

令和 2 年 5 月 1 日現在

機関番号：16201

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2017～2019

課題番号：17K14563

研究課題名(和文)セラミック軸受球の変動温度差下での繰返し熱衝撃疲労破壊メカニズム解明と信頼性評価

研究課題名(英文) Fatigue fracture analysis and reliability estimation of ceramic ball subjected to thermal shock under variable temperature difference

研究代表者

松田 伸也 (Matsuda, Shinya)

香川大学・創造工学部・講師

研究者番号：10550460

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,000,000円

研究成果の概要(和文)：一定温度差(CT)および2段変動温度差(VT)での水中急冷CTSFS試験をセラミック軸受球に対して実施した。その結果、CT-CTSFS試験で得られた寿命分布は2母数ワイブル分布を適用して評価できたが、VT-CTSFS試験で得られた寿命分布は特異性を示し、2母数ワイブル分布では評価できなかった。そこで、多段階の熱衝撃応力に曝された場合を仮定し、安定き裂成長則(SCG)則とワイブル分布と組合せて構築した確率論的モデルによって予測した結果、よく一致した。したがってVT-CTSFS寿命分布の特異性は、変動する温度差が原因であることを理論的に明らかにした。

研究成果の学術的意義や社会的意義

セラミック軸受球に対する変動温度差下での繰返し熱衝撃疲労(CTSFS)データベース(CTSFS寿命特性、球径依存性、損傷プロセス、損傷形態)を蓄積することができたため、セラミック軸受球の信頼性向上につながり、世界市場への普及加速に貢献できる。さらに変動温度差でのCTSFS寿命を予測するための確率論的モデルが構築できたため、ハイエンド部品適用時の構造設計に活用できることが期待される。

研究成果の概要(英文)：Cyclic thermal shock fatigue (CTSFS) test was performed under constant temperature difference (CT) and two-step variable temperature difference (VT). As the result, the CT-CTSFS life distribution was obeyed by 2-parameter Weibull distribution, but the VT-CTSFS life distribution wasn't obeyed. Thus, a probabilistic model was established on the basis of slow crack growth (SCG) concept in conjunction with Weibull distribution for a brittle material subjected to multi-stage thermal shock stress. The measured and predicted curves were in good agreement. Therefore, it was theoretically showed that the VT-CTSFS lifetime distribution was dominated by the variable temperature difference.

研究分野：材料力学，材料強度学，破壊力学

キーワード：熱衝撃疲労寿命分布

## 様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

低エネルギー社会の構築が喫緊の課題となる中、環境負荷低減のために機械構造物の軽量化や高性能化が要求されている。窒化ケイ素( $\text{Si}_3\text{N}_4$ )製のセラミック軸受球(以下、軸受球と称する)は、高剛性、耐焼付き性、耐摩耗性、高比強度、耐熱性などの優れた特性を有するため、その市場が大幅に拡大しており、各種工作機械や一般産業用機械への実用化が目覚ましい。さらに従来の鋼球では対応が不可能であった超高速回転や高温環境下で使用され、航空機用ジェットエンジンの主軸用軸受や自動車用ターボチャージャーなど高信頼性が要求される機械構造物のハイエンド部品として適用が進んでいる。こうした中、機械構造物の高性能化に活躍する軸受球には更に高い信頼性と厳しい品質管理が要求される。そのため世界市場への普及を加速するためには、ハイエンド部品への適用を想定した実高温環境下での運転を繰返し経験した場合の熱負荷による損傷現象に対する強度評価技術は重要である。ゆえに、実環境下を模擬した実験による強度特性や損傷機構を明らかにするとともに力学的な観点からモデル化など基礎的かつ統合して実質的に評価する研究が必要不可欠である。

### 2. 研究の目的

軸受球に対して実高温環境下で使用することを想定し、変動温度差下における繰返し熱衝撃疲労(Cyclic Thermal Shock Fatigue: CTSF)破壊メカニズムを解明して、その強度信頼性を評価することを目的とする。その詳細は下記の通りである。

- (1) 軸受球に対して一定および変動温度差下での CTSF 試験を実施し、CTSFC 寿命特性や球径依存性、損傷形態をデータベース化して破壊メカニズムを実験的に解明する。
- (2) 破壊力学および破壊統計を適用した力学的モデルを構築し、データベースを基にモデルの妥当性を検証して強度信頼性を評価する。

