

熱間鍛造用金型の製作技術の構築

工業材料科 主任研究員 福 田 洋 平
所 長 馬 場 恒 明

金型を使用している県内企業の多くは金型の設計・製作を県外への外注に頼っており、金型に関するノウハウの蓄積が少なく、現場で起こる様々な課題に対して改善が進まない状況にある。また近年、金型を用いて量産加工を行う自動車産業関連の誘致企業が増えており、それら企業からも県内金型技術の高度化が求められている。

本研究では、本県の金型技術のボトムアップを図るため、熱間鍛造用金型の①熱処理、②切削加工、③表面処理および④塑性加工解析に関する基礎技術の構築に取り組んだ。

1. 緒 言

本県の産業は、造船やプラントといった大型・単品物の製造が多くを占めており、大型製品向けの溶接や機械加工に関する特徴的な技術の集積がある。しかし、その一方で大量生産に必要な技術の集積は少なく、例えば、自動車産業関連の製造を行う県内の事業所の多くは県外からの誘致企業となっている。

大量生産に必要な技術の一つとして金型の製作技術が挙げられるが、都道府県別の金型製造企業の本社所在地ランキング^[1]において、長崎県は沖縄県に次いでワースト2位となっており、金型に関する技術の集積が少ないことが窺える。そのような状況の中、金型を使用している県内企業の多くは金型の設計・製作を県外への外注に頼っており、現場で起こる様々な課題に対して改善が進まない状況にある。また近年、自動車産業関連の誘致企業からも県内金型技術のボトムアップが求められている。

そこで本研究では、県内ボルトメーカーが使用している熱間鍛造用金型（JIS 規格 :SKD61 相当品）にターゲットを絞り、①熱処理、②切削加工、③表面処理および④塑性加工解析に関する基礎技術の構築を図り、金型の内製化実現に取り組んだ。

2. 熱処理

工具鋼の焼入れは、脱炭防止および光輝性維持の観点から真空熱処理炉もしくはソルトバスを用いた処理が主流である。しかし、いずれの装置も導入コストが高く、熱処理の専門業者でなければ導入メリットを得ることは難しい。そこで、本研究では低頻度の使用でも導入メリットを得ることができるよう、導入コストが安い小型のマッフル炉を用いて熱処理を行った。

2.1 熱処理条件

マッフル炉の使用による最も大きな懸念は脱炭による表面硬度の低下である。そこで、①大気雰囲気、②窒素ガス流通下、③アルゴンガス流通下および④脱炭防止剤を塗付した4条件で焼入れを行い、各条件における表面硬度の低下を評価した。図1は使用したマッフル炉の写真である。ワークは日立金属(株)のDAC3（SKD61 相当品）とし、サイズはφ50mm×30mmとした。熱処理の条件を図2に示す。雰囲気ガスの流入量は5L/h、脱炭防止剤は(株)ダイケミ製のシープロ202を使用した。



図1 マッフル炉

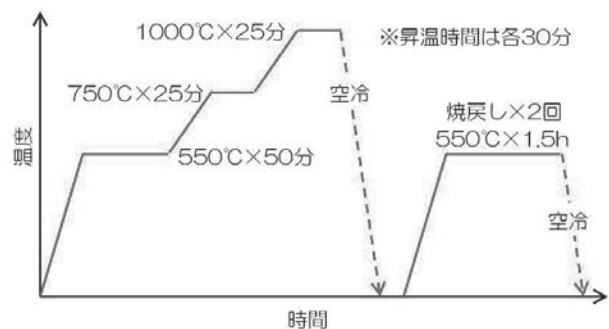


図2 熱処理条件

2.2 熱処理結果

硬度の評価には工具鋼の硬度測定で一般的に使用されるロックウェル硬度計を用いた。硬度の測定結果を図3に示す。ワーク端面を測定面とし、測定結果は4点を測定した平均値である。研削加工により端面を除去していくことで、深さ方向の硬度データを取得した。測定結果を図3に示す。

