

底吹き樋型反応器の浴振動

福澤 安光*・古山 貞夫*・岩崎 智*・福澤 章*

Bath Vibration in Bottom Blowing Trough Type Reactor

Yasumitsu FUKUZAWA, Sadao FURUYAMA, Satoshi IWASAKI and Akira FUKUZAWA

Synopsis : In the case to introduce the bottom blowing method under the trough type continuous steelmaking furnace, wave motion of steel bath should be suppressed. To solve this problem, water model equipment has been used to examine the wave motion in the range of shallow water waves. Basic results obtained are as follows.

- (1) Frequency of the induced wave is mainly affected by the bath depth, and along with the increase of the bath length this frequency is kept in a certain range by increasing the node number of the wave.
- (2) In the transition range of the node number, wave motion can be weakened.
- (3) To suppress the wave motion it is very effective to locate each bottom blowing nozzle at the distance from transition range to the wall obtained in one nozzle test and put the nearest nozzle from the wall at the half distance of transition range.
- (4) The node number and transition range can be represented on the non-dimensional diagram of the bath depth to the ratio between distances from nozzle position to both side walls.

Key words : wave motion ; steel bath ; continuous steelmaking ; bottom blowing nozzle ; trough type furnace ; water model.

1. 緒言

これまで、多段式の樋型炉による連続製鋼実験¹⁾²⁾および槽型炉による溶銑の連続選択酸化実験を試み³⁾、各段ごとに脱 Si、脱 C、脱 Nb など特定の反応を主体的に行わせるといふ所期の目的を達成してきた。特に槽型炉は底吹き方式を採用し、操業性、反応の制御性に良好な結果を得た。しかし、反応の分割のために複数の炉を使用することの問題点として、炉から炉への溶湯の移送に伴う熱損と複雑な築炉構造が指摘されてきた。

これに対処する一つの方策として、旧来試みられた単段の樋型炉⁴⁾に酸素底吹き方式を採り入れることにより、1 炉内で反応を分割する可能性が考えられる。鋼浴の浅い底吹き炉では均一混合時間が長いことが報告されており⁵⁾、また著者らの連続溶解還元炉実験においても⁶⁾、激しく CO が沸騰しているにもかかわらず、浴深が浅いため均一混合時間は長かったことから、気泡の上昇が浴の水平方向の移動を抑える効果があることが認められてきた。このことから、樋型炉に長手方向に間隔をおいて底吹きノズルを設け、不活性ガス吹き込みによるバブルカーテンで炉を複数に分割し、各領域ごとに上、あるいは底吹き込みにより反応物質を投入することにより、特定の反応を行わせる連続反応器の可能性を検討することにした。実機の流通型連続反応器としては、過去の経験から浴長2.0m、浴深0.2~0.4m程度、各反応領域毎に排滓口を設けた樋型底吹き炉を想定した。

その際、底吹きガスによる鋼浴の振動を抑制することは Q-BOP における浴振動の文献⁷⁾にも述べられているように装置、操業性、耐火物損傷の上から非常に重要であり、樋型底吹き炉においても吹精ガスによる鋼浴振動の発生が予想される。鋼浴の振動は、本検討の主目的である反応領域を分割する妨げとなるであろうこと、また、炉構造の上からも大きな浴振動は操業上（排滓口からの、メタルの排出など）問題となると考えられる。実機は流通型を想定しているが、ここでは、非流通型水モデルにより、浴振動を抑止する吹き込み条件の検討を行った。

2. 実験装置及び方法

2・1 実験装置

Fig. 1 に実験装置の概略図を示す。容器は、実機の 1/2~1/3 モデルを想定し、内寸法で、長さ1.0m、深さ0.45m、幅0.10mの透明アクリル（板厚さ0.005m）製を用いた。底吹きノズル径は、槽型炉³⁾でのガス吹き込みと同様にジェットイングとするため0.001mとし、ガス気泡で浴を仕切るようにするため、1 箇所につき2 孔ずつ、幅方向に0.05m間隔で設けた。以下、箇所は2 孔一組のノズル吹き込み位置を指すこととする。吹き込みガスとしては窒素ガスを用い、流量は各箇所ごとにマスフローコントローラー (MFC) で制御し、各箇所底部に設けたアクリル製の風箱を介して浴内に吹き込んだ。

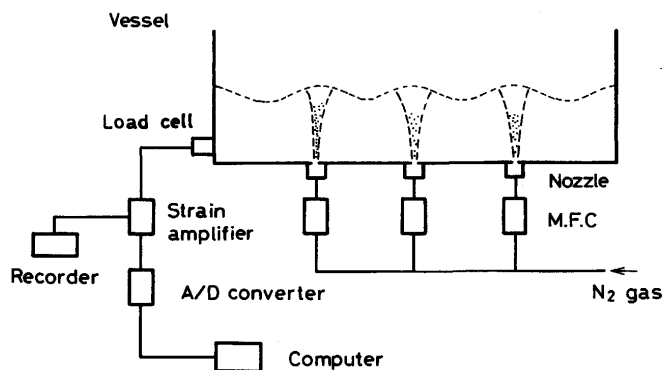


Fig. 1. Schematic representation of bath wave measuring equipments.

