

塑性加工におけるトライボロジー研究の役割*

中 村 保^{*1}

Roll of Tribology Researches in Metal Forming Processes

Tamotsu NAKAMURA^{*2}^{*2} Department Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Shizuoka University,
3-5-1 Johoku, Hamamatsu-shi, Shizuoka, 432-8561 Japan**Key Words:** Tribology, Metal Forming Processes, Deep Drawing, Drawing, Ironing, Forging, Seizure, Lubricant, Lubricity, Tribo-Simulator

1. はじめに

大学の卒業研究において、深絞り形摩擦試験機を用いて鉱油系潤滑剤の性能評価試験を始めて以来、35 年余り、塑性加工のトライボロジーに関する研究が続けてきた。その間、恩師からは、役に立たない摩擦試験機を開発してもむだであるといわれながら、引抜き形、しごき形、圧延しごき形、分流鍛造形、前方押出し形、しごき・ハット曲げ形、繰返し板材成形向け、前後方複合押出し形等、多くの摩擦試験機を開発してきた。それらの摩擦試験機は、そのつど、必要に迫られて開発したもので、それなりの研究成果は得られたと思うが、それらが本当に役立つものであったかどうか、自己評価をしてみたことはない。

今回、日本機械学会から研究展望の執筆を依頼されたのを契機に、これまで行ってきた研究について塑性加工におけるトライボロジー研究の役割の観点から整理してみたい。

2. 塑性加工におけるトライボロジー研究の役割

図 1 に示すように、塑性加工において、所望の強度、寸法精度、表面仕上げの製品を、低コストで安定して生産するために、多くのトライボロジー的諸課題を解決することが要求される。例えば、工具と素材間の摩擦抵抗が高すぎると成形荷重が過大になって、素材や工具の破壊を招くとともに、製品寸法精度に影響を及

ぼす。また、潤滑状態は製品表面仕上げと工具摩耗に直接影響を及ぼす。特に焼付きの発生は激しい製品表面損傷を引き起こすとともに、工具寿命を著しく短くする。

これらの課題を解決するためには、図 1 に示すような塑性加工のトライボロジー現象に及ぼす影響因子を考慮して、適切な工具材質とその表面トポグラフィおよび硬質表面処理、素材材質とその表面トポグラフィ、加工条件、潤滑剤と潤滑条件を選択して、最適な潤滑状態を維持することが求められる。また、最近では、作業環境や地球環境保護のために、使用可能な潤滑剤の種類が制限され、新たな工具材料や表面処理、潤滑剤の開発や、加工条件、潤滑条件の見直しが迫られている。従来、実際の生産加工現場においては、より良い潤滑状態を維持するために、経験的あるいは試行錯

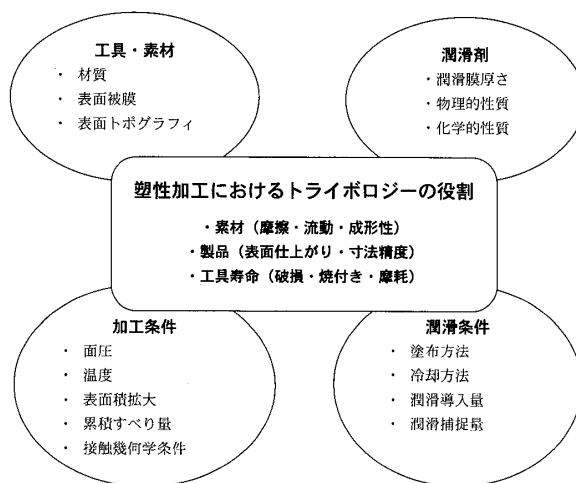


Fig. 1 Various factors influencing on tribological phenomena in metal forming processes

