

平成 24年度戦略的基盤技術高度化支援事業

「多孔質金属を用いた高効率熱交換器の開発」

研究開発成果等報告書

平成 25年 3月

委託者 近畿経済産業局

委託先 太盛工業株式会社

第1章 研究開発の概要

1-1 研究開発の背景 研究目的及び目標

【背景】

我が国の二酸化炭素排出量の内訳で、一般産業に次いで、運輸の占める割合が高く中でも自動車の主たる要因となっており、その対策として、従来の化石燃料自動車に替わり、CO₂の排出が少なく環境に優しいハイブリッド車あるいは電気自動車が社会に受け入れられ、世代交代が進んでいる。

これら、電気を動力源とする車では、インバーターにより直流を交流に変換し、バッテリー電源からモーターに電気を供給している。車の発進時や加速時には、大電流をモーターに供給する必要からインバーターの負荷が大きくなり、損失エネルギーとしての発熱も著しくなるため、水冷の熱交換器によって冷却し、インバーターの損傷を防いでいる。現状の水冷熱交換器は、冷却水との接触面積を少しでも大きくするために、内部に曲折する溝を設けるあるいはフィン状の突起を付与する等工夫されているが、さらなる熱交換特性の向上と、それに伴う小型化が大きな課題となっている。

また最近では、省電力の照明装置としてLED照明の実用化が始まった。しかしLEDは自己発熱で温度が上昇するにつれ、輝度が低下する、あるいは劣化して寿命が低下するなどの問題があり、熱対策が必須である。特に、LEDを自動車の照明に応用した場合には、積極的な放熱対策が必要であり、パワーモジュールと同様に水冷装置が有効と考えられている。

弊社は、平成20年から、金属繊維の焼結による多孔質体製造の基礎研究を始め、熱交換器部材としての有用性を確認してきた。アルミ繊維【解説1】の焼結多孔質体は、その3次元複雑構造により、冷媒の流体を通じた時の圧力損失が小さく、かつ伝熱面積を増大し、さらに冷却水の攪拌も得られ、結果的に熱伝達特性を向上することが出来る。

また、金属繊維を焼結する際、ハウジングの緻密構造体と圧接し、拡散接合【解説2】することにより、金属繊維の多孔質部材とハウジング部分の原子間結合が可能となり、この界面における熱抵抗を最小に抑えることが出来る。

【研究開発の高度化目標及び技術的目標値】

(1)自動車に関する事項 イ.難接合材の溶接技術の向上

アルミ繊維の圧縮・焼結体を用いた高効率な熱交換器を開発し、下記のような環境保全、省エネルギー対策で社会に貢献することを目指す。

ハイブリッド車や電気自動車の普及に貢献し、二酸化炭素排出量の削減。

LED照明の普及促進による、さらなる二酸化炭素排出量の削減。

従来回収で困難であった低温領域の廃熱についても、高効率で低コストの熱交換器を用い、さらに熱電素子と組み合わせれば、熱回収が可能となり、社会の省エネルギー化に貢献する。

具体的な研究目標を、以下に示す。

【1】アルミ繊維の高能率焼結法の開発

アルミは軽量かつ熱伝導率が高く、自動車用に搭載する小型熱交換器用途に最も適した素材であると考えられる。しかしながら、アルミの表面層は強固な酸化皮膜に覆われており、これが焼結時の拡散接合を阻害するため、焼結は困難とされている。従来、弊社では、バッチ式炉で真空状態を保持しつつ高温に加熱する方法で、アルミ繊維の焼結体が製造可能であることを確認している。しかしこの方法は生産性が低く、コスト面でも不利である。従い、量産のためには、不活性ガスで置換した無酸化雰囲気、あるいは水素ガスの還元性雰囲気において、連続的に焼結する方法を確立することが必須である。

【1 - 1】雰囲気と圧縮荷重がアルミ繊維の焼結性に及ぼす影響の調査

アルミ繊維の焼結能率として、不活性雰囲気において、焼結温度での保持が2時間以内で焼結完了することを目標とする。また、予備試験で得られた結果と同様に、多孔質体の効果として熱伝達係数が8倍以上に増大することを目標とする。さらに、拡散接合による多孔質体と緻密ケーシングとの接合の効果は、単純接触に比し熱伝達係数で50%以上の増加を目標とする。

【1 - 2】連続式焼結炉によるアルミ繊維の焼結試験

連続炉により、アルミ繊維の焼結および多孔質体と緻密材との拡散接合が可能であり、この場合も、上記【1 - 1】で得られた性能と同等以上であることを目標とする。

【2】熱交換器設計のための基礎試験

【2 - 1】多孔質体の形状が伝熱特性および圧損に及ぼす影響の調査

多孔質体の断面形状による、熱伝達特性と圧力損失の定量的なデータを得ることを目標とする。

【2 - 2】多孔質体の表面性状が伝熱特性に及ぼす影響の調査

多孔質体表面の親水処理により、熱伝達率が5%以上向上することを目標とする。

【3】熱交換器の試作と性能評価

【3 - 1】伝熱特性評価試験装置の製作、設置

アルミ多孔質体および試作熱交換器の、熱伝達特性ならびに圧力損失を測定出来る装置の完成を目標とする。

【3 - 2】熱交換器の試作

実用化モデルを製作し、伝熱特性評価に供試する試作することを目標とする。

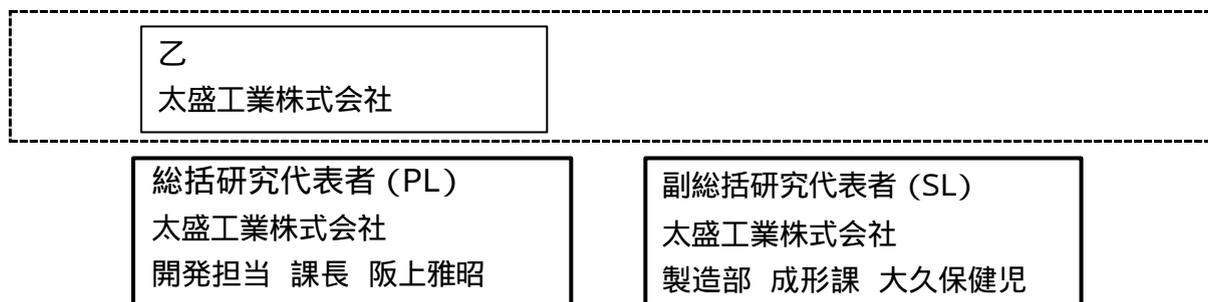
【3 - 3】試作熱交換器の伝熱特性評価

装置寸法として、体積100立方cm以下の容積であって、1000w以上の伝熱特性を有することを目標とする。

1-2 研究体制

(1) 研究組織及び管理体制

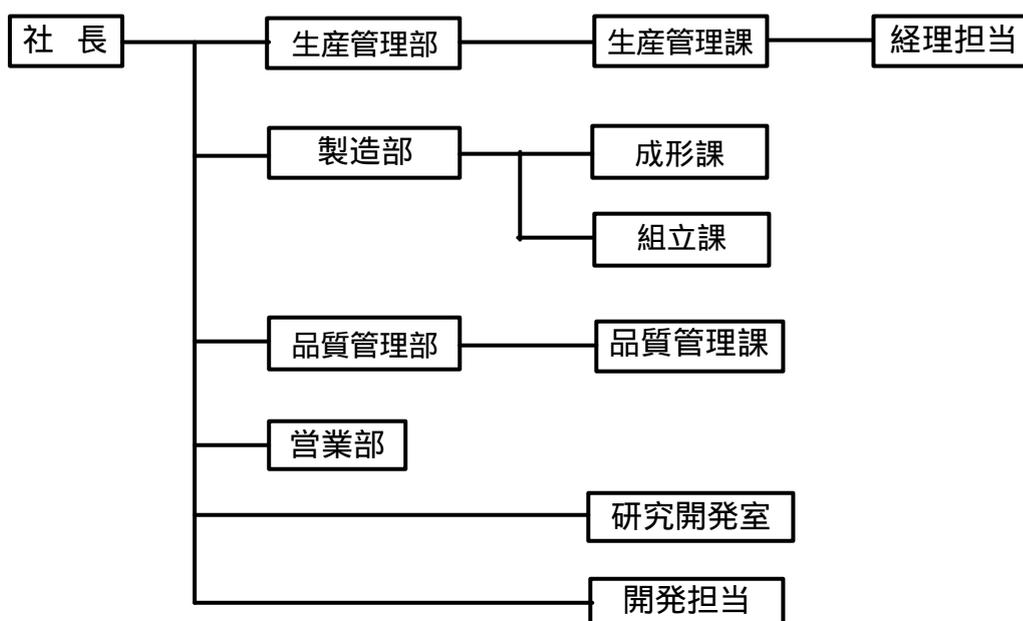
1) 研究組織 (全体)



