

液圧押出しによる金属加工とその応用

Hydrostatic Extrusion and its Application to Metal Working

With the progress of high pressure technology, hydrostatic extrusion, in which contact between billet and container is precluded and friction on the die surface is minimized, is attracting attention of all the concerned as a new metal working method. Compared with conventional methods it has many features. To mention a few, it can be applied over a wide range of working both in cold and warm processing, and permits extrusion of clad materials and other difficult-to-work materials. The article describes its principle, characteristics in comparison with those of conventional ones, some of its application, etc.

エールシュレーゲ*
ル・ディートリッヒ

Dietrich Oelschlägel

参 木 貞 彦**

Sadahiko Mitsugi

山 路 賢 吉***

Kenkichi Yamaji

1 緒 言

周知のように押出しとは、所定形状のダイス孔から金属ビレットを排出することによって、棒、管および各種形状材を製造する加工方法である。従来押出し法では、必要な圧力は移動するステムによって、直接ビレット後端に加えられる。一方、液圧押出しでは、コンテナ内のビレットは液状の圧力媒体で包まれており、この媒体がステムで圧縮され、その結果ビレットに圧力が伝達される。

この液圧押出し法が、工業化されたのは、ごく最近であるが、その基本的な考え方は、すでに1893年（明治26年）J. Robertsonにより特許化されている。しかしながら当時は適当な高压技術がなかったため、その着想を実現することができなかった。その後これらの技術は、おもにP.W.Bridgmanによって開発された。彼は、1935年（昭和10年）に50kb(1kb $\approx$ 1kg/cm²)までの圧力を得ることに成功したのみならず高压下における材料の性質に関し、広範囲にわたる研究を行なった⁽¹⁾。加工手段としての液圧押出しの開発に関する研究は、1957年（昭和32年）以来、ソ連のB.I. BeresnevおよびL.F. Vereshchagin⁽²⁾、イギリスのNational Engineering LaboratoriesのH.L.I.D. Pughら⁽³⁾によって精力的に行なわれた。またアメリカのBattelle Memorial InstituteのR.J. Fiorentino

ら⁽⁴⁾によっても重要な開発研究が行なわれている。これら初期の研究に端を発し、その後この分野の研究は世界中に広まり、多くの研究室がこれに携わっている。初期の実験は、力量の小さい装置で行なわれたため、押出し比も低い値に限定されたが、最近では力量4,000t、圧力16kbのプレスが利用できるようになり、この新しい加工方法の工業的な応用が具体化するに至った。表1は、最近におけるおもな液圧押出し機の設置状況を示すものである。

2 従来押出し法と液圧押出し法の比較

従来押出し法に対する液圧押出し法の長所は、次の2点から導かれる。第1点は、静水圧下で被加工材の性質が変化することにある。特に脆(ぜい)性材料では、延性の増加とあ

表1 液圧押出し機の設置状況 近年、大形化への開発が進み、力量4,000t圧力、16kbの生産用押出し機の利用が可能となった。

Table 1 Main Hydrostatic Extrusion Presses in Current Use

公表時期 (西暦年)	設 置 場 所	国 名	押出し力 (t)	目 的	押出し機 メーカー
1965	ASEA	スウェーデン	1,200	実験用	ASEA
1968	UKAEA	イギリス	1,600	"	Fielding and Platt
1969	BNFMRA	"	1,250	"	ASEA
1971	株式会社神戸製鋼所	日 本	500	"	株式会社 神戸製鋼所
1972	ASEA	スウェーデン	4,000	生産用	ASEA
"	日立電線株式会社	日 本	"	"	"

注：ASEA = Allmänna Svenska Elektriska Aktiebolaget
UKAEA = United Kingdom Atomic Energy Authority
BNFMRA = The British Non-Ferrous Metals Research Association

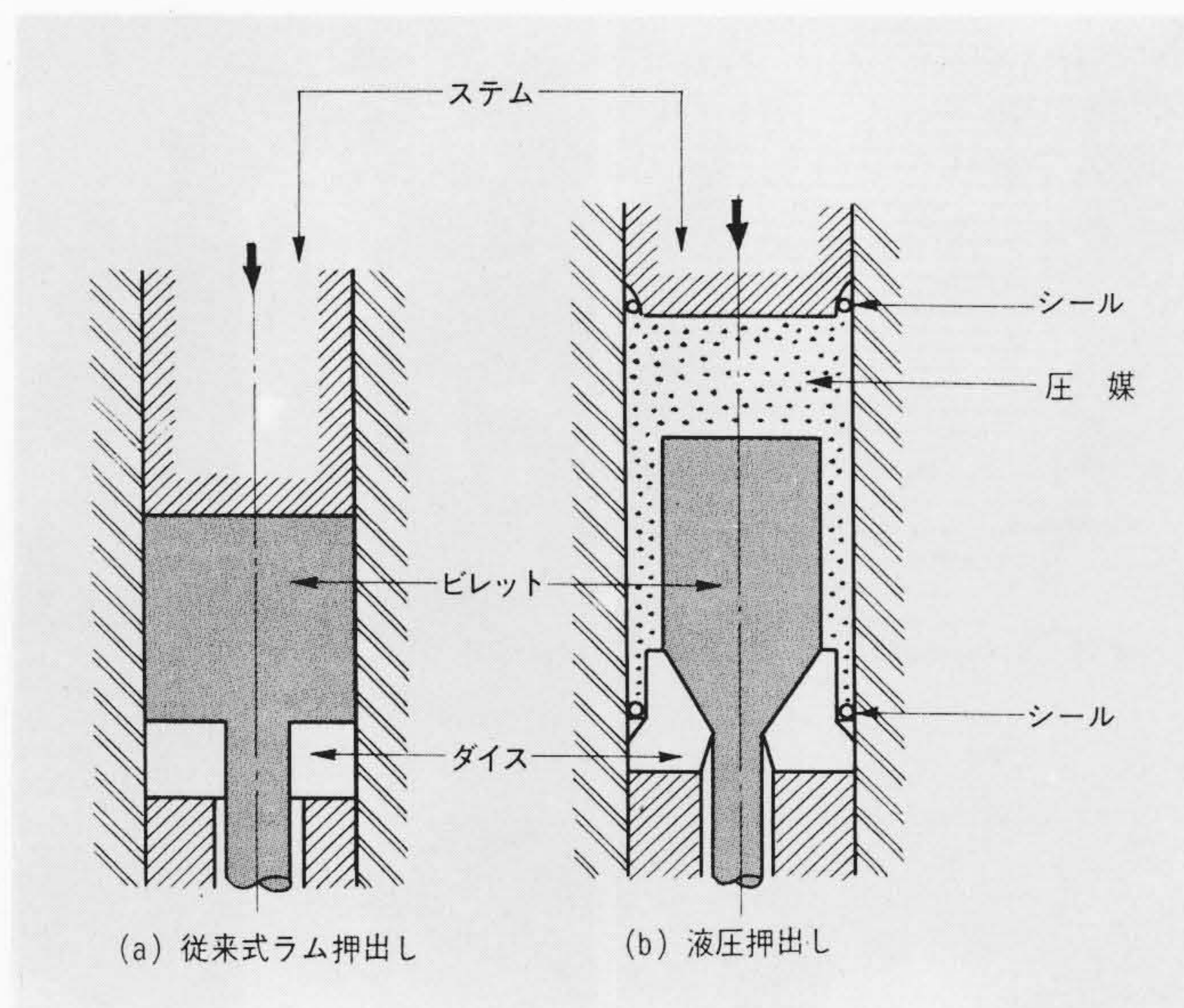


図1 従来式ラム押出しと液圧押出しの加工原理 従来式押出し法では、ビレットはコンテナの器壁およびステムと接触し、大きな摩擦を生ずるが、液圧押出しでは、ビレットは圧媒に包まれ、これら工具との摩擦はない。
Fig. 1 Schematic Diagram of Conventional and Hydrostatic Extrusion Processes

* 日立電線株式会社研究所 理学博士 ** 日立電線株式会社研究所 *** 日立電線株式会社研究所 工学博士

いまって、内部き裂の発生が抑制され健全な押し出しが可能となる⁽³⁾。第2の点は、押し出しの機構が変化することにある。すなわち、潤滑が改善され、材料の流れが均一化する。

図1は、従来押し出し法ならびに液圧押し出し法の原理を示したものである。従来押し出し法では、ピレットは、降伏強度を下げたため、加熱した状態でコンテナに装入する。ステムの前進とともにピレットは圧縮され、コンテナ内に充填した後ダイス孔から押し出される。この際、コンテナの器壁とピレットの間に大きな摩擦が発生し、押し出し圧力および材料の流れに影響する。一方、液圧押し出しでは、圧力媒体がピレットを包んでいるため、この摩擦は完全に消失する。また流体中に発生する圧力により、ピレットは、ダイス孔付近を除いて静水圧の応力状態となるが、ダイス孔付近では、応力系が不均衡となりピレットの降伏強度を越え、その結果ダイス（ピレットにより圧媒をシールするため、円すいダイスを使用する）を通じて塑性変形が起こる。さらにピレットの移動によりダイス内に圧媒が引き込まれ、良好な潤滑状態が生まれるが、これは従来押し出し法には見られなかった事実である。

以上のような基本的な特長から、液圧押し出しのすべての特性を導き出すことができる。

2.1 所要押し出し圧の低下

従来押し出し法では、押し出し力の50%までが、ピレット/コンテナ間の摩擦に費やされるため、ピレットの長さは事実上直径の3倍に限定される。一方、液圧押し出しではコンテナ摩擦が存在しないため、押し出し力はピレットの長さに関係なく常に一定である。

たとえば液圧押し出しにおいて、通常使用するピレット径に対する長さの比 $l/d=8$ の場合、従来押し出しでは、液圧押し出しの約3倍の圧力を必要とする。これは4,000tの液圧押し出し機は、従来押し出し機の約12,000tに相当する能力を有することを意味している。

