

ネットワーク状粒子分散制御によるステンレス鋼の断熱化

北條浩，山田勝則，松岡孝明

Improvement in Heat Insulation of Stainless Steel by Network Structure of Particulate Dispersoid

Hiroshi Hohjo, Katsunori Yamada, Takaaki Matsuoka

要 旨

Si₃N₄/SiC複合体においてSiC粒子をネットワーク状に分散することにより熱伝導性，電気伝導性，耐クリープ性，耐酸化性が向上した。

本研究では，ZrO₂セラミックスの溶射に替わるステンレス鋼の断熱化手法として低熱伝導性であるZrO₂粒子のネットワーク状分散制御法を適用した。

ZrO₂粒子のネットワーク構造は，ZrO₂粒子と微細なステンレス鋼粉末をまぶした球状の粗大なステンレス鋼粉末を焼成することにより形成した。

作製した試料について熱伝導率と曲げ強度を求めた。また，熱伝導率に及ぼす分散形態とネットワークセルサイズの効果を複合材料の特性予測プログラムm-scopeにより予測した。

主な結果を示すと，

1. 20vol.%のZrO₂粒子と気孔のネットワーク分散により，ステンレス鋼の断熱性が2倍に向上した。
2. 均一分散と比較すると，20vol.%のZrO₂粒子のネットワーク分散によりステンレス鋼の断熱性が10%向上し，さらに7.5%の気孔のネットワーク分散により30%向上した。
3. シミュレーションの結果，ZrO₂粒子のネットワーク分散により，さらにはそのセルサイズを大きくすることにより，ステンレス鋼の断熱性が向上すると予測された。このことは実験結果と一致した。

Abstract

Thermal and electrical conductivity, creep resistance and oxidation resistance of Si₃N₄/SiC composites have been improved by forming three-dimensional network structure of SiC particles.

In this study, the network structure of low thermal conductivity ZrO₂ particles and micropores was applied to stainless steel in place of sprayed coating of ZrO₂ ceramics for improving the heat insulation.

The network structure of ZrO₂ particles was formed by sintering spherical coarse stainless steel powder surrounded by the mixture of ZrO₂ particles and fine stainless steel powder.

Thermal conductivity and bending strength of samples were estimated. Furthermore, effects of dispersion morphology of ZrO₂ particles and the cell size of the network on thermal conductivity were

predicted by “ m-scope ” (software for predicting mechanical and thermophysical properties of composites).

The results indicate that:

1. Formation of the network structure of both 20vol.% ZrO₂ particles and pores doubled the heat insulation of stainless steel.
2. In comparison with random dispersion, the network structure of 20vol.%ZrO₂ particles improved the heat insulation by 10%, and in addition to that, 7.5vol.%pores improved the heat insulation by 30%.
3. As a result of the simulation of thermal conductivity, it was predicted that the network structure of ZrO₂ particles and its larger cell size are effective for improving the heat insulation of stainless steel, which was in agreement with experimental results.

キーワード

複合材料，ステンレス鋼，ジルコニア，気孔，ネットワーク分散，分散制御，断熱，熱伝導率

1. はじめに

複合材料は、マトリックス中に第2相粒子を分散することにより、単一材料では得られない特性を発現できるという特長がある。しかしながら、一般的な構造用複合材料では、第2相粒子が均一に分散されており、このような分散形態では、それぞれの粒子がランダムに孤立して存在しているために、第2相粒子の特性を十分に発現できないという問題がある。

一方、セラミックス/セラミックス複合材料である窒化ケイ素/炭化ケイ素複合材料において、炭化ケイ素粒子を3次元ネットワーク状に分散制御することにより、窒化ケイ素の耐クリープ性や耐酸化性を大幅に向上させることができるだけでなく、さらに電気伝導性や熱伝導性の付与も可能である^{1,2)}。このネットワーク状分散制御法は、複数のマトリックス結晶粒の周囲を、第2相粒子で取り囲むようなネットワーク構造を有しており (Fig. 1)、従来の1/2以下という少ない添加量で上記のような特性を発現できる点に特徴がある。

このようなネットワーク状分散制御法を金属基複合材料に適用する第一ステップとして、代表的な構造用金属材料であるステンレス鋼SUS304L (以下、SUSと略記) の断熱性向上を目的として、SUS中に、低熱伝導材料である ZrO_2 および微細な気孔をネットワーク分散制御したSUS/ ZrO_2 複合体を検討した。

SUSは、鉄とクロムおよびニッケルとの合金で

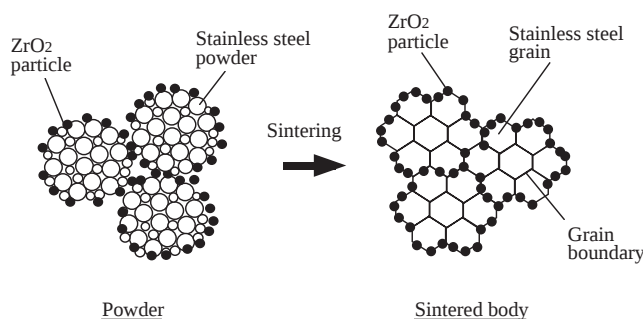


Fig. 1 Method of formation of network structure of ZrO_2 particles in SUS/ ZrO_2 composite.

