

引抜き、押し出しおよび鍛造における加工発熱の得失

松下富春 (工博)

電子・情報事業本部・医療材料部

Heat Generation during Drawing, Extrusion and Forging Process

Dr. Tomiharu Matsushita

The merits and demerits of heat generation in wire drawing, hot extrusion and hot forging of aluminum alloys were discussed. In general, heat generation due to deformation and friction becomes large during high area reduction and high speed forming, and this results in poor mechanical properties, poor product surface quality and a low production rate. In order to improve these factors, lubricating conditions and direct tool and product cooling can be applied. Numerical simulation using thermorigid-plastic coupled simulators could also prove useful.

まえがき = 引抜き、押し出しおよび鍛造は塑性加工法として古くから金属製品の生産に適用され、技術課題もその都度解決されてきた。当社の場合、鉄鋼、アルミ/銅、チタン合金、超電導線、特殊金属など多種にわたる製品にこれらの加工法が利用されており、第1表に熱間加工と冷間加工の組合わせで製造される製品の例を示す。

大量に低コストで精度よく、高い生産性で加工することが塑性加工の特徴といえるが、生産性を高めるために加工率を大きく取り、加工速度を上げることやプロセス全体の簡略化、プロセスの連続化・無人化が追求されている。われわれがユーザーの要求品質を満足させながら生産性を追求する場合、加工速度や加工率を高めることが加工中の発熱につながり、材料組織の変化や表面品質の劣化など思いがけない問題に遭遇する。そこで現実の加工プロセスでは良きにつけ悪しきにつけ加工熱との妥協点を見つけることが必要である。

本稿においては引抜き、押し出しおよび鍛造プロセスで製造される2,3の代表製品を取り上げ、加工発熱に焦点を当てて生産性と品質の向上を両立させる技術の開発状況を紹介します。

1. 塑性加工における加工発熱

大半の塑性加工プロセスにおいて、鑄塊に熱間加工で大変形を与えて鑄造組織を破壊し材料の特性を改善し、仕上げに近い工程では室温で加工(冷間加工)する。素材の温度がいかにあるとも材料を変形させると、成形に必要なエネルギーが熱に変化する。変形エネルギーは材料を理想的に無駄なく変形させるときの仕事(理想仕事)、工具との摩擦による仕事(摩擦仕事)、所定形状に変形させるための付加的せん断変形による仕事(付加的工作)で構成され、加工プロセスによってそれらの比率は異なる。変形に際して生ずる加工発熱による温度上昇を ΔT とすると、製品の温度 T_p は次式で示される。

$$T_p = T_b + \Delta T = T_b + \frac{kp}{J C} = T_b + \frac{k'}{J C} \times \{1nR + \mu \cdot f(S) + f(s)\} \dots\dots\dots (1)$$

ここで T_b は素材の温度、 k k' は加工速度、加工方法、材料などに依存する定数、 p は単位体積当りの仕事量(加工応力)、 J は仕事の熱等量、 $\mu \cdot f(S)$ は摩擦仕事、 $f(s)$ は付加的工作、 $1nR$ は変形歪み、 s は付加的剪断歪み、および C はそれぞれ材料の密度および比熱を示す。

式(1)から容易に理解されるように材料の密度、比熱が小さい材料では加工時の温度上昇が大きい。 k 或いは k' は工具と材料の接触状況、接触時間や接触面積に依存する係数で、実際の加工プロセスでは加工速度を制御することで工具への熱放散量を調整することもあるので、加工条件に依存する値で0.5~0.8の範囲である。

