

超音波振動しごき絞り法による精密深絞り品製作法に関する研究

日本工業大学 機械工学科

教授 村川 正夫

(平成9年度外国人技術者養成援助助成 AF-97(35))

キーワード：しごき絞り，超音波振動

1. まえがき

最近，精密プレス絞り・しごき加工によって製作される，例えば CD-ROM ドライブ用モータ部品などコンピュータ関連機器用の部品に対する精度向上および低コスト化の要求が厳しくなっている¹⁾。これらの要求を満足させるためには一般的にはしごき加工性を向上させる高粘度加工油の使用が不可欠となるが，一方では，環境規制により同加工油洗浄のための強力脱脂剤（例えばフロンや 1,1,1 トリクロロエタン等）が使用できなくなったため高粘度加工油が使用しにくくなっている。そのため，洗浄しやすい低粘度加工油による高精度プレス絞り・しごき法の開発が要望されている。

解決法として，加工油の観点からは低粘度かつ加工性に優れた水溶性加工油の開発が進められているようであるが，本研究では，ダイスに超音波振動を付加することによって低粘度加工油使用時のしごき加工性を向上させる方法について検討した。ダイスに付加する超音波振動の主振動方向は，次章でその理由を詳述するように，ダイス半径方向とすることが原理的により優れているのではないかと考え，半径方向超音波振動がしごき加工における潤滑性および加工精度の向上に与える影響について検討した。その結果，半径方向の超音波振動を付加することにより限界しごき率（LRRWT）を含むしごき加工性がより好適に向上することがわかったのに加え，その効果は特に低粘度の加工油を用いた場合ほど顕著に現れることがわかった。この理由については FEM を利用して考察を試みた。それらの結果について報告する。

2. 超音波振動しごきにおけるダイス振動方向と加工機構の幾何学的考察

ダイスに付加する超音波振動の振動方向としごき機構の関係について幾何学的に考察してみる。同振動としては，Fig. 1 に示すように，ダイス軸方向振動 (f, a_a) および半径方向振動 (f, a_r) の 2 種類に大別できる。慣用しごき，軸方向超音波振動しごき，および半径方向超音波振動しごきにおけるダイスと工作物の幾何学的相対変位をそれぞれ Fig. 2 に示す。慣用しごきの場合，ダイスは不動で工作物のみがポンチ速度 v_i と等しい一定速度で移動し，時刻 t 経過時における工作物移動軌跡点 $W(t)$ が W_0 から W_1, \dots, W_n へと移動することによってしごき加工が行われる。ダイスを軸方向に正弦波振動させた場合，しごき速度はポンチ速度 $v_i +$ 振動速度 $v_a(t)$ で表される。このとき，しごき速度 v_i と最大振動速度 $v_a(t)_{max}$ の関係を $v_i < v_a(t)_{max}$ ($v_a(t)_{max} = 2\pi a_a f$) とすることによって，ダイス振動方向がしごき方向と同方向に転じた際，ダイスアプローチ部が工作物から軸方向に分離するようになり，加工と分離を交互に繰り返すしごき機構が得られる。このとき，振動 1 サイクル毎

の軸方向加工長さ Q_T は $Q_T = v_i/f$ となる。なお，この機構ではダイスベアリング部は工作物と常時接触したままである。一方，ダイスを半径方向に正弦波振動させたときは，一定速度 v_i で移動している工作物をダイスベアリング部が半径方向に叩きながら加工する機構となる。このとき，工具と工作物が半径方向に分離するためのしごき速度条件は $v_i < v_r(t)_{max}/\tan \alpha$ ($v_r(t)_{max} = 2\pi a_r f$ ， $\alpha =$ ダイスアプローチ半角) となる。この場合，振動 1 サイクル毎の軸方向加工長さ Q_T は軸方向振動の場合と同様 $Q_T = v_i/f$ となるが，このしごき機構の特徴はダイスアプローチ部とベアリング部の両方で同時に間隙が発生することにある。なお，ベアリング部が工作物から分離することが幾何学的にしごき面に凹凸を発生させ，加工精度に悪い影響を与えるのではないかという懸念については，ベアリング部長さ Q_B を Q_T 以上に設定することで解消される。

