

高張力 S N C M 4 3 9 鋼の 応力腐食割れき裂成長とフラクタル特性

津田政明* ○黒瀬雅詞** 広瀬幸雄*

松岡三郎*** 黒部利次**** 田中啓介*****

*金沢大学教育学部 **金沢大学大学院 ***金属材料技術研究所

****金沢大学工学部 *****名古屋大学工学部

1. 緒言

応力腐食割れ (SCC) においてき裂は枝分かれ、うねりなど様々な形態を示すことはよく知られている。そして高張力鋼においても SCC き裂は選択的に前オーステナイト結晶粒界に進展していくことはよく知られており、その結晶粒径が枝分かれ、うねりなどの単位として考えられたり、き裂進展あるいは発生のメカニズムを考える上での重要な経路となってきた。また、破壊力学の適用により SCC の挙動はより定量的に整理された。しかしながら、SCC は環境、組織など多様な因子の複合的な現象であり、いくつかのパラメータを用いたとしても現象を網羅することはできない。

SCC き裂の形態については、これまでに、大規模な領域について扱われることが多く巨視的な解析は多い。しかしながら、実際にき裂は前オーステナイト結晶粒径程度、あるいはその桁の範囲で複雑な形態を有するが、微視的なき裂に対する定量的な評価はされていない。SCC き裂の形態について定量的な評価法を開発することは、SCC の機構の解明の点でも、さらに破壊予知の点から見ても有益である。

近年、複雑な形態をフラクタルの概念^{1) 2)}により整理することが試みられており³⁾、これまでも自然界に存在する多くのものについてフラクタル特性が発見されている。これまでに筆者らは高張力鋼の SCC き裂のうねりがフラクタル特性を有していることを明らかにした。そのフラクタル特性は前オーステナイト結晶粒径の範囲以下の粗視化寸法で成り立っており、前オーステナイト結晶粒径がフラクタル特性の領域に影響を及ぼしていると考えた。⁴⁾ これまでの環境条件下でフラクタル特性が成り立ったことから、これ以外の条件下でき裂形態の複雑さを定量的に評価できる可能性を持っていると思われる。

そこで本報告では、環境液の温度が異なっても SCC き裂にフラクタル特性が存在するか、また存在するときに環境液の温度がフラクタル特性にどのような影響を及ぼしているかを調べるため、前報告と同様の試験片を用いて、3.5% NaCl 水溶液の温度を種々変化させて SCC 実験を行い、き裂のフラクタル特性を測定し

た。また、今回はき裂のうねりだけでなく、異なる測定方法も用いて SCC き裂に特徴的に見られる微視的な枝分かれも含めて測定した。この結果にもとづき、環境液の温度がフラクタル特性に及ぼす影響を調べ、フラクタルからみた SCC き裂成長について検討を行った。

2. 実験方法

試験片は前報⁵⁾と同様の市販の高張力 S N C M 4 3 9 鋼を用いて、板厚 5.5mm の 1 インチ型コンパクト引張型試験片を作製し、熱処理により前オーステナイト結晶粒径 d を $12\mu\text{m}$ に調整した。実験は環境液に 3.5% NaCl 水溶液を用い、試験片を環境液中に 24hr 無負荷状態で保持したのち応力拡大係数 K 一定で行った。環境液の温度は二重に製作した環境槽の外槽とウォーターストラスの間で蒸留水を循環させ、任意の温度に調整した。き裂長さの測定はダブルカンチレバービームゲージと 10 倍の移動型顕微鏡を併用した。

き裂成長挙動のフラクタル特性を測定するため、き裂は実験後直ちに板厚中央部を切断し、バフ研磨の後、走査型電子顕微鏡を用いて幾種類かの倍率で観察した。

3. フラクタル特性

我々は空間について、線を 1 次元、平面を 2 次元、立体を 3 次元、という概念を持っている。図 1 に示すようにある直線を $1/2$ に区切った線分の数はもとの図形の 2^1 個、同様に正方形の各辺を $1/2$ に区切ると 2^2 個、立方体は 2^3 個になる。 $1/3$ に区切ればそれぞれ 3^1 個、 3^2 個、 3^3 個になる。つまり、ある図形を $1/a$ で区切った図形はもとの図形の a^n 個に分割される。

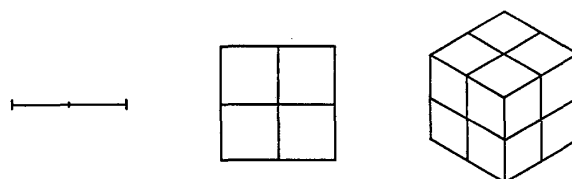


図 1 直線、正方形、立方体を分割する場合

今、分割された個数を b とすると

$$a^D = b \quad (1)$$

なので D は

$$D = \log b / \log a \quad (2)$$

となる。この D をフラクタル次元とする。 $\log a$ をグラフの横軸、 $\log b$ を縦軸をとすれば、 a 、 b の間に直線関係があるときその傾きがフラクタル次元 D に相当する。言い替えれば、測定する基準の長さ a を変えることによる距離 b の両対数線図上での変化の割合が D である。

