

Fig. 9.4. The improvement of strength-ductility balance through applying the thermo-mechanical treatment for various beta titanium alloys.

実際に精緻な加工熱処理により β 粒を著しく微細にするとともに、下部組織と調整して α 相を均一微細に析出することにより、予測した延性を持ち引張強さ約 2,000 MPa が得られた。

③ 冷間鍛造用 β チタン合金

自動車用など一般民需用に冷間鍛造用チタン合金が開発された。V, Mo などの β 相安定化元素を添加していくと高温の β 相が溶体化処理により常温までもちこされ、歪誘起マルテンサイト、双晶変形、ひき変形により低い変形抵抗で冷間加工される。Ti-22V-4Al 合金は 800 MPa 以下の変形抵抗をもち、冷間鍛造して一般乗用車のバルブリーナに使用された。さらに低い変形抵抗の合金 Ti-20V-4Al-1Sn および Ti-16V-4Sn-3Al-3Nb が開発されている。

④ その他の合金開発

チタン合金中の合金元素の電子状態を分子軌道法を用いて計算し、合金設計に利用する提案がなされ、実際に従来の実用合金より耐クリープ性の優れた Ti-6Al-4Sn-3.5Zr-1Ta-0.5Mo が開発された。また、チタン合金の弱点である切削性を改善するため、S とレアアース金属を添加した合金が開発され、乗用車のコンロッドに実用化された。従来の Ti-6Al-4V 合金に W_2C または Cr_3C_2 を添加することにより TiC を均一分散させ、耐摩耗性を大幅に改善した。生体用チタン合金として Al, V を含有しない Ti-15Sn-4Nb-2Ta-0.2Pd と Ti-15Zr-4Nb-2Ta-0.2Pd が発表されている。

(6) 今後の方向

チタン材料発展の鍵はいかに安価に製造できるかにある。この課題を解決するため以下の活動が必要である。

① スポンジチタンを安価にするため、合理化された Kroll 法において、還元工程の連続化の発展が今後の課題である。さらには、Kroll 法を越える新製錬法の開発が期待される。

② 純チタンの溶解はさらに安価に製造するため経済的な連続溶解法の開発が必要である。

③ チタン合金の溶解は二つの方向があり、一つは航空機用エンジン回転体部品などに現在より品質的に高いレベルを要求される溶解法の開発であり、二つ目は非回転部品や民生用途に高品質よりむしろ可能な限り安価な溶解法の開発であ

る。

④ 精密鍛造, 精密鑄造・HIP, 超塑性加工・拡散接合, 粉末冶金・HIP など安価な技術の開発が重要である。

⑤ コストダウンのため量産化が不可欠であり、大量の安定生産が必要である。需要を喚起し用途拡大のための加工技術の発展が必要で、成形加工技術, 表面処理技術, 接合技術, 切削・研磨技術面で使用者側に立った技術開発がチタン材料発展のために必要である。

⑥ 用途拡大のための材料特性の高性能化が必要である。高強度化, 高靱性化, 高耐熱化をはじめ耐摩耗性, 快削性, 特殊環境での耐食性などの面でさらに高性能化の研究開発が重要となる。

9.2.2 電磁気冶金の基礎と応用

鉄鋼業は、典型的な設備産業であり、新しい装置の開発・設置そして装置の大型化・連続化により成長・発展を遂げてきた。我が国においては、昭和 40 年代から 50 年代にかけて高炉の大型化, LD 転炉, 連続鑄造および連続圧延の設備導入により鉄鋼業は、隆盛を極めた。しかしながら、それ以後、個々の技術の改良・改善による高能率化により技術の進展が見られたものの、実用化に至る革新的な技術の開発がほとんどなされていない。

鉄鋼プロセスは、高温系であり、特に連続鑄造までの工程は、熔融状態の金属をハンドリングする必要があり、多くの制約が存在する。そのために、目的とする操作を理想的に行えず、革新技術の開発の妨げとなっており、アイデアの実現のための具体的手段が、非現実的なことが多々ある。

このような技術の飽和感の中で、導電性流体である熔融金属に対し、非接触状態で、加熱、攪拌、流動制御などを実現できる電場・磁場の利用技術が、アイデアの実現のための手段として注目されるようになってきた。なお、ここで着目する力は電磁気力であり、磁石が鉄を吸引する磁化力とは異なるため、以下に述べることは強磁性材料の鉄に限らずすべての金属に適用できるものである。

