# 法政大学学術機関リポジトリ HOSEI UNIVERSITY REPOSITORY

PDF issue: 2025-07-17

# ジルコニア基複合材料の高温特性に関するナ ノ・ミクロ・マクロ連成評価

# KUDO, Tomoo / 工藤, 智朗

(出版者 / Publisher)
法政大学大学院理工学研究科
(雑誌名 / Journal or Publication Title)
法政大学大学院紀要.理工学研究科編
(巻 / Volume)
64
(開始ページ / Start Page)
1
(終了ページ / End Page)
8
(発行年 / Year)
2023-03-24
(URL)
https://doi.org/10.15002/00026300

# ジルコニア基複合材料の高温特性に関するナノ・ ミクロ・マクロ連成評価

Nono-, Micro- and Macro-scale Coupling Evaluations of High Temperature Characteristics of Zirconia Matrix Composites

# 工藤智朗

# Tomoo KUDO 指導教員 塚本英明

#### 法政大学大学院理工学研究科機械工学専攻修士課程

In the past decades, ceramic matrix composites (CMCs) have been attracting much attention for hightemperature structural applications. Ceramics are characterized by high hardness, high corrosion resistance, high heat resistance, high wear resistance, and low thermal expansion to be used for turbine blades of aircraft engines and others. It is important to not only improve fracture toughness but also creep and creep-fatigue resistances for high-temperature structures. In this study, SiC particles, SiC whiskers,  $\alpha$ -alumina (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) particles, Ni particles, Ti powders, and SUS304 powders were prepared and added to partially stabilized zirconia (PSZ) for enhancement of high-temperature strength of the materials through the interaction due to the stress-induced transformation of PSZ and strengthening by the additives. The effects of the additives on the strengthening of PSZ were investigated on nano-, micro- and macro-scale mechanical properties at elevated temperatures. Nano- and micro-scale indentation hardness, elastic modulus and damping properties were evaluated using high-temperature nanoindentation equipment. For macro scale properties, biaxial bending tests were conducted at RT and 300°C. The effect of the additives on mechanical characteristics of PSZ were investigated by a coupling of nano-, micro- and macroscale analysis at elevated temperatures.

Key Words : zirconia, creep, discharge plasma sintering (SPS), nanoindentation

# 1. 緒論

高温構造への適用を想定した複合材料として傾斜機能 材料が注目されている.二層接合系では高温環境下にお いて大きな熱応力が発生し,応力集中や界面剥離が生じ るのに対して,傾斜機能材料は耐熱・遮熱性に優れたセ ラミックスを高温側に,構造用として信頼性のある金属 を低温側に配置し,中間領域を両者の組成比が連続的も しくは段階的に変化する複合体で構成するもので,組成 分布の最適な傾斜化を通じて発生熱応力を低減し,熱応 力割れに対して大きな効力見せる.

しかし、実用化に関して破壊強度の改善が必要不可欠で あるのはもちろんだが、高温環境下の使用を想定する場 合、使用性能として耐クリープ特性および耐クリープ疲 労特性が要求される.本研究では、応力誘起変態という 高靱化機構をもつ PSZ(部分安定化ジルコニア)に注目し、 PSZにSiC粒子、SiCウィスカー、α-アルミナ(Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>)粒 子、Ni粒子、Ti粉末、SUS304粉末を添加し、PSZによ る応力誘起変態機構と強化剤による強化機構との相互作 用により更なる材料の高強度化を試みると共に、PSZの 高強度化に及ぼす添加剤の影響を、常温・高温でのナノ スケール、ミクロスケール、マクロスケールから調査し た.応力誘起変態とは、亀裂進展時に材料の内部組織が相 変態し、体積が膨張することで亀裂先端に圧縮応力がか かり進展を抑制するものである.

ナノ・ミクロスケールでは常温・高温ナノインデンテ ーションによる押込み硬さ,弾性率,ダンピング特性の評 価,マクロスケールでは常温・高温での均等2軸曲げ強度 の調査から強化添加剤が PSZ に及ぼす高温環境下での影 響,そのメカニズムを検討した.

