

# コークスの剪断応力による粉化挙動解析

深田 喜代志\*・板垣 省三\*・下山 泉\*・佐藤 道貴\*

Mechanism of Coke Deterioration by Shear Stress

Kiyoshi FUKADA, Shozo ITAGAKI, Izumi SHIMOYAMA and Michitaka SATO

**Synopsis** : To clarify the generation behavior of fine coke by shear stress in the lower part of blast furnace, coke degradation behavior was investigated using the shear stress tester. Furthermore the theory of tribology was applied to estimate the resistance of wear. The main results obtained are as follows;

1) The generation rate of coke fine was basically proportional to sliding distance. Shear conditions (shear rate and vertical stress) had a great effect on coke deterioration behavior.

2) The coke fine ratio increased rapidly with the vertical pressure or the decrease of coke strength. It was assumed that plastic deformation of coke surface layer resulted in the expand of real contact area among lump coke.

3) The wear resistance of coke could be described by the specific wear rate and breaking energy which were approximately  $0.1 \text{ kJ}^{-1}$  and  $200 \text{ kJ/kg}$  respectively for normal metallurgical coke.

**Key words** : ironmaking; coke; coke degradation; coke strength; shear stress.

## 1. 緒言

高炉への微粉炭吹込みは、溶銑コストの低減やコークス炉の老朽化対策に効果的な技術であり、吹込み量の積極的な拡大が推進されてきた。1998年6月には月間266 kg/tの多量吹込み操業も達成されており<sup>1)</sup>、この技術は高炉の定常操業として定着しつつある。一方、吹込み量の増加にともない高炉下部のコークス粉蓄積量は増大し、炉内圧力損失の上昇に影響を及ぼしていることが指摘されている<sup>2)</sup>。安定した微粉炭多量吹込み操業を継続していくためには、高炉内におけるコークスの粉化挙動を定量的に把握することが望まれている。

これまで、高炉解体調査によりコークスの劣化挙動に関する定性的な傾向が確認され<sup>3,4)</sup>、高炉の部位ごとの現象に即したコークス粉化挙動解明に関する研究が行われてきた。高速衝撃<sup>5)</sup>、熱衝撃<sup>6)</sup>、燃焼粉化<sup>7)</sup>などレースウェイ近傍のコークス粉化挙動に関しては様々な視点から研究が行われてきた。一方、シャフト部の摩耗挙動に関しては、回転研磨盤を用い摩耗強度を測定した例<sup>8)</sup>があるものの、ほとんどがドラム強度指数等の回転強度指数で評価されている。

しかし、微粉炭多量吹込み操業時の炉芯蓄積粉の大部分が炉芯上部からの流入粉であることから<sup>9)</sup>、シャフト部やレースウェイ縮流部において剪断応力により発生するコークス粉は無視できず、より精度の高い解析が必要である。

したがって、高炉内コークスの降下挙動とそれともなう粉化現象を明確にすることが必要となっている。清水ら<sup>10)</sup>は高炉冷間モデルを用いて装入物の降下挙動、応力分布の測定を行い装入物の力学的挙動を明らかにした。また、片山ら<sup>11)</sup>は弾塑性理論に基づいた数学モデルを構築し実高炉内の応力分布の評価を行った。しかしながら、これらの結果に基づいたコークスの粉化に関する検討はほとんど行われていないのが現状である。そこで、本研究では高炉内におけるコークス充填層の降下挙動をシミュレート可能なコークス粉化試験装置を用い、剪断応力場におけるコークスの粉化挙動について定量的な解析を行った。この結果、コークスの剪断粉化機構に関する基礎的な知見が得られたので報告する。

## 2. 実験方法

### 2.1 実験装置

Fig. 1にコークス粉化試験に用いた剪断粉化試験装置の模式図を示す。本装置はコークス充填層部と駆動部からなる。充填層部は底板1枚、側板4枚(固定板2枚、可動板2枚)に囲まれており、幅300 mm、奥行300 mmの充填層を形成する。可動板は底辺を軸とした往復運動が可能な構造をしているため、充填層には高さ方向で異なる水平移動速度が生み出され、この結果コークス充填層内には剪断速度が発生する。充填層の剪断速度はモーターの回転速度およ

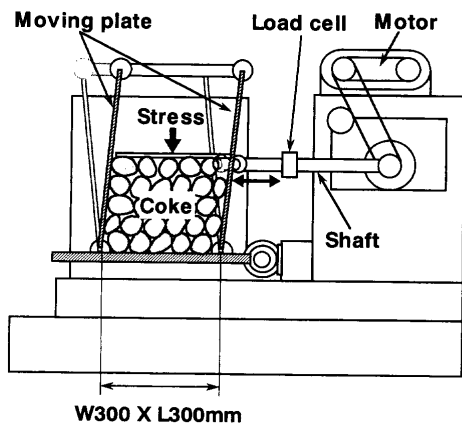


Fig. 1. Schematic illustration of shear stress test.

