

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 3 日現在

機関番号：34315

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2012～2014

課題番号：24560092

研究課題名(和文)多軸変動負荷に対応した疲労強度評価モデルおよび疲労強度設計支援解析ツールの開発

研究課題名(英文) Developments of Damage Model and Analytical Tool for Evaluation of Fatigue Strength under Multiaxial Random Loading

研究代表者

伊藤 隆基 (Itoh, Takamoto)

立命館大学・理工学部・教授

研究者番号：40242581

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,100,000円

研究成果の概要(和文)：3軸応力・ひずみ状態における最大主応力・主ひずみの方向の変化量を定量化し、非比例負荷下での応力・ひずみおよび疲労損傷を評価するための評価モデルを提示した。同評価モデルを基に応力・ひずみ状態、負荷の非比例度および疲労損傷をビジュアル的に示すことができる解析ツールを開発した。これにより研究者・技術者らは、多軸負荷に関する特別な知識や判断を要することなく疲労強度評価が可能となり、開発した評価・解析ツールを実用化へ向けての準備が整った。

研究成果の概要(英文)：This study presented a simple method of determining stresses and strains and a severity of loading history under non-proportional loadings with defining the rotation angles of the maximum principal stress and strain in a three dimensional stress and strain space. Based on this method, an analytical program for visually presenting the stress/strain state, the non-proportionality of loading, and the damage evaluation was developed. It will be possible for researchers and engineers to assess the fatigue strength under non-proportional loading without requiring special knowledge and judgment about multiaxial loading.

研究分野：材料力学

キーワード：疲労 低サイクル疲労 多軸応力

1. 研究開始当初の背景

原子力構造機器関連の圧力容器・配管、熱交換器などの高温機器では、機械的負荷と熱的負荷との重畳により比較的大きな応力振幅を伴う繰返し多軸負荷が生じる。これまで、こうした組合せ多軸負荷を考慮した疲労強度設計は、一般的にミーゼスやトレスカなどの相当応力・ひずみにより負荷状態を単軸下に置き換えて行われてきた。しかし、これらの多軸を考慮した設計手法（例えば、ASME Boiler & Pressure Vessel Code Case Section IIIおよびVIII等の設計基準（文献1,2））は、主に応力やひずみの主軸方向が変化しない、いわゆる比例多軸負荷に対するものであり、主軸方向が時間的に変化する非比例多軸負荷にはそのまま適用するものではなかった。このことから、かならずしも疲労損傷を適切に評価できるものではないことが分かっている（文献3-7）。加えて、応力・ひずみ範囲の計算は人の判断に頼らざるを得ないことから、解析・計算が自動化できず、技術者には非比例多軸負荷に対する高度な知識の要求と労力・負担が強いられてきた。さらに負荷経路によっては計算結果が解析者によって異なるというような問題も生じていた。

2. 研究の目的

最近の研究より、非比例多軸負荷における応力・ひずみの評価手法として、サイクル中で最大値をとる主応力ないし主ひずみ面に着目して主軸の方向変化量を定量化し、それに基づいた多軸疲労寿命評価モデルとして IS (Itoh-Sakane) 損傷評価手法 (IS 法) が提案されている。この IS 法は、多軸疲労設計・評価に対して極めて有益なモデルではあるが、複雑に変動する非比例多軸負荷を解析するには高度な知識が要求されるため、実用化のためには改良と強化が必要であった。

本研究では、上記の IS 法を基に、構造機器・部材の疲労に関する実設計・開発および維持管理の現場への応用を強く意識した、多軸疲労強度評価法を構築する。すなわち、実機部材の応力・予測寿命などを瞬時に評価できる簡便で実用性の高い多軸疲労強度設計支援解析ツール（以下ツール）を開発することである。

