

Fig. 2. Relation of oxygen mass flow rate, oxygen pressure and diameter of throat in LD-converter.

によつて転炉工場の吹錬計画を酸素ノズル・スロートに表現することができる。吹錬時間をチャージ平均した脱炭速度におきかえれば、吹錬に必要な酸素量 (Nm³/min) とノズル・スロート断面積 (cm²) および吹錬圧力 (kg/cm²·G) の関係について、吹錬計画も炭素バランスに折り込んで算出することができる。αはマルチ・ノズルとシングル・ノズルの断面積比で、これはたとえば0.8から1.2程度の任意の値をとることができる。一例として13T/ch 炉、シングル・ノズルについて求めたスロート径-流量関係線図を Fig. 2 に示す。

4. 総 括

LD 法の吹錬反応機構を吹錬用酸素の吹きつけ条件との関連において解明するため、まず吹きつけ酸素の初期条件であるノズルにおける酸素の流れの状態を気体力学的に計算した。ノズルの断面積関係とずれた使い方をする場合に衝撃波あるいは膨張波を発生し、流れは乱れる。炭素バランスからスロート口径を算出した。

文 献

- 1) 土居: 鉄と鋼, 50 (1964), p. 217
- 2) 川上, 藤井, 岸田: 鉄と鋼, 48 (1962), p. 1371
- 3) 文献 1) ほかのパネル・ディスカッション
- 4) 川上, 板岡: 鉄と鋼, 50 (1964) 11, p. 1712
- 5) A. HOUGEN, K. WATSON & R. RAPATZ: Chemical Principles, Part 2 Thermodynamics (1959), p. 691 [Wiley]
- 6) Gas Engineers Handbook (1935), [McGraw-Hill]
- 7) H. W. EMMONS: Fundamentals of Gas Dynamics (1958), p. 161 [Princeton]
- 8) リープマン・ロシュコ: 気体力学(1960年11月) p. 59 [吉岡書店]

(51) ノズルから噴出する酸素ジェット
の構造について

(純酸素転炉における吹錬反応機構の解析—II)

日本鋼管, 技術研究所 ○川上 公成
On the Structure of Oxygen Jet Emerged from a Laval Nozzle.

(On the kinetics of the blowing reactions in basic oxygen converter—II)

Kiminari KAWAKAMI.

1. 結 言

前報においてLD法におけるノズルでの気体酸素の流れの状態が解明され、流速、流量に関する吹錬用酸素の初期条件が算出された。引続いて、所定の初期条件で噴出された酸素ジェットについて、ノズルを離れてから鋼浴面に達するまでの間の状態について調べ、吹錬反応にあずかっている鋼浴での酸素ジェットの構造を解析した。

2. ジェット構造に対する理論的考察

ノズルから噴出するジェットの挙動に関する理論的検討はあまりおこなわれてきていないようである。ここではつきのごとく“乱流理論”に“誤差曲線理論”を組合わせて解いた。

Fig. 1 のごとき three-dimensional なジェットにおいて (流れは Turbulent flow とする),

- 1) ジェット内部において運動量は一定である。
- 2) ジェット内部において速度分布函数は一定であると仮定する。2) の仮定は,

$$\bar{u}/u_{max} = f(\eta), \eta = Y/X \dots\dots\dots (1)$$

で表わすことができる²⁾。また上記の仮定によればジェット各部の運動量はつねに一定 (実際上ほとんど正しい) であり、次式を導くことができる。すなわち,

$$M/M_0 = 1 = \int_0^\infty (\bar{u})^2 \cdot dA / (U_0^2 \cdot A_0) \dots\dots\dots (2)$$