# 2. 試料作製の手順

# 2.1 強化剤混合粉末の作製

ZrO<sub>2</sub>粉末には、粒径 62nmの PSZ 粉末(東ソー株式会 社, TZ-3Y-E)を用いた.また、添加剤として、Ni粒子、 Ti粒子、SUS304粒子、SiC粒子、SiC繊維、Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>粒子を 用意した. Ni粒子には粒径 74µm以下のNi粉末(ニュー メット株式会社), Ti粒子は粒径 45µm以下のTi粉末 (株式会社ニラコ)、SUS304粒子は粒径 149µm以下の SUS304粉末(株式会社ニラコ)を用いた.α-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>には粒 径 1µmの粉末(株式会社ニラコ)を用いた.α-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>には粒 径 1µmの粉末(株式会社ニラコ)を用いた.α-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>には粒 位学研究所)を用いた.これらの添加剤と基材(PSZ)の 粉末にエタノール(甘糟化学産業株式会社、特級、 99.5vol%以上)を入れて混ぜ合わせスラリーとし、これを 十分に乾燥させて均一な混合粉末を作製した.

#### 2.2 SPS 焼結体の作製

混合粉末を,カーボンウールを巻いた外径 30mm,内径 20.4mm,高さ 50mm の黒鉛製ダイに充填し,SPS チャン バーにセットした.焼結は,SPS (エスエスアロイ株式会 社,プラズマンキット焼結装置,CSP-KIT-02121)を用い て,圧力 30MPa,焼結温度 1473K,真空度 20Paで 10分間 行った.サンプルは 2 種類あり,ナノインデンテーション 試験用に前述の金型を用いて直径 20mm,厚さ 5mm,円 盤曲げ試験用に前述の金型を用いて直径 20mm,厚さ 1mmで作製した.Fig.1 に,内径が 20.4mm のグラファイト ダイの詳細および Fig.2 に各焼結サンプルを示す.



Fig.1 Graphite die set up with dimensions.



Fig.2 Photos of samples fabricated by SPS.

### 3. 性能評価法

# 3.1 ナノインデンテーション試験

ウルトラナノインデンテーションテスタ(株式会社ア ントンパール・ジャパン, UNHT<sup>3</sup>, UNHT<sup>3</sup> HTV)を使用し て, PSZおよび Ni, Ti, SUS304を vol50%添加した試料に 対して、ビッカース硬さ試験機により圧痕を付与し、25℃ (室温),300℃における圧痕による亀裂近傍に対して押込 み硬さ H<sub>IT</sub>,押込み弾性率 E<sub>IT</sub>,損失正接 Tanδを測定した.ま た、PSZ 試料に対して動的粘弾性測定を行い、活性化エ ネルギーについて解析した.測定は、真空下で行うものと して,先端形状が Bercovich の WC (タングステンカーバイ ド) 圧子を用いて,鏡面研磨済みサンプル表面に実施した. 測定条件は、負荷荷重を 80mN,負荷時間、最大荷重保持時 間,徐荷時間を 30,30,30 秒とした.以下に使用した式と導 出方法を示す.

$$H_{\rm IT} = \frac{F_{\rm max}}{A_{\rm p}} \tag{1}$$

$$A_{\rm P} = C_0 h_{\rm c}^2 \tag{2}$$

 $F_{max}$ は最大試験力(N),  $A_p$ は接触投影面積(m<sup>2</sup>),  $C_0$ は圧子形状によって決定する係数であり(Berkovich は  $C_0$ = 24.5),  $h_c$ は押し込み深さ(nm)を表している[1].

$$E_{\rm IT} = \frac{1 - (v_{\rm s})^2}{\frac{1}{E_{\rm c}} - \frac{1 - (v_{\rm s})^2}{E_{\rm c}}}$$
(3)

$$E_{\rm r} = \frac{\sqrt{\pi}}{2\beta} \times \frac{S}{\sqrt{A_p}} \tag{4}$$

 $ν_{s}$ は試料のポアソン比(-), $v_{i}$ はインデンター圧子のポ アソン比(-), $E_{i}$ はインデンター圧子の弾性率(GPa),S は接触剛性(N/m),βはインデンター圧子の形状補正係 数(Berkovich は β=1.034)をそれぞれ表している.

