海上を浮遊するコンテナの 風による漂流挙動に関する数値解析

中村 友昭¹・水谷 法美²

¹正会員 名古屋大学特任講師 高等研究院 (〒464-8601 名古屋市千種区不老町)

E-mail: tnakamura@nagoya-u.jp

²フェロー 名古屋大学教授 大学院工学研究科社会基盤工学専攻 (〒464-8603 名古屋市千種区不老町)

E-mail: mizutani@civil.nagoya-u.ac.jp

気相・液相・固相の相互作用を解析できる数値計算モデルを用いて、風による風波の発達現象に対する同モデルの再現性を検証するとともに、風によるコンテナの漂流挙動をコンテナへの作用力の観点から考究した。風による風波の発達現象に関して、吹送距離の増加とともに有義波高も増加する点で水理実験との対応を確認した。ただし、その増加割合には水理実験との差異を確認し、気液界面での相互作用を適切に再現する必要性を示した。風を主要因としたコンテナの漂流現象の解析では、風速の増加やコンテナの質量の減少とともにコンテナがより大きく漂流することを確認した。さらに、コンテナに作用する風下方向の力は抗力だけでは評価できず慣性力の影響を大きく受けることを示し、コンテナの漂流挙動を予測する際における慣性力の重要性を明らかにした。

Key Words : wind, shipping container, inertia force, drag force, wind wave, numerical analysis

1. 緒言

2011年東北地方太平洋沖地震津波により、仙台港に蔵置されていた約4,400個のコンテナのうち約2,000個が海上へ流出した。それらのうち、約340個は仙台港内で沈没し、約200個は石巻市から岩沼市にかけての海岸に打ち上げられた¹⁾。このように、沈没したり海岸に打ち上げられたりしたコンテナは、津波の余波により漂流した後、風とそれに伴う風波により運ばれたと推測される。

一方、巨大地震の発生時には、港湾は物資輸送の拠点や救援活動の基地として期待されている。しかし、被災地の支援のために出入港する船舶にとって海上を漂流するコンテナは航行の障害となることから、流出したコンテナの早期の発見と回収が望まれる。その際に、コンテナの位置を正確に予測できれば、それに基づいてコンテナのより効率的な回収が可能になると考えられるものの、そのためには津波によるコンテナの流出と漂流だけではなく、風とそれに伴う風波による漂流と、その後の海底への沈没や海岸への打ち上げまでを包括的に取り扱う予測手法の確立が不可欠である。それらのうち、津波が治まってからのコンテナの漂流挙動に対して支配的と考えられる風とそれに伴う風波の影響に関しては、コンテナへの作用力として風と流れによる抗力を考慮した漂流

予測モデルの構築と、現地でのコンテナの漂流事例および漂流実験との比較による妥当性の検討がDanielら²⁾によって行われている。しかし、比較対象とした現地データには複雑に変化する気象や海流の影響が含まれていることから、熊谷・鈴木³⁾と熊谷・根木⁴⁾は風洞水槽を用いた水理実験により理想的な条件下での検討を行っている。また、富田・廉⁵⁾は漂流物移動解析モデルSTOC-DMに風による抗力の影響を組み込む改良を行い、台風によるコンテナの漂流挙動を検討する際における風の考慮の必要性を示しているものの、コンテナへの作用力に対する詳細な検討は行っていないことから、風とそれに伴う風波による作用力のモデル化に検討の余地を残しているなど、風とそれに伴う風波によるコンテナの漂流現象に対する予測手法の確立には到っていない。

本研究では、気相・液相・固相の相互作用が解析できる3次元流体・構造・地形変化連成数値計算モデル⁶⁾を水谷ら⁷⁾の水理実験に適用し、まず風による風波の発達現象に対する同モデルの再現性を確認する。そして、同モデルを用いて風によるコンテナの漂流現象に対する解析を行い、コンテナの風による漂流挙動をコンテナへの作用力の観点から考究する。

