

マルチフィジカルモデルによる電磁プロセスソリューション

Multi Physical Model Application to Process Solution in Electromagnetic Field Technique

藤崎 敬介^{*(1)} 平山 隆^{*(2)} 和嶋 潔^{*(2)}
 Keisuke FUJISAKI Ryu HIRAYAMA Kiyoshi WAJIMA

抄 録

現実のプロセスは、複数の物理現象がからみあっているため、それぞれの物理現象の連成を数値解析上にて表現するマルチフィジカルモデルを開発した。本マルチフィジカルモデルは、電磁場、流体場、伝熱、凝固、品質、プロセス制御を連成したもので、現場の実現象を定性的に、定量的に表現しており、鑄造、プラズマ加熱、マイクロ波加熱、カラーコーティングライン、湯面レベル制御等の技術課題に的確に解決してくれるプロセスソリューションツールである。

Abstract

Since the practical on-line process in steel making plant consists of a kind of the combined multi-physical phenomena, multi-physical model taken into account of each physical phenomenon as a numerical calculation model is developed. The multi-physical model taken into account of electromagnetic field, fluid dynamics, heat transfer, solidification, steel quality and process control expresses the practical on-line process phenomena qualitatively and/or quantitatively. It is a useful process solution tool to solve such technical problems as casting, plasma heating, microwave heating, color coating line and free surface level control system.

1. 緒 言

最近の国内外の大きな環境の変化に伴い、鉄鋼プロセス開発も更なる品質向上とコスト切り下げが要求され、そのための新しいシーズ技術として、電磁場利用技術がこれまでになく脚光を浴びている¹⁾。電磁場を鉄鋼プロセスに応用する場合、単に、電磁コイルを配置しただけでは、電磁場の発散、現象の複雑さのために当初の特性が出ない場合が多い。また、電磁場技術が適用される鉄鋼プロセスも複雑な現象からなるため、両者を深く俯瞰して適用することが大切である。

現実の鉄鋼プロセスは、流動、熱、制御等の複雑な物理モデル、システムから構成され、それらが互いに関連しあっているために、単にひとつの物理モデルだけで全体を把握することは難しい。一方、最近のITを初めとした数値解析技術は目覚ましいものがあり、複数の物理モデルを連成解析することが可能な条件下にある。

本文では、電磁場解析技術を中心として、現実の鉄鋼プロセスの物理現象をできるだけ反映させたマルチフィジカルモデル²⁾と、その技術を用いて現実の鉄鋼プロセスにおける種々の技術課題を解決する電磁プロセスソリューションについて、いくつかの事例を紹介することにする。

2. マルチフィジカルモデル

図1に電磁場を中心としたマルチフィジカルモデルの構成図を示す。電磁場、流体場、伝熱、プロセス制御等の各ブロックは、それぞれ独立した物理モデルであり、有限要素法、差分法等の数値解析手法でコーディングされている。

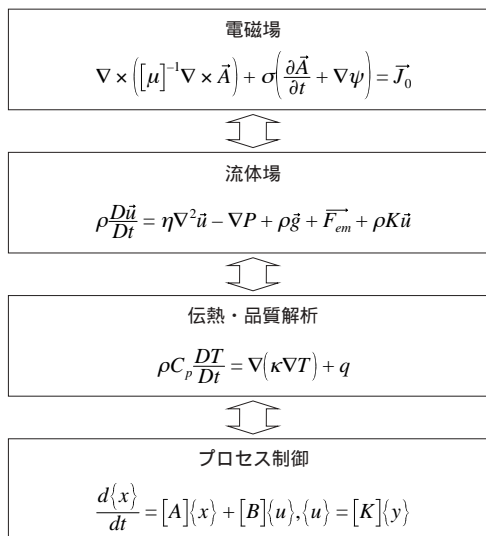


図1 電磁場を中心としたマルチフィジカルモデル

^{*(1)} 環境・プロセス研究開発センター 計測・制御研究開発部 主幹研究員 工博
 千葉県富津市新富20-1 〒293-8511 TEL(0439)80-2460

