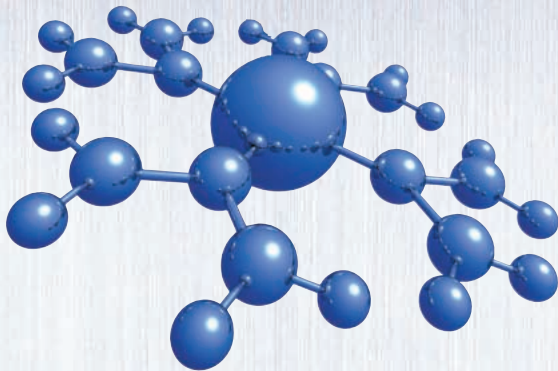


鋼を生み出す

その4 高度な解析技術と今後の展開

「精錬」「連続 casting」プロセスの重要な役割は、鋼に含まれる不純物を除去または無害化し、溶鋼が凝固するときの「割れ」や鋼材のもろさの原因となる「中心偏析」を防ぐことにある。新日鉄では長年、高度な解析技術を駆使し、こうした課題に挑戦し続けてきた。本シリーズの最終回では、新日鉄の強みを紹介するとともに、未来の casting 技術とその可能性を探る。



高度な解析技術を蓄積

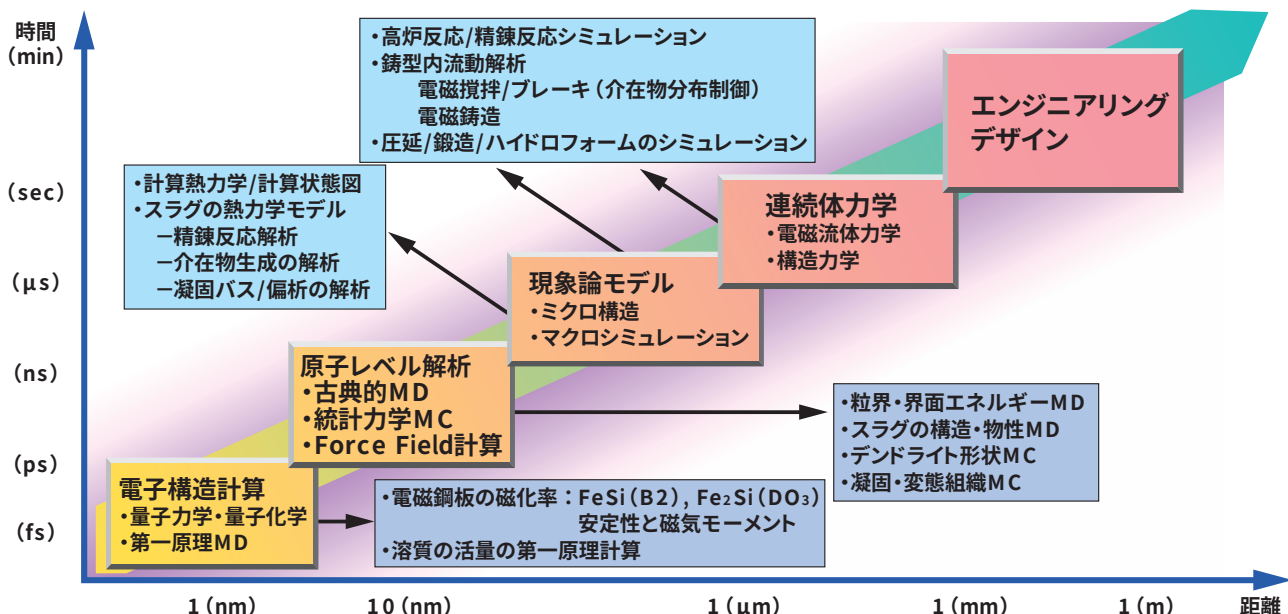
鋼の大敵である「介在物」を除去したり、「割れ」や「中心偏析」を防ぐには、溶鋼や介在物の輸送現象や成分のコントロールが必要であり、そのためには、起きている現象を把握し、分析し、予測することが重要だ。それらを支える技術が「解析技術」だ。