2. 3次元数値計算モデルの概要

3次元流体・構造・地形変化連成数値計算モデル⁶⁾は、メインソルバーと3つのモジュールから構成されている。メインソルバーは、非圧縮性粘性流体からなる全気液相に適用できるように一般化し、さらに可動構造物や地形変化を取り扱えるように拡張した連続式とNavier-Stokes方程式に基づくLESである。そのメインソルバーには、気液界面を追跡するMARSに基づくVOFモジュール、可動構造物の運動を計算する体積力型IB法に基づくIBモジュール、浮遊砂の解析を行うとともに掃流砂と浮遊砂の輸送に伴う地形変化の計算を行う底質輸送モジュールが組み込まれている。ただし、本論文では地形変化は取り扱わないことから、底質輸送モジュールは使用しなかった。モデルの詳細は、紙面の都合上、中村ら⁹⁾を参照されたい。なお、これまでに本モデルを津波による船舶⁸⁾、コンテナ⁹⁾、ケーソン¹⁰⁾の移動現象に関する水理実験に適用することで、波による構造物の移動現象についての本モデルの妥当性は検証されている。

3. 風による風波の発達

(1) 計算条件

図-1に水谷ら⁷⁾の水理実験をモデル化した計算領域の概略図を示す。同図に示すように、反流を分離するための隔壁床を設け、その上部の静水深を0.45 m、さらにその上部の通風部の高さを0.25 mとした。その長さは計算負荷の軽減のために水理実験よりも短い3.20 mとし、その両側に1.0 mの減衰領域を、さらにその風上側には1.0 mの助走区間を設けた。そして、計算開始とともに風上側の境界から与える風速を徐々に大きくし、計算開始10秒後には高さ0.25 mの通風部での断面平均流速が $u_{air}^m = 2.0$ m/sまたは3.0 m/sとなる風を計算開始200秒後まで作用させた。なお、本論で用いた上述の数値計算モデルは3次元モデルであるが、ここでは計算負荷の軽減のために単位奥行きの断面2次元計算を行った。

計算格子は、次章でコンテナの漂流現象を取り扱うこ

図-1 計算領域の概略図（風による風波の発達）

とを考慮して、減衰領域と助走区間を除く範囲の静水面の近傍($0 \leq x \leq 3.20$ m, $-0.04 \leq z \leq 0.04$ m)に対して、 x 軸方向の格子幅 Δx がコンテナの短軸方向の長さ32 mmを1/8した4 mm、 z 軸方向の格子幅 Δz がコンテナの高さ35 mmを1/7した5 mmの等間隔格子を用いた。それ以外の範囲については、計算負荷のさらなる軽減のために格子幅を徐々に広げ、助走区間では $\Delta x = 20$ mm、底面の近くでは $\Delta z = 36$ mmの不等間隔格子を用いた。なお、コンテナの諸元の説明は次章で行う。流速と圧力の境界条件として、助走区間と減衰領域で風速分布の発達を促すことを考慮して、風上側の境界から上述した断面平均流速の対数則分布の風を流入させた。また、底面などの不透過壁の表面にはno slip条件を、手前側と奥側の境界にはslip条件を、風下側の境界には圧力一定の条件を課した。VOF関数の境界条件には、全境界に勾配ゼロの条件を用いた。

(2) 計算結果および考察

水面変動が安定した計算開始30秒後から170秒間の水面変動より求めた有義波高 $H_{1/3}$ の空間分布を図-2に示す。ここで、図-1に示したように風上側に1.0 mの減衰領域を設けていることから、ここでは $x = -1.0$ mからの距離を吹送距離として図示した。また、図-2には水谷ら⁷⁾による水理実験結果も同時に示した。ここで、 U_{10} は吹送距離0.50 mにおける静水面上10 mでの風速である。

図-2より、水理実験ではより高風速の風を作用させていると考えられることや60秒間の水面変動から $H_{1/3}$ を算出しているなど条件が一致していないことや、減衰領域があるために吹送距離の算出方法が不明確であることから直接の比較は困難であるものの、吹送距離の増加とともに $H_{1/3}$ も増加している点で水理実験との対応が認められる。ただし、水理実験ではより高風速の条件が多いと考えられることを考慮すると、吹送距離が短いときには $H_{1/3}$ の増加量を過大評価し、逆に吹送距離が長いときには $H_{1/3}$ の増加量を過小評価する傾向が確認できる。したがって、十分に細かい計算格子を用いて気液界面近傍を高解像度で解析したり、渡部・岩下¹¹⁾が提案している気

