風洞水槽におけるコンテナ模型の流動に与える 風と流れの効果に関する実験

EXPERIMENTS OF EFFECTS OF WIND AND WIND-DRIVEN CURRENT ON CONTAINER MODEL DRIFT IN WIND-WAVE CHANNEL

熊谷兼太郎¹・根木貴史²
Kentaro KUMAGAI and Takashi NEGI

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

²正会員 工修 国土交通省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

In this study, experiments were conducted on the effects of a container drifted by wind, wind-driven current and wave of a wind-wave channel. The channel is 28.5 m in length, 1.3 m in height and 1.5 m in width. The wind blown into the channel drives the wind-driven current and wave. In the case that the blower operated at 300 rpm, the kinematic eddy viscosity K_z was measured as $3.46 \text{ cm}^2/\text{s}$ at the fetch $x=18 \text{ m}$ and 0.475 m above the water surface.

The container model is 1/20 scale of 40 feet container. At the middle of the channel, the container model is floated on the surface of the water and is stilled at its initial position by a rigid steel base. The container model is forced by wind-drag, wind-wave and drag of the wind-driven current. The drag force and force of wind driven current acted on the container model were estimated by calculation in balance of the forces. The result is compared to the drag force coefficient and coefficient of force of wind driven current proposed by the previous researches.

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

1. 研究の背景と目的

2004年、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、「コンテナ」という。）を考える。

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¹⁾。また、Daniel et al.²⁾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、風の吹く海域を模擬した風洞水槽で水面上に浮遊するコンテナ模型の流動に与える風と流れの効果に関する実験を行い、海域に流出したコンテナの流動の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、2010年11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。この風洞水槽は、既往の報告³⁾で用いたものと同じ水槽である。図-1は、水槽の見取図で、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 $h_0=0.4 \text{ m}$ 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。実験は主として断面C～Dの間で行った。

図-1 風洞水槽の見取図

(2) 風速の測定

風速の測定は、熱線流速計（日本カノマックス株式会社製CTAユニットMODEL1011，X字型プローブ0249R-T5，温度補償・リニアライザー機能付き）を用いた。熱線流速計の測定値の検定はピトー管（株式会社岡野製作所製LK-1S）及び微差圧計（株式会社山本電機製作所製W081）による測定値と比較することにより行った。

風速の測定時間間隔は0.01 sとし、一定時間（60 s）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C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。なお、実験期間中の環境は気温7～20℃，水温8～15℃，気圧999～1039 hPa，湿度34～81%という範囲であった。

図-2は、断面Cの主流方向の風速 u_a の分布である。 z は静水位 h_0 からの高さである。 z が大きくなるに従い、風速が大きくなっている。図中の実線と破線は、以下のように求めて書き加えたものである。すなわち、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、ここでは加藤ら⁴⁾と同様に式(1)が成立するものとして考える。図-2の測定点のうち、200rpmの場合は水面に近い7点（ $z=0.040\sim0.170$ m）について、分布形状から判断して内部領域にあって式(1)が成立すると考え、近似すると、 $u_*=0.181$ m/s となった。さらに、 z_0 を求め書き加えたものが図中の実線である。ただし、このときの z_0 は 5.73×10^{-6} mと非常に小さくなったので、水面近傍（ $z=0.040$ 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と考えられる。300rpm

の場合も同様に水面に近い4点（ $z=0.065\sim0.125$ m）について近似して、 $u_*=0.262$ m/s， $z_0=7.58 \times 10^{-6}$ mを求めた。それを書き加えたものが図中の破線である。

図-3は、 u_a を u_* で、また、 z を(3)の波高の測定結果より求めた断面C位置の有義波高 $h_{1/3}$ で無次元化した風速分布を示す。なお、(1)式から求めた z_0 は非常に小さかったことを考慮して、ここでは z の無次

図-2 風速分布（断面C）

図-3 無次元化した風速分布

元化のために水面の状態を代表する指標の一つと考えられる $h_{1/3}$ を用いた。 $h_{1/3}$ は200rpmのとき0.0259 m, 300rpmのとき0.0406 mである。

