

# 連铸铸型内メニスカスにおける Ar ガス気泡の挙動

水上 英夫\*・平城 正\*・渡部 忠男\*

The Behavior of Argon Gas Bubbles at Meniscus in Continuous Casting Mold

Hideo MIZUKAMI, Sei HIRAKI and Tadao WATANABE

**Synopsis :** The behavior of argon gas bubbles at meniscus in the continuous casting mold was studied using a Wood's metal model. Argon gas was injected into Wood's metal flow through a porous plate or an orifice set in the immersion nozzle. Both the diameter and the number of argon gas bubbles generated at meniscus regions were measured with a color high-speed video camera. Generation rate of argon gas at each region of meniscus was measured with a mass flow meter. The distribution of argon gas bubbles at meniscus was dependent on the flow rate of argon gas injected into the immersion nozzle, but was independent on the flow velocity of Wood's metal in the nozzle. The number of argon gas bubbles at meniscus was dependent on the diameter of bubble. The ratio of the number of argon gas bubbles at meniscus in a unit time was estimated as the following function of bubble diameter.

$$n = \Omega d^{-5.5}$$

where  $n$  is the ratio of the number of argon gas bubbles at meniscus in a unit time,  $\Omega$  is the constant and  $d$  is the diameter of argon gas bubble.

The flow velocity of Wood's metal at meniscus in mold was influenced by the injection rate of argon gas into the immersion nozzle.

**Key words:** Argon gas; bubble; meniscus; continuous casting; mold; Wood's metal.

## 1. 緒言

連続铸造スラブから製造される極低炭素鋼板の表面品質向上のためには、鋼板表面に発生するへげ疵の低減が不可欠である。これにはへげ疵の一因と考えられる気泡の初期凝固シェルへの捕捉を抑制することが重要である。

連続铸造においては、一般に浸漬ノズルの閉塞防止のため浸漬ノズル内に Ar ガスを導入している。連铸スラブの表層に関する研究<sup>1)</sup>によれば、Ar ガスを含んだピンホールが存在が確認されており、Ar ガスの供給源が他に無いことを考え併せるとピンホールは浸漬ノズル内に導入された Ar ガスにより形成されたものと予想される。

ところで、連铸铸型内の初期凝固シェル形成に影響を及ぼす溶鋼流動に関しては従来から Ar ガスの影響を考慮しないモデル実験および解析<sup>2)</sup>が行われてきた。最近、铸型内溶鋼流動に及ぼす Ar ガス気泡の重要性が認識され、浸漬ノズル内に導入される Ar ガスを考慮したモデル実験や流動解析<sup>3-12)</sup>が進められ、連铸铸型内における溶鋼および Ar ガス気泡の挙動予測が試みられるようになってきた。しかし、初期凝固シェルへの気泡の捕捉は、浸漬ノズル内に導入される Ar ガスおよび浸漬ノズルから排出される Ar ガス気泡の挙動と深く関連すると考えられるが、铸型内の気泡挙動に関する詳細な研究は見当たらない。

そこで本研究では連铸铸型内の Ar ガス気泡の挙動を明らかにするため、低融点金属であるウッドメタルを用いたモデル実験を行い、浸漬ノズル内への Ar ガスの導入条件と铸型内メニスカスにおける Ar ガス気泡の直径および個数分布、気泡の発生位置の関連を検討した。また、铸型内のメニスカスの挙動を特徴づけるメニスカス流速に及ぼす Ar ガス気泡の影響も検討した。

## 2. 実験方法

### 2.1 実験装置

Fig. 1 に実験装置の模式図を示す。実験装置は、铸型、浸漬ノズル、配管系、電磁流量計、電磁ポンプ、ウッドメタル保管用タンクで構成されている。铸型断面サイズは実機铸型想定サイズの 1/4 縮尺とした。実験装置はすべてステンレス製であり、溶鋼と耐火物が濡れにくいと同様にステンレスとウッドメタルは濡れにくい材質である。铸型と配管系にはヒータおよび熱電対が設置されており、ウッドメタルの温度が一定となるように温度制御を行った。ウッドメタルの循環流量の制御は、配管途中に設置した電磁流量計の出力信号を基に電磁ポンプへの印加電圧を変えて行った。電磁ポンプの電磁力がウッドメタルに印加されることにより循環中のウッドメタルの温度が上昇するた

平成 11 年 11 月 18 日受付 平成 11 年 12 月 27 日受理 (Received on Nov. 18, 1999; Accepted on Dec. 27, 1999)

\* 住友金属工業 (株) 総合技術研究所 (Corporate Research & Development Laboratories, Sumitomo Metal Industries, Ltd., 16-1 Oaza-Sunayama Hasakimachi Kashim-gun Ibaraki-ken 314-0255)

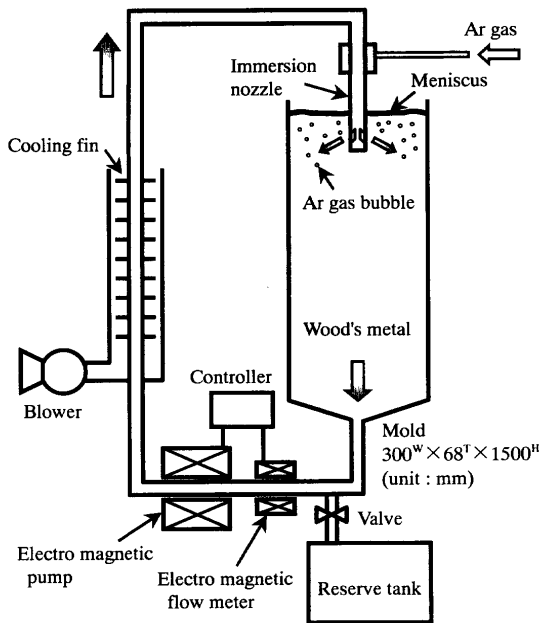


Fig. 1. Schematic diagram of experimental apparatus for molten Wood's metal flow in continuous casting mold.

