

令和 3 年 8 月 18 日現在

機関番号：13701

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2018～2020

課題番号：18K04775

研究課題名（和文）潤滑油を用いた塑性加工における摩擦法則の構築

研究課題名（英文）Friction law in metal forming under oil-lubricated condition

研究代表者

王 志剛（Wang, Zhigang）

岐阜大学・工学部・教授

研究者番号：30244510

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,400,000円

研究成果の概要（和文）：潤滑油を用いた塑性加工における摩擦法則の定式化を行った。潤滑油は接触圧力の低い領域では油圧は発生しないが、その後接触圧力の増加に伴い急増する。加工後の摩擦面の観測結果に基づいて潤滑油の密閉プールの面積比を見積もり、密閉プール内の油圧は変形抵抗に相当する接触圧力付近で最大値に達する。これらの結果に基づいて、潤滑油の圧力分担比を定義し、摩擦法則を定式化した。また、摩擦法則に及ぼす被加工材表面の摩擦履歴、被加工材材質および予ひずみの影響を調べ、これらの因子の影響はほとんどないことを確認した。確立した摩擦法則を有限要素解析コードに導入し、塑性加工のシミュレーションに広く活用できるようにした。

研究成果の学術的意義や社会的意義

塑性加工は自動車、電気電子等の分野において高品質の部品を低コストで大量生産する技術として用いられている。新たな塑性加工法の開発あるいは従来技術の改善に際して、有限要素法を用いたシミュレーションは多用されているが、その解析精度を上げるために、金型と被加工材界面の摩擦法則を精緻化する必要がある。研究代表者はこれまでにドライ加工の摩擦法則を提案し、国際的に認知されている。本研究では、潤滑油を用いた場合の摩擦法則を提案し、塑性加工における摩擦法則の体系を完成させ、塑性加工技術開発の高効率に寄与することを目的とした。一連の研究は所望の成果を挙げた。

研究成果の概要（英文）：The friction law in metal forming under oil-lubricated conditions is proposed. The lubricant pressure does not generate at lower contacting pressure but increases rapidly with the increasing contact pressure. Based on the observation of tested specimen surfaces, the ratio of closed pools is estimated. The lubricant pressure in the closed pools reaches the maximum at a contacting pressure of the flow stress of the specimen. Based on these results, the contribution ratio of the nominal contact pressure by lubricant is introduced and the friction law is formulated. Moreover, the effects of the friction history of the specimen surface, the specimen material and its pre-strain on the friction law are investigated and it is confirmed that the influences of these factors are minor. The proposed friction law has been introduced into a FEM simulation code.

研究分野：塑性加工

キーワード：塑性加工 トライボロジー 摩擦法則 潤滑油

1. 研究開始当初の背景

塑性加工の数値シミュレーション技術は、いまでは新しい加工法の開発、生産現場の技術改善等あらゆる場面において不可欠な道具となっている。この数値シミュレーションの解析精度を上げるために、解析に必要な被加工材の構成式に関しては精力的な研究が積み重ね、精緻な域に達しつつある。一方、解析に必要なもう一つの関係式である、被加工材と金型間の摩擦法則に関しては、面圧の低い領域ではクーロンの法則($\tau = \mu p$)、面圧の高い領域では摩擦せん断応力一定則($\tau = mk$)が一般的に使われており、それぞれの法則の適用可能な面圧範囲は不明確であり、 μ と m の関係も判然としない。このことは、圧延、鍛造加工のような接触界面の面圧が大きく変動し得る加工法の数値解析にとって大きな障害となっている。

研究代表者は先行研究において図1に示す摩擦法則を提案した。この摩擦法則ではクーロン則の適用可能限界面圧を理論式で提示されており、低面圧域における摩擦係数を計測しておけば、高面圧域での摩擦が予測可能となる。摩擦法則の形も極めてシンプルで数値シミュレーション解析コードへの導入も簡便である。

