

# 酸素ガス上吹きによる溶銑脱炭時の スプラッシュ発生挙動

© 1990 ISIJ  
 ///////////////  
 技術報告  
 ///////////////

北村 信也\*・大河平 和男\*<sup>2</sup>

## Behavior of Sprash Formation by Top Blown Oxygen Gas under Hot Metal Decarburization

Shin-ya KITAMURA and Kazuo OKOHIRA

### Synopsis :

To clarify the sprash formation behavior by top blown oxygen gas under hot metal decarburization, the experiments by small scale induction furnace and water model were carried out and the following points were found.

1) Between sprash height and cavity depth, when the oxygen gas was blown to hot metal, clear relationship was not found but when the Ar gas was blown to hot metal or the oxygen gas was blown to low carbon content molten steel, good relation was found.

2) When Ar gas was blown to hot metal, carbon content of the sprash particles were similar to that of hot metal bath and the size were large. On the contrary, when oxygen gas was blown to hot metal, very low carbon containing, small size sprash particles were collected.

3) For oxygen gas blowing condition, good relationship was found between sprash height and waste gas flow rate calculated by the degree of decarburization.

According to the above mentioned results and energy balance calculation, it can be considered that the energy generated by gas formation when decarburization reaction took place was the primary affecting factor for sprash formation rather than the kinetic energy of the top blown gas.

**Key words :** steelmaking ; oxygen top blow ; sprash ; dust ; decarburization ; water model.

## 1. 緒 言

LD 転炉法に代表される上吹き酸素ガスによる脱炭方法は、VOD, RH・OB, CAS・OB といった 2 次精錬工程や、一部の溶銑予備処理工程においても適用されつつあり、製鋼プロセス全体において、広く用いられている方法である。しかし、酸素ガス上吹き法には、ダストやスプラッシュの発生という固有の問題があり、歩留りの低下、耐火物への地金付着等の弊害を生じている。このうち、ダストの発生に関しては、基礎検討や大型転炉での調査が数多く報告されているが、スプラッシュの発生に関する研究は少なく、実際の現象を十分に説明できる状態にはないようである。例えば、梶井ら<sup>1)</sup>は水モデルによりスプラッシュ発生の臨界条件を、上吹きガスにより液体表面に生じるへこみ（キャビティー）の深さや表

面張力の関数として求め、これが、溶鉄に対する酸素ガス吹付け時にも適用できるとしている。また、島田ら<sup>2)</sup>、石川ら<sup>3)</sup>も水モデルの結果等より、スプラッシュ発生量は、主に上吹きガスの運動量やキャビティー深さにより決定され、同様な整理が転炉における脱炭時にも成り立つとしている。この他の研究結果<sup>4)~7)</sup>においても、スプラッシュの発生量を決定する主な要因は、上吹きガスの運動エネルギーであるとされている。しかし、いずれの場合においても、酸素ガスによる脱炭時の定量的なデータは少ない上に、脱炭速度や脱炭量を大きく変化させた実験は行われてなく、また、実際の操業においては、キャビティー深さ等から推定される高さ以上にスプラッシュが飛散する現象も認められている。

そこで、本研究では、溶銑脱炭時のスプラッシュ発生挙動に及ぼす酸素ガス吹付け条件の影響を明らかにする

昭和 63 年 11 月・平成元年 4 月本会講演大会にて発表 平成元年 4 月 27 日受付 (Received Apr. 27, 1989)

\* 新日本製鉄(株)八幡技術研究部 (Yawata R & D Lab., Nippon Steel Corp., 1-1-1 Edamitsu Yahata-higashi-ku Kitakyushu 805)

\*<sup>2</sup> 新日本製鉄(株)八幡技術研究部 Dr. Ing. (Yawata R & D Lab., Nippon Steel Corp.)

ために、種々の条件下で溶銑を用いた実験と水モデル実験を行い、その結果に基づき、スプラッシュの発生に関して、上吹きガスの運動エネルギーと脱炭反応によるガス発生エネルギーとの二つの観点から検討を加えた。

## 2. 実験方法

### 2.1 溶銑脱炭実験方法

溶銑脱炭時のスプラッシュ発生挙動の調査方法の概要を Fig. 1 に示すが、60~70 kg の炭素飽和溶銑を溶解した高周波炉に、上吹きランスより酸素ガス、もしくは Ar ガスを吹き付け、スプラッシュを発生させた。スプラッシュ粒は、炉の上部に設置された樋に回収され、実験前後の樋の重量変化で発生量を測定した。ここで高周波炉の炉上はスプラッシュ回収樋の設置位置を除いて、不定形耐火物製のスプラッシュカバーで囲み、実質上、炉高を高くする工夫をした。上吹きランスは水冷式のラバールノズルとステンレスパイプの周囲にアルミナのキャストを塗布し保護した構造のストレートノズルを用いたが、両者による有意差は認められなかった。ランスの中心線から回収樋先端までの距離 ( $x$ ) は 130 mm を標準としたが、一部の実験では、65~265 mm まで変化させた。実験は、大気圧下で、1823 K から 1923 K の温度範囲で行い、炉底より 0.1 NI/s の Ar ガスを吹き込み、浴を攪拌した。また、浴の組成は、通常は炭素飽和溶銑としたが、炭素濃度の影響を調べるために [C] が約 0.3% の溶鋼を用いた場合と、表面張力の影響を調べるために [S] を約 1% まで増加させた溶銑を用いた場合の実験も行った。実験条件を後記の水モデル実験時の条件と対比して Table 1 に示す。

