

# 石炭軟化・再固化過程における体積変化がコークス炉の軟化溶融層内ガス圧に及ぼす影響

野村 誠治\*・有馬 孝\*

Effect of Volume Change of Coal during Plastic and Resolidifying Phase on the Internal Gas Pressure in Coke Ovens

Seiji NOMURA and Takashi ARIMA

**Synopsis :** The coking pressure in coke oven, which is caused by the internal gas pressure in the coal plastic layer, is determined by the gas permeability of the layer. The gas permeability of the plastic layer depends on its density as well as the physical property of the plastic coal itself. The plastic layer is between the coke layer and the coal layer and the effect of the volume change of these outer layers, i.e. contraction and compression, on the density and the internal gas pressure of the plastic layer was studied. Sandwich carbonization test, where different coals were charged in the test coke oven, showed that the internal gas pressure in the plastic layer depends not only on the one kind of coal in plastic phase but also on the other kind of coal in resolidifying phase near the oven walls. The relative volume of coke transformed from the unit volume of coal was measured using X-ray CT scanner and it varied greatly across the coke oven width depending on the kinds of coals. The volume change of coal during plastic and resolidifying phase affects the density and the internal gas pressure of the plastic layer. The relative volume of semicoke and coke transformed from the unit volume of coal near the oven walls is higher for a high coking pressure coal than that for a low coking pressure coal. This leads to the high density of the plastic layer and the generation of dangerously high internal gas pressure in the oven centre.

**Key words:** coal; coke; coking pressure; internal gas pressure; plastic layer; resolidifying layer.

## 1. 緒言

コークス炉の炭化室で石炭を乾留すると、軟化溶融した石炭層内に熱分解ガスがトラップされ、このガスの圧力によって軟化溶融層が膨張しようとするため、炉壁に膨張圧と呼ばれる力が作用する。膨張圧が高いとコークス押出し時の抵抗が増加して炉壁に過剰な負荷を及ぼすだけでなく、場合によってはコークス炉の炉壁損傷をも引き起こすため、膨張圧低減はコークス製造プロセスにおいて極めて重要な課題である<sup>1)</sup>。

膨張圧は石炭の種類によって大きく異なり<sup>2)</sup>、揮発分が低く（石炭化度が高く）不活性成分量が少ない石炭ほど膨張圧の発生原因である軟化溶融層内のガス圧が高いことが知られている<sup>3)</sup>。軟化溶融層内ガス圧は、軟化溶融層の通気抵抗、厚み、および軟化溶融層内における石炭熱分解ガス発生速度に依存すると考えられる<sup>4)</sup>。軟化溶融層の通気抵抗は、主に(1)石炭に由来する軟化溶融物自体の物性（例えば粘度や表面張力など）と(2)軟化溶融層の密度（空隙率）によって支配されると考えられる。軟化溶融物自体の物性については、例えば軟化溶融物の粘度が高いと軟化溶融層の通気抵抗が増大し、揮発分が抜けにくくなる

ために軟化溶融層内ガス圧が高くなると考えられている<sup>5)</sup>。一方、軟化溶融層の密度（空隙率）についてはこれまで詳細に検討された例が少なく、Haysらによる軟化溶融層から再固化層における気孔形状変化に関する報告<sup>6)</sup>や、西村らによる軟化溶融・再固化過程での石炭体積変化に関する報告<sup>7)</sup>があるのみである。このため、炭種および炉幅方向で軟化溶融層密度がどの程度異なり、これが軟化溶融層内ガス圧にどのような影響を及ぼすのかについては不明であった。

コークス炉の炭化室内における乾留現象を考えると、Fig. 1に模式的に示すように、石炭層、軟化溶融層、再固化層およびコークス層が同時に存在している。ここでは、軟化溶融層の高温側で気孔が圧密されつつある領域<sup>6)</sup>を再固化層と考えるが、石炭が軟化溶融して再固化する過程は連続的であるので、これらの層を温度等で厳密に区分することはできない。軟化溶融層は石炭層、再固化層およびコークス層には含まれており、軟化溶融層は膨張により炭中側の石炭層および壁側再固化層を圧密し、さらに壁側コークス層の収縮により生じたスペースに体積を拡大していく。別の見方をすれば、軟化溶融層の膨張は石炭層、再固化層およびコークス層により拘束されていると言える。

Fig. 2に示すように、軟化溶融層の膨張拘束度が大きい

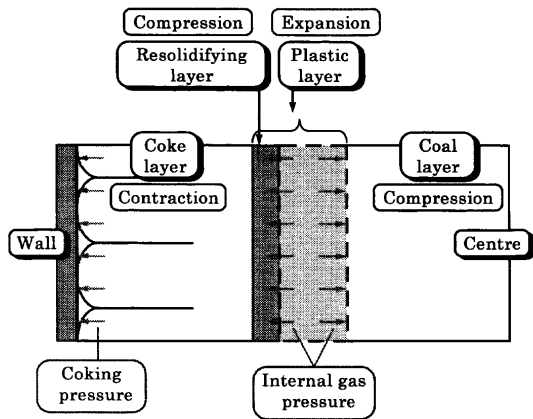


Fig. 1. Schematic view of the coke, plastic and coal layers in the coke oven chamber.