あることから成分金属の鉄に比べて自由電子が少なく、セラミックスでみられるような格子のフォノンによる熱伝導の割合が高い³⁾。その熱伝導率は、構造用金属材料ではTi合金に次いで低いことから、断熱性を兼ね備えた構造用金属材料としての応用が期待される。

ZrO_2 との複合化によるSUSの断熱性の付与は、従来、SUSの表面に ZrO_2 粒子を溶射し被覆した2層構造あるいは傾斜構造が一般的である⁴⁻⁷⁾が、製造設備等のコストが割高なことや、SUSと ZrO_2 の熱膨張差により界面にはく離が生じるといった問題がある^{8,9)}。上記のネットワーク分散制御を用いれば、低コストで信頼性が高い高断熱性の複合体が得られるものと期待できる。

本報では、 ZrO_2 粒子のネットワーク状粒子分散制御法がSUSの断熱性の向上に有効であること、さらに ZrO_2 粒子とともに微細な気孔をネットワーク分散制御することによって熱伝導率を大幅に低減できることを実験的に明らかにすると共に、その結果をシミュレーションにより解析したので報告する。

2. 方法

2.1 ネットワーク状分散制御方法

ネットワーク状分散制御法をFig. 1に示す。日本アトマイズ加工製の粒子径 $5\mu m$ のステンレス鋼粉末 (SUS304L) を $500\mu m$ 以下の顆粒状に造粒し、この造粒粉の表面を住友大阪セメント製の ZrO_2 -12mol.% CeO_2 粒子0~20vol.%で被覆した。この ZrO_2 粉の焼成温度は $1200 \sim 1300$ であり、世の中で多く使用されている ZrO_2 - Y_2O_3 系粉末の焼成温度に比べて低いという特徴がある。このような ZrO_2 粒子で被覆したSUS造粒粉を500MPaの圧力で一軸成形をして真空中で焼成した。焼成条件は、 1260×4 時間とした。

比較のため、SUS中に上記0~20vol.% ZrO_2 粒子を均一に分散した複合体を作製した。

2.2 熱伝導率の計測方法

作製した試料について焼結体密度 ρ 、比熱 C 、熱拡散率 κ を測定した。焼結体密度はアルキメデス法により測定し、比熱および熱拡散率はレーザーフラッシュ法熱定数測定装置 (真空理工製TC-

3000H-NC)を用いて室温で測定した。試料の形状は、 $\phi 10 \times t 1.5\text{mm}$ の円板で、厚さ方向がプレス方向となるように作製した。測定した ρ, C, κ を用いて熱伝導率 λ を次式により求めた。

$$\lambda = \rho C K \quad (1)$$

2.3 複合材料の構造・特性予測プログラム

当所で開発した複合材料の構造・特性予測プログラムm-scopeの概要をFig. 2に示す。本プログラムにより以下の解析が可能である。

- 1) スピノーダル分解による相分離およびせん断流動による相構造変化の解析 (相構造解析)。
- 2) ミクロな材料構造に起因するマクロな力学特性の予測 (応力解析)。
- 3) ミクロな材料構造に起因するマクロな伝導特性の予測 (伝導解析)。
- 4) 目標とする特性を発現する材料構造の推定 (遺伝的アルゴリズムGA機能)。

ここでは、伝導解析機能による熱伝導率の計算方法について概要を以下に述べる。

二次元定常熱伝導は次のラプラス方程式によって記述される。

$$\frac{\partial (\lambda_x \partial T)}{\partial x^2} + \frac{\partial (\lambda_y \partial T)}{\partial y^2} = 0 \quad (2)$$

