

図解 傾斜機能材料の 基礎と応用

工学博士 上村 誠一 編著
工学博士 渡辺 義見

コ ロ ナ 社

編 著 者

うえむら せいいち
上村 誠一 (元日本石油株式会社)

わたなべ よし み
渡辺 義見 (名古屋工業大学)

執 筆 者

しのはら よしかず
篠原 嘉一 [1 章] (物質・材料研究機構)

渡辺 義見 [2, 4 章]

とき た まさ お
鴫田 正雄 [3 章] (株式会社エヌジェーエス)

かな い ひろし
金井 洋 [5 章] (日鉄住金銅板株式会社)

しらがき のぶ き
白垣 信樹 [5 章] (日鉄住金銅板株式会社)

ごとう たかし
後藤 孝 [6 章] (東北大学)

いとう あきひこ
伊藤 暁彦 [6 章] (東北大学)

つかもと ひであき
塚本 英明 [7 章] (名古屋工業大学)

は せ ぎかずひろ
長谷崎和洋 [8 章] (徳島大学)

かん の つとむ
菅野 勉 [9 章] (パナソニック株式会社)

こばやし いく お
小林 郁夫 [10 章] (東京工業大学)

くまかわ あきなが
熊川 彰長 [11 章] (宇宙航空研究開発機構)

上村 誠一 [12 章]

(2014 年 1 月現在)

ま え が き

傾斜機能材料は、スペースプレーンの開発をめざした宇宙開発プロジェクトにおいて、熱応力緩和を目的とした材料開発のために日本で生まれたデザインコンセプトである。このコンセプトは、単に宇宙開発で使われるだけでなく、さまざまな場面でわれわれの生活に役立てられている。強度と延性、耐食性と強度、審美性と強度、性能と経済性など、トレードオフの関係にある性質を同時に満たしたい場合、すなわち二律背反性の解決手段に傾斜機能材料のコンセプトは有効である。特にバルクとして必要な特性と表面において必要な特性が異なるような場面では、このコンセプトの威力が強く発揮される。また、同一材料で組成や組織が位置ごとに変化しているため、コンビナトリアルな実験の対象としても利用できる。

本書では、傾斜機能材料について、その基礎となる概念、製造および応用について、豊富な図をもとに丁寧に紹介する。まず、1章では傾斜機能材料の概念と歴史について、これまでに行われてきた大型の研究開発プロジェクトを中心に述べる。2章では金属およびセラミックス系傾斜機能材料の代表的な製造法について概説し、その中でも、現在最も代表的な製造方法である粉末冶金を用いた傾斜機能材料製造法については、3章で詳細に説明する。また、4章では連続的な組成傾斜形成が可能な遠心力を用いた製造法について、5章では傾斜構造塗膜に代表される高分子系傾斜機能材料の製造法について、6章では超硬合金工具への応用が可能な CVD による各種コーティング技術とその傾斜機能材料化について紹介する。傾斜機能材料は、設計-合成-評価の三つの過程を経て製造されるため、7章においては傾斜機能材料の評価法について説明する。8章および9章ではそれぞれ熱電と太陽光の分野および熱発電チューブにおけるエネルギー分野への応用について説明する。

生体組織はしばしば傾斜機能的な性質を有しており，傾斜機能材料の生体分野への応用は今後，活発に行われるであろう。また，傾斜機能材料の研究開発のきっかけとなった宇宙分野への応用についても研究が幅広く行われている。これらに関しては，それぞれ 10 章で生体分野，11 章で宇宙分野をとりあげている。最後の 12 章では，傾斜機能材料のコンセプトを応用して開発された工具材料，光ファイバ，腕時計および電気カミソリの内刃を例に，傾斜機能材料の産業での応用例を紹介する。

これらにより，読者の方が基礎的知識を確実に身につけられ，その基礎的内容を発展的に展開することによって実用化する流れを習得できると信じている。そして，本書により，傾斜機能材料のファンが一人でも増えれば光栄である。

最後に，編者の一人で著者でもある上村誠一博士が，2013 年 10 月 31 日に急逝されました。生前，この本が完成できなかったことは，残った編者として大変心残りです。ご冥福をお祈りするとともに，霊前にこの本を捧げます。

2014 年 1 月

渡辺 義見

目 次

1 章 傾斜機能材料の概念と歴史

1.1 傾斜機能材料の時代背景	1
1.2 傾斜機能材料の誕生	4
1.3 傾斜機能材料の概念の変遷	6
1.4 自然界にみる傾斜構造	8
1.4.1 竹	8
1.4.2 人 骨	9
1.5 研究開発プロジェクト	10
1.5.1 FGM パート I ・プロジェクト	10
1.5.2 FGM パート II ・プロジェクト	13
1.6 開発された代表的な実用傾斜機能材料	15
1.7 傾斜機能材料の今後	18
引用・参考文献	19

