



特集記事・6

ここまで来た鉄鋼の計測・制御・システム技術

モデル予測制御を活用した熱延鋼板の蛇行制御

Walking Control in Hot Strip Rolling Using Model Predictive Control

住友金属工業(株) 総合技術研究所
主任研究員

大阪大学 大学院基礎工学研究科
教授

中川 繁政

Shigemasa Nakagawa

大塚 敏之

Toshiyuki Ohtsuka

1 はじめに

モデル予測制御 (MPC : Model Predictive Control) は、簡単に言えば、「プロセスの入出力間の動的モデルを用い、現時刻より未来の出力の動きを予測し、その動きができるだけ好ましい動きとなるように操作量を決定する。このような操作量の決定手続きを制御周期ごとに繰り返し行なう」ものである。

モデル予測制御は、1970年代後半から80年代にかけて誕生し、石油化学産業などのプロセス制御の分野で広く実用化され、プロセス制御の高度化や技術水準の向上に貢献している^{1,2)}。

鉄鋼プロセスにおいても、モデル予測制御は連続式加熱炉や薄板圧延機などのプロセス制御において実用化され、品質向上や能率向上などに効果を上げている。

また、計測・制御・システム工学部会の「オンライン最適化を核とした次世代鉄鋼プロセス制御」研究会 (2005年～2009年) において、最新技術である非線形モデル予測制御やハイブリッドモデル予測制御の鉄鋼プロセスへの応用研究が各種なされている。

本稿では、実用的な制御系設計手法として産業界からの注目度の高いモデル予測制御について、その基本的な考え方を説明するとともに、モデル予測制御の適用事例として熱延鋼板の蛇行制御について紹介する。

2 モデル予測制御とは

制御対象として、次の状態空間モデルで表される離散時間線形システムを考える。

$$x[k+1] = Ax[k] + Bu[k] \dots\dots\dots (1)$$

$$y[k] = Cx[k] \dots\dots\dots (2)$$

ここで、 k は離散的な時間ステップを表す整数、 $x[k]$ はシステムの状態を表す状態ベクトル、 $u[k]$ は操作量 (制御に使える入力) を表す入力ベクトル、 $y[k]$ は制御量 (制御すべき出力) を表す出力ベクトルである。それらベクトルの次元に応じて行列 A 、 B 、 C のサイズは決まる。

(1)、(2) 式のシステムを制御するという事は、制御量 $y[k]$ が所望の応答になるよう操作量 $u[k]$ を決定することに他ならない。操作量の決定方法を与える制御理論にはさまざまなものがある。本稿で紹介するモデル予測制御では、各時刻において有限時間未来までの応答を予測し最適化することによって操作量を決定する。以下ではモデル予測制御の問題設定と操作量決定方法を述べる。

各時刻 k において、所望の応答を表す制御量の参照値が N ステップだけ未来まで与えられるとし、それを $y_r[k+i|k]$ ($i=0, \dots, N$) と置く。この場合、目標とする制御量の参照値が与えられていない遠い未来の操作量は決めようがないので、操作量の方も、各時刻において適当な有限ステップだけ未来まで考えることとし、それを $\hat{u}[k+i|k]$ と表すことにする。同様に、状態と制御量も各時刻を起点に有限ステップだけ未来まで考え、それらをそれぞれ $\hat{x}[k+i|k]$ 、 $\hat{y}[k+i|k]$ と表す。ただし、 $\hat{x}[k|k] = x[k]$ である。すなわち、未来の操作量 $\hat{u}[k+i|k]$ が与えられれば、(1)、(2) 式を用いることにより、未来の応答 $\hat{y}[k+i|k]$ が現在時刻 k における実際の状態 $x[k]$ と $\hat{u}[k+i|k]$ ($i=0, \dots, N-1$) の1次式 (係数行列は、 A 、 B 、 C で表される) で予測 (モデル予測) することができる。

次に、応答の最適化を考えよう。参照値 $y_r[k+i|k]$ と制御量の予測値 $\hat{y}[k+i|k]$ との誤差はなるべく小さいことが望ましいが、一方、操作量があまり大きくなることも避けたい。そこで、以下のように両者の重み付き2乗和を評価関数とする最適化問題を考える。

$$J[k] = \sum_{i=0}^N \|\hat{y}[k+i|k] - y_r[k+i|k]\|_Q^2 + \sum_{i=0}^{N-1} \|\hat{u}[k+i|k]\|_R^2 \dots \dots \dots (3)$$

