静水圧押出しにおけるスティックスリップ*

久 保 勝 司**

Prevention of Stick-Slip Motion in Hydrostatic Extrusion of Billet

by

Katsushi KUBO

(Government Industrial Research Institute, Nagoya, Nagoya)

The hydrostatic extrusion of the billet is a new extrusion process differing from the conventional method in utilizing the pressurized liquid and keeping the material in contact with the dies. The practical use of this process involves a serious question concerning how to prevent the stick-slip motion. There are, it is considered, various factors that bring about the stick-slip motion, such as lubricants, extrusion ratios, the materials of the billet and die angles. In the present study the stick-slip motion has been analyzed in terms of these factors using an electromagnetic oscillograph. The results obtained are as follows.

(1) The temperature of oil film of lubricant formed inside the dies holding the billet plays an important part in causing the stick-slip motion.

(2) The smaller die angle will render the lubricant to be preventive of the stick-slip motion.

(3) Large stick-slip motion has always appeared with bulging deformation at the extrusion of brittle materials.

(Received Apr. 2, 1971)

1 緒 言

静水圧押出し法は高圧力媒体液を介してビレットを押出すために、ビレットとコンテナ間の摩擦はなく、また、ビレットとダイとの摩擦係数も小さい。したがって静水圧押出し法は従来のラム押出し法に比べて、(1)押出し圧力が小さい (2)均一な材料の流れが得られる (3)長い素材の押出しができる (4)素材の断面形状は自由であるなどの長所を持っている。

静水圧押出しにおいては、押出し荷重が周期的な振動を起こすことがある^{1)~4)}。この現象はスティックスリップ (stick-slip) と呼ばれ静水圧押出し法の欠点の一つである。押出し時にスティックスリップが発生すると、押出し材表面には損傷が起こるし、工具は必要以上の応力を繰り返し受けるので工具寿命は短くなる。このように、静水圧押出しのさいスティックスリップが発生すると加工に悪い影響を与えるが、スティックスリップの発生におよぼす押出し条件の影響はあまり知られていない。

さて、スライダと台とのすべり摩擦の研究によれば⁵⁾⁶⁾、材料が二面間ですべり運動をする場合に、静摩擦係数と動摩擦係数の大きさに違いがあり、その運動系が弾性自由度を有するとスティックスリップが発生す

ることが明らかにされている。

本報告は、静水圧押出しのさいに発生するスティックスリップを防止するのを目的として、スティックスリップにおよぼすダイ角度、押出し比、ビレット材料、潤滑剤の影響を調べたものである。

2 実験装置と方法

2・1 静水圧押出し装置および圧力媒体

Fig. 1 に静水圧押出し装置の概略を示す。プランジャ先端部およびダイ下部の圧力シールは、リン青銅製のマイタリングとネオプレン製の O-リングを組み合わせで行なった。押出し用円錐ダイ①はダイス鋼 (SKD-11) を焼入れ焼もどし処理後研摩してあり、硬度は $H_R C 52 \sim 55$ 、表面あらさは $H_{max} 0.4 \sim 0.8 \mu$ である。使用したダイの半角 α は 7.5° 、 15° 、 22.5° 、 30° 、 45° の 5 種類で、出口直径はいずれも 15 mm である。ダイ出口の角は微少な丸みをつけてあるが、ランドは設けてない。

プランジャに負荷するとビレット②は圧力媒体液④を介して押出される。なお、負荷中のプランジャの平均速度は約 0.7 cm/秒である。ダイ半角が 30° 以上の場合にはガイド③を使用してビレットがなるべく垂直に押出されるようにした。

本実験で圧力媒体として主に使用したモータ油は、内燃機関用の潤滑油として一般に使用されているもの

* 原稿受理 昭和46年4月2日

** 正 会 員 名古屋工業技術試験所 名古屋市北区平手町

Fig. 1. A sketch of hydrostatic extrusion apparatus.

