

低周波振動付与成形加工

—反復ダイス回転がねじり押し特性におよぼす影響—

神奈川工科大学 工学部 機械工学科
教授 水沼 晋

(平成 17 年度研究開発助成 AF-2005016)

キーワード：サーボモーター，ねじり押し，負荷特性

1. 研究の目的と背景

塑性加工中に超音波を付与することにより成形性を向上させる研究が多数行われているが，金型ごとに適正な入力機構など超音波付与条件を決定しなければならず，実用化の上での問題点が多い．すでに板材成形や粉末成形の分野では，リンク機構を有したプレス機械で成形性を向上させている．しかしながら，これらの技術は工程が原理的に一方向であり，サーボ技術を十分に利用しているとは言い難い面がある．最近，サーボ技術を利用した機械プレスが実用化され，これまで困難であった低周波振動付与加工が可能になり，サーボ技術の応用範囲が非常に拡大されてきている．また，板材の成形の一部にこの技術を応用して成形性が向上した例が報告されている．

このような背景のもと，サーボ技術による低周波振動が塑性加工における加工力，加工限界，材質などに対して大きく影響するものと予想されている．現在，筆者らはねじり押し法という新しい塑性加工プロセスを提案している^{1)~5)}．これは，1パスで大ひずみを材料に付加し，超微細材料を創製できるものであり，Mg合金を主対象として開発中である．Mg合金は実用金属中最軽量であり，輸送機械や電子部品への適用拡大が期待されている．

このプロセスはダイス（あるいはコンテナ）を回転させながら押し加工を行うものである．今回は，ダイス回転用にサーボモーターを使用し，通常押し，通常ねじり押し，反復回転ねじり押し¹⁾の3者に関する実験を行い，負荷特性と微細化挙動の調査を行った．対象材料はMg合金AZ31の棒材であり，成形品は棒材と管材の2種とした．

2. 実験方法

横型ねじり押し装置と縦型ねじり押し装置を使用した．前者は棒状製品用であり，後者は管材製品用である．

2.1 横型ねじり押し装置および実験条件

Fig.1 に示したように，装置は，コンテナ，ダイスからなる本体部，押し込み部およびダイス回転部の3ユニットから構成されている．本装置では3ユニットを横置き

とした．パンチの押し込みを行う押し込み部は，インバータで速度制御された減速機付きモーターでボールネジを回転し，ボールネジナットに固定したラムを駆動する機構になっている．押し込み(押し)荷重はラムに設置した油圧式ロードセルで，押し込み変位はひずみゲージ式変位計でラムストロークを計測することによって求められる．ダイス回転部は減速機付きサーボモーターでダイスホルダー軸を直接回転して材料をねじる機構となっている．最大押し込み速度は出力周波数 120Hz で 7.2mm/min，ダイスの定格回転速度は出力軸で 30rpm(最大 50rpm)である(機械効率 100%の場合)．

