

# 熱輸送制御を目的とする局所発泡金属と Al 基複合材料の接合に関する研究

秋田大学大学院 理工学研究科 物質科学専攻 材料理工学コース  
助教 福地 孝平  
(平成 29 年度 奨励研究助成 A(若手研究者) AF-2017040)

キーワード：発泡金属，Al 基複合材料，熱特性

## 1. 研究の目的と背景

現在，地球温暖化問題や，化石燃料の枯渇問題などからエネルギー効率の改善が急務となっている．そこで，排熱の回収・再利用により熱効率を高めるコージェネレーションシステムの一般家庭への普及や，ハイブリット自動車(HEV)に排気熱回収器を搭載することにより燃費の向上が図られている．また，HEV などに使用される絶縁ゲートバイポーラトランジスタ(IGBT)のようなパワーデバイスでは，小型化，大出力化が進んでいる，つまり，単位体積当たりの発熱量が増加しているため，冷却方法に関する課題を抱えている．このように，熱輸送技術の改善は極めて重要な課題である．従来，アルミニウム(Al)や銅などの熱伝導率の高い金属を熱交換器やヒートシンクなどの冷却システムに使用してきたが，上記のような熱問題を解決するには既存の材料や冷却システムだけでは不十分であると考えられる．

このような熱問題の解決のため，優れた熱伝導率，導電率，強度特性を有する炭素繊維(CF)を含有させた Al 基複合材料が開発されている<sup>1)~3)</sup>．この複合材料は，CF を一方向に配向させた場合，CF の軸方向には，純 Al よりも高い熱伝導率を有し，CF の半径方向には，Al よりも低い熱伝導率を有する，つまり，熱異方性を持つということがわかっている<sup>1), 2)</sup>．この複合材料を熱間押し出し法で作製した場合，複合材料の成形と繊維の配向が同時に起こる，つまり，押し出し方向に CF が配向できることも知られている<sup>3)</sup>．

また，スポンジのような多孔質構造を持つ発泡金属は，一般に使用される緻密な金属と比べて，軽量の構造材料や優れた吸音性，衝撃吸収性などを有する機能材料として注目されている<sup>4)</sup>が，その熱特性も緻密な金属とは異なっている<sup>5)</sup>．例えば，気孔一つ一つが繋がらないクローズドセルと呼ばれる状態では，内部の気泡が材料の熱伝導率を低下させ，断熱性の良い材料となり，気孔が外部に繋がったオープンセルと呼ばれる状態，特に，一方向の気孔を有する状態では，放熱面積が増加することから，フィン効率が増加するということが知られている．筆者らは，発泡金属の気泡分布を能動的に制御できる熔融再加熱法を開発し，局所的に緻密部と発泡部を合わせ持った局所発泡金属の作製を可能にしている．

これらの CF 含有 Al 基複合材料と局所発泡金属を 1 つの部材の中で任意の位置に配置することができれば，部材

内の伝熱方向を任意に制御できる可能性がある．ただし，熔融再加熱法により作製した局所発泡金属の熱・強度特性における有用性については，まだ明らかにできていない．また，複合材料と発泡金属を一つの部材として運用するためには，それらを一体成型で作製する方法，もしくは，接合する方法を検討しなければならない．

以上のことから，本研究では，まず，熔融再加熱法により作製した局所発泡金属の熱・強度特性の有用性を検討するために，熱負荷と機械的負荷を受ける部材への実用化を目的に，形状を簡素化した底なし円筒形状(以後，模擬ピストン)の発泡化を行った．具体的には，熔融再加熱法で試作した発泡ありと発泡なしの模擬ピストンの放熱特性評価と模擬ピストン頂部の強度特性評価を実施した．放熱特性の評価は，有限要素解析(FEA)と実機を用いた実験を行った．強度特性評価には，ピストン頂部から試験片を切り出し，引張試験を行った．次に，Al 基複合材料を発泡金属と同じ組成の Al 合金によって鋳込み法で接合し，その鋳込み境界の界面性状について，電界放出型走査電子顕微鏡(FE-SEM)を用いて微視観察し，鋳込み法による発泡金属と複合材料の接合の可能性について検討した．

