

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 21 日現在

機関番号：82627

研究種目：基盤研究(A) (一般)

研究期間：2013～2015

課題番号：25249129

研究課題名(和文)乱流摩擦抵抗低減のためのポリマー溶出界面の研究開発

研究課題名(英文)Study on interface with polymer elution for turbulent friction drag reduction

研究代表者

安藤 裕友 (ANDO, HIROTOMO)

国立研究開発法人 海上技術安全研究所・その他部局等・上席研究員

研究者番号：70462869

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 36,100,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では乱流中の壁面に掛かる摩擦抵抗を低減させるためにポリマー溶出界面を創出することを考えた。これは、乱流中にポリマーを添加することにより摩擦抵抗低減が生じるトムズ効果を応用した技術である。しかし、摩擦抵抗低減メカニズムは、十分に解明されていないため適切なポリマー溶出界面を創出することが難しい。そこで、ポリマー・乱流相互作用としてのトムズ効果のメカニズムを解明し、適切な会合特性をもつポリマーと溶出機構制御の基礎の確立を目指した。主な成果は、ポリマー会合体をマルチビーズ・バネ・ダンパモデルで表現した直接数値シミュレーションでポリマー会合体と乱流との相互作用を評価できる計算手法を開発した。

研究成果の概要(英文)：In this study, we tried to create interfaces between solid surface and liquid by polymer elution from solid walls to reduce the frictional drag that applied to the walls in turbulent flow. The technology is based on the Toms effect that causes frictional-drag reduction by addition of polymers in turbulent flow. However, it is difficult to create suitable interfaces by polymer elution since the reduction mechanism of the frictional drag is not well clarified. Therefore, we aimed to elucidate the mechanism of the Toms effect with regard to polymer-turbulence interaction, synthesize polymers with appropriate association property, and establish the control method of elution. As major outcomes, we have developed the calculation method that can evaluate the interaction between associated polymers and turbulence using direct numerical simulation in which polymer association is represented by using beads-spring-dashpot chain model.

研究分野：船舶海洋工学

キーワード：船底摩擦低減 ソフトマター ポリマー会合

### 1. 研究開始当初の背景

研究代表者とその研究チームは、2007年度から2009年度に、独立行政法人新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO)の「エネルギー使用合理化技術戦略的開発」プログラムにおいて先導研究課題「海水摩擦抵抗を低減する船舶用塗料の基礎技術の研究開発」を実施し、ポリエチレンオキド(PEO)を添加した試作塗料を長さ8mの模型船に塗布して行った水槽試験で11.5%の摩擦抵抗低減が得られることを示すとともに、以下の知見を得た。

(1) 固液界面から流れの粘性底層・緩和層にポリマーが供給されることで、レイノルズ応力の抑制による摩擦抵抗低減が可能である。

(2) 抵抗低減効果の高いポリマーは超高分子量(>100万g/mol)であり、抵抗低減効果は分子量と相関する(図1参照)。また、抵抗低減には渦のサイズと同等の大きさ(50 $\mu$ m程度)が必要であることが直接シミュレーション(DNS)から推測される。

(3) ポリマー溶出機構を付与した塗料の適用により、外部流れ場においてポリマー溶出により抵抗を低減することは原理的に可能である。

しかしながら、市販のポリマーと現行の塗料の組み合わせでは、抵抗低減効果の持続時間が短く、この原理を実際の船舶に適用するためには飛躍的な持続性向上が必要である。そのために、流体とポリマーの相互作用の解明に基づく合理的な高機能ポリマー設計が必要であり、一方で、関係する学術・技術の発達により、ポリマーと流れの相互作用の理解を大きく進めることができる。具体的には：

- ・流れの速度分布を計測する技術により、界面近傍の流れ場の構造を明らかにできる可能性がある。

- ・ソフトマター科学において、溶液中のポリマー状態を計測することが可能となっており、界面近傍に適用することで溶出から流れとの干渉までの状態を追跡できる可能性がある。

- ・材料科学においても、湿潤な環境における観察技術が進歩して、溶液中のポリマー観察が可能となってきた。

- ・Navier-Stokes方程式を直接計算するシミュレーション(DNS)の高度化により、界面近傍の流れを詳細に知ることができる。ポリマー分子を表現することができれば、トムズ効果のメカニズムを数値計算上で明らかにできる可能性がある。

