

令和元年9月2日現在

機関番号：14501

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2016～2018

課題番号：16H03135

研究課題名(和文)地球規模に拡大する液体輸送のスロッシング影響を加味した船舶の最適運航システム

研究課題名(英文)Optimal Operation System of Ships with Sloshing Effect for Liquid Transportation in Global Scale

研究代表者

笹 健児 (Sasa, Kenji)

神戸大学・海事科学研究科・准教授

研究者番号：10360330

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 13,300,000円

研究成果の概要(和文)：世界の物流を支える海上輸送は高度化・多様化を迎えており、次世代の海上輸送に対応した技術発展が求められている。特に海上輸送の場合、気象海象の変化が船舶に強く影響し、波浪による船体動揺、船速低下、CO2排出量を最適化するため、本研究では63,000DWTばら積み貨物船による実船実験を計画、準備、実施すると同時に、2010～2016年に実施した28,000DWTばら積み貨物船での荒天航海時のデータ分析を進め、荒天航海時の意識的減速と自然減速の関係を明らかとした。液体貨物の場合、これにスロッシングの影響が加わる状況を再現すべくモデルの構築を実施した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

海上輸送は現代社会の大動脈であるが、陸上輸送と異なり気象海象の変化が船舶に強く影響し、波浪による船体動揺、船速低下、CO2排出量を最適化するため、本研究では63,000DWTばら積み貨物船による実船実験を計画、準備、実施することにより実海域での運航実態を明らかとする点に大きな意義がある。さらに2010～2016年に実施した28,000DWTばら積み貨物船での荒天航海時のデータ分析を進め、荒天航海時の意識的減速と自然減速の関係を明らかとしたことにより、船舶の最適運航(ウェザールーティング)の高度化に重要となる部分の構築できた。

研究成果の概要(英文)：The marine transportation is diversified now, and development of transport technologies needs to be developed. Especially, weather conditions strongly influence to ships, such as ship motions, speed loss, and gas emission in waves. In this study, the field measurement of ship performances has planned and conducted for 63,000DWT bulk carrier to investigate actual situations at sea. Moreover, measured results are analyzed for 28,000DWT bulk carrier to evaluate deliberate speed reduction in rough sea voyages. Theoretical analysis of sloshing is modeled for ships with liquid cargo.

研究分野：安全工学、船舶海洋工学

キーワード：海上輸送 スロッシング 荒天航海 船速低下 船体動揺 実海域性能 数値シミュレーション

様式 C-19、F-19-1、Z-19、CK-19（共通）

1. 研究開始当初の背景

我々が日常必要とする物資の約95%は海上で輸送される。2011年に東北地方が大震災で輸送網が遮断され、地域社会が機能不全に陥ったことは、輸送の重要性を改めて認識する機会となった。英国 Qinetiq 社、Lloyds 社、Strathclyde 大学は2030年には新興国が躍進し、LNG（液化天然ガス）や原油などのエネルギー資源の需要急増、アフリカやオセアニアなど渇水の予想地域への水輸送の需要、利用頻度が低かった南半球や高緯度を含めた輸送経路の拡大等を予測している。また次世代のクリーンエネルギーとして水素を極低温(-253°C)状態とした液体水素など液体輸送の需要は一層増加・多様化すると考えられる。一方、2013年より海洋上のCO2排出削減に関する国際規制(EEDI, Energy Efficiency Design Index)が施行され、2025年までに段階的な削減目標の達成を課せられている。CO2排出量は主機関の燃料消費量に比例するが、これは波浪中の船体動揺、速力低下、機関の出力変化などに大きく左右される。よって波浪中の船舶への諸影響を総合的に評価した運航が非常に重要となり、申請者もこの点の研究を鋭意進めてきた。一方、液体貨物やバラスト水（船舶の重心確保のために積載する水）を積載航海する場合、船に揺れや加速度が加わると液体がタンク内で大きく振動するスロッシング(sloshing)が発生し、船自身にも大きな影響を与える。スロッシングについては国内・海外で数値流体力学や境界要素法による計算例が多数あり、研究が成熟しつつある。しかし、これらの船舶運航への応用事例は非常に少なく、安全指針ではタンクを半載状態としない、スロッシングの固有振動数と波浪の同調を避けるとある。液体輸送が今後急増すれば、船舶数の増加、輸送経路・海域の多様化は必至であるが、満載か空載状態のみでの運航は輸送計画の自由度を強く制限し、固有振動数も様々なモードが発生するため波浪と同調しない設計は容易でない。LNG船は独立タンク方式（スロッシングが小）よりもメンブレン方式（甲板下のスペースにタンクを配置、スロッシングが大）が最近増加している。「タンク＝局所現象」のスロッシングが「船＝全体現象」である波浪中の運動・推進性能に及ぼす影響については未知の部分が多く、荒天時のスロッシングが運動・推進性能へ及ぼす影響を船型やタンク方式ごとに評価でき、地球全体に拡大する輸送経路上の気象海象を正確に推定した最適運航の確立は緊急を要する。

