

材料電磁プロセッシングの進展

浅井 滋生 *

Development of Electromagnetic Processing of Materials

Shigeo Asai

Synopsis: Application of electromagnetic forces to materials processing, so called "Electromagnetic Processing of Materials (EPM)" has been recognized as an edge cutting technology, especially in the fields of steelmaking and advanced materials processing. The history of EPM in Japan is mentioned and the background to promote EPM is described. The present state of EPM is given through briefly introducing several examples regarding to the applications of a high frequency magnetic field, a DC magnetic field, DC magnetic and electric fields, and a traveling magnetic field. Furthermore, the possibility of utilization of a high static magnetic field is mentioned and the future view of EPM is revealed.

Key words: steelmaking; continuous casting; application of electromagnetic force; electromagnetic processing of materials; magnetization force.

1. はじめに

金属分野においては古くから電気エネルギーを溶解・精錬・凝固の分野において用いてきたのであるが、高周波磁場によるレビテーション・メルティングは1923年に、最近話題のcold crucibleは1931年に、電磁攪拌は1932年に、すでに提案されていたことは驚きである。熔融金属では、通電に伴って磁場が発生し、この磁場と印加電流によって電磁気力が誘起される。この電磁気力は流体を駆動するので、通電によって熔融金属は流動することになる。同じことは交流磁場を熔融金属に印加したときにも見られ、やはり熔融金属は流動する。このようなことは次に述べる電磁流体力学の分野ではよく知られている現象である。

電磁流体力学 (Magnetohydrodynamics) は電磁場と流体の運動の場の連成問題を取り扱う学問であり、1942年に Alfvén (1970年にノーベル賞を受賞) によって体系化された。プラズマや宇宙物理の分野で発展したこの電磁流体力学の知見を材料プロセッシングの分野に導入し、その積極的な利用を図るのが「材料電磁プロセッシング (Electromagnetic Processing of Materials = EPM)」である。この言葉は耳慣れない新語であるため、電気や磁気に関連する材料を作る分野と誤解されることもあるが、「材料製造工程において電磁気力を利用する工学分野」を指す言葉として我が国で生まれたものである。最近では我が国で EPM '94の国際会議が開催され、フランスで EPM '97が

開催予定となっており、また、フランスの国立研究機関 MADYLAMがEPM-MADYLAMと改名されるなど、EPMという言葉が国際的にも認められるようになってきた。

本稿では、最近のEPMのトピックスの紹介を通じて、材料電磁プロセッシングの可能性を探ることとする。

2. 電場・磁場が電気伝導性流体に示す機能

2・1 形状制御機能

熔融金属に高周波磁場Bを印加すると熔融金属表面に磁気圧力 $P_m = B^2/2\mu$ (ここで μ は透磁率である) が作用する。この磁気圧力を使うと、熔融金属の形状を無接触で変化させることができる。例えば、Fig.1に示すように、溶湯静圧 $P_s = \rho g z$ と P_m を平衡 ($P_s = P_m$) させれば鑄型を用いることなく熔融金属の鑄造が可能となる。この原理に基づく鑄造法を電磁鑄造 (Electromagnetic Casting = EMC) と呼ぶが、欧米のアルミニウムの分野では大断面のスラブがこのEMCによって製造されている。EMCの採用は鑄型壁との接触によって生じる鑄片表面の欠陥を一掃する。

溶鋼の鑄造にあってもEMCは大変魅力的な技術ではあるが、アルミニウムと比較して密度 ρ が大きいこと、およびアルミニウムと比較して鑄造速度が大きく溶湯保持高さhが大きくなることから、EMCの原理である $\rho g h = B^2/2\mu$ の達成が難しく、その実現は困難視されてきた。ところが最近、鑄型の外側より高周波磁場の印加を行い、表面品質の

