

製鋼における計測・制御技術

小西正躬

(株)神戸製鋼所 生産技術研究所 研究首席

Masami Konishi

和佐泰宏

(株)神戸製鋼所 生産技術研究所 主任研究員

Yasuhiro Wasa

Instrumentation and Control in Steel Making Process

1 はじめに

製鉄所では種々の計測・制御システムが介在して設備の自動運転や品質向上を支えている。中でも製鋼工程は下工程での品質を左右する重要なプロセスである。一貫製鉄所における製鋼工程は、高炉で生産される溶銑を脱炭処理して各種金属元素を調節して客先の要求に応じた特性を持った鋼を製造するものである。この工程は、極めて高温の作業であることから計測が困難なプロセスであるが、各種の開発により計測・制御が実施され品質制御が行われている。すなわち、所定の目標品質を得るために、溶鋼温度と溶鋼中の合金成分を計測しその変動を把握し制御する。高炉から供給される銑鉄は温度・成分といった特性のばらつきが避けられないため、計測値をもとに種々の副原料を投入して溶鋼の成分を調節する。その目的のため、各種の計測・制御がおこなわれている。

本稿ではこれまでの公表文献や、当社での事例を引用し

つつ製鋼における計測・制御技術の現状と課題の一端を紹介する。

2 製鋼における計測技術

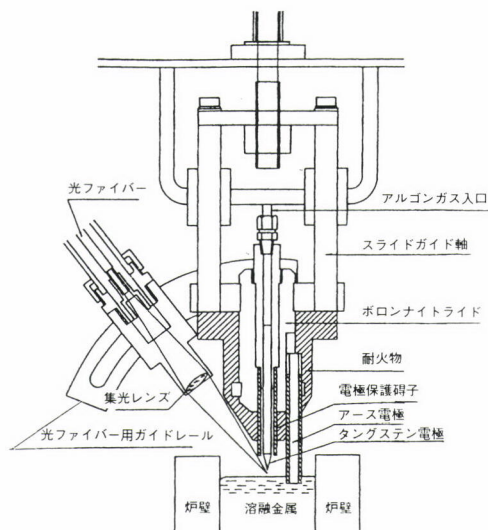
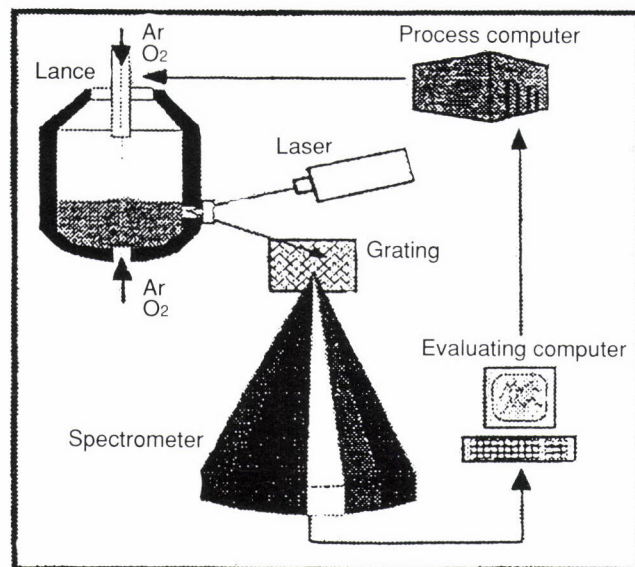
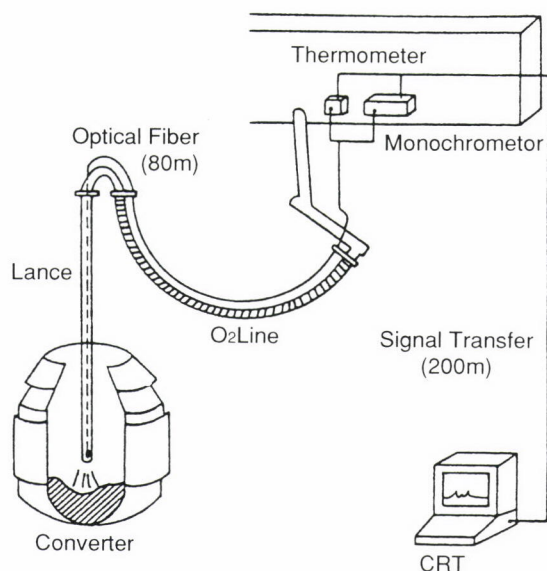
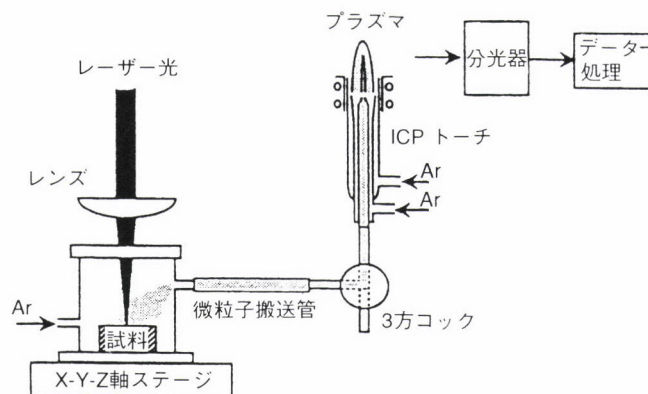
転炉等、製鋼工程の計測は温度計測と溶鋼成分の分析が主たるものである。以下では紙面の都合上、温度計測については省略し、近年関心の高い溶鋼成分の迅速分析に的を絞って最近の技術を紹介する。

