

# 押出し中のコークスケーキ変形挙動

渡壁 史朗\*・武田 幹治\*・杉辺 英孝\*<sup>2</sup>・板谷 宏\*

Deformation Behavior of Coke Cake during Discharge

Shiro WATAKABE, Kanji TAKEDA, Hidetaka SUGINOBE and Hiroshi ITAYA

**Synopsis :** Coke supply for ironmaking will sharply decrease in the beginning of the 21st century in Japan, because of the end of service life of coke ovens. For the purpose of extending the life of the oven, deformation of the coke cake and the load on the side wall during pushing were studied by applying an electric furnace equipped with a movable wall. Cake deformation under compressive force was found to proceed in three stages. The coke cake was reduced in length in the pushing direction in the cake deformation stage, and load was generated on the side walls in the high wall load stage. The secondary crack in the cake prevents the load transmission on the wall. The load transmission rate when the pushing stress was 0.19MPa,  $\beta_p$ , was controlled by adjusting the maximum fluidity and mean reflectance of the blended coal.

**Key words :** coking ; coke ; fluidity ; mean reflectance ; crack ; hard push ; operation ; coke oven ; compressive force ; compression ; deformation stage.

## 1. 緒言

日本国内の多くの室炉式コークス炉は21世紀初頭には従来寿命とされている35年を越えようとしている。現状の代替プロセスとして、連続式成形コークス炉<sup>1)</sup>やJCR (Jumbo Coking Reactor)<sup>2)</sup>の研究が行われているが、高炉での多量使用には使用試験を含めた長期間の研究開発が今後も必要である。また、低品位安価炭の使用量増加時には、押出し中にコークスケーキ(以下、ケーキ)が炉内に閉塞する現象(以下、押詰り)が頻発し、炉体を損傷する。そのため、既存コークス炉の寿命延長と、老朽化した炉体を保護する操業技術の開発が重要である。

老朽化や損傷などの炉体要因による押詰りは熱間溶射補修<sup>3)</sup>により、また付着カーボンによる押詰りについては焼却設備を用いた付着量制御<sup>4)</sup>や炉壁面のガラスコーティングによる付着防止<sup>5)</sup>による解決が図られている。

一方ケーキ特性に起因する押詰りについて、押出し中のケーキの変形挙動に関する研究が従来から行われている。吉田ら<sup>6)</sup>は冷間状態でのケーキの押出し実験を行った。その結果、押出し中にケーキが炉幅方向に広がって炉壁への荷重が発生すること、またケーキ構造や炉壁状態の変化によって炉壁への荷重が変化することを報告している。しかし、この実験ではケーキの圧縮がケーキ自重による摩擦力に依るため、平滑な炉壁状態を想定した実験では炉壁損傷につながる炉壁への荷重の発生は見られなかった。

Hortonら<sup>7)</sup>は可動壁炉によるコークス押出し実験を行った。充填粒子層の圧縮挙動との比較から亀裂構造がコークスの押出し性におよぼす影響を検討し、ケーキ中の過剰な亀裂が炉壁への荷重と押力の増大をもたらすことを見出した。また、石炭溶融時の過剰な膨張や亀裂進展の抑制等によって、炉壁への荷重発生が低減できるとしている。

また、乾留終了時のコークス表面と炉壁間の隙隙(クリアランス)を管理することにより円滑な押出しが可能であることが見出されている<sup>8,9)</sup>が、クリアランスはケーキの幅方向の変形によって押出し初期に消失すると考えられるため、押詰りとの関係を検討する際にはケーキの圧縮変形における動的な観察が不可欠である。

本研究では、可動壁を有する試験乾留炉を用いた実験によってケーキの圧縮変形挙動の解析を行い、コークスの押出し性と石炭配合との関係を明らかにし、ケーキの押出し性に及ぼすケーキ構造の影響を検討した。

## 2. 実験方法

### 2・1 実験装置

Fig. 1に概略を示した装置を用いて、石炭乾留、ケーキ圧縮実験を行った。炭化室内の石炭は両炉壁内部の縦型電気ヒーターにより加熱される。実炉のケーキ構造を再現するために炉幅を実機と同寸法とし、両端のドアを断熱れんがで作製した。炭化室内寸法はL1.00×H1.00×W0.46m、石

平成9年7月10日受付 平成9年11月2日受理 (Received on July 10, 1997; Accepted on Nov. 2, 1997)

\* 川崎製鉄(株)技術研究所 (Technical Research Laboratories, Kawasaki Steel Corp., 1 Kawasaki-cho Chuo-ku Chiba 260)

\* 2 川崎製鉄(株)千葉製鉄所 (Chiba Works, Kawasaki Steel Corp.)

