

## 最大応力拡大係数(K値)増による 下限界K値範囲漸減率の定量予測\*

飯井俊行<sup>\*1</sup>, 石原健一<sup>\*2</sup>, 朝倉俊行<sup>\*3</sup>

### Quantitative Estimation of Decrease in Threshold Stress Intensity Factor (SIF) Range due to High Maximum SIF

Toshiyuki MESHII<sup>\*4</sup>, Kenichi ISHIHARA and Toshiyuki ASAKURA\*<sup>4</sup>School of Nuclear Power and Energy Safety Engineering, University of Fukui,  
3-9-1 Bunkyo, Fukui-shi, Fukui, 910-8507 Japan

In this paper, we propose a method to quantitatively estimate the decrease in threshold stress intensity factor (SIF) range due to high SIF, that is observed for some materials in constant maximum SIF fatigue crack growth tests. The parameters used for the simulation were inversely determined with the aid of Genetic Algorithm. The validity of our method was shown by comparing the simulation data with experimental data for embrittled S55 C.

**Key Words:** Fatigue Crack Growth, Threshold Stress Intensity Range, Static Fracture Mode, Genetic Algorithm

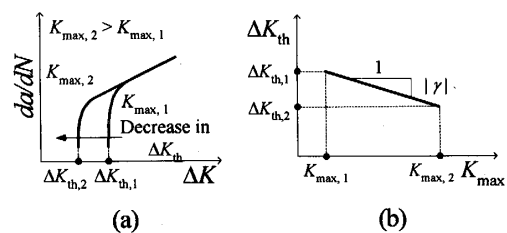
#### 1. 緒 言

小規模降伏条件下の疲労き裂進展(FCG)速度  $da/dN$  については広範囲の材料に対しこれが応力拡大係数 (K値) 範囲  $\Delta K$  により整理できることが古くから知られており<sup>(1)</sup>,  $\Delta K$  が減少すると  $da/dN$  が急激に低下してき裂の進展が事実上ないとみなされる  $\Delta K$  に至り, これを下限界K値範囲  $\Delta K_{th}$  と呼んでいる. この  $\Delta K_{th}$  についてはこれまでに応力比(R)一定試験法を中心に多数のデータが取得されており, ほぼ例外なく正の R を増加させるに従い  $\Delta K_{th}$  が減少する結果が得られている<sup>(2)</sup>. 当初 Schmidt と Paris はこの現象をき裂閉口のみ影響として説明した<sup>(3)</sup>. このモデルによれば, たとえば  $\Delta K_{th}$  近傍の低荷重域にてき裂閉口を生じない状態が実現されると考えられている  $K_{max}$  一定試験法にて得られる  $\Delta K_{th}$  は試験パラメータである  $K_{max}$  によらず一定値となりそうであるが, 最近 Ritchie らや Newman らにより  $K_{max}$  一定試験によった場合であっても, 試験  $K_{max}$  を増加させると得られる  $\Delta K_{th}$  が漸減する現象 (以下  $K_{max}$  増による  $\Delta K_{th}$  漸減, 図 1(a)) が報告され<sup>(2), (4)</sup>,

その漸減率を式

$$\Delta K_{th} = \Delta K_{th,1} + \gamma \cdot K_{max} \dots \dots \dots (1)$$

の  $\gamma (< 0)$  として定義している<sup>(2)</sup> (図 1(b)) が, そのメカニズムについては必ずしも明らかになっていない.

Fig. 1 Decrease in  $\Delta K_{th}$  due to increase in  $K_{max}$ 

著者らはこのき裂閉口が無い条件下での  $K_{max}$  増による  $\Delta K_{th}$  漸減現象に対し次の取り組みを行い, 現象の解明に取り組んできた.

- (1) どのような材料, 条件下で  $\Delta K_{th}$  漸減現象が観察されるのか, その発生を予測可能にする
- (2)  $\Delta K_{th}$  漸減メカニズムを定性的に説明可能にする
- (3)  $K_{max}$  増による  $\Delta K_{th}$  漸減率 (まずは  $\gamma$ ) を数少ないデータから定量予測可能にする

(1)については過去のき裂閉口・環境効果がない条件下  $K_{max}$  増により  $\Delta K_{th}$  が漸減した例を整理することにより  $\Delta K_{th}$  漸減の有無を予想するための  $\Delta K_{th}$  漸減判定線図<sup>(5)</sup>を提案した. (2)については2章で述べるような  $\Delta K_{th}$

\* 原稿受付 2005年2月10日.

<sup>\*1</sup> 正員, 福井大学大学院工学研究科 (〒910-8507 福井市文京3-9-1).<sup>\*2</sup> 学生員, 福井大学大学院工学研究科.<sup>\*3</sup> 正員, 福井大学工学部.

E-mail: meshii@mech.fukui-u.ac.jp

漸減メカニズムを定性的に説明しうるモデル<sup>(5)</sup> (図2)を提案した. 本研究の目的は(3)の項目であり, 著者が提案した定性的モデル<sup>(5)</sup>をもとに定量的なシミュレーションへと展開する際に必要となる材料抵抗やその他パラメータを過去の各種材料に対する実験データ $(\gamma)$ を再現するべく遺伝的アルゴリズム(GA)により求め, これをまとめることにより $\gamma$ が未知の材料に対し, その $\gamma$ を数少ないデータから定量予測する手法を提案することを試みた.

2.  $\gamma$ の予測手法の提案

2.1 シミュレーションアルゴリズム ここではまず先に提案した $K_{max}$ 増による $\Delta K_{th}$ 漸減メカニズムを定性的に説明しうる FCG モデルをシミュレーションへと展開する際に必要となる考え方および具体的な計算アルゴリズムを述べる.