2) 管理体制

事業管理機関

[太盛工業株式会社]



(2) 管理員及び研究員

【事業管理機関】太盛工業株式会社

管理員

氏名	所属 役職
阪上 雅昭	開発担当 課長
森田 純代	生産管理部 生産管理課 課長

研究員

氏名	所属・役職
田中 茂雄	代表取締役
阪上 雅昭(再)	開発担当 課長
金谷 陽太	製造部 成形課 主任
大久保 健児	製造部 成形課 課員
鹿子 泰宏	研究開発室 研究員
渡辺 勇佑	研究開発室 研究員

(3) 経理担当者及び業務管理者の所属、氏名

(事業管理機関)

太盛工業株式会社

(経理担当者)	生産管理部 生産管理課 課長	森田純代
(業務管理者)	開発担当 課長	阪上雅昭

(5)その他

【アドバイザー】

氏名	所属・役職	助言内容
稲岡恭二	同志社大学 理工学部 教授	熱交換器の設計及び伝熱特性の評価について、伝熱工学の専門的な助言
荒木邦彦	株式会社 平安製作所 代表取締役社長	自動車用の熱交換器について、市場動向の情報提供と助言 プレス加工の専門事業者として、熱交換器の製作への助言

1-3 成果概要

アルミ繊維のバッチ炉による焼結試験の結果、次のような成果が得られた。

- 1)焼結時の雰囲気、アルゴン、窒素、および水素の場合も、真空の場合と同様、2時間以内の焼結時間で、繊維と緻密板並びに繊維間の接合を得ることが出来る。
- 2)焼結接合させたアルミ繊維と緻密板の接合強度は、材質や雰囲気によっても異なるが、焼結温度が高い程、接合強度も高くなる。

また、アルミ繊維の連続炉による焼結試験の結果、次のような成果が得られた。

3) 連続炉においても、温度と速度の適正化を図ることにより、バッチ炉の場合と同様にアルミ繊維とアルミ板の拡散接合が得られる。

4) 拡散接合部のマイクロ観察および面分析から、アルミ繊維とアルミ板の冶金的接合が確認された。また接合部においては、母材のアルミ成分と表面の酸化物の酸素だけが検出された。

熱交換器モデルの伝熱測定結果より、次の成果が得られた。

5) アルミ繊維の相対密度が高い程、熱伝達係数は高くなる。

6) アルミ繊維多孔質体の熱伝達係数は、平滑面に比し、最高で2.5倍である。

7) アルミ繊維多孔質体の伝熱面との焼結接合の効果は、単純接触に比し、熱伝達係数で100%以上の増大である。

8) 独自の設計による熱伝達特性の測定装置を導入し、水を媒体とした場合の熱伝達特性を実験的に求めることが出来た。

流路断面の形状について、

9) 熱交換器の壁面近傍のみに多孔質体を配置し、流路の中央部を空洞化したモデルの熱伝達特性は、壁面が平滑な空洞モデルの特性と数値的に類似したことから、流路の全体で熱伝達が行う機構が判明した。

10) アルミ繊維と緻密材を複合化することにより、アルミ繊維単体よりも熱伝達特性が向上することを確認した。

1-4 当該プロジェクト連絡窓口

太盛工業株式会社 開発担当 課長 阪上 雅昭

050-1402-3765

E-mail masaaki_sakagami@taisei-kogyo.com

第2章 本論

2-1 アルミ繊維の焼結試験

バッチ炉および連続炉を用いて、純アルミの繊維を純アルミ板と焼結接合する試験を実施した。

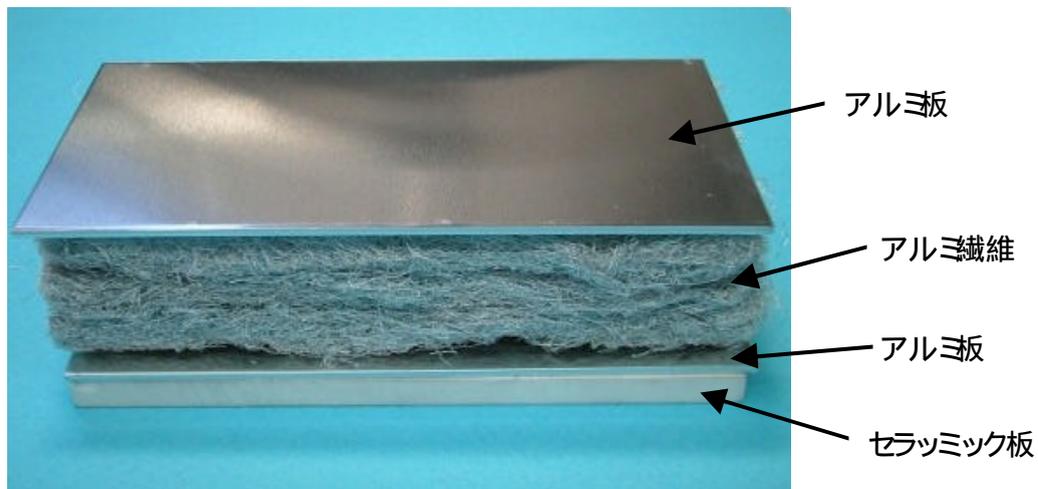


写真 2-1 アルミ繊維焼結のセットアップ



写真 2-2 焼結後のアルミ繊維多孔質体

アルミ繊維と板の接合部をSEMで観察すると、2つの部材が一体化していることが確認される。さらに断面をイオンミリング装置で研磨した後、EDX面分析装置を用いて、元素分析を実施した。

