



M. Yang



K. Manabe

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

楊 明*, 真鍋 健一**

1. はじめに

チューブハイドロフォーミング（以下 THF）は軽量かつ高剛性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、従来の小物部品から構造部材へと THF 製品の応用展開が進んでいる。しかし、その THF 技術の進展には目を見張るものがあるものの、依然として未解明な部分が多く、特に内圧と軸押しの負荷経路に関しては試行錯誤によることが多い。近年では数値計画法を用いた数値シミュレーションによる最適化も試みられているが、まだ多くの時間と労力が必要とされている。その最適負荷経路の決定と同様に、その最適プロセス制御技術の開発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、ヴァーチャルで構築した本ファジィ制御システムとそれに必要な新たな評価関数の有効性を検証するため、ヴァーチャルで得られた負荷経路を新たに開発した制御システムに適用しその経路を用いて本システムの妥当性を検証した。

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、以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)}をコンピュータ上に構築し、THF に適用している。図 2 にデータベース援用ヴァーチャル 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、加工条件の変更、およびプロセス制御に不可欠

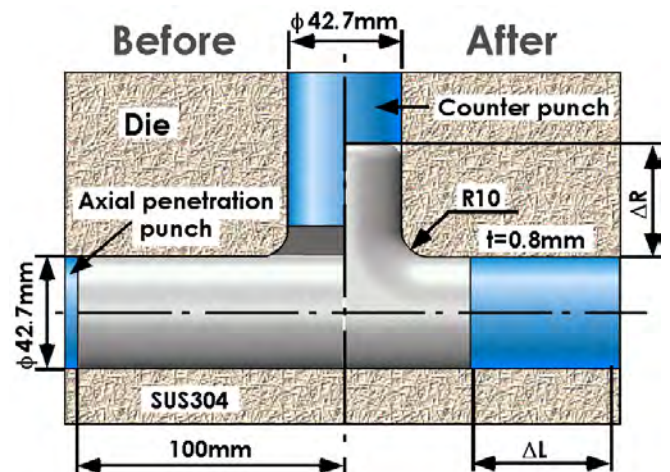


図 1 本研究で取り上げた THF モデル（T 成形）
（T-branch）。

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

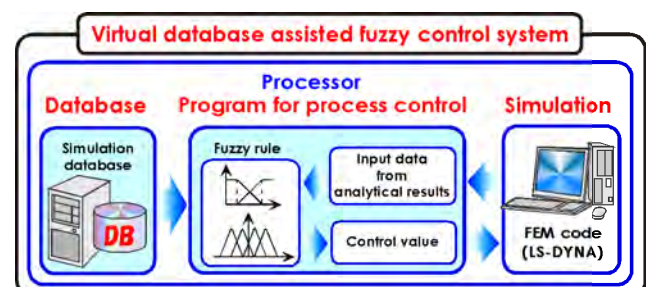


図 2 データベース援用仮想ファジィ制御システムの概要

* 首都大学東京大学院システムデザイン研究科 教授

** 首都大学東京大学院理工学研究科 教授

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、パラメータ決定の効率化、高柔軟化を図るものである。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。

