

(論文)

アルミ鍛造による自動車サスペンションの軽量化

Weight Reduction of Forged-aluminum Automotive Suspension



稲垣佳也*
Yoshiya INAGAKI



福田篤実*
Atsumi FUKUDA

The 6061 aluminum alloy is commonly used for forged automotive suspensions. To improve fuel performance even more, further weight reduction of the suspensions is required. To meet this requirement, the alloy composition and production process have been reviewed. As a result, the strength has increased, as a consequence of increased sub-grain. Also weight reduction by 10% has been achieved compared to the products made of 6061 alloy. A new micro-structure control technology is proposed which involves FEM analysis.

まえがき = 自動車は、環境保護のための燃費向上に加え、安全装備の充実や運転性能の向上を背景に軽量化が年々強く求められている¹⁾。これに伴い、サスペンションアームも軽量化を目指してアルミ化が進展し、製造プロセスの中では最も軽量化効果が得られて信頼性の高いアルミ鍛造品の採用が増加している¹⁾。

アルミ鍛造サスペンションにおける当社の国内シェアは80%とナンバーワンのシェアを誇る。また、本稿で述べる開発材であるKD610材は、サスペンション用6000系合金で最高強度を有しており、他社に対して大きな差別化が図られている。

大安工場では、アルミ鍛造サスペンションをナンバーワン製品に位置づけ、さらなる性能向上・高効率生産を目指している。

サスペンション構造の一例を図1に示す。また、表1にはサスペンション部品の代表的な製造方法を示す。アルミ鍛造品は、主に強度・靱性が要求されるロアアームに多く採用されており、従来は高級車のみ採用されていたが近年は中級車種にも採用され始めている。これ

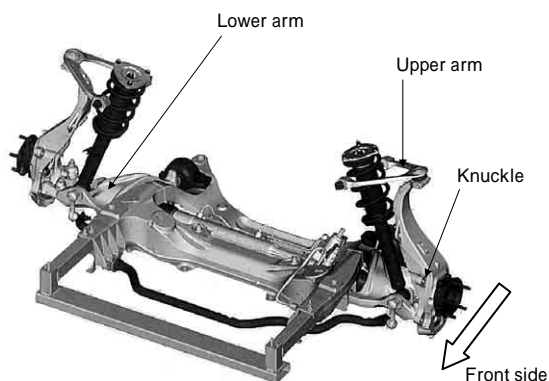


図1 フロントサスペンション例
Fig. 1 Example of front suspension

表1 アルミサスペンション部品の例

Table 1 Example of aluminum suspension parts

Vehicles	Site	Model	Parts	Manufacture
A	Front	Double wishbone	Knuckle	High pressure casting
			Lower arm	Forging
			Upper arm	Forging
	Rear	Multi link	Carrier	High pressure casting
			Lower link	Vacuum die casting
B	Front	Double wishbone	Knuckle	Forging
			Lower link	Forging
			Upper arm	Forging
	Rear	Multi link	Carrier	Gravity casting
			Lower link	Vacuum die casting
			Upper arm	Forging
			Link lower front	Extrusion
		Control arm	Forging	

は、サスペンションのアルミ鍛造化が進むに伴い、製造面でのコストダウンが推進された結果である。一方、従来採用されてきた鉄プレス品においてもハイテン材の高強度化による軽量化・コストダウンは目覚しく、アルミ鍛造との競合が厳しくなっている²⁾。

そこで、さらなるサスペンションの軽量化および低コスト化を図るため、材料面、製造面、工程設計の改善を試みた。以下にその取組事例を紹介する。

1. 材料面・製造面での開発

サスペンション部品に要求される材料特性は、静的強度、疲労強度、伸び、衝撃値、耐食性と相反する特性を合せ持つことが求められる。このような要求特性のなかで、初期のアルミ鍛造に採用された材料には、6061材が多かった。当社では、6061材より高強度を有するKS651材の量産化を既に実施していたが³⁾、さらなる高強度化

*アルミ・鋼カンパニー 大安工場

要求にこたえるべくKD610材の開発を行った⁴⁾。これにより、6061材に比較して約10%強の軽量化が達成された。図2には各種アルミ合金の耐力と軽量化率の関係を示す。