その結果、接合箇所では母材のアルミ成分と、周囲の酸化皮膜に該当する箇所の酸素成分が検出されている。

このことから、アルミ繊維と板の拡散接合が可能であることが確認された。

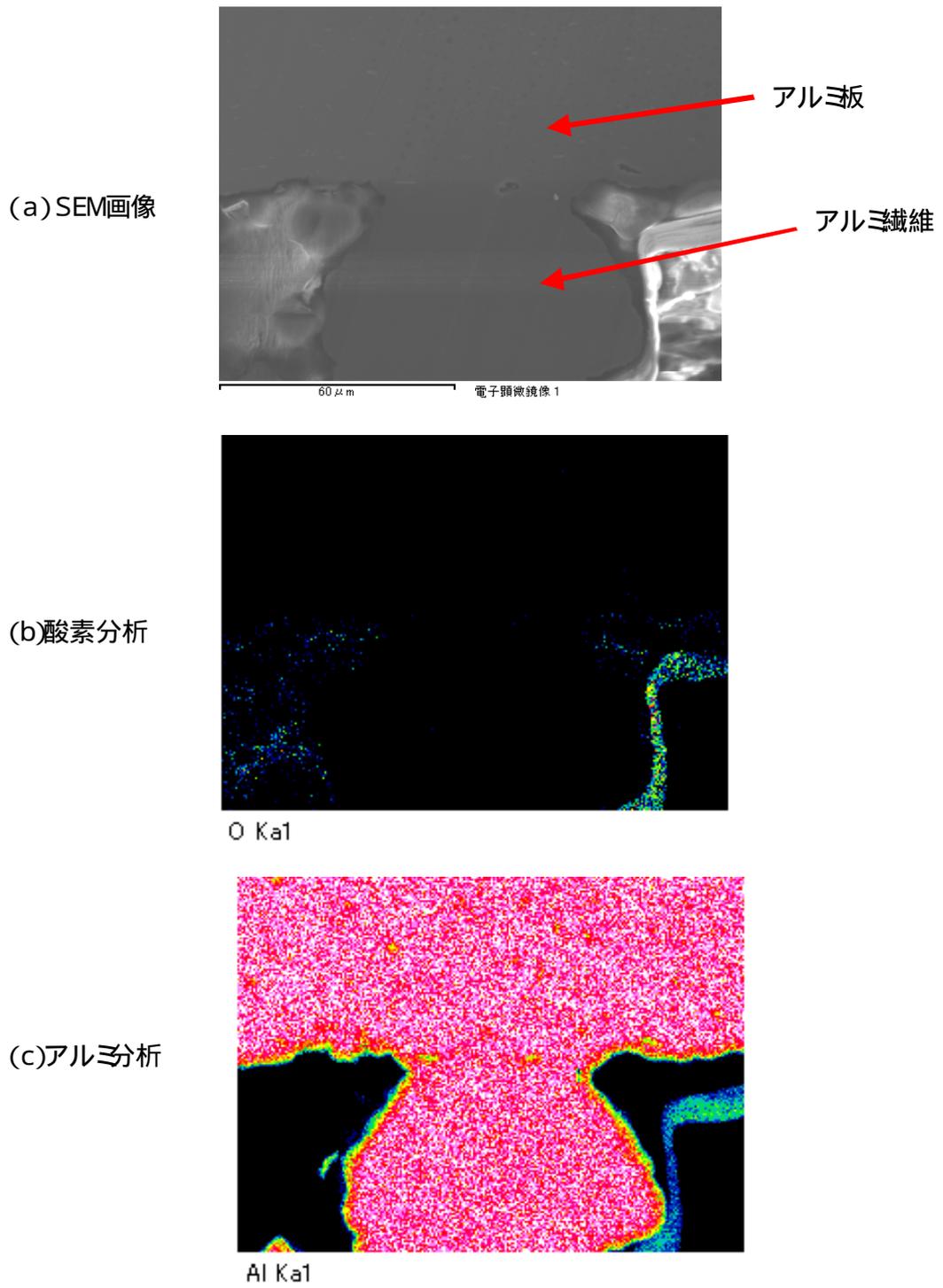


図 2 - 1 アルミ繊維接合部の面分析

使用したイオンミリング装置と EDX 面分析装置を下図に示す。



写真 2 - 3 イオンミリング装置 (株)日立ハイテクノロジー製 E - 3500)



写真 2 - 4 EDX面分析装置
(株)日立ハイテクノロジー製 SU1510/EX - 350xact)

2-2 接合強度の測定

焼結後のアルミ繊維多孔質体から、20mm 角の部材を切り出し、これに接続金具を接着し、下図に示すように、板面と垂直な方向に引張り、破断に至る最大荷重を測定した。

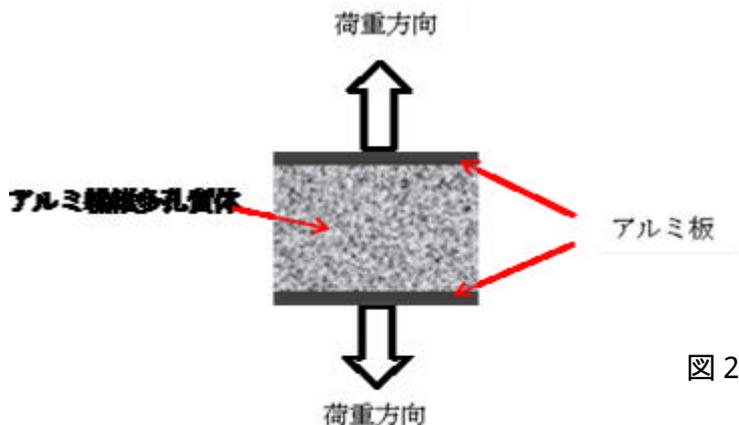


図 2-2 引張り試験の概略

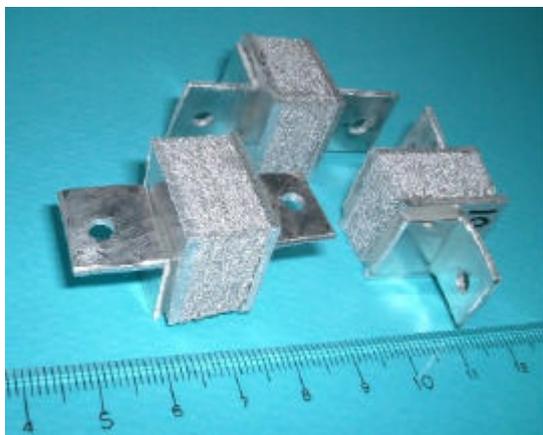


写真 2-5 引張り試験片



写真 2-6 引張り破断後の試験片

また、焼結後のアルミ繊維多孔質体から、幅 20mm、長さ100mm の部材を切り出し、これに接続金具を接着し、下図に示すように、板面と平行な方向に引張り、破断に至る最大荷重を測定した。

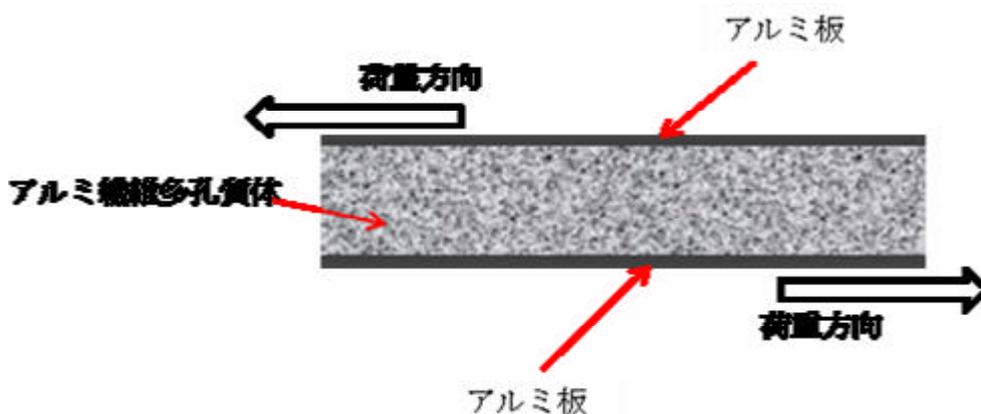


図 2-3 せん断試験の概略



写真 2 - 7 せん断試験片



写真 2 - 8 せん断試験の破断後の試験片

第 3 章 焼結条件がアルミ繊維の拡散接合に及ぼす影響

3 - 1 焼結炉の雰囲気の影響

各種雰囲気焼結したアルミ繊維多孔質体の引張り強度と、せん断強度をそれぞれ図 2 - 4 および図 2 - 5 に示す。横軸は、圧縮、焼結後の相対密度を示している。接合のアルミ板材は A1100 で、圧縮荷重は 500 g である。

