

## 5章 均質化法によるコークス強度発現機構の解明

### 5-1 序

高炉における微粉炭吹き込み(PCI: Pulverized Coal Injection)は、CO<sub>2</sub>削減やコークス炉の劣化に対応し、総コークス量を減らす目的として行われている。しかし、PCIの増加は、レースウェイや高炉下部においてコークス粒子間の衝突による劣化を引き起こす。そこで、その劣化による高炉内の通液・通気性の減少が安定操業を阻害するため、要求される品質としてコークスの粒度や機械強度が重要な因子となる。つまり、粒度や強度の向上によって、高炉操業がスムーズになり、高い生産性からエネルギー消費量を減らすことが可能となる。

コークス製造プロセスに関して、コークス品質の向上を目的とした粒度や機械強度の評価法の確立は、微視構造の複雑さやスケール間の相関を得る困難さにより、現状では解決に至っていない。しかし、コークスの強度に関する特徴は微視構造に影響されるため、解析による微視挙動を考慮することが、コークスの評価に関して求められている。さらに、微視気孔、微視亀裂間の応力集中によるコークスの破壊挙動は粒度や機械強度に関して重要である。そこで、高炉においてコークスの体積破壊や磨耗を防ぐために、気孔率や気孔形状<sup>1)</sup>、イナート(不活性物質)、デポジットカーボン<sup>2)</sup>等の複雑な微視構造を評価しなければならない。現在のところ、これらの微視構造が粒度、強度に及ぼす影響に関して検討した基礎研究は少ない。最近、微視構造と巨視構造を同時に評価可能な均質化法<sup>3)</sup>を用いて、コークスの破壊メカニズムの解明に関する研究が始められている。

現在、均質化法を用いる問題点として、コークスの微視気孔や亀裂等の微視構造を単純に扱いきれていることがあげられる。そこで、デローニ三角分割<sup>4-6)</sup>及びデジタルイメージ<sup>7)</sup>を用いて、複雑な微視構造に対してより厳密な評価を試みた。これにより従来得られなかった、微視気孔や亀裂を含む場合の応力緩和や集中効果を表現することが可能になると考えた。

さらに、コークスの微視構造に関して均質化法の有効性を検証するために、カーボンデポジットコークスの強度向上の効果に対して解析を試みた。しかし、コークス炉における現象の1つであるデポジットカーボンの付着がコークス強度に及ぼす影響は明らかにされていない。そこで、デジタルイメージを用いた均質化法によって、微視構造の評価から強度向上のメカニズムを定量的に解明する。

## 5-2 均質化法

4章では巨視破壊が微視構造に影響されることを示したが、本章では、微視構造の応力発生から微視亀裂に至るまでの過程を詳細に検討する。Fig.5-1 に示すように、材料に気孔や異種材料が存在すると必ず、応力分布が発生する。その応力が破壊条件に至ると破壊が進行して微視亀裂となり、亀裂伝播し、巨視亀裂に成長する。この破壊条件を検討するためには、複雑な微視構造を考慮し応力分布を詳細に検討する必要があるため、マルチスケール解析の中でも均質化法を用いた。以下で、均質化法を用いる利点や定式化について述べる。

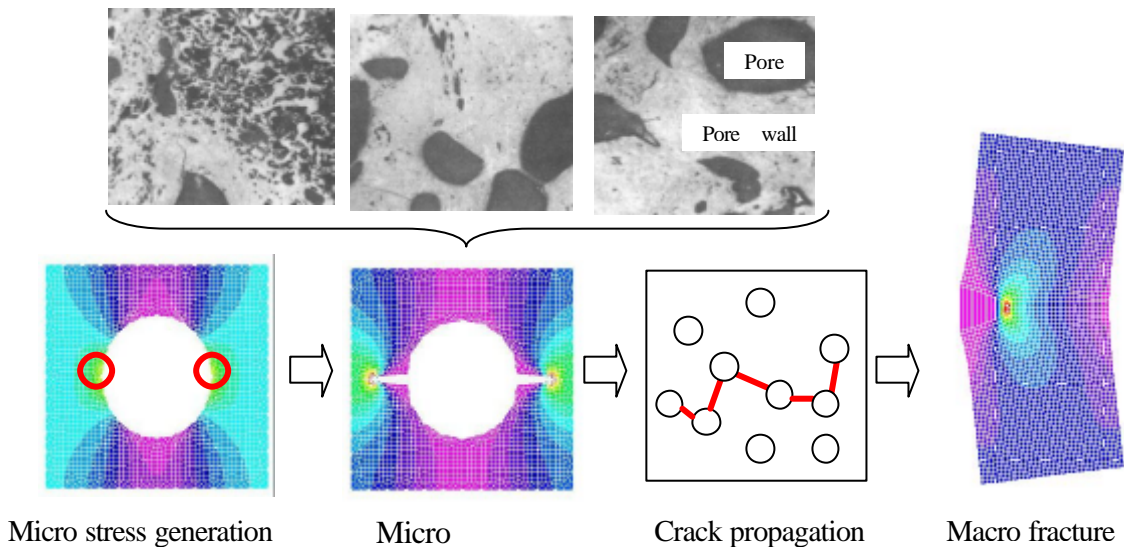


Fig.5-1 Mechanism of micro fracture

### 5-2-1 コークスへの均質化法の適用

現在、機械的挙動の数値解析は、コンピュータ技術の発達によって急速に進歩している。主な目的は巨視構造に関して行われており、一般に、巨視構造と不均一な微視構造の相関は困難なため、巨視の特性は均質であるとして扱われる。しかし、微視挙動の理解の重要性から、微視の複合材料の力学に対して、均質化法が巨視、微視の結合問題を解くための理論的かつ数学的な技術として注目を浴びている。

均質化法の長所の1つは力学理論であり、巨視と微視のスケール間の相関を反映できる点にある。コークスのような複合材を解析するために、その相関を考慮しなければならない

い。実際の材料の微視構造は、巨視物性値として巨視構造に影響する。この時、巨視領域を均一場として扱うことによる困難な点は、微視領域における破壊判定、つまり、微視亀裂が進展するかどうかである。そこで、脆性材料に対して正確に微視の破壊に対応することが可能である均質化法を用いた。実際、コークスのような材料では、多くの微視亀裂や気孔が微視レベルで存在するため、それらが破壊するかどうか、破壊判定条件として考慮されなければならない。この均質化法を用いることによって、微視レベルの応力分布から破壊条件を評価する。

