

ティと呼ばれるガス単相の領域が生成し、その不安定化によって吹き込んだガスが吹き戻されるバックアタック（または底たたき）現象が起こる。これを解消するには、扁平ノズルや螺旋状ノズルを用いたり、高圧でガスを吹き込むことなどが推奨されている。ガス流速が小さく、吹き込みガスがノズル出口で直ちに気泡になるような領域では、ガスホールドアップ分布、気泡頻度、気泡径、気泡上昇速度などが電気探針法によって測定されている。その結果より等温系については水-ガス系はもちろん、液体金属-ガス系でも精度よく適用できる実験式が導かれている。また気泡分散の機構として乱流拡散に着目し、ガスホールドアップ分布から乱流拡散係数を求めた研究もある。

次に液の流動状態については、水モデル槽内の流速分布がレーザードップラー流速計や熱線流速計などを用いて測定されている。また、トレーサー粒子の運動から空間流速分布を求める画像計測法も考案されている。これらによって得たデータより、時間平均の流速分布のみでなく、変動流速や渦スケールなどの乱流特性値も求められている。また円筒容器底部中心からガスを吹き込むと、気泡噴流が槽内の液とともに円周方向に旋回する現象が発生することがあるが、この現象も詳しく調べられている。この旋回現象により均一混合時間が減少することが見いだされている。

ガス吹き込み下の移動現象についても研究が進展している。ガス-金属間物質移動は、気泡分散領域の気泡-金属間および液自由表面の2領域で進行するが、これら2領域の容量係数がCO₂-水系の実験によって分離され、それぞれの物質移動特性が検討されている。また同じ手法が溶鋼-窒素系にも適用されている。ガス吹き込み下のスラグ-金属間物質移動に関しては溶鋼中Siのスラグ中FeOによる酸化反応速度が求められ、その結果から金属側物質移動係数の推算式が導出されている。また、気泡噴流中の固-液間熱伝達率が水球の溶解速度から求められている。その結果は既往の実験式に乱流強度を付加した新しい実験式にまとめられている。

近年の計算機の飛躍的発展に伴い、浴の流動状態をナビエ・ストークスの式を基礎とする計算機シミュレーションによって求めることが、比較的容易にできるようになった。シミュレーションにおける乱流モデルとしては、乱流粘性を一定と仮定する0方程式モデルと $k-\epsilon$ モデルとの2種がよく用いられている。また気泡流の取り扱いとしては、気泡を含む液を気泡率に応じて密度の変化する連続体と仮定する単相流モデル、ガスおよび液をそれぞれ連続相とみなし、相間の運動量の授受を考慮する2相流モデル、および個々の気泡の乱流中での軌道を求めるJohansenのモデルなどが適用されている。最近では2相流モデルの適用例が多く、気泡流による乱流生成や液自由表面の変形も考慮した計算が行われ、実測値と一致するガスホールドアップや時間平均液流速分布が得られている。しかし乱流変動などの乱流特性を実測値と一

致させるには、ガスホールドアップに実測値を用いるなどの操作が必要のようである。これらの研究は外国で多く行われているが、我が国でも0方程式モデルによる流動および気-液間物質移動の解析や2相流モデルによる流動解析などが行われている。

(3) 電磁気力と流動

溶融金属に電磁気力を作用させることにより、電磁攪拌、電磁制動、溶湯表面保持など各種の材料電磁プロセッシングが可能となる。この分野の最近10年間における研究の進展および新技術の開発は実に目覚ましい。その概要は後で述べられるので、本節では電磁気力による金属の流動に焦点を絞り解説する。

電磁攪拌法を大別すれば固定磁界方式と移動磁界方式とに分けられる。前者に属する高周波誘導炉は迅速な加熱溶解力と電磁攪拌による混合作用を有するため、実験室から実操業規模まで広く利用されている。実験室規模の誘導炉内の溶融金属の流れについては種々の周波数とコイル電流についてナビエ・ストークスの式の数値解が得られている。また、炉内に種々の抵抗をもつシールドを設置することにより、溶融金属の温度を一定に保ちながら攪拌を広範囲に変化させ得ることも確認されている。後で詳しく述べられるが、るつぽからの汚染のないコールドクルーシブル溶解法についても湯流れをシミュレートした研究がある。

移動磁界方式による攪拌は、ASEA-SKFプロセスにおける取鍋内溶鋼攪拌や連続鋳造における電磁攪拌などに適用されている。鋼の連続鋳造においては、鋳片の等軸晶率を高め中心偏析を防止する目的で以前から2次冷却帯の電磁攪拌が行われてきたが、近年ではモールド内でも電磁攪拌が行われている。それぞれについて流動解析が行われているとともに、低融点金属を用いたモデル実験も行われている。また、強力な回転磁界攪拌の下で溶鋼の脱酸実験が行われ、遠心力による介在物の中心方向への集積と凝集の促進効果によって極めて速い脱酸速度が実現されている。