それぞれの超音波振動の振動方向がしごき加工性に与える影響を考察してみると，まず，軸方向超音波振動の場合

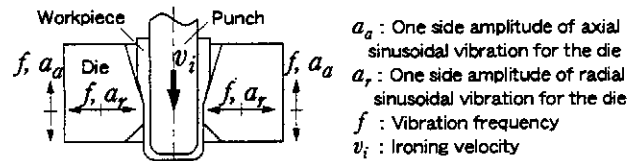


Fig. 1 Two vibration modes for ironing die

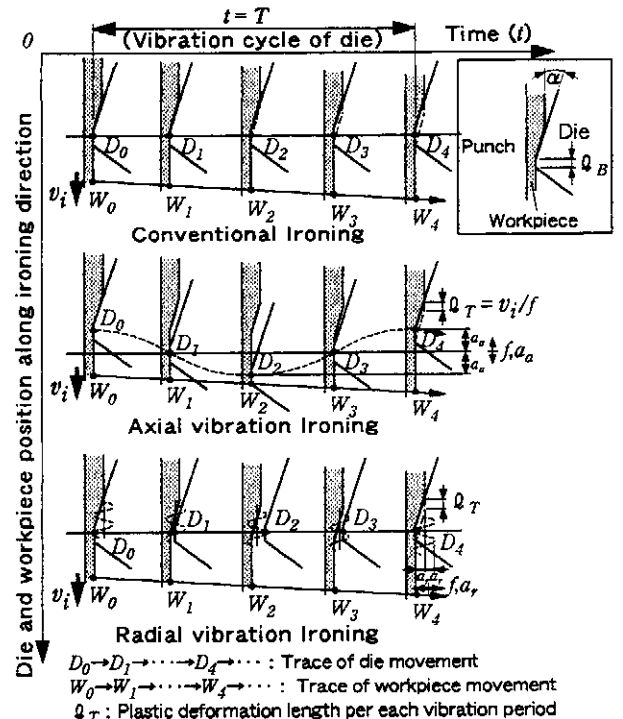


Fig. 2 Comparison of ironing mechanisms between axial and radial vibration methods and conventional one

は、アプローチ部で間隙が発生する際に加工油進入が促進される効果が得られるものの、ベアリング部には付加的な摩擦運動が生じる。それに対して半径方向超音波振動の場合は、ベアリング部とアプローチ部で同時に間隙が発生することで、前記付加的摩擦運動もなく、より高い加工油進入促進効果が得られると考えられる。このことから、超音波振動をダイスに付加するにあたって潤滑性の観点からは、振動方向を半径方向とすることがより適当と考えられる。

3. 実験装置および方法

超音波振動しごき装置として Fig. 3 に示すように 15 kHz で共振する軸対称の半径方向振動ダイス②および軸方向振動ダイス③の 2 種類を製作した。半径方向振動ダイスは、中心に穴を有する円盤の 1 次の軸対称伸縮振動モードの振動系とし、ダイス台金④はプレハードン鋼製、ダイス②および③はしまりばめされた超硬製とした。軸方向振動ダイス③は、図中左側に示すように前記の振動系の円盤から 1/4 波長分の長さだけ軸を伸ばした形状のダイス台金に設置した。振動の付加は両者のダイスに振動子⑩ 2 本を対向させてダイス外周面にねじで連結することにより行なっている。これらの超音波振動ダイスユニットを 200 kN 油圧プレスに取り付けて振動しごき装置を構成した。ダイスのプレスへの取付けはダイスの下部に 1/2 波長ホーン⑤をねじで連結し、同ホーンのフランジ部⑪を図示のように半割り固定治具⑥によってベースプレート⑬で支持する方法により行った。