よりジェット軸上の流速は,

$$u_{max}/U_0 = D_0 / \sqrt{X \cdot 8 \cdot I_m} \left. \begin{matrix} \\ \\ \end{matrix} \right\} \dots\dots\dots (3)$$

$$I_m = \int_0^\infty f^2(\eta) \cdot \eta \cdot d\eta$$

によつて求められる。ここで u_{max}/U_0 の値は (3) 式において $f(\eta)$ の函数が定まらぬことには解くことはできない。しかし一方このような乱流ジェットの拡散現象について、正確にその拡散状況を説明できる函数はまた見出されておらず、それぞれ仮定にもとずいてつぎの2手法がある。その第1は“Momentum transfer theory”であり、その第2は“Error curve theory”であり、こ

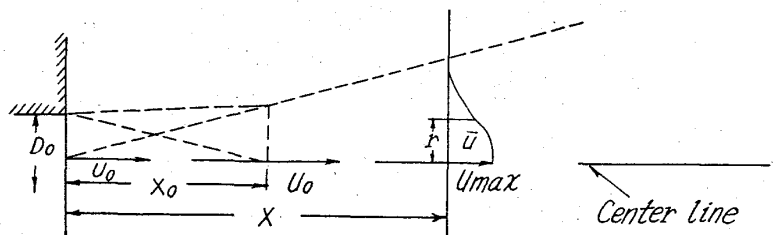


Fig. 1. Definition sketch for diffusion of jets.

ここでは積分計算の比較的容易な“Error curve theory”を用いた。すなわち乱流ジェットにおいて第3の仮定として、

3) ジェット内部の流速分布函数は Gauss の正規分布函数である。

と考える。そうすれば (1) 式は、

$$f(\eta) = \exp[-J], J = \eta^2/2C^2, \sigma = CX \dots (4)$$

で表わされ、(2-3) 式に (2-4) 式を代入すれば、

$$u_{\max}/U_0 = (D_0/X) \cdot (1/2C) \dots (5)$$

が求められる。(5) 式において $u_{\max} = U_0$ を代入すれば、これは Fig. 1 においてジェットの拡散が丁度中心軸上に達したこと、すなわちジェットのコアー長さを意味し (5) 式より、

$$X_0/D_0 = 1/2C \dots (6)$$

から X_0/D_0 を実測して求めれば、積分定数 C が決定でき上述の理論式がすべて決定される。すなわち前記各式より、

$$\bar{u}/U_0 = (1/2C) \cdot (D_0/X) \cdot \exp[-1/2C^2 \cdot (Y/X)^2] \dots (7)$$

が求まり、ジェット各部の流速が算出できる。

なお、後述の定数 C の測定結果により、コアー長さ $1/(2C)$ が非常に大で、 X_0/D_0 で 20~30 に達する値が実測された。これによれば一般の LD 法操業においてはときにはコアー端以内で吹錬がおこなわれている場合も予想される。上記 (7) 式はコアー端以遠の完全拡散領域についての計算式であるが、不完全拡散領域については次式のごとく変形される。

$$\bar{u}/U_0 = \exp[-(Y-CX-D_0/2)^2/2(CX)^2] \dots (8)$$

これらの考え方はすべて理想状態に対するもので、具体的には同一温度、同一密度の同一気体で満たされている雰囲気中へそれと同じ気体を噴出させたときに成立すべきもので、たとえば純酸素を噴出後の温度と同じ温度の純酸素中に噴出させるときに成立すべきものである。

3. 小型ノズルによる実測結果

上記のような仮定にもとづくジェットについて、以下に小型ノズルを用いて酸素ジェットを空气中に噴出させてジェット内部の流速分布を実測し、その構造決定をおこなった。

3.1 測定装置

測定に用いたジェット測定台は Fig. 2 のごとくである。同図 (a) は ±2mm 程度、(b) は小型旋盤の一部改造品であるが ±0.2mm 程度の精度を有している。ジェット用の気体としては川鉄転炉工場の 12kg/cm²・G 雑用純酸素を用いた。酸素の圧力は禁油ブルドン管圧力計 (20kg/cm²・G) により、手動バルブで読みに対して ±0.10kg/cm² 程度に調節した。ジェット内部の流速は超音速ピトー管を用い、ジェット内部の動圧力を水銀マンノメーターで測定して、計算式により算出した。なお衝撃波を発生する場合にはハンティングにより圧力測定が困難であった。

