設計者が欲しがる材料特性

非酸化物セラミックス系材料の設計に
求められる特性

秋 宗 淑 雄*

1. 緒 言

非酸化物系セラミックスで考慮される主な特性値は、物性値に近い比熱、熱膨張率、熱伝導率などやセラミックス材料としての本来の特性値である密度、強度、靱性値、耐酸化性などであり、物質創生や材料開発の立場から精力的に研究がなされている。

一方、このような材料を使う立場から見ると材料の適用可否を判定する時には前記特性値だけではなく、適用する装置の特徴をよりよく引き出すための耐衝撃性や経年の耐久性を示す寿命などの値が重要になってくる。設計者からみると、非酸化物セラミックスを用いた製品を世に出す立場から特に装置類の性能維持にかかわる特性を重要視して製品開発に取り組んでいるのであり、特性値のとらえ方が材料屋とは少し異なっていると思える。ここでは、特に後者の商品を生み出す設計者から見た材料特性について考えていきたい。

2. 材料の特性値

(1) 材料屋から見た特性値

セラミックス材料の特性値については数多くの測定方法があり、JISにより制定された方法も数多い。基本物性では密度(R1600)、弾性定数(R1602, R1605)、熱特性では熱膨張係数(R1618)や熱拡散係数、比熱の測定方法(R1611)である。時間非依存型特性値では強度(R1601, R1604, R1606, R1608)、破壊靱性値(R1607, R1617)、硬度(R1610, R1623)について制定され、時間依存型特性である静疲労(R1612)、繰返し疲労寿命(R1621)、耐食性(R1614)、耐酸

化性(R1614)、耐磨耗性(R1613, R1615)についても制定されている。今後は高温での繰返し疲労寿命などの制定が計画されているところである⁽¹⁾。

これらの材料特性はセラミックスの多結晶体として測定された値であり、いわゆるカタログに材料特性として掲載されている例が多い。窒化ケイ素について例を挙げると密度、強度(室温、高温)、靱性値(室温)などJIS準拠の測定値を表示したカタログもある。これらの特性値はセラミックス材料製造時や購入者が受入検査をする時の検査基準としての意味合いで用いられる。強度特性や靱性値は高ければ高いほど良い望大特性で有り、製造技術の進展で改良された場合にカタログ中で書き換えられていく例が多いと見られる。

(2) 設計屋から見た特性値

一方、装置類を設計する立場から見ていくと、最も必要な特性はエンジンなら出力やトルクであり、タービンなら熱効率であり、エンジンやタービンの保証年数となる。また、プレス機械装置なら最高圧力や利用回数となり、材料が何であれ装置機能を満たすように造ることが使命である。

例えば、工業技術院のムーンライト計画の一環でスタートしたセラミックスガスタービンプロジェクト⁽²⁾においても目標値は軸出力、熱効率、入り口温度、排ガス特性を挙げ、利用すべきセラミックス材料の特性値には高温強度(1773 K)と破壊靱性値を掲げている。エンジン諸元としては出力、熱効率、質量、装置サイズ、比出力であり、タービン形式、燃焼器形式、熱交換器形式が示されている。ここで重要なのは装置設計の諸元が優先事項であり、セラミックス材料として開発の目標値は示されているものの、高温での特性を満たす材料があれば設計者の目標達成という訳けではないという考

* 産業技術融合領域研究所単略研究室戦略研究官(〒305-8562 つくば市東1-1-4)

Properties of Non-Oxide Ceramics for Design; Yoshio Akimune(National Institute for Advanced Interdisciplinary Research, Tsukuba)

Keywords: *robust design, mechanical properties, ALN, Si₃N₄ thermal properties, non-oxide ceramics*

2000年7月18日受理

えである。というのも、タービンの定格運転における材料特性を満たしていても、装置の運転条件が変われば材料の使われる環境が変化する。例えばタービンの場合、運転直後はまだ低温で内側から高速に昇温している状態であり、定格運転での負荷と異なった入力予測されるが、これをクリアできて初めて、定格運転での特性値が評価されるのである。

