

© 1990 ISIJ

## 論 文

モデル実験による底吹き羽口におけるバック  
アタック現象の発生メカニズムの検討

青 木 健 郎\*

The Mechanism of the Back-attack Phenomenon on a Bottom  
Blowing Tuyere Investigated in Model Experiments

Takeo AOKI

## Synopsis :

The "back-attack" phenomenon was suspected to be an important factor in tuyere refractory erosion, so the characteristics of submerged high speed gas jet were investigated in a water model, and the mechanism of the back-attack generation was clarified.

1) The submerged gas jet forms a cavity in the bath, but occasionally the cavity is constricted close to the tuyere, and collapses, so the jet blows back and attacks the surface of the tuyere. That is named "back-attack" phenomenon. This constriction is thought to be caused by the suction, because the static pressure distribution shows large negative value there. Therefore not only the surrounding gas, but also the liquid is drawn into the negative depression of static pressure.

2) The velocity of the jet blown in water at the pressure 3.84 bar through the straight type tuyere reached sonic velocity at the exit of the tuyere and increased suddenly to super sonic value after exceeding the tuyere. Mach number distribution showed large up-and-down change and formed supersonic core in  $Z/D$  from 0 to 7, and the super sonic region continued to  $Z/D$  of 12.8 where  $Z$  is distance from the tip of the tuyere along the tuyere centerline and  $D$  is inner diameter of the tuyere. The value of Mach number of the gas jet in water showed good agreement with that in air before the exit of the tuyere, but decayed more rapidly than the air jet after leaving the tuyere, because the gas jet in water was pushed in the cavity and cavity collapsed intermittently.

**Key words :** back-attack phenomenon; tuyere; refractory erosion; bottom blowing; steelmaking; submerged gas jet; water model; Mach number; static pressure; total pressure.

## 1. 緒 言

従来 LD 転炉の上吹き酸素ジェットによる溶湯の攪拌力は非常に大きいものと考えられていたが、炉底の羽口から精錬用ガスを吹き込んで精錬を行う AOD や Q-BOP などの純酸素底吹き転炉が出現するにおよんで、上吹きジェットの攪拌力に疑問がもたれはじめた。それは底吹き転炉の合金鉄 (Cr や Mn) の歩留りが上吹き転炉に比べて非常に高いのは底吹きによる溶湯の強力な攪拌力に起因していることが認識されたからである。そこで底吹きの効果をも LD 転炉にも取り込もうという機運が高まり、住友金属工業(株)においても上吹き法と底吹き法の結合によりいっそう優れた特徴を有する複合吹錬法を開発した<sup>1)~7)</sup>。

しかし底吹き転炉においては宿命的な欠点として羽口

耐火物の溶損の問題が依然として取り残されており、これは程度の差こそあれ複合吹錬法でも同じである。そこで液中に吹き込まれたジェットの特性を水モデルにより検討した結果、羽口溶損の重要なファクターとして液中ジェットのバックアタック現象があることが判明した<sup>8)</sup>。

底吹き羽口から液体中に吹き込んだガスジェットの流体力学的挙動に関しては従来から多数の研究が行われており<sup>9)~24)</sup>、バックアタック現象についても「後退現象」あるいは「底たたき」として羽口耐火物の溶損との関連が述べられている<sup>25)~28)</sup>。しかしこの現象がどのようなメカニズムによって発生するかという点についてはまだ解明されていない。

そこで水モデルによりその原因究明を行い、バックアタック現象の発生メカニズムを明らかにしたのでその概

平成 2 年 3 月 6 日受付 (Received Mar. 6, 1990)

\* 住友金属工業(株)鉄鋼技術研究所 (Iron & Steel Research Laboratory, Sumitomo Metal Industries, Ltd., 16 Oaza-Sunayama Hasakimachi Kashima-gun Ibaraki pref. 314-02)

要を報告する。

2. 液中ジェットの特性

液体中への高速ガスジェットの吹込みについての基礎的な事柄について不明な点が多いのでその性質を調べるため水モデル実験を行った。

ここで行った実験は実際の底吹き羽口の操業条件にあわせて、小沢らのいうジェティング<sup>16)</sup>の条件下で行った。吹込み条件はそれぞれの図中に示している。

