



S. Takahashi

## プレス成形時の高速成形における 摩擦特性計測

高橋 進\*

### 1. まえがき

二酸化炭素排出による地球環境への負荷低減温対策として自動車の排出ガス削減が求められる中、車体の軽量化が積極的に進められている。車体軽量化には高張力鋼板やアルミニウム合金板など軽量化材料が適用されているが、普通鋼板と比較してスプリングバックが大きく、また成形性が低いことから金型開発に多大な時間を必要としている<sup>1)</sup>。

自動車の車体を構成する板材のプレス成形部品は、われ、しわ、スプリングバックおよび面ひずみに代表される不具合が発生する場合がある。これらの不具合の発生事前予測は、金型開発及び製品開発の期間短縮に大きく貢献する。事前予測技術としては、有限要素法による成形シミュレーションが適用されている。成形シミュレーションの高精度化のためには、降伏関数等の高精度化が進められているが、成形性に影響を及ぼすと考えられる成形中の板材と金型間の摩擦に関する研究は、少ないのが現状である。

自動車のパネル部品等のプレス成形時では、材料の引張速度は、300mm/s の高速に達する。その時は、板材と金型との間の摺動速度も同程度になると考えられる。そこで本研究では、300mm/s 以上で素材が金型間を摺動する時の荷重を計測可能な、治具を開発する。摩擦計測試験は、高速でかつ一定速度で行われる必要があり、通常の引張試験機ではクロスヘッドの速度が最大で 15mm/s 程度なので、材料の引抜き駆動力としてサーボプレスを活用する。高速でかつできるだけ定速で金型間を材料が引抜ける様な、治具を開発すると共に、金型材質、素材と金型との接触圧力および摺動速度を変化させた時の摩擦特性を検討したので報告する。

### 2. 擦試験治具の設計

現在活用が広がっているサーボプレスは、スライドの位置および速度制御を任意に設定可能で、かつ当然のことながらプレスの成形速度でスライドを駆動可能である。したがって、本研究における摩擦試験治具の駆動源としてサーボプレスは適していると言える。新規に摩擦試験方法を検討するにあたり、当該治具を、プレスのボルスタとスライドに汎用の固定工具で設置可能とすることにより、複数のメーカーのサーボプレスに簡単に装着可能とした。試験治具は、荷重計測用のロードセル以外は、新規に設計した。

### 2.1 治具設計における基本方針

摩擦試験治具の開発において、駆動力の発生源として、治具の試験片を固定しているチャックの位置および速度共に精度良く制御可能なサーボプレスを使用することとしているので、当該プレスの仕様に適した治具の考案を行った。サーボプレスは、図 1 に示す、2000kN の能力を有する SDE-2025 (アマダ製) を用いることとして、構造等を考案した。

設計の基本方針を以下に示す。

- ① 指定した摺動速度で、摩擦試験が行える。
- ② 素材と金型との接触圧力を自由に設定可能とする。
- ③ 素材に均等に金型から圧力が作用する。
- ④ 金型の設置位置を容易に決められる。
- ⑤ 試験片のセッティングを容易にする。
- ⑥ 構造を簡素化して、製作費用を削減する。



図 1 摩擦試験に使用したサーボプレス

### 2.2 基本方針に対応した治具の設計

サーボプレスに装着可能な摩擦試験治具を図 2 に示す。治具の高さは、適用したサーボプレスのスライドとボルスタ間の寸法を参考にして決定した。ダイハイトの異なるサーボプレスへの設置に関しては、本研究で使用したプレスより大なるダイハイトのプレスであれば適用が可能である。開発した試験治具をサーボプレスに装着した状態を図 2 に示す。

