を求めたものである。この条件では F_h と H とは概略一直線上に分布し、 x 点における条件 I 以外はクーロムの法則に従っている。条件 II および I の μ_h の比は、 i 点すなわち静摩擦係数では約 2/1, x 点では平均して約 4/1, u 点では約 3/2 となっている。 μ_h が工程を通じて決して一定でないことはこの数字によってもきわめて顕著である。

以上を総合するに、板おさえ面における摩擦係数は加工を通じて変化するのみならず、その変化の様相が潤滑剤とおさえ力により変ずるものと考えなくてはならぬ。これは板おさえ面の下において、境界潤滑域における摩擦状態が加工中刻々変化して現われるためである。潤滑剤によってはこの性質が有利に展開され、工程の中間段階において、材料と板おさえの間の接触をほとんど全く断ち切ることも可能である。ちなみにこのような好条件は、本実験では粘度約 400 ストークスのモビールグリースにおいて得られたのであるが、この潤滑剤は従来慣用された潤滑剤の多くに比し

きわめて粘潤なるものである。

注:—

- (1) 昭和 25 年 10 月 22 日 第 511 回講演会並びに昭和 26 年 4 月 5 日 第 23 期定時総会講演会において講演、原稿受付昭和 27 年 4 月 1 日。
- (2) 正員、名古屋大学工学部。
- (3) Asimow, M., : Publication in Engineering, Univ. of California, Vol. 3, p. 235 (1936).
- (4) Fukui, S., : Sc. Papers of the I. P. C. R., Vol. 34, 1422, (1938), Vol. 35, 373 (1939).
- (5) 益田: 機械学会論文集, 8 巻 32 号, 1-121~136, (昭 17) 11 巻 41 号, 1-1~7 (昭 20).
- (6) Chung, S. Y., Swift, H. W. : Proceedings I. M. E., Applied Mechanics, Vol. 165, p. 199 (1951).
- (7) Hofman, W, Koelzer, H. : Werkst. u Masch. bau., Jg. 42, S. 88 (1952).
- (8) 菊池: 機械学会誌, 56 巻 409 号, 110 ページ (昭 28).
- (9) $T = F + BT + S$ と考える。
- (10) 注(6)によれば、 R_p における子午面応力 σ_{rp} を純絞り応力 σ_r , 板おさえおよびダイプロファイルにおける摩擦応力 σ_{fb} , σ_{fd} および曲げ応力 σ_b の和としている。
- (11) 中西: 機械学会誌, 33 巻 158 号, 325 ページ (昭 5).
- (12) 本グリースの規格は 山口, 潤滑剤及び潤滑法 154 および 330 ページ (昭 27) 参照。

621.983.3

深 絞 り に 関 す る 研 究

第 2 報 板おさえ面およびダイ面に生ずる摩擦抵抗⁽¹⁾

春日保男⁽²⁾

Research on Deep Drawing

(2nd Report, Friction of the Holder and the Die Surfaces)

by Yasuo KASUGA

Continued from last report, the character of friction of the holding surface is more fully examined, also the character of frictional resistance of the die surface as well as that of bending resistance of material over the drawing radius is discussed indirectly, and these are reported in this paper. The experimental works are carried out with tin plate blanks and steel die in conditions almost the same as in the preceding report.

結 言

前報に引き続き、板おさえ面の摩擦係数に及ぼす各種因子の影響を検討し、また、ダイ面において生ずる摩擦抵抗の性質につき間接に論及する。実験素材は厚さ約 0.3 mm, 直径 29 mm のすず引鋼板で、絞り率は 0.535, パンチおよびダイの丸味は共に 2 mm を標準とする。

1. 圧縮変形の存在と接触状態の変化の影響

材料が板おさえの下で圧縮変形(主絞り変形)を受

けることがおさえ面の摩擦係数にどの程度影響するか

(a)

(b)

