

浮揚型コールド・クルーシブルからの 被融解物の注湯制御

安藤 健治*・岩井 一彦*²・浅井 滋生*²

Control of Pouring Molten Charge out of a Levitation Type Cold Crucible

Kenji ANDO, Kazuhiko IWAI and Shigeo ASAI

Synopsis : A new method for pouring a molten charge out of a levitation type cold crucible has been proposed. In the new method, the charge is taken out through the bottom-hole of the crucible by changing the magnetic field which results in the break-down of the mechanical balance among magnetic pressure, hydrostatic pressure and the pressure due to surface tension. Pouring the charge out of the crucible was demonstrated by changing the distance between the coil and the crucible. A new technique which can fix the shape of the molten charge in the crucible has been proposed. By using this technique, the elongation of the charge shape predicted by the numerical analysis was confirmed and whether the charge contacted with the crucible was examined. In the experiment, the small temperature difference between the molten charges before and after pouring was observed and the large super heat in the poured metal was available.

Key words : levitation type cold crucible ; pouring ; process control ; super heat ; castings ; electromagnetic processing of materials ; electromagnetic metallurgy ; non-contact melting ; foundry.

1. 緒言

コールド・クルーシブルはセグメントに分割された水冷銅るつぼ(クルーシブル)、コイル、被融解物(チャージ)から構成される非汚染融解プロセスである。コイルに印加された高周波電流はクルーシブルを介してチャージに誘導電流を生じせしめる。この誘導電流により、チャージはジュール加熱され融解する。一方、誘導電流と磁場によって生ずるローレンツ力により、チャージはクルーシブルと一部非接触、場合によっては完全に非接触の状態に保持される。コールド・クルーシブルはその形状により連鑄型と下部支持型、浮揚型に大別できる¹⁾。このうち、浮揚型はクルーシブル形状を碗型とし、底部に設けた穴(以後、クルーシブル底穴と呼ぶ)の近傍に磁場を集中させ、チャージ全体の融解・非接触保持を図るものである。連鑄型や下部支持型とは異なり、チャージは浮揚しながら融解するので伝導伝熱による抜熱が無く、高い過熱度を得ることができる。そのため、この溶湯を用いて鑄造を行う際には湯まわり不良(鑄型内に完全に湯がまわらない状態)防止が期待できる。また、チャージの攪拌も同時になされるので均質な組成の溶湯を得ることができる。

これらの特長を有する浮揚型コールド・クルーシブルは、高融点材料や活性金属に代表される難鑄造材料の融解プロ

セスとして有望視されている。しかし、この浮揚型コールド・クルーシブルからチャージを取り出す方法、すなわち注湯法についての報告は見受けられない。これまでに公表されている注湯法には下部支持型クルーシブルを用いて溶融された溶湯を減圧吸引²⁾するものや、クルーシブルを傾ける傾動法³⁾⁴⁾がある。前者は融解されたチャージに吸引パイプを挿入し、チャージを鑄型に減圧吸引するものである。この方法は減圧装置を備える必要があるばかりでなく、吸引パイプからの汚染や抜熱が憂慮される。後者では注湯時の溶湯とクルーシブル側壁との大幅な接触が不可避であり、凝固核の生成や過熱度の低下を招き、鑄造時の湯まわり不良や歩留まりの悪化、溶湯の汚染をもたらす。以上から、浮揚型コールド・クルーシブルにおける、新たな注湯方法の開発が必要となっている。

本研究では浮揚型コールド・クルーシブルからの電磁気力を利用した注湯法を新たに提案する。そして、注湯原理を理論と実験の両面から検討したので報告する。

2. 注湯方法

印加磁場の周波数が十分高く、浮揚しているチャージ内の流動が無視し得る場合にはチャージには静圧、表面張力、磁気圧のみが作用し、Fig. 1-aに見るようにこれらがチャー

平成6年3月7日受付 平成6年9月2日受理 (Received on Mar. 7, 1994; Accepted on Sep. 2, 1994)

* 名古屋大学大学院生 (Graduate Student, Nagoya University)

