

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 5 年 6 月 11 日現在

機関番号：82627

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2020～2022

課題番号：20K04948

研究課題名（和文）Side-by-Side係船時の遮蔽影響を考慮した風荷重推定法に関する研究

研究課題名（英文）On the Estimation Method of Wind Forces Acting on Ship Hull During Side-by-Side Mooring Situation Considering Shielding Effect

研究代表者

湯川 和浩（Yukawa, Kazuhiro）

国立研究開発法人海上・港湾・航空技術研究所・その他部局等・研究員

研究者番号：80435776

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,300,000円

研究成果の概要（和文）：天然ガス燃料船を想定したPCC船型とVLCC船型、バンカー船を想定した内航LNG船型の風洞模型を用いて、単船およびバンカリングのオペレーション時の配置を想定したSide-by-Side状態にある2船体に作用する風荷重の計測試験と2船体周りの風場の可視化試験を実施し、風荷重に及ぼす遮蔽影響やPIV解析により天然ガス燃料船の風下側に生じる遮蔽エリアや渦度の変化を把握した。また、バンカー船に作用する風荷重について、天然ガス燃料船の船型や2船体の相対距離等に基づき遮蔽影響度を整理し、単船に作用する風荷重を基にSide-by-Sideの配置にある2船体に作用する風荷重の推定法について検討を行った。

研究成果の学術的意義や社会的意義

天然ガスの需要増加に伴い、FLNG（浮体式LNG生産・貯蔵・出荷設備）からLNG運搬船、LNG運搬船からFSRU（浮体式LNG貯蔵・再ガス化設備）、LNGバンカー船から天然ガス燃料船など、船舶間のLNG移送オペレーションに対するニーズが高まると考えられる。上記オペレーションをSide-by-Side係船にて実施する場合の安全性や稼働性評価では、2船の遮蔽影響を考慮した環境外力の推定が必要となる。風荷重に関して、Side-by-Side状態の2船を対象とした研究例はなく、本邦企業が進める船舶間のLNG移送オペレーションを伴う事業に対する安全性や稼働性の評価技術の確立への一助となる。

研究成果の概要（英文）：Using scale models of a PCC and a VLCC, which are assumed to be LNG fueled ships, and a coastal LNG ship, which is assumed to be a bunker ship, we conducted wind loads measurement tests acting on two ships in Side-by-Side arrangement assuming bunkering operation. Furthermore, we visualized wind field around those two ships by PIV analysis to understand the changes of shielding area and vorticity of the leeward side of the LNG fueled ship. Based on the hull shape of the LNG fueled ship and the relative distance between two ships, we investigated the tendency of the shielding effect acting on wind loads of the bunker ship, and we examined the estimation method of the wind loads acting on the bunker ship in Side-by-Side arrangement using wind loads acting on the single ship.

研究分野：船舶海洋工学

キーワード：風荷重 遮蔽影響 Side-by-Side LNGバンカリング 2船体

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

2020年からのSO<sub>x</sub>排出規制の強化やGHGゼロエミッションを目指すGHG削減戦略(2030年までに効率40%以上削減,2050年までに総排出量50%以上削減)といった国際海事機関(IMO)による環境規制が進められる中,SO<sub>x</sub>以外にCO<sub>2</sub>排出量も削減可能なLNG燃料と天然ガス燃料船の優位性が注目されている。今後の天然ガスの需要増加に伴い,FLNG(Floating LNG;浮体式LNG生産・貯蔵・出荷設備)からLNG運搬船,LNG運搬船からFSRU(Floating Storage and Regasification Unit;浮体式LNG貯蔵・再ガス化設備),LNGバンカー船から天然ガス燃料船など,船舶間でのLNG移送オペレーションに対するニーズが高まると考えられる。それらの安全性や稼働性を評価する場合,環境外力の推定精度が重要であり,上記オペレーションをSide-by-Side係船にて実施する場合には,相互の遮蔽影響を考慮した環境外力の推定が必要となる。しかしながら環境外力の一つである風荷重に関して,単船を対象とした研究は既に実施されているが<sup>例え1)</sup>,Side-by-Side係船された2船を対象とした研究例は見られない。

