

氏 名	Jang 張	Soon 舜	Shik 植
授 与 学 位	工 学 博 士		
学位授与年月日	昭和 62 年 3 月 25 日		
学位授与の根拠法規	学位規則第 5 条第 1 項		
研究科, 専攻の名称	東北大学大学院工学研究科 (博士課程) 機械工学第二専攻		
学 位 論 文 題 目	海洋構造材料の腐食疲労き裂進展挙動に及ぼす海水 流動に関する研究		
指 導 教 官	東北大学教授 高橋 秀明		
論 文 審 査 委 員	東北大学教授 高橋 秀明	東北大学教授 前川 一郎	
	東北大学教授 小林 陵二	東北大学教授 島田 平八	

## 論 文 内 容 要 旨

### 第 1 章 緒 論

海洋構造物はエネルギー開発を目的とした石油, ガス掘削用海洋プラットフォームをはじめとして産業廃棄物処理場, 海洋レジャー施設などその種類も増える一方である。近年その大型化が進められてきた海洋構造物は事故の規模も大きくなっており1980年北海での石油掘削リグ, アレキサンダーキルランド号の事故は123人の死者を出した。使用鋼材の高張力化により軽量化, 溶接時間の短縮等のメリットが期待される反面, 低強度鋼に比較して高張力鋼では環境の影響が顕著に現れるため海洋環境にさらされる高張力鋼の環境助長割れに関する研究が強く要望されている。海洋環境での構造物に現れる腐食疲労を始めとする環境助長割れは大きく材料因子, 力学因子そして環境因子によって支配される。この三つの因子のなかで環境因子についての研究は他の二つの因子に対する今までの研究に比べて必ずしも十分とは言えない現状である。つまり海洋構造物が曝される条件としては巨視的には風, 波浪, 潮流などおもに力学的因子として働くものと, 溶存酸素, pH, 水温及び海水の化学組成など環境因子として作用するものが存在するがこれら因子は互いに影響を及ぼすことによりどちらか一方だけを考慮するだけでは十分ではない。上記の点に鑑み本研究では流動の腐食に及ぼす影響に関する研究の現状において問題点を整理した結果, 1) 今までの研究成果のほとんどが海洋構造物に適用できるような流速としてはあまりにも高速であること。2) 腐食疲労き裂進展における物質移動論的および電気化学的考察が同時に行われていないこと等が挙げる事が出来た。

以上述べたようにこれまでの海洋構造物の腐食疲労き裂進展に関する研究では海水の流動の影響は注目されておらずき裂進展の加速機構についても明確な考え方は示されていない。

本研究では海洋構造材料を用いて海水の流動による腐食疲労き裂進展機構を流体力学、電気化学及び破壊力学的側面から解明することを目的とする。

## 第2章 流動海水環境中における疲労き裂進展挙動

本章では海洋構造用の供試材として80kg/cm<sup>2</sup>級低合金鋼および二相ステンレスを用いてそれぞれに対して流速、電位および応力比を変えて腐食疲労き裂進展試験を行い各条件でのき裂進展結果を考察し、次のような結果を得た。

流動は腐食疲労き裂進展に対し加速及び減速因子として作用する。本研究の条件では腐食電位の場合、低流速では静止海水中でのき裂進展速度と同じ結果が得られたが高流速条件では静止海水環境の約1.4倍の加速が得られた。これに対して-450mV印加電位では腐食電位での結果とは逆に高流速環境より低流速の環境で大きな加速が見られた。この電位でのき裂進展速度は腐食電位の静止海水中に比べて、低流速環境で2.10倍、高流速環境では1.54倍の加速を示した。一方、-523mV印加条件では流速によるき裂進展速度の差は認められなかった。また流動は静止条件に比して腐食電位を70mV程、貴にすることが明らかになり、電位変化をもたらす因子として流動を考慮することが不可欠である。一方、-450mV印加環境では低流速条件で腐食生成物によるき裂閉口現象が現れ、流動のき裂閉口挙動に及ぼす影響の検討が必要であることを示した。

## 第3章 き裂閉口挙動に及ぼす海水流動の影響

疲労き裂進展速度はき裂閉口により生じる有効荷重減少の現象から著しい影響を受ける。W. ElberはAl合金において、下限界値近傍でのき裂閉口挙動を検討した。このモデルではき裂閉口、正確には塑性誘起き裂閉口の原因は疲労き裂進展中き裂先端で塑性ひずみが生じ周辺の弾性域によって拘束されることによって除荷時にき裂先端には圧縮荷重が生じき裂面の接触が起こり、負荷があるレベル以上にならないと閉口は生じないことになる。き裂は閉口している間は進展しないので、このき裂閉口現象は有効応力拡大振幅を低下させる。一方、環境にさらされるき裂では酸化物あるいは腐食生成物によるき裂閉口が存在し、これは前述の塑性誘起き裂閉口に比べてき裂進展速度範囲依存性はなく幅広い範囲にわたり現れる。また材料側の因子としては表面粗さ誘起き裂閉口も考慮に入れる必要がある。