* 2名古屋大学工学部 (Faculty of Engineering, Nagoya University, Furo-cho Chikusa-ku Nagoya 464-01)

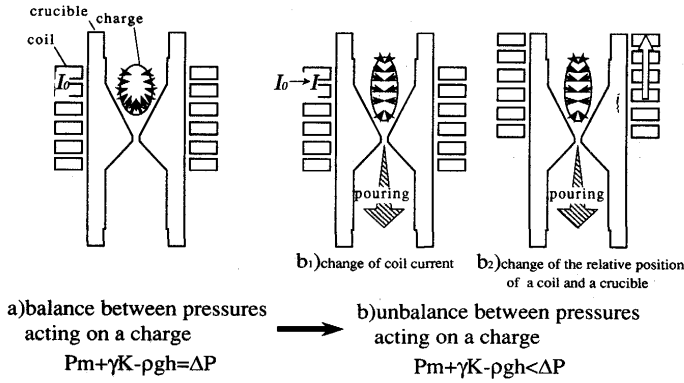


Fig. 1. The principle of pouring a charge.

ジ表面において釣り合う。

$$P_m + \gamma K - \rho gh = \Delta P \quad \dots\dots\dots (1)$$

ここで P_m は磁気圧, γ は表面張力, K は曲率, ρ は密度, g は重力加速度, h はチャージの最高点から測った鉛直距離, ΔP は溶湯内外の圧力差を表す。なお, チャージ表面に描いた矢印はチャージに加わる磁気圧の向きと大きさを示す。いま, チャージ側面に加わる磁気圧を増加させると, チャージ形状は Fig. 1-b にあるように軸方向に細長化する。よってチャージ底部における表面張力, 静圧とも増加するが, 静圧の増加が表面張力のそれより大きいときには, クルーシブル底穴より溶湯が流下することが期待される。この釣合を崩す方法として, ここでは

- (1) コイル電流値を変化させる (Fig. 1-b₁)
- (2) コイルとクルーシブルとの相対位置を変化させる (Fig. 1-b₂)

方法を取りあげ, 予備的な理論検討を行った。

3. 解析

3・1 磁場解析

(1) コイル電流値を変化させる方法, (2) コイルとクルーシブルとの相対位置を変化させる方法のそれぞれについて, 磁場解析によりチャージに加わる電磁気力を求めた。コールド・クルーシブルの磁場解析モデルとしては Gagnoud らによって提案されたワイヤーモデル⁵⁾やその改良型^{6)~8)}, 境界要素法による 3次元モデル⁹⁾等が挙げられる。電磁場を精度良く解析するためには 3次元モデルが望まれるものの, 記憶容量, 計算時間の点で問題がある。一方, ワイヤーモデルは基本的には軸対称 3次元モデルで, 周方向を均一として取り扱うためスリットの影響を表現することはできない。しかしながら, プログラム作成が容易で計算時間も短いことを考慮して, ここではワイヤーモデル⁵⁾を採用して磁場解析を行った。解析対象には Fig. 2 に示すコールド・クルーシブルを選んだ。ここでコイルとクルーシブルとの相対

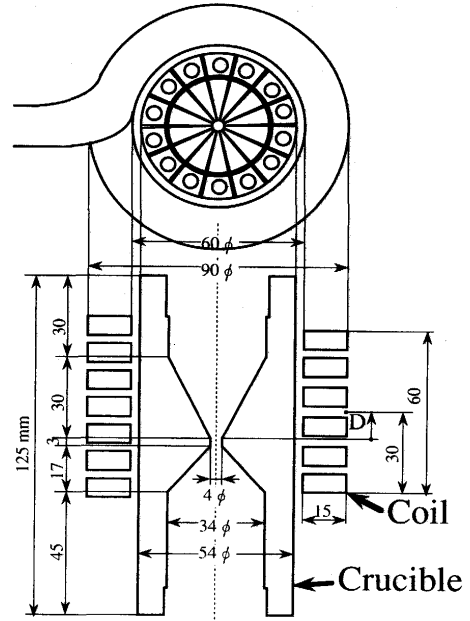


Fig. 2. Experimental and calculated apparatus.

