

3Dプリントの最新技術*

The Latest Technology of Additive Manufacturing

保田 憲孝¹⁾
Noritaka Yasuda

佐々木 信之²⁾
Nobuyuki Sasaki

小松 伸弘³⁾
Nobuhiro Komatsu

山本 晃弘⁴⁾
Akihiro Yamamoto

The production process using metal 3D printers, which can reduce the number of parts by integrating multiple functions and reduce weight by optimizing the shape, is beginning to take root in the aviation and medical fields, mainly in Europe, the United States and China. This article will introduce the latest technology of materials and designs unique to metal 3D printing, which will be the key to this process.

KEY WORDS

Production・Manufacture

Additive Manufacturing, 3D Printing, Metal [D4](#)

1 はじめに

近年、ものづくりにおいて、金属3Dプリンタ（以下「金属AM」と記載する。なお、AMは3D造形を意味する英語Additive Manufacturingの略）は、欧米や中国を中心に航空・医療分野等で実用品・量産品を製造するための生産プロセスとして定着し始めている。一方、日本ではその認知度は高まってきているが、いまだ開発試作品の製造が主であり、実用品レベルでの普及には至っていないというのが実情である。

自動車分野での活用事例としては、日本でもレース分野等、特殊車両では一部実用部品への適用が進みつつあるが、量産車への適用例はコストの課題が大きく、ほとんどみられない。欧州では乗用車への適用例として、一部の高級プレミアムカーへの適用が進みつつあり、複数機能の一体化による部品点数の削減や、形状最適化による軽量化などAMでしかできない構造を採用している。重要なのは、従来品の置き換えではなく、金属AMならではの特色を生かしたアプリケーション

開発である。

では、金属AMならではの特色とは何か、どのようなことが期待できるのだろうか。一般的に金属AMのメリットは、デザインフリーであることから軽量化、高機能化、複数部品の一体化が可能となること、難加工材での造形も可能、短納期、在庫レス、物流の簡略化（地産地消型）などが挙げられよう。一方、課題としては、コスト問題、最適化デザインのための人材不足、品質の良い製品を作るためには高度な操業技術・ノウハウが必要であること、品質における再現性・均一性、限られた材料種類による選択枠の狭さ、材料特性に関する情報の不足などがあると考えられる。しかし、いずれ装置やソフトウェアは高度化され、低価格化に向かう中で、課題の多くは解消されてくるであろう。そうなった場合に、最も重要かつKeyになってくるのは、金属AMならではの材料とデザインであると考えるので、今回はこの2点に焦点を当てることとする。

現在、東京アールアンドデーと日本積層造形は、金属AMの活用範囲を拡大していくために、新材料の開発、特性把握や、解析を使用した最適化などに共同で取り組んでいる。その取組みの一部を紹介したい。特に材料については、自動車分野で重要視されるアルミ系の合金を例に紹介することとする。

* 2021年2月26日受付

1) 日本積層造形(株) 取締役副社長(営業管掌)

(985-0874 多賀城市八幡一本柳3-8)

E-mail: yasuda.noritaka@jampt.jp

2) 同社 開発部・品質保証部(同所)

3) 同社 営業部(同所)

4) (株)東京アールアンドデー 車両事業部

(243-0027 厚木市愛甲東1-25-12)

