

# 連铸铸型内における非導電性第2相の挙動解明

研究代表者 名古屋大学大学院工学研究科 助教授 岩井一彦

## 1. 緒言

鋼の連続铸造では、ノズル部の目詰まり防止のためのアルゴンガス吹き込みや、脱酸生成物、パウダー巻き込みにより、非導電性の固相や気相が溶鋼中に存在する。これらには溶鋼とは異なる浮力、粘性力、慣性力等が作用するため、铸型内流動は純粋に溶鋼のみのときとは異なることとなる。例えば、溶鋼中のAr気泡の有無により流動や温度分布が変化することが数値計算によって予測されている。高谷は、Ar気泡を吹き込むことにより、溶鋼表面の水平方向最大流速が0.49m/sから0.43m/sへと変化することとともに、溶鋼表面および壁付近の溶鋼温度分布に違いが出ることを予測している<sup>1)</sup>。また柴田らは連続铸造機内溶鋼表面の過冷度を数値計算したが、Ar気泡を考慮した計算結果と考慮しなかった計算結果とは5度程度差異が生じるとともに、前者は測定結果とほぼ一致したことを報告している<sup>2)</sup>。これらは、連続铸造プロセスにおける溶鋼の流動状態や温度分布を数値計算によって予測するためには、混相流としての取り扱いが必要であることを示している。

一方、通常の連続铸造プロセスでは電磁ブレーキを利用して溶鋼にローレンツ力を作用させることによって流動制御を行っている。その最適化には流動解析と電磁場解析とを連成させた数値計算が必要とされ、そこでは、溶鋼は非導電性第2相との混相流として取り扱われている。しかしながら、磁場印加された導電性液体内の非導電性第2相挙動については種々の研究があるものの、鋼の連続铸造プロセスに合致するような流動条件下での研究例はなく、Ar気泡や非金属介在物等の非導電性第2相に作用するローレンツ力の反力は無視されている。従って、得られる数値計算結果は厳密には正しくなく、連続铸造プロセスに合致する流動条件下でのAr気泡や非金属介在物の磁場中挙動を明らかにする必要がある。

そこで、本研究では磁場印加された溶鋼中の非導電性第2相挙動を模擬観察するプロセスを提案するとともに、それを利用して磁場印加された導電性液体内のAr気泡挙動を明らかにすることを研究目的とする。

## 2. モデル実験系の構築

ここでは磁場環境下での溶鋼中Ar気泡の挙動把握を目的としたモデル実験の構築に必要な条件を考える。以下の議論と同様なことがアルミナなどの脱酸生成物などにも適

用可能である。

Table. 1 Physical properties of some typical materials<sup>3-5)</sup>.

Material	Electrical conductivity $\sigma/\text{Sm}^{-1}$	Viscosity $\eta/\text{Pa}\cdot\text{s}$	Density $\rho/\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$
Liquid steel	$\approx 10^6$	$10^{-3}$	$10^3$
Strong electrolytes	$10^{-2}$ to $10^2$	$10^{-3}$	$10^3$
Weak electrolytes	$10^{-4}$ to $10^{-2}$	$10^{-3}$	$10^3$
Distilled water	$\approx 10^{-4}$	$10^{-3}$	$10^3$

モデル実験において Ar 気泡の挙動観察を行うためには透明な液体が適している。そこで、ここでは強電解溶液、弱電解溶液、蒸留水を候補としてそれらの電気伝導度、粘性係数、密度を溶鋼の値と併せて Table. 1 に示す。Ar 気泡の諸物性値は Table.1 中の物性値と較べて十分に小さいため、以下では Ar 気泡の電気伝導度、粘性係数、密度を 0 と見なす。

溶鋼中を浮上する Ar 気泡挙動に関する重要な無次元数として慣性力と浮力の平方根をあらわす無次元数であるフルード数が挙げられる。

$$\text{Fr} = \frac{v}{\sqrt{gL}} \quad (1)$$

ここで、 $g$  は重力加速度である。

Table. 1 に示された液体の粘性係数および密度は物質に依らず同じオーダーなので、その中を Ar 気泡が浮上するとき気泡に作用する浮力とその浮上速度は同じオーダーである。つまり、これらの物質を使えばフルード数に関する相似を満足させることは比較的容易である。

磁場環境下で液体に作用するローレンツ力の大きさは  $\sigma vB^2$  で評価できるので実操業とモデル実験とで代表速度と代表磁場とが同一と仮定すれば、蒸留水に作用するローレンツ力の大きさは、溶鋼の場合の  $10^{10}$  倍の大きさになる。それに対して、蒸留水中の気泡と溶鋼中の気泡とに作用する浮力のオーダーは同じである。故に、同一磁場を印加してもアルゴン気泡に働くローレンツ力の反力と浮力の比が溶鋼を用いた場合と較べて非常に小さくなるため、水モデル実験に磁場印加しても気泡に作用するローレンツ力の反力の影響は非常に小さく、その影響を調べることは難しい。ローレンツ力を誘起するためには、使用するモデル流体の電気伝導度は大きいほど良いのでここでは強電解溶液をモデル流体とした。強電解溶液をモデル流体と見なして磁場を印加した場合(以下、強電解溶液系)と溶鋼に磁場を印加した場合(以下、液体金属系)とで気泡に作用する浮力

