

最近の鋳造技術

Recent Casting Technologies for Aluminum

並河 良徳

Yoshinori Nabika

概要 アルミニウムの製造工程の1つである鋳造について、展伸材用途における最近の技術を紹介する。溶解した金属を凝固させる際に生ずる問題、例えば湯漏れや鋳塊割れを解決する手法や設備がさまざまに提案されてきたが、近年、そのメカニズムについて、再度解明が試みられている。一方で、従来は展伸材の製造工程の素材の位置付けであった鋳塊に対して、より良好な品質が求められてきており、表皮近傍の組織改善技術に加えて、内部品質改善の技術開発が求められている。薄板水平連続鋳造法についても、その製品特性向上のために、技術改善の努力がなされている。

Abstract : Casting is one of the manufacturing processes for aluminum materials. The author introduces the recent casting technologies concerned with aluminum sheets, plates, pipes and bars. To solve the problems of casting ingots, for example, breaking of shell and cracking of ingot, various ways and equipment have been suggested, and the efforts for analyzing accurately the mechanism of casting troubles have been proposed in recent several years. On the other hand, ingots were no more than the material for rolling in the past, but today, they are required of better quality. So, it is necessary to develop the technologies for improving the quality of not only surface grains but also inner grains. Efforts are also continuing to improve the technologies of horizontal continuous casting of sheets.

1. はじめに

アルミニウムは実用に供されてから、100年余りのまだ若い金属であるが、その製造工程の1つである鋳造は、製品品質に与える影響が大きく、各種の技術開発が重ねられてきている。展伸材用途での鋳造工程は、堅型半連続鋳造法 (direct chill casting, DC 鋳造法) を基本として、品質向上や製造コスト低減を目指した各種の技術改善が近年も継続して行われている。さらには、熱間圧延工程省略による製造コスト低減を主眼とした薄板水平連続鋳造法 (continuous casting, CC 鋳造法) も世界的に普及してきている。一方で、製品に直結する鋳物分野では、砂型、重力鋳造から各種ダイカスト法への転換が行われている。

本稿では、展伸材用途における鋳造工程の重要性と技術課題および最近の鋳造技術の改良技術について解説する。

ここでは製造工程、内部品質に関わる技術、複合鋳塊および薄板連続鋳造の順で紹介する。

なお、本稿では鋳物、ダイカストなどの新技術については触れないが、詳しい解説¹⁾があるので、そちらを参照されたい。

2. DC 鋳造法について

DC 鋳造法の概略を図1²⁾に示す。スパウトを通して注がれた溶湯は、ボトムブロックと、水冷されたモールドの壁、およびインゴット (鋳塊) の外周部に直接吐出される冷却水で熱を奪われ、凝固し、鋳塊として下方に引き出される。本方法では、必要長さを製造した時点で鋳造完了とするが、一般的にはいくつかのモールドを並べ、複数本の鋳塊を同時に鋳造する。DC 鋳造法は、圧延に供される直方体のスラブや、押出用途の円筒形のビレットなどの鋳塊の製造に用いるが、昨今の熱間圧延機

の大型化から、スラブにおいては20 ton以上、幅2 m以上、厚さ600 mm以上といった大型鑄塊も製造されるようになってきた。一方で、製品要求に応じたさまざまなサイズの鑄型を多数持ち、これらを交換する煩雑さを解消すべく、複数の幅サイズの鑄塊を1台で製造可能とする、**図2**のような幅可変鑄型が普及している。このように、DC鑄造法は、形状やサイズを選択幅が広く、複数本同時に製造できるメリットから、広く普及している技術である。

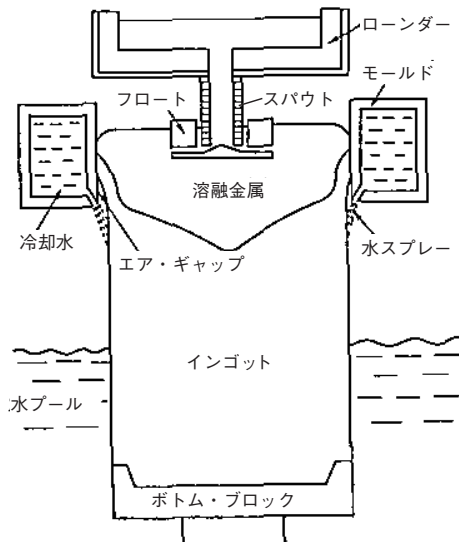


図1 DC鑄造の概略図
Fig.1 Illustration of direct chill casting process.

