

コークス塊内き裂の破壊に及ぼす影響の解析

副島 宗高*・朝熊 裕介*・森 哲哉*²・山本 剛*³・青木 秀之*³
三浦 隆利*³・谷岡 誠一*⁴・板垣 省三*⁵

Analysis of the Influence of Crack in Coke on the Fracture

Munetaka SOEJIMA, Yusuke ASAKUMA, Tetsuya MORI, Tsuyoshi YAMAMOTO, Hideyuki AOKI,
Takatoshi MIURA, Seiichi TANIOKA and Shozo ITAGAKI

Synopsis : Homogenization method and s-version FEM are proposed to estimate the strength of coke in the view of its microstructure.

It is important for improvement of permeability in a blast furnace to estimate the condition for making high-strength coke by evaluating its strength. To evaluate the strength of brittle materials with complex microstructural geometry such as coke, it is required to develop analytical procedures that can consider microscopic fractures. Stress intensity factor considering influence of microscopic cracks and inclusions can be estimated by using homogenization method and s-version FEM.

To evaluate the strength of macroscopic base, we use homogenization method and estimate the stress intensity factor. Then the influence of the crack distribution on the stress intensity factor is considered. The stress intensity factor is estimated in the case when inclusions exist.

On the other hand, s-version FEM is used to estimate the stress intensity factor of macrocracks that are a principal factor of coke's brittle fracture considering the influence of microstructure.

Numerical results calculated by those two methods are in good agreement with analytical result, and the performances of these methods are verified.

When the Young's modulus of inclusions is higher than that of the matrix, the stress intensity factor of the microcrack decreases and increases in case inclusions locate ahead of the microcrack-tip and aback of the microcrack-tip, respectively.

Macrocrack will propagate easily when microcracks lay ahead of macrocrack, and it will be hard for macrocrack to propagate when microcrack lay aback of macrocrack.

Key words : coke; strength; microstructure; crack; stress intensity factor; homogenization methods; s-version FEM.

1. 緒言

室炉コークス製造法においては、乾留所要熱量の低減とともに炉体の延命化を目標として高炉PCI (Pulverized Coal Injection) の吹込み量が増加しつつある。しかしながら、微粉炭の増加は高炉内の通気性や安全操業を阻害するため吹込み量は抑えなければならず、吹込み量を増加した高炉PCI技術に対応する高品質なコークス製造法の確立が要求されている。また、SCOPE21 (Super Coke Oven for Productivity and Environment enhancement toward the 21st century) では、より高効率に安価かつ高品質のコークスを製造するための次世代コークス製造技術として中温乾留法が検討されている。以上のような要求を満たすためには、乾留室内の移動現象を定量的に把握し、コークスの品質予測を可能とする必要がある。

これまで乾留現象の把握に関し、著者らは石炭充填層か

らコークス層における熱伝導率の測定¹⁾を始め、乾留炉内現象を模擬する各種シミュレーションモデルの開発²⁻⁸⁾、乾留実験^{2,5)}および物性値測定^{9,10)}を行い、様々な成果を挙げてきた。

一方、コークスの品質の評価という点において、強度を推算することにより高強度となる条件を割り出し、硬いコークスを製造することは、高炉における通気、通液性の確保という観点から非常に重要な位置を占める。しかし、コークスのような不均質材料は、材料の基質を構成する物質の種類やその組合わせの影響、微視き裂や気孔の存在および構成物質相互の界面の影響などから多数のき裂が干渉し合う非常に複雑な状況となっているため、強度を予測するには微視構造を考慮することが必要であるが、それは今まで困難とされてきた。現在、微視的なアプローチとして気孔壁の厚さが強度に与える影響や破壊に対して支配的となる気孔径の大きさについての研究¹¹⁾が行われているが、

平成12年8月31日受付 平成12年11月10日受理 (Received on Aug. 31, 2000; Accepted on Nov. 10, 2000)

- * 東北大学大学院生 (Graduate Student, Tohoku University, Aza-Aoba Aramaki Aoba-ku Sendai 980-8579)
- * 2 大阪ガス (Osaka Gas Corp.)
- * 3 東北大学大学院工学研究科 (Graduate School of Engineering, Tohoku University)
- * 4 三菱化学 (株) (Mitsubishi Chemical Corp.)
- * 5 NKK 総合材料技術研究所 (Materials & Processing Research Center, NKK Corp.)

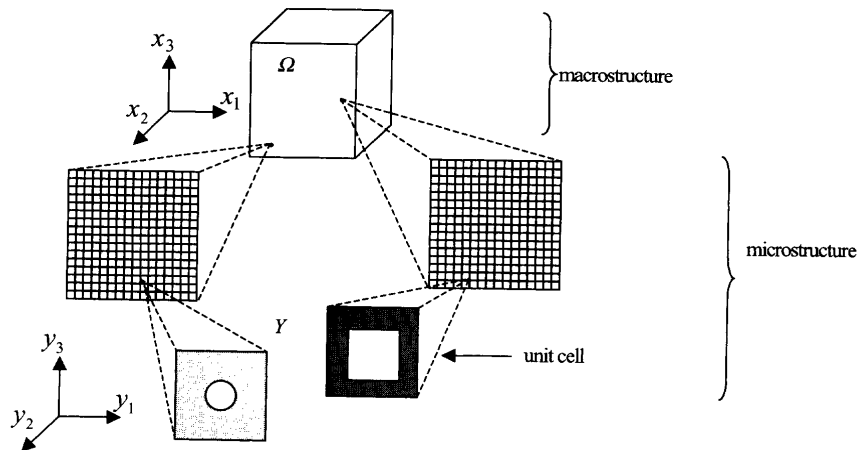


Fig. 1. Locally periodic microstructure and macrostructure.