E-mail: yamamoto.akihiro@tr-d.co.jp

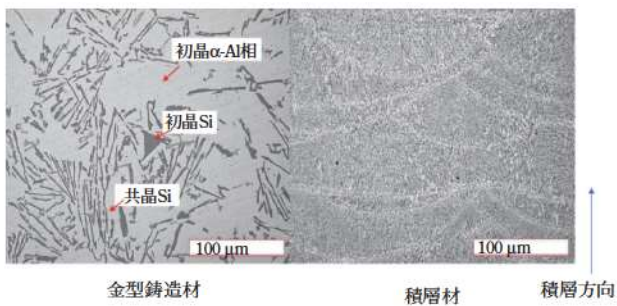


図1 鑄造法と積層造形法の比較

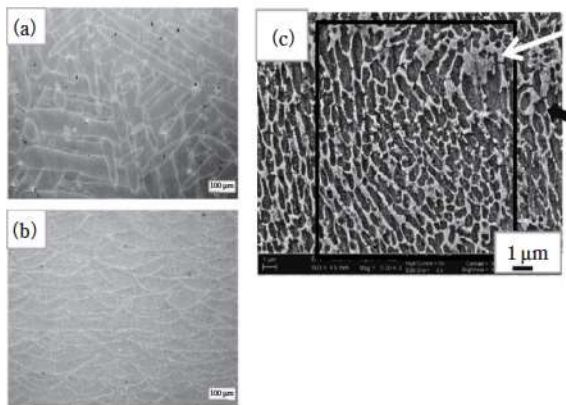


図2 Al-10%Si-0.3%Mg合金積層材のマイクロ組織

2 金属AMを用いたアルミニウム合金の特性

2.1 金属AMならではの材料特性

金属AMにおいては形状の自由度の有利さに加えて、材質においても有利である。また、同法は従来鑄造法よりもはるかに急速に凝固する。また、従来行われていた急冷凝固アルミニウム粉末成形のように、粉末の凝固組織を壊さないようにして表面同士を接合させる方法と異なる。すでに凝固した下部組織と上部粉末が急速溶解・急速凝固を繰り返していく、ある意味、連続積層鑄造法でもある。これにより収縮巣・偏析のない極めて微細な凝固組織を有する複雑かつ緻密な製品ができる(図1)。しかし、圧延・鍛造のような加工組織によってもたらされる結晶粒微細化は期待できないが、凝固時に生成された微細組織の強化機構は積層素材でも材料次第で期待できる。熔融凝固過程の繰り返しながらも、従来法の100倍以上の凝固速度により、晶出物の微細化、固容量の増加、積層中の熱影響などにより高い機械特性が期待できる。

図2に、Al-10%Si-0.3%Mg合金積層材のマイクロ組織を示す。積層造形表面の組織写真を(a)

に、積層方向の組織写真を(b)に示す。(a)ではレーザーによる溶融痕、(b)では鱗片状の組織が認められる。(a)、(b)での白色部位のSEMによる拡大組織を(c)に示す。0.2~2 μm程度の繊維状SiとαAlから構成される共晶組織(白色矢印部)が線状のSiによってつながり、その網目(積層方向に対してと垂直方向も網目状連結)の中に、0.1 μm以下の微細な析出物とみられる組織を含む初晶αAlが閉じ込められたように見える。ここで、(a)(b)の白色部に相当する(c)の黒色矢印部のところに着目すると、それを挟む部位と比較すると網目の間隔が広いことがわかる。EBSDを用いた結晶方位解析によれば、この四角に囲ったエリアには白色部をまたいでいる結晶粒も含まれて複数存在しており、結晶粒内に共晶部が含まれているように見える。粉末が溶融し、すでに凝固していた下部の組織を溶かして融合し、下部組織に連続して細かいαAl相が成長し、その相の間に共晶組織が生成されたと考えられる。

急速凝固であるがために、重力鑄造法で常用されることが多いSiの改良元素は添加されていないが、繊維状の微細な改良組織を呈している。また、金型鑄造材にみられる粗大な針状Si、Al-Fe-Si化合物、初晶Siは認められない。また、あらかじめ求めたDASと実測の冷却速度の関係から推測すると、1,000°C/s以上と推定された。

2.2 機械特性に合わせたアルミ合金開発の事例

アルミ合金は押出・圧延用では2000~7000系、鑄造用ではACシリーズ、ダイカスト用にADCシリーズと多種多様なグレードが存在し、用途に応じて使い分けが可能である。一方で、金属積AMのアルミ合金はAl-10%Si-0.4%Mgのみがスタンダードとなっており、選択肢の拡充が求められている。かかる状況下、新しい金属AM用アルミ合金の開発が進んでおり、以下に(株)コイワイ、東洋アルミニウム(株)、千葉工業大学、九州大学により開発された具体的な事例を紹介する。なお、日本積層造形(株)は両社との間において独占使用実施権を現在有している。

(1) 高強度アルミ合金(日本特許6393008海外特許出願中) アルミニウム合金の積層においてはAl-10%Si-0.4%Mg合金が広く知られている。積層時基盤プレートを予熱しない場合

表1 高強度アルミ合金組成

Si	Mg	Fe	Mn	Al
7	0.7	≦0.3	1.5	bal.