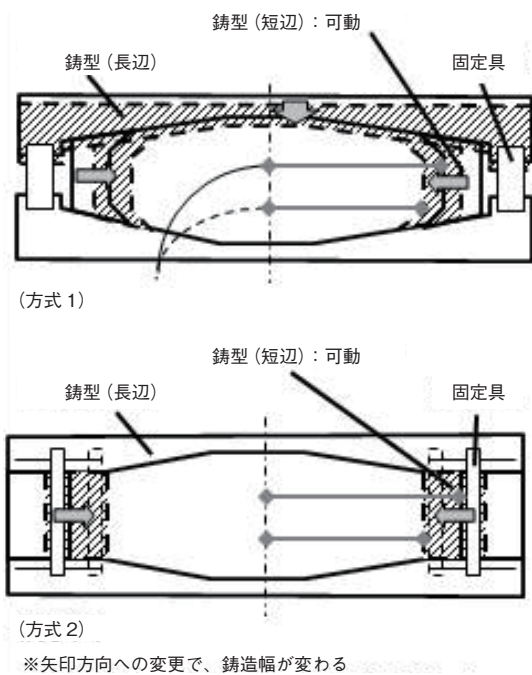


図2 幅可変鑄型模式図
Fig.2 Illustration of variable width mold.

しかし、DC鑄造法にも、製造時の凝固に伴う湯漏れ、凝固時の割れといった工程上の課題があり、完全な解決には至っていない。また、製造された鑄塊の内部品質についても、過去の単純な鑄込み法に比べれば、介在物の巻込みや巣穴の生成の点で優れるものの、表層付近の不均一組織、鑄塊内外部凝固速度差による若干の組織差、晶出物サイズのなど課題がある。しかし、これら課題への対策努力は現在も継続されており、次にその内容を解説する。

3. 鑄塊製造時の課題解決技術

3.1 湯漏れ対策

湯漏れは鑄造の初期に、溶湯を凝固させ、徐々に鑄造速度を上げていく中で、特にボトムブロックが鑄型を抜ける際に生じやすい。湯漏れは、凝固に必要な冷却能力が単純に不足している場合は、それを補えばよいが、スラブのような縦横同一寸法でない場合には、熱応力で変形が生じ、短辺側が反り上がって、該当部から溶湯が漏れ、対応が難しい。本現象は鑄塊サイズにも当然関連する。各種鑄造条件改善で基本対応するが、鑄型構造が設計で決められたサイズのホールやスリットを通して、冷却水を吐出する構造である以上、極端な冷却水量減少による熱応力緩和で、この反り上がりおよび湯漏れを防止することは困難である。そこで、初期の冷却のみを緩和できる各種の設備改善が実用化されてきた。

具体的な技術としては、**図3**³⁾に示すような、冷却水を間欠的に吐出するパルス冷却、CO₂を冷却水に混在させるCO₂プロセス、空気を混在させるエアターボ法などが挙げられる。また、ボトムブロックの形状も重要であり、各社での経験的改善に加え、鑄塊底部の凝固殻を十分に発達させる検討もなされている⁴⁾。

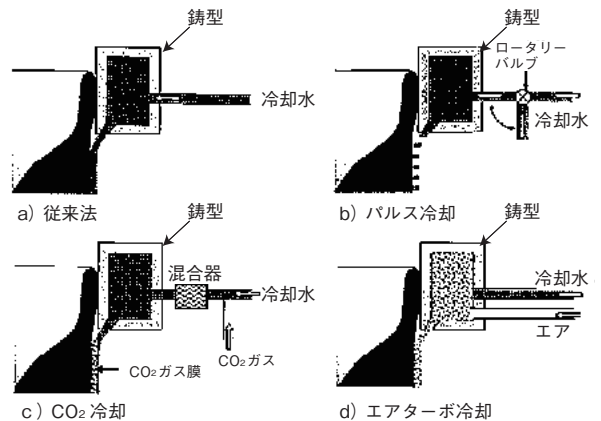


図3 各種冷却システム
Fig.3 Various systems cooling.