2. 加工発熱対策による生産性と品質の向上

2.1 高炭素鋼線引抜きの場合

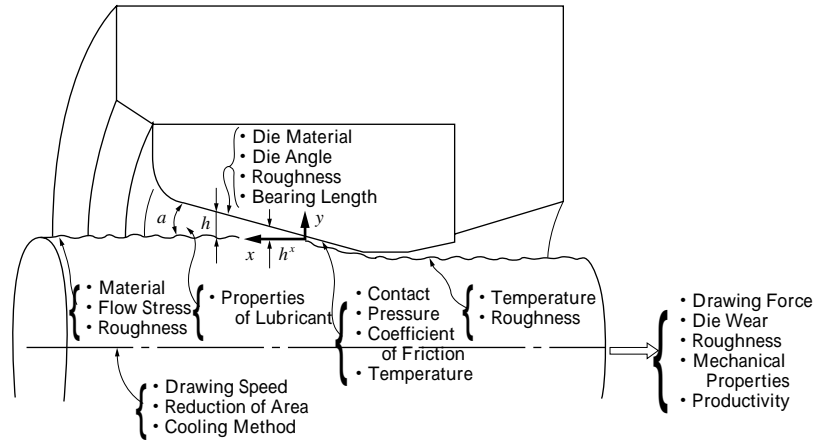
引抜きの生産性向上にはプロセス全体では大単重コイルの使用、操業の連続化・無人化による省力化が重要であるが、加工そのものでは減面率を大きくして引抜き回数を少なくすることや、引抜き速度を高速にすることで時間あたりの生産量を増すことにつける。両者はともに加

第1表 引抜き、押し出しおよび鍛造プロセスで製造される製品例
Table 1 Typical products manufactured by drawing, extrusion and forging process in Kobe Steel

Material	Hot Process			Cold Process	
	Rolling	Extrusion	Forging	Drawing	Forging
Steel Ti-alloy Superalloy etc.	○			○	● Cold Forging Parts
	○			●	● Carbon Steel Wire SUS, Ti-alloy etc.
		○		●	● SUS, Ti-alloy and Superalloy Tubes
			○	●	● Ti-alloy, Superalloy Disk for Aerospace ● Crank Shaft Nuclear Vessel
			○	●	● Super Conducting Wire, Clad Wire
Cu-alloy		○		●	● Cu-alloy Bar, Tube Air Condenser Tube etc.
Al-alloy		○		●	● Al-alloy Bar, Tube and Wire
			○	●	● Tube and Shape for Structures
				●	● Aerospace and Automobile Parts

第1図 引抜き加工の摩擦と潤滑に影響を及ぼす因子

Fig. 1 Factors affecting on lubricating condition during drawing



工時の発熱を大きくし、工具寿命を短くする。

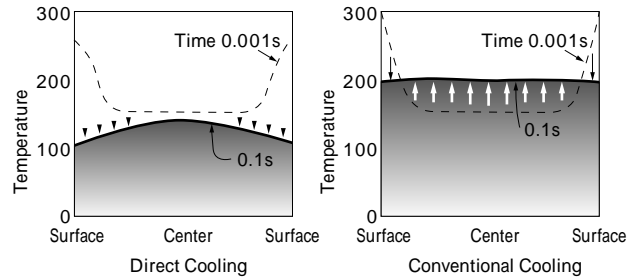
引抜き加工は周知のとおりダイス出口の製品に引張り力を与え、ダイス穴形状に変形させるので自ずと減面率に制約があり、大きな減面率で加工するためにもダイス界面の摩擦を小さくすることが重要である。摩擦に影響を与える諸因子¹⁾は第1図に示すように種々あるが、究極的には製品表面を用途に応じた光沢度に保ちながら摩擦を小さくすることが望まれる。鋼線の場合、摩擦による表面温度は通常の潤滑状態で操業すると300~400にも達し、それはダイスおよび線材に伝わり、線材の平均温度は伸線速度とともに上昇し200以上に達する。ところが高炭素鋼線ではこのような高温で歪み時効が発生し、靱性が低下する問題が生じる。

