

CVJ アウターレース用温間サイジング工法の開発

Development of Warm Sizing Method for CVJ Outer Races

阿部剛士 T. ABE 小西功一 K. KONISHI 栗栖健一 K. KURISU
 福田修平 S. FUKUDA 松本和也 K. MATSUMOTO

We have developed a warm sizing method that reduces CO₂ emissions from the forging production line of CVJ outer races. The conventional process took a long time to go from heating to cold sizing. We hoped to reduce the energy consumed by consolidating processes, so we investigated the use of warm sizing to incorporate cold sizing into the warm forging process. Eliminating cold sizing using this method reduced CO₂ emissions by 24% and forging costs by 13%. Although based only on the results of our own research, this technology is unique in Japan and is considered to be extremely advanced.

Key Words: CVJ outer race, warm sizing, cold sizing, CO₂

1. はじめに

近年、世界全体が脱炭素に取り組む中、自動車業界においても今まで以上のCO₂削減が求められており、生産技術革新による省エネルギーのニーズが年々高まってきている。この要求にこたえるため、ジェイテクトの鍛造素形材ラインでもCO₂排出量の少ない温間サイジング工法を開発し、さらに本工法を活用した工程集約でCO₂排出量の削減に取り組んでいる。本報では、乗用車の一部に使用される等速ジョイント（Constant Velocity Joint : CVJ）の鍛造工程での取り組みを紹介する。

ドライブシャフトは、図1に示すようにインボードジョイント（デファレンシャル側 CVJ）とアウトボードジョイント（タイヤ側 CVJ）とそれをつなぐ中間シャフトで構成されている。その中のCVJに求められる主要な機能は、エンジンからデファレンシャルに伝わった回転速度をトルク交差角度に依存することなく等速でタイヤに伝達することである。アウトボードジョイントを構成する主要部品はボール、インナーレース、ケージ、アウターレースの4種類である。このうちアウターレースの鍛造工程でCO₂排出量の多い冷間サイジングを廃止し、温間鍛造（以下、温鍛）にて素形材の内径・外径の寸法を仕上げる温間サイジング工法を開発した。以下に開発内容を述べる。

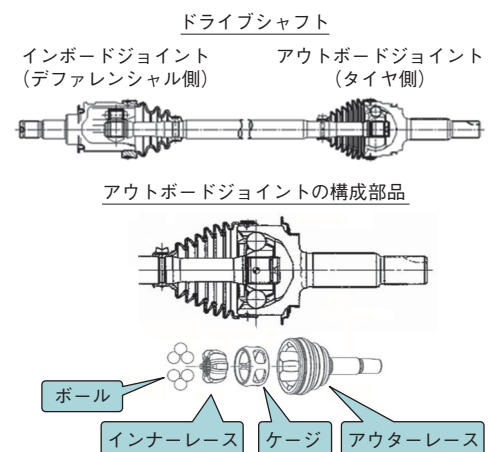


図1 ドライブシャフトとCVJの構成部品
 Drive shaft and CVJ component parts

2. 開発の狙い

今回取り組んだ鍛造素形材ラインは、従来の工程では材料を加熱後、温鍛にて素材形状を成形したのち、規定温度まで冷却し、別ラインの冷間サイジングにて寸法仕上げを行うため、非常に長い工程と中間在庫を必要としていた。そこで、工程を集約することでエネルギーを削減できると考え、冷間サイジングを温鍛工程に取り込むために温間サイジング化を検討した。図2で示すように従来はアウターレースの素形材（以下、ワークとする）の内径・外径寸法の要求精度が高いため、温鍛4工程後に冷間サイジングを行っていたが、温間サイジング化では#1工程と#2工程の前方押し出しの集約と、それに

