

4 走錨リスク判定システムの開発

宮崎 英樹*, 河村 昂軌*, 柳 裕一郎*, 鈴木 良介*
渡邊 充史**, 長谷川賢太**, 石田 圭**, 齊藤 昌勝**
佐藤 宏**, 湯川 和浩**, 田口 晴邦*

Development of Support System for Selecting Appropriate Anchoring Method and the Anchorage Area

by

MIYAZAKI Hideki, KAWAMURA Koki, YANAGI Yuichiro, SUZUKI Ryosuke
WATANABE Mitsushi, HASEGAWA Kenta, ISHIDA Kei, SAITO Masakatsu
SATO Hiroshi, YUKAWA Kazuhiro and TAGUCHI Harukuni

Abstract

A tendency to increase includes the number of typhoons to strike Japan. Ships typically avoid typhoons by moving away from the course of the storm in advance. However, when it is difficult to avoid, ships anchor in a port or bay. When a ship is anchored during a typhoon and strong wind, a slewing motion can occur and cause extreme tension in the anchor chain. When the tension exceeds the maximum mooring force of the anchor and the chain, the anchor is at risk of being dragged. To prevent marine accidents caused by the dragging anchor, we developed a support system for selecting the appropriate anchoring method and anchorage area. The slewing motion is numerically simulated taking into account hydrodynamic forces, wave drift force, and wind load, and then the anchor chain tension during slewing and the maximum mooring force are compared. In this paper, we introduce this support system and found that the simulation results and experimental results showed good agreement.

* 流体性能評価系, ** 海洋開発系

原稿受付 令和3年5月20日

審査日 令和3年6月15日

1. はじめに

2018年9月に台風21号が非常に強い勢力を保ったまま神戸市付近に上陸した際に、1隻のタンカーが関西国際空港の連絡橋に衝突し、同空港へのアクセスが遮断された。また、翌年の台風15号が横浜市付近を通過した際に一般貨物船が走錨して南本牧コンテナターミナルと首都高速湾岸線を直結する臨港道路の橋梁に衝突し、この道路は通行止めとなった。このように走錨が原因と考えられる海難事故が続いている。

そこで国土交通省海事局の「走錨リスク判定システムの確立のための調査事業」として、走錨による海難事故を防止するために適切な錨泊方法や錨泊地の選定を支援する「走錨リスク判定システム」の開発を行った。

2. 走錨リスク判定システムの開発

本システムは船舶情報や錨泊地情報、気象・海象情報を入力データとして、走錨リスクの判定を行うものである。走錨リスクの判定は入力データを基に錨泊中の船体の振り回り運動のシミュレーション計算を行って、振り回り運動中に生じる錨鎖張力と錨・錨鎖で確保される最大係駐力を比較することで行っている。入力データの項目を表2.1に示す。

表2.1 入力データ

船舶情報	船長、船幅、型深さ、喫水、風圧面積、錨重量、錨鎖の長さ、錨鎖の単位長さ当たりの重量、プロペラ要目 など
錨泊地情報	水深、底質
気象・海象情報	風速・風向、波高・波向・波周期

このうち、船舶情報は事前の入力が可能で、それ以外の項目については本システムを使用する度に入力することを想定している。また、利用者の利便性を考慮して、代表的な船型の船舶情報に該当する入力データを別途用意している。利用者は自船に該当する船舶または類似の船舶のデータを選択して、自船のデータを上書きすることで自船用のデータを作成することも可能である。

2.1 運動方程式

本システム内で行っている錨泊中の振り回り運動の推定に用いる運動方程式は、水平面内の3自由度の船体運動(前後・左右・回頭運動)を対象としたものである。

図2.1に示す座標系における水平面内の船体運動を表す運動方程式は(1)式のように表した。

$$\left. \begin{aligned} (m + m_x)\dot{u} - (m + m_y)vr &= X \\ (m + m_y)\dot{v} - (m + m_x)ur &= Y \\ (I_{zz} + J_{zz})\dot{r} &= N \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

ここで、

- u, v, r : 船速 U の x, y 軸方向成分及び回頭角速度
- m, m_x, m_y : 船の質量及び x, y 軸方向の付加質量
- I_{zz}, J_{zz} : 重心まわりの回頭運動に関する慣性モーメント及び付加慣性モーメント
- X, Y, N : 船体に作用する外力の x, y 軸方向成分ならびに回頭モーメント

