

平成 30 年 5 月 2 日現在

機関番号：14401

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2015～2017

課題番号：15K06504

研究課題名(和文) 材質制御とネットシェイプ化を目的とするねじりモーシオン付加鍛造加工法の開発

研究課題名(英文) Development of Forging Process with Torsion Motion for Microstructure Control and Net-Shape

研究代表者

松本 良 (Matsumoto, Ryo)

大阪大学・工学研究科 准教授

研究者番号：50362645

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,700,000円

研究成果の概要(和文)：塑性加工プロセス中の加工モーシオン制御に着目して、鍛造加工中にねじりモーシオンを付加するねじりモーシオン付加鍛造加工プロセスを考案し、成形荷重の低減、材質制御・形状制御に取り組み、以下の成果を得た。
(1) ねじりモーシオン付加鍛造加工装置を設計・作製した。(2) 設計・作製した鍛造加工装置および有限要素シミュレーション解析により、据込み自由鍛造、型鍛造においてねじりモーシオン付加の効果調べた。(3) ねじりモーシオン付加による加工現象の変化およびねじりモーシオン制御の指針について考察した。

研究成果の概要(英文)：To reduce forming load, control microstructure and material flow of workpiece, forging process with torsion motion was developed. Following achievements were obtained. (1) Apparatus for forging with torsion motion was originally designed and developed. (2) Effects of torsion motion on forming load, microstructure and material flow were investigated in upsetting and die forging processes of aluminum workpiece by forging experiment on the forging apparatus and the finite element analysis. (3) Mechanisms of reduction of the forming load and change in the material flow were discussed from viewpoint of theory of plasticity. The validity of the torsion motion conditions (torsion speed, amplitude) was proposed.

研究分野：工学，塑性加工，鍛造

キーワード：塑性加工 鍛造 加工モーシオン 成形荷重 材質制御 材料流動制御 プレス機械 有限要素シミュレーション

1. 研究開始当初の背景

成形限界の向上や加工形状の高精度化を目的とした塑性加工プロセスの研究・開発において、加工モーション制御が注目されている。これはサーボモータを駆動源としたサーボプレスの利用拡大が起因しているものと考えられる。サーボプレスは任意の位置でのスライド速度設定が可能であり、例えば、加工中にスライド速度の加速、減速、一旦停止、上下振動（パルス）等の任意のスライド動作が可能となることから、フレキシブルな塑性加工プロセスが研究・開発されている。しかしながら、加工モーション制御の効果について、学術的に系統的な研究・開発は行われておらず、実加工プロセスへの適用事例も少ない。

一方、環境負荷低減のために航空機、自動車に代表される輸送機械の軽量化が強く求められ、構造部材の高張力鋼、アルミニウム等の軽量材料・高比強度材料への置換や中空化・薄肉化といった構造の変更が積極的に取り組まれている。しかしながら、これらの材料は成形限界が低い、焼付き・凝着を引き起こしやすい等の観点から難加工材に分類され、また中空部材や薄肉部材の塑性加工は高度な成形技術が必要となるため、先進的な塑性加工プロセスの確立が強く求められている。

本研究では、塑性加工中のねじり付加に着目する。従来の加工モーション制御（加速、減速、一旦停止、上下振動等）は、主加工方向と同一方向の加工モーション制御であるが、ねじりモーション付加制御は主加工方向とは異なる方向（直角方向の回転）であり、これまでにない加工モーション制御手法である。またこれまでにねじりを付加する鍛造加工の研究例はいくつか存在するが、いずれも鍛造加工終了後にねじりを付加しており、鍛造加工中に同時にねじりを付加するものでないこと、ねじり付加の目的がトライボロジー試験、材料試験や巨大ひずみ導入であることから、本研究で取り組む鍛造加工中にねじりモーションを付加する加工法は従来にはないものである。