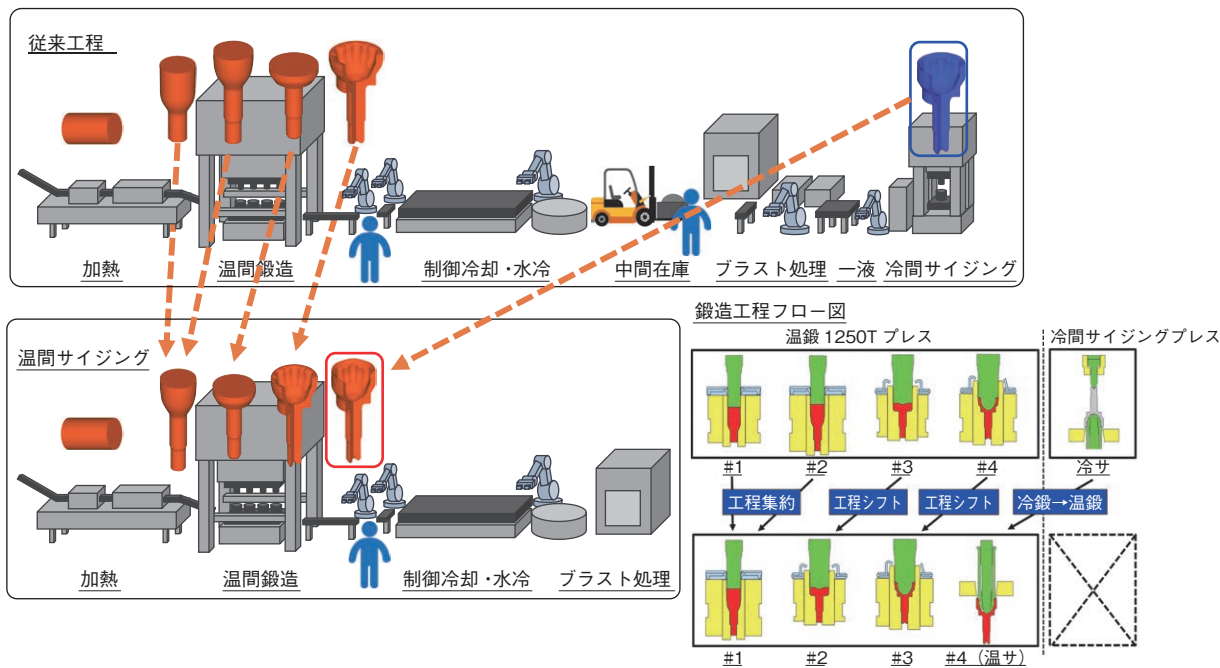


図2 開発工法説明

Explanation of development method

に伴い# 3工程 (据込み) と# 4工程 (成形) をシフトし、冷間サイジングを# 4工程 (温間サイジング) に取り込むことを狙いとしました。

ここで、
 w : 摩耗深さ, K : 係数, P : 面圧,
 V : 相対すべり速度, H : 金型材料の硬さ
 である。

3. 技術課題

3.1 温鍛の工程集約 4工程から3工程への取り組み

従来では# 1工程, # 2工程の2度に分けて前方押出しを行っていたが, # 1工程にて前方押出しを完了させる必要があるため, 必要成形量が増え, 絞り成形部のすべり距離も増加する。そのため, 摩擦熱の式(1)のとおり, 金型温度の上昇が懸念される。

$$Q = \mu mgs \tag{1}$$

ここで、

Q : 摩擦熱, μ : 係数, m : 質量,

g : 重力, s : すべり距離

である。

さらに Archard の摩耗予測式(2)より, 金型の熱軟化で金型硬度の低下が予想され, 絞り成形部の摩耗量増加につながる可能性がある。したがって, 金型の熱軟化抑制による摩耗低減が必要である。

$$w = \int \frac{KP^a V^b}{H^c} dt \tag{2}$$

3.2 冷間サイジングから温間サイジング化への取り組み

はじめにサイジング工法について解説する。まず図3に示すようにカップ口元ストレート形状のワークをダイス上にセットする。その後カップ外径を徐々にしごいていくが, その過程でパンチ形状に沿ってワークが充肉され口元がすぼんだ形状 (アンダーカット) が形成される。この状態ではアンダーカット形状のためパンチをワークから離型できない。

