

チューブハイドロフォーミングの知的センシング・制御システムの開発

東京都立大学大学院 機械工学専攻

助教授 楊 明

(平成13年度研究開発助成 AF-2001016)

キーワード：チューブハイドロフォーミング、知的制御システム、T成形

1. 研究の目的と背景

チューブハイドロフォーミング（以下 THF）は軽量かつ高強度な構造部材を製造する有用な塑性加工技術であり、これまで困難とされてきた一体成形品などの高付加価値製品を生み出す技術として注目されている。近年、自動車産業をはじめとする多くの産業技術分野において、省エネルギー化や地球環境保全の観点から軽量化の推進が重要課題となっており、構造部材への THF 製品の適用が期待されている。しかし、THF 技術には未解明な部分が多く、その試行錯誤によるプロセス開発には多くの時間と労力が必要とされ、プロセス制御技術の開発が最も重要な研究テーマとして挙げられている。

そこで本研究では、主要な THF である T 字枝張出し型 THF を対象として、柔軟性の高い制御が期待できるファジィ推論を用いたプロセス制御コンセプトを提案し、THF ファジィ制御システムを開発することを目的としている。また、オンライン上に構築した本システムの有効性を FEM シミュレーションにより明らかにし、THF 設計ツールとしての可能性について検討している。さらに実際に装置の成形開発を行い、実験により本システムの有効性を検証することを試みる。

2. T 字枝張出し型 THF モデル

対象とした T 字枝張出し型 THF モデルを図 1 に示す。本モデルは内圧、軸押しおよびカウンターパンチ（以下 CP）変位を制御することによって、新たに枝張出し部を成形する代表的な THF のひとつである。FEM コードは LS-DYNA ver. 950 を用いた。プランクは面外異方性弾塑性体のシェル要素、ダイ等は剛体モデルとした。全要素数は 14592、全節点数は 15004、プランクの要素数は 9500、節点数は 9696 である。加工速度は解析上 0.1 秒で 50MPa の内圧に上昇させる線形負荷とし、軸押し・CP 変位は後

表 1 FEM シミュレーションで用いた管状素材の力学的特性

Density (kg/m ³)	Young's modulus (GPa)	Poisson's ratio	Yield stress (MPa)	n-value	r-value
8.0	197	0.34	262	0.53	0.96

述するファジィルールに準じて制御した。材料モデル SUS304 の材料特性値を表 1 に示す。摩擦係数は $\mu_s=0.02$, $\mu_k=0.01$ とした。

3. 仮想 THF ファジィ制御システム

本研究では、数年前に開発されたデータベース援用深絞り加工ファジィ制御システム^{1)~3)}をオンライン上に構築し、THF に適用している。図 2 にデータベース援用仮想 THF ファジィ制御システムの概要を示す。本システムの特徴は、データベース、プロセス設計を行うプログラムおよび FEM シミュレーションの 3 つの構成要素がオンライン上に構築されていることであり、金型形状、加工条件

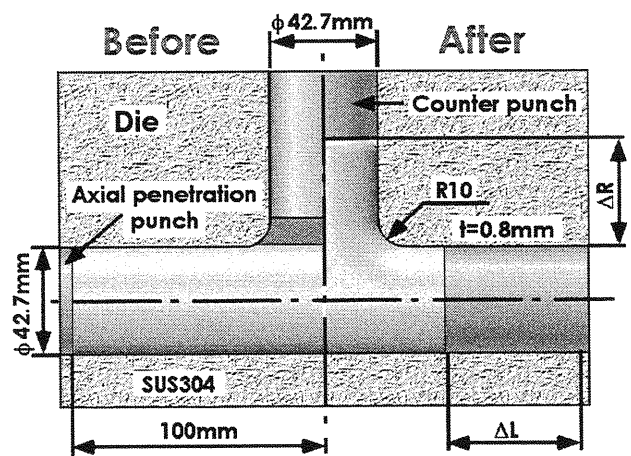


図 1 本研究で取り上げた THF モデル(T成形)

