

データベースを基とする金属板材のV曲げ加工用AI制御システムの開発

楊 明*・真鍋 健一**

1. まえがき

現在、V曲げ加工の分野では曲げ成形過程の解析と加工の知能化の研究が中心に行われている¹⁾。前者は有限要素法を利用したV曲げのシミュレーションを行い、スプリングバックを解析し実験結果と比較検討を行って、より高精度なシミュレーションを確立させる研究である^{2),3)}。しかし、シミュレーションには仮定が多く、精度に影響をすべての要素をモデルに組み込むことは難しく、限界がある。後者は、オンライン計測システムとコンピュータ制御システムを導入して、曲げ加工プロセスの知能化を目指している研究である。これらの研究では、ニューラルネットワーク等を制御システムに導入して力学モデルとの併用⁴⁾によって、あるいは単純曲げ理論に基づく加工モデルを制御に導入することによって加工精度を向上させることなどが行われている。しかしニューラルネットワークには学習データが少ない場合には信頼度が低いなどの問題がある。さらに力学モデルには、シミュレーションと同様に誤差が多く含まれる。

V曲げ加工では、高精度な曲げ角度を得るために加工材料に応じて正確にスプリングバックを予測し、正確な加工条件を求める必要がある。しかし曲げには、材料の塑性変形特性や素材と金型の間の摩擦など非線形要素が多い。また、同種の材料であってもメーカー、ロット、ロール目の方向、板厚のばらつき、板の中央と端部等によって、材料特性が異なるため曲げ角度が異なる。さらに加工環境における温度、機械の油温の変化等も精度に影響を及ぼす。

そこで本研究では、V曲げ加工の基礎実験データ、引張試験データを蓄積したデータベースを構築し、さらにそのデータベースを基とする金属板材のV曲げ加工用AI制御システムの開発を試みた。

2. データベースを用いたV曲げ加工制御システム

2.1 知的V曲げ加工システムの概念

データベースとは、共通のデータがさまざまな応用に対応できるように格納されたデータの供給基地である。機械工学では、材料強度分野において疲労強度特性の予測に利用されているほか、塑性加工分野、特に冷間鍛造の設計において、データベースを利用したエキスパートシステムが研究、開発されている。V曲げ加工では、早乙女らは塑性加工モデルによる無次元化解析結果をデータベース化し、

種々の材料、加工条件に柔軟に対応できる加工制御システムを開発している⁵⁾。

データベースは大量のデータを蓄積しているので、検索するのに時間がかかり、オンライン制御には不向きである。そこで、必要最小限のデータを格納した小さなデータベースを別に構築し、オンライン制御に導入することが必要であると考えられる。図1⁶⁾にデータベースを基とする制御システムの概念を示す。図に示すように加工前に分かる情報(例えば、公称板厚、製造メーカー、目標曲げ角度など)をコンピュータに入力して、それを基に基礎データベース(オフラインデータベース)の一次検索を行い、その結果をオンラインデータベースとして保存する。加工中に測定した情報を用いてオンラインデータベースを二次検索し、測定情報とデータベースからの情報を制御モデルによって総合的に評価して、加工条件を推定する。

2.2 F-S曲線データデータベースの構築

曲げに影響する要素は多く存在するが、より多くの影響要素を曲げ加工制御システムに取り入れるために、曲げの基礎実験データとして、素材の板厚、材質、力学特性などの数値データ以外に、すべての因子の影響を含む加工中に

