

X-FEM による応力腐食割れのき裂進展解析

076784 稲田 二郎

指導教員 鈴木 克幸 准教授

A high incidence of Stress Corrosion Cracking (SCC) has been found in structures of several Japanese Boiling Water Reactor(BWR) plants. Evaluating the life of the structure is important, but most of existing researches for SCC ignore the intricate shape of SCC. As a rule, this intricate SCC growth along the crystal grain boundary of metal. Therefore considering the shape of grain boundary enables SCC analysis to be more sophisticated. In this paper, in order to express the grain boundary, Voronoi diagram is applied. Using this diagram and X-FEM for decision of the line of crack growth leads display the crack growth route of intricate shape

Key words: Stress Corrosion Cracking, Grain boundary, Voronoi diagram, X-FEM

1 緒言

1970年代後半から現在に至るまで、国内外の沸騰水型軽水炉において、特に原子炉内の压力容器の内張や燃料棒を支えるという極めて重要な役割を持つシュラウドや、圧力バウンダリを形成する再循環系配管などに使用されている、極めて腐食されにくいと言われていたSUS304ステンレス鋼などから、多数の応力腐食割れ(以下、SCC:Stress Corrosion Cracking)が確認されている¹⁾。

SCCは疲労の場合と同様に、設計許容応力以下の応力でき裂が発生、進展するため、未然に予測して防ぐことが困難であり、現在でも原子炉内の構造物損傷の要因となっている。

SCCによるき裂に関してその進展速度予測等は重要な取り組みであるが、現行の評価法ではその複雑なき裂形状や材料金属の結晶粒径・硬さ等を現実的に即したかたちで考慮している例は少ない。

そこで本研究では、SCCき裂で代表される複雑形状き裂に対して破壊力学的評価を行うことを目標とし、結晶粒界を考慮したき裂進展経路のシミュレーション解析を行う。

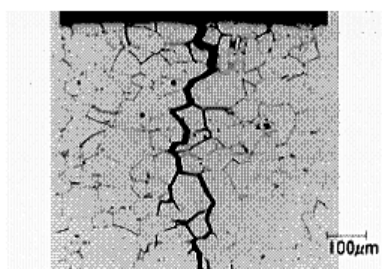


Fig.1 Stress Corrosion Cracking¹⁾

き裂の発生・進展のシミュレーションについては、簡便で精度の高いシミュレーション技術が必要でありBelytschkoら⁴⁾によって提案された簡便で精度の高い extended finite element method (X-FEM)を用いる。

本論文では、結晶粒界、き裂の枝分かかれ等を考慮してX-FEMを用いた応力腐食割れにおけるき裂進展解析を行い、シミュレーション解析結果と実験結果の比較を行った結果について報告をする。

2 結晶粒界のモデル化

2.1 Voronoi 分割によるモデル化

結晶粒界の形状モデルの作成にVoronoi分割によるモデル化を行った。Voronoi分割²⁾では、平面内にプロットした母点について、隣り合う2点を結ぶ線分の垂直二等分線の交点をVoronoi点とし、このVoronoi点を結んで領域を分割する(Fig.2)。本研究では、結晶の核を母点とみなし、結晶粒を分割された領域として表現した。

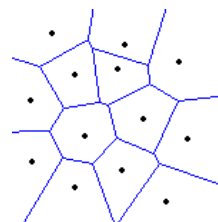


Fig.2 Voronoi diagram

2.2 乱数による母点生成

既存の研究で多く用いられている乱数を用いた場合の母点生成を行なった。乱数による結晶粒界を作成した場合、母点の間隔が極端に狭くなり母点が密集している部分が多数出来る場合や、母点間隔が狭くなることで、針状結晶などが形成される場合がある。

2.3 低食い違い量列を用いた母点生成

低食い違い量列とは、食い違い量が低い点列のことであり、代表的なものとして、Faure列などがあり、Niederreiterなどにより築かれた点列である。低食い違い量列を母点に用いることで、母点同士の密集や針状結晶の生成を防ぐことが可能になった。

2.4 結晶粒界モデルの検証

本研究では、Voronoi分割を用いて結晶粒界モデルを作成する際に母点に乱数、低食い違い量列などを用いて結晶粒界をモデル化しているが、実際のステンレス鋼の結晶粒界との比較を行なう必要がある。そこで、実際のステンレス鋼の結晶形状を特徴づけるパラメーターとして、結晶粒径、アスペクト比に着目し、オーステナイト系ステンレス(SUS316L)の結晶粒径とアスペクト比の分布図と比較して結晶粒界モデルの妥当性の検証を行う。