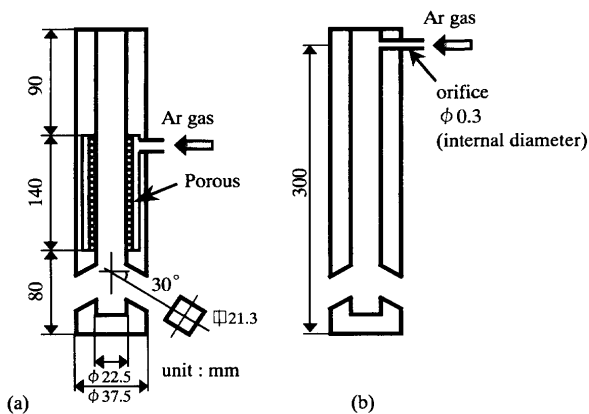


Fig. 2. Schematic diagram of immersion nozzle. (a) porous type nozzle and (b) orifice type nozzle.

め、配管の一部に冷却フィンを設けブローを用いて強制空冷することでウッドメタルの温度を一定に保った。

モデル実験では、実機とモデル装置を相似させる必要がある。本研究は浸漬ノズル内に導入するArガスの挙動を対象としているため、相似則として浸漬ノズル内のウッドメタル循環流速に対するReynolds数近似を採用した。なお、浸漬ノズル内のウッドメタル循環流速は、ウッドメタルの循環流量を浸漬ノズル断面積で割り求めた。

本研究では、メニスカスにおける気泡の発生挙動に及ぼす浸漬ノズル内へのArガス導入条件の影響を検討するため、Fig. 2に示すようなポラスおよび貫通孔を有する浸漬ノズルを用いて実験を行った。なお、ポラス・ノズルは、メッシュ・サイズ $1 \times 10^{-6}$  mのステンレス製焼結体を内装して作製した。

本実験装置の循環系は閉ループを形成しており、配管の

Table 1. Experimental conditions.

Model rule	Reynolds number in immersion nozzle
Mold size, mm	$300^W \times 68^T \times 1500^H$
	1/4 scale of continuous casting mold
Molten metal	Wood's metal
Experimental temperature, K	383
Wood's metal velocity in nozzle, $\text{ms}^{-1}$	1.0 (Casting speed : $1.2 \text{mmmin}^{-1}$ ) 0.68 ( $0.8 \text{mmmin}^{-1}$ )
Argon gas injection rate, $\text{m}^3 \text{s}^{-1}$	$1.1 \times 10^{-5}$ (10NI/min) $0.3 \times 10^{-5}$ (3NI/min)
Mold material	Stainless steel
Nozzle material	Stainless steel
Nozzle angle, degree	downward, 30
Nozzle depth, m	$8.4 \times 10^{-2}$

Table 2. Physical properties of Wood's metal.

Property	Value
Composition, mass%	50.0Bi-26.7Pb-13.2Sn-10.0Cd
Melting point, K	343
Density, $\text{Kgm}^{-3}$	$9.6 \times 10^3$
Viscosity, $\text{Pa} \cdot \text{s}$	$3.2 \times 10^{-3}$
Surface tension, $\text{Nm}^{-1}$	0.29

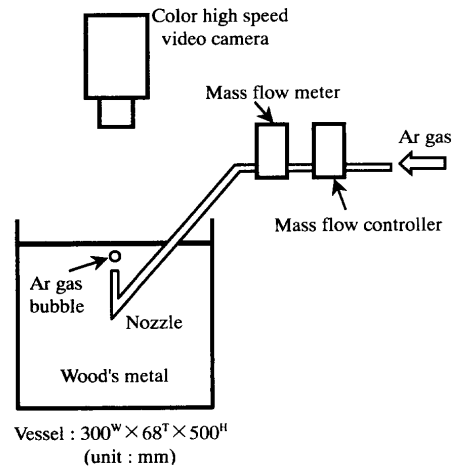


Fig. 3. Calibration method of diameter of Ar gas bubble measured by a color high speed video camera.

接続部はフランジ構造をしているため空気の吸い込みは無く、鑄型内のメニスカスで観察される気泡は浸漬ノズルから導入されたArガスにのみ起因する。

Table 1に実験条件を、Table 2に実験で使用したウッドメタルの物性値を示す。

## 2・2 メニスカスにおけるArガス気泡径の評価

Arガス気泡の直径および個数の分布の測定には最高600フレーム毎秒の撮影が可能なカラー高速度ビデオ・カメラを使用し、撮影された画像からArガス気泡の直径および個数の測定を行った。メニスカスで観察されるArガス気泡の形状を評価するには、Arガス気泡の直径と気泡1個当たりの体積から求めた気泡直径との関係を把握する必要がある。そこで、Fig. 3に模式的に示す装置を用いて、ビデオ・カメラの撮影結果から求めた気泡の直径と、気泡が球形であると仮定して気泡を1個発生させるのに要するArガス流量から求めた直径の関連を検討した。この際、Arガスの温度はウッドメタルの温度383Kになっていると仮