き裂先端に加わる応力は球状気孔に加わる応力に比べはるかに大きいので、き裂の挙動を微視的に、かつ破壊力学的な立場から論ずることはコークスのような脆性破壊を引き起こす材料では重要であるが、微視き裂の影響を理論的に論じた研究は皆無であった。

近年、巨視構造とともに微視構造を考慮する均質化法や重合メッシュ法などのシミュレーション手法が開発され、様々な分野への応用が大いに期待されている。

均質化法とは、応用数学の一種で、巨視スケールと微視スケールというはるかに異なる2つのスケール間の相互作用を考慮しつつ、両スケールにおける挙動を記述するための理論である。具体的には、微視構造における平均物性値を求め、この値を巨視スケールにおける等価な物性値と仮定し、巨視スケールにおける応力解析を行い応力分布を求める。さらに、この結果を用いて微視スケールの詳細な応力分布を求める手法である。なお、工学者と数学者らの橋渡しをした文献としては、1990年の Guedes and Kikuchi¹²⁾ が挙げられる。

重合メッシュ法とは、Fish によって提案された解析手法¹³⁾ で、2つのメッシュを重ね合わせることで、両スケールを同時に解く手法である。しかし、重ね合わせる領域の境界は必ずしも粗いメッシュと一致する必要がなく、単に重ね合わせる領域形状の条件のみを満たせばよいため、非常にフレキシブルな解析が可能である。均質化法が微視構造を平均化し、巨視構造全体に分布させる手法であるのに対し、重合メッシュ法は巨視構造のある一部分にのみ微視構造を適用するものであるが、巨視スケールと微視スケールを同時に解析するため、両スケールの相関をより強く反映させることができる。

そこで、本研究ではコークスの機械的物性および強度の予測を目的としてき裂による破壊に焦点を絞り、均質化法および重合メッシュ法を導入し、微視構造も考慮したき裂解析を行う。具体的には、均質化法を用いて微視き裂群について解析し、破壊力学パラメータである応力拡大係数

を推算し、解析解と比較を行うことにより妥当性を検証する。さらに、微視き裂先端の近傍にイナート粒子などの介在物が存在する系について計算し、介在物の応力拡大係数に及ぼす影響について推算する。また、微視および巨視の相関をより強く考慮できる重合メッシュ法を用いて、微視き裂の影響を考慮した巨視き裂の応力拡大係数を推算する。ここで、高い精度で応力拡大係数を計算するため、Henshell, Shaw¹⁴⁾ および Barsoum¹⁵⁾ らによって提案された、特異アイソパラメトリック要素を用いる。

2. 解析手法

2.1 均質化法の定式化¹²⁾

均質化法においては、以下の仮定を用いる。① Fig. 1 に示すように、微視的な複合構造が周期的に全巨視領域 Ω 内に分布する。② 1周期を単位として分割された微視領域 Y は非常に小さい。③ 境界値問題の解である微視構造を考慮した変位 u^ϵ は漸近展開による近似式 (1) で求められる。

$$u^\epsilon(x) \approx u^0(x) + \epsilon u^1(x, y) \dots \dots \dots (1)$$

ここで、巨視レベルと微視レベルのスケール比を ϵ とする。 x は巨視変数、 $y = x/\epsilon$ は微視変数、 u^0 は巨視スケールにおける変位、 u^1 は微視スケールにおける変位を示す。式 (2) に表される変数分離により境界値問題を微視的問題と巨視的問題に分離する。

$$u^1(x, y) = -\chi(y) \partial_x u^0(x) \dots \dots \dots (2)$$

χ は変位の微視的な乱れを表し、特性変位という。平衡方程式から、微視スケールの方程式 (3) と巨視スケールの方程式 (4) を導出する。

$$\int_Y (\partial_y \delta u^1)^T E (I - \partial_y \chi) dY = 0 \dots \dots \dots (3)$$

$$\int_{\Omega} \frac{1}{|Y|} \int_Y (\partial_x \delta u^0)^T E (\partial_x u^0 + \partial_y u^1) dY d\Omega$$

$$= \int_{\Gamma} (\delta u^0)^T t d\Gamma + \int_{\Omega} \frac{1}{|Y|} (\delta u^0)^T b dY d\Omega \dots\dots\dots(4)$$

