

## 論文

© 1982 ISIJ

## 底吹き転炉内の鋼浴振動

加藤 嘉英\*・中西 恭二\*<sup>2</sup>・野崎 努\*<sup>3</sup>  
鈴木健一郎<sup>2</sup>・江見 俊彦<sup>3</sup>

## Wave Motion of Metal Bath in Bottom Blown Converter

Yoshiei KATO, Kyoji NAKANISHI, Tsutomu NOZAKI  
Kenichiro SUZUKI, and Toshihiko EMI

## Synopsis:

Water model experiment has been carried out to investigate motion of bath in bottom blown converter with tuyeres set in two rows.

Visual observation has indicated the occurrence of two types of wave motions (A- and B-type). A type of wave motion is similar to that generated in a U-shaped tube. B type resembles that two separated bubble regions interfere laterally and repeat collision and repulsion alternately.

The generation of wave motions is varied by gas flow rate, bath depth and tuyere configuration. On keeping gas flow rate at which either of the wave motion is generated, the criterion for the generation of wave motion has been characterized by  $H/D$  and  $L_2/L_1$ , where  $H$  is the bath depth,  $D$  is the bath depth,  $D$  is the diameter of the bottom,  $L_2$  is the spacing of the two rows of tuyeres, and  $L_1$  is the length of the row of tuyeres.

Period of the wave motion is calculated by means of simple models. The calculated results agree well with the observed ones for a variety of experimental conditions.

A type of wave motion carries larger energy of oscillation than that of B type at the same rate of energy input into the bath, indicating that B type of wave motion occurs in preference to A type version.

## 1. 緒 言

炉底羽口から大量の純酸素ガスを吹き込む底吹き転炉 (Q-BOP) は、鋼浴へのガスの供給形態の違いから、上吹き転炉 (LD) とは異なる鋼浴流動を誘起するであろう。Q-BOP と LD の冶金反応の相違、例えば Q-BOP における鉄歩留りの向上なども鋼浴の強い流動に起因することが明らかにされてきている<sup>1)~3)</sup>。

最近、インジェクション冶金が盛んになるにつれ、ガス吹き込みによるメタルの浴流動に関する基礎的な研究が活発になつてきた。佐野ら<sup>3)~6)</sup>は、熔融金属-ガス系についての一連の実験で上浮中のガスの挙動を調べ、近藤ら<sup>7)</sup>も、底吹きノズル中心軸上でのガスホールドアップが修正フルード数で整理できることを報告している。小沢ら<sup>8)~10)</sup>は、水銀中にガスを低流速から音速に到る広範囲の流量で吹き込み、ノズル近傍でのガスの挙動を詳細に観察している。ETIENNE<sup>11)</sup>は、水-空気系により底吹き転炉の羽口配列と液の噴出状態の関連を調べて

いる。また、筆者ら<sup>12)</sup>は、水モデル実験により、鋼浴、スラグ、スラグ-メタル間の混合を定量化し、Q-BOP と LD の違いを明らかにした。

このように、従来の報告は液中でのガスの挙動に注目した研究が多い。一方、筆者らは上述の水モデルにおける液流動の観察から、液全体が羽口設定条件などにより特定の振動挙動を示すという知見を得た。ガスによる浴の強撹拌によつて生じるこの振動現象は、吹錬操作のみならず炉体にも影響をおよぼすので、定量的な検討が必要である。

浴の振動に類似の現象としては、造船学の分野で吉岡ら<sup>13)~15)</sup>および CHESTER ら<sup>16)~17)</sup>が、水槽を水平揺動もしくは傾斜揺動させて生じる浅水波を理論解析し実験的に検証しているが、気-液系の振動に拡張するのは難しい。

そこで、筆者らはガス撹拌に起因する浴振動のパターンと要因の関係を実験的に求めるとともに、浴の振動周期を簡単なモデルで説明し、振動の開始および減衰時

昭和 55 年 10 月本会講演大会にて発表 昭和 56 年 9 月 7 日受付 (Received Sept. 7, 1981)

\* 川崎製鉄(株)技術研究所 (Research Laboratories Kawasaki Steel Corp., 1 Kawasaki-cho Chiba 260)

\*<sup>2</sup> 川崎製鉄(株)技術研究所水島研究部 工博 (Mizushima Research Dept., Research Laboratories Kawasaki Steel Corp.)

\*<sup>3</sup> 川崎製鉄(株)技術研究所 理博 (Research Laboratories, Kawasaki Steel Corp.)

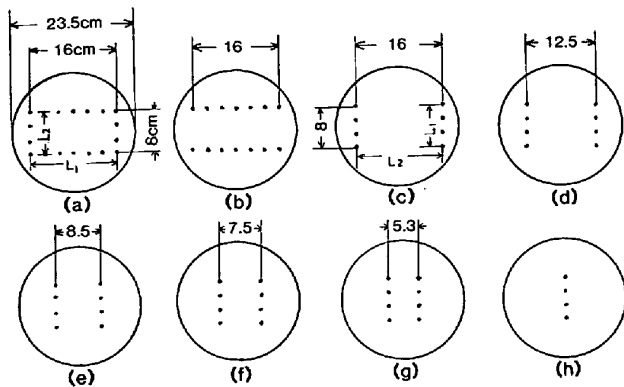


Fig. 1. Tuiyere configurations employed.

