

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 9 日現在

機関番号：82626

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2011～2013

課題番号：23560177

研究課題名(和文) 安価な砂鉄、珪砂等を用いた自然系液体用しゅう動材料の開発

研究課題名(英文) Development of sliding materials prepared by iron sand, silica sand, etc. for native liquid

研究代表者

村上 敬 (Murakami, Takashi)

独立行政法人産業技術総合研究所・先進製造プロセス研究部門・主任研究員

研究者番号：40344098

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,900,000円、(間接経費) 1,170,000円

研究成果の概要(和文)：Fe-Si系合金についてエタノール中で低摩擦・低摩耗の得られる組成を調べ、Fe-66.7at%SiよりSiが高濃度の領域で低摩擦の得られることを明らかにした。また FeSi₂に5vol%グラファイトを添加するとさらに摩擦係数を下げられることを明らかにした。Fe-Si合金の低摩擦機構はXPSなどの表面分析の結果、SiO₂がエタノールと反応してできる低摩擦ゲル状化合物及び鉄系酸化物両方の効果と考えられる。さらに拡散処理によるコーティング実験の結果、Si拡散処理試料については良い値が得られなかったが、Cr-B拡散処理試料については、良好な耐摩耗性及び低摩擦の得られることがわかった。

研究成果の概要(英文)：The friction and wear properties of Fe-Si alloys were examined in ethanol, and it was found that the Fe-Si alloys containing Si content higher than 66.7 atomic percent exhibited low friction coefficients. It was also found that the friction coefficients of the alpha-FeSi₂ alloys could be reduced by adding 5vol% graphite. According to the XPS analysis, it is considered that the low friction of the Fe-Si alloys was due to the formations of low friction gel-type compounds, which was formed by the reaction of SiO₂ with ethanol, and low friction iron oxides. Besides, it was found that borochromized specimens, not siliconized specimens, exhibited low friction coefficients in ethanol.

研究分野：工学

科研費の分科・細目：機械工学、設計工学・機械機能要素・トライボロジー

キーワード：トライボロジー 表面・界面物性 金属物性 環境対応 材料加工・処理

1. 研究開始当初の背景

1997年の京都議定書以降、地球温暖化抑制のため国内外でCO₂排出量の削減が重要な課題になってきている。CO₂排出量削減方法の一つとして、自動車エンジンの燃料を化石燃料からバイオエタノールなどの自然系液体に切り替える方法が考えられる。このためには現在使用されている内燃エンジンのしゅう動材料をエタノールに合った材料に切り替える必要があるがこのような研究はほとんど進んでいない。現在内燃エンジンのしゅう動部分であるシリンダライナには従来のしゅう動材料である鋳鉄が使用されている。しかし鋳鉄はエタノールに対するしゅう動特性があまり良好でない欠点があり、対策が必要である。研究代表者は、今まで自然系液体など環境負荷の小さい液体中にけるしゅう動材料の開発に従事しているが、最近次の2点を明らかにしている。

- (1) エタノール中で FeSi₂等の Fe-Si 系合金が鋳鉄や Fe₇Mo₆基金金など従来のしゅう動材料より低摩擦を示す。また高硬度のため耐摩耗性も極めて良好である。
- (2) 安価で調達容易な砂鉄、珪砂(それぞれ約 30~40 円/kg)、グラファイトの混合物の熱処理で直接バルク状の Fe-Si 系合金が作製できる。

また現用の鋳鉄製シリンダライナはアルミニウム合金製シリンダブロックと別に作製され、あとから組み込むことで使用されることが多い。しかし部品が別々なことで工程の負荷が大きいため、最近シリンダブロック上にしゅう動材料被膜を直接コーティングすることが一部の自動車メーカー等で検討され始めている。

2. 研究の目的

上記の背景により、本研究では最も低摩擦・低摩耗の得られる Fe-Si 系合金の組成、焼結条件等を明らかにし、さらにその低摩擦・低摩耗機構を明らかにすることを目的とする。また低摩擦・低摩耗合金被膜の製造方法を明らかにすることを目的とする。

