

# コークス生成過程における熱応力と塑性変形挙動解析

板垣 省三\*・下山 泉\*・深田 喜代志\*・長谷部 新次\*<sup>2</sup>・鈴木 喜夫\*<sup>3</sup>

Thermal Stress and Deformation of Coke Layer during Carbonization

Shozo ITAGAKI, Izumi SHIMOYAMA, Kiyoshi FUKADA, Shinji HASEBE and Nobuo SUZUKI

**Synopsis :** The non-uniform shrinkage and matrix strength of coke during coal carbonization have a great influence on the size of metallurgical coke. The influence of coal properties and carbonization conditions on the thermal stress and deformation of coke layer were evaluated by the carbonization test and a mathematical simulation model. The deformation was defined by the curvature of coke layer. The coke-fissure formation behavior in coke layer was investigated by the carbonization test using thin coal layer. The fissure distributions and curvature of coke layer were measured by X-ray computerized tomography. The thermal tensile stress leads to cause the curvature and coke fissure of coke layer. There is a good relationship between the curvature, fissures and size distribution of coke and the curvature and thermal stress distributions calculated by the mathematical simulation model. The contraction coefficient and Young's modulus of coal have a great influence on the thermal stress and deformation of coke layer. As the thermal stress in coke layer increases along with increase of the heating rate and transverse temperature gradient of coal layer, the size of coke is decreased. It was clarified that the thermal stress and deformation of coke layer are controlled by coal properties and carbonization conditions.

**Key words :** thermal stress ; deformation ; carbonization ; simulation model ; coal property ; coke fissure ; coke size.

## 1. 緒言

高炉の安定操業を維持するうえでコークスの強度および粒径は重要な因子である。特に、高炉の高出銑比操業や高微粉炭吹込操業時の炉内通気性を確保するため強度や粒径が向上した高品質なコークスが要求されており<sup>1)</sup>、より精度の高い制御技術の確立が求められている。

コークス強度については、石炭性状、乾留条件を考慮した制御方法や推定式が各種提案<sup>2,3)</sup>され実操業に適用されてきた。一方、コークス粒径は従来よりコークス強度や乾留温度に影響されることが知られているが、粒径の推定は実操業を単に統計的に解析した方法を用いているため制御精度に問題があった。最近ではコークス粒径が石炭の乾留過程で発生する熱応力に起因する亀裂により支配されると考え、コークス化機構に基づく亀裂発生挙動やコークス粒径制御に関する検討が行われてきた。例えば、中島ら<sup>4)</sup>は石炭性状、プログラム加熱条件のコークス粒径に及ぼす影響を調査し、コークス粒径制御の可能性を示唆した。鈴木ら<sup>5)</sup>は不活性原料やピッチなどを添加し、粗粒コークスが製造可能なことを示した。また、三浦ら<sup>6,7)</sup>はコークス層内熱応力推算により求めた引張応力位置と炭化室内X線断層写真に

おける亀裂発生位置が定性的に対応することを解明し、コークス塊内の熱応力分布解析による亀裂進展機構の検討を試みている。しかし、コークス炉内では炉幅方向で昇温速度、温度勾配などの温度履歴が異なり、これらを考慮した亀裂発生挙動の定量化やコークス粒径の推定について詳細な検討が行われていない。

このため、本報ではコークス炉内の物理現象を炉幅方向に分割した微分層の挙動の集合と想定し、コークスの亀裂発生挙動解析を行った。コークス炉内伝熱・熱応力推算モデルおよび薄層乾留炉を使用し、石炭性状や乾留条件のコークス生成過程におけるコークスの塑性変形や亀裂生成への影響を検討した。

## 2. コークス層内の熱応力と塑性変形解析

### 2・1 解析方法

コークス層内の伝熱・熱応力推算には三浦ら<sup>6)</sup>の方法を用い温度分布、歪および応力分布の経時変化を計算した。歪量として解析領域の2次元座標の軌跡を評価する方法、反りの変位量を評価する方法などが考えられるが、塑性変形現象を一次元にて簡便に表現するため、歪をコークス表面

平成7年10月31日受付 平成8年1月18日受理 (Received on Oct. 31, 1995; Accepted on Jan. 18, 1996)

\* NKK総合材料技術研究所 (Materials & Processing Research Center, NKK Corp., 1-1 Minamiwatarida-cho Kawasaki-ku Kawasaki 210)

\* 2 NKK製鉄技術開発部 (Ironmaking Technology Development Dept., NKK Corp.)