実験条件を Table 1 に示す。ダイスの振動状態は、無負荷時において半径方向振動ダイスおよび軸方向振動ダイス共にほぼ所定の振動方向になっていることを CCD カメラにより確認した。しごき時の振幅は、正確な測定はできなかったが、無負荷時の約半分程度となっていた。実験は、前工程として、打抜きにより製作した丸形ブランクから深絞りカップを作成し、そのカップをしごき実験に供するという方法で行った。ブランクにはアルミニウム、SPCE 共にもと板厚 2.0 mm の冷間圧延板を使用し、表中に示した所定の板厚 Th は #60WA 砥石により同板両面を平面研削することによって得た。ブランクの表面粗さは両面共に $5.0 \mu m R_y$ 程度、深絞り後の外表面粗さは、アルミニウムの場合 $1.2 \mu m R_y$ 程度、SPCE の場合 $4.2 \mu m R_y$

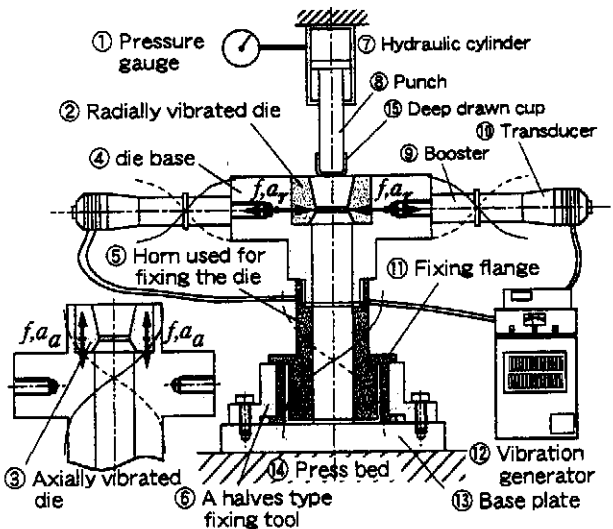


Fig. 3 Experimental setup for ironing

Table 1 Experimental conditions

Frequency	$f = 14.8 \text{ kHz}$
Amplitude measured	$a_r = 15 \mu m$ and $a_a = 15 \mu m$ (under no load condition)
Ironing speed	$v_i = 38 \text{ mm/s}$
Lubricants	1. Press oil (Viscosity $\approx 1473 \text{ mm}^2/\text{s}$ at 40°C) 2. Emulsion type water-soluble oil (10% dilution, Viscosity $\approx 1 \text{ mm}^2/\text{s}$ at 40°C) 3. Solution type water-soluble oil (10% dilution, Viscosity $\approx 1 \text{ mm}^2/\text{s}$ at 40°C)
Work materials	Aluminum (A1050-H24) : $\sigma_B = 185 \text{ MPa}$, $\psi = 4\%$ Steel (SPCE) : $\sigma_B = 345 \text{ MPa}$, $\psi = 25\%$
Blank thickness (Th) and RRWT	$Th (\text{mm}) < RRWT(\%) >$ 1.0 $< 25.0 >$, 1.2 $< 37.5 >$, 1.3 $< 42.3 >$, 1.4 $< 46.4 >$, 1.5 $< 50.0 >$, 1.6 $< 53.1 >$, 1.7 $< 55.9 >$, 1.8 $< 58.3 >$

σ_B : Tensile strength (MPa), ψ : Elongation (%)

RRWT : Reduction Ratio of Wall Thickness (%)