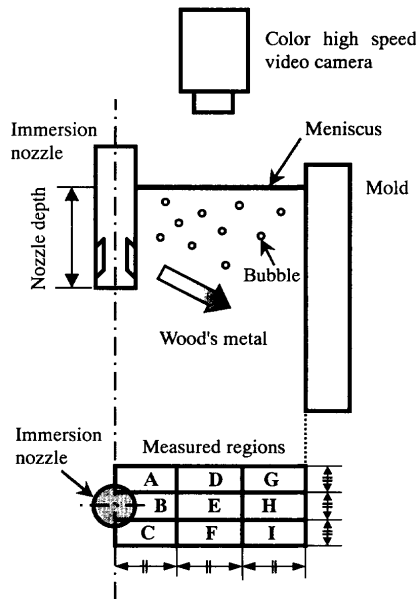


Fig. 4. Schematic diagram of measured system both of diameter and number of Ar gas bubble at meniscus by a color high speed video camera.

定し体積膨張を考慮した。

モデル実験装置の鑄型と断面サイズが同じで温度制御の可能な容器内でウッドメタルを溶融し温度383Kに保持した。このウッドメタル中にArガス導入用のステンレス製パイプを浸漬させ、気泡が間欠的に発生するようにマスフロー・コントローラで流量を制御しながらArガスを吹き込んだ。パイプの先端部 $3 \times 10^{-2}$  mを曲げてパイプの先端部を鉛直とすることで気泡の発生を安定化させた。気泡の直径はパイプの外径で決まることから、パイプの外径を変えて実験を繰り返した。

Arガス気泡の直径は、ウッドメタル容器の上方に配置したカラー高速度ビデオ・カメラを用いて撮影し、ウッドメタル表面に現れた気泡の直径を測定した。気泡の直径はウッドメタル表面に浮上するにつれて変化し、気泡は最終的に破裂して消滅する。このためビデオ・カメラによる撮影結果から気泡の直径を特定するには、気泡の直径の測定タイミングを規定する必要がある。本研究では、メニスカスに浮上する気泡の直径が最大となる際の直径を撮影フレームから測定した。なお、気泡径の測定可能範囲は、ビデオ・カメラの空間分解能から換算すると $1.5 \times 10^{-4}$  m以上である。

### 2・3 Arガス気泡の個数・径分布の測定

Arガス気泡の個数・径分布の測定方法の模式図をFig. 4に示す。

ステンレス製鑄型の上方にカラー高速度ビデオ・カメラを配置した。このビデオ・カメラの撮影速度を毎秒250フレームとしていったんビデオ・カメラ内のメモリーに保存してからVTRに記録し、実験終了後の再生画像からArガス気泡の直径および個数の測定を行った。測定時間は1s

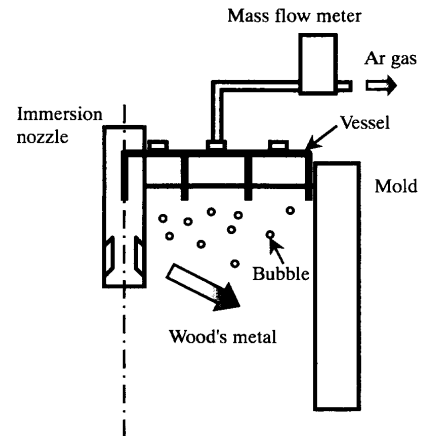


Fig. 5. Schematic diagram of measurement system of Ar gas flow rate at meniscus in mold by a mass flow meter.

とし、250フレームをコマ送りして気泡の個数および直径の測定を行った。撮影速度を大きくしたため、同じ位置に気泡が連続して現れる。そこで、各フレームごとに気泡の位置をディスプレイ上にマーキングし、同じ位置に連続して現れる気泡は1つとすることでダブル・カウントを防いだ。

Arガス気泡の測定は、鑄型幅の1/2領域を対象とした。気泡の発生位置の分布を求めるために、モニタ上で観察されるメニスカスの領域を9分割し、各分割領域内における気泡の個数を測定した。

### 2・4 Arガス発生量分布の測定

ビデオ・カメラの撮影結果からArガス気泡の個数分布、気泡径分布が分かれば、メニスカスの各領域におけるArガスの発生量を求めることができる。しかし、ビデオ・カメラによる撮影結果からArガス発生量を算出するには解析に時間を要するため、長時間に渡る測定は事実上困難である。そこで、マス・フローメータを用いてメニスカスの各領域におけるArガスの発生量を測定し、Arガス発生挙動の検討を行った。測定時間は30sとし、Fig. 4に示す測定方法と比較するため単位時間当たりの流量に換算した。

Arガスの発生量は、Fig. 5に模式的に示す装置を用いて測定した。鑄型内メニスカスに内部を9分割したステンレス製容器の先端部をウッドメタル中に $2 \times 10^{-3}$  m浸漬させ、各領域ごとにマスフロー・メータでArガス発生量を測定した。Arガス発生量の測定領域は、ビデオ・カメラによる測定領域A~Iに対応させて、Arガス気泡の個数および直径の分布と発生量の関連を検討した。ステンレス製の捕集容器とマスフロー・メータの接続にはステンレス製配管およびスウェージ・ロックを用い、Arガスの漏れを無くした。なお、マスフロー・メータの測定精度は $8.3 \times 10^{-8}$  m<sup>3</sup> s<sup>-1</sup>である。

### 2・5 メニスカス流速の測定

Arガス気泡により鑄型内流動が変化することが予想さ

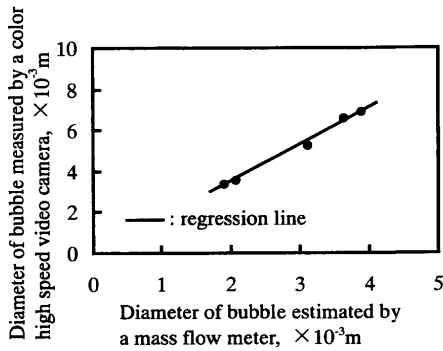


Fig. 6. Relationship between diameter of Ar gas bubble measured by a color high speed video camera and diameter estimated by a mass flow meter.