で、潤滑効果を向上させるために鉱油に、主として清浄剤、酸化防止材、極圧剤、油性剤などの添加剤が添加されている。したがって、塑性加工用の潤滑剤としても有効であるが、別に添加する潤滑剤として、二硫化モリブデンおよび黒鉛潤滑剤（商品名ダイループ）を用意し、これをダイとビレットに塗布してそれらの効果を調べた。

2・2 押出し圧力の測定

押出し圧力の測定はひずみゲージを貼ったロードセル⑦でプランジャ荷重を計測する方法を主に用いた。そして、補助的にマンガン圧力計⑨を用いて、押出し圧力の時間的変化を求めた。この場合、巨視的な圧力変化を記録するのに自動平衡式2ペンレコーダーを、微視的な変化を記録するには電磁オシログラフを用いた。

2・3 供試材料と試験片形状

供試材料は工業用純アルミニウム（A1 B1）、7—3黄銅の各引抜棒とアルミニウム合金鋳物（AC2B）および亜鉛合金鋳物（ZnADC1）の棒材である。

ラム押出し法において、ビレット先端の形状は押出し圧力に影響を与えることが知られている。つまり、ビレット先端部分がノーズをもたない平端面であったり、ノーズが短いと押出し始めにおいてビレットとダイ面間に局部的に大きな応力が発生して潤滑膜の破断を引き起こし、押出し初期に圧力こぶを作る原因となる。そこで、本実験に用いた試験片はFig. 2に示すように、旋削加工により任意の直径にしたあと、ダイ円錐部分にちょうどはまるノーズを設けて、圧力こぶの

Fig. 2. Dimensions of billet.

発生を防ぐようにした。試験片の表面あらかさは $H_{\max}$ で $2\mu\sim 3\mu$ であり、熱処理はしていない。ここで押出し比 R はダイの出口寸法を D_d 、ビレットの直径を D_b とすれば、 $R=(D_b/D_d)^2$ で表わされる。

3 実験結果

3・1 静水圧押出しにおけるスティックスリップの特徴

Fig. 3はスティックスリップが発生したときの押出し圧力の変動を巨視的に示す一例である。Fig. 3に示すように、静水圧押出しにおけるスティックスリップはバルジ変形によって起こる場合（Fig. 3の(a)）と、ダイとビレット間の潤滑性によって起こる場合（Fig. 3の(b)）とに大別できる。後述するように、後者の場合はダイ表面とビレットは境界摩擦状態にあると考えられる。バルジ変形を伴う場合は、(b)の場合に比べて激しいスティックスリップが起こる。このように、押出し時にスティックスリップが起こると、押出し圧力が周期的な振動を行なうとともに、コーン、コーンという摩擦音を伴うのが大きな特徴である。一方、押出し材表面には円環状のストップマークができるが、この数は押出し線図に現われている振動数と一致する。

Fig. 3. Pressure diagram for AC2B showing "stick-slip motion".

上述したように、スティックスリップが起こると押出し圧力が周期的に変動するので、以後においてはこの圧力の振幅の大きさ Δp_f を fluctuation pressure と呼んでスティックスリップの大きさを表わす尺度として用いる。

3・2 バルジ変形に起因するスティックスリップ

Fig. 4に大きなダイ角度のさいに起こるスティックスリップの大きさを示す。この場合 AC2B を除けば

スティックスリップが起こる押し比の範囲は小さく、いずれも押し比が小さい所でバルジ変形を伴う激しいスティックスリップが起こっている。 $4p_f$ の大きさは材料によって異なるが、バルジ変形を伴うスティックスリップが消滅する押し比 R_B はほぼ同じである (R_B は約 1.3)。ただ AC2B はバルジ変形がなくなった後もスティックスリップが起こっている。しかし、同じアルミニウム系でも A1B1 の場合、バルジ変形は起こっているが、スティックスリップは生じない。

Fig. 4. Variation of fluctuation pressure of stick-slip motion with extrusion ratio for 45° semi-cone angle die.

Fig. 5. Photograph of extruded materials with stick-slip motion caused by buldge formation.

Fig. 5 はバルジ変形を起こしたときの押し比材の写真で、材料による表面損傷の違いを示す代表例である。黄銅にくらべると、AC2B および ZnADC1 は周期的にかなりひどいむしれ傷を生じている。そして AC2B の場合は、バルジ変形の発生に対応してダイの出口近傍表面に約 2~3mm の幅で材料の固着が生じている。

3・3 ダイ角度と押し比の影響

Fig. 6 に AC2B の $4p_f$ におよぼすダイ角度と押し比の影響を示す。押し比が約 3 ($\ln R \approx 1.1$) 以上になると、いずれの場合も、定常押し中にはスティックスリップは起こらなくなる。一方押し比が 3 以下の場合、 $4p_f$ はダイ角度の影響を受けるが、特に

Fig. 6. Effects of die angle α and extrusion ratio on fluctuation pressure $4p_f$.