2. 研究の目的

海上輸送の最適化を目標に2009年より国際航海に従事するばら積み貨物船を対象にて荒天時の運動・推進性能を把握、これを反映した最適運航モデルの高度化を達成しつつある。ここでは実船での航海データ（位置、速度、方位、操舵量など）、機関データ（回転数、燃料消費量、馬力など）、気象データ（波浪、風）、船体動揺（船の揺れ、加速度）を世界中の海域で長期間計測し、北太平洋だけでなくインド洋や大西洋の南半球海域においても荒天に遭遇し運動・推進性能が大きく低下した実績が多いことが分かってきた。図-1に2013年6月に南アフリカ沖で計測された諸性能の低下状況を示す。当該海域は観測データも大きく不足しており、船舶運航に与える影響が定量的に分析評価された事例は極めて少ない。

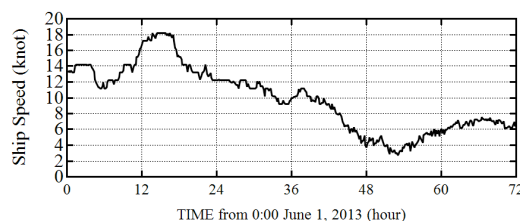


図-1 荒天時の船速低下例

波浪中の船体動揺、速力低下について、実用精度が高く評価されている EUT (Enhanced Unified Theory)にて解析、不規則波中のプロペラ性能、主機関性能、燃料消費量およびCO2排出量を時間領域で推定するモデルに拡張した。EUTからさらに精度向上を目指し三次元計算法（ランキンパネル法）への転換を実施しつつある。しかし高波浪時には船体動揺が顕著となるだけでなく、スラミング（船体が波浪によって持ち上げられた後、海面に激しく叩きつけられる現象）や海水打ち込み（船首部が海面に沈み込んだ時に大量の海水が甲板上に打ち込む現象）など非線形現象も発生し、スロッシングへの影響も無視できなくなる。申請者の研究成果にスロッシング理論を組み合わせ、荒天時の液体輸送に対応可能な解析手法が必須と考え、本研究の着想に至った。

本研究はスロッシングを考慮した船舶の運動・推進性能に対する影響推定モデルの構築、未知の部分が多い南半球や高緯度海域も含めた地球規模での気象海象（荒天時）の高精度推定を行う。

- ①荒天航海時のスロッシングと船体動揺、速力、燃料消費量等との相関関係の明確化
- ②南半球、高緯度を含めた地球規模での気象海象に関する再現性の高度化
- ③スロッシングによる船体動揺、速力、燃料消費量、CO2排出量等への影響推定モデルの構築
- ④地球規模での液体輸送の安全性、経済性、環境性より最適運航に関する方法論の確立

3. 研究の方法

本課題では LNG 船のように液体輸送に従事する船舶を対象に実船実験を行う予定であったが、船会社との交渉にて実現困難との事情があり、ここでは 63,000DWT 型ばら積み貨物船を実船実験の対象に変更した。さらに 2010～2016 年に実施した 28,000DWT ばら積み貨物船の実船データも活用する。

