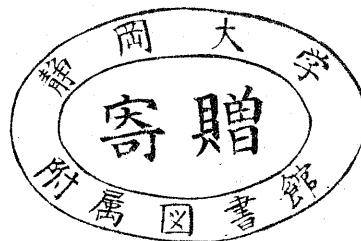

生産加工における高性能クリーン 潤滑システムの開発研究

0 4 5 5 5 0 3 4

平成 6 年度科学研究費補助金
〔試験研究（B）〕研究成果報告書



平成 7 年 3 月

静岡大学附属図書館



030850262 4

研究代表者 中 村 保

（静岡大学工学部教授）

は し が き

研究組織

研究代表者： 中 村 保 （静岡大学工学部教授）
研究分担者： 田 中 繁 一 （静岡大学工学部助教授）
研究分担者： 平 岩 正 至 （静岡大学工学部助教授）
研究分担者： 今 泉 晴 樹 （静岡大学工学部教務員）
研究分担者： 石 橋 格 （住鋇潤滑剤(株)室長）

研究経費

平成4年度	9, 3 0 0 千円
平成5年度	9 0 0 千円
平成6年度	1, 5 0 0 千円

研究発表

- (1) 中村保, 済木弘行, 石橋格: 後方押出しによる固体潤滑剤の性能評価, 第4回日中精密鍛造シンポジウム論文集, 1992.10.6.
- (2) 中村保, 石橋格, 趙宇飛, 田中久一郎: 高温塑性加工用超高分子量ポリエチレン系潤滑剤の開発研究(前方押出しによる潤滑性能評価), 平成5年度塑性加工春季講演会講演論文集, Vol.1, 1993.5.25.
- (3) T. Nakamura, H. Saiki, N. Ikeuchi & I. Ishibashi: Effects of Solid Lubricants in Backward Extrusion, Proceedings of 6th International Congress on Tribology, Vol.1, 1993.8.
- (4) 中村保: 塑性加工における焼付き防止対策, 塑性と加工, Vol.34, No.393, 1993.10.
- (5) 中村保, 石橋格, 今泉晴樹, 趙宇飛: 前後方押出し形摩擦試験法の提案, 平成6年度塑性加工春季講演会講演論文集, Vol.2, 1994.5.27.
- (6) 中村保, 石橋格, 今泉晴樹, 趙宇飛: 前後方押出し形摩擦試験による温・熱間鍛造用潤滑剤の性能評価, 平成7年度塑性加工春季講演会講演論文集, 1995.5.
- (7) T. Nakamura & I. Ishibashi: Forward-Backward Extrusion Type Friction Testing Method, Transactions of NAMRI/SME, 1995.5.
- (8) T. Nakamura, I. Ishibashi & H. Yamagata: Lubricities of Graphite Lubricants in Hot Forging of Aluminium-Silicon Alloys, Proceedings of International Tribology Conference (ITC Yokohama), 1995.10-11.

研究成果概要

生産加工現場において、黒鉛系潤滑剤は低コストで高性能な温・熱間塑性加工用潤滑剤やダイキャスト用離型剤として多用されているが、作業環境を著しく悪化させるため、作業者に敬遠され大きな社会問題となっている。そこでクリーンで高性能な潤滑システムの開発により、快適な生産加工環境の構築が急務となっている。

本研究代表者らは、非黒鉛系の各種固体潤滑剤の性能評価を試み、とくに超高分子量ポリエチレン粉末は黒鉛系潤滑剤に匹敵する優れた潤滑性能を発揮することを発見した。この潤滑剤は白色無害であるため、これを主成分とする潤滑剤を用いてクリーンで高性能な潤滑システムの開発が可能となる。

本研究では、超高分子量ポリエチレンを主成分とした非黒鉛・白色系潤滑剤を試作し、基礎的摩擦試験および実加工モデル摩擦試験により、基本的潤滑性能を評価した。また、潤滑剤塗布方法および塗布条件を確立し、実加工現場において、潤滑性能や離型性だけでなく、発煙性、残留性、耐食性、環境清浄性等の環境上の課題についての評価も実施した。その結果、以下のような結論が得られ、生産加工用高性能クリーン潤滑システムの構築の可能性が確認された。

(1) リング圧縮摩擦試験でスクリーニングテストを実施した各種固体潤滑剤について、前方押出し形摩擦試験および後方押出し形摩擦試験法を用いて潤滑性能評価を行った結果、超高分子量ポリエチレン、およびステアリン酸Caの潤滑性能が優れていること、およびこれらを主成分とする水溶性白色系潤滑剤は、市販の黒鉛系潤滑剤と同等の減摩性能を発揮することが確認された。ただし、耐焼付き性は黒鉛系潤滑剤の方がやや優れていることが認められた。

(2) 温・熱間鍛造における各種潤滑剤の潤滑性能を実験室的に評価する摩擦試験法として、これまでリング圧縮摩擦試験法は汎用性の高い塑性加工用基礎的摩擦試験法として多用されてきた。しかし、押出し鍛造等の過酷な摩擦条件をシミュレートできないという欠点が指摘されていた。そこで本研究では、押出し鍛造における過酷な摩擦条件をシミュレート可能な前後方押出し形摩擦試験法を新たに提案した。この摩擦試験法について塑性変形の理論解析を行った結果、加工力や素材変形抵抗を測定することなく、摩擦係数あるいは摩擦せん断係数等を見積もることができる汎用性の高い摩擦試験法であることが確認された。

(3) 鍛造用メカニカルプレスに、素材の高周波誘導加熱装置、潤滑剤のスプレー塗布装置、電気抵抗加熱ダイス温度調整装置、およびパンチとストリッパ等を組み込んだ前後方押出し形摩擦試験機を製作した。

(4) 前後方押出し形摩擦試験機を用いて、前方押出しにおけるダイス半角 $\alpha = 10^\circ$ 、後方押出しにおける断面減少率 $R_e = 25, 50, 70\%$ 、素材初期試験片直径 $d_0 = 20\text{ mm}$ 、長さ $L_0 = 20\text{ mm}$ 以上、パンチ押込み量 $L_r = 0\text{ mm}$ の条件で、加工力や素材変形抵抗を測定することなく摩擦係数または摩擦せん断係数を的確に測定できること、および前方押出しのダイス面と後方押出しのパンチ面における耐焼付き性能を的確に評価できることが確認された。

(5) 前後方押出し形摩擦試験機を用いて、ステンレス鋼素材の熱間鍛造に対する超高分子量ポリエチレン系潤滑剤と黒鉛系潤滑剤の潤滑性能を比較検討した。その結果、両潤滑剤ともに、摩擦係数または摩擦せん断係数はほぼ同程度になるが、パンチ側の耐焼付き性能は黒鉛系潤滑剤の方がやや優れていることが確認された。

(6) 前後方押出し形摩擦試験機を用いて、Siを10%および20%程度含有するアルミニウム合金素材の熱間鍛造における黒鉛系潤滑剤の潤滑性能を試験した。その結果、Si含有量が多いほど摩擦係数あるいは摩擦せん断係数が高くなることを確認した。

(7) 耐熱鋼素材の熱間鍛造の実加工現場において、超高分子量ポリエチレンを主成分とする水溶性白色潤滑剤の潤滑性能、離型性、発煙性、耐食性、環境清浄性等の評価を行い、市販の水溶性黒鉛系潤滑剤と性能比較を実施した。その結果、超高分子量ポリエチレン系潤滑剤は、黒鉛系潤滑剤と潤滑性能の点ではほぼ同等であり、発煙性、耐食性、環境清浄性等の環境の観点では黒鉛系潤滑剤より極めて優れていることが明らかになった。

(8) 以上の結果を総合して、超高分子量ポリエチレンを主成分とする水溶性白色系潤滑剤を用いて、生産加工における高性能クリーン潤滑システムの開発が可能となることが明らかになった。

目 次

1. 緒 言	1
2. 潤滑剤の性能評価試験法及び試験条件	3
2. 1 リング圧縮摩擦試験	3
2. 2 前方押出し形摩擦試験	9
2. 3. 前・後方押出し形試験	18
2. 3. 1. 前・後方押出し形試験の理論解析	18
2. 3. 2. 試験条件	36
3. ステンレス鋼素材の潤滑性能評価試験	46
3. 1. リング圧縮摩擦試験結果	46
3. 2. 前方押出し形摩擦試験結果	46
3. 2. 1. 高炭素鋼の温間前方押出し形摩擦試験結果	46
3. 2. 2. ステンレス鋼の熱間前方押出し形摩擦試験結果	48
3. 3. 前・後方押出し形摩擦試験結果	54
3. 3. 1. 連続繰り返し摩擦試験結果	54
3. 3. 2. ダイス温度の影響	61
4. アルミニウム合金素材の潤滑性能評価試験	72
4. 1 リング圧縮摩擦試験	72
4. 2 前・後方押出し形摩擦試験	72
4. 2. 1. パンチ荷重と変形特性	72
4. 2. 2. 摩擦特性値推定の最適試験条件	77
4. 2. 3. Al-Si合金の潤滑性能評価	82
5. 結 言	101

参 考 文 献

1. 緒言

塑性加工の歴史の中で、トライボロジーが果たした役割は極めて大きい。摩擦抵抗の低下、焼付き防止、型摩耗抑制、製品表面品位の向上等への寄与はもとより、材料破壊、工具破損等加工の成否に直結する場合が少なからず経験されてきた。一つの塑性加工法の開発とその実用化には、適切な潤滑剤や潤滑法を見いだすことが必須条件であった。塑性加工におけるトライボロジーに関して、歴史的な事実関係と意義を正當に評価し展望するためには、塑性加工学とトライボロジーの両分野における進展とその遭遇点の的確な認識が必要と考えられる。われわれの今日の科学的知識はほとんど学術文献によって受け継がれているが、塑性加工におけるトライボロジー問題は必ずしも学問的取扱いだけでなく、現場的、経験的あるいは技能的試行錯誤の積み重ねによる寄与が想像以上に大きいと思われる。

塑性加工のトライボロジーはまた、塑性加工の理論的解明のためにも、実用技術のためにも、欠くことのできない学問領域である。金属材料の塑性加工では、工具と材料との接触面で $1\text{MPa} \sim 1\text{GPa}$ のオーダーの高面圧下ですべりが生じている。銅の熱間加工の場合には、最高 1000°C 以上にも達する高温の材料が工具に接触したまますべる。冷間加工の場合でも、数十 m/sec の高速ですべりながら塑性変形する材料からは、摩擦仕事と変形仕事が熱に変わり、絶えず摩擦面に供給される。したがって、塑性加工のトライボロジーでは、熱間加工・冷間加工の区別なく、温度の影響を考慮に入れなければならない。しかも、塑性変形によって材料の表面積が増大するので、工具との接触面で材料表面に処女結晶面が現れる。その摩擦特性には未知の問題がある。これら各種の難しい条件が重なり、塑性加工のトライボロジーは軸受などを対象としたトライボロジーの進歩にもかかわらず、まだ不明の点が多く、今後の発展に期待しなければならない状態である。しかし、実際の作業に際しては、工具

と材料の間の摩擦は加工力に大きな影響があるうえに、工具の寿命と製品の表面状態をも左右するので、トライボロジーの理論と技術とは、現状でも塑性加工の重要な基礎であることに変わりはない。

以上のような塑性加工におけるトライボロジーの課題を解決するため、これまできわめて多くの塑性加工モデル摩擦試験法が提案されてきた。しかし、試験機の構造が複雑になるため潤滑剤の性能評価用としては汎用性が少ないという欠点があった。リング圧縮摩擦試験法は、加工力や素材変形抵抗を測定することなく摩擦係数等の摩擦特性値が簡便に求められるため、汎用性の高い塑性加工用基礎的摩擦試験法として多用されている。しかし、鍛造等における過酷な加工条件をシミュレートできないという欠点が指摘されている。そこで、リング圧縮摩擦試験に変わって、鍛造等における摩擦条件をシミュレートするための適切な摩擦試験法の確立が強く望まれている。

従来、鋼の温・熱間鍛造では、安価で潤滑性能が良好な潤滑剤として黒鉛系潤滑剤が多用されてきた。しかし、この黒鉛系潤滑剤は作業環境を著しく悪化させるとともに、金型の腐蝕を促進するため、これに変わって、白色あるいは無色透明で高性能な潤滑性能を有する非黒鉛系潤滑剤の開発が強く望まれている。すでに、白色系あるいは無色透明の非黒鉛系潤滑剤として、水溶性高分子系潤滑剤等が開発され、一部実用化している。しかし、それらの潤滑性能は黒鉛系潤滑剤に比較して十分であるとはいえない。

そこで、本研究では、各種金属に対する温・熱間鍛造用非黒鉛系潤滑剤の性能を比較評価し、黒鉛系潤滑剤と同等以上の潤滑性能を有する潤滑剤を開発する。潤滑剤の性能評価には、リング圧縮摩擦試験および前方押し形摩擦試験以外に、新たに提案する前・後方押し形摩擦試験法を用いる。このようにして性能評価された、非黒鉛系白色潤滑剤を用いて、クリーンで高性能な潤滑システムの開発を試みる。

2. 潤滑剤の性能評価試験法及び試験条件

2. 1 リング圧縮摩擦試験

リング圧縮摩擦試験法は塑性加工における摩擦係数, または摩擦せん断係数の測定方法として従来から用いられてきた方法である。リング圧縮摩擦試験法は図1と図2に示すようにリング状試験片を平行平面工具間で圧縮変形すると, 図3のように端面の摩擦力の大小に応じて内径の縮小・拡大が生じる, 図4と図5に示すような圧縮率 R_e と最小内径比 E あるいは最小内径縮小率 E_r の関係を表すグラフを用いて, 潤滑剤の摩擦係数 μ または摩擦せん断係数 m を測定する方法である。加工力や素材の変形抵抗を測定することなく摩擦係数等の摩擦特性値が得られるため, 極めて汎用性の高い潤滑剤性能評価試験として多用されているが, しかし, 据込み形の塑性変形であるため, 工具-素材両面への潤滑剤の捕捉が容易であることおよび素材表面積拡大が少ないことのため, 潤滑条件はさほど過酷ではない。

本研究ではまずこのリング圧縮摩擦試験を利用して, 超高分子量ポリエチレン (UHMW-PE) 潤滑剤および黒鉛系潤滑剤等について, アルミニウム材料、低炭素鋼材料、黄銅材料、ステンレス鋼材料に対する摩擦係数および焼付き状態による潤滑性能の評価を行った。

試験には合金工具鋼SKD61 ($HV = 58$) 製の圧盤を用い、供試面は試験毎に自動ラップ盤 (ラップマスターSFT株式会社製モデルラップマスター) で、表面粗さ $R_a = 0.02 \mu m$ 程度に仕上げた。素材試験片 (内径10.5mm、外径21.0mm、厚さ7.0mm) として、アルミニウム-A6061、黄銅C-3771、低炭素鋼SWCH10K、ステンレス鋼SUS403、ステンレス鋼SUS630を用いた。供試面の表面粗さは旋削仕上げにより $R_a = 0.3 \sim 0.6 \mu m$ に調整した。表1に試験条件を示す。

摩擦試験には1. 6MNの機械プレス (MKN2-160/7)

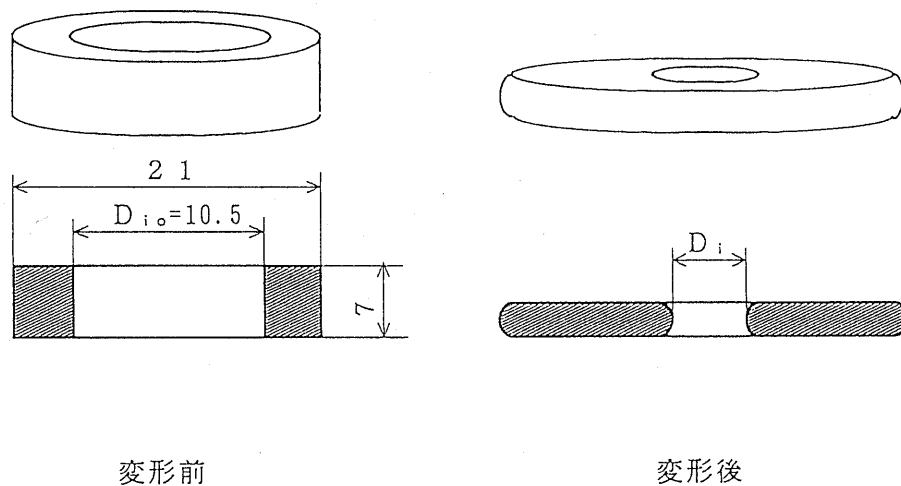


図1 リング圧縮試験の試験片

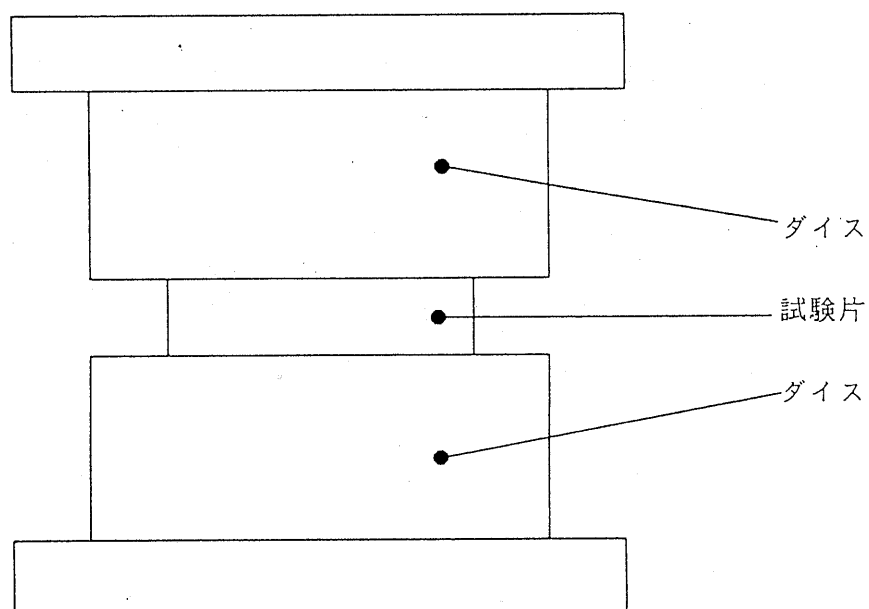
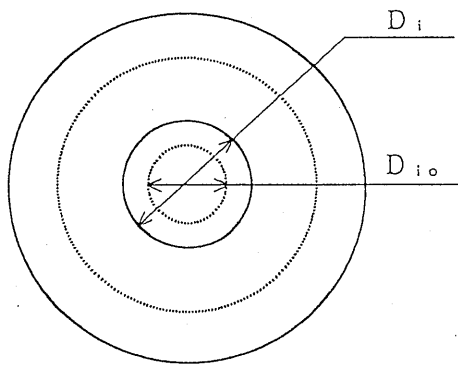


図2 リング圧縮試験摩擦試験法の工具配置

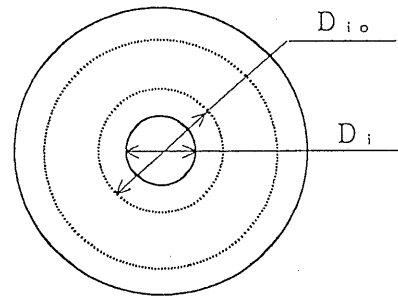


μ 小 : 内径拡大

$$D_i > D_{i.o}$$

$$E = D_i / D_{i.o} > 1$$

$$E_r = (D_{i.o} - D_i) / D_{i.o} < 0$$



μ 大 : 内径収縮

$$D_i < D_{i.o}$$

$$E = D_i / D_{i.o} < 1$$

図3 リング圧縮試験における内径収縮率の変化

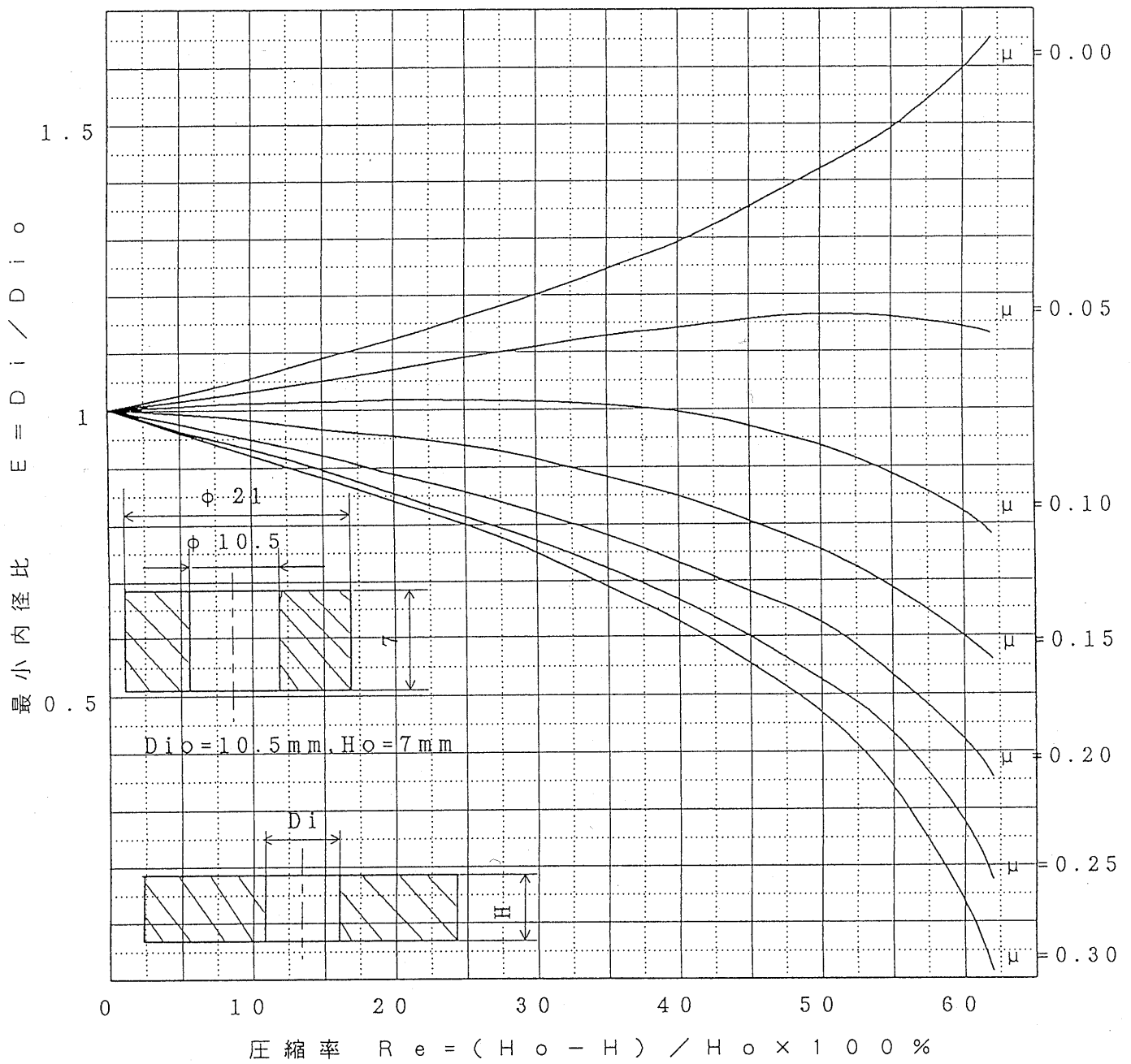


図 4 内径比と圧縮率の関係

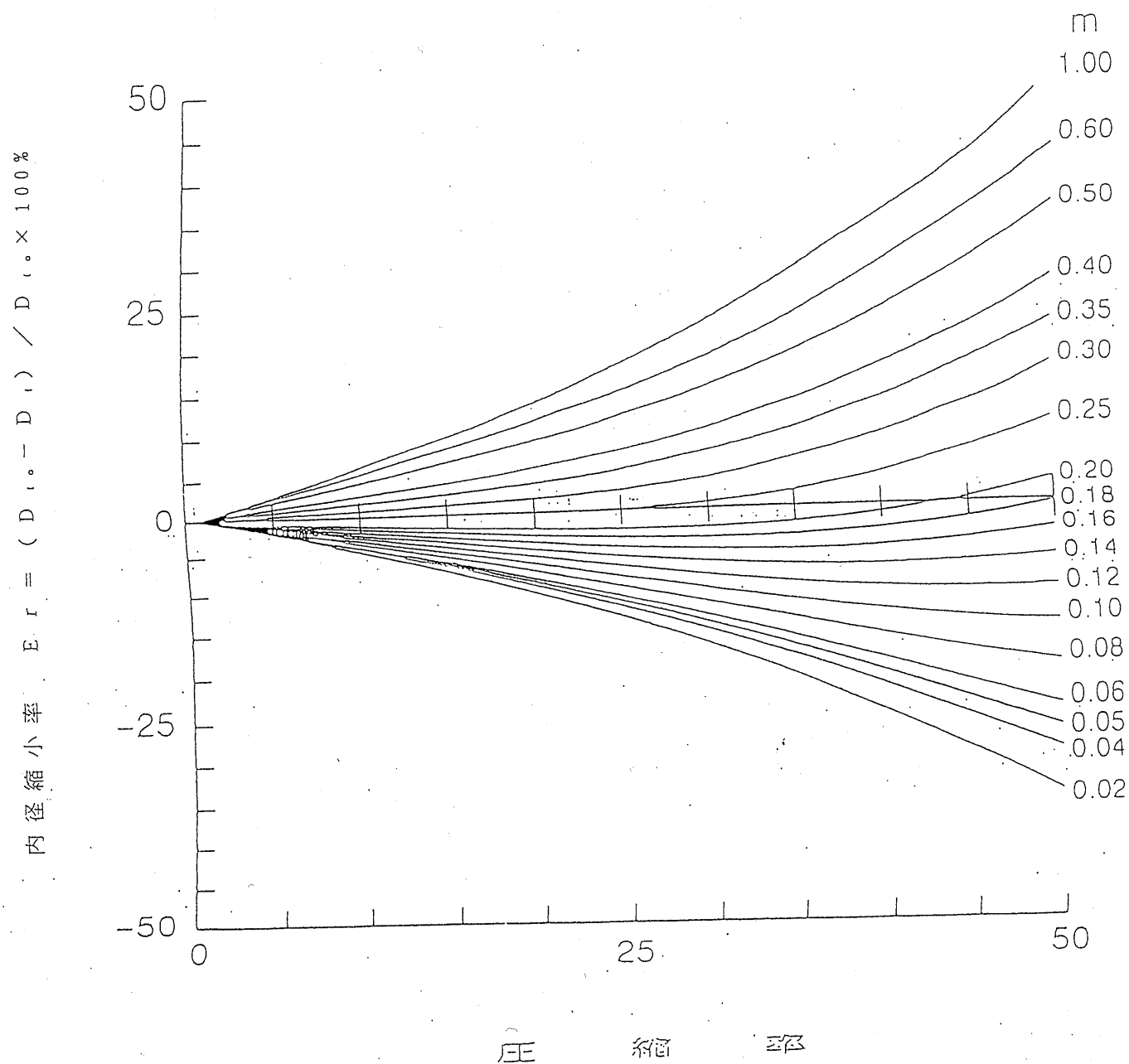


図5 内径比と圧縮率の関係

表1 試験条件

(a) 工具

材 質	表面粗さ	加熱温度
S K D 6 1	$Ra=0.02\mu m$	$300^{\circ}\text{C}\sim 350^{\circ}\text{C}$

(b) 素材

材 質	表面粗さ	加熱温度
アルミニウム A 6 0 6 1	$Ra=0.3\sim 0.6\mu m$	500°C
黄銅 C 3 7 7 1	$Ra=0.3\sim 0.6\mu m$	700°C
低炭素鋼 S W C H 1 0 K	$Ra=0.3\sim 0.6\mu m$	800°C
ステンレス鋼 S U S 4 0 3	$Ra=0.3\sim 0.6\mu m$	800°C
ステンレス鋼 S U S 6 3 0	$Ra=0.3\sim 0.6\mu m$	1100°C

を用た. 最大パンチストロークは70mm, 下死点上10mmの位置における速度は80mm/sである. 工具温度は300℃と350℃で、試験片加熱温度は、アルミニウム：500℃、低炭素鋼：800℃、黄銅：700℃、ステンレス鋼（S U S 403）：800℃、ステンレス鋼（S U S 630）：1100℃で試験を行った.

加熱した試験片を金型上で急速に冷やさないため、試験片の妨げにならないように、ニクロム線またはスチール線で足を付け、所定温度の電気炉で加熱する. 上型をバーナー、下型を電気炉所定温度まで加熱する.

工具を500℃の電気炉へ入れ、300℃または350℃になるまで加熱する. 潤滑剤を2～5μm工具へスプレイ塗布し、所定温度に加熱し

た試験片をセット後、すぐに圧縮加工を行った。

2. 2 前方押し出し形摩擦試験

押し出しは、工具のくぼみまたは穴の中に挿入した材料を加圧して工具に設けたすきまから流出させることにより、一定断面を持つ製品または素材をつくるような加工方法の総称である。前方押し出しは、ピレットと呼ばれる素材片を、コンテナと呼ばれる容器状工具の中にまず挿入して、パンチによって加圧し、ダイス孔から流出させる。加圧工具の進行方向に押し出すときは前方押し出しと呼ばれる。前方押し出し形摩擦試験法は、図6に示すように円柱状素材からテーパ半角 α のダイスにより前方押し出しを行い、その加工面圧 p から摩擦係数 μ 等の摩擦特性値を見積もる方法である。

円錐ダイスを用いた軸対称前方押し出し圧力の初等解析によれば、押し出しパンチ面圧比 $p_m / \bar{\sigma}_Y$ （ここで、平均変形抵抗 $\bar{\sigma}_Y$ ）は、押し出し比 R 、ダイス半角 α 、摩擦係数 μ の関数として次式のように示される。

$$\frac{p_m}{\bar{\sigma}_Y} = \frac{1 + \cot \alpha}{\mu \cot \alpha} (R^{\mu \cot \alpha} - 1)$$

この式に従って計算した結果を図7と図8に示す。図7に示すように、ダイス半角 5° では押し出し面圧比が潤滑剤の摩擦係数の変化に敏感すぎるため、本研究に用いるプレス機の最大荷重をオーバーする恐れがある。 20° 以上では、押し出し面圧比が潤滑剤の摩擦係数の変化に鈍感すぎるため、摩擦係数の変化を読みとり難い。また、図8に示すように、ダイス半角 10° において、押し出し比2では押し出し面圧比の変化が少なく、押し出し比が6では押し出し面圧比が摩擦係数の変化に敏感すぎる。そこで、ダイス半角を 10° 、押し出し比を4として摩擦試験を行うのが適当である。

表2に試験条件を示す。前方押し出し形摩擦試験には最大荷重が1.6 kN、パンチストロークが70 mmの機械プレス（MKN2-160/7）

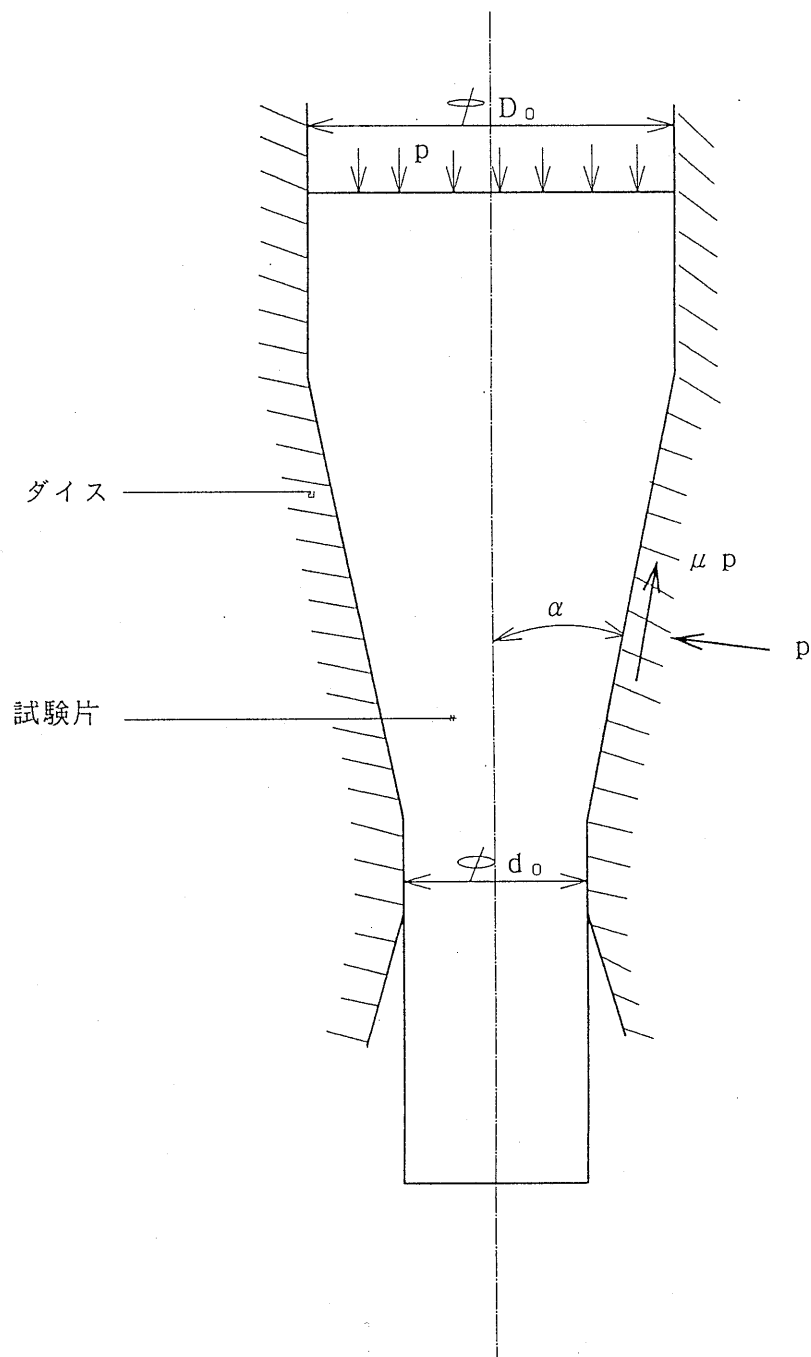


図6 前方押出し形摩擦試験法の原理図

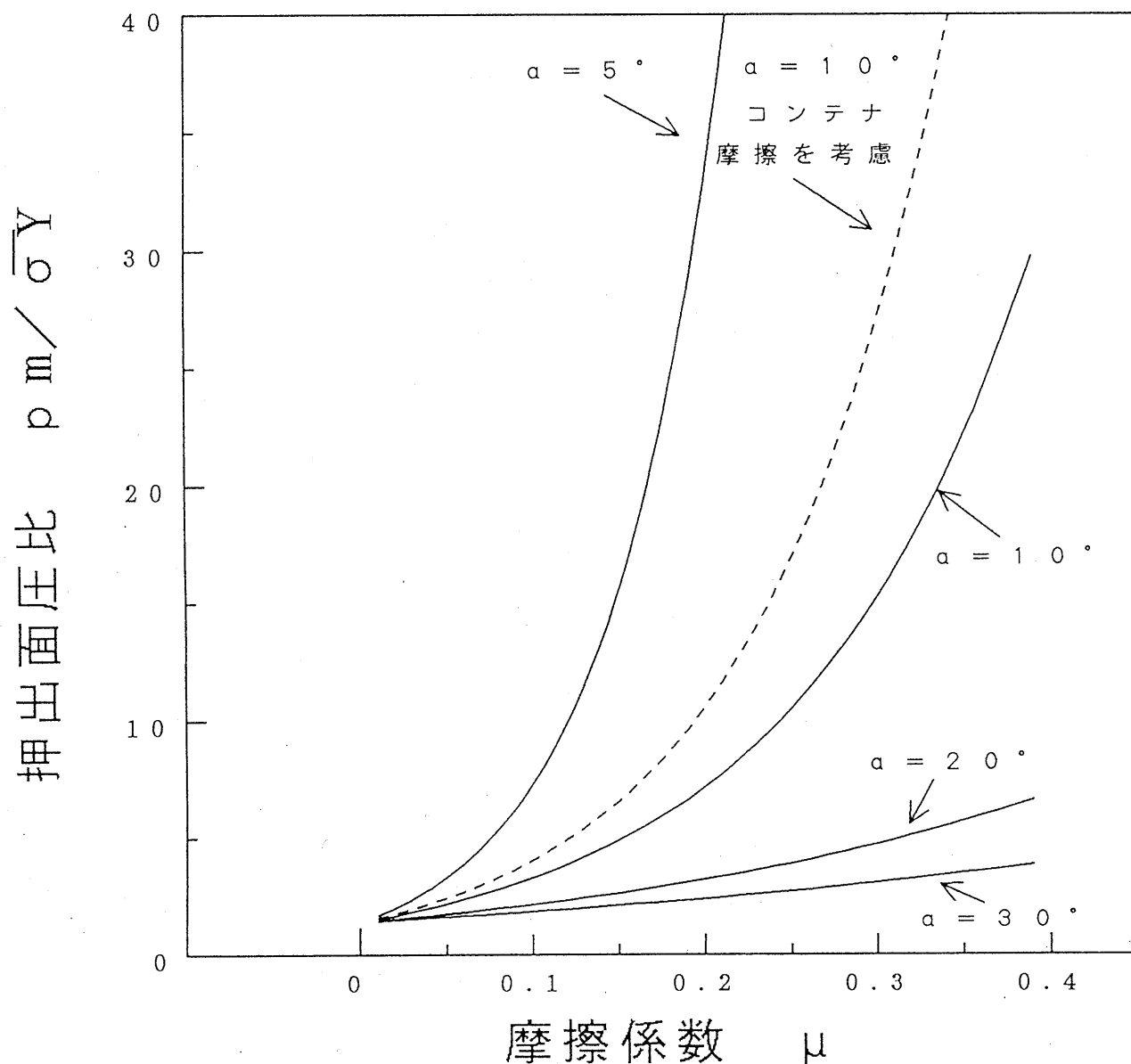


図 7 押出し比 4 における押出し面圧比に及ぼす摩擦係数とダイス半角の影響

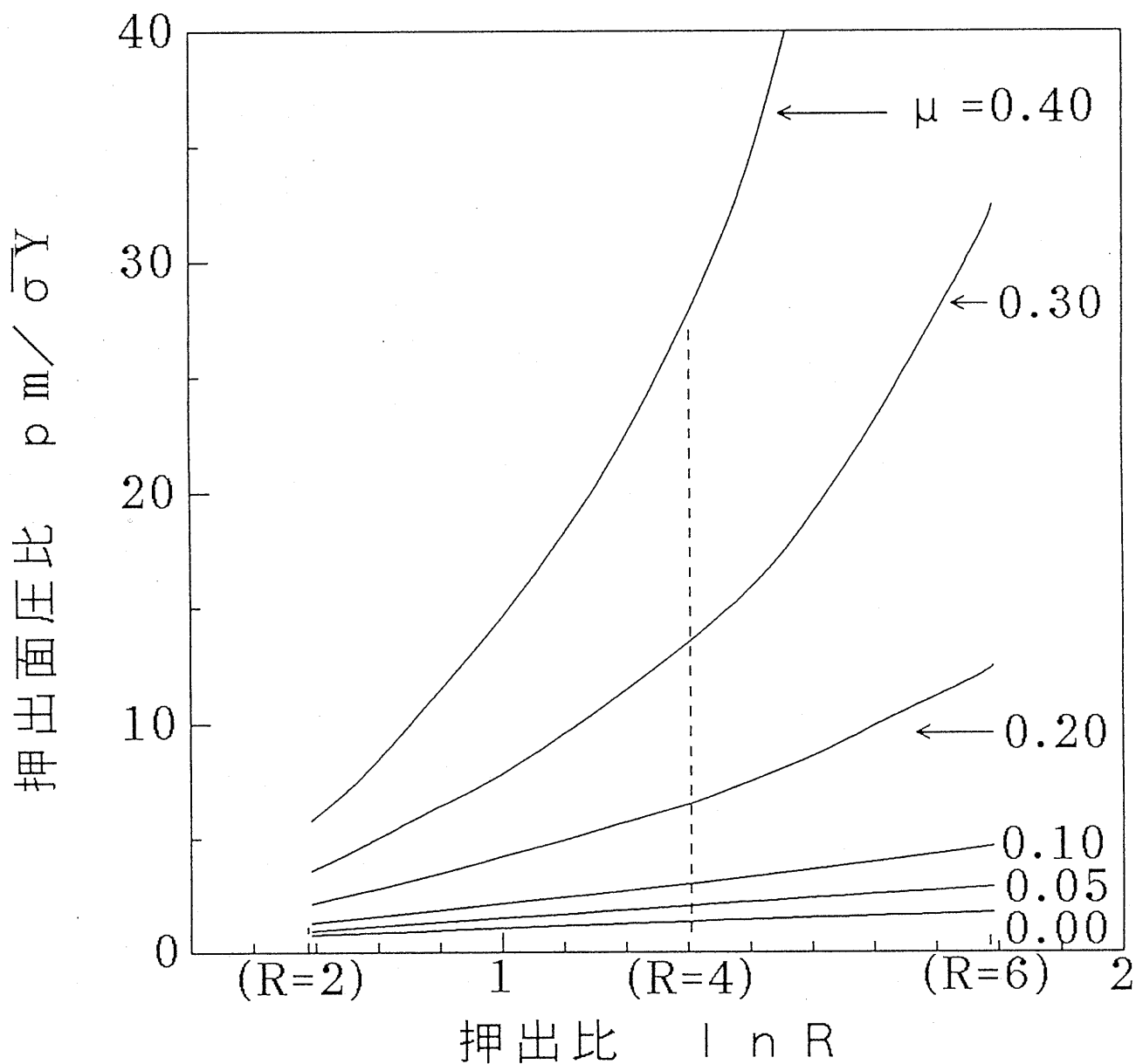


図 8 ダイス半角 10° における押出面圧比に及ぼす押出比と摩擦係数の影響

を用いた。10mm圧下した時のパンチの平均速度は約40mm/sである。

表2 試験条件

	材質	表面粗さ	加熱温度
工具	S K H 5 1	Ra=0.3 μ m	200℃
素材	S 4 5 C	Ra=0.3~0.6 μ m	800℃
	S U S 6 3 0	Ra=0.3~0.6 μ m	1100℃