$2\alpha=90^\circ$ と 15° の両者において著しい。 $2\alpha=30^\circ$ の値は 45° の値とはほぼ同じ値を示す。このように 15° のダイではっきりとしたスティックスリップを起こすのは AC2B のみであり、他の材料はバルジ変形を起こす 90° ダイのときのみスティックスリップを起こしている。ただ潤滑剤との化学反応性が悪い同じアルミニウム系の A1B1 も 15° のダイでスティックスリップを起こすが、スティックスリップの形態は AC2B の場合と異なっており、A1B1 は非常に短い周期で振動し $4p_f$ も小さい。

3・4 押し比材表面のマイクロプロフィール

Fig. 7 にスティックスリップが起きたときの押し比材表面のマイクロプロフィールを示す。あらかの測定位置は、Fig. 7 に示すようにダイ円錐部分 A と押し出された部分 B であり押し比方向に測定した。Fig. 7 の(a)より変形の進行につれて素材のあらかがダイとの接触面で平坦化されていくのがわかる。このことから出口近傍では、厚い潤滑膜は存在し得なくて境界潤滑状態にあると考えられる。このことは、押し出された材料が金属光沢を有していることから推察される。一方 Fig. 7 の(b)に示すように押し出された部分には、スティックスリップの影響として外表面に円環状のストップマークができてはいるが、この数は押し比線図に現われている振動の山数と一致している。AC2B の押し出された部分の表面あらかは、ダイ角度、押し比による変化はあ

Fig. 7. Micro-profiles of extruded billet ($2\alpha=15$, AC2B, $R=2.2$).

まり認められなかった。しかし、ダイに接している部分の表面あらさは、押し出し比が大きくなると全接触部分にわたって平坦化されている。ただ、ダイ角度が小さい場合はダイ角度が大きい場合よりも多少平坦化される割合が小さくなっている。これはダイ角度が小さいとくさび効果によって潤滑剤がダイとビレット間に入り込みやすくなるためであると考えられる。

4 検 討

ここでは、まず押し出し荷重が自由振動を行なうことについて述べ、次に供試材料および潤滑剤がスティックスリップにおよぼす影響について検討する。さらに、バルジ変形に起因するスティックスリップについて若干の検討を加える。

4・1 押し出し圧力の自由振動

Fig. 8は静水圧押し出しの概念図である。プランジャに負荷するとビレットは圧力媒体液を介して押出される。Fig. 9はFig. 3(b)の圧力変動を電磁オシログラフで描かせたものである。ビレットの運動に着目すると、ビレットはA点で急激にすべり始め、AB間ですべり、B点で再びダイと固着し、BC間固着している。次に、圧力媒体液のエネルギーに着目すると、ビレットがダイに固着している間もプランジャは前進して圧力媒体液を圧縮するので、その間圧力媒体液中にエネルギーが蓄積されているが、この蓄積された力がビレットをダイに固着させている力よりも大きくなると、ビレットはすべり始めるはずである。つまり、Fig. 9に示したスティックスリップは自励振動の一種であり、エネルギーが蓄積される過程と蓄積されたエネルギーを消費される過程が存在し、固着している期間とすべっている期間がそれらに対応している。

Fig. 8に示した静水圧押し出しの運動を Fig. 10に示すような単純化したモデルに置き換えて考えるとA B

Fig. 8. General view of hydrostatic extrusion.

Fig. 9. Pressure variation in stick-slip motion.

Fig. 10. A model of stick-slip motion under hydrostatic extrusion.

間の運動はすべり面に摩擦力が働く単振動の問題として取り扱うことができる。ここでビレットとダイの静摩擦力と動摩擦力をそれぞれ f_s , f_k としビレットはバネに作用する力が f_s に等しくなったときにすべり始め、すべっている間の摩擦力は一定であると仮定し、バネの圧縮量を x とすると、ビレットの運動方程式は

$$m \frac{d^2 x}{dt^2} - f_k = -kx \quad (1)$$

で与えられる。ここで、初期条件として、すべり始めの点を考えると、A点における変位は $x = f_s/k$ であり、その時の速度はプランジャの加圧速度 v_p に等しいので(1)式の解は

$$x(t) = \frac{f_s - f_k}{k} \cos \omega t + \frac{f_k}{k} + \frac{v_p}{\omega} \sin \omega t \quad (2)$$