* 原稿受付 2005 年 1 月 5 日。

*¹ 正員、静岡大学工学部機械工学科(〒432-8561 浜松市城北 3-5-1)。

E-mail: tmtnaka@ipc.shizuoka.ac.jp

誤的なやり方で各種条件設定を行うことが多かったと考えられる。しかし、最近の生産加工現場では、開発リードタイムの短縮と安定した品質が望まれるため、最適な潤滑状態を得るための条件設定を、できるだけ迅速かつ合理的に決定することが求められる。

塑性加工のトライボロジー研究に携わる立場から、このような塑性加工のトライボロジー(プロセス・トライボロジーと名付けられた⁽¹⁾)に関する条件設定を合理的に行うためには、摩擦、潤滑、摩耗、表面生成等の普遍的な摩擦・潤滑メカニズムの解明や摩擦法則の構築を図り、その結果に基づいて解決することができれば理想的と考える。塑性加工の研究開発が活発になった1960年代からこれまでに、摩擦・潤滑メカニズムの解明についても極めて多くの研究が行われてきた⁽²⁾。著者自身も、1967年以来、深絞り形摩擦試験機を用いた各種鉱油系潤滑剤の潤滑特性の解明から始まり、多くの摩擦・潤滑メカニズム解明の研究を行ってきた。しかし、塑性加工のトライボロジー条件は加工法によって大きく異なるため、摩擦・潤滑メカニズムの解明は不十分であり、基本的摩擦・潤滑メカニズムに基づく合理的な条件設定はまだまだほど遠い現状にある。

そこで、塑性加工向けの各種摩擦試験機を開発して、工具、素材、潤滑剤等の条件設定のために、摩擦・潤滑性能、耐焼付き性能、耐摩耗性能等を評価することにより、合理的かつ迅速な摩擦・潤滑性能の評価が求められる。しかも、実際の生産加工現場の加工条件をできるだけ忠実に再現することが必要になる。特に、塑性加工では多数回の繰返し条件下におけるトライボ性能の評価を可能にすることが望まれている。

さらに、最近では、塑性加工数値シミュレーションを用いて、素材材料流動や応力とひずみ状態の予知、工具に作用する面圧や応力とひずみ状態の予知を行い、工程設計や金型設計に役立てることが活発に行われている。その際、工具と素材の境界条件として、適切な摩擦係数、摩耗係数、熱伝達係数等の摩擦・潤滑特性値を与えることが要求される。そのためには、塑性加工の各種加工条件下における摩擦・潤滑特性値のデータ収集、すなわち摩擦・潤滑特性データベースの構築が必要になる。

これまでに著者が試みた研究は、(1)塑性加工におけるトライボロジー現象の基礎的解明、(2)塑性加工用摩擦試験機の開発と摩擦・潤滑特性評価の観点から試みられたものがほとんどである。これに対して、塑性加工における摩擦・潤滑特性データベースの構築という観点からの摩擦試験はまだ試みた経験がない。以

後の章では、これまでに著者が行ってきた研究について、上述の研究の役割の考え方に従って整理してみたい。

3. 塑性加工におけるトライボロジー現象の基礎的解明

板材成形におけるトライボロジー現象の解明では、深絞り形摩擦試験機を用いて、各種鉱油系潤滑剤の潤滑特性を中心に調べた。深絞り板押さえ面では典型的な混合潤滑状態を示し、素材の平坦化された境界潤滑部に作用する摩擦せん断応力 τ と面圧 p は、ほぼ線形関係にある⁽³⁾。この特性は春日らによっても確認されている⁽⁴⁾。また、鉱油基油に各種添加剤を混合する場合には、添加剤の摩擦低減効果は、できるだけ不純物の少ない基油の場合に最も大きくなることが明らかになった⁽⁵⁾。また、板材成形の比較的厳しくない摩擦条件では、概して油性向上剤の減摩効果が大きいようである。

