

令和 5 年 6 月 8 日現在

機関番号：82627

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2018～2022

課題番号：18K04592

研究課題名(和文) 曳航時の3次元動的索張力を考慮した多方向不規則波中での直接復原性評価

研究課題名(英文) Direct stability assessment for towed ship in multi-directional irregular waves considering 3D dynamic towline tension during tow

研究代表者

黒田 貴子 (Kuroda, Takako)

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：00415811

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)：船舶曳航時の曳航索に働く動的索張力を推定するために、3次元ランブドマス法に被曳船の曳航点に運動を定式化して与えて曳航索張力を動的に解く方法を示した。  
また、不規則波中の被曳船の船体運動を推定するために、メモリー影響を考慮した短波頂不規則波中船体運動の時間領域計算法を構築し、模型実験との比較により十分な精度があることを確認した。  
被曳船の長期発生確率による復原性評価法として、第二世代非損傷時復原性基準暫定ガイドラインにある直接復原性評価法に従い、構築した不規則波中時間領域計算法を用いて復原性評価を行い、長期発生確率を示す手法を示した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究で示した船舶の曳航時の索張力の推定で曳航索の3次元変形とその動的な影響を扱った3次元ランブドマス法で解く手法はこれまで行われておらず、曳航時の動的索張力、最大索張力の推定に有効な手段になると考える。  
また、模型実験で裏付けされたメモリー影響を考慮した不規則波中時間領域計算法とその計算法を用いた長期発生確率による復原性評価の方法を示したことも、船舶の安全性に貢献できると考える。

研究成果の概要(英文)：In order to estimate the dynamic towline tension acting on a towing line during ship towing in waves, a method is presented to solve for the towing line tension by applying a three-dimensional lumped mass method with a formulated motion at the towing point of the towed ship.

Moreover, a time-domain simulation method for ship motions in short-crested irregular waves with memory effect is constructed to calculate the ship motion of the towed ship in irregular waves. its accuracy is confirmed by comparison with a model test.

As a method for evaluating stability of the towed ship based on the long-term occurrence probability was conducted. In accordance with the direct stability assessment in the second generation intact stability criteria, a process to indicate the long-term occurrence probability of phenomena caused by stability of towed ship was presented using a constructed time-domain simulation in irregular waves.

研究分野：船舶の耐航性能

キーワード：曳航 動的索張力 ランブドマス法 船体運動の時間領域計算法

## 様式 C-19、F-19-1、Z-19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

曳航時の索の急張や振れまわりによる転覆事故は毎年発生している。海難事故等により曳航不能となった船舶の曳航や曳航バージの安全性に関する研究は操縦性の分野で扱われ、曳船・被曳船の操縦運動問題は索張力を取り扱うのが特徴であり、これまでにいろいろな手法が提案されているが曳航で問題となる曳航索の3次元変形とその動的な影響を扱う計算法はまだ提案されていない。また、曳航時の転覆問題では3次元での動的索張力を扱い、運動・復原性を時間領域で直接評価する必要がある。曳航問題は主に操縦分野で扱われるため、曳航時の転覆原因となる曳航索張力による復原性への影響を実海域に近い海象でかつ時間領域で扱ったものはない。

### 2. 研究の目的

本研究では、3次元ランプドマス法を用いて索張力を動的に解く3次元動的索張力計算法を構築する。曳航時の3次元での曳航索の変形を考慮した多方向不規則波中時間領域での船体運動・振れまわり運動計算法を構築し、曳航時の被曳船の復原性を直接評価する手法を提案する。

### 3. 研究の方法

本研究では①3次元ランプドマス法を用いた3次元での動的索張力計算法を構築し、この計算法を導入した②多方向不規則波中の被曳船の時間領域での船体運動及び振れまわり運動計算法を提案する。次にこの計算法を用いて③曳航中の復原性を直接評価する。多方向不規則波中の時間領域での動的索張力による横揺れ角を求めて超過確率の予測を行う。

### 4. 研究成果

#### 4.1 3次元ランプドマス法を用いた曳航時の動的索張力の推定

3次元ランプドマス法を用いて曳航索の運動を定式化したモデルを導入した3次元動的索張力計算法を行った。ランプドマス法では曳航索をN等分の要素に分割し、各要素の自重を1点集中させ、各質点間には曳航索の伸びを表現するため直線ばねを与える。また、曳航索の接線方向の付加質量と伸びを考慮し、曳航索の運動を3次元で扱う。

