



入門講座

鉄鋼材料を作り込む計測技術 -4

製鋼分野における計測技術

Measurement Technology in the Field of Steelmaking

飯塚幸理
Yukinori Iizuka

JFE スチール (株)
スチール研究所 計測制御研究部
部長

1 はじめに

計測技術の入門講座の4回目は製鋼プロセスにおける計測技術について解説する。

製鋼プロセスは、鉄鋼材料を作りこむ上での要とも言え、低コスト化と高い生産性を達成するとともに、高品質化のために不純物や欠陥の低減が要求される。このためには計測技術は不可欠であり、製鋼分野においても従来から様々な研究開発が行われている。

本稿を執筆するにあたり、製鋼の計測技術について全体を概観できる文献を探してみたが、転炉の計測制御について項のある鉄鋼便覧第4版¹⁾を除き、あまりまとまったものはないうのである。文献を調べていくと、近年でも研究開発は地道に継続されているものの、1980年代に極めて活発に研究開発が行われていることに改めて感嘆させられた。その中には工程使用されている技術もあれば、ニーズの変化あるいは耐環境性での課題等により現在では使われていない技術もある。この辺りの事情はあまりオープンにはなっておらず、また各社によっても異なるであろう。本稿ではいずれも取り上げることで、製鋼分野の計測技術を概観できる内容となるよう努めた。

製鋼プロセスは、一般に溶銑予備処理、転炉、二次精錬、連続鋳造からなるが、本稿では転炉と連続鋳造における計測技術を主として取り上げることとする。

2 転炉の計測技術

転炉操業の概要を図1に示す²⁾。転炉操業では、成分量および温度が目標値となるように、スタティック制御とダイナミック制御が一般に行われる。スタティック制御は吹錬に必

要な酸素量や副原料投入量を吹錬開始前に決定するものである。ダイナミック制御は、吹錬途中でサブランスを投入して求めた炭素濃度および溶鋼温度を用い、成分量と温度が目標値に的中するように、以後の酸素量や冷材等の投入量を決定するものである。

2.1 サブランスでの測定

転炉操業では溶鋼中の成分量と温度が特に把握したい情報であるが、炉内の温度は1600℃を超え、吹錬中は火炎も吹き上がる厳しい環境であるため、連続的な直接測定は難しい。このため、サブランス^{3,4)}での測定が一般的であり、主に温度および炭素濃度が測定されている。安定に実施でき、かつ必須の計測技術として現在でも用いられている手法である。図2にサブランス先端のセンサの例を示す⁴⁾。温度測定には熱