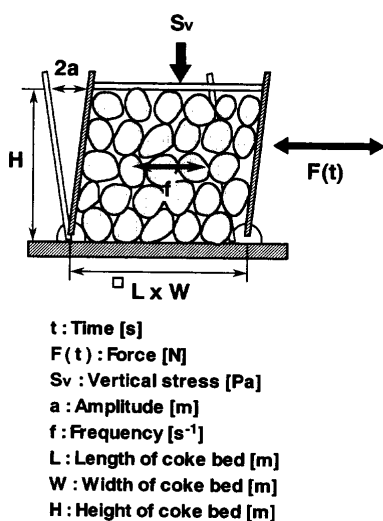


Fig. 2. Schematic drawing of the estimation for shear conditions.

びシャフトの水平方向の移動幅で制御する。垂直応力は充填層上部への荷重値により調整される。また、充填層に与えられる力はシャフト中間部に設置したロードセルで検出する。

2.2 剪断条件

Fig. 2にコークス充填層に係る力学状態の概念図を示す。剪断応力  $S_s$  (Pa), 剪断速度  $V_s$  ( $s^{-1}$ ) および剪断エネルギー  $E_s$  (J) はそれぞれ(1)から(3)式で表せる。

$$S_s = F(t) / (L \cdot H) \dots\dots\dots (1)$$

$$V_s = 2\pi a f \cdot \sin(2\pi f t) / H \dots\dots\dots (2)$$

$$E_s = \int_0^T F(t) \cdot a \pi f \cdot \sin(2\pi f t) dt \dots\dots\dots (3)$$

ここで、剪断時間  $t$  (s), 剪断力  $F(t)$  (N), 充填層長さ  $L$  (m), 充填層高さ  $H$  (m), 振幅  $a$  (m), 振動数  $f$  ( $s^{-1}$ ), 剪断終了時間  $T$  (s) とする。

Table 1に本試験の剪断条件を示す。本試験では剪断速度  $V_s$  と垂直応力  $S_s$  を変化させた。なお、剪断速度  $V_s$  は振幅  $a$  と振動数  $f$  の両方の条件によって決定されるが、コークス

Table 1. Shear conditions.

Shear rate ( $s^{-1}$ )	0.12 / 0.23 / 0.35 / 0.43
Amplitude (m)	0.03
Vertical stress (kPa)	0.5 / 6.0 / 16.9 / 27.8
Shear time (min)	10 / 20 / 30 / 40 / 50

Table 2. Coke properties.

	DI <sub>15</sub> <sup>30</sup> (-)	CSR (-)	CRI (-)
Coke A	88.0		
Coke B	92.6		
Coke C	94.1	58.0	28.5
Coke D	94.7	59.7	27.2
Coke E	95.1	61.1	26.1

Table 3. Coke properties after reaction.

	Properties	Reaction ratio			
		0%	6%	15%	25%
Coke C	MSI <sub>28-65#</sub> (%)	38.3	37.4	37.0	37.0
	Porosity (%)	46.7	48.4	52.0	57.7
Coke D	MSI <sub>28-65#</sub> (%)	38.7	36.3	35.5	32.2
	Porosity (%)	45.1	47.5	50.6	55.4
Coke E	MSI <sub>28-65#</sub> (%)	41.1	40.2	39.8	38.5
	Porosity (%)	47.8	48.5	54.2	56.8

\* Reaction temperature : 1000°C, Reaction gas : CO<sub>2</sub> 100%

の回転モーメントのコークス剪断粉化に及ぼす影響を一定とするため振幅  $a$  は一定とした。

2.3 コークス試料

使用したコークスの性状を Table 2, 3に示す。コークス性状が剪断粉化挙動に及ぼす影響を評価するためドラム強度指数 DI<sub>15</sub><sup>30</sup> およびソリューションロス反応率の異なるコークスを使用した。また、ドラム強度試験の粉化特性と比較できるように試料には粒径が 50 mm 以上のコークスを使用し、試験1回あたりの充填重量は 10 kg とした (充填層高さ約 250 mm)。