3.2 鑄塊割れ発生防止

鑄塊割れは、材料特性を満足させるために添加される合金元素による凝固温度範囲拡大が、鑄塊内外の温度勾配と絡み、熱応力によって割れが生じるものとされている。2000系や7000系合金の冷間割れが著名であるが、3000系や6000系合金鑄塊で生ずる熱間割れも問題である。鑄塊割れ防止技術として、各種鑄造条件適正化や結晶粒微細化材添加による母相強度向上が適用されるが、制御因子が多いこともあり、割れはかならずしも皆無になっていない。割れは一旦生じると鑄造途中で停止することはまずなく、大型鑄塊1本全量の損失となるため、製造費用増加やエネルギー損失はもとより、昨今重視される必要量のみの生産計画に与える影響が大きい。一般的に対策検討はかなり過去の事項となるが、直近でもその重要性から、基礎的な各種合金の固液共存域での割れ感受性評価⁵⁾や破断挙動調査⁶⁾が行われるとともに、スラブのDC鑄造における温度域や破面形態を具体的に踏まえつつ、表面割れ感受性を指標で示す研究が報告されている⁷⁾。また、表面割れ発生の要因の1つとして、鑄型と凝固時の鑄塊表面の潤滑性悪化による表面欠陥も挙げられる。こちらについても経験則に基づくだけでなく、最近理論的説明がなされている⁸⁾。

4. 鑄塊の内部品質改善技術

4.1 鑄塊表層付近の組織の改善

鑄塊製造工程での課題に引き続き、鑄塊の内部品質のうち、表層付近の不均一組織について言及する。もともと熱間加工時の表面が製品表面になるために、DC鑄造時の鑄型からの冷却で生ずる表層付近の偏析層や粗大セル層などの部分を面削し除去することが、展伸材では基本工程となっている。上記層は、凝固殻が収縮で鑄型から離れることにより生ずるエアギャップに影響されて発生している。そのため、エアギャップの低減や、一次冷却の緩和に種々改善の取り組みがなされてきた。エアギャップを低減させるには、一定になるように制御された湯面の位置を下げ、精度良く保持することが、有効である。そのため、湯面位置が精度良く制御できるように、元来の湯面にフロートを浮かべる方式や、フロートの位置検出により注湯ストップ位置を調整する方式から、湯面位置をレーザで検出する方法へと、制御方式が変わりつつある。さらに、安全性や効果の拡大を配慮した各種技術が開発されている。例えばピレット鑄造では、**図4**に示すようなhot top鑄造法が代表的な技術である⁹⁾。この方法では、鑄型上部に断熱材を設置し、断熱材の位置まで溶湯を満たすため、鑄型と溶湯の接触位置の一定化および一次冷却域の短縮化を図ることができ、面

削量の低減に寄与する。さらに、鑄型と溶湯の間に潤滑油とともにエアーを導入することによりさらなる緩冷却を実現し、不均質層の生成をほぼ抑制する、気体加圧hot top鑄造法も実用化されている(**図5**¹⁰⁾)。

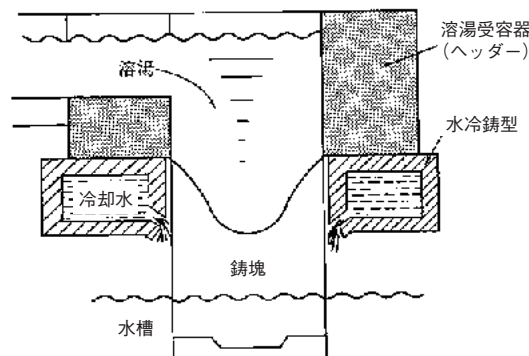


図4 hot top鑄造法の概念図
Fig.4 Illustration of hot top casting process.