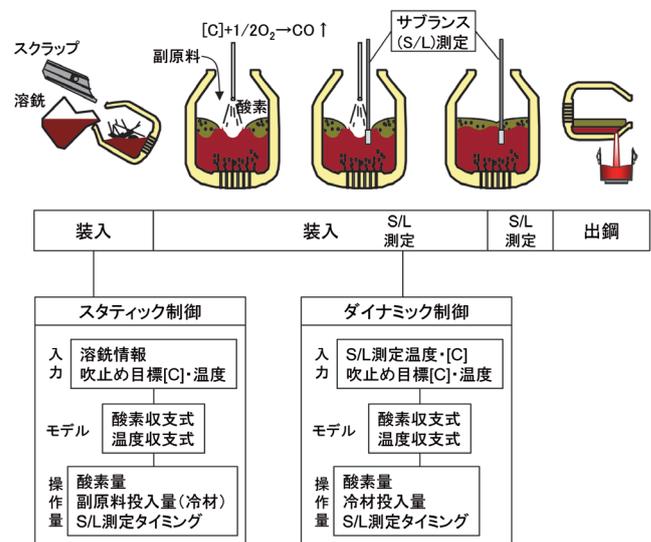


図1 転炉操業の概要²⁾ 図6.6を元に改編して作成

電対が利用され、炭素濃度はサンプリングされた溶鋼の凝固温度から求められる。

サブランスでサンプリングされた鋼をその場で分析する技術も報告されている。代表的なものは固体電解質を用いた酸素センサ⁵⁾である。固体電解質としては主にジルコニアが用いられ、高温で酸素イオンに対し導電性を示すジルコニアの酸素濃淡電池作用が利用されている。すなわちジルコニアの外側（測定側）と内側（基準側）で酸素分圧が異なると、その酸素分圧に応じた起電力がネルンストの式に従い生じる。基準側の酸素分圧を一定にできれば起電力を測定することで測定側の酸素分圧を知ることができる。このセンサは1980年代に主に吹き止め時の脱酸剤量の調整を目的として使用量が拡大した⁵⁾。また、スラグ中の酸素ポテンシャルを測定し、統計的吹錬制御モデルに反映することで的中率を向上させている⁶⁾。同様の原理は、Mn,S,Siなどへも応用されている⁷⁾。

サブランスでサンプリングされた鋼のその場分析ではカントバック分析も報告されている⁸⁾。

2.2 炉内の測定

耐環境性に優れた光ファイバを用いて、炉内の溶鋼測温や火点の測定も行われている。

溶鋼測温は、光ファイバを炉底ノズルに通し、溶鋼の放射輝度から温度を測定するもので、以下の2種類がある。

一つは浸漬消耗型光ファイバ放射温度計を用いる手法⁹⁾である。ファイバ先端を溶鋼に浸漬することで黒体条件が成り立ち、放射率を1とみなして測定が可能である。

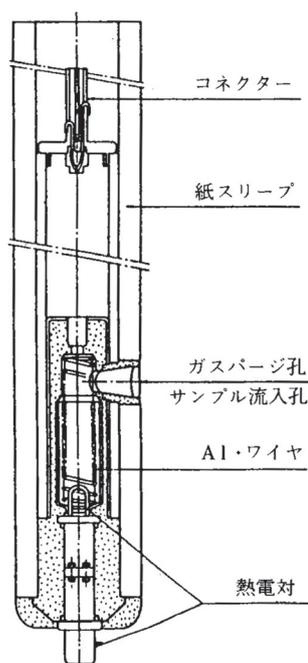


図2 サブランス先端の例⁴⁾

もう一つは光ファイバ温度計を溶鋼から離して溶鋼の輝度を測定する手法¹⁰⁾である。ノズルから不活性ガスを流すことで観察部位に空洞黒体が形成され、放射率を1とみなして測定が可能となる。この手法の場合、ノズル先端に付着した地金で視野が縮小することがある。その課題に対応するため、図3に示されるように、耐熱イメージファイバを通してCCDカメラで観察し、視野内の溶鋼像を自動検出してその放射輝度から測定する方法が報告¹¹⁾されている。ステンレス鋼精錬炉 (AOD) にて実機測定が行われている。

火点の測定では、上吹きランスに光ファイバを通し火点の発光スペクトルからMn濃度を求める例¹²⁾や、ラボであるが脱Si処理における火点温度測定の例¹³⁾がある。

2.3 スロッピング予知

吹錬の進行に伴いスラグが形成されると、脱炭反応で発生するCOガスによってスラグの泡立ち、すなわちフォーミングが始まる。さらに脱炭が進行していくと、炭素の酸化と並行して鉄の酸化が始まる。スラグ中に過剰に酸化鉄が増すと、溶鋼中の炭素と急激に反応し、鉄を含んだスラグが炉外に飛散するスロッピングが発生する。スロッピングは成分的中率や歩留りの低下、あるいは操業の妨げとなるため、スロッピングを予知する技術が開発されている。

吹錬用ランスの振動を用いる方法¹⁴⁾ではランスの上部に加速度計を直角2方向に配置し、その合成加速度がスラグフォーミング高さに関係を持つことを利用している。スラグフォーミング高さが適正域からずれた場合、ランス高さまたは送酸速度を修正してスロッピングを防止するようにしている。また、加速度計の代わりにロードセルを用いる方法¹⁵⁾や、フォーミングに伴う音の強度変化を音響センサで測定し加速度センサと冶金モデルも組み合わせてスロッピングを予知するシステム¹⁶⁾も報告されている。