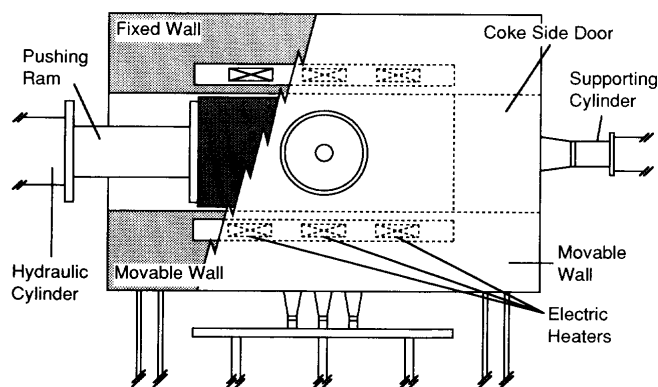


Fig. 1. Schematic illustration of the experimental apparatus.

炭装入量は250kg(dry base)である。

炉壁の片側(以下、可動壁)が炉体と分離した構造となっており、圧縮中に可動壁に作用する荷重を測定可能である。圧縮ラムは油圧シリンダを用いて駆動した。圧縮ラムヘッドの寸法はH0.91×W0.34mである。

## 2・2 実験手順

所定の最大流動度(logDDPM, 以下, MF), およびピトリニット平均反射率(以下,  $\bar{R}_0$ )に調整した配合炭を用いた。調湿炭操業を想定して、0.003m以下の粒径が70%となるように粉碎した配合炭250kgを水分6%に調節した後、所定温度の炭化室内に装入した。装入炭の嵩密度は750kg/m<sup>3</sup>である。加熱中は炉内を大気圧に対して約50~100Paの正圧に保ち、64.8ks乾留を行った。

圧縮試験はラムの推力が実機での押し詰り時に想定される最大推力に相当する75kNになる時点まで行った。コークス排出側(以下, C/S)のドアを固定した状態で押し機側(以下, M/S)の油圧シリンダで炉内のケーキを圧縮した。

実機のコークス押しにおけるケーキの圧縮変形と荷重伝達挙動を検討するために、ケーキ圧縮中のラムの圧縮荷重(以下、圧縮荷重)、可動壁への荷重(以下、炉壁荷重)、C/Sドアへの荷重(以下、伝達荷重)、およびラムヘッドの変位を測定した。圧縮中の炉壁荷重は3点のロードセルで、伝達荷重と圧縮荷重はそれぞれ1点のロードセルで測定した。またラムヘッドの変位は超音波変位計で測定した。

圧縮試験後ケーキを炉外へ押し出し、N<sub>2</sub>雰囲気中で冷却した。冷却後のケーキについて外形寸法、内部の亀裂状態を調べ、その後ケーキを崩してコークス塊の粒度分析等を行った。

Nazarenkoら<sup>10)</sup>、Tuckerら<sup>11)</sup>が指摘しているように、ケーキ圧縮時のコークス塊の破壊、移動が炉壁負荷発生の原因であると考えられる。圧縮中のケーキ内部の変形挙動を明らかにするため、炭化室上部の装入孔から観察する実験を並行して行った。乾留後のケーキ上表面を厚さ約0.1m掻き取り、圧縮中のコークス塊の挙動を水冷箱中に設置した小型カメラで観察した。

Table 1. Experimental conditions.

Crushing	3mm under 70 %
Blending	6~8 Coals
Maximum Fluidity	1.3~2.4 (log DDPM)
Mean Reflectance	0.9~1.2 (%)
Moisture	6 %
Wall Temperature	1273 K
Heating Time	64.8 ks (18 hours)
Carbonization Time	57.6ks (16 hours)
Ram Velocity	0.02 m/s

## 2・3 実験条件

基本的な実験条件をTable 1に示す。ケーキ構造に起因する押し出し性の変化を検知しやすくするために乾留温度を1273Kとした。乾留ガスの発生量の減少にともなう排ガス温度の低下を熱電対で測定し、コークス化終了(火落ち)の判定を行った。乾留温度1273Kでの火落ち時間は約57.6ksで、その後7.2ks炉温を保持した。乾留完了時のケーキ中心温度は1193±20Kであった。

圧縮試験時のラム速度は、実機で測定したケーキ変形の平均ひずみ速度に一致するように約0.016m/s一定とした。

コークス強度を支配する石炭MFと $\bar{R}_0$ <sup>12,13)</sup>がコークスの押し出し性に与える影響を調査した。低品位炭の増配合を想定してMF=1.3~2.4、 $\bar{R}_0$ =0.9~1.2の範囲で石炭配合を行った。