動的粘弾性測定はバネとダッシュポッドが直列につな がった力学モデル(マックスウェルモデル)で説明する ことができ、応力が加わったとき以下の式が成り立つ.

$$\frac{\mathrm{d}\sigma(t)}{\mathrm{d}t} + \frac{1}{\tau}\sigma(t) = \mathrm{k}\dot{\varepsilon} \tag{5}$$

定常流動では以下の式が成り立つ.

$$\sigma(t) = \mu \dot{\epsilon} \left( 1 - \exp\left( -\frac{t}{\tau} \right) \right) \tag{6}$$

$$t = \frac{\mu}{k} \tag{7}$$

εはひずみ, k はバネ定数, μ は粘度, τ は緩和時間を表している.また, 複素数を用いて表すことができ,以下の 式が成り立つ.

$$G = k \frac{\omega^2 \tau^2 + i\omega \tau}{1 + \omega^2 \tau^2} = G' + iG''$$
(8)

$$G' = k \frac{\omega^2 \tau^2}{1 + \omega^2 \tau^2}$$
(9)

$$G'' = k \frac{\omega \tau}{1 + \omega^2 \tau^2} \tag{10}$$

$$\frac{G''}{G'} = \frac{1}{\omega\tau} = \tan\delta \tag{11}$$

G(複素弾性率)に対し、実部と虚部をそれぞれ G'(貯蔵弾性率)、G"(損失弾性率)とすると、複素平面上において G と実軸がなす角が  $\delta$ となり、 $tan\delta$ は損失弾性率と貯蔵弾性率の比を表している[2].

ωは角周波数であり本研究では 62.8 rad/s で行った.

$$\dot{\varepsilon}_{c} = A\sigma^{n} \exp\left(-\frac{Q}{RT}\right)$$
 (12)

*ċc*は定常クリープひずみ速度,A は定数,n(本実験では n=1とする)は応力指数,Qは活性化エネルギー,R は気 体定数,Tは絶対温度を表す.また,式(12)は以下のよ うに展開することができる[3].

$$\ln\left(\frac{\dot{\epsilon}c}{\sigma}\right) = -\frac{Q}{RT} + \ln(A) \tag{13}$$

式 (13) より,  $\ln\left(\frac{\varepsilon c}{\sigma}\right) \geq \frac{1}{T}$ のグラフの傾きから活性化エネ ルギー求めることができる.

## 3.2 微細構造観察·元素分析

走査型電子顕微鏡(日立ハイテク株式会社,SEM, SU8020) とエネルギー分散型X線分光法(EDX)を使用して,圧痕 周りの組織観察と元素マッピングを実施した.観察にはナ ノインデンテーション試験で使用済みのサンプルに炭素 蒸着させたものを用いた.

## 3.3 円盤曲げ試験

インストロン型引張試験機(株式会社島津製作所,オー トグラフAG-10TA)を用いて、サンプルに平衡二軸面応力 を発生させる円盤曲げ試験を実施した.変位速度は 0.05mm/minに設定した.Fig.3に曲げモーメントを受ける サンプルの様子を、Fig.4にサンプルにバランスの取れた二 軸曲げ応力を生成する円盤曲げ試験用のサンプルホルダ ー部分の概略図を示す.円盤曲げ試験から、引張面のひず みεは式(18)を、最大曲げ応力σは式(19)を用いて算出し た.

$$\varepsilon = \frac{t\omega}{2r_i^2} \tag{14}$$

$$\sigma = \frac{_{3P}}{_{4\pi t^2}} \left\{ \frac{(1-\nu)(r_0^2 - r_i^2)}{R^2} + 2(1+\nu) ln\left(\frac{r_0}{r_i}\right) \right\}$$
(15)

 $\epsilon$ は表面ひずみ(-),tは試験片の厚さ(mm), $\omega$ はたわみ(mm), $\mathbf{r}_i$ はロッド半径(mm), $\sigma$ は最大曲げ応力(MPa),Pは荷重(kN), $\nu$ はポアソン比(-), $\mathbf{r}_0$ は治具フランジ半径(mm),Rは試験片半径(mm)をそれぞれ表している[4].



Fig.3 Schematic illustration of the samples subject to bending moment.



Fig.4 The part of the sample holder for disk bending tests producing balanced biaxial bending stresses in the samples.