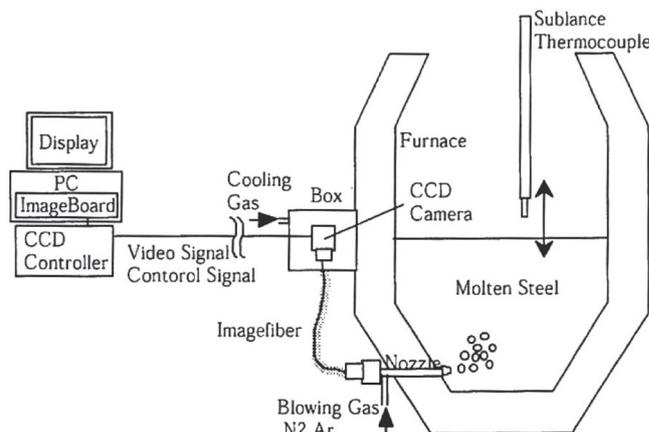


図3 溶鋼の連続測温の例¹¹⁾

とスラグの比重差によって振動が変わることを利用しており、加速度センサが用いられている。

3 連続鋳造の計測技術

連続鋳造機の例を図7に示す。取鍋からノズルを介して溶鋼を一旦タンディッシュで受け、さらにノズルを介して溶鋼をモールドへ注ぎ、周囲から徐々に固め、サポートロールで支えつつ二次冷却帯で冷却しながら引き抜いて最終的に完全に凝固させ、所定長さで切断して鋳片を製造する。連続鋳造においては、表面および内部の欠陥、あるいは中心偏析を抑えつつ高速に鋳造することが求められる。

3.1 タンディッシュ内溶鋼测温

タンディッシュ内の溶鋼温度は操業や品質に与える影響が大きく、いくつかの測定手法が適用されている。

一般的には熱電対が用いられ、消耗型熱電対によるパッチ測定その他、適切な保護管により連続測定できるように工夫されたもの^{30,31}もある。

2.2で述べた浸漬消耗型光ファイバ放射温度計は、タン

ディッシュ溶鋼测温での適用も報告されている³²。

3.2 モールド湯面レベル

モールド内の湯面レベルを一定に制御することはパウダ巻込みや表面割れ防止のために極めて重要であり、種々の制御手法が開発されている。この要となるのが湯面レベル計であり、操業上欠かせないセンサとなっている。

原理は図8に示す渦流式³³である。検出コイルに高周波電流を流すと、溶鋼湯面に渦電流が発生し、その影響で検出コイルのインピーダンスが変化する。このインピーダンスから湯面レベルを求めるものである。溶鋼上のパウダを通して直接湯面レベルを測定できる。

その他、 γ 線を横からモールドを通して透過させ、その減衰位置からレベルを測定する手法³⁴も報告されている。渦流式レベル計と組み合わせることでパウダ厚の測定も可能としている。

オートスタートを行うためには、高速で上昇する湯面を広い範囲で測定する必要があり、縦方向に複数並べてモールドに埋め込んだ熱電対の応答からレベルを測定する技術³⁵や、モールド内に2本の電極を配置し、伝搬する信号の時間遅れからレベルを測定する技術³⁶が報告されている。