一般的に、基本成分(Si, Mg, Cuなど)または遷移元素(Mn, Cr, Zrなど)の成分添加のみでの高強度化は、靱性や耐食性を大きく低下させる。このため、靱性・耐食性低下防止には、各製造プロセスにおいて未再結晶化および亜結晶粒化とするための改善が必要とされる。以下にその改善点について述べる。

(1) 鍛造温度の高温化

アルミの熱間加工においては、下部組織として微細な亜結晶粒を形成することによって耐力を高められることが知られている^{5)~7)}。亜結晶粒組織を得るためには、鍛造温度を高温化し、鍛造時に形成される転位密度を減少させて回復組織とすることが必要である。図3に、鍛造後、T6処理した6061合金の耐力値と結晶粒径、亜結晶粒径との関係を示す。亜結晶粒組織とすることで耐力が向上しているのが分る。

熱間鍛造条件とミクロ組織との関係は、Zener-HollomonのZ変数を用いて整理されることが多い^{8),9)}。低Z化により亜結晶粒組織の割合が大きくなることが認められた(図4)。

図5はL形アームにおける鍛造温度と引張強度、耐力、伸びの関係を示す。鍛造温度の高温化に伴い、耐力に加

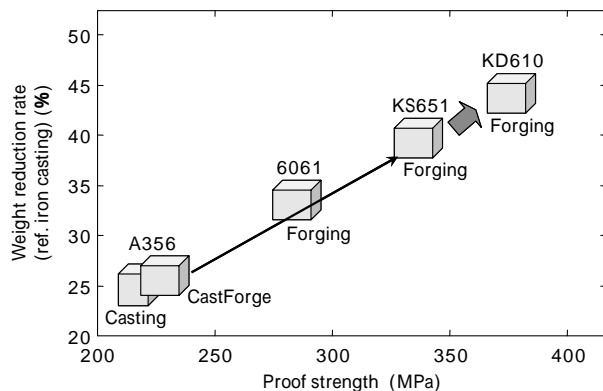


図2 アルミ合金の耐力と軽量化率の関係

Fig. 2 Relation between weight reduction effect and material proof strength

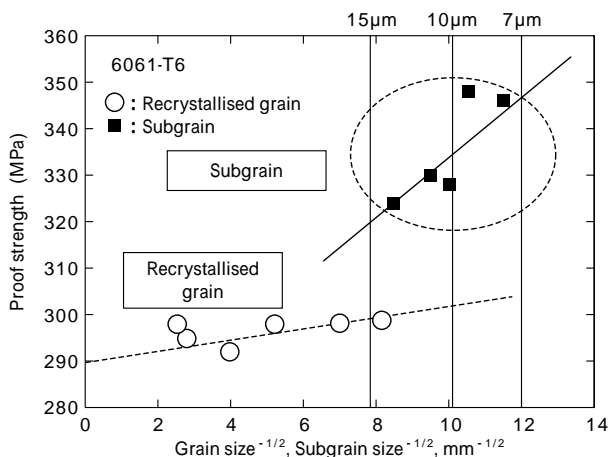


図3 結晶粒径と耐力の関係

Fig. 3 Relation between grain size and proof strength

えて引張強さや伸びも大きくなる。これは、ミクロ組織の亜結晶粒化に対応する。

(2) 遷移元素とソーキング

鍛造ならびにその後のT6処理時の結晶粒成長を防止して亜結晶粒とするためには、材料に微細・高密度の分散粒子を形成する必要がある。このためには、Mn, Cr, Zrなどの遷移元素の適量添加および均質化熱処理工程の適正化が重要となる。本開発において主に添加した遷移元素は、Mn, Crである。ポイズニングによる鑄造組織の粗大化を防止するため、Zrは無添加としている¹⁰⁾(図6, 図7)。

均質化熱処理において、分散粒子は低温側で微細・高密度に形成する。粒界移動拘束力は増大し、亜結晶粒組織となりやすい(図8)。ただし、均質化熱処理温度の低温化は、未固溶の粗大な晶出物が残存することとなり、靱性・疲労といった破壊特性の低下をもたらす。均質化熱処理温度は、亜結晶粒組織化と破壊特性の低下防止との両面から最適な条件を選択した。