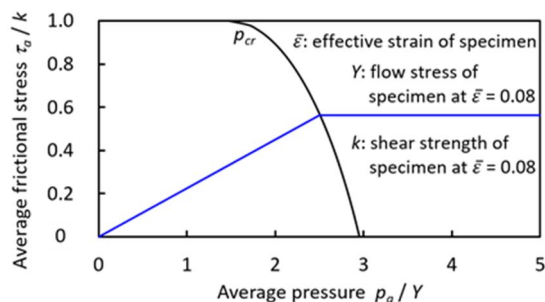


図1 提案したドライ加工の摩擦法則

しかし、実際の塑性加工はほとんど潤滑油を用いて行われる。図2に示すように潤滑油を用いた場合、摩擦は面圧の低い領域 ($p/Y < 0.5$, Y は材料の変形抵抗) と、面圧の高い領域 ($p/Y > 1.0$) においてクーロンの法則に従うが、その中間の領域において面圧の増加に伴い、摩擦応力はむしろ減少する。この現象は大変ユニークなもので、面圧の変化に伴う潤滑油の圧力分担の変化、素材表層の塑性変形に伴う接触部の変動によるものと考えられる。この現象の機構解明は、塑性加工における潤滑機構の解明に繋がると考えられる。

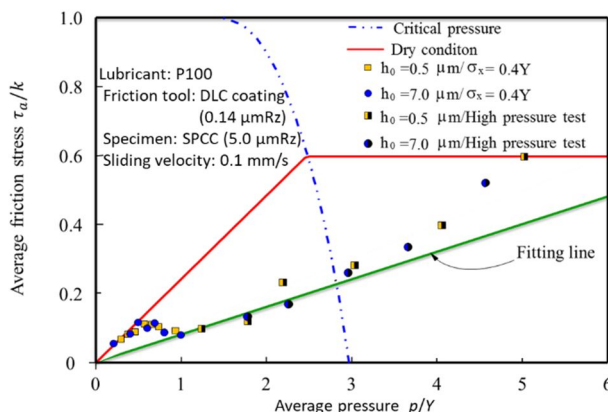


図2 潤滑油を用いた場合の摩擦挙動

2. 研究の目的

塑性加工の現場でよく用いられる潤滑条件下での摩擦法則を明らかにし、潤滑機構を解明する。また、摩擦法則を数値シミュレーション解析コードへ導入する。

3. 研究の方法

- (1) 潤滑油を用いた場合の摩擦法則の定式化および潤滑機構の推定とその実験的検証
- (2) 摩擦法則の数値シミュレーション解析コードへの導入

4. 研究成果

- (1) 潤滑油を用いた場合の摩擦法則の定式化および潤滑機構の推定とその実験的検証
先行研究で提案した図1のドライ加工の摩擦法則に基づいて、図2に示す摩擦挙動を理解す

るために、潤滑油の圧力負担を求めた。図3はその結果である。摩擦応力がドライ条件下と同一挙動を示す平均接触圧力域では、潤滑油に圧力の生成はないが、その後、急増している。さらに、加工後の摩擦面を詳細観測し、潤滑油の密閉プールの面積比の最大値を見積もり、これを用いて、潤滑油の密閉プール内の油圧を算出した。その結果を図4に示す。密閉プール内の油圧は接触圧力の増加に伴い、急速に増加し、接触圧力 1.0 あたりで最大値に達する。

これらの結果に基づいて、潤滑油の圧力分担比 β を定義し、摩擦法則を下式のように定式化した。なお、 α は真実接触率で、 μ_r は真実接触部の摩擦係数である。定式化した摩擦法則を図5に示す。摩擦係数は低面圧域では一定値を保つが、面圧の増加に伴い、減少した後再び一定値となる。

$$\mu = \frac{\alpha \tau_r}{(\alpha + \beta) p_r} = \frac{\alpha}{\alpha + \beta} \mu_r$$