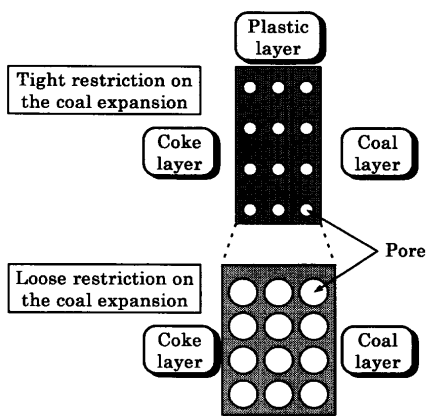


Fig. 2. Restriction on the coal expansion and the density of the plastic layer.

れば、軟化溶融層は膨張して広がることができず、その結果軟化溶融層の密度が低下せず、通気抵抗が増加してガス圧は高くなる。一方、拘束度が小さければ軟化溶融層は自由に膨張して体積を拡大できるため、軟化溶融層の密度が低下し内部のガス圧は低下する。この膨張拘束度は、石炭層、再固化層の圧縮性、およびコークス層の収縮という外的要因により影響を受ける。石炭層の圧縮性は石炭の種類に依存しないと考えられるが、コークス層の収縮は揮発分により大きく異なり、揮発分が高いほどコークスの収縮率は大きい<sup>8)</sup>。また、再固化層の圧縮性は炭種により異なることが報告されている<sup>6,9)</sup>。したがって、コークス層の収縮率および再固化層（軟化溶融層の高温部分）の圧縮性の差は、軟化溶融層の密度を変化させることにより、軟化溶融層内ガス圧に影響を及ぼすと考えられる。

そこでわれわれは、コークス炉で発生する膨張圧の支配要因を解明するため、(1)炭化室炉幅方向における石炭軟化・再固化過程における体積変化をX線CT装置により実測し、炭種による違いを明らかにするとともに、(2)炭化室炉幅方向中央側と壁側で異なる石炭をサンドイッチ状に装入して乾留して炉幅方向での体積変化の差が軟化溶融層

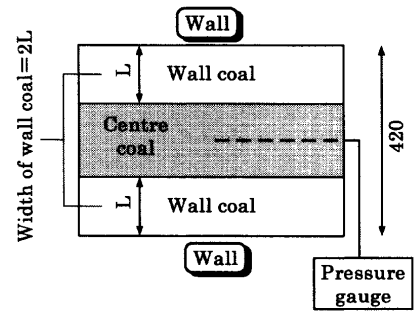


Fig. 3. 'Sandwich' carbonization.

Table 1. Characterization data for the coals used.

Coal	Proximate analysis (mass %, db)		Total dilatation (vol%)	Maximum fluidity (log MF/ddpm)	Petrographic analysis	
	VM	Ash			Reflectance (av.) (%)	Total inerts (%)
Peko	35.8	9.9	32	2.65	0.70	30.2
Mapco HV	34.7	6.4	128	3.42	0.86	20.4
Pittston MV	32.8	7.3	154	4.00	0.93	19.4
Moura	27.2	7.9	88	3.03	0.97	31.4
Goonyella	23.8	9.1	106	2.99	1.18	35.1
German Creek	20.4	9.0	120	2.70	1.37	25.5
Gregg River	21.2	9.6	35	2.07	1.39	37.6
K-9	18.3	9.5	60	1.42	1.58	26.5

Table 2. Experimental conditions.

Run	Centre			Wall		
	Coal	VM (mass %,db)	Width	Coal	VM (mass %,db)	Width
1	Pittston MV	32.8	50mm	Pittston MV	32.8	185mm × 2
2	Pittston MV	32.8	50mm	Moura	27.2	185mm × 2
3	Pittston MV	32.8	50mm	Gregg River	21.2	185mm × 2
4	Pittston MV	32.8	50mm	K-9	18.3	185mm × 2
5	K-9	18.3	50mm	K-9	18.3	185mm × 2
6	K-9	18.3	50mm	Pittston MV	32.8	185mm × 2
7	German Creek	20.4	420mm	Peko	35.8	0mm
8	German Creek	20.4	100mm	Peko	35.8	160mm × 2
9	German Creek	20.4	50mm	Peko	35.8	185mm × 2
10	German Creek	20.4	0mm	Peko	35.8	420mm

内ガス圧に及ぼす影響について検討したので、その結果について報告する。

## 2. 実験方法

### 2.1 炉幅方向分割装入試験

コークス層の収縮率および再固化層の圧縮性の差が軟化溶融層内のガス圧にどの程度影響を及ぼすかを調べるため、Fig. 3に示すように、電気加熱式試験乾留炉（炉幅420 mm; 炉長610 mm; 炉高400 mm）<sup>10)</sup>の炉幅方向中央側と壁側で異なる石炭をサンドイッチ状に装入して乾留した。実験には、石炭化度（ビトリニットの平均最大反射率）0.70~1.58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。また、実験条件をTable 2に示す。装入炭は3 mm以下80%に粉碎、水分3%に調整した後、装入密度850 dry-kg/m<sup>3</sup>で亜鉛鉄板製の装入缶に装入し、実コークス炉におけるフリー温度1250°Cでの炭中昇温パターンに合うように電気発熱体の温度を調整し、

