



A. Yanagida

ホットプレスでの潤滑特性の研究

柳田 明*

1. 諸言

近年、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。これを克服するために高強度鋼板が開発されてきたが、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、材料を高温に加熱することで成形性の向上とスプリングバックの低減を可能とし、1500MPaの強度を持つ部材を得ることが出来るホットスタンピング、あるいはホットプレスと呼ばれる成形法が実用化されている。この成形法では鋼板が900°C前後のオーステナイト域の温度に加熱され、金型に移動後、冷却された金型で成形し、金型内での冷却にてマルテンサイト変態による高強度化が行われる¹⁾。ホットプレスの最適化には、多くのプロセスパラメータが必要とされ、鋼板の成形性²⁾、温度に対する機械的特性^{3,4)}などの研究が行なわれている。しかし、工具の摩耗や焼付きなどの問題から潤滑特性の研究が必要とされているにも関わらず、世界的にもホットプレスのトライボロジ的な研究は少なく、SRVのような摺動型の試験⁵⁾に留まっていた。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鋼の熱間摩擦係数を測定した⁶⁾。ホットプレスでは加熱による酸化を抑制するため、アルミや亜鉛めっきを施した素材を用いる場合とコーティングなしの素材を用いる場合があるが、著者らは、Al-Si めっき鋼板(22MnB5)のドライ、潤滑条件での熱間での摩擦係数を測定した⁷⁾。Dessain らは円筒金型引拔きによる試験機を開発し、Al-Si めっきホットプレス鋼板(Usibor1500)のドライ条件下での摩擦係数を測定し⁸⁾、Hardell らはAl-Si めっき、非めっきホットプレス鋼板と未処理および表面処理を施した金型間の摩擦係数の測定を行った⁹⁾。

金型表面粗さやスケール厚さのようなトライボロジー因子が摩擦係数に及ぼす影響に関する報告は見られない。本報告では、Al-Si めっき、非めっき22MnB5鋼板のスケール厚さおよび、金型の表面粗さ、金型温度が摩擦係数に及ぼす影響をドライ・潤滑条件下の摩擦係数の測定により調査した結果を既報のデータ^{10,11)}を含めて示す。

2. 評価試験機の概要

2.1 評価試験機の構成

熱間潤滑性評価試験機の概要を図1に示す。この試験

機は油圧アクチュエータ、加熱炉、張力装置から構成される。この試験機の主な仕様は表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200kNである。加熱炉としては、加熱部長さ960mmの赤外線イメージ加熱炉を使用し、加熱温度は、デジタル調節計によって制御され、1100°Cまで設定することができる。炉内には雰囲気ガスとしてアルゴンガスを導入し、加熱された試験片の酸化を制御させることができる。出口側引抜き装置はボールネジにより駆動し、その最大値は20kN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。

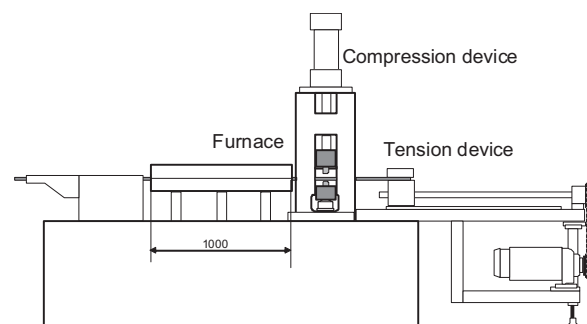


図1 試験装置模式図

表1 試験機特性

Compression load P	Max・200kN
Tension load T_F	Max・20kN
Tension speed V	Max・30mm/s
Temperature T_f	Max・1100°C

2.2 金型

金型はベース(S50C)とダイ(SKD61)を2分割できる形式とした。引抜き部の長さは20mmとし、コーナーRは5mmとした。金型の冷却の効果を調査するために、ベースおよび、ダイに冷却溝を有するものを作成した。その寸法を図2に示す。チラーにより15°Cの冷却水を循環させることによりダイを冷却する。また、通常の試験には、冷却溝が無いベース及びダイを用いて試験を行う。

