

2 洋上・海底施設作業船と吊荷の波浪中連成運動評価

大坪 和久*

Evaluation of Wave-Induced Coupled Dynamics Between Offshore Working Vessel and Suspended Load

by

OTSUBO Kazuhisa

Abstract

Crane lifting operations in ocean are crucial for constructing offshore structures and installing subsea facilities on the seafloor, and safety and availability of the crane lifting operation must be analyzed when planning construction. Wave-induced coupled dynamics between a vessel and a suspended load need to be predicted for these analyses. As the coupled dynamics can result in more complex mechanics. A thorough understanding of the coupled dynamic mechanics is required when using a multi-purpose offshore working vessel because the mechanics are present in various crane operation. We conducted both model experiments and numerical calculations to investigate the wave-induced coupled dynamics. Then we predicted the impact of the suspended load's location and weight on the peak period of the vessel's roll motion using numerical methods. We clarified that the inversion of the natural period can occur before and after the suspended load enters the water, which can increase the risk of the accidents during the crane lifting operation.

* 海洋開発系 海洋システム研究グループ

原稿受付 令和 3 年 4 月 2 1 日

審査日 令和 3 年 5 月 1 1 日

1. はじめに

構造物や施設を洋上または海底に設置するためには、クレーン作業を必要とする場合がほとんどである。最近では構造物が複雑化及び大型化してきていることから、排水量の異なるクレーン船を2隻用いた同時作業や、構造物の柔軟性を考慮して多数の吊点を設けてクレーン作業を行うなど、求められる作業が高度化している。どのようなクレーン作業を行う場合においても作業時に発生する吊荷の振れ回り運動は、船上設備や作業員にとっては大きなリスクとなり、更に、吊荷との連成によって船体運動は影響を受ける。したがって、作業を安全かつ効率的に進めるには、吊荷と船体の波浪中連成運動の評価が重要となる。

洋上クレーン作業における吊荷と船体の波浪中連成運動評価に関する研究はすでに多くの試みが行われている。例えば、野尻らの研究は吊荷を懸下したクレーンバージに対する周波数応答に関する水槽試験及び数値計算を実施している^{1),2)}。また、船級協会においては洋上クレーン作業を安全に行うためのガイドラインを発行しており、クレーン作業に係る様々な解析手法についての有益な情報を提供している³⁾。しかしながら、これらの考え方のベースにあるのは、従来からある大型クレーンバージに関する応用である。したがって、海上工事作業が多様化している現在においては、それらの解析手法を適用する際に注意を払う必要があると考える。

このような背景などを踏まえながら、今期中期計画から重点研究「海洋資源開発に係る基盤技術及び支援技術に関する研究」の一つとして、著者は海上工事作業（マリンオペレーション）に関する研究を進めている。マリンオペレーションにおける課題抽出をすると共に、水槽試験による検証を通じた数値計算法の開発を行うことにより、マリンオペレーションに関する安全性・稼働性評価手法の確立を目指すことを目標としている。本論文ではこれまでに著者らが行ってきたマリンオペレーションに関する研究の中から、洋上クレーン作業における吊荷と船体の波浪中連成運動評価に関する研究の取り組みについて報告する。特に、吊荷が作業船の波浪中連成運動に与える影響に注目し、吊荷の位置（吊点）や重量が作業船のロールの固有周期に大きな影響を与えることを水槽試験や数値計算結果を示しながら説明する。本論文では運動の同調周期を固有周期と呼ぶことにする。

2. 研究対象船と吊荷の基本諸元

本研究で対象とする多目的作業船（以下、作業船と略）の基本諸元を表-1に、その模型船を図-1（上）に示す。クレーン作業を行う際には右舷船尾にある大型クレーンを使用する。通常、作業船の吊荷能力(SWL: Safety Working Load)は排水量の数%程度であることから、本船の吊荷能力を排水量から換算して123ton程度（作業船排水量の約2%）と設定した。その他の特徴としてはミッドシップ付近にムーンプール