λ は熱伝導率、 T は温度、 x - y は二次元直交座標である。上式は有限要素法により数値解析できる¹⁰⁾。正方形の解析領域を考え、解析領域を細かな正方

格子で分割する。格子のセル単位に各素材成分の熱伝導率を設定して材料構造モデルを作成する。次に境界条件を設定する。例えば解析領域内で上下の熱伝導を想定した場合、解析領域の上辺に温度 T_U を、下辺には温度 T_L を設定し、左右辺は周期境界とする。有限要素法熱伝導解析によって得られる計算結果から解析領域の上辺または下辺を通過する全熱流束 Q を算出する。最後に全熱流束から系全体のマクロな熱伝導率 λ_c が次式で求められる。

$$\lambda_c = Q (T_U - T_L) \quad (3)$$

粒子分散材料では成分間の界面における熱伝導が重要である。界面を通過する熱流束 q は界面熱伝達率を h として次式で与えられる。

$$q = h (T_1 - T_2) \quad (4)$$

T_1 は成分1の界面温度、 T_2 は成分2の界面温度である。ここで界面熱伝達の考慮を自動化するため界面熱伝達を熱伝導に置き換える。界面に仮想の間隙 L を考え、間隙が仮想の熱伝導率 λ' を持つ物質で満たされているとすれば界面での熱流束は次式になる。

$$q = \lambda' (T_1 - T_2) / L \quad (5)$$

$$\lambda' = Lh \quad (6)$$

さらに材料構造モデル作成を自動化するためFig. 3に示す二重格子モデルを考案した。 x - y 面内の解析領域について z 方向に L だけずらした二重の格子モデルを作る。下側モデルに成分1の領域を、上側モデルに成分2の領域 (図で網掛け部分) を定義する。そして成分1と成分2との界面となる全周に上下のモデルを繋ぐ仮想のセ

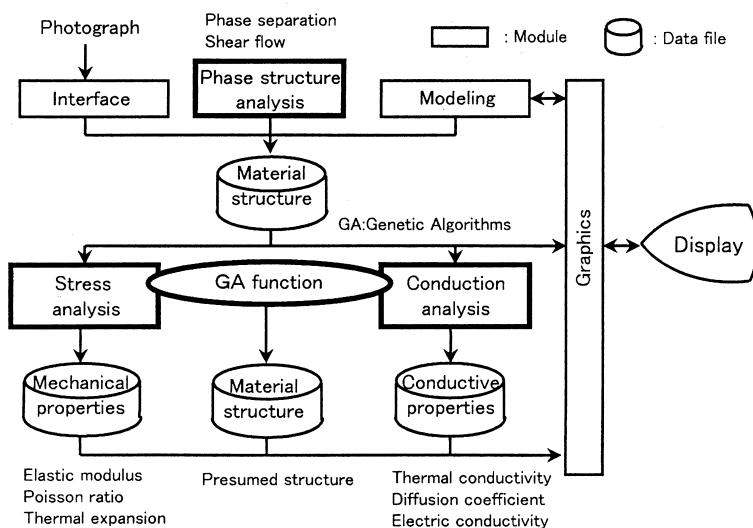


Fig. 2 Outline of the "m-scope" system for predicting structure and properties of mixtures.

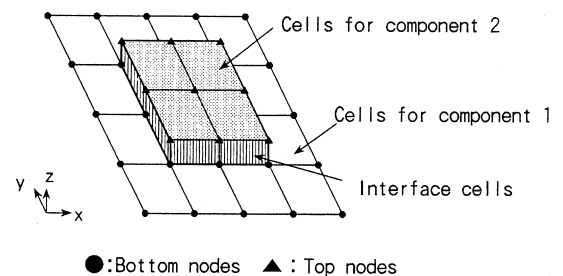


Fig. 3 Duplicate grid model for the analysis of interfacial heat transfer.

ル（図で縦線部分）を生成させる。これを界面セルとする。界面セルは z 方向だけに熱を伝えることができ、その熱伝導率は λ である。二重格子モデルを用いることにより界面熱伝達を考慮した熱伝導解析が容易になる。

開発プログラムでは材料構造，成分の熱伝導率，界面熱伝達率を入力すれば，二重格子モデルの作成，境界条件の設定，界面セルの生成，熱伝導率の算出などはすべてプログラム内で自動的に処理される。

3. ZrO₂粒子ネットワーク分散制御による断熱性向上効果

3.1 熱伝導率に及ぼすZrO₂粒子の分散形態と添加量の影響

Table 1にネットワーク分散SUS/ZrO₂複合体におけるZrO₂添加量と相対密度の関係を，均一分散SUS/ZrO₂複合体のそれと共に示す。ネットワーク分散SUS/ZrO₂複合体の相対密度は，Table 1からわかるように，いずれのZrO₂添加量においても96.5%前後であり，さらに均一分散SUS/ZrO₂複合体のそれと比較しても同程度か，多少低い程度である。したがって，上記試料については，熱伝導率の差に及ぼす気孔率の影響は小さいと考えられることから，以下，気孔率の影響を考慮せずに熱伝導率の比較を行う。