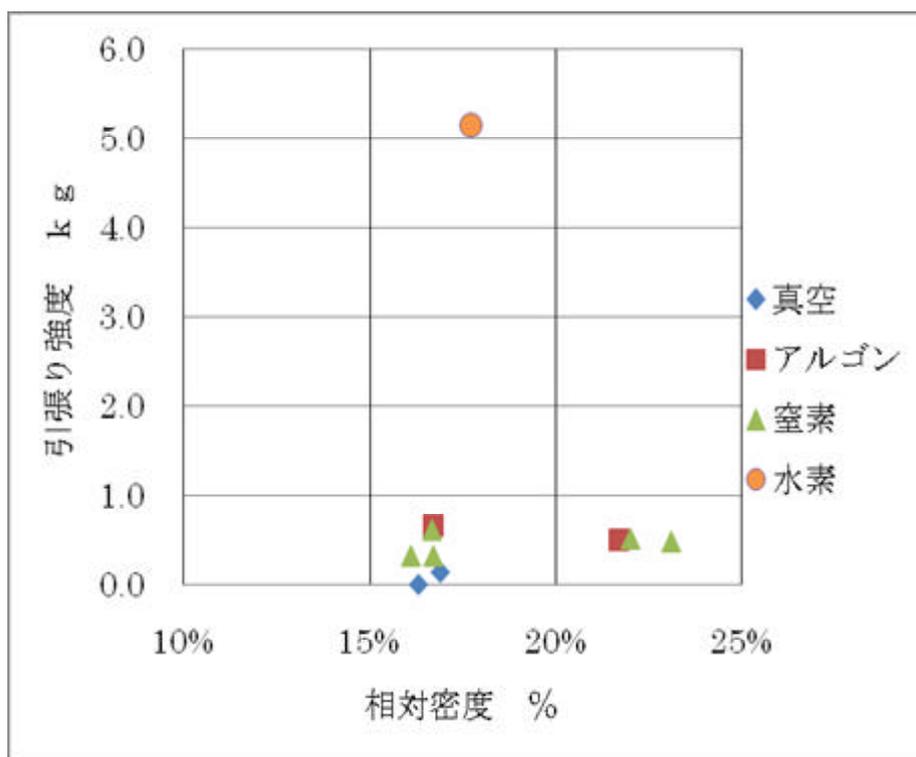


図 2 - 4 焼結品雰囲気と引張り強度

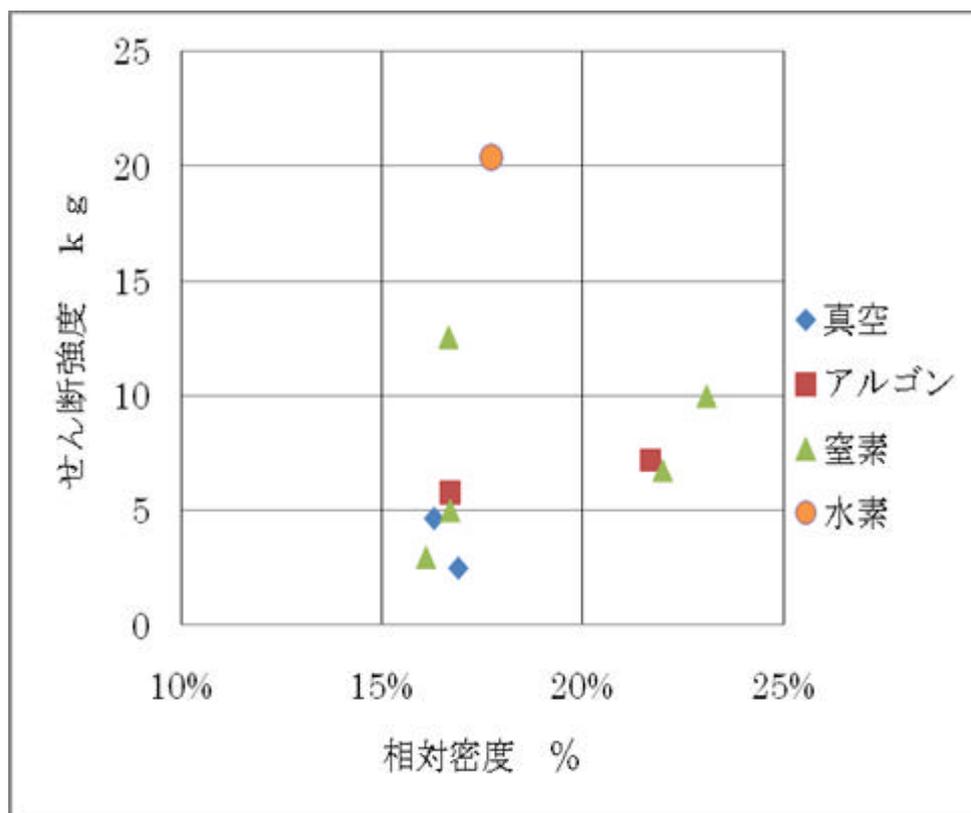


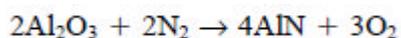
図 2 - 5 焼結雰囲気とせん断強度

引張り、せん断のいずれの強度も、相対密度との顕著な相関は見られない。
 また、引張り、せん断のいずれの場合も、水素雰囲気中で圧縮、焼結した多孔質体が、最も高い強度を呈している。しかし、この場合のアルミ板の表面には、写真 2 - 8 に示すような無数の凹みが観察されることから、局部的な溶融が始まっており、材料の適正焼結温度を越えて過熱されたことが推測される。



写真 2 - 8 水素雰囲気中で焼結したアルミ板の表面

窒素雰囲気での焼結体も比較的高い強度を示している。文献()によれば、すなわち、アルミ表面で下記式の反応が進行し、酸化皮膜の破壊が生じるものと考えられている。



【引用文献】

- () G.B.Schaffer & B.J.Hall: “The Influence of the Atmosphere on the Sintering of Aluminium”
Metallurgical and Materials Transactions A Vol.33A, Oct., 2002

