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

村川正夫＊

1. まえがき

プレス絞り・しごき製品は例えば電気・電子機器など各種機械部品として従来より広く用いられれているが，最近，特に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関して加工精度向上および低コスト化の要求が厳しくなってきているようである[1]．しかしながら，一方では，良好な深絞り性やしごき性を得るために必要な高粘度加工油や種々添加剤を配合した高潤滑性加工油が環境汚染防止および低コスト化のための洗浄工程の簡略化という観点から使用しにくくなっているのも現状である．そのため，低粘度で洗浄しやすく，かつ有害な添加剤がなく環境負荷が小さい潤滑油を用いての高精度プレス絞り・しごき加工方法が強く要望されている．

その問題点の解決法として，著者は工具および加工方法の観点から検討を進めてきており，これまで高潤滑・高硬度膜コーティング工具による無潤滑深絞り法など検討[2]してきた．本研究では，第2の方法として，加工性を向上させる手段に超音波振動を利用する方法について検討した．著者をも含めたこれまでの超音波振動を塑性加工に利用した研究において，工具に超音波振動付加することによって，摩擦抵抗が減少する効果[3]，振動により微細な間隙が発生し潤滑剤が進入しやすくなる効果[5]，および加工抵抗が減少する効果[7]などの加工性向上効果が得られるようになることがわかっている．これらの結果から考察すると，超音波振動により低粘度化のために犠牲になった潤滑性能を補うことができれば，低粘度潤滑油を用いた場合でも高粘度油を用いたときと同等の高精度プレス絞り．しごき加工法が可能になるのではないかと考えた．

そこで，周波数15kHzで超音波振動するしごきダイスを試作し，種々潤滑条件においてしごき実験を行ってみた結果，特に半径方向の超音波振動を利用した場合に低粘度潤滑油を使用したときのしごき性を向上させる効果が得られることがわかったので報告する．

2. 超音波振動しごき方法および加工機構

ダイスに付加する超音波振動の振動方向とそのときの幾何学的しごき加工機構の関係，およびその機構がしごき性に与える効果について考察した．ダイスに超音波振動を付加させるときの振動方向としては，図1

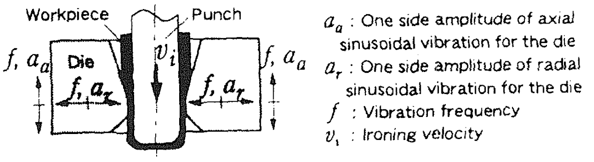

図1　超音波振動しごき法

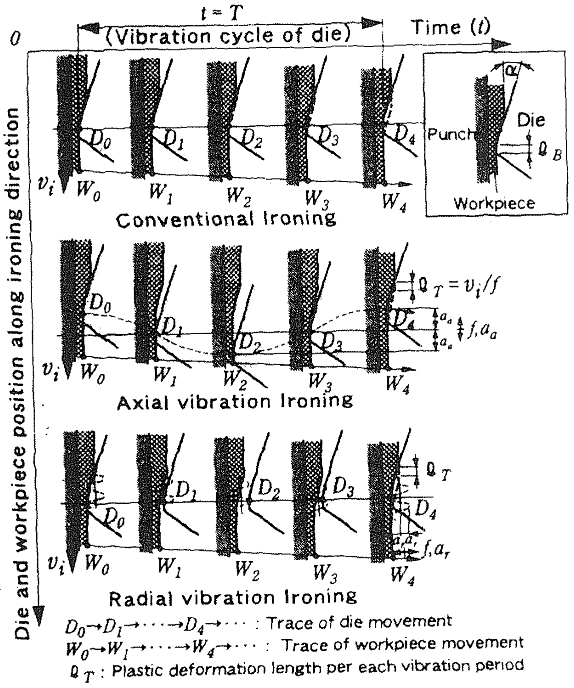

図2　超音波振動しごき加工におけるダイスと工作物の幾何学的相対変位

に示すように，ダイスの軸方向（f, a_a）および半径方向（f, a_r）の2方向が考えられる．慣用しごき加工，軸方向超音波振動しごき加工，および半径方向超音波振動しごき加工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図2に示す．まず，慣用しごきの場合はダイスは不動で工作物のみが一定速度v_iでW_1からW_2・・・へと移動することによってしごき加工が行われる．次に，ダイスを軸方向に振幅a_aの正弦波形で超音波振動させた場合は，工作物の一定速度変位に超音波振動の振動速度が重畳された速度でしごかれる機構となる．しごき速度はポンチ速度 v_i＋振動速度