\* 日本大学 生産工学部 機械工学科 教授



図2 試験前の高速摩擦試験治具

前述した設計指針の各項目に対して、開発した治具への対応について以下に示す。

① 指定した摺動速度で摩擦試験が行える。

サーボプレスは、スライドの速度および位置をプログラムで任意に設定・制御が可能なのが特徴である。しかしながら、モータによってスライドを制御しているため、速度が速くなると、設定速度に達するまでに時間を要する。したがって、スライドが設定速度に達するまでの間に、試験片には荷重が作用しないようにする必要がある。そこで、図3に示されているように、試験片下端のチャックは、試験開始直後は、治具の他の部品と接しておらず、スライドが、50mm上昇した時点で、治具のフレームに接触して上昇が停止し、試験片に荷重を作用させる機構とした。この機構は、既開発の同様にサーボプレスを使用した高速引張試験の開発時に考案した機構<sup>2)</sup>を参考に設計を行った。本実験で採用したサーボプレスの場合、スライドの上昇速度500mm/sに十分な、加速距離として50mmの試験片の空走距離を設定した。

② 素材と金型との接触圧力を自由に設定可能とする。

摩擦試験の場合、素材の金型との摺動速度の制御と共に、金型を素材に押さえ付ける圧力の制御も大切である。そこで任意の圧力を発生させるために、油圧ジャッキを使用した。実験では、ジャッキに作動油を送り込む油圧式の手動ポンプ(TWA-0.3：大阪ジャッキ製)とフラットジャッキ(EF10S1.1：大阪ジャッキ製)を使用して片側の金型から圧縮荷重をかけることとした。

③ 素材に均等に金型から圧力が作用する。

金型等のセッティング状況を、図4に示す。油圧ジャッキは、金型の中央を押すように配置した。その作用圧力の測定には、油圧ジャッキが荷重を作用させている金型の反対側の金型と治具のフレームとの間に、2個のロードセルを配置した。ジャッキによる荷重点とロードセルによる金型の支持点は、2等辺三角形をなすように配置し、素材に金型から均等な圧力が作用するようにした。

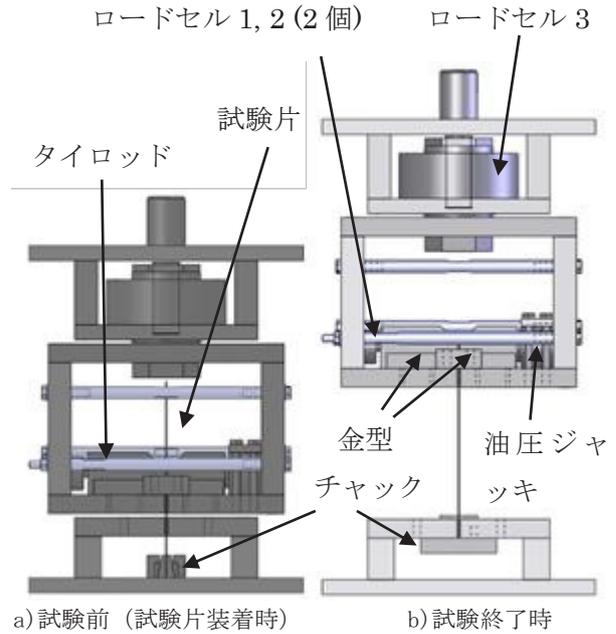


図3 試験前後の摩擦試験治具

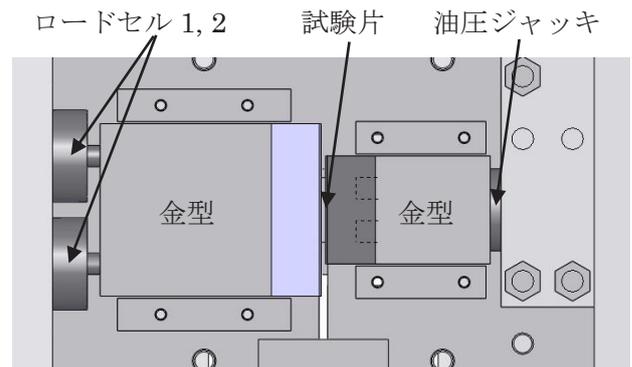


図4 試験開始前の金型等セッティング状況

④ 金型の設置位置を容易に決められる。

金型の中央に素材を配置し、かつ素材と金型の表面が平行になるように、荷重を付加する前の金型を配置するために、金型の両側に金型の側面と平行にガイドを配置した。また、金型がガイドと接すると計測荷重に影響するので、両者間に1mm程度の一定の隙間を設けられるように、隙間と同じ板厚の治具を用いて、金型の容易な位置設定を可能とした。

