

# 炉幅方向のコークス性状分布解析にもとづく コークスの強度および反応性の数式化

論文

西岡 邦彦\*・吉田 周平\*

## Evaluation of Coke Strength and Reactivity Based on the Analysis of Coke Property Distribution across the Oven Width

Kunihiko NISHIOKA and Shuhei YOSHIDA

### Synopsis:

Previous researches on coke strength and reactivity have been performed without consideration of coke property distribution across the coke oven width. However, the importance and decisive effect of the coke property distribution across the coke oven width was confirmed both by experiments and by the analysis of measured results.

The coke produced by a 250 kg electric test coke oven was divided into 10 sections across the oven width and the various coke property distributions were measured as well as coke strength and reactivity of whole samples.

Based on the analysis of measured coke properties, it is found that coke strength can be basically evaluated by the porous material strength formula based on porosity and inherent strength. Furthermore it is found that weight loss by reaction of coke can be evaluated from porosity and the degree of graphitization, while coke strength after reaction with CO<sub>2</sub> gas can be evaluated from porosity, inherent strength, and the degree of graphitization.

### 1. 緒 言

高炉用コークスの品質評価は、高炉炉況を大きく左右する通気・通液性の観点から、近年冷間強度のみならず熱間性状でも行われるようになってきた。

これらコークスの冷・熱間性状に関する研究は、コークスの研究の中で最も重要な分野の1つであり、これまで膨大な報告がなされている。

従来、コークスの冷間強度については、乾留過程で生成するき裂に依存するとの報告<sup>1)~3)</sup>や石炭性状としての炭化度および流動性等に依存するとの見解<sup>4)5)</sup>から検討されてきた。しかしこれらは冷間強度に影響する乾留条件や石炭性状のような要因と、結果としての強度とを直接結びつけて論じられたものが多い。ところが近年コークスを多孔材料の観点から捉え、コークスの強度を材料力学的手法で解析する研究<sup>6)~10)</sup>が進められるようになり、コークスの強度評価も新しい展開をみるに至っている。

一方、コークスの熱間性状については、古くから研究の対象として取り上げられていたが、コークス品質の管

理指標として用いられることはなかつた。しかし近年活発におこなわれた高炉の解体調査<sup>11)~14)</sup>や試験高炉の結果<sup>15)16)</sup>から、コークスの熱間性状の重要性が指摘され、最近ではCO<sub>2</sub>反応後試験法<sup>17)</sup>で得られる反応量(Weight Loss by Reaction: WLR)や反応後強度(Strength Index after Reaction: SIR)を管理指標として用いる製鉄所も多く見受けられるようになった。

このWLRやSIRの評価は、コークスの光学的組織成分の選択反応性、気孔やき裂の量、さらには灰分の触媒作用の面から検討<sup>18)~21)</sup>されているが、まだ定量的に評価されるまでには至っていない。

このようにコークスの冷・熱間性状の評価は、高炉における解析技術の向上に伴って重要性を高めているにもかかわらず、まだ十分とは言えないのが現状である。

本研究では、コークスの品質評価について、これまでほとんど無視されてきた炉幅方向の品質分布を詳細に解析することによつて、冷・熱間性状がコークスのどのような物性に左右されているか検討した。

昭和 57 年 9 月 本会講演大会にて発表 Trans. ISIJ Vol. 23 (1983) Nos. 5 & 6 に一部掲載  
昭和 58 年 2 月 25 日 受付 (Received Feb. 25, 1983)

\* 住友金属工業(株)中央技術研究所波崎研究センター (Hasaki Research Center, Central Research Laboratories, Sumitomo Metal Industries, Ltd., 16 Oaza-Sunayama Hasakimachi Kashima-gun Ibaraki pref. 314-02)

Table 1. Properties of coals.

Coal	Ash (%, d. b.)	Volatile matter (%, d. b.)	Max. fluidity (log ddpm)	Total reactives (%)	Mean reflectance (%)	Blending ratio (%)
Cerro	9.2	18.1	1.10	88.4	1.53	15
Balmer	9.7	20.4	1.36	63.7	1.33	25
Pittstone	7.5	30.1	3.66	84.3	1.07	25
Goonyella	7.7	26.1	3.38	71.8	1.05	20
Akabira	6.3	41.9	2.88	96.0	0.72	15
Blended coal	8.2	26.8	2.20	79.0	1.15	100

## 2. 実験方法

### 2.1 供試コークスの作成方法

コークスの物性検討に供する試験片の作成は極めて重要である。これまでコークスの強度および反応性についての研究は、炉幅方向のコークス品質分布を無視し、均質なものとして扱っているため、測定値のばらつきを考慮して測定個体数を多くとる必要があるばかりでなく、得られる測定値の解析も不十分なものとならざるを得なかつた。

そこで著者らは従来の方法に比較してはるかに均質なコークスを得る方法として、以下の手順を採用することによりこの問題を解決した。

まず Table 1 に示す単味炭もしくは配合炭を炉幅 450 mm、装炭量約 250 kg の電気加熱式試験コークス炉にそれぞれ装入し、乾留温度および装入炭嵩密度を変えて乾留した。この方法により、マクロ的には原料が同一で、乾留温度と気孔率の異なるコークスを多量に得ることができる。次いでこれらのコークスは、さらに炉幅方向に約 20 mm の幅で 10 分割し、各分割部分から各種性状測定用の試験片を切り出した。この方法により、ミクロ的にも原料が同一で乾留温度と気孔率の異なるコークスを多量に得ることができる。

