

極低周波振動ファジィ適応制御による薄板のドライプレス成形

首都大学東京 機械工学専攻

教授 真鍋健一

(平成 15 年度研究開発助成 AF-2003013)

キーワード：絞り加工、極低周波振動付加制御、成形性

1. 研究の目的と背景

近年、地球環境保護の観点から深絞り加工に関して、無潤滑あるいは無洗浄油化を目指した高柔軟・高品位の加工法の開発が望まれている。無潤滑化を志向した場合、プランクと工具間の摩擦増大による加工限界低下、深絞り容器の表面粗さ、型かじりや工具寿命の低下などの悪影響が想定される。

摩擦影響を極力抑える摩擦低減法として各種振動付加法が注目されている。それに摩擦力と密接な関係があるしわ抑え力ファジィ適応制御深絞り法¹⁾を組み合わせることで、一層良好な潤滑状態で制御され、環境にやさしく、かつフレキシブルで高品位な深絞り加工が実現可能であると期待される。これまで超音波振動を適用した深絞り加工の研究が行われてきたが、装置自体に多大なコストがかかり、コンパクトではなく、汎用性はなかった。

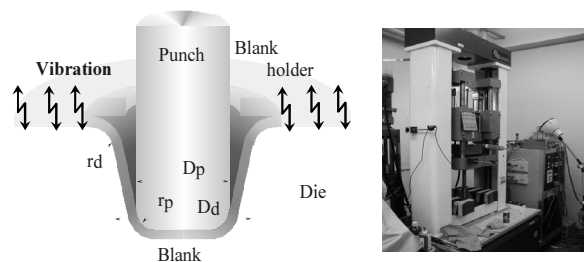
そこで本研究では、地球環境にやさしいドライフォーミングを目指し、まず設備費を低く抑えられる簡便な油圧制御による、5 Hz 以下の極低周波振動を付加できる多機能なファジィ適応制御深絞り装置を開発した。そして振動付加円筒深絞り実験を行い、振動付加の効果を検証した。実験結果から、極低周波でもプランクホルダーに振動を付加することで、パンチ荷重特性から加工エネルギーの低減が確認され、摩擦力の低減効果を実証した。さらにしわ抑制ファジィ制御方式と振動付加を組み合わせ、良好なしわ抑え状態を確立し、さらなる摩擦低減を実証し、両者を組み合わせることによる実機への適用の可能性について検討した。

2. 振動付加ファジィ適応制御円筒深絞り加工試験機の開発

本研究では油圧を用いて所望の極低周波振動しわ抑え力制御を行うために、サーボバルブを用いることにした。従来のサーボモータ制御方式より負荷できる振動数の適用範

Table 1 Performance and functions of new deep drawing apparatus with servo valve

Fuzzy adaptive control	BHF F/kN	0.05~50
	Punch speed v/mm·min ⁻¹	0~1000
Controlable vibration	Amplitude A/kN	0~3.0
	Frequency f/Hz	0~5.0
Maximum load F/kN		100



Die diameter D_d /mm	36.5
Die shoulder r_d /mm	3.0
Punch diameter D_p /mm	33.0
Punch shoulder r_p /mm	4.0

Fig. 1 Outline of deep drawing with blank holder vibration control

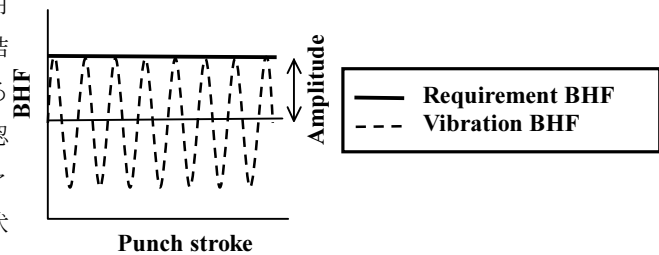


Fig. 2 Schematic of vibration patterns applied to blank holder

囲を拡大し、振動付加時におけるサーボモータ方式の駆動部への慣性的な損傷を軽減させた。製作費は従来の簡易な油圧機構のため、低コストで開発できている。具体的な振動付加方式は油圧アクチュエーターによるプランクホルダーへの直接振動付加方法を採用した。これらの改良を施し

たことで、従来備えていたファジィ適応制御機能¹⁾に加えて、多目的、多用途な制御の実現が可能になった。Table 1 に新試験装置のクロスヘッド制御範囲、しわ抑え力制御範囲、振動適用範囲などの詳細を示す。制御装置は深絞り加工の時々刻々の加工データとして瞬間絞り比、パンチ荷重、しわ抑え力、ストロークをリアルタイムに出力できるようにし、制御の高精度化と高速化を実現した。更に、ネットワークに対応して LAN と接続することで、データ保存において理想的な環境を構築した。