図-2 有義波高 $H_{1/3}$ の比較

液界面の力学的境界条件等を導入したりして、気液界面での相互作用を適切に再現することの必要性が指摘できる。ただし、そのような細かい格子を用いて後述する3次元領域の計算を行うことは、現時点では計算負荷の観点から現実的ではない。また、同様の理由で計算領域の長さを十分に確保できないために、水面変動が安定するまでの長時間の計算を行うとコンテナが風下側の境界に達してしまうことから、以下では、風波の発達が小さい風作用初期を対象に、風を主要因としたコンテナの漂流現象を対象に検討を行う。

4. 風によるコンテナの漂流

(1) 計算条件

図-3に計算領域の概略図を示す。同図に示すように、ここでは前章で用いた図-1の計算領域を活用したことから、計算領域との縮尺を考慮して、津波によるコンテナの漂流特性の検討を行っている中村ら⁹⁾と同様に、国際規格に基づく40 ftコンテナを1/75でモデル化した163 mm × 32 mm × 35 mmの模型（貨物半載時：37.8 g；満載時：77.6 g）を対象とした。また、コンテナの長軸を風向と同方向に設置した場合でも、漂流開始とともに風向と直交方向になるまで回転することが確認されている⁹⁾ことから、ここではコンテナの長軸を風向と直交方向とした場合のみを対象とした。それに併せて、図-3に示すように、前章で用いた計算領域の奥行きをコンテナの長軸方向の長さ163 mmの5倍とし、さらに計算領域の手前側と奥側の境界条件を周期境界に変更した。コンテナがFroudeの相似則で1/75でモデル化されていることから、実スケールでは減衰領域と助走区間を除く計算領域の長さは240 m、奥行きは61.125 mに相当する。計算格子は、 x 軸と z 軸方向の格子については前章と同じ設定を用い、 y 軸方向の格子には、コンテナの初期設置位置($-0.815 \leq y$

図-3 計算領域の概略図（風によるコンテナの漂流）

≤ 0.815 m)に対してはコンテナの長軸方向の長さ163 mmを1/8した幅 $\Delta y = 20.375$ mmの等間隔格子を、それ以外の範囲に対しては Δy を徐々に広げた不等間隔格子を用いた。

コンテナの初期位置は、コンテナが風下側の境界に達するまでの時間をできる限り長く確保するために、その重心が減衰領域と助走区間を除く計算領域の風上端近くの $x=0.1$ m, $y=0.0$ mとなるように設定した。また、コンテナの喫水は、静水状態での動揺ができる限り抑えられるように、半載のとき7.20 mm、満載のとき14.90 mmとした。ただし、中村ら⁹⁾はコンテナの中心に重心がくるようにした模型を用いているものの、安定な浮体としてのコンテナを対象とするために、ここでは簡単のためにコンテナの重心の位置を初期の浮心の位置と一致させた。したがって、コンテナの重心の位置と浮心の初期位置が、半載のとき $z=-3.60$ mm、満載のとき $z=-7.45$ mmとなるように設定した。そして、前章と同様に、計算開始10秒後に $u_{air}^{in} = 2.0$ m/sまたは3.0 m/sとなる風を作用させた。ただし、上述したように、風を主要因としたコンテナの漂流現象を対象することや、コンテナが風下側の境界に達する前までの計算結果しか検討に用いられないことに加えて、3次元計算のために計算負荷が非常に高いことを考慮して、ここでは計算開始14秒までの計算を行った。以下では、風速が一定となった計算開始10秒後から4秒間の計算結果に対して検討を行う。また、Reynolds数の相似と渦動粘性係数によるReynolds数の相似で実スケールへ換算した風速が数オーダー異なり⁴⁾、またコンテナはFroude数の相似に基づいてモデル化されていることから⁹⁾、現地スケールへの換算は今後の課題とし、ここでは実験スケールによる検討を行うこととする。

