

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 5 月 22 日現在

機関番号：11301

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2013～2014

課題番号：25630320

研究課題名(和文)単分散粒子規則配列を用いた高効率マイクロチャンネル集熱器の研究

研究課題名(英文)High efficiency micro channel heat collector resulting from periodically arranged monosized particles

研究代表者

川崎 亮(KAWASAKI, AKIRA)

東北大学・工学(系)研究科(研究院)・教授

研究者番号：50177664

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,000,000円

研究成果の概要(和文)：廃熱(未利用エネルギー)を伴った流体から極めて高い効率で熱エネルギーを回収するための革新的マイクロチャンネル集熱器について検討を行った。その構造は単分散金属粒子(単一粒径球状金属粒子、粒径数100 μm)を規則的・周期的に積層配列し、隣接粒子間に焼結ネックを形成して連結した3次元人工結晶であり、その3次元空隙を流路とするものである。従来の直線流路やフィンタイプの熱交換器より熱交換(回収)効率が非常に高くなる可能性がある。単分散銅粒子の作製、規則的粒子配列体の作製プロセスについての研究開発を行い、熱流体シミュレーションと廃熱回収実験によって熱回収効率および廃熱利用のための応用上の優位性を考察した。

研究成果の概要(英文)：Although the energy density of the waste heat released from automobiles, factories, and plants is low, high amounts are released. There has been multiple approaches to recover this waste energy; however, the fundamentals of this heat collection are not sufficient. The aim of this study is to produce a highly efficient waste heat recovery by developing a micro channel heat collector by passing fluids through a channel produced via a 3D array of periodic monosized particles. In order to produce heat collectors, evaluation of heat energy recovery efficiency based on thermic fluid simulations were performed. On the head of the monosized particles result were arranged into periodical organization, and determined the sintering condition for heat collectors.

研究分野：粉体加工学

キーワード：粉末プロセス 粉末冶金 廃熱 マイクロチャンネル 粒子配列

1. 研究開始当初の背景

輸送機器（自動車、バス、トラック、鉄道車両、船舶等）や工場設備からの廃熱（未利用エネルギー）は、エネルギー密度は低いものの、総量としては莫大に存在するため、これを妥当なコストで回収することが可能になれば、新たなエネルギーを得るだけでなく、大気の温暖化の熱源を低減することにもなる。未利用熱エネルギーの密度が小さいために利用が難しいことは周知の事実ではあるが、おそらく数 10 年後においても莫大に存在するエネルギーであることは容易に推測される。

廃熱利用のこれまでの研究の代表例として、熱電発電を用いた手法が検討されてきたが、熱電モジュールの変換効率に注目されることが多く、一方、単に排気管に貼付けた程度のものであり、廃熱から熱エネルギーを積極的に回収した上で熱電発電するに至っていない。そのため廃熱全体に対するエネルギー回収効率は低く、廃熱を有効に利用しているとは言えない。これまでの廃熱回収方法としては、直線流路伝熱管や集熱フィンを用いたものがあるが、熱回収効率がかかなり小さいものであり、大部分の熱エネルギーが素通りしてしまい廃棄される。したがって、真に廃熱を有効利用するためには、まず、廃熱から高効率で熱エネルギーを回収することが必須である。その上で、例えば熱電発電を行えば廃熱を有効利用したと言え、廃熱全体に対するエネルギー回収効率を飛躍的に高めることが出来る。

本提案では、単分散粒子（単一粒径球状粒子、粒径：数 100 μm ）を規則的・周期的に積層し、隣接粒子間を焼結結合したときに生じる空隙を流路とする単分散粒子マイクロチャンネル集熱器(図 1)の成立性を明らかにし、単分散金属粒子を用いたマイクロチャンネル集熱器の作製を試みる。また、その高い熱エネルギー回収効率を明らかにする。