がある。位置保持には自動位置保持（DPS）を使用するため、船首には2基のトンネルスラスターと船尾には2基のアジマススラスターを搭載する。

表-1 模型船の諸元

	Actual	Model	Note
Length (L_{oa})	78.00m	2.60m	
Length (L_{pp})	75.20m	2.51m	
Breadth	21.50m	0.72m	
Depth	7.50m	0.23m	
Draft	5.61m	0.19m	Operational Condition
Displacement	6,129ton	227kg	
GM_T	4.20m	0.14m	
SWL	123ton	4.56kg	

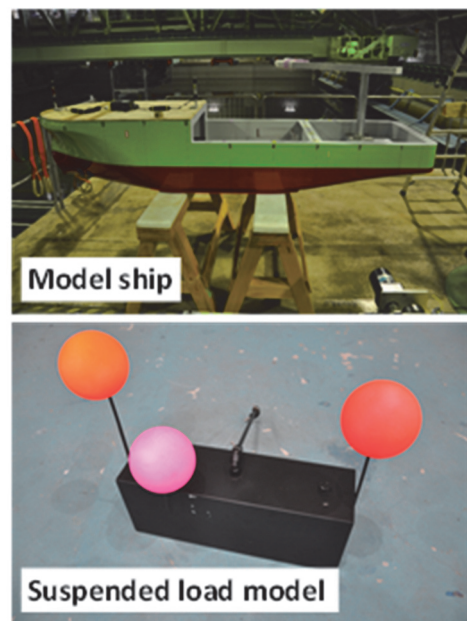


図-1 研究対象とする模型船と揚降物模型

表-2に本論文で対象とする吊荷に関する基本諸元、その模型を図-1(下)に示す。吊荷の空中重量は、作業船の排水量の約4.0%、水中に着水した状態（釣り合い状態）では約2.8%であった。揚降物の重量次第では大きく喫水が変わる可能性はあるが、排水量に占める吊荷重量の割合から、本研究では喫水の変化は軽微と考え、稼働状態における値を対象として研究を行った。また、後述する画像計測用のマーカー同士の距離を確保するために吊荷模型が少し大きくなってしまい、吊荷重量が作業船のSafety Working Loadを少し超える形で試験を実施することになった。本研究の目的から、この点は支障ないと考えたが、その影響を把握するため、水槽試験を行

う前に作業船の定常傾斜（ヒール）が流体力や運動に及ぼす影響を評価し、影響が軽微であることを確認した。なお、吊長はクレーン先端部の吊点から吊荷重心までの距離、作業船の排水量に対する吊荷重量の比を重量比と定義する。

表-2 揚降物の諸元

	Actual	Model
Length	12.0m	0.40m
Breadth	3.6m	0.12m
Depth	4.5m	0.15m
Height of C.G.	2.25m	0.08m
Weight in Air	261.9ton	9.7kg
Weight in Water	176.0ton	6.5kg
Sling Length	13.1m	0.44m

3. 座標系

本論文では、鉛直上向きをz軸とする右手系グローバル座標系、作業船の船体中央の水線面位置に原点 o_v 、船首方向を x_v 軸、左舷方向を y_v 軸、鉛直上向きを z_v 軸の正方向とする右手系直交作業船（物体）座標系を定義した。なお、初期状態においてはグローバル座標系と作業船座標系は一致させた。吊荷に関しては、クレーン先端部から吊荷の重心までの距離（吊長）を L とし、吊荷の中央の水線面位置に原点 o_s 、船首方向を x_s 軸、左舷方向を y_s 軸、鉛直上向きを z_s 軸の正方向とする右手系直交吊荷（物体）座標系を定義した。入射波の進行方向については、船尾から船首方向へ到来する波を追波(0deg.)、右舷側から到来する波を横波(90deg.)、船首から船尾方向へ到来する波を向波(180deg.)とし、反時計回りに入射角 $0\sim 360$ deg.を定義した。図-2に座標系を示す。