品質を確保しながら生産性を高めるために線材の温度上昇を抑え、かつ加工速度をあげる手段として二つの方法が考案された²⁾。その一つは多パスの連続伸線で各パスごとの温度が一定になるように減面率を設定する方法(等温パススケジュール法)で、時効による品質劣化が生じない温度下で高速化が実現した。他の一つは線材を直接冷却することによりダイスおよび線材の温度上昇を抑える方法で、冷却伸線と呼ばれる。その効果の一例を第2図に示す。線材断面の温度分布は直接冷却することによりダイスを出た直後(0.001秒後)で外周で40, 0.1秒後には中心部でも70程度低いことがわかる。このような効果により伸線速度を上げて時効による劣化が抑えられ、高炭素鋼線では抜じり特性を落とすことなく加工速度を数十%高くすることができている(第3図)。

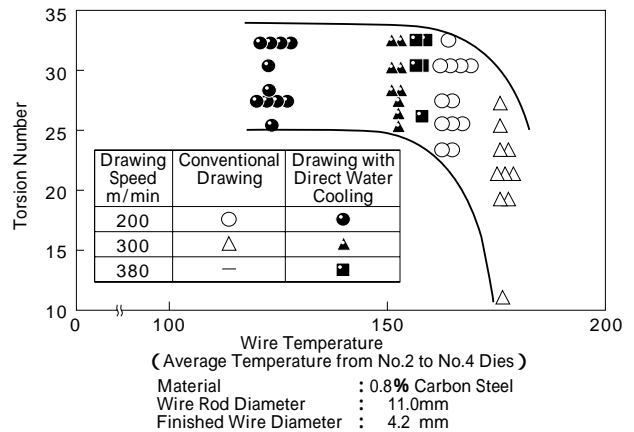
2.2 熱間押し出しの場合

当社における押し出し技術はアルミ合金の線棒管型材、ステンレス鋼管、銅管、銅合金管、超電導線材など主要製品の製造にもちいられる。押し出しの多くは熱間でおこなわれ押し出し圧力が400~1000MPaの範囲であるので、温度上昇 T は材料によっても異なるが100~400にも達する。

押し出し時の欠陥発生を防ぐには温度上昇量を予測しながら製品温度が適正になるようにピレット温度を選定したり、押し出し速度を制御する。加工発熱の影響を受けて押し出し時に結晶粒成長が生ずる銅合金などは次工程の冷間加工(多くは引抜き)で微細結晶粒化され、材質が調整されるので加工熱は問題視されないが、アルミ合金型



第2図 鋼線引抜き時の温度分布に及ぼす直接冷却の影響²⁾
Fig. 2 Temperature distribution in a cross section of high carbon steel wire drawn with direct water cooling

