

4 章 重合メッシュ法によるコークス破壊機構の解明

4-1 序

現在、コークス炉の老朽化・延命対策、CO₂ 排出規制問題等のため、コークス使用量の低減を目標として高炉への微粉炭吹き込み(PCI: Pulverized Coal Injection)が増加しつつある。しかし、この微粉炭吹き込みの増加により炉下部滴下帯やレースウェイにおいてコークスの小粒化・粉発生が促進され、通液・通気性の低下を引き起こし安定操業を阻害する。さらに、使用石炭の変化(非微粘結炭の配合増加)に対応するためには、乾留室内の移動現象を定量的に把握し、コークス劣化メカニズムの解明やコークスの品質予測を行う必要がある。

これまで乾留現象の把握に関し、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⁾を行い、様々な成果を挙げてきた。しかし、これらの結果をいかに活用すればコークス強度を向上できるかという議論には至っていない。また、従来のコークスの強度評価は、気孔率、ドラム強度指数、反応後強度等からの経験則が用いられている。これは微視構造が複雑なことや、巨視と微視領域におけるスケール間の相互作用の評価が困難であるためである。そこで、現在コークスのような不均質材料に対して、マルチスケール解析が重要であると考えた。つまり、材料の基質を構成する物質の種類やその組み合わせの影響、微視亀裂や気孔の存在および構成物質の界面の影響等から多数の亀裂が干渉し合う複雑な微視構造を考慮した均質化法¹⁰⁾により強度の予測を行っている。

コークスの高炉内における体積破壊¹¹⁾や粉化を防ぐためには気孔率、気孔形状¹²⁾、イナーートやデポジットカーボン¹³⁾等の微視構造を評価することが重要である。しかし、これらの微視構造がコークスの粒度や強度にいかに関与するか等、コークス強度についての基礎的な検討は不十分である。そのため、様々な微視構造を評価可能な重合メッシュを用いた有限要素法¹⁴⁻¹⁸⁾により、破壊つまり巨視亀裂進展を対象とし、亀裂先端での応力集中の指標である応力拡大係数を解析した。重合メッシュとは巨視メッシュと微視メッシュを重ね合わせて配置し、巨視解析と微視解析を同時に行うマルチスケール解析であり、本解析では、亀裂先端に気孔、イナーート等の微視構造を考慮したローカルメッシュを配置し、巨視挙動と微視挙動の相関を考慮しつつ、応力拡大係数の評価を行った。本重合メッシュ解析は同時に開発を行っている均質化法¹⁰⁾とともに、数値解析を用いたコークス品質評価の新

しい指標となることが期待されている。

4-2 解析手法

コークスの強度評価にマルチスケール解析を利用する利点として、広範囲にわたるコークスの品質評価や微視領域における破壊メカニズムを検討可能であることである。このためには、コークスのような複雑な気孔形状や気孔径分布を含む微視構造を厳密に評価する必要がある。今回注目するコークスの体積破壊、つまり、巨視亀裂進展は単調に進展していくのではなく、Fig.4-1 に示すように気孔やイナート、微視亀裂に大きく影響するため、マルチスケール解析を行う必要がある。そこで、巨視領域の亀裂進展と複雑な微視構造を同時に解析する必要があり、巨視亀裂の先端に特徴的な微視構造を重ねて配置し評価可能な重合メッシュ法が有効であると考えた。以下に定式化を示す。

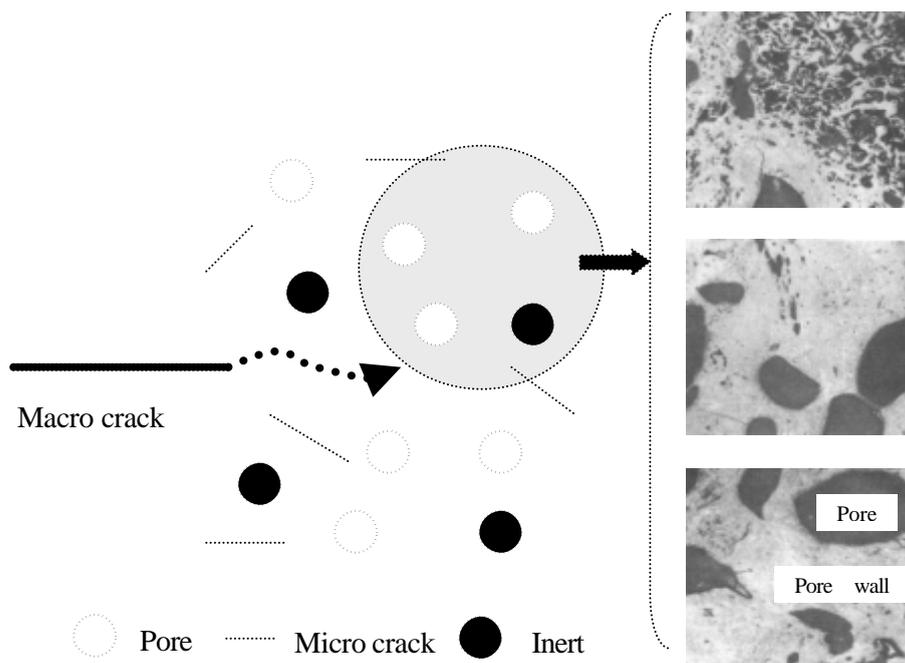


Fig.4-1 Relation between macro crack and micro structure

4-2-1 重合メッシュ法の定式化¹⁸⁾

重合メッシュ法は Fig.4-2 に示すように、2つの異なるメッシュを重ね合わせる。ローカルモデルの領域 O^L はグローバルモデルの領域 O^G に含まれている必要がある ($O^L \subset O^G$)。ローカル領域とグローバル領域の境界を G^{GL} とする。場の関数としての変位は式(4-1)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。ここで u の u^G と u^L への分割の一意性がなく解が定まらないため G^{GL} では $u^L = \mathbf{0}$ とする。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。

$$u = \begin{cases} u^G & \text{on } O^G \\ u^G + \mathbf{0} & \text{on } G^{GL} \\ u^L & \text{on } O^L \end{cases} \quad (4-1)$$

これを、通常の有限要素法と同様に離散化を行う。それぞれ変位は、以下のようになる。

$$u^G = N^G \bar{u}^G \quad (4-2)$$

$$u^L = N^L \bar{u}^L \quad (4-3)$$

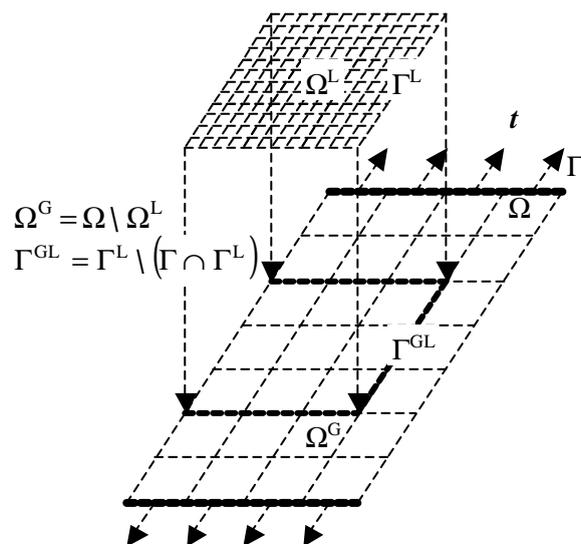


Fig.4-2 Definition of the problem domain for global and local modeling

$N^G, N^L, \bar{u}^G, \bar{u}^L$ はそれぞれグローバル、ローカルメッシュにおける形状関数マトリクス、節点変位を表す。歪はその節点での変位から、以下のように表現される。

$$e = \begin{cases} e^G & \text{on } W^G \\ e^G + e^L & \text{on } W^L \end{cases} \quad (4-4)$$

$$e^G = B^G \bar{u}^G \quad (4-5)$$

$$e^L = B^L \bar{u}^L \quad (4-6)$$

これらの式(4-4)~(4-6)の領域 O^L における歪は、グローバル及びローカルの歪の和であることを意味する。

これらを次式の仮想仕事の原理式に代入する。

$$\begin{aligned} \int_{\Omega} (de^G + de^L)^T E (e^G + e^L)^T dO - \int_{\Omega} (du^G + du^L)^T b d\Omega \\ - \int_{G_i} (du^G + du^L)^T t dG = 0 \end{aligned} \quad (4-7)$$