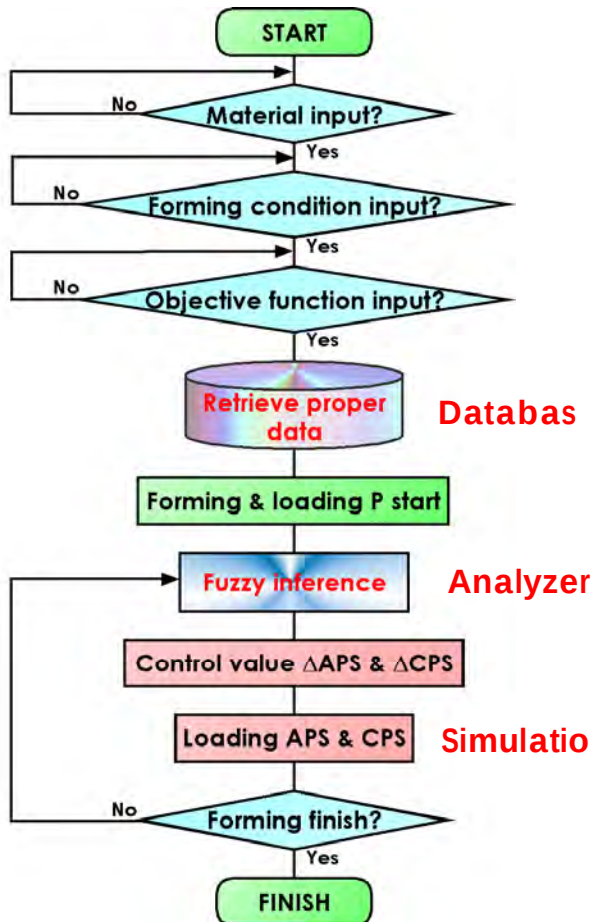


図 3 チューブハイドロフォーミングのファジィ制御システムによるプロセス制御の流れ

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、成形部でしわ・座屈（以下、座屈）が生じ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 は初期直径 42.7mm に達した時点を経済最終製品形状とした。

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。

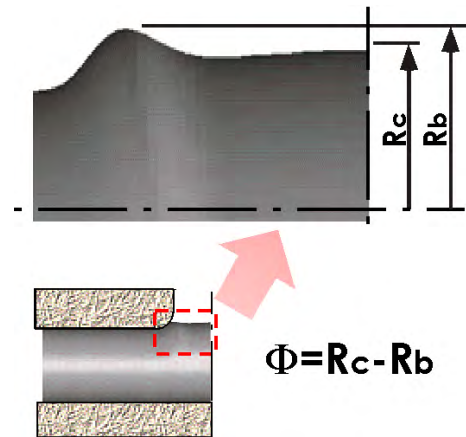


図 4 枝管部の波状座屈に対する評価関数 Φ

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

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' は座屈の成長速度を表す指標で制御精度向上のための補助的な評価関数として用いた。

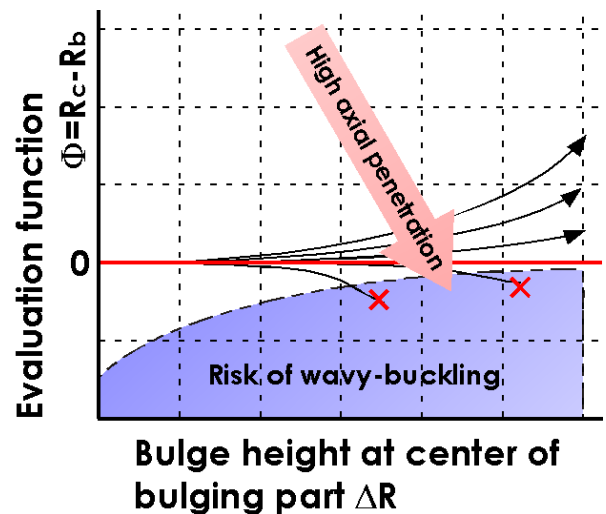


図 5 座屈危険度評価に関する評価関数 Φ

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。 ϕ_a 、 ϕ_b 、 ϕ'_a 、 ϕ'_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

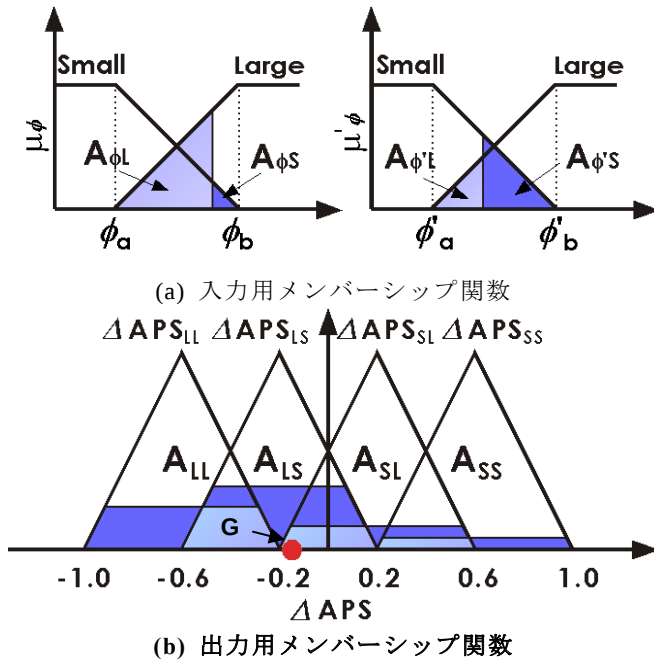


図 6 評価関数 F に対するファジィモデル

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	$\Delta APS = \Delta APS_{LL}$