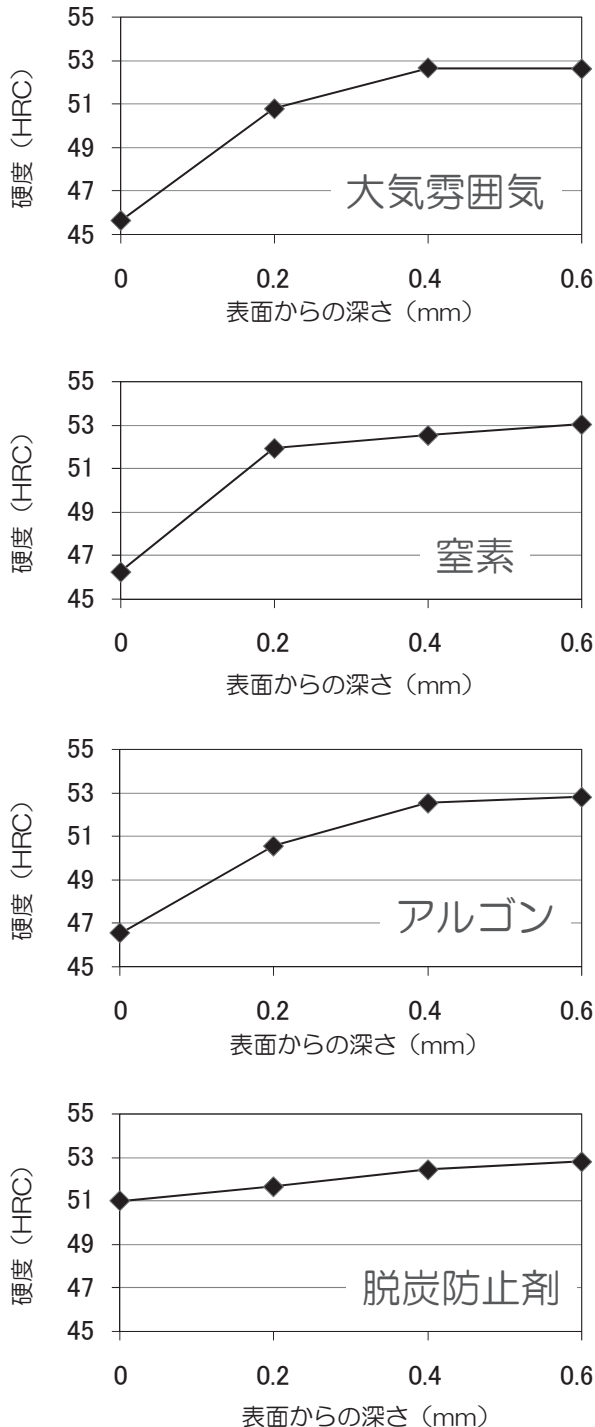


図3 表面硬度の測定結果

測定の結果、大気雰囲気では表面から0.4mmまで脱炭による硬度の低下が確認された。窒素ガス流通下およびアルゴンガス流通下においては、大気雰囲気との大きな差が見られなかった。これは、使用したマッフル炉が十分な気密性を持たず、ガス雰囲気を保つことができないためだと考えられる。脱炭防止剤を塗布した場合、表面硬度はHRC50以上となり、脱炭による表面硬度の低下を抑えることができた。

3. 切削加工

金属材料の加工に用いられる工具鋼は非常に硬く、その切削加工においては、一般的な構造用鋼を加工する場合と異なるノウハウが必要となる。そこで、本研究では熱間鍛造用金型の製作に必要な切削加工ノウハウを蓄積するため、工具鋼のターニング加工実験およびミーリング加工実験を行った。

