

1J15 ロケット回収用船舶における 船体動揺が着陸条件に及ぼす影響に関する考察

○小知井秀馬（日本郵船株式会社，株式会社 MTI），
松下凜太郎， Sreenath Subramaniam（株式会社 MTI），松谷広，今井源太（三菱重工業株式会社），
山口真，寿賀大輔（日本郵船株式会社）

Study on the Effect of Ship Motion for Landing Conditions in Rocket Recovery Vessels
Shuma Kochii (NYK Line, Monohakobi Technology Institute),
Rintaro Matsushita, Sreenath Subramaniam (Monohakobi Technology Institute),
Hiroshi Matsutani, Genta Imai (Mitsubishi Heavy Industries), Makoto Yamaguchi, Daisuke Suga (NYK Line)

Key Words: Rocket Recovery Vessels, Reusable Rocket, Ship Motion Analysis, Offshore Landing Condition

Abstract

In order to reduce the cost of space transportation systems, it has become urgent to develop the 'ocean recovery system', which involves using 'reusable rockets' and a 'recovery vessel' at sea. However, concerns have been raised that the motion of the recovery vessel may affect the landing conditions of the rocket. Therefore, we conducted a three-dimensional motion analysis of the vessel using the boundary element method and analyzed the motion conditions at each point on the recovery deck when motion is coupled, and organized the results into a displacement map in this paper. This enabled us to define parameters for evaluating the vertical movement of the deck relative to the rocket, as well as providing insight into calculating optimal heading command values for vessels to achieve optimal landing conditions.

1. 緒言

近年，宇宙輸送市場における国際競争力を確保するためには，宇宙輸送システムの高頻度化および低コスト化が急務となっており，ロケットの再利用に関する研究開発や実証が盛んに行われている．我が国においては，次期基幹ロケットとして再使用型が構想されており，宇宙輸送の技術ロードマップでは2030～2040年頃までの主要マイルストーンとして位置づけられている¹⁾．

国土面積が限られた日本における再使用型ロケット開発の特徴としては，広大な太平洋を活用した洋上回収船の開発が有効である点が挙げられる．こうした背景を踏まえ，筆者らは JAXA の宇宙戦略基金事業「将来輸送に向けた地上系基盤技術」における(A)再使用機体の回収系に係る地上系基盤技術開発に応募・採択され，ロケット洋上回収システムの要素技術構築を進めている²⁾．

2. 研究課題

前記した再使用型ロケットの洋上回収システム開発では複数の開発テーマを掲げているが，とりわけ動揺する回収船にロケットを安定して着陸させるた

めの機体捕獲システムは重要な要素技術の一つである．機体捕獲システムでは，風や波といった海気象に曝された状況下で，図1に示すように定点保持している回収船の甲板へロケットを相対誘導し，着船させる必要がある．そのため，ロケットと船側それぞれのシステム間における相互作用を考慮し，多様な条件下で性能評価を実施することが不可欠である．

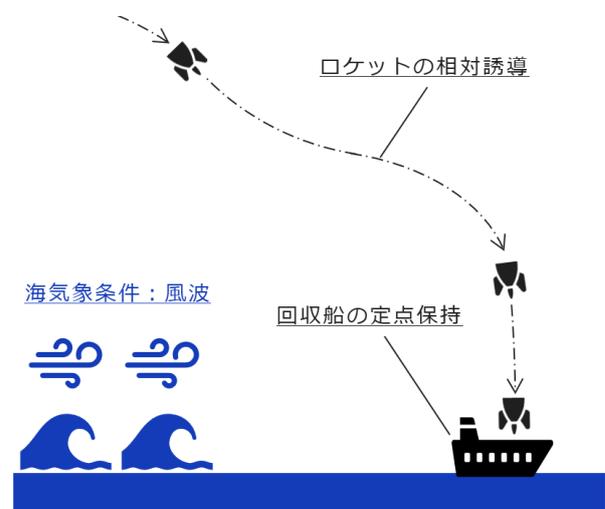


図1 機体捕獲システムの概要

上記に対し有力な先行研究として、松井ら³⁾はセットベース設計手法を用いて着陸安定解集合の探索を実施している。当該研究では、設計者が自由に制御できない因子を誤差要因として設定し、安定着陸に向けた検討および評価を行っており、洋上回収船の動揺も着陸条件に影響を及ぼす因子として定義されている。一般的に、船舶の動揺性能解析では、本船の推進方向を x 軸、上方向を z 軸とする右手座標系を定義し、浮力による復元力が作用する x 軸および y 軸周りの動揺 (Roll, Pitch) と、 z 軸方向の動揺 (Heave) について、それぞれ独立に評価する。