ロックアウトストロークは30mmである。図9にダイスの寸法を示す。摩擦条件を厳しくするためにダイスベアリング長さを5mmとした。ダイスは高速度工具鋼S K H 5 1（H R C 6 0 ~ 6 2）製で、表面粗さは $R_{max}=0.1\mu m$ である。潤滑剤の変更時には、ダイス面の凝着はダイヤモンド研磨剤で超音波研磨して取り除いた。図10に示すようにダイスはダイスホルダーに2kwのカートリッジヒーターを埋め込み、200℃に加熱した。また、パンチは高速工具鋼S K H 5 1相当（M H 8 5，H R C 6 4）製で、加熱しないで試験した。試験片材質は高炭素鋼S 4 5 Cとステンレス鋼S U S 6 3 0を用いた。試験片寸法を図11に示す。ロックアウトストロークの関係で、押出し長さを約30mmとした。試験片は試験直前に10kw高周波誘導加熱装置を用い、約22秒と30秒で、それぞれ800℃と1100℃になるように調整して加熱した。

表3に供試潤滑剤を示す。固体潤滑剤単独での潤滑性能を把握する目的で、固体潤滑剤として、超高分子量ポリエチレンU H M W - P E，ステアリン酸C a，B N，絹雲母をそれぞれ20wt%添加した供試潤滑剤を試作した。これらの潤滑剤をダイスへ付着するためのメチルセルロース樹脂と疎水性粉体を水中へ分散させるためのノニオン系界面活性剤を必要最低限量、溶液中へ添加した。さらに、市販されている黒鉛潤滑剤、白色系潤滑剤、透明系潤滑剤と、U H M

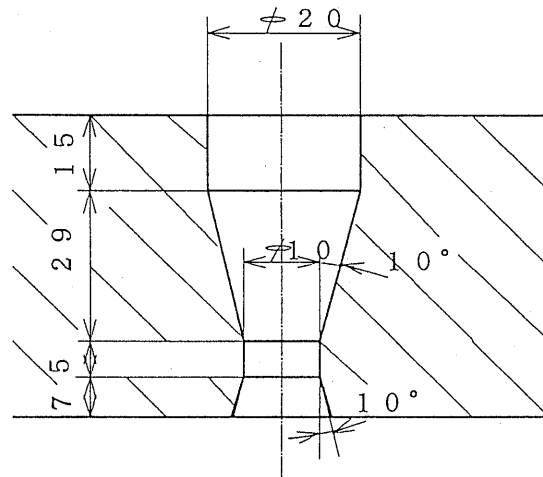


図 9 前方押し出し形摩擦試験用ダイス

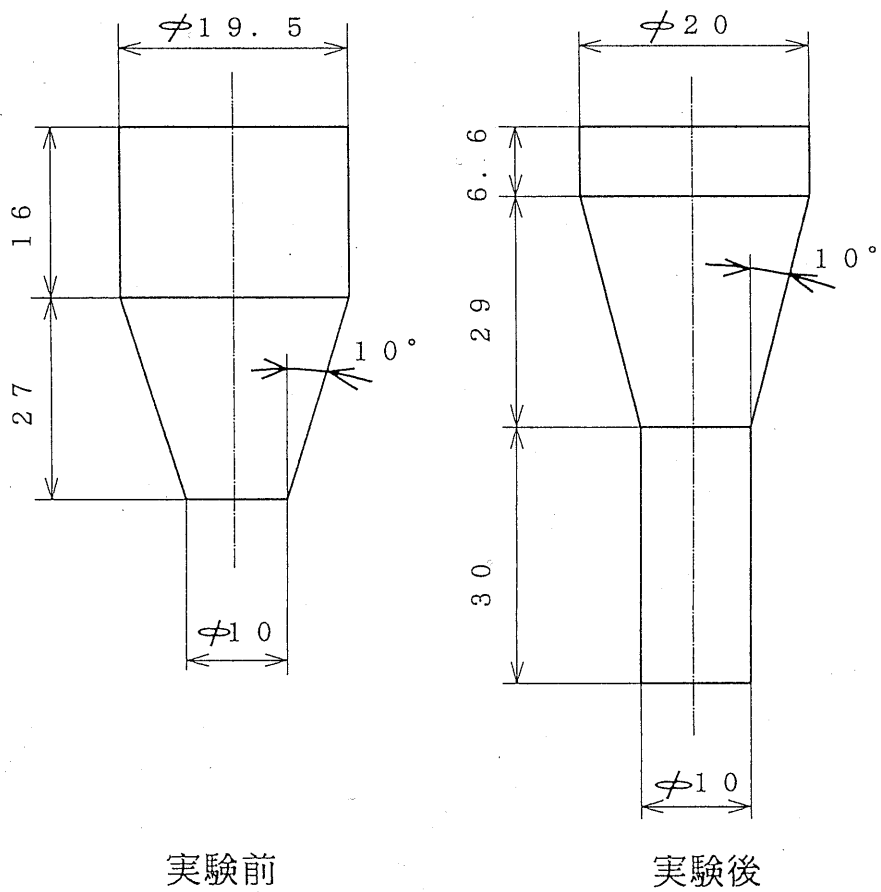


図 11 試験片寸法とその変形

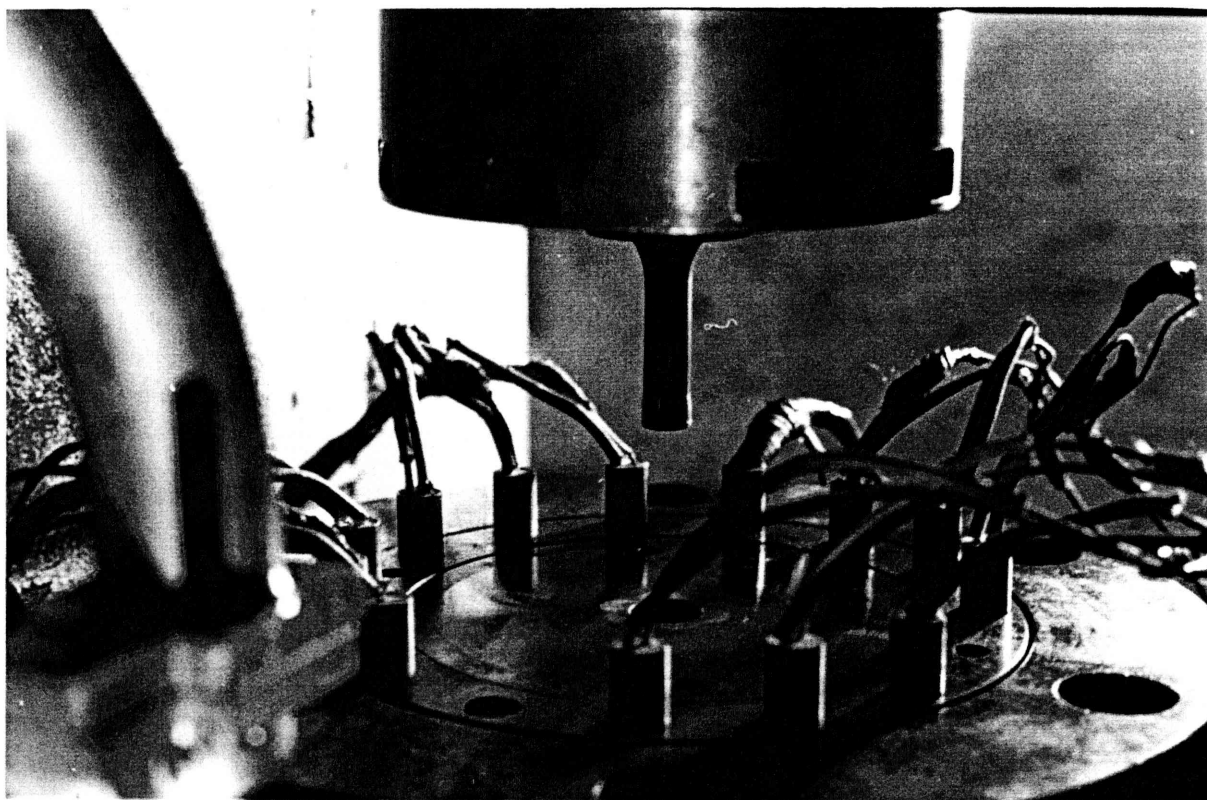


図 1 O ダイスの加熱状態写真

W-P-Eを主成分として試作したUHMW-P-E系潤滑剤についても試験した。黒鉛系10倍、そのほかは7倍に水で希釈し、空気圧0.2MPa、潤滑剤液圧0.15MPaに調整した2個のノズルを持つ自動スプレー装置でダイスとパンチへ0.5秒間塗布した。この時の塗布量は約8gである。

200℃に加熱したダイスと室温のパンチへ潤滑剤を0.5秒間塗布すると共に、試験片を約30秒間高周波加熱し、所定温度になると同時にダイスへ挿入し、押出し加工を行った。押出し荷重 P はプレス機のコンロッドに貼り付けた歪ゲージで測定した。この荷重 P をパンチ端面の面積で除しパンチ面圧 p_m を算出した。S45Cの800℃における平均変形抵抗 $\bar{\sigma}_F$ は、志田の実験式を用いて計算し(1)、

表3 供 試 潤 滑 剤

潤 滑 剤	平均粒径	備 考
* UHMW-PE (200万)	30 μ m	メチルセルロース樹脂4wt% ノニオン系界面活性剤2wt% UHMW-PE20wt%含有 する水分散液
ステアリン酸Ca		上記のUHMW-PE20wt% をステアリン酸Ca20wt%に 代替
BN	4.5 μ m	上記のステアリン酸Ca20wt% をBN20wt%に代替
絹雲母	0.3 μ m	上記のBN20wt%を絹雲母 20wt%に代替
黒鉛系潤滑剤		黒鉛を22wt%含有する市販 の水系熱間鍛造用潤滑剤
白色系潤滑剤		金属石ケンを主成分として有効 成分40wt%含有する市販の 水系熱間鍛造用潤滑剤
透明系潤滑剤		金属石ケンを主成分として有効 成分55wt%含有する市販の 水系熱間鍛造用潤滑剤
UHMW-PE系潤滑剤		UHMW-PEを主成分とし有効 成分40wt%含有する試作水系 熱間鍛造用潤滑剤

* 超高分子量ポリエチレン (平均分子量)

$\overline{\sigma}_Y = 146 \text{ MPa}$ を求めた。押出しパンチ面圧を変形抵抗で除し、押出し面圧 p_m を求めた。この押出し面圧比を基に図 7 の点線で示した $\alpha = 10^\circ$ のダイスでコンテナ摩擦を考慮した線図から摩擦係数を求めた。試験後、焼付き状態を観察し、正常にロックアウトされ、試験片表面にも焼付きが無い場合には、各種固体潤滑剤は 3 回まで、市販、試作潤滑剤は 10 回まで連続して試験を行った。焼付きが発生した場合には、そこで試験を中止した。

2. 3. 前・後方押出し形試験

2. 3. 1. 前・後方押出し形試験の理論解析

前・後方押出し形試験法は、図12に示すように円柱素材からテーパ半角 α のダイスによる前方押出しと後方押出しを同時に行い、後方押出し荷重にバランスする前方押出し長さ S_f を測定して、テーパダイス面上の摩擦係数 μ 等を算出する方法である。

パンチがテーパ入口角から L_r の位置まで進んだ場合の前方押出し面圧比 p_f/σ_y を初等解析法によって求める。

(I) 摩擦せん断係数 $\tau_f = mk$ 一定の場合

図13に従って、押出し材料から押出し方向に対して垂直の微小要素(スラブ)を考える。 x 方向の力のつり合いの条件は次の形の式になる。

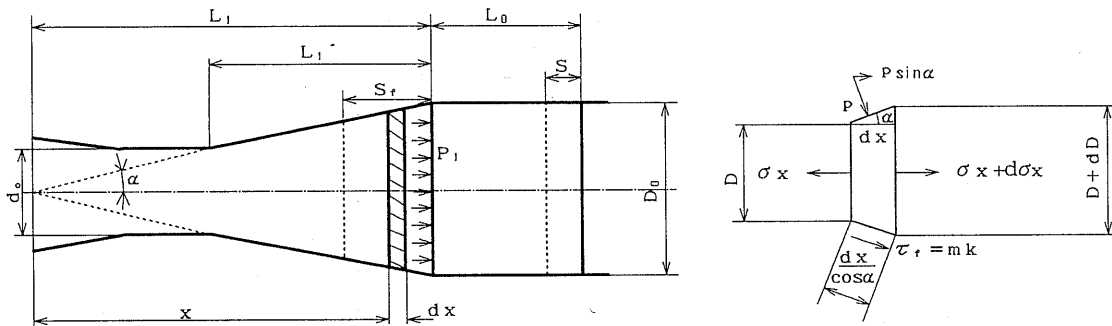


図 1 3 円柱状素材の押出し

$$\frac{\pi}{4} (D+dD)^2 (\sigma_x + d\sigma_x) - \frac{\pi}{4} D^2 \sigma_x + \pi D \frac{dx}{\cos \alpha} p \sin \alpha + \tau_f \cos \alpha \frac{dx}{\cos \alpha} \pi D = 0$$

(2-1)

2 次の微小項を無視して、

$$2\sigma_x dD + D d\sigma_x + 4p (\tan \alpha) dx + 4mk dx = 0$$

(2-2)

ここで

$$dD = 2 (\tan \alpha) dx$$

(2-3)

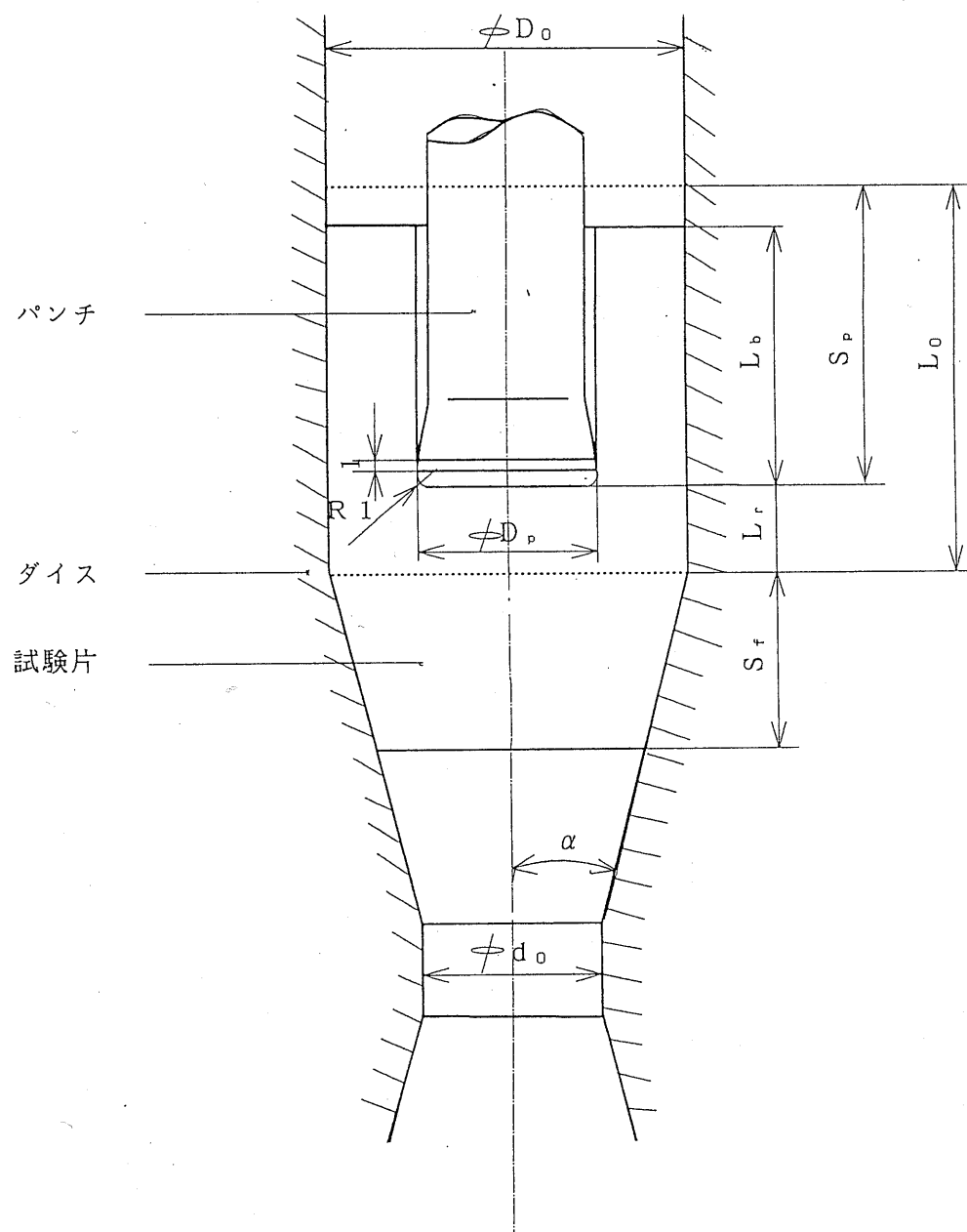


図12 前後方押し出し形摩擦試験法の原理図

を代入すると (2 - 2) 式は次の形になる.

$$2\sigma_x [2(\tan\alpha) dx] + Dd\sigma_x + 4p(\tan\alpha) dx + 4mk dx = 0 \quad (2-4)$$

ここで

$$D = 2(\tan\alpha)x,$$

(2 - 4) 式に代入すると次の式が得られる.

$$2x(\tan\alpha) d\sigma_x + 4(\sigma_x \tan\alpha + p \tan\alpha + mk) dx = \quad (2-5)$$

$$\text{降伏条件} \quad \sigma_x = \sigma_y, \quad \sigma_y = \sigma_z = -p$$

$$\sigma_x + p = \sigma_y$$

を式 (2 - 5) に代入すると.

$$d\sigma_x = -2\sigma_y \left(1 + \frac{m}{\sqrt{3}} \cot\alpha\right) \frac{dx}{x} \quad (2-6)$$

積分すれば

$$\sigma_x = -2\sigma_y \left(1 + \frac{m}{\sqrt{3}} \cot\alpha\right) \ln x + c \quad (2-7)$$

境界条件は,

$$x = \frac{d_0}{2} \cot\alpha + Ll' - S \quad \text{の時,} \quad \sigma_x = 0$$

上式を (2 - 7) に代入すると,

$$c = 2\sigma_y \left(1 + \frac{m}{\sqrt{3}} \cot\alpha\right) \ln \left(\frac{d_0}{2} \cot\alpha + Ll' - S\right) \quad (2-8)$$

また, (2 - 8) を (2 - 7) に代入して,

$$\sigma_x = -2\sigma_y \left(1 + \frac{m}{\sqrt{3}} \cot\alpha\right) \ln \frac{x}{\frac{d_0}{2} \cot\alpha + Ll' - S_f} \quad (2-9)$$

$$x = Ll' + \frac{d_0}{2} \cot\alpha \quad \text{の時,} \quad \sigma_x = -p_1$$

上式を (2 - 9) に代入すると,

$$Pl = 2\sigma_y \left(1 + \frac{m}{\sqrt{3}} \cot\alpha\right) \ln \frac{L_1}{L_1 - S_f} \quad (2-10)$$

図 1 4 に示すように, コンテナ部の微小要素の釣合から,

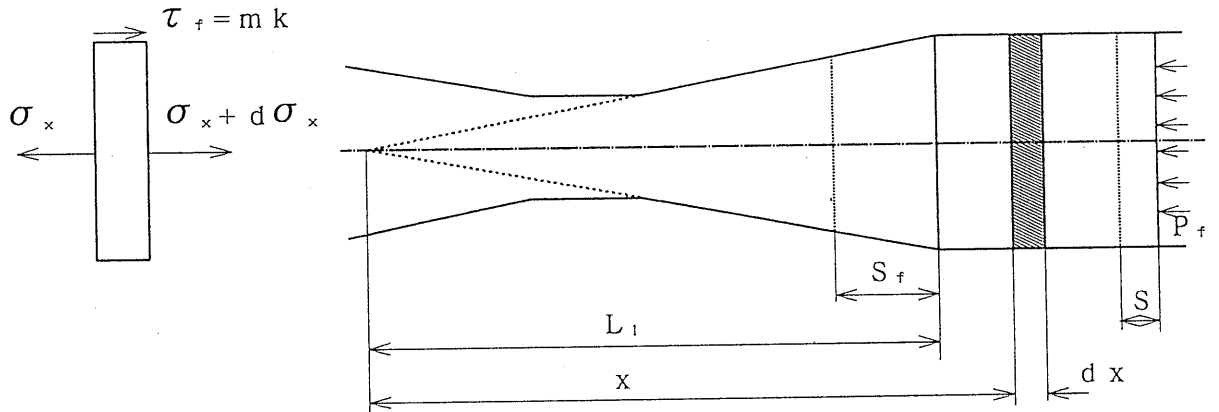


図 1 4 円柱上素材の押出し

$$(\sigma_x + d\sigma_x) \frac{\pi}{4} D_0^2 - \sigma_x \frac{\pi}{4} D_0^2 + \pi D_0 dx \tau_f = 0 \quad (2-11)$$

$$D_0 d\sigma_x = -4m \frac{\sigma_y}{\sqrt{3}} dx \quad (2-12)$$

積分すれば

$$D_0 \sigma_x = -4m \frac{\sigma_y}{\sqrt{3}} x + C \quad (2-13)$$

境界条件

$$x = L_1 \quad \text{の時} \quad \sigma_x = -p_1 \quad (2-13) \text{ 式に代入すれば}$$

$$-D_0 p_1 = -4m \frac{\sigma_y}{\sqrt{3}} L_1 + C \quad (2-14)$$

$$C = -D_0 p_1 + 4m \frac{\sigma_y}{\sqrt{3}} L_1 \quad (2-15)$$

式 (2-15) は式 (2-13) に代入し, 整理すると

$$\sigma_x = -\sigma_y \left\{ \frac{4m}{\sqrt{3} D_0} + 2 \left(1 + \frac{m}{\sqrt{3}} \cot \alpha \right) \ln \frac{L_1}{L_1 - S_1} + 4m \frac{L_1}{\sqrt{3} D_1} \right\} \quad (2-16)$$

$$x = L_1 + L_0 - S \quad \text{の時} \quad \sigma_x = -P_f$$

$$\frac{P_f}{\sigma_Y} = \frac{4m}{\sqrt{3}D_0} (L_0 - S) + 2 \left(1 + \frac{m}{\sqrt{3}} \cot \alpha\right) \ln \frac{L_1}{L_1 - S_1} \quad (2-17)$$

(II) 摩擦係数 $\mu = \text{一定}$ の場合

The figure consists of two diagrams. The left diagram shows a shaft of total length L_1 with a conical section of length L_0 and diameter D_0 . A force P_1 is applied at the end of the conical section. The right diagram shows a cross-section of the shaft with dimensions D , dx , and angles α and $\cos \alpha$. It illustrates the forces σx , $\sigma x + d\sigma x$, and $\tau r = \mu p$.

$$\frac{\pi}{4} (D + dD)^2 (\sigma_x + d\sigma_x) - \frac{\pi}{4} D^2 \sigma_x + \pi D \frac{dx}{\cos \alpha} P \sin \alpha + \tau_f \cos \alpha \frac{dx}{\cos \alpha} \pi D = 0$$

(2 - 1 8)

$$\sigma_x D^2 + 2\sigma_x D (dD) + \sigma_x (dD)^2 + D^2 d\sigma_x + 2D (dD) d\sigma_x + d\sigma_x (dD)^2 - D^2 \sigma_x + 4pDt \tan \alpha dx + 4\tau_f D dx = 0 \quad (2-20)$$

$$(x \tan \alpha) d\sigma_x + 2(\sigma_x \tan \alpha + p \tan \alpha + \mu p) dx = 0 \quad (2-21)$$

$$(x \tan \alpha) d\sigma_x + 2 [\sigma_x \tan \alpha + p (\tan \alpha + \mu)] dx = (2 - 2 \frac{2}{2})$$

- 22 -

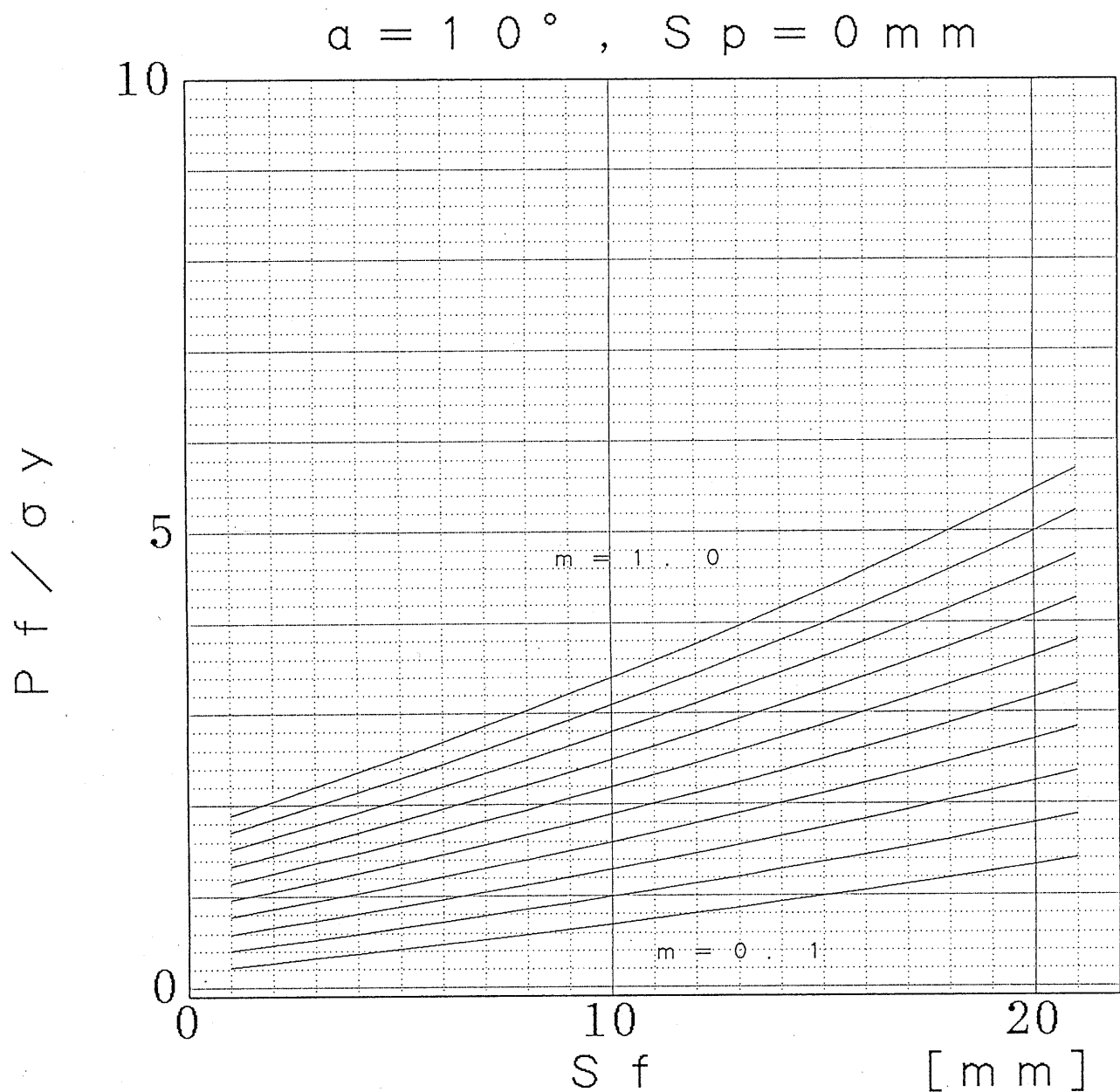


図 15 摩擦せん断係数 m の変化に伴う前方押出し長さ S_f と P_f / σ_y との関係

$$\sigma_x - (-p) = \sigma_y, \quad p = \sigma_y - \sigma_x. \quad (2-23)$$

これを (2-22) 式に代入して

$$(x \tan \alpha) d\sigma_x + 2 [\sigma_x \tan \alpha + \sigma_y (\tan \alpha + \mu) - \sigma_x (\tan \alpha + \mu)] dx = 0 \quad (2-24)$$

$$x \tan \alpha d\sigma_x + 2 [\sigma_y (\tan \alpha + \mu) - \sigma_x \mu] dx = 0 \quad (2-25)$$

$$\frac{d\sigma_x}{\mu \cot \alpha \sigma_x - \sigma_y (1 + \mu \cot \alpha)} = 2 \frac{dx}{x} \quad (2-26)$$

$\mu' = \mu \cot \alpha$ を仮定して、式 (2-26) は次の式を表します。

$$\frac{d\sigma_x}{\mu' \sigma_x - \sigma_y (1 + \mu')} = 2 \frac{dx}{x} \quad (2-27)$$

この式を積分すれば、

$$\frac{1}{\mu'} \ln [\mu' \sigma_x - \sigma_y (1 + \mu')] = 2 \ln x + c \quad (2-28)$$

$$\ln [\mu' \sigma_x - \sigma_y (1 + \mu')] = 2 \mu' \ln x + \mu' c \quad (2-29)$$

$$\mu' \sigma_x - \sigma_y (1 + \mu') = \exp (\ln x 2 \mu' + \mu' c) \quad (2-30)$$

$$\sigma_x = \frac{x^{2\mu'} \exp (\mu' c)}{\mu'} + \frac{1 + \mu'}{\mu'} \sigma_y \quad (2-31)$$

この式に、素材先端における境界条件：

$$x = L_1 - S_1 \text{ の時, } \sigma_x = 0$$

を代入すると、

$$0 = \frac{(L_1 - S_1)^{2\mu'} \exp (\mu' c)}{\mu'} + \frac{1 + \mu'}{\mu'} \sigma_y \quad (2-32)$$

$$-\frac{\sigma_y (1 + \mu')}{(L_1 - S_1)^{2\mu'}} = \exp (\mu' c) \quad (2-33)$$

$$\ln \left[-\frac{\sigma_y (1 + \mu')}{(L_1 - S_1)^{2\mu'}} \right] = \mu' c \quad (2-34)$$

$$c = \frac{1}{\mu'} \ln \left[-\frac{\sigma_y (1 + \mu')}{(L_1 - S_1)^{2\mu'}} \right] \quad (2-35)$$

$$x = L_1 \text{ で, } \sigma_x = -P_1 \quad \text{これと式 (2-35) を式 (2-31) に代入して、整理すると}$$

$$P_1 = \frac{1+\mu'}{\mu'} \sigma_Y \left[\left(\frac{L_1}{L_1 - S_1} \right)^{2\mu'} - 1 \right] \quad (2-36)$$

$\mu' = \mu \cot \alpha$ ので、次の式になる。

$$\frac{P_1}{\sigma_Y} = \frac{1+\mu \cot \alpha}{\mu \cot \alpha} \left[\left(\frac{L_1}{L_1 - S_1} \right)^{2\mu \cot \alpha} - 1 \right] \quad (2-37)$$

コンテナ部の微小要素の釣合より、

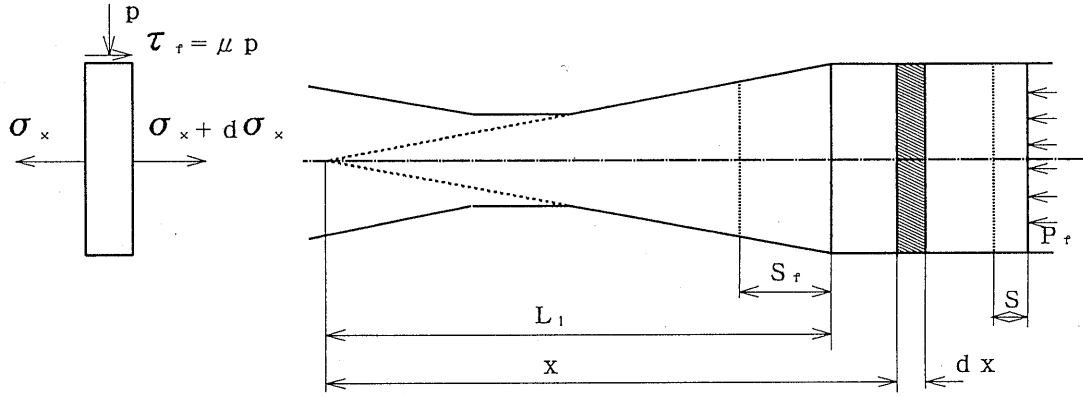


図 1 7 円柱状素材の押出し

コンテナ部における dx に作用する軸方向の力の釣合方程式は、次のようになる。

$$(\sigma_x + d\sigma_x) \frac{\pi}{4} D_0^2 - \sigma_x \frac{\pi}{4} D_0^2 + \pi D_0 dx \tau_f = \quad (2-38)$$

$$D_0 d\sigma_x = -4\tau_f dx \quad (2-39)$$

$$D_0 d\sigma_x = -4\mu p dx \quad (2-40)$$

主応力は $\sigma_1 = \sigma_x$, $\sigma_2 = \sigma_3 = -p$ であると仮定すると、トレスカおよびミーゼスのいずれの降伏条件も次式のように表される。

$$\sigma_x + p = \sigma_Y \quad (2-41)$$

式 (2-40) および (2-41) より p を消去して、積分すると、次式になる。

$$\ln(\sigma_x - \sigma_Y) = \frac{4\mu}{D_0} x + C \quad (2-42)$$

境界条件によると、 $x = L_1$ で、 $\sigma_x = -P_1$

$$C = \ln(-P_1 - \sigma_Y) - \frac{4\mu}{D_0} L_1 \quad (2-43)$$

$$C = \ln \left\{ \frac{1 + \mu \cot \alpha}{\mu \cot \alpha} \sigma_Y \left[1 - \left(\frac{L_1}{L_1 - S_1} \right)^{2\mu} \right] - \sigma_Y \right\} - \frac{4\mu}{D_0} L \quad (2-43)$$

この式は (2-41) 式に代入して、整理すると次式になる。

$$\sigma_x = \sigma_Y + \exp \left[\frac{4\mu}{D_0} (x - L_1) \right] \left\{ \frac{1 + \mu \cot \alpha}{\mu \cot \alpha} \sigma_Y \left[1 - \left(\frac{L_1}{L_1 - S_1} \right)^{2\mu} \right] - \sigma_Y \right\} \quad (2-44)$$

境界条件

$$x = L_1 + L_0 - S \text{ で, } \sigma_x = -P_f$$

によって (2-44) 式は次の式になる。

$$\frac{P_f}{\sigma_Y} = e^{\frac{4\mu}{D_0} (L_0 - S)} \left\{ 1 - \frac{1 + \mu \cot \alpha}{\mu \cot \alpha} \left[1 - \left(\frac{L_1}{L_1 - S_1} \right)^{2\mu \cot \alpha} \right] \right\} - 1 \quad (2-45)$$

この式は $\frac{P_f}{\sigma_Y} (\mu)$ と S_1 (S_1) の関係である。図 18 示したように、

摩擦係数 μ の変化に伴う前方押し長さ S_1 と P_f / σ_Y との関係。 μ 値は一定の時、 P_f / σ_Y は S_1 の増加と共に増加する。

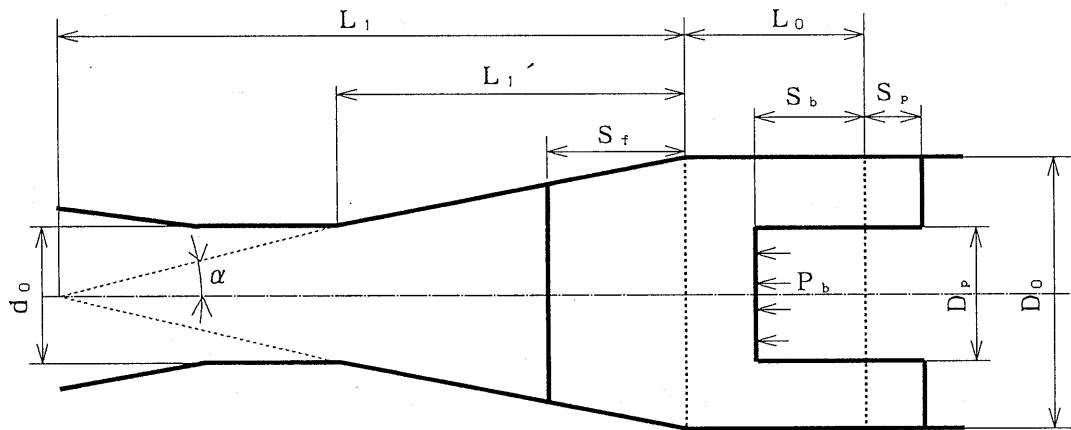


図 19 円柱状の前後方押し

前方押出しの初等解析から摩擦係数 μ と摩擦せん断係数 m と p_f / σ_Y の関係が求められる。

$$\frac{p_f}{\sigma_Y} = \frac{4m}{\sqrt{3}} \frac{L_r}{D_0} + 2 \left(1 + \frac{m \cot \alpha}{\sqrt{3}} \right) \frac{L_1}{L_1 - S_1} \quad (1)$$

$$\alpha = 10^\circ, \quad S_p = 0 \text{ mm}$$

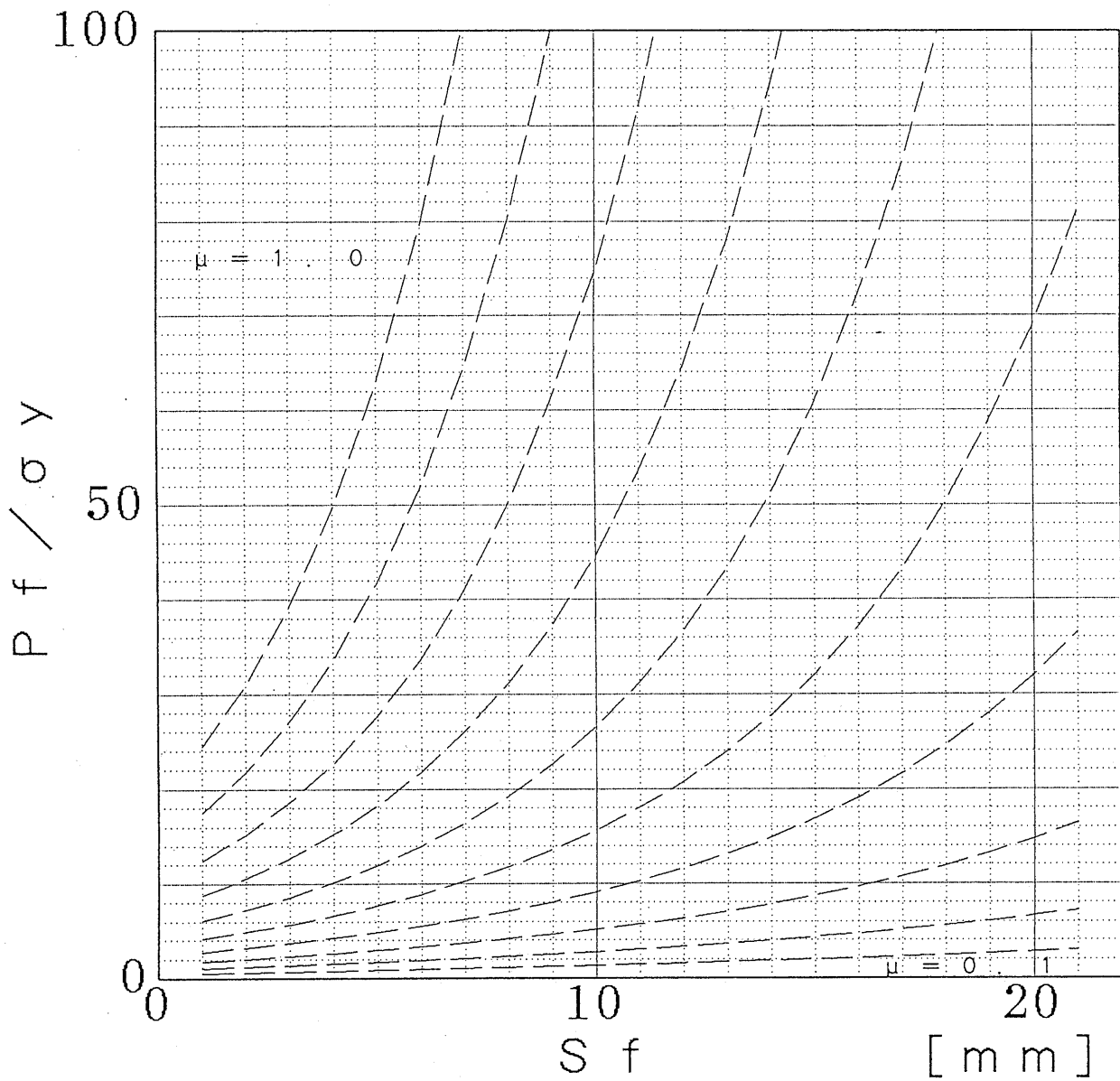


図 1 8 摩擦係数 μ の変化に伴う前方押し出し長さ S_f と P_f / σ_y との関係

$$\frac{P_f}{\sigma_y} = e^{\frac{4\mu}{D_0} (L_0 - S)} \left\{ 1 - \left(\frac{1}{\mu \cot \alpha} - 1 \right) \left[1 - \left(\frac{L_1}{L_1 - S_1} \right)^{2\mu \cot \alpha} \right] \right\} \quad (2)$$

ここで、式(1)は摩擦せん断係数 $m = \text{一定}$ の場合、式(2)は摩擦係数 $\mu = \text{一定}$ の場合である。一方、後方押出しのパンチ面圧比 P_b / σ_y は、前方押出しとの変形の相互干渉が無いと仮定して、例えば Avitzur による上界法の解析結果を利用できる(3)。Avitzur による上界法の解析結果は、

$$\frac{P_b}{\sigma_y} = \frac{2}{\sqrt{3}} \times \frac{1}{1 - R_e} \left[\frac{\sqrt{3}}{2} \ln \frac{1}{R_e} + \frac{\beta}{\sin^2 \beta} - \cot \beta + \frac{\cot \beta}{2} \ln \frac{1}{R_e} + m(1 - \sqrt{R_e}) \cot \beta \right]$$

図20は、上式から摩擦せん断係数 m の変化に伴う断面減少率 R_e と P_b / σ_y との関係求めて示したものである。

後方押出しの断面減少率 $R_e = (D_p / D_0)^2$ とすると、前方押出しと後方押出しの加工力の釣合関係

$$\frac{P_f}{\sigma_y} = \left(\frac{P_b}{\sigma_y} \right) R_e$$

から、 S_1 と m あるいは μ の関係が得られる。

ダイス半角 α および断面減少率 R_e を種々変更して計算した結果、 S_1 と μ あるいは S_1 と m の関係を得るためには、図21から図26に示すように、ダイス半角 $\alpha = 10^\circ$ で、断面減少率 R_e が25%、50%および70%の場合が最適であることが確認された。ただし、これらの図はコンテナ直径 $D_0 = 20\text{mm}$ 、押残り長さ $L_r = 0, 5, 10, 15\text{mm}$ について示してある。これらのノモグラフを用いれば、加工力や素材変形抵抗を測定しなくても、 S_1 を測定することにより、 m あるいは μ を求めることができる。厳密には、前方押出しと後方押出しの変形の相互干渉、パンチ頭部の摩擦あるいは素材の加工硬化等を考慮した塑性変形解析が必要となるが、図21から26に示したノモグラフを用いて第一近似的に μ と m を見積もることが可能である。