間、振幅、さらに振動の発生条件などについて調べた。

## 2. 実験方法

実験装置は前報<sup>12)</sup>と同様、透明アクリル製の転炉型容器である。吹き込みガスとして空気、メタル浴として水を用い、スラグは考慮しなかつた。Fig. 1 に、実験に用いた羽口配列を示す。羽口内径はすべて 2.0 mm である。以下、これらの羽口配列を「□」型、「| |」型といった記号で示す。なお、Fig. 1 に示したように、各羽口配列の長辺側羽口群の長さを  $L_1$  とし、羽口群間距離を  $L_2$  と定義する。

浴振動の有無、および振動形態の識別は目視観察によ

つた。ガス吹き込み後、5 min 以上経過しても浴振動が観察されない場合は振動なしとした。

浴振動の開始時間は、模型転炉に所定流量のガスを吹き込んで、浴全体が一定周期の振動を開始するまでの時間とした。逆に、浴振動の減衰時間は、ガス吹き込みを中止して、浴全体の振動が観察されなくなるまでの時間とした。これらの測定は、同一実験者が数回おこない、その平均値を測定値とした。

浴振動の周期は、模型炉体の外側に直接、加速度計を取りつけ、周波数分析計に表われるピーク周波数の逆数から求めた。

浴振動の振幅は、炉体に付した目盛りにより、定常の揺れに達した浴面における高さを測定し、これと静止浴面高さの差として求めた。

基準状態は前回と同様<sup>12)</sup>、「□」型 18 本羽口配列、ガス流量 175 NI/min、浴深 6.8 cm とした。

## 3. 実験結果

### 3.1 浴振動のパターン

浴振動を目視観察すると、Photo. 1, Photo. 2 のように、2つのタイプに大別できる。

Photo. 1 は Fig. 1(a) に示す「□」型 18 本羽口配列で、ガス流量 175 NI/min、浴深 6.8 cm の基準状



Photo. 1. Typical example of wave motion, which is defined as A type (Gas flow rate; 175NI/ min, Bath depth; 6.8cm, Tuiyere configuration; 「□」 with 18 tuiyeres).

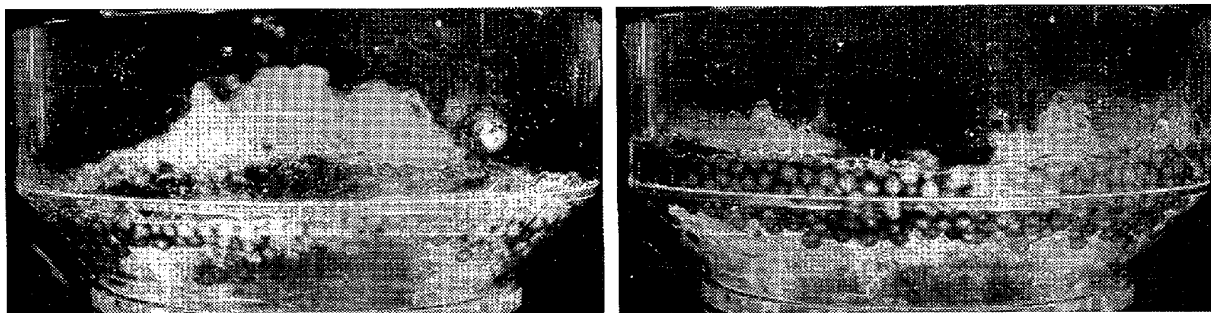


Photo. 2. Typical example of wave motion, which is defined as B type (Gas flow rate; 175NI/ min, Bath depth; 6.8cm, Tuiyere configuration; 「| |」 with 8 tuiyeres).

態における浴振動である。羽口群から噴出したガスは浮上過程で一団となつて気-液共存域を形成し、その領域を中心にU字管中の液の振動のように左右に揺れる。このタイプの浴振動は浴が深い場合に多くみられる。以後、これをAタイプの浴振動と呼ぶ。

Photo. 2はFig. 1(c)に示す「| |」型8本羽口配列で、ガス流量175 Nl/min, 浴深6.8 cmでみられる浴振動である。羽口群から噴出したガスは、水中で一団とはならず、2つの羽口群によつて形成される気-液共存域が近寄つては離れる振動を繰り返す。以後、これをBタイプの浴振動と呼ぶ。

なお、このほかに、浴振動の方向がゆつくり回転するタイプも存在するが、浴振動の一周期に着目すれば、上記A, Bのどちらかのタイプに分類できる。

### 3.2 浴振動におよぼすガス流量, 浴深, 羽口配列の影響

「□」型18本羽口配列(Fig. 1(a))での浴振動におよぼすガス流量 $Q$ と浴深 $H$ の影響をFig. 2に示す。 $Q$ と $H$ により浴振動のタイプと発生条件を明確に整理できることがわかる。すなわち、低ガス流量においては浴振動がなく、 $H \leq 5$  cmではBタイプのみ、 $H \geq 6$  cmではAタイプのみが生じる。 $H = 5 \sim 6$  cmは、浴振動がBタイプからAタイプに移行する振動タイプの遷移域であり、その近傍では浴振動の生じる最低ガス流量が大きくなることも知られる。

「| |」型8本羽口配列(Fig. 1(c))における浴振動のタイプと発生条件をFig. 3に示す。Fig. 2の「□」型羽口配列と異なる点は、第1に、浴深 $H$ が深くてもBタイプの浴振動が生じることである。これは「| |」型羽口配列の羽口群間距離 $L_2 = 16$  cmが「□」型羽口配

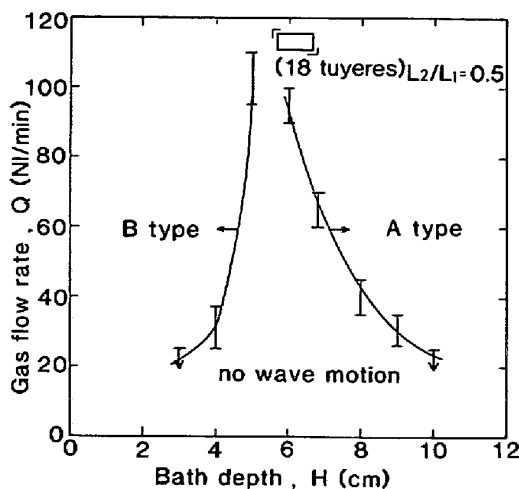


Fig. 2. Influence of gas flow rate and bath depth on the generation of wave motions for the tuyere configuration of 「□」 with 18<sub>2</sub>tuyeres.

