

平成 30 年 6 月 14 日現在

機関番号：13701

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2015～2017

課題番号：15K05717

研究課題名(和文) 新しい摩擦法則に基づく冷間鍛造用摩擦試験体系の再構築

研究課題名(英文) Determination of friction law in metal forming

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) 3,800,000円

研究成果の概要(和文)：塑性加工プロセスのシミュレーション技術は精緻の域に達し、広く使われている。しかし、摩擦に関するデータは材料データあるいはシミュレーション方法に比べると精度が不十分であり、精密な摩擦法則は板鍛造のような摩擦に敏感なプロセスのシミュレーションにとって不可欠である。研究代表者は先行研究においてドライ条件下での新しい摩擦法則を提案した。この摩擦法則において臨界面圧が存在し、臨界面圧以下ではクーロン則が成立し、臨界面圧以上では摩擦応力一定則が成立する。本研究では、この先行研究を発展させて冷間塑性加工によく用いられる潤滑条件下の摩擦法則を明らかにする。

研究成果の概要(英文)：Process simulation by FEM analysis has become precise enough and is used commonly in metal forming factories. But the friction data used in the simulation is not as accurate as the simulating method and the material data. Thus, establishment of accurate friction law is desired in designing the processes which are affected significantly by the frictional condition, such as plate forging. The study leader has proposed a friction law under dry condition. The main feature of this friction law is Coulomb friction up to a critical pressure, and a constant frictional stress for higher pressures. This friction law can be determined by measuring the friction coefficient μ at any average pressure lower than the critical pressure, and can be included in the FEM codes easily. In this study, the proposed friction law is extended to be applied to general lubrication conditions of cold metal forming processes.

研究分野：塑性加工

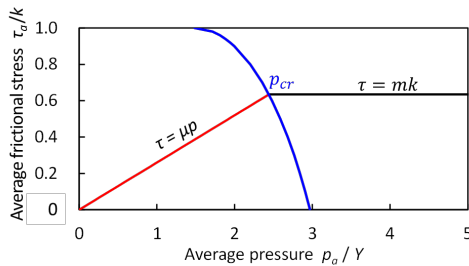
キーワード：塑性加工 トライボロジー 摩擦法則 鍛造加工 摩擦試験 シミュレーション

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。

本研究はこの摩擦法則をベースに一般的な潤滑条件における摩擦法則を構築するものである。



$$\tau = \mu p \quad (p \leq p_{cr}) \quad * \mu \text{ is a measured value}$$

$$\tau = mk \quad (p > p_{cr}) \quad m = \sqrt{3}\mu(-3.82\mu + 3.0)$$

$$\frac{p_{cr}}{Y} = \frac{2}{\sqrt{3}} \left(\frac{1 + \sin 2\varphi}{2} + \frac{\pi}{4} + \varphi \right) \quad \text{In case of } \mu \geq 0.40, m = 1.0$$

$$\varphi = \frac{1}{2} \cos^{-1} m \quad \frac{p_{cr}}{Y} = \frac{1}{\sqrt{3}\mu}$$

図1 研究代表者が提案した摩擦法則

2. 研究の目的

塑性加工の現場によく用いられる潤滑条件下での摩擦法則を明らかにし、プロセスシミュレーションに必要な摩擦データを得るための摩擦試験体系を構築することを目的とする。

3. 研究の方法

- (1) 図1の摩擦法則を予ひずみをもつ材料に適用可能な形に拡張する。
- (2) 冷間鍛造に多用される潤滑被膜の摩擦法則を明らかにする。
- (3) 潤滑油を用いた場合の摩擦法則を明らかにする

4. 研究成果

(1) 摩擦法則における被加工材の予ひずみの取扱い方法を開発した。

図1は加工硬化のないアルミニウム硬化材を用いた場合の結果である。この摩擦法則を加工硬化材に適用可能な形に拡張するために、絞り鋼板 SPCC と純銅 C1100 を用いて同様な実験を行った。図2に示すように、相当ひずみ 0.08 に対応する相当応力 Y を用いて平均面圧を無次元化すれば、図1に示す摩擦法則は加工硬化材に適用可能であることが分かった。

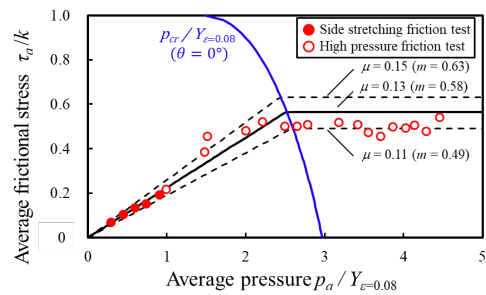


図2 加工硬化材の摩擦法則

さらに、引張試験を用いて被加工材に予ひずみ ϵ_0 を付与し、同様な摩擦試験を行った。図3に示すように、相当ひずみ ($\epsilon_0 + 0.08$) に対応する相当応力 Y を用いて平均面圧を無次元化すれば、図1に示す摩擦法則は予ひずみをもつ材料に適用可能であることが分かった。