引抜きおよびしごき形摩擦試験機による焼付き現象の解明では、焼付きの発生・成長過程を中心に調べた⁽⁶⁾⁽⁷⁾。行程の進みに伴い、境界潤滑状態において塑性変形に伴う表面積拡大等による新生面発生を潤滑剤が補修できなくなると焼付きが発生すると考えられるが、その焼付きは潤滑剤の焼付き補修効果とバランスをとるまで成長する。そのときの摩擦係数は焼付きの面積割合に対応するため、その値を潤滑剤の耐焼付き性能を表す評価尺度とすることができる。

分流押出し形摩擦試験機および前方押出し形摩擦試験機による焼付き発生機構の解明では、図2に示すよ

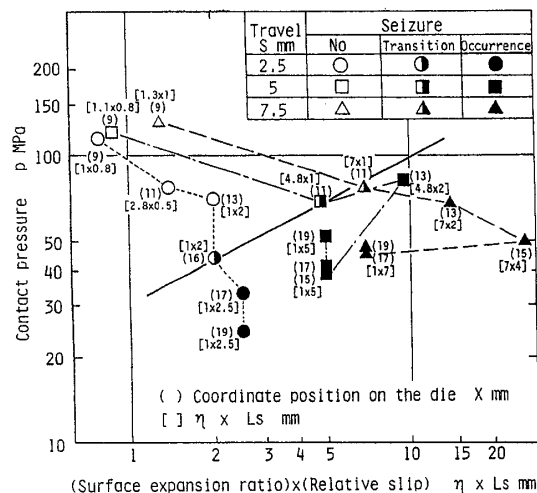


Fig. 2 Seizure initiation criteria under dry friction condition in injection extrusion type friction test⁽⁸⁾

うに無潤滑条件における焼付き発生は面圧が高いほど抑制される傾向にあることを明らかにした⁽⁸⁾。さらに、潤滑剤の粘度および温度が変化した場合には、図3に示すように焼付き発生が限界油膜厚さによって律せられることがわかった⁽⁹⁾。

リン酸塩皮膜+金属石けんの固体潤滑剤は、冷間鍛造等の厳しい摩擦条件に使われることが多い。有限要素解析法 FEM による数値シミュレーションを用いて、鍛造における固体潤滑剤の潤滑挙動の解明を試みた⁽¹⁰⁾。工具と固体潤滑剤間の摩擦係数 μ_D と素材と固体潤滑剤間の摩擦係数 μ_M を変えて FEM 解析を行っ

た結果、素材側の密着が強い条件として μ_M を高く、工具側をすべりやすく μ_D を低くすると、図4に示すように圧下率 60%でも固体潤滑剤は摩擦端末においても膜切れが発生しないが、素材側の密着が弱い条件として μ_M を低く、工具側をすべりにくく μ_D を高くすると、圧下率 15%でも固体潤滑剤は端面端末に膜切れが発生する。このような固体潤滑剤の挙動は、超高分子量ポリエチレン UHMWPE や四フッ化エチレン PTFE において実験的に確認されている。

4. 板材成形用摩擦試験機の開発と 摩擦・潤滑特性評価

板材成形における摩擦・潤滑特性の評価を行うため、帯板ハット曲げ形摩擦試験機や深絞り形摩擦試験機を用いて、表面処理鋼板やステンレス鋼板等の潤滑特性を評価した⁽¹¹⁾。