上式を整理すると、解くべき方程式は以下ようになる。

$$\begin{bmatrix} K^G & K^{GL} \\ K^{LG} & K^L \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \bar{u}^G \\ \bar{u}^L \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} f^G \\ f^L \end{Bmatrix} \quad (4-8)$$

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、以下のようになる。

$$K^G = \int_{\Omega} (B^G)^T E B^G dO \quad (4-9)$$

$$K^{GL} = \int_{\Omega^L} (B^G)^T E B^L dO \quad (4-10)$$

$$K^{LG} = \int_{\Omega^L} (B^L)^T E B^G dO = (K^{GL})^T \quad (4-11)$$

$$K^L = \int_{\Omega^L} (B^L)^T E B^L dO \quad (4-12)$$

ここで E は弾性マトリックスを表している。なお、荷重ベクトルは次式で表される。

$$f^G = \int_W (N^G)^T b dW + \int_{G_i} (N^G)^T t dG \quad (4-13)$$

$$f^L = \int_W (N^L)^T b dW + \int_{G_i} (N^L)^T t dG \quad (4-15)$$

4-3 解析対象及び検証

コークスは、製造する条件つまりコークス炉の操業条件や原料の配合条件によりコークス生成時に加わる熱応力や気孔内圧力が異なるため、様々な気孔率、気孔形状を有している。また、気孔壁へのデポジットカーボン¹³⁾の付着によりコークス品質の向上が報告されている。更に、イナート等の介在物は使用する炭種により分布が大きく異なり、これらがコークスの品質に大きく影響すると考えられる。微視亀裂による破壊が進み巨視亀裂に成長した場合やコークス生成時より巨視亀裂が存在する場合、応力は巨視亀裂先端に集中し、破壊は微視亀裂より巨視亀裂に対して支配的になる。しかし、巨視亀裂は単調に進展していくのではなく、微視構造の影響を受ける。そこで、気孔率、気孔形状、イナート及びデポジットカーボン等の微視構造が巨視亀裂に及ぼす影響について、亀裂先端での応力集中の指標である応力拡大係数を用い検討した。

4-3-1 解析対象

Fig.4-3 に示すような引張応力 $\bar{\sigma}$ を負荷した片側亀裂を含む試験片を対象として、平面歪状態を仮定し解析を行った。グローバルメッシュ(Fig.4-4(a)、縦 82×横 42)に対して、亀裂経路を対象としたローカルメッシュ(Fig.4-4(b)、縦 21×横 21)と、亀裂先端周囲にそれぞれの微視構造を対象としたローカルメッシュ(Fig.4-4(c))を重ね合わせ配置した。なお、図中に示すように、グローバルメッシュ 1 要素ごとにローカルメッシュを配置した。

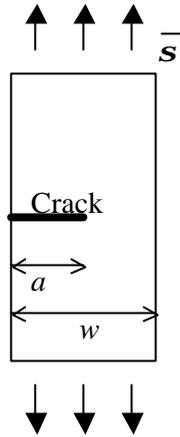


Fig.4-3 Single-edge-cracked specimen (ECT)

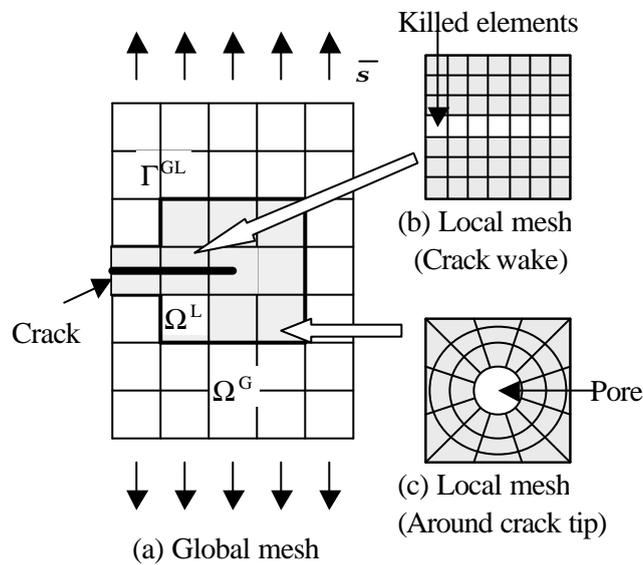


Fig.4-4 Illustration Overlaying mesh

ここで、グローバルメッシュにおける亀裂経路は、損傷要素(Damaged element)として扱い、損傷パラメータ d ¹⁹⁾ を含む次式で表現した。

$$E_d^G = (1-d)E^G \quad \text{at crack wake in global mesh} \quad (4-16)$$

また、ローカルメッシュにおける亀裂経路は、Padovan¹⁵⁾ による欠陥要素(Killed elements)を用い表現した。

$$E_k^L = 0 \quad \text{at crack wake in local mesh} \quad (4-17)$$

また、亀裂先端に特異要素²⁰⁾ (Singular element)を含むテンプレート^{15,17)}から算出した応力拡大係数 K_I を、次式のように無次元化した。

$$K_I^* = \frac{K_I}{\bar{S}\sqrt{pa}} \quad (4-18)$$

なお、本解析は上記のような無次元応力拡大係数で議論しており、異種材料が存在する微視構造を評価するにあたり、基質と異種材料とのヤング率の比($E_i/E, E_c/E$)をパラメータとして用いた。

4-3-2 モデルの検証

解析に先立ち本モデルの妥当性を検証した。Fig.4-3 の片側亀裂における引張りを対象とし、亀裂先端に Fig.4-5(a)に示すローカルメッシュ(縦 21×横 21)を配置した。Fig.4-5(b)に亀裂長さ a/w と応力拡大係数 K_I^* の関係を示す。曲線及びプロットはそれぞれ解析解²¹⁾と本モデルによる計算結果を示し、両者は良好に一致することを確認した。また、重合メッシュ解析では、試料幅と気孔やイナート等の微視構造のスケール比が重要であるが、実際の塊コークスにおけるスケール比は十分小さく、解析結果に影響しないことを確認している。

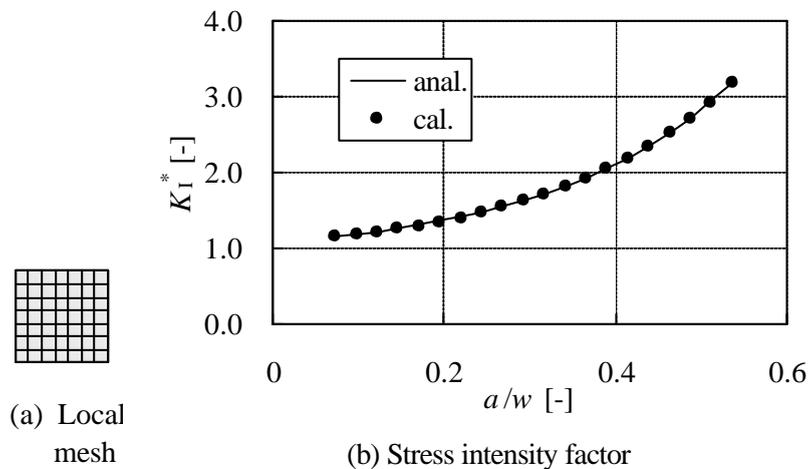


Fig.4-5 Effect of crack length on K_I^*

4-3-3 解析例

Fig.4-6 に解析例として亀裂長さ $a/w=0.25$ 、気孔率 $e=0.20$ における応力分布を示す。まず、以上の定式化から(a)グローバル解析、(b)ローカル解析の両方を同時に行う。次に、ローカル領域の亀裂先端にテンプレートメッシュ^{15,17)}を配置し、ローカル解析の変位を境界条件として、(c)亀裂先端での応力分布及び変位を正確に求める。このテンプレートの特異要素における特異点(1~5)の変位から応力拡大係数を算出する。