2.1 実験装置

液中ジェット測定装置を Fig. 1 に示す。1 m の深さ

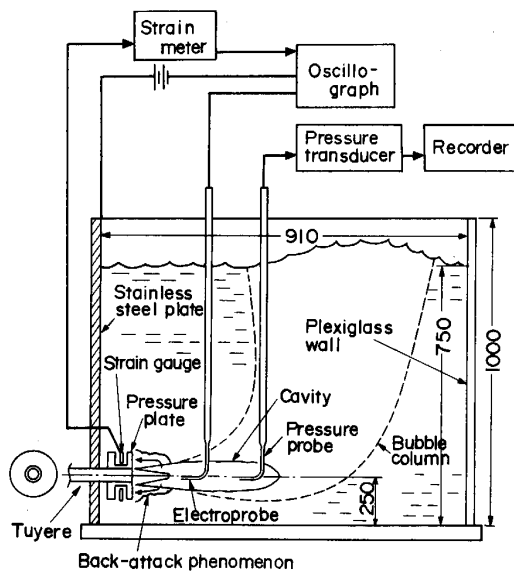


Fig. 1. Schematic diagram of the apparatus for measurement of water-bath submerged gas jet.

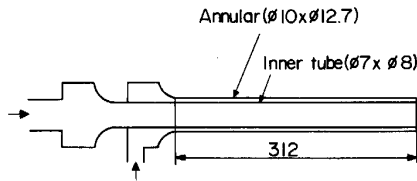


Fig. 2. Schematic diagram of tuylene.

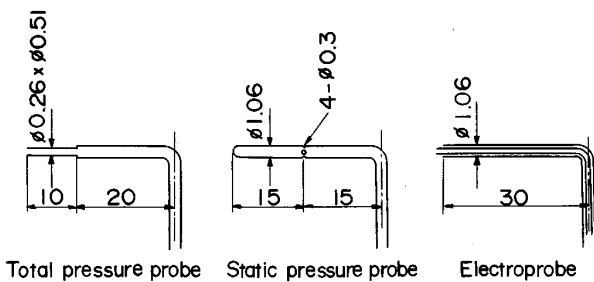


Fig. 3. Measuring probes used in the water model.

をもつ透明アクリル製の水槽の側壁底部に羽口を取り付け圧縮空気を吹き込んだ。Fig. 2 に羽口の形状寸法を示す。Fig. 3 に示す小型の圧力探子により液中ジェットの圧力分布を測定し、電極探子によりキャビティー内部の気体と液体の比率を調べた。

また圧力分布の測定結果をもとに(1), (2)式によってマッハ数分布を計算した<sup>29)</sup>。

亜音速の場合：

$$\frac{P_t}{P_s} = \left(1 + \frac{k-1}{2} M^2\right)^{k/(k-1)} \dots\dots\dots (1)$$

超音速の場合：(Rayleigh の超音速の Pitot 公式)

$$\frac{P_t}{P_s} = \frac{\left(\frac{k-1}{2} M^2\right)^{k/(k-1)}}{\left(\frac{2k}{k+1} M^2 - \frac{k-1}{k+1}\right)^{1/(k-1)}} \dots\dots\dots (2)$$

2.2 気液分布

Fig. 4 に 3 極式電極探子の構造を示す。外径 1 mm の細いステンレス鋼のパイプに 2 本のエナメル銅線が挿入されている。エナメル線は先端のみを露出させマイナス極とする。ステンレスパイプはエポキシ樹脂で絶縁被覆し、先端のみを露出してプラス極とする。また水槽の側面板の一つをステンレス鋼板で作りこれをプラス極と

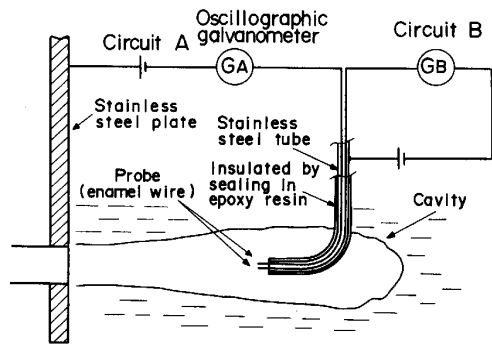


Fig. 4. Three-pole electroprobe.

Table 1. The relationship between combined conduction of A and B circuits and state of jet cavity.

State of jet cavity	Circuit A	Circuit B
Cavity collapse	○	○
Droplet	×	○

○ Conductive    × Nonconductive

し、図のように A, B 二つの電気回路を構成する。この二つの回路の通電の組合せとキャビティの状態の関係は Table 1 のようになる。

すなわち A, B 両回路が通電のときはキャビティは破断状態（少なくともつぶれた状態）であり、B 回路のみ通電のときはキャビティの外部とつながらない液の破片を検知したものと考えられる。

Fig. 5 はジェットを中心軸（Z 軸）にそってこの 3 極式電極探子で気液分布を測定した結果である。気体比率は電磁オシログラフの測定チャートから求めたもので、佐野、森らのガスホールドアップ<sup>13)</sup>とおなじ内容