\* 3 日本鋼管テクノサービス(株) (NK Techno Service Corp.)

の座標値を円近似にて求めた曲率で評価した。

解析領域は軸対称円筒形座標系で半径方向と中心軸方向の2次元とし、解析に用いた要素分割をFig. 1に示す。境界温度条件は境界AおよびBを加熱、境界CおよびDは断熱とした。境界拘束条件は、境界A、BおよびDは拘束無し、境界Cはr軸方向に拘束とした。コークス層厚み方向(z軸)の温度勾配を常に直線となる条件で炉内の微分層を表現した。

2.2 解析条件

石炭およびコークスの物性値である熱伝導率、比熱、密度は既報<sup>9)</sup>の値を、膨張収縮係数およびヤング率については文献値<sup>9,10)</sup>を使用した。計算に使用した線収縮率、ヤング率の温度依存性をFig. 2に示す。軟化溶融層および石炭層のヤング率は、それぞれ1 Paおよび1 MPaと仮定し、コークス層のポアソン比は一定値の0.3を使用した<sup>9)</sup>。

石炭性状や乾留条件の層内温度勾配、昇温速度および試料層厚等により石炭の熱分解挙動や温度履歴等が変化するため、発生する熱応力や塑性変形挙動は異なる。そこで、石炭性状の影響は膨張収縮係数、ヤング率の温度依存性を変更することにより表現した。乾留条件としては、層内温度勾配を5から25K/mmまで、昇温速度を3から10K/minまで変更させた。試料層厚は熱応力発生や塑性変形挙動に影響を及ぼすと考えられるが10mm一定とした。

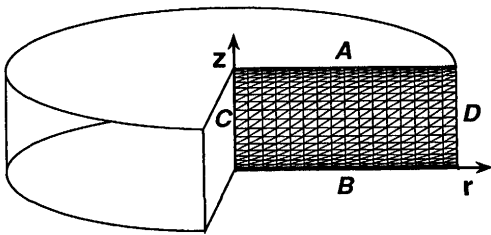


Fig. 1. Mesh divisions for FEM calculation.

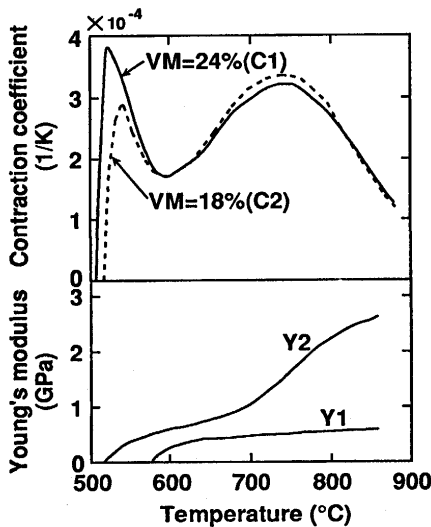


Fig. 2. Temperature-dependence of contraction coefficient and Young's modulus<sup>9,10)</sup>.

3. 乾留試験によるコークスの亀裂発生挙動調査

3.1 実験装置

本試験で用いた熱処理炉の概略図をFig. 3に示す。熱処理炉寸法は横200×奥行200×高さ50mmであり、発熱体および加圧用プレートを有している。加圧プレートは石炭の自由膨張を抑制するために設置され、荷重圧力はコークス炉内における膨張圧を想定して $2.2 \times 10^{-3}$ MPaの一定圧力とした。コークス層内の温度勾配を一定に制御するためコークス層の上面と下面の2面から加熱制御が可能な構造とした。コークス炉内の炭中から炉壁へのガス流れを考慮し上面を高温面、下面を低温面とした。