図21から図26までの断面減少率 $R_e = 25\%$ の場合には、最大の前方向押し長さは $S_1 = 21\text{mm}$ であるのに対して、 $R_e = 50\%$ の場合に

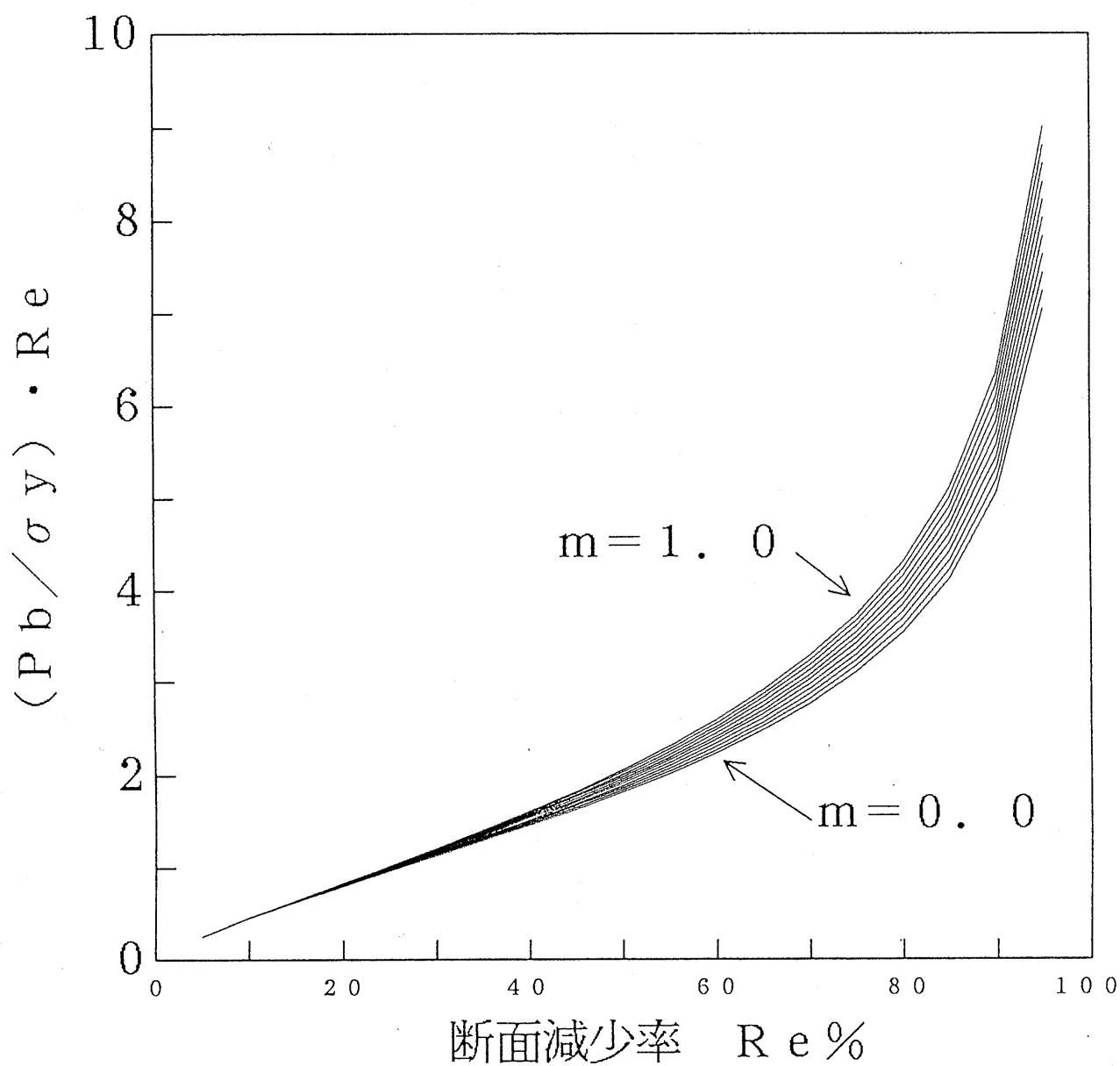


図 2 0 摩擦せん断係数 m の変化に伴う断面減少率 Re と $(Pb/\sigma_y) \cdot Re$ との関係

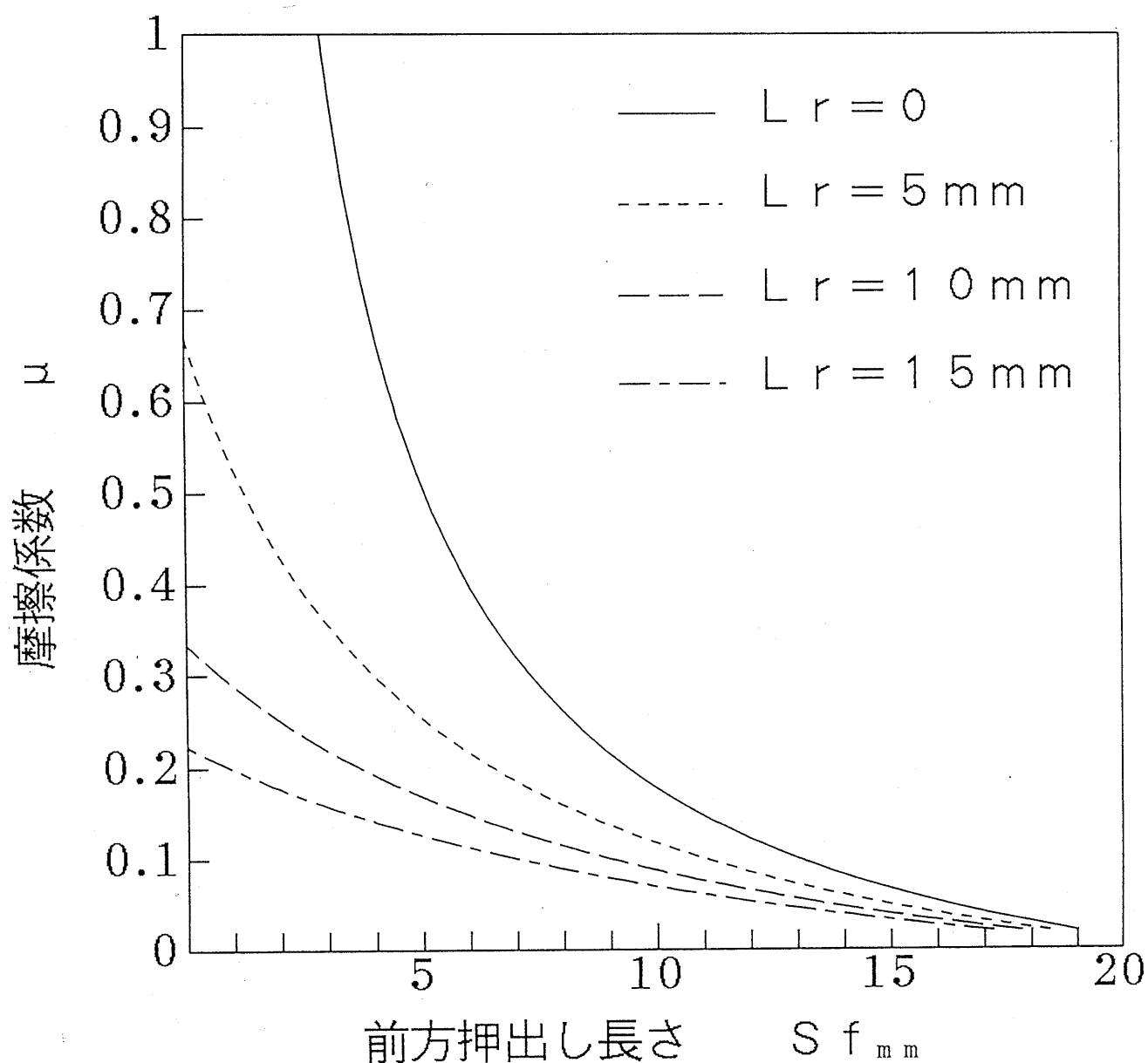


図2 1 前・後方押し出しにおける前方押し出し長さ と摩擦係数の関係 ($Re = 25\%$, $\alpha = 10^\circ\text{C}$)

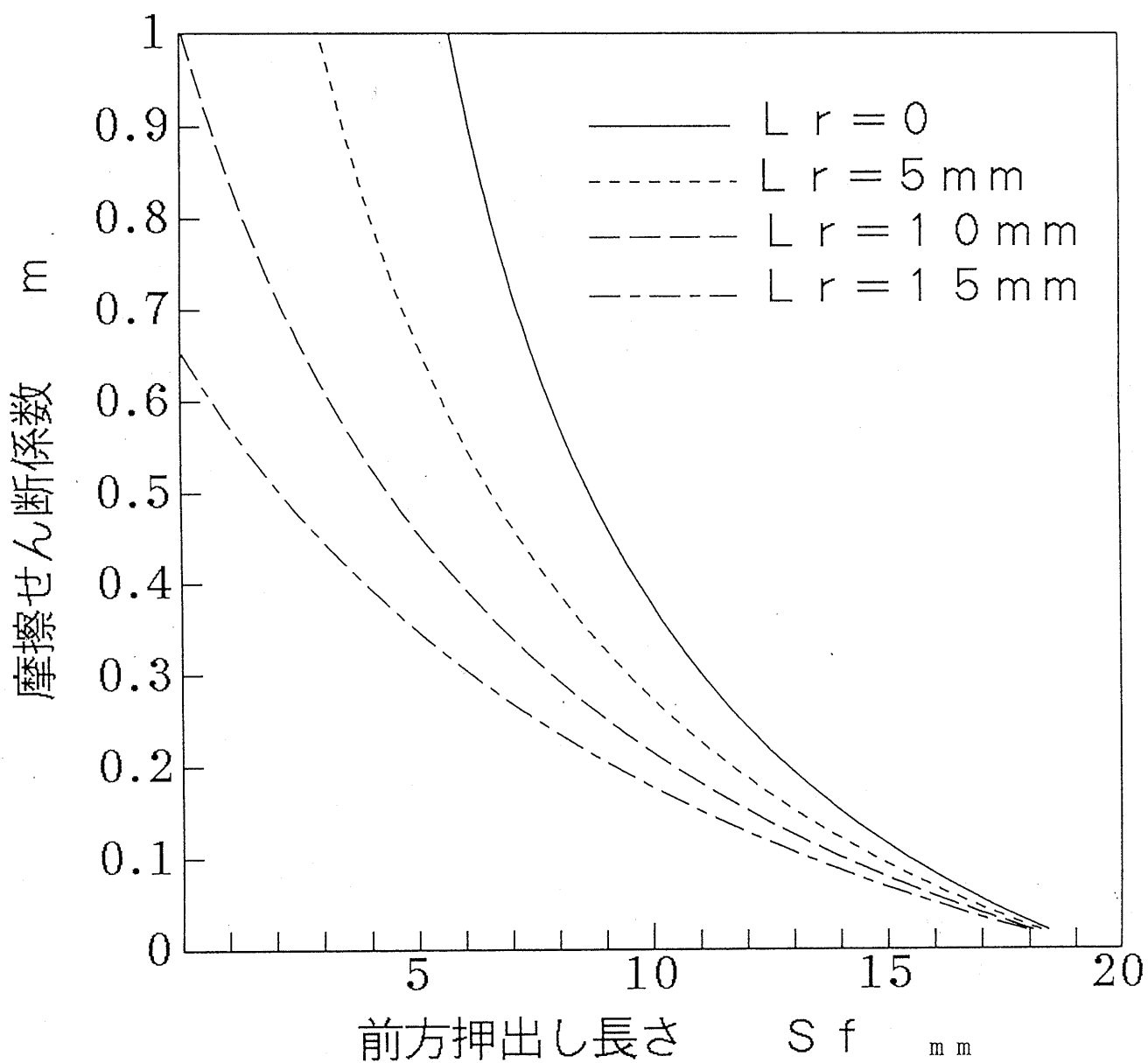


図 2.2 前・後方押し出しにおける前方押し出し長さ と 摩擦せん断係数の関係 ($R_e = 25\%$, $\alpha = 10^\circ$)

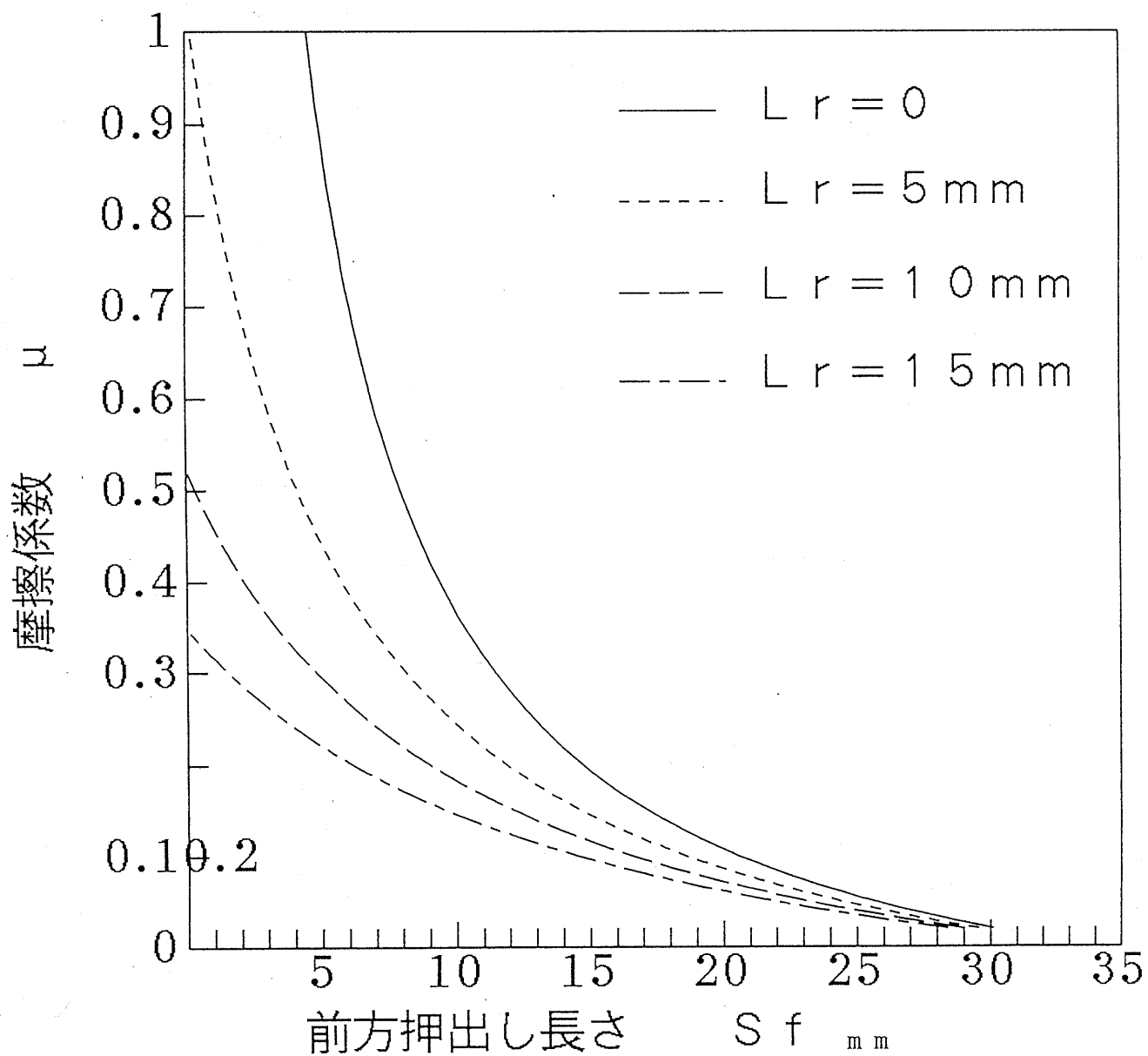


図 2 3 前・後方押し出しにおける前方押し出し長さ と 摩擦係数の関係 ($R_e = 50\%$, $\alpha = 10^\circ$)

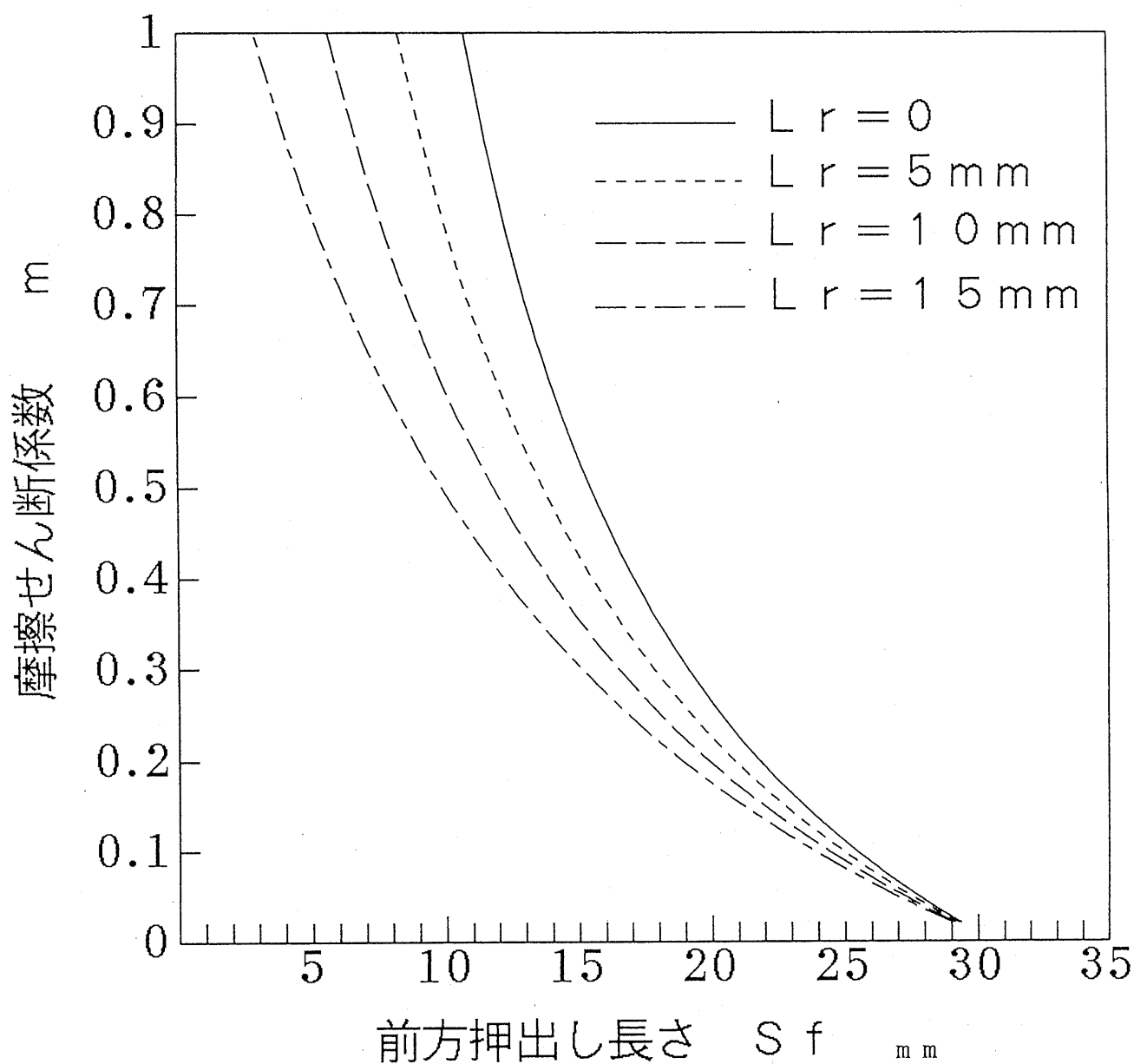


図2.4 前・後方押し出しにおける前方押し出し長さ と摩擦せん断係数の関係 ($Re = 50\%$, $\alpha = 10^\circ$)

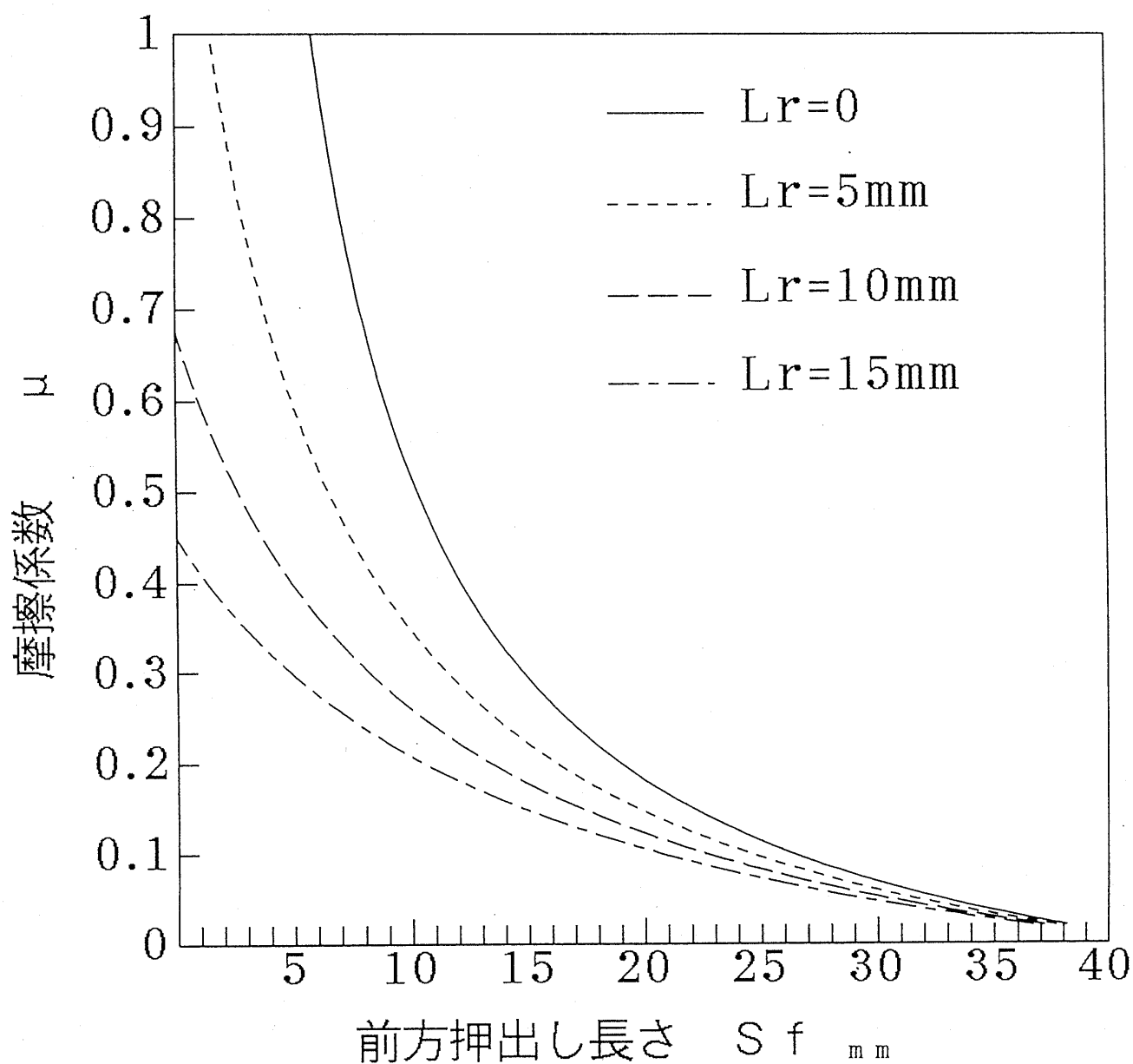


図25 前・後方押し出しにおける前方押し出し長さ と摩擦係数の関係 ($Re = 70\%$, $\alpha = 10^\circ$)

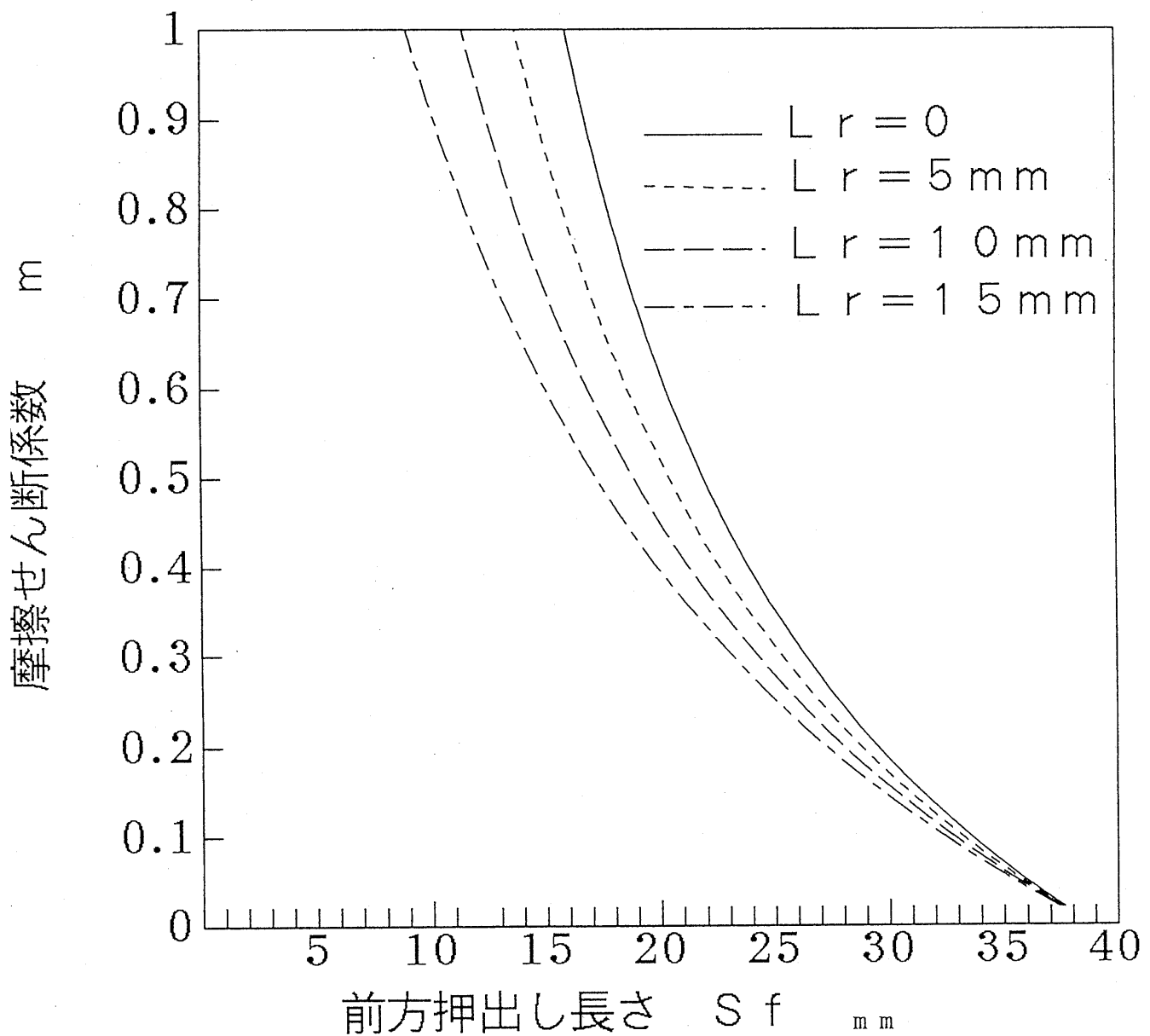


図2.6 前・後方押し出しにおける前方押し出し長さ と摩擦せん断係数の関係 ($Re = 70\%$, $\alpha = 10^\circ$)

は最大 $S_r = 33\text{mm}$ までとなり、 $R_e = 70\%$ の場合には、最大 $S_r = 40\text{mm}$ までとなり、 R_e が大きいほどすべり距離が長く、より厳しい摩擦条件での潤滑試験が可能となる。また、本摩擦試験では後方押出しのパンチ側の潤滑状態、とくに焼付き状態の評価も可能となる。

2. 3. 2. 試験条件

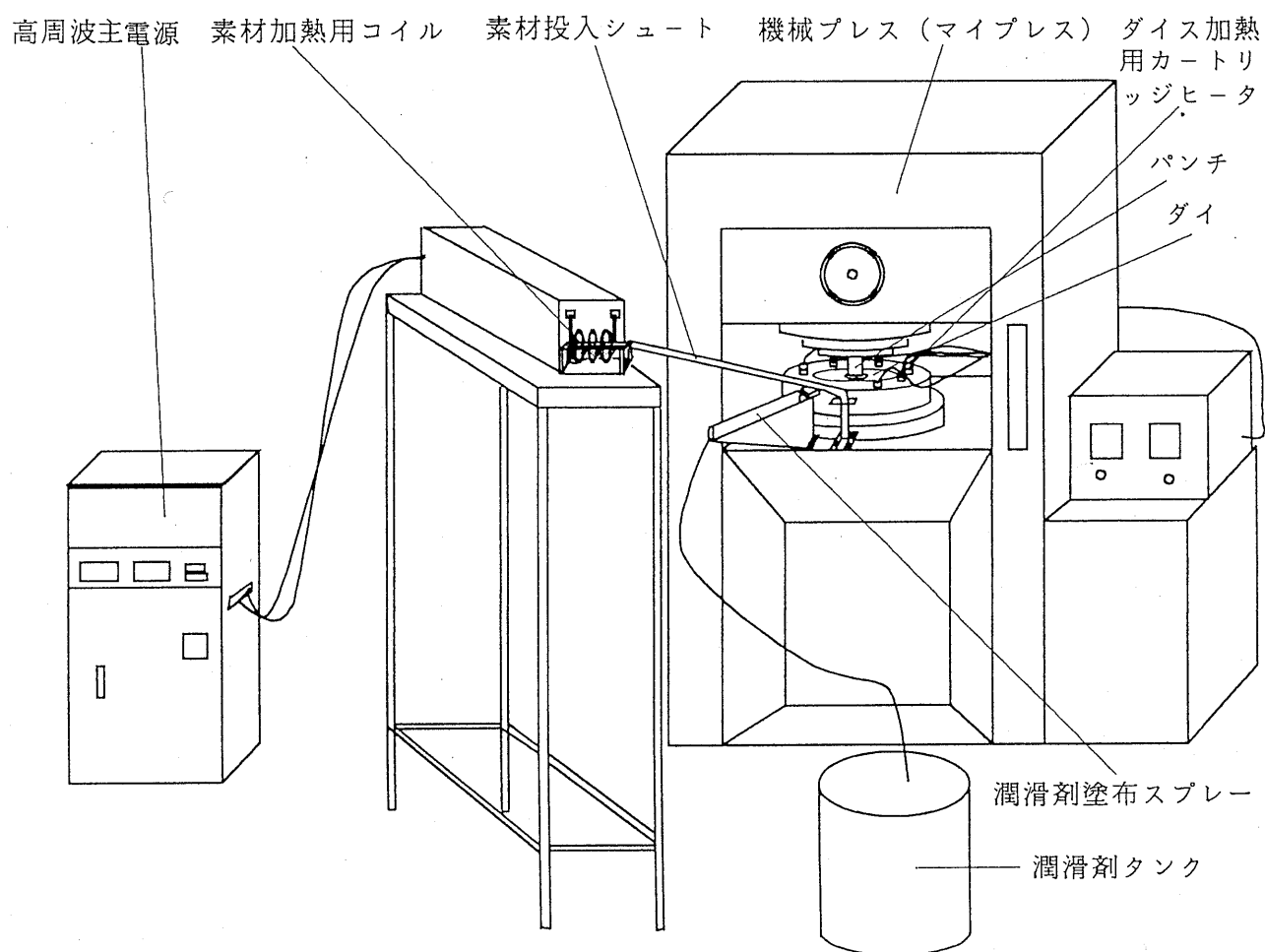
(I). 供試素材アルミニウム A-6061 の場合

表 4 試験条件

		材質	表面粗さ	加熱温度
工 具	ダイス	S K H 5 1	$Ra=0.3\mu\text{m}$	200℃
	パンチ	超硬(4)	$Ra=0.1\mu\text{m}$	200℃
素 材		A 6 0 6 1	$Ra=0.3\sim0.6\mu\text{m}$	500℃

表 4 に試験条件を示す。図 27 と 28 は前後方押出し摩擦試験の概略図と全体写真である。高周波加熱装置が素材を加熱用である。高周波加熱された素材はシュートを通して、型近傍に落とされ、手で型孔内に挿入する。ダイスはカートリッジヒーターで加熱される。潤滑剤はスプレーによって塗布される。ダイス $\alpha = 10^\circ$ ，断面減少率 $R_e = 25, 50\%$ ，押残り長さ $L_r = 0, 5\text{mm}$ とした。ダイスは図 29 に示す形状寸法である。高速度工具鋼 S K H 5 1 (60～62 H R C) 製で、表面粗さは $R_{\text{max}} = 0.3\mu\text{m}$ である。ダイスは 200℃ に加熱保持した。

パンチ形状を図 30 に示す。後方押出しのとき、材料の流れを考慮した上、パンチ先端が図 30 の詳細図のように作られている。材質は超硬 (V 4) 製である、予め 200℃ に加熱した状態で潤滑剤水溶液中に浸漬し十分に塗布した。荷重はプレスのコンロッドに貼付けた歪ゲージで測定した。図 31 は検定図線である。



10KW高周波加熱装置

形式：T-10S（10KW，AC200V）

機械プレス（コマツ製）

形式：ナックルジョイント
ストレートサイド型

最大荷重：160t

ストローク：70mm

ロックアウトストローク：32mm

圧下速度：下死点上10mmの速度は
約80mm/sec

図27 前後方押し出し形摩擦試験装置の概略図

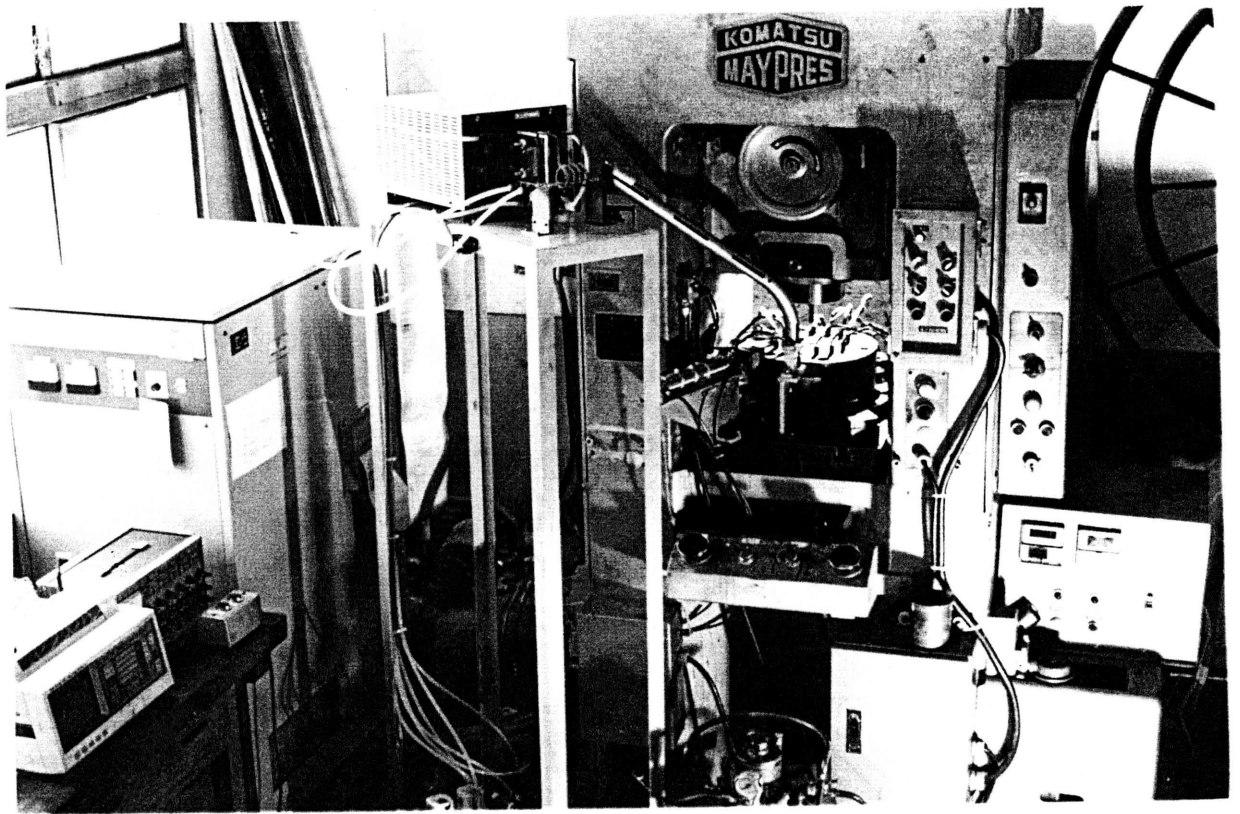


図 2 8 前後方押出し形摩擦試験装置の全体写真

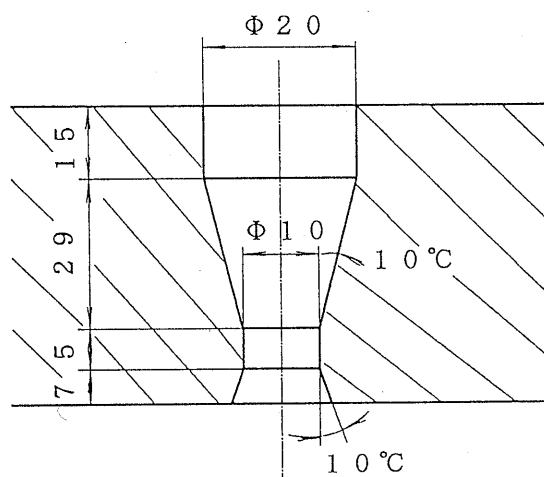


図 2 9 前後方押し形摩擦試験用ダイス

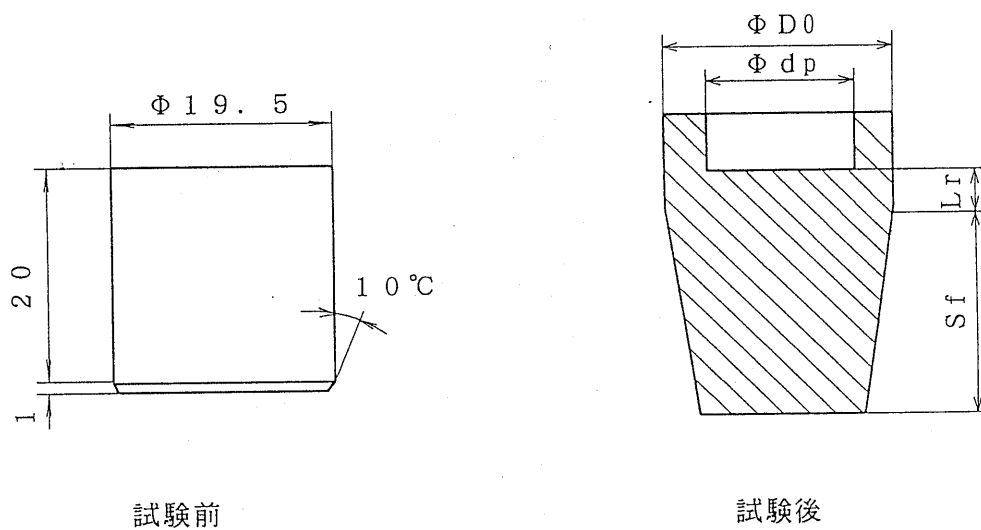


図 3 2 前後方押し形摩擦試験の試験片寸法とその変形

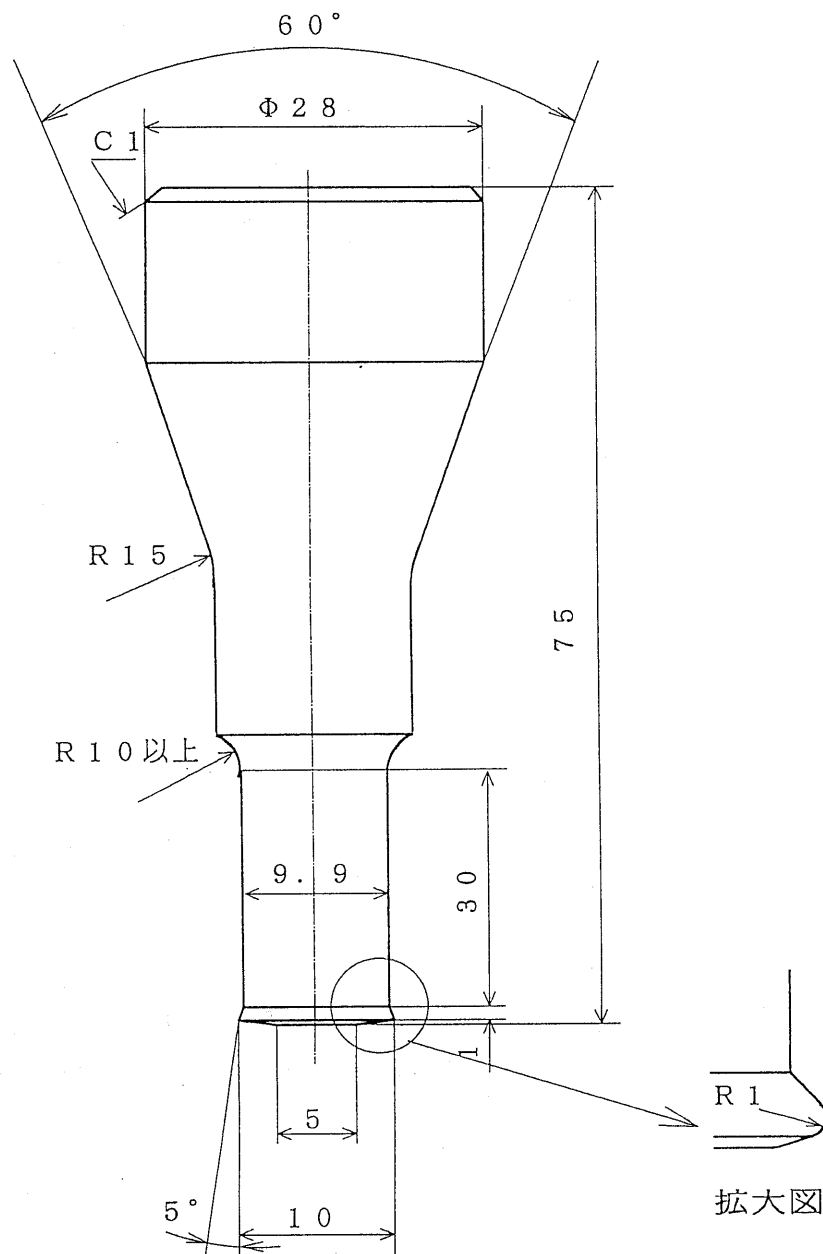


図30 パンチの寸法と形状

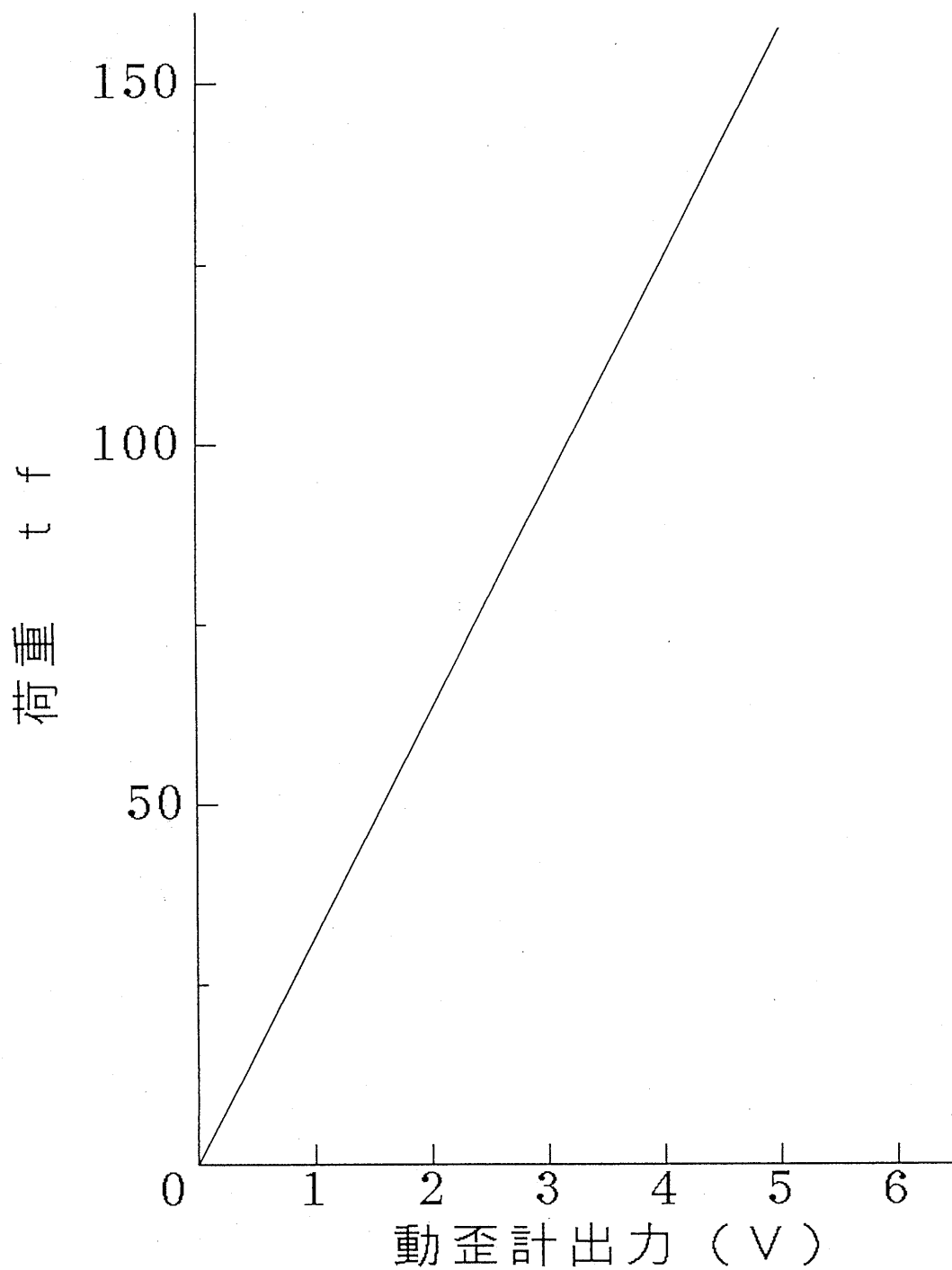


図 3 1 歪ゲージ(マイプレスコンロッドに貼)
歪ゲージの出力と荷重の関係

図 3 2 に示すように試験片寸法は、直径 19.5mm、長さ $L_0 = 15, 17, 20, 22, 24\text{mm}$ の 5 種類とした。先端にはダイス角度と合わせて、 10° 、1mm の面取りをした。これは、試験片角による潤滑剤の剥離を軽減するためである。また、試験片は試験直前に電気炉大気中で 500°C に加熱した。