(1) 電磁気力利用のための基礎

ここでは、電磁気力利用の進展について述べるに当たって、電磁場中の熔融金属の挙動に関する基礎知識について簡単に触れておく。

Fig. 9.5(a) に示すように、電流が導体中を流れると、その周囲に磁場が電流の進行方向に対して右ネジを巻く方向に形成される。このときの電流密度 J と磁場の強度 B との関係は、アンペアの定理と呼ばれている。

一方、強度 B の磁場中を速度 V で運動する電気伝導度 σ の導電性流体のオームの法則は次式で表される。

$$J = \sigma(E + V \times B) \dots \dots \dots (9-1)$$

(9-1) 式で右辺第 1 項の E は電界の強さで、ここまですべて一般によく知られた静止系でのオームの法則である。右辺第 2 項が、磁場中を流体が流れるときに発生する電流を意味す

る。そして、流体に働く電磁気力 F は、(9-2) 式で与えられる。

$$F = J \times B \dots\dots\dots(9-2)$$

この電磁気力の作用する方向は、Fig. 9.5(b) に示すとおりである。この電磁気力は、交流磁場の場合、流体を駆動する回転力と等方的に作用する磁気圧に分けることができる。低周波では回転力が、高周波では磁気圧が、卓越する。また、溶融金属に交流磁場を印加したときに、磁場は、溶融金属内部にいくに従い減衰する。そして、高周波の場合、誘導電流と磁場の作用する領域が導体表面に集中する表皮効果が現れる。この磁場の減衰の目安は、溶融金属表面での磁場強度の値の $1/e$ に減衰する表面からの距離 d で計ることができ、この距離を表皮厚さ (skin depth) と呼び、(9-3) 式で表される。

$$d = \sqrt{2/\mu\sigma\omega} \dots\dots\dots(9-3)$$

μ : 透磁率, σ : 電気伝導度, ω : 角速度

一方、直流磁場においては、外部から印加される静磁場と誘導電流との相互作用力が主に利用される。この場合、誘導電流は、保存則を満足するように流れるため、電磁力が、常に制動力として働くとは限らない。

(2) 利用技術の進展

① 交流磁場

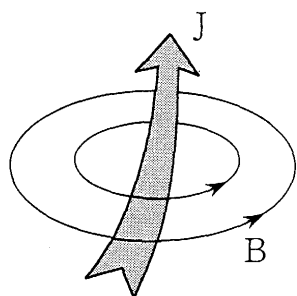
冶金分野における交流磁場の利用は古く、1930 年代に既に凝固組織におよぼす電磁攪拌の影響が研究されており、溶融金属の攪拌、輸送、および加熱に活用されてきた。

その中で、Getselev によって開発された電磁铸造 (EMC) 法は、画期的であった。これは、溶融金属の連続铸造におい

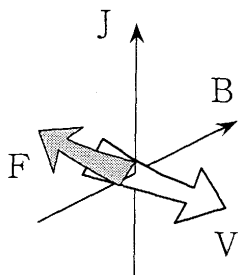
て、メナスカ部に高周波コイルにより磁気圧を作用させ、溶湯を保持し非接触で铸造を行うもので、アルミニウム合金を中心に、Keiser や Alusuisse によって、1980 年頃に実用化された。その一例を Fig. 9.6 に示す。そして、このプロセスは銅への適用がなされ、成功をおさめている。これは、適正な条件さえ選択すれば、鉄への利用も可能なことを示唆している。しかし、現在の鉄の連続铸造の生産性を低下させずに EMC を適用することは、冷却速度の面から不可能なことも示された。

一方、低周波磁界をアルミニウム合金の連続铸造の初期凝固部に印加し、鑄片の表面欠陥を改善する低周波電磁铸造 (CREM) が 1980 年代後半に提案され実用化されている。この方法は、冷却鑄型を用いるものの、商用周波数の交流を用いることができ、経済的である。

これらの状況を踏まえ、鉄の分野では、鑄型を用いた連続铸造を前提に、初期凝固を交流磁場を用いて制御を行う研究が進められている。その方法は二通りあり、一つは、上の CREM プロセスの延長線上にあり、低周波の交流磁界を利用する方法、もう一つは、後で述べるコールドクルーシブル技術の応用で、高周波磁場を用いる方法がある。前者は、低周波を用いるため、溶湯の攪拌力が無視できず、メナスカの安定性確保が問題となろう。また後者は、表皮効果により磁場が溶湯にまで浸透しないため、分割された鑄型を用いる必要がある。また、コールド・クルーシブルのように非接触で铸造するのではなく、接触状況を制御することを狙っている。



(a) The magnetic field due to a current.