- ①実船実験の計画を策定、対象船型の決定と観測項目およびシステムの設計
 - ②実海域における 63,000DWT ばら積み貨物船に対するデータ計測（2018 年 3 月より実施）
 - ③28,000DWT 貨物船に対する実海域データの分析による荒天時の船速低下、気象海象の推定精度を向上
 - ④荒天航海時における船体動揺を想定した液体スロッシングに関する模型実験
 - ⑤ポテンシャル論をもとにしたスロッシング理論のモデル化
- を対象に 2010 年～2016 年の期間でオンボード計測された実海域データの多面的な分析、過去の関連研究にて提案された閾値の実海域データによる検証、さらに実務者を対象に行ったアンケート調査にて荒天時の機関運転に関する状況の把握に努めた。

4. 研究成果

(1)実海域実験に関する計画策定および観測システムの設計

前述したとおり、当初の構想では液体輸送に従事する船舶（例えば LNG 船）を対象に実施するとしていた。船会社にも構想を説明し、実現可能性を模索したが、船価の高さから共同所有の船舶しかなく、実船実験の実施は困難との事情であった。このため、LNG 船と船型が比較的類似している 63,000DWT ばら積み貨物船を対象に変更した。これまでに 28,000DWT ばら積み船を対象に数年間にわたる実船実験を実施し、世界中の海域にて貴重な実海域データを蓄積してきた。本研究では船をサイズアップした場合の実海域データを取得し、以下の点にて観測の問題があったので、改善を図る。

- ①レーダー波浪計による観測精度の向上
- ②船体動揺とスロッシングの関係性把握
- ③船体運動と加速度の関係性把握
- ④航海時の運動性能と機関性能の関係性を把握

(2)実海域における 63,000DWT ばら積み貨物船に対するデータ計測

対象とした 63,000DWT ばら積み船にて観測システムを設計・構築した。観測項目は船体動揺、加速度、位置、速度、方位、操舵量、主機回転数、主機出力、シリンダ排気温度、過給機回転数等の運動・機関性能に関する項目を、風向、風速、波浪（方向スペクトル）を同時計測するシステムとした。船体動揺および加速度について、慣性計測ユニット NAV440 を船内に設置し、波浪についてはレーダー式波浪計を一式設置した。その他については、船内に設置される VDR およびエンジンデータロガーから船陸間通信装置（IBSS）から LAN 接続にてデータ通信を行う。システム設計および設置工事を平成 28 年度～29 年度に実施し、平成 30 年 3 月より実船計測を開始し、現在も実験を実施中である。

(3)28,000DWT 貨物船に対する実海域データの分析による荒天時の船速低下、気象海象の推定精度を向上

南半球海域を航行していた 28,000 トン級のばら積み貨物船を実験対象とした。表-1 にばら積み船の主要目を示す。

表-1 28,000DWT ばら積み貨物船の主要目

Length, between Perpendiculars	160.4 m
Breadth	27.2 m
Draft (Fully Loaded)	9.82 m
Navigation Speed	14.0 knots

主機出力やスラスト、主機回転数といった航海機関データについては船内の計器により観測されたデータをエンジンデータロガーから船陸間通信装置を介して記録され、船体運動及び各加速度等については船橋に設置した慣性計測ユニットにより観測した。航海機関データは 1 秒ごとに記録され 1 時間を 1 データ(1×60×60=3,600 点)として、船体運動及び加速度等は 0.1 秒ごとに記録され 1 時間を 1 データ(10×60×60=36,000 点)として保存される。波浪情報に関しては、気象機関 NCEP (National Centers for Environmental Prediction) および ECMWF (European Centre for Medium Range Weather Forecasts) が公開している気象の客観解析データ NCEP-FNL および ERA interim をもとに、グローバル波浪モデル Wave WATCH III にて数値計算した結果及び客観解析データを入力とし、大気モデル WRF にて風情報を再現した後に Wave WATCH III で波浪情報を求める三手法で計算した結果を用いた。表-2 に示すように 3 種類の計算波を用いて相対水位変動を求めるものとする。今回使用する実海域データは本船がアフリカ大陸南岸を西航しながらインド洋から大西洋に向かって航行中に船首方向から強風を伴った高波浪に遭遇している。図-2 に表-2 にて

示した三手法にて2013年6月1日～4日における本船位置での有義波高の追算した結果を示す。図より、6月2日～3日にかけて波高が非常に高くなっており、最大で5～7mとなっている中で荒天航海している。これより、2013年6月1日～3日までの3日間を対象としている。