3.7.3 非線形現象

ある現象を記述する未知数、未知関数あるいは未知関数の導関数を含む方程式が、一次の形で表されるものを線形といい、そうでないものは非線形と呼ばれる。製鋼プロセスにおいても、流動に対するナビエ・ストークスの方程式、2次以上の化学反応速度式、あるいは化学反応と拡散の連結（連成）、電磁気冶金におけるジュール発熱と熱伝導の連結など、各種連結現象は、本質的にはほとんどが非線形の問題である。このような非線形現象を積極的にとりあげ、解析を試みる気運が近年高まり、室温系における各種現象の理解、あるいは、生命現象の理解へと発展してきており、新しい学問分野が開かれつつある。

製鋼プロセスにおいては、非線形現象の一つであるマランゴニ効果の異相流体間反応に果たす役割の重要性がF. D.

Richardson によって早くから指摘されてきた。最近になって、酸化物系あるいは、酸化物-非酸化物系のスラグ表面、スラグ-メタル界面で生じる局部溶損に（後述）マランゴニ効果が本質的に重要な役割を果たしていることが明らかになってきた。ガス-メタル間反応でも、非線形解析を積極的に取り入れた研究の芽が生まれつつあり、マランゴニ効果の関与についても、従来の現象面の観察から一歩進んだ、定量的結果が得られつつある。

(1) マランゴニ効果

マランゴニ効果とは、界面張力場の不安定性によって引き起こされる界面の自発的な攪乱運動であり、界面張力場の不安定性は界面の温度差、界面活性成分の濃度差、あるいは電位差が原因となって生じる。溶鋼、溶滓は、水溶液などに比して、それ自身高い表(界)面張力を持つ上に、酸素、硫黄などによって表(界)面張力が著しく低下する。したがって、界面を通して界面活性成分の移行がある場合、濃度差に起因する界面攪乱が生起する可能性が高い。しかも、界面攪乱は界面で最も活発であるので、界面を通しての物質移動を効果的に促進し、物質移動律速の場合の異相流体間反応速度を増大させる。

気相-溶鋼間反応では、酸素の吹き付け、あるいは溶鉄表面からの蒸発の際に界面攪乱が生じ、両相間の反応速度に影響する場合があることが定性的には知られていた。最近では、溶鋼の脱窒速度が水素の吹き付けによって増大すること、水素の吹き付けの際、溶鋼表面に 0.17 m/s 程度の表面流が生じることが報告されている。これは、溶鋼の水素脱酸に伴う表面張力勾配によって界面攪乱が生じ、脱窒速度が増大すると説明される。

溶鉄表面に窒素ガスを吹き付けて窒素の吸収速度を測定する実験においても、表面流の生じることが X 線透過装置を用いた実験で見いだされている。しかも、窒素の物質移動係数が、浸透説を用いた拡散のみの場合より約一桁大きくなる。窒素の吸収速度および表面流の測定結果は、数学モデルを用いてよく説明でき、生じる表面流は弱い乱流であると推定できる。この結果は、窒素の吸収速度に対するこれまでの酸素、硫黄など表面活性成分の毒作用あるいは表面ブロッキング作用に加えて、界面攪乱の寄与を考慮に入れる必要のあることを示している。また、ガス吹き付け法によるガス-溶鋼間反応速度の測定において、強力な界面活性成分の移行を伴う場合には、測定法自身に無視し得ないほどのマランゴニ対流の寄与が含まれていることになる。したがってこのような方法による測定結果を比表面積の小さい実操業規模の速度解析に適用（スケールアップ）する場合には、この寄与を注意深く分離して用いる必要のあることを示唆する。

耐火物のスラグ、溶鋼による溶損においては、スラグ表面およびスラグ-メタル界面で溶損が局所的に進行する現象（局部溶損現象）が知られている。この局部溶損は、スラグ表面あるいはスラグ-メタル界面で耐火物表面に形成されるス

