

# 輸送工程におけるコークス粒度と強度の変化

上條綱雄\*・岩切治久\*・木口淳平\*<sup>2</sup>・矢場田武\*<sup>3</sup>  
田中英年\*<sup>4</sup>・北村雅司\*<sup>5</sup>・野間文雄\*<sup>4</sup>

## Change in Size and Tensile Strength of Coke during Conveyance

*Tsunao KAMIJO, Haruhisa IWAKIRI, Junpei KIGUCHI, Takeshi YABATA,  
Hidetoshi TANAKA, Masaji KITAMURA and Humio NOMA*

### Synopsis :

One of the required properties of coke for blast furnace is its size to maintain permeability. Then, authors investigated changes in the size and the tensile strength of coke during a conveyance process, and calculated the size distribution of coke after breakage by using the initial size and the tensile strength of coke. The main results are summarized as follows.

(1) Change in size of coke and the effect of positions in the coke oven on coke properties are clarified by the sampling and the simulation of the conveyance process.

(2) The tensile strength of coke is analysed by the Weibull's distribution function and the stabilized effect is quantitatively clarified.

(3) The calculation of the effect of the initial size and the tensile strength of coke on the size distribution makes it possible to estimate the size of coke charged in blast furnace.

**Key words :** coke ; tensile strength ; Weibull type's plot ; conveyance process ; blast furnace.

## 1. 緒 言

高炉においてコークスがスパーサーとして機能するためには、その粒度を保持することが必要である。粒度は、コークス炉の操業条件に影響されたコークス塊内部の不均質性、内部構造欠陥などに、また、輸送工程における外部応力に依存して変化し、その制御は重要な問題である。

輸送工程に注目すると、従来、粒度変化を評価する方法として、コークスの集合粉碎特性を示すドラム型試験機が用いられ、コークス粒子の転動と落下運動によって破碎と摩耗を含んだ強度指数が採用されている<sup>1)2)</sup>。しかし、回転式の強度指数は物理的強度と粒度を同時に評

価する指数であり、それぞれを独立に評価できないので、粒度を制御するための指針が強度の問題と明確に分離できない。

コークス粒子の個々の強度は、集合状態の粉化性を支配しているが、十分な理論的解析がなされてはいない<sup>3)</sup>。ただし、多孔質体の強度評価法として用いられている圧縮試験による間接引張強度を、コークスの物理的強度の評価法として採用した結果<sup>4)~7)</sup>、相対的に強度を比較できることが示されている<sup>8)</sup>。

そこで本研究では、引張強度を用いて、輸送工程でのコークス性状の変化を明らかにし、初期粒度と強度の関係から破壊後のコークス粒度分布の予測を試みた。

平成3年11月8日受付 平成4年4月10日受理 (Received on Nov. 8, 1991; Accepted on Apr. 10, 1992)

- \* (株)神戸製鋼所鉄鋼技術研究所 (Iron & Steel Research Laboratories, Kobe Steel, Ltd., 2222-1 Ikeda Onoe-cho Kakogawa 675)
- \*<sup>2</sup> (株)神戸製鋼所加古川製鉄所 (Kakogawa Works, Kobe Steel, Ltd.)
- \*<sup>3</sup> (株)神戸製鋼所神戸製鉄所 (Kobe Works, Kobe Steel, Ltd.)
- \*<sup>4</sup> (株)神戸製鋼所生産技術部 (Technology Administration Department, Kobe Steel Ltd.)
- \*<sup>5</sup> (株)神戸製鋼所鉄鋼技術研究所 工博 (Iron & Steel Research Laboratories, Kobe Steel, Ltd.)

## 2. 実験方法

### 2.1 供試試料

輸送工程における破壊の影響を受けていないコークスとして、コークス炉ワーク上で炉幅方向につながった長さ 200 mm 前後の大塊コークスを約 200 kg 採取した。試料採取は加古川工場の No. 3, 4 コークス炉 (A コークスと称する) と尼崎工場の扇町コークス炉 (B コークスと称する) でそれぞれ行った。コークス性状を Table 1 に示す。

粒度変化の推定式を検討するために、前述の大塊コークスおよび、乾式消火コークス (CDQ コークスと称する) と乾式消火しないで抜き取って湿式消火したコークス (CWQ コークスと称する) を用いた。CDQ 通過後に測定した CDQ コークスの性状、およびワーク後で測定した CWQ コークスの性状を Table 2 に示す。

