

【回答】 動的問題の有限要素解析には空間領域の離散化誤差と時間領域の離散化誤差があり、精度の高い有限要素解析を行うためには、適切な要素サイズと時間増分を決定する必要がある。本研究は有限要素解析に使用される要素サイズと時間増分が適切であるかを判断することを目的とした事後誤差評価を行うものである。

時間増分の決定には式(17)により与えられる時間領域の事後誤差( $\| \Delta e_t \|$ )が必要であり、要素サイズの決定には式(18)により与えられる空間領域における事後誤差( $\| \Delta e_s \|$ )が必要になる。動的問題の場合、両離散化誤差ともに運動エネルギーに関する誤差( $\| \Delta e^k \|$ )とひずみエネルギーに関する誤差( $\| \Delta e^s \|$ )の和により求められるが、運動エネルギー

とひずみエネルギーに関する誤差の個別評価よりも両者の和の推定精度が重要になる。

Fig. 5, Fig. 6において、ひずみエネルギーに関する誤差は多少高く予測され、運動エネルギーに関する誤差は多少低く予測されている。このプラス量とマイナス量が打ち消し合って両者の合計は良い評価値になっている。両エネルギーに関する誤差を精度よく評価できればよいのであるが、現在のところ、この程度の予測誤差が発生している。しかし、前述のように、空間領域における事後誤差と時間領域の事後誤差の評価が重要であり、本研究で提案する事後誤差評価手法は有効であると考えられる。

## 40 人工海水中における造船用鋼板の長寿命腐食疲労強度の検討

【討論】 江原隆一郎 君 (1) 腐食速度に及ぼす繰返し応力の影響についてどのようにお考えでしょうか。

(2) 長時間腐食疲労試験においては、しばしば長時間側でS-N曲線に折点が生ずることが報告されています。長時間側での腐食速度の変化がリニアでないことが想像されますが、御見解をうかがいたい。

【回答】 (1) 繰返し応力が腐食速度に及ぼす影響は、現在、分極抵抗の測定から電気化学的に調べています。負荷応力範囲が増加すれば、腐食速度が大きくなる結果は得ていますが、この結果を腐食疲労寿命に定量的に算入するまでには至っておりません。また、この測定では、電気的絶縁性を長時間にわたり保持することが困難であり、種々の角度から検討しているところです。

(2) 腐食速度が一定で断面減少すれば、負荷応力も一定速度で増加することになります。しかし、S-N線図の寿命は対数で表しますので、S-N線図に折点ができて短寿命となってもおかしくない気がします。折点の寿命は、腐食速度に依存すると考えられます。

腐食速度が経過時間とともに増加するなら、上述の折点はさらに短寿命側にずれることになります。また、長寿命域では、腐食生成物が局所的に脱落して局部電池が形成され、選択的な腐食進行となることや腐食ピットの合体などが生じ、腐食疲労を短寿命化させることが考えられます。何れの状態が短寿命を引き起こす要因となっているかは、今後の研究課題と考えます。概念的な回答かと思いますが、討論課題を念頭において研究を進めていきたいと思えます。

【討論】 菅田 登 君 (1) 全面腐食速度について

結論の(1)において、研磨面、ショットブラスト面の全面腐食速度に相違があると述べられておりますが、長寿命域では表面層が完全に腐食溶解し両者に相違がなくなると

思います。このような理解で宜しいでしょうか。また、p 386の7行目に45%の断面積減少と書かれておりますが、経年船の実測との比較がありましたらご紹介願います。

(2) 腐食ピットの成長速度について

結論の(5)を導き出すに当たり、応力因子の限定は必要ないのでしょうか。また、全面腐食速度と同様、腐食ピットの成長速度が腐食疲労き裂発生の有無に強く影響すると思いますが、本論文で腐食ピットの成長速度則として何か仮定されているのでしたらご教授下さい。

【回答】 (1) 全面腐食の場合、長寿命域では、ご指摘のとおり、研磨面とショットブラスト面の腐食速度は同じになると思います。

45%の断面減少は、ここで対象としている試験片についてであります。経年船の腐食については、日本海事協会(水上・石川：最近の船体損傷の傾向と対策、日本海事協会誌、No. 227, 1994)によりますと、油タンカー、鉱石運搬船、ばら積貨物船、一般貨物船、木材運搬船の平均年間衰耗率(mm/year)は、それぞれ0.1, 0.12, 0.17, 0.09, 0.2であり、またこれらの最大年間衰耗率(mm/year)は、それぞれ0.4, 0.46, 0.49, 0.29, 0.55と報告されています。

(2) 腐食速度には、応力の影響、すなわち応力腐食が関与することが知られています。この問題につきましては、電気化学的計測により調べています。現在までに海水中における負荷状態での分極測定によると、降伏点以下では0.13 mm/yearの一定値となり、降伏点を超える負荷では負荷が大きくなるほど腐食速度が大きくなり0.18 mm/yearとなりました。また、分極抵抗法によると、腐食速度は、負荷荷重が大きいほど大きく、また繰返し応力範囲が大きいほど大きくなる結果を得ています。このような結果とき裂発生寿命との関係につきましては、まだ発表の段階