$v_a(t)$で表されるが，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$v_i < v_a(t)_{max}$ $(=2\pi a_a f)$ とすることによって，ダイス振動方向が引抜き方向と同方向に転じた際に$v_v(t)=v_i$となった時点をもってダイスが工作物から分離するようになる．従って，加工と分離を交互に規則的に繰り返すしごき機構となる．このとき，振動1サイクル毎の軸方向加工長さl_Tは$l_T=v_i/f$となる．なお，この機構ではベアリング部は常時接触したままである．一方，半径方向に振幅a_rで超音波振動させたときは，一定速度で変位している工作物にダイスがハンマリング加工のよう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 $v_i < v_r(t)_{max}/\tan\alpha$ $(v_r(t)_{max}=2\pi a_r f$，α=ダイスアプローチ半角）となる．振動1サイクル毎の軸方向加工長さl_Tは軸方向振動の場合と同様に$l_T=v_r/f$となる．この振動方向の場合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．

それぞれの超音波振動の振動方向がしごき性に与える影響を考察してみると，まず，軸方向振動および半径方向振動共に 15kHz のサイクルで加工と休止を繰り返すため，加工抵抗は 15kHz のパルス状となり，計測される加工抵抗が周波数特性上平均化され見かけ上減少してくる効果[6]が期待できる．次に，間隙発生時に加工点に潤滑剤進入がなされる効果はダイスのベアリング部とアプローチ部で同時に間隙が発生する半径方向振動しごきの場合の方が効果が大きいように考えられる．

3．実験装置及び方法

実験に用いた超音波振動しごき装置を図3に示す．ダイスの形状は 15 kHz で共振する円盤をベースに設計し，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で振動系を設計し，ダイス台金はプレハードン鋼により製作し，ダイスは超硬製とした．軸方向振動ダイスは，半径方向振動ダイスで用いた振動系の円盤からさらに 1/4 波長分の長さだけ軸を伸ばした位置にダイスを設置することにより軸方向振動を得た．振動数は，電歪型振動子の圧電セラミックの容量が大きくでき，大きな振動駆動力と振幅を得ることを考慮し 15 kHz とした．

この超音波振動ダイスを 20t 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固定はダイスの下部に固定用フランジ付きの 1/2 波長ホーンをねじ止めし，そのフランジを支持する方法で行った．

実験工程は，前工程として，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．前工程の深絞りおよびしごき実験に用いた工具の形状を図4に示す．深絞りダイス径は，それぞれの板厚に対し 1.3 倍のクリアランスになるように設定した．しごき工具間のクリアランスは 0.67 mm とし，アプローチ部角度は 4°，ベアリング長さは 2 mm とした．ポンチ材質には SKD11 を，ダイスには超硬を用いた．

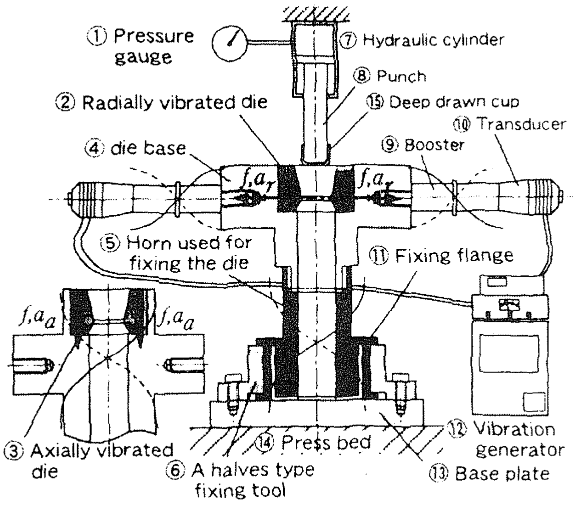

図3　実験に用いた超音波振動しごき装置

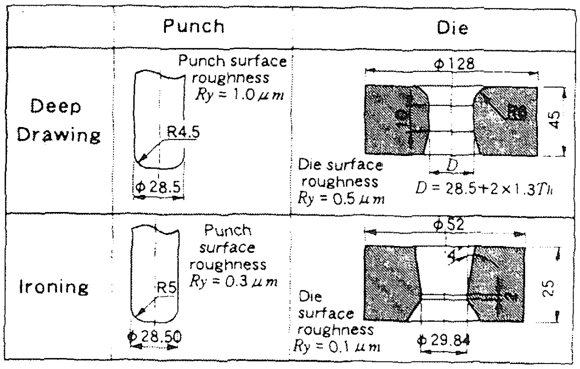

図4　深絞り（前工程）およびしごき実験に用いた工具形状

実験条件を表 1 に示す．ダイス振動数は 14.8 kHz，無負荷時の振幅は半径方向，軸方向，共に p-p で 15 μm，しごき時の振幅は CCD カメラで観察した結果では，正確な測定はできなかったが，無負荷時の約半分程度まで減少していた．ブランクは冷間圧延鋼板から打抜きにより作成し，表中に示したように厚さを変化させることによってしごき率を変えて実験を行った．加工油にはプレス加工油，エマルション型水溶性切削油，ソリューション型水溶性研削油の3種類を使用した．以上の実験装置および条件においてしごき性，限界しごき率，加工精度などを慣用しごき，軸方向および半径方向の超音波振動しごきについて比較・検討した．