## 3. 実験結果

### 3・1 圧縮中のケーキ変形挙動

ケーキ圧縮中の各荷重とラム変位の測定例をFig. 2に示す。ケーキは圧縮中盤までほぼ等速で変形し、徐々に変形速度が低下する。変形の初期には伝達荷重、炉壁荷重はほとんど発生せず、押力の大部分は炉底との摩擦とケーキ変形とによって消失する。圧縮中盤で伝達荷重が増加し始め、押力とほぼ並行に推移する。圧縮後半では炉壁荷重の増加につれて伝達荷重と押力との差が大きくなり、炉壁へ伝達する力の割合が増加することを示している。

押力に対する炉壁荷重、伝達荷重の比をそれぞれ $\beta$ 、 $\gamma$ として、圧縮変形中の両者の変化をケーキの圧縮ひずみに対してプロットした結果をFig. 3に示す。圧縮変形の中盤には主に $\gamma$ が増加し、 $\beta$ はほぼ一定で推移する。圧縮ひずみが0.1~0.12に達した後では、 $\gamma$ の増加は緩やかとなって炉壁荷重が急激に増加する。

Hortonら<sup>7)</sup>によると、押し出し中のケーキに関する力の釣合い状態は次式で表される。

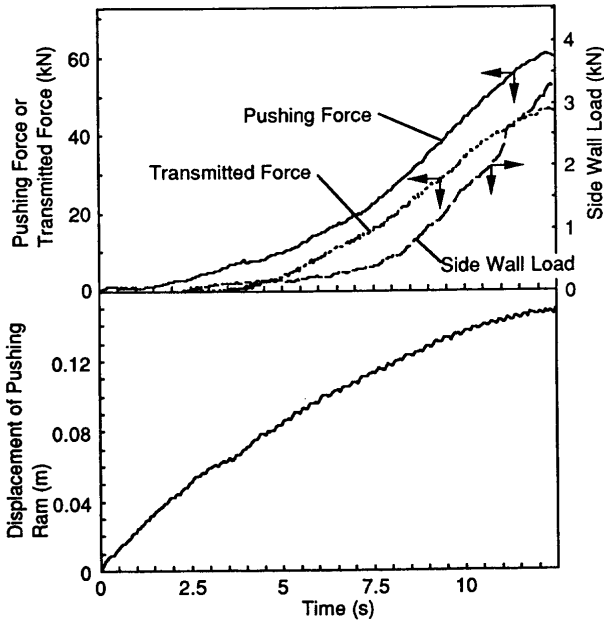


Fig. 2. Typical measurement of forces and deformation of coke cake during pushing.

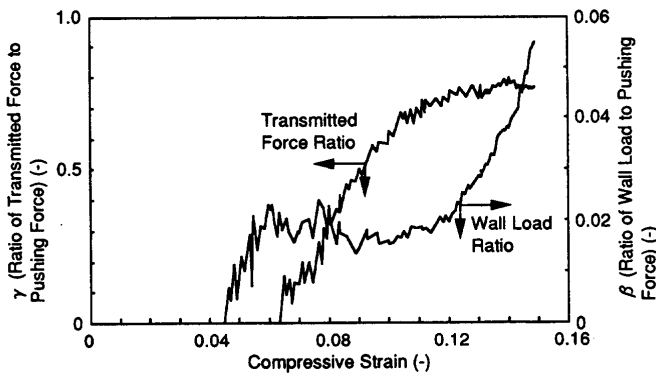


Fig. 3. Change in ratios of the transmitted force and the wall load to the pushing force during pushing.

$$Q = \frac{\mu_s \rho b^2 h g}{2 \mu_w \beta L} \left[ \exp\left(\frac{2 \mu_w \beta L}{b}\right) - 1 \right] \dots\dots\dots (1)$$

ただし、Qはラムの押力、 $\mu_s$ 、 $\mu_w$ は炉底、炉壁とケーキとの摩擦係数、b、h、Lはそれぞれケーキの幅、高さ、長さ、 $\rho$ はケーキの見掛け密度、gは重力加速度である。すなわち、 $\beta$ の増大は押し出しに有効な推力の低下と炉壁との摩擦力の増加を意味する。

また、本実験からケーキ変形が一定量を超えると押力の増分は炉壁への荷重に分配され、押し出しを阻害することがわかる。そこで、ラムヘッド面積当たりの圧縮応力0.19MPa時の $\beta$ (以下、 $\beta_p$ )をコークスの押し出し性の指標と考えて以下の検討を行った。

3・2 圧縮によるケーキ構造の変化

Fig. 4に圧縮前後のケーキ内部の様子を示す。これらは同一の配合条件(MF=2.2、 $\bar{R}_o=1.1$ )のコークスについて、圧縮方向に垂直なケーキ内部の断面写真から亀裂のみを抽