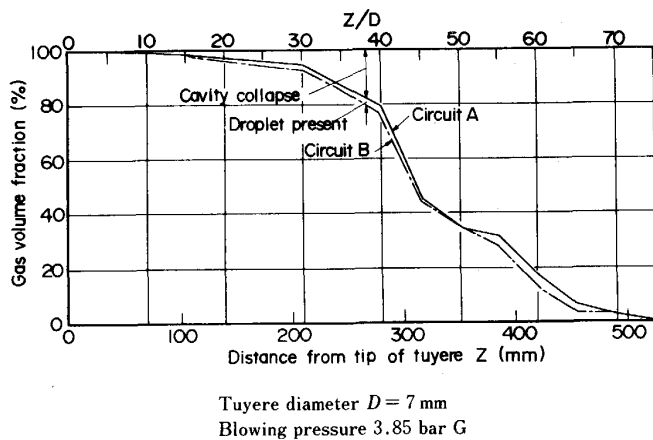


Fig. 5. Distribution of gas volume fraction on jet's axis measured by three-pole probe.

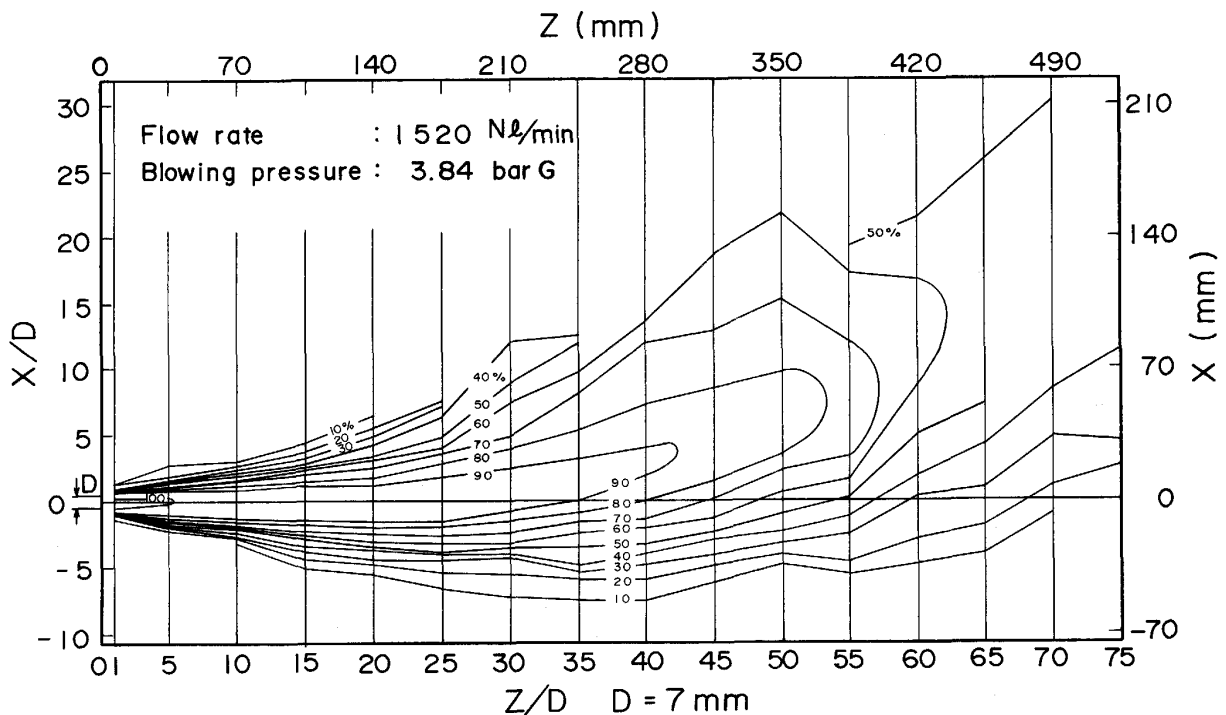


Fig. 6. Distribution of gas volume fraction in vertical plane including the jet's axis.

のものである。

$$\text{気体比率(\%)} = (\text{測定時間中の A (または B) 回路の非通電時間の和} \times 100) \div \text{測定時間} \dots\dots\dots (3)$$

A 回路と B 回路による測定結果の差は少なく、ほとんどキャビティの破断によってこの分布ができていことがわかる。

Fig. 6 は A 回路のみによって測定した気体比率の分布である。液中ジェットの中心部には気体比率 90 % 以上のほとんどガスから成るキャビティがある。その周囲はガスの比率が暫時下がり、液体と気体が混在しておりこの部分は気泡の層を形成している。ガス、メタルの反応の場所として冶金反応上重要な場所である。キャビティの先端部は浮力の影響で幾分上を向いている。