各種焼結炉雰囲気における、圧縮荷重と引張り強度並びにせん断強度の関係を、それぞれ図 2-6 および図 2-7 に示す。

いずれの場合も、平均値的には圧縮荷重の増加に伴い、強度が高くなる傾向が見られるが、個体ばらつきも大きく、明瞭ではない。

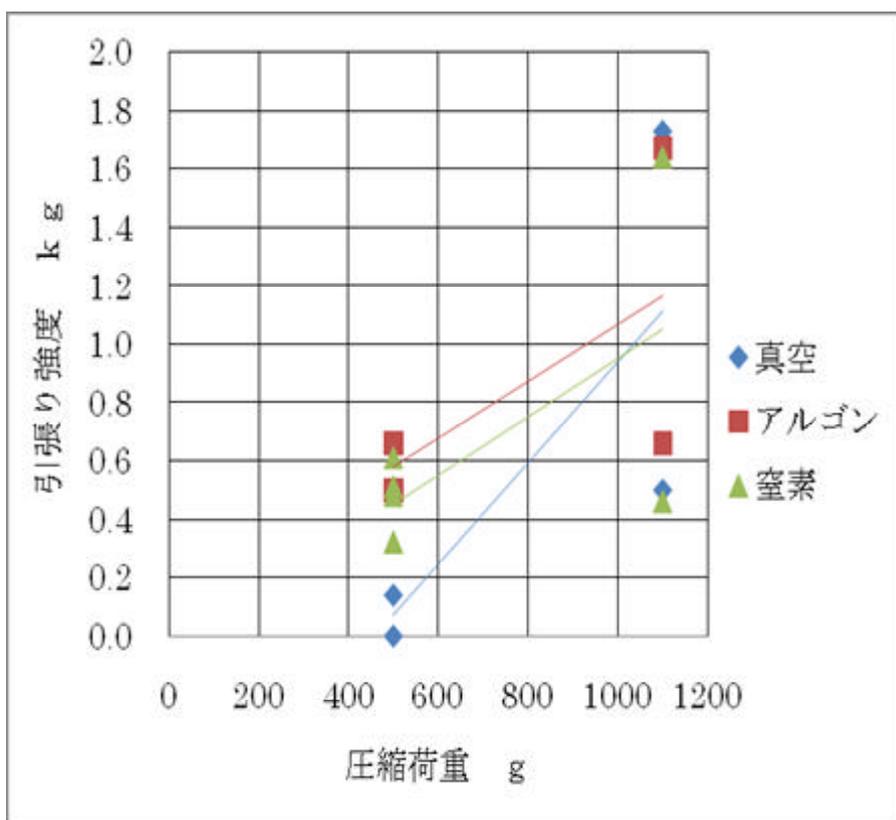


図 2 - 6 圧縮荷重と引張り強度の関係

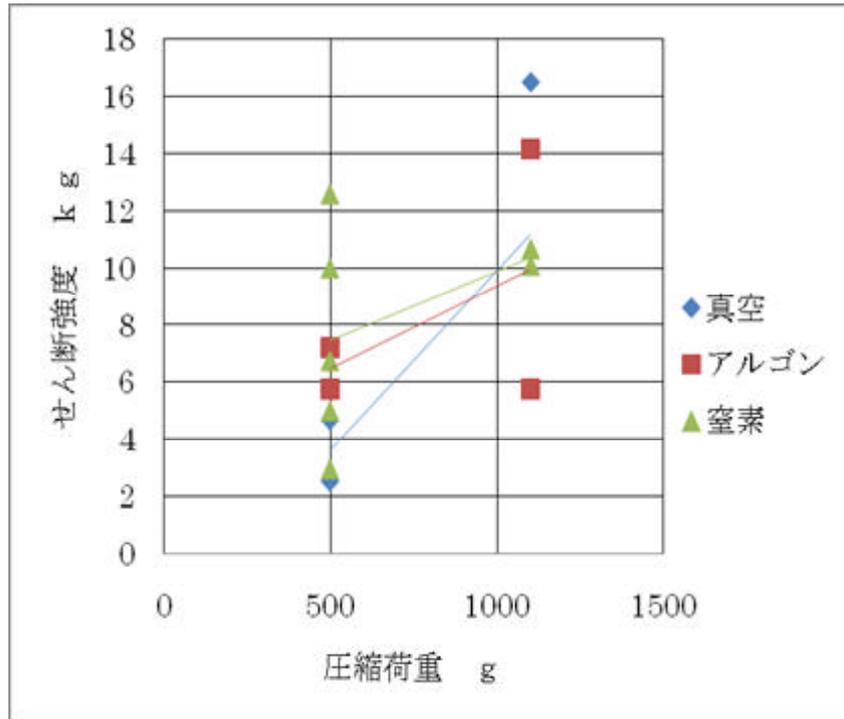


図 2 - 7 圧縮荷重とせん断強度の関係

連続炉による焼結体のせん断強度を、バッチ炉での焼結体と比較し、図 2 - 8に示す。連続炉で焼結したアルミ繊維は、バッチ炉で焼結したものと同等以上のせん断強度を呈している。

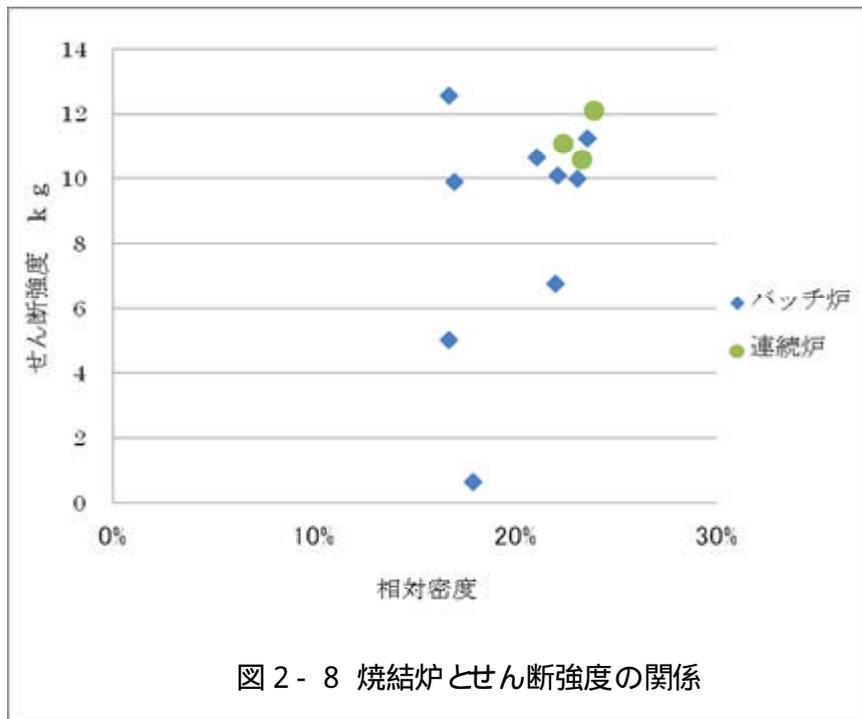


図 2 - 8 焼結炉とせん断強度の関係

2-2 熱交換器モデルの製作

アルミ繊維を拡散接合した多孔質体の側面と端面をアルミ材で被覆し、内部に水の流路を有する熱交換器モデルを製作した。



写真 2 - 9 熱交換器モデル

2-3 伝熱特性の測定

アルミ繊維焼結体の伝熱特性を測定するために、本研究で独自の装置を設計、製作した。その概略を下図に示す。全体が、冷却水の循環配管でつながっており、ポンプによって冷却水を強制的に循環させる。また、循環経路の途中に挿入した水温調節器により、水温を一定に制御する。

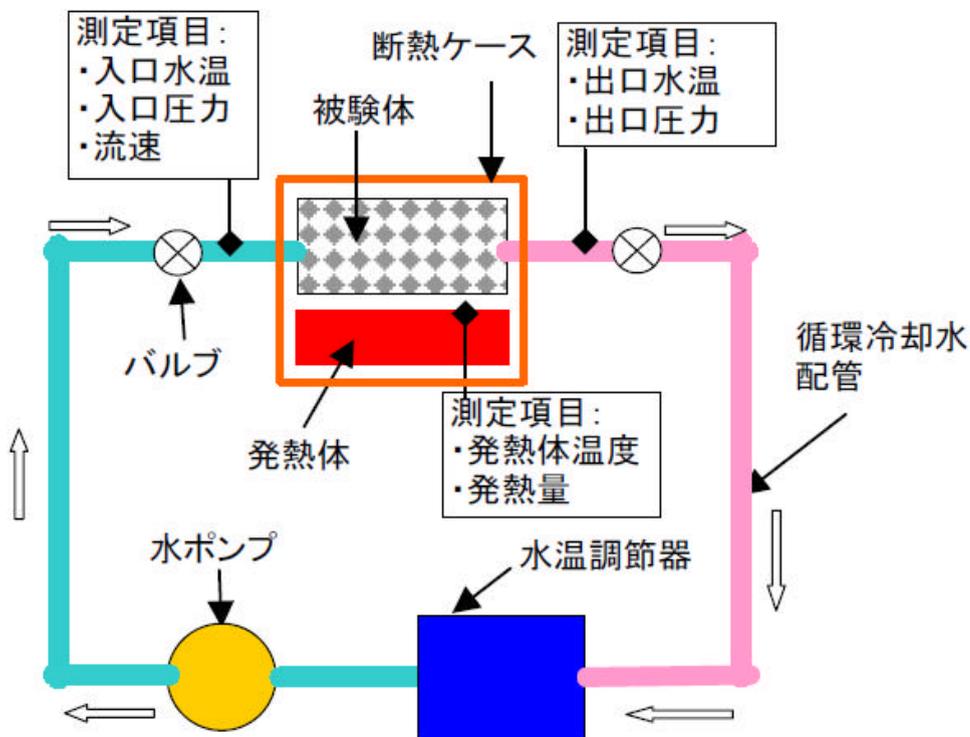


図 2 - 9 熱伝達特性測定装置の概略

被験体は、発熱体と共に断熱ケースに格納し、冷却水配管と接続する。
 測定項目は、被験体前後の水温と圧力並びに流速。また発熱体の熱量と温度も測定する。
 これら測定値から、発熱体と冷却水との熱伝達係数を下式により求めることが出来る
 【解説 4】。

