

© 1982 ISIJ

統計理論のコークス炉装入炭粒度調整技術への応用

論文

杉 辺 英 孝*・宮 川 垂 夫*2

Application of Statistic Theory to the Size Preparation of Coal Charge

Hidetaka SUGINOBE and Tsugio MIYAGAWA

Synopsis :

For the purpose of obtaining the maximum coke strength by optimum size preparation of coal charge, a mathematical theory is developed, which clarifies the relation between coke strength, inhomogeneity of charge and grain size structure of charge.

Inhomogeneity of charge is represented by variance (V) of caking property parameter (X) and of coal rank parameter (Y), and related to observed coke strength (\bar{S}) by the following equation,

$$\bar{S} = S + \frac{1}{2} \frac{\partial^2 S}{\partial X^2} V_{xx} + \frac{\partial^2 S}{\partial X \partial Y} V_{xy} + \frac{1}{2} \frac{\partial^2 S}{\partial Y^2} V_{yy}$$

where S is coke strength of homogeneous charge. Furthermore the mathematical solution is derived for each variance, which is expressed by volume and coking properties of each coal particle.

The preliminary analysis of coke strength shows that the second derivatives are always negative. The mathematical solution shows that the variance is effectively lowered by the selective fine crushing of coal.

The validity of theory is examined by experiments. For practical purposes, the theoretical equation is approximated based on the experimental results.

1. 緒 言

装入炭の細粒化がコークス組織の均質性を高め、コークス強度の向上に効果的なことはよく知られているが、過度の微粉化には幾つかの欠点もあり、実際には装入炭の粒度水準は一定範囲に留めざるを得ない。すなわち、過度の粉碎は装入炭嵩密度の低下と膨張性の減少を招くので粒子間の融着が阻害され、時としてコークス強度を低下させることがある。また嵩密度の減少はコークス炉の生産性を低下させる。

このため、微粉碎がコークス強度の向上に効果的な石炭ほど細粒化し、そうでない炭種は比較的粗粒のままとするという方向で粒度調整が行われている。しかし現行の粒度調整法は定性的な考え方に立脚するものであり、美浦¹⁾が指摘しているように統一的な粒度調整理論はいまだ完成していない。この理由は、装入炭の均質性の定義があいまいのまま使用されてきたためと考えられる。たとえば、SIMONIS ら²⁾は装入炭の均質性を高める方法として、各配合種の表面積を同一とする粒度調整法を提唱したが、均質性が理論的に定義されていない現状では、彼らの方法でどれだけの均質化がなされるかは不明である。

今回、コークス強度と装入炭の均質性および粒度構成

との一般的関係を理論化し、一般的な粒度調整理論を構築したので報告する。

2. 理 論

2.1 前提条件

コークス強度に関して一般的に認められた経験則³⁾を出発点とする。すなわち、石炭 i のコークス化性は融着性パラメータ (X_i) と石炭化度パラメータ (Y_i) で規定され、また配合炭のコークス強度 (S) は両パラメータの加重平均値、 \bar{X} と \bar{Y} で決定されるとする。 F_{i0} を各石炭の重量配合率、 n を配合種の総数とすると、次式で前提条件が表される。

$$S \equiv S(\bar{X}, \bar{Y}) \dots \dots \dots (1)$$

$$\bar{X} = \sum_{i=1}^n F_{i0} X_i, \quad \bar{Y} = \sum_{i=1}^n F_{i0} Y_i \dots \dots \dots (2)$$

2.2 コークス強度と装入炭の不均質性の関係

通常測定されるコークス強度とは、確率的な意味において装入炭の各部分から得られるコークスの強度の平均値である。そこで、装入炭を仮想的に同一重量で N 個に分割し、 j 番目のブロックから得られるコークスの強度を S_j としよう。この時、実測強度 (\bar{S}) は次式で与えられる。

昭和 55 年 4 月 1 部本会講演大会にて発表 昭和 57 年 3 月 17 日受付 (Received Mar. 17, 1982)

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

*2 川崎製鉄(株)技術研究所 工博 (Research Laboratories, Kawasaki Steel Corp.)

$$\bar{S} = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N S_j \dots\dots\dots (3)$$

ここで j 番目のブロックに注目すると、この部分における性状は装入炭の平均値 (\bar{X} , \bar{Y}) からある偏差を有した ($\bar{X} + \Delta X_j$, $\bar{Y} + \Delta Y_j$) の値となっており、強度 S_j は次式で与えられる。

$$S_j = S(\bar{X} + \Delta X_j, \bar{Y} + \Delta Y_j) \dots\dots\dots (4)$$

上式を (\bar{X} , \bar{Y}) 近傍でテーラー展開して、2次項までをとり、(3)式に代入すると、

$$\bar{S} = S + \frac{1}{2} \frac{\partial^2 S}{\partial X^2} V_{XX} + \frac{\partial^2 S}{\partial X \partial Y} V_{XY} + \frac{1}{2} \frac{\partial^2 S}{\partial Y^2} V_{YY} \dots\dots\dots (5)$$

ここに、 V 項は次式で定義される。

$$V_{XX} = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N (\Delta X_j)^2 \dots\dots\dots (6)$$

$$V_{XY} = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N \Delta X_j \Delta Y_j \dots\dots\dots (7)$$

$$V_{YY} = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N (\Delta Y_j)^2 \dots\dots\dots (8)$$

(5)式の意味は次のように解釈される。仮に装入炭各部の性状が同一であれば \bar{S} は S と一致するので、 S は装入炭が均質な時の強度を表す。 V 項は強度因子の分散であり、装入炭の不均質性をコークス化性パラメータで表現したものである。また2次偏微分係数値は装入炭の性状 (\bar{X} , \bar{Y}) で決定されるから、コークス強度に対する不均質性の効果が装入炭性状に依存することがわかる。

