

高強度アルミニウム熱間鍛造の新プロセスの開発[†]

鈴木 一広^{1*}・殿園 広²・小林 岳人¹・浅井 千尋³
山田 正洋¹・五十川 雅之¹・阪本 正悟⁴・堀 雅是⁵

Journal of The Japan Institute of Light Metals, Vol. 76, No. 3 (2026), 171-174
© 2026 The Japan Institute of Light Metals

New process development for hot forging of high-strength aluminum alloys[†]

Kazuhiro SUZUKI^{1*}, Hiroshi TONOZONO², Takehito KOBAYASHI¹, Chihiro ASAI³
Masahiro YAMADA¹, Masayuki ISOGAWA¹, Shogo SAKAMOTO⁴ and Masayuki HORI⁵

Keywords: hot forging; high-strength aluminum alloy; steering knuckle

1. 背景

近年、カーボンニュートラル達成に向けたさまざまな取り組みが本格化しており、自動車産業においても電動化シフトやエネルギー利用の見直しといった動きが加速している¹⁾。トヨタ自動車株式会社においても、2035年までに全世界の自社工場におけるCO₂排出ゼロの目標を掲げており、再生可能エネルギーの利用のほか、エネルギー利用の多い工程の改善や省エネ活動に取り組んでいる。

電動化を支える中核材料としては、バッテリーやセンサーなどの機能材料と軽量化のための構造材料がある。バッテリー性能は急速に進化してきており、充電時間の問題も解決に向かっているが、それでも内燃機関車の航続距離にはおおよそ変わらず、電動車の普及に対しては航続距離の延長が不可欠である。そのため自動車業界においては燃費・電費の向上に向けて、高張力鋼板の採用や、アルミニウムや樹脂への置き換えなど、さまざまな軽量化技術の開発に取り組んでいる。

こうした背景を受けて、足回りの基幹部品であるステアリングナックル(図1)においては、従来の鋼製からアルミニウム鍛造製への置き換えが進められてきた。ステアリングナックルはステアリングシステムの構成部品であり、ハンドルの力をタイヤに伝えるバネ下位置に搭載される部品である。そのため、図2に示すように軽量化により乗り心地や操縦安定性、燃費が大きく向上する。

一般的なアルミニウム鍛造ナックルはT6プロセスにより製造されている。加熱したアルミニウムビレットに熱間鍛造

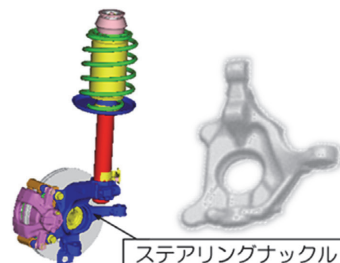


図1 ステアリングナックルの搭載位置

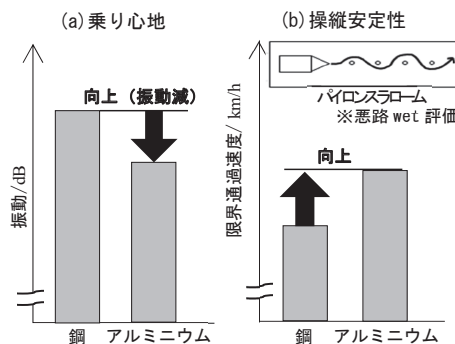


図2 ステアリングナックルの軽量化効果

を行うことで製品形状を造り込み、その後、溶体化処理、焼入れ、時効処理を施すことで強度を付与している。

しかし、T6プロセスには鍛造前の加熱工程、溶体化工程、時効工程でそれぞれ長時間の加熱を必要とするため製造時のCO₂排出量が多いという欠点がある。また、鍛造工程で導入

[†] 本原稿の一部は素形材, Vol.64, No.12 (2023), pp.2-6に掲載したものである。

¹ トヨタ自動車株式会社 素形材技術部 (〒471-8571 愛知県豊田市トヨタ町1) Raw Material Development Div., Toyota Motor Corporation (1, Toyota-cho, Toyota-shi, Aichi 471-8571)

² トヨタ自動車株式会社 本社鍛造部 (豊田市) Honsha Plant Forging Div., Toyota Motor Corporation (Toyota-shi, Aichi)

³ トヨタ自動車株式会社 モビリティ材料技術部 (豊田市) Mobility Material Engineering Div., Toyota Motor Corporation (Toyota-shi, Aichi)

⁴ 株式会社神戸製鋼所 大安製造所 (いなべ市) Daian Works, Kobe Steel, Ltd. (Inabe-shi, Mie)