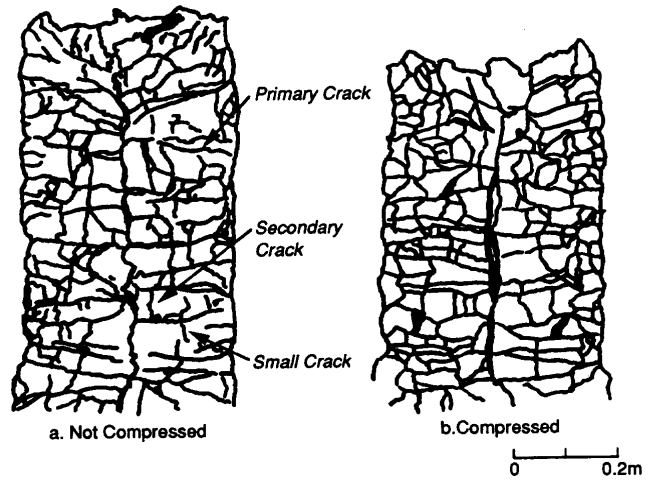


Fig. 4. Primary and secondary cracks observed in the cross section of coke cake.

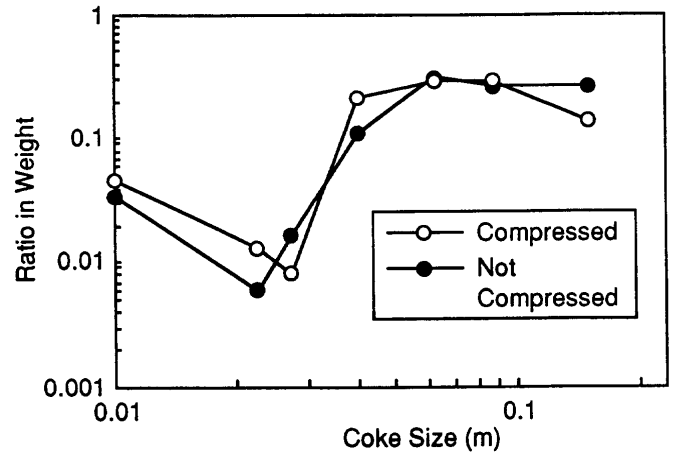


Fig. 5. Changes in coke size distribution before and after pushing of coke cake.

出したものである。観察した断面の位置はいずれもケーキの中央である。

Fig. 4で観察される亀裂は、ケーキ中央の空隙と炉壁間を貫通する大亀裂(以下、1次亀裂)と、それに垂直にコークス塊を貫通する小亀裂(以下、2次亀裂)に大別できる<sup>14)</sup>。ただし、ここではカリフラワー部の亀裂は考えない。また、1次亀裂に垂直で塊を貫通しない亀裂(以下、潜在亀裂)も見られる。Fig. 4のa、bを比較すると、荷重の作用によって2次亀裂の数が増加することがわかる。

Fig. 4のケーキについての粒度分析結果をFig. 5に示す。ケーキの圧縮によって、粒径0.1m以上のコークス塊の比率が減少し、0.03~0.05mのコークス塊の割合が増加している。1次亀裂間隔が平均0.04~0.05m程度であることから、圧縮による2次亀裂数の増加は粒径0.03~0.05mのコークス塊の増加に対応している。

3・3 石炭配合がケーキ押し出し性に及ぼす影響

Fig. 6に $\beta_p$ と配合炭MF、 $\bar{R}_o$ との関係を示す。配合炭MF、 $\bar{R}_o$ の増加とともに $\beta_p$ は減少する。極端な低MF、 $\bar{R}_o$

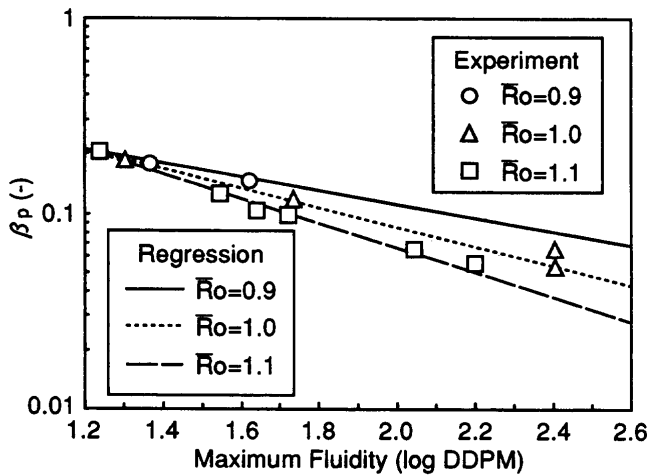


Fig. 6. Relation between  $\beta_p$  and the property of blended coal.