3. 実験

本実験で用いた振動付加深絞り加工の概略図、実験装置外観写真および工具寸法を Fig. 1 に示す。また振動適用方法は Fig. 2 に示す方法で行った。供試材には板厚 1.0mm、絞り比 2.06 の絞り用鋼板 SPCD を用いた。その材料特性値を Table 2 に示す。全実験はドライ加工を目指して工具とblankをアセトン脱脂した無潤滑条件とした。本実験はサーボバルブによる油圧で制御するという簡便な手法を採用することから、極低周波な振動がblankホルダーに付加される。

4. blankホルダー極低周波振動付加による定性的な摩擦低減効果

振動付加による摩擦低減効果について定性的な評価を目的として実験を行い、振幅、振動数に関して検証し、振動のメカニズムを検証した。適用した振動条件及び加工条件を Table 3 に示す。

4.1 振動条件からの検討

Fig. 3 に、振動付加円筒深絞り試験におけるパンチ荷重-ストローク線図及びしわ抑え力の挙動を示す。加工力、加工エネルギーに着目すると、摩擦低減の程度は変化する。振動数 $f=0.5\text{Hz}$ ・振幅 $A=2.0\text{kN}$ (Fig. 3(i)) の場合と、振動数 $f=1.0\text{Hz}$ ・振幅 $A=0.5\text{kN}$ (Fig. 3(ii)) の場合を比較すると、振動数を高くすることが工具摩擦低減に影響するわけではなく、振幅が大きい順に摩擦低減効果が大きいことがわかる。これは振幅を大きくし、しわ抑え力の平均を下げることで、フランジ部あるいは絞り部での摩擦抵抗を低減できることを示唆している。

4.2 成形されたカップの比較

Fig. 4 は成形後のカップ高さを振動条件別に示したものである。この結果から、極低周波で振幅を大きくする方がよりカップ高さが低くなっていることがわかる。成形後の

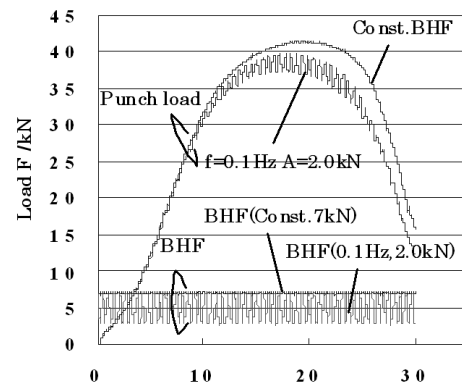
Table 2 Mechanical properties of material used

Yield stress $\sigma_s / \text{N} \cdot \text{mm}^{-2}$	153
Tensile strength $\sigma_b / \text{N} \cdot \text{mm}^{-2}$	315
Breaking elongation $\delta / \%$	47
F value $/ \text{N} \cdot \text{mm}^{-2}$	410
n value	0.24
r value	1.97

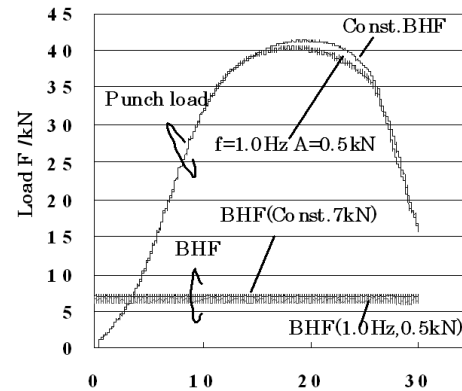
$$(\sigma = F \epsilon^n)$$

Table 3 Experimental conditions of vibration effect test

Frequency A/Hz	0.1, 0.5, 1.0
Amplitude f/kN	0.5, 1.0, 2.0
Constant BHF F/kN	7.0
Punch speed v/mm·s ⁻¹	5.0



(i) $f=0.1\text{Hz}$, $A=2.0\text{kN}$



(ii) $f=1.0\text{Hz}$, $A=0.5\text{kN}$

Fig.3 Comparison between vibration BHF and const.BHF (No lubricant, f=frequency, A=Amplitude)

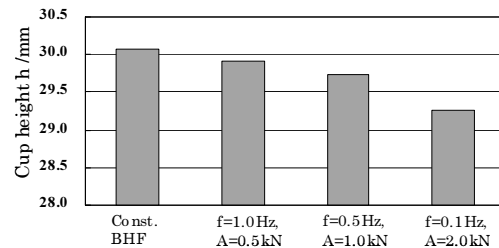


Fig.4 Cup height of drawn cup under various blank holding conditions (No lubricant, f=frequency, A=Amplitude)