2.1 迅速分析の目的

製鋼プロセスの高精度化、低コスト化を実現するために、溶鋼成分の分析を迅速に行うことが要求されている。現状、一般的に行われている成分分析では、溶鋼をサンプリングし、凝固、研磨した後放電発光を分光器で観測し、その発光スペクトル強度から成分毎の検量線による定量化を行っている。この方法を用いると、ほとんどの金属元素が分析

表1 溶鋼成分迅速分析法の分類

分類	概要	励起方法	特徴	課題	開発・導入企業例
直接発光	外部励起源の作用により溶鋼表面を励起発光させその光を用いて分光分析する	酸素ガス(火点)	・湯面変動に比較的強い ・測定距離を大きくできる	・分析可能元素種に制限 ・短波長側紫外光の制限	新日鐵5)
		レーザー	・分析可能元素種が比較的多 ・測定距離を比較的大	・湯面変動に弱い ・短波長側紫外光の制限	住金6)、川鉄7,8) Krupp 9,10)
		放電	・分析可能元素種が多い	・測定距離が短い ・湯面変動に弱い ・短波長側紫外光の制限	新日鐵11)、 神鋼12)
ガス分析	溶鋼成分を含むガスを採取しガス分析して成分量を測定する。	塩素ガス	・分析は既存装置が利用可能 ・多種元素が分析可能	・プローブの耐久性	NKK13)
		水素	・溶鋼中の水素成分を測定	・浸漬サンプラの消耗 ・水素のみ	新日鐵14)、住金15) 神鋼16)
		排ガス ガスト	・Mn、Oなどが測定可能	・成分が限定される	新日鐵17)、NKK18)
起電力	溶鋼中の成分と電気反応する電極を浸漬し成分に応じた起電力を測定する。		・Si、Mnが測定可能	・成分が限定される ・浸漬電極の消耗	新日鐵19,20)、 新日鐵21)、NKK22)
微粒子発生+ICP	外部励起源の作用により溶鋼から微粉体(ガス)を発生し外部分析器(ICP)へガス搬送し定量分析する。	不活性ガス	・分析は既存装置が利用可能 ・湯面変動に強い	・ガス搬送中の汚染 ・搬送遅れ ・分析値の代表性	新日鐵23)
		レーザー	・分析は既存装置が利用可能 ・湯面変動に比較的強い	・不活性ガス法と同じ	NKK24)
		放電	・分析は既存装置が利用可能	・不活性ガス法と同じ ・湯面変動に弱い	新日鐵25)

図1 放電による直接発光法¹²⁾図3 レーザ励起法による成分分析⁴⁾図2 火点法による成分分析⁵⁾図4 レーザ ICP 法による成分分析²⁴⁾

可能である。しかし、オンサイトで分析するなどの改善が進められていても、なお1回の分析に数分の時間を必要とする。したがって、溶鋼の迅速分析が実現できれば、成分調整のフィードバック制御による高精度化や、耐火物の損耗軽減によるコストダウンなど波及効果は大きい。