3. 研究の方法

開発したツールの模式図を図1に示す。応力・ひずみの時刻歴のデータおよび実験から得られる寿命データ（非比例多軸負荷による損傷増加の材料依存性を示すパラメータ α が追加）を入力することで、計算部分はブラックボックスでも、最終的に応力・ひずみの状態（応力・ひずみの大きさと主軸方向の変化）、非比例度、応力・ひずみ範囲、同平均値、さらに予測寿命が出力される。出力データからは、非比例多軸負荷の状態を視覚的および数値にて確認することができ、非比例度を考慮した強度評価の要否の判断や予測寿命の瞬時的な把

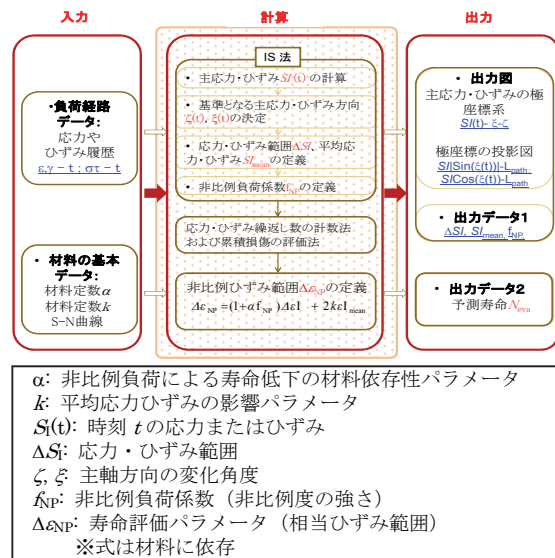


図1 ツールの模式図

握・判断が可能である。すなわち、非比例多軸負荷での疲労に関する専門知識がない技術者でも機械的且つ手軽に解析ツールを扱うことができる点において汎用性が高く、優位性があるツールとして開発した。また、モデルおよびツールは、負荷経路および多軸負荷場の厳しさの可視化の工夫や、入力メニュー画面の改良、ヘルプ画面などの機能を追加するなど、さらになる汎用性の向上を図った。

4. 研究成果

(1) 非比例多軸負荷に対する評価手法

① 主応力および主ひずみの定義

非比例多軸負荷では、主軸方向が時間的に変化するため、主応力・主ひずみおよびその主軸方向を時間の関数で表す必要がある。時刻 t における主応力・主ひずみベクトルを $S_i(t)$ とする。ここで、添え字 i は 1、2 および 3 であり、それぞれ、最大、中間および最小主応力・主ひずみベクトルを表す。また、 $S_i(t)$ は応力基準では σ に、ひずみ基準では ε に置き換える（以下、同様）。主応力・主ひずみベクトルを xyz 座標系上で模式的に表したのが図2である。時刻 t における応力・ひずみ ($SI(t)$: $\sigma I(t)$, $\varepsilon I(t)$) を次式の最大主応力・主ひずみベクトル ($S_1(t)$) または最小主応力・主ひずみベクトル ($S_3(t)$) の絶対値の最大で定義する。