## 2. 実験方法および解析方法

### 2.1 材料の作製方法

#### 2.1.1 局所発泡金属の作製方法

本研究では，熔融再加熱法を用いて，Al 基発泡金属を作製した．供試材には，主要合金元素がピストン用 Al 合金 AC8A とほぼ同様な Al 合金を用いた．表 1 に供試材の化学組成を示す．気泡安定化のため，溶湯の粘度を増加させる増粘剤には Ca を用い<sup>6)</sup>，発泡剤には良好な発泡特性を持つ TiH<sub>2</sub>を用いた．発泡金属の作製方法は，熔融発泡法の改良型である熔融再加熱法を用いた．

図 1 に熔融再加熱法の概略図を示す．図 1(a)のように，円筒形ステンレス容器(φ60)内の 650℃で熔融させた Al 合金へ発泡剤を投与した後，汎用攪拌機で 30s 強制攪拌を

表 1 発泡金属用 Al 合金の化学組成[wt%]

Aluminum alloy	Si	Cu	Mg	Others
	8	3	1.5	--
Ca (Thickening)		TiH <sub>2</sub> (Forming)		
1		2		

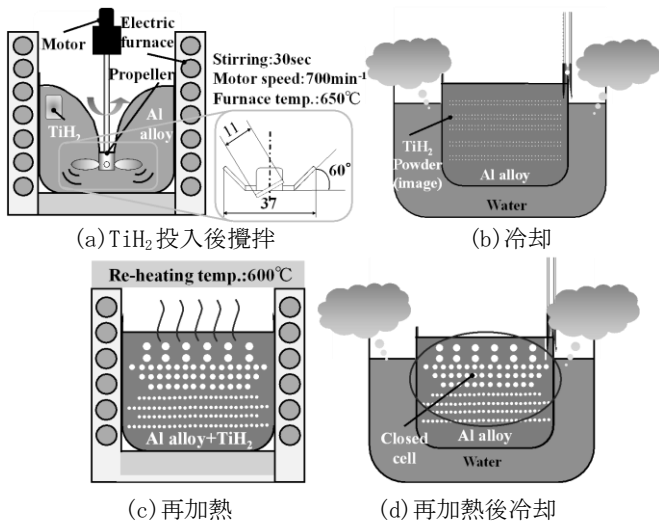


図1 溶融再加熱法の模式図

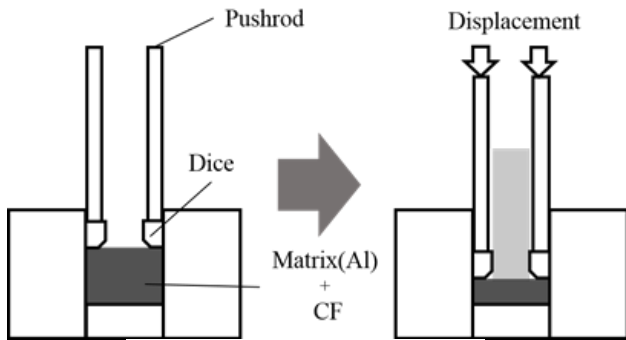


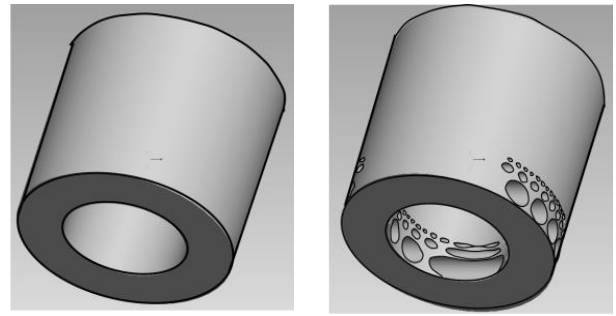
図2 熱間押し出し法の模式図

行った。その後、図1(b)のように、発泡金属をすぐに水冷して、図1(c)のように600°Cで再加熱を行った。これにより、発泡剤を含有したAl合金を再加熱することで未反応分の発泡剤を反応させ、局所発泡を意図的に行った。最後は図1(d)のように、再び水冷した。