- ・自己組織化によりさまざまな構造や機能を分子に付与する技術の研究が進み、トムズ効果発現に適したポリマーを設計することが可能となってきた。

これらの手法・技術を総合することにより、抵抗低減メカニズムに基づく材料創製により、トムズ効果を船舶を含む外部流れ場に適

用する技術の基礎が確立できるようになる。本研究では、流体力学、材料科学、ソフトマター科学を背景とする研究者が協働して、ポリマー・水(乱流)相互作用による渦発生抑制のメカニズム解明と、それに基づくポリマー溶出界面の創製のための基礎技術について検討を行う。

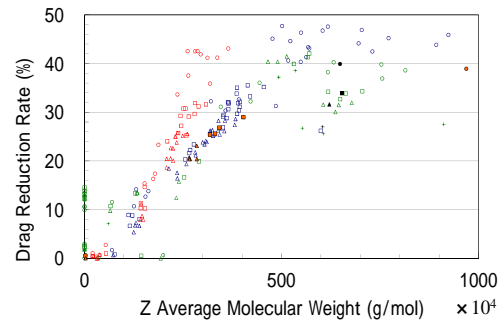


図1 分子量と抵抗低減効果の相関

### 2. 研究の目的

船舶運航のエネルギー消費の大半を占める乱流摩擦抵抗を低減することは、海運のエネルギー高効率利用に貢献する。特殊なポリマーの微量添加による劇的な流体抵抗低減(最大70%)はトムズ効果として知られているが、船舶のような外部流れ場では実用化されていない。今までに、船底塗料の防汚剤溶出制御技術を用いてソフトマター層を固液界面近傍に形成させ、10%超の摩擦抵抗低減が可能であることを実証したが、実用化にはポリマー・塗料系の抜本的な再構築が必要である。ポリマー分子の会合により適切な粘弾性を示す分子団の形成が必須であり、会合体特性の制御が抵抗低減のカギであることが示唆されている。本研究では、流体、材料、ソフトマターというスケールや手法の異なる学術領域の連携により、ソフトマター界面の流れ場と分子状態を計測し、ポリマーの溶出、会合体形成、拡散、流体への作用を明らかにする。これらの結果を基に、ポリマー・乱流相互作用としてのトムズ効果のメカニズムを解明し、適切な会合特性をもつポリマーと溶出機構制御の基礎を確立する。

### 3. 研究の方法

#### (1) 溶出ポリマーの水中形態の解明

抵抗低減効果があるポリマーが水中でどのような形態を取っているのかを解明するために、流れ場中の生体高分子凝集体などの測定実績のあるフィールド・フロー・フラクシオネーション法(FFF;巨大粒子やポリマーなどを薄いリボン状(フローチャンネル)の空間で分離し、本来の形態のまま測定できる方法)や光散乱による粒度分布解析等により水中でのポリマーの状態を測定する手法を確立する。そのような手法を確立することで、水中でのポリマーの状態を測定し、会合体(分子団)の形成、サイズ及び形態等を明

らかにする。

(2)ポリマーの溶解過程における会合特性の制御

抵抗低減機能の高いポリマーを得るために、ポリマーの会合状態や流体中でのポリマーに関する知見から、有効な会合を誘起させるモデルポリマー群を調査する。モデルポリマー群としては、自己組織化技術等を応用して、疎水性相互作用、静電相互作用、水素結合、トポロジカル結合等の多様な会合様式で会合体を形成するモデルポリマーを対象としている。その調査結果を踏まえてポリマーを試作し、会合状態を分光学的に評価する。これらの結果で得られた流体中でのポリマー状態に関する情報を基礎に、抵抗低減に影響する会合基団の種類、密度、位置等の因子を解明する。最終的には、それらの結果を踏まえて、流体中でのポリマー状態に関する情報を基に、抵抗低減に影響する会合基団の種類、密度、位置等の因子によって会合特性が最適化されたモデルポリマーの創製及び第2成分の添加による抵抗低減の向上を目指す技術を明らかにする。