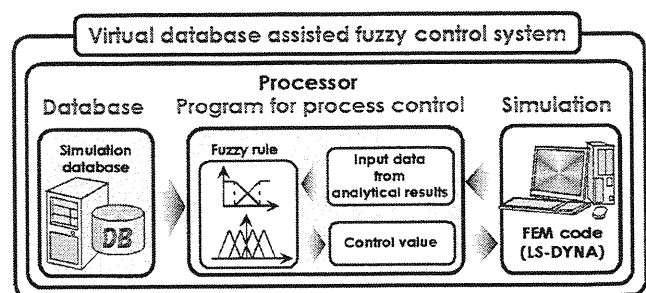


図 2 データベース援用仮想ファジィ制御システムの概要

の変更, およびプロセス制御に不可欠な変形履歴データ等の獲得を簡単に行える利点がある. 図3に本システムのプロセス制御工程を示す. 本システムでは, ファジィ制御パラメータ決定にデータベースを導入し, パラメータ決定の高効率化, 高柔軟化を図っている. 制御プログラムは次に説明するファジィ制御コンセプトをプログラム化したものであり, FEMシミュレーション上でプロセス制御設計を行う.

4. T字枝張出し型 THF ファジィ制御コンセプト

4.1 目的関数

THF製品に求められる品質は, 張出し高さおよび肉厚減少抑制による製品強度の向上の二つが考えられる. 本研究では, 座屈が発生しない程度の可能な限りの軸押し変位を負荷することで張出し側壁部での引張応力を抑え, 薄肉化を抑制することで達成する「肉厚減少抑制による製品強度の向上」を目的関数とした. なお, 張出し高さ ΔR が初期直径42.7mmに達した時点を終産品形状とした.

4.2 評価関数

前述の目的関数を満足する制御を行うためには, 時々刻々と変化する座屈の危険度を評価可能な指標を定義し, 座屈発生を正確に予測しなくてはならない. そこで, 本研究では成形初期に発生する波状座屈の危険度を評価する指標として, 図4に示す評価関数 Φ を提案し, 式(1)のように定義した.

$$\phi = R_c - R_b \quad (1)$$

R_c は張出し中央部の張出し高さ, R_b はダイ肩R近傍の最大張出し高さである. この評価関数は図5に示すように, Φ の値がマイナスの場合は過大な軸押し変位により座屈危険度が大きいことを意味し, 逆にプラスの場合は座屈の危険性は小さいことを意味する. また, Φ の微分値 Φ' を精度向上のための補助的な評価関数として用いた.

4.3 ファジィモデル

座屈危険度の評価には図6(a)に示す入力メンバーシップ関数群を用いる. $\phi_a, \phi_b, \phi'_a, \phi'_b$ の各値は座屈の評価を適切に行うための重要な値であり, データベースより半自動的に決定される. 表2にそれらの値を示す. ここで, ϕ_b, ϕ'_b は座屈発生時の値, つまり座屈危険度指数の最大値が代入され, ϕ_a, ϕ'_a には最小値, つまり最も安全である値が代入される. 制御値の決定は, 図6(b)に示す制御値決定用出力メンバーシップ関数群と, 表3に示す入出力メンバーシップ関数を関連付けるIf-thenルールにより行われ, 式(2)より出力メンバーシップ関数の重心値Gとして軸押し変位速度の増分 ΔAPS が算出される.