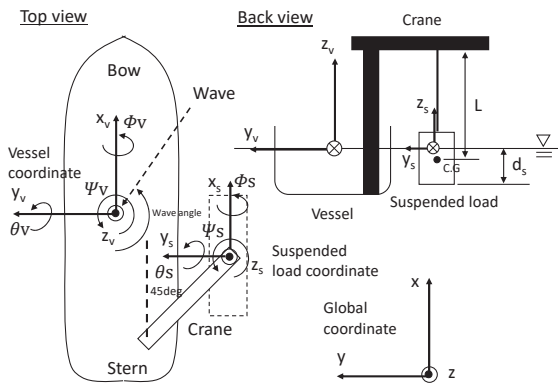


図-2 座標系

4. 吊荷と作業船の波浪中連成運動評価

4.1 水槽試験

着水した直後の吊荷と作業船の波浪中連成運動を把握するため、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の深海水槽において波浪中動揺模型試験を実施した。図-3は試験時の写真である。作業船及び吊荷に

は画像計測用カラーマーカーが3個ずつ装着されており、作業船と吊荷の運動6成分はこのマーカー座標を使って求めた。吊荷の長手方向が作業船と同一方向になるようにアルミロッドと、その両端部にユニバーサルジョイントを用いることによって、クレーン模型と吊荷が常時捻じれない形で接続した。作業船は造波により漂流しないように4本の係留ライン（ばね+ワイヤー）によって位置保持した。模型が係留された状態において、規則波、不規則波を発生させ、その時の船体及び吊荷運動を計測した。波については水槽試験で使用する入射波を事前に容量式波高計を使って計測し、試験中も同波高計を使って模型船からの反射の影響が小さく、入射位相が同じとなる位置において計測した。規則波の結果についてはフーリエ解析によって振幅を求め、同解析を使って求めた入射波の振幅結果で除することで応答関数を求めた。不規則波については運動と入射波のクロススペクトルを入射波のオートスペクトルで除することで複素応答関数を求め、その絶対値をとることで応答関数を求めた。スペクトル解析はBlackman-Tukey法を採用し、三角形周波数フィルターで平滑化処理を行った。

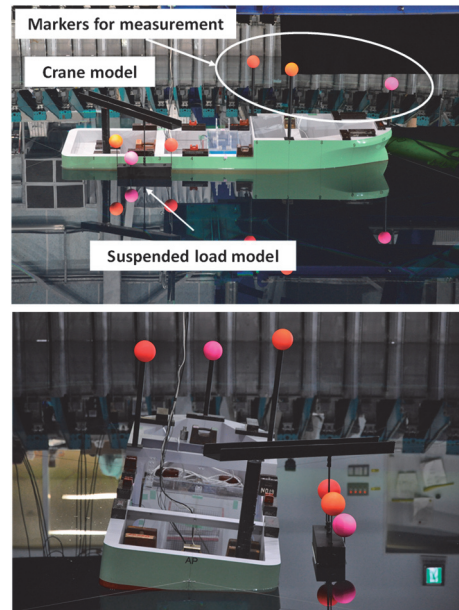


図-3 セットアップ（水槽試験）

4.2 試験結果

試験結果の中から作業船のロールとピッチに対する応答関数の結果を図-4に示す。図中には参考として作業船単独状態、吊荷が空中に懸下された状態（吊荷の形状は若干異なる）における作業船の応答関数も併せて示している。上段は作業船のロール、下段はピッチの応答関数の結果である。規則波（中抜マーク）と不規則波（線+中実マーク）中での結果を併記している。波高は0.6m（不規則波の場合は有義波高が0.6m、ピーク周期が7.6秒）とした。吊荷が無い場合の作業船の動揺固有周期は、自由動揺実験の結果からロールが約8.96秒、ピッチが6.55秒であったが、半没状態の吊荷がある場合の

