

プロセストライボロジーに関するデータベースの開発研究

日本塑性加工学会 プロセス・トライボロジー分科会

研究代表者：中村 保，情報データベース部会長：片岡 征二，潤滑機構研究部会長：池 浩
鍛造データベース部会長：済木弘行，摩耗研究部会長：水野 高爾

(平成8年度研究開発助成AF-96001)

キーワード：塑性加工，トライボロジー，データベース

1. 研究の目的・背景

ここ数十年間，プロセス・トライボロジーに関する極めて多数の研究が行われ，膨大なデータが蓄積されてきた。これらの文献やデータを収集し，取捨選択・整理することにより，塑性加工にとって極めて貴重なデータベースが得られると考えられる。これらのデータベースは，塑性加工における潤滑機構，摩耗機構，焼付き機構等のプロセス・トライボロジーの基礎的研究，あるいは塑性加工の数値シミュレーション解析に必要な境界条件や実加工現場における潤滑剤の選択指針の提供などへの利用が考えられる。これらの貴重なデータベースの利用価値を高めるためには，その利用し易い形態を検討しなければならない。

本開発研究では，平成8年から平成11年にかけて，4つの部会，すなわち情報データベース部会，潤滑機構研究部会，鍛造データベース部会，及び摩耗研究部会に分かれて開発研究活動を続けてきた。それぞれの部会において，これまでの貴重な文献，潤滑機構研究資料データ，鍛造のトライボロジー研究資料データ，及び摩耗研究資料データを収集・整理・分析することにより，プロセス・トライボロジーデータベースの構築を目指すことを試みてきた。本報告では，それぞれの部会における活動成果をとりまとめて報告する。

2. プロセス・トライボロジー文献情報データベース

本章では，毎年発表される多数のプロセス・トライボロジーに関連する文献やデータの収集・整理方法，そして，現在，いかなる文献情報データベースを構築しているかについて紹介することにする。これらは，本開発研究を進める上での基礎となるものである。

文献情報データベースの構築という忍耐のいる実作業に当たっているのは，プロセス・トライボロジー分科会

の情報データベース部会である。本部会は，平成2年(1990年)4月に，プロセス・トライボロジー分科会・情報WGとして発足し，平成8年に，他の3部会(潤滑機構研究部会，鍛造データベース部会，摩耗研究部会)が発足するのに伴って情報データベース部会となった。現在の部会員数は7名である。

文献，データの収集方法は，表1に示す22名のモニターが分担してモニタリングを行っている。同表には，対象となる51のモニター雑誌も紹介しているが，この他に，モニターの所属する機関において発行している技報・紀要等もモニタリングの対象としている。

その具体的な方法は，まず，各モニターが担当雑誌を調査し，塑性加工のトライボロジーに関連すると思われる文献をピックアップする。この場合，関連が薄いものでも，将来的に塑性加工のトライボロジーに関連が出て来ると予測されるものについては，幅広くピックアップするように心がけている。

つぎに，モニターがピックアップした文献に対して，表2に示す文献調査票に基づいて必要事項をモニター自身が書き込む。不明な点はブランクにしているが，推測で書き込めるものは，モニターの責任で書き込むこととしている。文献調査票に記載されている各項目は，実際に文献を検索する場合のキーワードとなり得るものであり，その項目の設定についてはこれまでの経験を基に，何度か修正を行っている。

このようにして調査された文献は，情報データベース部会メンバー数名で分担しパソコンに入力する。データベースのソフトウェアは，市販のソフトウェア(EXCEL)を用いることにしており，データのやりとりはCSV形式というMS-DOSのテキスト形式で行っている。このようにして，現在までに本文献情報データベースに収集された文献数は1万件以上(2000年9月現在)にのぼる。

検索の方法は，表題からキーワードで選択する方法や，

文献調査票に記載されている項目から選択する方法が可能であるが、著者から選択する方法も効果的に利用されている。

本データベースは、平成 10 年度までは、フロッピーディスクで、分科会会員に直接郵送によって提供していたが、11 年度からは、インターネットの WWW ホームページ上から、分科会会員が随時取得できるようにした。なお、データベースは、年数回の Update を行って常に最新情報を提供できるよう心がけている。

また、これらのデータを活用することによって、塑性加工学会誌「塑性と加工」の 8 月号に掲載される年間展望において、最新の塑性加工のトライボロジーに関する情報も提供している。

3. 潤滑機構研究資料データベース

3.1 目標

当部会は、プロセス・トライボロジー分科会の設立趣旨の一つである、各種の塑性加工に共通する潤滑機構を明らかにすることと、逆に加工法の特性による潤滑機構の相違点を明らかにすることを、一つの目標としている。

今回のデータベース作成においては情報データベース部会と協力して

- (1) トライボロジー文献データベースの質的進化
- (2) ピックアップされた文献の整理および研究の流れをまとめて潤滑機構の研究の歴史と流れを整理し立体的に誰もが流れを理解できるように配慮した。具体的には(混合潤滑を含む)流体潤滑と境界潤滑に問題をひとまず分け、その理論的扱いの系譜と到達点を明らかにし、今後の発展方向を探る作業を行った。

3.2 トライボロジー文献データベースの質的進化

主として2つの作業をおこなった。

(1) 一つは過去の有力な文献で取り上げられている参考文献をトライボロジー文献データベースに取り込むこと。その対象となった文献は以下の通りである。また各文献末尾に何件の文献が現在収録されているかの数を示す。

[88Ta2-00], 日本塑性加工学会編, 塑性加工におけるトライボロジー - (1988), 日刊社, (1988), 日刊社. (314 件)

[93Ta0-00], 日本塑性加工学会編, プロセス・トライボロジー - 塑性加工の潤滑 -, (1993), 日刊社. (304 件)

[83T01-01], 水野 高爾, 塑性加工における潤滑論 [PHL], 塑性と加工 24-265 (1983), 93-99.

[93T01-07], 水野 高爾, 塑性加工におけるトライボロジーの現

状と動向, 塑性と加工 34-393 (1993), 1069-1074.

[94T01-02], 水野 高爾, プロセス・トライボロジー - 21 世紀への展望, 塑性と加工 35-400 (1994), 446-451.

[93T01-30], (特集号) 塑性加工におけるトライボロジーの最近の進歩, 塑性と加工 34-393 (1993), 1067-1198.

[95T01-37], (小特集) 塑性加工のトライボロジーの基礎を探る, 塑性と加工 36-413 (1995), 558-599.

[83Tp8-00], Schey, J.A., Tribology in Metalworking-Friction, Lubrication and Wear, (1983), ASM. ISBN: 0-87170-155-3 (1730 件)

(2) キーワードの整理: データベースを有効に活用する上で重要なのは文献が適切なキーワードにより整理されているかどうかである。プロセス・トライボロジー分科会の文献調査票は整理されたキーワードによる分類入力形式をとっているが、周辺の文献などの扱っている問題を広く扱うためにはより拡張されたキーワードが必要かと考えられた。そこでプロセス・トライボロジーのキーワードを新たに整理し3段階のレベルごとに整理した。内容的にはトライボロジーの側面と加工の側面の2つのアプローチがあり、第一段階として完成した。しかし加工の用語については塑性加工学会の用語辞典との整合性をとる作業が残っている。このキーワードを活用して文献の整理を進めるのは今後の課題である。

3.3 流体潤滑に関するまとめ

表面あらさの取扱いが、弾性流体潤滑理論構築に至る過程を参考に「マイクロ弾性流体潤滑 (MEHL) では、相対すべりに対して直角方向の溝や畝は平均油膜厚さを増加させる。一方、長手方向の溝や畝は有害な影響を与える。等方的な凹凸の列は直角方向の粗さモデルに近い解を与える」[Dowson, 95T30-03]とまとめられていることに注目した。

塑性流体潤滑 (PHL) 解析は、水野[83T01-01][88Ta2-12]や Wilson, W.R.D.[90T23-28], 中村[93T06-04]等によってまとめられているが、通常は面圧分布をマクロな計算、すなわち潤滑界面を想定しない塑性加工解析から解くか、あるいは実測から求め、それに適合するように Reynolds の方程式を解く。一方、Wilson は流体潤滑からのアプローチとして摩擦せん断抵抗は油膜の粘性抵抗で定まるという考えで粘性抵抗式と塑性変形の方程式を組み合わせで解く手法を展開している。Wilson の方法は、ある意味でトライボロジー理論に整合性の高い考え方であるが、実際の塑性加工を考えた時にどの程度それが加工様式の特徴や境界条件を組み込んでモデリングでき、また数値解などが容易に得られるか、各種のトライボロジー因子の影響を組み込めるか、などの種々の問題を含んでい

る。Wilson も試行錯誤的にあるいは複数のアプローチを使って圧延や鍛造、板材成形（主としてパンチ張出し）などへの適用を試みてきた。その中でバルクの塑性変形の近似的導入、混合潤滑をどう取り扱うか、またそれと表裏の問題として表面粗さの取扱い、温度・熱の考慮、などを行なって、ある程度定性的には実験結果と合う結果を得るところまで来ているように見受けられる。しかし、取扱いが順次複雑になってくるので、実際の加工条件をいろいろ変えてすぐ解析するようなわけにはいかず、いわば解析のチャンピオンデータを提出しているような状態かと思われる。圧延については表面あらかさの影響について定性的には上記の EHL の結果にも似たものを得ている。我々としてはその取扱いの方法論的なところは多いに参考にすべきものがあると思われるが、本来は独自のシミュレーション手法を開発していく必要があると思われる。

