



T. Yoneyama

超音波押出しの研究

米山 猛*

1. 緒言

超音波付加の効果は、摩擦の低減、変形抵抗の低減などが期待されている。超音波振動の付加は、打抜き加工¹⁾や引抜き加工などの塑性加工や難削材への切削加工など各種の加工への応用が広がっており、加工荷重が著しく低減するなどの効果が現れている²⁾。押出しにおいては、高い加工荷重が求められており、超音波を付加することで加工荷重や応力を低減することができれば、従来には困難であった断面形状の加工が実現したり、加工装置の小型化、省エネルギーの効果などが得られたりすると考えられる。しかしこれまでのところ、押出しへの適用については、MousaviらがFEM解析を行っているのみで、実物への適用が試みられていない³⁾。圧縮変形⁴⁾や圧印加工⁵⁾に対しては超音波を付加することで加工荷重が低減することが知られており、押出し加工に対しても、超音波の与え方によって、荷重の低減効果が得られることが期待される。

そこで本研究では、まず塑性変形に対する超音波の効果の確認として、超音波圧縮の実験を行い、次に超音波の押出しへの適用を行った。

2. 超音波圧縮

2.1 圧縮実験結果

超音波振動を加えながら圧縮を行う装置を図1に示す。20kHzの超音波振動ユニット（UL20（株）岳将製、外径126mm長さ367mm）を300kN油圧サーボ試験機にとりつけた。超音波振動ユニットで加振されるホーンは、先端部を円錐状にし、さらに試料を加圧する下端面を直径20mmの平面とした。圧縮荷重を検出するロードセルを超音波振動ユニットの上部に取り付けた。

圧縮する試料の寸法は直径8mm、高さ12mmの円柱とした。材質は純アルミニウムA1050とAl-Mg合金A6063を用いた。いずれも鋳造材から切り出したものである。圧縮は室温で行い、圧縮速度は0.1mm/sと10mm/sの2種類とした。無負荷時の振幅で、11 μ m～20 μ mを超音波ホーンの下端面に発生させて圧縮した。

純アルミニウムA1050、圧縮速度0.1mm/sの場合の応力-ひずみ線図を図2に示す。圧縮前にホーンに加振を始めると、接触時に試料が移動したため、振幅11 μ mの場合は圧縮を始めた直後に、振幅20 μ mの場合は、圧縮

ひずみがおよそ0.07の時点から振動を加えた。振動を加えなかった場合の応力に比べ、振幅11 μ mの場合の応力は約65%に、振幅20 μ mの場合の応力は約40%に低減している。

Al-Mg合金A6063を0.1mm/sで圧縮したときの応力-ひずみ線図を図3に示す。純アルミニウムA1050と比べると応力低減率は低く、超音波振幅20 μ mで、振動なしの場合の約75%に低減している。