ここで、 $\|y\|_Q = \sqrt{y^T Q y}$ 、 $\|u\|_R = \sqrt{u^T R u}$ であり、 Q は準正定対称行列、 R は正定対称行列の重み行列である。

(3) 式の評価関数を最小化する操作量 $\hat{u}[k+i|k]$ を求める問題は、制約無し²の2次計画問題であり、最適性条件 $\partial J / \partial \hat{u}[k+i|k] = 0$ により、解析的に最適解を求めることができる。このようにして、 N ステップだけ未来までの応答を最適化する操作量の系列が求められる。

上の最適化問題によって求めた操作量の系列は時刻 k から $k+N-1$ までで終わってしまうため、そのままでは継続的な制御に用いることができない。そこで、求めた操作量 $\hat{u}[k+i|k]$ の系列全体を使うことはせず、 $i=0$ にあたる現時刻 k に対応する最初の部分 $\hat{u}[k|k]$ のみを実際の操作量 $u[k]$ として使うことにする。次の時刻 $k+1$ においては、1ステップ未来の情報が加わった参照値 $y_r[k+N+1|k+1]$ を使って操作量 $u[k+1]$ を決定するので、時刻 k において求めた $\hat{u}[k+1|k]$ が $u[k+1] = \hat{u}[k+1|k+1]$ と必ずしも一致しないことに注意されたい。同様に、予測値 $\hat{u}[k+i|k]$ 、 $\hat{x}[k+i|k]$ 、 $\hat{y}[k+i|k]$ ($i=1, 2, \dots$)は、実際の値 $u[k+i]$ 、 $x[k+i]$ 、 $y[k+i]$ と必ずしも一致しない(図1)。モデル予測制御を最適制御問題として見ると、各時刻 k で応答を最適化する評価区間が k から $k+N$ までであり、時間とともに評価区間(horizon)が未来へ後退(recede)していくので、receding horizon制御とも呼ばれる。

モデル予測制御の特徴は、最適化問題さえサンプリング周期内に解ければさまざまな問題設定を扱えることである。たとえば、実際の制御問題では、操作量、状態、制御量に対して不等式制約条件が課される場合も多く、そのような問題に対してモデル予測制御は有用である。特に、本章で扱ったような制御対象が線形システムで評価関数が2次式である問題

は、操作量、状態、制御量に関して1次式の不等式制約が課せられたとしても標準的な2次計画問題であり、大域的な最適解が求めやすい。さらに、モデルや制約条件が非線形関数であったり、評価関数がより一般的な関数であるような問題も考えられるが、その場合は非線形計画問題になるので、大域的な最適解が必ず求められるとは限らない。また、局所最適解であっても求めるための計算量が大きく、サンプリング周期内に最適化計算が終了するとも限らない。

モデル予測制御の問題設定としては、他に、制御量と操作量とで異なる評価区間を用いることや、操作量そのものではなく、その変化量 $\Delta u[k] = u[k+1] - u[k]$ を最適化することも多い。また、モデルとして本稿のような状態空間モデルの代わりに伝達関数モデルやステップ応答モデルもしばしば用いられる¹⁾。制御対象と制御目的に応じた問題設定を使い分けることが重要である。

3 モデル予測制御を用いた鉄鋼プロセス制御

3.1 鉄鋼プロセスにおけるモデル予測制御の開発事例

鉄鋼プロセスにおける計算機制御においては、従来よりモデルに基づいた制御が各種導入され効果を挙げてきているが³⁾、近年、モデル予測制御を適用した開発事例が増えてきている⁴⁻⁸⁾。

たとえば、連続式加熱炉の計算機制御においては、燃焼帯の燃料流量をモデル予測制御により求めた開発事例⁵⁾や、モデル予測制御を用いて各燃焼帯毎に在帯スラブが昇温パターンに沿うように設定炉温を決定する開発事例⁶⁾が報告されている。

