

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 30 年 5 月 30 日現在

機関番号：34315

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2015～2017

課題番号：15K05698

研究課題名(和文) 非比例多軸変動負荷における疲労強度特性の実験的解明および強度評価手法の開発

研究課題名(英文) Investigation and Evaluation of Fatigue Property and Damage under Non-proportional Multiaxial Variable 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) 3,800,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、研究代表者らの非比例多軸負荷におけるこれまでの一連の疲労強度研究の成果を基に、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具体化するための多軸疲労強度評価手法を構築した。すなわち、蓄積された多軸疲労強度データおよび研究代表者らが提示している応力・ひずみの評価手法(IS法)および解析ツールを最大限活用し、複雑な非比例の繰返し変動負荷にも対応できる多軸疲労損傷評価モデルを開発した。

研究成果の概要(英文)：This study discussed the investigation of fatigue properties under non-proportional multiaxial random loadings to improve safety design and reliable maintenance for structure components and materials based on a series of the delegate's works. Developments of damage model and design tool to evaluate state of stress and strain multiaxiality as well as damage under the loadings are also carried out.

研究分野：材料強度

キーワード：金属疲労 多軸負荷 疲労損傷 寿命評価 解析ソフト

1. 研究開始当初の背景

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[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とから、かならずしも疲労損傷をうまく評価できないことが分かっている[1-4]。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や解釈が解析者によって異なるというような問題があった。

航空機や各種車両をはじめとする重工業関連の設計・開発および製造の現場でも、変動荷重を受ける構造部材の疲労設計が重要である。しかし、実機では非比例多軸変動負荷を受けることが多いにもかかわらず、通常多用されている機械構造用材料などは単軸負荷での疲労強度評価がされている。そのため、非比例変動負荷を見極めて疲労寿命が設計寿命を満たすよう取り組まなければならないところ、非比例多軸負荷に対する力学的な取扱いの複雑・困難さ故にそれを避けている。その結果、安全率を大きく見積ることによる対応で済まして過剰設計になったり、安全率の見積もりによる強度よりも実際の疲労強度の方が低くなるなど、予期せぬ機器の損傷の対応に追われているのが実情である。また、ここ数年のいくつかの実験研究報告では、非比例多軸負荷を受ける構造材料の疲労寿命が著しく低下することが指摘されており[2,5-7]、設計現場でもその危険性が強く受け止められ、非比例・多軸の過酷負荷状態下にある機器・構造物の健全性および信頼性保証の点からも、適切な非比例多軸疲労の変形・損傷評価モデルの構築が強く望まれている。とくに、機器の製造費軽減や軽量化に伴ってその社会的ニーズは年々増加し、国内外の研究者や企業より申請者らに対して多軸疲労に関する研究相談や共同研究の件数が増加する傾向にある。しかしながら、いくつかの寿命評価モデルが提案されてはいるが、依然寿命評価モデルの完成の域には至っていないのが実状である。その理由として、

- (1) 非比例多軸の繰返し変動負荷による疲労強度低下のメカニズムの把握・解明が不十分。すなわち、変動負荷において寿命に及ぼす負荷経路の影響を考察するためには、

変形・破壊挙動が未解明の多軸領域での実験データの収集と解析が必要。(基礎研究：実験・解析、評価)

- (2) 研究室レベルでの寿命評価モデルはいくつかあるが、それを実際の設計開発や維持管理等に適用させるには修正・補強が必要。すなわち、設計現場で技術者が容易に使える、且つ繰返し変動負荷に対応した寿命評価の評価モデルや手法の提示が必要。(応用研究：評価、分析)

が挙げられる。(1)については、一定振幅負荷での疲労損傷のメカニズムはこれまでの実験を通してある程度明らかになりつつあるものの、変動負荷に対してはまだ十分に明らかにされていない。したがって、未解明のままの非比例多軸の変動負荷下での累積損傷について実験を通して明らかにする必要がある。(2)では提案されている各種寿命評価モデルを非比例多軸の変動負荷に適用するには、いくつかの未解決の問題を抱えている。その最も大きな障害となっているのが、応力・ひずみの主軸方向が複雑に変化する非比例多軸負荷では、適切な応力・ひずみの評価手法が存在しなかったことにある。