3.1 CBN工具によるターニング加工実験

CBN（立方晶窒化ホウ素）とは、ダイヤモンドに次ぐ硬度を持つ物質であり、熱に強く、鉄との親和性が低いいため工具鋼の切削加工に使用される工具材種である。

工具鋼のターニング加工におけるCBN工具の工具寿命に関するデータを取得するため、3種のCBN工具を用いた切削実験を行った。

実験条件を表1に、実験結果を図4に示す。

実験の結果、最も寿命の長い工具は耐摩耗性重視のBN1000であった。定常摩耗の進行が非常に緩やかで、切削距離16km時点においても逃げ面摩耗幅は $110\mu\text{m}$ に抑えられていた。そのためワークの大きさ次第では、熱処理後に荒加工と仕上げ加工を一貫して行うことも十分に可能である。ただし、熱処理後の肌面等の切削時にはチッピングが発生しやすく、前工程の管理が必要となる。

表1 実験条件（ターニング加工）

ワーク	DAC3 (53HRC)
工具	住友電工ハードメタル(株) ノンコートCBN焼結体チップ ・BN1000（耐摩耗重視） ・BN2000（耐欠損重視） コーテッドCBN焼結体チップ ・BNC160
切削速度	150m/min
送り速度	0.1mm/rev
切込み	0.2mm
潤滑	水溶性クーラント

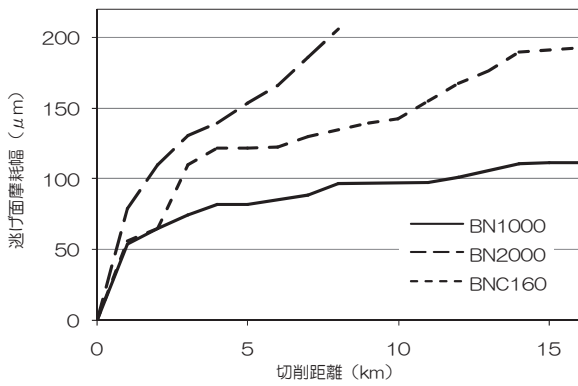


図4 ターニング加工における逃げ面摩耗の進行

3.2 5軸加工によるミーリング加工実験

切削工具向けのコーティング技術の進歩により、放電加工や研削加工によらないコートッド超硬工具を用いた工具鋼の直彫り加工が浸透してきている。金型は自由曲面を持つ場合が多く、切削加工にはボールエンドミルが使用される。しかし、ボールエンドミル切削は、工具軸と加工面の傾きによって切削に寄与する切れ刃の位置が変化し、実切削条件も変わってしまう。

そこで、4種の2枚刃ボールエンドミルを用いて、工具軸を加工面に対して直角にした場合と、45°傾斜させた場合における切削実験を行った。

実験条件を表2に、工具傾斜0°の実験結果を図5に、工具傾斜45°の実験結果を図6に示す。

工具傾斜0°の場合、いずれの工具も240分におよぶ長時間の加工であったがチッピング等を生じることなく安定的に加工することができた。また最大逃げ面摩耗幅は、工具④が最も狭く良好な結果となった。

一方、工具傾斜45°の場合、いずれの工具も切れ刃に欠損が生じ、欠損に至るまでの切削時間には最大で6倍の差が表れた。これは、工具傾斜0°に比べて切れ刃の実切削速度が速くなったことにより、コーティングの性能が顕著に表れたためと考えられる。工具寿命が最も長かった工具②は、切削時間120分で欠損が確認されたが、切削時間100分まで切れ刃の顕著な摩耗は生じていなかった。そのため、切れ刃の欠損はコーティング層が摩耗し超硬合金の母材が露出したことで生じたと考えられる。

本加工実験により、工具鋼のボールエンドミル切削においては、工具軸と加工面は直角に近いほうが工具寿命の面で良いことが分かった。3軸制御加工機は工具軸が固定されており、工具軸と加工面の傾斜は加工面の形状により決まってしまう。一方、5軸制御加工

機は工具軸と加工面の傾斜を変更することが可能であり、工具寿命を延ばすうえで非常に有効なツールとなる。

表2 実験条件 (ミーリング加工)