第 1 図 切欠き素材

はきわめて興味ある問題の一つである。

ここでは、第1図aのごとき切欠きつき素材によってこの点を確かめた。この素材は外径 29 mm で、加工後は同図bのごとく側壁が形成され、その部分の材料は全く周方向の圧縮を受けない。

推定粘度約 400 ストックスなるモビールグリースを潤滑剤として与えた場合、(潤滑条件 I) および無潤滑(潤滑条件 II)において得られた本素材による実験記録の一例を第2図に示し、異なる板おさえ力に対して得られたおさえ面の摩擦係数

(a)

(b)

第 4 図

← 進行方向

潤滑条件 I

←

潤滑条件 II

第 2 図

第 3 図

μ_h の傾向を第3図に示す。この μ_h の傾向は既に得られた切欠き無き素材のそれにきわめて近似し、ただ、工程の長さが短縮され μ_h の値が全般的にやや高まっているのみである。この程度の差異は、材料の半径方向の流れが無いことと、切欠きを入れた、そのことのために現実の当り並びに潤滑状態が当然変化することを思えば予期できぬことではない。

ゆえに、この場合には、摩擦面で材料に圧縮変形が伴うか否かは摩擦に対して本質的な影響をもたぬものようである。

次に、材料と板おさえ面の接触状態の変化は、前報の表面状態の検査によって一応確認されたのであるが無潤滑(条件 II)の場合の μ_h の加工中の変化が、接触状態によっていかに影響されているかは未だ十分に検討されていない

もし、材料と板おさえの接触状態が加工中ほとんど変らぬような実験を行って摩擦抵抗を測定し得れば、その結果と既に得られている結果とを比較して、条件 II における μ_h の意義を確かめ得はしないであろうか。この見地より、ダイの平面部を削り込んで逃がし、角隅のみ丸味半径 2 mm のビードを残した工具(第4図a参照)によって切欠き素材を絞って見た。この場合には、板おさえの当りは事実上ビードの頂部のみで生じ、

その箇所には加工を通じて新しい素材部分が次々に接触するから、接触状態はほぼ一定に保たれるはずである。第4図bはそのときの μ_h の傾向を示すものであるが、おさえ力を問わず μ_h 曲線の主要部はほとんど一定の高さを保ち、境界摩擦の特性と見られるものが表われている。ただ、条件 II の場合には加工末に近く μ_h の値の著しい低下が見られる。この低下は切欠き素材の外周部の影響の現われと見られ、材料の直径に限りがあるために、ある程度以上に絞ってくると事実上接触状態の変化が生ずることを物語っている。この時期における μ_h の値の変化はあたかも第3図の曲線 II において、 i より u に至る μ_h の変化に等しい。これより察するに、条件 II において i 点以後 μ_h が漸減するのは全く接触状態の変化に起因し、ことに材料の周辺部の影響によるもののようである。加工を通じて、周辺部が常に強い当りを示すことは既に明らかなことであるが、そのために、加工の進行と共に該接触部は微視的加工を受け、まず、すずの層が引き搔かれてすずの粒子が遊離し、固体間の減摩の働きを示す一方、生地表面は幾分バーニシされる傾向をもつことがこの無潤滑摩擦に優勢な支配力をもつのではなかろうか。

2. スピンドル油による実験

モビールグリースの粘度は、慣用される潤滑剤に比

しきわめて高く、高圧潤滑性能も比較的よい。比較のために、低粘度でかつ油性にも乏しいスピンドル油を潤滑剤とした場合の実験記録の一例を第5図に示し、*

*主要測定値を第1表に、 μ_h 曲線を第6図に示す。ただし、実験室温におけるスピンドル油の粘度は約 90 センチストークスである。

← 進 向 方 行
第5図(a) スピンドル油

←
第5図(b) スピンドル油

第1表 (第5図附表)

図番	H_x kg	P_x kg	$F_{hx'}$ kg	F_{hx} kg	μ_{hx}
5-a	156	527	10.4	32.6	0.208
5-b	265	552	14.7	46.1	0.174