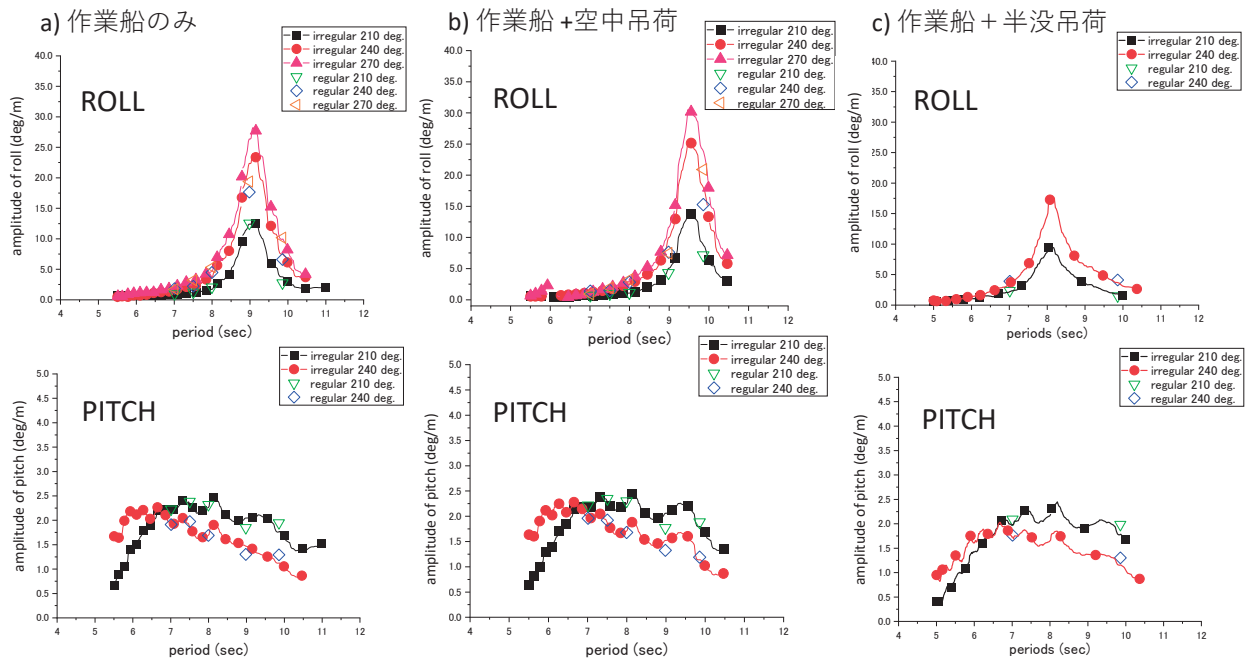


図-4 作業船応答関数の比較

ロールの固有周期は 8.05 秒となっており、短周期側への固有周期シフトが確認された。吊荷の振り子としての運動については、単振り子（1 自由度モデル，1 次モード）としてモデル化すると固有周期は 7.34 秒，半没した吊荷に作用する付加質量及び浮力の影響を考えると，吊荷の振り子としての固有周期は約 36.00 秒であった。

小さくするためにロールの固有周期は長くなる。図-4 の空中吊荷の結果から，作業船のみの場合と比べて固有周期は長くなっている。これは，空中吊荷の振り子としての固有周期は 7.34 秒と作業船のロールの固有周期 8.96 秒よりも十分短いために周期が長くなったことが説明出来る。吊荷が着水した後については，付加質量及び浮力が作用し，吊荷の振り子としての固有周期が 36.00 秒と変化することで，作業船のロールの固有周期が短くなったことが同じく理解できる。

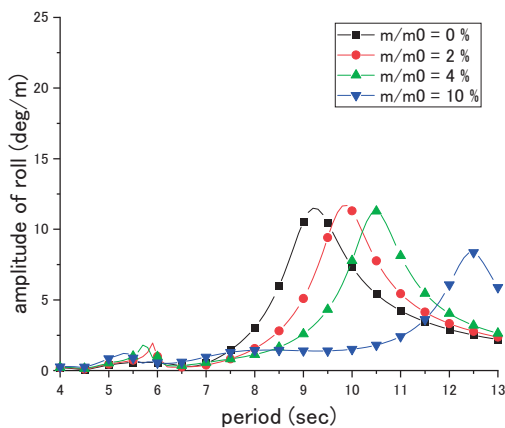


図-5 重量比が作業船固有周期に与える影響（空中吊荷）

通常，吊荷の振り子としての固有周期が作業船のロール固有周期よりも長い場合には，作業船の運動に追従出来ないために，見掛け上，吊荷は作業船のロールの復原力を増大させる方向に作用する。したがって，作業船のロールの固有周期は短くなる方向にシフトする。一方，吊荷の固有周期がロール固有周期よりも短い場合には，作業船ロールの復原力を減