2. 研究の目的

本研究では,天然ガス燃料船とバンカー船が近接する状態(LNGバンカリングオペレーション時の状態)を対象として,船体周りの風速分布や可視化により下流側に位置する船体の遮蔽度を把握するとともに船体に作用する荷重に及ぼす影響を検討することで,2船体に作用する風荷重の簡易的な評価法を提案することを目的とする。

3. 研究の方法

天然ガス燃料船としてVLCC船型とPCC船型,バンカー船として内航LNG船型の計3隻の1/180縮尺模型を風洞試験用に製作し,単船時および天然ガス燃料船とバンカー船の近接時(Case 1:天然ガス燃料船とバンカー船の中心間距離がCase 2の2倍),バンカリングオペレーションを想定した天然ガス燃料船とバンカー船がSide-by-Side状態で接触した状態(Case 2:天然ガス燃料船とバンカー船の舷側間を実機スケールで3.9m(空気式フェンダーの直径相当))の3状態を対象として,船体に作用する風荷重と船体まわりの風場観測試験を行った。模型試験は国立研究開発法人海上・港湾・航空技術研究所海上技術安全研究所が所有する変動風水洞にて実施した。対象船の主要目を表1,模型の外観を図1に示す。模型は載荷状態に応じて乾舷高さを変更できるようにした。

風荷重計測試験では,図2に示すように変動風水洞の計測洞上流端から7.5mの位置に供試模型の相対風向を変化させるためのターンテーブル(直径1.8m)を設置し,その床面中心に6分力計(図中に示すLoad cell)を取り付けた。また,高さ調整のためのスペーサーを介して供試模型の中央(Midship)が6分力計のセンサーフランジ中心と一致するように模型を固定した。計測では相対風向を0から360degまで15deg刻みで変化させながら模型に作用する荷重(F<sub>x</sub>, F<sub>y</sub>, M<sub>x</sub>, M<sub>z</sub>の4成分)を計測し,6分力計からデータロガー(共和電業製EDX200A)を介してロガー制御用のノートPCにデータを転送した。その際,ロガーに内蔵されたデジタルフィルタにより10Hzのノイズ除去を行った。また,風荷重を計測する際の代表風速は,図2の右上(計測洞入り口,高さ約1.8m),風洞幅中心付近に設置した熱線風速計(カノマックス製アネモマスター)で計測した。なお,本試験では粗面板による境界層の修正は行っていない。

表1 対象船の主要目(実機スケール)

項目	PCC	VLCC	バンカー船
垂線間長 L <sub>pp</sub>	192.0 m	320.0 m	82.5 m
型幅 B <sub>mid</sub>	32.3 m	58.0 m	15.3 m
型深さ D <sub>mid</sub>	35.0 m	26.0 m	8.0 m
(満載状態)			
喫水 d	10.0 m	19.3 m	4.3 m
正面投影面積 A <sub>T</sub>	1,025.5 m <sup>2</sup>	1,292.4 m <sup>2</sup>	157.9 m <sup>2</sup>
側面投影面積 A <sub>L</sub>	5,685.8 m <sup>2</sup>	4,095.9 m <sup>2</sup>	582.4 m <sup>2</sup>
(軽荷状態)			
喫水 d	7.6 m	10.0 m	2.5 m
正面投影面積 A <sub>T</sub>	1,102.8 m <sup>2</sup>	1,831.8 m <sup>2</sup>	186.0 m <sup>2</sup>
側面投影面積 A <sub>L</sub>	6,152.3 m <sup>2</sup>	7,069.5 m <sup>2</sup>	734.1 m <sup>2</sup>