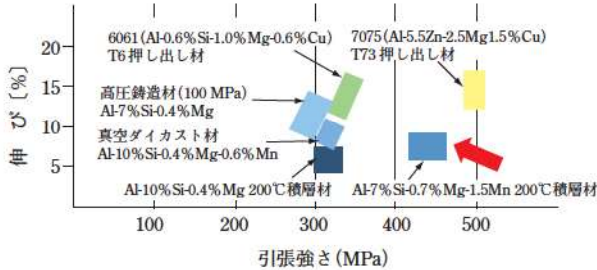


図3 各種アルミ合金の引張強さと伸び

450 MPa程度の強度を示す。しかし、同合金を用いて歪みを抑えて成形しようとする積層成形時の基盤プレートの温度を200°C近くに保持することが必要であり、引張強さは300 MPa程度まで低下する。強度の低下の理由は、200°CにおいてMg-Siの過時効組織が発生するからである。

開発されたMn添加の新合金(表1)は歪みを抑えて400~500 MPa程度の7000系合金レベルの高い引張強さを示す(図3)。積層法としてはレーザ法を用いる。また、従来行われるT6処理(530°C溶体化処理⇒水焼き入れ⇒焼き戻し)を行わない。なお、本合金は強度を大きく低下させずに積極的に素材内部に残存する内部応力を緩和し、延性を向上させることができる優れた性質も有する。

(2) 耐熱アルミ合金(日本特許6393008 海外特許出願中) 耐熱用の鋳造用アルミ合金として、JIS AC8A合金(Al-12%Si-1%Cu-1%Mg-1%Ni)がよく知られている。しかし同合金を金属積層法で成形すると、むしろ従来知られている高温強度が得られない。このために、種々検討した結果、遷移金属を添加した合金(表2)を用いることで従来よりも1.5~2倍の値を示すことを確認した(図4)。積層法としては、レーザ法を用いる。従来行われるT6処理(510°C溶体化処理⇒水焼き入れ⇒焼き戻し)を行わない。

(3) 高熱伝導率合金(株)コイワイ日本特許出願中)

展伸用アルミ合金においてはAl-Mn系の3003合金の焼きなまし材が純アルミの熱伝導率230 W/m・Kに近い高熱伝導率材料(190 W/

表2 耐熱アルミ合金組成

化学成分 (%)					
Si	Cu	Mg	Ni	Fe	Al
10	1	1	1	2	bal.