* 名古屋大学[Nagoya University, Furocho, Chikusa-ku, Nagoya 464-01], 工博

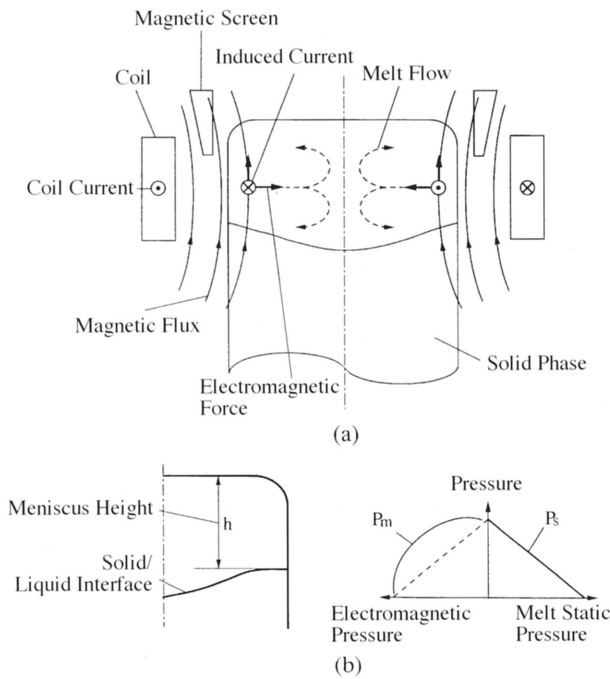


Fig.1. Principle of the Electromagnetic Casting.

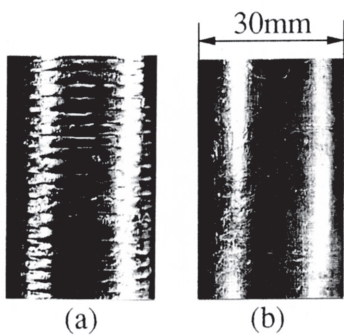


Fig.2. Surface aspects of tin cast billets.
 (a) Without magnetic field.
 (b) With magnetic field.

向上を図る軟接触凝固の提案がなされた¹⁾。この方法で鑄込まれた錫の鑄片の外観をFig.2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²⁾。

さらに一歩進めて、これまでEMCで用いてきた高周波磁場に換わり高周波磁場を間欠的に印加する提案もなされている³⁾。間欠型高周波磁場（以後、間欠磁場と略称する）と湯面形状の経時変化を模式図としてFig.3に示す。この磁場は1kHz以上の高周波磁場で構成されており、最大および最小の磁束密度 B_{max} と B_{min} が $1 \sim 1/100s$ の周期 T_{int} で切り替え可能である。この切り替え周波数を間欠印加周波数($f_{int}=1/T_{int}$)と呼ぶ。また、間欠印加の一周期中 B_{max} を印加している割合 r_d も任意に設定することができる。間欠磁場の印加によって湯面形状は一周期毎に変化を繰り返すことになる。

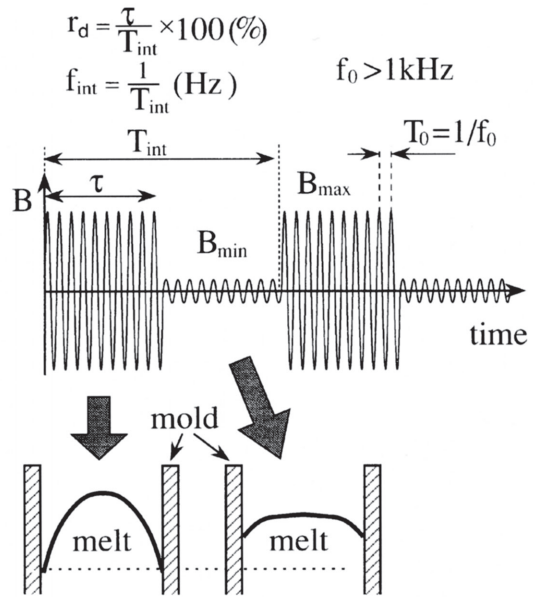


Fig.3. Wavepattern of the intermittent high frequency magnetic field and melt shape.