表 5 に示すように潤滑剤には、黒鉛を 22wt% 含有する市販の水系

表 5 供試潤滑剤

潤滑剤	備 考
D a g 5 5 6 1	黒鉛を 22wt% 含有する市販の水系熱間鍛造用潤滑剤
Z n S	硫化亜鉛 ZnS を 20wt% と水ガラス 5wt% 含有する水系潤滑剤

熱間鍛造用潤滑剤 (Dag5561) と、比較のため μ が高いと推定される硫化亜鉛 ZnS20wt% と水ガラス 5wt% 含有水系潤滑剤をそれぞれ 10 倍に水で希釈して用いた。潤滑剤は、空気圧 0.2MPa、潤滑剤液圧 0.15MPa に調整した自動スプレー装置でダイスへ 0.5 秒間塗布する作業を 3 回繰り返し、十分に塗布した。

(II) . 供試素材ステレンス鋼 SUS 6 3 0 の場合

表 6 に試験条件を示す。ダイス $\alpha = 10^\circ$, 断面減少率 $R_e = 25, 50$

表 6 試験条件

		材質	表面粗さ	加熱温度
工 具	ダイス	超硬 (4)	$R_a = 0.1\mu\text{m}$	200°C
	パンチ	超硬 (4)	$R_a = 0.1\mu\text{m}$	200°C
素 材		S U S 6 3 0	$R_a = 0.3 \sim 0.6\mu\text{m}$	1100°C

%, 押残り長さ $L_r = 0\text{mm}$ とした。ダイスは超硬 (V4) 製で、表面粗さは $R_{\text{max}} = 0.3\mu\text{m}$ である。ダイスは 200°C に加熱保持した。ダイ

スの形状寸法は図 2 9 と同じである。また、パンチは図 3 0 と同じで超硬（V 4）製である。予め 200℃ に加熱した状態で潤滑剤を十分に塗布した。荷重はプレスのコンロッドに貼付けた歪ゲージで測定した。図 3 1 はマイプレスの歪ゲージの検定線図である。

試験片寸法は図 3 2 と同じで、直径 19.5mm、長さ $L_0 = 20\text{mm}$ とした。試験片は、図 2 7 に示すように試験直前に 10 kW 高周波誘導加熱装置を用いて、約 30 秒で 1,100℃ に加熱した。図 3 3 は温度と時間の推移線図である。

表 7 に供試潤滑剤を示す。黒鉛を 22wt% 含有する市販の水系熱間

表 7 供試潤滑剤

潤滑剤	備 考
D a g 5 5 6 1	黒鉛を 22wt% 含有する市販の水系熱間鍛造用潤滑剤
Soluble HM-1	水溶性高分子系潤滑剤
SP-891001-24	超高分子量ポリエチレン系潤滑剤

鍛造用潤滑剤（Dag5561）と、水溶性高分子系潤滑剤（Soluble HM-1）と超高分子量ポリエチレン系潤滑剤（SP-891001-24）をそれぞれ 10 倍に水で希釈して用いた。潤滑剤は、空気圧 0.2MPa、潤滑剤液圧 0.15MPa に調整した自動スプレー装置でダイスへ 0.5 秒間 1 回吹き付けて 1.458g 塗布した。実験は、この 3 種類の潤滑剤を使って、連続 10 回行った。毎回、パンチとダイス両方へ潤滑剤を塗布し、パンチ側の焼付き状態を観察した。10 回の試験中、パンチとダイスは、そのまま継続に用いた。

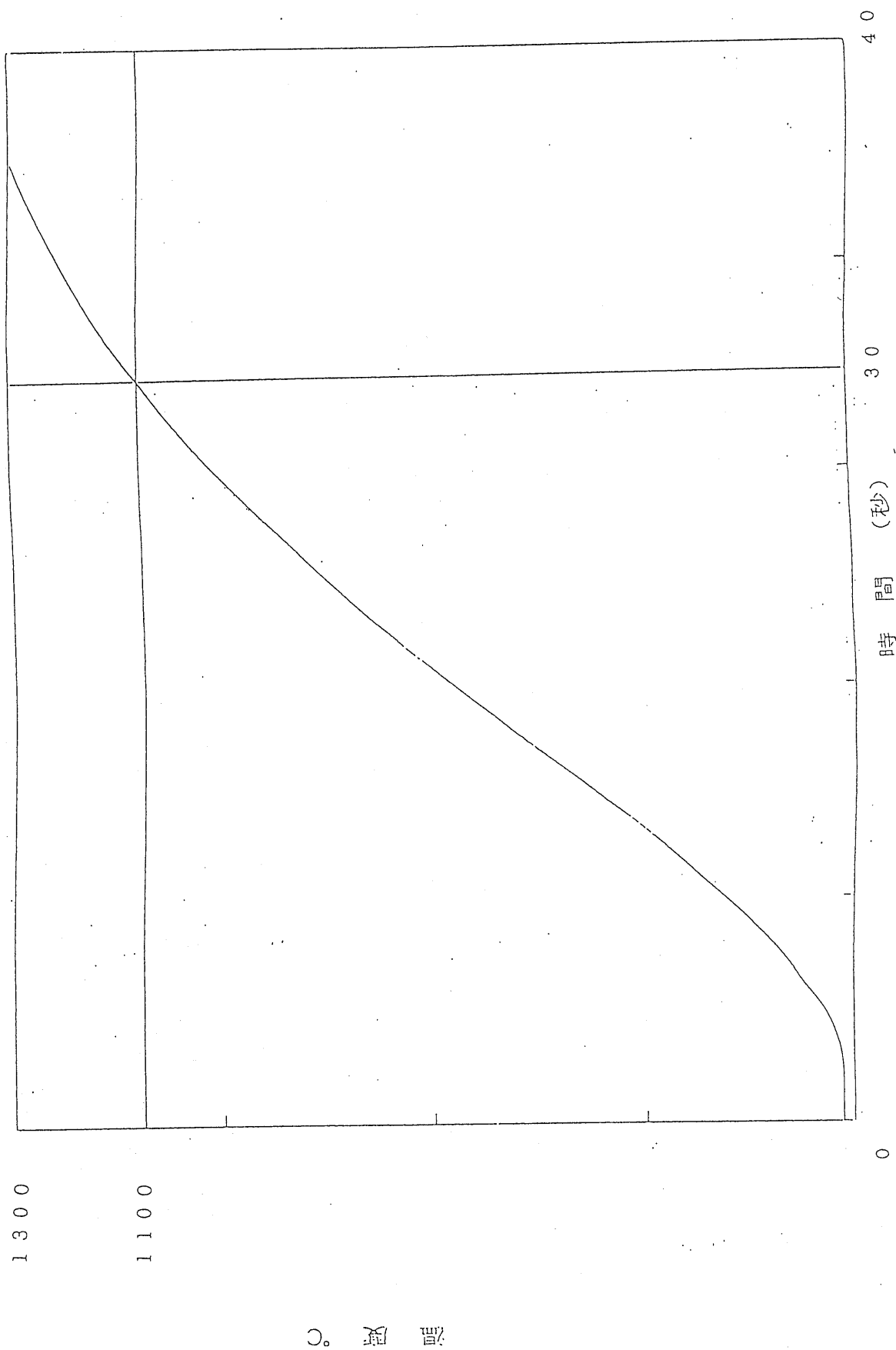


図 3 3 温度と時間の推移図

(Ⅲ) 供試素材 Al-Si 合金の場合

表 8 試験条件

		材質	表面粗さ	加熱温度
工 具	ダイス	超硬(4)	$Ra=0.1\mu m$	200℃
	パンチ	超硬(4)	$Ra=0.1\mu m$	200℃
素 材		Al-Si 合金	$Ra=0.3\sim 0.6\mu m$	500℃

表 8 に試験条件を示す。ダイス $\alpha = 10^\circ$ ，断面減少率 $R_r = 25, 50, 70\%$ ，押残り長さ $L_r = 0\text{ mm}$ とした。ダイスは超硬(V4)製で，表面粗さは $R_{max} = 0.3\mu m$ である。ダイスは200℃に加熱保持した。また，パンチは超硬(V4)製で，予め200℃に加熱した状態で潤滑剤を十分に塗布した。また，試験片は試験直前に電気炉中で500℃に加熱した。荷重はプレスのコンロッドに貼付けた歪ゲージで測定した。

潤滑剤は，素材へ溶剤系ドライフィルム型黒鉛D-900505-6を塗布した。素材加熱において，黒鉛は多少消失するが，その残量は充分程度である。素材への塗布と加熱方法は，ディッピングした後加熱した。ダイスへは水系黒鉛Dag5561(10倍希釈)、油性黒鉛0-940201-1、油性黒鉛HITASOL G0-102を塗布した。ダイス側への塗布は，水系黒鉛Dag5561(10倍希釈)の場合に，空気圧0.2MPa，潤滑剤液圧0.15MPaに調整した自動スプレー装置でダイスへ0.5秒間1回塗布し，油性黒鉛0-940201-1とHITASOL G0-102の場合に，ハンドスプレーガンを使って，潤滑剤液圧0.15MPaに調整し，手動でダイスへ約3秒間塗布した。

3. ステンレス鋼素材の潤滑性能評価試験

3. 1. リング圧縮摩擦試験結果

表9は黒鉛系潤滑剤と、超高分子量ポリエチレンUHMW-PEと無機固体潤滑剤を混合したUHMW-PE系潤滑剤を2～5μmダイスヘスプレー塗布し、各種金属素材のリング試験片を温・熱間で圧縮したときの摩擦試験結果である。UHMW-PE系潤滑剤(A)は、アルミニウム、黄銅、低炭素鋼では黒鉛に勝るとも劣らない良好な性能を示した。また、ステンレス鋼SUS403の800℃の試験では黒鉛とほぼ同等の性能を示し、ステンレス鋼SUS630の1100℃の試験では黒鉛よりも性能がやや低下した。UHMW-PE系潤滑剤(B)は、黄銅とアルミニウムの場合は、UHMW-PE系潤滑剤(A)と同じ程度の性能を示したが、SUS403及びSUS630では黒鉛潤滑剤より悪い性能となっている。

表9 リング圧縮摩擦試験による摩擦係数(焼付状態)の測定結果

潤滑剤 素材 (加熱温度)	黒鉛潤滑剤	UHMW-PE系潤滑剤 (A)	UHMW-PE系潤滑剤 (B)
A-6061(500℃) (アルミ)	0.13(小)	0.05(小)	0.07(中)
C-3771(700℃) (黄銅)	0.07(小)	0.05(無)	0.05(微小)
SWCH 10K(800℃) (低炭素鋼)	0.10(無)	0.10(無)	0.17(無)
SUS403(800℃) (ステンレス鋼)	0.08(無)	0.03(無)	0.10(無)
SUS630(1100℃) (ステンレス鋼)	0.15(無)	0.16(無)	0.21(無)
塗布膜厚 (密度1g/cm ³ として計算)	2～3μm	3～5μm	2～5μm

3. 2. 前方押し出し形摩擦試験結果

3. 2. 1. 高炭素鋼の温間前方押し出し形摩擦試験結果

(1) 各種固体潤滑剤の試験結果

素材S45Cを用いて、素材加熱温度800℃で、前方押し出し形摩擦試験を行い、押し出し面圧比 $p_m/\bar{\sigma}_Y$ で評価した場合の各種固体潤滑剤の試験結果を図34に示す。BNと絹雲母の押し出し面圧比は約19

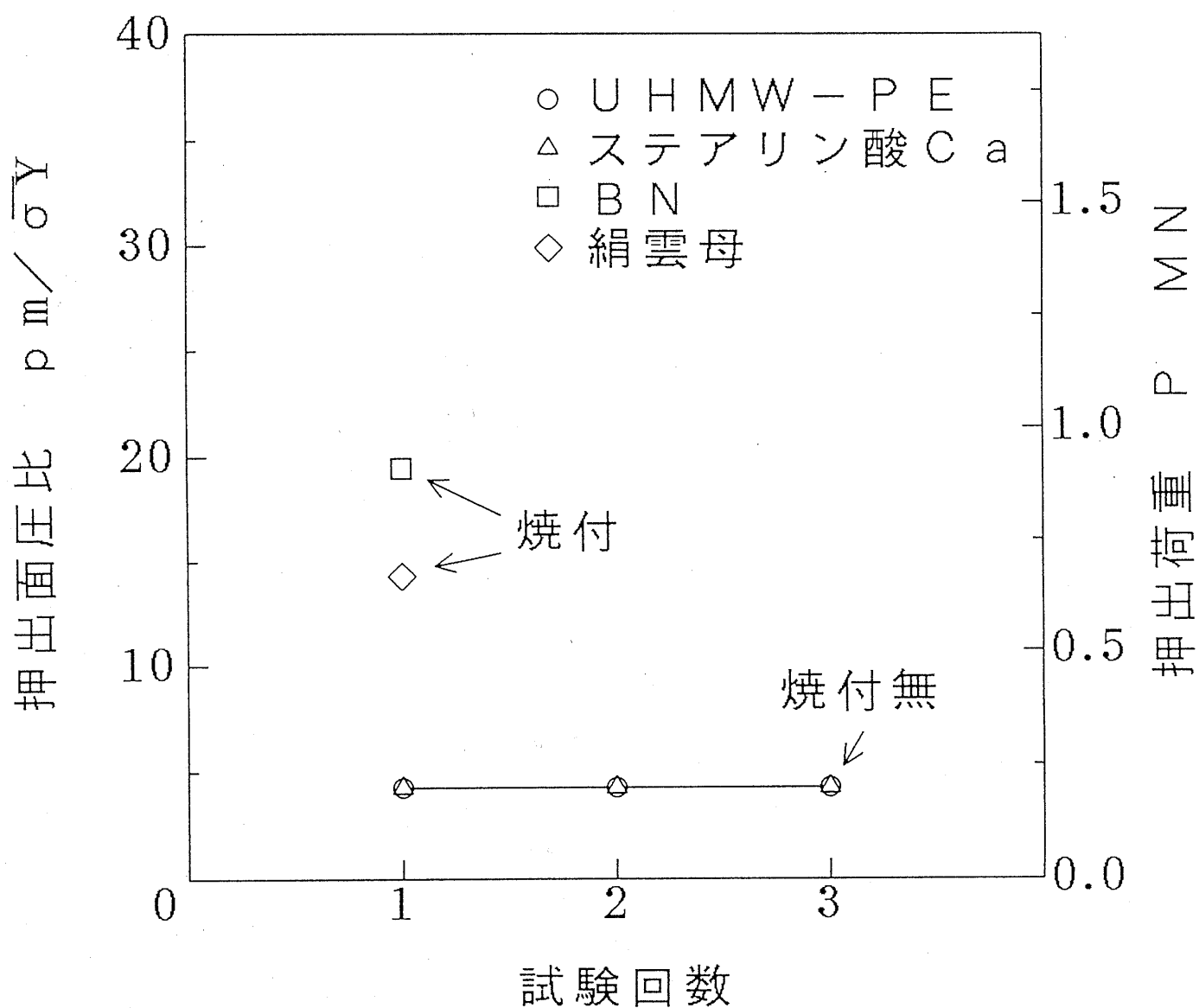


図 3 4 各種固体潤滑剤の連続前方押出し形摩擦試験回数に伴う押出し面圧比（荷重）の変化 (S45C, 800°C)

及び14と極めて高く、激しい焼付きを生じ、ロックアウト不良となった。これに対して、UHMW-PEとステアリン酸Caは押出し面圧比が約4と低く、焼付きも無く安定している。

図35は、この押出し面圧比 $p_m / \bar{\sigma}_Y$ から摩擦係数 μ を見積もった結果である。BNと絹雲母の摩擦係数は0.25以上であるのに対して、UHMW-PEとステアリン酸Caの摩擦係数は0.11程度となっている。この値は表2のSWCH-10K (800℃) の場合の摩擦係数とほぼ一致している。この試験条件では、UHMW-PE及びステアリン酸Caは、単独でも良好な潤滑性能を示すことが分かった。

(2) 市販及び試作潤滑剤の試験結果

素材S45Cを用いて、素材加熱温度800℃で、押出し面圧比で評価した場合の市販、試作潤滑剤の試験結果を図36に示す。黒鉛系潤滑剤Dag5561、UHMW-PE系潤滑剤、白色系潤滑剤、透明系潤滑剤、UHMW-PE系潤滑剤共に同様の低い押出し面圧比を示し、焼付きも発生していない。

図37は摩擦係数の変化を示す。どの市販、試作潤滑剤の摩擦係数も0.11前後である。この摩擦係数は、表9に示した本試験と比較的試験条件が近い低炭素鋼SWCH10Kの800℃におけるリング圧縮試験の場合の摩擦係数とほぼ同じである。この試験条件では、市販白色系及び透明系潤滑剤が黒鉛系潤滑剤並の性能を示すことを確認できた。試作UHMW-PE系潤滑剤も同様である。

3. 2. 2. ステンレス鋼の熱間前方押出し形摩擦試験結果

素材SUS630、加熱温度1100℃で摩擦試験を行い、市販の試作潤滑剤の試験結果を図38に示す。ステンレス鋼SUS630の1100℃における変形抵抗はまだ求められていないため、押出し荷重と焼付き状態で評価した。この場合、市販の白色系及び透明系潤滑剤でも黒鉛よりもかなり大きな押出し荷重を示し、ダイスのベアリング部分に激しい焼付きを発生した。表9のステンレス鋼SUS630の

リング試験結果と同様に，試作 U H M W - P E 系潤滑剤は黒鉛系潤滑剤にかなり近い押出し荷重となり，同程度の潤滑性能と耐焼付き性を示した。

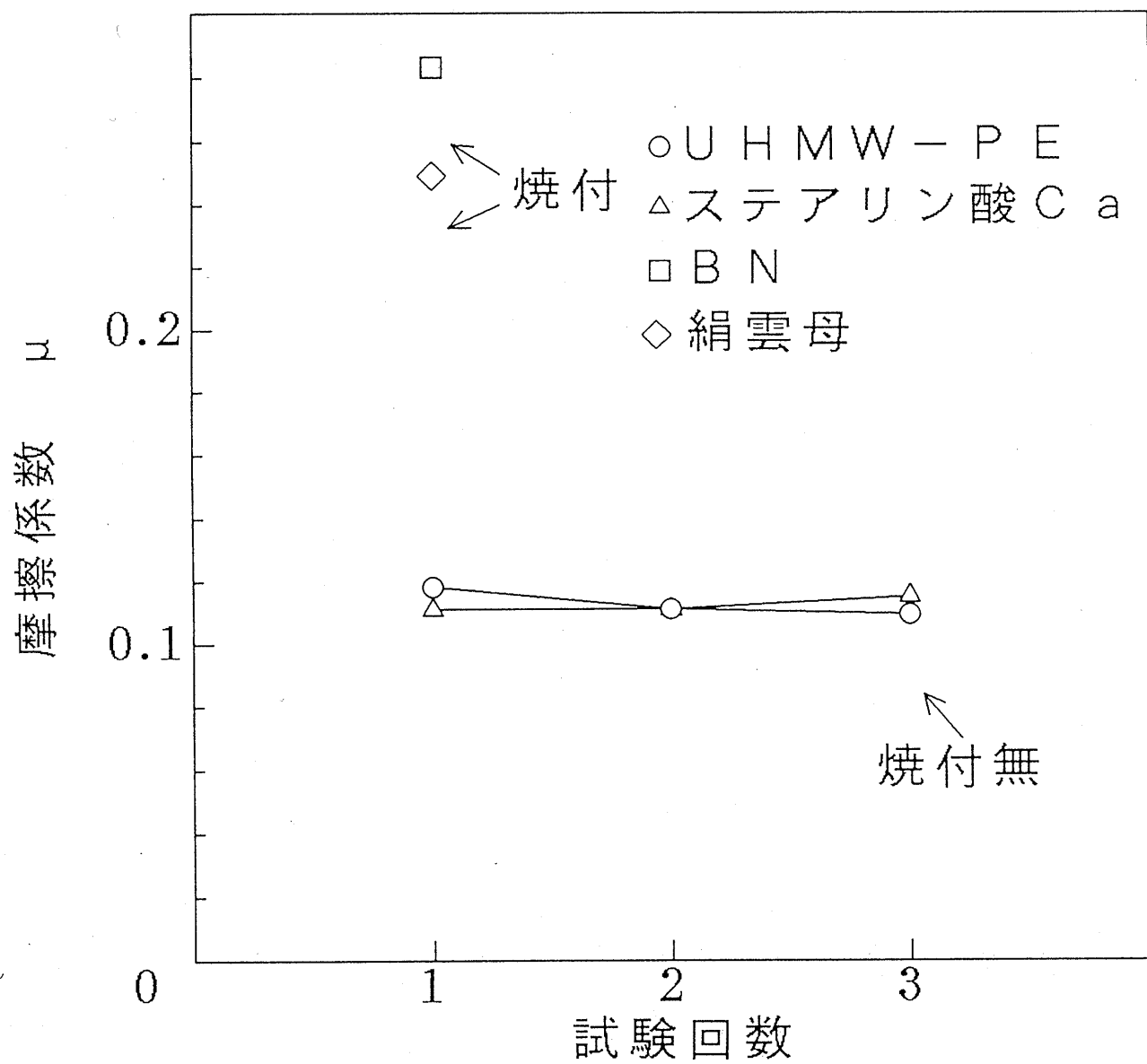


図 3 5 各種固体潤滑剤の連続前方押出し形摩擦試験回数に伴う摩擦係数の変化 (S45C, 800°C)

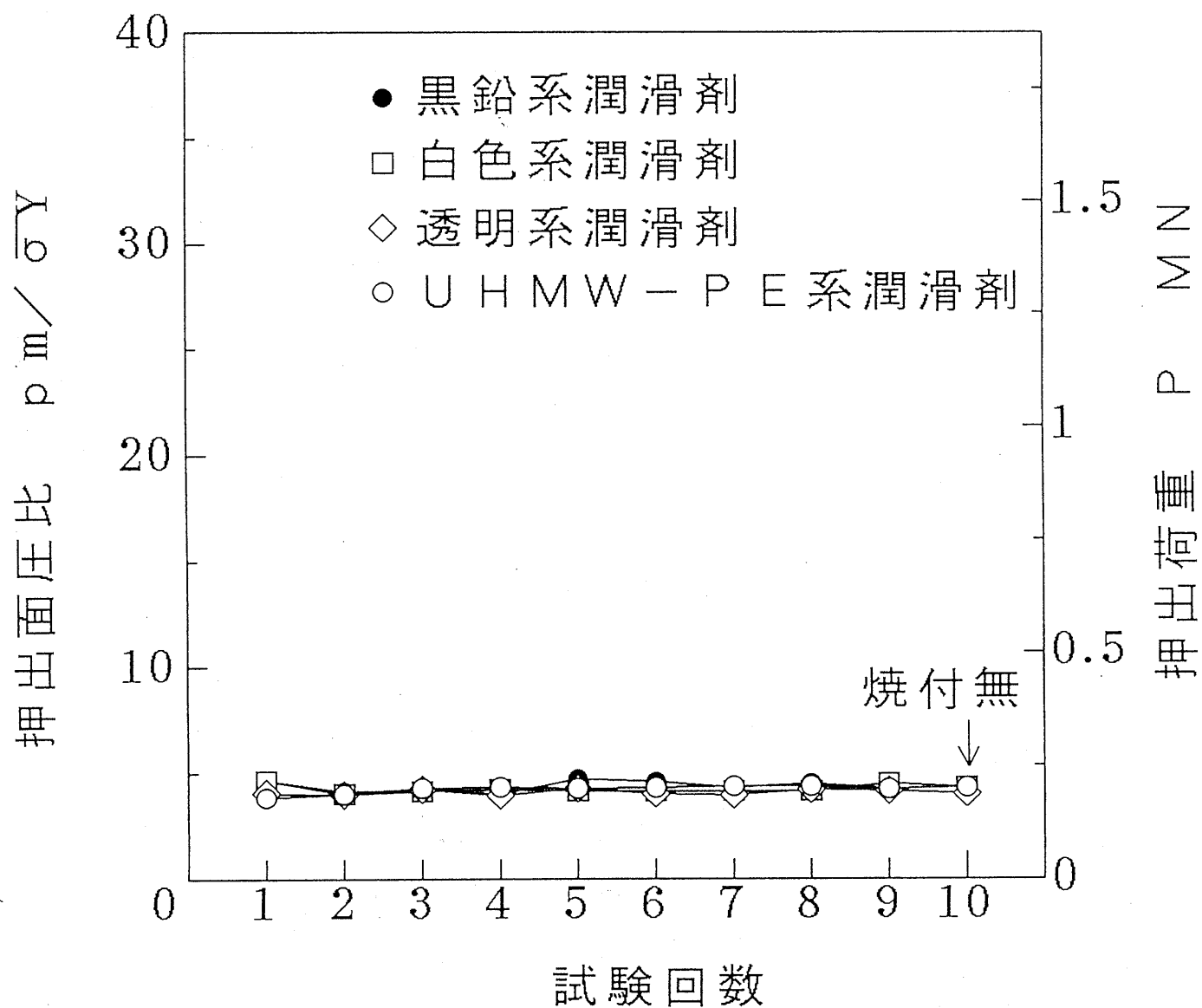


図 3 6 市販，試作潤滑剤の連続前方押し形摩擦試験回数に伴う押し面圧(荷重)の変化(S45C, 800℃)

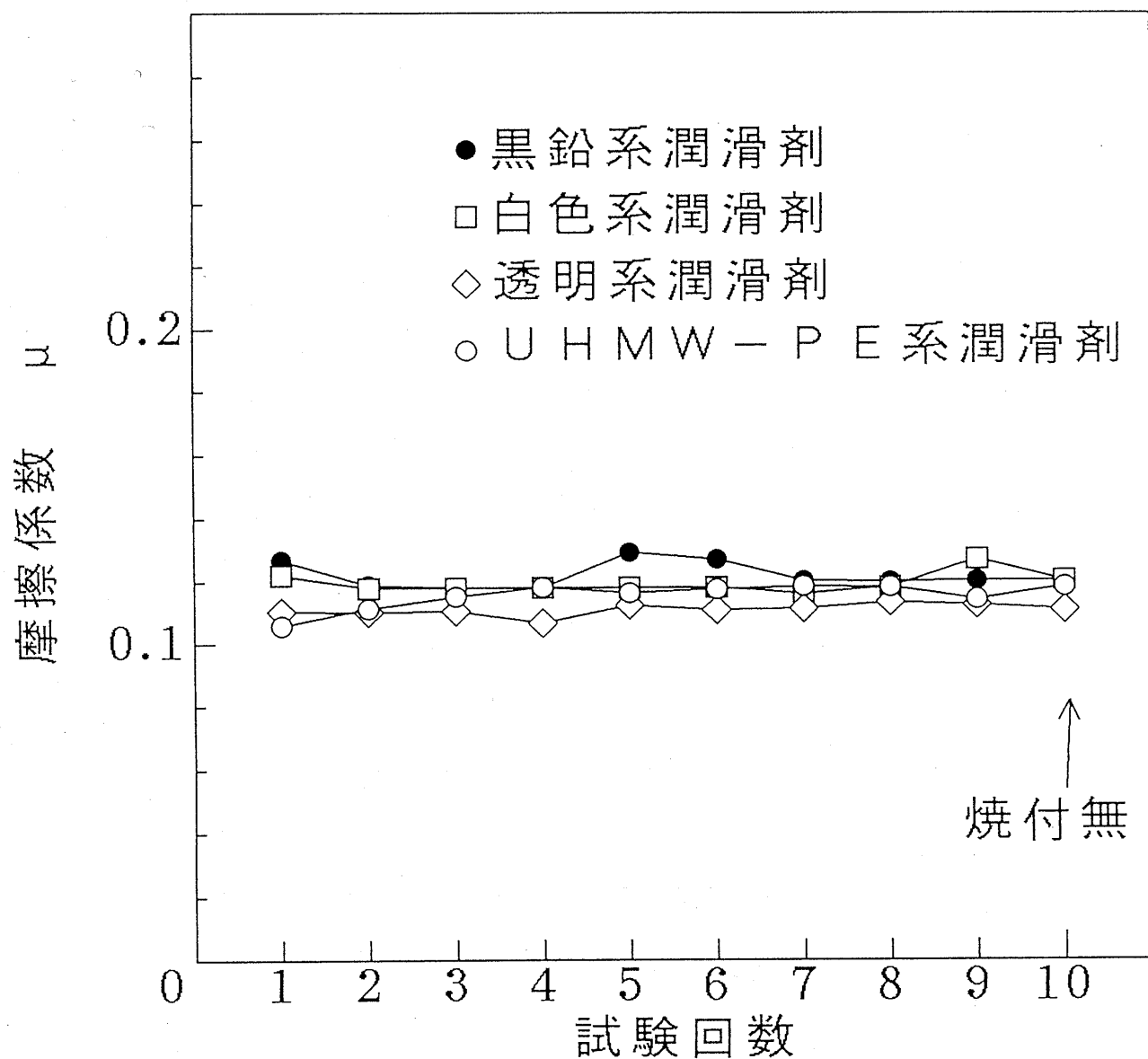


図 3.7 市販，試作潤滑剤の連続前方押し形
 摩擦試験回数に伴う摩擦係数の変化
 (S45C, 800℃)

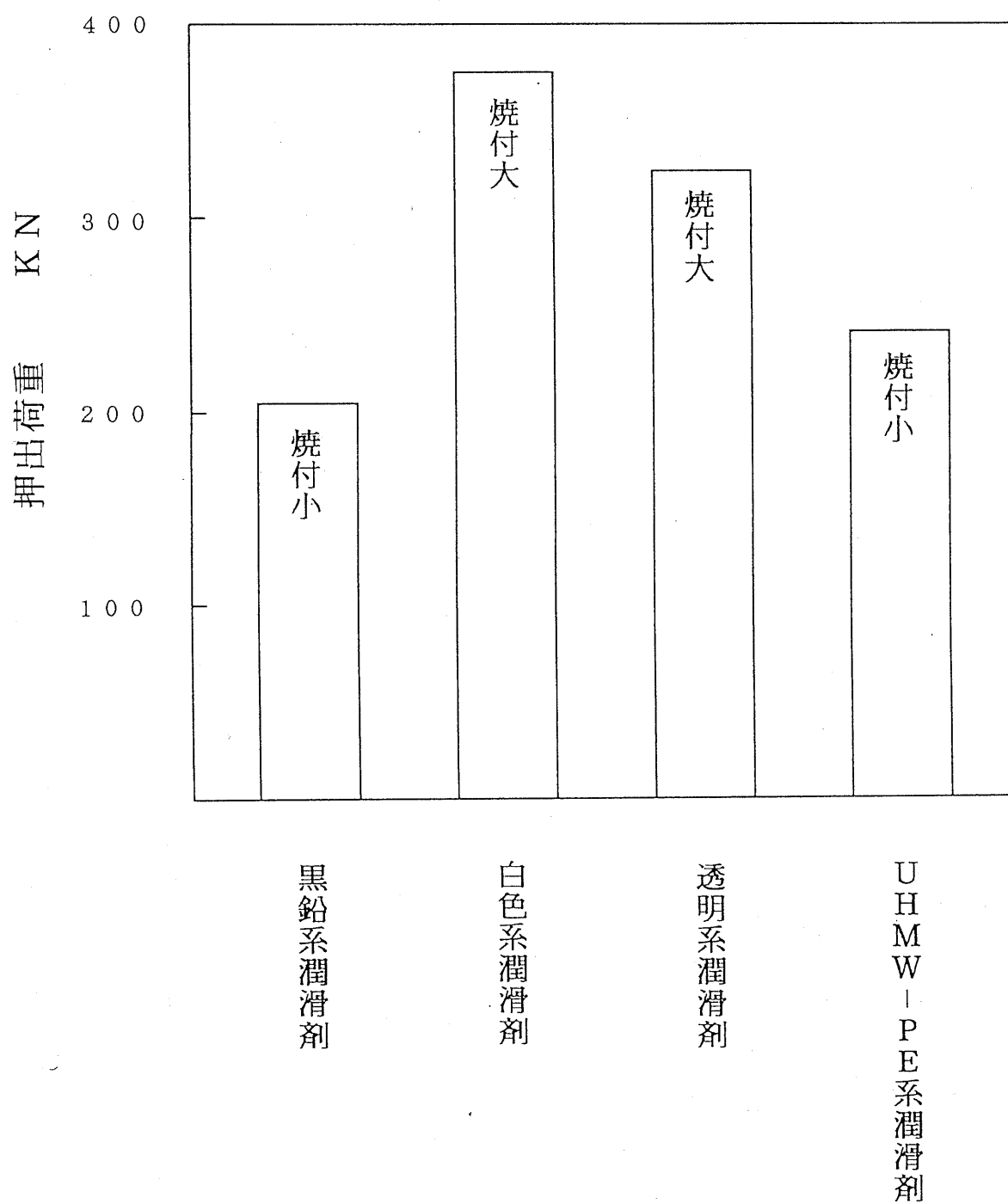


図38 市販，試作潤滑剤の前方押出し形摩擦試験結果
(SUS630, 1100℃)

3. 3. 前・後方押出し形摩擦試験結果

3. 3. 1 連続繰り返し摩擦試験結果

供試潤滑剤として黒鉛系潤滑剤市販 Dag5561 (10 倍希釈)、水溶性高分子量系潤滑剤 Soluble (10 倍希釈) および超高分子量ポリエチレン系潤滑剤 SP-891001-24 (10 倍希釈) を用いた。

図 39 から図 42 までは、断面減少率 $R_e = 50\%$ のステンレス鋼 SUS 630 の連続 10 回前後方押出し形摩擦試験の結果を示す。図 39 は実験回数に対する摩擦係数の変化を示す。この図から 3 種類の潤滑剤の摩擦係数がほぼ同じで、0.1 程度の値となっている。

図 40 は試験回数に対する摩擦せん断係数 m の変化を示す。3 種類の潤滑剤の摩擦せん断係数 m が 0.28 と 0.38 程度の間ではほぼ一定となっている。

図 41 は試験回数に対する最大荷重 P の変化を示す。3 種類の潤滑剤の最大荷重はほとんど変化しないで、13kN と 15kN の間である。超高分子量ポリエチレン系潤滑剤 SP-891001-24 の荷重がやや高目である。

図 42 は試験回数に対するダイス面とパンチ面の焼付き状態の変化を示す。パンチ側の焼付き程度が図 43 に示すように、焼付き無 (0) から焼付き激大 (5) までランク付けした。一方、ダイス側の焼付き程度は図 42 において黒塗の記号である。図 44 に示すように、0 ~ 5 段階でランク付けし評価した。ダイス側の焼付き状態は、超高分子量ポリエチレン系 SP-891001-24 が 8 回から焼き付き始めたのは、黒鉛系潤滑剤市販 Dag5561 (10 倍希釈) と水溶性高分子系潤滑剤 Soluble では全く焼付きが生じなかった。図 42 において焼付きの記号で示す。パンチ側の焼付き状態は、3 種類の潤滑剤がすべて一回目から焼き付き、試験回数とともに焼付き程度が激しくなった。後方押出しのパンチ面の摩擦条件が前方押出しのダイス面より厳しいと思われる。黒鉛系潤滑剤の場合が焼付き小から焼付き大まで徐々に上昇した。水溶性高分子系と超高分子量ポリエチレン系が最初から焼付