3.2 乾留条件

使用した石炭の性状をTable 1に示す。石炭の装入条件は、粒度が3 mm以下82%となるように調整した試料を、水分8%、嵩密度750dry-kg/m<sup>3</sup>、試料層厚10mmの一定条件で充填した。乾留条件は層内温度勾配が5から25K/mmまで、昇温速度が1から7 K/minまで変更した。最高熱処理温度はコークス上面温度で500から800°Cまで変化させた。コークス性状としては、亀裂発生状況、粒径、曲率および強度を測定した。コークス亀裂発生状況および曲率は、試料の厚さ方向にX線断層写真を撮り<sup>11)</sup>、亀裂量の測定とコークス表層の座標値測定から円近似で曲率を算出し、塑性変形量を評価した。

4. 結果および考察

4.1 石炭性状の熱応力および塑性変形に及ぼす影響

Fig. 4に熱応力数値解析、薄層乾留試験で得られたコークス塑性変形挙動の温度依存性および石炭性状の影響を示し

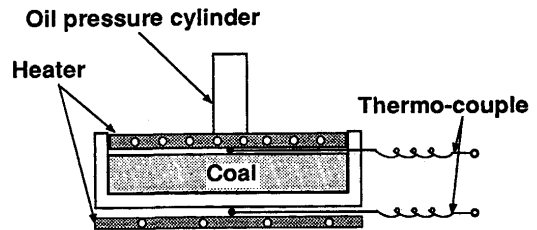


Fig. 3. Carbonization test oven.

Table 1. Coal properties.

	Proximate analysis		Gieseler plastometer				Reflectance
	Ash (d.b. %)	VM (%)	ST (°C)	MFT (°C)	FT (°C)	MF (ddpm)	R <sub>o</sub> (%)
Coal A	9.6	24.9	403	456	492	1380	1.10
Coal B	9.6	21.7	429	465	497	44	1.26
Coal C	10.0	19.3	434	473	503	76	1.40

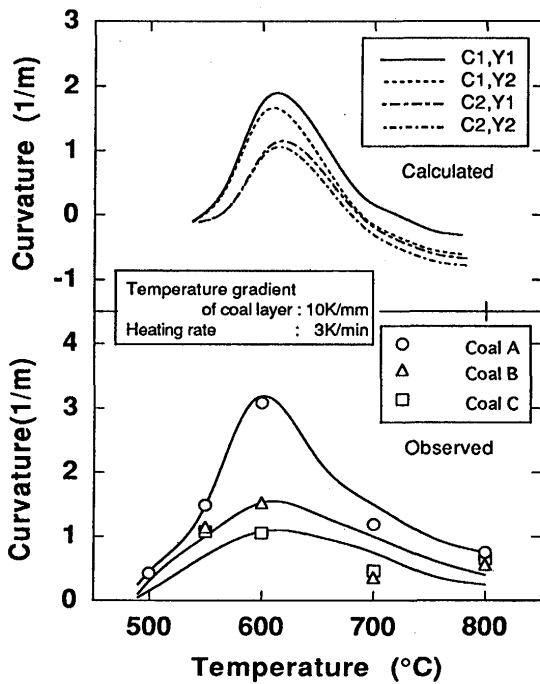


Fig. 4. Effect of coal properties and temperature on the deformation of coke layer.

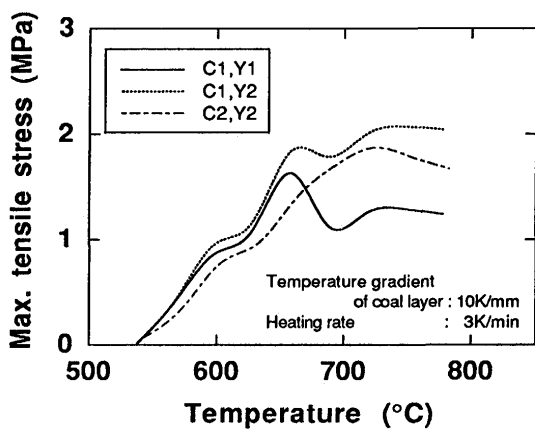


Fig. 5. Effect of coal properties and temperature on the maximum tensile stress in coke layer.

