

令和 2 年 6 月 29 日現在

機関番号：12614

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2017～2019

課題番号：17K06959

研究課題名（和文）海中用高強度摩擦材の開発

研究課題名（英文）Development of high-strength frictional materials for seawater

研究代表者

藤野 俊和 (FUJINO, Toshikazu)

東京海洋大学・学術研究院・准教授

研究者番号：70508514

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,700,000円

研究成果の概要（和文）：摩擦改質処理は基材と合金化しやすい硬質微細粉末を、キャリア粉末と混合して間断なく基材と工具の間に送り込み、局所的高面圧下で摩擦することにより、微細粉末による被覆層を創生する処理技術である。本研究では、強度が高い金属（耐食性ステンレス鋼、および耐食性はないが工業的に多用される合金鋼）に、研究代表者らのグループが開発した摩擦改質処理と熱処理を併用して密着性が高く海水における耐食性と低摩擦・耐摩耗性を有する表面を創生することによりこれらの性質を付与した。そして各種評価試験を実施し、海中にて使用できる高強度の摩擦材の開発に資する有益な成果を得た。

研究成果の学術的意義や社会的意義

海中用高強度摩擦材に必要とされる条件は、耐食性と低摩擦・耐摩耗性を有することが挙げられるが、これらを海洋環境の汚染なく満足する摩擦材は強度・耐久性に難がある高分子材料を除けばほとんどなく、またこの分野の研究自体極めて少ないのが現状である。本研究では、強度の高い金属に、優れた耐食性と低摩擦かつ優れた耐摩耗性を独創的な方法で付与し、海中にて使用可能な高強度の摩擦材の開発に資する有益な成果を得ることができた。これは学術的にも社会的にも意義のあることである。

研究成果の概要（英文）：Friction reforming technique is a technical treatment to create a coating layer of hard powder by continuously feeding a mixed of hard fine powder that easily alloys with the base material and carrier powder between a base material and a tool and rubbing them under local high pressure. In this study, this friction reforming technique and heat treatment were used to provide a high strength metals with a surface having high adhesion and corrosion resistance, low friction and excellent wear resistance in seawater. And then, we obtained useful results that contribute to the development of high strength frictional materials that can be used in seawater through various evaluation test.

研究分野：トライボロジー

キーワード：海洋環境 トライボロジー 表面改質 耐食性 低摩擦 耐摩耗性 高強度摩擦材

## 1. 研究開始当初の背景

海洋資源の利活用は、今後ますます進展してくるものと考えられ<sup>(1)</sup>、それに伴い海洋資源探査機器・構造物等の性能や信頼性が重要となっている。これらには、多くの摩擦部分や微小なすべりを伴う継手等の接触部分があり、その摩擦・摩耗や腐食に対する技術的課題の解決が急務となっている。そのため、海水環境に適した各種ステンレス鋼の選別試験<sup>(2)</sup>、ダイヤモンドライクカーボン(DLC)膜の海水中での性能評価<sup>(3),(4)</sup>などが行われている。また、カソード防食技術を応用して摩耗を抑止しようとする試みもなされている<sup>(5)</sup>。しかし、潤滑油中での摩擦・摩耗研究に比べ、海水中での評価、材料開発研究は極めて少ないのが現状である。

本研究で取り上げる合金鋼は、腐食には弱くそのままでは使用できない材料である。一方、ステンレス鋼やチタン合金は、優れた耐食性を持つものの、摩擦・摩耗特性には難があり、また海水中では摩擦の繰り返しにより不動態膜が破断して腐食摩耗を生じることが知られている。これらの材料に、海水中における耐食性と低摩擦・耐摩耗性の両方を付与するには、適切な表面処理・表面改質が必要不可欠である。なお、テフロンやポリアミドなどの高分子材料は、低面圧では優れた特性を持つものの、高面圧下での使用には難があり、また膨潤による劣化が知られている。

## 2. 研究の目的

本研究では、強度が高い金属(耐食性ステンレス鋼、および耐食性はないが工業的に多用される合金鋼)に、後述する摩擦改質処理と熱処理を併用して密着性が高く海水における耐食性と低摩擦・耐摩耗性を有する表面を創生することによりこれらの性質を付与し、海水中にて使用できる高強度の摩擦材を開発することを目的とする。

## 3. 研究の方法

研究代表者らのグループでは、基材と合金化しやすい硬質微細粉末を、キャリア粉末と混合して間断なく基材と工具の間に送り込み、局所的高面圧下で摩擦することにより(図1参照)、微細粉末による被覆層を創生する技術を考案している<sup>(6)</sup>。