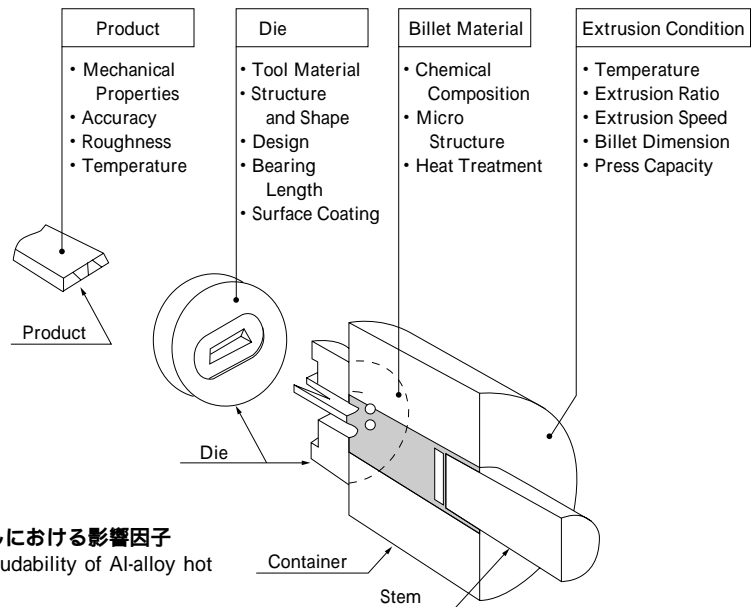


第3図 高炭素鋼線引抜き時の製品温度とねん回値の関係²⁾
Fig. 3 Drawing temperature and torsion number

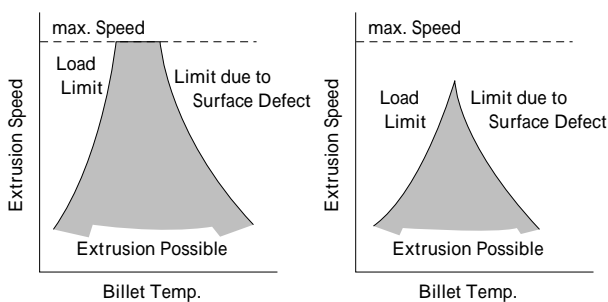
材のように押し出しのまま製品になるものでは、プロセス上の温度制御が非常に重要な意味を持つ。

アルミ合金の押し出し加工のプロセス諸因子(第4図)の中で押し出し速度を左右するのは素材がダイス面上を撻動する際の摩擦である³⁾。これは押し出材の表面性状に影響を及ぼすだけでなく、摩擦にもとづく発熱が結晶粒粗大化などの品質劣化を招き、結果的に押し出し速度を低く抑えざるをえず、またダイス交換頻度が多くなるなど、生産性や操作性を左右する。

アルミ合金の熱間押し出しにおける製品速度の関係は第5図に示すように押し出し荷重限界線と表面性状や割れの発生による表面性状限界線で示される。たとえばサッシなどの建材用に多量に生産されているAl-Mg-Si系合金では押し出し圧よりも押し出し材の表面性状に起因する押し出し速度の上限が問題となる。また、Al-Zn-Mg系やAl-Mg系合金では押し出し圧と割れにより、限界押し出し速度が生



第4図 アルミ合金の熱間押しにおける影響因子
Fig. 4 Factors affecting on extrudability of Al-alloy hot extrusion



(a) A1000, A3000, A6000 Alloys (b) A5000, A7000 Alloys

第5図 アルミ合金の押し限界線図

Fig. 5 Extrusion limit diagram of Al-alloy hot extrusion

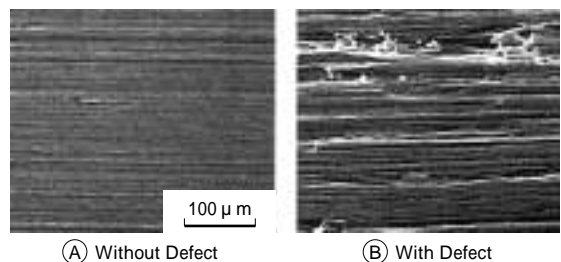
産性向上の障壁となる⁴⁾。

以上のことを熱の観点で整理すると以下のように説明できる。すなわち、アルミ合金押出しのピレット温度は450~500 が一般的であるが、変形熱と摩擦熱が加算され、ダイス出口ではアルミ合金の融点近傍まで上昇する。いっぽう、材料はダイス等工具への放熱により冷やされ、それは押し速度に依存するので、割れや部分溶解が生じない速度で押しをおこなうことは、押し時の発生熱と放熱のバランスを維持することに相当する。

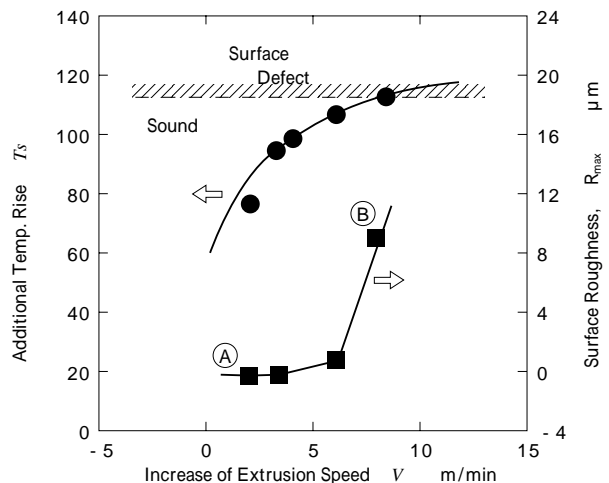
いっぽう、押し速度と温度との関係で押し限界線図を見ると第5図で示したように品質に依存する限界線は製品温度の上限を代表している。アルミ合金の等温度押出しの狙いの一つはこの限界線を越えないように速度調整することであり、この方法で生産性が向上している。また液体窒素による工具冷却をおこなうと数10 の温度低減効果があり、押し速度を増大させうる。