なお、各分割部分の乾留温度は Fig. 1 にみられるごとく、炉幅方向に 9 本の熱電対を設置し、各測温点を結ぶ炉幅方向の温度分布から読みとつた。そして乾留後のコークスは炉内中央部をドラム強度および反応性測定用に約 65 kg サンプリングするとともに、その一部の測温位置の炉幅方向塊コークスを 10 分割し、以下に示す各種性状測定に供した。

### 2.2 性状測定項目と測定方法

#### (1) 引張強度

一般に岩石類の引張強度試験として用いられ、PATRI-CK<sup>6)</sup> や宮川<sup>7)</sup> によつてコークスに適用された間接引張強度試験法(以後引張試験と略記)に準じて測定した。なお、測定値は個体数 20 個の平均値を代表値とした。

#### (2) 気孔率

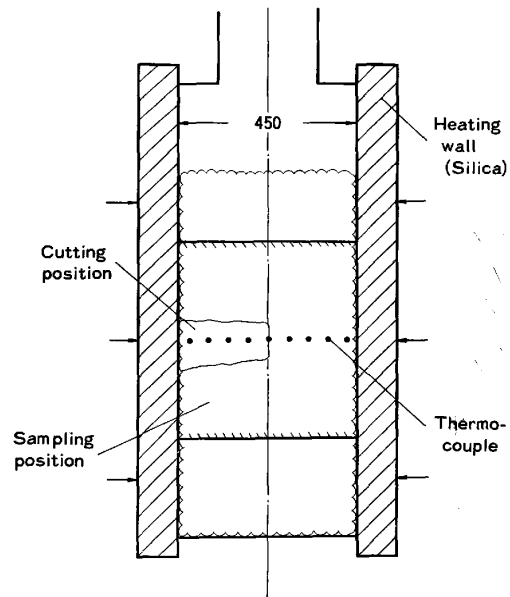


Fig. 1. Test coke oven and sampling position.

引張試験用に切り出されたディスク状コークスの直径、厚み、重量から見掛密度を求めるとともに、引張試験後の試料を粉碎し JIS K 2151 に準じて真比重を求め、それら両測定値から気孔率を算出した。

#### (3) マイクロ強度

引張試験後の試料は前記の真比重測定用に供するとともに、14~28 mesh に粉碎整粒し、H. E. BLAYDEN<sup>22)</sup> の方法に準じマイクロ強度を測定した。ここで強度表示のフルイ目として Tyler フルイの 28, 48, 65, 100 mesh (各目開き寸法; 589, 295, 208, 147  $\mu\text{m}$ ) を用い、各フルイ上重量百分率を  $MI_{28}$ ,  $MI_{48}$ ,  $MI_{65}$  および  $MI_{100}$  として表示した。

#### (4) 黒鉛化度

マイクロ強度測定後の試料を全量 200 mesh 以下に粉碎後、(002) 面について X 線回折により C 軸方向の結晶子寸法  $L_c$  を求めた。

#### (5) JIS 反応性、コークス組織分析

引張試験用の試料切り出し後の炉幅方向の各分割部分残部コークスを、それぞれ 10~20 mesh に粉碎整粒し、JIS K 2151 に準じて反応性を測定する一方、別途 20~200 mesh に粉碎整粒し、樹脂埋め込み後コークスの組

織分析を行った。

上記(1)～(5)の性状測定は、炉幅方向塊コールクスを壁側から炉芯まで 10 分割した各コールクスについて実施したが、さらに炉内中央部の採取コールクスは、JIS K 2151 にもとづくドラム強度測定と熱間性状としての WLR および SIR 測定用に供した。

### 3. 結 果

#### 3.1 炉幅方向のコールクス性状分布

炉幅方向の各分割部分について測定したコールクス性状分布の 1 例を Fig. 2, 3 に示す。これらはいずれも Table 1 に示す配合炭を嵩密度 720 kg/m<sup>3</sup> で装炭し、炉温 1140°C、乾留時間 24 h で乾留したものであり、Fig. 2 中の温度は窯出し時の各分割部分の温度である。

まず Fig. 2 において、壁側コールクスが炭中側コールクスより従来の知見<sup>23)24)</sup>と同じく、気孔率が小さく強度の高いことを示し、コールクスが極めて不均質な多孔材料であると理解される。

ここで注目すべきことは、引張強度と気孔率とは比較的良好な対応を示すものの、マイクロ強度は気孔率と関係なく、壁側から炭中へと逐次低下する傾向を示していることである。こうした傾向は他の条件変更コールクスについても同様に認められ、各分割部分の窯出温度と対応することから、マイクロ強度は最終到達温度に依存していると判断された。すなわち通常の乾留温度範囲においては、最終到達温度が高くなるほど一般に黒鉛化度は向上し、マイクロ強度が高くなる<sup>25)~27)</sup>ことから、マイクロ強度はコールクスの基質強度を反映しているものと考えられる。