3. 研究の方法

- (1) 放電プラズマ焼結法で作成した Fe-Si 系合金等について、ボールオンディスク法によるエタノールなどの自然液体中における摩擦摩耗試験を行い、摩擦係数、比摩耗量の評価を行い、低摩擦・低摩耗の得られる組成の探索を行った。
- (2) 上記で低摩擦・低摩耗の得られる合金について、XPS、SEM-EDS などの表面分析を行い、低摩擦・低摩耗機構の解明を行った。
- (3) 珪砂、砂鉄、黒鉛の混合物について、DTA 分析を行い、反応温度などを調べた。
- (4) 各種コーティングにより、鋼、鋳鉄上に自然液体中低摩擦低摩耗を示すコーティングの作成を行った。

4. 研究成果

- (1) 放電プラズマ焼結法で作成した Fe-Si 系合金等について、ボールオンディスク法によるエタノールなどの自然液体中における摩擦摩耗試験を行った結果、FeSi₂より Si 濃度が高い Fe-Si 合金について低摩擦が得られることがわかった。しかし FeSi₂(組成 Fe-70.5at% Si)より Si 濃度が高くなると、Si 相が脆いために耐摩耗性は低下することも明らかになった。さらに FeSi₂に比べると MoSi₂、ReSi_{1.8}の摩擦係数は高めになり、Fe 成分も何らかの形で低摩擦に貢献していることが明らかになった(図1)。また、図2に示すように FeSi₂に 5vol% グラファイト相を分散させると、耐摩耗性をほとんど低下させることなくさらに摩擦係数を下げられることを明らかにした。また自然液体の種類はことなるもの水中で AlB₁₂、SiB₆セラミックスが低摩擦を示すことも明らかにした(図3)。