Fig. 4に，ネットワーク分散SUS/ZrO₂複合体におけるZrO₂添加量と熱伝導率の関係を示す。ネットワーク分散SUS/ZrO₂複合体の熱伝導率は，ZrO₂添加量の増加に伴って減少するが，その減少量は，均一分散SUS/ZrO₂複合体のそれに比べて大きいこ

とがわかる。20vol.%ZrO₂を添加したネットワーク分散SUS/ZrO₂複合体の熱伝導率は，均一分散SUS/20vol.%ZrO₂複合体のそれより約12%低く，その値は約10W/(m・K)である。

また，ネットワーク分散SUS/ZrO₂複合体中のZrO₂の分散形態は，Fig. 5に示すように，500 μ m以下の大きさのネットワークセル構造になっていることがわかる。したがって，上記ネットワーク分散SUS/ZrO₂複合体での熱伝導率の低下，すなわちSUSの断熱性の向上は，ネットワーク状に分散した低熱伝導率のZrO₂粒子によって熱流が遮蔽

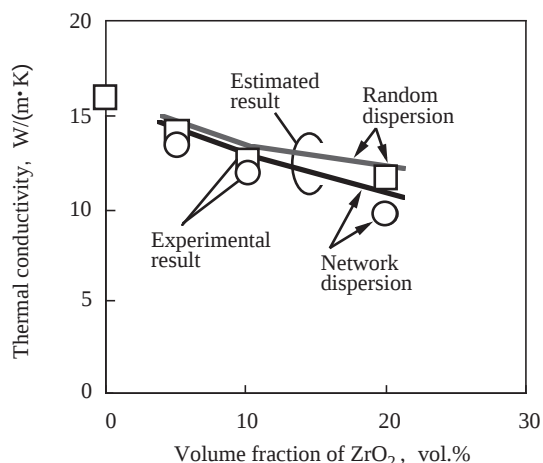


Fig. 4 Effect of dispersion morphology of ZrO₂ particles and volume fraction of ZrO₂ on thermal conductivity in SUS/ZrO₂ composites.

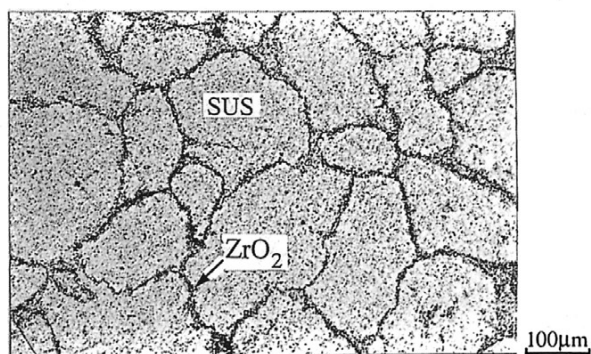


Fig. 5 Network dispersion morphology of ZrO₂ particles in SUS/ZrO₂ composite.

Table 1 Relative density of SUS/2 ~ 20vol.%ZrO₂ composites.

Volume fraction of ZrO ₂ (vol.%)	Network dispersion	Random dispersion
2	96.0%	96.5%
5	96.0	96.4
10	96.2	96.7
20	96.7	96.6

されたことによる効果と考えられる。

3.2 熱伝導率の予測

熱伝導率の予測計算は、各試料における ZrO_2 の分散形態をビデオカメラと画像処理装置を介してコンピュータ内に取り込み、その画像をもとに作成した2次元格子構造モデルについて、前述の特性予測プログラムm-scopeを用いて行った。ここでは、(1)複合体は完全な緻密体であり、かつ(2) ZrO_2 とSUS界面での熱伝達率の影響がないと仮定して、定性的な解析を行った。Fig. 4中に、ネットワーク分散SUS/2～20vol.% ZrO_2 複合体の熱伝導率の予測結果を示す。熱伝導率の予測値は、 ZrO_2 添加量の増加に伴って減少し、この傾向は、実測値と定性的に一致している。

一方、 ZrO_2 粒子の分散形態が均一な場合の予測値は、 ZrO_2 添加量の増加に伴って減少したが、その減少率は、 ZrO_2 添加量10～20vol.%の間で小さくなり、このような現象は、実測値とほぼ同様である。これらの結果から、ネットワーク状粒子分散制御はSUSの断熱性の向上に有効であることを検証できた。

4. ZrO_2 粒子と気孔のネットワーク分散制御による高断熱化

4.1 分散制御方法

ここでは、試料として、

ZrO_2 粒子と微細な気孔をネットワーク状に分散したSUS基複合体、

気孔のみをネットワーク状に分散したSUS基複合体、

ZrO_2 粒子を均一に分散したSUS基複合体、

気孔を均一に分散したSUS基複合体、の4種類を作製した。 ZrO_2 粒子と気孔をネットワーク状に分散した試料は、表面に ZrO_2 粒子(ZrO_2 -12mol.% CeO_2 、住友大