研究代表者は、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(以下、IS法)を提案している[8]。この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。さらに、同手法を強度設計の現場の技術者がより使い易くするために時系列の応力・ひずみの振幅や同主軸方向の変化の度合いをビジュアル的に示すことができる解析ツールを製作した(平成24~26の科研基盤研究Cの成果)。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いる。しかし、上述したように変動負荷での非比例負荷の損傷メカニズムの取扱い方法が未解決問題となっている。したがって、(1)の基礎研究の追加およびその結果に基づいた非比例負荷による累積損傷メカニズムを明らかにした上で、それを損傷評価モデルや解析ツールに反映する必要があった。

そこで本研究では、これらの課題を遂行し、工業界に適応し得る多軸疲労強度評価モデル(以下、損傷評価モデル)を開発し、さらにそれを基に、ビジュアル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を構築するに至った。

<引用文献>

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. 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.
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.
5. D.F. Socie and G.B. Marquis, "Multiaxial Fatigue", pp.129-339 (2000) Society of Automotive Engineers International.
6. Andrea Carpinteri, Takamoto Itoh, Thierry Palin-Luc, Masao Sakane, Luca Susmel (Guest Editors), International Journal of Fatigue: Special Issue on "Multiaxial Fatigue 2013", Vol.67, 1-228, 2014.
7. Takamoto Itoh, TaoYang, "Material Dependence of Multiaxial Low Cycle Fatigue Lives under Non-proportional Loading", International Journal of Fatigue (Special Issue: Multiaxial Fatigue Models), Vol.33, No.8 (2011), pp.1025-1031.
8. 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, (2012), pp.110-116.

## 2. 研究の目的

航空機や高速鉄道車両、高温構造機器などの実機を構成する部材では、繰返し荷重の応力・ひずみの主軸が多方向に複雑に変動する多軸負荷（非比例多軸負荷）を受けることが多い。しかしこのような繰返し負荷に関して、その多軸応力・ひずみ状態や多軸負荷損傷を考慮した強度評価手法の開発はまだ発展途上にある。本研究では、申請者らの非比例多軸負荷におけるこれまでの一連の疲労強度研究の成果を基に、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具体化するための多軸疲労強度評価手法を構築する。すなわち、蓄積された多軸疲労強度データおよび申請者らが提示している応力・ひずみの評価手法（IS法）および解析ツールを最大限活用し、複雑な非比例の繰返し変動負荷にも対応できる多軸疲労損傷評価モデルを開発する。

## 3. 研究の方法

非比例多軸負荷における応力・ひずみの評価手法（IS法）を繰返し変動負荷に応用するための改良・強化を行い、産業界で通用する利便性と実用性の高い多軸疲労強度評価モデルの開発および同モデルを基に応力・予測寿命などを評価できる多軸疲労強度設計解析ツ

ールを開発することを目的としている。そこで、(1) 研究調査, データ収集および(2) 多軸疲労試験を実施し、(1)と(2)で得られた情報およびデータの解析結果を踏まえて、既に繰返し変動負荷に適応すべく改良したIS法を組み入れた(3) 多軸疲労強度評価モデル(損傷モデル) および (4) 改良型多軸疲労強度設計解析ツール(改良解析ツール)を開発する。最終的には、設計、維持・管理の現場の技術者が、多軸疲労強度評価を容易且つ機械的にできるようにするための疲労強度評価・解析のシステムを構築する。

## 4. 研究成果

### (1) 成果概要

平成 27~28 年度では、まず①国内外でのこれまでの多軸疲労研究の再調査と国内外研究ネットワークを利用して、変動負荷での多軸疲労強度データの入手と既存の損傷評価モデルの再検証を行い、モデルとツールの開発にフィードバックした。また、②非比例多軸の変動負荷における疲労損傷に及ぼす材料依存性および負荷経路依存性を明らかにするために疲労試験を実施した。得られた試験結果および①で得た情報を総合的に評価分析して、非比例多軸の繰返し変動負荷で各種損傷パラメータを抽出し、それを反映してIS法の変動負荷への対応強化に繋げた。

平成 28~29 年度では、上述の①および②に基づき非比例多軸の変動負荷にも対応した①損傷モデルの開発と多軸疲労強度設計解析ツール(解析ツール)の開発を行った。解析ツールでは、応力・ひずみの時刻歴のデータおよび実験寿命データを入力すると、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、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。さらに、非比例多軸繰返し負荷でのサイクル計数法や累積損傷評価法の組み込みを行い、解析ツールを強化した。また、損傷モデルおよび解析ツールを負荷経路および多軸負荷場を可視化するための工夫や、入力メニュー画面の改良などの機能を追加するなど、実用性に高いツールが開発できた。