$$SI(t) = \text{Max}[|S_1(t)|, |S_3(t)|] \quad (1)$$

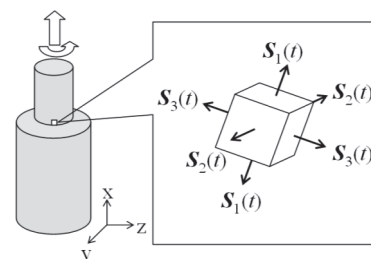


図2 xyz 座標系上における主ひずみ・主応力

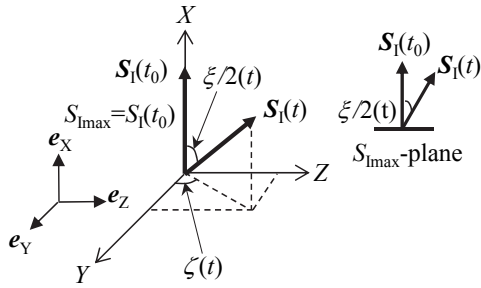


図3 XYZ座標系上における主ひずみ主応力の定義

また、負荷経路を一巡する間(1サイクル中)での $SI(t)$ の最大値を SI_{max} とし、次式で表す。

$$SI_{max} = SI(t_0) = \text{Max}[SI(t)] \quad (2)$$

すなわち、 t_0 は $|S_1(t)|$ または $|S_3(t)|$ のいずれかが1サイクル中での最大となる時刻である。

② 主軸方向の変化角

主応力・主ひずみの主軸方向の変化を表すために、基準となる新たな直交座標系 XYZ を定義する。X軸の定義方法は最大ひずみ方向と最大累積損傷平面の2種類あり、最大ひずみ方向は SI_{max} の方向をX軸と定義し、最大累積損傷平面は1サイクル中における応力・ひずみの累積値が最大となる面に対する垂直方向をX軸と定義する。Z軸はYZ面に投影された主応力・主ひずみベクトルが最大となる時の方向とする。

図3に示すように応力・ひずみの主軸方向の変化角は、任意の時刻の主応力・主ひずみベクトル ($S_i(t)$) とX軸方向との間の角度 $\xi(t)/2$ および $S_i(t)$ をYZ面に投影した方向とY軸方向の間の角度 $\zeta(t)$ で定義され、次式で与えられる。

$$\frac{\xi(t)}{2} = \cos^{-1} \left(\frac{S_i(t_0) \cdot S_i(t)}{|S_i(t_0)| |S_i(t)|} \right) \quad (3)$$

$$\text{ただし、} \left(0 \leq \frac{\xi(t)}{2} \leq \frac{\pi}{2} \right)$$

$$\zeta(t) = \tan^{-1} \left(\frac{S_i(t_0) \cdot e_z}{S_i(t_0) \cdot e_y} \right) \quad (4)$$

$$\text{ただし、} (0 \leq \zeta(t) \leq 2\pi)$$

ここで、 e_y および e_z はそれぞれ、YおよびZ軸方向の単位ベクトルである。また、添え字 i は、 SI_{max} が与えられる主応力・主ひずみによって決まり、1または3である。たとえば、 $SI_{max} = |S_3(t_0)|$ のとき、 $i=3$ である。

③ 応力・ひずみ範囲および平均ひずみ・応力の定義

式(1)の応力・ひずみ $SI(t)$ と式(3)および式(4)の角度 $\xi(t)/2$ および $\zeta(t)$ を同時に表す方法として、図4に示すような $SI(t)$ と $\xi(t)$ および $\zeta(t)$ を用いた極座標系表示法を用いる。極座標系表示では、直交する3つの方向 SI_1 、 SI_2 および SI_3 をそれぞれ、 $\xi=0$ 、 $\xi=\pi/2$ で $\zeta=0$ および $\zeta=\pi/2$ の方向にとる。なお、図4の極座標系

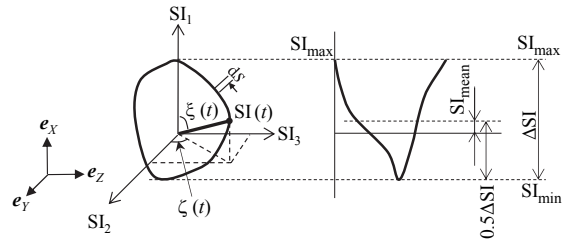


図4 主応力・主ひずみ範囲および平均値の定義

上では、表示する角度 $\xi(t)$ は図3の材料上での角度 $\xi(t)/2$ の2倍となっていることに注意を要する。

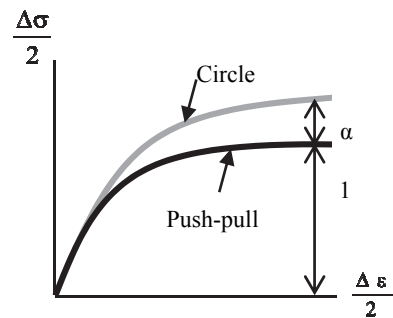
ここで定義した応力・ひずみおよび主軸方向の変化角を極座標系表示することによって、3軸負荷状態での応力・ひずみ大きさと主軸方向変化の軌跡を3次的に表すことができる。また、応力・ひずみ範囲および平均応力・ひずみを容易に定義できる。