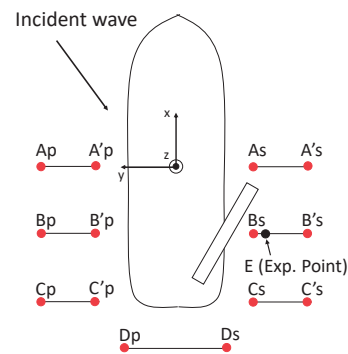


図-6 感度解析のための吊点配置

4. 3 数値計算法

前節において実施した試験結果を定量的に理解するために，数値計算法について検討した。空中にある吊荷と作業船の連成運動は Lagrange 方程式を解くことによって，8 自由度の拡大された運動方程式として求めることができる⁴⁾。一方で，吊荷が着水した後は流体力が作用するため，その線形流体力は別途，境界要素法を使って求めることになる。

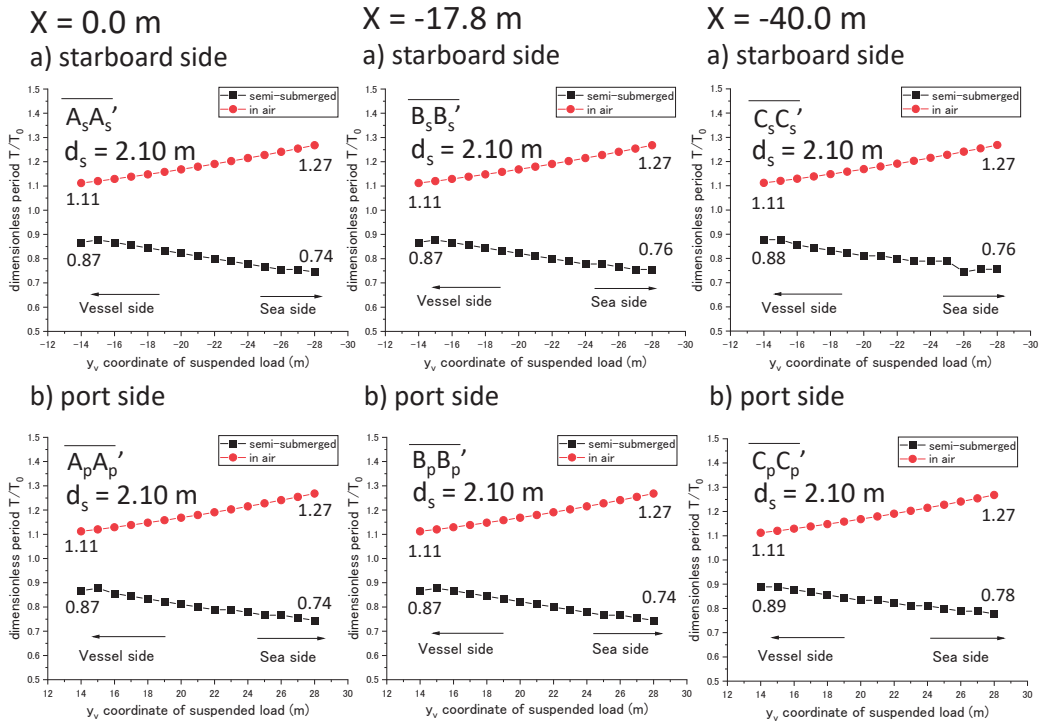


図-7 吊点位置が作業船の固有周期に与える影響（吊荷が着水する前後での比較）

流体力の計算座標系と拘束された運動方程式の座標系は異なるため、流体力の座標変換が必要になる。この問題を解消するため、本論文では作業船と吊荷を計算座標系と同じ座標系で運動方程式をそれぞれ構築し、それに吊索影響を拘束力（拘束条件）として随伴させて解くことによって、吊荷と作業船の連成運動を考慮することにした⁵⁾。