提案した定性的モデル (図2) <sup>(5)</sup>では, 破面観察結果より FCG メカニズムは $\Delta K$ の大小にかかわらず基本的に同じであり, き裂は結晶粒毎に繰り返し荷重による損傷機構 (以下 cyclic 機構), 静的損傷機構 (以下 static 機構) により局所的に進展し, それが合体することにより, き裂前縁がマクロに進展すると考えた<sup>(5)</sup>. 図2中, 各四角形 (以下セルと称する) が結晶粒に対応する.

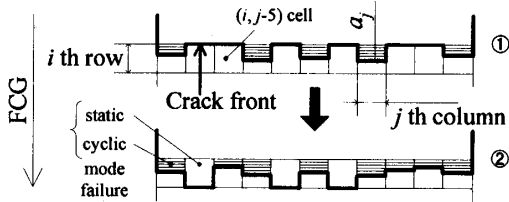


Fig. 2 Our simplified mesoscopic crack coalescence FCG model<sup>(5)</sup>

シミュレーションではセルの位置を特定するのに  $i$  行  $j$  列 ( $i=1 \sim n_{row}, j=1 \sim n_{column}$ ) と付番する. 各結晶粒ではたとえば FCG 方向に対する角度によりすべり易さが異なる結果, その結晶粒内でき裂が進展するメカニズムが cyclic 機構, static 機構のいずれかとなると考え, これをモデル化するために各セルの cyclic 機構, static 機構に対する材料抵抗を各々  $\Delta K_{Sij}, k_{Cij}$  とした. ここではいずれの場合にもセル内のき裂進展方向と FCG 方向は一致するとした. き裂前縁は列毎に異なり,  $j$  列目のき裂長さを  $a_j$  として, 試験荷重は最大 K 値が設定値  $K_{max}$ , K 値範囲  $\Delta K$  が試験片の表裏平均き裂長さ  $a = (a_1 + a_{n_{column}})/2$  と次式<sup>(6)</sup>に示す計画値となるように制御されるのは実際の実験と同様である.

$$\Delta K = \Delta K_0 \exp[C(a - a_0)] \dots \dots \dots (2)$$

ここに  $\Delta K_0$  は初期き裂長さ  $a_0$  のときの  $\Delta K$ ,  $C$  は  $\Delta K$  漸減率である.

このとき各列のき裂先端に着目するときき裂長さ  $a_j$  が異なる結果, 各列の荷重分担が当初の一樣分担から再配分され, K 値範囲, 最大 K 値が各々  $\Delta k_j, k_j$  となる. 本シミュレーションではこれらのき裂駆動力とき裂先端が存在するセルの材料抵抗を比較することによりセル内のき裂進展の有無を評価し,  $\Delta k_j \geq \Delta K_{Sij}$  または  $k_j \geq k_{Cij}$  の場合に進展, 一方  $\Delta k_j < \Delta K_{Sij}$  かつ  $k_j < k_{Cij}$  の場合に進展なしと判定する. すべてのセルにてき裂の進展なしとなったときの試験 K 値範囲  $\Delta K$  を  $\Delta K_{th, sim}$  とする. 以下具体的アルゴリズムを図3のフローチャートに示し, 各ブロックの内容を説明する.

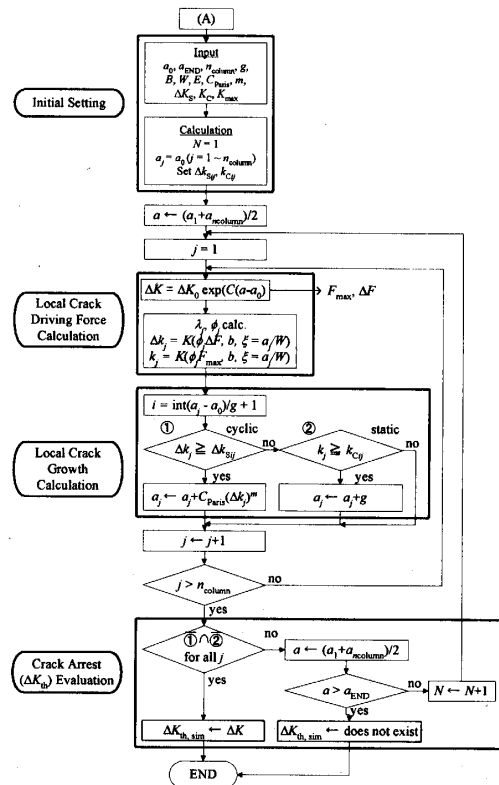


Fig. 3 Flow chart of FCG Simulation

初期設定(Initial Setting)

まず CT 試験片の寸法 ( $B$ : 試験片厚み,  $W$ : 試験片幅,  $a_0$ : 初期き裂長さ,  $a_{END}$ : シミュレーション強制終了用き裂長さ), 材料抵抗に関連する量 ( $E$ : ヤング率,  $\nu$ : ポアソン比,  $C_{Paris}, m$ : Paris 則の材料定数,  $\Delta K_S, K_C$ : 材料の cyclic, static 機構に対する基本材料抵抗,  $\alpha_1, \beta_1, \alpha_2, \beta_2$ : 各セルの材料抵抗のばらつきを示す指標,  $RI$ : 一樣乱数初期化番号), セルの寸法, 位置

を特定するための量 ( $g$ : 結晶粒径かつ FCG 方向の 1 セル (行) の寸法とし, 試験片の厚み方向 (列) 寸法  $b \approx g$  となるよう列数を  $n_{\text{column}} = B/b$  とした. なお  $\Delta K_{th}$  が存在しない場合にシミュレーションを強制終了するための表裏平均き裂長さ  $a_{\text{END}}$  より行数  $n_{\text{row}} = (a_{\text{END}} - a_0)/g$  としている).