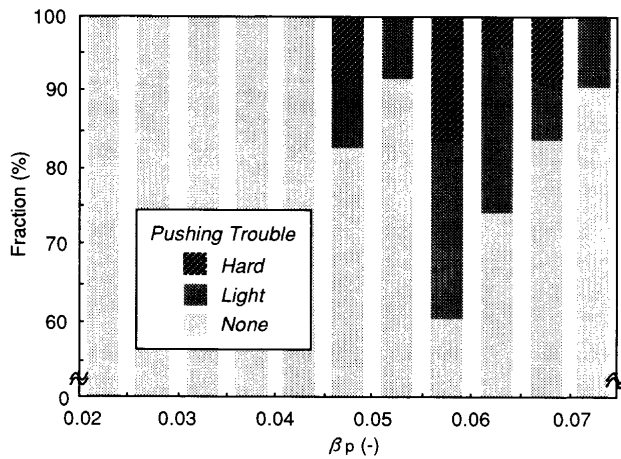


Fig. 7. Relation between the hard pushing and  $\beta_p$ .

配合では、コークス塊間の相互作用がない粒体的な圧縮挙動を示して $\beta_p$ は粒体での値<sup>15)</sup>0.19に近づき、逆に高MF、 $\bar{R}_o$ 配合では連続体に近い挙動を示して $\beta_p$ は0に漸近すると考え、 $\beta_p$ とMF、 $\bar{R}_o$ との関係を(2)式で重回帰した。

$$\ln \beta_p = (a\bar{R}_o + b)(cMF + d) + e \quad \dots\dots\dots (2)$$

ここでa~eは定数で、今回の乾留条件ではa=-3.32, b=2.22, c=1.00, d=-1.26, e=-1.66である。(2)式により、石炭配合からケーキの押し出し性を表す指標 $\beta_p$ を算出することができる。(2)式による回帰結果をFig. 6に併記した。

#### 4. $\beta_p$ 配合管理によるコークス押し出し性の制御

千葉製鉄所のコークス炉において、 $\beta_p$ (計算値)と押し出し性指標との関係を調査した。対象としたコークス炉は、炉高6.4m、炉幅0.43m、長さ14.8m、66門の炉団である。炉令は約17年で、炉体損傷はほとんど見られない。調査期間中の石炭配合は $\bar{R}_o=0.87\sim 1.14$ , MF=1.82~2.98である。極端な操業条件を除いた操業データを用いた。押し出し性指

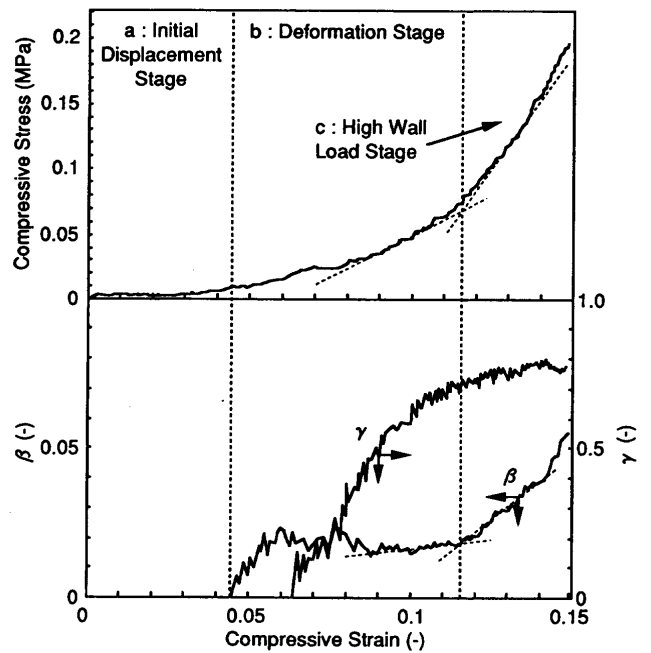


Fig. 8. Changes in  $\beta$  and transmitted force ratio with compressive strain.

標は、1日の全窯全押し出し数に対する押し出し不良数の比で表した。

Fig. 7に押し出し不良の発生頻度を $\beta_p$ 別に表した。 $\beta_p$ と押し出し不良の間には明瞭な相関が見られ、コークス炉の損傷程度や操業条件によって変化するが、押し出し不良が発生しない $\beta_p$ のしきい値が存在することがわかった。

#### 5. 考察

コークスの圧縮変形中の内部構造の変化とそれとともに生ずる炉壁荷重は、コークスの押し出し性を支配することがわかった。内部構造の変化と炉壁荷重との関係、さらに石炭配合がおよぼす影響を考察する。

##### 5.1 圧縮中のケーキ変形挙動

ケーキ圧縮中の $\beta$ ,  $\gamma$ および圧縮応力の変化例をFig. 8に示す。これから、ケーキの圧縮変形は次の3段階に分けられることがわかる。