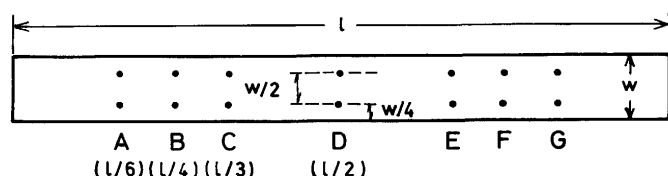


Fig. 2. Position of sets of nozzles on the bottom plate.

各吹き込み箇所の位置は浴全長を2, 3, 4, 6等分する位置とした。Fig. 2にノズル孔の配列と各吹き込み箇所をAからGの記号で表した。

2・2 実験方法

実験は浴深0.10, 0.15, 0.20mで実験した。吹き込み箇所数は1～3箇所の吹き込み箇所を使用し、各箇所からのガス吹き込み流量は20, 30, 40 l/minとした。振動解析の基本となる1箇所吹き込みの実験では、吹き込み箇所が浴長の中心にくる場合と、中心からずれた場合について箇所Dを用い、容器内に仕切り板を入れ浴長を変えて検討した。

底吹き込みガスにより誘起される波は、容器の長手方向の壁に波の腹がくることから、Fig. 1に示すように振動の測定は長手方向の側壁の浴底から0.035mのところに微小圧力検出器を設置し、浴の波高を水圧の変化として測定し、A/D変換器を介してパーソナルコンピュータに記録させた。振動数は記録させた波形をフーリエ解析により求めた。振動の定常化を待ってガス吹き込み開始5～6 min後に、1回当たり30sに2¹⁰個のサンプリングを連続して3～5回行った。また、1箇所吹き込みで仕切り板を使用し浴長を変える実験では、仕切り板下部に導圧管を取付け微小圧力検出器に接続し振幅を測定した。また、長周期の浴振動の場合には、同時に浴中のガス上昇流の揺れ周期を目視観察によりストップウォッチで測定し、フーリエ解析で得られる波の振動数を確認した。

ガス吹き込みにより容器中に発生する波は、浴の両端に波の腹がくる静振 (Seiche) と仮定して解析した⁸⁾。容器内の波は浴深 (h) と波長 (L) の比で定義される浅水度 (h/L) の値により $h/L < 1/25$ が長波, $1/2 > h/L > 1/25$ が浅水

波 (波高がかなり大きい場合に $1/2 > h/L > 1/10$ と $1/10 > h/L > 1/25$ にさらに区分する扱いもある), $h/L > 1/2$ が深水波 (表面波) と分類される⁹⁾が、本実験は先の槽型炉¹⁾の経験を参考にしたため、1箇所吹き、複数箇所吹きともに領域的には浅水波の範囲であった。

水表面に正弦波を与えた場合に生ずる静振の波の振動数 f (Hz) は次式で与えられる⁸⁾⁹⁾。

$$f = \sqrt{gk \tanh(kh)} / (2\pi) \quad (1)$$

ここで、 g : 重力加速度 (m/s^2), h : 浴深 (m), k : 波数を表し、波数 k は次のとおり置き換えた。

$$k = n\pi/l \quad (2)$$

ここで、 n : 波の節数, l : 浴長 (m), (m^{-1})。

(1)式は、浴深、浴長、節数により振動数が決まることを示している。

3. 実験結果と考察

3・1 1箇所中心吹き込み実験

容器中心1箇所吹きの実験は、上述の各浴深において、Fig. 2の吹き込み箇所Dを中心にして両側に仕切り板を左右等距離に設置し、その間隔を順次拡げて測定した。

測定結果の1例として浴深を0.10m, 仕切り板間隔すなわち浴長を0.16mから0.75mまで変えた場合および1.0mとし、ガス流量30 l/minとした場合の測定結果をFig. 3に示す。図中各浴長で吹き込みガスにより誘起される浴の長手方向の波の振動数を○印で、振幅を折れ線 (点線) で示す。また、(1)式に基づく浴長と正弦波の場合の振動数の関係を、各 n 数ごとに一点鎖線で示した。また、基本となる単節 ($n=1$) の周期性の波を手動で起こし、各浴長における固有振動数を求め、振動数解析の基準とし、その振動数を実線

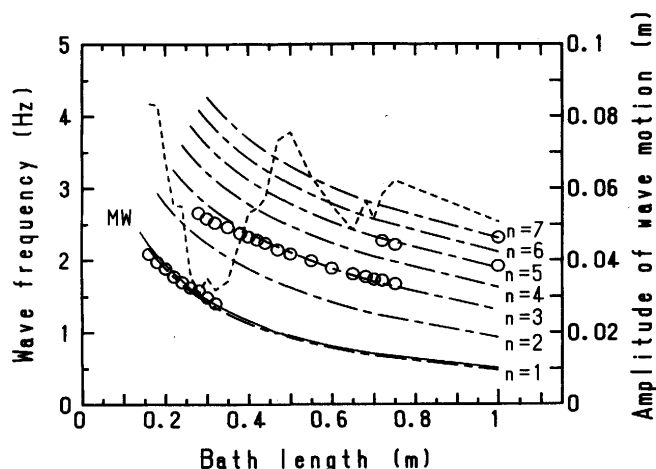


Fig. 3. Variation of frequency and amplitude of wave with bath length on symmetrical blow: bath depth 0.1m, N_2 blowing rate 30 l/min (MW: manually induced wave).