その後  $RI$  に対し発生する  $0 \sim 1$  の一様乱数  $\psi_{j1}, \psi_{j2}$  を用い, 各セルの材料抵抗を次式にて設定する.

$$\Delta k_{sj} = (\alpha_1 + \beta_1 \psi_{j1}) \Delta K_S \equiv \Psi_{j1} \Delta K_S \dots\dots\dots (3)$$

$$k_{Cij} = (\alpha_2 + \beta_2 \psi_{j2}) K_C \equiv \Psi_{j2} K_C \dots\dots\dots (4)$$

**局所き裂駆動力計算 (Local Crack Driving Force Calculation)**

あるサイクル  $N$  に対しまず試験片の表裏平均き裂長さを  $a$ ,  $K$  値範囲, 最大  $K$  値を各々  $\Delta K, K_{\text{max}}$  となるように荷重が式(2)により制御されているとして, このときの公称の荷重範囲, 試験最大荷重  $\Delta F, F_{\text{max}}$  は CT 試験片に対する  $K$  値の計算式から逆算できる. ここでは ASTM<sup>(6)</sup> の次式を用いた.

$$K(F, B, W, \xi = a/W) = \frac{F}{B\sqrt{W}} \left[ \frac{(2+\xi)}{(1-\xi)^{1.5}} (0.886 + 4.64\xi - 13.32\xi^2 + 14.72\xi^3 - 5.6\xi^4) \right] \dots\dots\dots (5)$$

その後  $j$  列目のき裂先端における局所き裂駆動力  $\Delta k_j, k_j$  を求めるために, 荷重分担係数  $\phi_j$  を算出する.  $\phi_j$  は図 4 に示すように CT 試験片を幅  $b = B/n_{\text{column}}$ , き裂長さ  $a_j$  のスライスに分割し, そしてこれらが並列バネ (コンプライアンス  $\lambda_j$ ) として荷重を分担しているとして評価した.

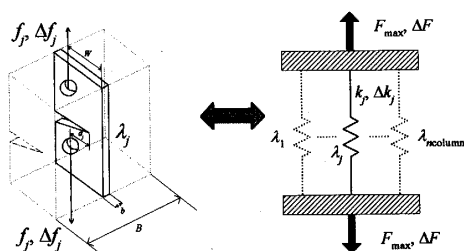


Fig. 4 Slice model for stress redistribution

$$\phi_j = 1 / \left( \lambda_j \sum_{l=1}^{n_{\text{column}}} \frac{1}{\lambda_l} \right) \dots\dots\dots (6)$$

$\lambda_j$  の評価には次式にて与えられる ASTM<sup>(6)</sup> のものを用いた.  $\xi = a/W$  として,

$$\lambda_j = \frac{1-\nu^2}{Eb} \left[ \frac{19.75}{(1-\xi)^2} (0.5 + 0.192\xi + 1.385\xi^2 - 2.919\xi^3 + 1.842\xi^4) \right] \dots\dots\dots (7)$$

$j$  列目のスライスの分担荷重は荷重範囲, 最大荷重

が各々  $\phi_j \Delta F, \phi_j F_{\text{max}}$  であるので  $\Delta k_j, k_j$  は式(5)により次の通り求まる.

$$\Delta k_j = K(\phi_j \Delta F, b, W, \xi = a_j/W) \dots\dots\dots (8)$$

$$k_j = K(\phi_j F_{\text{max}}, b, W, \xi = a_j/W) \dots\dots\dots (9)$$

**局所き裂進展計算 (FCG Calculation)**

$j$  列の局所き裂駆動力が求まったので, まずき裂先端が位置するセルを特定するために行指標  $i$  を求め, その後このセルの材料抵抗  $\Delta k_{sij}, k_{Cij}$  とき裂の駆動力  $\Delta k_j, k_j$  をセル毎に比較することにより局所的なき裂進展の有無を判定する.

ところでこの場合セルの損傷がいずれの機構により生じるかをプログラムの中で扱う場合に, 両機構に対する判定を当然のことながら同時に行うことができない. 実際の物理現象では 1 サイクルの荷重を正弦波状に負荷する過程において荷重が増加後減少すると考えるならば, 初めに static 機構による損傷判定を行い, この損傷がなく, 1 サイクルの負荷を完了した時点で cyclic 機構による損傷判定を行うことが考えられる. しかし 1 サイクル中にすべりが先行して生じるような現象の場合には, 最大荷重にて static 機構による損傷が必ずしも生じない<sup>(7)</sup> ので, いろいろ選択肢はあると思われるが, 今回は static 機構による損傷が付加的な損傷機構であると考え, まず cyclic 機構による損傷の有無を  $\Delta k_j$  と  $\Delta k_{sij}$  を比較することにより判定し, 損傷がない場合に static 機構による損傷の有無を判定するアルゴリズムとした. そしてあるサイクル  $N$  にて生じる局所的なき裂進展量は次のように評価することにした.

- (1)  $\Delta k_j \geq \Delta k_{sij}$  の場合に Paris 則が成り立つとして進展量が  $C_{\text{Paris}} (\Delta k_j)^m$
- (2)  $k_j \geq k_{Cij}$  の場合に進展量が 1 セル分  $g$  (注: static 機構により局所的なき裂が進展する場合に荷重の再配分により進展量が  $g$  以下で  $k_j < k_{Cij}$  となる場合が物理的には考えうるが, き裂長さが  $g$  程度変化することによる荷重分担係数  $\phi_j$  の変化が式(5)による場合は小さく, 現状では一律に  $g$  進むとしている)

**き裂停留判定 (Crack Arrest Evaluation)**

すべての列に対し局所的なき裂進展量評価を行った後, き裂停留判定を行う.