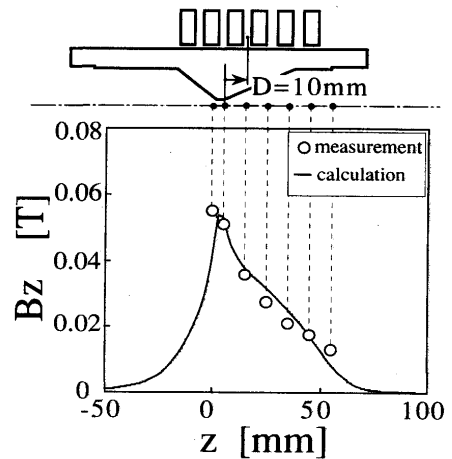


Fig. 3. Comparison of the axial component of magnetic flux density along the center axis of the crucible calculated by a wire model with experimental data.

位置を表す指標としてクルーシブル底穴から鉛直上向きに測ったコイル中心までの距離を D とする。 D はコイル中心がクルーシブル底穴より下方にある場合には負値を, 上方にある場合には正値を取る。まず, 計算精度を確認するため, クルーシブルとコイルのみが存在する場合のクルーシブル中心軸に沿った磁束密度の軸方向成分 (B_z) を計算した。計算条件は $D=10\text{mm}$, コイル電流値 300A , 周波数 58kHz である。計算値をサーチコイルを用いて測定⁹⁾した値とともに Fig. 3 に示す。横軸はクルーシブル底穴を原点として上方に測った軸方向距離, 縦軸は磁束密度の軸方向成分を表す。計算値と実測値は良く一致していることから, 本磁場解析は妥当であると判断した。

3・2 チャージに加わる電磁気力の評価

チャージの注湯現象を明らかにするためには、操作因子(コイル電流値, I)の変化にともなう磁場, チャージの浮揚位置, 自由表面形状の変化を連成して解くことが求められるが, 計算時間, 記憶容量の点から困難と判断した。そこでここではチャージ形状の変化はないものとし回転楕円体で近似し, そこに加わる電磁気力を求めた。そのとき, 縦横比を3通りに変化させることでチャージ形状の変形の効果を見積った。クルーシブル内でのチャージの浮揚位置は以下のように決めた。

操作因子が変化すると磁場は瞬時に変化すると考えられるが, チャージの浮揚位置はチャージの慣性のため操作因子の変化に即応するとは限らない。そこで操作因子の変化に際して,

A: 磁場と同時にチャージの浮揚位置が変化する, B: チャージの浮揚位置は変化せず磁場のみが変化する, の2通りの場合について解析を行った。Aの計算手順を①~⑦に示す。