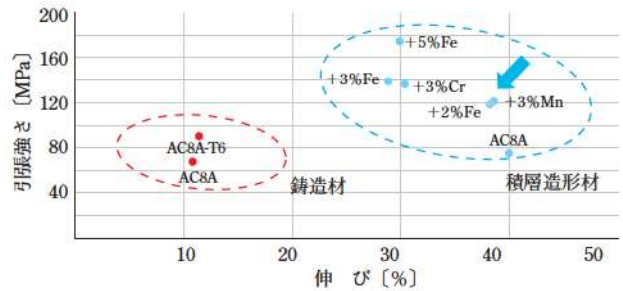


図4 鋳造材と遷移金属添加積層造形材の伸びと強さ

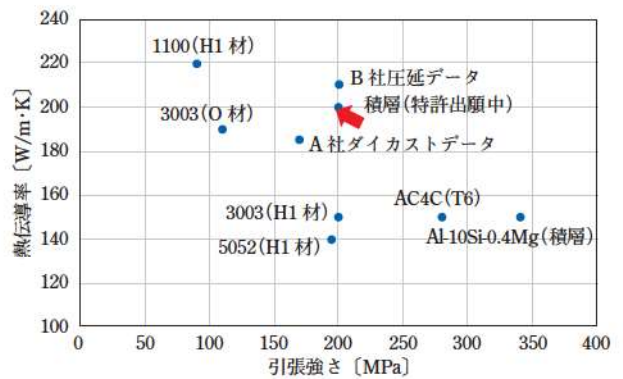


図5 各種アルミニウム合金の熱伝導率と強さ

m・K)として知られている。しかし、引張強さは110 MPaと低い。逆にこの合金の強度を200 MPaに上げる加工処理をすると、熱伝導率は110 W/m・Kまで低下する。一方で、アルミの展伸材で熱伝導率200 W/m・K、引張強さ200 MPaを示す材料も報告されている。電子機器の冷却においてはヒートシンクのような放熱性フィンが用いられるが、このような複雑な小物への活用は難しい。

開発した積層体は、積層した製品に高熱伝導付加処理を施すことで200 W/m・Kの熱伝導率と200 MPaレベルの強度を示す(図5)。

(4) 高耐食合金(現在開発中) 現在開発中で、本年中にリリース予定。

2.3 機械的特性把握の取組み

アルミ合金の金属積層が展伸材、鋳造材と比較し、どのような機械的特性なのかを検証した。東京アールアンドデーと日本積層造形が共同で実施した引張試験の結果を紹介する。金属積層材料

表3 引張試験結果

	AlSi10Mg (金属 AM 材)	ANP-H4 (金属 AM 材)	A5052-H34 (展伸材)	AC4C-T6 (鑄造材)
引張強さ (MPa)	384	486	275	275
0.2% 耐力 (MPa)	211	322	218	247
伸び (%)	6.6	4.7	14.3	2.1

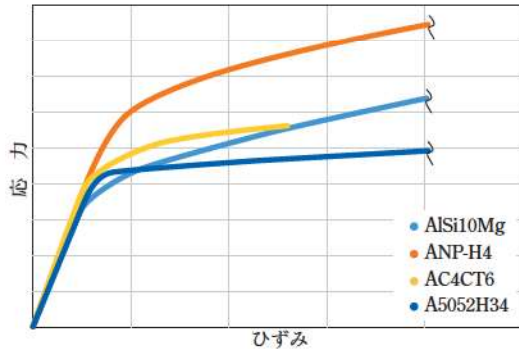


図6 応力-ひずみ線図

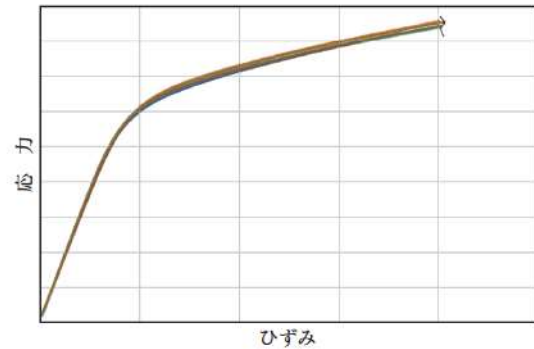


図8 ANP-H4 応力-ひずみ線図

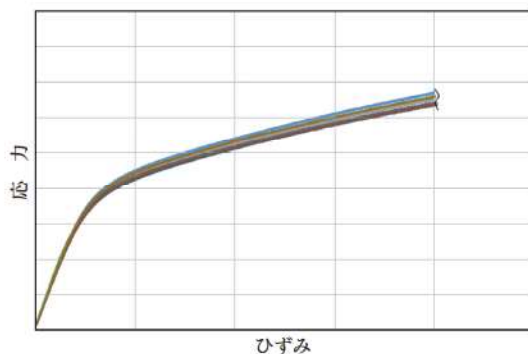


図7 AlSi10Mg 応力-ひずみ線図

として、金属積層の標準材料ともいえるAlSi10-0.4%Mg (以下AlSi10Mg) と、前述の積層用高強度アルミ合金ANP-H4を用いた。比較用として、展伸材はA5052-H34、鑄造材はAC4C T6を用いた。表3に引張試験の結果を示す。引張試験は、試験片にて実施した。金属積層の結果は、試験片長手方向に積層を行ったときの結果である。図6に応力-ひずみ線図を示す。AlSi10Mgのメーカ公称値 (390 MPa) に対して $\pm 2\%$ 以内の結果が得られた。0.2%耐力も同様に、メーカ公称値 (210 MPa) に対して、 $\pm 2\%$ 以内の結果が得られた。