2.3 圧力分布およびマッハ数分布

Fig. 7 に全圧および静圧分布を示す。これは Z 軸にそった分布である。同図中には気液分布も示している。また Fig. 8 はこの圧力分布からマッハ数分布を計算した結果である。吹込み条件は Fig. 8 右上に示している。

圧力分布については Fig. 7 から次のことがわかる。羽口内径の 7 倍くらいの所までは全圧、静圧ともに大きな凹凸状の変化を示し、この部分は Fig. 8 と対応させるとわかるが超音速のコア部を形成している。これより以降は全圧は急速に減衰し、気液分布の傾斜部では全圧と静圧がほとんど等しい状態であり、ジェットの力と液の静圧がスタティックにバランスした不安定な領域

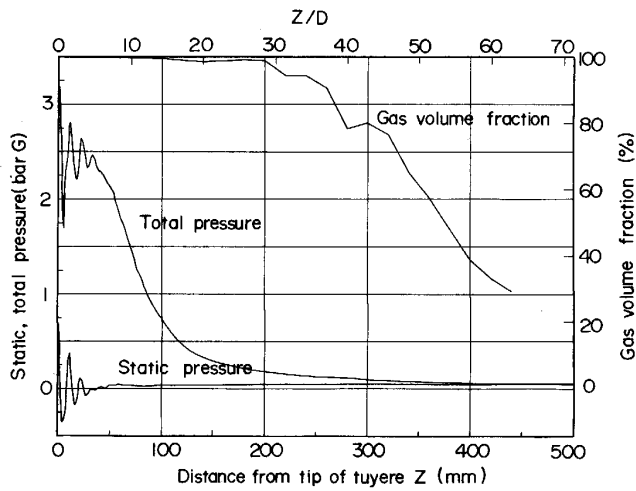


Fig. 7. Distribution of pressure and gas volume fraction along the jet's axis.

で、気泡の生成場所になっている。

マッハ数分布については Fig. 8 から次のことがわかる。この羽口の構造は Fig. 2 のようであり、いわゆるストレート形のノズルである。そのため流れは羽口出口で音速に達し、羽口を出てから音速を超えて超音速

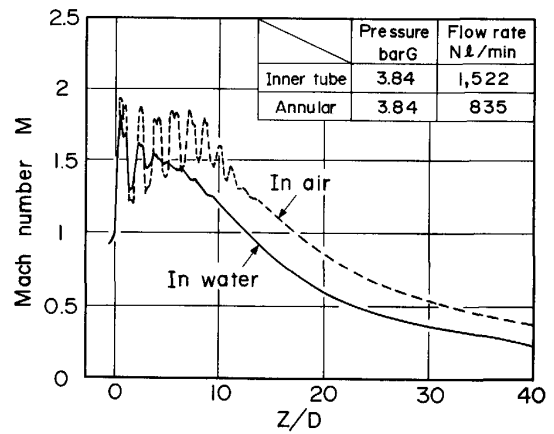


Fig. 8. Mach number distribution of air jet and submerged air jet in water.

ジェットとなり、 $Z/D=7$  くらいまでは凹凸の激しいジェットのコア部を形成している。また  $Z/D=0$  から 12.8 の範囲は超音速部になっている。Fig. 8 には水中の測定結果と共に同一吹込み条件下の大気中での測定結果も示す。羽口の出口では水中ジェットと大気中ジェットはほとんど一致しているが  $Z/D$  の増加に従って水中ジェットは大気中ジェットよりも速やかに減衰してい

