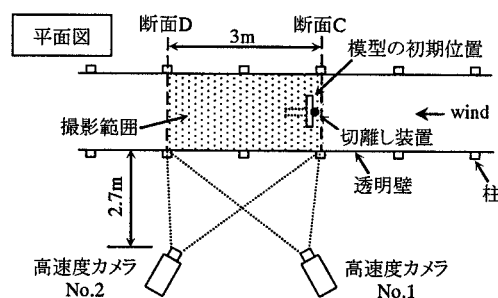


図-8 高速度カメラ設置位置

(5) 相似則

航空機等の模型実験でおこなわれているように、実験と現地の風の流れとを相似させるためにレイノルズ数 UL/ν (U : 実験における代表速度, L : 実験における代表長さ, ν : 空気動粘性係数) を一致させようとする。実験と現地は ν がほぼ同じとして、実験では模型の縮尺に逆比例する大きさの風速が必要になる。すなわち、300 rpmの場合に $u_a=7.0$ m/s, 模型の縮尺 $s=1/20$ であるから、現地の0.35 m/s程度の風と相似していることになる。

この考え方に対し、加藤・佐野⁷⁾は、乱流状態のときは運動量や熱量の拡散が層流状態のときよりも大きくなることに着目し、流体の性質を表すものは次の関係で用いられる渦粘性係数 A , すなわち、

$$\tau_t = A \frac{\partial U}{\partial z} \quad (3)$$

(τ_t : 乱れによる風のせん断力) が一般的であり、 A を流体の密度 ρ で割った渦動粘性係数 K_z を用いて、渦動粘性係数 K_z によるレイノルズ数

$$R_K = \frac{UL}{A/\rho} = \frac{UL}{K_z} \quad (4)$$

による相似について検討している。また、現地についてはかなりの幅をもって変わることを指摘しつつ $z=10$ mに対し $K_z=10 \times 10^3$ cm²/sという値を採用している。このレイノルズ数 R_K の相似については、今回の実験では風速の乱流成分の測定を行っていないため、十分に検討することができなかった。

3. 実験結果

図-9は、300 rpmの場合の満載コンテナ模型の水平面内の漂流軌跡である。図中の直線は、模型上面の4つの発光ダイオードのうち風上側2つの位置を直線でつないだものである。それを、切り離し後の時刻 t について0.5 sごとに示した。ただし、風洞水槽の壁面外側には水槽を支える柱があり（図-8参照）、カメラの死角が生じる。そのため $t=5.0\sim7.0$ s及び $t=8.5\sim10.5$ sの間の軌跡は欠測である。

図-10は、0.1 sごとに模型中心の位置座標を求め、それから算出した模型の移動速度 u_m の時間変化である。 u_m は比較的短い周期で変動しているものの、平均的には、切り離し後2 s程度の間に加速度運動を行ったあと、0.2 m/s程度の移動速度で漂流する。図-11は、そのときの加速度 a_m の時間変化である。

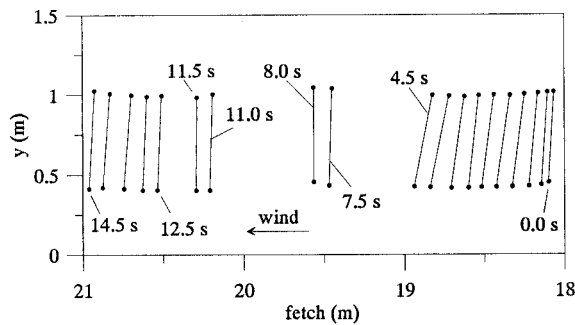


図-9 漂流軌跡 (300rpm, 満載, 90度)

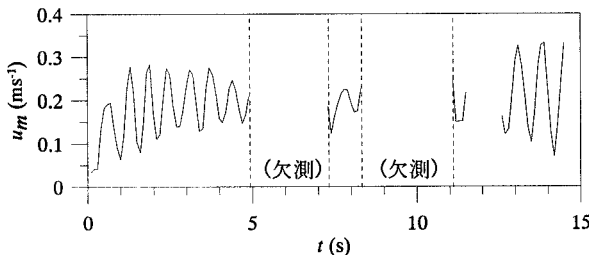


図-10 移動速度

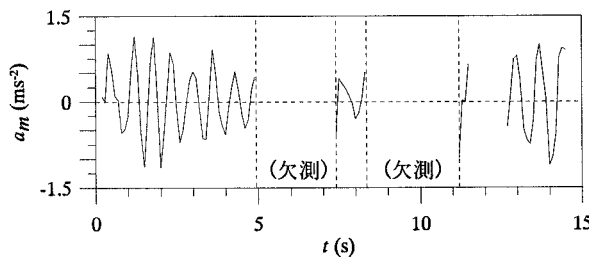


図-11 加速度

図-12は、風上側の断面Cの水面下4 cmの位置の流速 u_f の時間変化である。断面Cでは、 $t=0\sim7$ sの間に比較的流速が小さい状態が続いたあと、正の値、すなわち風下方向の流れが生じていた。一方、断面Dでは風上方向の流れが生じていて、両断面の間の流れには相関はみられず、両断面の u_f からコンテナ模型がある場所の流速を推測するのは困難だった。