れる。そこで、鑄型内流動を特徴づけるメニスカス流速を測定し、Arガス気泡の影響を評価した。メニスカス流速の測定には、パイプ流速計<sup>13)</sup>を使用した。この流速計は、外径 $3 \times 10^{-3}$  m、長さ $6 \times 10^{-3}$  mの永久磁石と、磁石内の両側面に埋設された外径 $0.2 \times 10^{-3}$  mのエナメル線で構成されており、局所的なウッドメタル流速の測定が可能である。流速の測定は、鑄型幅 $1/4W$ 、鑄型厚み $1/2T$ の位置で、メニスカス下 $1.5 \times 10^{-2}$  m位置で行い、流速の鑄型幅方向成分を求め、この値でメニスカス流速を代表させた。

### 3. 結果および考察

#### 3.1 メニスカスにおけるArガス気泡形状

気泡が球形であると仮定して1個の気泡を発生させるために必要なArガス量から求めた気泡の直径と、カラー高速度ビデオ・カメラによる撮影結果を基にして測定した気泡の直径の関係をFig. 6に示す。

Arガス流量から換算した気泡径の増大と共に、ビデオ・カメラで撮影した気泡径も直線的に大きくなる。ただし、流量から換算した気泡径よりもビデオ・カメラで測定した気泡径の方が大きい。これはメニスカスにおいて観察される気泡が球形でないためと予想される。

気泡径と気泡形状について従来から研究<sup>14)</sup>が行われており、気泡の形状はEotvos数 $Eo$ とReynolds数 $Re$ の値により予測することができる。ここで、

$$Eo = \frac{d^2(\rho - \rho_{Ar})g}{\sigma} \quad \dots\dots\dots(1)$$

$$Re = \frac{dUp}{\mu} \quad \dots\dots\dots(2)$$

ただし、 $d$ : 気泡直径(m)、 $\rho$ : ウッドメタルの密度( $\text{kg m}^{-3}$ )、 $\rho_{Ar}$ : Arガスの密度( $\text{kg m}^{-3}$ )、 $g$ : 重力加速度( $\text{ms}^{-2}$ )、 $\sigma$ : 表面張力( $\text{Nm}^{-1}$ )、 $U$ : 気泡の終末速度( $\text{ms}^{-1}$ )、 $\mu$ : 粘性係数( $\text{Pa}\cdot\text{s}$ )である。

気泡の終末速度は従来<sup>6)</sup>と同様な手法で次式の

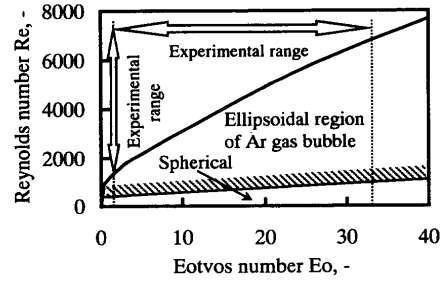


Fig. 7. Relationship between Reynolds number and Eotvos number of Ar gas bubble in molten Wood's metal.

$$U = \sqrt{\frac{4d(\rho - \rho_{Ar})}{3\rho C_d}} \quad \dots\dots\dots(3)$$

ように求めた。

ただし、 $C_d$ : 気泡の抵抗係数である。この抵抗係数はReynolds数に依存して、以下の様に表される。

$$C_d = \begin{cases} 24Re^{-1} & (0 < ReM^{0.23} < 8M^{0.068}) \\ 0.076(ReM^{0.23})^{1.82} & (8M^{0.068} < ReM^{0.23} < 6) \quad \dots\dots\dots(4) \\ 1.25(ReM^{0.23})^{0.26} & (6 < ReM^{0.23} < 16.5) \end{cases}$$

ここで、パラメータ $M$ は次式で表される。

$$M = \frac{g\mu^4}{\rho\sigma^3} \quad \dots\dots\dots(5)$$

上記の計算により求めたEotvos数とReynolds数の関係をFig. 7に示す。

Fig. 7中に示す結果と、従来の報告<sup>14)</sup>を考え併せると、本研究における $Eo$ 数と $Re$ 数の範囲内ではメニスカス位置におけるArガス気泡が厚み方向に扁平化しているものと考えられる。このため、Fig. 6で示した様に、ビデオ・カメラによる撮影結果から求めたArガス気泡の直径の方が、Arガス量から気泡が球形であると仮定して求めた直径よりも大きくなったものと考えられる。以上の推定から以下では、ビデオ・カメラによる撮影で測定した気泡径をFig. 6の関係で換算し、これを真の気泡径として整理した。

#### 3.2 Arガス気泡の個数分布

浸漬ノズル内へのArガス導入にポーラス・ノズルを用いた場合に、メニスカスで単位時間当たりにも出現したArガス気泡の個数をカラー高速度ビデオ・カメラにより測定し、その結果をFig. 8(a)~(d)に示す。Arガス発生を特定するためメニスカスを9等分割し、各領域ごとに気泡の個数を測定した。

