金属材料の高温静水圧押し

松下 富春* 野口 昌孝**

1. 緒 言

静水圧押しは古くは1893年のRobertson⁽¹⁾のイギリス特許にみることができるが、冷間の静水圧押しに関する研究は1950年以降に精力的に行なわれた。当初はモリブデンやマグネシウムなどの難加工材の加工に、ついで複合材や特殊合金の加工に冷間静水圧押しを利用する試みがなされた。この方法は現在では銅クラッドアルミニウム導体のような複合材や貴金属などの特殊な材料の加工に用いられているのみである。

いっぽう、ビレットを加熱して静水圧押しする高温静水圧押しでは良好な潤滑状態であつ材料の変形抵抗の低い領域でビレットを変形させるので、低い圧力で押し出すことができる。その結果、特殊な材料のみならずアルミニウム合金や銅合金さらには鋼などの一般工業用材料を生産性高く、設備上も安心して活用できる製造法として高温静水圧押しが注目をあびるようになってきた。

静水圧押し全般については西原⁽²⁾の解説があるので、本稿においては高温静水圧押しの基本的な特長と押し出し例についてのべる。

2. 高温静水圧押しの基本的特長

高温静水圧押しの特長は冷間静水圧押し⁽³⁾のそれと同じであつて、コンテナとビレット間の摩擦がなく、ダイスとビレットの摩擦が改善されること、ビレットの外周に静水圧が作用し、ビレットの予めのすえこみ変形がないことにつぎが、熱間静水圧押し特有のものとして圧力媒体が工具に対する断熱材の働きをする点がある。図1は1073 Kに加熱した銅ビレットを無潤滑および静水圧押しする場合のコンテナの温度上昇を計算した結果⁽⁴⁾で、コンテナ最内層の温度は静水圧押しの方が著しく低くなっていることがわかる。図2に押し出中のマンドレル中心部の温度上昇を実測した結果を示

す。マンドレルがビレットの未変形域にある時に圧力媒体を介してビレットの熱をうけ、マンドレル温度は徐々に上昇し、変形域に達すると急激に高温になる。さらにダイスを出た製品が冷えるにつれてマンドレルも冷却される。マンドレルの温度上昇を低く抑えるには高速押し出しや圧力媒体層の厚みを大にすることが好ましい。

ダイスやコンテナとビレットの摩擦が少なくなれば、その部分における発熱も少なくなる。このことは押し出速

図1 コンテナ壁の温度上昇(計算値)⁽⁴⁾。

図2 高温静水圧押し出中のマンドレルの温度変化。

* 株式会社神戸製鋼所中央研究所主任研究員

** 株式会社神戸製鋼所中央研究所研究員

Hot Hydrostatic Extrusion of Metallic Materials;
Tomiharu Matsushita, Masataka Noguchi (Central
Research Laboratory, Kobe Steel, Ltd., Kobe)
1979年10月22日受理

図3 変形域の材料の温度分布に及ぼす潤滑状態の影響⁽⁴⁾。
(a) 無潤滑押し、(b) 静水圧押し

度が製品の温度に制約をうけるアルミニウム合金や銅合金の押しにおいて重要な意味をもっている。図3に無潤滑押しと静水圧押しにより573 Kに加熱したアルミニウム合金ピレットを押しした場合のピレットの温度分布⁽⁴⁾を示す。無潤滑押しの場合はダイスとピレット間の摩擦のために中心部よりも外周部の方が高温になっているのに対し、高温静水圧押しでは外周部よりも中心部の方が高温になっている。これはダイスとピレットの摩擦が小さい場合、摩擦による温度上昇よりもダイスに逃げる熱による温度低下の方が大きいためである。このように製品の温度上昇が少なく、かつピレット加熱温度を低くして潤滑押しができる高温静水圧押しの方が、従来法よりも高速押しが可能である。例えばアルミ合金では無潤滑の直接押しに比べて10~100倍の高速押しが可能であることが実験的に示されている⁽²⁾。

