

B

鑄造プロセスへのシミュレーションの適用

素材メーカーにとって熔融金属を凝固させて形を作る技術は基盤技術であり、鋼やアルミ合金、銅合金の連続鑄造のほか大型鑄鋼品等の砂型鑄造プロセスなどは一般的に利用されている。

一方、その凝固プロセスでいかに欠陥の少ない製品を製造するかは重要な問題であるが、取り扱う材料が高温であるため可視化などが非常に困難であるため、数値シミュレーションによる可視化が有効な手段として発展してきている。

第1世代では、熱伝導、流動などのマクロな現象に関するアプローチから鑄造プロセスで発生する欠陥などのメカニズム解明に数多くの成果を挙げてきた。第2世代では、凝固-流動連成のような連成シミュレーションが発達し、現在はこの技術がさらに洗練されてより使いやすいシステムが開発されている。このようなシステムの開発と同時に、熔融金属の物性値や水冷による熱伝達率等の境界条件に不明な点が多いことが明らかとなり課題となっている。また、鑄造中に発生する成分偏析や割れなどの予測に関しても、汎用的と言える手法の開発は十分でなく、マクロ解析を適用する上で問題となっている。さらに第3世代では、セルラーオートマトン法を用いた凝固組織シミュレーションを用いて単結晶タービンブレードの鑄造予測や、フェイズフィールドモデルを用いたデンドライトレベルの現象を考慮した検討が行われている。また、最適化理論を用いた湯道の最適化などの論文も増加してきており、従来から行われてきたマクロ解析の応用展開もなされている。ここでは、鑄鋼、アルミの鑄造プロセスにおける、熱、流動および変形解析とそれを利用した欠陥予測解析を紹介する。

B-1

大型鑄鋼品への適用

大型鑄塊には押湯などの最終凝固部に向かって合金成分が濃化した正偏析帯が形成される。このマクロ偏析の予測に関しては多くの報告がされている。ここでは、坂本らが報告した手法¹⁾を紹介する。

第1図に成分偏析予測法の概略を示している。(1)熱力学データベース「Thermo-Calc」²⁾による平衡分配係数計算、(2)有限要素法解析コード「CASTEM」による伝熱・凝固解析³⁾、(3)溶質再分配による物質収支計算から構成されており、マクロ偏析の生成については、高橋らの凝固遷移層の概念⁴⁾を適用している。

つまり、樹間に濃化する合金元素の分配は、パートンの式(1)を用い、バルク溶湯中に混合、集積する濃化溶湯はある洗浄限界固相率 (fs.crit) 以下の低固相率領域のみが寄与するモデルとしている。次に、このfs.crit をパラメータにして (2)式から合金元素の物質収支を計算している。

$$k_e = k_0 / (k_0 + (1 - k_0)e^{-Rd/D}) \dots\dots\dots (1)$$

$$C_s = (1 - fs.crit) C_0 + fs.crit \cdot k_e \cdot C_0 \dots\dots\dots (2)$$

ここで、 k_e ：実効分配係数、 k_0 ：平衡分配係数、 R ：凝固速度(m/s)、 d ：液相側での溶質の拡散層厚さ(m)、 D ：液相内での溶質の拡散係数(m²/s)、 C_s ：凝固部分の合金元素の濃度、 C_0 ：バルク溶湯中の合金元素の濃度である。

この方法を用いて、2.25Cr-1Mo鋼の190トン鋼塊のC、Cr、Moの偏析を予測した結果を第2図に示す。この図から実測結果とfs.critを0.1~0.2とした場合により一致が見られることが分かるが、これは高橋らによる凝固遷移層の概念^{4),5)}に相当すると考えられ、妥当であると考えられる。

