交流磁場間欠印加による部分強化型 Al 基 SiC 粒子分散複合材料の作製

菅野 能昌*・谷口 尚司**・嶋崎 真一**・吉川 昇**

Journal of Japan Institute of Light Metals, Vol. 57, No. 1 (2007), pp. 12-18

Fabrication of aluminum-matrix composites locally reinforced with SiC particles by using intermittent A.C. magnetic field

Yoshimasa KANNO*, Shoji TANIGUCHI**, Shin-ichi SHIMASAKI** and Noboru YOSHIKAWA**

In our previous study, aluminum matrix composites partly reinforced by SiC particles were fabricated by the imposition of a high frequency magnetic field to molten aluminum suspending SiC particles. The thickness of particle-accumulated layer (PAL) was almost the same as the skin depth that depends on the frequency of the magnetic field. In the present study, a 3 kHz magnetic field is applied to realize thicker PAL. Although a 4.71 mm PAL is expected at 3 kHz, PAL is not formed because of a strong electromagnetic flow. Intermittent imposition of magnetic field is tested to increase PAL, which seems effective to reduce the electromagnetic flow. A 4 mm PAL with dense particle packing is realized by an intermittent magnetic field composed of 1 s imposition and 1 s pausing. Numerical calculation is performed to understand the behavior of metal flow with the intermittent magnetic field. It is found that 0.5 s is required for the development of metal flow. As the relaxation time of a single SiC particle in molten aluminum is far less than 0.5 s, PAL can be formed before the metal flow develops.

(Received May 30, 2006 Accepted September 6, 2006)

Keywords: aluminum matrix composite, functionally graded materials (FGMs), reinforced layer, SiC particle, electromagnetic force, intermittent magnetic field

1. 緒 言

近年、電磁力を各種の溶融金属プロセスに適用する材料電磁プロセッシング(EPM: Electromagnetic Processing of Material)の分野が急速に進展しつつある^{1,2)}。EPMの機能には、駆動機能、制動機能、形状制御機能、浮揚機能、電磁分離機能などがあり、これらの機能のいくつかは、電磁攪拌、電磁ブレーキ、電磁ポンプ、電磁界鋳造、浮揚溶解などとして、実際の金属製造プロセスで利用されている。電磁分離機能はいまだ工業的な利用が進んでいないが、近年の高清浄金属素材への強い要請から、介在物除去への電磁力の応用に期待が集まっている。この機能を利用すれば、重力分離やフィルタによる分離に頼らなくても、溶融金属中の介在物を高速分離することができる。

一方、粒子の電磁分離機能を用いて、Al-Si合金溶湯中のSi初晶を表面に集積させたり^{3,4)}、アルミニウム(以下、Alと略記)溶湯中に添加したSiO₂粒子から置換反応で生成させたAl₂O₃粒子を表面に電磁集積する方法⁵⁾が提案されている。これらの研究を踏まえ、著者の一部は前報⁶⁾で電磁分離機能をSiC粒子分散Al合金の部分強化に利用した。すなわ

ち、溶融Al中に分散したSiC粒子を高周波電磁力によってるつば壁面に電磁集積させ、表面のみを強化した変形加工可能な複合材料を作製することに成功した。このような材料の用途としては、自動車のエンジン用シリンダ、ブレーキディスクなどの耐摩耗性を要求される部品などが挙げられる。これらの製品は、やがて市場に出現する粒子分散合金の廃材を粒子源として再利用でき、粒子強化層が薄ければ変形加工が可能であり、さらに表層を除去すれば粒子を含まない金属部を容易にリサイクルできるなどの優れた特徴をもつ。

ブレーキ材料のように過酷な使用条件に耐えるためには、粒子集積層を厚くする必要がある。そのためには磁場の周波数を減少させて、電磁力が有効に作用する表皮厚さを厚くすればよい。しかし、周波数を低くすると溶融金属中に激しい電磁流動が発生し⁷⁾、粒子の電磁集積が妨げられる^{8,9)}。本研究では、その対策として磁場を間欠印加する方法を開発し、その特性を検討した。

2. 原 理

2.1 電磁分離の原理

Fig. 1に電磁分離機能の原理を示す。誘導コイルに高周波

* 東北大学大学院環境科学研究科博士前期課程 (〒980-8579 仙台市青葉区荒巻字青葉 6-6-02) [現在: 古河スカイ(株)]. Master Course Student of Graduate School of Environmental Studies, Tohoku University (6-6-02, Aza-Aoba, Aramaki, Aoba-ku, Sendai-shi, Miyagi 980-8579) [Present: Furukawa Sky Co, Ltd.].