2. 研究の目的

鍛造加工中にねじりモーションを付加する先進的な鍛造加工プロセスを開発する。鍛造加工中に被加工材にねじりを付加することで、応力成分の重ね合わせによる成形荷重の変化、材料流動特性の変化、ひずみ分布の変化による被加工材の材質制御が予想されることから、成形荷重の低減、加工品の複雑形状化（ネットシェイプ化）、加工品の材質制御（高機能化）が期待できる。本研究では、ねじりモーション付加が鍛造加工特性へ及ぼす効果を調べ、据込み自由鍛造および型鍛造を対象にして、鍛造加工中にねじりモーション付加が可能な加工装置（金型）を作製する。そして、ねじりモーション付加が鍛造特

性に及ぼす効果について、加工実験とコンピュータによるシミュレーション解析を併用して明らかにする。

3. 研究の方法

(1) ねじりモーション付加鍛造加工装置の設計・作製

本研究で提案するねじりモーション付加鍛造加工では、ねじりモーションの付加方向が主加工方向（鍛造方向、プレスのスライド動作方向）とは異なる方向（直角方向の回転）であるため、通常のサーボプレス機や油圧プレス機のスライドモーション制御機構をそのまま活用することはできない。したがって、鍛造加工を行いながら、ねじりモーションを同時に付加できる加工装置を設計・作製する。

(2) 据込み自由鍛造加工におけるねじりモーション付加効果の調査および型鍛造へのねじりモーション付加の展開

(1)で設計・作製する鍛造加工装置を用いて、アルミニウムを被加工材として、ねじりモーションを付加した据込み自由鍛造加工を行う。ねじりモーション付加条件（ねじり速度、角度）が鍛造加工特性（成形荷重、材料流動、ひずみ）に及ぼす影響を調べる。またねじりモーション付加鍛造の実用化を目指して、型鍛造へ展開する。

(3) ねじりモーション付加による加工現象の変化およびモーション制御指針に関する考察

ねじりモーション付加の効果、成形荷重の低減、材料流動性の変化、加工品の材質制御に着目して、その加工メカニズムを考察する。加工中のひずみ変化、加工発熱分布等の加工実験のみでは把握できない因子については、コンピュータによるシミュレーション解析（有限要素シミュレーション解析）を併用することで、塑性力学理論に基づく考察を行う。加工メカニズムを解明することで、さまざまな鍛造加工プロセスでのねじりモーション付加の制御指針を導出する。

4. 研究成果

(1) ねじりモーション付加鍛造加工装置の設計・作製

図1に設計・作製したねじりモーション付加鍛造加工装置の外観写真を示す。サーボモータを駆動源として、上ラムは上下移動、下ラムは上下軸まわりに回転する。上ラムは最大負荷荷重 100kN、最大速度 10mm/s であり、下ラムは最大負荷トルク 200N・m、最大回転速度 25rpm である。加工装置の主な仕様を表1にまとめる。

(2) 塑性力学理論による成形荷重の低減機構の考察

非加工硬化性の等方性金属を仮定し、 $r\theta z$ 座標系において z 方向に垂直応力 σ_z と θ 方向

にせん断応力 $\tau_{z\theta}$ が同時にはたらく場合を考える．相当応力を $\bar{\sigma}$ ， z 軸方向， θ 方向の塑性ひずみ増分 $d\varepsilon_z^p$ ， $d\varepsilon_{z\theta}^p(=d\gamma_{z\theta}^p/2)$ とすると，流れ則および Mises の降伏条件式より， σ_z と $d\gamma_{z\theta}^p/d\varepsilon_z^p$ の関係は，

$$\sigma_z^2 = \frac{3\bar{\sigma}^2}{(d\gamma_{z\theta}^p/d\varepsilon_z^p)^2 + 3}$$

と表され， σ_z は $d\gamma_{z\theta}^p/d\varepsilon_z^p$ の上昇により低下する．したがって， z 方向に鍛造中に θ 方向にねじりを付加することで， z 方向の圧縮荷重を低減できることが力学理論より示唆されることを明らかにした．