とローレンツ力の反力とで相似を成り立たせるためには、液体金属系で作用するローレンツ力と強電解溶液系で作用するローレンツ力とが同じオーダーでなければならない。

$$10^4 (vB^2)_{\text{metal}} = (vB^2)_{\text{model}} \quad (2)$$

ここでは(2)式を満たす以下の2つの条件を考える。

- (1) 強電解溶液系の代表速度が液体金属系の  $10^4$  倍の大きさであり、両者の代表速度は同一である。
- (2) 強電解溶液系の磁場強度が液体金属系の  $10^2$  倍の大きさであり、両者の代表磁場強度は同一である。

まず、強電解溶液系の代表速度が液体金属系の  $10^4$  倍であり、両者の代表速度は同一である場合を考える ((3)式)。

$$10^4 v_{\text{metal}} = v_{\text{model}}、B_{\text{metal}} = B_{\text{model}} \quad (3)$$

フルード数に関する相似 ((4)式) を満足させるには、強電解溶液系の気泡直径が液体金属系の  $10^8$  倍の大きさでなければならない ((5)式)。

$$\left( \frac{v}{\sqrt{gL}} \right)_{\text{metal}} = \left( \frac{v}{\sqrt{gL}} \right)_{\text{model}} \quad (4)$$

$$10^8 L_{\text{metal}} = L_{\text{model}} \quad (5)$$

従って、液体金属系における気泡直径を 1mm としたときの強電解溶液系での気泡径は 100km となるので、このような実験系の構築は不可能である。

次に、強電解溶液系の磁場強度が液体金属系の  $10^2$  倍の大きさであり、両者の代表磁場強度は同一である場合を考える ((6)式)。

$$v_{\text{metal}} = v_{\text{model}}、10^2 B_{\text{metal}} = B_{\text{model}} \quad (6)$$

Ar 気泡の浮上速度は同一オーダーなので、この場合のフルード数に関する相似条件は、強電解溶液系の気泡直径と液体金属系のそれとが同一であることとなる。

$$L_{\text{metal}} = L_{\text{model}} \quad (7)$$

連続鋳造プロセスにおける電磁ブレーキの磁場強度を 0.1T とすれば、気泡に作用するローレンツ力の反力と浮力との相似を満たすために必要な強電解溶液系における磁場強度は(6)式より 10T と計算される。電磁石の最大磁場強度は 1T 程度であるため、この相似条件を満足するモデル実験系の構築は困難であった。しかしながら、近年の超伝導磁石の発達に伴い 10T 程度の強磁場環境が利用できる状況となり、このようなモデル実験系の構築を可能とした。

そこで、本研究では超伝導磁石によって発生した磁場を透明導電性液体に印加することにより、液体に加わるローレンツ力を顕在化させた条件下で非導電性第2相の挙動観察が可能なモデル実験系を構築するとともに、第2相である気泡の運動方向と磁場の向きとが直交する条件下で、気泡挙動に及ぼす磁場の効果を明らかにした。

### 3. 実験

#### 3. 1. 実験装置

実験装置は Fig. 1 に示すものを用いた。7.0T の静磁場を生成する超伝導マグネットのボア内に、飽和食塩水で満たしたアクリル製矩形容器(内寸法 : length 64mm×width 54mm×height 890mm)を設置した。そして、容器底面にある Cu パイプ先端のノズルから直径 3mm の Ar 気泡を生成し、その挙動を高速度カメラ(撮影速度 240FPS)を用いて録画し、浮上距離 30mm の気泡通過時間を測定した。磁場は 7.0T, 0T の 2 条件とし、測定した気泡数は  $B=0T$  で 60 個、 $B=7.0T$  で 54 個であった。本実験条件では、気泡に作用する磁化力の大きさはローレンツ力の約 5% であると推定されるので、磁化力が気泡挙動に与える効果は小さいと考えられる。今回の実験条件は実操業において、 $Fr$  近似では気泡径 2mm、ローレンツ力と浮力の比の近似では気泡径 0.3mm、 $Ha$  近似は気泡径 0.6mm に相当する。