Fig. 8(a)に浸漬ノズル内ウッドメタル循環流速 $1.0 \text{ ms}^{-1}$ 、Arガス流量 $1.1 \times 10^{-5} \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ の場合のArガス気泡の個数分布を示す。測定領域はFig. 4中の記号に対応する。Arガス気泡は浸漬ノズル近傍の領域A, B, Cで多く、鑄型短片側の領域G, H, Iで少なくなっている。鑄型厚み方向の個数分布を見ると、鑄型厚み中央の領域B, E, Hの方が鑄型長辺

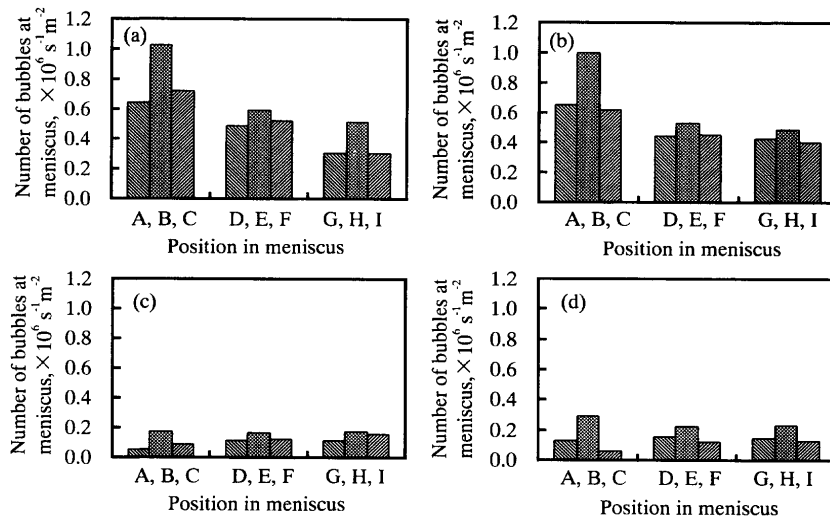


Fig. 8. Relationship between number of Ar gas bubble and measured position in meniscus.  
 (a) Wood's metal velocity:  $1.0 \text{ m s}^{-1}$ , Ar gas injection rate:  $1.1 \times 10^{-5} \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ , (b)  $0.68 \text{ m s}^{-1}$ ,  $1.1 \times 10^{-5} \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ , (c)  $1.0 \text{ m s}^{-1}$ ,  $0.3 \times 10^{-5} \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$  and (d)  $0.68 \text{ m s}^{-1}$ ,  $0.3 \times 10^{-5} \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ .

側の領域A, D, Gと領域C, F, Iよりも多いがその差は小さい。

Fig. 8(b)にウッドメタル循環流速 $0.68 \text{ m s}^{-1}$ , Arガス流量 $1.1 \times 10^{-5} \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ とした場合の気泡の個数分布を示す。

Fig. 8(a)の場合より、ウッドメタル循環流速を小さくすることでメニスカスの気泡個数に及ぼす浸漬ノズル内のウッドメタル循環流速の影響を検討した。Arガス気泡の個数は浸漬ノズル側で多く、鋳型短辺側で少なくなっている。鋳型厚み方向の個数は、厚み中央領域B, E, Hの方が両長辺側の領域A, D, Gおよび領域C, F, Iよりもわずかであるが多くなっている。Arガス気泡の個数および分布はFig. 8(a)の場合とほぼ同じであり、ウッドメタル循環流速の影響は認められない。

Fig. 8(c)にウッドメタル循環流速 $1.0 \text{ m s}^{-1}$ , Arガス流量 $0.3 \times 10^{-5} \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ とした時のメニスカスにおけるArガス気泡の分布を示す。メニスカスに現れるArガス気泡個数の領域による差は小さい。同じウッドメタル循環流速であるFig. 8(a)の結果と考え併せると、本実験条件の範囲内ではArガス気泡の個数は浸漬ノズル内に導入するArガス流量に依存するものと考えられる。

Fig. 8(d)には本実験条件の範囲内でウッドメタル循環流速およびArガス流量を低減させた時のArガス気泡分布を示す。浸漬ノズル内のウッドメタル循環流速 $0.68 \text{ m s}^{-1}$ , Arガス流量 $0.3 \times 10^{-5} \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ である。鋳型幅方向あるいは鋳型厚み方向におけるArガス気泡の個数の差は小さい。この傾向は、Fig. 8(c)の場合と同様である。ウッドメタル循環流速が同じFig. 8(b)と比べると、Arガス気泡の各位置の個数はArガス流量に依存することが分かる。

Arガス導入にポーラス・ノズルを用いたFig. 8の結果から、メニスカスにおけるArガス気泡の分布はArガス流量に依存し、ウッドメタル循環流速には依存しないことが明

らかとなった。

Arガス導入に貫通孔を有する浸漬ノズルを用いた場合も、3・4節に後述する様にポーラス・ノズルと同様の結果が得られた。浸漬ノズル内へのArガス導入方法を変えてもメニスカスで現れるArガス気泡の分布に差が認められないのは、ウッドメタルとステンレス製浸漬ノズルの濡れ性が悪く、浸漬ノズル内のArガス気泡の形成がArガスの導入方法に影響されなかったためと考えられる。最近の水モデルによる研究<sup>11)</sup>では、浸漬ノズル内にポーラス・ノズルを用いてArガスを導入したとしても水とノズルの濡れ性が悪いと微細な気泡は発生せず、膜状に発達したArガスが浸漬ノズル内面を覆うということが明らかにされている。貫通孔を有する浸漬ノズルを用いた場合でも気泡の分散挙動に有意差が認められなかったのは、本実験系においても同様の現象が生じたものと考えられる。