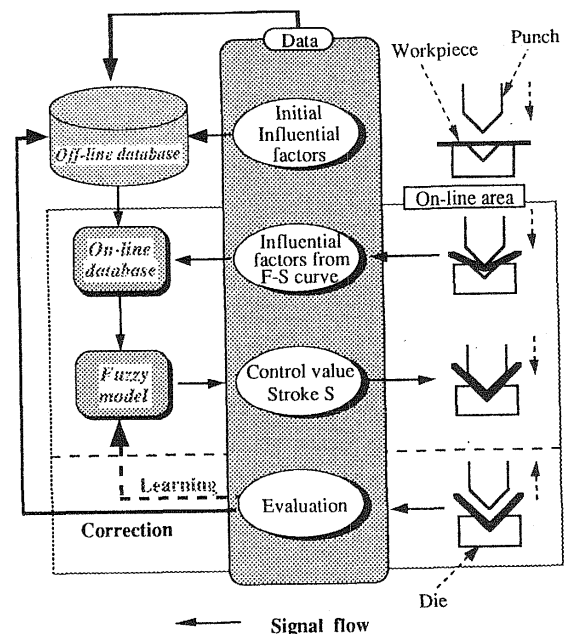


図1 データベースを用いたV曲げ加工制御システム

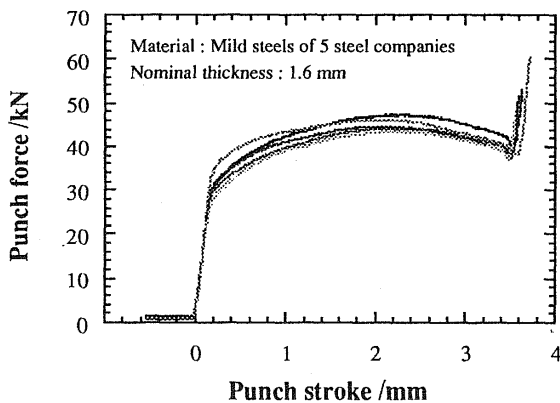


図2 製造メーカーやロットの違いに対する荷重-ストローク曲線の相違

得られるパンチ荷重-ストローク曲線 (F-S曲線) を採り入れることは高精度化には有力と考えられる。測定したパンチ荷重-ストローク曲線を図2に示す。図から分かるように同一材質の材料でも製造メーカーやロットの違いによって曲線も微妙に異なる。そこで、曲線を分析することによって、より多くの影響要素を抽出し、それを基に高精度の加工が可能と考えられる⁹⁾。図3にF-S曲線から抽出した四つの離散化因子とその抽出方法を示す。このように曲線から抽出した離散化因子はその他のファクターと一緒にデータベースに保存する。表1にデータベース内の項目を示す。

2.2 推論モデル

多くの影響要素から加工条件を推定するモデルを塑性力学モデルによって表すことはとても困難である。このような場合、人工知能 (ファジィ推論, ニューラルネットワーク等) を利用した推論手法が有効であると考えられる。本研究では、ファジィ推論を用いて、複数のファクターから加工条件を推定する推論モデルを構築した。具体的には、加工中にセンシングしたF-S曲線から離散化因子を求め、こ

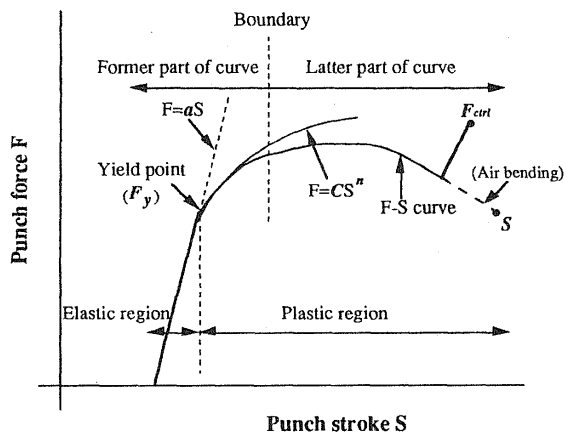


図3 F-S曲線の離散化方法

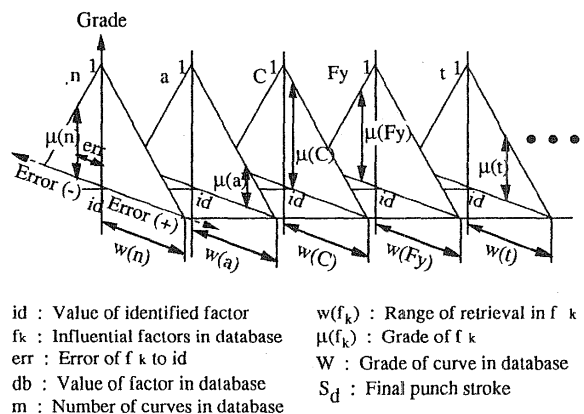
表1 データベースに保存されるデータ項目

Item	Physical meaning	
F-S curve	a	F-S curve slope of Elastic region (Ref. Fig. 3)
	C	Coefficient in Equation $F=CS^n$ (Ref. Fig. 3)
	n	exponent in in Equation $F=CS^n$ (Ref. Fig. 3)
	F_y	Yield punch force (Ref. Fig. 3)
	S_No.	Serial number
Workpiece	Material	Material
	Maker	Maker
	t	Thickness
	B	Width
	l	Length
Condition & Bend angle	θ	Bend angle
	F	Punch force for desired bend angle
	S	Punch stroke for desired bend angle
	T	Ambient temperature
tools	v	die width
	R_d	Radius of die
	R_p	Radius of punch
	α	die angle