段階a: 炉壁荷重、伝達荷重は現れず、押力のみがほぼ一定値で推移する。これは、ラムによってケーキが炉底上を滑り、圧縮前のケーキと両側のドアとの間隙が消滅する過程である。

段階b: この例ではケーキひずみ量約0.045で炉壁荷重が、約0.063で伝達荷重が発生する。それぞれの発生時のケーキひずみ量は実験によってばらつきが見られたが、いずれの場合も炉壁荷重が先に発生した。炉壁荷重は緩やかに増加するのに対し、伝達荷重は急激に増加する。この間の押力の増加は少ない。これは、ケーキ内部の空隙が消滅しながらケーキ全体が圧縮方向に収縮する過程で、押力は大部分ケーキの推進に使われる。

この段階では、ケーキの圧縮中に内部のコークス塊の一部が押出されるように炉壁方向へ広がる挙動が観察された。これは、一般に1次亀裂が圧縮方向に垂直でないためであり、西岡ら<sup>16)</sup>が観察した現象に対応すると考えられる。炉壁方向に移動して炉壁に接触したコークス塊を通して押力が炉壁に伝達され、炉壁荷重を発生する。炉壁荷重の発生時点が伝達荷重に比べて早いことは、ケーキの炉壁方向への広がりがラム近傍からC/Sに向かって順次派生することを示している。

段階c: ケーキの変形量が小さくなり、ケーキ内部の塊の移動はほとんど起こらない。炉壁に接触するコークス塊を通じて炉壁に伝達される荷重の割合が大きくなるため $\beta$ の増加が急激になり、伝達荷重の増加は緩慢となる。 $\beta$ の増加時の $\gamma$ の増加が小さいのは、炉底との摩擦力が増加したためと考えられる。

ケーキの変形がこの段階に至ると、 $\beta$ が急激に増大して押出し性が悪化する。

ここでは、以上の変形段階をそれぞれ、初期移動段階、圧縮変形段階、炉壁荷重増大段階と呼ぶ。Fig. 9, 10に各変形段階におけるケーキ変形量、 $\beta$ と石炭MFとの関係を示

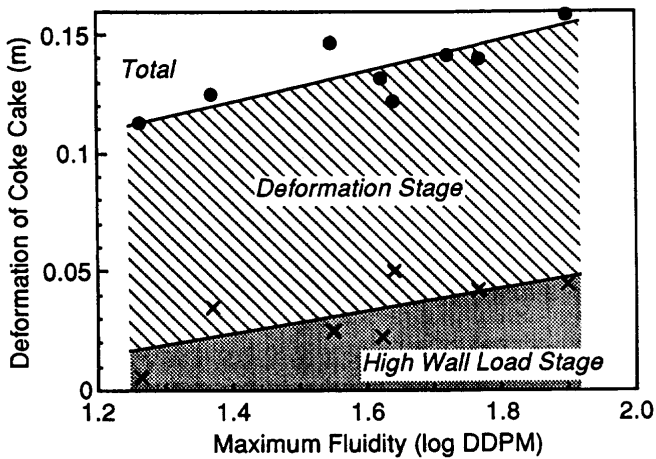


Fig. 9. Deformation of coke cake in each stage.

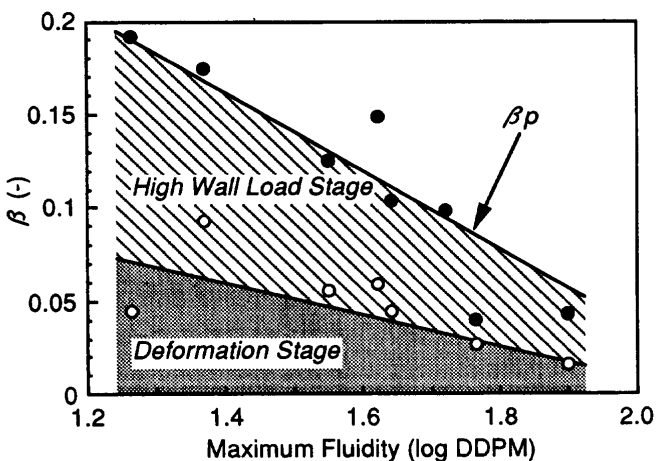


Fig. 10.  $\beta$  in each stage.

