

# 手指の機能を模倣した揺動回転成形機の開発とその智能化

北澤君義\*

## 1. 緒言

「一本の魔法の棒を使って、絵を描くと、金属薄板がその絵の形に形成される。例えば、自分の欲しい形状の自動車ボデーの絵を描いたら、本当にできて、乗ることができる」そんな魔法の塑性加工機を作りたい。これは5年ほど前に見た夢である。幸運にも天田金属加工機械技術振興財団から平成元年度の奨励研究助成という形でこの夢に挑戦するチャンスを与えていただいた。そして、この研究助成をもとに一本の棒状工具を動かすだけで薄板を自在な形に成形する CNC 塑性加工機を試作し、この加工機を用いて実際に薄板をいろいろな形状に成形してみた。その結果、ささやかではあるが、この夢へ一歩近づくことができたので、概要を報告する。

## 2. 金型を用いない方法

プレス加工では、金属薄板を金型形状に転写させるように成形して形を作る。この方法は、量産には威力を発揮するが、オーダーのような一品生産には向いていない。これは、金型を使うことに原因している。従って、金型に代わるものを作り、作られたものの形状に薄板を成形させれば良いことになる。しかし、そんな旨い方法があるのだろうか？

意外なことに、この方法に関する重要な知見が、ちょうど5年ほど前のこのころに行っていた管材端部の揺動回転成形に関する結果から得られた。この加工法は、円錐工具が管材のまわりを回転運動し、管材に対して相対的な意味で創成される工具包絡面に円管端末をなじませて、口広げ加工と口絞り加工を行う方法である。このため、この加工法では、工具を運動させて作る工具包絡面を金型の代わりに用いるため、金型を用いる必要がなく、一本の工具を成形形状の形を描くように相対運動させるだけで、多種多様な形状に管材端末を成形することができた。しかも、プレス加工で発生する「しわ」「カーリング」等の型なじみ不良現象を抑止できることが明らかになった。すなわち、この方式は、型なじみ（型転写）性が極めて良い（工具包絡面を用いるのであるから正確には包絡面転写性あるいは写形性）。このように、揺動回転成形の実験から、「形を創る上では、金型よりも工具包絡面の方が優れている」という極めて重要な知見が得られた。

もし、この方式が普遍性のある一般的な加工原理であるのであれば、一本の棒状工具を用いだけで、棒状工具の描く多種多様な形状（工具包絡面形状）に金属薄板を成形することが可能になるはずである。このような理由から、写形性の優れた工具包絡面を用いる方式（工具の運動を利用する方式）を選択することにした。

