

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 をつばを用いた 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、

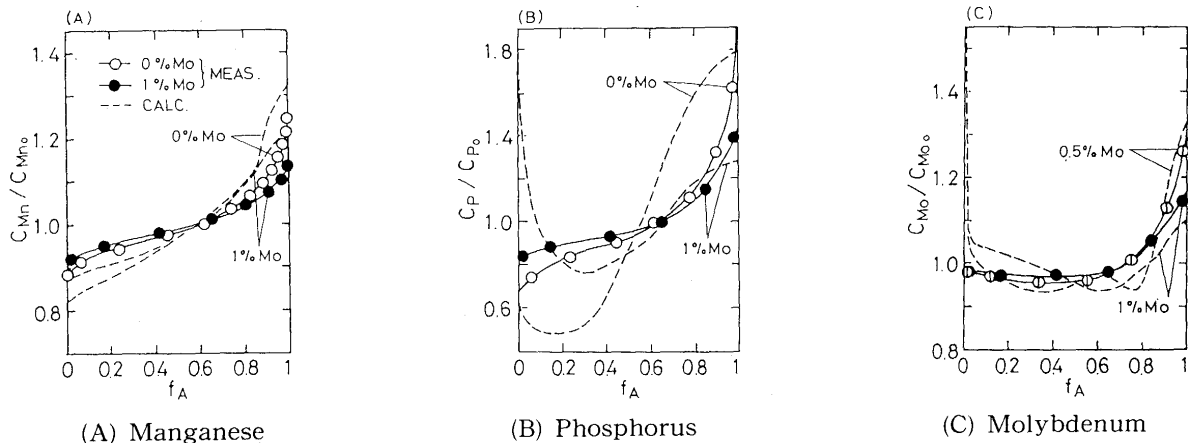
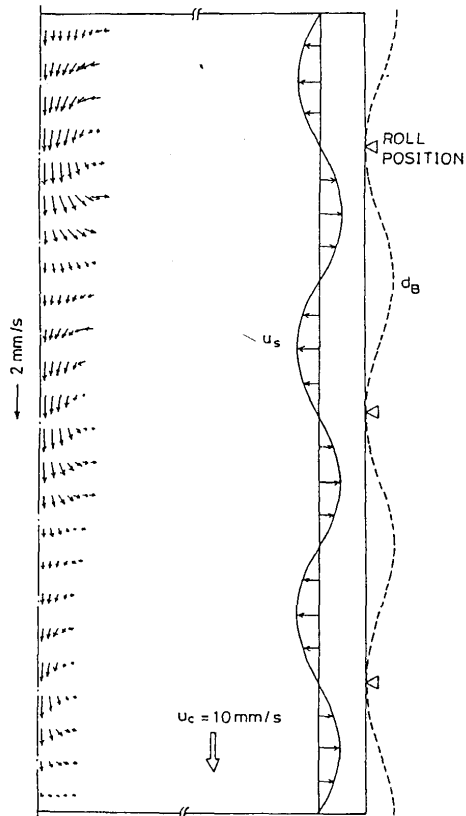


Fig. 3.51. Effect of Mo-addition on microsegregation at 1,300°C. (*Tetsu-to-Hagané*, 73 (1987), p. 1554)

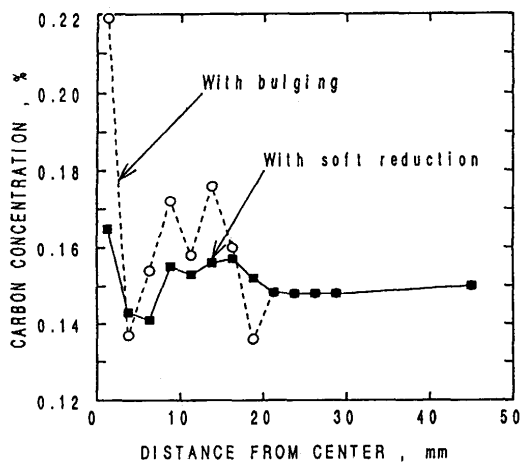
連続鍛造鑄造法などが開発された。またその軽減機構についても考察が加えられたが、必ずしも明確にはされていない。

### (3) 初期凝固現象

連続鑄造鑄型内での凝固現象は、溶鋼流動、メニスカスの凝固、パウダーの焼結・溶解と鑄型/凝固シェル間への移動、凝固シェルの変形などがからむ複雑な現象である。金属平板を一定時間溶湯中に浸漬したり、金属板上に熔融金属液滴を落下させて得られた凝固組織や凝固層の厚さ、変形などが調



