

# ドライブピニオンの高生産性（短サイクルタイム）

## 実現の為の良品条件確立

### Establishment of Quality Criteria for Achieving

### High Productivity (Short Cycle Time) in Drive Pinion Manufacturing

尾崎 晴香\* 伊藤 健司\* 山本 宏樹\* 西村 周三\* 竹本 紘基\* 太田 裕紀\*\*  
Haruka Ozaki Kenji Ito Hiroki Yamamoto Shuzo Nishimura Hiroki Takemoto Hironori Oota

#### Abstract

We addressed quality stabilization and productivity enhancement of the automatic forging of drive pinions. Compared to manual machines, automatic forging systems offer superior mass-production capability due to shorter cycle times. However, elevated die temperatures hinder the formation of lubricant films, resulting in defects such as reduced shaft length and underfill. Our initial attempts to improve cooling through increased lubricant volume and plunger mechanisms proved insufficient due to significant frictional heat. To overcome this challenge, we developed a dual-circuit die cooling system integrating warm-air preheating and water cooling. This system successfully maintained die temperatures within the optimal range of 100–300°C, thereby suppressing defects. Consequently, our approach achieved both high productivity and improved product quality, contributing to the advancement of efficient forging processes.

#### 1. はじめに

当社には、手動機と自動機 の2種類の熱間鍛造プレス機が導入されている。生産効率の向上を目的として、手動機から自動機への切り替えが多く進められてきた。BEV (Battery Electric Vehicle) 部品を含む軸物部品の増産に伴い、手動機の負荷が増加傾向にある。負荷軽減と新規品受注への対応のため、鍛造工程を自動機へ切り替える必要が生じた (Fig. 1)。工程変更対象として、重量が3~4kgと重く、作業負荷の大きいドライブピニオンを選定した。

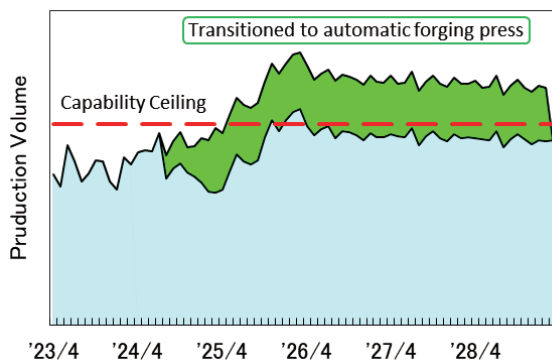


Fig. 1. Load Forecast of Manual Forging Machine

自動機は手動機と比較して、サイクルタイム (円柱状のピレットから鍛造品 1 個が成形されるまでの時間) が短く、量産に適している。一方で、サイクルタイムが短い場合、材料投入頻度の増加に伴い熱鍛金型の温度が上昇する。鍛造品の品質を安定させるには金型温度の管理が重要になる。本稿では、二回路式型内冷却装置を用いた、自動機におけるドライブピニオンの良品条件確立の取り組みについて述べる。

#### 2. 現状把握

##### 2. 1 自動機鍛造における金型温度管理について

ドライブピニオンは、Fig. 2 に示すように細長い軸形状が特徴である。自動機ではこの軸長の良品判別に画像判別装置を使用している。Fig. 3 には画像判別装置による軸長寸法の測定結果を示す。各点は鍛造品 1 個ごとの軸長寸法を表しており、鍛造数の増加に伴って軸長が短くなる傾向が確認された。さらに、軸長が短い製品では、全数において軸先