① コイル電流値と D を与え, チャージ, クルーシブルの誘導電流密度を求める。

② チャージ表面上の磁束密度 (B_c) を求め, (2)式にて磁気圧 (P_m) を計算する。

$$P_m = B_c^2 / 2\mu \quad \dots\dots\dots (2)$$

ここで $\mu (=4\pi \times 10^{-7} \text{H/m})$ は透磁率を表す。

③ チャージに加わる電磁気力の鉛直成分の総和値 (F_z), すなわちチャージを浮揚させる電磁気力を求める。

$$F_z \equiv \int_{S_{ch}} P_m i_z \cdot i_n dS \quad \dots\dots\dots (3)$$

ここで i_z は鉛直方向上向き単位ベクトル, i_n は外向き法線単位ベクトル, S_{ch} はチャージ表面を表す。

④ チャージに加わる重力と F_z との大きさを比較する。

⑤ 両者の平衡が満足されるまで, チャージ重心位置を軸方向に変化させ, ①~④を繰り返す。

⑥ 平衡が満足されたら, そこを浮揚位置とし, クルーシブル底穴からチャージ重心までの鉛直距離 Z_{up} を定める。

⑦ チャージに加わる電磁気力の半径方向成分の総和値 (F_r), すなわちチャージを半径方向内側に抑え込む電磁気力を(4)式を用いて求める。

$$F_r \equiv - \int_{S_{ch}} P_m i_r \cdot i_n dS \quad \dots\dots\dots (4)$$

ここで i_r は半径方向単位ベクトルを表す。

一方, Bの計算の手順は①, ②, ⑦である。

3・3 注湯現象の理論的検討

質量18gのアルミニウムをチャージに選び, $D=10\text{mm}$ で一定とし, コイル電流値を変化させて計算した Z_{up} と F_r をそれぞれFig. 4-a, bに示す。図中の実線, 破線, 点線はチャージの縦横比を7/3, 5/3, 3/3としたもので計算結果はA(チ

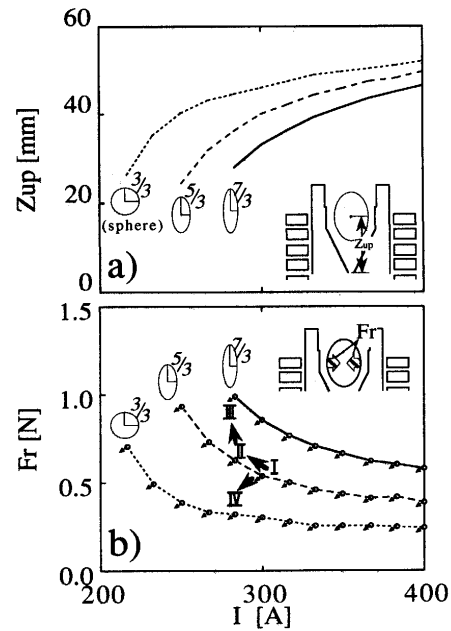


Fig. 4. a) Effect of coil current (I) on the distance (Z_{up}) between the centroid of a charge and the bottom of the crucible. b) Effect of I on the integrated radial component of magnetic force (F_r).

ャージの浮揚位置が変化する)の仮定に基づくものである。チャージ形状によらずコイル電流値の減少にともない浮揚位置は下がり (a), F_r は増加している (b)。ここで縦横比5/3のチャージがコイル電流値300Aで安定浮揚しているものとする (Fig. 4-b中のI)。このとき, コイル電流値を減少させれば F_r が増加しチャージの状態はIからIIへ向かう。チャージの体積は保存されるので, F_r の増加にともないチャージは軸方向へ細長化することが予測される。仮に, チャージの縦横比が5/3から増加して7/3へと向かえばIIからIIIへと F_r のさらなる増加を示し, 最終的にはチャージ底部において力学的釣合が崩れ, 注湯に至ることが推察される。

一方, 3本の線上を始点とする矢印はB(チャージ位置は変化せず磁場のみが変化する)の仮定に基づいて, コイル電流値のみを5A減少させた場合の計算結果である。この仮定は, コイル電流値の変化に対してチャージの浮揚位置が追従しないこと(チャージの慣性が十分大きいこと)を意味している。チャージ形状, コイル電流値によらず F_r は減少している。今, 縦横比5/3のチャージがコイル電流値300Aでクルーシブル内に保持されていたものとする (Fig. 4-b中のI), コイル電流値の減少にともなって F_r は減少しIからIVの方へ向かうことになる。この場合にはチャージの縦横比が減少することが予測される。すなわち, コイル電流値の減少操作を採用すると, チャージの浮揚位置が完全に追従する場合には F_r は増加し, 追従しない場合には F_r は減少することになる。以上から, コイル電流値を変化させる方法を採用する場合には, チャージの浮揚位置の変化を形状変化と併せて詳細に把握する必要が生ずる。