高温静水圧押しの基本的特長は以上のように圧力媒体の潤滑作用と断熱材の働きにつくが、これに帰因する特長として製品の品質向上および製造工程の短縮化があげられる。写真1は2024アルミニウム合金を高温静水圧押しと熱間無潤滑押しした場合の製品横断面の組織を示す。無潤滑押し材では外周部の温度上昇のために粗大結晶層が存在するのにに対し、高温静水圧押し材ではほぼ均一な組織になっている。

熱間無潤滑押し 高温静水圧押し
写真1 熱間無潤滑押しおよび高温静水圧押しした2024アルミニウム合金棒横断面のマクロ組織の比較。

製造工程の短縮化に関しては押し出しの減面率を大きくできるので、従来おこなわれてきたような押し出し後のレデュース、引抜きなどが削減されることが特長である(表3参照)。ただしピレットの準備が従来法よりも複雑である点は今後改善の余地がある。

高温静水圧押しの利用は押し出しにおける生産性向上の手段として有用であるが、従来の押し出しでは不要であった圧力媒体(潤滑剤)やパッキン部材を使用しなければならない。高温静水圧押しを安定して行なうには圧力媒体を作業温度域によって選択することが重要で、図4に種々の温度・圧力領域において使用可能な圧力媒体の種類を示す。冷間静水圧押しに通常用いられる鉱油や動植物油では発火点が500~570 Kにあり、大気中での加熱ピレットとの接触をさけるようにすれば750~820 Kの熱間押しにも使用できる。耐熱グリースは室温から1250 Kの温度範囲で使用可能である。770 K以上の高温では金属酸化物や塩類なども圧力媒体として使用でき、高温における粘度を目安にして作業温度域に適したものを選択することが必要である。これらの物質は工具や製品に付着すると後処理が複雑になり、工具類を腐食する問題もある。1300 Kをこえる高温になるとガスを圧力媒体に用いることも試みられているが、実用化は今後の課題である。

図4 各種圧力媒体の使用可能な領域。

3. 高温静水圧押しの方法

工業的に高温静水圧押しを行なうには加熱したピレットをコンテナ内に入れ、圧力媒体を注入した直後に加圧して押し出す方法が採用される。これはピレットの温度低下を防止し、工具の熱負担を軽減するとともに、押し出しのサイクルタイムを短縮するためである。冷間静水圧押しと同じ圧力媒体を用いピレットを単に加熱するだけの高温静水圧押しはピレット加熱温度800 Kまでの温度域で実用されている⁽⁵⁾が、ピレット温度に限界があ

り、また圧力媒体の劣化がはげしい難点がある。

液状の圧力媒体を用いる静水圧押出しでは圧力媒体量が多くなりすぎ、サイクルタイムの増大、動的不安定現象など生産プロセスとしては好ましくない場合がある。この点を改善した高温静水圧押出し法がバテル研究所で開発されたハイドラフィルム法⁽⁶⁾である。図5にこの方法の概略を示す。ビレットとコンテナ間の圧力媒体量を静水圧的に圧力が伝達される範囲で最少限にしており、ビレットに予め塗布した潤滑剤あるいはコンテナ内面に塗布した潤滑剤にその働きをさせる。

圧力媒体の注排を簡単にするために塊状の粘塑性圧媒を用いる方法⁽⁷⁾が開発されている。この方法で管を押出す場合の押出順序を図6に示す。コンテナ内にダイスがセットされた後、加熱されたビレットがチャージされ、ついでコンテナ端部の圧媒チャージャーに充填された粘塑性圧媒がスラムによりコンテナ内に注入され、そのまま押出しが進行する。ビレットの大部分が押出された

図5 ハイドラフィルム法⁽⁶⁾。

図6 粘塑性圧力媒体を用いた高温静水圧押出しのシーケンス。

後、コンテナ内の圧力を除圧しダイスと押粕が取出され、ついでダイスと押粕は一体的に製品から分離される。この方法では加熱されたビレットのコンテナ内での滞留時間が短く、また圧力媒体の種類を選択することにより常温から1300 K 程度までの高温域で使用できる多用途性がある。

4. 高温静水圧押出しによる金属材料の押出例

高温静水圧押出しの特長を有効に活用すれば従来の押出しを凌駕する生産性が得られ、省エネルギーが可能になるとともに、従来成形が困難であるとされている材料の成形もできる。以下に代表的な材料の押出例を示す。