2 章 金属およびセラミックス系傾斜機能材料の製造法

2.1 製造法の分類	20
2.2 CVD 法	22
2.3 PVD 法	23
2.4 複合めっき法	25
2.5 溶 射 法	27
2.6 粉 末 冶 金 法	28
2.7 遠 心 鑄 造 法	30
2.8 組織制御による傾斜機能材料化	30

2.9 拡散による傾斜機能材料化	32
引用・参考文献	35

3 章 粉末冶金を用いた傾斜機能材料製造方法

3.1 各種焼結法の分類	36
3.2 粉末冶金法の基本概念	37
3.2.1 粉末冶金法（粉末プロセス）とは	37
3.2.2 液相焼結と固相焼結（ネックの形成と拡散現象）	39
3.3 各種焼結法	40
3.3.1 各種焼結法とその装置概要	40
3.3.2 加圧焼結法（HP 法と HIP 法）の焼結工程例	41
3.3.3 放電プラズマ焼結（SPS）法	43
3.4 SPS 法による傾斜機能材料の作製	52
3.4.1 SPS 法による傾斜機能材料創製の概念	52
3.4.2 SPS 法による傾斜機能材料作製方法と留意点	54
3.4.3 SPS 法による各種傾斜機能材料の創製例	58
3.4.4 実用材料としての傾斜機能材料	62
3.5 粉末冶金を用いた傾斜機能材料製造の今後	70
引用・参考文献	71

4 章 遠心力を用いた傾斜機能材料製造法

4.1 遠心力を用いた製造法の分類	76
4.2 遠心力スラリー法	78
4.2.1 遠心力スラリー法	78
4.2.2 遠心力スラリー投入法	80
4.2.3 溶融可能な固相を溶媒帯とした遠心力スラリー投入法	83
4.3 遠心力法	85
4.3.1 遠心力法とは	85
4.3.2 遠心力法で製造した金属/セラミックス系傾斜機能材料	86
4.3.3 遠心力固相法と遠心力晶出法	87
4.3.4 遠心力固相法における組成制御	89

4.3.5 板状粒子を含む系に遠心力固相法を適用した例	90
4.3.6 遠心力晶出法により製造した傾斜機能材料の組織	92
4.4 遠心加圧法	95
4.4.1 遠心力混合粉末法	95
4.4.2 遠心力混合粉末法により作製した傾斜機能砥石	98
4.4.3 遠心焼結鑄造法により作製した傾斜機能砥石	100
4.4.4 遠心力混合粉末法による母相金属の結晶粒微細化	101
4.4.5 遠心加圧法による生体用傾斜機能材料の作製	102
引用・参考文献	104

5 章 高分子系傾斜機能材料の製造法

5.1 高分子系の傾斜構造形成の特徴	107
5.2 傾斜構造形成のために考慮すべき因子	108
5.3 傾斜構造形成の例とその形成機構	109
5.3.1 エポキシ/アクリル樹脂混合溶液の自己組織化による傾斜構造形成	109
5.3.2 塗膜の表面と内部の反応速度差を利用した傾斜構造形成	116
5.3.3 反応速度差とポリマーブレンドによる傾斜構造の複合化	120
5.3.4 ポリマーブレンドの自己組織化による傾斜構造形成	124
5.3.5 ポリマーのポリマー溶液への拡散を利用した傾斜構造形成	126
5.4 高分子系傾斜機能材料の今後	128
引用・参考文献	129

6 章 コーティング技術とその傾斜機能材料化

6.1 切削工具向けコーティング	132
6.2 CVD による傾斜機能コーティング	134
6.3 光・熱分解レーザー CVD と連続発振高強度レーザー CVD	137
6.4 CVD による α - Al_2O_3 コーティング	139
6.5 レーザ CVD による α - Al_2O_3 コーティング	140
6.6 CVD による TiN および TiC コーティング	146
6.7 レーザ CVD による TiN コーティング	149
6.8 レーザ CVD による TiC コーティング	152

6.9 α -Al ₂ O ₃ /TiN 傾斜機能コーティング	154
6.10 TiON 傾斜機能コーティング	156
6.11 傾斜機能コーティングの実用化に向けて	157
引用・参考文献	158