(3)ポリマー・水系の速度場計測・数値シミュレーション

速度場計測に関しては、既存水路を使用して、壁面よりポリマーを溶出させることでソフトマター状態を形成させて、界面近傍における速度とその分布を計測することで、ポリマー会合体と乱流との相互作用を計測することが可能となる。そのために必要な測定手法について検討を行う。数値シミュレーションに関しては、ポリマー会合体をマルチビーズ・パネ・ダンパモデルで表現し、直接数値シミュレーション(DNS, 図2参照)を用いたポリマー会合体と乱流との相互作用を評価できる計算手法を開発する。開発したDNSを用いてポリマー会合体と乱流との相互作用を評価する。評価結果よりソフトマターによる摩擦抵抗低減メカニズム及び各ポリマー会合体と乱流構造との相互作用を流体力学的に解明する。

(4)ポリマー溶出機構を有する樹脂/ポリマー系の創製

溶出を効果的に持続させる方法として、加水分解による表面研磨機構或いはゲル状樹脂をベースとしたポリマー溶出型マトリックス樹脂を検討する。ポリマー溶出に適した物理特性(水溶解性,強度等)を得るために、防汚塗料技術を応用して、アクリル樹脂、金属アクリル樹脂、シリコン樹脂等をベースとした樹脂及び有効な添加剤の成分に関して検討する。検討した結果を踏まえて、有効なポリマー溶出機構を有する試作塗料を作製する。

(5)外部流れ場におけるポリマー溶出による摩擦抵抗低減効果の検証

平行平板試験装置(試作塗料と標準塗料を塗装した2枚の平板の同時曳航により試験水槽で高精度に摩擦抵抗を測定する装置,図3

参照)を用い、外部流れ場とみなせる船舶試験水槽(長さ150m,幅7.5m,水深3.5m)での曳航試験において創製したポリマー溶出機能を有する界面の低減効果を検証する。

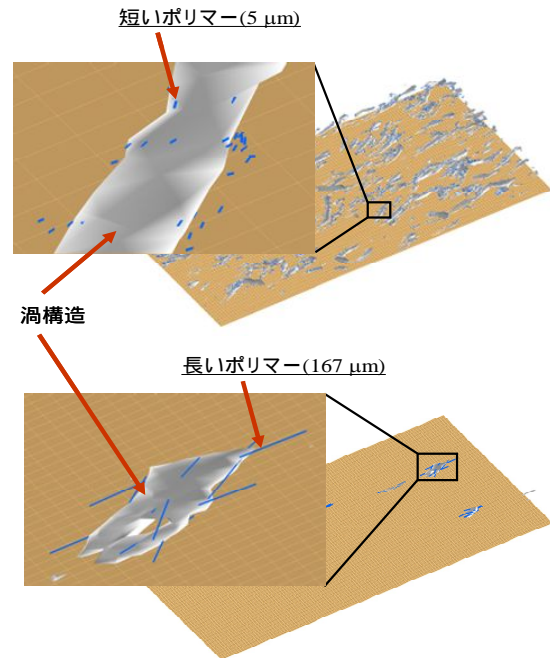


図2 ポリマー1分子毎でのDNSでのポリマー長さとの乱流渦の相互干渉の計算例

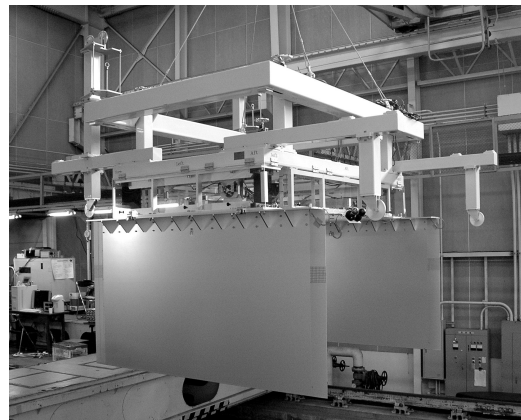


図3 装置の外観

#### 4. 研究成果

各年度の研究成果は下記のとおりである。

○平成25年度

溶出ポリマーの水中挙動の解明に関しては、フィールド・フローフリクシオン法を導入し、会合特性を測定するために適切なパラメータについて検討を行った。現状は、パラメータの検討が十分ではないが、公称分子量よりも数十倍大きなポリマー状態を計測することが出来た。ポリマーの溶解過程における会合特性の制御に関しては、溶解