(1)式の右辺の外力は以下のような成分を考慮した。

$$\left. \begin{aligned} X &= X_H + X_P + X_A + X_W + X_T \\ Y &= Y_H + Y_A + Y_W + Y_T \\ N &= N_H + N_A + N_W + N_T \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

ここで、添字の H, P, A, W, T はそれぞれ船体に作用する流体力、プロペラ推力、風圧力、波漂流力及び錨鎖の張力を表している。なお、本計算においては、舵力については考慮していない。また、水平面内での船体運動のみを取り扱っているので、ピッチングやヒービング、ローリングによる錨鎖への影響は考慮していない。

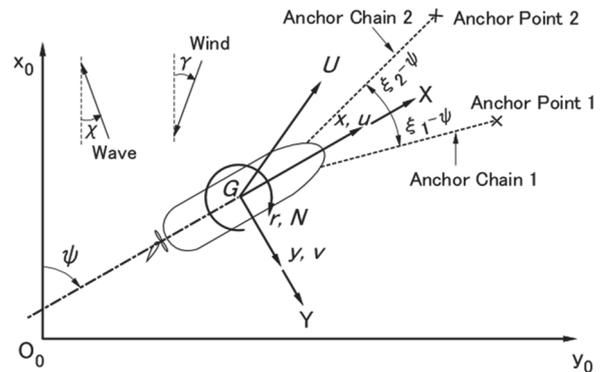


図2.1 座標系

2.2 各種外力の表現

① 船体に作用する操縦流体力

船体に作用する操縦流体力 X_H は、これまでに実施した標準的な瘦せ型船型及び肥大船型の抵抗試験結果を適用して推定している。また Y_H, N_H は、高品¹⁾により提案された低速時操縦運動の数学モデルを適用している。

② プロペラ推力

プロペラ推力はMAUプロペラの単独性能の多項式近似を用いて推定を行っている。推定に必要なデータは「船舶情報」で入力される、

③ 風圧力

船体に働く風圧力係数は藤原ら²⁾により提案された推定式を用いて推定している。風圧力の推定に必要なデータは「船体情報」で入力される。

④ 波漂流力

波漂流力は上野ら³⁾により構築された停船時の波漂流力データベースを参照している。本データベースは事前に入手可能な船型情報を使用してタンカー、コンテナ船、PCC、貨物船及び漁船を対象とした計算を行い、データベースを構築した。構築されたデータベースから船長船幅比や幅喫水比、船種をパラメータとして推定を行っている。

⑤ 錨鎖張力

2本の錨鎖の張力 $T_i (i=1,2)$ は貴島⁴⁾ が用いた推定手法を用いた。本推定法では錨鎖はアンカー位置とベルマウス位置を通る鉛直面内に存在するものと仮定した。この仮定の下で船舶に作用する錨鎖の張力以外の外力が錨鎖の張力と釣り合うと仮定すると、単錨泊の場合の錨鎖張力の水平面内成分 T は(3)式のように表すことができる。

$$T = -(X_H + X_P + X_A + X_W) \cos(\xi_1 - \psi) - (Y_H + Y_A + Y_W) \sin(\xi_1 - \psi) \quad (3)$$

ここで、 ξ_i は錨鎖 i と空間固定座標系の x_0 軸がなす角度、 ψ は回頭角である。このとき、錨鎖の張力 T_i の x, y 軸方向成分 X_T, Y_T 及び錨鎖の張力によって船体に作用するモーメント N_T は(4)式により表される。

$$\left. \begin{aligned} X_T &= \sum_i^2 T_i \cos(\xi_i - \psi) = \sum_i^2 T_{ix} \\ Y_T &= \sum_i^2 T_i \sin(\xi_i - \psi) = \sum_i^2 T_{iy} \\ N_T &= \sum_i^2 (-T_{ix} \cdot y_{bi} + T_{iy} \cdot x_{bi}) \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

ここで x_b, y_b は船体固定座標系 $G-xy$ におけるベルマウスの座標である。

2.3 暫定版システムの試用

本システムの使い勝手や入・出力項目、判定結果の妥当性を検証するため、内航船の船員の方々にて試用して貰うこととした。図2.2に暫定版システムの起動画面を、図2.3に暫定

版システムの出力画面を示す。

国土交通省海事局のご協力により、内航船の運航会社4社にて試用して頂けることとなった。試用して頂いた船舶は15隻で、船種や総トン数などの異なる船舶を対象とした。試用期間は2020年8月下旬から11月中旬までとした。船員の方々から寄せられたアンケート結果を基に本システムの改良を行った。