(a) Simulated fluid flow



(b) Simulated carbon distribution

べられた。

また、鑄型表面を加工して、緩冷却することにより均一な初期凝固層が得られることが明らかにされた。すなわち、幅 0.5、深さ 0.5、間隔 5 mm 程度の格子溝を形成することにより、亀甲状凹凸が生じる亜包晶鋼でも平滑な表面が得られ、しかも平均熱流束は増大することが基礎実験で明らかにされた。しかし、このような格子溝では引き抜き抵抗が大きく、連続鑄造できないため、幅 1、深さ 1、間隔 10 mm の溝の上面を Cu メッキした鑄型、あるいは、間隔 0.9、深さ 0.2~0.3 mm の鑄造方向への縦溝のある鑄型で実際に鑄造した結果、不均一凝固を大幅に軽減できることが示された。この原因としては、熱流束の小さい部分で、 $\delta$ - $\gamma$ 変態による凝固シェルの変形が規則的に生じることや、単に緩冷却になったため、比較的平滑になると説明されている。今後、この機構のより明確な説明と耐久性のある鑄型の開発が期待される。

メニスカスの凝固による爪の形成と、表面偏析の生成機構もかなり明らかにされた。すなわち、爪はメニスカスの凝固とその上への溶湯のオーバーフローにより生じ、オシレーションマーク谷部での凝固遅れ部から濃化液相が圧力差および毛管現象で押し出されると理解されている。

なお、電磁気力を作用させることにより、オシレーションマークによる凹凸を著しく軽減し、より平滑な鑄肌を得ることができると示された。この理由としては、鑄型と溶湯の接触圧を下げることにより、熱伝達を妨げ(緩冷却)、不均一凝固を防止すること、メニスカスの変動を抑制すること、誘導加熱によりメニスカスの凝固が防止されることなどが考えられている。

鑄型内流動現象が物理的あるいは数値シミュレーションによりかなり明らかにされた。溶融スラグの鑄型-凝固シェル間への流入機構に関する進歩はほとんど見られなかったが、潤滑機構としては鑄型上部で液体潤滑(スラグが液相状態)、下部では固体潤滑になることが多いことが明らかになった。鑄型/溶湯あるいは凝固シェル間の熱抵抗についても調べられたが、初期凝固との関係はまだ明確になっていない。しかし、潤滑と熱移動の観点からスラグ組成の最適化がかなり進みつつあり、鑄造速度の向上に役立っている。

ストリップ鑄造の表面欠陥についても、メニスカスの強制攪乱、雰囲気鑄造、ロール出口での温度分布測定、透明鑄型による溶湯との接触挙動の直接観察などによって調べられた。そして、メニスカスの凝固(特に低鑄造速度時)、空気巻き込み、酸化物などの巻き込み、ロールの傷、ヒートクラウン、不均一温度分布による不均一変形などによって欠陥が生じることが明らかになった。

また、ロールと凝固シェル間の熱移動係数データもかなり得られている。すなわち、凝固シェルがロールに圧着されると熱伝達係数が 4 倍程度上昇すること、ロール周速の上昇とともに熱伝達係数は減少することが明らかにされた。

さらに、基板に滴下された液滴の温度変化を光ダイオード

Fig. 3.52. Computer simulation of centerline segregation in continuous steel casting. (Int. Conf. Computer-assisted Materials Design Process Simulation, ISIJ, Tokyo (1993), p. 111)

で検出する技術が開発され、ステンレス鋼における急冷初期凝固機構がある程度明らかにされた。すなわち、オーステナイト系ステンレス鋼でも、鑄型接触直後の急冷により、溶湯がかなり過冷して、準安定 $\gamma$ 相がまず生成し、ある冷却速度以下になると $\delta$ 相が生じることが示された。これは高温相が安定であるため、あるいは $\gamma$ 相の核生成がより容易であるためと説明されている。

#### (4) 計算機シミュレーション

ワークステーションの進歩とも相まって凝固シミュレーションが一般的に行われるようになり、水平連続鑄造やストリップ鑄造法の開発などに活用された。例えば、水平連続鑄造の開発では、ブレードリングの材質・形状・寸法の凝固シェル形状に及ぼす影響などが調べられている。また、ストリップ鑄造でも鑄造速度の最適化やロール設計にシミュレーションが利用されている。

シミュレーション技術の進歩としては、前記のマイクロ偏析の解析以外に、流動を考慮した解析が進んだことである。特に、形鑄造の分野では、複雑な鑄型空隙部を溶湯が充満する過程が解析されるようになった。また、連続鑄造における中心偏析や鋼塊のマクロ偏析の直接シミュレーションが可能になりつつある (Fig. 3.52 参照)。この場合、熱エネルギー保存則のみならず、溶質量保存則、運動量保存則、熱力学的関係を連成させ (バルジングや軽圧下などの場合には凝固シェルの移動は既知のものと仮定している)、溶質分布も直接計算できるようになった。