一方、Fig. 3 において、前記したように本結果でも黒鉛化度は乾留温度の高い壁側が炭中側より高く、逆に JIS 反応性は壁側が炭中側より低い傾向を示している。そしてコールクスの組織分析から得られる高次異方性組織(粗粒モザイク構造、繊維構造、葉片状構造)の含有量は、壁側が顕著に高く、等方性組織はその逆の傾向を示している。

このような炉幅方向コールクスの性状分布はいずれのコールクスにも存在するものであり、それらを無視したマクロ的な品質評価は、必ずしもコールクスを正確に評価しているとはかぎらないことを示唆しよう。

#### 3.2 コールクスの基質強度

従来、基質強度の測定は、マイクロビッカースやヌープ硬度計により若干行われているものの、サンプルの代表性の問題やコールクス組織の不均一性により、必ずしも信頼できる測定値が得られているとは言い難い<sup>28)29)</sup>。

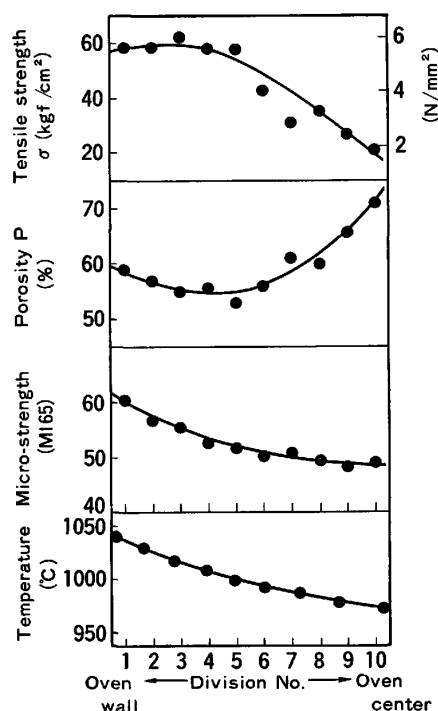


Fig. 2. Variation of coke properties across the oven width.

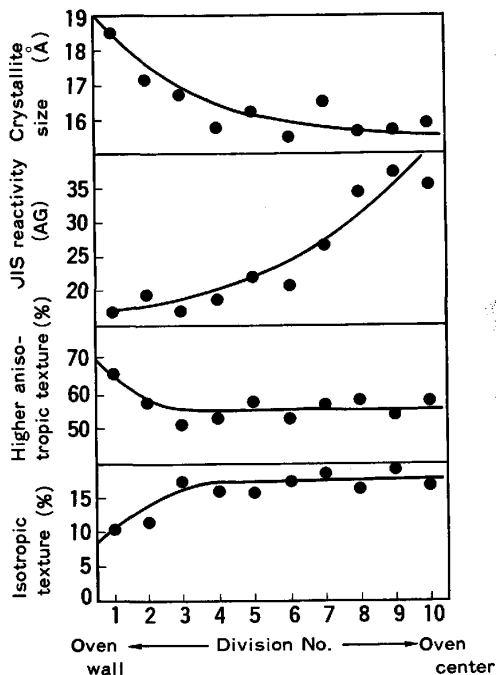


Fig. 3. Variation of coke properties across the oven width.

そこで著者らは、基質強度を相対的に評価していると考えられたマイクロ強度について、最も基質強度を反映するフルイ目の検討を実施した。

前記 3.1 の結果を踏まえ、乾留温度とマイクロ強度との関係をフルイ目で整理した。この結果は、Fig. 4 に示すごとく 28 および 48 mesh に比較し、65 および

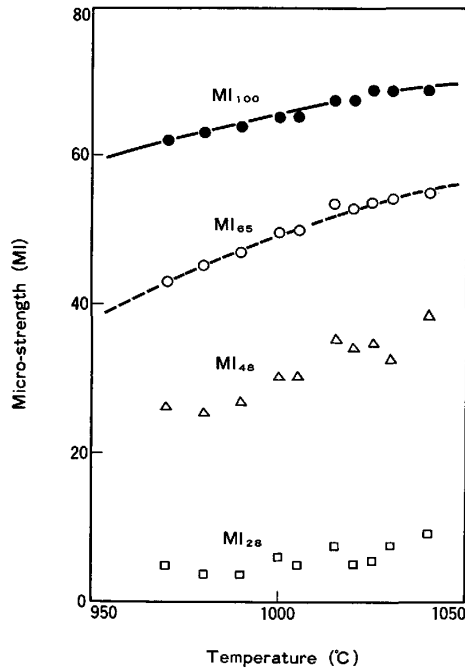


Fig. 4. Relation between micro-strength of coke and carbonizing temperature.