- (1) すべての列に対し  $\Delta k_j < \Delta k_{sij}$  かつ  $k_j < k_{Cij}$  の場合にき裂が停留したと判定する. そしてこのときの試験  $K$  値範囲  $\Delta K$  を  $\Delta K_{th, \text{sim}}$  とする.
  - (2)  $a$  が  $a \geq a_{\text{END}}$  を満足したとき  $\Delta K_{th}$  は存在しないとしてシミュレーションを終了した.
- 以上のいずれも該当しない場合に  $N + 1$  サイクル目に対しふたたび局所き裂駆動力計算を行う.

**2・2 GA によるシミュレーションパラメータの推**

定 2・1 のシミュレーションを実行するには基本材料抵抗  $\Delta K_S, K_C$ , およびセルの材料抵抗のばらつきを表す指標  $\alpha_1, \beta_1, \alpha_2, \beta_2$  を指定する必要がある。  $\Delta K_S, K_C$  はモデル化の考え方から各々 cyclic, static 機構に対応する材料抵抗を割り当てることが考えられる。そこで具体的には図1(a), (b)に示す  $K_{max}$  一定  $\Delta K_{th}$  試験のデータ ( $K_{max,1}, \Delta K_{th,1}$ ) が得られている場合に図3のシミュレーションにて基本材料抵抗  $\Delta K_S = \Delta K_{th,1}$ ,  $K_C = K_{IC}$  と選定することにし、この場合に  $K_{max}$  を  $K_{max,1}$  とすると  $\Delta K_{th, sim} = \Delta K_{th,1}$  が、また  $K_{max}$  を  $K_{max,2}$  に変えて図3のシミュレーションを行うと  $\Delta K_{th, sim} = \Delta K_{th,2}$  (従って実験で得られる  $\gamma = (\Delta K_{th,2} - \Delta K_{th,1}) / (K_{max,2} - K_{max,1})$  が得られる  $\alpha_1, \beta_1, \alpha_2, \beta_2$  を GA により逆推定することにした。

GA の具体的手順 (図5)

GA を行う際に  $\gamma$  そのものを評価値とすることも考えたがパラメータの数を考慮すると現実的ではなく、そこでまずは図1(b)の  $K_{max,1}$  に対応する  $\Delta K_{th,1}$  を再現するように cyclic 機構に対する材料抵抗のばらつきを示す指標  $\alpha_1, \beta_1$  を求め、次に図1(b)の  $K_{max,2}$  に対応する  $\Delta K_{th,2}$  を再現するように static 機構に対する材料抵抗のばらつきを示す指標  $\alpha_2, \beta_2$  を求めるという2段階に分けて取り扱うことにした。また  $\alpha_2, \beta_2$  を求めるときの  $\alpha_1, \beta_1$  については、  $\Delta K_{th,1}$  を再現するように求めた  $\alpha_1, \beta_1$  の値を用いた。以上の考え方のフローチャートを図5、今回の GA のアルゴリズムを図6に示し、以下詳細に説明する。