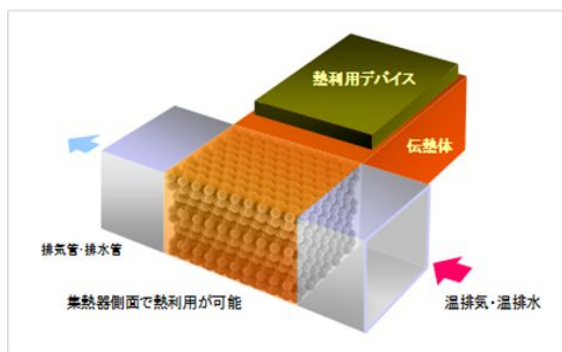


図 1：マイクロチャンネル集熱器の模式図

2. 研究の目的

廃熱（未利用エネルギー）を伴った流体から極めて高い効率で熱エネルギーを回収するための革新的マイクロチャンネル集熱器を研究開発する。その構造は、単分散金属粒

子（単一粒径球状金属粒子、粒径数 100 μm ）を規則的・周期的に積層配列し、隣接粒子間に焼結ネックを形成して連結した 3 次元人工結晶であり、その 3 次元空隙を流路とするものである。従来の直線流路やフィンタイプの熱交換器とは全く異なり、同じ流路断面積比であっても流路数が飛躍的に増加し熱流体が壁面近くを流れる割合が非常に高まることになり、特に大きな比表面積と平滑な表面により熱交換（回収）効率を非常に高くすることができる。単分散銅粒子の作製、規則的粒子配列体の作製プロセスについての研究開発を行い、熱流体シミュレーションと廃熱回収実験によって熱回収効率および廃熱利用のための応用上の優位性を明らかにする。

3. 研究の方法

(1) 熱流体解析

本実験における熱流体解析には、有限体積法の汎用熱流体解析ソフトウェアである ANSYS-CFX14.0（ANSYS 社製）を使用した。単分散粒子マイクロチャンネル構造としては fcc(111)面が流れ方向に垂直になるように規則配列させ、そして焼結し、ネックを形成させた積層体を円柱状に切り出した構造を模している。これを球状粒子集熱体モデルとして(図 2)に示した。

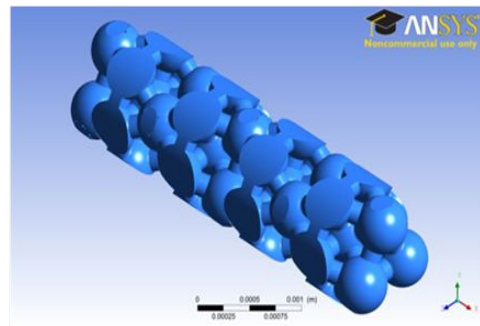


図 2：球状粒子集熱体モデル

これは高さ 1.1 mm の円筒状流路の中心に球状粒子をおいた構造を模している。そして球状粒子の半径を 0.250 mm と決定した。粒子は 9 層計 43 個であり、集熱部の長さはおよそ 4.1mm となった。比較対象としてはフィン型熱回収プロセスを意識した円筒状流集熱体モデルを設定した。これを(図 3)に示す。

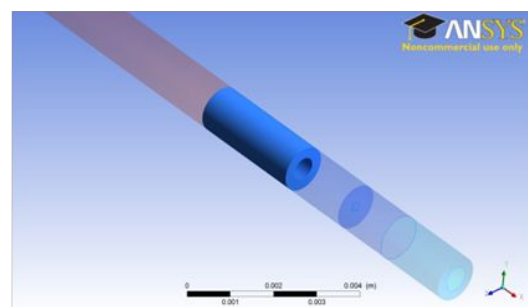


図 3：円筒状集熱体モデル

円管状集熱体の内径は 0.56 mm、外径および流路直径は 1.1 mm である。そして円管状集熱体の長さを 2.88 mm と決定した。本章において、単分散粒子配列集熱体との比較を行う上で、それぞれの集熱体の体積および平均断面積率が等しくなるように各寸法を決定している。ただし、球状粒子集熱体モデルについては出入り口部分に接するべき粒子計 7 個分を除外している。また、粒子間距離を 0.1mm 広げたために本来の fcc(111)面の平均断面積よりも若干小さくなっている。共に集熱体材料は Cu、流路外壁は理想的な断熱材であり、熱交換は行われない。集熱体外周温度を 20、40 とした。熱流体に 70 の水および空気を選択し、流入速度を 25~ 1500 mm/ s 程度まで変化させた。以上より、流路に流入した熱量 Q_{in} 、各集熱体が回収した熱量 Q_c を算出し、熱回収効率 Q_c / Q_{in} を求めた。さらに流入境界での圧力を P_{in} 、そして流出境界での圧力を P_{out} として、圧力損失 $\Delta P = P_{in} - P_{out}$ も同様に算出した。そして、それぞれの関係をグラフに示し、熱回収効率について検討する。