3次元ランプドマス法を用いた曳航時の動的索張力の推定法の検証のために、被曳船にコンテナ船模型を用いた曳航実験を水産技術研究所の海洋工学総合実験棟(角水槽)で実施した。本実験の対象船は全長 $L_{OA}336.19\text{m}$ のコンテナ船とし、実験には1/96.054縮尺模型を使用した。模型実験では被曳船の船首部に取り付けた張力と索の張り出し角度を計測する治具を介して曳航索を、曳引台車側の曳航点に設置した被曳船側と同じ計測治具に繋いで船を曳航した。曳航索の張力は歪みゲージを用いた張力計で、張り出し角度はポテンショを用いた角度計で計測した。被曳船の航跡と速度は被曳船の重心位置及び曳航点に設置したプリズムをトータルステーションで追尾して計測した。被曳船の船体運動は重心位置に設置したジャイロで計測した。曳航索は $\phi 1.05\text{mm}$ 、単位重量 $4.7\text{g/m}$ 、索長 $7\text{m}$ のワイヤーを用いた。曳航速度は5kts相当の $F_n=0.046$ (台車速度 $0.262\text{m/s}$ )、波は規則波と不規則波とし、波高は実スケール $4\text{m}$ 相当、波長船長比 $\lambda/L=1.0$ 、波向きは向波及び斜め向波とした。図1に規則波向波中の被曳船側索張力の計測結果の一例を示す。波が模型船に到達した時点で索張力が大きくなり、次に曳引台車が発進して索が急張した時点で再度索張力が大きくなっている。波の出会い周期で索張力が変動していることが確認できる。

3次元ランプドマス法で曳航時の動的索張力を実スケールで計算した。被曳船側の曳航点に与える運動は、ジャイロで計測したX方向の加速度からsurgeの振幅を求め、それを曳航索端部の運動として与えた。計算結果を実スケールに換算した実験結果と比較して図2に示す。動的索張力の変動周期、最大値はよく一致しているが変動振幅は計算結果が計測結果より小さくなっている。この解決策としては、曳航索端部に与える運動に上下揺れと縦揺れを合わせた上下方向の運動振幅も加えることが挙げられる。

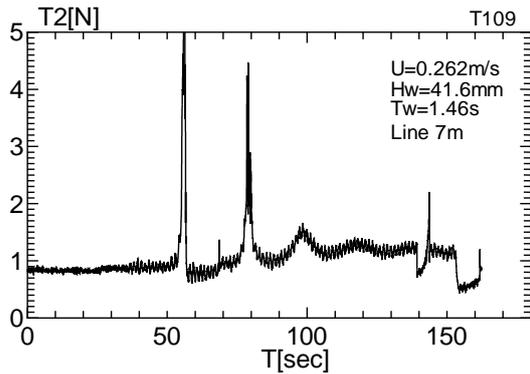


図1 模型実験で計測した索張力

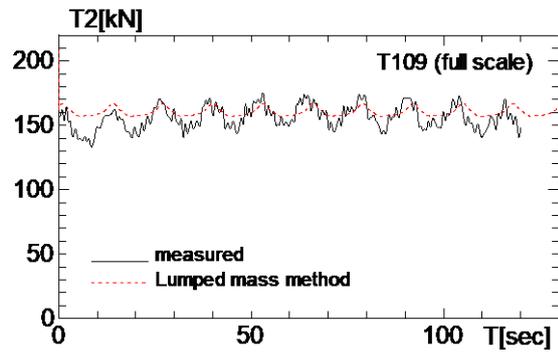


図2 実験結果と 3 次元ランブドマス法による索張力計算結果と実験結果の比較（実スケール）

#### 4.2 短波長不規則波中の船体運動時間領域計算法

曳航時は低速航行になるため、本研究では短波頂不規則波中前進速度無しの状態での時間領域船体運動計算を実施した。扱う運動軸は6自由度、流体力は3次元特異点分布法で解いており、メモリー影響を考慮している。横揺れ減衰力は模型実験での自由横揺れ試験で得られた横揺れ減衰係数を使用した。船の前後左右に与えるばね定数は実験時と同等の値を設定した。