には至っておりませんので今後の検討課題とさせていただきます。

本論文では、腐食ピットが成長してき裂となる繰返し数(き裂発生寿命)は容易に求められないため、板厚貫通疲労き裂深さ1 mmのときを対象とし、き裂進展則との関係から検討しました。腐食疲労のき裂発生として、駒井先生らが腐食ピットの観察および画像処理から求めた応力拡大形数範囲 $\Delta K_{CF}$ を使用させていただきました。また、腐食速度が大きくなる環境では、溶解速度が大きいために腐食ピットはできないと考えています。

【討論】鈴木秀人君 本研究は、詳細な実験の積み重ねによる貴重な成果である。しかしながら、TMCP 基材に関しては腐食疲労き裂発生を詳細に論じているが、実用上重要であるショットブラスト、プライマーなど表面処理を施した場合のそれに対する考察が不足しているように思われる。

例えばショットブラストのような表面処理を施した平滑材の場合、必ずしも試験片表面の腐食損傷からき裂が発生するとは限らず、むしろき裂が内部の非処理部から発生し、成長して表面改質部を突き破って最終的破壊をもたらすことが多い<sup>(1)</sup>。その場合、疲労強度は $10^7$ 回を超える超長寿命領域で未処理材と同レベルまで収束する。

このような点も考慮し、表面改質した場合についても浸漬試験結果と長寿命腐食疲労試験結果を比較検討いただければ幸いです。

(1) 片平和俊・鈴木秀人：機論, 63-612, A(1997), 1607-1611.

【回答】本供試材のショットブラストは、圧延による黒皮を除去し、塗装をし易いようにする事が主たる目的であります。X線による残留応力の測定では、深さ0.2 mm以内で250 MPa程度の残留応力がありました。この残留応力は、疲労強度を改善させていると考えられます。しかし、本実験では、機械加工の切欠き底から発生する腐食疲労き裂を対象としており、また高強度材に対するハードショットピーニングのような表面改質ではないため、ショットブラスト下部の内部組織からのき裂発生は、特に考えませんでした。材料表面の腐食速度や腐食疲労き裂発生に関しましては、現在、電気化学的測定により調べております。

ご指摘の点に関しましては、今後の研究で検討させていただきますと思います。

【討論】才本明秀君 (1) Fig. 2において腐食速度を除錆後の重量変化から求めておられるが、除錆による腐食速度の変化は考慮する必要はないか。

(2) 式(6)はき裂深さ1 mmまでの疲労き裂発生寿命と応力拡大係数範囲との関係を表している。この間き裂は0 mmから1 mmまで成長するが、 $\Delta K$ として深さ1 mmのき裂に対する値を用いることの物理的な根拠は何か。

【回答】(1) 除錆時の減量は、ブランク測定を行い、腐食速度の算定に加味しています。

(2) き裂深さが1 mm程度になれば、直流電位差法では十分な精度でき裂がとらえられ、さらに、き裂は板厚を貫通するようになります。この点から、き裂深さ1 mmのときをき裂発生寿命としています。また、板厚貫通き裂が1 mmではパリス則が十分成立していると考えますので、そのき裂深さに対する $\Delta K$ を用いることがよいと考えます。

【討論】幸英昭君 (1) Fig. 2において腐食速度の経時変化を示されていますが、縦軸は文脈からしてあくまでも平均腐食速度のようですから、その時間時間での瞬間の腐食速度ではありませんので、一見すると誤解されかねない表示ですので注意された方がよいと思います。

(2) 本文中に記述されていますように、これまで海水中でのき裂進展速度は繰返し速度が低下すると増大するとされていましたが、なぜ本研究ではFig. 7に見られるように変化しないのでしょうか。文献と比較して何か試験条件に差があるのですか。本当に差がないとするならば、大気中と海水中でのき裂進展速度に差を生じる理由のメカニズムをどのように考えられますか。

【回答】(1) 横軸は、平均腐食速度です。

(2) 本実験における0.1 Hzと1 Hzの結果は、 $\Delta K$ が10~20 MPaにプロットされており、両周波数の相違がき裂進展速度に大きな影響を与えてはいません。また、文献(日本鉄鋼協会、第3回シンポジウム前刷集、1978, p. 196)によりますと、HT 50-CRの $\Delta K=10$  MPaにおける1 Hzと0.17 Hzのき裂進展速度は、ばらつきが大きいので、繰返し速度が2 Hzから0.17 Hzに低下しても増大する結果が得られているようには見えません。何れにせよ、低応力拡大係数範囲における繰返し速度がき裂進展速度に与える環境の影響に関しては、実験データが乏しく、今後の研究に待ちたいと思います。

また、海水中のき裂進展速度が大気中のそれより早くなるのは、き裂先端が海水中で溶解するためと考えられます。詳細なマイクロメカニズムにつきましては、今後の検討課題とさせていただきます。