(b) The directions of the current, magnetic field and electromagnetic force.

Fig. 9.5. Sketch of elementary electro-dynamics.

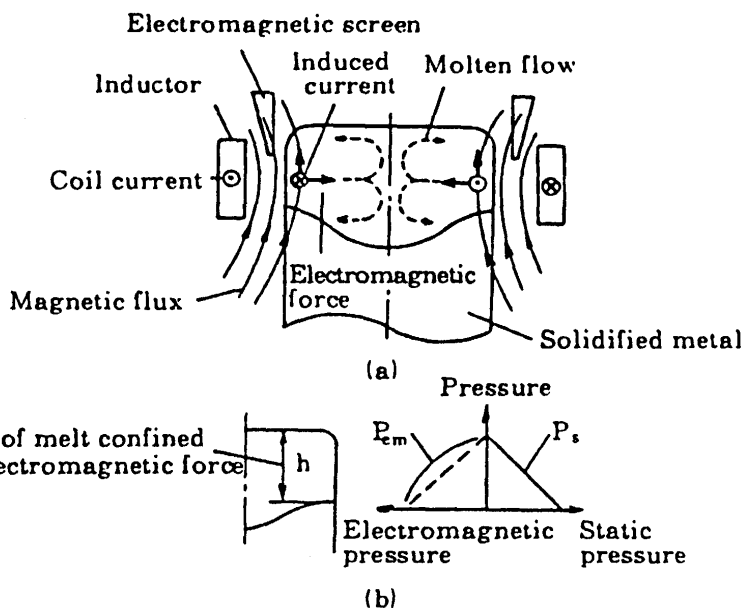


Fig. 9.6. (a) Schematic diagram of EMC and (b) its principle. (Tetsu-to-Hagané, 73 (1987), p. 403)

磁気圧を利用した典型的なプロセスとして、コールド・クルーシブル技術がある。この概念図を Fig. 9.7 に示す。スリットを有する水冷銅鑄型を使用し、誘導電流が分割鑄型内でループを描き、その電流により被加熱物に誘導電流が流れ、加熱と同時にコイル電流により生じる磁場と被加熱物内を流れる誘導電流との相互作用によって生ずる電磁気力が溶湯を押さえる方向に作用する。その結果、被加熱物を鑄型と非接触で融解することが可能となる。図には、連続鑄造タイプを示したが、バッチ処理型のものもある。特に、バッチ処理型ものは、完全非接触な融解が可能であり、汚染を嫌う高純度材料の融解に適した方法である。本方法によれば、高融点の活性金属が比較的容易に融解可能であり、種々の利用が考えられる。ただし、冷却鑄型を用いて加熱するため、熱エネルギー的には、非効率的である。この技術の実用化は、これからの課題であるが、現在、以下のような開発に力が注がれている。

- 鋼の連続鑄造への適用（接触）
- Ti 合金の連続鑄造
- 航空機材料用 Ti 合金の大量バッチ溶解
- 多結晶半導体シリコンの連続鑄造
- 核廃棄物処理

鉄の分野での交流磁場の実用化技術は、主に攪拌、加熱の利用であった。連続鑄造における電磁攪拌は、古くから試みられて、1970 年の後半から 1980 年代にかけて実用化され、現在では、小断面のほとんどの連続鑄造機には、電磁攪拌装置が設置されている。そして、1980 年代後半にかけて、スラブ型連続鑄造機の鑄型内での利用が試みられているが、実機への適用数としては少ない。

② 直流磁場

直流磁場の利用技術に関する研究は、日本で活発に行われてきた。工業的規模で直流磁場が利用されたのは、1980 年初めに、連続鑄造機の 2 次冷却帯での静磁場通電攪拌が最初であった。これは、直流磁場の印加領域に直流電流を通電し、