$$\text{熱伝達係数} : h = Q / A (T_w - T_f) \quad \text{単位} : \text{w} / \text{m}^2 \cdot \text{K}$$

$$= \text{単位時間に伝達される熱量} / \text{伝熱面積 (固体の温度 - 流体の温度)}$$

$$\text{単位時間に伝達される熱量} : Q = \rho \cdot q \cdot c_p \cdot \Delta T_f$$

$$= \text{流体の比熱} \cdot \text{密度} \cdot \text{流量} \cdot \text{流体の温度上昇}$$

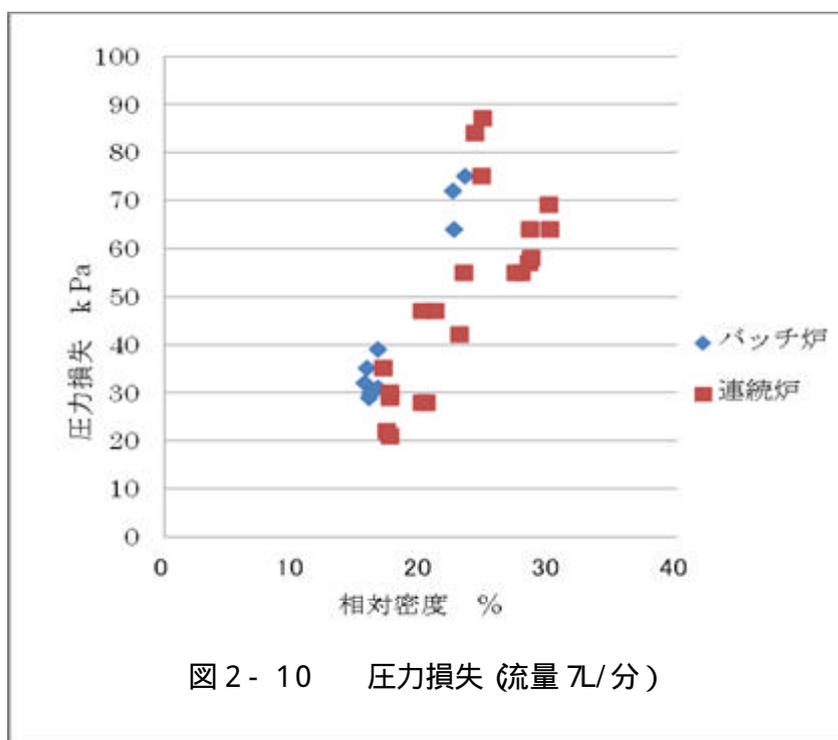
(水の場合 = 1)

$$Q = q \cdot \Delta T_f$$

$$= \text{流量} \cdot \text{流体の温度上昇}$$

熱交換器モデルに、冷却媒体としての水を流入した場合、入口と出口間で圧力差を生じる。
 これを圧力損失と称する。圧力損失が生じる要因は、水が多孔質体の内部を流動する際に受ける摩擦抵抗や、衝突による運動エネルギーの損失である。従い、多孔質体の相対密度が高い程、圧力損失は大きくなる。流量が毎分 7L の場合の、圧力損失を図 2 - 10 に示す。ここで横軸は、相対密度 【解説 3】を表している。

この結果から、連続炉で焼結したアルミ繊維多孔質体の場合、バッチ炉での焼結体よりも圧力損失が若干低くなっているが、理由は明らかではない。



連続炉で焼結したアルミ繊維の多孔質体について、熱伝達係数の測定結果を図 2 - 11に示す。横軸が相対密度で、縦軸が熱伝達係数である。

全般に、右上がりの傾向が見られる。すなわち、相対密度が高い程、熱伝達係数が高い。

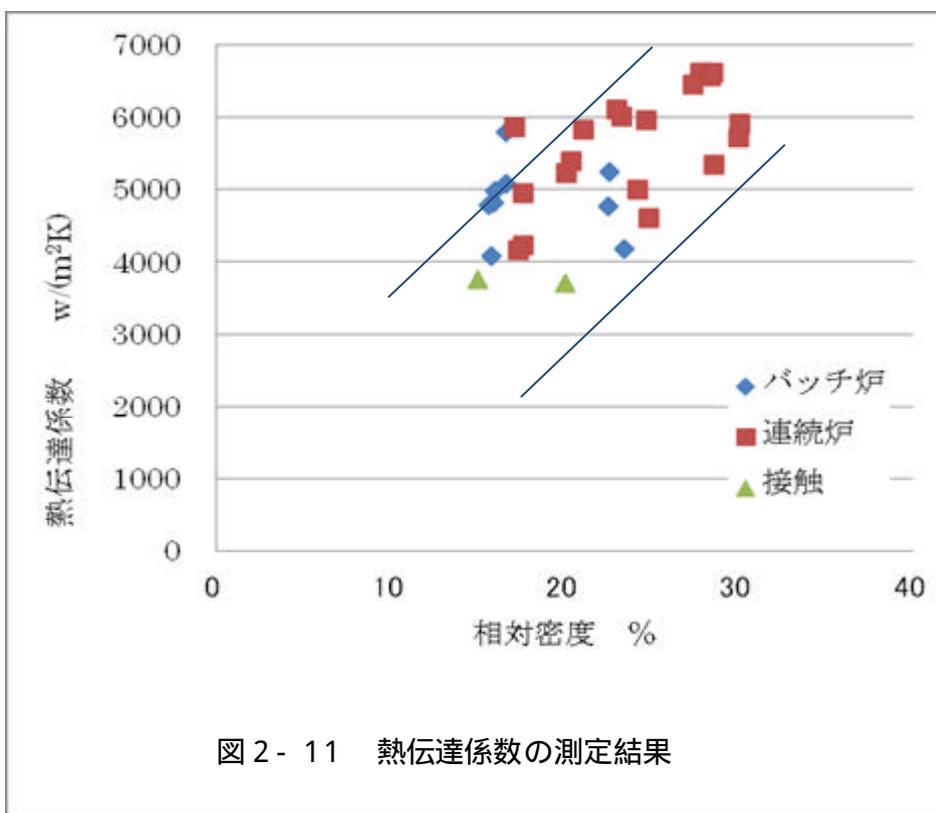


図 2 - 11 熱伝達係数の測定結果

その理由は、相対密度が高い場合は、流体との伝熱面積が増大するためと考えられる。

連続炉での焼結体の熱伝達率は、多孔質と板の単純接触品よりも高く、相対密度 20% 近傍での平均値で 47% の増加となっている。

また、バッチ炉での焼結体と比較し、連続炉の焼結体は同等もしくはそれ以上の熱伝達特性を有することが確認された。

2- 4 複合化による伝熱特性の向上

アルミ繊維と、熱伝導を強化する緻密部材とを複合化し、3種類のタイプの試験体を試作した。

タイプ- A (繊維と板の複合化)

