

機関番号：12101

研究種目：基盤研究(B)

研究期間：2008～2010

課題番号：20360410

研究課題名(和文) 再利用可能なエンジニアリングセラミックスの開発と利用技術の確立

研究課題名(英文) Development of Reusable Engineering Ceramics and Procedures to Recover the Strength by Healing the Defects

研究代表者

阿部 修実 (ABE OSAMI)

茨城大学・工学部・教授

研究者番号：40231948

研究成果の概要(和文)：

金属間化合物 NiAl を分散添加したアルミナ基およびジルコニア基複合材料について、材料組織の制御方法、NiAl の酸化反応による材料欠陥の修復メカニズムを明らかにし、損傷許容性を明らかにした。半径 270 μm 以下の単純欠陥は短時間の酸化処理によってほぼ完全に修復できること、この修復機構により 20 回以上の再利用が可能であること、多数個の欠陥の同時修復が可能なこと、微細な欠陥が広範囲に形成される摺動欠陥の修復も可能なことなどを見出した。

研究成果の概要(英文)：

Two kinds of reusable ceramics composites, NiAl-dispersed alumina and PSZ have been developed. The materials with controlled microstructure show the healing performance by the oxidation of NiAl providing the rebonding of cracks (<270 μm) and compressive stress around the repaired cracks. The healing mechanism is applicable for more than 20 times. The simultaneous healing of multiplied cracks and the sliding damages formed on the wide surface is also demonstrated.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2008年度	7,900,000	2,370,000	10,270,000
2009年度	4,400,000	1,320,000	5,720,000
2010年度	2,000,000	600,000	2,600,000
年度			
年度			
総計	14,300,000	4,290,000	18,590,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：総合工学・リサイクル工学

キーワード：再利用，エンジニアリングセラミックス，アルミナ，ジルコニア，熱処理，酸化反応，強度，欠陥修復

1. 研究開始当初の背景

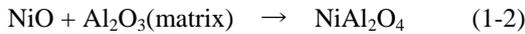
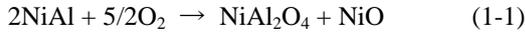
脆性材料であるセラミックスでは再利用と寿命予測が困難である。しかしながら、潜在欠陥を破壊源の大きさに成長する前に修復することができれば、材料を再利用できる可能性がある。非酸化物セラミックスの酸化反応によりを利用した生成する SiO₂ により

欠陥を充填して修復する方法が提案されているが、反応に伴って発生する気体生成物が材料を劣化させる可能性がある。

2. 研究の目的

本研究で提案する欠陥修復機構は酸化物セラミックス中に分散した金属間化合物

NiAl の酸化反応 (1-1) および (1-2) によるもので、気体の発生がないこと、および、NiAl の酸化生成物とマトリックス酸化物との反応 (1-2) によって生じる圧縮応力により欠陥の再結合部を安定化させて新たな破壊源となることを防ぎ、材料の繰り返し再利用を実現することに特徴がある。



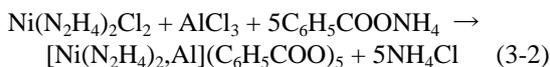
まず、修復メカニズムを検証して種々の大きさや集積度の欠陥を修復処理して半減期および再結合と圧縮応力の寄与率を調べ、部分安定化ジルコニア (PSZ) とアルミナの混合組成をマトリックスとする複合材料にも、この修復技術を応用して、より汎用性の高い技術として拡大・発展させることとした。

3. 研究の方法

(1) 母材 NiAl/ α -Al₂O₃ 複合材料の作製プロセスと諸特性

①原料粉末の合成と焼結

金属間化合物 NiAl とアルミナの複合材料は、アルミナ粉末を分散した沈殿剤溶液に NiCl₂ と AlCl₃ の混合溶液を滴下して作製した前駆体粉末を熱処理することにより合成した。沈殿剤反応は次式 (3-1), (3-2) の通りである。