100 mesh のようにふるい目の細かい方が乾留温度との対応が良く、基質強度をより相対的に評価していると判断される。

これは、ふるい目が細かいほど供試コークスに内包される気孔や微細き裂の影響が除去され、基質の強度を良く反映するためと推定される。

#### 4. 考 察

##### 4.1 強度評価

###### 4.1.1 気孔率、マイクロ強度と引張強度

一般に多孔材料の強度は、気孔率に大きく依存している。今回の測定結果についても、Fig. 5 に示すごとく引張強度と気孔率とは比較的良好な関係がみられる。しかし気孔率だけでは引張強度のばらつきが大きく十分とはいえない。これは基質強度の影響を無視しているからと考えられる。そこで前記 3.2 の結果にもとづいて、基質強度を相対的に評価していると考えられる 65 mesh ふるい上のマイクロ強度 ( $MI_{65}$ ) で層別した。その結果、図中の実線で示されるように、同一マイクロ強度値であれば引張強度と気孔率とは極めて良好な相関をもつことが確認された。

ここでコークスの引張強度を多孔材料強度式で整理する場合、RYSHKEWITCH<sup>30)</sup> や KNUDSEN ら<sup>31)</sup> が焼結アルミナや種々のセラミック焼結体の強度を表すために提案した(1)式が、最近では PATRICK ら<sup>6)</sup> や八嶋<sup>10)</sup> によつて適用され、その有用性が報告されている。

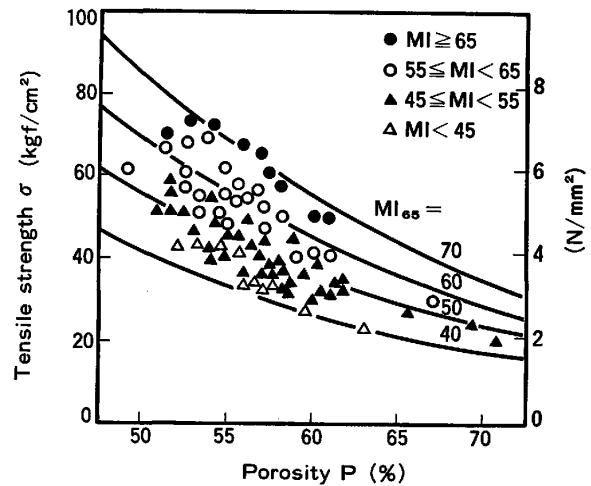


Fig. 5. Relation between porosity, micro-strength and tensile strength of various cokes.

$$\sigma = \sigma_0 \exp(-cP) \dots\dots\dots (1)$$

- ここで、 $\sigma$  : 引張強度 [kgf/cm<sup>2</sup>]
- $\sigma_0$  : 基質強度 [kgf/cm<sup>2</sup>]
- $P$  : 気孔率 [-]
- $c$  : 定数

しかしこれまでの研究では、既に述べたように基質強度 (気孔率ゼロでの強度) の測定法は確立されておらず、PATRICK や八嶋らの研究においても言及されていないのが現状である。

著者らは(1)の基質強度  $\sigma_0$  の項を、前記 3.2 において基質強度を相対的に評価していると判断されたマイクロ強度  $MI$  を用い、その一次回帰式で置換し、今回の実験で得られた全データをもとに解析して(2)式を得た。

$$\sigma = (11.4MI - 114) \exp(-4.2P) \dots\dots\dots (2)$$

$r = 0.72, n = 220$

ここで、 $MI$  : マイクロ強度 65 mesh 値 (%)

上記(2)式の妥当性を検証するため、今回の炉幅方向コークスについて、各分割部分の引張強度をそれぞれの気孔率とマイクロ強度から計算し、実測値と比較した。その結果は Fig. 6 に例示するごとく、良好な対応がみられ(2)式が妥当な近似式であると確認された。

従つて、コークスの引張強度は基本的には、一般の多孔材料と同じく気孔率と基質強度に依存していると考えられる。

###### 4.1.2 引張強度とドラム強度

一般にコークスの強度は、JIS ドラム強度やマイカム強度、タンブラー強度といった回転強度で管理されており、それらの強度指数に関する研究も多く報告<sup>32)~36)</sup> されている。しかしコークスを材料強度面から解析したも

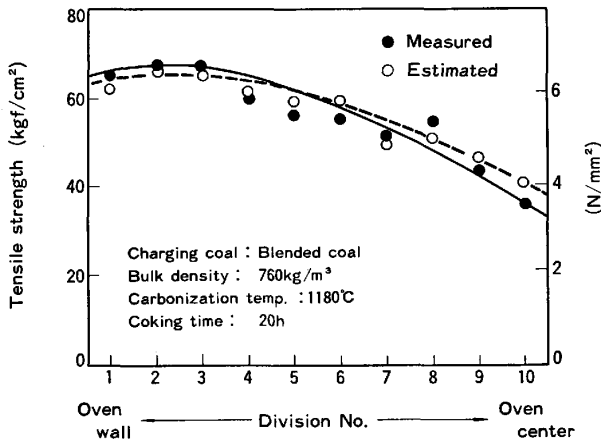


Fig. 6. Variation of tensile strength across the oven width.