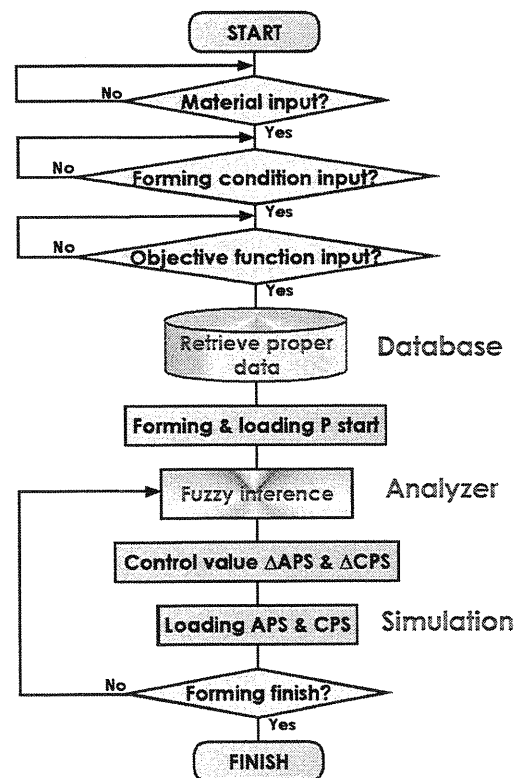


図3 チューブハイドロフォーミングのファジィ制御システムによるプロセス制御の流れ

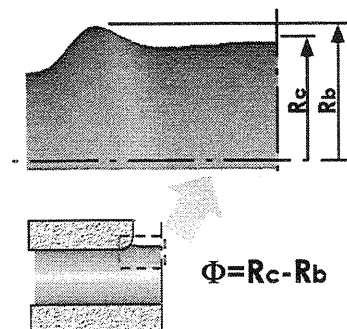


図4 枝管部の波状座屈に対する評価関数 Φ

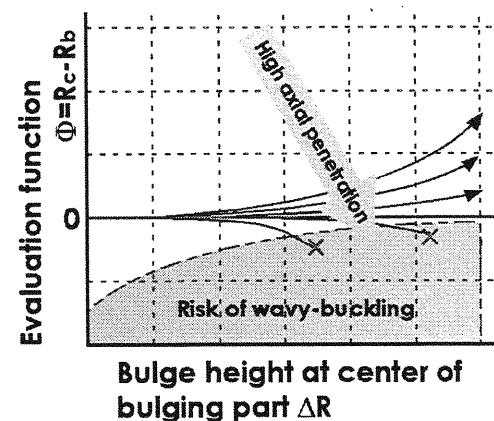


図5 座屈評価に関する評価関数 Φ の概要

$$\Delta APS = G = \frac{a_1 g_1 + a_2 g_2 + \dots + a_n g_n}{a_1 + a_2 + \dots + a_n} = \frac{\sum a_i g_i}{\sum a_i} \quad (2)$$

4. 4 評価関数Ψ

加工中期以降、枝張出し部は肉厚減少を抑制するためにCPとの接触を保持した状態で成形すべきである。そこで本研究では、接触を評価する指標として図7に示す評価関数Ψを提案した。Ψは式(3)に示す張出し部のCPとの接触度合を表している。

$$\Psi = C_l - C_{ideal} \quad (3)$$

C_l はCPとの軸方向接触長さ、 C_{ideal} はFig.7に示す張出し高さ増加に伴う理想的な接触長さの経路を示している。張出し高さの増加に伴い徐々に接触率も増大させることによって、張出しR部での引張応力を抑制、肉厚減少を抑制する。Ψの値がプラスのときは軸押し変位を減少、CP変位を増加させ、Ψの値がマイナスのときは逆の制御を行うことによって、その時々の内圧に対する適切な軸押し変位とCP変位を制御する。また、評価関数Φの場合と同様にΨの微分値Ψ'を精度向上のため用いた。ファジィモデルはFig.6に示すメンバーシップ関数群の各値が表4に示す値に変換され、ΔAPSおよびCP変位速度の変化量ΔCPSが算出される。

4. 5 ファジィ制御パラメータチューニング

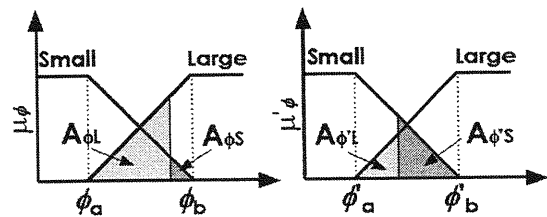
制御値ΔAPSおよびΔCPSの係数をチューニングし、 $F_{\Phi APS} \dots \dots, F_{\Psi APS} = 0.03, F_{\Psi CPS} = 0.03$ と設定した。また、加工後期は最終張出し高さでの型なじみ工程であり、内圧と軸押し変位の関係を $\Delta p / \Delta l = 0.3$ と設定し、本システムによるファジィ制御を行った。