第6図は基準押し速度から増速した場合の押し速度上昇 ΔV と押し材の表面温度上昇 ΔT_s および表面粗さ変化 ΔR_{max} を示す⁵⁾。 ΔV の増大とともに ΔT_s は高くなり、ある限界温度 ΔT_s を越えると表面粗さは急増し、表面性状は①の状態から②のように肌の悪い製品になる。

第7図は押し時の加工発熱を活用し、溶体化処理をおこなう方法を模式的に示す。変形にともなう温度上

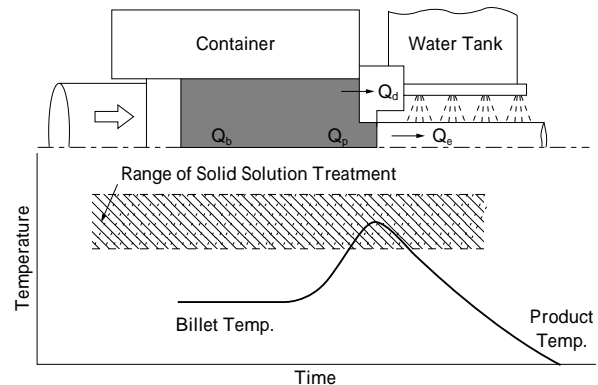


(A) Without Defect (B) With Defect



第6図 アルミ合金押し速度の増大にともなう製品の温度上昇と表面粗さの変化⁵⁾

Fig. 6 Effects of extrusion speed on product temperature rise and surface roughness



第7図 アルミ合金押し中の急冷による溶体化処理

Fig. 7 Water cooling of product at die exit in hot extrusion of Al-alloy

昇で製品は溶体化処理温度域に達し、ダイス出口で強制空冷や水冷却をおこなって焼入れをおこない、これを引張り矯正したのち焼戻し処理することで高強度型材がえられる。このプロセスでは急冷時の変形防止策や焼入れの不均一防止策が必要であるが、押し出し後の熱処理が不要の低コスト生産技術として現在利用されている。

2.3 熱間型鍛造の場合

当社の鍛造製品はロータやクランク軸などの大型品からチタン合金製航空機部品、超合金製ディスク、アルミ合金製各種鍛造品、冷間鍛造による小物精密鍛造品など多種多様である。これらの中でとくに熱間鍛造される大中型製品には熱間型鍛造が活用される。

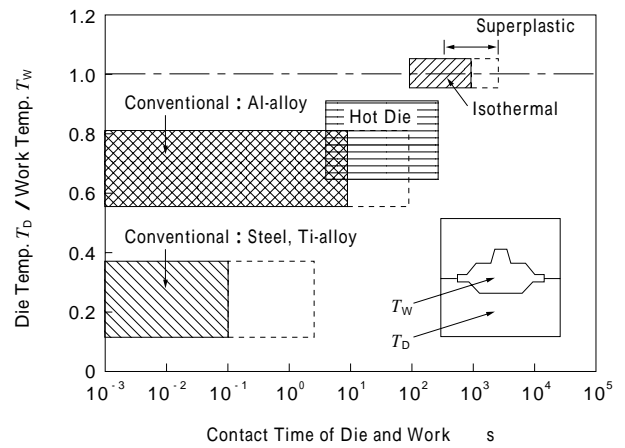
熱間鍛造により材質改善と形状付与をおこなう場合、金型と素材の接触面積が広いので接触時間が長いほど素材の温度が低下する。第8図は鍛造時の金型・素材温度と接触時間との関係⁶⁾を示したもので、鉄鋼系材料では金型/素材温度比が小さく、鍛造速度を速くして素材の温度低下を防止する。アルミ合金では400~500 の金型温度で鍛造されるので、金型/素材温度比は0.8程度である。熱間の変形抵抗が極端に高い耐熱合金やチタン合金では金型と素材の温度をほぼ同一にして鍛造する(超塑性鍛造, ホットダイホーシング)こともある⁷⁾。