2.3 装入炭の不均質性と粒度構成の関係

装入炭の不均質性の起源は混合過程と粒度構成に求められる。しかし実際の配合過程を考えると混合は十分に留意して行われており、また混合操作の改良が細粒化よりもコークス強度の向上に有効であるという報告は見当たらない。このことから、装入炭の混合は十分に進行して各石炭粒子は統計的に分布しており、不均質性は粒度構成に起因するものと考えられる。

BUSLIK⁴⁾ は一定体積中に含まれる特定粒径の粒子の濃度を対象とし、その分散の一般解を求めた。BUSLIK の考え方を拡張すると、(5)式中の分散項は石炭の性状と粒子体積で表される。簡単のために、石炭の密度は炭種によらず一定であり、石炭 i は単一の粒子体積 v_i を有すると仮定し、 I を 1 ブロックに含まれる石炭の体積とすると次式を得る (Appendix 参照)。

$$V_{XX} = \frac{1}{I} \sum_{i=1}^n F_{i0} v_i (\bar{X} - X_i)^2 \dots\dots\dots (9)$$

$$V_{XY} = \frac{1}{I} \sum_{i=1}^n F_{i0} v_i (\bar{X} - X_i)(\bar{Y} - Y_i) \dots\dots\dots (10)$$

$$V_{YY} = \frac{1}{I} \sum_{i=1}^n F_{i0} v_i (\bar{Y} - Y_i)^2 \dots\dots\dots (11)$$

実際の粉碎炭は粒度分布を有し、また同一の石炭であっても粒径によつて性状は異なる。したがつて、石炭粒子が球形であると仮定すれば、(9)~(11)式は次のように一般化される。

$$V_{XX} = \frac{\pi}{6I} \sum_{i=1}^n F_{i0} \int_0^\infty f_1(r) r^3 \{\bar{X} - X_i(r)\}^2 dr \dots\dots (12)$$

$$V_{XY} = \frac{\pi}{6I} \sum_{i=1}^n F_{i0} \int_0^\infty f_1(r) r^3 \{\bar{X} - X_i(r)\} \cdot \{\bar{Y} - Y_i(r)\} dr \dots\dots\dots (13)$$

$$V_{YY} = \frac{\pi}{6I} \sum_{i=1}^n F_{i0} \int_0^\infty f_1(r) r^3 \{\bar{Y} - Y_i(r)\}^2 dr \dots\dots\dots (14)$$

ここに、 r : 石炭粒径、 $f(r)$: 微分型粒度分布関数、 $X(r)$: 直径 r の粒子の X 値、 $Y(r)$: 直径 r の粒子の Y 値であり、 $f(r)$ は次式で規格化されている。

$$\int_0^\infty f_1(r) dr = 1 \dots\dots\dots (15)$$

3. 理論式の解釈

前章で述べた理論は(1)、(2)式で表される単純な経験則を出発点としている。そこで、このコークス強度に関する経験則を踏まえて理論式の具体的な意味を解釈しよう。最初に(5)式中で分散項とコークス強度を結びつけている偏微分係数について検討する。以下、具体的に論じるときは、 X として最高流動度対数値 (MF)、 Y としてピトリニットの平均最高反射率 (\bar{R}_0)を用いる。

宮津ら⁵⁾ は、コークス強度 DI_{30}^{30} と装入炭性状の関係を調査し、 \bar{R}_0 が一定値の場合、 DI_{30}^{30} は MF の増加につれて上昇するが、やがて飽和する傾向にあることを示した。この結果は実測強度 \bar{S} に関するものであるが、 S も同様に振舞うことは容易に想像できる。なぜならば、粒度調整の差異よりも装入炭性状の差異が DI_{30}^{30} に大きく寄与することはよく知られており、この経験から(5)式中の分散項の寄与は比較的小さいと判断されるからである。 S が X に対して指数関数的に増加、飽和する挙動を模式的に Fig. 1 に示す。この時、 $\partial S / \partial X$ は単調に減少し、その減少幅は徐々に小さくなる。したがつて、 $\partial^2 S / \partial X^2$ は常に負値であり、その絶対値は X が小さい時ほど大きい。

DI_{30}^{30} と \bar{R}_0 の関係を Fig. 2 に示す。Fig. 2 は千葉

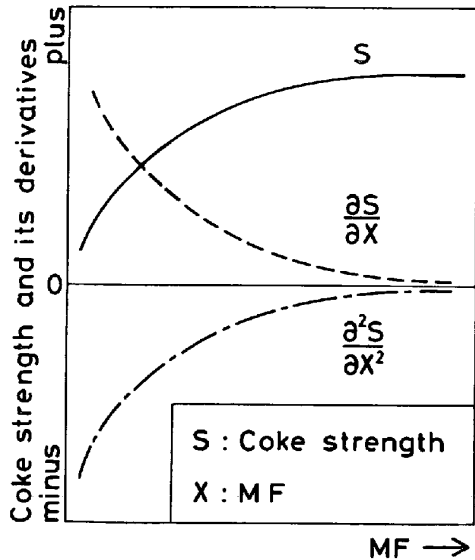


Fig. 1. Schematic representation for influence of maximum fluidity(log ddpmm) of charge on coke strength and its derivatives.