さらに、一部の実験においてはダストの発生挙動を調査するため、浴表面から約 250 mm 上方の炉内に挿入した鉄製のパイプより発生ガスを吸引し、配管の途中に設けたろ紙にダストを回収し、吸引ガス量当たりのダスト重量を測定した。

### 2.2 水モデル実験方法

水モデル実験の概要を Fig. 2 に示す。スプラッシュ発生量の測定は、上吹きランスより空気を吹き付けることで発生させた水滴を回収するための、樋を設置したアクリル製の管を水槽に浸漬し、樋の中にあらかじめ敷いていたスポンジの実験前後の重量を秤量することにより行った。また、キャビティーの深さは、目視観察により測定した。実験はすべて大気圧、常温で行い、槽底より空気を約 0.17 NI/s 吹き込み、浴を攪拌した。

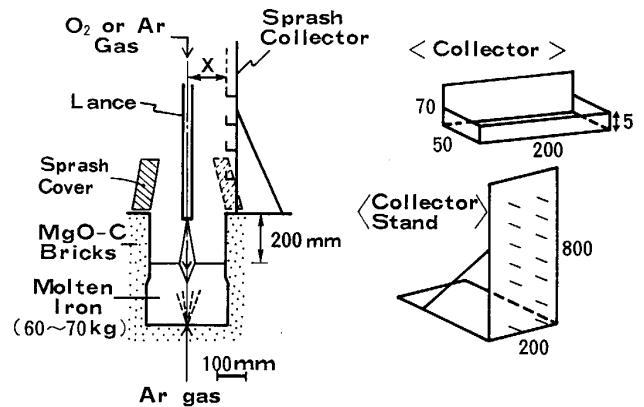


Fig. 1. Experimental apparatus of hot model.

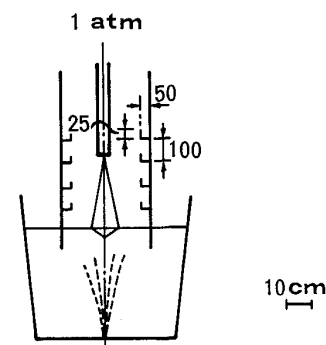


Fig. 2. Experimental apparatus of water model.

Table 1. Experimental conditions.

		Decarburization experiment	Water model
Top blown gas		O <sub>2</sub> , Ar	Air
Nozzle diameter		4 mm, 10 mm	1.75~7.86 mm
Gas flow rate		150~600 NI/min	90~385 NI/min
Lance gap		75~350 mm	75~400 mm
Bath composition	[C]	<0.3%, 4~5%	—
	[S]	<0.03%, 0.8~1.2%	—
Distance between lance center and splash collector		65~265 mm	175 mm
Diameter of furnace		275 mm	600 mm

## 3. 実験結果

### 3.1 溶銑脱炭実験結果

実験結果の例を Fig. 3 に示す。ここで、縦軸は、各回収樋で測定された重量がその樋と直上の樋との間の面に付着したスプラッシュ量に対応すると考え、単位時間当たりに、壁面の単位面積当たりに回収されたスプラッ

シュ粒の重量として表した値を対数表示したものであり、横軸は浴面から各極までの高さであるが、良い直線関係が認められる。このような結果からスプラッシュ発生挙動を整理する方法として、スプラッシュの堆積速度

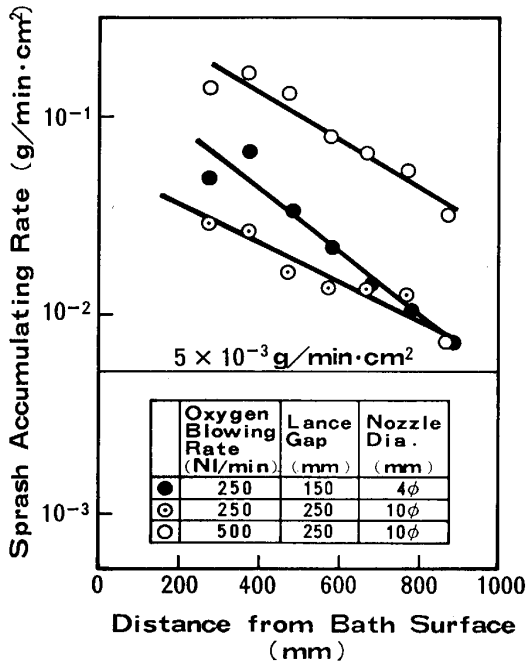


Fig. 3. Typical results of experiment by molten iron.