マトリックス成分の α -Al₂O₃ 粉末は合成後の NiAl の体積含有量が 10vol%, 30vol%, 50vol% となるように沈殿剤溶液にあらかじめ添加して超音波分散した。得られた沈殿の有機基の炭化、NiAl の合成 (1350~1450°C)、残留炭素除去により NiAl/Al₂O₃ 粉末とした。以下、得られた粉末および焼結体を NiAl の含有量を基に NA10 (10vol% NiAl/ α -Al₂O₃ 組成), NA30, NA50 のように表記する。

作製した NiAl/ α -Al₂O₃ 粉末は 0.5~0.8 μm の NiAl 粒子が Al₂O₃ 粒子で取り囲まれた二次構造を持ち、1500°C 程度の温度で無加圧焼結が可能である。得られた焼結材料密度は 97.61%~98.24% で、十分に満足できる値であった。

②母材焼結体の機械的特性

これらの材料の密度および機械的特性を、比較材料とともに、Table 1 に示す。NiAl/Al₂O₃ 複合材料の強度 (σ_f) と破壊靱性 (K_{IC}) は NiAl の添加量が増加するほど高くなっている。

Table 1 複合材料および比較材料の諸特性

	NA10	NA30	NA50	Al ₂ O ₃	NiAl	NiAl ₂ O ₄
Volume fraction of NiAl, V_f / vol%	10	30	50	0	100	—
Sintered density, ρ / %	97.6 ₁	98.2 ₄	97.9 ₀	99.4 ₀	96.0 ₆	97.8 ₀
Fracture strength, σ_f / MPa	558	661	696	623	693	288
Fracture toughness, K_{IC} / MPa $\cdot\text{m}^{1/2}$	4.1 ₀	5.6 ₃	8.3 ₃	3.4 ₃	~6 [*]	3.1 ₁
Elastic modulus, E / GPa	349	308	257	388	149	275
Poisson's ratio, ν	0.24 ₀	0.25 ₃	0.26 ₀	0.23 ₆	0.29 ₃	0.28 ₆
Vickers hardness, H_V / GPa	16.0	12.1	8.5	16.8	3.2	14.8

* H. Bei and E.P. George, "Microstructures and mechanical properties of a directionally solidified NiAl-Mo eutectic alloy", *Acta Mater.*, **53**, 69-77 (2005).

③酸化処理による機械的特性の改善

本研究で修復機能として期待している亀裂の再結合と圧縮応力の発生に最適な酸化処理条件を調べるため、まず、これらの母材焼結体を 1250°C で 3 時間酸化処理して機械的特性を調べた。得られた諸特性を Table 2 に示す。なお、この酸化処理では NiAl の酸化生成物として NiAl₂O₄ のみが同定され、他の結晶相は観察されない。酸化処理剤の強度と破壊靱性は母材に比べて大幅に増加し、特に、NA50 の破壊靱性値はビッカース圧痕からの亀裂進展帳を精度良く測定することが困難なほど短くなった。また、数 μm 程度の気孔は NiAl の酸化生成物によって充填された。

Table 2 NiAl/Al₂O₃ 酸化処理材の諸特性

	NA10	NA30	NA50
Degree of oxidation, ξ / %	57.6	42.0	21.1
Thickness of metamorphic layer, δ / μm	15	23	36
Fracture strength, σ_f / MPa	665	738	769
Fracture toughness, K_{C-eff} / MPa $\cdot\text{m}^{1/2}$	4.7 ₂	7.7 ₂	(10.2 ₇)
Vickers hardness, H_V / GPa	15.5	11.6	8.2

Oxidation treatment: 1250°C for 3h.