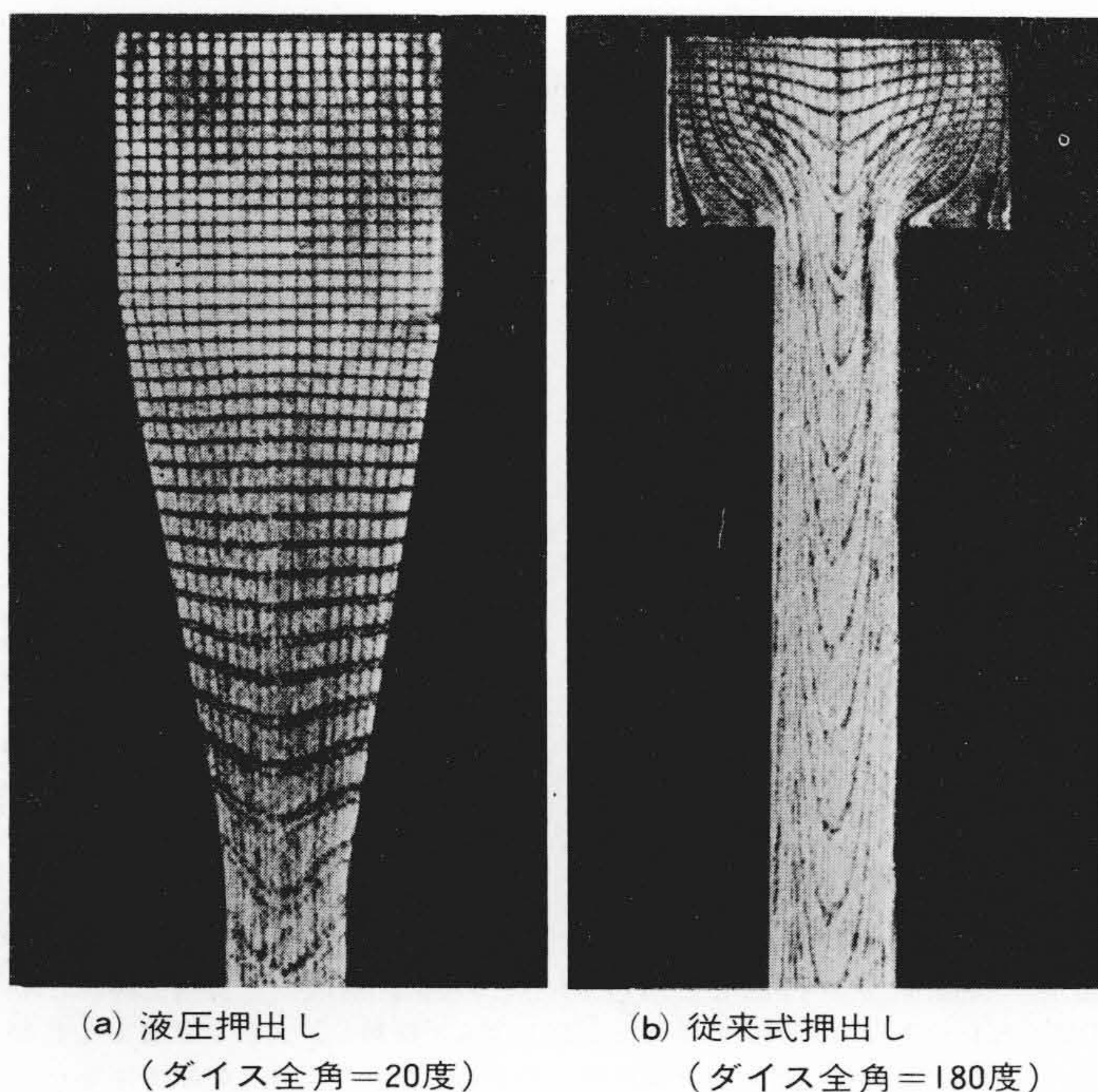


図2 液圧押し出しおよび従来式押し出しにおけるフロー・パターン⁽²⁾ 液圧押し出しでは、コンテナ摩擦がなく、またダイス潤滑が良好なため、ピレットの内外部が同じ比率で均一に変形する。

Fig. 2 Deformation Patterns in 99.5% Aluminum Extruded by Conventional and Hydrostatic Extrusion⁽³⁾

2.2 材料の流れの均一化

図2は、従来押し出しおよび液圧押し出しにおけるダイス内金属のフロー・パターンを示したものである⁽³⁾。熱間押し出しでは、180度ダイスを使用するため、変形領域において工具との摩擦に起因する強い剪(せん)断と不均一なフローが発生する。またダイス隅(すみ)では、材料の静止領域(デッドメタル・ゾーン)が生ずるため、ダイスおよびベアリング表面の潤滑が阻害される。この種の現象はたとえ円すいダイスを使用した場合においても、従来押し出しでは存在するものである。しかしながら、液圧押し出しでは、ピレットの内外部が同じ比率で均一に変形する。このことは次に述べるような液圧押し出しの重要な性質に関係している。すなわち、

- (1) 心材と被覆材が、互いに均一に変形するので、複合ピレットから複合材を製造することができる。
- (2) 薄肉製品および寸法変化の大きい製品を製造することができる。
- (3) 押し出し材の機械的性質が、断面内で均一である。

2.3 押し出し比が増加

液圧押し出しでは、印加された圧力はほとんど材料の変形に費やされる。したがって従来の熱間押し出しと比較すると、低い温度においても十分高い押し出し比を得ることができる。図3に示すように、所定の押し出し圧に対して材料のかたさと可能な押し出し比との間には一定の関係がある。たとえば、圧力を14kbとした場合、アルミニウムのような軟質材料では、500以上の押し出し比が可能であり、また鋼のような硬質材料においても断面減少率で70%以上の押し出しが可能である。低い温度で、このように高い押し出し比が可能であることから、次のような利点が生まれる。すなわち、

- (1) 熱間圧延や引抜きにみられるいくつかの加工段階を一つの作業に集約することができる。
- (2) 冷間加工材と同等の表面仕上げ、寸法許容差が得られる。

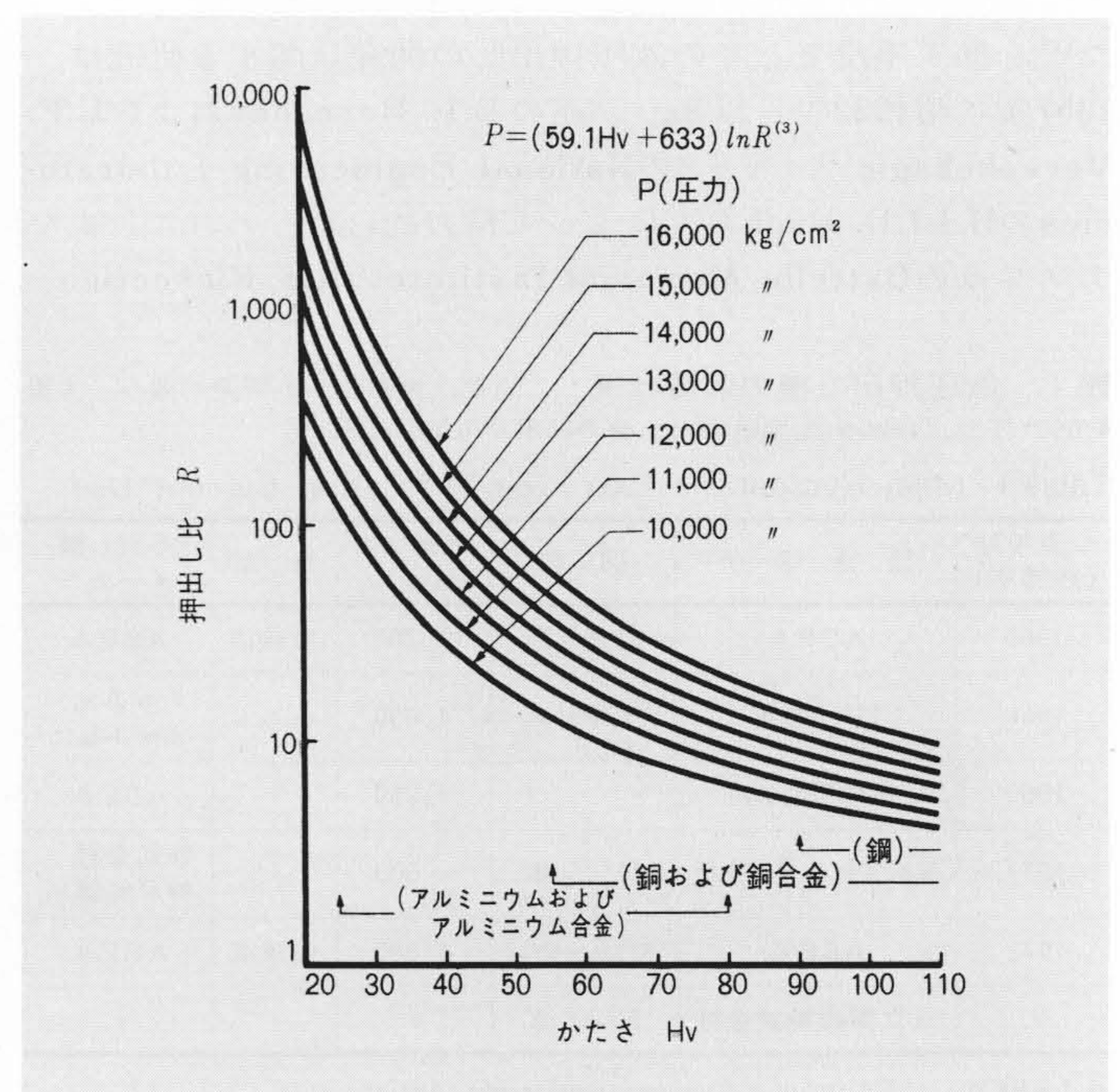


図3 液圧押し出しにおける材料かたさと押し出し比の関係 従来の熱間押し出しと比較し、低い温度においても十分高い押し出し比を得ることができる。

Fig. 3 Relationship between Billet Hardness and Extrusion Ratio for Different Extrusion Pressures

(3) 従来押し出し材、たとえば、二、三の高力アルミニウム合金でみられる高温脆性が避けられる。したがって、この種の合金も高速かつ大きな押し出し比で押し出すことができる。

(4) 再結晶温度以下においても、非常に大きな塑性変形が可能であり、押し出し材の機械的性質が改善される。このことは、特に時効硬化性合金に顕著な影響を及ぼすものと考えられる。

2.4 効率のよい押し出し作業

従来押し出しに比較して、液圧押し出しは材料損失が少なく効率がよい。すなわち、長尺ビレットを使用できるので、1サイクルあたりの加工量が増加し屑(くず)が減少する。またコンテナ摩擦がないので、従来押し出しの端末にみられるパイプ状の押し出し欠陥がなくなる。この「パイピング」によりビレットの約20%が損失する。