れらの離散化因子を用いて、データベースの二次検索を行い、検索した各ファクターに対する適合度を計算する。図4に適合度 μ を決めるメンバーシップ関数を示す。得られたこれらの適合度をかけ合わせるによって、下記のようにデータベース中の各F-S曲線の重みを計算する。

$$W_i = \prod \mu(f_k) \quad (1)$$

W_i はデータベース中のi番目のF-S曲線が加工中のF-S曲線に対する重みであり、その値が1に近ければ近いほど、加



id : Value of identified factor
 f_k : Influential factors in database
 err : Error of f_k to id
 db : Value of factor in database
 m : Number of curves in database
 $w(f_k)$: Range of retrieval in f_k
 $\mu(f_k)$: Grade of f_k
 W : Grade of curve in database
 S_d : Final punch stroke

図4 ファクターの適合度を決めるファジィメンバーシップ関数

工中のものと似ていることを意味する。これらの重みを用いて、下記の3種類の方法で加工制御値を求めた。

(a) 重み付き平均法：もっとも簡単な方法として、加工制御値を式(2)に示す重み付き平均で求めることができる。

$$F = (\sum w_i F_i) / \sum w_i \quad (2)$$

(b) 補正法：各ファクターの加工中のセンシングデータがデータベースから検索したデータと大きく異なる場合、式(2)による重み付き平均だけでは、精度が得られないと考えられる。そこで、センシングデータと検索データとの隔たりに用いて、式(3)に示す ΔF_i によって制御値の補正を行う。

$$\Delta F_i = \sum_k \Delta f_k \frac{dF_i}{df_k} \quad (3)$$

ここで、 Δf_k はセンシングデータと検索データとの隔たりを表し、 dF_i/df_k は各ファクターの制御値に対する強さを表す。得られた補正量 ΔF_i は制御値に加えられた後に、式(2)の重み付き平均によって最終制御量を決定する。

(c) ベクトル選択法：実験データベースを用いる場合、その情報が均一に分布する場合と偏りを持つ場合があり得る。データが均一に分布する場合は上記の重み付き平均法がよい推論結果を示すが、偏りを持つ場合は誤った結果を得る可能性がある。図5にその一例を示す。図5(a)のようにデータベース中の情報が加工中の材料に対して両側に適切