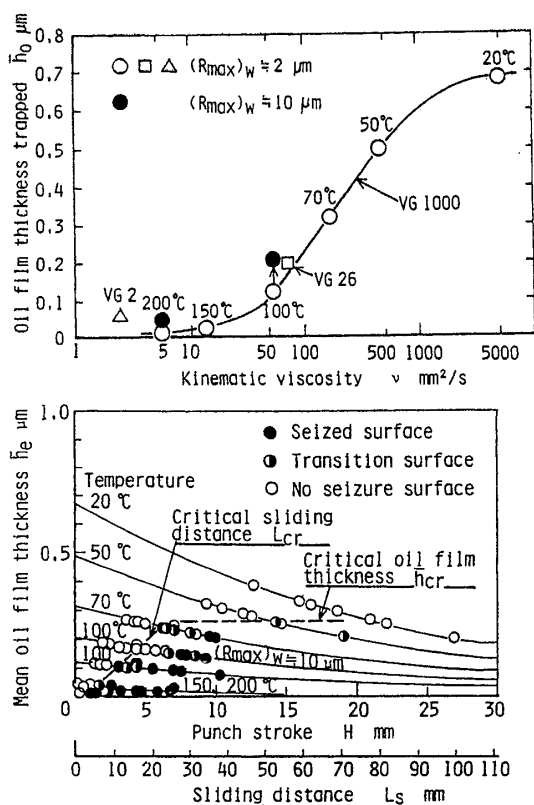


Fig. 3 Critical oil film thickness for seizure initiation in injection extrusion type friction test⁽⁹⁾

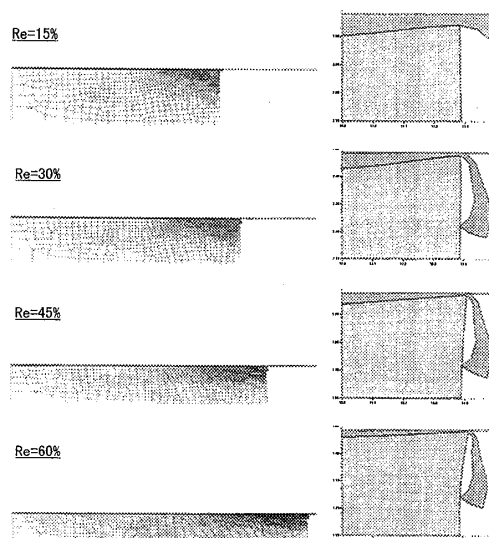


Fig. 4 Lubrication behavior of solid lubricant in upsetting process⁽¹⁰⁾ ($\mu_D=0.05$, $\mu_M=0.15$, Initial oil film thickness 0.1 mm)