(2) コンテナの漂流挙動

図-4と図-5に貨物半載時のコンテナの漂流状況を示す。同図より、時間の経過とともにコンテナが徐々に風下へ漂流する様子が確認できる。また、図-4に示した $u_{air}^{in} = 2.0$ m/sよりも図-5に示した $u_{air}^{in} = 3.0$ m/sの方が、同じ質量でも漂流する距離が長いことが分かる。さらに、コンテナを回り込んだ風によってコンテナの風下側の水面に乱れが生じており、コンテナの漂流とともにその乱れも風下側へ移動する様子が確認できる。

図-6にコンテナの漂流挙動の比較を示す。ここで、 x_c^c と v_x^c はコンテナの x 軸方向の重心位置と速度、 x_c^c と v_x^c は z 軸方向の重心位置と速度、 θ_c^c と ω_c^c は重心を中心とする y 軸回りの角度と角速度を表す。

図-6の x_c^c と v_x^c より、計算開始10秒後以降は u_{air}^{in} が一定であることから、 v_x^c もほぼ一定値をとっていることが確認できる。また、その値はコンテナの質量が等しい場合には $u_{air}^{in} = 2.0$ m/sよりも $u_{air}^{in} = 3.0$ m/sの方が大きく、その

図-4 コンテナの漂流状況 (貨物半載時, $u_{air}^{in} = 2.0 \text{ m/s}$)

図-5 コンテナの漂流状況 (貨物半載時, $u_{air}^{in} = 3.0 \text{ m/s}$)

ために x_c^c も大きいことから、図-4と図-5の比較で示したように $u_{air}^{in} = 3.0 \text{ m/s}$ の方がコンテナに大きな漂流が生じたことが分かる。一方、 u_{air}^{in} が等しいときには半載時の方が v_x^c が大きく、漂流する距離も長いことが分かる。

続いて、図-6の x_c^c , v_z^c , θ_c^c , ω_c^c の振幅に着目すると、 u_{air}^{in} が等しいならば半載時の方が振幅が大きいことが分かる。一方、コンテナの質量が等しいときは、満載の場合にのみ、 x_c^c や v_z^c の振幅が $u_{air}^{in} = 2.0 \text{ m/s}$ よりも $u_{air}^{in} = 3.0 \text{ m/s}$ の方が大きい現象を確認できる。しかし、半載時の x_c^c と v_z^c の振幅や、コンテナの質量に関わらず θ_c^c と ω_c^c の振幅には、 u_{air}^{in} による差は明確には認められない。一方、位相に着目すると、 x_c^c が v_z^c , θ_c^c が ω_c^c に対して1/4周期遅れ

ていることが確認できるものの、 v_x^c , v_z^c , ω_c^c の間には位相に明確な関係は認められないことが分かる。これは、風速の差に加えてコンテナの質量の違いによる固有周期の差の影響を受けたためと考えられる。