時間領域での船体運動計算で扱う波は短波頂不規則波とし、周波数スペクトルは ITTC 型を、方向スペクトルは横波 90deg.を主方向とした  $\text{COS}^4$  分布で与えた。有義波高  $H_{1/3}$  は 5.5m, 平均波周期  $T_{01}$  は 9.5s とした。波形表現はシングルサンメンション法 (SS 方式) とし、初期位相と方向角初期値は乱数を与えて設定した。周波数スペクトルによる周波数 ( $f = 0.0 \sim 3.0\text{Hz}$ ) の分割はエネルギー等分割を行い、周波数分割数は計算時間を抑えるために安定した統計値が得られる最小分割数とした。波周波数分割数を検討するため 50, 150, 250, 350 分割で試算を行った。

波周波数の分割数を 50, 150, 250, 350 と変化させて刻み 0.01sec., 1,000,000 ステップ (約3時間相当) の計算を行った。周波数分割数に対する横揺れの両振幅分布統計値と極大値・極小値分布統計値を図3に示す。波周波数分割数 50 での横揺れの標準偏差は平均値と比べると差が大きいが、波周波数分割数 150 以降はばらつきが比較的小さい。この結果から今回の時間領域計算では波周波数の分割数を 150 分割とする。

必要な計算時間 (総ステップ数) を検討するために、計算時間による統計解析結果の相対誤差を調べた。波周波数 150 分割 SS 方式で計算刻み 0.01sec. で計算ステップ数 1,000,000 ステップ (10,000 秒  $\Rightarrow$  約 2.8 時間) まで計算した。横揺れの 1/3 最大平均値と標準偏差の計算結果を 100,000 ステップ (1,000 秒  $\Rightarrow$  約 17 分) ずつ増やして統計解析した結果を最も長い計算時間の 1,000,000 ステップでの場合と比較し、その比を相対誤差として図4に示す。横揺れの統計値の相対誤差は 300,000 ステップ以上で 2% 以内, 700,000 ステップ (1.94 時間) 以上計算すれば相対誤差 1% 以内に入る。よって、今回の時間領域計算は 3 時間分の計算を基準とする。

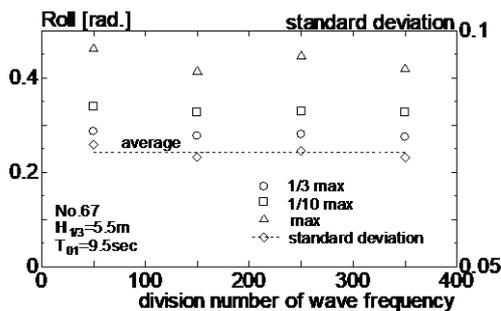


図3 波周波数分割数に伴う横揺れ両振幅分布統計値の変化

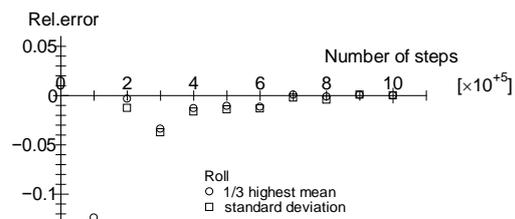


図4 計算時間に伴う横揺れの 1/3 最大平均値と標準偏差の相対誤差の変化

短波頂不規則波中での船体運動時間領域計算法の精度を確認するために、海上技術安全研究所の実海域再現水槽で模型実験を実施した。横波を主方向とする短波頂不規則波中前進速度無しの状態での船体運動と横加速度の計測と自由横揺れ試験を ITTC 7.5-02-07-04 に基づいて実施した。模型船は前述の実験で用いた全長 $L_{OA}$ は 3.5m, 縮尺 1/96.054 のコンテナ船である。模型船の状態は計算及び前述の実験時と同じ状態とした。縦慣動半径は 0.25L である。船体運動は 6 軸を自由とし、前後揺れ、左右揺れ、船首揺れには模型船の計測位置を保持するために変位に比例する復原力をばね定数で与えた。使用した波の有義波高と波周期は計算時と同様とし、有義波高 $H_s$ は 5.5m 相当、平均波周期 $T_{01}$ は 9.5s 相当である。不規則波の周波数スペクトルは ITTC 型を、方向スペクトルは横波 90deg. を主方向とした  $\text{COS}^4$  分布で与えた。波形表現はシングルサンメンション法とし、初期位相と方向角初期値は乱数で設定した。周波数分割数は 150 分割である。計測時間は実船時間で 3 時間相当の 20 分とした。なお、模型実験前に短波頂不規則波の波検定を実施し、設定した波条件に則した波浪場が計測時間の間保たれていることを確認した。