3. 結果

3.1 剪断応力によるコークスの粉化

コークス充填層に加わる剪断応力の推移を Fig. 3に示す。剪断応力は剪断粉化試験装置のロードセル値と剪断方向の垂直断面積 (充填層奥行: 300 mm と充填層高さの積) により計算した。剪断応力は剪断速度の増加とともに大きくなり、コークス充填層に働く最大剪断応力は振幅 0.03 m, 垂直応力 6.0 kPa の条件下において約 2.0 kPa であった。また、剪断応力はコークス性状に依存し、振幅、振動数、垂直応力が一定の条件下においては高ドラム強度コークスあるいは低反応率コークスに働く剪断応力が大きくな

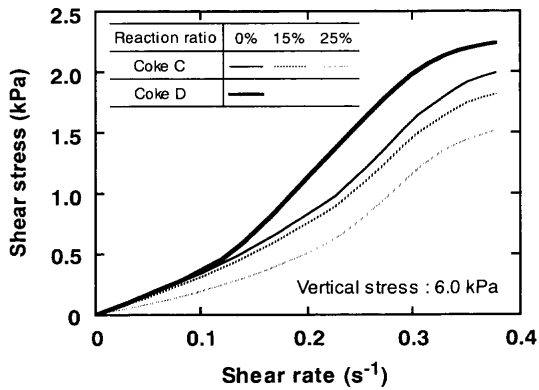


Fig. 3. Relationship between shear rate and shear stress.

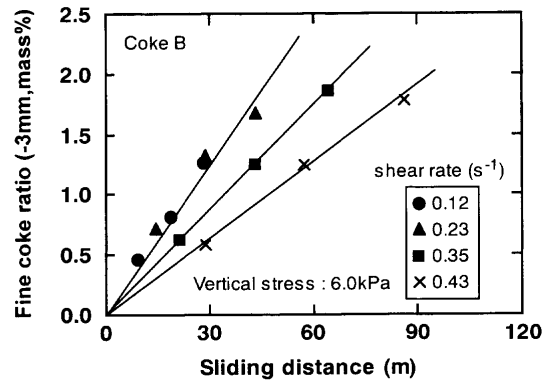


Fig. 5. Effect of shear rate on fine coke ratio.

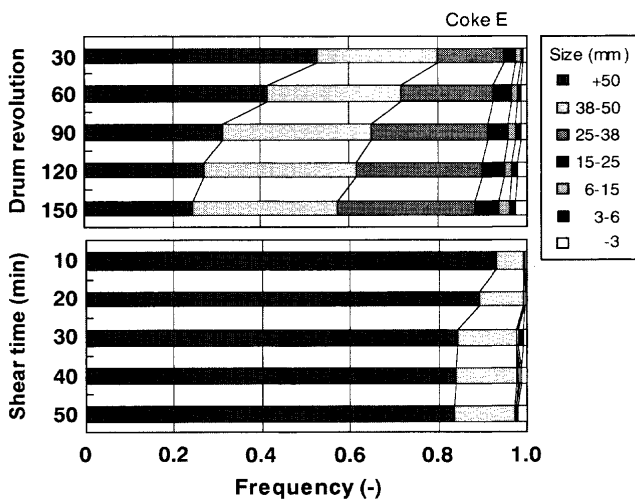


Fig. 4. Change of coke size distributions.

ることが認められた。コークス強度の増加にともない弾塑性変形および破壊に必要なエネルギーが大きくなるためと推察される。

Fig. 4に剪断時間ごとのコークス粒度分布を示す。比較のため、ドラム強度試験結果を併記した。なお、ドラム強度試験および剪断応力粉化試験においてコークスが受ける単位エネルギー量はそれぞれ23.4 J/kg・rot<sup>12)</sup>、約60 J/kg・minであり、ドラム30回転と剪断時間10分でコークスが受けるエネルギーはそれぞれ約7 kJ、約6 kJとほぼ等価である。このようにコークスが受けるエネルギーが同レベルであるにもかかわらず、試験後のコークス粒度分布は異なっていた。ドラム強度試験後のコークスには粒径が15から38 mmの比較的粗い粒子が多く認められた。一方、剪断応力粉化試験で発生したコークス粉の大部分が高炉内でコークス粉率の基準として頻繁に使用されている3 mm以下の粉であった。すなわち、ドラム強度試験は落下衝撃にともなう体積破壊とコークス粒子間およびコークス粒子とドラム試験機表面間の摩擦による表面破壊の複合破壊を評価しているのに対し、剪断応力粉化試験によるコークスの破壊は、塊コークス表面の摩擦による表面破壊が支配的と考えられる。