ワーク	DAC3 (53HRC)
工具	三菱マテリアル(株) ① MP2SB-R3 ② VF2SB-R3 日進工具(株) ③ MSBH230-R3 三菱日立ツール(株) ④ EPBT2060
主軸回転数	10000min ⁻¹
送り速度	2000mm/min (0.1mm/tooth)
軸方向切込み	0.2mm
径方向切込み	0.5mm
工具傾斜	0°, 45° (送り方向に対して直角)
潤滑	MQL

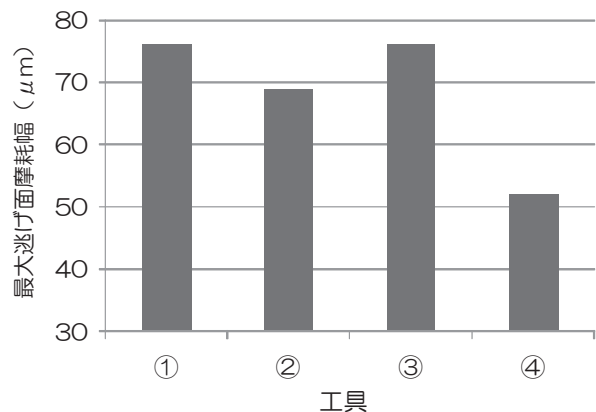


図5 最大逃げ面摩耗幅
(工具傾斜0°、切削時間240min)

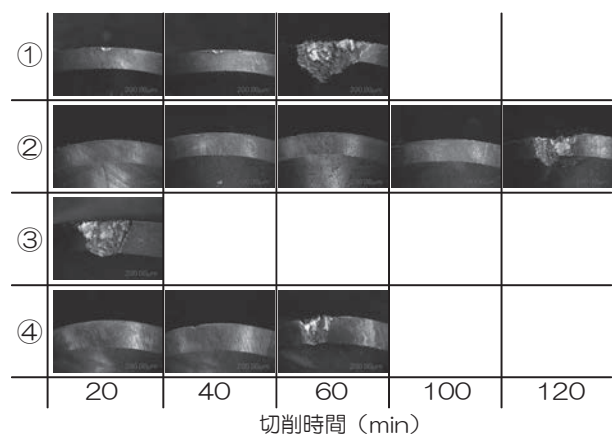


図6 切れ刃の状態 (工具傾斜45°)

4. 表面処理

熱間鍛造金型には、高温強度、靱性、耐摩耗性および耐溶着性等が求められる。しかし、工具鋼において高温強度と靱性はトレードオフの関係にあるため、鋼種選定の最適化だけでは大幅な改善効果は期待できない。一方、表面処理の適用によって熱間鍛造用金型の性能を大幅に改善した事例は数多く報告されている。

そこで、六角穴付きボルトの六角穴を鍛造成形するパンチにラジカル窒化処理を施し、鍛造テストによってその効果を検証した。

4.1 ラジカル窒化処理

ワーク材種は山陽特殊製鋼の QD61 (SKD61 相当品) および QDH (SKD61 相当品改良鋼) とし、アンモニアと水素を作動ガスとした直流放電プラズマによって窒化処理を施した。図7にラジカル窒化の処理条件を、表3に窒化後のビッカース硬度測定結果を示す。

深さ方向における硬度分布を簡易的に把握するため、ビッカース硬度測定は HV10、HV5 および HV2 の3条件で実施した。なお、HV の後に続く数値は試験荷重を表し、数値が小さいほど表面近傍のみの硬度を評価することとなる。HV2 の測定結果より、表面から数十 μm の深さでは 1250HV と非常に高い硬度が得られていることが確認された。

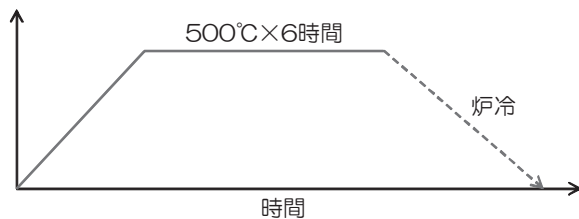


図7 窒化処理条件

表3 窒化後のビッカース硬度測定結果

	QD61	QDH	QD61(窒化)	QDH(窒化)
HV10	657	683	981	967
HV5	695	702	1088	1131
HV2	-	-	1258	1291