時間領域での横波を主方向とする短波頂不規則波中前進速度無しでのコンテナ船の船体運動計算を実施した。模型実験で使用した波と同じ 5 ケースの波を用いた計算を 1,080,000 ステップ (0.01 秒刻み 3 時間) 実行し、95%信頼区間を模型実験と比較した。波条件は有義波高 $H_s=5.5\text{m}$ , ゼロアップクロス平均波周期 $T_z=9.5\text{sec}$ とし、波周波数分割数は 150 である。試行 5 回の時間領域計算による横揺れの標準偏差と両振幅分布の 1/3 最大平均値/2 を図 5 に示す。図中、試行 5 回の平均値を破線で示す。試行ごとの統計値は 5 回の試行回数の平均値に近いことが分かる。模型実験 (試行回数 7 回) と時間領域計算 (試行回数 5 回) での横揺れの両振幅分布の 1/3 最大平均値の半分の平均値と 95%信頼区間 (Confidence Interval; C.I.) を図 6 に比較して示す。横揺れの模型実験結果と時間領域計算の 95%信頼区間は重なっており、本時間領域計算法は十分な精度であることが分かる。

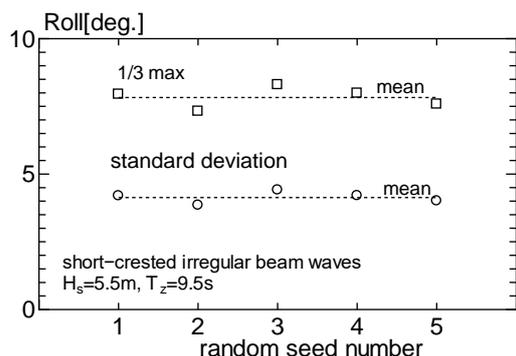


図5 波にランダム位相・方向を与えた時間領域計算による横揺れの統計値結果 ( $H_s=5.5\text{m}$ ,  $T_z=9.5\text{s}$ )

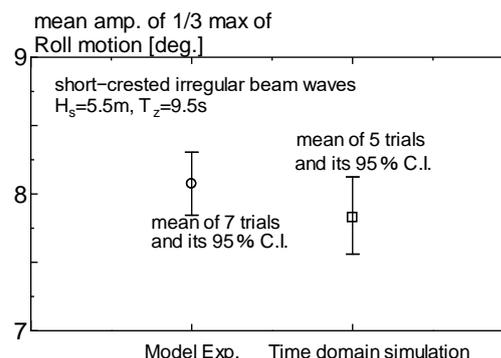


図6 模型実験と時間領域計算の横揺れの平均値と信頼区間 ( $H_s=5.5\text{m}$ ,  $T_z=9.5\text{s}$ )

#### 4.3 短波頂不規則中復原性評価

時間領域計算法を用いて短波頂不規則波中での復原性評価を行った。復原性の評価は国際海事機関 (IMO) で 2020 年に承認された第二世代非損傷時復原性基準暫定ガイドライン (MSC.1/Circ.1627<sup>13)</sup>) で扱う危険モードのうち、過大加速度モードの直接復原性評価に従い、短波頂不規則波中時間領域計算法を用いて対象船を評価した。