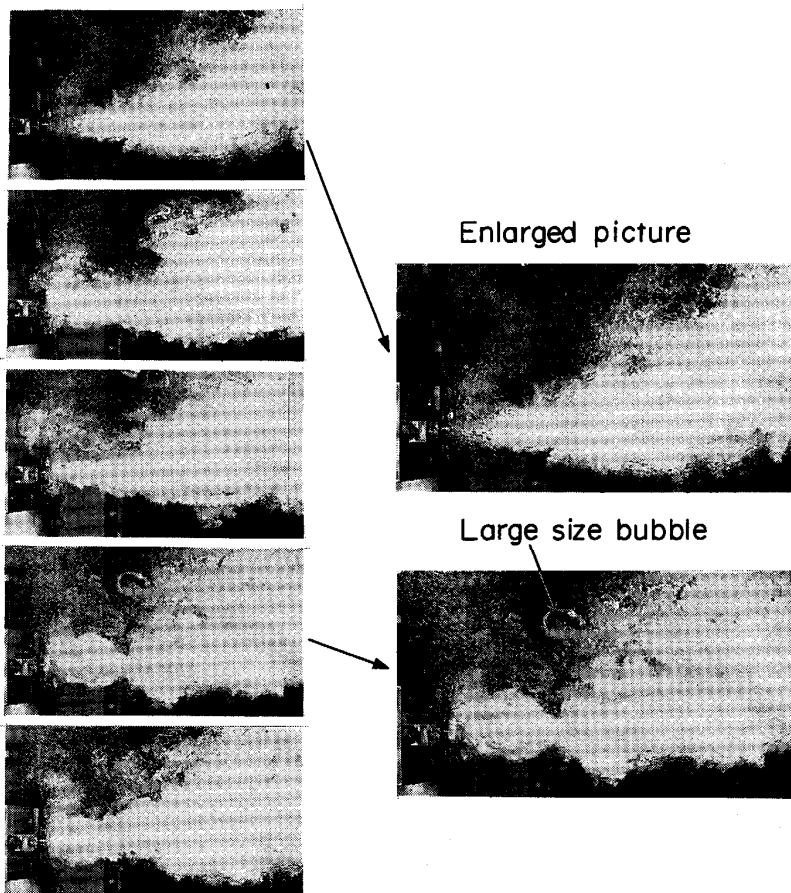


Photo. 1. Sequence photographs showing "back-attack" phenomenon.

る。これは水中ジェットの場合キャビティーの中に押し込められた状態になっており、かつこのキャビティーが間欠的につぶれるためと考えられる。

小沢らは羽口出口における静圧の測定結果から吹込みガスの線流速はオリフィス出口で音速に達し、液体中で超音速になると結論したが<sup>21)</sup>、ここでは更に羽口先端からジェット軸にそったマッハ数の分布と、同一吹込み条件の大気中ジェットのマッハ数分布との相関関係も明らかにした。

### 3. バックアタック現象のメカニズム

Photo. 1 は水中ジェットを 4 こま/s で撮影した連続写真である。ジェットが羽口前面に吹きもどされてキャビティーはくびれ、また大気泡の生成が見られる。このように液中に吹き込まれたジェットが羽口前面に吹きもどされる現象をバックアタック (Back-attack) 現象と呼ぶことにする。この現象は相当高い頻度で発生する。このようなジェットの吹きもどしと同時に羽口前面は衝撃的な力を受けることが判明した。

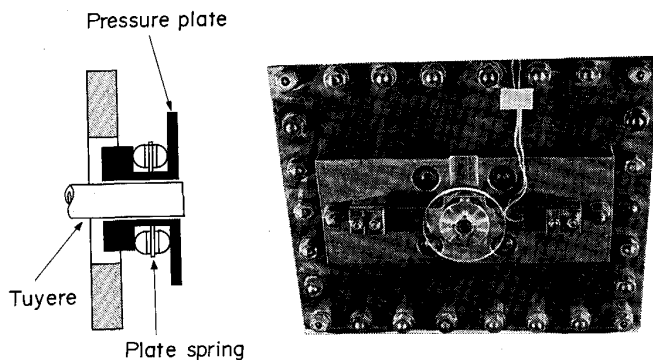


Photo. 2. An instrument for measuring the frequency and the strength of back-attack impact.

羽口耐火物が溶損される原因の一つとしてこのバックアタック現象があるのではないかと考えられる。

#### 3.1 実験装置

このバックアタック現象の解明を行うには、まずガス吹込みの各種の条件に対するバックアタック発生頻度とその力の大きさを測定する必要がある、Photo. 2 に示す測定器を羽口先端に取り付けた。

バックアタックによるジェットの吹きもどしの力を受圧板で受け、これを防水型ストレンゲージ (耐水圧 98 bar, 100 h 以上) を貼った板バネに伝えて測定する方法である。

#### 3.2 バックアタック現象の発生メカニズム

Fig. 9 にバックアタック測定結果の 1 例を示す。吹込み条件は Fig. 8 と同一である。

バックアタックは毎分 300~400 回の頻度で 98 N (10 kgf) 以上の力が断続して衝撃的に作用することがわかる。

チャートの上部に示しているのはキャビティー内部に電極探子を挿入して A 回路により測定した結果で、バックアタックの発生と同時にキャビティー内部に液が侵入していることがわかる。

Fig. 10 はこの現象を詳しく見たものである。Fig. 11 に測定方法を示すが、羽口の中心軸にそって多数の電極を設置し、バックアタックの発生と液の侵入伝播状況を見たものである。羽口径の 2 倍の位置において液が侵入し、これが下流に押し流されている。また液の侵入と同時にバックアタックが起こっている状況がよくわかる。