⁵ 株式会社神戸製鋼所 アルミ鋳鍛工場 (いなべ市) Aluminum Casting & Forging Plant, Kobe Steel, Ltd. (Inabe-shi, Mie)

* 責任著者 E-mail: kazuhiro_suzuki_aa@mail.toyota.co.jp
受付日: 2025年11月12日 受理日: 2025年12月19日

された多量の転位が起点となり、高温の溶体化工程で再結晶や結晶粒の粗大化が進むことが強度低下の要因となっている(図3)。

そこで、これらの課題を解決するために新プロセスの開発に着手した。

2. 開発技術の概要

新プロセスでは、一般的なT6プロセスの材料加熱と溶体化処理の工程を集約することで長時間加熱回数を3回から2回へ変更した(図4)。すると当初懸念していた通り、加工発熱により部分溶融するバーニング(図5)と強度不足(図6)の2つの開発課題が発生した。

材料加熱温度が高いとバーニングが発生し、また低いと強度不足となり、良品条件が極めて狭いことから、量産化するためには良品条件の拡大が必須であった。そこで本開発では、①制御冷却工程の追加と②製品温度低下の抑制に取り組んだ。

その結果、量産化を実現するレベルの良品条件範囲へ拡大

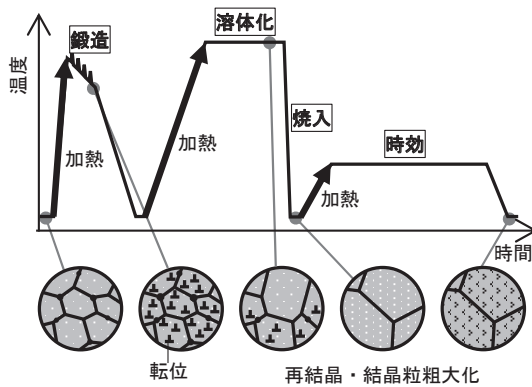


図3 T6プロセスのヒートパターン・組織

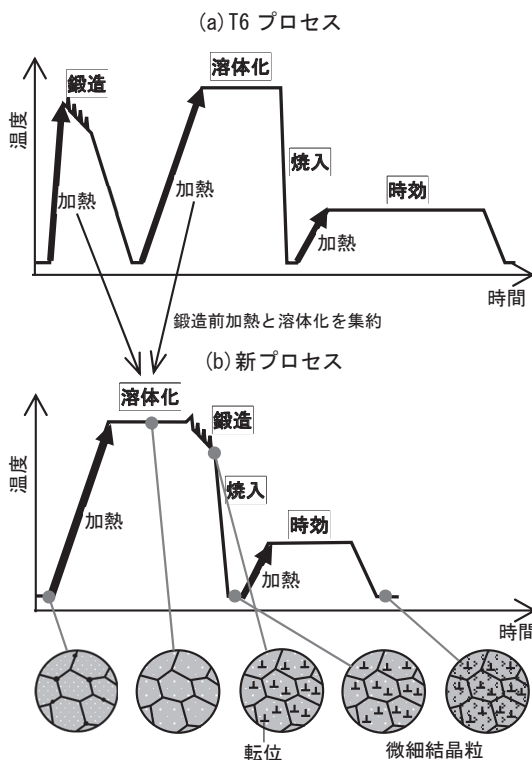


図4 新プロセス開発による加熱回数低減

することができ、CO₂排出量を67% (鋳鉄製ナックル比79%) 低減する新プロセスを確立した。また、鍛造・焼入れ後は低温の時効処理しか行わないため、再結晶や粒成長を防止し微細結晶を維持することができ、T6プロセスよりも強度を5%、耐応力腐食割れ性(耐SCC性)を10%向上することができた。その後の量産化フェーズにおいては、微細結晶粒の利点を活かして③時効処理時間を短縮することで、従来よりも省スペースな時効炉を導入することができた。

3. 技術開発項目と技術上の特色

3.1 制御冷却工程

溶体化温度を高くするほどアルミニウム母相への合金元素の固溶(溶体化)が促進されるため、強度向上には有利となる。しかし、新プロセスでは溶体化処理を鍛造前に行うため、溶体化温度を融点近傍の温度に設定すると、鍛造時の加工発熱により融点を超えて溶解するバーニングと呼ばれる現象が発生する。一方で、バーニングを防止するために溶体化温度を下げると、溶体化が進みづらくなるため強度が低下するという背反があった。そこで、溶体化工程の後に短時間の制御冷却工程を追加した。融点近傍まで溶体化温度を上げることで強度向上を狙い、その後の制御冷却工程で加工発熱分を見越した抜熱を行うことで鍛造時のバーニング発生を防止した(図7)。