(MW) で表したが、計算値と非常によく一致し、 $n=1$ の波を $l=1.0\text{m}$ においても起こすことができた。図から明らかなように、吹き込みガスによる波の振動数と正弦波とした場合の振動数は、各 n ごとによく一致していることから、本実験範囲では吹き込みガスによる波の振動を正弦波で近似することができた。

Fig. 3 に見られるように浴長が長くなるにつれて振動数は小さくなるが、ある浴長 (図では $0.28\sim 0.35\text{m}$) では 2 種の振動数が同時に起こり、波の振幅が小さくなり、次に高い n 数の波に移行し振幅も大きくなることが認められる。より浴長が長くなればこれを繰り返す、さらに高い n 数の波になる ($0.70\sim 0.75\text{m}$)。この現象は、ガス吹き込みにより誘起された波が静振となる波長はその浴深において決まっており、浴長が限界以上に長くなれば、浴内の波は節数を増して、次の安定して依存しうる波を形成することに起因すると考えられる。この n 数が移る過程で複数の n 数が共存する浴長領域を以後遷移域と呼ぶことにする。浴深 0.15m 、 0.20m についても同様の結果が得られた。

以上のことから、1 箇所中心吹きの実験では、ガス吹き込み位置を節とする n が奇数の波が誘起され、 h/l 値が大きい場合低次の n の波が誘起され、浴長が長くなるに従い高次の n の波が起きることがわかった。

Fig. 4 に Fig. 3 と同一条件で、浴長 0.22m における波の波型 (a) とフーリエ変換により得られた振動数のピーク (b) の 1 例を示す。解析振動数は 0 から 10Hz の範囲とした。 1.8Hz に現れている高いピークは節数 $n=1$ の波の 1 次振動数、 3.6Hz に現れているピークは $n=1$ の 2 次、 5.3Hz の小さなピークは $n=1$ の 3 次の高調波が存在することを表している。

遷移域では、目視観察でも、2 種以上の振動数の波が同時に起こることによって $5\sim 10\text{s}$ 周期のうねりを生ずるか、あるいはほとんど波立たないことが認められた。Fig. 3 では浴長 $0.28\sim 0.35\text{m}$ ($n=1\rightarrow 3$)、 $0.70\sim 0.75\text{m}$ ($n=3\rightarrow 5$) に相当する。この遷移域 (浴長 0.28m) でサンプリングした波の波形とフーリエ変換による解析振動数のピークの例を Fig. 5 に示す。Fig. 5 (b) の振動数のピークは 1.6Hz

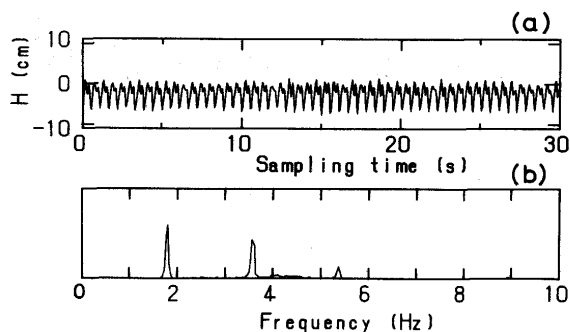


Fig. 4. Wave motion (a) and its Fourier analysis (b) at the bath length of 0.22m in Fig. 3.

に $n=1$ 、 2.8Hz に $n=3$ の波が、 $5.6\sim 6.0\text{Hz}$ の間は高調波が現れている。また、 $2.0\sim 3.0\text{Hz}$ に見られるピークは、Fig. 4 では認められなかった振動で、幅方向の振動との合成によるものと考えられる。Fig. 5 (a) の振幅の時間変化から、振幅の大 (約 0.015m) と小 (約 0.007m) が約 10s の間隔で起こり、うねりを生じていることがわかる。また、Fig. 3 中の折れ線から明らかなように、遷移域の振幅は n 数が高くなるに従い大きくなる傾向にあることが、各浴深で認められた。

また、遷移域の幅はガス流量により異なり、各浴深における吹き込みガス量と、遷移域の浴長と浴深の比 (h/l) との関係で示すと Fig. 6 のようになる。図中、浴深 0.10m については、 n が 1 から 3 および 3 から 5 、浴深 0.15m および 0.20m については 1 から 3 への遷移域を示している。この図から $n=1$ から 3 への遷移域についてはガス流量の増加に伴い遷移範囲が狭くなり、遷移開始浴長が長くなる傾向、すなわち、 $n=1$ を保持できる最大波長が長くなることがわかる。また、終了浴長は浴深 0.10m 以外はガス流量の増加に伴い急激に短くなった。本実験条件範囲内では $n=3\rightarrow 5$ の遷

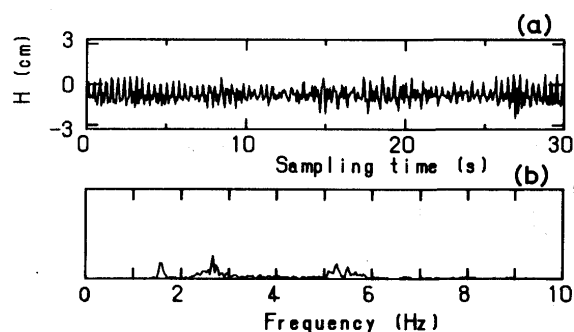


Fig. 5. Wave motion (a) and its Fourier analysis (b) at the bath length of 0.28m in Fig. 3.