一方で、洋上回収船の場合、ロケットが甲板上のいずれかの地点に着船することから、上記の各軸揺れが複合して上下方向の変動をもたらすことが想定され、通常の分析では十分に考慮されない要因や影響が生じる懸念がある。そこで本研究では、回収船の各動揺が連成した際に着陸甲板の上下変動へ及ぼす影響を調査し、ロケット着船時における設定条件の評価手法を検討した。

3. 解析手法

本研究における解析方法としては、下記に説明するように動揺解析・動揺の連成解析・甲板変位マップの作成という三つのプロセスに大別される。なお、解析条件として、 $L \times B \times d = 152 \text{ [m]} \times 38 \text{ [m]} \times 4 \text{ [m]}$ である回収船を想定し、動揺解析では計算の簡易化のため上記寸法の箱型形状に近似している。

3-1 動揺解析

動揺解析においては数値計算手法として有限体積法や有限要素法が挙げられるが、本研究では計算効率に優れ波作用下において 3 次元での動揺解析が可能な境界要素法⁴⁾を用いて計算を実施した。

本解析により、波周期と波高、波向を与えた際の動揺特性 (振幅および位相遅れ) を算出できる。図 2 には解析例として、波向 60 [deg.] 、波高 1 [m] の波に回収船が遭遇した場合の、各波周期に対する Roll 回転における振幅および位相遅れの応答を示す。上記の動揺計算結果に対して、下記式を用いることで図 3 に示すように、Roll / Pitch / Heave の各軸における時間応答としての動揺特性を導出した。

$$\phi(t) = A_\phi \cdot \sin(\omega t + \alpha_\phi) \quad (1)$$

$$\theta(t) = A_\theta \cdot \sin(\omega t + \alpha_\theta) \quad (2)$$

$$z(t) = A_z \cdot \sin(\omega t + \alpha_z) \quad (3)$$

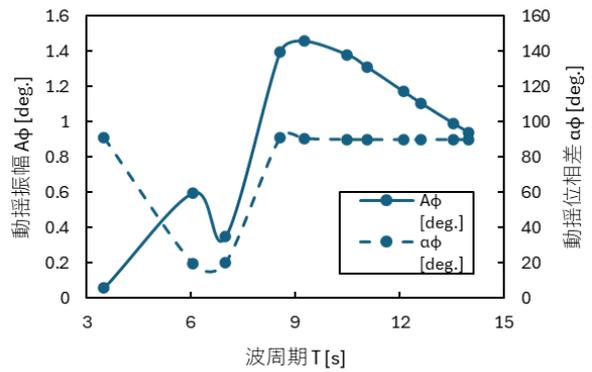


図 2 動揺特性の解析結果例 (動揺振幅 / 位相)

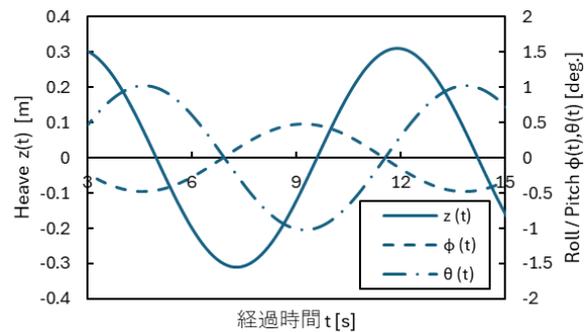


図 3 各軸での独立した動揺特性

ここで、上式において $\phi \text{ [deg.]}$ 、 $\theta \text{ [deg.]}$ 、 $z \text{ [m]}$ はそれぞれ Roll / Pitch / Heave の各軸における動揺であり、 A_{axis} と α_{axis} は動揺解析から算出される添字軸に関する動揺振幅と位相差、 $\omega \text{ [deg./sec]}$ は波周期であり、 $t \text{ [sec]}$ は経過時間である。