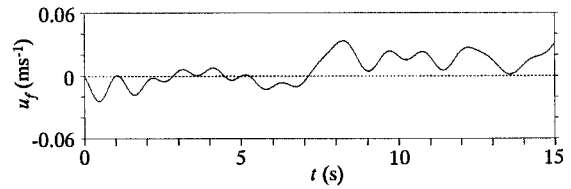


図-12 流速の時間変化 (断面C, 水面下4cm, 300rpm)

模型の水平方向には、風抗力、流れ抗力、慣性力及び波力が作用する。このうち風抗力 F_a と流れ抗力 F_f は、流体と物体との相対速度の2乗に比例する形の式が一般的に用いられていて

$$F_a = \frac{1}{2} C_a \rho_a u_a' |u_a'| A_a \quad (5)$$

$$F_f = \frac{1}{2} C_d \rho_w u_f' |u_f'| A_f \quad (6)$$

ここで、 C_a : 風抗力係数、 ρ_a : 空気の密度、 u_a' : 風速 u_a に対する模型の相対速度、 A_a : 気中部分の受圧面積、 C_d : 流れ抗力係数、 ρ_w : 水の密度、 u_f' : 流速 u_f に対する模型の相対速度、 A_f : 水中部分の受圧面積である。Daniel et al.⁴⁾は、 u_a の定義位置を海面上10 mとして $C_a=1.0$ を用い、 u_f の定義位置は特に明示していないが $C_d=1.0$ の値を用いている。そこで、まず $C_a=1.0$ 、 $C_d=1.0$ とする。また、実験室の気温、気圧及び水温の測定結果より $\rho_a=1.254$ kg/m³、 $\rho_w=1,000$ kg/m³とする。 u_a 、 u_f は模型直上、直下の測定値がないので、断面Cの測定値を用いる。すなわち、 u_a 、 u_f として境界層外側の平均風速に最も近いと考えられる $z=0.75$ mの $\overline{u_a}=8.19$ m/sと、水面下4 cmの位置の $t=0\sim15$ sの間の平均値 $\overline{u_f}=0.01$ m/sを用いる。 A_a 、 A_f は、模型が静水中に正立して浮遊しているときの $A_a=3.02 \times 10^{-2}$ m²、 $A_f=8.05 \times 10^{-2}$ m²とする。図-13は、そうして求めた F_a と F_f の計算結果である。 F_f は変動が大きい、模型がほぼ等速運動する $t=2.0\sim14.5$ sの間の両者の平均値を求めると、 $F_a=1.21$ N、 $F_f=-1.57$ Nとなった。すなわち、風抗力に比較して、流れ抗力の平均値は向きが反対で大きさはやや大きくなった。

なお、ビデオ画像でみると、波と波との間の谷にあるコンテナに対して次の波の峯が追い越すようにあたると、コンテナがやや加速するような挙動が見られた。また、波の峯と谷が通過するたびに長軸まわりに少し回転してまた戻るといった揺動する挙動が

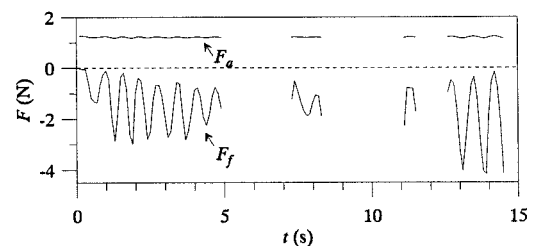


図-13 風抗力及び流れ抗力

みられた。このような波の及ぼす影響についても今後詳細な検討が必要である。

図-14は、図-9の条件のうち送風機の回転数を200rpmに減じた場合で、約18 sで断面Dに到達しており300 rpmと比較し移動速度が小さくなっている。

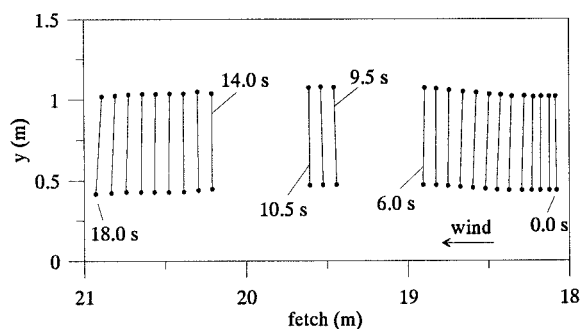


図-14 漂流軌跡 (200rpm, 満載, 90度)