す。実験条件の範囲内では、 $\bar{R}_o$ がコークスケーキの変形におよぼす影響は不明瞭であった。この結果から、圧縮変形段階ではケーキの圧縮変形が、炉壁荷重増大段階では $\beta$ の増加が支配的であることがわかる。

### 5・2 炉壁荷重発生機構

Fig.11に圧縮後の炉壁、炉底に垂直な高さ1mのケーキ断面当りの2次亀裂数と $\beta p$ との関係を示した。2次亀裂の増加とともに $\beta p$ が減少することがわかる。

上述したように、炉壁荷重増大段階での炉壁荷重の発生は圧縮変形段階でのコークス塊の移動に大きく影響される。一般にコークス粒径が低下すると押しにくいと考えられ、Hortonら<sup>7)</sup>もケーキ内の亀裂増加とともに炉壁荷重が増大することを報告しているが、これら従来の議論では亀裂の種類を区別していないか、乾留中の熱応力によって決まる1次亀裂を考えている。しかし、押力の分配を考える場合には、方向、生成機構およびコークス粒径に与える影響が異なる1次亀裂と2次亀裂に分けて考える必要がある。石炭性状を変更して行った今回の実験では、Fig. 5のように圧縮前後で2次亀裂数の増加に一致する粒径の変化が見られ、1次亀裂数の変化はなかった。すなわち、石炭性状によるケーキの押し性は、2次亀裂に代表されるケーキ強度によって決まると考えられる。圧縮中に2次亀裂数が増加すると、圧縮変形段階でのコークス塊の炉壁方向への移動が2次亀裂で分断されるため、炉壁への荷重伝達が阻害されると考えられる。

### 5・3 石炭配合とケーキ内部構造との関係

コークス内部の亀裂は乾留中の熱応力に起因するが<sup>17,18)</sup>、Kloseらは再固化開始時には亀裂パターンが既に存在し、その後のコークス化にともなう収縮過程では亀裂の進展と拡幅のみが進行すると報告している<sup>19)</sup>。今回の実験のように石炭の溶解性が低い場合には、粒子間の結合は粒子の軟化膨張によって行われ<sup>20)</sup>、溶解成分の量によって支配されると考えられる。高MF炭が溶解してネットワークが発達し

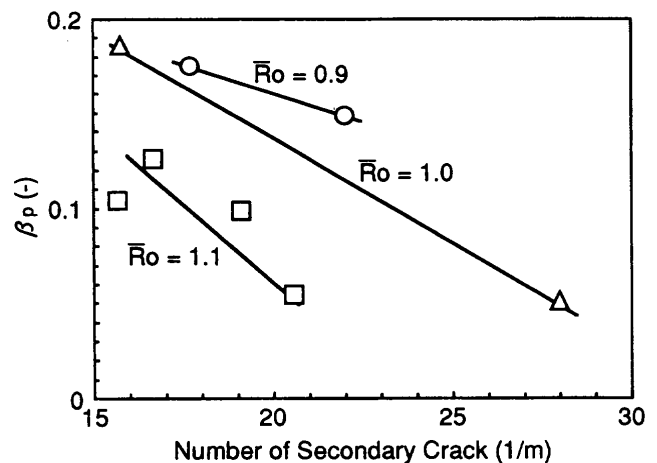


Fig. 11. Relation between  $\beta p$  and number of secondary crack.

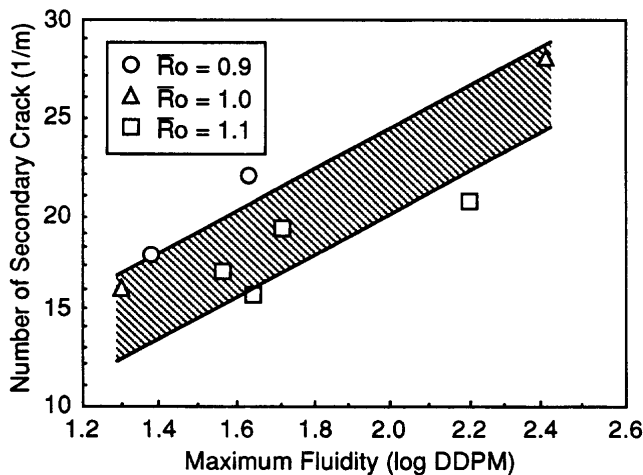


Fig. 12. Relation between number of secondary crack and property of blended coal.

