

境界潤滑機構の解明およびその超精密表面創成への応用

岐阜大学 工学部 機械システム工学科
 教授 堂田邦明
 (平成6年度研究開発助成 AF-94019)

1. 研究の目的と背景

近年、塑性加工品の高精度化、高強度化および微細複雑形状化の傾向が益々高まっている。これらの要求に応ずるにはいずれの場合にも、工具・被加工材間のトライボ現象の理解が重要であり、摩擦の制御が加工の成否に深くかかわっている。特に、超精密表面の創成を狙う場合、その理解が一層重要になってくる。その為、摩擦を制御し工具・被加工材間の凝着・焼付きを防止する強固な境界潤滑膜を作る極圧添加剤が必要である。代表的な極圧添加剤の1つにリン系極圧添加剤があるがその作用機構に関する研究⁽¹⁾⁻⁽³⁾は少ない。

そこで、本研究では、しごき形摩擦試験機を用いて、難加工材であるアルミニウム合金およびステンレス鋼の塑性加工中の被加工材新生面でのリン系極圧添加剤の摩擦係数低減効果を評価する。さらに各種構造のリン系化合物の摩擦面での構造変化をXPSにより分析し、その作用機構について検討する。また、超精密表面創成のアプローチとして、工業用純アルミニウム A1100-O に数回のしごき加工を加えて薄肉化し、その際生じるトライボ現象について検討し、さらに工具面転写による表面平滑化についても検討する。

2. 実験方法

2.1 加工原理

本実験に用いたしごき形摩擦試験機の概略を Fig. 1 に示す。L 曲げした 2 枚の試料は、コンテナの上部に固定され上方からパンチを押込むことによりしごき加工が加えられる。しごき率はコンテナの厚さ t_c を変更することによって調整することができる。パンチしごき面上に作用する諸力の水平方向成分である圧縮力 C と加工方向成分である加工力 P は、しごき行程を通じて連続的に測定される。これらの値を用いて、摩擦係数 μ を

$$\mu = \frac{(P/2)\cos\alpha - C\sin\alpha}{C\cos\alpha + (P/2)\sin\alpha} \quad (1)$$

によって求め、摩擦状態の評価尺度とする。

Table.2 Experimental conditions

Workpiece	Aluminum alloy: A1100-O Width: 35mm, Length: 70mm, Thickness: 0.39mm
Ironing velocity	2, 5, 10mm/s
Lubricant	Praffinic mineral oil (P100, P460, St)
Tool	Punch: Tool steel alloy SKD11 (HRC60) Surface roughness: 0.04 μ m Ra Container: Tool steel alloy SKD11 (HRC60) Surface roughness: I 0.4 μ m Ra, II 0.06 μ m Ra
Die angle	8°
Temperature	Room temperature

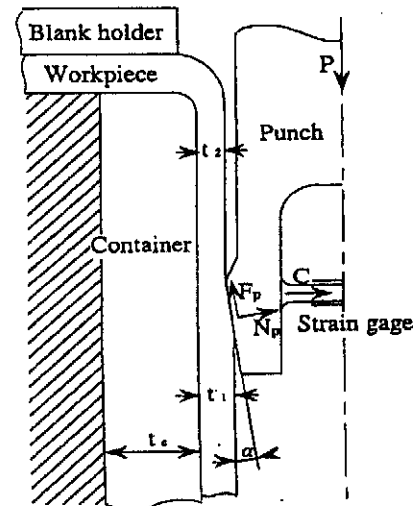


Fig.1 Principle of strip ironing type tribometer

2.2 実験条件

リン系極圧添加剤の作用機構に関する実験条件を Table.1 に、薄肉化プロセスに関する実験条件を Table.2 に示す。試料にはアルミニウム合金 A6061-T4 材、オーステナイト系ステンレス鋼 SUS304 材および工業用純アルミニウム A1100-O 材を用いた。その機械的性質を Table.3、化学成分を Table.4 に示す。

Table.1 Ironing condition

Reduction	5~30%
Die angle	8°
Ironing velocity	1.0mm/s
Ironing travel	100mm
Dimensions of workpieces	Thickness: 1.0mm (A6061-T4) 0.8mm (SUS304) Width : 20mm
Punch	Tool Steel Alloy SKD11 (HRC60) Surface roughness: 0.05 μ m Ra
Container	Tool Steel Alloy SKD11 (HRC60) Surface roughness: 0.4 μ m Ra