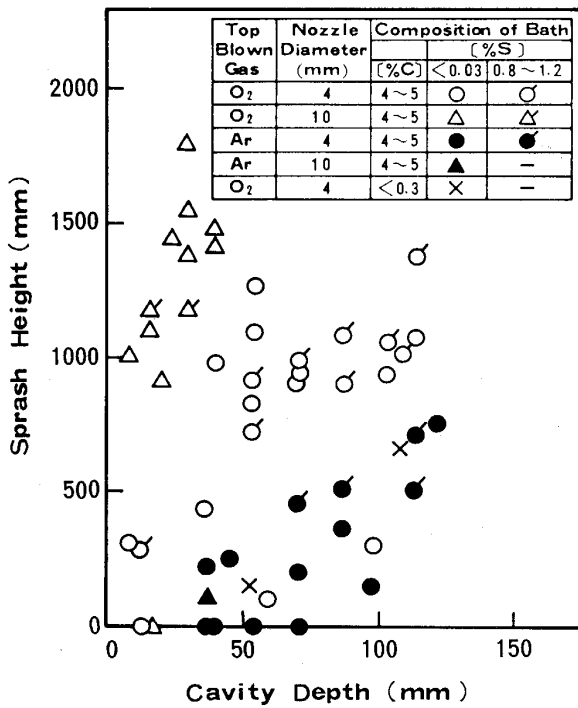


Fig. 4. Relation between cavity depth and sprash height under various top gas blowing conditions.

がある基準値となる位置の浴面からの高さ（スプラッシュ高さ： $H$ ）と、Fig. 3における直線の勾配（ $S$ ）との二つを考えた。ここで、スプラッシュ高さを定義するための基準値としては、実験条件を大幅に変化させた場合にも、大きな外挿をせずにスプラッシュ高さを規定できる量である  $5 \times 10^{-3} \text{ g}/(\text{cm}^2 \cdot \text{min})$  という値を採用した。なお、Fig. 3の結果を高さ方向に積分して求めた全スプラッシュ発生速度（ $W$ ）は、 $H$ と良い対応関係があった。

Fig. 4は瀬川の式<sup>8)</sup>により求めたキャビティー深さとスプラッシュ高さ（ $H$ ）との関係を示したものであるが、以下のことがわかる。

- 1) 溶銑に対して上吹きガスに酸素を用いた場合、同一のノズル径のランスであってもキャビティー深さとの間には明瞭な相関はなく、ノズル径を変化させた場合も含めると、まったく相関は認められない。
- 2) [C]が低い溶鋼を用いた場合には Ar 上吹き時と同程度のスプラッシュ高さであるのに対して、溶銑を用いた場合は非常に大きい値を示す。
- 3) 上吹きガスが Ar の場合には良い相関が認められ

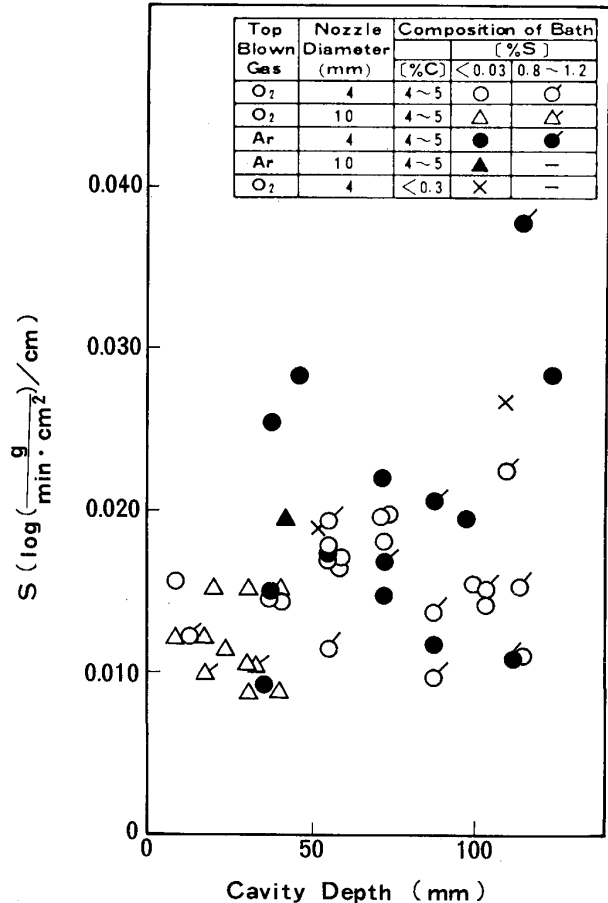


Fig. 5. Relation between cavity depth and S.

る。

4) [S]の影響は, Arの場合, 酸素の場合のいずれにおいても明確には認められない。

一方, Fig. 5はキャビティー深さと勾配(S)との関係を示したものであるが, キャビティーが深くなるにつれて, やや勾配が大きくなるようであるが明瞭ではない。回収されたスプラッシュ粒子の外観と分析結果, 及び粒度分布の測定結果を Photo. 1, Table 2, 及び Fig. 6に示すが, これより, 次の点がわかる。

1) Ar上吹きの場合には, 浴の[C]に近い組成で数mm程度のサイズの粒子が発生している。

2) 酸素を上吹きし, かつ, キャビティー深さが深い場合には, 大きな粒子が減少し, 数100 $\mu$ m程度のサイ

ズの微細な粒子の割合が増大する。また, 大きなサイズのものは, 浴の[C]に近い組成であるが, 微細なものは, 1.0%程度まで低下している。

3) キャビティー深さが浅い状態で酸素を上吹きした場合には, 浴の[C]よりも非常に低く, 0.1%程度の数100 $\mu$ m程度のサイズの粒子が発生し, 大きなサイズのものは認められなくなる。