2.2 溶鋼成分迅速分析技術の開発状況

溶鋼迅速分析の技術開発の歴史は古く、多くの報告がある¹⁻⁴⁾。これらの報告から、各社が開発してきた主な溶鋼成分迅速分析法をまとめたものが表1である。以下でその内容について解説する。

表1に示すように、当初は直接発光法が開発されてきた。たとえば、図1に示すような電極と溶鋼間でスパーク放電させ、その発光を光ファイバーで分光器まで導光し分析す

る方法が研究されたが、実用化には至っていない。これは、溶鋼表面が揺動するとともにスラグで覆われているという事情から、十分な精度を確保するのが困難なためである。また、溶鋼に浸漬する放電部分の損傷が激しくランニングコストが高くなる問題点もある。

さらに、分析に重要な260nm程度以下の短波長での軽元素の発光スペクトルが光ファイバーでの導光では減衰してしまい分析できないことも問題である¹⁾。直接発光法の中で実用化またはそれに近いものとしては、転炉において酸素吹付点(火点)での発光を光ファイバーで導光し、FeとMn、Crの発光スペクトルを分光分析してMn、Cr濃度を測定する方法(図2)がある⁵⁾。

さらに、スラグの影響を受けないために転炉側壁に穴を開けアルゴンガスで溶鋼表面を保ちながら大パワーYAGレーザを照射し、そのときの発光を分析する方法(図3)がある^{9,10)}。この場合、装置が非常に大がかりになるとともに、溶鋼面の変動を抑えないと発光スペクトルが大きく変

動する問題点がある。以上のように、直接発光は原理的には理想ではあるが、精度、安定性やコスト面で問題がある。

分析元素は限定されるが、ガス分析の一部では実用化が進んでいる。転炉の排ガスやダストを分析して溶鋼成分を推定する方法や、溶鋼中に塩素ガスを流し溶鋼成分を塩化物ガスとして取出し分析する方法¹³⁾、またガス中に溶鋼の水素成分を取出して濃度分析する方法が開発され実用化されている¹⁴⁻¹⁶⁾。

また、Si、Mnに限定されるが、電極を溶鋼中に浸漬し、起電力を測定して成分濃度を分析する手法もある。幅広い元素を分析できる方法として、溶鋼中から溶鋼成分を代表した微粒子を発生させ、不活性ガスの形で搬送し、分析技術として確立しているICP(Inductive Coupled Plasma)発光分析装置に導入して、成分分析する手法が開発されつつある。微粒子の発生方法として、溶鋼中に不活性ガスをバブリングして発生させたり、図4に示したように大パワーレーザを照射してアブレーションにより微粒子を発生させる方法²⁴⁾や、放電による方法がある²⁵⁾。成分分析はICP分析装置でできるため、安定した分析が可能であるが、いかに溶鋼成分を代表する微粒子を発生させるかが鍵になる。また、ICP装置が離れている場合、搬送に要する時間や搬送路中での微粒子の汚染の問題が考えられる。

2.3 溶鋼成分迅速分析の今後の課題

過去、様々な迅速分析技術が開発されてきたが一部を除いて実用化されている技術は少ない。このような状況であるが、たとえばレーザ励起ICP法が銅板を対象に実用化されつつあり、溶鋼に対する本手法の適用が期待される。現在の放電発光分析の代替として溶鋼を対象にするのは課題が大きすぎるので、たとえば多少精度は劣るが連続オンライン分析可能という利点を生かして、従来の分析法を補完する分析手法というような位置づけでの技術開発が必要である。