となる。ここで $\omega^2 = k/m$ である。Fig. 9でもわかるように v_p/ω はきわめて小さいので、最後の項は省略できて、

$$x(t) = \frac{1}{k} \{ (f_s - f_k) \cos \omega t + f_k \} \quad (3)$$

と書ける。つまり $dx/dt = v_p$ のとき、すなわち $\omega t = \pi$ のとき、ビレットは再びダイに固着すると考えてよい。なお、静水圧押し出しにおいては、プランジャとビレット間の相対変位量 x とプランジャ荷重との間には、高圧域においては（たとえばAC2Bの場合、押し出し比が約1.8のときの定常押し出し圧力は約2400気圧）ほぼ直線関係になりたつので、ビレットが第(3)式で示されるような間欠運動を行なうと、押し出し圧が周期的に振動すると考えられる。

ここでは、単純化したモデルで押し出し圧力の変動を説明したが、このモデルでは、Fig. 11に示すスティックスリップの発生初期の現象およびFig. 12に示すようなスティックスリップが消滅する限界押し出し比近傍で起こる定常押し出し後期のスティックスリップは説明できない。この大きな理由として(1)ダイとビレット間で発生する熱の潤滑油膜におよぼす影響を無視したこと、(2)第(1)式で減衰項 dx/dt を考慮しなかったこと

Fig. 11. Showing start of stick-slip motion by an electromagnetic oscillograph.

Fig. 12. Pressure diagram for AC2B showing stick-slip motion near the critical extrusion ratio stick-slip motion is extinct ($2\alpha=15^\circ$, AC2B, $R=4.5$).

が考えられる。たとえば、Fig. 11 に示す発生初期の現象は、ダイとビレット間に存在する潤滑油膜の厚さおよび強度は急激に変化できず、徐々に変化しながら一定値に近づくためであると考えられる。

4・2 ダイ面の摩擦係数の変化

Fig. 9 においてA点およびC点は静摩擦時の押し出し状態に相当し、一方、すべりの中央点Dが動摩擦時の押し出し状態に相当する。

軸対称押し出しの際のビレットとダイ表面の摩擦係数を知る方法としては、初等解による方法や、半径方向流れを用いた上界接近法が知られているが、初等解の近似解法と上界法から得られる $\Delta\mu$ は両者とも次式で表わされる。

$$\Delta\mu = \mu_s - \mu_k = \left\{ \frac{(p_s - p_k)}{Y_m} \right\} \times \frac{1}{\epsilon \cdot \left(1 + \frac{\epsilon}{2}\right) \cot \alpha} \quad (4)$$

ここで p_s は静摩擦のときの押し出し圧力、 p_k は動摩擦のときの押し出し圧力、 $\epsilon = \ln R$ である。なお、平均変形抵抗 Y_m は定常押し出し圧力と圧縮試験で得られた $Y(\epsilon)$ 曲線を用いて次式から求めた。

$$\left. \begin{aligned} p_s &= \int_0^\epsilon Y(\epsilon) d\epsilon \\ Y_m &= \left[\int_0^\epsilon Y(\epsilon) d\epsilon \right] / \epsilon \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

(4)式から、ダイ半角が小さい時ほど、また変形抵抗と押し出し比が大きいくほど、 $\Delta\mu$ のわずかな変化に対して Δp_f は大きく変化することがわかる。Fig. 13 は大きなスティックスリップが起こる AC2B を $2\alpha=15^\circ$ の

Fig. 13. Effects of extrusion ratio on $\Delta\mu$ calculated by Eq. (4).

ダイで押し出したときの $\Delta\mu$ と押し出し比の関係を示したものである。このように、小さな $\Delta\mu$ の変化が大きな圧力変動を引き起こすが (Fig. 6 の白丸)、 $\Delta\mu$ がなぜ押し出し比によって変化するのは今のところわからない。

4・3 ダイとビレット界面の潤滑油膜におよぼす温度の影響

AC2B は $2\alpha=15^\circ$ のダイで押し出す場合、押し出し比が3以上だと室温で押し出した場合は定常押し出し中にはスティックスリップを起こさない。しかし、ダイおよびビレットを加熱して押し出しを行なうと Fig. 14 に示すようにスティックスリップを起こす。温度が低くなるにしたがってスティックスリップが起こる時期は遅くなり、また Δp_f も小さくなっている。このことから、ダイとビレット間に存在する潤滑油膜の変化、特に温度による変化が静水圧押し出しにおけるスティックスリップと深い関連があると思われる。

Fig. 14. Effects of heating temperature on stick-slip motion ($2\alpha=15^\circ$, AC2B, $R=3$).