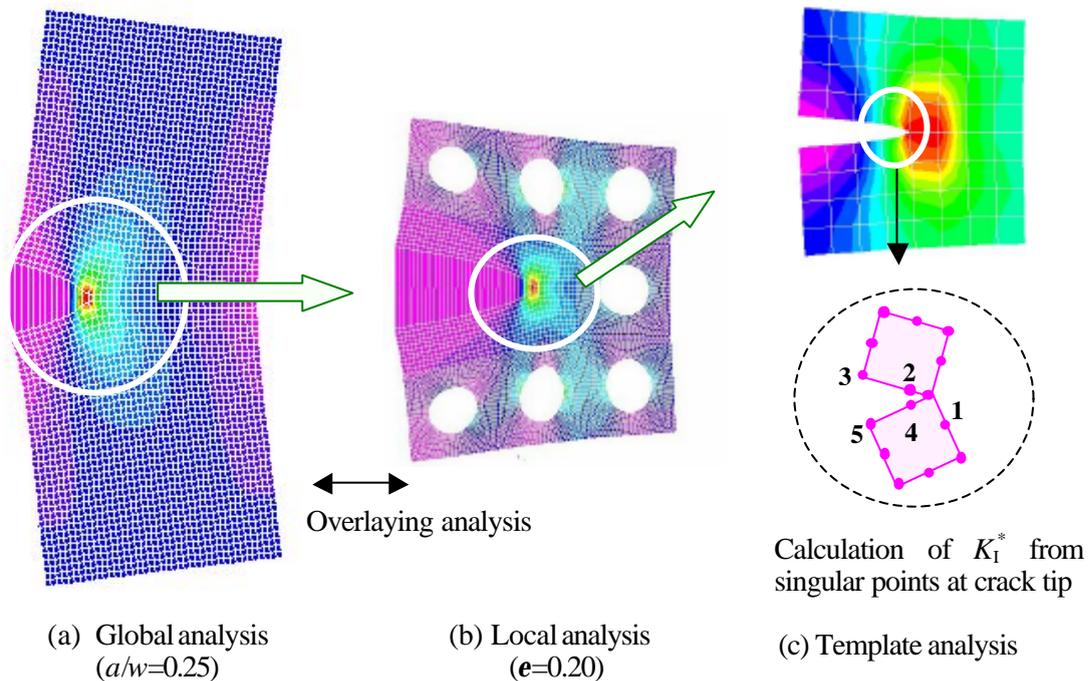


Fig.4-6 Illustration of this analysis

4-4 結果と考察

本節では、気孔率、気孔形状、イナート及びデポジットカーボン等の微視構造を表現したローカルメッシュを配置し、これらが巨視亀裂に及ぼす影響について、亀裂先端での応力集中の指標である応力拡大係数を用い検討した。この解析結果から、コークスの体積破壊のメカニズムをこれらの微視構造から考察する。

4-4-1 気孔が応力拡大係数に及ぼす影響

(a) 気孔率の影響

亀裂先端に Fig.4-7(a)のように中心に気孔があり、その気孔率 e のローカルメッシュ(縦 21×横 21×径 11)を配置し応力拡大係数 K_I^* の解析を行った。Fig.4-7(b)が示すように、気孔率の増加とともに応力拡大係数は減少する。これは気孔率が増加、つまり、気孔径が増加するため気孔周囲での引張応力が大きくなり、亀裂先端近傍における応力集中を緩和するためである。応力拡大係数の減少は亀裂進展が抑制されることを意味する。Fig.4-8 に気孔率(a) $e=0.20$, (b) $e=0.40$ における亀裂先端での応力分布を示す。この応力分布からも、気孔率増大による応力の緩和効果が示され、気孔率が大きくなるほど、亀裂先端で緩和された応力が各気孔壁に集中し、その気孔壁からの破壊が生じやすくなることを示している。なお、気孔率 e と応力拡大係数 K_I^* の間には次式で示すように負の傾き($C<0$)を持つ線形の関係が得られた。

$$K_I^* = B(1 + Ce) \quad (4-19)$$

Fig.4-9 に亀裂長さ a/w に対する B 、 C の関係について示す。 $e = 0$ の時の K_I^* である B は、Fig.4-5 と一致しており亀裂長さとともに大きくなるが、 C は亀裂長さに依存せず一定となり、今回の気孔形状が円の場合、 $C \approx -0.75$ が得られた。なお、解析対象であるコークスは脆性材料であり、塑性領域がリガメントの長さ(試料幅から亀裂長さを引いた長さ)に比べ十分小さいと仮定している。

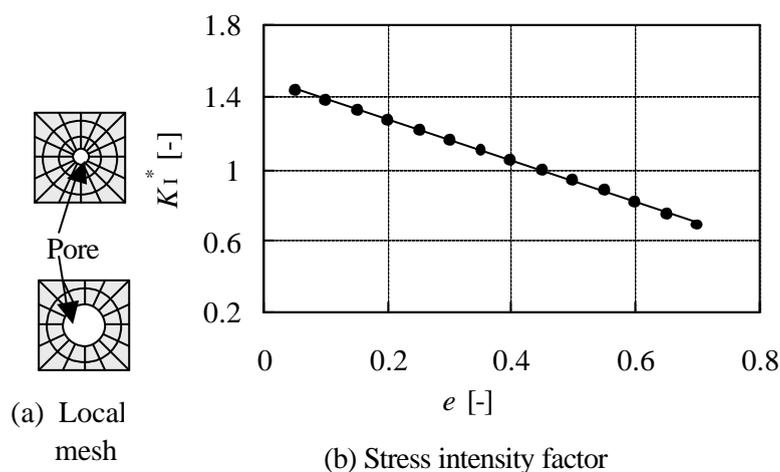


Fig.4-7 Effect of porosity on K_I^*

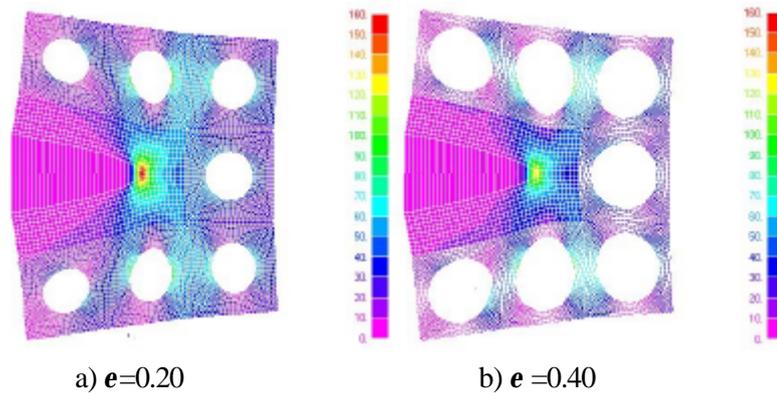


Fig.4-8 Stress distribution around crack tip

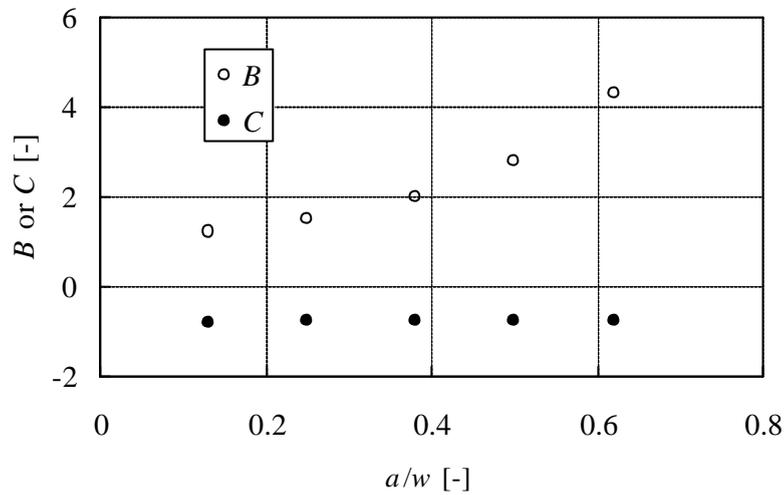


Fig.4-9 Effect of crack length on B or C

(b) 気孔形状の影響

亀裂先端に Fig.4-10(a)のように中心に同じ気孔幅(x 一定)で扁平率の異なる ($y/x=0.1(e=0.020)$, $0.5(e=0.098)$, $0.7(e=0.14)$, $0.9(e=0.18)$)楕円気孔を含むローカルメッシュ(縦 $21 \times$ 横 $21 \times$ 径 11)を配置し、亀裂に対して異なる気孔方向 q で応力拡大係数 K_I^* の解析を行った。Fig.4-10(b)に示すように、楕円気孔が亀裂に対して垂直に配置された場合($q=90$)、亀裂がより大きく垂直方向に引っ張られるため、より主亀裂先端で応力が集中すると考えられる。また、気孔方向 $q=0, 90 \text{ deg.}$ における値の差 ΔK_I^* は扁平率の小さい方が大きくなることから、気孔形状が応力緩和現象に大きく影響を与えることがわかる。そこで、以下で気孔形状に関する詳細な検討を行う。