### 3.2 剪断条件のコークス粉化挙動に及ぼす影響

剪断条件である剪断速度、垂直応力は剪断応力を変化させコークスの粉化挙動に影響を与えられられる。そこで、剪断条件のコークス粉化挙動に及ぼす影響について検討を行った。

#### 3.2.1 剪断速度の影響

Fig. 5は剪断距離に対するコークスの粉率を剪断速度で層別して示したものである。ここで、剪断距離はコークスの粒子間距離が常に50 mm一定と仮定して算出した値を使用し、剪断速度は(2)式に示したように時間の関数であるため平均値を表記した。また、破壊にともない発生した粒径3 mm以下のコークス粉の割合をコークスの粉率と定義した。コークス粉の発生挙動は剪断速度で異なることが明確になった。すなわち、剪断速度が大きくなるにつれて単位剪断距離あたりのコークス粉率増加量は減少した。コークスの移動速度の増加にともないコークス粒子間の真実接触面積が減少したこと、荷重速度が速い場合は弾性的性質が支配的になり強度が増加する<sup>13)</sup>ことが原因と考えられる。一方、剪断速度が0.23 s<sup>-1</sup>以下の条件ではコークスの粉率は剪断速度に依存せずほぼ一定であることから、コークスの真実接触面積は剪断速度に依存せず一定と推察される。したがって、以下の試験では剪断速度が0.23 s<sup>-1</sup>の条件で実験を行った。

#### 3.2.2 垂直応力の影響

垂直応力とコークス粉率の関係をFig. 6に示す。垂直応力の増加にともないコークスの粉率は増加するものの、垂直応力の値が20 kPa近傍前後で粉の発生挙動が異なることが明らかになった。すなわち、垂直応力が20 kPa以下の条件では垂直応力と粉率の間に比例関係が認められるもののその変化量は小さく、20 kPaを越える垂直応力が加わることで粉率は急激に増加した。一定値以上の垂直応力が加わることでコークス表面の塑性変形量が増加し、コークス粒子間の真実接触面積が大きくなるため粉率が拡大したと考えられる。

そこで、コークス粒子に働く応力と塑性変形量の関係の定量化を行った。試験には汎用の圧潰試験装置を使用し、

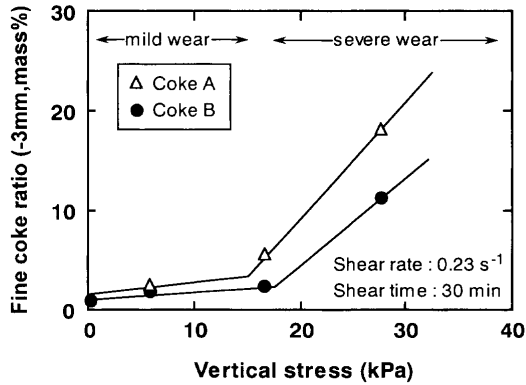


Fig. 6. Effect of vertical stress on fine coke ratio.

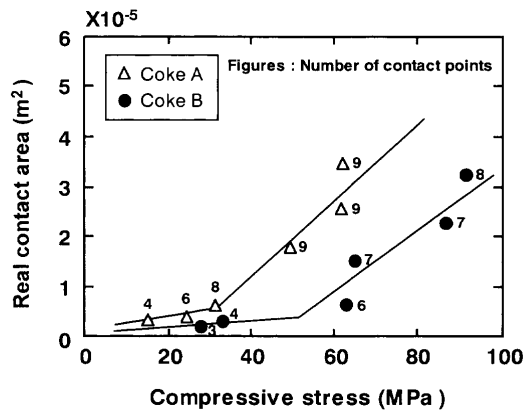


Fig. 7. Real contact area of lump coke.