^{*(2)} 環境・プロセス研究開発センター 計測・制御研究開発部 主任研究員

マルチフィジカルモデルでは、解析対象の特性を十分に考察し、対象物に応じて各物理モデル間の相互作用をモデル化して解析することが、実用上極めて重要である。たとえば、自由表面を考慮した流体と電磁場との連成解析の場合、電磁力によって変動した流動によって自由表面が変形する。それは電磁場から見ると境界条件が変更したことになるため、厳密に、時々刻々の自由表面形状に対応した電磁場分布を大規模数値解析で評価しようとする、多大な計算時間が掛かる。従って、効率良く数値計算する場合、何らかのモデル化が必要であり、ここではRの射影法によってモデル化している³⁾。また、連続鋳造機における電磁攪拌装置のような磁場の移動速度よりも溶鋼の流動が極めて遅い解析対象の場合には、電磁場における速度起電力の影響は無視することが可能であり、流体の荷重項に電磁力を付与するといった単純なモデル構成を採用している⁴⁾。

マルチフィジカルモデルによって、鉄鋼プロセスを支配する物理現象の場を直接評価し、更に溶鋼内の非金属介在物や割れ、偏析等の品質モデルと組み合わせることによって、品質を指標としたプロセス開発・設計ができるようになってきている。

3. 電磁プロセスソリューション

マルチフィジカルモデルは、現実の鉄鋼プロセスのある断面を如実に表現しているため、現場の種々の技術課題を解決してくれることがある。図2は、電磁場を中心としたマルチフィジカルモデルによる電磁プロセスソリューションを示したもので、現場で実際に困窮している操業問題、プロセス設計、プロセス研究開発等の技術課題に対し、このマルチフィジカルモデルによって、設備仕様提示、プロセスの可視化、知見の提示等のことを解決してくれる。以下に、本手法によって解析している事例をいくつか示す。

3.1 ビレット電磁軟接触鋳造技術⁵⁾

電磁軟接触鋳造(Electromagnetic Casting, 以下EMCと呼称する)は、連続鋳造の鋳型を取り囲むように配置したソレノイドコイルに交流電流を通電することによって、鋳型内初期凝固制御を行うもので、鋳片表面品質のより一層の改善、および鋳型・鋳片間の潤滑性安定を実現する技術として期待されている。

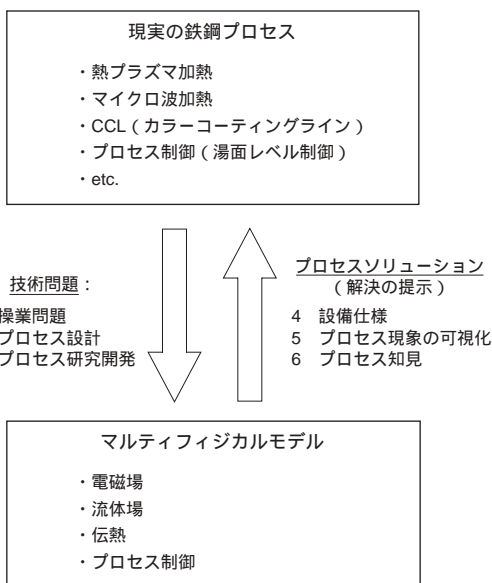


図2 電磁場を中心としたマルチフィジカルモデルによる電磁プロセスソリューション

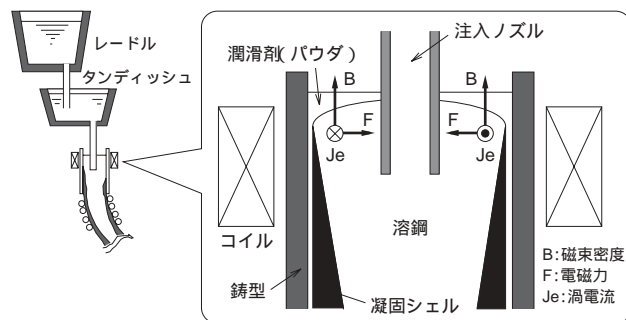


図3 電磁軟接触鋳造技術(EMC)の概念図

図3は、EMCの原理を示す概念図である。鋳型メニスカス部に設置した電磁コイルから発生した交流磁場が鋳型内溶鋼に作用し、誘起された渦電流と交流磁場の相互作用によってローレンツ力が生ずる。このローレンツ力は、ピンチ力として作用するため、溶鋼メニスカス形状が盛り上がり、凝固シェルと鋳型間のフラックスチャンネルが拡大する。その結果、フラックスチャンネル内に発生する鋳型振動起因の圧力変動を緩和して、鋳型内潤滑の安定化と鋳片表面性状改善が実現できる。