直接復原性評価は横揺れ角 40deg, 横加速度  $9.81\text{m/s}^2$  を閾値とし、北大西洋の波浪発現頻度表にあるすべての有義波高と波周期での波向きと船速を変化させた不規則波中船体運動計算を行い、発生確率を求める完全確率的評価(Full probabilistic assessment)とした。完全確率的評価の平均長期危険事象発生確率は単位時間当たりの危険事象発生確率 $r(1/\text{s})$ で評価し、基準値は $2.6 \cdot 10^{-8}(1/\text{s})$ である。一波当たりの平均長期危険事象発生確率 $p$ から単位時間当たりの平均長期危険事象発生確率 $r$ は以下の式で求まる。

$$r = -\ln(1 - p)/T_e \quad (1)$$

ここで $T_e$ は船速ごとの平均出会い周期であり、前進速度零の場合は波周期の期待値になる。

本研究で扱う過大加速度モードは旅客あるいは乗組員が居る最も高い位置にある居住区や船橋に働く横方向の加速度に関する基準である。短波頂不規則波中での横加速度を時間領域計算法で IACS の波浪発現頻度表で発生回数のあるすべての波浪条件 197 ケースに対して計算を行った。波周波数の分割数は 150 分割、計算時間は 0.01 秒刻みの 1,080,000 ステップ（実船スケールで 3 時間）である。全波条件での横加速度の分散値を図 7 に示す。分散値から  $9.81\text{m/s}^2$  を閾値として求めた IACS の波浪発現頻度表にある短期海象での超過確率を表 1 に示す。

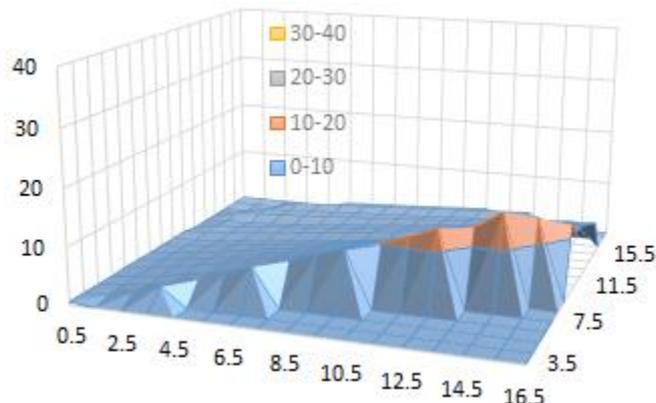


図7 時間領域計算法による短波頂服足波中横加速度分散値

表1 横加速度の分散値から求めた  $9.81\text{m/s}^2$  を閾値とした短期超過確率

Hs	Tz: average zero up-crossing wave period[s]																
	3.5	4.5	5.5	6.5	7.5	8.5	9.5	10.5	11.5	12.5	13.5	14.5	15.5	16.5	17.5	18.5	
0.5	2.30E-36	1.66E-38	1.93E-41	4.30E-46	1.32E-37	4.96E-38	3.37E-48	1.03E-42	1.83E-43	5.47E-43							
1.5	1.42E-27	1.49E-23	2.64E-23	1.57E-20	1.18E-20	1.82E-23	3.58E-24	2.03E-33	4.60E-26	1.08E-25	2.23E-47	2.82E-25					
2.5		7.75E-12	1.66E-14	7.00E-14	1.81E-12	6.99E-13	2.66E-14	1.90E-15	1.32E-21	8.01E-19	8.84E-20	5.26E-43	7.29E-20	1.16E-28			
3.5		4.26E-07	1.80E-09	1.84E-09	8.70E-09	2.71E-09	3.81E-10	2.87E-11	3.41E-15	5.78E-14	3.52E-15	1.99E-26	2.52E-16	3.53E-21	1.32E-17		
4.5			1.30E-06	5.05E-07	9.75E-07	3.60E-07	8.09E-08	6.47E-09	1.45E-11	6.86E-11	5.26E-12	8.89E-19	1.04E-13	3.12E-17	8.65E-15		
5.5			7.37E-05	1.73E-05	1.92E-05	8.59E-06	2.58E-06	2.51E-07	3.06E-09	7.59E-09	8.01E-10	2.63E-14	1.05E-11	1.42E-14	9.23E-13	1.33E-23	
6.5			8.93E-04	1.85E-04	1.43E-04	7.21E-05	2.38E-05	3.42E-06	1.13E-07	1.92E-07	2.61E-08	2.26E-11	3.44E-10	1.30E-12	3.07E-11	6.58E-19	
7.5				1.00E-03	6.11E-04	3.36E-04	1.32E-04	2.39E-05	1.49E-06	2.02E-06	3.48E-07	2.33E-09	5.17E-09	4.45E-11	4.88E-10	1.16E-15	
8.5				3.68E-03	1.82E-03	1.08E-03	4.78E-04	1.05E-04	1.01E-05	1.18E-05	2.52E-06	6.08E-08	4.74E-08	7.40E-10	4.64E-09	2.54E-13	
9.5				8.52E-03	4.34E-03	2.65E-03	1.31E-03	3.38E-04	4.49E-05	4.68E-05	1.19E-05	6.68E-07	2.91E-07	7.16E-09	3.00E-08	1.47E-11	
10.5					9.20E-03	5.47E-03	2.91E-03	8.74E-04	1.47E-04	1.42E-04	4.18E-05	4.10E-06	1.32E-06	4.66E-08	1.46E-07	3.56E-10	
11.5					1.67E-02	9.81E-03	6.45E-03	1.91E-03	3.83E-04	3.48E-04	1.16E-04	1.74E-05	4.68E-06	2.28E-07	5.60E-07	4.54E-09	
12.5					2.96E-02	1.60E-02	1.09E-02	3.64E-03	8.48E-04	7.32E-04	2.71E-04	5.54E-05	1.37E-05	8.90E-07	1.80E-06		
13.5						2.46E-02	1.69E-02	6.19E-03	1.64E-03	1.37E-03	5.51E-04	1.44E-04	3.48E-05	2.83E-06	4.99E-06		
14.5							5.02E-02	2.47E-02	9.68E-03	2.89E-03	2.34E-03	1.02E-03	3.23E-04	7.85E-05	7.83E-06		
15.5								3.40E-02	1.40E-02	4.66E-03	3.70E-03	1.74E-03	6.32E-04	1.60E-04	1.89E-05		
16.5									1.94E-02	7.07E-03	5.48E-03	2.73E-03	1.12E-03	2.99E-04			