材料屋としては最終目標値をクリアすることに注力し、高温強度の向上を目的とした研究を実施する。ところが、1773 K での高温強度を改善したために 1273 K での特性が不十分な材料を利用することも起こりうると考えられる。また、高温強度を持たせるために全体強度をあげる手法もとられることもあると思われるが、高温では劣化し始めていることは明白であり、けしてこのような材料開発が期待されているわけではない。設計者は常温から 1273 K では今までどおりの機械性能を発揮できかつ 1773 K までもその性能を維持できる材料がほしいわけである。

3. 装置設計に必要な特性値

(1) 装置設計の考え方

ここでは自動車用部品等の量産製品のロバスト設計技術について考えていく。特に大切な考え方は、すべての製品が設計図どおりできているものではなくすべての製品は機能にばらつきを持つので、このばらつきを如何に減らすかつ「機能を乱す原因を少なくしていくこと」という品質問題をクリアしていくことが重要である。この考え方の中で材料や材質の選定が行われるものであり、このような考え方が品質工学のなかでパラメーター設計としてうたわれている⁽³⁾。これは、いかに製造時から利用時まで環境変化に影響されない頑強な製品を造るかであり、極寒の地でも灼熱の砂漠においてもエンジンがスムーズにスタートできることが要求されているのであり、これにこたえる設計技術が適用されているのである。

パラメーター設計⁽³⁾⁽⁴⁾では、基本機能は入力信号と出力特性に比例関係が成立することが重要であり(図 1)、多くの他の因子も少なからず影響をする。その影響に振られることなく性能を発揮するには入出力の比(傾き)を格段に大きくできるように開発することが重要(図 2)である。一例として、1980年代のセラミックスターボチャージャーロータやグロープラグの開発では⁽⁵⁾⁽⁶⁾、比重が格段に小さく耐熱性も高いセラミックの活用で一気に達成できたものである。図 2 からは、ばらつきの小さい領域では機能の安定性を確保してから調整因子でエンジンの要求特性に合わせていく方法が有利であり、設計者のアプローチ方法として理解しておきたい。

前述のセラミックガスタービンを考えても出力特性のバラツキの少ない装置諸元が第一に検討され、次に運転因子、部品形状などを決めていく過程が重要である。金属と異なる特性値を有するセラミック材料の利用に関しては、バラツ

図 1 入力(例えば荷重)に対する出力(例えば歪)の関係。

図 2 直線性の乱れと傾きの向上。

キの小さい領域で入出力の比が大きい装置をどう設計できるかをもたらすものである。これは、材料特性は分かっている、顕在化していない多くの装置パラメーターの解決も含まれており、設計段階では不可分な設計上の技術課題をもダイレクトに解決していくという極めてチャレンジングな開発例であると言える。

(2) 設計者の必要とする非酸化セラミックスの材料特性値

装置設計者からみると部品の出力特性のみならず、どんな実験にも耐えられる材料の耐久性がないことやメーカーごとに違う特性が頭痛の種である。自動車用のエンジン関連部品の例を挙げると、金属部品の代わりに非酸化セラミックスを用いてエンジン特性の差異を検討するわけであり、材料屋から見ると簡単に差し替えて実験できると想像しがちであるが、けして簡単ではない。実験準備中の部品の破損やエンジンの燃焼不具合により中断を余儀なくされる例が多いのが実状である。プラグのように簡単に交換できるものは良いが、

エンジンの主運動部品でみるとエンジンブロックの鋳造工程から関係し各種金属部品と同様に組み付けつつ、各製造工程で行われる簡便な性能試験をクリアして試作エンジンが出来上がるのである。セラミックス部品ではこのような工程に絶えられないケースがまま有り、性能実験に至らないこともある。それでもここまですべてクリアしてやっと本来のエンジンテストに移るが、性能は如何にと思いきや、試運転や分解調査が引き続き行われ、エンジン特性評価値はすぐに得られない。このようなテスト形態は材料屋からはすぐに試してほしい性能ではなく、エンジン部品としての材料特性表にない「あたりまえ品質」と呼ばれる内容であるが、設計者は最も気にして調査する部分である。