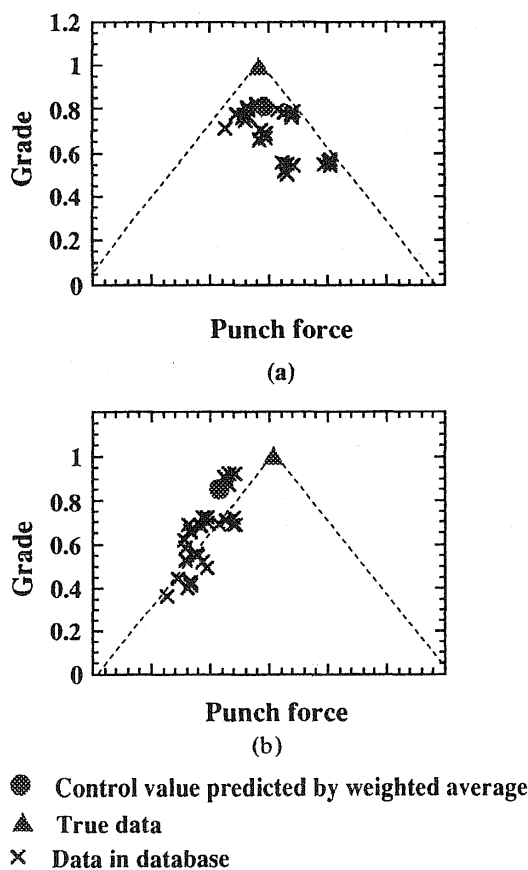


図5 実験データベースを用いる場合の推論精度

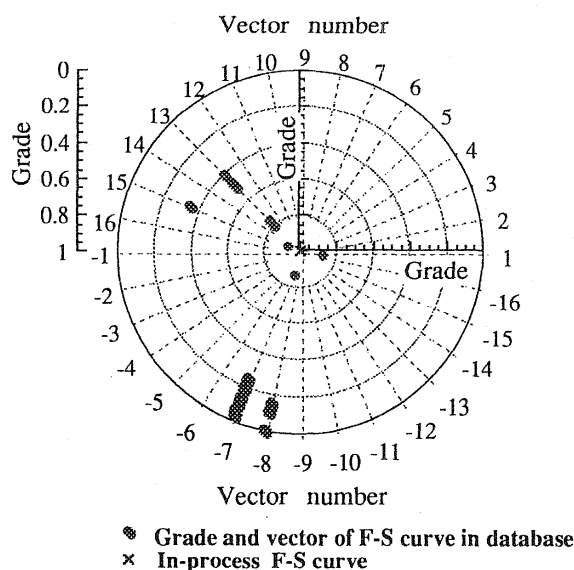


図6 ベクトル選択法によるデータの分類・選別

に分布している場合は推論された制御量も正解のパンチ荷重に近い値を示すが、(b)のように情報が偏った場合、誤った制御量が推論されることになる。そこで、加工中のプランクの各因子と実験データベース内のF-S曲線の各因子の大小関係の組み合わせをベクトルを用いて表し、それによってF-S曲線を分類・選別するものである。本研究では、素材の変形特性をF-S曲線から離散化した四つの離散化因子と板厚の五つのファクターによって表しているため、そのベクトル数は9となる。このように分類された各ベクトル上のF-S曲線群からグレードの最も高いものを選択してファジィモデルに代入してパンチ押込み量の決定を行う。図6にその一例を示す。

3. 結果と考察

基礎実験は製造メーカーの異なる7社の軟鋼板を用いて行った。材料特性や加工条件は表2に示す。市販のリレシヨナルデータベースソフトウェア (UNIFY) を使用して、F-S曲線を離散化したものや加工条件他のファクターをオフラインデータベースとして構築した。また、F-S曲線も同じハードディスクに保存され、シリアルナンバーによ

表2 プランクの寸法と曲げ加工条件

Test piece	Thickness	t/mm	1.539~1.607
	Width	B/mm	150
	Length	l/mm	300
	Bend line		Rolling direction
Conditions & bend angle	Bend angle	θ /degree	90
	Ambient temperature	T/°C	20
Tool conditions	Die width	v/mm	9
	Die radius	r_m /mm	0.5
	Punch profile radius	r_p /mm	0.2
	Die angle	α /degree	89

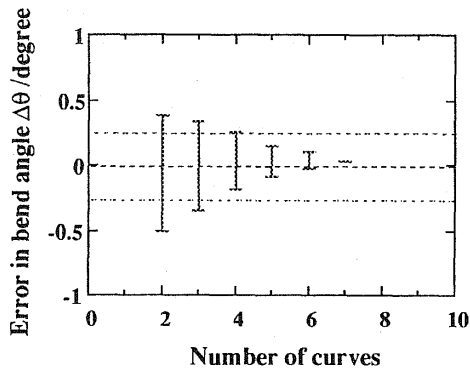


図7 曲げ加工精度に及ぼす推論に用いるデータ数の影響

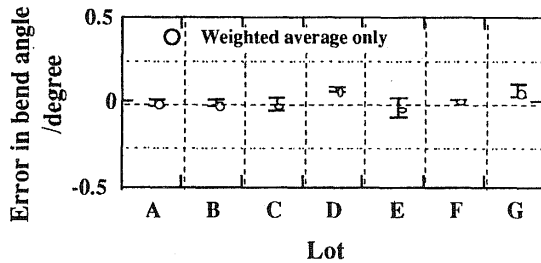


図8 同一ロットのデータベースを用いた場合の加工制御の精度

て検索できるようになっている。オンライン用データベースはデータ量が少ないので、既存のソフトウェアは使用せず、プログラムを組んで独自のデータベースを構築した。また、ファジィ推論モデルを用いて、加工制御の精度評価を行った。図7に曲げ加工精度に及ぼすデータ数の依存性を示す。結果から分かるように6個以上のデータを用いれば、安定した精度が得られる。

