

令和 6 年 5 月 30 日現在

機関番号：82627

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2020～2023

課題番号：20K04677

研究課題名（和文）腐食生成物のくさび効果を利用した疲労き裂の進展抑制技術に関する研究

研究課題名（英文）Research on a technique of restraining fatigue crack growth using wedge effects of corrosion products

研究代表者

高橋 一比古（Takahashi, Ichihiko）

国立研究開発法人海上・港湾・航空技術研究所・海上技術安全研究所・研究員

研究者番号：30425748

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,000,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、高含水率の含水ジェルを用いたき裂進展抑制シートを試作して鋼製の平板試験片に適用し、疲労試験による性能評価を行った。腐食生成物のくさび効果によりき裂進展を抑制する上で有効な局所的湿潤腐食環境とはどのようなものかを見定めるため、腐食反応を促進する因子としての含水成分や流電陰極層の効果についても比較検討を行った。

結果として、進展抑制シートの効果によってき裂進展速度が2オーダー近く抑制され、破断寿命が9.6倍にまで延伸される場合のあることが判明した。また、実用化に向けての課題と対策についても検討を加え、成果をまとめた論文投稿や基本技術の特許出願を行った。

研究成果の学術的意義や社会的意義

構造物に生じる損傷のうち、金属疲労に起因するものの割合は依然として高く、発生した疲労き裂が進展し続けて重大な事故に至ることのないよう、適切な対策（補修）を施す必要がある。これまでにも、き裂内に腐食生成物が生じると、所謂くさび効果によりき裂進展速度が著しく抑制される場合のあることが報告されていたが、現場における局所的な腐食湿潤環境の実現や制御が難しいことから、実際の補修法として積極的に利用しようとする例は見当たらなかった。本研究の成果はそのような課題に応えるものであり、従来、構造物において負の因子と捉えられてきた腐食現象を、き裂進展抑制のためのプラス因子として利用したところに特徴がある。

研究成果の概要（英文）：Crack growth restraining sheets with a high water content gel were manufactured by way of trial and applied to plate specimens of steel, and the efficacy of the sheets to restrain crack growth was evaluated by fatigue tests. In order to find a local humid (or wet) corrosive environment, which is most suitable for the crack growth restraint by wedge effects of corrosion products on the crack surfaces, water components absorbed in the gel and effects of a cathode layer as promoting factors of the corrosive reaction were comparatively examined. As a result, it was found that the efficacy of the gel sheets with 3% salt water and synthetic sea water was remarkable (4.1-9.6 times extension in failure life), and the cathode layer produced certain additional positive effects in those gel sheets.

Above results were reported through a research paper and a presentation, and the fundamental techniques were applied for a patent.