(3) コンテナへの作用力

図-7にコンテナに作用するx軸方向の力 F_x を示す。ここで、赤線は数値計算結果である。また、同図には以下の式により求めた解析解も同時に示した。

$$F_x = F_M^w + F_M^a + F_D^w + F_D^a \quad (1)$$

(a) 貨物半載時

(b) 貨物満載時

図-6 コンテナの漂流挙動

 図-7 コンテナへのx軸方向の作用力 F_x

$$F_M^w = C_M^w \rho_w V_w \frac{\partial(u_w - v_x^c)}{\partial t} \quad (2)$$

$$F_M^a = C_M^a \rho_a V_a \frac{\partial(u_a - v_x^c)}{\partial t} \quad (3)$$

$$F_D^w = \frac{1}{2} C_D^w \rho_w A_w (u_w - v_x^c) |u_w - v_x^c| \quad (4)$$

$$F_D^a = \frac{1}{2} C_D^a \rho_a A_a (u_a - v_x^c) |u_a - v_x^c| \quad (5)$$

ただし、 C_M^w は水による慣性力係数、 C_M^a は空気による慣性力係数、 C_D^w は水による抗力係数、 C_D^a は空気による抗力係数、 ρ_w は水の密度($= 9.97 \times 10^2 \text{ kg/m}^3$)、 ρ_a は空気の密度($= 1.18 \text{ kg/m}^3$)、 V_w はコンテナの没水体積、 V_a はコンテナの気中体積、 A_w はコンテナの水中投影面積、 A_a はコンテナの気中投影面積、 u_w はコンテナの水中部分の中心位置でのx軸方向の流速、 u_a はコンテナの気中部分の中心位置でのx軸方向の風速、 v_x^c はコンテナのx軸方向の漂流速度(図-6参照)である。ここで、 u_w と u_a はコンテナを設置しない状態の計算結果から求めたコンテナの中心位置($x = x_c$)での流速または風速である。空気による抗力係数 C_D^a に関して、Danielら²⁾は海面上10 mの高さでの風速を想定して $C_D^a = 1.0$ を用いており、熊谷・根木⁴⁾は水理実験で海面上10 mに相当する高さでの風速に対して $C_D^a = 2.72$ と求めている。一方、清宮¹²⁾は浮体構造物の気中部分の中心位置での風速に対して $C_D^a = 1.2$ を用いている。そこで、風速 u_a の定義位置が清宮¹²⁾と同じであることから、ここでは $C_D^a = 1.2$ とした。また、図示しないが、 C_M^a は F_x にほとんど影響を与えないことを確認していることから、 F_x の振幅が一致するように試行錯誤により $C_M^w =$

1.0、 $C_D^w = 0.2$ と決定し、 C_M^a は簡単のために C_M^w と等しいとした。ここで、熊谷・根木⁴⁾は喫水が5.0 cmのコンテナに対して水面下4.0 cmでの流速から $C_D^w = 2.72$ と求めているが、コンテナの水中部分の中心位置である水面下2.5 cmよりも深い位置での流速を用いていることから、ここで用いたそれより小さい $C_D^w = 0.2$ に矛盾はないものと思われる。なお、図-7には慣性力のみ($C_D^w = C_D^a = 0$)と抗力のみ($C_M^w = C_M^a = 0$)の解析解も示した。

図-7より、慣性力と抗力の両者を考慮した解析解(黒線)には、数値計算結果(赤線)にみられるスパイク上の非常に細かい振動が現れていないことが分かる。これは、数値計算結果は全計算ステップの F_x をプロットしているのに対して、解析解は0.01秒間隔で求めたために現れなかったと考えられる。また、図-7(c)に示した $u_{air}^{in} = 3.0 \text{ m/s}$ かつ貨物半載時の場合には、 $t = 12$ 秒過ぎから両者に若干の差異が認められることが分かる。しかし、解析解は数値計算結果と概ね一致しており、良好に再現できていることが分かる。また、慣性力のみ解析解(緑線)からも同様の傾向が確認できる。一方、抗力のみ解析解(青線)は振幅を大幅に過小評価しており、数値計算結果にみられる周期的な変動を現せていないことが分かる。Danielら²⁾は抗力のみを考慮してコンテナの漂流モデルを構築しているが、以上の結果より、コンテナへの作用力は抗力だけでは評価できず、慣性力の影響を大きく受けると言える。そのため、コンテナの漂流挙動の予測を行う際には、慣性力も考慮してコンテナへの作用力を評価することの重要性が指摘できる。ただし、コンテナの海流や潮流などによる漂流、海底への沈没、海岸

への打ち上げなどの現象に対する検討までは行えなかったことから、コンテナの位置予測手法の確立に向けて、今後さらなる研究を行う必要がある。

5. 結論

本研究では、風による風波の発達現象と風によるコンテナの漂流現象を対象に、気相・液相・固相の相互作用が解析できる3次元流体・構造・地形変化連成数値計算モデルによる数値解析を行い、風によるコンテナの漂流挙動をコンテナへの作用力の観点から考究した。その結果、得られた主要な結論を以下にまとめる。