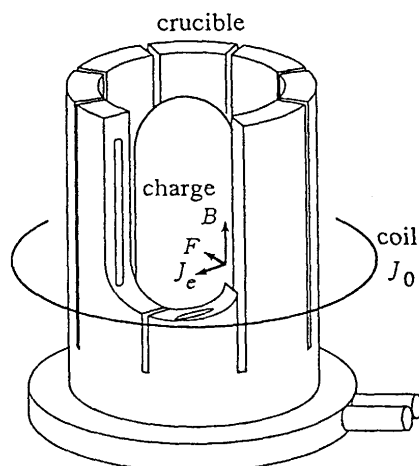


Fig. 9.7. Schematic illustration of cold crucible (continuous casting type).

溶鋼を駆動させるものである。そして、1980 年代中頃に、スラブ型の連続鑄造機において、浸漬ノズルからの吐出溶鋼流に静磁場を印加し、流れを制動する電磁ブレーキ技術が開発された。この初期の電磁ブレーキでは、磁場印加が局所的であったため、鑄造条件によっては、その効果が十分に発揮されない場合もあり、スラブの全幅にわたって印加される次世代の方式が模索されている。

③ 基礎技術

以上、材料電磁プロセッシングの実用化あるいは、実用化に近い技術を述べてきたが、電気・磁気の素材プロセス製造への利用を促進する上で種々の機能を提案することも極めて重要である。ここでは、実用化には至っていないが、興味ある新しい電磁気の利用技術に関する基礎的な試みについて述べる。

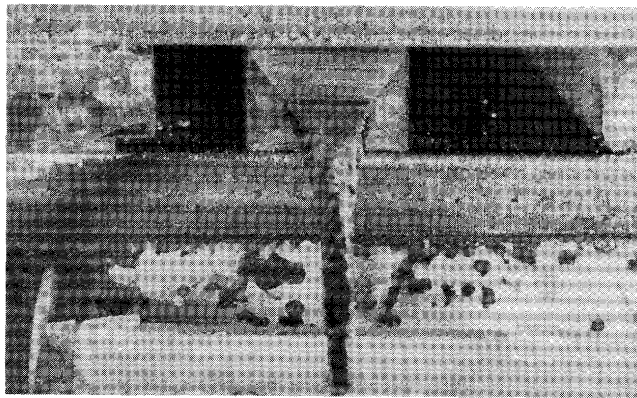
多くのプロセスで問題となる溶融金属の自由表面の波動を直流磁場により抑制しようとする試みが多くの研究者によって実験的ならびに理論的に検討された。磁場の印加方向には種々考えられるが、液面に垂直な方向からの印加が最も波動抑制効果が大きいことが示された。この機能では、連続鑄造機鑄型内の湯面変動抑制への適用が考えられるが、低融点合金でのモデル実験が行われたものの実用化には至っていない。

また逆に、精錬分野ではメタルとスラグ界面を通しての物質移動促進が重要な課題であるが、湯面の加振を電磁力によって行う試みがある。方法は何通りか考えられるが、低周波の交番磁場を印加する方法や静磁場と外部からの電流を印加する方法などが行われ、興味ある結果が得られている。

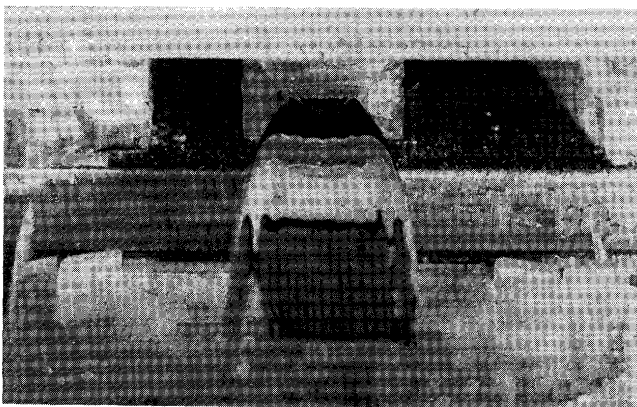
溶融金属をある容器から別の容器に供給するときに、自由自在に溶融金属流の形状制御ができれば、便利なが多い。ニアネットシェイプ CC への溶融金属流の供給などが良い例である。これについても、高周波の交流磁場の磁気圧による成形と直流磁場勾配を利用した扁平化が行われた。直流磁場を用いて水銀ジェットを扁平化した様子を Fig. 9.8 に示す。この方法は、発熱をほとんど伴わないことを特徴としている。