図2.2 暫定版システムの起動画面

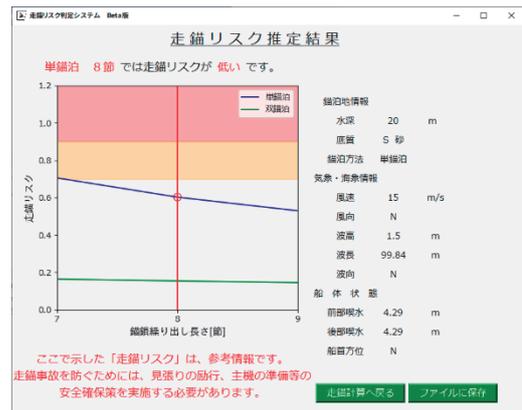


図2.3 暫定版システムの出力画面

3. 水槽実験

本システムの推定精度の向上を図るために、また、推定精度を検証するために水槽実験を行った。

3.1 供試模型

表3.1 供試模型の主要目

	内航フェリー模型	内航タンカー模型
垂線間距離 (m)	2.78	2.87
船幅 (m)	0.52	0.53
喫水 (m)	0.14	0.15
排水容積 (m³)	0.126	0.164
風圧側面積 (m²)	1.02	0.64
模型スケール	1/36	1/30

錨泊中の船体に働く外力のうち、走錨に至る影響の大きいものは風圧力と波漂流力と考えられる。風圧力は水面上の風圧面積と相関があり、波漂流力は水面下の肥大度と相関がある。そこで供試模型は、風圧面積の大きい内航フェリーと水面下の肥大度の大きい内航タンカーの2隻とした。供試模型の主要目を表3.1に示す。

3.2 操縦流体力の計測

錨泊中の振り回り運動を想定した船体に働く操縦流体力の計測を行った。計測は海洋構造物試験水槽を用いて行った。

実験は抵抗・斜航試験などを行った。また、錨泊中の振り回り運動は前進速度よりも横流れ速度の方が支配的となるため、高品¹⁾が行ったその場回頭試験とYaw Rotating Testも行った。計測項目は船体に働く流体力(前後力・左右力と回頭モーメント)とプロペラ推力、舵力である。

内航タンカー模型を用いた斜航試験時の横力の計測結果を図3.1に示す。横軸が斜航角で、縦軸が横力の無次元値である。図中のオレンジ線は調和解析により求めたフーリエ係数の主要な項を用いて近似したものを示している。

本計測で得られた操縦流体力の近似式は、本システム内に反映している。

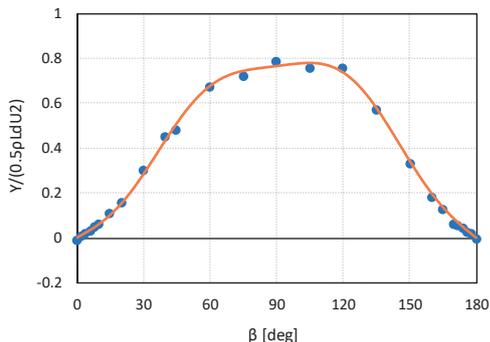


図3.1 横力の計測結果(斜航試験, 内航タンカー模型)

3.3 停船時の波漂流力の計測

錨泊中の船体に働く波漂流力の計測を行った。計測は実海域再現水槽で行った。

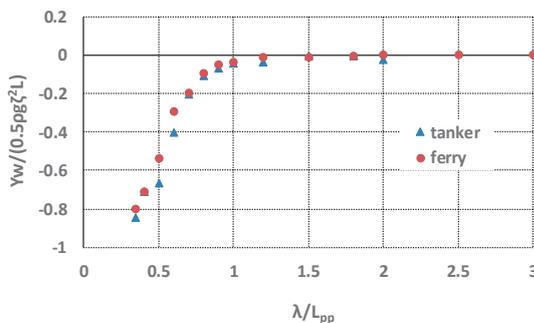


図3.2 波漂流力の計測(出会い角120度)

実験は波による船体動揺を出来るだけ抑制せず、船体に働く流体力を計測することが可能な波力測定装置を用いて計測を行った。計測項目は船体動揺(縦揺れ・横揺れ・船首揺れ、前後揺れ・左右揺れ・上下揺れ)と船体に働く波漂流力(前後力・左右力・回頭モーメント)である。