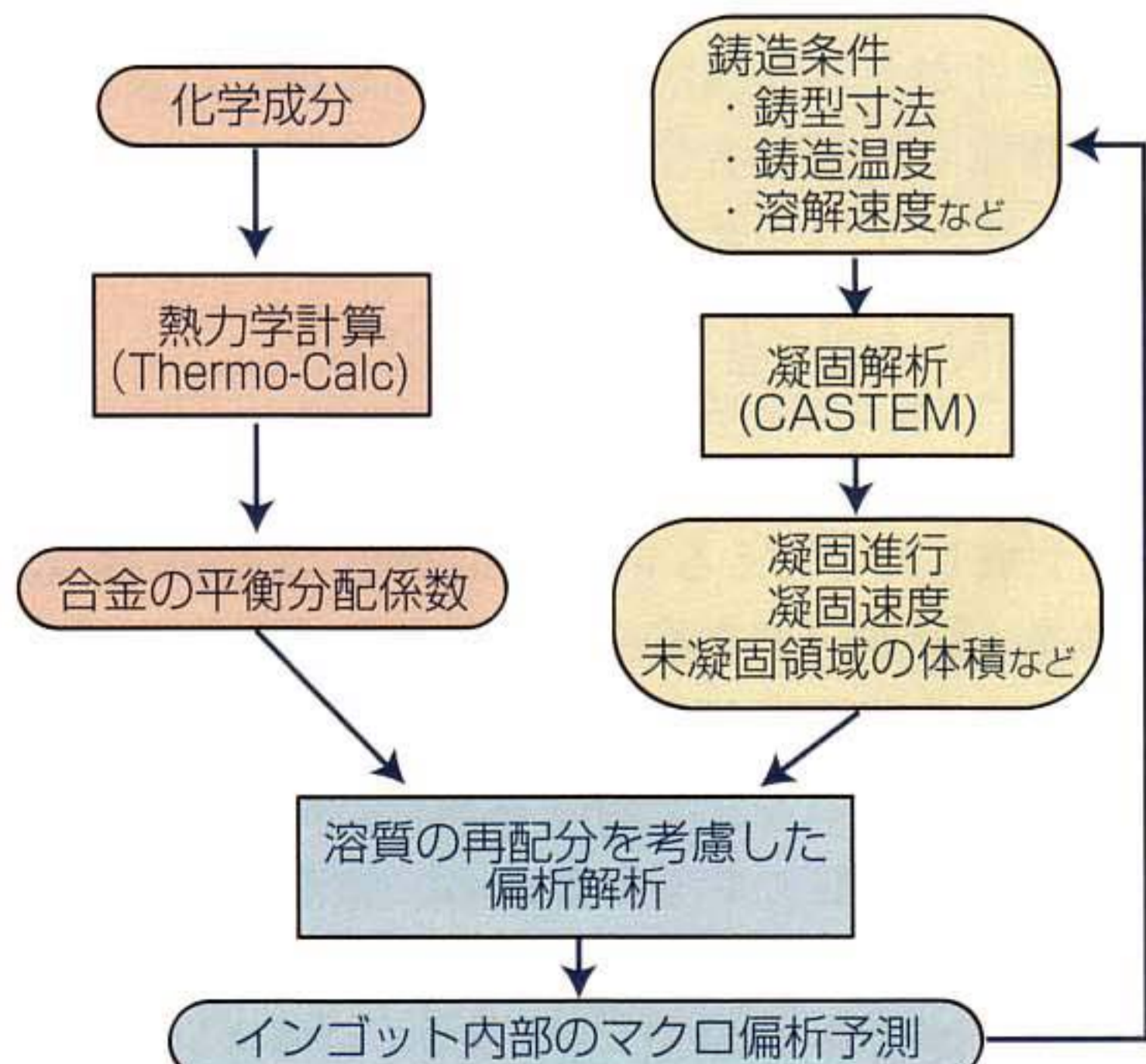
1)坂本浩一ほか：鑄造工学、vol.70(1998)、No.1、p.21

2)B. Sundman et al. : Calphad, vol.9(1985)、p.153

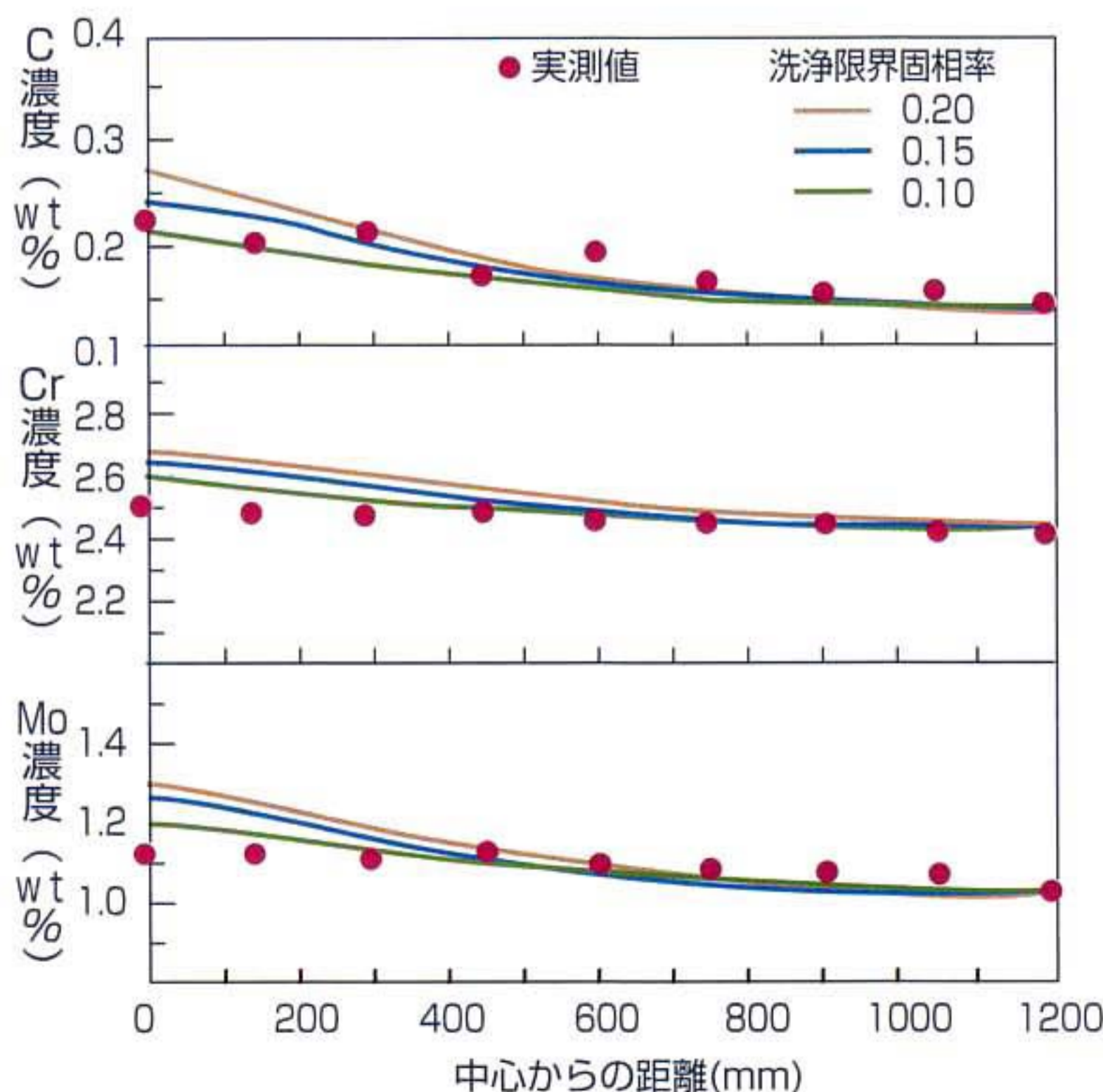
3)藪忠司ほか：神戸製鋼技報、vol.37(1987)、No.4、p.99

4)高橋忠義ほか：鉄と鋼、vol.76(1990)、p.728