7 章 傾斜機能材料の評価法

7.1 マクロ的特性の評価	161
7.1.1 遮熱性の評価	161
7.1.2 耐熱性の評価	164
7.1.3 実環境評価試験	167
7.1.4 小型パンチ試験による機械的性質の評価	169
7.1.5 破壊力学に基づく解析	171
7.2 ミクロ的特性評価	171
7.2.1 ミクロ組織、結晶構造評価	171
7.2.2 ナノ・ミクロ的機械的性質評価	172
7.2.3 熱応力評価	175
7.3 熱応力緩和型傾斜機能材料に関するマイクロメカニクス解析	176
7.4 傾斜機能材料の設計と評価	183
引用・参考文献	184

8 章 エネルギー分野への応用（1） 熱電発電と太陽光熱複合発電

8.1 エネルギー変換	186
8.1.1 エネルギーの変換効率の基本	186
8.1.2 熱エネルギーの変換効率	187
8.1.3 太陽からのエネルギーの基本概念	188
8.2 熱電発電	190
8.2.1 熱電半導体の原理	190
8.2.2 熱電発電モジュールの構造	191
8.2.3 カルノー効率と熱電変換	192
8.2.4 熱電変換材料	193

8.2.5 接合部の問題点	199
8.2.6 熱電発電モジュールの評価方法	200
8.3 太陽光熱複合発電	202
8.3.1 集光型太陽電池	202
8.3.2 集光システムおよび波長選択膜	203
8.3.3 太陽光熱複合発電（集光型太陽電池システム）の例	204
8.3.4 宇宙太陽光利用システム（SSPS）	205
引用・参考文献	207

9 章 エネルギー分野への応用（2） 低温熱源からのエネルギー回収

9.1 エネルギーと熱	210
9.2 低温熱源からの熱電発電	211
9.3 熱発電チューブの構造	213
9.4 傾斜積層構造と発電との関係	215
9.5 熱発電チューブの作製	219
9.6 発電性能と発電ユニットの構成	221
9.7 ごみ焼却熱を利用した発電	222
9.8 熱発電チューブを越えて	224
引用・参考文献	224

10 章 生体分野への応用

10.1 生体組織と生体材料	226
10.2 生体材料に求められる異方性と傾斜機能性	229
10.3 傾斜機能材料の生体材料への応用の可能性	231
10.3.1 ロータス金属	231
10.3.2 傾斜組織を有する環境浄化多孔質材料	232
10.3.3 気孔を内蔵するハイドロキシアパタイト/チタン傾斜機能生体材料の開発	233
10.3.4 ハイドロキシアパタイト含有ガラス/チタン傾斜機能複合材料の開発	234
10.3.5 その他の多孔質生体材料の傾斜機能化の研究開発動向	235

10.4 生体用傾斜機能材料の課題	236
引用・参考文献	237

11 章 宇宙分野への応用

11.1 高熱負荷機器と傾斜機能材料	239
11.2 ロケット燃焼器の構造と冷却	242
11.3 実用化に向けた研究	247
11.3.1 高温落差試験	247
11.3.2 軌道変換システム (OMS)	247
11.3.3 姿勢制御システム (RCS)	250
11.4 熱防護材	252
11.5 欧米の動向	256
11.5.1 米国における熱応力緩和型傾斜機能材料の検討事例	257
11.5.2 フランスにおける熱応力緩和型傾斜機能材料の検討事例	257
11.5.3 ドイツにおける熱応力緩和型傾斜機能材料の検討事例	258
11.6 熱応力緩和型傾斜機能材料への期待	258
引用・参考文献	259

12 章 傾斜機能材料の産業での応用例

12.1 傾斜機能材料のコンセプトを使用した商品	260
12.2 粉末焼結法および CVD 法を用いた工具材料への傾斜機能材料の コンセプトの適用	261
12.2.1 切削工具材料とは	261
12.2.2 粉末焼結法による傾斜機能超硬合金	264
12.2.3 CVD 法によるコーティング工具	267
12.3 光学分野への傾斜機能材料の応用	272
12.4 傾斜機能材料の腕時計外装への応用	278
12.5 傾斜硬度を持つ電気カミソりの内刃	283
12.6 傾斜機能材料化による付加価値の付与	289
引用・参考文献	289
索引	291

1章

傾斜機能材料の概念と歴史

傾斜機能材料はスペースプレーン（宇宙往還機）用の耐熱材料として1980年代半ばに産声を上げたが、いまでは生体材料，半導体材料，高分子材料などの分野にも浸透している。本章では傾斜機能材料の概念の変遷および材料開発の歴史を以下に紹介する。