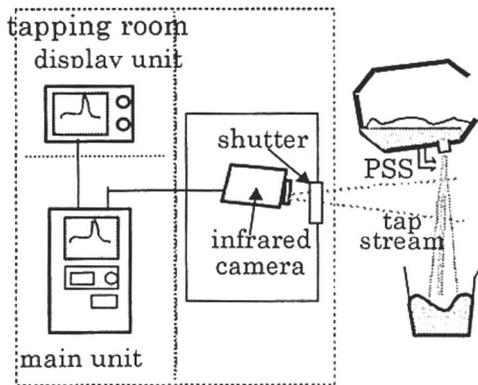


図6 スラグ流出検知の例²⁷⁾

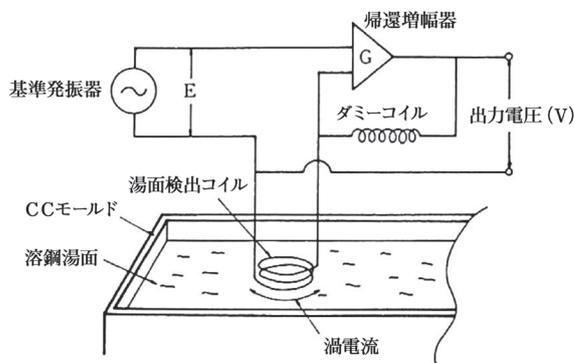


図8 渦流式モールド湯面レベル計の原理³³⁾

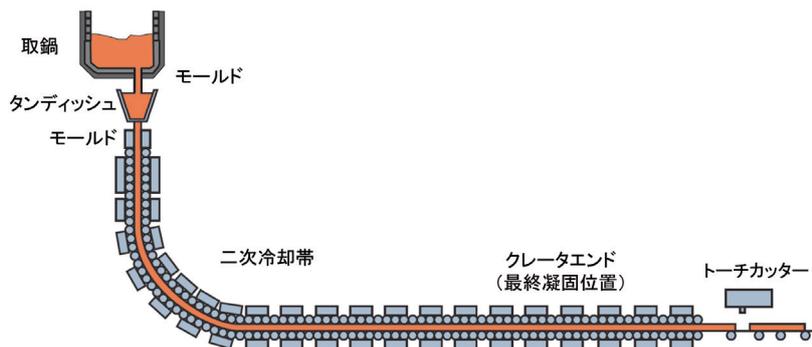


図7 連続鋳造機

3.3 モールド内溶鋼流速

モールド内の溶鋼流速は品質への影響が大きく、流速センサが望まれているが難易度が高く報告例も少ない。非接触では電磁流量計の原理が報告³⁷⁾されているが、空間分解能とリフトオフとのトレード、湯面変動や温度、外部磁場などの外乱影響が課題になると思われる。接触式では、溶鋼に浸漬させたロッドの振動周波数から流速を測定するカルマン渦ブローブ³⁸⁾が開発されている。

3.4 ブレークアウト予知

ブレークアウト (BO) には拘束性、凝固遅れ性、異物噛み込み性などの種類がある。

この内、拘束性BOに関しては、モールド内に埋め込んだ複数の熱電対の温度変化から早期検出する方法³⁹⁾が開発され、一般的に適用されている。

凝固遅れ性BOや異物噛み込み性BOに関しては、熱電対で測定した熱流束からモデル計算を組合せてシェル厚をオンライン測定する技術⁴⁰⁾が報告されている。

最近ではFBG (Fiber Bragg Grating) 型の光ファイバ分布温度計をモールドに埋め込み多点測定を行う技術^{41,42)}も開発されている。

3.5 バルジング測定

鑄片表面が溶鋼静圧で膨れるバルジングは湯面変動やBOの原因となるため、この測定技術も開発されている。

代表的な手法は水柱超音波方式⁴³⁾である。この技術は鑄片に当てた水柱内に超音波を伝搬させ、鑄片の表面で反射してきたエコーの伝搬時間を測定することで距離を測定し、バルジングを求めるものである。水柱を用いるため蒸気ミストや粉塵影響を受けず、センサも水流によって冷却されるため、高温環境下でも安定に測定できる。鑄片の短辺に3つのセンサを並べて測定することで、短辺バルジングの測定がなされている。最近でも本技術の適用例は報告されており、クレー

タエンドの少し上流側に図9に示されるように設置したセンサを用いて非定常バルジングの解析が行われている⁴⁴⁾。

その他、渦流距離計を用いて短辺バルジングを測定した例⁴⁵⁾も報告されている。

3.6 クレータエンド検知

クレータエンド (最終凝固位置) は中心偏析や最大鑄造速度に影響し、連続鑄造において重要な値の一つである。主に電磁超音波法を用いた技術が報告されている。

電磁超音波法とは、外部磁場と渦電流との相互作用で超音波を鑄片に直接発生させ、その逆作用で超音波を検出する技術である。鑄片への応用では透過法が用いられ、超音波のモードには縦波を用いるものと横波を用いるものの2種類がある。縦波は液相も透過するため、縦波を用いた手法では音速が固相と液相で異なることを利用し、透過波の伝搬時間からシェル厚を推定し、シェル厚からクレータエンドを求めるようにしている⁴⁶⁾。横波は液相を透過しないため、透過信号の有無で凝固しているかしていないかの判別が可能である⁴⁷⁾。