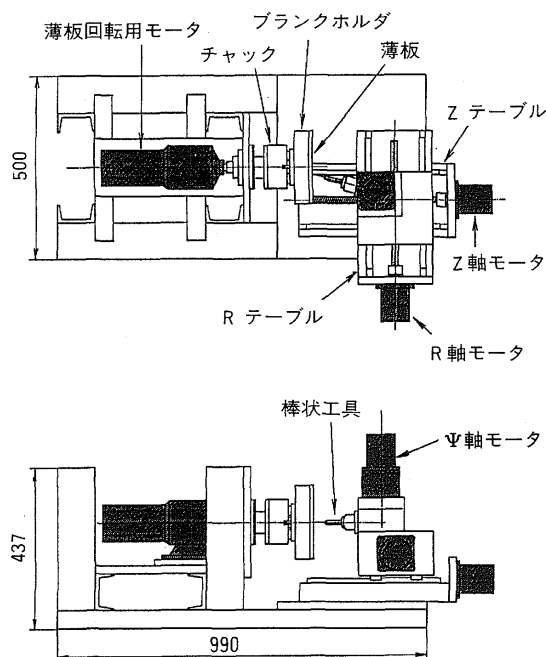


図1 新たに開発した薄板成形用軸対称 CNC 塑性加工機の概略図

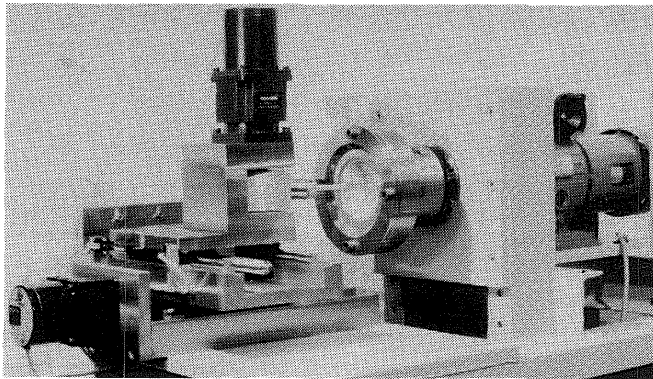


図2 新たに開発した薄板成形用軸対称 CNC 塑性加工機の外観

### 3. 試作した CNC 塑性加工機

CNC 工作機械では、工具の運動により創成される工具包絡面形状に沿って除去加工が行われる。すなわち、工具包絡面形状に除去加工されている。我々が目指しているのは、工具包絡面形状に塑性加工することであるから、原理的には、CNC 工作機械を用いることができるはずである。このような観点から、最低限のレベルではあるが、この方式を実現可能とする機械装置として、既存の CNC 工作機械に注目し、これを塑性加工用に改良した新しい装置を試作した。

図1に自作した CNC 塑性加工機の概略図を、図2にその外観を示す。金属薄板は、旋盤のチャックに相当する部分にクランプ（簡単なクランプで十分：ヒード不要）されている。一方、刃物台に相当する部分に空回りする棒状工具（先端が球面状）が取り付けられ、薄板の回転半径方向（R 方向）と回転軸方向（Z 方向）への移動およびこれらの面内（RZ 面内）の回転が行えるようになっている。装置の仕様を表1に示す（なお、通常の CNC 旋盤を用いる場合には、切削バイトの代わりに先端が球面状になった棒状工具（空回りする工夫が必要）を刃物台に取り付けて、棒状工具の先端アールを考慮して切削加工のプログラムを変更することにより、同様の加工を実行することができる）。

この R 軸移動、Z 軸移動、RZ 面内回転の合計3自由度

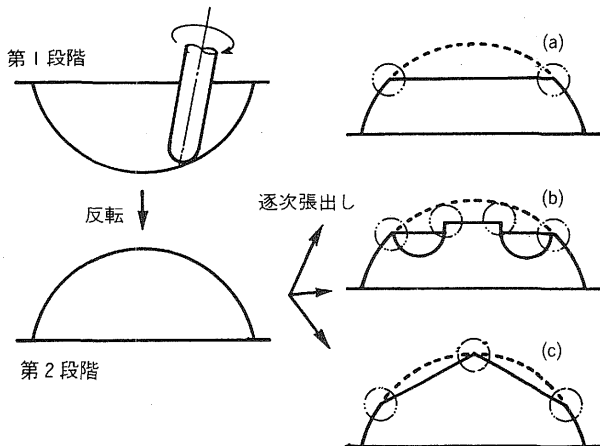


図3 反転成形プロセス

表1 新たに開発した CNC 軸対称成形機の仕様

棒状工具 傾斜部 ( $\Psi$ 軸)	回転範囲	0 ~ 90°
	分解能	0.0072°
	回転速度	0 ~ 35 rpm
クロス テーブル R 軸方向	移動範囲	180 mm
	分解能	1.39 $\mu$ m
	移動速度	0 ~ 20.8 mm/s
クロス テーブル Z 軸方向	移動範囲	180 mm
	分解能	1.39 $\mu$ m
	移動速度	0 ~ 20.8 mm/s
薄板回転部	回転数	0 ~ 600 rpm

で創成可能な工具包絡面形状（製品形状）は、多種多様な形状に及び、事実上ほとんどの軸対称形状の創成が可能となる。このうち、棒状工具の先端アールよりも鋭いコーナー部を有する形状については、図3に示す反転プロセスを施すことにより、その創成が可能となる。

本開発機は、CNC 工作機械をベースにその機能を拡張開発した機械であるが、人の手指の運動を模倣する観点からは、最も簡単な一本指（関節無し）の運動を模倣できる機械としてとらえることができる。また、現状では手指と同様な触覚器官を工具内に複数散りばめることには成功していないが、原始的な触覚機能（力覚と接触覚）が装備されており、この情報をもとにした適応制御が「高寸法精度化」に対して可能になっている。この意味で、本試作機は、人手指の運動と機能を最も簡単なレベルで模倣した新しいタイプの塑性加工機として位置付けられる。

### 4. 自在成形の可能性

アルミニウム硬質板の部分球面状張出し成形途中の外観を図4に示す。成形面がバニシ状に仕上げられ、光沢を放っている。この場合の工具運動プロセスを模式化すると図5(a)のようになる。この方式で張出し成形された製品の外観を図5(b)に示す。成形品は、目的の部分球面形状に成形されている。工具を図6(a)のように移動させた場合に