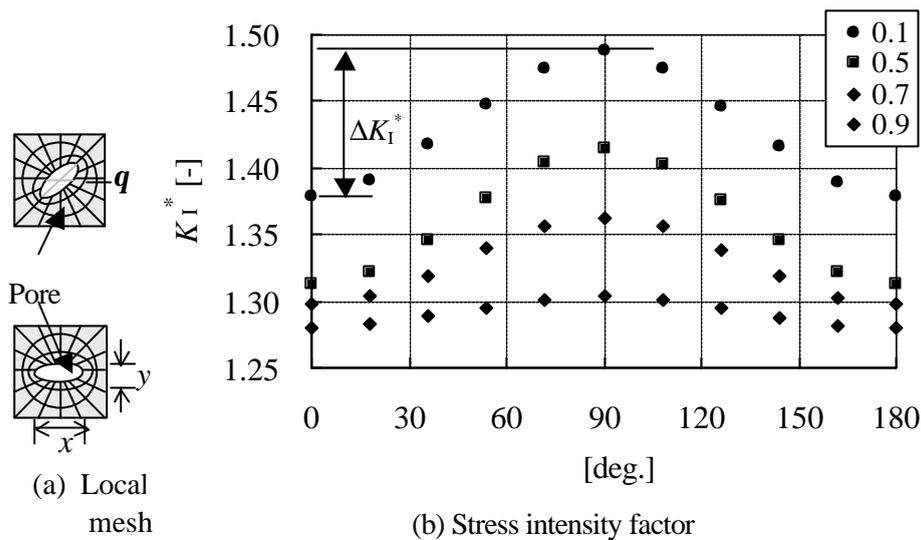
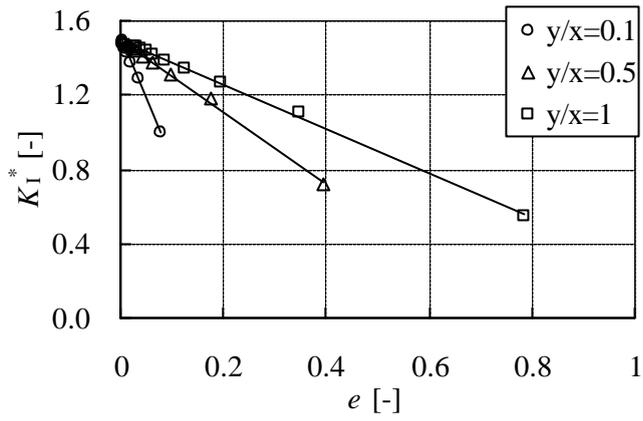
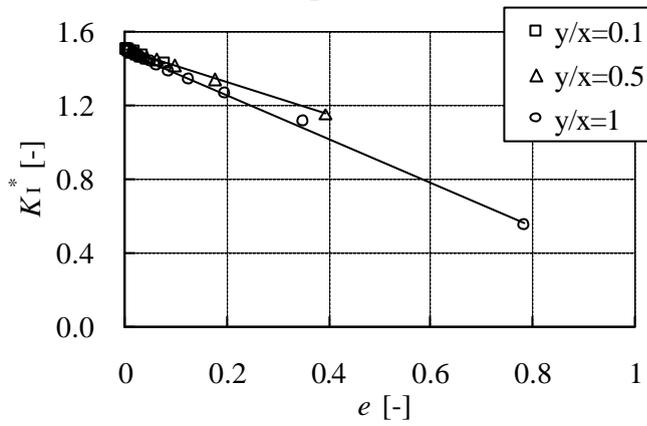


Fig.4-10 Effect of ellipse pore orientation of on K_I^*

Fig.4-11 に異なる楕円気孔の扁平率 y/x で、気孔率 e と応力拡大係数 K_I^* の関係を、それぞれ気孔方向 (a) $q = 90$ 、(b) $q = 0$ deg. の場合について示す。ここで、扁平率 y/x が小さい場合は、楕円気孔は微視亀裂に相当する。すべての条件において式(4-19)で示すように負の傾きをもつ線形の関係を得た。 $q = 90$ deg. の場合、扁平率 y/x が小さいほど負の傾き C は小さくなり、針状気孔となるほど気孔率依存度が大きく、曲率半径のより小さい気孔先端で応力集中を引き起こすため、亀裂先端での応力を緩和することを示している。Fig.4-12 にそれぞれの楕円気孔の扁平率 y/x に対して式(4-19)から得られる C をプロットした。この時 C は Fig.4-9 と同様に亀裂長さ a/w に依存しないことを確認した。扁平率が小さくなると気孔率依存度である絶対値 C は大きくなり、このことから、特定の扁平率、気孔方向 q に対して C を得る。Kimura ら²²⁾の多孔黒鉛の針状気孔及び矩形気孔に関する実験結果 $C = -1.9, -1.4$ と比較すると、気孔の曲率が小さくなると C は小さくなっており、本解析の結果は妥当であるといえる。よって、この C が品質評価の指標となる可能性を示唆している。また、扁平率の小さい場合は微視亀裂に相当するが、この時、 C の値は $-4.3 \sim -0.7$ と幅があり、主亀裂に対する配向性が重要であることを示している。



(a) $q = 0$ deg.



(b) $q = 90$ deg.

Fig.4-11 Effect of ellipse pore porosity on K_I^*

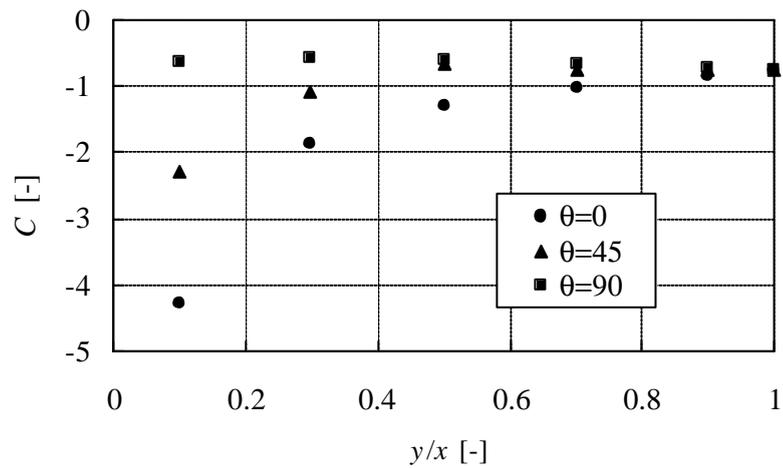


Fig.4-12 Relation between C and oblateness of pore

(c) 気孔数密度の影響

亀裂先端に Fig.4-13(a)のような気孔率が一定($e = 0.20$)で 1 セルあたりの気孔数密度 (n)の異なるローカルメッシュを配置し応力拡大係数 K_I^* の解析を行った。Fig.4-13(b)が示すように、気孔が等間隔に配置され気孔率が一定ならば、今回のスケール比においては気孔数密度に対して応力拡大係数の影響は少ないことがわかる。