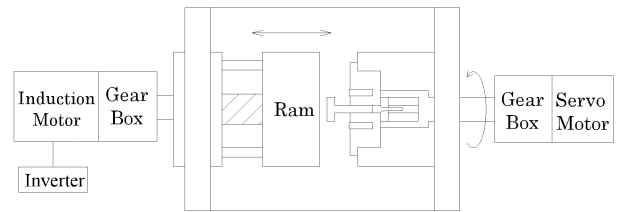


Fig.1 横型装置概要

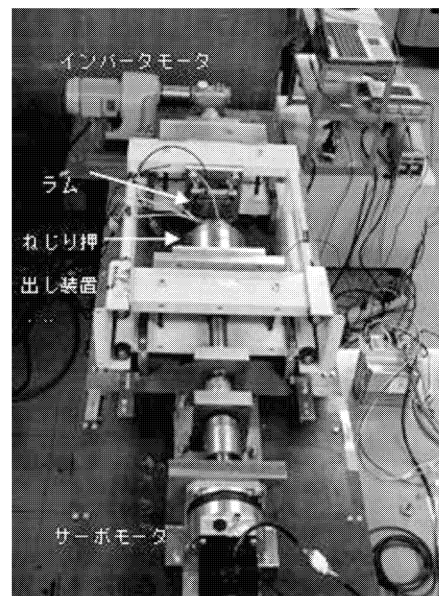


Fig.2 横型装置写真

実験には、Fig.3 に示したようにテーパダイス(入側φ3.6mm, 出側φ3.0mm)および角形断面ダイス(□4mm)と円形断面ダイス(φ3mm)を2段にした組み合わせダイスの2種類のダイスと試験片のすべりを防ぐために十字突起付きパンチを使用した。パンチの突起高さが2mmあるため、最初はダイス回転を行わずに一定速度で押し込み、ラムストロークが約2mmになった位置で回転を開始した。押し込み速度は0.2および1.0mm/min, ダイス回転速度は1~15rpmである。反復回転実験では、回転角(設定)を72°と144°の2種とした。試験片サイズはφ8mm×20mmである。温度は503Kを標準とした。

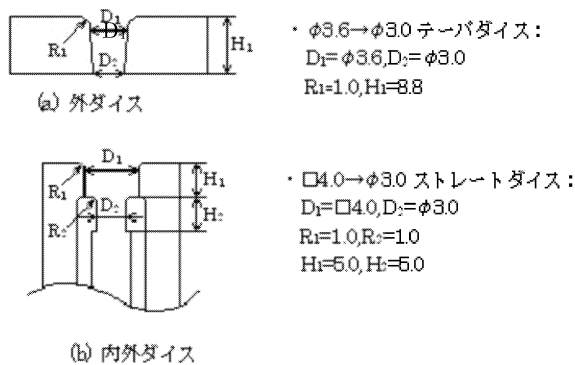


Fig.3 ダイスの形状寸法

2・2 縦型ねじり押し装置および実験条件

縦型ねじり押し装置 (Fig.4) を用い、中実材プラグ方式と中空材マンドレル方式の二種類の実験を行った。温度は全て473Kである。ダイス回転なし、ダイス一方向回転(ねじり押し込み量10mmに対して回転回数 $N=60$)、およびダイス反復回転(ねじり押し込み量10mmに対して正逆交互回転回数 $N=60$)の3種類の管材押し実験を行った。コンテナダイス間には潤滑材を塗布した。上パンチに荷重を加え、押し込み速度が一定になるようにした。反復回転角(設定)は90°である。

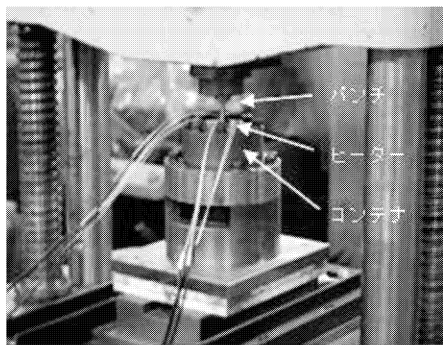


Fig.4 縦型ねじり押し装置

中実材プラグ方式では、Fig.5 に示すようにプラグを回転させてねじりを加えた。素材は直径8mm, 高さ30mmの中実材である。プラグ直径は6mmである。

中空材マンドレル方式(テーパダイス)では、Fig.6

に示すようにダイスを回転させてねじりを加えた。直径3mmのマンドレル, テーパー角30°のダイスを使用した。

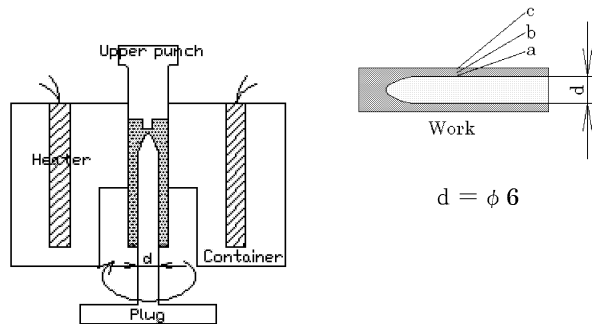


Fig.5 中実材プラグ方式

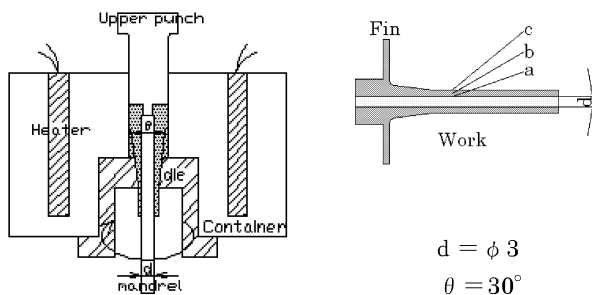


Fig.6 中空材マンドレル方式(テーパダイス)