5)大笹憲一ほか：鑄物、vol.61(1989)、p.92



第1図 偏析予測法のフローチャート

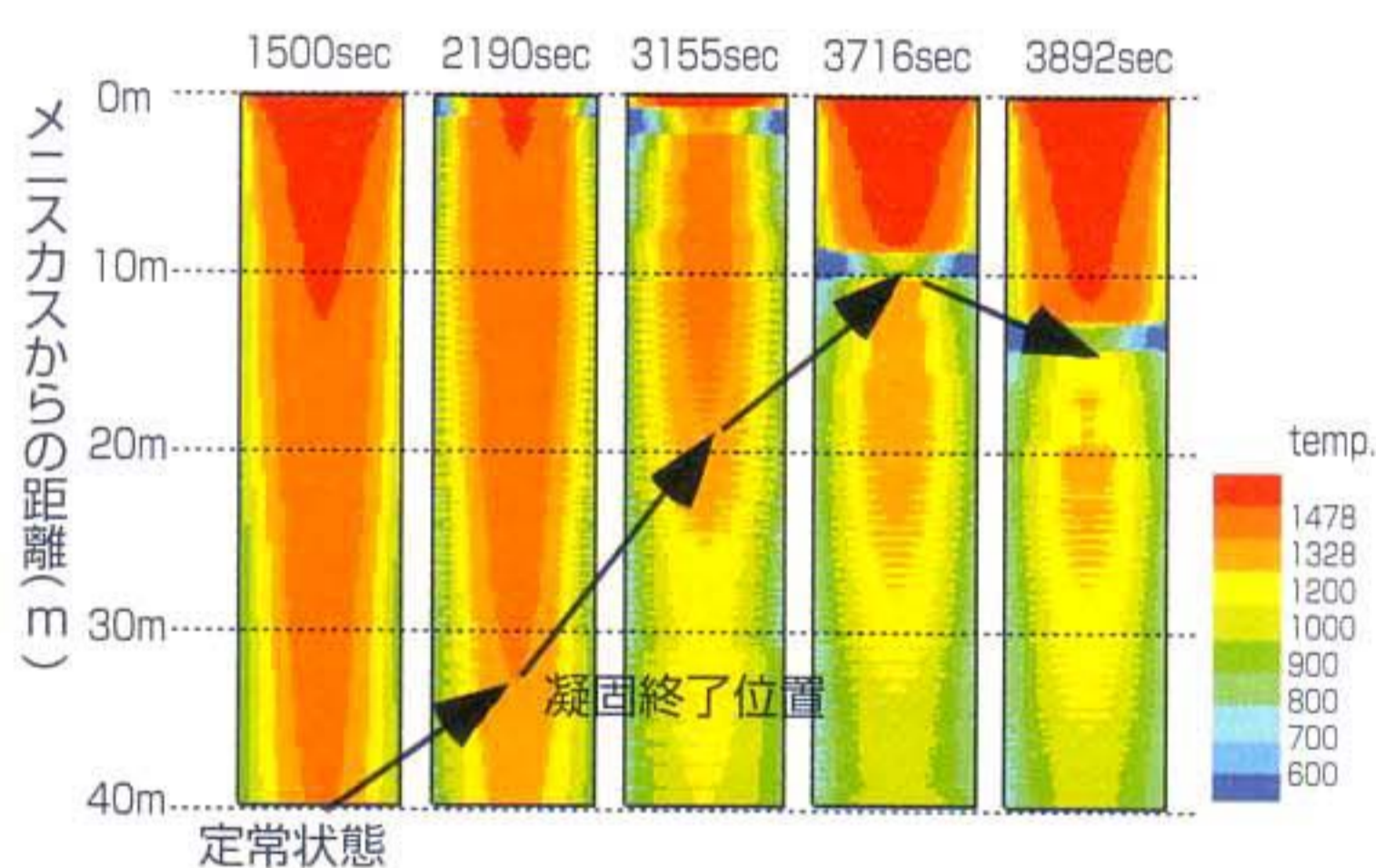


第2図 2.25Cr-1Mo 190トン鋼塊の偏析予測結果と実測値の結果

鋼の連続铸造プロセス（以下連铸と呼ぶ）では、これまで铸片の変形解析、铸型内の溶湯の流動解析など数多くのシミュレーションが実施されており、割れ欠陥や介在物欠陥の低減対策の検討に用いられている。

