

材料電磁プロセッシング

Electromagnetic Processing of Materials

浅井 滋生
Shigeo Asai

名古屋大学 大学院工学研究科
材料プロセス専攻 教授

1 緒言

材料電磁プロセッシングでは、これまで電気伝導性流体である熔融金属を対象にしてローレンツ力とジュール発熱に原理を置き、無接触での攪拌、輸送、昇温等の機能を活かした適用を行ってきた。特に、鉄鋼分野を中心に技術開発が進められ、連続鋳造プロセスには多くの適用例を見ることができる。今後はより付加価値の高い活性金属、例えばチタン、ジルコニウム等の浮揚・溶解・精錬・鋳造へと展開が図られよう。

一方、液体ヘリウムを必要としない超電導磁石の出現は強磁場の比較的大きな空間の実現を可能にしたため、従来技術の代替、革新が期待できる。さらに、強磁場を用いると磁化力（磁石が鉄を引きつける力）を非磁性物質においても発現させることができるため、材料電磁プロセッシングが対象と

する材料種も金属から有機・無機物質へと格段に広がる。

本稿では、材料電磁プロセッシングをローレンツ力応用と磁化力応用に分け、最近の適用例を見ながら概説することにする。

2 ローレンツ力応用

電場・磁場が電気良導性流体に示す機能別に電磁気力利用プロセスを分類して表1に示す。以下には機能毎に適用技術・プロセスを説明する。

(a)形状制御機能

熔融金属表面に高周波磁場を印加すると磁気圧力が発生するが¹⁾、これを利用する代表プロセスに電磁鋳造（EMC: Electromagnetic Casting）がある。これは1966年にソ連邦のGezelev²⁾によって考案されたプロセスで、その後、欧米

表1 電磁気力利用技術の機能別分類

基本原理	材料処理に用いる機能	プロセス
ローレンツ力 $f = J \times B$	(a) 形状制御 $P_m = -B^2 / 2\mu_m$ $f = \sigma(v \times B) \times B$	コールド・クルーシブル、浮揚溶解、電磁鋳造、電磁塑性変形、軟接触凝固
	(b) 流動抑制 $f = \sigma(v \times B) \times B$	磁場中チョクラルスキー法、電磁ブレーキ、電磁堰
	(c) 分離・凝集	電磁介在物分離
	(d) 駆動（攪拌）	直流の電流と磁場による攪拌、移動磁界による攪拌、電磁ポンプ、介在物の遠心力による分離
	(e) 振動	電磁振動、電磁超音波
	(f) 浮揚 $ J \times B = \rho g $	水平電磁鋳造、気泡生成頻度制御
ジュール熱	(g) 昇温 $q = J^2 / 2\sigma$	コールド・クルーシブル、浮揚溶解、高周波加熱、通電加熱
フレミングの右手の法則	(h) 速度検出 $E = -v \times B$	速度センサー
上記機能の複合	(i) 精錬 (c)+(d)+(e)+(f)+(g)	電磁精錬、介在物除去
	(j) 凝固組織制御 (b)+(d)+(e)+(f)	結晶粒微細化、結晶粗大化、単結晶育成、過冷凝固

のアルミニウム素材製造会社がその開発に取り組み、現在は商用ベースで稼働している³⁾。

溶融金属を連続的に固める連続鋳造機の鋳型に替わり、図1に示すような、1～数ターンのコイルを配置する。このコイルに周波数1～数千ヘルツの高周波電流を通電すると、磁気圧力 $P_m = B_e^2 / 2\mu_m$ (B_e : 磁束密度の実効値, μ_m : 溶融金属の透磁率) が溶融金属の表面に作用する。この磁気圧力 P_m および表面張力に伴う圧力増分 $P_c = \sigma_f / r$ (σ_f : 溶融金属の表面張力, r : 曲率半径) を溶融金属の静圧 $P_s (= \rho gh)$ と動圧 $P_{dyn} (= \frac{1}{2} \rho v^2$, v : 流速) とに平衡させること ($P_m + P_c = P_s + P_{dyn}$) により、溶融金属は鋳型を用いることなく、無接触で保持される。その結果、表面正常の優れた鋳片が製造可能となる。