単位ベクトルを I 、弾性応力-歪マトリックスを E 、物体力を b 、表面力を t として、式 (3) から χ を求めると均質化弾性応力-歪マトリックスと物体力はそれぞれ次式で計算される。

$$E^H = \frac{1}{|Y|} \int_Y E (I - \partial_y \chi) dY \dots\dots\dots(5)$$

$$b^H = \frac{1}{|Y|} \int_Y b dY \dots\dots\dots(6)$$

また、式 (4) から巨視レベルでの変位を求め、式 (7)、(8) から、微視レベル、巨視レベルでの応力 σ 、 σ^H が求まる。

$$\sigma = E^e (I - \partial_y \chi) (\partial_x u^0) \dots\dots\dots(7)$$

$$\sigma^H = E^H (\partial_x u^0) \dots\dots\dots(8)$$

式 (5)、(6)、(8) の添字 H のついた各量は等価物性を与えるもので、領域 Y 内の体積平均として定義される。 E^e は微視構造を考慮した弾性応力-歪マトリックスを示す。

2.2 重合メッシュ法の定式化¹⁶⁾

いま、Fig. 2 に示すような領域を考える。グローバルな構造の領域およびその境界を Ω, Γ とし、ローカル構造の領域を Ω^L 、グローバルな領域とローカルな領域の境界を Γ^{GL} とする。場の関数としての変位は次式のように、グローバルモデルにおける変位 u^G とローカルな変位 u^L の重ね合わせで表現する。以下、添え字 G, L のついた各量はグローバル領域、ローカル領域の変数であることを意味する。

$$u = \begin{cases} u^G & \text{on } \Omega^G \\ u^G + 0 & \text{on } \Gamma^{GL} \\ u^G + u^L & \text{on } \Omega^L \end{cases} \dots\dots\dots(9)$$

これを、通常の有限要素法と同様に離散化を行う。歪は

$$e = \begin{cases} e^G & \text{on } \Omega^G \\ e^G + e^L & \text{on } \Omega^L \end{cases} \dots\dots\dots(10)$$

となる。ただし、

$$e^G = B^G \bar{u}^G \dots\dots\dots(11)$$

$$e^L = B^L \bar{u}^L \dots\dots\dots(12)$$

\bar{u} は節点変位を表す。これを次式の仮想仕事の原理式に代入すると、

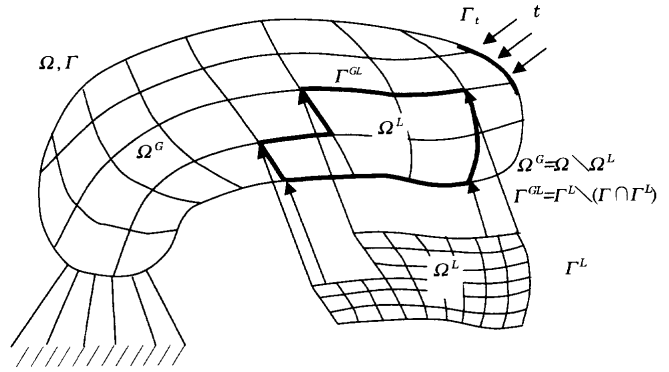


Fig. 2. Definition of the problem domain for global and local modeling.

$$\int_{\Omega} (\delta e^G + \delta e^L)^T E^H (e^G + e^L)^T d\Omega$$

$$- \int_{\Omega} (\delta u^G + \delta u^L)^T b d\Omega - \int_{\Gamma} (\delta u^G + \delta u^L)^T t d\Gamma = 0 \dots\dots\dots(13)$$

解くべき方程式は以下のようなになる。

$$\begin{bmatrix} K^G & K^{GL} \\ K^{LG} & K^L \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \bar{u}^G \\ \bar{u}^L \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} f^G \\ f^L \end{Bmatrix} \dots\dots\dots(14)$$

K は剛性マトリックス、 f は荷重ベクトルを示す。剛性マトリックスの各部分は

$$K^G = \int_{\Omega} (B^G)^T E^H B^G d\Omega \dots\dots\dots(15)$$

$$K^{GL} = \int_{\Omega^L} (B^G)^T E^H B^L d\Omega \dots\dots\dots(16)$$

$$K^{LG} = \int_{\Omega^L} (B^L)^T E^H B^G d\Omega = (K^{GL})^T \dots\dots\dots(17)$$

$$K^L = \int_{\Omega^L} (B^L)^T E^H B^L d\Omega \dots\dots\dots(18)$$

となる。ここで E^H は均質化弾性マトリックスを表しているが、均質な構造を考える場合には通常の弾性係数マトリックス E を用いればよい。なお、荷重ベクトルは次式で表される。

$$f^G = \int_{\Omega} (N^G)^T b d\Omega + \int_{\Gamma} (N^G)^T t d\Gamma \dots\dots\dots(19)$$

$$f^L = \int_{\Omega} (N^L)^T b d\Omega + \int_{\Gamma} (N^L)^T t d\Gamma \dots\dots\dots(20)$$

