

# コークス炉における膨張圧と焼減り

野村 誠治\*・有馬 孝\*

Coking Pressure and Coke Shrinkage in Coke Oven

Seiji NOMURA and Takashi ARIMA

**Synopsis :** Relationship between coking pressure, lateral shrinkage and vertical shrinkage during carbonization in coke oven was investigated by the use of movable-wall type test coke oven. The lateral shrinkage started to rise after the coking pressure disappeared. The final lateral shrinkage was 2~5 mm and slightly increased with increasing volatile matter content. The vertical shrinkage increased in proportion to the lateral shrinkage after the disappearance of coking pressure. The final vertical shrinkage decreased with increasing coking pressure and decreasing vertically applied force. The time when the vertical shrinkage starts to rise is considered to depend on the balance between the friction force between coke and oven wall caused by coking pressure and the vertical force applied on coke. The coke layer is pressed against the oven wall by high coking pressure and the coke cake is prevented from lowering which would result in wider fissures between coke lumps and thus harder pushing.

**Key words:** carbonization; coking pressure; lateral shrinkage; vertical shrinkage.

## 1. 緒言

現在日本で稼働中のコークス炉は、その大半が昭和30~40年代に建造された炉令20~30年の炉であるため、炉体が老朽化しており、炉命延長および炉体管理はコークス製造工程における最重要課題の一つと認識されている<sup>1)</sup>。特に、コークスケーキを窯から押出す時の押し出し負荷の極端な上昇や押し詰り等のトラブルは、コークス炉の炉壁に過大な負荷を加えて炉壁損傷につながるため、押し出し抵抗に影響を及ぼす要因の解明は極めて重要である。

コークスケーキの押し出し抵抗はさまざまな要因によって支配されるが、中でもコークスケーキと炉壁間の間隙である「水平焼減り」(lateral shrinkage)の影響が大きく、水平焼減りが小さいほど押し出し抵抗が大きくなり、押し出し電流値が上昇すると考えられている<sup>2)</sup>。また、炉高方向コークス収縮量で表される「垂直焼減り」(vertical shrinkage)についても経験的に押し出し抵抗と相関があるとされており、実コークス炉において垂直焼減りが小さいほど押し出し抵抗が大きくなるとされている<sup>3)</sup>。

このように、焼減りは押し出し抵抗に大きな影響を及ぼすにもかかわらず、その支配因子や発生メカニズムについては不明な点が多い。これは、コークス炉においてはコークス層、軟化溶融層、石炭層の三層共存下で乾留が進み、焼減りはコークスの収縮挙動のみでなく、軟化溶融層の膨張挙動の影響を大きく受ける複雑な現象であるためと考えられる<sup>4)</sup>。

そこでここでは、コークス炉における水平焼減りおよび垂直焼減りと軟化溶融層の膨張挙動、特に膨張圧との関係について検討し、焼減り発生機構および支配要因の解明を試みたので、その結果について報告する。

## 2. 実験方法

### 2.1 試料

実験には、石炭化度(ビトリニットの平均反射率)0.85~1.48の範囲の8種類の石炭を使用した。実験に使用した石炭の性状をTable 1に示す。

### 2.2 乾留試験

3 mm以下80%に粉碎した石炭試料(水分3%)を、Fig. 1に示すような電気加熱式の可動壁型乾留試験炉(炉幅400 mm; 炉長600 mm; 炉高600 mm; 炉温1350°C)に装入し、乾留中の膨張圧、水平焼減りおよび垂直焼減りの経時変化を測定した。

Table 1. Characterization data for the coals used.

Coal	Proximate analysis (wt% db)		Dilatometry Total dilatation (vol.%)	Gieseler plastometry Maximum fluidity (log MF/ddpm)	Petrographic analysis	
	VM	Ash			Reflectance (av.) (%)	Total inerts (%)
A	34.9	7.4	111	3.59	0.85	17.8
B	33.4	8.2	125	3.40	0.90	24.7
C	25.2	7.9	149	3.16	1.14	28.9
D	25.6	8.8	244	3.86	1.15	18.5
E	20.8	9.7	77	2.54	1.28	29.8
F	21.0	9.8	33	1.87	1.32	35.5
G	20.4	9.0	120	2.70	1.37	25.5
H	18.6	10.0	63	1.65	1.48	25.9