て軸押し変位速度の増分 ΔAPS が算出される。

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

4.4 評価関数

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 とのなじみ度を表す接触度合を表している。

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

ここで、 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す。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

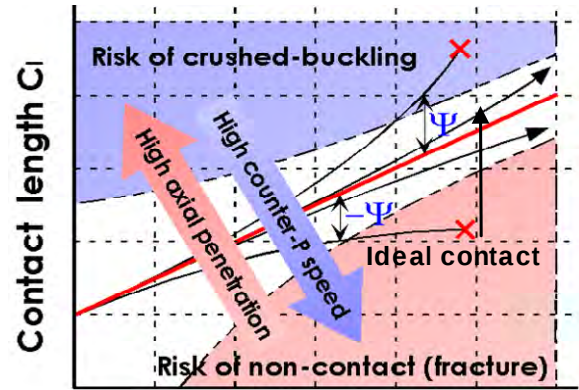


図 7 成形限界評価用の評価関数 Ψ

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 変位を負荷する。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。

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

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. ヴァーチャルファジィ制御結果

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、その時々内圧に対する適切な軸押し変位と CP 変位が負荷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。

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

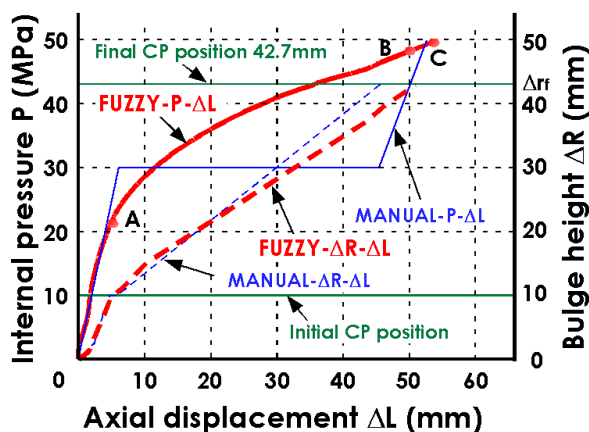


図 8 ファジィ制御と従来方式制御の加工負荷経路の比較

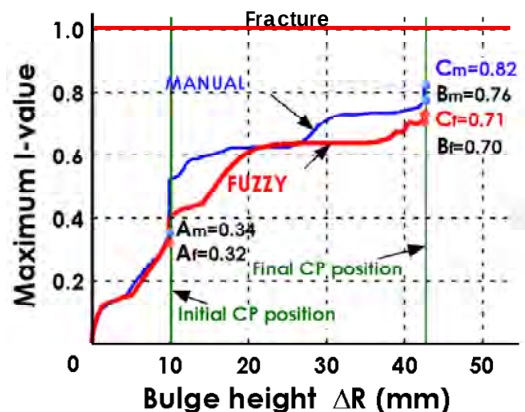


図 11 ファジィ制御と従来制御方式での延性破壊危険度 I 値の比較

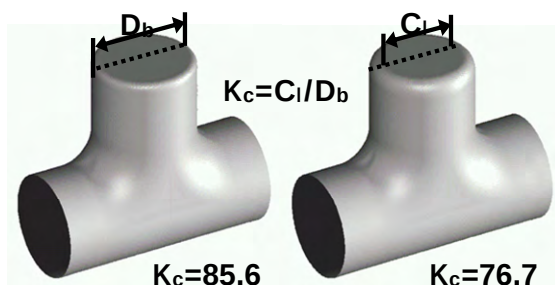


図 9 最終 THF 製品の比較.
(左：ファジィ制御，右：従来方式制御)