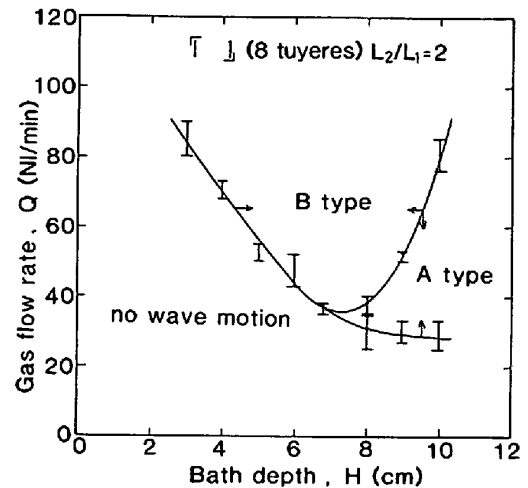


Fig. 3. Influence of gas flow rate and bath depth on the generation of wave motions for the tuyere configuration of 「| |」 with 8 tuyeres.

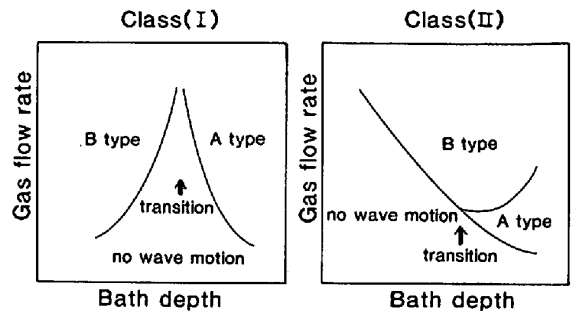


Fig. 4. Sketch of the region for the generation of wave motions.

列の $L_2 = 8$  cmに比べて大きいので、気-液共存域が2つに分かれて干渉しあうためと思われる。第2に、 $H = 6.8 \sim 8$  cmにおいてBタイプの浴振動となるガス流量に極小値が存在することである。第3に、 $H \geq 8$  cmでは、同一浴深においてガス流量の増大に伴い、振動なし→Aタイプ→Bタイプと変化することである。

「□」型18本羽口配列では、浴振動がBタイプからAタイプに移行する浴深を振動タイプの遷移域としたが、「| |」型8本羽口配列においてはAタイプの浴振動が出現する浴深を振動発生遷移域と定義する。振動発生遷移域は $H = 6.8 \sim 8$  cmである。

Fig. 2およびFig. 3から浴振動の発生条件は羽口配列によつて異なることがわかつた。そこで、Fig. 1に示した各羽口配列における浴振動のタイプ別発生条件を調べたところ、Fig. 4に模式的に示すように、Fig. 2と同様のクラス(I)、Fig. 3と同様のクラス(II)に分類できた。各羽口配列の浴振動の発生条件をTable 1に示す。振動の発生は羽口配列が $L_2/L_1 < 1$ の時、Fig. 4のクラス(I)、 $L_2/L_1 > 1$ の時クラス(II)

Table 1. Condition for the initiation of wave motions.

Tuyere configuration in Fig.1	$L_2/L_1$	Type in Fig.4
(h)	0	(I)
(a) (b)	0.5	(I)
(g)	0.66	(I)
(f)	0.94	(I)
(e)	1.06	(II)
(d)	1.56	(II)
(c)	2	(II)

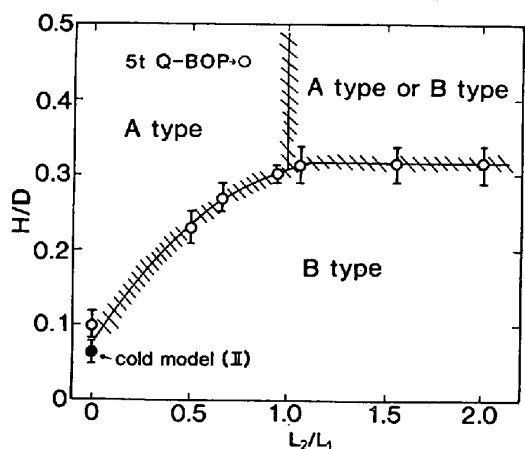


Fig. 5. Influence of  $H/D$  (bath depth/diameter of the bottom) and  $L_2/L_1$  (spacing of two rows of tuyeres/length of the row of tuyeres) on the generation of wave motions.

となることがわかる。

さて、浴振動の発生におよぼす浴深と羽口配列の影響をさらに明確にするためには、浴深の遷移域と  $L_2/L_1$  の関係を知る必要がある。Fig. 5 に、縦軸に浴深  $H$  を炉底径  $D$  で無次元化した  $H/D$ 、横軸に  $L_2/L_1$  で表される羽口配列をとつた場合の浴振動の発生状況を示す。図中のプロットを結んだ斜線部は振動タイプの遷移域であり、コールドモデル (II) は  $D=36.5$  cm,  $L_1=21$  cm  $L_2=0$  cm の転炉型模型容器での実験結果である。図のように、 $L_2/L_1 > 1$  では振動タイプの遷移域は  $H/D=0.32$  と一定であるが、 $L_2/L_1 \leq 1$  では  $L_2/L_1$  が減少するにつれて遷移域も小さく、すなわち浅くなる。

$H/D \geq 0.32$ ,  $L_2/L_1 \geq 1$  では、AタイプもしくはBタイプの浴振動が生じるが、これは Fig. 3 に示したように低ガス流量でAタイプ、高ガス流量でBタイプになることを意味している。