铸片の内部および表面品質の安定化のために重要な温度コントロールに関しては、一般に铸造方向に垂直な断面の移動を、外部の熱伝達条件の変化で表現した温度予測⁶⁾が一般的に行われている。しかし、多品種少量生産が適用されるブルームやビレット铸片のように铸造中に铸造条件（主に铸造速度）がたびたび変化する場合、一般に铸造速度が遅くなった状況で铸造方向への熱移動やロールとの接触部での局所的な温度変化が無視できないため、この方法の適用は難しい。そのため、铸造速度にあわせて節点温度を移動させて铸片の移動を表現する計算⁷⁾も必要である。

第3図に铸造速度の変化にしたがって変化する铸片の凝固進行の変化を示す。

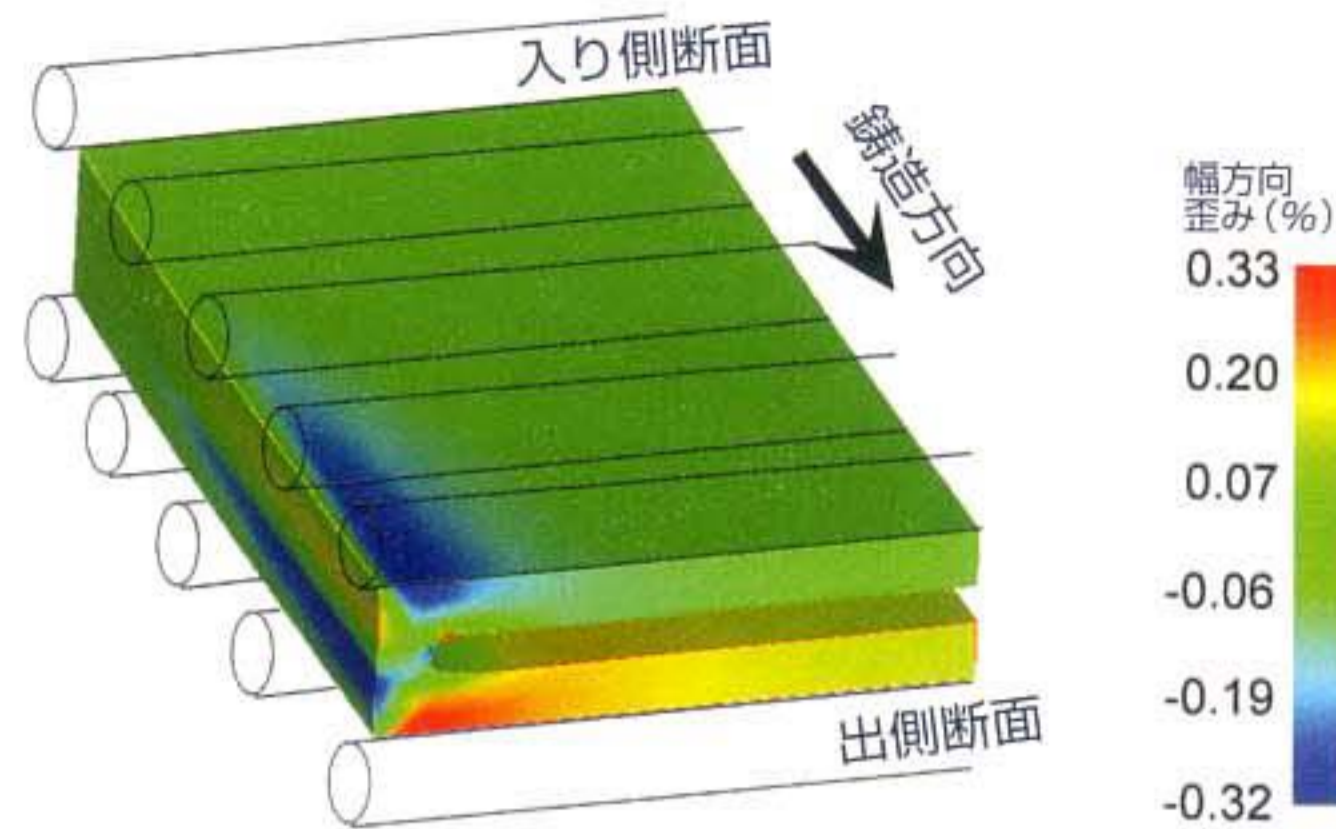


第3図 非定常状態での連铸の凝固進行予測結果

これより定常状態では最終凝固部までの距離がメニスカスから40m程度であるが、铸造速度の変化と共にメニスカスから10m程度の位置まで上昇して来る可能性があり、歩留まり向上のために、非定常状態での铸片の温度コントロールが重要であることが分かる。

铸片の変形解析としては、多くの研究がされている。その代表的な例が溶鋼静圧によりロール間で铸片が膨れるバルジングによる割れを予測する解析^{8),9)}である。これらの解析では、铸片の移動を考慮した解析を行っているが、解析の対象は1ロールスパンのみであり、現在のところ、複数ロールスパンでの3次元解析はそれほど多くは行われていない。ここでは、铸片の矯正部での曲げ戻し挙動^{10),11)}に関して紹介する。