3. 実験結果および考察

ダイス回転を行わない通常押しとダイス回転を行う通常ねじり押しとの比較を行った後、反復回転ねじり押しデータの説明と考察を行う。

3・1 棒材の横型ねじり押し

Fig.7 および Fig.8 は2種類のダイスでねじり押しした場合のラムストロークと負荷特性の関係を示す。トルク値はサーボモータの指令値であるため、減速機やねじり押し工具などの被動側慣性トルクや摩擦トルクを含んだ値である。回転速度については、サーボモータ本体の実回転速度に減速機の減速比を乗じて求めている。ダイスを回転させる前に約2mm押し込んでいるため、押し込み力はラムストローク2mm付近までは単調に増加するが、回転を開始すると組み合わせダイスではほぼ一定となり、テーパダイスでは増加の割合が小さくなった後、急増する傾向が見られる。両ダイスの押し込み力の挙動の違いは、主にダイス穴形状の影響と考えられる。組み合わせダイスで回転開始後押し込み力が一定である区間(ラムストローク2~5mmの約3mmの区間)は、材料が□4ダイス内に押し出されており、押し込み力が急増している区間(ラムストロークおよそ5~6mmの約1mmの区間)は、φ3ダイス内に押し出されていると推定される。ただ、ダイス穴部体積からこの体積を押し出すために必要

な押し込み長さを計算すると、上記の区間内でそれぞれ1.6mm および 0.7mm であり、実験結果よりかなり小さい値である。その原因は材料がねじり押し出し中にコンテナとダイスの間などにバリとして出て行くためである。定常状態になった後の押し込み力が増加する傾向も同じ理由と推定される。Fig.9 にバリが生じた箇所を示す。

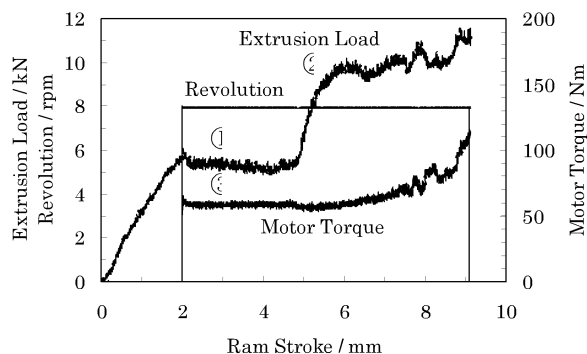


Fig.7 ストローカー-負荷曲線
(□4+φ3 組合せダイス, 503K, 0.2mm/min)

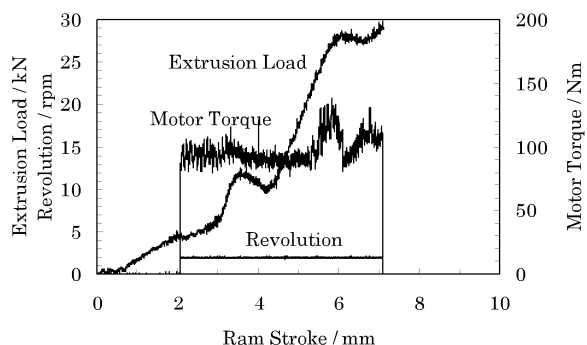


Fig.8 ストローカー-負荷曲線
(φ3.6→φ3.0 テーパーダイス, 503K, 0.2mm/min)