応力・ひずみ範囲 (ΔSI) は、極座標系表示した応力・ひずみの経路の SI_1 方向の最大値と最小値の差で与えられる。また、その応力範囲の中央値が平均応力 (SI_{mean}) であり、次式で与えられる。

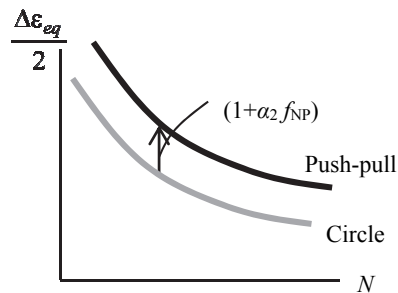
$$\Delta SI = \text{Max}[SI_{max} - \cos \xi(t) SI(t)] = SI_{max} + SI_{min} \quad (5)$$

$$SI_{mean} = \frac{1}{2} (SI_{max} - SI_{min}) \quad (6)$$

ここで、 SI_{min} は $(SI_{max} - \cos \xi(t) SI(t))$ が最大となる時の $(-\cos \xi(t) SI(t))$ である。 ΔSI は図4で示した SI_{max} 面に作用する主応力・主ひずみの垂直成分の振幅であり、 SI_{mean} はその中間値である。なお、ここでは SI を主応力・主ひずみとした



(a) 追硬化による α_1 の定義



(b) データフィッティングによる α_2 の定義

図5 α_1 の定義法

が、ミーゼスやトレスカの相当応力・ひずみに置き換えても良い。

④ 非比例度の定義法

Itoh らは平面負荷下での非比例多軸低サイクル疲労寿命を評価するために、ひずみ経路および材料依存性を考慮した次式の非比例多軸低サイクル疲労寿命評価式 $\Delta \varepsilon_{NP}$ を提案している。

$$\Delta \varepsilon_{NP} = (1 + \alpha f_{NP}) \Delta SI \quad (7)$$

ここで、係数 α は非比例負荷の影響の材料依存性を示す係数であり、非比例負荷による応力増加の程度を表している。この材料依存性を示す α の定義方法は二通り挙げられる。

一つ目の定義方法は、図 5 (a) に示すように非比例負荷による応力増加（追硬化、Additional hardening）の程度より求める方法である。すなわち、ひずみ振幅が十分に大きいとき時の非比例負荷（円形負荷、Circle）の応力振幅を比例負荷（引張・圧縮、Push-pull）のそれと比べたときの増加割合である。なお、このときの α を以下では α_1 とする。

二つ目の定義方法は、図 5 (b) に示すように Circle の疲労寿命線図が Push-pull のそれと一致するように α を決める、いわゆるデータフィティングによる決定法である。なお、このときの α を以下では α_2 とする。

Itoh らはいくつかの材料について非比例多軸試験を行って、疲労寿命や追硬化の挙動および α の材料依存性について系統的に考察した。その結果、 α_1 は結晶構造が面心立方晶（FCC）以外の材料に対してはそのまま適用できないことが分かり、 α_2 を代入した $\Delta \varepsilon_{NP}$ で疲労寿命を適切に評価できることを示した。また、 α_1 と α_2 は図 6 のように FCC 材料と BCC 材料毎にはほぼ直線で整理され、その関係が次式で表されることも示した。

$$\alpha_2 = \begin{cases} 0.8\alpha_1 + 0.1 & \text{for FCC} \\ 2(0.8\alpha_1 + 0.1) & \text{for BCC} \end{cases} \quad (8)$$