フラクタル次元を測定するには円、球、線分、正方形、立方体などの基本的図形によって近似する方法があるが、²⁾今回は二通りの方法を用いた。

方法 I として図 2 に示すように、円を用いて折れ線であまりを伴うき裂を近似する方法を用いた。測定する基準の長さを短くすると、き裂形態をより近似する。

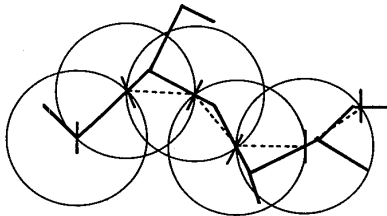


図 2 フラクタル次元を折れ線近似で測定する場合

この場合、(1)式の関係から、全体の長さを l 、測定する基準の長さを δ とすると次式が成立する。

$$l = c_1 \delta^{1-D} \quad (3)$$

方法 II として図 3 に示すように、正方形でき裂を近似する方法を用いた。平面を間隔 r の格子によって 1 辺が r の正方形に分割する。その平面上においてき裂を含む正方形を塗り潰し、その個数を数える。この r を小さくすると、塗り潰された正方形の形態はき裂形態をより近似する。この場合は(1)式の関係から、それぞれの間隔 r で数えた全体の個数を $N(r)$ とすると、

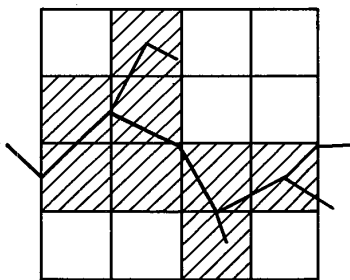


図 3 フラクタル次元を正方形近似で測定する場合

次式が成立する。

$$N(r) = c_2 r^{-D} \quad (4)$$

き裂形態が複雑であれば測定距離(個数)が長くなりグラフの傾きは大きくなる。つまり、き裂のうねりや枝分かれが大きく複雑である方がフラクタル次元は高くなる。

4. 実験結果及び考察

図 4 にそれぞれの条件下のき裂成長速度 da/dt と応力拡大係数 K との関係を示す。いずれの成長曲線も K_{ISCC} 近傍の第 I 領域、不安定破壊応力拡大係数 K_{sc} 近傍の第 III 領域及び中間の第 II 領域に分かれる。同一の K で比較すると、環境液の温度が高い方がき裂成長速度は速い傾向のあることが分かる。

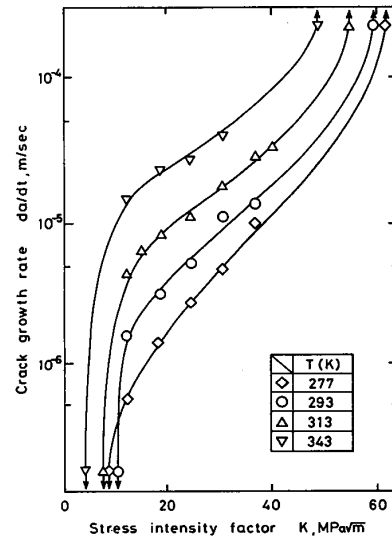
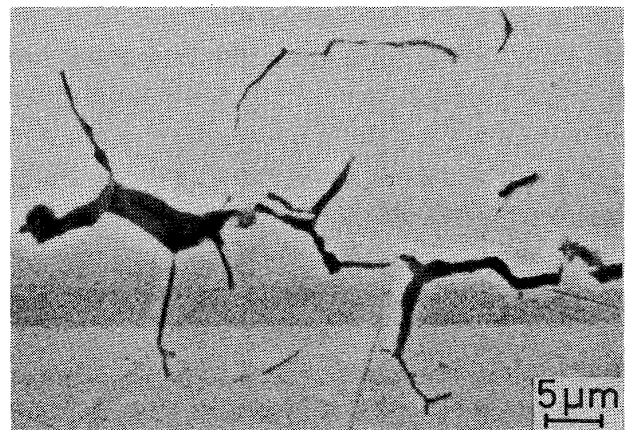


図 4 環境液温度とき裂成長速度の関係

次に、き裂成長挙動のフラクタル特性について検討を行った。



$T = 313\text{K}$, $K = 31.0\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$, $d = 12\mu\text{m}$