** 東北大学大学院環境科学研究科 (仙台市). Graduate School of Environmental Studies, Tohoku University (Sendai-shi, Miyagi). E-mail: s-tanig@mail.kankyo.tohoku.ac.jp

Fig. 1 Principle of electromagnetic separation.

B : applied magnetic field, J : induced current, F : electromagnetic force, F_p : electromagnetic separation force.

電流を流すと、コイル内に交流磁場が発生する。その結果、熔融金属内部には電磁誘導の原理により誘導電流が流れる。この誘導電流と印加磁場との相互作用によって、金属内部には中心軸に向かう電磁圧縮力が発生する。この圧縮力により、熔融金属中には内部に行くほど圧力が高くなる圧力勾配が形成される。このとき、熔融金属と異なる導電率を有する粒子には、粒子に加わる電磁力と圧力勾配による力との釣合いが崩れ、導電率が熔融金属のそれより大きい粒子では電磁力と同じ向きに、導電率が小さい粒子では電磁力と逆向きに力が作用する。Leenov と Kolin¹⁰⁾ は、この力を単一の球形粒子について理論的に求め、(1) 式を得た。

$$F_p = -\frac{3}{2} \frac{\sigma_L - \sigma_p}{2\sigma_L + \sigma_p} \frac{\pi d_p^3}{6} F \quad (1)$$

ここに σ_L は熔融金属の導電率、 σ_p は粒子の導電率、 d_p は粒子径、 F は電磁力を表す。一般に、熔融金属中の非金属介在物は $\sigma_p = 0$ とみなせるので、(1) 式は (2) 式となる。

$$F_p = -\frac{3}{4} \frac{\pi d_p^3}{6} F = -\frac{\pi d_p^3}{8} F \quad (2)$$

すなわち、粒子に加わる分離力 F_p は印加した電磁力とは逆向きに作用する。(2) 式の係数 $3/4$ は、粒子周囲の電流のひずみによって力の一部が減殺されることを表す。なお、2個の球形粒子が近接した場合については、著者らの一部によって数値解が導かれている^{11)~13)}。

(2) 式の分離力をストークスの粘性抗力と等置すれば、粒子の泳動速度は次式で表される。

$$v_p = -\frac{d_p^2}{24\mu} F \quad (3)$$

ここに μ は熔融金属の粘性係数である。

電磁力 F の印加方法としては、直流電流と直流磁場の同時印加¹⁴⁾、交流電流の印加¹⁵⁾、交流電流と交流磁場の同時印加^{16),17)}、交流磁場の印加^{18)~21)}、移動磁場の印加などがある²²⁾。また電磁分離法の詳細は文献²³⁾に紹介されている。前報および本報では、小型の設備で済む交流磁場の印加による方法を採用している。この方法では、次式で表される表皮の内部で電磁力が作用する。

$$\delta = (\pi \mu_e \sigma f)^{-1/2} \quad (4)$$

ここに μ_e は透磁率（真空の透磁率 $4\pi \times 10^{-7}$ に等しい）を

(a) Experimental result (b) Calculated flow pattern

Fig. 2 Comparison between experimental result and calculated flow pattern ($f=30\text{ kHz}$, $I_{rms}=163\text{ A}$).