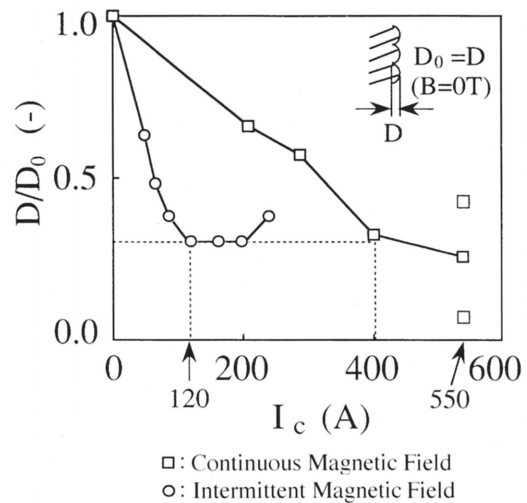


Fig.4. Effect of coil current on the surface property of continuously cast Tin.

間欠磁場印加と通常の高周波磁場（以後、連続磁場と略称する）印加が鑄片表面性状に及ぼす差異を明らかにするため、この二種類の磁場の印加下で錫の連続鑄造実験を行った。得られた鑄片の表面粗度をFig.4に示す。図中の□印は連続磁場を印加した場合のもので、○印は間欠磁場を印加した場合のものである。いずれの場合においてもコイル電流の増大にともない表面粗度は減少する。破線で示す表面性状の鑄片を得るに要する電流量は間欠磁場印加によって400Aから120Aと大幅に低減可能であることがわかる。

現在、連鑄片の約半数のものが鑄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。本技術が確立された暁には鑄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予測されるため、平成7年度より国家プロジェクトに採用され、現在、本格的推進が図られている。我が国の鉄鋼の総生産量に基づいて、直送圧延に伴う省エネ量を試算すると、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なる。

2・2 浮揚機能

電磁気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、ろつぼからの汚染を回避して材料を溶解・保持することが可能となる。本機能を利用する代表例にコールド・クルーシブルがある。コールド・クルーシブルはFig.5に示すように高周波コイル中にセグメントに切った水冷の銅製のろつぼを入れたものである。このろつぼによって磁場の集中と平滑化がなされ、Fig.6に見るごとく金属が浮揚できる。現在、55kgまでの溶鉄が浮揚できている。また、高融点材料 ThO_2 （融点 3400°C ）の単結晶育成、太陽電池用多結晶シリコンおよびチタンの連続製造がコールド・クルーシブルを用いて一部実施されている。本融解技術と精密製造を組み合わせ製造される軽量耐熱金属間化合物(TiAl)のターボチャージャが車に搭載される日も近いであろう。

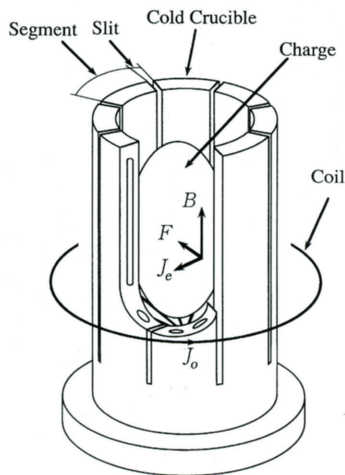


Fig.5. Principle of a cold crucible.

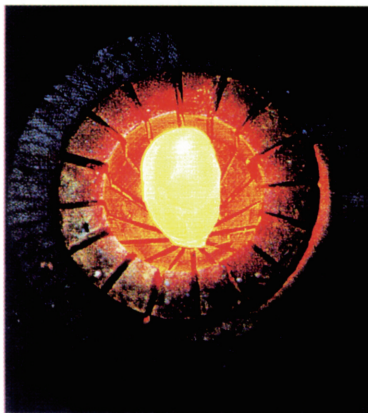


Fig.6. Levitation of molten Aluminum in a cold crucible.

2・3 流動（波動）抑制機能

静磁場には溶融金属の流れを抑制する機能がある。静磁場を印加して乱流の発生を抑制する磁場中チョコラスキー法はこの流動抑制機能を利用するもので、Si単結晶育成に適用されている。

Fig.7に示すように連铸プールの中央に静磁場を印加すると磁場の上部と下部の溶鋼の混合が抑制できる。今、上部にステンレス鋼を、下部に普通鋼を注ぐとすれば、表層をステンレス鋼、中身を普通鋼とするクラッド鋼を作ること