また、本研究においては周波数解析を行うため、運動モデルの定式化においては線形近似を行った。定式化の詳細な内容については文献⁶⁾を参考にさせていただきたい。作用する流体力については、作業船と吊荷の相互干渉を考慮した形で境界要素法を使って別途評価し、数値計算プログラムの中で周波数や吊点に応じてその結果を線形補間して使用した。吊荷が半没することによって、その没水容積は作業船排水量と比べて十分小さいとは言えるものの、作業船の重心位置を若干変化させる効果があるため、見掛け上、作業船の横メタセンター高さを修正する形でその影響を考慮した⁷⁾。

5. 吊点の感度解析（作業船ロールの固有周期評価）

吊荷が空中にある場合、吊荷と作業船の連成によって作業船ロールの固有周期が長周期側にシフトする。図-5は模型船の排水量に対する吊荷（空中）の重量比がロールの応答関数に与える影響についての数値計算の結果である。計算の際、図-4 b)の試験条件に条件を合わせ、重量比(m/m₀)のみを変化させた。一方、前節にて述べたように、半没した吊荷を懸下した作業船のロールの固有周期が作業船本来の固有周期よりも短周期側にシフトする。作業船のロールの固有周期はオペレーションを実施する上での判断材料になる。また、作業

船は様々な吊式（吊点）によるクレーン作業が行われることがある。そこで吊点が作業船のロール固有周期に与える影響を明らかにするために数値計算を使って感度解析を行った。図-6には本研究で計算した吊点配置を示す。D_p-D_sは縦吊り（A-Frameからの吊式）と呼ばれるクレーン作業に対応する。変数中の右下添字のpは左舷（port side）、sは右舷（starboard side）を意味する。その時の波向240degの場合におけるロールの固有周期の結果をまとめたものを図-7に示す。参考として端点における値を明記した。結果をまとめる際には、周波数域内で応答関数がピークとなる周期を固有周期とした。X=-17.8mを基準（水槽試験（E点）と同じ）として、X=0.0mはミッドシップ、X=-40.0mは船尾付近に吊点がある場合を比較している。縦軸は作業船本来の固有周期T₀（=8.96秒）に対する周期比T/T₀、横軸は船幅方向の吊点位置を意味し、作業船の舷側に近いところから吊点を徐々に離している。吊点次第では、流体力（波強制力）には作業船との相互干渉によって左右非対称性が存在するため、吊点が左舷側、右舷側にある場合についても比較した。図中には文献⁶⁾において示した方法に従い、吊荷が着水する直前（空中にある状態）での作業船のロールの固有周期について示した。評価を単純化するために吊荷の喫水についてはすべて一定（d_s=2.10m）とした。

空中での固有周期はすべてT/T₀が1よりも大きく、吊点が作業船から離れるほど長周期側に大きくシフトする傾向が分かる。一方、吊荷が半没状態ではT/T₀が1よりも小さくなっている。つまり、これは短周期側にシフトすることを意味し、作業船から離れるほど短周期側に大きくシフトする傾向

がある。空中にあった際には T_0 よりも長周期側に固有周期があったものが、吊荷が水没することによって T_0 よりも短周期側にシフトする。本論文ではこれを固有周期の反転と呼ぶ。吊荷が着水前には長周期側にあったものが着水後には短周期側にシフトするとすると、短時間の中で固有周期が大きく変化することを意味し、オペレーションの視点から考えると新たな作業リスクを招く可能性がある。船首方向における吊点の位置影響についてみると、船幅方向に対する固有周期変化の傾き(変化率)については同程度であるが、船尾付近の結果は全体的に長周期側(T/T_0 が大きい方向)に幾分かオフセットしたものになっていることが端点の値を参考にする と分かる。この結果は、作業船に対して吊荷の前後位置がミッドシップに近くなるほど固有周期の反転が大きくなることを意味する。

以上は横吊りを想定した結果であったが、A-Frameからのクレーン作業、つまり縦吊りに対する検討結果を図-8に示す。吊点位置は図-6の D_pD_s である。この結果から、空中と半没状態の両者の結果が図-7と比べると近い値になっていることが分かる。また、半没の状態であっても幾つかの吊点においては T/T_0 が1よりも大きくなっている。つまり、これは固有周期の反転が生じないことを意味する。縦吊りは横吊りの場合に比べると、クレーン作業時における運動特性の変化が小さいと言える。