### 3・3 Arガス気泡の発生量分布

浸漬ノズル内のArガス導入にポーラス・ノズルを用いた場合のメニスカスにおけるArガス気泡の発生量の測定結果をFig. 9(a)~(d)に示す。Arガス気泡の発生量の測定にはFig. 5に示した様にマスフロー・メータを用いた。メニスカスの分割方法はFig. 8の場合と同様であり、メニスカス領域でのArガス気泡の個数と発生量の対応を検討した。

Fig. 9(a)には浸漬ノズル内ウッドメタル循環流速 $1.0 \text{ m s}^{-1}$ , Arガス流量 $1.1 \times 10^{-5} \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ とした場合のArガス気泡の発生量分布を示す。Arガス気泡の発生量は、浸漬ノズル側の領域A, B, Cで最も多く、浸漬ノズルから鋳型短辺間中央領域D, E, F, 鋳型短辺側の領域G, H, Iの順に、浸漬ノズルから離れるにつれて少なくなる。また、鋳型厚み方向におけるArガス発生量の差は小さい。

Fig. 9(b)にウッドメタル循環流速 $0.68 \text{ m s}^{-1}$ , Arガス流量 $1.1 \times 10^{-5} \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ の場合の測定結果を示す。Fig. 9(a)の条件

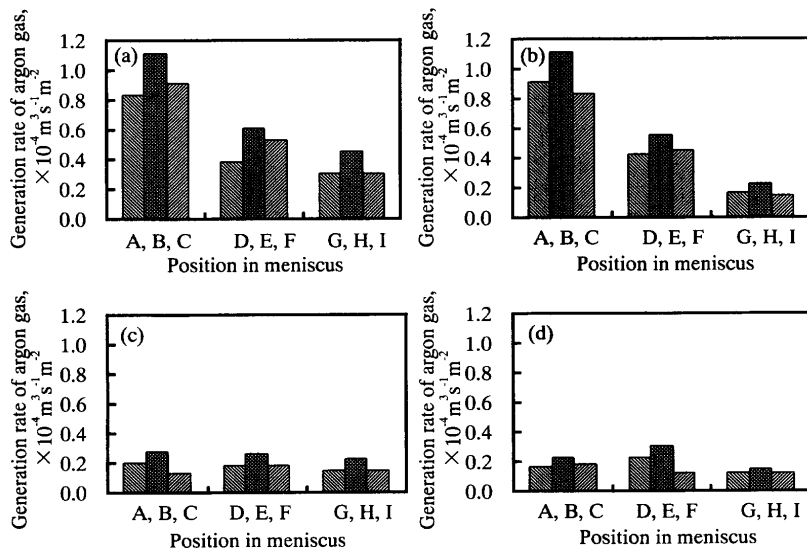


Fig. 9. Relationship between generation rate of Ar gas at meniscus and measured position in meniscus. (a) Wood's metal velocity:  $1.0 \text{ m s}^{-1}$ , Ar gas injection rate:  $1.1 \times 10^{-5} \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ , (b)  $0.68 \text{ m s}^{-1}$ ,  $1.1 \times 10^{-5} \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ , (c)  $1.0 \text{ m s}^{-1}$ ,  $0.3 \times 10^{-5} \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$  and (d)  $0.68 \text{ m s}^{-1}$ ,  $0.3 \times 10^{-5} \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ .

の場合よりも浸漬ノズル内におけるウッドメタル循環流速を低下させ、ウッドメタル循環流速の影響を検討した。Arガスの発生量の分布は、Fig. 9(a)と同様の傾向を示し、発生量は浸漬ノズル側の領域A, B, Cが最も多く、領域D, E, Fおよび領域G, H, Iと浸漬ノズルから離れるにつれて少なくなっている。鑄型厚み方向におけるArガス発生量の差は小さく、Fig. 9(a)と同様の傾向を示した。

Fig. 9(c)はウッドメタル循環流速  $1.0 \text{ m s}^{-1}$ 、Arガス流量  $0.3 \times 10^{-5} \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ とした場合の測定結果を示す。Fig. 9(a)の条件よりArガス流量を低減させ、Arガス導入量の影響を検討した。Arガス発生量の鑄型幅方向における差は認められない。ただし、鑄型厚み中央領域B, E, Hの方が鑄型長辺側の領域A, D, GあるいはC, F, Iよりもわずかであるが多くなっている。Fig. 9(a)と比較するとArガス気泡の発生量分布はArガス流量の方がウッドメタル循環流速よりも支配的であることが考えられる。

Fig. 9(d)はウッドメタル循環流速  $0.68 \text{ m s}^{-1}$ 、Arガス流量  $0.3 \times 10^{-5} \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ の場合のArガス発生量分布を示す。Arガスの分布はFig. 9(c)と同様の傾向を示している。

Fig. 9(a)~(d)の結果から、本実験条件の範囲内ではメニスカスにおけるArガス気泡の発生量分布は浸漬ノズル内に導入されるArガス流量に依存し、ウッドメタル循環流速に依存しないことが明らかとなった。Fig. 9で測定されたArガス気泡の発生量は鑄型全体の1/2領域に相当することから浸漬ノズル内に導入されたArガス量の1/2とほぼ一致し、浸漬ノズル内に導入されたArガス気泡がメニスカスですべて発生している。また、Fig. 8(a)~(d)に示したArガス気泡の個数分布とFig. 9(a)~(d)の発生量分布の傾向は対応しており、Arガス気泡の個数が多いほどArガス量も多くなっている。なお、ビデオ・カメラの撮影結果を基に