測定に用いたノズルは銅丸棒より切削製作したもので、その特性圧力は Table 1 のごとくである。同表において P_0 は理想吹錬圧力、 P' は衝撃波発生圧力 (後述) である。

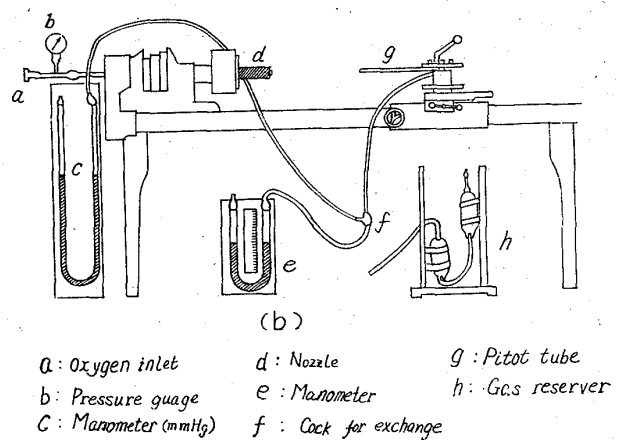
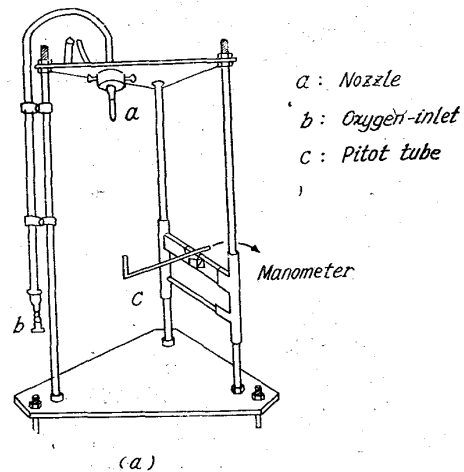


Fig. 2. Schema of experimental apparatus.

Table 1. Characteristic data of nozzles experienced.

$$P = 1.034 \text{ kg/cm}^2$$

| Laval angle (°) | A/A* | M | P ₀ (kg/cm ²) | P' (kg/cm ²) | Throat diameter (mm) |
|-----------------|------|-------|--------------------------------------|--------------------------|----------------------|
| 3 | 1.60 | 1.93 | 7.25 | 3.8 | 5 |
| 5 | 2.06 | 2.253 | 12.0 | 5.7 | 3, 5, 7, 10 |
| 7 | 2.60 | 2.48 | 17.4 | 7.3 | 5 |
| 10 | 3.58 | 2.83 | 29.4 | 11.3 | 5 |
| 15 | 5.30 | 3.24 | 54.3 | 20.1 | 5 |

3.2 測定結果

ジェット軸上の流速変化についてはノズル出口のジェット初速との比較において (u_{\max}/U_0) 検討をおこなった。実測は酸素圧力 3~10kg/cm² の範囲でおこなった。衝撃波については前記測定方法では直接測定は不可能であるため、ここでは初速は理想状態と仮定してコアー長さが変化し (衝撃波が強いほど短くなる)、それに伴ってジェット内部の流速低減係数が大となると考えた。Fig. 3 は開き角度 5°, 10° および 15° ならびにスロート径 5, 7, 10mm について、酸素圧力によるコアー長さの変化を示したが、5kg/cm²・G 付近に衝撃波が見られる。これらの測定結果からコアー長さに対しつきのごとき実験式を導いた (Fig. 2-3-b))。