### 3. 研究の方法

試験片として、JIS B1501 に基づく等級 G5 の 3/8 および 15/32 inch のサイズを有する  $\text{Si}_3\text{N}_4$  製軸受球をそれぞれ用いた。図 1 に液中急冷熱衝撃試験機および温度管理ダイアグラムをそれぞれ示す。図 1(a) に示すように、軸受球を入れたバスケットにワイヤーを取り付け、加熱炉の中心部に吊るした。ワイヤー部には、まっすぐに自由落下させるために金属棒を取り付けた。なお、バスケット、ワイヤーおよび金属棒はいずれも SUS304 製である。1 分間で所定の温度  $T_1$  まで加熱して 30 分間保持した後に、自由落下にて液媒に金属中空棒とともにバスケットを投下させて冷却した。その際、加熱温度は熱電対によってプログラムコントローラによる管理のもと測定した。また液媒には水を用い、その温度  $T_2$  は  $298\text{ K} \pm 3\text{ K}$  とした。これを 1 サイクルの熱衝撃試験と定義する。温度管理として、一定温度差での CTSF 試験(CT-CTSFC 試験と称する)の場合(図 1(b))、温度差  $\Delta T_1 (= T_1 - T_2)$  を一定とし、軸受球が破壊するまで繰返し熱衝撃を与えた。一方、変動温度差での CTSF 試験(VT-CTSFC 試験と称する)の場合(図 1(c))、1 サイクル目において、温度差  $\Delta T_1$  を与え、2 サイクル目以降は、 $\Delta T_2$  へ温度差を可変させた 2 段変動温度差を与え、軸受球が破壊するまで繰返し熱衝撃を与えた。2 段変動温度差条件として、 $\Delta T_1 > \Delta T_2$  および  $\Delta T_1 < \Delta T_2$  の場合の 2 種類とした。なお本実験では、低サイクル側(最大 20 サイクル)の疲労寿命を調査した。

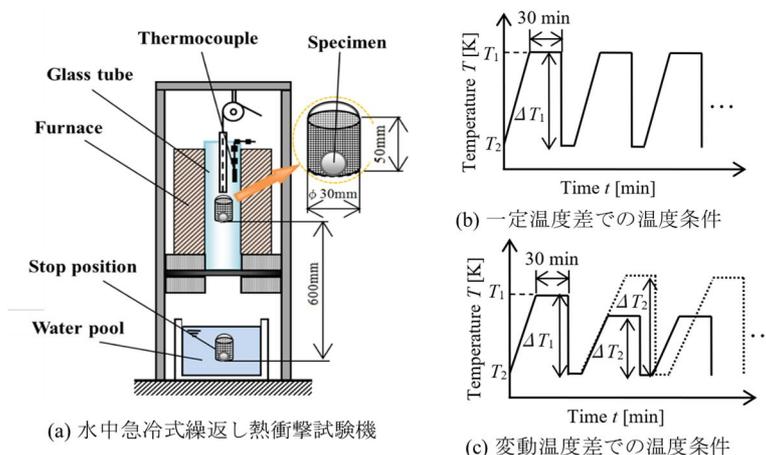


図 1 水中急冷式繰返し熱衝撃試験とその温度管理ダイアグラム

### 4. 研究成果

- (1) 目的(1)に対する成果  
損傷形態

図 2 に CTSF 試験後の軸受球(15/32inch)の破壊形態をそれぞれ例証する。図のように表面にき裂の発生および進展や破断が起きたとき熱衝撃破壊と判定し、 $N_f$  はそのときの繰返し数である。表面において、ある 1 点を起点としてき裂の発生と分岐が観察され、CTSFC 試験条件によら

ず同様の破壊形態であった。このような破壊形態は、軸受球の熱衝撃破壊の場合と同様であった。ゆえに CT-SF においても、極表面層に内在する欠陥周りに発生する熱応力による応力拡大係数が破壊靱性値に到達したとき 1 本のき裂が発生し、球形に依存したフープ熱応力によってき裂は分岐しながら進展して破壊したと考えられ、温度差条件によらず破壊メカニズムは同一である。