⑤ 試験片のセッティングを容易にする。

試験片は、図3に示されているように、治具の中央に配置されている。治具への試験片のセッティングを容易にするために、チャックに固定した試験片を治具内に装着できるように、治具のフレームの一部にスリットを加工して、試験片がスリットを通過して治具中央に設置可能とした。

⑥ 構造を簡素化して、製作費用を削減する。

治具の部品形状をできるだけ簡単にし、加工費を削減するために、鋼のプレートをボルトで締結する構造とした。

ただし、金型を試験片に押付けるために油圧ジャッキを作用させると、フレームの縦板を变形させる可能性が考えられるので、フレームの縦板をサポートするために、タイロッドを金型の両脇に各2本配置して、治具の剛性向上により試験片へ作用する圧力の均一化を狙った。

その他の実験上の配慮として、金型と治具のフレーム間の摩擦の低減のために、金型とフレーム間にテフロンシートを配置して実験を行った。油圧ジャッキから金型に伝えられた荷重を圧縮型ロードセル(LCX-A-10kN：共和電業製)を2個使用して測定する。金型から試験片に圧力を負荷した状態で、サーボプレスのスライドに装着されている金型を高速で上昇させる。この時に、金型と試験片間の摩擦力を引張型ロードセル(LUK-A 100kN：共和電業製)で測定する。摩擦力を金型の圧縮力で除することで摩擦係数を求めた。

また、実験において、試験片が金型上を滑り出す時の時間を正確に計測するために、荷重の計測と同時期にスタートさせた高速度カメラによって試験片の移動状態を把握し、摩擦力の評価領域を正確に求めた。

### 3. 高速摩擦実験

#### 3.1 試験片

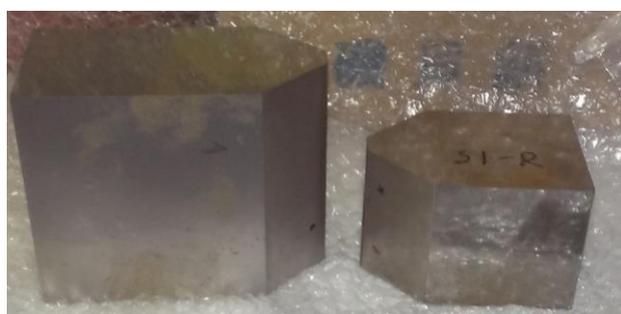
試験片は長さ260mm、幅30mm、厚さ1mmとし、材料は、アルミニウム合金板(A5052-0)の表面がダル仕上げを使用した。試験片の切り出し方向は、試験片の長手方向が圧延方向とした。試験片の写真を図5に示す。

#### 3.2 金型

金型の写真を図6に示す。ロードセル側は、ロードセルを2個並べるので、ジャッキ側より幅が広がっている。金型の材質は、SKD11(HRC60)およびFCD600(HRC10)とした。