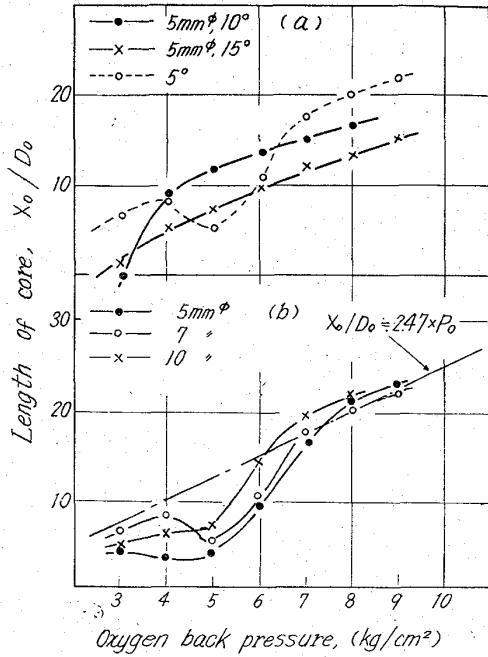


Fig. 3. Effects of oxygen back pressure (P_0), Laval angle and diameter of nozzle on the core-length (X_0/D_0) of oxygen jet emerged into air.

$$X_0/D_0 = 2.47 \times P_0 \dots \dots \dots (2 \sim 9)$$

$$C = 0.202 \cdot P_0^{-1} \dots \dots \dots (2 \sim 10)$$

また所定の形状のノズルに関し衝撃波発生圧力を P' とすれば,

$$P/P_0 = f \cdot P'/P_0 \quad f: \text{係数} \dots \dots \dots (2 \sim 11)$$

で表わせば, 上記測定結果より $f=2.0$ が求められる.

つぎにジェットの高方向の圧力分布については前述の旋盤のおくりを利用して測定した. (4) 式について,

$$\sigma = CX, \quad C = \tan \theta \dots \dots \dots (12)$$

なる角度 θ を考えれば, これは確率積分において, $Pr\{-\sigma < x < \sigma\} = 0.683$ に相当するジェットの開き角度を示す. すなわち (1) 式, (4) 式において $Y = \sigma (=CX)$ なる条件を代入して,

$$\bar{u} = 0.605 \times u_{\max} \dots \dots \dots (13)$$

なる流速 \bar{u} に相当する開き角度を表わすものである. これに関し横方向の実測結果について, ジェット軸上の圧力の 0.366 に相当する圧力に対する開き角度を求め θ の実測値とした. コア長さより算出した θ_{cal} と実測した θ_{obs} との比較を Table 2 に示す.

Table 2. Comparison of calculated θ and observed θ .

| | | Comparison of θ calculated and observed | | | | | | |
|---------------------------------------|--|--|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| Oxygen pressure (kg/cm ²) | | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 |
| Calculated | ($= X_0/D_0$) | 10.5 | 12 | 9 | 14 | 22 | 24.5 | 26.5 |
| | $C = D_0/2X_0$ $\theta = \tan^{-1} C$ | 0.0476 2°54' | 0.0417 2°23' | 0.0556 3°11' | 0.0357 2°03' | 0.0227 1°18' | 0.0204 1°10' | 0.0189 1°05' |
| Observed | 5.53 mm ϕ , 169.0 | 2°56' | 4°50' | 3°48' | 2°40' | 1°40' | 2°19' | 2°11' |
| | 7 mm ϕ , 210 | — | 6°07' | 6°24' | 5°10' | — | 2°47' | 2°21' |

4. ジェット内部の酸素濃度分布

引続いてジェット内部の所定点からサンプリングをおこない, その酸素濃度を分析した. このジェット内部の酸素濃度の数量的表示は, 流速分布の数量的表示とともに, LD 法の基礎知識として必要欠くべからざる極めて重要なデータであろうと考えられる.

測定は圧力分布測定後のピトー管をそのまま用い, Fig. 2 の三方コック f を切替えてジェットの動圧を利用してレーザー h に飽和食塩水置換法で圧力測定点のガスを捕集した. 採取したガスはガスクロマトグラフ法で窒素および酸素について小数 2 桁まで分析した. 純酸素を空气中へ噴出する場合, ジェット内部へ拡散した窒素の量は運動量一定の仮定より,

$$\{1 - (\bar{u}/U_0) \times 32 / (32 - 4 \cdot N_{\text{dif}})\} \times N_{\text{air}} = N_{\text{air}} \dots \dots \dots (14)$$

で求められる (N_{dif} : 窒素濃度, N_{air} : 空气中の窒素濃度). 同様にして計算値と実測値の関係を Fig. 4 に示す. 低窒素域に対するばらつきは, スロート径に対してピトー管径が比較的大きい (1 mm ϕ) ことによるものであろう. なお酸素-酸素の理想状態では \bar{u}/U_0 がそのまま酸素濃度を示す式となる.

