

均質化法による気孔形状を考慮したコークス強度評価

上岡 健太*・尾形 知輝*・両角 仁夫*²・青木 秀之*²
三浦 隆利*²・上坊 和弥*³・福田 耕一*⁴

Evaluation of Coke Strength Considering Pore Shapes by Using a Homogenization Method

Kenta UEOKA, Tomoki OGATA, Yoshio MOROZUMI, Hideyuki AOKI, Takatoshi MIURA, Kazuya UEBO and Koichi FUKUDA

Synopsis : In this study, the effect of pore on coke strength is investigated using a homogenization method. The stress analysis using a homogenization method is carried out for two cases of pore shapes. Case 1 is the round pores with the same diameter, which is regularly arranged in the unit cell. Case 2 is the irregular shape pores arranged randomly in the unit cell.

In Case 1, the stress in the coke rises with an increase in the porosity. The stress distribution is determined by the porosity and is independent of the pore diameters and the number of pores. In Case 2, the stress in the coke with the irregular pore shapes increases with porosity and is larger than that with regular pore shapes. This is because that the stress concentration occurs at the sharp edges of pores. In addition, the stress analysis is carried out for the unit cell composed of circular pores which has different diameters and randomly arranged pores. As a result, the existence of circular pore reduces the stress in the coke and hardly lowers the rigidity of the coke while the arrangement of pores has little effect on lowering the rigidity.

Key words : homogenization method; pore shape; coke strength; finite element method; microstructure.

1. 緒言

中国の経済発展の影響から世界の粗鋼生産量は増加しており、粘結炭の価格は2005年現在、前年度比で約2倍に高騰している。粘結炭価格の高騰に伴い、コークスの価格も高騰しており、コークス製造プロセスでは製造過程におけるコストダウンを行うため、安価な非微粘結炭の多量使用技術の開発が望まれている。

高炉においてコークスは熱源、還元材、通気・通液性維持材、鉄の融点降下材の役割を担っている。この4つの役割のうち、炉内の通気・通液性を確保するスペーサとしての役割が、高炉の安定操業を維持するために最も重要である。すなわち、コークスは粉を発生させず、かつ炉内において大塊で存在できる高強度なものほど高品質であるとされる。高品質なコークスの製造技術を開発するためには、コークス強度の発現機構やコークスの強度因子を明確にする必要がある。しかし、コークスは乾留により石炭が非常に複雑な化学反応を伴いつつ軟化溶融、再固化といった現象を経て製造される物質であり、コークスの強度発現機構の解明に関する研究^{1,2)}は以前から行われてきたが、未解明な部分が非常に多い。また、コークスは気孔率が50%前後の多孔質脆性材料であり、かつ機械的物性が異なる組

織^{3,4)}が混在した複合材料であるため、コークスの強度評価は困難であり、強度因子はいまだ明確となっていない。

コークスに関する研究はコークス強度の向上を目的としたもの^{5,6)}、体積破壊による細粒化、表面摩耗などのコークス強度の劣化機構に関するもの^{7,8)}のように常に強度と密接に関わった研究が行われてきた。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を行うためには、コークスの複雑な気孔構造および機械的物性の異なる組織を考慮する必要がある。

朝熊ら⁹⁾は均質化法を用いた応力解析により気孔構造および亀裂配置が破壊力学パラメータである応力拡大係数に与える影響について詳細に検討している。しかし、その解析例は気孔を円形と仮定した非常に簡単なものであり、複雑な形状を持つミクロ的な気孔構造がコークス強度に与える影響を明確にしているとは言い難い。

そこで、本研究では円形状の気孔が規則配置した気孔構造、不規則形状の気孔がランダムに配置した気孔構造を有するコークス組織に対して均質化法を用いた応力解析を行い、気孔構造がコークスの強度因子に及ぼす影響について検討した。

平成17年7月1日受付 平成17年9月7日受理 (Received on July 1, 2005; Accepted on Sep. 7, 2005)

* 東北大学大学院生 (Graduate Student, Tohoku University, 6-6-07 Aoba Aaramaki Aoba-ku Sendai 980-8579)

*2 東北大学大学院工学研究科 (Graduate School of Engineering, Tohoku University)

*3 住友金属工業(株) 総合技術研究所 (Corporate R&D Labs., Sumitomo Metal Industries Ltd.)

*4 新日本製鐵(株) 環境・プロセス研究開発センター (Environment & Process Technology Center, Nippon Steel Corp.)