2.3 試験方法

試験材料を張力装置にセットし、アルゴン雰囲気制御した赤外線瞬間加熱炉により試験材料を加熱する。加熱炉温度 T_f で試験片温度が均一になるまで保持して、試験材料を一定速度 V で移動させる。温度均一部が金型を通過した後、圧縮荷重 P がかかるように設定する。

摩擦係数は圧縮荷重 P と引張り荷重 T_F より算出され、

*東京電機大学工学部機械工学科 准教授

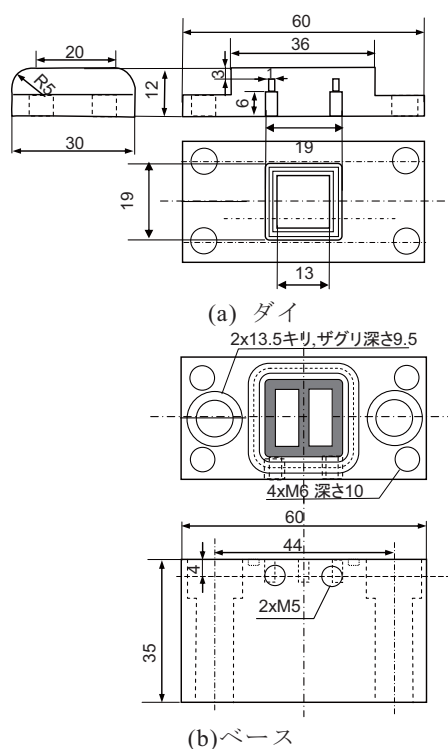


図 2 冷却金型寸法

次式で示される。

$$\mu = \frac{T_F}{2P} \quad (1)$$

2.4 試験材料の加熱特性

試験材料に Al-Si めっき(めっき材)と非めっき(裸材)22MnB5(0.22%C, 1.2%Mn, 0.002%B)鋼板を用いた。試験片サイズは幅 22mm, 厚さ 2.3mm, 長さ 2000mm とした。試験材料(裸材)を加熱炉内で加熱し材料温度が一定温度になった後に実験を行う必要があるため、加熱炉内での試験片の温度特性を調べた。加熱炉温度 T を 720°C と設定し、1 分間で目標温度に到達させ、その温度を維持するように制御した場合の試験片の温度変化を測定した。また、実際に金型に入り引抜かれる時の温度を調べるために、試験片が一定温度に到達後、速度 10mm/s で金型へ移動させた場合の試験片温度と移動距離の関係も測定する。なお、試験片の測定点は加熱炉出口から 150, 300, 470mm の 3 点で、それぞれの点に K 熱電対をスポット溶接させて試験材料の温度変化を測定した。それぞれの測定結果を図 3 に示す。図 3a より、加熱開始から

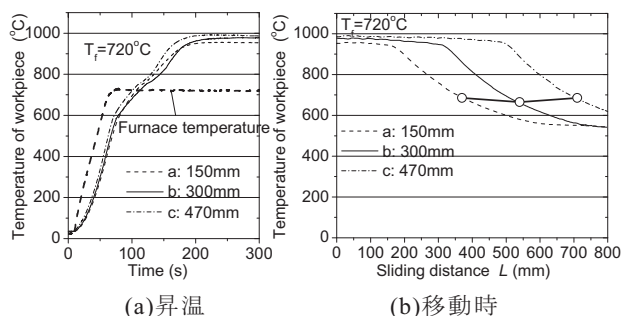


図 3 加熱特性(非めっき 22MnB5 鋼板)

200s 後には加熱炉内の 3 点で温度が均一になり、 970°C 程度で十分オーステナイト化している。また図 3b より、試験材料が金型へ移動する間に温度が下がり、引抜き時の温度は加熱炉温度 T_F 前後になっている。

3. 実験条件

加熱炉の設定温度 T_F は 720°C とし、引抜き速度 10mm/s で、押付け荷重を 3.5kN として引抜きを行った。

a) スケール厚さおよびめっき層 炉内のアルゴンの流量をおよび、保持時間を 180 - 300s で変化させることで裸材のスケール厚さを 10, 30, 50, 80 μm に調整した。めっき材は保持時間 180s で Ar ガス圧は 0.1MPa とした。加熱条件とスケール厚さ、表面粗さの一覧を表 2 に示す。加熱後のめっき材のめっき層の断面組織を図 4 に示す。