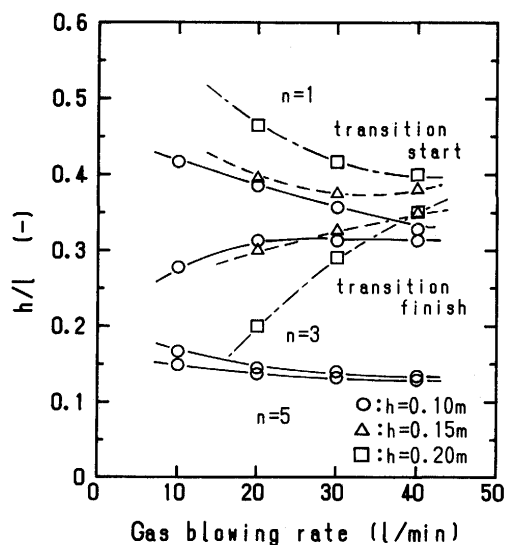


Fig. 6. Effect of gas blowing rate on transition range from $n=1$ to 3 and from $n=3$ to 5 in symmetrical blow.

移は図に示すように浴深0.10mについてのみ観察されたが、その遷移はガス量の影響はほとんど認められず、 h/l の狭い範囲で終了することが分かった。

3・2 1箇所左右非対称吹き込み実験

ガス吹き込み位置が浴の中心を外れた場合について、片側の仕切り板を任意の位置あるいは後述の特定位置に固定し、他方の仕切り板を移動させる実験を行った。

3・2・1 片側任意の距離

Fig. 7 に浴深0.10m, 吹き込みガス量30 l/min, 吹き込み箇所から0.20m (l_1) に片側の仕切り板を固定し、他方の仕切り板との距離 (l_2) を変化させて実験した結果を示す。図中の線の定義は Fig. 3 と同じである。

ここでも、1箇所中心吹き込みの場合と同様に、ガス吹き込みにより誘起された波は浴長が長くなる (h/l の減少) に従い、振動数をほぼ一定に保持するように、より大きい n 数に移行している。しかし、中心吹きの場合と異なり n が偶数の波も生じているが、これは吹き込み箇所から両側の仕切り板までの距離の比 (l_2/l_1) に関係し、吹き込み箇所が偶数の節に近い場合は偶数の節の波を造ることによる。そのため、図に見られるように l_2 の増加に伴い節数は偶、奇を繰り返しながら増えていく結果となった。また、中心吹きの実験で見られたように、 n 数が移行するときにガス上昇流の振幅が小さくなるのがここでも見られた。ただし、中心吹き (Fig. 3) に比べ各遷移域は狭い。浴深0.15m, 0.20m についても同様の結果が得られた。

中心吹きの観察では、槽型浴内では基本的にガス吹き込み位置を節にする波を造ろうとすることが認められた。一方、非対称吹き込みでは、 h/l で決まる誘起され易い波の節の位置が吹き込み箇所と一致しない場合、ガス上昇流が節の位置に傾き、生じ易い波を造ることが認められた。吹き込みガス流が節の位置に傾く範囲 (修正可能範囲) は深さ (h/l) が増すに従い広くなることがわかった。

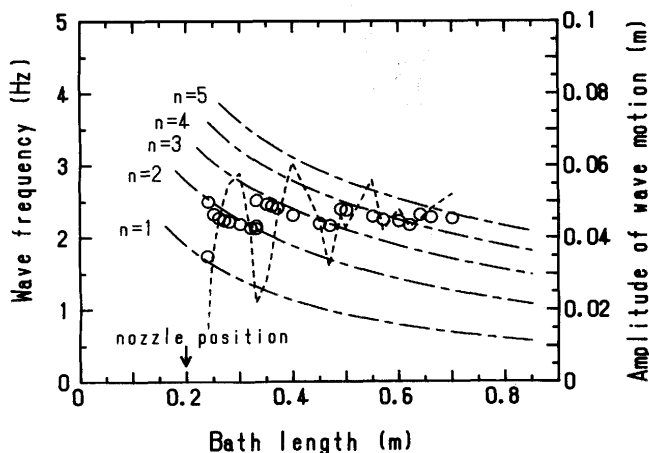


Fig. 7. Variation of frequency and amplitude of wave with bath length on non-symmetrical blow: bath depth 0.1m, N_2 blowing rate 30 l/min, nozzle-wall distance 0.2m fixed.

3・2・2 片側を遷移域浴長の 1/2 とした場合

中心吹き込み実験で、遷移域では浴の振動を抑制する効果が認められたが、その遷移域浴長の 1/2 の距離を吹き込み箇所と一方の仕切り板間距離 (l_1) とし、他方の仕切り板を移動し、浴振動を観察した。その 1 例を Fig. 8 に示す。この場合、 l_1 は Fig. 3 の $n=1$ から 3 の遷移浴長 (0.28~0.32 m) の 1/2 の 0.15m とした。他の吹き込み条件は Fig. 7 と同じである。その結果、Fig. 3 と同様、浴長 0.30m 近傍では $n=1, 3$ の波が共存し振幅も狭い。移動仕切り板までの距離 (l_2) が l_1 より短い範囲で $n=1$ の振幅の大きい波の急激な立ち上がりが観察されたが、その振幅は Fig. 3 に比べ狭い。また、浴長が長くなるに従い l_2/l_1 値により振幅の大小を繰り返すが、総じて、 l_1 が任意の場合に比べて振幅は小さいという結果が得られた。浴深 0.15m, 0.20m についても、ほぼ同様に結果が得られた。このことから、ノズルと隣接する壁との距離を遷移浴長の 1/2 にすることにより、浴の振動を抑制する可能性があるといえる。