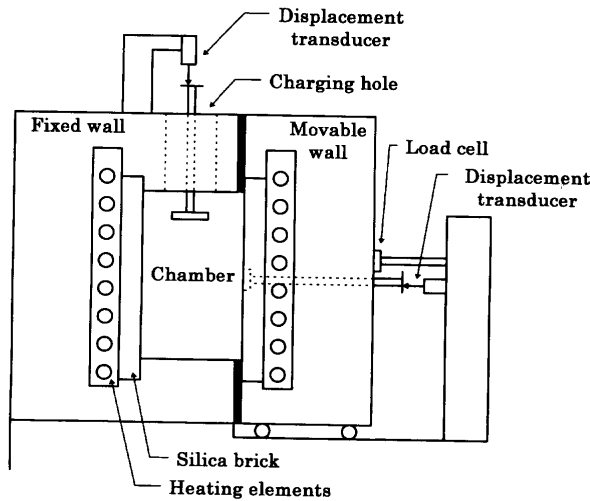


Fig. 1. Movable wall oven.

水平焼減りは、試験炉の可動壁にあけた水平孔に測定プレート(φ55 mm)を取り付けたシャフトを通し、荷重により測定プレートをコークス側に押しつけてシャフトの変位を作動変圧器により測定し、壁とコークスの間隙距離で表した。

垂直焼減りは、装入蓋内にあけた垂直孔に測定プレート(φ200 mm)を取り付けたシャフトを通し、シャフトに分銅をのせて測定プレートをコークス側に1 kPaの荷重で押しつけてシャフトの変位を作動変圧器により測定し、最大高さからの沈下量で表した。また、垂直焼減り率を石炭装入高さに対する垂直焼減り量の百分率で表した。また、荷重および装入密度が垂直焼減りに及ぼす影響を調べるため、D炭については分銅を増やして17 kPaの荷重を加えた場合、および装入密度を変えた場合についても実験を行った。また乾留後コークスについて、炭化室中心部における間隙幅の測定も実施した。

### 3. 実験結果および考察

#### 3.1 水平焼減り

##### 3.1.1 水平焼減りと膨張圧

Fig. 2 に膨張圧および水平焼減りの経時変化測定例を示す。膨張圧が低い場合 (A炭) 高い場合 (G炭) とも、膨張圧は乾留開始約9~10時間後にピークを示し、膨張圧が完全に消滅した直後から水平焼減りが生じはじめていることがわかる。すなわちFig. 3 に示すように、膨張圧が発生している間はコークスは炉壁に押しつけられており、炉壁-コークス表面間に間隙は無く、軟化熔融層が炭化室中央で会合し膨張圧が消滅すると水平焼減りが発生すると考えられる。

膨張圧が発生している状態で水平焼減りが観測される例<sup>5,6)</sup>が報告されており、また著者らの測定でも同様な例があった。しかし、膨張圧が測定されるということは、壁

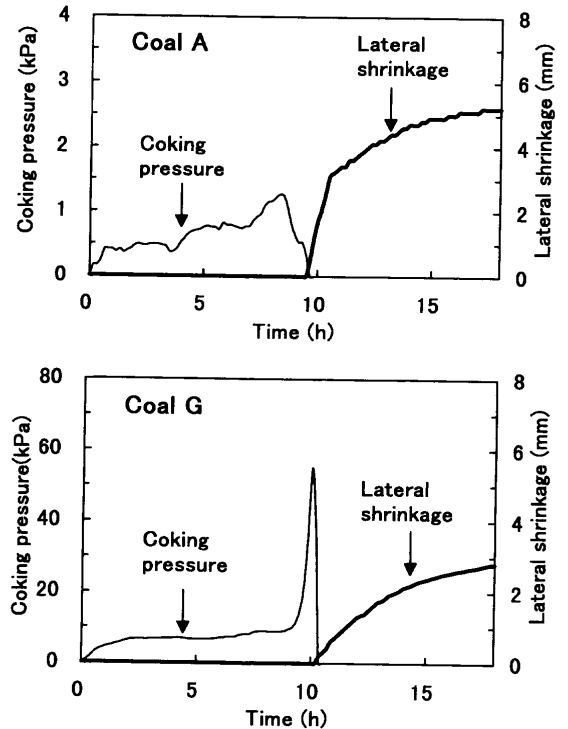


Fig. 2. Coking pressure and lateral shrinkage for A and G coals.