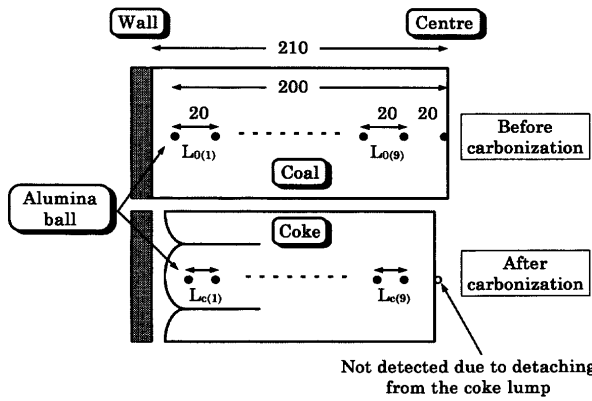


Fig. 4. Direct measurement of relative volume ratio of coke to coal in the direction of oven width.

18.5h 乾留した。ここで、炉幅方向での石炭・コークス体積変化の差が炭化室炉幅方向中央での軟化溶融層内ガス圧に及ぼす影響について検討するため、壁側および中央側に装入する石炭の種類（揮発分）あるいは装入幅を変えた。石炭装入時には、まず取り外し可能な仕切り板により装入缶の壁側と中央側を仕切り、壁側および中央側に石炭を装入した後で仕切板を引き抜くことにより、サンドイッチ状に装入した。また、ステンレス管（内径1mm、外径2mm）をプローブとして用い、試験乾留炉の底面から高さ120mmにおける炉幅方向中央での軟化溶融層内のガス圧を測定した。さらに、乾留後コークス塊の炉幅方向中央側より40mmを切断し、炉幅方向中央部（コークス塊の足部）近傍におけるコークスの気孔率を測定した。

### 2.2 コークス化時体積変化測定試験

石炭中にマーカー粒子を入れて乾留し、乾留後コークス中のマーカー位置をX線CT装置<sup>11)</sup>によって同定することにより、石炭が軟化溶融・再固化し、コークス化する過程での体積変化を測定した。実験には揮発分の異なる3種類の石炭（低揮発分炭：K-9炭、中揮発分炭：Goonyella炭、高揮発分炭：Mapco HV炭）を用いた。試験乾留炉の底面から高さ120mmまで石炭を装入した後、Fig. 4に示すように装入面上にアルミナボール(φ4mm)を炭化室炉幅方向中央より壁側に向かって炉幅方向片側のみに20mm間隔で11個配置した。その後、高さ400mmまで石炭を装入して乾留した。装入炭の粉碎粒度は3mm以下80%、水分3%、装入密度850 dry-kg/m<sup>3</sup>とし、乾留条件は炉幅方向分割装入試験と同じとした。乾留後のコークスは、X線CT装置を用いて加熱壁に平行に2mm間隔で断層撮影観察を行い、コークス塊内におけるアルミナボールの位置を同定した。これにより、コークス相対体積比 $R_c$  (The relative volume ratio of coke to coal during carbonization)を(1)式により求めた。

$$R_{c(i)} = L_{c(i)} / L_{0(i)} \dots \dots \dots (1)$$

ここで $L_{c(i)}$  (mm)は壁より*i*番目の区間におけるコークス

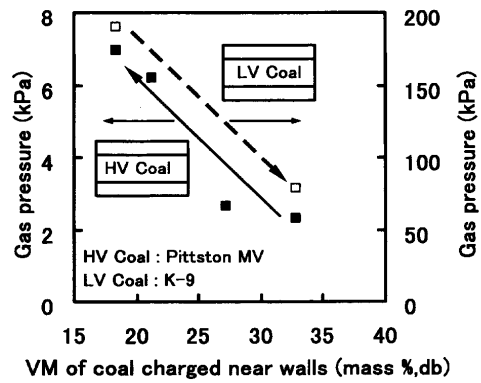


Fig. 5. Relationship between VM of coal charged near the oven walls and internal gas pressure in the oven centre.