また設計者は、メーカーごとに違う特性にも不安感を持ち結局は「JIS にない材料を使うのはペンディングします。」となってしまうケースが多いと考えられる。それでも設計者の立場だと JIS に乗っていない材料を使うことは、高性能化の可能性を少しでも見出そうと努力した結果でもあり、いわゆる特性値に出ないパラメーターの検出に終わってもその努力には敬意を払いたい。一方のセラミックス製造メーカーは、設計屋が欲しいような非酸化物系セラミックスの材料 JIS 化など眼中にないようでもある。JIS に載ると設計者の目に触れる機会を増すばかりでなく、供給される材料特性の多品種化や安定化にもつながり、装置設計を推進することが可能となる重要な事項であると考えているがなかなか実行には移されないのである。

(3) 特性値の実用例

もちろん装置設計本来の問題も多々あるのが実情である。金属部品との組み合わせについての不具合はほとんどが熱に関する内容である。熱膨張率の違いにより発生する熱応力をもたらす影響は深刻であり、非酸化物系セラミックスでは熱膨張係数が低いので実際上の影響を大きくすることもある。最も多いのが剥離や部品間のすきまが開くことによる水漏れやそのために発生する異音である。初期段階で出ていなくても数十時間の実験過程や耐久試験中に発生することもあり、注意深い設計が必要になるが、クリアランスがないなど寸法上対策が取れないことも多く不採用の評価を受ける結果となってしまう。

最近の記事には1990年代の非酸化物セラミックス応用例のひとつに放熱基板用のセラミックスが掲載されている⁽⁷⁾。この用途はセラミックスの絶縁性と熱伝導率向上による放熱性向上によるものであり、静的な使用条件下での活用であり、期待される用途である。材料としては AlN や Si₃N₄ 材料が候補になっていると見られる。ここでは、発生する問題の原因は同じで材料特性から見ると熱膨張係数と熱伝導率であろう。熱膨張係数は基板上に印刷した回路の金属材料との剥離にかかる問題であり、剥離に関しては利用環境化を模擬した熱サイクル試験(約 230 K から約 400 K まで)を行い試

図3 セラミックス基板における熱抵抗の比較。

図4 ガスタービンの燃焼筒に発生した熱応力。

験することになる。これは、回路基板材料と回路材料の接合に関するものであり、実験を重ねることで改良されていくものと考えられる。

材料選択上、設計者が考える熱伝導パラメーターについては、熱伝導率だけでなく部品形状を加味した熱抵抗として考えていくことがある。 R (熱抵抗) = L (伝導距離) $\div$ κ (熱伝導率) $\div$ (面積) として扱い、例えば 10 mm 角で厚み 1 mm の窒化アルミニウム AlN ($\kappa=160 \text{ W/mK}$) 基板では $R_{\text{AN}} = 0.001 \text{ m} \div 160 \text{ W/mK} \div 0.0001 \text{ m}^2 = 0.0625 (\text{K/W})$ とあらわす。競合材料の Si₃N₄ 基板では $\kappa=120 \text{ W/mK}$ とし、材料強度が約 60% 高いので厚みを 0.8 mm 程度にできるとすれば $R_{\text{SN}} = 0.0008 \div 120 \div 0.0001 = 0.0667 (\text{K/W})$ となり AlN と Si₃N₄ は同等の熱抵抗値を有することになる(図 3)。このように設計する方向であると熱伝導率が優れていても総合的な部品評価値でみるとほとんど変わらないこともありうる。材料特性がいいのにどうして使えないのかと疑問にもたれるところでもあり、材料屋からは理解しにくいパラメーターである。