なお、式(8)の関係を用いて、 α_1 から求めた α_2 を以下では α_2' とする。

さらにこの研究では、静引張試験から得られる機械的特性から α_2 を簡易的に求める簡易推定法を次式で提案した。なお、簡易推定法で求めた α を以下では α_3 とする。

$$\alpha_3 = S \frac{\sigma_B - \sigma_Y}{\sigma_B} \quad (9)$$

ここで、 S は結晶構造の違いを考慮した材料定数であり、FCC 材料で $S = 1$ 、BCC 材料で $S = 2$ となる。 σ_B は引張強さであり、 σ_Y は降伏応力または 0.2%耐力である。図 7 には α_2 を α_3 との関係を示すが、若干のデータのばらつきは見られるものの、両者はほぼ一致している傾向が見て取れる。

f_{NP} は非比例負荷係数で、ひずみ経路の非比例負荷の強さを表すパラメータであり、次式で定義される。

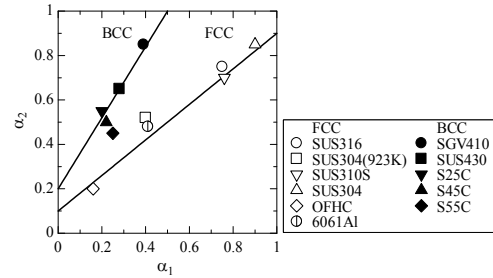


図 6 α_1 と α_2 の関係

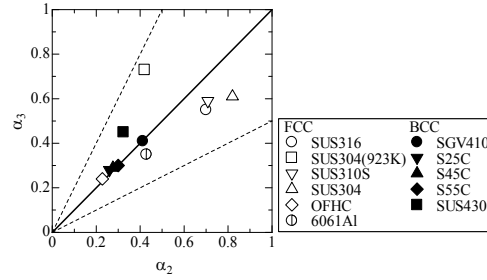


図 7 α_2 と α_3 の関係

$$f_{NP} = \frac{\pi}{2SI_{\max} \cdot L_{\text{path}}} \int_C |e_1 \times e_R SI(t)| ds \quad (10)$$

f_{NP} は比例負荷では 0 であり、非比例負荷では $0 < f_{NP} \leq 1$ となる。ここで、 e_R は $SI(t)$ 方向の単位ベクトルであり、 ds は応力・ひずみ経路での経路の増加分を示している。 C は応力・ひずみ経路の積分路であり、“ \times ”は外積を示している。また L_{path} は全負荷経路の長さの和である。式(10)で $SI(t)$ は、応力の場合は σ 、ひずみの場合は ε と置換すれば良いが、 SI - ξ - ζ 極座標系での経路で積分するので応力およびひずみ基準の違いによる f_{NP} 値の差はない。また、 f_{NP} は極座標において円形の場合 1 をとる。

(2) 解析ツール

上述で示した IS 法の手法に基づいた応力・ひずみの解析ツールを製作した。プログラム言語は C# である。図 8 は本プログラムの計算の流れを示しており、下記に示す 1)-8) のカテゴリに分けられる。図 9 に示す円筒試験片に軸ひずみ (ε) とねじり (γ) を負荷した場合を本ツールの解析例として用いる。

① データ入力

実験・実機計測データや構造解析結果等の時系列の応力・ひずみデータ ($S(t)$: 応力・ひずみの 6 成分の時間データ) を指定の書式で入力する。

② $S(t)$ および S_{\max} の計算

IS 法に従って、 $S(t)$ 、 S_{\max} 等の計算を行う。

③ 基準軸の決定

$\xi(t)$ および $\zeta(t)$ を決める基準軸は、IS 法では S_{\max} 方向となるが (Method-1)、開発した解析ツールでは、最大累積損傷面と垂直な方向 (Method-2) およびユーザーが任意に決めた方向 (Method-3) を新たに加えている。