阪セメント製)を固着させたSUSビーズ(球状粉末、伊藤機工製)Aと、そのビーズよりも細かいSUS304粉末(5 μm 、日本アトマイズ加工製)と ZrO_2 粒子を均一に混合した粉末Bとを混合し、一軸金型成形後、1320℃で焼成して作製した。 ZrO_2 粒子の添加量は複合体全体で10、20vol.%とした。また、平均径60、100、200 μm のSUSビーズ粉末を用いることにより3水準のネットワークセルサイズの複合体を作製した。

一方、気孔のみをネットワーク状に分散した試料は、SUS304微粉末とSUSビーズを混合し、一軸金型成形後、焼成して作製した。原料粉末の粒度分布を2重分布とし、かつ、微粉末の量をビーズ間の空隙に適度のすき間が形成されるように調整する(ビーズが真球で一様な大きさと仮定すると、26vol.%未満)ことで気孔が残留するようにした。

さらに、 ZrO_2 粒子のネットワーク分散の効果を明確にするため、 ZrO_2 +気孔のネットワーク分散複合体をホットプレスして気孔をできるだけ無くした試料も作製した。

4.2 ZrO_2 粒子と気孔の体積率とセルサイズの影響

作製した試料の組織写真をFig. 6に示す。Fig.6(a)に示した ZrO_2 粒子を添加した試料で、白色に見える粒子が ZrO_2 粒子である。数 μm 程度の大きさに焼結したと思われる ZrO_2 粒子がSUS界面に沿って分散しており、その ZrO_2 粒子の間隙は気孔を形成

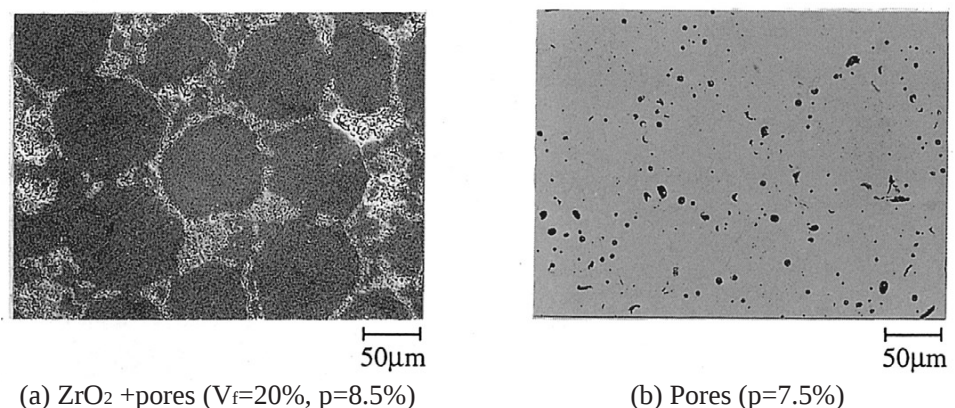


Fig. 6 SEM photographs of network structure in SUS/ ZrO_2 -pores composite (a) and SUS/pores(b).

している。一方、気孔のみを分散した試料 (Fig. 6(b)) では、球状の微細な気孔がネットワーク状に分散している。

Fig. 7にSUS/ZrO₂複合体の熱伝導率 λ のZrO₂添加量依存性を、Fig. 8に熱伝導率 λ および気孔率のSUSビーズサイズ依存性をそれぞれ示す。いずれの図においても、縦軸上の丸印はSUS単体の値

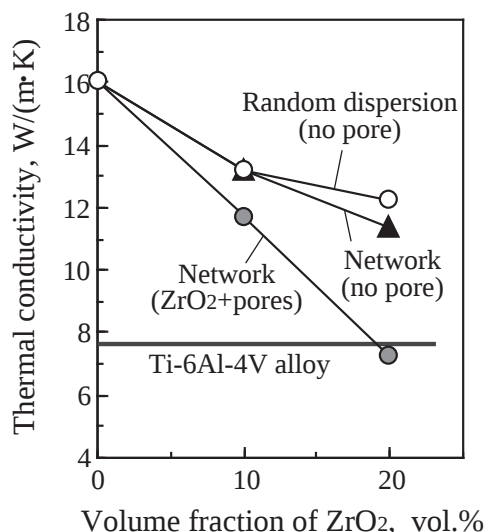


Fig. 7 Improvement of heat insulation of SUS by forming network structure of ZrO₂ particles and pores.

