

	はしもと こうじ	
氏名(本籍)	橋本浩二(神奈川県)	
学位の種類	博士(情報科学)	
学位記番号	情博第238号	
学位授与年月日	平成14年10月10日	
学位授与の要件	学位規則第4条第1項該当	
研究科, 専攻	東北大学大学院情報科学研究科(博士課程) 情報基礎科学専攻	
学位論文題目	表面処理鋼板の摺動特性とそのプレス成形性に及ぼす影響	
論文審査委員	(主査)	
	東北大学教授 伊藤 耿一	東北大学教授 猪岡 光
	東北大学教授 加藤 康司	東北大学教授 庄司 克雄
	(工学研究科)	(工学研究科)

## 論文内容要旨

### 第1章 序論

本章では、自動車車体用途を中心に開発されてきた高機能薄鋼板の開発経緯と、新機能を付与したがゆえのプレス成形問題について触れ、新開発材が産業界で十分に用いられていない原因のひとつであることを述べた。また、これら高機能鋼板のプレス成形における最適条件を検討する上で、計算シミュレーション技術が重要な役割を果たすようになってきた経緯について言及した。しかし、有限要素法を中心とする数値シミュレーション技術は、コンピュータ自体の進歩とともに年々進歩して実用域に達して久しいが、スプリングバックや成形性一般の予測精度向上など課題も多く残されていることについても述べた。

プレス成形では、材料と金型工具との接触による摩擦力が材料流入量に大きな影響を与えるために、板材成形解析において正確な解、特にひずみ分布や応力分布を得るには、摩擦現象(摩擦抵抗力)をFEMプログラムに正確に反映させる必要がある。一方で、新機能鋼板の一つである表面処理鋼板は、表層に母材鋼板と異なった特性を持つ皮膜を有するため、特異な摩擦現象を引き起こすことが知られている。このような現象に対し、従来の摩擦モデルに基づく有限要素法シミュレーションでは計算精度に限界がある。以上の理由により、本研究において検討する現象論的な非線形摩擦モデルの必要性について述べ、さらに後続の章構成についても触れた。

### 第2章 摩擦力の発生機構と数理化モデルの変遷

本章では、被加工材と工具との間で生じる摩擦力の発生機構に関して、古典的なAmontons・Coulomb則や凹凸理論、凝着説、さらに20世紀になってから進歩したAsperity変形理論や潤滑状態での理論の従来知見を概観し、その簡単な紹介とそれら理論の限界について述べた。すなわち、実際のプレス現場では、同じ摩擦係数を与える同一材料でも成形形状が激しい場合には違った成形結果となることがしばしば指摘されていることに触れ、この現象を説明するためには従来の線形摩擦則(Amontons-Coulomb 則)では不十分で、絞り1工程の間における摩擦係数の変化を考慮できうる非線形摩擦モデルが、表面処理鋼板など高機能鋼板では特に重要であることを述べた。さらに、Sub & sin や Nakamachi らなどによる非線形摩擦モデルの例を挙げるとともにその問題点を指摘し、現象論的な非線形摩擦モデルを提案する必要があること、さらに有限要素法プログラムに適用できる数理モデルを導くこと、が重要であることを述べた。

### 第3章 めっき種ごとの摺動による摩擦係数変化とプレス成形性に及ぼす影響因子

本章では、実際の自動車車体に適用される表面処理鋼板の代表として電気亜鉛めっき鋼板、熔融亜鉛めっき鋼板、および比較用の冷延鋼板を用いて、独自に開発した連続摺動試験機を用いてめっき種類ごとの摺動試験を行い、摩擦係数の摺動距離依存性、及

び面圧依存性を示した。冷延鋼板や比較的めっき層の硬度が高い合金化溶融亜鉛めっき鋼板では摺動距離の増加によって摩擦係数が漸減すること、一方、めっき層硬度が比較的低い電気亜鉛めっき鋼板では一旦摩擦係数が低下した後、急激に上昇に転じることを明らかにした。これにより、摩擦係数が摺動距離によって変化する事が実証され、プレス成形中に摩擦係数が変化して成形性に影響する可能性を示した。さらに、この摩擦係数の変化が成形性に実際に影響するか否かを検証するために、力学的に相似形状を有する円筒工具により摺動距離のみを変えた実験を行い、摺動距離による成形性への影響を検討した。その結果、摺動距離の増大により摩擦係数が減少する傾向を示す冷延鋼板や合金化溶融亜鉛めっき鋼板では摺動距離の増加(工具径の増加)によっても成形性への影響がわずかであるのに対して、摺動距離の増加によって摩擦係数が顕著に増大する電気亜鉛めっき鋼板では、摺動距離の増加(工具径の増加)によって成形性が劣化することが明確になった。また、初等解法を用いて円筒深絞り成形試験のポンチ荷重変化をシミュレートし、摩擦係数変化を織り込むことで観察されたポンチ荷重の変動的な現象を再現できることを示した。