試験片10本におけるばらつきを、図7および図8の応力-ひずみ線図にて示す。

AlSi10Mg, ANP-H4共に引張強さのばらつきは2%程度の結果が得られた。同様に試験を

行ったA5052-H34は1%程度、AC4C T6は2%程度であった。鑄造材と同等のばらつき度合いであることから、今回の積層条件下では金属積層でも安定した機械的特性が得られることがわかる。

今回の試験では、比較的安定した機械的特性を示す結果を得られたが、金属積層には積層条件に対する影響など、他にも明らかにしていかなければいけない要素がある。今後も機械的特性を把握する活動を進めていく。

3 金属AMの活用を目指したデザインへの取組み

金属AMは、従来工法ではできなかった形状を製造することができる。その代表例は、軽量化の代表的な手法であるトポロジー最適化解析や、高冷却構造で注目されているラティス形状である。これらの活用を検討した取組みの事例を紹介する。

3.1 軽量化手法としてのトポロジー最適化解析

入門フォーミュラ用アップライトを題材に、トポロジー最適化解析を実施した事例を紹介する。鑄物で製作したアップライトを比較対象に、トポロジー最適化解析を用いて、どの程度の軽量化が可能なのかを確認した。荷重条件は、鑄物製品設計検討時と同様な14ケースの条件を与えた。

この条件下で、設計強度を確保し、剛性を鑄物製品と同等以上に保つことを条件に加え解析を行った。図9および図10に最適化対象領域(設

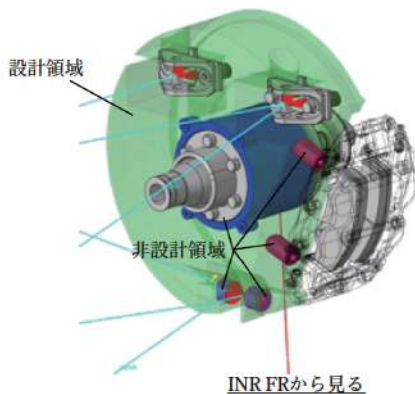


図9 領域の定義

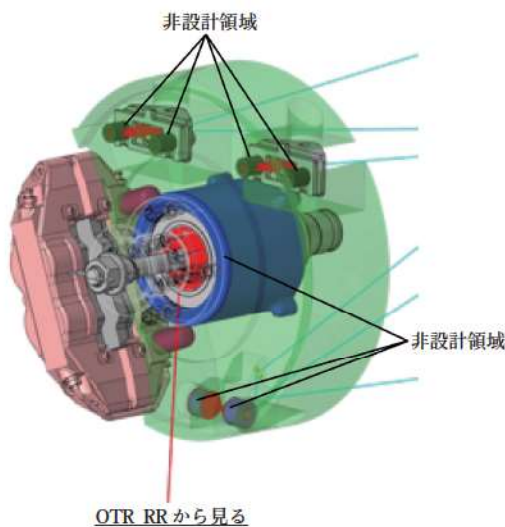


図10 制約条件の定義

計領域)の定義, 図11に荷重条件を示す。

トポロジー最適化解析の結果, 曲げ比強度/比剛性が改善された形状で約24%軽量かつ約20%高剛性の結果を得られた。図12にベース形状と解析結果形状を示す。

3.2 高冷却構造とするための熱流体解析

ヒートシンクなどの放熱効率を上げるために, 表面積の増加が期待できるラティス形状が注目されている。ラティス形状と放熱性能の関係を, 熱流体解析を用いて確認をした事例を紹介する。ラティス形状のビーム径とセルサイズを変化させた場合の放熱性能を比較した。解析モデルと条件を図13に示す。