端の欠肉が発生していた。これらの特徴は、手動機による鍛造品では確認されなかった。

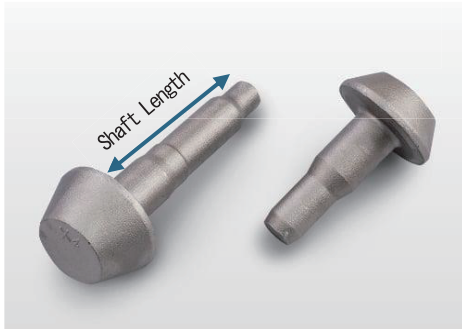


Fig. 2. Pinion, Differential Drive

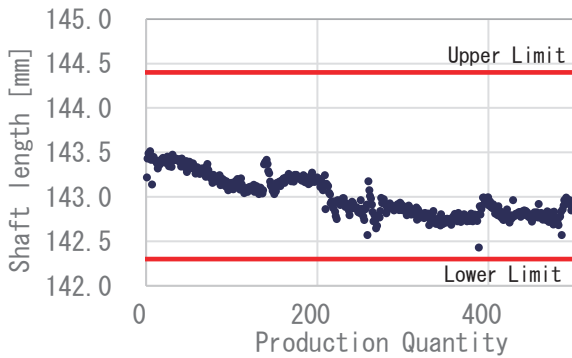


Fig. 3. Shaft Length Data from Image Recognition System

自動機のみで発生する軸長短に対して要因分析を実施した。その一部を Fig. 4 に示す。金型表面に塗布された潤滑材は乾燥して被膜を形成し、この潤滑被膜によって金型と材料との摩擦が低減されスムーズな成形が可能となる。しかし、何らかの要因で潤滑被膜が形成されない場合、金型-材料間の摩擦が増加し成形が阻害され、欠肉や軸長短などの不具合が生じる。適切な潤滑被膜ができるか決める因子として、型温度、潤滑剤塗布量、潤滑剤糖度、などが挙げられる。特に潤滑被膜の形成は金型温度と密接な関係がある。型温が 100℃を下回ると潤滑液が乾燥せず被膜が形成されない。一方、金型温度が 300℃を超える高温域では、ライデンプロスト現象が発生し潤滑液が金型表面に接触した瞬間に急速に蒸発することで、蒸気の膜が形成され、潤滑被膜の形成を妨げる。これらの現象を踏まえ、潤滑被膜の安定的な形成には、金型温度を 100℃～300℃の範囲に維持することが最適であるとされている。

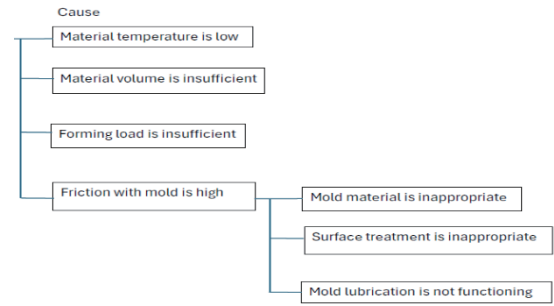


Fig. 4. Cause Analysis (FTA)

Fig. 5 にドライブピニオンの荒地成形における累積摩擦仕事量と型温の関係を示す。累積摩擦仕事量は成形開始から成型完了までに金型表面へ摩擦がする仕事の量を指す。荒地工程の中でも変形が大きい 3 カ所 (①～③) で熱電対による型温測定を実施し、解析による累積摩擦仕事量との比較を行った。断面積の変化量が最も大きい点①において型温・累積摩擦仕事量共に最大となった。以下、本稿における型温は全て点①で測定したものである。

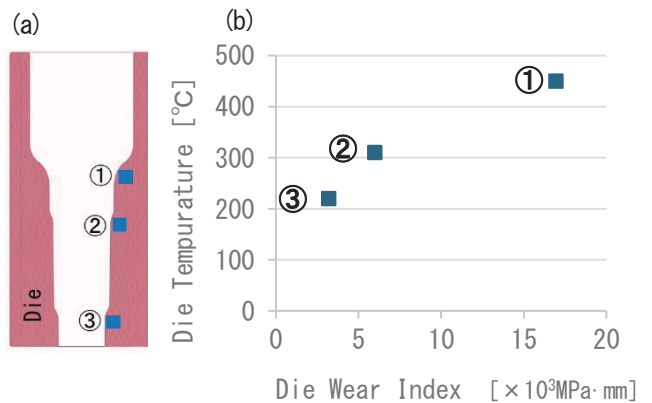


Fig. 5. Die Temperature Measurement Location

(a) Measurement Points

(b) Die Temperature and Wear Index

Fig. 6 に手動機と自動機での金型温度測定結果を示す。横軸は鍛造個数、縦軸が金型温度を表す。鍛造開始前に、温風予熱装置を用いて型温度を 100℃まで昇温した。手動機は約 250℃の一定温度で連続鍛造が可能であった。一方自動機では、鍛造開始から約 20 個の時点で、潤滑使用の最適温度範囲を逸脱している。自動機特有の軸長短不良改善のためには、金型温度を適正範囲に維持した状態で鍛造しなくてはならない。