図-15は、図-9の条件のうち初期設置角度を $\theta_0=0$ 度とした場合で、静止状態から解放した直後に水平面内で回転し、ほぼ90度の角度になって流された。なお、断面Dよりもさらに下流側まで様子を観察すると、90度になったあとは回転せずにほぼ90度の角度のまま流されていた。一般に、流体中の矩形物体は抗力を最も小さくするように流線に沿った方向に長軸が向いて流されると考えられるが、実験結果ではそれとは異なる結果となった。この原因として、両側に壁が存在することにより生じる横断方向の風速分布及び流速分布の影響、水路内で生じる二次循環流の影響等の、風洞水槽という環境で実験を行ったために生じる影響、また、水路長軸方向に不均一な風速及び流速の影響等が考えられる。

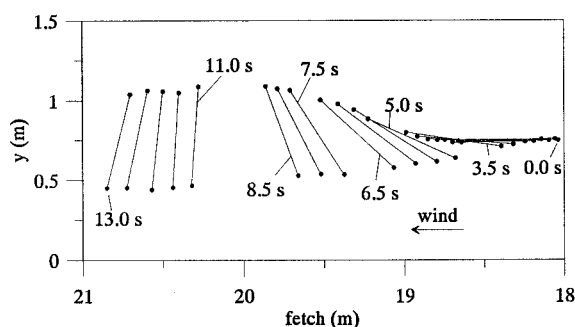


図-15 漂流軌跡 (300rpm, 満載, 0度)

図-9の条件のうち模型質量を空載コンテナとした場合は、静止状態から解放した直後にコンテナの長軸回りに回転して水面上を転がるように流された。空載コンテナで200 rpmとしていくつかのケースを実施すると、300 rpmに比べて水面上を転がるケースは減ったが、転がりやすく不安定な状態であった。空載のときは満載に比べて喫水が小さく、風抗力をより大きく受けるため不安定になったと考えられる。

4. 結論

本研究は、海域に流出したコンテナの流動の基礎的な特性を把握するため、風洞水槽において水面上に浮遊するコンテナ模型を静止状態から解放し動き出して漂流させる実験を行った。

- ・コンテナ模型を風向に対し直交する初期位置に静止させて解放した場合、水平面内で回転はせず、そのまま並進的に加速して、その後ほぼ等速運動を行った。
- ・コンテナ模型に作用する風抗力及び流れ抗力を算定し、ほぼ等速運動するときの両者の平均的な値を比較すると、風抗力に対して、流れ抗力は向きが反対で大きさはやや大きくなった。
- ・コンテナ模型を風向に対し平行する初期位置に静止させて解放した場合、水平面内で回転し、風向に対し直交する向きとなって流された。ただし、この原因として、風洞水槽という環境で実験を行ったために生じる影響等が考えられるので、今後詳細な検討が必要である。
- ・コンテナに波の峯が追いつくようにあたるとコンテナがやや加速するような挙動や、波の峯と谷が通過すると長軸まわりに少し回転してまた戻るといった揺動する挙動が観察されており、波の及ぼす影響についても今後詳細な検討が必要である。

謝辞：本研究を行うにあたり、大阪産業大学工学部水谷夏樹准教授、大阪大学大学院工学研究科出口一郎教授に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。また、国土交通省中国地方整備局宇野港湾事務所水島港事務所豊田英夫課長に水島港のコンテナ漂流被害調査にご協力を頂きました。ここに記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 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。
- 2) 熊谷兼太郎・河合弘泰・浅見靖伸：三河港における平成21年台風第18号高潮によるコンテナ漂流被害調査，第65回年次学術講演会講演概要集，土木学会，2010，投稿中。
- 3) Fanch, C. and Yannick A.: Criteria for Decision Making Regarding Response to Accidentally Spilled Chemicals in Packaged Form: Hydrodynamic Aspects, Spill Science & Technology Bulletin, Vol. 4, No.1, pp.7-15, 1997.
- 4) Daniel, P., Gwenaele, J., Fanch, C., Landau, Y. and Loiseau, E.: Drift Modeling of Cargo Containers, Spill Science & Technology Bulletin, Vol. 7, No.5-6, pp.279-288, 2002.
- 5) 加藤始・竹村莞爾：水面上の風速分布（第1報），港湾技術研究所報告，第5巻1号，pp.15-16，1966。
- 6) 日本規格協会：国際貨物コンテナ外りの寸法及び最大総質量，JIS Z 1614，8p，1994。
- 7) 熊谷兼太郎・小田勝也・藤井直樹：コンテナ沈没挙動の現地実験と港湾における漂流数値シミュレーション，海岸工学論文集，土木学会，第55巻，pp.271-275，2008。
- 8) 加藤始・佐野喜久雄：風洞におけるウインドスクリーンの模型実験，港湾技術研究所報告，第11巻，第1号，pp.23-66，1972。