Arガス気泡の直径と個数から算出したメニスカスにおけるArガスの総発生量と、マスフロー・メータにより測定したArガス発生量はほぼ一致したことから、Fig. 8の結果は妥当であり、またステンレス容器の先端部をウッドメタル中に浸漬させた影響は無視できるものと考えられる。

浸漬ノズル内へのArガス導入のため貫通孔を有するノズルを用いて行った結果も、ポラス・ノズルを用いて結果と同様の傾向を示し、Arガスの導入方法による違いは認められなかった。

### 3.4 Arガス気泡径の分布

メニスカスで発生するArガス気泡の大きさを評価するため、Arガス気泡の直径と個数の関係を求め、その結果をFig.10(a)~(c)に示す。Arガス気泡の直径と個数はカラー高速度ビデオ・カメラによる撮影結果を基に算出した。

Fig.10(a)にはArガス導入用にポラス・ノズルを用い、浸漬ノズル内のウッドメタル循環流速  $1.0 \text{ m s}^{-1}$ あるいは  $0.68 \text{ m s}^{-1}$ 、Arガス流量  $1.1 \times 10^{-5} \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ あるいは  $0.3 \times 10^{-5} \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ とした場合の結果を示す。いずれのウッドメタル循環流速あるいはArガス流量の場合もArガス気泡の直径が小さいほどメニスカスで発生するArガス気泡の個数は多くなっている。また、浸漬ノズル内へのArガス導入量が多いほどArガス気泡の数も多い。

Fig.10(b)にはArガス導入に貫通孔を用いた場合のArガス気泡の個数と直径の関係を示す。ポラス・ノズルを用いたFig.10(a)の結果と同様に、Arガス気泡の直径が小さくなるほど個数は増大する。Arガス気泡の個数は、Arガス流量が  $1.1 \times 10^{-5} \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ の方が  $0.3 \times 10^{-5} \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ よりも多い。

Fig. 8に示した様にArガス流量の多いほど気泡の個数の総和も多く、また、Fig.10に示した様にArガス気泡の個数は気泡の直径に依存して変わる。そこで、各実験条件ごと

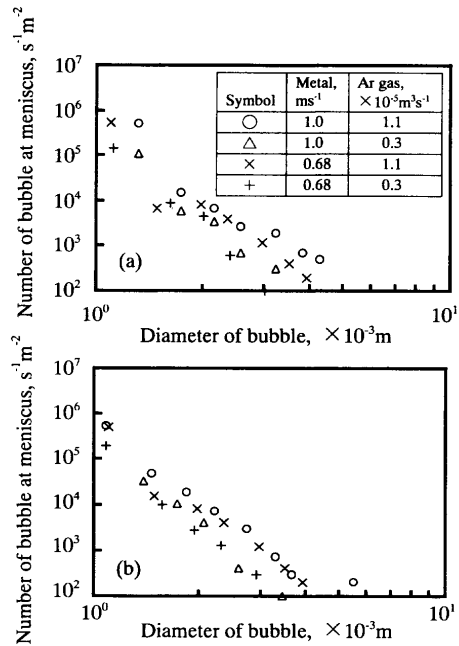


Fig. 10. Change of number of Ar gas bubble at meniscus with diameter of Ar gas bubble. (a) porous type nozzle, (b) orifices type nozzle.

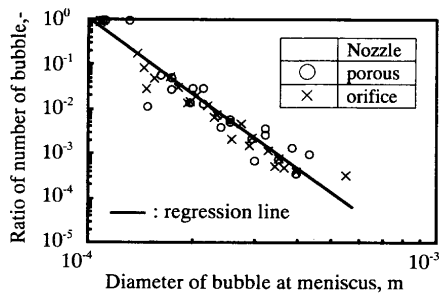


Fig. 11. Relationship between ratio of number of Ar gas bubble and diameter of bubble at meniscus.

に各直径に対する気泡個数を気泡の全個数で割り規格化して個数比率を求め、気泡径に対して整理した結果を Fig.11 に示す。

Fig.11の Ar ガス気泡の個数比率と直径の関係は、Ar ガス導入用ノズルごとに分類した。いずれの浸漬ノズルを用いた場合でも単位時間当たりの気泡の個数比率と直径の関係はほぼ一致すると考えられることから、全結果に対して統一的に以下の回帰式で求めることができる。

$$n = \Omega d^{-5.5} \dots\dots\dots (6)$$

ただし、 $n$ : メニスカスで発生する Ar ガス気泡の個数比率、 $\Omega$ : 比例定数(=  $1 \times 10^{-33} \text{ m}^{5.5}$ )、 $d$ : Ar ガス気泡の直径(m)である。メニスカスで発生する Ar ガス気泡の個数比率は、気泡直径の指数関数で表すことができる。

Ar ガス気泡の影響を考慮した鋳型内流動解析には、境界条件として Ar ガス気泡の個数と直径の関係が必要であるが、本研究で求めた回帰式を用いることで解析が可能に

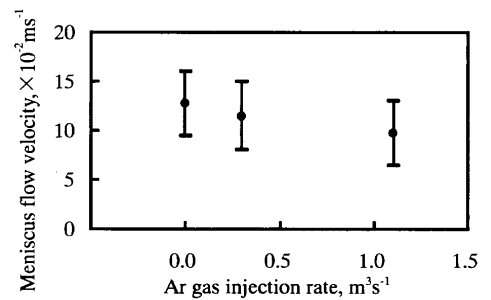


Fig. 12. Change of meniscus flow velocity of molten Wood's metal with Ar gas injection rate.