溶鋼の連続鋳造にあってもEMCは大変魅力的な技術ではあるが、鋳造速度がアルミに比べて10倍以上であるため、溶湯保持高さ h が大きくなる。さらに、鉄はアルミニウムと比較して密度 ρ が約2倍であるため、EMCの原理である $\rho gh = B_e^2 / 2\mu_m$ の達成が難しく、その実現はこれまで困難とされてきた。ところが最近、鋳型の外側より高周波磁場の印加を行い、表面品質の向上を図る軟接触凝固の提案がなされた⁴⁾。この方法で鋳込まれた錫の鋳片の外観を写真1に示す。磁場の印加によって表面性状の顕著な改善が見られる⁵⁾。

現在、鋼の連鋳片の約半数が鋳造後いったん常温にて表面手入れを行った後、再び加熱され圧延工程にまわされている。

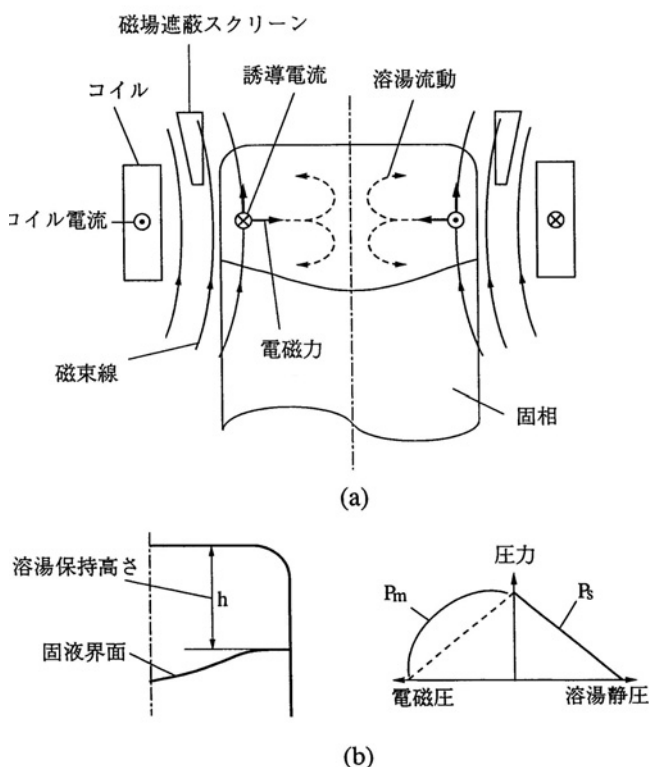


図1 電磁鋳造の原理

本技術が溶鋼の鋳造に適用された暁には鋳片を無手入れのまま圧延工程にまわす直送圧延が可能となる。我が国の鉄鋼の総生産量に基づいて、この直送圧延に伴う省エネルギー量を試算すると、全国のエネルギー消費量の約0.2%、高知県の全エネルギー消費量に匹敵するものと試算され、国家プロジェクトとして採り上げられた⁶⁾。鋼の連続鋳造の試験実験では本プロセスの実用化の可能性が確認されており、実稼動される日の来ることを期待したい。

高周波磁場が有する形状制御と後述する昇温および攪拌機能を合わせ活用する技術にコールド・クルーシブルがある。これはセグメントに切った金属製水冷のつぼを高周波誘導コイル中に設置したものである(図2に模式図を示す)。磁気圧力による無接触保持(写真2参照)と溶解の機能を備えたつぼである。このコールド・クルーシブル技術と精密鋳造技術を組み合わせることによって、化学活性金属であるチタン合金のゴルフクラブのヘッドやターボチャージャー等の軽量部品が製造可能となった⁷⁾。

