コンテナ船の甲板上積み付け状態と風圧力の関係

正会員 久 米 健 一*

正会員 濱 田 達 也*

Changes in Wind Forces of a Container Ship Depending on Loading Conditions on Deck

by Kenichi Kume, *Member* Tatsuya Hamada, *Member*

Summary

Container ships are becoming larger in order to reduce fuel consumption per unit transportation volume. As the ship size grows, the number of bays in which containers are loaded will increase, and the number of containers per bay will also increase. The loading order of a large number of containers is usually optimized by a computer-aided planning system called a Loading Computer that can comprehensively consider ship stability and cargo handling efficiency. However, due to the increase in the size of ships, the number of ports of call in one voyage and the number of empty containers to be transported also increase, and the container loading patterns are more diverse than before. There is more than one solution.

On the other hand, the loading condition of the containers on deck affects the wind forces during the voyage. The above-mentioned Loading Computer does not consider the wind forces acting on a ship, but from the viewpoint of improving energy efficiency, it is desired to consider the wind forces that change depending on the loading patterns as one parameter.

In this paper, the relationship between the loading patterns of containers on deck and wind forces was clarified by means of wind tunnel tests, focusing on the number of gaps between container bays.

1. 緒 言

エネルギー消費量の削減と温室効果ガス排出削減に向けた船舶の取り組みは加速しており、世界の海上物流量の増大も相まって、特にコンテナ船の大型化は著しく進展している。近年では2万TEUを超える船も就航している状況である。コンテナ船が大型化するとコンテナを搭載する船倉の数(ベイ)が増加し、1ベイ当たりの積載個数も増加する。復原性を満足し、貨物の積みと揚げを伴う寄港の順序を考慮したコンテナの積載順はローディングコンピュータと呼ばれるシステムで最適化されているが、船型の大型化により1航海中の寄港地の増加や移送する空コンテナ数の増加もあり、以前よりもコンテナの積み付け状態は多様となっている。

一方で、コンテナの甲板上の積み付け状態は航海中の風圧力に影響する。ローディングコンピュータはトリムや復原性、縦強度等を考慮しつつコンテナの荷役の効率を最適化するものであるが、エネルギー効率の最適化の観点からは積み付け状態により変化する風圧力も一つのパラメータとして考慮されることが望まれる。コンテナの積み付け状態と風圧力の関係はいくつかの文献1)~4)で報告があるが、本稿では特に、コンテナ・ベイの前後に生じる空隙の数と風圧力の関係

を風洞試験により明らかにした。

2. 対象船型

2.1 主要目等

甲板上コンテナの積み付け状態と風圧力の関係进行评估するための船型として、Table 1に示す要目を有する6,500TEUコンテナ船を選択した。

Table 1 Principal dimensions of an object ship.

	Ship scale	Model scale
L_{OA}	311.7 m	1.2468 m
L_{PP}	300.0 m	1.2000 m
B	40.0 m	0.1600 m
Scale	1/250	
Capacity	6,500 TEU	

2.2 積み付け状態

コンテナ船の風圧力の評価のために甲板上のコンテナの積み付け状態を変化させた。甲板上のコンテナを満載した状態を“Full”，全く無くした状態を“Empty”とするとともに、風圧抵抗に大きな影響を及ぼす可能性があるベイ間の空隙の数を変化させた半積載状態を“Partial-x”として設定した。1列おきにベイ間に隙間が生じるように楕形に配置した半積載状態を“Partial-1”，さらに甲板上のコンテナをなるべくまとめて配置し、ベイ間の空隙の数を減少させた半積載状態を

* (国研) 海上・港湾・航空技術研究所
海上技術安全研究所

それぞれ”Partial-2”, ”Partial-3”とした。それぞれの側面形状を Fig. 1～Fig. 5 に示す。いずれも幅方向には同じ高さでコンテナが積載されている。各状態の甲板上のコンテナ個数および Full に対する甲板上積載率を Table 2 に示す。コンテナの積載個数に応じて貨物重量が変わり、喫水やトリムが変化することもあるが、本研究は甲板上積み付け状態と風圧力との関係を明らかにすることを目的としていることや、コンテナ船はバラスト調整により喫水変化が小さい船種であることから、ここで想定する全ての積み付け状態における喫水・トリムは同一とした。

また、風圧力の無次元化や後述する簡易推定法で用いる各種パラメータを Fig. 6 および Table 3 に示す。ここで、 A_T は正面投影面積、 A_L は側面投影面積、 A_{OD} は上甲板より上の部分の側面投影面積、 H_{BR} は海面から船橋までの距離、 H_L は A_L/L_{OA} で計算される側面平均高さ、 H_C および C_{dis} は A_L の面積重心 C_G の水面からの高さとミッドシップからの前方変位である。

Table 2 Number (TEU) of containers loaded on deck.