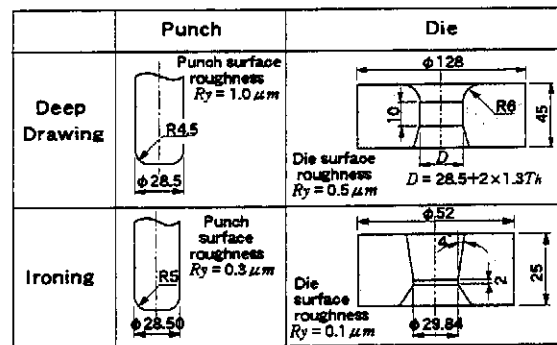


Fig. 4 Shape and dimension of deep drawing and ironing tools

程度、また偏肉は両者共 $55 \mu m$ 程度となっていた。しごき加工油にはプレス加工油（日本工作油 No.660）、エマルジョンタイプ水溶性切削油（カストロール JE-295）、ソリューションタイプ水溶性研削油（クレノートン ET50）の 3 種類を使用した。しごき時には限界しごき率を向上させるためポンチとカップ間に潤滑油を使用しなかったため、しごき後のカップの取出しは、作用する大きなストリッピング力が製品精度に悪影響を与えないように、カップをあたたため、熱膨張させてストリッピング力がほぼゼロになる状態で行った。

それぞれの工具の形状を Fig. 4 に示す。深絞りダイス径は、この段階でしごき加わらないように各板厚に対し 1.3 倍のクリアランス（片側）になるように設定した。また、しごきポンチとダイス間のクリアランスは片側 0.67 mm となっている。すなわち、しごき率の変化は板厚を変化させることによって行なっている。

以上の実験装置および条件で慣用しごき法およびダイス振動方向を替えた各しごき法における加工油としごき加工性の関係について表面性状、限界しごき率、形状精度などを測定し調査した。

4. 実験結果および考察

4.1 しごき抵抗およびしごき状態

しごき音については、軸方向および半径方向超音波振動しごきの場合共に同程度で、カップが加振されている音が若干聞こえる程度であった。

しごき温度については、各加工油使用時の場合共、半径方向振動しごきの場合には慣用しごきの場合とほぼ同程度となった。それに対して、軸方向振動しごきの場合には温度がかなり高くなり手で触れない程度となった。これは前記の考察でも述べたようにダイスベアリング部が工作物と摩擦するためによるものと考えられる。

しごき抵抗については、ポンチ油圧シリンダの油圧計を利用して測定した結果によると、焼付きが発生しない条件においては、軸方向振動しごきで一般的に慣用しごきの場合に対して40%程度、半径方向振動しごきでは20%程度減少することがわかった。

この理由について考察してみると、軸方向振動しごきの場合、Fig. 2 においても示したように、ダイスベアリング部と工作物は常に接触しているために、そこでの摩擦抵抗がしごき抵抗の変動に関与し、ダイスがしごき方向と同方向に変位するときにダイスと工作物間の摩擦抵抗がしごき抵抗と反対の方向となるため、しごき抵抗波形の最小値がマイナスの領域にまで減少してくるものと考えられる。それに対し、半径方向振動しごきの場合には原理的にその影響がないので、しごき抵抗減少率に関しては、軸方向振動の場合の方が減少幅が大きくなるものと考えられる。しかし、軸方向振動の場合には付随的にベアリング部と工作物が数万回/秒のサイクルで激しくこすれるために、それによる発熱と焼付きの発生度合いが極めて高くなるものと考えられ、実際に実験においても発熱と焼付きの現象が認められている。この焼付きが発生する条件では、焼付きによるしごき抵抗増大が加味され、この際のしごき抵抗減少率は半径方向振動しごきの場合と同程度かそれ以下にまで低下してしまうこともわかった。

4.2 表面性状

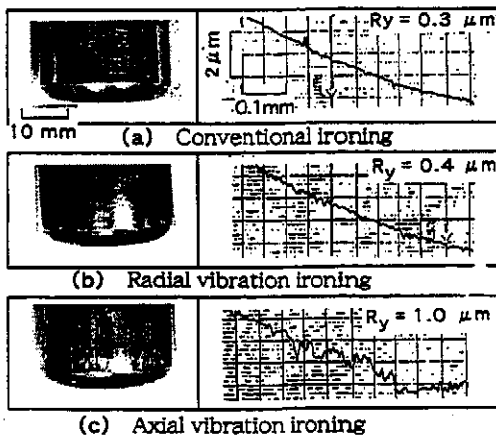


Fig. 5 External surface views and roughness values measured in peripheral direction of ironed cup (Aluminum, RRWT: 37.5%, Solution type water-soluble oil)

