

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(C) (一般)

研究期間：2013～2015

課題番号：25420040

研究課題名(和文)耐疲労スマート材料の適用性および影響因子に関する研究

研究課題名(英文)Study on applicability and influencing factors of an anti-fatigue smart material

研究代表者

高橋 一比古(TAKAHASHI, ICHIIHIKO)

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：30425748

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,700,000円

研究成果の概要(和文)：高硬度の微粒子と粘性流体を混合した耐疲労スマートペーストをボルト穴、マイクロカプセル、溶接継手ルート部など種々の閉空間に封入した場合の有効性について実験的に検証すると共に、ペーストの粘度や粒子の材質・粒径など、機能発現に影響する諸因子についても比較検討した。き裂内物質のくさび効果によるき裂遅延現象については、有限要素モデルを用いたき裂進展解析を実施し、実き裂進展データも援用しながらくさびの厚さや形成範囲についての定量的な考察を行った。加えて、高チクソ性粘性流体を用いたき裂の目視検出方法を新たに考案し、その有効性を実験的に示した。

研究成果の概要(英文)：Validity of an anti-fatigue smart paste, which is a mixture of fine and very hard particles and a viscous fluid, has been experimentally confirmed when applied to various enclosed spaces such as bolt holes, microcapsules or welding roots. Also the influencing factors, such as viscosity of the paste, particle material and particle size, have been comparatively studied. Concerning the crack retardation phenomenon by the wedge effect of foreign matter in a crack, crack growth analyses have been carried out using finite element models, and the thickness and forming range of the wedge have been quantitatively examined invoking the actual crack growth data. In addition, a new method of visual detection of cracks using viscous fluid with high thixotropy was invented and validated experimentally.

研究分野：金属疲労、海洋工学

キーワード：疲労き裂 スマート材料 耐疲労スマートペースト くさび効果 き裂進展抑制 き裂検出 チクソトロピー ボルト穴

1. 研究開始当初の背景

一般に、引張荷重によって開口した疲労き裂の内部に何らかの物質が入り込み、荷重除荷に伴うき裂の自由な閉口が阻害されると、有効応力拡大係数範囲が抑制され、き裂の進展速度は低下する。このような現象はくさび効果と呼ばれるが、近年、このくさび効果をき裂の簡便な補修法として積極的に利用しようという研究が行われ、いくつかの成果が報告されてきた。しかし、これらはいずれもある程度の大きさまで成長した疲労き裂を静的な引張荷重によって強制的に開口させ、その中に樹脂等の物質を注入して固化させる事により人工的なくさびを形成し、以後のき裂進展を抑制するというものであったため、実構造物で施工する際には多大な手間と困難を伴い(往々にして施工不可能) また施工後にき裂が更に進展すると抑制効果が失われてしまうという欠点があった。一方、研究代表者らは、高硬度・高剛性で白色のアルミナ微粒子とシリコン系の灰白色粘性流体を混合してペースト状にし(耐疲労スマートペースト、以下スマートペーストと略記) これをき裂の発生・進展が予想される経路に塗布しておくだけで、繰り返し荷重によるき裂の開閉に伴い自動的にき裂内に入る微粒子の作用により、き裂の進展抑制および目視検出という二つの機能が同時に発現することを実証してきた。しかしながら、スマートペーストはその名の通り柔らかなペースト状であるため、物理的接触や強い水流などを受ける箇所にはそのままでは適用しづらいという課題があった。また、ペーストの粘度特性や微粒子の材質・粒径など、機能発現に影響する諸因子に関する知見も不足しており、基礎的なデータの蓄積が必要とされていた。

2. 研究の目的

スマートペーストを実構造物に適用する場合、半流動体であるペーストを堅固な閉空間に封入して適用した方が環境や経年による影響を受けにくく、信頼性が格段に向上すると思われる。また、ペーストの粘度特性や微粒子の材質・粒径など、機能発現に影響する諸因子に関する知見が深まれば、より一層の機能向上が期待される。

そこで本研究では、スマートペーストをボルト穴やマイクロカプセル、溶接継手ルート部などの閉空間に封入した場合について疲労試験を行い、き裂の進展抑制および目視検出機能の発現性を検証する。