### 4. 結果と考察

# 4.1 ナノインデンテーション試験の結果

# 4.1.1 亀裂付近での測定

Fig.5 (a)に常温(b)に高温での PSZ, (c)に常温(d)に高温で の Ni 添加試料, (g)に常温(h)に高温での Ti 添加試料, (k)に常温(l)に高温での SUS304 添加試料のナノインデンテ ーション, Fig.5(e)に常温(f)に高温での Ni 添加試料, (i)に 常温(j)に高温での Ti 添加試料, (m)に常温(n)に高温での SUS304 添加試料の EDX 解析による亀裂付近での圧痕の 様子を示す. また, Fig.6 から Fig.8 に常温での, Fig.9 か ら Fig.11 に高温での EIT, HIT, Tanô,

Fig.6, Fig.7 より常温での PSZ に関して圧痕なしに比べ て圧痕の亀裂付近で測定した EIT, HIT が大きくなった. これは,式(1),(2),(3),(4)より Ap(接触投影面積)が 小さくなったことが原因と考えられるが,圧痕付近での Apが小さくなった理由としては応力誘起変態による体積 膨張が考えられ,この結果から亀裂や圧痕などのある付 近では応力誘起変態が起きやすいことも分かった.

また, Fig.9, Fig.10より高温では PSZ の EIT, HIT が圧痕 なしと圧痕の亀裂付近とでほとんど同じ値を示したこと から高温環境下では応力誘起変態による体積膨張が起き なかったと考えられる.

画像から添加材付近及び,添加材を測定している箇所 が確認できるが,添加材を測定している点,PSZ を測定 している点に関係なく測定したすべての箇所で添加材の 影響が出ており,このことから PSZ 内で添加した Ni, Ti, SUS304 は化合物を形成していると考えられる.

Fig.8, Fig.11 より常温に比べて高温では PSZ のダンピ

ング特性が向上しており、ダンピング特性とクリープの 関係から高温時に常温に対して荷重が加わった時の変形 量は増加することが推測される.また,添加材により Tano の値が大きくなっており、ダンピング特性の向上が 確認できたが、特に Ni を添加した時が最も顕著であった. EDX 画像(e), (f)より(c)の③, ④, (d)の③, ④はそれぞれ PSZ, Ni 部分を測定していることが確認できるが, Fig.7, Fig.10 では Ni を測定している④の硬さが③よりも小さく, Niの影響が出ており, Fig.8, Fig.11 では Ni を測定してい る④の Tan $\delta$  が③より大きくなっていることが確認できる.

また,Niを添加した場合ではTanδの値が常温・高温共 に上昇し, SUS304 を添加した場合は常温に比べて高温で はTanoの値が大きくなっており、反対にTiを添加した場 合は常温に比べて高温での Tanδ の値が低下しており、ま た Fig.6, Fig7, Fig.9, Fig.10 より Ti を添加した試料では EIT, HIT の値が常温・高温共に大きな変化がないことが 分かった. また, 常温において SUS304 の添加で Ni, Ti 同様に弾性率が低下したが硬さの大幅な減少は見られな かった。そして, EDX 画像(e), (f), (m), (n)より Ni, SUS304 を添加した試料に関しては亀裂が添加材で止まっ ていたり添加材を避けるように進展しているが, Ti を添 加した試料に関しては EDX 画像(i), (j)より亀裂が添加材 を跨いで進展していることが確認できた. Ti とは本来耐 蝕性に優れた金属であるが、それは Ti が酸素との結合力 が高く瞬時に酸化被膜を形成し、それが安定した不働態 であり、それ以上酸素を通さないためである. そのため、 Ti が焼結時に PSZ の O₂部分と結合したことが考えられ, (i), (j)の EDX 画像より Ti 内部に PSZ が分散されているこ とが確認できる.

(b)













\_10µm⇔ <mark>Ni</mark>









\_10µm⇔



<u>\_10µm</u>⇔

(1)





Fig.5 Indentation image and EDX image near the crack



Fig.6 Nanoindentation EIT parameter at room temperature



Fig.7 Nanoindentation HIT parameter at room temperature



Fig.8 Nanoindentation Tano parameter at room temperature



Fig.9 Nanoindentation EIT parameter at high temperature  $(300^{\circ}C)$ 



Fig.10 Nanoindentation HIT parameter at high temperature  $(300^{\circ}C)$ 



Fig.11 Nanoindentation Tan $\delta$  parameter at high temperature (300°C)

#### 4.1.2 動的粘弾性測定による活性化エネルギーの解析

Fig.12 に式(13) より PSZ の 300, 400, 500, 600℃で の動的粘弾性測定から得られた活性化エネルギーを表す グラフ, Fig.13 に各温度での粘度, Fig.14 には円盤曲げ試 験の式(14) より得られるひずみ速度( $\dot{\epsilon}$ ), ナノインデ ンテーション試験により得られた粘度( $\mu$ ),緩和時間 ( $\tau$ )を式(6) に示すマックスウェルモデルの構成式に当 てはめることでナノ・ミクロ・マクロの連成した応力ひ ずみ線図を示す. Fig.12 より活性化エネルギーは 14.39kJ/mol となった. 活性化エネルギーとは原子の拡散や転位の移動に必要な エネルギーを表しており,ジルコニアなどのセラミック スは転位の存在・移動が容易でなく,高温環境下におけ る変形は拡散クリープが主であるため今回得られた活性 化エネルギーは熱拡散によるものと考えられる.