本章ではき裂閉口挙動の解明に当たって超音波法並びに背面ゲージ除荷弾性コンプライアンス法を用いて検討を行い、両者ともき裂閉口挙動を検知することが可能であることを明らかにした。また本実験では試験片形状、腐食セル、データの計算機処理の簡便さより主として背面ゲージ法を用いて解析を行った。得られた結果よりき裂進展速度に直接関与するき裂閉口挙動は材料、応力比また流速等に影響され、特に流動は腐食生成物をき裂面上から排出することによりき裂閉口を妨げ、結果的にき裂進展速度の加速要因として作用することが分かった。具体的には、高張力鋼HT80は低流速において腐食生成物誘起き裂閉口が認められた。一方、二相ステンレスDPSS材につ

いては表面粗さ誘起き裂閉口が主因であることを明らかにした。

#### 第4章 流動海水中における電気化学的分極挙動

腐食疲労き裂進展速度に及ぼす流動の影響を調べるために、第2章ではその実験の結果を列記したが、流動は結果的には条件によって腐食疲労き裂進展速度の加速あるいは減速の因子として働くことが分かった。このような流動の腐食疲労き裂進展速度への影響の機構を解明するには、き裂先端での材料の溶解の挙動を明らかにするのが不可欠である。そのためには基本的な挙動解明の目的から、流体力学的に整備された条件下で金属表面における溶解反応速度に及ぼす流動の効果を調べることが必要となる。流動による腐食反応速度に関しては古くから数多くの研究がなされてきたが、実際研究されている流速範囲はその大部分が高流速である。海洋構造物における腐食疲労現象を考える上では、実際腐食反応が進行するき裂先端を考慮すると非常に低流速が対象となり、より低流速のデータが必要となってくる。上記の点に鑑み、本研究では平板の金属表面での腐食反応速度におよぼす支配因子として生成皮膜の安全性を調べることが目的として海水の流動環境中での電気化学的分極測定を行い腐食反応速度を考察した。具体的には、流速、溶存酸素濃度および電位掃引速度を種々変えて分極測定を行った。その結果、流動は基本的には物質移動の役割から考察すると物質の拡散を助長するが、保護皮膜の生成の有無、または生成皮膜の安定性の観点より、反応促進、抑制効果の二つ通りの場合が有り得ることが見いだされたが、き裂先端部の条件を考慮すれば、流動は基本的には加速因子として作用することが分極挙動上からも明示された。

#### 第5章 き裂内電位分布に及ぼす海水流動の影響とその電気化学的評価

第2章ならびに第4章の結果に基づけば流動は材料の腐食電位を変化させ、さらに環境依存の電位および生成皮膜の安定性によって金属表面の腐食反応速度は異なることが分かったが、腐食疲労き裂が進展するき裂先端を考えたとき、き裂先端では沖合いに比べて流速が非常に遅いこと、従って供給される溶存酸素の濃度も低下することなどの特性を持ち、腐食疲労き裂進展における流動の影響を調べるにはき裂先端での電位の解明は不可欠である。このような流動による沖合いとき裂内での電位の差は自然腐食電位だけではなく試験片に電位を印加した場合でも同じ事が予想され、き裂先端での電位と印加電位とは異なることが予期される。これは沖合い側で印加された電位はき裂先端に至るまでの隙間表面での腐食状況によって電位降下が十分起こり得るからである。以上の背景より、本章では腐食疲労き裂進展試験で用いた材料の寸法および形状を模擬した試験片で、流動による隙間内電位分布の変化を測定し、第2章で得られた腐食疲労き裂進展試験の結果と比較検討し次の知見を得た。

流動は腐食疲労き裂先端の電位を変化させるが、この際電位変化の様子は電位によって異なる。この流動によるき裂先端での電位の変化は腐食疲労き裂進展速度に著しい影響を及ぼし、流動によって貴に変化する場合に加速が生じることが明らかになった。

## 第6章 腐食疲労き裂進展に及ぼす流動海水の流体力学のおよび電気化学的作用

前章まで述べてきた腐食疲労き裂進展速度に及ぼす流動の効果を流体力学的側面から考察することは、実験結果よりその機構を考察し、さらにより広範囲の現象に応用可能とする上で非常に重要である。前述のように金属の腐食におよぼす流動の影響に対する研究はさまざまな側面からなされており、流体力学的側面からも古くから考察されてきた。しかしながらこれまでの研究では、主に物質移動論的な考え方から金属表面の溶解反応速度と反応種の流動による移動（反応種の金属表面への接近及び排除）の観点から流動の効果を調べているが腐食疲労き裂進展速度に及ぼす流動の効果を直接評価できるような知見はない。そこで本章では、第4章で得られた流速による電流密度変化の関係に汎用性を与えるためパラメータを無次元化し、第5章の結果と共に腐食疲労き裂進展に及ぼす流動の効果を考察した結果、以下の知見を得た。