表す。前報では、周波数 f が 30, 80, 200 kHz の場合について、熔融 Al 中に分散した SiC 粒子の電磁分離実験を行い、10 数秒の短時間で電磁集積が完了することと、粒子集積層の厚さがほぼ (4) 式の表皮厚さ（上記各周波数についてそれぞれ 1.49, 0.91, 0.58 mm）と等しくなることを見出した。この速やかな電磁集積現象は熔融金属本体における電磁流動の働きによる。すなわち、電磁力の作用しない表皮の外側にある粒子は、電磁流動によって表皮内部に輸送されてそこに集積する。電磁流動がなければ熔融金属本体の粒子が分離されることはない。一方、電磁流動が激しすぎれば、電磁集積が妨害される。Fig. 2 (a) による壁に沿った粒子集積層の分布を示したが、集積層の厚さは熔融金属の高さの中央部で厚く、液自由表面および底部で薄くなっている。また、Fig. 2 (b) には実験条件の下で数値計算によって求めた熔融 Al のフローパターンを示した。液の流動は熔融金属の上部と下部で激しくなっており、それらの位置で粒子集積層が薄くなっている。これは、電磁流動が粒子の電磁集積を妨害するためである。

(4) 式より粒子集積層を厚くするためには、低い周波数の磁場を用いる必要があるが、周波数が低くなると熔融金属の内部まで電磁力が作用するようになり⁷⁾、電磁流動が激しくなる結果、期待した粒子集積層厚さが得られなくなる可能性

Fig. 3 Intermittent imposition of magnetic field.

Fig. 4 Experimental apparatus used for the electromagnetic accumulation of Al-SiC system⁶⁾.

がある。

2.2 間欠型磁場印加法

電磁流動の役割を保ったままで電磁集積に対する妨害作用を抑制するためには、電磁力を維持しながら流れを緩やかにする必要がある。そこで本報では、磁場の間欠印加法を考案しその効果を検証した。

ストークスの抵抗則が成立するとき、密度 ρ_p 直径 d_p の粒子の緩和時間は次式で与えられる。

$$\tau_p = \frac{\pi d_p^3}{6} \rho_p / 3\pi d_p \mu = \frac{d_p^2 \rho_p}{18\mu} \quad (5)$$

本研究の条件である $d_p=21\mu\text{m}$, $\rho_p=3180\text{kg/m}^3$, $\mu=1.38\times 10^{-3}\text{Pa}\cdot\text{s}$ を用いると、 $\tau_p=18\mu\text{s}$ となり、粒子は電磁力印加とほぼ同時に定常速度に達するとみなすことができる。一方、電磁流動は電磁力印加と同時に発達するとは考えられず、秒のオーダーの緩和時間を要するであろう。このような粒子運動と流動の緩和時間の差を利用することにより、流動が未発達の際に粒子を電磁集積させることが可能と考えられる。

そこで、本研究では Fig. 3 のように、磁場印加時間 t_1 、停止時間 t_2 を交互に繰り返す、間欠磁場印加法を適用した。

3. 実験方法および数値計算方法

3.1 実験方法

実験装置には前報⁶⁾ と同じ Fig. 4 の装置を使用した。実

Table 1 Experimental conditions

Frequency, f/kHz	3
Coil current, I_{rms}/A	752, 532
Initial concentration of SiC, $C_0/\text{vol}\%$	0.9, 5.9
Mean diameter of SiC particle, $d_p/\mu\text{m}$	21
Total imposition time of magnetic field, t_H/s	30, 60, 120
Imposition time of magnetic field, t_1/s	1
Pause time of magnetic field, t_2/s	1, 2

験手順はまず、所定量の純 Al (99.9%) を入れた石英るつぼ (内径 40 mm, 溶融 Al 高さ 60 mm) をコイル中央部に置き、Al を誘導溶解した。溶湯温度が 800°C に安定した後、いったん誘導炉の電源を止め、平均粒径 21 μm の SiC 粒子を 23 mass% 含有した所定量の Al 合金 (9 mass% Si, 6 mass% Mg) を投入し、1 分間アルミナ棒で溶湯を手動攪拌して SiC 粒子の分散を図った。溶融 Al 中の SiC 粒子の添加量が多い実験では、SiC 粒子含有 Al 合金の添加による溶融 Al の温度低下が著しいため、初めから SiC 粒子含有合金を純 Al とともに電磁溶解した。SiC 粒子を分散させた後、再び誘導炉の電源を入れて電磁集積を開始した。所定時間後、るつぼ側面に水スプレーを噴射し溶融 Al を急冷凝固させた。凝固した試料を縦に切断し、その断面を鏡面研磨して光学顕微鏡で観察した。なお、実験で石英るつぼを用いたのは、石英が水による急冷に耐えることと、Al との濡れがよく、SiC 粒子がるつぼ壁に付着しないためである。石英は溶融 Al に還元されるが、本実験温度および実験時間ではその反応量は無視できる程度であった。