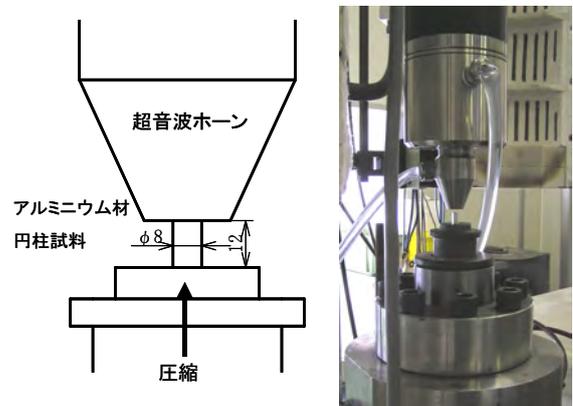


図1 超音波圧縮装置

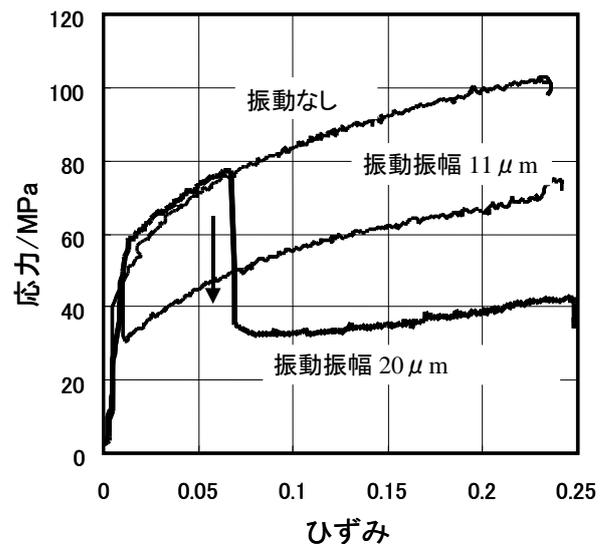


図2 純アルミニウムの圧縮応力とひずみに対する超音波振動の効果（圧縮速度0.1mm/s）

* 金沢大学理工研究域機械工学系 教授

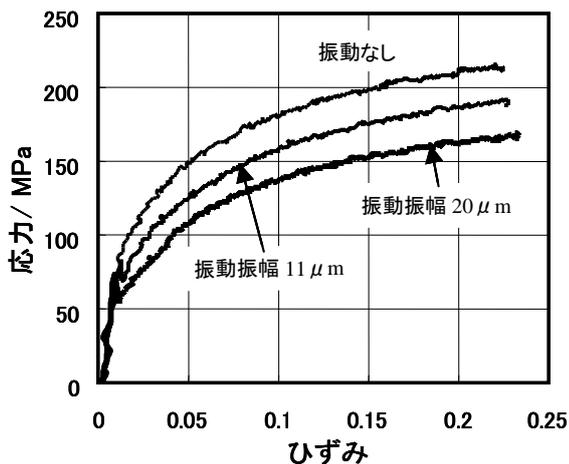


図3 A6063の圧縮応力とひずみに対する超音波振動の効果（圧縮速度0.1mm/s）

2.2 超音波圧縮についての考察

(1) 応力低減量の比較

A6063はA1050に比べて超音波付加による応力の低減率が小さいが、振動なしのときの応力からの低減量を比べるとあまり変わらない。ひずみ0.2において、超音波を付加しない場合の応力からの低減量について比較する。圧縮速度0.1mm/sにおける比較を図4に示す。A1050でもA6063でも、応力の低減量は振動振幅にほぼ比例しており、材質や圧縮速度による違いはあまりない。

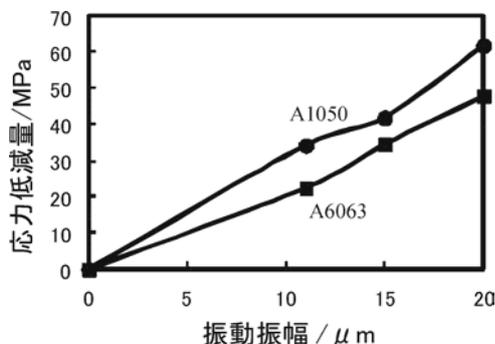


図4 振動振幅と応力低減量との関係

(2) 超音波で与える変位と試料の変位

試料の塑性変形において、試料の高さ方向に様なひずみと応力を生じると仮定して、超音波による変位と塑性変位との関係について考える。

圧縮速度0.1mm/sと圧縮速度10mm/sの塑性変形において、20kHzの超音波振動一回つまり2万分の1秒あたりの塑性変形変位はそれぞれ、0.005μmおよび0.5μmである。これらは、超音波振幅10μm~20μmに比べると非常に小さい。一方試料が塑性変形を生じるためには、弾性限界まで弾性変形を生じる必要がある。そこで超音波振動1回あたりの振幅の大半が試料の弾性変位を生み、最後の一部で試料の塑性変形を生じると考える。試料の下端面はほとんど動かないと考える。下ロッドには、試料の変形によって生じる応力によって、20kHzの力振動が与えられるが、下ロッドの直径は100mm、長さ400mm