Table.3 Mechanical properties of workpieces

Material	Tensile Strength [MPa]	Elongation
A6061-T4	240.1	22
SUS304	665.0	51
A1100-O	98.0	40.3

Table.4 Chemical composition of workpieces

Material	C	Si	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti	Ni	Others	Al	Fe
A6061-T4	—	0.46~ 0.80	0.46~ 0.80	0.15	0.46~ 0.80	0.46~ 0.80	0.25	0.15	—	0.05	Bal.	0.70
SUS304	0.07	0.52	—	0.86	—	18.22	—	—	8.6	0.03	—	Bal.
Al100-0	—	0.15	0.07	<0.01	<0.01	0.00	<0.01	0.01	—	—	99.15	0.59

供試潤滑剤を Table.5 に示す。Table.6 に実験に用いた、エステル中の炭素数が異なる亜リン酸ジエステルをまとめて示す。略号の始めの数字は構造中のエステル ($C_nH_{2n+1}O$) の数を示し、後の二桁はエステル中の炭素の数 ($C_nH_{2n+1}O$ 中の n) を意味する。例えば亜リン酸水素ジオレイル ($C_{18}H_{37}O$)₂P(O)H は 218 と略記する。基油として、A6061-T4 材の場合、パラフィン系鉱物油である P02、SUS304 材の場合、P10 を使用した。各種添加剤の添加量は亜リン酸水素ジオレイル(218)を 5mass% 添加した場合のモル当量を基準とし、リンの含有量が同一のモル当量となるように添加した。そして潤滑剤は、全てパンチ接触面側のみに塗布し実験を行った。加工後の摩擦面に残存する化合物の解析には XPS (島津製作所製: ESCA850, MgK α 1253. 6eV) を用いた。そして、Table.7 に薄肉化プロセスにおける各しごき段階における板厚の変化を示す。

3. 実験結果および考察

3. 1 リン系極圧添加剤の摩擦係数低減効果

本実験で用いる摩擦係数は、本実験装置での最大しごき距離 100mm 付近では、左右 2 枚の試料のバ

ランスが崩れて、実験データにばらつきが生じることがあり、なるべくしごき距離を長く取る意味で、しごき距離 80mm 地点での摩擦係数 μ_{80} を代表値として用いる。

Fig.2 にジエステルの摩擦係数の低減効果を示す。A6061-T4、SUS304 材のいずれの場合でも、摩擦係数低減効果を示すが、その中で炭素数の最も少ない 212 が最も優れている。

Fig.3 にジエステルのエステル基中の炭素数と摩擦係数の関係を示す。A6061-T4 材の場合には、炭素数の増加に伴い、いずれのしごき率においても、摩擦係数が増加しているが、しごき率が大きいほどその傾向は顕著になっている。SUS304 材の場合には、しごき率 10、15% では、炭素数の増加に伴い摩擦係数は増加しているが、しごき率 20、25% では、炭素数 18 において摩擦係数が最も高い値を示している。油性剤等金属表面で金属石鹸を作り、摩擦係数を低減させる添加剤では、炭素数が増加し直鎖が長くなるに従い摩擦係数は低下することが知られている⁽⁴⁾。本実験のように炭素数の増加が摩擦係数の増加を引き起こすことから亜リン酸ジエステルの摩擦係数低減効果は油性剤の作用機構とは異なる機構によると思われる。

Table.5 Properties of lubricant used

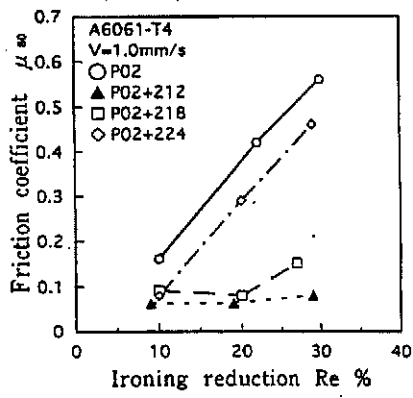
Lubricant	P2	P10	P100	P460	St	
Viscosity ($\times 10^{-6}$ m ² /s at 40°C)	2.11	9.87	98.6	493	1007	
Sulfur weight %	0.00	0.95	0.23	0.38	0.9	
Mean molecular weight	—	—	—	—	771	
Ring analysis	CA%	16.8	64.3	7.4	8.3	7.7
(n-d-m method)	CN%	32.9	26.6	24.4	23.5	26.7
	CP%	50.3	9.1	68.2	68.2	65.6