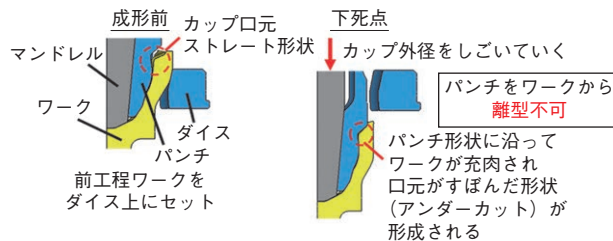


図3 サイジング工法
Sizing method

パンチとワークの離型方法は、図4に示すように、まずカップ端面をストリッパーで押さえ、次にマンドレルがパンチ内をしゅう動すると、パンチとマンドレルの間にすきまが発生する。すきまができることで、パンチがワーク形状に沿って縮径し、アンダーカットを回避することで離型を行っている。

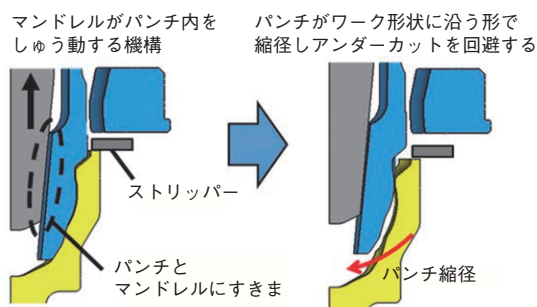


図4 パンチとワークの離型方法
Punch and workpiece releasing

この工法を温間サイジングにおいても採用を検討しているが、温間サイジング化の一つめの懸念事項として、ワークの変形抵抗の低下がある。温間サイジングは冷間サイジングに対しワーク温度が高く、図5の荷重/ストローク線図で示すように、温鍛化により変形抵抗が75%低下することが分かった。そのためパンチを引き抜く際にアンダーカット形状を崩してしまう可能性がある。したがって、ワーク形状維持可能なパンチ設計の確立が必要である。

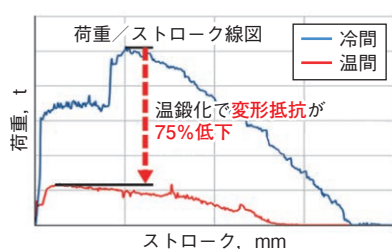


図5 荷重/ストローク線図
Load/stroke diagram

次に温間サイジング化の二つめの懸念事項として、パンチの温度変動がある。温間サイジングは冷間サイジングに対し大幅な温度変動が予測される。熱膨張量の式(3)よりパンチの温度変動の影響で熱膨張量が変化し、ワークの内径寸法のばらつきが懸念されるため、パンチ温度制御によるワーク内径寸法の精度確保が必要である。

$$\lambda = aL_0(t - t_0) \quad (3)$$

ここで、

λ : 熱膨張量, a : 係数, L_0 : 初期長さ,

$t - t_0$: 温度変化

である。

4. 実施内容と結果

4.1 金型の熱軟化抑制による摩耗低減

金型温度をCAE解析した結果、図6で示すように従来に対し温間サイジングでは最高温度が17%上昇することが分かり、熱軟化による金型の摩耗増加の懸念が高まった。

次に熱軟化による金型硬度を検証するため、焼戻しパラメーターによる硬度低下の予測を行った。図7で示す熱軟化による金型硬度予測は、金型に熱を加えたときの硬度予測結果である。従来に対して温間サイジングは金型の硬度低下が予測されるため、対策が必要である。