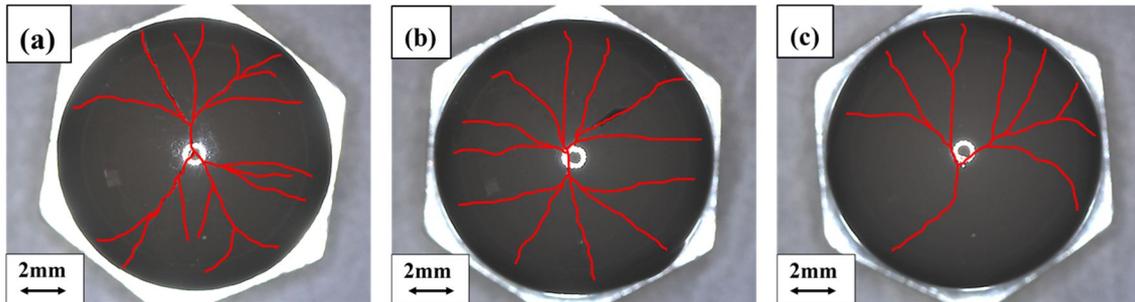


図 2 (a) CT-CTSF 試験 (470K ( $N_f=3$ )) および VT-CTSF 試験 (b) 410K 510K ( $N_f=4$ ), (c) 510K 410K ( $N_f=2$ ) 後の破壊形態

### CT-CTSF 寿命特性および球径依存性

図 3 に CT-CTSF 試験から得られた破壊繰返し数  $N_f$  のワイブルプロットおよび 2 母数ワイブル解析から得られた形状母数  $m$  と尺度母数  $N_0$  をそれぞれ示す。ここで、破壊確率  $F$  は、メディアランク法に基づき各  $N_f$  に対して割り当てた。図中の矢印付きプロットは、各試験条件において  $N_f=1$  で破壊したデータおよび  $N_f=20$  で破壊しなかった打ち切りデータをそれぞれ示している。 $N_f$  は、軸受球のサイズの増加に伴ってわずかに低寿命側にシフトした。ゆえに、軸受球の CT-SF 試験において、 $N_f$  に対して寸法の影響があることが明らかとなった。これは、内在する大きなサイズの欠陥が CT-SF 破壊に関与する確率が高くなったためと考えられる。また  $N_f$  のワイブルプロットは、試験条件によらずいずれも直線で近似することができている。 $N_f$  のばらつきを示す  $m$  値は、15/32inch の 430K において高い値を示しているが、他の条件ではほぼ一定である。すなわち、試験条件は異なってもバラツキの程度は同じであることを意味しており、内在する欠陥サイズに  $N_f$  のばらつきは起因していると考えられる。したがって、CT-CTSF 寿命はワイブル分布で評価できる。

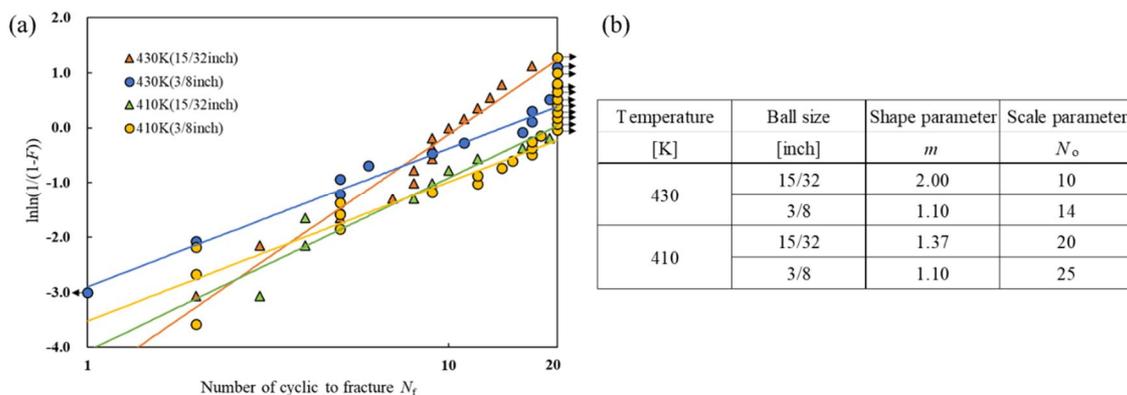


図 3 CT-CTSF 試験から得られた破壊繰返し数の(a)ワイブルプロットと(b)ワイブルパラメータ

### VT-CTSF 寿命特性および球径依存性

図 4 に VT-CTSF 試験から得られた破壊繰返し数  $N_f$  のワイブルプロットと 2 母数ワイブル解析から得られた形状母数  $m$  と尺度母数  $N_0$  をそれぞれ示す。同一の温度差条件において、それぞれの球径の  $N_f$  を比較すると、CT-CTSF 試験と同様に球径の増加に伴って低寿命側にシフトした。したがって変動温度差での CT-SF 試験でも、 $N_f$  は球径依存性を示すことが明らかとなった。各試験片において、温度差条件  $\Delta T_1 < \Delta T_2$  での  $N_f$  は、 $\Delta T_1 > \Delta T_2$  の場合と比較して低寿命であった。このことから VT-CTSF 疲労寿命は、1 サイクル目に与える温度差よりも熱衝撃破壊直前で曝される温度差に大きく支配されることが言える。