④酸化処理した NA10 材料の機械的特性の酸化反応時間依存性

まず、材料特性の酸化処理時間依存性を調べた。Fig. 1 に、酸化処理した NA10 の強度と破壊靱性値を示す。酸化処理時間 3 時間までは、強度と破壊靱性値はともに酸化度に比例して増加し、母材強度は 558MPa から 676MPa に、破壊靱性値は 4.1₀MPa $\cdot\text{m}^{1/2}$ から 4.8₀MPa $\cdot\text{m}^{1/2}$ に増加した。修復に用いる処理条件も 1250°C-1 時間以下で十分である。

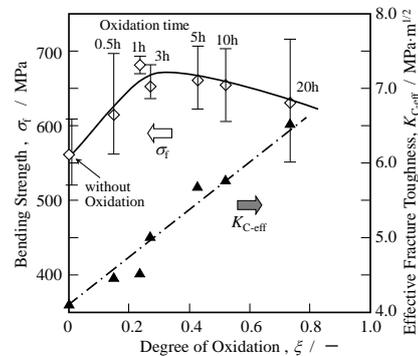


Fig. 1 NA10 材料の酸化処理による強度と破壊靱性の変化。

⑤酸化処理による表面変質層の形成と圧縮応力の発生

酸化生成物は表面に網目状の皮膜を形成すると同時に、マトリックス粒界に沿って内部に拡散して粒界が NiAl₂O₄ に置き換えられた変質層を形成して圧縮応力を生じる。酸化処理時間の平方根 ($t^{0.5}$) に対して酸化度 (ξ) および表面変質層厚み (δ) をプロットすると、いずれの値も $t^{0.5}$ に比例して増加した。従って、この変質層の形成は酸化生成物の拡散によって起こり、NiO は粒界を素早く拡散してマトリックス・アルミナと反応して NiAl₂O₄ を生

成すると考えられた。この反応が迅速に起こることは、欠陥の再結合による修復に極めて有利である。

X線残留応力測定と酸化処理材料表面の亀裂進展長 (R) を用いた方法で表面変質層内部の応力 (それぞれ、 σ_R^{obs} , σ_R^{calc}) を求めると、 σ_R^{obs} と σ_R^{calc} は良く一致し、ともに、酸化度に比例して増加した。発生する圧縮応力は 20~100MPa であるが、表面圧縮応力が高すぎると、これに対抗して材料内部には引っ張り応力が発生して潜在欠陥を成長させる可能性があるため、材料強度の 20% 程度であるこの圧縮応力は材料の強靱化や修復機構の一部として利用するのに程よい値である。

(2) 基礎的な修復挙動

① 強度回復の修復時間依存性

ビッカース法でメジアン・クラック状の人工欠陥を導入した NA10 材料に、1250°C で修復処理を施し、回復強度を処理時間 (t) の関数として整理した。得られた結果を Fig. 2 に示す。強度 $\sigma_f^0 = 558\text{MPa}$ の母材 NA10 に 194 μm の亀裂を導入すると、材料強度は 150MPa まで低下し、アルゴン雰囲気中、1250°C で 10 時間のアニーリング処理を施しても強度 (σ_f) は母材強度の 62.4% までしか回復しなかった。これに対して、同じ温度で大気中熱処理による修復を施すと、処理時間 0.5 時間で、強度 599MPa となり、母材強度を上回った。修復処理時間を 1 時間、3 時間にのぼすと、強度はさらに向上し、欠陥を導入せずに熱処理して強度を改善した材料とほとんど同じになった。

次に、測定された σ_f と K_{C-eff} から、次式 (3-3) により破壊源サイズ (C^*) を推定した。

$$C^* = \left(\frac{K_{C-eff}}{Y \cdot \sigma_f} \right)^2 \quad (3-3)$$

求められた C^* は、アルゴン中のアニーリング処理では 59.5(1h)~37.1 μm (10h) であったのに対して、修復処理では 14.3 μm (= 0.5h)~18.8 μm (10h) で、母材の潜在欠陥の推定値 14.0 μm とほぼ一致した。欠陥導入材とアニーリング材の破壊は欠陥導入部から起きているのに対して、酸化修復した試験片は欠陥修復部からはなれた場所から破壊した。