また、圧延機の制御においては、近年の開発事例として、熱延仕上圧延機での鋼板蛇行制御の開発⁷⁾や、モデル予測制御を用いた冷延鋼板形状矯正の開発⁸⁾があげられる。

さらに、モデル予測制御の鉄鋼プロセスへの応用研究としては、非線形モデル予測制御の冷間圧延機への応用研究⁹⁾やハイブリッドモデル予測制御の熱延仕上ミル張力・ルーパ系への応用研究^{10,11)}、などがあり、現在も積極的に研究開発が進められている。なお、文献^{9,10)}は計測・制御・システム工学部会の「オンライン最適化を核とした次世代鉄鋼プロセス制御」研究会の研究成果である。

以下では、具体的な開発事例として、モデル予測制御を用いた熱延薄板圧延での鋼板蛇行制御⁷⁾について紹介する。

3.2 モデル予測制御を活用した熱延鋼板の蛇行制御

熱間薄板仕上圧延において、鋼板尾端部が圧延機を抜ける際に蛇行し、鋼板の板幅方向端部がサイドガイド装置と接

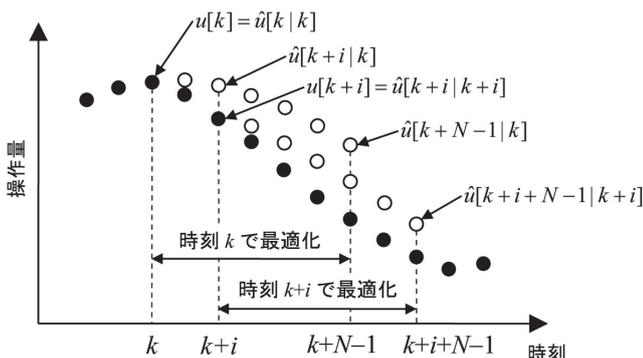


図1 操作量の予測値と実際の値との関係

触して折れ込み、下流の圧延機で正常に圧延できないことがある(絞り込みトラブルと呼ぶ)。絞り込みが発生すると、ロール表面に生じた疵が製品に転写されることによる不良品の発生、ロール替えによるロール原単位の悪化、生産性の阻害など、多くの弊害が生じる。

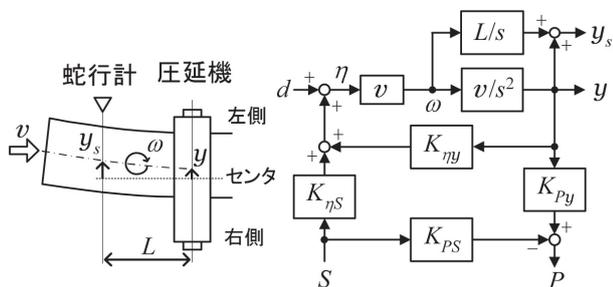
従来、絞り込みを防止する蛇行制御としては、鋼板が蛇行すると、寄った側の荷重が増加し反対側の荷重が減少するという差荷重の変化を検出して、圧延機の左右のロール開度差であるレベリングを操作する差荷重方式が用いられていたが、鋼板が広幅になるほど制御効果が極端に減少するという問題があった。

そこで圧延機の入側に蛇行計を設置して、その検出値に基づいてレベリングを操作する蛇行量検出方式の蛇行制御が開発された。ただし、蛇行が生じるときは、鋼板は回転しながら並進するため、蛇行計で検出された蛇行量は、鋼板が蛇行計位置から圧延機まで移動する時間だけ遅延させても、制御量である圧延機位置の蛇行量には一致しないという問題がある。モデル予測制御では、モデルを用いて制御量の未来値を予測するという基本的な考え方により、この問題を自然に解決することができ、レベリング操作量を最適化することができる。

(1) 蛇行現象の数式モデル

蛇行現象のブロック線図は、図2で表される¹²⁾。ここで、 $1/s$ は積分演算、 s は微分演算を表す。この制御対象の特徴は、次の3点である。

- 二重積分があるため、立ち上がりは遅い。
- 蛇行量から角速度への正帰還ループがあるため、蛇行し始めると指数関数的に発散する不安定系である。



y_s : 蛇行量検出値 (+:左方向, -:右方向)
 y : 圧延機位置における蛇行量 (+:左方向, -:右方向)
 η : 鋼板の幅方向速度分布率
 ω : 鋼板の回転角速度
 L : 蛇行計から圧延機までの距離
 v : 鋼板の並進速度
 d : 外乱
 S : レベリング量 (左側開度 - 右側開度)
 P : 差荷重 (左側 - 右側)
 K_{BA} : A から B への影響係数