4.2 試作パンチによる鍛造テスト

フリクションプレスを用いて、試作したパンチの鍛造テストを行った。ワークは工具摩耗の進行が早く、凝着等のトラブルも生じやすい SUS304 とし、加熱温度は 1000°C とした。①QD61、②QDH、③QD61+窒化、

および④QDH+窒化の4種のパンチを用いて加工を5ショット実施し、加工後のパンチを評価した。

加工後のパンチのエッジ部写真を図8に示す。また、非接触3次元測定装置(三鷹光器株式会社: NH-3N)を用いて測定したエッジ部のプロファイルデータを図9に示す。

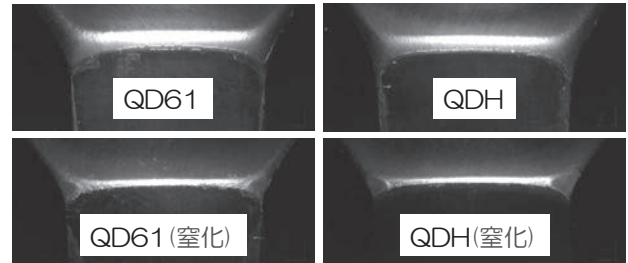


図8 加工後のパンチエッジ部

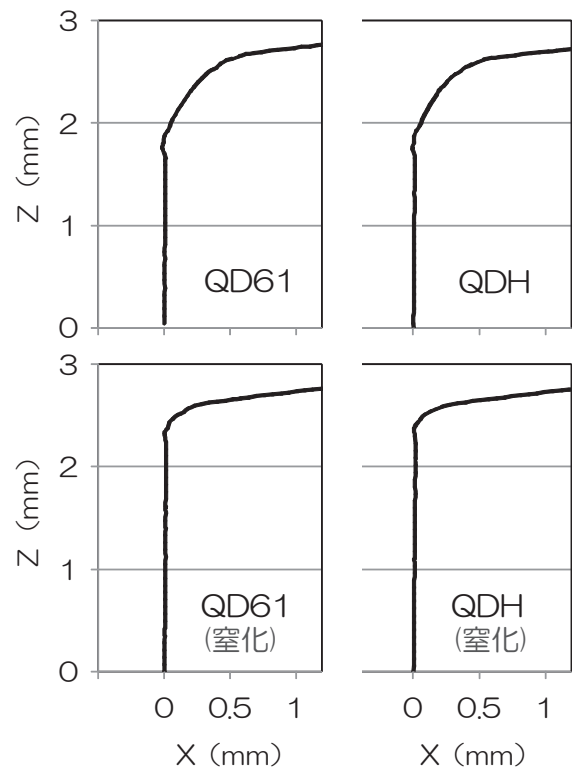


図9 エッジ部のプロファイル計測結果

プロファイルの計測結果において、未処理のパンチはエッジ部に大きなダレが生じている。一方、窒化処理を施したパンチは、エッジ部のダレが非常に小さく、窒化処理が工具寿命の改善に有効であることが確認された。

5. 塑性加工解析

パンチの負荷低減を目的として鍛造時のワーク温度を最適化するため、塑性加工解析シミュレーションシ

システム「DEFORM」による鍛造解析を実施した。解析条件を表4に、解析結果を図10および図11に示す。

表4 解析条件

収束法	
ソルバー	共役勾配法
反復方法	直接反復法
オブジェクト	
ワーク	剛塑性体 SUS304 50000メッシュ
工具	剛体 SKD61 30000メッシュ
オブジェクト間関係	
せん断摩擦	0.3
熱伝達係数	11 (kW/(m ² ・K))
加工条件	
パンチ速度	100mm/sec