5. ファジィ制御結果

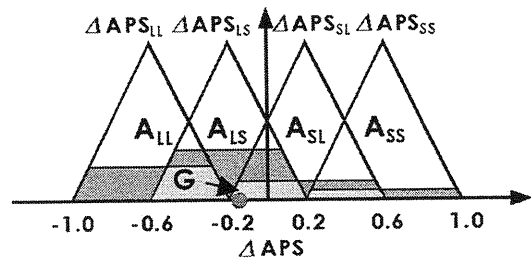
図8にファジィ制御結果および一般的な従来設計法によるマニュアル制御の加工経路を示す。図中のアルファベットはCPに接触した時点A、最終張出し高さに達した時点B、成形完了時点Cである。ファジィ制御結果はマニュアル制御の加工経路に比べ、その加工経路は曲線で構成されており、その時々の内圧に対する適切な軸押し変位とCP変位が制御されていることが分かる。そのため、ファジィ制御では枝張出し部への十分な材料流動が起り、図9および式(4)に示す型なじみ率 K_c はファジィ制御： $K_c = 85.6\%$ 、マニュアル制御： $K_c = 76.7\%$ と型なじみが大きく向上している。

$$K_c = C_l / D_b \quad (4)$$

ここで、 D_b は枝張出し部直径42.7mmである。また、図10に最小肉厚 t_{min} と張出し高さ ΔR および図11に延性破壊



(a) 入力用メンバーシップ関数



(b) 出力用メンバーシップ関数

図6 評価関数Φに対するファジィモデル。

表2 入力メンバーシップ関数Φ用のパラメータ

Φ_a	Φ_b	Φ'_a	Φ'_b
0	-0.771	0	-126

表3 メンバーシップ関数Φ用の If-then ルール

if (ϕ, ϕ')	then (ΔAPS)
ϕ is Small and ϕ' is Small	$\Delta APS = \Delta APS_{SS}$
ϕ is Small and ϕ' is Large	$\Delta APS = \Delta APS_{SL}$
ϕ is Large and ϕ' is Small	$\Delta APS = \Delta APS_{LS}$
ϕ is Large and ϕ' is Large	$\Delta APS = \Delta APS_{LL}$

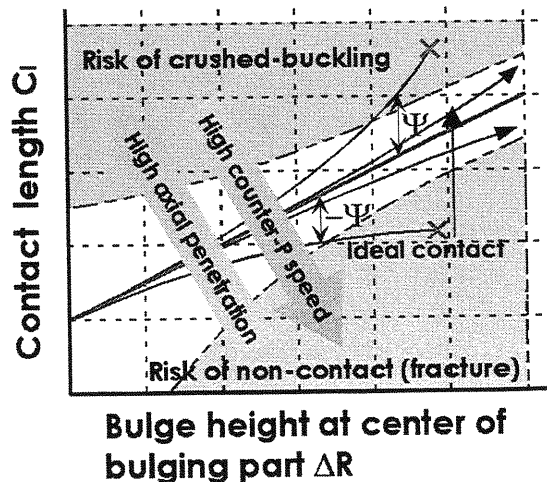


図7 成形限界評価用の評価関数Ψ

条件 I 値と ΔR の関係を示す。延性破壊条件 I 値は式 (5) に示す大矢根の延性破壊条件式で表される材料の成形余裕度および割れに対する指標で、 $I=1$ 以上で割れ発生とみなす。

$$I = \frac{1}{b} \int_0^{\epsilon_{eqf}} \left(\frac{\sigma_m}{\sigma_{eq}} + a \right) d\epsilon \quad (5)$$