Fig.10 は Fig.8 の実験で得られたねじり押し出し材の軸心部と外周部の組織写真である。軸心部は $1\mu\text{m}$ 程度の微細粒も見られるが $5\mu\text{m}$ 前後の結晶粒が多く、場所によっては伸長粒も見られた。しかしながら、軸心部としてはかなり微細化されているといえる。外周部はほとんどが $5\mu\text{m}$ 以下の微細粒である。

Fig.11 はダイス回転速度、押し込み速度および温度を変化させた場合の押し込み圧力とラムストロークの関係を示した図である。ダイスは□4+φ3 組合せダイスを用いている。温度が同じ 503K では、押し込みのみ(0rpm)の場合に比べ、ねじりながら押し出すことで押し込み圧力は大きく低下している。また、回転数を一定にして押し込み速度を下げると押し込み圧力も下がることがわかる。さらに 8rpm, 1mm/min の条件では、473K の場合の押し込み圧力が 503K の場合の 1.5 倍前後になっており、温度の影響も大きいことがわかる。

Fig.12 は組合せダイスを用いて、0.2mm/min の押し込み速度で実験を行った場合の押し込み圧力およびトルクとダイス回転速度の関係を調べたものである。押し込み圧力はダイス回転開始直後の一定値(Primary Plateau Pressure : Fig.7 の①)と急増後の最初のピーク値(Stationary Pressure : Fig.7 の②。これ以降押し出しはほぼ定常状態になっていると推定される)を示しており、トルクはダイス回転開始直後の一定値(Primary Plateau Torque : Fig.7 の③)を示している。押し込み圧力は回転速度を大きくすることにより低下している。

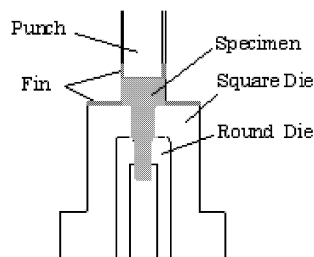


Fig.9 バリの発生箇所

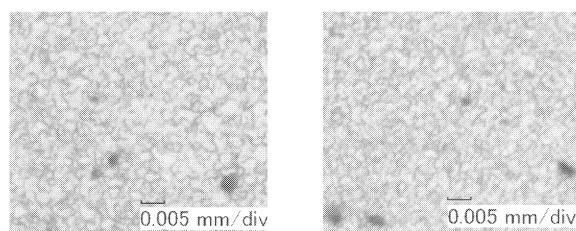


Fig.10 ねじり押し出し材の組織写真
(テーパダイス, 503K, 2rpm, 0.2mm/min)

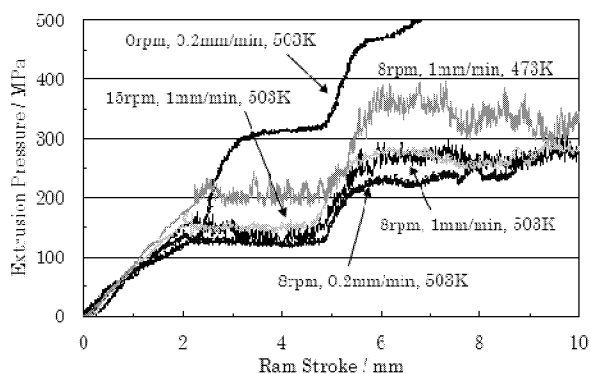


Fig.11 押し込み圧力とラムストローク
(□4+φ3 組合せダイス)

上記実験結果より、一般的に“ダイス回転速度/押し込み速度”を大きくすると、トルクが上昇し押し込み圧力が低下する傾向が見られる。この現象は降伏条件から予想される挙動である。

なお、加工速度が比較的遅く、また、温度調節を行っているため、上記では加工発熱の影響は考慮していない。

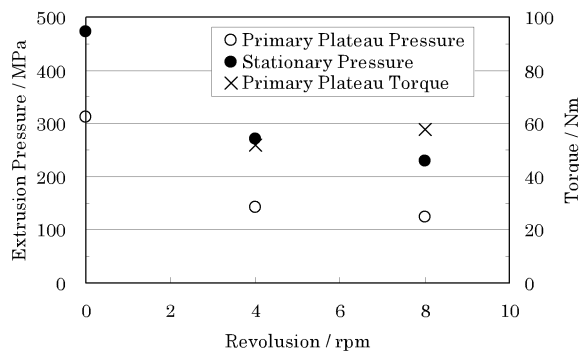


Fig.12 ダイス回転速度と荷荷特性
(□4+φ3 組合せダイス, 503℃, 0.2mm/min)