ここで、長期の超過確率を求める。表 3 に示す短波頂不規則波中での横加速度の短期の超過確率と IACS の波浪発現頻度表を用いて、加重平均により長期の超過確率  $p$  を求めた場合、 $0.0000168$  になる。波浪発現頻度表の平均波周期  $8.86\text{s}$  を用いて (20) 式で単位時間当たりの平均長期危険事象発生確率  $r$  は  $1.9 \cdot 10^{-6}(1/\text{s})$  であり、基準値は  $2.6 \cdot 10^{-8}(1/\text{s})$  より大きいため不合格となる。

#### 4.4 まとめ

3 次元ランプドマスマ法を用いた波浪中の曳航索の動的索張力計算を実施した。動的索張力の変動周期、最大値は良い一致を示した。

メモリー影響を考慮した短波頂不規則波中での時間領域船体運動計算法を構築し、安定した解が得られる最小限の波周波数分割数と計算時間を検討した。検討した計算条件で横波を主方向とする短波頂不規則波中の前進速度無しのコテナ船の船体運動を計算し、模型実験と比較した。その結果、計算と実験での横揺れの 1/3 最大値の 95% 信頼区間は重なっており、本計算法の精度は十分であることを確認した。

精度を模型実験との比較で確認した短波頂不規則波中での時間領域船体運動計算法を用いて、非損傷時復原性基準暫定ガイドラインにある直接復原性評価を実施し、評価手法を示した。

今回、時間領域計算法へ動的索張力の影響を組み込むところまで到達しなかったが、一定の成果が得られた。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2件（うち査読付論文 2件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 T. Kuroda, S. Hara, H. Houtani, D. Ota	4. 巻 187
2. 論文標題 Direct Stability Assessment for excessive acceleration failure mode and validation by model test	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Ocean Engineering	6. 最初と最後の頁 1-8
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.oceaneng.2019.106137	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 T. Kuroda	4. 巻 -
2. 論文標題 Evaluation and countermeasures for excessive acceleration at the bridge caused by the ship stability	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Proceedings of the PRADS 2022	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計1件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 1件）

1. 発表者名 T. Kuroda
2. 発表標題 Evaluation and countermeasures for excessive acceleration at the bridge caused by the ship stability
3. 学会等名 International symposium on practical design of ships and other floating structures, PRADS2022 (国際学会)
4. 発表年 2022年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

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	原 正一 (Hara Shoichi) (60399524)	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
---------	---------