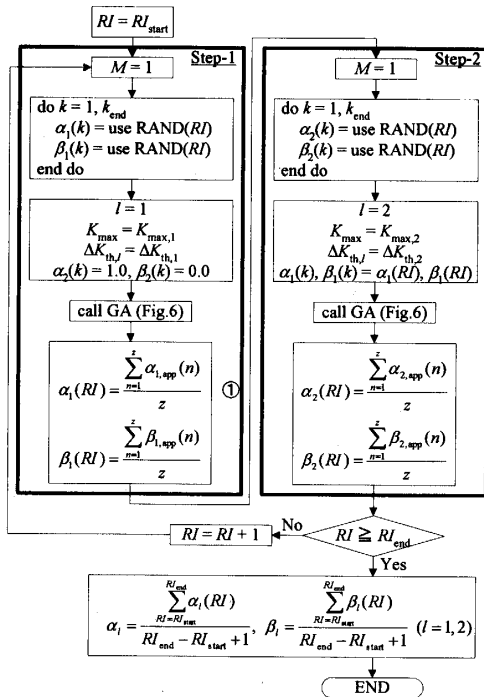


Fig. 5 Concrete procedure of GA

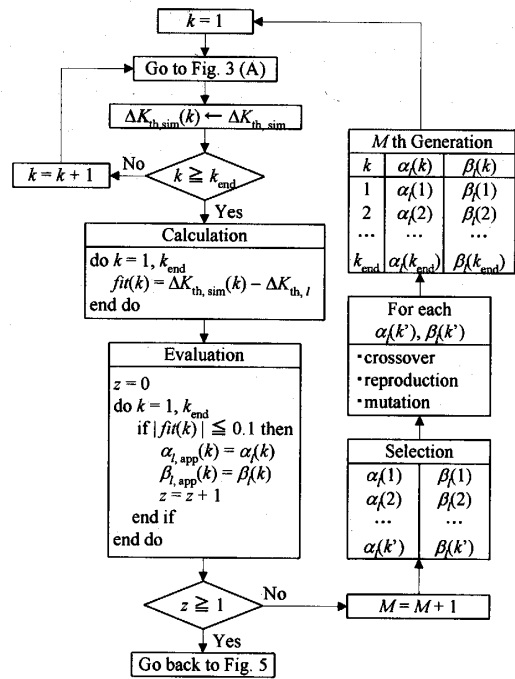


Fig. 6 GA algorithm for Mth generation

Step-1 図5において、まず  $RI = RI_{start}$  のとき、図1(b)の  $K_{max,1}$  に対応する  $\Delta K_{th,1}$  を再現するための  $\alpha_1, \beta_1$  を求める。この  $RI$  はいわば材料のロットを区別するための指標であり、プログラム上は一樣乱数生成上の核 (任意の自然数) である。世代を表す  $M$  が1に対応する初期集団生成では、一樣乱数を用いて、  $\alpha_1, \beta_1$  を  $\alpha_1(k), \beta_1(k)$  とし、それぞれ  $k_{end}$  個の個体を生成する ( $k = 1 \sim k_{end}$ )。各個体に対し図3のシミュレーションを行うが、この場合の実験条件に対応するパラメータは  $K_{max} = K_{max,1}$  とし、基本材料抵抗  $\Delta K_S = \Delta K_{th,1}$ ,  $K_C = K_{IC}$ , また  $\alpha_2(k) = 1.0, \beta_2(k) = 0.0$  (低  $K_{max}$  ( $K_{max,1}$ ) では static 機構による損傷は起きないと仮定して) とし、  $k$  番目の個体に対して  $\Delta K_{th, sim}(k)$  を得る。これは static 機構に対する材料抵抗  $k_{Cij} = K_C$  で一定となりアルゴリズム上低  $K_{max}$  では static 機構による損傷が起きないようにしたことになる。

全ての  $k$  に対し  $\Delta K_{th, sim}(k)$  が求まったならば、次式に示す評価関数  $fit(k)$  にて  $l = 1$  とし、適応度を求める (図6)。

$$fit(k) = \Delta K_{th, sim}(k) - \Delta K_{th, l} \dots \dots \dots (10)$$

そして  $\alpha_1(k), \beta_1(k)$  それぞれ  $k_{end}$  個生成した組合せのうち次式を満足する  $\alpha_1(k), \beta_1(k)$  をそれぞれ  $\alpha_{1, app}(k), \beta_{1, app}(k)$  とし、その個数を  $z$  とする。

$$|fit(k)| \leq 0.1 \dots \dots \dots (11)$$

$z \geq 1$  の場合にはこの  $RI$  での  $\Delta K_{th,1}$  を再現する  $\alpha_1(RI), \beta_1(RI)$  が各々  $\alpha_{1, app}(k)$  の平均値,  $\beta_{1, app}(k)$  の平均値

として求めたとした。

$z=0$  の場合には、選択についてはエリート選択<sup>(8)</sup>、交叉については交差確率 = 0.8 で一点交叉<sup>(8)</sup>、突然変異については突然変異率 = 0.1 で通常の突然変異<sup>(8)</sup>として次の世代の集団 (図 6) を生成し、式(11)を満足するまで同様の計算を繰り返す。

**Step-2** 次に図 1(b)の  $K_{\max, 2}$  に対応する  $\Delta K_{th, 2}$  を再現するための  $\alpha_2, \beta_2$  を求める。  $M=1$  に対応する初期集団生成では、一様乱数を用いて、  $\alpha_2, \beta_2$  を  $\alpha_2(k), \beta_2(k)$  としてそれぞれ  $k_{\text{end}}$  個の個体を生成する ( $k=1 \sim k_{\text{end}}$ )。各個体に対しシミュレーションを行うが、この場合の実験条件に対応するパラメータは  $K_{\max} = K_{\max, 2}$  とし、基本材料抵抗は Step-1 同様  $\Delta K_S = \Delta K_{th, 1}$ ,  $K_C = K_{IC}$ ,  $\alpha_1, \beta_1$  は Step-1 にて求めた値とし、以下  $l=2$  として Step-1 同様の計算を行う。そして、  $\alpha_2(RI), \beta_2(RI)$  は式(11)を満足した  $\alpha_{2, \text{app}}(k), \beta_{2, \text{app}}(k)$  の平均値とした。

以上の計算を  $RI$  が  $RI_{\text{end}}$  になるまで繰り返し、各材料に対する適切な  $\alpha_1, \beta_1, \alpha_2, \beta_2$  の値は各  $RI$  ごとに求めた  $\alpha_1(RI), \beta_1(RI), \alpha_2(RI), \beta_2(RI)$  の平均値とした。

#### GA によるシミュレーションパラメータの推定例

以下例として  $K_{\max}$  増による  $\Delta K_{th}$  漸減現象を経験している Ti-6Al-4V<sup>(2)</sup>, Al7050<sup>(4)</sup>, S55C<sup>(5)</sup> に対し上述の手法によりシミュレーションパラメータの  $\alpha_1, \beta_1, \alpha_2, \beta_2$  を推定した。シミュレーションに用いた実験データを表 1a

~b にまとめた。ここに  $W, B, a_0$  は各々 ASTM 標準 CT 試験片<sup>(6)</sup>の幅, 厚み, 初期き裂長さである。  $E, \nu$  は各々ヤング率, ポアソン比であり, 文献に記述なき場合は標準的な値を使ってある。  $K_{IC}$  は破壊靱性値であり, S55C については  $\Delta K_{th}$  試験後 CT 試験片を強制破断させることにより得た靱性値をここでは使っている。  $g$  は平均的な結晶粒径であり, 文献に記載されている写真より読み取った。  $\Delta K_0, C$  は式(2)中の荷重パラメータ,  $(K_{\max, l}, \Delta K_{th, l})$  ( $l=1, 2$ ) は  $K_{\max}$  一定  $\Delta K_{th}$  試験データである。また  $C_{\text{Paris}}, m$  は Paris 則  $da/dN = C_{\text{Paris}} \cdot (\Delta K)^m$  mm/cycle の定数である。図 3, 5, 6 中のその他のパラメータを表 2 にまとめた。また  $a_{\text{END}}$  は計画荷重式(2)中にてそれぞれの材料について  $\Delta K = \Delta K_S/2$  となるときの  $a$  の値とした。