電磁超音波法は感度が低いため、センサのリフトオフ (鑄片との距離) を2mm以内に近づけなければならず耐久性に課題があったが、図10に示すデジタル信号処理を適用する

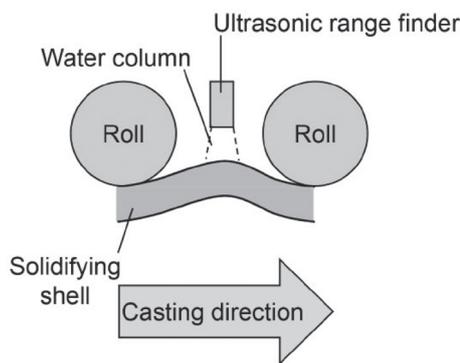


図9 水柱超音波によるバルジング計⁴⁴⁾

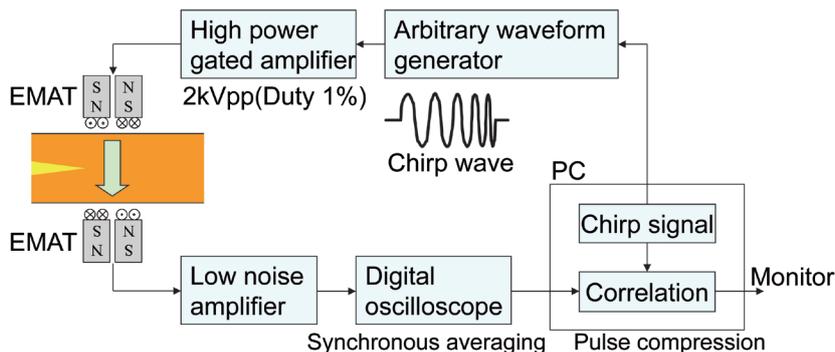


図10 電磁超音波クレータエンドセンサ⁴⁸⁾

ことで感度を改善して5mmまで離しても測定できるようにし、耐久性を向上させた技術⁴⁸⁾も報告されている。

その他の手法としては、完全凝固時にロール反力が増大することを利用して検知する方法⁴⁹⁾も報告されている。

3.7 スラブ表面温度

鑄片の表面温度測定は二次冷却の適正化や、表面割れの抑制、鑄片温度分布の推定に有用であり、放射温度計が適用されている。例えば1次元CCDを用いてスラブの幅方向温度分布が測定されている⁵⁰⁾。

3.8 スラブの検査技術

スラブで検査したい欠陥としては、表面の割れ、表層下の介在物やブローホール、中心付近の割れやポロシティがある。表面に関しては画像検査の報告例⁵¹⁾があり、また海外製の検査装置も存在するが、内部欠陥はオシレーションマークの影響や高温といった難しさからいまだに実用的な技術は開発されていない。ラボ的には、表面を研削したサンプルを用いたV反射型超音波探傷法⁵²⁾が研究用に適用されている。

3.9 その他の計測技術

その他、ダミーバーに取り付けたセンサで二次冷却ノズル^{53,54)}やロールアライメント⁵⁵⁾を診断する技術や、スカーフィングの溶剤量を測定する技術⁵⁶⁾、スカーフィング時の微小火花から表層下の介在物を判定する技術⁵⁷⁾などが報告されている。

4 おわりに

製鋼プロセスにおける計測技術について概観した。時間的な制約や知識不足もあり、漏れた技術もあると思われるが、この点をご容赦頂きたい。また、やや過剰に参考文献を挙げたが、今後の本分野の開発の一助となれば幸いである。

高温かつ粉塵も多い製鋼プロセスは、精密なセンサにとって厳しい環境であり、耐久性が常に課題となる。一方、近年では直接測定できない量を他の測定値およびモデルから推定するソフトセンサ技術が発展してきている。また、Deep Learningに代表されるデータサイエンス技術の進歩も著しい。今後は最新のデバイスにこのような手法を融合させることで、厳しい環境でも安定かつ精度良い計測を可能とする技術の実現が期待される。