2. 解析

2.1 均質化法

均質化法は、複合材料のマクロ的な等価物性を算出するだけでなく、同時にミクロ的な視野から、各材料の変形や応力分布を算出する手法である。Fig. 1に周期的なミクロ構造を有する構造物を示す。領域 Ω はミクロ周期構造 Y の集合体であり、境界 Γ_t において表面力 t_i が作用しているものとする。マクロおよびミクロ領域における座標は x, y で表すと、各領域間での関係はスケール比 ε を用いて $y=x/\varepsilon$ と表される。 ε はユニットセルの代表長さ l 、構造全体の代表長さ L を用い、 $\varepsilon=l/L$ で定義される。また、マクロおよびミクロ領域に関して漸近展開理論を用いると、構造物の変位 u_i を以下のように表現できる。

$$u_i = u_i^0(x, y) + \varepsilon u_i^1(x, y) + \varepsilon^2 u_i^2(x, y) \dots, \quad y = x/\varepsilon \dots \dots (1)$$

ここで、 u_i^0 は複合材料の等価物性を用いて算出するマクロ領域の変位であり、 u_i^1 はマクロ領域の変位を用いて算出するミクロ領域に関して周期的な変位である。構造物の変位 u_i はスケール比 ε に関する線形結合の形をとり、 x および y で表示する。スケール比 ε は非常に小さく、 ε^2 以降は無視できる。 $\varepsilon < 0.1$ であると、均質化法による近似が良好に成立することが報告されている¹⁰⁾。本解析では $l=1\text{ mm}$ 、 $L=100\text{ mm}$ とし、このとき $\varepsilon=0.01$ であることから、均質化法の適用は十分可能である。

変分原理を用いることによって、解析対象である構造物に対して仮想仕事式は以下のように表される。

$$\int_{\Omega} E_{ijkl} \frac{\partial u_k}{\partial x_i} \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} d\Omega = \int_{\Gamma_t} t_i \bar{u}_i d\Gamma \dots \dots \dots (2)$$

E_{ijkl} は弾性係数テンソルを表す。また、 \bar{u}_i は仮想変位を表す。本解析では体積力を無視し、2次元で解析を行っている。

次に、マクロおよびミクロ領域の変位を結合する特性変位 χ_i^{kl} を次式のように定義する。

$$u_i^1 = -\chi_i^{kl}(y) \frac{\partial u_k^0}{\partial x_l} \dots \dots \dots (3)$$

式(2)に式(1)および式(3)を代入し、平均化原理 (the averaging principle)¹¹⁾と、 ε に関する恒等式よりミクロ領域 Y における以下の関係式を得る。

$$\int_Y E_{ijkl} \frac{\partial \chi_p^{kl}}{\partial y_q} \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial y_j} dY = \int_Y E_{ijkl} \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial y_l} dY \dots \dots \dots (4)$$

式(4)に対して周期境界条件を適用することにより、特性変位を算出することができる。

さらに、均質化されたマクロ領域に対する仮想仕事式を次式のように表現することができる。

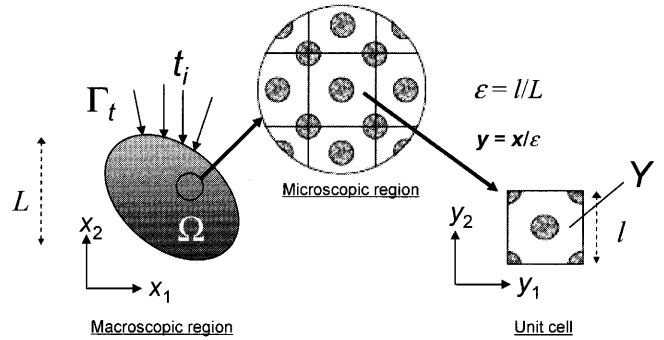


Fig. 1. A structure with a microscopic periodic unit cell.

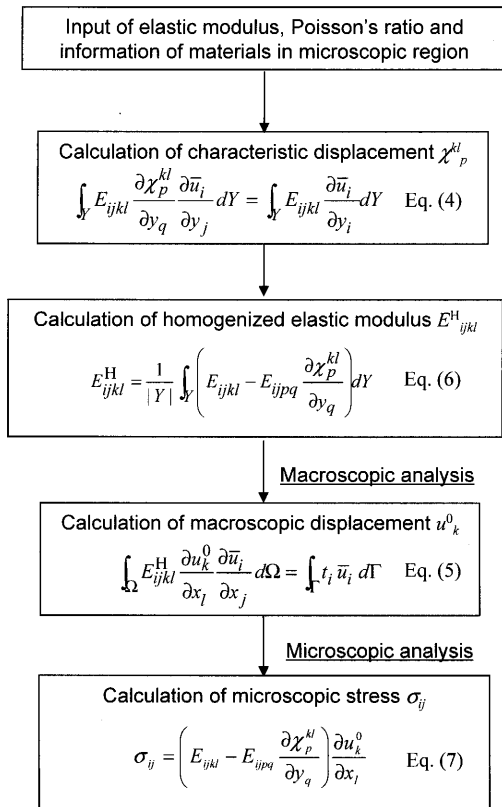


Fig. 2. The procedure for stress analysis using homogenization method.