④ $\xi(t)$ および $\zeta(t)$ の計算

IS 法に従って $\xi(t)$ および $\zeta(t)$ 等の計算を行う。

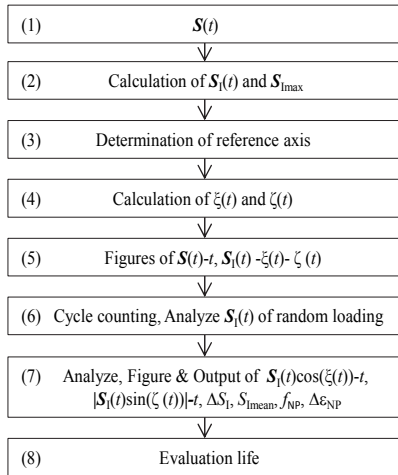


図8 プログラムの解析フロー

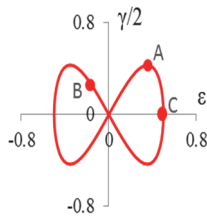


図9 ひずみ経路

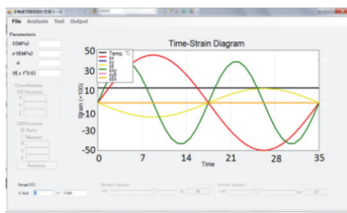


図10 ひずみ波形（入力データ）

⑤ $S_1(t)-t$ 、 $S_1(t)-\xi(t)-\zeta(t)$ の図示

IS法に従って、入力データ ($S(t)-t$) および極座標系表示 ($S_1(t)-\xi(t)-\zeta(t)$) した図を示すことで、ユーザーは応力・ひずみの変動について視覚的に確認することができる。例として、図10および図11に、本ツールより表示される入力データおよび極座標表示した図を示す。

⑥ 変動負荷での解析

繰返し負荷の振幅が複雑に変化する変動負荷については、レインフロー法等を用いて波形を分割し、サイクルカウントを行う。また分割された波形は、分割された範囲内での非比例度をそれぞれ算出し、それぞれの波形において非比例度を考慮した単軸負荷相当を求める。

⑦ 各種パラメータ・数値の解析、図示および出力

IS法に従って解析した図や数値が出力される。ユーザーは、これらの結果から応力・ひずみ範囲、平均値、非比例度などの情報を視覚と数値で読み取ることができる。例として、図12に本ツールより解析した単軸負荷相当 ($S_1(t)\cos\xi(t)-t$) と非比例度 ($|S_1(t)\sin\xi(t)|-t$) を示す。また、出力されたデータはファイルに保存できるので、そのデータを使って、ユー

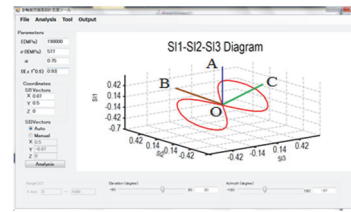


図11 極座標表示

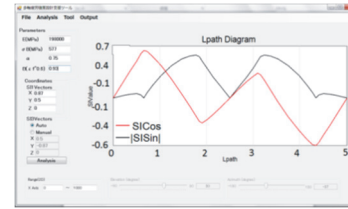


図12 ひずみ波形（出力データ）

ザー独自の解析もできる。

⑧ 損傷および寿命評価

疲労強度特性の基本データと応力・ひずみ履歴を入力することで、疲労損傷の累積状態や予測寿命を算出することができる。

以上より、IS法を三軸応力・ひずみ状態に適用できるように拡張するとともに、同手法を用いた解析ツールの開発を行った。この改良IS法は、多軸疲労設計・評価を行う上で応力・ひずみの状態を機械的に計算できるたいへん便利な手法である。また、本解析ツールは、複雑な繰返し多軸変動負荷状態を単軸の繰返し変動負荷に変換し、従来の繰返し変動負荷と同様の強度評価ができるようになっており、これにより研究者・技術者らは、多軸負荷に関する特別な知識や判断を要することなく疲労強度評価が可能となった。