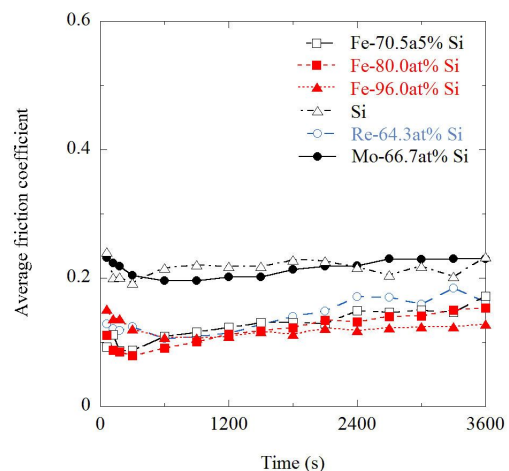


図1 Fe-Si 系合金及び ReSi_{1.8}、MoSi₂の摩擦係数

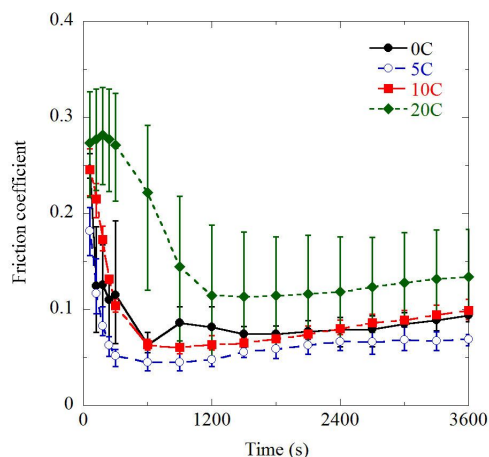


図2 FeSi₂-グラファイト系複合材料の摩擦係数とグラファイト濃度の関係

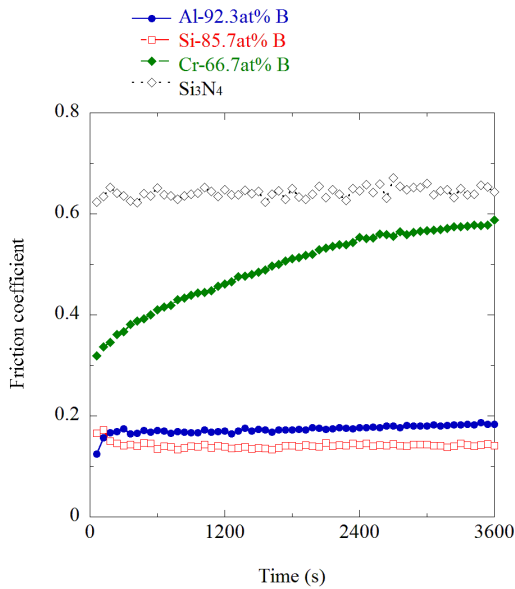


図3 AlB₁₂ (組成 Al-92.3at% B) SiB₆ (組成 Si-85.7at% B) セラミックスの水中における摩擦係数変化

- (2) 低摩擦の得られた Fe-Si 系合金について、XPS 分析を行った結果、Fe 系酸化物と SiO₂ のピークが確認された。SiO₂ はエタノール中でゲル状低摩擦化合物を形成し、低摩擦に貢献していると考えられるが、上記で述べたように Fe 酸化物も何らかの形で低摩擦に貢献していると考えられる。しかしどのように貢献しているかについてははっきりさせることはできず、今後の課題となった。
- (3) 硅砂、砂鉄、黒鉛の混合物について DTA 分析を行った結果、Fe と Si の形成される温度にかなり違いがあり、どのように対処するかが課題になることがわかった。しかしグラファイトを若干過剰に入れても上記のように低摩擦になりやすいという結果が得られたため、混合比の縛りはあまり大きくなると考えられる。

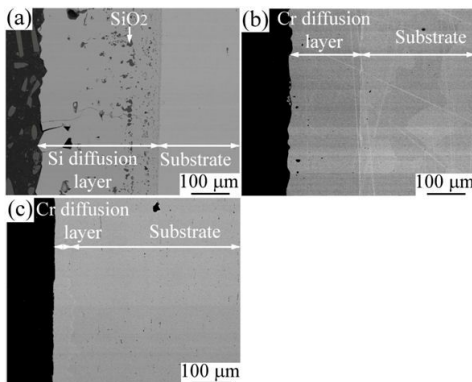


図4 パックセメンテーション法などで作成した (a)Si 拡散層、(b)Cr 拡散層、(c)Cr-B 拡散層の断面組織写真

- (4) パックセメンテーション法を用いて、鋼、鋳鉄基板上に各種コーティングを実施した結果、シリサイドコーティングについては緻密性や基板への密着性を上げることが難しいことが分かった。しかし、ポロライジング、クロマイジング処理して得られた被膜は密着性、緻密性も良く、摩擦係数、比摩耗量も低く抑えられることがわかった。

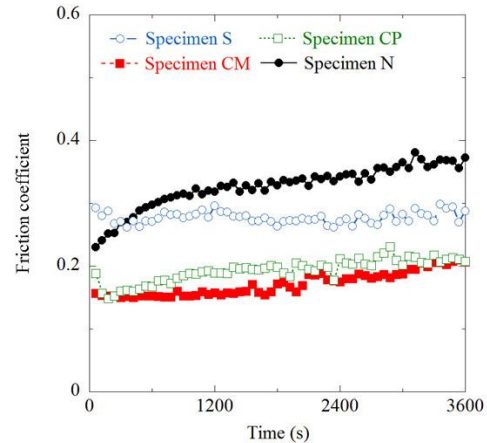


図5 (S)Si 拡散処理、(CP)Cr 拡散処理、(CM)Cr-B 拡散処理及び(N)未処理試料のエタノール中における摩擦係数変化

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文](計 8 件)

T. Murakami, Y. Hibi, H. Mano, K. Matsuzaki, H. Inui. Friction and wear properties of the silicide-coated steel substrates prepared by pack cementation. *Materials Science Forum*, 査読有, 783-786, 2014, 1464-1469. DOI: 10.4028/www.scientific.net/MSF.783-786.1464