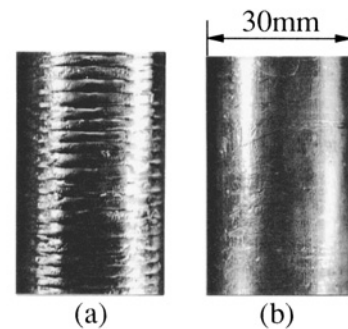


写真1 錫鋳片の外観
(a) 磁場印加なし (b) 磁場印加あり

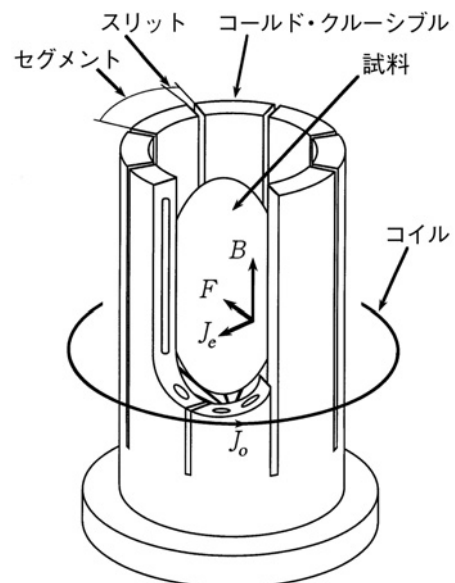


図2 コールド・クルーシブルの原理

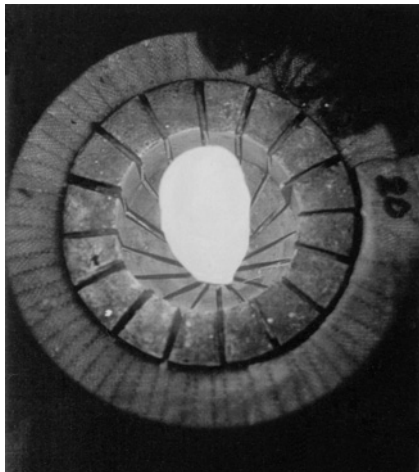


写真2 コールドクルーシブルによるアルミニウムの溶解・保持

(b) 流動抑制機能

図3に示すように y 方向の磁束 B_y の作用下において x 方向の流れ v_x が存在すると、フレミングの右手の法則に基づいて z 方向の誘導電流が生じる。

$$\mathbf{J} = \sigma \mathbf{u} \times \mathbf{B} = (0, 0, \sigma v_x B_y) \dots \dots \dots (1)$$

この $J_z = \sigma v_x B_y$ よりローレンツ力を求めると、

$$\begin{aligned} \mathbf{f} &= \mathbf{J} \times \mathbf{B} = (-J_z B_y, 0, 0) \\ &= (-\sigma v_x B_y^2, 0, 0) \dots \dots \dots (2) \end{aligned}$$

となり、 x 方向に $-\sigma v_x B_y^2$ の体積力 f_x が生ずることになる。この f_x はその負符号が示すとおり、 v_x と逆方向に作用し、 v_x の抑制力となる。この議論は z 方向の流れ v_z が存在する場合にも同様に成立し、その際誘導される力は $f_z = -\sigma v_z B_y^2$ となる。すなわち、磁場の印加方向である y 方向以外の流れはすべて抑制されることになる。本機能は鉄鋼分野においては電磁ブレーキと呼ばれて溶鋼の鋳造プロセスである連続鋳造機に適用され、鋳片の品質向上に寄与している⁸⁾。また、表層をステンレス鋼、内部を普通鋼とする複層鋳片製造にあたり、両鋼の混合を抑制する目的で、本機能の適用がなされている⁹⁾。

(c) 分離・凝集機能

図4に見るように熔融金属に直流電流と静磁場を互いに直行する方向に印加すると、金属にはローレンツ力が働くが、電気伝導度の小さい介在物には電流が流れにくいのでローレンツ力はほとんど生じない。そのため、介在物はそれを取り巻く金属から反作用力を受け、熔融金属中に生じる電磁気力の方向とは逆の方向に移動する。この際、介在物が熔融金属から受ける力を“電磁アルキメデス力”と呼んでいる¹⁰⁾。