この被覆層をバニシ仕上げて得られた表面は、(微細粉末の埋め込みと溶着を生じた領域)+(基材表面の露出した領域)が密に分散し、実用に耐える表面粗さをもつ面となる。

これらの処理(以降、摩擦改質という)は、容易に基材表面・表層に硬質微細粉末を埋入/冷間溶着させることを可能とするが、処理可能な基材はピッカース硬さ Hv500 程度以下のものであり、それ以上の硬さをもつ基材に対しては適用できない。また、粉末の密着性が十分でないため、摩擦係数の高い条件でのしゅう動、例えば無潤滑下でのしゅう動などでは、粉末の脱落により耐摩耗性が低下する欠点がある。摩擦改質で創生された材料が、海洋環境中で高負荷を受けつつ、その性能を最大限発揮するためにはこれらの欠点を克服する必要がある。本研究では、これらの欠点を克服する方法として既存技術である熱処理の併用に着目した。

本研究では、摩擦改質と熱処理を併用して密着性が高く海水における耐食性と低摩擦・耐摩耗性を有する表面を創生するものであり、具体的には、(1)耐食性材料に海水中における低摩擦・耐摩耗性を付与し、(2)工業的に多用されているしゅう動材料に海水に対する耐食性と低摩擦・耐摩耗性を付与することを試みる。これらでは(3)熱処理を援用して摩擦改質により被覆された微細粉末を拡散接合させて基材との密着性の向上と高強度化を図る。

得られた改質層を有する材料に対して、

硬さ試験とスクラッチ試験を行い、硬さと硬質粉末の密着強度を調べ、その効果を確認する。

表面および断面の EDX 元素分析等を行い、硬質粉末の拡散浸透状況を調べ、その効果を確認する。

海水中における静的腐食試験を実施して防食効果を確認する。

摩擦摩耗試験を海水中で行い耐摩耗性を評価する。被覆作業、熱処理および から の評価試験を繰り返し、海水中用高強度摩擦材を創出する。なお多くの試料を迅速に評価する必要があることから、円筒表面への被覆を行い、交差円筒方式の往復動摩擦摩耗試験を実施し、その効果を明らかにした。

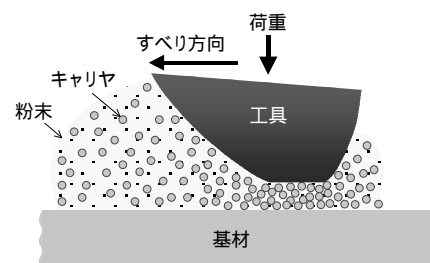


図1 被覆層創生原理

## 4. 研究成果

### (1) 耐食性材料に海水中における低摩擦・耐摩耗性の付与

高強度かつ優れた耐食性をもつ材料である 18Cr-8Ni ステンレススチール (SUS304) を基材として、この表面と工具の間にアルミナ ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ )、チタン (Ti)、クロム (Cr)、窒化チタン (TiN) および窒化クロム ( $\text{Cr}_2\text{N}$ ) の各種硬質微細粉末とキャリア粉末を混合したものを間断なく送りこみ、局所的な高面圧下で摩擦する (摩擦改質処理) ことにより、基材表面に微細粉末による被覆層を形成した。その後、必要に応じて熱処理を施した。これらの結果、基材に対して実用的な表面粗さを有する被覆層が形成できる硬質粉末の組み合わせが明らかになった。

作製された試験片に対して硬さ測定およびスクラッチ試験を実施し、硬さと硬質微細粉末の密着強度について比較検討した。また表面・表層に存在する粉末粒子の分布状況 (拡散浸透の有無) を EDX 元素分析し考察した。これらと並行して海水中における静的腐食試験ならびに往復動摩擦摩耗試験を実施し、耐食性と耐摩耗性を調べ、本手法の有効性を確認した。これらの結果、SUS304 基材に各種摩擦改質処理を施し、その後、熱処理を施すと SUS304 基材に比べ耐食性が低下することがわかった。

### (2) 工業的に多用されるしゅう動材に海水に対する耐食性と低摩擦・耐摩耗性の付与

高強度かつ工業的に多用されている材料としてクロムモリブデン鋼 (SCM435) を基材として、摩擦改質処理にてアルミナ ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ )、チタン (Ti)、クロム (Cr)、モリブデン (Mo) および窒化クロム ( $\text{Cr}_2\text{N}$ ) の各種硬質微細粉末とキャリア粉末による被覆層を形成した。その後、必要に応じて熱処理を施した。これらの結果、実用に耐える表面粗さをもつ面を創生することが確認できた。

作製された試験片に対して、上記(1)と同様に硬さ測定およびスクラッチ試験を実施し、硬さと硬質微細粉末の密着強度について比較検討した。また表面・表層に存在する粉末粒子の分布状況 (拡散浸透の有無) を EDX 元素分析して考察した。これらと並行して海水中における静的腐食試験ならびに往復動摩擦摩耗試験を実施し、耐食性と耐摩耗性を調べ、本手法の有効性を確認した。これらの結果、耐食性と耐摩耗性が向上する硬質粉末の種類が明らかになった。