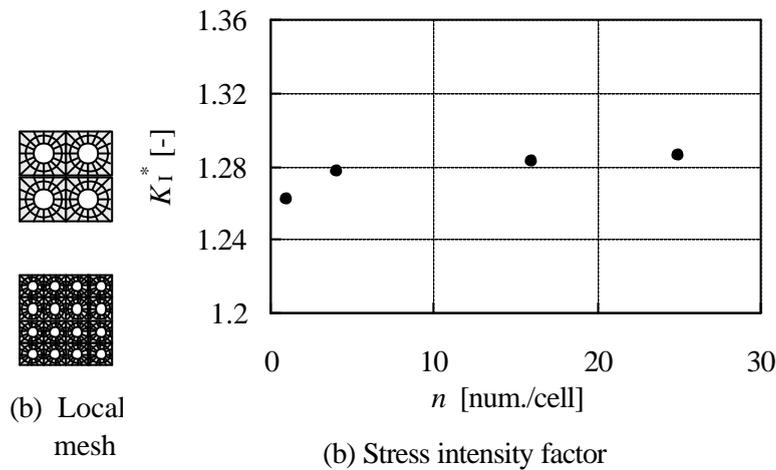


Fig.4-13 Effect of pore number density on K_I^*

(d) 気孔からの破壊の検討

コークスのような複雑な微視構造を解析するにあたり、重要となってくるのが、破壊が亀裂、気孔壁のどちらから起きるかである。そこで、Fig.4-14(a)のようにローカルメッシュの気孔壁に微小な亀裂を配置し、その応力拡大係数を求めた。Fig.4-14(b)に、(c)の応力分布中の各場所 1~4 における応力拡大係数を示す。気孔率が大きくなったとしても、気孔壁では主亀裂より応力拡大係数は大きくなりえないことがわかる。これは、今回の気孔径では、気孔壁から破壊が亀裂より起こりにくいことを意味する。Fig.4-14(c)に気孔率 $e=0.20$ での応力分布を示す。応力拡大係数の比較と同様に、気孔壁では主亀裂ほどの応力集中はみられない。

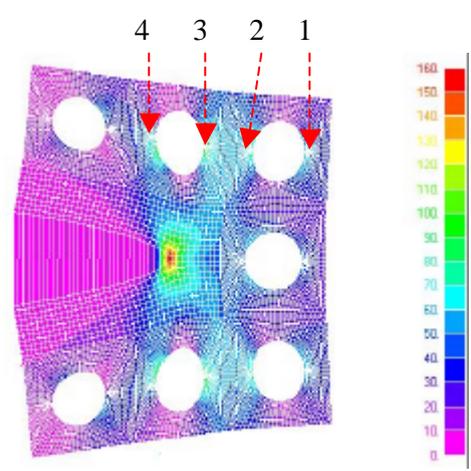
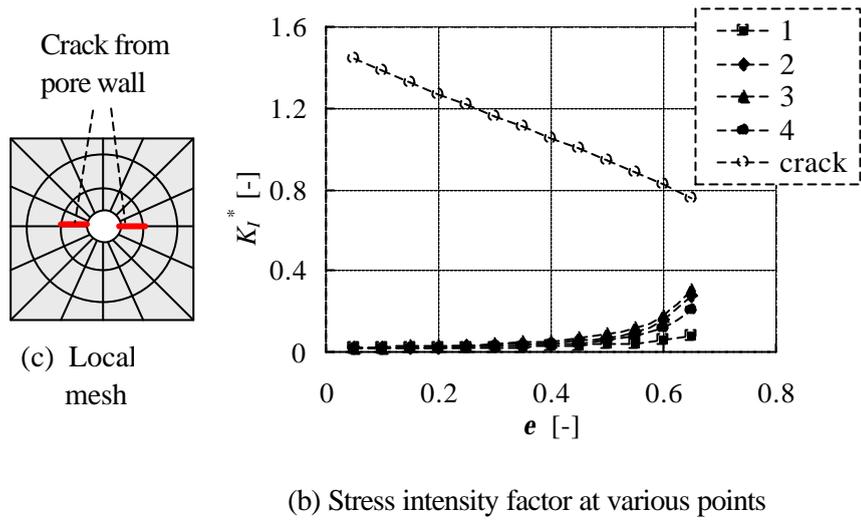
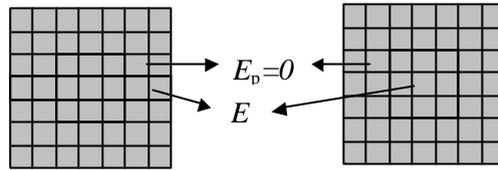


Fig.4-14 Effect of both porosity and inert ratio on K_I^*

(e) 連結気孔の検討

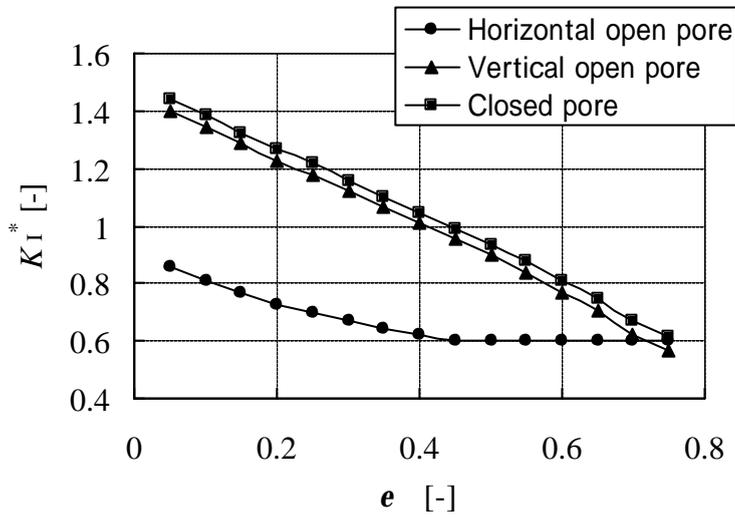
コークスの気孔の種類には、乾留条件や炭種によって、閉気孔や開気孔が存在する。また、開気孔が複数連結する場合は内部亀裂と考えることもできる。そこで、これらの影響を調べるために、Fig.4-15(a)に示すようなデジタルイメージメッシュを用いた。このメッシュを亀裂に対し、水平及び垂直に配置することによって(c)、応力拡大係数に及ぼす影響を検討した。Fig.4-15(b)に閉気孔及び開気孔における応力拡大係数を示す。亀裂に対して、垂直に開気孔が配置された場合は、閉気孔と同様の性質を示す。一方、水平に配置された場合は、その開気孔の両側に応力が集中するため、亀裂先端での応力は大きく緩和される。Fig.4-15(c) に気孔率 $e=0.20$ での応力分布を示す。(b)と同様に亀裂に対して水平な開気孔が亀裂先端で応力の緩和を引き起こすが、その開気孔の両側で応力集中を引き起こし、

開気孔の大きさ、つまり、気孔が連結する数によっては破壊を引き起こす可能性があることを示している。なお、開気孔が亀裂に対して垂直な場合は応力の緩和は小さい。

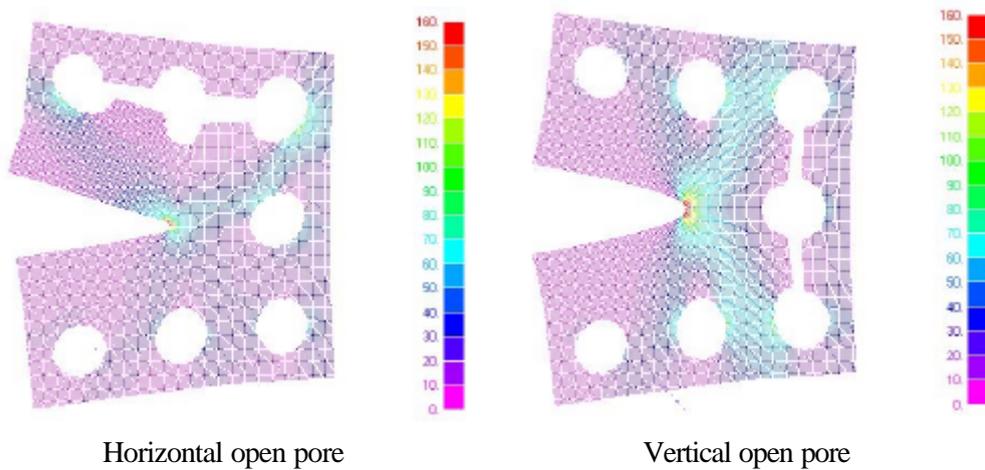


Horizontal open pore Vertical open pore

(a) Local mesh



(b) Stress intensity factor



Horizontal open pore Vertical open pore

(c) Stress distribution ($e=0.20$)