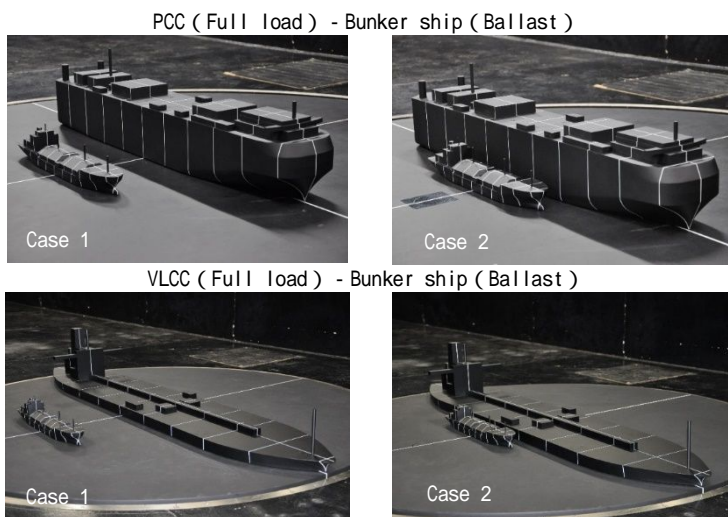


図1 供試模型の外観

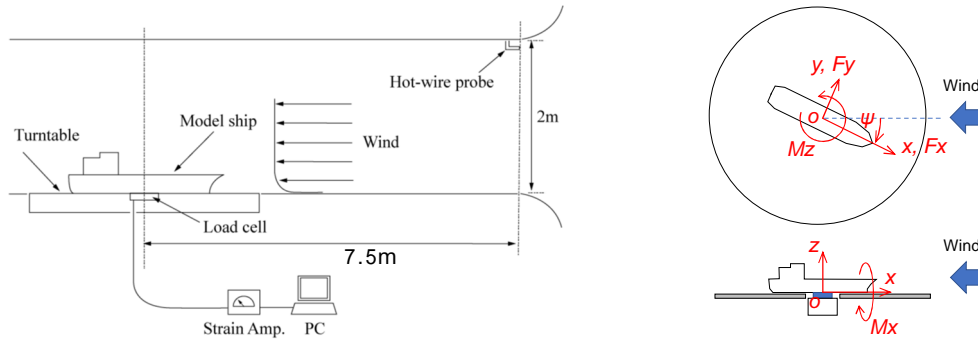


図2 風荷重計測試験の設営および座標系

全ての試験において 50 Hz のサンプリング周期で 30 秒間の計測を行い、前後 5 秒ずつをカットした 20 秒間のデータに対し、平均値解析を行った。計測した荷重は次式で無次元化を行い、風向と風荷重係数の関係を整理した。但し、 $\rho$ は空気密度、 $L_{OA}$ は全長、 $A_L/L_{OA}$ は模型の平均高さ、 $U$ は風速を表す。

$$C_{Fx} = \frac{F_x}{\frac{1}{2} \rho A_T U^2}, \quad C_{Fy} = \frac{F_y}{\frac{1}{2} \rho A_L U^2}, \quad C_{Mx} = \frac{M_x}{\frac{1}{2} \rho A_L \frac{A_L}{L_{OA}} U^2}, \quad C_{Mz} = \frac{M_z}{\frac{1}{2} \rho A_L L_{OA} U^2}$$

可視化試験では、2 船の乾舷差とそれに伴う遮蔽影響が大きくなるように、天然ガス燃料船の荷状態は軽荷状態、パンカー船は満載状態とした。可視化のためのトレーサーには内部にヘリウムガスを注入して浮力調整を行う直径約  $300 \mu\text{m}$  のソーブバブルを用いた。毎秒約 40,000 個噴出されるソーブバブルに所要の高さで CW レーザーのレーザーシート光を照射し、時々刻々のトレーサー粒子の動きを模型上部に設置したハイスピードカメラと 4K ハンディービデオカメラにて撮影した。計測時は 4K ハンディービデオカメラの撮影映像により 2 船体周りの風場を観測し、後処理としてハイスピードカメラで撮影したトレーサー粒子の画像を用いた PIV 解析により、2 船体周りの風場を可視化した。試験における風速は  $5 \text{ m/s}$  とし、風向は  $30, 45, 60, 90, 210, 225, 240, 270 \text{ deg}$  の 8 ケースとした。ハイスピードカメラは画角  $2,560 \times 1,680 \text{ pixel}$  の設定で、毎秒 1,000 フレームのスピードにて 5 sec 間の撮影 (1 ケース当たり 5,000 フレーム) を行った。図 3 に可視化試験の設営の様子を示す。