Table.6 Phosphorus type EP additives

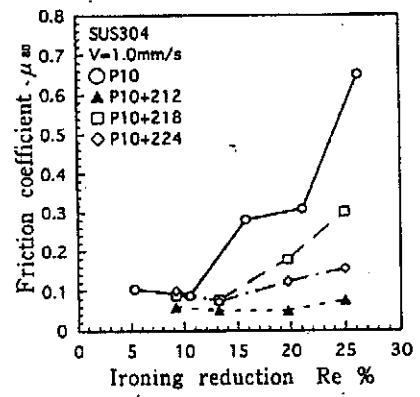
Classifications	Code	Chemical formula	Specific gravity (25°C)	P contents (%)
Phosphite diester	212	(C ₁₂ H ₂₅ O) ₂ P(O)H	0.915	6.8
	218	(C ₁₈ H ₃₇ O) ₂ P(O)H	0.90	5.2
	224	(C ₂₄ H ₄₉ O) ₂ P(O)H	0.89	3.6

Table.7 Thickness change of workpieces in ironing stage

Ironing stage	1st	2nd	3rd	4th	5th	6th
Thickness (mm)						
Before ironing : t ₁	0.39	0.29	0.24	0.19	0.16	0.14
↓						
After ironing : t ₂	0.29	0.24	0.19	0.16	0.14	0.12
$\Delta t = t_1 - t_2$ (mm)	0.1	0.05	0.05	0.03	0.02	0.02
Ironing reduction Re (%)	26	17	21	16	13	14

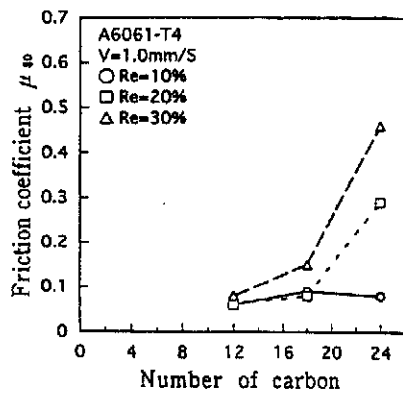


(a) A6061-T4

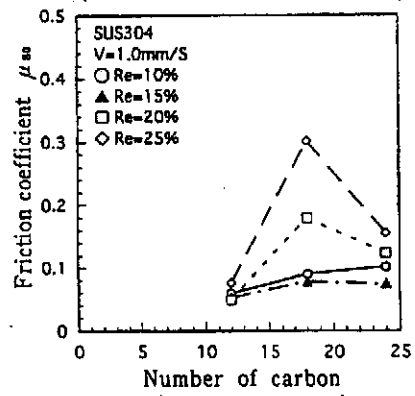


(b) SUS304

Fig.2 Relation between ironing reduction and friction coefficient μ_{80}



(a) A6061-T4

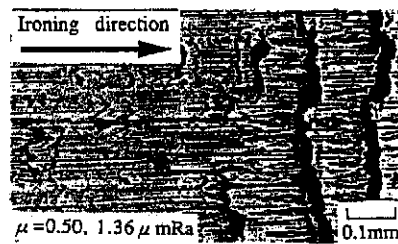


(b) SUS304

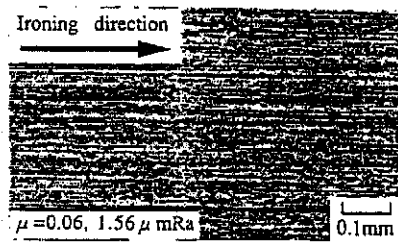
Fig.3 Relation between carbon number and friction coefficient μ_{80}



(a) Before ironing

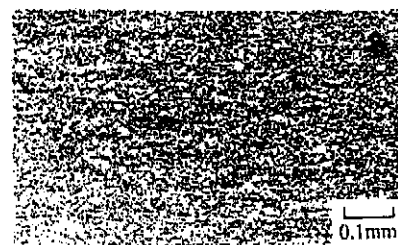


(b) P02, Re=20%

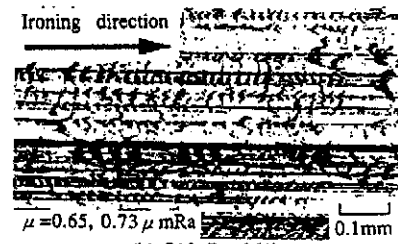


(c) P02+212, Re=20%

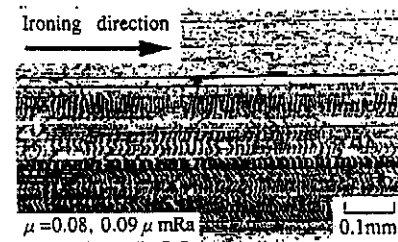
Fig.4 Surface appearance of workpiece (A6061-T4)