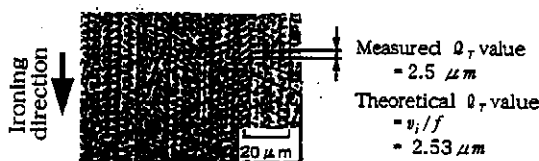


Fig. 6 Vibration marks observed on the cup surface obtained with radial vibration ironing (Aluminum, RRWT: 37.5%, No lubrication)

ソリューションタイプ水溶性切削油を用いてしごいたアルミニウムカップの外表面写真および円周方向表面粗さをFig. 5に示す。半径方向振動しごきによるカップの表面状態は慣用しごきに比べ若干曇り気味となることがわかった。図示は省略するが、無潤滑の場合にも、その程度は減少するものの同様の傾向が観察された。これらの現象から潤滑状態が向上していることが推察できた。また、半径方向振動ダイスでしごいたカップの表面には虹面が観察され、表面を顕微鏡で観察してみるとFig. 6に示すように振動1周期毎の加工マークが $\lambda_T = v_i/f$ の計算値 $2.5 \mu m$ にほぼ一致する間隔で観察された。このことから先に考察したようにダイスがカップに接触・分離を繰り返す機構によってしごき加工が行なわれていることが推測できる。一方、軸方向振動しごきによる表面は、Fig. 5に示したように材料のダイスへの凝着が原因のスクラッチ傷が激しく入っているものであることがわかった。これは、ベアリング部が工作物と接触したまま大振幅で往復運動するため、摩擦による焼き付きが発生しやすくなったためと考えられる。この対策法として、前述のように振幅を $5 \mu m$ 程度と小さくし、軸方向の振動にわずかに半径方向成分を重畳させ、ベアリング部を円弧にする方法が提案されている²⁾。しかしながら、前述の振動しごき加工機構の考察および、以上の実験結果から、ベアリング部のこすれない半径方向振動の利用が、潤滑性を向上させるためにはより適当であると判断し、以下は半径方向振動しごきに対してしごき加工性検討を行うこととした。

4.3 限界しごき率

アルミニウム板およびSPCE鋼板に対し各種加工油を

Table 2 The LRRWT values
(a) Aluminum (A1050-H24)

T_h mm	RRWT %	Press		Emul		Solut		No-lub	
		CI	RVI	CI	RVI	CI	RVI	CI	RVI
1.0	25.0	○	○	○	○	○	○	○	○
1.2	37.5	○	○	○	○	○	○	○	○
1.3	42.3	○	○	○	○	○	○	×	○
1.4	46.4	○	○	○	○	○	○	×	○
1.5	50.0	○	○	×	○	×	○	×	×
1.6	53.1	○	○	×	○	-	×	-	-
1.7	55.9	×	○	×	×	-	×	-	-
1.8	58.3	-	×	-	-	-	-	-	-

(b) Steel (SPCE)

T_h mm	RRWT %	Press		Emul		Solut		No-lub	
		CI	RVI	CI	RVI	CI	RVI	CI	RVI
1.0	25.0	○	○	○	○	○	○	○	○
1.2	37.5	○	○	○	○	○	○	×	○
1.3	42.3	○	○	○	○	○	○	×	○
1.4	46.4	○	○	○	○	○	○	×	○
1.5	50.0	○	○	○	○	×	○	×	×
1.6	53.1	×	○	×	×	-	×	-	-
1.7	55.9	-	×	-	-	-	-	-	-

T_h : plate thickness (mm)

Press : Press oil, No-lub : No-lubrication

Emul : Emulsion type water-soluble oil

Solut : Solution type water-soluble oil

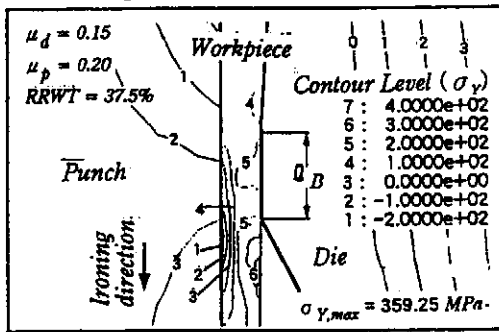
○ : Success of ironing, × : Failure of ironing