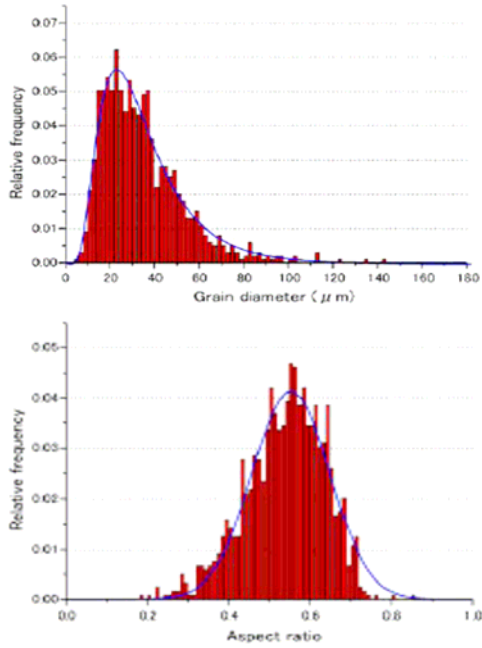


Fig.3 Experiment result

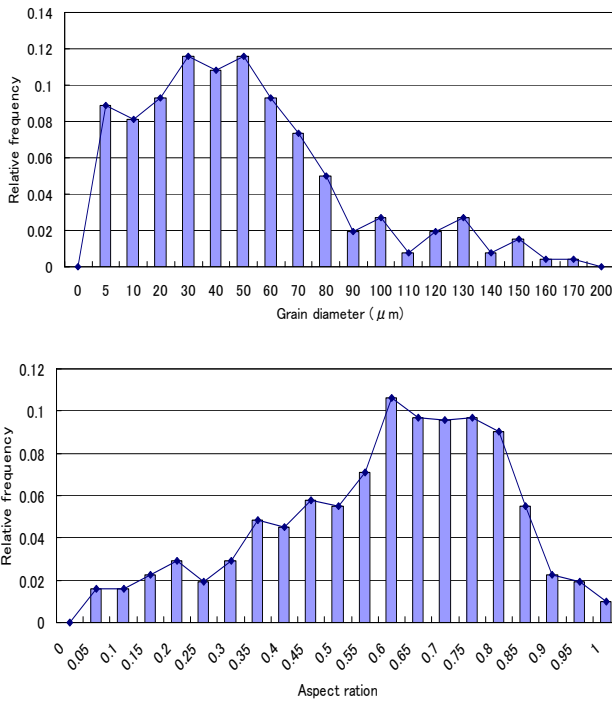


Fig.4 Random number

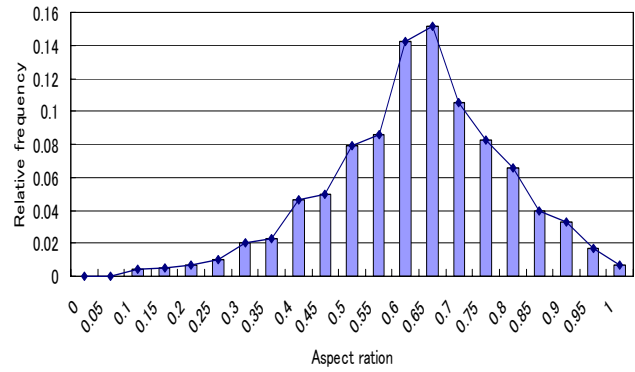
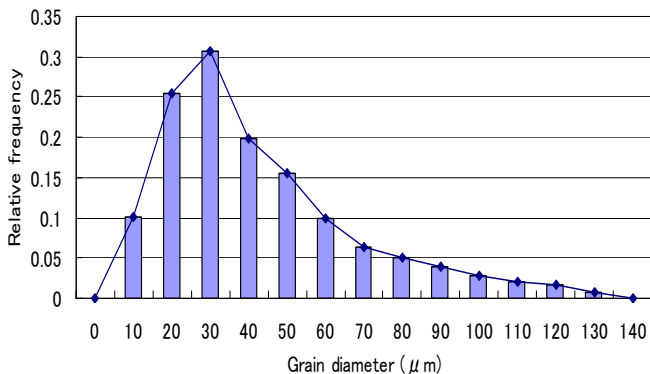