さらに、成形に伴う表面処理鋼板めっき層に生じるクラックに着目し、表面のクラックの摩擦係数への影響を検討した。その結果、表面のクラックは摩擦係数の変化にさほど大きな影響を与えていないことを示した。これにより、本論文で検討する現象論的な非線形摩擦モデルでは、表面のクラック(もしくは母材の変形)は考慮せずに、摺動距離と垂直押付け圧力に注目すればよいことを示した。

#### 第4章 摩擦仕事量の定義と非線形摩擦モデルの提案、及び摩擦仕事量の経路非依存性の検討

本章では、摺動に伴う摩擦係数変化を表すための新たな変数として、表面形態変化を表すことができる“摩擦仕事量 $\omega$ ”の概念を導入した。摩擦仕事量 $\omega$ は、工具との接触を伴う微小変位を試料に連続的に与えたとき、工具との間で生じる単位面積あたりの接触抵抗圧力 $P_T$ と、滑り変位量 $g_s$ を掛けた値の数値積分で与えられる。この摩擦仕事量 $\omega$ と垂直押付け圧力 $P_N$ の関数で摩擦係数 $\mu$ を与えられる多項式関数( $\mu = F(P_N, \omega)$ )を新たに定義した。摩擦係数 $\mu$ は摩擦仕事量 $\omega$ と垂直押付け圧力 $P_N$ の関数となっているが、概念的には $\mu_{n+1}$ は過去の摩擦係数 $\mu_n$ の履歴で表せる $\omega$ を使って、 $P_N$ と $\omega$ の多項式関数表示としている。従って、過去の摩擦係数変化の履歴から現在の摩擦係数が求められるのである。

また、新しい摩擦仕事量のパラメーターを導入する上で、摺動履歴、すなわちある時間 $t_n$ の前の時間 $t_{n-1}$ までにおける摩擦仕事量 $\omega$ のたどってきた過程や垂直押付け圧力 $P_N$ のたどってきた過程によらず、時間 $t_n$ における摩擦仕事量 $\omega$ と垂直押付け圧力 $P_N$ が同一であれば同じ摩擦係数を与えられるとする摩擦経路非依存性が確認できれば、弾塑性理論におけるひずみ増分理論と同様に数値アルゴリズムに組み込むときに非常に有効となるため、摩擦仕事の経路非依存性の検討を行った。具体的には、試験中の垂直押付け圧力をいろいろなパターンで変化させた連続摺動試験を実施したり、数条件の垂直押付け条件である所定の摩擦仕事量 $\omega$ まで連続摺動試験を行い、その後垂直押し付け圧力を同じ条件に揃えて摩擦係数が同一になるか検討した。その結果、面圧及び滑り距離の履歴で表される摺動履歴を“負荷経路”とすれば、摺動における負荷経路を様々に変えても、時間 $t_n$ における摩擦仕事量 $\omega$ と垂直押付け圧力 $P_N$ が一定であれば同一の摩擦係数を与えることが確認できた。

これより、非線形摩擦モデルをFEMに適用したときに、時刻 $t$ における面圧とそれまでの摩擦仕事量 $\omega$ によって摩擦係数 $\mu$ が規定できるため、非線形摩擦モデルの一般モデル化が容易となった。

#### 第5章 非線形摩擦モデルを考慮したFEMプログラム

本章では、有限要素法で一般的に用いられているAmontons-Coulomb則に基づく摩擦モデル(線形摩擦則)の有限要素法プログラムへの定式化を概観するとともに、本論文で提案した非線形摩擦モデルの定式化とFEMプログラムへの適用を行った。

まず、摩擦問題を有限要素法に定式化して組み込むに当たり、摩擦問題と弾塑性問題の類似性を示し、古典的な弾塑性構成式を有限要素法へ展開する手法を摩擦問題にも適用可能であることを示した。すなわち、第4章で示した摩擦仕事量 $\omega$ の変形経路非依存性の特徴から、摩擦現象における摩擦仕事量 $\omega$ が弾塑性のひずみ増分理論と非常に類似していること。また、微小変位を与えたときの変位速度を、弾塑性構成式では弾性ひずみと塑性ひずみに分解できるが、摩擦問題では固着変位と滑り変位に分解でき、さらに、弾性ひずみと固着変位は塑性ひずみ及び滑り変位に比べて微小であることなどを示した。摩擦問題の定式化においては、これらの類似性をもとに定式化に必要な関係式を定義し、有限要素法へ導入するための道筋を示した。

