冷間鍛造用潤滑剤開発と鍛造シミュレータ

小見山 忍^a^a 日本パーライジング(株) 総合技術研究所 (〒 254-0012 神奈川県平塚市大神 2784)

The Development of Lubricant for Cold Forging by the Simulator

Shinobu KOMIYAMA^a^a Central Research Laboratories, Nihon Parkerizing Co., Ltd. (2784, Ohgami, Hiratsuka-shi, Kanagawa 254-0012)**Keywords** : Cold Forging, Lubricant, Tribology, Friction Test, FEM

1. はじめに

金属製品の多くは金型などにより圧力を加えることで所望の形状に変形させる塑性加工によって作られる。通常、金型と被加工材金属との間には潤滑膜を介しており、両者の相対滑りを促すとともに焼付きを抑制する。潤滑膜は、液体状に流動する流体潤滑膜と固体皮膜状で使用される固体潤滑膜とに大別できる。油に代表される流体潤滑膜は、鋼板のプレス成形、鋼線や鋼管などの比較的加工難易度が小さい引抜き加工などで多く使用されている。一方、鋼の塊を巨大な圧力でつぶすなどして複雑形状の自動車部品類を作り出す冷間鍛造など加工難易度が大きい塑性加工領域では、通常、固体潤滑膜が用いられる。冷間鍛造の加工面は、巨大な面圧と高い加工熱にさらされる特殊な環境であり、そこでは流体潤滑膜の保持が難しく金型表面と鋼との焼付きが容易に生じる。そのような環境においても、固体潤滑膜は金型と被加工材との直接的な接触を防ぐことができ、かつ両者の相対滑りを促進するための低摩擦を提供する。

このような潤滑膜の設計には、評価方法が必要とされる。例えば機械摺動部の摩擦低減と摩耗抑制を目的に使われる摺動潤滑塗料も固体潤滑膜に類するが、これらの設計には例えば荷重をかけたボール圧子を接触させた円板状の試験片を回転させることで摺動時の抵抗から摩擦を評価するような「ボールオンディスク形」などの摩擦摩耗試験機を用いて、面圧や温度、摺動雰囲気や速度などによる固体潤滑膜の摩擦摩耗特性を評価する。その評価結果は、実際の機械摺動部における固体潤滑膜の性能によく一致する。冷間鍛造で用いる固体潤滑膜の設計においても同様の摩擦摩耗特性の把握が必要である。しかし、上述したような摩擦摩耗試験機での評価結果はほとんど当てにならず、冷間鍛造の摩擦面環境を再現できる評価方法の検討が必要となっている。

本稿では、冷間鍛造時の潤滑膜の挙動を調査するための評価方法としての鍛造形摩擦試験法(シミュレータ)の開発とそれをういた潤滑剤の評価事例などについて紹介する。

2. 冷間鍛造の摩擦面環境

前述したように塑性加工における摩擦面環境の特徴として、巨大な面圧と加工面温度が挙げられる。金属を塑性変形させるためには最低でも降伏応力以上の大きな力を与える必要があるが、粘土でも扱うかのように固体の金属を流動させながら金型内に押し込んでいくような場合にはさらに巨大な力が必要で、金型と被加工材との接触圧力は数 GPa レベルにもなる。

図1は、円柱状の鋼に柱状金型を差し込んでいき、外金型との隙間に鋼を押し出していくことでカップ状に変形させる後方押し出し冷間鍛造をモデルに、金型と被加工材の加工熱分布を調べたCAE (Computer Aided Engineering) 解析結果である。なお、本報でのCAE解析には市販の有限要素法解析ソフト DEFORM-2D, 3D を用いる。被加工材に差し込まれる柱状金型の先端付近の温度は加工が進むにつれ急速に上昇し高いところでは 300℃ 近くにも達する。

そのほかの特徴として、被加工材表面の拡大も挙げられる。塑性変形にともなって様々な形に変形していく被加工材表面

図1 後方押し出し加工時の加工熱分布解析例

には局所的な圧縮や引張りなどによる表面積の変化が起こる。この程度は加工形態により大きく異なり、伸線加工などのように2倍程度までの拡大ですむものもあるが、冷間鍛造では数十倍以上にもなるものも多い。図2に後方押し出し加工時の表面拡大状況を調べた解析例を示す。1/4カットモデルでの円柱状被加工材端面に位置する潤滑皮膜の部分面積 S_0 は、被加工材端面に差し込まれる柱状金型によるカップ状への加工により S_1 までにも引き伸ばされる。このときの接触圧力は局所的に3 GPaを超え、表面積拡大比は約50倍にも至る。