1.1 傾斜機能材料の時代背景

1980年代から1990年代にかけて日本ではさまざまな材料概念が提唱された。それらはヘテロ構造材料，ナノスケールマテリアル（ナノマテリアル），ハイブリッド材料，バイオミメティック材料，インテリジェント材料，エコマテリアル，傾斜機能材料，ソフトマテリアル等で，これらの新規材料は研究者の創意工夫，時代の要請および国の政策とのマッチングによって生み出されたものである。昭和から平成にわたるこの時代は，日本経済のバブルとその崩壊，それに続く不良債権処理へとダイナミックに変化した時代で，材料分野でも材料概念が百花繚乱のごとく提案された。

これら新規材料はカタカナ表記が多く，材料の専門家であっても，どのような材料であるかがすぐにはわからない場合も少なくない。例えばヘテロ構造材料がある。ヘテロとは「異なる」という意味のギリシャ語由来の接頭辞で，ヘテロ構造は異種材料 A, B を原子・分子レベルで積層した界面 A-B（hetero-junction, ヘテロ接合）を持つ構造を指す。ヘテロ構造材料とはもともと半導体分野で用いられた用語で，界面で電荷が移動したりすることによって，それ

ぞれの材料だけでは発現しない現象を利用することができる材料を指している。

しかし現在では、金属材料分野でも用いられるようになってきた。ここでいうヘテロ構造には、巨視的には異なる金属の複合化から、微視的には格子欠陥の**不均一性** (heterogeneity) まで、また、物理的な不均一性から化学的な不均一性までが含まれる。つまり、金属材料分野では、ヘテロ構造材料は材料中に存在するさまざまな不均一性を利用した金属材料を指す。このように同じ用語でも利用される分野によって内容が異なるため、用語を聞いただけでは具体的にどのような材料かがわからない場合もある。

最初に紹介した八つの材料概念はおおまかに二つに分類される。一つは材料内部の構造に由来するもの、もう一つは材料の付加価値または代替価値に由来するものである。材料内部の構造に由来するものとしては、ヘテロ構造材料、ナノスケールマテリアル、ハイブリッド材料およびバイオミメティック材料がある。材料の付加価値または代替価値に由来するものとしては、傾斜機能材料、インテリジェント材料 (スマート材料)、エコマテリアル、ソフトマテリアルがある (図 1.1)。それぞれの材料概念を簡単に以下に紹介する。

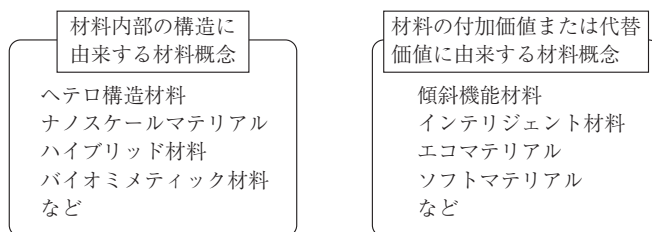


図 1.1 1980, 1990 年代に提唱された新たな材料概念

【材料内部の構造に由来する材料概念】

ヘテロ構造材料：異種材料の接合界面や材料内部の不均一性を利用することにより新しい機能が得られる材料を指している。

ナノスケールマテリアル：ナノスケールとは英語で 10^{-9} m 程度の大きさのことである。この材料概念は $10^{-7} \sim 10^{-9}$ m 程度の大きさの結晶、クラス

ター、微粒子やこれらで構成された材料を指している。粒子の微細化により新しい機能が見出されると考えられ、20世紀末から研究開発が活発化した。

ハイブリッド材料：ハイブリッドとは英語で「混成の、雑種の」という意味の形容詞である。この材料概念は、性質の異なった物質を原子・分子の大きさ (10^{-9} m 程度) のレベルで混合したり接合したりすることによって新しい機能が得られる材料を指している。組み合わせるという点でヘテロ構造材料と、ナノレベルという点でナノスケールマテリアルと似ているが、金属/セラミックスや無機半導体/有機材料のような大胆な組合せも対象としており、より広い材料概念といえる。

バイオミメティック材料：バイオミメティックとは英語で「生体模倣の」という意味の形容詞である。この材料概念は、生体構造を模倣した物質を人工的に合成して、新しい特性の発現や環境適合性の向上を狙った材料を指している。

【材料の付加価値または代替価値に由来する材料概念】

傾斜機能材料：もともとは材料内部で組成を傾斜（変化）させるという設計概念が基本となっている。これにより材料内部で性質を変化させることによって新しい機能が得られる材料を指している。

インテリジェント材料：インテリジェントとは英語で「利口な、聡明な」という意味の形容詞である。この材料概念は、既存材料の性質が時間とともに変化することに対応して自発的に信号を発生したり変化そのものを防ごうとする機能を付加された材料を指している。