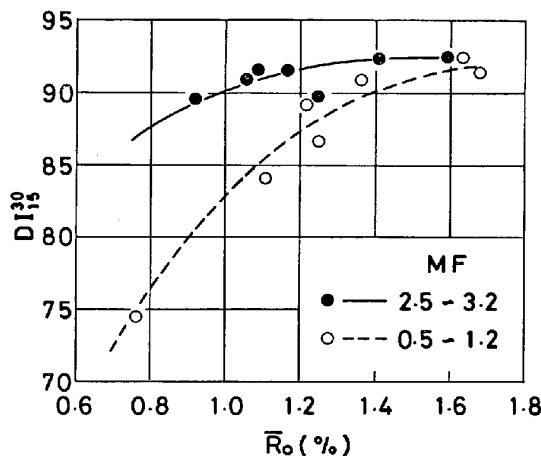


Fig. 2. Relation between coke strength and re-reflectance of vitrinite (results of single coal coking in 250 kg test ovens).

工場入荷炭(昭和52年4月~54年3月)の250kg試験炉による単味炭乾留試験の結果を整理したものである。 \bar{R}_0 に対しても DI_{15}^{30} は指数関数的に増加,飽和する。したがって $\partial^2 S / \partial Y^2$ は常に負値であり,その絶対値は Y が小さい時ほど大きい。また,ある一定の \bar{R}_0 値でのMF増加による強度向上分,すなわち $\partial S / \partial X \cdot \Delta X$ は \bar{R}_0 の増加にともなつて徐々に減少することがわかる。したがって $\partial^2 S / \partial X \partial Y$ も常に負値であり, X, Y 値が大になるにつれて0に近づく。

このように偏微分係数値はすべて負値であるので,装入炭の不均質がコークス強度に負効果を与えることがわかる。また,装入炭の品位が劣る時ほど偏微分係数の絶対値が大なので,強度に対する不均質性の効果が顕著となる。 V_{XY} が負値の時の見掛け上の強度向上効果は,融

着性の不足した部分では高い石炭化度で,石炭化度の低い部分では良好な融着性で強度低下が補償されていることを表している。

一般的な粒度調整の指針は,(9)~(11)式から得られる。すなわち一般に細粒化を行えば不均質性が減少し,コークス強度が向上する。特に平均性状から大きく異なる性状の炭種の微細化が強度向上に貢献する。

4. 理論式の検証

4.1 単味炭

簡単のために,融着性が十分で,コークス強度が近似的に石炭化度のみで規定された場合を考える。微粉碎時と粗粉碎時の強度差は,(5),(14)式から

$$\bar{S}_F - \bar{S}_C = \frac{\pi}{12I} \frac{\partial^2 S}{\partial Y^2} \int_0^\infty [f_F(r) \{ \bar{Y} - Y_F(r) \}^2 - f_C(r) \{ \bar{Y} - Y_C(r) \}^2] r^2 dr \dots \dots \dots (16)$$

ここに,添字 F は微粉碎を, C は粗粉碎を表す。石炭化度パラメータの値は有限であるから, $f_C(r)$ に比べて $f_F(r)$ を十分に小径側に移行させれば上式中の積分は負となり,微粉碎が強度を向上させることになる。

宮川ら⁶⁾は単味炭を同一条件で粉碎して \bar{R}_0 と粒径の関係を調べ,粒径による \bar{R}_0 の変化が炭種によらずほぼ一定であることを見出した。すなわち, $\bar{Y} - Y_i(r)$ は粉碎条件によつて定まり,炭種による差は小さい。したがって(16)式中の積分値は粒度構成の変化によつて定まるので,単味炭微粉碎時の強度向上は $\partial^2 S / \partial Y^2$ の絶対値に比例する。また $\partial^2 S / \partial Y^2$ の絶対値は3章で述べたように \bar{R}_0 に対して指数関数的に減少するから,強度向上は低 \bar{R}_0 炭ほど大きいことになる。

この理論的予測を確認するために,250kg試験炉による乾留実験を行つた。 DI_{15}^{30} が近似的に \bar{R}_0 のみの関数となるように比較的流動性の高い石炭を選び,各石炭の3mm目篩下重量%(P)が70,85,100%となるように調整し,乾留コークスの DI_{15}^{30} を測定した。供試炭の性状とコークス強度をTable 1に示す。微粉碎時の強度向上分(3mm篩下70%時の強度を基準)と \bar{R}_0 の関係をFig. 3に示す。 \bar{R}_0 が小さい時ほど微粉碎効果が大きく,実験結果は理論からの予測と一致している。

Table 1. Coking properties of coal samples.

Coal	Liddell	Pittston Blend	South Bulli	Itmann	
MF(log maximum fluidity)	2.40	3.40	2.86	2.38	
\bar{R}_0 (%)	0.78	1.06	1.24	1.55	
DI_{15}^{30}	-3mm, 70%	71.9	89.6	90.6	91.4
	85%	75.9	91.2	91.2	91.4
	100%	80.0	92.4	92.7	91.3

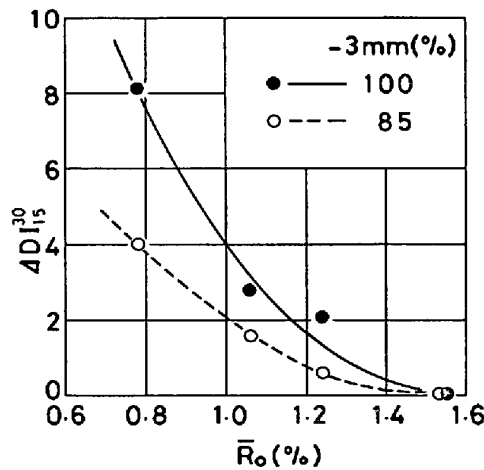


Fig. 3. Influence of reflectance of vitrinite on increase of coke strength by fine crushing (the coke strength of charge crushed to pass 3 mm sieve by 70% is regarded as standard).