た。計算結果では薄層コークスの曲率は高温部(上面)の加熱面温度がギーセラープラストメータの再固化温度に到達後に発現し、600から650°Cの範囲で極大値を示し、それ以降は徐々に減少した。石炭性状の影響では高揮発分炭ほど曲率の極大値は増大することが認められた。乾留試験においても同様な結果が得られており、モデル計算が塑性変形現象をよく表現していることが確認された。しかし、乾留試験では薄層コークスの曲率は700°C以上の高温域で計算値より大きな値を示した。これは、コークスが細粒化し熱応力が解放されたためと考えられる。

また、薄層コークスの高温部、低温部の温度がそれぞれ線収縮率で極小値、一次ピークを示す温度にて曲率は極大

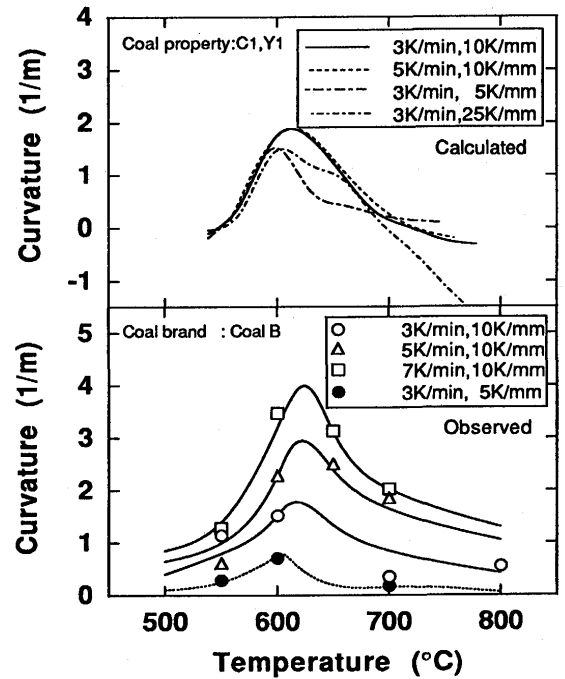


Fig. 6. Effect of carbonizing conditions and temperature on the deformation of coke layer.

値を示した。コークス層内における線収縮率の較差が大きいほど塑性変形が著しく、極小値を示す温度がほぼ一定と考えられることから、薄層コークスの塑性変形には線収縮率の一次ピーク値およびピーク温度が大きく依存すると推察される。ヤング率の塑性変形への影響は線収縮率に比較し小さかった。熱応力数値解析にて求めた石炭性状および熱処理温度とコークス層内の最大熱応力の関係をFig. 5に示した。線収縮率の一次ピークが大きくなることにより最大熱応力値は大きくなる傾向を示した。ヤング率も大きくなるにしたがい最大熱応力値は増大した。

以上より、熱応力の抑制には線収縮率の一次ピーク値またはヤング率の低減が有効的であることが示唆された。

#### 4・2 乾留条件の熱応力および塑性変形に及ぼす影響

Fig. 6に熱応力数値解析、乾留試験で得られたコークス塑性変形挙動と層内温度勾配および昇温速度の関係を示した。数値解析結果では、曲率の極大値は線収縮率の極小値温度である600°Cから650°Cの範囲に現われ、層内の温度勾配の減少によりシャープなピークとなった。数値解析、乾留試験の結果はいずれも層内の温度勾配の増加にともない曲率の極大値は高温側に移行し、モデル計算結果が現象をよく表現していることを確認した。

熱応力数値解析にて求めたコークス層内の最大熱応力と層内温度勾配および昇温速度の関係をFig. 7に、乾留試験にて得られたコークスの熱処理温度と平均粒径の関係をFig. 8に示した。層内温度勾配の増加にともない熱応力は増大し、特に、700°C以上で最大熱応力値の格差は拡大した。また、乾留試験結果では層内温度勾配の増加にともないコークス

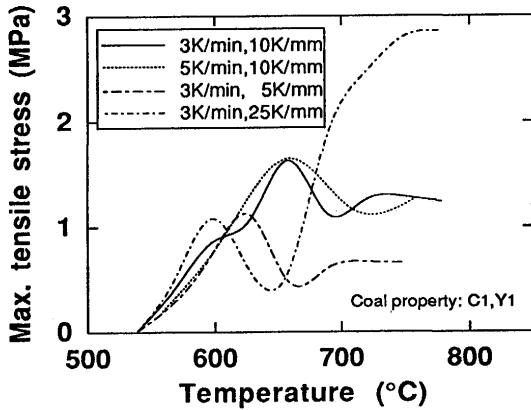


Fig. 7. Effect of carbonizing conditions and temperature on the maximum tensile stress in coke layer.