また、機能発現に影響する諸因子として、媒質に用いる粘性流体やペーストの粘度特性や微粒子の材質・粒径を取り上げ、それらの影響について実験的に評価する。

更に、き裂内に入った微粒子のくさび効果によるき裂遅延現象を FEM によりモデル化し、解析的検討を加える。

3. 研究の方法

(1) 種々の閉空間に封入して適用した場合の機能発現検証

ボルト穴に封入した場合

図1に示すように鋼製平板試験片の中央部にボルト穴と切欠きを設け、図2の仕様のごとくボルト穴とボルト軸部の間にスマートペーストを封入後ボルト・ナットを締結し、疲労試験に供した。比較のため、ボルト穴だけでなく試験片の表裏面にも併せてペーストを塗布した仕様についても試験を行った。

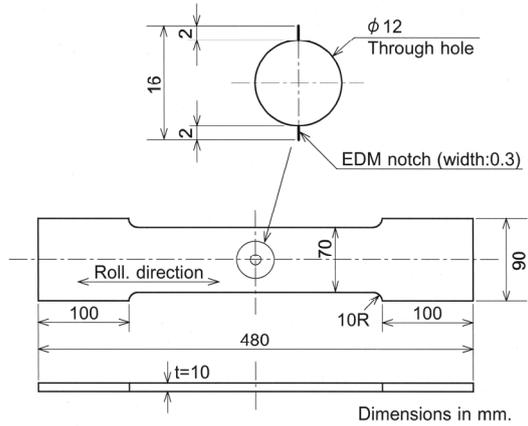


図1 ボルト穴入り平板試験片

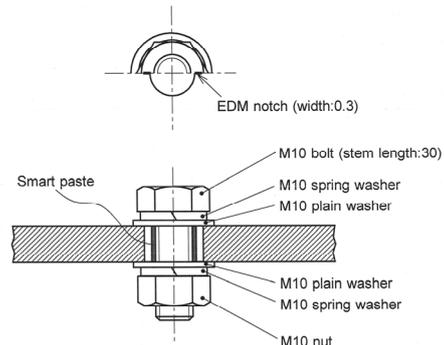


図2 ボルト穴にスマートペーストを封入

マイクロカプセルに封入した場合

スマートペーストを芯物質とし、メラミンを殻物質とするマイクロカプセルを製作し、エポキシ樹脂系塗料と混合した後、板厚 5 mm の切欠き付き平板試験片(図3、鋼製およびアルミ合金製)に塗布して乾燥硬化させ、き裂進展試験を実施した。

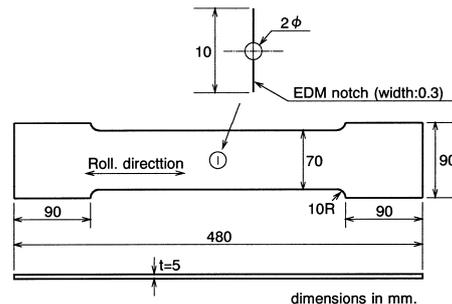


図3 切欠き付き平板試験片

溶接継手ルート部に封入した場合

図4に示す通り、スマートペーストを荷重伝達型十字継手（鋼製）のルート部空隙に封入し、疲労試験を行った（鋼板板厚 10 mm、写真の上下方向に繰り返し荷重を載荷）。



図4 十字継手のルート部に封入

(2) 機能発現に影響する諸因子

粘性流体およびペーストの粘度の影響

粘度を種々に変えた粘性流体およびスマートペーストを調整してB型回転式粘度計による粘度測定を行い、各々の粘度特性を把握すると共に、機能発現への影響について考察した。

微粒子の材質や粒径の影響

粒径（粒度分布）の異なる3種類のアルミナ粒子、シリカ粒子、炭化タングステン(WC)粒子の計5種類の微粒子を用いてスマートペーストを調整し、鋼製切欠き付き平板試験片（図3）に適用して疲労試験を行い、機能発現への影響を調べた。

(3) き裂内物質のくさび効果によるき裂遅延現象の有限要素モデル化および解析

き裂内に進入したアルミナ粒子のくさび効果によるき裂進展遅延現象について、接触要素を用いた有限要素(FE)モデルを構築して解析を行い、結果を既得の実き裂進展データと比較検討することにより、くさびの厚さや形成範囲について定量的な考察を加えた。