N は形状関数マトリックスを示す。

3. 解析例

コークス生成時に加わる熱応力や気孔内圧力の上昇の影響から微視き裂が発生すると考えられるが、製造する条件によりき裂の長さや数は変化する。物質内に多数のき裂が存在する場合、き裂の長さやき裂相互の位置関係によってき裂の進展を助長させたり、抑制したりするような相互干渉状況にある。そこで3・1節では、長さや相互の位置関係が微視き裂に与える影響を考察した。また、3・2節では、コークス内に存在するイナート等の介在物の分布やその物性値が微視き裂による破壊に及ぼす影響を考察した。一方、微視き裂による破壊が進み巨視き裂に成長した場合やコークス生成時より巨視き裂が存在する場合、応力は巨視き裂先端に集中し、破壊は微視き裂より巨視き裂に対して支配的になる。しかし、巨視き裂は単調に進展していくのではなく、微視き裂などの微視構造の影響を受ける。そこで、3・3節では微視き裂の分布が巨視き裂に与える影響を考察した。

3.1 均質化法による微視き裂群の解析

3.1.1 解析対象

Fig. 3 に示すような引張り応力 σ を負荷した無限体中の周期き裂群を対象として、平面歪状態を仮定し二次元問題として解析を行う。実際に用いたメッシュとして、Fig. 4(a)に巨視メッシュ（メッシュ数、横10、縦20）、Fig. 4(b)に微視メッシュ（メッシュ数、横20、縦20）を示す。巨視メッシュに加える応力 σ を10 MPaとする。無限周期構造の1周期部分を微視メッシュとして解析する。均質化法により微視メッシュに対して解析を行い、これより得られた均質化弾性係数を用いて、有限要素法により巨視メッシュに対する解析を行う。ここで得られた巨視スケールの点 A (Fig. 3(a))における歪から微視スケールにおける変位、応力分布および応力拡大係数を計算する。微視構造の構成材料として Young 率 $E=100$ GPa, Poisson 比 $\nu=0.3$ の弾性体を考える。周期き裂に対して直交方向の距離の尺度を意味する無次元長さ c/b および無次元き裂長さ a/b を変化させて応力拡大係数の変化を計算した。

3.1.2 解析結果

微視き裂先端の応力拡大係数の計算結果を Fig. 5 に示す。ここで、横軸は無次元き裂長さ (a/b) を、縦軸は次式で定義される無次元応力拡大係数を表す。

$$F_I = \frac{K_I}{\sigma \sqrt{\pi a}} \dots \dots \dots (21)$$

Fig. 5 において、実線が均質化法による計算結果を、破線が解析解（選点法¹⁷⁾）を示している。均質化法による計算結果は、解析解と比較してやや大きく評価されているものの、良好な一致を示している。単一のき裂の場合には、き裂が長くなるに従って応力拡大係数が増加していくこと

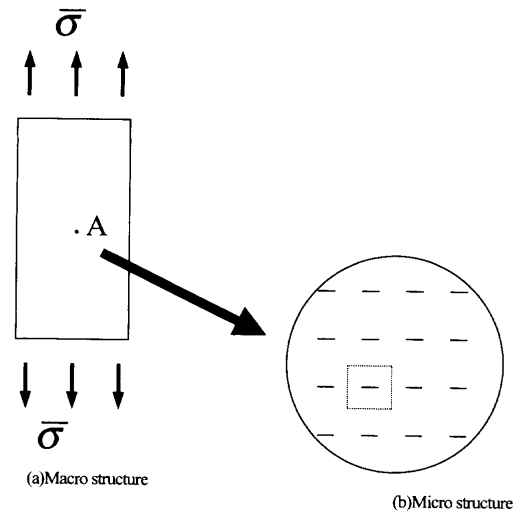


Fig. 3. Schematic diagram of analysis of microcrack array by homogenization method.

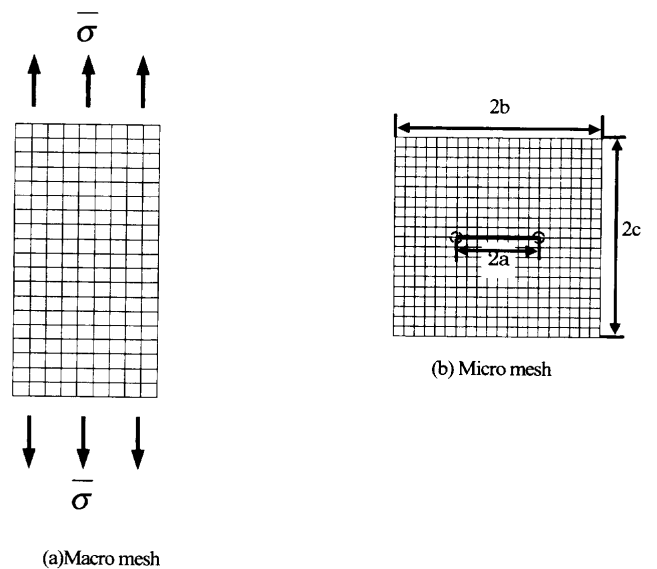


Fig. 4. Macro mesh and micro mesh.