図5 試験片の外観写真

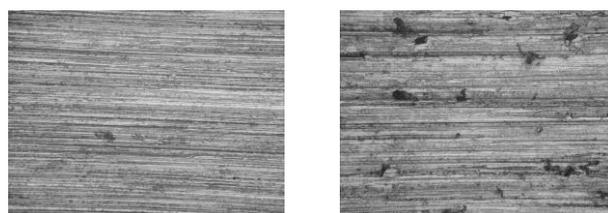


a) ロードセル側      b) ジャッキ側

図6 ロードセル側およびジャッキ側の金型

金型と素材との接触面積は、面圧を計算するために重要である。接触面の長さは、試験片の幅となるので、接触面の幅の寸法計測が重要となる。また、金型の接触部分の両側は、試験片表面を傷つけないように、R形状となっているので、接触幅の長さは、R止まり間の距離とした。距離の計測には、読取顕微鏡(NRM-D-ZXZ：ミットヨ製)で金型形状を拡大して計測を行った。計測位置は、金型の接触面の長手方向の中心と、その中心より左右に17mmの位置での平面部分の長さを計測して、平均値を当該金型の接触面の幅とした。接触面の両側のR部分もバフ仕上げを行っているが、その部分は、手仕上げであることから、接触面の幅に影響をおよぼす。そこで、それぞれの金型での計測値で、値の差が近くなる組み合わせを探して、実験を行った。接触面の幅は、ペアの金型の計測値の平均値とした。摩擦試験では、金型の表面状態が測定結果に大きく影響すると考えられる。金型の試験片との接触面は、金型の接触面の長手方向にバフ仕上げを施している。金型の素材との接触部分である、金型の中央部分の顕微鏡写真(200倍)を図7に示す。観察には、顕微鏡(EPIPHOT 200：NIKON製)を用いた。図の縦方向が、素材が移動する方向となっている。したがって、バフ仕上げによる傷と垂直方向に材料が接触しながら移動することになる。傷の方法と材料の移動方向が垂直なので、潤滑剤は、試験中に接触部分外に流れにくく、潤滑効果としては良い方法に作用すると考えられる。

金型の試験片との接触面での表面粗さを、表面粗さ計(サーフコム 2900SD3-12：東京精密製)を用いて計測した。結果より、SKD11の方がFCD600よりも、表面が平滑であることがわかる。SKD11のRaとRzの平均は、それぞれ、0.436( $\mu\text{m}$ )と3.6( $\mu\text{m}$ )であった。また、FCD600のRaとRzの平均は、それぞれ、0.508( $\mu\text{m}$ )と4.0( $\mu\text{m}$ )であった。



a) SKD11      b) FCD600

図7 金型の表面状態

#### 3.3 実験条件

実験条件は、面圧を5~10MPaに変化させ、引抜速度を、5, 500mm/sに変化させて試験を行った。潤滑剤は、洗浄防錆油(プレトン R303P：スギムラ科学工業社製)を使用した。潤滑材の塗布量は、約0.1gとした。試験毎に金型表面をウエスで拭いて傷の有無を確認し、付着物がある場合は、取り除いて実験を行った。

### 3.4 実験の高精度化 (1) : 金型への圧縮荷重

上記の設計による治具を製作し、トライアルの試験を行った結果を図8に示す。図は、金型に作用している荷重を計測している2個のロードセルの荷重と時間の関係を示している。2個のロードセルの荷重が、約40%異なる結果となった。左右の金型の値が異なる場合は、試験片への圧力が不均一になっていることが考えられる。金型の油圧ジャッキで押されている面を確認したところ、金型の油圧ジャッキとの接触面に片当たりしている痕跡が確認された。