(2)焼結体の作製

本試料作製法では試料を周期構造に構築することや、焼結段階において生成する粒子間ネック径をできるだけ均一にする目的で単分散粒子を使用している。本研究で用いた単分散 Cu 粒子（粒径 $736 \pm 5 \mu m$ 、住友特殊金属）の粒度分布を（図 4）に示す。

fcc 粒子配列体試料作製にあたり、（図 5）に示すグラファイト製の治具を用いた。

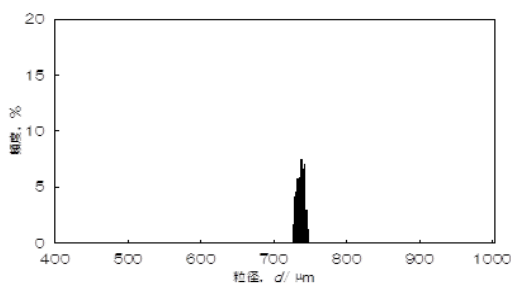


図 4：使用した単分散 Cu 粒子の粒径分布

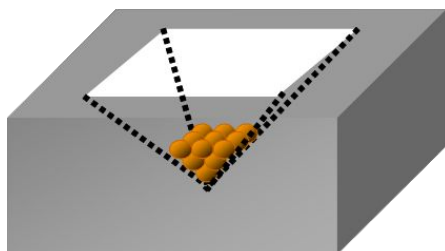


図 5：fcc 配列用グラファイト治具の概略図

この治具は中央に正 4 角錐のディンプルをもっており、このディンプルに単分散粒子を投入し、振動を与えることで粒子を fcc に配列させることができる。この治具を用いて fcc に配列した粒子を、治具ごと Ar-H₂ 雰囲気の中にて 5 / min で昇温させ、900 または 980 の各温度で 1h、2h 及び 3h 保持して焼結を行い、ピラミッド型の焼結体を作製した。ここで、ピラミッドの底面が (100) 面、側面の 4 面が (111) 面に対応している。そして最後に作製した試料に対して成形性を確認する意味で、外観並びにネック状態の観察を行った。この観察には走査型電子顕微鏡（JSM-6010LV: 日本電子; Scanning Electron Microscope, 以下 SEM）を用いた。

4. 研究成果

(1)熱流体解析結果

FEM 解析で得られた流路内の温度分布を単分散粒子と円管状流路の各形状においてそれぞれの（図 6）および（図 7）に示す。

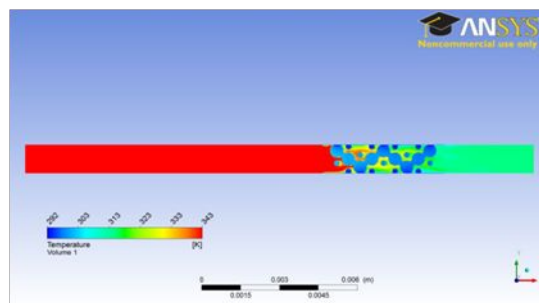
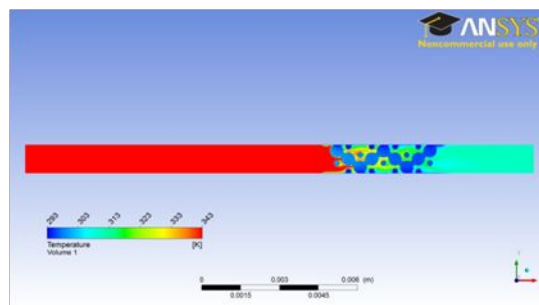
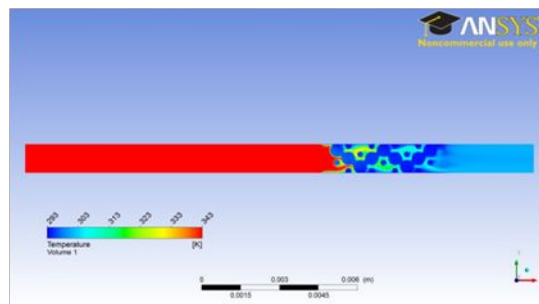