一般に、材料中で微視の空隙や亀裂進展は、それらの合体や成長によって損傷や破壊を引き起こす。さらに、これらの微視の空隙は巨視亀裂の生成や最終的な破壊だけでなく、強度や剛性、靱性の減少を引き起こす。微視の空隙の力学的挙動は、損傷力学では連続体として扱われるため<sup>10)</sup>、微視領域における詳細な損傷条件を考慮せずにすべての空隙を平均化させ、広範囲な巨視の領域を解析する。そこで、微視領域において気孔や亀裂、不活性物質を含むコークスのような複合材料に対して、損傷力学の応用が有効である。

また、微視亀裂がコークスのような複合材料で存在するとき、その分布状態によっては、それらの亀裂が相互干渉を引き起こす。これらの微視的干渉挙動を十分に考慮した解析が必要である。具体的には、巨視の亀裂の前方では、微視亀裂が生じ、'process zone'と呼ばれる<sup>11)</sup>。結果として、その領域において微視亀裂の生成により剛性が減少するため、巨視の亀裂は制御される。この効果は'crack tip shielding'と呼ばれる<sup>11)</sup>。従って、微視における亀裂同士の相互作用、つまり、応力分布は大変重要である。

上記のように、損傷力学を用いながら、微視の相互作用を評価できる手法として、均質化法が注目を浴びており、さまざまな形状や大きさをもつ実際のコークスの解析に対して適用を試みられている。最近の解析では、有限要素メッシュの複雑さからコークス微視構造を単純な微視亀裂群<sup>12)</sup>として解析を行っているため、詳細な破壊のメカニズムまでは明らかになっていなかった。そこで、デローニ三角分割<sup>4,6)</sup>及びデジタルイメージ<sup>7)</sup>を用いて、複雑な微視構造に対してより厳密な評価を試みる。

### 5-2-2 均質化法の定式化

Fig.5-2 に巨視と微視の関係を示す。それぞれ巨視、微視座標は  $x, y$  で表され、全体の領域  $\Omega$  は微視周期構造  $Y$  の集合体であると仮定する。境界  $\Gamma_i$  において表面力  $t_i$  が作用しているものとする。この時、各領域間での関係はスケール比  $e$  を用いて  $y = x/e$  と表される。

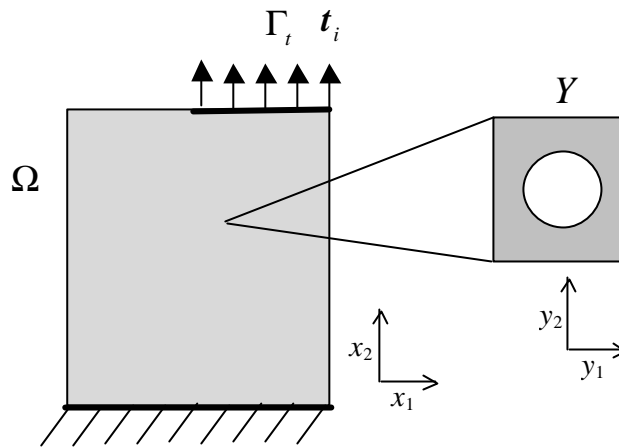


Fig.5-2 Macroscopic region with a microscopic periodic unit cell

また、漸近展開理論を用いると、境界値問題の解  $u_i$  は以下のように表される。

$$u_i = u_i(\mathbf{x}, \mathbf{y}) = u_i^0(\mathbf{x}) + \mathbf{e}u_i^1(\mathbf{x}, \mathbf{y}) + \mathbf{e}^2u_i^2(\mathbf{x}, \mathbf{y})\dots \quad \left( \mathbf{y} = \frac{\mathbf{x}}{\mathbf{e}} \right) \quad (5-1)$$

ここで、 $u_i^0$ 、 $u_i^1$ は巨視変位、微視変位を表す。これは、摂動法を空間的な「乱れ」として応用したものであり、支配方程式の解が2変数( $x, y$ )表示による漸近展開の形で表される。ここで $u_i$ 解はスケール比 $\mathbf{e}$ に関する線形結合の形をとり、各オーダーの乱れの重ね合わせとして定義される。 $u_i^0$ は平均化された変位であり、 $u_i$ は微視構造からの不均一性による乱れによって振動する。実際、スケール比 $\mathbf{e}$ は非常に小さく、 $\mathbf{e}^2$ 以降は無視できる。

また、変分原理を用いることによって、境界値問題における仮想仕事の原理は以下のように表される。

$$\int_{\Omega} E_{ijkl} \frac{\partial u_k}{\partial x_l} \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} d\Omega = \int_{\Gamma_t} t_i \bar{u}_i d\Gamma \quad (5-2)$$

$E_{ijkl}$ は弾性係数ベクトルを表す。また、 $\bar{u}_i$ は重み関数としての仮想変位を表す。今回、体積力は無視し、2次元で扱っている。

次に、平均化原理<sup>3)</sup> (the averaging principle)を用いて、式(5-2)に式(5-1)を代入することに

よって、 $\epsilon \rightarrow 0$  の条件から、微視領域  $Y$  における以下の関係式を得る。

$$\int_Y E_{ijkl} \frac{\partial c_p^{kl}}{\partial y_q} \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial y_j} dY = \int_Y E_{ijkl} \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial y_j} dY \quad (5-3)$$

この式を周期境界条件で解くことになる。ここで、関数  $c_p^{kl}$  は  $y$  の周期関数であり、巨視と微視を結合する特性変位として定義される。これは、幾何学形状や構成組織による不釣合いを反映した微視変位である。つまり、巨視歪みによって、巨視領域と微視領域が結合し、微視変位  $u_i^1$  は特性変位  $c$  を用いて以下のようなになる。

$$u_i^1 = -c_i^{kl}(y) \frac{\partial u_k^0}{\partial x_l} \quad (5-4)$$

この式(5-4)により式(5-3)の唯一の解が、周期境界条件のもとで求まることになる<sup>3)</sup>。

さらに、均質化された巨視領域に対して、弱形式化すると次式を得る。

$$\int_{\Omega} E_{ijkl}^H \frac{\partial u_k}{\partial x_l} \frac{\partial u_i}{\partial x_j} d\Omega = \int_{\Gamma} t_i \bar{u}_i d\Gamma \quad (5-5)$$

$$E_{ijkl}^H = \frac{1}{|Y|} \int_Y \left( E_{ijkl} - E_{ijpq} \frac{\partial c_p^{kl}}{\partial y_q} \right) dY \quad (5-6)$$