粒径が38から50mmのコークス塊を試料とした。サンプルを感圧紙が敷かれた測定用テーブルの上に設置し、一定荷重を加えた後、感圧紙に表れた圧痕の面積を真実接触面積とした。この接触面に働いた応力と真実接触面積の関係をFig. 7示す。この結果、圧縮応力が大きくなるに従い接触点の数は増え、真実接触面積は大幅に増加することが明らかになった。さらに、圧縮応力が30から50MPaを越えると真実接触面積の増加傾向は顕著に現れ、この現象が認められる圧縮応力値は高強度コークスほど大きくなった。

摩耗形態が凝着摩耗の場合、圧力が低い場合は粉発生量が垂直応力に比例するホルムの法則が成立し、一定圧力(遷移圧力)を越えると摩耗量は急激に増大することは知られている<sup>14)</sup>。Fig. 7の結果からコークスの遷移圧力は30から50MPa程度と考えられる。また、剪断粉化試験において20kPa以上の垂直応力を加えた場合、コークス粒子間の接点で遷移圧力以上の圧力が加わっていたと予想される。このように本試験においても遷移圧力が認められることから、コークスの剪断応力による粉化は凝着摩耗に支配されている可能性があると考えられる。

また、コークスの圧潰強度は約15MPa<sup>15)</sup>程度であり、コークスの半分が空隙と仮定した場合、コークスの基質強度は約30MPaと推定できる。このように、遷移圧力とコークス強度がほぼ等しいことから、遷移圧力以下での

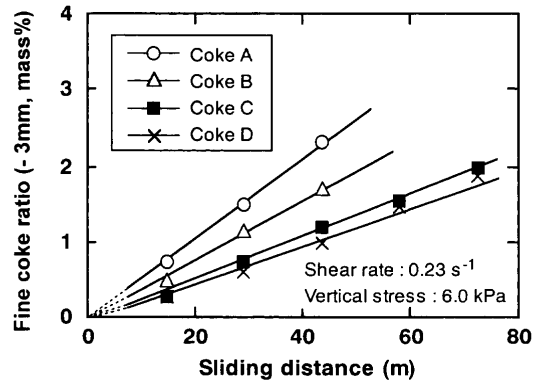


Fig. 8. Relationship between sliding distance and fine coke ratio.

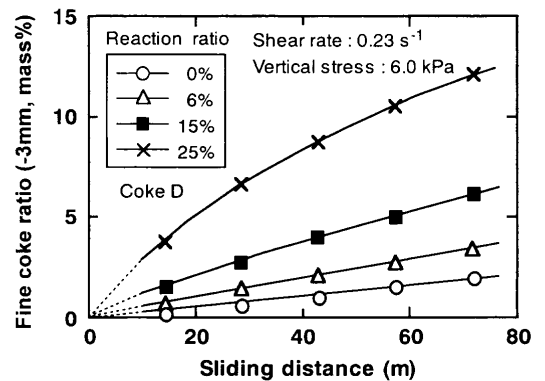


Fig. 9. Relationship between sliding distance and fine coke ratio.

コークスの変形は弾性的性質、遷移圧力以上では塑性的性質に支配されていると考えられる。したがって、垂直応力による塑性破壊の影響を小さくするため、以下の試験では垂直応力が6kPaの条件で試験を行った。

### 3.3 コークス性状の粉化挙動に及ぼす影響

#### 3.3.1 コークス強度の影響

Fig. 8は剪断距離に対するコークス粉率をドラム強度で層別した結果を示す。今回使用したいずれのコークスについてもコークス粉率は剪断距離に比例して増加した。しかし、剪断距離10mあたりの粉率増加量は0.5%程度と小さいことが明らかになった。また、コークス強度の低下にともない粉率は増加する傾向を示した。これは、ドラム強度が低いコークスの基質強度が低いことに起因していると考えられる。

#### 3.3.2 ソリューションロス量の影響

Fig. 9にソリューションロス反応後コークスの剪断距離とコークス粉率の関係を示す。剪断距離の増加にともない粉率は増加し、反応率の高いコークスは粉率が大きいことを認めた。ソリューションロス反応の進行にともなう基質強度の低下と気孔率の増加(Table 3)がコークスの剪断摩耗強度を低下させたためと考えられる。

また、剪断距離と粉率の関係は反応の進行度で異なり、

反応率が0, 6, 15%の低反応率コークスの粉率は剪断距離にほぼ比例して増加したのに対し、反応率が25%のコークス粉化挙動は低反応率コークスとは異なり、剪断粉化初期に多くのコークス粉が発生し、粉化の進行にともない剪断距離に対する粉率の増加量が徐々に減少することを明らかにした。コークス強度が低い場合、粉化の初期において表面の摩耗に加えて同時に突起部の脱落が生じるためと考えられる。また、粉化の進行にともないコークス粒径が減少し比表面積が減少したため粉率の増加量が減少したと推察される。