4. 研究成果

(1) 種々の閉空間に封入して適用した場合の機能発現検証

ボルト穴に封入した場合

スマートペーストをボルト穴に封入した場合、図5に示す通り、き裂進展に伴う明瞭な黒発色が見られ、目視検出効果が確認された。また、スマートペーストの適用仕様を変えて疲労試験を行ったところ、目視検出効果については図6のようになり、いずれのペースト適用仕様においても、き裂の発生・伝播に伴ってワッシャーの左右端から明瞭な黒発色が生じ、目視検出は容易であった。ただし、ボルト穴のみに適用する仕様(SP1)の場合は黒発色がき裂進展の途中で途切れるため数mm程度の短いき裂の発生を検知する手段として捉えた方が妥当であり、試験片表裏面への1.4 mm厚の塗布を併用する仕様

(SP3)の場合は他の二つの仕様に比べてき裂検出感度が大幅に低下した。一方、試験片表裏面への0.7 mm厚の塗布を併用する仕様(SP2)の場合は、黒発色が不連続ではあるもののペースト表面に生じる凹みと共に破断直前まで観察され、短いき裂発生を検知のみならず、き裂進展の逐次追跡にも用いることができることが判明した。

寿命延伸効果については図7のような結果となり、いずれのペースト適用仕様においてもき裂進展抑制による寿命延伸効果が現れた。特に、ボルト穴への適用と試験片表裏面への1.4 mm厚の塗布を併用したペースト適用仕様(SP3)では、ばらつきが小さく安定した寿命延伸効果が得られ、ペーストなしでボルト・ナットを締結したのみの場合と比べると、高応力レンジ域で1.6倍、低応力レンジ域で3.5倍程度の寿命延伸効果が得られた。



図5 ボルト穴からのき裂進展に伴う黒発色

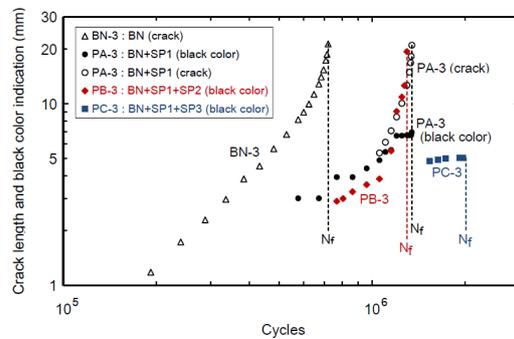


図6 スマートペーストの適用仕様による目視検出効果の違い

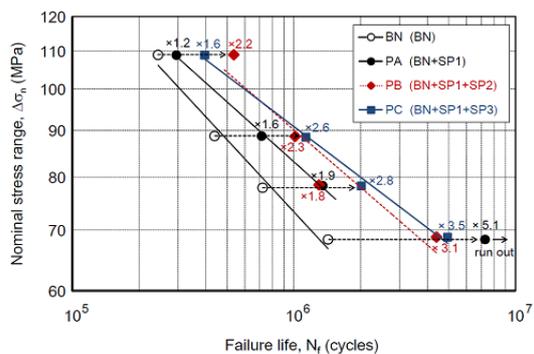


図7 スマートペーストの適用仕様による寿命延伸効果の違い

疲労試験終了後の破面マクロ観察の結果、き裂先端が通過する板厚中央付近までペーストがうまく供給されると、き裂進展抑制効果が大きくなり、より寿命が延伸されることがわかった。また、SEM による破面のミクロ観察の結果を過去の検討結果と照らし合わせるにより、ボルト穴へのペースト適用によって切欠き端部近傍に、試験片表裏面へのペースト適用によって試験片表裏面近傍に、いずれもペーストの流入口から 2~3 mm 程度の範囲でアルミナ粒子の微細な碎片が鋼母材の摩耗粉と混ぜ合わさってき裂面に圧着してできる顕著な固着くさび層が形成されていることがわかった(図 8、9)。

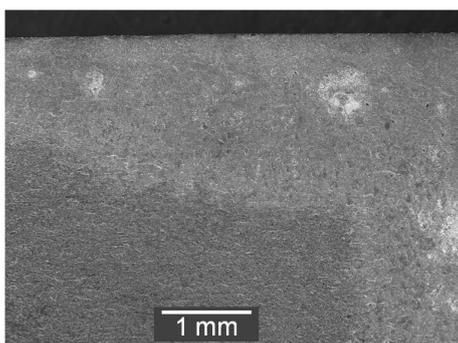


図 8 切欠き端部近傍および試験片表面近傍に形成された固着くさび層 (SP-2 仕様)