カップ高さが低くなることから、パンチストロークに対するフランジ部の流入量が多くなり、フランジ部での摩擦が低減されていることが考えられる。また Fig. 5 では成形後のカップの肉厚分布を示したものであり、振動を付加することで肉厚減少が抑止されていることがわかる。これは振動による平均しわ抑えレベルの低下が肉厚減少を抑止していると考えられる。平均しわ抑えレベル低下によりフランジ部あるいはダイ肩部でのブランク流入が促進させられ、摩擦低減と肉厚減少抑止の効果が現れ、成形品にしわも発生させることなく加工できるものと予測される。

5. 振動付加ファジィ適応制御円筒深絞り加工

しわ抑制ファジィ適応制御とは、ブランクのフランジ部に生じるしわの発生を抑制するために、加工中のブランクの厚さの変化からしわの挙動を把握し、必要最小限のしわ抑え力を加工の進行状況に応じてしわ抑え力を制御する方式である。実験条件を Table 4 に示す。供試材には、前節と同様に SPCD を用いた。

5.1 加工挙動の比較

Fig. 6 は最小一定しわ抑え条件としわ抑制ファジィ適応制御を比較したものである。ファジィ制御により、最小しわ抑え力が負荷されていることから、加工力、加工エネルギーは低減され、摩擦低減効果が現れている。Fig. 7 にファジィ適応制御と振動付加ファジィ適応制御の比較結果を示す。ファジィによる最小しわ抑え力と振動による摩擦低減により、振動付加ファジィ適応制御方式が最も加工力、加工エネルギーを減少させ、最大の摩擦低減効果が得られることが明らかになった。

5.2 成形されたカップの比較

Fig. 8 に各しわ抑え条件における成形後のカップ高さの比較を示す。最も摩擦低減効果のある振動付加ファジィ適応制御法では最大のカップ高さが得られている。これはパンチストロークに対するフランジの流入が最大であることを意味し、フランジ部での摩擦低減が著しいことを示している。Fig. 9 に各しわ抑え条件で成形されたカップの肉厚を示す。振動付加ファジィ適応制御のしわ抑え条件は、ファジィ制御と振動付加の相乗効果により、肉厚減少は他のしわ抑え条件よりも小さく、他のしわ抑え条件の摩擦・フランジ流入現象との関連と同様に、Fig. 8 のカップ高さの結果とよい対応関係が見られる。また Fig. 10 に示すカップ肉厚の標準偏差からも、振動付

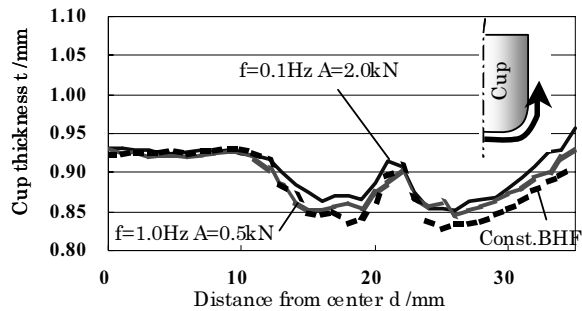


Fig. 5 Thickness distribution of drawn cup under various blank holding conditions (No lubricant, f =frequency, A =Amplitude)

Table 4 Experimental conditions of combination fuzzy and vibration test

Frequency f /Hz	5.0
Amplitude A /kN	1.0
Minimum BHF F /kN	2.0
Punch speed v /mm \cdot s $^{-1}$	5.0

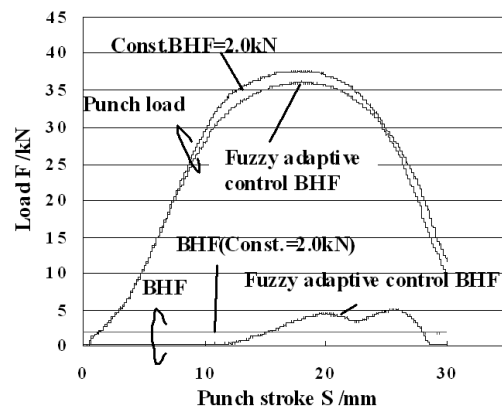


Fig. 6 Comparison between vibration BHF and const. BHF (No lubricant)