ここでは、铸片は非圧縮性で粘塑性体であるとして取り扱い、第4図に示す铸片(幅(W)=2,160mm、厚さ(H)=280mm、凝固シェル厚み=100mm)を計算対象とし、図に示しているように5ロールスパンをモデル化している。铸片の温度は、スラブ長辺面温度を700°C、短辺面温度を1,000°C、凝固界面の

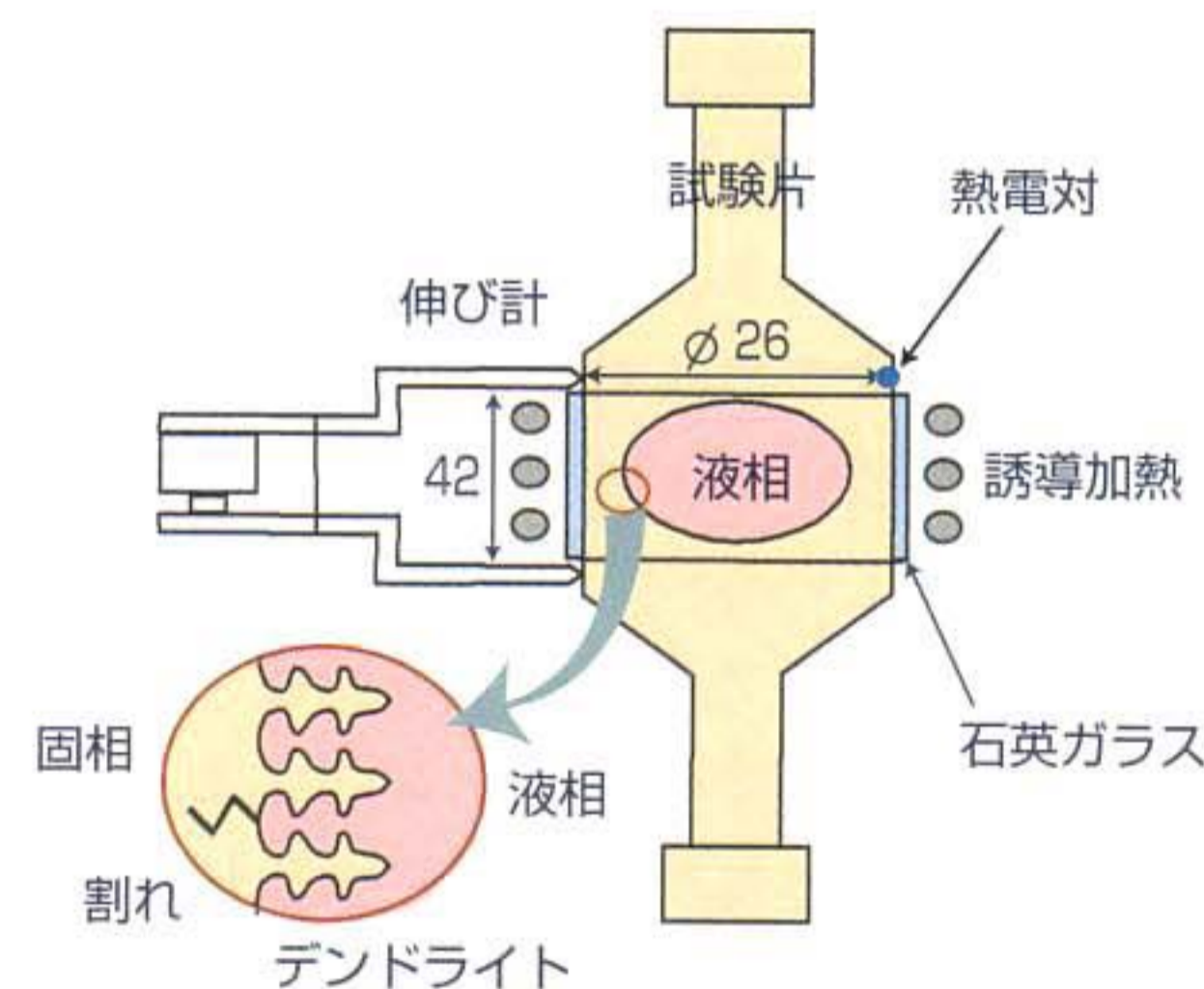


第4図 铸片の矯正部でのシミュレーション結果

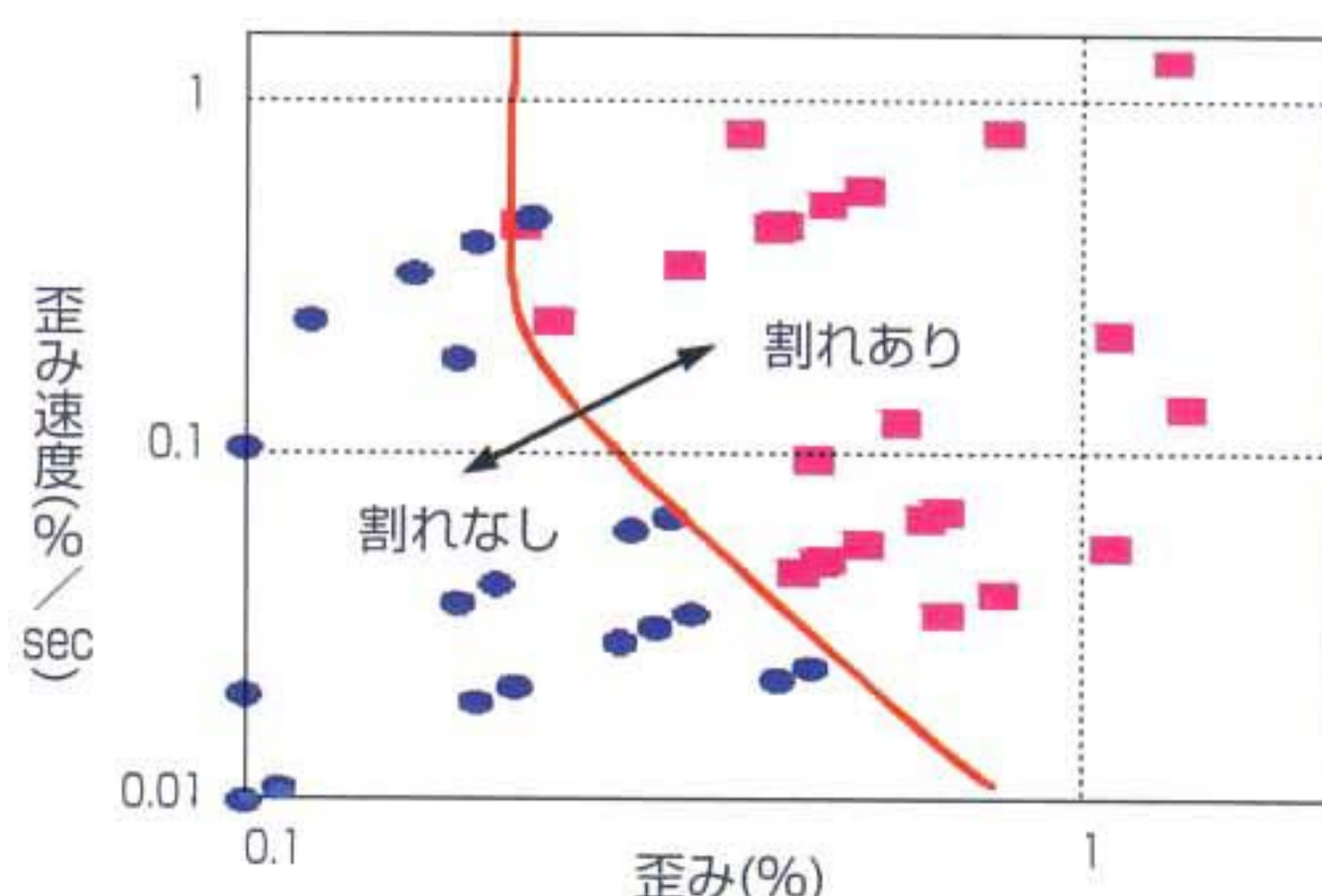
温度は1,470°Cとして铸片内部の温度を決定した。また、铸造速度は1.2m/minである。

同図には矯正部での铸片幅方向歪みの分布を示している。特徴的な現象として、上広面板のコーナー部に比較的大きな引張歪みが生じている。一方、変形解析が高度化するにしたがい、定量的な予測をするための基準が必要となる。例えば、変形解析結果から得られる歪みを用いた铸片内部割れの予測である。内部割れの限界値に関してこれまで数多くの研究^{12),13)}がなされているが、歪みを直接計測できる第5図に示すような小型試験片により熱間割れ再現実験を実施した¹⁴⁾。実験は第5図の試験片の中央部を誘導加熱で一度溶融させた後冷却し、外周部より凝固シェルを成長させた。その後、引張試験を行った後、切断し、エッチングを行い内部割れの有無を調査した。ここで確認された内部割れ部の成分を調査するとP(りん)、S(いおう)などの偏析が認められ、典型的な凝固界面割れの特徴を示していることが確認された。

実験の結果を割れの有無で整理したグラフを第



第5図 内部割れ限界歪み測定試験の概要



第6図 内部割れ限界歪み測定結果

6)木村雅保ほか：材料とプロセス、vol.2 (1989)、No.4、p.1154

7)仲山公規ほか：材料とプロセス、vol.3 (1990)、No.4、p.1165

8)松宮徹ほか：連続铸造における力学的挙動、p.149

9)J.B.DALIN et al. : Int. J. Num.Methods Eng.,vol.25(1988), p.147.

10)M.Deisinger et al. : Ironmaking and Steel-making.vol.24(1997), No.4, p.321

11)豊島史郎ほか：塑性と加工、vol.43、No.502、p.33

12)T.Matsumiya et al. : Transactions ISIJ, vol.26(1986). p.540

13)H. Hiebker et al. : CAMPS-ISIJ, Vol.6 (1993), p.1132

14)K.Nakayama et al. : Proc. of Modeling of casting, welding and advanced solidification process-VIII (1998), p.915

6 図に示す。この結果では、歪み速度が遅くなると限界歪みが大きくなるようになっているが、試験中の凝固進行の影響によると考えられ、真の限界歪みは0.2%程度で一定であると考えている。

