

氏名（本籍）	鈴木 達博（愛知県）
学位の種類	博士（工学）
学位授与番号	甲第482号
学位授与日付	平成27年9月30日
専攻	生産開発システム工学専攻
学位論文題目	塑性加工における摩擦法則の構築 (Determination of friction law in metal forming)
学位論文審査委員	(主査) 植松 美彦 (副査) 山下 実 王 志剛

### 論文内容の要旨

塑性加工における摩擦法則として、クーロンの法則と摩擦せん断応力一定則の2つが一般的に使われている。クーロンの法則は摩擦応力が面圧に比例することを示すもので、主に板金プレス加工のような低面圧における加工法に適用されている。一方、摩擦せん断応力一定則は摩擦応力が面圧に無関係の一定値を示すもので、主に鍛造加工のような高面圧加工に適用されている。この2つの摩擦法則の根拠となっているのは Bay らのすべり線場法による被加工材表面凹凸の押しつぶし解析の結果である。しかし、Bay らの解析は、被加工材バルクの塑性変形がないと仮定しており、バルクの塑性変形を伴う塑性加工における摩擦挙動を表現できていない可能性がある。

被加工材表面凹凸の押しつぶし挙動に及ぼすバルクの塑性変形の影響について、池らは FEM 解析を用いて検討を加えた。その結果、平均面圧に対する表面平坦化率の変化はバルクの応力状態によって大きな差異が現れ、なかんずく、バルクに引張応力が作用する場合には平均面圧に対して表面平坦化率が急激に増加することが明らかとなった。これは、平坦面における摩擦せん断強さが一定ならば、平均摩擦応力も急増することを意味し、従来の摩擦法則で表現できない現象である。

本研究は、被加工材表面凹凸の押しつぶし挙動に及ぼすバルクの応力状態の影響を実験的に検討し、塑性加工用摩擦法則を構築することを目的とした。

まず、摩擦挙動に及ぼすバルクの応力状態の影響を検討し得る側方引張形摩擦試験機を開発した。平均面圧に対して摩擦応力の急増現象の有無を実験により明らかにするには、焼付きが生じない条件下かつ無潤滑状態における平坦化率と平均摩擦応力を把握する必要がある。この二つの要件を同時に満たすことは困難であったが、摩擦工具の表面に DLC コーティングを施すことで実現した。

加工硬化性の無い工業用純アルミニウム A1050-H24 を用いて、以下の実験結果が得られた。

- 1) 光学顕微鏡画像から算出した平坦化率は母材が塑性変形すると平均面圧に対して急増するが、平均摩擦応力は比例増加に止まる。
- 2) 平坦化率と平均面圧より算出される平坦面の面圧は母材が変形し始めると比例減少する。
- 3) 電子粗さ顕微鏡により母材変形前後の平坦面を観察すると、塑性変形した後には小さな凹凸ができており、真実接触面積は平坦面よりも小さい。

以上の実験結果に基づいて、摩擦応力が比例増加する限界の面圧を臨界面圧とし、この臨界面圧よりも低い面圧ではクーロン則、高い面圧では摩擦せん断応力一定則となる摩擦法則を構築した。この法則の特徴は臨界面圧と摩擦せん断係数を摩擦係数から算出でき、面圧の全範囲に亘る摩擦挙動を表現できている点にある。

側方引張形摩擦試験機では臨界面圧よりも高い面圧での実験は不可能で、構築した摩擦法則の妥当性を実証するために高面圧側の実験が必要である。高面圧摩擦試験機では試験片の四方を拘束することで母材の塑性変形を阻害し、高面圧下の摩擦試験を可能とした。高面圧摩擦実験の結果、臨界面圧以上における摩擦応力は一定であり、その値は摩擦係数より算出される摩擦せん断係数で表現できることを明らかにした。

次に構築した摩擦法則の一般形を検討した。加工硬化性を有する冷間圧延鋼板 SPCC を用いて検討した結果、押し込み硬さ試験相当の塑性ひずみである 0.08 に対応する変形抵抗値を用いて面圧を無次元化すれば、構築した摩擦法則は加工硬化性を有する被加工材に適用できることを明らかにした。また、加工履歴のもつ被加工材に適用する場合、予ひずみに 0.08 を加えたひずみに対応する変形抵抗