3.1 同一ロットのデータベースを用いる場合

まず、加工中の材料と同一メーカー、同一ロットの材料がデータベースに存在する場合の結果を図8に示す。加工中の材料特性等にかなり近い情報がデータベースにあるので、これらの情報をファジィモデルによって評価した場合、曲げ角度の90度に対してばらつきが $\pm 5'$ という高精度なものが得られた。

3.2 異ロットのデータベースを用いる場合

加工中の材料と同一メーカーあるいは同一ロットの材料がデータベースに存在しない場合の結果を図9に示す。式(2)の重み付き平均だけで評価した場合の結果をマークxで示す。また、式(3)のファクターの強さによる補正を行ったあと、重み付き平均による評価を行った場合の結果をマーク△で示し、さらに、選択法も併用した場合の結果をマーク○で示す。図8の結果と比較して曲げ精度が $\pm 20'$ となっている。しかし、マークxに示された結果よりマーク△、さらにマーク○の結果は誤差のばらつき範囲がかなり小さ

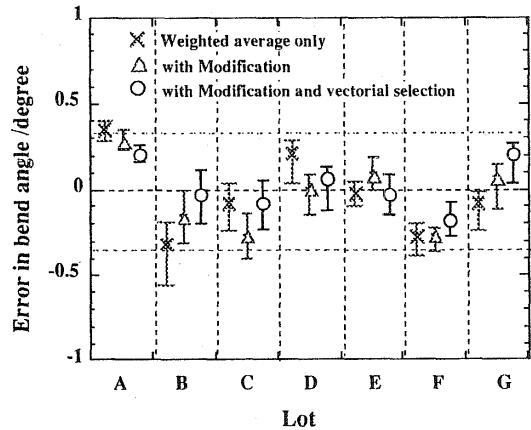


図9 異なるロットのデータベースを用いた場合の加工制御の精度

表3 異なるブランク材の試験片の寸法

Workpiece	Material	Aluminium Alloy(Al) Stainless Steel(SUS) Mild steel(SPC) Brass
	Thickness t/mm	0.99 ± 0.2
Width W/mm	150	
Length l/mm	100	
Bend line	Rolling direction	

くなっており、精度も向上している。

以上の結果から、F-S曲線データベースを用いた曲げ加工のプロセス制御が大変有効であることがわかる。特に、加工する材料と同様なデータがデータベースに存在する場合において、 $\pm 10'$ という高精度の加工が得られる。

3.3 学習による異なるブランク材料への対応

材質あるいは板厚が異なる4種類のブランク材を用いてV曲げ加工を行った。ブランクの幾何学寸法と実験条件を表3に示す。ここでは、材料特性が大きく異なった材料を初めて加工する場合を想定し、その評価結果からシステムの学習を行うことによって、加工精度の向上の方法論について考察する。

まず、未知の材料に対して今までの実験データベースを用いて加工を行う場合、材料などが大きく異なるため、得られた曲げ角度に大きな誤差が含まれていた⁹⁾。このことから職人が経験と知識を蓄えると同様に、システムの学習を行う必要がある。そこで、加工中に得られた情報と製品の結果をデータベースに蓄積すると同時に、補正ファジィモデルの係数を学習する。図10は学習による加工精度の変化を示す。図に示すように4、5回の学習によって、加工精度が大きく向上している。学習によって、多くの材料に関する知識を獲得し、より広範囲に適用できる推論ができる。また、多くの材料の曲げ加工情報をデータベースに蓄