#### 4. 考察

##### 4.1 コークス粉化挙動の定量化

剪断応力によるコークスの粉化挙動を定量化するため、新しい評価基準の導入を検討した。

耐摩耗性の定量化には摩耗量を摩擦距離と荷重で除した比摩耗量が定義され使用されている<sup>16)</sup>。そこで、(3)式で得られる剪断エネルギー $E_s$ あたりの粉率（以下比摩耗率）を新しい耐摩耗性を評価する基準に用いた。また、コークスの剪断破壊を定量化するため、発生粉1kgの生成に必要なエネルギー（以下破壊エネルギー）も評価基準に加えた。

Fig.10にコークスドラム強度と比摩耗率および破壊エネルギーの関係を示す。ドラム強度が大きいほど比摩耗率は小さく、耐摩耗性に優れていることが分かる。一方、破壊エネルギーは増加し、細粒化しにくいことを示唆している。

また、ドラム強度 $DI_{15}^{30}$ が95のコークスの剪断応力による破壊エネルギーは200kJ/kg程度であるのに対し、ドラム試験における破壊エネルギーは、ドラム試験でコークスが受ける単位エネルギー量 $23.4\text{J/kg}\cdot\text{rot}^{12)}$ から推算すると140kJ/kg程度であり、剪断応力による破壊エネルギーと比較すると小さい。ドラム試験では、Fig. 4の結果も示すようにコークスの体積破壊にともなう大幅な粒径低下がコークスの比表面積を増加させたため、破壊エネルギーが小さくなったと推察される。この結果は、コークス粒径が低下し比表面積が増加することでコークスの粉化が促進されることを示唆していると考えられる。

Fig.11はコークス反応率と比摩耗率および破壊エネルギーの関係をコークス性状で層別した結果を示す。コークスソリューションロスの進行にともない比摩耗率は増加、破壊エネルギーは減少し、反応率25%のコークスの破壊エネルギーは反応前の10から20%程度まで減少することを明らかにした。Fig.11で示したコークスの剪断強度と破壊エネルギーの関係をFig.12に示す。なお、剪断強度 $S_{sh}$ (MPa)は間接引張強度 $S_d$ (MPa)を測定し(4)式<sup>13)</sup>により算出した。

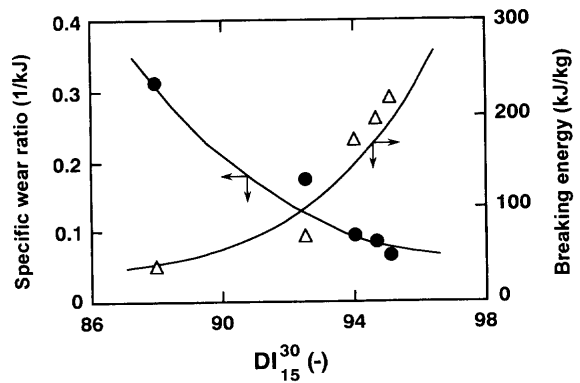


Fig. 10. Effect of coke strength on coke deterioration.

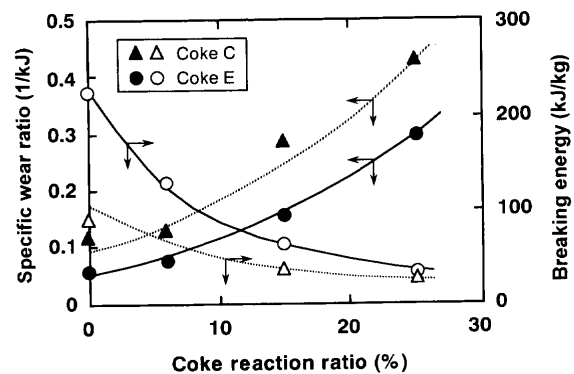


Fig. 11. Effect of coke reaction ratio on coke deterioration.