抗値で面圧を無次元化すればよいことを明らかにした。

さらに、構築した摩擦法則に及ぼす被加工材表面の潤滑状態の影響を検討するために、ボンデ被膜と一液潤滑被膜を施した試験片を使用し、摩擦試験を行った。その結果、臨界面圧以上の面圧であっても摩擦応力は一定値を示さず、比例関係を保つことを明らかにした。

そして、本研究で提案した摩擦法則の活用をはかるために、有限要素解析コードへの組み込みを試みた。サブルーチンの計算過程は以下の通りである。

- 1) 温度と表面積拡大比の関数となる摩擦係数を入力する。
- 2) 入力した摩擦係数から摩擦せん断係数を算出する。
- 3) 摩擦せん断係数と被加工材材料特性から臨界面圧を算出する。算出にあたって接触節点の相当ひずみに 0.08 を加えた値に対応する変形抵抗を用いる。
- 4) 臨界面圧によりクーロン則と摩擦せん断応力一定則のどちらを使用するか判定する。
- 5) 摩擦応力をメインに戻す。

このサブルーチンを用いて、リング圧縮試験の FEM 解析を行った結果、FEM 解析精度の向上がみられ、提案した摩擦法則の実用性が高いことを示した。

### 論文審査結果の要旨

本論文は、塑性加工における摩擦法則を構築しようとするものである。摩擦法則に及ぼすバルク材の塑性変形の有無、バルクの応力状態、バルク材の加工硬化挙動、潤滑皮膜などの影響について研究されている。本論文で取り上げたバルク材塑性変形時の応力状態の影響は、当該分野の最大の懸案事項であり、その解明が望まれている。これまでに発表された数値解析の結果によれば、平均面圧に対する表面平坦化率の変化はバルクの応力状態によって大きな差異が現れ、特にバルクに引張応力が作用する場合には平均面圧に対して表面平坦化率が急激に増加することが明らかとなっている。これは、平坦面における摩擦せん断強さが一定ならば、平均摩擦応力も急増することを意味し、従来の摩擦法則で表現できない現象である。しかしながら、この現象の実験的な検証は実験の難しさもあって未着手のままである。そこで本研究では、まず、摩擦挙動に及ぼすバルクの応力状態の影響を検討し得る側方引張形摩擦試験機を開発した。平均面圧に対して摩擦応力の急増現象の有無を実験により明らかにするには、焼付きが生じない条件下かつ無潤滑状態における平坦化率と平均摩擦応力を把握する必要がある。この二つの要件を同時に満たすことは困難であったが、摩擦工具の表面に DLC コーティングを施すことで実現した。一連の実験によって、工具の圧下でできた平坦面にはバルクの塑性変形によって小さな凹凸ができ、真実接触面積は平坦面よりも小さいという大変興味深い事実を突き止めた。得られた実験結果に基づいて、摩擦応力が比例増加する限界の面圧を臨界面圧とし、この臨界面圧よりも低い面圧ではクーロン則、高い面圧では摩擦せん断応力一定則となる摩擦法則を構築した。この法則の特徴は臨界面圧と摩擦せん断係数を摩擦係数から算出でき、面圧の全範囲に亘る摩擦挙動を表現できている点にある。さらに、構築した摩擦法則の加工硬化材への適用方法を新たに提案し、潤滑皮膜を用いた場合の摩擦法則も明らかにした。これらの知見は本研究において初めて明らかにされたものであり、当該分野の共通認識を大きく塗り替えたとともに、塑性加工分野の数値解析技術の進歩にも大いに役立つものと思われる。このように、本論文は斬新な知見を数多く見出しており、独創性、新規性、有用性の点で極めて優れていると評価できることから、学位審査委員会は、この論文を学位論文に値するものと判定した。

### 最終試験結果の要旨

学位審査委員会は、提出論文の基礎となる発表論文（査読付き論文 2 編）の内容を確認し、平成 27 年 8 月 7 日に開催された学位論文公聴会における論文提出者との質疑応答と口頭試問などに基づいて審査を行い、最終試験に合格と判定した。

---

発表論文（論文名、著者、掲載誌名、巻号、ページ）

1. Determination of friction law in dry metal forming with DLC coated tool (Z.G. Wang, Y. Yoshikawa, T. Suzuki, K. Osakada), CIRP Annals, 63 (2014), pp.277-280.
2. Evaluation of lubricants without zinc phosphate precoat in multi-stage cold forging (Z.G. Wang, S. Komiyama, Y. Yoshikawa, T. Suzuki, K. Osakada), CIRP Annals, 64 (2015), pp.285-288.