以上の 1 箇所吹き込み実験の結果を基に、浴深 0.10m, 吹き込みガス流量 30 l/min での実験について、横軸に吹き込み位置と両端の壁 (仕切り板) との距離の比 (l_2/l_1) ($l_2 \geq l_1$, ここでは一般化のため狭い方を l_1 とした。+1 は線形化のため) を、縦軸に h/l をとり節数をパラメーターとしてまとめたのが Fig. 9 である。図から、中心吹き (横軸 2 の位置) では h/l の減少すなわち浴が長くなるのに従い、Fig. 3, 4 に見られたように節数が 1, 3, 5 と増えていくことがわかる。また、非対称域 ($l_1/l_2 > 1$) では、左上から右下がりに $n=1, 2, 3, \dots$ と带状に連なる領域と、その下に $n=3, 4, 5, \dots$ と連なる領域が認められる。

図中●印で示されている遷移域 (ガス上昇流が振動しないか、あるいは、振幅の小さい不規則な振動を起こす) は、各節数が占める領域の間隙に存在し、中心近傍での $n=1$

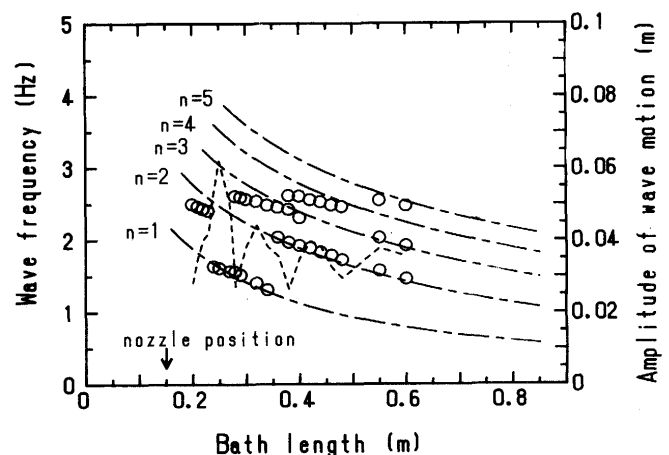


Fig. 8. Variation of frequency and amplitude of wave with bath length on non-symmetrical blow: bath depth 0.1m, N_2 blowing rate 30 l/min, nozzle-wall distance fixed at 1/2 of transition range.

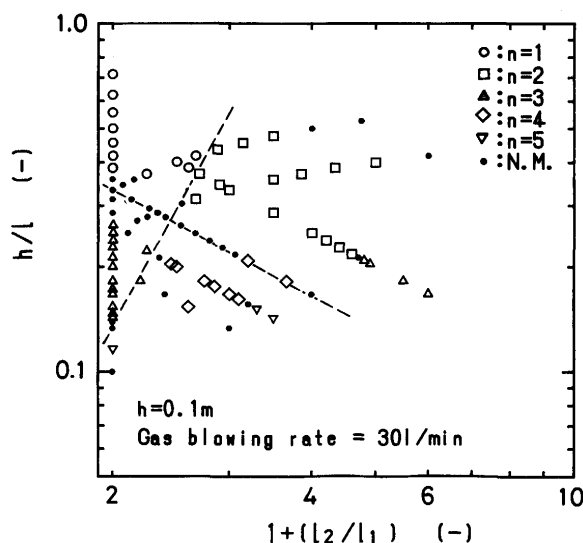


Fig. 9. Distribution of node number on $1 + (l_2/l_1) - h/l$ diagram. (N. M.: no wave motion or small amplitude of wave motion)

から3の遷移域は広いが、非対称域ではFig. 7で見られたように非常に狭い範囲で遷移している。図上、広がりはあるものの、各点は、 $l_2/l_1 = 1$ で $h/l = 0.3 \sim 0.4$ を通る勾配-1の線上、及び、同じく $h/l = 0.1$ を通る勾配+3強の線上に多く分布していると見なせる。図から、3あるいは4種の節数の領域が接するところでは、遷移域が広がりを有することがわかる。浴深0.15及び0.20mの吹き込みガス流量30, 40 l/minについても、Fig. 6で見られたように中心吹き込みの h/l に若干の差はあるがFig. 9と同様の n の領域を取ることが認められた。以上の検討から、この図は縦軸、横軸ともに無次元表示のため、1箇所吹き込みにおいて浴振動が発生しない浴長、浴深および吹き込み位置の関係をほぼ一般化していると考えられる。

3・2・3 1m浴長での吹き込み

複数箇所吹き込み実験は、容器浴長1mで行ったが、それに先立ち、各吹き込み箇所個々に吹き込んだ場合の振動測定結果をTable 1にまとめた。E, F, GはC, B, Aと対称位置のため省略した。また、本実験を通して浴深0.10mではFig. 3, 7, 8に見られるように誘起される波の振動数は1.5~2.5Hzであり、浴深0.15mでは1.4~2.1Hz, 0.20mでは0.7~1.5Hzを保持したことから、浴長1mの容器内でとり得る節数は浴深0.10mで5~9, 0.15mで3~5, 0.20mで1~3となる。

