



A. Yanagida

ホットスタンピングにおける潤滑特性と影響因子の検討

柳田 明*

1. まえがき

近年、環境問題に端を発する自動車の軽量化や安全性向上といった観点から高強度鋼板の使用が積極的に行われている。鋼板強度が 1000MPa を越えると複雑な形状へのプレス成形は困難になる。そこで、高温に加熱することで成形性向上と低スプリングバックを可能とし、1500MPa の強度を持つ部材を得るためホットスタンピングが実用化されている。著者らは、熱間平板引拔を用いた潤滑性評価試験機を開発し、SPHC 鋼、ボロン鋼を用いて、ホットスタンピングにおける潤滑特性を評価できることを示した¹⁾²⁾。試験片の表面性状、金型の表面粗さ、潤滑剤が摩擦係数に及ぼす影響を調査し、熱間鍛造用潤滑剤を用いることで摩擦係数をドライの 0.5 から 0.3 まで低減することを示した³⁾。

試験機の特性上、引抜き速度と試験片の温度設定を独立して行えないこと、圧縮力の微調整が困難なことから、引抜き速度や材料の変形抵抗と面圧の関係などの検討が十分になされておらず潤滑特性におよぼす個々の影響因子の検討が必要とされる。そこで低摩擦化技術、潤滑特性の影響因子の検討を行うために、個々の影響因子を分離した試験を可能とする熱間潤滑評価試験機を新たに開発し、引抜き速度、加工圧力、金型コーティング等が潤滑特性に及ぼす影響を調査した結果を示すとともに、潤滑剤の開発および鋼板のスケール厚さやめっき層が深絞り時のフランジ部における摩擦係数に及ぼす影響を、ブランクホルダに作用する水平力を測定することにより調査した結果を示す。

2. 熱間潤滑評価試験機の開発

2.1 評価試験機の構成

熱間潤滑性評価試験機の模式図、外観をそれぞれ図 1, 2 に示す。試験機は垂直圧力用の油圧アクチュエータ、通電ロール、張力装置から構成される。試験機的主要仕様は表 1 に示す。油圧アクチュエータにより負荷される押付け荷重の最大値は 20kN である。出口側引抜き装置はボールネジ装置により駆動し、その最大値は 10kN である。ロードセルにより押付け荷重 P および引抜き荷重 T_F が検出される。通電ロールは板材の走行に際し、ロールが走行速度と同じ速度で滑らかに回転することで安定した給電が可能

となっている⁴⁾。ロール径は 80mm で幅は 25mm とした。上下ロール間にばねを入れ接触圧を調整できる。給電電源は 5.0kW(最大 600A)を用いた。工具には平行部長さ 20mm、もしくは 15mm で工具肩 R5 の SKD61 を用いる。

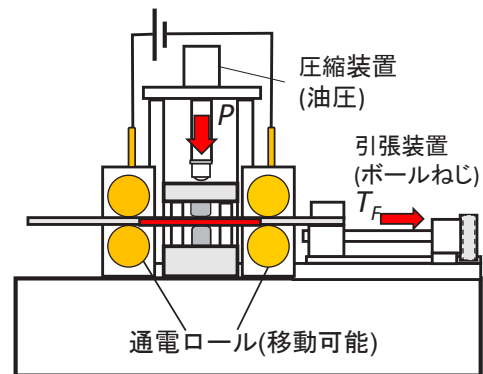


図 1 試験装置模式図

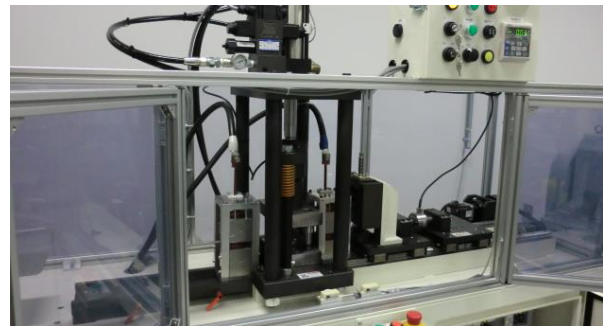


図 2 装置の外観

表 1 試験機特性

Compression load P	Max・20kN
Tension load T_F	Max・10kN
Stroke : compression, tension	50mm, 300mm
Tension speed V	Max・30mm/s

2.2 実験方法

通電ロールの配置は圧縮工具を(a)挟み込むように設置する方法(図 1)と(b)手前に設置する 2 通りの方法がある。(a)の方法では圧縮時に通電を停止する必要があるが均熱部が圧縮工具の直下にあるため、摺動温度を制御しやすい。(b)では、連続的に加熱された状態で試験を行うことがで