3.2 製品温度低下抑制

T6プロセスでは溶体化処理後に直ちに焼入れを行うことで、室温でもアルミニウム母相に合金元素が固溶した状態(過飽和固溶体)を維持している。新プロセスでは溶体化処理後に熱間鍛造を行い、その後に焼入れを行うため焼入れ前の製品温度低下が不可避であるが、製品温度が低下しすぎると固溶していた合金元素から粗大な析出物が生成し、強度が低下するという課題があった。

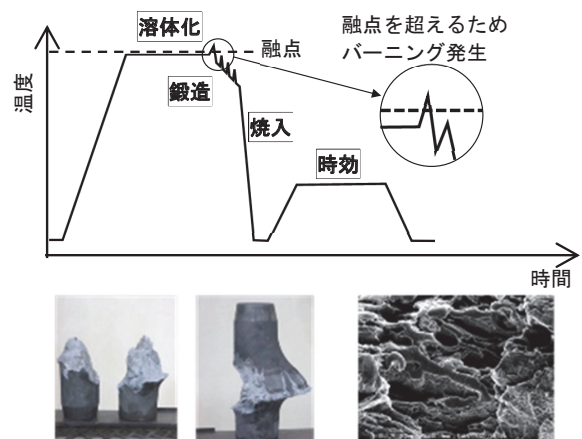


図5 新プロセスの課題①

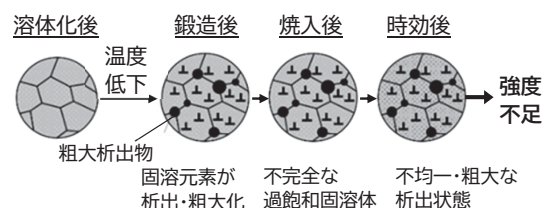


図6 新プロセスの課題②

そこで製品温度低下の対策として、メカニカルプレスへの導入による鍛造速度を向上させた。また、従来は焼入れ前に熱間トリミングを実施していたが、工程順序を入れ替えて焼入れ後の冷間トリミングとすることで焼入れまでの工程数を削減した。

抜熱量低減に対しては、鍛造時の金型への抜熱量を最小限にするため、従来よりも金型温度を高温化した。高温化に伴い鍛造時に金型に塗布する潤滑剤の付着性と潤滑性能が低下することが懸念されたため、新たに高温用の潤滑剤を開発し、金型へのアルミニウムの凝着を防止した。また図8のように製品のバリ部と搬送装置のロボットハンドに位置決め用の溝を付与することで、XYZ全方向の位置決めと接触面積低減を両立させ、搬送中の抜熱量を低減した。

上記の取組みの結果、製品温度の低下による強度低下を最小限に抑制し、必要な強度を確保することができた(図9)。

3.3 時効時間短縮

一般的なT6プロセスにおける時効処理では、強度を向上させるために、微細で均一な析出物が生成するよう低温かつ長時間の条件を設定する。そのため連続炉で処理する場合には30m以上の時効炉の長さが必要となる。