図 4 より Al-Si めっき層は加熱中に熔融せずに、5 層から成る Fe-Al 合金相となっている。このめっき層の組成は耐食性、塗装性に優れており¹²⁾、実プロセスはこのような表面状態で行われている。

表 2 加熱条件とスケール厚さと表面粗さ

	Al-Si	裸材			
Arガス圧 /MPa	0.1	0.2	0.1		
総加熱時間 /s	240	240	240	280	360
スケール厚さ/μm	-	10	30	50	80
表面粗さ, Ra/μm	2.87	0.99	1.36	1.45	1.62

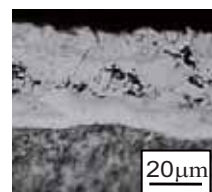


図 4 Al-Si めっき 22MnB5 材の加熱後の組織写真

b) 工具表面粗さ エメリー紙を用いて、引抜き方向に対して垂直に研磨した。工具粗さは $R_a = 0.07, 0.2, 0.5\mu\text{m}$ に調整した。工具表面プロファイルを図 5 に示す。

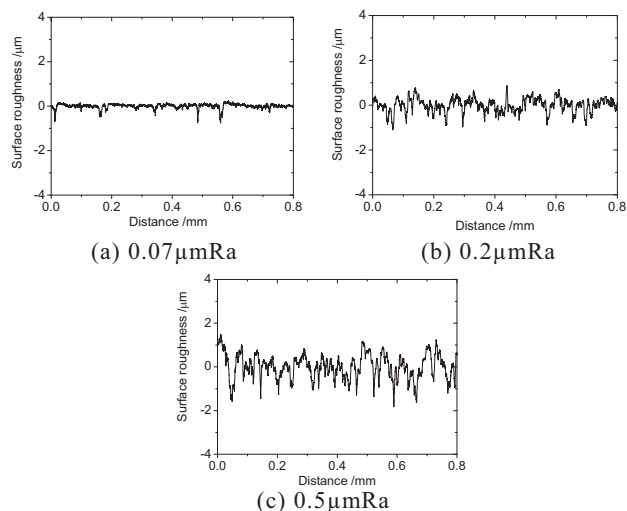


図 5 工具表面粗さ

c)潤滑条件 試験は、ドライおよび潤滑条件下で行った。潤滑剤は熱間鍛造用白色系潤滑剤を用いた。工具を150℃に加熱し、20%に希釈した潤滑剤を吹き付けることで、工具表面に付着させた。

d)金型温度 裸材において、スケール厚さ30μm、工具表面粗さ0.07、0.2μmRa、ドライ条件で冷却溝を有する金型を用いて試験を行った。

4. 実験結果と考察

4.1 裸材での結果

4.1.1 ドライ条件での摩擦係数¹⁰⁾

図6に0.2μmRaの表面粗さをもつ工具を用いてドライ条件でスケール厚さ30μmの試験片を引抜きしたときの摩擦係数と引抜き距離の関係を示す。図6から引抜き距離が15mmを越えると摩擦係数はほぼ一定であることがわかる。他の表面粗さの工具の場合もこの図と同様に摩擦係数は引抜き距離20mmを越えるとほぼ一定であった。この結果から摩擦係数の測定値は式(2)に示すように、引抜き距離20mmから40mmの平均値とし、平均摩擦係数値と定義することにした。

$$\mu_m = \frac{1}{L_2 - L_1} \int_{L_1}^{L_2} \mu dL \quad (2)$$

ここでは、 $L_1=20\text{mm}$ 、 $L_2=40\text{mm}$ である。

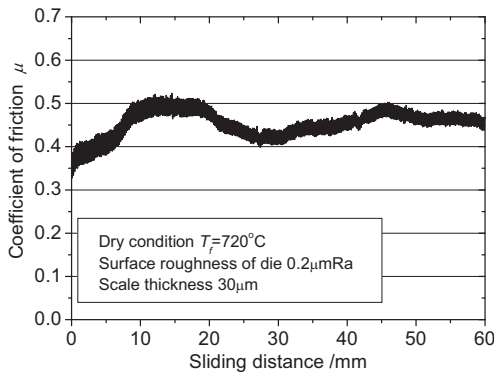


図6 摩擦係数と引抜き距離の関係(裸材，ドライ)

