ファインセラミックスの自動車部品への応用*

西 口 文 雄**

Fine Ceramic Applications for Automotive Parts / Fumio NISHIGUCHI

Key words : fine ceramic, turbocharger, design, particles attack, time to failure

1. はじめに

自動車部品にファインセラミックスを応用する場合、ファインセラミックスの特性の中で、どの特性を活かすかによって、その設計法は異なるであろうが、多くの場合、高温におけるセラミックスの優れた特性を活かすことが期待されている。また、ターボチャージャ付きエンジンの加速性改善の一つの手段として、タービンロータの慣性モーメント低減効果が大きいことが知られている。

ファインセラミックスは、その軽量性と、高温における耐熱強度に注目され、タービンロータに適用する試みが世界各国で続けられていた。1985年10月、日産自動車が世界で初めてセラミックターボチャージャを乗用車(フェアレディーZ)に搭載して以来、構造部材へのファインセラミックスの応用は本格的な第一歩を踏み出したといえる。

ここでは、自動車用ターボチャージャのタービンロータを例に、ファインセラミックスの強度および信頼性を考慮した設計の現状および問題点を概説する。

2. セラミックタービンロータの設計

自動車用ターボチャージャのタービンには、一般に超耐熱合金製のラジアルタービンロータが使用されており、エンジンの排気ガス(約900°C)で駆動され、100 000~150 000 rpmで回転する。また、セラミックスタービンロータ(以下、セラミックスロータ)を設計する場合は、現状ではまだ、メタルベースの設計からの置換えが中心となると思われる。このような条件の

下で、自動車用部品として信頼性のあるファインセラミックス製のタービンロータを実現するためには、

- (a) 強度が高く、ばらつきの少ない材料を使用する
- (b) 極力低応力化を図る

ことが重要であるが、タービンロータとしての空力性能に悪影響を及ぼすことは避けなければならない。応力計算を進める場合、空力性能計算と並行して進める必要がある。

3. 応力計算

応力計算は、どのような運転条件が最も厳しいかを想定し、その条件下で計算することが必要である。Schwetzらは、コールドスタートから全開加速をした場合のセラミックスロータ各部の応力の時間変化を示し、場所によって応力の最大値があらわれる時間は異なるが、おおむねロータに発生する応力が最大となる50 s後の状態(ほぼ定常状態)で設計して間違いないとしている¹⁾。Schwetzらの例では応力の最も高い部位は、タービンロータの背板からシャフトにつながる部分である。図1~3は別の解析例であるが、同様の部位に最大応力が発生している。この部分の応力を下げるためには、背板部のテーパ形状とシャフト部とのつなぎ部分の形状を工夫することが必要である。これによって最大応力を下げ、応力の平均化を図った例がある²⁾。オリジナルのメタルタービンロータから出発して、セラミックス材料に置き換えていく過程では、できるだけ最大応力レベルを下げるように工夫することが長時間経過後の信頼性を確保する上で大切である。

また、タービンロータのように複雑な形状を持った回転体を温度分布のある高温雰囲気下で高速回転させ

* 原稿受付 昭和63年4月26日

** 日産自動車(株)(横須賀市夏島町1)

図1 遠心応力

図2 熱応力

図3 合成応力

る場合は、図1に示す遠心応力が発生するほかに、図2に示すように1/3程度の熱応力も同時に発生する。したがってセラミックス部品を設計する場合には、熱応力を考慮することを忘れてはならない。図3はこれらの応力の合成応力を示したものである²⁾。

4. 信頼性設計

セラミックス材料の場合は、テストピースによって得られる強度（応力値）を実際の成形材で得ることは非常に困難である。また実体ロータから切り出したテストピースによって得られた強度であっても、実体ロータの強度を代表することは難しい。これらは主に成形時の型の相違、切出し部位の相違に起因すると

図4 実体ロータの瞬間破壊強度

図5 試験片の三点曲げ抗折強度

われる。図4にその一例を示すように、応力計算によって求められた最大応力を基にして、実体ロータから切り出したテストピースを用いた三点曲げ抗折試験より得られたデータ(図5)から、Weibullの理論によって推定したセラミックスタービンロータの瞬間破壊強度は、ホットスピンテストによる実体ロータ瞬間破壊強度より高く推定され、実体ロータはさらに低い応力で壊れ、Weibull数(直線の傾き)も小さく、ばらつきが大きいことを示している。このためセラミックスロータの強度を考える場合は実体ロータのスピンテストの結果に基づく必要がある。

セラミックスロータの長時間使用後の寿命を予測する場合には、slow crack growthの考え方をを用いる。

図6 寿命と残存確率

これによればセラミックスの寿命は初期欠陥長さで決まり、最低必要寿命の時の欠陥長さは、

$$a_1^{(2-N)/2} - a_c^{(2-N)/2} = I \cdot \sigma^N t_c \quad (1)$$

で表される³⁾。ここに、 $I = (N-2)/2 \cdot A \cdot Y^N$ 、 a_1 ：初期欠陥長さ、 a_c ：臨界欠陥長さ、 σ ：応力、 t_c ：疲労寿命、 Y ：形状係数。ここで、 $a_1^{(2-N)/2} \gg a_c^{(2-N)/2}$ のために $a_c^{(2-N)/2}$ は無視できるからセラミックスロータの寿命は初期欠陥長さで決まることがわかる。