次にDを変化させて Z_{up} , F_r を計算した結果をそれぞれFig. 5-a, bに示す。チャージは質量18gのアルミニウムであり、コイル電流値を300Aで一定とした。図中の実線, 破線, 点線はAの仮定下の計算結果で, それぞれチャージの縦横比を7/3, 5/3, 3/3としたものである。縦横比3/3のチャージにおける F_r はD=10mm付近で極大値を示す(b)。これはD=10mm以上の条件にて3/3のチャージがクルーシブル上端を超える浮上位置を示し(a), クルーシブル内壁の誘導電流による影響が少なくなることによるものである。一方, 縦横比5/3, 7/3のチャージではDの増加にともない F_r は増加している。ここで縦横比5/3のチャージがD=10mmで安定浮揚しているものとする(Fig. 5-b中のI)。このとき, Dを増加させれば F_r は増加し, IからIIへ向かう。この F_r の増加にともなってチャージの軸方向への細長化が予測される。すなわち, チャージの縦横比が5/3から増加し7/3へと向かえば, F_r はIIからIIIへとさらなる増加を示し, チャージ底部において力学的釣合が崩れ注湯されると推察される。

一方, 図中の矢印はBの仮定に基づいてDのみを1mm増加させた場合の計算結果である。チャージ形状, コイル電流値によらず F_r は増加している。今, 縦横比5/3のチャージがD=10mmでクルーシブル内に保持されたものとする(Fig. 5-b中のI), Dの増加にともなって F_r は増加しIからIVへ向かうことになる。すなわち, この場合は, チャージ浮揚位置の追従性によらず, Dの増加にともなってチャージの軸方向への細長化が期待できる。ここに示した方法で注湯開始位置を推算するには, チャージの初期の形状と浮揚位置,

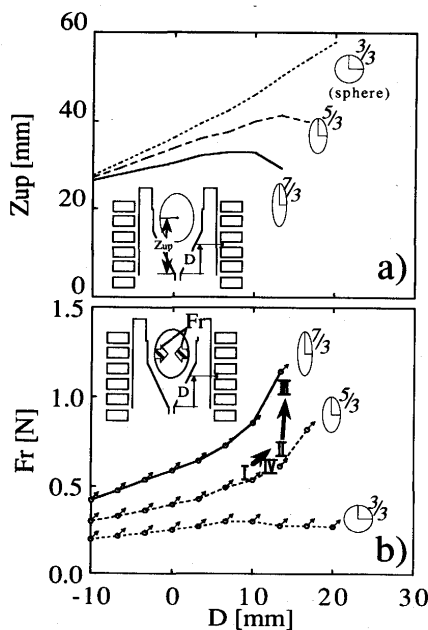


Fig. 5. a) Effect of the distance (D) between the bottom hole of the crucible and the center of the coil on the distance (Z_{up}) between the centroid of a charge and the bottom of the crucible. b) Effect of D on the integrated radial component of magnetic force (F_r).

および磁場分布の変化にともなうチャージ形状変化をあらかじめ知っておく必要がある。

以上, コイル電流値とDを変化させる2つの方法の理論的検討から, チャージの浮揚位置の追従性によらず注湯可能と予測される(2)の操作を選び注湯実験を行うことにした。

4. 実験

4.1 注湯実験

実験装置は先に解析対象としてFig. 2に示した角型6ターンのコイル中に14セグメントで構成される銅製クルーシブルを配したものである。実験条件をTable 1に示す。チャージはアルミニウムとし, 融解・保持のDの初期設定値は10mmとした。融解後にクルーシブルを一定速度(2mm/s)で降下させることによりDを増加させ, 質量15gのチャージの注湯を試みた。クルーシブル上方から観察したチャージの注湯の様子をFig. 6に示す。D=10mmのときにはチャージがクルーシブル内で浮揚している(Fig. 6-a)が, D=17mmのときに, チャージは側面から押しつぶされるように変形し, クルーシブル底穴から流下(注湯)し始めた(Fig. 6-b)。注湯は瞬時に完了し, クルーシブル底穴には大気中の実験のため生じた少量の酸化膜が残留した(Fig. 6-c)。こ

Table 1. Experimental conditions.