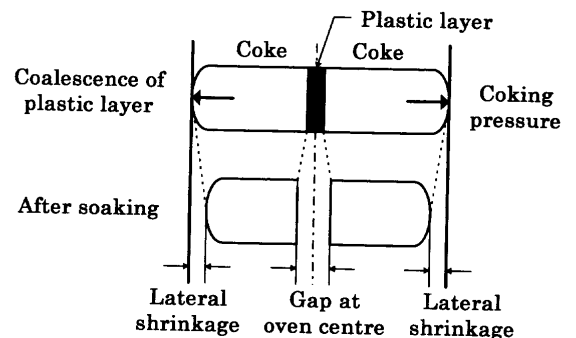


Fig. 3. Definition of lateral shrinkage and gap at oven centre.

とコークスがどこかで接触しているということであり、膨張圧が発生している状態で水平焼減りが発生することはないと考えられる。これは水平焼減り測定装置の測定プレートをコークスケーキの収縮に追従させるために焼減り測定装置に作用させている圧力が膨張圧を上回り、コークスを炭化室側に押し込んだためと推察される。

##### 3.1.2 水平焼減りの絶対値

水平焼減りの絶対値は2~5 mmであった。再固化温度(500°C程度)から1000°C程度までの間のセミコークスの収縮は揮発分25%の石炭で約12%であり<sup>7)</sup>、したがってセミコークスの収縮がすべて水平焼減りに寄与するとすれば、炉幅400 mmの場合で片側24 mmになる。しかし、実際に焼減りが生じるのは膨張圧消滅後なので、焼減り発生時点(炭化室中心が再固化温度に到達する時点)で加熱壁側のコークスの大半はすでに高温状態にさらされてかなりの収

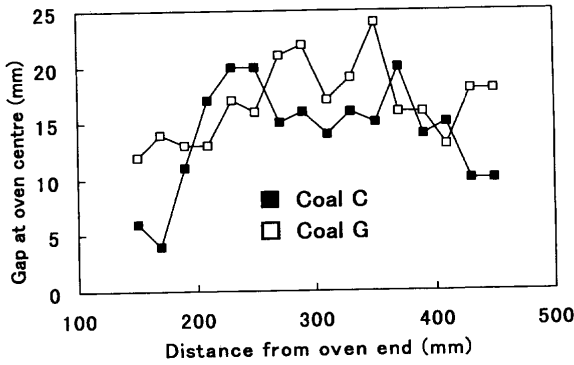


Fig. 4. Distribution of gap at oven centre.

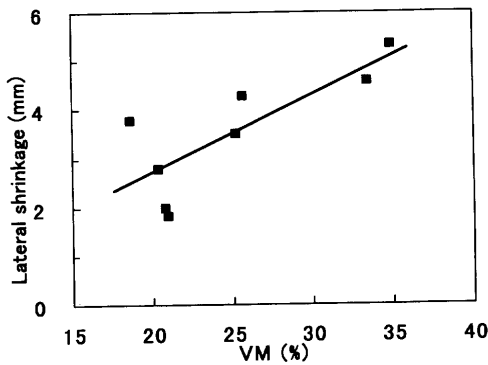


Fig. 5. Relationship between volatile matter and lateral shrinkage.

縮を終えており、それ以降の収縮は少なく、膨張圧消滅後の炉幅方向コークス収縮量は約10mmである。この収縮は、Fig. 3に示すように「水平焼減り」(炉壁-コークス表面間の間隙)と「中央部焼減り」(炭化室中心部間隙)として現れるが、両者への分配は収縮中心の位置によって決る。収縮中心が炉壁近傍部になった場合は水平焼減りが0になり、収縮中心が炭化室中心部になった場合は中央部焼減りが0になる。炭化室中心部の間隙の測定例をFig. 4に示す。収縮中心がどの位置になるかは、コークス塊に発生する亀裂の影響が大きく、偶発的な影響が大きいため、炭化室中心部の間隙の値にはばらつきがある。その一方で、C炭の場合中央部焼減りの半分の平均値7mmと水平焼減り3.5mmとの合計は10.5mm、G炭の場合中央部焼減りの半分の平均値8.4mmと水平焼減り2.8mmとの合計は11.2mmであり、膨張圧消滅後のコークス収縮量が壁側と炭化室中央側にほぼ分配されていることが確認された。水平焼減りの絶対値が~15mmという結果<sup>6)</sup>も報告されているが、これは、前述したように水平焼減り測定装置の測定プレートが炭化室側に押し込まれ、見かけ上大きい値になったためと推察される。