表 1　実験条件

振動数	f ＝14.8 kHZ
振幅	a_r = 15　m ,　a_a = 15　m (無付加時)
しごき速度	υ_I = 38 mm/s
加工油剤	1.プレス油 (粘度 ≒ 1437 mm^2/s at 40℃) 2. エマルジョンタイプ切削油 (10% 希釈, 粘度 ≒ 1 mm^2/s at 40℃) 3. ソリューションタイプ切削油 (10% 希釈, 粘度 ≒ 1 mm^2/s at 40℃)
被加工材	アルミニウム (A1050-H24) : σ_B = 185 MPa, ψ = 4% 鉄鋼 (SPCE) σ_B = 345 MPa, ψ = 25%
板厚 (*Th*) および *RRWT*	*Th* (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>

4．実験結果及び考察

4.1　しごき状態

超音波振動しごきにおけるしごき音については，しごき時に，軸方向および半径方向の場合共に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，半径方向振動しごきの場合は慣用しごき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る傾向にあることがわかった．これは振動によりベアリング部が激しく摩擦するためによるものと考えられる．

4.2　しごき抵抗

しごき抵抗をポンチ油圧シリンダの油圧計を利用して測定した結果，しごき荷重は半径方向振動しごきと軸方向振動しごきにおいて慣用しごきに比べ約 20% 程度しごき抵抗が減少している．他の条件の場合も一般的に，半径方向および軸方向超音波振動しごきの場合でしごき荷重が慣用しごきの場合から，おおむね 15% ～ 40% 程度減少することがわかった．

4.3　表面性状

しごいたカップを定性的に観察した結果を図 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とほぼ同じか，あるいは若干曇り気味の表面状態となることがわかった．このことから潤滑状態がやや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を太陽光線に当ててみるとその表面に虹面が観察された．そこで，その表面を顕微鏡で観察した結果，振動 1 周期毎の加工マークが $l_T = v_r/f$ の計算値 2.5 μm にほぼ一致する間隔で観察できた．このことから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も推測できた．一方，軸方向振動しごきによる表面状態は，ダイスへの材料の凝着が原因のスクラッチ傷が激しく入ることがわかった．これは，ベアリング部が接触したまま激しく往復運動するため，摩擦と，それによる発熱のため焼き付きが発生しやすくなったことによるものと考えられる．この結果から，超音波振動をしごきに適用するにあたっては半径方向振動が

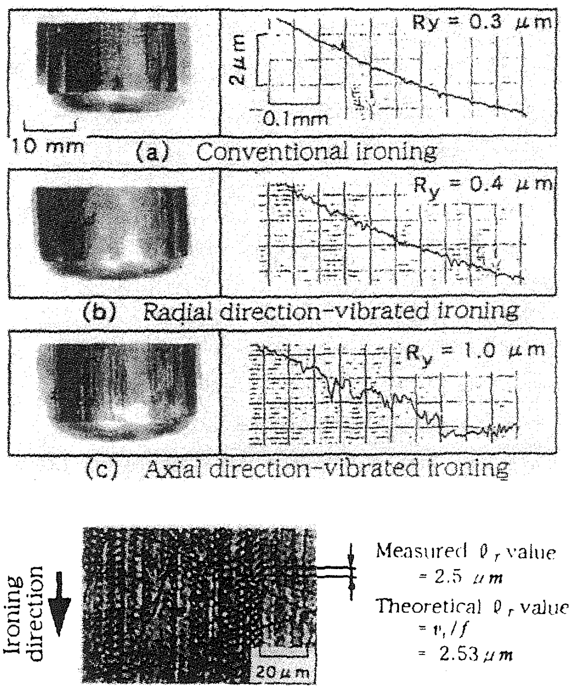

図 5　しごきカップの表面状態

表2　アルミニウムに対し各種加工油を用いて限界しごき率を測定した結果

Th (mm)	*RRWT* (%)	Press CI	Press RVI	Emul CI	Emul RVI	Solut CI	Solut RVI	No-lub CI	No-lub RVI
1.0	25.0	○	○	○	○	○	○	○	○
1.2	37.5	○	○	○	○	○	○	○	○
1.3	42.5	○	○	○	○	○	○	×	○
1.4	46.4	○	○	○	○	○	○	×	○
1.5	50.0	○	○	×	○	×	○	×	×
1.6	53.1	○	○	×	○	−	×	−	−
1.7	55.9	×	○	×	×	−	×	−	−
1.8	58.3	−	×	−	−	−	−	−	−

Th : 板厚 (mm)
Press : プレス油, No-lub : 無潤滑
Emul : エマルジョンタイプ切削油
Solut :ソリューションタイプ切削油
○ : しごき成功, × : しごき失敗

適当と判断し，以下は半径方向振動しごきに対して検討をおこなうこととした.