(a) Before ironing



(b) P10, Re=25%



(c) P10+212, Re=25%

Fig.5 Surface appearance of workpiece (SUS304)

3. 2 摩擦面観察および XPS 分析

Fig. 4 に A6061-T 4 材の、Fig. 5 に SUS304 材のしごき加工後の試料表面の光学顕微鏡写真を示す。図にしごき方向に対して垂直方向の粗さを付記した。基油のみでしごき加工を行った場合は、写真に見られるように激しい焼付きが発生しており、摩擦係数は高く、表面粗さも大きい値を示している。しかし、各種リン系極圧添加剤を添加する事により表面性状は改善され、添加効果が認められる。

次に、加工中に生成すると思われる反応生成物の成分を解明するため、加工後の試料摩擦面の XPS 分析を行い、リンの化学状態を調べた。Fig. 6 に例として、SUS304 材をしごき率 20% で加工した場合の亜リン酸ジエステル 212 の XPS スペクトルを示す。リン酸エステルの摩擦係数低減作用は金属表面でリン酸ガラス (P_2O_5) が生じるためという説⁽⁴⁾もあるが、亜リン酸ジエステルでは P_2O_5 の結合状態 135.0eV のピークは認められず、5 価の $(C_{12}H_{25}O)_2POH$ 133.30eV のみが観察される。尚金属との反応物 $MeO_2P(C_nH_{2n+1}O)_2$ の結合状態は $(C_nH_{2n+1}O)_2POH$ とほぼ重なり合うため区別できない。この結果、亜リン酸ジエステルの減摩機構は、化学反応によるリン酸ガラスの生成ではなく、リン酸ジエステルの構造を保ったまま金属表面での吸着であると考えられる。Fig. 7 に示すように極性を持った末端基 $=O$ 、 $-H$ が被加工材表面へ吸着しているものと考えられる。

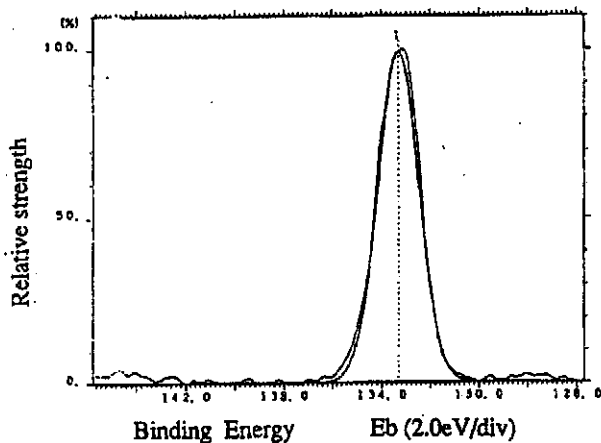


Fig.6 XPS spectra of ironed surface (SUS304, Re=20%)

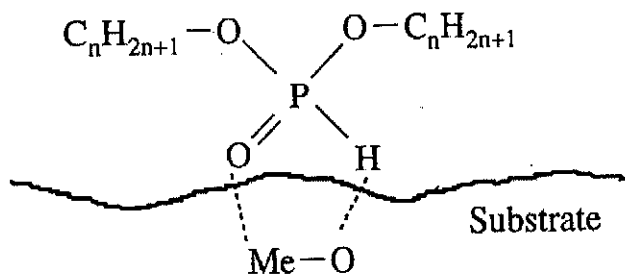
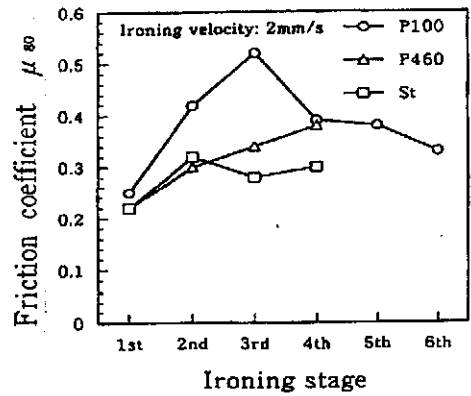
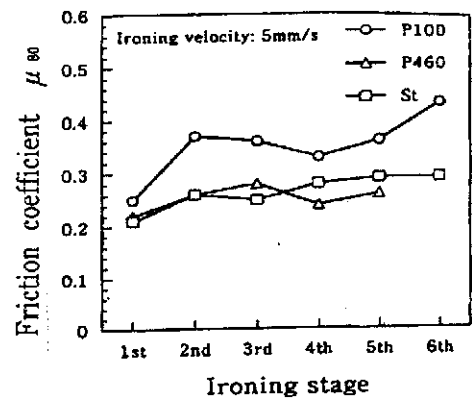