### (2) 多軸疲労強度設計解析ツール

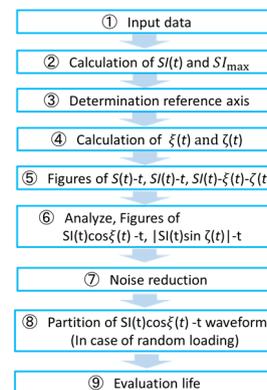


Fig. 1 The flowchart of this software

IS 法に基づいて、疲労寿命評価および負荷経路の解析ツール（解析可視化を行うソフトウェア）を開発した。プログラム言語はC#である。Fig. 1 に本ソフトウェアのフローチャートを示す。本ソフトウェアのプログラムは、下記のように①～⑨の計算工程に分割できる。以降は、フローチャートに基づいて本ソフトウェアの説明を行う。

① データ入力：

Excel ファイルに指定の書式で保存された実験データを本ソフトウェアに読み込む。

② SI(t)およびSI<sub>max</sub>の計算：

IS 法に基づいて、SI(t)およびSI<sub>max</sub>の計算を行う。SI(t)は式(1)で表され S<sub>i</sub>(t)は最大および最小の主応力または主ひずみのベクトルである。SI(t)は時刻 t の主応力・主ひずみの最大振幅を示している。また、SI(t)の 1 サイクル中の最大値を SI<sub>max</sub> とする。

$$SI(t) = \max[|S_1(t)|, |S_3(t)|] \quad (1)$$

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

③ 基準軸の決定：

IS 法では、ξ(t)およびζ(t)を決定する基準軸を SI<sub>ma</sub> 方向とする(Method-1)。本研究では、それに加えあるアルゴリズムで決定する最大損傷面と垂直な方向(Method-2)およびユーザーが自由に決定できる方向(Method-3)から選択できる。

④ ξ(t)およびζ(t)の計算：

IS 法に基づいて、次式でξ(t)およびζ(t)の計算を行う。

$$\frac{\xi(t)}{2} = \cos^{-1} \left( \frac{S_i(t_0) \cdot S_i(t)}{|S_i(t_0)| |S_i(t)|} \right), \quad 0 \leq \frac{\xi(t)}{2} \leq \frac{\pi}{2} \quad (3)$$

$$\zeta(t) = \tan^{-1} \left( \frac{S_i(t_0) \cdot e_z}{S_i(t_0) \cdot e_y} \right) \quad 0 \leq \zeta(t) \leq 2\pi \quad (4)$$

⑤ S(t)-t, SI(t)-t, SI(t)-ξ(t)-ζ(t)の描画：

IS 法に基づいて、入力データ S(t)-t, 主応力・主ひずみの時間履歴 SI(t)-t および極座標系表示 SI(t)-ξ(t)-ζ(t)を行う。これにより、ユーザーは応力・ひずみの大きさや非比例多軸負荷状態の変動を視覚的に確認できる。

⑥ SI(t) cosξ(t)-t, |SI(t) sinξ(t)|-t の描画：

IS 法に基づいて、実験データを単軸負荷相当に変換した負荷波形 SI(t) cosξ(t)および主軸方向の変化量|SI(t) sinξ(t)|を描画する。Fig. 2 は描画を行った実行画面である。

⑦ ノイズ除去

本ソフトウェアでは、本研究室で行われた実験により得られた実験データを使用するため、データにノイズが含まれる場合がある。ノイズが含まれていると、ノイズを極大値・

極小値として処理を行ってしまい適切に波形を分割することができない。そこで、ノイズを取り除くため、本ソフトウェアに 7 点近似法を行うプログラムを追加した。

7 点近似法は、波形のある 1 点と連続する前後 3 点（計 7 点）の平均を計算し、その 1 点の値が平均の値からユーザーによって決定された割合以上異なっている場合は、その 1 点をノイズと判断し取除く方法である。

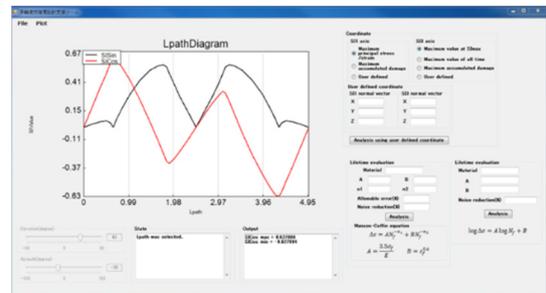


Fig. 2 L\_path on screen

⑧ 波形の分割

従来の本ソフトウェアでは、単軸相当の負荷波形が変動負荷波形である場合に疲労寿命評価を行うことが出来なかった。そこで、本ソフトウェアにレインフロー法を行うプログラムを追加した。本ソフトウェアでのレインフロー法の処理を以下に示す。