で、その固有振動数は2kHz程度であり、振動が追従しないので、下ロッドの変位は力振動の平均値によって生じる変位に保たれる。このことは、アルミニウム試料をばね定数の小さいばね、下ロッドをばね定数の大きいばねと考えて、アルミニウムの上端に変位振動を与えたと考えても、アルミニウム試料のばね定数に対して下ロッドのばね定数が約20倍あるので、アルミニウム試料のみが伸びちぢみして、下ロッドには振動が伝わらないと考えることもできる。

一方試料の上側では、超音波振動子が節で支えられている。やはり20kHzの力振動が上ロッド側に伝えられるが、ロードセルの固有振動数は6kHzで、上ロッド側全体の固有振動数はさらに低くなるため、上ロッド側も力振動のほぼ平均値による変位に保たれると考えられる。

(3) 超音波変位による応力

超音波による変位によって圧縮中の試料が弾性変形すると考える。超音波振幅を δ 、圧縮試料のヤング率を E 、圧縮試料の高さを h とすると、試料が δ だけ圧縮されたことによって発生する応力 σ は、

$$\sigma = E \frac{\delta}{h} \quad (1)$$

となる。圧縮中のポンチにはこの振動による応力変動が生じると考えられるが、前節で述べたように、ロードセルには、この荷重のほぼ平均値が検出されると考えられる。したがって、超音波を付加したときの応力低減量は、式(1)による応力の半分の値になると考えられる。つまり応力低減量 $\Delta\sigma$ は、

$$\Delta\sigma = \frac{1}{2} E \frac{\delta}{h} \quad (2)$$

となる。振動なしの場合の応力-ひずみ関係と超音波を加えた場合の材料の変形と検出される応力-ひずみ関係、およびこの時の試料変形の概念図を図5に示す。ある時点において、超音波変位によって材料の弾性変形が進み、弾性限界に達して、塑性変形に至る。この時の塑性変形量がこの1サイクルの間にポンチが進む変位に一致する。超音波変位が戻るときは、この塑性変形した点から弾性変形として戻る。

試料のヤング率を $E=69\text{GPa}$ とし、ひずみ0.2における試料高さ $h=9.6\text{mm}$ を代入して、振幅 δ による応力低減量 $\Delta\sigma$ を求めると、図6のようになり、実験における応力低減量とよく合う。実験における応力低減量がこれよりも小さいのは、試料下端面側にも多少変位が生じて、試料に与えられた変位が超音波変位よりも小さくなったからだと考えられる。