研究分野：金属疲労、海洋工学

キーワード：疲労き裂 き裂進展 くさび効果 腐食生成物 高含水ジェル き裂進展抑制シート 含水成分 流電陰極層

1. 研究開始当初の背景

船舶、海洋構造物、橋梁等の構造物に生じる損傷のうち、金属疲労に起因するものの割合は依然として高く、発生した疲労き裂が進展し続けて重大な事故に至ることのないよう、適切な対策を講じる必要がある。一般に、疲労き裂の進展速度は、き裂先端の有効応力拡大係数範囲 K_{eff} により支配されるため、応力拡大係数の上限値 K_{max} を保持したまま、き裂開口時の応力拡大係数 K_{op} を何らかの方法で押し上げれば、き裂進展速度は減少する。例えば、モードⅡ形負荷を受けるき裂の開口時に何らかの物質がき裂内に入り、引張除荷に伴うき裂の自由な閉口を阻害すると、 K_{eff} が減少し、き裂進展速度は抑制される。このような現象はくさび効果と呼ばれるが、その一例として、き裂内に腐食生成物が生じると、それがくさびとなってき裂開口応力を上昇させ、き裂進展速度が抑制される場合があることが報告されている。腐食環境下におけるき裂進展挙動は、上記のような腐食生成物のくさび効果によるき裂進展の抑制作用と、き裂面からの金属イオンの溶出、即ち腐食溶解によるき裂進展の加速作用という相反する二つの作用のせめぎ合いとなるため、前者の抑制作用が相対的に卓越するような(浸漬状態のようにき裂面の金属イオンが著しく溶出することなく、き裂面上に適度の腐食生成物(錆)が生じる程度の)適度な湿潤腐食環境をき裂内に作り出すことにより、き裂の進展を効果的に抑制することが可能となる。このような湿潤腐食環境を現場で簡便かつ局所限定的に作り出し、そのまま一定の期間保持できるような技術はこれまで見当たらなかったが、近年、含水率が85%にも及ぶようなヘルスケア(局所冷却)用の特殊な高含水率ジェルが種々開発されており、これを用いることにより上述のようなき裂周りの局所的な湿潤腐食環境を比較的簡便に実現する望みが出てきた。

2. 研究の目的

本研究の目的は、高含水ジェルを用いたき裂進展抑制シートを試作して鋼製試験片に適用し、き裂の進展を実際にどの程度抑制することができるのか、疲労試験を通じてその性能を評価することである。試作および評価の過程においては、腐食生成物のくさび効果によりき裂進展を抑制する上で最適な局所的湿潤腐食環境とはどのようなものかを明らかにするため、湿潤の度合いや、酸素供給のための通気手段、乾燥防止膜、腐食反応を促進する因子としての含水成分や流電陰極層の効果について比較検討を行う。また、き裂進展抑制シートを実構造物に適用する際の課題についても検討し、解決に向けた方策について考察を加える。

3. 研究の方法

3.1 き裂進展抑制シート

図1は、板厚貫通き裂にき裂進展抑制シート(以降、進展抑制シート)を適用したところを、き裂を含む断面について模式的に示したものである。金属母板の板厚を貫通して進展する疲労き裂に対して、図面下側のき裂開口部を覆うように進展抑制シートの含水ジェル底面を押し当て、粘着させている。また、乾燥防止カバーは含水ジェルの支持織物を覆うように設けられており、その端部は母板底面に密着している。図1の進展抑制シートは通気孔を持たないが、反対側

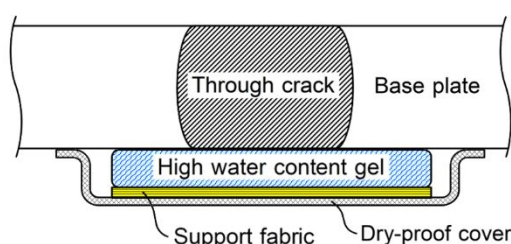


図1 き裂進展抑制シートの模式図

(図面上側)のき裂開口部が通気手段として開放されており、そこから十分な空気(酸素)がき裂内に取り込まれるため、き裂面上には腐食生成物(錆)が生じてくさび効果を発現し、き裂進展が抑制されることが期待される。以下、各構成要素の具体的な詳細について述べる。

3.1.1 含水ジェルおよび支持織物

き裂内の局所的な湿潤腐食環境を作り出すために、市販されているヘルスケア用冷却ジェルシートを用いた。図1に示すように、含水ジェルを柔軟な支持織物(不織布)で支える2層シート構造となっており適度な柔軟性と強度を有すること、含水ジェル表面は適度の粘着性を有しているため試験片表面に貼付しやすいことで、本研究の用途に適している。含水ジェルは高分子を網目状(スポンジ状)にして内部に水分を取り込んだ高含水ジェルを用いており、その含水率はメーカー表示値で85%である。