### 3.1.3 水平焼減りに及ぼす炭種の影響

Fig. 5に揮発分と水平焼減りの関係を示す。揮発分が高いほど水平焼減りは大きくなるが、その影響は比較的小さく<sup>8)</sup>、揮発分10%の増加により約1.6mmの増加である。水

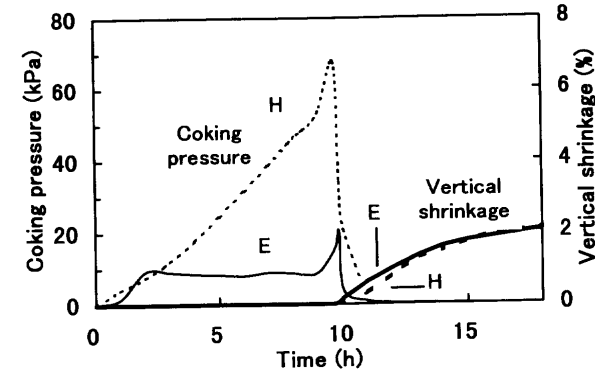
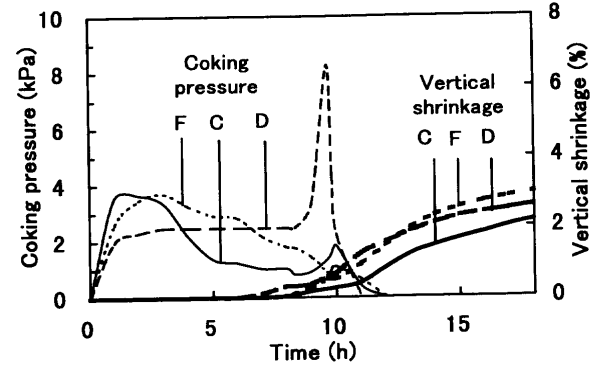
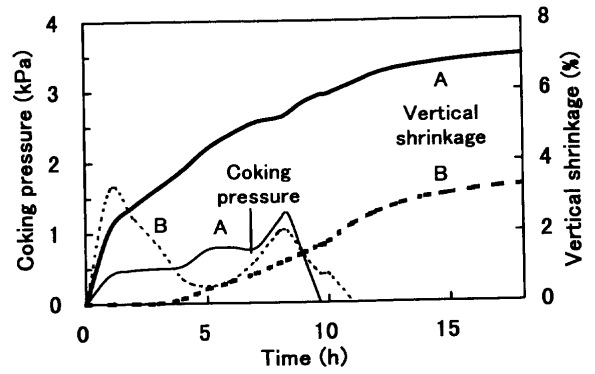


Fig. 6. Coking pressure and vertical shrinkage.

平焼減りに寄与するのは、炭化室中心部を除けば高温域でのセミコークスの収縮であり、高温域、少なくとも600°C以上での収縮係数は炭種による差が少ない<sup>7)</sup>ので、水平焼減りに及ぼす揮発分の影響は小さいと推定される。揮発分10%の増加により水平焼減りが6~7mm増加するとの報告<sup>9)</sup>もあるが、高揮発分炭は膨張圧が低いいため測定プレートの押し込みが発生しやすく、揮発分が高い領域で水平焼減りが実際より大きい値になったと考えられる。

## 3.2 垂直焼減り

### 3.2.1 垂直焼減りと膨張圧

Fig. 6に、低膨張圧炭(A炭, B炭), 中膨張圧炭(C炭, D炭, F炭), 高膨張圧炭(E炭, H炭)のそれぞれについての、膨張圧および垂直焼減り率の経時変化を示す。垂直焼減りには、石炭装入後数時間の間におこる一次収縮と乾留後期におこる二次収縮があることが知られているが、一次収縮は、予熱炭装入時はほとんど観察されず<sup>7)</sup>、水分の蒸発に起因する石炭粒子充填構造の圧密化によりおこると

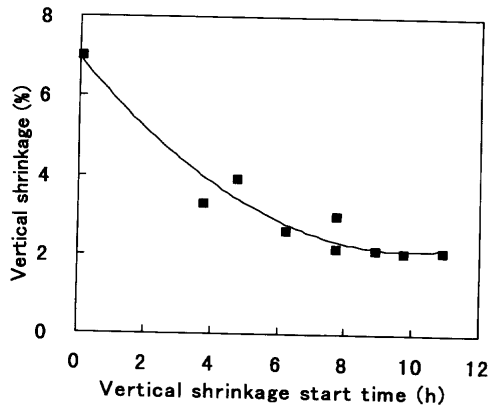


Fig. 7. Relationship between vertical shrinkage and the time when it starts to rise.