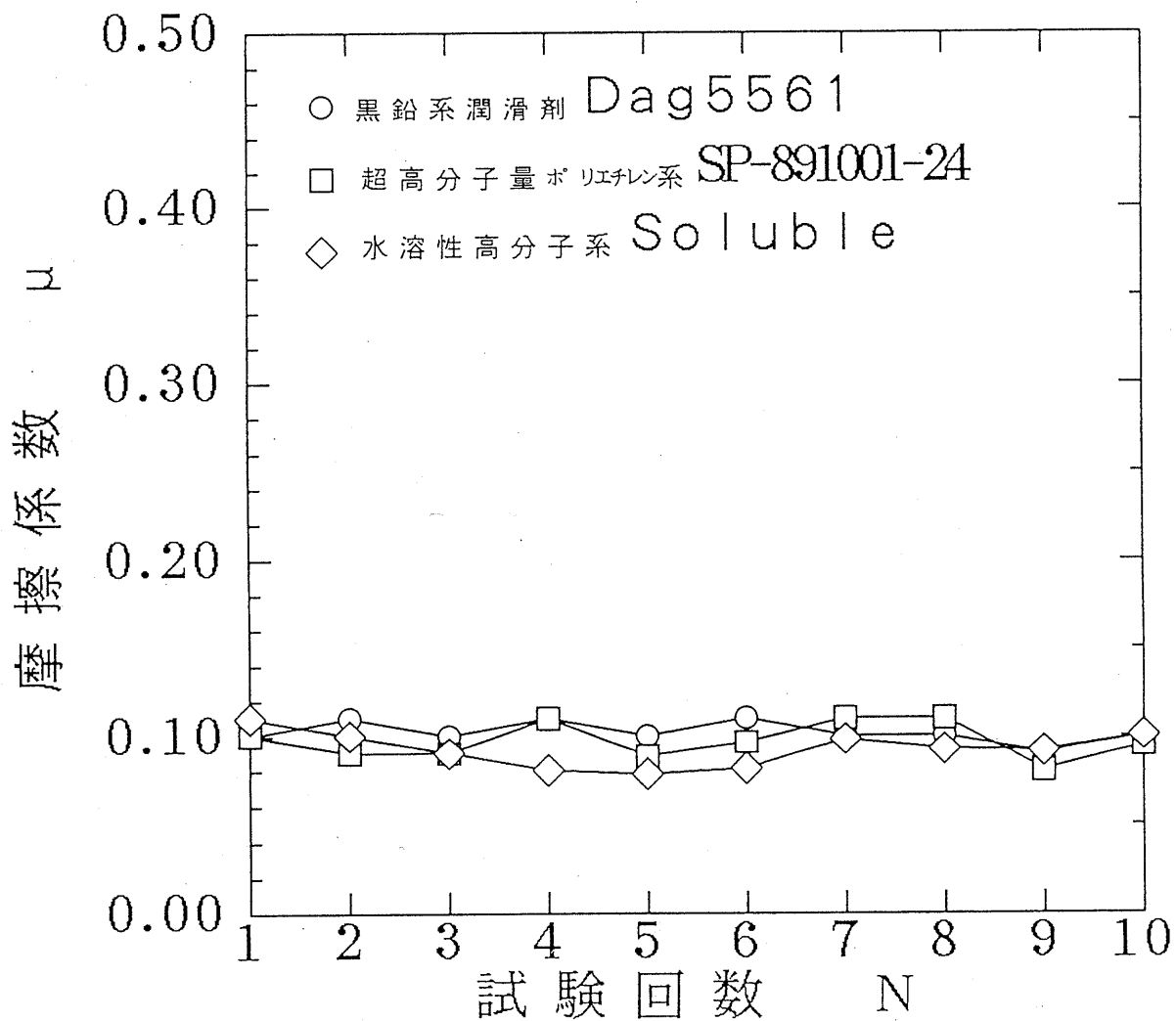
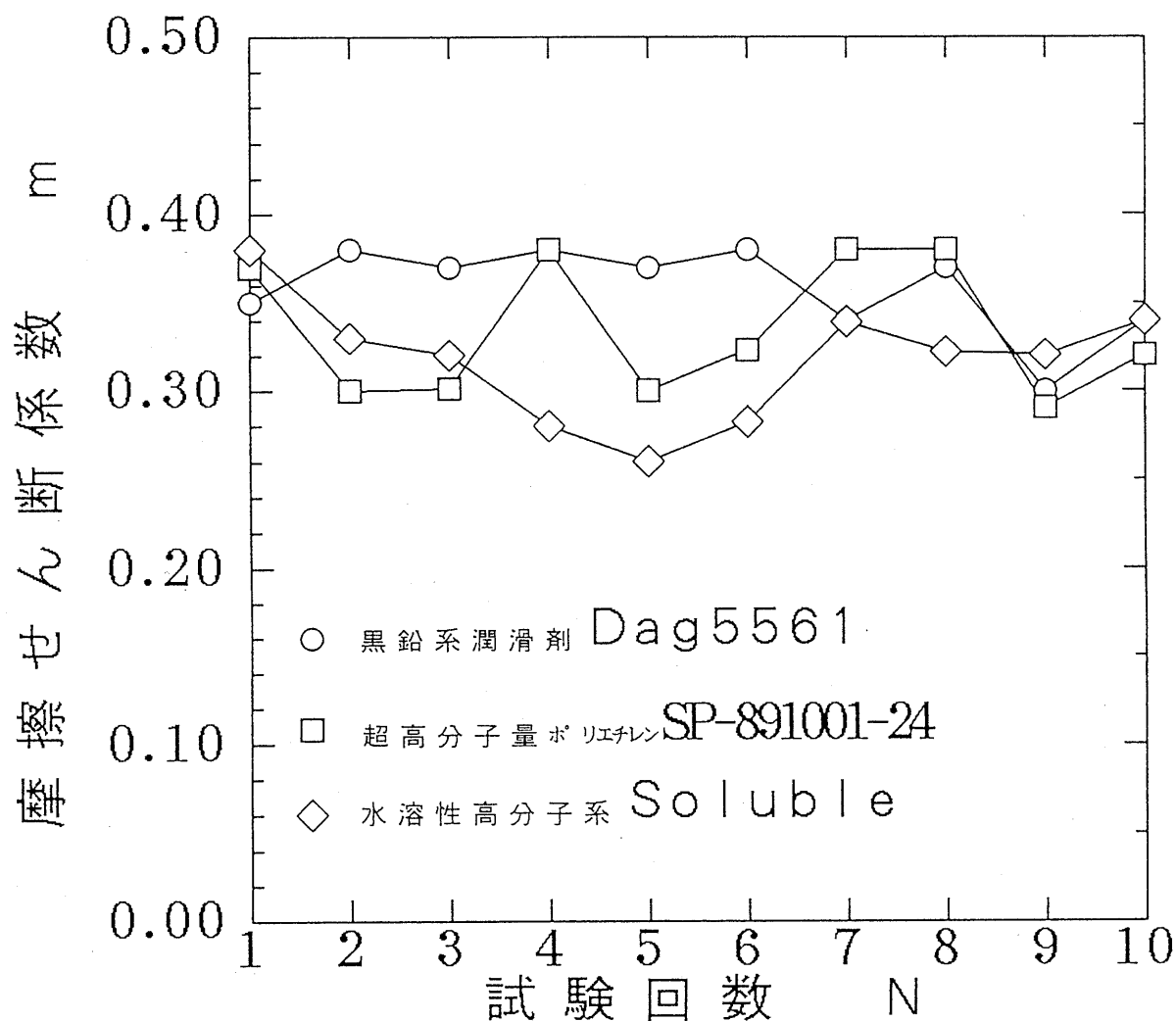


図 3 9 SUS 630 の連続 10 回の前後方押し形摩擦試験における摩擦係数変化
 潤滑剤：黒鉛系潤滑剤市販 Dag 5561 (10 倍希釈)，
 水溶性高分子系潤滑剤 Soluble (10 倍希釈)，
 超高分子量ポリエチレン系 SP-891001-24
 (10 倍希釈)
 素材：ステンレス SUS 630，加熱温度：1100℃
 金型：超硬合金 V4，加熱温度：200℃
 断面減少率：Re = 50%



140 SUS630の連続10回の前後方押し出し形摩擦試験における摩擦せん断係数
 潤滑剤：黒鉛系潤滑剤市販Dag5561（10倍希釈），
 水溶性高分子系潤滑剤Soluble（10倍希釈），
 超高分子量ポリエチレン系SP-891001-24
 （10倍希釈）
 素材：ステンレスSUS630，加熱温度：1100℃
 金型：超硬合金V4，加熱温度：200℃
 断面減少率：Re = 50%

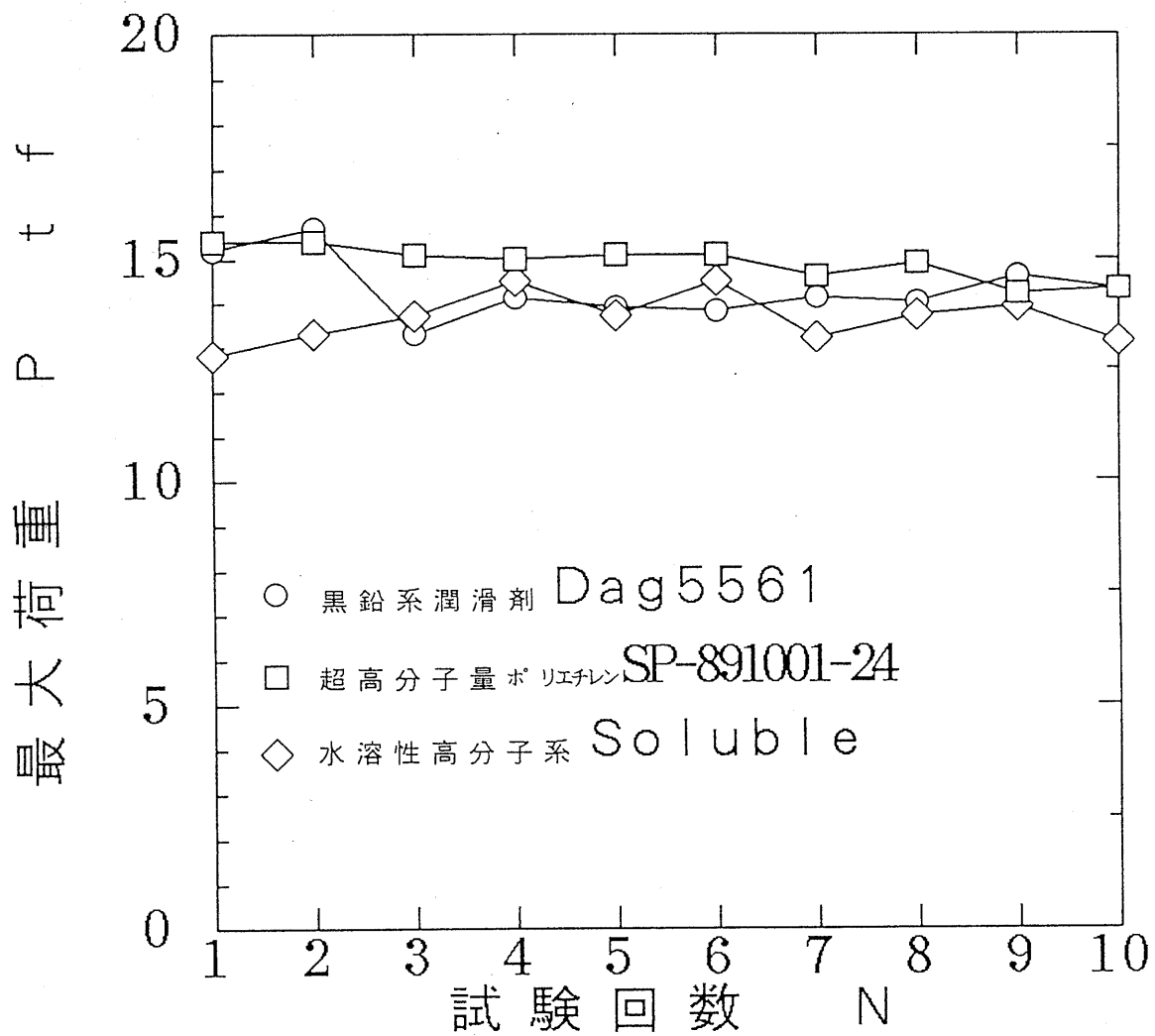


図 4 1 SUS 630 の連続 10 回の前後方押し形摩擦試験における最大荷重変化
 潤滑剤：黒鉛系潤滑剤市販 Dag 5561 (10 倍希釈)，
 水溶性高分子系潤滑剤 Soluble (10 倍希釈)，
 超高分子量ポリエチレン系 SP-891001-24
 (10 倍希釈)
 素材：ステンレス SUS 630，加熱温度：1100℃
 金型：超硬合金 V4，加熱温度：200℃
 断面減少率：Re = 50%

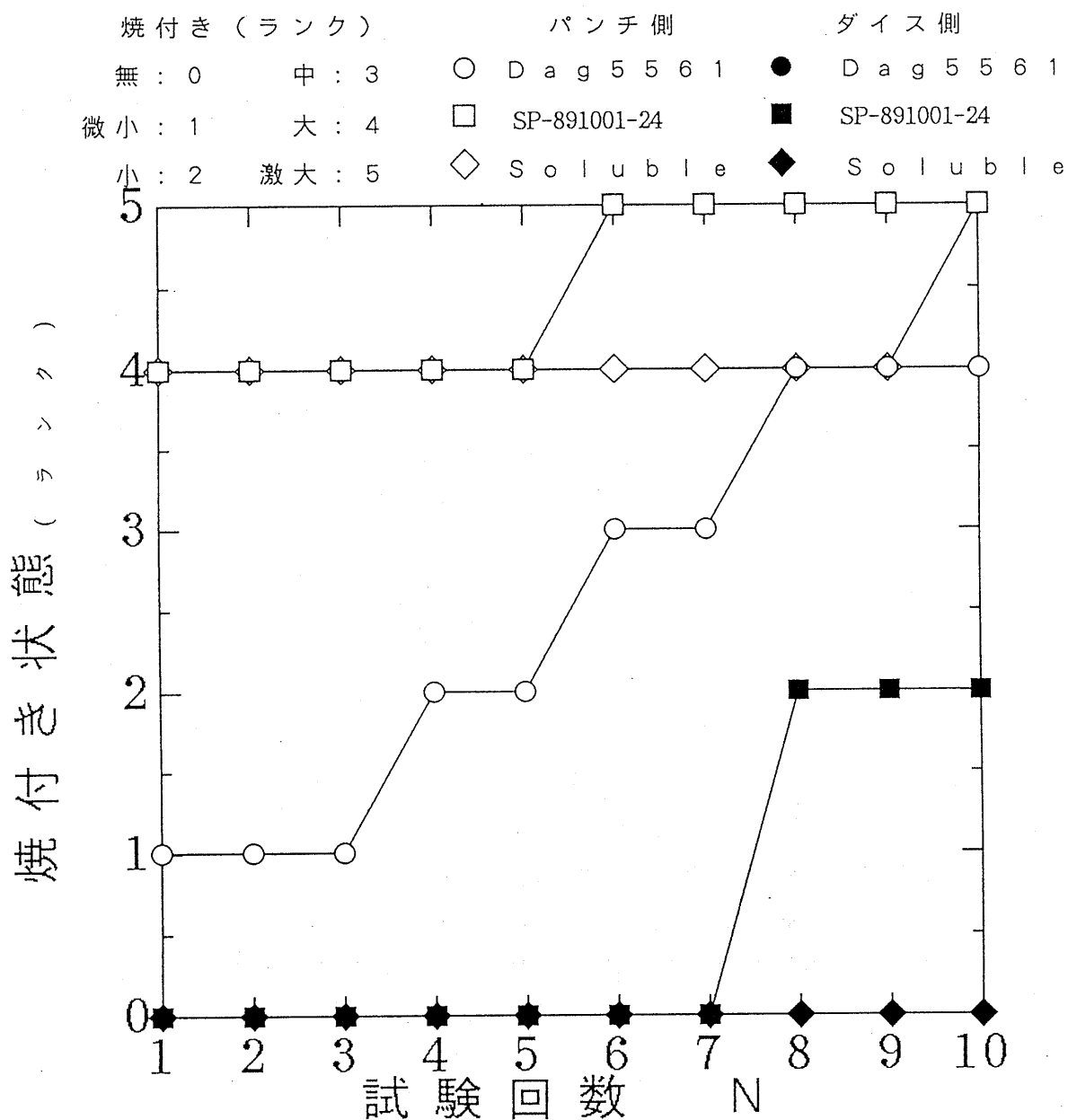
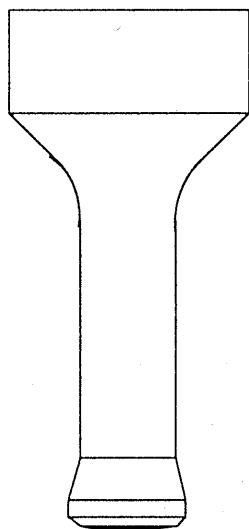
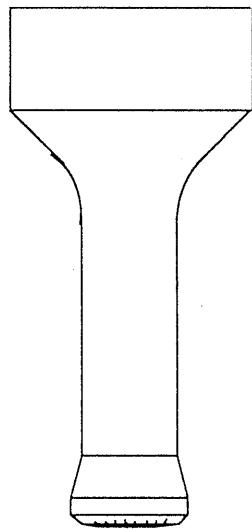


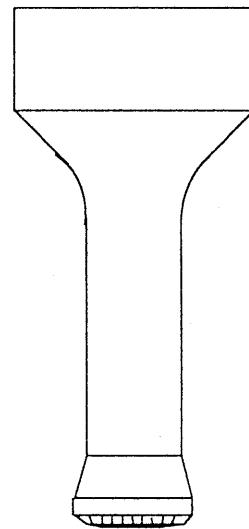
図 4 2 連続 10 回の前後方押し摩擦試験における焼付き状態変化
 潤滑剤 : 黒鉛系潤滑剤市販 Dag 5561 (10 倍希釈),
 水溶性高分子系潤滑剤 Soluble (10 倍希釈),
 超高分子量ポリエチレン系 SP-891001-24
 (10 倍希釈)
 素材 : ステンレス SUS 630, 加熱温度 : 200 °C
 金型 : 超硬合金 V4, 加熱温度 : 200 °C
 断面減少率 : Re = 50 %



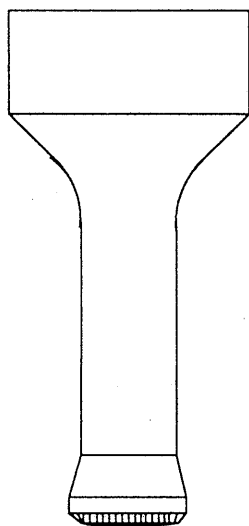
無 (0)



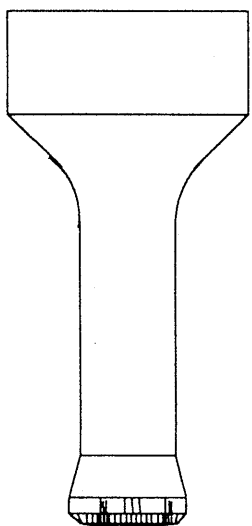
微小 (1)



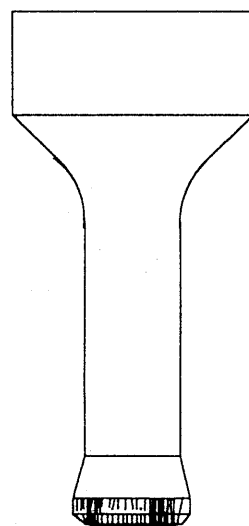
小 (2)



中 (3)

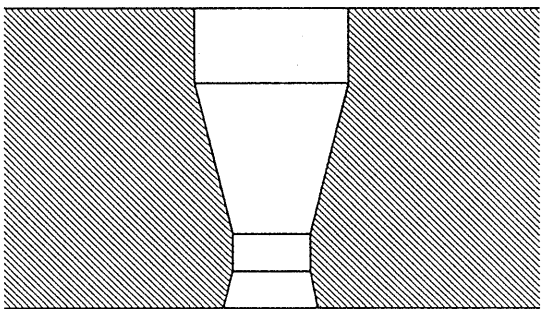


大 (4)

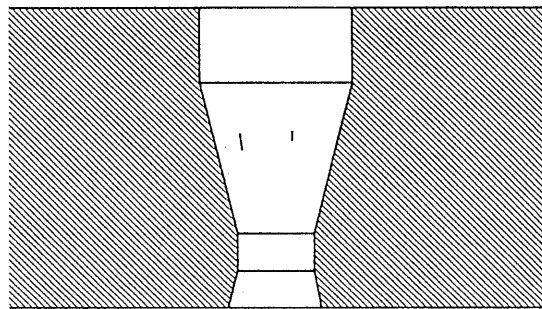


激大 (5)

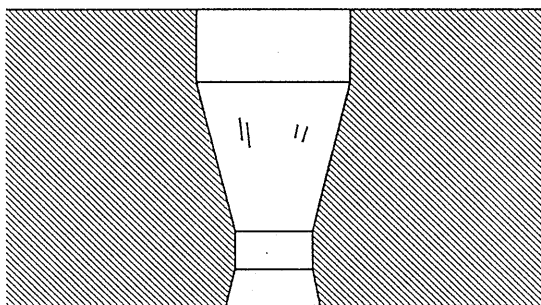
図 4 3 パンチ側の焼付きランク分類



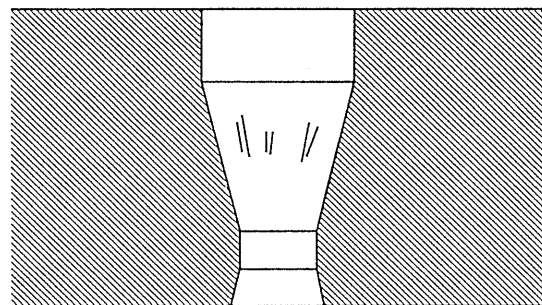
無 (0)



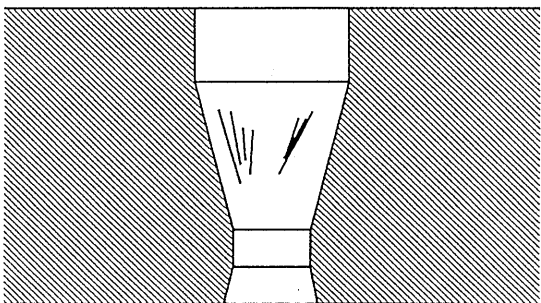
微小 (1)



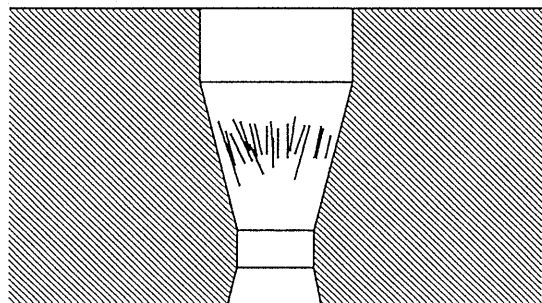
小 (2)



中 (3)



大 (4)



激大 (5)

図 4 4 ダイス側の焼付きランク分類

きが激しい，特に超高分子量ポリエチレン系は六回目から激大になった。

図 4 5 から図 4 8 までは，断面減少率 $R_e = 25\%$ のステンレス鋼 SUS 630 の連続 10 回前後方押出し形摩擦試験の結果である。図 4 5 は試験回数に対する摩擦係数 μ の変化である。水溶性高分子系と超高分子量ポリエチレン系が黒鉛系よりやや低い値を示し， $R_e = 50\%$ とほぼ同じ程度となっている。同じように，図 4 6 の摩擦せん断係数 m も同様な傾向を示している。

図 4 7 は試験回数に対する最大荷重 P の変化である。黒鉛系が一番低く，次は超高分子量ポリエチレン系，水溶性高分子系が一番高い値を示す。断面減少率 $R_e = 50\%$ より低かった。

図 4 8 は試験回数に対する焼付き状態の変化である。この図を見ると，3 種類の潤滑剤のダイス側の焼付きは全く生じなかった。パンチ側の焼付き状態は，黒鉛系潤滑剤に $R_e = 50\%$ とほぼ同じ傾向を示している。水溶性高分子系と超高分子量ポリエチレン系が二回目から激大になっている。 $R_e = 25\%$ の方がは $R_e = 50\%$ より後方押出し条件厳しいと考えられた。

3. 3. 2. ダイス温度の影響

摩擦特性及ぼすダイス温度の影響を調べるため， $R_e = 50\%$ ， $L_r = 0$ として，ダイス温度を $150^\circ\text{C} \sim 250^\circ\text{C}$ まで変化させ，他の試験条件は同じで摩擦試験を行った。ダイス温度 200°C での試験を含めて，SUS 630 の前後方押出し摩擦試験における摩擦係数 μ とダイス温度 T_D の関係を図 4 9 に示す。3 種類の潤滑剤ともにダイス温度の上昇に伴い摩擦係数 μ が上昇することをわかる。特に，黒鉛系潤滑剤 Dag5561 の上昇が著しく， $T_D = 250^\circ\text{C}$ で， $\mu = 0.15 \sim 0.16$ まで達する。水溶性高分子系 Soluble HM-1 の変化が最も少くなっている。図 5 0 は摩擦せん断係数 m とダイス温度 T_D と関係で，摩擦係数 μ とほぼ同じ傾向を示している。図 5 1 は最大荷重 P とダイス温度 T_D の関係で，黒鉛系潤滑剤 Dag5561 はダイス温度 T_D を変わっても，最大荷重 P があまりかわらない。水溶性高分子系潤滑剤 Soluble HM-1 と超

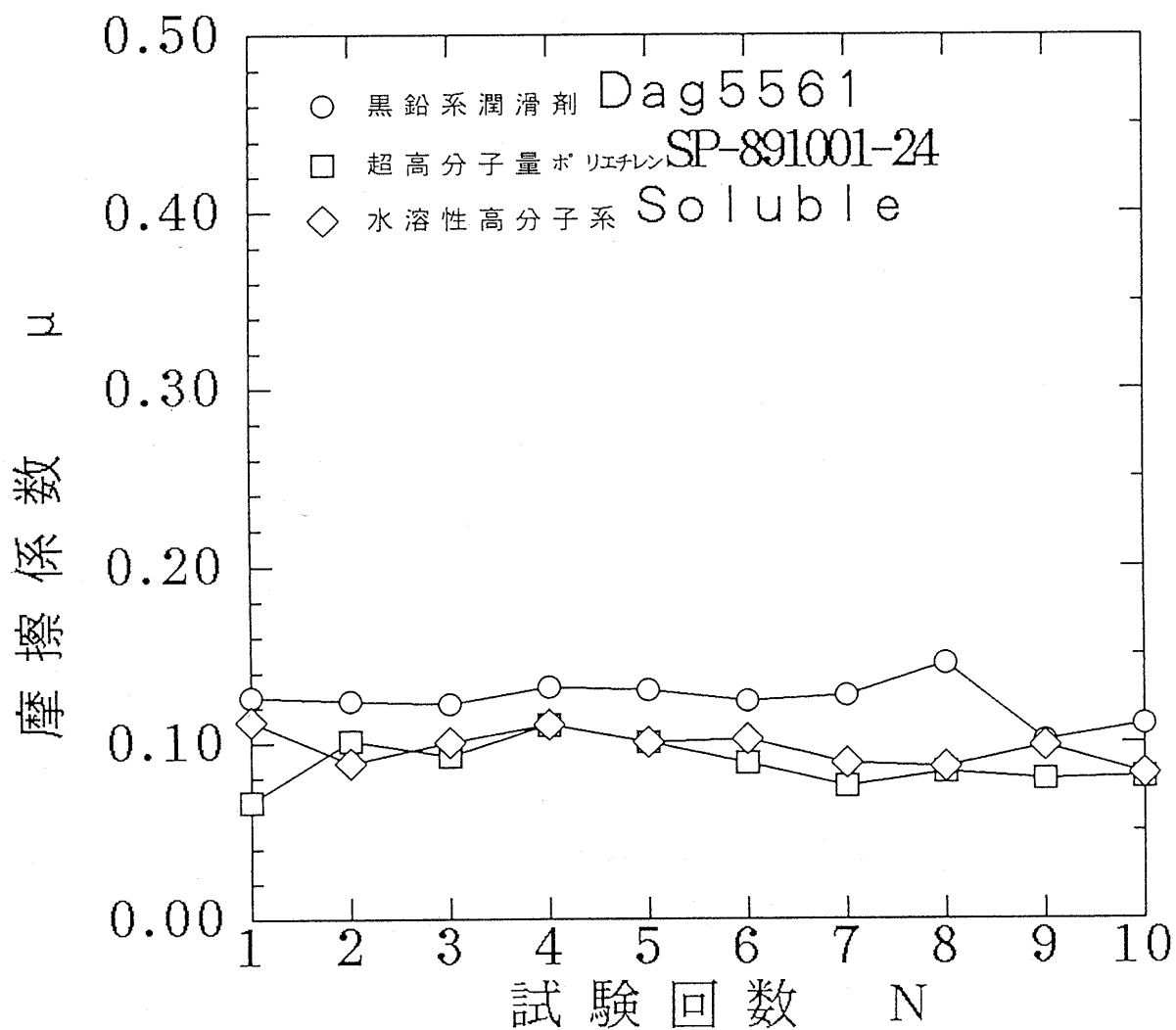


図 4 5 SUS 630 の連続 10 回の前後方押し摩擦試験における摩擦係数変化
 潤滑剤：黒鉛系潤滑剤市販 Dag 5561 (10 倍希釈)
 水溶性高分子系潤滑剤 Soluble (10 倍希釈)
 超高分子量ポリエチレン系 SP-891001-24
 (10 倍希釈)
 素材：ステンレス SUS 630, 加熱温度：1100℃
 金型：超硬合金 V4, 加熱温度：200℃
 断面減少率：Re = 25%

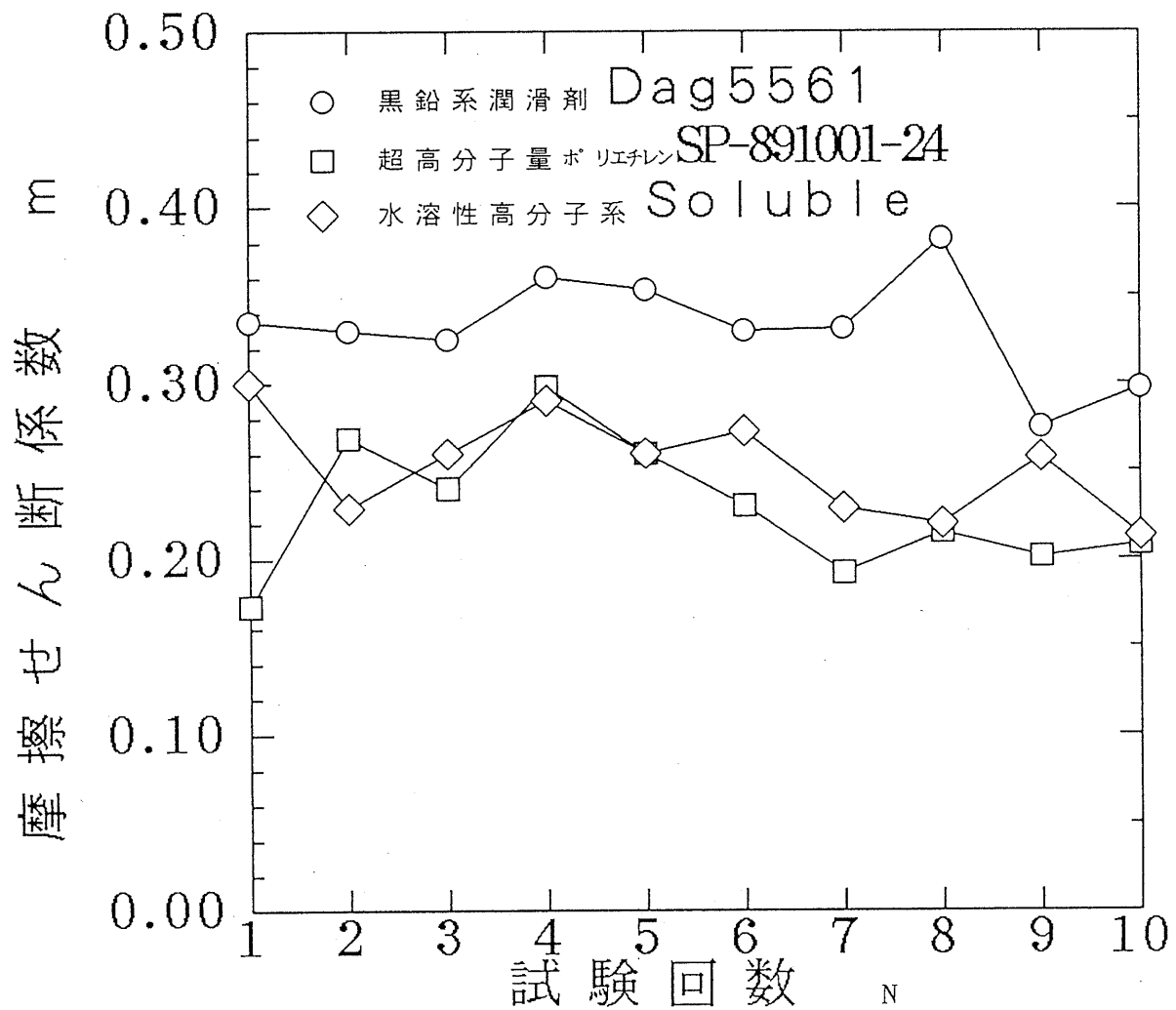


図 4 6 SUS 6 3 0 の連続 1 0 回の前後方押し摩擦試験における摩擦せん断係数
 潤滑剤：黒鉛系潤滑剤市販 Dag 5 5 6 1 (1 0 倍希釈)
 水溶性高分子系潤滑剤 Soluble (1 0 倍希釈)
 超高分子量ポリエチレン系 SP - 8 9 1 0 0 1 - 2 4
 (1 0 倍希釈)
 素材：ステンレス SUS 6 3 0, 加熱温度：1 1 0 0 °C
 金型：超合金 V 4, 加熱温度：2 0 0 °C
 断面減少率：Re = 2 5 %

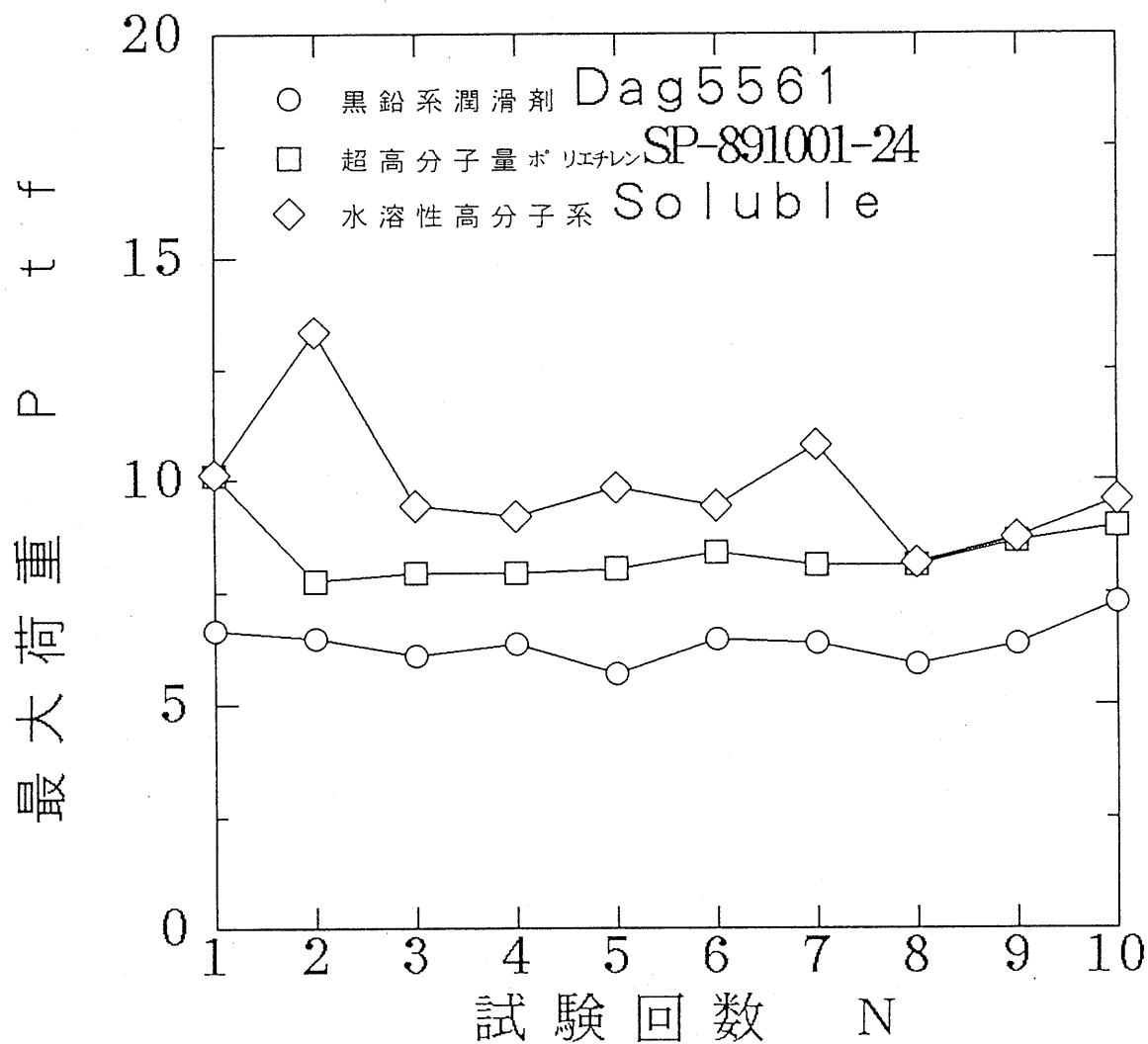


図 4 7 SUS 630 の連続 10 回の前後方押し摩擦試験における最大荷重変化
 潤滑剤：黒鉛系潤滑剤市販 Dag 5561 (10 倍希釈)
 水溶性高分子系潤滑剤 Soluble (10 倍希釈)
 超高分子量ポリエチレン系 SP-891001-24 (10 倍希釈)
 素材：ステンレス SUS 630，加熱温度：1100℃
 金型：超硬合金 V4，加熱温度：200℃
 断面減少率：Re = 25%

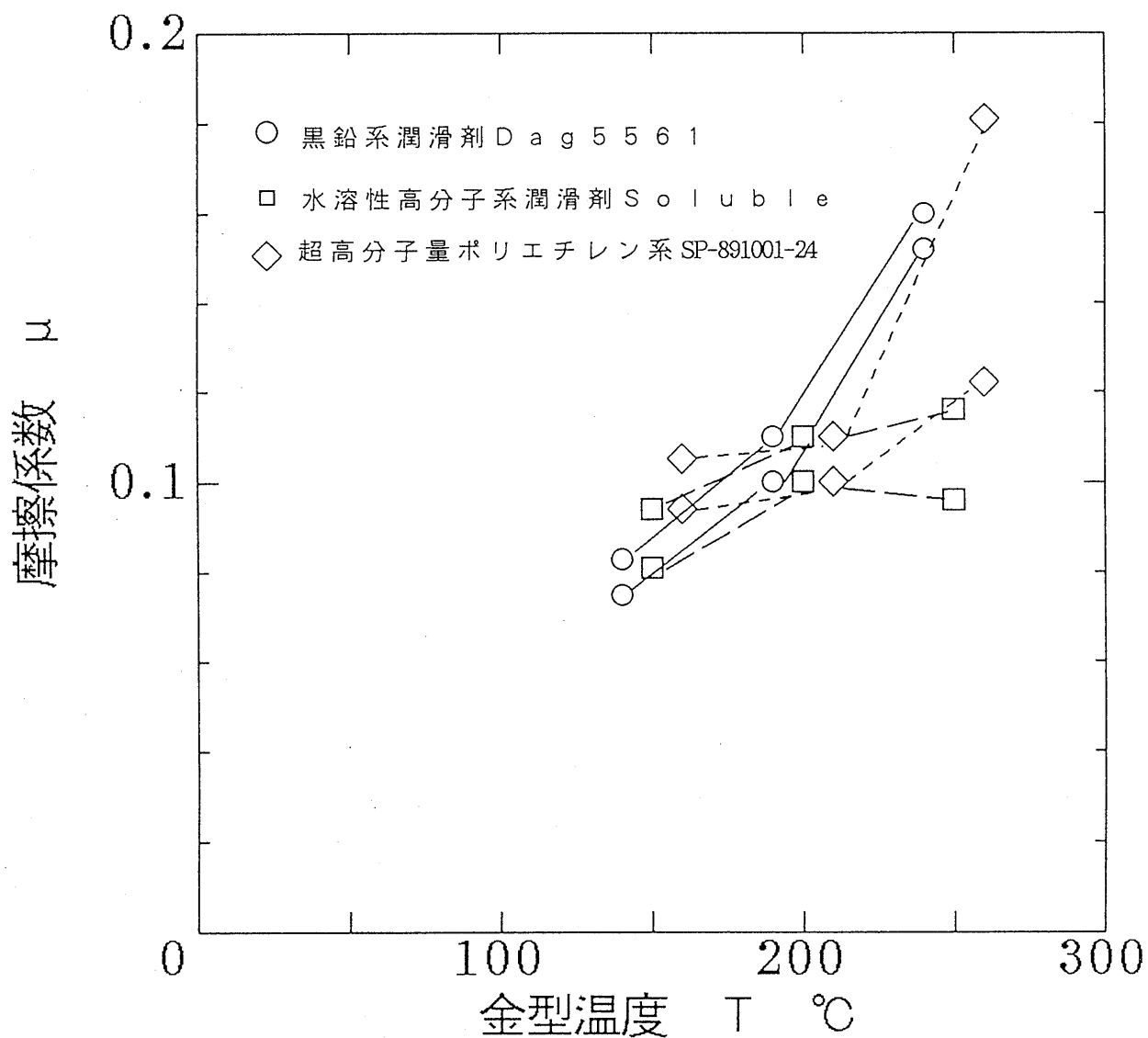


図 4 9 SUS 630 の前後方押出摩擦試験における摩擦係数と金型温度の関係
 潤滑剤：黒鉛系潤滑剤市販 Dag 5561 (10 倍希釈)
 水溶性高分子系潤滑剤 Soluble (10 倍希釈)
 超高分子量ポリエチレン系 SP-891001-24 (10 倍希釈)
 素材：ステルス SUS 630, 加熱温度：1100 °C
 金型：超硬合金 V4, 断面減少率：Re = 50 %

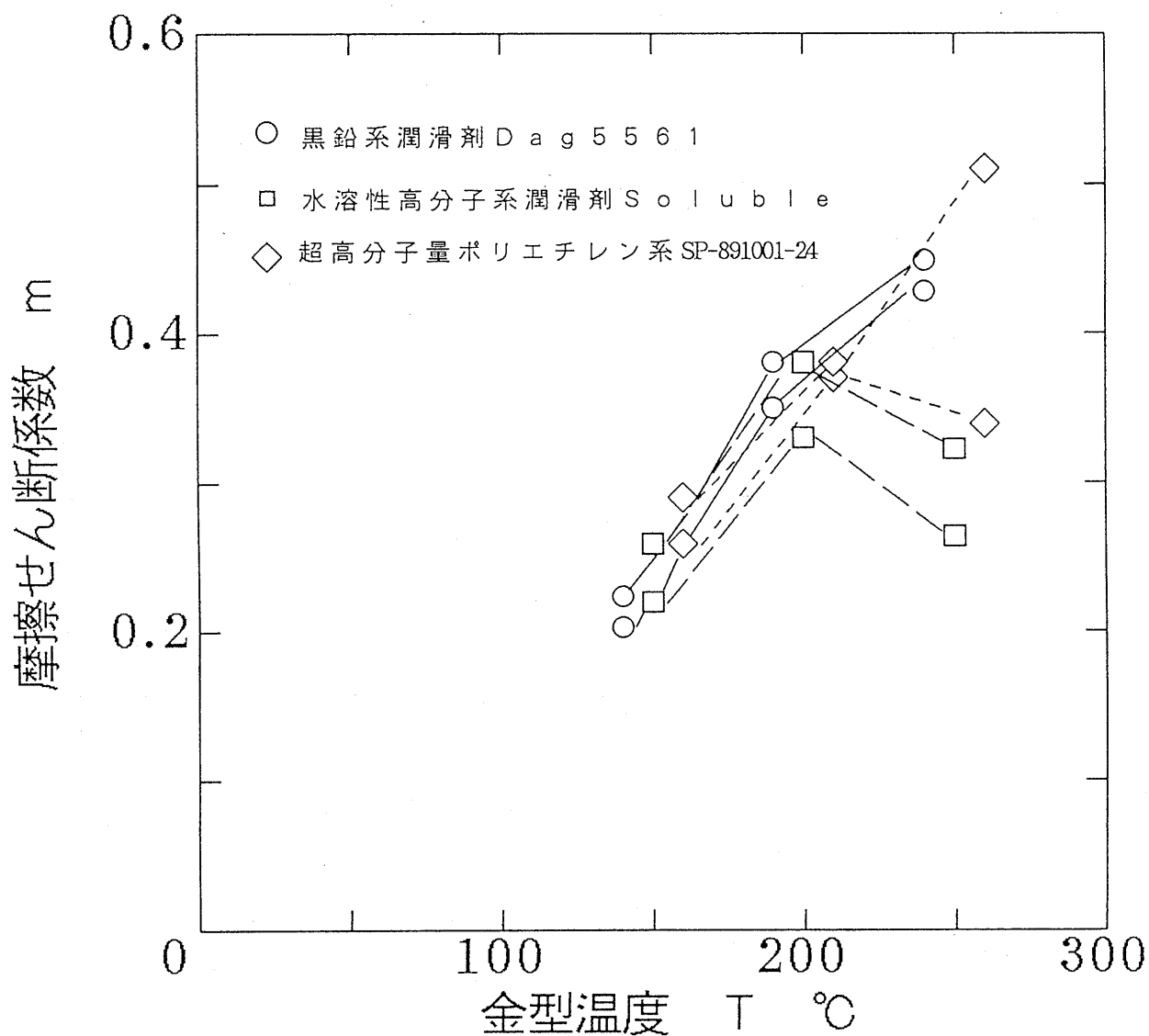


図 5 0 SUS 6 3 0 の前後方押出摩擦試験における摩擦せん断係数と金型温度の関係
 潤滑剤：黒鉛系潤滑剤市販 Dag 5 5 6 1 (10 倍希釈)
 水溶性高分子系潤滑剤 Soluble (10 倍希釈)
 超高分子量ポリエチレン系 SP-891001-24 (10 倍希釈)
 素材：ステレンス SUS 6 3 0, 加熱温度：1100 °C
 金型：超硬合金 V 4, 断面減少率：Re = 50 %