3.1.2 含水成分

含水ジェルに含ませる水には、蒸留水、3%食塩水(溶媒は蒸留水)、人工海水の3種類を用いた。人工海水は金属腐食試験用のキット「アクアマリン」を用いて調整し、主な成分の重量濃度は、塩化ナトリウム 2.35%、塩化マグネシウム 1.07%、硫酸ナトリウム 0.39%、塩化カルシウム0.15%、塩化カリウム 0.07%などである。3%食塩水および人工海水を用いる場合は、含水ジェルシートを各水溶液中に24時間以上浸漬し、各水溶液を含む含水ジェルを作成した。一方、

蒸留水を用いる場合は、長時間浸漬すると含水量が過大となって膨張し、シート形状が崩れてしまうため、シャーレ状の容器にシリンジを用いて4 ccの蒸留水を平らかに注ぎ、そこに含水ジェルシートを浸してほぼ全量を吸収させることにより、蒸留水を含む含水ジェルとした。

なお、含水ジェルの支持織物はそれ自身が含水性を有しており、含水ジェルシート全体を浸漬した場合には支持織物も含水ジェルと同様の含水状態となる。

ここで図2 (a), (b)に、アルミニウム合金板の上に支持織物を下側にして(実際の適用時とは逆向きに)載せた含水ジェルシートの断面写真を示す。このうち(a)は製品開封直後のもの、(b)は上記方法により蒸留水を含浸させた後のものであるが、蒸留水を含ませることによりジェル、支持織物双方が膨張・増厚している様子が見てとれる。

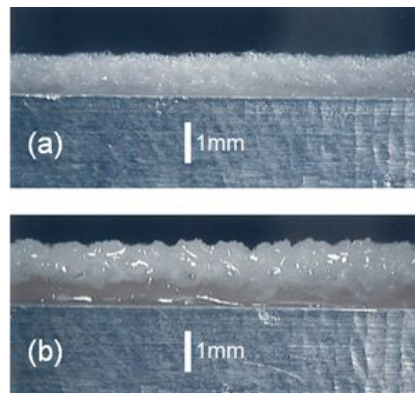


図2 高含水ジェルシートの断面写真

3.1.3 乾燥防止カバー

含水ジェルが過度に乾燥するのを防止するためのカバーとして、市販のマグネットシート(厚さ0.9 mm)を用いた。図1に示す通り、含水ジェルシートを支持織物側から覆うようにマグネットシートを被せ、試験片長手方向のマグネットシート両端部を磁力により試験片表面に吸着させた。使用したマグネットシートは比較的曲げ剛性が高く、試験片幅方向のマグネットシート両端部を図1に示すように屈曲させて試験片に吸着させることはできないため、次項で述べる流電陰極層(銅箔テープ)を用いない場合には、当該両端部にできる隙間をポリエチレンクロスの養生テープにより塞いだ。なお、本マグネットシートは乾燥防止機能のほか、垂直面に貼付した含水ジェルシートの位置がずれたり剥がれ落ちたりしないように保持する機能も有している。

3.1.4 流電陰極層

き裂内における腐食反応をより促進させるため、図3に模式的に示す通り、支持織物の外側に流電陰極層(以降、陰極層)を設け、その影響を調べた。陰極層としては、Feよりも電極電位が高く、イオン化傾向の小さい銅箔の導電性テープを用いた。これは、銅箔の片面に導電性を有する粘着層を備えたもので、テープを金属面に貼付するだけで容易に電気化学的回路を形成できるようになっている。3.1.2項の末尾で述べた通り、試験中の支持織物は含水状態となるため導電性を有し、電気化学的回路の形成を遮断しない。陰極層を用いる場合には、疲労試験に先立ち、銅箔テープと試験片の間に流れる微小な電流を測定し、陰極層としての作用を確認した。

なお、実際の試験片への適用に際しては、図3とは異なり、銅箔テープの両端部を試験片の側面から反対側の表面にかかるまで延ばして粘着させ、含水ジェルシートの固定および側方端部からの乾燥防止という役割を持たせた。また、念のため銅箔テープの両端部と試験片との間を鋼製のクリップで挟み、両者の間の導通を確実なものとした。図4に、含水ジェルシートおよび銅箔テープを試験片の裏面に適用した場合の概観を示す(後述の試験番号SS2の試験片装着時。まだ鋼製クリップは付けていない)。