### 2・1・2 Al基複合材料の作製方法

本研究では、熱間押し出し法を用いて、Al基複合材料を作製した。母材には、Al粉末を90wt%とアルミニウムシリコン共晶合金(Al-12%Si)粉末を10wt%混合した粉末を使用した。Al-12%Si粉末は母材中の充填率をより高くするため混合している。使用したCFの長さは約50-200 $\mu$ mである。CFと母材粉末をそれぞれ乳鉢に入れ、均一に混合する。CFの含有量は0wt%、5wt%、10wt%、15wt%、20wt%とする。0wt%は母材のみで作製した試料のことを示す。

図2に熱間押し出し法の概略図を示す。まず、混合した粉末を内径20mmの金型に充填する。粉末を充填した金型は電気炉を用いて加熱する。金型が500°Cに達した後、30min温度を保持した後、万能試験機を用いて内径8mmのダイスに10mm/minの速さで変位を与え、粉末を押し出し成型する。電気炉内は、大気雰囲気である。成型後は炉から試料を取り出し、冷却を行う。また、加工硬化による試料のばらつきを防ぐため、300°Cで1時間の焼鈍し熱処理を行う。



(a) 発泡なし (b) 発泡あり

図3 放熱特性評価のFEモデル

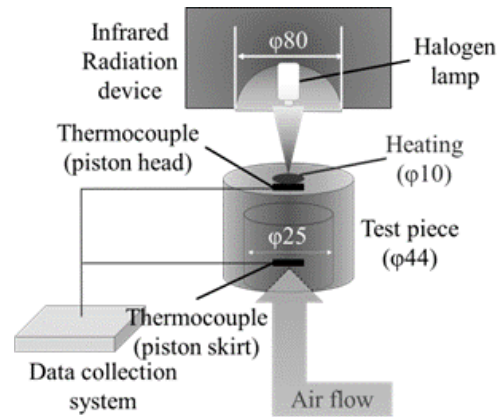


図4 放熱特性評価試験の模式図

## 2・2 模擬ピストンの放熱特性評価

### 2・2・1 FEAによる検討

本研究では、自動二輪搭載の空冷単気筒2サイクルエンジンに使用される、ボア径 $\phi 44$ のピストンを模した解析を試みた。図3(a)、(b)に模擬ピストンのFEモデルを示す。図3(b)の発泡ありのモデルではピストン頂部からスカート部へ向かって $\phi 1$ 、 $\phi 3$ 、および、 $\phi 5$ の順で発泡部を模した貫通穴が空いている。FEAは、Pro ENGINEER Wildfire4.0付属のMechanicaで、解析種類は熱伝導解析である。後述する放熱特性評価試験を模した解析を行うため、熱境界条件は、模擬ピストン頂部中心に高温を与え、他の面には、雰囲気温度20°Cと熱伝達係数を与えた。

### 2・2・2 実験による検討

本研究では、模擬ピストンの放熱性能を確認するために実機エンジンのガス燃焼による加熱とエンジンオイルによるピストンの冷却を模擬する必要があるため、図4に示す放熱特性評価試験を実施した。試験片は、発泡剤添加の有無の異なる試料から、図3のFEモデルと同一形状の模擬ピストン(ボア径 $\phi 44$ )を作製した。作製した発泡ありの模擬ピストンを図5に示す。図5より、模擬ピストン頂部は緻密であり、スカート部に気泡があることがわかる。実験条件は、大気雰囲気中において模擬ピストン頂部中央へ制御装置で出力電流(8A)を制御した赤外線放射加熱装置(アドバンス理工製、MR-39H)を用いて局所加熱( $\phi 10$ )を20min間行った。冷却は送風機を用いて模擬ピストン内