図7に各工具表面粗さにおける摩擦係数とスケール厚さの関係を示す。工具表面粗さが0.2、0.5μmRaのときは、摩擦係数がスケール厚さに影響を受けずにほぼ一定であることを示している。つづいて、工具表面粗さが

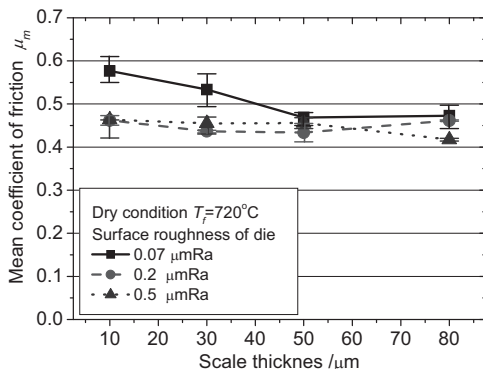


図7 スケール厚さと摩擦係数の関係(裸材，ドライ)

さが0.07μmRaのときはスケール厚さが50μm以下においてスケール厚さが薄くなるにつれて摩擦係数は増加している。

図8に工具粗さ0.07、0.5μmRaでスケール厚さ10、50μmの試験条件での引抜き後の試験片表面写真を示す。図8より工具粗さ0.07μmRaでスケールが薄いとときに摩擦係数が増加するのは、深いスクラッチ痕に起因していることが分かる。

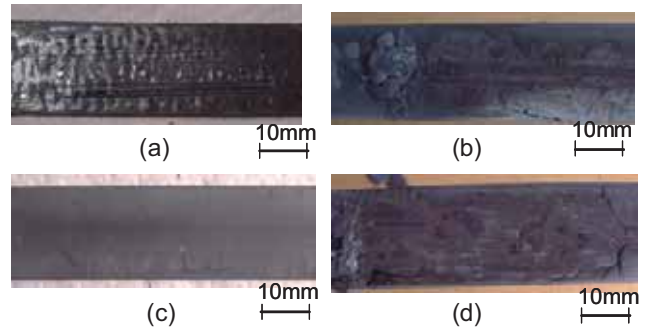


図8 引抜き後の表面写真(裸材，ドライ)
工具表面粗さ (a), (b) 0.07, (c), (d) 0.5μmRa
スケール厚さ: (a), (c) 10μm, (b), (d) 50μm

4.1.2 潤滑条件下での摩擦係数¹⁰⁾

図9に0.2μmRaの表面粗さをもつ工具を用いて潤滑条件下でスケール厚さ30μmの試験片を引抜きしたときの摩擦係数と引抜き距離の関係を示す。この図から引抜き距離が15mmを越えるとドライ条件と同様に摩擦係数はほぼ一定であることがわかる。図10に各工具表面粗さにおける摩擦係数とスケール厚さの関係を示す。

工具表面粗さが0.2μmRaおよび0.5μmRaのときは、スケール厚さが50μmまでは摩擦係数がスケール厚さに影響を受けずにほぼ一定であり、スケール厚さが80μmになると摩擦係数が大きくなる。一方、工具表面粗さが0.07μmRaのときはスケール厚さが10μmのとき摩擦係数が小さくなる。図11に工具表面粗さ0.5μmRaでスケール厚さ10、30、50、80μmでの試験片表面写真を示す。図11から工具と試験片の真実接触面積はスケールが厚くなるほど減少していることが分かる。真実接触面積の減少は接触圧力の増加を引き起こし、潤滑領域および潤滑膜の厚みを減少させ、結果として摩擦係数はスケール厚さの増加に伴い増加する。