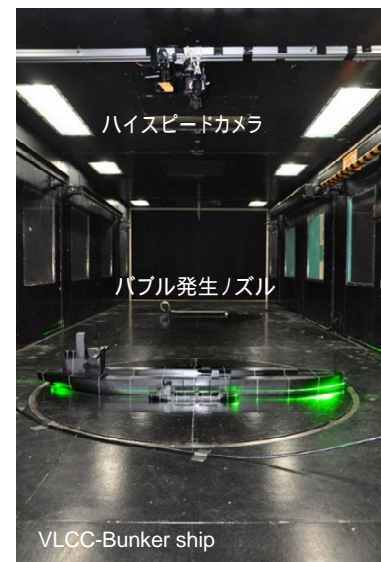


図3 可視化試験の設営

#### 4. 研究成果

図 4 に一例として、PCC とパンカー船の組み合わせに対する風荷重係数 ( $C_{Fy}, C_{Mz}$ ) の計測結果を示す。無次元化は 3. で示す式に従う。図の横軸は風向を表し、図中の○印が Case 1、△印

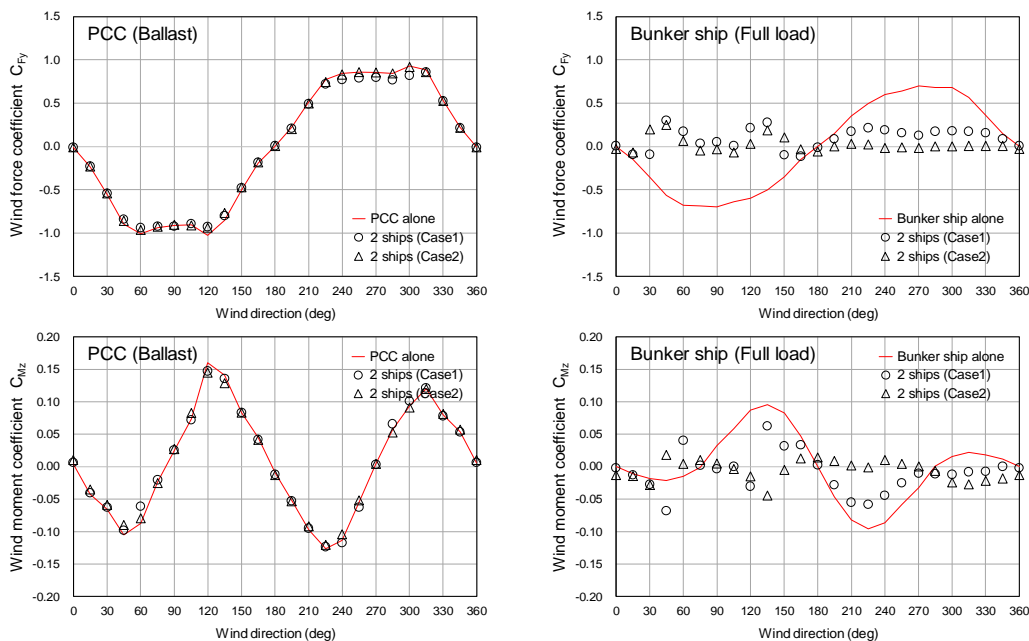


図4 風荷重係数の計測例 (PCC[軽荷]-パンカー船[満載])