図2 蛇行現象のブロック線図

●実際に蛇行が問題になるほど増大するのは、圧延機入側の拘束力が無くなる時間帯、すなわち、上流圧延機の尾端オフから当該圧延機の尾端オフまでであり、制御している時間が短い。したがって、尾端オフ時の蛇行制御では定常応答が無いため、一般的に制御で最も重要視される安定性よりも速応性が重要になる。

(2) 蛇行量検出方式による蛇行制御

蛇行量検出方式では、圧延機入側に設置された蛇行計で検出した蛇行量に基づいて圧延機のレベリングを操作する。蛇行計で検出された蛇行計位置の蛇行量 y_s と、圧延機位置の蛇行量 y との関係は

$$y_s = \left(\frac{L}{v}s + 1\right) \cdot y \dots\dots\dots (4)$$

となる。したがって、蛇行量検出方式では、レベリング操作の制御ループ内に、制御量である圧延機位置蛇行量の微分情報を自然に取り込むことになり、速応性に優れた制御系を構成できる。

図3は、蛇行量検出方式で比例制御を実施した場合の制御ゲインと制御効果の関係をシミュレーションした結果である。同じ比例制御の差荷重方式の図4と比べて、板幅によらず、小さい制御ゲイン域でも制御ゲインにほぼ比例した制御

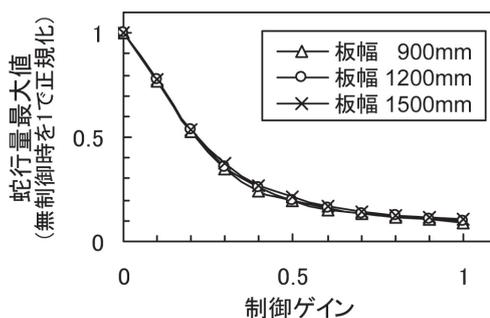


図3 蛇行量検出方式における制御ゲインと制御効果の関係

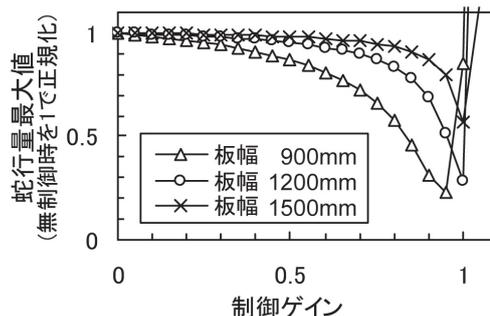


図4 差荷重方式における制御ゲインと制御効果の関係

効果が得られており、差荷重方式より優れた制御方式であることがわかる。

(3) モデル予測制御による蛇行制御

蛇行量検出方式は差荷重方式より優れた制御方式であるが、鋼板は回転しながら並進するため、制御量である圧延機位置の蛇行量を測定できていないわけではない。蛇行計位置の蛇行量 y_s から圧延機位置の蛇行量 y への伝達関数は、(4)式からわかるように、一次遅れ要素である。逆に言えば、蛇行計で検出した蛇行量は、圧延機位置の蛇行量より急峻になる。そこで、蛇行計で検出した蛇行量 y_s から圧延機位置の蛇行量 y を予測し、その予測値を最適化するようにレベリング量 S を求めるモデル予測制御を適用する。

図2において、 $z=y$ とおき、 $d=0$ と仮定し、周期 τ で離散化すると、(1)、(2)式の形の状態方程式を得る。ただし、

$$x[k] = [y[k] z[k] d[k]]^T, u[k] = S[k] \dots\dots\dots (5)$$

である。圧延機位置の蛇行量推定値を \hat{y} とし、評価関数を

$$J[k] = \frac{1}{q-p+1} \sum_{i=p}^q \hat{y}[k+i|k]^2 + r \cdot u[k]^2 \dots\dots (6)$$

とおくと (r は y と u の評価の重みを表す設計パラメータ)、 $J[k]$ を最小にする現ステップ k の最適レベリング操作量 $u[k]$ を $x[k]$ の線形式で表すことができる。さらに、(4)式を離散化して $x[k]$ の要素である y に代入すると、検出できない y の代わりに、検出値 y_s を用いた制御則に変更できる。 $x[k]$ の残りの要素である z と d は直接検出できないので、最小次元オブザーバによる推定値を用いる。