3 液圧押し出しにおける変形機構⁽³⁾

3.1 押し出し圧

ある製品が製造可能か否かは、ビレットを所定の断面形状に減面するための圧力が決定的要因となる。図4は、液圧押し出しにおける典型的な圧力ストローク線図を示すものである。すなわち、押し出しはある一定の圧力(P_{max})で始まり、その後それより低い圧力($P_{stationary}$)で進行する。 $P_{stationary}$ は、材料を変形させるに要する圧力を示し、一方、押し出し開始圧力 P_{max} が、 $P_{stationary}$ より高いのは、移動するビレットがダイス内に流体を引き込み、良好な潤滑状態を得るための余剰仕事ならびに静摩擦から動摩擦に移行するための仕事に原因している。なお P_{max} はビレット先端に新たに潤滑剤を塗布したり、ノーズ形状を適切にすることによって低下させることができる。

液圧押し出しの別の特徴として、スティック・スリップと呼ぶ現象がある。これは、図4(b)に示すように押し出し中に圧力が変化することをさすもので、ビレットが急速に押し出された場合、ステムの移動がおそく、ビレット排出に伴う体積変化を補償できずコンテナ圧が低下するものである。一般にこの種の原因によるスティック・スリップは、圧力の変化が規則的であるが、別の形式のスティック・スリップとしてダイスへのビレットの焼付きに起因するものがある。この場合、押し出し圧は急激に上昇し不規則な変化を示す。これはダイス潤滑が不十分であることを意味するものであり、安定な潤滑膜が、ビレットとダイスを分離するように、押し出し要因を変化させることによって避けることができる。

3.2 定常押し出し圧の計算

一定の押し出し条件のもとで材料の押し出しに必要な圧力は、理論的に次の三つの部分から成る。

P_D =材料が、加工硬化しないものと仮定した場合、ビレット断面を均一変形により減面するための応力、

$$P_D = \int_0^{\ln R} \sigma d\epsilon = \sigma \ln R \quad \text{.....(1)}$$

ここに、 R : 押し出し比 = $\frac{\text{ビレット断面積}}{\text{押し出し材断面積}}$

σ : 降伏応力

ϵ : ひずみ

P_R =円すいダイスの入口および出口において、材料の流れ方向を変えるための応力この流れ方向の変化に要する剪断量は、ダイス角に関係し、Pughは次式で実験データがよく表わせることを示した。

$$P_R = 0.924 \sigma [\alpha / \sin^2 \alpha - \cot \alpha] \quad \text{.....(2)}$$

ここに、 σ : 降伏応力

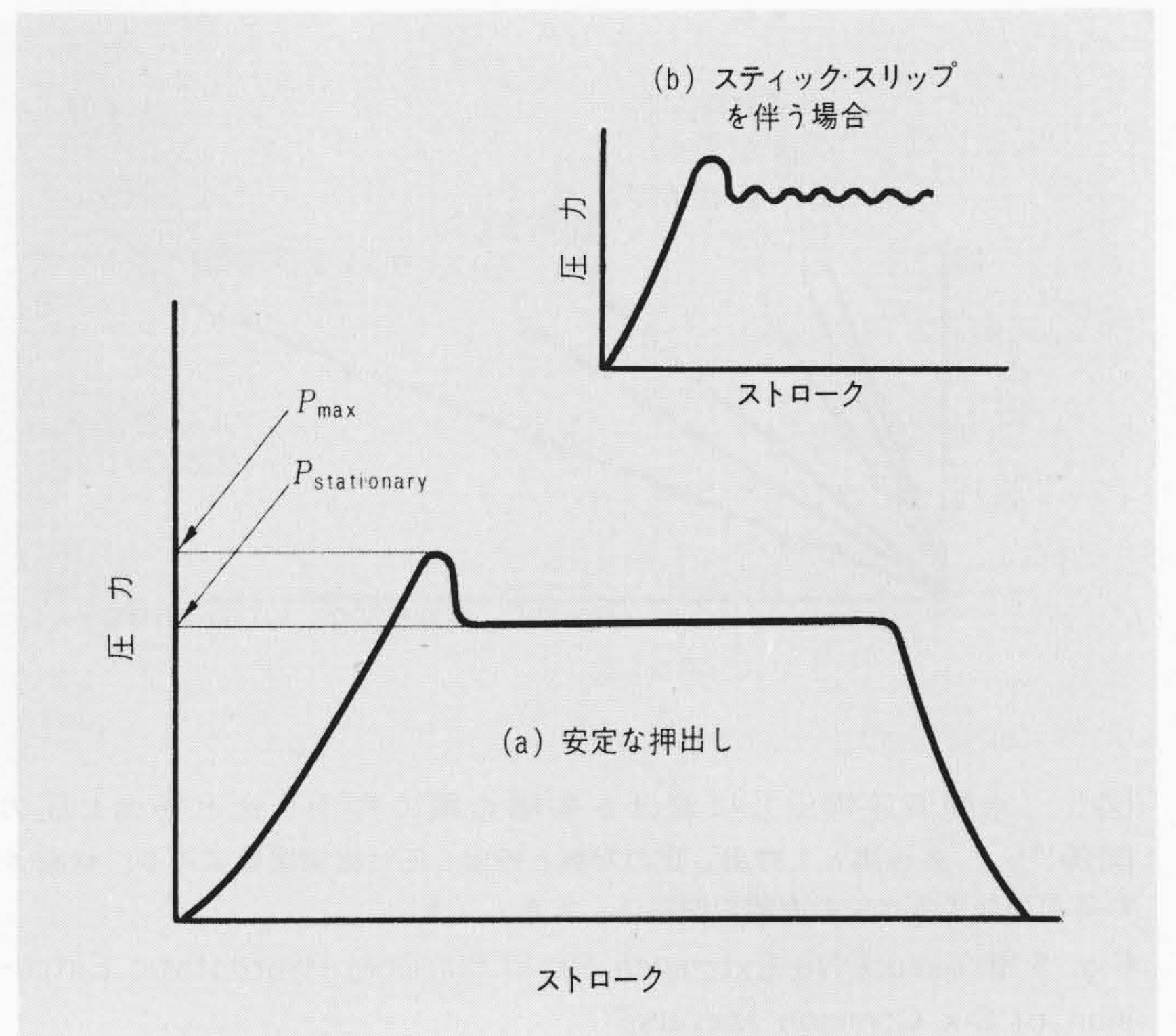


図4 液圧押し出しにおけるストローク・圧力線図 押し出しは、ある一定の圧力(P_{max})で開始し、その後それより低い圧力($P_{stationary}$)で進行する。なお、押し出し条件によっては、スティック・スリップと呼ぶ押し出し圧の変動がある。

Fig. 4 (a) Typical Pressure-Stroke Curve for Hydrostatic Extrusion (b) Pressure-Stroke Curve Showing Stick-Slip Behaviour

α : ダイス半角

P_F =ビレット/ダイス界面の摩擦に起因する応力ダイスの潤滑状態に関し、仮定を含むためこの項の大きさを評価することは困難であるが、摩擦は小さいものとする、

$$P_F = \left[\frac{\mu R \ln R}{\sin \alpha (R-1)} \right] \sigma \ln R \quad \text{.....(3)}$$

で表わすことができる。

したがって、理論的な全押し出し圧は次式によって与えられる。

$$P = P_D + P_R + P_F = \sigma [\ln R + 0.924 (\alpha / \sin^2 \alpha - \cot \alpha) + \frac{\mu R \ln R}{(R-1) \sin \alpha} \ln R] \quad \text{.....(4)}$$

ここで、摩擦がないものとする($\mu=0$)、(4)式は、周知の一般式に書き替えることができる。すなわち、

$$P = a (\ln R + n) \quad \text{.....(5)}$$

ここに、 a, n : 定数

4 液圧押し出しの応用

4.1 単体材料の押し出し

(1) 線および棒状体

線および棒状体については、すでに数多くの押し出し実験が行なわれているが、図5は、二、三の代表的な材料の押し出し比と押し出し圧の関係を示すものである⁽⁶⁾。押し出し比の対数と押し出し圧は直線関係にあり、材料かたさが増すにつれ、直線の傾斜は大きくなる。

図6は、軟質材料の適用例として冷間で液圧押し出したアルミニウムの機械的性質を示すものである⁽⁶⁾。1,000以上の押し出し比では、当初低下した伸びの回復が著しいが、これは押し出し時の変形熱により押し出し材が軟化したことによるものである。