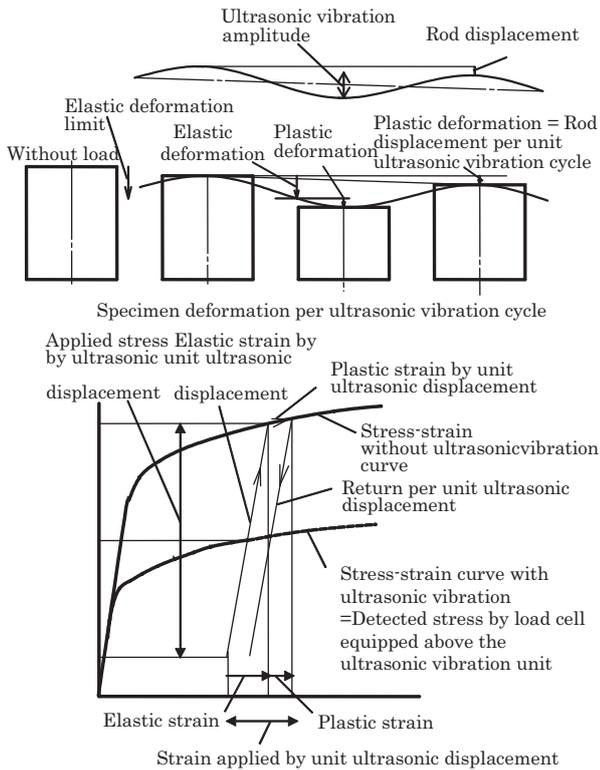


図5 応力-ひずみ曲線に与える超音波振動の効果

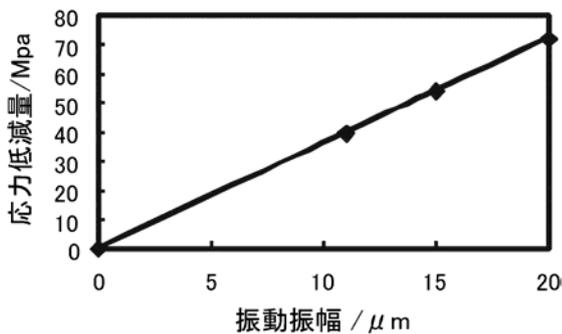


図6 式(2)から推定した応力低減量

3. 超音波押し出し

3.1 後方押し出し装置

超音波振動を後方押し出しのダイに付加する装置を考えた。後方押し出しにおいては、ピレット内の変形がダイ近傍に集中し、ダイをピレットに押し込む方式を取ることから、ダイに超音波を付加することで、塑性変形領域に有効に振動を与えることができると考えたからである。

後方押し出し工具の構成を図7に、ダイ等の寸法の詳細を図8に示す。コンテナ内径8mm、ダイ出口径4mm、押し出し比4とした。ダイとピレットの境界面に超音波振動の最大振幅が生じるように、ダイの厚さを1mmと薄くした。超音波振動ユニットとして、20kHzのユニット(UL20(株)岳将製、外径126mm長さ367mm)を使用した。超音波振動ユニットの先に、直径50mmの円柱の先端部が円錐状になっているホーンを取り付けた。ホーンの先端部を中空パイプ状に作成した。中空パイプ部分の外径を7.8mm、内径を4.3mmとし、ストレート部分の

長さを約6mmとした。

ストレート部分の長さが長いほど、押し込み量を大きくとれるが、押し出し荷重に対して座屈するのを恐れ、押し出し量は少なくても、超音波付加による荷重低減効果を見ることを優先して、ピレットを5mm程度押し込むことができる長さとした。ホーン先端に厚さ1mmのダイを加えたダイ面で最大振幅 $15\mu\text{m}$ (無負荷時)が発生するようにホーン形状を調節した。

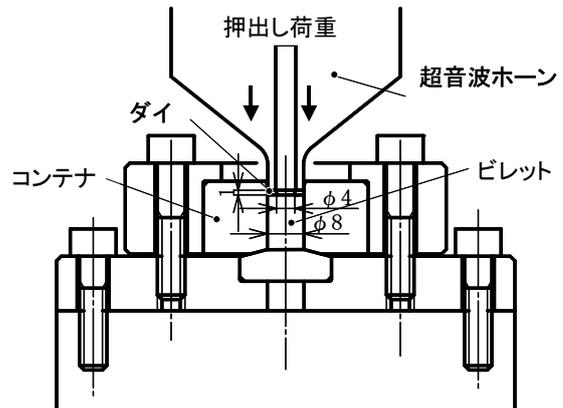


図7 超音波付加後方押し出し装置

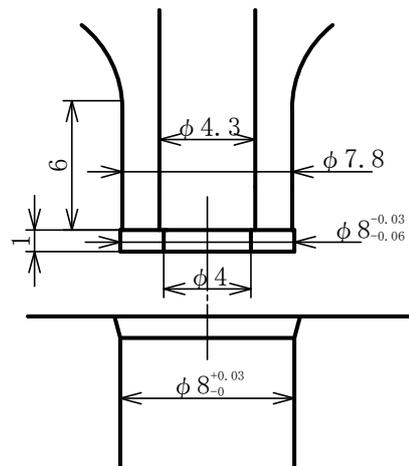


図8 ダイおよびホーンの寸法詳細

押し出し装置の全体状況を図9に示す。超音波振動ユニットを30トン油圧サーボ試験機(島津製作所サーボパルサー)の上ロッドに取り付け、下ロッドにコンテナを取り付けた。上ロッドの上部にはロードセルが設置されている。