図-4は、 z を後述するコンテナ模型の高さ H (0.130 m) で無次元化した風速分布を示す。図-3と比較すると、200rpmの場合と300rpmの場合の分布のずれが小さくなってほぼ重なっている。

図-4 無次元化した風速分布

図-5は、風速の測定結果の例を示す。ここでは、測定間隔を100 H_zで測定した流速を、断面Cの200rpmのときの測定開始～1 sの間を例として主流方向及び鉛直方向についてそれぞれ示した。いずれも波形の峯と谷が明確に測定できていることから、風速の乱れの各成分 u' 及び w' を測定するための測定間隔は100 H_zで十分であると判断した。

図-6は、断面Cの乱れ成分平均値 $\overline{u'w'}$ の鉛直分布、渦動粘性係数（式(2)）の鉛直分布をそれぞれ示す。

$$K_z = \frac{-\overline{u'w'}}{\frac{\partial \overline{u}}{\partial z}} \quad (2)$$

$\overline{u'w'}$ は、 $z=0.2$ 付近まではばらつきが大きいですが、それより z が大きくなると概ね小さくなっている。また、 K_z は、300rpmのときに $z=0.475$ mの位置で $K_z=$

(1) 主流方向

(2) 鉛直方向

図-5 風速の測定結果の例 (200rpm)

(1) 乱れ成分平均値の鉛直分布

(2) 渦動粘性係数の鉛直分布

図-6 乱れ成分及び渦動粘性係数

3.46 cm²/sとなった。井上⁵⁾は風洞の構造、風速等によるとしつつ風洞気流の $K_z=1\sim100$ cm²/sを挙げていて、今回の実験結果はその範囲内にある。

(3) 波高及び波速の測定

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CHT6-30，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ので、送風開始から20分以上の十分な時間が経過してから全ての計測を行った。

断面Cの横断方向中央位置で計測した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に、有義波高 $h_{1/3}$ 、最高波高 $h_{\max}$ 及び有義波周期 $T_{1/3}$ を示した。

表-1 波高の測定結果

送風機回転数 (rpm)	有義波高 $h_{1/3}$ (cm)	最高波高 $h_{\max}$ (cm)	有義波周期 $T_{1/3}$ (s)
200	2.59	4.00	0.40
300	4.06	6.33	0.49

波速の測定は、上と同じ容量式波高計2台を水平主流方向に0.2 mの間隔を空けて設置し、同時に測定を行った。そのデータのうち20波のピークを抽出する方法により、それぞれ波速を算定した。その結果、20波の波速の平均値 $\bar{c}$ は200rpmのとき0.72 m/s、

300rpmのとき0.85 m/sとなった。(2)の u_* で $\bar{c}$ を割った値である「波齢」は1よりも大きく、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。

波高及び波速の測定は気温、水温、気圧、湿度とも(2)とほぼ同じ条件で行った。

(4) 流速の測定

流速は、既往の報告³⁾で測定した結果を用いた。すなわち、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、横断方向中央位置で鉛直方向に高さを変えて測定している。図-7は、300rpmのときの断面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。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。

図-7 流速分布 (断面C, 300rpm)

(5) コンテナ模型に作用する力の測定

実物コンテナの形状は、日本規格協会⁶⁾の発行する日本工業規格により規格されている。図-8は、その規格に相似するように作成した縮尺 $s=1/20$ 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2 mm, 密度1.19 g/cm³)を接合して作られている。

次に、模型質量の設定方法を述べる。満載コンテナ模型は、重り及び空隙調整用の小部材を図-8(2)のようにコンテナ模型内部に追加して質量を調整している。実物コンテナの満載質量は、先述の日本工業規格によると30,480 kgである。模型に作用する力の大きさ、例えば風抗力の大きさは模型の喫水に影響されると考えられる。そこで、実物コンテナの海上での喫水に対して模型の喫水が約1/20になるよう質量を調整した。その結果、模型の質量は4.051 kg, 喫水は0.053 mとした。一方、空載質量(自重)は前述の規格に規定がなく、筆者ら⁷⁾の現地調査結果を参考に質量は0.877 kg, 喫水は、模型の浮遊時の安定性を考慮して0.018 mとした。