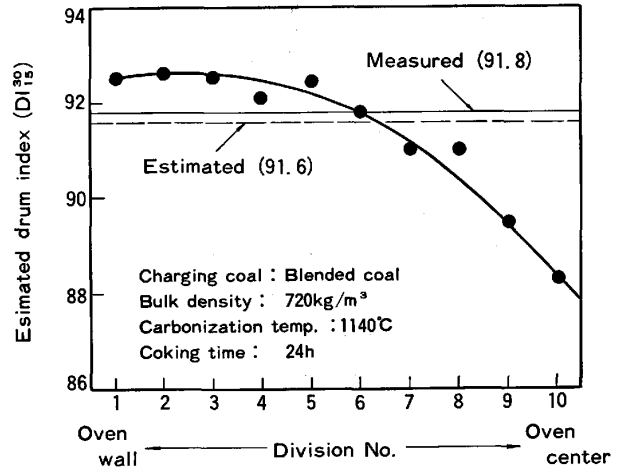


Fig. 8. Variation of estimated JIS drum index across the oven width.

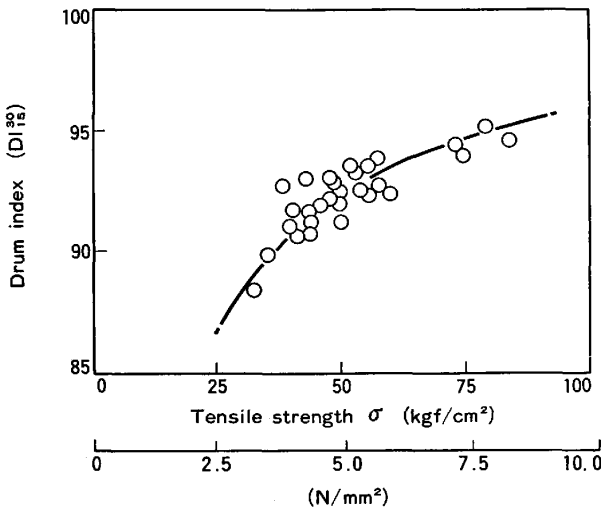


Fig. 7. Relation between tensile strength and JIS drum index ( $DI_{15}^{\%}$ ) of various cokes.

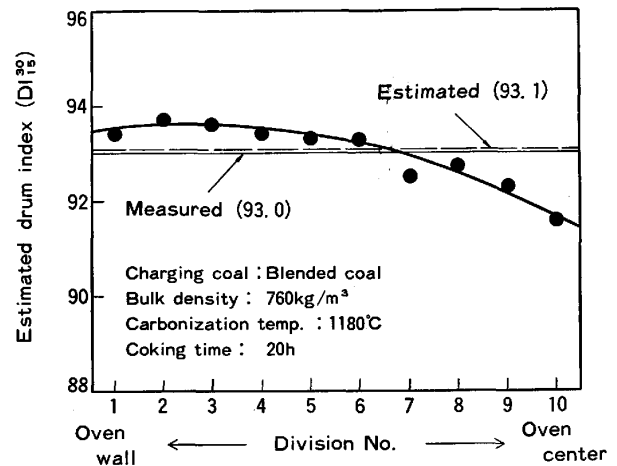


Fig. 9. Variation of estimated JIS drum index across the oven width.

のと回転強度との結びつきを研究した報告はほとんどない。そこでここでは研究指標としての引張強度と管理指標としての JIS ドラム強度との関係を検討した。

Fig. 7 は、今回種々の条件で製造したコールクスについて測定された炉幅方向塊コールクスの加重平均引張強度と、中央部サンプルコールクスのドラム強度  $DI_{15}^{\%}$  との関係を示したもので、両者には比較的良好な関係が認められる。そしてこれらの関係を次式により整理した。

$$DI_{15}^{\%} = 100 \exp(-0.81\sigma^{-0.60}), r=0.80 \dots (3)$$

従つて、(3)式中の  $\sigma$  を前記(2)式で置換すれば、次式に示すように、ドラム強度が気孔率とマイクロ強度とにより推定できることになる。

$$DI_{15}^{\%} = 100 \exp[-0.81\{(11.4MI - 114) \exp(-4.2P)\}^{-0.60}] \dots (4)$$

上述の考え方は、コールクス中のマクロき裂のような構造欠陥が大きく影響する指数、たとえば  $DI_{15}^{\%}$  や  $M_{40}$  を除けば他の回転強度指数についても同様に適用できるも

のと考えられる。

#### 4.1.3 炉幅方向コールクスのドラム強度分布

炉幅方向のコールクスについて、壁側から炭中までのドラム強度分布を実測することは技術的に不可能であるが、前記(4)式を適用すれば容易に推定できる。

そこで 3.1 で示した炉幅方向の各分割部分について測定された気孔率とマイクロ強度値を用い、(4)式により炉幅方向のドラム強度分布を計算した。これらの試算には、装入炭嵩密度と乾留温度の異なる 2 ケースについて実施した。

これらの結果は Fig. 8, 9 に見られるごとく、いずれも壁側と炭中側とは予想以上の大きなドラム強度差があると推測された。

ここで炉幅方向コールクスのドラム強度を、(5)式により加重平均強度として算出し、実測のドラム強度と比較した結果、図中に示されるごとく良く一致し、(4)式が妥当な近似式であると確認された。

$$\overline{DI} = \frac{\sum_{i=1}^n (DI_i \cdot W_i)}{W_0} \dots\dots\dots (5)$$