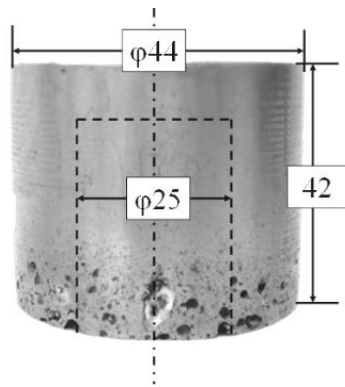
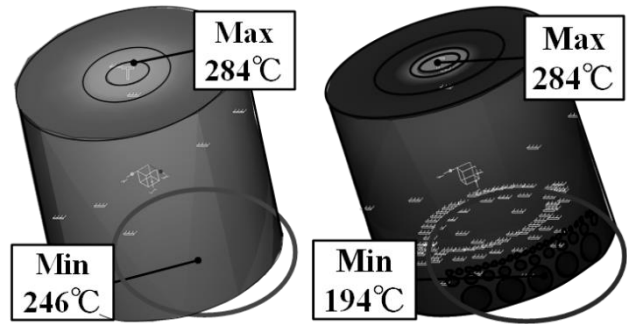


図5 作製した模擬ピストン(発泡あり)



(a) 発泡なし (b) 発泡あり

図7 放熱特性評価のFEA結果

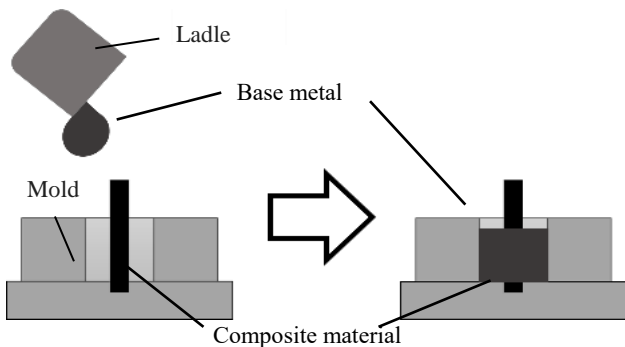


図6 鋳込み法の模式図

表面に空気による強制対流を行い、加熱後も20min間冷却した。温度測定には、K型シース熱電対(φ0.5)をピストン頂部とスカート部の2ヶ所に設置し、データ集録システムを介して、解析用PCに接続した。

### 2・3 局所発泡金属の緻密部の強度特性評価

発泡金属の作製には、増粘剤Caと発泡剤TiH<sub>2</sub>の投与が不可欠であるが、これらの添加剤には、強度向上に寄与しない、という問題点がある。局所発泡金属緻密部の強度への添加剤の影響を確認するため、本研究で作製した局所発泡金属の緻密部から引張試験片を切出し、その引張強さを、AC8Aの焼鈍材(AC8A-0)とT6処理材(AC8A-T6)と比較する。試験片形状は、平行部厚さ2mm、幅5mm、長さ25mmであり、各条件の試験片を5本ずつ用意した。引張試験は、精密万能試験機オートグラフ(島津製作所製、AG-100kN Xplus)を用い、室温で1mm/minで実施した。

### 2・4 鋳込みによる接合界面性状の検討

本研究では、複合材料と発泡金属を接合する方法として、鋳込み法を選択した。図6に鋳込み法の概略図を示す。2・1・2節に示す熱間押し出し法で作製した複合材料が中央になるように内径20mm、高さ35mmの金型を設置した。そこへ、発泡金属と同じ組成のAl合金を溶湯温度750°Cで金型に注湯することで、鋳込み試料を作製した。

作製した鋳込み試料について、複合材料の押し出し方向に垂直な面と平行な面に切り出し、研磨した後に、金属顕微鏡、FE-SEMを用いて接合界面を観察し、界面の密着性について検討した。