### (3) 総合考察

総合考察として主にこれまで解析評価した SUS304 基材へ各種処理を施し被覆層を有する材料 (上記(1)) および SCM435 基材へ各種処理を施し被覆層を有する材料 (上記(2)) の両者を対象に、EDX 元素分析やレーザ顕微鏡観察等による詳細な表面および断面状況解析を中心に実施して、海水中における静的腐食試験ならびに往復動摩擦摩耗試験等の各種評価試験により得られた各材料の耐食性と摩擦・摩耗特性について考察を深めた。海水中にて使用可能な高強度摩擦材の開発に資する多くの有益な成果を得るとともに、本研究で解析評価した範囲内で海水中用高強度摩擦材として活用できる可能性が高い基材とその処理方法の組み合わせについて目星をつけることができた。これは学術的および社会的に意義のあることである。

### < 引用文献 >

- (1) 総合海洋政策本部, 平成 21 年度版, 海洋の状況及び海洋に関して講じた施策, 内閣官房総合海洋政策本部事務局, 2009, 17-27.
- (2) E. PEREZ, M. TANAKA, T. JIBIKI: Wear of Stainless Steels -Cause and Transition of Wear of Martensitic Stainless Steel, 日本マリンエンジニアリング学会誌, Vol.48, No.5, 2013, 76-83.
- (3) 志摩 政幸, 根田 康弘, 菅原 隆志, 伊藤 聡史・地引達弘: Cr-Mo 鋼に被覆された DLC 膜の海水中における耐摩耗性改善, 日本マリンエンジニアリング学会誌, Vol.47, No.2, 2013, 139-146.
- (4) 志摩 政幸, 黄 童林, 根田 康弘, 菅原 隆志, 地引 達弘: SUS304 鋼に被覆された DLC 膜のフレッチング摩耗 -海水中における摩耗特性とその改善, 日本マリンエンジニアリング学会誌, Vol.49, No.2, 2014, 98-105.
- (5) M.TAKEUCHI: Fretting and Fatigue of a Roping Steel in Seawater, Ph.D. Thesis, 1988.
- (6) 志摩政幸 (研究代表者): 科学研究費補助金 基盤研究(C) 海洋環境適合摩擦材の開発に関する基礎研究 2011-2013.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計4件（うち査読付論文 4件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Yao Zhu, Toshikazu Fujino, Tatsuhiko Jibiki	4. 巻 4
2. 論文標題 Electrochemical analysis of corrosion and wear resistance characteristics of stainless steel modified by friction reforming under micro-reciprocating frictional conditions in seawater	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Mechanical Engineering Letters	6. 最初と最後の頁 18-00177
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 -

1. 著者名 陳函、大和田貴理子、菅原隆志、藤野俊和、地引達弘	4. 巻 52-6
2. 論文標題 摩擦改質と浸炭熱処理援用による表面改質層を有する合金鋼の海水中における耐食性と摩擦・摩耗特性	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 日本マリンエンジニアリング学会誌	6. 最初と最後の頁 112-119
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 -

1. 著者名 Yao Zhu, Toshikazu Fujino, Tatsuhiko Jibiki	4. 巻 80-10
2. 論文標題 Electrochemical Analysis of Various Materials Modified for the Marine Environment by Friction Reforming	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 ECS Transactions	6. 最初と最後の頁 1415-1426
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 -

1. 著者名 Kiriko Owada, Toshikazu Fujino, Tatsuhiko Jibiki	4. 巻 C14-103
2. 論文標題 Thermodynamic Discussion of Various Materials Modified by Friction Reforming for Adaptation to a Marine Environment	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Proceedings of International Symposium on Marine Engineering (ISME) October 15-19, 2017, Tokyo, Japan.	6. 最初と最後の頁 423-428
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2件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 1件）

1. 発表者名 豊田健一郎, 藤野俊和, 菅原隆志, 地引達弘, 岡部森, 長谷川慎二
2. 発表標題 海中における摩擦改質と熱処理援用による表面改質層を有するステンレス鋼の耐食性と耐摩耗性
3. 学会等名 日本トライボロジー学会トライボロジー会議2018秋伊勢
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Zhu Yao, Toshikazu Fujino, Tatsuhiko Jibiki
2. 発表標題 Electrochemical discussion of various materials modified by friction reforming adapted to marine environment
3. 学会等名 232nd ECS Meeting (国際学会)
4. 発表年 2017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	地引 達弘  (JIBIKI Tatsuhiko)  (40322094)	東京海洋大学・学術研究院・教授    (12614)	
研究分担者	徳田 祐樹  (TOKUTA YUUKI)  (30633515)	地方独立行政法人東京都立産業技術研究センター・開発本部 開発第二部表面・化学技術グループ・副主任研究員   (82670)	
研究分担者	柳澤 憲史  (YANAGISAWA Kenji)  (90585580)	長野工業高等専門学校・機械工学科・准教授   (53601)	