ここで、 $|Y|$  は微視領域のユニットセルにおける面積である。また、 $E_{ijkl}^H$  均質化弾性係数テンソルは式(5-6)によって計算される。

最終的に、微視領域の応力分布は以下のようなになる。

$$s_{ij} = \left( E_{ijkl} - E_{ijpq} \frac{\partial c_p^{kl}}{\partial y_q} \right) \frac{\partial u_k^0}{\partial x_l} \quad (5-7)$$

これは、巨視歪み  $\partial u_k^0 / \partial x_l$  と巨視と微視相関式  $\partial c_p^{kl} / \partial y_q$  を結合することを意味している。

ここで、微視応力場の算出に関して、正確な巨視歪みが必要であることがわかる。

次に、式(5-3)に関する偏微分方程式を解くために、有限要素を用いて離散化すると以下

の式が得られる。

$$\left( \int_Y \mathbf{B}^T \mathbf{E} \mathbf{B} dY \right)^{ij} = \int_Y \mathbf{B}^T E^{ij} dY \quad (5-8)$$

ここで、 $E, B$  はそれぞれ微視領域に関する応力 歪みマトリクス及び変位 歪みマトリクスである。また、 $c^{ij}$  は次式で示すような要素ごとの特性変位に関するマトリクスとなる。

$$\mathbf{c} = (\mathbf{c}^{11} \quad \mathbf{c}^{22} \quad \mathbf{c}^{12}) \quad (5-9)$$

式(5-5)の巨視における構成方程式、式(5-6)の均質化弾性係数算出式を  $E, B$  を用いて表す。

$$\mathbf{E}^H = \frac{1}{|Y|} \int \mathbf{E} (\mathbf{I} - \mathbf{B}^{-1}) dY \quad (5-10)$$

$$\left( \int_{\Omega} \mathbf{B}^T \mathbf{E}^H \mathbf{B} d\Omega \right) \mathbf{u}^0 = \int_{\Gamma} \mathbf{N}^T t dY \quad (5-11)$$

ここで、 $N$  は形状関数である。式(5-7)の微視における応力場  $s$  は、上式から求めたから巨視変位  $\mathbf{u}^0$  から次式のように表される。

$$\mathbf{s} = \mathbf{E} (\mathbf{I} - \mathbf{B}^{-1}) \mathbf{B} \mathbf{u}^0 \quad (5-12)$$

これは均質化弾性係数  $E^H$  を用いて表現すれば、従来の複合材料を連続体として扱う次式と一致する。

$$\mathbf{s}^H = \mathbf{E}^H \mathbf{B} \mathbf{u}^0 \quad (5-13)$$

巨視解析は、Fig.5-3 の両側引っ張りを解析対象とし、式(5-10)で算出した均質化弾性係数  $E^H$  を用いて行われる。なお、表面力  $\bar{s}$  はコークスの引張強度である 4 MPa を、ヤング率はナノインデンテーション法より 17.5 GPa<sup>16)</sup>を用いた。また、中心 A における微視領域の解析を行い、式(5-12)から微視応力分布を求める。

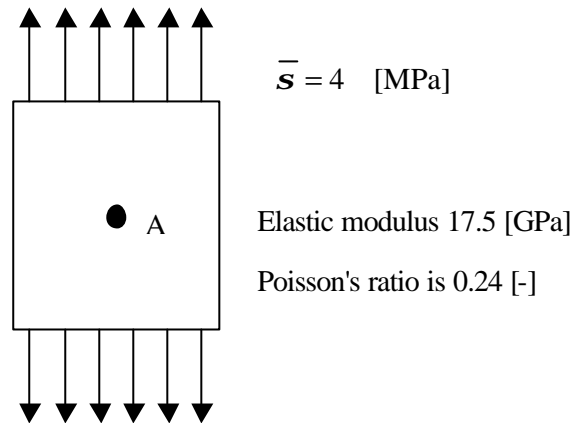


Fig.5-3 Schematic diagram of macro analysis

### 5-2-3 微視領域における応力拡大係数

微視領域で破壊判定を行うとき必要になるのはその破壊条件である。本章ではこの破壊判定条件として、亀裂先端での応力集中の指標となる応力拡大係数  $K_I$  を求めた。例えば、Fig.5-4(a)のような中心亀裂に対して、Fig.5-4(b)のような特異要素<sup>13, 14)</sup>を配置し、その要素における変位から、亀裂開口、つまり、亀裂先端での応力集中の指標となる応力拡大係数を算出する。ここで、以下のように表面力  $\bar{s}$  及び亀裂長さ  $a$  で無次元化した  $K_I^*$  を用いる。

$$K_I^* = \frac{K_I}{\bar{s}\sqrt{pa}} \quad (5-14)$$

この無次元応力拡大係数  $K_I^*$  と式(5-10)による均質化弾性係数から、コークスのような複合材料に対しての破壊メカニズムの解明を行う。

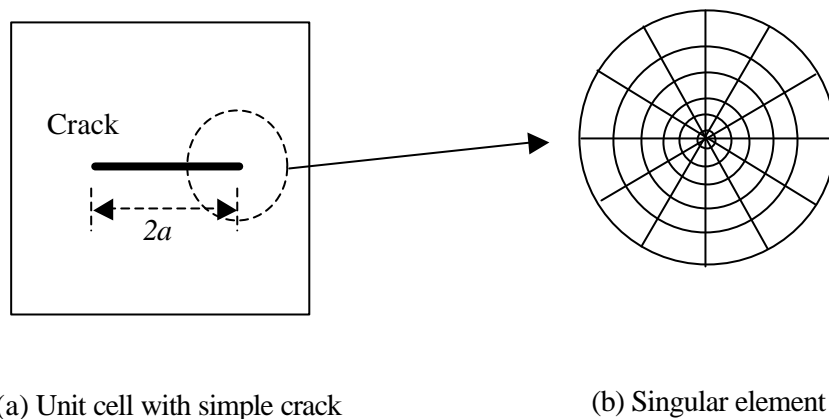


Fig.5-4 Relation between unit cell and singular element

ここで、以下に本解析の流れを示す。

1. Mesh formation at microscopic region
2. Calculation of characteristic function,  $c$  by Eq. (5-8)
3. Calculation of **homogenized elastic modulus**,  $E^H$  from  $c$  by Eq. (5-10)
4. Macroscopic analysis from  $E^H$  by Eq. (5-11)
5. Calculations of microscopic deformation,  $\mathbf{u}^1$  and **microscopic stress distribution**,  $\mathbf{s}$  from macroscopic deformation,  $\mathbf{u}^0$  and  $c$  by Eq. (5-12)
6. Calculation of **stress intensity factor**,  $K_I^*$  from  $\mathbf{u}^1$  by Eq. (5-14)