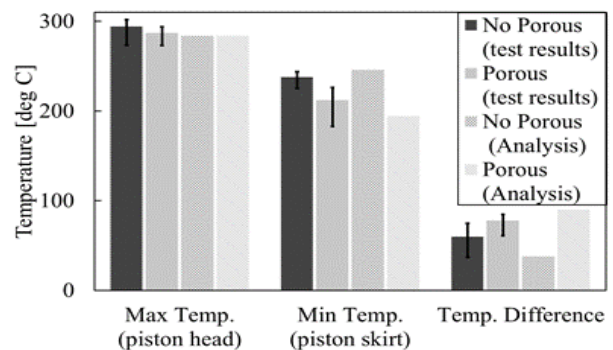


図8 模擬ピストン頂部の最高温度とスカート部の最低温度、その温度差の関係

## 3. 実験結果および考察

### 3・1 模擬ピストンの放熱特性評価

図7に、FEA結果の模擬ピストンの温度分布を示す。図7(a)が発泡なし、(b)が発泡ありのモデルとなっている。発泡の有無によるスカート部の最低温度を比較すると、発泡なしが246°Cであるのに対し、発泡ありでは194°Cとなっており、52°Cの温度低下が生じた。これは発泡化によるスカート部の表面積の拡大により、放熱性能が向上し、温度低下に寄与したものであると思われる。よって、このように模擬ピストン内部と外部をつなぐような発泡化は放熱性能向上へ寄与すると考えられる。

次に、図8に実験、解析から得られた模擬ピストン頂部の最高温度、スカート部の最低温度、および、最高温度と最低温度の温度差を示す。実験結果の発泡ありと発泡なしを比較すると、頂部の最高温度では、発泡なしに比べ発泡ありにおいて7°Cの温度低下が生じ、スカート部の最低温度では、15°Cの温度低下が生じた。以上の結果から、本研究で用いた模擬ピストンの発泡部は放熱性能の向上に寄与することがわかった。発泡金属の気泡構造には、泡構造の茎部分だけが残ったオープンセルと泡構造の膜面が残ったクローズドセルの2つに分類される。本研究で用いた発泡金属は、その作製方法からクローズドセルになると考えられるが、ピストン形状へ加工する際に、発泡部膜面の一部が削り取られることにより、表面積が拡大し、発泡なしの模擬ピストンよりも強制対流による放熱効果が得ら

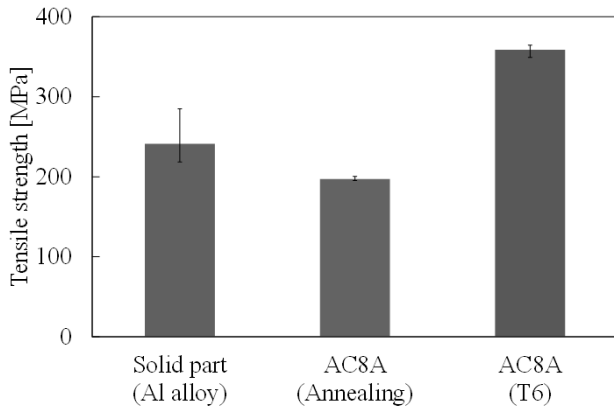


図9 局所発泡金属緻密部とAC8A材の引張強さの比較

れたことで、放熱性能の向上につながったと考えられる。

また、実験結果を解析結果と比較すると、その傾向は定性的に一致した。但し、解析の最低温度は試験片の測定結果よりも低かった。この理由として、図3(b)からわかる通り、発泡ありのFEモデルではオープンセルを想定しているためであり、発泡ありの解析における発泡部の放熱特性への寄与が、実際の測定における発泡部の寄与よりも大きなものであったと考えられる。

### 3・2 局所発泡金属の緻密部の強度特性

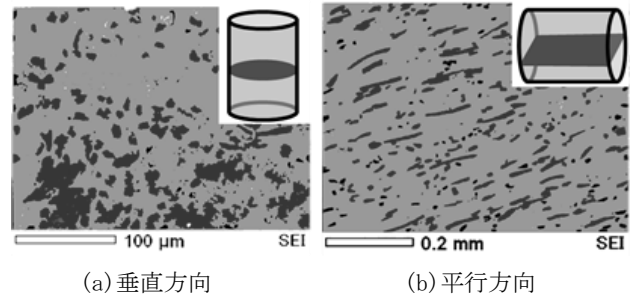
図9に、引張試験結果として、各条件の引張強さの平均値を示す。図9より、発泡金属緻密部の引張強さとAC8A材の引張強さで比較を行うと、発泡金属の緻密部はAC8A-0材の引張強さよりも大きく、AC8A-T6材の引張強さよりも小さい結果となった。発泡金属の緻密部が熱処理を行っていない作製したまま材であることから、今後、溶体化処理などを行うことにより、引張強さを向上させることが可能と考えられる。また、エネルギー分散型X線分光器(EDS)を用いた化学組成分析で増粘剤Caと発泡剤TiH<sub>2</sub>の含有率測定をそれぞれ行ったところ、発泡金属緻密部における増粘剤と発泡剤の含有量は発泡金属作製時の添加量に比べて極めて小さいことがわかった。以上のことから、緻密部への増粘剤と発泡剤の強度や化学組成に対する影響は小さいと考えられる。