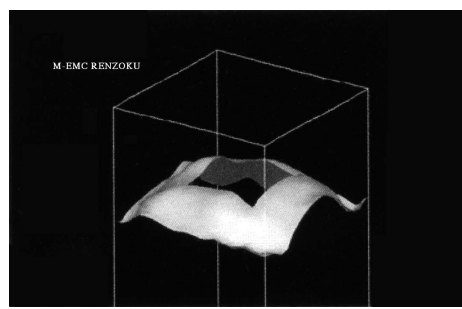
しかしながら、溶鋼メニスカスに印加する磁場が適切でない場合には、電磁力起因の過剰な流動が発生し、湯面不安定化、更にはパウダ捲込みを引き起こすことがあるため、良好な初期凝固制御を実現するには、電磁ピンチ力強度や印加パターンを適正化することが重要である。そこで、マルチフィジカルモデルによって、角ビレットEMC鋳造装置解析モデルの電流通電パターンを種々変更し、溶鋼メニスカスのダイナミック挙動を評価することで、迅速に適正条件を見出すこととした。なお、この解析は、財団法人 金属系材料研究開発センター(JRCM)が、通商産業省(当時)の補助金を受けて1995年度～2000年度に実施した国家プロジェクト“ エネルギー使用合理化金属製造プロセス ”の成果である。

各電磁力印加パターンにおける湯面形状を図4に示す。従来の連続電磁力印加の場合、電磁力誘起流れによってメニスカスが非対称に揺らぐなど不安定化している。一方、0.1秒の短周期でパルス電磁力を印加した場合、マクロに湯面が盛り上がった上にパルス周期の微小振動が重畳した状態となる。また、電磁力のオン・オフを滑らかに切り替え、台形状に強度が変化するパルス電磁力を印加した場合、湯面はパルス周期で規則的に盛り上がっている。このようにマルチフィジカルモデルによって見出されたパルス条件を用いて鋼のEMCオンライン鋳造テストを行い、表面性状が改善する結果が得られている。

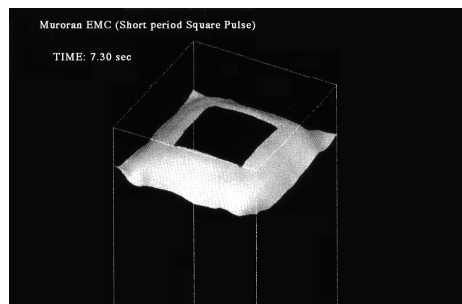
3.2 スラブ鋳型内溶鋼電磁攪拌技術⁶⁾

表面品質を向上させるために、鋳型内電磁攪拌装置(Electromagnetic Stirring, 以下EMSと呼称する)が実用化されており、優れた品質向上の結果をもたらしている。しかしながら、現場のハードウェア、ソフトウェア面での制約条件下でよりよい設計、操業を行うために、電磁場解析、流動解析、伝熱解析、品質解析を一貫して行うマルチフィジカルモデルが開発され、現実の課題を解決している。

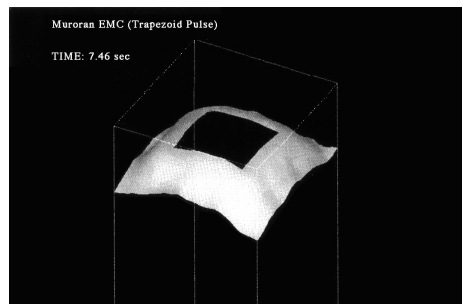
図5は、EMS印加時の磁束密度分布を、解析結果と測定結果とを比較したもので、電磁場解析にて実現象を定量的に把握していることがわかる。この技術を用いることで、高度な電磁コイルの設計を行うことができる。