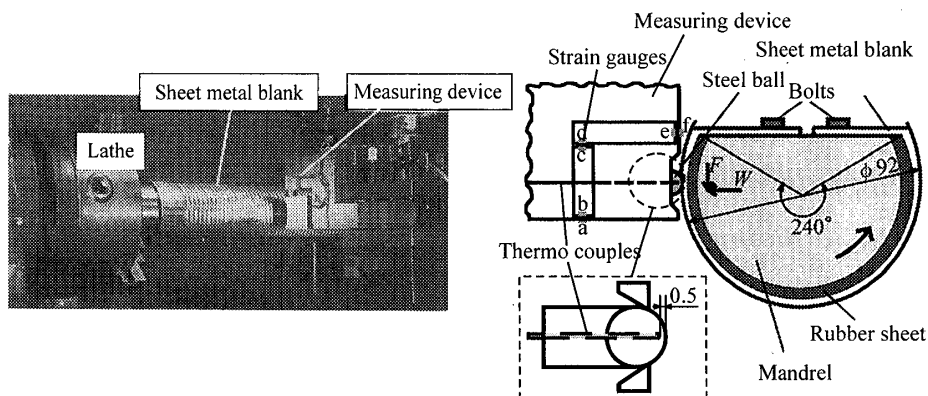


Fig. 5 Tribo-simulator for iterative processes in sheet metal forming⁽¹²⁾

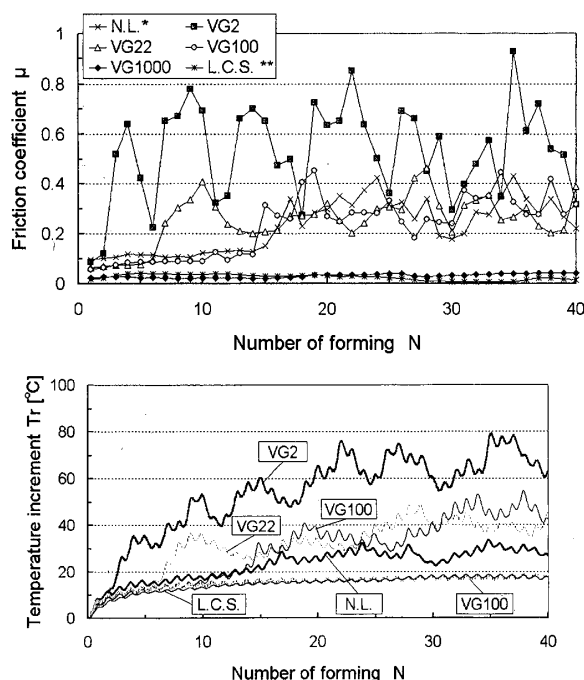


Fig. 6 Evaluation of tribo-characteristics of stainless steel by tribo-simulator for iterative processes in sheet metal forming⁽¹³⁾

しかし、実際の生産加工現場のように繰返し板材成形を行う場合には、加工回数の増加に伴い潤滑特性が変化する。そこで、図5に示すような繰返し板材成形向け摩擦試験機を開発した⁽¹²⁾。40回程度のビード成形の繰返しが可能で、総すべり距離は7.2 m程度になる。摩擦面温度は、鋼球の摩擦面下約0.5 mmに埋込んだ熱電対によって測定された。

ステンレス鋼板に各種粘度の鉱油を適用して繰返し板材成形向け摩擦試験を行った結果、図6に示すように高粘度鉱油 VG 1000 では全加工回数で焼付きが発生せず低い摩擦係数を維持できるが、粘度の低い鉱油や無潤滑では早い加工回数で焼付きが発生し、摩擦係数と摩擦面温度が急上昇することが示されている⁽¹³⁾。

現在、摩擦試験機を用いて、DLC 皮膜工具等によるアルミニウム板、チタン板、ステンレス鋼板等の無潤滑加工の可能性について検討を進めている。

5. 鍛造用摩擦試験機の開発と 摩擦・潤滑特性評価

リング圧縮形摩擦試験法は、加工力や素材変形抵抗を測定することなく、簡便に摩擦係数等の摩擦特性値を得ることが可能な摩擦試験法として、鍛造における摩擦・潤滑特性を評価するために用いられてきた。しかし、この据込み鍛造型の摩擦試験は、押出し形の鍛