Configuration	TEU	Loading ratio to "Full"
Full	3,556	1.00
Partial-3	2,624	0.74
Partial-2	2,532	0.71
Partial-1	1,872	0.53
Empty	0	0.00

Fig. 1 Container configuration (Full).

Fig. 2 Container configuration (Partial-3).

Fig. 3 Container configuration (Partial-2).

Fig. 4 Container configuration (Partial-1).

Fig. 5 Container configuration (Empty).

Fig. 6 Definitions of lateral projected areas.

3. 試験状態等

3.1 風洞

風圧力計測は Fig. 7 に示す海上技術安全研究所（海技研，NMRI）の変動風水洞で実施された。変動風水洞の仕様を以下に示す。

- ・ゲッチンゲン型水平回流式
- ・風洞部計測区間：密閉型 幅 3 m、高さ 2 m、長さ 15 m
- ・送風性能：定常風 1.0～30.0 m/s
- ・乱れの強さ：0.5 % 以下

Fig. 7 Plan view of wind tunnel in NMRI.

3.2 閉塞率

風洞試験において考慮すべき試験状態の一つである閉塞率は、5 % 以下の範囲では計測値に対する影響は小さく、許容できるとされている⁵⁾。海技研の風洞（計測部断面寸法：3×2 m）に前節で示した 5 状態の模型船を設置した場合の閉塞率を Table 4 に示すが、数値が最大となる甲板上コンテナ満載状態 (Full) の横風時で約 2.0 % であり、今回の風圧力計測試験では問題ない。

3.3 模型船設置位置と風速分布

風圧力計測に用いる模型船は、Fig. 8 に示すように風洞計測部の最上流位置から 4,500 mm 下流の床面に設置された。

Table 3 Particulars of each loading condition.

Configuration	LOA [m]	H_{BR} [m]	H_L [m]	A_T [m ²]	A_L [m ²]	A_{OD} [m ²]	H_C [m]	C_{dis} [m]
Full	1.2467	0.1413	0.0961	0.0225	0.1198	0.0705	0.0551	-0.0785
Partial-3			0.0838		0.1045	0.0552	0.0514	-0.0814
Partial-2			0.0831		0.1036	0.0543	0.0508	-0.0764
Partial-1			0.0737		0.0918	0.0425	0.0470	-0.0717
Empty			0.0497	0.0184	0.0619	0.0126	0.0292	-0.0438

Table 4 Blockage ratio in crosswind.

Configuration	Blockage ratio [%]
Full	2.0
Partial-3	1.7
Partial-2	1.7
Partial-1	1.5
Empty	1.0

4. 解析方法

4.1 風圧力の無次元化

風圧力計測の際の座標系を Fig. 10 に示す。計測された風圧力は(1)～(3)式で無次元化した。ここで、 ρ は空気密度、 U_{A1} 、 U_{A2} は代表速度である。 U_{A1} 、 U_{A2} には流入風速分布の影響を軽減できることが確認されている高さ平均風速⁶⁾を用いることとし、Fig. 9 に示した風速分布の2乗値を(4)～(5)式により、風洞床面から H_{BR} と H_L までの範囲で積分して求めた。試験状態毎に算出した高さ平均風速を Table 5 に示す。

$$C_X = F_X / \left(\frac{1}{2} \rho U_{A1}^2 A_T \right) \quad (1)$$

$$C_Y = F_Y / \left(\frac{1}{2} \rho U_{A2}^2 A_L \right) \quad (2)$$

$$C_N = M_Z / \left(\frac{1}{2} \rho U_{A2}^2 A_L \cdot L_{OA} \right) \quad (3)$$

$$U_{A1}^2 = \frac{1}{H_{BR}} \int_0^{H_{BR}} U(z)^2 dz \quad (4)$$

$$U_{A2}^2 = \frac{1}{H_L} \int_0^{H_L} U(z)^2 dz \quad (5)$$

Table 5 Height average wind velocities.

Configuration	U_{ref} [m/s]	U_{A1} [m/s]	U_{A2} [m/s]
Full	25.00	23.58	22.95
Partial-3			22.62
Partial-2			22.60
Partial-1			22.26
Empty			21.39

Fig. 8 Measurement position in the longitudinal direction of the wind tunnel.

Fig. 9 Wind profile at the center of a turn table ($U_{ref}=25$ m/s).