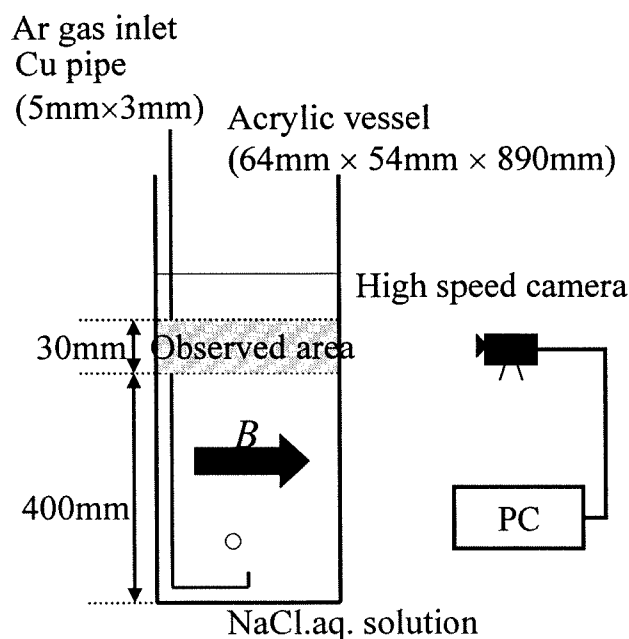


Fig. 1 Schematic view of experimental apparatus.

#### 3. 2. 実験結果

浮上距離 30mm を気泡が通過するのに要した時間の分布を Fig. 2 に示す。

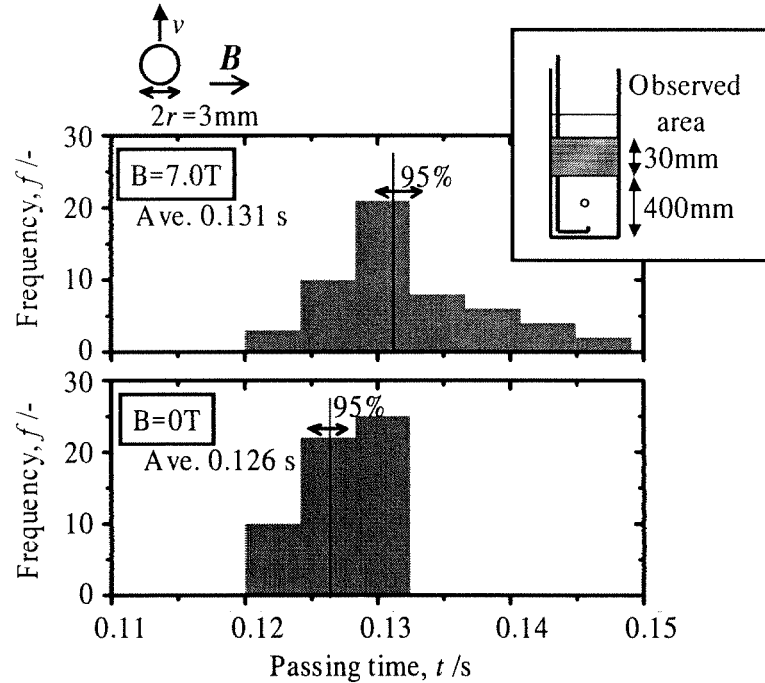


Fig. 2 Histograms of bubble passing time.

$B=0\text{T}$  では、通過時間の平均値は 0.126s で、95%信頼区間は 0.1256-0.1274s であった。 $B=7.0\text{T}$  では、通過時間の平均値は 0.131s、95%信頼区間は 0.1294-0.1326s であった。 $B=7.0\text{T}$  の磁場を印加した場合の平均通過時間が長くなったことから、磁場印加によって気泡浮上速度が抑えられたことが分かる。その平均通過時間の差は 0.005s であり、本実験条件である高速カメラの撮影間隔の時間  $1/240\text{s} = 0.0042\text{s}$  よりも大きい。また磁場印加の有無による平均通過時間の 95%信頼区間を較べてみると、各々の信頼区間は重ならず、有磁場下における気泡通過時間の 95%信頼区間の方が大きいことが分かる。これらのことから、磁場印加によって気泡の通過時間が増大したと言える。これは磁場印加により液体に作用するローレンツ力が、気泡回りの液体運動を抑制したためだと考えられる。

#### 4. 結言

本研究から得られた主な結果を以下に示す。  
透明導電性液体に強磁場印加することで、磁場印加された溶鋼中の Ar 気泡に作用するローレンツ力の反力を再現可能な可視化モデル実験系を構築した。  
上記モデル実験系を用いて導電性液体中の気泡の上昇速度は水平方向磁場の有無により変化することを明らかにした。

#### 参考文献

- 1) K. Takatani: *ISIJ Int.*, 43(2003), pp.915-112.
- 2) H. Shibata *et al.*: *CAMP-ISIJ*, 16(2003), 167.
- 3) 鈴木信夫: 改訂第3版金属データブック, 丸善, 東京, (1993).
- 4) 日本化学会: 化学便覧基礎編 改訂第2版, 丸善, 東京, (1975).
- 5) R. Moreau: *Magnetohydrodynamics*, Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, (1990), 3.