また、Fig.12より、温度が大きくなるとひずみ速度と応 力の比が大きくなっており、ひずみ速度と応力の比が粘 度の逆数であることから温度が上昇すると粘度が小さく なると考えられる.そして、Fig.13より温度が大きくなる 程粘度が小さくなることが分かり、Fig.14より温度が大き くなる程最大応力が低下していることから温度上昇によ りひずみ速度が大きくなることは明らかであり、それに 伴いひずみも増加することが考えられる.



Fig.12 Activation energy determined from DMA



Fig.13 Relationship between viscosity and temperature



Fig.14 Stress-strain diagrams determined from DMA

## 4.2 円盤曲げ試験の結果

Fig.15 から Fig.20 に常温, Fig.21 から Fig.26 に高温での 試料に面内二軸応力を負荷する円盤曲げ試験にて得られ た応力-ひずみ線図を示す.

Fig.15, Fig.16, Fig.17 より添加材として PSZ と同じセ

ラミックスである Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, SiCp(粒子), SiCw(繊維)を 添加すると曲げ応力は低下したが、ひずみが増加するこ とが確認でき、特に Al2O3の vol5%で大幅にひずみが増加 した. また, Fig.18, Fig.19, Fig.20 より添加材として金 属である Ni, Ti, SUS304 を添加すると曲げ応力はセラミ ックスを添加したときと同じく低下し、Ni, Ti でひずみ の増加が確認できたが、SUS304 を添加した試料では添加 率が増加するほど曲げ応力,ひずみ共に減少した. Vol4%, vol5%では曲げ応力が急激に増加していくことな く破断していることが確認できる.これは添加した SUS304の粒径が149µm以下と添加材の中では一番大きく 焼結した際に凝集ができやすくなり、添加率が増えるほ ど応力、ひずみが低下していることからも凝集が原因と 考えられる.また、ナノインデンテーションでの結果か らNi添加試料のTanδが増加しており、金属添加材の中で Ni を添加したときが最もひずみが増加する傾向になりダ ンピング特性とひずみの相関性が確認できた.

ナノインデンテーションでの高温試験と常温試験の Tanδの結果とクリープの関係から高温では常温よりもひ ずみが増加することが予想され、PSZ 単体では高温時に ひずみが増加していることが確認できたが、Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、SiCp, SiCw, Ni, Ti, SUS304 添加試料の各応力-ひずみ線図で は高温でのひずみが常温でのひずみよりも小さくなると いう結果になった. Fig.21 の Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>添加試料では 1vol%, Fig.22 の SiCp 添加試料では 4vol%, 5vol%, Fig.23 の SiCw 添加試料では 1vol%, 2vol%, Fig.24 の Ni 添加試料では 3vol%, 5vol%, Fig.25 の Ti 添加試料では 2vol%, 4vol%, Fig.26 の SUS304 添加試料では 2vol%の最大応力が高温時 の PSZ に比べて大きくなることが分かった.

Fig.27, Fig.28, Fig.29, Fig.30 からも高温環境下では PSZ に比べて強化剤添加試料ではひずみが小さくなり, 最大曲げ応力が大きくなっていることが確認でき,4.1.2 の結果より高温時, PSZ の応力が小さくなりひずみが増 加していることは傾向に即しているが,添加材を添加し ている場合ではひずみが低下し,応力が増加しているこ とから,添加材により拡散が阻害され高温環境下におけ る変形が抑制され応力の増加につながったと考えられる.