• coil current	300A
• frequency	58kHz
• initial distance between bottom hole of a crucible and a center of a coil.	10mm
• descending speed of a crucible	2mm/s

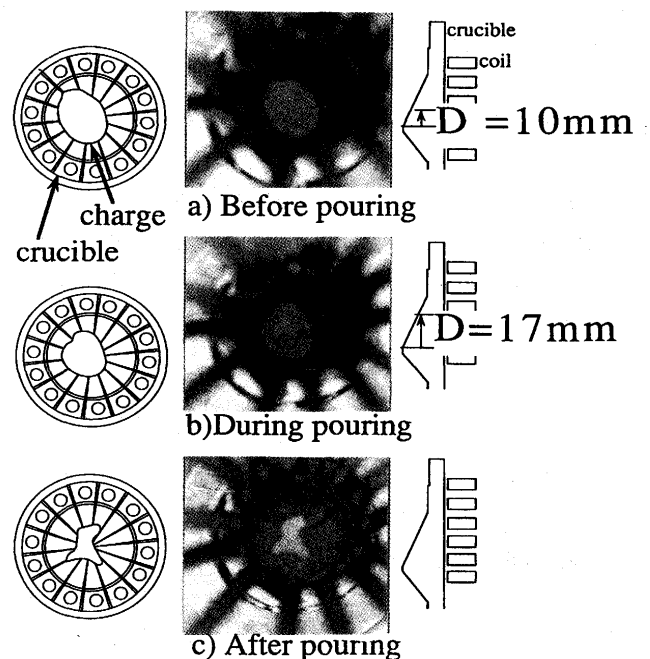


Fig. 6. Pouring behavior of an aluminum charge.

の場合、注湯が開始されたDは17mmであったが、以後、この注湯開始時のDをD_pと表すことにする。

4・2 チャージ形状の測定

クルーシブル内で融解しているチャージの形状の測定法を新たに開発した。実験手順を以下に述べる。

①底穴をアルミナセメントで塞いだ後、クルーシブル内でチャージを融解・保持する。

②上部から鑄物砂をクルーシブル内部へ流し込み、チャージを包み込む。

③電源出力を徐々に低下させてチャージを凝固させる。

質量16gのチャージを用いて、Dを10, 15, 20mmと変化したときのチャージ形状の変化をFig. 7に示す。先の解析の予測どおり、Dの増加につれて、チャージが絞られ、軸方向に細長化することが確認できる。ただし本系では砂の応力が静圧の数分の一の大ささとなるので実際形状と多少異なる可能性がある。また、D=20mmのチャージ表面上でクルーシブルとの接触によって生じたと思われるスリット跡が観察された。このスリット跡に拠るチャージとクルーシブルとの接触の有無をFig. 8に示す。図中の○印はスリット跡が存在せずチャージがクルーシブルと非接触な状態であ

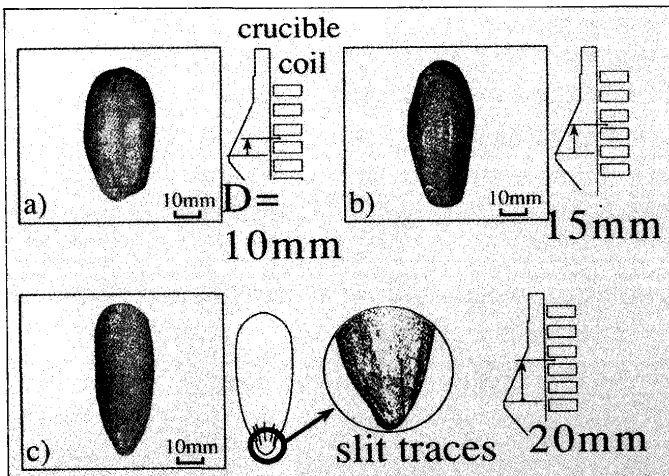


Fig. 7. Shapes of an aluminum charge(16g) at different D.