素材 すず引鋼板 $t_0=0.29$ mm $D_0=29.0$ mm
 $m=0.535$ 潤滑剤 スピンドル油

第 6 図

μ_h の傾向はモビールグリースに対して求めたものと異なることはもちろん、条件 I, II の中間に納まるものとも見えない(前報第9図参照)。しかし、これまでの実験結果を参酌すれば、この μ_h の傾向の意義は次のように解釈できるのである。

i 点で、板おさえと材料の相対すべりが始めて大きく生じ、その後ごくわずかに粘性潤滑の影響が現われるかに見えるが、 μ_h は直ちに極小点に達し、その後かなり著しく増加し、あたかも P が最高値となる x 点附近で最高値に達している。この μ_h の上昇経過は潤滑剤の効果が消滅している時期を示す。一方、 μ_h 曲線は i 点近傍を除けば、大局的に板おさえ力に関せず一致し、あたかもその最高値 (x 点附近) は条件 II の場合の i 点における値に一致している。ゆえに、スピンドル油を用いた場合、 x 点近傍では、無潤滑の場合の i 点近傍に類似した摩擦状態となっているものと見られ、スピンドル油の xu 間は無潤滑の iu 間に対

応するものと考えられる。この時期には油の影響はほとんど全く認められないのである。このように解釈すれば、スピンドル油の場合も両極端の潤滑条件 I, II から演繹できる一つの特別の場合に過ぎず、潤滑剤が違ったために前実験結果と全く無縁な傾向が現われたものでは決してないことがわかる。

この油においては一種の偶然ではあるが、 P が最大となる時期と、 μ_h が最大となる時期がほとんど一致し、潤滑剤によって P の最大値を低下させるためにはきわめて不利となっている。

3. 潤滑条件と最大絞り力

加工中における P の最大値 P_x とその時期における H の値 H_x の関係を見れば μ_h の差が P にいかに影響するかを間接に知ることができる。第7図は潤滑条件を変えた場合のそれを求めたものである。 H_x が大となれば、条件 I, II の P_x の差は約 20% に達し、しわ発生の限界おさえ力においても約 10% の差が生じている。スピンドル油に対する直線 III はむしろ II より高まっていることがわかる。時期 x における抵抗軽減を目標とする限りこの油はきわめて不都合なものと言わねばならぬ。潤滑剤が最大絞り力の軽減に効果をもつためには、工程の中間段階において μ_h の値ができるだけ低い値を保つことが必要で、少くも潤滑剤の粘度がごく高いことを要するもののようである。なお、粘度のみがすべてを解決するものか否かについては別の機会に触れる。

第7図 最大絞り力

第8図 素材直径の影響

第2表 素材直径の影響

潤滑条件	D_0 mm	H_x kg	P_x kg	F_{hx}' kg	F_{hx} kg	μ_{hx}
I (モグビールス)	28	231	448	7.8	24.5	0.106
	26	229	414	4.7	14.7	0.064
	24	234	327	7.2	22.6	0.097
	22	224	207	7.0	22.0	0.098
II (無)	28	222	528	13.4	42.1	0.190
	26	227	457	11.7	36.7	0.162
	24	233	370	11.7	36.7	0.158
	22	219	224	8.9	27.9	0.127

素材 すず引鋼板 $t_0=0.28$ mm

4. 板おさえ面の摩擦抵抗に及ぼす 素材直径の影響

標準工具により、厚さ 0.28 mm、直径 22, 24, 26, 28 mm の 4 種類の素材を一定のおさえ力において絞った場合の記録例を第 8 図、 μ_h 曲線を第 9 図、主要値を第 2 表に示す。

この場合、潤滑条件は前述 I および II で、素材直径 D_0 と、 P_x に対応する μ_h の値 μ_{hx} との間には第 10 図のごとき関係を認め得る。 D_0 が 29 mm より大なる場合には、条件 I, II 共におよそ 29 mm におけ