結果を表 3 に示す。対象とした 3 種の材料の試験片形状, 荷重条件, 特性は表 1 より多様であり, 結果としてシミュレーションに採用した基本材料抵抗の値も多様であったにもかかわらず, 表 3 より GA の結果得られた  $\alpha_1, \beta_1, \alpha_2, \beta_2$  の平均値は材料によらずほぼ等しいことが読み取れる。この結果はもちろん限られた材料に対する結果ではあり, 今後さらなる検証が必要ではあろうが,  $K_{\max}$  増による  $\Delta K_{th}$  漸減が観察される材料について図 2, 3 のモデル化を行う場合に得られる共通の特徴の一つと考えることができそうである。

Table 1a  $K_{\max}$ -const.  $\Delta K_{th}$  test data (CT specimen configuration and material properties)

Material	$W$ mm	$B$ mm	$a_0$ mm	$E$ GPa	$\nu$	$K_{IC}$ MPam <sup>1/2</sup>	$g$ $\mu\text{m}$
S55C <sup>(5)</sup>	50.0	12.5	18.00	206	0.3	80	30
Al7050 <sup>(4)</sup>	30.5	2.5	12.15	70	0.3	29	60
Ti-6Al-4V <sup>(2)</sup>	25.0	8.0	9.00	116	0.3	67	30

Table 1b  $K_{\max}$ -const.  $\Delta K_{th}$  test data (Loading condition and results)

Material	$\Delta K_0$ MPam <sup>1/2</sup>	$C$ mm <sup>-1</sup>	$K_{\max, 1}$ MPam <sup>1/2</sup>	$\Delta K_{th, 1}$ MPam <sup>1/2</sup>	$K_{\max, 2}$ MPam <sup>1/2</sup>	$\Delta K_{th, 2}$ MPam <sup>1/2</sup>	$\gamma$	$C_{\text{Paris}}$	$m$
S55C <sup>(5)</sup>	12	-0.7	18	2.6	70	2.0	-0.0115	$1.35 \times 10^{-9}$	3.77
Al7050 <sup>(4)</sup>	3	-0.8	5.5	1.1	22	0.73	-0.0224	$4.00 \times 10^{-7}$	2.93
Ti-6Al-4V <sup>(2)</sup>	3	-0.08	26.5	2.33	56.5	2.04	-0.0097	$7.00 \times 10^{-9}$	3.77

Table 2 Simulation parameter for GA

Material	$a_{\text{END}}$ mm	$n_{\text{row}}$	$n_{\text{column}}$	$k_{\text{end}}$	$RI_{\text{start}}$	$RI_{\text{end}}$
S55C	21.1	138	400	10	1001	1010
Al7050	14.3	54	40	10	1001	1010
Ti-6Al-4V	20.8	428	250	10	1001	1010

Table 3 GA results (mean  $\pm$  standard deviation)

Material	$\alpha_1$	$\beta_1$	$\alpha_2$	$\beta_2$
S55C	0.29 $\pm$ 0.02	0.87 $\pm$ 0.02	0.31 $\pm$ 0.02	0.69 $\pm$ 0.05
Al7050	0.32 $\pm$ 0.06	0.88 $\pm$ 0.03	0.28 $\pm$ 0.04	0.69 $\pm$ 0.11
Ti-6Al-4V	0.26 $\pm$ 0.06	0.81 $\pm$ 0.05	0.31 $\pm$ 0.04	0.68 $\pm$ 0.09

**2.3  $K_{max}$  増による  $\Delta K_{th}$  漸減率  $\gamma$  の定量予測手法の提案** 以上,  $K_{max}$  増により  $\Delta K_{th}$  漸減が観察される材料については図 3 のシミュレーションにより  $\Delta K_{th}$  漸減率  $\gamma$  を予測する場合に, 表 4 に示す基本材料抵抗, シミュレーションパラメータを用いることを提案する. 従って, 低  $K_{max}$  ( $K_{max,1}$ ) 時の  $\Delta K_{th}$  ( $= \Delta K_{th,1}$ ) と破壊靱性値  $K_{IC}$  さえ得られれば, あらためて時間がかかる  $\Delta K_{th}$  試験を行うことなく,  $\gamma$  を予測できると期待される. 以下, この提案の妥当性を 3 章にて確認した.

Table 4 Recommended values for simulation

$\Delta K_S$	$K_C$	$\alpha_1$	$\beta_1$	$\alpha_2$	$\beta_2$
$\Delta K_{th,1}$ for $K_{max,1}$	$K_{IC}$	0.29	0.86	0.30	0.69

### 3. 提案したシミュレーション手法の適用例

著者らの手法<sup>(5)</sup>により  $K_{max}$  増による  $\Delta K_{th}$  漸減が予測された S55C 脆化材 (100 °C, 1h 保持, 空冷: 引張強さ  $\sigma_B = 814$  MPa, 降伏点  $\sigma_Y = 413$  MPa) について表 1 の S55C (以下通常材) と同一の試験片寸法 ( $W, B, a_0$ ), 荷重条件 ( $\Delta K_0, C, K_{max,1}$ ) に対し実験を行い  $\Delta K_{th,1} = 3.29$  MPam<sup>1/2</sup>,  $K_{IC} = 64$  MPam<sup>1/2</sup> が得られたので, これをもとに表 4 のパラメータ (ただし  $\Delta K_S = \Delta K_{th,1} = 3.29$  MPam<sup>1/2</sup>,  $K_C = K_{IC} = 64$  MPam<sup>1/2</sup>) を用い図 3 のシミュレーションを行うことにより脆化材の  $\gamma$  を予測した.  $K_C = 64$  MPam<sup>1/2</sup> であったので  $K_{max,2} = 50$  MPam<sup>1/2</sup> とし, また別途これに対応する実験も行った. この脆化材の結晶粒径は当然のことながら粗大化しており, 観察結果より  $g = 0.1$  mm, これに対応し  $n_{column} = 125$ , また  $a_{END} = 20.8$  mm に対応し  $n_{row} = 40$  とした.  $C_{Paris}, m$  は通常材と大差が無かったため同じ値を用いた. その他  $RI_{start} = 1001, RI_{end} = 1050$  とした.