製鋼研究を支える計算科学には、まず物質間の熱力学的平衡関係を計算する「計算熱力学」がある。さらに、気体や液体の流れをシミュレーションする「計算流体力学」も重要だ。介在物の動きや転炉内の攪拌状況を予測するうえで欠かせない。新日鉄の強みは、これらの計算科学を組み合わせることで分析を行う高度な「解析技術」にある。

電磁力の活用技術やMURC法、SMPをはじめとする新日鉄の独自技術は、こうした解析技術があったからこそ生まれてきた。例えば、 casting で活用されている「電磁ブレーキ (Level Magnetic Flow, LMF)」 「 casting 内電磁攪拌 (In-mold electromagnetic stirrer, EMS)」は「電磁流動解析」によって誕生した。またMURC法に代表される精錬反応は、「計算流体力学」による熱や成分元素の移動 (物質輸送) と、反応界面では「計算熱力学」による多成分系での化学平衡 (多元平衡) の解析とを組み合わせることで予測する。前号で述べたスチールコード中の介在物組成や中心偏析部での硫化物の組成も、「計算熱力学」による多元平衡計算と凝固偏析モデルを組み合わせた解析で予測

鉄鋼技術と物理の関係

図1



広範囲におよぶ鉄鋼製造技術には、物理学つまり科学の世界の裏づけがある。例えば、起きている現象を正確に把握・分析し、予測する高度な「解析技術」。物質間の熱力学的平衡関係を計算する「計算熱力学」。気体や液体の流れをシミュレーションする「計算流体力学」。そうした「計算科学」を組み合わせる解析技術が、新日鉄の優れた鉄づくりの強みだ。

される。さらには溶鋼の成分コントロールでは、スラグを分子構造から分析するなど、原子レベルの解析や電子構造計算も行っている（図1）

一方、取鋼と鑄造機の橋渡しの役割を担うタンディッシュにも、独自の解析技術が活かされている。その一例がプラズマ加熱だ。タンディッシュ内で溶鋼の温度が下がると、固体の析出物が増えたり、ノズル詰まりが起こる。そこで、特に温度が下がりやすい継ぎ目付近（溶鋼が少なくなった部分）の温度低下を防ぐため、局部的にプラズマ加熱して温度を維持する。鑄造中継続して加熱すると、エネルギーの消費量や耐火物の消耗が大きくなるため、継ぎ目の低温部分だけをピンポイントで加熱する。この温度変化のシミュレーションでも計算科学に基づく解析技術は欠かせない。

こうした成果の背景には、層の厚い専門家集団が存在する。新日鉄では基礎となる要素技術を体系的に保有し、新たな知識を蓄積してきた。特に「計算熱力学」については、1980年代中頃、共通基礎基盤技術と化学冶金・凝固現象をマトリックスに、長期的ビジョンに立った開発に取り組む旧特別基礎第二研究センター（その後旧未来領域研究センターに統合）で先行的に取り入れられ、今日の基礎となった。昨年10月には、こうした取り組みが評価され、状態図や熱力学データベースに関する国際協力機構「APDIC（アロイ・フェーズ・ダイアグラム・インターナショナル・コミッション）」（加盟国：約20カ国）から、状態図、熱力学データベースの産業応用活動の実績を表彰するインダストリアル・アワードが授与された。

夢の技術～電磁鑄造（EMC）

近年、国家プロジェクトとして未来の鑄造技術「電磁鑄造（EMC：エレクトロ・マグネティック・キャスティング）」の研究が進められている。

EMCの原理は次のようなものだ。まず連続鑄造の鑄型の外側にコイルを巻き電流（電流の向きが一方向ではない交流）を流す（一次電流）。そうすると最初の電流が磁場をつくり、次にその磁場を消すために、鑄造物の中には電流が逆向きに流れて（二次電流）、磁場との間で電磁力が生まれる。その電磁力は内側に向かい、鑄造物を少し締めつけるようなピンチ力として働く（図2）。