本原理は交流磁場を印加した際にも生じる。例えば、コールド・クルーシブルによって浮揚された熔融金属の表面には介在物が集積されるが、この現象は金属中の介在物の迅速分

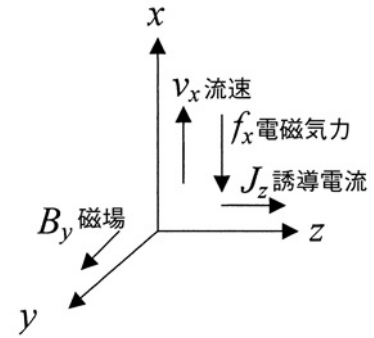


図3 流動抑制機能を説明する原理図

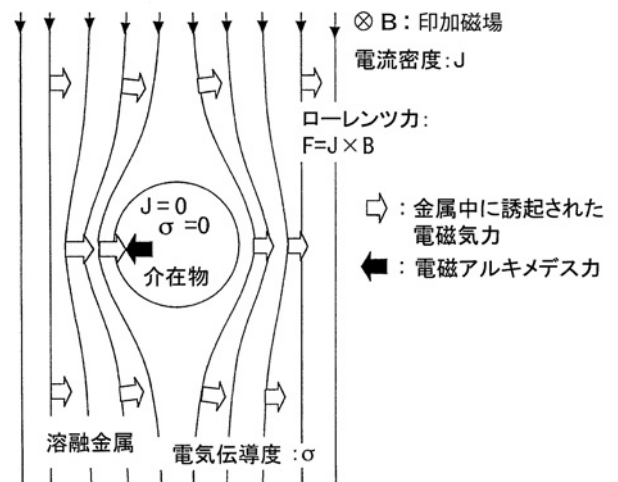


図4 電磁気力による介在物分離の原理図

析法として用いられている¹¹⁾。

(d) 駆動 (攪拌) 機能

直流の電流密度 J_x (x 方向)と直流の磁束密度 B_y (y 方向)を直交する方向に印加すると電磁体積力 f_z (z 方向)が誘発される。

$$f_z = J_x B_y \dots \dots \dots (3)$$

同様のことは、交流電流 ($J_x = \sqrt{2} J_e \sin(\omega t)$) と交流磁場 ($B_y = \sqrt{2} B_e \sin(\omega t - \beta)$) を印加した場合にも生じる。この場合、体積力は交流の一周期の間に変化するので、次式に示すように交流の一周期にわたって平均を取る。

$$\begin{aligned} \bar{f}_z &= \frac{1}{T} \int_0^T \sqrt{2} J_e \sin(\omega t) \cdot \sqrt{2} B_e \sin(\omega t - \beta) dt \\ &= J_e B_e \cos \beta \end{aligned} \dots \dots (4)$$

ここで、 β は電流と磁場の位相差、 T は周期、 J_e 、 B_e は交流の実効値を表す。

一方、電流の直接印加は行わず、磁場のみによって金属を駆動するには交流の移動磁場を用いる。 x 方向に移動する交流磁場を印加すると x 方向に電磁体積力が誘導される。この機能は熔融金属の攪拌、輸送に用いられている。

(e) 振動機能

交流電流と直流磁場あるいは直流電流と交流磁場を重ね印加する場合、交流の一周期が流体の機械的緩和時間より短くても、体積力が大きいと流体の粘性に打ち勝って流体中に振動が生じる。その振動数が大きい場合には、電磁超音波が発生する¹⁷⁾。

(f) 浮揚機能

電磁体積力を重力と平衡させることによって、材料を空中に浮揚させることができる。その平衡条件は、次式で与えられる。

$$\mathbf{J} \times \mathbf{B} = \rho \mathbf{g} \cdots \cdots \cdots (5)$$

体積 V ($\equiv \int dv$) の物体を空中浮揚する条件は、(5) 式を積分型に替えることによって得られる。

$$\int \mathbf{J} \times \mathbf{B} dv = \mathbf{g} \int \rho dv \cdots \cdots \cdots (6)$$

高周波磁場によるレビテーションやコールド・クルーシブルによる浮揚の場合、被浮揚物体内にローレンツ力分布が生じる。その際の浮揚条件は (6) 式から求められる。

(g) 昇温機能

電気伝導性流体では電流 $\mathbf{J}$ が流れると次式で示されるジュール熱が生ずる。

$$q = |\mathbf{J}|^2 / \sigma \cdots \cdots \cdots (7)$$

ここで、電流 $\mathbf{J}$ の起源には3種類ある。

$$\mathbf{J} = \underbrace{\mathbf{J}_0}_{\text{第1項}} + \underbrace{\sigma (-\partial \mathbf{A} / \partial t)}_{\text{第2項}} + \underbrace{\sigma \mathbf{v} \times \mathbf{B}}_{\text{第3項}} \cdots \cdots \cdots (8)$$

ここで、 $\mathbf{A}$ は磁場のベクトルポテンシャル ($\mathbf{B} = \nabla \times \mathbf{A}$ 、 $\nabla \cdot \mathbf{A} = 0$ で定義されるベクトル) である。

- 1) 第1項は外部より印加された電流
- 2) 第2項は交流磁場による誘導電流
- 3) 第3項は磁場中の電気伝導性流体の運動によって誘導される電流である。

一方、交流磁場によって生ずるジュール熱は (9) 式で与えられる。

$$\bar{q} = \frac{\omega B_0^2}{2\mu_m} \cdot \exp(-2z\sqrt{\omega/2\nu_m}) \cdots \cdots \cdots (9)$$