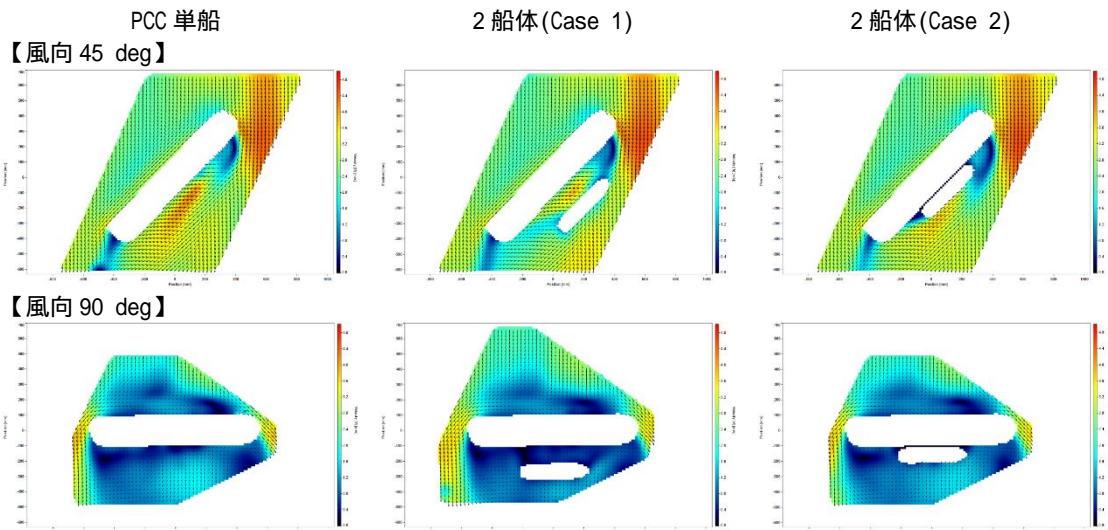


図5 PIV解析による平均風速分布の結果（PCC-バンカー船）

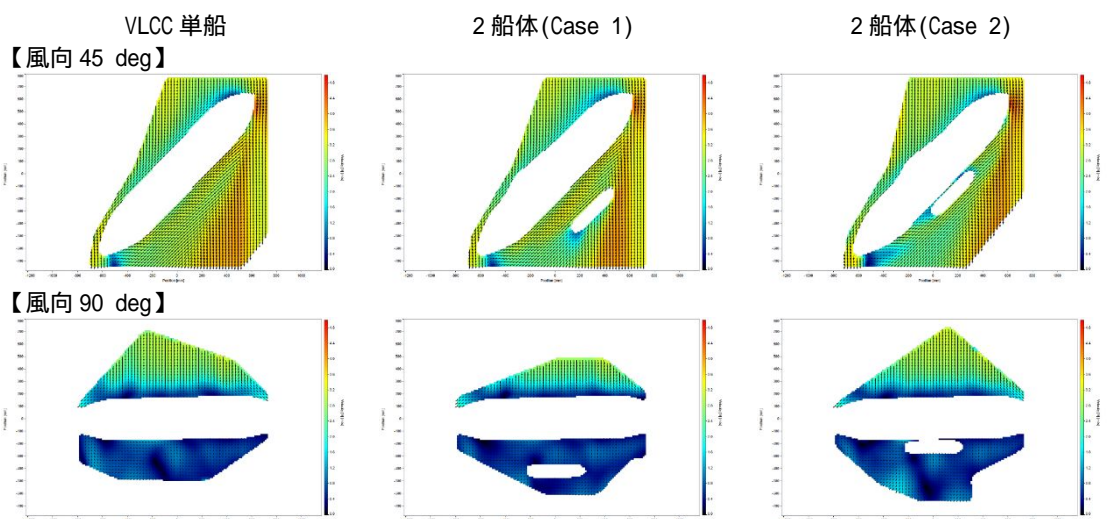


図6 PIV解析による平均風速分布の結果（VLCC-バンカー船）

が Case 2 での計測結果である。また、赤色の実線が単船による計測結果を示す。PCC や VLCC の単船での結果は、類似船型を扱った他の文献<sup>2), 3)</sup>との比較から妥当性を検討し、オーダーや傾向に大きな差がないことを確認した。結果を比較すると、PCC は満載状態、軽荷状態ともに単船の場合と 2 船体の場合で殆ど差が見られなかった。風上側あるいは風下側にバンカー船が位置していても、PCC に作用する風荷重は単船の場合と同等の結果となった。