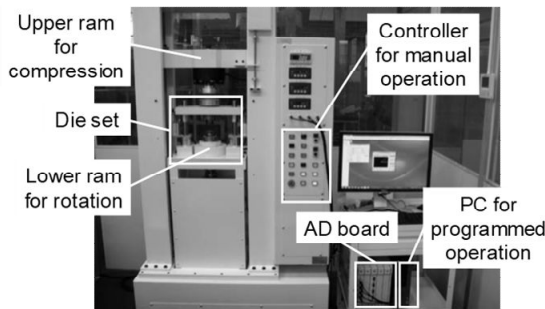


図 1 設計・作製したねじりモーション付加鍛造加工装置（計測機器や PC は，保有物品を流用）

表 1 設計・作製したねじりモーション付加鍛造加工装置の主な仕様

Upper ram for compression	Maximum load /kN	100
	Speed v /mm s ⁻¹	0.050–10
	Maximum stroke /mm	250
Lower ram for rotation	Maximum torque /N m	200
	Speed ω /rpm (rad s ⁻¹)	0.10–25 (0.010–2.6)
	Amplitude a /° (rad)	360–360 (-2 π –2 π)

(3) 据込み自由鍛造でのねじりモーション付加効果の調査

図 2 に示すような円柱状被加工材の据込み自由鍛造において，上工具で圧縮（速度： v ）しながら，下工具を被加工材の z 方向中心軸まわりに繰り返し両振り回転（速度： ω ，振幅角度： a ）あるいは一方向回転（速度： ω ）させることでねじりを付加した．被加工材には A1070 アルミニウム（直径 10mm，高さ 10mm）工具には SKD11 工具鋼を使用した．被加工材 - 工具間ですべりを生じさせずにねじりを付加するため，上・下工具の圧縮端面にローレット状の溝（深さ：約 0.5mm，頂角：60°，間隔：0.8mm）を設けた．

まず加工荷重について調べた．図 3 に一方向ねじりを付加した場合の軸方向荷重の加工実験結果を示す．ねじり開始とともに軸方

向荷重は低下し， ω/v が高いほど軸方向荷重の低減量は大きくなった．本鍛造条件では， ω/v が約 15°/mm 以上，ねじり角度が 1°以上のねじり振動を付加することで，軸方向荷重を 5%以上低減できることが分かった．

図 4 に $a = 5^\circ$ の両振りねじりを付加した加工実験での軸方向荷重率と ω/v の関係を示す．ここで軸方向荷重率はねじりを付加した場合の軸方向荷重をねじり付加しない場合の軸方向荷重で除したものである． $\omega/v < 300^\circ/\text{mm}$ では， ω/v が高いほど軸方向荷重は低下した一方， $\omega/v > 300^\circ/\text{mm}$ では軸方向荷重率は約 0.2 で一定となった．これより，ねじり付加により軸方向荷重を最大で約 80% 低減できることが分かった．なお有限要素シミュレーション解析によると，本鍛造条件において塑性発熱による被加工材の温度上昇は，最大でも約 15°C ($\omega/v = 600^\circ/\text{mm}$)であり，被加工材の軟化による荷重低減ではないことが分かった．

加工実験において約 80%の軸方向荷重の低減を実証するため， $\omega = 0.5\text{rpm}$ ， $a = 5^\circ$ の両振りねじり付加で，最大軸方向荷重 10kN で据込み鍛造を行った．ここでは軸方向荷重が 10kN に達するまでは $\omega/v = 30^\circ/\text{mm}$ で圧縮し，10kN に達した後は 10kN を維持したまま $\omega = 0.5\text{rpm}$ のねじりを付加し続け， v を従動(減速)させることで ω/v を上昇させた．これは ω を高くすると，工具 - 被加工材間ですべりが生じるためである．図 5 に軸方向荷重制御の両振りねじり付加での軸方向荷重の結果を示す．最大軸方向荷重（10kN）に達した後， v の減速により， ω/v は約 1700°/mm まで上昇し，約 6.8mm の軸方向ストロークまで 10kN で加工可能であった．ねじりを付加しない場合，約 6.8mm の軸方向ストロークでは約 60kN の加工荷重が必要であったため，軸方向荷重率は約 0.2 となり，約 80%の軸方向荷重の低減が得られることが分かった．またねじり付加により加工限界ストロークを約 2.0mm から約 6.8mm に大幅に向上させるとも解釈できる．ただし， v の減速のため，加工時間が長くなることには注意を要する．