たコークスでは再固化開始時の亀裂形状は微小で先端は鋭利であるのに対して、低MF炭コークスでは石炭粒子間の空隙が充分には充填されず、内包する亀裂は粗大であると考えられる。

押出し中の圧縮応力によって内包クラックが進展するには応力集中が必要であると考えられている<sup>21)</sup>。Griffith理論によると、脆性破壊における亀裂進展の応力限界値は亀裂長さの平方根に反比例し<sup>22)</sup>、楕円孔を有する平板の引張り応力下での応力集中係数は先端部の開口半径の平方根に反比例するから、微小で鋭利な高MF炭コークス内部の亀裂は、低MF炭コークスに比較して低い応力で容易に進展すると考えられる。その結果、高MF炭コークスでは押出し中の2次亀裂数の増加が大きくなる。今回の実験やTuckerら<sup>11)</sup>の実験で見られた2次亀裂数の増加は、再固化時の潜在亀裂が熱応力および押出し時の圧縮応力によって成長したためと考えられる。

Fig.12に示したように、石炭のMFの増加にもなって圧縮後の2次亀裂数が増加する。松平ら<sup>23)</sup>、横山ら<sup>24)</sup>は、石炭MFの低下とともに塊が割れやすくなることを報告しているが、これは炉壁と接するカリフラワー部のコークス塊についての知見であり、本論文の2次亀裂とは異なる。高MF炭コークスでは、押出し中の2次亀裂数の増加により押出し性が改善される。

今回の実験では、石炭 $\bar{R}_o$ の増加による $\beta_p$ の減少の機構は明らかにできなかったが、マイクロ強度の増加<sup>25,26)</sup>が影響していると考えられる。

## 6. 結言

(1) 石炭性状を変更したコークスの圧縮実験を行った結果、圧縮中のケーキ変形は初期移動段階、圧縮変形段階、炉壁荷重増大段階の3段階から成り、第2の段階で圧縮変形が、第3の段階で炉壁への荷重発生が支配的となることを見出した。ケーキが押出し方向の力を受けた時に発生する炉壁荷重( $\beta_p$ )は、ケーキ内の2次亀裂数に大きく依存する。

(2) 石炭性状(MF,  $\bar{R}_o$ )は、ケーキ内の亀裂構造を支配し、この亀裂構造を通してコークス圧縮時の炉壁への負荷を決定している。炉壁荷重と石炭配合との関係を表す実験式を得た。

## 文 献

- 1) 奥原捷晃：鉄鋼界，**34** (1984)8, 86.
- 2) H.Bertling and W.Rohde：The First International Congress of Science and Technology of Ironmaking, ISIJ, Tokyo, (1994), 420.
- 3) 松田恵嗣，高橋 保，沼澤 誠，松本和俊，大平英毅：材料とプロセス，**9** (1996), 152.
- 4) 小久保信作，駒村 聖，杉辺英孝：材料とプロセス，**8** (1995), 127.
- 5) 高平拓也，安藤 猛，笠岡玄樹：材料とプロセス，**9** (1996), 646.
- 6) 吉田周平，西岡邦彦，植田 宏：鉄と鋼，**71** (1985), S859.
- 7) A.E.Horton and D.T.Freeman：The Coke Oven Managers' Year Book, (1979), 209.
- 8) 主代晃一，松井 貴，花岡浩二，井川勝利，反町健一：鉄と鋼，**81** (1985), 625.
- 9) V.I.Addes：Proc.of 52nd Ironmaking Conference, AIME, New York, (1993), 303.
- 10) B.G.Nazarenko *et al.*：Koks Khim., **10** (1978), 18.
- 11) J.Tucker, G.Everitt and G.Hall：Proc.of 49th Ironmaking Conference AIME, New York, (1991), 211.
- 12) 美浦義明：燃料協会誌，**63** (1984), 882.
- 13) 井川勝利，笠岡玄樹，大島弘信：材料とプロセス，**2** (1989), 924.
- 14) T.Arima, T.Nishi and T.Okuhara：2nd International Cokemaking Congress, The Institute of Materials, London, (1992), 248.
- 15) H.A.Janssen：VDI-Z., **39** (1895), 1045.
- 16) 西岡邦彦，植田 宏，小川真資，吉田周平：コークスサーキュラー，**35** (1986), 21.
- 17) 美浦義明，吉野博之，斎藤正三郎，大谷重盛：燃料協会誌，**68** (1989), 1045.
- 18) 板垣省三，下山 泉，深田喜代志，長谷部新次，鈴木喜夫：鉄と鋼，**82** (1996), 414.
- 19) W.Klose and F.Kunde：Fuel，**65** (1986), 1964.
- 20) 持田 勲，角南好彦：鉄と鋼，**71** (1985), 1589.
- 21) 美浦義明：燃料協会誌，**63** (1984), 419.
- 22) 井形直弘：材料強度学，培風館，東京，(1983), 147.
- 23) 松平寛司，西村 勝，朝田真吾：材料とプロセス，**9** (1996), 43.
- 24) 横山貴司，朝田真吾，松平寛司，西村 勝：材料とプロセス，**9** (1996), 644.
- 25) 宮川亜夫，嵯峨三男，神下 護，谷原秀太郎：鉄と鋼，**66** (1980), A21.
- 26) 西岡邦彦，吉田周平：鉄と鋼，**70** (1984), 351.