Fig. 5 より、 $H/D$  と  $L_2/L_1$  がわかれば浴振動のタイプが推定可能となつた。一例として6本羽口を有する

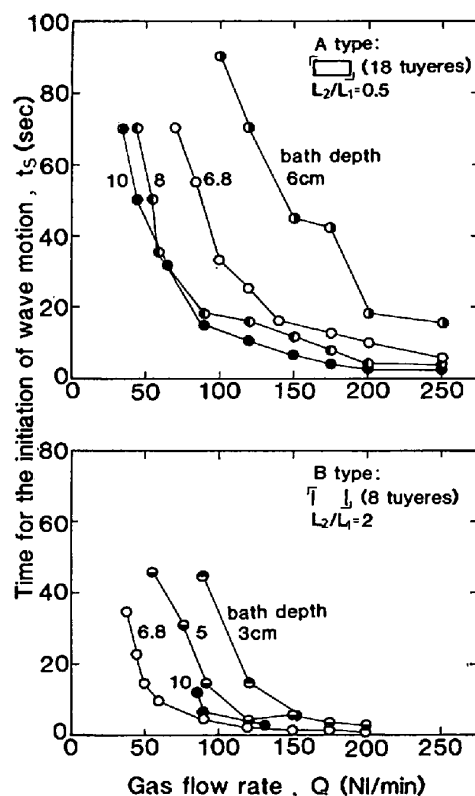


Fig. 6. Change of time for the initiation of wave motions (upper figure; A type wave motion for [ ] with 18 tuyeres, lower one; B type [ | ] with 8 tuyeres).

5tQ-BOP の  $H/D$  および  $L_2/L_1$  を Fig. 5 中に白丸で示した。粘性、密度などの物性値やスラグ存在の影響がないことを前提としなければならないものの、5tQ-BOP で浴振動が生じるとすればAタイプになるものと推定される。

なお、Fig. 5 の実験結果は Fig. 2 および Fig. 3 にみられるように、浴振動の生じる最低ガス流量以上を吹き込んだ場合のもので、ガス流量の影響については 4.1 で考察する。

### 3.3 響浴振動の開始時間および減衰時間

Fig. 6 に A, B 両タイプの浴振動の開始時間を示す。図の上部は [ ] 型 18 本羽口配列 (Fig. 1(a)) において生じるAタイプの浴振動、下部は [ | ] 型 8 本羽口配列 (Fig. 1(c)) でのBタイプの浴振動についてである。浴が深く、ガス流量が大きいほど浴振動は早く開始する。しかし、Aタイプの  $H=8$  cm と  $H=10$  cm, またはBタイプの  $H=6.8$  cm と  $H=10$  cm を比較すると、浴が十分深くなればガス流量が同一の場合浴振動の開始時間に顕著な差がなくなる。また、A, B両タイプの浴振動を比較すると、同一ガス流量、同一浴深においてBタイプの方が開始時間が短い。

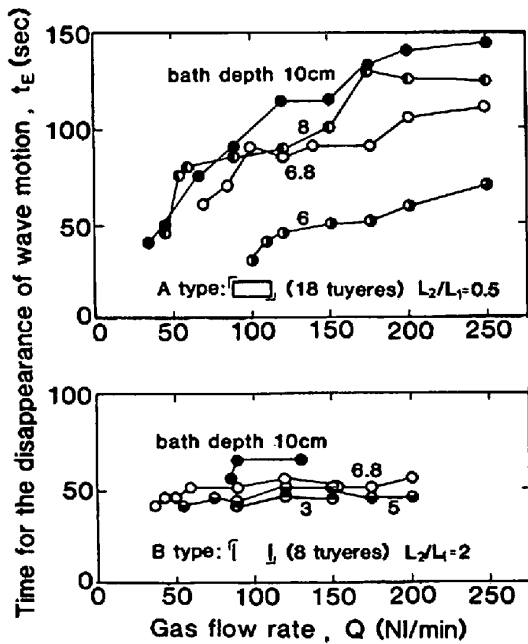


Fig. 7. Change of time for the disappearance of wave motions (upper figure; A type wave motion for [ ] with 18 tuyeres, lower one; B type for [ ] with 8 tuyeres).

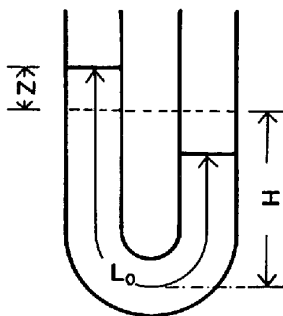


Fig. 8. Oscillation of liquid in U-shape tube.

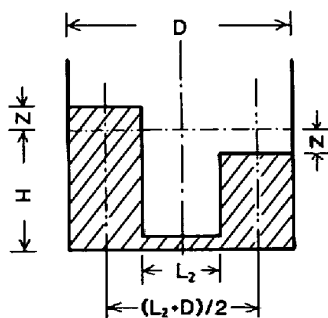


Fig. 9. Model of oscillation in U-shaped tube by which A-type wave motion is simulated.

Fig. 7 に A, B 両タイプの浴振動の減衰時間の変化を示す。Fig. 6 と同様、上図が [ ] 型羽口配列の A タイプ、下図が [ ] 型羽口配列の B タイプの浴振動である。A タイプの浴振動の減衰時間はガス流量が大きく、浴が深いほど長くなる傾向にあるが、 $H=8\text{ cm}$  および  $H=10\text{ cm}$  のように浴が十分深くなると減衰時間に

差がなくなる。これは開始時間についてと同様の傾向である。B タイプの浴振動の減衰時間は浴が深くなるにしたがい若干長くなるが、ガス流量による違いは明瞭でない。また、B タイプの浴振動は A タイプのそれに比べて減衰時間が短い。

3.4 浴振動の周期

A, B 両タイプの浴振動周期を簡単なモデルに基づき計算から求め、測定データと比較する。

3.4.1 Aタイプの浴振動モデル

A タイプの浴振動を Fig. 8 に模式的に示すような U 字管振動と見なす。U 字管振動とは U 字管中に流体を入れて外力を加えた場合に、一定の周期で流体が往復運動することをいう。

U 字管中の液の振動は次式で与えられる<sup>18)</sup>。

$$L_0 \frac{d^2Z}{dt^2} + C \frac{dZ}{dt} + 2gZ = 0 \dots\dots\dots (1)$$

ここに、 $L_0$  は液の全長 (cm)、 $C$  は減衰係数 (cm/s)、 $g$  は重力加速度 (cm/s<sup>2</sup>)、 $Z$  は静止レベルを原点とした座標 (cm)、 $t$  は時間 (s) である。