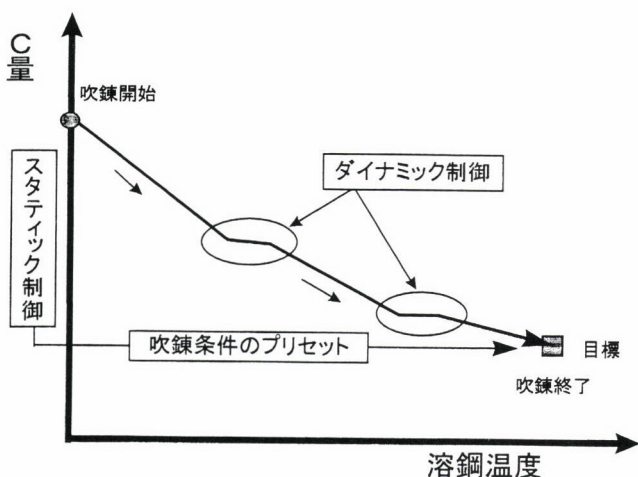


図5 ダイナミック制御とスタティク制御

3 製鋼における制御技術

3.1 転炉吹錬における温度・成分制御

転炉に溶銑が注入された後、酸素を溶鋼に吹き付けることによる脱炭がおこなわれる。この際、事前に成分と温度の調整を目的として副原料鉱石が挿入される。転炉において吹錬開始の前に総送酸素量と挿入副原料量を計算し設定する制御を、吹錬中の温度・成分の動的制御と対比してスタティク制御と呼ぶ。

総送酸素量は吹錬時間に対応し、投入副原料量が吹錬中の脱炭反応や吹錬終了後の溶鋼中の各種合金成分の濃度に関連する。一方、吹錬途中では溶鋼温度と成分を計測して当初の予定値と比較し誤差を補正するための再調整を行う。吹錬途中で行われるこの操作はダイナミック制御と呼ばれる。スタティク制御とダイナミック制御の関係は、図5のようである。本稿では紙面の関係からスタティク制御に的を絞って紹介する。ダイナミック制御については文献²⁶⁾を参照されたい。

3.2 スタティク制御による溶鋼の温度・成分調整

転炉での温度および合金成分の調整のための制御手段は総送酸素量と副原料投入量である。鉄鉱石と石灰石および蠟石等の副原料は溶鋼の温度および、脱炭、脱りんといった成分濃度の調節に用いられる。転炉での吹き止め時の目標温度を T 、各成分元素の目標値を C_j ($j = 1, m$) とする。これを実現するための操作量として、総酸素流量を y_1 、副原料の投入量を x_i ($i = 1, n$) とすると、一般に

$$(T, C_j)^t = F(y_1, x_i) \dots\dots\dots (1)$$

の関係が成り立つ。ここで、右辺の F は炉内の反応式から導かれる $(m+1)$ 次元の非線形関数で、操作量 (y_1, x_i) と吹き止め時での炉変数 (T, C_j) の関係を表す。吹き止め時の炉変数 T および C_j を、それぞれの目標値 T_f, C_{fj} に制御するための操作量 y_1, x_i を求めるには、(1)式の逆関数 F^{-1} を用いて

$$(y_1, x_i)^t = F^{-1}(T_f, C_{fj}) \dots\dots\dots (2)$$

とすればよい。しかし、(1)式の関数 F の次数が $(m+1)$ であるのに対し、変数(求める操作量の数)は $(n+1)$ となり、一般には式の次数と変数の数は等しくならず、非線形関数 F の逆関数は解析的には求まらない。したがって、実用上は非線形計画法を援用して操作変数を求めている。すなわち、(1)式を制約条件にしつつ、適当な評価関数 $J(T, C_j)$ を定義してこれを最大または、最小にする操作変数 (y_1, x_i) を求めるというものである。転炉の操業においては、副原料の投入に関してはフレコンと呼ばれる袋単位となるものもあるため、操作変数のいくつかは整数となる。この場

合、上記最適化は混合整数計画問題となって計算が一層複雑となってくる。

実際には、以下に示すように2段階に分けて操作量を決定している場合が多い。

1) 総酸素流量と副原料鉄鉱石量の計算

第1次近似として(1)式を総酸素流量 y_1 と副原料鉄鉱石 x_1 のみの関係式と考えると、(2)式は2つの式から2つの未知変数 y_1 、 x_1 を求める問題となり簡単に解けて、総酸素流量と副原料鉄鉱石量を求めることができる。

2) 成分調整のための副原料(焼石灰、蠟石)投入量の計算

溶銑中の過剰なP成分等を除去する目的で投入される焼石灰(x_2)、蠟石(x_3)の投入量計算を例に非線形計画法の適用を紹介する。成分元素 $C_2(P)$ の分配モデルとして、物理的な構成式をベースにした次式が与えられている。

$$C_2 = f(x_2, x_3) \dots\dots\dots (3)$$

成分調整の目的は、(3)式の C_2 がその目標値 C_{f2} に一致するような副原料 x_2 および、 x_3 の値を決定する事である。(3)式の左辺の値 C_{f2} を与えた場合、(3)式を満たす非負の解(x_2, x_3)は無数に選べるため、それらの間に何らかの関係を規定する必要がある。ここでは、副原料の投入コストを最小に抑えることを目的とする。すなわち、(3)式の等式制約の下で、コスト関数