3-2 動揺の連成解析

動揺の連成解析においては、動揺解析によって得られた Roll / Pitch 揺れを考慮し、甲板上の各点において結果として複合的に生じる z 軸方向の並進揺れを算出する。まず、経過時間に応じて Roll および Pitch の揺れにより甲板上の法線ベクトル \mathbf{n} は以下のように変化する。

$$\mathbf{n}(t) = \begin{bmatrix} n_x \\ n_y \\ n_z \end{bmatrix} = R_y(\theta) R_x(\phi) \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sin(\theta) \cos(\phi) \\ -\sin(\phi) \\ \cos(\theta) \cos(\phi) \end{bmatrix} \quad (4)$$

ここで、 R_{axis} は添字軸周りの回転行列を表し、 ϕ および θ は前述の式(1)、(2)より算出される時間 t の関数である。次に、回収船の回転中心を原点とし、甲板の xy 平面上に設定した二次元格子点に対して、甲板表面の各点における正味の Heave 揺れ z_{net} を算出する。

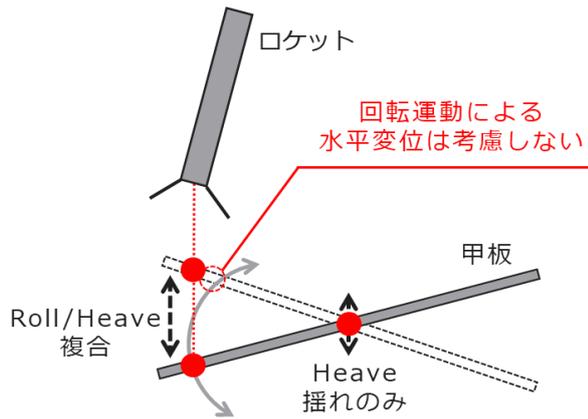
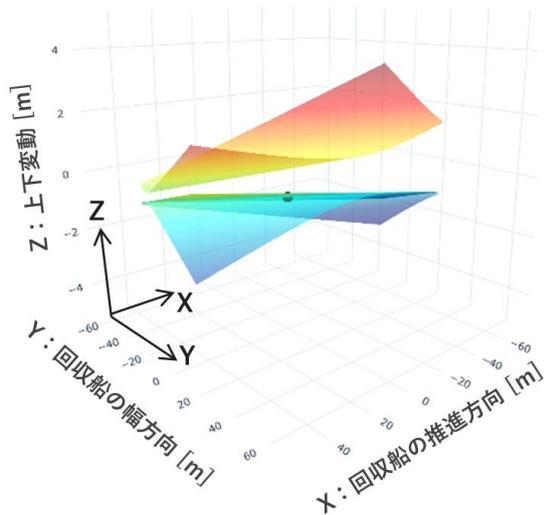
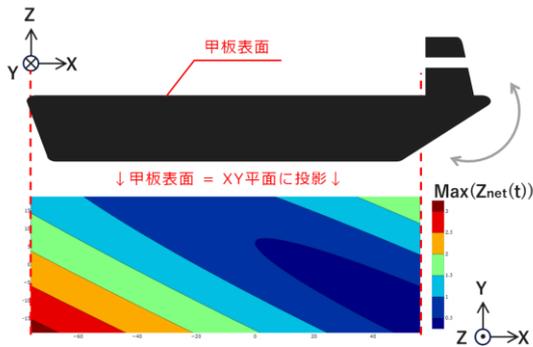


図4 各軸の振動が複合した Heave 揺れ



(a) 甲板の最大動揺変位に関する解析結果例



(b) 甲板変位マップの定義

図5 Roll / Pitch / Heave 動揺の連成解析

法線ベクトルと平面に水平なベクトルが直交する条件から、甲板上の各格子点における正味の z 軸方向変位 z_{net} は式(4)を用いて下記の様に求まる。

$$z_{net}(t) = z + \frac{z_M - i \cdot n_x - j \cdot n_y}{n_z} = z + \frac{z_M - i \cdot \sin(\theta) \cos(\phi) + j \cdot \sin(\phi)}{\cos(\theta) \cos(\phi)} \quad (5)$$