このことより, 酸素上吹き時には, 上吹きガスの運動エネルギーによる発生に比べて, 脱炭反応によるスプラッシュの発生が非常に大きな影響を持つことが考えられる。Fig. 7は, 脱炭量より計算したCOガスの発生速度とスプラッシュ高さとの関係を見たものであるが, Fig. 4に比べてよい相関が得られたが, 同一のガス発生

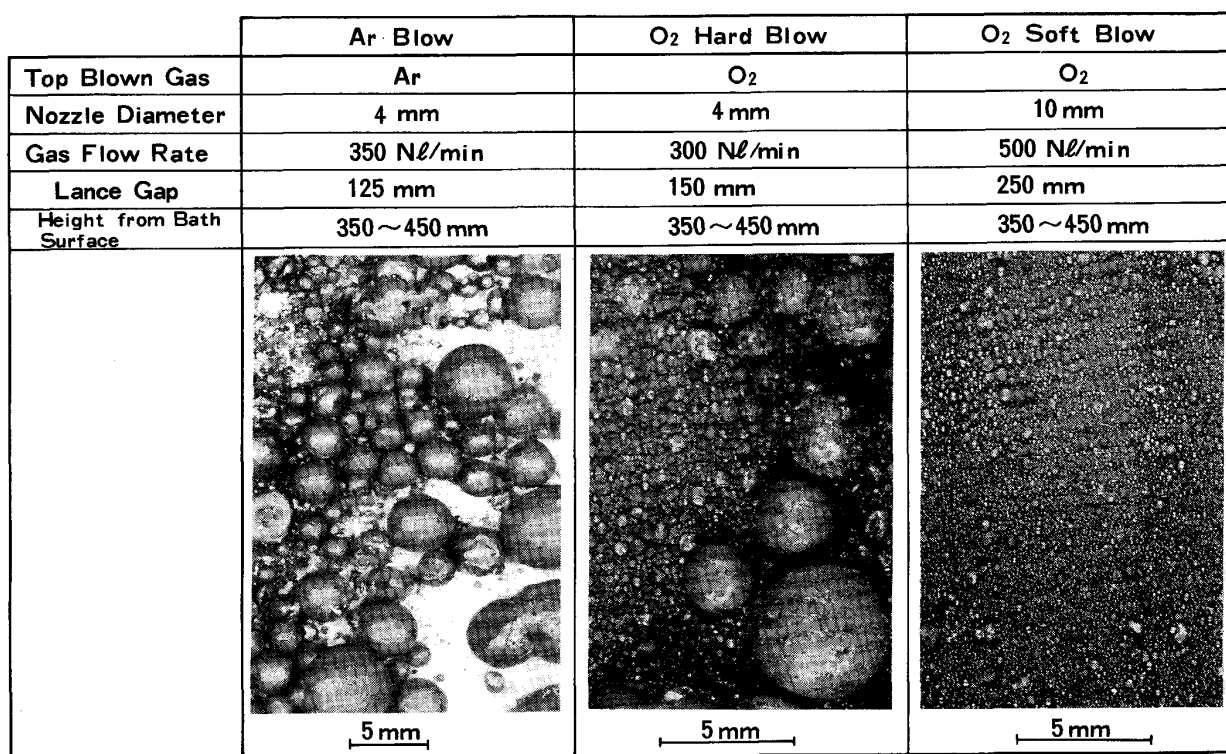


Photo. 1. Shape of splash particles under various top blowing conditions.

Table 2. [C] content of splash particles under various top blowing conditions.

Top blown condition					Splash characteristics			
Top blown gas	Nozzle diameter (mm)	Gas flow rate (Nℓ/min)	Lance gap (mm)	Cavity depth (mm)	Height from bath surface (mm)	[C] content of bath (%)	Size of particles ( $\mu$ m)	[C] content of particles (%)
Ar	4	350	125	114	350~450	3.48	<500	2.8
							500~2000	3.4
							>2000	3.5
O <sub>2</sub>	4	300	150	87	350~450	4.73~4.08	<500	0.95
							500~5000	4.2
O <sub>2</sub>	4	250	200	54.5	350~450	4.6~3.8	<500	0.065
O <sub>2</sub>	10	500	250	40	350~450	5.0~4.5	<500	0.092