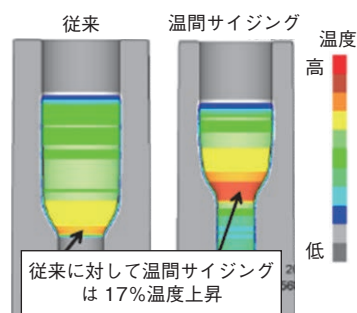


図6 CAE解析での金型温度検証結果
Mold temperature verification result from CAE analysis

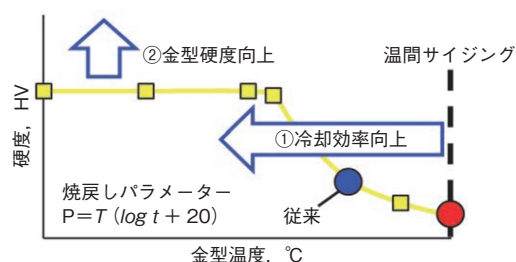


図7 焼戻しパラメーターによる硬度予測結果
Hardness prediction results based on tempering parameters

金型の摩耗を低減するための対策として、①冷却効率向上、②金型硬度向上の2点を実施した。

①冷却効率向上

温鍛工程では型打ち前に水溶性潤滑液を塗布するが、流体解析の結果、潤滑液は大気開放されており、高温部に届いていないことが分かった。そこで潤滑吹き付け角

度を変更し、高温部を吹き付けられるよう最適化を行った。再度、流体解析にて検証したところ、高温部への吹き付け面圧を従来に対して 67% 向上させる結果が得られたので、潤滑液の吹き付け量を増やすことで冷却効率の向上を図った (図8)。

②金型硬度向上

従来材質より高硬度な材質の金型を採用することで硬度を 16% 向上し、硬度低下を抑制した (図9)。

上記2点の対策を行ったことで金型摩耗を抑制することができ、設計目標金型寿命を達成した。

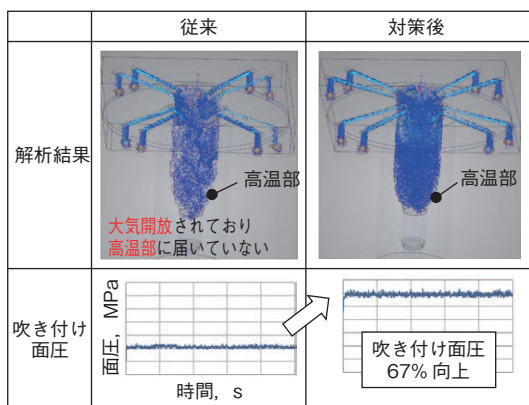


図8 流体解析結果
Fluid analysis result

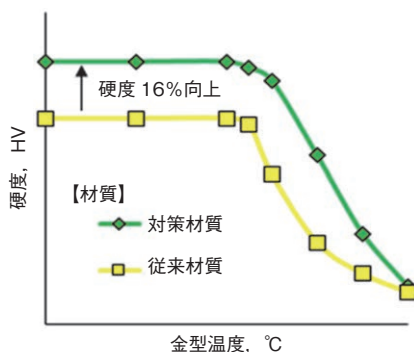


図9 対策後の硬度予測結果
Hardness prediction result after countermeasures

4.2 ワーク形状維持可能なパンチ設計の確立

温鍛化によりワークの変形抵抗が 75% 低下することが分かったため、ワークの形状維持可能な最適パンチ形状の検討を行った。アンダーカット形状が崩れないようにパンチ引き抜き時にワークへかかる荷重 (W) の低減が必要である。そこで、図10に示すパンチの肉厚(t)を変更することにより低剛性化を図ることとした。肉厚の設計方法としてパンチの肉厚変更部位を片持ち梁の先

端 1 点集中荷重モデルと想定し、荷重とパンチ肉厚の関係を荷重計算式(4)より算出した。

$$W = 6EI\delta/l^3 \tag{4}$$

ここで、

W：荷重，E：ヤング率，I：断面二次モーメント，
δ：たわみ量，l：パンチ長さ

である。

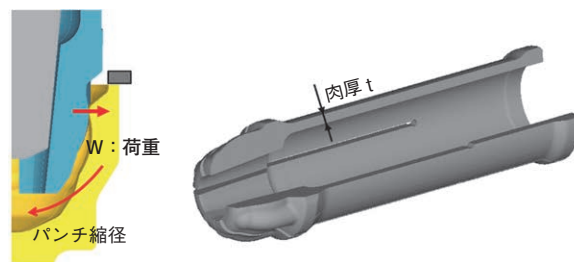


図10 パンチ構造
Punch structure

図11に示すように、現状の設計に対して荷重がワークの変形抵抗低下75%と同じ割合になるようにパンチの肉厚を設定し、パンチ引き抜き時のワークにかかる荷重 (W) を低減させた低剛性設計とすることで、ワーク形状維持可能なパンチ設計を確立した。