Fig.4-15 Effect of open pore on stress intensity factor

4-4-2 イナートが応力拡大係数に及ぼす影響

(a) イナート面積の影響

亀裂先端に Fig.4-16(a)のような中心にイナートを想定したヤング率(E_i)の領域をその外側に基質を想定したヤング率(E)の領域を含むローカルメッシュ(縦 21×横 21×径 11)を配置し、異なるイナート面積率 h_i で応力拡大係数 K_I^* の解析を行った。Fig.4-16(b)に示すように、基質とのヤング率比 $E_i/E = 10$ の場合、イナート面積率が上昇するとヤング率の大きい物質があるため、亀裂に対し垂直方向へより強く引っ張られ応力が集中すると考えられる。Fig.4-17 にそれぞれのイナート面積率(a) $h_i=0.0079$, (b) $h_i=0.20$ における応力分布を示す。イナート面積率が大きくなるとより応力が亀裂先端で集中するとともに、亀裂先端での歪みが増大するため、応力の大きい部分が引っ張られる上下方向に対して広がる。なお、Fig.4-7(b)における気孔率の影響の場合とは逆に、イナート面積率 h_i と応力拡大係数 K_I^* の関係は次式で示すように正の傾きを持つ($C_i>0$)線形の関係が得られた。

$$K_I^* = B_i(1 + C_i h_i) \quad (4-20)$$

ここで C_i は気孔率の場合と同様に亀裂長さ a/w に依存せず、 B_i は $h_i = 0$ での解析解(Fig.4-5)と一致することを確認し、Fig.4-18 に基質とのヤング率比 E_i/E に対して C_i をそれぞれプロットした。本結果はイナートと基質のヤング率比に対して特定の C_i が得られることを示しており、この C_i が品質評価の指標となる可能性が考えられる。 $E_i/E = 0$ の時、 $C_i = -0.75$ となり、Fig.4-9 の円気孔の場合と一致している。なお、 $E_i/E = 1$ 以上では C_i は 0 以上となり、応力集中効果を、 $E_i/E = 1$ 以下では応力緩和効果を示す。しかし、実際のヤング率比 E_i/E はナノインデンテーション法により 1.1 程度²³⁾で C_i は 0.027 となり、イナートを含む微視構造が亀裂先端に及ぼす影響は気孔形状($C = -0.75$)よりは少ないと考えられる。

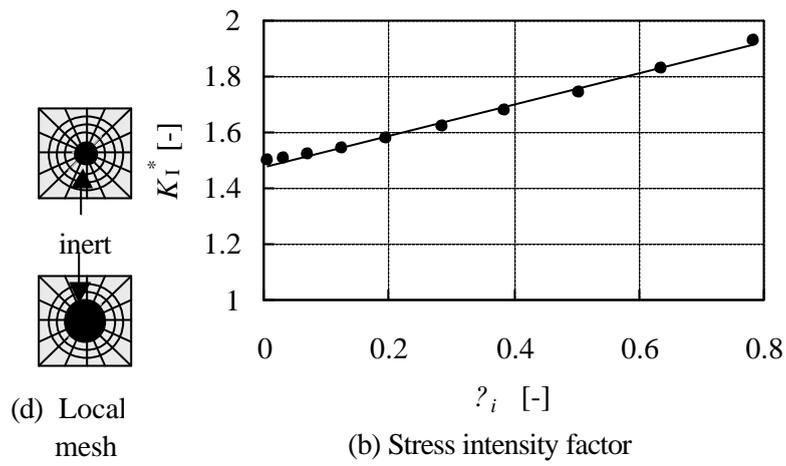


Fig.4.16 Effect of inert area on K_I^*

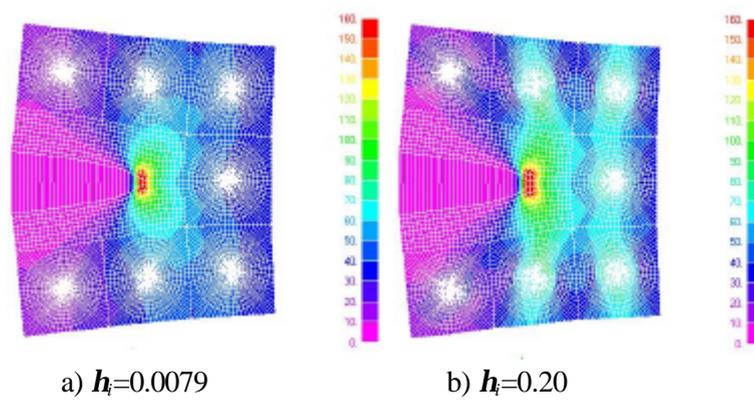


Fig.4.17 Stress distribution around crack tip

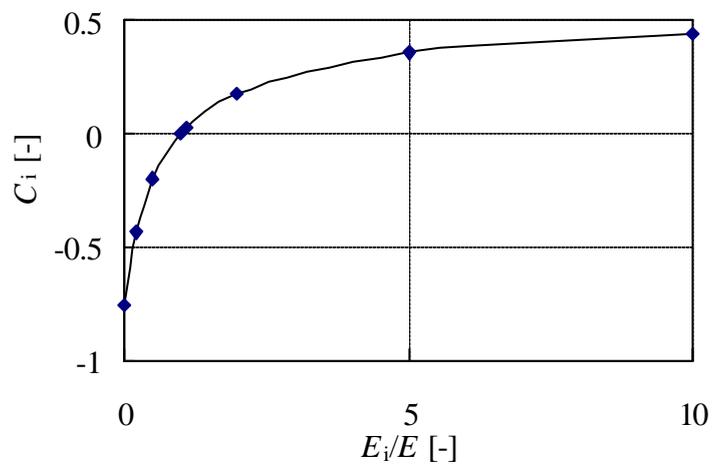
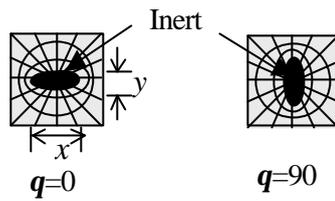