Fig. 12 はバックアタック現象の発生した瞬間の高速写真をトレースしたものである。羽口径の 2 倍くらいの位置にキャビティーのくびれが生じ、それと同時に

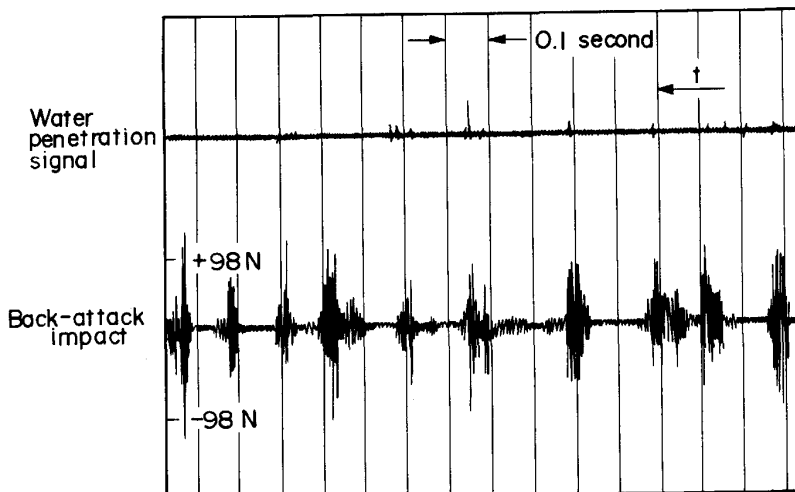


Fig. 9. Oscillograph chart showing "back-attack" force and water penetration.

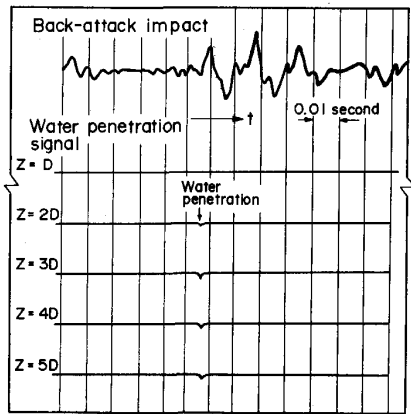


Fig. 10. Oscillograph chart showing timing of "back-attack" and water penetration.

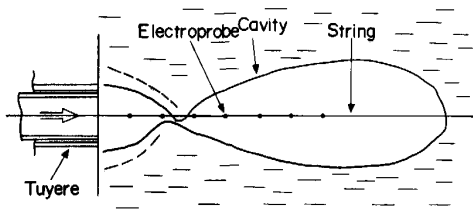


Fig. 11. Experimental technique.

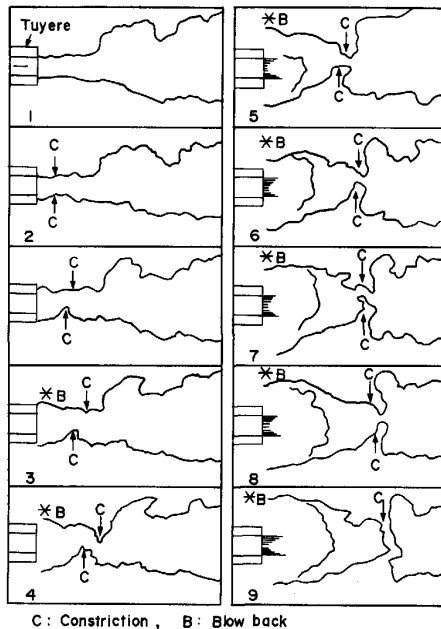


Fig. 12. Sequence of high-speed photographs taken at 2000 frame/second showing "back-attack" phenomenon (Traced).

ガスが羽口前面に吹きもどされる。くびれの位置はしだいに下流に押し流されていく様子がわかる。

以上の実験結果からバックアタック現象は Fig. 13 に

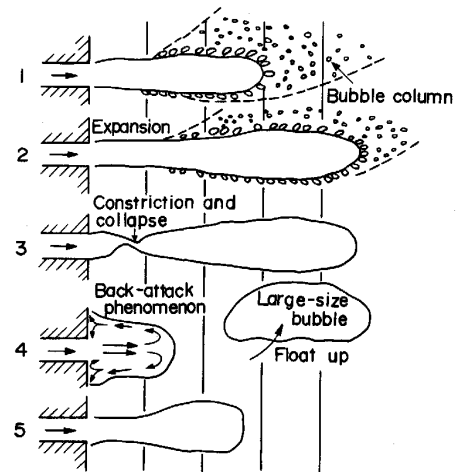


Fig. 13. Mechanism of "back-attack" phenomenon.