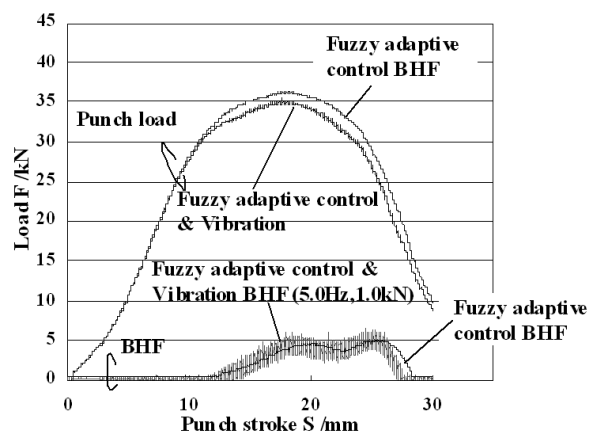


Fig. 7 Comparison between Fuzzy adaptive control & Vibration BHF and Fuzzy adaptive control BHF (No lubricant)

加ファジィ適応制御法が最も肉厚減少を抑止し、かつ肉厚一様化に効果があり、さらに他の条件と比較しても、薄肉化を避けて製品強度を向上させることができる。

6. 連続加工試験

振動付加ファジィ適応制御加工のドライ加工への実用性を検討するため、連続加工試験により評価した。試験では成形されたカップの表面粗さの変化を調査し、その結果によって適用性の評価を行った。

6.1 実験条件

しわ抑え条件は一定しわ抑え条件、振動付加ファジィ適応制御 (Fig. 11 (i)) に示すような振幅一定、振動付加ファジィ適応制御 (Fig. 11 (ii)) に示すような振幅が 0 kN に達する) の 3 パターンで比較した。供試材のアルミニウム合金 A5182 の材料特性値を Table 5 に示す。潤滑剤は低粘度油を用いた。板厚 1.0mm、絞り比 1.98 のブランクを用い、振動条件及び加工条件は Table 6 に示す。

6.2 表面粗さ比較

Fig. 12 に表面粗さの測定結果を示す。しわ抑えの 3 条件を比較した場合、一定しわ抑え力の場合と、振幅一定の振動付加ファジィ適応制御の場合は、あまり差異が見られず、最も表面の悪化を抑えたのは、Fig. 11 (ii) に示すしわ抑えパターン (VA) であった。これは振動の下死点が 0kN に達することで、工具と材料の間に瞬間的につくられる間に、強制的に潤滑油を流入させていることが原因であると推定される。本実験では供試材の A5182 が軟質な材料のため、凝着が起りやすく、肉眼でカップ壁部を比較しても差異が認められなかった。凝着の少ないより硬質の材料を選定することによって、例えばステンレス材料等の硬質材では、表面粗さの差がより顕著に現れるのではないかと期待される。

7. まとめ

(i) ブランクホルダーに極低周波振動を付加することで、摩擦低減効果が得られ、更に、同振動付加ファジィ適応制御円筒深絞り加工を行うことで、より効果的な摩擦低減効果が得られた。適用するブランク材料によってはドライ加工、セミドライ加工の可能性が期待される。

(ii) 本方式の採用によるしわ抑え力の更なる低レベル化が実現でき、その結果、フランジ部とダイ肩部で摩擦低減効果が大きく見られた。

(iii) 振動付加ファジィ適応制御法は、成形されたカップ肉

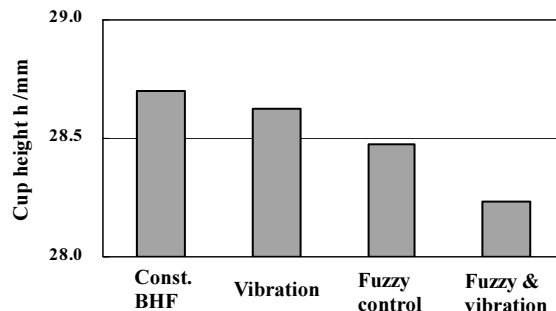


Fig.8 Cup height of drawn cup under various blank holding conditions (No lubricant)

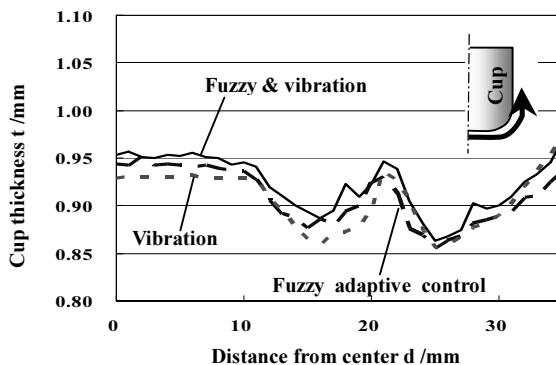


Fig.9 Thickness distribution of drawn cup under various blank holding conditions (No lubricant)