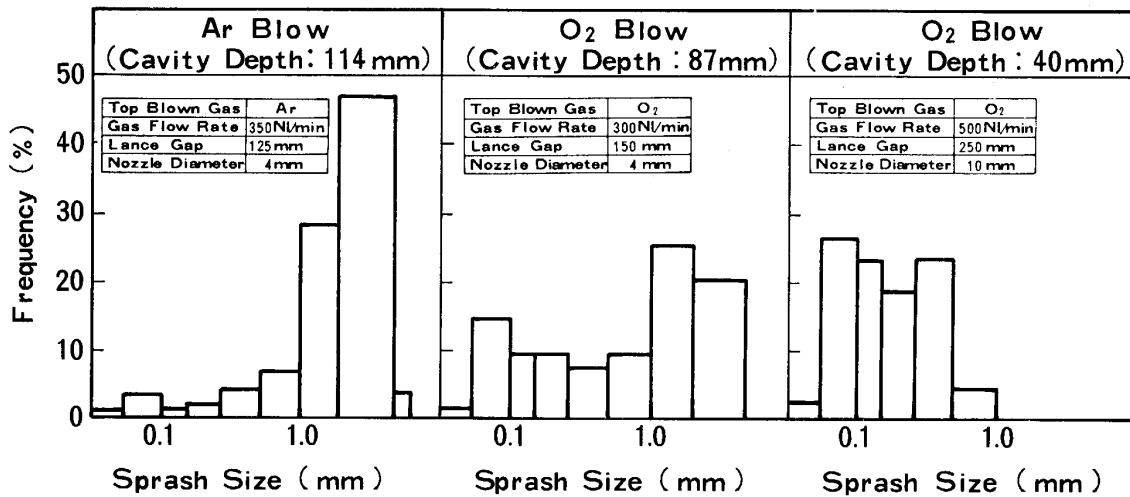


Fig. 6. Size distribution of splash particles under various top blowing conditions.

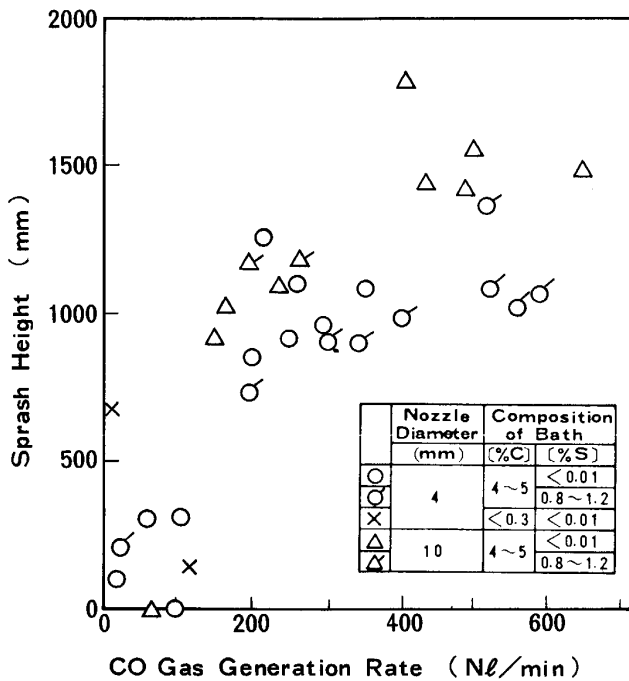


Fig. 7. Relation between waste gas flow rate and splash height.

量では大きなノズル径を用いた場合の方が、スプラッシュ高さは高いようである。Fig. 8 は、回収樋の位置の影響を見るため、Fig. 7 の横軸をランスの中心線から回収樋先端までの距離(x)で割って表示したものであるが、良い対応が認められ、本実験結果の実機へのスケールアップに関する指標となりうると考えられる。また、Fig. 9 には、同程度のガス発生速度の場合のダスト発生量とキャビティー深さの関係を示してあるが、キャビティーが深くなるにつれてダストが減少していることが認められる。

### 3.2 水モデル実験結果

水モデルの実験結果の例を、Fig. 3 と同一の整理方法で表したところ、良い直線関係が認められたため、溶銑脱炭実験時と同様に、スプラッシュ高さと、直線の勾配とを求めた。ここで、スプラッシュ高さの基準は、溶銑脱炭試験と同様の理由より  $5 \times 10^{-3} \text{ g}/(\text{cm}^2 \cdot \text{min})$  という値を採用した。さらに、溶銑脱炭時と同様に、 $W$  は  $H$  と良い対応関係にあった。

Fig. 10 は測定されたキャビティー深さとスプラッシュ高さ ( $H$ )、および勾配 ( $S$ ) との関係を示したものであるが、いずれも非常によい相関が認められる。しかし、溶銑脱炭時にはキャビティーが深くなるにつれて、 $S$  はやや増大したのに対し、水モデルでは逆の傾向を示している。

## 4. 考 察

本実験における水モデルの結果や溶銑に対して Ar を上吹きした場合の実験結果は、スプラッシュの発生挙動は主に上吹きガスの運動エネルギーにより支配されるとする、従来、報告されている結果と一致している。しかし、溶銑脱炭時には Fig. 4 に示したように、キャビティー深さとスプラッシュ高さとの間には相関が認められず、上吹きガスの運動エネルギーに支配されているとは考えにくい。また、この溶銑脱炭試験の条件を、梶井ら<sup>1)</sup>が報告しているスプラッシュ発生臨界条件式に当てはめると、Fig. 11 に示すように、 $[S]$  を増加させかつランスギャップを極端に低下させた場合の数例を除いてはスプラッシュは発生しない条件となり、観察結果と対応しない。さらに、Fig. 7 のように、溶銑脱炭時のスプラッシュ発生高さと、脱炭による CO ガスの発生速