表2は、均質化熱処理温度による分散粒子の形態とT6後の鍛造組織を示す。均質化熱処理温度の低温化で、分散粒子は微細・高密度化し、鍛造後にT6処理した材料のミクロ組織は亜結晶粒組織となる。一方、高温側では、分散粒子は粗大・低密度化し、粗大な再結晶粒組織となる。鍛造組織を決定する他の要因として、鍛造時の加工率が挙げられる。Z変数が同一の値でも、鍛造時の加工率によりT6後の組織形態は異なる。例として表3に6061材での単純据込材のミクロ組織を示す。とくに、鍛造温度が低下した場合には、圧下率が高い程、再結晶粒組織の領域が拡大しているのが認められる。したがっ

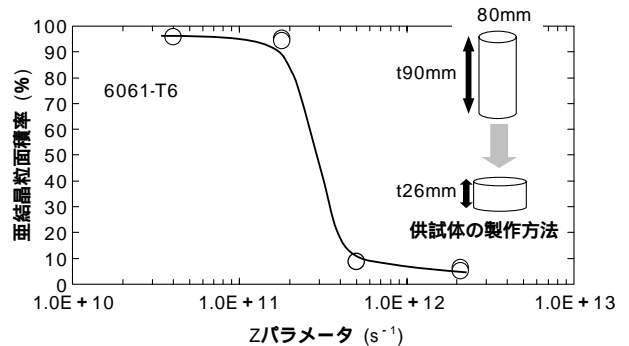


図4 Z変数と亜結晶面積率の関係(6061-T6)

Fig. 4 Relation between Z parameter and subgrain area (6061-T6)

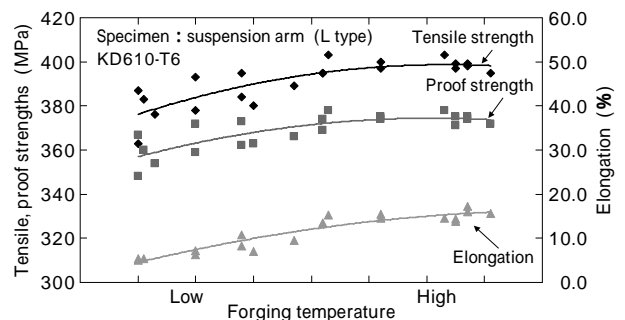


図5 強度と鍛造温度の関係(KD610-T6)

Fig. 5 Mechanical properties of materials forged at various temperature (KD610-T6)

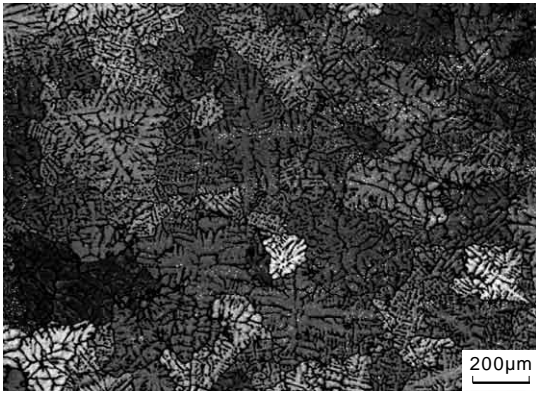


図6 Zr0.12%添加ビレットの組織 (KD610)

Fig. 6 Casting structure of billet containing 0.12%Zr (KD610)

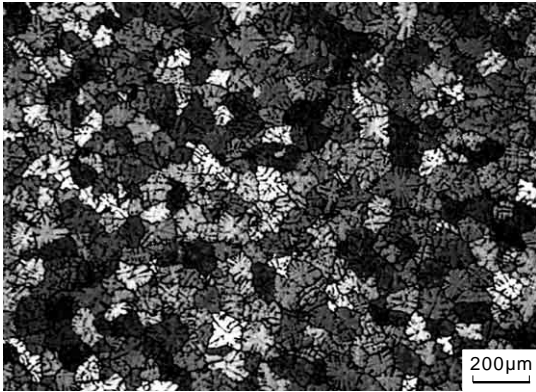


図7 Zr無添加ビレットの組織 (KD610)

Fig. 7 Casting structure of billet without Zr (KD610)