巨大な圧力下で金型に沿った大きな変形が進むと金型表面の転写が進み、被加工材表面が平滑化していくのも摩擦面環境の変化として特徴的である。加工面での平滑化は金型と被加工材表面の真実接触部を増大するため、それらの摩擦力は大となる。その反対に、金型とは接触しない自由表面で大きな変形がおこる場合もある。この場合の被加工材表面は大きく荒れることになる。複雑形状化が進む冷間鍛造部品では、その部分部分で加工形態やその程度が異なることが多く、摩擦面環境も大きく異なる。

以上に示したように、冷間鍛造は潤滑膜の立場から見ると過酷な環境であることが容易に推測できる。潤滑膜の目的は、加工面に介することで金型と被加工材の直接接触による焼付きを防ぎ、摩擦の低減も提供することであった。図3は鍛造

加工面で引き延ばされていく潤滑膜のイメージである。巨大な圧力と熱は、潤滑膜の結晶崩壊や分解などの構造破壊を促し、金型での強いせん断を受けながらの表面拡大は潤滑膜を摩耗させながら薄く引き延ばしていく。加工面が平滑化すると潤滑膜は足がかりを失い排除されやすくなり、荒れると崩れやすくなる。潤滑膜の設計では、このような環境における潤滑膜の挙動調査が重要となる。対象とする加工面環境を再現し、そこでの潤滑膜の特性を知ることによって適する潤滑膜が設計できるのである。

3. 鍛造シミュレータと潤滑膜の評価事例

冷間鍛造に係る様々な加工形態を考慮し、それらの加工面環境での潤滑膜の挙動を調査する目的で各種鍛造摩擦試験法(鍛造シミュレータ)が開発されてきた^{1)~4)}。これらのほとんどは一定の加工形態での鍛造を行い、そのときの加工荷重や加工品寸法から加工時の摩擦履歴を調べるものである。加工面での摩擦により加工荷重には変化が生じ、金型表面での被加工材の流動状態にも影響するので、摩擦係数と荷重、もしくは加工品形状との関係をCAEで解析することにより鍛造加工面での摩擦履歴を定量的に把握することができる。これらの鍛造シミュレータを組み合わせることで、加工対象の鍛造形態により適した固体潤滑膜を選定できるし、新たな潤滑技術の開発なども効率的に進められる。

潤滑剤開発に従事している著者らは、対象とする鍛造部品の製造に適する潤滑膜設計を目的に、その加工形態の特徴を抽出して摩擦状態が調べられる鍛造シミュレータの開発にも取り組んできた。以下に、そのいくつかを紹介する。

たとえば、シャフト系の部品などを製造する際に、棒鋼材をその径よりも細い金型内に押し出して軸径を細めていく軸絞り加工における摩擦特性を高感度で比較する方法として「バルジ変形をとる前方押し出し形摩擦試験法⁵⁾」を開発した。図4に示すように、ダイス導入部に空間を有する絞りダイスを用いて円柱状試料に前方押し出し加工を行う摩擦試験法であり、押し出し時ダイス入口での摩擦抵抗によりダイス導入部空間への試料側部の張出し(バルジ)変形が起こり軸方向に押し出す材料が消費されるため、加工ストロークによる押し出し長さ

図2 後方押し出し加工での表面拡大例

図3 鍛造加工面での潤滑膜の薄膜化と機能維持

は摩擦係数に依存して大きな変化を示す。押出し長さにより大きく変化する試料高さと摩擦せん断係数との関係を図5の如くCAE解析による校正線図として作成しておくことで、潤滑膜毎に鍛造時の摩擦状況を定量的に評価することができる。図6は、一般に工業使用されている各種潤滑剤を比較評

図4 バルジ変形をともなう前方押し形摩擦試験法原理図

図5 摩擦せん断係数を算出する校正線図

図6 前方押し加工時の摩擦状態比較結果

価した結果である。常温で加工したものは全体に摩擦が高く ($m0.16\sim0.26$), 摩擦差も大きかったが, 連続生産時の冷間鍛造金型の温度を想定した $100\sim200^\circ\text{C}$ の範囲では全ての潤滑剤で大幅な摩擦の低減が見られ ($m0.05\sim0.11$), 摩擦差も小さくなることで実用上の問題にはならないことが確認された。