一方、バンカー船に作用する荷重係数は、単船の場合に作用する風荷重係数に比べて傾向が大きく変わる。風向 $\psi$ が  $0 \sim 180$  deg では PCC の背後（風下側）にバンカー船が位置する状態であるが、特に Case 1 の場合、風向 $\psi$ が 45 deg と 120 deg 付近で風荷重係数 $C_{Fx}$ が大きくなり、 $C_{Fy}$  や  $C_{Mx}$  については、単船の場合とは逆向きの力やモーメントが発生した。風向 $\psi$ が  $75 \sim 105$  deg の範囲では、いずれの風荷重係数も凡そ 0 に近い（バンカー船には風荷重が作用しない）結果となっている。一方、風向 $\psi$ が  $180 \sim 360$  deg は PCC の風上側にバンカー船が位置する場合であるが、その状態でも単船に作用する荷重係数と傾向が異なることが分かる。風荷重係数 $C_{Fx}$  は単船の場合に比べて大きな差は見られなかったが、他の 3 成分については、PCC に対し側方距離が大きい Case 1 の場合、定性的には単船の状態と同様な傾向を示すが、定量的には半分程度の値となっている。また、側方距離が近い Case 2 では、風荷重係数 $C_{Fy}$  と  $C_{Mx}$  は凡そ 0 に近い値となった。風荷重係数 $C_{Mx}$  も風向 $\psi$ が  $180 \sim 270$  deg の範囲では凡そ 0 に近い値であるが、風向 $\psi$ が  $270 \sim 360$  deg の範囲で単船の場合とは逆向きのモーメントが作用することが分かった。

図5および図6に単船と2船体周りの風場に関する PIV 解析の結果を示す。図は風向が 45 deg と 90 deg の結果を示しており、計測した 5,000 フレームの粒子画像を元にした 5 sec 間の平均風速 $|\bar{V}|$ （単位：m/s）の分布を表している。風向は図中のベクトル、風速は色付けしたコンターで表示しており、青色が低速、赤色が高速を表す。例えば図5に示す PCC 単船の結果を見ると、船首尾端から風下方向へ低速域が発達しており、PCC の背面（風下側）に広範囲で  $0.4 \sim 2.8$  m/s 程度の低速域が生じている。PCC の乾舷が高いことが原因の一つと考えられるが、風向が 90 deg の場合では、PCC の背面に加えて前面（風上側）にも広い範囲で  $0.4$  m/s 程度の低速域が生じている様子が分かる。

2 船体 (Case 1) の結果を見ると, 風向が 45 deg の場合, 2 船間の Gap (隙間) にバンカー船背面 (風下側) に比べて若干速度の速い領域が生じている。また, 2 船間の Gap 内の風向ベクトルを見ると, バンカー船から PCC 方向へ向かう流れが作用しており, 船首より船尾側 (風下側) の風速の方がベクトルの長さが長く, 風速が速いことが分かる。また, 風向が 90 deg の場合では, PCC の背後 (風下側) あるいは正面 (風上側) に生じる低速域にバンカー船が位置し, 特に 90 deg では風の主流方向とは逆方向の風が船体に作用するとともに, バンカー船周りの風速は非常に小さくなっている。

2 船体 (Case 2) の結果を見ると, バンカー船は PCC に近接しているため, Case 1 の傾向に加えて, 風向が小さい 45 deg の場合でもバンカー船は PCC 周りに生じる低速域に位置する結果となっている。

これらの結果から, 2 船体の場合は風によってバンカー船には PCC へ近づく方向 (正の方向) の横力や船尾を PCC に近づける方向 (負の方向) の回頭モーメントが作用すると考えられ, 風向が 90 deg ではバンカー船に作用する風荷重自体が小さくなる。特に Case 2 ではバンカー船は PCC 近傍の低速域に位置することから, バンカー船に作用する風荷重そのものが非常に小さくなるものと考えられ, 図 4 に示す Side-by-Side 状態におけるバンカー船に作用する風荷重係数の傾向をうまく説明することができる。