次にねじり付加による被加工材の材料流動の変化について調べた．図 6 に両振りねじり付加据込み自由鍛造における被加工材のバルジング変形（中央部直径 / 端面直径）の測定結果を示す． ω が 0.25rpm 以上， a が 5°以上の両振りねじり付加でバルジングの度合いが低下した．これはねじり付加により工具 - 被加工材接触面での半径方向のすべりが促進されたためと考えられる．また被加工材の $r\theta$ 断面の楕円度も小さくなった．

両振りねじり付加据込み自由鍛造において被加工材に付加されるひずみ分布を有限要素シミュレーション解析により調べた．図 7 に解析結果を示す．ねじりを付加することにより，大きなひずみが付与されることが分かった．一方，加工実験において鍛造後の被

加工材の硬さ分布を調べたところ、ねじり付加による硬さ値の向上はわずかであった。これは付加されたひずみが大きく、加工硬化度が小さなひずみ域であったため、硬さ値の差異が小さかったためと考えられる。今後、加工硬化度の高い材料や金属組織に変化が生じやすい高温域での加工実験での詳細な検証が必要である。

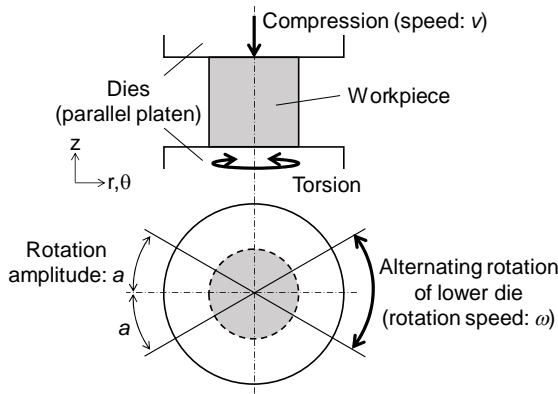


図2 ねじり付加据込み自由鍛造の加工形状および工具動作

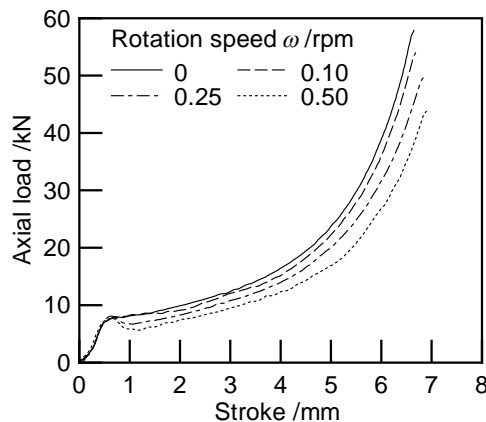


図3 一方向ねじり付加据込み自由鍛造における軸方向荷重

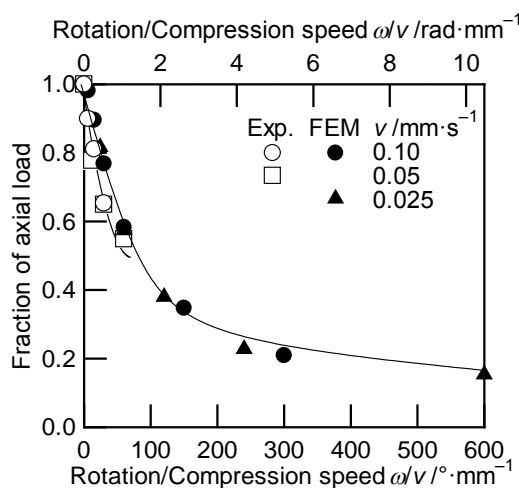


図4 両振りねじり付加据込み自由鍛造における軸方向荷重に及ぼすねじり速度の影響

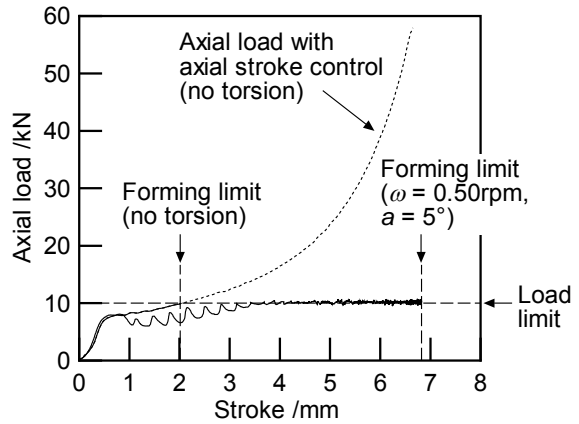