アルミニウムに比較して硬質の銅および銅合金あるいは、高力アルミニウム合金の場合は、冷間では押し出し圧14kbにお

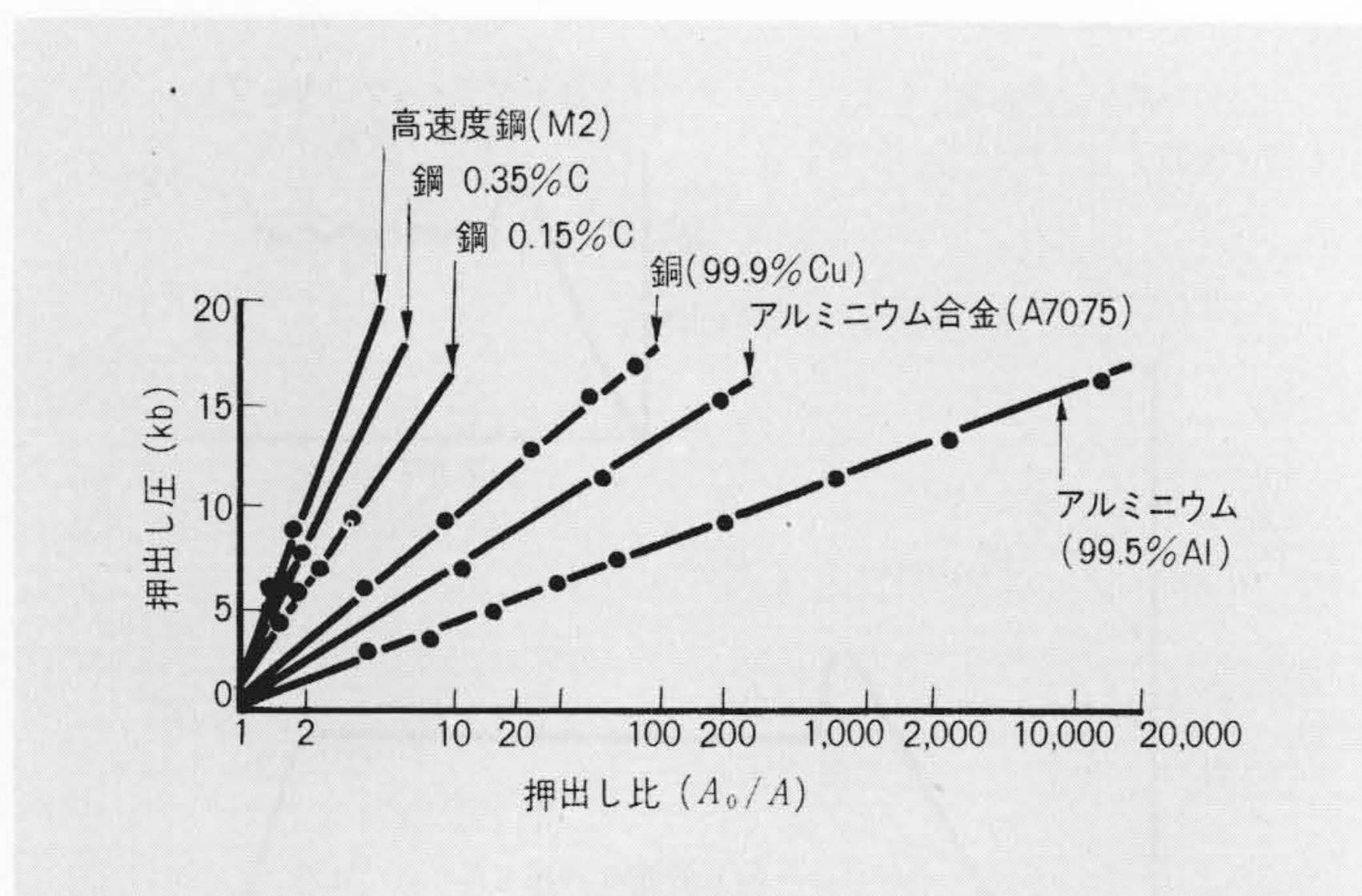


図5 冷間液圧押しにおける各種金属の押し比と押し圧の関係⁽⁶⁾ 各金属とも押し比の対数と押し圧は直線関係にあり、材料かたさが増加するにつれ直線の傾斜は、大きくなる。

Fig. 5 Pressure vs Extrusion Ratio for Cold Hydrostatic Extrusion of Six Common Metals⁽⁶⁾

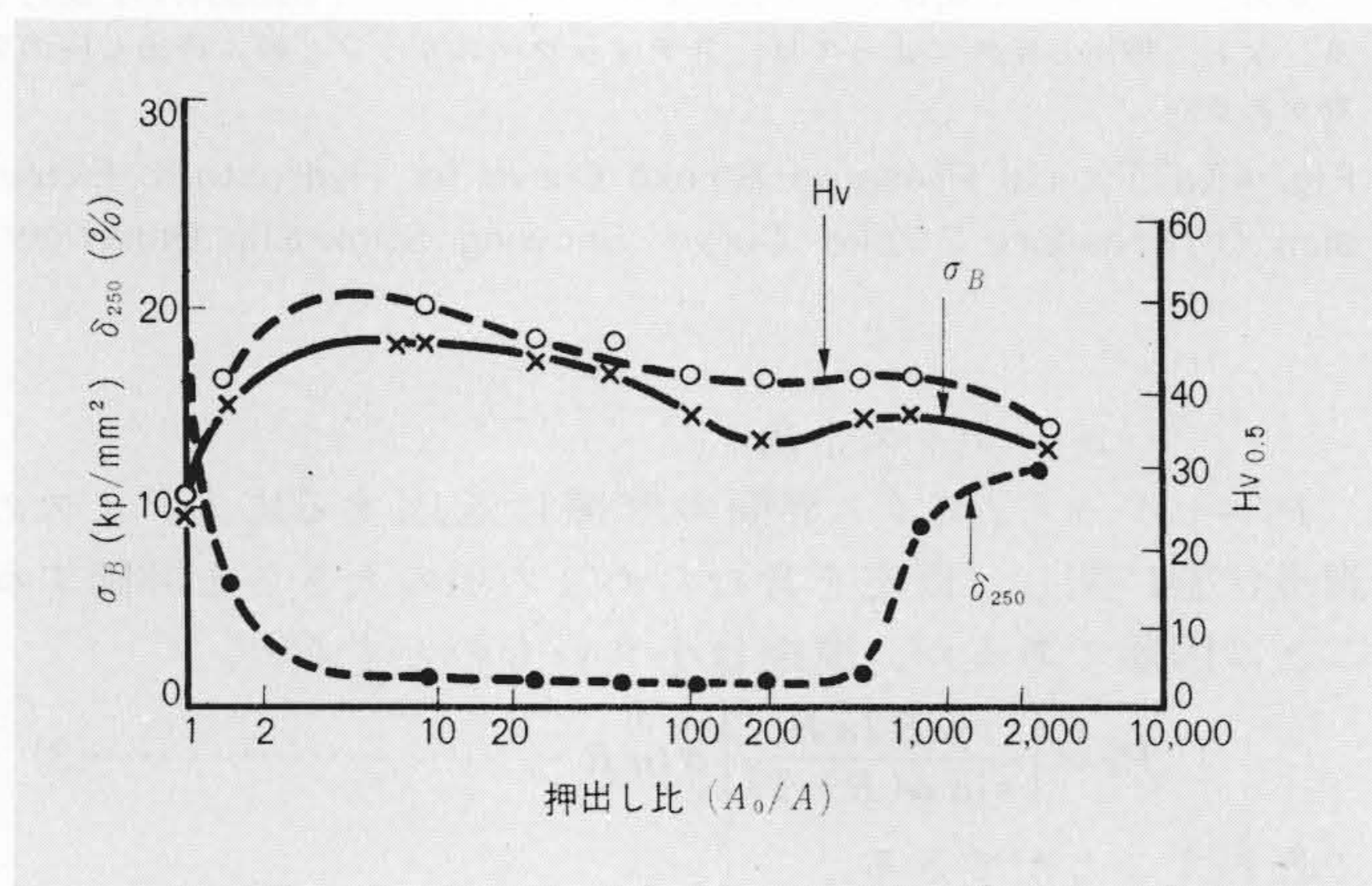


図6 液圧押ししたアルミニウムの機械的性質と押し比の関係⁽⁶⁾ 冷間押しであるため、一般に硬質ないし半硬質の押し材が得られる。ただし、1,000以上の押し比では、変形熱によりある程度軟化する。

Fig. 6 Mechanical Characteristics of Hydrostatically Extruded Pure Aluminum⁽⁶⁾

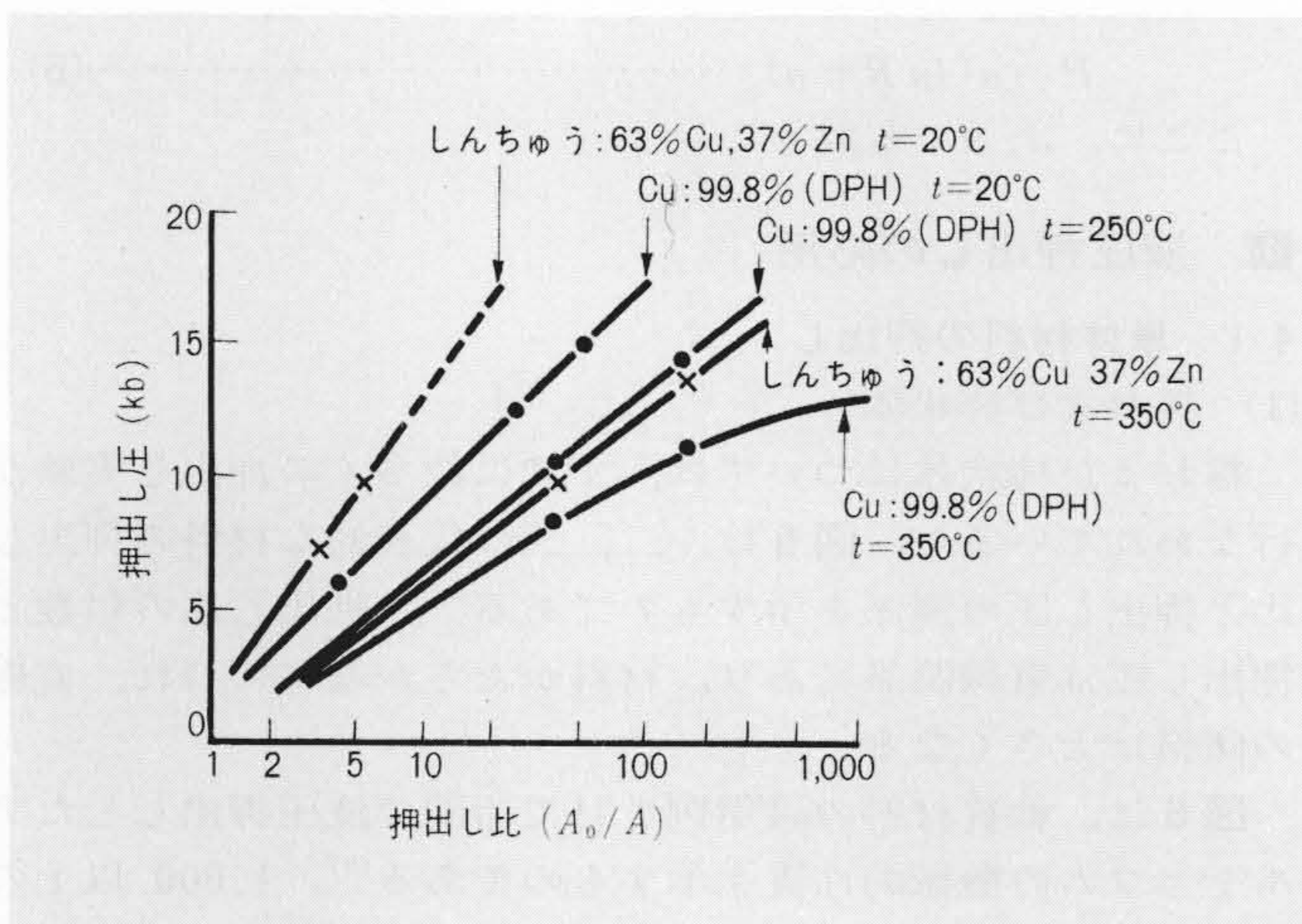


図7 銅およびしんちゅうの液圧押し圧力に及ぼす押し温度の影響⁽⁷⁾ 押し温度350°Cの場合、銅は約2,000、しんちゅうは約150の押し比が得られる。

Fig. 7 Effect of Extrusion Temperature on Pressure-Extrusion Ratio Curve for Copper and Brass⁽⁷⁾