この位置のターンテーブル中心(模型船のミッドシップとなる位置)における鉛直方向風速分布を Fig. 9 に示す。風速分布は風洞内の上流部に固定されたピトー管で計測される基準風速 U_{ref} で正規化している。

風洞内には境界層や流れの乱れ度を調整するための装置は設置されていない。風洞床面で自然発達した境界層の厚さはターンテーブル中心位置で約 90 mm であり、この境界層の外ではほぼ一様な流れとなっている。

Fig. 10 Coordinate system.

5. 試験結果

5.1 レイノルズ数影響

風洞での風圧力計測に際し、まず計測する風圧力にレイノルズ数影響が無いことを確認するために、風洞の風速を変更して風圧力係数の変化を調べた。計測結果を Fig. 11～Fig. 13 に示す。文献 8)～10)によれば模型船長を代表長さとするレイノルズ数が 1.0×10^6 以上であれば風圧力に対する影響が無くなるとされているが、今回の風圧力計測試験での設定風速 $U_{ref}=25 \text{ m/s}$ は $Re=2.1 \times 10^6$ であり、Fig. 11～Fig. 13 でも一定値に漸近する傾向が表れており、十分高い設定風速であることが確認できる。

Fig. 11 Reynolds number effect of C_x ($\Psi=0 \text{ deg}$).

Fig. 12 Reynolds number effect of C_y ($\Psi=90 \text{ deg}$).

Fig. 13 Reynolds number effect of C_N ($\Psi=90 \text{ deg}$).

5.2 風圧力係数分布

Fig. 1～Fig. 5 に示す積み付け状態における風圧力係数分布を Fig. 14～Fig. 16 に示す。参考までに藤原らの方法¹¹⁾による簡易推定結果も併記した。いずれの状態も船体の形状は

左右対称であり風向角の設定は片舷側のみで十分ではあるが、風洞床面の水平度や風洞内の風速分布の不均一性など、わずかではあるが左右差が生じうることを考慮し、両舷で計測した風圧力を平均化し各状態の風圧力係数分布とした。

C_x の絶対値は Empty の場合が最も小さく、Full がそれに続いた。また、1 列おきにコンテナ・ベイ間の空隙がある Partial-1 が最大となった。

C_y の絶対値は Empty とそれ以外の積み付け状態とで二分する結果となった。甲板上へ積載したコンテナの数が満載時の半数～7 割程度となる半積載状態(Partial-1～3)と満載状態(Full)の C_y について、 C_y がおおよそ最大値をとる $\Psi=90 \text{ deg}$ のデータを用いて解析した平均値 μ と標準偏差 σ を Table 6 に示す。甲板上にコンテナを半数程度以上積載し横風を受ける場合、 C_y の 2σ は平均値の約 5.2%であった。

C_N の絶対値は甲板上に積みつけられたコンテナの前後バランスに大きく影響を受けるため、コンテナ・ベイ間の空隙の数による影響を評価することは困難であったが、空隙の数が多いほど風向角に対する風圧力の変化が小さい傾向が見られた。

Table 6 Statistical values of C_y s under the conditions of Full and Partial loading on deck.

Coefficient	Ψ [deg]	Average, μ	Standard Deviation, σ	$2\sigma/\mu$ [% of ave.]
C_y	90	0.998	0.026	5.2

Fig. 14 Coefficient of longitudinal force.

Fig. 15 Coefficient of lateral force.

Fig. 16 Coefficient of yaw moment.

6. 考 察

6.1 風圧力係数の所要馬力に対する影響評価

コンテナ船の甲板上の積み付け状態と風圧力係数の関係は、過去の文献でも調査がなされている^{1)~4)}。それらによれば甲板上コンテナが1ベイおきに空隙となっている楕形配置(本稿ではPartial-1と表記した状態)では、空隙がない状態と比べて C_X の最大値が増加し、 C_Y は比較的空隙の影響を受けにくいことが示されている。前節で示したFullとPartial-1の C_X 、 C_Y の定性的な傾向は、これらとほぼ同様であった。

前節に示した風洞試験結果のうち C_X と C_Y について、海上技術安全研究所で開発した実海域性能評価プログラムVESTA¹²⁾を用いて、所要馬力に対する影響を評価した。VESTAでは波向と風向を同一と仮定し、波浪と相対風による抵抗変化を考慮している。前節で明らかとなったコンテナ・ベイの空隙による C_X と C_Y の変化が所要馬力に及ぼす影響を、船速20ノット、ビューフォート風力階級を5と仮定して推定した結果をTable 7に示す。

Table 7 Changes of power at Beaufort Scale=5 under the "Full" conditions (Ship speed=20 knots).