図5 最大軸方向荷重を制御した両振りねじり付加自由据込み鍛造における軸方向荷重-ストローク線図

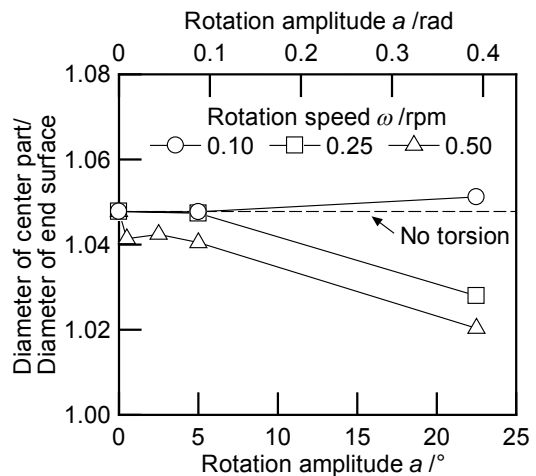


図6 両振りねじり付加据込み自由鍛造における被加工材のバルジング変形

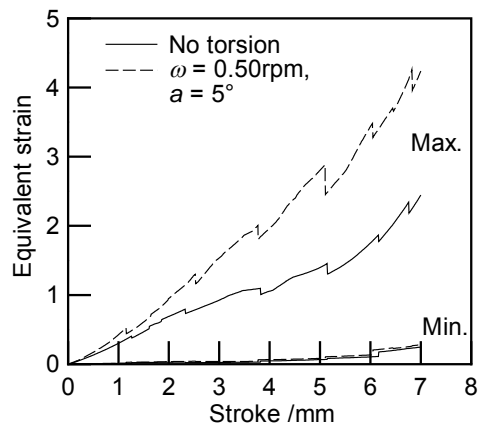


図7 両振りねじり付加据込み自由鍛造における被加工材の最大・最小相当ひずみの有限要素シミュレーション解析結果

(4) 型鍛造への展開

図8にねじり付加型鍛造の金型構成を示す。金型は図1のねじり鍛造試験装置に取り付け、コンテナ内に挿入した円柱状被加工材を押しパンチで $v = 0 \sim 0.1 \text{ mm/s}$ で押し出しながら、ロックアウトパンチを押し出し軸まわりに繰り返し両振り回転させた。据込み自由鍛造

と同様、 $\omega/v > 15^\circ/\text{mm}$ のねじり付加で軸方向荷重の低減が得られた。ただし、荷重低減量は鍛造形状に依存して、本鍛造形状では約20%の低減に留まった。またすぐばかさ歯車部品を模した形状の鍛造加工にも展開した。本加工では被加工材が歯形部へ充満開始後にねじり付加を開始し、歯形部の形状拘束によりねじりを付加した。 $\omega/v = 30^\circ/\text{mm}$ のねじり付加で軸方向荷重を約30%低減できた。ねじりを付加することで、半径方向への材料流動が促進されたため、ねじり付加の開始ストロークや形状によっては歯先部への被加工材の充満を促進でき、低荷重化とネットシェイプ化を両立できる可能性を見出した。