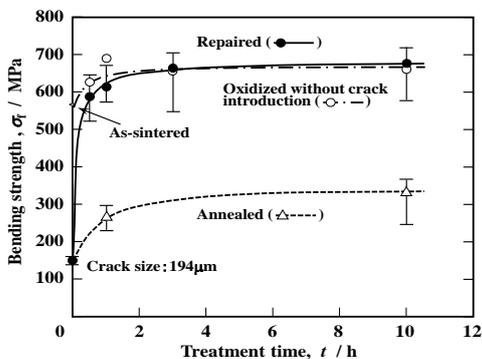


Fig. 2 回復強度の収縮処理時間依存性。

② 修復可能な欠陥サイズ

欠陥の修復と強度の回復が亀裂の再結合と圧縮応力の作用によって起こることがわかったので、次に、大きさの異なるメジアン・クラックを導入し、1250°C で1時間の修復処理を行って強度 (σ_f) を比較した。強度の欠陥サイズ依存性を Fig. 3 に示す。導入欠陥サイズ 272 μm までは修復されて、強度は大幅に回復する。修復限界を超えた 346 μm の亀裂導入材と修復材の破断面を観察すると、強度から推定した C^* (28.6 μm) に対して、破面には 350 μm 程度の亀裂の痕跡が明らかに認められた。また、亀裂周囲に粒内破壊が特徴的な変質層が形成されていることが確認でき、この部分に発生した圧縮応力が再結合の不十分さを補って、強度の低下を母材の 76% 程度に抑えていると考えられた。Fig. 2 の結果と合わせて、修復処理温度 1250°C、0.5 時間の処理で 190 μm 程度、1 時間の処理で 270 μm 程度のメジアン・クラックの修復が可能と考えられる。

(3) 繰り返し修復挙動

繰り返し修復による再利用の可能性は本研究の中心的課題である。そこで、まず、NA10 材料と NA30 材料について、メジアン・クラックの導入 (98N) と修復処理 (1250°C、0.5h) を交互に繰り返して、修復過程を追跡した。

Fig. 4 に、欠陥導入と修復を繰り返した時の強度および破壊靱性値の変化を繰り返し回数 (n) の関数として示す。NA10 の強度 (σ_f) は n に対して直線的に減少したが、1 回の欠

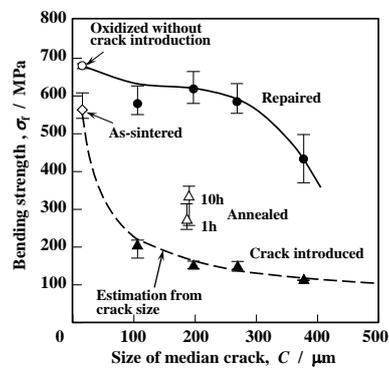


Fig. 3 修復強度の欠陥サイズ依存性。

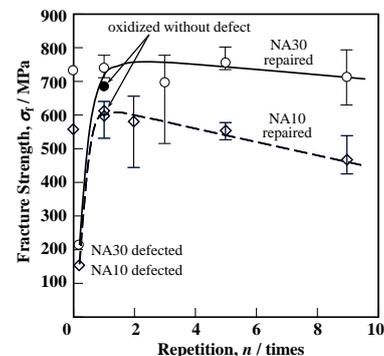


Fig. 4 NA10 と NA30 の繰り返し修復挙動。

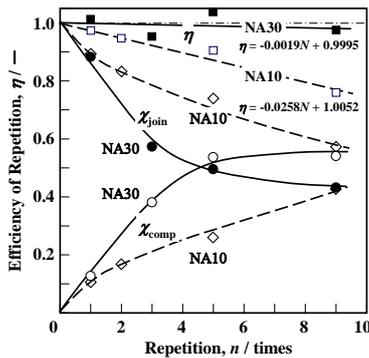


Fig. 5 NA10 と NA30 の相対強度 (η) および再結合と圧縮応力の寄与率 (χ_{join} と χ_{comp}).