したがって、第4 図に示した前述のシミュレーション結果を考慮すると、矯正部において上広面側の凝固界面コーナー近傍部に割れが発生する可能性があることが予測される。

B-3

アルミダイキャストのシミュレーション

近年数多くのシミュレーションシステムが開発され、実績を上げている。国内で開発された主なシステムの例としては、JSCAST (クオリカ)、ADSTEFAN (日立情報サービス)、TOPCAST (トヨタコミュニケーションシステム) などがあげられる。これらのシステムは、3D-CADとの連携により比較的容易に複雑形状鋳物のモデル化が可能となっており、それを用いた湯流れ解析と凝固解析が可能となっている。

ただし、これらのシステムでは差分法を採用しているために、第7 図に示しているように、曲率

がある流路の場合には、これまでの直交要素のみの場合には段差が生じてしまい、そこでシミュレーション結果と実測に大きな差が発生していた。また、凝固解析においても曲率のある鋳物の表面が構造要素で分割した場合に、形状が階段状になってしまうために冷却時の温度分布に不自然な温度分布が発生する問題があり、その結果、解析結果の評価などに問題が生じることがあった。この問題に対して大中らは非構造要素を導入し改善している¹⁵⁾。

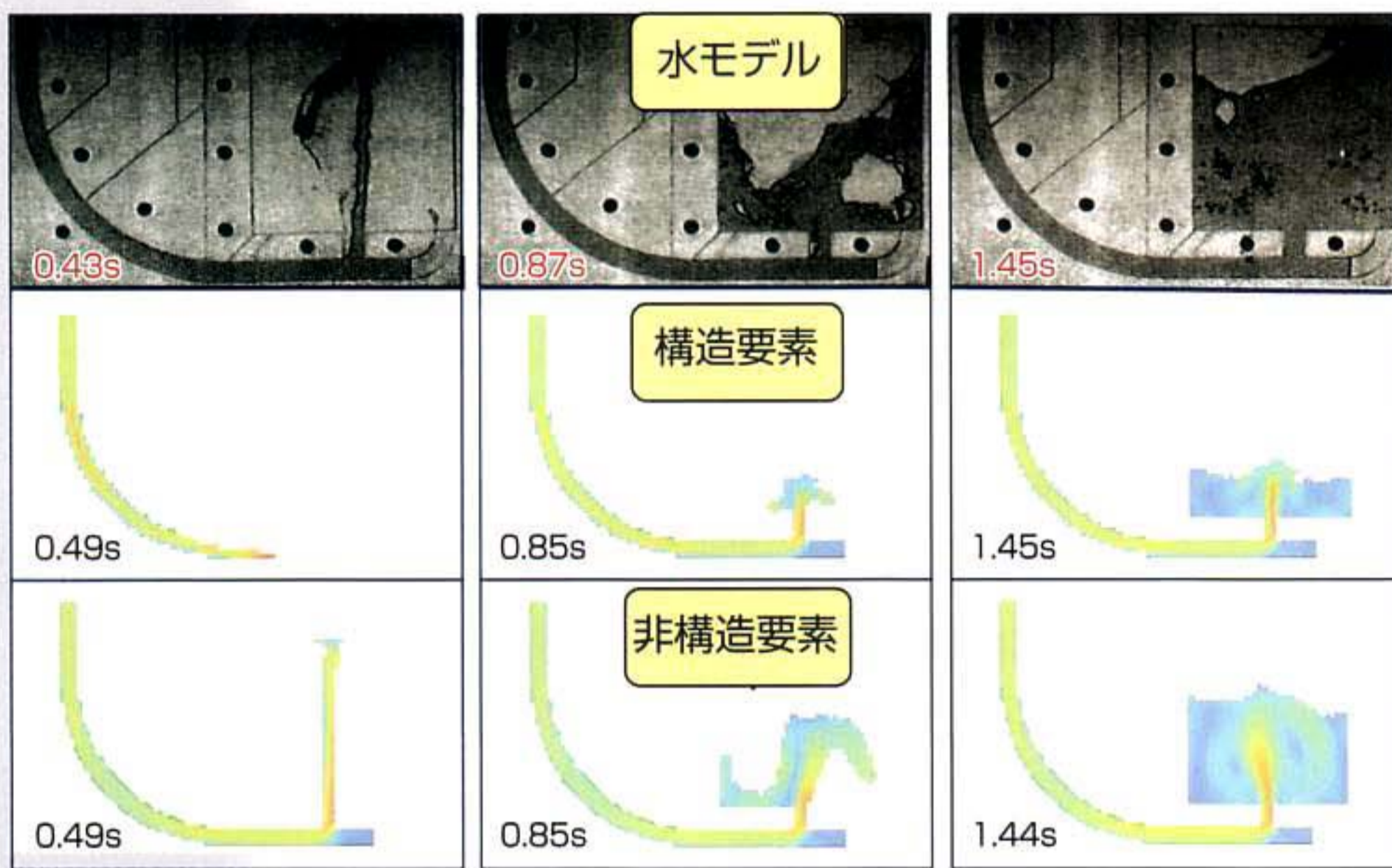
この図からわかるように、従来の差分法では曲がった湯道の部位でエネルギーが散逸するために鋳型内に流入する時の流速が小さくなってしまい充填挙動に実測値と大きな差が現れているのに対して、非構造要素を導入した結果では、非常に良く一致していることがわかる。

これらのシステムを用いた解析では、コンピュータ性能の向上により、近年では2,000万要素クラスの解析がパソコンで可能となっている。

具体的には、シリンダーヘッドのような複雑形状で薄肉品の凝固解析において、鋳型を含めて1.5mm均一要素分割を行い、1,500万要素(内鋳物部分の要素は150万程度)の湯流れと凝固の連成解析で5時間程度、凝固解析が30時間程度で解析が可能となっている。