*東京電機大学 工学部 先端機械工学科 教授

きるが、通電ロール出側での温度低下が大きいため今回は (a) の配置を用いた。

試験片の温度は試験片側面に $\phi 1\text{mm}$ の穴をあけ K 熱電対を挿入して測定する。試験片は通電ロールに通し、端部を引抜き用チャックに取り付ける。通電を開始し、試験片を 920°C まで加熱し、加熱開始から 4 分間経過するまで温度を保持する。その後、電流を止め、一定速度で引抜きを行うと同時に垂直負荷を与えることで摩擦係数の測定を行う。摩擦係数 μ は引張荷重 T_F と圧縮荷重 P から式(1)を用いて算出する。

$$\mu = T_F / 2P \quad (1)$$

2.3 試験材料の昇温特性

試験材料に 22MnB5(0.22%C, 1.2%Mn, 0.002%B) 鋼板を用いた。Al-Si めっき(付着量 $80\text{g}/\text{m}^2$) が施してある。本稿ではすべてにおいてこの鋼材を用いるが一部、非めっき材も用いた。試験片サイズは幅 15mm 、厚さ 1.6mm 、長さ 450mm とした。電極間距離を 230mm とした。入側の加熱ロールの直下を基準として 100mm の位置を A 点(圧縮工具の入側)としそこから 20mm 手前の位置を B 点とし、試験片側面に K 熱電対を挿入した。図 3 に昇温特性を示す。電極間の中心に近い A 点の温度が B 点と比べてやや高い結果となったが摩擦係数を測定する範囲での均熱性は高い。

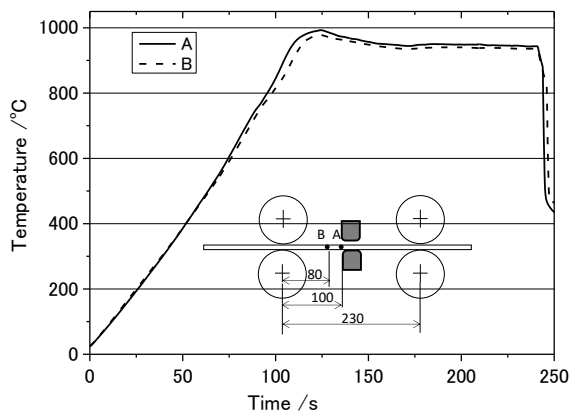


図 3 昇温特性($t=1.6\text{mm}$, $w=15\text{mm}$)

2.4 標準的な摩擦係数の測定例

測定例として、引抜き速度 $10\text{mm}/\text{s}$ で、圧縮荷重を 1.0kN (面圧 3.3MPa)として引抜きを行った。エメリー紙を用いて、引抜き方向に垂直に研磨し、工具粗さは $0.2\mu\text{m Ra}$ に調整した。図 4 に温度と荷重の測定例を示す。総加熱時間 240s で給電を停止し試験片を移動させる。2 秒後に加圧を開始する。図より移動時は $23^\circ\text{C}/\text{s}$ で冷却され、A 点は 890°C で工具へ導入され、工具に接触することで 500°C まで温度が低下する。B 点では入側で 840°C 、出側での温度 500°C となった。工具温度が上昇するので引抜き後の温度は B 点の方がわずかに高くなっている。圧縮荷重はや

や変動がみられるものの均一に負荷されていることがわかる。

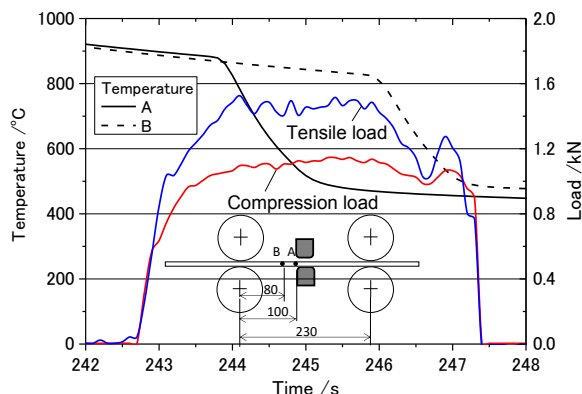


図 4 摺動時の温度と荷重の測定結果($V=10\text{mm}/\text{s}$, $P=1\text{kN}$)

3. 加工条件の影響(平板引き抜き試験)⁵⁾

3.1 試験条件

試験片は、2.3 節と同一の材料を用いた。電流を流し、試験片を約 2 分で 900°C まで加熱し、加熱開始から 4 分間経過するまで温度を保持した。4 分間経過後、電流を止め 6 秒間空冷を行う。その後、垂直負荷を与えると同時に試験片を一定速で引抜きを行う。摺動開始時の試験片温度は 800°C 程度となる。表 2 表に熱間潤滑評価試験の実験条件を示す。そこで、圧縮荷重は引抜き距離 $2\sim 26\text{mm}$ の平均が $0.5\text{kN}\sim 0.8\text{kN}$, $0.8\text{kN}\sim 1.2\text{kN}$, 1.2kN 以上の 3 種類になるように行った。 2.0kN 以上の荷重では引抜き時に試験が破断してしまつた。荷重変動がみられたが、代表荷重値として $0.7, 1.0, 1.5\text{kN}$ として表記する。平均面圧はそれぞれ、 $2.3, 3.3, 5.0\text{MPa}$ となる。工具平行部長さは 20mm とし、工具表面粗さは $0.10\mu\text{m Sa}$ とした。