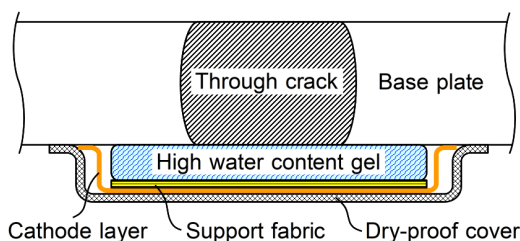


図3 き裂進展抑制シート(流電陰極層あり)



図4 平板試験片に適用した進展抑制シート(流電陰極層あり)

3.2 疲労試験

進展抑制シートの有効性を実験的に調べるため、鋼製の切欠き付き平板試験片を用いた疲労試験を行った。試験の詳細について以下に述べる。

3.2.1 供試材および試験片

平板試験片の供試材はSM490A鋼板で、形状・寸法は図5に示す通りである。試験片中央部に長さ10 mm、幅0.3 mmの板厚貫通切欠きを放電加工(EDM)により導入した。なお、試験中にき裂観察を行う表側については、き裂の予想進展経路周辺を鏡面仕上げとした。

3.2.2 試験方法

疲労試験はすべて軸方向荷重制御で行った。荷重波

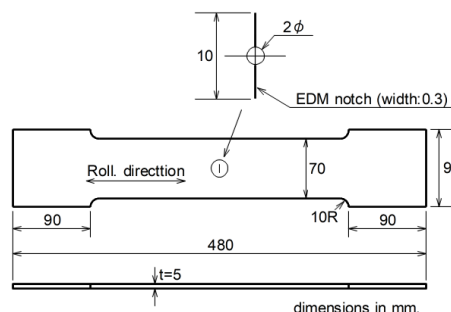


図5 平板試験片の形状・寸法

形は周波数5.1 Hzの正弦波であり、荷重比 $R=0$ の引張側完全片振り荷重とした。試験中は荷重データを連続的に計測し、適宜記録した。加えて、所定のサイクル数に達したところで破面へのビーチマーク導入を試みた(後述するが、くさび物質の作用によりビーチマークを識別できない場合が多かった)。また、0.01 mmピッチで動作するX-YテーブルにCCDマイクروسコープのズームレンズを載せ、所定のサイクル数に達した所でき裂長さの測定およびき裂周辺の「その場観察」を行った。

4. 研究成果

4.1 実験結果および考察

4.1.1 疲労試験条件および結果

疲労試験の条件および結果を、表1にまとめて示す。BM1は母材ままで試験したものであり、DW1・2は蒸留水の含水ジェルを、SW1・2は3%食塩水の含水ジェルを、SS1・2は人工海水の含水ジェルを、それぞれ用いた進展抑制シートを適用して試験したものである。また、BM1以外の試験において、試験ID末尾の番号が1の場合は図1に示した陰極層(銅箔テープ)のない進展抑制シートを、同じく番号が2の場合は図3に示した陰極層を有する進展抑制シートを、それぞれ適用して試験を行ったものである。

疲労試験結果について、まず、蒸留水の含水ジェルを用いたDW1・2のBM1に対する破断寿命比をみると、両者ともに寿命比が2倍以上となっており、蒸留水であっても若干の寿命延伸効果(進展抑制効果)が現れている。陰極層の有無による有意な差は認められず、蒸留水の含水ジェルでは電荷を運ぶイオンが乏しく、陰極層で電位を負荷しても効果が現れなかったものと推察される。