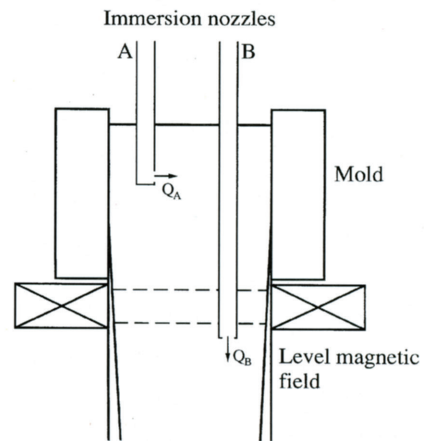


Fig.7. Schematic illustration of the bimetallic slab caster using magnetic field⁴⁾.

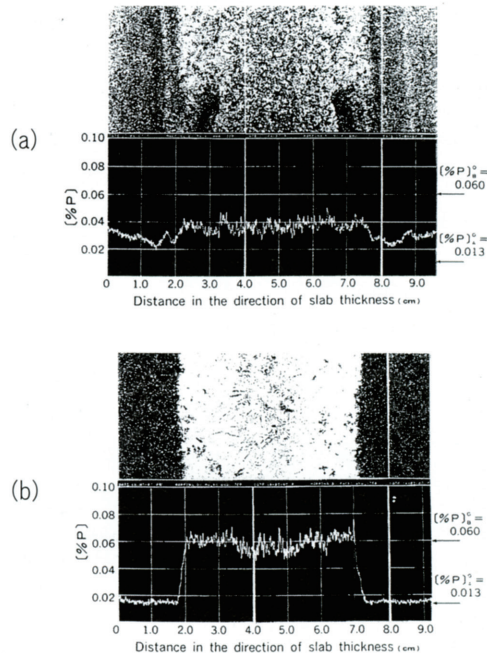


Fig.8. Phosphorus distribution in a cross-section of bimetallic slabs⁴⁾.
 (a) Without magnetic field.
 (b) With magnetic field (0.55T).

ができる⁴⁾。Fig.8は燐をトレーサーとして静磁場を印加した場合と、しない場合のトレーサーの分散状況の違いを見たものである。溶鋼対流の抑制に及ぼす静磁場印加の効果が顕著に見られる。本技術はクラッド鋼の安価・増産に繋がるばかりでなく、圧延後の材料に特殊な機能が付加できるものとして大きな期待が寄せられている。

2・4 分離・凝集機能

一般に熔融金属には非金属介在物が含まれる。この介在物は材料の機械的性質を低下させるため、その除去は精錬技術者の永遠の課題となっている。従来、介在物と金属との比重差に基づいたストークス則に則った浮上分離が図られてきたが、10 μ m以下の微小介在物の分離には長時間を要し、その除去は困難を窮めている。

いま、Fig.9に見るとおり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、金属と介在物の電気伝導度の差から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生じない。そのため、介在物はそれを取り巻く金属から力を受けることになり、電磁気力印加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ぶことにする。

Al-Si合金に溶解したFeは針状の金属間化合物として析出し、合金の機械的強度を著しく低下させる。そのため、アルミニウムのリサイクルにあつては溶解した鉄の除去が重要な課題となっている。この場合、Al-Si-Fe合金にMnを添加することによってFe成分を金属間化合物として固定し、合金とこの金属間化合物の電気伝導度の差を利用してFeの分離を行うことが可能である⁵⁾。なお、同じ原理に基づいてAl-20%Si合金から晶出するシリコン（溶湯に比較して電気伝導度が悪い）を偏在させ、耐摩耗性の向上を図った例をFig.10に示す。電磁気力を印加しない（ $B=0, J=0$ ）場合には均一に晶出していた初晶シリコンが電磁気力の印加（ $B=0.19T, J=5 \times 10^6 A/m^2$ ）によって電磁気力とは逆方向の

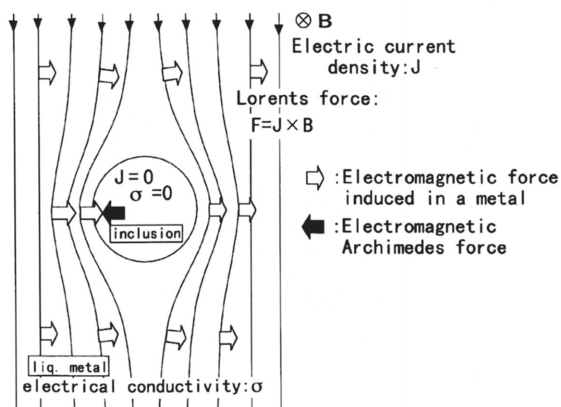


Fig.9. Principle of inclusion separation using electromagnetic force.