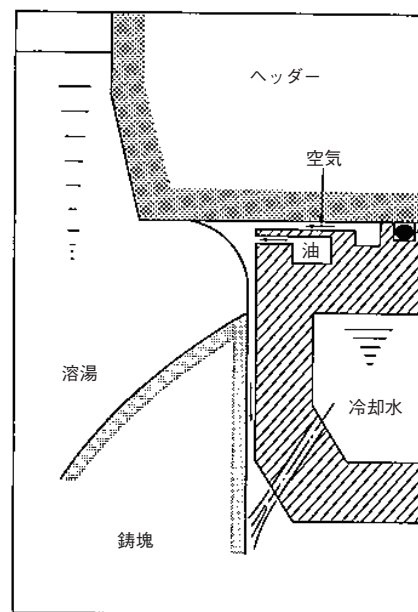


図5 気体加圧hot top鑄造法 (Showa process)
Fig.5 Illustration of gas-pressurized hot top continuous casting process.

一方、スラブ鑄造では、hot top鑄造法は普及していない。理由の1つとして、断面が矩形であるため、溶湯の流れの適正化を阻害している点が挙げられる。一次冷却緩和の手段として、過去には**図6**¹¹⁾に示す電磁場鑄造(EMC)が開発された。

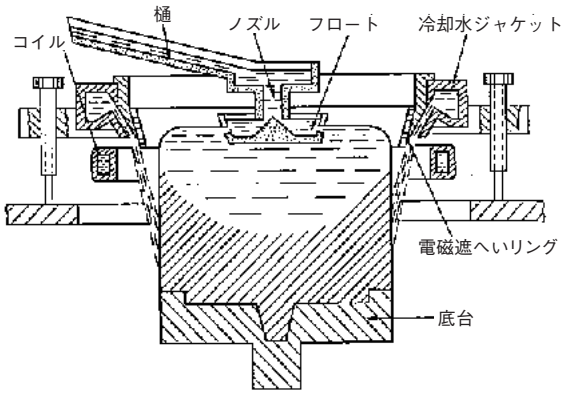


図6 電磁鑄造の概念図
Fig.6 Illustration of EMC.

これは、従来の鑄型に代わり、電磁力で溶湯を保持するため、一次冷却がなく、表層部の不均質組織がほとんど発生しないものである。しかし、本設備は、湯面変動で鑄塊形状が変化する点や、設備使用時の製造コスト上昇が大きいこと、鑄塊サイズや取得本数への制約が生ずることなどがあり、普及に至らなかった。

海外ではこの点を改善する手段として、新しい鑄型 (low head composite mold : 低ヘッド複合材鑄型) が実用化されている。本鑄型は図7¹²⁾に示すように、内面に高潤滑で低熱伝導のグラファイトがライニングされており、鑄型-鑄塊間の潤滑油量の削減と、一次冷却の緩和が可能になっており、表層部の品質改善を果している。さらに、本鑄型は、鑄塊直接冷却(二次冷却)が二系統になっており、定常時には二系統の冷却の両方が使用されることから強い冷却が実現されて、高速鑄造に対応することが可能となっているが、初期鑄造で緩冷却が必要な場合には、低角度で当たる冷却水のみが少量吐出される構造となっている。本設備は、海外で普及しつつある。

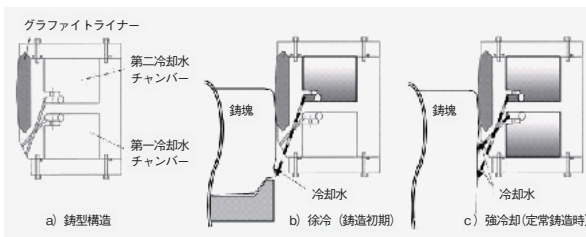


図7 低ヘッド複合材鑄型の概略図¹²⁾
Fig.7 Illustration of low head composite mold.