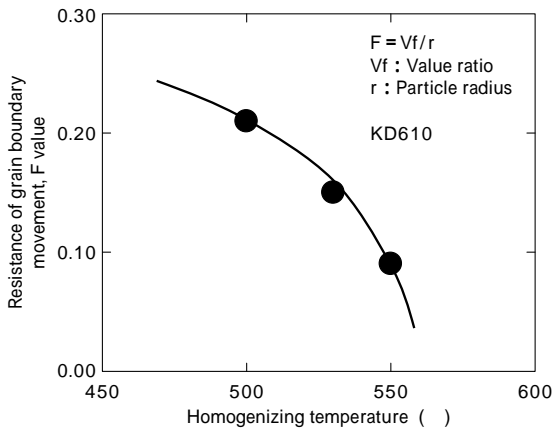


図8 粒界移動拘束力と均熱温度の関係 (KD610 材)

Fig. 8 Relationship between F-value and homogenizing temperature (KD610)

表2 ソーキング温度と分散粒子・鍛造組織の関係 (KD610 材)

Table 2 Relation between homogenizing temperature and dispersoids, forging microstructure (KD610 alloy)

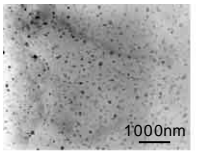
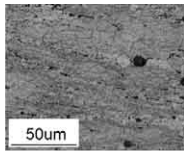
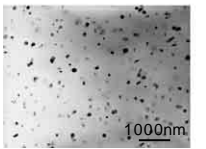
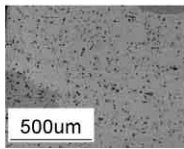
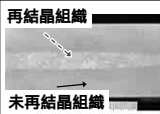
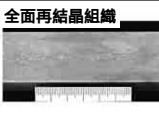


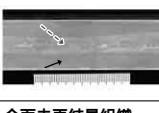
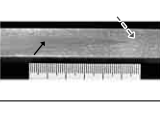

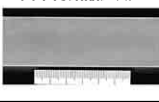
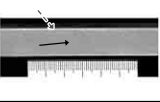
Homogenizing temperature	Dispersoids	Microstructure of forging with T6
Low		
High		

表3 鍛造圧下率, 鍛造温度とミクロ組織の関係 (6061 材)
Table 3 Relation between microstructure and forging reduction, forging temperature (6061alloy)

		Forging reduction		
		Low	Middle	High
Forging temperature	Low			
	Middle			
	High			

--- : 再結晶組織部を示す
← : 未再結晶組織部を示す

て、Z 変数 (鍛造温度, ひずみ速度) のほかに鍛造時の加工率も, 鍛造品のミクロ組織に大きな影響を及ぼし, これらの値とミクロ組織との関係をあらかじめ把握する必要がある。

上述のように, 6000 系合金において適正な主要成分 (Si, Mg, Cu) の選択に加え, 鍛造後に T6 処理した材料のミクロ組織を亜結晶粒組織とするため, 適正な遷移元素の添加や均質化熱処理温度, ならびに温度, 加工度などの鍛造条件の最適な選定を行った。

2. 鍛造シミュレーションを活用した工程設計の改善

サスペンションアームのような量産品を鍛造する際には, 主として鍛造欠陥発生防止の観点から鍛造ブロー回数数は複数とするのが通常である。代表的な工程を図9に示す。Preform Bending Buster Blocker Finisher Trim の工程を経て鍛造品が成形される。鍛造欠陥発生防止を目的とした各ブローでの設計基準は, 多くの資料が刊行されている¹¹⁾。本開発では市販の鍛造解析ソフトを用いて, 将来的には鍛造品の材料特性の予測を目的に今回は各ブローにおける形状の適正化をシミュレーションした。