面に偏析している。

上述した電場・磁場を直接印加する場合、電極を介した熔融金属への通電が必須である。そのため本法を高融点金属に適用することは難しい。次に、電極を必要としない移動磁界を用いる新しい介在物分離法について述べる⁶⁾。Fig.11に示すように細管を通して熔融金属をy方向に流しつつ、z方向に伝播する移動磁界を印加する。移動磁界によって駆動される熔融金属の動きは細管によって拘束されるため、熔融金属中の介在物には電磁アルキメデス力が働き、介在物は-z方向に移動し、壁に捕捉される。10mass% Al₂O₃を含有するアルミニウムを用いて行った実験結果をFig.12に示す。(a)は磁場を印加しなかったもので、Al₂O₃はアルミニウムとの比重差のため重力方向（-x方向）に沈降している。一方、(b)は0.08Tの移動磁界を印加したものである。Al₂O₃は電磁気力作用方向（z方向）と逆の管壁に移動している。

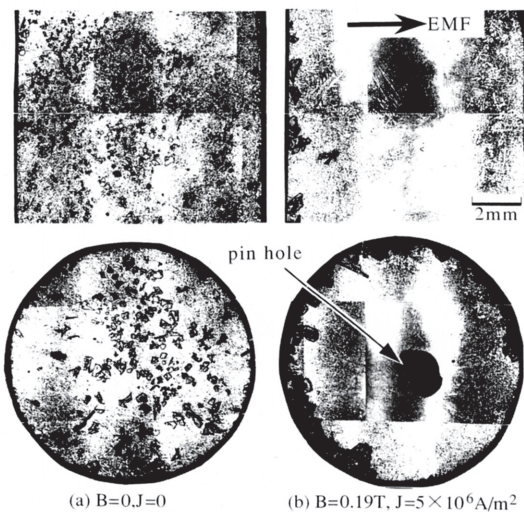


Fig.10. Distribution of primary crystal Si in Aluminium⁵⁾.

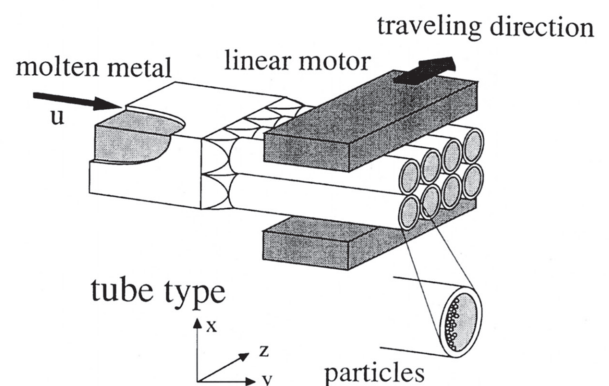


Fig.11. Imaginary concept of the electromagnetic inclusion separation method using a traveling magnetic field⁶⁾.