自動車のギア部品類には, 図7のように円柱状鋼材側部を樽状に張出す工程に続き, 歯出し工程の金型内に大きな接触圧力と表面拡大をとまって押出されるものが多い。前述したように自由表面での張出し変形による表面荒れで, その上に被っている潤滑膜の一部が剥がれ落ちるなどのダメージを受けるが, それにより潤滑能が悪化すると次の歯出し過程での荷重増大で金型の寿命を早めたり, 材料の流動不良となったりなどの不具合を生じる。

このような複雑な変形が組み合わさった場合の潤滑挙動は推測が難しく「据込み-押し形摩擦試験法⁶⁾」や「据込み-ボールしごき摩擦試験法⁷⁾」など, その環境を具体的に再現しようとする新たな評価法を提案している(図8)。これらは, 円柱ビレットの端面が広がらないように拘束した状態で上下金型での圧縮加工(据込み)に次いで, 大きな表面拡大で潤滑膜の薄膜化を強いるカップ状の押し加工や, 球状金型でのしごき加工を行うものである。たとえば球状金型でのしごき加工では, 加工ストロークにより刻々と表面拡大が高まっていくことで潤滑膜は非常な薄膜化を強いられる。

図9にしごき加工面の走査型電子顕微鏡像を示す。しごき加工初期(2mm 部位)には結晶状の潤滑膜が見られるが, 加工ストロークが進むとその表面から潤滑膜結晶の残渣が見ら

図7 ギアの閉塞鍛造過程のイメージ

図8 据込みと押し加工もしくはしごき加工との組み合わせ例

図9 しごきストローク位置毎の表面外観

図10 しごき加工による潤滑膜残存状態の推移

れなくなるほど薄膜化が進む。エネルギー分散型X線分析(EDS)で皮膜構成元素の残存状態を調べた結果を図10に示す。潤滑膜を構成するリンと炭素の検出強度がしごき加工により大幅に低下していくことが確認できる。鍛造用潤滑膜の性能はこのような薄膜状態での焼付き抑制と摩擦低減をいかに保てるかで決まるのである。

図11に、前述の工業用潤滑剤についてしごきストロークによる加工荷重の推移を比較する。樽状に張出した被加工材側面のしごき加工では、張出し部の中腹までに最大荷重に達し、計算上では20倍程度の表面拡大に対応する摩擦状態が最大荷重に反映される。さらに下部へのしごきストロークにより荷重は低減していくが表面拡大は150倍程度まで高まることから上述したように潤滑膜は引き延ばされ、潤滑不良や焼付きなどの不具合を生じる。この例では、Lub.Aの荷重カーブに対してLub.Cはストローク8mm以降で荷重の増大が顕著である。Lub.Cは20倍程度の表面拡大まではLub.Aと同

図11 しごきストロークによる荷重推移

等の摩擦状態であったが、それを超えると潤滑膜が表面拡大に追従できずに被加工材表面の局所的な露出が生じ、摩擦の増大につながったものと推測する。このような詳細の潤滑特性の把握が可能となることで、潤滑剤の開発や改善の効率は飛躍的に高められるのである。

4. おわりに

本稿では、CAEを利用した事例紹介として、冷間鍛造で潤滑膜がさらされる加工面環境の理解、およびその環境を再現できる鍛造シミュレータ開発と工業使用の潤滑剤評価例などを紹介した。近年、複雑な塑性変形の3D解析も通常のパソコンレベルで容易に扱えるようになり、これらを利用することでの技術開発の進歩が著しい。非常に厳しく複雑な環境での潤滑挙動の調査が定量的に可能となり、その環境での潤滑膜がどのような機構でその挙動を示すのかなど調べていくべきことが多くなった。今後、さらに深く突っ込んだ解析に取り組むことにより潤滑技術の発展は急速に進むことが期待される。

(Received September 2, 2013)

文 献

- 1) A.T. Male, M.G. Cockcroft; *J. of the Inst. of Metals*, **93**, 38 (1964).
- 2) T. Ohmori, K. Kitamura, A. Danno, M. Kawamura; *Wear*, **155**, 183 (1992).
- 3) H. Kaiser; *Proc. 13th Int. MTDR Conf.*, p.555 (1972).
- 4) S. Isogawa, A. Kimura, Y. Tozawa; *CIRP Ann.*, **42**, (1), 263 (1992).
- 5) 王 志剛, 小見山忍, 山岡祐一; *塑性と加工*, **51**, (597), 953 (2010).
- 6) 王 志剛, 小見山忍, 徳永龍一, 山岡祐一; *塑性と加工*, **51**, (591), 336 (2010).
- 7) M. Hirose, Z. Wang, S. Komiyama; *Key Eng. Mater.*, **535-536**, 243 (2013).