この式から、周波数 ω の増大に伴って発熱速度は増大し、かつ表層に集中するようになることがわかる。

(h) 流速検出機能

磁束密度 $\mathbf{B}$ の存在下で電気伝導性流体が流速 $\mathbf{v}$ で移動すると誘導起電力が生ずる。これはフレミングの右手の法則であり (10) 式で表される。

$$\mathbf{E} = -\mathbf{v} \times \mathbf{B} \cdots \cdots \cdots (10)$$

$\mathbf{B}$ が既知の場合、(10) 式に基づいて $\mathbf{E}$ を測定して $\mathbf{v}$ を求めることができる。本機能は熔融金属の流速を測定するセンサーとして広く用いられている¹³⁾。

(i) 精錬および (j) 凝固組織制御の機能

精錬機能は分離・凝集、駆動、振動、飛散、浮揚、昇温の各機能が組み合わさって生まれる機能である。また、流動抑制、駆動、振動、浮揚の各機能から凝固組織制御機能が生まれる。

3 磁化力応用

磁化力 ($F = (\chi / \mu) \cdot (B \cdot \nabla B)$ 、 χ : 磁化率、 μ : 透磁率) の利用はこれまでもっぱら鉄のような強磁性物質に限定されてきた。その理由は強磁性物質の磁化率 χ_m (ここに示した磁化率 χ_m は $M_s = \chi_m H_s$ として強磁性体の飽和磁気 H_s で飽和磁気モーメント M_s に等しくなるよう便宜的に定めた見かけの磁化率) は 10^{+3} 程度であるのに対し、非磁性物質のそれ χ_n は 10^{-3} と、その比にして約 10^{-6} の違いがあることによる。そのため、非磁性物質に作用する磁化力はこれまでまったく無視されてきた。ところが、近年の超電導磁石の発展にともなって入手可能な磁場の強度は10テスラとなり、日常身の回りで見かける磁石 (0.01 テスラ) の強度の約1000倍に飛躍している。 F は B^2 に比例することから $(10^{+3})^2 = 10^{-6}$ となり χ の 10^{-6} 倍の違いを埋めるものとなる。すなわち強磁場 (~ 10 テスラ) は通常の磁石 (0.01 テスラ程度) が鉄を引きつける感覚で非磁性物質を引きつけるものと推測できる。

なお、磁化力が発現するためには磁化エネルギーが熱による分子の揺らぎ (ブラウン運動) に勝つことが必要であり、この条件は (11) 式で表される。

$$(\chi / 2\mu) B^2 V > kT \cdots \cdots \cdots (11)$$

ここで、 k はボルツマン定数、 V は磁化力が作用する結晶の体積、 T は絶対温度である。ここから、温度が低い程、結晶が大きい程、磁化力は顕在化し易くなることが分かる。

磁化力に関して強磁場が有する機能には (k) 物質の輸送と (l) 結晶配向がある。なお、強磁場が有するもう一つの機能としてはラジカル反応の抑制作用も知られている¹⁹⁾ が、ここでは (k) と (l) の機能に限定して、その適用例を示すことにする。

(k) 物質の輸送

上述したように、磁場下では $F = (\chi / \mu) \cdot (B \cdot \nabla B)$ の力が物質に作用する。磁化率 χ は物質に固有の物性値であるので、液体Iに固体IIが浮遊している場合、固体IIには $F = ((\chi_I - \chi_{II}) / \mu) \cdot (B \cdot \nabla B)$ の力が働くことになる。すなわち、物質Iと物質IIの磁化率差が大きい程この力は顕在化し易くなる。ちなみに溶鋼はキュリー点より高温であるため、当然常磁性を示すが、その磁化率は他の常磁性物質に比べて2~3桁大きい。このことは溶鋼中の物質は磁化力によって分離し易いことを物語る。写真3にFe-Cu合金を12