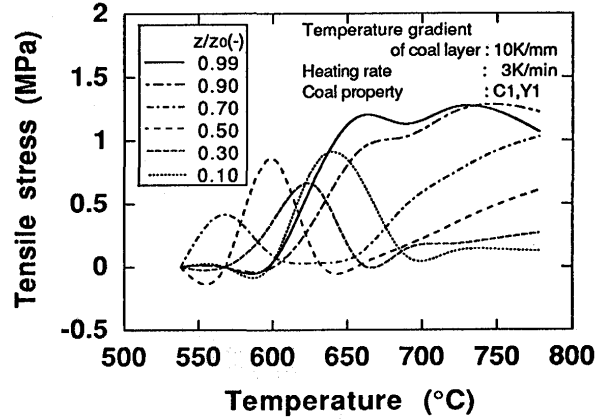


Fig. 9. Effect of temperature on the tensile stress distributions in coke layer.

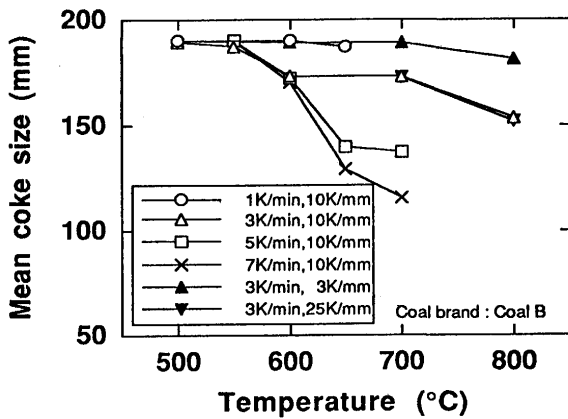


Fig. 8. Relation between mean coke size and carbonization conditions.

粒径の低下が認められ、これは最大熱応力の増大に起因するものと考えられる。層内温度勾配の増加による熱応力の増大は、高温層と低温層の収縮量の差が大きくなることによる歪量の増大と、これにともなう熱応力の増加によるためと推察される。

昇温速度の影響は、数値解析結果では曲率の昇温速度による影響が小さいのに対し、乾留試験では昇温速度の増加にともない曲率の極大値は大きくなり、曲率の極大値を示す温度は高温側に移行した。同様に、数値解析結果では熱応力の昇温速度依存性は確認されなかったが、乾留試験では昇温速度の増加によりコークス粒径の細粒化が認められた。このことは、解析に使用した物性値に昇温速度依存性を与えていないためと推察され、昇温速度依存性を考慮した石炭・コークスの物性値の導入が必要と考えられる。

#### 4.3 亀裂発生挙動解析

コークス層内の熱応力分布解析と乾留試験における熱処理温度と亀裂発生位置、亀裂量を測定することにより、熱応力と亀裂の発生挙動の関係を調べた。

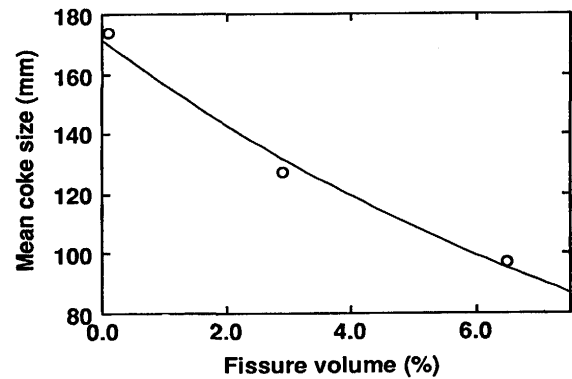


Fig. 10. Relation between fissure volume of coke and mean coke size.