図6⁴⁾は、寿命を求める場合に必要の係数 A 値、 N 値を実体ロータの回転試験から求めたもので、通常より大きな応力がかかるように定格回転速度より高い回転速度でホットスピンテストを行い、破壊するまでの時間を測定し、破壊確率との関係をプロットしたものである。これらの実験点から最小二乗法により直線を求めると、軸との切片および直線の傾きから A 値、 N 値が求まる。このようにして得られた A 値、 N 値は、テストピースから得られた値とはかなり異なるので、注意を必要とする。図6は、また定格回転速度で運転したときの1000 h使用後の残存確率が99%以上であることを示している。このレベルの信頼性が、十分であるかどうかは判断の問題であるが、不十分となれば、さらに信頼性を上げる努力が必要となる。

5. 寿命保証

セラミックスロータの必要寿命を製品として保証するためには、前述の式(1)を用いて、必要寿命に対する許容最大欠陥長さ a を求め、すべての製品の最大欠陥長さを許容欠陥長さ a 以下とすることが必要になる。したがって製品の欠陥長さを測定することが必要であるが、X線や超音波探傷等による非破壊検査の現在の技術水準では寿命を保証するだけの微小欠陥を検

図7 ブルーフテスト後の寿命

出することは不可能である。このため寿命保証試験としてブルーフテストが実施される。

ブルーフテストは、製品にある応力をかけることによって、許容欠陥長さ a 以上の大きな欠陥を持つ低強度品をあらかじめ壊してしまい、残ったものだけを採用することにより必要寿命を保証しようとするものである。つまり、許容最大欠陥長さ a を持つものが瞬時に破壊する応力 σ_R を式(1)より求め、この σ_R に相当する応力をスピンテストによってロータに負荷すれば、残存したロータ内に存在する欠陥長さは、許容最大欠陥長さ a 以下になる。この考え方に基いて品質を保証している。

図7は、あるブルーフテストをしたと仮定した時に保証される最低寿命の推定値と、ブルーフテストをして生き残ったものの実際の寿命をテストした結果を示している。図からわかるようにすべての実験点は最低保証寿命より長く生き残っており、前述のような考え方に基いて推定された寿命は、安全側に予測していることがわかる。

現在、セラミックスの破壊に関する理論的な取扱いは、比較的簡単な式が用いられており、自動車用ターボチャージャーのような小型のセラミックスロータに対しては、これらの理論を駆使し、実験データを積み重ねることによって実用に供するレベルのものが製造できるようになったが、さらに高度な手法の開発によって、セラミックスの材料としての取扱いが簡単になることが望まれる。

6. 耐異物衝突強度

主に鋳造で製作されるガソリンエンジン用部品の内部には、鋳造時に残る鋳砂など種々の異物が混在している。さらに、排気マニホールドはエンジン運転中およそ900°Cに達する排気ガスにさらされるため、内表面が酸化し、酸化スケールが層状に生成され剥離する

図8 粒子衝突のスケッチ

ほか、マニホールド内表面にある欠陥や突起の強度が低下して脱落する。これら異物の粒子が、タービンスクロールを通り、タービンロータに衝突することは容易に想像できる。このことは、セラミックスロータをエンジンに適用する上で、非常に困難な問題の一つである。

この問題は、先に述べたセラミックスロータの回転強度に対する信頼性とは異なり、飛来粒子とタービンロータの衝突機会の多少にかかわる問題である。このため、タービンロータに衝突する粒子片のタービンスクロール内での挙動の解析、および衝突する可能性のあるすべての粒子片について、タービンロータに与える損傷の大きさを知る必要がある。

タービンロータに衝突する粒子は、排気マニホールドから侵入し、その飛来速度がタービンロータ外径の周速に比べて極めて遅いために、タービンロータの回転方向前面(負圧面)側に衝突する。図8は実験によって粒子がタービンロータに衝突する部位を観察したときのスケッチであるが、打痕の様子から、タービンロータに衝突する粒子は、ロータ入口部の負圧面に集中して衝突していることがわかる。このことからロータ入口部の翼形状が粒子衝突時の強度に与える影響を調べることが重要である。

図9は、その一例としてセラミックスロータの入口が、粒子衝突によって欠損する時の翼厚と粒子の重さとの関係を実験的に求めた結果を示したものである。これらのデータを基にタービンロータの翼厚からエンジン内に残留する粒子の許容限度を求め、各部品ごとに残留する異物の量および大きさを管理することに

図9 粒子による翼の欠損

よって粒子衝突によるセラミックスロータの破壊を防止することが必要である。

7. おわりに

ファインセラミックスは、小型のターボチャージャーロータで実用の域に達したが、構造用材料として実用化されてからまだ日も浅く、その理論的な取扱いも不十分であり、設計手法が確立しているわけではない。また形状によって製法が異なり、相似形の部品であっても少し大きくなるだけで欠陥の少ないものを製造することが非常に難しくなる。このような材料であるファインセラミックスを構造用材料として応用する場合は、ある考えに基づいて設計を行い、実験・評価の結果を設計手法にフィードバックするサイクルを繰り返すことによってデータを蓄積し、設計手法を高度化して行くことが重要と思われる。

参考文献

- 1) K. A. Schwetz et al. : Ceramic Materials and Components for Engines, Deutsche keramische Gesellschaft, (1986) 1059.
- 2) 川瀬道彦ほか：ターボチャージャー用セラミックロータの開発，第14回ガスタービン定期講演会講演論文集(1986. 6)。
- 3) 渡辺亜夫ほか：セラミックターボチャージャーの開発，日産技報，21 (1985. 12)。
- 4) K. Katayama et al. : Development of Nissan High Response Ceramic Turbocharger Rotor, SAE 861128, (1986. 8)。
- 5) I. Matuo et al. : The Development of Second Generation Ceramic Turbocharger, SAE 880703, (1988. 3)。