いても押し比は、ただだか30~100程度である。したがって大サイズの製品については十分な減面率であるが、小サイズの製品については押し比が不足する。このような場合にはビレットをある程度加熱し、その変形抵抗を低下させた状態で押しを行なういわゆる温間押し法が有利である。図7は銅およびしんちゅうを温間押しした場合の押し比と押し圧の関係を表わすものである⁽⁷⁾。押し温度350°Cの場合、押し圧14kbで銅は約2,000、しんちゅうは約150の押し比が得られる。

図8は、温間押しした純銅を示すものである。また、図9は従来押しおよび液圧押しした銅の断面かたさ分布である⁽²⁾。従来法であるラム押しに比較し断面かたさ分布が均一である。

ところで純銅のように本来加工性のよい材料以外に、従来押しでは、熱間脆性を起こし押し困難な高力アルミニウム合金材料（ジュラルミン系、超々ジュラルミン系、快削性アルミ合金系材料など）に対しても温間液圧押しは、有力な加工手段となるであろう。

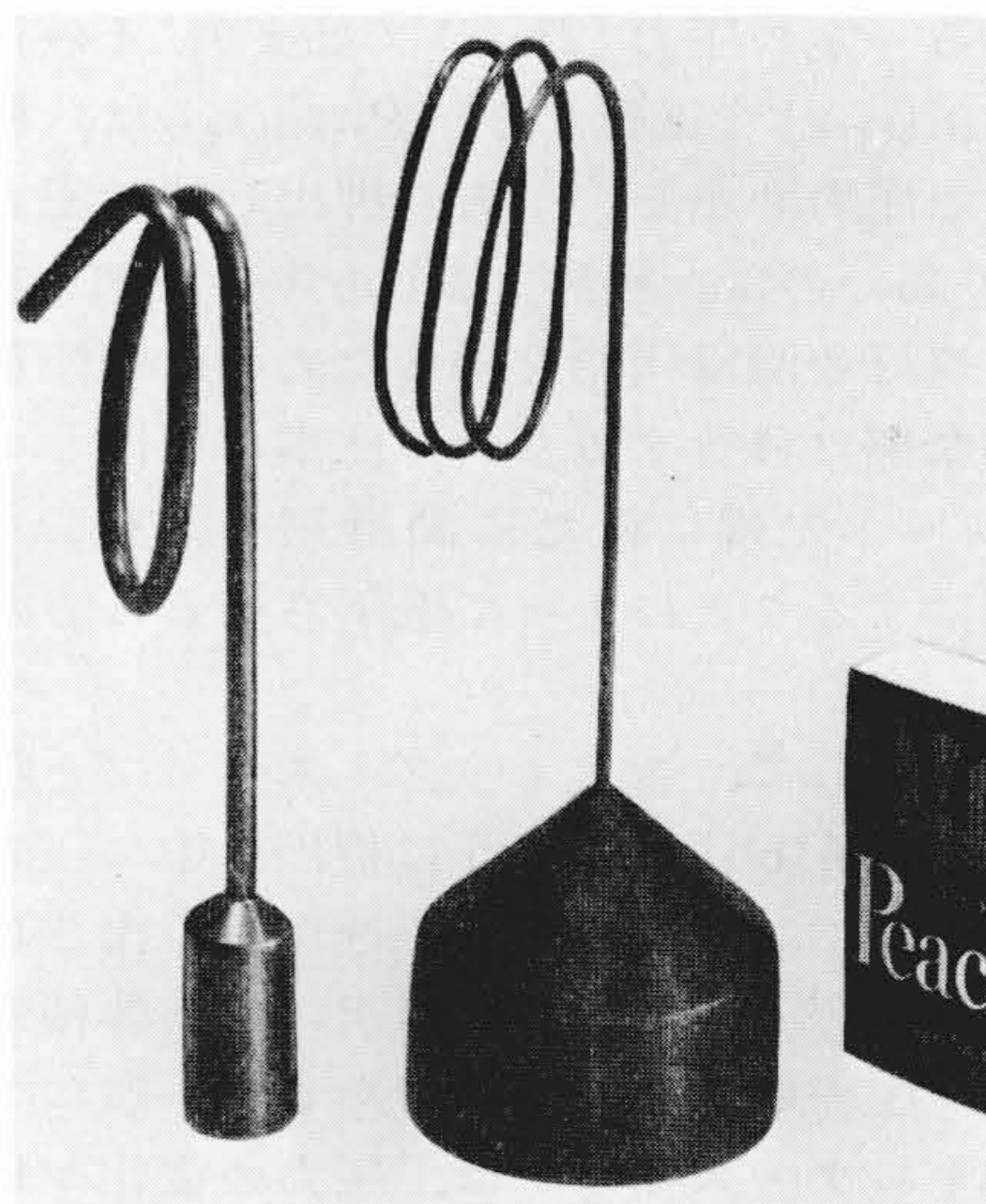


図8 温間液圧押しによる純銅の押し例 硬質材料も温間押しによれば、高い寸法精度で大きな減面率を与えることができる。

Fig. 8 Copper Wire Extruded by Hydrostatic Worm Extrusion

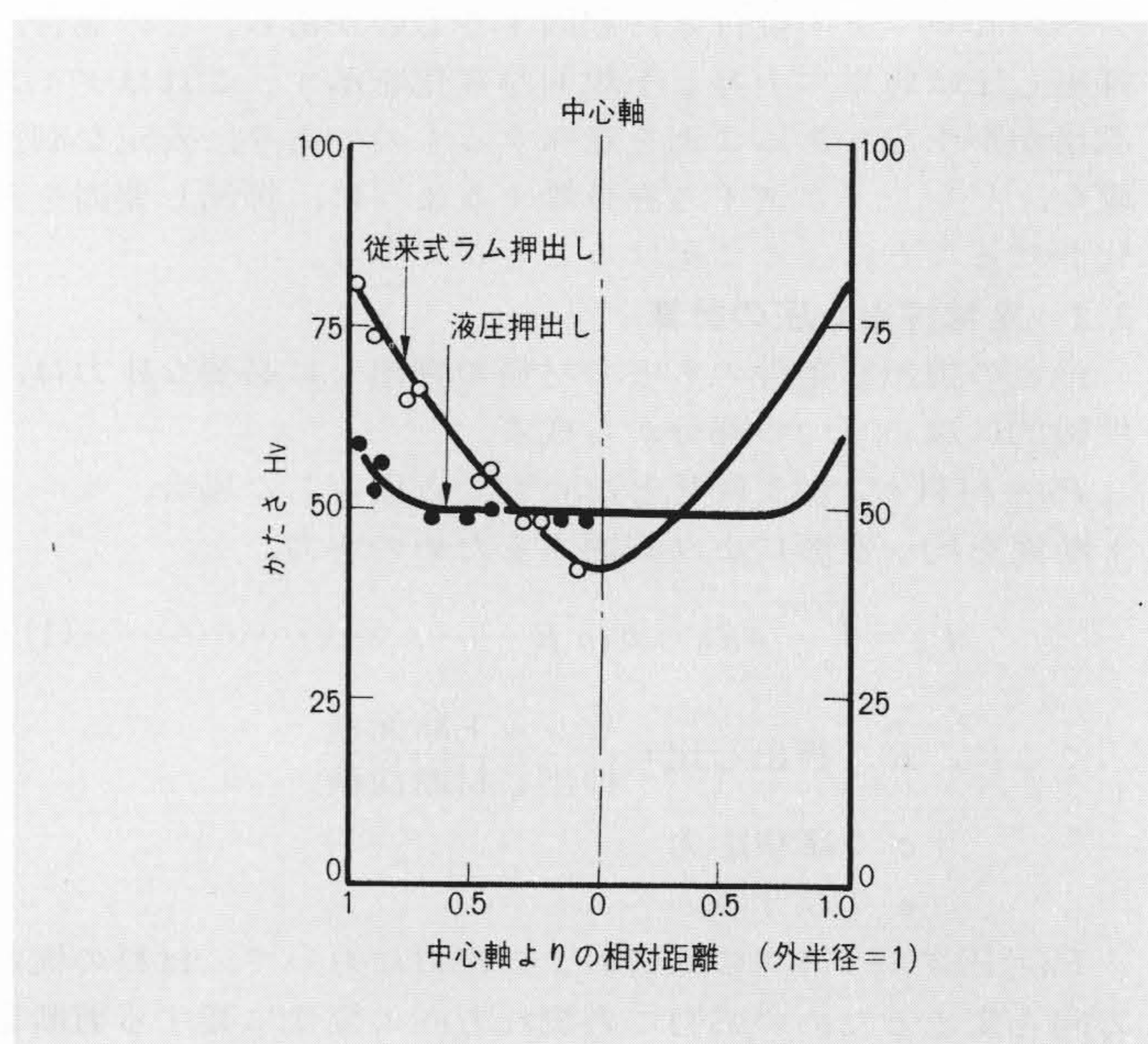


図9 ラム押しならびに液圧押しした銅の断面かたさ分布⁽²⁾ ラム押しと比較し、液圧押し材は、断面内のかたさ分布が均一である。

Fig. 9 Hardness Distribution Across the Longitudinal Section of Conventionally and Hydrostatically Extruded Copper Rod⁽²⁾