ノズルから流出する溶融金属に直流電流を流れ方向に、直流磁場を水平にそれぞれ印加することにより、重力と反対方向に電磁力を作用させ、溶融金属の浮揚を図りつつ、他方の端より冷却凝固させる水平式の電磁鑄造が行われ、高密度、低熱伝導度の金属の鑄造の可能性が示された。また、同様の設定において、電流または、磁場強度を強くすると、液体金属は液滴となって飛散する。印加電流をパルス状に制御すると均一な粒径分布を持つ粉末の製造が可能であることが示された。スプレー・キャストや溶射への適用が考えられる。

溶融金属中の非金属介在物の除去は、冶金プロセスにおいて極めて重要な操作であるが、決定的な分離除去技術は、未だ開発されていない。溶融金属に磁場と電流が作用している



(a)
 $B_{0u} = 0T$



(b)
 $B_{0u} = 1.97T$

Fig. 9.8 Photographs of the jet issuing from a rectangular nozzle. *Trans. JSME*, **B59** (1986), p. 2888

場合、電流は主に電気伝導度の高い熔融金属中を流れ、電磁力は熔融金属に作用し、その反作用力が介在物に働くことになる。その結果、介在物の移動を促すことになり、これを利用すれば介在物の分離のみならず、電気伝導度の異なる物質の分離ができる。直流磁場と直流電流の印加や交流磁場のピンチ力を利用する方法が提案され、その効果が実験室レベルで確認されている。

熔融金属を直流磁場中で凝固させると熱対流が抑制され、凝固界面近傍での結晶核の増加も抑えられることから結晶組織は柱状晶化する。反対に攪拌すれば、凝固界面での結晶の分断さらには結晶核の輸送により結晶組織は等軸晶化する。後者の機能は、現在多くの連続鋳造機で利用されている電磁攪拌装置により実用に供されている。前者については、最大磁束密度4テスラの超伝導磁石を用い、Sn-Pb合金の一方方向凝固実験を行い、凝固方向と平行に磁場を印加すれば、Fig. 9.9に示すように均一な柱状晶組織が得られることが示された。

その他、多くの電磁気力利用のための新機能提案が精力的に行われてきた。今後、これらの提案の一つでも多くが、実際の製造プロセスに適用されることを期待する。

④ 数値解析

ここでは、数値解析技術の進展について述べる。電気・磁気の利用を考える上で、実験的アプローチに加え、数値計算による解析がプロセス開発の効率化に大きく寄与する。数値解析技術は、計算機ハードの処理速度の飛躍的な向上に支えられ、流体解析および電磁場解析技術のそれぞれが大きく進歩し、電磁流体の解析基盤は、整備されつつある。