実験では磁場印加時間 t_1 を 1 s とし、磁場停止時間 t_2 を 1 および 2 s としたときの粒子集積状況を調べた。コイル電流は溶融 Al を 800°C に保つのに必要な電流を基本とし、一部の实验では、比較のために電磁力が半分になるような電流値で磁場の連続印加実験を行った。実験条件を一括して Table 1 に示した。

3.2 数値計算方法

磁場を連続印加する場合の数値計算については既報^{7,24)} を参照されたい。間欠磁場印加条件における電磁界解析には連続磁場印加と同じ方法を用いた。これは、系内の電磁界が磁場の印加と同時に定常分布になるためである。解析には前報⁶⁾ と同じ Lavers²⁵⁾ の方法を用いた。

間欠磁場印加における流動解析は、上記の電磁界解析で得られた電磁力分布に基づき、市販の熱流体解析ソフトである FLUENT6.2 によって行った。乱流モデルには標準型の $k-\epsilon$ モデルを用いた。

計算は、2 次元軸対称の条件で行い、温度一定、液自由表面は平坦であるとした。計算メッシュには、壁面および自由表面に近づくにつれて間隔が小さくなる、 $(r \times z)=24 \times 67$ の不等間隔メッシュを採用した。

4. 結果および考察

4.1 実験結果

前報⁶⁾ で実験に用いた最小の周波数は 30 kHz で、そのときの表皮厚さは 1.49 mm であった。本報の周波数 3 kHz における表皮厚さは 4.71 mm になる。まず、前報と同じ粒子添加

Fig. 5 Optical photographs of the cross section of the solidified Al sample after the electromagnetic accumulation. ($t_h=30$ s, $C_0=0.9$ vol%)

Fig. 6 Particle accumulated layer formed during electromagnetic melting (Initial condition, $t_h=0$, $C_0=5.9$ vol%).

量の 0.9 vol% について、粒子集積状況を調べた結果を **Fig. 5** に示した。写真より、SiC 粒子の集積は認められない。これは前述のように、前報⁶⁾の条件に比べて周波数が低いため、激しい電磁攪拌による電磁集積の妨害作用が顕在化したためであると考えられる。

つぎに粒子添加量を 5.9 vol% とした場合の結果について述べる。この場合には、粒子を含有する Al 合金を純 Al とともに電磁溶解したが、溶解中に一部の粒子が電磁集積された。その様子を **Fig. 6** に示した。図より最大 1.5 mm の粒子集積層が形成された。また集積層内の粒子体積率は約 40% に達し、前報の 20% の約 2 倍となった。溶解中に粒子集積が起こったのは、Si および Mg を含む SiC 分散合金が先に溶解し、

Fig. 7 Particle layer for continuous imposition of magnetic field for $I_{ms}=752$ A.

Fig. 8 Change in particle-layer thickness with time for the case of continuous imposition of magnetic field.