(1) アルミ合金の押出し

図7に押出圧980 MPa における最大の押出比を 冷間静水圧押出しの場合と高温静水圧押出しの場合を比較し

図7 アルミニウム合金の冷間および高温静水圧押出しにおける押出圧(押出圧: 980 MPa⁽⁴⁾)。

て示す。ビレット温度を約 520 K にすることにより押出比は著しく増大することがわかる。従来アルミニウム合金は無潤滑で直接押し出されるのが一般的であったが、最近は間接押し出しが採用されだし押し出速度は増大しつつある。しかしダイス変形域における摩擦による温度上昇は避けることができず、製品の割れ等の問題で押し出速度に制限がある。高温静水圧押し出しでは摩擦による温度上昇が少なく(図 3)、高速押し出しができるので、小断面寸法材の押し出しには生産性の点で有利である。大断面寸法材の押し出しには間接押し出しと高温静水圧押し出しにおける生産性の差はほとんどない(表 1)。

表 2 に 7075 アルミニウム合金を押し出した場合の機械的性質を示す。高減面率で冷間静水圧押し出すと熱処理時に再結晶が進み、強度が JIS 規格値よりも低くなっているが、高温静水圧押し出したものでは JIS 規格を十分満足したものが得られる。

表 1 高温静水圧押し出しと間接押し出しによるアルミニウム合金の生産性の比較。

材種	製品断面積 (cm ²)	1 時間当り生産量(kg)		W_H/W_I
		間接押し出し (673 K) W_I	高温静水圧押し出し (523 K) W_H	
2024 合金	20	1190	1180	0.99
	4	300	890	2.96
	0.8	65	570	8.77
5056 合金	20	1430	1060	0.74
	4	360	870	2.42
	0.8	80	270	3.38

表 2 7075 アルミニウム合金押し出棒の機械的性質。

性 質	降伏応力 (MPa)	引張強度 (MPa)	伸び (%)
押し出材の種類			
冷間静水圧押し出し後 T_6 処理したもの	470	559	7.7
高温静水圧押し出し($T=503$ K)後 T_4 処理したもの	538	599	8.8
JIS 規格	>500	>559	>7

(2) 銅合金の押し出し

冷間静水圧押し出し用の圧力媒体(ひまし油)を用いた銅管の熱間静水圧押し出しがオランダにおいて実用されている⁽⁵⁾。820 K に加熱されたビレットが 39.2 MN プレスで押し出され、直径 20~25 mm の素管にされ、必要に応じてその後の引抜きに廻される。押し出温度を 920 K 程度まで高くすると押し出比を大きくできるので、大きいビレットから小径管を押し出すことができる。表 3 は従来の無潤滑熱間押し出しと高温静水圧押し出しのそれぞれを用いて外径 10 mm、肉厚 0.5 mm の銅管を製造する場合の主要

項目を比較(推定値)したものである⁽⁶⁾。高温静水圧押し出しを用いることによりレデュースによる減径工程が不要になり、また引抜き回数が少なくなることがわかる。

黄銅やキュープロニッケルなどではビレット温度を銅の場合より高温にしなければならず、粘塑性圧媒を用いる方法でなければ工業的には使用できない。図 8 に押し出圧 980 MPa における最大押し出比とビレット温度の関係を示す。アルミ黄銅やキュープロニッケルでも 1070~1170 K の高温静水圧押し出しをすることにより高減面率の押し出しが可能になる。

表 3 銅管製造法の比較(最終製品寸法 $\phi 10$ mmOD $\times t 0.5$ mm)⁽⁶⁾。

	熱間静水圧押し出し	無潤滑押し出し	
		ケース I *1	ケース II *2
ビレット単重(kg)	340	218	218
ビレット温度(K)	923	1023~1123	1023~1123
プレス力量(MN)	29.4	34.3	24.5
チューブレデュースの要・不要	不要	不要	要
押し出後の引抜き回数	3	9	7
1 時間当り生産量(t)	8.1	8.8	8.8