また加工界面での潤滑剤の特性をよりよく把握する意味での高圧粘度の取扱い、非ニュートン粘性の取扱いの現状についても整理した。

3. 4 境界潤滑に関する中間的な整理

境界潤滑については極圧添加剤の作用機構についての整理・検討と現状での境界潤滑状態への認識に関する意見交換、および潤滑剤メーカとして注目している新しい境界潤滑機構についての検討を行なった。環境問題が厳しくなるなかで、従来使われていた塩素や硫黄系、フッ素系の添加剤や表面処理剤の使用が困難になっており、それに替わる新しい潤滑機構と潤滑剤・後処理などが求められている。その意味でホットな話題であり、実際にこれらの課題に取り組んでいる人の参加を増やして共通な認識を高めていく必要があると思われる。

3. 5 現状と今後の課題

流体潤滑・混合潤滑については歴史的な取扱いの発展についてかなりの整理ができたが、今後は日本独自の実際加工に应用できる手法を身に付ける必要があると思われる。次期の課題としては塑性力学や数値シミュレーションの分科会などとの連携をはかってこの種のトライボロジーと塑性加工解析の連合問題を取り扱う方法を具体的に検討していくことが必要であると思われる。

また境界潤滑については、環境部会の活動とも連携して新しい潤滑機構を開発していく基礎となるような機構の整理と課題の整理をはかっていくことが求められるであろう。

4. 鍛造トライボロジーデータベース

4. 1 はじめに

最近の精密型鍛造においては、歯車、スプライン、運動継ぎ手部等を含む複雑形状部品のネットシェイプ加工が開発最前線となっている。そこでは、成形面圧低減を狙った新成形プロセスの開発、高精度高剛性の金型加工技術の開発、成形過程に生ずるスプリングバックや加工熱処理ひずみ補正技術などが必要になっている。成形品には数マイクロメータの形状精度が要求される場合も増えており、高精度のコンピューターシミュレーションによる鍛造パラメータの影響評価が欠かせなくなっている。そこでは解析精度に影響する境界条件としてトライボロジーに関するデータベースが重要になっている。もちろん摩擦低減と安定化、焼付き限界あるいは工具摩耗予測などのトライボロジーに関する課題の解決も関係している。

鍛造におけるトライボ条件は、閉じ込められる潤滑剤とその量、摩擦界面の置かれる温度、圧力、摩擦すべりと変形モードの関数である。これらの条件は、加工速度やサイクルタイムなどの鍛造プロセス条件、接触及び変形の幾何学条件、潤滑剤・工具・素材の材質条件などに依存して現れるため、それらの影響を的確に評価できる必要がある。そこで、鍛造におけるトライボ条件の特徴と数値シミュレーションで望まれるトライボデータベースについて述べる。

4. 2 トライボ条件としての特徴

4.2.1 接触圧力条件と潤滑剤の捕捉

鍛造における接触圧力条件は、被加工材料の降伏応力 Y と流動拘束条件から決まる。もちろん、加工する工具の降伏応力あるいは必要鍛造数における疲労破壊応力を超える負荷は許されない。鋼の鍛造における許容面圧 p は、 $3 \sim 5Y$ 、 2000MPa 程度である。平面工具で凹凸表面をつぶす場合に潤滑剤が閉じ込められていない条件では、この面圧で $80 \sim 95\%$ の接触率 R に達し得る（図 1 参照¹⁾）。潤滑被膜で突起つぶれ面と工具面間を潤滑（境界潤滑）膜で隔てない限り大きな摩擦せん断応力を覚悟しなければならない。

潤滑剤は、①液体潤滑剤の動水力学的作用、②表面粗さ孤立谷部や接触端末間に作られる閉じた油だまり、及び③固体系の潤滑被膜の捕捉によって界面に閉じ込められる。よく知られているように液体潤滑剤（粘性流体で粘度 $\eta(\text{Pa} \cdot \text{s})$ ）の場合、接触面が直径 $d=2r$ であれば被加工材端面に対する工具面の近寄り速度 $V(\text{m/s})$ を用いて接触端末部が開放されている場合、閉じ込められる最大

油膜厚さ h_L は、次式で近似される。

$$h_L = 1.44(\eta V r^2 / p_s)^{1/3} \quad \dots\dots(1)$$

引抜き加工における入り口部の楔作用で導入される膜厚さの評価式は、鍛造においてパンチが傾き角 α で被加工材面に速度 V で近接する場合に利用でき、入り口において閉じ込められる膜厚さは次式で与えられている。

$$h_L = 6\eta V / (\alpha^2 \cdot p_s) \quad \dots\dots(2)$$

潤滑膜と工具及び被加工材料間に摩擦せん断抵抗 τ_f が働く固体被膜の場合にも、加工面圧に耐えて界面に潤滑膜が残留し得る。残留する膜厚さは、固体潤滑膜の変形抵抗を Y_L とすると初等解法による見積もりでは、次式で近似できる。

$$h_L = 0.193md / (p_s / Y_L - 1) \quad \dots\dots(3)$$

m は、 $\tau_f = m k$ としたときの摩擦せん断係数で、 $0 \sim 1$ の値である。界面膜の変形抵抗 Y_L が被加工材料のその $1/100$ 、 $p_s = 3Y$ として、接触径 d が膜厚さ h の 3000 倍あれば $m_L = 0.5$ の場合でも膜を押し潰すことは困難になる。しかし、表面積が 10 倍拡大すれば、 $1/10$ の膜厚さになるし、表面あらしの突起部で膜をひっかく時には、膜は容易に薄くなりうる。すべり、表面積拡大、膜厚さおよび工具表面あらしの相対関係が潤滑維持にとって重要となる。

図 2 は、被加工材としてアルミニウム A1050-F 材を用い 2~2.5Y 程度の接触面圧で加工できる平面ひずみ圧縮摩擦試験における摩擦係数の計測結果である。パラフィン系潤滑剤の粘度に対して、油膜が捕捉されたときの摩擦係数と圧下率 50% までの摩擦係数の変化（増加）状態を示している。低粘度では捕捉膜が十分でなく、接触率が初期からすでに高いので、摩擦係数は工程を通して高くなっている。中程度の潤滑剤では初期膜厚は接触率を低く保つに十分で、初期摩擦係数は小さい。しかし、50% の圧縮でも接触率がかなり増加し、摩擦係数が増加している。高粘度の潤滑剤では行程初期から 50% の圧縮率まで十分な膜厚を保持していることを示している。

図 3²⁾ は、図 2 同様の平面ひずみ圧縮試験で、表面粗さ及びトポグラフィと接触端末条件を変更した結果である。摩擦係数の大小は、捕捉油膜厚さと捕捉時の発生圧力（接触率に影響）の指標と見ることができ、接触端末の特異性、孤立油だまりのでき易いディンプル状の表面粗さあるいは端末に平行な峰を持つ表面トポグラフィ ($\chi = 90$) など接触率を低く保てる条件では、摩擦係数が小さくなっていることが分かる。

4.2.2 変形様式と表面積拡大

鍛造加工では、工具と被加工材料が作る変形の幾何学条件によって基本の変形様式が現れる。これに被加工材料の変形特性、摩擦抵抗、温度分布などの影響が重なって流動模様を変える。鍛造で現れる基本変形様式には、掘込み、前方押し、後方押し、しごきとその複合形式がある。前項の接触圧力は、工具からの流動拘束の程度とこれらの変形様式によって決まってくる。変形様式に対応する接触圧力、すべり量や速度及び表面積拡大がトライボ条件と結びついてくる。歯車の成形や局所突起の押し出しは、全体における体積としては小さくても押し出しにおける基本変形の特徴がそのまま局所化されて現れる。

図 4~6 は、掘込み、前方押し、後方押しの典型的な例に対し表面積拡大を比較している。摩擦対象となる面におけるすべり量や表面積拡大率は、主に下記の因子の影響を受ける。

- ① 他の工具の摩擦条件や流動拘束条件
- ② 材料の加工硬化特性
- ③ 当該面の摩擦抵抗そのもの
- ④ 当該面の場所、特に角部や端末域
- ⑤ 温度場

図 4 のヘディングの例では、他工具側の変形が拘束されているためすべりと表面積拡大が大きくなっている。そして、摩擦せん断係数が高くなるとそれらの値は減少する。端末部では、表面積拡大が特異的に増加する。

前方押し出しの例では、押し出し出口までの表面積拡大は小さいが、出口角丸み部で急増する。出口のランド部における表面積拡大は、摩擦が大きくなると増加している。図 6 の後方押し出しの場合も同様な傾向となる。ただし、この場合には半径方向の移動に伴う表面積拡大とパンチ端面での表面積拡大が累積する。そのため押し出し出口における表面積拡大が押し込み工程の進行とともに大きくなる。この様式は、歯車やスプラインの成形における歯形状の押し込み時にも見られる。この典型として円筒プロフィールを押し込む例を図 7 に示した。

表面積拡大の大きさは、加工硬化指数が小さいほど、摩擦抵抗が小さいほど、相対押し込み量 s/d が大きいほど、大きくなることが分る。すべり量もこれらの影響を受ける。鍛造形式と工具部位によって上記①~④の影響が大きく異なるので、トライボデータベースを作成する場合に考慮せねばならない。

4.2.3 摩擦すべりモードと界面温度

鍛造摩擦面の温度は、①被加工材料の温度(鍛造温度)、

②摩擦すべり仕事, ③鍛造サイクル条件, ④変形熱によって異なってくる。例えば, 被加工材料温度 950~1250℃, 接触熱コンダクタンス 10~50kW/(m²K), 形表面の強制冷却強さ~3kW/(m²K), 強制冷却時間~1.5s, 接触時間~0.3s, サイクルタイム~5.25s, アンピル高さ 30~225mm に変化させた場合, 温熱間据込み鍛造(相当ひずみ 1 の圧縮変形)のアンピル面の到達する最高温度は 500~850℃, 最低温度で 200~500℃の範囲で大きく変化しうる。