塊内の炉幅方向隣接アルミナボール間距離、 $L_{0(i)}$  (mm)は壁より*i*番目の区間における装入時における炉幅方向隣接アルミナボール間距離(=20mm)である。炉幅方向中央部に配置したアルミナボールの多くはコークス塊よりとれてしまい、位置の同定ができなかったため、1~9の区間について測定を行った。

また同時に、試験乾留炉の底面から高さ120mmにおいて、炉幅方向6箇所（炉壁から20, 62.5, 105, 147.5, 190, 210mm=炭化室炉幅方向中央）で軟化溶融層内のガス圧を測定した。ガス圧測定用のプローブは、アルミナボールを配置していない炉幅方向の片側に設置した。さらに、乾留後のコークス塊を炉幅方向に5等分し、それぞれについてコークス気孔率を測定した。

### 3. 実験結果および考察

#### 3.1 炉幅方向分割装入が軟化溶融層内ガス圧に及ぼす影響

Fig. 5に壁側に装入した石炭の揮発分と炉幅方向中央における軟化溶融層内ガス圧の関係を示す。図より中央部の石炭が低膨張圧の高揮発分炭であるPittston MV炭の場合(■, 単味炭の炉幅方向中央での軟化溶融層内ガス圧は2kPa)、壁側装入石炭の揮発分を低下させると炉幅方向中央での軟化溶融層内ガス圧が増加することがわかる。一方、中央部の石炭が高膨張圧の低揮発分炭であるK-9炭の場合(□, 単味炭の炉幅方向中央での軟化溶融層内ガス圧は190kPa)、壁側装入石炭の揮発分を上昇させると炉幅方向中央での軟化溶融層内ガス圧が低下することがわかる。

また、Fig. 6に示すように、壁側に装入する高揮発分炭(Peko炭)の装入幅が大きくなると、炉幅方向中央部における乾留後コークスの気孔率が増加し、軟化溶融層内ガス圧が低下することがわかる。

以上より、炉幅方向中央の軟化溶融層内ガス圧は、軟化状態にある石炭の種類だけではなく、軟化溶融層よりも炉壁側にあり既に再固化過程（コークス層および再固化層）

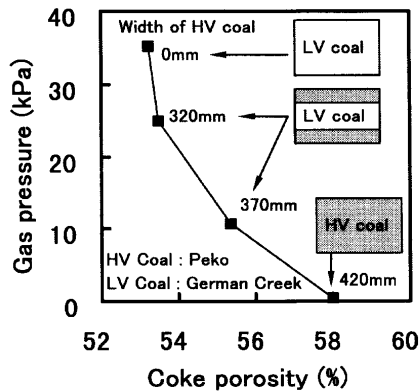


Fig. 6. Relationship between coke porosity and internal gas pressure in the oven centre as a function of the width of HV coal: charged near the oven walls.

にある石炭種の影響を受けることがわかる。さらに、壁側装入炭の揮発分が高いほど、あるいは壁側に装入する高揮発分炭の装入幅が大きいほど、炉幅方向中央における軟化溶融層内ガス圧が低下することがわかる。

コークス炉炭化室内においては、Fig. 1に示すように再固化層（軟化溶融層の高温部分）は隣接する軟化溶融層の膨張により圧密されるため、コークスの気孔率は必ずしも軟化溶融層の密度（あるいは空隙率）と相関があるとは言えない。しかしながら、炭化室炉幅方向中央部においては、軟化溶融層が再固化した後は、その再固化層に圧密等の影響を及ぼす軟化層は存在しないので、その部位におけるコークス気孔率は再固化直前の軟化溶融層の密度を反映していると考えられる。すなわち、Fig. 6において壁側に装入する高揮発分炭の装入幅が大きいほど炉幅方向中央部における乾留後コークスの気孔率が高いことは、炉幅方向中央部で軟化溶融層の密度が低かったことを示唆しており、このため軟化溶融層の通気抵抗が低下し、ガス圧が低下したと考えられる。

### 3.2 石炭軟化・再固化過程における体積変化

Fig. 7に、石炭乾留過程における石炭・コークス体積の変化を模式的に示す。石炭は軟化溶融すると膨張するが、再固化時（軟化溶融層の高温部分）において隣接する軟化溶融層内のガス圧により圧密され<sup>6,9)</sup>、体積が減少する。さらに再固化温度を超えて昇温すると、コークスは収縮する。このように、膨張して体積が最大となってからの体積変化は、再固化層が圧密される過程とコークスが物質収縮する過程の二つに大きく分けられると考えられる。そこでここでは、便宜的にそれぞれの過程が終了した時点における体積を別々に考慮することとし、単位体積の石炭を基準として、再固化時の圧密が完了したと考えられる時点（再固化温度近傍）における体積を、セミコークス相対体積比  $R$  (The relative volume ratio of semicoke to coal)<sup>7)</sup>、乾留終了時における体積を、コークス相対体積比  $R_c$  (The relative volume ratio of coke to coal) と定義する。ここで、再固

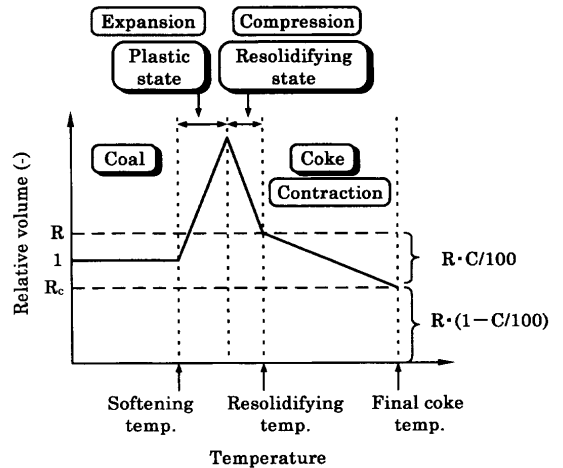


Fig. 7. Volume change of coal in the direction of the coke oven width during plastic and resolidifying state.