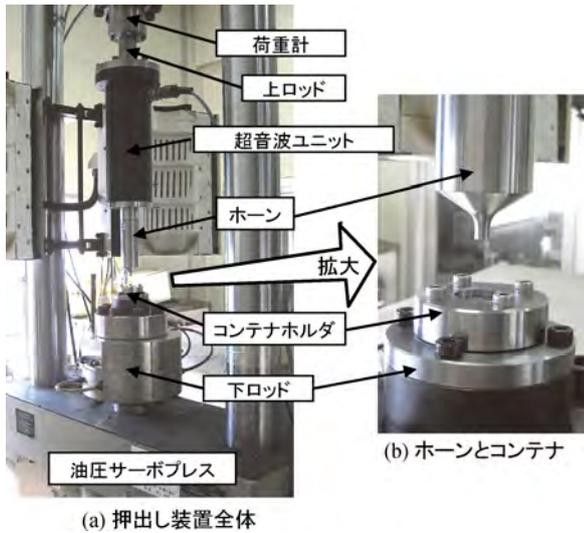


図9 超音波押し装置全体

3.2 後方押し実験

供試材は、直径7.8mm、長さ12mmのA1050ビレットで、鋳造後そのままの材料から削り出したものである。平均粒径は $90\mu\text{m}$ であった。試料表面に潤滑剤(CRC-55)を塗布してコンテナ内に挿入し、ダイをビレット上面に載せ、中空ホーンで加圧して、後方押しを行った。押しは常温(20°C)で行った。超音波振動をあらかじめホーンに付加し、0.1mm/sの速度でホーンを下降させてダイを加圧して押しを行い、サンプリングタイム1msで荷重とストロークを測定した。比較のため、超音波振動を付加しない場合の押しも行った。ホーンへの荷重付加を20kN以下に抑えるため、ビレットへの押し込み量(ストローク)を超音波振動なしの場合は、ビレット長さの15%(1.8mm)、超音波振動付加の場合は、ビレット長さの20%(2.4mm)とし、2回ずつ押しを行った。

3.3 後方押し実験結果

押し荷重とストロークとの関係について、超音波振動付加の場合と超音波振動付加なしの場合を比較して図10に示す。

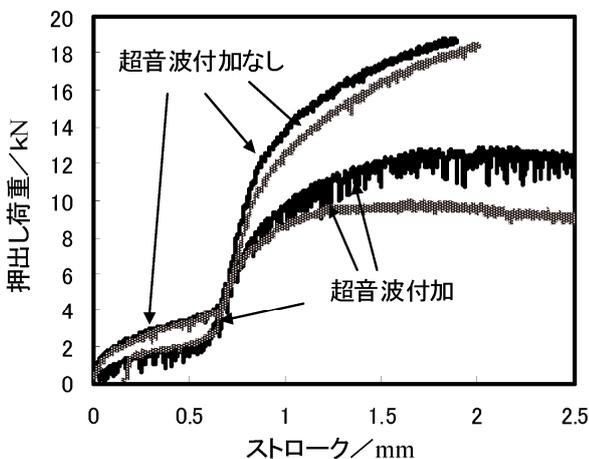


図10 後方押しに対する超音波付加の効果

押し荷重は最初にコンテナ内のビレットを圧縮する荷重を経た後、押しを始める荷重へ増加している。

超音波振動を付加しない場合、ビレットを圧縮する過程で約4kNに達した後、荷重が増加して押しが始まり、ストローク2mmで押し荷重は18~18.5kNまで上昇している。ストロークとともにさらにまだ増加を続ける途中である。純アルミニウムは、加工硬化が著しいため、押し初期の変形による加工荷重の増加が著しく、このストロークではまだコンテナ内の変形が定常的な状態に至らず、加工硬化を続けている過程であると思われる。