温度一定, 流速一定の空気を入口から入れた場合の放熱量を解析した。形状による比較のため, 外部影響はないものとした。図14に解析モデル

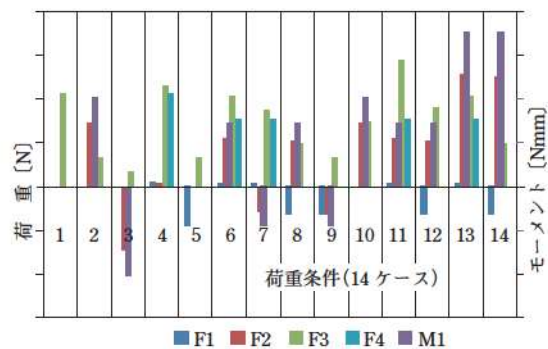


図11 荷重条件

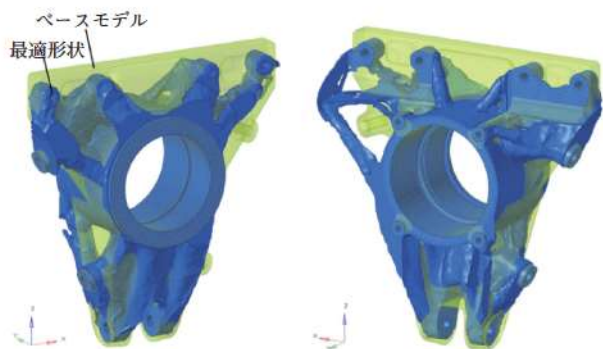


図12 解析結果

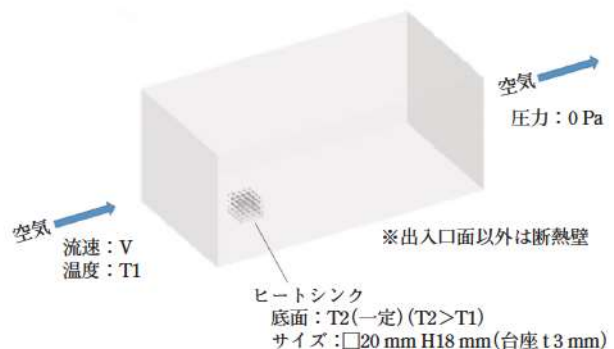


図13 解析モデルおよび解析条件

を示す。ビーム径は0.25, 0.5, 0.8, 1.0, 1.25, 1.5 mmの6種類, セルサイズは3, 4, 5, 6, 7の5種類とした。

放熱量の比較と解析結果の抜粋を図15, 図16に示す。今回は, 放熱量が最大となったケースを100%で表している。今回の条件下では, ビーム径0.8 mm, セルサイズ5 mmが放熱量最大となったが, この結果は流速等の条件により大きく変わるものである。さまざまな条件に合わせて形状を最適にアレンジできることは, 金属AMの最大のメリットといえる。今回はその片鱗を確認することができた。今後も, 金属AMの特徴を最大限引