エコマテリアル：エコとは英語の Environmentally Conscious（環境問題意識を持った）を略した言葉である。Ecological（環境保護の）の略ではないので、この材料概念は、有害物質を含まないように工夫されたり、リサイクルしやすいように処理が施されるなど、既存材料に低環境負荷性を付加した材料を指している。シックハウスの原因となる**揮発性有機化合物**（volatile organic compound, **VOC**）を含まない材料やフロンガスの代替

物質なども含まれる。

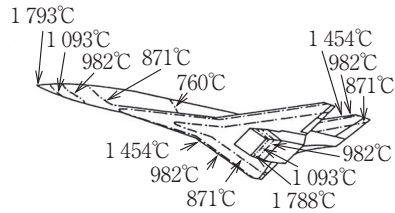
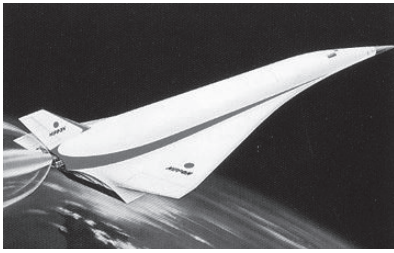
ソフトマテリアル：読んで字のごとく柔らかい材料の総称で、小さな分子がひも状につながった高分子、ゲル、ゴム、コロイド、ミセル、液晶、生体高分子（たんぱく質、DNA）、粘土等といった、金属やセラミックスなどの硬い材料と大きく異なった性質を有する材料を指している。

いずれの材料概念も、既存の材料を整理・分類するために生まれたものではなく、材料開発の立場から提案された新しい概念である。傾斜機能材料はもとも 1980 年代半ばのスペースプレーン構想に対応するために考案された新耐熱材料である。インテリジェント材料は、1985 年の御巣鷹山での日航機墜落事故を受けて、じわじわと進行する金属疲労破壊に対応するために研究が開始された。エコマテリアルは現在の地球環境問題に材料学的に対応するために 1990 年頃に提案された。また、ヘテロ構造材料、ナノスケールマテリアル、ハイブリッド材料、バイオミメティック材料は 21 世紀に向けてシーズを創出するために先行投資的に開発が始まった。いずれの材料概念も時代の要請を受けて誕生したのである。

1.2 傾斜機能材料の誕生

傾斜機能材料の基本概念とはそもそもなんなのであろうか。これを説明する前に、傾斜機能材料が誕生するに至った経緯を紹介する必要がある。1.1 節でも触れたが、事の発端はスペースプレーン構想である。

「21 世紀初頭には日本も世界の宇宙開発の中核的一翼を担う」ことを目的として、スペースプレーン構想が 1980 年代中頃に提案された。スペースプレーンとは地上と大気圏外とを往復する有人宇宙往還機（図 1.2 (a)）で、ジェット機とロケットを組み合わせたようなものである。アメリカのスペースシャトルとの大きな違いに、スペースプレーンはジェットエンジンとロケットエンジンを両方有していること、自力で地上の滑走路から飛翔するため補助ロケットを必要としないこと、30 回程度は無補修で飛行することなどがある。



(a) 日本版スペースプレーンのイメージ

(b) 運航時に予想される機体の表面温度

図 1.2 日本で提案されたスペースプレーン構想

大気圏内を長時間高速で飛行することを想定すると、図 1.2 (b) に示すように、機体の機首やエンジン前縁では 1800°C 近い超高温に達すると考えられる¹⁾。スペースシャトルの最高表面温度は約 1500°C （垂直尾翼前縁）で、スペースプレーンの機体のほうが約 300°C も高い温度にさらされることになる。機体表面温度が低いスペースシャトルでも機体表面のトラブルがたびたび報道されてきた。それは機体表面を覆っている耐熱タイルの剥離・脱落である。耐熱タイルは大気圏突入時の高温から機体を保護するという重要な役目を担っており、このタイルの剥離・脱落は機体および人命の焼失を意味する。スペースプレーンの機体を超高温から保護するためには新しい概念の耐熱材料が必要となった。そこで誕生したのが傾斜機能材料である。傾斜機能材料の基本概念を説明する前に、スペースシャトルで発生したトラブルの原因をつぎに紹介する。