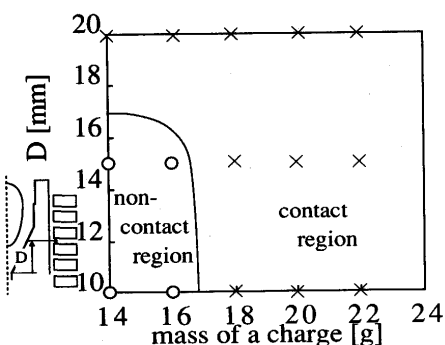


Fig. 8. Contact and non-contact regions in the domain of distance D and mass of a charge.

ったもの、×印はスリット跡が見られ接触状態であったものを表す。今回の実験範囲において質量18g以上のチャージはDによらずクルーシブルと接触状態にあったことが示された。また、質量14g, 16gのチャージはD=10, 15mmで非接触融解・保持されたことがわかった。この方法は従来困難であった熔融金属の自由表面形状の測定やチャージとクルーシブルとの接触状態の確認手段として有効である。

4・3 注湯開始時の距離D_pに及ぼすチャージ質量の効果

Table 1 に示した実験条件のもとでチャージ質量を14gから23gまで変化させた。D_pに与えるチャージ質量の影響をFig. 9に示す。なお図中の実線は溶湯形状測定法で求めたチャージとクルーシブルの接触、非接触領域の境界を表す。質量がほぼ17gに満たないチャージのD_pは、接触、非接触領域の境界付近にある。この範囲では、非接触融解されたチャージに対して注湯操作が開始され、クルーシブルとの接触とほぼ同時期に注湯されたと推察できる。一方、質量17g以上のチャージは注湯操作開始前からクルーシブルと接触状態にあり、そのまま注湯に至ったことが確認できた。以上より、本方法ではチャージとクルーシブルの接触の有無によらず注湯可能であることが示された。

4・4 チャージ温度に及ぼすチャージ質量の効果

4・1で述べた注湯実験と同一の条件で、注湯前後のチャージの温度を調べた。注湯前の温度はチャージに熱電対を直接挿入し、注湯後の温度はクルーシブル底穴下方に熱電対を設置して测温した。結果をFig.10に示す。□印は注湯前にクルーシブル内で浮揚保持されているチャージの、▲印はクルーシブルから流下したチャージの温度を示している。一点鎖線はアルミニウムの融点 (933.2K) を表している。Fig. 9 に示したD_pと同様、チャージ温度についても質量17g付近でその傾向が二分されている。すなわち、質量17g以下のチャージはクルーシブルと非接触で保持され、伝導伝熱による抜熱がないため、チャージは十分過熱され、注湯前の温度は約300Kの過熱度を有しており、注湯後も温度の低下はあまり見られない。一方、質量17g以上のチャージはクルーシブルと接触しつつ融解しており、伝導による抜熱が

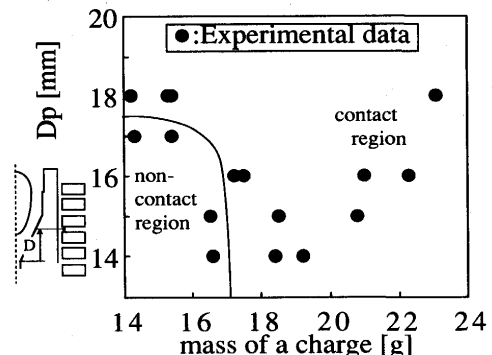


Fig. 9. Effect of mass of a charge on the distance D_p, at which pouring of a charge takes place.

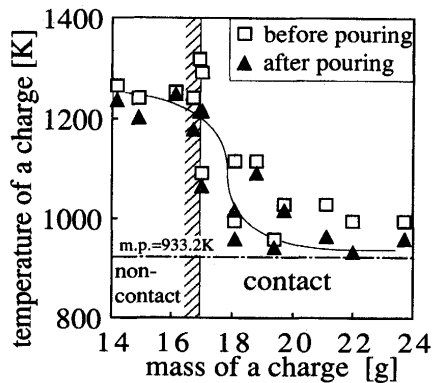


Fig. 10. Effect of mass of a charge on the temperature before and after pouring of a charge.