海面上の模型に作用する力を測定するため、模型を水表面付近に固定するための台座を作成した。台座は、水路内部を横断する門型部とその脚部からなり、鋼製の剛な構造である。台座(門型部)の天井部分に三分力計(株式会社共和電業製LSM-B-50NSA1)を下向きに取付ける。そこから剛な鋼棒で

コンテナ模型を吊下げて固定した。コンテナ模型は、中心がちょうど断面Cの位置にくるように、また、模型の喫水が静水面と一致するように設置した(写真-1)。3.(2)で述べるように、既往の報告³⁾ではコンテナ模型を海面上に浮遊させて拘束せずに自

図-8 コンテナ模型の見取図

写真-1 コンテナ模型に作用する力の測定

図-9 コンテナ模型の設置向き

由状態で漂流させた場合、コンテナ模型は風の主流方向に対して模型長軸が90度を向く方向で漂流していた。そこで、コンテナ模型の設置向きは、風の主流方向に対して模型長軸が90度となるようにした(図-9)。

実験は、この環境で送風機回転数を300rpmで送風し、コンテナ模型に作用する風抗力、流れ抗力、波力、慣性力、鋼棒に作用する風抗力の合力を測定した。また、コンテナ模型を取り外した状態でも測定を行うことにより、コンテナ模型を吊り下げている鋼棒部分のみに作用する風抗力を測定した。最初に挙げた合力から鋼棒に作用する風抗力を差し引いて、コンテナ模型に作用する風効力、流れ抗力、波力及び慣性力の合力を算定した。

3. 実験結果

(1) 現地への適用性

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 : 空気の動粘性係数) 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 が約8 m/sとすると、模型の縮尺 $s=1/20$ であるから、現地の約0.4 m/sの風と相似していることになる。

この考え方に対し、加藤ら⁸⁾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。そこで、これを参考に現地への適用性を検討する。

実験結果より、300rpmのとき $z=0.475$ mで $K_z=3.46$ cm²/s²となった(2. (2)節)。この $z=0.475$ mは、縮尺1/20ならば、現地で気象観測が頻繁に行われている高さ10 mにほぼ相当する。同じ位置の $u_a=8.26$ m/sであり、代表長さ L としてコンテナ模型の高さ $H=0.13$ mを選ぶと、(4)式より $R_K=3,107$ となる。一方、現地の渦動粘性係数について、加藤ら⁸⁾はかなりの幅をもって変わりかつやや小さめであることを指摘しているものの、 $z=10$ mに対し現地

の渦動粘性係数 $K_{z0}=2.0 \times 10^3$ cm²/sという値を挙げている。この K_{z0} と実物コンテナの高さ $H_0=0.26$ mを用い、先ほどの R_K を一致させようとするれば、(4)式より現地の風速 $U_0=R_K \cdot K_{z0}/H_0=239$ m/sとなる。わが国における平地での台風の最大風速記録は1965年に記録された69.8 m/sであり、それと比べると実験の風速は大きな値となっているようである。一方、吹送距離 $x=18$ mの位置で容量式波高計を用い測定した風波に、フルードの相似則を適用すると、現地では $h_{1/3}=0.518 \sim 0.812$ m, $T_{1/3}=1.8 \sim 2.2$ sの概ね妥当な波浪場に相当していた。このように、風速については現地よりも大きな値を与えているようであり、乱れを小さくした条件とするなどより詳細に実験条件を調整することが必要である。

(2) コンテナ模型に作用する力

図-10は、既往の報告³⁾における、300rpm、満載の場合のコンテナ模型を自由状態で漂流させた場合の漂流軌跡及び移動速度である。(1)は、 $t=0.0$ sに拘束を解かれた模型が、右から左方向にむかって移動する軌跡を0.5 s間隔で示す。棒線は模型の中心軸位置である。(2)は、その座標位置から算出した移動速度 u_m の時間変動を示す。 u_m は比較的短い周期で変動しているものの、 $t=2$ s程度よりあとは平均的には0.2 m/s程度の移動速度で漂流する。そこで、図-11のような状態を仮定する。風波はコンテナ模型を追い越す際に模型を揺動させるが、平均的には、風抗力 F_a と流れ抗力 F_d が釣り合うと仮定する。なお、 F_a は風の主流方向に正方向の力、 F_d は模型の移動速度が吹送流の流速よりも大きいため模型の移動速度とは逆向き方向、すなわち風の主流方向に負方向の力である。 F_a と流れ抗力 F_d は、流体と物体と