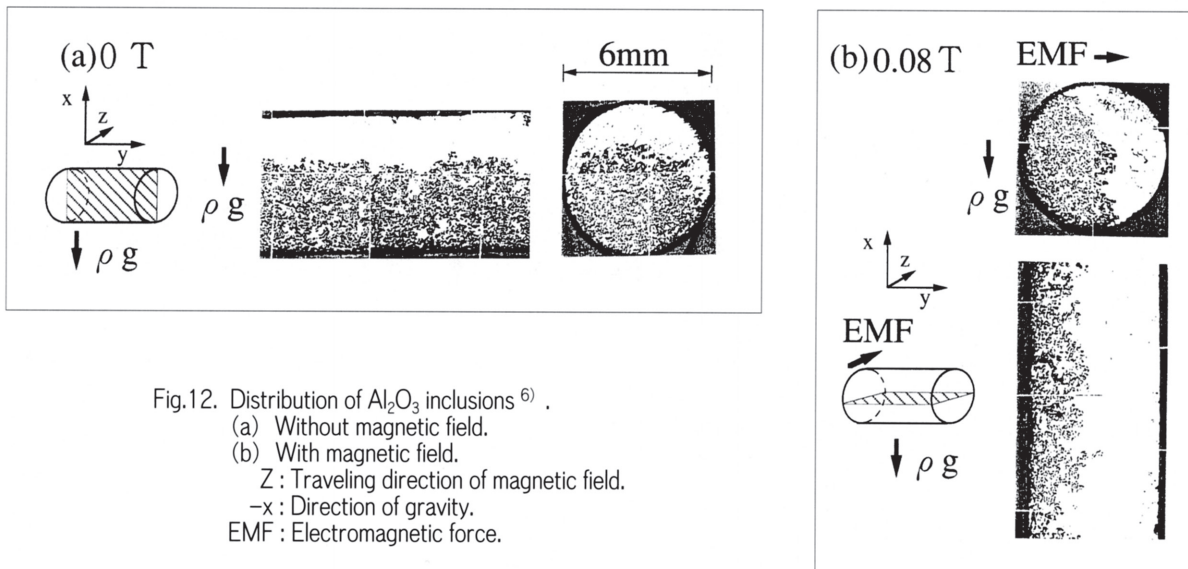


Fig.12. Distribution of Al_2O_3 inclusions⁶⁾.
 (a) Without magnetic field.
 (b) With magnetic field.
 Z: Traveling direction of magnetic field.
 -x: Direction of gravity.
 EMF: Electromagnetic force.

本法は、商用周波数の電流を用い、熔融金属への電極浸漬を必要としないという点で従来提案されている直流電流と直流磁場の直接印加⁵⁾ および、高周波磁場印加の方法⁷⁾ と異なる。今後、実操業への適用が望まれる。

3. 強力磁場による材料プロセッシング

3・1 電析の形態制御

ここでは、茂木巖、大久保晋⁸⁾ によって行われた興味深い実験結果を紹介する。

プレパラート上に $AgNO_3$ 水溶液を垂らし、そこに銅板を浸し、放置すると $2AgNO_3 + Cu(S) \rightarrow Cu(NO_3)_2 + 2Ag(S)$ の化学反応によって銀が析出する。Fig.13の(a)に見るように銀はデンドライト状に析出するので、これを金属葉(この場合は銀葉である)と呼んでいる。Fig.13の(a)は磁場を印加していない場合で、(b)は8Tの磁場を印加したものである。磁場の印加によってデンドライト形状が大きく変化している。Fig.14は磁場の印加方向の依存性を見たもので、(a)は紙面の下から上向きに、(b)は紙面の上から下向きに磁場が印加されている。磁場の印加方向の違いによってデンドライトの成長の回転方向が逆転している。このことからこの現象はローレンツ力($J \times B$)に関係するものであると推察できる。Fig.15は銀葉の成長の経時変化を見たものである。左側の(a)は磁場を印加していない場合、右側の(b)は磁場を印加したものである。左側の写真上に*印で示した枝に注目すると、この枝は成長が抑制されていることがわかる。すなわち、磁場を印加していない場合には枝の成長には競争がみられ、結果として銀葉の密度は粗となっている。一方、磁場を印加した場合には最初にできた枝はほとんどそのまま成長を続けるため、背丈は低いが枝の密度は高くなっている。蛇足ではあるが、

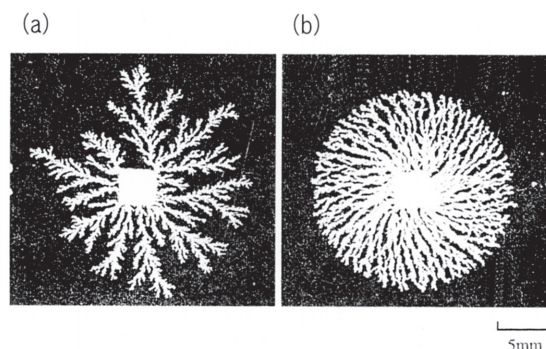


Fig.13. Growth pattern of the leaf-like Silver⁸⁾.