アルミ繊維を、0.1mmのアルミ板で約 15の筒状に巻いたものを重ね、流路を形成した。その流路方向に直角な断面を、写真 2 - 10に示す。

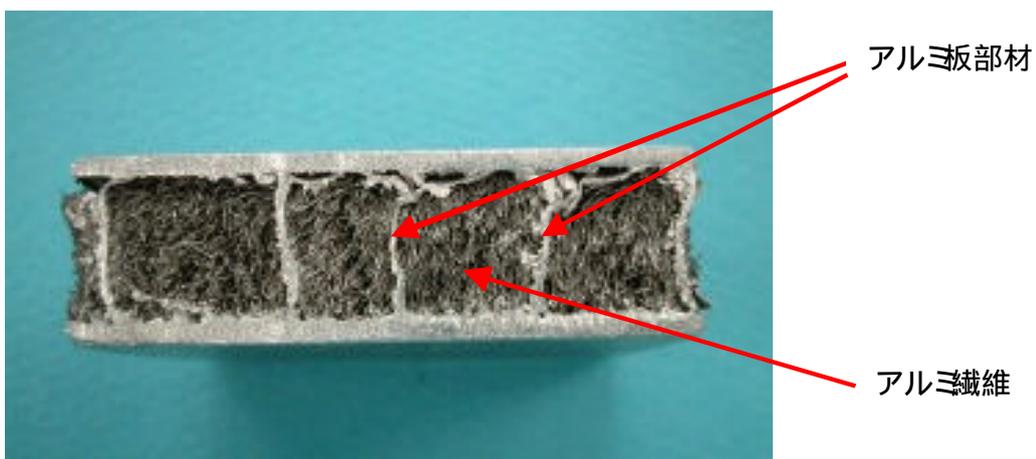


写真 2 - 10 タイプ - A複合体の断面

タイプ - B (繊維とワイヤーの複合化)

アルミ繊維を径 1mmのアルミワイヤーでスパイラル状に巻き、それを重ねて流路を形成した。その X線 CT画像を図 2 - 12に示す。

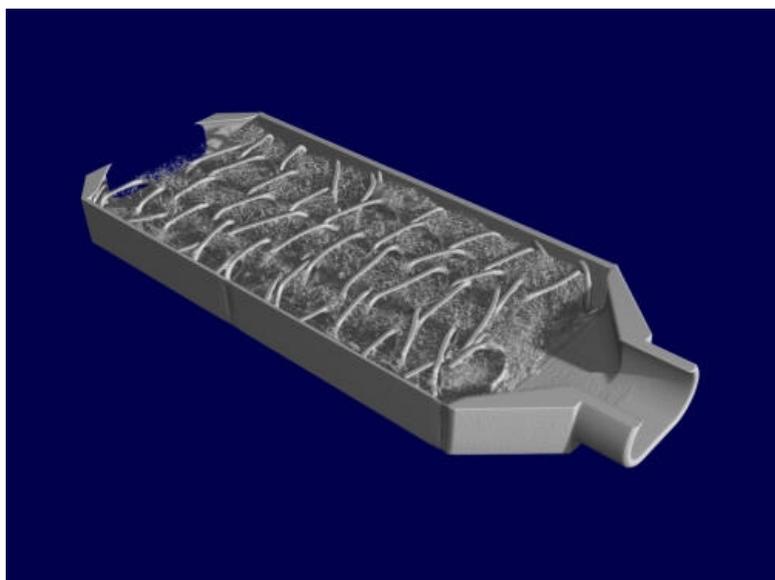


図 2 - 12
タイプ - B複合体の
X線 CT画像

タイプ - C (繊維とアルミメッシュの複合化)

アルミ繊維を厚さ1.2mmのアルミメッシュ板で巻き、それを重ねて流路を形成した。その X線 CT画像を図 2 - 13に示す。

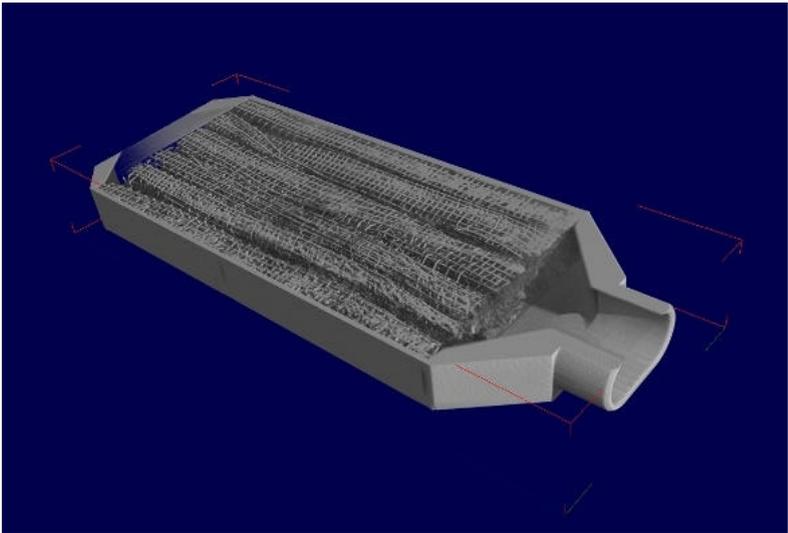


図 2 - 13
タイプ- C複合体の
X線CT画像

3種の複合体について、水の流量が毎分7Lの場合の圧力損失の測定結果を図2- 14に示す。
繊維径70- 90 μ mと比較し、複合体の圧力損失は低い。これは、緻密材を装入することにより
界面が減少し、水の流動抵抗が低下減少したことによるものと考えられる。

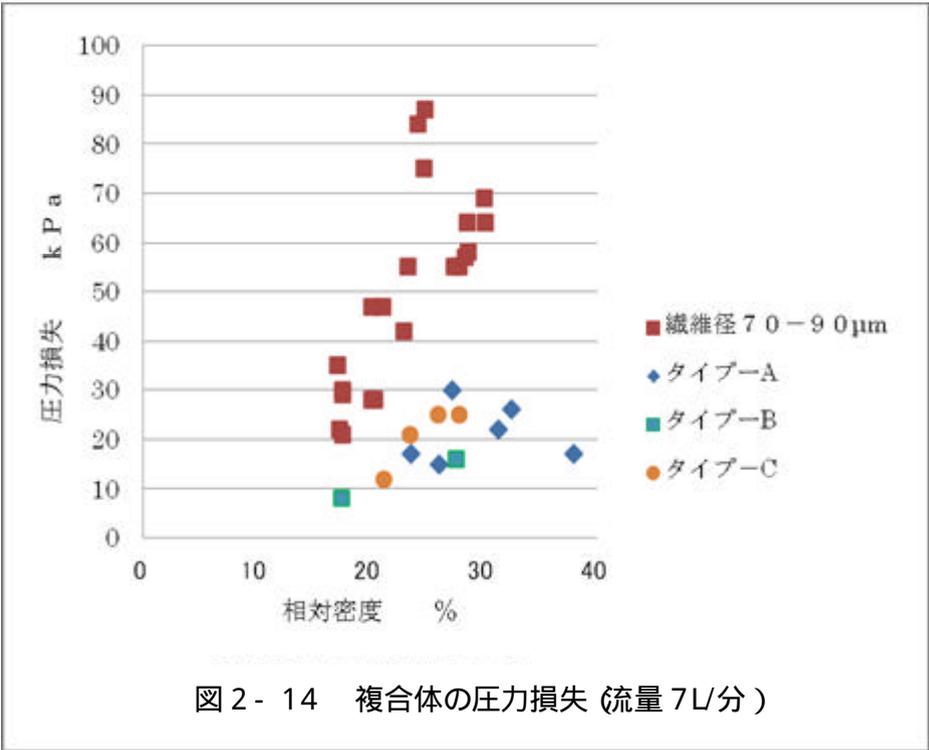


図 2 - 14 複合体の圧力損失 (流量 7L分)