Apparent wind direction	C_X : equal to Partial-1	C_Y : 5.2% down to Full	C_Y : 5.2% up to Full
head (0 deg)	+2.0 %	0.0 %	0.0 %
bow quartering (45 deg)	+26.2 %	-0.1 %	+0.1 %
beam (90 deg)	+14.0 %	-0.1 %	+0.1 %
stern quartering (135 deg)	+2.8 %	0.0 %	0.0 %
following (180 deg)	0.0 %	0.0 %	0.0 %

満載状態"Full"の風圧力係数のうち C_X を楕形の半積載状態"Partial-1"の数値に差し替えた場合、または、 C_Y を5.2%増減させた場合の所要馬力を、Fullの所要馬力に対する増減

率として示している。Fullの C_X をPartial-1の数値に置き換えた場合、遭遇する頻度が高い斜向風及び横風時の所要馬力増加が顕著であり、甲板上コンテナの積み付け状態に配慮すべきであることが分かる。一方、 C_Y は $\pm 5.2\%$ 変化しても、所要馬力に対する影響は高々0.1%であることから所要馬力に対する感度は小さい。つまり、甲板上コンテナが半数以上積載されている状態では、 C_X が所要馬力に対する主要因子であると言える。

6.2 甲板上コンテナの隙間影響の評価

藤原らは甲板上コンテナ・ベイの前後に空隙があることで生じるコンテナ前後面の圧力差が、風圧力に影響を及ぼしていると考え、隙間影響を考慮しない従来の簡易推定式¹¹⁾に対し隙間影響の補正法を提案している¹²⁾。この補正法により本稿の試験状態について甲板上コンテナの空隙の影響を評価した結果を述べる。

藤原ら¹²⁾はコンテナ隙間影響を、1ベイおきに空隙があるComb typeと、複数ベイがまとまって一つの大きな空所となっているOLG (One Large Gap) typeに区別して整理しているが、本稿ではComb typeに相当するPartial-1の隙間影響を算出した。これら補正量の推定式ではコンテナ・ベイ間の空隙の面積 A_{RC} が用いられるとともに、Fig. 17に示すように、隙間影響補正に用いる A_L にはコンテナ・ベイ間の隙間の面積も含まれておりTable 3の数値とは異なっているため、補正量算出に用いた数値を改めてTable 8に示す。

Table 8 Parameters for simple estimation method by Fujiwara et al.

Config.	A_L [m ²]	A_{OD} [m ²]	A_{RC} [m ²]	A_{RC}/A_{OD}
Partial-1	0.1257	0.0764	0.0309	0.41

Fig. 17 Definitions of lateral projected areas for the estimation method of gap of containers on deck.

藤原らの補正式で計算されるPartial-1の隙間影響と、本研究の風洞試験で得られた隙間影響(FullとPartial-1の風圧力係数の差)を比較するために両者をFig. 18に示す。ここで ΔC_X 、 ΔC_Y 、 ΔC_N はそれぞれ隙間影響を考慮しない藤原らの式¹¹⁾により得られる C_X 、 C_Y 、 C_N に対する補正量である。なお、ここで比較対象とした積み付け状態Partial-1の A_{RC}/A_{OD} は0.41であり、藤原らの補正方法の適用範囲($A_{RC}/A_{OD} < 0.5$)であることを付記する。

Fig. 18は、風洞試験で得られたコンテナ・ベイの隙間影響のうち最も所要馬力に影響する ΔC_X が藤原らの方法で推

定される補正量と定性的および定量的に同等であることを示している。一方、 ΔC_Y については定性的な傾向が、 ΔC_N については定量的な傾向が両者の間で異なるが、本研究と藤原らの風洞試験では居住区を含む船体の考慮の有無が異なるため、その影響が現れたものと考えられる。いずれにしても係数の絶対値はほぼ0であることから所要馬力に対する影響は実用上は無視できる。

藤原らが構築したコンテナ隙間影響の補正式は隙間の前後面で生じる圧力差を反映したものであるが、甲板上コンテナ部分だけでなく船体部分も含む模型を用いて実施した本研究の風洞試験でも、その補正式の有効性が改めて確認できた。

Fig. 18 Comparisons of gap effect of Partial-1 condition between experiment and simple estimation method by Fujiwara et al.