表 2 実験条件

Compression load	0.5~2.8kN
Electric current	230~300A
Sliding distance	30mm
Sliding velocity	3, 10, 20mm/s
Distance between electrodes	230mm

3.2 結果と考察

(a) 引抜き速度の影響

図 5 に圧縮荷重 1kN における引抜き速度別の摩擦係数の一例を示す。この結果から、引抜き距離が 2mm 以降で摩擦係数が安定していく傾向にあることが分かる。また通電加熱がアルミめっきの合金化に及ぼす影響も調査する必要がある。図 6 に引抜き距離 $2\sim 26\text{mm}$ の摩擦係数の平均値 μ_m の速度による変化を示す。この結果より引抜き速度が遅いと摩擦係数が低くなるのが分かる。これは引抜き速度が遅いため、試験片温度が低下したことが原因とも考えられる。この結果からある一定以上の速度になると摩

摩擦係数が一定になることが分かる. 図7に引抜き後の工具表面写真を示す. 引抜き速度 10mm/s, 3mm/s とともに表面にアルミめっき層が付着していることが確認された. 光の当たり方により見え方が異なっているが, 10mm/s の方がその付着量は多い. 図8に引抜き後の試験片の表面写真を示す. いずれの速度においてもスクラッチ痕が確認され, 掘り起し現象による摩擦の増加が摩擦係数の引抜き速度の依存の主たる原因ではなく, 引抜き速度が遅いと工具-材料界面の温度が低下するため, アルミめっき層の接触界面での状態が異なるために摩擦係数が変化するのではないかと推測される.

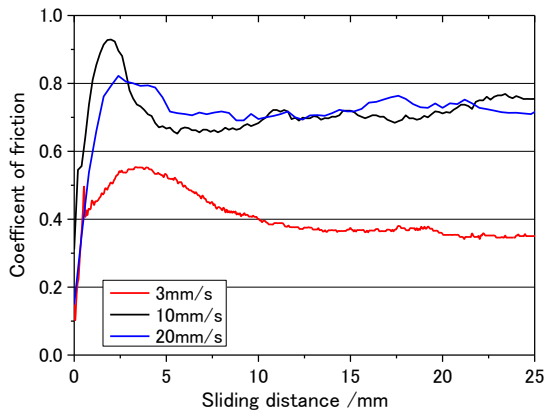


図5 摩擦係数と引抜き距離の関係

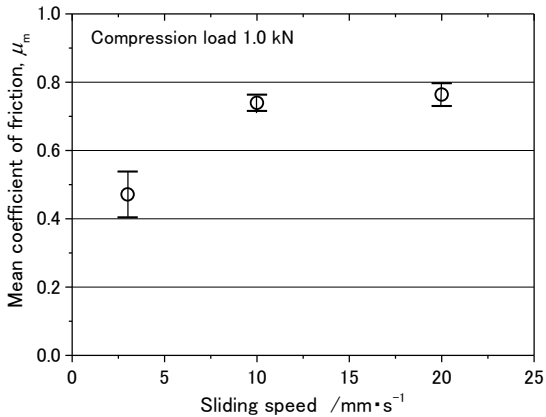
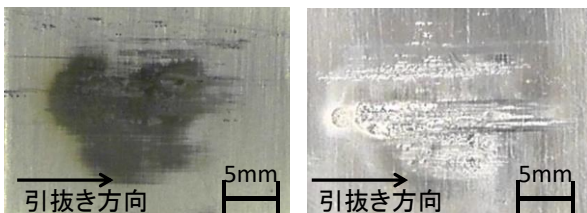


図6 引抜き速度による摩擦係数の関係(2~27mm)



(a) 10mm/s (b) 3mm/s

図7 摺動後の工具表面

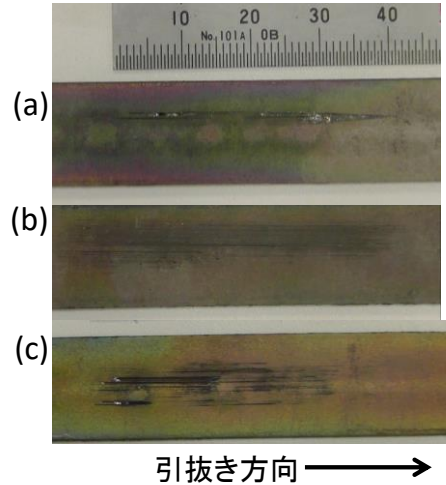


図8 引抜き後の工具表面 引抜き速度 (a) 3mm/s, (b) 10mm/s, (c) 20mm/s

(b) 圧縮荷重の影響

図9に圧縮荷重の違いによる摩擦係数の変化を示す. 摩擦係数は引抜き距離 2~26mm の摩擦係数の平均値である. この結果より圧縮荷重による摩擦係数の変化は少ないことが分かる.