Fig.5 Low Discrepancy Sequence

実際のステンレス鋼は結晶粒径とアスペクト比の分布に特徴がある．結晶粒径は対数正規分布となっており、アスペクト比は0.5, 0.6付近で正規分布となっている．

Fig.4は乱数による母点生成から作った結晶モデルの結晶粒径とアスペクト比の分布図だが、実際のステンレス鋼の分布と若干の相違がある．

それに比べて、Fig.5の低食い違い量列による結晶粒径とアスペクト比分布図は、乱数より明らかにステンレス鋼の結晶分布に近いものとなっているのが分かる．しかし、この違いだけで乱数による母点生成が結晶粒界モデルには向かないとは言い切れない．そこで、き裂進展解析を用いて乱数と低食い違い量列との比較を行なった．

3 定式化

3.1 X-FEM

X-FEMは、Babuska⁶⁾らのPU-FEMの重み関数において重み関数として有限要素法の形状関数を使い、近似関数として要素内でのき裂の不連続性を表す関数およびき裂先端の特異場を表す関数を付加したもので、変位の近似式は次式で表される．

$$\mathbf{u}(\mathbf{x}) = \sum_{i \in I} N_i(\mathbf{x}) \mathbf{d}_i + \sum_{j \in J} N_j(\mathbf{x}) H(\mathbf{x}) \mathbf{b}_j + \sum_{k \in K} N_k(\mathbf{x}) \sum_{l=1}^4 \psi_l(\mathbf{x}) \mathbf{c}_k^l \quad (1)$$

ここで、 N_i は節点*i*に関する(通常のFEMと同じ)内挿関数である．また、 $H(\mathbf{x})$ はき裂面の不連続性を表す関数、そして $\psi_l(\mathbf{x})$ はき裂端周辺の特異変位場を表す関数の基底である．

3.2 き裂進展経路

SCC き裂は粒界型応力腐食割れ、粒内型応力腐食割れの2種類ある．本論文では、粒界型応力腐食割れを対象にするため、粒界型割れの特徴である結晶粒界に沿って発生しやすいという性質から、き裂は粒界上を進展していくものと仮定する．また、粒界の分岐点におけるき裂の進展には、エネルギー解放率を用いて進展方向の選択を行う．

3.3 エネルギー解放率による進展方向選択

エネルギー解放率とは、き裂が進展したときに解放されるエネルギーであり、この値が大きいほどき裂が進展しやすいといえる。よってき裂の分岐点においては、候補となる進展方向にき裂を微量進展させたときのエネルギー解放率を比較し、最大値を示した方向にき裂を進展させることとした。

分岐点において枝分かれを扱う場合には、予め基準となるエネルギー解放率の値を決めておき、き裂を枝分かれさせるかさせないかの判断を行う。

エネルギー解放率の値は、これと等価な J 積分値を用いた J 積分は式(4)により計算される。

$$J = \int_{\Gamma} \left(W dy - \{T\} \cdot \frac{\partial \{u\}}{\partial x} ds \right) \quad (2)$$

W は点 (x, y) におけるひずみエネルギー密度、 Γ はき裂先端を反時計回りに囲む経路、 ds は Γ 上の微小要素、 $\{T\}$ は経路 Γ 上の表面応力ベクトル、 $\{u\}$ は変位ベクトルであり、式(2)を算出するには、き裂端近傍の解析が必要である。このき裂進展解析には X-FEM(extend finite element method)を用いた。

3.4 き裂伝播速度

応力腐食割れにおけるき裂進展速度式は、状況に応じた実験により算出されたものが多く、確定的なものがない。本論文では、酒井らの研究⁵⁾によって求められた、き裂進展速度式を使用することとする。

定荷重試験のき裂進展速度式は、

$$\frac{da}{dt} = 2.31 \times 10^{-12} J^{0.473} \quad (3)$$

$$\frac{da}{dt} = 1.81 \times 10^{-12} J^{0.375} \quad (4)$$

式(3)は、0.03%C 材における進展速度式、式(4)は、0.06%C 材における進展速度式となっている。また、CT 試験片を用いたき裂進展速度式は、

$$\frac{da}{dt} = 2.71 \times 10^{-11} J^{0.511} \quad (5)$$

となる。

4 き裂進展解析

結晶粒界モデルを Voronoi 分割を用いて作成し、粒界に沿った初期き裂を設定する。き裂を粒界方向に進展させ、分岐点ではき裂をそこから微量進ませた際のエネルギー解放率(すなわち J 積分)を X-FEM 解析により求める。その値を比較して進展方向を選択する。以上の流れを繰り返すことによりき裂進展経路を表現していく。

