

第 3 会 場 (転 炉 ・ ラ テ ラ イ ト)

(50) ノズルにおける酸素の超音速流れについて

(純酸素転炉における吹錬反応機構の解析—I)

日本鋼管, 技術研究所 ○川 上 公 成

On the Supersonic Flow Conditions of Gaseous Oxygen at a Laval Nozzle.

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

Kiminari KAWAKAMI.

1. 緒 言

純酸素上吹き転炉製鋼法 (LD 法) はたとえば平炉法, 電気炉法等の製鋼法と比較した場合, いくつかの独自の反応機構によつて推進されていることに注目される。

脱炭反応については, この反応の推進力が平炉法精錬期におけるスラグを通しての酸化によるものであるのとまったく異なり, 吹錬用酸素によるファイヤー・ポイントでの直接反応が支配的であるということが出来る。また脱硫反応についても, 酸素による直接酸化脱硫すなわち気化脱硫の効果が期待され, 気化脱硫を増大させることにより一層の低硫鋼の製造が期待される。

窒素は LD 法においてもつとも特色のある成分である。すなわち純度の高い酸素で吹錬をおこなえば, LD 法は窒素については Closed Vessel 内における高真空精錬処理法と考えることができる。このため, LD 鋼の窒素含有量は他の製鋼法によるものに比べて著しく低い値となつてゐる。

脱炭反応に関連して特色づけられるのは衆知のごとく, 脱炭と脱りん反応の相対速度の自由なコントロールが可能となる点である。このため, LD 法に有利な原料 (比較的りん含有量の低い溶銑) の使用と吹錬技術の開発とによつて, LD 転炉は低炭素鋼専門炉から脱脚して中炭素鋼から高炭素鋼の製造とも活用されてきている。脱炭と脱りんの相対速度の関係はいわゆる soft blow と hard blow の問題につながつており, この問題の解明はランス高さとか吹錬圧力とかの酸素吹きつけ条件を除外して考えることはできない。

また LD 合金鋼の分野については, 18-8 ステンレス鋼程度の高合金鋼にいたるまで技術的に成功裡に試作されている。LD 合金鋼の製造においては, たとえば 7% 程度のクロム元素の添加も 3 min 間足らずの“溶解吹錬”により均一にしかも極めてクロム歩留りも高く実施することが可能となつた。数分間で 7% にも達する合金元素が均一に添加されるのは, 溶解吹錬中に極めて活発な攪拌がおこなわれていることを意味するが, これは吹錬条件のわずかの変動により大きく影響される。

このように LD 法の特色を列記した場合, 吹錬用酸素の吹きつけ条件と吹錬反応との関係の定量的な把握が吹錬反応機構の解明につながるものと考えられる。

LD 法では 99.5% 以上の高純度の酸素をノズルから超

音速で噴出させ, ノズルを鋼浴面から所定の高さに保つて吹錬をおこなつてゐる。その際ノズル形状としてはシングル型とマルチ型とがあり, またノズル設計にはおもにラバル型等を採用している。ここではシングル型ノズルについて, 吹錬用酸素の吹きつけ条件と吹錬反応の関係から吹錬反応機構を解析した。

2. ノズルにおける流れの状態

はじめにノズルにおける酸素気流の流れの状態について調べて吹錬用酸素の噴出の際の初期条件を求め, LD 法における主要設備である酸素ノズルの設計方法を求めた。計算にはおもに米国の基礎航空力学に関する文献を中心として気体力学を参照した(5)~(8)。

2-1 酸素の流速と流量

気体力学においてはもつとも重要な量としては, 圧縮性流体の中に微小変動 (波) が伝はんする速さ, すなわち音速を選ぶことができる。流体内の波についてその前後の状態に質量保存則を適用すれば, $(\partial P / \partial \rho) s \equiv a^2$ が音速の式として求められる (ρ : 密度, P : 圧力, a : 音速)。流れている流体においては速度に対しては, “Mach 数” ($M = u/a$) なる無次元の表現が用いられる (u : 流れの速度, M : マッハ数)。

断面積の異なる流管内の定常な断熱流については連続の式より, 断面積と速度の関係について,

$du/u = (-dA/A) \cdot (1 - M^2) \dots\dots\dots (1)$

が求められる (A : 断面積)。上式において, 1) M が 1 と 0 の間 (亜音速) においては断面積が減少すると速度は増加する。2) 超音速においては分母は負となり, 断面積が増加すると速度も増加する。これは超音速においては“密度の減少が速度の増加より速やか”であることによるものである。上式において $M=1$ では $dA/A=0$ の場合のみ du/u が有限であり, $M=1$ という状態 (音速状態) は管のスロート部においてのみ起り得ることを示す。定常な流れについてエネルギーの式より, よどみ点あるいは貯気槽状態を \circ 印を付して示せば, 貯気槽圧力 P_0 の変化に対するマッハ数および流速の変化は,