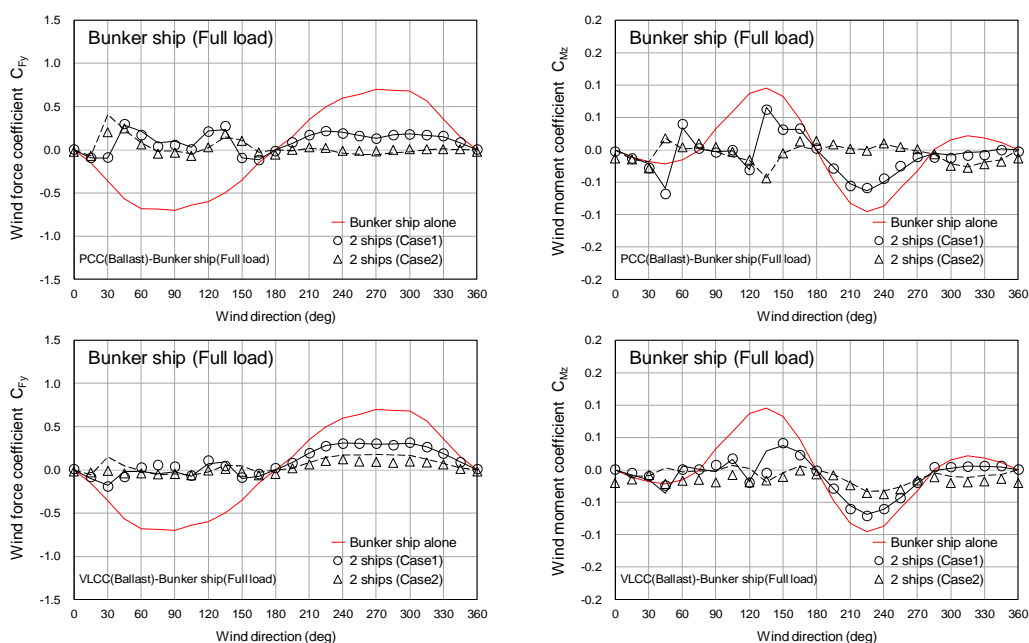


図 7 Side-by-Side 状態におけるバンカー船に作用する風荷重の評価

単船については幅広い船型に対する風荷重の簡易的な推定法が既に提案されており<sup>1)</sup>, 実用的にも十分な精度で推定することが可能である。従って, 本研究では単船時に作用する風荷重は既知として, 天然ガス燃料船の主要目やバンカー船との乾舷差 2 船の側方距離等に注目して Side-by-Side 係船時に対する補正手法について検討を行った。図 7 に PCC や VLCC と Side-by-Side 状態にある満載状態のバンカー船に作用する風荷重係数の評価結果の一例を示す。図中の○印や△印が計測結果, 対応する実線と破線がそれぞれ評価結果を示す。若干, 計測結果との間に差が生じている部分も見られるが, 単船時に比べてバンカー船に作用する荷重が小さいことと, 風向に対する荷重係数の定性的な変化は捉えられていると思われる。

< 引用文献 >

- 1) 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, 日本船舶海洋工学学会論文集 第 2 号, pp.243-255, 2005.
- 2) 桃木勉, 大西星輝, 池田良穂, 片山徹: PCC に働く風圧力特性に関する研究, 日本船舶海洋工学学会講演会論文集 第 7K 号, pp.53-56, 2008.
- 3) Oil Companies International Marine Forum (OCIMF): Mooring Equipment Guidelines 4rd Edition (MEG4), 2018.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計0件

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

Ship-to-Ship方式によるバンカリングオペレーションにおける安全性・稼働性評価に関する研究  
[https://www.nmri.go.jp/study/research\\_organization/ocean/research8\\_1/8\\_1\\_2.html](https://www.nmri.go.jp/study/research_organization/ocean/research8_1/8_1_2.html)  
 「バンカリング時における2船体周りの風場観測試験」を公開（結果報告）  
[https://www.nmri.go.jp/news/another\\_news/news20220330.html](https://www.nmri.go.jp/news/another_news/news20220330.html)

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	長谷川 賢太  (Hasegawa Kenta)  (20772130)	国立研究開発法人海上・港湾・航空技術研究所・その他部局等・研究員   (82627)	
研究分担者	石田 圭  (Ishida Kei)  (60636827)	国立研究開発法人海上・港湾・航空技術研究所・その他部局等・研究員   (82627)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------