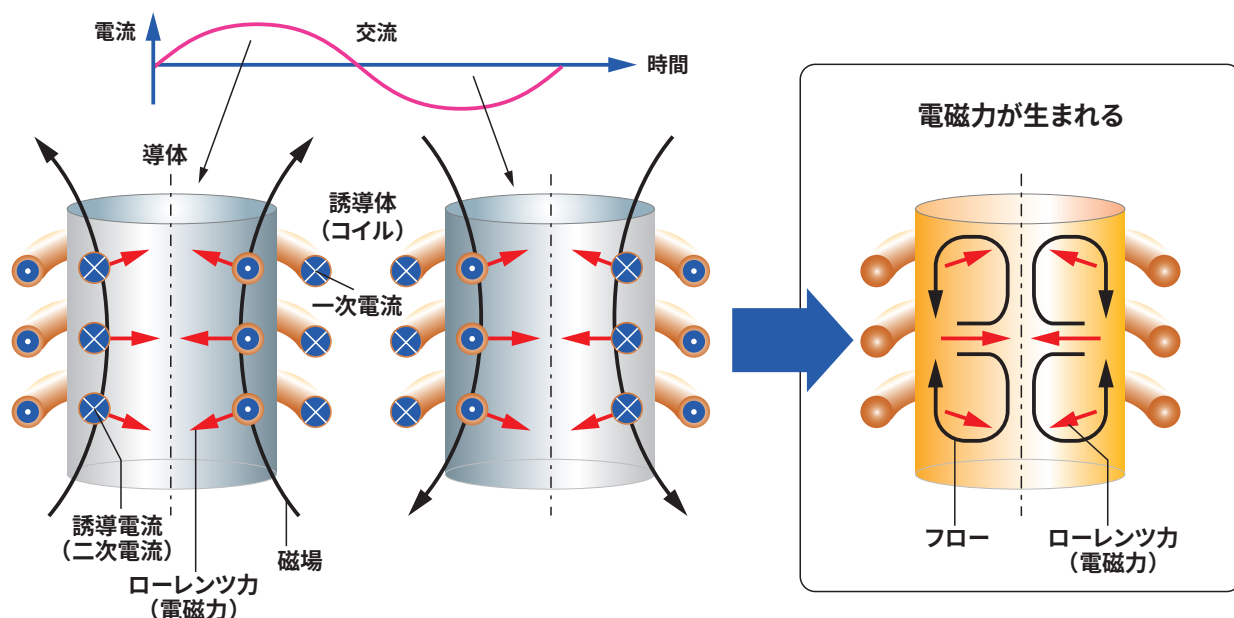
鑄型と、凝固しつつある鑄造物の間には、保温・潤滑機能を持つ連鑄パウダーが介在する。ピンチ力によって鑄造物の表面が中心部に引っ張られ、鑄型と鑄造物の間が広がり、パウダーの流入経路が確保される。そうするとパウダーの厚みが厚くなり、保温効果が高まることによって冷却速度が遅くなる（緩冷却）。

従来、極低炭素鋼など高純度で融点が高い鋼材の鑄造では、温度が下がりやすい溶鋼表面が早く固まり、メニスカス（連鑄パウダーと溶鋼の界面）まで凝固殻を形成する。そのため、溶鋼のオーバーフローや鑄型オシレーション（鑄型振動）の圧力変化などで生じるくぼみ（オシレーションマーク）に、介在物や気泡が捕らわれ表面欠陥の原因になっていた（図3左図）。

電磁鑄造では、緩やかに冷却することにより凝固速度が遅くなり、メニスカスでは凝固は始まらず、鑄型のよ

電磁鑄造（EMC）の原理

図2



- ①連続鑄造の鑄型の外側にコイルを巻き電流を流す（一次電流）。
- ②電流が磁場をつくり、次にその磁場を消すために、鑄造物の中に電流が逆向きに流れ（二次電流）、「電磁力」が生まれる。
- ③電磁力は内側に向かい、鑄造物を締めつけるような「ピンチ力」として働く。