(1) 式を A タイプの浴振動に適用すると、ガス攪拌時の定常状態においては目視観察から振幅の大きさに変化がなく、みかけ上減衰していないとみなせるので、 $C=0$  とおける。初期条件として  $Z=0$  を与え、(1) 式を解けば次式のようなになる。

$$Z = A \sin(\sqrt{2g/L_0} \cdot t) \dots\dots\dots (2)$$

ここに  $A$  は振動の振幅である。

(2) 式から、減衰のない U 字管振動の振動周期  $T_A$  (s) は次のようになる。

$$T_A = 2\pi \sqrt{L_0/2g} \dots\dots\dots (3)$$

Fig. 9 に、U 字管振動に見立てた A タイプの浴振動の概念図を示す。ここに、 $L_2$  は Fig. 2 で定義した羽口群間距離 (cm)、 $D$  は炉底径 (cm)、 $H$  は浴深 (cm) である。気-液共存域である浴の中心部を U 字管の中心とみなせば、液の全長  $L_0$  は以下のようなになる。

$$L_0 = 2H + \frac{D+L_2}{2} \dots\dots\dots (4)$$

A タイプの浴振動周期は、(4) 式により液の全長  $L_0$  を計算し、(3) 式に代入すれば求められる。

3.4.2 Bタイプの浴振動モデル

B タイプの浴振動の自由表面は、Photo. 2 を見ればわかるように、定常波の波面に類似している。そこで、B タイプの浴振動を定常波のモデルで表す。

幅  $D$  (cm) の角箱内に浴深  $H$  (cm) の液体がある時、この液が作る波長  $D$  の定常波の振動周期  $T_B$  (s) は次式で与えられる<sup>9)</sup>。

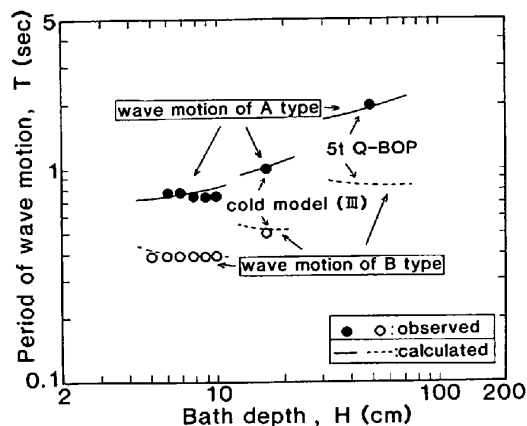


Fig. 10. Period of wave motions vs. bath depth (lines; calculated by models, plots; observed).

$$T_B = \sqrt{\frac{2\pi D}{g}} \cdot \coth\left(\frac{2\pi H}{D}\right) \dots\dots\dots (5)$$

転炉内のBタイプの浴振動周期は、炉底径を角箱の幅に等しいと近似すれば(5)式により計算できる。

3.4.3 計算値と実測値の比較

Fig. 10 に、A、B 両タイプの浴振動周期の計算値と実測値を示す。Aタイプの浴振動は「□」型18本羽口配列 (Fig. 1(a)), Bタイプのそれは「|」型8本羽口配列 (Fig. 1(c)) の場合であり、ガス流量は流量によつて振動周期の变化がないことを確かめ 175NI/min 一定とした。コールドモデル (III) は転炉型模型の炉底径を  $D=43$  cm と大きくしたもので、Aタイプの浴振動は  $L_2/L_1=0$  の羽口配列、Bタイプのそれは  $L_2/L_1=2.0$  の時の結果である。5 t Q-BOP の実測値は、水モデルにより炉体の傾転方向における揺れの周期と浴振動周期が一致することを確認したので、吹錬中の炉体の揺れを目視観察して求めた。

図から明らかなように、水モデルの実測値と計算値はよく一致している。5tQ-BOP の実測値はAタイプの浴振動周期の計算値にほぼ等しいことから、その鋼浴振動をAタイプとみてよい。これは、Fig. 5 における羽口配列と浴深からの推定結果と一致している。

また、Bタイプの浴振動周期はAタイプのその約半分となることもわかる。

3.5 浴振動の振幅

Fig. 11 に、A、B 両タイプの振幅の変化を示す。図の上部は「□」型18本羽口配列 (Fig. 1(a)) で生じるAタイプの浴振動振幅、下部は「|」型8本羽口配列 (Fig. 1(c)) で生じるBタイプの浴振動振幅の場合である。A、B 両タイプの浴振動ともに、ガス流量、浴深の増大に伴い、振幅が増加することがわかる。また、同一ガス流量、同一浴深においては、Aタイプの振

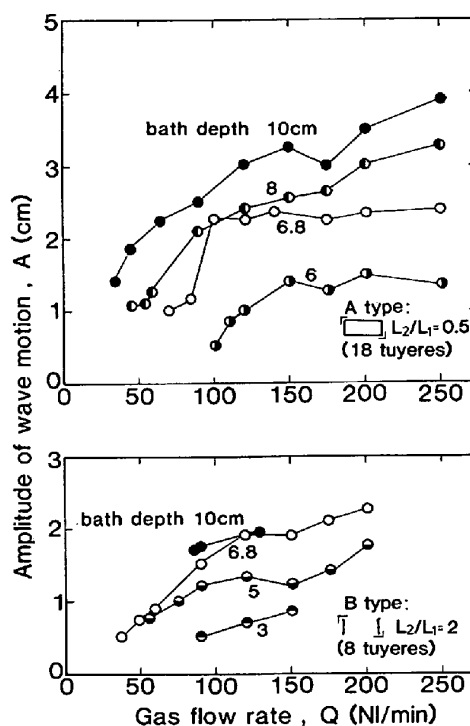


Fig. 11. Change of amplitude of wave motions, (upper figure: A type wave motion for 「□」 with 18tuyeres, lower one: B type for 「|」 with 8 tuyeres).