非線形摩擦モデルを有限要素法に組み込む具体的な方法に関しては、代表的な有限要素法として静的陰解法、静的陽解法、動的陽解法があるので、その中でソースコードがオープンになっている静的陽解法(ITAS-3D)へのImplementを想定して、連続体力学の定式化から、離散化モデルの定式化を展開した。その過程で、摩擦問題と弾塑性問題の類似性により、古典的な弾塑性構成式の

有限要素法への展開に用いられる Return mapping 法(弾性予測子・半径修正子法)が適用できることを明らかにし、数値アルゴリズムを具体的に示した。これにより、静的陽解法プログラム(ITAS-3D)および動的陽解法(Pam-stamp)への適用を実際に行った。

## 第6章 表面処理鋼板の深絞り成形の数値解析

本章では、非線形摩擦モデルを組み込んだ動的陽解法FEMプログラム(Pam-stamp)を用いて表面処理鋼板の成形解析を行った。まず、非線形摩擦モデルがFEMプログラムで正確に機能しているか確認する目的で摺動試験をシミュレートし、実験結果と良い対応が得られたことから、非線形摩擦モデルがFEMプログラムにおいて正しく機能していることが確認できた。次に、第3章で行った力学的に相似形状を有する円筒深絞り試験のうち、最も摺動距離の長くなる300mmφの円筒工具による成形解析を中心に、非線形摩擦モデルの有効性を確認した。その結果、合金化溶融亜鉛めっき鋼板や電気亜鉛めっき鋼板のみならず、冷延鋼板においても非線形摩擦モデルの数値解析結果が実験結果と良い一致を示すことがわかった。しかしその一方で、現状の有限要素法が抱える問題による精度向上の限界も明らかになった。すなわち、Shell要素を用いることにより、フランジ部の面圧分布が正確に求まらない点などが、Solid要素を用いた解析との比較により明確にする事ができた。今後、非線形摩擦モデルの有用性をさらに高めるためには、こうしたFEMプログラム本体の問題点も解決していく必要があり、今後の課題である。

## 第7章 表面性状が及ぼす摩擦係数および成形性への影響

本章では、本論文で取り上げてきた摩擦係数が摺動距離によって変化する現象を、簡単なモデルによって説明することを試みた。そのために、まず摺動に伴う表面トポロジー変化を電子顕微鏡写真及び3次元粗度計で計測し、表面平滑化と摩擦係数変化の関係を調べた。その結果、摺動回数(=累積の摺動距離)の増加に伴い、初期に存在した表面の細かな突起が平滑化され、平滑化面積割合が増加していくこと、表面平滑化割合が90%を超えると今度は掘り起こしと見られる表面荒れが見られるようになり、平滑化が進まなくなることがわかった。Asperity変形理論により、一定の摩擦仕事による平滑化割合を考慮することにより平滑化仮定を説明でき、さらに混合潤滑と境界潤滑領域の概念を用いることで、表面平滑化の進展から摩擦係数が低下していく現象を定性的に表せることを示した。また、さらに平滑化が進行した場合には、真実接触部分及び境界潤滑領域の剪断変形抵抗力を考慮して、摩擦係数が増加していく過程の説明にも成功した。

めっき層の存在によって表面処理鋼板の機械的特性は少なからず影響を受けるが、この見掛け上の機械的特性の変化は、実際の成形において工具とサンプルの接触条件を一定にすることによって無視できることを明確にした。すなわち、見掛け上の機械的特性が変化しても、表面処理鋼板の成形性は十分な潤滑条件を与えてやれば、原板のもつ成形能と同等の成形能を有する。つまり、表面処理鋼板の成形性は、めっき層の存在による機械的特性の劣化が原因で変化するのではなく、工具と成形サンプルとの間の摩擦状態によって影響されるといえる。この結論より、表面処理鋼板の成形性は見掛けの機械的特性変化によって影響を受けるのではなく、工具とサンプルの間の摩擦状態に依存すること、また、摺動距離の増大に伴う表面処理鋼板の摩擦係数変化は、主に表面トポロジーの変化に起因する事を明確にした。