過程における摩擦抵抗低減効果の増大について、分子量分布やサイズ変化との相関を光散乱測定や分子量測定によって検討した。すなわち市販の PAM と定法に従いアクリルアミドモノマーを重合した PAM の 2 つのポリマーに対して、時間経過毎の DR 効果と分子量及び回転半径を計測した。その結果、いずれの PAM においても溶解初期過程では、重合時に生じる高分子鎖の絡みあい等によって生じる会合物が存在し、これによって DR 効果が増大されている一方、これを十分良く溶解すると分子量、回転半径、そして DR 効果がいずれも減少することが明らかになった。ポリマー・水系の速度場計測・シミュレーションに関しては、ポリマー壁面溶出により界面近傍にソフトマター状態を形成させ、その場の速度とその分布を計測することで、溶出したポリマーが流れ場に与える影響を解明するための計測手法の検討を行った。計測手法として、粒子画像流速測定法 (PIV: Particle Image Velocimetry) を用いて、壁面の極近傍に流れ場を測定することが可能となった。具体的には、平滑面上における PIV 計測の実験結果は DNS の結果と粘性底層まで良く一致し、本実験装置の平滑時における流れ場及び PIV 計測の健全性を確認した。高精度な計測技術が確立したことで、通常は計測ができないポリマーが発生する応力も、全応力から計測したレイノルズ応力・粘性応力を減算することにより、算出することが可能となった。また、ポリマー会合体をマルチビーズ・パネ・ダンパモデルで表現し、DNS を用いたポリマー会合体と乱流との相互作用を評価できる計算手法の検討を行った。

#### ○平成 26 年度

溶出ポリマーの水中形態の解明に関しては、FFF 法や光散乱による粒度分布解析により水中でのポリマーの状態を測定した。溶媒中に塩を添加することで、会合体(分子団)の形成に変化が生じることが確認され、それに伴い抵抗低減効果の変化が起きることも確認できた。ポリマーの溶解過程における会合特性の制御に関しては、分子量 1000 万以上の超高分子量ポリマーを合成することが可能となり、それらのポリマーを用いて種々の塩存在下でのポリマーの抵抗低減効果の変化を確認した結果、超高分子量化によって極低濃度での抵抗低減効果が増大すること、また電解質ポリマーは流体中の食塩によって溶解速度が著しく加速し、結果として同効果が増大するなど溶解過程の変化と低減効果の相関も確認できた。一方、金属イオンとの配位結合によるポリマー会合体の形成を目的とし、銅や亜鉛イオンなどの添加を試みた。そして配位力の強い銅イオンでは、数 ppm という極微量でも抵抗低減効果を低下させる一方、配位力の弱い亜鉛イオンでは低減効果への影響はほとんど見られなかった。以上より配位結合による会合体形成は低減効果の

向上に寄与しないことが推測できた。ポリマー・水系の速度場計測の実験のツールとして、超高分子量ポリマーに蛍光修飾する技術を確立するための検討を行い、蛍光修飾した超高分子量ポリマー(重量平均分子量 1000 万以上)をグラムスケールで作製できるようになった。ポリマー・水系の速度場計測・数値シミュレーションに関しては、蛍光修飾したポリマーと従来のローダミンを溶液に混ぜたポリマーとで乱流中のポリマー状態を比較した結果、蛍光修飾したポリマーの方が長時間糸状物質を維持することが分かり、今後壁面近傍での摩擦抵抗低減効果メカニズムを解明するための新たなツールを見出すことができた。さらに、波長帯によって光を反射・透過するダイクロイックミラーと高速度カメラ 2 台を用いることにより、蛍光修飾したポリマーを観察するレーザー誘起蛍光法 (LIF: Laser Induced Fluorescence) と流体速度を計測する PIV の同時測定が可能な装置を構築した。また、ポリマー会合体をマルチビーズ・パネ・ダンパモデルで表現したポリマー・乱流の DNS を用いてポリマー会合体と乱流との相互作用を確認した。ポリマーの混入濃度を一定の条件で、ポリマー会合体の分子量を増加させた場合(マルチビーズ・パネ・ダンパモデルの自然長を延ばすことに相当)、抵抗低減効果が増加することが分かった。ポリマーモデルと流体との間で乱れの散逸量が増加し、渦構造が減少することに起因する。ポリマー溶出機構を有する樹脂/ポリマー系の創製に関しては、ポリマー溶出に適した塗料樹脂としてアクリル樹脂、金属アクリル樹脂、シリコン樹脂などをベースとした塗料にポリマーを混入させてポリマー溶出機構について検討を行った。現状では、ポリマーを塗料から溶出させて界面に滞留させた状態を作り出すことができたが、低減効果を十分に得るまでには至っていない。