考えられている。今回の実験ではA炭の場合を除いて石炭装入直後の垂直焼減りは生じていないが、これは装入炭水分が低く(3%)一次収縮がおこらないためであると考えられる。したがって、今回測定された垂直焼減りは、コークスの収縮に起因する二次収縮に相当すると考えられる。

① 低膨張圧炭 (A炭, B炭)

A炭の膨張圧は乾留開始から徐々に増加し、約9時間後にピーク値(約1kPa)を示す。また垂直焼減り率は、膨張圧の低い乾留初期から増加し始める。またB炭はA炭と比較して初期の膨張圧が高く、初期および約9時間後にそれぞれピーク(約1~2kPa)を示す。また垂直焼減り率は、初期の膨張圧ピークが終了した4時間後から増加し始める。

② 中膨張圧炭 (C炭, D炭, F炭)

初期0~4時間における膨張圧はいずれも2~4kPaであり、低膨張圧炭と比較して高い。また垂直焼減り率増加時期は6~8時間後であり、低膨張圧炭より遅い。

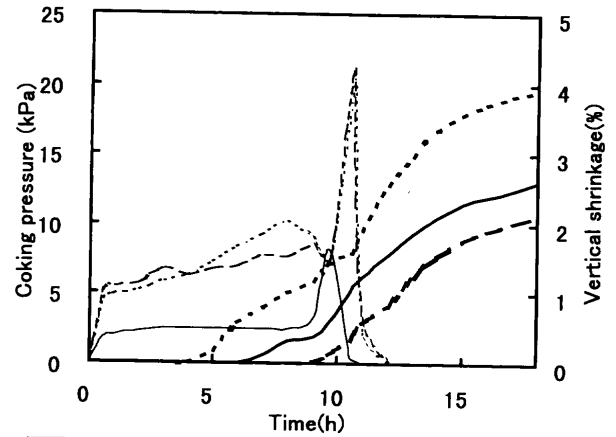
③ 高膨張圧炭 (E炭, H炭)

膨張圧はかなり高く、約10時間後に鋭いピークを示す。また、垂直焼減り率は、膨張圧が消滅する10時間後近辺から増加し始める。

以上より、垂直焼減り開始時期は炭種により大きく異なり、膨張圧が高いと垂直焼減り開始時期が遅くなることがわかる。また、Fig. 7に示すように、垂直焼減り開始が遅いほど乾留終了時における垂直焼減り率が小さくなることわかる。

3.2.2 垂直焼減りに及ぼす荷重の影響

Fig. 8に石炭装入密度を変えた場合、および石炭層上面に加える荷重を変えた場合の垂直焼減り率および膨張圧の経時変化を示す。膨張圧は装入密度が高いほど高く、荷重の大小に依存しない。また、焼減り開始時期、および乾留終了時(18時間後)の焼減り率は実験条件により異なり、膨張圧が高く、荷重が小さいほど焼減り開始が遅く、焼減り率が小さいことがわかる。



pressure	shrinkage	weight	bulk density
—	—	1kPa	700kg/m <sup>3</sup>
- - -	- - -	1kPa	773kg/m <sup>3</sup>
· · ·	· · ·	17kPa	773kg/m <sup>3</sup>

Fig. 8. Effect of weight and bulk density on coking pressure and vertical shrinkage.

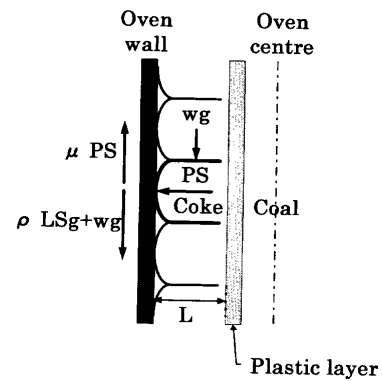


Fig. 9. Mechanical force on coke cake during carbonization.