本解析では、1-6段階の手順で行い、3の均質化弾性係数  $E^H$ 、5の微視応力分布  $\mathbf{s}$ 、6の応力拡大係数  $K_I^*$  に関して考察を行う。

### 5-3 微視領域における応力集中、緩和効果

コークスの機械強度の向上に関して、微視領域における応力集中からの破壊を正確に評価することが要求される。コークスのような複雑な構造に対して有限要素メッシュを作成することは困難であるが、デローニ三角分割法<sup>4,6)</sup>を用いることによって、複数の気孔や亀裂などを含む微視構造を表現することが可能となった。



### 5-3-1 モデルの検証

解析に先立ち、本モデルの検証を行った。亀裂長さ  $2a$  の単純周期亀裂群における応力拡大係数  $K_I^*$  の解析解と本解析を比較した。Fig.5-5(a)に使用したユニットセル、(b)に亀裂長さを変更したときの解析解との比較を示す。応力拡大係数は亀裂長さとともに大きくなっており、より亀裂先端に応力が集中することがわかる。両者は良好に一致し、均質化法による結果の妥当性を示している。

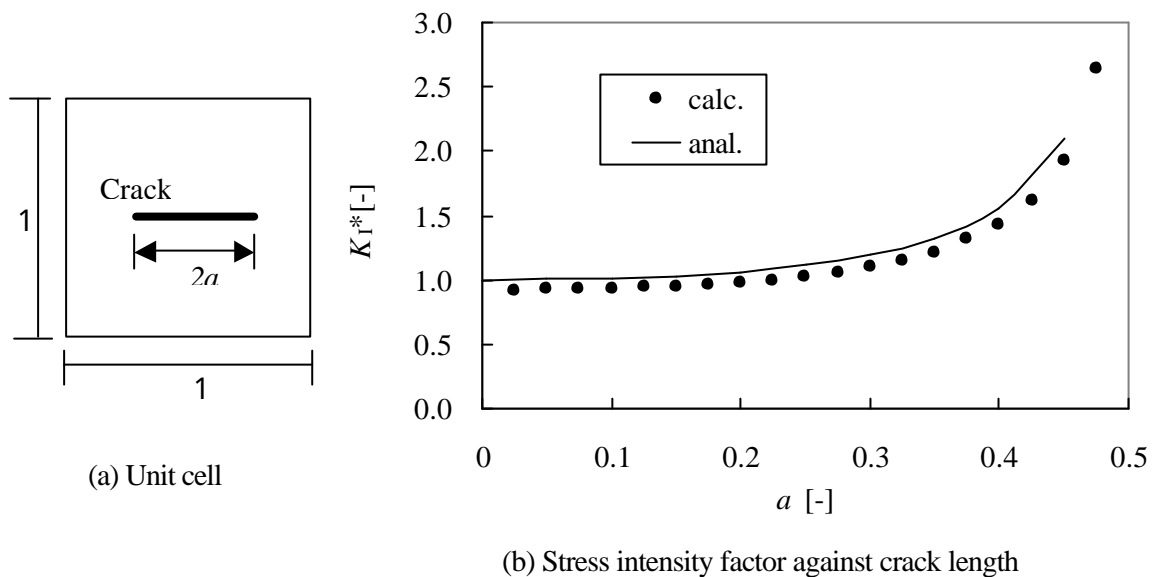


Fig.5-5 Stress intensity factor for single crack

### 5-3-2 気孔分布が強度に及ぼす影響

気孔分布の影響を調査するため Fig.5-6(a)に示すようなユニットセルを用い、気孔の数  $n$ 、つまり、気孔分布が均質化弾性係数  $E_{22}^H$  や応力拡大係数  $K_I^*$  に及ぼす影響を検討した。ここでは、中心亀裂の無次元長さ  $a$  に対して、気孔を配置しない場合と気孔率を 20% として気孔の数を増やした場合を比較した。Fig.5-6(b)に無次元長さ  $a$  に対する均質化弾性係数の変化について示す。気孔なしの場合(no pore)と比べて、気孔が存在する( $n=4, 16, 64$ )と大幅に弾性係数は減少している。これは気孔の存在により材料の剛性が減少していることを意味する。しかし、気孔の数に対しては大きな違いは見られなかった。つまり、剛性の影響は見られず、気孔率に対しては分布に関係なく同じ幅だけ歪むことを意味する。次に、Fig.5-6(c)に無次元長さ  $a$  に対する応力拡大係数を示す。この図の見方は、気孔なしに対し

て、上部は応力集中効果、下部は応力緩和効果を表す。Fig.5-6(b)において、気孔分布に対して剛性が同程度減少することから、歪み増大による応力の集中への影響も同程度であると考えられる。しかし、実際は、気孔なしを中心に振動し、条件によっては気孔なしよりも小さくなる応力緩和効果を示す。このことから、気孔と亀裂の位置関係が、亀裂先端の応力集中に大きな影響を及ぼす。この条件を Fig.5-7 の微視応力分布から説明する。亀裂長さ  $a=0.3$  で、気孔数は(a)  $n=16$ , (b)  $n=4$  である。亀裂先端の引張方向に気孔が存在しない場合(a)、より強く引っ張られるために応力集中効果を示す。一方で、引張方向に気孔が存在する場合(b)、その気孔壁に歪みが集中し、亀裂での応力が緩和される。このように、応力集中からの微視破壊に関する強度は気孔分布に強く影響する。そこで、Fig.5-6(b)より剛性に対して気孔の影響は見られなかったことから、気孔の影響のない場合の詳細な応力集中及び緩和効果のメカニズムが要求される。次節で気孔の影響を排除し、それらの効果を検証した。