鋼の冷間鍛造においても, 摩擦界面の温度は大きく変化する。例えば, 変形抵抗 830MPa の鋼材を相当ひずみ 2.3 まで軸対称パンチ(断面形状モジュール 2)を押し込み加工すると材料温度は初期温度 100℃から 450℃上昇する。パンチと被加工材料面間に摩擦が働かない条件で接触熱コンダクタンスを 27.6kW/(m²K)のとやや小さく設定した場合においても, 繰り返し鍛造によって押し込みパンチの表面温度は 327℃まで上昇する(図 8 参照)。摩擦が働く条件では加工速度と摩擦仕事の影響を受け表面温度は更に上昇する。

摩擦仕事のみによる接触界面(摩擦界面)の温度上昇分は, 次のように近似評価できる。工具と素材の接触界面において摩擦仕事の 95%が熱に変換し, 界面を最高温度とした三角山形の温度分布(摩擦による工具側温度上昇域深さ δ_T , 素材側 δ_M)が生ずると仮定する。摩擦熱は, 材料と工具へ温度伝導率に応じて伝導する。その伝達距離 δ は, 有限要素解析結果によると $\delta = 1.5(t\lambda/\rho c)^{0.5}$ と近似できる。摩擦すべり仕事は, すべり速度 v_{sm} , せん断摩擦応力 τ_f および接触時間 t_c の積で与えられる。素材と工具の密度 ρ , 比熱 c および熱伝導率 λ などの物性値(工具と素材の区別は, 添え字 T と M を使用した)を用いて, 摩擦界面の上昇温度 ΔT_f を次式で計算できる。すべり距離 $l_s = v_{sm} t_c$

$$\Delta T_f = 1.26 \tau_f v_{sm} (t_c)^{1/2} \{ (\rho_T c_T \lambda_T)^{1/2} + (\rho_M c_M \lambda_M)^{1/2} \} \dots\dots(4)$$

$$\Delta T_f = 1.26 \tau_f (l_s v_{sm})^{1/2} \{ (\rho_T c_T \lambda_T)^{1/2} + (\rho_M c_M \lambda_M)^{1/2} \} \dots\dots(4')$$

炭素鋼を炭素鋼及び超硬工具で摩擦する場合の計算例を図 9 に示した。すべり距離 $l_s = 0.01m$ で, 摩擦応力 τ_f を 10~300MPa まで変化させた時の相対滑り速度に対する摩擦界面到達温度を示している。摩擦すべり速度と摩擦せん断応力が摩擦界面の温度上昇に及ぼす影響を一目評価できる。冷間鍛造では摩擦せん断応力が数十 MPa 程度にはなり得るので, 高速鍛造では摩擦のみによっても 200~300℃の温度上昇も生じる。したがって, これを考慮したトライボ条件の検討が必要である。

4.3 望まれるデータベース

上述したように鍛造の摩擦面は, 取り上げられる鍛造問題, 型形状の設計, 工程設計, プロセス条件によって様々に変化する。型形状のわずかな変更, 材料流動拘束の変更, 或いは材質変化によって, トライボロジーの環境が著しく変化することが分かる。鍛造問題の解析においてトライボ条件である摩擦係数や摩擦せん断係数の値は, ある特定の基礎試験から得られた特定な値を利用することになる。したがって, トライボデータがどのような条件(界面域温度, 圧力, 表面積拡大, すべり距離, 表面構造, 潤滑剤膜厚さとその変化範囲)で得られたものなのかが明記してあれば, 当該問題との相違を考慮しながら解析結果を評価することもできる。

4.3.1 基本データ・物性値

潤滑剤の選択, 摩擦係数や摩擦せん断係数の評価において摩擦環境の温度は重要である。従って, (1)~(4)式に現われる型材料, 潤滑剤及び被加工材料の熱伝導率, 密度, 比熱及び潤滑剤の粘性係数やその温度圧力依存性などのデータが必要になる。

被加工材料の変形抵抗特性値(F 値, n 値)は, 材料流動様式, 表面積拡大やすべり速度に影響を及ぼすし, 界面の接触圧力に直接関係してくる。固体潤滑剤の捕捉膜厚さを推定するために被加工材料との圧縮抵抗比なども必要となる。

鍛圧機のスライドモーションは, 加工速度や摩擦すべり速度, 潤滑剤の捕捉条件に影響を与える。そして, 鍛造サイクル条件, 型の冷却条件(時間と強さ)などととも, 摩擦界面の温度場を支配する。

型と被加工材料の表面トポグラフィーは, 潤滑剤の捕捉状態, 接触熱抵抗に影響する。型と被加工材料の表面被膜は, 熱伝導率, 密度, 比熱などの物性値を通して熱抵抗と摩擦条件に影響する。

いずれの特性値も界面の温度場を評価するために主に利用される。

4.3.2 摩擦せん断応力

工具面に働く平均の摩擦せん断応力 τ_m については, 良く知られているように図 10 に示した関係が認められている。低接触圧力側におけるクーロンの摩擦則と高圧力側におけるせん断摩擦一定則である。接触圧力が 2k を越える場合が多い鍛造では, 後者の条件が用いられて良い。しかし, 実際の鍛造では低摩擦域が加工上利用されるのでクーロン摩擦が利用されることが多い。鍛造シミュレーションで利用されている関係式は次のようである。

1) クーロン摩擦則:

$$\tau_m = \mu p \quad \text{ただし, } \tau_m \leq k \dots\dots(5)$$

2) 摩擦せん断応力一定則:

$$\tau_m = m k \quad \text{ただし, } 0 \leq m \leq 1 \dots \dots \dots (6)$$

3) 1)と2) 組み合わせ表示:

$$\tau_m = m k \{1 - \exp(-\mu p/mk)\} \dots \dots \dots (7)$$

上式で p は平均の接触圧力, μ は摩擦係数, m は摩擦せん断係数, k は摩擦界面と接する被加工材料のせん断降伏応力である。

シミュレーションで必要になるデータは, μ と m の値である。鍛造加工で工具面の圧力範囲が場所や工程で大きく変わらない場合には, 摩擦せん断係数は, $m = \mu(p/k)$ で換算して利用される。接触圧力が $5k$ (或いは $3Y$) を越える押し込み鍛造では, 摩擦係数 μ が 0.2 ($m = 1$, 限界摩擦係数 μ_c となる) を越えること (は加工上望ましくない。さらに摩擦すべりが強制される工具域では, 厳しい焼付きに至る危険があるので当該潤滑剤の使用限界と言える。

鍛造では摩擦係数の値の如何によらず, すべりや変形が生じ難くなる変形の幾何学条件がある。一方, 摩擦係数等の値によって, すべりや変形が著しく変化する変形の幾何学条件がある。この場合, 摩擦が大きくなるとすべりや表面積拡大が増加する場合 (場所) と, 逆に減少する場合 (場所) がある。前者の場合には, 表面積拡大やすべりによって潤滑条件は悪化するもので, 良好な潤滑を保つことが厳しくなる。

このように鍛造における潤滑の難しさは変形の幾何学に依存するため, それに応じた潤滑剤の選定と開発が必要になることである。図 11 では, 面圧 (変形抵抗) と表面積拡大で, 図 12 では表面積拡大と型と被加工材料間の摺動距離で加工における潤滑の厳しさの領域を区分している。これに基づき潤滑性能の異なる潤滑剤の使用範囲を決めている。各領域で潤滑限界となる境界に近づくとも摩擦係数が限界 μ_c 以上に増加し, 焼付きに至る危険が生ずる。

区分された各領域内での摩擦係数等の値は, 潤滑剤の種類, 潤滑膜厚さ及び素材表面トポグラフィ, 潤滑剤の呈する捕捉圧力, 接触率, 温度, さらに, 工具の表面被膜の種類と表面粗さに関係する。ただし, これらのパラメータは, 限界摩擦係数の値 μ_c や領域区分境界を変位させるパラメータである。

鉱油, 菜種油, 豚脂, ステアリン酸など数百 MPa ~ 1000MPa の鍛造圧力における境界摩擦せん断応力の値は 20~100MPa, 摩擦係数で 0.04~0.1 程度である。ナフテン系鉱油の臨界せん断応力も, 同程度の 40MPa (67℃) ~ 100MPa (25℃) である¹⁾。端面に螺旋状の突起を有する (初期 $Rz=45 \mu m$) アルミニウム A1050

焼なまし材のリング圧縮試験³⁾で得られたパラフィン系鉱油潤滑の摩擦せん断応力は 30(VG2 ~ 80MPa(VG460))であった。無潤滑における摩擦せん断応力の値は 100MPa であった。突起潰れ部の局所摩擦せん断係数では 0.3~0.8 となるが, 接触率は 0.2 から 0.45 程度であり, この影響を入れ平均の摩擦せん断係数を求めると, 0.2~0.4 となる。この実験では潰れ部の一部に焼付きが認められている。200MPa 程度の接触圧から判断すると, これらの値は境界膜の摩擦せん断応力よりかなり大きい。局所的に限界摩擦条件を越えていると判断できる。