作用するため、十分な過熱度を得ることができず、注湯後のチャージ温度も融点に近いものとなっている。高い過熱度を維持して注湯を行うためには、融解されたチャージとクルーシブルとの接触の有無を調査し、非接触な条件で注湯操作を行うことが肝要である。

5. 結言

浮揚型コールド・クルーシブルから電磁気力を利用しチャージを注湯する方法を新たに提案し、理論解析、実験にて注湯現象を検討した。得られた結果を以下に示す。

(1) クルーシブル内で浮揚しているチャージ側面にかかる電磁気力の増加に着目し、解析を行ったところ、
・コイル電流値を変化させる場合、チャージ浮揚位置の追従性によって注湯現象が異なる。

・コイルとクルーシブルとの相対位置を変化させる場合、注湯現象はチャージ浮揚位置の追従性に依存しない。

(2) コイルとクルーシブルとの相対位置を変化させることにより、チャージの注湯が可能であることを確認した。

(3) 溶融金属の自由表面形状、およびクルーシブルとの接触状態を把握する溶湯形状測定法を提案した。理論解析にて予測したチャージの細長化を、この方法を用いて確認した。

(4) クルーシブルと非接触に融解されているチャージは十分高い過熱度を有し、本方法による注湯後もほぼその過熱度を維持している。

記号

- B_c : チャージ表面上の磁束密度の絶対値 (T)
- B_z : クルーシブル中心軸に沿った磁束密度の軸方向成分 (T)
- D : クルーシブル底穴から鉛直上向きに測ったコイル中心までの距離 (mm)
- D_p : 注湯が開始した時点での距離 D の値 (mm)
- F_r : チャージを半径方向内側に抑え込む電磁気力の総和値 (N)
- F_z : チャージを浮揚させる電磁気力の総和値 (N)
- g : 重力加速度 (m/s^2)
- h : チャージ高さ (m)
- I : コイル電流値 (A)
- I_0 : コイル電流値の初期設定値 (A)
- i_n : 外向き法線単位ベクトル (-)
- i_r : 半径方向単位ベクトル (-)
- i_z : 鉛直上向き軸方向単位ベクトル (-)
- K : 曲率 (m^{-1})
- P_m : 磁気圧 (Pa)
- S_{ch} : チャージの表面積 (m^2)
- Z_{up} : チャージ重心からクルーシブル底穴までの鉛直距離 (mm)
- z : クルーシブル底穴を原点として上方に測った軸方向位置 (mm)
- ΔP : 溶湯内外の圧力差 (Pa)
- γ : 表面張力 (N/m)
- μ : 透磁率 (H/m)
- ρ : 密度 (kg/m^3)

文献

- 1) 岩井一彦, 浅井滋生: 金属, 63 (1993), p.50
- 2) 出向井登: 素形材, 9 (1993), p. 12
- 3) 服部正司, 北村信男: 熱プラズマの基礎と新しい利用プロセス, (1993), p.59 [日本鉄鋼協会基礎研究会, 熱プラズマ研究部会]
- 4) 津田正徳, 池口秀夫, 尾崎和郎, 中井泰弘, 河野 等, 田所昌宏: 神鋼電機技報, 37 (1992), p.9
- 5) A. Gagnoud, D. Delage and M. Garnier: The 4th Beer-Sheva Seminar on MHD Flows and Turbulance, Beer-Sheva, Israel. Feb.27-March 2, (1984), p.634
- 6) M. Kuwabara, H. Nakata, K. Sassa and S. Asai: Proc. of The Sixth Int. Iron and Steel Congress, Nagoya, Vol. 4, (1990), p.246
- 7) 田中 努, 栗田興一, 黒田篤彦: 鉄と鋼, 77 (1991), p.345
- 8) 籾 健彦, 竹内栄一: 電磁気力による新しいプロセスの可能性を求めて, (1993), p.334 [日本鉄鋼協会 特基研究会, 材料電磁プロセス部会]
- 9) 岩井一彦, 佐々健介, 浅井滋生: 鉄と鋼, 79 (1993), p.152