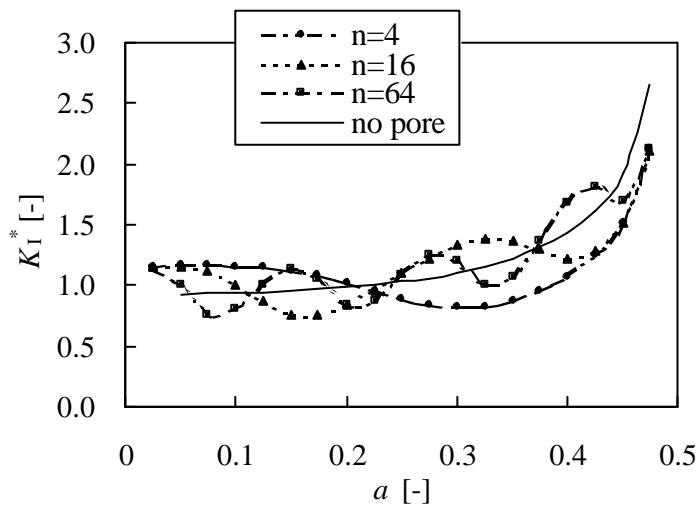
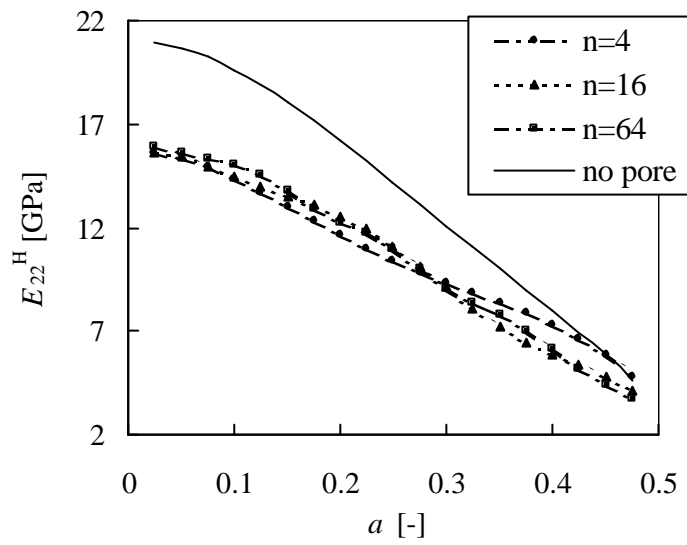
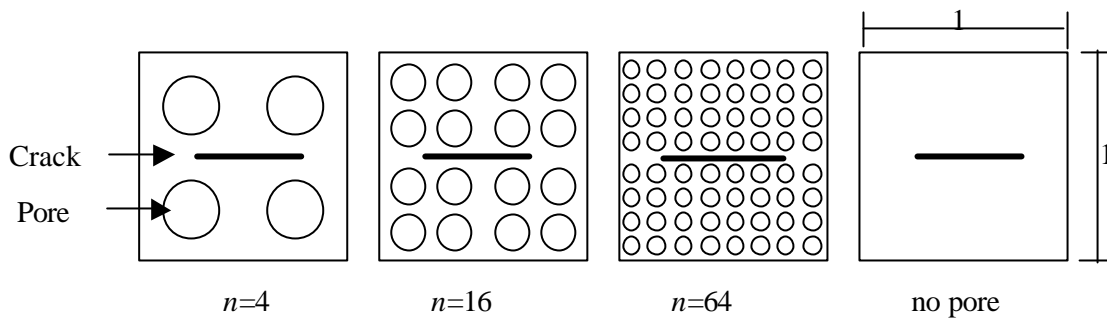
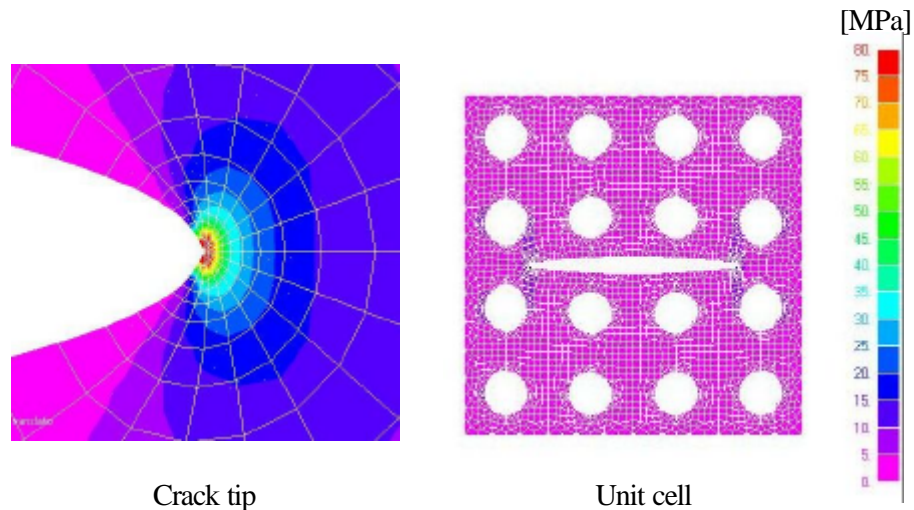
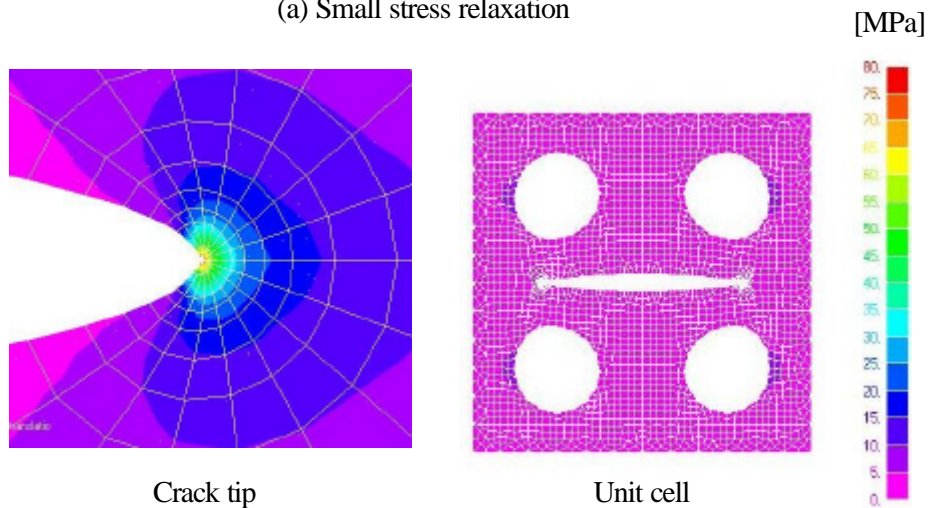