ここで、 $\overline{DI}$  : 平均ドラム強度  
 $DI_i$  : 分割点  $i$  のドラム強度  
 $W_i$  : 分割点  $i$  のコークス重量 [kg]  
 $W_0$  : 壁側から炭中までの各分割部分合計の  
 コークス重量 [kg]

以上の解析には、気孔分布や微細き裂の影響が反映されておらず十分とは言えないが、基本的には管理指標であるドラム強度は引張強度を介し、気孔率と基質強度で整理される多孔材料の1つとして評価できるといえよう。

4.2 反応性評価

コークスの熱間性状として重要な  $CO_2$  との反応性に関しては多数報告され、優れた総説<sup>37)38)</sup>もあるが、これらの報告のほとんどが強度解析と同じく炉幅方向の品質分布を考慮したものではない。

著者らは、近年高炉操業の管理指標として用いられている WLR および SIR とコークスの基礎物性との関係について、3.1 で示した炉幅方向コークスの品質分布データをもとに解析を行った。

4.2.1 黒鉛化度、気孔率と WLR

一般にコークスの  $CO_2$  との反応は、黒鉛化度に代表される化学的構造、気孔率や内部表面積に代表される物理的性状とに加え、灰分の触媒効果に依存していると考えられる。これらの要因の中で、灰分の触媒効果を除く他の要因について WLR への影響を検討した。

炉幅方向塊コークスについて、壁側から炭中まで 10 分割して測定された黒鉛化度  $L_c$  の加重平均値と、中央

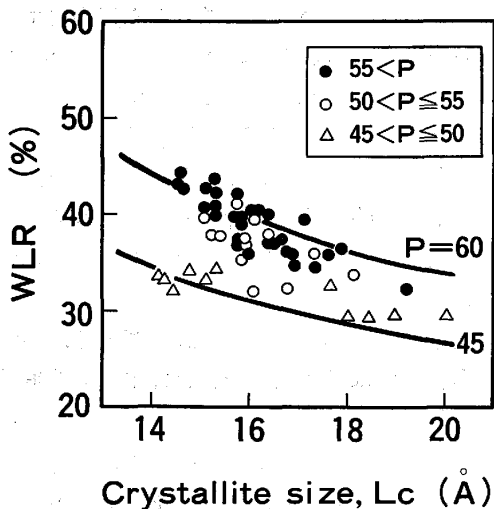


Fig. 10. Relation between crystallite size, porosity and WLR of various cokes.

部採取コークスについて測定された WLR との関係は Fig. 10 に示す。この図から明らかなことは、黒鉛化度の向上は WLR の低下に効果的といえるが、同一黒鉛化度で見た場合、ばらつきも大きく良好な関係にあるとはいえない。

しかし図中に示した物理性状としての気孔率（黒鉛化度と同じく炉幅方向の加重平均値）で層別すれば、黒鉛化度と WLR との関係は明瞭となる。

これらの結果から、WLR を評価する下記の実験式を得た。

$$WLR = 160(P - 0.102)^{0.67} \exp(-6.08 \times 10^{-2} L_c) \\ r = 0.75 \dots\dots\dots (6)$$

ここで、 $P$  : 気孔率 [-]

$L_c$  : 黒鉛化度 [Å]

なお上式では、灰分の触媒効果や気孔分布の影響が考慮されていないため、相関係数は高いとはいえないが、大略 WLR を物理的・化学的性状としての黒鉛化度と気孔率で評価できると考えられる。

次に上記(6)式を用い、実測が困難な炉幅方向コークスの WLR 分布を試算するとともに、それらの加重平均 WLR と中央部採取コークスの実測 WLR と比較した例を Fig. 11 に示す。図から明らかなごとく、壁側コークスと比較して炭中側コークスの WLR が極めて高いと予想された。また加重平均 WLR と実測 WLR とは比較的良く一致し、(6)式は十分とはいえないまでも WLR を評価する近似式と判断された。

今後、灰分の触媒効果や気孔分布の影響を補正することにより更に精度の高い近似式とすることができよう。

4.2.2 WLR,  $DI_{10}^0$  と SIR

通常、WLR が大きいコークスは SIR が小さい。しかしその関係は、ある幅をもつた傾向として認められる

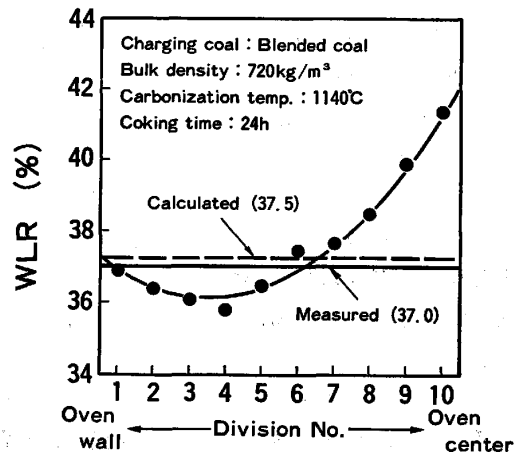


Fig. 11. Variation of calculated WLR across the oven width.