3.2.3 コークスケーキの沈下条件から見た膨張圧・荷重の垂直焼減りへの影響

コークスケーキにはFig. 9に示すように、上部からの荷重とコークス塊の自重、および軟化溶融層のガス圧が作用すると考えられる。したがって、コークスケーキが沈下して垂直焼減りが開始する条件は、コークスケーキに作用する力のバランスにより決まり、(1)式に示すように塊コークスの重量とコークス上面に加わる荷重の和(左辺)がコークスと炉壁間の静止摩擦力(右辺)を超える場合と考えられる<sup>3,10)</sup>。

$$\rho L S g + w g > \mu P S \dots\dots\dots (1)$$

$\rho$  : コークス見掛密度 [kg/m<sup>3</sup>]

$L$  : コークス塊長さ [m]

$S$  : 断面積 [m<sup>2</sup>]

$g$  : 重力加速度 [m/s<sup>2</sup>]

$w$  : 荷重 [kg]

$P$  : 膨張圧 [Pa]

$\mu$  : コークス-炉壁間の最大静止摩擦係数 [—]

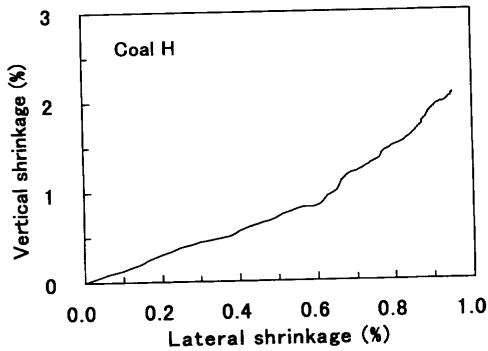


Fig. 10. Relationship between lateral shrinkage and vertical shrinkage.

この式より、膨張圧と荷重、コークス塊長さ、すなわち乾留時間のバランスによりコークスケーキの沈下開始時期が決まることが示唆される。高膨張圧炭（E炭、H炭）の場合、(1)式右辺（摩擦力）が大きいので、膨張圧が消滅するまで垂直焼減りが生じないと考えられる。一方、中膨張圧炭（C炭、D炭、F炭）および低膨張圧のB炭の場合、乾留初期～中期まではコークス塊の長さが短く、かつ膨張圧もある程度高いレベルにあるため、コークス重量+荷重<摩擦力となり、コークスケーキは沈下しないが、乾留進行につれてコークス塊の長さが長くなり(1)式左辺が大きくなり、垂直焼減りが生じ始めると推定される。低膨張圧のA炭では、乾留初期における膨張圧が低いので、乾留直後から沈下が始まっている。

また、D炭で装入密度が高い場合には、膨張圧が高く右辺（μPS）が大きいので、荷重が小さい場合は左辺（wg）が小さいため、左辺>右辺の条件が満たされる時期が遅れ、焼減り開始が遅くなると理解できる。

さらに、垂直焼減り開始時におけるコークス塊長さ推定値（伝熱モデルから計算）と膨張圧測定値を用いて、(1)式によりコークス-炉壁間の最大静止摩擦係数を推算したところ、0.40~0.62となった。これは、冷間状態で測定した値0.51~0.67とほぼ等しく、(1)式の考え方が正しいことを示唆している。

揮発分が低いほど焼減り開始時期が遅くなるとの報告<sup>7)</sup>があるが、今回の実験で揮発分がほぼ同じC炭とD炭、E炭とF炭を比較すると、C炭、E炭の方が焼減り開始時期が遅く乾留終了時における焼減り率が小さいことが明らかになった。これは、垂直焼減り開始時期は揮発分だけでは決まらず、膨張圧が影響を及ぼすことを示している。

以上より、膨張圧が高い場合は、膨張圧によるコークス-炉壁表面間の摩擦力が大きいため垂直焼減り開始時期が遅くなると推察される。

### 3.3 水平焼減りと垂直焼減りの関係

Fig.10 に水平焼減りと膨張圧消滅後の垂直焼減りの関係（H炭）を示す。水平焼減りの増加に比例し、垂直焼減りも増加することがわかる。これは、水平焼減りおよび膨張