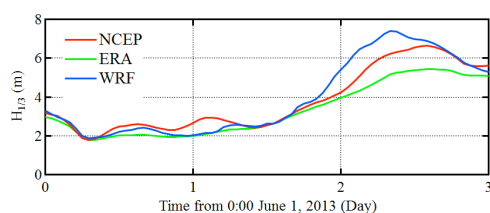


図-2 荒天航海時における船舶位置での有義波高の変化 (2013年6月1日～3日)

船舶が荒天に遭遇する場合、船体動揺が増加するとともに波高の2乗に比例する抵抗増加も顕著となる。荒天時には船体動揺の非線形性が強くなりスラミングや海水打ち込みといった強非線形現象が発生するほか、鉛直および水平方向の加速度や roll が増大すると乗組員が作業困難となるであろう側面より、ある程度以上の荒天状況になると、自然減速となる前に船体の安全確保のため、意識的な減速操作を行うのが一般的とされている。このときの判断指標について、欧州を中心に1970～1980年代に多くの研究が実施されている。この中でもノルウェーのNORDFORSKが実施した調査によると、FP および船橋での鉛直加速度、船橋での水平加速度、および roll の rms 値、さらにスラミングおよび海水打ち込みの発生確率について、表-2 に示す限界値が示されている。航海中にこれらの値の内いずれかを超過する場合、意識的減速に至る考え方である。

表-2 意識的減速に関する提案指標例

Vertical Acceleration at FP (rms)	0.2 g
Vertical Acceleration at bridge (rms)	0.15 g
Lateral Acceleration at bridge (rms)	0.12 g
Roll (rms)	6.0 °
Probability of Slamming	0.025
Probability of Deck Wetness	0.05

機関データの処理はそれぞれ1分間ごとの平均値を取り、1時間あたり60点の変動値として処理する。船体運動および各位置における鉛直加速度、分析結果等の観測データを整理しそれぞれの関係性について考察する。図-2 に2013年6月1日～3日間の船橋における鉛直加速度の変化を示す。図中の赤線は表-3 に示した現在基準とされている値を表す。図-3 に同時刻の船速と主機回転数を示す。図-3 より船橋にて40時間を超える時間から顕著に大きくなり始め、特に船橋では限界とされている0.15gを上回りつつある。図-1 および図-4 より速の顕著な低下は40時間を過ぎた頃から生じており、主機回転数もほぼ同じタイミングで低下していることがわかる。船速については当時12ノットにて航行しているが、30時間くらいの時点から2ノット程度の減速が生じている。一方で主機回転数は低下していない。図-5 と比較すると船橋での鉛直加速度がしきい値(0.15g)を超過したのが40時間付近であるため、船速および主機回転数が大きく低下し始めるタイミングに非常に近い。荒天航海時にもかかわらず海水打ち込み確率やスラミングの発生確率が非常に低く出た原因として二つ考えられる。一つは、この航海においてばら積み貨物船が満載状態でなかったことが挙げられる。満載でなかったため水面から船首部までの距離が大きくなり海水打ち込みやスラミングが発生しづらかったのではないかと推察される。もう一つは海水打ち込みの発生確率を相対水位変動が水面から貨物船の船首楼高さまでの距離 f を上回る時と定義した点にある。ばら積み貨物船において船首部は船楼甲板と呼ばれる海水打ち込みを防ぐための部位があり、乾舷よりも少し高い位置となっている。つまり船首の一部では船楼甲板により海水打ち込みを防ぐことができているがその少し後部の乾舷部分では海水打ち込みが発生している可能性が考えられるため、海水打ち込みの定義を水面からデッキまでの高さを上回る時と定義すれば海水打ち込みの発生確率は大きくなるだろうと考えられる。

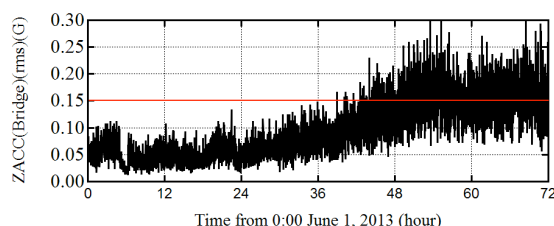


図-3 鉛直加速度の変動 (2013.6.1～3)