示したメカニズムで発生すると考えられる。

羽口からキャビティー内に流入したガスはキャビティー界面において気泡となり液中に分離していく(1)。この時羽口からキャビティーに流れ込む流量とキャビティー界面で気泡化するガスの量とがバランスせず気泡化する量が少ない場合キャビティーは膨張していく(2)。膨張しすぎるとある所で不安定になってキャビティーがくびれ破断する(3)。すると羽口からのジェットはその前面に突然液の壁ができて吹きもどされる(4)。これがサイクリックに繰り返されるのがバックアタック現象である。

### 3.3 キャビティーのくびれ・破断の発生メカニズム

バックアタック現象発生の引き金となるのはキャビティーのくびれとそれに続く破断現象である。そこでこのくびれ破断の発生メカニズムについて検討した。

キャビティーのこのくびれ破断現象が起こるのはジェット内部の静圧分布に原因していると考えられる。

Fig. 14 は Fig. 7 に示した中心軸上の静圧分布を羽口付近についてわかりやすいように拡大して示したものである。Z/D が負の範囲は羽口内部に静圧管を挿入して測定した。羽口断面積に対する静圧管の断面積比は 2% であり羽口内に静圧管を挿入した影響はほとんど認められなかった。減衰振動曲線と類似の変化をしており、下に示す 3 か所で極小値を示す。

Z/D	静圧 $P_s$ (bar G)
0.57	-0.357
2.29	-0.172
3.86	-0.080

Fig. 15 はジェットの中心軸と直角方向の静圧分布である。Z/D=2.43~2.71 の部分を示しているが、これ

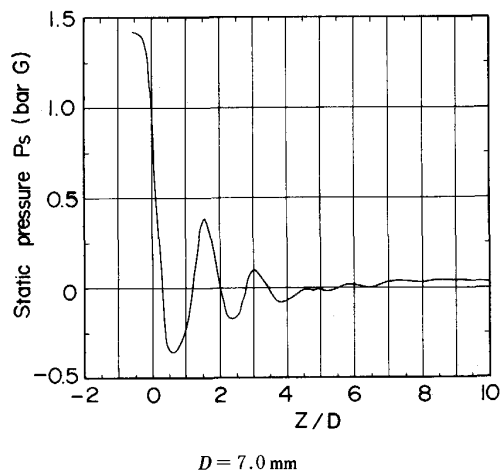


Fig. 14. Static pressure distribution on jet's axis.

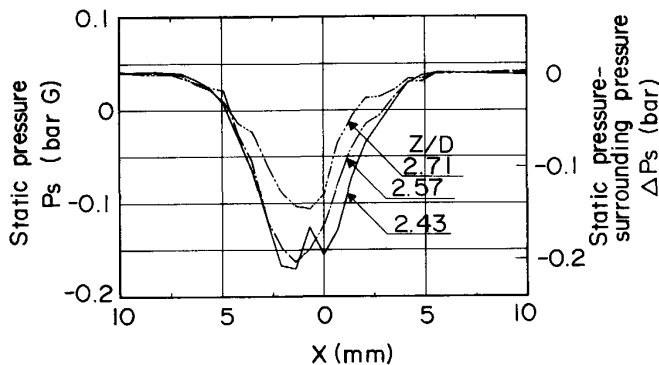


Fig. 15. Lateral static pressure distribution.

は Fig. 14 の 2 番目の極小部に対応している。中心部は大きな負圧を示し、ジェットの外周部は静水圧に等しい。そして外周部から中心軸に向かって大きな圧力勾配があることがわかる。

大気中にガスジェットを噴出させた場合も静圧分布は上に述べた状況と相似しており、ジェットのまわりの雰囲気ガスがこの静圧分布の負圧部に向かって流れ込み、いわゆる雰囲気ガスの巻き込み現象を起こす。

液中ジェットの場合は Fig. 12 の高速度写真を見ると静圧部の極小部に対応した位置でくびれの発端が生じ、これが発達しながら下流に押し流されていく状況がみられる。

液中ジェットにおいてはこの静圧分布の負圧部にまわりのガスのみならず液の部分までも吸い込まれるためにキャビティの破断が起こり、前節に述べたメカニズムでバックアタック現象が発生すると考えられる。

#### 4. 結 言

液体中に吹き込まれる高速ジェット(液中ジェット)

の特性を調べ、底吹羽口耐火物の溶損原因の一つと考えられるバックアタック現象の発生メカニズムを明らかにするため、水モデル実験を行い、以下の結果を得た。

1) 液中ジェットの圧力分布、マッハ数分布、気液分布を明らかにした。ストレート形羽口の中心軸上のマッハ数分布は羽口出口において音速に達し、羽口を出てから音速を超えて超音速ジェットとなり、 $Z/D=7$ までは凹凸の激しいジェットのコア部を形成している。また  $Z/D=0$  から 12.8 の範囲は超音速部になっている。羽口の出口では水中ジェットと大気中ジェットはほとんど一致しているが  $Z/D$  の増加に従って水中ジェットは大気中ジェットよりも速やかに減衰している。これは水中ジェットの場合キャビティの中に押し込められた状態になっており、かつこのキャビティが間欠的につぶれるためと考えられる。