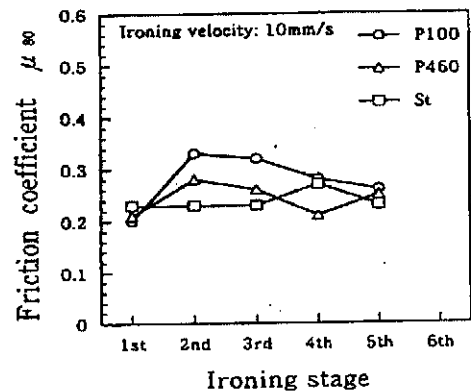
Fig.7 Schematic illustration of absorption mechanism



(a) Ironing velocity 2mm/s



(b) Ironing velocity 5mm/s



(c) Ironing velocity 10mm/s

Fig.8 Relation between ironing stage and friction coefficient

3. 3 薄肉化プロセス

Fig. 8 にしごき回数と摩擦係数の関係を示す。いずれのしごき速度においても 1 回目のしごき加工では、潤滑剤の粘度の違いによる摩擦係数の差は見られないが、2 回目以降では差が現れている。しごき速度 2mm/s の場合、P100 の 2 回目以降、P460、St の 4 回目以降で焼付きが発生している。また、P460、St では、5 回目において試料は破断している。しごき速度 5mm/s で P100、St では、6 回目までしごき加工を行うことが出来、本実験における最も薄肉可能な条件であった。この時の板厚は 0.12mm であった。

Fig. 9 にしごき速度 2mm/s における 1, 3, 5 回目のパンチ側試料表面の光学顕微鏡写真を示す。1 回目では、表面に圧延状痕が残留しその中にオイルピットと見られる斑点が見られる。最もしごき率が高い 1 回目の摩擦係数が最も低く、また潤滑剤の粘度の違いによる摩擦係数の差が見られなかったのは、オイルピットから接触界面に潤滑剤が供給された為であると考えられる。しかし、それ以降ではオイルピットも見られなくなり、試料表面は擦過傷面となり、焼付きも見られる。

Fig. 10 に試料のコンテナ接触面側の光学顕微鏡写真を示す。コンテナ側試料表面性状は、パンチ面に焼付きの生じたものではパンチ側の表面性状に対応して、焼付き部は白濁した面に、線状痕部は光輝面となる。そして、白濁した面にはパンチ面の高摩擦の影響を受け、しごき方向に対して直角方向に微小な亀裂が生じていることがわかる。試料の破断はこの微小な亀裂が成長したものであると思われる。

3. 4 工具面転写による表面平滑化

Fig.11 にコンテナ表面の光学顕微鏡写真を示す。試料の表面粗さは $0.26 \mu\text{mRa}$ である。コンテナ I は $0.4 \mu\text{mRa}$ と試料よりも粗いのにに対して、コンテナ II は $0.06 \mu\text{mRa}$ と試料より平滑である。