第 9 図

る値が当てはまるものと推定される。

本実験のごとく、直径 16 mm のダイのみによって行われた結果によって、摩擦抵抗 F_h に影響する素材の寸法効果について一般的に論ずることは困難であるが、この結果は寸法効果に影響する要素の因子を把握する緒となり得るものであろう⁽³⁾。

なお、実作業では、本実験のごとく絞り率を変化すれば、当然、限界板おさえ力も変化するの、素材直

径が異なった場合に最小限伴うべき摩擦抵抗 F_{hx} をこの μ_{hx} の値のみから推定することは早計である。 D_0 が 29 mm から 22 mm に減ずれば、限界板お

さえ力は約 150 kg から約 50 kg まで減ずる。ゆえに板おさえ面でやむをえず伴う摩擦抵抗は、条件 I においては、限界おさえ力の差異と、 μ_{hx} の差異が互に打消し合うため、 D_0 が異なっても余り大きな差は現われないが、条件 II においてはこれらの差異が互に重り合って比較的大なる差を示す可能性がある。後者の場合にはいうまでもなく D_0 が大なるほど摩擦抵抗が大となる。

5. 板おさえ面の摩擦抵抗に及ぼす ダイ角隅の丸みの影響

$D_0=29$ mm の素材を 16 mm のダイで絞る場合にダイの角隅の丸み半径 r_d を 1 mm および 3 mm に変更し、同じおさえ力のもとにおける r_d の F_h に及ぼす影響を検討した。 μ_h の傾向を比較すると第 11 図のごとく、主要測定値を第 3 表に示す。本実験例からは確定的な結論を述べ得ないが、おさえ力が働く有効工程の長さ P の最大値の現われる時期の相対関係

第 11 図

第 3 表 ダイ丸味の影響

条件	r_d mm	P_x kg	H_x kg	$F_{hx'}$ kg	F_{hx} kg	μ_{hx}
I	1	520	297	5.3	16.6	0.056
	3	482	337	9.1	28.6	0.084
II	1	588	276	18.0	56.5	0.205
	3	570	297	16.9	53.1	0.179

素材 すず引鋼板 $t_0=0.28$ mm $D_0=29.0$ mm
 $m=0.535$

第 10 図

から察するに、条件 I では、 r_d が大なるほど μ_{hx} が原則的に大なるべきものと認められる。

この場合にも、 r_d が変れば、 H の最小限界値は変ずべきであり、この結果のみから F_{hx} と r_d の一般的相関を求めるのは無理である。ただ、 r_d を変更しても、 D_0 を変更しても板おさえ力の負担に関与するおさえ面積が変化するため、このことが、その潤滑状態に直接影響をもつことは疑いないことである。

6. ダイ面における摩擦抵抗の実験的推定

H. W. Swift⁽⁴⁾ は近年、ダイ角隅部の応力平衡式からここに生ずる摩擦に起因する附加応力の表示を求めた。計算実施はやや煩雑であるが、これによって、ともかくダイ角隅の摩擦抵抗相当値が計算可能となった。しかし、結果を実験的に裏づける点はなお十分と言えない。

本研究においては、 P , H , F_h を同時に測定したために、関節ではあるがダイ面側の摩擦抵抗 F_d を実験的に検討することができた。

第 12 図

まず、潤滑条件を変えることにより F_d がどうなる影響を検討すると、結果は第 12 図のごとくなる。図は最大絞り力点 x における P と F_h の値すなわち P_x および F_{hx} の関係を H を変更せる実験から求めたものであるが、条件 I, II は前述同様、I' および II' はそれぞれ板おさえ面側およびダイ角隅部のみをごく粘潤なモビールグリースで潤滑した場合に対応する。 x における絞り深さが十分深い場合には、同じ F_{hx} の値に対応する各潤滑条件の P_x の差は他の要素が著しく変じない限り主に F_{dx} の値の差を反映しているものと見られる。