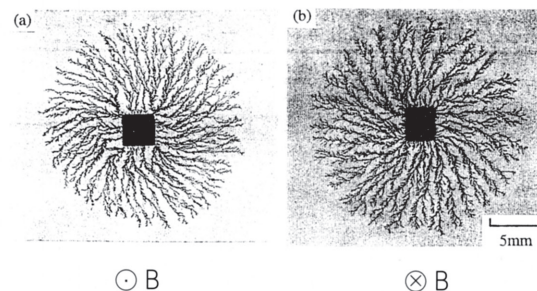


Fig.14. Effect of direction of applied magnetic field on growth pattern of leaf-like Silver⁸⁾

西欧社会(磁場を印加しない場合)と日本社会(磁場を印加した場合)の違いを見るような気がする。

これまでのところFig.13~15に示した実験結果を定量的に説明することは難しいが、この場合、かなり強い磁場の印加によってイオンの動き(電流)がローレンツ力の影響を受けたものと推察できる。

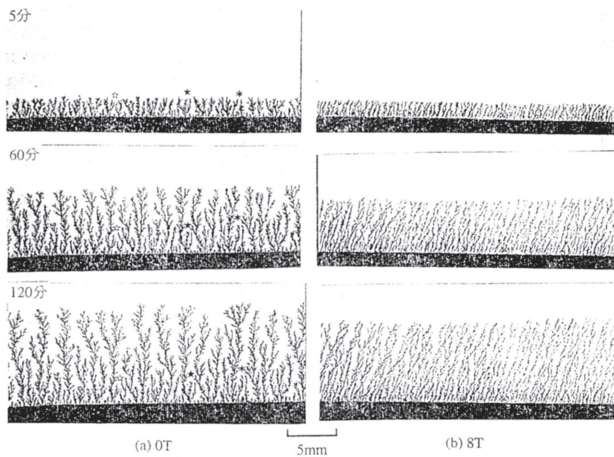


Fig.15. Growth pattern of leaf – like Silver with time ⁸⁾.
(a) 0T, (b) 8T ⊗

Table 1. Levitation of diamagnetic materials in the high magnetic field ⁹⁾.

	Maximum Field in the Center of the Coil(T)	Field-Field Gradient B dB/dz(T ² /cm)
Water	27	30
Ethanol	21	16
Acetone	22	20
Bismuth	15.9	7.3
Antimony	18.8	12
Wood	21.5	17
Plastic	22.3	20

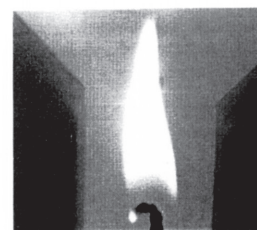
3・2 磁化力利用の可能性

これまで磁化力 ($\mu_0\chi (H \cdot \nabla) H$) 利用はもっぱら鉄のような強磁性物質に限定されてきた。その理由は強磁性体では磁化率 $\chi \approx 10^3$ であるのに対し、非磁性体では $\chi \approx 10^{-3}$ と、その比にして約 10^6 倍の違いがあることによる。しかし近年、超電導磁石の発達に伴い入手可能な磁界の強さは 10^3 倍程度（基準の磁束密度の値を約0.01Tとすれば10Tに当たる）に飛躍している。そのため、Hの2乗に比例する磁化力は χ の 10^6 の違いを埋めるものとなりつつある。すなわち、強磁場（～10T）を用いると日常、鉄が磁石（基準とした0.01T程度のおもちゃの磁石）に吸引される感覚で非磁性物質を磁化率が高い結晶方位に優先配列可能と予測できる。従来、静磁場を印加して対流を抑制し、等軸晶から柱状晶へ遷移させる凝固組織制御がなされてきたが、それとは内容をまったく異にする磁化力による結晶方位制御の可能性がみえてきたことになる。