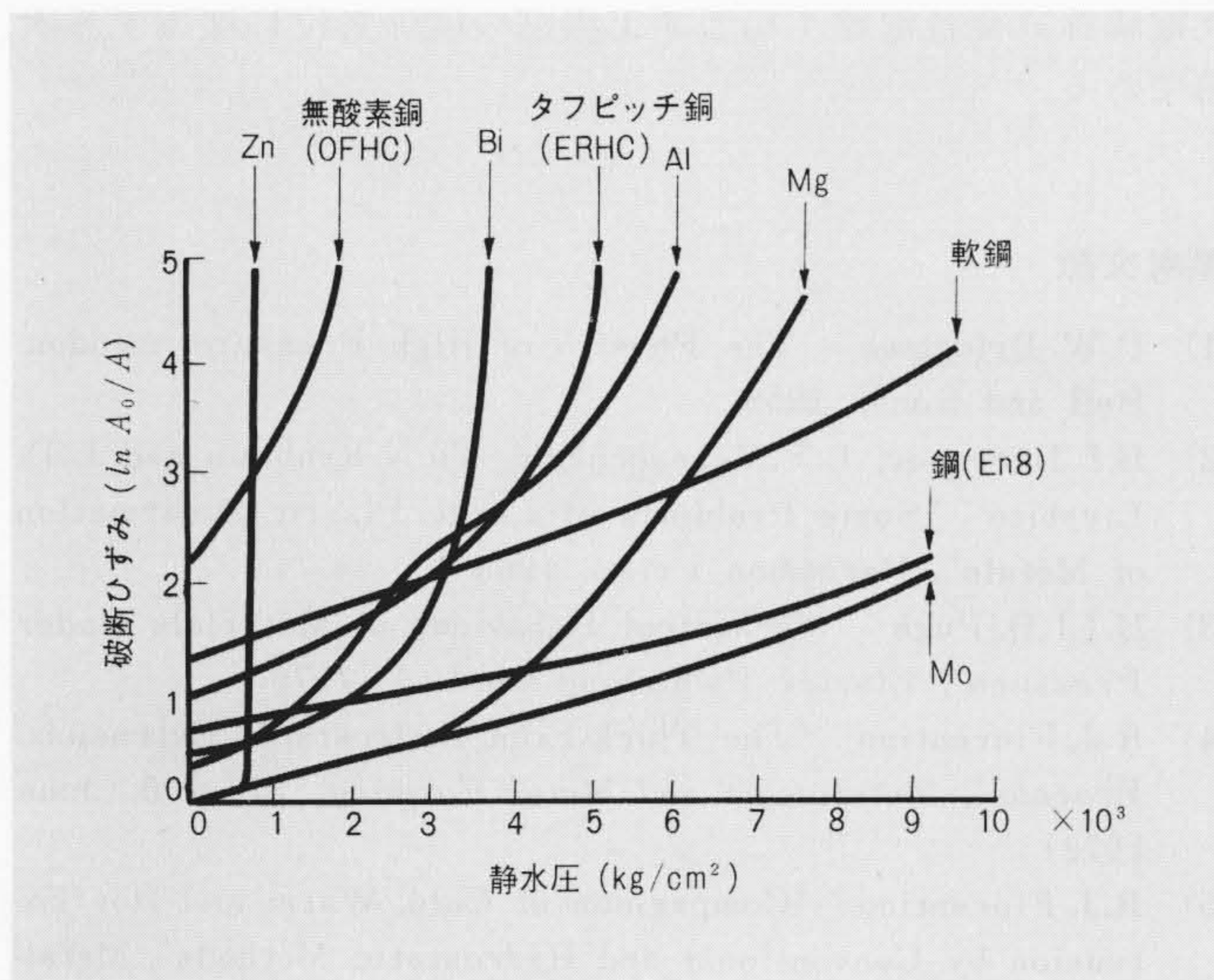


図10 金属の引張り延性に及ぼす静水圧の影響⁽³⁾⁽⁸⁾ 静水圧の増加につれて一般に延性が増加するが、特にZn, Biなどはある一定の圧力で急激に延性が増加し、いわゆる脆性-延性遷移がみられる。

Fig. 10 Effect of Hydrostatic Pressure on the Tensile Ductility of Various Metals⁽³⁾⁽⁸⁾

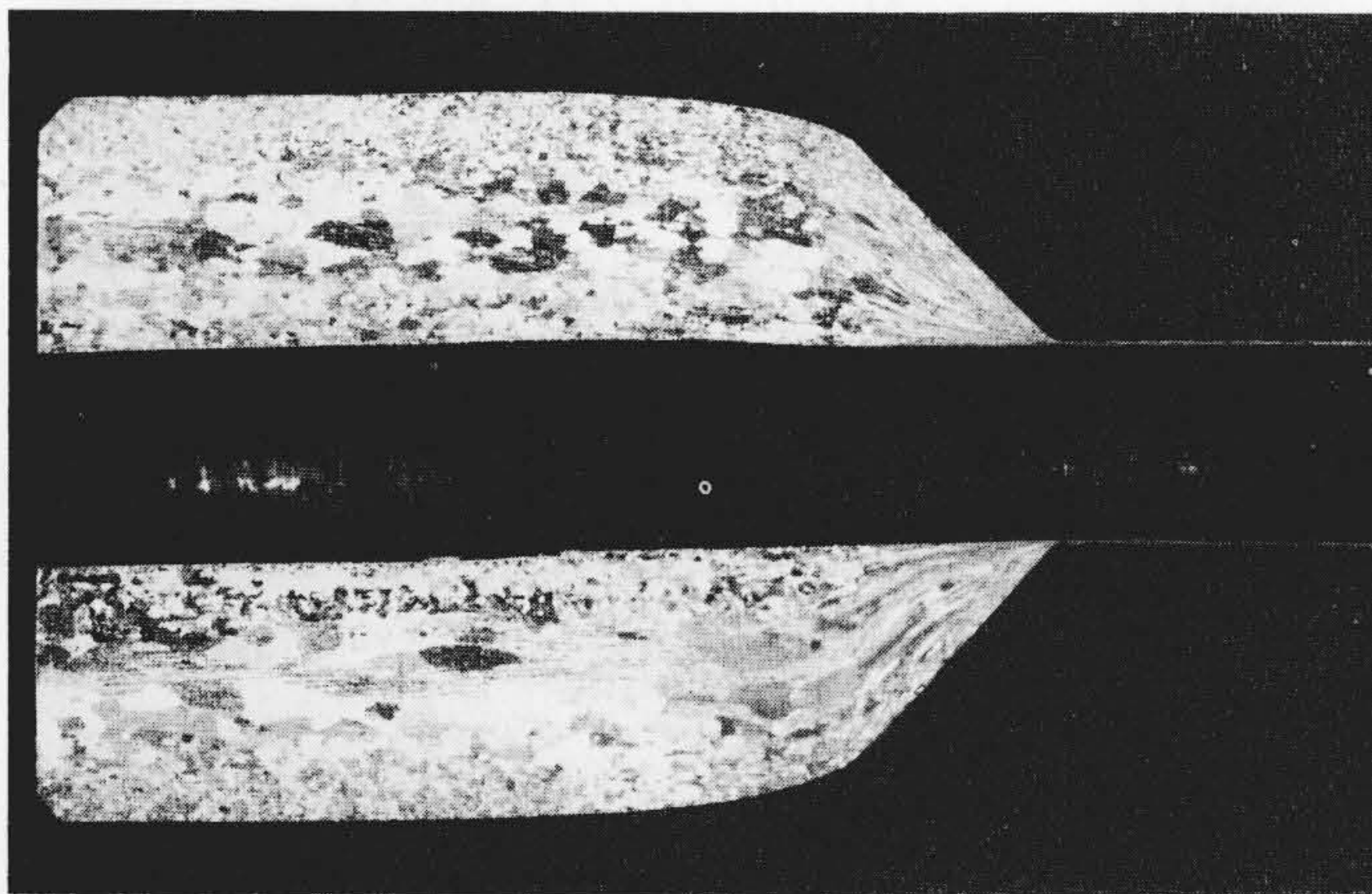


図11 静水圧押しした薄肉アルミニウム管の縦断面(外径5 mm, 肉厚0.15 mm) 液圧押しによれば、寸法精度の高い薄肉管の押しも可能である。

Fig. 11 Longitudinal Section of Thin Walled Aluminum Tube (Outer Diameter 5 mm, Wall Thickness 0.15 mm)

すでに述べたように静水圧下では、被加工材の性質が変化するが、とりわけ延性の増加は著しいものがある。図10は、静水圧による引張り延性の増加傾向を示したもので⁽³⁾⁽⁸⁾、これよりマグネシウム、亜鉛、ビスマスのような脆性材料の押しに対して、潤滑の向上とあいまって好影響が期待される。

(2) 管状体

図11は、液圧押ししたアルミニウム管の縦断面を示すものである。このように液圧押しによれば、寸法精度の高い薄肉パイプの製造が可能である。さらに図12は、高力アルミニウム合金管(A7075)の押し例であり、その寸法精度、表面仕上りは、冷間引抜き品と十分比較しうるものである。従来、この種の材料は、経済性の面から特殊用途に限られていたが、今後は本押し法の実用によりコストの低下と性能の向上が期待され、各方面より大きな関心が寄せられている。

(3) 異形材

異形材押しの特異な応用例として、図13は鋼製ヘリカル

ギヤシャフトを示すものである⁽⁸⁾。従来この種形状は切削後研削加工により製造するのが一般的であった。ごく最近では、ロールによる転造加工も行なわれているが、仕上げ加工にしか応用できない。これに対して液圧押しでは素材ビレットから、一度に長尺の製品を押し出すことができ、製造工程が大幅に合理化される。その他、従来押しで取り扱う製品形状はすべて液圧押し可能で、同様の効果が期待され興味ある応用分野である。

4.2 複合材料の押し

複合材料の押しは、液圧押しの特徴を最大限に生かした応用分野である。従来の熱間押しでは得られない製品精度、特に横断面内はむろんのこと、長手方向に対しても被覆層厚さの均一な製品が得られる。また従来押しは熱間で作業するため、被覆材と心材とが反応しやすい組合せ(たとえば銅被覆アルミニウム材)あるいは構成材の融点が著しく異なり、低融点材が溶融しやすい組合せ(はんだ被覆アルミニウム材)に対しても、液圧押しでは構成材の反応、溶融の危険もなく、健全な押しが可能である。

図14は液圧押しにより製造した銅被覆アルミニウム材で、銅とアルミニウムは大きな減面加工により完全に一体化結合し、曲げおよびねじりなどの加工に対しても銅層がはく離するおそれは全くない⁽⁹⁾⁽¹⁰⁾。