現在の流体解析の主流は、ベクトル演算器の能力を最大限に引き出せる差分法(FDM)あるいは有限体積法(FVM)であ

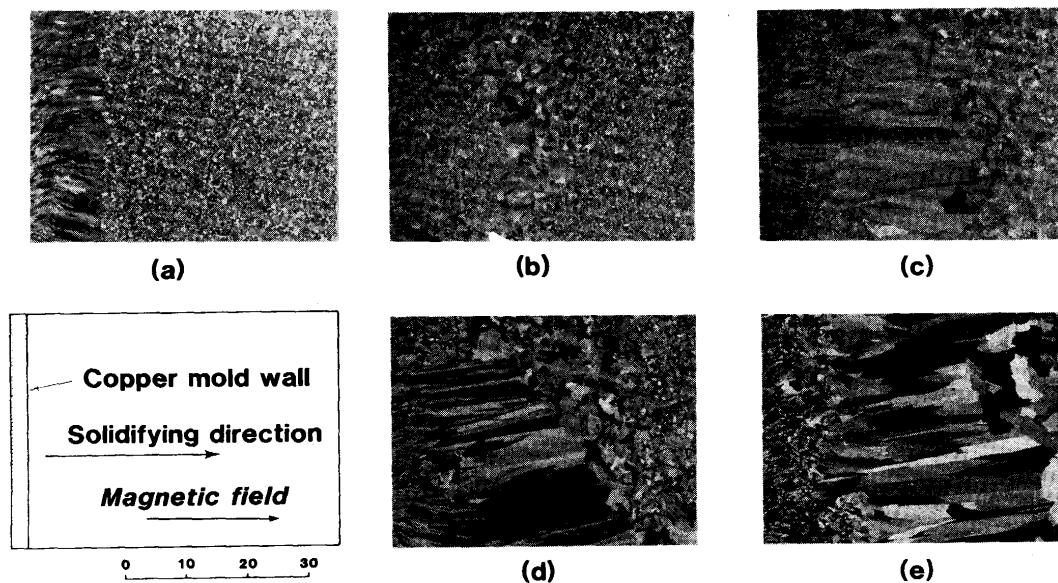


Fig. 9.9. Macro structure of Sn-Pb alloy solidified under the D.C. magnetic field parallel to the solidifying direction: (a) 0 Tesla, (b) 1.0 Tesla, (c) 2.0 Tesla, (d) 4.0 Tesla. (The Report of the Committee on Electromagnetic Metallurgy, ISIJ, Tokyo, (1990), p. 68)

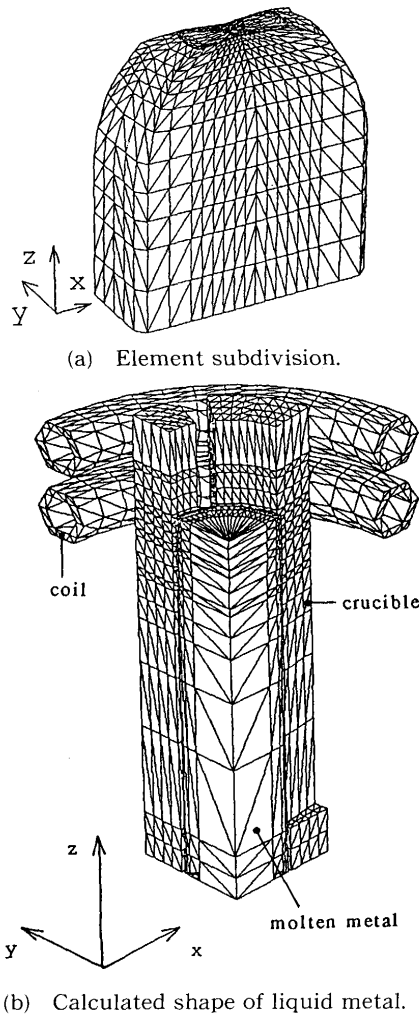


Fig. 9.10. 3-dimensional FEM analysis of cold crucible. (Advances of MHD Application in Materials Processing, ISIJ, Tokyo, (1993), p. 295)

る。また、差分法の解析手法を有限要素法 (FEM) に適用するハイブリッド型の手法が研究され、それぞれの手法の融合による高速化と汎用化が進んでいる。

また、流体解析の最大の関心事は、乱流解析にあり、従来の時間平均モデルの改良に加え、非定常挙動を記述可能な空間平均操作を行う LES (Large eddy simulation) による解析が一般化しつつある。さらに、スーパーコンピュータの高速演算を背景に、低 Re 数領域ではあるが、精細な格子分割を用いて直接、乱流を計算しようとする DS (Direct simulation) により、複雑な乱流構造が解明されつつある。材料電磁プロセッシングの扱う液体金属もほとんどの操作条件において乱流状態にあり、マクロな解析ではほぼ満足できるものの、電磁場におけるミクロな挙動については、多くの不明点がある。

電場・磁場の解析には、電気・電子機器の複雑な形状を表現する必要性から、主に有限要素法や境界要素法 (BEM) が利用される。この分野への有限要素法あるいは境界要素法の適用は比較的最近で、解析手法の妥当性を検証するベンチ

マークテストが、現在でも盛んに行われている。最近では、有限要素法と境界要素法とのハイブリッド法も利用され、かなり複雑な形状の 3 次元解析が可能となっている。Fig. 9.10 に有限要素法によるコールド・クルーシブルの 3 次元磁場解析例を示す。この解析では、被加熱物の流動は無視されているものの、自由表面形状が磁場分布と同時に求められている。