$$\int_{\Omega} E_{ijkl}^H \frac{\partial u_k^0}{\partial x_i} \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} d\Omega = \int_{\Gamma_t} t_i \bar{u}_i d\Gamma \dots \dots \dots (5)$$

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

ここで、 $|Y|$ はミクロ領域のユニットセルにおける面積、 E_{ijkl}^H は均質化弾性係数テンソルである。

最終的に、ミクロ領域の応力分布を以下の式より計算する。

$$\sigma_{ij} = \left(E_{ijkl} \frac{\partial \chi_p^{kl}}{\partial y_q} \right) \frac{\partial u_k^0}{\partial x_l} \dots \dots \dots (7)$$

Fig. 2に本解析の計算手順を示す。まず、ミクロ領域に

おける構成材料の弾性係数，ポアソン比および材料構成を与え，式(4)を特性変位 χ_p^M について解く。算出した χ_p^M を用いて，式(6)からマイクロ構造を反映したマクロ領域の等価物性である均質化弾性係数 E^M を算出する。次に均質化弾性係数 E^M を用いてマクロ解析を行い，マクロ領域の変位 u_p^0 を算出する。算出した特性変位 χ_p^M およびマクロ領域の変位 u_p^0 を用いて式(7)よりマイクロ応力を算出する。

2.2 解析対象

本研究では，コークスの気孔構造と強度の関係を明確にするため，気孔構造を2つのケースに分類して考えた。2つのケースとは，Case 1として形状および配置が規則的なもの，Case 2として形状および配置が不規則なものである。ここで，規則的な形状は円形状として，また，規則的な配置は等間隔な配置として定義し，それ以外の形状および配置は不規則なものとして定義する。既往の研究^{3,4)}よりコークス組織の弾性係数は，活性成分由来の組織と不活性成分由来の組織の2種類で大きく異なり，組織の光学的異方性に依らないことが報告されている。そのため，コークス組織のモデル化では，活性成分由来の組織は光学的異方性に依らず，同一のものとして取り扱っている。本研究では，気孔の数密度と配置が応力および剛性に与える影響を調査するため，コークスのマイクロ構造を活性成分由来の組織と気孔のみから成るユニットセルとして単純な構造にモデル化している。

解析対象としたユニットセルについて説明する。Fig. 3およびFig. 4にCase 1およびCase 2におけるユニットセルの一例を示す。Fig. 3およびFig. 4において灰色の領域は活性成分由来の組織を表し，白色の領域は気孔である。

Case 1では，円形状の気孔が等間隔に配置したコークスのマイクロ構造を想定している。Fig. 3(a)~(c)では，それぞれのユニットセル内の気孔率は等しいが，気孔の数密度が異なり，順にユニットセル内に25, 100 および400個の気孔数が存在する。Case 1においては，気孔径を変化させることにより，ユニットセル内の気孔率を約10~70%の範囲

で変化させる。

一方，Case 2では，ユニットセル内にランダムに同一径の気孔を重ねないように配置し，その気孔を直径基準で1~2.4倍まで膨張させることによりコークスのマイクロ構造をモデル化している。また，気孔率は気孔径および気孔数により変化させる。コークスの気孔率は一般的に50%前後である。Case 2の方法で気孔率が50%以上のユニットセルを作成した場合，活性成分由来の組織が気孔によって囲まれる領域が大部分を占め，活性成分由来の組織が気孔内において島状に存在する。そこでCase 2では，気孔率が50%以下のユニットセルのみを作成し，コークスの複雑な気孔構造が強度へ与える影響を調査した。Fig. 4(a)~(d)は，ユニットセル内に500個の気孔を配置し，気孔径を1.1, 1.3, 1.7および2.3倍に膨張させて作成したユニットセルである。