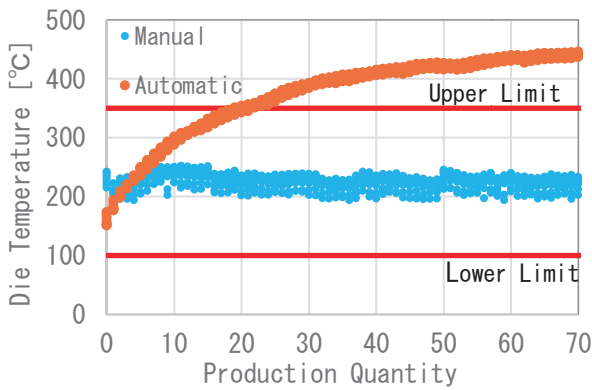


Fig. 6. Die Temperature in Manual/Automatic Forging

熱間鍛造における、成型時の入熱と排熱の関係について Fig. 7 に示す。入熱因子となるのは、材料の接触熱・摩擦熱、排熱因子としては、型潤滑液による金型表面との熱交換・気化熱が挙げられる。材料温度は1230°C、初期型温度は100°C、型の表面積は 0.034m<sup>2</sup>、接触時間は 0.8s、摩擦仕事量を 26000Mpa・mm、潤滑液量は 100ml とした。材料の変形時に発生する熱は考慮しない。1 回の成形における金型への入熱は 79.21kcal、排熱は 61.77kcal、収支は+17.44kcal。熱収支から換算すると、型温度は 67.16°C 上昇する。温度上昇を抑制するため、①潤滑液量の増加、②潤滑液接触面積増加によって熱交換の促進を狙った。

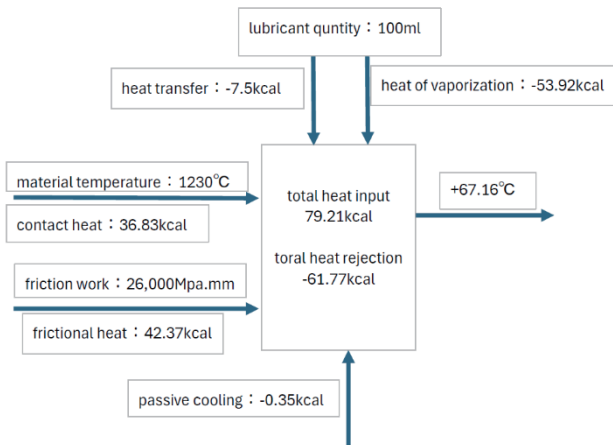


Fig. 7. Heat Balance of Hot Forging Dies

## 2. 2 潤滑液増加による熱交換の促進

潤滑液は被膜形成による潤滑機能の他に、型冷却の機能も担っている。金型へ塗布する潤滑液量を増加させて、型温の低下を狙った。Fig. 8 に潤滑液量と型温度の関係性を示す。潤滑液量を 20ml から 400ml の範囲で変化させ、100 個まで鍛造した時点での型温度を測定した。200ml 付近で型温が最も低くなったが、潤滑の適温範囲までは冷却されなかった。

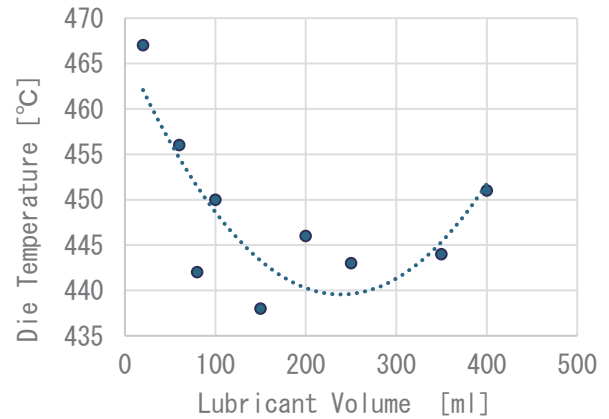


Fig. 8. Lubricant Volume and Die Temperature

## 2. 3 潤滑-金型間の接触面積増加

高温状態の金型に潤滑液が接触すると、金型-潤滑液間で熱交換がなされ、金型温度は低下する。加えて、潤滑液が気化する際に金型の熱を奪うことで金型が冷却される。しかし、型内を流れる流路の途中で潤滑液がせき止められ、高温のまま滞留すると、熱交換が発生せず型温は上昇する。金型の温度が上昇し続け 350°C 以上になると、型と潤滑液の間に蒸気の層が生成され、潤滑液が金型と接触しなくなる。潤滑液が型に接触する面積が半分になると、式(2)より交換できる熱量も半分となる。

$$Q=h \times A \times \Delta T \times t \quad (2)$$

Q: 熱量 [J]、h: 熱伝達係数 [W/m<sup>2</sup>・K]、A: 接触面積 [m<sup>2</sup>]、 $\Delta T$ : 温度差 [K]、t: 接触時間 [s]。潤滑液による型冷却の効果を十分に発揮するには、熱交換の完了した潤滑液を如何に素早く型の外部へ放出できるかが重要となる。潤滑液の滞留を解消するため、型内部にボールプランジ機構を導入した。Fig. 9 に機構の簡略図を示す。