4.2 鑄塊内部・表層部での組織差異の改善

最近では、鑄塊内部・表層部の凝固速度差による若干の組織差も、課題として取上げられるようになってきている。

鑄塊内部では、アルミニウムの熱伝導率との関係から、冷却速度が低下しやすく、表層部に比べて粒径の粗大化などが発生しやすい。しかし、これまで各種熱間展伸加工用の素材としての位置づけであった鑄塊が、液晶製造装置の部材や大型導電材料として、展伸加工をすることなく従来の厚板製品を補完する形で用いられるようになってきており、鑄塊組織などへの要求品質レベルの向上および技術改善が求められている。また、鑄塊割れの発生しやすい7000系合金などでも、組織の均一化による割れ防止の実現が求められている。現時点では鑄塊の肉厚、鑄造速度などを主とした製造条件の適正化、微細化材の添加などで、品質の向上が図られているが、具体的な発生機構の解明や凝固過程のシミュレーションによる調査をもとにした根本的な解決策の提案が求められている。

これらの研究の一例として、電磁鑄造法の見直しが行われている。従来の電磁鑄造法は表層部を対象にした高周波帯を用いたものであった。しかし、1980年代に開発された低周波を用いたCREM法¹³⁾をベースに、内部組織や成分偏析を電磁力による攪拌効果で改善する試みが、現在、成長著しい中国¹⁴⁾あるいは日本¹⁵⁾で検討されている。電磁鑄造技術は鉄鋼業界において適用がかなり進んでおり¹⁶⁾、アルミニウムにおいて本技術適用が今後進む可能性がある。また、詳細技術は公表されていないが、鑄塊内のマイクロ組織のばらつきを均一微細化する鑄造技術を開発したとの発表がなされている¹⁷⁾。

4.3 晶出物の微細化

鑄造時に生じる晶出物の微細化も要求されている。これはMn, Cr, Zrなどの遷移金属添加時に高融点金属間化合物の生成により生ずる、100 μmを超えるようなサイズの巨大晶出物(成分や鑄造条件規制で対応可能)と異なり、製品要求レベルの向上に伴って、これまでのDC鑄造での冷却速度範囲で生ずる数μmのサイズの晶出物までもが問題視されるようになってきたことによる。例えば、磁気ディスク用アルミニウム合金基板では、製品欠陥抑止に必要として不純物であるSiやFeの規制による晶出物サイズの抑制が実施されている¹⁸⁾。また、過共晶Si組成における初晶Siサイズの低減策として、超音波を付与する鑄造法の開発が行われている¹⁹⁾。また、工業的には普及の前段階であるが、組織や晶出物の微細化に関し強磁場下での電磁振動力などを用いる方法も開発されている²⁰⁾。

鑄塊の品質レベルを向上させるために、上記のような新技術の実用化が期待される。

5. 複合鑄塊の製造法

展伸材の製造工程を大幅に合理化する目的で、Novelis社が複合インゴットのキャスト方法²¹⁾を開発している。これは、例えば図8に示すブレイジングシートの製造工程²²⁾に代表される、従来別々のDC鑄造塊(心材と皮材)を合せ熱間圧延で接合する工程を、1回の鑄造で製造するものである。図9²¹⁾に示すように、従来の鑄型の中に、冷却水を吐出しない鑄型を設置した形態をとっており、内部と外部に合金組成の異なる溶湯が流し込まれ、2合金の複合鑄造が一举に実施される。

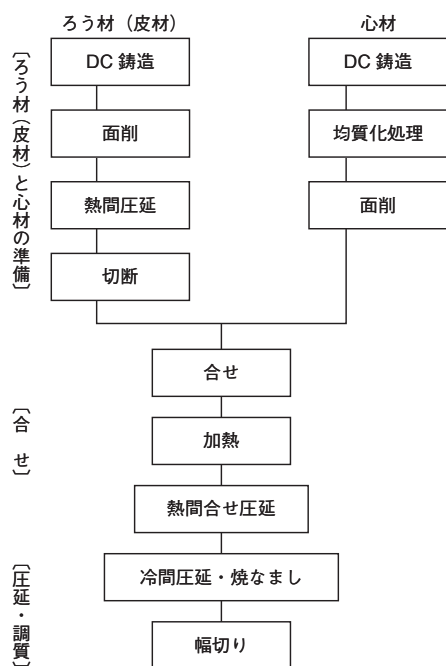


図8 ブレイジングシートの製造工程
Fig.8 Producing process for brazing sheets.