最初に, 鍛造解析ソフトによる実機鍛造品の再現性の確認が必要となる。まず, 各ブローでの鍛造温度ならびに鍛造荷重の再現性を試みた。鍛造温度は, 金型との熱伝達率を適正化することにより, 材料温度の計算値と実温とはほぼ一致し, 図10に示すような良好な再現性を得た。また, 鍛造荷重に対しても摩擦係数の適正化により図11に示すような再現性が得られた。熱伝達率ならびに摩擦係数ともにラボでの測定は可能ではあるが, 実機とラボとで面圧などの表面状態を一致させることは難しく, 往々にして異なる値が生じる。このため, 今回は全て実機鍛造実績を用いて推定を行った。なお, シミュレーションに用いた材料 (KD610 材) の高温圧縮特性は, 小形円柱試験片を用いた高温圧縮試験より求めた応力-ひずみ曲線を用いた。

以上のような解析・実機の相関関係, 使用材料の温度・ひずみ・ひずみ速度と組織の相関関係を整理した上で鍛

造方案の検証を行った。図12, 図13 はL形アームの鍛造シミュレーションの結果 (Finisher 時) であり, それぞれ鍛造時の相当ひずみ分布, 鍛造素材温度分布を示す。これらはマイクロ組織に直接対応する指標であり, 前段階の Blocker, Buster および Preform の形状設定に大きく依存する。高強度, 高靱性, ならびに高耐食性に対応する鍛造組織を最終製品で得るためには, 各ブローの

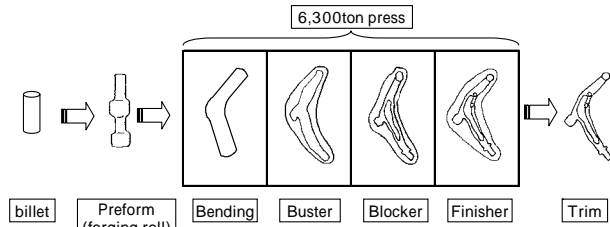


図9 サスペンション鍛造品製造工程
Fig. 9 Forging process for suspension parts

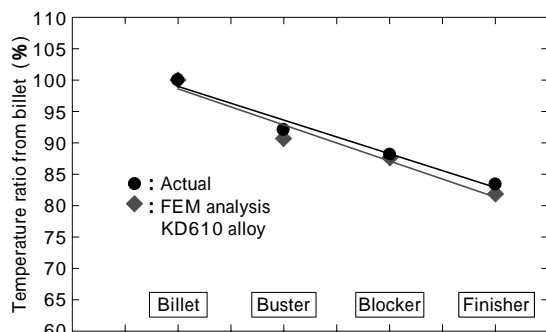


図10 各鍛造工程での素材温度推移 (KD610 材)
Fig.10 Material temperature change in forging process (KD610)

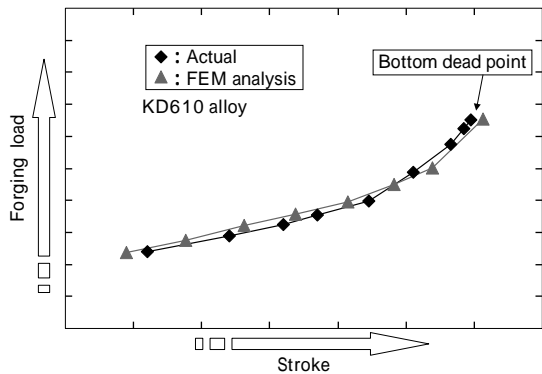


図11 鍛造荷重-ストローク線図 (KD610 材)
Fig.11 Forging load-stroke diagram (KD610)

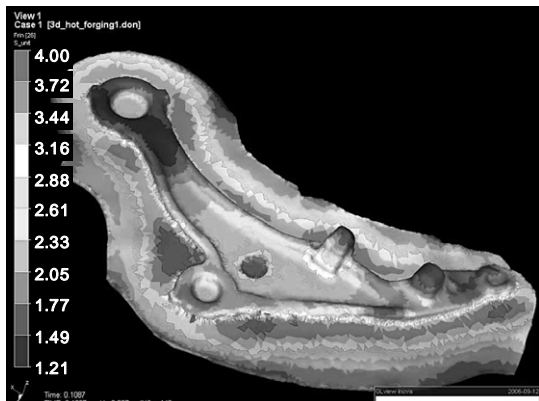


図12 FEM 解析結果 (鍛造相当歪分布, KD610 材)
Fig.12 Result of FEM analysis (Equivalent strain distribution, KD610)