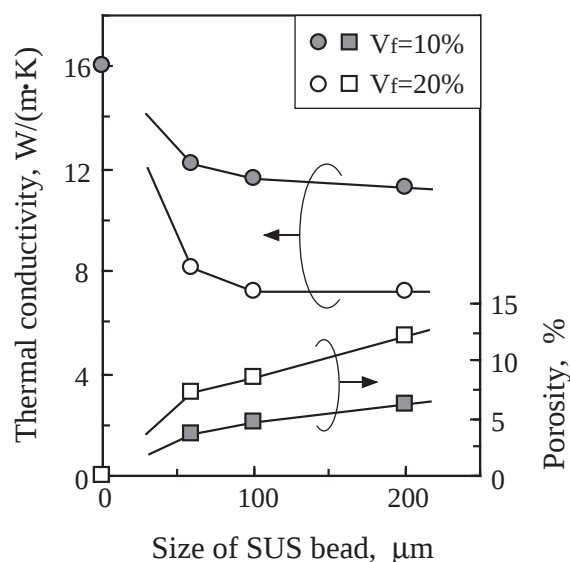


Fig. 8 Effects of SUS bead size on thermal conductivity and porosity in SUS/ZrO₂-pores composite.

(緻密体の文献値¹¹⁾)である。

ZrO₂粒子の添加量 V_f の増加に伴って熱伝導率はFig. 7のように低下する。ホットプレスにより気孔を除去したネットワーク分散複合体の熱伝導率は、均一分散複合体と比べると $V_f = 0.1$ の場合はほとんど等しいが、 $V_f = 0.2$ の場合約9%低下する。この差がZrO₂粒子をネットワーク分散したことによる効果であると考えられる。

ZrO₂ + 気孔のネットワーク分散複合体の熱伝導率は、気孔の無い場合よりも大幅に低下し、均一分散複合体と比べると $V_f = 0.1$ で13%、 $V_f = 0.2$ で42%それぞれ低下する。特に $V_f = 0.2$ の場合は、金属材料の中で熱伝導率の最も低いTi-6Al-4V合金 (7.6W/(m·K)¹²⁾) よりも低い値7.2W/(m·K)が得られている。

SUSビーズのサイズの増加に伴って熱伝導率はFig. 8のように低下する。SUSビーズのサイズが大きくなると、SUS界面の表面積が小さくなるので、同じZrO₂添加量の場合はネットワークセルの壁厚が厚くなる。また、気孔率はSUSビーズのサイズの増加に伴って逆に増加している。したがって、熱伝導率のSUSビーズサイズ依存性は、ネットワークセルの壁厚と気孔の影響が重畳されたと予想される。

Fig. 9に気孔のみを分散させたSUSの気孔率と熱伝導率の関係を示す。気孔率の増加に伴って

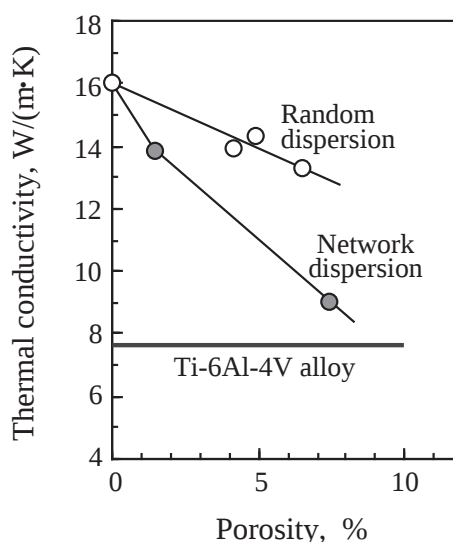


Fig. 9 Improvement of heat insulation of SUS by forming network structure of pores.

SUSの熱伝導率は低下するが、気孔をネットワーク状に分散制御することにより均一分散よりも熱伝導率がさらに大きく低下することがわかる。その低下割合は気孔率1.7%の時、均一分散に対して9%、気孔率7.5%の時、同じく28%である。この結果から前述の熱伝導率のSUSビーズサイズ依存性は、この気孔のネットワーク分散の影響が強く現れたものと考えられる。

Fig. 7に示したZrO₂と気孔のネットワーク分散と比較すると、気孔のみのネットワーク分散の方が少量の気孔率で断熱性向上の効果が大きいことがわかる。また、気孔のみの分散ならば、ZrO₂を添加した系に比べ被削性が向上し、加工コストの低減も期待できる。

4.3 特性予測プログラムによる検証

2次元平面上に分散粒子を均一あるいはネットワーク状に分散させた理想的な複合材料の熱伝導について、前述の特性予測プログラムm-scopeによる計算機シミュレーションを行った。ここでは、100×100にメッシュ分割した正方形の領域内に1個が3×3メッシュの大きさのZrO₂粒子をネットワーク状あるいは均一に分散させ、残りの領域を母相のSUSとした。また、ZrO₂およびSUSの熱伝導率はそれぞれ $\lambda_d = 3.0$ 、 $\lambda_m = 14.4 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ とし、SUS/ZrO₂界面の熱伝達率 h は $100 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ とした。