未溶解の純 Al とるつば側壁の間に狭い融液層を形成し、流動が制約された下で電磁分離が進行したためと考えられる。なお、この場合にも液自由表面およびるつば底近傍では粒子集積は起きていない。本報ではこれを初期条件として各種条件の電磁集積について検討した。

Fig. 7 に磁場を連続的に 30 s 間印加したときの試料の断面写真を示した。初期粒子集積層の外側に、粒子体積率の小さい層が形成されており、これが磁場印加中に電磁集積した粒子層と考えられる。**Fig. 8** には初期粒子集積層を含めた粒子層厚さの時間変化を示した。図より、60 s の磁場印加により平均厚み約 2 mm の粒子集積層が形成されている。これより初期厚みを差し引くと約 1 mm の電磁集積が進行したに過ぎず、 $f=3$ kHz の表皮厚さ 4.71 mm に比して極めて小さい。これは前述のように、激しい電磁流動による妨害作用のためである。

Fig. 9 に $t_1=1$ s, $t_2=1$ s の間欠磁場印加条件で得られた粒子集積層の写真を示した。図より Al の電磁溶解中に形成された初期粒子集積層と同程度の高い粒子体積率を有する層が磁場印加時間の経過とともに厚く成長している。高さの中央部では、全印加時間 $t_h=60$ s において表皮厚さに匹敵する厚い集積層が形成されている。これは当初予期したように、電磁

Fig. 9 Particle accumulated layer for intermittent magnetic field imposition during 30 and 60 s under the condition of $t_1=1$ s and $t_2=1$ s ($I_{rms}=752$ A).

Fig. 10 Change in mean and maximum particle accumulated layer thickness for the case of $t_1=1$ s and $t_2=1$ s ($I_{rms}=752$ A).

流動と粒子運動の緩和時間の差によって、流動が未発達の内に電磁集積が起きたためである。しかし、この場合にも液自由表面およびつば底近傍には電磁集積が認められない。これはつぎのように考えられる。熔融金属側面から中心に向かう電磁力が高さ方向に一樣であれば、電磁力はポテンシャル力となり、熔融金属の電磁流動は発生しない。本実験条件では、熔融金属の上下部における端効果によって、電磁力の向きが局所的に変化する。そのため、電磁流動の駆動力である回転成分が端部で大きくなり、磁場印加直後の流れの発達は上下端部から開始し、次第に高さの中央部に及んでくる。このために、間欠磁場印加時においても熔融金属上下部では流れの妨害作用が大きく、電磁集積が起きなかったものと考えられる。このことについては、流動解析の項で改めて考察する。

Fig. 10 に粒子集積層の厚さの時間変化を示した。図より集積層の厚さは磁場の総印加時間 t_h が 60 s までは時間とともに厚くなっているが、90 s では飽和している。このとき集積層の最大厚さは 4 mm を超えており、表皮厚さと同程度となっている。つぎに **Fig. 11** に、粒子集積層厚さに及ぼす磁場の停止時間 t_2 の影響を示した。図より t_2 を大きくすると、

Fig. 11 Effect of t_2 on the particle accumulated layer thickness ($I_{rms}=752$ A).

Fig. 12 Particle accumulated layer thickness for continuous imposition under a low coil current.

粒子の集積が遅れている。これより、 t_2 を 1 s 以上に増加しても粒子集積が遅れる効果しかないことがわかった。

さて、連続磁場印加において電磁集積が十分進行しなかったのは、激しい電磁流動による電磁集積の妨害作用のためであることはすでに明らかにされた。このことを更に検討するために、印加する電磁力が 1/2 になるようにコイル電流を 532 A に減少させてみた。その結果を **Fig. 12** に示した。図は、連続磁場印加の場合に $I_{rms}=752$ A および 532 A とした場合と、 $I_{rms}=752$ A で $t_1=t_2=1$ s とした間欠磁場印加の場合とを比較したものである。連続磁場印加では、電流が小さい方が集積層が厚くなっており、その厚さは間欠磁場印加と同程度となっている。しかし連続磁場印加では **Fig. 7** に示したように集積層の粒子体積率は小さい。両者の粒子体積率の分布を **Fig. 13** に比較して示した。図には壁からの距離による粒子体積率の変化を連続磁場印加と間欠磁場印加とについて比較して示したが、間欠磁場印加の場合には、40% 程度の体積率が厚さ 4 mm 以上まで保たれており、それより距離が増すと急減している。これに対して連続磁場印加の場合には、壁の