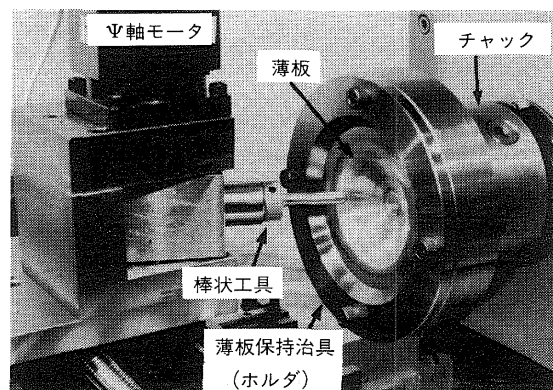
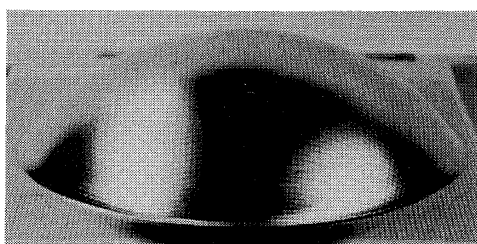
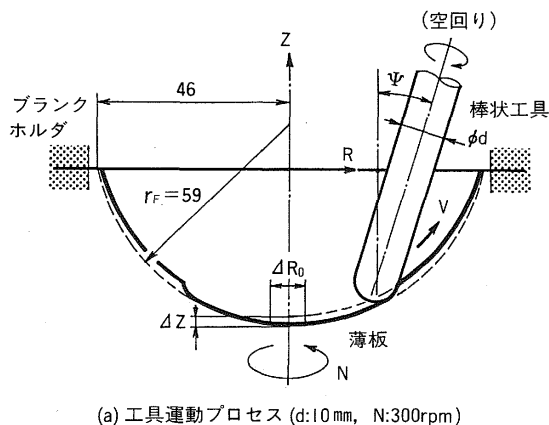
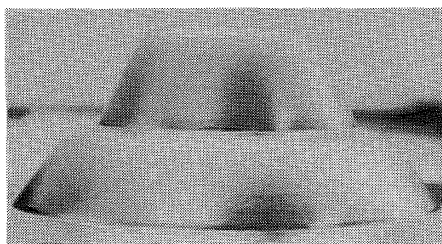
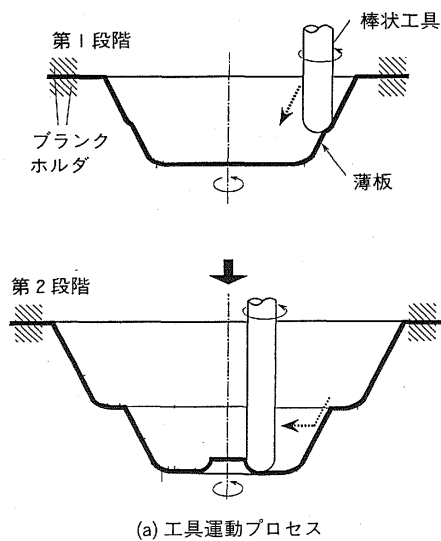


図4 アルミニウム硬質板の部分球面状張出し成形途中の外観



(b) 成形品の外観 (表面の格子はひずみ測定用)

図5 アルミニウム硬質板の部分球面状張出し成形

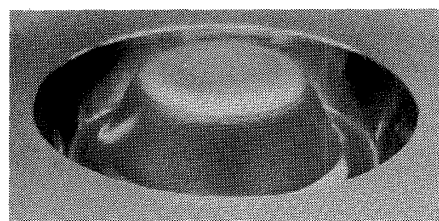
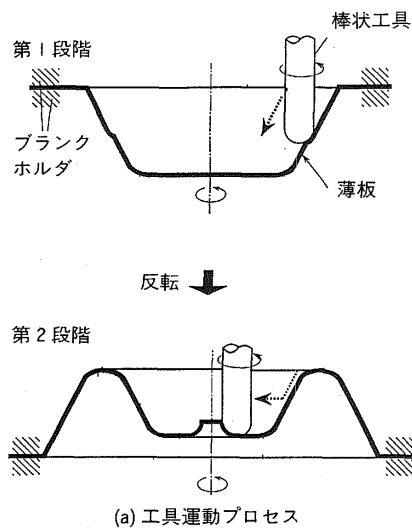