*1: 29.4 MN プレス使用

*2: 24.5 MN プレス使用

図 8 各種のビレット温度における銅合金の最大押し出比(押し出圧: 980 MPa)。

(3) 鋼の押し出し

鋼の押し出しには従来ガラス潤滑法(ユージン・セジュールネ法)が用いられ、潤滑性の点では必ずしも高温静水圧押し出しを必要としない。しかしガラス潤滑剤の製品表面への付着や表面の肌あれ防止の点では静水圧押し出しの方がすぐれている。

図 9 は 0.40% 炭素鋼をガラス潤滑法および粘塑性圧力媒体を用いた高温静水圧押し出しにより押し出した場合の圧力-時間線図の比較である⁽⁹⁾。静水圧押し出しの方が押し出圧は約 20% 低くなっている。これはガラス潤滑押し出しにおけるコンテナとビレット間の摩擦係数が経験的に約

図9 炭素鋼のガラス潤滑押出しおよび高温静水圧押出しにおける押出圧⁽⁹⁾.

0.02 程度といわれているのに対し、高温静水圧押しではほぼ零とみなしてもよいことに起因する。

表面肌の良い、寸法精度のよい鋼材を得るには押出条件の選択が重要である。図10にビレット温度、押出比と製品の表面粗さとの関係を示す。この例では押出比を20程度、ビレット温度約1270 K程度で最も表面の良好なものが得られている。このような条件で鋼管を押出した場合、外径寸法は5/100 mm 以内のパラッキであり、偏肉率も5~10% 以内であることも経験されている。

炭素鋼、低合金鋼、ステンレス鋼など⁽¹⁰⁾の外に、ステライトや超合金などの高温静水圧押しも試みられ、

図10 高温静水圧押しした0.40% 炭素鋼棒の表面粗さに及ぼす押出比、ビレット温度の影響⁽⁹⁾.

また形状では丸棒、円管ばかりでなく異形断面材の成形も実験的に行なわれている。

(4) その他の材料の押出し

以上代表的な金属材料の押出例をのべたが、この外には焼結モリブデンのように常温では脆くて成形できないものを670~720 Kで押出すと割れないものが得られ、またリン銅ろうでは720~770 Kに加熱することにより容易に線材が押出される。さらに室温において変形抵抗の大きい材料の組合せからなる複合材料の成形も高温静水圧押しすることにより成形が容易になると同時に異種材料間の接合度も良好になることが知られている。

5. 結 言

高温静水圧押しの特長ならびに具体的な押出例を示すことにより、このプロセスの利用分野について概説した。冷間静水圧押しは特殊な加工法としてみられがちであったが、簡単な高温静水圧押し法の開発が進むにつれて、工業的に活用しうるプロセスとして注目をあびるようになってきた。プロセス上の諸問題の解決と同時に、使いやすい生産用設備の開発が進み、今後押し技術分野の新しい方法になるものと思われる。

最後に本稿作成に際し種々の討論をいただいた中央研究所 山口喜弘主任研究員に感謝する次第である。

文 献

- (1) J. Robertson : British Patent No.19356 (1893).
- (2) 西原正夫 : 日本機械学会誌, **78** (1975), No.678, 403.
- (3) たとえば H. L. D. Pugh : *The Mechanical Behaviour of Materials under Pressure*, Elsevier Pub. Co. Ltd., (1970).
- (4) M. Nishihara, M. Noguchi, T. Matsushita and Y. Yamaguchi : *Proc. 18th MTDR Conf.*, (1977), 91.
- (5) J. Hollingum : *The Engineer*, **12** (1973), 32.
- (6) R. J. Fiorentino, G. E. Meyer and T. G. Byrer : SME Paper, MF 71-103 (1973).
- (7) 藤田 達, 山口喜弘, 松下富春, 野口昌孝, 山崎龍雄 : R & D/神戸製鋼技報, **24** (1974), 46.
- (8) T. Matsushita, Y. Yamaguchi, M. Noguchi and M. Nishihara : *J. Mech. Working Tech.*, **2**, (1978), 33.
- (9) M. Nishihara, T. Matsushita, Y. Yamaguchi, T. Yamazaki and M. Noguchi : *Proc. 20th MTDR Conf.*, (1979), I-87.
- (10) S. Takahashi, N. Asami, T. Ishimori, A. Tamai, M. Nakatsukasa and H. Kono : *Engineering Solids under Pressure*, IME, London, (1970), 161.