新プロセスの製品は鍛造前に高温の溶体化処理を実施するため、時効処理前の段階でも微細結晶組織を維持している。

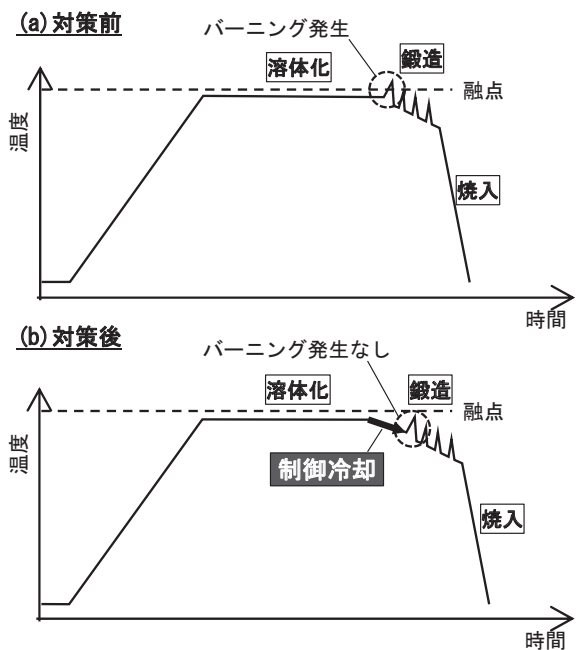


図7 制御冷却工程の効果

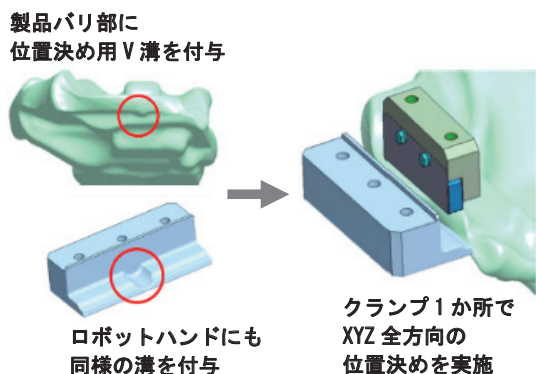


図8 搬送装置の位置決め・接触面積低減

析出の起点となる結晶粒界が増加しているため、T6プロセスよりも短時間で合金元素が析出する結果、図10に示すように時効処理時間をT6プロセスの1/3程度まで短縮し、時効炉の長さも15mまで短縮することができた。

4. 開発結果

新プロセスはT6プロセスと比較して、工程集約による熱処理回数の低減(3回→2回)と、時効処理時間短縮(T6比: 1/3)によりエネルギーや投資を低減することができた。その結果、新プロセスで製造したアルミニウム鍛造ナックルはCO₂排出量を67%、投資を15%、コストを9%、ラインスペースを49%、生産リードタイムを50%削減した(図11)。

従来の鋳鉄製ナックルと比較すると、社内製造工程のCO₂排出量を79%削減することができた。また、同程度の強度を確保できたことで、車両質量11kg/台(ナックル質量比50%削減)の軽量化を達成した(図12)。この軽量化の効果により、乗り心地と操縦安定性の向上、1%の燃費改善を実現した。

新プロセスを適用した製品は2022年5月よりトヨタ自動車(株)本社工場にて生産を開始し、ミドルクラスのSUVに採用された。2023年6月までに累計19万台分を生産し、現在も適用車種を増やしながら生産を継続している。

また、ステアリングナックルと同様に、後輪側のばね下位置に搭載されているリアアクスルキャリアも鋳鉄製から高強度アルミニウム鍛造製への置き換えが進んでいるため、現在、新プロセスの生産能力増強を目的とした新設ラインの導入と並行して、新プロセスでのリアアクスルキャリアの試作・生産準備も進めている。

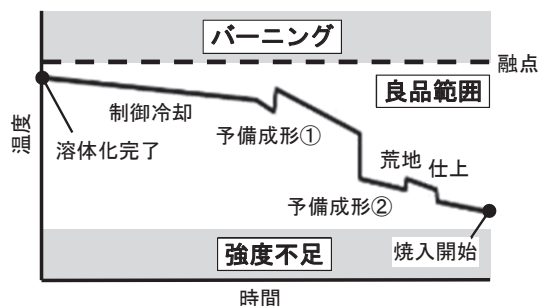


図9 製品温度低下抑制

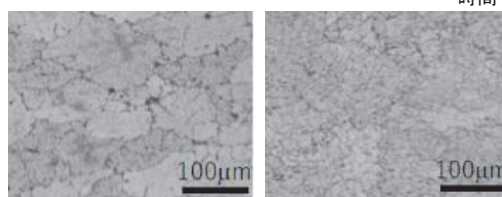
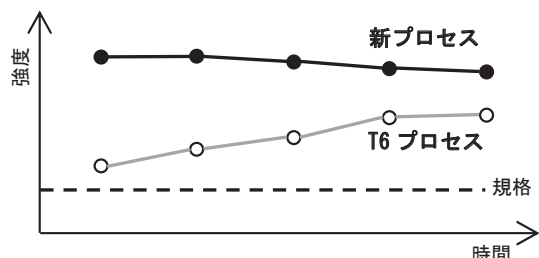