(b) 成形品の外観

図6 アルミニウム硬質板の二段円すい状張出し成形

も、工具包絡面形状と同じ形状の図6(b)に示す製品を得ることができた。また、図6(a)のプロセスの途中で図7(a)に示す反転プロセスを施すところにより、図7(b)に示す製品を得ることができた。ところで、様々な形状の反転プロセスを試みたところ、図3(a)のプロセスを行う場合には、工具を単純に水平方向へ移動させても、工具包絡面になじまない。この場合には、図8に示す工具の運動プロセスを選択することにより、工具包絡面形状になじませることができた。この例は、最も「写形性」の悪い条件に対応している。上述のように通常の場合には「形を創る」ための工具運動プロセスの選択は問題にならないが、図4(a)の反転成形の場合には、プロセス探索の知能化が必要になる(これは、後述の「高寸法精度化」問題に含まれる)。

このように、一本の棒状工具を用いただけでも、棒状工具の運動により創成される多種多様な工具包絡面形状に金属薄板を成形することができる。



(b) 成形品の外観

図7 アルミニウム硬質板の反転二段円すい状張出し成形

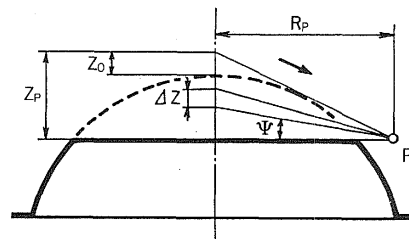
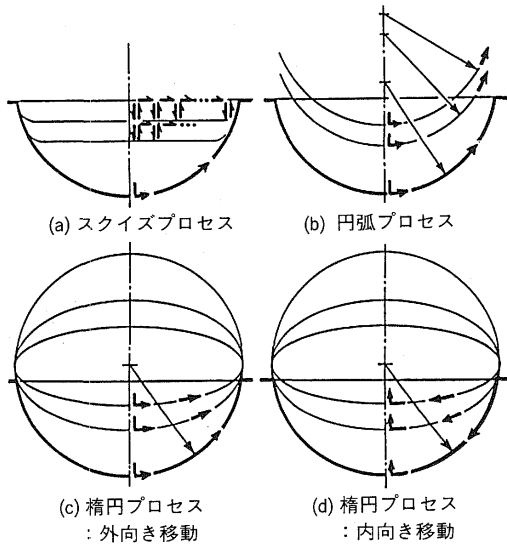