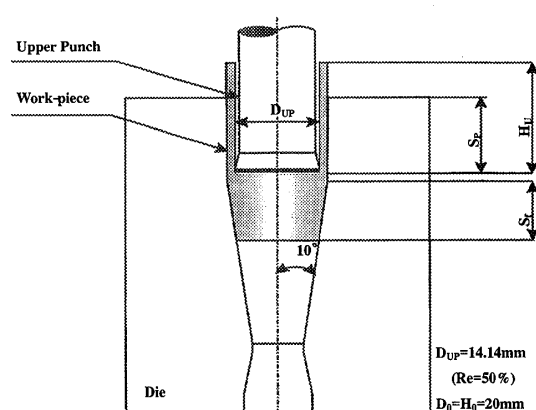


Fig. 7 Tribo-simulator of combined forward rod-backward can extrusion type⁽¹⁴⁾

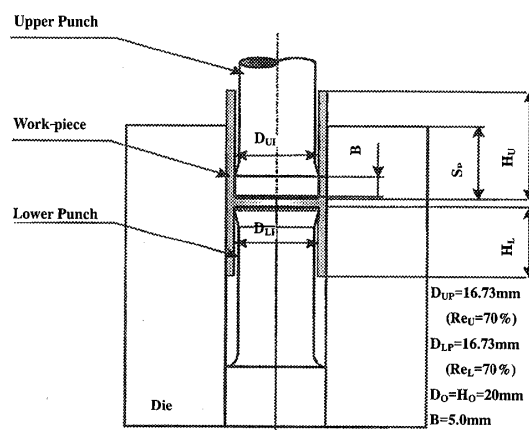


Fig. 8 Tribo-simulator of combined forward can-backward can extrusion type⁽¹⁵⁾

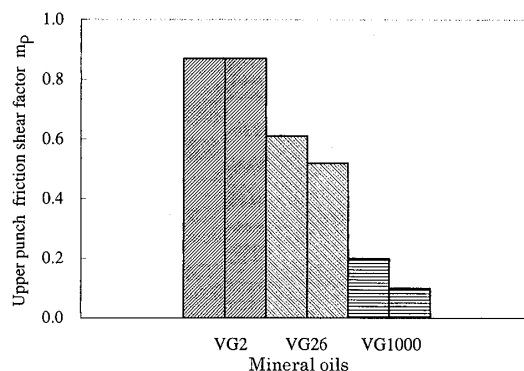


Fig. 9 Evaluation of lubricity at punch in tribo-simulator of combined forward can-backward can extrusion type⁽¹⁵⁾

造に適用することは必ずしも適当ではない。そこで、図7に示すように、軸・缶の前後方押し形摩擦試験機を開発した。缶の後方押し加工力とバランスをとる軸の非定常押し長さ S_f を測定することにより、加工力や素材変形抵抗を測定することなくダイス面の摩擦特性値を求めることが可能になる⁽¹⁴⁾。

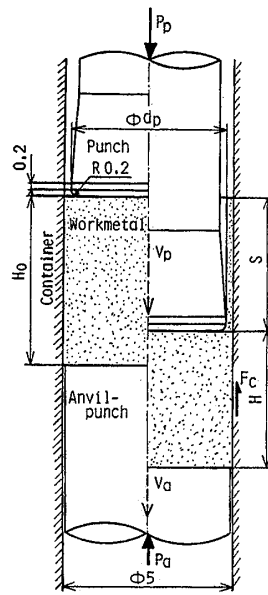


Fig. 10 Principle of friction-assisted extrusion of thin wall can⁽¹⁶⁾

鍛造の中でも、缶の後方押しにおけるパンチ頭部は、面圧が高く、表面積増加が著しいため、最も厳しい摩擦条件にさらされる。このパンチ面の摩擦特性値を直接見積もることが可能な方法として、図8に示すような直缶・直缶の前後方押し形摩擦試験法を提案した。この試験法では、長さ5mmのベアリングにおける上パンチ面の摩擦せん断係数を見積もることが可能になる⁽¹⁵⁾。図9は、この摩擦試験法により、長いベアリングを持つパンチ面の摩擦せん断係数 m_P を測定した結果を示したもので、アルミニウム合金 A 6061 の場合、低粘度油ほど極めて大きな m_P を示している。

現在、これらの前後方複合押し形摩擦試験機を用いて、リン酸塩皮膜処理潤滑剤に替わる環境負荷の低い潤滑剤の性能評価を試みている。

6. おわりに

塑性加工における工具面摩擦力は、通常、素材の変形を妨ぎ、加工面圧の増大をもたらすことが多く、塑性加工のトライボロジー現象の課題の対策に追われることが多い。しかし、圧延においては、ロールの摩擦力がないと素材のかみ込みが生じないように、塑性加工のトライボロジーも積極的な活用の工夫が可能である。図10は、工具面摩擦力を活用して底付き薄肉缶⁽¹⁶⁾を製造する方法、図11ではマンドレル⁽¹⁷⁾、図12ではアンビル⁽¹⁸⁾を駆動することにより、その工具面摩擦力で素材を流動させる方法である。また最近では、環境負荷を軽減するために新たな潤滑剤や潤滑法