図 6：単分散粒子流路内の温度分布図（流入速度は上から 100,300, 500mm/s）

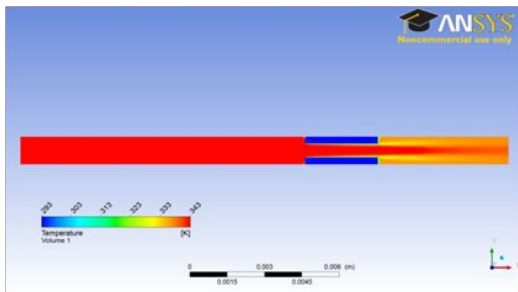
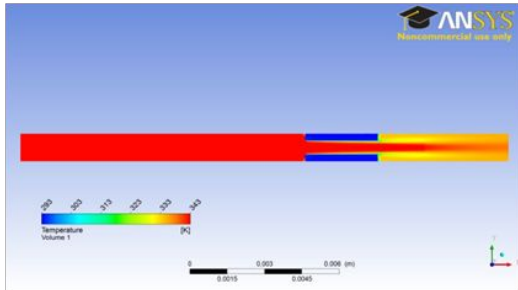
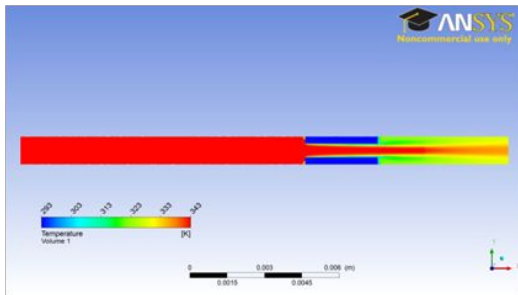


図 7:円管状流路内の温度分布図(水) (流入速度は上から 100,300,500 mm/s)

ここから、単分散粒子配列では流入速度が大きくなるにしたがい、流出境界温度は 28、37、そして 41 と高くなり、温度回収の低下が確認された。これは、流入速度が大きくなると、熱回収に関与せずに通り返る熱流体が多くなるためだと考えられる。また、円管状流路では流入速度が大きくなるにしたがい、流出境界温度は 57、63、そして 65 と高くなり、円管状集熱体は単分散粒子配列集熱体よりもさらに温度回収の低下がおこった。これは、水 70 が円管状集熱体に触れていない領域で通り抜けていることが確認できる。つまり、単分散粒子配列集熱体よりも熱回収に関与せずに通り返る熱流体が多くなったためと考えられる。以上より、単分散粒子配列集熱体は円管状集熱体より温度回収が高いということと、特に円管状集熱体は、流入速度が大きくなるにしたがい、熱回収に関与しない熱流体が多くなることが明らかになった。ただしここでは、前述の通り各集熱体の長さや平均断面積は粒子間距離などの都合により多少異なるものの、それを加味して、円管状流路の内径と長さを大きくしても大幅な変化はよる大幅な変化は見られないと考えた。な

ぜならば、平均断面積を減じるために円管状流路の内径を大きくすることにより集熱量は減る方向になり、体積を揃えるために長さを増やすと集熱量は増加して、これらの効果がある程度相殺すると予想されるからである。

単分散粒子と円管状流路の各形状における流入速度と圧力損失 ΔP の関係を次の(図 8)に示す。

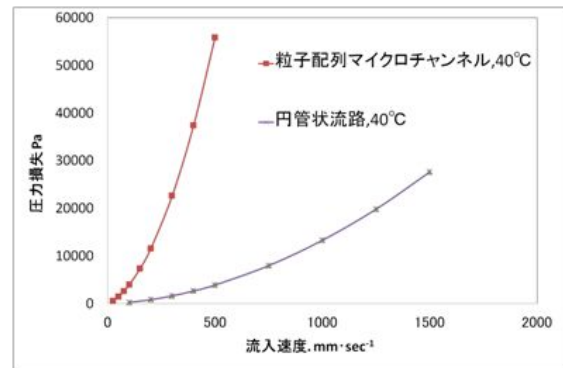


図 8 : 流入速度と圧力損失 ΔP の関係(水)

この(図 8)の流入速度と圧力損失 ΔP の関係から、流入速度が 100 mm/s より小さい範囲の圧力損失 ΔP は各集熱体ともに小さく、大きな差はみられない。しかし、流入速度の増加によって、圧力損失 ΔP が増加し、特に、単分散粒子配列集熱体の増加量が大きいことが確認された。これは、単分散粒子配列集熱体の方が熱流体である水 70 との相互関係が大きく、すなわち熱交換量が大きいと考えられる。