2) 液中ジェットにはキャビティの破断に伴ってジェットが羽口に吹きもどされる現象—バックアタック現象—がある。これはジェットの静圧分布の負圧部の存在が原因しており、この静圧分布の負圧部にまわりのガスのみならず液の部分までも吸い込まれるためにキャビティの破断が起こり、バックアタック現象が発生すると考えられる。

#### 記 号

- $D$ : 羽口内径 (mm)
- $Z$ : 羽口先端からの羽口中心軸上の距離 (mm)
- $X$ : 鉛直方向の距離 (mm)
- $P_t$ : 全圧 (ピトー管で測定した) (bar)
- $P_s$ : 静圧 (bar)
- $M$ : マッハ数
- $k$ : 吹込みガスの比熱比

#### 文 献

- 1) 池田隆果, 多賀雅之, 青木健郎, 増田誠一: 鉄と鋼, **65** (1979), A141
- 2) 池田隆果, 多賀雅之, 増田誠一: 鉄と鋼, **65** (1979), S194
- 3) 多賀雅之, 増田誠一: 鉄と鋼, **65** (1979), S675
- 4) 平原弘章, 吉田克磨, 丸川雄浄, 山崎 勲, 姉崎正治, 広木伸好: 鉄と鋼, **65** (1979), S676
- 5) 平原弘章, 丸川雄浄, 山崎 勲, 姉崎正治, 戸崎泰之, 平田武行: 鉄と鋼, **65** (1979), S677
- 6) 岡村祥三, 中島英雅, 丸川雄浄, 姉崎正治: 鉄と鋼, **67** (1982), S192
- 7) 植田嗣治, 丸川雄浄, 姉崎正治: 鉄と鋼, **68** (1983), p. 24
- 8) 青木健郎, 増田誠一, 鳩野哲男, 多賀雅之: 鉄と鋼, **65** (1980), S822
- 9) J. K. BRIMACOMBE, E. S. STRATIGAKOS and P. TARASSOFF: Metall. Trans., **5** (1974), p. 763
- 10) T. A. ENGH and H. BERTHEUSSEN: Scand. J. Metall., **4** (1975), p. 241
- 11) G. N. ORYALL and J. K. BRIMACOMBE: Metall. Trans. B, **7** (1976), p. 391

- 12) A. E. WRAITH and M. E. CHALKLEY: *Advances in Extractive Metallurgy*, Institution of Mining and Metallurgy, London (1977), p. 27
- 13) 佐野正道, 森 一美: 鉄と鋼, **64** (1978), p. 1714
- 14) G. A. IRONS and R. I. L. GUTHRIE: *Metall. Trans. B*, **9** (1978), p. 101
- 15) E. O. HOEFELE and J. K. BRIMACOMBE: *Metall. Trans. B*, **10** (1979), p. 631
- 16) 小沢泰久, 森 一美, 佐野正道: 鉄と鋼, **67** (1981), p. 2655
- 17) 小沢泰久, 森 一美: 鉄と鋼, **68** (1982), p. 90
- 18) 小沢泰久, 森 一美: 鉄と鋼, **68** (1982), p. 98
- 19) M. J. MACNALLAN and T. B. KING: *Metall. Trans. B*, **13** (1982), p. 165
- 20) 小沢泰久, 鈴木克紀, 森 一美: 鉄と鋼, **69** (1983), p. 564
- 21) 小沢泰久, 森 一美: 鉄と鋼, **72** (1986), p. 426
- 22) 佐野正道, 牧野 浩, 小沢泰久, 森 一美: 鉄と鋼, **72** (1986), p. 1552
- 23) A. H. CASTILLEJOS and J. K. BRIMACOMBE: *Metall. Trans. B*, **18** (1987), p. 659
- 24) T. A. ENGH and M. NILMANI: *Metall. Trans. B*, **19** (1988), p. 83
- 25) 石橋政衛, 白石惟光, 山本里見, 島田道彦: 鉄と鋼, **61** (1975), S111
- 26) 島田道彦, 石橋政衛, 白石惟光, 森瀬兵治: 鉄と鋼, **61** (1975), S447
- 27) 坂口庄一, 石橋政衛, 吉井正孝, 山本里見, 梶岡博幸: 鉄と鋼, **63** (1977), S534
- 28) J. K. BRIMACOMBE, S. E. MEREDITH and R. G. H. LEE: *Metall. Trans. B*, **15** (1984), p. 243
- 29) H. W. LIEPMANN and A. ROSHKO: *Elements of Gasdynamics* (1960) [John Wiley & Sons]