村上敬、固体潤滑剤の最新技術動向、潤滑経済、査読無、586, 2014, 26-30. http://www.juntsu.co.jp/books/keizai/k_index2014.html#a2014_04

T. Murakami, H. Inui. Friction and wear properties of α -AlB₁₂- and SiB₆-based ceramics in water. *Tribology International*, 査読有, 74, 2014, 38-45. DOI: 10.1016/j.triboint.2014.02.005

T. Murakami, H. Mano, Y. Hibi, K. Matsuzaki, H. Inui. Friction and wear properties of α -FeSi₂-Si alloy, ReSi_{1.8} and MoSi₂ in ethyl alcohol. *Tribology International*, 査読有, 69, 2014, 61-69. DOI: 10.1016/j.triboint.2013.09.002

日比裕子、村上敬、間野大樹、エタノール

ル-n-ヘキサン混合液中のアルミニウム-ケイ素焼結体の摩擦・摩耗特性、トライボロジスト、査読有、58, 2013, 589-595. https://www.tribology.jp/dissertation/detail.php?id=10859&keyword=%E6%97%A5%E6%AF%94%E8%A3%95%E5%AD%90&sort=vol_num_reverse
T. Murakami, K. Matsuzaki, H. Inui. Microstructure, friction and wear properties of alpha-FeSi₂-graphite composite specimens, Tribology International, 査読有, 67, 2013, 98-103. DOI: 10.1016/j.triboint.2013.07.005
T. Murakami, K. Matsuzaki, Y. Gomi, S. Sasaki, H. Inui. Microstructure and tribological properties of gray cast iron specimens coated by aluminizing, boronizing, chromizing and siliconizing. 2012 MRS Fall Meeting Proceedings, 査読有, 1516, 2013, mrsf12-1516-jj03-09. DOI: <http://dx.doi.org/10.1557/opl.2012.1726>
T. Murakami, H. Mano, Y. Hibi, K. Matsuzaki, H. Inui. Friction and wear properties of Fe₇Mo₆- and alpha-FeSi₂-based alloys in rapeseed oil. Tribology International, 査読有, 56, 2012, 1-8. DOI: 10.1016/j.triboint.2012.06.017

〔学会発表〕(計 17 件)

村上敬、境界潤滑下で固体潤滑膜を形成させる硬質材料の開発、トライボロジー会議 2014 春東京、2014 年 5 月 21 日、東京
日比裕子、村上敬、間野大樹、n-ヘキサン中およびエタノール中の鑄鉄、アルミニウムおよびアルミニウム-ケイ素焼結体の摩擦・摩耗特性、トライボロジー会議 2014 春東京、2014 年 5 月 20 日、東京
村上敬、松崎邦男、乾晴行、アルゴンアーク溶解法で作成した Si-B 系合金の組織及び機械的性質、日本金属学会 2014 年春期大会、2014 年 3 月 23 日、東京
T. Murakami, Y. Hibi, H. Mano, K. Matsuzaki, H. Inui. Friction and wear properties of the silicide-coated steel substrates prepared by pack cementation, THERMEC' 2013, 2013 年 12 月 2 日、ラスベガス(米国)
村上敬、乾晴行、水中におけるホウ化物の摩擦・摩耗特性、トライボロジー会議 2013 秋福岡、2013 年 10 月 25 日、福岡
村上敬、松崎邦男、乾晴行、Al、Si、Cr のホウ化物の水潤滑特性、日本金属学会 2013 年秋期大会、2013 年 9 月 17 日、金沢
日比裕子、村上敬、間野大樹、エタノー