ラグフィルムが活発に運動することにより、物質移動が効果的に促進される結果生じる。スラグフィルムの運動は、耐火物からスラグに溶解する成分により誘起されるマランゴニ効果によって引き起こされる。 $\text{SiO}_2(\text{s})-(\text{PbO}-\text{SiO}_2)$ スラグ系のように、 SiO_2 の溶解によりスラグの表面張力が増大する場合には、スラグフィルムは上昇する領域と下降する領域からなる循環流を形成する。そしてスラグ相本体から供給される SiO_2 濃度の低い、新鮮なスラグフィルムによって試料面が活発に洗われる領域において、物質移動が促進され、局部溶損が進行する。 $\text{SiO}_2(\text{s})-\text{Pb}(\text{l})-(\text{PbO}-\text{SiO}_2)$ スラグ系すなわち、スラグ-メタル界面の局部溶損も、上記スラグ表面の局部溶損と本質的に同様の機構で生じる。一方、 $\text{SiO}_2(\text{s})-(\text{Fe}_2\text{O}_3-\text{SiO}_2)$ スラグ系のように、 SiO_2 の溶解によりスラグの表面張力が減少する場合には、スラグフィルムは、円柱状固体 SiO_2 の周りを、回転状の運動をしたり、溶損の後期あるいは角柱状固体 SiO_2 では、上下運動（すなわち、スラグフィルムの生成と消滅）を繰り返す、非線形特有の規則的あるいは不規則な周期運動が現れる。このようにして、固体 SiO_2 はスラグレレベルより上方のスラグフィルムが活発に運動する領域で物質移動が促進される結果、鋭いくびれすなわち局部溶損が生じる。

$\text{SiO}_2(\text{s})-(\text{K}_2\text{O}-\text{SiO}_2)$ スラグあるいは $(\text{Na}_2\text{O}-\text{SiO}_2)$ スラグ系のように、 SiO_2 が溶解しても、スラグの表面張力がわずかしき変化しない系では、局部溶損は実験室的にはほとんど検出されない。実用系においても、高炉出銑種材のスラグ表面およびスラグ-メタル界面における局部溶損、マグネシア・クロム質耐火物のスラグ表面における局部溶損、浸漬ノズルのパウダー-メタル界面における局部溶損には、本質的に同様のメカニズムが主要な役割を果たしている。

上記局部溶損機構の解明においては、固-液間反応速度の物質移動係数 D/δ (D : 拡散係数, δ : 濃度境界層厚さ) の中身が、従来の取扱いから一歩進んだよりミクロ的なしかも反応系の実際に近い形で明らかにされた。このことは、実用的には局部溶損防止策樹立のためのよりの確な指針を与えるものであるが、速度論的なアプローチの一つとしても、今後検討されるべきものと考えられる。

(2) 非線形反応解析

高温の気-液、液-液、固-液間反応では、化学反応過程の速度が速いので、物質移動律速とする考えが一般的である。しかし、界面での吸、脱着プロセスを含めた化学反応過程を律速とする、あるいは物質移動と化学反応過程の混合律速とする研究結果もかなり報告されてきている。

製鋼反応系の解析に、非線形概念を意識的に導入した研究は数少ない。最近になって、溶鋼と $\text{CO}-\text{CO}_2$ ガスとの反応速度を非線形の反応速度式を用いて解析した報告がなされている。ここでは、反応系が安定定常状態にあるとして、溶鋼界面の拡散層内における化学反応と拡散プロセスの連結効果を考慮に入れて、非線形の反応速度式を導出し、これまでに

報告されている測定結果を解析した。その結果によれば、レビテーション法による 2,000 K 以上の高温から、MgO りつぽを用いた 1,853~1,873 K の温度における反応系において、加炭（および酸素の吸収）と脱炭（および脱酸）の両方向の反応進行時における炭素と酸素相互間の濃度変化の関係、および経時変化を、およそ統一的に記述できる。

(3) 将来の展望

合金の析出物の粗大化挙動において、Ni-Mo 系や Ni-Cu-Si 系のように弾性拘束が強く、弾性エネルギーの効果が顕著になる系では時間の経過とともに、析出物粒子の粗大化が停滞し、各粒子のサイズが揃ってくる現象が見いだされている。この現象は、従来の界面自由エネルギーを駆動力とするオストワルド成長理論だけでは理解できないが、弾性エネルギーの寄与を取り入れた粗大化理論である分岐理論を導入することにより明解に説明できる。これらは、製鋼プロセスの現象そのものを対象としたものではないが、研究手法として、非線形の取扱いを意識的に適用することの効用を示すものとして興味深い。

非線形の取扱いは、従来からも意識するしないに関わらず、製鋼プロセスの解析に用いられてはきた。しかし、非線形概念と解析を意識的に適用することによって、これまでに説明できなかった現象の理解を深め、定量的記述を可能にし、未知の現象の存在を予知しうることが期待される。