1. 風による風波の発達現象について、吹送距離の増加とともに有義波高も増加する点で水理実験との対応が確認できた。ただし、有義波高の増加割合には水理実験との差異が認められたことから、細かい計算格子を用いて気液界面近傍の高解像度に解析したり、気液界面の境界条件等を導入したりして、気液界面での相互作用を適切に再現することの必要性を示した。
2. 風によるコンテナの漂流現象について、風速の増加やコンテナの質量の減少とともにコンテナがより大きく漂流することを確認した。また、風速の差に加えて固有周期の差の影響から、上下運動と回転運動の位相には明確な傾向は確認できなかった。さらに、コンテナに作用する風下方向の力は抗力だけでは評価できず、慣性力の影響を強く受けることが判明した。そのため、コンテナの漂流挙動を予測する際には、慣性力も考慮してコンテナへの作用力を評価することの重要性を明らかにした。

謝辞：本研究は、公益社団法人日本科学協会笹川科学研究助成による補助を受けたことを付記し、謝意を表する。

参考文献

- 1) 読売新聞社：漂着コンテナ 撤去本格化（オンライン），<http://www.yomiuri.co.jp/e-japan/miyagi/news/20110826-OYT8T00048.htm>，参照 2011-08-28。
- 2) Daniel, P., Jan, G., Cabioc'h, F., 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) 熊谷兼太郎, 根木貴史：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，*土木学会論文集 B3 (海洋開発)*，Vol. 67, No. 2, pp. I_154-I_159, 2011.
- 5) 富田孝史, 廉 慶善：風応力を考慮した漂流物モデル，*土木学会論文集 B2 (海岸工学)*，Vol. 67, No. 2, pp. I_316-I_320, 2011.
- 6) 中村友昭, 小竹康夫, 水谷法美：3 次元流体・構造・地形変化連成数値計算モデルを用いた施工時における上部斜面堤の波浪動揺に関する数値シミュレーション，第 25 回数値流体力学シンポジウム，E11-5, 10 p., 2011.
- 7) 水谷夏樹, 鍛冶允啓, 宮島昌弘：砕波を伴わない風波の自己調整機能に対する気流の剥離の役割について，*土木学会論文集 B2 (海岸工学)*，Vol. 67, No. 2, pp. I_056-I_060, 2011.
- 8) 水谷法美, 小池 竜, 中村友昭, 子安友加里：岸壁に入射する津波の反射・遡上特性と小型船舶の打上げ・漂流挙動に関する研究，*土木学会論文集 B2 (海岸工学)*，Vol. 65, No. 1, pp. 841-845, 2009.
- 9) 中村友昭, 青山功治, 水谷法美：遡上津波と胸壁からの反射波によるコンテナの漂流特性と海上への流出対策工の有効性に関する研究，*土木学会論文集 B3 (海洋開発)*，Vol. 68, No. 2, pp. I_216-I_221, 2012.
- 10) 中村友昭, 安藤康平, 山田裕貴, 水谷法美, 小竹康夫：津波の越流に伴う混成堤ケーソンの挙動とその機構に関する数値解析，*土木学会論文集 B2 (海岸工学)*，Vol. 68, No. 2, pp. I_831-I_835, 2012.
- 11) 渡部靖憲, 岩下厚志：気液二相流の界面力学的境界条件適合スキームの開発と風波生成過程への応用，*土木学会論文集B2 (海岸工学)*，Vol. 67, No. 2, pp. I_016-I_020, 2011.
- 12) 清宮 理：海上風の性質とそれによるく（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.

NUMERICAL ANALYSIS OF WIND-INDUCED DRIFT BEHAVIOR OF A SHIPPING CONTAINER

Tomoaki NAKAMURA and Norimi MIZUTANI

A three-dimensional coupled fluid-structure-sediment interaction model is applied to the development of wind waves to examine the computational capability of the model. Furthermore, wind-induced drift behavior of a shipping container floating on the water surface is investigated using the model in terms of force acting on the container. In the development of the wind waves, numerical results are reasonably consistent with experimental data in terms of an increase in the significant wave height with the fetch. In the wind-induced drift of the container, numerical results show that the inertia force is dominant in the force acting on the container compared with the drag force, and suggest that it is essential to consider the inertia force when predicting the wind-induced drift behavior of the container.