(a)電磁力連続印加モード



(b)0.1秒周期パルスモード



(c)1秒周期台形パルスモード

図4 EMC各電磁力モードにおける湯面形状

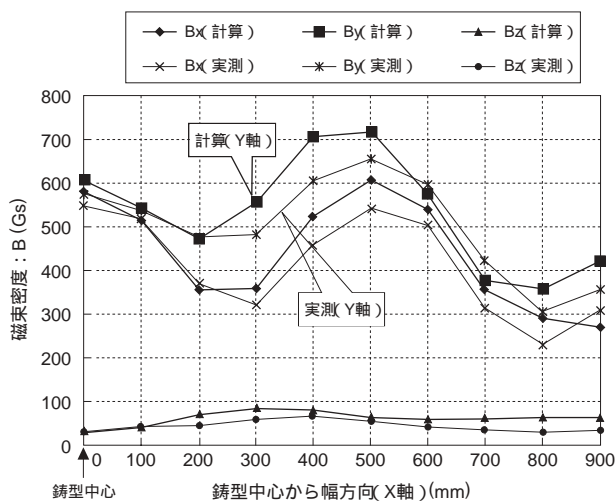


図5 スラブEMSの磁束密度分布の計算値と実測値

図6は、EMSを印加したときの流速値の解析結果と実測値を比較したもので、実測値と解析結果が等しい場合の実線を併記している。三角形のプロットと直線の比較により本マルチフィジカルモデルで、3割程度の精度にて実プロセスの流動を推定できることが言える。

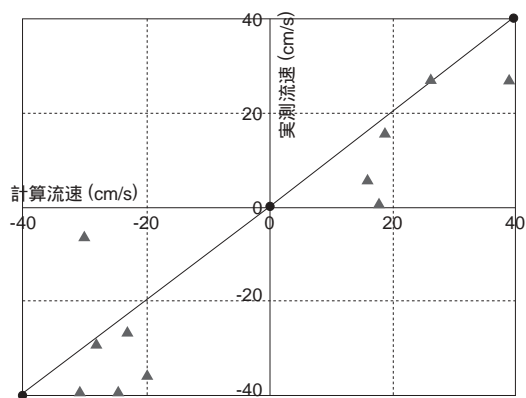
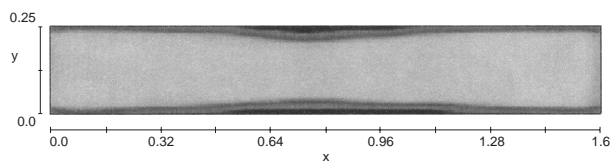
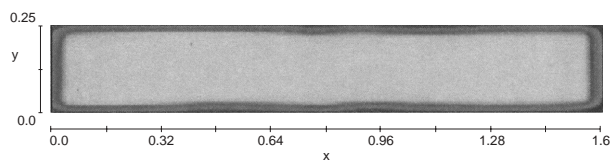


図6 スラブEMSの溶鋼流速の計算値と実測値



(a)EMS off



(b)EMS on

図7 EMS On/Offによる凝固シェル厚分布(計算値) (黒色が凝固シェル、白色が溶鋼)

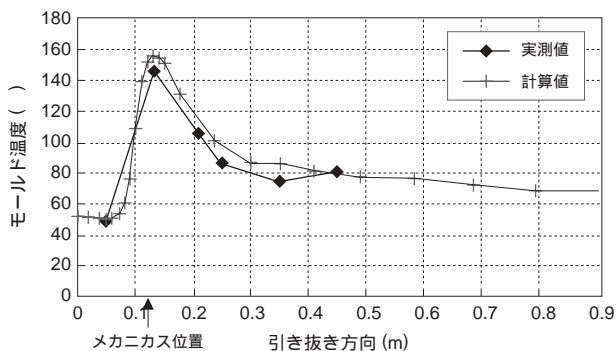


図8 モールド内温度分布の計算値と実測値

図7は溶鋼の凝固シェル分布、図8はモールド内温度分布を示したもので、それぞれ、本マルチフィジカルモデルで、実現象を定性的、定量的に表現していることがわかる。

つまり、本マルチフィジカルモデルは、最終目標である品質の面から、電磁コイル設計、プロセス設計、操業指針、現象解明を行うことができる有力なツールといえる。

3.3 熱プラズマ加熱技術

熱プラズマは、製鋼プロセスのタンディッシュにおける熱源供給として実用化されているが、その現象は十分に把握されていないため、数値解析による研究が行われている。図9は、三次元熱プラズマの電磁流体解析結果である。ここでは、プラズマトーチを温度によって密度、熱伝導、導電率等の物理定数が変化する導電体としてモデル化して、電磁場、流体場、伝熱の連成計算を行っている。