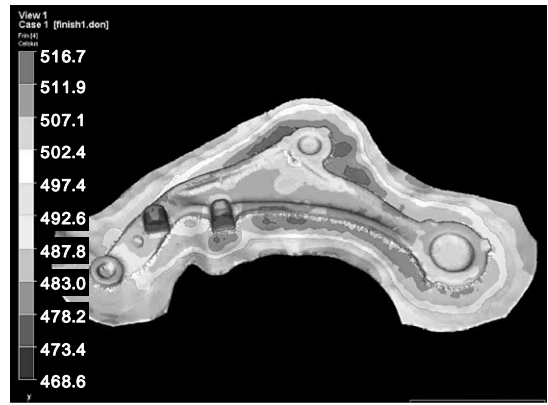


図13 FEM 解析結果 (鍛造温度分布, KD610 材)
Fig.13 Result of FEM analysis (Forging temperature distribution, KD610)

形状の適正化が必須であり, 鍛造解析ソフトによるシミュレーションは有効な手段になると考える。

なお, 鍛造シミュレーションは, 鍛造変形時の欠陥予測と対策, 金型発生応力の算出による金型寿命の推定も行っており, これらの結果から形状決定と金型構造を決定している。

3. 改善材 (KD610) の諸特性

上記のほかに, 溶体化処理温度の高温化も適用し, 材面・製造面・工程設計での改善を行った。以下にサスペンション鍛造品の代表的な諸特性 (調質: T6) を述べる。図14 は各合金の引張強さ, 耐力, 伸びを示す。改善材 (KD610 材) の耐力は, 6061 材に対して約 35% の向上が認められた。また, 引張強さや耐力の増大に伴って疲労強度も増大し (図15), 6061 材に対して約 35% 向上

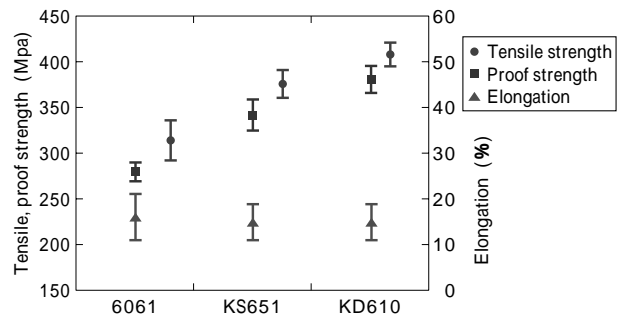


図14 6000 系合金の引張特性
Fig.14 Tensile properties for 6000 system alloys

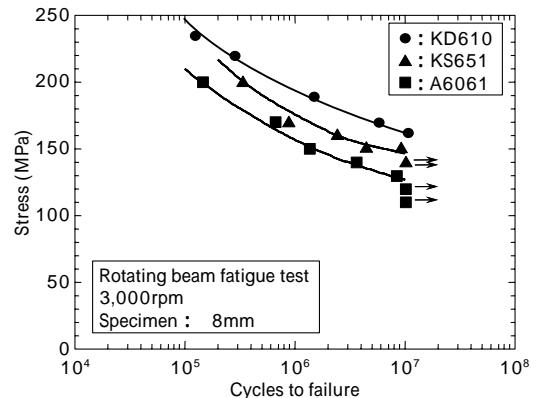


図15 6000 系合金の回転曲げ疲労強度
Fig.15 Fatigue strength properties for 6000 system alloys

した。また、図16に示すように、KD610材の耐食性(腐食減量)は実績のある従来の高強度合金KS651材と同等である。これは、KD610材では溶体化温度を高温化し、腐食起点となりやすいSi, Mg 晶出物を固溶させ、不連続化したことによるものと考えられる(晶出物: 図17, 図18の矢印部)。

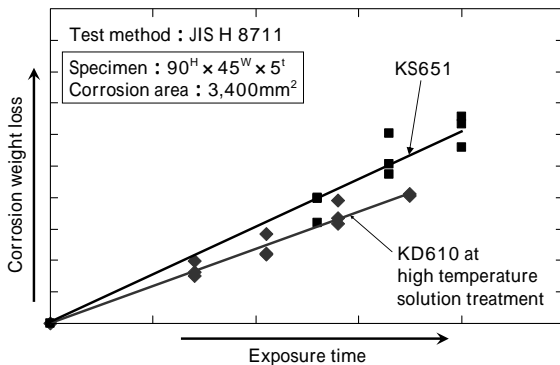


図16 KD610材とKS651材の腐食減量
Fig.16 Corrosion weight loss (KD610, KS651)