上述した液体潤滑剤では境界摩擦係数や境界摩擦せん断応力を越える条件で焼付きが認められる。牛脂黒鉛潤滑では接触率を低く保つ ($R=0.1$) ことができるが, 平均の $M=0.1$ と小さいためすべりが多くなる。突起部では潤滑剤の流入がなく, 局所の摩擦せん断係数は高くなっている。接触率を減ずる役目と局所摩擦の臨界条件とは一致しない。固体潤滑剤, 燐酸塩被膜, 軟質金属被膜などは母材との直接接触を防ぐ役割を持っている。ある意味で, 母材との接触率をゼロに低下させる役目を持っている。固体被膜が摩擦せん断抵抗を小さくする役目を自身が持つか他の潤滑剤に頼るかの問題がある。また, 母材の変形に追随するか, 母材から剥離しないか, 新たに反応膜を形成するかなども焼付き限界条件に関係する。潤滑剤の開発や潤滑剤の性能評価ではこれらの点が評価されなければならない。

4.3.3 熱抵抗

工具面と被加工材料面間の接触状態は, 界面を通じた熱の通過に変化をもたらす。被加工材と工具が他の材料を介せず接触率 $R=1$ (100%) で接触するとき, 熱抵抗は零, 熱抵抗の逆数である熱コンダクタンスは無窮大となる。接触率が 1 より小さい場合, 両材料面に潤滑膜などが挟まれている場合, 被加工材料や工具面が被膜で覆われている場合には, 被加工材料から型への熱流れに抵抗が生ずる。

膜厚さ δ の一様な薄膜熱 (伝導率 λ) が挟まれている場合には, 工具と被加工材料間の熱コンダクタンスは, λ/δ で評価される。図 13 に示すように接触界面が, 局部接触し (接触率 R , 突起の接触間隔 $2W$, 表面粗さ δ), 工具と被加工材料が被膜 (δ_s, δ_m) で覆われている場合には, 局所的に熱通過の状態が異なる。この様な場合, 界面の呈する平均的な熱抵抗が換算できれば便利である。これに対して, 界面を通して流れる全熱流量が等しくなる一様抵抗膜を求めることによって, 摩擦界面域の接触構造が持つ熱抵抗を評

備することができる。鍛造では接触時間が短いので熱抵抗は、初期に小さい値から急増し 0.05 秒前後には準定常値となる。

一様膜相当の熱抵抗の評価結果例を図 13 右側に示した。接触率 R 、表面あらかさ δ 、突起間隔 $2W$ 、接触する材料の温度伝導率 a 、粗さの谷を埋める材料の熱伝導率、被膜厚さと熱伝導率が主に影響する。これらの評価式をまとめて表 3 に示した。熱抵抗を増すには接触率を 0.25 以下に小さくすること、谷部に捕捉されている潤滑剤などの熱伝導率が小さいこと、接触点の数が少ないことが必要である。鋼同志の接触で型と被加工材料に被膜のない条件では、潤滑膜が存在ことを考慮すると、熱抵抗を $0.025\text{m}^2\text{K}/\text{kW}$ 以上（熱コンダクタンスで $40\text{kW}/\text{m}^2\text{K}$ 以下）にすることは困難である。従って、工具もしくは被加工材料に熱伝導率の小さな薄膜（数 μm ～数十 μm の厚さ）で被覆することが必要になる。被加工材表面の酸化膜、工具表面のセラミック被膜や窒化膜、磷酸塩被膜にはその役目が期待できる。

4.3.4 トライボ試験法

潤滑剤の性能を評価する試験法には様々な方法が提案されてきた。リング圧縮試験はその代表的な方法である。据込み前後の内径変化率（場合によっては外径変化速度あるいは変化率）を計測することによって摩擦係数等を求められる。変形量の計測から摩擦係数を求めるものに、図 14 上に示すスパイク高さから摩擦係数を測定する方法、図 2 における上下非対称変形率から平面アンビル側の摩擦係数を評価する方法、前方軸押し後方カップ押しでは押し出し量から摩擦係数を求める方法などがある。一方、摩擦力を計測する方法としては、例えば図 6 の後方押しでパンチを回転することで摩擦力を計測する方法、図 4 で平面ダイスを滑らせる方法、図 14 下に示す波形凹凸を持つ表面ダイスで局所引抜きを行う方法等が最近行われている。局所引抜き法では、波形形状突起の丸み半径と押し込み量を選択することで表面積拡大や接触面圧を変更できる。もちろん、すべり距離や界面温度も幅広く変更できる。また、平面ダイスと波形ダイスを用い、引抜きを連続させることで累積加工による影響も評価できる。

何れの方法を採るにしろ摩擦係数等に重大な影響を持つ、表面積拡大、すべり量、界面域温度、摩擦面圧を評価対象の鍛造に対応させて幅広く試験できることが必要である。また、焼き付き限界条件（限界摩擦係数、限界温度、限界すべり量）を評価できることも必要になる。焼き付き限界については図 15 に示すボ

ール通し法（リダクションと押し込み量を計測）や図 6 に示した後方押しにおける焼付きまでのパンチ工程なども利用されている。何れも摩擦係数を求める方法ではない。

4.4 おわりに

鍛造加工では、局所的な押し、据込み、穿孔を含む複雑形状の成形が対象となる。工程数、素材形状の選択、工具丸みなどのプロフィール形状やプロフィール押し込みの導入形状などが様々に変化しうる。それによって表面積拡大、面圧、摩擦すべり距離が大きく変化する。鍛造サイクル条件や加工速度など摩擦界面の温度環境も大きく変化する。従って、加工対象のトライボ環境の難易度を詳しく調査して、はじめて潤滑条件の選定が可能になる。摩擦係数等の値と共に加工限界（焼付き）条件を把握できる試験法が重要になる。この際摩擦条件が悪化することで局所トライボ条件が緩和される場合と逆に益々厳しくなる場合がある。潤滑剤の性能評価ではこの点を注意せねば判断を誤る場合もある。

接触熱コンダクタンスの実験評価では、工具表面近傍の温度と温度勾配のサイクル履歴が必要になる。これに対する正確な実験は、必ずしも容易でない。間接的な評価法であるが界面構造の調査と表面を構成する材料の熱物性値を正しく評価して、解析的に熱抵抗を求める方法が有効であろう。鍛造トライボデータとしては摩耗抵抗データが必要になる。接触率、摩擦仕事、界面温度が重要な情報となる。この情報と基礎試験による摩耗抵抗、鍛造現場実験による摩耗データから、摩耗抵抗を評価する取り組みもされ始めている。今後のデータ蓄積に期待したい。

4.5 参考文献

- 1) 日本塑性加工学会編：塑性加工技術シリーズ 3，プロセストライボロジー，(1993)，コロナ社。
- 2) Saiki,H. et al. : Advanced Technology of Plasticity , 1(1984),219-224.
- 3) 濟木ほか：機論，60-577(1994)，3171-3176.
- 4) Saiki,H.: 1st Intern. Conference on Tribology in Manufacturing Processes'97,Gifu,22-31.
- 5) 濟木ほか：機論，61-589(1995)，3762-3768.
- 6) 濟木弘行：鍛造技法，22-69(1997),2-17.
- 7) 濟木弘行，中村保：塑性と加工，39-455(1998)，1185-1191.
- 8) 五十川幸宏，土屋能成：塑性と加工，39-455 (1998)，1207-1211.

- 9) Bay, N.: 1st Intern. Conference on Tribology in Manufacturing Processes'97, Gifu, 9-21.
- 10) Saiki, H. et al.: Trans. ASME, J. of Tribol., 119(1997), 667-671.
- 11) Nakamura, T., et al.: Trans. ASME, J. of Tribol., 120 (1998), 716-723.
- 12) 北村ほか：塑性と加工, 34-393(1993), 1178-1183.

5. 摩耗研究資料データベース

5.1 調査・研究の課題

- 1) 塑性加工における摩耗データはどのように整理・比較したらよいか。
- 2) 摩耗の第一近似則を塑性加工工具に適用してみると、どうなるか。
- 3) 摩耗の微視的メカニズムはどうなっているか。

5.2 調査・研究の方法

塑性加工工具の摩耗現象に焦点を絞って重点的に研究している委員がいないので、当面は、文献調査を通じて上記の課題に接近する。

データの収集・整理に続いて、必要で、可能であれば、実用的な摩耗試験の方法と条件などについて共同研究を行う。

5.3 調査・研究の成果（中間報告）

(1) 冷間加工における摩耗データの収集・整理・比較
最も単純な Holm 流の摩耗則「摩耗は、荷重とすべり距離に比例し、硬さに反比例する」を塑性加工工具の摩耗データに適用して、加工法・加工条件・工具材質・潤滑条件などによって摩耗率や摩耗係数がどのように変化しているかを調べた結果を表4に示す。算出手順は次のとおり：

1) 摩耗率としては、 $d_w/l = \text{摩耗深さ}/\text{すべり距離}$ を用いる。すべり距離は製品形状・寸法および個数あるいは重量から算出した。引抜きと冷間鍛造の摩耗深さは製品の寸法変化から算出した。

2) 比摩耗量： $w_s = W/(P \cdot l)$ 。分母分子を接触面積で割れば、 $w_s = (d_w/l) / p$ 。接触圧力 p は加工条件から適当に推定した。 w_s の単位には、次に硬さ数値が用いられるため、 $[\text{mm}^2/\text{kgf}]$ を用いた。

3) 摩耗係数： $K = w_s \cdot H$ 。硬さ H についても概略値を用いた。

(2) 公開研究会の開催（平成11年7月23日、名古屋通信ビル、参加者45名）

上記の冷間加工における摩耗データの整理・比較（名古屋工業大学・水野高爾）に加えて、セラミックスを

中心とした摩耗形態図と摩耗則（山形大学・堀切川一男）、冷間圧延における摩耗と耐摩耗ロールの開発事例（関東特殊製鋼・神保安広）、冷間圧延における板の摩耗と摩耗粉の影響（大同化学工業・岡本隆彦）、鋼線引抜きにおけるダイス摩耗（神戸製鋼所・佐藤仁資）、冷間鍛造における工具摩耗と対策事例（トヨタ自動車・横尾芳樹）、せん断工具の摩耗と長距離摩耗試験結果（日本工業大学・村川正夫）、各種工具材料の耐摩耗試験結果（日立金属・久保田邦親）が報告され、活発な質疑応答がなされた。