シミュレーションによりSUS/ZrO₂複合体の熱伝導率を予測した結果をFig. 10に示す。縦軸は、複合体の熱伝導率 λ_c をZrO₂添加量0%の時に1、100%の時に0となるように無次元化して表した。ZrO₂添加量が少ない場合（8.1%、ZrO₂粒子がネットワーク状で、かつ不連続に分散した状態）は、複合体の熱伝導率は均一分散の場合とほとんど等しくなる。ZrO₂添加量が多くなると（17.7%）、均一分散よりもネットワーク分散の方が複合体の熱伝導率が低くなる。このことはFig. 7中の気孔のない場合の実験結果と定性的に一致している。また、ZrO₂添加量が少ない場合は、セルサイズの大小による熱伝導率の差はない。ZrO₂添加量が多くなるとZrO₂粒子が連続したネット

ワークを形成し、セルサイズの大きい方が若干ではあるが熱伝導率が低くなる。このことはFig. 8中の熱伝導率に及ぼすネットワークセルサイズの影響に関する実験結果と定性的には一致しているが、シミュレーションでは気孔の存在を考慮していない。したがって、セルサイズの影響がシミュレーションの予測通りに小さい、すなわち、もう一方の支配要因である気孔率に大きく依存するとすれば、今回ZrO₂ + 気孔のネットワーク分散で得られた高い断熱性は、気孔のネットワーク分散の寄与が大きいものと考えられる。

4.4 複合体の強度

Fig. 11に、20vol.%ZrO₂ + 気孔、ならびに気孔のみのネットワーク分散複合体、および、気孔、ZrO₂の均一分散複合体の曲げ強度を市販のSUS焼結体¹³⁾のそれと比較して示す。市販のSUS焼結体の気孔率は18%で、今回作製した複合体のその約2倍である。Fig. 11からわかるように、気孔のみを均一あるいはネットワーク分散させたものの強度は、市販の焼結材料のそれとほとんど差がないが、ZrO₂粒子を均一分散させたものがその約1/2、ZrO₂ + 気孔のネットワーク分散が約1/5と、いずれも低い値を示した。

ZrO₂粒子とSUSの界面の結合強度が弱いこと、SUSが連続してつながっている部分が少ないこと、さらに気孔が前記のように焼結したZrO₂界面に存在することから、ZrO₂を添加した系では強度

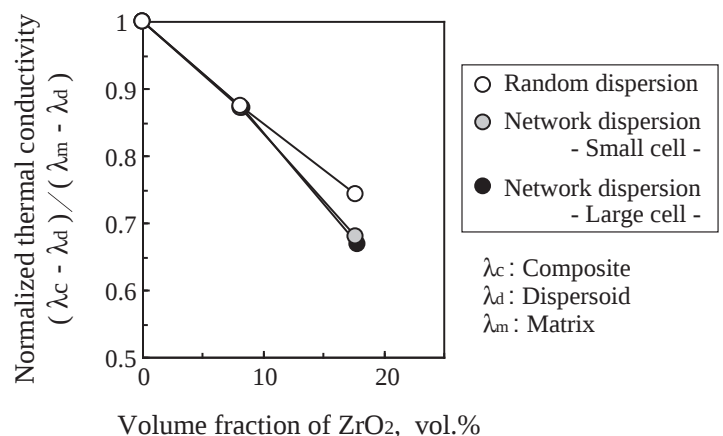


Fig. 10 Relationship between volume fraction of ZrO₂ and thermal conductivity predicted by a finite element method in SUS/ZrO₂ composite.

が著しく低下したものと考えられる。気孔のみを分散したものは、気孔以外の部分でSUSが連続してつながり、さらに個々の気孔の形状が球状であり応力集中が小さくなったため、強度低下が小さかったものと考えられる。

Fig. 11には各材料の熱伝導率も示したが、気孔のみをネットワーク分散したものが強度を維持した上で高い断熱性が得られていることがわかる。気孔のサイズ、ネットワークセルサイズの最適化により断熱性のさらなる向上を期待できるものと考えられる。

5. まとめ

ステンレス鋼SUS304Lの断熱性向上を目的として、SUS中に、低熱伝導材料である ZrO_2 および微細な気孔をネットワーク分散制御したSUS/ ZrO_2 複合体を検討した。以下に主な結果を示す。

(1) ZrO_2 粒子ネットワーク分散SUS基複合体の熱伝導率は、ネットワークセルサイズが大きいほど、また、 ZrO_2 添加量が多いほど低下し、 ZrO_2 添加量20vol.%では、SUS単体の約1/2の熱伝導率

