曲げ成形シミュレーションの基礎と応用例

Foundation and application of bending simulation

内海 能亜*

Noah UTSUMI*

Keywords: bending, extruded section, aluminum alloy, FEM, forming property

1. はじめに

筆者が塑性加工解析の業務に携わるようになったのは、企業に勤めていた1996年からのことである。その企業では、オートマチックトランスミッションの部品であるクラッチドラムの生産技術開発を行った。部署内では、塑性加工シミュレーションに関心はあったが、ソフトウェアの導入は非常にコストがかかり、また、その効果の検討には困難が予想されたため、ソフトの選定には慎重になり時間を要した。そこで、解析ソフトを適用している金型メーカーに解析を依頼し、業務を進めた。ここでは、クラッチドラムを成形するフローフォーミングのシミュレーションを進めた。使用した解析ソフトはMARCであった。解析の目的は金型寿命を推定するためのデータベースの構築であった。モデリングは二次元、三次元ともに行った。三次元の結果は芳しいものではなく、二次元で得た解析結果を評価することとなったが、定性的な評価にすぎなかった。

2001年に在籍していた企業では、DEFORM2D, 3Dという塑性加工専用の解析ソフトを使った。解析対象は自動車のアクスル部品で、熱間鍛造の変形経路、ばりの状況、素材形状、金型形状および金型寿命などを検討するために解析を行った。すでに、ここでは、三次元解析が主流となっており、塑性加工の成形シミュレーションも、PCレベルで動作可能な年代である。

現在では、主として押出型材の曲げ成形解析に、LS-DYNA3Dを1998年から適用している。時が変われば解析内容が変わり、所が変われば解析ソフトも変わる。しかしながら、解析する人は変わらないので、それらを適用するためのトレーニングに時間を費される。本講座を読まれている方も同様の苦勞を強いられていることと思う。

また、塑性加工の分野において、シミュレーションに関心を持つ学生は年々多くなってはいるが、卒業研究として最後まで塑性加工解析に携わる学生は少ないのが現状である。筆者は、学生は実際の塑性加工に携わってから、成形シミュレーションを行うことが理想と考えている。しかしながら、学部生で1年間、修士の学生で計3年間という限られた期間で開発を行うことは、非常に難しい課題である。

さて、本講座では型材の曲げ成形シミュレーションについて

の基礎と応用例について述べる。はじめに、一般的に行われている型材の曲げ加工と、その成形シミュレーションについて紹介する。次に、筆者がこれまでに進めてきた曲げ解析の一部を紹介する。さらに、曲げ成形シミュレーションにおける今後の課題について述べる。

2. 押出型材の曲げ加工とシミュレーション

2.1 押出型材の曲げ加工

押出型材の曲げ加工製品の品質に関する問題点には、しわ、割れ、外観傷、断面形状・肉厚の変化、曲げ半径・角度の寸法誤差などが挙げられる。品質Q (Quality) のほかに、曲げ加工製品のコストC (Cost)、生産性D (Delivery: この場合、直訳ではない)、さらに、最近では環境E (Environment) も考慮に入れ、曲げ加工を行わなければならない。型材の代表的な曲げ加工例¹⁾を図1に示す。

(1) 準均等曲げ

曲げ加工の初等理論に用いられる加工法で、型材に均等に曲げモーメントを負荷する加工法である(図2参照)。実際には、均等に曲げモーメントを負荷することは困難であり、製品を得るための加工法として適用するものではなく、しわや割れ限度を検討する実験装置として適用されることが多い。あえてここで準均等曲げとしたのは、図1に紹介した加工法は腕の長さを十分長くした片持ち曲げとしてモーメントを負荷しており、型材にかかるモーメントにわずかな偏差が生じるためである。

(2) ロール曲げ

汎用的な曲げ加工法の一つであるロール曲げは、三つのロールで板材、円管や型材などを挟み込んで加工する。通常、心材など拘束治具を用いることができないため、大きな曲げ半径や肉厚の厚い型材の曲げに適用される。

(3) プレス曲げ

プレス機に曲げ金型を装着させ、型材を押込む加工法である。プレス機の性能にもよるが、生産性が高い。心材や拘束治具などの装着が困難であるため加工限度は制限される。

(4) 押通し曲げ

押通し曲げの例としてMOS曲げ²⁾がある。三次元の曲げ加工が可能で、自由度の高い曲げ加工法である。しかしながら、曲げ加工時には押通し力を伴うため、しわの抑制には逆