スペースシャトルの機体表面には炭素繊維強化炭素基複合材料（C/C セラミックス）が耐熱タイルとして貼り付けられている。このタイルはスポンジ状で比重が約 $0.1 \sim 0.2$ と小さく、また遮熱性に優れている。金属製の機体上に貼り付けられたタイル表面が高温に加熱されると、耐熱性があっても金属機体の表面温度は相当上昇することになる。通常、温度が上昇すると材料は膨張する。例えば、鉄の熱膨張係数は室温近傍で $11.7 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ 、アルミニウムでは $23.9 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ と大きく、これに対して C/C セラミックス製の耐熱タイルの熱膨張係数は $\sim 3 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ 程度と小さい。耐熱タイルを貼った金属機体の温

度が上昇するとどうなるかを模式的に図 1.3 に示す。温度が上昇してもタイル（C/C セラミックス）はそれほど膨張しないのに対して、金属機体は大きく熱膨張する。そのため貼り合わせ界面には大きな熱応力が発生し、この熱応力が貼り合わせ強度よりも大きくなったときにタイルの剥離・脱落が生じる。これがスペースシャトルで発生したトラブルの原因である。

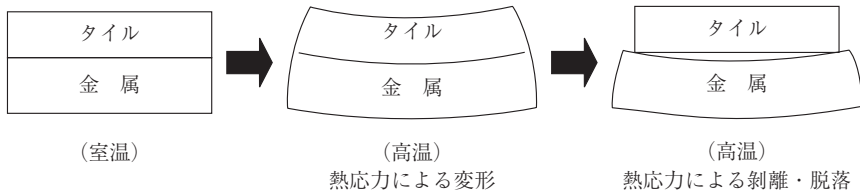


図 1.3 熱応力によってタイルと金属が剥離する様子

耐熱タイルの剥離を防止するためには、発生する熱応力を特定の貼り合わせ界面に集中しないように分散させることが必要となる。そこで提案されたのが、金属から耐熱タイルへと組成を連続的に変化させることにより、熱膨張係数を金属の大きな値から耐熱タイルの小さな値へと連続的に変化させた材料である。この新材料では界面近傍に発生する熱応力を 30% 以上低下させることが可能になった。**傾斜機能材料** (functionally graded materials, **FGMs**) の誕生である。なお、FGM という単数の省略形は、他との混同を避けるために 2013 年以降は公式には使われなくなっている。

1.3 傾斜機能材料の概念の変遷

傾斜機能材料とは、1.2 節で述べたように金属からセラミックスへと組成を連続的に変化させることにより熱膨張係数を連続的に変化させた材料で、高温で発生する熱応力の緩和を目的としたものであった。これが“元祖”傾斜機能材料である。各種材料の構成と諸特性の関係を図 1.4 に示す。複合材料では諸特性が接合界面において大きく異なり、特性に段差がある。熱膨張係数の段差は高温において大きな熱応力を発生させ、接合界面の破壊を招くことになる。

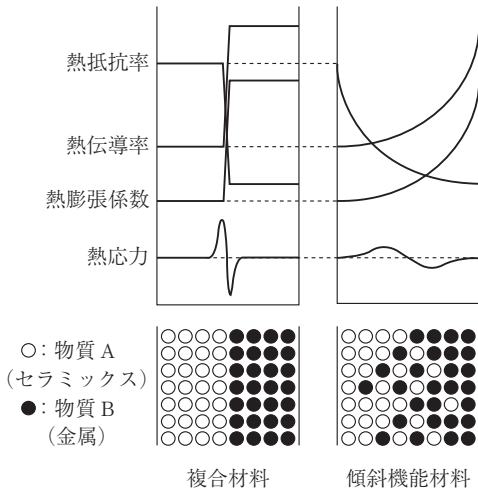
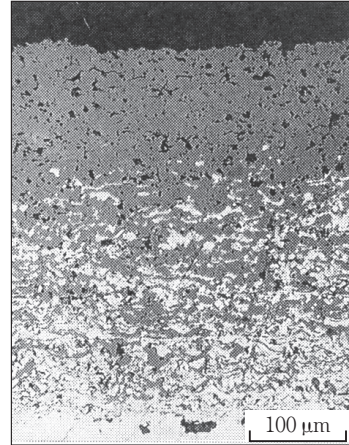


図 1.4 材料内部の物質構成と諸特性

図 1.5 PSZ/Ni-Cr-Al-Y 系の
傾斜機能材料

傾斜機能材料の場合には、組成が連続的に変化しているために特定の接合界面が存在せず、諸特性も連続的に変化する。熱膨張係数に段差がないため高温で発生する熱応力は 30% 以上低減することができ、超高温における接合界面の破壊を防ぐことが可能になった。傾斜機能材料の実例を図 1.5 に示す。図中で灰色に見えるのがセラミックスの**部分安定化ジルコニア** (partially stabilized zirconia, **PSZ**), 白く見えるのが耐熱金属の Ni-Cr-Al-Y 系合金である。厚さ方向に (図では下から上に向かって) 金属からセラミックスへと組成が連続的に変化していることがわかる。これに伴って、熱膨張係数も同様に連続的に変化している。