なると考えられる。

### 3.5 メニスカス流速の変化

Fig.12に浸漬ノズル内のウッドメタル循環流速  $1.0 \text{ ms}^{-1}$  とした場合の鋳型幅 1/4W、厚み 1/2T 位置におけるメニスカス流速と Ar ガス流量の関係を示す。Ar ガスを導入しない場合のメニスカス流速の平均値は約  $1.3 \times 10^{-1} \text{ ms}^{-1}$  であるが、Ar ガス流量を  $0.3 \times 10^{-5} \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$  あるいは  $1.1 \times 10^{-5} \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$  と増加させるに従いメニスカス流速は減少する。これは浸漬ノズル内への Ar ガス導入により、連鋳鋳型内メニスカス流速の制御の可能性を示すものと考えられる。なお、Ar ガスの導入によりメニスカス流速が減少したのは鋳型内の流動パターンが変化したためと考えられる。

## 4. 結言

浸漬ノズル内への Ar ガス導入による連鋳鋳型内における Ar ガス気泡の挙動を検討するため、低融点金属であるウッドメタルを用いたモデル実験を行った。鋳型内メニスカスで発生する Ar ガス気泡の直径および個数分布をカラー高速ビデオ・カメラの撮影結果から求めるとともに、メニスカス領域における Ar ガス発生量分布をマスフロー・メータにより測定し、これらの対応を検討した。また、鋳型内流動を特徴づけるメニスカス流速に及ぼす Ar ガス気泡の影響も検討した。

(1) 鋳型内メニスカスに浮上する Ar ガス気泡の個数分布は、浸漬ノズル内ウッドメタル循環流速によらず、導入される Ar ガス流量に依存して変化する。Ar ガス量が多い場合は浸漬ノズルに近いほどメニスカスで発生する Ar ガス気泡の個数は多い。

(2) 鋳型内メニスカスにおける Ar ガス発生量の分布は、浸漬ノズル内のウッドメタル循環流速によらず Ar ガス流量に依存して変化する。

(3) 鋳型内メニスカスに浮上する Ar ガス気泡の直径は小さく、いずれの実験条件の場合も直径約  $1.5 \times 10^{-3} \text{ m}$  より小さい気泡が全個数の約 90% 以上を占める。

(4) Ar ガス気泡の直径と単位時間当たりの個数比率の関係は、実験条件によらず次式の様に気泡直径の指数関数

として統一的に表すことができる。

$$n = \Omega d^{-5.5}$$

ただし,  $n$ : メニスカスで発生する Ar ガス気泡の個数比率,  $\Omega$ : 比例定数( $=1 \times 10^{-33} \text{ m}^{5.5}$ ),  $d$ : Ar ガス気泡の直径(m)である。

(5) 鑄型内メニスカスに浮上する Ar ガス気泡の挙動は, ポーラス・ノズルと貫通孔との比較では浸漬ノズル内への Ar ガスの導入方法によらずほぼ同一である。

(6) メニスカス流速は浸漬ノズル内に導入される Ar ガス流量に影響される。

## 文 献

- 1) N.Kasai, Y.Watanabe, K.Kajihara and M.Toyoda: *Tetsu-to-Hagané*, **83** (1997), 24.
- 2) B.G.Thomas, X.Huang and R.C.Sussman: *Metall. Mater. Trans. B*, **25B** (1994), 527.
- 3) N.Bessho, R.Yoda, H.Yamasaki, T.Fuji, T.Nozaki and S.Takatori: *ISIJ Int.*, **31** (1991), 40.
- 4) N.Kasai, M.Iguchi, H.Ookita and T.Nakaya: *CAMP-ISIJ*, **8** (1995), 1028.
- 5) T.Ishii, N.Kubo, M.Suzuki, M.Nakada, J.Kubota and R.Nishimach: *CAMP-ISIJ*, **9** (1996), 212.
- 6) B.G.Thomas, A.Denissov and H.Bai: *Steelmaking Conf. Proc.*, ISS, Warrendale, (1997), 357.
- 7) J.Kubota, N.Kubo, M.Suzuki, T.Ishi, Y.Yamaoka and M.Yamagishi: *CAMP-ISIJ*, **10** (1997), 235.
- 8) N.Kubo, T.Ishi, J.Kubota, M.Suzuki and M.Nakata: *CAMP-ISIJ*, **10** (1997), 758.
- 9) R.Nabben, R.Duursma, A.Kampermen and J.Lagerberg: *Ironmaking Steelmaking*, **25** (1988), 403.
- 10) D.Xu, K.Jones and J.Evans: *Steelmaking Conf. Proc.*, ISS, Warrendale, (1999), 155.
- 11) Z.Wang, K.Mukai and D.Izu: *ISIJ Int.*, **39** (1999), 154.
- 12) Z.Wang, K.Mukai, Z.Ma, M.Nishi, H.Tukamoto and F.Shi: *ISIJ Int.*, **39** (1999), 795.
- 13) C.Vives and R.Ricou: *Metall. Trans. B*, **16B** (1985), 377.
- 14) J.Szekely: *Fluid Flow Phenomena in Metals Processing*, Academic Press, New York, (1979), 321.