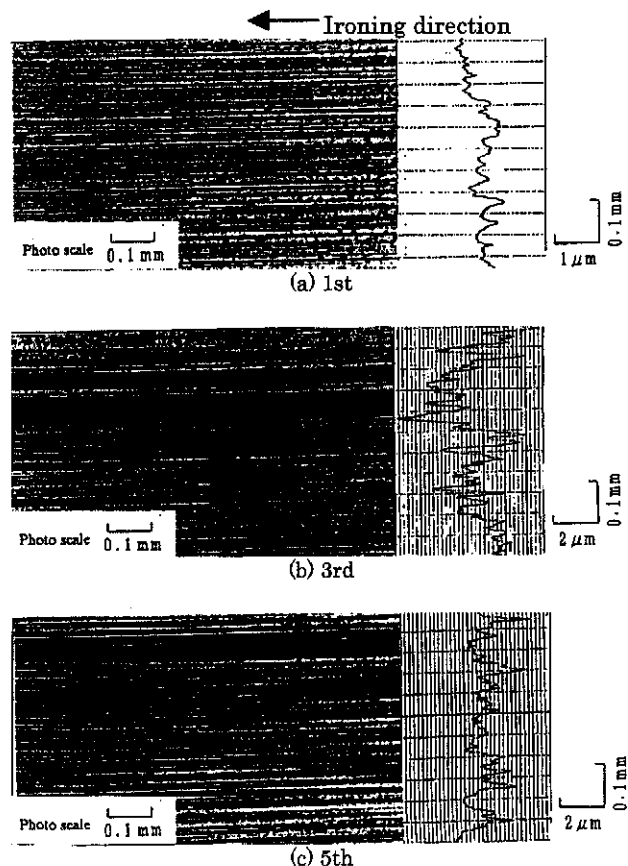


Fig.9 Surface appearance at punch side
($v=2\text{mm/s}$, P100)

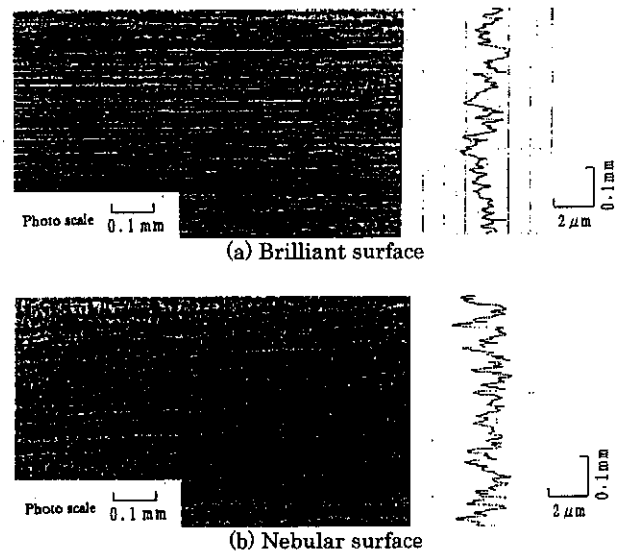


Fig.10 Surface appearance at container side
($v=2\text{mm/s}$, P100)

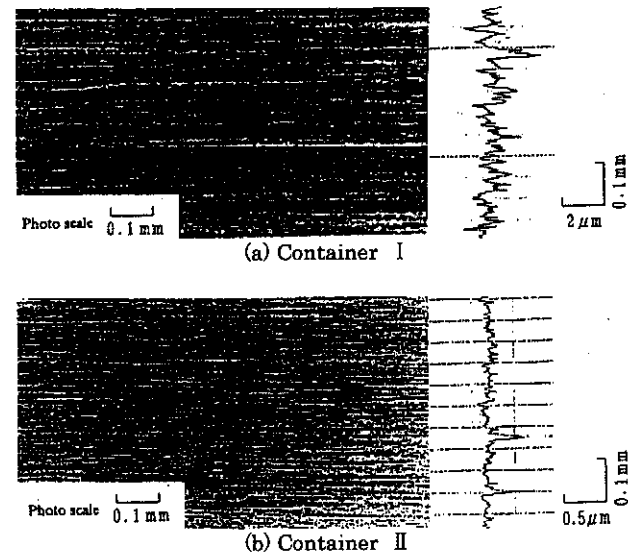


Fig.11 Surface appearance of container

Fig.12 にしごき回数とコンテナ側試料表面粗さの関係を示す。図中の破線はコンテナの表面粗さを示す。コンテナ I の場合、しごき速度 10mm/s ではコンテナ表面とほぼ同等の粗さとなっているが、 $2, 5\text{mm/s}$ では、焼付きが発生した 3 回目以降は表面粗さが大きく上昇している。これは試料のパンチ側表面に焼付き面と線状痕部が混在し、コンテナ側表面にもそれに対応して異なる表面性状が混在している為と考えられる。一方、コンテナ II では、2 回目以降においてコンテナ表面よりも表面粗さが小さくなり、工具表面よりも平滑な面となった。