5. 酸素ジェット吹きつけ条件の表現

以上の結果を総括して考えるとき, 鋼浴における酸素の吹きつけ条件の表示は一元的な単純な式のみでは表わすことはできず, 以下の 3 項目に関する式を併用してはじめて決定できるものである (完全拡散部についてのみ

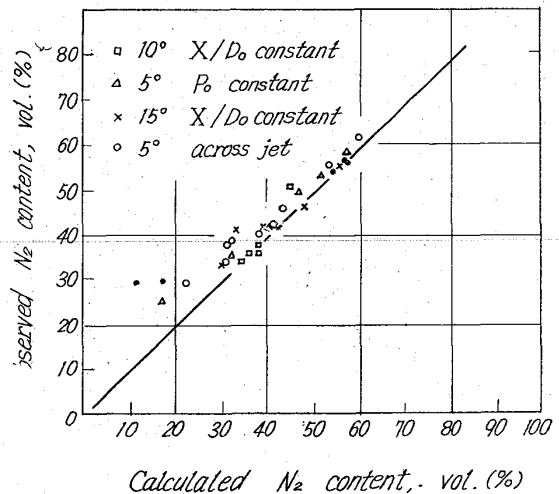


Fig. 4. Comparison of nitrogen volume percentage calculated and observed.

169.184.244.66:669.184.235.4

記す)

5.1 酸素濃度に関する式

ジェット軸上

$$u_{max}/U_0 = (D_0/X) \cdot (1/2C) \dots\dots\dots (5)$$

鋼浴面での平均値

$$Q_0/Q = (U_0 \cdot A_0) / \int_0^\infty \bar{u} \cdot dA$$

$$= (D_0/X) \cdot (1/4C) \dots\dots\dots (15)$$

5.2 流速に関する式

$$u_{max} = (D_0/X) \cdot (1/2C) \cdot U_0 \dots\dots\dots (5')$$

$$\bar{u} = (1/2C^2) \cdot (D_0/X) \cdot \exp$$

$$[-(1/2C^2) \cdot (Y^2/X^2)] \cdot U_0 \dots\dots\dots (7')$$

$$U_0 = \sqrt{(\gamma+1)/(\gamma-1) \cdot \{1 - (P_0/P)(\gamma-1)/\gamma\}^{1/2} \cdot a^*} \dots\dots\dots (3)$$

5.3 吹きつけ動圧に関する式

$$\text{動圧} = (\gamma/2g) \cdot (\bar{u})^2 \dots\dots\dots (16)$$

6. 総 括

前報で求めた初期条件にもとずいて、ノズルから噴出する酸素ジェットの構造を理論検討と実測値にもとずいて解明した。すなわちジェット内部の流速分布とともに、今回初めて酸素濃度分布の数式化をおこなった。

文 献

- 1) H. ROUSE: Advanced Mechanics of Fluid, (1959), p. 359 [Wiley]
- 2) A. F. DONOVAN & H. R. LAWRENCE: Aerodynamic Component of Aircraft at high Speed, (1957), p. 649 [Princeton]

(52) 純酸素転炉における吹錬試験の実施

(純酸素転炉における反応機構の解析—Ⅲ)

日本鋼管, 技術研究所

川上 公成・○藤井 隆

On the Operation of Blowing Tests in Basic Oxygen Converter.

(On the kinetics of the blowing reactions in basic oxygen converter—Ⅲ)

Kiminari KAWAKAMI and Takashi FUJII.