(2) 単分散粒子と円管状流路の各形状における流入速度と熱回収効率の関係を次の(図 9)に示す。

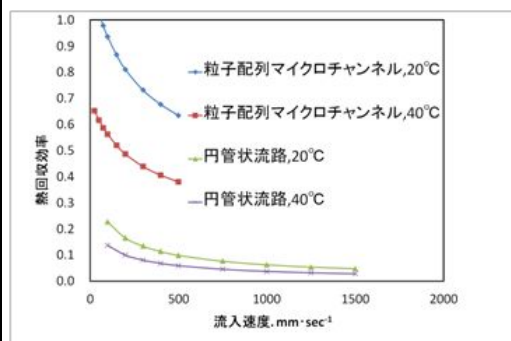


図 9 : 流入速度と熱回収効率の関係(水)

ここから単分散粒子配列集熱体は円管状集熱体より非常に高い熱回収効率を有していることが明らかになった。集熱体外周温度が 20 の条件では 5 倍程度高く、集熱体外周温度が 40 の条件では 4 倍程度高い。熱流体が水 70 と温度差が大きいことから、集熱体外周温度 20 の条件の方が高い熱回

収効率を示している。流入速度の増加に伴い、熱回収効率が減少傾向にある。これは、流入速度の増加とともに入熱量 Q_{in} と集熱量 Q_c は増加するが入熱量 Q_{in} の増加量がより大きくなったためだと考えられる。つまり、集熱体が熱流体からの熱を回収しきれずに、素通りしてしまった熱が多くなっていくことを意味している。以上より、熱回収効率は流入速度の増加とともに減少するが、単分散粒子配列集熱体は円管状集熱体よりも非常に高い熱回収効率を有していることが明らかになった。

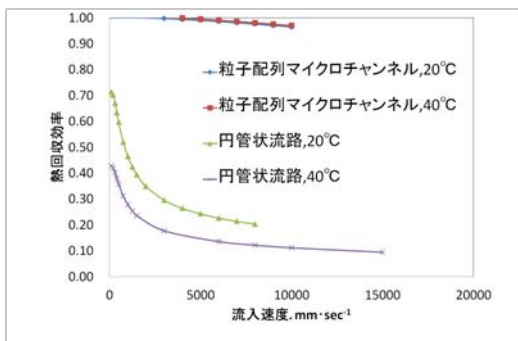


図 10: 流入速度と熱回収効率の関係(空気)

図 10 に示すように、流体が空気の場合には水の場合と同様に粒子配列マイクロチャンネルが円管状流路に対し高効率を示す結果となった。しかし、円管状流路が流入速度の増加に伴い熱回収効率が大きく減少したのに対し、粒子配列マイクロチャンネルは大幅な変化は見られなかった。このことから流体が水の場合に比べ空気の方が粒子配列マイクロチャンネルにより大きな利点が生まれると考えられる。

(3) 圧力損失 ΔP と熱回収効率の関係

単分散粒子と円管状流路の各形状における圧力損失 ΔP と熱回収効率の関係を次の(図 11)に示す。

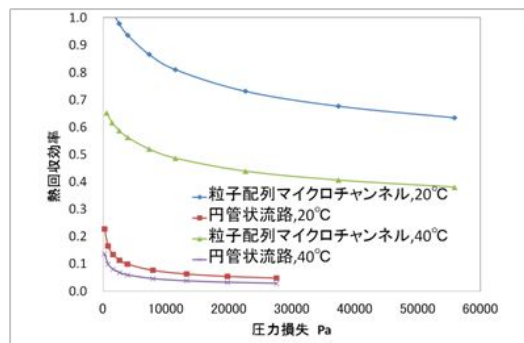


図 11: 圧力損失 ΔP と熱回収効率の関係(空気)

ここから圧力損失を基準とした場合でも、単分散粒子配列集熱体は円管状集熱体より 4 倍から 10 倍程度の非常に高い熱回収効率を示すことが分かった。(図 12) の圧力損失と

熱回収効率の関係から、(図 8) の時同様に圧力損失基準においても粒子配列マイクロチャンネルは円管状流路より非常に高い熱回収効率を有していることが分かった。また、圧力損失の増加の伴う熱回収効率の減少量が円管状流路に比べ粒子配列マイクロチャンネルの方が小さいことが分かった。ここから、圧力損失の観点からも流体が空気である方が水である場合に比べてより大きな利用価値が生まれうると考えられる。