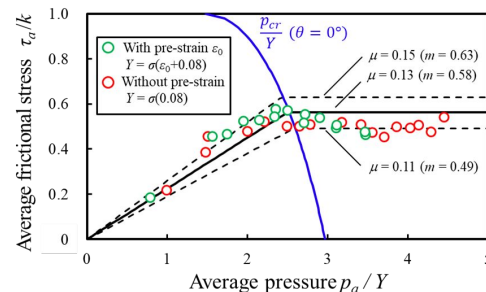


図3 摩擦法則に及ぼす被加工材の予ひずみの影響

(2)冷間鍛造用潤滑被膜の摩擦法則を明らかにした。

冷間鍛造によく用いられるリン酸塩潤滑被膜と一液潤滑被膜の摩擦法則を図4に示す。健全な潤滑被膜が介在する場合は、摩擦法則はシンプルで、クーロン法則のみである。

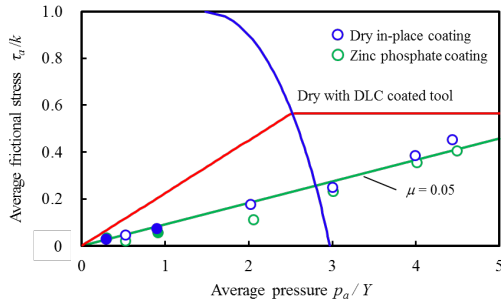


図4 潤滑被膜の摩擦法則

(3)潤滑油を用いた場合の摩擦法則を明らかにした。

図5に示すように、潤滑油を用いた場合、平均面圧の増加に伴い、平均摩擦応力は線形的に増加した後、減少し、再び線形的に増加する。この傾向は潤滑油の粘度、油膜厚さ、被加工材の応力状態に依存しない。

さらに、この挙動は平均面圧の増加によるオイルピット内の潤滑油の圧力負担によるものと判明した。

これに基づいて、摩擦法則を構築した。図6に示すように、潤滑油を用いた場合、摩擦法則は低圧区域の摩擦係数と高面圧域の摩擦係数によって表される。

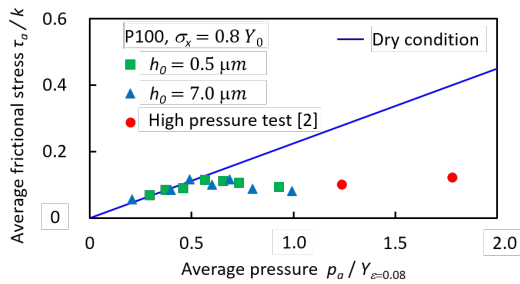


図5 潤滑油を用いた場合の摩擦挙動

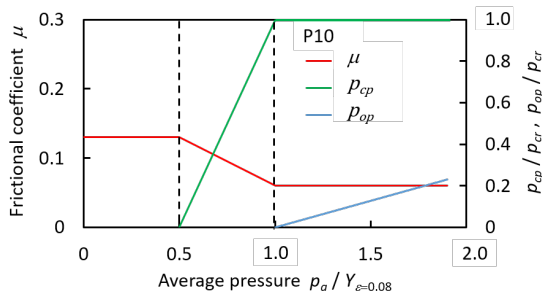


図6 潤滑油を用いた場合の摩擦法則

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計3件)

Z.G. Wang, T. Suzuki, Friction law in dry metal forming of materials with work hardening, *Procedia Manufacturing*, 査読有, 2018, accepted.

Z.G. Wang, W.Z. Dong, K. Osakada, Determination of friction law in metal forming under oil-lubricated condition, *CIRP Annals*, 査読有, 2018, <https://doi.org/10.1016/j.cirp.2018.04.027>

Y. Zhang, Z.G. Wang, Y. Yoshikawa, W.Z. Dong, Experimental investigation on friction law under starved lubrication in metal forming, *Procedia Engineering*, 査読有, Vols. 207, 2017, pp.2269-2273.

〔学会発表〕(計7件)

Y. Zhang, Z.G. Wang, Y. Yoshikawa, W.Z. Dong, Experimental investigation on friction law under starved lubrication in metal forming, *ICTP2017*, Sep. 20, 2017, Cambridge, UK.

張野、董文正、吉川泰晴、王志剛、枯渇潤滑状態における摩擦挙動、平成29年度塑性加工春季講演会論文集、2017年6月9日、岐阜市。

吉川泰晴、加藤涼一郎、小坂井祐季、王志剛、ドライ円板圧縮による新規摩擦法則の検証、平成29年度塑性加工春季講演会論文集、2017年6月9日、岐阜市。

N. Maruyama, Z.G. Wang, Y. Yoshikawa, T. Suzuki, Friction law in metal forming under lubricated condition, 7th International Conference on Tribology in Manufacturing Processes, Feb.28, 2016, Thailand.

T. Nakano, Z.G. Wang, Y. Yoshikawa, T. Suzuki, Friction law in dry forming of metals with work hardening, 7th International Conference on Tribology in Manufacturing Processes, Feb.28, 2016, Thailand.

丸山直人、王志剛、吉川泰晴、鈴木達博、潤滑下における表面接触状態と摩擦挙動の関係、第66回塑性加工連合講演会論文集、2015年10月30日、いわき市。

中野貴文、王志剛、吉川泰晴、鈴木達博、ドライ塑性加工における摩擦法則の有用性の検証、第66回塑性加工連合講演会論文集、2015年10月30日、いわき市。

〔図書〕(計0件)

〔産業財産権〕

出願状況（計0件）

取得状況（計0件）

〔その他〕
ホームページ等

6．研究組織

(1)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