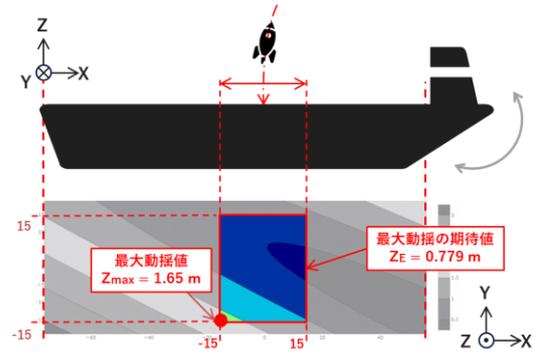


図6 着陸条件の評価値

ここで、 z は式(3)より求める Heave 振動を、 z_M は原点(本船の回転中心、本稿では仮に箱型の中心と仮定)から甲板表面までの z 軸方向変位であり、値は 2 [m] とする。 i および j は甲板表面に設定した各格子点の x および y 座標である。なお、甲板表面に注目すると、Roll および Pitch の回転運動により xy 方向にも水平変位が生じるが、ロケットは特定の目標点に向かって垂直に侵入することを想定しているため、式(5)では図4に示す通り、水平時における各格子点の直上における z 変位の推移を算出している。

3-3 甲板変位マップの作成

ここまでの解析により得られた各軸の振動が連成して生じる正味の z 軸方向変位 z_{net} をもとに、ロケットが着陸する際の回収船側の特徴量を算出する。まず、式(5)を用いて三次元的に甲板がどのように振動しているかを示す例を図5に示す。

図5(a)は、式(5)において数周期分の時間経過後における各格子点の最大値および最小値の変位から構成される曲面を示しており、波高 5 [m]、波周期 6.98 [s]、波向 30 [deg.] の条件下での解析結果を表している。また、図5(b)は図5(a)の最大変位曲面を xy 平面に投影したものであり、ロケットから船を見下ろした視点において、甲板の各格子点が最大どの程度の振幅を有しているかを確認できる。

これらの結果をもとに、甲板上の特定の領域にロケットが着陸するように、ロケットの相対誘導制御および回収船の定点保持性能を設計した場合に得られる特徴量として、図6に示すような値が抽出できる。すなわち、領域内の最大動揺振幅値 z_{max} と期待値の z_E である。ここで、 z_{max} はロケット着陸時に遭遇し得る最大の動揺振幅を示し、 z_E はロケット着陸時に遭遇しやすい動揺振幅と解釈できる。なお、以下はロケットの着陸分布を一様分布と仮定して計算を行うため、 z_E は、着陸面における最大動揺振幅の平均値として扱える。