### 2.2 実験方法

#### 2.2.1 大塊コークスの性状評価

大塊コークスはコークス炉の加熱壁面に平行なクラックに沿って 3 等分してそれぞれに彩色し、各部分が炉内の乾留位置と対応するものとみなし、加熱壁から中心部に向かって、それぞれ加熱壁側部、中間部、中心部とした。その大塊コークス約 10 kg を JIS ドラム試験機に入れて 2, 10, 30, 100, 150, 300, 1 000 回転し、各回転ごとの粒度分布と、乾留位置ごとのコークスの個数を測定した。

#### 2.2.2 コークス引張強度測定

大塊コークスおよびそれをドラム試験機で 150, 1 000 回転した後のコークスについて、大塊コークスでは乾留位置別に区別した部分、または破碎されて 40 mm 以上で乾留位置が色で識別できたコークスから 20 mm 径のロッド状のコークスを切り出し、それから 5~7 mm の

厚さのディスク状の試料を作成し、両端を平行に研磨したものを試料とした。明らかに不均質な組織やクラックの存在するものを除外し、各試料 40 枚ずつとした。

ディスク状のコークスは、間接引張強度<sup>4)~7)</sup>の測定に供した。圧潰試験機により試料の直径方向に荷重をかけ、その荷重方向と垂直な直径方向の試料内部に最大引張応力が生じクラックが発生して破壊するので、この時の応力から引張強度を評価した<sup>4)~7)</sup>。ただし、一般に脆い物質は完全弾性体でないので加圧板に接する部分が破壊変形してしまい点接触でなくなり、荷重が直線荷重にならなくなる。したがって、厳密な意味での引張強度にはならないが、相対的には評価することができる<sup>8)</sup>。

ここで、引張強度  $St$  (MPa) は次式で与えられる。

$$St = 2 Pr / \pi l R \dots\dots\dots (1)$$

ここで、 $Pr$ : 荷重 (N),  $R$ : 試料半径 (m),  $l$ : 試料厚さ (m) である。

また、この引張強度の値はコークス内部の微細構造欠陥の量と質に依存してばらつきの多い値であるので、以下に示す Weibull の分布関数<sup>11)12)</sup>で整理した。

物体中に存在する弱点、欠陥をクラックと称し、次の仮定をおいている。すなわち、物体中の単位体積当たり存在するクラックの強度は一定の法則に従って確率分布し、しかも、クラック相互の間隔が十分に大きくて干渉がないものとする。そこで、試験片の強度が最も弱いクラックの強度で決定されるとすると、その最も弱いクラックの強度がコークスの引張強度  $St$  を超えない確率  $F(St)$  を Weibull の分布関数で表すと、

$$F(St) = 1 - \exp(-\alpha \cdot (St)^m) \dots\dots\dots (2)$$

となる。 $\alpha, m > 0$ , で  $\alpha$  は定数,  $m$  は均一性係数である。 $F(St)$  は順序付け統計量として、

$$F(St) = P = j / (1 + N) \dots\dots\dots (3)$$

で表される。ここで、 $P$  は破壊が起こらない確率 (-),  $j$  は試料の引張強度の順序,  $N$  は試料総数である。確率密度関数  $f(St)$  は式 (2) の微分により、 $St$  の代表値としての並数  $Sm$  は式 (2) の二次微分の最大値を示す時の  $St$  で与えられる。

## 3. 結果と考察

### 3.1 輸送工程での性状変化

#### 3.1.1 粒度変化

輸送途中での粒度変化を検討するために、A コークスについてコークス炉のワークからベルトコンベアーへの乗り継ぎ部、カッター通過後のスクリーン部、サイロ下部の切り出し部、高炉炉頂の上ベル部の 4 ケ所で 25 mm 以上のコークスをそれぞれ約 50 kg 採取した。B

Table 1. Properties of coke.

Sample	Properties				
	DI <sub>15</sub> <sup>30</sup>	DI <sub>30</sub> <sup>30</sup>	Ash (%)	RSI (%)	RI (%)
A	94.0	34.7	10.7	67.2	28.6
B	93.1	43.8	11.3	62.4	33.6

Table 2. Properties of CWQ and CDQ coke.