(1) 漂流軌跡

(2) 移動速度

図-10 漂流軌跡と移動速度 (300rpm, 満載)

図-11 自由状態で漂流させた場合の作用する力

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。(5)式の右辺と(6)式の右辺とが等しいとすれば、300rpm、満載のときの $C_a:C_d=0.30:1$ となった。ここで、2.(5)で得られた合力の時間平均値は、300rpm、満載の場合に1.584 Nであったので、 $\rho_w=1,000 \text{ kg/m}^3$ 、 $A_f=0.0323 \text{ m}^2$ 、 $u_f=0.0103 \text{ m/s}$ 、 $\rho_a=1.21 \text{ kg/m}^3$ 、 $A_a=0.0470 \text{ m}^2$ 、 $u_a=8.26 \text{ m/s}$ として、 $C_a=0.815$ 、 $C_d=2.72$ となった。

既往の適用事例と比較すると、本田ら⁹⁾が $C_a=0.681$ を提案している。これは、ふ頭上の直立した固定壁として陸上で実物コンテナの風抗力を測定した結果であり、今回の結果はこれと比較するとやや大きくなった。Daniel et al.²⁾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。ただし、これは数値計算にあたっての仮定条件として与えたものであるが、今回の結果はやや C_d に関しては大きいようである。これについては、波力の適切な考慮等により詳細な検討が必要であると考えられる。また、清宮¹⁰⁾は、海上の浮体構造物の受ける流れ風抗力として $C_a=1.2$ としているが、この算定にあたっては風速の定義位置を高さ10 m位置の風速 U_{10} ではなく、浮体構造物高さ中心位置の風速を用いており、単純な比較が難しい。また、貨物積載の影響として、空載と満載とを比較すると、流れ抗力係数に対する比率は、満載のときの風抗力係数よりも空載のときの風抗力係数の方が大きくなる傾向がみられた。

今回は、コンテナ模型を台座に固定して実験を行っているため海面の上下動に連動しないかたちになっているが、実際には海面の上下動にあわせて漂流物も上下しているので、その影響を考慮できていない。また、風向きに対して直立に固定しているが、

風を逃がすよう傾いて漂流することも観察された。これらの挙動が及ぼす影響についても、今後詳細に検討を加えていく必要がある。

4. 結論

風の吹く海域を模擬した風洞水槽においてコンテナ模型を用いた実験を行った。

まず、現地の波浪場及び風場への適用性を検討し、波浪場については概ね適用できると考えられるが、風場については現地よりも大きな値を与えているようであり乱れを小さくした条件とするなど今後の詳細な検討が必要であることが分かった。

また、模型に作用する風抗力係数及び流れ抗力係数について満載で送風量が比較的大きい場合の値を算定し既往の提案されている値との比較を行い、ふ頭上で実物コンテナの風抗力を測定した既往の結果と比較すると風抗力係数はやや大きかった。流れ抗力についても、一般的に用いられているものよりも大きくなる結果となり、波力の適切な考慮等により詳細な検討が必要であると考えられる。

謝辞：本研究を行うにあたり、株式会社エコー長谷川巖氏をはじめ各位に風洞実験の実施についてご助力を頂きました。ここに記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 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.
- 2) Daniel, P., Gwenaële, 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.
- 3) 熊谷兼太郎、鈴木武：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、海洋開発論文集、第26巻、pp.951-956, 2010.
- 4) 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.
- 5) 井上榮一：自然の風と風洞実験・第2報、応用力学、第4巻、第22号、pp.3-6, 1951.
- 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.
- 9) 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、pp.29-34, 1980.
- 10) 清宮理：海上風の性質とそれによる（矩）形浮体の動揺解析、港湾技術研究所報告、第19巻第2号、pp.115-167, 1980.