次に統計的性質に注目すると、 $N_f$  のばらつきを示す  $m$  値は、CT-CTSF 試験で得られた値と比較すると  $\Delta T_1 < \Delta T_2$  では大きく、 $\Delta T_1 > \Delta T_2$  では小さい値を示した。の結果で述べたように、欠陥サイズによって  $N_f$  のばらつきが支配されるならば一定値であるが、このことは、変動温度差によって統計的性質が変化していることを意味している。以上のことから、VT-CTSF 寿命分布特性は、CT-CTSF 寿命分布の評価として用いた単純な 2 母数ワイブル分布では評価できないことが明らかとなった。

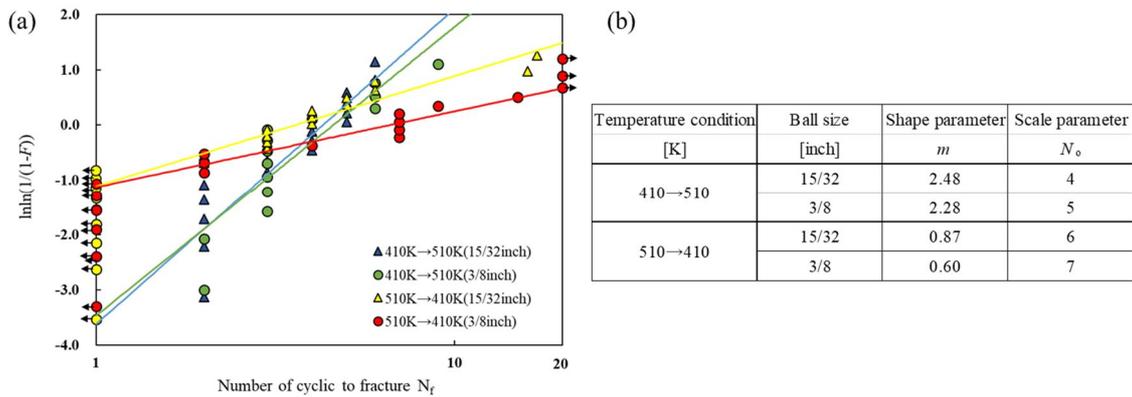


図4 VT-CTSF 試験から得られた破壊繰返し数の(a)ワイブルプロットと(b)ワイブルパラメータ

(2) 目的(2)に対する成果

目的(1)の成果を基に次の CSTF 破壊メカニズムを仮定して，確率論的モデルを構築した．

- I. セラミック球表面に初期き裂が分布しており，ワイブル分布が成立つ．
- II. 安定き裂成長（Slow Crack Growth : SCG）は熱衝撃中に初期き裂から発生する．
- III. 繰返し熱衝撃を受けることで安定成長したき裂長さが臨界値に達したとき，き裂は不安定成長して熱衝撃破壊を起こす．
- IV. 一般的な脆性材料では，繰返し熱衝撃時の初期き裂長さと SCG 量が試験片の寸法に比べて十分に小さい．そのため実際には熱応力勾配が発生するが，SCG は一様な熱応力を受ける状態下で起こる．

図5にVT-CTSF試験から得られた破壊繰返し数  $N_f$  のワイブルプロットおよび確率論的モデルによる予測線図をそれぞれ示す．ここで，予測線図を作図するにあたり，材料定数は CT-CTSF 試験から得たデータを用いて決定した． $\Delta T_1 > \Delta T_2$  の場合（図5(a)），温度差を  $\Delta T_1$  から  $\Delta T_2$  へ切替えた後に本モデルではワイブル確率紙上では非線形となり，実験値とおよそ一致している．また，寸法効果の影響も本モデルによって評価できている．一方， $\Delta T_1 < \Delta T_2$  の場合（図5(b)），予測線図は，分布の形状や傾向は捉えているものの，いずれも実験値を過小評価した．以上の解析結果より，変動温度差の影響による CSTF 寿命分布の特異性は，主に SCG 則に依存しているために現れることが明らかとなった．ただし，1 サイクル目に与える温度差が低い場合，本モデルで仮定したこと以外の現象が起きていることを示唆しており，今後の検討課題である．