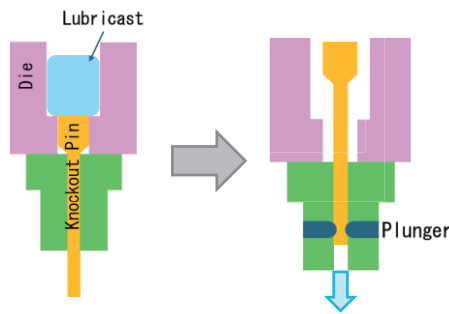


Fig. 9. Diagram of Plunger Mechanism

成型後の製品を持ち上げるために型の下部にノックアウトピンが挿入されており、これが型の出口を塞いで潤滑液が滞留していた。プランジャを利用しノックアウトピンを浮かせることで、潤滑液は留まることなく型表面を流れることが出来る。Fig. 10 にプランジャ使用時の荒地金型温度を示す。軸長と軸径の異なる4品番(A~D)で測定を実施した。測定時の潤滑液量は120mlで一定である。

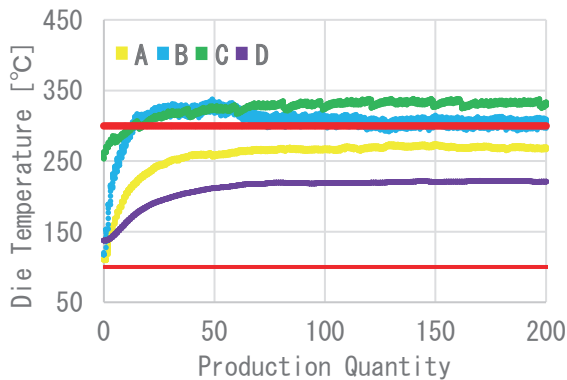


Fig. 10. Die Temperature during plunger operation

A品番及びD品番は、連続鍛造中も200~300°Cの安定した型温を示した。この2品番においては、プランジャによる潤滑液の排出が、型温度上昇抑制に効果的であることが確認された。しかし、B品番及びC品番は、プランジャを導入しても金型温度が300°Cを下回らない。Fig. 7で示すように、入熱因子の中では摩擦熱が支配的である。A~C品番の軸長と摩擦仕事量の関係をFig. 11に示す。軸長が長い品番では成形量時の摩擦仕事量が大きく、金型温度が高い傾向が確認された。

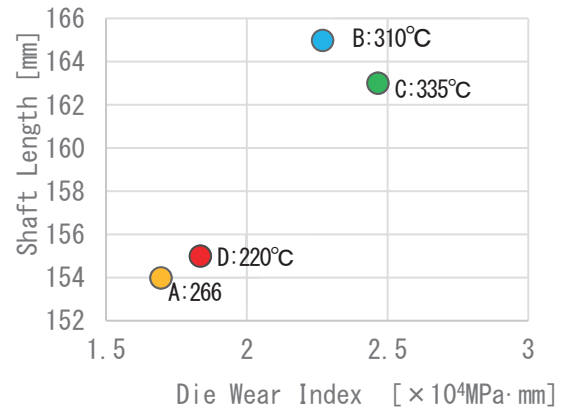


Fig. 11. Die Temperature and Wear Index

### 3. 目標設定

摩擦仕事量の大きい品番では、型潤滑による外部からの冷却だけでは温度上昇を抑制できない。そこで、型内水冷装置を導入して、軸形状に依らず100~300°Cの型温度で連続鍛造することを目標とした。

### 4. 型内水冷装置の導入

#### 4. 1 二回路式金型の設計

型内冷却を行うには、既の実施中の型内予熱との兼ね合いが課題であった。当初は、螺旋状の溝に温風を流して予熱を行い、予熱完了後は同じ溝に入れ替わり水を流そうとした。しかし、この切り替え構造は、水の逆流により温風発生装置を故障させる恐れがある。そこで螺旋溝を二系統に分離して温風と水を個別に流せる金型を設計した。Fig. 12に二回路式金型の概略図を示す。この金型を用いて、C品番の金型温度測定を実施した(Fig. 13)。連続鍛造中の金型温度について、約250°C付近の安定した温度で保持することが可能となった。