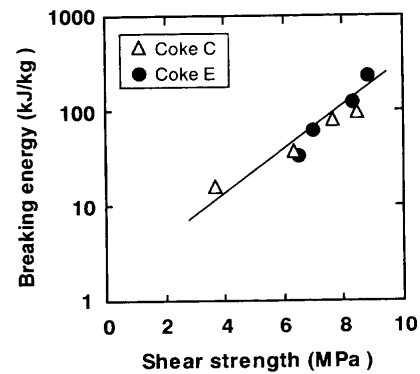


Fig. 12. Relationship between shear strength and breaking energy.

$$S_{sh} = 3^{1/2} \cdot S_d \dots \dots \dots (4)$$

剪断強度の増加にともない破壊エネルギーは指数関数的に大きくなることを明らかにした。反応劣化の進行にともない、気孔率が増加し気孔壁厚みが減少したことで剪断強度が低下し、破壊エネルギーが大幅に減少したと推察される。

また、低反応性コークスは高反応性コークスに比較し比摩耗率は小さく破壊エネルギーは大きいことから、高反応性コークスに比較して剪断粉化が起りにくいことを表している。これは、高反応性コークスは低反応性コークスに

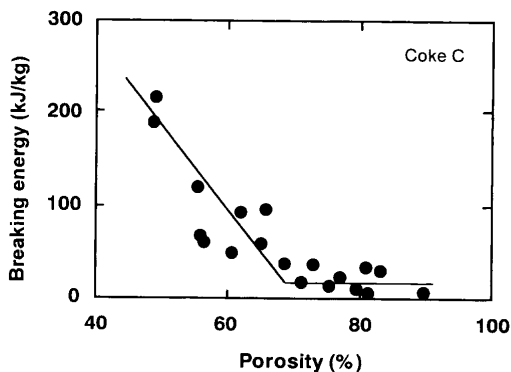


Fig. 13. Effect of porosity on coke breaking energy.

比較して塊表層の反応負荷が大きいため、コークス表層の強度が低下したためであり、従来の反応性と反応後強度(CSR)の知見<sup>17)</sup>と一致する結果が得られた。この結果は、比摩耗率および破壊エネルギーを評価指標としたコークスの強度評価が可能であることを示唆していると考えられる。

#### 4.2 臨界気孔率

前節においてコークスの気孔率（あるいは気孔壁厚み）は剪断粉化挙動に大きな影響を及ぼしている可能性があることを示した。ここでは、コークスの気孔率が破壊エネルギーに及ぼす影響を明らかにし、剪断破壊に耐えるコークスの限界の気孔率（臨界気孔率）がどの程度なのか評価を行った。

コークスの気孔率と破壊エネルギーの関係をFig.13に示す。なお、気孔構造を大きく変化させるため反応率の異なるコークスを解析対象とした。また、気孔率は剪断応力粉化試験において一定の剪断条件で塊コークスの表面層から脱落したコークスの体積とそのコークス粉の重量から粉化前の剥離層の見掛け気孔率を求め、真比重が塊内で1.95一定と仮定して算出した。この結果、気孔率の増加とともに破壊エネルギーは減少し、気孔率が70%を越えると破壊エネルギーは気孔率にほとんど依存しなくなることを明らかにした。気孔率が増加するにつれて連結気孔の数も増え、コークスが構造体を形成するために必要な最低強度まで強度が低下したためと考えられる。したがって、コークスの臨界気孔率はコークス品質に依存するものの70%程度であると考えられる。

#### 4.3 剪断粉化メカニズム

以上の結果に基づきコークスの剪断粉化メカニズムを以下のように推察した。コークスは多孔質材料であるため表面には比較的大きな凹凸が存在する。コークス充填層に剪断応力が加わることで、主に凸部同士の接触面に剪断応力が働く。ここで、剪断速度が小さい場合に粉率が大きくなることから(Fig. 5)、剪断速度が比較的遅い場合は凸部と凹部の接触点も比較的多く存在すると推察される。剪断応力が働くことでコークス層の表面には塑性域と弾性域が形成

され、塑性域からコークスの粉が剥離していると考えられる。

一般に、高強度コークスは気孔壁の厚みが厚く基質強度が大きいため、塑性域は小さく、剪断粉化が進行しにくいと予想される。一方、低強度コークスあるいはソリューションロス反応の進行にともない劣化したコークスは、気孔壁厚みが薄くなっている。このため、コークスの接触面積が減少するため、一定の垂直応力条件下において気孔壁に加わる実応力が増大する。あわせて基質強度も低いため、塑性域が拡大すると考えられる。この結果、コークス粉の発生量が大きくなると推察される。以上のことから、コークスの気孔壁厚みを大きくすることが耐剪断応力粉化性に優れたコークスを得るための必要条件であると考えられる。