1. 緒 言

第1報および第2報では純酸素転炉における吹錬用酸素ジェットの特性について理論的な解析を行なった。その結果ジェットの特性についていろいろの事実が明らかになった。このため当研究所の 10 t/ch 試験転炉において酸素吹きつけ条件を大巾に変更させた吹錬試験を実施し、吹きつけ条件の変化による純酸素転炉の吹錬反応について研究したので以下に報告する。

2. 実 験 計 画

試験は実験計画法 $L_{32}(2^{31})$ 型直交表に各要因、水準を割りつけ計 32 チャージ行なつた。要因は酸素ジェット・スピードを主体に Table 1 に示すようなものを用いた。なお他の主要因は Table 2 に示すごとく装入量にスライドさせて一定とした。

Table 1. Factors and level.

| Factor | Level | 1 | 2 | 3 | 4 |
|---|-------|---------------|---------------|------|------|
| A. Charging tonnage (t/ch) | | 9.9 | 13.0 | — | — |
| B. Dia. of nozzle (mm φ) | | 18.0 | 25.8 | 30.0 | — |
| C. O ₂ mass flow rate (Nm ³ /min·t) | | 2.1 | 2.8 | — | — |
| D. Jet speed (kg/cm ²) | | 0.05 | 0.30 | 0.70 | 1.20 |
| E. V. P. [C%] (%×10 ⁻²) | | 5~10 | 30~60 | — | — |
| F. V. P. temperature (°C) | | 1600 ~1630 | 1680 ~1710 | — | — |

Table 2. Operating condition.

| Materials | Pattern | No. 1 No. 2 | |
|--|---------|-------------------------------|------|
| | | | |
| Charging tonnage (t/ch) | | 9.0 | 13.0 |
| Pig ratio (%) | | 90.0 | 90.0 |
| Burnt lime (CaO/SiO ₂ =4.3) (kg/ch) | | 600 | 860 |
| Fluor spar (kg/ch) | | 90 | 120 |
| Scale (kg/ch) | | 200 | 300 |
| Lance height and O ₂ pressure | | Constant level during blowing | |

2.1 要因と水準

2.1.1 装入量 (t/ch)

吹錬反応機構におよぼす装入量、湯溜形状の影響を調査するため今回の試験では装入量に2水準を設けた。装入量 9 t, および 13 t は試験転炉炉容から決定した。

2.1.2 ノズル・スロート径 (D*mm φ)

試験転炉におけるノズル・スロート径は次式で計算した。

吹錬用酸素量 (Nm³/min)

$$= \frac{(\text{銹鉄}[C\%] \times \text{銹鉄比} - \text{終点}[C\%]) \times 9.33}{\text{吹錬酸素の脱炭効率} \times \text{吹錬時間}}$$

$$\times \text{全装入量} = \theta_T \cdot S \cdot P_0 \dots\dots\dots (1)$$

θ_T : 定数 (1.04 Nm³/kg·min, 300°K), S^* : ノズル断面積 (cm²), P_0 : 貯気槽圧力 (kg/cm²) 標準操業では装入量 13 t, 吹錬時間 17 min, 脱炭効率 75%。銹鉄比 0.9 とし、ノズルスロート径 25.8 mm φ を用いているが、今回の試験ではその他に 18.0 mm φ, および 30.0 mm φ, ノズルを使用した。なおノズルはすべてダイバージェット・コンバージェットタイプのシングル・ノズルとした。

2.1.3 酸素供給量 (Nm³/min·t)

水準 1 の 2.1 Nm³/min·t は普通 LD 操業の値に近く、水準 2 の 2.8 Nm³/min·t は普通 LD 操業に比べ若干高い値である。要因 C の実操業水準は 2.1 Nm³/min·t, 2.8 Nm³/min·t と装入量に対し、(1) 式から各ノズルに対応する吹錬圧力を求め、この吹錬圧力を用いた。設定圧力を酸素供給量から決定したため各ノズル (固有の理想噴出圧力に適合しない値も実操業水準中に含まれた。これらの圧力はショック・ウェイブを発生し、吹錬上不利となることが予想される。