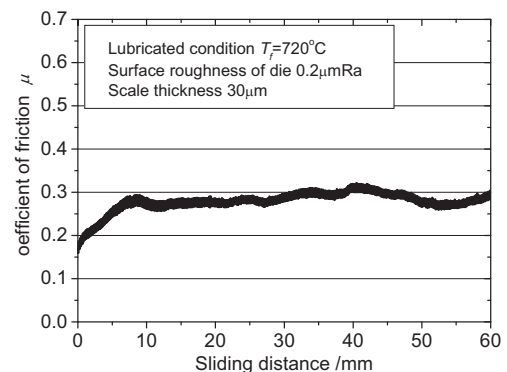


図9 摩擦係数と引抜き距離の関係(裸材，潤滑)

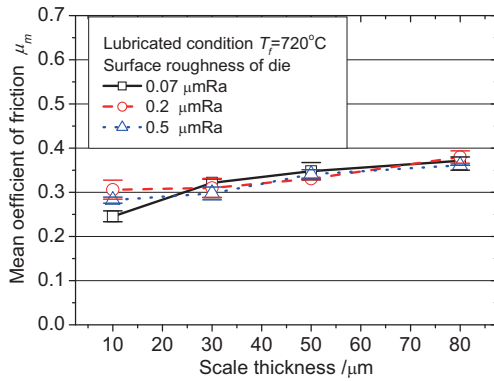


図 10 スケール厚さと摩擦係数の関係(裸材, 潤滑)

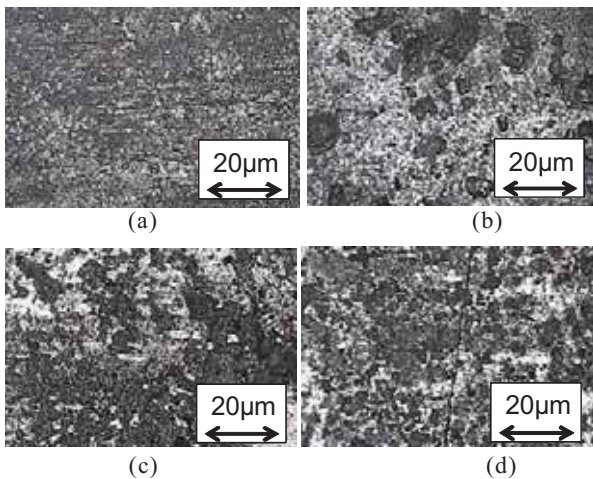


図 11 引抜き後の表面性状(工具表面粗さ 0.5 μmRa)
スケール厚さ(a) 10, (b) 30, (c) 50, (d) 80 μm

4.1.3 冷却工具

冷却の有無による平均摩擦係数の比較を図 12 に示す。図 12 から工具表面粗さが 0.2 μmRa の場合、摩擦係数が低下していることから、接触界面での温度が上昇すると摩擦係数も増加すると考えられる。工具表面粗さが 0.07 μmRa の場合、冷却があっても焼き付きが生じるため、冷却が無い場合との差が小さい。

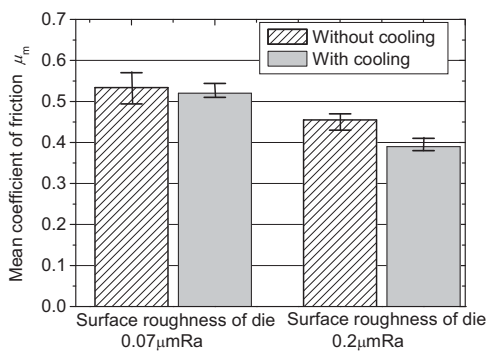


図 12 金型冷却の有無による摩擦係数の比較
(裸材, ドライ)

4.2 Al-Si めっき材¹¹⁾

4.2.1 摩擦係数

ドライおよび潤滑条件での Al-Si めっき材の摩擦係数

と工具表面粗さの関係を図 13 に示す。図 13 より、ドライ条件で行った場合では、摩擦係数が工具表面粗さにほとんど影響を受けずにほぼ一定であることを示している。

潤滑条件では図 13 より、工具表面粗さが 0.07 μmRa から 0.2 μmRa まで増加するにつれて摩擦係数が 0.2 まで低下し、0.2 μmRa から 0.5 μmRa まで増加するにつれて摩擦係数が増加している。摩擦係数は工具表面粗さの影響を受け、0.2 μmRa 程度の表面粗さをもつ工具の摩擦係数が 0.2 と低い値となった。