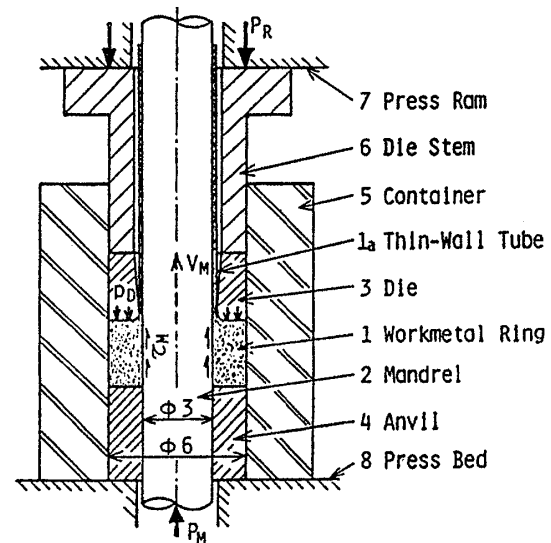


Fig. 11 Principle of friction-assisted extrusion of thin wall tube⁽¹⁷⁾

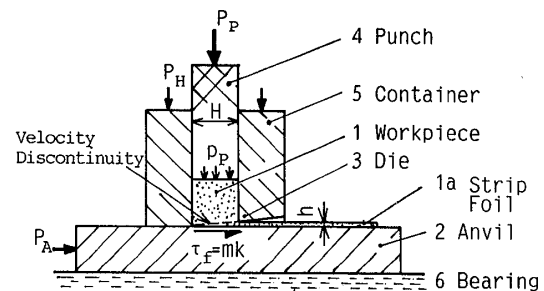


Fig. 12 Principle of friction-assisted extrusion of thin strip⁽¹⁸⁾

の開発研究や、硬質表面処理工具を用いて無潤滑加工の研究開発の試みが少しずつ行われるようになってきた。

今後、塑性加工におけるトライボロジー研究の役割は、課題対策型から積極策提案型になることが期待されていると考えられる。

文献

- (1) 日本塑性加工学会編, プロセストライボロジー, (1993), コロナ社.
- (2) Schey, J. A., *Tribology in Metalworking*, (1983), American Society for Metals.
- (3) 河合望・中村保・近藤一義, 機論, **39**-326 (1973), 3181-3189.
- (4) 春日保男, 塑性と加工, **9**-87 (1968), 207-215.
- (5) 河合望・近藤一義・清水勲・中村保, 機論, **37**-301 (1971), 1788-1794.
- (6) 河合望・中村保・宮本重, 機論, **47**-417, C (1981), 644-652.
- (7) 河合望・中村保・堂田邦明・広瀬圭介, 機論, **48**-433, C (1982), 1473-1481.

- (8) 河合望・済木弘行・中村保・名倉誠, 機論, **49**-441, C (1983), 875-882.
 - (9) 中村保・金原秀幸, 機論, **55**-513, C (1989), 1289-1295.
 - (10) Nakamura, T., *Trans. ASME, J. Tribol.*, **122**-4 (2000), 803-808
 - (11) 中村保・ほか 4 名, 塑性と加工, **34**-393 (1993), 1153-1159.
 - (12) Nakamura, T., ほか 7 名, *Proc. 22nd Biennial Congress*, (2002), 259-268.
 - (13) Nakamura, T., ほか 5 名, *Proc. 2nd ICTMP*, **2** (2004), 437-444.
 - (14) Nakamura, T., Bay, N. and Zhang, Z. H., *Trans. ASME, J. Tribol.*, **119**-3 (1997), 501-506.
 - (15) Nakamura, T., Tanaka, S., Hayakawa, K. and Takahashi, I., *Lubr. Eng.*, **59**-4 (2003), 12-17.
 - (16) 中村保, 機論, **53**-486, C (1987), 488-493.
 - (17) 中村保, 機論, **54**-501, C (1988), 1150-1156.
 - (18) 中村保・ほか 4 名, 機論, **61**-584, C (1995), 1613-1617.
-