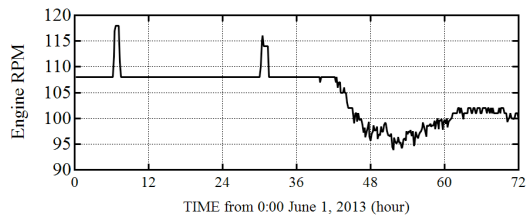


図-4 主機回転数の変化 (2013.6.1~3)

一方、荒天航海時にはプロペラから軸を通じて抵抗が増大し、主機出力やスラストが低減する。船速を維持しようとすれば、燃料投入を増加させ主機出力の低下を防止する必要がある。ただし、この状況で燃料増加は燃焼不良による排気温度の上昇や過給機への圧縮空気の逆流(サージング)等が生じ、主機が過負荷となる危険性がある。このため、機関室では関連する項目を常時モニタリングし、上記現象のおそれがある場合には燃料投入量を減少させ、主機回転数を意識的に下げる措置を取ると言われている。ここで荒天時に生じた軸系および主機関係のパラメータについて、変動する周期特性を把握することも重要と考え、これらのデータに対する周波数特性を比較した。図-5 に主機回転数、燃料流入量、過給機の回転数および船速を対象に 6 時間のデータ長さ(1s 間隔)にてスペクトル解析した結果を示す。

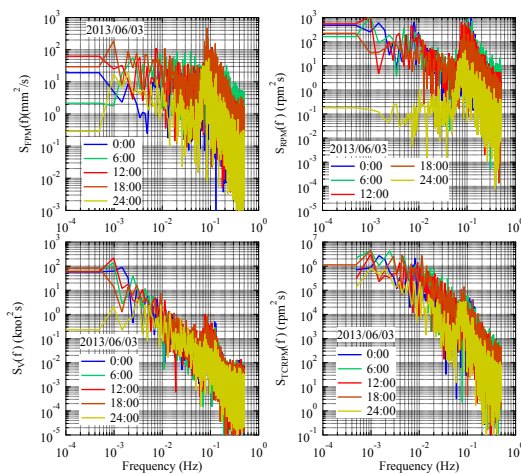


図-5 主機関連のスペクトル (荒天時)

静穏時のスペクトルにて低周波数側の値が大きくなっているケースについて、減速運転している影響にて煙突に付着したススを落とすために主機回転数を常用の回転数に増速する操作のためである。静穏時と荒天時の両方にて $0.005 \sim 0.008\text{Hz}$ ($125 \sim 200\text{s}$) の領域にピークが見られるが、周期が 2~3 分であることを考えるとオートパイロットの影響によるものと言える。一方、荒天時のみ 0.1Hz (10s) 付近に顕著なピークが存在するが、これは周期を考慮しても波や船体運動に影響された成分であることも明らかであろう。さらに $0.001 \sim 0.002\text{Hz}$ ($500 \sim 1000\text{s}$) にもピークが存在するが、これが意識的減速に関わる操作の周期ではないかと考えられる。前述のアンケート調査にても減速操作の効果確認と作業判断に関する周期は 10 分~1 時間程度との回答が多かった結果にも合致しており、調査結果の妥当性がデータからも裏付けられる。以上から荒天時には周期 2~3 分のオートパイロット操作に加え、周期 10s 前後の波浪影響および周期 9~17 分程度の意識的操作が重なった状態で船速低下が発生している点が明らかとなった。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 (計 9 件)

- (1) 笹健児、三井正雄、青木伸一、田村政彦：外洋性港湾における船舶係留の現状分析および緊急安全システムの構築、土木学会論文集 B2(海岸工学)、Vol.74, No.2, pp.1_1399-1_1404, 2018
- (2) Prpić-Oršić, J., Sasa, K., Valčić, M., and Faltinsen, O. M., "Energy Efficiency of Ship Under Real Weather Conditions", Proceedings of the 37th International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering, OMAE2018, pp.1-7, 2018
- (3) Sasa, K., Mitsui, M., and Tamura, M., "Survey and Analysis on Safety of Ship Mooring Operations in Japanese Ports Facing Open Seas", Proceedings of the 37th International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering, OMAE2018, pp.1-8, 2018
- (4) 笹健児、竹内海智、田村政彦、三井正雄：波浪データを用いた係留限界の二段階予測によ