$M = \sqrt{2/(\gamma - 1)} \cdot \{(P_0/P)^{(\gamma - 1)/\gamma} - 1\}^{1/2} \dots (2)$

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

で求められる (γ は比熱比で酸素に対しては 1.40, a^* は音速状態で $P^*/P_0 = 0.5283$ に対応する値である)。

同様にして連続の式により, 流量については $m = \rho \cdot u \cdot A$ より,

$m = (P_0 \cdot A^* / \sqrt{R \cdot T_0}) \{ \sqrt{2\gamma/(\gamma - 1)} \cdot \{(P^*/P_0)^2/\gamma - (P^*/P_0)^{(\gamma + 1)/\gamma}\}^{1/2} \}$
 $= X(\gamma) \cdot P_0 \cdot A^* / \sqrt{R \cdot T_0} \dots\dots\dots (4)$

が求められる (T_0 : 貯気槽温度, A^* : スロート断面積, R : ガス定数)。酸素について (2), (3) 両式を 2~10 kg/cm² の貯気槽圧力で噴出させたときの条件を解けば Table 1 のごとくなる。

Table 1. Supersonic data calculated for oxygen flow at an ideal nozzle.

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

P_0	2	3	4	5	6	7	8	9	10
P/P_0	0.517	0.3446	0.2585	0.2067	0.1723	0.1477	0.1292	0.1149	0.1034
M	1.0186	1.3336	1.5361	1.6864	1.8064	1.9066	1.9927	2.0683	2.1357
$u(=m/sec)^*$	308.2	377.9	418.2	444.9	464.2	479.3	491.5	501.6	510.3
T_0/T	1.2075	1.3557	1.4919	1.5668	1.6526	1.7270	1.7942	1.8556	1.9122
$T(^{\circ}K)^*$	248.4	221.3	201.1	191.2	181.5	173.7	167.2	161.7	156.9

* $T_0=300^{\circ}K$.

また(4)式はこのままでは使いにくいので、酸素について変形すれば(5)式のごとくになり、吹錬圧力、ノズル・スロート径と酸素流量の純理論関係式が簡潔で現場的にも十分使用できるものになる。

$$V = \theta_T \times S^* \times P_0, \text{ただし } P/P_0 < 0.5283 \dots (5)$$

V : 酸素流量 Nm^3/min , θ_T : $T=300^{\circ}K$ で約 1.06 なる係数, S^* : スロート断面積 (cm^2 で表わす)。

LD法の酸素流量については、現在の操業条件では相当温度=1.8, 相当圧力=0.18 で圧縮率, フュガシティ係数はいずれもほとんど 1.00 に近く理想ガスの状態に近い。また実在ノズルについても、ノズル設計と製作を十分注意深くおこなえば、噴出係数, ノズル効率ともほとんど問題なしとすることができる。このため酸素の流量係数はほとんど 1.00 に近い。ただし吹錬圧力の測定場所からノズルにいたるまでの配管内の圧力低下には十分留意することが必要で、これは設備上できるだけ少にすることが望ましい。

2.2 ノズルの断面積関係

(1) 式に前記条件を適応して変形すればノズルにおける断面積関係はつきのごとく求められる。

$$\frac{A}{A^*} = \frac{1}{M} \left[\frac{2}{\gamma+1} \right]^{(\gamma+1)/(\gamma-1)} \dots (6)$$

上式について若干の数式計算をおこない、マッハ数を P/P_0 におきかえれば、

$$\frac{A^*}{A} = \frac{1 - \left(\frac{P}{P_0}\right)^{(\gamma-1)/\gamma}}{\left(\frac{\gamma-1}{2}\right)^{(1/2)} \cdot \left(\frac{2}{\gamma+1}\right)^{(1/2) \cdot (\gamma+1)/(\gamma-1)}} \dots (7)$$

が求められる。(7)式から所定の貯気槽圧力 (P_0) とスロート断面積 (A^*) を与えた場合、ディフューザー出口の断面積 (A) が求められる。

LD法において吹錬圧力は重要な管理因子の1つであり、操業上変化させることがある。その際断面積関係、 A^*/A の値は当然吹錬圧力とともに異なる。たとえば吹錬圧力 $8 \text{ kg/cm}^2 \cdot G$ と $6 \text{ kg/cm}^2 \cdot G$ では A^*/A の値で約 17%の差がある。しかし酸素用ノズルはいうまでもなく一定の形状を有しており、簡単に変化させることはできない。このためもしある吹錬圧力を設定してその条件でノズルを設計すると、想定した圧力から大巾にはなれた吹錬圧力で操業する際には流れは等エントロピー的ではなく、shock wave (衝撃波)あるいは膨脹波を発生し、流れは乱れてしまう。すなわち想定圧力付近では流れはスムーズであるが、圧力が少し離れてくると乱れを生ずるようになる。

2.3 衝撃波の発生

流れの中に非平衡領域が生ずると、そこを通るとき変化を示さなくなる。このような非平衡の散逸領域についてその内部の状態を問題にしないとき、この領域の前後において流れの変数は“跳ぶ”ことになる。このような場合、この不連続は衝撃波と呼ばれる。