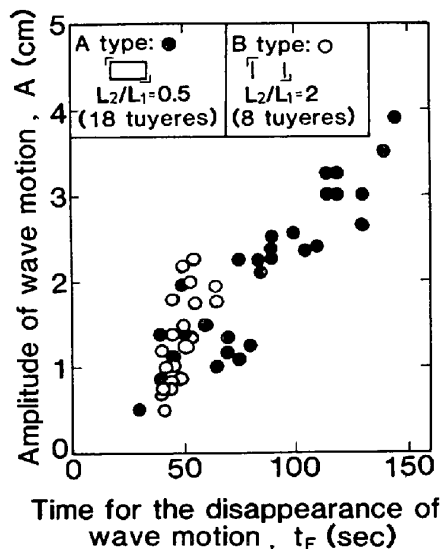


Fig. 12. Relation between the amplitude and the time for the disappearance of wave motions.

幅の方がBタイプのそれより大きい。

Fig. 12 に、振幅と減衰時間の関係を示す。A、B 両タイプの浴振動ともに、振幅が大きくなるほど減衰時間も長くなることがわかる。さらに、同一振幅においては、Bタイプの減衰時間の方がAタイプのそれより短い。粘性減衰力が作用する系では振動周期が短いほど減衰速度が大きいが、A、B 両タイプの浴振動において

も同様の傾向がある。

4. 考 察

4.1 浴振動の発生条件

3.1 節では浴振動のタイプが  $L_2/L_1$  と  $H/D$  によって定まることを示した。しかし、浴振動におよぼすガス流量の影響については、Fig. 2 と Fig. 3 から一定値以上の流量を必要とすること、Fig. 6 から流量が大きいほど浴振動の開始時間が早まることなどの知見を得たにとどまる。

そこで、浴振動の発生条件をガス流量と相関をもつ量、すなわちガスが浴内に持ちこむエネルギーによって整理しよう。

浴内にもちこまれるガスの攪拌エネルギー密度  $\dot{\epsilon}$  は<sup>12)</sup> ガスの浮力と膨張による仕事率  $\dot{\epsilon}_1$  と運動エネルギーの供給速度  $\dot{\epsilon}_2$  の和として次式のように示される。

$$\dot{\epsilon} = \dot{\epsilon}_1 + \dot{\epsilon}_2 = 0.0285QT/W_g \log(1 + H/1034) = \{ \frac{1}{2}(\rho_g u s) u^2 / W_g \} 10^{-7} \dots\dots\dots (6)$$

ここに、 $\dot{\epsilon}$ ,  $\dot{\epsilon}_1$ ,  $\dot{\epsilon}_2$  の単位は (W/t),  $Q$  はガス流量 (NI/min),  $T$  は絶対温度 (K),  $W_g$  は水の重量 (t),  $H$  は浴深 (cm),  $\rho_g$  はガス密度 (g/cm<sup>3</sup>),  $S$  は羽口の全断面積 (cm<sup>2</sup>)  $u$  はノズル出口でのガスの線速度 (cm/s) である。

さて、ガスによるエネルギーが、浴振動がはじまるまで浴内に蓄積されると考えよう。このとき、蓄積エネルギー密度  $\hat{E}$  (J/t) は、エネルギーの供給速度である  $\dot{\epsilon}$  と浴振動の開始時間  $t_s$  の積となり(7)式で表される。

$$\hat{E} = \dot{\epsilon} \cdot t_s \dots\dots\dots (7)$$

Fig. 13 に、 $\dot{\epsilon} \cdot t_s$  と浴深  $H$  を炉底径  $D$  で無次元化した  $H/D$  の関係を示す。Aタイプの浴振動は「□」型18本羽口配列 (Fig. 1(a)), Bタイプのそれは「|」型8本羽口配列 (Fig. 1(c)) の場合である。これより、A, B 両タイプの浴振動ともに、 $H/D \leq 0.43$  では  $H/D$  が増加するにしたがい、 $\dot{\epsilon} \cdot t_s$  は小さくなる。これは、浴が浅いほどガスが浴内にエネルギーを十分伝えないまま系外に去るためであると思われる。 $H/D > 0.43$  では、A, B 両タイプの浴振動ともに  $\dot{\epsilon} \cdot t_s = 5 \times 10^3 \sim 1 \times 10^4$  J/t となる。すなわち、浴が深くなればガスの持つエネルギーが浴内に十分伝わるので、浴内に蓄積されるエネルギーは浴深に無関係にほぼ一定値となる。

Fig. 13 の関係を実炉にスケールアップすれば、鋼浴振動の発生条件を推定できる。

5 tQ-BOP についての諸元は、 $W_g = 5$  t,  $Q = 23 \times 10^3$  NI/min,  $H = 50$  cm,  $T = 1873^\circ\text{K}$ ,  $\rho_g = 1.34 \times 10^{-3}$  g/cm<sup>3</sup>,  $u = 3.4 \times 10^4$  cm/s,  $S = 12.06$  cm<sup>2</sup> である。実炉に

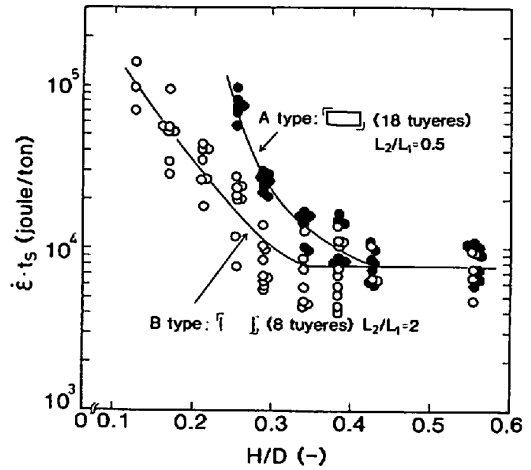


Fig. 13. Relation between the sum of supplied energy in the bath until the wave motion starts and the ratio of bath depth to bottom diameter.

Table 2. Calculated time for the initiation of wave motions in 5t and 230t Q-BOP.