これら2種類のユニットセルの有限要素分割は，デジタルイメージによるメッシュ作成法¹²⁾によって行った。

2.3 解析条件

気孔を含むユニットセルを均質化法によって解析する場合，気孔部分においてもメッシュを作成すると，マイクロ解析における周期境界条件を容易に適用することができる。本解析では，気孔の弾性係数に活性成分由来の組織の弾性係数よりも 10^{-4} 倍程度小さい値を採用すると，気孔部分にメッシュを作成しないモデルの場合の応力値とほぼ一致

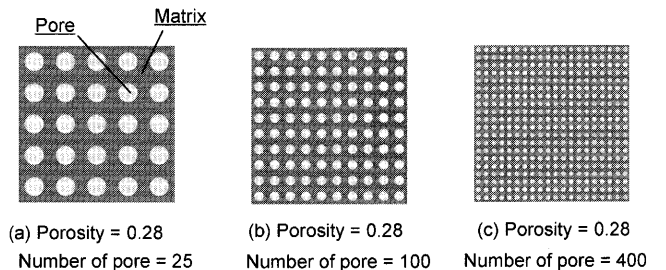


Fig. 3. Examples of unit cell models with regularly arranged round pore (Case 1).

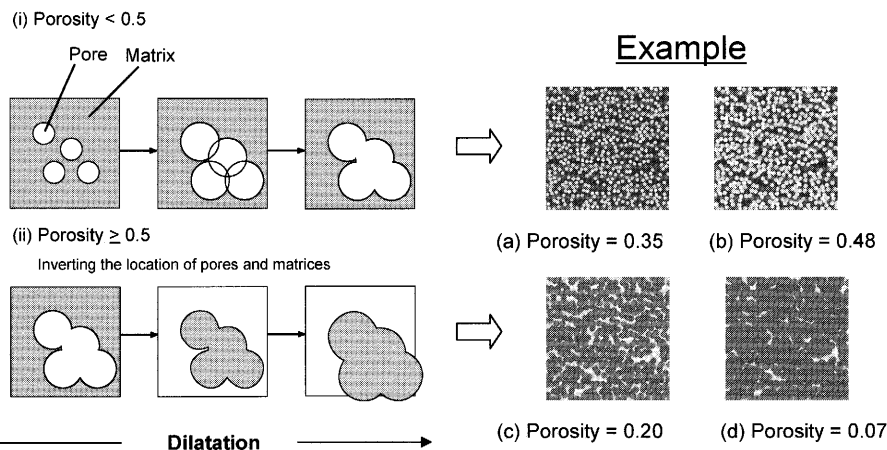


Fig. 4. The process of making unit cell models with irregular shape pore arranged randomly and examples of unit cell models (Case 2).

することを検証している。したがって、活性成分由来の組織および気孔の弾性係数は30および 30×10^{-4} GPaとし、ポアソン比に0.3を与えている。

解析において、ミクロ領域の応力算出にはマクロ領域の変位を与える必要があり、ここでは三点曲げ試験を想定した1/2モデルを対象にマクロ解析を行い、マクロ領域の変位を決定した。Fig. 5にマクロ解析の境界条件およびマクロ解析結果の von Mises 応力分布の例を示す。また、コークスの曲げ強度が約5 MPaと報告されているため¹³⁾、応力値が約5 MPaである Fig. 5の斜線部分の要素をミクロ解析の対象とした。すべての有限要素は4節点アイソパラメトリック要素を採用し、平面ひずみ状態で解析を行った。

3. 結果と考察

3.1 円形状の気孔を規則配置したユニットセルと不規則形状の気孔を任意に配置したユニットセルに対する結果と考察

Fig. 6にユニットセル内の最大応力、平均応力および2222成分の均質化弾性係数と気孔率の関係を示す。Case 1の(a)~(c)は同一の気孔率でユニットセルに同一径の円形状の気孔が25、100および400個存在するミクロ構造である。また、Case 2では、配置する気孔を200~650個まで変化させユニットセルを作成し、解析を行っている。さらに、解析結果の例として Fig. 7に Case 1, Fig. 8に Case 2の von