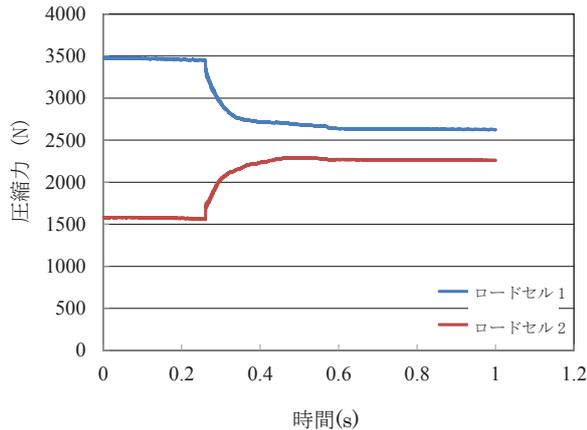


図8 球面座が無い時の圧縮荷重

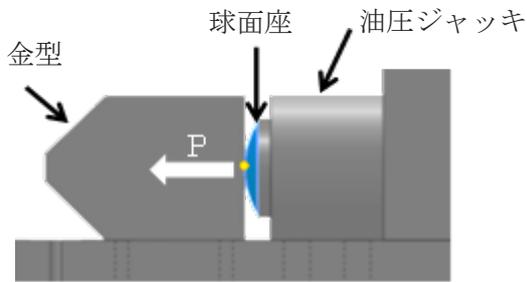


図9 球面座の設置位置

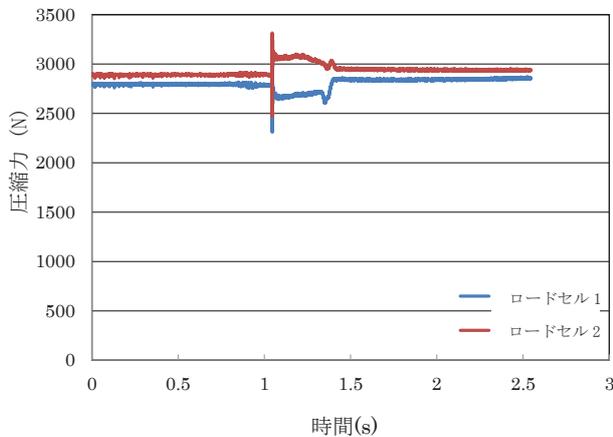


図10 球面座が有る時の圧縮荷重

そこで、図9に示すように、油圧ジャッキの可動面に球面座を配置することにより、圧力の均一化を行った。球面座は、1点に大きな荷重が作用するので、金型材料のSKD11を熱処理して使用した。球面座を使用した時の荷重と時間の関係を図10に示す。図8と図10を比較すると、押付け荷重の差が1/20になっており球面座金の導入によって圧縮荷重の均一化が達成できた。

### 3.5 実験の高精度化 (2) : 試験片引抜き荷重

過去の実験で得られたグラフ(引抜き速度 500mm/s, 面圧 5MPa)を図11に示す。

図11より、従来の試験方法によって得られたデータには、引抜き力に大きなノイズが乗っていることが分かる。例として、黒枠で囲った部分は、試験が終了しプレスが停止している時の状態を表しているが、±250Nの大きなノイズが乗っている。この原因としてアースの取り方や電工ドラムをアース線及び計測線に近い位置に電工ドラムを設置すると、ノイズが発生することが分かった。そこで、電工ドラムを実験機器より離して設置すること、アースの取り方をこれまでサーボプレスの配電盤から、ボルスタに変更しノイズの大幅削減を行った。ノイズ除去後の荷重の計測値を図12に示す。

図12より、引抜き力のグラフから大幅にノイズを除去できたことが分かる。試験機停止時のノイズを比較すると、除去前は±250N あったノイズが除去後は±15N にまで減少し、約94%のノイズが削減できた。