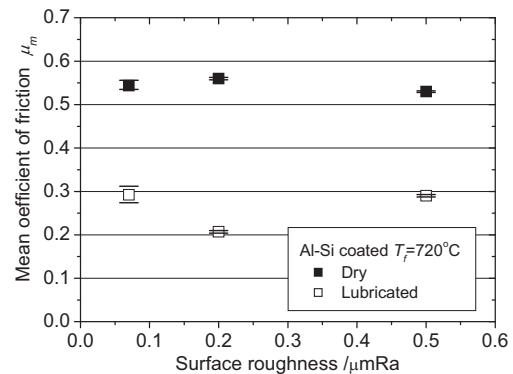


図 13 工具表面粗さと摩擦係数の関係(めっき材)

4.2.2 Al-Si めっき材に関する考察

めっき材では、ドライ条件で摩擦係数は工具表面粗さの影響をほとんど受けずにほぼ一定となった。図 14 に表面粗さ 0.2 μmRa の工具の引抜き後の表面写真と表面プロフィールを示す。EDX 分析では図 13b の黒い部分(光学顕微鏡では薄いグレー)ではアルミニウムが多く検出された。図 14c のプロフィールから工具表面に厚さ数 μm のアルミニウム層が付着していることが分かる。アルミニウム層の共金により高い摩擦係数値となったと思われる。表面粗さ 0.07, 0.5 μmRa の工具も同様の結果であった。

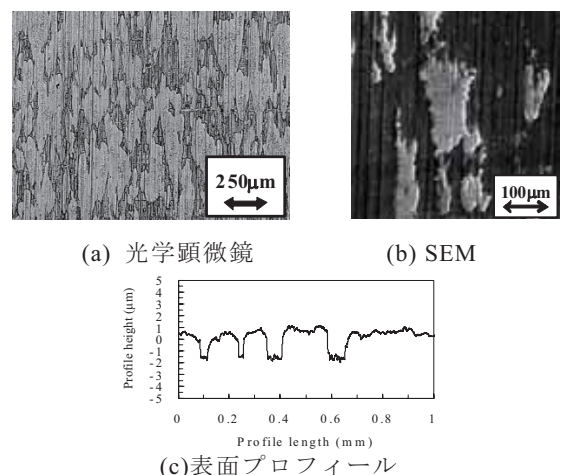


図 14 試験後の工具表面写真
(めっき材, 工具表面粗さ 0.2 μmRa, ドライ)

図 15 にめっき材の潤滑条件で表面粗さ 0.2 μmRa の工具の引抜き後の表面写真と表面プロフィールを示す。図 15 よりアルミニウム層の付着は少ないことが確認できる。さらに、付着部分は EDX 分析より、Al, O 原子によ

り生成されている。潤滑条件で摩擦係数が低くなったのは、アルミニウム層の付着物と潤滑油の添加剤の成分との反応により生成した反応物が摩擦係数を低下させたと思われる。工具表面粗さが $0.2\ \mu\text{mRa}$ の摩擦係数が低くなった要因としては、工具表面粗さ $0.07\ \mu\text{mRa}$ では潤滑剤がトラップされない、また工具表面粗さ $0.5\ \mu\text{mRa}$ では、材料および工具の突起の接触が起こりやすいため摩擦係数が $0.2\ \mu\text{mRa}$ に比べて高くなったと考えられる。

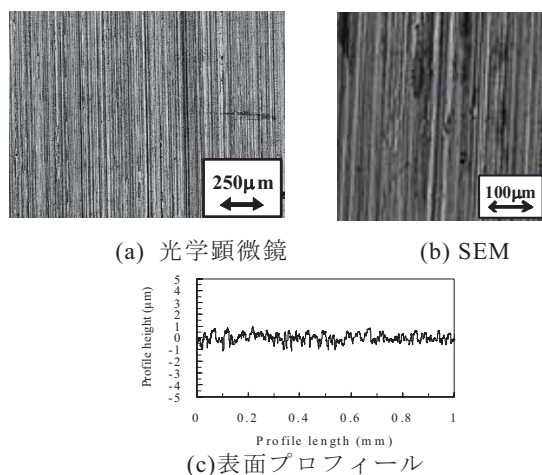


図 15 試験後の工具表面写真

(めっき材, 工具表面粗さ $0.2\ \mu\text{mRa}$, 潤滑)