7. 結 言

6,500個積みコンテナ船の甲板上の積み付け状態のうち特にコンテナ・ベイの前後に空隙が生じる場合の風圧力係数に

ついて風洞試験により評価を行った。その結果、以下に示す事項が明らかとなった。

- ・コンテナ・ベイ間の空隙の数が多いほど、空隙の前後面で生じる圧力差によって風圧抵抗が生じ、 C_X が増加する。
- ・最も C_X が増加する楕円配置の状態では、隙間がない状態に対して所要馬力が約26%増加する(船速20ノット、ビューフォート風力階級5、斜向風の場合)。
- ・甲板上コンテナが半積載～満載状態において、 C_Y の変化は実用上は無視できる程度である。
- ・ C_N は、コンテナ・ベイ間の隙間の数が多いほど風向角に対する変化が小さい傾向となる。

謝 辞

本研究は、海事クラスタ共同研究実海域実船性能評価プロジェクト (OCTARVIA プロジェクト) に関係して実施しました。

参 考 文 献

- 1) Fujiwara, T., Tsukada, Y., Kitamura, H., Sawada, H. and Ohmatsu, S.: Estimation Method of Wind Load for a Container Ship with Clearance gaps, Journal of the Japan Society of Naval Architects and Ocean Engineers, Vol. 10, pp.159-166, 2009 (in Japanese).
藤原敏文, 塚田吉昭, 北村文俊, 沢田博史, 大松重雄: コンテナの隙間影響を考慮した風圧力の推定, 日本船舶海洋工学会論文集, 第10号, pp.159-166, 2009.
- 2) Fujiwara, T., Tsukada, Y., Kitamura, H., Sawada, H. and Ohmatsu, S.: Experimental Investigation and Estimation on Wind Forces for a Container Ship, Proceedings of the Nineteenth International Offshore and Polar Engineering Conference, pp.555-562, 2009.
- 3) Kuroda, M., Tsujimoto, M. and Sogihara, N.: Onboard Measurement for a Container Ship in View of Container Load Condition, Journal of the Japan Society of Naval Architects and Ocean Engineers, Vol. 15, pp.29-35, 2012.
- 4) Andersen, I.M.V.: Wind Loads on Post-Panamax Container Ship, Ocean Engineering 58, pp.115-134, 2013.
- 5) The Building Center of Japan: Guidebook of Wind Tunnel Test for Experienced Researchers, 2008 (in Japanese).
日本建築センター: 建築物風洞実験ガイドブック, 1986.
- 6) Kume, K., Ohba, H., Orihara, H. and Mizokami, S.: Wind Velocity Profile and Representative Wind Velocity for Wind Resistance Measurement of Ship Models, Journal of JASNAOE, Vol.30, pp.1-13, 2019.
- 7) Kume, K., Bielicki, S., Kobayashi, H. and Ohba, H.: Validation of Dimensionless Method Using Height Average Wind Velocity for Wind Forces, Journal of JASNAOE, Vol.31, pp.39-46, 2020.

- 8) Nonaka, K., Nimura, T., Ueno, M., Fujiwara, T., Miyazaki, H. and Haraguchi, T.: Basic Study on External Forces and a Drifting Motion of a Ship, Report of Ship Research Institute, No. 5, Vol. 36, pp. 1-41, 1999 (in Japanese).
野中晃二, 二村正, 上野道雄, 藤原敏文, 宮崎英樹, 原口富博: 外乱力と漂流運動についての基礎的研究, 船舶技術研究所報告, 第36巻, 第5号, pp.1-41, 1999.
- 9) Wagner, B.: Windforce on surface ships, Ship and Port, pp. 894-900, 1967 (in German).
Wagner, B.: Windkrafte an Oberwasserschiffen, Schiff und Hafen, pp. 894-900, 1967.
- 10) Tsuji, T., Takaishi, Y., Kan, M. and Sato, T.: Model Test about Wind Forces Acting on the Ships, Report of Ship Research Institute, No. 5, Vol. 7, pp. 13-37, 1970 (in Japanese).
辻豊治, 高石敬史, 菅信, 佐藤辰二: 船体に働く風圧力に関する模型試験, 船舶技術研究所報告, 第7巻, 第5号, pp.13-37, 1970.
- 11) Fujiwara, T., Ueno, M. and Ikeda, Y.: A New Estimation Method of Wind Forces and Moments acting on Ships on the basis of Physical Component Models, Journal of the Japan Society of Naval Architects and Ocean Engineers, Vol. 2, pp.243-255, 2005 (in Japanese).
藤原敏文, 上野道雄, 池田良穂: 成分分離型モデルを利用した新しい風圧力推定法, 日本船舶海洋工学会論文集, 第2号, pp.243-255, 2005.
- 12) Tsujimoto, M., Sogihara, N., Kuroda, M. and Sakurada, A.: Development of a Ship Performance Simulator in Actual Seas, Proceedings of 34th OMAE, OMAE2015-41708, pp.1-12, 2015.