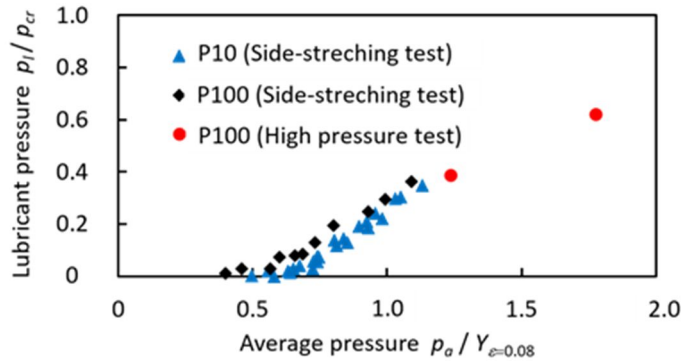


図3 潤滑油の圧力の平均値

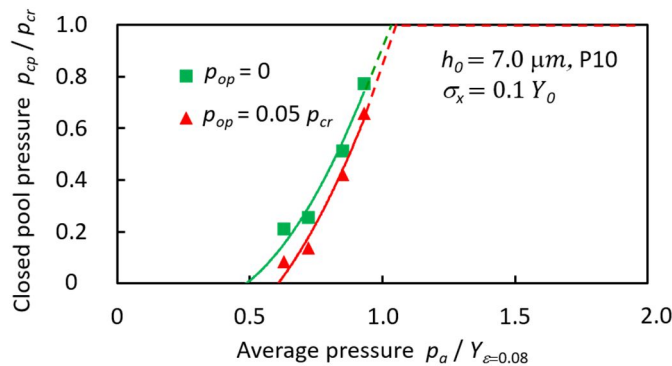


図4 密閉プール内の油圧

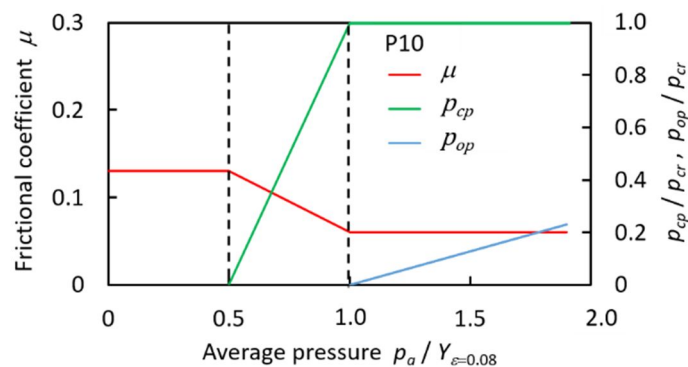


図5 潤滑油を用いた場合の摩擦法則

上記摩擦法則を実際の塑性加工に適用するために、被加工材の摩擦履歴、予ひずみ、被加工材材質などの影響を明らかにする必要がある。図6は摩擦試験中に増圧、減圧、あるいは再加圧などの様々な摩擦履歴を設定した場合の摩擦試験の結果である。摩擦挙動は概ね摩擦履歴の影響を受けないことがわかった。すなわち、摩擦履歴によって被加工材の表面性状が大幅に変化するが、その摩擦挙動への影響はほとんどみられない。

潤滑機構の詳細を解明するため、摩擦面の平坦域の比率 η と、摩擦応力から算出される真実接触率 α と潤滑油の圧力分担比 β 間の関係を調べた。その結果を図7に示す。 α と β の値を足しても平坦化率には満たない。平坦化部には α と β に加え、平坦部ではあるが油圧も摩擦も発生し

ない箇所である γ が存在する。圧縮工具が完全にフラットな理想的な平面と仮定すると α 、 β 、 γ のモデル図は図 8 のように考えられる。

なお、詳細を省くが、DP 鋼を用いた実験においても上記同様の摩擦挙動を観測した。また、予ひずみをもつ DP 鋼を用いた実験においても、図 1 に示すような無次元化表記をすれば、同様の摩擦法則が成立することを確認した。