Sample	After wharf		Before B. F.	
	DI <sub>15</sub> <sup>30</sup>	Size (mm)	DI <sub>15</sub> <sup>30</sup>	Size (mm)
CWQ	94.3	67.9	95.3	42.6
CDQ	95.6*	56.2*	95.9	46.0

\*: After CDQ

コークスは、アンローダーによる荷揚げ後のベルトコンベアーへの乗り継ぎ部、および、カッター以降の3ヶ所の計4ヶ所で同様に採取した。

A コークスにおける輸送工程での平均粒度の変化の一例を Fig. 1 に示す。ワーフ後では 65 mm 程度あるのに対して高炉炉頂では 45 mm であり、約 20 mm の平均粒度の低下が認められる。各採取箇所での  $DI_{15}^{30}$  はワーフ後の 94.0 から炉頂では 96.5 へと 2.5 上昇し、見かけ上強度が上昇している。しかし、コークスの粒度構成が異なり、ハンドリングにともない各粒度分布内の強度にも変化が生じていることが考えられることから、この上昇が集合状態の粉化性を評価する回転試験機に特有の現象であり、個々のコークス粒子の強度変化を評価していないことが推定できる。

3.1.2 輸送工程のシミュレーション

ワーフ上の大塊コークスが輸送工程を経て行くうちに破壊し、粒度変化を生じていく様子を、JIS ドラム試験機による破壊と摩耗挙動でシミュレーションできるもの

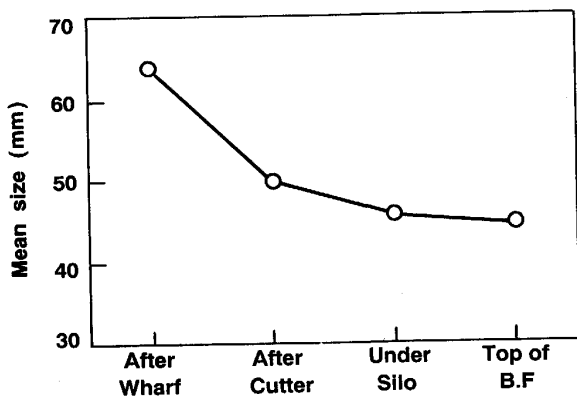


Fig. 1. Change of mean size of coke during conveyance at Kakogawa.

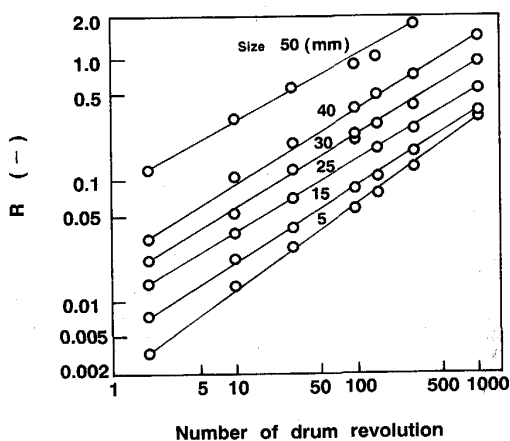


Fig. 2. Relation between R index and number of drum revolution (A coke).

として、2 回転~1000 回転後のコークスの粒度分布の変化を検討した。

破壊後の累積粒度分布が Rosin-Rammler 指数法則に従うものとして、次式に示す R 指数 (-) で整理した<sup>9)</sup>。

$$R = 2 - \log I \dots \dots \dots (4)$$

I: ふるい上の歩留り量 (%) である。

R 指数とドラム回転数との関係を Fig. 2 に示す。いずれの粒径でも比較的良い直線関係を示している。ここで、輸送工程における R 指数をもとに 25 mm 以上での粒度分布に対して R 指数を求め、Fig. 2 の R 指数と回転数の関係に当てはめると各サンプリング位置に相当するドラム回転数を求めることができる。Fig. 3 に A コークスの場合について示す。また、相当ドラム回転数は Table 3 に示すが、A コークスではワーフ後で 2 回転、炉頂で 66 回転である。一方、B コークスではアンローダーまでが 6 回転と多いので、各位置での相当回転数は高くなるものの、炉頂では 58 回転とほとんど差がなくなっている。両者から、高炉には約 60 回転相当のハンドリングを受けたものが装入されていると見なすことができる。

3.1.3 コークスの破碎、粉化挙動

大塊コークスの破壊後の粒度構成は、コークス炉の炉幅方向に発生するマクロクラックとそれに垂直なマクロ

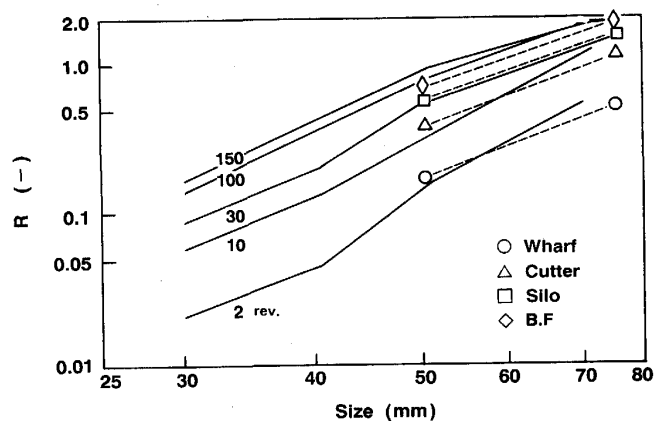


Fig. 3. Relation between R index and size of coke by simulation using drum and during conveyance.