4.2 2 種配合炭

SIMONIS ら²⁾ は 2 種配合炭について、両石炭の表面積を同一とする粒度調整が最大のコークス強度を与えることを実験的に確認した。したがって、SIMONIS らと同一の結論が理論式から導出されることを証明すればよい。

簡単のために石炭粒子は球であり、石炭 A, B は単一粒径 r_A, r_B の粒子で構成され、両者の密度は同一値 ρ とする。両石炭の配合率を $F_A, F_B (=1-F_A)$, 融着性パラメータを X_A, X_B , 石炭化度パラメータを Y_A, Y_B で表すと、(5)式は(9)~(11)式から、

$$\bar{S} = S + K(F_B r_A^3 + F_A r_B^3) \dots\dots\dots (17)$$

ここに、 K は次式で表される。

$$K = \frac{\pi \rho F_A F_B}{12 I} \left\{ \frac{\partial^2 S}{\partial X^2} (X_A - X_B)^2 + 2 \frac{\partial^2 S}{\partial X \partial Y} (X_A - X_B)(Y_A - Y_B) + \frac{\partial^2 S}{\partial Y^2} (Y_A - Y_B)^2 \right\} \dots\dots\dots (18)$$

平均粒径が一定値 r_0 である条件は次式で与えられる。

$$F_A r_A + F_B r_B = r_0 \dots\dots\dots (19)$$

細粒化がコークス強度を上昇させる時は、 K は負値であるから、(19)式の条件下で $F_B r_A^3 + F_A r_B^3$ を最小とすれば最大のコークス強度が得られる。

簡単な計算から、 $F_B r_A^3 + F_A r_B^3$ を最小とする粒径が

$$r_A = r_0 F_A / (F_A^2 + F_B^2) \dots\dots\dots (20)$$

$$r_B = r_0 F_B / (F_A^2 + F_B^2) \dots\dots\dots (21)$$

であることがわかる。この時、配合炭単位重量当たりの石炭 A の表面積、

$$4\pi \left(\frac{r_A}{2} \right)^2 \frac{F_A}{4/3\pi (r_A/2)^3 \rho} = \frac{6(F_A^2 + F_B^2)}{\rho r_0} \dots\dots\dots (22)$$

と石炭 B の表面積

$$4\pi \left(\frac{r_B}{2} \right)^2 \frac{F_B}{4/3\pi (r_B/2)^3 \rho} = \frac{6(F_A^2 + F_B^2)}{\rho r_0} \dots\dots\dots (23)$$

は一致する。

4.3 多種配合炭

配合組成が一定の時、 S と偏微分係数は定数となる。また、(12)~(14)式中の積分項は実測可能な値であるから、不均質パラメータを

$$D_{XX,i} = \int_0^\infty f_i(r) r^3 \{ \bar{X} - X_i(r) \}^2 dr \dots\dots\dots (24)$$

$$D_{XY,i} = \int_0^\infty f_i(r) r^3 \{ \bar{X} - X_i(r) \} \{ \bar{Y} - Y_i(r) \} dr \dots\dots\dots (25)$$

$$D_{YY,i} = \int_0^\infty f_i(r) r^3 \{ \bar{Y} - Y_i(r) \}^2 dr \dots\dots\dots (26)$$

と定義すると、(5)式は次のように変形される。

$$\begin{aligned} \bar{S} = & A_1 + A_2 \sum_{i=1}^n F_{i0} D_{XX,i} + A_3 \sum_{i=1}^n F_{i0} D_{XY,i} \\ & + A_4 \sum_{i=1}^n F_{i0} D_{YY,i} \end{aligned} \dots\dots\dots (27)$$

($A_1 \sim A_4$: 定数)

粒度構成のみを変化させた時のコークス強度が上式にしたがえば、理論が検証されたことになる。

配合組成を一定のまま、粒度構成のみを変化させ、小型レトルト法 (JIS-M8801) による乾留実験を行った。(繰り返し 2 回)。配合組成を Table 2 に示す。試料石炭 (粒径: 6~10 mm) はあらかじめ、小型ハンマー・ミル (スクリーン・スリット: 7 mm) で粉碎し、 $P \approx 75$ および 90% の 2 種の粒度水準の試料を作製し全量を篩分けて粒度分布および各粒度区分ごとの MF, \bar{R}_o を測定した。Pittston Blend 炭粗砕試料の粒度間特性を Fig. 4 に示す。なお、Balmer 炭と大夕張炭の MF は実測できなかつたため、セミ・コークスの引張強度による評価法⁷⁾を適用した。各石炭の粒度水準は 2 種であるから配合炭の粒度構成は 2ⁿ 通りある。この中から 17 種の粒度構成を選び、高密度を一定 (0.707 kg/l) として乾留した。

Table 2. The composition of blend used in the experiment.

Coal	MF (log ddpm)	\bar{R}_o (%)	Blending Ratio (%)
Itmann	1.33	1.53	8.7
Pittston Blend	3.11	1.00	19.5
Balmer	-0.03*	1.26	18.4
Coal Cliff	1.12	1.13	11.6
Wollondilly	0.88	0.93	10.0
Newdell	1.86	0.80	20.0
Oyubari	6.09*	0.93	11.8
Blend	2.03	1.05	

*estimated value according to the tensile strength measurement⁷⁾

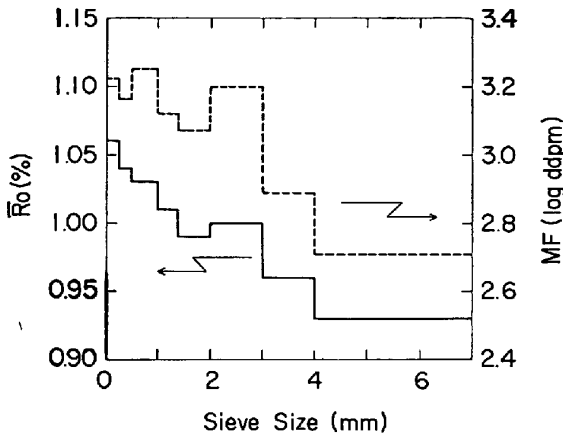


Fig. 4. Effect of diameter of coal on coking properties (Pittston Blend coal, 75% under 3 mm sieve).