一方で、熱膨張係数が大きいとセラミックス部品内部に発生する熱応力も高くなるため金属との接合界面での発生応力を分散できて有利だが、セラミックス材料の本体の寿命には不利になる。この場合はコンピューターシミュレーションによる熱応力解析(定常、非定常)をしっかり行い形状設計にフィードバックしていく必要がある⁽⁸⁾(図 4)。設計者から見たところこのような場合は、耐久性の評価を行って性能面での優劣をつけていくことになる。熱抵抗などのパラメーターは材料

を部品にする場合に必要となる特性値であり、材料データと設計図面から検討していけるモデル例であると見られる。部品や材料を提供した材料屋から見ると何で評価しているか見えな
いと感じることもあり得るが、いずれにしろ設計者の考え方を理解して対応することで開発が進展する。

4. 論文に見られる特性値

ここでは、恐縮ではあるが一般論を述べさせていただきたい。設計者から見た材料特性値は、日本国内では日本機械学会や日本精密工学会の論文誌などで論文として公表された記事の中に用いた材料の特性値表として掲載される例が多い。非酸化物セラミックス材料ではエンジン部品開発にかかわる内容が多いのも事実であり、エンジン開発に必要な特性値(強度、密度、疲労パラメーター等)を抜粋していることがある。設計者が材料関連の論文誌を見ることはまれであり、JIS ハンドブックや新聞記事を見ることで材料関連情報を得ている。いくら良い特性値を持つ材料を創製しても公表を論文誌上だけで行っていると設計者の目に触れることは少ないと考えられる。

一方、材料屋から見ると材料関連の学会誌を見ながら研究開発を遂行していくことが多く、設計者の立場と異なり機械系の学会誌を見る機会も少なそうである。ニーズと開発製品の仕様に違いがあり、設計者のほしがる材料をタイムリーに提供できない原因ではないかと推測している。ニーズとマッチする材料を持っている場合には研究開発とニーズへの対応を同時に遂行できる絶好のチャンスも生まれるのである。

非酸化物系セラミックスに関しては米国セラミックス協会の論文誌(Journal of the American Ceramic Society)が最も良いデータソースである。最近では科学系の論文が多いが多岐にわたる非酸化物系セラミックスのデータや測定方法が記載されており、多くの情報を得る論文誌であるといえる。また、非酸化物セラミックスの生産では日本の業界が世界有数であり、日本金属学会誌や日本セラミックス協会学術論文誌

記載のデータが有用である。いずれにしろ、学会誌を見る場合は10-15年以前から見直していくことも重要であり、当時はニーズと出会わなくても、今は応用の可能性が出てきたり、原料の改良で特性向上がなされ設計者を振り返らせることも可能であると考えている。

5. ま と め

本解説では、材料を使う立場(設計者)から見る材料特性値について文字数を割いてきた。ここで述べたことは、生産者からみて所定の材料であると認定する時に用いる特性値も重要だが、それだけではなく、設計者から見た材料特性については、装置の特徴を引き出せる簡便な性能値や耐久性につながる特性値も重要になってくる。特に、非酸化物セラミックスを用いた製品については材料 JIS がなく、黙っていると設計者の目に触れることが少ないことも現実である。材料屋としては、このような材料を装置の部品に活用する場合に、最終商品の性能向上やその性能の維持にかかわる特性を重要視した材料利用提案をしていくべきもので、本稿がその一助になれば幸いである。

文 献

- (1) 財団法人フaynセラミックスセンター「高効率発電用高温材料の信頼性向上に関する研究調査委託業務報告書」, (1996年3月).
- (2) 財団法人日本産業技術協会「21世紀の熱機関・セラミックスガスタービン」, (1999).
- (3) 上野憲造「機能性評価による機械設計」, 日本規格協会, (1998).
- (4) 田口玄一:「技術開発のための品質工学」, 日本規格協会, (1994).
- (5) K. Katayama: SAE Technical Paper Ser. 861128.
- (6) 島森 融: セラミックス, **35**(2000), 44-45.
- (7) 米屋勝利: セラミックス, **35**(2000), 30-31.
- (8) 秋宗淑雄: 日本機械学会誌, **100**, No. 943, (1997), 72.