き裂進展解析を行った例を示す。

Fig.7, Fig.8 の各モデルは乱数生成(A)と低食い違い量列による生成(B)となっている。母点数は共に 300 点としている。

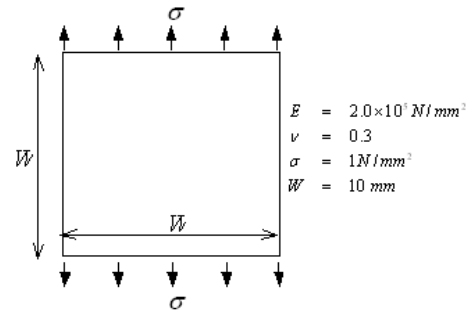


Fig.6 Edge crack model

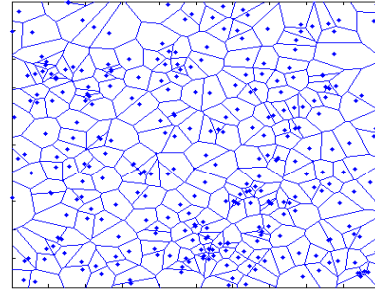


Fig.7 Voronoi model(A)

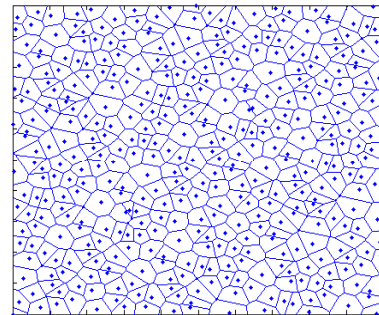


Fig.8 Voronoi model(B)

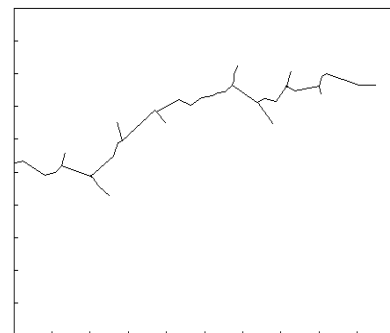


Fig.9 Crack growth(A)

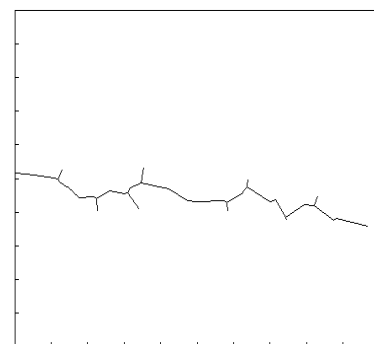


Fig.10 Crack growth(B)

乱数による母点生成において Fig.9 を見ると、針状結晶などが生成される場合、き裂進展経路に影響を及ぼす可能性があることが確認できる。

5 実験との検証

本論文では、酒井ら⁵⁾の研究で行われた実験を用いて解析し、シミュレーションの評価を行った。比較に用いた実験結果とシミュレーション結果をFig.11に示す。ピンク点が実験値であり、青点がシミュレーション値となっている。

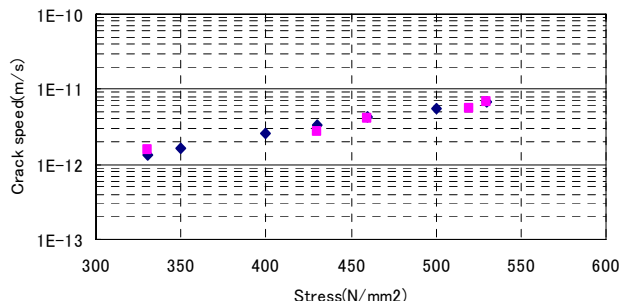


Fig.11 Comparison result

実験結果と比較したところ、良好な結果が得られたのが分かる。この結果からシミュレーションの妥当性が評価できる。

4.2 き裂進展解析例(定荷重試験)

き裂進展解析を行う上で、枝分かれを考慮したき裂進展解析と枝分かれを行わないき裂進展解析を行い検証を行った。

4.2.1 き裂進展解析(枝分かれ)