Table 3. Inhomogeneity, degree of crushing and coke strength of the blends used in the experiment.

Exp. No.	Inhomogeneity of charge			-3 mm%	DI ₁₅ ³⁰
	D _{XX}	D _{XY}	D _{YY}		
1	109.2	-5.05	1.073	74.1	87.5
2	104.8	-4.77	0.775	77.1	88.8
3	103.2	-4.76	1.049	79.2	87.8
4	93.3	-3.86	0.700	79.3	89.0
5	90.9	-4.43	0.960	80.0	88.3
6	49.7	-3.00	0.991	80.2	89.3
7	104.8	-4.83	0.606	80.6	89.3
8	102.4	-5.40	0.866	81.3	89.5
9	48.2	-2.37	0.732	81.4	89.0
10	93.3	-3.91	0.530	82.8	88.7
11	91.0	-4.49	0.791	83.5	88.2
12	48.2	-2.42	0.562	84.9	89.1
13	45.9	-2.99	0.822	85.5	88.8
14	31.4	-2.38	0.878	86.1	88.6
15	29.9	-1.76	0.619	87.3	88.2
16	31.4	-2.43	0.708	89.6	88.6
17	29.9	-1.81	0.449	90.8	88.5

各粉碎単味炭のD値は、(24)~(26)式を $r=0.01$ mm から 7 mm まで 0.01 mm 刻みで数値積分して求めた。この際、 $X(r)$, $Y(r)$ は実測値を、 $f(r)$ は Rosin-Rammler 式の1次導関数を用いた。実験結果をまとめて Table 3 に示す。

配合炭の粒度は $P=74\sim 91\%$ と広い範囲にわたっている。そこで、最初に No. 1~9 の比較的狭い粒度範囲を対象にして(27)式中の定数を最小自乗法で求め、

$$\begin{aligned}
 DI_{15}^{30} = & 92.1 - 0.0627 \sum_{i=1}^n F_{i0} D_{XX,i} \\
 & - 1.30 \sum_{i=1}^n F_{i0} D_{XY,i} \\
 & - 3.85 \sum_{i=1}^n F_{i0} D_{YY,i} \dots \dots \dots (28)
 \end{aligned}$$

の回帰式を得た。上式を No. 10~17 のデータに適用したところ、実測値よりも高い DI_{15}^{30} が計算されたが、推定残差と P には強い負相関が認められる。(Fig. 5)。こ

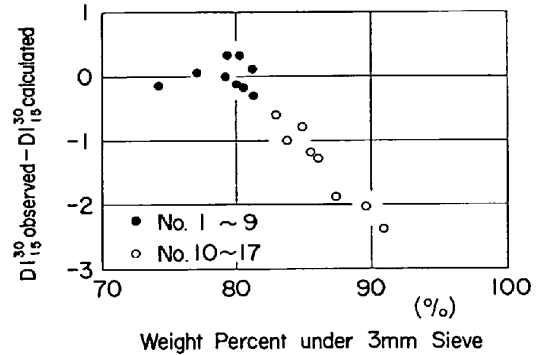


Fig. 5. Relation between crushing degree of blends and error calculated by equation (28) determined by No. 1~9 data.

のことは、コークス強度に対する微粉碎の負効果(膨張性の減少)が P で記述されることを示す。しかし、実操業においては、装入炭の P 値はコークス炉の乾留条件によつてあらかじめ決定されることが多い。この時は、コークス強度に対する P の効果は考慮する必要はなく、理論式にしたがつて均質化を進めればよい。(27)式に P の2次式を加え、全実験データを対象に解析し、次の回帰式を得た。

$$\begin{aligned}
 DI_{15}^{30} = & 92.7 - 0.0734 \sum_{i=1}^n F_{i0} D_{XX,i} \\
 & - 1.54 \sum_{i=1}^n F_{i0} D_{XY,i} \\
 & - 4.30 \sum_{i=1}^n F_{i0} D_{YY,i} - 0.0116(P - 74.50)^2 \\
 & \dots \dots \dots (29)
 \end{aligned}$$

粒度構成による強度の変動は、上式でほとんど説明される (Fig. 6)。

5. 実操業への応用

5.1 不均質性パラメータの近似

理論式を厳密に実操業に適用すれば、 D 項の算出のために多くの分析が必要となり繁雑である。そこで、 D 項を少数のパラメータで近似的に表す方法を考える。

Fig. 4 に示したように、石炭の性状は粒径に依存するが、その変動幅は MF で ± 0.3 , \bar{R}_0 で ± 0.06 程度であり比較的小さい。したがって、近似的に、

$$D_{XY,i} \approx (\bar{X} - X_i)(\bar{Y} - Y_i) \int_0^\infty f_i(r) r^3 dr \dots \dots (30)$$

と表される。 $\int_0^\infty f_i(r) r^3 dr$ は石炭 i の粒子平均体積に比例する項であり、 P の多項式で近似される。最も簡単な形として P の1次式を選び、微粉化によつて積分値が0に近づくこと、また P の最大値が100であることを考えると、 B を正の定数として、

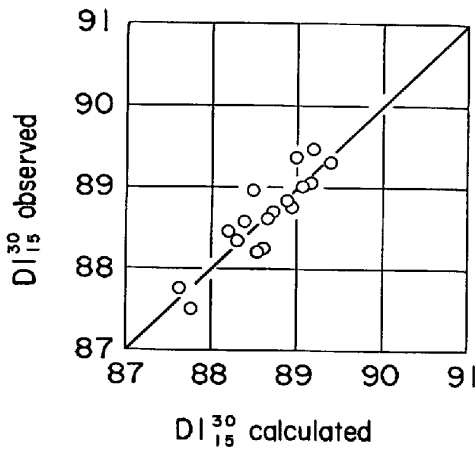


Fig. 6. Correspondence of coke strength calculated by equation (29) to observed one.