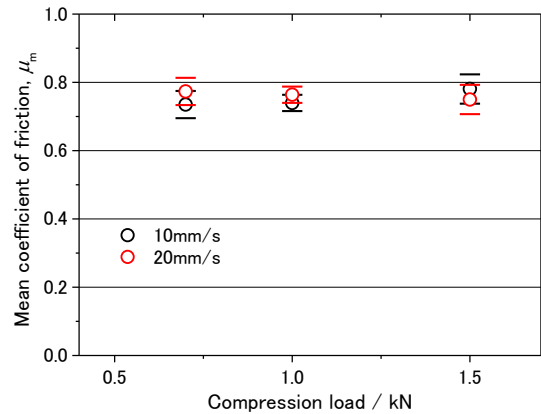


図9 圧縮荷重と摩擦係数の関係

(c) 試験片幅の影響

測定された摩擦係数は過去に著者ら^{1,2)}が異なる装置および試験片寸法(幅 20mm, 板厚 2.0mm)で測定した引抜き速度 10mm/s, で同程度の圧縮圧力の場合と比べて高い結果となった. 工具の引抜き方向長さとして試験片の幅が 4:3 過去の 1:1 に比べて小さいことが起因していると考えられたため, 板幅 20mm での試験を行った. 図10に面圧を約 2.3MPa に揃えた時の引抜き距離と摩擦係数の関係を示す. 図14より板幅を広くし, 工具の平行部長さと同等にすることで摩擦係数低く下している. 引抜き後のアルミめっきの工具への凝着幅が 15mm と 20mm で大きな違いがなかったことが確認されたことから, 板幅が狭いと凝着の影響が大きく表われ摩擦係数が高くなると考えられる.

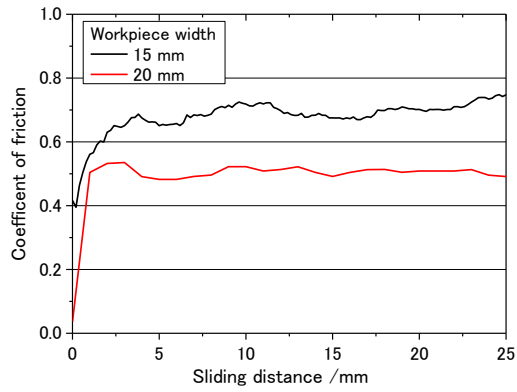


図 10 摩擦係数と引抜距離

4. 金型コーティングの影響⁶⁾

金型に付着したアルミめっきは寸法精度影響を及ぼすため金型の再研削が必要である。コーティングが付着物に及ぼす影響を調査した。

4.1 実験方法

工具平行部 15mm の工具(0.1 μ mSa)を用いて引抜き速度 10mm/s, 圧縮荷重を 2.8kN, 摺動距離を 70mm とした。試験片は 2, 3 章と同じである。工具の再研磨は行わずにそのまま次の試験を行う。コーティング厚は 2 μ m で AlCrN, DLC-Si の表面粗さはそれぞれ 0.12, 0.13 μ mSa となった。