Mises 応力分布の一例を示す。これらの応力分布はそれぞれ Fig. 3および Fig. 4に示したユニットセルを解析した結果である。

Fig. 6より Case 1の(a)~(c)において最大応力、平均応力および均質化弾性係数の値に大きな差異が見られないこと

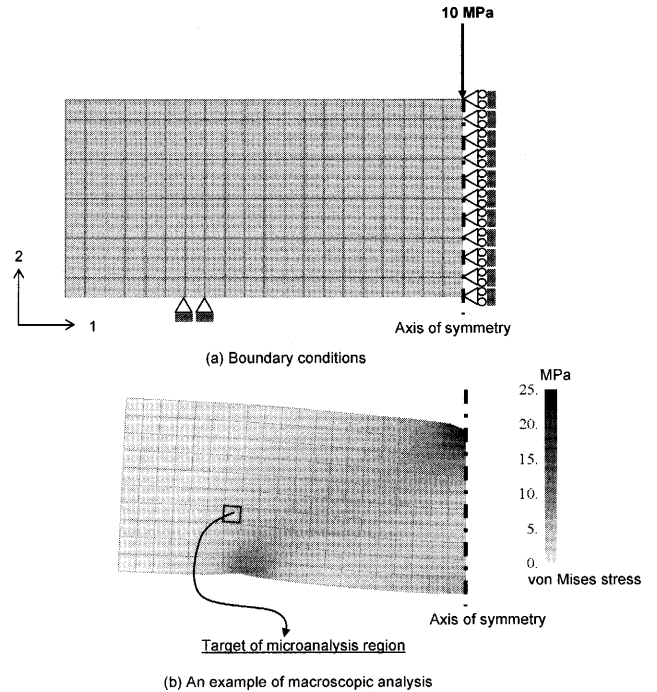


Fig. 5. Boundary conditions for macroscopic analysis and an example of macroscopic analysis.

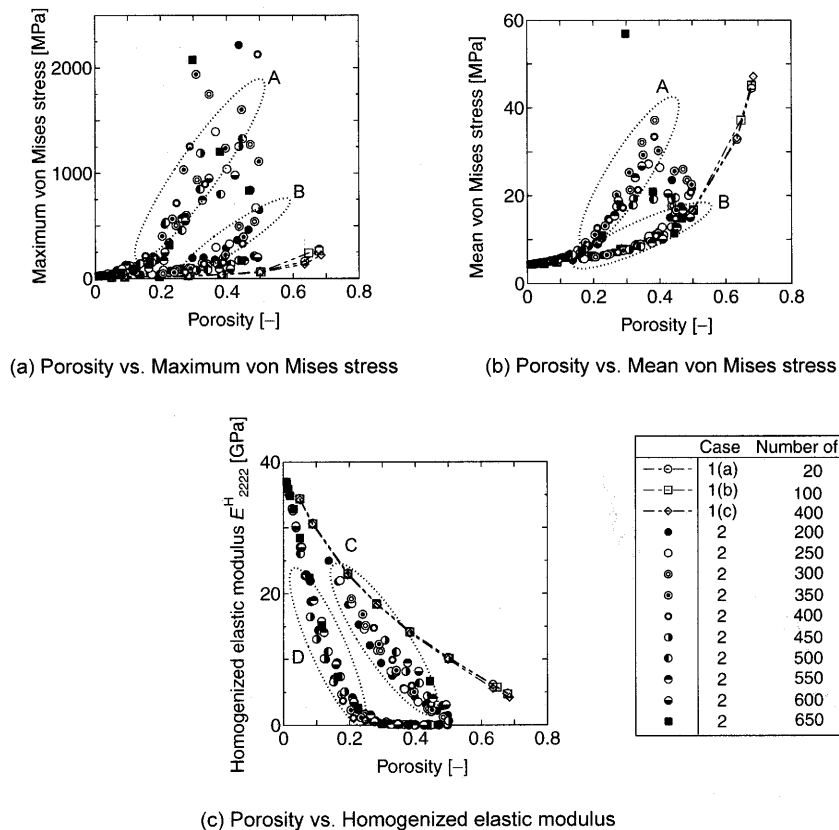


Fig. 6. Effect of porosity on stress and homogenized elastic modulus for Case 1 and Case 2.

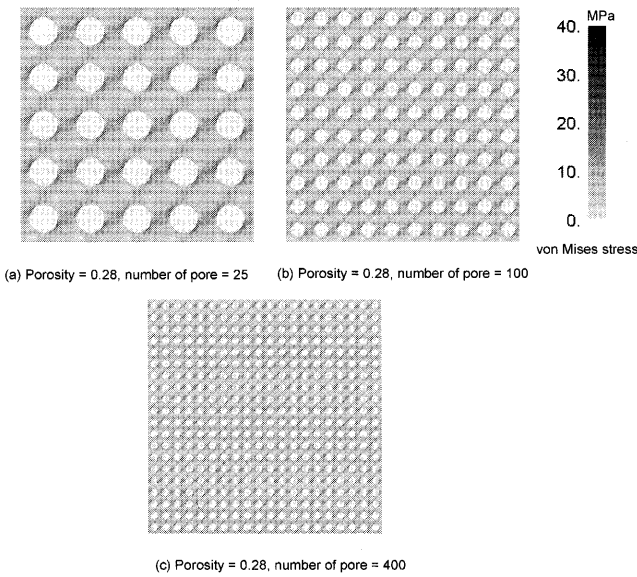


Fig. 7. Stress distribution in Case 1.