この結果から浴長1mの容器内の浴表面に正弦波を与えた場合の $n = 1 \sim 10$ の波形と、ガス吹き込み位置の関係をFig. 10に示した。Table 1の各吹き込み箇所の予測節数は、Fig. 10中の吹き込み位置と節が一致する波が正弦波とした場合の n 数を示している。ガス流量が変わっても各浴深で生じている波の n 数は、吹き込み位置ごとにほとんど同じであるが、ガス流量が少ないと波を誘起できないかあるいは、

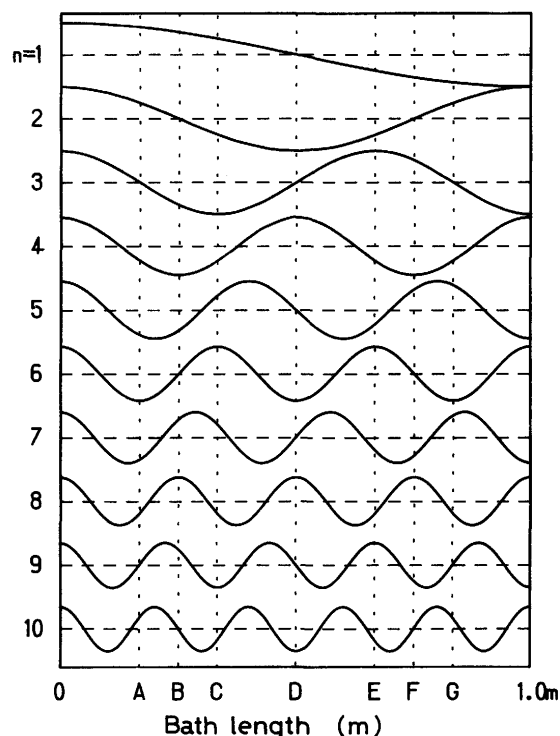


Fig. 10. Schematic representation of possible shallow water waves and nozzle positions in bath of 1m length.

高次の n 数の波が発生した。表中の↑印はガス流量が少ないため振動を生じないか、あるいは遷移域にある場合に観察されたガス上昇流が横揺れを生じない場合を示す（以降は↑で表す）。

Table 1の各吹き込み箇所誘起された波の実測 n 数は予測 n 数とほとんど一致しているが、浴深0.10mの箇所Aでは9をとらずに8、浴深0.15mの箇所Bでは6をとらずに5の波をとり予測 n 数と異なっている。Fig. 10で見ると、Aの場合側壁に近いことから、浴内流れの影響でジェットが常にB側に傾いていたため0.02m節の位置が移動した波を生成し、Bでは上述のようにこの浴深では3~5の波しかとらないことから、0.05mほど吹き込み箇所から中心側に節を持つ $n = 5$ の波を生じているといえる。このように、吹き込み箇所と浴深に応じた予測 n 数の節が一致している場合においても、波長の長い波が誘起される可能性があるといえる。

3・3 複数箇所吹き込み実験

吹き込み箇所A~Gの内、2箇所あるいは3箇所から吹き込んだ場合の浴振動の測定は、浴深0.10~0.20m、吹き込みガス流量30, 40 l/minで行い、その結果を2箇所吹き込みはTable 2に、3箇所吹き込みはTable 3にまとめた。

Table 2, 3の各浴深がとる節数は、3・2・3で述べた振動数と節数の関係を満足しており、浴長が増加しても振動数は保持されるという1箇所吹き込みでみられた現象が、複数箇所吹き込みにおいても確認されたといえる。

3・3・1 2箇所左右対称吹き込み

Table 1. Experimental results of node No. of wave (n) produced by the gas blow through each nozzle position in the bath of 1m length.

Bath depth (m)		0.10			0.15			0.20		
Gas blowing rate (l/min)		20	30	40	20	30	40	20	30	40
Gas blowing position and it's expected node No. (n)	D 1, 3, 5, 7, 9	(5, 7)	5	5	(3)	3	3	↑	3	3
	A (G) 3, 9	(8)	8	8	(3)	3	3	↑	3	3
	B (F) 2, 6, 10	(6)	6	6	↑	5	5	2	2	2
	C (E) - -	(8)	(5, 7)	(5, 7)	↑	4	4	↑	↑	↑

↑: no wave motion, (): small amplitude of wave motion

Table 2 中の (a) は左右対称の組合せ, (b) は非対称の組合せ, (c) は中心 D と A, B, C との組合せである。

左右対称位置からの吹き込みによる誘起される波の大部分は, Table 1 の A, B, C それぞれ 1 箇所吹き込みと同じ n 数の波が誘起されているが, 組合せ C-E (以後は単に C-E と記す) の $h=0.20\text{m}$ は $n=2$ が生じ, C のみの場合振動が認められなかったことと異なる。これは, 1 箇所吹き込みで吹き込み箇所が遷移域にあったが, Fig. 9 に見られるように遷移域幅が狭いため, 2 箇所吹き込みでは, 浴内流動の影響を受け双方のガス上昇流が浴内流れによって反発しあい, 中心から外側に向けて節を少し移動することにより $n=2$ の波が生じたといえる。表中 C-E の浴深 0.10m に 5, ↑ とあるのは, $n=5$ の波とガス上昇流が揺れない場合を繰り返していることを表し, () は振幅が $2\sim 3\text{cm}$ 以下の振動であったことを示す。