一定の形状をもつた理想的な Laval ノズルをいろいろな吹錬圧力で使用した場合の流れの状態を Fig. 1 に示す。これを実際の例にあてはめて見ると同図(2)と(3)は吹錬圧力で $9 \text{ kg/cm}^2 \cdot G$ と $6 \text{ kg/cm}^2 \cdot G$ 程度の関係となるようである。(第2報参照のこと)。

3. ノズル・スロートの決定

以上ノズルにおける酸素の流れに関する理論検討の概要を述べたが、もし吹錬に必要な酸素の量が知れば LD法の酸素ノズル・スロートはつきのごとく求められる。ここで酸素の量の決定が問題であり、これは吹錬条件によつていろいろ変化するが、ここではたとえば脱炭効率を求められたとして検討を進める。すなわち(1-5)式より、

$$\begin{aligned} \text{吹錬用酸素量 } Nm^3/min &= \frac{(\text{銑鉄}[C\%] \times \text{銑鉄比} - \text{終点}[C\%]) \times 9.333 (Nm^3/T)}{\text{吹錬用酸素の脱炭効率} \times \text{吹錬時間} (min/ch)} \\ &\times \text{全装入量} (T/ch) \\ &= \theta_T \cdot S_1^* \cdot P_0 (\text{シングル・ノズル}) \dots (8) \\ &= 3 \cdot \alpha \cdot \theta_T \cdot S_2^* \cdot P_0 (\text{マルチ・ノズル}) \dots (8') \end{aligned}$$

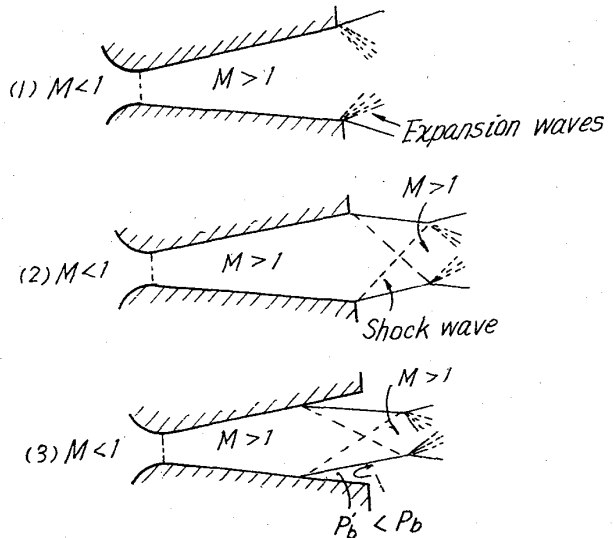


Fig. 1. Flow patterns in a real Laval nozzle for varying back pressure(Reference 3).

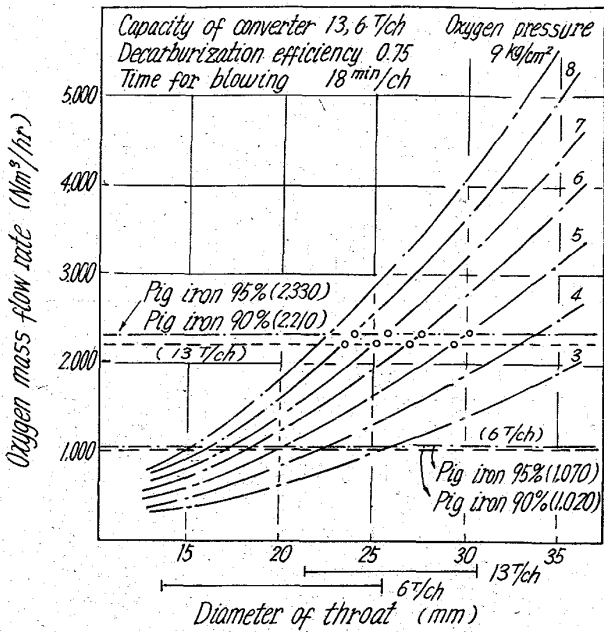


Fig. 2. Relation of oxygen mass flow rate, oxygen pressure and diameter of throat in LD-converter.

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

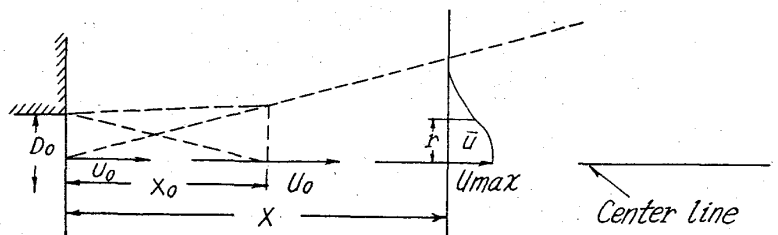


Fig. 1. Definition sketch for diffusion of jets.