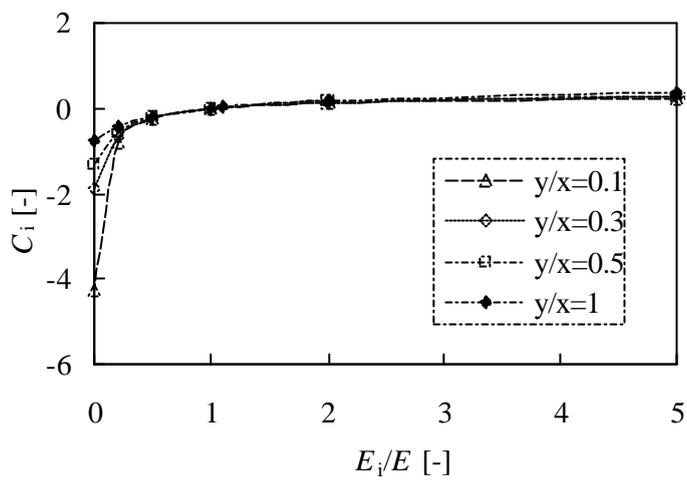
Fig.4-18 Relation between C_i and E_i/E

(b) イナート形状の影響

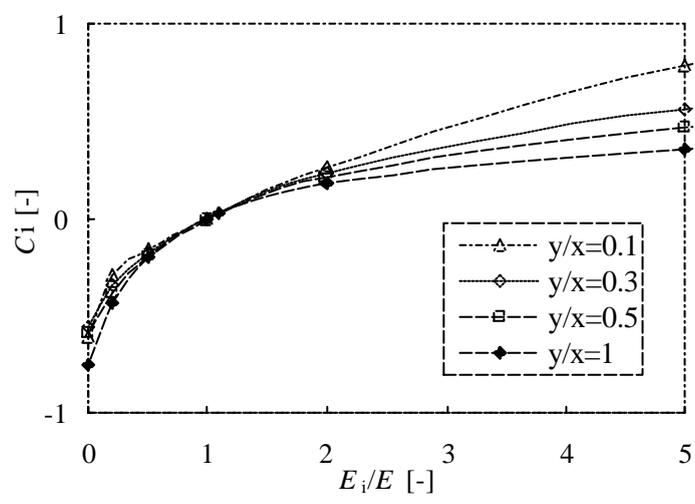
Fig.4-11 の気孔形状の場合と同様に、Fig.4-19(a)のような楕円状のイナートを用い、その縦横比($y/x = 0.1, 0.3, 0.5, 1$)、亀裂に対する方向($q=0, 90 \text{ deg.}$)及びヤング率比(E_i/E)を変更して、応力拡大係数の算出を行った。すべてのイナート面積に対して、式(4-20)で表される線形の関係式が得られた。それぞれ $q=0, 90 \text{ deg.}$ の結果を Fig.4-19(b), (c)に示す。ヤング率比 $E_i/E = 0$ の時、気孔の条件であり Fig.4-12 の結果と一致している。亀裂に対して平行に配置された場合($q=0 \text{ deg.}$)、 E_i/E が 1 以下で 0 に近い方が、よりイナートの形状(y/x)の影響 (C_i の絶対値)が大きくなる。一方、亀裂に対して垂直に配置された場合($q=90$)、 E_i/E が 1 より大きくなるほど、イナート形状(y/x)の影響は大きくなる。しかし、実際のヤング率比 E_i/E はナノインデンテーション法により求められた 1.1 程度²³⁾であり、この付近ではイナート形状(y/x)が C_i に与える影響はほとんどない。また、イナート形状は炭種や操業条件に対して制御できないことから、以下の解析では円形状のイナートとして解析を行う。



(b) Local mesh



(b) Relation between C and oblateness of inert ($q=0$)



(c) Relation between C and oblateness of inert ($q=90$)

Fig.4-19 Effect of inert shape

(c) イナート数密度の影響

亀裂先端に Fig.4-20(a)のようなイナート面積率が一定($h_i = 0.20$) でイナート数密度の異なるローカルメッシュを配置し応力拡大係数 K_I^* の解析を行った。Fig.4-20(b)が示すように、イナートが等間隔に配置されイナート面積率が一定ならば、今回のスケール比において、イナート数密度に対して応力拡大係数の影響は少ないことがわかる。しかし、イナート数密度つまりイナート間距離は、石炭軟化溶融過程の流動性と関連しコークス組織に影響を及ぼすことが考えられ更なる検討が必要である。

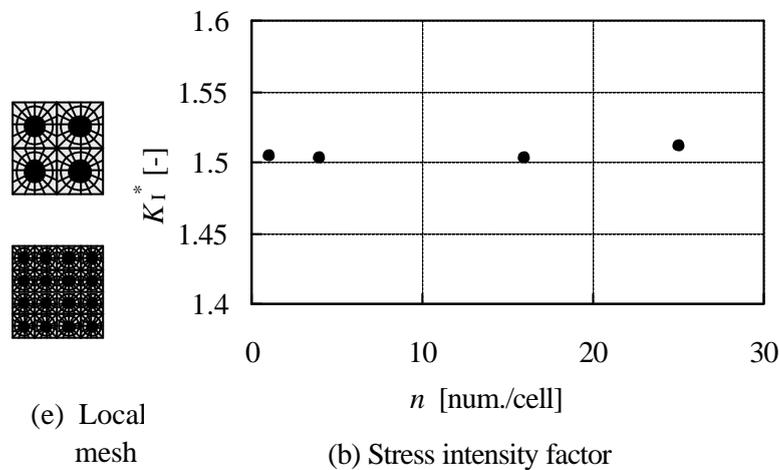


Fig.4-20 Effect of inert number density on K_I^*

(d) 界面剥離現象の検討

イナートと基質の異種界面は、接着強度の低下や弾性率の違いからの歪みの差によって剥離現象を引き起こすことが考えられる。そこで、Fig.4-21(a)のように異種界面に損傷要素を配置し、式(4-16)を用いて剥離現象を表現した。Fig.4-21(b)に各損傷パラメータに関する応力拡大係数について示す。接着強度が大きい場合、つまり、損傷パラメータ $d=0$ の場合は正の傾きになり応力集中効果を示すが、損傷パラメータが大きくなるにつれて負の傾きとなり応力緩和効果を示す。しかし、ナノインデンテーション法により接着強度が十分であることが測定されており²³⁾、イナートと基質間の界面剥離を考慮する必要はないと思われる。

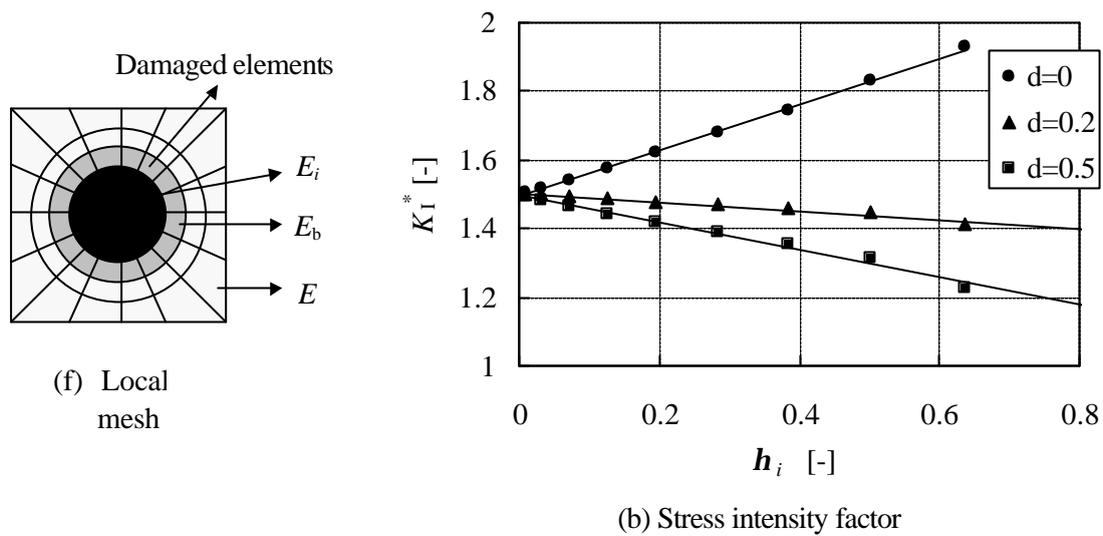


Fig.4-21 Effect of abrasion between inert and substrate

4-4-3 気孔とイナート両方が応力拡大係数に及ぼす影響

亀裂先端に Fig.4-22(a)のような気孔を想定したメッシュとイナートを想定したメッシュ ($E_i/E = 10$)を両方含むローカルメッシュを配置し、異なるイナート面積率 h_i で気孔率 $e = 0, 0.2, 0.3$ の時の応力拡大係数 K_I^* の解析を行った。Fig.4-22(b)にそれぞれのメッシュを配置した場合の解及び式(4-19), (4-20)から得られたパラメータ $B (B_i)$, C , C_i を含む次式からの値を示す。

$$K_I^* = B(1 + Ce + C_i h_i) \quad (4-21)$$

両者は良好に一致し、気孔とイナートが混在した場合でも式(4-21)で品質評価ができる可能性があることを示している。

今後のさらに本解析によるコークス品質評価を検証するために、本解析のようなコークス微視構造を簡略化したメッシュではなく、直接コークス顕微鏡画像からの微視構造を考慮した解析が必要である。