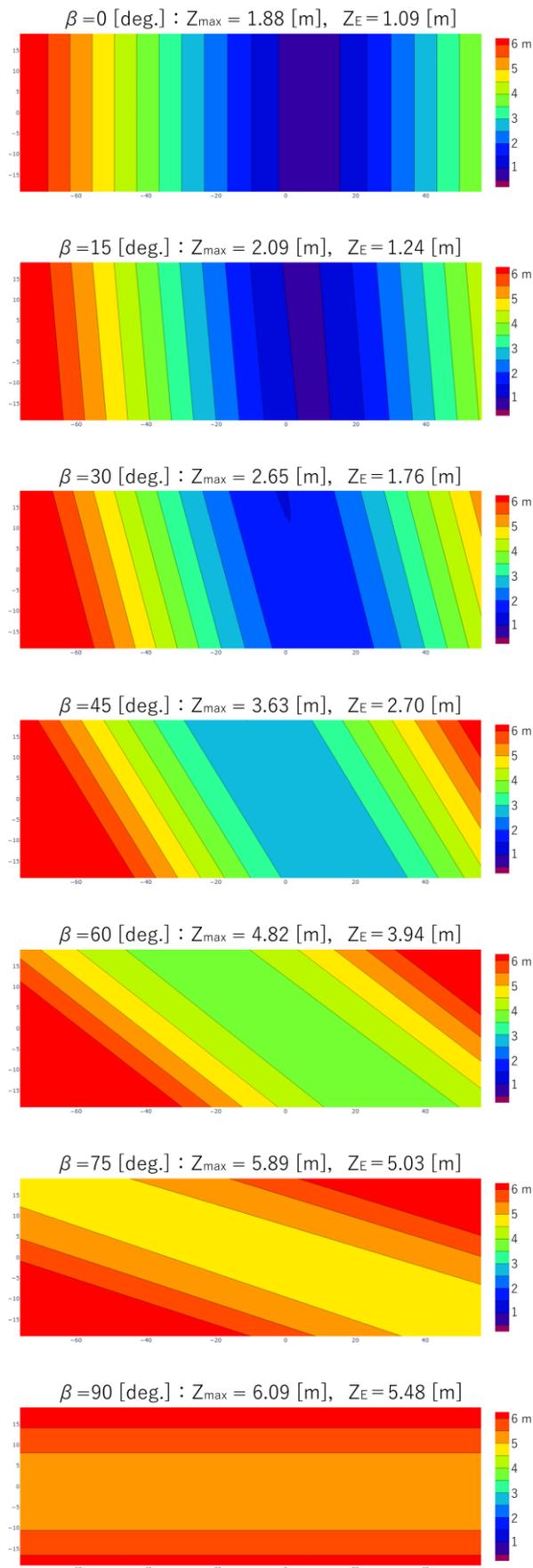


図7 遭遇波の波向を変化させた際の動揺特性

4. 解析結果および考察

4-1 波向と甲板変位の関係

海象条件として波高、波周期、波向が挙げられるが、波高や波周期は遭遇した時点で操作できない因子である一方、波向に関しては回収船の方位を制御することで能動的に調整可能である。そこで、前述の甲板変位マップについて、いくつかの波向に条件を設定した際に動揺の特徴量がどのように変化するかを考察した。なお、以下ではロケットの着船領域を、回収船の動揺中心から ± 15 [m]の範囲と仮定する。

例として、波高 5 [m]、波周期 10.5 [s]に回収船が遭遇した場合において、波向 β を 0 [deg.]から 90 [deg.]まで 15 [deg.]刻みで変化させたときの甲板変位マップを解析し、比較した結果を図 7 に示す。図 7 の結果から、波を本船の Sway (y 軸方向) から受けた場合、大きな Heave 揺れ (z 軸並進振動) に加え、Roll 回転 (z 軸回転) も複合して発生し、着陸領域内の最大値 z_{\max} は 6.09 [m]に達し、最大動揺振幅の期待値 z_E も 5.48 [m]と、遭遇した波高よりも大きな値となることが確認できる。一方、波を回収船の正面から受けた場合には、 z_{\max} は 1.88 [m]、 z_E は 1.09 [m]と、z 軸方向の並進振動を抑制できることも示されている。

このように、甲板変位マップを複数の波向について解析することで、ロケットが遭遇する正味の z 軸方向の揺れを概算できるとともに、回収船の定点保持における最適な方位指示値を決定することが可能と考えられる。

4-2 最適な着陸条件の決定

次に、前節に示した手法を複数の海象条件について実施し、各条件におけるロケット回収に最適な方位指示値を解析した結果を表 1 に示す。表 1 では、波高 5 [m]の場合について、波長船長比 (遭遇する波の波長と回収船長の比) を 0.125 ~ 2 倍まで変更した際に、各条件において z_E が最小となる波向を算出し、対応する z_{\max} と z_E を示している。解析結果からわかるように、基本的に回収船は波に対して正面に受けるように方位制御を行うことが有効であるが、Case 3, 4 のように、時にはやや傾けた方が z 軸方向の揺れを抑制できる場合も存在することが明らかとなった。

上記の結果について考察するために、Case 3 において波を正面から受けた場合と、船首方位から 30 [deg.] の角度で受けた場合の甲板変位マップを比較したものを図 8 に示す。また、比較のため、図 8 には着陸領域を赤枠で示している。既に図 7 に示した様に、 z_{\max} や z_E は波向 β が 90° に近づくほど大きくなる傾向にある。しかし、図 8 に示すように動揺の連成の仕

表 1 各海気象に対して最小動揺となるための波向

Case No.	波長船長比 [-]	波周期 T [s]	最小動揺波向 β_{min} [deg.]	動揺期待値 ZE [m]	動揺最大値 Zmax [m]
0	0.125	3.49	0.00	0.02	0.03
1	0.375	6.04	0.00	0.26	0.41
2	0.5	6.98	0.00	0.41	0.80
3	0.75	8.55	30.00	0.73	1.87
4	0.875	9.23	165.00	0.74	1.66
5	1.125	10.47	0.00	1.09	1.88
6	1.25	11.03	0.00	1.47	2.11
7	1.5	12.09	0.00	2.22	2.61
8	1.625	12.58	0.00	2.54	2.84
9	1.875	13.51	0.00	3.07	3.27
10	2	13.96	0.00	3.28	3.45