次に流量が毎分7Lの場合の、複合体の熱伝達係数を図2- 15に示す。

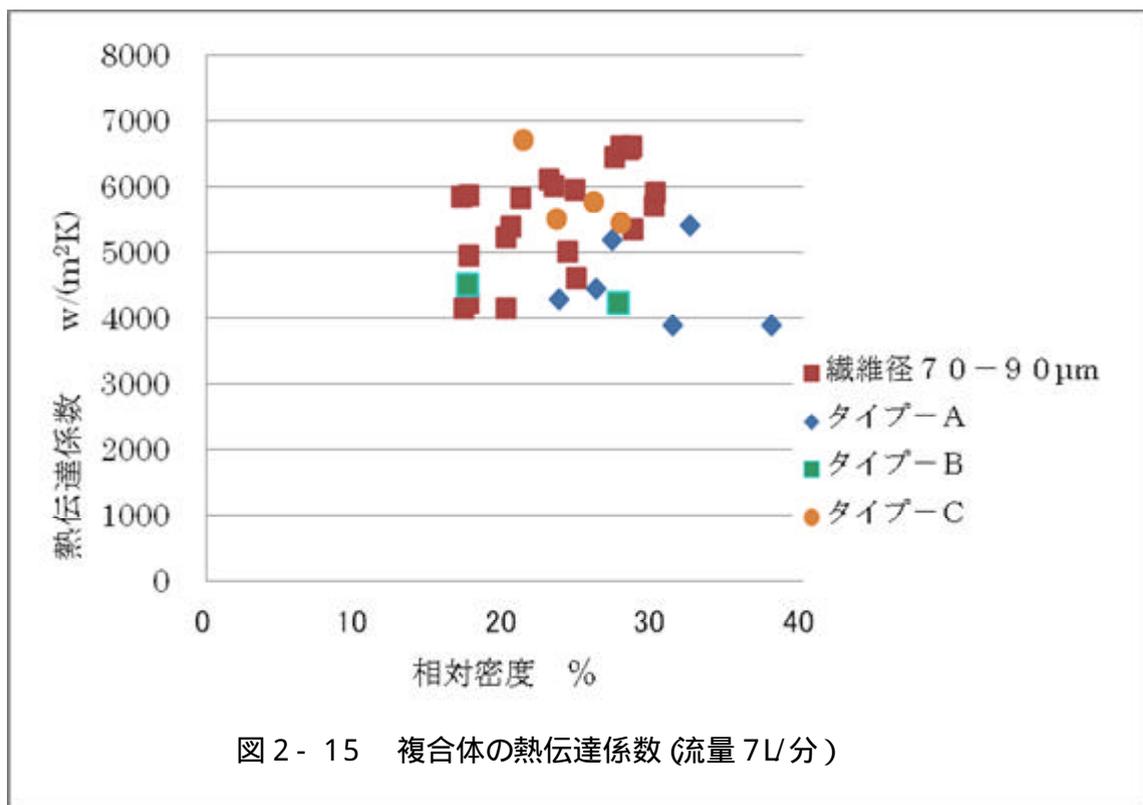


図 2 - 15 複合体の熱伝達係数 (流量 7L/分)

繊維径 70 - 90 μm の焼結体と比較し、タイプ A および B の熱伝達係数は低レベルにあるが、タイプ C の場合はほぼ同等と考えられる。また、タイプ C の熱伝達係数の上下ばらつきは比較的小さいものと観察される。

第 3 章全体総括

研究の成果

- (1) アルミ繊維の圧縮、焼結について、従来実績のある真空雰囲気に加え、アルゴン、窒素並びに水素の雰囲気でのアルミ繊維の圧縮、焼結試験を実施した結果、いずれの場合においてもアルミ繊維とアルミ板との拡散接合の得られることが確認された。また、アルミ繊維とアルミ板の接合部の面分析では、アルミや合金元素のみが検出された。
- (2) アルミ繊維の圧縮、焼結体の引張り及びせん断試験において、水素雰囲気での焼結体並びに窒素雰囲気での焼結体において、比較的高い強度が得られた。
- (3) アルミ繊維を圧縮、焼結した多孔質体に水を透過させた場合の圧力損失は、相対密度と顕著な相関がある。すなわち、同一流量の場合、相対密度が高い程、圧力損失は大きくなる。
- (4) アルミ繊維を圧縮、焼結した多孔質体を外部から加熱し、内部に水を透過させた場合の発熱体と水との間の熱伝達係数を測定した結果、その値は、空洞平滑面の流路の 2.5 倍であり、多孔質の接合の無い接触品の 2.1 倍であった。

(5)アルミ繊維とアルミ板を効率的に拡散接合する方法として無酸化雰囲気連続炉を試用した結果、温度と速度の条件を適正に選択することにより、バッチ炉の場合と同様な接合強度と伝熱特性を有する多孔質焼結体を得ることが出来た。また、焼結に要した時間は40分以下で、目標とした5時間よりも著しく短時間であった。これは、本研究で用いた連続炉が、対象とした焼結体の寸法に、熱容量的に適合していたものと考えられる。

従い、量産時に、炉のコンベア幅を拡張するなどの大型化を検討する場合、熱効率を十分検討し、最適化を図ることが肝要である。

(6)アルミ繊維と緻密材を複合化した焼結体を3種類試作し、伝熱特性の向上を図った。

結果的には、アルミ繊維をアルミメッシュ板で巻いた複合体について、アルミ繊維だけの構造と比較して、熱伝達係数に安定性が認められ、また圧力損失は平均値で約3分の1に低下した。

研究開発後の課題及び今後の事業展開

アルミ繊維は、流体との界面を拡大する効果の反面、壁面からの伝熱量が低下することから、相乗効果としての熱伝達特性に制約が存在すると考えられる。緻密材との複合化は、これを解決するための方策であり、さらなる調査研究が必要である。

解説

1. アルミ繊維の製法

アルミの金属繊維を製造する方法は、大別して2方法がある。1つは溶解したアルミを、微細なノズルを通して押し出し、冷却凝固させて繊維状に加工する方法で、「溶融紡糸法」と称する。もう1つの方法は、コイル状に巻き取ったアルミの薄板を、コイルの端面をバイトで切削することにより糸状の細長い形状に加工する方法で、「コイル切削法」と称する。

繊維の断面形状は、溶融紡糸法の場合円形であり、コイル切削法の場合長方形となる。溶融紡糸法は、アルミ地金の溶解過程から直接製造するので、コイル切削法に比し、コスト的に有利である。

2. 拡散接合

金属の母材を密着させ、母材の融点以下の温度条件で、塑性変形をできるだけ生じない程度に加圧して、接合面間に生じる原子の拡散を利用して接合する方法を「拡散接合」と称する。原子の拡散速度は、温度に依存し、温度上昇と共に高くなる。

拡散接合は溶融を伴わないため、接合面の汚染や成分の偏析がなく、高い接合強度が得られる。

3. 相対密度

多孔質体金属体において、見掛けの体積で算出した密度と、中実材の密度の比を意味する。すなわち、多孔質体金属体における金属部分が、全体の中で占める体積率に相当する。

4. 固体から流体への熱伝達

固体と流体間の熱伝達係数は、次式で求めることができる。

$$\text{熱伝達係数 : } h = Q / A (T_w - T_f) \quad \text{単位 : } \text{w} / \text{m}^2 \cdot \text{K}$$

= 単位時間に伝達される熱量 / 伝熱面積 (固体の温度 - 流体の温度)

$$\text{単位時間に伝達される熱量 : } Q = \rho \cdot q \cdot T_f$$

= 流体の比熱 · 密度 · 流量 · 流体の温度差
(水の場合 = 1)

$$Q = q \cdot T_f$$

= 流量 · 流体の温度差