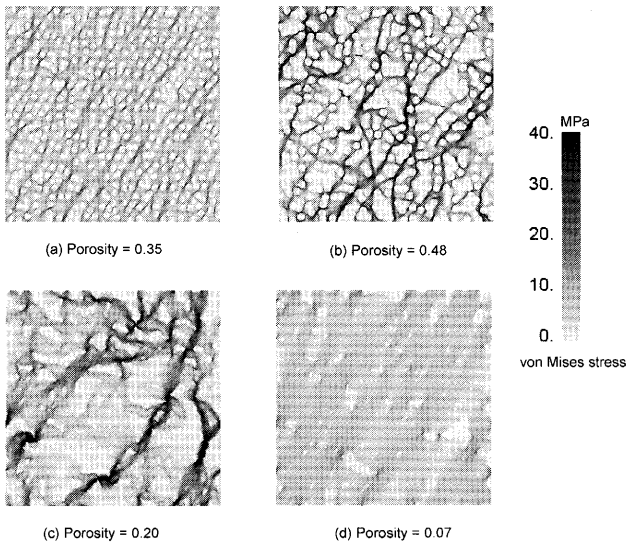


Fig. 8. Stress distribution in Case 2.

が示されている。Fig. 7のCase 1(a)~(c)において、応力分布はいずれの場合にも大きな差異は見られない。したがって、気孔が円形でかつ等間隔に配置されたマイクロ構造では、気孔率一定の場合、マイクロ構造の気孔数が異なっても最大応力、平均応力および均質化弾性係数は変化しないことが示されている。一方、Case 2では、最大応力値および平均応力値は気孔率の上昇とともに上昇し、Case 1よりも大きい値を示す。また、Case 2では最大・平均応力値はFig. 6に示すような大きな値の分布Aと小さな値の分布Bの2種類に分類できる。

Case 2の最大応力値および平均応力値の方がCase 1よりも大きい理由について考察する。Fig. 7とFig. 8の応力分布の一例を比較してみると、Case 2では角張った形状の気孔付近に応力が集中している。これは、円形状の気孔は応力を緩和するが、一方で不規則形状の気孔には応力が集中す

ることを示している。したがって、不規則形状の気孔の存在がCase 2の最大応力および平均応力がCase 1よりも大きい値となる原因であると考察できる。

上述の理由から、Case 2において応力値に2種類の分布が存在することは以下のように説明することができる。分布AはFig. 4(ii)のマイクロ構造に対する計算結果であるため、不規則形状の気孔が数多く存在し、応力集中が生じやすく、応力値が大きくなる。一方、分布BはFig. 4(i)のマイクロ構造に対する計算結果であるため、円形状の気孔が数多く存在し、分布Aの場合よりも応力が緩和され、応力値が小さくなる。

以上の考察は、Case 1およびCase 2の均質化弾性係数の変化にも対応している。Case 1およびCase 2の均質化弾性係数は気孔率の上昇とともに減少するが、Case 2の方がCase 1よりもその減少率が大きい。さらに、Case 2においてもFig. 6に示すような大きな値の分布Cと小さな値の分布Dの2種類に分類できる。分布CはFig. 4(i)、分布DはFig. 4(ii)のマイクロ構造に対する計算結果であるため、最大・平均応力値の分布AおよびBが生じた理由から、分布CおよびDが生じたと説明できる。

以上まとめると、不規則な形状の気孔には局所的に応力が集中するために応力値が大きく剛性を低下させ、一方、円形状の気孔は応力を緩和し、剛性の低下を少なくすることが示された。

3・2 配置および形状が不規則である気孔と不規則配置の円形状の気孔との比較

気孔の配置と形状のどちらが剛性を低下させるかをより明確にするため、Case 2の不規則形状の気孔を面積が等しい円形状の気孔に置き換え、ランダムに再配置してユニットセルを作成したCase 3に対して、Case 1およびCase 2と同様の解析条件で応力解析を行った。