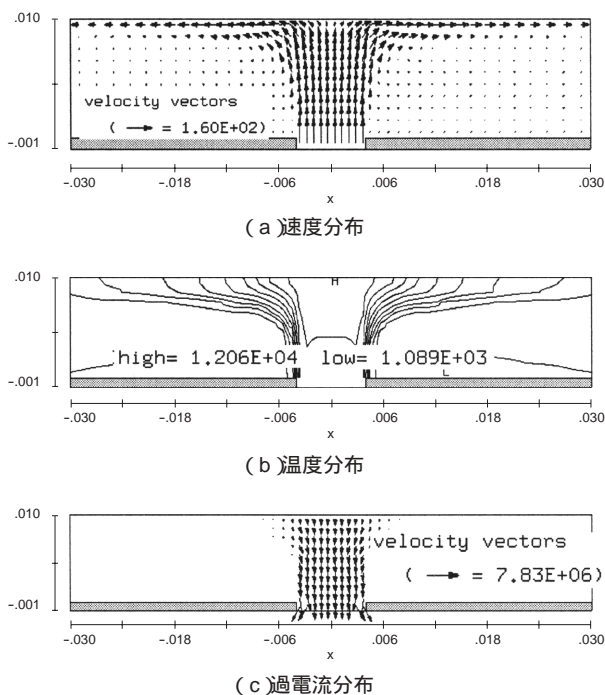


図9 三次元熱プラズマ加熱の電磁流体解析結果

これにより、現象、特性が明らかになり、効率のよい加熱方法が考案されている。

3.4 マイクロ波加熱⁹⁾

マイクロ波加熱は、不定形耐火物の乾燥技術として実用化されている。種々の形状、加熱条件に対して、導波管、アプリケーションの形状等の適切なプロセス設計を効率的に行うためには、電磁波解析およびその発熱分布に基づく伝熱計算が必要となる。電磁波解析は、渦電流場では無視した変位電流項を考慮する必要があり、また鉄鋼用の大形状でも計算できるように、差分によるFDTD法での解析を行っている。図10は、鍋内にマイクロ波を照射したときの電界分布を示しており、これにより耐火物の発熱状況が把握でき、効率よいプロセスを実現する照射方法が検討されている。

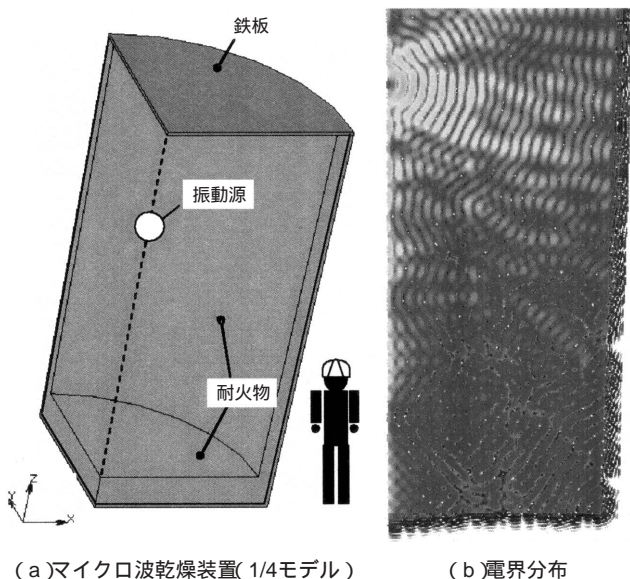


図10 マイクロ波乾燥プロセスの電磁波解析結果

3.5 カラーコーティングライン⁹⁾

カラーコーティングライン(CCL)は、薄い鋼板の表面に薄く塗料を塗布するラインであり、安定、均一に塗布することが大切である。図11は、塗料が走行する鋼板に丁度着地しているときの流動挙動を数値解析にて計算した例である。本解析で得られた品質指標は、実験で得られた塗料の表面品質と傾向がよく一致しており、これにより、操業の仕方、塗料の選定などを効率よく求めることが出来る。

3.6 プロセス制御：湯面レベル制御¹⁰⁾

マルチフィジカルモデルは同時に、プロセス設計にも適用できる。図12は、溶鋼湯面のレベル制御解析を行ったものであり、従来の設計モデルで用いられている集中モデルと、マルチフィジカルモデルで用いられている分布モデルとの比較を示している。分布モデルの計算では、流動の乱流の影響により、小さな波が出ていること