このように、解析手法はここ数年間に大きく進歩してきたが、材料電磁プロセッシングが扱う系では、自由表面を含む流動、凝固を伴う伝熱および電磁場の連成解析が必要となる。それらを同時に解析するには、膨大な計算量を必要とし現実的ではない。そのため種々の簡略化の下に解析されているのが実状である。

数値解析技術の今後の課題としては、完全な連成解析手法の確立であり、そのためには各種解析手法の融合技術の開発が必要である。また、数値解析の領域だけの問題ではないが、乱流現象におよぼす電気・磁気の影響の解明も必要であり、電磁流体の乱流モデルの構築が望まれる。

(3) 今後への期待

最初に述べたように鉄鋼業は典型的な設備産業であり、設備の革新・更新があつてこそ、その発達が期待できる。しかるに高炉—転炉—連铸による一貫製鉄の生産工程が定着して早 30 年以上が経過しようとしているが、その間、鉄鋼プロセスに大きな変革はない。さらに、1970 年代から中進工業諸国への技術移転が行われ、諸外国に近代製鉄所が誕生し、その生産が軌道に乗った昨今では、我が国の市場にも多大な影響が現れつつある。このような産業構造上の問題を打開する技術上での道は、唯一新しいプロセスの開発をおいてはなからいであろう。電磁気力の利用が進んでいる製鋼分野を見ると、電磁気力利用は LD 転炉や連铸の導入に匹敵するような抜本的技術革新に繋がるものとは言えないかもしれないが、熔融金属を非接触で、加熱、攪拌、輸送などができる電場・磁場の諸々の機能には夢が感じられる。この夢があつたればこそ、日本鉄鋼協会で「電磁気冶金部会」、「材料電磁プロセッシング部会」として計 6 年間の活動の継続が認められたのであろう。この部会活動を糧として、我が国の製鋼分野にあつては他の鉄鋼先進国とはひと味違い、電磁気力利用技術が一つの主要技術として定着しつつある。

これまでの電場・磁場の利用は加熱、攪拌、流動制御および駆動、浮揚、分離、分散など既存の機能の範囲内で行われてきており、実用化あるいは実用間近なものから萌芽期にあるものなど様々である。電磁気力の新しい適用分野としては、①熔融金属の乱流挙動制御を介した精錬反応の促進、②変形自在な交流磁界波形モードの積極的活用、③近年発達の著しい超強磁場の適用、などが考えられる。

今後、金属工学と電磁気学、電磁流体力学の境界に新しい「機能」の発見がなされることを期待したい。「夢は見るものではなくて見せるものである」。我が国の鉄鋼分野で育成さ

れた材料電磁プロセッシングの苗木に大輪の花を咲かせ、世界の鉄鋼技術者に鉄鋼プロセス革新の夢を現実のものとして見せたいものである。

9.2.3 プラズマの基礎と利用技術

(1) 概観

10年前の日本鉄鋼協会創立70周年記念特集号に目を通してみると、特殊金属、超合金あるいは合金鋼の溶解、精錬法としてのプラズマの登場と期待が半ページ以内で述べられているに過ぎない。しかし、その後の10年間は大きな飛躍のあった期間であったといえる。主な進展をまとめてみると、①プラズマ基礎現象の理解が進み、新しいプラズマの発生、制御技術が開発されたこと、②鉄鋼プロセスにおいてタンディッシュ内容鋼の加熱法が開発され普及し始めたこと、③プラズマ照射時の蒸発現象に対する多くの知見がえられ、水素プラズマを利用した新しいプロセスが開発されつつあること、④プラズマ合成、成膜技術に著しい進歩が見られたこと、⑤環境問題対応プラズマプロセスへの展開が始まったことなどがあげられる。日本鉄鋼協会においては平成元年度より平成4年度まで熱プラズマ研究部会として、その後、プラズマ分科会として活動が行われてきた。そこで取り上げられた内容を中心に、おもに熱プラズマに焦点を絞って、上に挙げた進展状況、課題、今後の展望などについて以下に述べる。