Fig. 9にCase 2で用いたユニットセルから新たに作成したCase 3のユニットセルの一例を示す。Fig. 10にCase 2およびCase 3のユニットセル内の最大応力、平均応力および2222成分の均質化弾性係数と気孔率の関係を示す。さらに、Fig. 11にCase 3のvon Mises応力分布の一例を示す。Case 2とCase 3の応力分布を比較すると、解析領域全体においてCase 3の方がCase 2よりも応力値が小さい。このことはFig. 10においてCase 3の最大応力値および平均応力の値がCase 2よりも小さいことから示されており、円形状の気孔形状は応力を緩和する形状であることが確認できる。また、Fig. 10の均質化弾性係数の値では、Case 3の方がCase 2よりも大きい傾向を示しており、気孔が円形状になることにより剛性の低下が少ないのに対し、一方、気孔の配置位置は剛性にほとんど影響を及ぼさないことが示されている。

以上より、円形状の気孔は応力を緩和し、その配置は応力集中や剛性にはほとんど影響しないことを示されてお

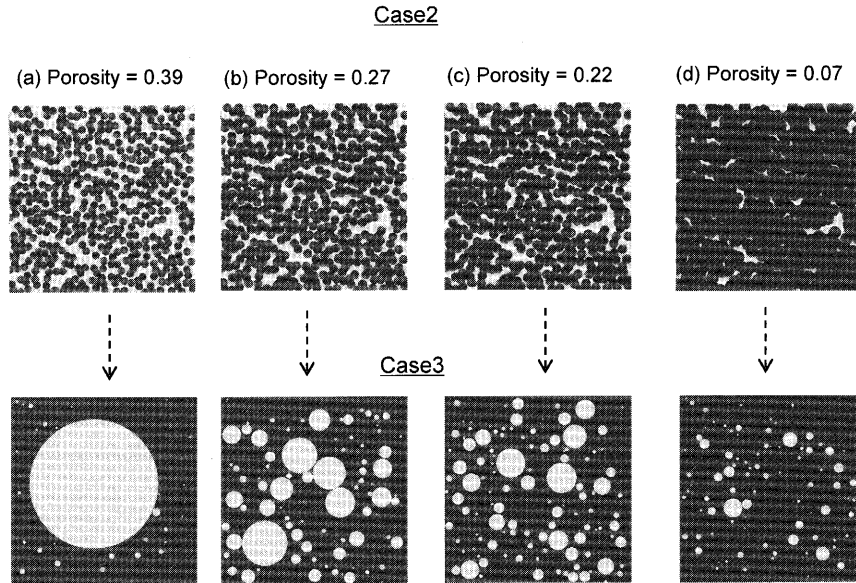


Fig. 9. Examples of unit cell models with round pores replaced with pores of Case 2 and arranged randomly (Case 3).

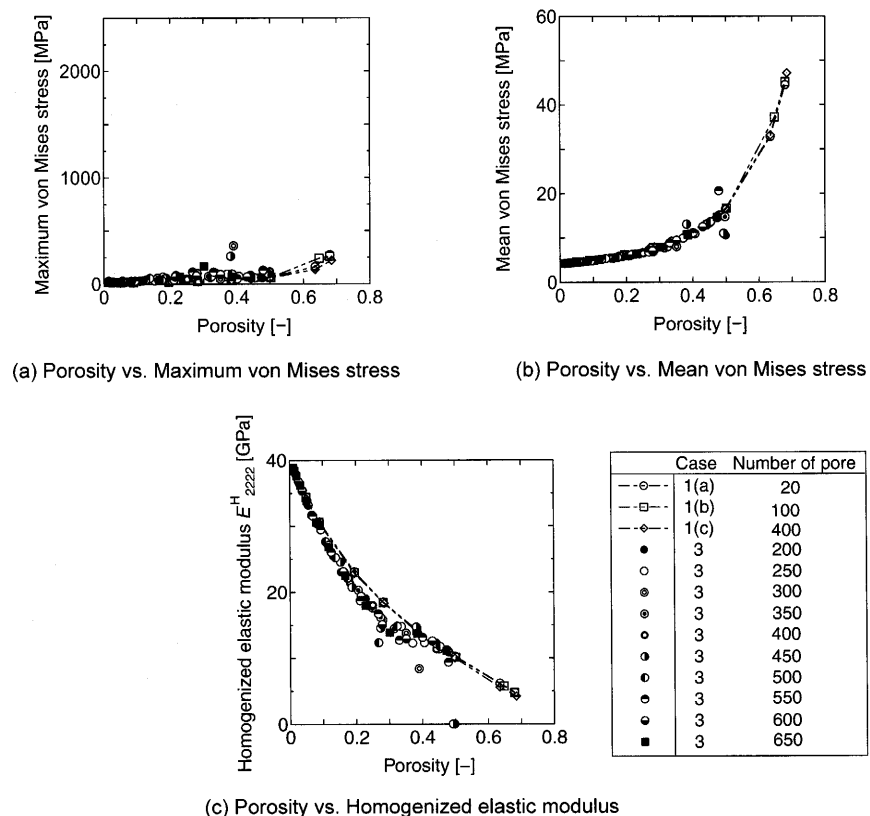


Fig. 10. Effect of porosity on stress and homogenized elastic modulus for Case 1 and Case 3.