ル-n-ヘキサン混合液中の Al-Si 焼結体のトライボケミカル反応に及ぼすエタノール含有量の影響、トライボロジー会議 2013 春東京、2013 年 5 月 21 日、東京
村上敬、松崎邦男、乾晴行、Al、Cr、Si のホウ化物の摩擦・摩耗特性、トライボロジー会議 2013 春 2013 年 5 月 20 日、東京
村上敬、間野大樹、日比裕子、松崎邦男、乾晴行、グラフアイトを添加した FeSi₂ 基合金の組織及び摩擦・摩耗特性、日本金属学会 2013 年春期大会、2013 年 3 月 29 日、東京
T. Murakami, K. Matsuzaki, Y. Gomi, S. Sasaki, H. Inui. Microstructure and tribological properties of gray cast iron specimens coated by aluminizing, boronizing, chromizing and siliconizing, MRS 2012 Fall Meeting, 2012 年 11 月 26 日、ボストン(米国)
村上敬、松崎邦男、五味泰久、佐々木信也、乾晴行、Al、B、Cr、Si 拡散処理した片状黒鉛鑄鉄の摩擦・摩耗特性、日本金属学会 2012 年秋期大会、2012 年 9 月 17 日、松山
T. Murakami, K. Matsuzaki, Y. Gomi, S. Sasaki, Microstructure of gray cast iron substrates coated by pack cementation methods, NIMS Conference 2012, 2012 年 6 月 5 日、つくば
村上敬、間野大樹、日比裕子、松崎邦男、乾晴行、Fe₇Mo₆、FeSi₂ 基合金の菜種油中における摩擦・摩耗特性、トライボロジー会議 2012 春東京、2012 年 5 月 14 日、東京
日比裕子、村上敬、間野大樹、エタノール、ヘキサン及びエタノール-ヘキサン混合液中の Al-Si 焼結体の摩擦・摩耗特性、トライボロジー会議 2012 春東京、2012 年 5 月 15 日、東京
村上敬、間野大樹、日比裕子、松崎邦男、乾晴行、FeSi₂-Si 系合金、ReSi_{1.8}、MoSi₂ 基合金のエタノール中における摩擦・摩耗特性、日本金属学会 2012 年春期大会、2012 年 3 月 30 日、横浜
村上敬、五味泰久、佐々木信也、パックスメンテーション法による厚膜コーティング及び金属・セラミックス基摺動材料の開発、平成 23 年度産業技術連携推進会議ナノテクノロジー・材料部会、製造プロセス部会 合同研究発表会、2012 年 2 月 2 日、つくば
村上敬、日比裕子、間野大樹、Fe-Si 系金属間化合物のエタノール中におけるトライボロジー特性及び機械的性質、日本金属学会 2011 年秋期大会、2011 年 11 月 9 日、宜野湾市

〔図書〕(計 0 件)

〔産業財産権〕

出願状況（計 1 件）

名称：水潤滑用低摩擦・低摩耗摺動部材、及び、その製造方法
発明者：村上敬
権利者：産業技術総合研究所
種類：特許
番号：特願 2013-214781
出願年月日：2013 年 10 月 15 日
国内外の別： 国内

取得状況（計 0 件）

名称：
発明者：
権利者：
種類：
番号：
取得年月日：
国内外の別：

〔その他〕

ホームページ：
<https://staff.aist.go.jp/murakami.t/>

6．研究組織

(1)研究代表者

村上 敬 (MURAKAMI, Takashi)
独立行政法人産業技術総合研究所・先進製造プロセス研究部門・主任研究員
研究者番号：4 0 3 4 4 0 9 8

(2)研究分担者

日比裕子 (HIBI, Yuko)
独立行政法人産業技術総合研究所・先進製造プロセス研究部門・主任研究員
研究者番号：5 0 3 5 7 8 4 4

間野大樹 (MANO, Hiroki)
独立行政法人産業技術総合研究所・先進製造プロセス研究部門・主任研究員
研究者番号：4 0 3 4 4 2 1 2

松崎邦男 (MATSUZAKI, Kunio)
独立行政法人産業技術総合研究所・先進製造プロセス研究部門・難加工材成形研究グループ長
研究者番号：2 0 1 8 1 7 1 1

(3)連携研究者

乾 晴行 (INUI, Haruyuki)
京都大学大学院工学研究科・教授
研究者番号：3 0 2 1 3 1 3 5