Fig.5-6 Effect of pore distribution on the strength



(a) Small stress relaxation



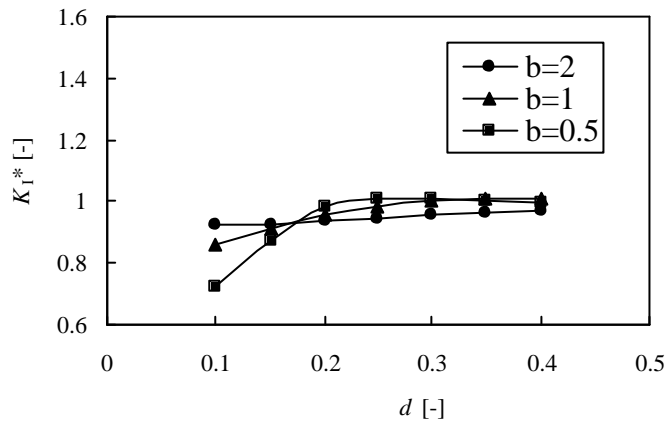
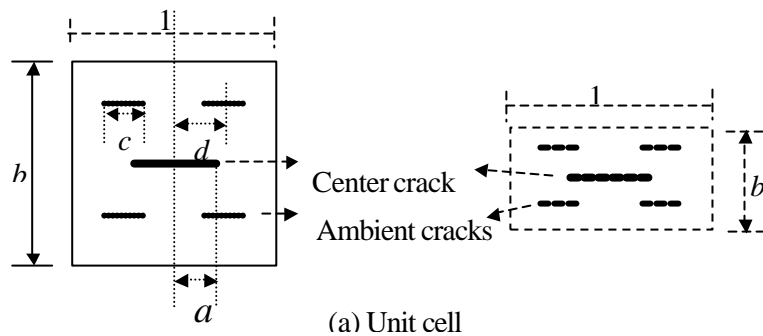
(b) Large stress relaxation

Fig.5-7 Stress distribution around crack tip and at unit cell ( $a=0.3$ )

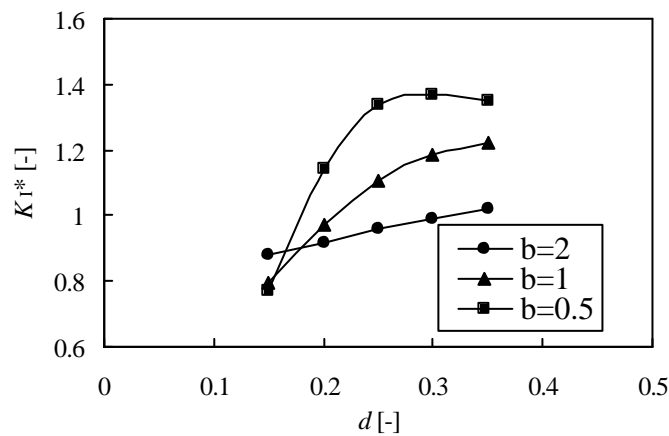
### 5-3-3 周囲亀裂が強度に及ぼす影響

気孔の影響を排除するため、Fig.5-8(a)に示すような中心亀裂(Center crack)と4つの周囲亀裂(Ambient cracks)をもつユニットセルを用いて解析を行った。操作パラメータとして、中心亀裂の長さ  $a$  や周囲亀裂の長さ  $c$ 、中心亀裂と周囲亀裂との水平方向距離  $d$  及び垂直方向距離  $b$  を変更した。中心亀裂の応力拡大係数  $K_I^*$  の算出から、周囲亀裂が与える影響を検討した。Fig.5-8(b), (c)に周囲亀裂との水平方向距離  $d$  が応力拡大係数に及ぼす影響を示す。この図の見方は、 $b=2$  の場合は十分水平方向の亀裂間距離が長く垂直方向に相互作用が少ない場合であるため、 $b=2$  より大きい場合は周囲亀裂による遮蔽効果が少なく応力

集中効果を、 $b=2$  より小さい場合は周囲亀裂による遮蔽効果が大きく応力緩和効果を示す。また、応力拡大係数  $K_{I}^*$  が多いほどより応力集中を示す。このことから、以下の3つの応力集中する条件を見つけた。まず、Fig.5-8(b)より、中心亀裂と周囲亀裂の垂直方向の距離  $b$  が小さい場合である。次に、Fig.5-8(b)より、中心亀裂と周囲亀裂の水平方向の距離  $d$  が大きい場合で、最後に、Fig.5-8(a), (b)より、周囲亀裂の長さ  $c$  が大きい場合である。これらの亀裂の位置関係で、大きな応力集中効果を引き起こす。



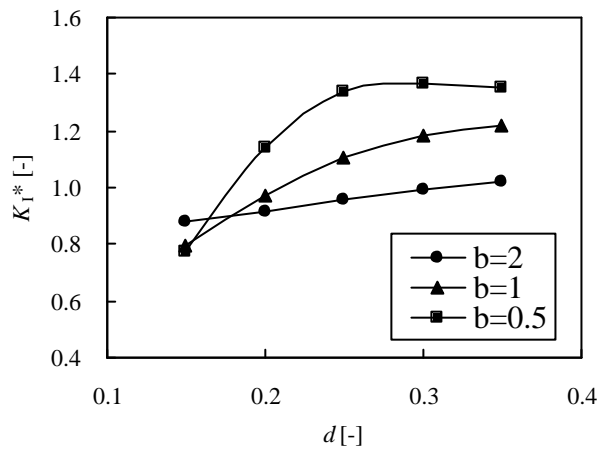
(b) Stress intensity factor in the case of  $c=0.1$



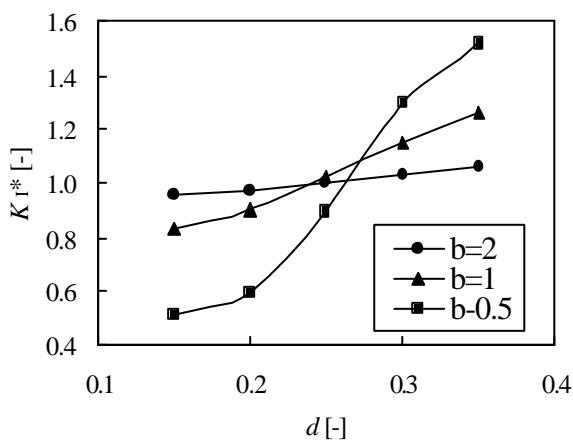
(c) Stress intensity factor in the case of  $c=0.2$

Fig.5-8 Effect of ambient cracks on the strength ( $a=0.1$ )