データリストから SI(t) cosξ(t)を読み込み、波形の尖頭値である極大値・極小値を計算し、配列としてデータリストに保存する。尖頭値を保存した配列を E<sub>n</sub> とする。連続した尖頭値 4 個 E<sub>n</sub>, E<sub>n+1</sub>, E<sub>n+2</sub> および E<sub>n+3</sub> を読み込み、中間の二つの尖頭値 E<sub>n+1</sub> および E<sub>n+2</sub> が両端の尖頭値 E<sub>n</sub> および E<sub>n+2</sub> には含まれた Fig. 3 に示す稲妻型になれば中間の二つの尖頭値を消去し、尖頭値 E<sub>n+1}-E<sub>n+2</sub> を振幅として 1 サイクルとカウントする。次いで、この両端に続く 2 個の尖頭値 E<sub>n+4</sub> および E<sub>n+5</sub> を読み込み、E<sub>n+2}→E<sub>n+1</sub>, E<sub>n+4}→E<sub>n+2</sub> および E<sub>n+5}→E<sub>n+3</sub> と置き換え上述の処理を次々に行う。このパターンにならない時は、E<sub>n+1}→E<sub>n</sub>, E<sub>n+2}→E<sub>n+1</sub> および E<sub>n+3}→E<sub>n+2</sub> と置き換え、尖頭値 E<sub>n+4</sub> を読み込み上述の処理を行う。この処理を n=0 から最終点まで行い、最終点まで伝達したら改めて n=0 から同様の処理を繰返し、Fig. 3 に示す稲妻型がなくなるまで実行する。このとき、最後に残った波形は半サイクルとしてカウントする。</sub></sub></sub></sub></sub></sub></sub>

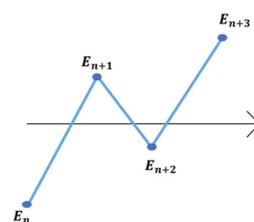


Fig. 3 Zigzag waveform

本ソフトウェアを用いて行ったレインフロー法の結果は、手計算で行った結果と一致し

た。

#### ⑨ 疲労寿命評価

入力データがひずみの場合は、レインフロー法を用いて分割した波形ごとに式(5)を用いてひずみ範囲 $\Delta\varepsilon_{NP}$ を計算し、そのひずみ範囲 $\Delta\varepsilon_{NP}$ から式(6)を用いて破断繰返し数 $N_f$ を計算する。その結果から線形累積損傷則を用いて、疲労寿命を計算する。

$$\Delta\varepsilon_{NP} = (1 + \alpha f_{NP})\Delta SI \quad (5)$$

$$\Delta\varepsilon_{NP} = AN_f^{-n_1} + BN_f^{-n_2} \quad (6)$$

本ソフトウェアでは、入力データが応力の場合に疲労寿命を計算することができなかったため、新たにプログラムの追加を行った。

入力データが応力の場合は、レインフロー法で分割した波形ごとに式(7)を用いて応力範囲 $\Delta\sigma_{NP}$ を計算し、その応力範囲 $\Delta\sigma_{NP}$ から式(8)を用いて破断繰返し数 $N_f$ を計算する。その結果から線形累積損傷則を用いて、疲労寿命を計算する。

$$\Delta\sigma_{NP} = \Delta SI \quad (7)$$

$$\Delta\sigma_{NP} = A \log N_f + B \quad (8)$$

Fig. 4 は計算結果の表示画面である。解析を実行すると疲労寿命を計算し、画面下の「Output」に計算結果が出力される。また、「State」にはレインフロー法で分割した各波形毎の応力・ひずみ範囲および繰返し破断寿命が表示される。