傾斜機能材料の基本概念は 1988 年に“元祖”傾斜機能材料よりも拡張され、それと同時に傾斜機能材料研究会が設立された²⁾。新基本概念では、「空間的に一つの機能から他の機能へと“連続的”または“段階的”に変化する一体の材料」となった。すなわち、組成変化の有無とは関係なく、機能 (熱膨張係数も当然含まれる) が連続的または段階的に変化した一体の材料を傾斜機能材料と称することにしたのである。

索引

【い】		【き】		酸化チタン 156
異方性材料 217		気孔率傾斜型 FGMs 53 軌道再突入実験 12, 168, 253		【し】
【う】		機能めっき 25 揮発性有機化合物 3 吸収性傾斜機能アパタイト 235		シェル・アンド・チューブ型
ウェルダブル FGM 超硬 67		急冷凝固法 219		熱交換器 213
ウォルフの法則 229		共沈降法 78		自己発熱反応合成法 36
宇宙太陽光利用システム 206		金属間化合物 87		姿勢制御システム 246
【え】		【く】		遮熱コーティング 244
液相焼結 39		空力加熱 167, 240 クリーブ 39 グレーデッドインデックス 17, 274		遮熱特性 161
遠心加圧法 95		【け】		重力倍数 76
遠心焼結鑄造法 100		傾斜機能材料 6		常圧焼結法 36
遠心鑄造 78		形状効果 57		昇温時間 58
遠心力 76		【こ】		焼結温度 58
遠心力固相法 89		極超音速飛行実験 12		焼結型 45
遠心力混合粉末法 95		誤差関数 33		焼結型基本アセンブリー 61
遠心力晶出法 89		固相焼結 39		焼結駆動力 44
遠心力スラリー投入法 80		コールドウォール式 CVD 135		焼結時間 58
遠心力スラリー法 78		【さ】		焼結法 38
遠心力法 85		サーメット 132, 263		省工程型高耐久性塗料 116
【お】		酸化アルミニウム 133		蒸発-凝固 40
オーミック接触 200		三次元ニヤネットシェーブ 69		真空蒸着法 23
温度傾斜焼結 37				シンクロトン放射光 X 線
温度傾斜焼結法 55				回折 176
【か】				【す】
化学気相成長法 22, 133				ステップインデックス 17, 273
化学蒸着法 22, 133				スパッタリング法 23
拡散 32, 39				スペースプレーン 4, 239
拡散クリーブ 48				スローアウェイチップ 261
カリフラワー状 145				寸法効果 57
カルノー効率 187				【せ】
				生体材料 226

ゼーベック効果 190
セラミックス-金属系熱応力
緩和型傾斜機能材料 54

【そ】

組成分布関数 54

【た】

体積拡散 40
太陽光熱複合発電 204
太陽定数 190
多重積層方式 55
炭化チタン 146
炭素繊維強化プラスチック 98

【ち】

窒化チタン 146
柱状晶組織 136
中性子回折 176
超硬合金 132, 263
沈 降 76

【て】

電位傾度 47
電気めっき 25
電磁界拡散効果 44
テンソル 217
電鑄法 243

【と】

等価回路 215

【な】

ナノインデンテーション 173
ナノポア 136

【ね】

熱 CVD 140
熱応力緩和型傾斜機能材料 166, 239
熱間等方圧加圧法 29, 36

ネック形成メカニズム 47
熱・電気伝導度傾斜型 FGMs 70
熱電半導体 195
熱発電チューブ 210
熱分解レーザ CVD 137
熱防護システム 253
燃焼合成法 36

【は】

ハイドロキシアパタイト 16, 226
ハイブリッド超機能材料 233
破壊力学 171
波長選択膜 203
パルス通電加圧焼結法 44
パワーファクター 192
バンドギャップ 196

【ひ】

光触媒機能 232
光ファイバ 17, 272
光分解レーザ CVD 137
微小重力場 76
非対角熱電効果 214
表面拡散 40

【ふ】

ファセット 150
ファン・デル・ワールス力 39
風 洞 167
不均一性 2
複合サイクルエンジン 240
複合めっき 25
付着強度 155
物理蒸着法 23, 133
部分安定化ジルコニア 7
プラズマ活性化焼結法 44
プラズマ励起 CVD 140
プレコート鋼板 116
粉末冶金 28, 36