Capacity	Wave motion	$\dot{\epsilon}$ (W/ton)	$\dot{\epsilon} \cdot t_s$ (joule/ton)	$t_s$ (sec)
5t Q-BOP	A	$6.21 \times 10^4$	$7.6 \times 10^3$	0.12
	B		$1.1 \times 10^4$	0.11
230t Q-BOP	A	$9.62 \times 10^4$	$2.5 \times 10^4$	0.26
	B		$1.1 \times 10^4$	0.11

において吹き込まれた1モルの酸素が2モルの一酸化炭素になることを考慮して  $Q$  を2倍とし、(6)式を溶鉄の場合に修正した(6)'式に上記数値を代入すれば、5 tQ-BOP の攪拌エネルギー密度  $\dot{\epsilon}_{5tQ-BOP}$  (W/t) は(8)式のように求められる。

$$\dot{\epsilon} = \dot{\epsilon}_1 + \dot{\epsilon}_2 = (0.0285 QT/W_g) \log(1 + H/148) + \{ \frac{1}{2}(\rho_g u s) u^2 / W_g \} 10^{-7} \dots\dots\dots (6)'$$

$$\dot{\epsilon}_{5tQ-BOP} = 6.21 \times 10^4 \text{ (W/t)} \dots\dots\dots (8)$$

また、230 tQ-BOP の  $\dot{\epsilon}_{230tQ-BOP}$  は前報<sup>12)</sup> より(9)式となる。

$$\dot{\epsilon}_{230tQ-BOP} = 9.62 \times 10^4 \text{ (W/t)} \dots\dots\dots (9)$$

一方、5 tQ-BOP では  $H/D = 0.78$ , 230 tQ-BOP の標準操業時では  $H/D = 0.29$  である。

与えられた  $H/D$  における  $\dot{\epsilon} \cdot t_s$  を Fig. 13 から読めば、(8), (9)式により  $\dot{\epsilon}$  が知られているので、鋼浴振動の開始時間を求めることができる。得られた結果を Table 2 に示す。5 tQ-BOP は前章において A タイプの浴振動と推定されたので、B タイプの結果は示していない。表から、5 t および 230 tQ-BOP ともに鋼浴振動の開始時間は非常に小さいことがわかる。すなわち、鋼浴振動はガス吹き込み後瞬時に生じているとみてよい。

以上、浴振動とガス流量を関連づけるためには、浴へ

の蓄積エネルギーの概念を用いることが有効であることを述べた。しかし、浴内に投入されるエネルギー密度と浴振動の開始時間の積で定義される蓄積エネルギーは、 $\dot{\epsilon}$ を無限に小さくしても浴振動の開始時間を十分長くすれば浴振動が発生する値となり得る。現実には Fig. 2, Fig. 3 の例で示したように、ガス流量、すなわち攪拌エネルギー密度が小さい場合には所定の  $\dot{\epsilon} \cdot t_s$  の値以上となつても浴振動は生じない。これは  $\dot{\epsilon}$  をある程度大きくしてはじめて浴振動が生じることを意味しているが、その最低値については本研究結果のみでは説明できない。

4.2 浴振動パターンの比較

前章の実験結果から、A, B 両タイプの浴振動の特性を比較すると Table 3 のようになる。ここで蓄積エネルギー  $\dot{\epsilon} \cdot t_s$  は同一浴深における比較であり、その他の特性はガス流量と浴深が同一の場合の比較である。

本表より、Bタイプの浴振動は開始時間が短く、しかも  $H/D < 0.43$  と浴が浅い場合には蓄積エネルギーも小さくてすむことから、Aタイプのそれより発生しやすい傾向にある。しかし、Aタイプの場合は振幅がBタイプより大きく減衰時間も長いので、定常の揺れに達した後は振動が激しいといえる。

さて、浴振動を比較するもう一つの尺度として定常状態における浴振動のエネルギーを取り上げ、A, B 両タイプの浴振動の場合を推定する。

一般に、波のエネルギーは最大振幅となる波面全体の位置エネルギーで表される。今、円筒容器において浴の静止状態を基準にした浴表面の高さを  $z$  とすると、波のエネルギー密度  $E$  は (10) 式となる<sup>19)</sup>。

$$E = \frac{1}{2} \cdot \frac{\rho_1 g}{W_g} \iint Z^2 dx dy \dots\dots\dots (10)$$

ここに、 $\rho_1$  は液の密度、 $x, y$  は円筒の中心軸を原点とし中心軸に垂直な平面の直角座標である。

A, B 両タイプの浴表面の高さをそれぞれ  $Z_A, Z_B$  とし浴振動の方向を  $x$  座標とすれば、Photo. 1, Photo. 2

より  $Z_A, Z_B$  をほぼ次の関数形で近似できる。

$$Z_A = l_A \sin(\pi/2rx) \dots\dots\dots (11)$$

$$Z_B = l_B \cos(\pi/rx) \dots\dots\dots (12)$$

ここに、 $r$  は円筒容器の半径、 $l_A, l_B$  はそれぞれ A, B タイプの浴振動の振幅である。

(11), (12) 式を (10) 式に代入し、積分区間を表示すると、A, B 両タイプの浴振動エネルギー密度  $E_A, E_B$  (13), (14) 式のようになる。

$$E_A = \frac{1}{2} \cdot \frac{\rho_1 g}{W_g} \cdot \int_{-r}^r \int_{-\sqrt{r^2-y^2}}^{\sqrt{r^2-y^2}} l_A^2 \sin^2(\pi/2rx) dx dy \dots\dots\dots (13)$$

$$E_B = \frac{1}{2} \cdot \frac{\rho_1 g}{W_g} \cdot \int_{-r}^r \int_{-\sqrt{r^2-y^2}}^{\sqrt{r^2-y^2}} l_B^2 \cos^2(\pi/rx) dx dy \dots\dots\dots (14)$$