ここで、 σ_m は静水圧応力、 σ_{eq} は相当応力、 ϵ_{eqf} は相当破断ひずみ、 $a=0.34$ および $b=0.56$ は材料モデル SUS304 の材料定数である。

本システムを用いることによって、最小肉厚 t_{min} は成形完了時においてマニュアル制御結果に比べ約 8% 向上し、本システムを用いたファジィ制御には肉厚減少抑制効果があることが明らかになった。また、延性破壊条件 I 値は約 15% 減少し、特に $\Delta R=20\text{mm}$ 以降の加工後期において安定した成形がされ、成形余裕度を十分保持した状態で成形が完了していることが分かる。

これらの結果より、本システムは目的関数「肉厚減少抑制による製品強度の向上」に基づいた適切な加工経路を設計し、さらには割れに対する材料の成形余裕度を保持することによって加工限界を向上させる可能性を持った THF 設計ツールであることが明らかになった。

6. ファジィ制御 THF 装置の設計試作

6.1 装置の設計・開発

データベース援用 THF ファジィ制御システムの基礎となる試験装置を設計・開発した。装置の設計にあたり、まず本装置に要求される加工力（最大内圧および最大軸押し荷重）をシミュレーションモデルの SUS304 およびアルミニウム合金管 A6063-T5、マグネシウム合金管 AZ31 のそれぞれの場合で算出し、設計の目安とした。これより、肉厚 1.0mm の SUS304 材に適用できるように設計仕様

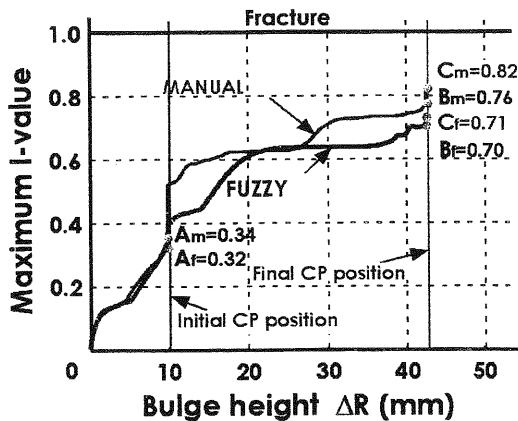


図 11 ファジィ制御と従来制御方式での延性破壊危険度 I 値の比較

表 4 入力用メンバーシップ関数 Ψ 用のパラメータ。

Ψ_a	Ψ_b	Ψ'_a	Ψ'_b
-0.2	0.2	-250	250

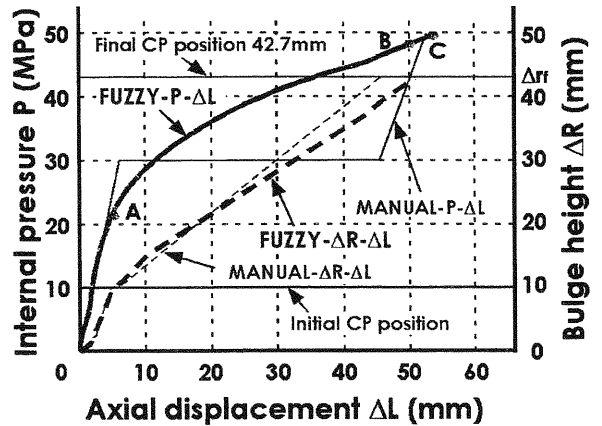


図 8 ファジィ制御と従来方式制御の加工負荷経路の比較

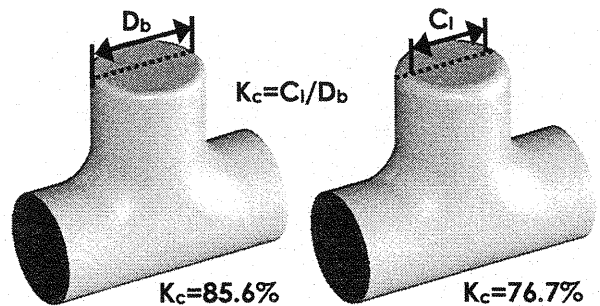


図 9 最終 THF 製品の比較。(左：ファジィ制御，右：従来方式制御)