(2) プラズマ発生・制御と基礎現象理解における進展

具体的なプラズマ応用については次章以下に示すが、熱プラズマ応用の新しい展開には、大出力プラズマトーチの開発が進み、長時間安定にプラズマを維持する技術が確立されたこと、多様なプラズマ発生装置が開発され、目的にあったプラズマ発生法の利用が可能になったことなどが、寄与している。1980年代後半に我が国でプラズマアークの電極現象の解析研究が精力的に行われ、電極内の温度分布や熱応力分布、電極点の運動、電極の消耗と電流値の関係などについての知見が多く蓄積された。その結果、大出力でのトーチの安定運転ができるようになり、実用化基盤が確立したといえる。電流に対して電極損耗は指数関数的に増加するので、アーク電流値をできるだけ抑えてアーク電圧を高めることが、トーチの長寿命化に有効である。このことを実現するために、Fig. 9.11に示すアーク乱流化方法が開発された。乱流化によりアーク柱内の電位傾度が2倍以上になり、アーク電圧が高めることができる。電極材料についての研究でも成果があり、牛尾らは La_2O_3 や Y_2O_3 、 Ce_2O_3 あるいは LaB_6 などを添加したW材料の電極は、 ThO_2 添加の従来材料より点火の安定性、耐久性において優れていることを見いだした。

プラズマアークにより広域加熱を効率的に行うため、外部交番磁界を印加してアークを高速で駆動し、広幅熱源とするFig. 9.12に示す磁気制御技術が開発された。

直流あるいは商用周波数の交流アーク発生法における技術進展のほかに、高周波誘導法によるプラズマ発生装置におい

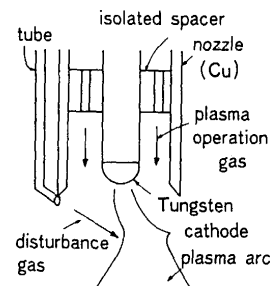


Fig. 9.11. Schematic illustration of mobile plasma torch. (Thermal Plasma Processing, ISIJ, Tokyo, (1992), p. 189)

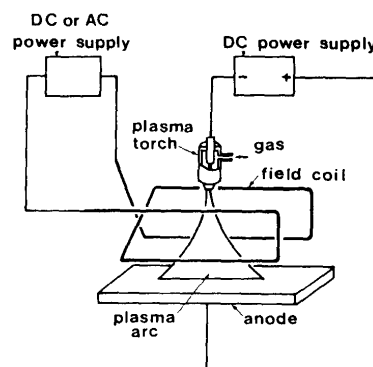


Fig. 9.12. Schematic arrangement for oscillating plasma arc by AC magnetic field. (*J. High Temp. Soc.*, 16 (1990), p. 363)

ても、大出力化が進んでおり、300 kW 級でのプラズマ発生・長時間維持が安定してできるようになっている。新しいプラズマ発生法として直流と高周波を組み合わせたハイブリッドプラズマ法 (Fig. 9.13) やマイクロ波によるプラズマジェット発生法が吉田らにより開発され、独自の利用分野が開かれている。

(3) 鉄鋼プロセスへの応用展開

ここ10年間に新しく登場し、実用が広まっている技術として、連続铸造タンディッシュ (以下 TD) 内容鋼の加熱法が挙げられる。近年、連続铸造では铸件品質の向上および操業の安定化を図るため、铸造中の溶鋼温度を一定に保つことの必要性が強く認識されるようになった。このため TD 内容鋼の加熱が行われる。この加熱装置として、誘導加熱方式とプラズマ加熱方式がある。プラズマ加熱方式の特徴は、設備構造が比較的簡単であること、溶鋼が無いときでも TD 耐火物の加熱が可能であることなどである。プラズマによる加熱には、直流プラズマアークによる方法と交流プラズマによる方法とがある。直流プラズマアーク法は交流プラズマアーク法に比べ、電力効率が低いこと、アークの安定度が高いことなどの利点があるが、溶鋼内に対極を設置しなければならない。一方、交流プラズマアーク法では、溶鋼内に対極の設置が不要であり、TD 内に溶鋼が無くても耐火物の加熱が容易であるという特徴があるが、複数のプラズマトーチが常に必要である。誘導加熱方式とプラズマ加熱方式のいずれが良いか、あるいは、プラズマ加熱方式でも直流、交流のいずれが