モデル予測制御では、モデルによる予測機能により、検出値 y_s と制御量 y が異なる問題を自然に解消することができる。また、モデル予測制御が蛇行制御に適しているもう一つの理由は、評価区間の妥当性と実装の容易性である。制御系の良し悪しを表す評価関数が最小になるように制御則を構築する最適制御としては、最適レギュレータが最もよく知られている。最適レギュレータでは、一般に、評価区間は制御開始時間から無限時間までとするが、定常状態がない尾端部の蛇行制御には不適である。評価区間の終端を有限時間にした最適レギュレータも考えられるが、制御則が時変になるため実装が容易ではない。モデル予測制御は、任意の有限時間帯を評価区間に設定でき、不等式制約のない2次形式の評価関数を最適化する場合は時不変の制御則が得られるので、尾端部の蛇行制御には好適である。

(6)式の具体的な評価区間は、シミュレーションにより検討することができる。まず、現在時刻から評価開始時刻まで

の時間 $t_1 = p\tau$ と蛇行制御効果の関係を図5(a)に示す。横軸は、鋼板のスタンド間移動時間 T で正規化して表示している。 t_1 が、蛇行計から圧延機間までの鋼板移動時間 L/v 以下の場合、制御効果はほぼ一定である。これは、蛇行量が測定された蛇行計直下にある点が、圧延機位置に移動したときの蛇行量は、その移動時間内のレベリング操作の影響をあまり受けないことを意味している。すなわち、制御対象の持つ二重積分による応答遅れが、蛇行計から圧延機までの移動時間よりも長い場合、レベリング操作は主に蛇行計より上流に存在する点に対して効果を表すことになる。したがって、 t_1 を L/v より短くしてもレベリング操作量が大きくなるだけで、制御効果はあまり変わらないので、 t_1 は蛇行計から圧延機までの鋼板移動時間 L/v くらいが妥当と考えられる。

次に、 t_1 を上記のように定めた場合の、評価区間の長さ $t_2 = (q-p)\tau$ と蛇行制御効果の関係を図5(b)に示す。シミュレーションではモデル予測誤差がないので、評価区間 t_2 を長くするほど制御効果が大きくなる。ただし、評価区間を長くすると、想定していない外乱の変化やモデル予測誤差の影響を大きく受けることになるので、実際の制御状況に応じた調整が必要である。

(4) 実機適用結果

蛇行を生じさせる外乱が鋼板回転角速度に与える影響は、板厚が薄いほど大きいため、板厚が薄いほど蛇行しやすい。また、板厚が薄いと、鋼板が蛇行してサイドガイドに接触したときに座屈しやすいため、絞り込みトラブルになりやすい。そこで、7スタンド連続式熱延仕上圧延機の後段4スタンド間に蛇行計を設置し、モデル予測制御を用いた蛇行制御を実施する。ここで、モデル予測制御の最適制御ゲインは、鋼板の圧延開始前に、それぞれの製造条件に応じて、制御用計算機で計算して設定するように構成されている。

制御適用例を差荷重方式と比較して図6に示す。モデル予

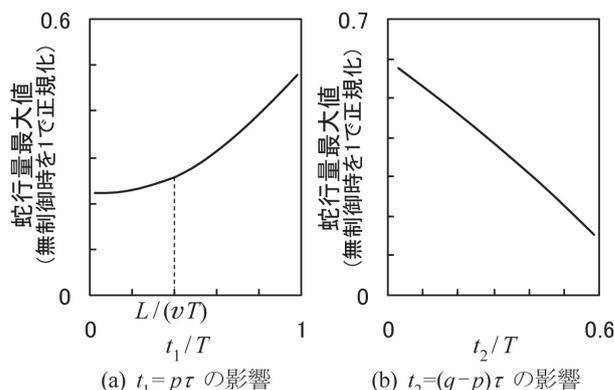
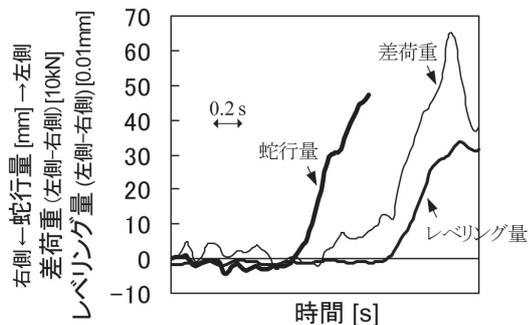