圧消滅後の垂直焼減りはコークスの物質収縮であり、基本的に温度のみによって決まるためと推察される。垂直焼減り率が小さいほどコークス押し出し抵抗が大きいことが知られているが<sup>3)</sup>、この理由の一つは膨張圧消滅後の垂直焼減り率が小さいほど水平焼減りが小さいためと考えられ、膨張圧消滅後の垂直焼減り率が押出管理に使えることを示唆している。

### 3.4 焼減りとコークス押出性に関する考察

実コークス炉では、垂直焼減り率が小さいほどコークス押し出し抵抗が大きいことが知られているが<sup>3)</sup>、これは以下の2つの点より説明できる。

- ① 膨張圧消滅後の垂直焼減り率が小さいほど水平焼減りが小さいため、コークス押し出し時の抵抗が大きい。
- ② 同一温度条件下では物質としてのコークスの収縮率は同じなので、垂直焼減り率が小さいと、コークス塊間の亀裂（主に主亀裂）幅が広く、押し出し時にケーキ崩れをおこし易い脆弱なコークスケーキ構造となるため、押し出し抵抗が増加する。

高膨張圧炭を乾留した場合、コークス炉における押し出し抵抗が増加すると言われている<sup>3,11)</sup>。この理由としては、1) 隣窯の膨張圧による炉壁変位により水平焼減りが減少することや、2) 膨張圧により広がった炉壁が戻るまで水平焼減りが生じない結果、水平焼減りが減少することが大きな要因と考えられるが、これに加えて、垂直焼減り率低下に伴うコークスケーキ構造の変化も、コークス炉における押し出し抵抗増加の一因と考えられる。垂直焼減り率とコークスケーキ構造の関係、および押し出し時のコークスケーキ崩れやすさに及ぼすコークスケーキ構造の影響を解明することが今後の課題である。

## 4. 結言

コークス炉における水平焼減り、垂直焼減り、および膨張圧の関係について検討し、以下の結論を得た。

- (1) 水平焼減りは膨張圧消滅後（炭化室中心が再固化温度に到達後）から生じはじめる。
- (2) 膨張圧消滅後のコークス収縮量は壁側と炭化室中央側に分配され、壁側収縮量（水平焼減り）絶対値は2~5mmである。
- (3) 揮発分10%の増加により水平焼減りは約1.6mm増加する。
- (4) 膨張圧が高くコークス層上面の荷重が小さいほど垂直焼減り開始時期が遅くなる。垂直焼減り開始時期は、コークス重量と上面荷重の和と、膨張圧による炉壁表面-コークス間の静止摩擦力とのバランスによって決まる。
- (5) 垂直焼減り開始時期が遅いほど焼減り率は小さくなる。焼減り率の差はコークス塊間の亀裂幅差としてコークスケーキ構造に反映されると推定される。

(6) 膨張圧消滅後においては、水平焼減りの増加に比例し垂直焼減りも増加する。

今後、垂直焼減り量と押出し性の関係についてコークスケーキ構造と結び付けた検討が必要である。

### 文 献

- 1) K.Masamori, Y.Ito and Y.Nakagawa: Ironmaking Conf. Proc. AIME, vol. 57, AIME, New York, (1998), 1143.
- 2) V.I.Addes and D.R.Barzan: Ironmaking Conf. Proc. AIME, vol. 45, AIME, New York, (1986), 459.
- 3) M.te Lindert and J.Tilma: Ironmaking Conf. Proc. AIME, vol. 46,

- AIME, New York, (1987), 313.
- 4) T.Arima: *CAMP-ISIJ*, 7 (1994), 920.
- 5) V.I.Addes: Proc. of 2nd Int. Cokemaking Cong., vol. 2, IOM, London, (1992), 70.
- 6) J.M.Duchène: *Rev. Métall., Cah. Inf. Tech.*, 79 (1982), 949.
- 7) C.Meyer, D.Habermehl and O.Abel: *Glückauf-Forschungshefte*, 42 (1981), 233.
- 8) S.Nomura and T.Arima: *CAMP-ISIJ*, 6 (1993), 955.
- 9) R.Loison, P.Foch and A.Boyer: *Coke: Quality and Production*, Butterworths Publications Ltd., London, (1989), 412.
- 10) H.Kunimasa, K.Inoue, T.Chikata, K.Nishioka and K.Miura: *CAMP-ISIJ*, 7 (1994), 928.
- 11) J.Tucker and G.Everitt: Ironmaking Conf. Proc. AIME, vol. 48, AIME, New York, (1989), 599.