参考文献

- 1) 日本鉄鋼協会：鉄鋼便覧第4版，2 (2002) 2編，8・4・5 C，CD-ROM.
- 2) 日本鉄鋼協会：鉄鋼便覧第5版，5 (2014)，228.
- 3) 飯田義治，江本寛治，難波明彦，武英雄，土田剛，高橋英幸，小川正勝，中路茂，増田康男：川崎製鉄技報，10 (1978)，314.
- 4) 山本倫久：富山県立大学紀要，1 (1991)，29.
- 5) 永田和宏，後藤和弘：鉄と鋼，74 (1988)，1801.
- 6) 加藤亮，鳥井孝一，藤原清人，岩田勝吉，加藤木健：CAMP-ISIJ，19 (2006)，126.
- 7) 岩瀬正則：鉄と鋼，75 (1989)，379.
- 8) 斎藤忠，江波戸紘一，坪根巖，山名寿，竹添英孝：鉄と鋼，76 (1990)，1972.
- 9) H. Kochner and T. Lamp：Stahl und Eisen，129 (2009) 3，39.
- 10) 犬井正彦，森明義，岡田剛，山本俊行，小山朝良：CAMP-ISIJ，2 (1989)，216.
- 11) 杉浦雅人，山崎強，中尾隆二，田中智昭，永田清二：新日鉄技報，379 (2003)，21.
- 12) 金本通隆，岡島正樹，山根博史，山内雅夫：鉄と鋼，76 (1990)，1964.
- 13) 松井彰敏，鍋島誠司，松野英寿，岸本康夫：CAMP-ISIJ，20 (2007)，136.
- 14) 飯田義治，江本寛治，小川正勝，大西正之，山田博右：鉄と鋼，68 (1982)，2480.
- 15) 竹添英孝，坪根巖，東洵，波戸口守一，山名寿，高嶋道久：CAMP-ISIJ，2 (1989)，1188.
- 16) 木村彰夫，三浦晶，堺浩一：CAMP-ISIJ，9 (1996)，908.
- 17) 小林純夫，鳩野哲男，加藤木健，栗山明，市原清：鉄と鋼，69 (1983)，51.
- 18) 川田豊，真鍋知多佳，小林明，坪根巖，山名寿：鉄と鋼，76 (1990)，2041.
- 19) 長棟章生，手塚浩一，佐藤光威，金田靖，菊地一郎：鉄と鋼，79 (1993)，794.
- 20) 別所永康，竹内秀次，藤井徹也，中西恭二，馬田一，森淳：鉄と鋼，75 (1989)，610.
- 21) 福味純一，滝千尋，畑中聡男，小倉英彦：鉄と鋼，76 (1990)，1956.
- 22) 小笠原泰志，松井章敏，菊池直樹，岸本康夫，井戸洋晴：CAMP-ISIJ，24 (2011)，163.
- 23) 新井学，櫻井栄司，福味純一，政岡俊雄，小倉英彦：CAMP-ISIJ，3 (1990)，284.
- 24) 須田守，水藤政人，蓮沼純一，大宮茂，浅野孝志，岡本浩志：CAMP-ISIJ，5 (1992)，218.
- 25) 佐藤敦，中島英雅，阪根武良，浜名孝年，中村雄二，小山朝良：CAMP-ISIJ，4 (1991)，1293.
- 26) 菅野晃由，段上孝良，富田裕志：CAMP-ISIJ，11 (1998)，952.