このように、発泡金属の発泡部、つまり、増粘剤と発泡剤を部材内で精度よく配置することができれば、構造材料として使用しつつ、発泡部のある部分では、機能材料として扱うことができると考えられる。

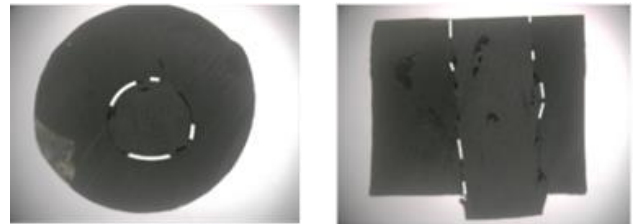
### 3・3 鋳込みによる接合界面性状の検討

図10にFE-SEMで観察した15wt%CF含有Al基複合材料試料の断面を示す。図10(a)が押し出し方向に対して垂直に切り出した断面、図10(b)が押し出し方向に対して平行に切り出した断面であり、黒く見えるものがCFである。図10より、(a)はCFが点状に、(b)はCFが紙面左右方向の押し出し方向に揃っていることがわかる。これはAl粉末とCFが押し出される際に、CFの向きが押し出し方向に揃うため、このような断面になったと考えられる<sup>3)</sup>。

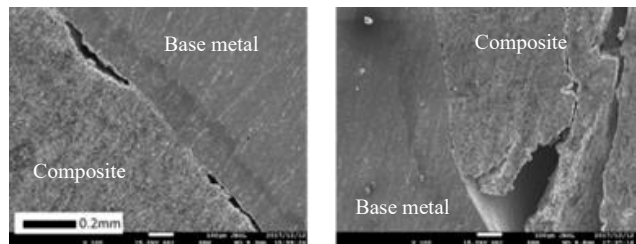
図11に鋳込み法により、発泡金属と同じ組成のAl合金



(a) 垂直方向 (b) 平行方向  
図10 押し出し法により作製した複合材料の断面観察 (15wt%CF)



(a) 垂直方向 (b) 平行方向  
図11 鋳込み法によって接合したAl合金と複合材料の断面観察 (15wt%CF)



(a) 垂直方向 (b) 平行方向  
図12 鋳込み法によって接合したAl合金と複合材料の断面微視観察 (15wt%CF)

と複合材料を接合した試料の断面を金属顕微鏡で観察した様子を示す。図11(a)が押し出し方向に対して垂直に切り出した断面、図11(b)が押し出し方向に対して平行に切り出した断面である。また、複合材料とAl合金部の境界部分において、複合材料とAl合金が密着していると見られる位置を白線で示している。図12に、白線の位置をFE-SEMで観察した様子を示すが、図12からも当該部位は微視的にも密着していることが確認できる。

図11(a)において、垂直断面の複合材料とAl合金の密着割合、つまり、複合材料とAl合金の境界線における白線の割合は、約50%であり、複合材料のCF含有率が異なる場合でも同様であった。この理由として、次のことが考えられる。本研究で使用した複合材料は押し出したままの状態で使用している。押し出されたままの状態では、図11(b)の下部で見られるように、表面粗さが大きい状態である場合がある。このように表面粗さの大きい部分ではAl合金の溶湯が細部に入る前に固化してしまうために、密着割合が小さくなってしまったと考えられる。また、本研究では、鋳込み温度を一定で実施したが、より適当な鋳込み条件があるものと考えられる。つまり、複合材料の表面を平滑にし、溶湯