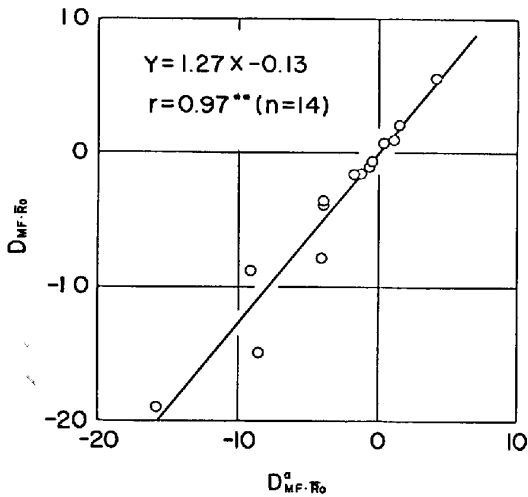


Fig. 7. Relation between inhomogeneity parameter estimated approximately and precise one.

$$\int_0^\infty f_1(r)r^3 dr \approx B(100 - P_1) \dots\dots\dots (31)$$

を得る. (30), (31)式から,

$$D_{XY,i} \approx B \cdot (\bar{X} - X_i) (\bar{Y} - X_i) (100 - P_1) \\ \equiv B \cdot D_{XY,i}^a \dots\dots\dots (32)$$

実際に, 4.3 の実験で用いた単味粉碎試料について $D_{XY,i}$ と近似値 $D_{XY,i}^a$ を比較すると高度の相関が認められ (Fig. 7), $D_{XY,i}$ の代わりに $D_{XY,i}^a$ を用いてもよいことがわかる. $D_{XX,i}$, $D_{YY,i}$ も次のように近似される.

$$D_{XX,i} \approx B \cdot (\bar{X} - X_i)^2 (100 - P_1) \equiv B \cdot D_{XX,i}^a \dots\dots (33)$$

$$D_{YY,i} \approx B \cdot (\bar{Y} - X_i)^2 (100 - P_1) \equiv B \cdot D_{YY,i}^a \\ \dots\dots\dots (34)$$

5.2 偏微分係数値の検討

実操業に理論を適用する場合, 実炉における S の挙動を調査し, 各分散項のコークス強度への寄与を評価することが必要である. このため, 水島工場 No. 3, 4, 5 コ

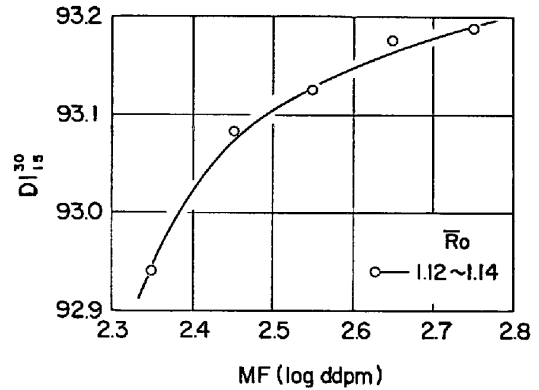


Fig. 8. Relation between coke strength and MF of charge (No. 3, 4 and 5 coke ovens in Mizushima Work).

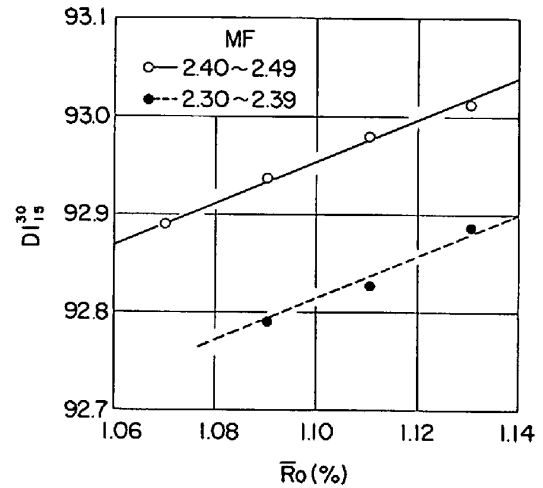


Fig. 9. Relation between coke strength and \bar{R}_0 of charge (No. 3, 4 and 5 coke ovens in Mizushima Work).

ークス炉団の実操業データ (昭和 52 年 1 月 ~ 54 年 3 月) を整理し, DI_{15}^{30} と MF, \bar{R}_0 の関係を調べた (Fig. 8, 9). 実操業の配合品位の範囲では, \bar{R}_0 に対して DI_{15}^{30} は直線的に増加し, その勾配は MF 値によらずほぼ一定である. したがって, 近似的に,

$$S = S(MF) + b \cdot \bar{R}_0 \quad (b: \text{定数}) \dots\dots\dots (35)$$

と表されるから, (5)式は, (12), (24), (33)式を用いて次式となる.

$$\bar{S} = S + \frac{\pi B}{12 I} \frac{\partial^2 S}{\partial X^2} \sum_{i=1}^n F_{i0} (\bar{X} - X_i)^2 (100 - P_1) \dots (36)$$

これらの炉団については, (36)式中の Σ 項を最小とするように P_1 を調整すれば最大のコークス強度が得られる. この理論粒度調整法はすでに実操業に適用され, 平均して DI_{15}^{30} で 0.1 の向上がもたらされた⁸⁾. また流動性が不足気味の配合ほど, 理論粒度調整法が効果的なことが確認されている⁸⁾.