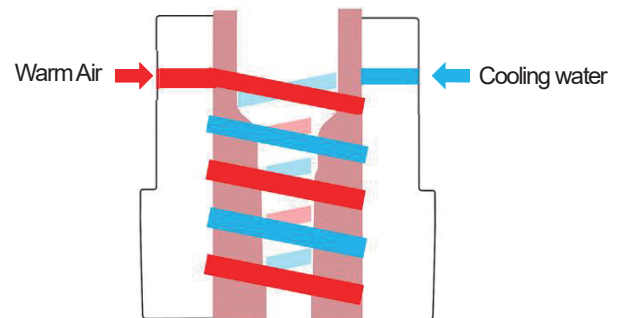


Fig. 12. Schematic Diagram of Dual-Circuit

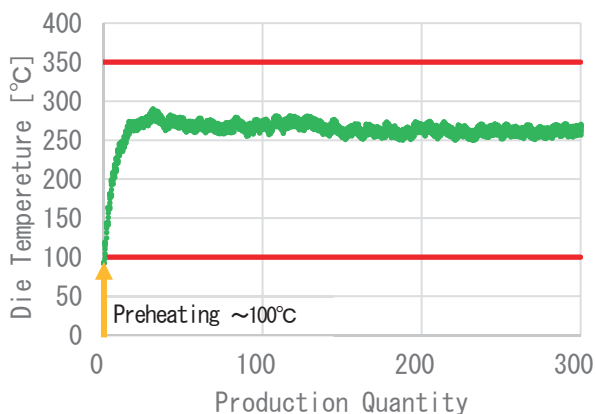


Fig. 13. Die Temperature (C)

#### 4. 2 エアーによる急速冷却防止

水を用いる金型冷却装置のもう一つの課題として、プレス機が停止した際の急激な温度低下が挙げられる。Fig. 14 はプレスが停止してから 150s 間の金型温度変化である。冷却装置未使用の場合、鍛造停止後の型温低下は 150s 間で 100°C 程度であった (緑線)。100°C 以上の金型温度を維持しているため、再予熱を行わず鍛造を再開することができる。冷却装置導入時は、同じ秒数で 200°C 以上の急激な型温低下が見られる。この場合、再度 1 時間かけて予熱を行い、型温を 100°C 以上まで上昇させた状態で鍛造を再開することが望まれるが、操業中は長時間プレスを止めることは難しい。プレス停止に伴い水冷が中断された直後に、型内の溝に残った冷却水が気化して熱を奪い、型温度の急激な低下を発生させたと考えられる。対策として溝に残った水を払い出せるよう、プレス停止後は型内に追い出しエアールが流れるような経路を追加した。追い出しエアール導入後の型温度低下について 30°C 程度の改善が見られた (黄線)。鍛造再開後の金型温度が 100°C を下回っていない場合、再開後の予熱が不要となる。

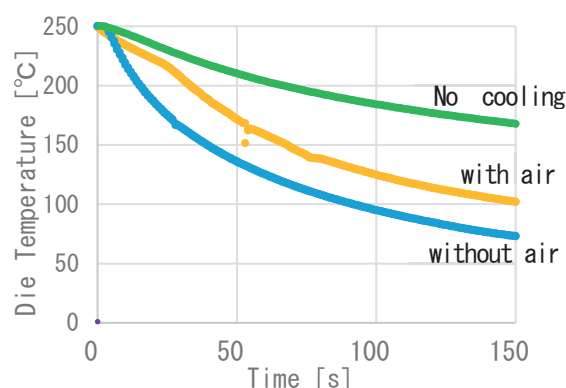


Fig. 14. Temperature change after forging cessation

#### 5. おわりに

金型温度安定化に必要なパラメータ抽出のため、鍛造中の金型を対象とした入排熱機構を解説した。自動機におけるドライブピニオンの鍛造では、二回路式金型の導入により金型の温度を制御することで軸長短や欠肉の発生を抑制できる。また、冷却装置の運用方法を工夫することで、プレス停止後の急激な温度低下を防ぎ、再予熱の手間を低減することも可能となった。これらの取り組みにより、量産性と良品生産の両立が実現でき、今後の鍛造工程のさらなる効率化に貢献するものと考えられる。