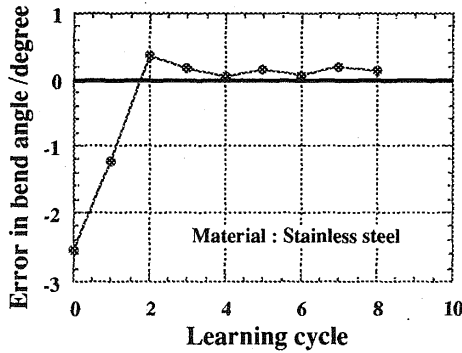


図10 学習による曲げ精度の変化

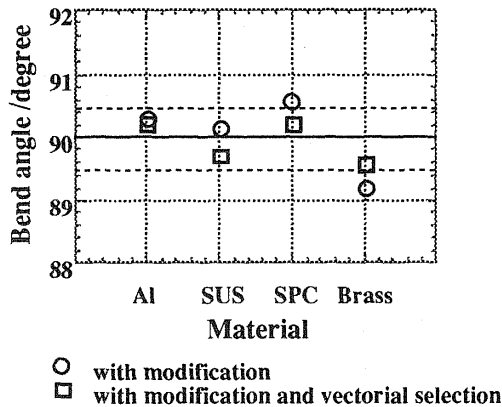


図11 学習後の曲げ加工精度

積することによって、ブランクにより近い情報を検索し、制御に用いることができる。これは弟子が職人に成長したことに相当する。ここで、4種類のブランク材に対して、それぞれ10回の学習を行った。学習を終えたデータベースとファジィモデルを用いて4種類のブランク材の曲げ加工に対して制御システムを適用し、加工精度とこのシステムの有用性を確認した。その結果を図11に示す。この結果より実験作業者はそれぞれの板材の材料特性を知らず、コンピューターにもそのような情報を入力しないにもかかわらず、加工は大変高精度で、しかもどの材料についてもその精度が安定している。

以上より、この制御システムの有効性が確認された。しかし、精度的には、曲げ角度の誤差が同一ロットでは約±5'、同一材料・異なるロットでは±20'、異なる材料では約±30'となっており、材料特性などのばらつき(差異)範囲が大きくなるにつれて、精度の低下が見られた。これは、本システムがデータベース内の情報の被加工ブランク材に対するグレード(相似の度合)を用いて内挿的な近似計算(式(2)参照)によって制御量を決定するものであるため、同一ロットの場合はグレードが高くなり、高精度な近似ができたが、グレードが低くなるにつれて、近似精度も低下した。また、補正ファジィモデルでは一次近似式(式(3)参

照)が用いられるため、補正量が大きくなるにつれ、その精度が低下したと思われる。今後、補正方法の改良が望まれる。しかし、上述の同一材料・異なるロットと異なる材料に関する精度はあくまでも初めてその材料を加工する場合を想定したものであり、加工を重ねるにつれて、その情報がデータベースに蓄えられ、次の加工に使用されるので、数回の実験後には同一ロットの場合と同程度の加工精度が得られる。すなわち、このシステムの各種材料に対する適応性は大変高いものである。また、この加工情報の管理とリアルタイム加工制御原理は曲げ加工だけでなく、機械加工全般に適用できる極めて応用性のあるものである。

4. まとめ

本研究では、V曲げ加工の基礎実験データから、データベースを構築し、プロセス制御に適用した。特に、加工中のF-S曲線をデータベースに蓄え、より多くの影響ファクターを抽出し、制御に取り入れることを試みた。さらに、データベースから検索した情報と加工中のセンシング情報をファジィモデルによって評価し、加工制御値を決定するような曲げ加工のAI制御システムの開発を行った。

今後、さらに、曲線から表1示す以外のファクターの抽出も行い、より多くの影響ファクターを考慮に入れる必要がある。また、制御モデルに対しても、その信頼度を評価し、より高精度なものになるように、モデルを学習していくことが必要である。

この研究の一部は天田金属加工技術振興財団の助成金を受けて行われたことを記して感謝の意を表す。

参考文献

- 1)川田：平5春塑加講論，(1993)，789.
- 2)滝沢他：40回塑加連講論，(1989)，457.
- 3)小川他：平4春塑加講論，(1992)，747.
- 4)楊他：42回塑加連講論，(1991)，453.
- 5)早乙女他：43回塑加連講論，(1992)，409.
- 6)Yang, Kojima, Manabe: V-bending Process Control System with an On-line database and a Fuzzy Control Model, Proc. Japan-U.S.A. Symposium on Flexible Automation, 1994, pp.1243-1249.
- 7)Yang, M., Kojima, N., Manabe, K. & Nishimura, H., "High Accuracy V-bending Process Control with an On-line Database and Modified Fuzzy Models", JSME inter. Journal Series C, Vol.40, No. 1, 1997, pp.157-162.
- 8)Yang, M., Manabe, K. & Nishimura, H., "Development of Real-time Process Control System for Precision and Flexible V-bending with an On-line Database", J. of Mater. Process. Technol., Vol.60(1996), pp.859-860.

* 東京都立大学大学院 工学研究科 機械工学専攻 助手

** 東京都立大学大学院 工学研究科 機械工学専攻 助教授