今後の課題として、開発した解析ツールを実用化に繋げるための改良と強化を施し、応力・予測寿命などを簡便に評価できる実用性の高い改良版の多軸疲労強度設計解析ツールへの展開が必要であるが、本研究成果ではその基礎が構築できた。

<参考文献>

- (1) ASME, Boiler and Pressure Vessel Code Section III, Division 1 NH (2004).
- (2) ASME, Boiler and Pressure Vessel Code Section VIII, Division 3 (2004).
- (3) S.H. Doong, D.F. Socie and I.M. Robertson, "Dislocation substructure and nonproportional hardening", Transaction of the American Society of Mechanical Engineers, Journal of Engineering Materials and Technology, Vol.112 (1990), pp.456-464.
- (4) C.H. Wang and M.W. Brown, "A path-independent parameter for fatigue under proportional and non-proportional loading", Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures, Vol.16 (1993), pp.1285-1298.
- (5) D.F. Socie and G.B. Marquis, "Multiaxial Fatigue", pp.129-339 (2000) Society of Automotive Engineers International.
- (6) T. Itoh, T. Nakata, M. Sakane and M. Ohnami, "Nonproportional low cycle fatigue of 6061 aluminum alloy under 14 strain paths", European Structural Integrity Society, Vol.25 (1999), pp.41-54.
- (7) T. Itoh, T. Yang, "Material Dependence of Multiaxial Low Cycle Fatigue Lives under Non-proportional Loading", International Journal of Fatigue (Special Issue: Multiaxial Fatigue Models), Vol.33 (2011), pp.1025-1031.

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 12 件)

1. Masao Sakane, Takamoto Itoh, Hideyuki Kanayama, “Effect of Multiaxial Stress on Low Cycle Fatigue”, Bulletin of JSME, Mechanical Engineering Reviews, Vol.2, No.1, (2015), pp.1-15, 査読有, DOI 10.1299/mer14-00214.
 2. Naomi Hamada, Masao Sakane, Takamoto Itoh, Hideyuki Kanayama, “High Temperature Nonproportional Low Cycle Fatigue Using Fifteen Loading Paths”, Theoretical and Applied Fracture Mechanics Vol.73, (2014), pp.136-143, 査読有, DOI: 10.1016/j.tafmec.2014.07.006.
 3. Takamoto Itoh, Masao Sakane, Kazuki Ohsuga, “Multiaxial Low Cycle Fatigue Life under Non-proportional Loading”, International Journal of Pressure Vessels and Piping, Vol.110, (2013), pp.50-56, 査読有, DOI: 10.1016/j.ijpvp.2013.04.021
 4. Takamoto Itoh, Kenichi Fukumoto, Hideki Hagi, Akira Itoh, Daichi Saitoh, “Low Cycle Fatigue Damage of Mod.9Cr-1Mo Steel under Non-proportional Multiaxial Loading”, Procedia Engineering, Vol.55, (2013), pp.457-462, 査読有, DOI: 10.1016/j.proeng.2013.03.280.
 5. 伊藤隆基, 坂根政男, 清水祐太, “Definition of Stress and Strain Ranges for Multiaxial Fatigue Life Evaluation under Non-Proportional Loading”, 材料 (高温特集号) Vol.62, No.2, (2013), pp.117-124, 査読有.
 6. 中村寛, 高梨正祐, 伊藤隆基, 吳敏, 坂根政男, “非比例多軸負荷における負荷経路の可視化手法および設計手法の開発”, 機械学会論文集 (A 編) Vol.79, No.798, (2013), pp.198-208, 査読有.
 7. 伊藤隆基, 福元謙一, 羽木秀樹, 伊藤晃, 齋藤大地, “改良 9Cr-1Mo 鋼の非比例多軸低サイクル疲労強度評価”, 材料 (高温特集号) Vol.62, No.2, (2013), pp.110-116, 査読有.
 8. Min Wu, Takamoto Itoh, Yuuta Shimizu, Hiroshi Nakamura, Masahiro Takanashi, “Low Cycle Fatigue Life of Ti-6Al-4V alloy under Non-proportional Loading”, International Journal of Fatigue, Vol.44, (2012), pp.14-20, 査読有.
- [学会発表等] (計 33 件)
1. Takahiro Morishita, Shuli Liu, Takamoto Itoh, Masao Sakane, Hideyuki Kanayama, Masahiro Sakabe, Norio Takeda, “Fatigue Failure Life of SS400 Steel under Non-proportional Loading in High Cycle Region”, 11th International Fatigue Congress (Melbourn, Austraria, September 3, 2014).
 2. Shuli Liu, Takamoto Itoh, Noriyuki Fuji, “Visualization of Multiaxial Stress/Strain State and Evaluation of Failure Life by Developed Analyzing Program under Non-proportional Loading”, 11th International Fatigue Congress (Melbourn, Austraria, September 3, 2014).
 3. Masao Sakane, Yusuke Kitamura, Takamoto Itoh, Yuichi Irisawa, “Development of Miniature Creep Testing for High Temperature Materials - Development of Testing Machine”, 2nd Annual International Conference SSTT (Ostrava, Czech Republic, October 3, 2012).
 4. Takamoto Itoh, Yuichi Irisawa, Masao Sakane, Yusuke Kitamura, Takafumi Tsurui, Masaharu