4.4　限界しごき率

アルミニウムに対し各種加工油を用いて限界しごき率を測定した結果を表2に示す．いずれの加工油の場合でも，半径方向振動しごきにより慣用しごきに比べて限界しごき率が向上しているが，この中で注目されるのは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. SPCE に対しての結果を表3に示すが，この場合もアルミニウムの場合と同じ傾向となることがわかった.

この原因は，第2章において工具と工作物の幾何学的相対位置関係を考察したように，半径方向に叩かれて加工される形態となることから，工作物に作用する応力状態が慣用しごきの場合に比べて異なっているためと考えられる.

表3　SPCE に対し各種加工油を用いて限界しごき率を測定した結果

Th	*RRWT*	Press		Emul		Solut		No-lub	
(mm)	(%)	CI	RVI	CI	RVI	CI	RVI	CI	RVI
1.0	25.0	○	○	○	○	○	○	○	○
1.2	37.5	○	○	○	○	○	○	×	○
1.3	42.5	○	○	○	○	○	○	×	○
1.4	46.4	○	○	○	○	○	○	×	○
1.5	50.0	○	○	○	○	×	○	×	×
1.6	53.1	×	○	×	×	−	×	−	−
1.7	55.9	−	×	−	−	−	−	−	−

Th：板厚 (mm)
Press：プレス油, No-lub：無潤滑
Emul：エマルジョンタイプ切削油
Solut：ソリューションタイプ切削油
○：しごき成功，×：しごき失敗

4.5　加工精度

今回試作したしごきダイスは必ずしも加工精度を十分に考慮したものにはなっていないが，加工精度についても比較・検討してみた．まず，アルミニウムに対し板厚精度を測定した結果を図6に示す．半径振動しごきにより，実際の工具クリアランス 0.67 mm 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 に対し外径精度を測定した結果を図7 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．このことから，半径方向振動しごきによれば加工精度も向上する傾向にあることがわかった.

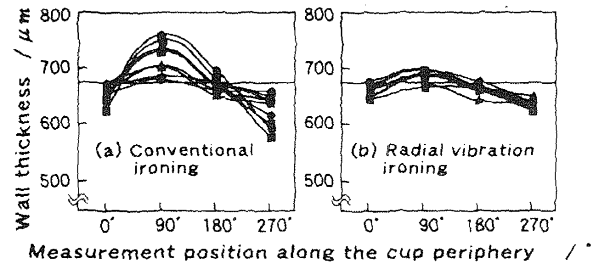

図6　板厚精度の測定結果（アルミニウム）

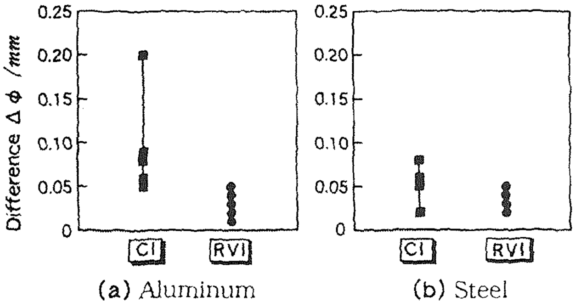

図7　外径精度の測定結果

5．むすび

プレス絞り・しごき製品の製作にあたり，環境汚染防止および製作コストの低減の観点から高粘度潤滑油が使用しにくくなりつつある状況に鑑み，低粘度潤滑油を使用した場合の潤滑を補うためにダイスに超音波振動を付加するしごき方法を検討した．その結果，特に半径方向の超音波振動を利用した場合に低粘度潤滑油を使用したときの限界しごき率と加工精度が向上することがわかった．この結果より，半径方向振動しごき方を利用することにより低粘度潤滑剤使用時のしごき性が向上することを明らかにすることができた.

参考文献

1) 北澤勉・丸山彰：プレス技術，34，10 (1996)，45.
2) 神雅彦・古閑伸裕・村川正夫・熊谷泰：塑性と加工，37，429 (1996)，1095.
3) 村川正夫・ポンパン ギャオタティップ・神雅彦：平9春塑加講論，(1997)，49.
4) 隈部淳一郎：振動切削，(1973)，374，実教出版.
5) 浅尾宏：塑性と加工，35，406 (1994)，1278.
6) 島進・長谷部忠司：塑性と加工，35，406 (1994)，1297.

＊日本工業大学　工学部機械工学科　教授