Table 3. Equivalent revolutions at each site.

Site	Equivalent Rev.	
	A	B
After wharf	2	6*
After cutter	14	28
Under silo	39	53
Before B.F.	66	58

\* After unloader

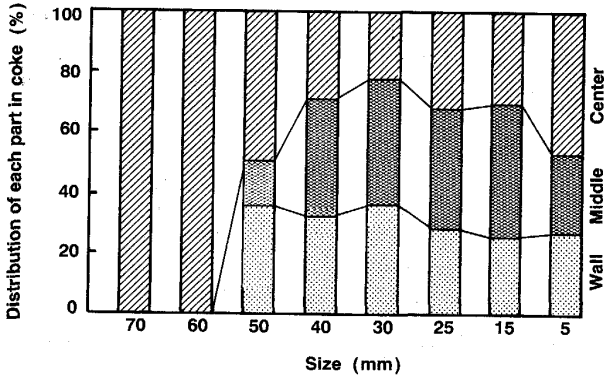


Fig. 4. Distribution of three parts in lump coke in each size fraction after 100 revolutions (B coke).

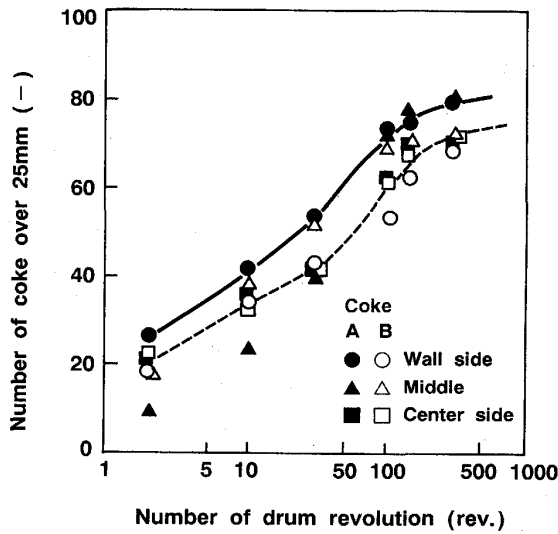


Fig. 5. Change of number of coke over 25 mm after drum revolutions.

クラックに影響される<sup>9)</sup>。そこで、コークス炉の炉幅方向に3等分に色分けした大塊コークスについて、ドラム試験機による破壊後の各粒度における存在割合を調べた。Fig. 4にBコークスの各粒度での構成を示す。粒度の大きい側に中心部由来のコークスが、加熱壁側由来のコークスは60mm以下にしか存在していない。

Fig. 5にドラム回転数に対する25mm以上のコークスの個数の変化を示す。100~150回転前後から個数の増加がほとんどなくなり、コークスの体積的破壊が減少し、摩耗破壊が進行することがわかる。

### 3.2 コークス強度の変化

#### 3.2.1 引張強度と乾留位置の関係

Fig. 6に引張強度の分布を示すが、引張強度が1MPaから10MPaまで広範囲にばらついていることがわかる。そこで、式(2)、(3)から確率関数と引張強度の関係を対数関数で示すと

$$\ln \ln(1/(1-P)) = m \cdot \ln(St) + C \dots \dots \dots (5)$$

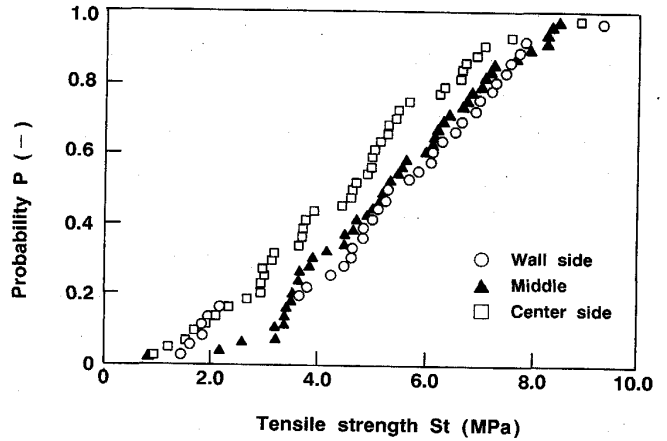


Fig. 6. Distribution of tensile strength (A coke).