次に、3%食塩水の含水ジェルを用いたSW1・2のBM1に対する破断寿命比をみると、両者ともに寿命比は4倍以上となっており、顕著な寿命延伸効果が現れている。陰極層の有無による影響をみると、SW2の破断寿命はSW1に比して1.35倍であり、若干の助長効果が認められる。これは、食塩水の含水ジェルでは水中で電離した Na^+ イオンと Cl^- イオンが電荷を運ぶため、陰極層で電位を負荷することにより電気化学的回路が形成され、き裂内の腐食反応が促進されたものと考えられる。

更に、人工海水の含水ジェルを用いたSS1・2のBM1に対する破断寿命比をみると、寿命比はそれぞれ6.5倍および9.6倍となっており、本研究で用いた3種類の進展抑制シートのうちで最も大きな寿命延伸効果が現れている。陰極層の有無による影響をみると、SS2の破断寿命はSS1に比して1.47倍であり、顕著な助長効果が認められる。これは、食塩水の含水ジェル同様に、電位の負荷によりき裂内の腐食反応がより促進されたためと考えられる。

表1 疲労試験条件および結果

Test ID	Absorbed water	Cathodic layer	Electric current lg (μA)	Change of sheets		Temperature ($^{\circ}\text{C}$)	Relative Humidity (%)	Nominal stress range $\Delta\sigma_n$ (MPa)	Failure life Nf (cycles)	Life ratio
				total times	times / 10^6 cycles					
BM1						22.3 ~ 22.8	20 ~ 27	104.9	529296	1.00
DW1	Distilled water			4	3.54	27.2 ~ 29.2	45 ~ 52	104.4	1130160	2.14
DW2		○	-1.97 ~ -0.03	2	1.56	22.9 ~ 26.3	27 ~ 37	104.3	1282300	2.42
SW1	3% salt water			8	3.71	22.1 ~ 24.6	20 ~ 48	104.6	2157460	4.08
SW2		○	-32.30 ~ -19.40	3	1.03	25.6 ~ 27.9	37 ~ 59	104.3	2908960	5.50
SS1	Synthetic sea water			8	2.33	21.2 ~ 23.0	20 ~ 31	104.3	3436790	6.49
SS2		○	-2.13 ~ -0.12	6	1.18	20.4 ~ 23.2	21 ~ 26	104.4	5064940	9.57

4.1.2 き裂進展曲線の比較

図6に、各試験におけるき裂長さ a とサイクル数の関係(き裂進展曲線)をまとめて示す。ここで、図中の点線は各試験ごとの破断寿命を表している。

前項でも述べた通り、DW1()およびDW2()のBM1(○)に対する破断寿命比は2倍以上となっており、蒸留水の含水ジェルであっても若干のき裂進展抑制効果が現れているが、陰極層の有無による差異は小さい。

次に、含水ジェルの種類や最終的な破断寿命比は異なるものの、陰極層を設けなかったSW1()とSS1()に着目すると、両者は比較的似通った傾向を示しており、き裂長さ a が10 mmを超える

辺りまで、き裂進展曲線は片対数座標上でほぼ一定の傾きを保って緩やかに上昇しており、その後、傾きが急激に増大して破断に至っている。これは、両者において、腐食生成物のくさび効果がき裂進展の終盤に至るまで持続的に作用していたことを示している。

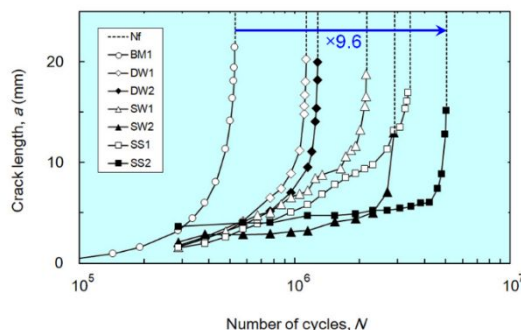


図6 片側き裂長さ a とサイクル数の関係

一方、陰極層を設けたSW2()とSS2()を見ると、この両者も比較的似通った傾向を示しており、き裂長さ a が5 mmに達する辺りまで、き裂進展曲線は片対数座標上でほぼ横ばいが極めて緩慢な微増に留まっており、その後、傾きが急激に増大して破断に至っている。これは、両者において、き裂進展の初期段階では極めて強いくさび効果が発現していたものの、 a が5 mmを超える段階になると進展抑制効果が急激に低下したことを示している。