図8 傾斜法：部分球面殻の平坦化を可能にする反転工具運動プロセス

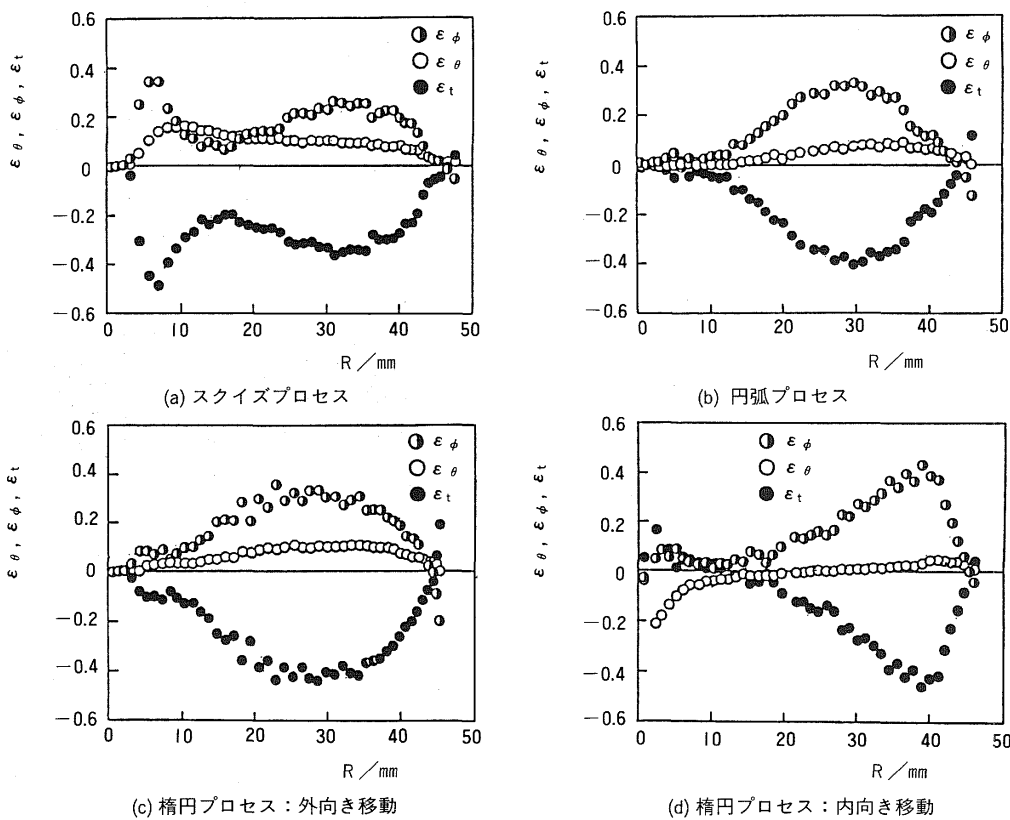
## 5. 肉厚分布制御と成形限界向上

棒状工具を動かして製品の絵(工具包絡面)を描く方法は、一通りではなく、複数存在する。このため、最終輪郭形状が同じ場合であっても、工具の運動プロセスの違いにより肉厚分布が異なるものと推察される。すなわち、棒状工具の運動プロセスを変えることにより、製品の肉厚を制御することができるはずである。そこで、一例として、**図9**に示す4種類の工具運動プロセスにより、金属薄板の部分球面状張出し成形を行った。その結果、**図10**に示すように、各運動プロセスにおける肉厚ひずみ分布は、それぞれ異なる分布となった。この結果は、工具の運動プロセスを変えることにより、肉厚分布を制御できる可能性を示唆している。しかし、後述のように「肉厚を制御する」工具運動プロセスの探索は極めて難しいため、今後、知能化技術の最大のターゲットになるものと思われる。

ところで、この成形では、ひずみを空間的に配分することが可能となるため、プレス加工で問題となる「ひずみが一箇所に集中することによる割れの発生」が抑えられる。しかし、成形中に同一箇所が何回も繰り返して変形を受けするため、この点に留意した成形限界の検討が必要になる。



**図9** 肉厚分布制御の可能性を調べるために取り上げた部分球面状張出し成形の工具運動プロセス  
(殻の高さ：96mm, 殻の半径：59mm)



**図10** 各部分球面状張出しプロセスのひずみ分布  
(アルミニウム硬質板, 板厚：1mm, 殻の高さ：96mm, 殻の半径：59mm)

そこで、純粋な形で実験を行い易いという観点から、CNCフライスを用いて図11(a)に示すように円弧軌跡の頂点に逐次ひずみを与え、破断発生状況を調べた。その結果、図11(b)に示すように、毎回加えるひずみ量に対応する円弧軌跡のピッチ  $dh$  を小さくするに従い、破断発生限界が向上した。この成形の破断ひずみは、引張り試験の破断ひずみ(図中の一点鎖線)よりも大きい値となっている。このように、この成形は、成形限界の点でもプレス成形よりも優れている。従って、逐次加えるひずみの量を小さくすることにより、成形限界を飛躍的に向上させることができる(この成形限界向上機構については、低サイクル疲労

のマンソンコフィン則を拡張したモデルにより説明することができる)。ここで得られた知見をもとに、成形限界を向上させるように工具運動プロセスを選択(プログラムに工夫するだけで良い)することにより、成形限界を向上させることができる。この意味で、成形限界については、特に、工具運動プロセスの知能化を図る必要がないことになる。