(13), (14) 式を整理すれば、(15), (16) 式を得る。

$$E_A = 0.643 \rho_1 g l_A^2 r^2 / W_g \dots\dots\dots (15)$$

$$E_B = 0.732 \rho_1 g l_B^2 r^2 / W_g \dots\dots\dots (16)$$

$\rho_1 = 1 \times 10^3 \text{ kg/m}^3, g = 9.8 \text{ m/s}^2, r = 0.175 \text{ m}$ , また振幅  $l_A, l_B$  を Fig. 11 から読み取り、さらに各浴深での水の重量  $W_g(t)$  を代入して、(15), (16) 式を計算すると、 $E_A, E_B (\text{J/t})$  は Fig. 14 のようになる。なお、横軸は攪拌エネルギー密度とした。図から明らかなように、同一  $\dot{\epsilon}$  に対して浴が浅い場合 ( $H=6 \text{ cm}$ ) を除けば、Aタイプの浴振動エネルギー密度の方がBタイプのそれより約2倍大きい値を示している。浴振動の自由表面を (11), (12) 式のように単純化しているものの、Aタイプの浴振動はBタイプのそれより激しいと考えられる。

また、AタイプおよびBタイプの浴振動において、浴深がそれぞれ  $H=6 \text{ cm}, H=3 \text{ cm}$  の時、 $E_A, E_B$  の値が小さいのは本実験に用いた容器が転炉型のものであるのに対し、計算値が円筒形を仮定した結果であるため浴の浅い場合に両者の不一致を生じたと思われる。

Table 3. Comparison between wave motion of A type and that of B type.

Property of wave motion	Comparison of A and B type
Time for initiation	A (longer) > B
Time for disappearance	A (longer) > B
Period	A (longer) > B
Amplitude	A (larger) > B
Accumulated energy ( $\dot{\epsilon} \cdot t_s$ )	A (larger) > B at $H/D < 0.43$ A = B at $H/D > 0.43$

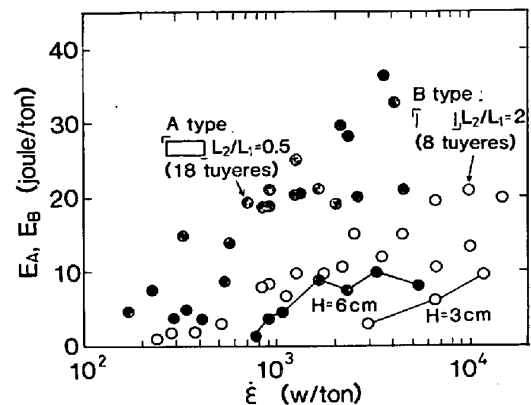


Fig. 14. Relation between the energy of wave motions and the rate of energy supply to the bath.



## 5. 結 言

底吹きガスの強攪拌によつて生じる浴の振動現象をワールドモデルで調べ、以下の知見を得た。

(1) 浴振動は、気-液共存域を中心として U 字管中の液の振動のように左右に揺れるタイプ (以下、A タイプの浴振動) と、2 つに分かれた気-液共存域が近寄つては離れる運動を繰り返すタイプ (以下、B タイプの浴振動) が存在する。

(2) 浴振動は羽口配列、浴深、ガス流量などを変えると A または B タイプとなる。

(3) ガス流量と浴深が同一なら、B タイプのほうが A タイプより浴振動の開始および減衰時間が短い。

(4) A タイプの浴振動の周期を U 字管振動モデル、B タイプのそれを定席波モデルで計算すると、計算値が実測値とよく一致する。

(5) ガス流量と浴深が同一なら、浴振動の振幅は A タイプの方が B タイプより大きい。

(6) 浴振動がはじまるまでに浴内に供給されるガスのエネルギーは、 $H/D \leq 0.43$  で A タイプの方が B タイプより大きいが、 $H/D \geq 0.43$  では A、B 両タイプともほぼ同一の値である。

(7) 浴内に持ち込まれる攪拌エネルギーが同一なら、A タイプの浴振動エネルギーは B タイプのそれより大きい。

## 文 献

- 1) 川名昌志, 岡崎有登, 永井潤, 数土文夫, 馬田一, 中西恭二: 鉄と鋼, 64 (1978), S 166
- 2) 中西恭二, 加藤嘉英, 鈴木健一郎, 香月淳一: 鉄と鋼, 64 (1978), S 169
- 3) 佐野正道, 森一美: 鉄と鋼, 60 (1974), p. 348
- 4) 佐野正道, 森一美, 佐藤哲朗: 鉄と鋼, 63 (1977), p. 2308
- 5) 佐野正道, 森一美: 鉄と鋼, 64 (1978), p. 1714
- 6) 佐野正道, 森一美: 鉄と鋼, 65 (1979), p. 1140
- 7) 近藤幹夫, 藤井徹也, 江島彬夫: 学振 19 委-No. 9894 (昭和50年9月)
- 8) 小沢泰久, 佐野正道, 森一美: 鉄と鋼, 64 (1978) S 582
- 9) 小沢泰久, 佐野正道, 森一美: 鉄と鋼, 64 (1978), S 583
- 10) 小沢泰久, 森一美: 鉄と鋼, 66 (1980), S 162
- 11) A. ETIENNE: CRM Report, No. 43, June (1975), p. 13
- 12) 中西恭二, 加藤嘉英, 野崎努, 江見俊彦: 鉄と鋼, 66 (1980), p. 1307
- 13) 吉岡 勲, 鈴木勝雄: 日本造船学会論文集, 128 (1970), p. 167
- 14) 吉岡 勲, 鈴木勝雄, 関 雅之: 日本造船学会論文集, 128 (1970), p. 167
- 15) 吉岡 勲, 平山次清, 山越康之: 日本造船学会論文集, 129 (1971), p. 55
- 16) W. CHESTER: Proc. of the Royal Soc. of London A, Vol. 306 (1968), p. 5
- 17) W. CHESTER and J. A. BONES: Proc. of the Royal Soc. of London A, Vol. 306 (1968), p. 23
- 18) たとえば, 神元五郎: 水力学 I, (1957), p. 176 [共立出版]
- 19) たとえば, 田丸卓郎: 流体力学, (1929), p. 75, p. 86, [岩波書店]