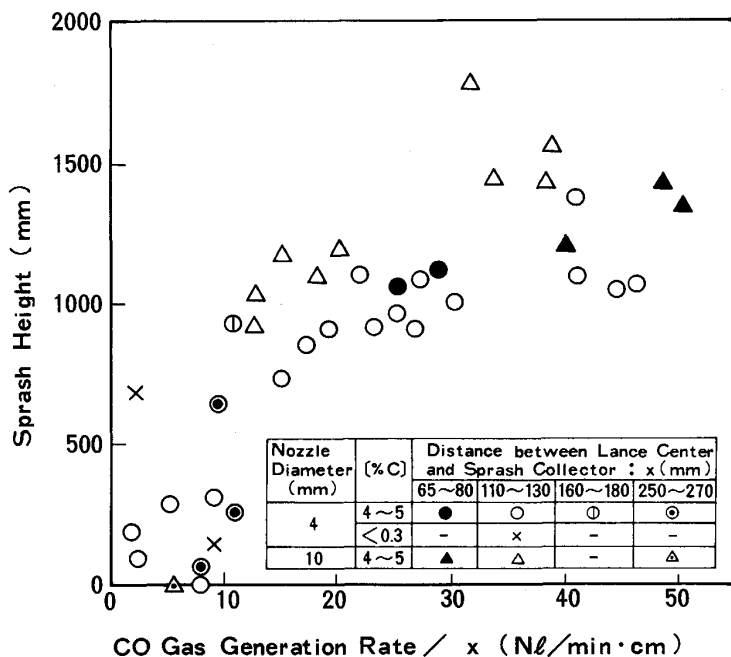


Fig. 8. Influence of distance between lance center and sprash collector on sprash height.

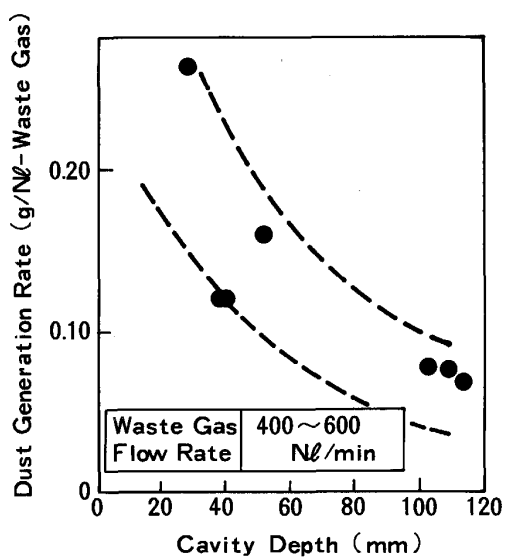


Fig. 9. Relation between cavity depth and dust generation rate under similar waste gas flow rate.

度との間に良い対応があることや、 $[C]$ が低い溶鋼を用いた場合にはスプラッシュが発生しにくいこと、及び酸素上吹き時にはAr上吹きの場合に比べて $[C]$ が低く微細なサイズの粒子が発生していることを考えると、本実験条件において、溶銑脱炭時のスプラッシュの発生は、主に脱炭時のガス発生に伴い生じるエネルギーにより支配されると言えると思われる。

そこで、簡単なエネルギーバランスに基づいた解析を試みた。瀬川ら<sup>8)</sup>は、上吹きガスの運動エネルギー( $E_T$ )と浴面に生成されるキャビティの静圧のエネルギー

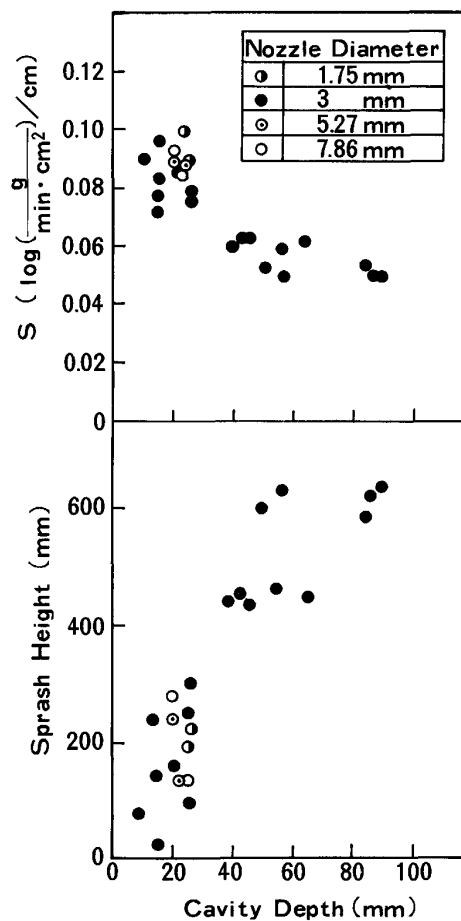


Fig. 10. Relation between sprash height, S and cavity depth by water model.