アルミ合金やチタン合金は材料の密度および比熱が小さいので式(1)に示したように変形にもなう発熱が大きく、いっぽうで金型との接触による温度低下が生じるので鍛造速度の最適化が重要である。第9図は変形と摩擦による発熱と金型との熱授受を考慮した熱連成変形シミュレーションでアルミ合金製自動車部品鍛造時の温度を予測した結果³⁾を示す。厚肉部(A)では製品温度は金型との接触で初期温度よりも低下しているが、薄肉部(B)では変形量が多く製品温度は初期温度よりも40~50 高くなっており、初期温度や鍛造速度の設定が不適切な場合には結晶粒粗大化などの問題が生じる。過剰な温度上昇の防止や欠陥発生を防ぐための素材形状設計、金型設計、鍛造速度設定には熱連成変形シミュレーションが役立ち、品質確保と生産性向上の両立が図られる。

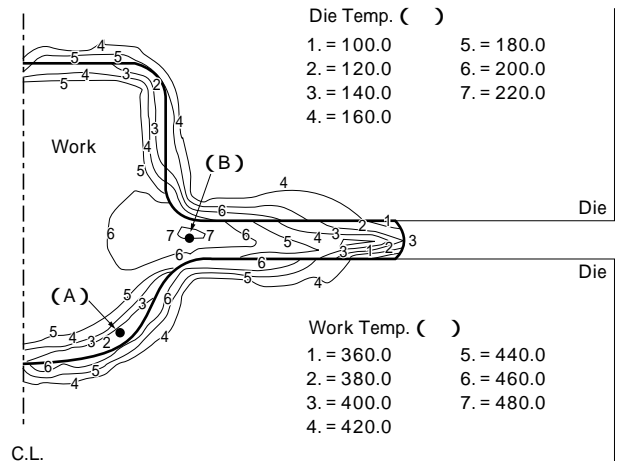
むすび=引抜き、押し出しおよび鍛造における加工発熱が生産性や品質に及ぼす功罪について実例を紹介した。メーカーにとって品質と生産性の両者を向上させることは常に求められ、経験的に対策が打たれてきた。熱連成変形シミュレーションなどの手法が発達するにつれ、数値的な裏付けをもって加工発熱の利用や温度上昇抑制策が具体化され、また加工発熱を活用した組織制御によるプロセスの簡略化が発達することを期待する次第である。

参考文献

- 1) 松下富春: 塑性と加工, Vol.31 (1990), p.958.
- 2) H. Kawakami: Steel Wire Manufacturing-Three Decades of



第8図 金型温度, 接触時間からみた各種鍛造法⁶⁾
Fig. 8 Various forging methods classified by temperature of die and work



第9図 アルミ合金製自動車部品の型鍛造時の製品および型の温度分布³⁾(写真の断面A-A)
Fig. 9 Temperature distribution in a cross section A-A of an Al-alloy automobile suspension part in hot forging

challenges, The Mordica Memorial Award Lecture at Interwire 97 (1997)

- 3) 松下富春ほか: 塑性と加工, Vol.38 (1997), p.106.
- 4) L. Martin et al: Proc 6th Int Aluminium Extrusion Tech. Seminar, Vol.1 (1996), p.11.
- 5) 山野隆行ほか: 第48回鋳造連講論 (1997), p.181.
- 6) G. H. Gessinger: Powder Metallurgy of Superalloys, Butterworth & Co., (1984).
- 7) 松下富春ほか: R&D 神戸製鋼技報, Vol.40, No.1 (1990), p.89.
- 8) 金丸信夫ほか: 軽金属, Vol.43 (1993), p.688.