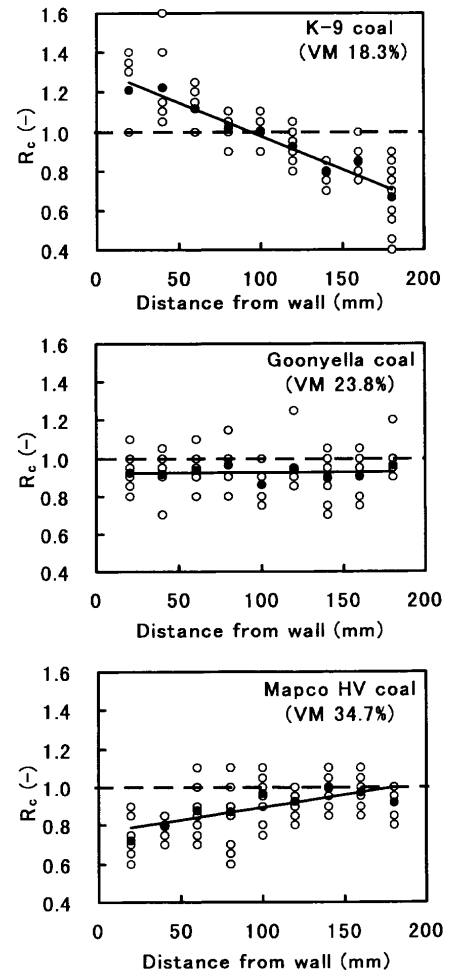


Fig. 8. Distribution of relative volume ratio of coke to coal across the oven width.

化温度以降のコークスの収縮率を  $C$  (%) とすると、Fig. 7に示すように、

$$R_c = R \cdot (1 - C/100) \dots \dots \dots (2)$$

の関係がある。

Fig. 8にコークス相対体積比  $R_{c(i)}$  の炉幅方向での分布を

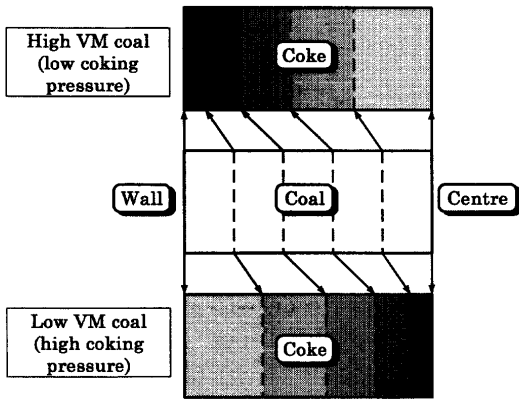


Fig. 9. Changes in volume from coal to coke across the oven width.

示す。ここで横軸は、 $R_{c(i)}$ を求めるために用いた隣接するアルミナボールの初期位置の中間とした。また、○は全実測値を、●は各位置における平均値を示す。コークス相対体積比 $R_c$ は炉幅方向で異なり、アルミナボールは石炭の体積変化に伴って移動したと考えられる。高膨張圧を示す低揮発分炭のK-9炭では、炉壁近傍のコークス相対体積比 $R_c$ は1より大きく、炉幅方向中央に向かうにつれて減少し、中央部では0.7と小さくなるのがわかる。このことは、加熱壁側ではコークス化後のコークス層の体積が元の石炭層の体積よりも大きいことを意味しており、Fig. 9に示すように炉幅方向中央に向かうにつれて石炭層は圧密され、軟化熔融層の膨張拘束度が大きくなり、密度が高くなることを示している。一方、Goonyella炭ではコークス相対体積比 $R_c$ は炉幅方向で0.9~1.0でほとんど変化しない。また、高揮発分炭のMapco HV炭では、炉壁近傍ではコークス相対体積比 $R_c$ は0.7と小さく、炉幅方向中央に向かうにつれて増加し、中央部では約1になるのがわかる。以上より、単位体積の石炭から生成する最終的なコークスの体積（コークス相対体積比）は、コークス炉炭化室炉幅方向および炭種により大きく異なるのがわかる。

次に、炭種毎のコークス収縮率を用い、コークス相対体積比 $R_{c(i)}$ よりセミコークス相対体積比 $R_{(i)}$ を求めた。

$$R_{(i)} = R_{c(i)} / (1 - C_{(i)} / 100) \dots\dots\dots (3)$$

ここで、 $C_{(i)}$  (%)はFig. 7に示すように壁より*i*番目の区間における再固化時から乾留終了時までのコークス収縮率であり、炭種と乾留終了時の温度により異なる。ここでは、揮発分および温度とコークス収縮率の関係を示す文献値<sup>8)</sup>を用いて、それぞれの石炭における壁より*i*番目の区間における再固化時から乾留終了時までのコークス収縮率を求めた。揮発分と温度は、実験値を用いた。本実験では、区間1~9におけるコークス到達最終温度は1104°C~1071°Cであり、それぞれの区間における再固化時から乾留終了時までのコークス収縮率は、K-9炭で11.73%~11.55%、Goonyella炭で12.46%~12.28%、Mapco HV炭で14.74%~