温度を含めた鑄込み条件を整えることにより、複合材料と Al 合金の密着割合を大きくすることが可能と考えられる。

以上の結果から、鑄込み法による局所発泡金属と Al 基複合材料の接合は、有用であると考えられる。ただし、本研究では、Al 合金と複合材料の接合状態を FE-SEM 等を用いた見た目上の密着割合で検討しているが、固体材料同士の伝熱を考える際には、界面熱抵抗を考える必要がある。また、構造材料として用いる場合でも、複合材料と発泡金属それぞれの強度特性の他に接合界面での強度特性も検討する必要がある。以上のことから、今後は、接合界面の熱・強度特性の評価についても検討する必要がある。

#### 4. 結 言

本研究では、溶融再加熱法により作製した局所発泡金属の熱・強度特性を明らかにするために、エンジンピストンを模擬した熱解析と実験を行い、発泡部の放熱特性の評価を行った。また、局所発泡金属の緻密部に対して、引張試験を行うことにより、緻密部の強度特性について検討した。そして、Al 基複合材料と発泡金属の接合方法について、鑄込み法を用いて検討した。その結果、以下の結論を得た。

- (1) 発泡部の有無の異なるピストン形状を簡易的に FE モデル化し、熱伝導解析を実施することにより、発泡部がある場合の方が、ない場合よりもピストンスカート部の温度が低下することを明らかにした。
- (2) 溶融再加熱法により作製した局所発泡金属の試料を用いて、(1)の模擬ピストン形状を実際に作製し、放熱特性評価試験を実施した結果、実験においても、解析と定性的に同様の結果が得られた。その理由として、発泡部の凹凸が模擬ピストン表面に曝されることにより、放熱に寄与する表面積が増加したことが原因と考えられる。
- (3) 発泡金属の緻密部から切出した試験片に対して、引張試験を実施したところ、AC8A の焼鈍し材より強度が大きく、T6 処理材より強度が小さくなった。その理由として、緻密部には、強度を低下させる可能性のある増粘剤 Ca や発泡剤  $TiH_2$  が存在しないことが考えられ、緻密部は強度部材として使用できる可能性が示唆された。

- (4) Al 基複合材料と発泡金属の母材となる Al 合金を、鑄込み法で接合することを試みたところ、複合材料と Al 合金の境界面の約 50%が密着していることがわかった。
- (5) 複合材料の表面を平滑にし、鑄込み条件を詳細に検討する必要があるものの、Al 基複合材料と発泡金属の接合方法として、鑄込み法は有用であると考えられる。

#### 謝 辞

本研究は、公益財団法人天田財団からの平成 29 年度奨励研究助成 A (若手研究者) (AF-2017040) の援助を受けて実施しました。ここに深く感謝申し上げます。また、本研究の遂行にあたり、釧路工業高等専門学校創造工学科教授の高橋剛先生、秋田大学大学院理工学研究科教授の大口健一先生、秋田県産業技術センター研究員の黒沢憲吾氏には多くのご助言を賜りました。ここに謝意を表します。

#### 参考文献

- 1) 今西輝光・佐々木克彦・片桐一彰・垣辻篤：CNT を添加した VGCF/アルミニウム複合材料の熱伝導特性，日本機械学会論文集 A 編，75-749(2009)，27-33.
- 2) Fukuchi, K., Sasaki K., Imanishi T. and Takeda R. : Temperature dependence on thermal and strength properties of aluminum based high thermal conductive composites containing VGCF-CNT fillers, 5-3(2018), 18-00001.
- 3) 徳永透子・高橋晃一・大野宗一・佐々木克彦・今西輝光・松浦清隆：熱間押出法による炭素繊維配向制御 Al 基複合材料の作製およびその熱伝導率評価，日本金属学会誌，80-10(2016)，640-645.
- 4) 宇都宮登雄・高橋和也・加藤弘規・半谷禎彦・北原総一郎・桑水流理・吉川暢宏：気孔率および気孔形態を傾斜的に変化させた ADC12 ポーラスアルミニウムの作製，軽金属，62-7(2012)，278-284.
- 5) 近藤義広・越田博之：多孔質金属フィンの圧力損失と熱伝達率の予測法，日本機械学会論文集，82-844(2016)，16-00173.
- 6) 濱田猛・西誠治・三好鉄二・金武直幸：溶湯法ポーラスアルミニウムの気孔形態と圧縮強度に及ぼす発泡条件の影響，日本金属学会誌，72-10(2008)，pp825-831.