4.3 Al-Si めっき材と裸材の比較

実操業では、裸材は窒素雰囲気中で加熱されるためそのスケール厚さは $10\sim 20\ \mu\text{m}$ 程度となる。スケール厚さ、 10 , $30\ \mu\text{m}$ の裸材とめっき材の各工具表面粗さにおける摩擦係数の比較を図 16 に示す。ドライ条件ではめっき材の摩擦係数が裸材に比べて高いが、潤滑剤を用いることで両者の違いはほとんど無くなることが分かる。

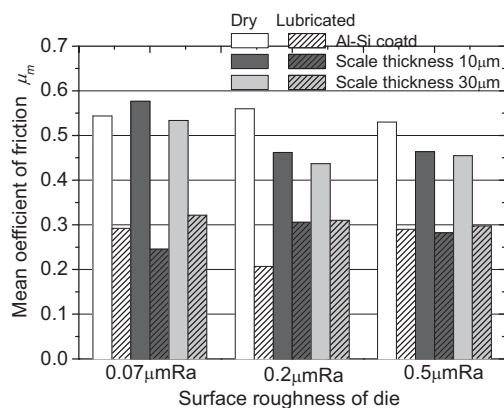


図 16 工具表面粗さと摩擦係数の関係(裸材, めっき材)

5. まとめ

種々の工具表面粗さ、スケール厚さにおいて、熱間平板引抜によるホットプレス潤滑特性評価を行い以下の結果を得た。

- 1) 裸材ではドライ条件下では、表面粗さが $0.07\ \mu\text{mRa}$ の場合スケールが薄くなるにつれて摩擦係数が上昇した。潤滑剤を用いた場合、工具表面粗さの影響は小さく、スケールが厚くなるにつれて、摩擦係数は上昇した。
- 2) めっき材では摩擦係数は、ドライ条件では工具表面にほとんど影響せずにはほぼ 0.6 程度で一定となり、潤滑条件では大幅に低減される。工具表面粗さ $0.2\ \mu\text{mRa}$ で 0.2 と低い値になった。
- 3) 実操業で行われている金型冷却は摩擦係数の低減においても効果的である。

謝辞

本研究を進めるにあたり研究助成をいただいた(財)天田金属加工機械技術振興財団に深く感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 例えば, H. Karbasian & A.E. Tekkaya: J. Mater. Proc. Technol. **210** (2010), 2103-2118.
- 2) S. Sikora & F.J. Lenze: Proc. IDDRG2006, 295-301.
- 3) M. Merklein & J. Lechler: J. Mater. Proc. Techn. **177** (2006), 452-455.
- 4) Y. Dahan et al.: Proc. IDDRG2006, 395-402.
- 5) J. Hardell, E.Kassfeldt & B.Prakash: Wear **264** (2008), 788-799.
- 6) A. Yanagida, T. Kurihara & A. Azushima: J. Mater. Proc. Technol. **210** (2010), 456-460.
- 7) A. Yanagida & A. Azushima: Annals of CIRP, **58-1** (2009), 247-250.
- 8) C. Dessain, P. Hein, J. Wilsius, L. Penazzi, C. Boher & J.Weikert: Proc. 1st Int. Conf. on Hot Sheet Metal Forming of High- Strength Steel CHS2 (2008), 217-227.
- 9) J. Hardell, B.Prakash & K.Steinhoff: Steel Grips **6** (2008) Suppl. CHS2, 69-76.
- 10) A. Yanagida, Y. Tanaka & A. Azushima: Proc. 3rd CHS2, (2011), 369-376.
- 11) A. Azushima, K. Uda & A. Yanagida: J. Mater. Process. Technol. **212** (2012), 1014-1021.
- 12) 末広正芳, 真木純, 楠見和久, 大神正浩, 宮腰寿拓: 新日鉄技報, **378** (2003), 15-20.