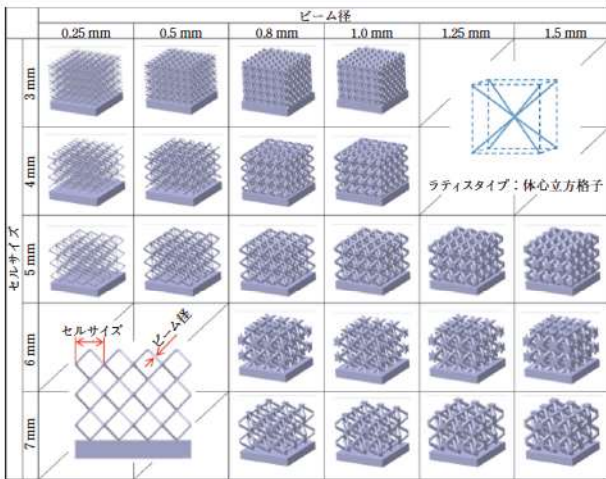


図14 解析モデル

セルサイズ [mm]	ビーム径 [mm]						AVE	MAX	MIN
	0.25	0.50	0.80	1.00	1.25	1.50			
3	78%	85%	65%	54%	-	-	71%	85%	54%
4	62%	88%	96%	81%	-	-	82%	96%	62%
5	57%	81%	100%	96%	84%	72%	82%	100%	57%
6	-	-	85%	87%	86%	81%	85%	87%	81%
7	-	-	84%	89%	90%	87%	88%	90%	84%
AVE	66%	85%	86%	81%	87%	80%	81%	-	-
MAX	78%	88%	100%	96%	90%	87%	-	100%	-
MIN	57%	81%	65%	54%	84%	72%	-	-	54%

図15 放熱量比較

き出し、効率化に貢献できる様活動を続けていく。

4 おわりに

今回は、金属AMのプロセスとしての特性を理解し、それを具体的なアプリケーション開発にどう生かしていくかの重要性和、そのアプローチに関して紹介を行った。

金属AM技術で特に重要なポイントは、従来品を単なるプロセス置換で考えるのではなく、必要とされる機能のデザイン・設計と、その機能を満たすための機械特性に合わせた材料開発がKeyになる。特に材料に関しては、従来プロセスでの常識と大きく特性が異なる点多々あり、そのメカニズムをいかに理解し、それを材料開発に適応させていくかが重要だと考える。つまり、求められる機械特性を決定し、それに合わせた材料開発を行うということであるが、金属AMではその実現可能性が極めて大きくなってきているということである。

昨今では材料のマルチマテリアル化も進んできており、異種金属による複層、またそれを実現するための装置開発も進みつつある。例えば、今ま

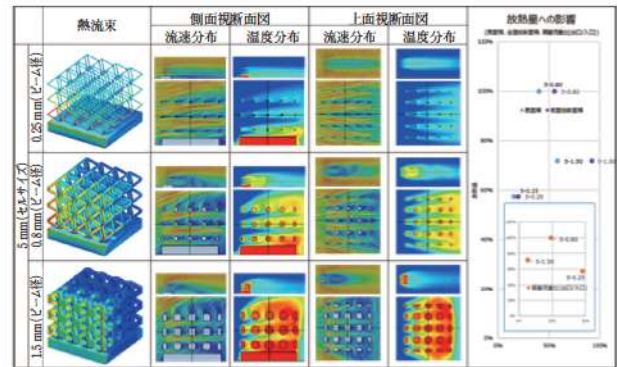


図16 解析結果

での常識ではアルミと鉄は従来の溶接では接合が難しいと考えられてきたが、金属AMではそれも実現できる可能性があるということである。また、こういったことが可能になってくれば、部位ごとに必要とされる機械特性を加味した金属材料の選定とデザイン・設計によって、究極的な軽量化も可能となってくる。

金属AMには、金属組織をコントロールすることで新たな機械特性をもたせるといった、今まであまり知られていないプロセス上のメリットもあり、従来では不可能と考えられたことが実現する可能性もあることを理解いただき、一日も早く日本でも本技術が普及し、日本が世界のリーダーとなることを切に願っている。

そのためには、日本が優位性を誇る自動車分野での適応が一番の機動力となるので、ぜひ積極活用を検討いただきたい。

今回は、金属AMの造形における開発手法と課題、量産化に向けた品質管理とそのデータ管理の重要性といったテーマでの紹介を行う予定である。

参考文献

- (1) 安達充, 小岩井豊己, 小岩井修二: 粉体および粉末冶金, 61, 227-233 (2014)
- (2) 安達充, 栗田健也, 永田佳彦, 小岩井修二: 塑性加工, 56, 118-123 (2015)
- (3) 高島大洋, 小泉雄一郎, 李云平, 山中謙太, 斉藤毅, 千葉昌彦: 粉体および粉末冶金, 63, 10-16 (2016)

フェイス



保田憲孝

佐々木 信之

小松伸弘

山本晃弘