工具面の転写による試料表面の平滑化は、薄肉加工においては、パンチ側試料表面性状がコンテナ側表面性状に影響を与え、パンチ側で焼付きが発生した場合、焼付き部は摩擦力が大きくしごき方向への塑性流動が妨げられる為にコンテナ側では白濁面となり転写性は悪くなる。パンチ側試料表面に焼付きを発生させない事が転写性の重要な条件となる。また

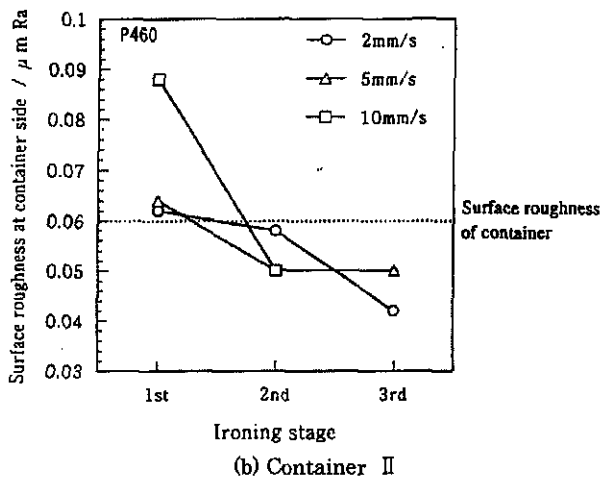
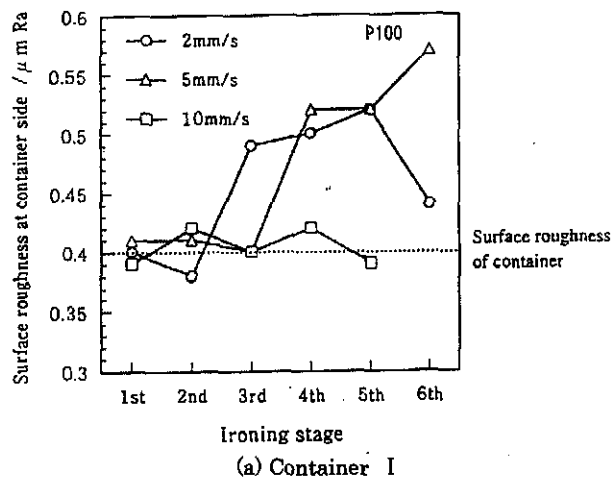


Fig.12 Relationship between ironing stage and surface roughness at container side

2回目以降において工具表面より平滑な表面が得られたのは試料の加工硬化により工具表面の谷部まで素材が十分に入り込まない為であると考えられる。

4. 結言

しごき形摩擦試験機を用いてリン系極圧添加剤の摩擦低減効果と超精密表面創成のアプローチとして、薄肉化におけるトライボ現象および工具面転写による表面平滑化について検討した結果、以下の結論を得た。

- (1) リン系極圧添加剤はアルミニウム合金 A6061-T4 材およびステンレス鋼 SUS304 材に対して摩擦係数低減効果を示す。
- (2) その作用機構は、被加工材表面への吸着でありエステル中の炭素数の少ないものほどより大きな摩擦係数低減効果を示す。
- (3) 薄肉加工においては、パンチ側試料表面性状がコンテナ側表面性状に影響を与える。パンチ側表面の線状痕部は、コンテナ側表面では光輝面に、焼付き部は白濁面となる。また、白濁面にはしごき方向に直角な微小な亀裂が生じている。
- (4) パンチ側試料表面で焼付きが発生しない場合、コンテナ側試料表面は、工具面の転写面とな

る。また、2回目以降では、試料が加工硬化し工具の凹部に入り込みにくくなる為、工具面より平滑な面が創成される。

謝辞

本研究は、(財)天田金属加工機械技術振興財団による研究助成を受けて行われたものであることを記し、深く感謝いたします。

参考文献

- (1) 大森俊英・北村憲彦・団野敦・川村益彦、トライボロジスト、36-6(1991)、452.
- (2) 大森俊英・北村憲彦・団野敦・川村益彦、トライボロジスト、36-10(1991)、792.
- (3) 大森俊英・北村憲彦・団野敦・川村益彦、トライボロジスト、36-10(1991)、799.
- (4) 永井雄次郎・石田久枝、潤滑、1-1(1956)、53.