3.3.2 2 箇所左右非対称吹き込み実験

左右非対称箇所からの吹き込み (Table 2(b)) によって誘起される波の多くは, 個々の吹き込み箇所て生ずる n 数のどちらか一方をとっている。浴深 0.20m では, 各組合せにおいてガス量 $30, 40\text{ l/min}$ で同じ $n=2$ の波を誘起している。これは各組合せ共に, どちらか一方が 1 箇所吹き込みで $n=2$ の波を誘起していたことと, 吹き込み箇所間隔が $n=2$ の

波長の $1/2$ に近いこと, 節の位置の修正可能な範囲にあることから起きる。しかし, A-E の $h=0.20\text{m}$ では, Table 1 に見られる $n=3$ あるいは ↑ ではなく $n=2$ の波を生じている。これは, Fig. 10 で A, E とともに 0.08m 右に平行移動し, より波長の長い波を合成した結果といえる。

しかし, B-E の 0.15m では C (E) 1 箇所の $n=4$ より B と同じ $n=5$ の波を生じている。これは B の位置が $n=4$ の波の腹にあたること, $n=5$ の波は Fig. 10 で B および E の位置を $0.03\sim 0.04\text{m}$ 右に平行移動するだけで済むことから, 例外的に波長の短い波となったと考えられる。また, 浴深 0.15m の A-F では, F が G の位置まで節を 0.08m 移動すれば $n=3$ の波が出来るが, 浴深に比べ移動距離が大きく修正可能範囲外であるため, ↑ と $n=5$ を繰り返す結果となっている。

3.3.3 2 箇所の片方中心吹き込み実験

Table 2 (c) に 2 箇所の片方中心吹き込み実験で誘起された波の n 数を示す。ここでは, 1 箇所が中心 (D) 吹きのため, 各組合せにおいて生ずる波は n が奇数の波であり, 前項の非対称吹き込みと同様な移動修正を行い波を誘起している。また, 移動修正できない場合は ↑ となっている。この場合も各 n 数はほぼ 1 箇所の値と同じである。

ただし, 浴深 0.20m で C-D からの吹き込みでは, 静止浴

Table 2. Node No. of wave (Blowing into bath from two positions).

Bath depth (m)		0.10		0.15		0.20	
Gas blowing rate (l/min)		30	40	30	40	30	40
(a) Symmetrical gas blowing position	A - G	(8)	8	3	3	3	3
	B - F	6	6	(5)	(5)	2	2
	C - E	(5, ↑)	(5, ↑)	4	4	2	2
(b) Non-symmetrical gas blowing position	A - F	(8, ↑)	(8, ↑)	↑	(↑, 5)	2	2
	A - E	8	7	4	4	2	2
	B - E	(5, 7)	(5, 7)	(5)	(5)	2	2
(c) Non-symmetrical gas blowing position	A - D	(↑, 7)	(↑, 7)	3	3	(3, ↑)	3
	B - D	(5, 9)	(5)	(3, 5)	3, 5	(3)	(3)
	C - D	5	5	(5)	(5, ↑)	1	1

↑: no wave motion, (): small amplitude of wave motion

中にガスを徐々に吹き込んで所定流量にした場合、浴振動の発生はなかったが、浴面に波が残っている状態から吹き込みを開始するとガス上昇流が同一方向に大きく振れ、 $n=1$ の波を形成した。このように吹き込み箇所間隔が浴深より狭い場合、両者の間には節も腹もなくガス上昇流は平行に振動することが観察された。また、浴深より広い場合は、2箇所のガス上昇流が向かい合って振動する場合と同一方向に振動する場合がある。向かい合って振動する場合は、吹き込み箇所間に腹が生じ、同一方向に振動する場合は、吹き込み箇所間に節が生じる。

またB-Dの0.20mではB単独では $n=2$ をとるのに対し、 $n=3$ の波を発生しているのはDにおける浴内流動によってBを壁側に押したためと考えられる。

3・4 3箇所吹き込み実験について

Table 3に3箇所吹き込みにより誘起された波の n 数の結果を示す。(a)は吹き込み箇所が左右対称の3組合せについての結果、(b)は吹き込み箇所が左右非対称の組合せについての結果である。いずれの組合せにおいても、吹き込み箇所(D)を使用していることから、ほとんどの組合せにおいてD1箇所吹き込み、あるいは、Dを組み合わせた2箇所吹き込みとほぼ同じ波を造る。

A-D-Gの左右対称の吹き込み実験では、いずれの浴深もFig. 10に見られる予測通りの n 数となった。 $h=0.20\text{m}$ のB-D-FはB-Fが左右対称の $n=2$ の波を造るが、その腹にDからガスが吹き込まれたため振動が止められたと理解できる。一方、 $h=0.15\text{m}$ のC-D-Eでは、C-EはB-F同様左右対称のため $n=4$ の波を造り、そこに波の腹の位置Dからガスを吹き込んでいるにも拘らず $n=4$ の波が存続した。この原因は、A-D-Gでは3箇所が0.25mに等間隔に配置されているのに対し、C-D-Eでは間隔が狭くCに対しD-Eが、Eに対しC-Dが壁の効果をもたらし、C、Eは壁側に揺れ、Dは直上に吹き上げる現象を呈したためといえる。中央に壁があるとすると、浴長0.5m、浴深0.15m、 $l_2/l_1=2$ の水槽とみなすことができ、この場合の波の n 数はFig. 9から $n=2$ が得られる。この波がDに対称に生じたため $n=4$ の波が消えなかったといえる。