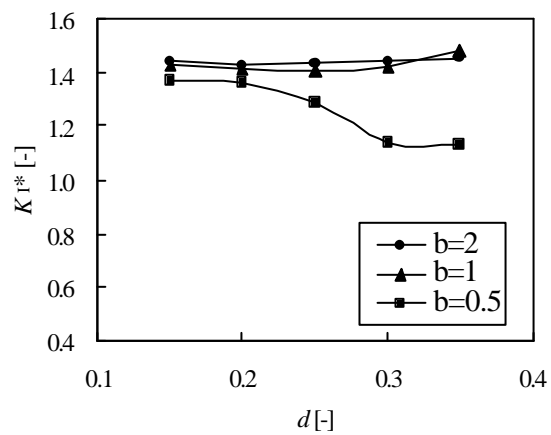
次に Fig.5-9 において中心亀裂の長さを変更した時の、応力集中・緩和効果を検討した。なお、周囲亀裂の長さは  $c=0.2$  とした。Fig.5-8 と同様に、 $b=2$  以上では応力集中効果、 $b=2$  以下では応力緩和効果を示す。中心亀裂長さが小さい時は ( $a=0.1$ ) 応力集中効果を示し、 $a$  が大きくなるにつれて応力緩和効果が表れ、 $a=0.4$  ではいずれの  $d$  に対しても緩和効果を示す。以上の Fig.5-8, 9 より、亀裂の位置関係による応力集中及び緩和条件が明らかにされ、その重要性が示された。



(a)  $a=0.1$



(b)  $a=0.2$



(c)  $a=0.4$

Fig.5-9 Effect of center crack length on the strength ( $c=0.2$ )

#### 5-4 デジタルイメージの使用による実際のコークスの解析

前節より、モデルケースとして応力集中・緩和効果が現れる亀裂及び気孔の位置関係を示した。しかし、石炭の乾留現象は、石炭の充填層から軟化熔融状態を経てコークス層へ至るまでに様々な物性の変化を引き起こす。さらに、乾留の進行に伴う気孔の形成や内部応力の発生により、コークスの微視構造は大変複雑になる。そこで、本節では、デジタルイメージを用いることによって、実際のコークス画像に均質化法を適用し、カーボンデポジットコークスを例にして、その高強度となるメカニズムを探索する。

デジタルイメージの解析手順<sup>7)</sup> は以下の4つからなる。

- 1、微視構造の画像の取り込み
- 2、代表体積要素の領域設定
- 3、材料を判別するためのしきい値の設定
- 4、画像1ピクセルの有限要素メッシュへの変換

この技術を適用することによって、正確に微視構造を反映できる。

解析対象として Fig.5-10 に示す画像を用いた。黒は気孔、灰色は基質、白はデポジットカーボンを示している。そこで、タールの熱分解ガスは気孔壁に付着し、カーボンデポジットコークスが作られるため、カーボンが付着する前後の2種類のパターンを考える。つまり、白を気孔として扱うカーボン付着前の(a)オリジナルコークス(original coke or non carbon deposited coke)、白を基質として扱うカーボン付着後の(b)カーボンデポジットコークス(carbon deposited coke)である。Fig.5-11 に(a)オリジナルコークス(b)カーボンデポジットコークスの有限要素メッシュを示す。ここで用いた物性値として、ヤング率、ポアソン比は 17.5 GPa<sup>16)</sup>、0.24 を用いた。また、超高密度炭素材の引張強度を 46.1 MPa とした。

Table5-1 に(a)オリジナルコークス(b)カーボンデポジットコークスに関する均質化弾性係数及び気孔率を示す。'11'と'22'と比べると弾性係数に大きな違いが見られる。これは、用いた画像の異方性が原因である。また、(a)から(b)、つまりカーボンが付着すると、弾性係数に大幅に上昇していることがわかった。これは主に気孔率の減少が原因である。

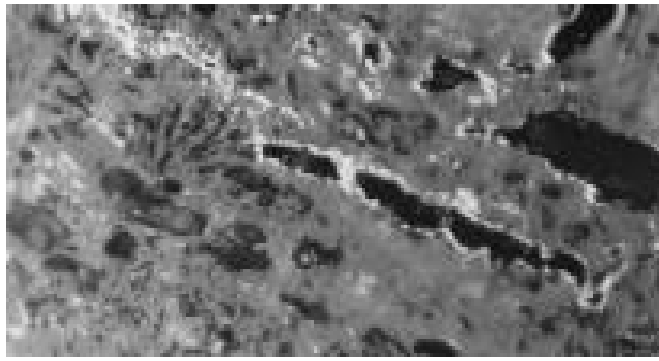


Fig.5-10 The image of carbon deposited coke (413 × 191 pixel)

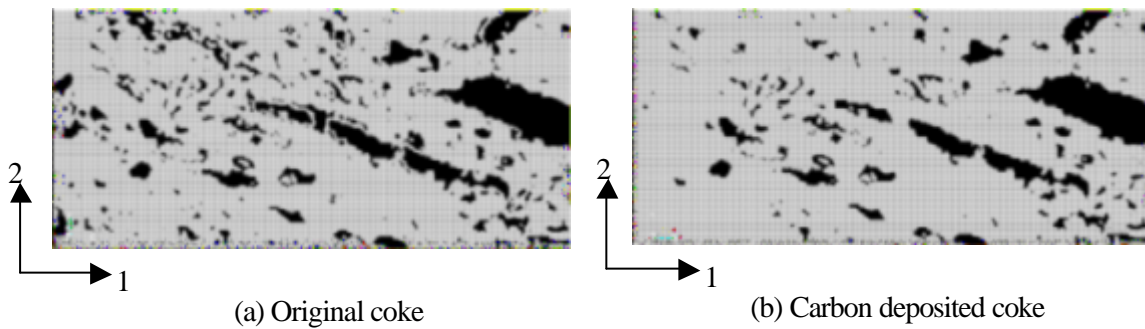


Fig.5-11 Finite element mesh (413 × 191 mesh)

Table5-1 Homogenized elastic modulus

	Porosity (%)	$E_{11}^H$ (GPa)	$E_{22}^H$ (GPa)	$E_{12}^H$ (GPa)
(a) Original coke	22	5.84	2.91	0.777
(b) Carbon deposited coke	15	9.27	6.16	1.45

次に、Fig.5-12 にそれぞれのコークスに対して、Fig.5-3 の A 点における Von-Mises 応力を示す。Fig.5-12(a)に関して、一般的には、大きな気孔周囲に応力は集中する。しかし、その周囲の小さな気孔のため、大きな気孔に応力は集中していない(図中 1)。この効果は Fig.5-7 で検証している。一方で、Von-Mises stress 応力が図中白丸において引張強度を超えていることから、小さな気孔から微視破壊を引き起こすことが予測される。また、特に(a)の左側では気孔率が大きく弾性係数は小さいために、歪みが大きく応力が気孔壁に集中す



る(図中2)。Fig.5-12(b)に関しては、図中3の部分で大きな気孔周囲に応力集中効果が見られる。しかし、Table5-1で示したように、大幅な弾性係数の増加がみられ、そのため試料全体の歪みが小さく、応力集中にもかかわらず微視破壊に至る大きな応力は生じていない。以上の均質化法による解析結果から、カーボンデPOSITコークスには均質化弾性係数の増加が見られ、さらに、応力分布から微視破壊に至る応力が発生していないという両方の面から、高強度になることが示された。