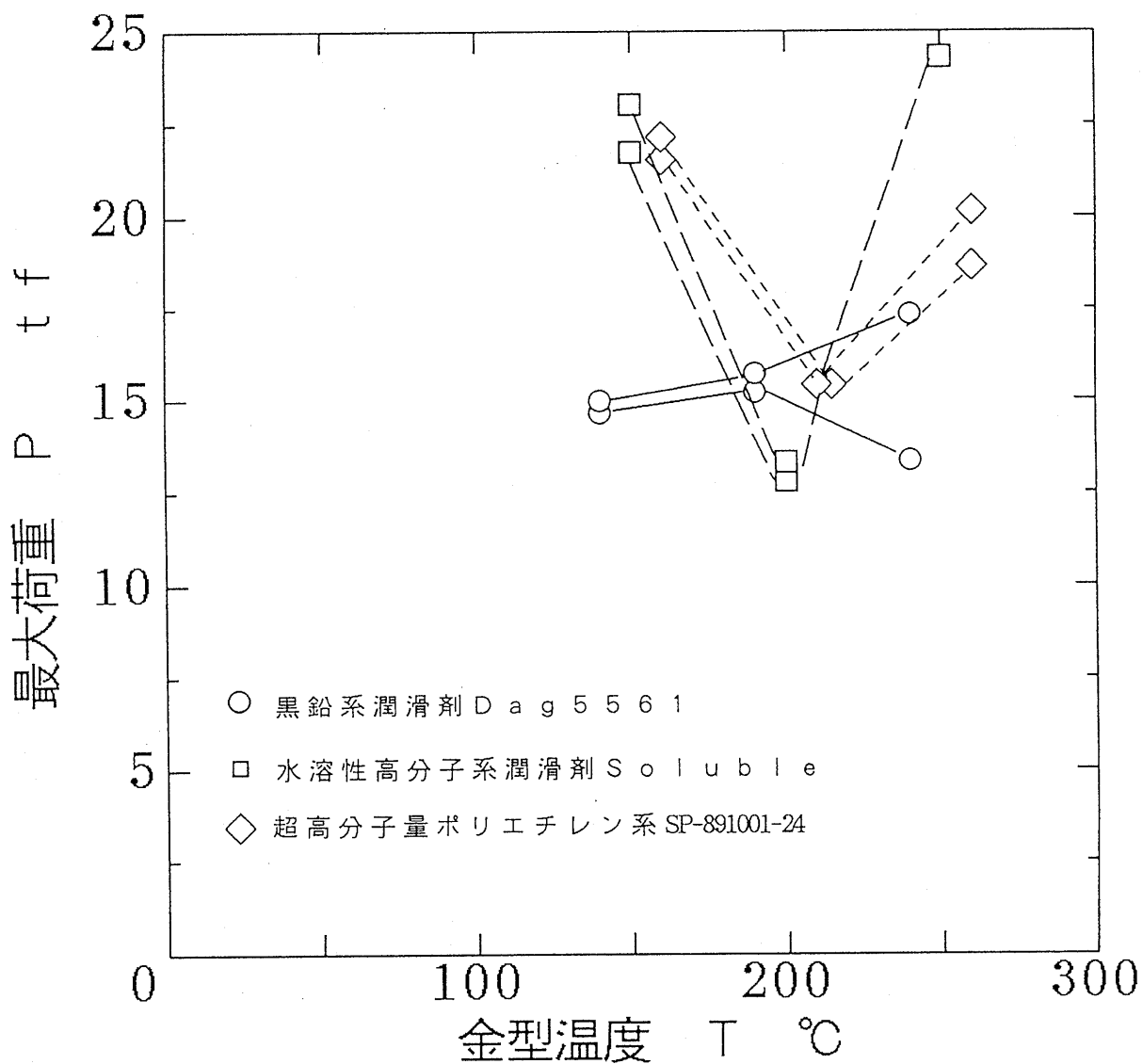
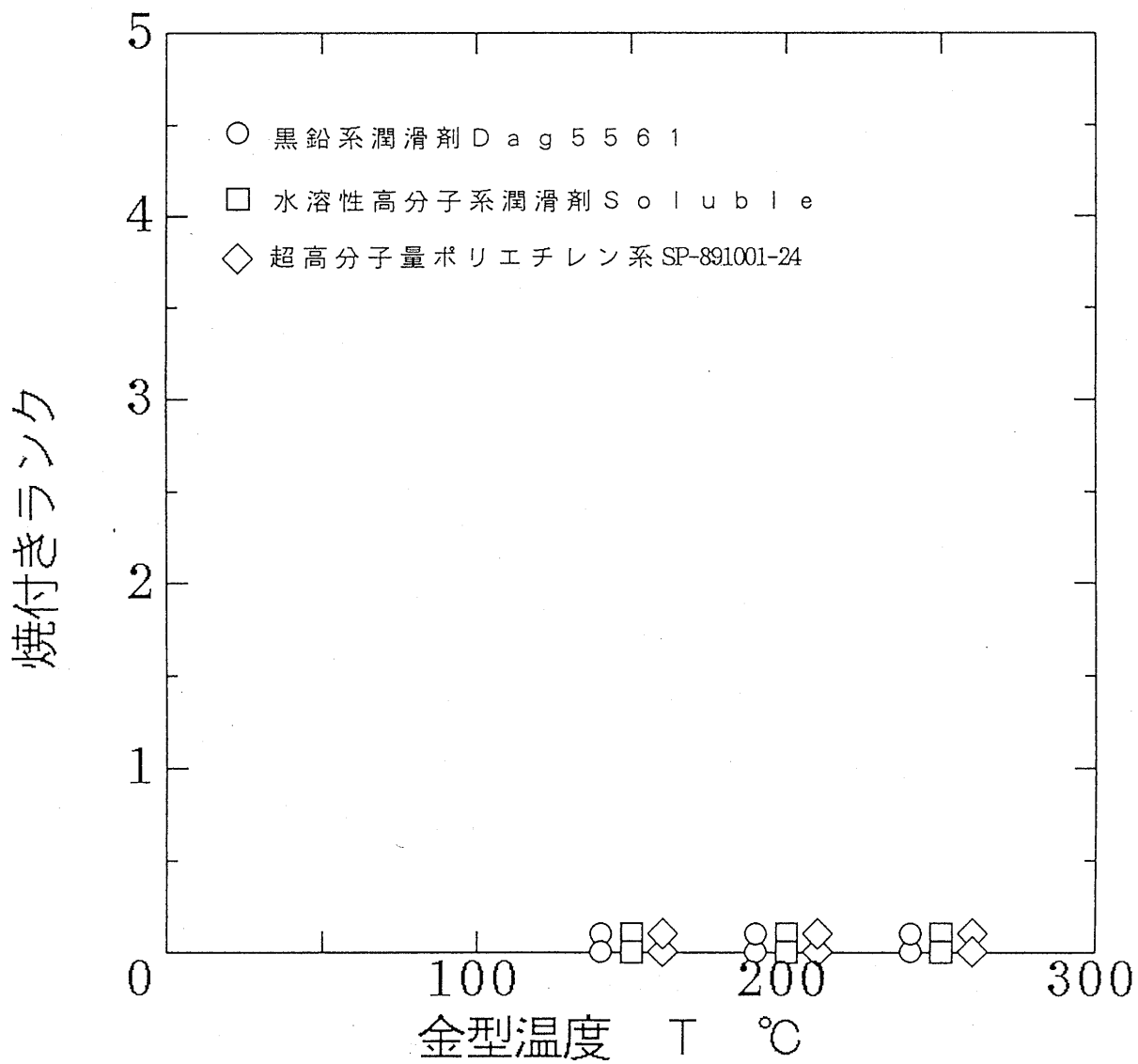
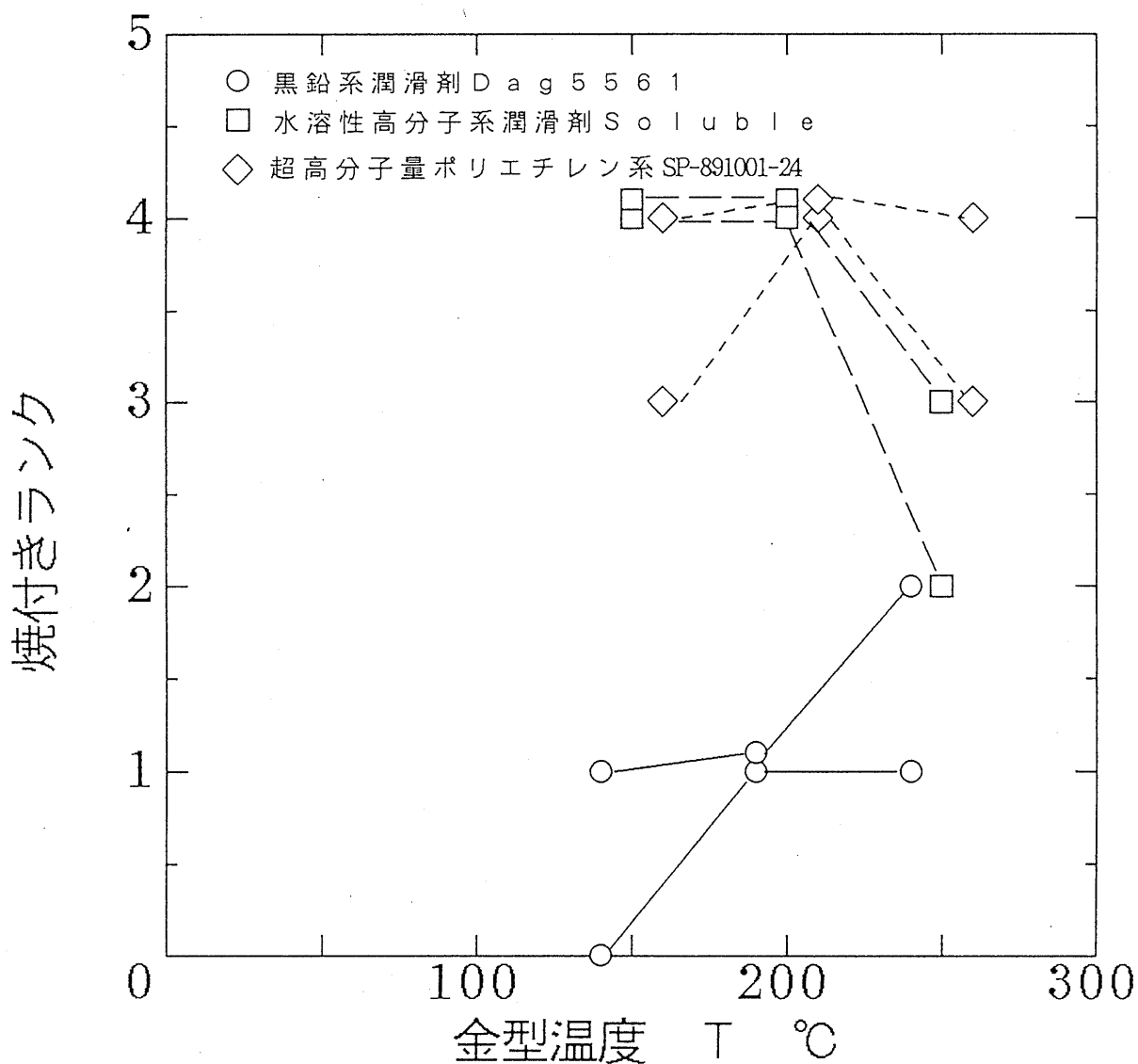


図 5 1 SUS 6 3 0 の前後方押出摩擦試験における最大荷重と金型温度の関係
 潤滑剤：黒鉛系潤滑剤市販 Dag 5 5 6 1 (1 0 倍希釈)
 水溶性高分子系潤滑剤 Soluble (1 0 倍希釈)
 超高分子量ポリエチレン系 SP-8 9 1 0 0 1-2 4 (1 0 倍希釈)
 素材：ステレンス SUS 6 3 0, 加熱温度：1 1 0 0 °C
 金型：超硬合金 V 4, 断面減少率：Re = 5 0 %

高分子量ホリフィソ系 SP-891001-24 の最大荷重 P はダイス温度 200℃ の時に、最も低い値を示している。図 5 2 はダイス側の焼付き状態とダイス温度の関係である。ダイス側は、何れの潤滑剤でも焼付きは全く生じていない。図 5 3 にパンチ側の焼付き状態を示す。黒鉛系潤滑剤 Dag5561 がダイス温度を変わっても、焼付き状態の変化が少く、水溶性高分子系潤滑剤 Soluble HM-1 と超高分子量ホリフィソ系 SP-891001-24 ではかなり焼付きが激しくなっていることがわかる。



- 5 2 SUS 6 3 0 の前後方押出摩擦試験におけるダイス側の焼付き状態と金型温度の関係
 潤滑剤：黒鉛系潤滑剤市販 D a g 5 5 6 1 (10 倍希釈)
 水溶性高分子系潤滑剤 S o l u b l e (10 倍希釈)
 超高分子量ポリエチレン系 S P - 8 9 1 0 0 1 - 2 4 (10 倍希釈)
 素材：ステレンス SUS 6 3 0, 加熱温度：1 1 0 0 °C
 金型：超硬合金 V 4, 断面減少率：R e = 5 0 %



- 53 SUS630の前後方押出摩擦試験におけるパンチ側の焼付き状態と金型温度の関係
 潤滑剤：黒鉛系潤滑剤市販D a g 5 5 6 1 (10倍希釈)
 水溶性高分子系潤滑剤S o l u b l e (10倍希釈)
 超高分子量ポリエチレン系S P - 8 9 1 0 0 1 - 2 4 (10倍希釈)
 素材：ステレンスS U S 6 3 0, 加熱温度：1100℃
 金型：超硬合金V4, 断面減少率：R e = 50%

4. アルミニウム合金素材の潤滑性能評価試験

4. 1 リング圧縮摩擦試験

アルミニウム合金 A-6061 素材について、リング圧縮摩擦試験を行った結果を図 5 4 と図 5 5 に示す。それぞれ、圧縮率 R_e % と摩擦係数 μ あるいは摩擦せん断係数 m との関係を示す。潤滑剤については黒鉛系 Dag5561 と硫化亜鉛 ZnS で、圧縮率が 35%、45%、55% について試験した。

図 5 4 の摩擦係数 μ を見ると、圧縮率に伴う黒鉛の μ の変化は少く、硫化亜鉛の摩擦係数より 0.2 程度低い値を示している。硫化亜鉛の場合、摩擦係数 μ は圧縮率 R_e の増加に伴い、やや増加する傾向にある。図 5 5 の摩擦せん断係数 m を見ると、黒鉛の場合には、摩擦せん断係数 m は圧縮率 R_e の増加に伴いやや減少する傾向を示し、 $m = 0.4 \sim 0.35$ 程度となっている。これに対し硫化亜鉛の摩擦せん断係数 m は極めて高く、ほぼ完全な固着摩擦状態となっていることがわかる。

4. 2 前・後方押し出し形摩擦試験

4. 2. 1. パンチ荷重と変形特性

アルミニウム合金素材 A-6061 を用いて前・後方押し出し形摩擦試験を行った。図 5 6 に試験片長さ L_o とパンチ荷重 P との関係を示す。荷重測定は数十 kN の範囲では十分な精度が得られないが、 $R_e = 25\%$ の場合、 $L_o = 17 \sim 20$ mm では P は 30 kN 前後のほぼ一定値を示している。 $R_e = 50\%$ の場合、 L_o の増加に伴い荷重が増加する傾向を示す。特に $L_r = 5$ mm ではその傾向が顕著であるが、 $L_o = 20$ mm 以上で $L_r = 0$ 場合に近い値を示すようになる。図 5 7 に示した試験片の縦断面写真において、黒鉛潤滑剤で、 $R_e = 50\%$ 、 $L_o = 20$ mm、 $L_r = 5$ mm のとき、明らかに後方押し出しが十分生じていない。このため $R_e = 50\%$ で $L_o = 17$ mm 以下、 $L_r = 5$ mm では本摩擦試験法の前提となる後方押し出し荷重一定の条件に達していないものと考えられる。

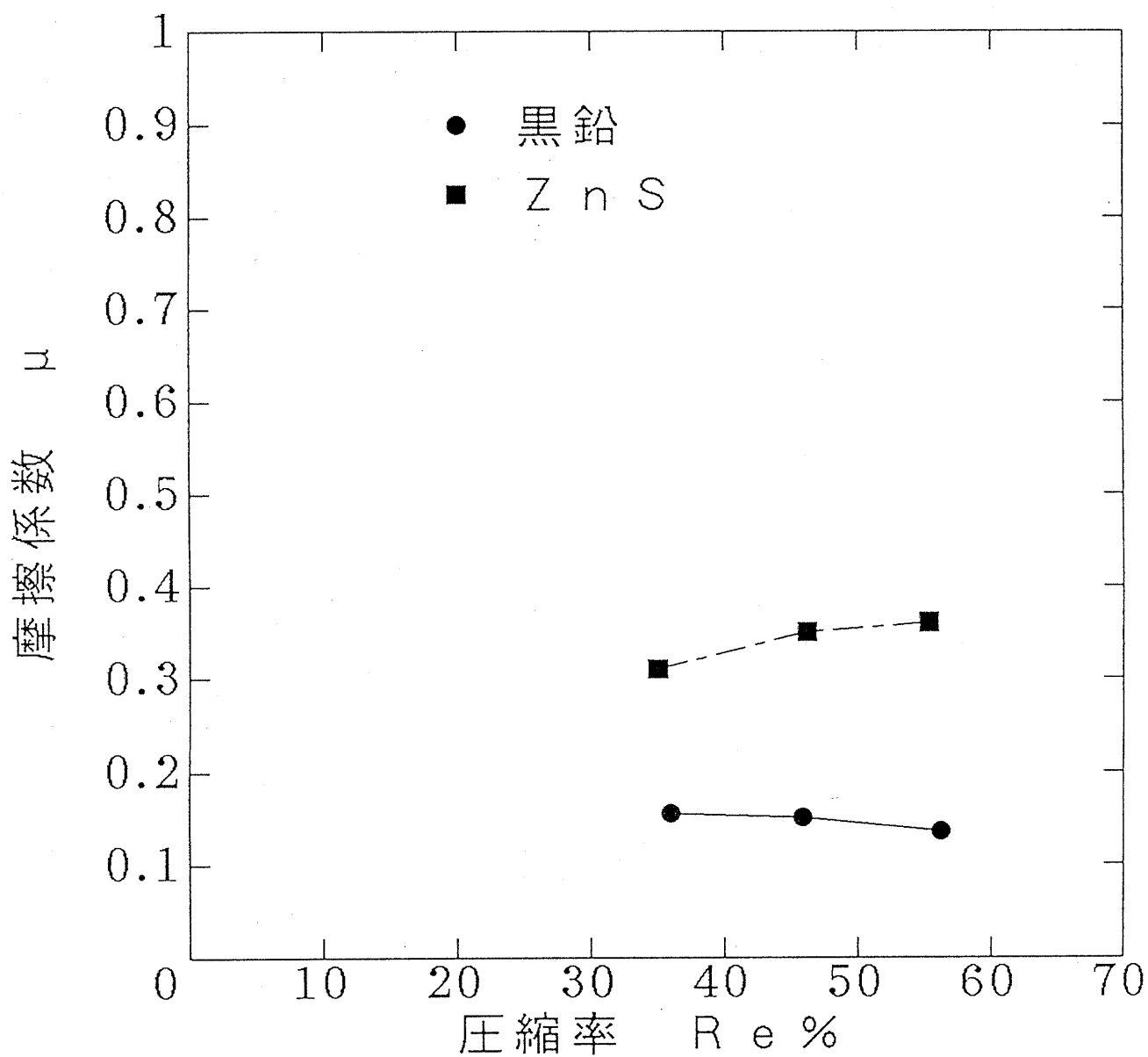


図 5 4 A - 6 0 6 1 のリング圧縮試験における
圧縮率と摩擦係数の関係

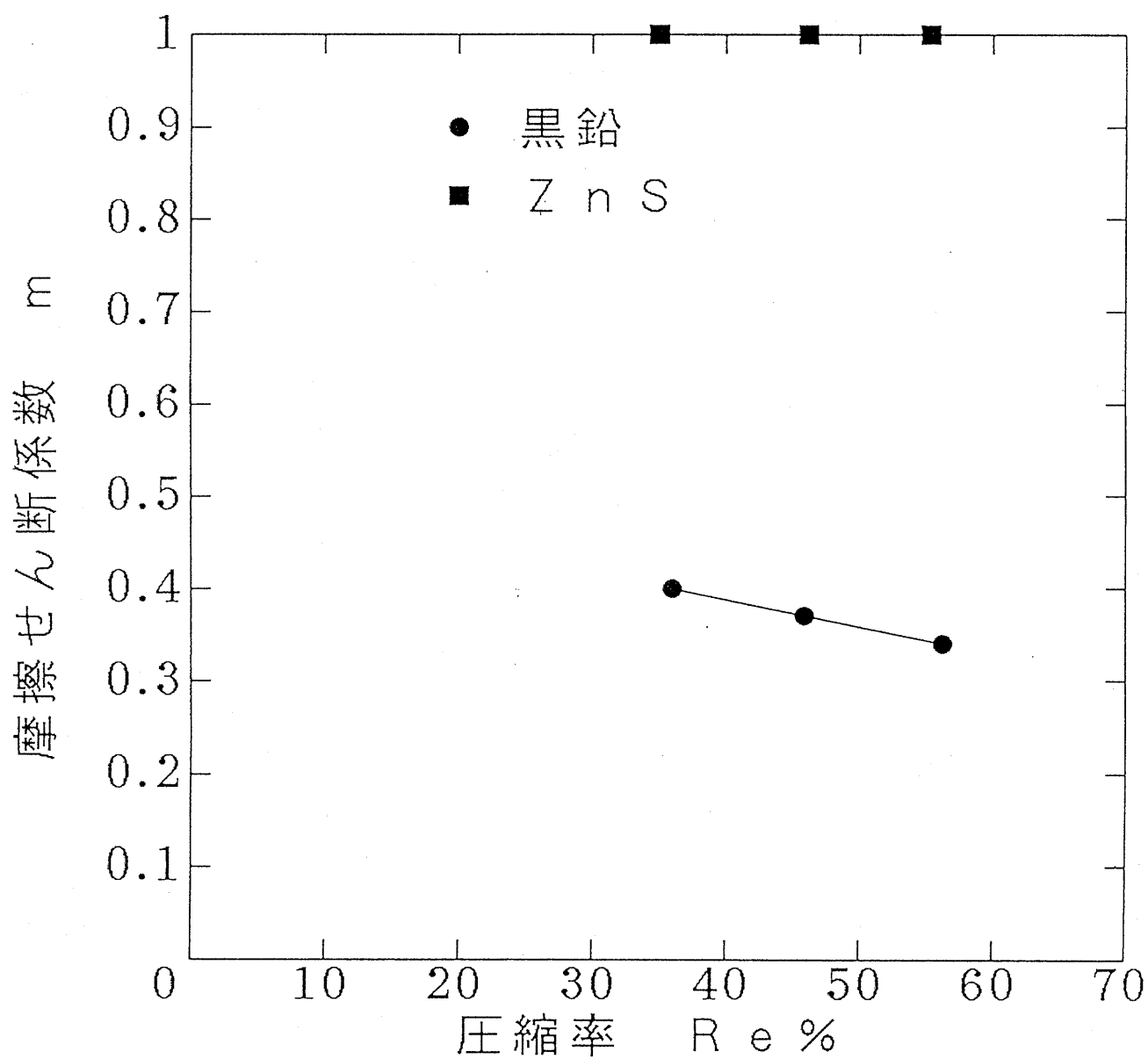


図 5 5 A - 6 0 6 1 のリング圧縮試験における
圧縮率と摩擦せん断係数の関係

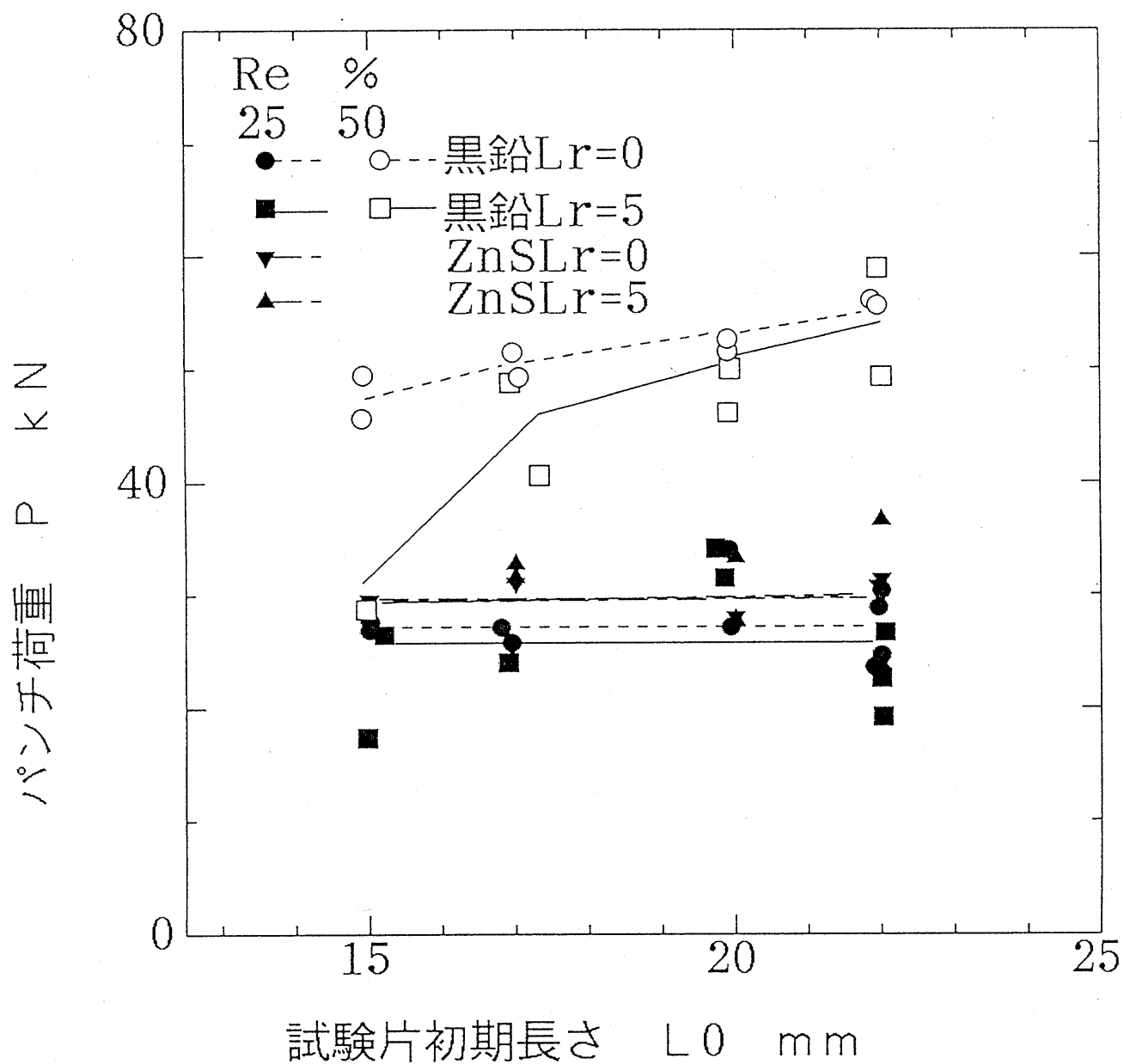
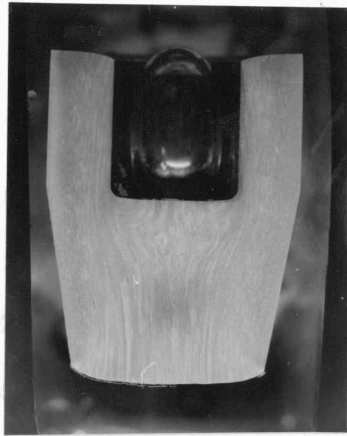
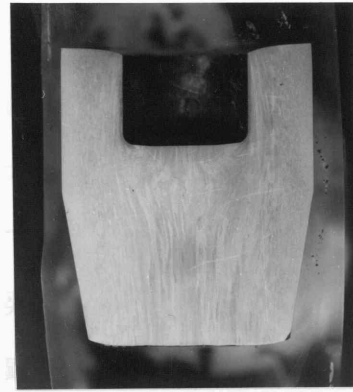


図5 6 A 6 0 6 1 の前・後方押出し形摩擦試験における試験片初期長さ とパンチ荷重の関係



$L_r = 0 \text{ mm}$

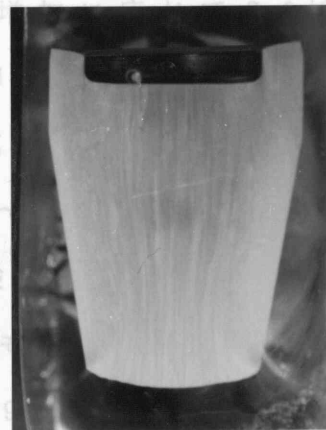


$L_r = 5 \text{ mm}$

(a) 黒鉛 $R_e = 25\%$, $L_o = 20 \text{ mm}$

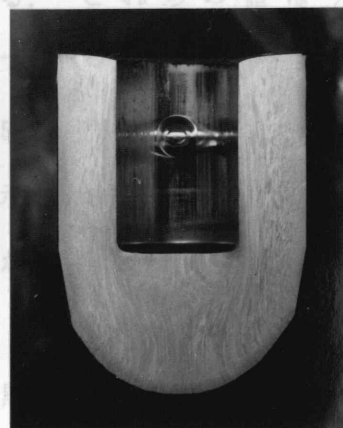


$L_r = 0 \text{ mm}$

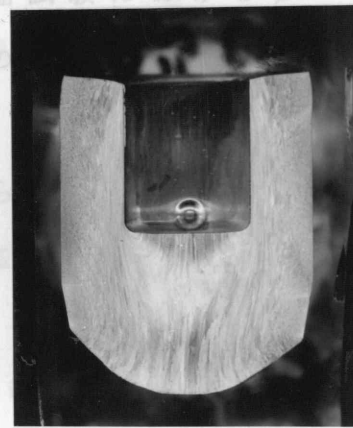


$L_r = 5 \text{ mm}$

(b) 黒鉛 $R_e = 50\%$, $L_o = 20 \text{ mm}$



$L_r = 0 \text{ mm}$



$L_r = 5 \text{ mm}$

(c) ZnS $R_e = 25\%$, $L_o = 20 \text{ mm}$

図 5 7 試験片の断面写真

図 5 7 の写真では, $R_e = 25\%$ に比べて $R_e = 50\%$ の方が S_f がかなり大きくなること, 黒鉛と ZnS では S_f に顕著な差異が生じること, 及び ZnS は前方押出し先端部が大きく膨らんでいることなどが分かる. ダイス面上の焼付きに関しては, 黒鉛では殆ど発生しなかったのに対して, ZnS は全試験で発生した. また, 後方押出しのパンチ側の焼付きも ZnS でとくに顕著であった.

図 58 に試験片長さ L_0 と前方押出し長さ S_f との関係を示す. $R_e = 25\%$ の場合, L_0 が 17mm 以上で S_f はほぼ一定となっている. $R_e = 50\%$ の場合, 図 5 6 の L_0 に伴う荷重増加に応じて S_f が増加する傾向を示している. 硫化亜鉛の場合の押出し長さは $S_f = 3 \sim 4\text{mm}$ 程度と極めて小さく, 黒鉛では, $R_e = 25\%$ で, $S_f = 12 \sim 14\text{mm}$ 程度. $R_e = 50\%$ では, $S_f = 12 \sim 20\text{mm}$ 及び $S_f = 17 \sim 25\text{mm}$ 程度となっている.

4. 2. 2. 摩擦特性値推定の最適試験条件

図 5 8 の S_f の値から摩擦係数 μ のノモグラフを用いて $R_e = 25\%$ における μ と L_0 との関係を示すと図 5 9 のようになる. 2 回ずつの試験における μ の再現性はかなり良いことが分かる. L_0 が 17mm 以上で μ はほぼ一定値を示し, 黒鉛は $L_r = 0$ で 0.08, $L_r = 5$ で 0.11 となっている. これらの値はリング圧縮試験における $\mu = 0.13$ に近い値となっている. ZnS は $L_r = 5$ の時 0.33 であるが, $L_r = 0$ の時は約 0.5~0.9 と異常に高く, L_0 によっても変化している. これは図 5 7 に示した ZnS の断面写真から分かるように, 前方押出しの先端部分が大きく膨らんで変形したことが影響していると考えられる.

図 6 0 に黒鉛系潤滑剤の $R_e = 50\%$ の時の L_0 と μ との関係を示す. $L_r = 0$ では, L_0 が 20 以上で μ は約 0.06 のほぼ一定値を示している. $L_r = 5$ では L_0 に伴って減少し $L_0 = 22\text{mm}$ 以上で $L_r = 0\text{mm}$ の値にほぼ近い値となっている.

図 6 1 は, 図 5 8 の S_f から摩擦せん断係数 m のノモグラフを用いて $R_e = 25\%$ の時の m を求め, L_0 に対して示した結果である. この