C-D-Eの $h=0.20\text{m}$ はTable 2のC-Dで述べたように吹

き込み箇所間隔が浴深より小さいため、3箇所のガス上昇流が同一方向に振動し $n=1$ の大波が起きた。

Table 3 (b)の左右非対称の吹き込み実験で、 $h=0.10, 0.15\text{m}$ の n 数はTable 3 (a)までに得られた値のいずれかと共通している。 $h=0.20\text{m}$ におけるA-D-Fの波の構成を見ると、Table 2でA-Fは波 $n=2$ をとり、その腹部にDからガスを吹き込んでいるため、B-D-Fと同じく振動が抑止されることが期待されたが、現象的にはFがGに移動しA-D-G同様 $n=3$ の波を造った。

また、 $h=0.20\text{m}$ のA-D-Eは、A-Dは $n=3$ をとりD-E(C)が上述のように一体で振動することから表に示すように波高のある $n=3$ と $\uparrow$ を繰り返す結果が得られた。一方、Aより0.08m Dに近いB-D-Eでは(a)のC-D-Eと同じ $n=1$ の波が発生した。

4. 結言

ガス底吹き樋型水槽による浴の振動実験から以下の知見が得られた。

1) 底吹き込みガスにより誘起される波は、長手方向の両壁を正弦波の腹にし、基本的には吹き込み位置を節にする波が誘起される傾向にある。

2) 底吹きガスにより誘起される波長は、浴深によりその範囲がほぼ決まり、1箇所吹き込みで浴長を増加するのに伴い、波の節数を増加させながら振動数を維持する。

3) 1箇所吹き込みにおける波の節数は浴深と浴長の比(h/l)と、吹き込み位置(l_2/l_1)の無次元図上の領域で現され、各領域の間に遷移域、すなわち振動の抑制された領域が存在する。

4) 波の節数が遷移するときに振幅が小さくなり、浴の振動が治まることが認められた。中心吹きでは節数は奇数を取り、非対称吹きでは浴長の増加に伴い偶、奇を繰り返しつつ節数を増す。この効果から浴の防振について以下に記す。

5) 1箇所中心で吹き込む場合は、波の節数が遷移する浴深と浴長の比(h/l)で操作する。ただし節数が奇数同士の遷移であるので、低次の節数での遷移域を利用の方が範

Table 3. Node No. of wave (Blowing into bath from three positions).

Bath depth (m)		0.10		0.15		0.20	
Gas blowing rate (l/min)		30	40	30	40	30	40
(a) Symmetrical gas blowing position	A-D-G	9	9	3	3	3	3
	B-D-F	5	5	(5)	(5)	$\uparrow$	$\uparrow$
	C-D-E	5	5	4	4	1	1
(b) Non-symmetrical gas blowing position	A-D-F	(9)	9	3	3	$\uparrow$	$\uparrow$
	A-D-E	(7)	7	(3)	3	3, $\uparrow$	3, $\uparrow$
	B-D-E	(5)	5	5	5	1	1

$\uparrow$: no wave motion, (): small amplitude of wave motion

囲が広いため有効である。

6) 1 箇所では非対称の位置で吹き込む場合は、両壁までの距離の比 (l_2/l_1) と節数の遷移する (l_2/l_1) を一致させる。ただし、節数が偶、奇の遷移をおこなうため、遷移域範囲は狭くなるので中心での吹き込みよりは不利である。

7) 複数箇所から吹き込む場合は、壁に近接する吹き込み箇所を中心吹き込みでの遷移域浴長の $1/2$ の距離に設置し、同距離を吹き込み箇所間隔とする。少なくとも、吹き込み箇所間隔を浴深の 2 倍以上にとり、節数の小さい長波長の波を造らせないようにすることが望ましい。

文 献

- 1) 中川龍一, 吉松史朗, 上田卓弥, 三井達郎, 福沢 章, 佐藤 彰, 尾崎 太: 鉄と鋼, **59** (1973), p. 414
- 2) 福沢 章, 中川龍一, 吉松史朗, 上田卓弥: 鉄と鋼, **64** (1978), p. 1333
- 3) 福沢 章, 中川龍一, 吉松史朗, 佐藤 彰, 尾崎 太, 周 栄章, 林 宗彩, 黄 曄, 姜 鈞普: 鉄と鋼, **73** (1987), p. 2145
- 4) H. K. Worner, F. H. Baker, I. H. Lassam and R. Siddous: J. Metals, **21** (1969), p. 50
- 5) 中西恭二, 野崎 努, 加藤嘉英, 江見俊彦: 鉄と鋼, **66** (1980), p. 1307
- 6) 福沢安光, 笠原 章, 渡辺敏昭, 笠原和男, 松本文明, 尾崎 太, 佐藤 彰, 福沢 章, 吉松史朗: 鉄と鋼, **71** (1985), p. 1919
- 7) 加藤嘉英, 中西恭二, 野崎 努, 鈴木健一郎, 江見俊彦: 鉄と鋼, **68** (1982), p. 1604
- 8) 岸 力: 物部 水理学 (本間 仁, 安芸皎一編), (1962), p. 464 [岩波書店]
- 9) 日野幹雄: 明解 水理学, (1983), p. 280 [丸善]