6. 結 言

装入炭のコークス強度が加成性のある2種のパラメータで規定されるという経験則を出発点として、コークス強度、装入炭の不均質性および粒度構成の関係について一般化した理論を構築した。この理論の特長は次の3点に要約される。

- (1) 従来はあいまいであった装入炭の不均質性をコークス化性因子の分散で定式化した。
- (2) 分散の一般解を粒度構成の関数として与えた。
- (3) コークス強度に対する不均質性の影響が、装入炭の性状に依存することを定量的に表現した。

単味炭と多種配合炭に対しては、理論の妥当性を実験によつて検証した。2種配合炭に対しては、従来の均質化を目標とした粒度調整の考え方を内包する理論であることが明らかとなつた。これらの実験結果を踏まえて理論式は近似化され、実操業に適用されている。

Appendix

j番目のブロック内での石炭iの重量分率を F_{ij} とすれば、各コークス化性パラメータの偏差は、

$$\Delta X_j = \sum_{i=1}^n (F_{ij} - F_{i0}) X_i \dots\dots\dots (A1)$$

$$\Delta Y_j = \sum_{i=1}^n (F_{ij} - F_{i0}) Y_i \dots\dots\dots (A2)$$

となり、共分散は次式で表される。

$$\begin{aligned} \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N \Delta X_j \Delta Y_j &= \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N \sum_{i=1}^n (F_{ij} - F_{i0})^2 X_i Y_i \\ &+ \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N \sum_{k=1}^n \sum_{l=1}^n (F_{kj} - F_{k0})(F_{lj} - F_{l0}) X_k Y_l \dots\dots\dots (A3) \end{aligned}$$

1. 異種石炭に関する項

BUSLIK⁴⁾と同様に各粒子が十分に小さい体積 v_0 の単位から構成されていると考え、石炭iの1粒子の体積を v_i とする。1粒子中の単位の個数 (v_i/v_0) と1ブロック中の単位数 $t(=I/v_0)$ は整数と見なせるので、(A3)式右辺第2項は一つの(k, l)の組について、次式に変形される。

$$\begin{aligned} &\frac{1}{N} \sum_{j=1}^N (F_{kj} - F_{k0})(F_{lj} - F_{l0}) X_k Y_l \\ &= \frac{1}{Nt^2} X_k Y_l \sum_{j=1}^N \left\{ \sum_{p=1}^t (\delta_{jp}^k - F_{k0}) \right\} \left\{ \sum_{q=1}^t (\delta_{jq}^l - F_{l0}) \right\} \\ &= \frac{1}{Nt^2} X_k Y_l \sum_{j=1}^N \sum_{p=1}^t (\delta_{jp}^k - F_{k0})(\delta_{jq}^l - F_{l0}) \end{aligned}$$

$$+ \frac{1}{Nt^2} X_k Y_l \sum_{j=1}^N \sum_{p=1}^t \sum_{q=1}^t (\delta_{jp}^k - F_{k0})(\delta_{jq}^l - F_{l0}) \dots\dots\dots (A4)$$

ここに、 δ_{jp}^k はjブロック中のp単位が石炭kに属する時に1の値をとり、他の場合は0となると定義された関数である。

1.1 同一単位に関する項

(A4)式の右辺第1項は、単位pが、k, l および m ($\neq k, l$) 石炭に属する場合に分けて考えると、次式で与えられる。

$$\frac{1}{Nt^2} X_k Y_l \sum_{j=1}^N \alpha_{jk} \beta_k (1 - F_{k0})(-F_{l0}), p \in k \dots (A5)$$

$$\frac{1}{Nt^2} X_k Y_l \sum_{j=1}^N \alpha_{jl} \beta_l (-F_{k0})(1 - F_{l0}), p \in l \dots (A6)$$

$$\begin{aligned} &\frac{1}{Nt^2} X_k Y_l \sum_{j=1}^N \sum_{m=1}^n \alpha_{jm} \beta_m (-F_{k0})(-F_{l0}), p \in m \\ &\dots\dots\dots (A7) \end{aligned}$$

ここに、 α_{jk} はjブロック中のk石炭の粒子数であり、 β_k は石炭kの粒子1個が有する単位の数 (v_k/v_0) である。(A5)~(A7)式を加え、

$$\sum_{j=1}^N \alpha_{jk} \beta_k = (NIF_{k0}/v_k)(v_k t/I) = NtF_{k0} \dots\dots (A8)$$

の関係を用いると、次式を得る。

$$\begin{aligned} &\frac{1}{Nt^2} X_k Y_l \sum_{j=1}^N \sum_{p=1}^t (\delta_{jp}^k - F_{k0})(\delta_{jq}^l - F_{l0}) \\ &= -\frac{1}{t} X_k Y_l F_{k0} F_{l0} \dots\dots\dots (A9) \end{aligned}$$

1.2 異なる単位に関する項

(A4)式右辺第2項は、p, q単位が互いに異なる石炭に属する場合と同じ石炭に属する場合に分けて考える。異なる石炭に属する場合は、 $(\delta_{jp}^k - F_{k0})$ と $(\delta_{jq}^l - F_{l0})$ の値は独立であるから、Nが十分に大きい時には、積の平均値はそれぞれの平均値の積で与えられる。明らかに

$$\frac{1}{Nt} \sum_{j=1}^N \sum_{p=1}^t (\delta_{jp}^k - F_{k0}) = \frac{1}{Nt} \sum_{j=1}^N \sum_{q=1}^t (\delta_{jq}^l - F_{l0}) = 0 \dots\dots\dots (A10)$$