用いて限界しごき率を測定した結果を Table 2 に示す。その結果、両者の工作物において、いずれの加工油の場合でも半径方向振動しごき（以下 RVI と略記する）の場合には慣用しごき（以下 CI と略記する）の場合に比べて限界しごき率が向上することがわかった。結果において特に注目すべきは、無潤滑を極限端として加工油の潤滑性能が悪くなるほど半径方向振動しごきによる限界しごき率向上の割合が大きくなっていることである。この結果は低粘度加工油使用時の潤滑性を向上させるという本研究の目的に適合するものである。しかし現象そのものは一見しただけでは理解しにくい。そこで、このことを検証するため、Table 2 (b) の SPCE 鋼板、 $Th = 1.2 \text{ mm}$ (No-lub のとき CI では破断、RVI では成功) のケースについてしごき時の工作物の応力分布を有限要素法により計算してみた。解析モデルは Fig. 5 に示したものと同様とし、振動 1 サイクル中の破断に関与するしごき方向引張り応力 σ_y の最大値をそれぞれの方法について求めた。潤滑油の影響については材料とダイス間の摩擦係数 μ_d を変化させることで調べた。すなわち、無潤滑の場合は $\mu_d = 0.2$ 、潤滑油を使用した場合は $\mu_d = 0.05$ から 0.15 までの数段階の値と仮

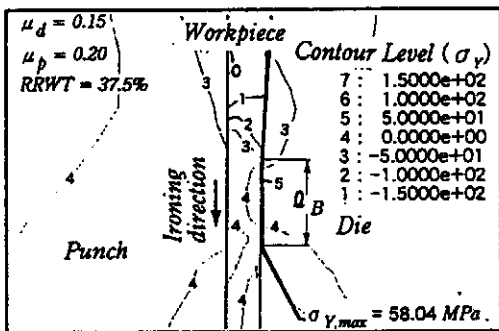
定した。工作物とポンチ間の摩擦係数は $\mu_p = 0.2$ 一定とした。 $\mu_d = 0.15$ の場合のしごき方向成分応力 σ_y の解析例を Fig. 7 に、摩擦係数 μ_d と軸方向応力 σ_y の関係を Fig. 8 に示す。慣用しごきの場合には、 σ_y は μ_d に大きく影響され、 μ_d が大きくなるにつれて σ_y が大きくなる傾向となり、 $\mu_d = 0.15$ 以上では、工作物の破断応力 $\sigma_B = 345 \text{ MPa}$ を越える。それに対して、半径方向振動しごきの場合には、 σ_y は μ_d に関係なくほぼ一定の小さな値となっている。すなわち、半径方向振動しごきによれば、もともとしごき方向成分応力 σ_y が小さくしかもその値が潤滑状態にあまり影響を受けないことから、潤滑状態が悪くなるほど慣用しごきに比べ σ_y が相対的に小さく結果的にしごき率が慣用しごきに比べ向上するという前記実験結果と符合する解析結果が得られた。この物理的意味を考察してみると、半径方向に超音波振動させた場合、工作物の変形形態はしごき速度 v_i が振動速度 v_r の 1/40 であり、したがって実質的に静止状態にある工作物がダイスベアリング部により半径方向に叩かれて減肉されるものとなるので、 σ_y は小さくしかもダイスと工作物間の摩擦係数にほとんど影響を受けないものと考えられる。それに対して慣用しごきの場合には σ_y が摩擦係数すなわち摩擦力の影響を大きく受けることから、半径方向の超音波振動しごき法は慣用しごきに比べて潤滑状態が悪いほどしごき加工性が相対的に向上することが理解できる。