Fujiwara, Taejoon Kim, “Development of Miniature Creep Testing for High Temperature Materials -Verification Testing-”, 2nd Annual International Conference SSTT, (Ostrava, Czech Republic, October 3, 2012).

5. Takamoto Itoh, Lixin Quan, Zhenlong Bao, “Development of low cycle fatigue testing machine for various multiaxial loading conditions”, 13th Int. Conf. on Pressure Vessel Technology (London, UK, May 21, 2012).
6. Takamoto Itoh, Masao Sakane, Kazuki Ohsuga, “Multiaxial low cycle fatigue life under non-proportional loading”, 13th Int. Conf. on Pressure Vessel Technology, London (London, UK, May 21, 2012).

[産業財産権]

○出願状況 (計 1 件)

名称: 多軸負荷試験装置及び方法

発明者: 伊藤隆基, 中澤理史, 旭吉雅健

権利者: 学校法人立命館, 独立行政法人国立高等専門学校機構

種類: 特許

番号: 特願 2011-077656

出願年月日: 2011 年 3 月 31 日

国内外の別: 国内

○取得状況 (計 2 件)

名称: 多軸疲労寿命評価方法及び装置

発明者: 坂根政男, 伊藤隆基, 中村寛, 高梨正祐

権利者: 学校法人立命館, 国立大学法人福井大学, 株式会社 IHI

種類: 特許

番号: 5540448

出願年月日: 2010 年 9 月 9 日

取得年月日: 2014 年 5 月 16 日

国内外の別: 国内

名称: 精密標点位置の作成治具

発明者: 坂根政男, 伊藤隆基, 中村寛, 高梨正祐

権利者: 権利者: 学校法人立命館, 国立大学法人福井大学, 株式会社 IHI

種類: 特許

番号: 5327541

出願年月日: 2009 年 11 月 9 日

取得年月日: 2013 年 8 月 2 日

国内外の別: 国内

6. 研究組織

(1)研究代表者

伊藤 隆基 (ITO, Takamoto)

立命館大学・理工学部・教授

研究者番号: 40242581

(2)連携研究者

坂根 政男 (SAKANE, Masao)

立命館大学・理工学部・教授

研究者番号: 20111130

山本 隆栄 (YAMAMOTO, Takaei)

大分大学・工学部・助教

研究者番号: 20295166

旭吉 雅健 (HIYOSHI, Noritake)

石川工業高等専門学校・機械工学科・講師

研究者番号: 30342489