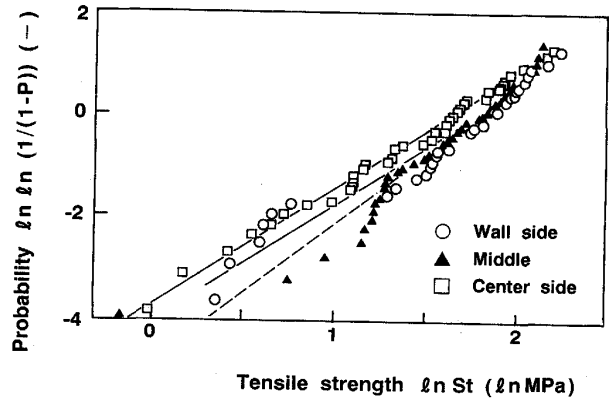


Fig. 7. Weibull type's plot of tensile strength (A coke).

となり、 $\ln \ln(1/(1-P))$ と $\ln(St)$ の一次の関係になる。ここで、 $C$ は定数である。Fig. 7に実測値とそれを基に直線回帰した線を示す。均一性係数 $m$ は加熱壁側で2.1、中間部で2.7、中心部で2.3である。比較的良い直線性を示すことから、Weibullの分布関数の適用が妥当であることを示している。

また、乾留位置の影響を比較すると、加熱壁側および中間部由来のコークス強度はほぼ同じ位置に分布しているが、中心部由来のコークスはそれより強度が低い側に分布していることがわかる。

#### 3.2.2 輸送工程における引張強度変化

輸送工程の引張強度の変化を検討するために、乾留位置ごとに0, 150, 1000回転後の各コークスの引張強度分布から並数 $S_m$ を導き、ドラム回転数との関係についてFig. 8に示す。Aコークスは回転数、すなわち、ハンドリングが多くなるにしたがって引張強度が低下し、その後再び上昇していく。一方、Bコークスはハンドリングが多くなるとともに引張強度は上昇するものが多く、Aコークスとほぼ同じ引張強度にまで達して

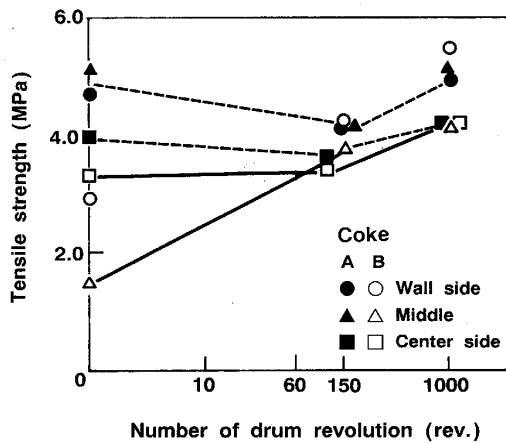


Fig. 8. Change of mean tensile strength of coke after drum revolution.

いることがわかる。また、乾留位置の影響についてみると、A, B の中心部由来のコークスは初期の引張強度に対して、ハンドリング後の変化は比較的小さい。

以上より、採取試料である 40 mm 以上のコークスについて、ハンドリングした後のコークスの引張強度分布はそれぞれハンドリングにより異なる影響を受けていることがわかる。

### 3.2.3 スタビライズ効果

ハンドリングによる引張強度分布に対する影響をより明確にするために、引張強度変化の著しい B コークスの壁側由来コークスと、あまり変化していない A コークスの壁側由来コークスについて、引張強度分布の変化を確率密度分布で比較し、Fig. 9 に示す。ここで、図中の曲線は、均一性係数  $m$  に依存してピークの高さが変化するの、それぞれの場合の最大確率密度の値で割って規格化している。

B コークスは、回転数の増加とともに  $m$  が 1.7, 2.5, 3.3 と増加し、確率密度分布曲線が高強度側へ移行している。すなわち、低強度部分のコークスがハンドリングにともない 40 mm 以下の粒度の小さい方へ移行し、相対的に引張強度の高いコークスが残っていることを示している。したがって、このようなコークスではハンドリングを行うことにより、引張強度が上昇することになる。

一方、A コークスはハンドリングとともに均一性係数  $m$  が 2.1, 2.2, 4.2 と増加していることから分布曲線が鋭くなって行き、全体的により均質な分布となっていることがわかる。すなわち、強度分布としては狭い範囲におさまっているのばらつきの少ないコークスである。しかし、 $Sm$  はほとんど変化していない。これは、低強度側と高強度側のコークスの数が減少していったことを示している。低強度側のコークスは、B コークス