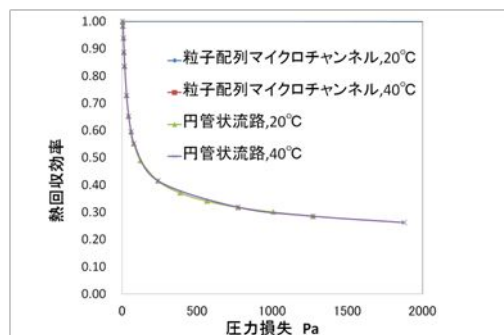


図 12: 圧力損失 P と熱回収効率の関係(空気)

(4) 粒子配列焼結体

図 13, 図 14 に 980 の各保持時間における SEM 画像を示す。

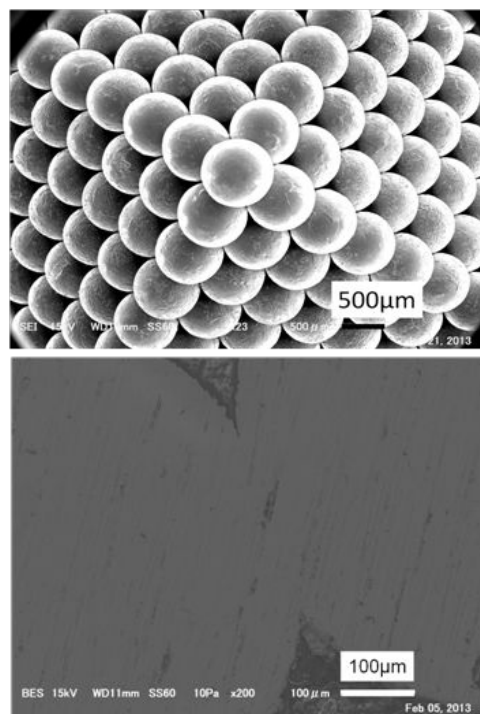


図 13: 980 1h 保持焼結の SEM 画像
(上:外観、下:ネック部)

1h 保持のものについては樹脂埋めも無い SEM での観察を通常の SEI ではなく低真空の条件下で観察を行った。図 14 に示される外観やネック部の様子から 1 h の物と比較しても温度の変化が大きく影響しネック成

長を促していることが分かった。さらに断面の観察結果からネック部と粒子部の密度に差が見受けられなかった。このことから、ネック部がシミュレーションで想定したもの以上に熱伝導の抵抗が大きくなるといった問題はないと考えられる。2h 保持のものについては 1h のものに比べて更なるネックの成長が見られたためこの温度域においても焼結時間を長くすることは有効だと分かった。

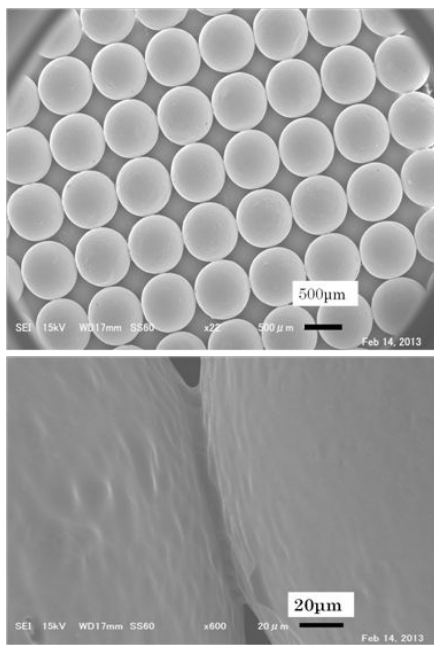


図 1 4：980 3h 保持焼結の SEM 画像（上：外観、下：ネック部）

3h 保持のものについては 2h のものに比べて粒子表面の平滑さは上昇したもののネック径に大きな変化は見られなかった。このことから焼結時間を伸ばしたことによる集熱体の強度への影響は小さいものと考えられる。また、これら総じて全体での寸法変化は見られなかった。最終的に流路に組み込むことを考えると寸法変化を許さないプロセスでの生産方法が求められるが、その点においても表面拡散だと考えられるこのネックの成長は有効だと考えられる。

5．主な発表論文等

（研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線）

〔雑誌論文〕(計 0 件)

〔学会発表〕(計 0 件)

〔図書〕(計 0 件)

〔産業財産権〕

出願状況 (計 0 件)

取得状況 (計 0 件)

6．研究組織

(1) 研究代表者

川崎 亮 (KAWASAKI AKIRA)

東北大学・大学院工学研究科・教授

研究者番号：50177664