以上の検討の結果, ダイス回転を行わない通常押し出しとダイス回転を行う通常ねじり押し出しの場合の変形荷荷特性の違いが明確になった。

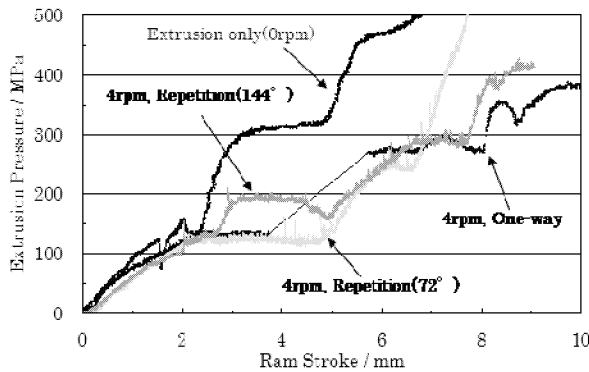


Fig.13 押し込み圧力とラムストローク
(反復角度の影響: 4rpm)
(□4+φ3 組合せダイス, 0.2mm/min, 503K)

つぎに, 反復回転ねじり押し出し実験結果について, 上記2条件と比較しながら説明する. 使用ダイスは, □4+φ3 組合せダイスである。

Fig.13 は, 回転速度 4rpm で, 反復回転角 144° と 72° の場合の押し込み圧力を示している. 図より, 反復回転させた場合の押し込み圧力は通常押し出しと通常ねじり押し出しの中間に位置していることがわかる. また, 最大押し込み圧力は, 一方向回転, 144° 反復回転, 72° 反復回転, 回転なしの順に大きくなっていくことがわかる。

Fig.14 は 8rpm の場合の同様の結果であるが, 傾向は 4rpm の場合と同様である。

Fig.15 は, 反復回転時の一次プラトーの圧力値と定常圧力値を Fig.13 に追加して示したものである. 4rpm の場合より 8rpm の場合の方が定常圧力値が高い場合があるが, コンテナ冷却などの実験条件のばらつきによるものと考えている。

以上より, 押し込み圧力に関しては, 反復回転角が大き

くなると, 一方向回転に近づき, 反復回転角が小さくなると回転なし通常押し出しに近づくと解釈される。

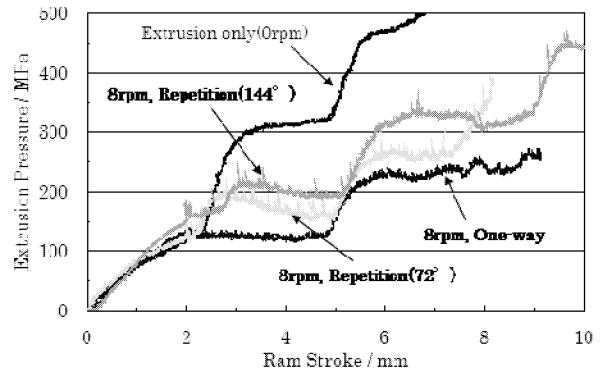


Fig.14 押し込み圧力とラムストローク
(反復角度の影響: 8rpm)
(□4+φ3 組合せダイス, 0.2mm/min, 503K)

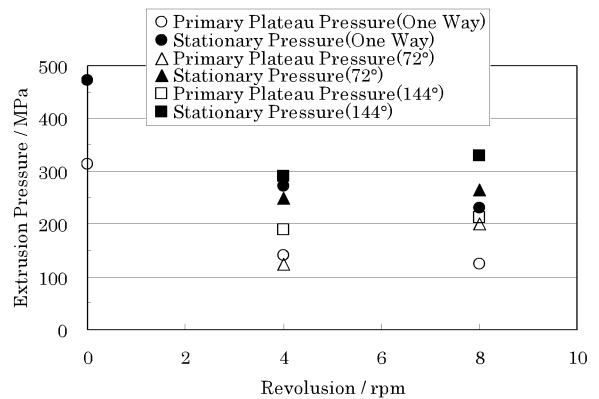


Fig.15 ダイス回転速度と荷荷特性(反復角度の影響)
(□4+φ3 組合せダイス, 503℃, 0.2mm/min)