結果を表 5 に示す. 脆化材のシミュレーション結果と比較するため, 通常材についても表 1 のシミュレーション条件と表 4 で提案したパラメータを組み合わせて (すなわち順計算) をあらためて行った.

まず表 5 中の S55C 通常材の  $\gamma$  について実験結果とシミュレーション結果を比較すると, 表 4 にて提案した  $\alpha_1, \beta_1, \alpha_2, \beta_2$  を使っている (ベストフィット値の表 3 の

値を使っているわけではない) もの, 両者がほぼ一致していることが読み取れる. そして S55C 脆化材についても, 実験データがばらつくことを考慮すると, よく一致しているといえそうである. 何よりも, 本シミュレーションにより S55C 脆化材の  $|\gamma|$  が通常材に比べ約 2 倍程度となることを予想できており, 以上により提案したシミュレーション手法の妥当性が確認できたと考えられる.

Table 5 Comparison of  $\gamma$  by simulation and experiment

Material	Simulation $\gamma$	Experiment $\gamma$
S55C	-0.0117	-0.0115
S55C embrittled	-0.0230	-0.0268

### 4. 考 察

2.3 で提案した  $\gamma$  の定量予測法は表 4 にてまとめた材料抵抗のばらつきを表す  $\alpha_1, \beta_1, \alpha_2, \beta_2$  が妥当であることを前提としている. 一例にすぎないかもしれないが, 材料特性を表 1 に示す S55C (通常材) と大きく変えた S55C 脆化材に対し提案した手法を適用することより手法の妥当性を示した.

またここでは紙数の制約上詳細を省略するが, 提案した手法により  $K_{max}$  増により  $\Delta K_{th}$  漸減現象を経験しない SUS304<sup>(6)</sup>, HT60<sup>(6)</sup>, SS400<sup>(6)</sup> について図 3 のシミュレーションを行ったところ,  $K_{max,2}$  を小規模降伏に対する ASTM の制限内にて選定する限り, 実験と対応する  $\gamma = 0$  という結果が得られていることも付記しておく.

一方本論文で扱った  $K_{max}$  増により  $\Delta K_{th}$  漸減を経験した S55C (通常材, 脆化材), Al7050, Ti-6Al-4V 材, あるいは経験しない SUS304, HT60, SS400 材が特殊な条件を満足する材料であった可能性は否定できない. たとえばシミュレーションに使用する実験データに着目すると,  $K_{max}$  増により  $\Delta K_{th}$  漸減を経験した材料については  $\Delta K_{th,1}/K_{IC} = 0.03 \sim 0.04$ , 経験しない材料については  $\Delta K_{th,1}/K_{IC} < 0.02$  であった. したがって今後  $\Delta K_{th,1}/K_{IC}$  が 0.04 より著しく大きい材料に対し提案した手法により  $\gamma$  を予測することを考えた場合には予測した  $\gamma$  が実験値からずれることが考えられる. しかしながらシミュ

レーション上  $\Delta K_{th,1}/K_{IC} > 0.04$  の場合には必ず  $\gamma > 0$  となり、そして  $K_{max}$  増による  $\Delta K_{th}$  漸減を念頭に置くことは安全側の評価であるから、まずは第一近似として提案した手法により表 4 の値を用い  $\gamma$  の定量評価を行うことは有意義であると考えられる。

さて 2・2 の GA 手順において初期集団生成を行う際に、 $K_{max,1} < K'_{max,1} < K_{max,2}$  の 3 点に対する  $\Delta K_{th}$  が得られている場合には、 $\alpha_1(k)$ ,  $\beta_1(k)$ ,  $\alpha_2(k)$ ,  $\beta_2(k)$  に対し次のような制約条件を適用するとシミュレーションの収束性が比較的良好なことを経験している。

$$(1) 0 < \alpha_1(k) < \Delta K_0 \exp[C(a_{END} - a_0)]$$

$$(2) \alpha_1(k) + \beta_1(k) > 1$$

$$(3) K_{max,1}/K_C < \alpha_2(k) < K'_{max,1}/K_C$$

$$(4) \alpha_2(k) + \beta_2(k) > K_{max,2}/K_C$$

(1) は実験時の  $K_{max,2}$  に対応する  $\Delta K_{th,2}$  の値をもとに下限界近傍においても cyclic 機構による損傷が存在、(2) は仮設定、(3) は実験時の 2 番目に低い  $K_{max}$  を  $K'_{max,1}$  とした場合に  $K'_{max,1}$  に対する  $\Delta K'_{th,1}$  が  $K_{max,1}$  に対する  $\Delta K_{th,1}$  よりも漸減しているという実験結果、(4) は実験時の  $K_{max,2}$  において  $\Delta K_{th}$  が存在、をそれぞれ満足するようにしたものである。