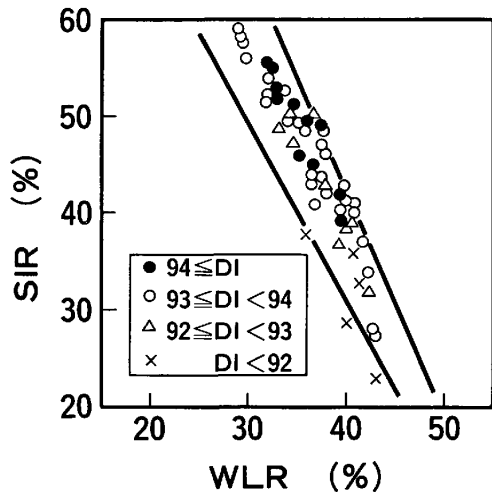


Fig. 12. Relation between WLR,  $DI_{15}^{\%}$  and SIR of various cokes.

もので明瞭な関係にあるとはいえない。著者らの検討においても、たとえば Fig. 12 にみられるように WLR と SIR の関係には、上述の傾向は認められるが、ばらつきも大きく密接な関係にあるとはいえない。

しかし SIR は WLR のみならずドラム強度の影響も受けるとし、これら3指標相互の関係も報告されている<sup>39)40)</sup>。すなわち Fig. 12 から理解されるように、反応前の強度である  $DI_{15}$  の高い方が、WLR が同一でも SIR が高くなる。これは  $CO_2$  との反応によつてもたらされるコールスの脆弱化は、反応量のみならずコールスの冷間強度にも依存していると考えることができよう。

これらの結果から、著者らも下記に示す実験式を得た。

$$SIR = (3.52 \times 10^{-2} DI_{15}^{\%} + 1.74) (-0.298 WLR + 20.3) \dots\dots\dots (7)$$

$$r = 0.86$$

ここで、(7)式中の  $DI_{15}^{\%}$ , WLR は既述の(4)(6)式により評価できることから、基本的には SIR もコールスの物理的・化学的性状としての気孔率、マイクロ強度および黒鉛化度により評価できる指数であると理解される。

次に WLR と同じく、実測が困難な炉幅方向コールスの SIR 分布を試算した。手順としては炉幅方向の各分割部分について測定された気孔率、マイクロ強度および黒鉛化度の値から(4)(6)式を用いて  $DI_{15}^{\%}$ , WLR をそれぞれ求め、次いでこれらの値を(7)式に代入することにより、炉幅方向の SIR 分布を試算した。

その結果の1例を Fig. 13 に示すが、壁側コールスと比較して炭中側コールスの SIR は著しく低いと推定された。そして図中に示す試算した各 SIR の加重平均

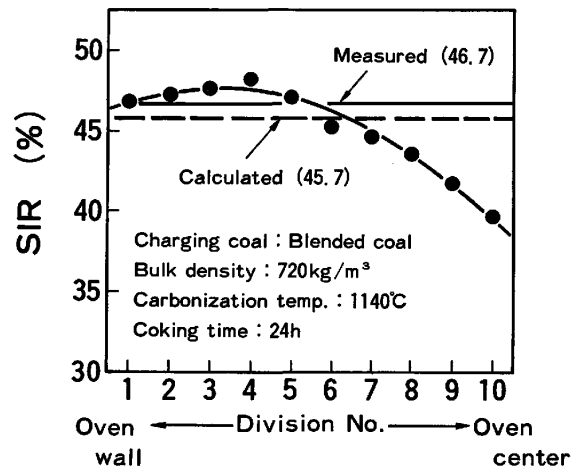


Fig. 13. Variation of calculated SIR across the oven width.

値と中央部採取コールスの実測 SIR との比較では、両者はほぼ一致し、(7)式は妥当な近似式であると判断された。

従つて、SIR は  $DI_{15}^{\%}$  と WLR を介し、気孔率、マイクロ強度および黒鉛化度に依存する指数と考へても、大きな矛盾はないだろう。

### 5. 結 言

これまでコールスの強度および反応性に関する研究において、ほとんど無視されてきた炉幅方向コールスの性状分布を詳細に分析し、それらのデータを解析することにより、次のような知見を得ることができた。

(1) コールス強度は、基本的には気孔率と基質強度に依存する多孔材料強度式で評価できる。そして基質強度の評価としては、65 および 100 mesh のようなフルイ目の細かいマイクロ強度値が妥当である。

(2) コールスの反応性は、 $CO_2$  反応後試験法で測定される反応量が気孔率と黒鉛化度、反応後強度が気孔率、基質強度および黒鉛化度により大略評価できる。今後、上記解析に加え、コールス強度は微細き裂の影響、反応性は灰分の触媒作用の影響を考慮することで、強度および反応性の評価もよりいつそう明確なものになるといえよう。

最後に、本研究を遂行するにあたり、終始御指導を賜りました住友金属工業(株)中央技術研究所西岡 邦夫 所長、赤松経一前波崎研究センター所長および有益なる助言をいただきました同研究所次長羽田野道春博士、角南好彦主任研究員に厚く感謝の意を表します。