であるから、次式を得る。

$$\frac{1}{Nt^2} X_k Y_l \sum_{j=1}^N \sum_{p=1}^t \sum_{q=1}^t (\delta_{jp}^k - F_{k0})(\delta_{jq}^l - F_{l0}) = 0 \dots\dots\dots (A11)$$

p, q両単位が同一の石炭に属する時は、その石炭がk, l, m($\neq k, l$)のいずれであるかによつて、

$$\frac{1}{Nt^2} X_k Y_1 \sum_{j=1}^N \alpha_{jk} \beta_k (\beta_k - 1) (1 - F_{ko}) (-F_{1o}), p, q \in k$$

..... (A 12)

$$\frac{1}{Nt^2} X_k Y_1 \sum_{j=1}^N \alpha_{j1} \beta_1 (\beta_1 - 1) (1 - F_{1o}) (-F_{ko}), p, q \in 1$$

..... (A 13)

$$\frac{1}{Nt^2} X_k Y_1 \sum_{j=1}^N \sum_{m=1}^n \alpha_{jm} \beta_m (\beta_m - 1) (-F_{ko}) (-F_{1o}),$$

p, q ∈ m (A 14)

の値となる。(A 12)~(A 14)式を加え、

$$\sum_{j=1}^N \alpha_{jk} \beta_k^2 = (NIF_{ko}/v_k) (v_k t/I)^2 = Nt^2 F_{ko} v_k / I$$

..... (A 15)

を用いて整理すると次式を得る。

$$\frac{1}{Nt^2} X_k Y_1 \sum_{j=1}^N \sum_{p=1}^i \sum_{q=1}^i (\delta_{jp}^k - F_{ko}) (\delta_{jq}^k - F_{1o})$$

$$= \frac{1}{I} X_k Y_1 F_{ko} F_{1o} \left(\sum_{i=1}^n F_{1o} v_i - v_k - v_i \right)$$

$$+ \frac{1}{t} X_k Y_1 F_{ko} F_{1o} \dots \dots \dots (A 16)$$

(A 9), (A 11)および(A 16)式を加え、k≠1 の条件で和をとると、次式を得る。

$$\frac{1}{N} \sum_{j=1}^N \sum_{k=1}^n \sum_{l=1}^n (F_{kj} - F_{ko}) (F_{lj} - F_{1o}) X_k Y_l$$

$$= \frac{1}{I} \left(\sum_{i=1}^n F_{1o} v_i \sum_{i=1}^n F_{1o} X_i \sum_{i=1}^n F_{1o} Y_i \right.$$

$$- \sum_{i=1}^n F_{1o} v_i \sum_{i=1}^n F_{1o}^2 X_i Y_i - \sum_{i=1}^n F_{1o} X_i v_i \sum_{i=1}^n F_{1o} Y_i$$

$$\left. - \sum_{i=1}^n F_{1o} X_i \sum_{i=1}^n F_{1o} Y_i v_i + 2 \sum_{i=1}^n F_{1o}^2 X_i Y_i v_i \right)$$

..... (17A)

2. 同種石炭に関する項

BUSLIK によれば、次式が求められている。

$$\frac{1}{N} \sum_{j=1}^N (F_{1j} - F_{1o})^2 = \frac{1}{I} \{ F_{1o} (1 - F_{1o}) v_i + F_{1o}^2$$

$$\left(\sum_{k=1}^n F_{ko} v_k - v_i \right) \} \dots \dots \dots (A 18)$$

上式を用いると(A 3)式右辺第1項は

$$\frac{1}{N} \sum_{j=1}^N \sum_{i=1}^n (F_{1j} - F_{1o})^2 X_i Y_i$$

$$= \frac{1}{I} \left(\sum_{i=1}^n F_{1o} X_i Y_i v_i - 2 \sum_{i=1}^n F_{1o}^2 X_i Y_i v_i \right.$$

$$\left. + \sum_{i=1}^n F_{1o}^2 X_i Y_i \sum_{i=1}^n F_{1o} v_i \right) \dots \dots \dots (A 19)$$

となる。(A 17)および(A 19)式を(A 3)式に代入し、 $\bar{X} = \sum_{i=1}^n F_{1o} X_i$, $\bar{Y} = \sum_{i=1}^n F_{1o} Y_i$ を用いて整理すると、最終的に次式を得る。

$$\frac{1}{N} \sum_{j=1}^N \Delta X_j \Delta Y_j = \frac{1}{I} \sum_{i=1}^n F_{1o} v_i (\bar{X} - X_i) (\bar{Y} - Y_i)$$

..... (A 20)

他の分散項も同様にして求められる。

文 献

- 1) 美浦義明: 燃料協会誌, 58 (1979), p. 902
- 2) W. SIMONIS, G. GNUSCHKE, and K. G. BECK: Glückauf Forsch. H., 27 (1966), p. 181
- 3) 美浦義明: 燃料協会誌, 57 (1978), p. 384
- 4) D. BUSLIK: ASTM Bulletin, (1950), 165, p. 66
- 5) 宮津 隆, 奥山泰男, 鈴木喜夫, 福山辰夫, 森高: 日本鋼管技報 (1975) 67, p. 125
- 6) 宮川亜夫, 榎木義夫, 嗟峨三男, 栗山哲郎, 磯崎秀夫: コークス・サーキュラー, 24 (1975), p. 118
- 7) 杉辺英孝, 宮川亜夫: コークス・サーキュラー, 29 (1980), p. 159
- 8) 笠岡玄樹, 青山充三, 山崎健二, 杉辺英孝, 宮川亜夫: 川崎製鉄技報, 13 (1981), p. 1