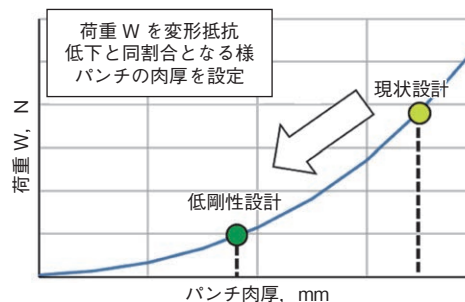


図11 荷重とパンチ肉厚の関係
Relationship of load and punch thickness

4.3 パンチ温度制御によるワーク内径寸法精度確保

熱膨張によるワーク内径寸法の予測を行い、内径寸法の上下限に対して中央値となるパンチ温度を狙いとした。次に、金型の温度推移予測では1ショット型打ち後に温度が上がり、潤滑塗布後に温度が下がる傾向が予測される。したがって潤滑塗布時に十分に温度を下げられない場合は徐々に温度が上昇してしまうため、金型温度が安定するように潤滑条件の最適化が必要である (図12)。

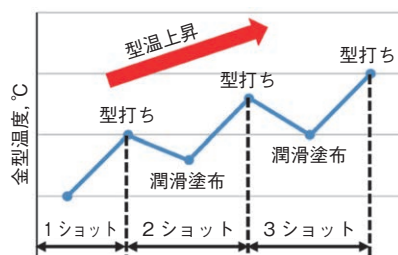


図12 金型温度推移予測

Prediction of mold temperature transition

ワークの内径寸法精度を確保するための対策として、①潤滑吹き付け位置の最適化、②潤滑流量監視の2点を実施した。

①潤滑吹き付け位置の最適化

従来では固定されていなかったノズルを固定化し、吹き付け位置をパンチの高温部に変更した(図13)。

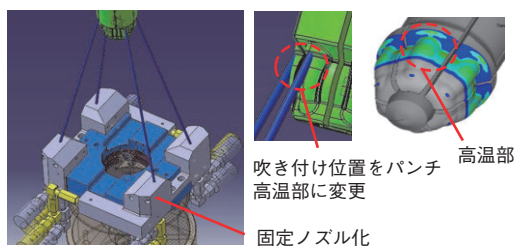


図13 潤滑吹き付け位置

Lubrication spray position

②潤滑流量監視

流量監視システムを採用し流量制御を行い、流量が設定した上下限から外れた場合はプレスを停止するシステムとした。上記2点の対策を行ったことでパンチ温度が安定し、ワーク内径寸法も工程能力を満足できた。

4.4 量産開始後の課題

技術課題を対策し、量産に移行したが温鍛4工程においてサイジング用ダイスの早期破損が発生した。この問題を対策するためCAE解析を実施した結果、ダイスに付与される応力は問題なく、成形過程でワークとダイス間に閉じた空間が発生することで破損につながっていることが分かった(図14)。

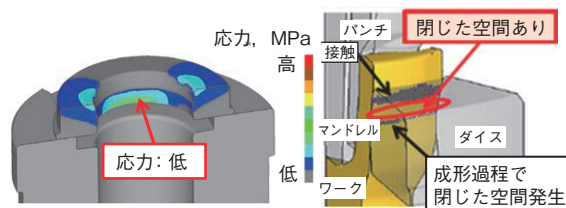


図14 サイジング用ダイス解析結果

Sizing die analysis result

ダイスが割れるメカニズムを図15に示す。ダイスに潤滑塗布した後、高温のワークを投入することで燃焼ガスが発生する。しごいていく過程で閉じた空間が発生し、閉じた空間の燃焼ガスが圧縮されてエロージョン(流体による物理的攻撃)が発生するメカニズムとなっている。

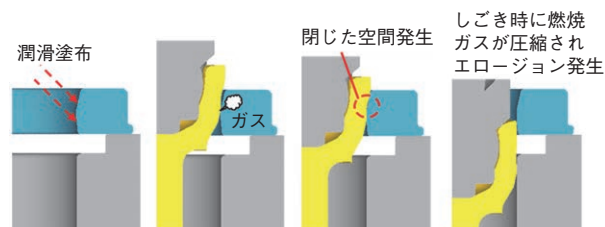


図15 サイジング用ダイス割れメカニズム

Sizing die cracking mechanism

閉じた空間の発生原因を調査すると、図16のようにワーク角がダイス角より大きくなっており、しごいていく過程でワークテーパの頂点が先にダイスに接触するため、閉じた空間になることが分かった。