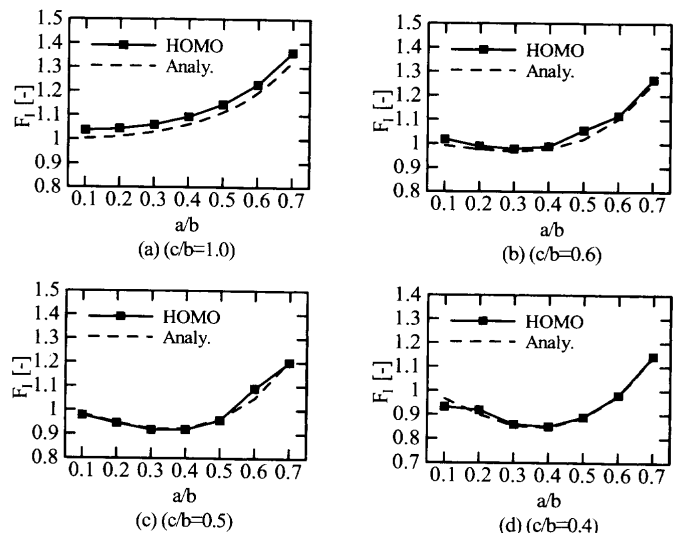


Fig. 5. Stress intensity factor by microcrack array interaction.

が知られており、 $c/b=1.0$ の場合 (Fig. 5(a)) はこの傾向に一致する。しかし、 c/b が $0.4\sim 0.6$ の場合には微視き裂の長さが0から大きくなるにつれ応力拡大係数は小さくなり、無次元き裂長 a/b が $0.3\sim 0.4$ 付近で極小値をとり、それ以上では増加していく傾向がある。これはき裂間の相互作用によるものであり、き裂一つについてはき裂長の増加により応力拡大係数が増幅されるが、このき裂にかかる応力を周囲のき裂が緩和してしまうために、このような傾向が生じるものと考えられる。実際、き裂の間隔が小さい程、き裂長さの増加に伴う応力拡大係数の緩和が顕著に見られる。

本解析対象のように単純な周期き裂群に対しては、解析的手法が優ると考えられるが、気孔および異種材料が存在する複雑な微視構造を持つコークスに対しては、有限要素による構造のモデル化が可能な均質化法が有力な手段であると考えられる。

3.2 介在物が微視き裂の応力拡大係数に及ぼす影響

3.2.1 解析対象

3.1 節では均質な材料を仮定したが、本節では微視構造に Young 率の異なる介在物が存在する場合の応力拡大係数を解析する。

Fig. 6 に示すようにき裂の延長上の両端に異種介在物が存在する場合、Fig. 7 に示すようにき裂を囲む4ヶ所に異種介在物が存在する場合について、異種介在物の剛性および配置が、応力拡大係数へ及ぼす影響を調べる。ここで、基質における物性値は Young 率 $E_1=100$ GPa, Poisson 比 $\nu_1=0.3$, 介在物の Poisson 比は一定で $\nu_2=0.3$ とする。また、 $c/b=1$, $a/b=0.5$ とする。 σ および微視メッシュ数と巨視メッシュ数は3.1 節と同じ値を用いる。

3.2.2 解析結果

(1) 微視き裂の延長線上に介在物が存在する場合

解析結果を Fig. 8 に示す。介在物の Young 率 (E_2) が構成材料の Young 率 (E_1) よりも大きい場合には、応力拡大係数は緩和され、介在物の Young 率が構成材料よりも小さい場合には、逆に応力拡大係数が増幅されることが分かる。また、介在物とき裂先端点との距離が小さいほど、介在物による応力拡大係数の緩和および増幅効果は高いことが分かる。しかし、介在物とき裂間の距離が $r/b=0.2$ および 0.3 の場合を比較すると、応力拡大係数の緩和および増幅効果はほとんど変わらない。これは、き裂先端近傍での応力の特異性によるものと考えられる。すなわち、き裂先端点からある程度離れた位置では応力分布は緩やかであり、介在物による応力拡大係数の緩和および増幅効果もこの傾向を示しているものと考えられる。

(2) 微視き裂を囲む4ヶ所に介在物が存在する場合

解析結果を Fig. 9 に示す。横軸は、微視き裂先端と介在物の中心との x 方向距離への無次元距離 r/b を示しており、縦軸が無次元応力拡大係数を表している。Fig. 9 中、

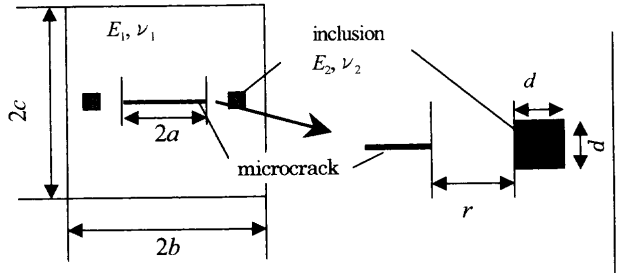


Fig. 6. Geometric configuration of microcrack and inclusion.