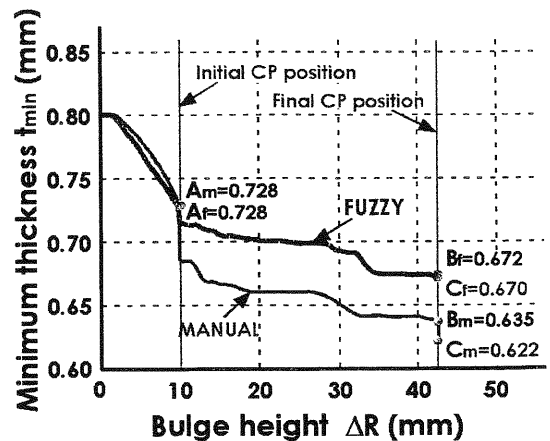


図 10 ファジィ制御と従来制御方式での T 成形での最小肉厚の比較

を決定した。

図12および図13に本研究で設計・開発したTFH装置の外観およびT成形用金型、表5に同装置の設計仕様を示す。本装置は、あらかじめPCに入力した負荷経路に基づき左右軸押しパンチ、CP、増圧機に対しアナログ閉ループ制御を行なうもので、加工中の各シリンダ変位および内圧は変位センサーと圧力計を用いて測定しPCへ送られる。また、SUS304の加工に必要な内圧を供給するために増圧機を用い、軸押しパンチの中心に設けた通路より耐摩耗性作動油を試験片内部に供給し内圧を負荷する。

6.2 装置の動作確認および性能評価

本装置の動作確認および性能評価のためマニュアル制御の加工経路を用いて、成形実験を行なった。なお、開発の初期段階であるため安全性を考慮し、試験片として比較的加工力の低いアルミニウム合金管 A6063-T5 (長さ $L_0=200\text{mm}$, 直径 $D_0=42.7\text{mm}$, 厚さ $t_0=1.2\text{mm}$) を選定した。図14より、入力した負荷経路と出力された負荷経路はほぼ一致しており、指令どおりに本装置が制御されていることがわかる。また、本実験では加工後に試験片をおよそ12mm軸押しし、中央部に $\Delta R=3\text{mm}$ の張出し部が成形された。これより試作した装置の基本性能がほぼ確認することができた。今後はファジィ制御システムの有効性を検証できるように検討を進める予定である。一方、マクロセンサーの試作は単に接触だけでなく金型との面圧まで計測できる見通しを得ることができた。TFH装置の基本性能試験が終わり、十分な性能が確認でき次第、マイクロセンサーを実機に組み込みファジィ適応制御実験まで行いたい。

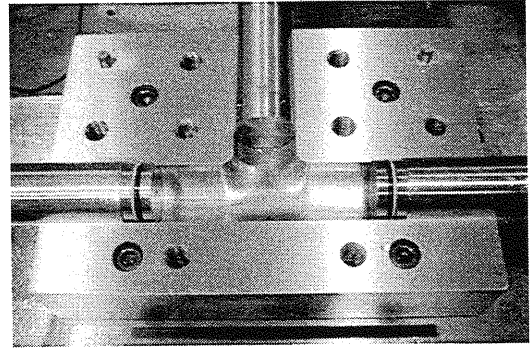


図13 T成形用金型

表5 設計開発したTFH装置の設計仕様

Max pump pressure [MPa]	21
Max internal pressure [MPa]	70
Max axial force [kN]	320
Max axial punch displacement [mm]	80
Max counter punch displacement [mm]	80