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。

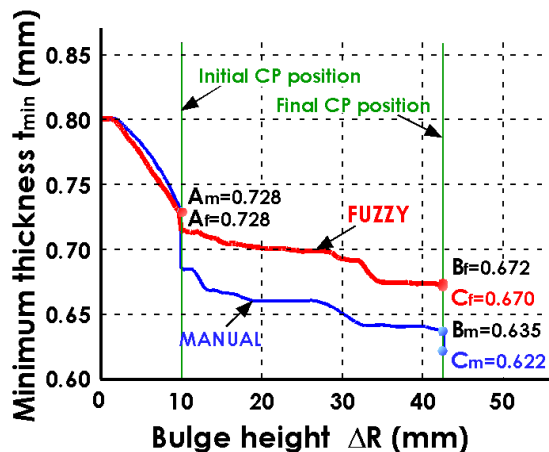


図 10 ファジィ制御と従来制御方式での T 成形での最小肉厚の比較

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

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 装置の試作と実験検証

6.1 THF 装置の設計・開発

THF ファジィ制御システムの基礎となる試験システムを設計・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設計仕様を決定した。

図 12 および図 13 に本研究で設計・開発した THF 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



図 12 設計試作した THF 装置の概観（温間成形仕様）

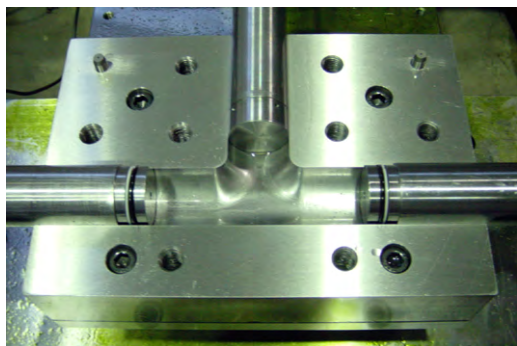


図 13 T 成形用金型

表 5 設計開発した THF 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

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。また室温で難成形性のマグネシウム合金の温間 THF にも適用できるように、カートリッジヒータを挿入した金型と温間用の加圧媒体としてシリコン油を別回路で負荷できるシステムとした。

6.2 アルミニウム合金管を用いた実験による検証

本制御システムの性能評価とファジィ制御アルゴリズムの有効性検証のため、アルミニウム合金管を用いた室温での検証実験を行った。供試材はアルミニウム合金管 A6063-T1（長さ $L_0=200\text{mm}$ 、直径 $D_0=42.7\text{mm}$ 、厚さ $t_0=1.2\text{mm}$ ）を用い、その材料特性を表 6 に示す。潤滑はスプレー式フッ素潤滑剤を用いた。まず本材料特性値を用いてヴァーチャルファジィ制御 T 成形シミュレーションを行い、得られた適正負荷経路（実線）を図 14 に示す。なお、同図に経験的に設定した 2 種類の折れ線からなる負荷経路を破線で示す。この折れ線負荷経路での実験を行った結果、同図中に示すように、経路 1 ではコー

表 6 実験で用いたアルミニウム合金の材料特性

Material (Aluminum alloy)	6063-T1
Young's modulus E [GPa]	70
Yield stress σ_y [MPa]	50
F-value [MPa]	293
n-value	0.3
r-value	0.44