$$J(x_2, x_3) = a \cdot x_2 + b \cdot x_3 \dots\dots\dots (4)$$

を最小にする変数 x_2 および、 x_3 を求める問題を解けばよい。ここで、 a および b は焼石灰と蠟石のコスト係数である。さて、実炉操業においては焼石灰や蠟石の投入によるスラグの量や塩基度の変化に着目し、それらが良好なスラグ形成や吹錬中のスロッピング抑制の条件を満足するよう留意する必要がある。

これらの制約は

スラグ制約

$$SLG(x_2, x_3) > S_1 \dots\dots\dots (5)$$

スロッピング制約

$$SLP(x_2, x_3) < S_2 \dots\dots\dots (6)$$

のように表される。なお、ここで S_1 と S_2 は操業から定まる制約値である。

結局、副原料の決定のためには、(3)式の等式条件と、(5)、(6)式の不等式条件下で(2)式のコスト関数を最小にする変数 x_2 と x_3 が求まれば良いわけである。大森らは(3)式から(6)式までを総合した新しい非線形の評価関数 J^* を以下のように定義して、これを最小化する方法を提案している²⁷⁾。すなわち、

$$J^*(x_2, x_3) = J(x_2, x_3) + w_1 \cdot (C_{f2} - f(x_2, x_3))^2$$

$$-w_2 \cdot \exp(S_1 - SLG(x_2, x_3)) + w_3 \cdot \exp(S_2 - SLP(x_2, x_3)) \dots\dots\dots (7)$$

を最小にするような変数 x_2 と x_3 を非線形最適化法により求めるものである。ここで、 w_1 から w_3 はコストや各操業制約を評価関数に反映させるための非負の重み係数をあらわす。なお、この事例では非線形最適化法としてフレキシブルポリヘドロン法を用いている²⁸⁾。

3.4 2次精錬開始前の合金鉄投入制御

2次精錬開始前にMn、Si、Cr、C等の各元素の成分調整のために各種の合金鉄を混合投入する。各合金鉄 k に含まれる元素 l の構成比を γ_{lk} 、各合金鉄の投入量を z_k とすると、混合投入後の各元素の成分 s_l は

$$s_l = \sum_{k=1}^N (\gamma_{lk} \cdot z_k) + (\text{吹止成分推定値}) \dots\dots (8)$$

となる。また、この合金鉄投入のコスト I は各合金鉄の単価 p_k と投入量 z_k の積和として計算できる。すなわち、

$$I = \sum_{k=1}^N (p_k \cdot z_k) \dots\dots\dots (9)$$

である。基本的には(8)式の s_l がその目標値に一致するとの制約条件を満たしつつ、(9)式のコストを最小にする合金投入量 z_k ($k=1, N$)を線形計画法を用いて求めることになる。合金投入が袋(フレコン)単位のものであり、その合金に対応する投入量 z_k は整数変数となるため混合整数計画問題となる。その場合は分枝限定法を用いて解を求めることになる。投入コストについてあらかじめ予算値があり、それを極力守りたいような場合には、大塚らが提案している目的計画法を援用することになる^{29,30)}。なお、ここでの記述は簡略化しているが、実際の運用に際しては(8)式の条件以外に、投入ホッパーの重量制約、投入に伴うB等の不純物ピックアップ制約等が満たされる必要があり、これらの制約をも考慮しつつ投入量 z_k を決定する必要がある。

4 おわりに

本稿では、転炉での精錬工程における計測・制御技術の一端を紹介した。計測技術に関しては、溶鋼の成分分析的を絞って非接触迅速測定技術の現状を概説した。現在試験的に行われている溶鋼成分の迅速分析が高精度で実用化されれば、吹錬中のダイナミック制御のための数学モデルも精度良く構築でき、現代制御理論の適用も可能となるであろう。スタティック制御については、本稿で述べたような多変数の連立式を満たしつつ、各種の制約条件の下に特定の評価関数を最適化する形が定着し、人間では出来ない多くの因子を考慮した制御がコンピュータの力で実現し

ている。制御に用いられている数学モデルについては、炉操業の進行に伴う炉の特性変化に追従するよう学習する仕組みが準備されているが、完全なものとは言えず、今後の開発課題である。