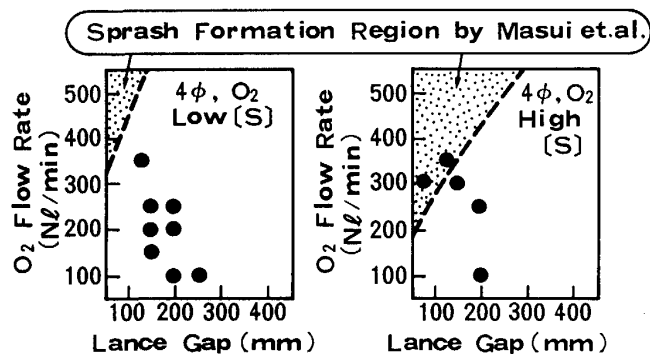


Fig. 11. Comparison between experimental conditions and sprash formation region by MASUI *et al.*

( $E_{CV}$ ) が釣り合うとして、(1)、(2)式に基づき(3)式を導出した。

$$E_T = (\rho_G \cdot v_m^2) / (2 \cdot g) \quad \dots\dots\dots (1)$$

$$= L \cdot \rho_L / 1000 = E_{CV} \quad \dots\dots\dots (2)$$

$$v_m = 9.35 \cdot d \cdot v_0 / (L + h) \quad \dots\dots\dots (3)$$

$$d \cdot v_0 = \alpha \cdot (L + h) \cdot L^{1/2} \quad \dots\dots\dots (4)$$

$$\alpha = 0.015 \cdot (\rho_L / \rho_G)^{1/2} \quad \dots\dots\dots (5)$$

しかし、実際には、上吹きガスの運動エネルギーはキャビティの静圧のエネルギーの他、浴の攪拌とスプラッシュの生成とのエネルギーに消費されると思われる((4)式)。ここで、甲斐ら<sup>9)</sup>による上吹きガスの運動エネルギーと浴の攪拌に消費されるエネルギーの間には、比例関係が成り立つという結果((5)式)を用い、さらに、従来行われていた、水モデルのようなガス発生を伴う反応のない系での実験結果より、スプラッシュの生成に消費されるエネルギーはキャビティの静圧のエネルギーに比例する<sup>2)</sup>((6)式)と仮定すると、(3)式は(7)、(8)式のようになる。

$$E_T = E_{CV} + E_{SP} + E_{ST} \quad \dots\dots\dots (6)$$

$$E_{ST} = a \cdot E_T \quad \dots\dots\dots (7)$$

$$E_{SP} = b \cdot E_{CV} \quad \dots\dots\dots (8)$$

$$E_T = \{(1 + b) / (1 - a)\} \cdot E_{CV} \quad \dots\dots\dots (9)$$

$$d \cdot v_0 = \beta \cdot (L + h) \cdot L^{1/2} \quad \dots\dots\dots (10)$$

$$\beta = 0.015 \cdot (\rho_L / \rho_G)^{1/2} \cdot \{(1 + b) / (1 - a)\}^{1/2} \quad \dots\dots\dots (11)$$

ここで、比例定数、 $a$ 、 $b$ を含む項を $f$ とし((9)式)、小型炉により種々の液体に対して測定されたキャビティ深さと上吹き条件のデータ<sup>3)8)</sup>へのフィッティングにより、 $f$ の値を決定した。

$$f = \{(1 + b) / (1 - a)\}^{1/2} \quad \dots\dots\dots (12)$$

結果を Fig. 12 に示すが、これより、水のように比重の小さい液体での  $f$  は約 1.5 であるのに対して、溶鉄のように比重の大きい液体では 1.0 の近傍にばらつくことがわかる。これは、水の場合、甲斐ら<sup>9)</sup>の測定結果

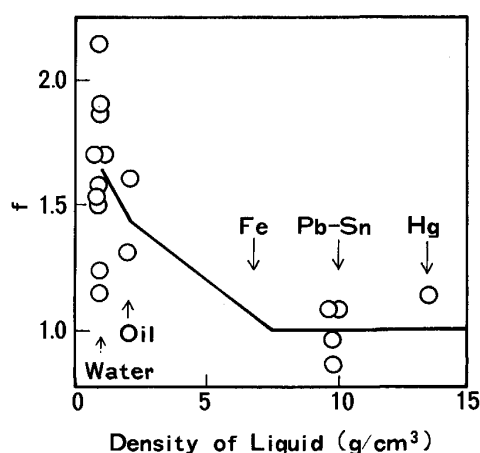


Fig. 12. Relation between density of liquid and  $f$  value.

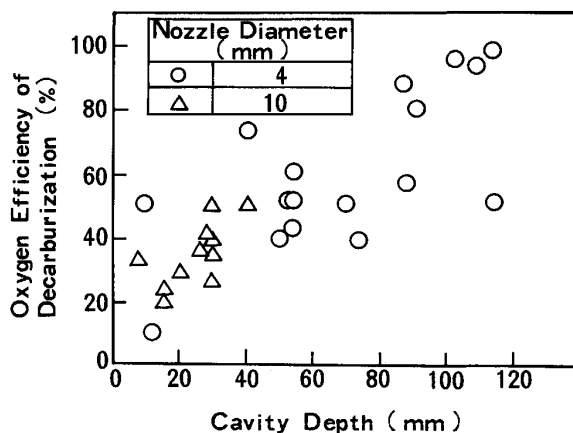


Fig. 13. Relation between cavity depth and oxygen efficiency of decarburization.