## 6. 知能化へのアプローチ

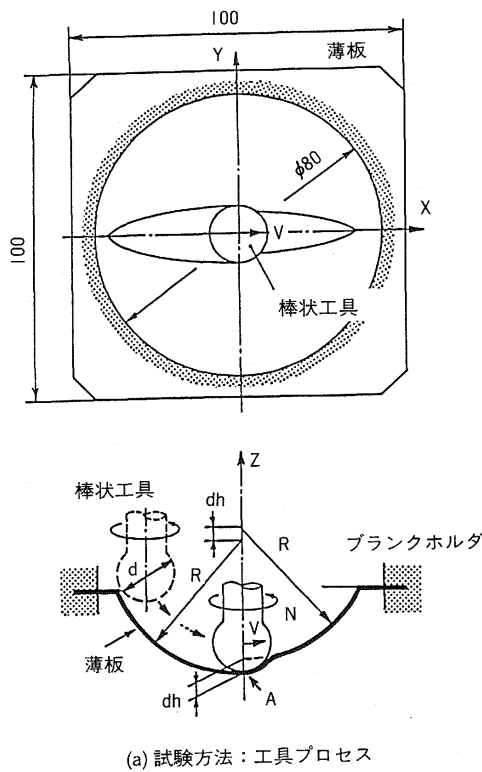
張出し成形に限定されるものの、金型を使わないで「形を創ること」は出来た。しかし、形の精度と肉厚の抑制については解決すべき課題が数多く残されている。これらの課題を解決するためには、適切な工具運動プロセスの探索がポイントとなる。しかし、いわゆる多品種少量生産化への対応を目的に開発された方法であるため、データベースを構築して知能ソフト化を図るといような悠長な対応を取ることはできない。戦略としては、機械(ハード)の知能化そのものが基本のはずである。このような観点から、機械自身が試行錯誤(経験)しながら、より有効な工具の運動プロセスを探して行く、知能化塑性加工機の開発へ向けて、本開発機を用いて知能化技術に関する基礎実験を行ってきた。この主な目的は、本開発機の接触覚を用いて「高寸法精度化」を図ることと、接触覚と力覚を併用して「肉厚を抑制する」ことにある。このうち、「高寸法精度化」を図ることについては接触感覚情報を用いた適応制御技術でかなりのところまで対応できるが、「肉厚を制御する」ことには成功していない。従って、「肉厚を制御する」知能化技術の開発が今後の課題となる。

## 7. 今後の展開

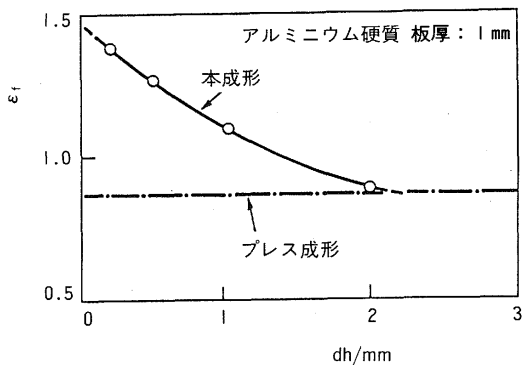
上述のレベルになると、本試作機のレベルでの対応では困難であり、新しい知能化塑性加工専用機の開発が必要になる。幸運にも、この研究に引き続く研究として、「肉厚を制御する」ことを目的とした、張出し、絞り、しごき加工を複合して行う知能化塑性加工機の開発に対して天田金属加工機械技術振興財団から平成4年度開発助成という形で再びチャンスを与えて頂いた。本研究で得られた成果を核にして、より高機能な知能化塑性加工機の開発に挑戦したい。

## 本研究に係わる発表

- (1) 北澤君義、清野次郎、村田和也: 棒状工具を用いた薄板軸対称CNC逐次張出し成形機の開発、平成4年度塑性加工春季講演会講演論文集
- (2) 北澤君義、清野次郎、村田和也: 反転プロセスによる鋭凸輪郭製品のCNC逐次張出し成形、平成4年度塑性加工春季講演会講演論文集
- (3) 北澤君義、清野次郎、小林光征、山本道彦: CNC工作機械を用いた薄板逐次張出し成形における破断発生機構、平成4年度塑性加工春季講演会講演論文集



(a) 試験方法: 工具プロセス



(b) 逐次成形ピッチ  $dh$  の減少に伴う破断ひずみ  $\epsilon_1$  の増大

図11 薄板の逐次張出し成形限界

- (4) 北澤君義、清野次郎、山本道彦、村田和也、堤信一：CNC工作機械による薄板の塑性加工、日本機械学会ロボティクスメカトロニクス講演会92講演論文集
- (5) 北澤君義、清野次郎、堤信一、金子哲也：薄板のCNCインクリメタルフォーミング、第70期日本機械学会全国大会講演論文集
- (6) 北澤君義、若林昭彦、金子哲也：薄板の円すい状逐次張出し成形におけるメタルフロー挙動、平成5年度塑性加工春季講演会講演論文集
- (7) Kimiyoshi Kitazawa: Incremental Sheet Metal Stretch-Expanding with CNC Machine Tools, Proc.4th ICTP(1993)