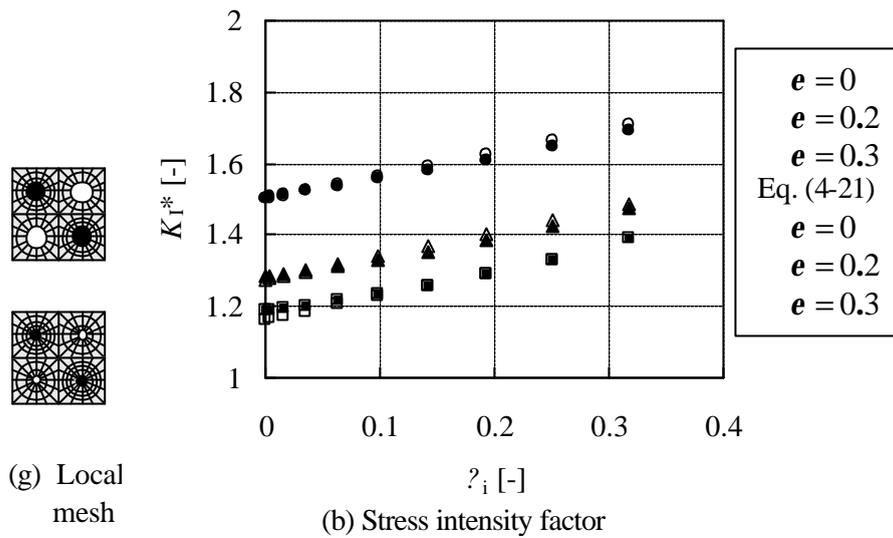


Fig.4-22 Effect of both porosity and inert ratio on K_{I^*}

4-4-4 デポジットカーボンが応力拡大係数に及ぼす影響

亀裂先端に Fig. 4-23(a)のように中心に気孔がありその周囲にデポジットカーボンを想定したヤング率(E_c)の領域を、さらにその外側に基質を想定したヤング率(E)の領域を含むローカルメッシュ(縦 21×横 21×径 11)を配置し、異なるデポジットカーボン面積率 h_c で応力拡大係数 K_{I^*} の解析を行った。Fig.4-23(b) に示すように、気孔率 $e = 0.20$ 、基質とデポジットカーボンのヤング率比 $E_c/E = 0.71$ の場合、デポジットカーボン面積率が上昇すると基質に替わりよりヤング率の小さい物質が付着することから、気孔周辺のデポジットカーボンに応力が集中するため、亀裂先端での応力集中が緩和される。なお、ここで用いたヤング率比 $E_c/E = 0.71$ はナノインデンテーション²³⁾による測定結果を用いた。また、デポジットカーボンが付着した場合、気孔率の減少や気孔形状のスミージング等の効果も考えられ、Fig. 4-7, 4-11 で示したように、これらはいずれも亀裂近傍での応力集中を引き起こす。しかし、Fig. 4-7, 4-11 と Fig. 4-23 の傾き C を比較する限り、より気孔率の減少や気孔形状のスミージングの影響が大きいと思われ、亀裂での応力集中を引き起こすと考えられる。

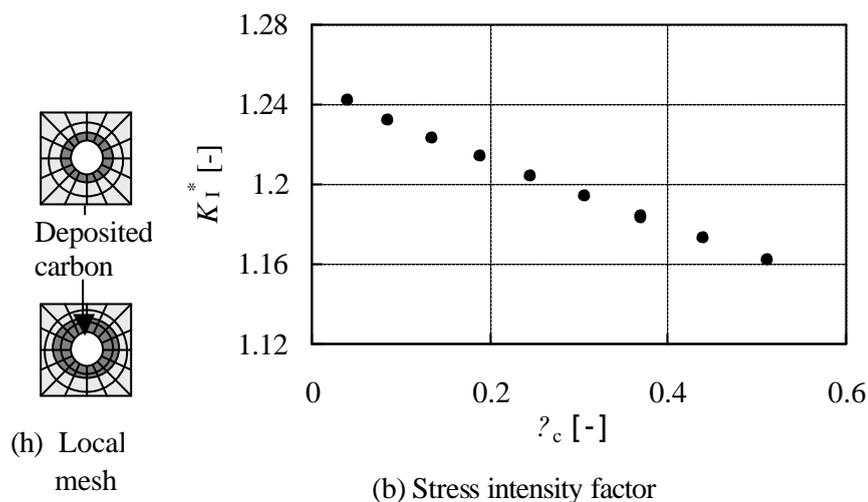


Fig.4-23 Effect of deposit carbon ratio on K_{I^*}

4-5 結言

重合メッシュ法を用いて、気孔、イナート、デポジットカーボン等の微視構造が亀裂に及ぼす影響を応力拡大係数から評価した。

気孔に関して、気孔率、気孔形状が応力拡大係数に及ぼす影響を検討し、気孔率と応力拡大係数の関係は式(4-19)で表され、得られた C は気孔形状によって決定され、品質評価の指標となる可能性を示した。この時、気孔の数密度は、応力拡大係数に影響しないことを示した。さらに、気孔壁からの破壊を検討し、閉気孔であれば、気孔壁からの破壊が起こりにくいことを示した。

イナートに関して、イナート面積率、イナート形状が応力拡大係数に及ぼす影響を検討した。面積率との関係は式(4-20)で表され、基質とイナートとのヤング率比やイナート形状に依存する C_i が得られる。しかし、実際のヤング率が 1.1 程度であることから、イナートが亀裂先端での応力集中に及ぼす影響は少ないことを明らかにした。また、イナートの数密度が応力拡大係数に及ぼす影響は少ないことを示した。さらに、イナートと基質の剥離現象についても検討し、その接着の度合いを損傷パラメータによって表現し、その剥離現象が亀裂の応力集中に及ぼす影響を検討することができた。

気孔及びイナートが混在した場合において応力拡大係数を評価する時、式(4-19)、(4-20)を考慮した式(4-21)を用いることが有効である。

デポジットカーボンが応力拡大係数に及ぼす影響を検討し、デポジットカーボンの付着により、亀裂での応力集中を促進することを示した。

Nomenclature

$\mathbf{0}$:	zero vector	[-]
a :	crack length	[m]
\mathbf{B} :	strain matrix	[-]
B :	dimensionless stress intensity factor at $\mathbf{e} = 0$	[-]
B_i :	dimensionless stress intensity factor at $\mathbf{h}_i = 0$	[-]
\mathbf{b} :	body force vector	
C :	parameter in Eq. (18)	[-]
C_i :	parameter in Eq. (19)	[-]
\mathbf{e} :	strain vector	[-]
d :	damage parameter	[-]
\mathbf{E} :	stress-strain matrix	[Pa]
E :	elastic constant	[Pa]
K_1^* :	dimensionless stress intensity factor	[-]
\mathbf{K} :	stiffness matrix	
K_I :	stress intensity factor	[Pa m ^{1/2}]
N :	shape function	
n :	number density	[-]
\mathbf{t} :	traction vector	
\mathbf{u} :	displacement vector	[m]
$\bar{\mathbf{u}}$:	nodal displacement vector	[m]
w :	width of specimen	[m]
x :	horizontal length of ellipsoidal pore	[m]
y :	vertical length of ellipsoidal pore	[m]

<i>e</i> :	porosity	[-]
<i>G</i> :	boundary	
<i>h</i> :	inert or carbon deposits area ratio	[-]
<i>n</i> :	Poisson's ratio	[-]
<i>q</i> :	orientation of ellipsoidal pore	[deg.]
\bar{S} :	tensile stress	[Pa]
<i>W</i> :	domain	

Superscripts

<i>c</i> :	deposited carbon
<i>d</i> :	damaged element
<i>G</i> :	global domain
<i>i</i> :	inert
<i>k</i> :	killed element
<i>L</i> :	local domain
<i>T</i> :	transposed matrix