これに対し、超音波振動を付加した場合には、ビレットを圧縮する荷重も約2kNと低く、その後荷重が上昇して押しを始めるが、ストローク2mmで押し荷重は10kNないし12kNで、その後はほぼ一定となっている。定常的な押し状態に達したと考えられる。押し荷重が低減するとともに短いストロークで定常状態に達している。2回の押しのうち、1回は荷重変動が小さいが、もう1回では、押し過程で荷重の断続的な下落と復帰が起こった。

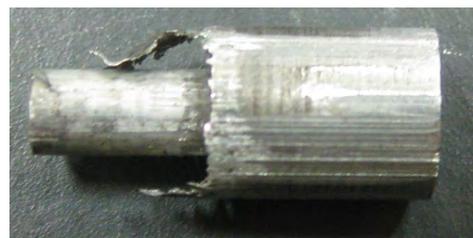
コンテナ内でビレットを圧縮する荷重は、超音波振動の付加によって、約60%に低減しており、押し荷重も55%~60%に低減している。

なお超音波振動を付加した場合には、押しが進むとともに、潤滑材が焼けたためか、ビレット外周部から煙の発生が見られた。押し中のビレットの温度上昇量は計測していないので不明であるが、コンテナを外側から触った状態でおよそ50°C程度の温度になっていた。

押し後の試料を図11に示す。超音波押しでは、押し中にダイ外周とビレット内面との間の隙間から材料がバリとして出ており、ビレットを取り出したときに、ダイの周りにこびりついている。このバリの厚さは $28\mu\text{m}$ で、ダイとコンテナ内面との間のクリアランスに対応する厚さであった。超音波なしでは、ダイの外周部に材料が入り込むことはなかった。



(a) 超音波付加なしの試料



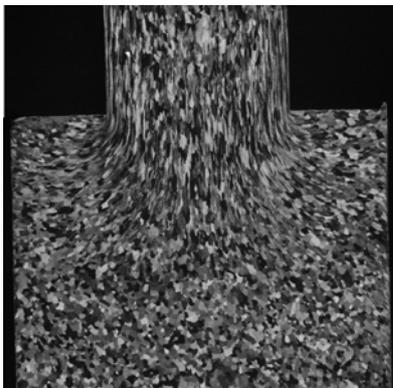
(b) 超音波付加の試料

図11 後方押し後の試料

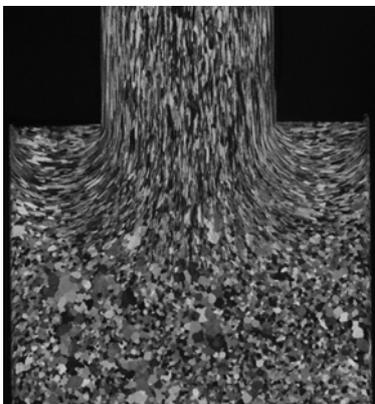
押し出し後の試料を縦割りにカットして、エッチングして断面組織を比較したのが図 12 である。

超音波なしの場合は、ダイ直下の材料の変形が小さく、コーナ部はデッドメタルになっていて、ダイ出口に向かって円錐領域で変形が起こってダイ出口へ流れている。これに対して超音波付加の場合には、ダイ直下の部分の材料が圧縮されてダイ出口にむかって流れ、ダイ出口から流出している。またダイの外周部へも流れ込んでいる様子がわかる。

超音波振動付加効果のイメージを示したのが図 13 である。後方押し出しにおいてなぜ工具近傍のみでの変形が促進されたのか明確ではないが、自由表面への材料流動を起こしやすい材料出口近くの工具界面で超音波振動を与えたときの効果として、今後検討を進めたい。