内航フェリー模型及び内航タンカー模型を用いた波漂流力の横力の計測結果を図3.2に示す。横軸が波長船長比で、縦軸が横力の無次元値である。図中のオレンジ線がフェリー模型で、青線がタンカー模型の計測結果を示している。波長船長比が1.5以上の範囲では船型による違いは少ないが、それよりも小さい範囲では内航タンカー船型の方が内航フェリーよりも大きな絶対値となっている。

3.4 プロペラ単独性能の計測

船体に働く錨鎖張力を緩和する対策の一つとして、プロペラを作動させる手法がある。供試模型用に製作した2枚のプロペラの単独性能の計測を行った。計測結果を用いて本システム内で使用している多項式近似の妥当性の確認を行った。

3.5 錨泊時の振り回り運動の計測

本システムの妥当性を検証するために、風・波中錨泊時の振り回り運動の計測を行った。計測は錨泊時の水深に近い状態が再現可能な海洋構造物試験水槽で行った。

風圧力は当所で開発した風荷重模擬装置⁵⁾を用いて与え、船体の航跡は走行副台車が模型船を自動追尾することで計測し、船体動揺は走行副台車に取り付けたモーションキャプチャーシステムを用いて計測した。また、船体に働く錨鎖張力は模型船に取り付けた検力計で計測し、錨の位置での張力は水槽の底に設置した検力計で計測を行った。さらに、水中での錨鎖の挙動は水中に設置したCCDカメラを用いて撮影し、撮影された画像を画像解析することで求めた。

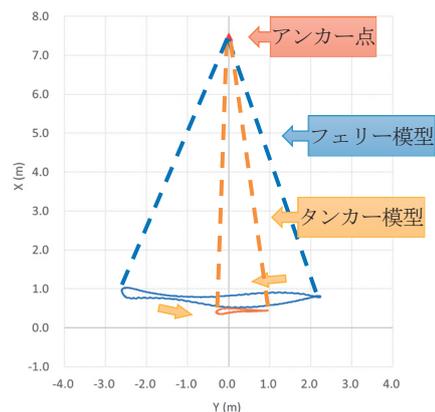


図3.3 振り回り運動時の航跡の比較(単錨泊)

水槽実験は内航フェリー模型及び内航タンカー模型を用いて、錨泊方法や外力条件による影響、主機やサイドスラスターの使用による抑制手法の効果の計測を行った。

外力条件の近い状態での内航フェリー模型と内航タンカ

一模型の航跡の比較を図3.3に示す。図中の青線が内航フェリー模型の航跡で、オレンジ線が内航タンカー模型の航跡を示している。

本水槽実験は「波・風中の錨泊船の振れ回り運動に関する水槽実験」として、令和2年9月18日に公開実験として配信した。

4. 走錨リスク判定システムの検証

上記水槽実験で取得した操縦流体力や波漂流力などを用いてシミュレーション計算を行い、錨泊中の振れ回り運動の計測結果と比較することで本システムの推定精度の検証を行った。

4.1 錨鎖張力の計算法の変更

暫定版システムでは船舶に作用する錨鎖の張力以外の外力が錨鎖の張力と釣り合うと仮定するモデルを使用していたが、庄司⁶⁾により提案された錨鎖の伸びを考慮したカタナリー近似を適用することとした。錨鎖張力は(5)式のように表される。

$$\left. \begin{aligned} S &= \frac{T_0}{W} \sinh \frac{W}{T_0} \left(X - \frac{T_0 S}{EA} \right) \\ T_x &= T_0, \quad T_z = WS, \quad T = \sqrt{T_x^2 + T_z^2} \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

ここで、 S は錨鎖長さ A は錨鎖断面積、 E は錨鎖のヤング率、 W は錨鎖の単位長さ当たりの水中重量、 T_0 は水底固定点での張力である。

この式の解法に(6)式の近似を適用する。

$$\sinh^{-1} X = X - \frac{X^3}{6}, \quad \sqrt{1+X^2} = 1 + \frac{1}{2} X^2 \quad (6)$$