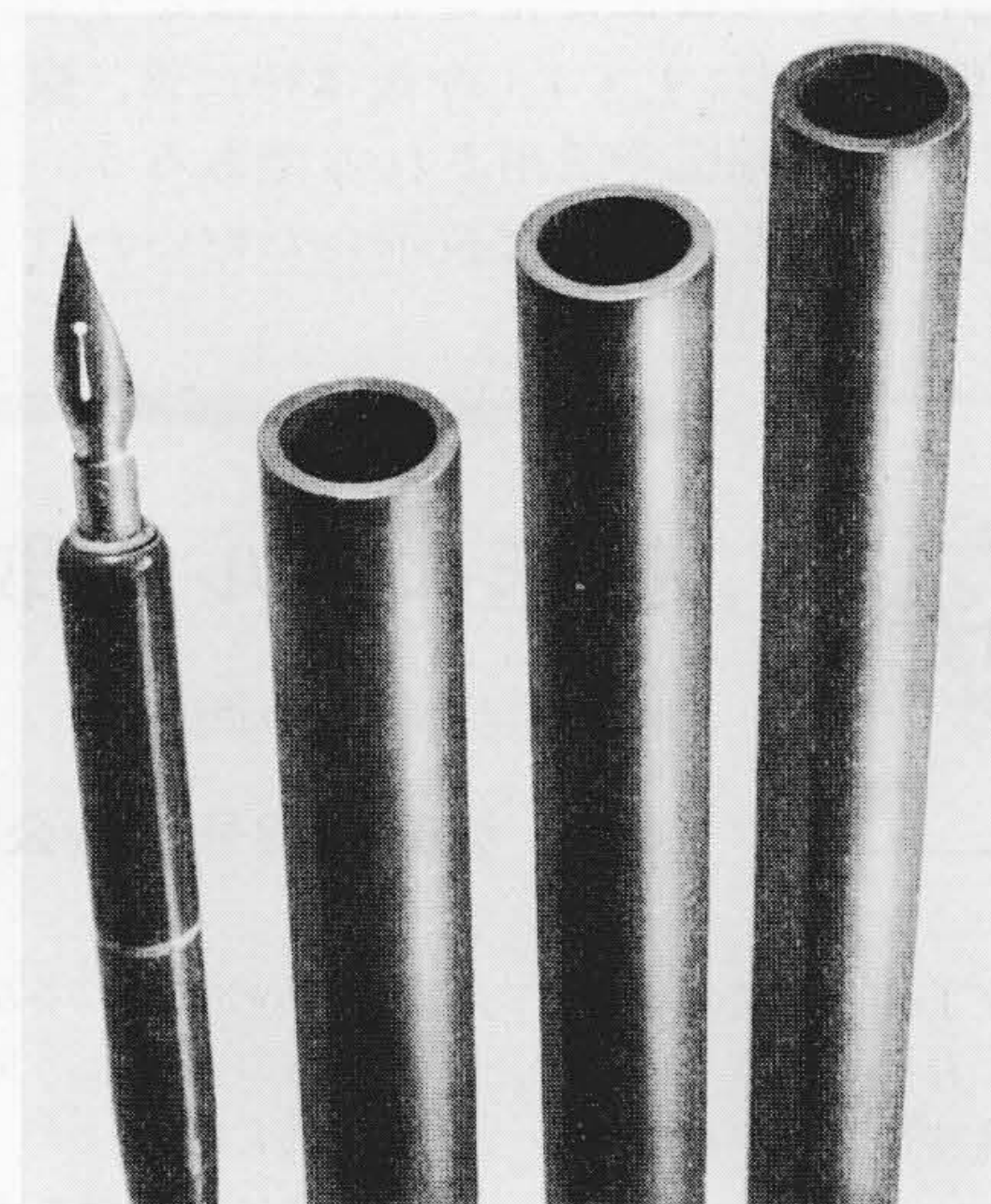


図12 液圧押しした高力アルミニウム合金管 従来押しでは、熱間脆性を起こし、押し困難な高力アルミニウム合金管の押しも可能である。
Fig. 12 Hydrostatically Extruded High Strength Aluminum Alloy Tubes

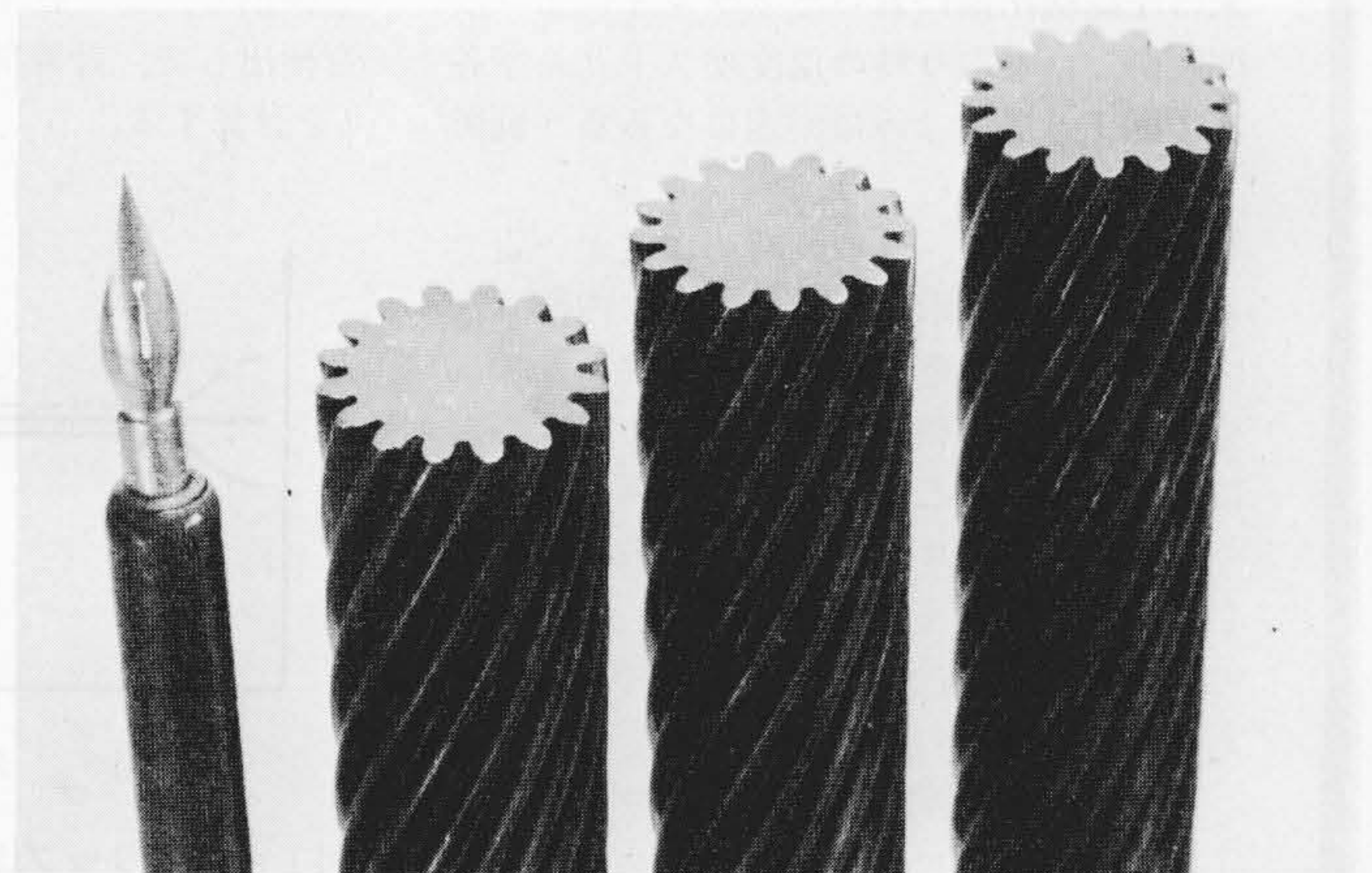


図13 液圧押ししたヘリカルギヤシャフト 液圧押しによれば、素材ビレットから直接、製品サイズのヘリカルギヤシャフトの押しが可能である。

Fig. 13 Helical Gear Shafts of Case-Hardening Steel Hydrostatically Extruded Directly from a Round Billet

立電線株式会社電線工場豊浦工場部の関係各位に深謝する次第である。

参考文献

- (1) P.W. Bridgman: "The Physics of High Pressure, London Bell and Sons," 1958
- (2) B.I. Beresnev, L.F. Vereshchagin, Yu.N. Ryabinin and L.D. Livshito: "Some Problems of Large Plastic Deformation of Metals", Pergamon Press, 1963
- (3) H.L.I.D. Pugh: "Mechanical Behaviour of Materials Under Pressure", Elsevier Publishing Co. Ltd., 1970
- (4) R.J. Fiorentino: "The Thick-Film Hydrostatic Extrusion Process", Metallurgia and Metal Forming, 37, 200 (June 1972)
- (5) R.J. Fiorentino: "Comparison of Cold, Warm and Hot Extrusion by Conventional and Hydrostatic Methods", Metallurgia and Metal Forming, 38, 52 (February 1973)
- (6) Stig Johnson: "Fortschritte Beim Hydrostatischen Strangpressen", Draht-Welt, 54, 209 (April 1968)
- (7) W. Svedberg and R. Erbe: "Hydrostatisches Warm-Strangpressen", Erzmetall, 24, 534 (November 1971)
- (8) T.E. Davidson and A.P. Lee: "The Tensile Fracture Characteristics of Metals Under Hydrostatic Pressure to 23 Kilobars", Acta Metallurgica, 14, 937 (August 1966)
- (9) 参木, 三宅ほか: 「銅被アルミニウム材の諸性能」 日立評論 54, 956 (昭和47-11)
- (10) 参木, ディートリッヒ・エールシュレーゲルほか: 「銅被アルミニウムブスバーの諸性能」 日立評論 55, 917 (昭和48-9)