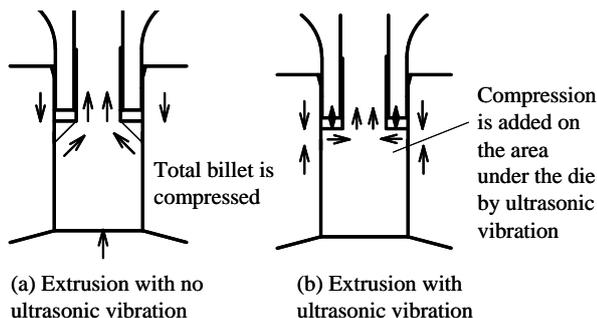


(a) 超音波なしの結晶組織



(b) 超音波付加した場合の結晶組織

図 12 押し出し後のビレット断面結晶組織



(a) Extrusion with no ultrasonic vibration

(b) Extrusion with ultrasonic vibration

図 13 後方押し出しダイに超音波振動を与えたときの効果のイメージ

超音波を付加しながら十字断面を持つ異形材の押し出しを行った例を図 14 に示す。超音波付加なしでは、押し出し荷重が大きくてステムの耐荷重を超えてしまうが、超音波を付加することによって、耐荷重を超えずに押し出しを行うことができた。



図 14 超音波付加による十字断面形材の押し出し

4. 結言

本研究では、まずこれまでの研究でも報告されていた超音波圧縮を行い、超音波付加による荷重低減を確認した。この効果は、超音波による変位が圧縮試料の弾性変位と塑性変位を受け持つことによって、平均荷重を低減させたと考えている。純アルミニウムの圧縮に対する荷重低減に比べ A6063 の圧縮に対する荷重低減の効果が小さかったのは、A6063 の方が変形抵抗が大きいため塑性変形に至るまでの弾性変位が大きく、より大きな効果を得るためには、より大きな超音波変位が必要であったためと考えている。

加工荷重低減のためには、加工される材料に有効に超音波変位が与えられることが必要だと考え、後方押し出しのダイに超音波振動を付加した。その結果、加工硬化が大きくて、室温での押し出しは通常行われぬ純アルミニウム材の押し出しにおいて、押し出し荷重が約 40% 低減することを見出した。ダイ直下での材料内の塑性変形が促進されていることが観察された。押し出しにおいて、ダイ近傍は、押し出し出口（自由表面）に向かって大きく塑性変形が起こる領域であり、この領域に効果的に超音波振動を加えることによって、ダイの変位がダイ近傍の材料の塑性変形を促進して、荷重を低減することができたと考えられる。

ステムに対する荷重負荷が大きくなりすぎる断面形材に対しても超音波を加えることによって押し出しが可能であったことは、従来は荷重が過大となって押し出しが難しかった断面形状の押し出しを行うことが可能となることを示唆している。

以上のように、本研究では、超音波を押し出しダイに加えることによって、押し出し荷重を低減することができることを明らかにした。従来困難であった押し出しが可能となる可能性もあり、今後の発展を期待する。

本研究は住友軽金属工業（株）高橋昌也氏との共同研

究として進めた。本研究を進めるに当たり，超音波振動ユニットの適用について，(株) 岳将にお世話になった。

本研究を推進することができたのは，公益財団法人天田財団より研究開発助成をいただいたからである。ここに改めて御礼申し上げる。

参考文献

- 1) 竹増 光家・山崎 進・三浦 秀士・水江 亮太・星山 卓志・尾崎 龍夫：塑性と加工, **47-548** (2006), 885-889.
- 2) 日本塑性加工学会：超音波応用加工,(2004),森北出版.
- 3) Mousavi, S.A.A.A., Feizi, H. & Madoliat, R. : *Material Processing Technology*, 187-188(2007), 657-661.
- 4) 和泉修・大山致知・鈴木義彦：塑性と加工, **7-61**(1966), 59-64.
- 5) 神雅彦・林正弘・Thipprakmas, S.・村川正夫：平成 15 年度塑性加工春季講演会講演論文集,(2003), 85-86.
- 6) 米山猛・高橋昌也：塑性と加工, **52-601**(2011), 63-67.
- 7) 米山猛・高橋昌也・長井康礼：塑性と加工, **53-618**(2012), 641-645.