#### ○平成 27 年度

ポリマーの溶解過程における会合特性の制御に関しては前年度までの結果を踏まえて、流体中でのポリマー状態に関する情報を基に、抵抗低減に影響する会合基団の種類、密度等の因子によって会合特性が最適化されたモデルポリマーの創製による抵抗低減の向上の可能性を検討した。まず上述したポリマーの溶解初期の絡み合いによる会合物を持続的に発生させることを目的とし、表面をコーティングしたポリマーの抵抗低減効果の経時変化を測定した。その結果、コーティング前に比べ、低減効果が増大し(約 9.6% 増)、効果持続性も若干改善することが明かとなった。一方、ポリマーの架橋反応による高分子量化では、分子量やポリマー粒径は増大するものの、検討した全ての架橋密度において抵抗低減効果がむしろ減少することが判明した。これは架橋によって溶媒膨潤が抑制されたためと推測される。

また、ポリマー・水系の速度場計測に必要な、超高分子量かつ蛍光修飾したポリマーを作製した。加えて同ポリマー作製のスケールアップ技術も確立できた。ポリマー・水系の速度場計測・数値シミュレーションに関しては、蛍光修飾したポリマーを用いてポリマー会合体と乱流との相互作用を検証した。抵抗低減効果が発生する場合、アスペクト比の大きい(細長い)蛍光修飾されたポリマーが観察され、乱流強度も減少していることが分かった。また、ポリマー会合体をマルチビーズ・バネ・ダンパモデルで表現し、ポリマー-乱流のDNSを用いて、ソフトマターによる摩擦抵抗低減メカニズム及び各ポリマー会合体と乱流構造との相互作用を流体力学的に解明した。抵抗低減効果が大きい程、乱流強度は減少するが、ポリマー会合体はより流れ方向に配向し、より真っすぐに伸びることが分かった。渦構造周りでは、ポリマー会合体と流体とのエネルギー輸送が増加することも示された。ポリマー溶出機構を有する樹脂/ポリマー系の創製に関しては、ポリマー溶出に適した金属アクリル樹脂及びシリコン樹脂をベースにした試作塗料を作製した。試作塗料が持続的に界面にポリマーを供給できるかを確認するために、二重円筒試験装置を用いて、1週間エージング後の効果を確認した。結果としてシリコン樹脂系塗料は、1週間後でも界面にポリマーを滞留させた状態を保持でき、比較対象円筒(無塗装塩ビ円筒)と同程度の抵抗値を示していることを確認した。外部流れ場におけるポリマー溶出による摩擦抵抗低減効果の検証に関しては、上記の試作塗料に対して平行平板試験装置を用いた外部流れ場とみなせる船舶試験水槽(長さ150m,幅7.5m,水深3.5m)での曳航試験を実施した。結果としては、二重円筒試験と同様に1週間浸漬後でも比較対象平板(無塗装アルミ板)に近い抵抗値を示すことを確認した。また、試験後の塗膜断面を走査型電子顕微鏡で観察した結果、塗膜中にポリマーが残存していることを確認した。

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計3件)

- (1) M. Fujimura, H. Mamori, K. Iwamoto, A. Murata, M. Masuda, and H. Ando, Energy Transfer between Turbulent Structures and Polymer in Drag-Reducing Channel Flow by Using Beads-Spring-Dashpot Chain Model, Proc of 8th International Symposium on Turbulence, Heat and Mass Transfer, Sarajevo, Bosnia and Herzegovina, Sept. 15-18, 2015, J060(11pages).
- (2) T. Atsumi, H. Mamori, K. Iwamoto, A. Murata, H. Ando, M. Masuda, and M. Wada, Friction-Drag Reduction Effect in Wall Turbulence with Fluorescently-Labeled Polymer, Proc of 8th International Symposium on Turbulence, Heat and Mass Transfer, Sarajevo, Bosnia and Herzegovina, Sept. 15-18, 2015,

J034(7pages).