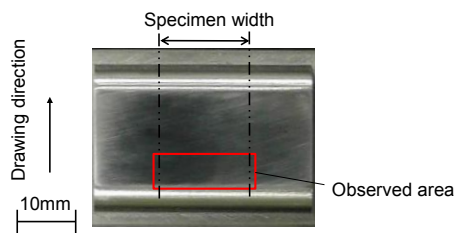


図 11 付着量の測定位置

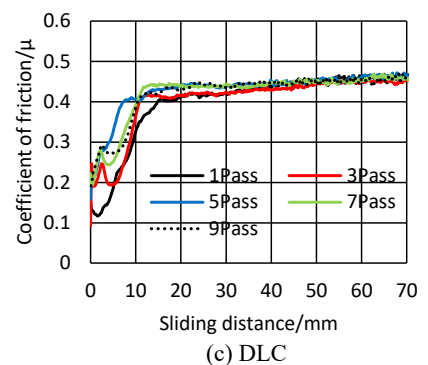
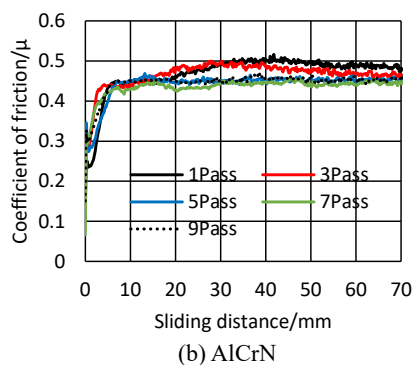
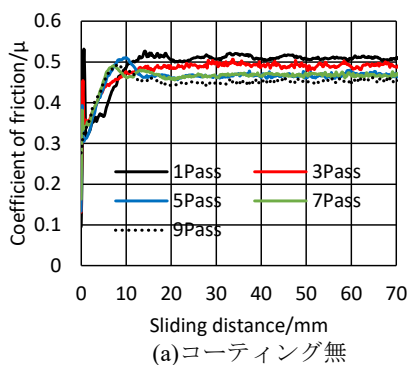


図 12 摩擦係数の測定結果

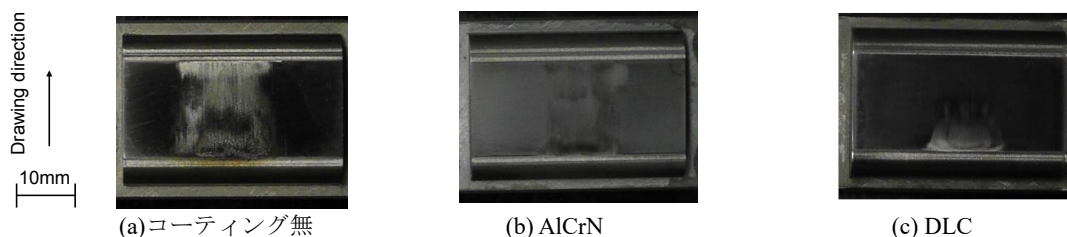


図 14 9パス加工後の工具表面の外観

1, 3, 5, 7, 9 回目の試験時には、レーザ顕微鏡(KEYENCE: VK-X150)により工具表面の凝着物の厚さから付着量を測定する。測定部は工具入側部の 17.6mm 幅, 7.5mm 長さ 2 を 10 倍の対物レンズを用いて測定した。測定位置を図 11 に示す。

4.2 試験結果と考察

図 12 に摩擦係数の測定結果を示す。コーティングなしと AlCrN では 15mm 以降で定常状態となり 1, 3 パスでは 0.5 程度となったが 5 パス以降では 0.47 に低下した。また、定常状態では DLC においてはパス数によらず摩擦係数は 0.4~0.45 となった。図 13 に入側部での凝着量を示す。図 13 からコーティングなしでは 1 パスで工具に多くの凝着物が観察され試験パス数に伴い増加した。コーティングを施すことで凝着量が減少した。図 14 に 9 パス終了後の工具の外観を示す図 14 よりコーティング無し, AlCrN では工具の全体に凝着物が見られるのに対して, DLC では、入側部のみに凝着が観察され, DLC は凝着が起りにくく, それにより摩擦係数をわずかではあるが低下させることが出来ると考えられる。

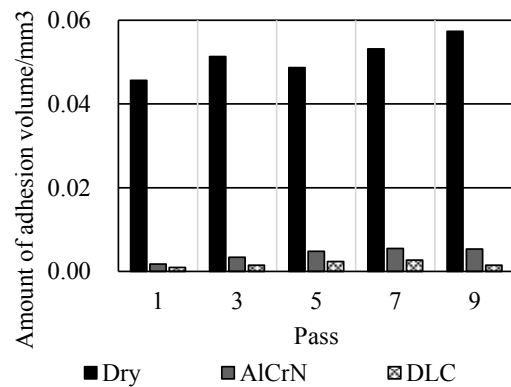


図 13 付着量の変化

5. ホットスタンピング用潤滑剤の開発⁷⁾

成形荷重の低減や成形性、工具寿命の改善を目的としてホットスタンプ用の潤滑剤の開発を行った。

5.1 摩擦係数の測定

潤滑特性評価試験装置は文献 1),2) で用いた装置であり、2~4 章とは異なる。市販の水溶性熱間鍛造用潤滑剤をベースとして固体潤滑剤として膨潤性マイカ、非膨潤性マイカ、メラミン酸縮合物、チタン酸カリウムおよびセルロース粉末を加えた。固体潤滑剤の含有量は 5% とした。一覧を表 3 に示す。工具は、幅方向に研磨し、工具表面粗さを 0.2 μmRa とした。試験材料は厚さ 2mm、幅 20mm、長さ 2000mm の Al-Si めっき 22MnB5 鋼板を用いた。加熱炉設定温度(赤外線イメージ炉)を 720 $^{\circ}\text{C}$ とすることで鋼板は 970 $^{\circ}\text{C}$ に加熱され、炉から出た後に放冷により工具入口部では 700 $^{\circ}\text{C}$ 程度となる。引抜き速度 10mm/s で圧縮荷重を 3.5kN とし、引抜き距離 70mm で引抜き試験を行った。