Fig. 9 にコークス層内の厚さ方向の熱応力分布の温度依存性を示した。厚さ方向は層高さ ( $Z_0$ ) に対する相対比にて表現した。熱応力は高温部の表面温度が再固化温度に到達後に発生し、最大熱応力の発生位置は、曲率が極大値となる600から650°Cの温度範囲ではコークス表層から下層に移動し、それ以上の温度域では再び表層部に現われた。これらの現象はコークスの一次収縮および二次収縮挙動によるものと考えられる。最大熱応力の位置が表層部へ移行後は二次ピークを越える温度域までコークス層内の熱応力は増大した。これより、コークスの亀裂発生温度および位置は2つに区分でき、コークス温度が再固化温度から最大曲率温度近傍まではコークス上層または下層から亀裂が発生し、それ以上の温度ではコークス上層から発生すると考えられる。

X線断層写真を用いて亀裂発生挙動への一次収縮と二次収縮の影響について解析した。二次収縮による亀裂発生挙動への影響は、一次収縮終了まで乾留した亀裂発生状況の異なる各種サンプルを二次収縮温度まで熱処理し、前後の亀裂量(1 mm以上の亀裂容積)を測定することにより調べた。一次収縮にてコークス層内で亀裂が発生した場合はコークスを完全に分割するような大きな亀裂になることが明らか

になった。しかし、高強度コークスの場合はコークスを分割するまでに至らず大小の亀裂を内在することが確認された。

Fig.10に一次収縮後の亀裂量と二次収縮後まで乾留したコークスの粒径との関係を示した。一次収縮後と二次収縮後の亀裂量には高度な相関があり、一次収縮により発生した初期亀裂が二次収縮により進展し細粒化したものと推察される。コークス粒径は一次収縮時に発生した初期亀裂と相関があり、熱応力、基質強度および気孔率などにより支配されると想定される。

## 5. 結言

コークス炉の微分層モデルとして薄層コークスにおける熱応力と塑性変形解析を行い、石炭性状および乾留条件が熱応力発生挙動やコークス塑性変形に及ぼす影響を検討、以下のことが明らかになった。

(1)線収縮率の一次ピーク値が大きい高揮発分炭ほど大きな熱応力および塑性変形を示し、線収縮率が熱応力、塑性変形に大きく影響することが確認された。

(2)コークス層内温度勾配の増加により発生する熱応力は急激に増大し、コークス粒径が細粒化することが確認さ

れた。

(3)コークスの亀裂は、一次収縮により発生した初期亀裂が二次収縮により進展することによって拡大することが認められた。

最後に、本研究の推進にあたり、熱応力推算法についてご指導を賜りました東北大学三浦隆利教授に深く感謝いたします。

## 文 献

- 1) 森 侯寿, 高垣法義, 井上英明, 光藤浩之, 岸本純幸, 酒井 敦: 材料とプロセス, 8 (1995), 319.
- 2) 宮津 隆, 奥山泰男, 鈴木喜夫, 福山辰夫, 森 高: 日本鋼管技報, 67 (1975), 125.
- 3) 西岡邦彦, 吉田周平, 播木道春: 鉄と鋼, 70 (1984), 358.
- 4) 中島龍一, 長谷部新次, 武富洋文, 山手義友, 川口泰弘, 鈴木喜夫, 三谷成康: 材料とプロセス, 4 (1991), 149.
- 5) 鈴木 豊, 小林 純, 横溝正彦: 材料とプロセス, 4 (1991), 1098.
- 6) 三浦隆利, 吉野博之, 齊藤正三郎, 大谷重盛: 燃料協会誌, 68 (1989), 1045.
- 7) 青木秀之, 三浦隆利: 材料とプロセス, 7 (1994), 936.
- 8) 松原健次, 田島 治, 鈴木喜夫, 岡田 豊, 中山順夫, 加藤友則: 鉄と鋼, 68 (1982), 2148.
- 9) A.M.Wandless: Journal of the Institute of Fuel, 44 (1971), 531.
- 10) Yu.Ya.Filonenko, V.I.Eremov, V.N.Sharipov and G.N.Markarov: Koks i Khimiya, 4 (1975), 16.
- 11) Y.Kawaguchi, Y.Yamate and N.Suzuki: 2nd International Cokemaking Congress, 1 (1992), 312.