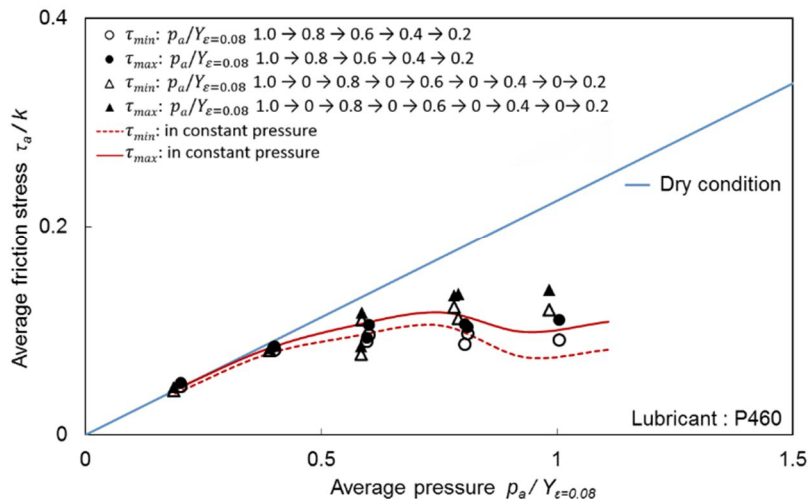


図 6 摩擦挙動に及ぼす摩擦履歴の影響

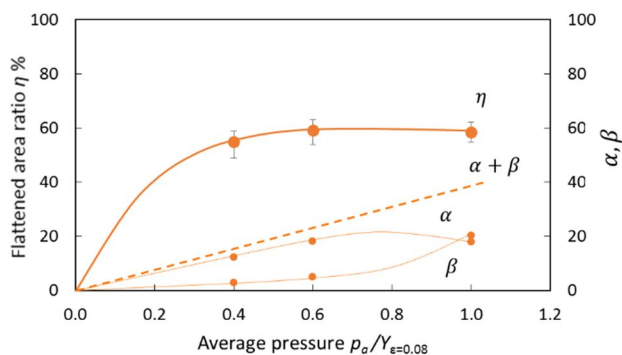


図 7 摩擦面における平坦率の変化

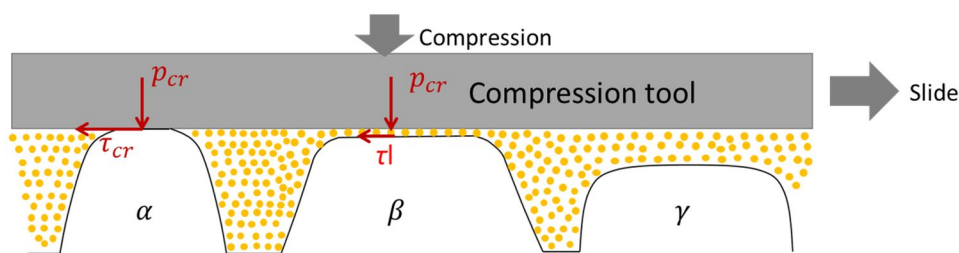


図 8 平坦部の圧力負担モデル

(2) 摩擦法則の数値シミュレーション解析コードへの導入

研究室保有の有限要素解析コード DEFORM に組み込み、定式化した摩擦法則を変形解析に使える環境を整えた。FEM 解析の節点における圧力、ひずみ情報を取り出して、摩擦応力を算出して FEM 解析ソルバーに返すユーザーサブルーチンを構築した。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計3件（うち査読付論文 3件/うち国際共著 2件/うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 Z.G. Wang, Y. Yoshikawa, W.Z. Dong	4. 巻 31
2. 論文標題 State-of-the-art of friction law in metal forming	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 China Mechanical Engineering	6. 最初と最後の頁 2708, 2714
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Z.G. Wang, W.Z. Dong, K. Osakada	4. 巻 67
2. 論文標題 Determination of friction law in metal forming under oil-lubricated condition	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Annals of CIRP-Manufacturing Technology	6. 最初と最後の頁 257-260
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Z.G. Wang, T. Suzuki	4. 巻 15
2. 論文標題 Friction law in dry metal forming of materials with work hardening	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Procedia manufacturing	6. 最初と最後の頁 475, 480
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

〔学会発表〕 計3件（うち招待講演 1件/うち国際学会 2件）

1. 発表者名 Z.G. Wang
2. 発表標題 Friction model in metal forming
3. 学会等名 8th International Conference on Tribology in Manufacturing Processes and Joining by Plastic Deformation（招待講演）（国際学会）
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Z.G. Wang, Y. Kozakai
2. 発表標題 Effect of friction history of workpiece on friction behaviour
3. 学会等名 IOP Conference series, Materials Science and Engineering (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 小早川理輝、箱山智之、董文正、王志剛
2. 発表標題 油潤滑における摩擦挙動に及ぼす摩擦履歴の影響
3. 学会等名 第70回塑性加工連合講演会講演会
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関