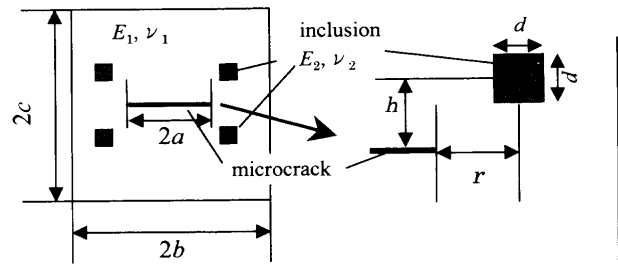


Fig. 7. Geometric configuration of microcrack and inclusion.

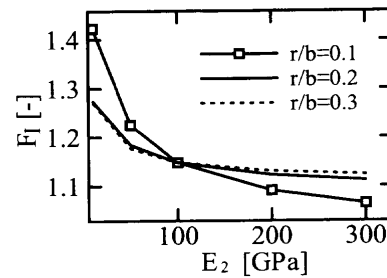


Fig. 8. Stress intensity factor by interaction of inclusion.

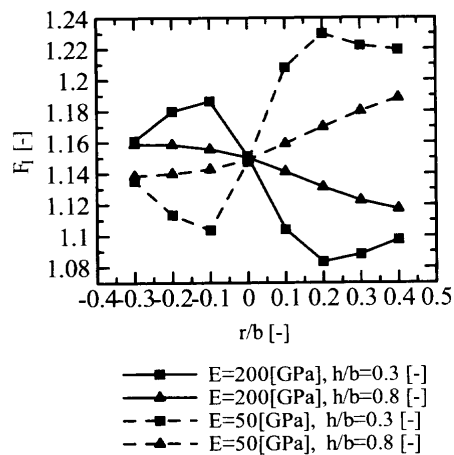


Fig. 9. Stress intensity factor by interaction of inclusion.

Young 率が 200 GPa の場合を実線で、50 GPa の場合を点線で示した。なお、▲は介在物とき裂の y 方向の無次元距離 h/b が 0.8 の場合を、■は h/b が 0.3 の場合について示している。なお、比較のために介在物が存在しない場合の値を、

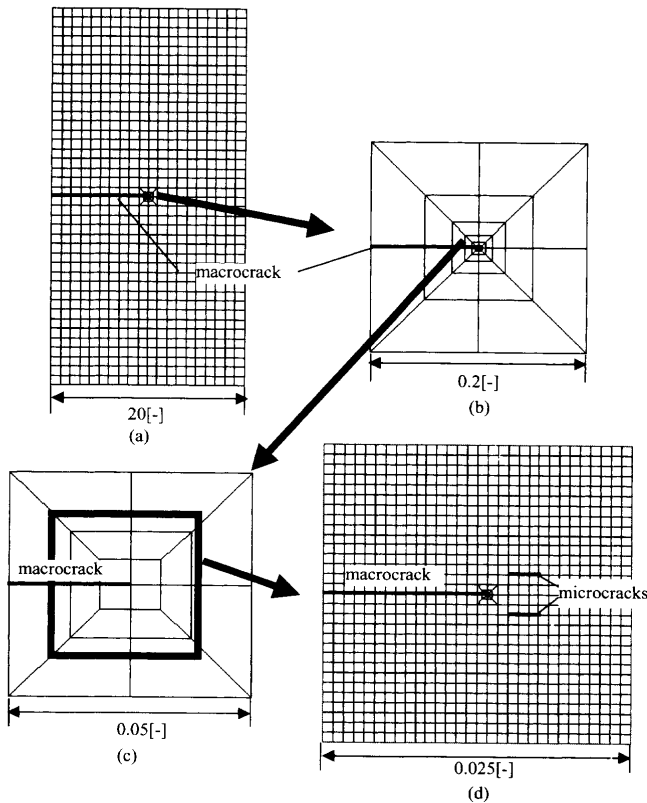


Fig. 10. Overlaying macro and micro mesh. (a) Macro-mesh with macro-crack, (b) transition mesh around macro-crack tip, (c) area which is overlaid, (d) micro-mesh with micro-cracks.

マークを付けない実線で示してある。

き裂先端の前方に介在物が位置する場合には、異種介在物の剛性が基質部より低い際には応力拡大係数を増幅させ、介在物の剛性が高い際には緩和させる傾向がある。しかし、 r/b が 0 の場合には介在物の影響は無くなり、 r/b が負の場合には逆に、異種介在物の剛性が基質部より低い際には応力拡大係数を緩和させ、介在物の剛性が高い際には増幅させる傾向が見られた。

き裂の近傍に剛性の低い介在物が存在する場合には、き裂を開口させる方向に負荷する引張り応力を、介在物の部分で緩和してしまうために、このような応力拡大係数の遮蔽効果が生じると考えられる。

3.3 重合メッシュ法による巨視き裂の解析

3.3.1 解析対象

解析に用いた有限要素メッシュを Fig.10 に示す。図 (a) は片面にき裂のある巨視構造のメッシュ (メッシュ数、縦 40、横 20) に一様な応力 $\sigma=1$ MPa を加え、き裂先端近傍では図 (b), (c) に示す詳細なメッシュを配置する。図 (b) の中心をさらに拡大したものが図 (c) で、太線で囲んだ領域に図 (d) に示す微視構造のメッシュを重ね合わせる (メッシュ数、縦 30、横 30)。微視構造のメッシュも片面から中央部にき裂があり、き裂先端で詳細なメッシュが配置されている。微視構造メッシュにおいて、き裂先端近傍に微視き

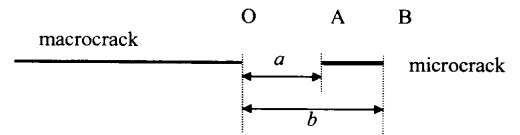


Fig. 11. Collinear microcrack ahead of macrocrack.