3.2 管材の縦型ねじり押し出し

反復回転角 90° の場合の押し込み圧力を, ダイス回転なしおよび一方向回転の場合と比較した. Fig.16 は中実材-φ6 プラグ方式, Fig.17 は中空材-φ3 マンドレル(30° テーパーダイス)方式の場合である。

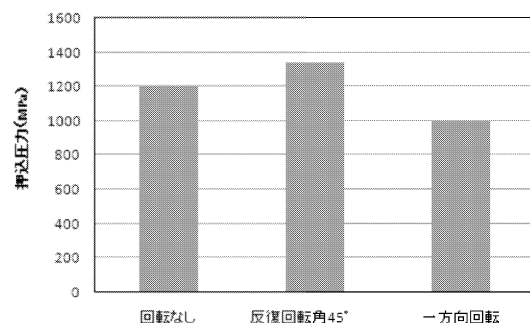


Fig.16 押し込み圧力 (中実材-プラグ方式)

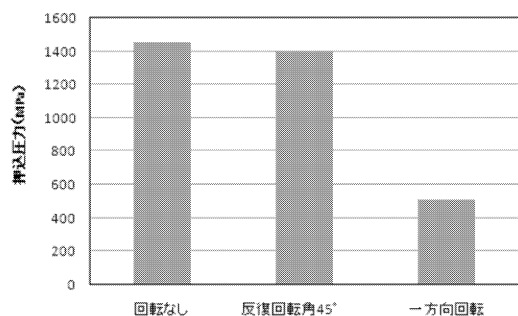


Fig.17 押込圧力（中空材－マンドレル方式）

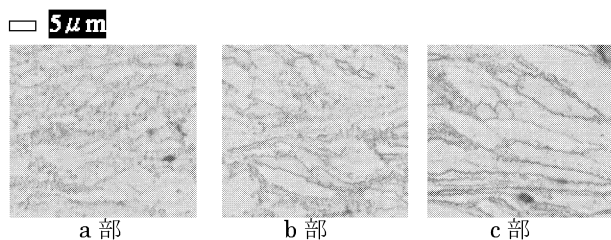


Fig.18 中実材－プラグ方式（ダイス回転なし）

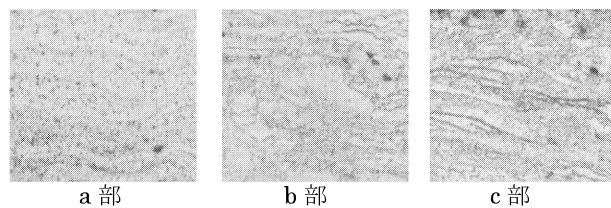


Fig.19 中実材－プラグ方式（反転回転角 45°）

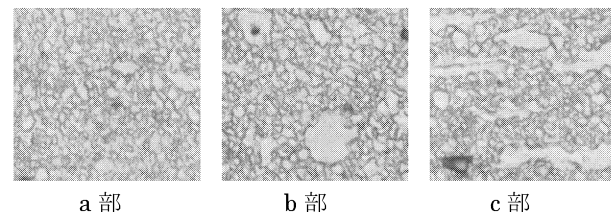


Fig.20 中実材－プラグ方式（一方向回転）

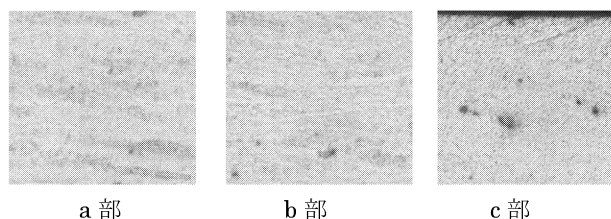


Fig.21 中空材－マンドレル方式（反転回転角 45°）

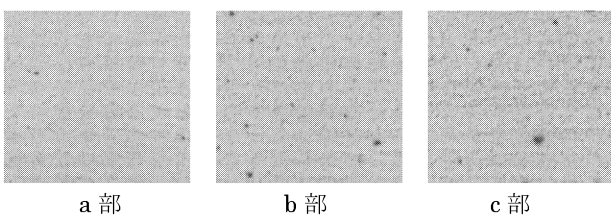


Fig.22 中空材－マンドレル方式（一方向回転）

また、Fig.18～Fig.22 は結晶組織である。

中実材の場合、一方向回転による押込み圧力の低下はあまり大きくないが、中空材の場合は非常に大きい。この理由は、中実材の場合プラグ内面ですべりが生じ、プラグ回転が有効に材料ねじれを生じさせなかったのに対し、中空材の場合は、材料をマンドレルとともに回転しているため十分に材料ねじれが生じたためであると考えられる。これは、結晶粒組織の変化挙動とも一致している。すなわち、中実材の場合、一方向回転（Fig.20）の結晶粒の微細化の程度は回転なし（Fig.18）と比較すると明らかなようにあまり大きくない。これに対して、中空材の場合、Fig.22 からわかるように結晶粒微細化は非常に大きい。

一方、反復回転の効果であるが、押込み圧力に関しては、Fig.16, Fig.17 からわかるように回転なしの通常押出しの場合と同程度である。これは、前節の棒材の場合、反復回転の押込み圧力は回転なしよりも一方向回転の場合の値に近かったのとは若干異なった挙動である。