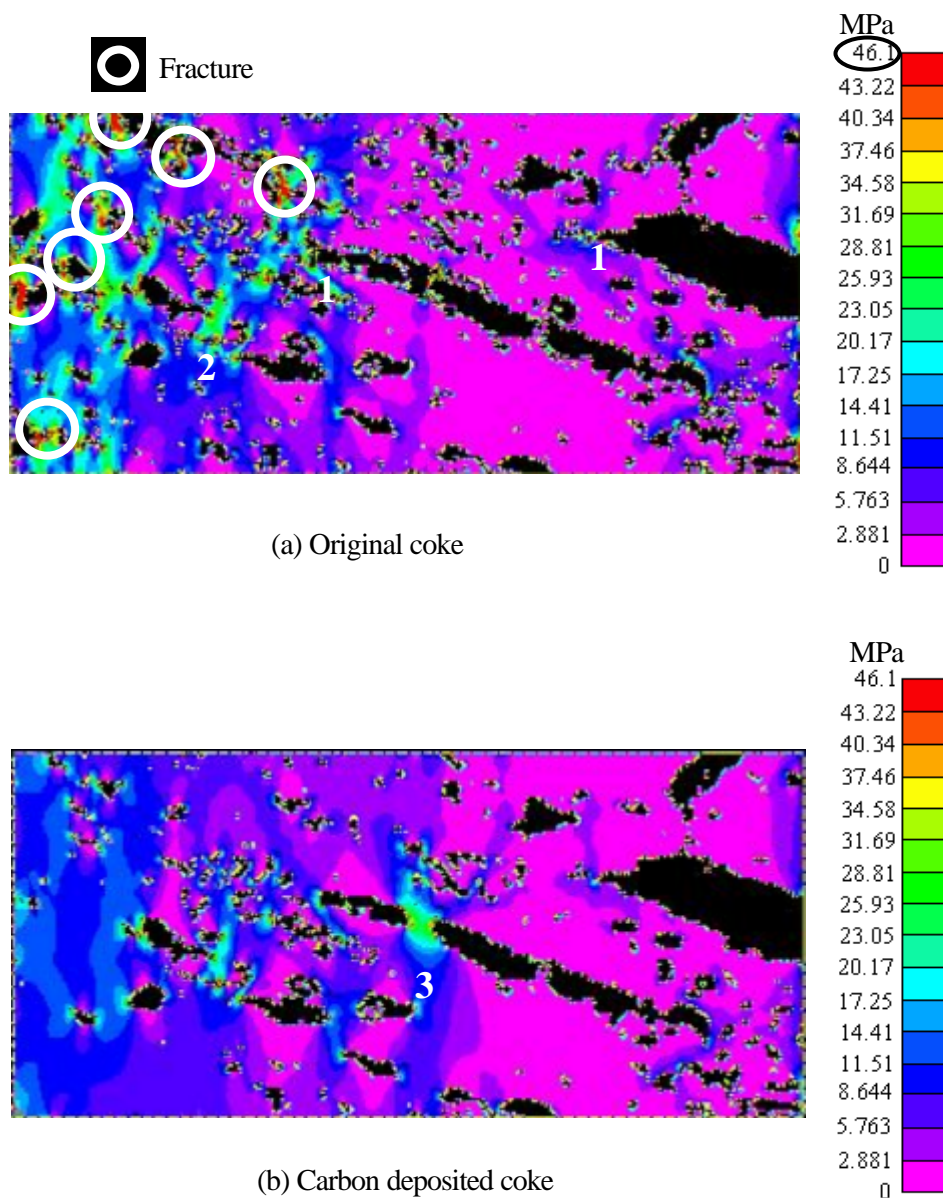


Fig.5-12 Stress distributions at microscopic level

## 5-5 結論

コークスの微視構造を評価し、破壊メカニズムを解明する目的として、均質化法が提案された。

まず、モデルケースとして、応力の集中効果及び緩和効果を引き起こす条件を検討し、微視破壊に関して、気孔及び亀裂の両方の位置関係が重要な因子であることを示した。さらに、詳細に亀裂同士的位置関係に注目し、亀裂の長さ、水平及び垂直方向の位置関係と応力集中、緩和効果の関係を明らかにした。

次に、コークスの複雑な微視構造を、デジタルイメージを用いて正確に評価し、カーボンデポジットコークスが高強度になるメカニズムを、微視応力分布及び均質化弾性係数の両方から明らかにした。オリジナルコークスでは小さな気孔に応力が分散される。しかし、弾性係数の減少による全歪みの増大により、小さな気孔の周囲で微視破壊に至る応力が発生する。一方、カーボンデポジットコークスでは、大きな気孔の間に応力が集中するものの、弾性係数の増加のために全体の歪みが小さくなり、応力は引張強度より小さく微視破壊に至らないことを示した。よって、コークスのような複雑な材料の解析には、弾性係数及び微視応力分布の両方で解析できる均質化法が大変有効である。

## Nomenclature

$a$ :	Half of crack length	[m]
$b$ :	Cell length	[m]
$\mathbf{B}$ :	Displacement-strain matrix	[m <sup>-1</sup> ]
$c$ :	Ambient crack length	[m]
$d$ :	Vertical distance between center crack and ambient crack	[m]
$E$ :	Elastic tensor	[Pa]
$\mathbf{E}$ :	Stress-strain matrix	[Pa]
$I$ :	Unit vector	
$K_I$ :	Stress intensity factor	[Pa m <sup>1/2</sup> ]
$K_I^*$ :	Dimensionless stress intensity factor	[-]
$n$ :	Pore number	[num]
$N$ :	Shape function	[-]
$t$ :	Traction vector	[Pa]
$u$ :	Displacement	[m]
$x$ :	Macroscopic coordinate	[m]
$Y$ :	Region of macroscopic cell	[m]
$y$ :	Microscopic coordinate	[m]

## Greek symbol

$\mathbf{c}$ :	Characteristic displacement	[m]
$\mathbf{e}$ :	Scale ratio	[-]
$\Gamma$ :	Boundary	
$\mathbf{n}$ :	Poisson's ratio	[-]
$\mathbf{s}$ :	Stress	[Pa]
$\bar{\mathbf{s}}$ :	Tensile load	[Pa]
$\Omega$ :	Region of macroscopic cell	

## Superscript

0:	Macro-scale
1:	Micro-scale
$H$	Homogenized parameter