I と I' の差はダイ面が潤滑されると否とによる F_{dx} の差を表わし、おおむね 30 ないし 35 kg である。

II と II' の差はダイ角隅部が潤滑されると否とによる F_{dx} の差で、これは約 20 kg である。

この数字より見るに、潤滑されると否とによる F_{dx} の差は F_{hx} の場合に見られたほど著しいものではな

い。よって、ダイ側では、板おさえ力の影響が著しく現われず、潤滑剤の効果も板おさえ面側ほど大きく現われ得ないものようである。

さて、切欠き素材によれば、絞りけん引力 T の中から材料の圧縮に要するけん引力 S を除外せる量を近似的に測定することができる。この測定量 T' が F_h および F_d と曲げ抵抗 B_T の和と考えると、 $T' - F_h = F_d + B_T$ により、ダイ側の摩擦抵抗と曲げ抵抗の和を近似的に求めることも可能となる。

F_d はダイの表面に分布する法圧に依存して定まるものであるが、この法圧を実験的に知ることは困難であるから、ここでは測定可能な力としてダイに加わる垂直力 $P+H$ を取り、 F_d が近似的に $P+H$ に依存しているものと見なした。また、 B_T がそれらと別個に独立に定まるべき値と考えると、 $F_d + B_T$ と $P+H$ の相関から F_d と B_T とを近似的に分離する可能性が次のように生じてくるのである。

たとえば、潤滑条件 I および II に対し、 H を 4 段階に変更して切欠き素材を絞り、加工開始後一定時刻における $F_d + B_T$ と $P+H$ の相関を求めると第 13 図のごとくなる。図は 4 秒、7 秒、10 秒における一例である。

第 13 図

$P+H=0$ ならば $F_d=0$ で、 B_T は潤滑条件に無関係なることを考慮すれば、 $B_T + F_d$ と $P+H$ の間には近似的に図のごとき直線関係を認めることができる。これより、 F_d がほぼ $P+H$ に比例するものと考えられ、この比例定数は摩擦係数に類似した値となるから、ここではこれを仮にダイ面の相当摩擦係数と称び μ_{de} をもって表わすことにする。図の直線のこう配が μ_{de} で、これは加工の段階により異なっている。

B_T は当然 $P+H=0$ における $F_d + B_T$ の値となるから、 $F_d + B_T$ 直線と縦座標軸の交点の高さによって与えられるのである。

以上の操作により、加工を通じて μ_{de} および B_T を求めた一例を第 14 図に示す。図は切欠き素材に対する値で、比較のために同素材における μ_h の平均的傾向を示す。 μ_{de} は単に便宜上近似的に得られた比例定数で、これを摩擦係数と直接比較したり、その物理的意義を詳論するのは無理であるが、条件 I の μ_{de} は

第 14 図

同じ条件の μ_h より概して大なるものようである。ゆえに、ダイ面側ではごく粘潤滑剤を用いても板おさえ側で得られたほど良好な潤滑状態には達し得ないものと考えられる。ダイ側において板おさえ側ほど潤滑効果を上げ得ないことはすでに本節の初めに推定された。

第 15 図 ○印 条件 I, △印 条件 II

ただし第 1 節で触れたごとく切欠き素材による実験においては摩擦係数が実素材におけるより高く現われる可能性がある。切欠き素材から形成される容器側壁は多角嚙面をなすから、ダイ角隅部に対する材料の当りは実加工とかなり異なり μ_{de} も相当に異なる懸念が生ずる。いま切欠きの深さを故意に浅くして、少くもダイ角隅部では周方向の圧縮加工を行わしめ、角隅部における材料の当りを実加工に近似させた場合の実験結果と、十分切欠きの深い素材によるそれとを比較すれば第 15 図のごとくなる。図は一例として、全工程の 40% の点における $F_d + B_T$ と $P+H$ の関係を示すもので、 a は十分に切欠きの深いもの、 b は切欠きの浅いものである。