- る短距離フェリーの最適運航、土木学会論文集 B2(海岸工学)、Vol.73、No.2、pp.I_1459-I_1464、2017
- (5) Sasa, K.: “Optimal Routing of Short -Distance Ferry from the Evaluation of Mooring Criteria”, Proceedings of the 36th International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering, OMAE2017, pp.1-8, 2017
 - (6) Lu, L.F., Sasa, K., Sasaki, W., Terada, D., Kano, T., and Mizojiri, T., “Rough Wave Simulation and Validation using Onboard Ship Motion Data in the Southern Hemisphere to Enhance Ship Weather Routing”, Journal of Ocean Engineering, Vol.144, pp.61-77, 2017
 - (7) Sasa, K., Faltinsen, O.M., Lu, L.F., Sasaki, W., Prpić-Oršić, J., Kashiwagi, M., and Ikebuchi, T., “Development and Validation of Speed Loss for a Blunt-shaped Ship in Two Rough Sea Voyages in the Southern Hemisphere”, Journal of Ocean Engineering, Vol.142, pp.577-596, 2017
 - (8) 笹健児、盧麗鋒、佐々木亘、寺田大介、加納敏幸、溝尻貴明：国際海上輸送におけるウェザールーティングの高度化に関する基礎的研究 I -南半球での荒天航海時における遭遇波浪の特性推定-、日本船舶海洋工学会論文集、第 25 号、pp.157-173、2017
 - (9) Sasa, K., Lu, L.F. and Chen, C.: “A Basic Study on Ship Speed Loss from the Viewpoint of Geographic Conditions and Ship Performance”, Proceedings of the 35th International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering, OMAE2016, pp.1-8, 2016

[学会発表] (計 6 件)

- (1) 藤松拓也、笹健児、陳辰、庄司りり：データ解像度の違いによる最適運航シミュレーション結果への影響比較、日本船舶海洋工学会講演会論文集、Vol.27、pp.517-522、2018
- (2) Trimulyono, A., Hashimoto, H., Osabe, N., Matsuda, A., Sasa, K., Taniguchi, Y., and Kawmura, K., “Large-scale Particle Simulation of Sloshing in a LNG Tank”, 日本船舶海洋工学会講演会論文集、Vol.26, pp.49-53, 2018
- (3) 竹内海智、笹健児、O. M. Faltinsen、J. Prpić-Oršić、三輪 誠、橋本博公：実海域データより見た荒天航海時の船速低下を支配する諸要因に関する基礎研究、日本船舶海洋工学会講演会論文集、Vol.26、pp.369-374、2018
- (4) 高垣暢、笹健児、寺田大介：外洋航行中の大型フェリーにおける車両貨物の安全性を支配する諸要因について-オンボード計測データを用いた一考察-、日本船舶海洋工学会講演会論文集、Vol.25、pp.559-564、2017
- (5) 米村太志、笹健児、盧麗鋒、大澤輝夫：ウェザールーティングにおける荒天航海時の風波再現性に関する比較検証、日本船舶海洋工学会講演会論文集、Vol.25、pp.589-594、2017
- (6) Sasa, K., Faltinsen, O., and Kashiwagi, M., “Comparison of Ship’s Speed in Some Numerical Simulation Methods”, Proceedings of the Third International Conference on Violent Flows 2016, pp.1-7, 2016

6. 研究組織

(1)研究分担者

研究分担者氏名：橋本 博公

ローマ字氏名：HASHIMOTO, Hirotada

所属研究機関名：神戸大学大学院

部局名：海事科学研究科

職名：准教授

研究者番号 (8 桁)：30397731

研究分担者氏名：柏木 正

ローマ字氏名：KASHIWAGI, Masashi

所属研究機関名：大阪大学大学院

部局名：工学研究科

職名：教授

研究者番号 (8 桁)：00161026

研究分担者氏名：佐々木 亘 (平成 28 年度のみ)

ローマ字氏名：SASAKI, Wataru

所属研究機関名：(株) 風力エネルギー研究所

部局名：技術部洋上グループ

職名：研究員

研究者番号 (8 桁)：30462500

(2)研究協力者

なし

※科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。