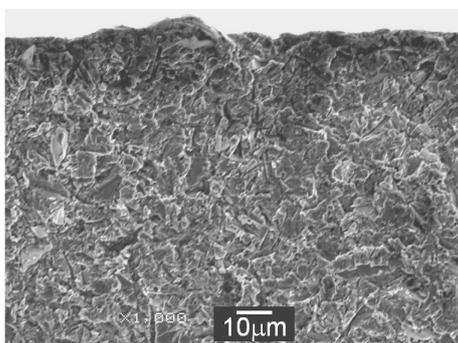


図 9 試験片表面近傍に形成された固着くさび層 (図 8 の上端部拡大像)

加えて、スマートペーストがくさび効果を発現する形態として、ペーストの流入口から 2~3 mm 程度の範囲に形成される固着くさび層によるものと、固着くさび層の形成までには至らずとも、より広い領域にまで到達したアルミナ粒子や黒色の母材摩耗粉がき裂面に挟まりくさびとして作用するものの二種類があることもわかった。

マイクロカプセルに封入した場合

スマートペーストをマイクロカプセルに封入した場合、き裂進展に伴うカプセルの破壊によって芯物質のペーストがカプセル外に流出するが、それだけではき裂内に進入するペーストの絶対量が足りず、有意なき裂進展抑制効果は認められなかった。一方、き裂検出効果に関しては、アルミ合金製平板試験片を用いた場合の例を図 10 に示す通り、不

連続ではあるが一部でき裂進展に伴う黒発色が認められた。

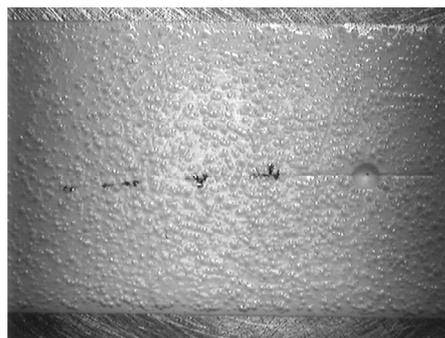


図 10 マイクロカプセルに封入した場合のき裂進展に伴う黒発色

溶接継手ルート部に封入した場合

スマートペーストを図 4 に示す通り荷重伝達型十字継手 (鋼製) のルート部空隙に封入して疲労試験を行ったところ、4 箇所のき裂発生箇所すべてから図 11 に示すように明瞭な黒発色が見られ、き裂の目視検出効果が確認された。また、継手の破断寿命はペーストを適用しない場合の 3.8 倍に延伸され、寿命延伸効果も確認された。

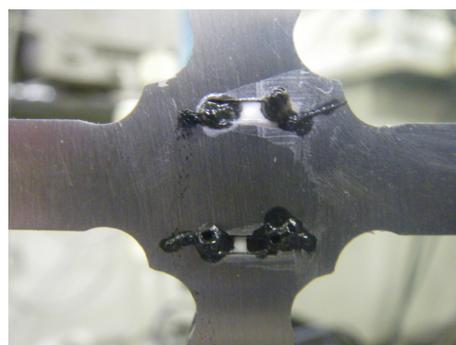


図 11 溶接継手ルート部に封入した場合のき裂進展に伴う黒発色

(2) 機能発現に影響する諸因子

粘性流体およびペーストの粘度の影響

図 12 は、バインダーの粘性流体 (シリコングリース) とスマートペースト (アルミナペースト) の粘度測定結果の一例である。スピンドルの回転速度が上がって試料のせん断速度が上昇するにつれてグリースおよびペーストの見かけ粘度は共に低下しており、顕著なチクソトロピック特性を示している。ペーストとグリースの粘度比は約 1.65 で、粒子混合による若干の粘度上昇はあるものの、スマートペーストの高チクソトロピック特性を伴う粘度特性は、バインダーに用いたシリコングリースに由来するものと考えられる。

このような高チクソトロピック特性はペースト適用上のメリットとなるものであり、スマートペーストを鉛直面や下向き面、複雑形状部分等に塗布しても、き裂がなくせん断速度がほぼゼロの健全部分では粘度が高い

ため自重で垂れを生じることなく塗布時の形状を保ち続け、施工性および形状安定性・均質性（粒子保持性）に優れている一方、き裂の近傍ではき裂の開閉によってせん断速度が上がり、局所的に粘度を下げて自ら流動性を増し、き裂内に進入してスマートペーストとしての主要な機能（き裂進展抑制および目視検出機能）を発現しやすくなる。