り深いところから固まり始める。そのため凝固殻への溶鋼のオーバーフローもなく、かつ casting 物と casting 型の隙間が広がることによって、オシレーションによる圧力変動も小さいのでオシレーションマークが生じない。また、溶鋼静圧が十分働いたため凝固殻が浮き上がらず、縦割れなどの欠陥も生じない（図3／右図）。

技術開発のポイント、巨大なコイルで均一な電磁力を生み出すことにある。小断面であれば比較的容易だが、スラブのような大きな鋼片に、均一な電磁力をかけるのは至難の技だ。単純に巻くだけでは不均一になるため、必要な磁場を必要な箇所にかけるコイルデザインが重要になる。高度な電磁場解析と流動解析によって初めて可能になる夢の技術だ。（なお、本研究はJRCMが経済産業省の補助金を受けて実施した「エネルギー使用合理化金属製造プロセス開発『電磁気力プロジェクト』」の成果である。）

新たな挑戦 ～溶鋼段階で製品をつくり込む

今後、製鋼技術が目指すものは何か。その一つに、現在在在物の影響を取り除くために使っている脱酸技術を、鋼材の品質向上に活かしていくことが挙げられる。

精錬と連続 casting の役割は、鋼の成分を整えて、在在物の悪影響をなくしておくことにあった。つまり連続 casting 後の「均熱処理」（鋼全体の温度を均一にし、鋼中の成分を安定化するプロセス）で溶けるものは制御し、そこで溶けない在在物の影響を事前に取り除くことにあった。

材質のつくり込みは、この均熱処理から始まった。成分が一定に鋼中に溶け込むように約1,250℃で熱処理（溶体化熱処理）し、その後、温度をコントロールしながら、析出や組織を制御する加工熱処理を行い、鋼の性質をつくり込んでいく。

しかし、熱処理の段階では、すでに連続 casting 時に固まった酸化物により、鋼材としての「素性」が決まっている。将来的には、精錬での溶鋼の脱酸によって生まれる生成物を考慮しながら、材質をつくり込んでいくことが一つの方向性として考えられる。すでに材質のつくり込みでは、酸化物を利用した「オキサイドメタラジー」が提案されている。

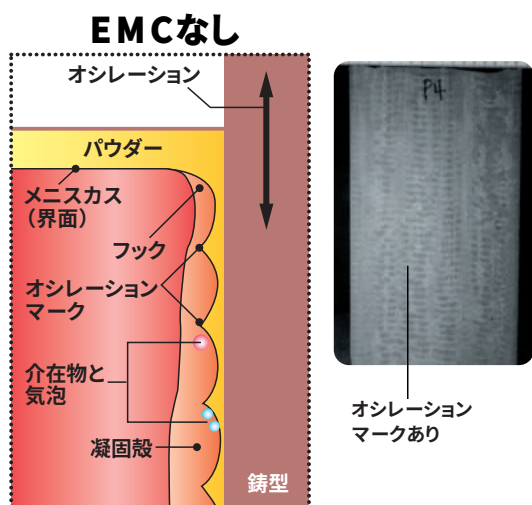
例えば、溶鋼の状態で作成する酸化物（析出物）の量と大きさおよび組成を変えることで、粘りと強さを持った厚板製品など、材質のつくり分けが可能だ。また、加工性に優れた薄板製品の材質創造も可能になるなど、生み出される鋼材のバリエーションはさらに広がる。加工熱処理プロセス以降、徐々に狙った材質をつくり込んでいくのではなく、溶けた鋼の状態から最終製品を見通すことが重要だ。