図10 時効時間の短縮

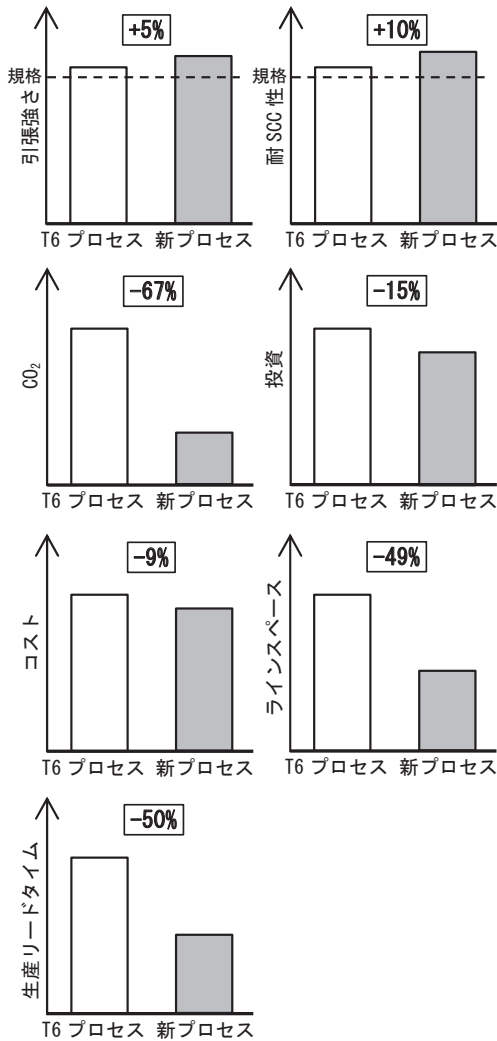


図11 新プロセスとT6プロセスの結果比較

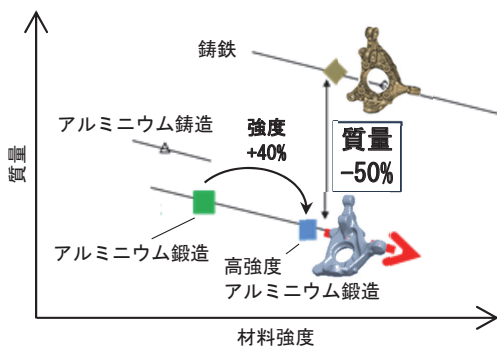


図12 アルミニウム鍛造ナックルの位置づけ

5. 将来への発展性

新プロセスではT6プロセスと比較して耐SCC性を向上させることができるため、耐食性を低下させても強度向上効果

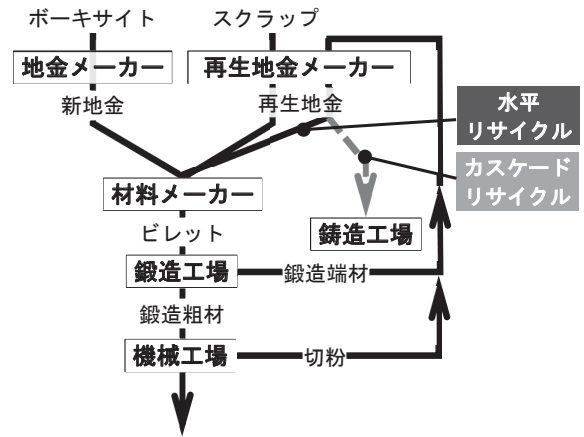


図13 アルミニウム材料の流れ

のある合金元素量を増やすことで、更なる高強度化による車両軽量化（乗り心地・操縦安定性の向上、燃費改善）を実現できる。

また、材料製造時のCO₂排出量も削減できる。アルミニウムの新地金はボーキサイトから取り出されたアルミナを電解精錬することで得られるが、製造時に大量の電力を消費するためCO₂排出量が多い。

一方で、スクラップから製造する再生地金のCO₂排出量は新地金の3%程度²⁾であるため、材料製造時のCO₂排出量を低減するためには再生地金を積極的に活用することが望ましい。

しかし、再生地金はスクラップ回収段階で鉄などの不純物が多く混入するため、製品の強度や耐SCC性が低下するという背反がある。そのため、特に成分規格の厳しい鍛造用途においては一部の活用にとどまっているが、新プロセスでは強度や耐SCC性が向上するため、成分規格を緩和して再生地金の配合量を増やすことが可能となる。

図13に目指すアルミニウム材料の流れを示す。従来は鍛造工程で発生するバリなどの鍛造端材は、再生地金メーカーを経て社内の鋳造工場で再利用していたが（カスケードリサイクル）、現在は材料メーカーに返す取組み（水平リサイクル）を始めた。機械工場から出る切粉についても同様で、再生地金として活用しても問題ないかの確認評価を開始している。さらに、材料メーカーとの連携による再生地金の配合量を増やす規格緩和合金の開発など、サプライチェーン全体の環境負荷低減に貢献していく。

参考文献

- 1) 日本自動車工業会：2050年カーボンニュートラルに向けた自動車業界の課題と取組（2022）, https://www.meti.go.jp/shingikai/energy_environment/transition_finance_suishin/pdf/009_05_00.pdf
- 2) 日本アルミニウム協会：アルミニウムVISION2050(2020), https://www.aluminum.or.jp/wp-content/themes/dp-colors/img/VISION2050_main.pdf