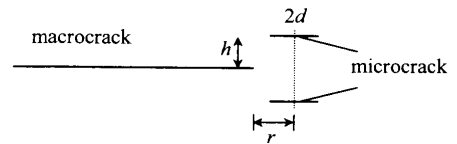


Fig. 12. A macrocrack and two symmetrical microcracks.

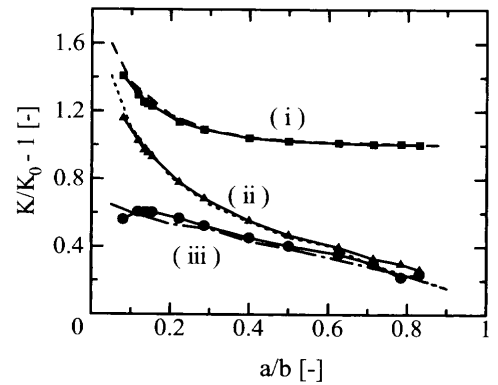


Fig. 13. Stress intensity factors for crack tips at (i) point O, (ii) point A, (iii) point B in Fig. 5-26, normalized relative to nominal stress intensity factor, K_0 .

裂を設定し、その位置が巨視き裂の応力拡大係数に及ぼす影響について解析を行う。以下、Fig.11 に示すように巨視き裂の延長線上に微視き裂が位置する場合と、Fig.12のように巨視き裂に平行に2つの微視き裂が位置する場合について解析を行う。

3.3.2 解析結果

(1) 巨視き裂の延長線上に微視き裂が位置する場合

Fig.11 に示すように、微視き裂先端A点、B点はそれぞれ巨視き裂先端 (O点) から a, b の距離に位置する。この時の巨視き裂先端 (O点) と微視き裂先端A点およびB点における無次元応力拡大係数を Fig.13 に示す。ここで横軸は a/b で定義される無次元距離を表す。また、縦軸は無次元応力拡大係数であり、各応力拡大係数を微視き裂が存在しない場合の巨視き裂の応力拡大係数で割った値から1を引いたものである。なお、比較のために無限領域において算出される解析解を点線で示してある。本解析の結果は解析解¹⁸⁾と良好に一致している。応力拡大係数は、 $F_I(O) > F_I(A) > F_I(B)$ の関係があり、微視き裂が巨視き裂に近づくるとO点とA点の相互作用が強くなるが、B点については大きな相互作用は見られない。

(2) 巨視き裂に平行に2つの微視き裂が位置する場合

巨視き裂に対して2つの微視き裂が平行に並ぶ場合について、巨視き裂の応力拡大係数の解析を行った結果を

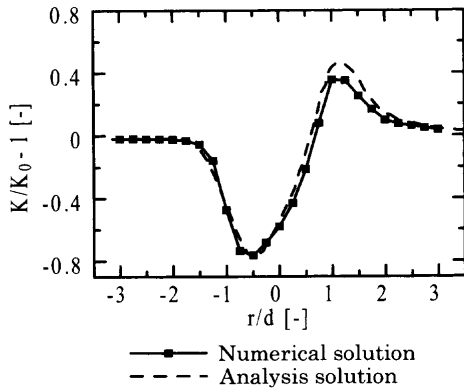


Fig. 14. Stress intensity factor at main crack tip for parallel microcracks.

Fig.14 に示す。本解析手法より得られた無次元応力拡大係数は解析解¹⁸⁾と良好に一致した。なお、微視き裂は巨視き裂先端前方に位置する場合には応力拡大係数は増幅されるが、き裂先端の後方に位置する場合には緩和されている。これは、微視き裂がき裂先端の後方にある場合、微視き裂においてき裂を開口させる方向に働く応力が緩和されるためであると考察される。

4. 結言

均質化法を用いた微視き裂群の解析と、重合メッシュ法によるき裂先端での微視構造を考慮した巨視き裂の解析を行った。その結果、得られた知見を以下に示す。

(1) 均質化法により得られた応力拡大係数は半解析解と良好な一致を得た。また、微視き裂先端近傍に介在物が存在する系について計算した。介在物が先端の前方にある場合、介在物の弾性が構成材料より大きいものでは応力拡大係数を緩和し、介在物の弾性係数が小さい場合には逆に増幅させる作用があることが分かった。一方、介在物がき裂先端の後方にある場合には、これとは逆の傾向が示された。