* 広島国際学院大学工学部機械工学科 (〒739-0321 広島市安芸区中野 6-20-1)。Hiroshima Kokusai Gakuin University (6-20-1 Nakano, Aki-ku, Hiroshima-shi, Hiroshima 739-0321). E-mail: utsumi@hkg.ac.jp
受理日: 平成 16 年 3 月 16 日

加工法	加工装置概略	解析の目的	解析事例
準均等曲げ		<ul style="list-style-type: none"> ・モデリング⁵⁾ ・応力とひずみ分布⁵⁾ 	
ロール曲げ		新工法の目処付け	
プレス曲げ		<ul style="list-style-type: none"> ・断面形状の変化^{7),8)} ・肉厚の変化^{7),8)} ・心材の効果⁷⁾ 	
押通し曲げ		最適加工条件 ⁹⁾	
回転引曲げ		<ul style="list-style-type: none"> ・加工限度⁶⁾ ・断面形状の変化¹⁶⁾ ・肉厚の変化¹⁶⁾ ・形材の最適設計¹⁷⁾ 	

図1 形材の曲げ加工法と解析事例

効果となってしまう傾向がある。自動車のスペースフレームには、この押通し曲げを適用したものがある³⁾。

(5) 回転引曲げ

回転引曲げは、形材を曲げ金型に固定し、曲げ金型を回転させ、曲げ負荷棒や圧力型の治具で曲げモーメントを発生させる方法である。加工限度を上げるために、心材の適用や、積極的な軸引張り力を負荷する加工法もある。また、曲げ半径は曲げ金型によって決定されるために、大型の曲げ金型の装着は困難であり、よって、曲げ半径に応じた曲げ金型が必

要となる。

このほかに、圧縮曲げや引張り曲げなども一般的に広く適用される曲げ加工法である。海外では、曲げ半径（金型）を持たない水平のポリウレタンに、直接形材をローラで押付けながら曲げ半径を形成する方法⁴⁾も開発されている。

このように数多くの曲げ加工法がある中で、曲げ加工を行う技術者は、上述したQ・C・D・Eを考慮に入れ、各種の曲げ加工法の中から最良と思われる加工法を選択しなければならない。各加工法の特徴を熟知しなければ、その選択は困

11

図2 曲げモーメント

難である。また、加工する製品の断面形状・材質から加工法の制限がなされる場合もある。さらに、軽量化技術という観点から開発を行う場合には、以下のような項目を重要視しなければならない。

- ・素材性能の向上
- ・部品点数の合理化
- ・材料転換
- ・加工技術の向上
- ・最適設計

筆者の研究ではこれらの項目中、うしろ3件を重要視している。すなわち、軽量化への貢献が著しいアルミニウム合金を適用し、押出材の曲げ加工技術の向上を目的として研究を進めている。さらに、高い曲げ加工限度が得られる押出材断面形状の最適設計の一部も進めている。

このような課題を解決するために、援用としての曲げ成形シミュレーションは、実際の曲げ加工と切り離して考えることができない状況と考える。

2.2 曲げ成形シミュレーション

近年、めざましく進歩の見える有限要素法（FEM）による成形シミュレーションは、モデルの変形挙動、応力やひずみなどを計算結果として出力することができる。この結果を用いて解析技術者が適切な“ある評価”をすることが求められる。この評価によって、開発コスト削減や納期短縮などの効果が見込まれる。図1に示しているように、各曲げ成形シミュレーションを行っている研究者によって、その目的も異なる。筆者が考える曲げ成形シミュレーションの目的をまとめると、図3のようになる。

また、塑性加工に関するシミュレーションの多数の研究報告により、その信頼性も増大している。さらに、研究機関独自の解析ソフトや市販されているソフトはもちろんのこと、ワークステーションやPCにおいても急速に発展し、高速・大容量化したため、精度が良好な成形シミュレーションが得られるようになった。筆者による調査の一例であるが、表1に示すように、計算機のCPUなどの違いにより計算時間が大きく短縮され、より要素数の多い解析を行うことが可能となり、高精度な結果が期待できるようになった。

先に示した図1には押出材の曲げ成形の解析事例を示す。均等曲げ⁵⁾、ロール曲げおよび回転引曲げ⁶⁾は筆者らの解析事例、プレス曲げは星野ら^{7,8)}、押通し曲げ（MOS曲げ）は村田ら⁹⁾によって研究されている。上記の解析ソフトには、市販の汎用コードLS-DYNA3Dが適用されており、曲げ加工以外の板材、材形および管などの塑性加工シミュレーションとしても適用されている。