固体潤滑剤濃度 5% を含有させたホットスタンピング用潤滑剤を用いた場合の結果を図 15 に示す。図 15 より摩擦係数は潤滑剤に依存しており、すべり距離が約 20mm から 40mm までほぼ一定であった。すべり距離が 40mm を超えると、各潤滑剤の摩擦係数はすべり距離とともに増加した。図 16 には 20mm から 40mm の間の平均摩擦係数を示す。図 16 より、各潤滑剤ともにベース潤滑剤 A よりも低くなった。また摩擦係数が固体潤滑剤に依存していることが分かった。特に、膨潤性マイカを加えた潤滑剤 A1 を用いたときに平均摩擦係数が最も低く 0.17 の値になった。

表 3 潤滑剤の成分

Lub	Compositions
A	Hydrophilic polymer 1 + Mineral salt
A1	Lubricant A + Swellable mica
A2	Lubricant A + Non-swellable mica
A3	Lubricant A + Melamine cyanuric acid
A4	Lubricant A + Potassium titanate
A5	Lubricant A + Cellulose powder

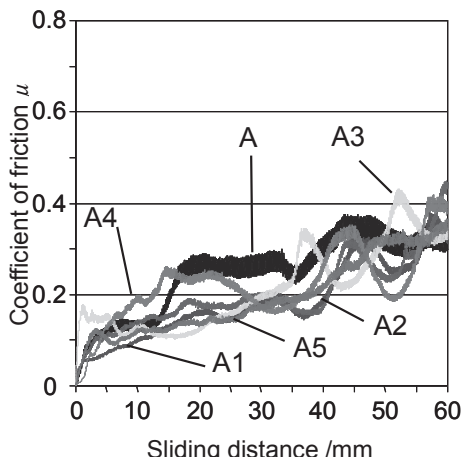


図 15 固体潤滑剤濃度 5% を含有した場合の摩擦係数の変化

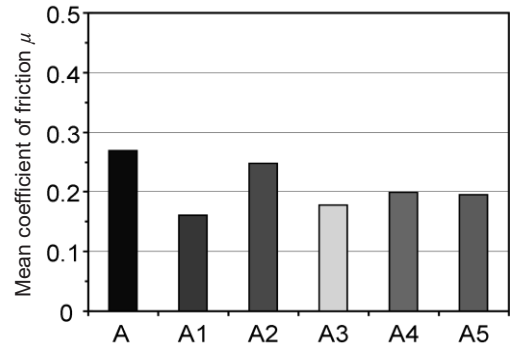


図 16 固体潤滑剤濃度 5% を含有した場合の平均摩擦係数

5.2 熱間深絞り試験

前項で低い摩擦係数となった潤滑剤 A1, A2 を用いて熱間深絞り試験を行った。ブランク径は 80mm、板厚は 1.6mm を用いた。工具形状に関しては 6 章に示す。960 $^{\circ}\text{C}$ に熱した加熱炉に試験片を 240s 保持し、試験片を 10s 以内に試験機にセットし加工を行う。潤滑剤塗布の場合、ブランクホルダ及びダイ表面を 150 $^{\circ}\text{C}$ に加熱し潤滑剤を噴霧し乾燥させ潤滑被膜を付着させる。プレス中の荷重と変位をロードセルと変位計にて測定する。試験片がパンチに触れた点を加工開始点とし、36mm/s で加工する。異なる潤滑剤を用いて成形性を評価した。この時、絞り比 $\alpha=1.6$ 、BHF=10kN、ストローク 15mm とした。図 17 に半径流入量を示す。潤滑剤 A1 の流入量が大きく、図 16 の結果と同様に潤滑剤 A1 は高い潤滑効果を示した。

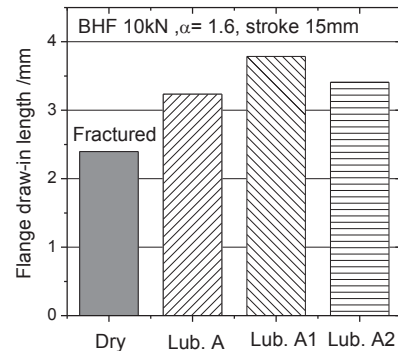


図 17 潤滑剤とフランジ流入量の関係

6. 熱間深絞り試験による摩擦係数の測定⁸⁾

平板引抜き試験では、塑性変形が起きない弾性域での摩擦係数であり、実際の加工中の界面状態とは異なる。よって深絞り中の鋼板のスケール厚さやめっきが深絞り時のフランジ部における摩擦係数に及ぼす影響を、ブランクホルダに作用する水平力を測定することにより調査した。