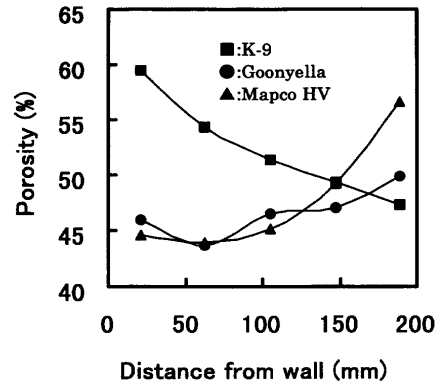


Fig. 10. Coke porosity across the oven width.

14.43%となった。

さらに、以下に示すような西村らの手法<sup>7)</sup>を用い、コークス気孔率よりセミコークス相対体積比（単位体積の石炭から生成するセミコークスの再固化温度における体積） $R$ を求めた。 $R$ は(4)~(6)式で表される。

$$R = W(\theta_{sol}) / \rho_a(\theta_{sol}) \dots\dots\dots (4)$$

$$W(\theta_{sol}) = \rho_{coal} \cdot \eta(\theta_{sol}) / 100 \dots\dots\dots (5)$$

$$\rho_a(\theta_{sol}) = \{1 - P(\theta_{sol}) / 100\} \cdot \rho_t(\theta_{sol}) \dots\dots\dots (6)$$

ここで、 $\theta_{sol}$  (°C)は再固化温度、 $W(\theta_{sol})$  (g/cm<sup>3</sup>)は単位体積あたりの石炭からの $\theta_{sol}$ におけるコークス重量、 $\rho_a(\theta_{sol})$  (g/cm<sup>3</sup>)は $\theta_{sol}$ におけるコークスの見掛比重、 $\rho_{coal}$  (g/cm<sup>3</sup>)は石炭装入嵩密度、 $\eta(\theta_{sol})$  (%)は $\theta_{sol}$ におけるコークス歩留り、 $P(\theta_{sol})$  (%)は $\theta_{sol}$ におけるコークス気孔率、 $\rho_t(\theta_{sol})$  (g/cm<sup>3</sup>)は $\theta_{sol}$ におけるコークスの真比重である。

ここで、再固化後はコークス気孔率は変化しないと仮定する。すなわち、

$$P(\theta_{sol}) = P(\theta_{coke}) \dots\dots\dots (7)$$

$P(\theta_{coke})$  (%)は、乾留終了後のコークス気孔率である。ゆえに、セミコークス相対体積比 $R$ は(8)式で表される。

$$R = \{ \rho_{coal} \cdot \eta(\theta_{sol}) / 100 \} / [ \{ 1 - P(\theta_{coke}) / 100 \} \cdot \rho_t(\theta_{sol}) ] \dots\dots\dots (8)$$

ここで、 $\theta_{sol}$ におけるコークス歩留り $\eta(\theta_{sol})$ およびコークス真比重 $\rho_t(\theta_{sol})$ は、文献値<sup>12)</sup>より揮発分(VM (mass%, db))の関数として(9)式、(10)式でそれぞれ表した。

$$\eta(\theta_{sol}) = 105.72 - 0.744 VM \dots\dots\dots (9)$$

$$\rho_t(\theta_{sol}) = 0.0028 VM + 1.286 \dots\dots\dots (10)$$

石炭装入嵩密度 $\rho_{coal}$ および乾留終了後のコークス気孔率 $P(\theta_{coke})$ は、実験値を用いた。

Fig.10にコークス気孔率の炉幅方向における変化を示す。通常、炉幅方向におけるコークス気孔率変化を観察すると、中央に近づくにしたがい気孔率は増大し、特に炉幅方向中央部（足部）では気孔率が高く、比較的脆弱なコーク

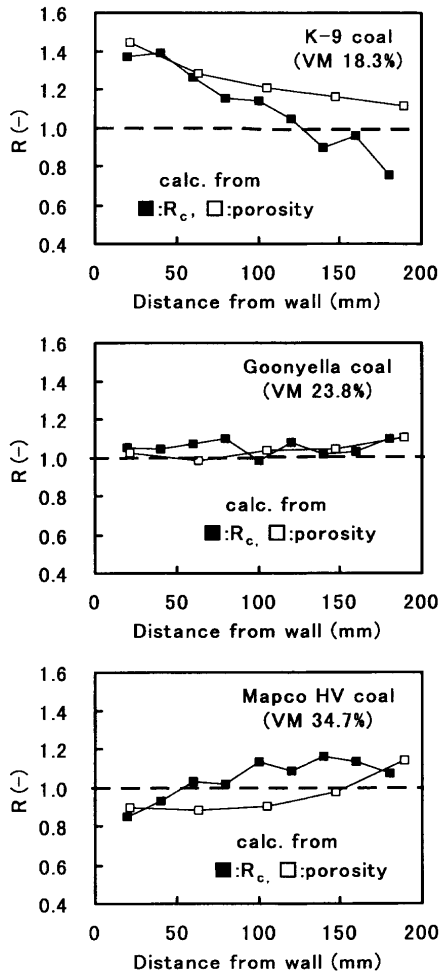


Fig. 11. Distribution of relative volume ratio of semicoke to coal across the oven width.