第4章の流動分極測定の結果流動の腐食速度に及ぼす結果と第5章の隙間内電位分布に及ぼす流動の効果は独立的ではなく、二つの効果を同時に考慮することが必要である。本章ではレイノルズ数とシャーウッド数との関係図を用いて腐食疲労き裂進展速度の評価線図を提案した。代表的な数値を用いてき裂内のレイノルズ数を評価した結果は、極めて小さな値（～20）を示し、このことと本章の結果より流動は基本的にはき裂進展を加速する作用を持ち、さらに流動による卑方向への電位の変化を考慮した場合、減速が生じ得ることが明らかとなった。

## 第7章 結 論

本研究で得られた成果を要約すると以下の3点にまとめることができる。

(1) 流動条件は、腐食疲労き裂進展速度の決定に重要な役目を果たすき裂閉開口挙動を決定する主要因子の一つとなる。き裂閉開口は材料因子及び環境因子によって異なった挙動を示すものの、有効応力拡大振幅を減少させることによって腐食疲労き裂進展速度を低下させることから、材料の環境強度を評価する上で重要な因子となる。本研究では高張力鋼のHT80が-450mVの印加電位下で著しいき裂閉開口挙動を示し、この条件でのき裂閉開口の機構は酸化物誘起き裂閉開口であることが明らかになった。一方、二相ステンレス鋼（DPSS）材ではその材料の化学組成の特性から腐食生成物は殆ど認められないが組織の特性による破面の粗さに起因したき裂閉開口が発生し、いわゆる表面粗さ誘起き裂閉開口が認められた。

(2) 金属の腐食反応速度に及ぼす流動の効果は生成される皮膜の性質によって二通り存在することが分かった。すなわち、腐食初期段階で十分な酸素の供給及び反応に費やされる時間が与えられた場合は安定な皮膜を形成するが、それとは逆に供給される溶存酸素の欠乏あるいは反応が行われる時間が充分でない場合は不安定な皮膜が形成される。そして、酸化物の皮膜が安定である場合は流動によって腐食速度は低下するが、不安定な皮膜であるときは腐食は流動によって促進される。

(3) 流動によって隙間内電位分布は影響をうける。このことはき裂先端の電位が沖合いでの電位と異なることから腐食疲労き裂進展機構を究明する上で重要である。すなわち、流動によってき裂先端の電位が貴に移行する流動条件下では、腐食疲労き裂進展速度は加速し、卑に移行する場合には減速することを見いだした。

以上の結果、海洋環境にさらされる鉄鋼材料に対して海水流動の影響を考慮した腐食疲労き裂進展挙動の定量的評価が可能になった。

## 審 査 結 果 の 要 旨

最近、石油資源開発など種々の産業分野で海洋構造物の腐食疲労強度を考慮した安全設計基準の整備が急務の課題となっている。しかしながら海水環境中の鉄鋼材料の腐食疲労強度の推定法は、影響因子の複雑さなども相まって未だ確立していない。特に海洋環境の特徴は海水が流動することであり、これによる腐食疲労強度への影響に注目しなければならない。

本研究は海洋構造材料として用いられる高張力鋼（HT 80）及び耐食性にすぐれた2相ステンレス鋼の海水環境中の腐食疲労き裂進展挙動に及ぼす海水の流動の影響について、破壊力学的ならびに電気化学的に考察したものであり全編7章よりなる。

第1章は緒言である。

第2章では流動海中における腐食疲労き裂進展挙動についての新しい知見が述べられている。一定流速の海水を循環させながら、弾性除荷コンプライアンス法を用い連続的にき裂伝播をモニタリングし、流速の増加とともにき裂は加速すること、電位を印加することによりその加速挙動が変化することなど新しい現象を見出ししている。

第3章は腐食疲労き裂成長にともなうき裂閉口に関する説明である。ここでは腐食生成物誘起き裂閉口と破面粗さ誘起き裂閉口について述べられている。

第4章は流動海中の鉄鋼材料（HT-80）の電気化学的分極挙動に関する実験の紹介である。同一流速の実験でも、電気化学的分極掃引速度を変え、表面酸化皮膜の安定性を変化させることにより溶解電流が著しく異なることを初めて明らかにしている。これは海水における腐食機構を考える上で重要な基礎的知見である。

第5章ではき裂のような狭いすき間内部の電位が海水の流動でどのように変化するか、またき裂先端の電位と沖合いのそれとの差についても詳細な検討を行っている。

第6章はき裂内部の流動海水の流体力学のおよび電気化学的作用に関する考察である。ここでは第4章で得られた溶解電流の流速依存性を腐食反応速度の無次元パラメータとしてシャーウッド数とレイノルズ数の関係で整理し、き裂のような狭いすき間の低レイノルズ数のき裂進展の加速現象を検討している。

第7章は結論である。

以上要するに本論文は、海洋構造物の設計基準の中の腐食疲労き裂進展挙動評価法を確立することを目的として、海水の流動効果を初めて明確にしたもので、機械工学の発展に寄与するところが少なくない。

よって、本論文は工学博士の学位論文として合格と認める。