($7.2\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$)を得た。この値は金属材料の中で熱伝導率の最も低いTi合金よりも低い。また、気孔のみのネットワーク分散にしても断熱性が大きく向上することがわかった。

(2)ネットワークセルサイズが大きく、また、 ZrO_2 粒子の添加量が多い複合体では、ネットワーク状部分に気孔が多く生じた。上記の断熱性は、 ZrO_2 粒子と気孔のネットワーク分散の相乗効果により得られたものと考えられる。

(3)複合材料の構造・特性予測プログラムm-scopeによるシミュレーションの結果、 ZrO_2 粒子のネットワーク分散によって断熱性が均一分散の場合よりも向上し、セルサイズを大きくすることでさらに向上することがわかった。(1)の実験結果は、このことを反映したものと考えられる。

参考文献

- 1) Yamada, K. and Kamiya, N. : Mat. Res. Soc. Symp. Proc., 365(1995), 113, MRS
- 2) Yamada, K. : FC Report, 14(1996), 177
- 3) 庄司正弦：伝熱工学，(1995)，32，東京大学出版会
- 4) 日本溶射協会編：溶射ハンドブック，(1986)，新技術開発センタ
- 5) Watson, J.W. and Levine, S. R. : Thin Solid Films, 119(1984), 185
- 6) Strangman, T. E. : Thin Solid Films, 127(1985), 93
- 7) Kawasaki, A. and Watanabe, R. : Ceram. Int., 23-1(1997),73
- 8) Yamada, Y., Kawasaki, A., Taya, M. and Watanabe, R., : Mater. Trans., JIM., 35-11(1994), 814
- 9) 松崎祐司, 藤岡順三, 吉川孝男：日本金属学会誌, 58-1 (1994), 98

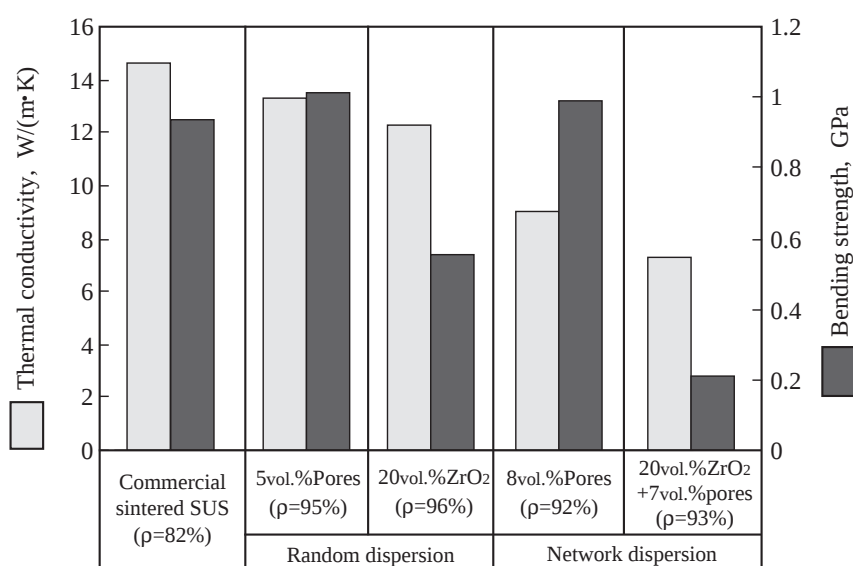


Fig. 11 Thermal conductivity and bending strength in SUS/ ZrO_2 composite and sintered SUS.

- 10) フェナー, R. T.: 有限要素法の実際, 加川幸雄訳,
(1980), 38, サイエンス社
- 11) 熱物性ハンドブック, 日本熱物性学会編, (1990), 26, 養
賢堂
- 12) ref. 11), p.27
- 13) 焼結機械部品—その設計と製造, 日本粉末冶金工業会
編, (1987), 107, 128, 技術書院

著者紹介



北條 浩 Hiroshi Hohjo
 生年：1962年。
 所属：電磁気材料研究室。
 分野：無機材料，複合材料の研究開発。
 学会等：日本材料学会，日本セラミック
 ス協会，日本金属学会会員。



山田勝則 Katsunori Yamada
 生年：1954年。
 所属：電磁気材料研究室。
 分野：無機複合材料分野の研究・開発。
 学会等：日本機械学会，日本セラミック
 ス協会会員。



松岡孝明 Takaaki Matsuoka
 生年：1951年。
 所属：材料モデリング研究室。
 分野：材料および加工分野におけるコン
 ピュータシミュレーション。
 学会等：日本機械学会，高分子学会，日
 本レオロジー学会会員。
 1995年日本レオロジー学会有功賞
 受賞。
 工学博士。