4・4 供試材料と潤滑剤の影響

Fig. 15 はほぼ同じ硬度と変形抵抗を有する Zn-ADC1 (Hv 94.2) と AC2B (Hv 93.5) を摩擦溶接法で接合して押し出したもので、前部が ZnADC1、後部が AC2B である。AC2B は大きなスティックスリップを起こすが、ZnADC1 は全然起こらない材料である。なお、この場合の動摩擦係数を上界法で求めるとそれぞれ0.03、および0.033 となる。また押し出された表面

Fig. 15. Pressure diagram for ZnADC1 and AC2B ($2\alpha=15^\circ$, $R=1.79$).

はいずれも滑らかで平均あらさは $H_{\max}$ で約 2μ である。

潤滑の研究⁹⁾によれば、接触する二種の金属間における μ_s と μ_k は金属の組み合わせに依存する。一方、Rabinowicz はこの特性に対して、すべり速度は非常に大きな影響を与えるが、面のあらさや荷重は無関係であると説明している。もともと滑らかな運動 ($\mu_s = \mu_k$) に対しては速度の影響もない。そこで、潤滑された状態において、AC2B でスティックスリップがあらわれ、ZnADC1 でスティックスリップがあらわれないのは、潤滑剤と金属の反応性とすべり速度が考えられる。AC2B も押出し速度がきわめて遅いとスティックスリップを生じない。

次に Fig. 16 に示すように AC2B に対する二硫化モリブデンおよび黒鉛潤滑剤の効果が大きいのは、層状組織をもつこれらの潤滑剤がダイとピレット間に入り込んで、高温まで安定な潤滑油膜を形成するためであろう。90°ダイでは潤滑剤の効果が無いのに、15°ダイでは添加潤滑剤の効果が大きいのは、 α が小さいためにくさび効果によって潤滑剤がダイとピレット間に入り込み易いためである。

Fig. 16. Effects of lubricants on stick-slip motion for AC2B.

AC2B を溶体化処理をした場合 (Hv 123), 15°ダイでスティックスリップは起こらなかった。しかし、溶体化処理後外表面を削り取って押出すと、スティックスリップが起こった。これは、AC2B を熱処理した結果生じた酸化膜層と、さらに地金のかたさも増すことによって、酸化膜が変形時に破壊されず、ダイとの凝着が起こりにくくなるためであろう。つまり、酸化膜と地金の硬度差が大きく機械的性質の異なるものほど、接触部が塑性変形を受けるとき、酸化膜がその変形に追従しきれず破壊するので容易に凝着が起こることが知られている⁹⁾。

4・5 バルジ変形に起因するスティックスリップ

押出し比が小さい範囲で起こる材料の盛り上りを伴う押出しの変形模様は、くさびの押込みや負のすくい

Fig. 17. Postulated slip line field for very small reductions of area.

Fig. 18. Slip line field for limit of buldge formation.

角をもつ切削変形と対比して考えられる。押出し比が小さいとダイ面圧は非常に大きくなり、この場合には Fig. 17 に示すようにダイは圧子のような作用をして、ダイ入口側で材料の盛り上がりが起こる。この場合、変形域は表面近傍に限られ、材料表面に standing-wave が生じるが、押出し比がある値に達すると、Fig. 18 に示すように材料の盛り上りはなくなり、すべり線場がブロックを貫通する。このバルジが消滅するバルジ限界の断面減少率 r_B は平面すべり線場から^{13),14)}

$$r_B = \frac{H-h}{H} = \alpha \left(0.23 + \frac{\alpha}{9} \right) \quad (6)$$

として与えられる。ここで、平面ひずみ線場の解を軸対称押出しに適用する方法として(1)押出し比を揃える方法と、(2)ダイプロフィールを揃える方法の二つが考えられるが、対応法(1)を用いて、 $2\alpha = 90^\circ$ に対するバルジ限界押出し比 R_B を(6)式より求めると、 $R_B = 1.325$ ($\ln R_B = 0.282$) となり、Fig. 4 の限界押出し比とよく一致する。また、ダイに残るバルジの残与物および押出し材の観察結果から判断すると、対応法(1)を用いて求めた R_B は有効であると考えられる。このように、バルジ限界押出し比とスティックスリップの消滅する押出し比が良い一致をみることから、バルジ変形とスティックスリップには深い関連があるといえる。

バルジ変形に起因するスティックスリップの場合は材料の盛り上りにつれてダイ面での摩擦力が増大してその間に圧力媒体液中に貯えられたポテンシャルエネルギーがある値に達すると急にすべりが起こっている。この過程は、先に述べた境界潤滑状態での自励振動と同じであるが、バルジ変形に起因するスティックスリップの場合は、押出された材料表面に周期的なむしれ傷が生じており、材料内部ですべりが起こっていることを示している (Fig. 5)。Fig. 19 は、ダイ入口手前

Fig. 19. Crack of bulged zone ($2\alpha=90^\circ$, ZnADCl).