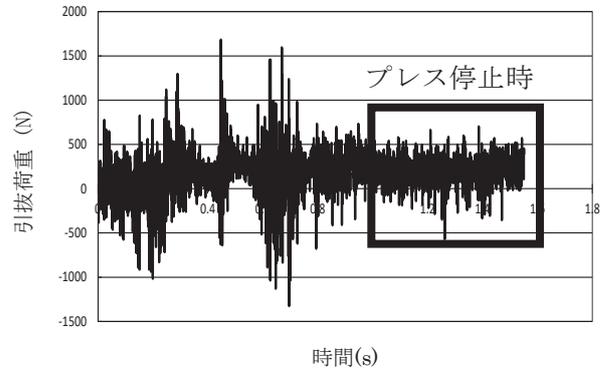


図11 ノイズ対策前の引抜き荷重<sup>3)</sup>

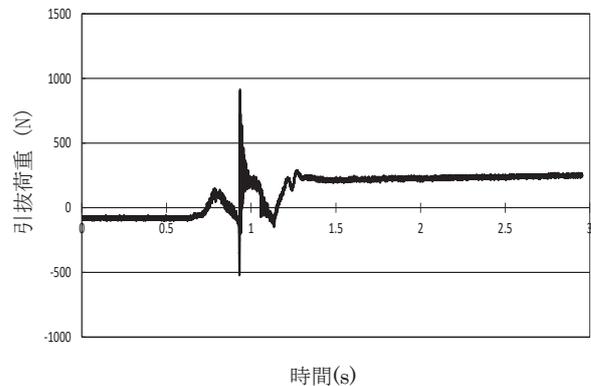


図12 ノイズ対策後の引抜き荷重<sup>3)</sup>

### 3.6 実験の高精度化 (3) : 摩擦係数のデータ処理

試験結果は図 13 に示した評価区間内の摩擦係数を平均して求めるが、0.04s 付近までは摩擦係数の変動が激しく、高精度での摩擦係数の計測が困難である。そこで、変動の周期がほぼ一定であることを利用して、移動平均法を用いて摩擦係数を求める。引抜き速度 500mm/s の場合、摩擦係数の振動周期がおよそ 3.5ms であるので移動平均の 1 区間を 3.5ms と設定した。移動平均法を用いて求めた摩擦係数を図 14 に示す。

本試験では図 14 に示した移動平均処理後の数値の平均値を摩擦係数として使用する。今回の例の場合、摩擦係数は 0.09 となる。他の試験条件でも同様の方法でデータを処理して摩擦係数を比較する。

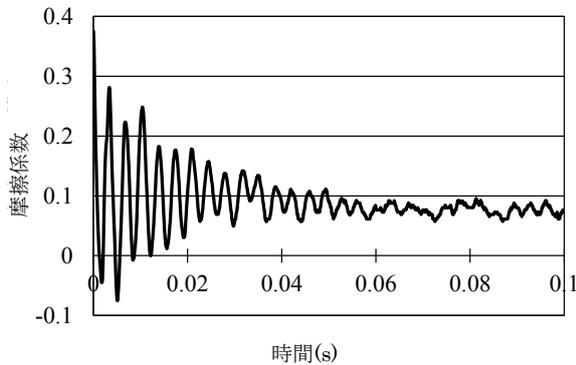


図 13 試験中の摩擦係数 (引抜き速度 : 500mm/s)

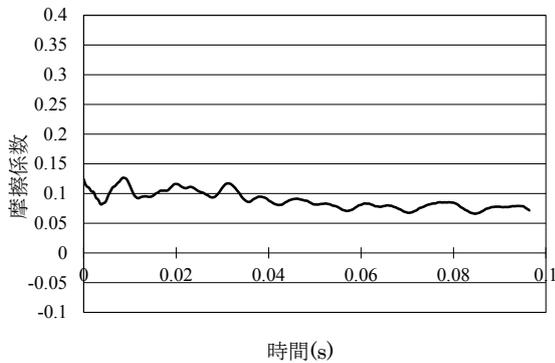


図 14 移動平均した試験中の摩擦係数  
(引抜き速度 : 500mm/s)

### 3.7 試験結果

引抜き速度が 5mm/s の摩擦係数と圧力の関係を図 15 に示す。圧延方向の方が圧延垂直方向より高い摩擦係数となり、0.16 であった。面圧 10MPa の場合は、試験片が変形したので、計測結果からは除外した。

一方、引抜き速度が 500mm/s の時の摩擦係数と圧力の関係を図 16 に示す。引抜き速度が 5mm/s の時と同様に、圧延方向が圧延垂直方向より高い摩擦係数となった。この条件で

は、試験片が変形すること無く結果が得られた。高圧力になっても摩擦係数は増加しない結果となった。

圧延方向の試験片における引抜き速度を変化させたときの摩擦係数と圧力の関係を図 17 に示す。500mm/s の方が約 0.3、摩擦係数が小さくなった。高速でかつ高面圧の値が最も小さい摩擦係数となった。