$$\sigma = F \varepsilon^n$$

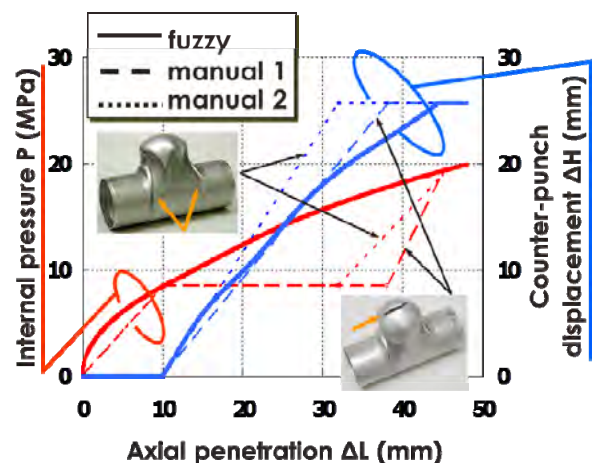


図 14 実験で用いたヴァーチャルファジィ制御から得られた負荷経路と経験から設定した負荷経路

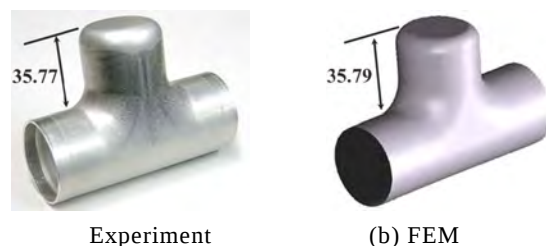


図 15 T 成形品の実験と FEM との比較

ナー肩部での座屈が生じながら枝管頂部での割れが発生し、経路 2 ではコーナー肩部での顕著な座屈が発生した。これに対し、ファジィ制御で得られた適正負荷経路では、座屈や割れが生じることなく T 成形に成功した。図 15 にその実験とヴァーチャルファジィ制御で得られた成形品の比較を示す。成形部の枝管高さは両者での差異はほとんどなく、実験ではヴァーチャルファジィ制御とほぼ同じように成形されているといえる。実験による成形品の横断面形状および肉厚分布（赤）と、ヴァーチャルファジィ制御による肉厚分布を図 16 に示す。両者の結果がよく一致していることがわかる。定量的に肉厚分布を比較するために成形部各部の肉厚を測定し、両者を比較した結果を表 7 に示す。この比較から、成形部全域で定量的にも両者の肉厚分布はよく一致しており、その誤差は最大 7 % 程度である。表中の結果から、肉厚分布の最大肉厚差は 1.12mm で両者とも同じである。

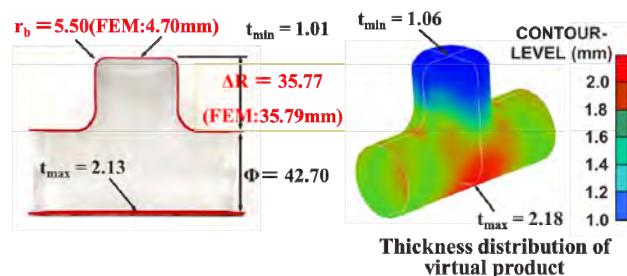
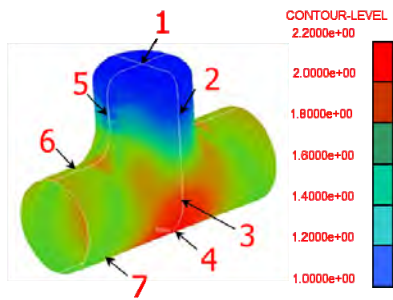


図 16 ヴァーチャルファジィ制御と実験から得られた T 成形形状および肉厚の比較

表7 ヴァーチャルファジィ制御と実験から得られた T 成形品の肉厚分布の比較



Locations in Fig. (right)	Thickness (mm)	
	Experiment	Simulation
1	1.01	1.06
2	1.11	1.16
3	1.92	2.05
4	2.13	2.18
5	1.23	1.29
6	1.76	1.73
7	2.07	1.92

以上より、ファジィ制御 THF システムとその新たな評価関数を用いたファジィ推論アルゴリズムの有効性を示すことができた。

7. 結言

本研究では 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、実際に THF 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 THF システムを構築し新たな評価関数を用いた基本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 THF 装置を設計試作した。得られた成果を以下にまとめる。

- 1) 代表的な THF である T 字枝張出し型 THF 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 の接触に着目した新たな評価関数を提案し、

それを用いたファジィ制御アルゴリズムを提案した。

- 2) 上記コンセプトをヴァーチャルで構築したデータベース援用 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 THF プロセス制御設計を行い、ヴァーチャルで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、成形性の向上および肉厚分布の均一化に適したプロセスとなることを示した。
- 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) 今後はマイクロセンサーを用いて実プロセスの中でセンシングする知的制御システムの開発確立を目指す予定である。

謝辞

本研究は公益財団法人天田財団(当時 財団法人天田金属加工機械技術振興財団)の一般研究開発助成(AF-2001016)から継続して研究開発を行った成果をまとめたもので、同財団および関係の皆様には深甚なる感謝の意を表します。また、本研究の遂行に携わった、当時大学院生、宮本俊介君、末武正充君、森島 稔侍君、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., Manabe K. and Yoshihara S. : Proc. ASME IMECE2000 MED-Vol.11(2000), 805-810.
- 2) 小山 寛, 真鍋健一, 吉原正一郎 : 塑性と加工, 43-503(2002), 1162-1167.
- 3) Koyama H., Manabe K. and Yoshihara S. : *Journal of Materials Processing Technology* Vol.139(2003), 343-348.
- 4) Manabe K., Suetake M., Koyama H. and Yang M. : *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 46(2006), 1207-1211.