Fig. 20. Showing heavy shearing of slip zone ($2\alpha=90^\circ$, ZnADCl).

における材料の盛り上りとそこに発生しているき裂を示す例である。材料が急速にすべっている状態を具現することは不可能であるので、この写真は固着終点近傍で押しを中止して断面の検鏡を行なったものである。き裂の様子は Fig. 17 のすべり線場における線 A—C—D—E に似ている。Fig. 20 は、はげしくむしられた個所を検鏡した写真であり、表面層近くでのみ大きな材料の流れが起きているのが明らかである。以上の観察結果から、材料がバルジ変形を起こした後急激にすべる場合は、ダイとの間ですべるのではなくて、これよりも変形エネルギーの小さい材料内部で急激なせん断変形を起こすものと考えられる。そしてこのむしれを生じる時のせん断変形力が、 f_s に比べて小さいためにスティックスリップを起こすと考えられる。ところで、材料によってむしれを生じるものと生じないものとにわかれるが、これは材料の破壊ひずみが小さければダイ面ですべるよりも材料内部でせん断すべりを起こした方が変形に要するエネルギーが小さくて済み、破壊ひずみが大きければ、むしれを起こすよりも standing-wave を起こしてダイとの間ですべった方がエネルギーが小さいためであろう。

5 結 論

静水圧押しの際に発生するスティックスリップを防止するのを目的として、ダイ角度、押し比、素材、潤滑剤の影響について調べた結果次のことがわかった。

(1) 潤滑剤との反応性が悪い材料はスティックスリ

ップを起こし易いが、ダイとビレット間の温度が高くなると、ダイとビレット間の潤滑油膜が薄くなって大きなスティックスリップが起こるようになる。

(2) 静水圧押しにおけるスティックスリップは潤滑剤の影響が大きい。特にダイ角度が小さいと、くさび効果によって潤滑剤がダイとビレット間に入り込みやすくなり、スティックスリップが防止できる。

(3) 金属の組合せによる $\Delta\mu$ が無い材料でもバルジ変形を起こす場合は、材料の延性が乏しいと材料内で急激なせん断すべりが起こるので激しいスティックスリップが起こる。一方延性が充分ある材料は、standing-wave を生じて変形するので、スティックスリップは生じない。

終わりに、本実験をてつだっていただいた豊田工機、土屋幸治氏および三菱商事、古橋明広氏に謝意を表す。また、有益な助言をいただいた京都大学大矢根教授はじめ研究室の諸氏に感謝する。

(昭和46年1月29日 高圧を利用した塑性加工シンポジウムにて講演)

参 考 文 献

- 1) Pugh, H. L. D., and K. Ashcroft. "Symp. on the Physics and Chemistry of High Pressure", 163 (1963) Society of the Chemical Industry, London.
- 2) Fiorentino, R. J., *et al.*, Intern. Conf. Mfg. Technol., 941 (1967).
- 3) 松浦祐次他2名, 第21回 塑性加工連合講演会論文集, 219 (1970).
- 4) 西原正夫ほか4名, 同上, 231, 239.
- 5) Bowden, F. P., and D. Tabor, "The Friction and Lubrication of Solids. Part II", p. 78 (1964) Oxford at the Clarendon Press.
- 6) Rabinowicz, E., "Friction and Wear of Materials," p. 52 (1965) John Wiley and Sons, New York.
- 7) 工藤英明ほか3名, 機械学会誌, 67—542, 392 (1964).
- 8) Dudley, B. R., and H. W. Swift, Phil. Mag., 40, 849 (1949).
- 9) バウデン, テイパー, "固体の摩擦と潤滑", 曾田範宗訳, 第5章 (1961) 丸善
- 10) Avitzur, B., Trans. ASME, (B) 86, 305 (1964).
- 11) Pugh, H. L. D., NEL Report, No. 142, 24 (1964).
- 12) 工藤英明他2名, 塑性と加工, 6—56, 499 (1965).
- 13) Hill, S. J., Tupper, J. Iron and Steel. Inst., 159, 353 (1948).
- 14) Green, A. P., and R. Hill, J. Mech. Phys. Solids, 1, 31 (1952—53).