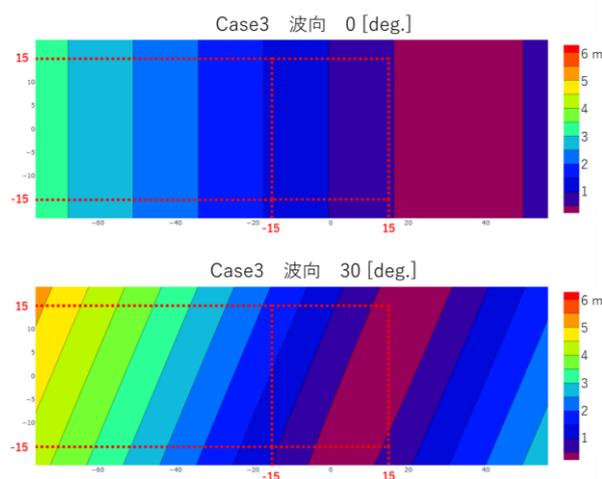


図 8 Case3 / 波向 $\beta = 0, 30$ [deg.]の比較

方によっては、動揺が少ないと想定されるエリアが着陸予測分布から外れてしまい、結果的にロケットの着陸予想エリア内で動揺が大きくなることもある。これは、回収船の回転中心をどこに設定するかという点や各振動間での位相差を適切に設定することで回避することができる。

5. 結言

本研究では、洋上回収船におけるロケット着陸時の動揺影響を評価するために、動揺解析と動揺の連成解析に基づく甲板変位マップを構築し、着陸甲板上の正味のz軸方向変位を算出する手法を提案した。具体的には、境界要素法によって得られるRoll/Pitch/Heaveの各軸動揺を考慮し、甲板上の各格子点におけるz方向変位を複合的に評価したほか、複数の波向や波長船長比に対して、回収船の方位制御による波向の最適化手法を検討した。

その結果、回収船を波に正面から受ける方位に制御するとz軸方向の動揺を抑制できる傾向にあるこ

とが確認できた一方、場合によっては若干角度を付けて波を受ける方が着陸領域全体の動揺が低減するケースがあることが確認された。これは、動揺の連成や甲板上の着陸予測エリアとの相互関係を考慮し、回収船の回転中心や振動間の位相差を適切に設定することで、ロケット着陸時に想定される動揺振幅をさらに低減し得ることを示唆している。

今後の課題としては、動揺によるロケットと回収船側双方の制御アルゴリズムを連携させ、海象条件に応じた総合的な着陸操作指針を構築することが挙げられる。また、回収時の風況や潮流などの追加要因を組み込んだ統合モデルの開発や、実海域での実証実験による検証も必要である。これらの取組により、再使用型ロケットの洋上回収を安全かつ高精度に実現するための基盤技術が強化され、宇宙輸送システムのさらなる高頻度化・低コスト化に寄与するものと期待される。

謝辞

本研究の遂行にあたり、宇宙航空研究開発機構の角有司様には多大なるご支援とご尽力を賜りました。心より感謝申し上げます。

参考文献

- 1) 宇宙航空研究開発機構：“宇宙輸送の技術ロードマップ（詳細版）（公開用）”，宇宙航空研究開発機構 研究開発部門 革新的将来宇宙輸送システム研究開発プログラム，2024年8月。
- 2) 児玉ら：“日本郵船におけるロケット洋上回収船の研究開発・事業開発の取り組み”，第69回宇宙科学技術連合講演会，2025年11月，in press。
- 3) 松井ら：“セットベース設計手法による再使用型ロケットの洋上着陸安定性の検討”，日本航空宇宙学会北部支部2025年講演論文集，2025年3月。
- 4) Tanizawa, K. : A Nonlinear Simulation Method of 3-D Body Motions in Waves (1st Report) Formulation of the Method with Acceleration Potential, Journal of the Society of Naval Architects of Japan, Vol. 178, pp. 179-191, 1995.