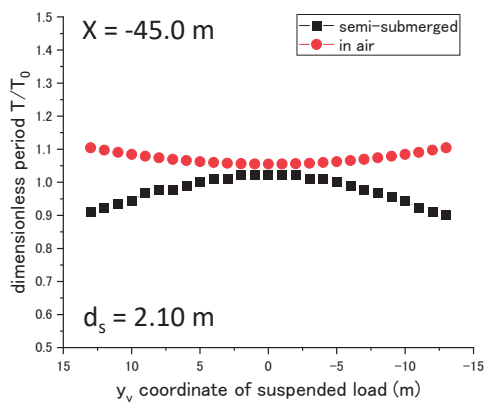


図-8 吊点位置が作業船固有周期に与える影響 (A-Frame)

6. まとめ

本論文では多目的作業船と吊荷の波浪中連成運動について検討した。

本論文では次のような成果を得た。

- 吊荷が着水した直後における、吊荷と作業船の波浪中連成運動を把握するために水槽試験を実施した結果、作業船のロールの固有周期が短周期側にシフトする傾向が確認された。吊荷が空中にある場合には固有周期は長周期側にシフトするために真逆の傾向となる。これは吊荷が着水することによって付加質量と浮力が新たに作用し、振り子としての固有周期が長周期側

に変化し、作業船のロールの固有周期との相対関係が大きく変化したことが原因と考えられる。吊荷が着水する前後で固有周期が反転することは、短い時間の中で固有周期が大きく変化することを意味する。クレーン作業者は吊荷が着水する前後では、吊荷のみならず、作業船の固有周期が大きく変化して、入射波と同調する可能性にも注意を払う必要がある。

作業船の固有周期の変化に関する考察を行った結果、吊点位置及び重量比が固有周期の反転の発生に大きな影響を与えることが分かった。特に横吊りの場合には着水前後で固有周期が大きく変化する傾向が顕著であることが分かった。クレーン作業者は横吊りを採用する場合には、より安全に配慮する必要がある。

謝辞

本研究の実施においては、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 海洋開発系の長谷川賢太、石田圭、佐藤宏、荒木元輝、伊藤絵里佳の諸氏に数値計算及び水槽試験においてご協力頂きました。ここに改めて感謝申し上げます。

本研究の一部は、JSPS 科研費 JP20H02378 の助成を受けたものです。

References

- Nojiri, N. and Mita, S.: On the Coupled Motion between a Crane Barge and Hook Load in Waves, Journal of West Japan Society of Naval Architects, Vol.59, pp.43-55, 1980. (in Japanese).
- Nojiri, N.: On the Coupled Motion between a Crane Barge and Hook Load in Waves (Second Report- Three-dimensional Responses in General Regular Waves), Journal of West Japan Society of Naval Architects, Vol.65, pp.95-106, 1983. (in Japanese).
- DNVGL: Modeling and Analysis of Marine Operations, DNVGL-RP-H103, April, 2011.
- Otsubo, K. *et al.*: Evaluation of Wave-induced Coupled Dynamics between Multi-purpose Supply Vessel and Suspended Load during Crane Lifting Operation, Journal of JASNAOE, Vol.30, pp.187-200, 2019. (in Japanese).
- Tajima, H.: Fundamentals of Multibody Dynamics, Tokyo Denki University Press, 2015. (in Japanese).
- Otsubo, K. and Hasegawa, K.: Evaluation of Wave-induced Coupled Dynamics Between Multi-Purpose Offshore Supply Vessel and Suspended Load During Crane Lifting Operation - Part 2 Analysis for Wave-induced Coupled Dynamics Right After Suspended Load Entry into the Water -, Journal of JASNAOE. (in Japanese).
- Ohgushi, M.: RIRON SEN-PAKU KOGAKU ('Theory of Ships', Vol.1), Kaibundo Book Company, Inc., 1972. (in Japanese).