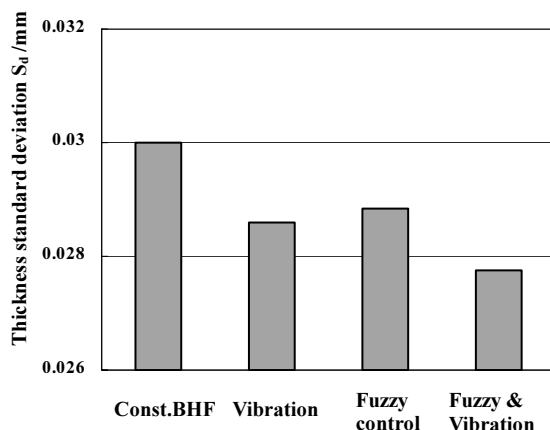


Fig.10 Comparison of thickness standard deviation under various blank holding conditions (No lubricant)

Table 5 Mechanical properties of material used (A5182)

Yield stress $\sigma_s / \text{N} \cdot \text{mm}^{-2}$	117
Tensile strength $\sigma_B / \text{N} \cdot \text{mm}^{-2}$	264
Breaking elongation / %	30.1
F value / $\text{N} \cdot \text{mm}^{-2}$	398
n value	0.28
r value	0.6

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

Table 6 Experimental conditions of continuous test

Frequency f/Hz	5.0
Amplitude A/kN	1.0,
Constant BHF F/kN	1.0
Punch speed v/mm · s ⁻¹	5.0
Lubricant viscosity $\eta/\text{mm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$	26.8

厚の増肉化を促し、絞り製品としての高強度化を図ることができる。

(iv)連続加工試験を行うことで、表面粗さの変化を調査し、振動付加ファジィ適応制御円筒深絞り加工法の実用性について検討し、その可能性を示した

謝 辞

本研究は天田金属加工機械技術振興財団の研究開発助成 (AF-2003013) により遂行された。ここに記して深甚な謝

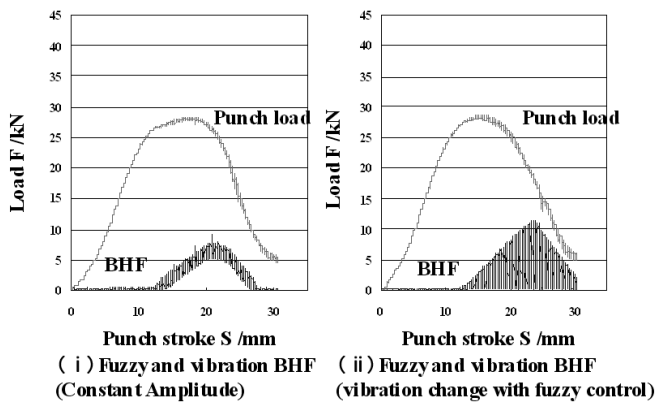


Fig.11 Behavior of punch load and BHF in continuous process test (First time)

意を表します。また、本研究の遂行に当たり有益な助言並びに協力をいただいた東京都立産業技術研究所 片岡征二博士、及び実験・解析で多大な協力をいただいた当時の大学院生、金谷康平氏に感謝いたします。

参考文献

- 1) 小山 寛・真鍋健一・吉原正一郎：塑性と加工、43-502(12002), 298-302.

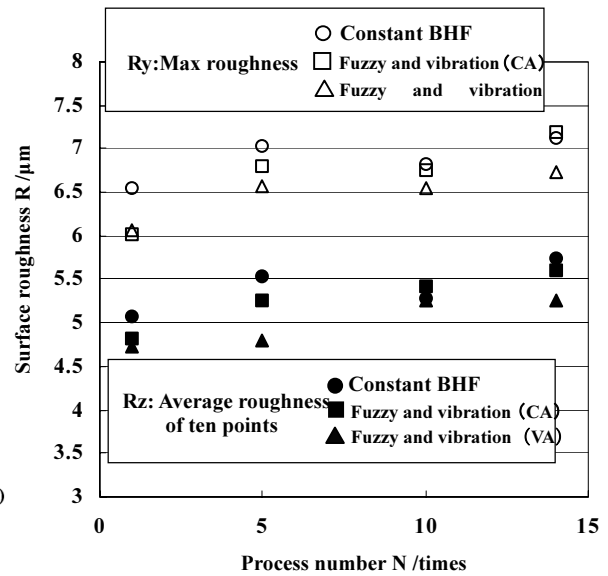


Fig.12 Variation of surface roughness on cup wall in continuous process test