ところで表 4 にて提案したシミュレーションパラメータ  $\beta_1$ ,  $\beta_2$  は式(3), (4)の定義により各セルの材料抵抗のばらつきを表す指標と考えると、ばらつきが大きいと読める。しかし別の見方をすると、表 4 および式(3)より  $\alpha_1 = 0.29$  なので cyclic 機構に対する各セルの材料抵抗  $\Delta K_{Sij}$  の最小値は  $0.29\Delta K_S$ ,  $\alpha_1 + \beta_1 = 1.15$  なので  $\Delta K_{Sij}$  の最大値は  $1.15\Delta K_S$ , よって  $\Delta K_{Sij}$  の中央値は  $0.72\Delta K_S$  となる。同様の方法で static 機構に対する各セルの材料抵抗  $k_{Cij}$  の中央値は  $0.65K_C$  となる。従って、cyclic 機構に対する各セルの材料抵抗は  $0.72\Delta K_S$  を中央値として約  $\pm 40\%$ , static 機構に対する各セルの材料抵抗は  $0.65K_C$  を中央値として約  $\pm 30\%$  でばらついていると見ることができ、各セルの材料抵抗のばらつきは現実的なレベルにあると考えられる。

## 5. 結 言

本研究では  $K_{max}$  増による  $\Delta K_{th}$  漸減率  $\gamma$  の定量予測手法を提案し、この妥当性について確認した。これにより、 $\gamma$  を数少ないデータ (低  $K_{max}$  一定疲労試験時の  $\Delta K_{th}$  と破壊靱性値  $K_{IC}$ ) から試算することが可能になった。

## 謝 辞

本研究は科学研究費 (基盤研究(C)2)16560065) の助成による研究の一部であることを付記して謝意を表す。

## 参考文献

- (1) Paris, P. C. and Erdogan, F., *Trans. ASME, Ser. D*, **85**, (1963), 528-534.
- (2) Boyce, B. L. and Ritchie, R. O., *Engineering Fracture Mechanics*, **68**, (2001), 129-147.
- (3) Schmidt, R. A. and Paris, P.C., *ASTM STP 536*, (1973), 79-94.
- (4) Newman, J. A., Riddell, W. T. and Piascik, R. S., *ASTM STP 1372*, (2000), 63-77.
- (5) 飯井俊行・石原健一・渡邊勝彦, 機論, **70**-692, A(2004), 604-611.
- (6) ASTM, E647-93, ASTM (1993).
- (7) Ritchie, R. O. and Knott, J. F., *Acta Metallurgica*, **21**, (1973), 639-648.
- (8) 北野宏明, 遺伝的アルゴリズム, 産業図書, (1993), 13-15.

## 記 号

$a$	CT 試験片の表裏平均き裂長さ ( $a_0$ : 初期き裂長さ)
$a_j$	$j$ 列目のき裂長さ (図 2)
$a_{END}$	シミュレーションを強制終了するための $a$
$b$	セルの列幅 ( $= B/n_{column}$ )
$da/dN$	疲労き裂進展速度 $mm/cycle$ ; $= C_{Paris} \cdot (\Delta K)^m$
$fit(k)$	$k$ ( $= 1 \sim k_{END}$ ) 番目の個体に対する適応度; 式 (10)
$g$	平均結晶粒径; セルの行幅として設定
$i, j$	セルの位置を特定するために行, 列指標 ( $i = 1 \sim n_{row}, j = 1 \sim n_{column}$ )
$k_j$	$j$ 列目の static 機構に対する局所き裂駆動力 (図 4)
$k_{Cij}$	static 機構に対する ( $i, j$ ) 番目のセルの材料抵抗
$l$	図 1 中 2 種の $K_{max}$ 一定疲労試験を区別するための指標 ( $l = 1 \sim 2$ )
$z$	適応度が設定値を満足した個体の数
$B$	CT 試験片の厚み
$C$	$\Delta K$ 漸減率
$E$	ヤング率
$F_{max}$	$N$ サイクル目の試験荷重範囲 $\Delta F$ 中の最大試験荷重
$K_C$	static 機構に対する基本材料抵抗; $= K_{IC}$ 破壊靱性値とした
$M$	世代を表すパラメータ
$N$	サイクル数
RAND	初期化番号 RI に対応する 0~1 の一様乱数 ( $RI = RI_{start} \sim RI_{end}$ )

$W$	CT 試験片の幅	$\Delta K_j$	$j$ 列目の cyclic 機構に対する局所き裂駆動力(図 4)
$\alpha_1, \beta_1, \alpha_2, \beta_2$	各セルの材料抵抗のばらつきの程度を示す指標 (なお, たとえば $\alpha_{1,app}(k)$ は $k$ 番目の個体に対する推定値)	$\Delta K_{Sij}$	cyclic 機構に対する $(i, j)$ 番目のセルの材料抵抗
$\gamma$	$\Delta K_{th}$ 漸減率; 式(1)	$\Delta F$	$N$ サイクル目の試験荷重範囲
$\lambda_j$	$j$ 列目のスライスのコンプライアンス (図 4)	$\Delta K$	試験 K 値範囲; 式(2)
$\nu$	ポアッソン比	$\Delta K_{th}$	下限界 K 値範囲
$\phi_j$	$j$ 列目のスライスの荷重分担係数; 式(6)	$\Delta K_{th, sim}$	シミュレーションにより得た $\Delta K_{th}$
$\xi = a/W$		$\Delta K_S$	cyclic 機構に対する基本材料抵抗; 低 $K_{max}$ 一定疲労試験時の $\Delta K_{th}$ と設定 (図 1 に対応して $K_{max} = K_{max, 1}$ 時の $\Delta K_{th} = \Delta K_{th, 1}$ と表している)
$\psi_{j1}, \psi_{j2}$	0~1 の一様乱数		