図3 シミュレーションの目的

図1のプレス曲げの押出材には、ソリッド要素モデルが適用されているが、ハイドロフォーミングで行われる予成形としてのプリベンディングやプリプレスのように、シェル要素モデルを適用している報告¹⁰⁾もある。図1のプレス曲げ以外の押出材モデルは、すべてシェル要素を適用している。断面形状・肉厚の変化を検討する場合にはどちらの要素でも解は得られるが、基本的には精度の高い解析を行う場合、ソリッド要素で行われる。

曲げ成形シミュレーションを行う場合のアルミニウム押出材の構成式は、べき乗硬化則（power law）の弾塑性体が一般的であると考えられる。ほかに多直線近似、移動硬化則を考慮した弾塑性体モデルなどもある。べき乗硬化則の弾塑性体の構成式¹¹⁾を以下に示す。

$$\sigma = k(\varepsilon_Y + \bar{\varepsilon}_p)^n \quad (1)$$

$\bar{\varepsilon}_p = 0$ の場合、 $\sigma_Y = k\varepsilon_Y^n$ を適用し、

$$\varepsilon_Y = (\sigma_Y/k)^{1/n} \quad (2)$$

ここで、 k : 強度係数、 ε_Y : 降伏点のひずみ、 $\bar{\varepsilon}_p$: 相当塑性ひずみ、 n : 加工硬化指数、 σ_Y : 降伏応力（耐力）とする。

寿命を検討する以外は、拘束治具や金型については剛体要素を用いるのが計算時間を短縮させる一般的な方法である。また、押出材の曲げ加工によって発生する不良現象を抑制する目的で用いられる心材を、モデル化した報告⁷⁾もある。

成形シミュレーションの摩擦力に関して、クーロン摩擦やせん断摩擦などがある。曲げでは前者を、鍛造などには後者を用いる場合が多い。負荷方法は、剛体の金型などに対して強制的に変位や速度を設定する方法がある。ほかに、節点（node）には集中荷重やモーメントを、要素（element）には

表 1 計算時間

期間 PC	～1999 IBM KIT-H7G		～2000 Gateway GP-7		2002～ DELL Precision 340	
OS	Windows NT				Windows 2000	
CPU	Pentium 200 MHz		PentiumIII 600 MHz		PentiumIV 2.53 GHz	
RAM	128 MB		384 MB		2 GB	
解析モデル	角管の軸圧縮	角管の 回転引曲げ	軸圧縮	回転引曲げ	軸圧縮	回転引曲げ
ソフトウェア	LS-DYNA3D ver 940		LS-DYNA3D ver 950		LS-DYNA3D ver 960	
要素数 *	256	2080	256	2080	256	2080
計算時間 **	610 秒	3422 秒	64 秒	583 秒	17 秒	169 秒

* 形材モデルのみ ** 各解析モデルの入力条件はすべて同様

圧力を負荷する条件を設定することができる。

余談になるが、学生への初歩の演習問題として、ある試験片を引張試験するシミュレーションを考えさせ、応力-ひずみ線図を出力させる課題を与えた。ある学生はモデルの両端に同値の引張りの集中荷重を負荷するシミュレーションを考えた。引張試験のような応力-ひずみ線図を得るためには、境界条件 (boundary condition) としてモデルの片側を回転および変位拘束し、もう一方に強制変位を設定するようなモデルを作成しなければならない。

実際の曲げ加工を行ったことのない技術者が、初めて曲げ加工機をモデリングすることや、境界条件などを設定することは非常に時間のかかる作業となる。大企業では解析技術者と生産技術者が一致していない場合が多い。今後、塑性加工解析に携わる技術者にアドバイスするならば、実際の加工装置をよく観察するということが、実際に加工を行うことである。特に、実機の拘束状態や負荷方法は、十分に時間をかけて観察することが重要である。境界条件の設定方法の注意点として、一つの節点や要素に拘束や荷重を集中させないことや、成形速度をなるべく現実の加工に近い値を設定することが挙げられる。ただし、計算時間が多くかかることに注意が必要である。

3. シミュレーションの応用例

3.1 モデリングと境界条件

(1) 均等曲げモデル

均等曲げモデルの概略を図 4 に示す。シェル要素の押出形材片端の全節点に対して全拘束を設定した。他端には、形材に剛体のシェル要素を貼付け、この剛体にモーメントを負荷した。曲げモーメント M は 0～500 kN・m まで負荷し、成形時間を 2 秒としてシミュレーションを行った。