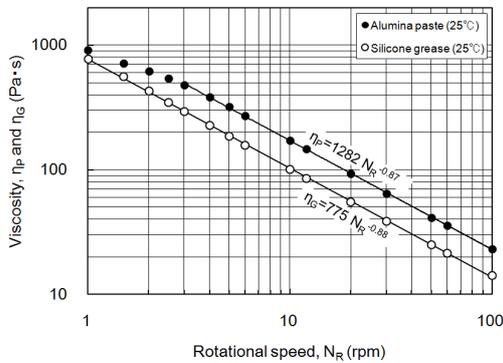


図 12 粘性流体とペーストの粘度特性

微粒子の材質や粒径の影響

5 種類の微粒子を用いてスマートペーストを調整し、鋼製の平板試験片（図 3）に適用して行った疲労試験の結果を図 13 に示す。

全応力レンジに亘って安定した寿命延伸効果を示したのは、平均粒径が $4.29 \mu\text{m}$ および $15.2 \mu\text{m}$ のアルミナ粒子の場合で、低応力レンジでは 2.1 倍～2.8 倍の寿命延伸が得られた。一方、アルミナ粒子の平均粒径が $47.3 \mu\text{m}$ と大きくなると、寿命延伸効果は相対的に小さくなった。シリカ粒子や炭化タンゲステン粒子を用いた場合は、低応力レンジにおける寿命延伸が 1.6 倍程度に留まり、アルミナ粒子に及ばなかった。

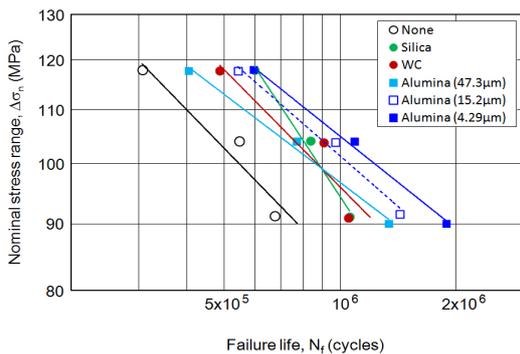


図 13 粒子の材質・粒径が寿命延伸に及ぼす影響

(3) き裂内物質のくさび効果によるき裂遅延現象の有限要素モデル化および解析

き裂内で粉砕されたアルミナ粒子の破片や母材金属の摩耗粉が混然となり、き裂面に強く圧着されて形成される固体くさびを、汎用構造解析コード MARC の接触要素を用いてモデル化した。作成した有限要素 (FE) モデルの一例を図 14 に示す。くさびの厚さや長さを種々に変えて既得のき裂進展データと比較対照したところ、FE モデルにおける

固体くさびの厚さを $7.5 \mu\text{m}$ とし、き裂開口量がこの値を超える領域に固体くさびが形成されると仮定して解析を行うと、図 15 の印 (黄色) のようになり、スマートペーストを適用した場合の実き裂進展データ (白抜き印) との間に良好な相関が得られた。

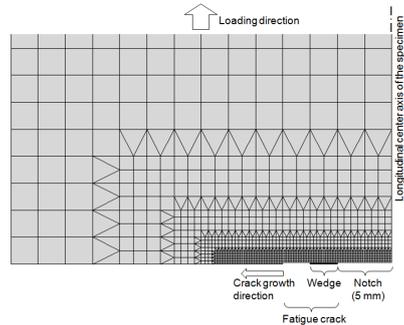


図 14 き裂内くさびの FE モデル

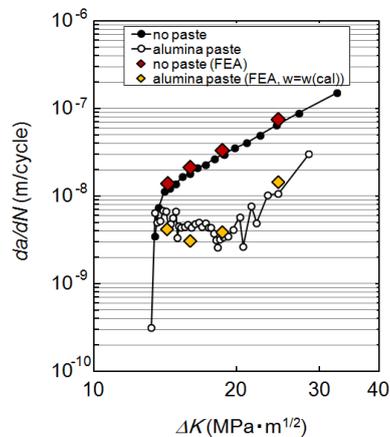


図 15 FE モデルを用いたき裂進展解析結果

(4) 高チクソ性粘性流体を用いた疲労き裂の目視検出

上述した通り、スマートペーストのバインダーに用いたシリコン系の粘性流体の粘度を測定したところ、顕著なチクソトロピック特性が認められたため、この性質を応用した疲労き裂の目視検出方法（図 16）を新たに考案し、鋼製の平板試験片（図 3）を用いたき裂進展試験によりその有効性を実証した。本方法による疲労き裂の目視検出（粘性流体中の凹み形成）の様子を図 17 に示す。