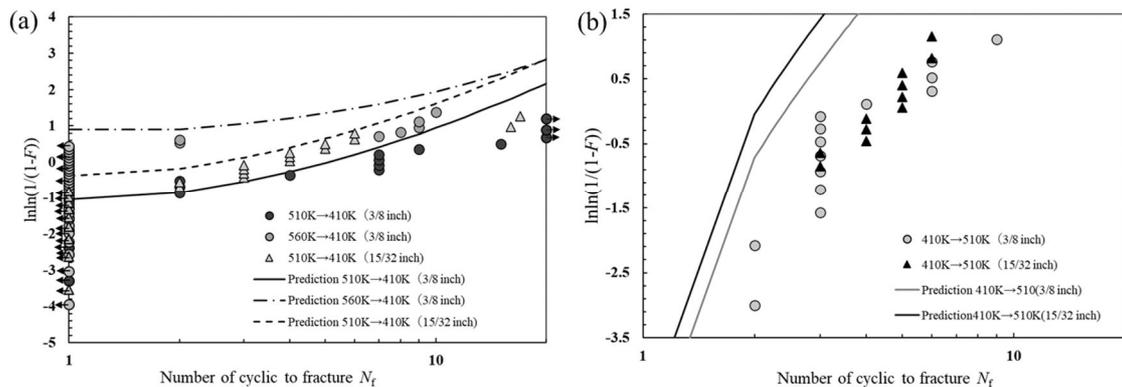


図5 VT-CTSF 試験から得られた破壊繰返し数のワイブルプロットと確率論的モデルによる予測線図

< 引用文献 >

Shinya Matsuda, Fracture characteristics of silicon nitride ceramic ball subjected to thermal shock, Journal of Materials Science, Vol.51, No.11, pp.5502-5513 (2016.6)  
 松田伸也，熱衝撃を受けたセラミック軸受球の巨視的割れおよび接触損傷に対する信頼性評価，科学研究費助成事業 研究成果報告書（課題番号 26820015），(2017.5)

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計3件（うち査読付論文 3件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Shinya Matsuda and Takeshi Nakada	4. 巻 197
2. 論文標題 Simple mechanics model and Hertzian ring crack initiation strength characteristics of silicon nitride ceramic ball subjected to thermal shock	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Engineering Fracture Mechanics	6. 最初と最後の頁 236-247
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） <a href="https://doi.org/10.1016/j.engfracmech.2018.05.003">https://doi.org/10.1016/j.engfracmech.2018.05.003</a>	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Shinya Matsuda	4. 巻 215
2. 論文標題 Theoretical approach to dynamic fatigue strength characteristics of ceramics under variable loading rate on the basis of SCG concept	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 International Journal of Fracture	6. 最初と最後の頁 175-182
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） <a href="https://doi.org/10.1007/s10704-018-00337-7">https://doi.org/10.1007/s10704-018-00337-7</a>	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 松田伸也	4. 巻 9
2. 論文標題 変動熱衝撃応力に曝されたセラミック軸受球の繰返し疲労寿命分布解析	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 構造物の安全性と信頼性 Vol.9 JCROSSAR2019論文集（A論文）	6. 最初と最後の頁 162-166
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計5件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 竹中仁哉, 松田伸也
2. 発表標題 セラミック軸受球の繰返し熱衝撃疲労破壊特性
3. 学会等名 金属第58回 鉄鋼第61回 中国四国支部講演大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 松田伸也, 黄木景二
2. 発表標題 セラミックス強度に対するワイブル係数の材料定数表現
3. 学会等名 日本材料学会 部門・支部合同講演会 - 九州支部第5回学術講演会・総会 / 第31回信頼性シンポジウム -
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 松田伸也, 中田豪
2. 発表標題 熱衝撃を受けたセラミック球のリングクラック発生残存強度に対する簡易なモデル
3. 学会等名 日本材料学会第66期学術講演会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 山下日菜子, 松田伸也
2. 発表標題 脆性材料のスモールパンチ試験と破壊形態
3. 学会等名 日本材料学会四国支部第17回学術講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 松田伸也, 竹中仁哉
2. 発表標題 セラミック軸受球の繰返し熱衝撃疲労寿命分布特性に及ぼす変動温度差の影響
3. 学会等名 日本材料学会第68期学術講演会
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
--	---------------------------	-----------------------	----