動的陽解法の LS-DYNA3D において、塑性加工のような比

図 4 均等曲げモデル

較的成形速度の遅い問題を取扱う場合、運動エネルギーが内部エネルギーよりも十分小さいことを確認する必要がある¹²⁾。均等曲げシミュレーションによって発生した各エネルギーを図 5 に示す。運動エネルギーは内部エネルギーより十分小さいことがわかる。しかしながら、成形時間が 1.6 s 付近で運動エネルギーが急に高くなっており、しわ (座屈変形) が発生したことを示す。

図 1 に示した均等曲げの解析結果は、押出形材の長手方向の応力を示したものである。形材下部の青色が圧縮応力域、上部の赤色は引張応力域である。しわが発生している領域では応力に乱れはあるものの、押出形材の長手方向に対して応力はほぼ一定となっており、均等の曲げモーメントが負荷されていることがわかる。

(2) 回転引曲げモデル

回転引曲げ加工機の概略と解析モデルを図 6 に示す。モデルでは剛体ドラムを回転変位させ、先端をドラムに共有 (剛体化) させた押出形材が、曲げ負荷棒によって曲げモーメントを受ける。ドラムの回転は 1 秒間で、およそ 180 度回転す

11

図5 均等曲げシミュレーションにおけるエネルギー

る設定とした。軸引張り力の負荷は、押出型材後部の多数の節点に負荷する等分布負荷とした。たとえば、10 kNの軸引張り力を負荷する場合、100個の節点にそれぞれ100 Nの引張り力を設定する。

実際の曲げ加工では、ドラムと押出型材の摩擦の影響を少なくするために、ドラムをマシン油で潤滑している。そこで、ドラムと押出型材との間の静・動摩擦係数は $\mu_s = \mu_k = 0.10$ とした。また、実験装置の曲げ負荷棒、その後部にある案内棒はベアリングにより回転が自由な状態で、押出型材が移動するに連れて回る。モデルの曲げ負荷棒と案内棒は押出型材を滑らせるモデルとしたので、摩擦による影響はほとんどないものとするように、摩擦係数を $\mu_s = \mu_k = 0.05$ に設定した。

回転引曲げ成形シミュレーションは、ドラムが回転変位し、押出型材が大きく変位や変形することから、均等曲げ成形に比べ、計算時間は大幅にかかる。実際の曲げ加工にはおよそ20秒かかるが、計算時間短縮のために、シミュレーションの成形時間を1秒に設定した。回転引曲げ成形シミュレーションによる内部エネルギーは、運動エネルギーの5~15倍程度となった⁵⁾。準静的な問題の場合は、均等曲げのようにエネルギーの差が十分必要になるが、成形時間を短く設定し、慣性力の影響が増すことや、しわが発生するような曲げ成形では運動エネルギーが高くなるおそれがある。したがって、回転引曲げ成形シミュレーションの有効性を確認するために、実験結果との比較検討を行った。

3.2 実験と解析結果の整合性

(1) 不良現象の予測

押出型材の曲げ加工によって発生する不良現象には、へん平変形、しわ、屈服および割れ・くびれがある。不良現象が発生した解析結果と製品例を図7に示す。製品例と解析結果の変形形状がよく一致していることがわかる¹³⁾。さらに、実加工とシミュレーションによる変形モード図を図8に示す。しわの判定方法¹⁴⁾は実際の曲げ加工製品と同様で、しわの凹凸差を読み取り、ある規定値を越えた場合をしわが発生してい

設定条件	押出型材	ドラム	棒
形状 (mm)	高さ・幅: 40~50	R50~1000	$\phi 20$
肉厚 (mm)	1~4	1	1
摩擦係数	0.05, 0.10	0.10	0.05
曲げ角 ($^{\circ}/s$)	—	180	—
拘束条件			
回転	フリー	フリー	拘束
変位	フリー	拘束*	拘束

* 中心軸のみ

図6 回転引曲げモデル

ると判断した。横軸には3種類の加工条件、縦軸には曲げ半径を示す。モード図から、しわや屈服が発生する加工条件では、よく一致していることがわかる。しかしながら、割れ・くびれは判定できていない。