15) 大中逸雄ほか:「規則-不規則混合要素を用いた湯流れ凝固解析システムの活用例」、H15年 鋳造工学会全国講演大会

16) 資料提供: (株)クオリカ



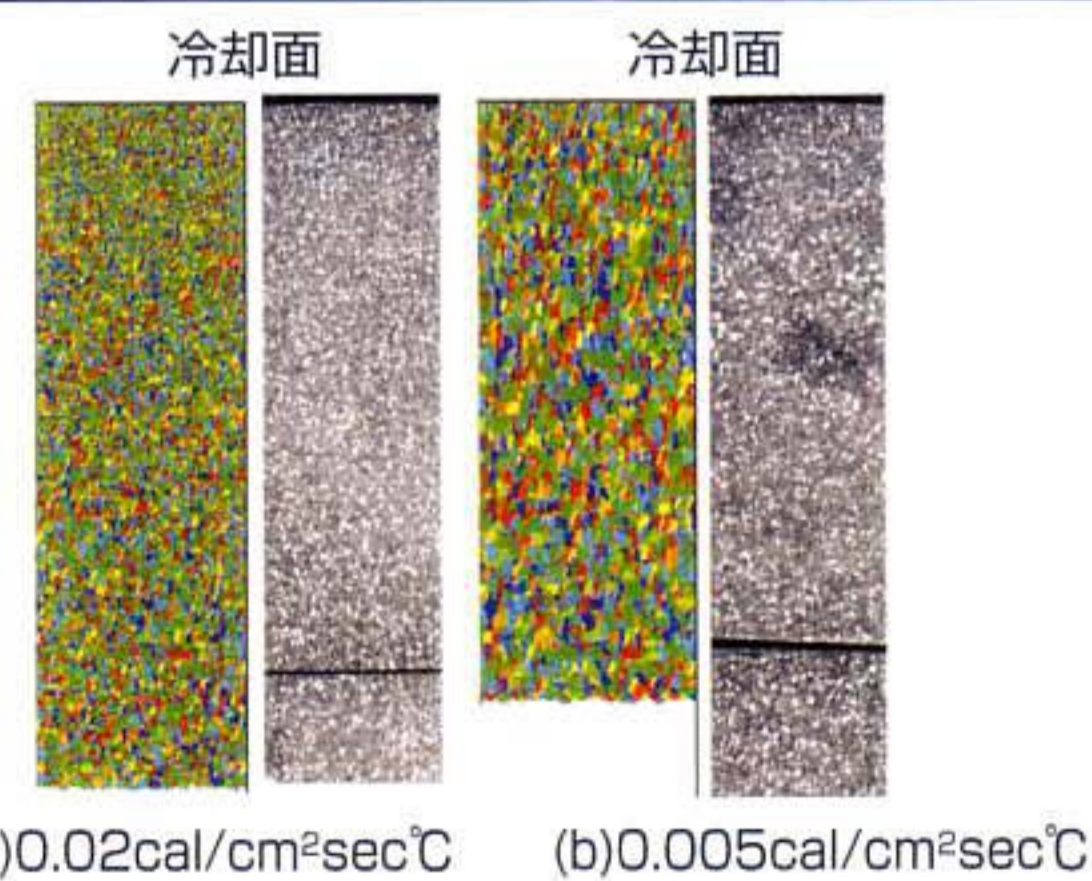
第7 図 構造要素と非構造要素による湯流れ解析の比較¹⁶⁾

B-4

凝固組織予測シミュレーションモデル

近年開発されてきた凝固組織予測シミュレーションでは、モンテカルロ法だけでなく、セルラーオートマトン法、フェイズフィールド法などの方法が用いられている¹⁷⁾。ここでは、セルラーオートマトン法によるアルミ合金の組織予測の例を紹介する。セルラーオートマトン法による組織予測は、一般的な伝熱解析に凝固による核発生と成長を考慮し、それによって凝固潜熱を放出するモデルを組み込んだ手法である。一般的な凝固解析では鋳物を要素分割するのみであるが、核生成や成長の考慮を、個々の要素をさらに細かく分割したマイクロ要素で計算している。

第8 図には、3000系のアルミ合金を一方向から冷却した場合の実験結果と計算結果を比較して示している。この解析では、核生成の過冷度が8℃、核生成頻度(確率)を40%とした結果であり、表面の抜熱速度により結晶粒がどの様に変化するかの予測が可能となっている。



第8 図 セルラーオートマトン法による凝固組織の予測

た。鋳造シミュレーションは、コンピュータの進歩と共に複雑な現象、より細かな現象の数値解析が可能になってきており、欠陥発生メカニズムの解明だけでなく防止のための対策を検討するための強力な武器となっている。しかし、解析の結果に大きな影響を及ぼす境界条件、物性値の整備・検討がまだまだ不十分であり、今後さらなる進歩をするためには、基本的なデータの蓄積がますます重要になってくると考えられる。

[エンジニアリングメカニクス事業部 応用技術部 仲山 公規]

代表的な鋳造シミュレーションに関して概説し

17) 例えば M. Rappaz et al: Metall. Trans. A, Vol. 27A (1996), p. 695