3.7.4 凝固現象

(1) 動向

1985 年ごろまでは、デンドライト組織の形成、等軸晶生成機構、中心偏析、V 偏析、逆 V 偏析などの凝固欠陥の生成機構などに関する研究が多かったが、最近の 10 年間はむしろ凝固欠陥対策に関連した成果が多かった。また、マイクロ偏析がより詳細に数値解析され、包晶反応系や多元系、2 次介在物の晶出などにも適用された。さらに、より健全な鑄塊の製造のため、鑄型内凝固現象（流動、介在物の巻き込み、潤滑機構、鑄型近傍での凝固現象すなわち初期凝固現象など）の解明が進むとともに電磁力の利用による制御、改善が試み

られた。バルジングなどの応力解析も 3 次元に拡張された。ストリップ鑄造や急速凝固技術の開発に伴い、急冷凝固現象の研究が盛んに行われたのも特徴である。この場合も表面欠陥の防止や組織制御が重要で、多くの研究が行われた。

これらの進歩に貢献したものとして、ワークステーションや数値シミュレーション技術などハード・ソフトの進歩、コンピュータ援用 X 線マイクロアナライザー (CMA) などの計測技術の進歩がある。また、日本鉄鋼協会・鉄鋼基礎共同研究部会「連続鑄造における力学的挙動部会」、「鉄鋼の急速凝固部会」や特別基礎研究部会「鉄鋼の初期凝固部会」などの寄与も大きかった。

今後の動向としては、固液共存域での流動現象のより定量的理解（コンピュータシミュレーションを含む）、薄スラブあるいはストリップ鑄造での組織制御と予測、初期凝固のよりいっそうの理解、鑄型内凝固現象の予測（流動解析との連成を含む）、介在物の制御などが期待される。しかし、大学関係の研究者は高齢化しており、何らかの活性化を図らなければ、大学での研究の停滞が予想される。

(2) ミクロおよびマクロ偏析

分配係数が熱力学的、実験的に詳細に調べられ、3 元系に対し分配相互作用係数の概念が導入された。

また、固相内拡散や液相内拡散を考慮したマイクロ偏析の近似解や厳密解が求められた。さらに多元合金である鋼に対し、熱力学データを使用して、状態図を数値計算し、分配係数、液相線温度などを求める数値的手法が開発された。そして包晶凝固近傍でのマイクロ偏析に及ぼす添加元素の影響 (Fig. 3.51 参照) のほか、スポット状偏析や 2 次介在物の生成もシミュレートされるようになった。特に、デンドライト樹間でのマイクロ偏析と 2 次介在物の晶出、その後の固相での MnS 析出はフェライト変態の核となるため、組織制御の有効な手段となり、今後の発展が期待される。

マクロ偏析の制御に関しては、基本的な（必ずしも根本的ではないが）偏析生成機構が概略理解できたとして、むしろ対策研究が行われてきた。その成果として、中心偏析や V 偏析、中心ポロシティの軽減に有効な軽圧下鑄造、大圧下鑄造、

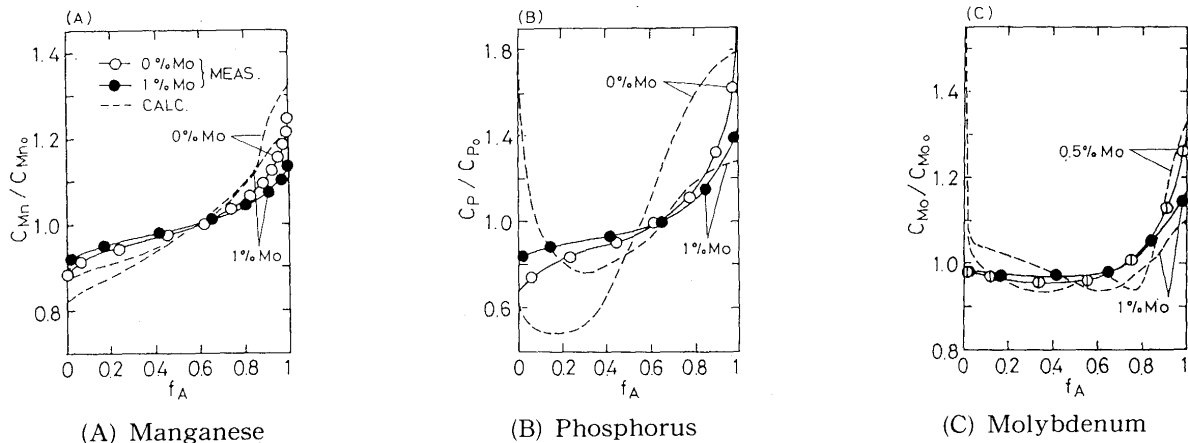


Fig. 3.51. Effect of Mo-addition on microsegregation at 1,300°C. (*Tetsu-to-Hagané*, 73 (1987), p. 1554)