## 第8章 結論

最後に本章では、本論文の総括的まとめを述べて結論としている。本論文は、表面処理鋼板などの高機能鋼板で、プレス成形に供したときに摩擦係数が成形過程で変化することに着目し、この摩擦係数のプレス成形中に変化する現象を非線形摩擦モデルとして数理モデル化し、有限要素法シミュレーションにおける解析精度を向上させるための研究である。そのために、プレス成形過程における摩擦係数変化を表す摩擦仕事量の概念を導入し、面圧と摩擦仕事量に依存する現象論的な摩擦モデルを提案・定式化し、実際に有限要素法プログラムに組み込み、プレス成形シミュレーションの精度向上に有効であることを検証した。これにより、従来プレス成形解析の精度が比較的低いとされてきた新機能材料、特に表面処理鋼板の成形解析精度が向上し、金型設計段階での成形可否判定が可能になる数値解析シミュレーション技術を構築することができた。

この研究により、表面処理鋼板を実プレスに適用する上で、工具形状や成形条件の早期確認・立ち上げが可能となり、産業界に大きな貢献ができると思う。また、非線形摩擦モデルの定式化を明らかにすることにより、工学的な分野にも貢献できたと思う。

## 論文審査の結果の要旨

高機能性薄板材として自動車などに使用されている表面処理鋼板は、そのプレス成形過程において、金型による表面メッキ層の摩擦と磨耗によりその摺動特性が変化する。このため、摩擦係数を一定とする古典的摩擦則ではその成形性を適切に予測し得ないことが知られており、表面処理鋼板の摺動過程における摩擦則の確立が望まれている。本研究はこの問題をとりあげて、独自に開発した摺動試験機による系統的な実験結果に基づいて、プレス成形シミュレーションに適用可能な非線形摩擦モデルを提案し、さらに、それを板材成形過程のシミュレーションを目的とした有限要素コードに組み込むことにより、その有効性を確認したものであり、全編8章よりなる。

第1章は序論であり本研究の背景と目的を述べている。

第2章では、摩擦と磨耗に関する従来の知見を概観し、従来理論の表面処理鋼板への適用についての限界と問題点を明らかにしている。

第3章では、独自に開発した摺動試験機により、代表的な表面処理鋼板である電気亜鉛メッキ鋼板、溶融亜鉛メッキ鋼板および比較材としての普通鋼板の摺動試験を系統的に行い、摩擦係数の摺動距離による変化としてまとめている。その結果、普通鋼板の摩擦係数は摺動距離の増加に伴って単調に減少しているのに対して、メッキ層を有する表面処理鋼板の摩擦係数は摺動距離に対して特異な変化を示すことを明らかにしている。これは新たな知見でありプレス成形性評価に対して有用な結果である。この現象を表面トポロジーの観察結果から解釈するとともに、力学的に相似な円筒絞りの実験および簡易解析により成形限界におよぼす寸法の影響が、ここに得られた摩擦特性により説明できることを示している。

第4章では、前章で得られた実験結果に基づき、摩擦係数の摺動距離に関する発展則を定式化している。具体的には現在の面圧とそれまでの摩擦仕事の関数として摺動過程における摩擦係数を表現している。これは摺動過程における摩擦係数が摩擦力と摺動距離の履歴に依存することなく、摩擦仕事と現在の面圧に対して一義的に定まることを意味しており、提案する摩擦則を成形シミュレーションのための有限要素法への適用可能とする有用な性質を与えている。

第5章では、前章で定式化した摩擦係数の発展則を塑性流れ理論のアナロジーにより一般化して有限要素法へ組み込むための定式化を与えており、静的陰解法、静的陽解法および動的陽解法に適用する際の基礎式の具体形と数値解法を提示している。これは提案する摩擦係数の発展則に基づく新しい摩擦則を用いた成形シミュレーションを実現するために価値ある成果である。

第6章では、提案した摩擦則を組み込んだ動的陽解法有限要素コードにより、第3章で実験を行った相似工具による円筒絞りのシミュレーションを行い、成形限界およびひずみ分布に及ぼす摩擦則の影響を明らかにし、提案した摩擦則によるシミュレーションの結果の方が、古典的摩擦則によるものよりも実験結果をよく説明できることを示すことにより、提案した摩擦則がプレス成形性評価の精度向上に有効であることを確認している。

第7章では、表面処理鋼板の摩擦係数の摺動距離による変化が単調でないことのトライボロジ的な解釈を試みており、本研究で得られた摩擦の発展則をさらに一般性のある形式に発展させる道への端緒となるものである。

第8章は結論である。

以上要するに本論文は、プレス成形に多用される表面処理鋼板の摺動特性の摺動過程における変化の特徴を解明し、その結果に基づく摩擦係数の摺動過程における発展則を定式化することにより、この種の鋼板のプレス成形性評価の精度向上を実現したものであり、機械工学ならびに情報科学の発展に寄与するところが少なくない。

よって、本論文は博士(情報科学)の学位論文として合格と認める。