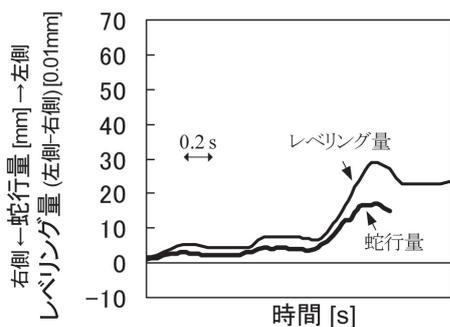
図5 モデル予測制御の評価区間と制御効果の関係

測制御方式では、蛇行量の増大とともに時間遅れなくレベリングを操作することにより、蛇行を抑制できている。最終的なレベリング量の大きさとしては、モデル予測制御方式の方が差荷重方式より、むしろ小さくなっており、蛇行に応じて素速かつ最適にレベリングを操作することの重要性が理解できる。

絞り込みトラブルに繋がる、鋼板とサイドガイドの接触の発生頻度の減少効果を図7に示す。トータルで集計した場合と、板幅1100mmを境界として狭幅材、広幅材別に集計した場合とを示す。差荷重方式では広幅材に対する効果が小さく、接触の発生頻度はトータルで85%にしか低減していない。一方、モデル予測制御方式では板幅の影響は小さく、接触の発生頻度はトータルで22%に低減している。



(a) 差荷重方式



(b) モデル予測制御方式

図6 蛇行制御適用例

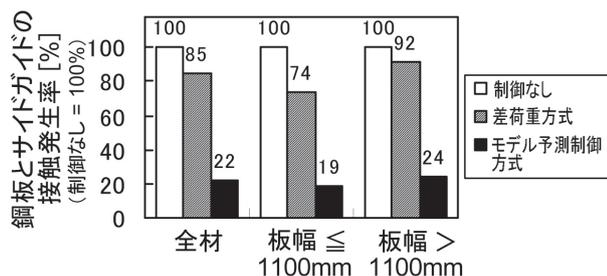


図7 蛇行制御効果

4 おわりに

本稿では、モデル予測制御の基本的な考え方と鉄鋼プロセスでの適用事例として熱延鋼板の蛇行制御について紹介した。

モデル予測制御は、石油化学産業などにおいて数多くの実機適用がなされ、効果をあげているが、鉄鋼プロセスにおいても、近年、開発事例が増えてきている。

鉄鋼プロセスの計算機制御においては、従来よりモデルに基づく制御を導入しており、モデル予測制御は計算機制御における数式モデルとの相性も高く、制御用計算機の演算能力の飛躍的向上とも相まって、今後ますますの適用拡大が期待される。

参考文献

- 1) J.M.Maciejowski 著, 足立修一, 菅野政明訳: モデル予測制御, 東京電機大学出版局, (2005)
- 2) 新見和久: 計測と制御, 43 (2004) 9, 647.
- 3) 高橋亮一: 鉄鋼業における制御, コロナ社, (2002)
- 4) 中川繁政, 鷲北芳郎, 岸真友: 計測と制御, 47 (2008) 11, 941.
- 5) N.Yoshitani, T.Ueyama and M.Usui: IECON Proceedings [c], 3 (1994), 1567.
- 6) 山本克史, 前田一郎, 三吉貞行, 中塚伸治, 中島宏幸, 柳野公治: CAMP-ISIJ, 10 (1997), 1017.
- 7) 鷲北芳郎, 伊勢居良仁, 武衛康彦, 齊藤憲幸: 鉄と鋼, 95 (2009) 1, 43.
- 8) 安藤正樹, 桂直之, 和田亨, 仲篤起: 電気学会金属産業研究会資料, MID-06-13 (2006), 5.
- 9) 尾崎昂平, 大塚敏之, 藤本健治, 北村章, 中山万希志: 鉄と鋼, 96 (2010) 7, 459.
- 10) 増田士朗, 浅野一哉, 今井築: 鉄と鋼, 96 (2010) 7, 443.
- 11) 井村順一, 児島晃, 増田士朗, 津田和呂, 浅野一哉: 鉄と鋼, 90 (2004) 11, 925.
- 12) 中島浩衛, 菊間敏夫, 松本紘美, 梶原利幸, 木村智明, 田川昌良: 塑性加工春季講演会講演論文集, (1980), 61.

(2010年12月2日受付)