に基づき  $a$  を 0.1 とすれば  $b$  は 1 となり、上吹きガスの運動エネルギーのうち、キャビティの生成と同程度のエネルギーがスプラッシュの生成に消費されていることになるのに対し、溶鉄の場合の  $b$  は非常に小さな値となり、上吹きガスの運動エネルギーのみでは、激しいスプラッシュは生じにくいことになる。これは、上記の実験結果とも対応しており、本実験条件下での溶銑脱炭時に生じるスプラッシュは、上吹きガスの運動エネルギーよりも、主に脱炭時のガス発生に伴うエネルギーにより生成されることを示していると思われる。ここで、脱炭によるガス発生時のエネルギーとしては、CO ガスが浴表面直下で、かつ、ある過飽和度に達した時にはじめて爆発的に生成するとした場合の、いわゆる、1 次のバブルバーストによるものが考えられる。

ところで、Fig. 7 において、同一のガス発生速度の場合ノズル径の大きいランスを用いた場合の方がスプラッ

シュ高さが高くなっている。Fig. 13 に、キャビティー深さと脱炭酸素効率の関係を示すが、大きなノズル径のランスを用いた場合の方が、キャビティーが浅くなるのに伴い脱炭酸素効率が低下しており、雰囲気中の  $O_2$ 、 $CO_2$  濃度が高いことが予測される。従って、この場合には、いったん浴表面で、1次のバブルバーストや上吹きガスの運動エネルギーの一部によって生成した粒滴が、雰囲気酸化力が高いことによりさらに脱炭される、いわゆる2次バーストがおこる確率が大きく、浴の [C] の変化から計算されるガス発生量よりも多いガスが発生することと、より微細な粒子が生成されるためにスプラッシュ高さが高くなると考えられる。これは、ノズル径の大きいランスを用いた方が、脱炭が進行した微細な粒子が多いこと (Fig. 6, Table 2) や、高炭素濃度域では2次バースト起因によるものが主体であるとされている<sup>10)</sup>ダストの発生が多いこと (Fig. 9) からも定性的には裏付けられると考えられる。

## 5. 結 言

溶銑脱炭時のスプラッシュ発生挙動に及ぼす酸素ガス吹付け条件の影響を明らかにするために、小型炉による溶銑脱炭試験と水モデル実験とを行った。その結果、以下のことが明らかとなった。

1) 溶銑脱炭時に発生するスプラッシュ高さは、送酸条件を大幅に変化させた場合も含めると、キャビティー深さと間に相関は認められない。

2) 上吹きガスが Ar の場合や、[C] が低い溶鋼を用いた場合にはキャビティー深さと間に良い相関が認められる。

3) 発生したスプラッシュ粒子は、Ar 上吹きの場合には浴の [C] に近い組成で数 mm 程度のサイズであるのに対し、溶銑に対する酸素上吹きの場合には非常に低い [C] の数 100  $\mu\text{m}$  程度のサイズのものが主体である。

4) 脱炭量から計算される CO ガスの発生速度とスプラッシュ高さとの間には非常によい相関がある。

これらの実験結果とエネルギーバランスに基づく検討結果より、本実験条件下において溶銑脱炭時にスプラッシュを発生させる主な原因は、上吹きガスの運動エネルギーよりも、むしろ、脱炭時のガス発生に伴うエネルギーであることが明らかとなった。

## 記 号

- $d$ : ランスノズル直径 (mm)  
 $E_T$ : 上吹きガスの運動エネルギー  
 $E_{CV}$ : キャビティー生成による静圧のエネルギー  
 $E_{SP}$ : 上吹きガスによるスプラッシュ発生のエネルギー  
 $E_{ST}$ : 上吹きガスによる攪拌エネルギー  
 $h$ : 液面からのランス高さ (mm)  
 $L$ : キャビティー深さ (mm)  
 $v_0$ : ノズル先端での見掛けの噴射速度 (cm/s)  
 $v_m$ : 中心流速 (cm/s)  
 $x$ : ランス中心線からスプラッシュ回収樋先端までの距離 (cm)  
 $\rho_L$ : 液体密度 ( $\text{g}/\text{cm}^3$ )  
 $\rho_G$ : 気体密度 ( $\text{g}/\text{cm}^3$ )

## 文 献

- 1) 梶井 明, W. WENZEL, F. R. BLOCK: 鉄と鋼, **57** (1971), S404
- 2) 島田道彦, 石橋政衛, 森瀬兵治: 製鉄研究 (1966) 266, p. 8855
- 3) 石川英毅, 溝口庄三, 瀬川 清: 鉄と鋼, **58** (1972), p. 76
- 4) 中村康久, 斉藤 力, 鈴木孟文, 石川英毅, 山本里見, 馬場賢一: 鉄と鋼, **70** (1984), S1024
- 5) 森 正晃, 小林 功, 中島敏洋, 荻野定志, 吉田学史: 鉄と鋼, **70** (1984), S244
- 6) 田中 努, 岡根幸司: 鉄と鋼, **74** (1988), p. 1593
- 7) 中尾安幸, 大野唯義, 三村満俊, 武田安夫, 堀内弘雄, 大浦俊明: 鉄と鋼, **68** (1982), S14
- 8) 瀬川 清: 鉄冶金反応工学 (1977) [日刊工業新聞社]
- 9) 甲斐 幹, 大河平和男, 樋口満男, 平居正純: 鉄と鋼, **69** (1983), p. 228
- 10) 大野剛正, 尾野 均, 岡島正樹: 鉄と鋼, **72** (1986), S239