6.1 試験方法

(a) 試験装置

摩擦係数の算出方法を図 18 および式(2)に示す⁹⁾。ブランクホルダは図 18 のように分割されており、矢印のよう

な摩擦成分力が働く。摩擦力の全周にわたる総計を F とし、分割面に直角な方向の力 F_v は、摩擦係数 μ 、しわ押さえ力 H とするとき (2) 式のように表される。 F_v は分割されたブランクホルダ間に設置した 2 つのロードセルで測定しており、ブランクホルダとブランクホルダガイドのクリアランスは 0.2mm とし摺動摩擦を低減させるために潤滑剤を塗布している。

$$\mu = \frac{F_v \cdot \pi}{H} \quad (2)$$

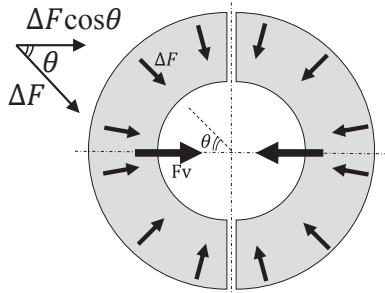


図 18 フランジに働く力

試験装置の概略図を図 19 に示す。しわ押さえ力(BHF)を負荷するサブジャッキとしてエアシリンダを用いた。最大時出力(1.96kN:空気圧 1.0MPa/1 機)であり、計 8 機配置し、最大出力は約 15.7kN となる。図 19 に示すようにしわ押さえ付与まではブランクホルダと試験片が触れ、急激な温度低下を抑えるためにピンにより支持している。加工速度は 36mm/s とした。熱間深絞り試験機はパンチ径 46mm、ダイス径 50mm、ダイス肩半径 10mm、パンチ肩半径 7mm とした。プレス中の荷重と変位をロードセルと変位計にて測定し、加工後試験片の直径を計測する。熱間深絞り試験機の概略を図 2 に示す。試験片は板厚 1.4mm、直径 80mm (絞り比 $\alpha=1.6$) の非めっきおよび Al-Si めっき 22MnB5 鋼板を用いた。試験はドライ条件で行い、しわ押さえ力は感度の変化を見るために 3.1kN、6.3kN の二種類で行った。

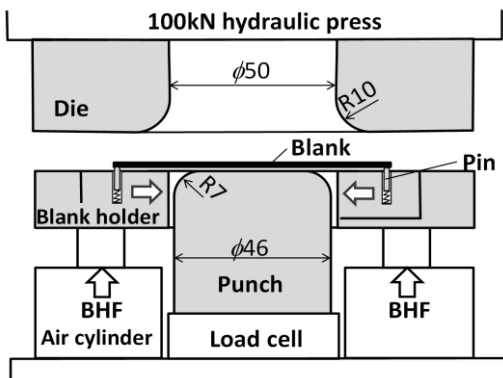


図 19 熱間深絞り試験金型の概略図

(b)加熱条件

2通りの加熱方法を用いた。1つは 950°C に熱した加熱炉で試験片を加熱する。もう一方はスケールの成長を抑えるために加熱炉内であらかじめ予熱させた、直径 100mm、厚さ 10mm のステンレスプレート(SUS304)で挟み込んで加熱を行った。炉から取り出した 7s 後にガラス粉末をふりかけることで冷却中のスケールの成長を抑制¹⁰⁾させ、スケール厚さを測定した。スケール厚さは抑制あり、無しでそれぞれ 5 μ m、26 μ m 程度であり、スケールの影響による摩擦係数の変化を観察することが出来る。いずれも 240s 保持し、試験片を炉から取り出した後 8s 以内に試験機にセットし加工を行い 10s 下死点保持する。搬送中の平均冷却速度は約 22°C/s であり、試験は炉から取り出して 7~8s 程度で加工が開始されていることからおよそ 800°C で加工が開始されている。

6.2 結果と考察

図 20 に摩擦係数-ストローク線図を示す。摩擦係数が急激に増加し、ストロークが増加していくにつれ安定していくことがわかる。急激な増加は静止摩擦によるものと考えられる。ストローク 10mm 以降に摩擦係数が下がっているのは、試験片が加工中に分割方向が長軸となるような楕円形となり徐々に水平力が下がるためか、合力 F_v が低下しているためだと考えられる。