その際にも高度な解析技術としての分析技術は不可欠だ。例えば、極低炭素鋼（IF鋼）では炭素および窒素をチタン化合物にして固定するが、固溶チタンと酸化チタンでは機能が異なる。酸化チタンでは炭素や窒素を固定できないため、例えチタンの全体量を制御していても、目的とする材質は得られない。現在では「カントバック法（アーク放電を利用した解析技術）」を進展させ、固溶チタンと酸化チタンを分離して分析し、不足するチタンを添加することも可能になっている。

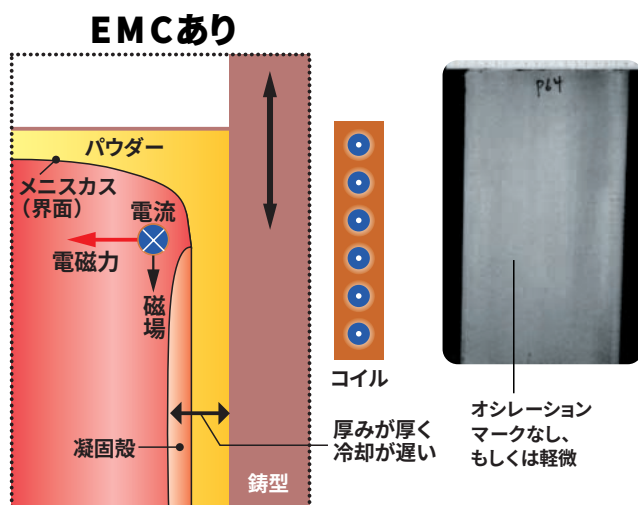
また、酸化物と窒化物、炭化物の関係など非常に細かい化学分析を、解像度の高い電子顕微鏡（EELS：エレクトロン・エネルギーロス・スペクトロスコピー）で行っている。EELSは、元素によって異なる入射電子のエネルギー変化を捉え、特定の元素に対応したエネルギーのところだけをフィルターに通して実像化する解析技術だ。

今後も予測の範囲を超えて、真実に迫る解析技術が着実に進化し、製鋼技術の可能性をさらに広げていこう。

電磁 casting (EMC) の効果



従来、極低炭素鋼など高純度で融点が高い鋼材の casting では、温度が下がりやすい溶鋼表面が早く固まり、表面欠陥の原因になっていた。



EMC では、緩やかに冷却することで凝固速度が遅くなり、 casting のより深いところから固まり始めるため、表面欠陥や縦割れ欠陥が生じにくい。

図3

鋼の魅力はシンプルさと奥深さ

新日本製鉄(株) フェロー 松宮 徹 (まつみや とおる)

精錬工程で、今後、特に重要となるテーマは「環境対応」で、二酸化炭素やスラグの排出量の削減が求められます。二酸化炭素の削減では、炭素量がもともと少ないスクラップの利用技術が有望ですが、例えばスクラップ中に含まれているトランプエレメント（Cu、Snなどの不要な成分元素）の無害化を達成するなどの新技術の確立も必要です。一方、スラグ量の削減については、効率的に脱磷でき、酸化カルシウムの原単位を下げる新たなスラグ開発と、排出されるスラグの高付加価値化が重要です。

また、連続 casting では casting 速度の高速化とともに、割れや介在物性欠陥のない鑄片を作り、凝固時の脱酸生成物や硫化物を制御して、品質のつくり込みに貢献することが重要なテーマです。その大きなターゲットは、エコ・プロダクツなどの高付加価値鋼材であり、それには3つの方向性があります。1つ目は鉛などの環境規制をクリアする材料。2つ目は高強度化による軽量化、耐食性向上による長寿命化などによって、より少ない材料でありながら同じ機能を果たせる鋼材。そして3つ目は、社会で使われて省エネルギーに貢献する材料です。自動車の軽量化を実現することにより、燃費を良くする高張力鋼、トランスやモーターのエネルギー損失を下げる高性能電磁鋼板、高い動作温度を実現して熱機関の効率を上げる耐熱鋼など、いわゆるお客様のエコ製品開発に貢献する鋼材です（図4）。