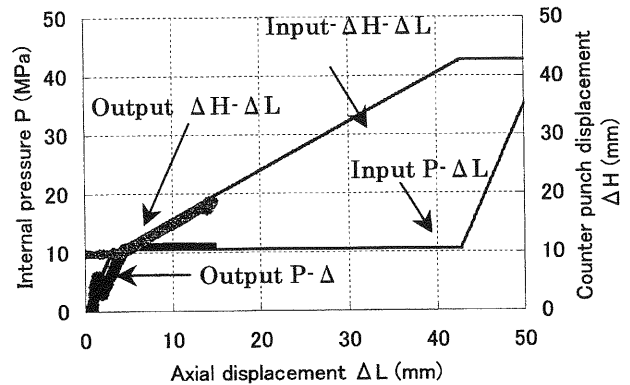


図14 開発したTFH実験装置の性能確認実験における応答性(A6063-T5)

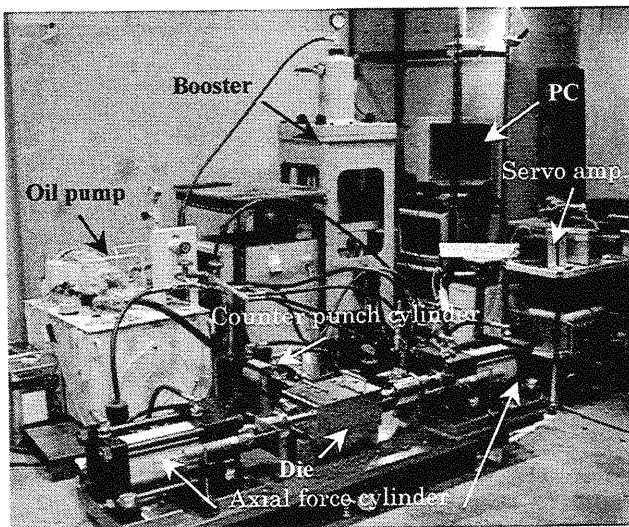


図12 設計試作したTFH実験装置の概観

7. 結言

本研究ではT字枝張出し型TFHを対象として、柔軟性の高い制御が期待できるファジィ推論を用いたプロセス制御コンセプトを提案し、実際にTFHファジィ制御システムを開発することを目的とした。そのため、まず、ヴァーチャルTFHシステムを構築し基本的制御アルゴリズムを検討し、その有効性を明らかにした上で、その有効性を実証するためにTFH装置を設計試作した。得られた成果をまとめると以下のとおりである。

- 1) 代表的なTFHであるT字枝張出し型TFHモデルを対象に、加工初期に発生する波状座屈および張出し部とCPの接触に着目したファジィ制御コンセプトを提案した。
- 2) オンライン上に本コンセプトをプログラム化したデ

ータベース援用仮想 THF ファジィ制御システムを開発した。

- 3) 本システムを用いてプロセス制御設計を行い、適正な加工経路を求めた。その結果、マニュアル制御結果と比較して最小肉厚 t_{\min} が約 8%向上し、また成形余裕度を表す延性破壊条件 I 値は約 15%減少した。
- 4) 本システムは目的関数「肉厚減少抑制による製品強度の向上」を達成し、その肉厚減少抑制効果および延性破壊条件 I 値抑制効果から、加工限界を向上させる可能性を持った THF 設計ツールであることが明らかになった。
- 5) THF 装置を設計試作し、今後、提案した制御システムが妥当であるか実証できる準備ができた。マイクロセンサーとの組み合わせで今後知的制御システムの確立を目指す予定である。

謝辞

本研究は財団法人天田金属加工機械技術振興財団の研究開発助成として採択され行われたもので、同財団からの研究助成に対し深く感謝の意を表します。

さらに、本研究の遂行に携わった、当時東京都立大学大学院生、宮本俊介君、末武正充君、学部生の山田晴一君に心から御礼申し上げます。

参考文献

- 1) Koyama H.ほか：Proc. ASME IMECE2000 vol.11(2000), 805-810
- 2) Koyama H.ほか：Proc. IMCC2000 vol.1(2000), 97-98
- 3) 小山 寛ほか：塑性と加工,43-503(2002), 1162-1167