ごく近傍で 40% の体積率であるが、 $t_h=30\text{s}$ では壁からの距離とともに体積率が連続的に減少しているのに対して、 $t_h=60\text{s}$ の分布には 23% 程度に肩が見られる。この体積率は前報で得られた値に近い。

以上の結果をまとめるとつぎのようになる。連続磁場印加の場合には、印加する電磁力を弱めると厚い集積層が得られるが、粒子体積率は低い。一方、間欠磁場印加では厚い集積層とともに高い粒子体積率が得られた。間欠磁場印加の場合に粒子体積率が高くなる機構については、今後の研究が必要である。

4.2 数値計算結果

Fig. 14 に、間欠磁場印加 ($t_1=t_2=1\text{s}$) の場合について種々の時間におけるフローパタンの数値計算結果を示した。磁場を印加して 1s 後には上下部に大きく発達した渦が生成している。 $t_h=1.5\text{s}$ すなわち磁場を止めて 0.5s 後には、流れは著しく減衰している。再び磁場を印加した $t_h=2.0\text{s}$ には、上下部の渦は $t_h=1\text{s}$ の場合より狭い領域で、直ちに発達している。そして $t_h=2.5\text{s}$ になると、中央部にも強い渦が生成している。フローパタンの時間変化を観察すると、磁場印加あるいは消去後の中央部の渦の発達と減衰は、およそ 0.5s 以内で完了している。これより流動の緩和時間は約 0.5s とみなされる。

つぎに、 $z=0.05\text{m}$ (自由表面より 10mm 下部) と $z=0.03\text{m}$

Fig. 13 Comparison of volume fraction of particle between continuous and intermittent imposition of magnetic field.

Fig. 14 Computed flow patterns of liquid Al at various times after the imposition of magnetic field for the case that $t_1=1\text{s}$ and $t_2=1\text{s}$.

(溶融金属の高さの中心) の 2 か所で、壁面より 1.5mm の位置の壁に沿う流速の時間変化を Fig. 15 に示した。強い渦が生成する $z=0.05\text{m}$ では 1 回目の磁場印加の場合に流速が大きく発達するが、2 回目以降は印加直後に最大値を示した後、やや減少するパターンを繰り返す。磁場を消去した後は流速が緩やかに減衰し、約 0.5s 後にはゼロに近づいている。これに対して $z=0.03\text{m}$ では、 $z=0.05\text{m}$ に比して流速はかなり小さく、かつ磁場印加後の流速の発達は遅い。これは先に述べたように、溶融金属上下部で渦が十分成長した後に中央部の流れが成長することを表している。

以上より、電磁流動の激しい $f=3\text{kHz}$ の条件においても、間欠磁場印加によって粒子集積が表皮厚さまで進行したのは、電磁流動が発達するのに要する時間が長く、その間に粒子の電磁集積が進んだためであることが明らかにされた。また、つば底および液自由表面近傍では、電磁流動が短時間で発達するために、それらの場所では電磁集積が起きなかったものと考えられる。

5. 結 言

以上本研究では、SiC 粒子を分散した溶融 Al に電磁力を間欠的に印加する場合の SiC 粒子の電磁集積現象を検討した。その結果、以下の結論を得た。

Fig. 15 Change in velocities at different positions, ($z, x/\text{mm}$) : (50, 1.5), (30, 1.5) with time after the imposition of magnetic field.

(1) 前報と同じ粒子添加量 0.9 vol% では、連続磁場印加による電磁分離は起きなかった。

(2) 粒子添加量 5.9 vol% では、Al 試料の電磁溶解時に SiC 粒子の電磁集積が起きた。集積層は溶融 Al の高さの中央で約 1.5 mm、粒子体積率は 40% であり、るつぼ底および自由表面近傍では集積しなかった。

(3) 連続磁場印加では、磁場印加時間が 60 s において約 1 mm の集積層が初期集積層の上に形成された。その粒子体積率は約 20% であった。

(4) 磁場印加時間 $t_1=1$ s、停止時間 $t_2=1$ s の間欠磁場印加の条件では、集積層の厚さは溶融 Al の高さの中央において、表皮厚さ 4.71 mm とほぼ同じ厚さとなった。また、 $t_1=1$ s、 $t_2=2$ s では電磁集積が休止時間の増加分だけ遅れた。