文字に x を附したのは 40% の点を x 相当点と見なしたためである⁽⁵⁾。両条件共に b の場合の方が直線のこう配が小さく、実加工においては切欠き素材の場合より μ_{de} が低いことが容易に推察される。かりに、この b の場合の μ_{de} によって、潤滑条件による F_d の差が P_x にもたらす影響を概算してみると、第 4 表のごとく両条件による F_{dx} の差は $H=300$ kg におい

て約 34 kg となり、本節初頭の推定といささかも矛盾しないのである。

第 4 表

条件	μ_{de}	H_x kg	P_x kg	$P_x + H_x$ kg	$F_{dx} = \mu_{de}$ ($P_x + H_x$) kg
I	0.099	300	480	780	77.2
II	0.126	300	580	880	111.0

$$F_{dxiI} - F_{dxiI} = 33.8 \text{ kg}$$

注:一

- (1) 昭和 26 年 11 月 5 日 第 524 回講演会において講演, 原稿受付 昭和 27 年 4 月 1 日。
- (2) 正員, 名古屋大学工学部。
- (3) 深絞りにおける寸法効果の一般論としては福井, 吉田両氏の研究がある。福井, 竹山, 吉田, 阿部: 機械学会誌, 55 巻 405 号 640 ページ(昭 27) 参照。
- (4) Chung, S. Y., Swift, H. W.: Proceedings I. M. E., Applied Mechanics, Vol. 165, p. 199(1951)
- (5) 切欠きなき素材においては x 点は全絞り行程の約 40% の点に存する。

621.983.3

深 絞 り に 関 す る 研 究

第 3 報 加工抵抗の構成⁽¹⁾

春日保男⁽²⁾

Research on Deep Drawing

(3rd Report, Composition of the Working Resistance)

by Yasuo KASUGA

Assuming that the drawing resistance consists of a few component forces i. e. the pure drawing force, the frictional force and the bending force, amount of each component is determined for experimental works and reported in this paper.

緒 言

前報において、深絞り加工抵抗を要素抵抗に分析考察する可能性を明らかにした。本報では各要素抵抗の加工抵抗への影響程度を明らかにする。実験条件はすべて前報と同じである。

1. 曲げ抵抗

深絞りに伴う曲げ抵抗は、実験的にはやや古く、M. Sommer, C. L. Eksergian 氏等により取扱われているが、いずれも、深絞り現象の一部を説明するものとしては不十分である。一方、H. W. Swift⁽³⁾, R. Hill⁽⁴⁾ 氏等は最近、ダイの角隅部における材料のごとく張力を受けながら曲げられる場合の仕事量から張力を求める理論を発表し、曲げ抵抗が加工抵抗の一要素として改めて注目され始めた。

本研究においては、曲げ抵抗と考

うべき要素抵抗が実験的に工程を通じて抽出されたのであるが(前報第 6 節参照)、結果を再掲すれば第 1 図のごとくである。本結果は切欠き素材によって求めたものであるが、これによって実際の加工における曲げ抵抗の加工中の変化の概略を推察することができる。

加工初期において高い値をとるのは、絞り深さが浅いために、材料がダイの丸味に接する弧の中心角が小さく、したがって、曲げモーメントを与えるアームが短かく、一定の曲げ加工を行うのに比較的大きな張力を必要とすることを物語るものであろう。また、工程の半ば以後においてほとんど一定値となるのは、絞り深さが十分深くなって、曲げ加工条件がほとんど変化しなくなるためであらう。工程の終末期に急に減ずるのは、曲げ加工のために張力が不必要となるためである。

切欠き素材によって求めた近似曲げ抵抗 B_T の値は切欠きが存するために、曲げられる材料の量が実加工に比し不足すること、圧縮変形に伴う材料のひずみ硬化および厚さの変化の影響が考慮の外に置かれている。ゆえに、この近似値は実際より過小に見積られている可能性が大きい。切欠きのための材料不足の程度は切欠きの深さによって異なるが、曲げ加工がダイの丸味の入口(半径 $R_2 = R_1' + r_d$)で行われ、材料がダ

第 1 図