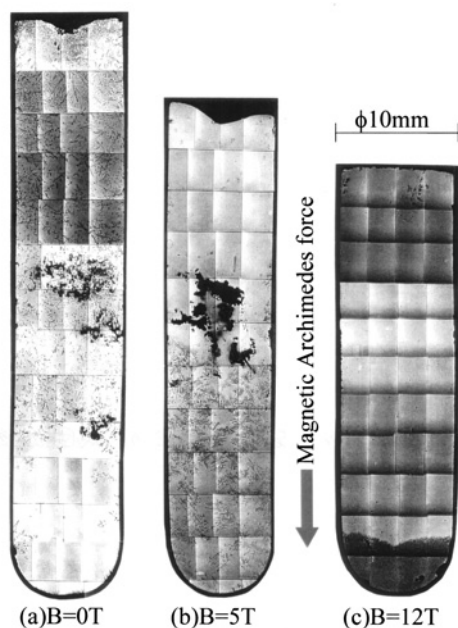


写真3 5wt% Fe-Cu合金の凝固組織

テスラの磁場中で凝固させた際のマクロ組織を示す。磁場印加により鉄化合物が底部に沈殿分離されている。

(1) 結晶配向

回転のトルクは(12)式で与えられる。

$$T = M \times H \quad \dots\dots\dots (12)$$

$M = \chi H$ であるので、結晶方位により χ の値が異なる場合、 χ の値の大きい方位が磁場方向に揃うことになる。磁場中で反磁性物質である亜鉛の電析、蒸着を行ったところ、亜鉛が結晶配向することが見出された¹⁵⁾。図5には鉄板上にめっきされた亜鉛を磁場中でその溶解温度まで昇温、部分溶解した後、凝固させた試料から得られたX線回折の結果を示す。磁場を印加したものはみごとにc軸方向に配向している。

4 まとめ

電磁気力の応用をローレンツ力と磁化力に分け、適用例を中心に概観した。

ローレンツ力利用に関しては、冶金現象との関わりで、これまでに知られていない新機能の発見が期待できる。それには電磁気現象についての理解にもまして、冶金現象に対する深い洞察が不可欠となろう。一方、磁化力に関しては、超電導技術の発展に伴いヘリウムを必要としない超電導磁石が普及しており、そのコスト低下と共に鉄鋼プロセスの下工程から適用が広がることになろう。

最後に、本分野の育成と発展に終始温かい支援を下された日本鉄鋼協会とその会員の皆様に本誌面を借りてお礼申し上げます。

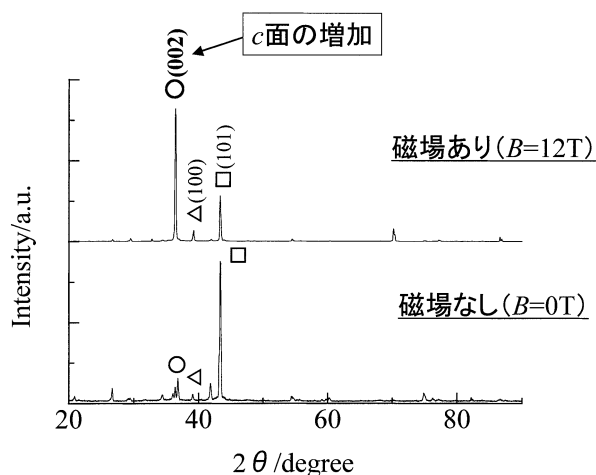


図5 亜鉛の再溶解過程における磁場印加の効果

参考文献

- 1) 浅井滋生：入門 材料電磁プロセッシング，内田老鶴圃，(2000)，28.
- 2) Z.N.Gezelev：U.S. patent 3467166
- 3) T.R.Pritchett：Light Metal Age，(1981) 10，12.
- 4) 浅井滋生：第129.130回 西山記念技術講座，日本鉄鋼協会(1989)，51.
- 5) T. Li， S. Nagaya， K. Sassa and S. Asai：Metall. Trans.， 26B (1995)， 353.
- 6) JRCM NEWS， No.142 (1998)， 4.
- 7) 山尾文孝， 佐々健介， 岩井一彦， 浅井滋生：鉄と鋼， 83 (1997) 1， 30.
- 8) わが国における鋼の連続製造技術史， 日本鉄鋼協会， 山本全作等編， (1996)， 557.
- 9) E.Takeuchi， H.Tanaka and H.Kajioka： Proceeding of Int. Symp. on Electromagnetic Processing of Materials， ISIJ， Nagoya， (1994)， 364.
- 10) J.Park， 森平淳志， 佐々健介， 浅井滋生：鉄と鋼， 80 (1994)， 389.
- 11) 近藤裕之， 藤 健彦， 植森龍治， 鈴木節雄：CAMP-ISIJ， 14 (2001)， 817.
- 12) S.Kawai， Q.Wang， K.Iwai and S.Asai： Mat. Trans. JIM， 42 (2001) 2， 275.
- 13) R.Ricou and C.Vives： Int. J. Heat Mass Transfer， 25 (1982) 10， 1579.
- 14) P.Atkins： Chemistry in Britain， 12 (1976)， 214.
- 15) 杉山翼， 田橋正浩， 佐々健介， 浅井滋生：日本学術振興会製鋼第19委員会資料， (2002)

(2002年5月17日受付)