陥導入／修復あたりの強度低下は 15.6MPa と低い値に抑えられた。NA30 では、繰り返しによる強度の低下率は NA10 に比較してはるかに少なく、9 回の繰り返し後にも修復強度は母材の 96% を維持していた。亀裂の再結合と圧縮応力の寄与率 (χ_{join} と χ_{comp}) を求め、 n に対してプロットすると、Fig. 5 が得られる。図には、未欠陥酸化処理材の強度を 1 としたときの相対強度 (η) も比較のために示している。NA10 の χ_{comp} は $n=9$ でも 0.43 で、 n の増加に対して一様に増加している。これに対して、NA30 では $n=5$ で χ_{comp} はすでに 0.53 に達し、それ以上繰り返しを重ねてもほとんど変化を示さない。これは材料表面が短時間で酸化生成物により覆われてしまうため、亀裂内部に十分な NiO を供給できなくなったためと考えられる。半減期 (強度が母材の 1/2 になる繰り返し回数, $n_{1/2}$) は NA10 で 21.3, NA30 で 260 と求められた。

次に、40 回以上の繰り返し修復操作を行って半減期付近における修復挙動を検討した。これらの材料の繰り返し修復による強度 (σ_f) の変化を Fig. 6 に示す。相対密度 97.6% の NA10 (\diamond) の σ_f が n によってほぼ直線的に減少したのに対して、密度 96.7% の NA10 (\blacklozenge) の σ_f は $n=20$ で増加している。これは、気孔が充填された結果で、この修復機構は、空隙の充填にも利用できる。変質層厚みは $n=40$ でメジアン・クラック半径の 1/2 に達し、厚

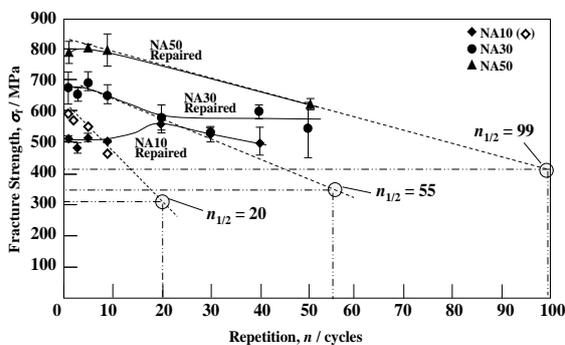


Fig. 6 多数回繰り返しによる強度の変化.

い表面変質層が一種の保護層として働いて材料の内表面よりも内側に亀裂が入りにくくなっている。NA30 と NA50 では、 $n=50$ でも母材焼結体の 70% 以上を保っていた。

結論として、50 回までの欠陥導入と修復の繰り返しでは、保護層の形成により修復強度は母材強度の 1/2 以上を維持できた。この材料の再利用においては、酸化反応を利用した修復操作によって、(1) 欠陥の再結合と圧縮応力による修復と (2) 圧縮応力を持つ表面変質層を保護層とする欠陥感受性の低減、の 2 段階の寿命延長が期待できる。

(4) 摺動摩耗損傷の修復

セラミックスを構造材料として使用するとき、コンタクト・ストレスによる摩耗損傷が破壊源となることが多い。そこで、モデルとして、NA10 試験片の中央に導入した複数の亀裂の同時修復を検討した。欠陥導入材とその修復材の強度をクラックの個数 (N) の関数として Fig. 7 に示す。最も大きな欠陥が破壊源として作用するとした最弱リンク説に従えば、多数の試験片について測定した強度の平均値は、導入した亀裂導入数に無関係のはずであるが、欠陥導入材の強度は 116MPa ($N=9$) まで低下し、欠陥が相互に影響して大きな破壊源として働いていることを示している。Fig. 7 から、本研究の修復機構はこのような欠陥にも有効に作用することがわかる。なお、損傷の程度は強度と破壊靱性値から破壊源サイズを求めて評価できたが、欠陥の発生機構と修復機構の関係の考察はここでは省略する。

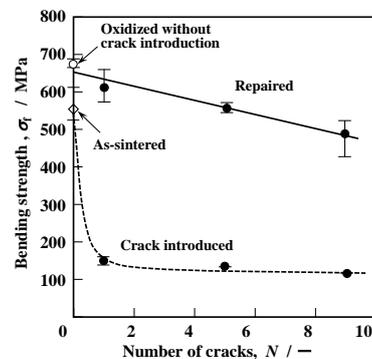


Fig. 7 集積欠陥の修復.