6. 結び

プロセストライボロジーデータベースの構築を目指して、4つの部会で研究開発した成果をまとめると、つぎのように要約される。

- 1) 情報データベース部会では、1万件余の文献をデータベースとして構築し、そのデータベースをインターネットの www ホームページ上から、分科会会員が随時取得できるようにした。
- 2) 潤滑機構研究部会では、流体潤滑機構、混合潤滑機構、及び境界潤滑機構に関する文献を整理・分析することにより、現状で解明されている潤滑機構の理解を深めた。
- 3) 鍛造データベース部会では、鍛造のトライボロジーの特徴を明らかにし、望まれるデータベースの条件を挙げ、各条件項目について現状で明きらかにされているデータベースを整理・分析した。

役割分担

- 研究代表者：中村 保（静岡大学）
- 情報データベース部会
部会長：片岡征二（都立工業技術センター）
世話人：石橋 格（住鋳潤滑剤）
- 潤滑機構研究部会
部会長：池 浩（理化学研究所）
世話人：小倉茂稔（元日本石油）
- 鍛造データベース部会
部会長：済木弘行（熊本大学）
世話人：五十川幸宏（大同特殊鋼）
- 摩耗研究部会
部会長：水野高爾（名古屋工業大学）

表1 モニタリング参加者と担当雑誌

氏名・所属	雑誌名
池 浩・ 理 研	Int.J.Mech.Sci Proc. WTC Proc.IDDRG Tribol. International 材料試験技術 精密工学会講演論文集
木村 紘・住友軽金属	軽金属 軽金属学会講演概要集 住友軽金属技報
中村 保・静岡大学	Proc. Inst.Mech.Eng.Pt.C Proc. Inst.Mech.Eng.Pt.B Blech Rohre Profile
石橋 格・ 住高潤滑剤	塑性と加工 トライボロジ
小倉茂稔・ 日石三菱	Wear Tribol. Trans. (STLE) トライボロジ-会議予稿集 Lubric. Engng. (ASLE)
加藤勝人・ 三菱自工	R & D神戸製鋼技報
金山公三・ 名工技研	機論C Ann. CIRP
川並高雄・ 金沢工大	精密工学会誌 J. Tribology (ASME)
坪内憲治・ 住友金属	材料とプロセス 鉄と鋼
王 志剛・ 岐阜大	春塑加講集 塑加連講論

酒井健次・ 協同油脂	トライボロジスト
白石利幸・ 新日鉄	ISIJ International
土屋能成・ 豊田中研	表面 表面科学 Int. Tribol. Conf.
斎藤正美・ 鈴鹿高専	J. Manuf. Sci. Engng. (ASME)
片岡征二・ 都産技研	プレス技術 塑性加工シンポジウム Materials Sci. & Tech. Metal Finishing
堂田邦明・ 岐阜大	JSME Int.J. Proc. STLE Conf. Trans. NAMRI
済木弘行	機械の研究
米山 猛・ 金沢大	J.Mater.Process.Technol. J.Materials Sci. J.Materials Sci.Letters
小豆島明・ 横浜国大	金属会報 金属会誌
田村 清・ 神産総研	Proc. ICTP Proc. ICTMP 鍛造技法
村川正夫・日工大	Surface & Coating Technol.
工藤英明・横浜国大	Umformtechnik

表2 プロセス・トライボロジ分科会 文献調査票

1. 文献番号 98 - -
 2. 著者名
 3. 表題
 4. 出典 (書誌名)

巻 号 (1998), p. ~

5. 記事の種別 5a 論文/5f 講演論文/5b 展望/5c 解説/5d 資料/5e その他
 6. 記事の性格分類 6a 基礎/6b 応用/6c 開発/6d 実際の生産技術
 7. 記事の大分類 (眼目) 7a 接触/7b 摩擦/7c 潤滑/7d 表面損傷/7e 摩擦/7f その他

(検索用補強項目) 7c1 流体潤滑/7c2 境界潤滑/7c3

f0 混合潤滑/7e1 アプレシブ摩擦

(記入は不要) 7g 工具/7i 被加工材/7h 潤滑剤(7h1:固体潤滑剤,7h2:油性剤,7h3:極圧剤)
 7p:表面性状(7p1:表面粗さ,7p2:表面処理)
 7q:界面条件(7q0:温度 3熱, 7q1:温間, 7q2:熱間, 高温, 7q3:面圧, 高压,
 7q4:摩擦せん断応力, 7q5:速度, 7q6:雰囲気,7qn7:接触面・膜厚)
 7s:化学反応/7t:変形, ひずみ/7m:計測法,試験法,評価法/7n:理論/7r:数値計算

8. 加工分類 8x 塑性加工一般/8a 圧延/8b 板材成形/8m しごき加工/8c 鍛造/8d 押し出し/
 n8e 引抜き/8f せん断/8g その他()
 (塑性加工以外) 8h 接触一般/8i 切削/8j 圧接/8k 機械要素/8l その他()

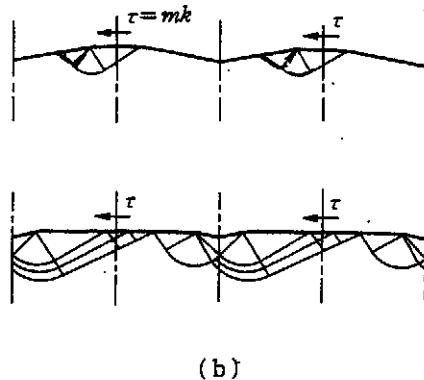
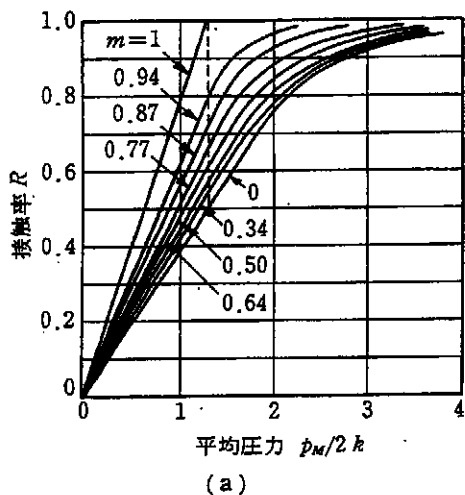
9. 研究の方法 9a 基礎試験/9b シミュレーション試験/9c 実機/9d 理論/9e 数値解析

10. 接触様式 20 10a ピン・ディスク/10b 2円筒/10c 球・平面/10h 球・球/10d 円筒・平面
 10e 平面・平面/10g 特定せず/10f その他()

11. 関連する理論 摩擦・摩擦[11a 凝着/11b 掘り起こし/11c 疲労/11d その他]
 潤滑[11f 固体

f0/11g 境界/11h 混合/11i 流体/11j 化学反応/11m EHL/11n PHL/11k
 その他()]

12. 測定(目的)項目 12a 摩擦力/ 12p 摩擦係数/ 12b 加工力/ 12q 変形/ 12t 寸法精度/ 12c 接触面圧/
 12d 接触面積/ 12e 接触面温度/ 12f 表面損傷/ 12r 光沢度・外観/ 12g 凝着/
 12h 摩耗/ 12i 型寿命/ 12j 成形性・加工限界/ 12k 表面あらさ/ 12k-1 微細形状/
 12l 油膜厚さ/ 12u 潤滑状態/ 12s 化学反応性/ 12f1 m 経済性/ 12n その他()
13. 変化(制御)因子 13a 工具材 /13p 工具表面処理/ 13b 被加工材/13b-1 被加工材表面処理/ 013h 表面状態/
 13h-1 表面粗さ/13c 潤滑剤/13q 潤滑方法/ 13m(付着)油量/ 13d 温度/ 13e 速度/
 0 13j 垂直荷重/ 13k 接触面圧/13t 摩擦/13i すべり距離・すべり率/13l 雰囲気/ 13f 加工度/
 13g 幾何学的条件/ in13r 加工条件/13s 加工法/ 13n その他()
14. 工具材料 14x 鉄系 [14a 鋳鉄/ 14b 工具鋼/ 14q 軸受鋼/ 14c 炭素鋼/ 14p その他()]
 14y 非鉄系 [14d 超硬/ 14e 銅合金/ 14f 亜鉛合金/ 14g その他()]
 セラミックス 14j 窒化ケイ素/ 14k 炭化ケイ素/ 14l アルミナ/ 14m シルコニア/
 14n その他のセラミックス()
 14i その他()
15. 工具表面処理 15a なし/ 15b クロムめっき/ 15c 溶射/ 15d PVD/ 15e CVD/ 15f TRD(TD など)/
 15g 窒化/ 15h その他()
16. 被加工材 16x 鉄系 [16a 軟鋼 (16a1 表面処理鋼)/ 16b 炭素鋼/ 16c ステンレス鋼/
 16m 高強度鋼 16d その他()
 16y 非鉄系 [16e 銅/ 16f 銅合金/ 16g アルミ/ 16h アルミ合金/
 16i チタン・チタン合金/ 16j その他()
 16l 表面に特殊な処理/加工をした材料 ()
 16l-1 プレート材/ 16k その他()
17. 潤滑剤 17x 油性 [17a 鉱油/ 17b 動植物油/ 17c 混合油/ 17d 合成油/
 17e その他()]
 17y 水性 [17f エマルジョンタイプ/ 17g その他()]
 17z 固体 [17h 黒鉛/ 17i 2硫化モリブデン/ 17j
- cf1 PTFE/
 17k その他の固体潤滑剤()]
 17l その他()
 17m なし
18. 潤滑剤の添加剤
 fs1818a なし/ 18b 油性剤/ 18c P系/ 18d S系/ 18e Cl系/ 18f その他()
19. 温度 19a 室温/ 19b 冷間/ 19ainc 温間/ 19d 熱間
20. すべり・加工速度 20a 10^{-3} m/s 以下/ 20b 10^{-3} ~0.1 m/s / 20c 0.1 m/s 以上
21. 平均接触面圧 1a 不明/ 21b 被加工材の降伏応力の10%以下
 21c 降伏応力の10%~100%/ 21d 降伏応力の100%以上
22. 雰囲気 22a 大気中/ 22b 真空中/ 22c ガス雰囲気/ 22d その他()
23. 年間展望項目 23i 一般/ 23a 基礎/ 23b 試験法/ n23c 潤滑剤/ 23d 工具/ 23d-1 被加工材/
 23e 各種加工法
24. 記入者のコメント()