4.1.3 き裂周辺のその場観察結果

図7に、SW1・2およびSS1・2におけるき裂周辺のその場観察結果を示す。まず、食塩水の含水ジェルを用いたSW1では、き裂開口部周辺に焦茶色～黒色の錆状物質が広がっており、その周りには半透明な膜が観察される。この膜は開口部よりも広範囲に広がっており、開口部から外部に拡散した塩分を含む水蒸気が周辺の母材表面に付着し、塩分だけが固化して残留したものと推察される。陰極層を設けたSW2でも、SW1同様に開口部周辺には焦茶色～黒色の錆状物質が広がっており、周囲には半透明な膜が観察される。切欠き部からは一部白色の液体が漏出しているが、おそらく塩水中の塩分が析出して濃縮されたものと推察される。

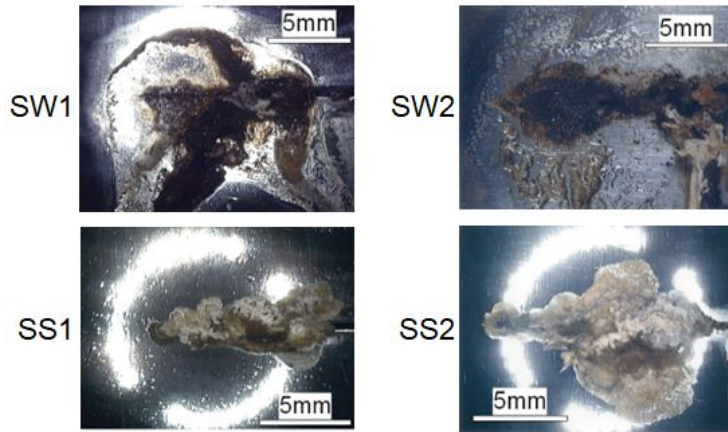


図7 き裂周辺のその場観察結果

次に人工海水の含水ジェルを用いたSS1では、開口部周辺には白色の物質が盛り上がるように析出しており、茶色～黒色の錆状物質が混在している。白色物質の顕著な析出はSSシリーズ特有の現象であり、その色合いや人工海水の成分からみて、CaやMg等の塩化物が混ざり合ったものと推察される。開口部周辺には白色の物質が盛り上がるように析出しており、茶色～黒色の錆状物質が混在している。陰極層を設けたSS2では、開口部周辺に析出した白色物質の広がりSS1よりも大きく、SS1と同様に茶色～黒色の錆状物質が混在している

4.1.4 破面観察結果

図8に、母材ままのBM1、人工海水の含水ジェルを用いたSS1(陰極層なし)およびSS2(陰極層あり)における破面の観察結果を示す。まずBM1の破面は、通常の母材試験で得られる疲労破面であり、光沢がある。また、ほぼ上下対称の楕円弧状ビーチマークが明瞭に認められる。これに対してSS1では、破面のほぼ全面が茶色～黒色の錆に覆われており、ビーチマークは視認できない。板厚を貫通して赤錆が発生し、繰り返し圧迫を受けた部分が島状に平坦化していることがわかる。一方、SS2では、SS1に比べて赤錆の量が少なく、全体として灰色がかって見える。板厚を貫通して赤錆が不連続的に点在し、繰り返し圧迫を受けた部分がSS1よりも広い範囲で白っぽく平坦化している。