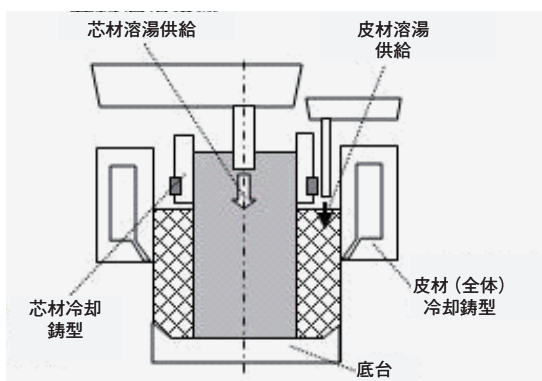


図9 複合インゴットのキャスト方法²¹⁾
Fig.9 Casting method for composite ingots.

本方法は発表されて間もないが、自動車材料への適用が報告されている。今後、各種合金のクラッド材を用いる熱交換器用材料や輸送機器用材料などへの適用が予想され、プロセスの革新として期待される。

6. 薄板水平連続鑄造法

鉛直方向へのDC鑄造以外の連続鑄造技術として、薄板水平連続鑄造法(CC鑄造)がある。水平方向へのDC鑄造自体は、鍛造用素材としての細径連鑄棒適用²³⁾以外、重力の影響を受けやすく、品質制御の困難さから普及しなかった。しかし、熱間圧延工程が省略できる双ロール、ベルトキャストやブロックキャストなどを用いた薄板連続鑄造法は、技術改善を経て、海外で広く実用化されている。双ロール式連続鑄造圧延法の一例を図10²⁴⁾に示すが、一對のロールの間に鑄造ノズルを通して、溶湯を供給し、ロールからの抜熱で薄板を直接鑄造する。最近では、鑄造板厚は数mmのレベルまで達している。本方式の詳しい解説は別稿²⁵⁾に譲るが、鑄塊がロール通過の際に若干の圧下を受け、積極的に潜熱が奪われるため、組織が微細化される。熱間圧延も省略できる本方式は、海外では普及している。国内では、設備投資費用以外に、表面品質が国内基準を満たすことが難しく、中心線偏析が顕著な点など課題があり、あまり普及しているとは言えない。課題の解決や、複合材鑄造法確立を狙う目的で、現在も研究が進められている^{26)~28)}。

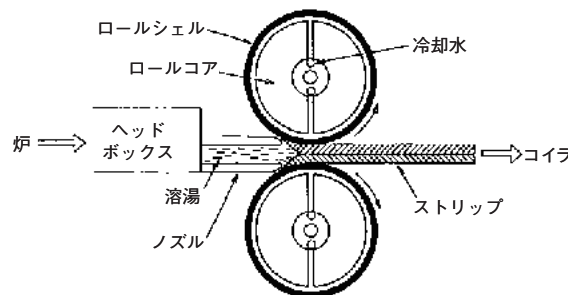


図10 双ロール式連続鑄造圧延法
Fig.10 Illustration of twin roll casting process.

7. おわりに

以上、DC鑄造法を中心に、最近のアルミニウム鑄造技術について、より高度化する技術課題に対して、さまざまな改善がなされてきたことを紹介した。特に、直近の技術動向としては、従来製造工程で発生していた問題のメカニズムを、より明確化しようとする取り組みと、製品品質のさらなる向上に対応した鑄造技術のレベルアッ

プを図る研究の2系統が有ると理解できる。また、CC鑄造法についても、まだ発展の余地があり、改善がなされていくものと思われる。アルミニウム製品自体の適用範囲の広がりに伴い、さらに高い品質要求が予想されるが、それに先行あるいは対応する形で、今後も新しい鑄造技術が生み出されていくと考える。