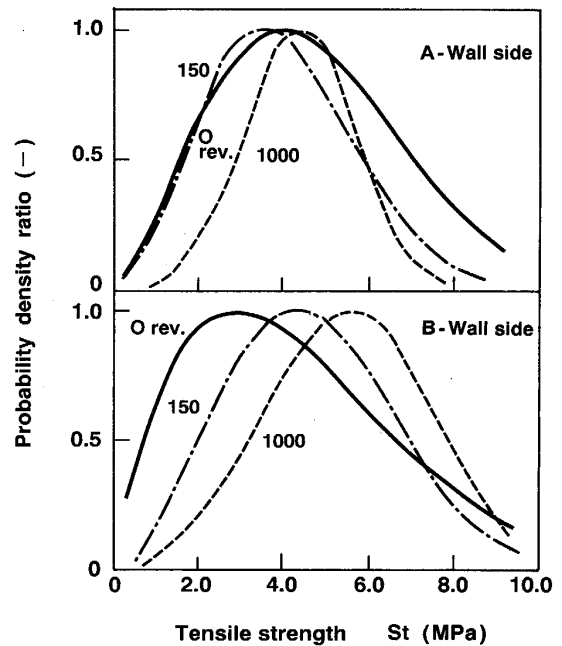


Fig. 9. Probability density distribution of tensile strength of coke.

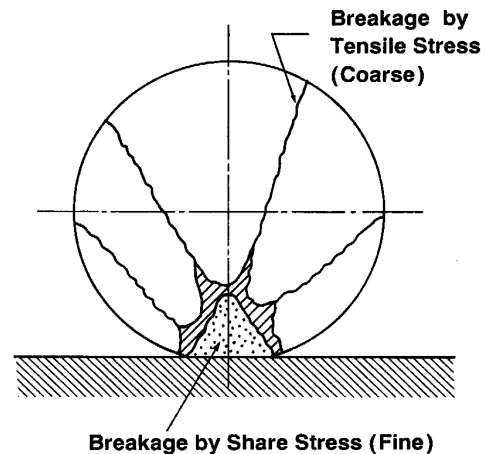


Fig. 10. Schematic drawing of the type of breakage<sup>14)</sup>.

と同様に、優先的に小粒になっていくものと推定できる。しかし、高強度側のコークスについては、対象となる試料粒度がもともと 40 mm に近く、ハンドリングにより、わずかに小粒化して、試料として採取されなかった可能性が考えられる。

### 3.3 粒度変化の予測

#### 3.3.1 粒度分布推定式

コークスが衝撃破壊で細粒化する場合、Fig. 10 に模式的に示した様に粒内にせん断応力と引張応力が生じて表面破砕により微粉が、体積破砕により粗粒が発生する<sup>15)</sup>。Fig. 11 に示す微粒部を含む場合についての Rosin-Rammler 型のプロットが屈曲していることから

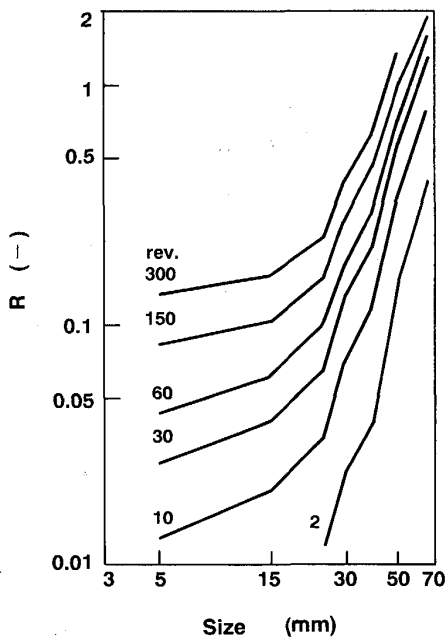


Fig. 11. Relation between R index and size of coke (A coke).