4.4 形状精度

今回試作したしごきダイスは形状精度について十分詳細に議論できるほど、工具精度は必ずしも高いものにはなっておらず、詳細な検討は今後の研究にゆずるが、予備的に形状精度について比較・検討してみた。アルミニウムに対しエマルジョンタイプ水溶性加工油を用い板厚精度を測定した結果を Fig. 9 に示す。半径方向振動しごきにより、実際のしごきダイスクリアランス（片側） 0.67 mm に対



(a) Conventional ironing



(b) Radial vibration ironing

Fig. 7 An example of analysis results obtained by the FEM analysis (Distribution of σ_y component of stresses in ironing direction)

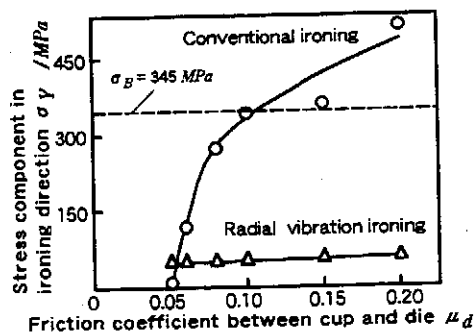
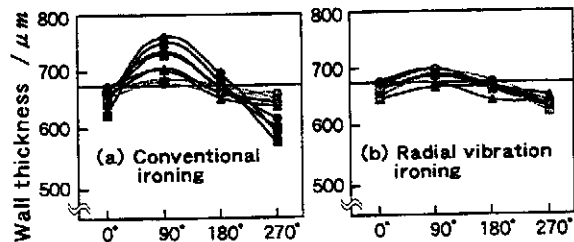


Fig. 8 Relation between μ_d and σ_y



Measurement position along the cup periphery / °

Fig. 9 Thickness variations of aluminum cups (RRWT : 37.5%, Emulsion type water-soluble oil)

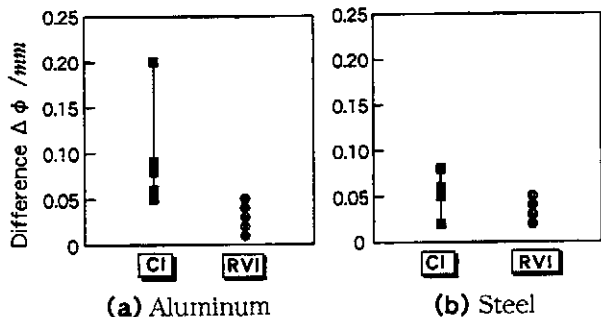


Fig. 10 Difference of diameters ($\Delta \phi = D_{max} - D_{min}$) of ironed cup (RRWT : 37.5%, Emulsion type water-soluble oil)

応する板厚により近い板厚分布となり、板厚精度が向上する傾向にあることがわかった。SPCE の場合も、図示は省略するが、同様の傾向となった。

アルミニウムと SPCE に対しエマルジョンタイプ水溶性加工油を用い外径精度を測定した結果を Fig.10 に示す。半径方向振動しごきにより慣用しごきに比べて外径精度が向上する傾向にあることがわかった。

以上の実験結果より、半径方向振動しごきによれば慣用しごきに比べて加工精度も向上する傾向にあることがわかった。

5. むすび

精密プレス絞り・しごき製品の製作にあたり、環境規制により高粘度加工油が使用できにくくなりつつある状況に鑑み、低粘度加工油を使用した場合の潤滑性低下を補う目

的で、ダイス半径方向の超音波振動を付加するしごき方法を検討した。その結果、同方法により低粘度加工油を使用した場合のしごき加工性をダイス軸方向振動付加の場合と比べてより安定的に向上させる効果が得られることがわかった。今後、特に形状精度に着目し同方法を実際の精密プレス絞り・しごき装置に適用する方法についてさらに検討していきたい。

参考文献

- 1) 北澤勉・丸山彰：プレス技術, 34-10 (1996), 44-50.
- 2) 竹増光家・尾崎龍夫・松永良一・山崎進・坂口雅司・富田賢二：塑性と加工, 38-442 (1997), 53-58.
- 3) 斉藤正美・斉木弘行・河合望：機論 C, 52-483 (1986), 2959-2966.