【ほ】

放電プラズマ焼結法 36, 174, 221
保持時間 58
ホットウォール式 CVD 135
ホットプレス法 36
ポリ-L-乳酸 103
ポリマー 107
ポリマー系の傾斜機能材料 107
ポリマー系の傾斜構造材料 107
ポリマーブレンド 107

【ま】

マイクロメカニクス 177
マシンナブル FGM 超硬 67

【む】

無加圧焼結法 36
無次元性能指数 192
無電解めっき 25

【ゆ】

有機金属 CVD 140

【よ】

溶解性パラメータ 110
溶 射 27
溶媒帯 80

【ら】

ラーソン・ミラーパラメータ 201
ラム/スクラムジェット
エンジン 240

【り】

粒界拡散 40
粒成長 39
粒度配合焼結法 64

【れ】		レーザフラッシュ法	162	【ろ】	
冷間等方圧加圧法	29	連続発振高強度レーザ CVD	138	ロケットエンジン	240
冷却構造	243			ロケットプレーン	239
レーザ CVD	138			ロータス金属	231

【A】		【N】		SPS 表面処理	46
Al ₂ O ₃ /Ti/Ti-6Al-4V 合金系		NS 法	36	SPS 法	36, 174, 221
傾斜機能材料	61			SP 値	110
【C】		【O】		SSPS	206
CFRP	98	OLPF	272	【T】	
CIP 法	29	ON-OFF 直流パルス		TiC	146
CVD 法	22, 133, 267	通電効果	50	TiCN-Ni	132, 263
		OREX	12, 168, 253	TiN	146
【E】		【P】		TiON	156
ECAS 法	44	PAS 法	44	TPS	253
【F】		PECS 法	44	【V】	
FGMs	6	PECVD	140	VOC	3
FGM 超硬	62	PLLA	103	【W】	
【G】		PLS 法	37	WC-Co	132, 263
GI	274	PSZ	7	WC/Co 系超硬合金	52
【H】		PVD 法	23, 133	【X】	
HA	16	【R】		X 線回折	175
HCD 型装置	24	RCS	246	【Z】	
HIP 法	29, 36	【S】		ZrO ₂ (3Y)-ステンレス鋼系	
HP 法	36	SHS 法	36	傾斜機能材料	59
HYFLEX	12	SI	273	【ギリシャ文字】	
【M】		SPS 合成	47	α-Al ₂ O ₃	133
MOCVD	140	SPS 焼結温度	57	β-ジケトン錯体	141
		SPS 焼結時間	58		
		SPS 接合	46		
		SPS 表面改質	46		

—— 編 著 者 略 歴 ——

上村 誠一 (うえむら せいいち)

1961 年 京都大学工学部燃料化学学科卒業
1961 年 日本石油化学 (株) (現 JX 日鉱日石
エネルギー (株)) 入社
1972 年 日本石油 (株) (現 JX 日鉱日石エネ
ルギー (株)) 出向・転籍
1983 年 工学博士 (京都大学)
1995 年 日本グラファイトファイバー (株)
代表取締役副社長
1998 年 退任
1998 年 九州大学先端物質化学研究所非常勤
講師
2013 年 逝去

渡辺 義見 (わたなべ よしみ)

1985 年 名古屋工業大学工学部金属工学科卒業
1990 年 東京工業大学大学院博士後期課程修了
(総合理工学研究科材料科学専攻)
工学博士
1990 年 鹿児島大学助手
1992 年 北海道大学助手
1995 年 信州大学助教授
1997 年
～98 年 文部省在外研究員
(カリフォルニア大学バークレー校)
2005 年 名古屋工業大学教授
現在に至る

図解 傾斜機能材料の基礎と応用

Functionally Graded Materials — Fundamentals and Applications —

©Yoshimi Watanabe 2014

2014 年 5 月 7 日 初版第 1 刷発行



検印省略

編 著 者 上 村 誠 一
渡 辺 義 見
発 行 者 株式会社 コ ロ ナ 社
代 表 者 牛 来 真 也
印 刷 所 新日本印刷株式会社

112-0011 東京都文京区千石4-46-10

発行所 株式会社 コ ロ ナ 社

CORONA PUBLISHING CO., LTD.

Tokyo Japan

振替00140-8-14844・電話(03)3941-3131(代)

ホームページ <http://www.coronasha.co.jp>

ISBN 978-4-339-04629-8 (中原) (製本：牧製本印刷)

Printed in Japan



本書のコピー、スキャン、デジタル化等の
無断複製・転載は著作権法上での例外を除
き禁じられております。購入者以外の第三
者による本書の電子データ化及び電子書籍
化は、いかなる場合も認めておりません。

落丁・乱丁本はお取替えいたします