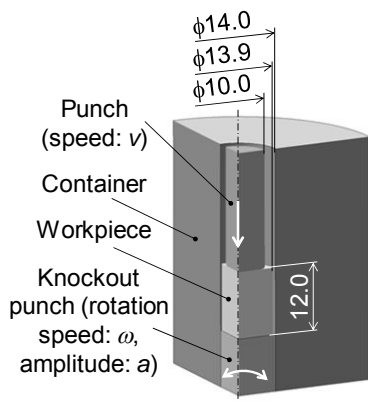


図8 ねじり付加型鍛造の金型構成

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計2件)

R. Matsumoto, J. Kou, H. Utsunomiya, Reduction in Axial Forging Load by Low-Frequency Torsional Oscillation in Cold Upsetting, The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 査読有, Vol. 93, No. (1-4), 2017年, pp. 933-943.

DOI: 10.1007/s00170-017-0553-1

松本 良, 鍛造加工におけるねじりモーション付加による軸方向加工荷重の低減, プレス技術, Vol.55, No. 11, 2017年, 30-33.(依頼解説)

〔学会発表〕(計10件)

R. Matsumoto, J. Kou, H. Utsunomiya, Development of Forging Process with Cyclic Alternating Torsion Die Motion, Frontiers in Materials Processing Applications, Research and Technology (FIMPART'17), 2017年. (Invited)

松本 良, 康 仁漢, 宇都宮 裕, 冷間据込み圧縮における軸方向荷重の低減条件および低減限界 - ねじりモーション付加鍛造加工法の開発 第2報 -, 平成29年度塑性加工春季講演会, 2017年.

松本 良, 加工荷重低減のためのねじりモーション付加鍛造加工プロセスの開発, プレス・板金・フォーミング展

(MF-Tokyo 2017)・日本塑性加工学会テクニカルセミナー, 2017年.(依頼講演)

松本 良, 康 仁漢, 宇都宮 裕, 冷間

据込み鍛造におけるねじりモーション付加による軸圧縮荷重の低減限界, 日本機械学会2017年度年次大会, 2017年.

DOI: 10.1299/jsmemecj.2017.G0400405

康 仁漢, 松本 良, 宇都宮 裕, 据込み圧縮における平滑工具によるねじり付加と軸方向荷重 - ねじりモーション付加鍛造加工法の開発 第3報 -, 第68回塑性加工連合講演会, 2017年.

松本 良, 高塚誠司, 宇都宮 裕, ねじり付加冷間後方押し鍛造における押し荷重の低減 - ねじりモーション付加鍛造加工法の開発 第4報 -, 第68回塑性加工連合講演会, 2017年.

松本 良, 康 仁漢, 宇都宮 裕, ねじり付加による冷間据込み圧縮における軸方向荷重の低減 - ねじりモーション付加鍛造加工法の開発 第1報 -, 第67回塑性加工連合講演会, 2016年.

松本 良, 康 仁漢, 宇都宮 裕: 冷間据込み鍛造における一方向ねじりモーション付加による軸方向荷重の低減, 日本機械学会第24回機械材料・材料加工技術講演会(M&P2016), 2016年.

DOI: 10.1299/jsmemp.2016.24.202

R. Matsumoto, J. Kou, H. Utsunomiya, Finite Element Analysis of Axial Forming Load Reduction in Upsetting with Cyclic Torsion Die Motion, Advances in Materials & Processing Technologies Conference (AMPT 2016), 2016年.

R. Matsumoto, H. Utsunomiya, Numerical Investigation of Forging Load Reduction in Upsetting with Cyclic Torsion Die Motion, Proceedings of the 24th International Symposium on Processing and Fabrication of Advanced Materials (PFAM XXIV), 2015年, pp. 442-447. (Invited)

6. 研究組織

(1)研究代表者

松本 良 (MATSUMOTO, Ryo)

大阪大学・大学院工学研究科・准教授

研究者番号: 50362645

(2)研究分担者

なし

(3)連携研究者

なし

(4)研究協力者

なし