軸対称問題の計算例
(円錐状溝, $m=0.2$
開き角 160度)

p_m/Y	接触率 R
3.09	57%以下
3.28	73.8%
3.53	82.5%
3.72	86.1%
3.96	89.3%
4.77	94.4%
5.49	97.6%

図1 二次元突起の平滑化状況, 平均面圧と接触率の関係

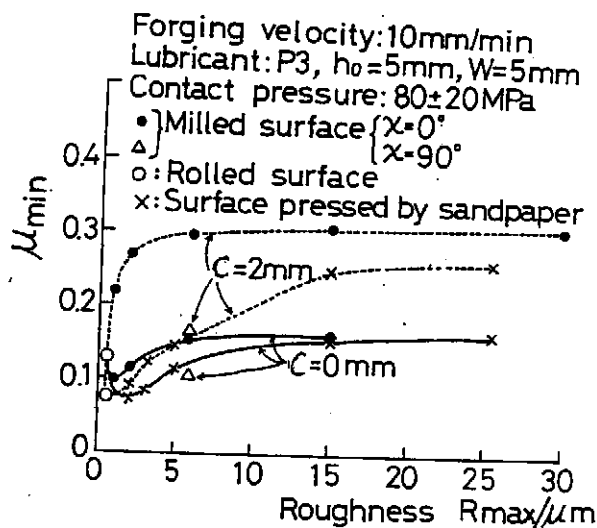
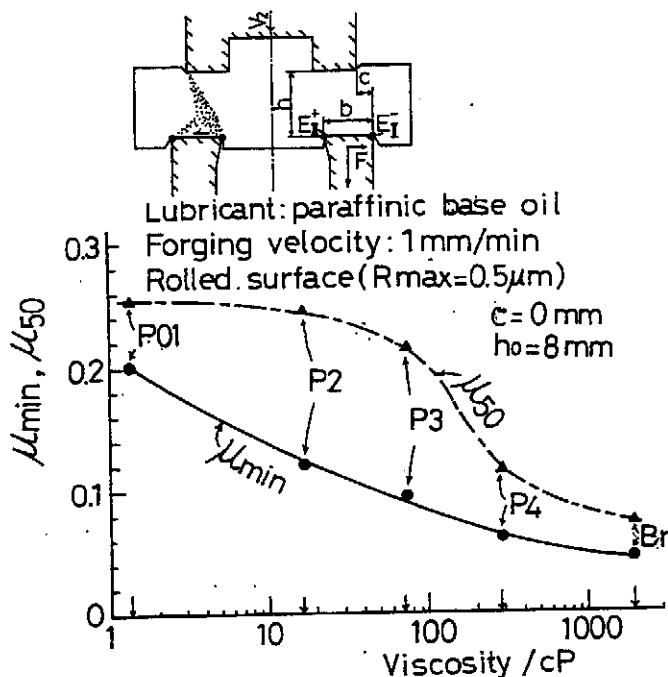


図2 潤滑剤の捕捉と摩擦係数(潤滑剤粘度の影響),

図3 潤滑剤の捕捉と摩擦係数(表面トポグラフィと接触端末条件の影響)

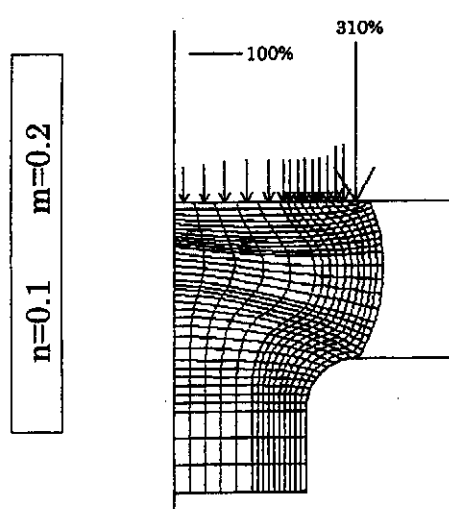


図4

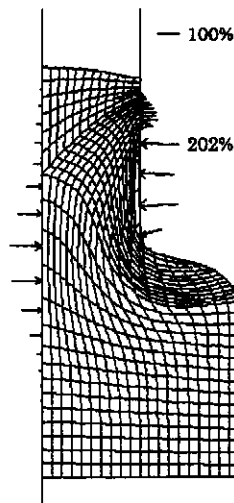


図5

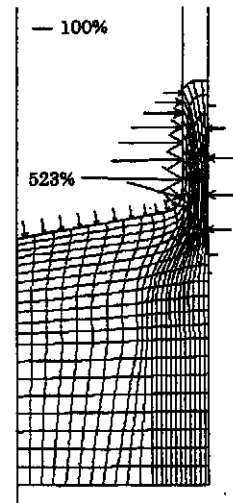


図6

代表的鍛造加工法における表面積拡大率の比較(矢印は表面積拡大率, 一は拡大率 100%のスケール)

S/r=50%	m=0.1	n	0.02	0.05	0.1	0.2
		Se	4.36	3.1	2.08	1.31
	n=0.02	m	0	0.1	0.3	0.5
		Se	8.01	4.36	2.53	2.06
m=0.1 n=0.02	S/r	20%	30%	40%	50%	
	Se	0.87	1.64	2.84	4.36	

Se: Maximum surface expansion
S/r: Stroke/radius

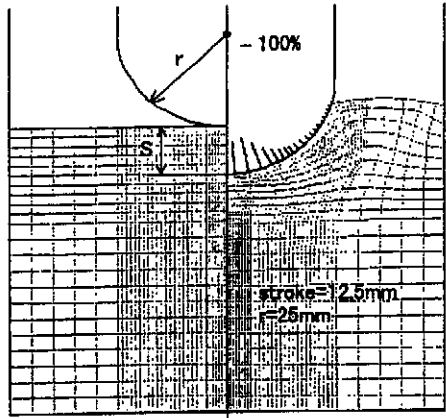


図7 円筒ポンチの押し込みにおける表面積拡大率 (Se×100%) の比較

No.	Logarithmic strain ϵ	MINMAX TEMP °C			
		Tool		Workpiece	
		m=0.0	m=0.3	m=0.0	m=0.3
1	0.105	87	138	110	140
2	0.288	104	159	142	173
3	0.693	147	204	220	250
4	1.386	224	282	362	392
5	2.303	327	383	555	585

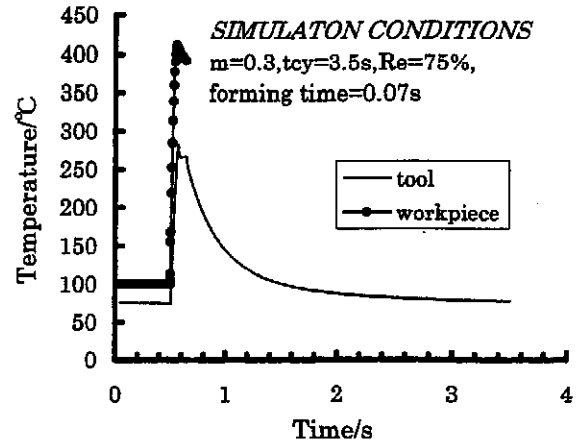


図8 冷間鍛造における界面温度計算例

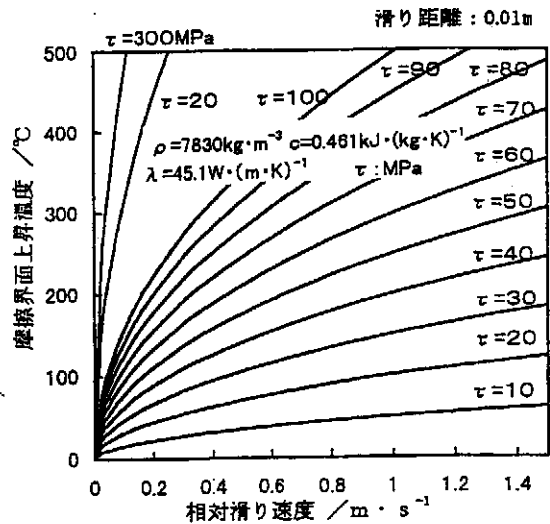
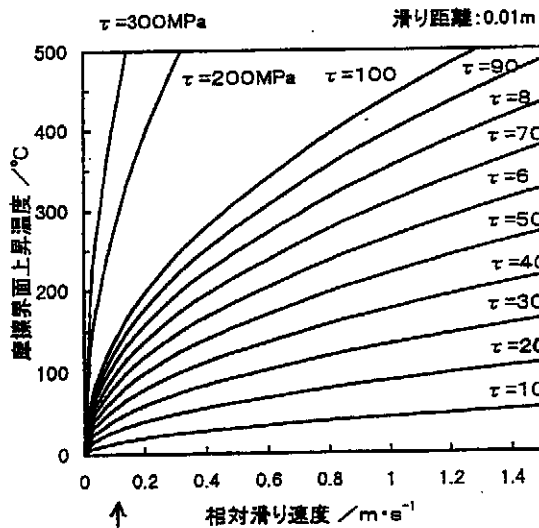