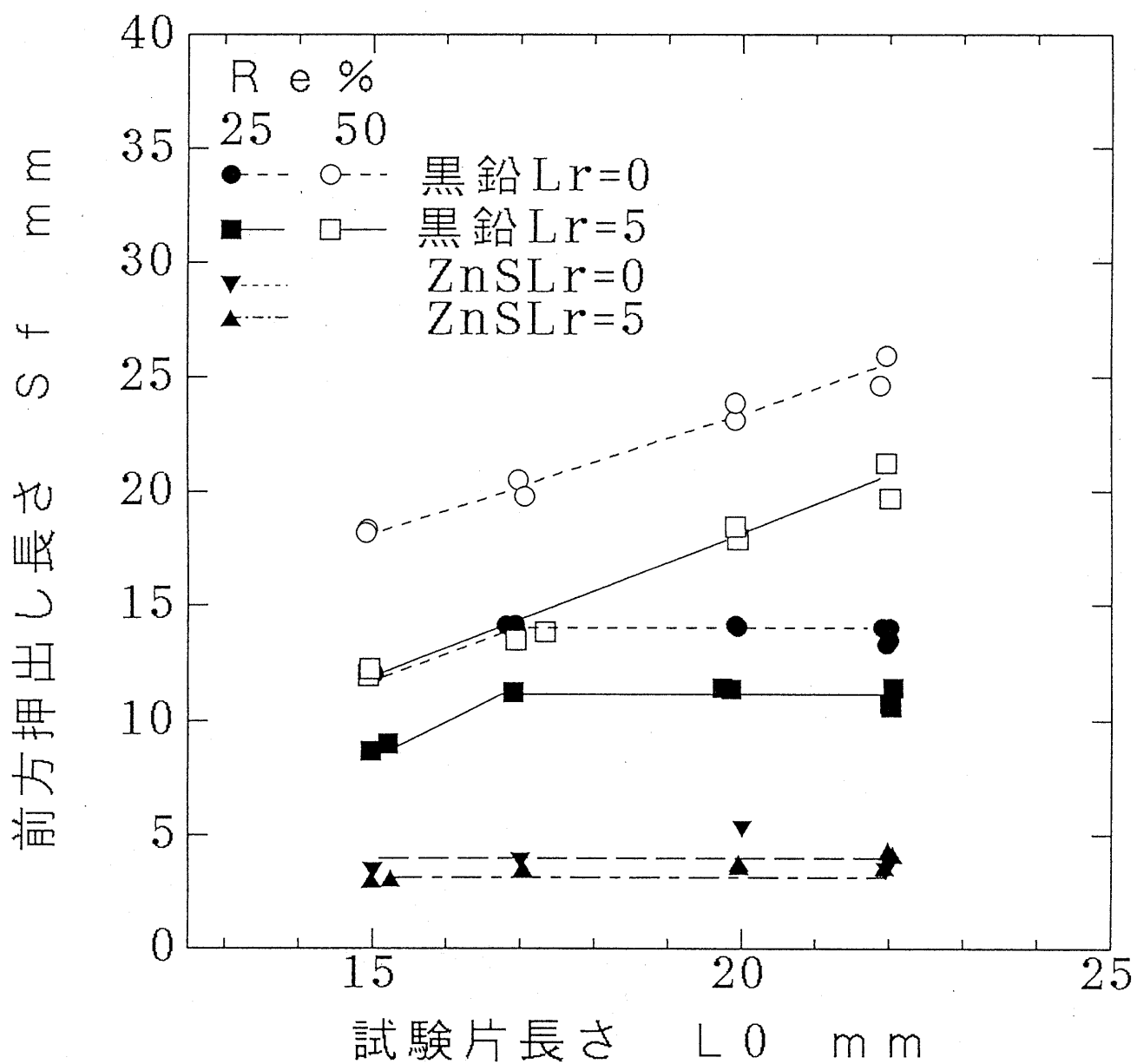


図 5 8 前後方押し出し形摩擦試験における試験片初期長さと前方押し出し長さとの関係

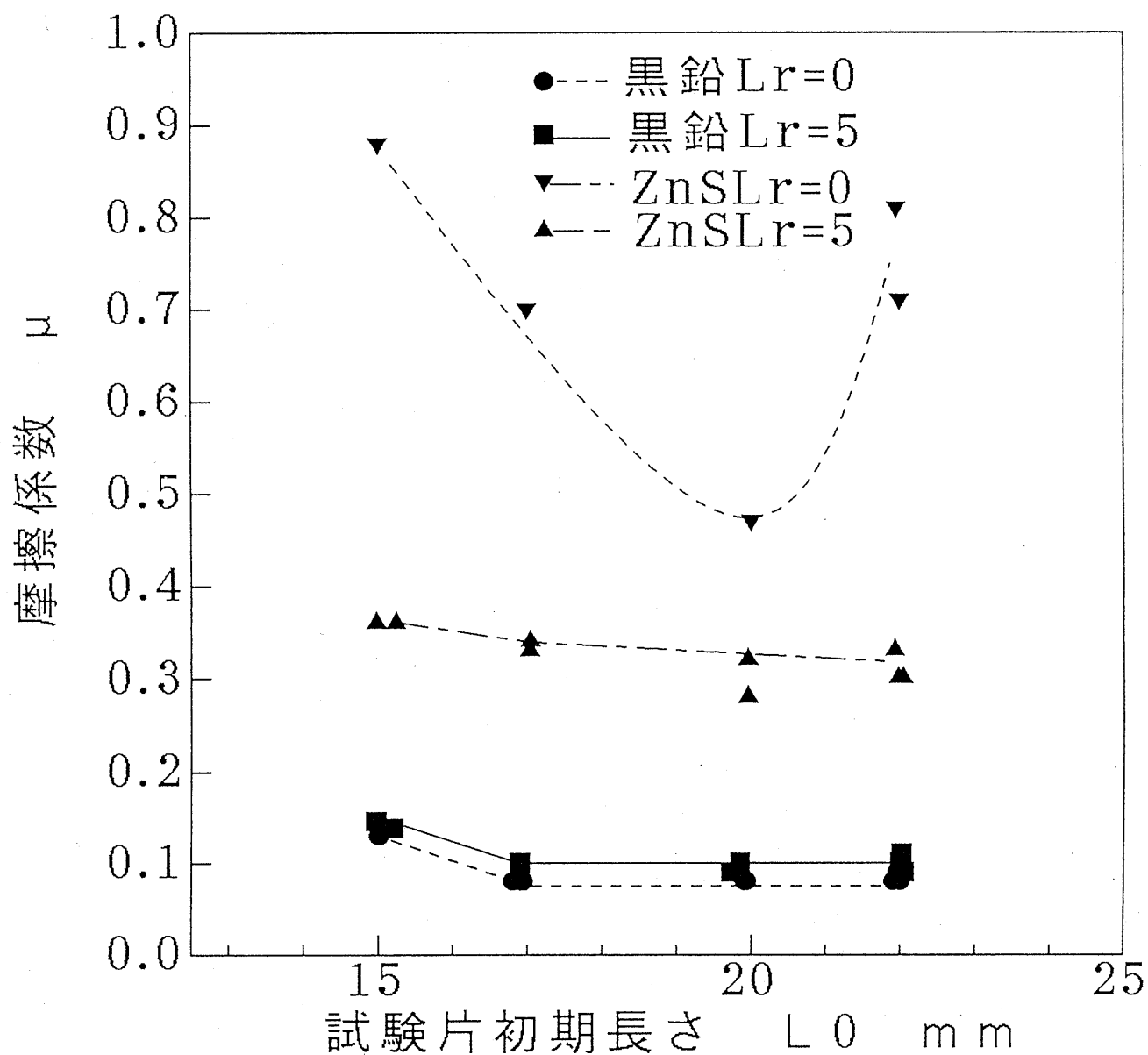


図 5 9 前後方押し出し形摩擦試験における $Re=25\%$ の時試験片初期長さと摩擦係数との関係

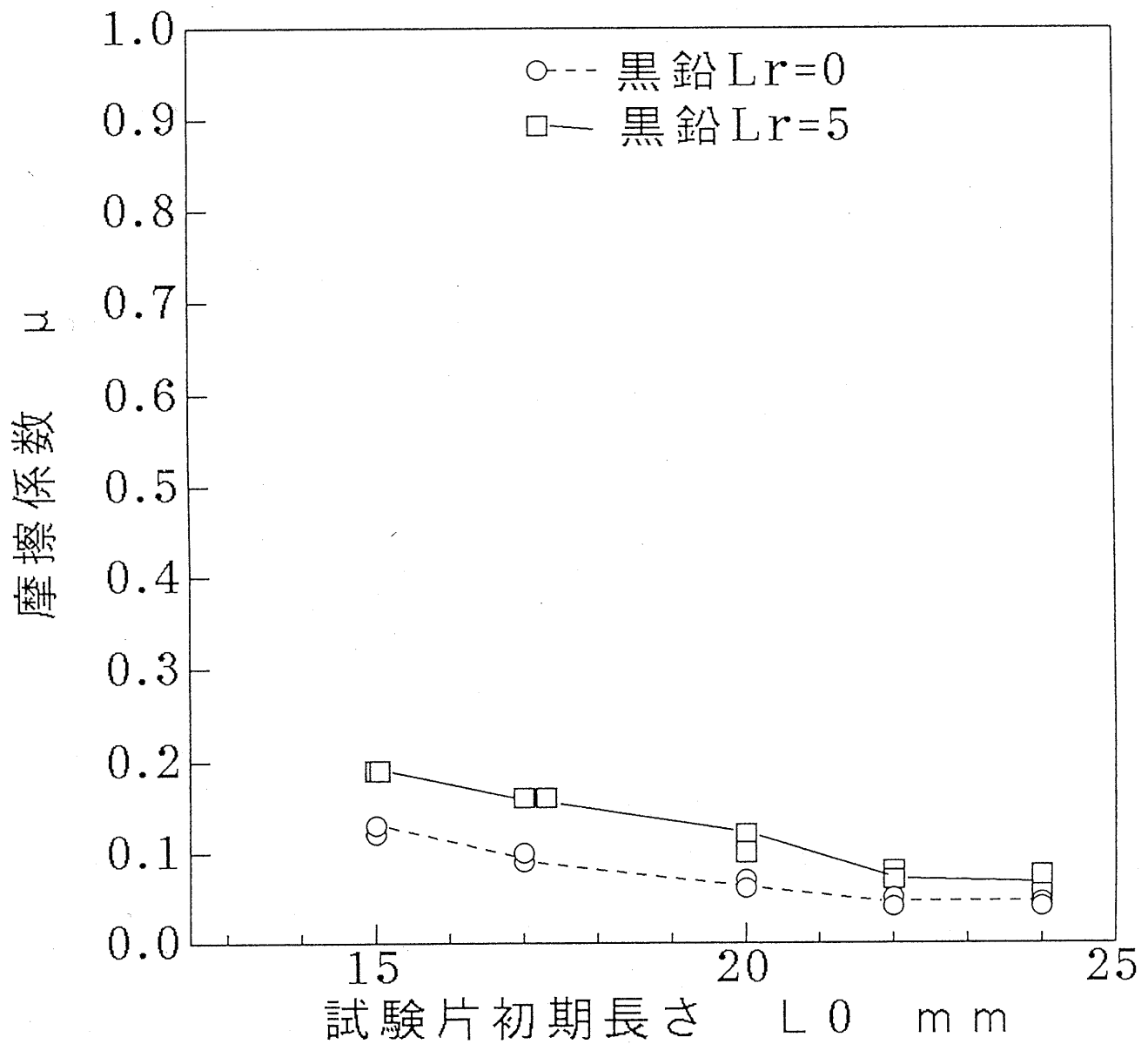


図 6 0 前後方押出し形摩擦試験における $Re=50\%$ 時の試験片初期長さと摩擦係数との関係

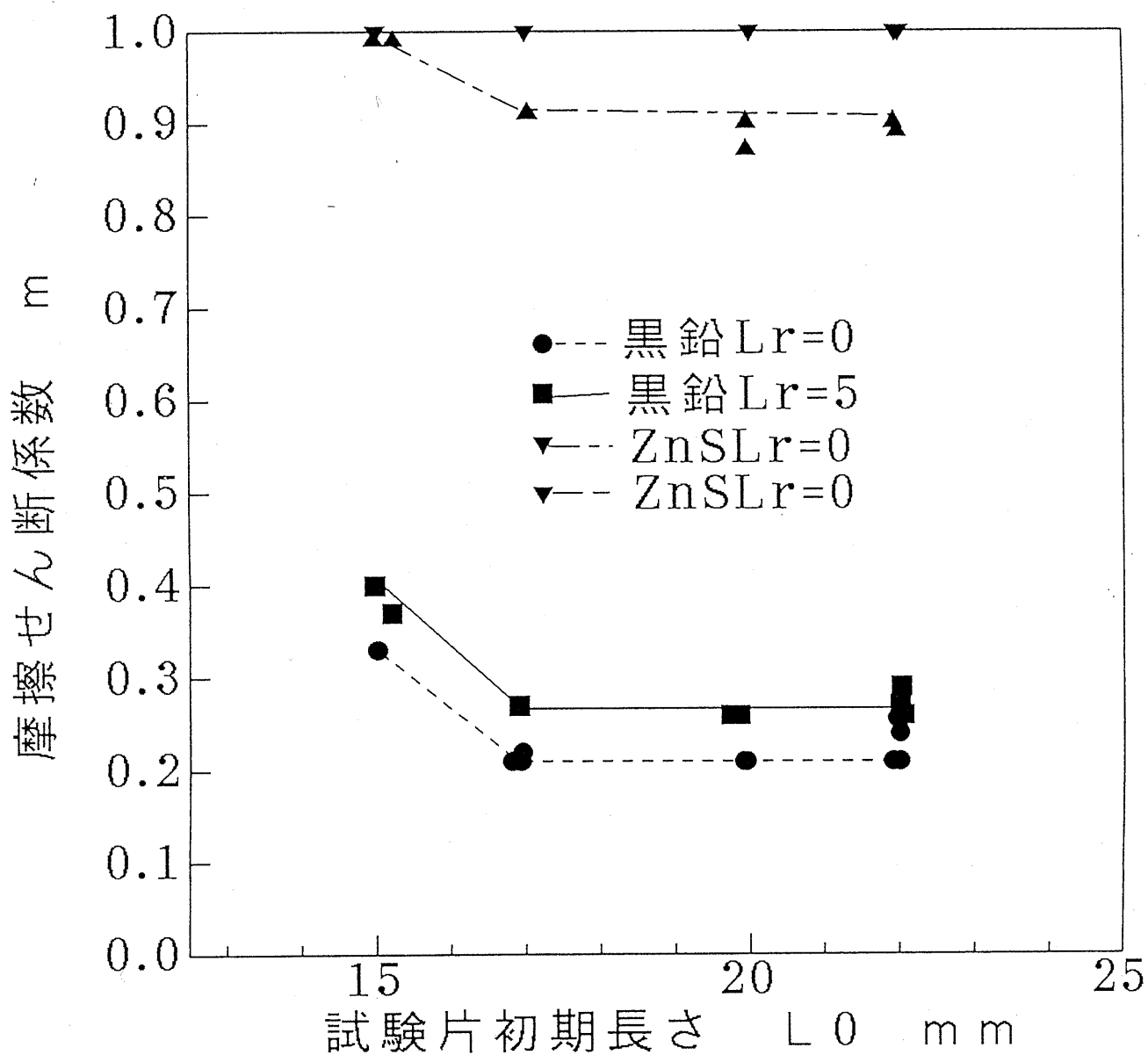


図 6 1 前後方押し出し形摩擦試験における $Re=25\%$ の試験片初期長さと摩擦せん断係数との関

場合の m の再現性もかなり良いことが分かる。 $L_0 = 17\text{mm}$ 以上ではほぼ一定の m の値を示している。黒鉛は $L_r = 0$ で $m = 0.21$, $L_r = 5$ で 0.27 程度となっている。この値はリング圧縮試験で得られた 0.3 に近い値である。ZnS は $m = 1$ 近傍の極めて高い値を示している。

図 6 2 に $R_e = 50\%$ の時の L_0 と m との関係を示す。 μ の場合より L_0 の増加に伴う m の減少が顕著となるが、 $L_r = 0$ では $L_0 = 20$ 以上になると $m = 0.2$ 程度となり $R_e = 25\%$ の場合に近い値となっている。

以上のように本試験法において μ あるいは m の的確な推定を行うためには、試験片初期長さ $L_0 = 20\text{mm}$ 以上、パンチ押込み量 $L_r = 0$ を標準条件とする事が望ましいと考えられる。

4. 2. 3. Al-Si 合金の潤滑性能評価

Al-Si 系合金の熱間鍛造における黒鉛系潤滑剤の性能を評価するため、A-6061, A4032 (Si=12%含有) 及び A390 (Si=18%含有) を用いて、前・後方押出し形摩擦試験を行った。

(I) A-6061 の場合

図 6 3 は A-6061 の前・後方押出し摩擦試験における摩擦係数 μ と断面減少率 R_e の関係である。水溶性黒鉛系潤滑剤 Dag5561 は、 $R_e = 25\%$ 、 50% において、摩擦係数 μ がやや低い、 $R_e = 70\%$ では少し高い値を示している。油性黒鉛 0-940201-1 は、 R_e が増加しても、 μ はそれほど増加していないことがわかる。油性黒鉛 HITASOL GO-102 はやや高い μ を示すが、 R_e 対するに変化はほとんどないことがわかる。

図 6 4 は A-6061 の前後方押出し摩擦試験における摩擦せん断係数 m と断面減少率 R_e の関係である。摩擦係数 μ とほぼ同じ傾向であるが、水溶性黒鉛系潤滑剤 Dag5561 の m は、 R_e に単調に増加している。油性黒鉛は $R_e = 50\%$ でやや高い値を示す。油性黒鉛 HITASOL GO-102 が m の変化比較的少ない。

図 6 5 は A-6061 の前後方押出し摩擦試験における最大荷重 P と断

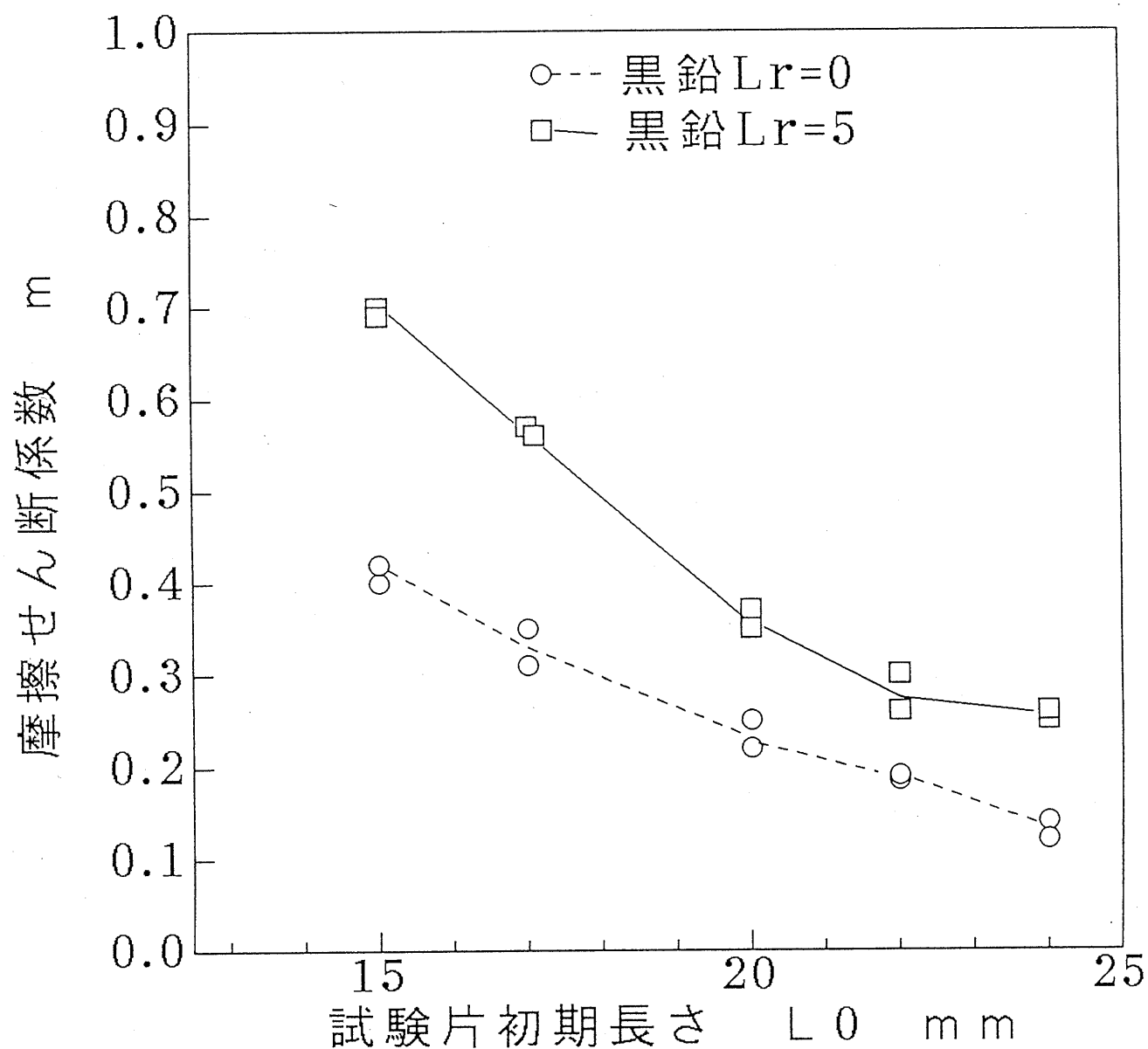


図 6 2 前後方押出し形摩擦試験における $Re=50\%$ の試験片初期長さ と摩擦せん断係数との関

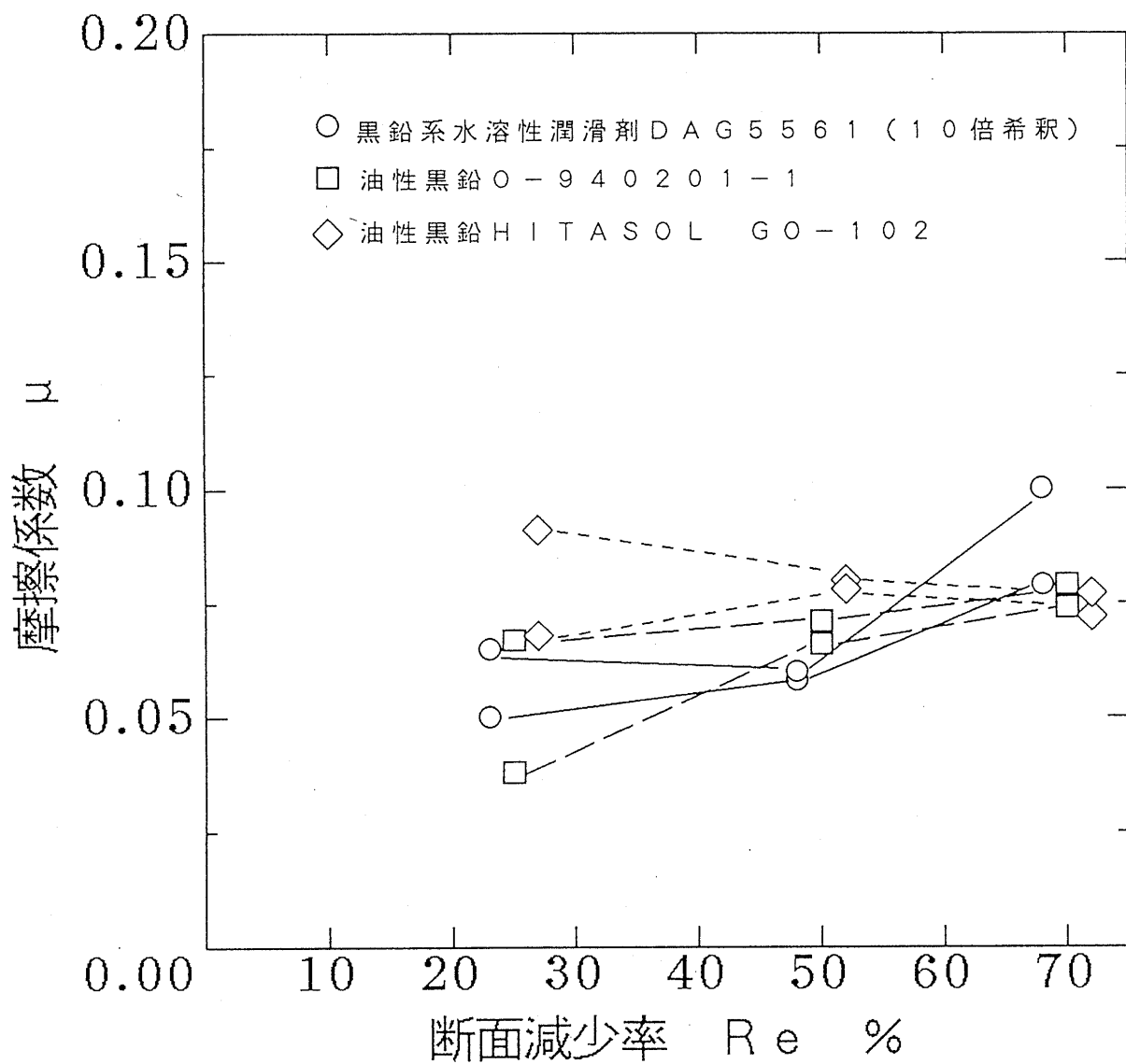


図 6 3 A-6061 の前後方押し摩擦試験における摩擦係数と断面減少率の関係
 潤滑剤：（素材）溶剤系ドライフィルム型黒鉛 D-900505-6，
 （金型）黒鉛系潤滑剤市販 DAG 5561（10 倍希釈）、
 油性黒鉛 O-940201-1
 油性黒鉛 HITASOL GO-102
 素材温度：500℃，金型温度：200℃

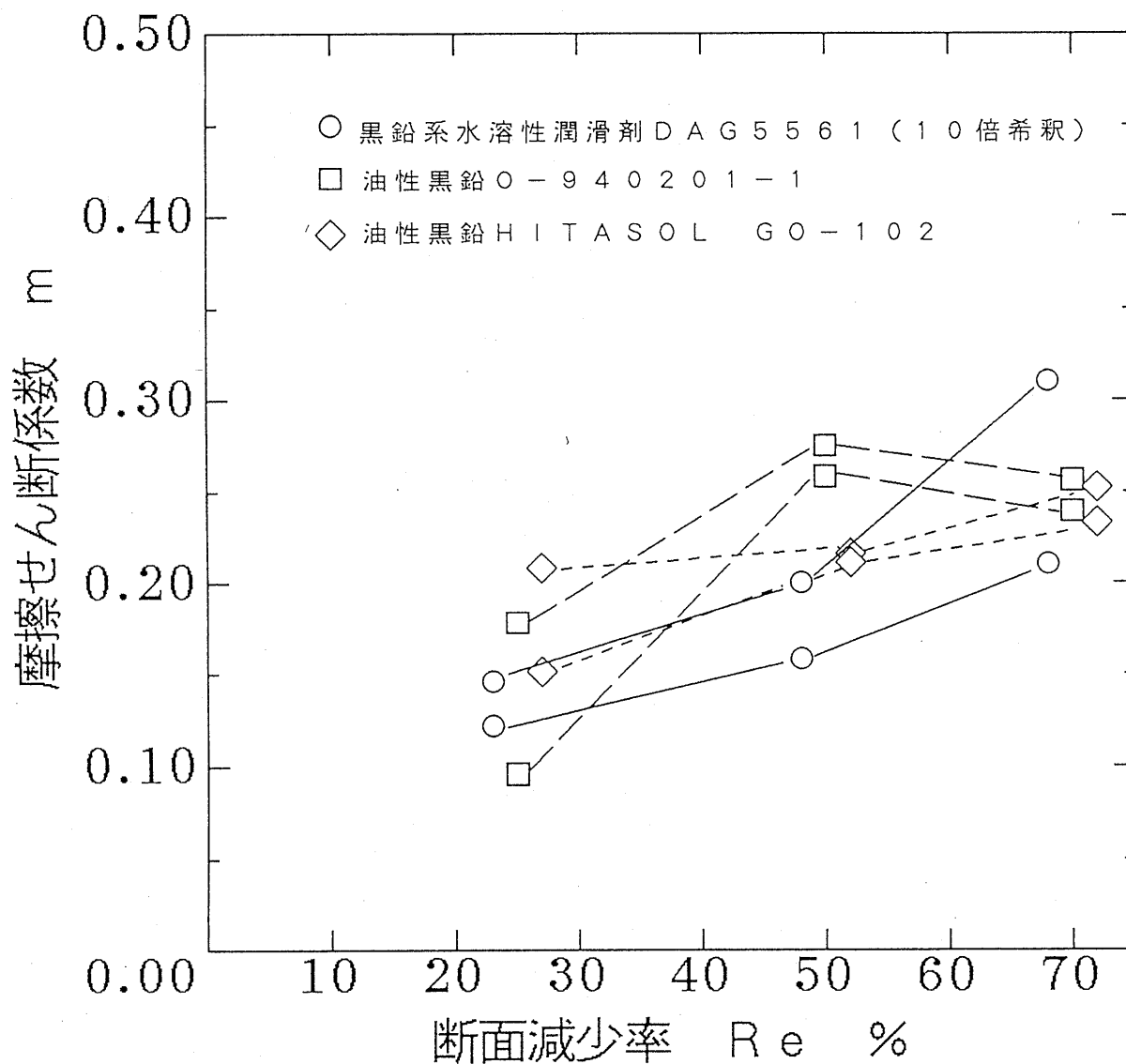


図 6 4 A-6061 の前後方押し摩擦試験における摩擦せん断係数と断面減少率の関係
 潤滑剤：（素材）溶剤系ドライフィルム型黒鉛 D-900505-6、
 （金型）黒鉛系潤滑剤市販 DAG 5561（10 倍希釈）、
 油性黒鉛 O-940201-1
 油性黒鉛 HITASOL GO-102
 素材温度：500℃，金型温度：200℃

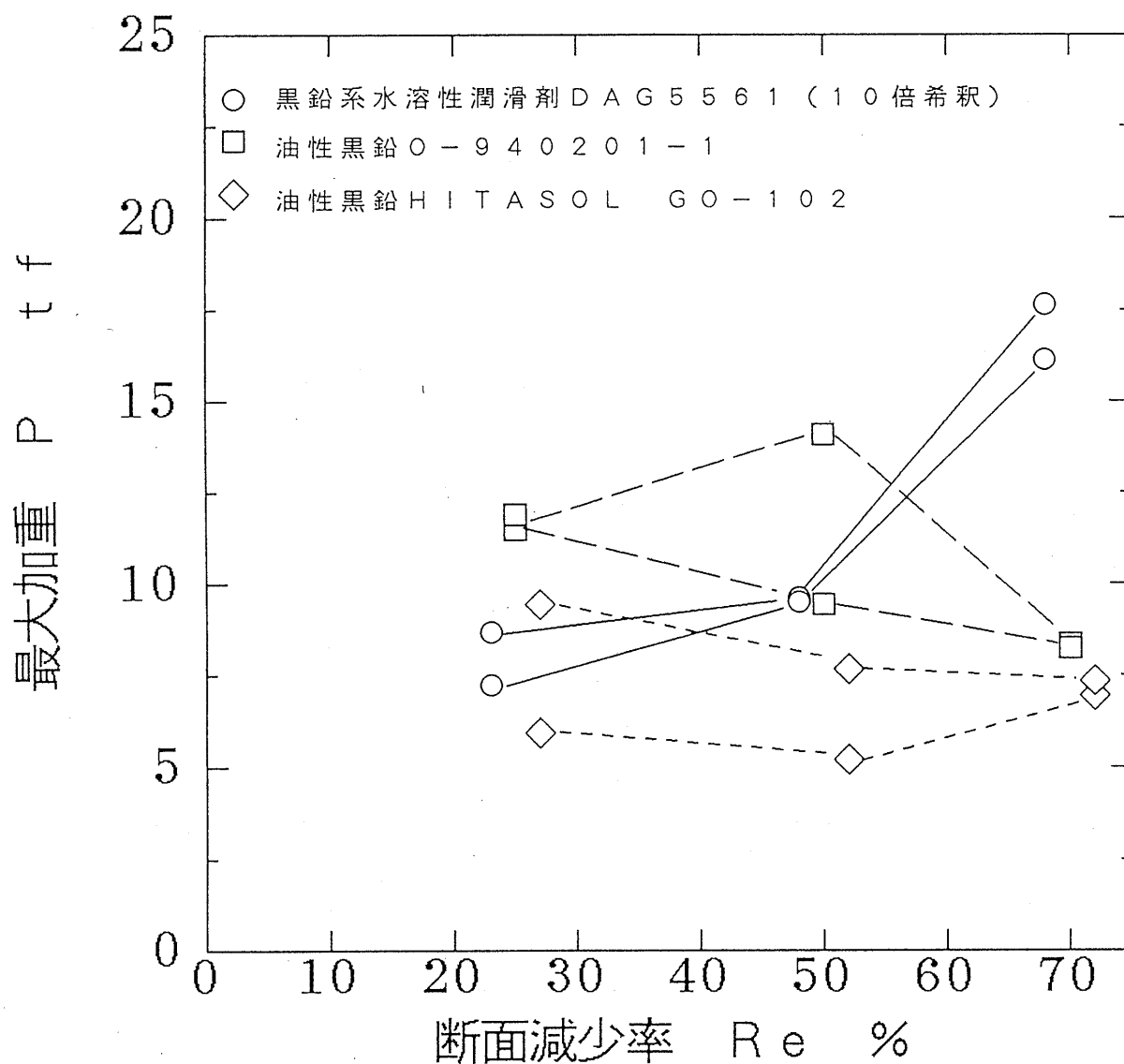


図 65 A-6061 の前後方押し摩擦試験における最大加重と断面減少率の関係
 潤滑剤：(素材) 溶剤系ドライフィルム型黒鉛 D-5005-6,
 (金型) 黒鉛潤滑剤市販 DAG 5561 (10倍希釈)、
 油性黒鉛 O-940201-1
 油性黒鉛 HITASOL GO-102
 素材温度：500℃，金型温度：200℃

面減少率 R_e の関係である。黒鉛系 Dag5561 の荷重が断面減少率の増加に伴って増加し、 μ あるいは m の変化にほぼ対応している。油性黒鉛の荷重 P はかなり低くなっている。同じ断面減少率では、油性黒鉛 HITASOL G0-102 の荷重が一番低いことを分かった。

図 6 6 は A-6061 の前後方押出し摩擦試験におけるダイス側の焼付きランクと断面減少率 R_e の関係を示したものである。断面減少率 R_e の増加に伴い、焼付きが 2 程度まで増加するが油性黒鉛ではほとんど変化しないで、ランクの数値は最大 2 (小) までである。

図 6 7 はパンチ側の焼付き程度を示す。黒鉛では $R_e = 50\%$ まで完全に焼付きを抑制できるが、 $R_e = 70\%$ では、1 ~ 2 程度の焼付きが生じる。油性黒鉛は、ダイス側と同様に R_e による変化がほとんどなし、1 程度の焼付きである。

(II) A4032 の場合

図 6 8 と図 6 9 は A4032 の前・後方押出し摩擦試験における摩擦係数 μ と摩擦せん断係数 m と断面減少率 R_e の関係である。油性黒鉛 0-940201-1 では断面減少率 R_e の増加に伴い μ は増加する傾向を示す。水溶性黒鉛 Dag5561 と油性黒鉛は $R_e = 50\%$ で極小値を示している。また、 $R_e = 70\%$ の時、3 種類の潤滑剤の摩擦係数 μ と摩擦せん断係数 m がほぼ一致している。

図 7 0 は A4032 の前・後方押出し摩擦試験における最大荷重 P と断面減少率 R_e の関係である。3 種類の潤滑剤が全体に断面減少率 R_e の増大するに伴う増大する。

図 7 1 はダイス側の焼付きランクと断面減少率 R_e の関係である。水溶性黒鉛の焼付きが最も少なく、油性黒鉛の焼付きが最も激しい、とくに $R_e = 70\%$ で著しい焼付きになっている。

図 7 2 はパンチ側の焼付きランクを示したものである。水溶性黒鉛 $R_e = 50\%$ で焼付きは大きい、一般に焼付きは小さい。油性黒鉛 HITASOL G0-102 がランクの数値は最大 3 で、最も焼付き易いことがわかる。油性黒鉛 0-940201-1 が比較的焼付きを抑制する効果大きい。

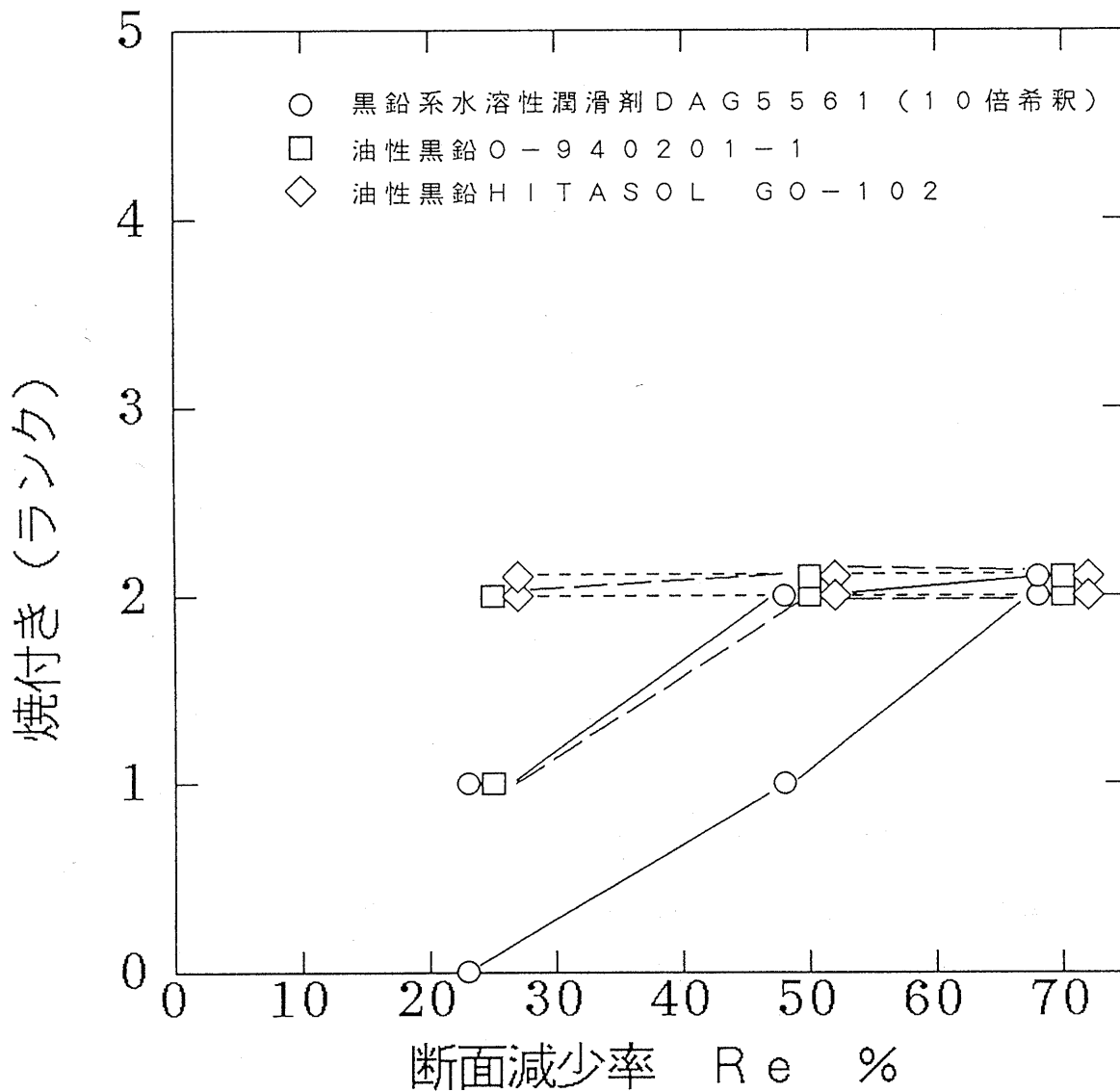


図 6.6 A-6061 の前後方押し摩擦試験におけるダイス側焼付きと断面減少率の関係
 潤滑剤：（素材）溶剤系ドライフィルム型黒鉛 D-900505-6，
 （金型）黒鉛潤滑剤市販 DAG 5561（10 倍希釈）、
 油性黒鉛 O-940201-1
 油性 HITASOL GO-102
 素材温度：500℃，金型温度：200℃

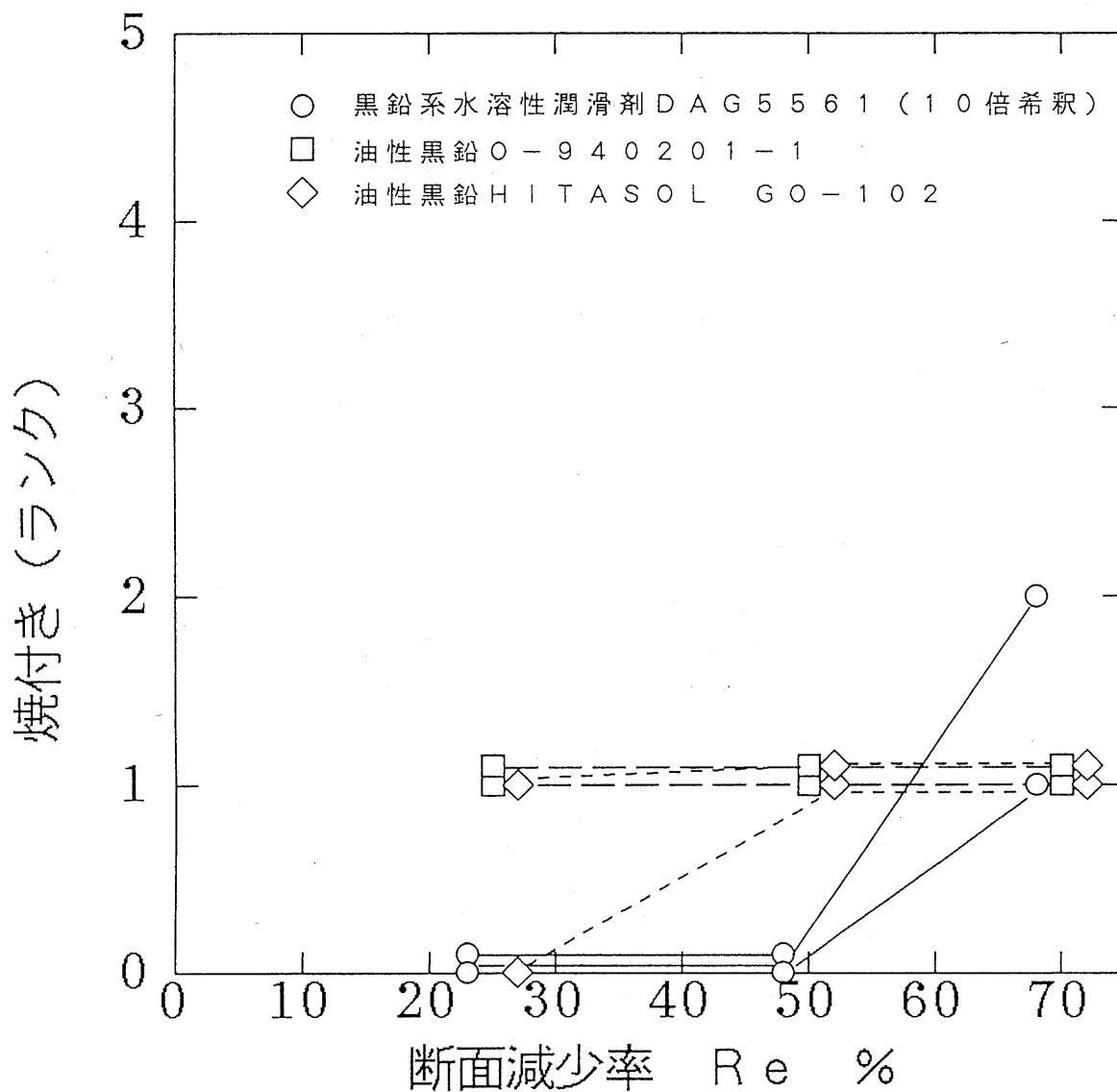


図 6.7 A - 6 0 6 1 の前後方押し摩擦試験におけるパンチ側焼付きと断面減少率の関係
 潤滑剤：(素材) 溶剤系ドライフィルム型黒鉛 D - 9 0 0 5 0 5 - 6 ,
 (金型) 黒鉛潤滑剤市販 D A G 5 5 6 1 (10倍希釈)、
 油性黒鉛 O - 9 4 0 2 0 1 - 1
 油性 H I T A S O L G O - 1 0 2
 素材温度：500℃，金型温度：200℃

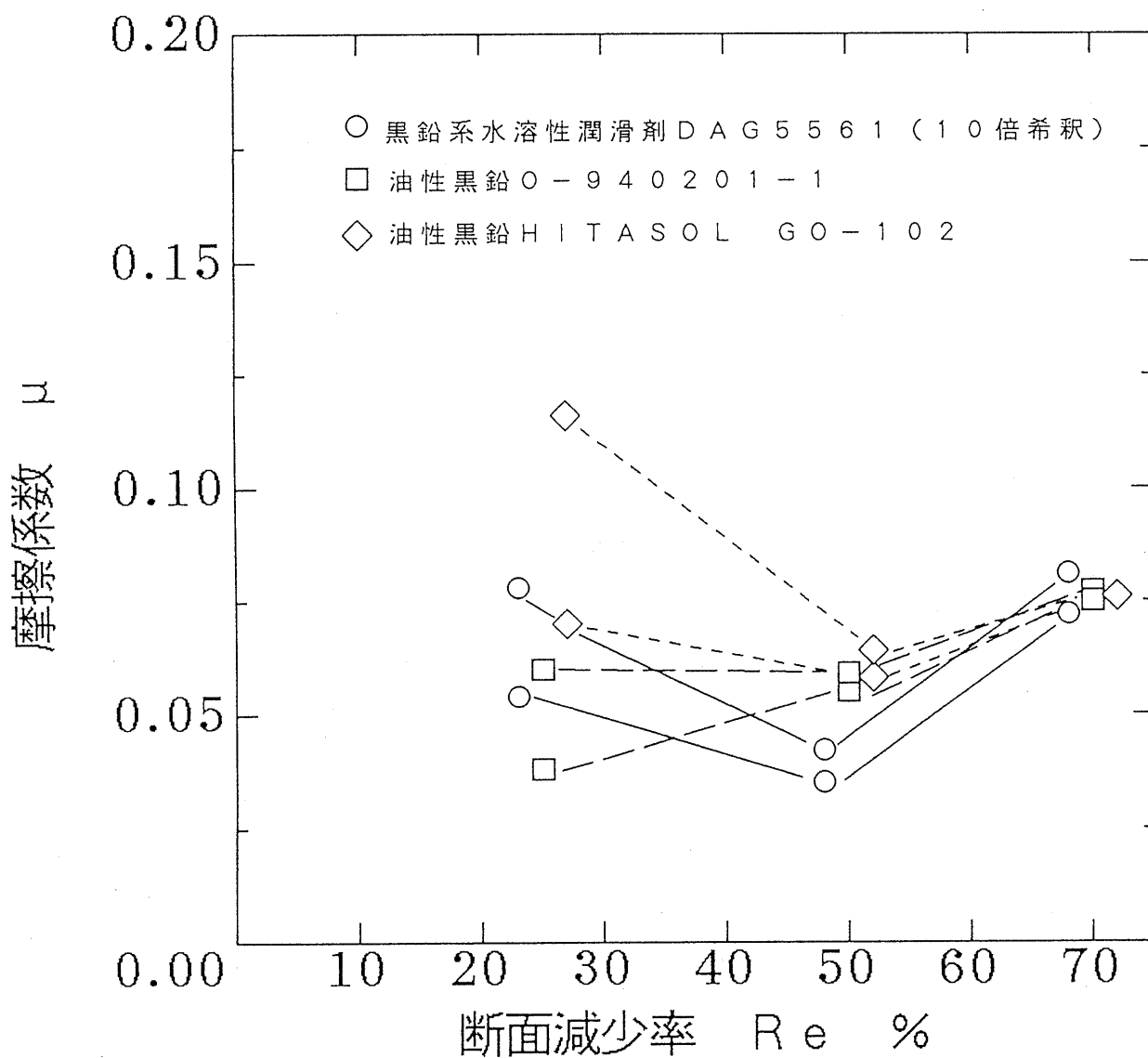


図6 8 A 4 0 3 2 の前後方押し摩擦試験における摩擦係数と断面減少率の関係
 潤滑剤：（素材）溶剤系ドライフィルム型黒鉛 D-9 0 0 5 0 5-6，
 （金型）黒鉛系潤滑剤市販 DAG 5 5 6 1（10倍希釈）、
 油性黒鉛 O-9 4 0 2 0 1-1
 油性黒鉛 HITASOL GO-1 0 2
 素材温度：5 0 0℃，金型温度：2 0 0℃