参考文献

- 1) 水野慎也：新しい鑄造凝固プロセス，軽金属，**47**（1997），580.
- 2) 松尾守：アルミニウムの連続鑄造，軽金属，**44**（1994），510.
- 3) 渡辺良夫：展伸用アルミニウム合金の連続鑄造，軽金属，**58**（2008.5），221.
- 4) M.Tsunekawa, N.Hayashi and T.Uno：Effect of casting conditions on the butt shape of DC aluminium slab，住友軽金属技報，**37**（1996），50.
- 5) 松原和男，大瀧光弘，高橋功一：Al-Mg-X多元系合金の鑄造割れ性に及ぼす添加元素の影響，軽金属学会第115回秋季大会講演概要（2008），247.
- 6) 坂口直人，常川雅功，渡辺良夫：アルミニウム合金の固液共存域での破断挙動，軽金属学会第116回春季大会講演概要（2009），261.
- 7) 森下誠，阿部光宏，徳田健二，吉田誠：DC鑄造におけるAl-Mn系およびAl-Mg系アルミニウム合金の割れ感受性予測法，軽金属，**59**（2009），417.
- 8) 永倉豊，徳田健二：Al-Mg系合金DC鑄塊の表面性状に及ぼす鑄造用潤滑油の影響，軽金属学会第117回秋季大会講演概要（2009），133.
- 9) 松尾守：アルミニウムの連続鑄造，軽金属，**44**（1994），516.
- 10) 松尾守：アルミニウムの連続鑄造，軽金属，**44**（1994），517.
- 11) 松尾守：アルミニウムの連続鑄造，軽金属，**44**（1994），518.
- 12) A.I.Nasbaum：Alcan Oswego Revolutionizes Ingot Casting，Light Metal Age，**53-1**（1995），58.
- 13) Ch.Vives：Electromagnetic refining of aluminum alloys by the CREM process，Metallurgical transactions B **20B**（1989），623.
- 14) Zhang B J, Cui J Z and Lu Z M：Effect of electromagnetics frequency on microstructures of continuous casting aluminum alloys [J]，Journal of materials science and technology，**18(5)**（2002），1.
- 15) 長海博文，鷺坂栄吉，吉川勝，堀雄一：低周波電磁攪拌による7000系合金の組織微細化効果，軽金属学会第116回春季大会講演概要（2009），265.
- 16) 梶谷敏之，山田亘，山村英明，若生昌光：鋼の連続鑄造における鑄型内潤滑と初期凝固制御，鉄と鋼，**9**（2008），189.
- 17) 三菱樹脂株式会社新聞発表記事，2009.8.5
- 18) 加藤良則，梅田秀俊，星野晃三：高容量磁気ディスク用アルミニウム合金基板，神戸製鋼技報，**55**（2005）.
- 19) 石渡保生，織田和宏，コマロフセルゲイ：DCプロセスにおける超音波処理による組織微細化，軽金属学会第115回秋季大会講演概要（2008），251.
- 20) 三輪謙治，西尾敏幸：金属組織微細化法，特許第3007947号，登録日1999.12.3
- 21) Robert B.Wagstaff, D.J.Lloyd and Todd F.Bishoff：Direct chill casting of clad ingot，Materials science forum vols.519-521（2006），1809.
- 22) 川瀬寛：熱交換器用ブレージングシート，アルミニウムの製品と製造技術，（2001），187.
- 23) 柳本茂：鍛造用細径棒の連続鑄造，軽金属，**47**（1997），605.
- 24) 渡辺良夫：展伸用アルミニウム合金の連続鑄造，軽金属，**58**（2008），222.
- 25) 芳賀俊雄：アルミニウム合金用双ロールキャスト，軽金属，**59**（2009），509.
- 26) 藤原高礎，堀康治，新井悦行，下坂大輔，熊井真次：縦型高速双ロールキャストしたAl-Si合金の板厚と凝固組織に及ぼすSi組成の影響，軽金属学会第115回秋季大会講演概要（2008），227.
- 27) 芳賀俊雄，中村亮司：縦型タンデム双ロールキャストによるアルミニウム合金クラッド材の作製，軽金属学会第116回春季大会講演概要（2009），263.
- 28) 岸野聡一郎，稲垣雄哉，渡辺将太，小川平，西田進一，本村貢：メルトドラッグ法を応用した急冷凝固Al-Cuハイブリッド線材の作製とその特性，軽金属学会第115回秋季大会講演概要（2008），235.



並河 良徳（Yoshinori Nabika）
技術研究所