(5) ジルコニア基複合材料の作製と酸化反応による特性向上

① 母材 NiAl/Al₂O₃/YTZ 複合材料

焼結体と酸化処理材の相対密度 (ρ) および曲げ強度 (σ_f) を Fig. 8 に示す。母材強度 761MPa の Z900 (YTZ : Al₂O₃ : NiAl = 90 : 9 : 1vol%) に酸化処理を施すと、強度は処理温度 800°C で最大強度 1140MPa まで増加した。一方、母材強度 722MPa の Z495 (YTZ : Al₂O₃ : NiAl = 49.5 : 49.5 : 1vol%) に酸化処理を施すと、密度が 93.2% に改善された 1000°C で最大

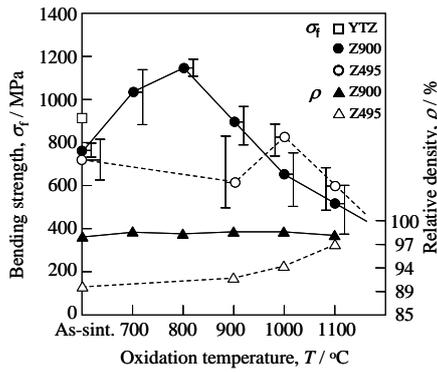


Fig. 8 Z900 および Z495 の酸化強靱化.

強度 824MPa を示した。有効破壊靱性値 (K_{C-eff}) も酸化処理によって大幅に向上し、Z900 (800°C) では $10.1 \text{MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$ に達した。この酸化処理材では、プロセス・ゾーンが横長に変形し、先端部に作用する応力が緩和されて亀裂進展抵抗が増強された。

②表面変質層の内部構造

YTZ 基複合材料では、酸化速度は非常に速く、900°C(0.5h)で 52 μm の変質層が形成され、変質層と母相との間に明瞭な境界が形成された。これが前述したプロセス・ゾーンの扁平化および強度と破壊靱性の向上の原因と考えられた。変質層内部の破壊靱性値 (K_{C-eff}) の分布を評価すると、Fig. 9 のようになり、変質層内部に生じる圧縮応力により YTZ の応力誘起変態の効率が改善されると考えられた。

③繰り返し修復挙動

母材 Z900 試験片に、メジアン・クラックの導入 ($C = 134\mu\text{m}$) と欠陥修復 (800°C, 0.5h) を交互に繰り返した時の σ_f と K_{C-eff} を Fig. 9 に示す。欠陥を導入すると、 σ_f は 303MPa まで低下し、アルゴン雰囲気中で熱処理をしても σ_f は 428MPa までしか回復しなかったが、酸化修復処理を行うと σ_f は 617MPa に回復した。また K_{C-eff} は酸化処理によって $8.26 \text{MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$ に増加した。この材料の再結合と圧縮応力の寄与率は $\chi_{join} = 0.26_2$, $\chi_{comp} = 0.73_7$ となり、アルミナ基材料に比較して圧縮応力の寄与率ははるかに大きい。この理由は、表面変質層内部で

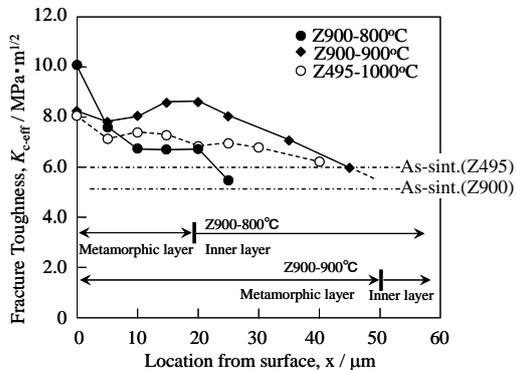


Fig. 9 変質層内部の有効破壊靱性値の分布.