以下、Fig.12, Fig.13にき裂進展速度、進展経路を示す。

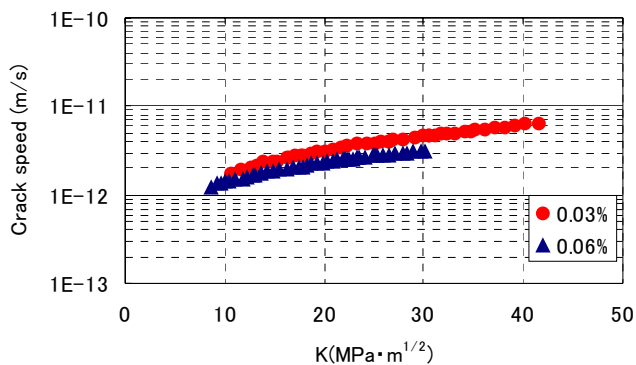


Fig.12 Crack speed and K

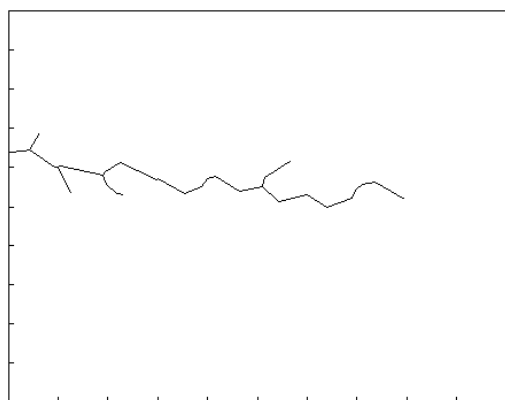


Fig.13 Crack growth route

4.2.3 枝分かれき裂と1本き裂の比較

き裂進展で枝分かれを考慮する場合と考慮しない場合の進展速度と時間の関係を示す。Fig.14が0.03%材を表し、Fig.15が0.06%材の進展速度と時間の関係をあらわすグラフとなっている。

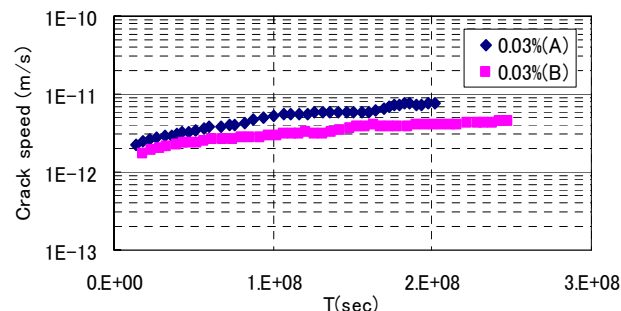


Fig.14 Crack speed and time

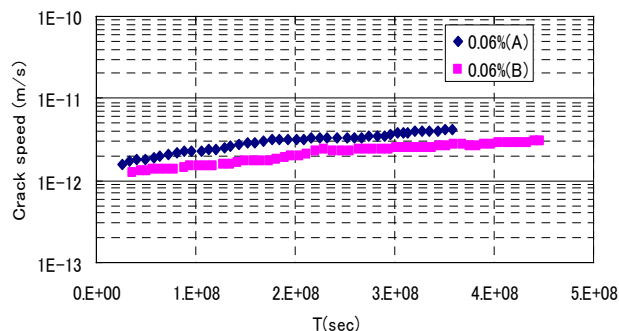


Fig.15 Crack speed and time

また、Fig.14, Fig.15についてだが、(A):枝分かれ無し、(B):枝分かれき裂となっており、枝分かれを考慮した場合と考慮しない場合では、き裂進展速度と時間の関係に差が生じていることが分かる。

6 結言

複雑形状を呈するき裂の進展方向決定のために結晶粒界をVoronoi分割を用いてモデル化し、分岐点においてはエネルギー解放率を比較しき裂進展の際の方向選択を行った。そして、結晶粒界をふまえて、分岐点においては枝分かれを考慮したき裂進展経路の表現を可能し、複雑形状き裂の表現を行ったことで、従来までのように複雑き裂を単一化して行うき裂進展シミュレーションよりも実際のき裂進展に近い解析を可能にした。

参考文献

- 1) 岡村祐一, 山下祐宣, 福田俊彦, 二見常夫: SCC が発生した炉心シュラウド, PRL 配管の構造健全性評価圧力技術, 43 (1), pp.4-14 (2005).
- 2) 岡部篤行, 鈴木敦夫: 「最適配置の数理」, pp.9-41, 朝倉書店 (1992).
- 3) Rice, J.R., Trans. ASME, J. Appl. Mech., (1968), 379.
- 4) T. Belytschko, T. Black: Elastic crack growth in finite elements with minimal remeshing. Int. J. Numer. Meth. Eng. 45(5), 601-620 (1999)
- 5) 酒井俊治, 戸塚信夫, 釜谷昌幸, 中島宣雄: MA600合金の1次冷却水中応力腐食割れ(PWSCC)進展速度に関する研究