図7(d)は心材モデルを適用したシミュレーションである。ここでは心材を弾性体のソリッドモデルとした。実際の曲げ加工に適用する心材の積層数はおおよそ20枚であるが、モデルでは積層数を4枚とした。また、心材を実際の加工に適用する場合、実際の押出型材の曲げ剛性 $E_W \cdot I_W$ の1/10000となるように、積層心材の枚数や板厚を調整する¹⁵⁾。計算時間の短縮を考え、心材の積層数を少なくしたため、心材モデルの断面二次モーメント I_a は実際の心材より高くなってしまふ。したがって、心材モデルの縦弾性係数 E_a を調整しなければ

図7 各種変形の解析結果と製品例

図8 変形モード図

ならない。次式が成立するように心材モデルの曲げ剛性を設定した。

$$E_w \cdot I_w / 10000 = E_m \cdot I_m = E_a \cdot I_a \quad (3)$$

ただし、実際の押出型材の縦弾性係数と断面二次モーメントをそれぞれ E_w , I_w , 心材を E_m , I_m , 解析モデルの4枚から

図9 肉厚変化

図10 断面変形

なる心材を E_a , I_a とした。

(2) 肉厚の変化

正方形断面の押出型材 A6063S-O, 曲げドラム半径 $R_0=200\text{mm}$ で回転引曲げ加工した製品の肉厚と解析結果の比較を図9に示す。材料モデルは式(1)を用い、シェル要素でシミュレーションを行った。肉厚の比較の場合でも、実験結果とよく一致していることがわかる。

(3) 断面形状の変形

高さ $H_0=50$, 幅 $W_0=50$ の正方形断面に十字型のリブを持つ押出型材 A6063S-O および T5, 曲げドラム半径 $R_0=100\text{mm}$, リブの肉厚 $t_r=2.0\text{mm}$, リブ以外の肉厚 $t_0=2.8\text{mm}$ で実際に曲げ加工した製品断面と解析結果の比較を図10に示す。圧縮側のコーナ部について、解析結果は製品に比べ、わずかに膨らみが大きくなっている。シェル要素では、押出型材断面のコーナ部の拘束力が弱く、変形しやすくなるものと考えられる。

このほかに押出型材長手方向のひずみ量, しわピッチおよび膨らみ量なども実際の製品とよく一致することがわかって¹⁶⁾。

3.3 最適設計

リハビリテーション用自転車のフレームに、押出型材を適用した一例¹⁷⁾を図11に示す。ここでは軽量かつ強度の確保が期待でき、さらに、高い曲げ加工度が期待できる正方形断面に、十字型のリブを持つ押出型材 A6063S-T5 を適用した

材質	断面形状	$I(\text{cm}^4)$	$E(\text{GPa})$	フレーム重量 (kg)
STKR	40×40×2.3	7.7	210	2.2
A6063S	50×50×2.8 (リブ 3.0)	21.9	70	1.9
	50×50×2.8 (リブ 2.0)	21.9	70	1.7 (上図フレーム)

図 11 リハビリテーション用自転車

図 12 十字型リブの評価

(図 10 参照)。リブの肉厚 $t_r=2.0\text{mm}$ 、リブ以外の肉厚を $t_0=2.8\text{mm}$ とし、リブ肉厚の低減を図ったものである。また、断面二次モーメントを低下させずに、市販の鋼管に比べ、フレーム重量を 30% 低減することができる。

実際にフレームの曲げ加工を行う前に、シミュレーションによって押出型材断面の変形量を予測し、さらに、変形前の型材の剛性および重量を比較した。その結果を図 12 に示す。リブのない押出型材、十字型リブの肉厚 $t_r=1.0, 2.0, 3.0\text{mm}$ (リブ以外の肉厚はすべて $t_0=3.0\text{mm}$) の押出型材を比較した。縦軸にはリブ肉厚が $t_r=3.0\text{mm}$ の場合を基準値 1.0 として、各条件との比を示した。リブの肉厚 $t_r=2.0\text{mm}$ は $t_r=3.0\text{mm}$

に比べ、重量は 10% 削減され、断面二次モーメントは 3% の低下にとどまる。また、曲げ加工におけるへん平変形量は 15% 大きくなるが、心材の適用により、リブの肉厚 $t_r=3.0\text{mm}$ と同様の精度が期待できる。このような評価を参考とし、図 11 に示すリハビリテーション用自転車のフレームの設計および加工に応用することができた。

4. 今後の課題

4.1 スプリングバック量の予測

板材の成形シミュレーションによるスプリングバックの予測は、近年、多く研究報告¹⁸⁾ されているが、押出型材の曲げ成形シミュレーションのスプリングバックに関する研究報告は少ない。