図9 摩擦仕事による摩擦界面の温度上昇の見積もり (一次元問題)

素材: 軟鋼 $\rho_1=7830\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ $c_1=0.46\text{kJ}\cdot(\text{kg}\cdot\text{K})^{-1}$
 $\lambda_1=45.1\text{W}\cdot(\text{m}\cdot\text{K})^{-1}$
工具: 超硬 $\rho_2=14800\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ $c_2=0.21\text{kJ}\cdot(\text{kg}\cdot\text{K})^{-1}$
 $\lambda_2=80\text{W}\cdot(\text{m}\cdot\text{K})^{-1}$

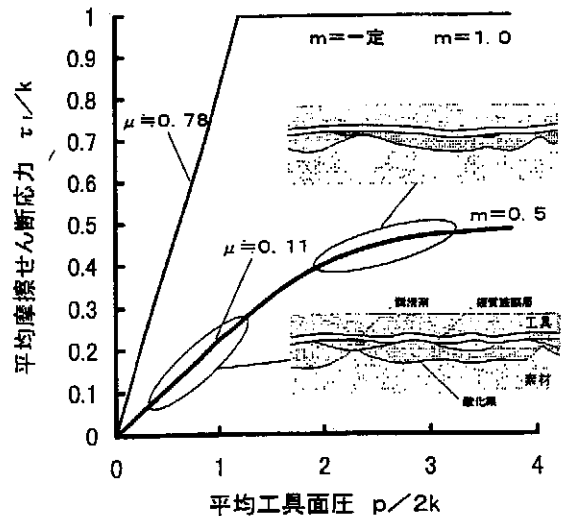
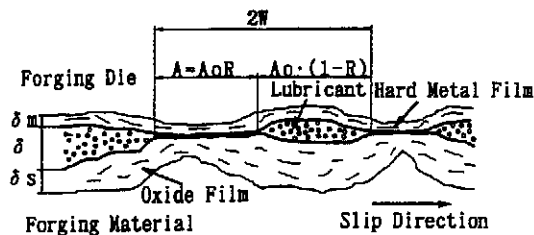


図10 摩擦せん断応力の圧力依存性 (平面ひずみ変形)

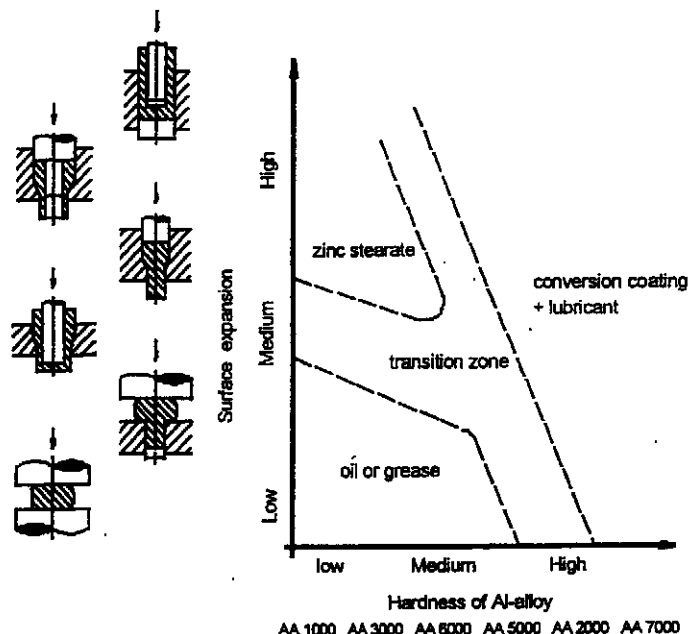


図 11 アルミニウム合金の冷間鍛造における潤滑剤の選択基準

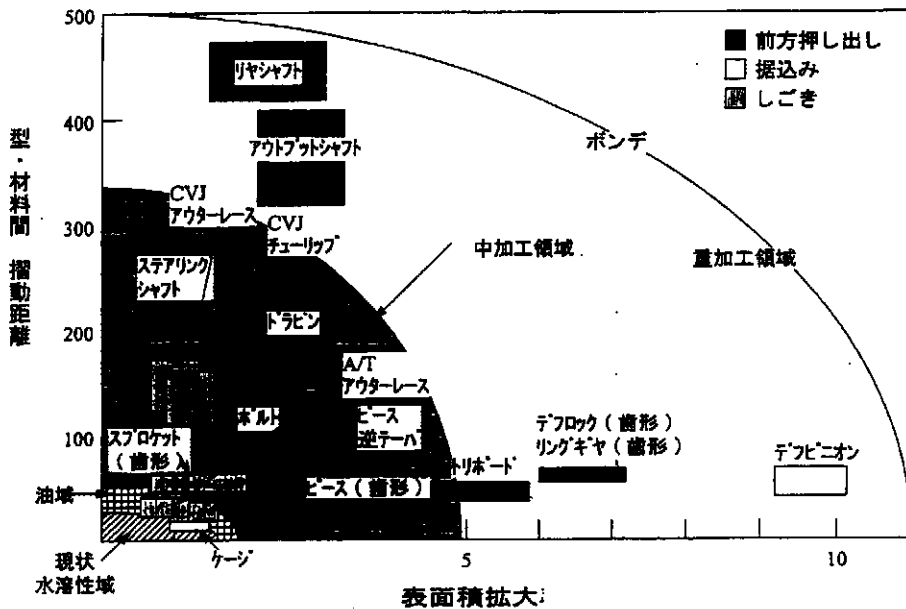


図 12 自動車部品の冷間鍛造における潤滑剤の選択基準

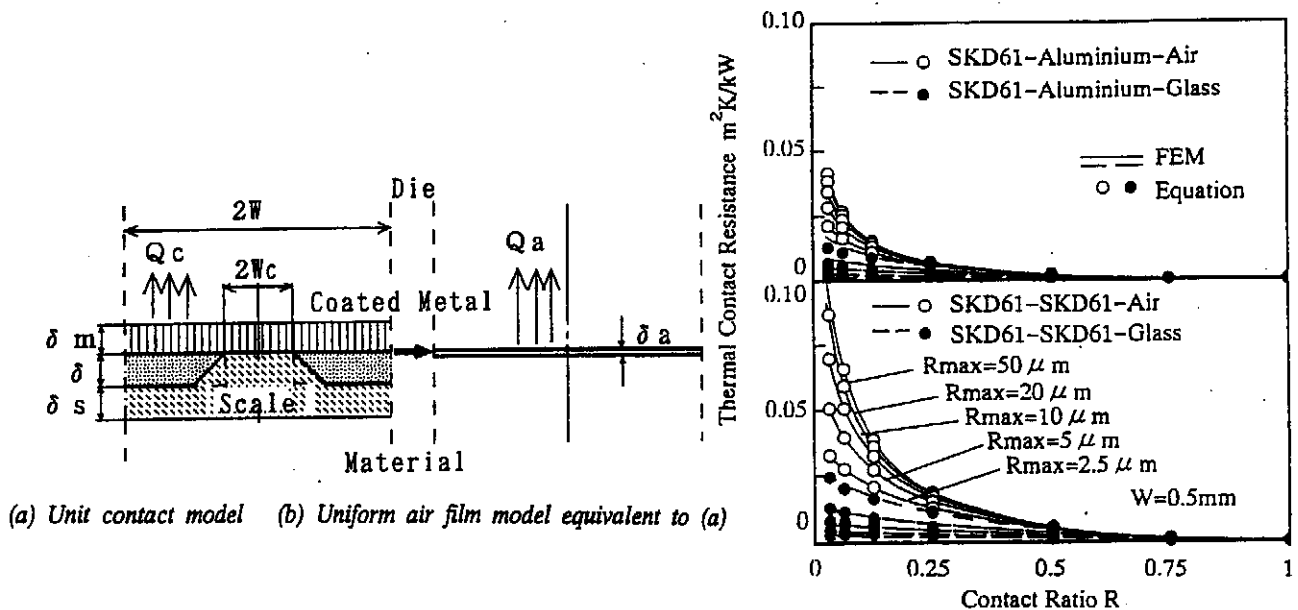
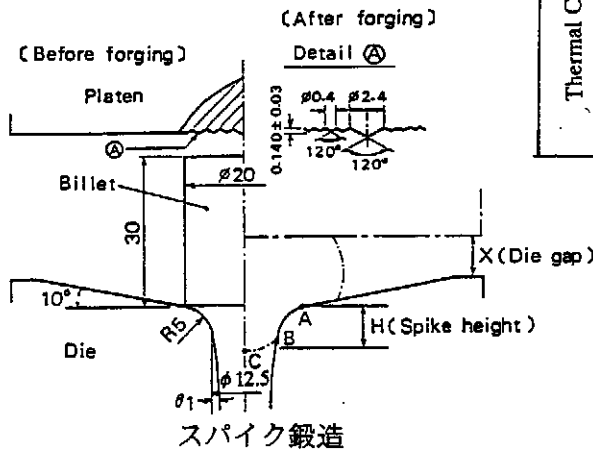
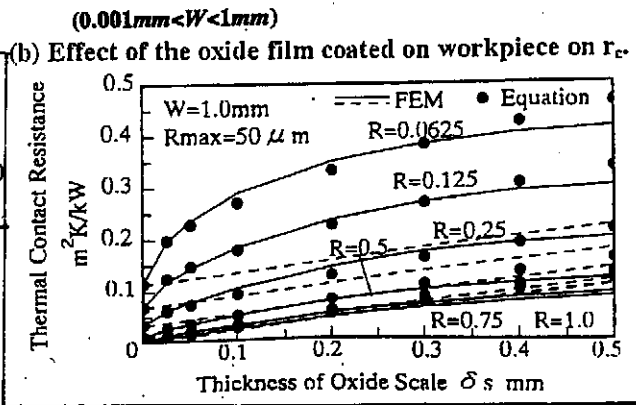