製鋼工程においても、今後他分野の新しい知見も取り入れ、より高度な計測・制御技術を構築することが求められており、製鋼技術者と計測・制御技術者が相互啓発し連携を深める必要がある。

参考文献

- 1) 石橋耀一, 岩田英夫: 鉄と鋼, 77 (1991), 46.
- 2) 小野昭紘: 鉄と鋼, 77 (1991), 1809.
- 3) 小野昭紘: 分析化学, 41 (1992), 289.
- 4) 千葉光一, 小野昭紘: 材料とプロセス, 8 (1995), 826.
- 5) 千葉光一, 小野昭紘, 佐伯正夫: 分析化学, 37 (1988), 365.
- 6) 本田達郎, 田村洋一, 山本俊行, 古賀隆治: 材料とプロセス, 5 (1992), 445.
- 7) 角山浩三, 谷本亘, 久田秀雄, 浅川久夫: 鉄と鋼, 71 (1985), A133.
- 8) 谷本亘, 山本公, 角山浩三: 川崎製鉄技報, 21 (1989) 2, 100.
- 9) C. J. Lorenzen, C. Carlhoff, U. Hahn and M. Jogwich: J. of Analytical Atomic Spectrometry, 7 (1992), 1029.
- 10) C. Carlhoff and S. Kirchhoff: Laser und Optoelektronik, 23 (1991) 4, 50.
- 11) 小野昭紘, 佐伯正夫: 鉄と鋼, 67 (1981), S403.
- 12) 野々村英造, 小谷直美, 徳田利幸, 成田貴一, 吉田康夫, 矢場田武: 鉄と鋼, 71 (1985), A125.
- 13) 秋吉孝則, 高橋隆昌, 近藤隆明: 分析化学, 38 (1989), 486.
- 14) 早川泰弘, 小野昭紘, 妹尾健吾, 務川進: 分析化学, 39 (1990), 617.
- 15) 大塚正俊, 中川敬太, 朱宮徹, 山田統明, 人見康雄, 永幡勉: 材料とプロセス, 7 (1994), 1116.
- 16) 瀬村康一郎, 松尾勝良, 中島慎一, 西口克茂, 高橋正光: 材料とプロセス, 7 (1994), 244.
- 17) 金本通隆, 岡島正樹, 山根博史, 山内雅夫: 鉄と鋼, 76 (1990), 1964.
- 18) 辻猛志, 望月正, 石橋耀一, 郡司直樹, 秋吉孝則, 村本靖徳: 材料とプロセス, 3 (1990), 599.
- 19) 岩瀬正則, 北口仁, 一瀬英爾, 中村一, 森谷尚玄, 丸橋茂昭: 鉄と鋼, 71 (1985), S1595.
- 20) 岩瀬正則, 北口仁, 一瀬英爾, 中村一, 森谷尚玄, 丸橋茂昭: 鉄と鋼, 71 (1985), S1594.
- 21) 米澤公敏, 原田俊哉, 田淵敏, 高本久, 小倉利弘, 藤原龍次: 鉄と鋼, 78 (1992), 74.
- 22) 鷺見郁宏, 高岡利夫, 菊池吉輝, 古田周良, 長塚利男, 雀部実: 材料とプロセス, 5 (1992), 1010.
- 23) 小野昭紘, 千葉光一, 佐伯正夫, 仁部晴美, 笠井茂夫: 鉄と鋼, 71 (1985), S1210.
- 24) 望月正: 鉄と鋼, 79 (1993), N783.
- 25) 早川泰弘, 小野昭紘, 辻野良二, 中島潤二, 仁部晴美: 材料とプロセス, 2 (1989), 153.
- 26) 山名寿: 鉄と鋼, 81 (1995), 301.
- 27) 大森知美, 西野都, 北村章, 木村世意, 瀬村康一郎, 三角龍平: 材料とプロセス, 10 (1997), 1009.
- 28) D. M. Himmelblau: Applied Nonlinear Programming, McGRAW-HILL, (1972), 148.
- 29) 大塚喜久, 瀬村康一郎: 神戸製鋼技報, 46 (1996) 2, 19.
- 30) 大森知美, 大塚喜久, 岩谷敏治, 瀬村康一郎: 第41回システム制御情報学会講演論文集, (1997), 123.

(1997年10月7日受付)