圧延垂直方向の試験片における引抜き速度を変化させた時の摩擦係数と圧力の関係を図 18 に示す。圧延方向の試験片の場合と同様な結果となったが、値は引抜き速度が高速になるほど小さい値となった。

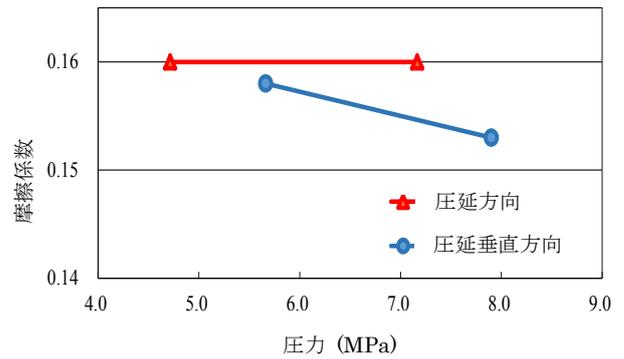


図 15 試験片の切出し方向を変化させた場合の圧力と摩擦係数の関係 (引抜き速度 : 5mm/s)

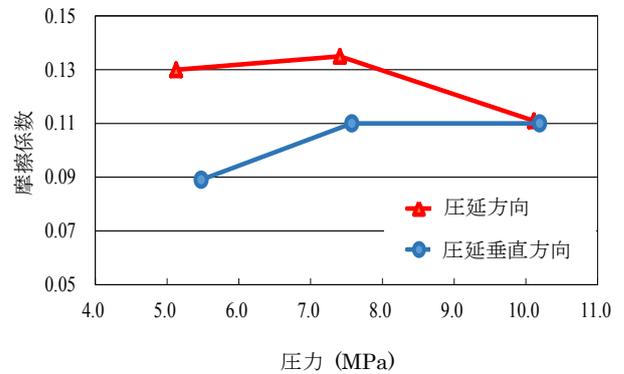


図 16 試験片の切出し方向を変化させた場合の圧力と摩擦係数の関係 (引抜き速度 : 500mm/s)

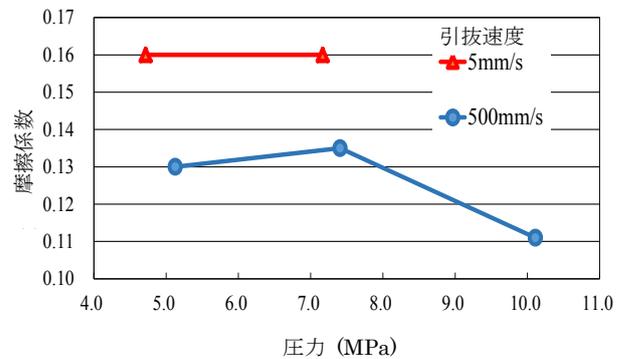


図 17 引抜き速度を変化させた場合の圧力と摩擦係数の関係 (圧延方向)

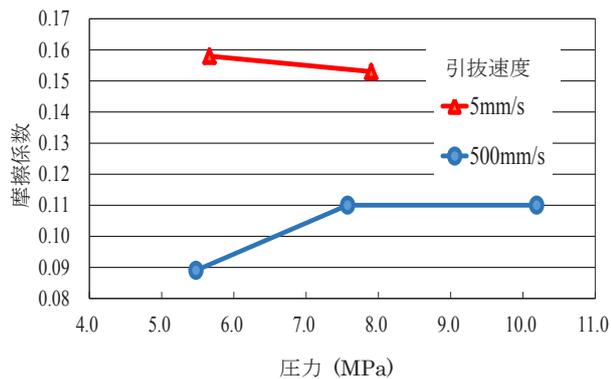


図 18 圧力と摩擦係数の関係 (圧延垂直方向)