クス構造になることが知られている<sup>13)</sup>。今回の試験では、Goonyella炭およびMapcoHV炭では中央に近づくとしたがい気孔率が増大するが、K-9炭では逆に中央に近づくとしたがい気孔率が低下していることがわかる。

Fig.11にセミークス相対体積比 $R$ の炉幅方向での分布を示す。ここで、■はコークス相対体積比 $R_{(c)}$ より求めた値、□は気孔率より求めた値であるが、それぞれの石炭において両者の傾向はよく一致している。また、高膨張圧を示す低揮発分炭のK-9炭では、炉壁近傍ではセミークス相対体積比 $R$ が1より大きく、炉幅方向中央に向かうにつれて減少することがわかる。このことは、加熱壁側では再固化時の体積が元の石炭層の体積よりも大きいことを意味している。一方、Goonyella炭ではセミークス相対体積比 $R$ は炉幅方向で1.0~1.1でほとんど変化しない。また、高揮発分炭のMapco HV炭では、炉壁近傍ではセミークス相対体積比 $R$ は0.8と小さく、炉幅方向中央に向かうにつれて増加し、中央部では約1.1になることがわかる。以上より、セミークス相対体積比は、コークス炉炭化室炉幅方向および炭種により大きく異なることがわかる。

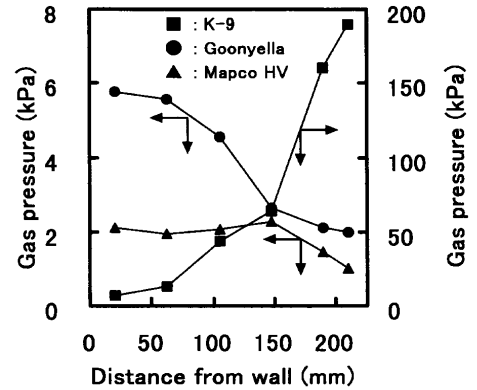


Fig. 12. Internal gas pressure in the plastic layer across the oven width.

### 3.3 石炭軟化・再固化時の体積変化が軟化溶融層内ガス圧に及ぼす影響

Fig.12に軟化溶融層内ガス圧の炉幅方向における変化を示す。K-9炭は、中央に近づくとしたがい軟化溶融層内ガス圧が急激に増大しているのに対し、Goonyella炭およびMapco HV炭では逆にガス圧が低下することがわかる。

これらの軟化溶融層内ガス圧の炉幅方向変化は、石炭軟化溶融・再固化時の体積変化の影響を受けており、高膨張圧のK-9炭におけるガス圧と石炭軟化溶融・再固化時の体積変化挙動の関係は、下記のように説明される。

(1) 炉壁近傍では、軟化溶融時に石炭層を圧密して大きく膨張する。このため、軟化溶融層の密度が低くなり、ガス圧は比較的低くおさえられる。

(2) 大きく膨張した軟化溶融層は、再固化温度前に隣接する軟化溶融層により圧密作用を受ける。しかしながら、K-9炭の再固化層は圧密されにくい<sup>9)</sup>。また、壁近傍においては隣接する軟化溶融層は石炭層を圧密して大きく膨張することが可能であり、軟化溶融層のガス圧は比較的低い。このため、再固化層はあまり圧密されず、再固化時の圧密が完了したと考えられる時点でのセミークス相対体積比 $R$ は高くなり(>1)、収縮を開始する前のセミークスの気孔率も高くなる。このため、温度が上昇して収縮過程が十分進んだ後においてもコークスの気孔率は高く、再固化温度後のコークス収縮を加えたコークス相対体積比 $R_c$ も1より大きくなる。

(3) 炭化室炉幅方向中央に向かうにつれて石炭層は圧密され、軟化溶融層の膨張が拘束されて密度が上昇する。このため軟化溶融層内ガス圧は上昇する。

(4) 一方、圧密可能な石炭層の厚みは薄くなり、石炭層および再固化層の密度は高くなるため、圧密されにくくなる。このため、軟化溶融層の膨張が拘束され、軟化溶融層の密度およびガス圧は高く保たれ、コークスの気孔率は低下する。また、炭化室中央部では、軟化溶融層厚みが厚くなる<sup>4)</sup>ため、ガス圧はさらに上昇する。