り、コークス中の気孔形状が円形に近い形状のものが多
程、応力値が減少し、剛性の低下が少ないことが予想され
る。

4. 結言

マクロおよびミクロ的な挙動を同時に取り扱うことが可

能な均質化法を用いて応力解析を行い、コークスのミクロ
構造がコークス強度に与える影響について検討を行った。
解析においてコークスのミクロ構造は、活性成分由来の組
織と気孔から構成されると仮定し、気孔の形状および配置
が規則的な場合と気孔の形状および配置が不規則な場合の
応力値および均質化弾性係数の値を比較した。その結果、
不規則形状の気孔の存在が応力値の上昇および剛性の低下

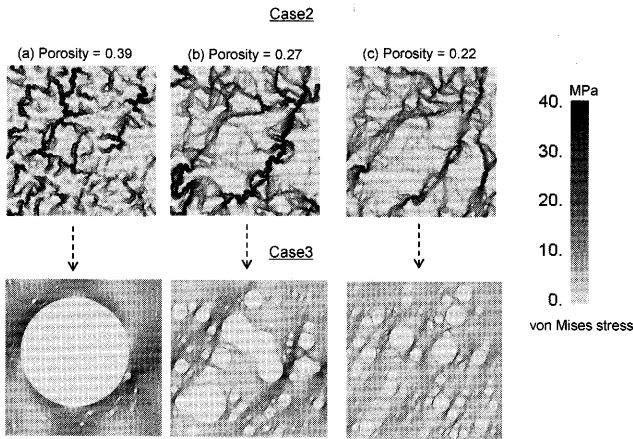


Fig. 11. Comparison of stress distribution between Case 2 and Case 3.

を引き起こすことが示された。さらに、不規則形状の気孔を円形状の気孔に置き換えた場合に対して解析を行い、マイクロ構造における気孔の配置は応力集中や剛性の低下に寄与せず、円形状の気孔は応力を緩和し、剛性の低下が少ないことが示された。本研究は劣質炭対応型コークス化技術研究会（平成14～16年，日本鉄鋼協会，主査：三浦孝一

教授（京都大学）における研究成果をまとめたものであり，謝意を表す。

文 献

- 1) K.Nishioka: *Tetsu-to-Hagané*, **82** (1996), 353.
- 2) H.Seki, O.Ito and M.Iino: *Fuel*, **69** (1990), 1047.
- 3) M.Mihashi, M.Soejima, Y.Asakuma, T.Yamamoto, H.Aoki, T.Miura, K.Kato and S.Itagaki: *Tetsu-to-Hagané*, **88** (2002), 188.
- 4) N.Andriopoulos, C.E.Loo, R.Dukio and S.J.McGuire: *ISIJ Int.*, **43** (2003), 1528.
- 5) M.Matsuura, M.Sasaki, K.Kato and Y.Nakashima: *Tetsu-to-Hagané*, **90** (2004), 69.
- 6) M.Matsuura, M.Sasaki, K.Saito, K.Kato and I.Komaki: *Tetsu-to-Hagané*, **89** (2003), 565.
- 7) T.Nishi, H.Haraguchi and T.Okuhara: *Tetsu-to-Hagané*, **73** (1987), 1869.
- 8) T.Arima: *Tetsu-to-Hagané*, **87** (2001), 274.
- 9) Y.Asakuma, M.Soejima, T.Yamamoto, H.Aoki and T.Miura: *ISIJ Int.*, **43** (2003), 1151.
- 10) 寺田賢二郎，菊池 昇：均質化法入門，丸善，東京，(2003)，33.
- 11) J.M.Guedes and N.Kikuchi: *Comp. Meth. Appl. Eng.*, **83** (1990), 143
- 12) K.Terada, T.Miura and N.Kikuchi: *Comp. Mech.*, **20** (1997), 331.
- 13) J.Fukai, T.Hashida, K.Suzuki, T.Miura and S.Ohtani: *Tetsu-to-Hagané*, **74** (1988), 2209.