図 5 応力腐食割れき裂の電子顕微鏡写真

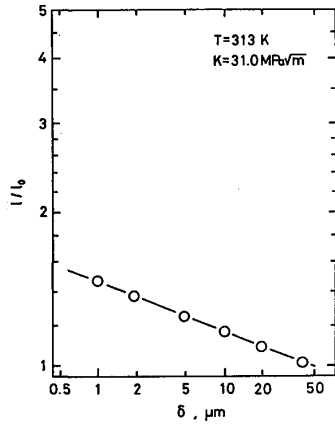


図6 基準長さと全き裂長さの比の関係
き裂のうねりのみを測定した

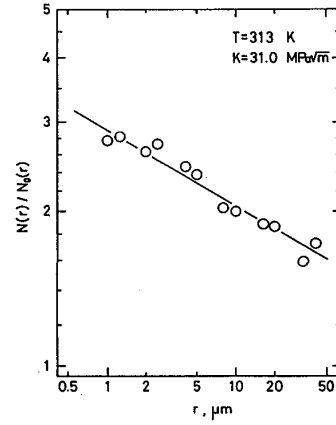


図7 基準長さと全き裂長さの比の関係
枝分かれを含むき裂を測定した

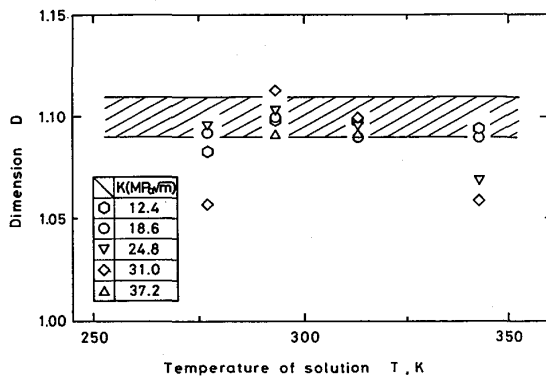


図8 環境液の温度とフラクタル次元の関係
応力腐食割れき裂のうねりのみ

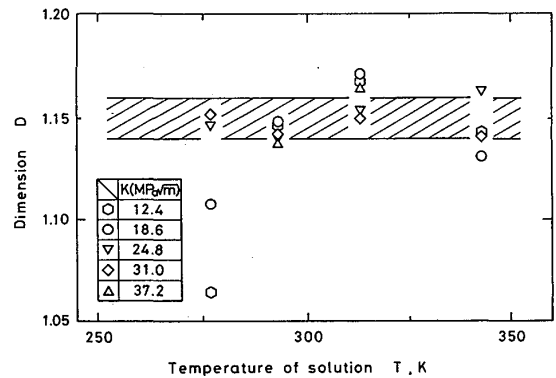


図9 環境液の温度とフラクタル次元の関係
枝分かれを含む応力腐食割れき裂

図5のような各写真について測定する基準の長さを変えたときの、き裂長さを求めた。方法Iのき裂のうねりだけに着目した場合、図6に示すように解析範囲 l_0 に対する l の比と δ の関係は今回解析した δ の範囲において両対数線上で負の傾きを持つ直線を示した。図7に示すように枝分かれも含んだ方法IIにおいても、解析範囲を水平にさし渡した正方形の個数 $N_0(r)$ に対する $N(r)$ の比と r の関係も両対数線図上で負の傾きを持つ直線を示した。この結果、枝分かれを含むSCCき裂もフラクタル特性を有していることが分かった。うねりだけに着目した場合と枝分かれを含む場合とを比較すると、今回測定した範囲では同一の基準長さにおいて解析範囲に対するき裂長さの比は枝分かれを含むき裂の方が大きな値を示しており、SCCき裂の枝分かれはき裂成長に影響を及ぼしているものと考えられる。

次に、これらの両対数線図の傾きからそれぞれフラクタル次元Dを求めた。図8にうねりのみを測定したDを、図9に枝分かれを含むき裂を測定したDをそれぞれ示す。両者ともそれぞれの条件下において、D値は環境液の温度によっては大きく影響していないが、

常温付近のD値が比較的高くなる傾向を示している。また、それらのD値はき裂のうねりのみではおよそ1.10近傍に集中しており、枝分かれを含むき裂はおよそ1.15近傍に集中している。このように枝分かれを含むSCCき裂の方がD値は高く、より複雑な形態であること示している。つまり、枝分かれが無いものより枝分かれが有るき裂のほうがD値が高くなる。それぞれの場合で得られたD値が異なったことから、き裂観察においてフラクタル解析を行うことは、き裂のうねりや枝分かれの形態を定量的に表現できる可能性を有していると考えられる。

5. 参考文献

- 1) B. マンデルブロ, 広中平祐訳, "フラクタル幾何学" 日経サイエンス社.
- 2) 高安秀樹"フラクタル" 朝倉書店.
- 3) 松岡三郎, 住吉英志, 石川圭介, 機械学会論文集, 56, 530, A2091(1990).
- 4) 津田政明, 広瀬幸雄, 黒瀬雅詞, 松岡三郎, 黒部利次, 田中啓介, 材料, (投稿中)
- 5) 広瀬幸雄, 田中啓介他, 材料, 28, 306(1979).