K-9炭のような高膨張圧炭は、軟化溶融時に形成される

気泡の大きさが小さく、気泡内外の圧力差は気泡径に反比例することから、気泡内ガス圧力は高くなり、軟化溶融物自身の通気抵抗も高くなることが示唆されている<sup>14)</sup>。なぜこのような小さい気孔が形成されるかについては不明であるが、おそらく軟化溶融物の表面張力や表面粘性が関与していると推察される。Fig. 5に示すように、コークス炉炭化室炉幅の約90%に相当する壁側領域に高揮発分炭(Pittston MV炭)を装入しても、炭化室炉幅方向中央(K-9炭装入部)の軟化溶融層内ガス圧は79 kPaあり、石炭由来の軟化溶融物固有の物性が軟化溶融層の通気抵抗に及ぼす影響は大きい。

一方、コークス炉において発生する膨張圧の経時変化を推定するには、炭化室炉幅方向における軟化溶融層内ガス圧変化を明らかにする必要がある。今回の研究により、石炭軟化・再固化過程での体積変化は、炉幅方向で大きく異なり、軟化溶融層の膨張拘束度を変化させることにより、軟化溶融層の通気抵抗およびガス圧に大きな影響を及ぼしていることが明らかになった。したがって、石炭軟化・再固化過程における体積変化のような外的要因は、コークス炉において発生する膨張圧の経時変化を推定する上で極めて重要な因子であると考えられる。

炉幅方向分割装入試験において、軟化溶融層よりも炉壁側にあり既に再固化過程にある石炭種が、軟化溶融層密度およびガス圧に及ぼす影響についても以下のように説明することができる。すなわち、壁側装入炭の揮発分が高いほど、あるいは壁側に装入する高揮発分炭の装入幅が大きいほど、炉壁側におけるコークス相対体積比が小さくなり、再固化後コークスの体積が小さくなる。このため、炉幅方向中央部における軟化溶融層の膨張拘束度が小さくなり、密度が低下して通気抵抗が低下し、ガス圧が低下すると推察される。

#### 4. 結言

石炭軟化・再固化過程における体積変化とコークス炉の軟化溶融層内ガス圧の関係について検討し、以下の結論を

得た。

(1) 軟化溶融層内ガス圧は、軟化状態にある石炭の種類だけではなく、軟化溶融層よりも炉壁側にあり既に再固化過程にある石炭種の影響を受ける。これは、石炭軟化・再固化過程における体積変化が、軟化溶融層の膨張拘束度に影響を及ぼして軟化溶融層密度を変化させるためである。

(2) 不活性成分含有量の少ない低揮発分炭のK-9炭において、炭化室炉幅方向中央に近づくにしたがい軟化溶融層内ガス圧が急激に増大する理由は、コークス相対体積比(単位体積の石炭から生成するコークス体積)が炉壁側で大きいため、炉幅方向中央で軟化溶融層の膨張拘束度が大きくなり、軟化溶融層密度が増大して通気抵抗が上昇するためと考えられる。

(3) 石炭軟化・再固化過程での体積変化挙動は炭化室炉幅方向で大きく異なるので、炉幅方向における軟化溶融層内ガス圧変化、すなわちコークス炉において発生する膨張圧の経時変化を推定する上で、考慮すべき極めて重要な因子である。

#### 文 献

- 1) W.Rohde, D.Habermehl and V.Kolitz: *Ironmaking Conf. Proc. ISS*, **47** (1988), 135.
- 2) R.Loison, P.Foch and A.Boyer: *COKE Quality and Production*, Butterworths, London, (1989), 396.
- 3) S.Nomura, T.Arima and T.Nishi: *CAMP-ISIJ*, **4** (1991), 132.
- 4) S.Nomura, T.Arima and T.Okuhara: *CAMP-ISIJ*, **5** (1992), 1077.
- 5) G.C.Soth and C.C.Russell: *Trans. AIME*, **157** (1944), 281.
- 6) D.Hays, J.W.Patrick and A.Walker: *Fuel*, **55** (1976), 297.
- 7) A.Nishimura, S.Tanaka and T.Arima: *CAMP-ISIJ*, **8** (1995), 123.
- 8) C.Meyer, D.Habermehl and O.Abel: *Glückauf-Forschungshefte*, **42** (1981), 233.
- 9) S.Nomura and K.M.Thomas: *Fuel*, **75** (1996), 187.
- 10) K.Shiraishi, T.Yamaguchi, T.Nishi and T.Arima: *Coke Circular*, **30** (1981), 239.
- 11) M.Sakawa, K.Shiraishi, Y.Sakurai and Y.Shimomura: *J. Fuel Soc. Jpn.*, **66** (1987), 259.
- 12) R.Loison, P.Foch and A.Boyer: *COKE Quality and Production*, Butterworths, London, (1989), 98.
- 13) K.Nishioka and S.Yoshida: *Tetsu-to-Hagané*, **70** (1984), 343.
- 14) T.Arima, S.Nomura and K.Fukuda: *Tetsu-to-Hagané*, **82** (1996), 409.