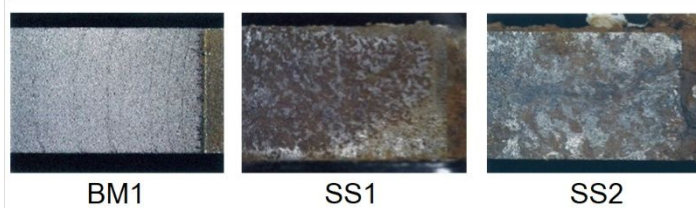


図8 破面観察結果(SS2)

4.2 FE解析および破壊力学的考察

図9は、BM1およびSS2におけるき裂進展速度 da/dN と応力拡大係数範囲 ΔK の関係を、FE解析の結果と併せて両対数座標上に示したものである。なお、上記FE解析は、き裂の全長に亘り厚さ7.5 μm の理想的な弾性くさび層が形成されると仮定したものであり、粒径15.2 μm のアルミナ粒子を用いた耐疲労スマートペーストを適用した疲労試験の結果とほぼ同程度のくさび効果を示している。図9を見ると、人工海水の含水ジェルを用いて陰極層を設けたSS2では、 $\Delta K=20 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$ およびその近傍において極めて大きな抑制効果が現れ、 da/dN がBM1より1/20～1/100にまで抑制されている。き裂進展が進んで ΔK が22 $\text{MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$ を超えると抑制効果は急激に減じるが、それでもなお $\Delta K=30 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$ 付近まではFE解析結果(青塗り)と同程度の効果を保っていることがわかる。

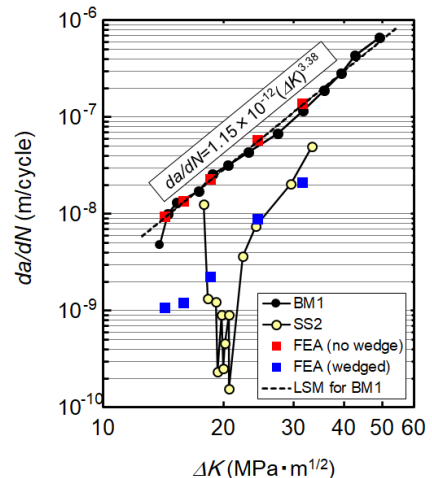


図9 da/dN と K の関係

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 1件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 高橋一比古	4. 巻 41
2. 論文標題 高含水ジェルを用いた疲労き裂進展抑制シートの試作と性能評価 - 腐食生成物のくさび効果を利用して -	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 溶接学会論文集	6. 最初と最後の頁 289 ~ 301
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.2207/qj jws.41.289	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

〔学会発表〕 計1件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 高橋一比古
2. 発表標題 高含水ジェルを用いた疲労き裂進展抑制シートの試作と性能評価 - き裂内生成物のくさび効果を利用して -
3. 学会等名 溶接学会 溶接疲労強度研究委員会（第280回）
4. 発表年 2024年

〔図書〕 計0件

〔出願〕 計3件

産業財産権の名称 疲労亀裂の進展抑制方法、及び疲労亀裂の進展抑制シート	発明者 高橋一比古	権利者 国立研究開発法人 海上・港湾・航空技術研
産業財産権の種類、番号 特許、特願2022-103834	出願年 2022年	国内・外国の別 国内
産業財産権の名称 疲労亀裂の進展抑制方法、及び疲労亀裂の進展抑制シート	発明者 高橋一比古	権利者 国立研究開発法人 海上・港湾・航空技術研
産業財産権の種類、番号 特許、特願2021-109233	出願年 2021年	国内・外国の別 国内
産業財産権の名称 疲労亀裂の進展抑制 / 検出方法、及び疲労亀裂の進展抑制 / 検出シート	発明者 高橋一比古	権利者 国立研究開発法人 海上・港湾・航空技術研究所
産業財産権の種類、番号 特許、特願2020-212641	出願年 2020年	国内・外国の別 国内

〔取得〕 計0件

〔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
---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------