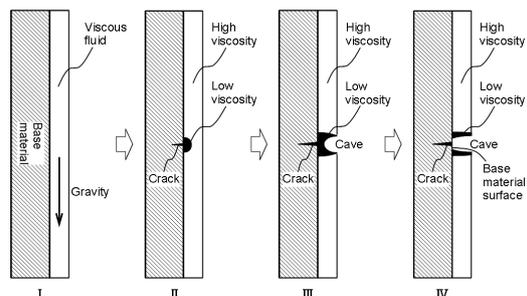


図 16 高チクソ性粘性流体を用いた疲労き裂の目視検出方法

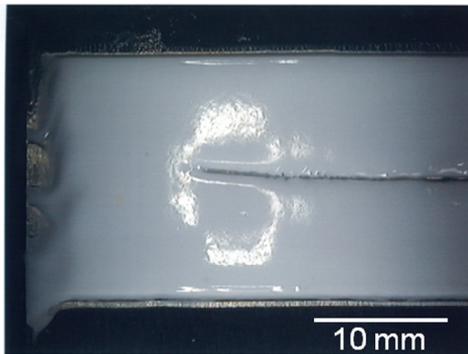


図 17 疲労き裂の進展に伴い高チクソ性粘性流体中に形成された凹み

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3件)

高橋一比古、田中義久、耐疲労スマートペーストをボルト穴に適用した場合の疲労き裂進展の自動抑制および目視検出、溶接学会論文集、査読有、第33巻・第3号、2015、pp. 211-223、https://www.jstage.jst.go.jp/article/qjws/33/3/33_211/_pdf

高橋一比古、田中義久、高チクソ性粘性流体を用いた疲労き裂の目視検出、非破壊検査、査読有、第64巻・6号、2015、pp. 290-297、https://www.jstage.jst.go.jp/article/jjsndi/64/6/64_290/_pdf

高橋一比古、高橋千織、植松進、田中義久、耐疲労スマートペーストの研究開発、海上技術安全研究所報告、査読有、第13巻・第2号、2013、pp. 335-350、<http://www.nmri.go.jp/main/publications/paper/pdf/21/13/02/PNM21130202-00.pdf>

[学会発表](計2件)

高橋一比古、田中義久、耐疲労スマートペーストをボルト穴に適用した場合の疲労き裂進展の自動抑制および目視検出、溶接学会、第245回溶接疲労強度研究(FS)委員会、FS-1245-15、2015。

高橋一比古、田中義久、耐損傷スマート材料、日本船舶海洋工学会誌 KANRIN、55号、2014、pp. 24-30、http://ci.nii.ac.jp/els/110009838873.pdf?id=ART0010351033&type=pdf&lang=jp&host=cinii&order_no=&ppv_type=0&lang_sw=&no=1460953217&cp=

[産業財産権]

出願状況(計5件)

名称：疲労亀裂検出方法
発明者：高橋一比古

権利者：海上技術安全研究所
種類：特許
番号：特願 2016-18825
出願年月日：2016年2月3日
国内外の別：国内

名称：粘性流体による亀裂の検出方法及び亀裂検出用の粘性流体

発明者：高橋一比古
権利者：海上技術安全研究所
種類：特許(国内優先権主張出願)
番号：特願 2015-152492
出願年月日：2015年7月31日
国内外の別：国内

名称：疲労亀裂の進展抑制ペースト、進展抑制方法、進展検出ペースト、及び進展検出方法

発明者：高橋一比古
権利者：海上技術安全研究所
種類：特許(国内優先権主張出願)
番号：特願 2014-199185
出願年月日：2014年9月25日
国内外の別：国内

名称：粘性流体による亀裂の検出方法及び亀裂検出用の粘性流体

発明者：高橋一比古
権利者：海上技術安全研究所
種類：特許
番号：特願 2014-162628
出願年月日：2014年8月8日
国内外の別：国内

名称：疲労亀裂の進展抑制ペースト、進展抑制方法、進展検出ペースト、及び進展検出方法

発明者：高橋一比古
権利者：海上技術安全研究所
種類：特許
番号：特願 2013-199185
出願年月日：2013年9月26日
国内外の別：国内

6. 研究組織

(1)研究代表者

高橋 一比古 (TAKAHASHI ICHIIHIKO)
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：30425748

(2)研究分担者

田中 義久 (TANAKA YOSHIHISA)
国立研究開発法人海上技術安全研究所・その他部局等・主任研究員
研究者番号：70399517