(2) 巨視構造として巨視き裂を与え、微視構造が巨視き裂の応力拡大係数に及ぼす影響について重合メッシュ法により解析を行った。無限領域における解析解と比較したところ、重合メッシュ法により得られた解は良好に一致した。重合メッシュ法により、微視構造を考慮に入れた巨視き裂の解析が可能であることが示された。

最後に、日本鉄鋼協会生産技術部門「石炭粒子の粘結機構解析研究会」の助成を受けました。ここに記し篤く御礼申し上げます。

また、寺田賢二郎助教授（東北大学大学院工学研究科）には、均質化法および有限要素法による数値解析に関して多くの御指導および御協力を頂きましたので、ここに記し感謝の意を表します。

記号

- $\mathbf{0}$: 零ベクトル (-)
- a : 微視き裂長さ (m)
- $[B]$: 歪マトリックス
- \mathbf{b} : 体積力ベクトル
- b : 微視メッシュの横の長さ (m)
- c : 微視メッシュの縦の長さ (m)
- d : 介在物の長さ (m)
- $[E]$: 応力-歪マトリックス
- E : Young 率 (Pa)
- $\delta \mathbf{e}$: 仮想歪ベクトル
- F_I : 無次元応力拡大係数 (-)
- h : き裂間に対し垂直方向の距離 (m)
- $[I]$: 単位マトリックス
- $[K]$: 剛性マトリックス
- K_0 : 微視き裂が存在しない場合の応力拡大係数 (Pa · m^{1/2})
- K_I : 応力拡大係数 (Pa · m^{1/2})
- $[N]$: 形状関数マトリックス
- r : き裂からの距離 (m)
- \mathbf{t} : 体積力ベクトル
- \mathbf{u} : 変位ベクトル
- $\delta \mathbf{u}$: 仮想歪ベクトル
- $\bar{\mathbf{u}}$: 節点変位ベクトル
- \mathbf{x} : 巨視スケールにおける座標
- $|Y|$: 微視メッシュ体積 (面積)
- Y : 微視領域
- \mathbf{y} : 巨視スケールにおける座標

ギリシャ文字

- χ : 特性変位ベクトル
- ε : 巨視と微視のスケール比
- Γ : 境界
- ν : Poisson 比 (-)
- σ : 応力ベクトル
- $\bar{\sigma}$: 引張応力 (Pa)
- Ω : 巨視領域

添え字

- 0 : 均質化法における巨視領域変数
- 1 : 均質化法における微視領域変数
- G : 重合メッシュ法における巨視領域変数
- H : 均質化変数
- L : 重合メッシュ法における微視領域変数
- T : 転置マトリックス

文献

- 1) T.Miura, J.Fukai and S.Ohtani: *Tetsu-to-Hagané*, **70** (1984), 336.
- 2) H.Aoki, H.Saito and T.Miura: *Kagaku Kogaku Ronbunshu*, **19** (1993), 647.
- 3) H.Aoki, A.Ueno and T.Miura: *Kagaku Kogaku Ronbunshu*, **20** (1994), 89.
- 4) A.Ueda, H.Aoki, A.Ueno and T.Miura: *J. Jpn. Inst. Energy*, **74** (1995), 154.
- 5) H.Aoki, H.Saito and T.Miura: *Kagaku Kogaku Ronbunshu*, **21** (1995), 341.
- 6) H.Aoki, K.Goto, M.Ueki, T.Miura, K.Fukuda and S.Itagaki: *Tetsu-to-Hagané*, **82** (1996), 404.
- 7) M.Nishizawa, T.Morito, M.Matsuura, H.Aoki and T.Miura: *Kagaku Kogaku Ronbunshu*, **22** (1996), 898.
- 8) K.Goto, A.Inomata, H.Aoki and T.Miura: *J. Jpn. Inst. Energy*, **76** (1997), 125.
- 9) H.Nogami, H.Saito, H.Nakajima and T.Miura: *J. Fuel Soc. Jpn.*, **70** (1991), 847.
- 10) A.Suzuki, M.Ueki, H.Aoki, T.Miura, K.Kato and K.Fukuda: *Tetsu-to-Hagané*, **84** (1998), 321.
- 11) M.Nishimura, H.Matsudaira, T.Yokoyama and S.Asada: *CAMP-ISIJ*, **11** (1998), 709.
- 12) J.M.Guedes and N.Kikuchi: *Comp. Meth. Appl. Eng.*, **83** (1990), 143.
- 13) J.Fish and A.Nath: *Int. J. Numer. Meth. Eng.*, **36** (1993), 2825.
- 14) R.D.Henshell and K.G.Shaw: *Int. J. Fract.*, **9** (1975), 495.
- 15) R.S.Barsoum: *Int. J. Numer. Meth. Eng.*, **10** (1976), 25.
- 16) N.Takano, M.Zako and M.Ishizaki: *Trans. Jpn. Soc. Mech. Eng. A*, **66** (2000), 14.
- 17) 石田 誠 : き裂の弾性解析と応力拡大係数, 培風館, 東京, (1976).
- 18) A.A.Rubinstein: *Int. J. Fract.*, **27** (1985), 113.