この対策としてワークテーパ角の最適化を実施し、ワークとダイステーパを同角度に統一することで閉じた空間をなくした。これによりダイスの早期破損がなくなり、設計目標金型寿命を達成することができた。

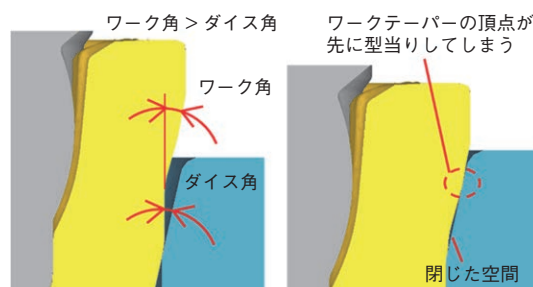


図16 閉じた空間の発生原因

Causes of closed spaces

5. 開発効果

5.1 CO₂ 排出量削減効果

従来のCO₂排出量に対して、開発後はCO₂排出量を24%削減できた。CO₂削減効果を図17に示す。

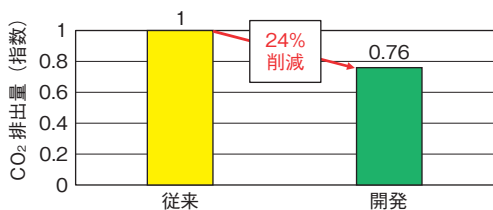


図17 CO₂ 排出量削減結果
CO₂ emission reduction

5.2 鍛造原単位削減効果

従来の鍛造原単位に対して、開発後は鍛造原単位を13%削減することができた。原単位削減効果を図18に示す。

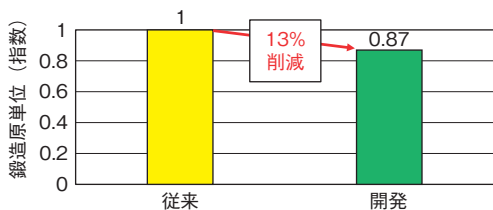


図18 鍛造原単位低減結果
Forging cost reduction

5.3 その他の効果

従来に対して、開発後は工程数を33%、温鍛中間在庫を100%削減することができた。各効果を図19、図20に示す。

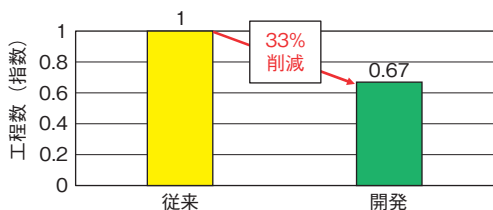


図19 工程数削減結果
Process count reduction

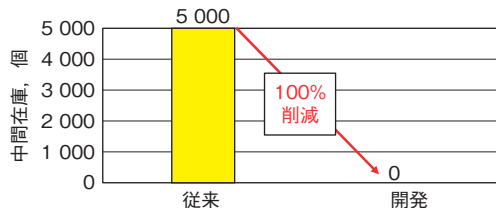


図20 中間在庫削減結果
Intermediate stock reduction

6. おわりに

今回の開発の結果、冷間サイジングを廃止して省工程化することでCO₂排出量を24%、鍛造原単位を13%削減することができた。自社の調査であるが、2023年6月現在において温間サイジング工法は日本国内でOnly Oneの技術であり、きわめて先進性が高いと考える。本報で開発した技術である温間サイジングは、これまでアウターレース8品番へ工法展開してきた。今後も他品番への展開を計画しており、環境問題とさらなる商品力向上に貢献していきたい。

参考文献

- 1) 三島嗣夫：CVJ小規模鍛造ラインの開発，JTEKT ENGINEERING JOURNAL, No. 1013 (2015) 77.

筆者



阿部剛士*
T. ABE



小西功一*
K. KONISHI



栗栖健一*
K. KURISU



福田修平*
S. FUKUDA



松本和也*
K. MATSUMOTO

* 生産技術本部 素形材革新部