摩擦係数の変位が安定しているストローク 5~10mm から摺動時の平均摩擦係数を求め、図 5 に示す。全体を通して Al めっき材に比べスケールがある場合に平均摩擦係数が低くでている。BHF3.1kN で酸化抑制を行った場合に平均摩擦係数がより低くなった。深絞り時のフランジ部のスケールが成形することで細かくなり潤滑効果が観察され、スケール厚さが薄くなるとより微細になり、効果的に潤滑剤として作用したと考えられる。また、BHF6.3kN では摩擦係数の減少が BHF3.1kN に比べて早い段階から減少しており、表面状態の差が定性的ではあるが得ることが出来た。この理由は明らかではないが、半割ブランクホルダの傾くことによりロードセルによって計測される水平力が減少することが原因であると考えられる。

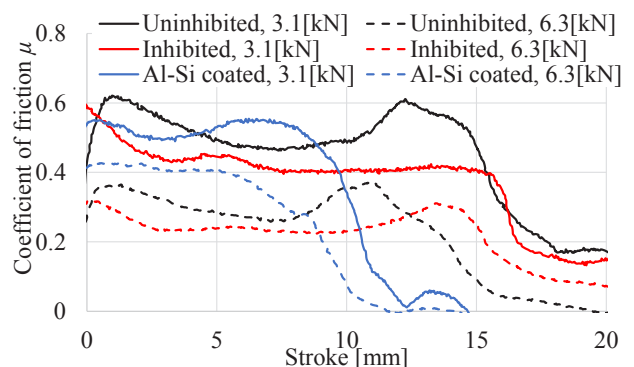


図 20 摩擦係数-ストローク線図

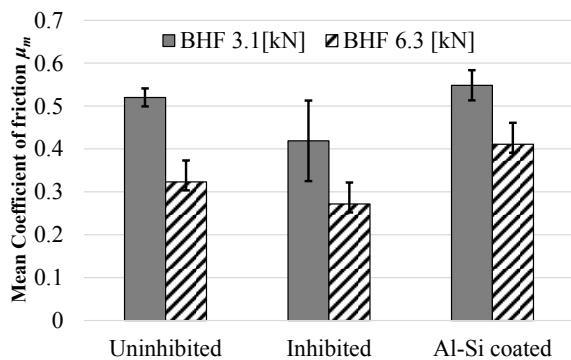


図 21 各表面状態での平均摩擦係数

7. まとめ

ホットスタンピングにおける潤滑特性を評価するために通電加熱を用いた熱間平板摺動装置を開発した。加熱装置は加熱後、すみやかに試験片を移動させることが可能な機構とし、熱間摩擦係数を種々の温度履歴・加工条件で実施することが可能である。引抜き速度、圧縮荷重、金型コーティングが摩擦係数に及ぼす影響を調査し、以下の知見を得た。

- ・引抜き速度が遅いと摩擦係数が低下し、狭い範囲ではあるが、圧縮荷重による摩擦係数の変化が小さい結果が得られた。
- ・工具をコーティングすることで Al-Si めっきの付着を低減ができ、DLC を施すことでドライ条件下で 0.5 から 0.45 に摩擦係数を低減させることができる。
- ・ホットスタンピング用の潤滑剤を開発し、摩擦の低減により成形性を向上できることを示した。
- ・熱間深絞りでのフランジ部に発生する力を測定することで摩擦係数を測定し、スケールが薄いと摩擦係数が

低下し、平板引抜きと同様に Al-Si めっきの方が非めっき材よりも高い摩擦係数となった。

謝 辞

本研究は、公益財団法人天田財団(当時: 天田金属加工機械技術振興財団)からの平成 24 年度一般研究開発助成(AF-2012022)により実施した研究に基づいていることを付記するとともに、同財団に感謝いたします。

参考文献

- 1) A. Yanagida and A. Azushima: Annals of the CIRP, 58-1(2009), 247-250.
- 2) A. Yanagida, T. Kurihara and A. Azushima: Journal of Materials Processing Technology, 210-3, (2010), 456-460.
- 3) A. Yanagida, Y. Tanaka & A. Azushima: Proc. 3rd CHS2, (2011), 369-376.
- 4) Y. Asano, T. Nishi, and J. Yanagimoto, ISIJ International, 42-10 (2002), 1112-1118.
- 5) 向井智徳・佐々木寛法・柳田明, 平成 28 年度塑性加工春季講演会, (2016), 59-60.
- 6) A. Yanagida, T. Mukai, K. Matsumoto, Procedia Manufacturing 15 (2018), 1041-1046.
- 7) K. Uda, A. Azushima, and A. Yanagida: Journal of Materials Processing Technology, 228 (2016), 112-116
- 8) H. Sasaki, T. Mukai and A. Yanagida: Key Engineering Materials, 716 (2016), 184-189.
- 9) Y. Kasuga, K. Yamaguchi and K. Kato: Bulletin of JSME, 11-44 (1967), 354-360.
- 10) H. Utsunomiya, S. Doi, K. Hara, T. Sakai and S. Yanagi: CIRP Annals 58-1 (2009), 271-274.