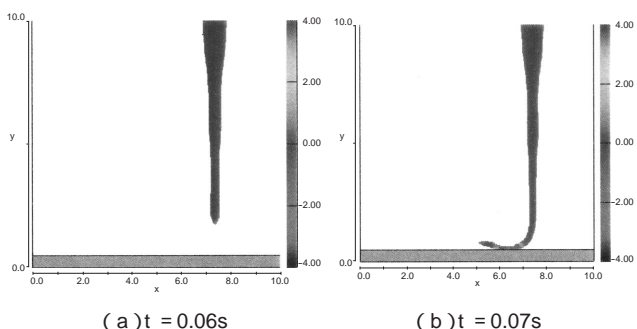
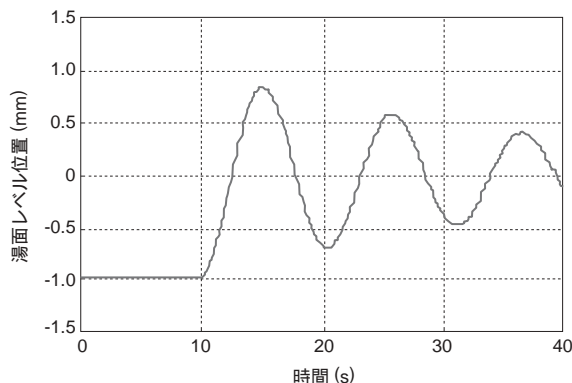
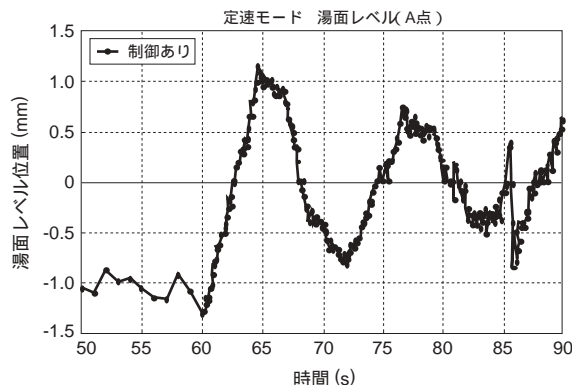


図11 カラーコーティングラインの塗料の流動特性 (t:落下開始時刻からの時間)



(a)従来の集中モデル計算での湯面挙動



(b)分布モデル計算での湯面挙動

図12 湯面レベル制御への応用事例

がわかる。プロセスの詳細な内部状況を把握しながらのプロセス制御法の開発に用いられている。

4. 結 言

以上のごとく、電磁場の製鉄プロセス応用は着実に進んでおり、マルチフィジカルモデルによる電磁プロセスソリューションが幅広く展開されていることがわかる。

参考文献

- 1) Fujisaki, K., Wajima, K., Sawada, K., Ueyama, T.: Application of Electromagnetic Technology to Steelmaking Plant. Nippon Steel Technical Report. (74), (1997)
- 2) 藤崎: マルチフィジカルモデルによる電磁プロセスソリューション. マテリア. 42(3), 239-241(2003)
- 3) Fujisaki, K., Ueyama, T.: Magnetohydrodynamic Calculation in Free Surface. Journal of Applied Physics. 83(11), 6356-6358(1998)
- 4) Fujisaki, K., Ueyama, T., Okazawa, K.: Magnetohydrodynamic Calculation of In-mold Electromagnetic Stirring. IEEE Trans, Magn. 33(2), 1642-1645(1996)
- 5) Fujisaki, K.: Magnetohydrodynamic Stability in Pulse EMC. Proceedings of the 2002 IEEE Industry Applications Society Annual Meeting. 2002, p.508-514
- 6) Fujisaki, K.: In-Mold Electromagnetic Stirring in Continuous Casting. IEEE Trans. IAS. 37(4), 1098-1104(2001)
- 7) Fujisaki, K.: 3D Heat Plasma Magnetohydrodynamic Calculation. Journal of Applied Physics. 91(10), 8319-8321(2002)
- 8) 藤崎, 梅津, 平山, 横田, 加藤, 平, 西, 富沢: FDTD法によるマイクロ波プロセスの電磁波解析. マイクロ波効果・応用国際シンポジウム. 2002-11, p.42-43
- 9) Fujisaki, K.: Dynamic Behavior of Level Flow Control by Numerical Physical Model. Automation in Mining, Mineral and Metal Processing 2001, edited by M. Araki, Pergamon, p.217-222
- 10) Fujisaki, K., Kanai, H., Kobayashi, R., Nishikawa, R., Satoh, S.: Air Entrainment Dynamic Simulation in Curtain Coating. 4th European Coating Symposium 2001. 2001. p.81-86