動的陽解法によるシミュレーションでは、スプリングバック時のモデルの振動を収束させるのに工夫がいる。また、押出型材の曲げによる断面の変形状態によって、それぞれ異なったスプリングバック量になるため、解析結果の整理が非常に厄介になる。したがって、押出型材の曲げ成形によるしわの有無で、スプリングバック量は大きく異なると予測できる。さらに、板材成形では板材の断面二次モーメントの変化量は少ない。しかしながら、押出型材の曲げ成形では、型材の断面二次モーメントの変化量は大きい。ほかに、心材の適用、圧縮および引張りなどの軸力負荷の条件や、その他の拘束条件をもつ実用的な曲げ成形では、スプリングバック量を評価することはさらに難しくなる。

押出型材のスプリングバック量を評価する方法の一つに、型材の変形を拘束する治具のような複雑なモデルを設定することなく、曲げシミュレーションを行うことが挙げられる。

4.2 押出型材の曲げ加工限度予測システム

曲げ加工製品が多種多様であるように、曲げ加工法も多く、実際に曲げ加工を行う技術者はその選択に苦慮する。しかしながら、曲げ製品を設計する技術者は曲げ加工法の選択は必要ではなく、要求する製品の材質・形状寸法で曲げ加工が可能であるか否かを知る必要がある。不可能な場合には、その加工限度に見合うように設計変更しなければならない。

近年では、型材の曲げ成形シミュレーションは、各成形法において加工限度の予測を行っている。今後、各加工法で予測した加工限度などの結果を統合した、『設計支援のための曲げ加工限度予測システム』を構築していく必要があると考える。はじめは、各曲げ加工法に関するデータベースの構築が必要不可欠となってくるであろう。一例として、筆者の研究室のホームページ¹⁹⁾ で公開している、簡易な回転引曲げ加工限度の予測システムがあるので参照して頂きたい。

参 考 文 献

- 1) 押出型材の成形法部会：研究部会報告書 No. 36「6061, 6063 アルミニウム合金押出型材の曲げ加工における精度と限界」, 軽金属学会, (1999), 2.
- 2) 村田 眞：塑性と加工, **37** (1996), 515.
- 3) 佐藤正和・斎藤政昭・安永晋拓・木山 啓・井出龍隆：軽金属, **50** (2000), 121.
- 4) H. Arnet: Advanced Technology of Plasticity, Proc. 6th ICTP, **3** (1999), 2349.
- 5) 内海能亜：東京都立科学技術大学 学位論文, (2000), 73.

||||| 11

- 6) 内海能亜, 坂木修次: 東京都立科学技術大学紀要, **14** (2000), 39.
- 7) 紺谷忠広, 内田幸彦, 星野倫彦: 第 50 回塑性加工連合講演会論文集, (1999), 437.
- 8) 高橋宗生, 内田幸彦, 星野倫彦: 第 49 回塑性加工連合講演会論文集, (1998), 310.
- 9) 村田 眞, 望月隆史: 日本塑性加工学会 チューブフォーミング分科会第 90 回研究例会講演前刷集, (1999), 5.
- 10) 日本塑性加工学会: チューブフォーミング分科会国際セミナー会報「チューブハイドロフォーミング技術の現状と動向」, (1999).
- 11) 日本総合研究所: LS-DYNA3D User's Manual Volume 2 Version 960, (2001), 83.
- 12) 日本塑性加工学会: FEM シミュレーション分科会資料集第 14 号, 第 13 回 FEM セミナー「動的陽解法による塑性加工の FEM シミュレーション」, (1997).
- 13) N. Utsumi, S. Sakaki: J. Mater. Process. Technol., **123** (2002), 264.
- 14) 坂木修次, 臼井清一, 原島寿和, 西村 尚: 軽金属, **46** (1996), 486.
- 15) 内海能亜, 坂木修次: 軽金属, **50** (2000), 65.
- 16) 内海能亜, 坂木修次: 第 50 回塑性加工連合講演会論文集, (1999), 435.
- 17) 内海能亜, 臼田英太郎, 坂木修次: 第 8 回機械材料・材料加工技術講演会論文集, (2000), 133.
- 18) 日本塑性加工学会東海支部: 第 37 回塑性加工懇談会資料「高精度・軽量化を目指した板材プレス成形—板材プレス成形のスプリングバック解析とその抑制技術—」, (2001).
- 19) <http://www.m.hkg.ac.jp/~utsumi/>