も、2種類以上の破碎様式が存在していることが推定できる。

そこで、コークスの破壊は体積破碎と表面破碎が同時に進行し、破壊後の粒度分布は破碎前の初期粒度と引張強度で代表できる多孔質強度により決まるものと仮定した。粉碎における粒度分布の実験式において、粗粒には式(7)の Gaudin-Meloy-Harris の式<sup>14)3)</sup>と、微粒には式(8)の Rosin-Rammler 型の式<sup>9)</sup>を適用し、式(6)の菅原の方法<sup>15)</sup>で組み合わせた。

$$I_x = b \cdot I_{x_1} + (1 - b) \cdot I_{x_2} \dots\dots\dots (6)$$

$$I_{x_1} = 100 \times \{1 - (X/X_0)^\beta\}^\gamma \dots\dots\dots (7)$$

$$I_{x_2} = 100 \times \exp(-e \cdot X^f \cdot Rev^g \cdot St^h) \dots\dots\dots (8)$$

ここで、 $I_x, I_{x_1}, I_{x_2}$ : ふるい目  $X(\text{mm})$  上の歩留り(%)、 $X_0$ : 初期粒度 (mm)、ただし  $X \leq X_0$ 、 $\gamma$ : 回転数に比例する粉碎比 (-)、 $b$ : コークスの体積破碎と表面破碎の割合 (-)、ただし  $0 \leq b \leq 1$ 、 $Rev$ : ドラム回転数 (Rev)、 $St$ : コークスの引張強度 (MPa)、 $\beta, e, f, g, h$ : 定数 (-)、である。

式(6)から式(8)におけるパラメーターは次の様にして求めた。

$\gamma$  はドラム回転数との関係から両対数のプロットで直線関係を示し、コークスの種類、すなわち、強度に依存しないことから以下のような回帰式で与えられる。

$$\gamma = 0.442 \times Rev^{0.421} \dots\dots\dots (9)$$

$b$  はドラム回転数と強度に依存し、強度で層別できることから、以下の関係で表す。

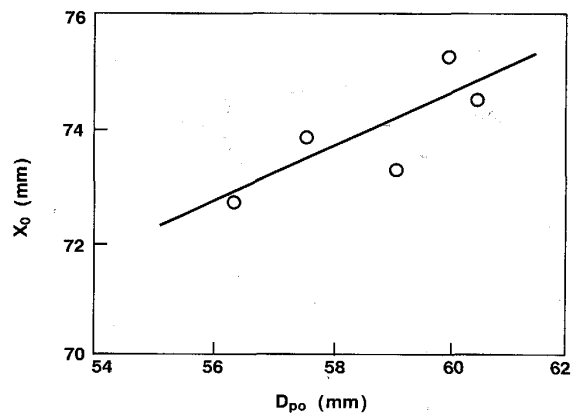


Fig. 12. Relation between initial size  $X_0$  and obtained size after wharf  $D_{p0}$ .

$$b = 0.988 - (11.383 - 0.110 \times St) \times 10^{-4} \times Rev \dots\dots\dots (10)$$

$\beta$  はドラム回転数およびコークス種類に依存してはなくて一定であるので、平均値として 2.396 を採用した。

初期粒度  $X_0$  は計算値であり、式(7)に  $\gamma, \beta$  を代入し、最も誤差の小さい  $I_{x_1}$  が得られた時の値である。ワーフ後の粒度  $D_{p0}(\text{mm})$  と Fig. 12 に示すような比例関係にあることから、

$$X_0 = 47.38 + 0.452 \times D_{p0} \dots\dots\dots (11)$$

と表される。

粒度分布を式(6)で求めた推定値と、ドラム試験機による実測値を比較すると、両者の間には比較的良い一致が認められ、標準誤差は 0.3% であった。したがって推定式はコークスの粒度分布変化を推定することが可能であることがわかる。そこで、式(6)を用いてコークスの粒度変化を引張強度 4.5 MPa、ワーフ後  $D_{p0}$  50, 60 mm について、ハンドリング量も含めて独立したパラメーターにより推定した例を、Fig. 13 に示す。ここで、 $DI_{15}^{30}$  は式(7)に  $Rev$  が 30、 $X$  が 15 mm を代入し、 $DI_{50}^{30}$  は  $Rev$  が 30、 $X$  が 50 mm を代入し、A コークスの場合について検討した。 $DI_{15}^{30}$  は引張強度が  $DI_{15}^{30}$  に比べて大きいことがわかる。また、図中には解体調査結果より高炉炉頂よりさらに 12 回相当のハンドリングを受けているとみなされているシャフト上部において、コークス粒径の推定値を示している。その結果、コークス粒度を上昇させるためには初期の粒度を上昇させた方が強度を上げるより効果的であることがわかる。すなわち、式(6)から式(8)において、 $Rev$  のあまり大きくない場合、絶対値として  $X_0$  の変化の方が  $St$  の変化より大きく寄与していることを意味している。