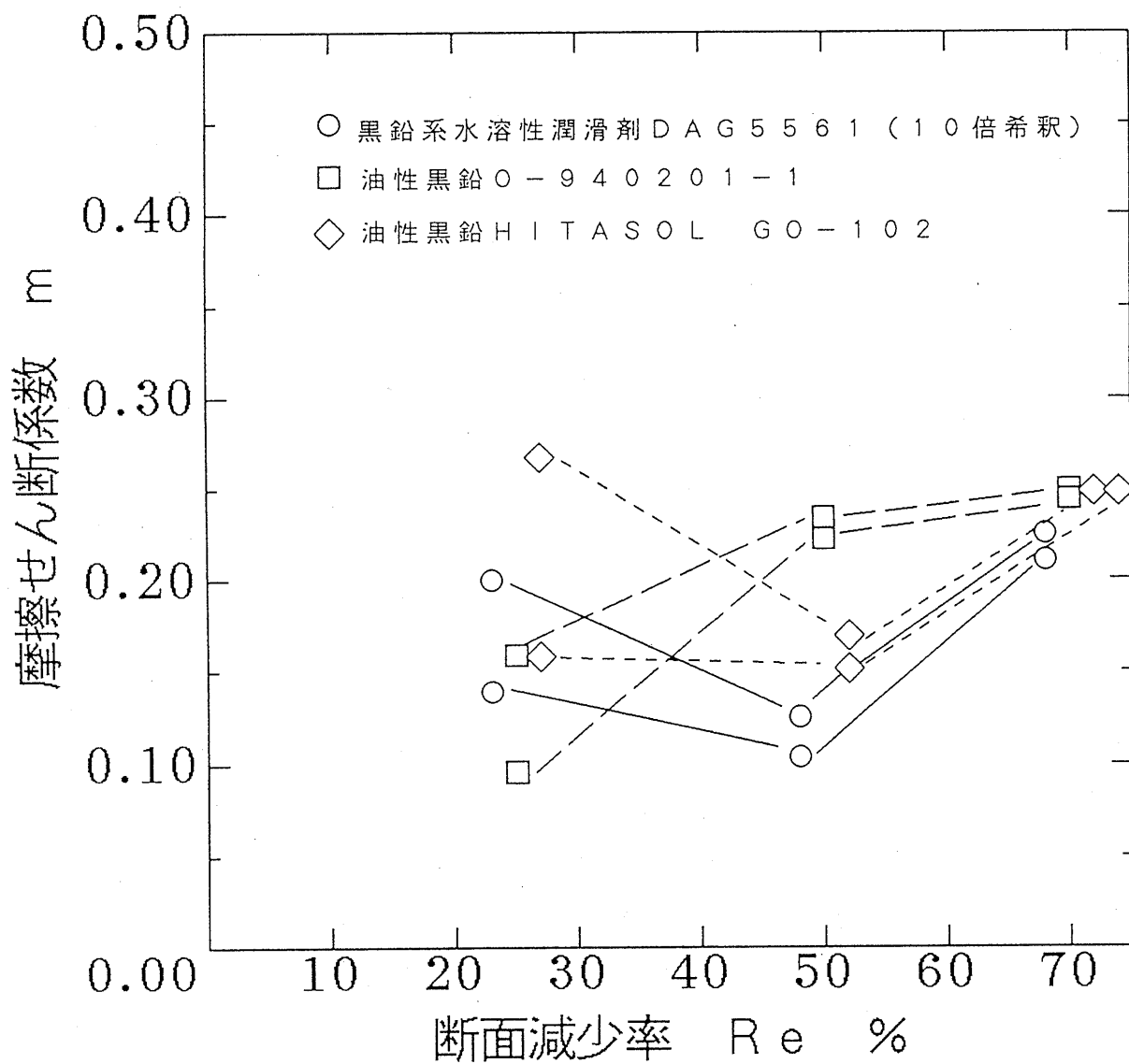


図 6 9 A 4 0 3 2 の前後方押し摩擦試験における摩擦せん断係数と断面減少率の関係
 潤滑剤：(素材) 溶剤系ドライフィルム型黒鉛 D-900505-6,
 (金型) 黒鉛系潤滑剤市販 DAG 5561 (10倍希釈)、
 油性黒鉛 O-940201-1
 油性黒鉛 HITASOL GO-102
 素材温度：500℃，金型温度：200℃

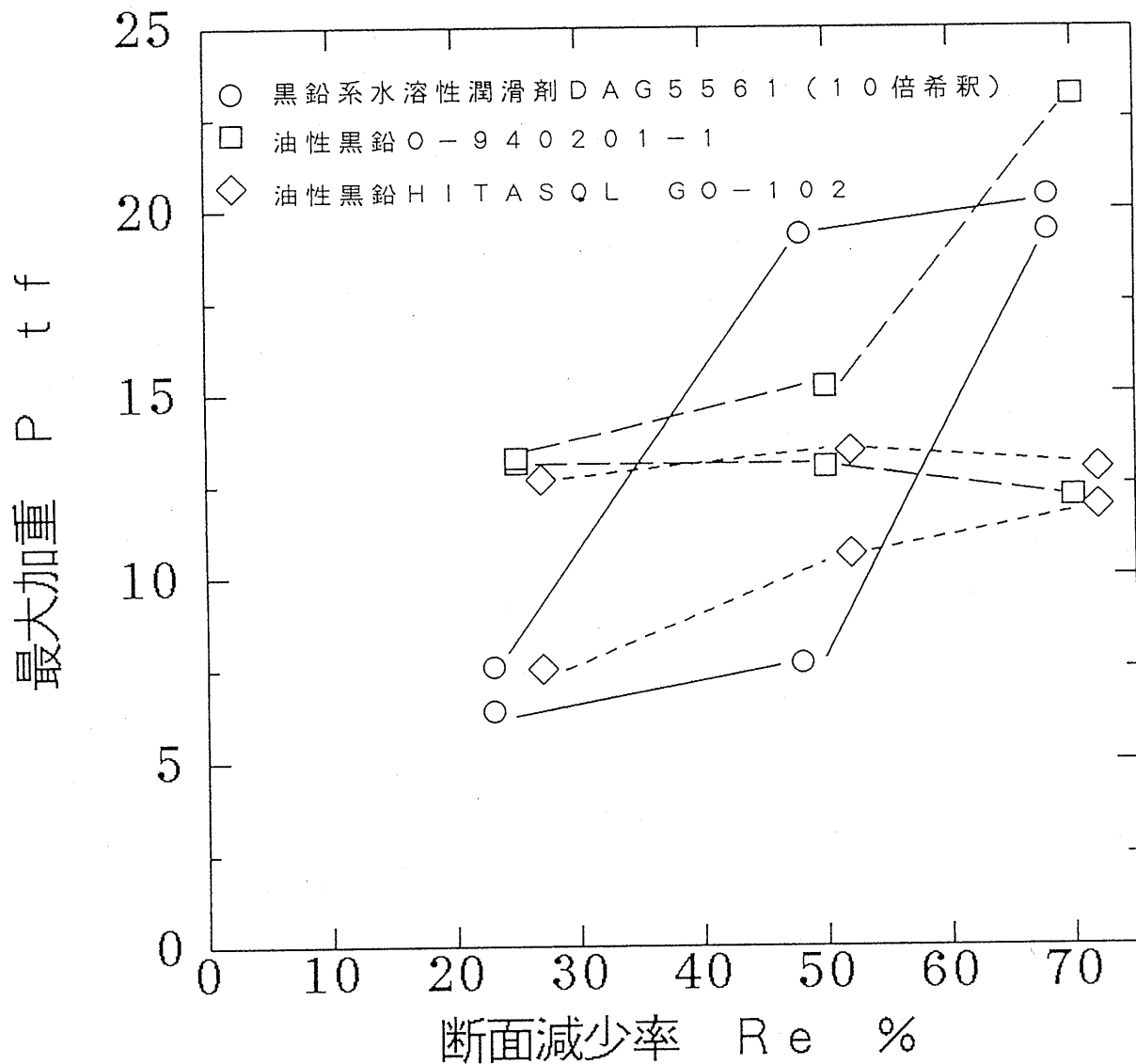


図70 A4032の前後方押し摩擦試験における最大加重と断面減少率の関係
 潤滑剤：(素材) 溶剤系ドライフィルム型黒鉛D-5005-6,
 (金型) 黒鉛潤滑剤市販DAG5561(10倍希釈)、
 油性黒鉛O-940201-1
 油性黒鉛HITAZOL GO-102
 素材温度：500℃，金型温度：200℃

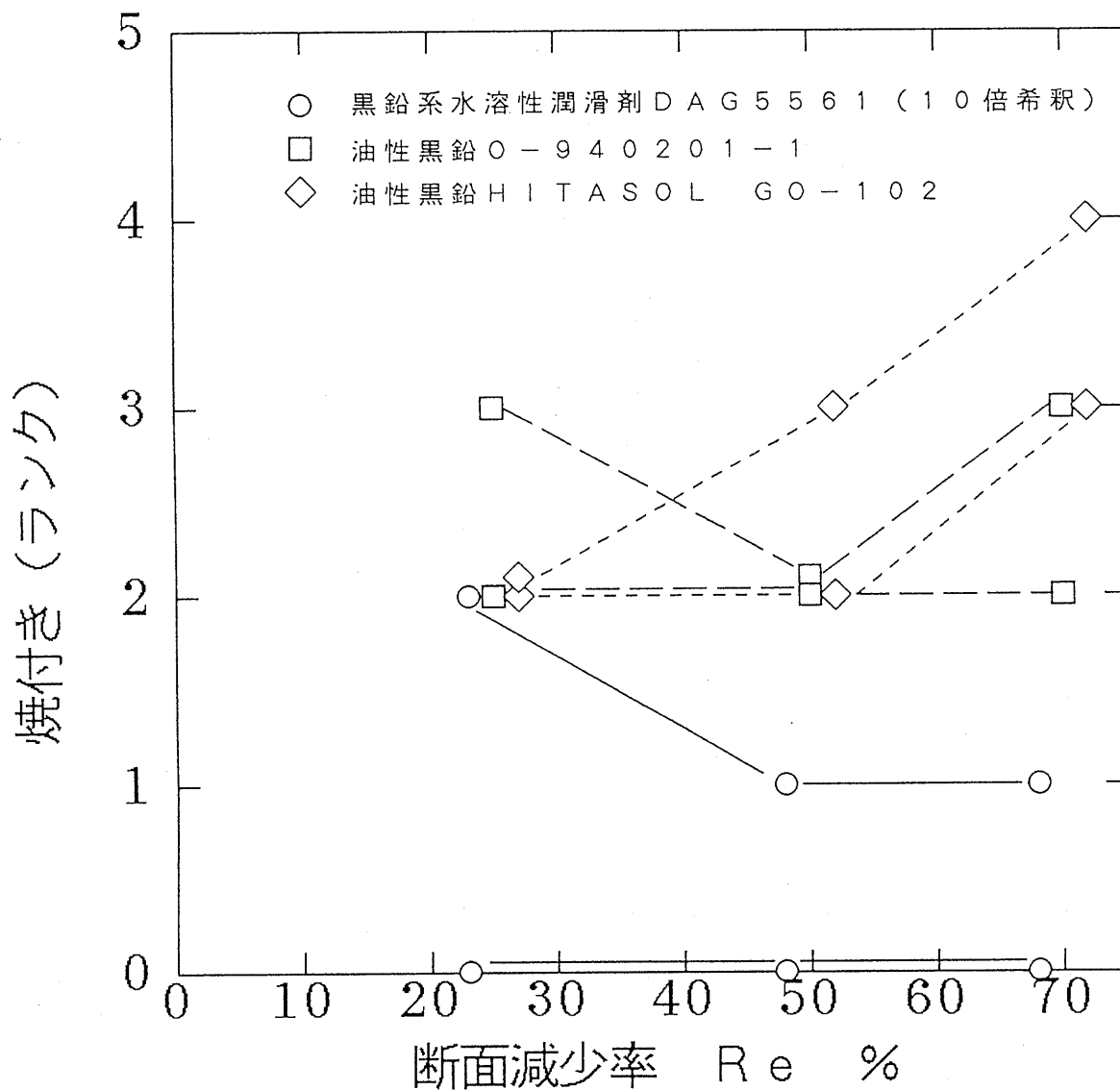


図 7 1 A 4 0 3 2 の前後方押出し摩擦試験におけるダイス側焼付きと断面減少率の関係
 潤滑剤：（素材）溶剤系ドライフィルム型黒鉛 D-900505-6，
 （金型）黒鉛潤滑剤市販 DAG 5561（10倍希釈）、
 油性黒鉛 O-940201-1
 油性 HITASOL GO-102
 素材温度：500℃，金型温度：200℃

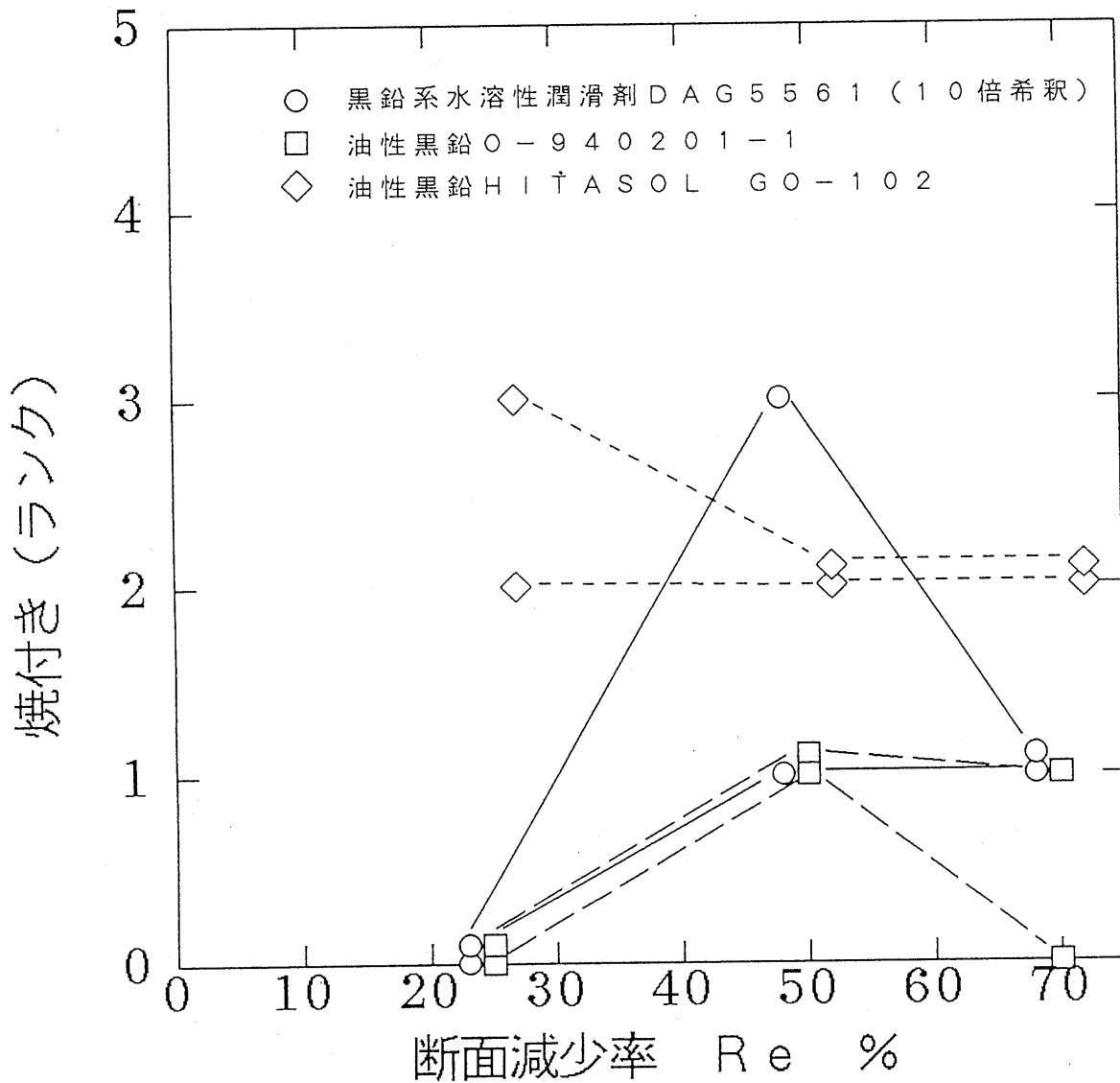


図 7 2 A 4 0 3 2 の前後方押し出し摩擦試験におけるパンチ側焼付きと断面減少率の関係
 潤滑剤：（素材）溶剤系ドライフィルム型黒鉛 D-900505-6，
 （金型）黒鉛潤滑剤市販 DAG 5561（10倍希釈）、
 油性黒鉛 O-940201-1
 油性 HITASOL GO-102
 素材温度：500℃，金型温度：200℃

(Ⅲ) A390 の 場 合

図 7 3 と 図 7 4 は A390 の 前・後 方 押 出 し 摩 擦 試 験 に お け る 摩 擦 係 数 μ と 摩 擦 せ ん 断 係 数 m と 断 面 減 少 率 R_e の 関 係 で あ る。水 溶 性 黒 鉛 が 最 も 低 い 摩 擦 値 を 示 し、油 性 黒 鉛 HITASOL GO-102, 0-940201-1 の 値 は 高 くな っ て い る。水 溶 性 黒 鉛 で は、 R_e と と も に μ 、 m が 増 加 す る 傾 向 は あ る が、A4032 の 場 合 と 同 様 に $R_e = 70\%$ の 時、摩 擦 係 数 μ と 摩 擦 せ ん 断 係 数 m の 値 が ほ ぼ 一 致 し て い る こ と が わ か る。

図 7 5 は A390 の 前・後 方 押 出 し 摩 擦 試 験 に お け る 最 大 荷 重 P と 断 面 減 少 率 R_e の 関 係 で あ る。断 面 減 少 率 R_e が 増 加 す る と、3 種 類 の 潤 滑 剤 が す べ て 顕 著 に 増 大 す る。

図 7 6 は ダ イ ス 側 の 焼 付 き ラ ン ク と 断 面 減 少 率 R_e の 関 係 で あ る。ダ イ ス 側 の 焼 付 き は、何 れ の 潤 滑 剤 も R_e の 増 加 に 伴 い 焼 付 き が 激 し く な る 傾 向 は あ る が、水 溶 性 黒 鉛 が 最 も 小 さ く、油 性 黒 鉛 0-940201-1 が 最 も 激 し く な っ て い る。

図 7 7 は パ ン チ 側 の 焼 付 き ラ ン ク を 示 す が、何 れ の 潤 滑 剤 で も 焼 付 き が ほ と ん ど 微 小 で あ る。

(Ⅳ) A1 - Si 合 金 種 々 に よ る 比 較 検 討

以 上 の 3 種 類 の 材 料 と 3 種 類 の 潤 滑 剤 の 摩 擦 特 性 を 比 較 す る と、い ず れ も 摩 擦 係 数 は 0.03 か ら 0.1 ま で 範 囲 内 に あ り、 $R_e = 70\%$ の 時、摩 擦 係 数 が ほ ぼ 一 定 値 0.075 に な り、摩 擦 せ ん 断 係 数 m は 0.25 に な っ て い る。ダ イ ス 側 の 焼 付 き 状 態 か ら 見 る と、A-6061 の 焼 付 き が 最 も 小 さ く、次 は A4032 で、A390 の 順 に 焼 付 き が 激 し く な る。パ ン チ 側 の 焼 付 き は、A-6061 が 最 も 小 さ く、A390 が A-6061 と ほ ぼ 同 程 度、A4032 が 最 も 激 し い 焼 付 き 程 度 を 示 し て い る。A390 の 後 方 押 出 し 摩 擦 性 能 が A4032 よ り よ い と 推 定 し た。

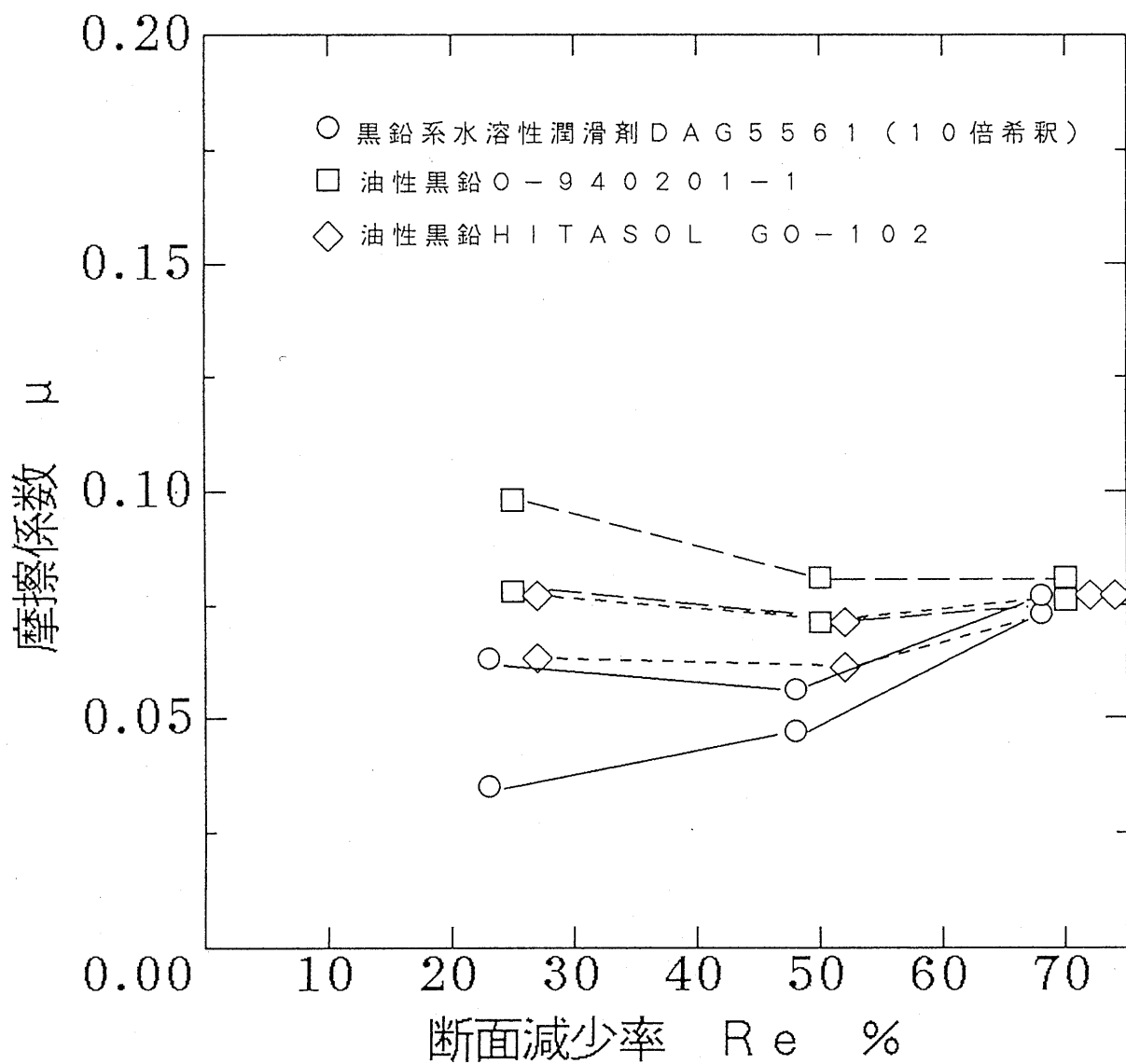


図 7 3 A 3 9 0 の前後方押出し摩擦試験における摩擦係数と断面減少率の関係
 潤滑剤：（素材）溶剤系ドライフィルム型黒鉛 D-900505-6，
 （金型）黒鉛系潤滑剤市販 DAG 5561（10 倍希釈）、
 油性黒鉛 O-940201-1
 油性黒鉛 HITASOL GO-102
 素材温度：500℃，金型温度：200℃

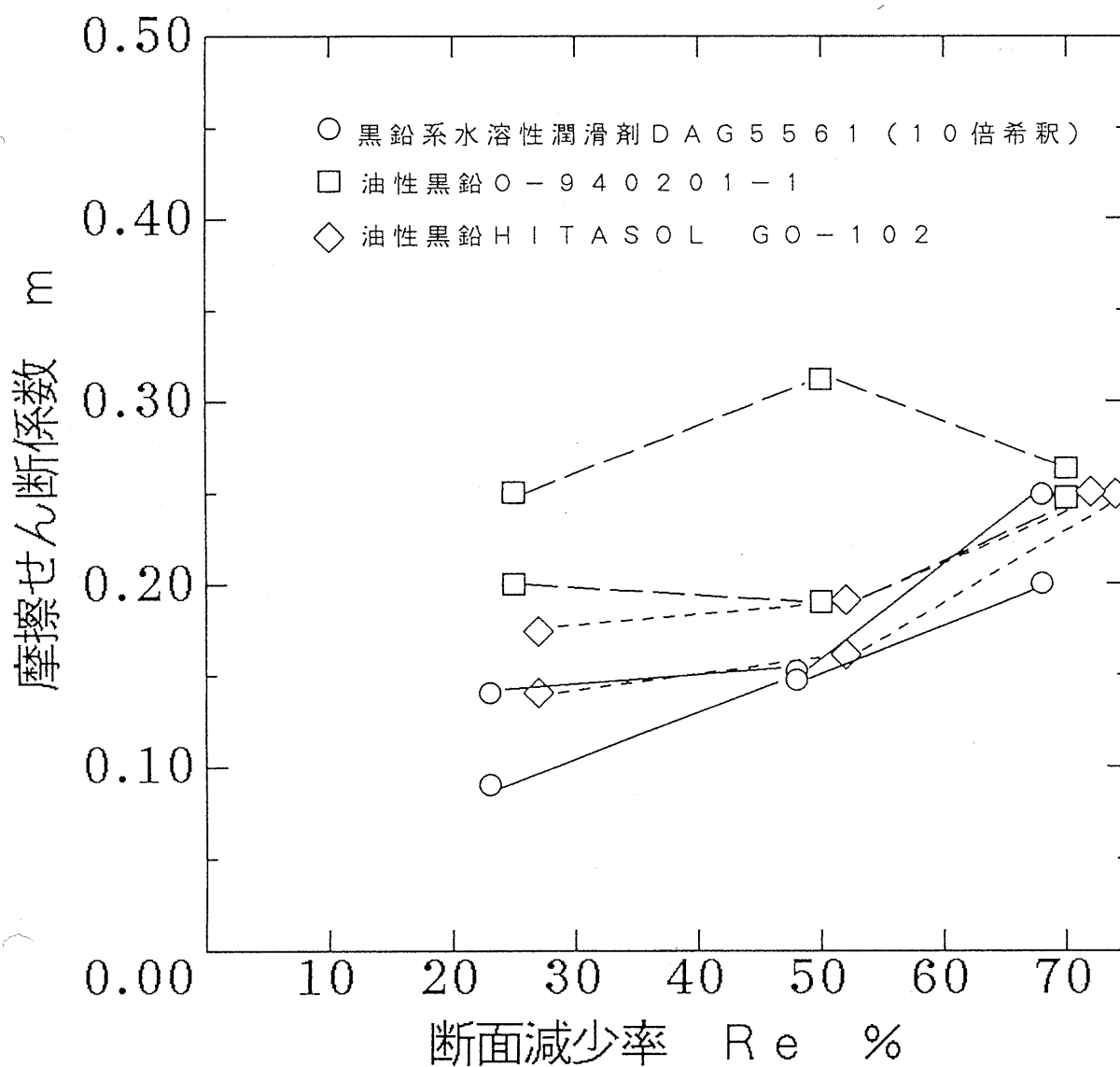


図 7 4 A 3 9 0 の前後方押し摩擦試験における摩擦せん断係数と断面減少率の関係
 潤滑剤：（素材）溶剤系ドライフィルム型黒鉛 D-900505-6，
 （金型）黒鉛系潤滑剤市販 DAG 5561（10倍希釈）、
 油性黒鉛 O-940201-1
 油性黒鉛 HITASOL GO-102
 素材温度：500℃，金型温度：200℃

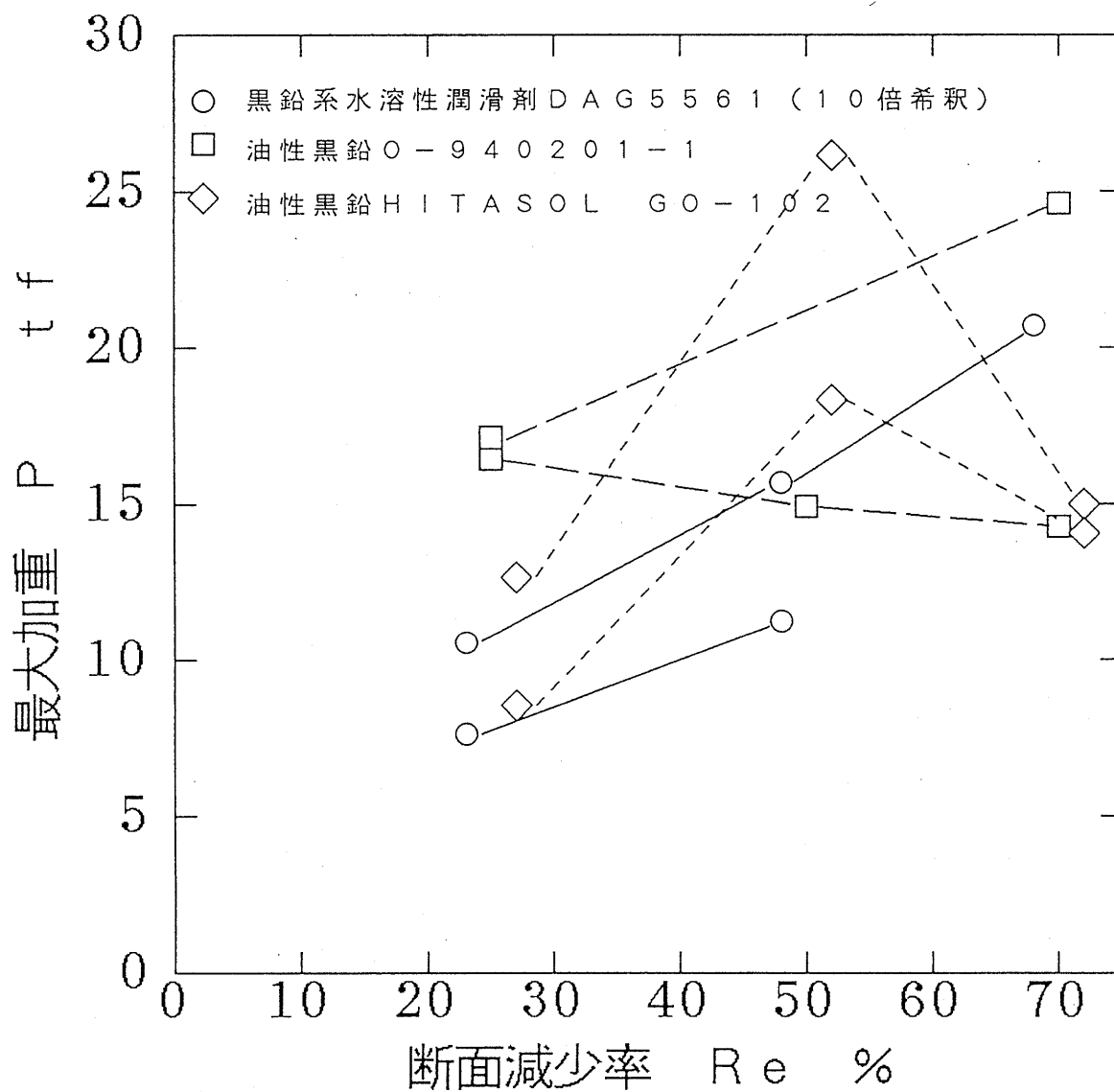


図 7 5 A 3 9 0 の前後方押し出し摩擦試験における最大加重と断面減少率の関係
 潤滑剤：（素材）溶剤系ドライフィルム型黒鉛 D-5005-6，
 （金型）黒鉛潤滑剤市販 DAG 5561（10倍希釈）、
 油性黒鉛 O-940201-1
 油性黒鉛 HITAZOL GO-102
 素材温度：500℃，金型温度：200℃

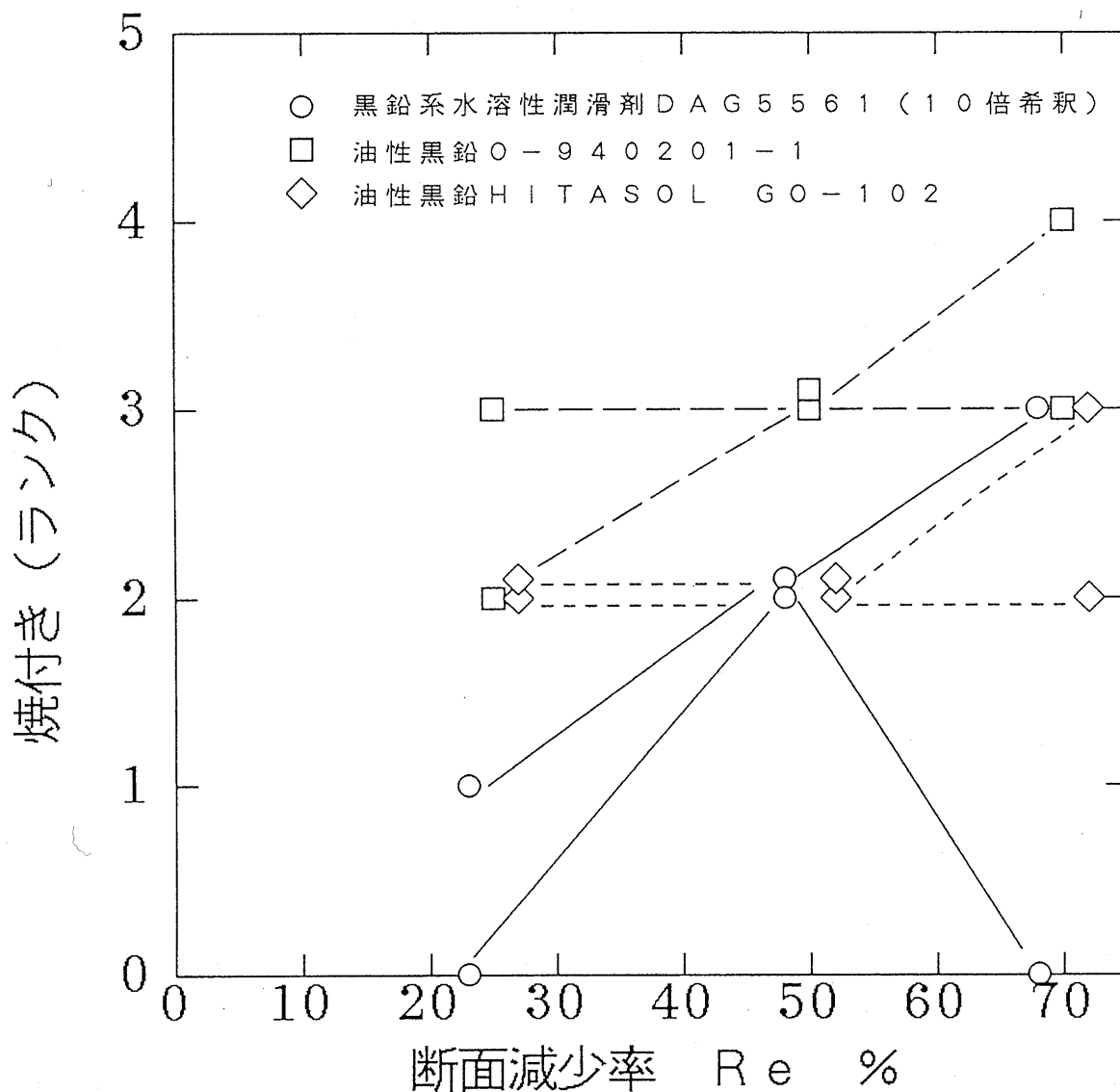


図 7 6 A 3.90 の前後方押し摩擦試験におけるダイス側焼付きと断面減少率の関係
 潤滑剤：（素材）溶剤系ドライフィルム型黒鉛 D-900505-6、
 （金型）黒鉛潤滑剤市販 DAG 5561（10 倍希釈）、
 油性黒鉛 O-940201-1
 油性 HITASOL GO-102
 素材温度：500℃，金型温度：200℃

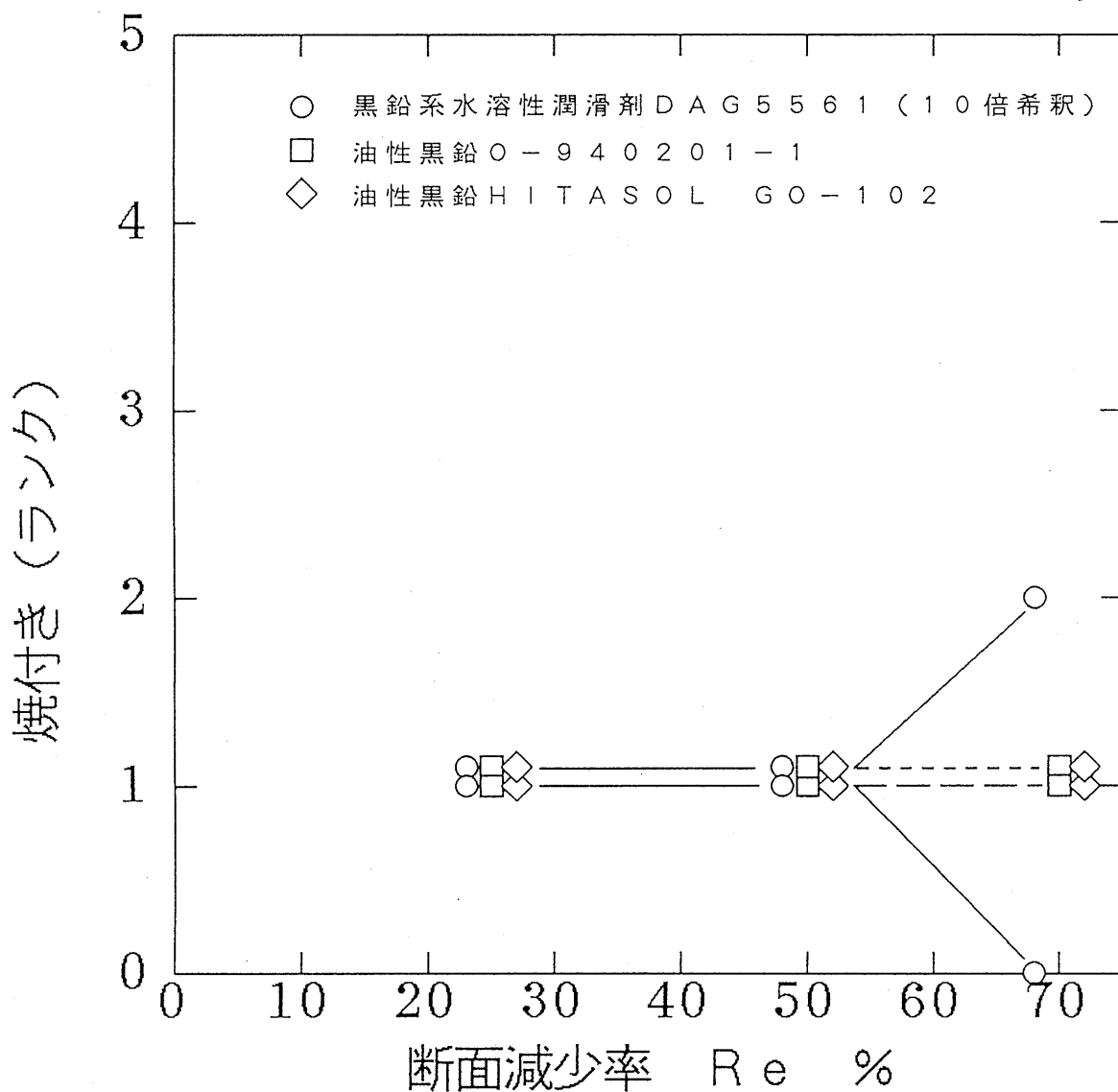


図 7 7 A 3 9 0 の前後方押し出し摩擦試験におけるパンチ側焼付きと断面減少率の関係
 潤滑剤：（素材）溶剤系ドライフィルム型黒鉛 D-900505-6，
 （金型）黒鉛潤滑剤市販 DAG 5561（10 倍希釈）、
 油性黒鉛 O-940201-1
 油性 HITASOL GO-102
 素材温度：500℃，金型温度：200℃

5. 結言

リング圧縮摩擦試験、前方押出し形摩擦試験及び前・後方押出し形摩擦試験の3種類の摩擦試験により、各種金属材料の温・熱間加工温度範囲における各種潤滑剤の潤滑性能評価を行った結果、次の結論を得た。

1) リング圧縮摩擦試験では何れの金属材料でも、素材温度800℃程度までであれば、超高分子量ポリエチレンは、黒鉛潤滑剤の低い摩擦係数よりも、さらに低い摩擦係数を示した。試作した超高分子量ポリエチレンベース潤滑剤の十分な性能を示している。ステンレス鋼の素材温度1100℃でも黒鉛よりも性能が低下することが、明らかになった。

2) リング圧縮摩擦試験では殆ど焼付きが発生しない場合でも、前方押出し形試験では激しい焼付きが発生する場合があります。比較的厳しい摩擦条件になっていると推定される。

3) 前・後方押出し形摩擦試験法によれば、ダイス半角 $\alpha = 10^\circ$ 、後方押出し断面減少率 $R_e = 25, 50, 70\%$ 、パンチ押込み量 $L_r = 0$ mm、初期試験片長さ $L_o = 20$ mm以上の条件で、加工力や素材変形抵抗を測定すること無く、摩擦係数あるいは摩擦せん断係数を的確に測定できることが確認された。

4) 硫化亜鉛ZnS混合潤滑剤はリング圧縮摩擦試験と前・後方押出し形摩擦試験のいずれにおいても、黒鉛系潤滑剤よりきわめて高い摩擦特性値を示した。両摩擦試験の特性値はほぼ一致した。

5) ステンレス鋼SUS630の連続10回の前・後方押出し形摩擦試験結果から水溶性高分子系潤滑剤Solubleと超高分子量ポリエチレン系SP-891001-24潤滑剤の摩擦係数と摩擦せん断係数が黒鉛系潤滑剤Dag5561よりやや低いことを分かった。

6) Al-Si合金の摩擦特性を評価するため、素材としてA-6061、A4032、A390を用いて、水溶性黒鉛系潤滑剤と油性黒鉛系潤滑剤0-940201-1、HITASOL GO-102を試験した。摩擦係数は0.03から0.1まで

範囲内にあり、 $R_e = 70\%$ の時、摩擦係数がほぼ一定値0.075になり、摩擦せん断係数 m は0.25になっている。ダイス側の焼付き状態から見ると、A-6061の焼付きが最も小さく、次はA4032で、A390の順に焼付きが激しくなる。パンチ側の焼付きは、A-6061が最も小さく、A390がA-6061とほぼ同程度、A4032が最も激しい焼付き程度を示している。

参考文献

- (1) 中村 保ら : 前・後方押出し形摩擦試験法の提案
- (2) 中村 保ら : 高温塑性加工用超高分子量ポリエチレン系潤滑剤の開発研究
- (3) Avitzur et al. : Trans. ASME, B, 94-4 (1972), 1079.
- (4) 社団法人日本塑性加工学会編 : 塑性加工におけるトライボロジ
- (5) 鈴木 弘編 : 塑性加工
- (6) 前田 三 : 塑性加工
- (7) 近藤 一義ら : “潤滑”. 22-1, (1977) 21-28