図10より、ワーク温度の上昇に伴うワークの軟化によって、1000℃における成形荷重は700℃における成形荷重の約1/2となる。一方、ワーク温度上昇に伴うパンチの温度上昇によって、パンチの軟化が懸念されるが、図11に示す解析結果ではパンチ温度はワーク温度に比例して上昇することなく、ほぼ横ばいであった。そのため、ショット間にパンチを充分冷却できるのであれば、工具寿命はワーク温度が高温であるほうが延びると考えられる。

6. 結言

本研究では、①熱処理、②切削加工、③表面処理および④塑性加工解析に関する基礎技術の構築を図り、下記の結果を得た。

- ・脱炭防止剤を塗布することで大気雰囲気化の熱処理でも HRC50 以上の表面硬度を得ることができた。
- ・SKD61 相当品のターニング加工において、CBN 工具を用いることによって切削距離 16km 時点における逃げ面摩耗幅を 110 μm に抑えることができた。
- ・SKD61 相当品のミーリング加工において、工具軸と加工面は直角に近いほうが工具寿命の面で良いことが確認された。
- ・ワーク材種 SUS304 の鍛造加工において、窒化処理がパンチの工具寿命の改善に有効であることが確認された。
- ・塑性加工解析により、ショット間にパンチを充分冷却できるのであれば、工具寿命はワーク温度が高温であるほうが延びると考えられる。

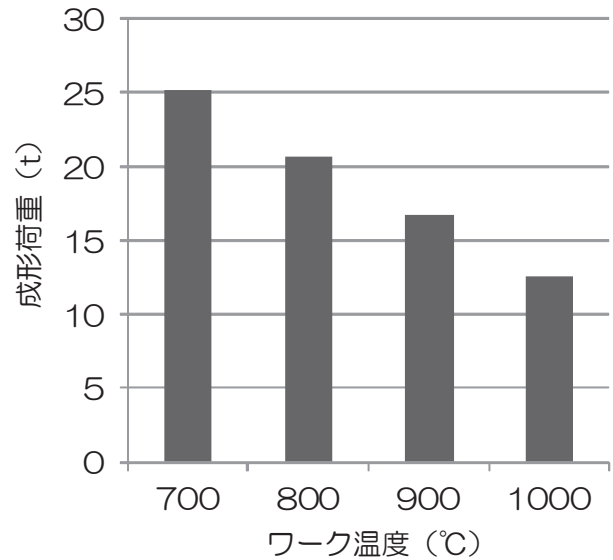


図10 ワーク温度が成形荷重に及ぼす影響

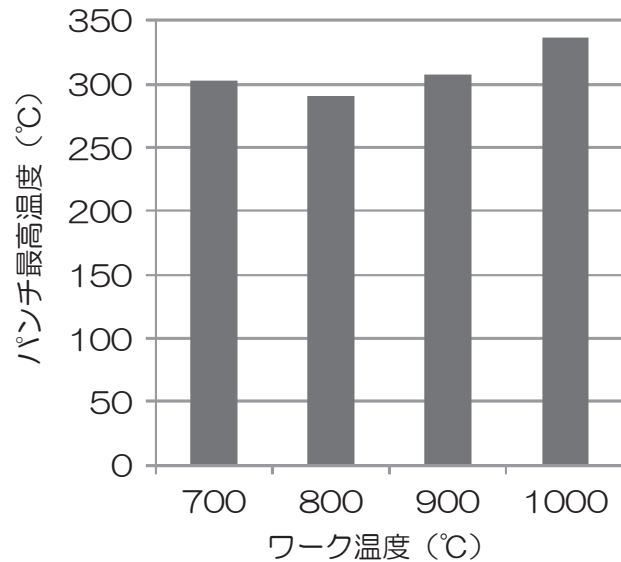


図11 ワーク温度がパンチ最高温度に及ぼす影響

参考文献

- [1] 藤川健：大都市圏に立地する金型製造企業の技術的な競争(前編), 型技術, Vol.30 No.5, pp.87-89(2015).