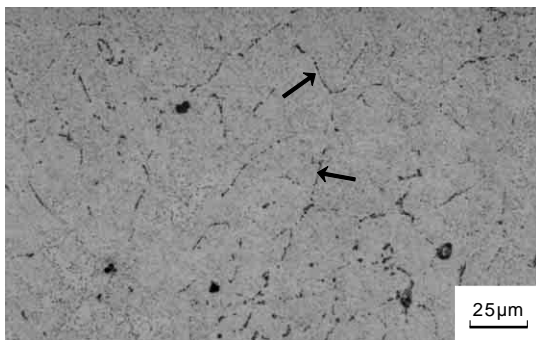


図17 低温溶体化での鍛造材マイクロ組織
Fig.17 Microstructure of forging with low temperature solution treatment

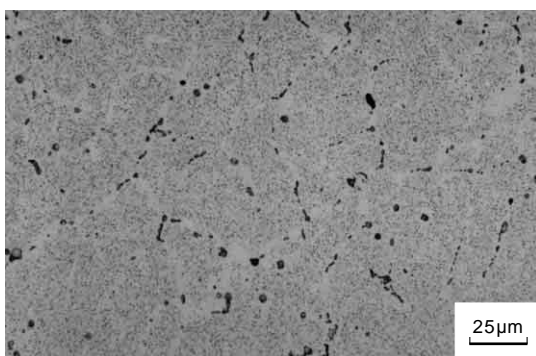


図18 高温溶体化での鍛造材マイクロ組織
Fig.18 Microstructure of forging with high temperature solution treatment

むすび= 今回の開発を通して、製造工程のほぼ全工程を見直し、組織と特性の観点から予測技術も含めて改善を行った。得られた効果は下記のとおりである。

低いZ変数での熱間鍛造、ソーキング温度の低温化、ならびに遷移元素の適正化などにより、鍛造後にT6処理したマイクロ組織において亜結晶粒組織の割合を増大させることができた。

Mg, Si, Cuなどの主要組成の適正化のほかにも上記の亜結晶粒の増大も合せ、実機のアームにおける改善材(KD610材)の耐力は6061材に対して約35%増大した。

溶体化処理温度の高温化により、引張強さ、耐力の増大とともに、腐食起点となるSi, Mg晶出物が固溶し、耐食性も向上した。

塑性流動解析を用いた組織予測技術と最適鍛造方案設計の指針を得ることができた。

ただし、予測技術については未だ完全とはいえ、今後さらなる改良を加えていくことで精度向上に努めていきたい。ユーザーズとして開発期間の短縮要求があり、CAE活用による開発の推進は今後ますます重要になると考える。

参考文献

- 1) 渡辺孝広ほか: アルトピア, Vol.37, No.4 (2007) pp.9-14.
- 2) 大聖泰弘: 日本塑性加工学会第271回塑性加工シンポジウム, (2008) pp.21-38.
- 3) 福田篤実ほか: R&D 神戸製鋼技報, Vol.52, No.3 (2002) pp.87-89.
- 4) 稲垣佳也ほか: R&D 神戸製鋼技報, Vol.55, No.3 (2005) pp.83-86.
- 5) 細田典史ほか: 軽金属学会第104回春期大会講演概要 (2003) pp.145-146.
- 6) 細田典史ほか: 軽金属学会第106回春期大会講演概要 (2004) pp.97-98.
- 7) 早坂敏明ほか: 自動車技術会学術講演前刷集, No.20-07 (2007) pp.11-14.
- 8) 中村正久ほか: 軽金属, Vol.25, (1975) pp.81-87.
- 9) 趙 丕植ほか: 軽金属, Vol.58, (2008) pp.151-156.
- 10) 岡田 浩ほか: 軽金属学会第114回春期大会講演概要 (2008) pp.65-66.
- 11) 鍛造技術研究所: 鍛造技術講座 型設計, (1996) pp.267-275.