- 27) 森田幸代, 川畑涼, 田中秀栄, 小平悟史, 納雅夫, 川島章浩 : CAMP-ISIJ, 15 (2002), 141.
- 28) 秦弘毅, 河合浩之, 小菅俊洋, 山田信夫 : CAMP-ISIJ, 7 (1994), 316.
- 29) W.K.Lee and Y.J.Kang : CAMP-ISIJ, 17 (2004), 181.
- 30) 入谷英樹, 星川郁生, 森井三千夫, 勝田順一郎, 木村雅保, 東洵 : CAMP-ISIJ, 5 (1992), 1349.
- 31) Y.N.Kim, Y.J.Kang and H.K.Cho : CAMP-ISIJ, 14 (2001), 1006.
- 32) 前田浩志, 丹村洋一, 板倉孝, 大角明, 旗手崇文, 山中善吉 : CAMP-ISIJ, 8 (1995), 1151.
- 33) 佐野和夫, 安藤静吾, 山田健夫, 石黒守幸, 中島広久, 山田俊郎 : 日本鋼管技報, 87 (1980), 35.
- 34) 中山傑, 西村司, 比屋根均 : CAMP-ISIJ, 5 (1992), 1351.
- 35) 工藤一郎, 矢崎尚, 成田津, 宮部修一, 田中重雄 : CAMP-ISIJ, 5 (1992), 294.
- 36) 手塚浩一, 長棟章生, 前田浩史, 宮原弘明 : CAMP-ISIJ, 8 (1995), 379.
- 37) 平賀由多可, 谷口齊一, 沖村利昭, 品川裕明 : CAMP-ISIJ, 13 (2000), 818.
- 38) M. Iguchi, H. Kawabata, T. Ogura, A. Hayashi and Y. Terauchi : ISIJ Int., 36 (1996), S190.
- 39) 糸山誓司, 垣生泰弘, 反町健一, 川原田昭, 矢部直 : 鉄と鋼, 68 (1982), 784.
- 40) 伊藤陽一, 村井剛, 三木祐司 : JFE 技報, 38 (2016), 48.
- 41) A.Krasilnikov, D.Lieftucht, M.Reifferscheid, E.Hovestädt, T.Schramm, D.Kirsch and P.R.Scheller : Proc. of ICS2012.
- 42) M.Sedén, A.Kamperman, E.Dekker, G.Hedin, K.Fröjdih and J.Pejnefors : CAMP-ISIJ, 29 (2016), 685.
- 43) 松村勝巳, 寺尾精太, 国田建司, 岡良徳, 坪井勇 : 鉄と鋼, 70 (1984), 1110.
- 44) 大野浩之, 三木祐司, 西澤佑司 : 鉄と鋼, 101 (2015), 661.
- 45) 東洵, 森井三千夫, 菅野邦孝, 小北寛巳, 小林一夫, 手塚正雄 : CAMP-ISIJ, 4 (1991), 1381.
- 46) 吉田透, 厚見直, 大橋渡, 加賀谷幸司, 椿原治, 曾我弘, 川島捷宏 : 鉄と鋼, 70 (1984), 1123.
- 47) 高田一, 市川文彦, 北岡英就, 桃尾章生, 西川広 : CAMP-ISIJ, 2 (1989), 1214.
- 48) Y.Iizuka and Y.Awajiya : J. Phys. : Conf. Ser., 520 (2014), 012011.
- 49) 木村雅保, 斎藤忠, 木村司, 上田輝, 大塚秀樹 : CAMP-ISIJ, 2 (1989), 1154.
- 50) 細谷誠一, 貝原保男, 濱田達也, 中尾勝, 上田輝 : CAMP-ISIJ, 5 (1992), 227.
- 51) K.W.Kim, H.M.Bae, S.H.Choi and S.Y.Kim : CAMP-ISIJ, 20 (2007), 296.
- 52) 古米孝平, 松井穰, 村井剛, 三木祐司 : 鉄と鋼, 100 (2014), 563.
- 53) 岸野孝信, 木村雅保, 上田輝, 細谷誠一 : CAMP-ISIJ, 5 (1992), 226.
- 54) 徳田将敏, 廣田哲也 : 非破壊検査, 50 (2001), 670.
- 55) 徳田将敏 : 鉄と鋼, 57 (2001), 593.
- 56) 加藤芳充, 森章徳, 森健 : CAMP-ISIJ, 5 (1992), 364.
- 57) 金森勇人, 松尾次郎, 笹森振一郎 : CAMP-ISIJ, 8 (1995), 1156.

(2018年5月2日受付)