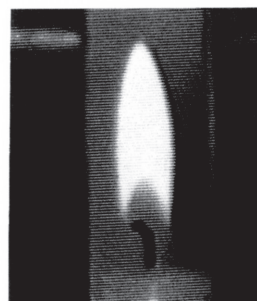
以上、水、木、プラスチックといった非磁性物質も磁場の作用を受ける可能性のあることを半定量的に述べたが、読者の多くの方々におかれては半信半疑の方も多いことで

あろう。そこで、Beaugnon ⁹⁾ が超電導磁石を用いて行った反磁性物質の浮揚実験の結果をTable 1に示す。この表には反磁性物質とそれらを磁場で浮揚するのに要した磁束密度Bと磁化力に比例する $B \cdot dB/dz$ の値が示されている。磁束密度15T～27Tの値は材料電磁プロセスで採用するには大きすぎる値とは思われるが、磁化力で非磁性物質の浮揚が可能であることを示した象徴的な結果と言えよう。

次に、1T以下の弱い磁場で磁化力の影響を可視化するため、固体に比べて密度の小さいガス体である火炎の実験結果を示す。Fig.16は磁極の上部、中央、下部に置いたろうそくの炎を示す。磁極の中央では磁場を印加しない場合とほとんど変わらない形状であるものが、磁極上部では細長く伸ばされ、下部ではキノコ状となっている。磁極の中央では磁場勾配がほとんど零に近いことから、磁化力がほとんど作用しなかったものと推察できる。一方、磁極の上部と下部では磁化力が作用し、燃烧に伴う気流に影響して図のような火炎形状になったのであろう。



upper part of magnetic pole



middle part of magnetic pole



lower part of magnetic pole

Fig.16. Shape of a candle flame at different parts in the magnetic poles.

4. おわりに

近年、金属材料分野は諸外国の追い上げにあい、苦しい立場に置かれている。これには種々の経済的要因もあろうが、新しいプロセスの開発が近年ほとんど見られないという技術的要因も大きい。特に、鉄鋼の上工程プロセスにおいては高炉-転炉（電気炉）-連铸プロセスが定着して久しい。この一連のプロセスを変えることは極めて難しいが、手を拱いては問題の解決にならない。一方、技術革新が叫ばれる中、ハイテク旋風が巻き起こっている。ところがハイテクはハイクオリティー製品の少量生産法と解されがちであり、量産品を合理的に製造する技術課題がハイテクから排除される嫌いがあることは残念である。幸いにも、材料電磁プロセスは材料量産プロセスに新風を吹き込む可能性を秘めていると期待され、材料関連分野で育成されてきた。電磁気力を利用するということは電場・磁場を生みだすためのエネルギーを投入するということであり、それに見合った価値の高揚が必須であることは言うまでもない。材料電磁プロセスに求められているものは極限環境下での材料創製ではなく、経済的合理性を持った夢の実現である。本稿では材料プロセスにおける

電磁気力利用と磁化力利用について、実験結果を踏まえ、その現状と可能性を見てきた。

“夢は見るものではなく見せるもの”

一つでも多くの夢を現実のものとして、人に夢を見せる喜びを味わいたいものだ。

文 献

- 1) 浅井滋生：第129・130回西山記念技術講座，日本鉄鋼協会編，(1989)，50.
- 2) T.Li, S.Nagaya, K.Sassa and S.Asai：Metall. Trans., 26B (1995)，353.
- 3) 李廷拳，佐々健介，浅井滋生：鉄と鋼，82 (1996)，197.
- 4) E.Takeuchi, H.Tanaka and H.Kajioka：Proceedings of Int. Symp. on Electromagnetic Processing of Materials, ISIJ, Nagoya, (1994)，364.
- 5) 朴俊杓，森平淳志，佐々健介，浅井滋生：鉄と鋼，80 (1994)，389.
- 6) 田中佳子，佐々健介，岩井一彦，浅井滋生：鉄と鋼，81 (1995)，1120.
- 7) 谷口尚司，J.K.Brimacombe：鉄と鋼，80 (1994)，24.
- 8) 茂木蔵，大久保晋：バウンダリー，10 (1994)，37.
- 9) E.Beaugnon, D.Bourgault, D.Braithwaite, A.Sulpice and R.Tournier：J. Phys. 1 France, (1993)，399.