(5) 電磁力が 1/2 になるコイル電流で磁場を連続印加すると、集積層の厚さは表皮厚さと同程度に達したが、粒子体積率は 20% であった。

(6) $t_1=t_2=1$ s の場合の流動の数値計算結果より、高さ中央部の電磁流動が発達するまでの時間は約 0.5 s であった。

本研究は独科学技术振興機構研究成果活用プラザ宮城シーズ育成試験（平成 17 年度）の支援によって行われたものである。また、本研究の遂行に当たり、小林敬幸君（現：東北大学大学院前期課程）の協力を得た。ここに深甚なる謝意を表します。

参 考 文 献

- 1) 高度電磁力利用マテリアル・プロセッシング研究会編：材料プロセスへの電磁力の高度利用，2003 年 11 月，日本鉄鋼協会。
- 2) S. Taniguchi, H. Yasuda and K. Takatani: ISIJ Int., **43** (2003), 799–800.
- 3) 朴 竣杓，佐々健介，浅井滋生：日本金属学会誌，**59** (1995) 7, 733–739.
- 4) Z. M. Xu, T. X. Li and Y. H. Zhou: Mater. Research Bulletin, **35** (2000), 2331–2336.
- 5) 恒川好樹，奥宮正洋，杉村恵吾：鑄造工学，**74** (2002)，170–176.
- 6) 高橋功一，谷口尚司：軽金属，**55** (2005)，483–488.
- 7) 谷口尚司，菊池 淳：鉄と鋼，**70** (1984)，846–853.
- 8) K. Takahashi and S. Taniguchi: Proc. of the 4th Int. Symp. of Electromagnetic Processing of Materials, EPM 2003, Lyon, France, 2003, (2003), 391–396.
- 9) K. Takahashi and S. Taniguchi: ISIJ Int., **43** (2003), 820–827.
- 10) D. Leenov and A. Kolin: J. Chem. Phys. **22** (1954), 683.
- 11) 窪田征弘，吉川 昇，谷口尚司：鉄と鋼，**87** (2001)，113.
- 12) T. Ogasawara, N. Yoshikawa, S. Taniguchi and T. Asai: ISIJ Int., **43** (2003), 862–868.
- 13) T. Ogasawara, N. Yoshikawa, S. Taniguchi and T. Asai: Metall. Mater. Trans B, **35B** (2004), 847.
- 14) 朴 竣杓，森平淳志，佐々健介，浅井滋生：鉄と鋼，**80** (1994)，389–394.
- 15) S. Taniguchi and J. K. Brimacombe: ISIJ Int., **34** (1994), 722–731.
- 16) A. Alemany, J. P. Argous, J. Barlet, M. Ivanès, R. Moreau and S. Poinot: French Patent No.80400 4430, (1980).
- 17) S. Taniguchi and A. Kikuchi: Proc. 3rd Int. Symp. on Electromagnetic Processing of Materials, EPM2000, Nagoya, Japan, (2000), 315–320.
- 18) 山尾文孝，佐々健介，岩井一彦，浅井滋生：鉄と鋼，**83** (1997)，30.
- 19) N. El-Kaddah, A. D. Patel and T. T. Natarajan: JOM, **47** (1995), 46.
- 20) D. Shu, B. Sun, K. Li, Z. Xu and Y. Zhou: ISIJ Int., **42** (2002), 1241–1250.
- 21) K. Li, J. Wang, D. Shu, T. Li, B. Sun and Y. Zhou: Materials. Letter, **56** (2002), 215–220.
- 22) 田中佳子，佐々健介，岩井一彦，浅井滋生：鉄と鋼，**81** (1995)，1120.
- 23) 谷口尚司：ふえらむ，**10** (2005)，88–96.
- 24) 谷口尚司，渡辺 実，菊池 淳，只木禎力：鉄と鋼，**66** (1980)，363–371.
- 25) J. D. Lavers: Diss. Thesis, Univ. Toronto, (1970).