しかし、固相流動のシミュレーションはまだ行われていない。未凝固圧下鑄造などに関連して、正確な未凝固部の推定とともに、今後の重要課題である。また、鑄型内流動のコンピュータシミュレーションは乱流モデルの導入まで進歩したが、凝固との連成はこれからの課題である。核生成、デンドライトの成長を考慮した組織形成のシミュレーションにおいては、我が国での研究は少なく、海外に遅れをとっている。

このほか、有限要素法による凝固シェルの応力解析も3次元で行われるようになった。また、内部割れの限界歪みに関するデータもいくつか提案されている。

#### (5) その他

急速凝固組織の形成や過冷凝固についての研究も進んだ。過冷凝固に関しては、1.5 kg ぐらいの炭素鋼 (Fe-0.23% C) で 100 K 程度の静的過冷が得られる技術が開発された。また、レオキャストイングに関する基礎的研究 (初期凝固、流動性、凝固組織など) が非常に進んだが、鋼に関する研究はあまり行われなかった。

### 3.7.5 基礎研究における将来課題

日本鉄鋼協会将来研究課題検討小委報告 (*Tetsu-to-Hagané* 80 (1994), No. 3, p. 124) の中で、将来課題を考察する場合の視点として、①リソースオリエンテッド、②ニーズオリエンテッド、③シーズオリエンテッドな視点から、各々考察すべ

きことを提案している。ここでも、その考え方を採用して考察する。

#### (1) リソースオリエンテッドな視点からの課題

今後日本、鉄鋼業にとって利用可能な資源、すなわち原燃料、労働力、環境、資本などの供給条件と関連させて、そこに置かれた製鉄技術の姿を描き、解決されるべき研究課題を想定する。製鉄技術のような上工程の段階で最も重要性が高いが、製鋼工程においても基本的な課題が存在する。

##### i) スクラップの利用拡大のための研究

老廃スクラップにおける混入元素や低合金鋼からの各種合金元素に由来する、いわゆるトレースエレメントの除去や無害化のための研究が製錬、加工、物性の各段階で必要とされる。特に製鋼分野では、そのための基礎として、溶鋼、溶融スラグ、および固液共存状態のこれら元素に関する熱力学データを整備し、スラグ-メタル界面反応、固液あるいは固体内相変態におけるこれら元素の挙動を、多元合金系の加工特性や材料特性に結びつけて把握する必要がある。

##### ii) 連続プロセスに関する研究

コンパクトな設備により高い生産性と制御性を保証し得るプロセスとして、連続製鋼法の実現は古くより製鋼技術者の夢であり、多くの開発の試みがなされてきた。労働力や資本の供給制約を緩和し、原理的に、より環境保全型のクローズド・システムとなりうる連続製鋼法は、将来の鉄鋼産業におけるリソース制約的課題を抜本的に解決する期待をもっている。溶鋼-スラグ流の向流反応特性、多混相流の流動制御、耐火物の利用法や炉の設計に関する新しいコンセプトなど多くの基礎的研究課題がある。

##### iii) 廃棄物のない完全リサイクリング型製鋼法の研究

精錬剤を用いる製鋼法では、従来は不純物を吸収したスラグの廃棄を前提としたプロセスを開発してきた。

人類社会の持続可能な発展という大目標のためには、あらゆる製造プロセスが基本的には「廃棄物ゼロ」を指向すべきことが要求される。それゆえ、今後目標とすべき、完全リサイクリング型製鋼法では、すべての不純物も何らかの副産物として製品化される。逆に言えば、スラグをリサイクル使用することにより、不純物を濃集し、経済的な技術行為の対象とすることが不可欠である。具体的には、例えば、P, Mn, V, Cr などの濃集回収が考えられ、適正スラグの開発とこれら元素の分配条件など、新しい視点に立った系統的基礎研究が必要になる。さらに、S の処理法 (利用法) について、広い視点からの検討が必要とされる。

#### (2) ニーズオリエンテッドな視点からの課題

言わば鉄鋼の需要側からの要求に応える材料特性の造り込みを保証する製鋼プロセスのための研究課題である。

純度や化学組成の精密制御に対する要求は、ますます高度になると予想され、超高純度あるいは超高清浄鋼のための基礎研究をいつそう深める必要がある。

そのためには、伝統的な雰囲気制御や特殊精錬剤の活用に