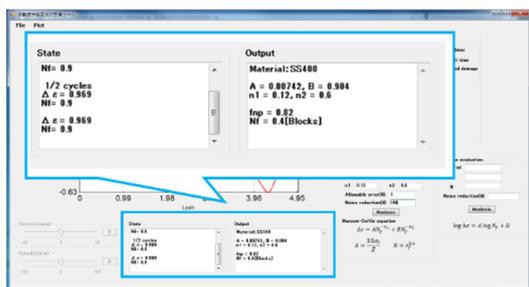


Fig. 4 Result of life evaluation

#### 5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 9 件)

- ① Fumio Ogawa, Takamoto Itoh, Takaei Yamamoto, Evaluation of multiaxial low cycle fatigue cracks in Sn-8Zn-3Bi solder under non-proportional loading, International Journal of Fatigue, 査読有、Vol.110, 2018, pp.215-224、DOI: 10.1016/j.ijfatigue.2018.01.021
- ② Pasquale GALLO, Stefano BRESSAN,

Takahiro MORISHITA, Takamoto ITOH, Filippo BERTO, Analysis of Multiaxial Low Cycle Fatigue of Notched Specimens for Type 316L Stainless Steel under Non-proportional Loading、Theoretical and Applied Fracture Mechanics, 査読有、Vol.89, pp.79-89, 2017, DOI: 10.1016/j.tafmec.2017.01.009

- ③ 伊藤隆基, 山本隆栄, 小川文男, 非比例負荷における Sn-8Zn-3Bi はんだの多軸低サイクル疲労寿命、材料、査読有、Vol. 66, No. 2, pp.166-172, 2017、DOI: <https://doi.org/10.2472/jsms.66.166>
- ④ Takahiro Morishita, Takamoto Itoh, Zhenlong Bao, Multiaxial Fatigue Strength of Type 316 Stainless Steel under Push-pull, Reversed Torsion, Cyclic Inner and Outer Pressure Loading, International Journal of Pressure Vessels and Piping, 査読有、Vol. 139-140, No.2, 2016, pp.228-236、DOI: 10.1016/j.ijpvp.2016.02.024
- ⑤ Takahiro Morishita, Takamoto Itoh, Masao Sakane, Hiroshi Nakamura, Masahiro Takanashi, Multiaxial Fatigue Property of Ti-6Al-4V using Hollow Cylinder Specimen under Push-pull and Cyclic Inner Pressure Loading, International Journal of Fatigue, 査読有、Vol. 87, No.6, 2016, pp.370-380, DOI:[dx.doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2016.02.019](https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2016.02.019)
- ⑥ Takahiro Morishita, Takamoto Itoh, Evaluation of multiaxial low cycle fatigue life for type 316L stainless steel notched specimen under non-proportional loading, Theoretical and Applied Fracture Mechanics, 査読有、Vol. 84, 2016, pp.98-105, DOI: 10.1016/j.tafmec.2016.02.007
- ⑦ Takahiro Morishita, Takamoto Itoh, Masao Sakane, Development of Bending and Torsion Fatigue Testing Machine for Multiaxial Non-Proportional Loading、Applied Mechanics and Materials, 査読有、Vol. 853, pp. 534-538, 2016、DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMM.853.534
- ⑧ Takamoto Itoh, Hiroshi Nakamura, Masahiro Takanashi, Min Wu, Multiaxial low cycle fatigue life of Ti-6Al-4V under non-proportional loading with mean strain、Theoretical and Applied Fracture Mechanics, 査読有、Vol.90, pp.165-173, DOI: 10.1016/j.tafmec.2017.04.004
- ⑨ 坂根政男, 伊藤隆基, 伝承すべき高温材料試験とその現状-3. 多軸クリープ疲労試験とその試験技術、材料、査読有、Vol. 64, No.12, 2015, pp.1047-1052, DOI: <https://doi.org/10.2472/jsms.64.1047>

[学会発表] (計 2 件)

- ① Takahiro Morishita, Fumio Ogawa, Takamoto Itoh, Evaluation and visualization of

multiaxial fatigue behavior under random non-proportional loading condition、The Challenges in Multiaxial Fatigue Workshop, 2017

- ② Takamoto Itoh, Fumio Ogawa and Takahiro Morishita、Fatigue Testing and Evaluation of Fatigue Strength under Multiaxial Stress State; Why do we need fatigue testing?、MATEC Web of Conferences

[その他]

ホームページ等

<http://www.ritsumei.ac.jp/~itohtaka/>

## 6. 研究組織

### (1)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

### (2)研究分担者

坂根 政男 (SAKANE, Masao)  
立命館大学・理工学部・教授  
研究者番号：20111130

### (3)連携研究者

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)  
大分大学・工学部・助教  
研究者番号：30342489