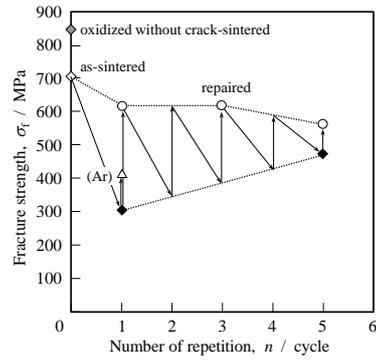


Fig.10 Z900 材料の繰り返し修復.

クラック先端のプロセス・ゾーンが変形することによる応力変態強化機構が効率よく作用したためである。欠陥の導入と修復を 3 回繰り返しても、 σ_f は 623MPa を維持していたが、欠陥導入と修復を 5 回繰り返すと強度の回復率はわずかに低下した。

④摺動摩耗損傷の修復

角柱状試験片 2 本を交差させて摺動摩耗損傷を与えた Z900 材料の σ_f を摺動距離 (x) の関数として Fig. 10 に示す。単成分 YTZ と比較して初期摩耗損傷が少なくなっている。さらに、摺動距離 200m で損傷を与えた試験片に 800°C で 0.5h の修復処理を施すと、強度は約 70MPa 改善された。従って、亀裂の再結合の寄与があまり高くない YTZ 基材料でも摩耗損傷の修復が可能であることがわかる。

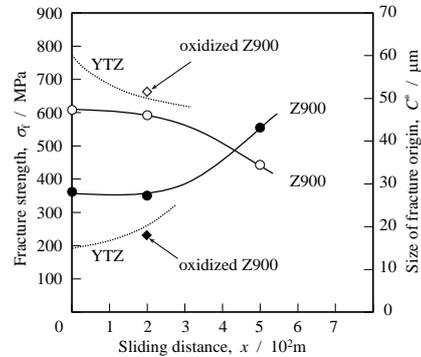


Fig. 11 Z900 材料の摺動損傷による強度の低下と酸化修復処理による強度の回復.

4. 研究成果

本研究では、アルミナやジルコニアなどの市場規模の大きい汎用セラミックスについて、再利用可能なエンジニアリングセラミックスとしての利用技術を確認することを目的として検討を進めた。修復に利用する化学反応が気体状の生成物を発生しないこと、および、化学反応に伴う体積膨張を利用した圧縮応力を有効に利用することを念頭に、金属間化合物 NiAl を分散したアルミナ基複合材料、イットリア添加部分安定化ジルコニアとアルミナの混合組成をマトリックスとする NiAl 分散

複合材料の2種類の再利用可能な材料を開発し、その欠陥修復メカニズムを明らかにした。これらの材料は100 μm 程度の大きさの欠陥に対して数十回以上に及ぶ繰り返し修復が可能で、さらに、修復反応に伴って材料表面に変質層が発達すると、これが保護層として働いて欠陥の発生が抑えられることを見出した。結果として、40回以上の欠陥の修復を繰り返しても母材強度の1/2以上の材料強度を維持できた。このような高い損傷許容性は他の材料では報告されていない。また、欠陥修復過程を、比較的大きな単一クラック状欠陥と摺動摩擦に伴う微細な欠陥の集合体としての損傷の2面から検討し、本報告の修復メカニズムがその両者に効果的であることを示した。さらに、検討を進める過程では、表面酸化変質層の形成と変質層に発生する圧縮応力を利用した本法の修復技術が、部分安定化ジルコニアのプロセス・ゾーンを扁平化して破壊靱性を10MPa $\cdot\text{m}^{1/2}$ に高める方法、および、不動態被膜として材料の内表面を保護する方法としても利用できる可能性を示した。これらの可能性については、今後、さらに検討を進める必要があるが、セラミック材料の強靱化技術の一つとして興味深い。

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計1件)

① T. Nagase, O. Abe, "Texture control of self-constructive tri-layer composites", *Trans. Mater. Soc., Jpn.*, **34** (2009) 157-160.