### 3.3.2 CDQ の効果

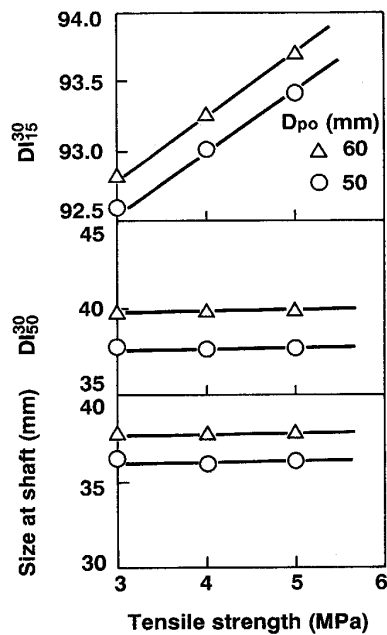


Fig. 13. Effect of obtained size after wharf  $D_{po}$  and tensile strength on  $DI_{15}^{30}$ ,  $DI_{50}^{30}$  and size at shaft.

Table 2 から明らかのように CWQ コークスと CDQ コークスの間にはスタビライズ効果、徐冷効果および均熱効果<sup>16)</sup>により見かけ上のドラム強度差がついており、 $DI_{15}^{30}$  の差は当初 1.3 であった。これを高炉装入前で測定すると、 $DI_{15}^{30}$  はそれぞれ 95.3 と 95.9 となりその差は 0.6 に減少する。ただし、両者のドラム強度差はサンプリング場所によって変化するので、CDQ の効果を定量的に評価することが困難である。そこで、本試料についてもディスク状試料による引張強度を測定し、Weibull の分布関数<sup>11)</sup>により並数  $S_m$  を求めると、CWQ コークスは 3.9 MPa、CDQ コークスは 4.2 MPa であった。

式(6)から引張強度  $St$  の差と平均粒度  $D_p$  の差を用いてスタビライズの効果による計算上の  $DI_{15}^{30}$  をそれぞれ求めて差を比較した。引張強度差は 0.3 MPa であることより、CWQ コークスの引張強度のみが 0.3 MPa 上昇したとすると、 $DI_{15}^{30}$  は 0.2 増加する。また同様に、高炉前での平均粒度差 3.4 mm であることより、CWQ

コークスの平均粒度のみが 3.4 mm 低下したとすると、 $DI_{15}^{30}$  の差は 0.17 の上昇に相当する。したがって、合計で 0.37 であり、高炉装入前でのドラム強度差 0.6 に対して、全体の 6 割がスタビライズによる効果であることがわかる。

#### 4. 結 言

(1) 輸送工程における粒度変化、および乾留位置の影響を実測とシミュレーションから明らかにした。

(2) コークス引張強度を Weibull の分布関数により解析し、輸送工程におけるスタビライズ効果を定量的に明らかにすることができた。

(3) 粒度分布における初期粒度と引張強度の影響を定量的に明らかにしたことにより、高炉に装入するコークス粒度の予測が可能になった。

#### 文 献

- 1) 近藤幹夫, 小西行雄, 岡部侠児: 川鉄技報, 6 (1974), p. 1
- 2) JIS K2151 (1972)[日本規格協会]
- 3) 八嶋三郎: 日本鉄鋼協会特定基礎研究会石炭のコークス化特性部会報告書(日本鉄鋼協会特定基礎研究会石炭のコークス化特性部会編)(1982), p. 117
- 4) J. W. Patrick and A. E. Stacey: Fuel, 51 (1972), p. 81
- 5) J. W. Patrick and A. E. Stacey: Fuel, 51 (1972), p. 174
- 6) J. W. Patrick and A. E. Stacey: Fuel, 51 (1972), p. 206
- 7) B. C. R. A: Carbonization Research Report, 73 (1979)
- 8) 宮川亜夫, 藤嶋一郎: 燃料協会誌, 84 (1975), p. 983
- 9) 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
- 10) 久田清明, 城本義光: コークスの研究(コークスシリーズ 4) (1954), p. 983
- 11) W. Weibull: J. Appl. Mech., 18 (1951), p. 293
- 12) 山口梅太郎, 西松裕一: 岩石力学入門 (1967), p. 209 [東大出版会]
- 13) N. Areiter: Trans. Society of Mining Engineers, 244 (1969), p. 118
- 14) C. C. Harris: Trans. Society of Mining Engineers, 235 (1966), p. 143
- 15) 菅原勝彦, 村田博之, 岡村 宏, 才田善之: 日本鉱業学会誌, 100 (1984), p. 663
- 16) 美浦義明, 原口 博, 西 徹, 古牧育男, 小串嘉宏: 鉄と鋼, 66 (1980), p. 1277