結晶粒微細化に関しては、中実材の場合、Fig.19 と Fig.20 の比較からわかるように、反復回転の方が一方向回転の場合より微細化が大きく進行している。これに対して、中空材の場合、Fig.21 と Fig.22 の比較から、どちらも結晶粒が大きく微細化されており、現時点では必ずしも優劣を判断することはできない。

なお、結晶粒の形状に関して、中実材、中空材のどちらに対してもいえることであるが、反復回転の場合結晶粒の形が wavy であるように見える。これは、反復回転の場合ねじり変形方向が絶えず逆方向に変化しながら伸びているという変形挙動に起因しているためと考えられる。

4. 結言

押込み速度およびダイス回転速度を連続的に変化させることのできる横型ねじり押し装置を製作し、従来の縦型ねじり押し装置を併用することにより、棒材と管材のねじり押し実験を行い、ねじり押し変形特性におよぼす低周波振動付与の影響について検討した結果以下の事項が明らかになった。

- 1) ダイスを一方向回転することにより、回転のない通常押しに比べて押込み圧力が大きく低下する。
- 2) 反復回転した場合の押込み圧力は、回転なしと一方向回転の場合の中間の値を示す。また、反復回転角が小さくなるほど回転なしの押込み圧力に近づき、反復回転角が大きいほど一方向回転の押込み圧力に近づく。
- 3) 結晶粒微細化の進展速度は、同じ回転速度の場合、反復回転の方が一方向回転より大きい。
- 4) 結晶粒形状は反復回転の場合、wavy である。

以上の結果より、ねじり押しに対して低周波振動を付与することにより、より効率的に結晶粒微細化を達成で

きる可能性があることが明らかになった。ただし、一方
向回転と比べて到達結晶粒の形状に違いがあり、これが
材質特性に対してどのような影響を持つかについての調
査が今後必要であると思われる。

5. 謝辞

本研究は、天田金属加工機械技術振興財団の研究助成
により遂行されたことを記し、謝意を表します。

参考文献

- 1)水沼晋：第 55 回塑連講論(2004),389.
- 2)水沼晋ほか：平成 17 年度塑春講論(2005),323.
- 3)水沼晋ほか：第 56 回塑連講論(2005),23.
- 4)Mizunuma,S. : Proc. of 8th ICTP (2005),435(CD)
- 5)Mizunuma,S. : MATER.SCI.FORUM,503-504(2006),185.