図 13 有限要素法による摩擦界面の(総合)熱抵抗の見積もり例

表 3 熱抵抗の評価式

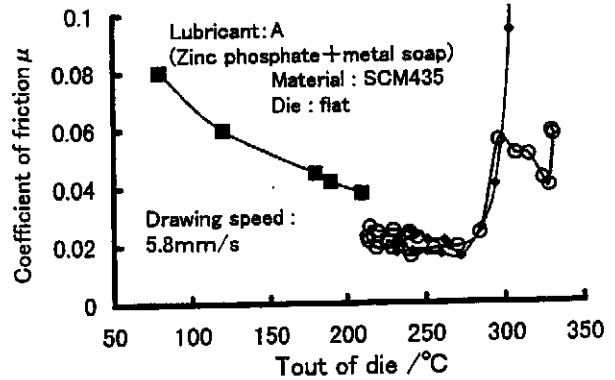
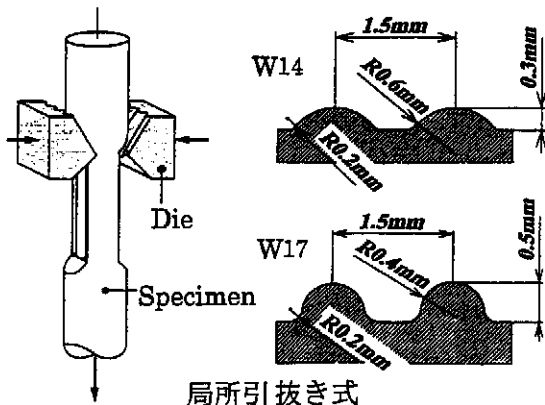
<p>1) 表面粗さ, 接触率, 突起間隔の影響</p> $r_{co} = a_3 Rmax / (a_1 R^4)$ $a_1 = 4 - 1.28W(1 - 0.215W^2) + 0.125Rmax(1 - 0.0125Rmax)$ $a_2 = [0.43 + 0.61W(1 - 0.25W^2)][1 - 0.157 \ln(Rmax + 0.1)]$ $a_3 = 0.0178[1 - 0.004R^{0.01} / (W^2 + 0.004R^{0.01})][1 + R^{0.01} / (Rmax^2 + 5)](1 - R^3)$	<p>----- (1)</p>
<p>2) 鍛造材料の影響</p> $r_{cm} = r_{cp}[(1-A)a^{0.3125} + Aa^{0.4667C}](1 + aB/3)/C$ $A = \arctan(a)/\pi \quad B = (C_R C_W C_m - 1) \quad C = a_{DIE} / 8.3825$ $C_R = (0.97 + 2.5R - 6R^2 + 3.5R^3)$ $C_W = 1 - 0.22 \ln(W + 0.001)$ $C_m = 0.64 + 0.083 \ln(Rmax + 0.001)$	<p>----- (2)</p>
<p>3) 潤滑剤の温度伝導率の影響</p> $r_c = (r_{cm}) C_R C_W C_m (a_{GLASS} / a_{AIR})$ $C_R = (1 - R)(16.55 + 283R + 141R^2 - 328R^3)$ $C_W = \exp[0.005 - 0.598 \ln(W + 0.001)]$ $C_m = 0.33 + 0.013Rmax(1 + 0.55[1 - 0.5(a_{DIE} / a_{MAT})]^2)$	<p>----- (3)</p>
<p>4) 酸化被膜の影響</p> $r_c = r_{co} + 17.8\delta_1(\lambda_1/\lambda_2) + 0.0178\delta_2(C_W C_R C_m + 2R)(1 - R^4/2)(a_o/a_s)$ $C_W = \exp[C_1 - C_2 \ln(\delta_2 + 0.001)]$ $C_1 = 0.875 + 4.9W - 2.794W^2 \quad C_2 = 1.119 - 1.054W + 0.535W^2$ $C_R = 1.5 - 9.29R + 23.72R^2 - 26.45R^3 + 10.56R^4$ $C_m = 0.042Rmax^{(0.253 - 0.001Rmax)}$ <p>δ_2: the thickness of the oxide films (μm)</p>	<p>----- (4)</p>
<p>5) 摩擦発熱の影響</p> $r_c = (r_{cd}) C_R C_W C_m$ $C_R = 1.36 - 1.2R + 4.098R^2 - 4.21R^3$ $C_W = (0.93 - 0.433 \ln(W + 0.001))(0.86 + 0.17W)$ $C_m = 1.26 - 0.072 \ln(Rmax + 0.001)$	<p>----- (5)</p>



スパイク鍛造の表面積拡大率(n=0.1)

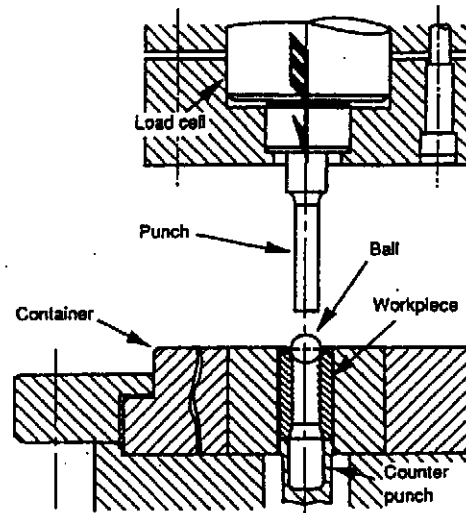
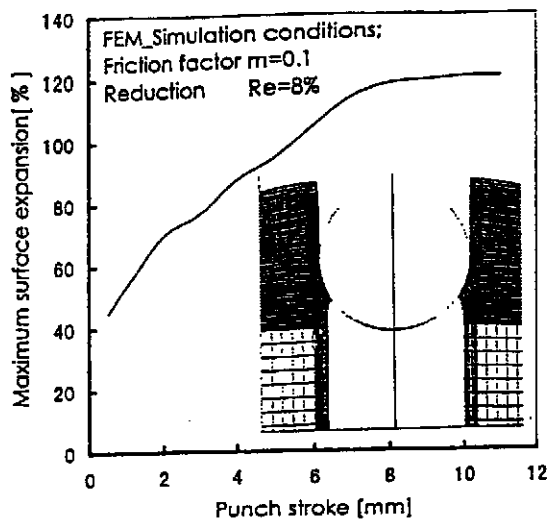
圧下量 18mm における拡大率

摩擦せん断係数 m	0.05	0.2
表面積拡大率(コーナー部)	301%	167%



局所引抜き摩擦試験摩擦係数の温度依存性

図 14 摩擦試験法



Schematic arrangement of the ball penetration test

図 15 摩擦試験法 ボール通し式

表 4 各種冷間加工における摩耗データから推定された摩耗率, 比摩耗量および摩耗係数の比較

加工法, 工具, 試験法	工具/被加工材/潤滑	摩耗率 $d_w/l[-]$	比摩耗量 $w_s [mm^2/kgf]$	摩耗係数 $K[-]$	備考
冷間圧延	3.2Cr ロール/軟鋼板/潤滑	1.0×10^{-7}	7.3×10^{-10}	6.5×10^{-7}	大貫ら
引抜き ダイス	軟鋼/軟銅線/石けん潤滑	4.0×10^{-8}	2.0×10^{-9}	4.0×10^{-7}	注 1)
	超硬合金/硬鋼線/石けん潤滑	3.0×10^{-10}	4.0×10^{-12}	8.0×10^{-9}	中村ら
	ダイヤモンド/SUS316 細線/乳化油	1.0×10^{-11}	1.0×10^{-13}	8.0×10^{-10}	松下
後方押し パンチ	SKH57/軟鋼/ボンデ+油	1.7×10^{-9}	4.0×10^{-9}	3.5×10^{-7}	岩崎
	超硬+TD/軟鋼/ボンデ+油	6.0×10^{-10}	1.4×10^{-11}	3.5×10^{-8}	岩崎
深絞りの しわ抑え	銅合金/0.3mm SUS304/潤滑	2.7×10^{-7}	1.7×10^{-7}	5.3×10^{-5}	前田ら
	銅合金/0.7mm SUS304/潤滑	1.3×10^{-6}	2.1×10^{-6}	6.6×10^{-4}	前田ら
大越式 (円筒/平面)	SKD11/SCM21/無潤滑		$(1-15) \times 10^{-8}$		新井
	SKD11/Al 合金/無潤滑		$(1-25) \times 10^{-7}$		清野
球 / 円板	ハイス+TiN/鋼球/各種潤滑剤		$10^{-11}-10^{-7}$		注 2)

注: 1) Christopherson & Naylor (1955)による軟鋼ダイスを用いた摩耗加速試験結果.

2) Bull & Chalker (1992). Holmberg & Matthews: Coatings Tribology, Elsevier (1994), p.253.より.