また,4.1.1 の結果より常温・高温共にダンピング特性 の向上が最も顕著であったNiの添加ではFig.29,Fig.30よ り添加量が増えるほど最大応力が増加し,最大ひずみが 減少することが確認できる.tanδ は材料の粘性と弾性の 比でありNiの添加により粘性が増加していることが考え られ,4.1.2 より粘性の増加は最大応力の低下,ひずみの 増加につながることが分かっているが,高温曲げ試験で は逆の結果になった.これはジルコニアの応力誘起変態 が起因していると考えられ,Fig.29,Fig.30よりNiのよう に添加量を増やすほど最大応力が増加する場合と添加量 が増えるほど最大応力が低下する場合があり,両者の熱 膨張率の差に起因する熱応力が影響すると考えられるが, 一概に添加量を増やすことが応力誘起変態を促進するこ とにつながるわけではないことが分かる.

そして、応力誘起変態は相変態による体積膨張によっ て起きるが、高温環境下では亀裂発生時以外でも相変態 が起きてしまうため今後は相変態の制御について検討し ていく必要性がある.



Fig.15 Stress-strain diagrams of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> added sample at room temperature



Fig.16 Stress-strain diagrams of SiCp added sample at room temperature



Fig.17 Stress-strain diagrams of SiCw added sample at room temperature



Fig.18 Stress-strain diagrams of Ni added sample at room temperature



Fig.19 Stress-strain diagrams of Ti added sample at room temperature



Fig.20 Stress-strain diagrams of SUS304 added sample at room temperature



Fig.21 Stress-strain diagrams of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> added sample at high temperature(300°C)



Fig.22 Stress-strain diagrams of SiCp added sample at high temperature(300°C)



Fig.23 Stress-strain diagrams of SiCw added sample at high temperature(300°C)



Fig.24 Stress-strain diagrams of Ni added sample at high temperature(300°C)



Fig.25 Stress-strain diagrams of Ti added sample at high temperature(300°C)



Fig.26 Stress-strain diagrams of SUS304 added sample at high temperature(300°C)



Fig.27 Maximum stress at room temperature



Fig.28 Maximum strain at room temperature



Fig.29 Maximum stress at high temperatures  $(300^{\circ}C)$ 



Fig.30 Maximum strain at high temperatures (300°C)

# 5. 結論

本研究では Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, SiCp, SiCw, Ni, Ti, SUS304 を PSZ に添加したときの高温環境下でのクリープ・破壊挙動を 調査した.以下に得られた結論を記す.

- ・ナノインデンテーション試験より亀裂や圧痕付近では
   応力誘起変態による体積膨張が起きやすいことが分かった。
- ・ナノインデンテーション試験よりNi、Ti、SUS304の添加によりダンピング特性が向上することが分かり,特にNiを添加した時が最も顕著であった.
- 動的粘弾性測定よりクリープ及び活性化エネルギーの 解析が可能であることが分かった。
- ・添加材により高温環境下での変形が抑制され、最大応力を増加させることが分かった。
- ・添加材の種類や添加量によってクリープ・破壊挙動を 制御できることが分かった。

**謝辞**:本研究を進めるにあたり大変お世話になりました塚 本英明教授に深く感謝いたします,また,実験をお手伝い いただきました本学構造・機能先進材料研究室の学部4年 の関根大氏,平野治人氏には大変お世話になりました.御 礼申し上げます.

#### 参考文献

- [1] Erqiang Liu, Hefeng Wang, Gesheng Xiao, Guozheng Yuan, Xuefeng Shu: Creep-related micromechanical behavior of zirconia-based ceramics investigated by nanoindentation, Ceramics International 41 (2015)12939-12944
- [2] 牛尼清治: 塗膜の粘弾性, 塗料基礎講座(第 VII 講)
   色材, 62[2] (1989) 100-107.
- [3] F.Khodabakhshi, M Zareghomsheh, G Khatibi: Nanoindentation creep properties of lead-free nanocomposie solders reinforced by modified carbon nanotubes, Materials Science & Engneering A 797 (2020) 1-14
- [4] T. Ishizuka, Y. Ohta, K. Wakashima: Functionally Graded Materials (1996), p.123-130.
- [5] P. M. Sargent and M. F. Ashby, Materials Science and Technology, 8 (1992) 594.
- [6] Yoshitaka Kubota, Masahiro Ashizuka, Eiich Ishizuka and Takashi Mitamura: Journal of the Ceramic Society of Japan 102 (1994) 708-712
- [7] J. Japan Inst. Metals, Vol. 58, No.7 (1994), p. 728-733.
- [8] Anthony C. Fischer-Cripps, Ph.D: Nanoindentation Second Edition Springer MECHANICAL ENGINEERING SERIES