### 文 献

- 1) 吉田雄次：コールスの研究 (コールス・シリーズ 4) (1954), p. 67

- 2) 吉田雄次, 山口 潔, 永田賢司: コークスの研究 (コークス・シリーズ 4) (1954), p. 81
- 3) Yu. Ya. FILONENKO, I. A. PYZHENKOV, V. N. SHARIPOV, G. N. MAKAROV, and I. M. DOROFEEV: *Coke and Chem.* (1975) 2, p. 15
- 4) 宮津 隆, 奥山泰男, 鈴木喜夫, 福山辰夫, 森高: 日本鋼管技報 (1975), p. 125
- 5) 杉辺英孝, 宮川亜夫: コークス・サーキュラー, 29 (1980), p. 159
- 6) J. W. PATRICK and A. E. STACEY: *Fuel*, 51 (1972), p. 81, p. 174, p. 206; 52 (1973), p. 27; 54 (1975), p. 213, p. 256
- 7) 宮川亜夫, 前島一郎: 燃料協会誌, 54 (1975), p. 587; 55 (1976), p. 30
- 8) BCRA: Carbonization Research Report, 73 (1979)
- 9) 磯部光利, 鈴木吉哉, 館 充, 北川英夫: 鉄と鋼, 66 (1980), p. 307
- 10) 八嶋三郎: 原料炭の基礎物性部会報告書(1982), p. 117
- 11) 神原健二郎, 萩原友郎, 重見彰利, 近藤真一, 金山有治, 若林敬一, 平本信義: 鉄と鋼, 62 (1976), p. 535
- 12) 下村泰人, 西川 潔, 有野俊介, 片山 力, 肥田行博, 磯山 正: 鉄と鋼, 62 (1976), p. 547
- 13) 佐々木稔, 斧 勝也, 鈴木 明, 奥野嘉雄, 吉沢謙一, 中村 隆: 鉄と鋼, 62 (1976), p. 559
- 14) 小嶋鴻次郎, 西 徹, 山口徳二, 仲摩博至, 井田四郎: 鉄と鋼, 62 (1976), p. 571
- 15) 館 充, 鈴木吉哉, 李 海洙, 桑野芳一, 張東植, 呉 平男, 松崎幹康, 中村成子: 鉄と鋼, 62(1976), p. 483
- 16) 館 充, 桑野芳一, 鈴木吉哉, 張東植, 呉平男, 松崎幹康: 鉄と鋼, 62 (1976), p. 495
- 17) 村上昭三, 原 義明, 石川 功: コークスサーキュラー, 23 (1974), p. 82
- 18) 館 充: 原料炭の基礎物性部会報告書(1982), p. 97
- 19) 宮川亜夫, 嵯峨三男, 谷原秀太郎: 燃料協会誌, 56 (1977), p. 337
- 20) 井田四郎, 木庭敬一郎, 山下 豊, 坂田康二: コークスサーキュラー, 27 (1978), p. 261
- 21) 木庭敬一郎, 坂田康二, 井田四郎: コークスサーキュラー, 30 (1981), p. 170
- 22) H. E. BLAYDEN, W. NOBLE, and H. L. RILEY: *JISI*, 86 (1937), p. 47
- 23) E. M. TAIT: *Coke and Chem.* (1963) 8, p. 31
- 24) 宮津 隆, 福山辰夫, 森山幸治, 森 高: 日本鋼管技報 (1967) 41, p. 139
- 25) 城 博, 西 徹, 仲摩博至: 燃料協会誌, 46 (1967), p. 582
- 26) 福山辰夫, 宮津 隆, 奥山泰男, 木村英雄, 白石稔: 燃料協会誌, 47 (1968), p. 607
- 27) 角南好彦, 西岡邦彦, 岩永祐治, 小川真資, 押栗憲昭: 鉄と鋼, 66 (1980) 2, p. '80-A20
- 28) 白石 稔, 熊井順二郎, 木村英雄, 吉田雄次: 燃料協会誌, 46 (1967), p. 487; 47 (1968), p. 695
- 29) 木村脩七: 原料炭の基礎物性部会報告書 (1982), p. 139
- 30) E. RYSHKEWITCH: *J. Am. Ceram. Soc.*, 36 (1953), p. 65
- 31) F. P. KNUDSEN: *J. Am. Ceram. Soc.*, 42 (1959), p. 376
- 32) 城 博, 井田四郎, 美浦義明: コークスサーキュラー, 9 (1960), p. 67
- 33) 永田賢司: コークスの研究 (コークス・シリーズ 5) (1956), p. 104
- 34) 和佐 昭, 中井利明: コークスサーキュラー, 19 (1970), p. 120
- 35) 宮津 隆, 福山辰夫, 小泉哲人: 日本鋼管技報, 48(1970), p. 9
- 36) 井筒和一郎, 野村和夫, 三品勝美, 戸田君雄, 原田公子: コークスサーキュラー, 24 (1975), p. 182
- 37) 宮川亜夫: 燃料協会誌, 58 (1979), p. 940
- 38) 奥山泰男: 燃料協会誌, 58 (1979), p. 954
- 39) 太田 進, 八巻孝夫, 菊地 望, 三国 修: 鉄と鋼, 66 (1980), S695
- 40) 三国 修, 井口利夫, 太田 進, 八巻孝夫, 水木健一: 第 48 回燃料協会大会発表講演要旨集 (1981), p. 1