(査読有)

[学会発表] (計15件)

- ① 長瀬貴俊, 阿部修実, "金属間化合物 NiAl を中間層に含む三層型積層材料の積層界面制御", 第24回日本セラミックス協会関東支部研究発表会, 箱根, 平成20年7月24-25日, 講演要旨集 p.3.
- ② 江尻雄大, 阿部修実, "WC/ NiAl の同時合成による複合粉末の合成", 第24回日本セラミックス協会関東支部研究発表会, 箱根, 平成20年7月24-25日, 講演要旨集 p.4.
- ③ 中山雄策, 阿部修実, "アルミナ基セラミックス複合材料の繰り返し修復挙動", 第24回日本セラミックス協会関東支部研究発表会, 箱根, 平成20年7月24-25日, 講演要旨集 p.62.
- ④ T. Nagase and O. Abe, "Texture control of self-constructive tri-layer composites", *IU-MRS-ICA 2008, Nogoya, Dec. 9-13 (2008) LLP-01.*
- ⑤ 長瀬貴俊, 阿部修実, "金属間化合物 NiAl を分散した Al₂O₃-YTZ 複合材料の作製", 第47回セラミックス基礎討論会, 大阪, 平成21年1月8-9日, 講演要旨集 pp.194-195.
- ⑥ 中山雄策, 阿部修実, "NiAl 分散複合化ア

ルミナ基複合材料のリニューザビリティ", 第47回セラミックス基礎討論会, 大阪, 平成21年1月8-9日, 講演要旨集 pp.496-497.

- ⑦ 江尻雄大, 阿部修実, "WC/NiAl 複合材料の作製", 第25回日本セラミックス協会関東支部研究発表会, 群馬県みなかみ町, 平成21年7月30-31日, 講演要旨集 p.55.
- ⑧ 阿部修実, 長谷部理沙, "NiAl/アルミナ複合材料の強靱化に寄与する変質層の形成過程", 第48回セラミックス基礎討論会, 沖縄, 平成21年1月12-13日, 講演要旨集 p.209.
- ⑨ 江尻雄大, 阿部修実, "無加圧焼結による WC-NiAl 複合材料の作製", 第48回セラミックス基礎討論会, 沖縄, 平成21年1月12-13日, 講演要旨集 p.213.
- ⑩ 川名孝弥, 大貫翔太, 阿部修実, "アルミナ-NiAl 複合材料の摩耗損傷とその修復", 第26回日本セラミックス協会関東支部研究発表会, 茨城県日立市, 平成22年7月22-23日, 講演要旨集 p.58.
- ⑪ 鈴木翔斗, 阿部修実, "三層積層化によるセラミックス材料の高靱性化", 第26回日本セラミックス協会関東支部研究発表会, 茨城県日立市, 平成22年7月22-23日, 講演要旨集 p.80.
- ⑫ 鈴木翔斗, 阿部修実, "高靱性三層積層セラミックス材料", 第21回日本化学会関東支部茨城地区研究交流会, 平成22年11月5日, 日立市, 予稿集 p.21.
- ⑬ O. Abe, Y. Kuranobu and Y. Nakayama, "Thermochemical Repair of Surface Defects for Reusable NiAl-dispersed Alumina-based Composites", *Joint Conference of 5th Int'l. Conf. on Sci. and Technol. for Advanced Ceramics and 2nd Int'l. Conf. on Advanced Mater. Development and Integration of Novel Structured Metallic and Inorganic Mater. (STAC5-AMNI2), Yokohama, June 22-24 (2011) 22pRbI04 (Invited)*
- ⑭ 長谷川拓哉, 阿部修実, "NiAl 分散ジルコニア基複合材料のリニューザビリティ", 第27回日本セラミックス協会関東支部研究発表会, 千葉県千葉市, 平成22年9月29-30日, 講演要旨集 p.80.
- ⑮ 鈴木翔斗, 阿部修実, "NiAl を分散したセラミックス基複合材料の摺動摩擦特性と欠陥の修復", セラミックス基礎化学討論会第50回記念大会, 東京都, 平成24年1月12-13日, 講演要旨集 p.281.

6. 研究組織

- (1) 研究代表者 阿部 修実
茨城大学 工学部 教授
研究者番号: 40231948