## 5. 結言

高炉のシャフト部やレースウェイ縮流部におけるコークスの粉化挙動解析に必要なコークスの剪断粉化挙動を明確にするため、剪断応力粉化試験装置を用いた基礎試験を行った。これらの結果をもとに、コークスの剪断破壊の定量化と剪断粉化メカニズムに関する考察を行った。この結果、以下の知見が得られた。

(1) コークスの粉化挙動は剪断速度に依存し、剪断速度の増加にともない粉の発生量は減少する。これは、コークス層表面の接触面積が減少するためと考えられる。

(2) 垂直応力が20kPa以下の場合、粉率は垂直応力に比例して増加するが、20kPaを越えると粉率は急激に増加する。これはコークス表面層の塑性変形領域が拡大したためと推定される。

(3) コークスの粉率は剪断距離に比例して増加し、その大きさはコークス強度の低下あるいはソリューションロス反応率の増加にともない大きくなる。

(4) コークスの粉化挙動は単位エネルギーあたりに発生した粉率で定義される比摩耗率または発生粉1kgの生成に必要なエネルギーで定義される破壊エネルギーで定量的な評価が可能である。

(5) コークスの破壊エネルギーは通常200kJ/kgであり、反応の進行とともに減少し、反応率25%のコークスの破壊エネルギーは反応前の10から20%程度まで減少する。これは、反応率の増加にともないコークス気孔壁の厚みが減少し、塑性域が拡大するためと推察される。

(6) コークスの破壊エネルギーは気孔率の増加にともない減少し、気孔率が70%を越えると破壊エネルギーに及ぼす気孔率の依存性は小さくなる。

## 文 献

- 1) T.Maruyama, A.Maki, A.Shimomura, I.Okochi, K.Mori, M.Sato and

- R.Murai: *CAMP-ISIJ*, **11** (1998), 834.
- 2) M.Shimizu, R.Ito and K.Hoshino: *CAMP-ISIJ*, **8** (1995), 6.
  - 3) K.Matsubara, T.Miyazu and R.Takahashi: Proc. Symp. on Gondwana Coals, ISS, Warrendale, (1983), 1.
  - 4) R.Nakajima, S.Kishimoto, H.Hotta, K.Ishii, M.Sakurai and S.Itagaki: *NKK Tech. Rep.*, **132** (1990), 1.
  - 5) H.Yamaoka and K.Nakano: *CAMP-ISIJ*, **13** (2000), 10.
  - 6) N.Suzuki, S.Itagaki, S.Mitani, S.Sato, T.Suzuki and T.Oikawa: *Tetsu-to-Hagané*, **78** (1992), 1116.
  - 7) S.Itagaki, N.Suzuki, I.Shimoyama and K.Fukada: *CAMP-ISIJ*, **7** (1994), 110.
  - 8) Y.Shigeno, M.-T.Hong, S.Kobayashi and Y.Omori: *Tetsu-to-Hagané*, **74** (1988), 787.
  - 9) K.Fukada, S.Itagaki, I.Shimoyama, H.Kadoya and A.Shimomura: 57th Ironmaking Conference Proceedings, ISS, Toronto, (1998), 719.
  - 10) M.Shimizu, A.Yamaguchi, S.Inaba and K.Narita: *Tetsu-to-Hagané*, **68** (1982), 936.
  - 11) K.Katayama, S.Wakabayashi, T.Inaba, K.Takatani and H.Yamaoka: *Tetsu-to-Hagané*, **83** (1997), 91.
  - 12) Y.Abe, M.Sugata, Y.Umezu, K.Yamaguchi and M.Nakagome: *Tetsu-to-Hagané*, **68** (1982), S124.
  - 13) 改訂6版化学工学便覧、化学工学会編、丸善、東京、(1999)、270.
  - 14) 伊藤祐光：摩耗とハードフェーシング、産報出版、東京、(1959)、26.
  - 15) コークスノート、日本エネルギー学会コークス部会編、日本エネルギー学会、東京、(1992)、55.
  - 16) 機械工学便覧、日本機械学会編、日本機械学会、東京、(1987)、B1-61.
  - 17) Y.Okuyama, T.Miyazu and S.Kishimoto: *Tetsu-to-Hagané*, **69** (1983), A161.