鋼の可能性は無限です。特別な合金を加えない鉄の温度

制御だけで、多様な材質を变幻自在に生み出すことができます。例えば、溶鋼から直接薄板鑄片をつくるストリップキャスティングの強みは、溶鋼からの急激な冷却で、細かい組織ができ飛躍的に表面がきれいになることです。

現在、国家プロジェクトとして「スーパーメタル」「新世紀構造用材料」の開発が進められています。その開発は、特別な合金を使わず単純な成分で寿命と強度を倍にすることを目的としています。単純な成分であればリサイクルも容易です。現在は強加工と急冷却によって鋼材の組織を超微細粒化して強度向上を図る、どちらかというプロセス・ハードに負担をかける技術の研究開発が行われていますが、今後、例えば酸化物の活用など、ソフト技術だけで細粒化が実現できれば革新的です。

鋼の魅力は、そのシンプルさと奥深さにあります。鋼材の性質を大きく左右するバリエーションの多いベースとなる鋼の母相（析出物以外のもの）、および炭化物、酸化物、硫化物などの量、サイズ、分布が、各温度でどのように変化するかを、平衡計算などにより理論的に予測する手立てはあります。しかし、実際の現象は非平衡的に進み、その定量的な把握は非常に難しいものです。大学の研究では細かい鉄炭化物（セメントタイト）を利用するだけで、飛躍的に伸びが大きく曲げやすい鋼材も開発されています。

微妙な温度変化などで鋼の母相は変わり、多様な析出物が生まれて性質が変わります。まさに柔軟な発想と的確な判断を必要としますが、逆に言えば、成分は一定であっても温度履歴、加工履歴で材料組織としての豊富なバリエーションを生み出すことができるのです。そのうえに成分系、さらには脱酸条件を変えれば、バリエーションはその掛け算になります。

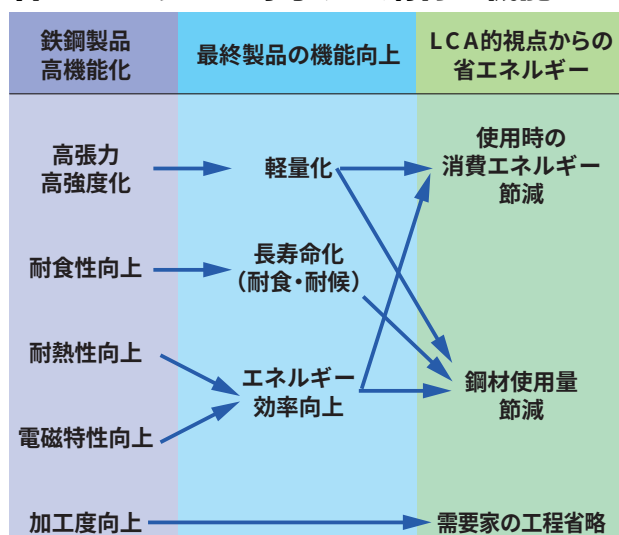
これほどのバリエーションは、他の素材が及ばない性質です。今後も、鋼の無限の可能性を探索し続けていきたいと思っています。



プロフィール

1949年生まれ、京都府出身。
1973年入社。2001年よりフェロー。
1980年：日本塑性加工学会 会田技術奨励賞
1985年：日本鉄鋼協会 依論文賞
1991年：日本金属学会 功績賞（金属加工部門）
1999年：(社)日本鉄鋼協会 西山記念賞
2002年：文部科学大臣賞 研究功績者表彰

省エネルギーに寄与する鋼材の機能 図4



出所：(社)日本鉄鋼連盟「LCA的視点からみた鉄鋼製品利用のエネルギー評価」(要約版)、1997年3月

新日鉄は、世界最高レベルのエネルギー効率と低環境負荷の製造工程で、リサイクル性に優れた「エコプロダクツ」を生産。省エネルギー、省資源、有害物質フリーなど、製品の製造から廃棄にいたる全工程（＝ライフサイクル）における環境負荷低減に取り組んでいる。