4.2 内航フェリー模型の比較

検証で用いた計測条件を表4.1に示す。水槽実験は規則波中で行った。

表4.1 計測条件（錨泊方法：単錨泊）

波高 (cm)	波周期 (s)	風速 (m/s)	錨鎖長 (m)
4.5	1.36	0.417	6

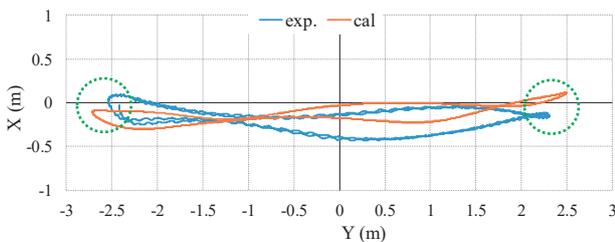


図4.1 振れ回り運動中の航跡の比較

水槽実験で計測された模型船の重心位置の航跡と本シス

テムの推定結果の比較を図4.1に示す。縦軸と横軸はそれぞれの実測値を表している。青線が計測値で、オレンジ線が推定結果となる。推定結果は定常状態になった箇所を抽出している。

計測結果及び推定結果ともに振れ回り運動の左右方向の振幅は2.5m程度となっている。また、本計測では左舷側の錨鎖を使用しているため、航跡は一般的な八の字の形にはなっていない。これについては推定結果でも同様の傾向が表れている。振れ回り運動の前後方向の振幅は計測結果の方が僅かに小さくなっているが、良好な結果が得られている。

水槽実験で計測された錨鎖張力（水平面合力）と本システムの推定結果の比較を図4.2に示す。縦軸は錨鎖張力を横軸は時間を表している。青線が計測値で、オレンジ線が推定結果となる。推定結果は定常状態になった箇所を抽出している。

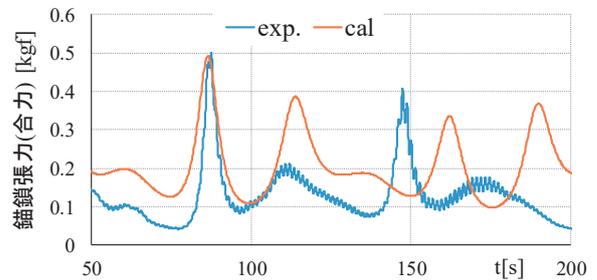


図4.2 振れ回り運動中の錨鎖張力の比較

錨鎖張力の最大値は船体が航跡の左右端で切り返す付近（図4.1の緑破線の位置）で生じる。本計測では航跡の右端で船首方位角が最大となる時に最大錨鎖張力が生じている。本計測では左舷側の錨鎖を使って単錨泊を行っているため、その影響と考えられる。同じように航跡の左端で船首方位角が最大となる付近で大きな値が計測されていて、推定結果でも周期の違いで少し遅れて生じているがほぼ同様の値となっている。また、110秒過ぎに錨鎖張力が大きくなっている箇所がある。これは船首方位角の変化（回頭角速度）が大きくなり始めた箇所が生じており、これは計測結果でも確認できる。本システムの推定値の最大値は計測結果の最大値と同等な値となっており、良好な結果が得られている。

4.3 内航タンカー模型の比較

検証で用いた計測条件を表4.2に示す。水槽実験は規則波中で行った。

表4.2 計測条件（錨泊方法：双錨泊、開き角：30度）

波高 (cm)	波周期 (s)	風速 (m/s)	錨鎖長 (m)
6.1	0.847	0.667	6

双錨泊時の水槽実験で計測された模型船の重心位置の航跡と本システムの推定結果の比較を図4.3に示す。縦軸と横軸はそれぞれの実測値を表している。青線が計測値で、オレ

ンジ線が推定結果となる。推定結果は定常状態になった箇所を抽出している。

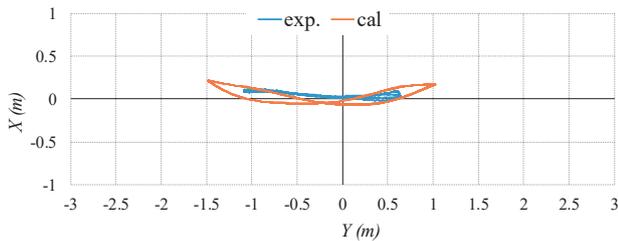


図 4.3 振れ回り運動中の航跡の比較

振れ回り運動の左右方向の振幅は推定結果の方が計測結果よりも僅かに大きな値となっている。振れ回り運動の前後方向の振幅も僅かに大きな値となっているが、良好な結果が得られている。