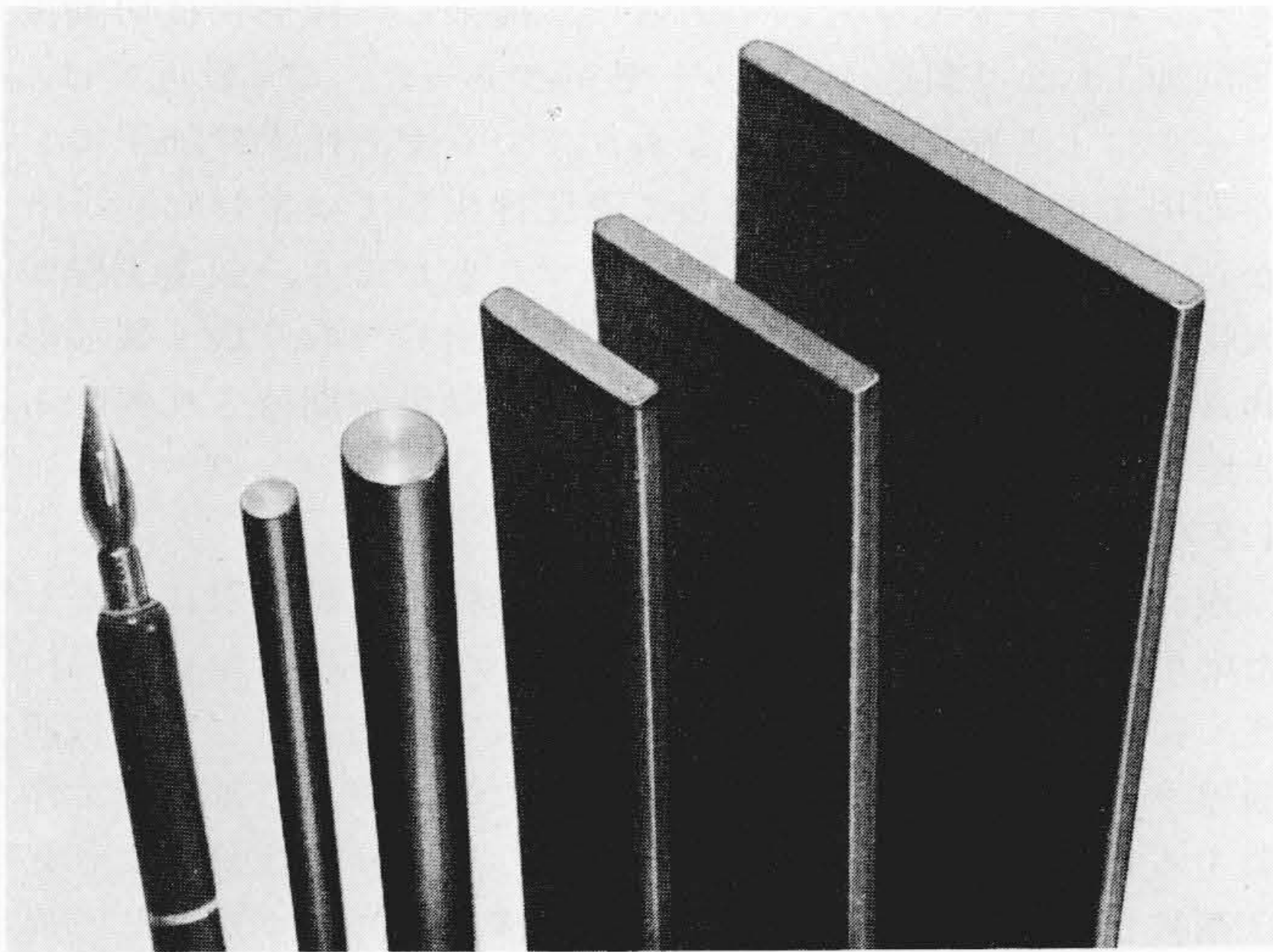


図14 液圧押出した銅被覆アルミニウム材 銅とアルミニウムは、金属学的に完全に一体化結合しており、曲げ、ねじりなどの加工によって銅層がはく離することはない。

Fig. 14 Hydrostatically Extruded Copper Clad Aluminum Products

5 結 言

液圧押出し法は従来押出し法にない幾多の特徴と可能性を有しているが、その応用に関してはまだ緒についたばかりである。すでにあげた応用例は一例にすぎず、今後は特に管、複合材料ならびに異形材の製造に幅広く活用されるであろう。

最後に本報告を終えるにあたり、種々ご教示いただいた日



熱延コイル巻取温度制御装置

北之園英博・中西 博

特許 第616013号 (特公昭45-20771号)

本発明は、巻取り完了後所定時刻における巻取コイルの各部における温度を所定の同一温度に保ち、焼鈍特性を良好に保つようにするものである。

ストリップを圧延機より巻き取る際、従来は圧延機出側においてスプレーにより温度制御し、巻取り時の温度がストリップ各部で図1の T_0 のように一定になるよう制御していた。

しかしながら、巻取り時の温度が一定であっても、巻き取られたコイルの内部は同図 T_2 のように、巻き始めと巻き終わりの部分は、巻取り直後急激に中間部より大幅な温度低下をしてしまうことが判明した。

これは、コイル巻き始めは巻取機に接触して冷されやすく、巻終わり(コイル外部)の部分は外気で冷えやすいためであると考えられる。

そこで、本発明は、ストリップ巻取り完了後の所定時刻におけるコイルの温度を、

同図 T_0 のように各部で一定にするため、巻取り時の温度は、同図 T_1 のように制御するようにした。

図2は本発明の実施例であるが、粗圧延機①の出側において、板の重量 W と板幅 b を検出し、また仕上圧延機②の出側板厚 h を検出して、計算部③はストリップの長さ l を計算する。

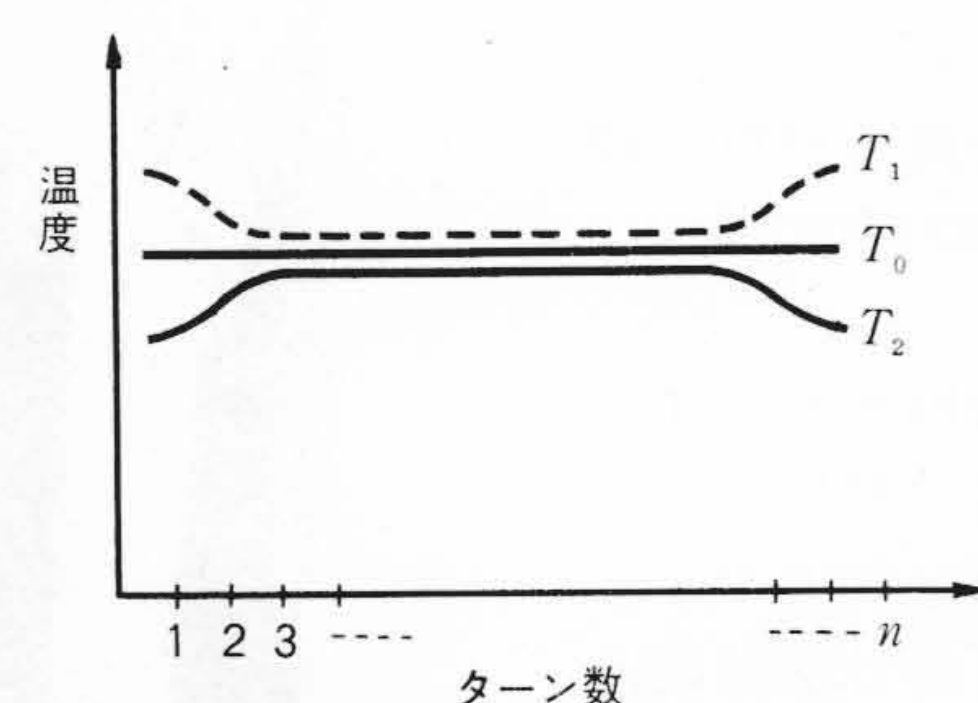


図1 ストリップ温度パターン

計算部③はさらに仕上圧延機②のロール回転速度 V を検出してストリップ巻取り後、所定時間経過時のコイル各部の温度が均一に T_0 となるような巻取り温度 T_1 を算出する。

計算部④は、巻取り温度 T_1 に応じたスプレー⑥の制御量を計算し、スプレー⑥はストリップを T_1 のように冷却するよう制御される。

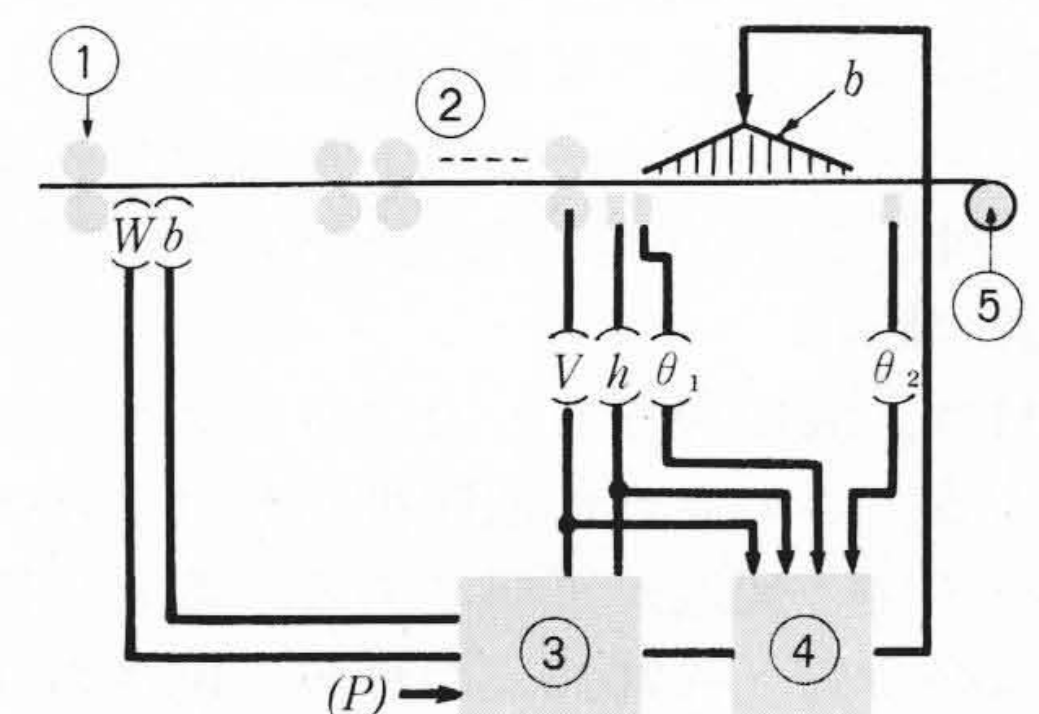


図2 本発明の構成図