- (3) 藤村将成, 守裕也, 岩本薫, 村田章, 増田光俊, 安藤裕友, 離散要素モデルが粘弾性流体の伸張変形に与える影響, 流体力学会誌「ながれ」第35巻2号

〔学会発表〕(計10件)

- (1) 増田光俊, 和田百代, 南川博之, 関 庸之, 安藤裕友, ポリアクリルアミドの溶解過程にみられる流体摩擦抵抗の低減増大現象の解析, 第61回高分子討論会, 2013.9.12, 金沢
- (2) 増田光俊, 和田百代, 南川博之, 関 庸之, 安藤裕友, ポリアクリルアミドの溶解過程にみられる流体摩擦抵抗の低減増大現象の解析, 第61回レオロジー討論会, 2013.9, 山形
- (3) 渥美宝, 守裕也, 岩本薫, 村田章, 安藤裕友, 増田光俊, ポリマーによる摩擦抵抗低減を目的とした平行平板間乱流のPIV計測, 関東学生会第53回学生員卒業研究発表講演会, 2014.3, 東京
- (4) M. Fujimura, H. Mamori, K. Iwamoto, A. Murata, M. Masuda and H. Ando, Numerical Simulation of Drag-Reducing Turbulent Channel Flow with Spring-Damper Chain Elements, The Third International Education Forum on Environment and Energy Science, 2014.12, オーストラリア
- (5) 増田光俊, 和田百代, 南川博之, 森田裕史, 岩本薫, 関庸之, 安藤裕友, 流体摩擦抵抗の低減効果を示すセルロース誘導体とその会合挙動, 高分子討論会, 2014.9, 長崎
- (6) 増田光俊, 魚類に学ぶ界面摩擦低減技術, 第7回産総研ナノシステム連携促進フォーラム 2014.10, 東京
- (7) M. Fujimura, H. Mamori, K. Iwamoto, A. Murata, M. Masuda and H. Ando, Relationship between Polymer Stress and Elongational Deformation in Drag Reducing Turbulent Flow, the 4th Int. Education Forum on Environment and Energy Science, 2015.12, USA
- (8) 藤村将成, 守裕也, 岩本薫, 村田章, 増田光俊, 安藤裕友, 離散要素モデルが粘弾性流体の伸張変形に与える影響, 第29回数値流体力学シンポジウム, 2015.12, 福岡
- (9) 渥美宝, 守裕也, 岩本薫, 村田章, 安藤裕友, 増田光俊, 和田百代, 壁乱流における摩擦抵抗低減効果を有する蛍光修飾ポリマーの可視化, 日本機械学会 第93期流体力学部門講演会, 2015.11, 東京
- (10) M. Fujimura, H. Mamori, K. Iwamoto, A. Murata, M. Masuda, and H. Ando, Effect of Spring-Damper Chain Elements with Two Different Lengths upon Drag Reduction in Turbulent Channel Flow, ASME-JSME-KSME Joint Fluids Engineering Conference 2015, Seoul, Korea, July26-31, 2015, AJK2015 -14365 (pp.1122-1123).

## 6. 研究組織

(1)研究代表者

安藤 裕友 ( ANDO HIROTOMO )

国立研究開発法人海上技術安全研究所・その他部局等・研究員

研究者番号：70462869

(2)研究分担者

増田 光俊 ( MASUDA MITSUTOSHI )

国立研究開発法人産業総合研究所・その他部局等・研究員

研究者番号：70358000

岩本 薫 ( IWAMOTO KAORU )

国立大学法人東京農工大学・工学(系)研究科(研究院)・准教授

研究者番号：50408712

川島 英幹 ( KAWASHIMA HIDEKI )

国立研究開発法人海上技術安全研究所・その他部局等・研究員

研究者番号：20450679

宮田 修 ( MIYATA OSAMU )

国立研究開発法人海上技術安全研究所・その他部局等・研究員

研究者番号：10450678

高橋 千織 ( TAKAHASHI CHIORI )

国立研究開発法人海上技術安全研究所・その他部局等・研究員

研究者番号：40399530

関 庸之 ( SEKI YASUYUKI )

国立研究開発法人海上技術安全研究所・その他部局等・研究員

研究番号：20645220 ( 2014 年度時点 )

友弘 智 ( TOMOHIRO SATOSHI )

国立研究開発法人海上技術安全研究所・その他部局等・研究員

研究者番号：70761039