水槽実験で計測された錨鎖張力(水平面合力)と本システムの推定結果の比較を図 4.4 に示す。縦軸は錨鎖張力を横軸は時間を表している。青線が計測値で、オレンジ線が推定結果となる。推定結果は中で定常状態になった箇所を抽出している。また、計測結果と比較し易くするために、左舷側の計測結果のみを示している。

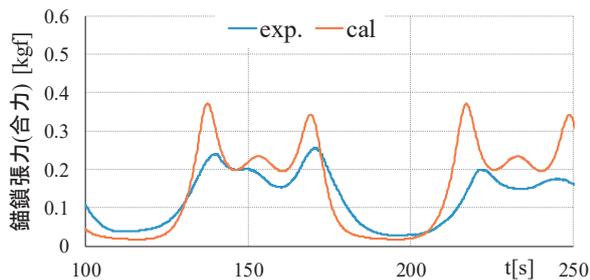


図 4.4 振れ回り運動中の錨鎖張力の比較

双錨泊の場合は錨と船体との相対位置の関係で、一方の錨鎖張力が大きくなり、他方の錨鎖張力は小さくなる。本計測では船体が航跡の左端から右端へ移動する際に左舷側の錨鎖張力が大きくなっている。計測結果では双錨泊時の最大錨鎖張力は単錨泊時の8割程度となっているが、推定結果では9割程度の値となっている。これは航跡の左右端での切り返しの際の回頭角速度が多少大きく推定されているためと考えられる。錨鎖張力が多少大きく推定されているために、航跡の前後方向の振幅が大きくなっていると考えられる。双錨泊の場合は、本システムの推定結果の最大値が計測結果を上回っており、本システムは安全側に評価されている。

5. まとめ

走錨による海難事故を防止するために、適切な錨泊地の選定を支援する「走錨リスク判定システム」の開発を行った。

本システムの推定精度の向上を図るために内航船の代表的な瘦せ型船型と肥大船型の模型船を製作し、本システム内

で用いている運動方程式の外力項の計測を行った。また、本システムの検証用に錨泊中の振れ回り運動の計測を行った。

シミュレーション結果と水槽実験結果との比較により、本システム内で用いている運動方程式の外力項が適切に推定出来れば、錨泊中の振れ回り運動を実用的にシミュレーション出来ることが確認された。今後は本システムを活用して、走錨を回避するための適切な錨泊方法の検討を行う予定である。また、プロペラやサイドスラスターなどを使用して走錨を回避するための適切な操船方法についても検討を行う予定である。

本システムは暫定版の試用による船員の方々のご意見を反映して、PC版とWeb版のリリースを行った。本システムが数多くの船舶で使用して頂き、走錨による海難事故の防止に役立つことを期待している。

謝辞

本研究は、国土交通省海事局の「走錨リスク判定システムの確立のための調査事業」として実施しました。関係各位に深く感謝申し上げます。

References

- 1) Junshi Takashina : Ship Maneuvering Motion due to Tugboats and Its Mathematical Model, Journal of the Society of Naval Architects of Japna, Vol. 160, 1986, pp.98-1028 (in Japanese).
- 2) Toshifumi Fujiwara, Michio Ueno and Yoshiho Ikeda : A New Estimation Method of Wind Forces and Moments acting on Ship on the basis of Physical Component Models, Journal of Japan Association of Naval Architects and Ocean Engineers, Vol.2, 2005, pp. 243-255 (in Japanese).
- 3) Michio Ueno, Shigeo Ohmatsu and Sadayoshi Chiaki : Estimation Program for Steady Wave Loads on Ships at Zero Forward Speed Using Database, Papers of National Maritime Research Institute, Vol.16, No.3, 2006, pp.43-52
- 4) Katsuro Kijima : Study of anchorage of Domestic Ships under typhoons, Collection of Marine Accident Analysis of Marine Accident Inquiry Agency, No.6, 2006, pp.88-99 (in Japanese).
- 5) Yoshiaki Tsukada, Ryosuke Suzuki and Michio Ueno : Development of a Wind Loads Simulator and Free-running Model Ship Tests in Actual Sea Conditions, Papers of National Maritime Research Institute, Vol.17, No.3, 2017, pp.167-185 (in Japanese).
- 6) Kuniaki Shioji, Study on the Motion of a Moored Body and the Tension of Mooring Lines, Journal of the Society of Naval Architects of Japan, Vol. 138, 1975, pp. 233-246 (in Japanese).