各実験条件での摩擦係数と面圧の関係を図 19 に示す。面圧は、5~10MPa に変化させて計測した。金型材料 (2 種) と引抜速度 (2 条件) の合計 4 条件の実験を行った。SKD11 を使用し、引抜速度が 500mm/s の時のみ、試験片に変形なく引抜けたが、他の条件の場合は、試験片が変形した。これは、SKD11 の方が、表面粗さが小さいことが影響していると思われる。金型材料が FCD600 の場合、面圧の摩擦係数への影響は少なかった。引抜速度が上昇すると、摩擦係数が減少した。500mm/s の高速での摩擦試験の結果、摩擦係数は、約 0.15 であった。これは、自動車部品の板成形シミュレーションで、一般的に使用される値に近いことから、高速での成形域における摩擦係数が適用されていることが分かった。一方 SKD11 では、面圧が上昇すると摩擦係数が減少した。同じ面圧の場合、引抜速度が増加しても、両者の摩擦係数の差は少なかった。

SKD11 と FCD600 で同様の摩擦と面圧の関係の傾向が観察されず摩擦の発生メカニズムに差があると思われるが、その理由については、今後検討したい。

自動車の板成形部品を成形用金型の材料の一つである FCD600 の場合は、引抜速度の摩擦係数への影響が大なので、成形シミュレーションの解析精度を向上させるために、摺動速度に依存した摩擦モデルの構築が有効と思われる。

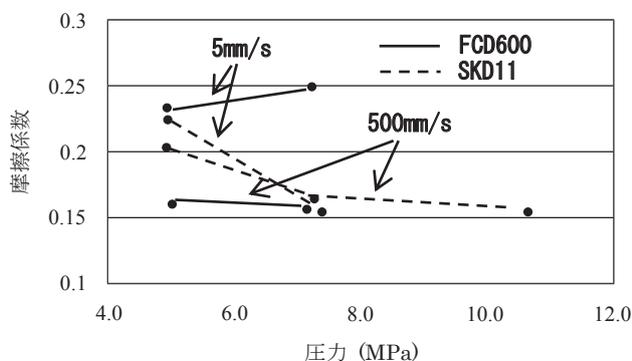


図 19 金型材料を変化させた場合の圧力と摩擦係数の関係

#### 4. 結言

- 1) 自動車部品のプレス成形速度でのサーボプレスを活用した高速摩擦試験方法を提案した。
- 2) 金型材料が FCD600 の場合、面圧の摩擦係数への影響は少なかった。引抜速度が上昇すると、摩擦係数が減少した。
- 3) 金型材料が SKD11 の場合は、面圧が上昇すると摩擦係数が減少した。引抜速度が増加しても、同じ面圧の場合は、摩擦係数の差が少なかった。
- 4) 金型材料が SKD11 の場合、FCD600 と比較して、引抜速度が 500mm/s の場合、高い面圧まで摩擦係数の計測が可能であった。
- 5) FCD600 と SKD11 では、摩擦係数と試験片・金型間の面圧の関係の傾向が異なっており、摩擦の発生メカニズムに差がある可能性があることが分かった。
- 6) 圧延方向の試験片より圧延垂直方向の試験片の方が摩擦係数が小さくなった。これは、試験片表面にある材料加工時の圧延跡の方向によって、圧延跡内の潤滑油の流動の難易が影響していると考えられる。
- 7) 材料の引抜速度の上昇に伴って、摩擦係数は減少した。このことから成形シミュレーションの精度向上のために、摩擦の速度を考慮可能なソフト開発が必要であると思われる。

#### 謝 辞

本研究は、公益財団法人天田財団の一般研究開発助成 (AF-2012021) により行われました。ここに深甚なる謝意を表します。

#### 参考文献

- 1) 高橋進：プレス技術，32-1 (2017)，60
- 2) 日本塑性加工学会：サーボプレス利用技術 研究成果報告書，(2011)，6
- 3) K.Ooki and T.Takahashi: Journal of Physics : Conference Series 734，(2016)，032040