

平成 29 年 6 月 19 日現在

機関番号：12102

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2013～2016

課題番号：25289002

研究課題名(和文) 一般化非相似形等寿命線図法と多軸疲労寿命予測法の開発・検証に関する基礎研究

研究課題名(英文) Studies on development and validation of generalized anisomorphic CFL diagram approach for multiaxial fatigue life prediction

研究代表者

河井 昌道 (KAWAI, Masamichi)

筑波大学・システム情報系・教授

研究者番号：90169673

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 14,200,000円

研究成果の概要(和文)：本研究においては、複合材料の疲労挙動の解明と複合材料に適した疲労設計法の確立を目的として実験的な基礎研究を行った。具体的には、研究代表者が提案した非相似形等寿命線図法を複合材料の異方性主軸方向に適用することで主軸・非相似形等寿命線図法へ一般化し、その妥当性を体系的な実験によって明らかにした。また、多軸応力状態となる多方向積層板の疲労解析へ応用する方法を確立した。より複雑な切欠き疲労寿命予測への発展的な応用方法も提案した。

研究成果の概要(英文)：A general fatigue life prediction method for composite laminates has been established on the basis of the in-plane principal CFL diagrams that are described by means of a new four-segment piecewise-linear CFL diagram with the spirit of the anisomorphic CFL diagram approach. It has successful been applied to fatigue life prediction of unnotched and notched composites of different kinds.

研究分野：材料力学

キーワード：複合材料 疲労 寿命予測 等寿命線図 非相似形等寿命線図 温度依存性 多軸応力 主軸等寿命線図

1. 研究開始当初の背景

複合材料の応用範囲の拡大に伴い、複合材料の任意の応力比に対する S-N 関係を予測する工学的な方法として等寿命線図を用いる方法が注目されるようになっていた。等寿命線図は金属材料に対しては目新しいものではない。しかし、連続繊維強化複合材料に対しては、それに適した等寿命線図法の議論が始まったのはごく最近のことであった。このため、複合材料に適した等寿命線図は同定されておらず、必然的に標準化も行われていなかった。金属材料に対して確立された手法が直接には複合材料には適用できないことが明らかにされつつあったが、このことは広く共通に認識されるには至っていなかった。

複合材料に適した等寿命線図法としてこれまでに提案されている有力な手法は世界に3つあった。Sutherland らの区分線形等寿命線図、Harris の釣鐘形等寿命線図、および Kawai (本研究代表者) の非相似形等寿命線図である。第1の方法は実験データの表示法であって疲労モデルではない。後者2つが実験データを減らすための工夫がなされた疲労モデルである。後者の2つの方法を比較したとき、Kawai モデルがより効率的で精度の高い疲労解析を可能にすることが明らかにされている。しかしながら、これら3つのモデルは、いずれも、複合材料の特定方位への疲労荷重に対するものであり、異なる方位については別々に適用されなければならないという制約を有していた。

2. 研究の目的

本研究においては次のことを目的とした。

(ア) 研究代表者が提案した非相似形等寿命線図法の有効性を広く検証すること

(イ) 非相似形等寿命線図法の概念を応用して、一方向炭素繊維強化複合材料 (CFRP) の異方位主軸方位に対する「主軸・非相似形等寿命線図法」を定式化すること

(ウ) 上記 (イ) を多方向 CFRP 積層板の「プライベース疲労寿命評価法」へ発展させること

(エ) 切欠きを有する一方向強化 CFRP ならびに多方向強化 CFRP の寿命評価に応用する方法を確立すること

3. 研究の方法

これらの目的を達成するため、次の3つの内容について研究することとした。まず、

(1) 一方向 CFRP に対して「主軸・非相似形等寿命線図法」を理論的にモデル化し、その一般的な有効性を検証する。このため、初期損傷のない平滑材および異なる損傷状態を模擬した切欠き材について実験等寿命線図を異なる温度で求め、等寿命線図に及ぼす温度と切欠きの影響を明らかにした。また、主軸・非相似形等寿命線図法による予測と比較することによって、提案する手法の適用性を評価した。次に、(2) 主軸・非相似形等

寿命線図法を応用して多方向積層板の疲労寿命を効率的に予測するためのプライベース疲労解析法を開発する。このため、提案する疲労モデルを古典積層理論に組み込み、多方向積層板に埋め込まれた一方向 CFRP の疲労破壊を評価する方法論を検討した。最後に、(3) 異なる多方向積層板 (クロスプライ積層板、擬似等方積層板など) の等寿命線図に及ぼす温度と切欠きの影響を明らかにし、得られた試験結果に基づいて主軸・非相似形等寿命線図法に基づく積層板疲労解析法の適用性を評価した。

4. 研究成果

(1) 一方向 CFRP の主軸・非相似形等寿命線図法の開発

①一方向積層板 (平滑材) の室温における非主軸等寿命線図の同定:

一方向 CFRP 積層板の非主軸疲労に対する等寿命線図の形状と繊維配向角依存性を明らかにした。また、先の研究において提案した非相似形等寿命線図の非主軸疲労に対する適用性を評価した。さらに、一方向 CFRP 非主軸等寿命線図の記述精度を向上させるための拡張された非相似形等寿命線図法を提案し、その有効性を実験結果との比較に基づいて調べた。この結果、以下の成果が得られた。

一方向 CFRP 積層板の非主軸疲労強度の応力比に対する感度は、繊維配向角に拘わらず、臨界応力比に対して最も高くなる。すなわち、臨界応力比に対して非主軸 S-N 関係の勾配が最も大きくなり、疲労荷重条件下の疲労損傷の累積が他の応力比による疲労荷重条件下よりも早くなる。

一方向 CFRP 積層板の非主軸等寿命線図は、応力振幅軸に関して非対称な形状を呈し、非対称性の程度は繊維配向角に依存する。非主軸等寿命線図の頂点は繊維配向角が大きくなるとともに第一象限から第二象限に向かって遷移する。この特徴は静的引張強度と圧縮強度の大小関係の遷移に対応している。 $\theta = 0, 10^\circ$ の場合は等寿命線図の頂点が第一象限に、また $\theta = 15, 30, 45, 90^\circ$ の場合には第二象限に現れる。(図 1 (a), (b))

繊維支配形の疲労挙動を呈する $\theta = 0^\circ$ 方位の疲労に対して、2領域形の非相似形等寿命線図法は、等寿命線図を精度良く予測することができる。また、それに基づく S-N 関係も実験結果とよく一致する。

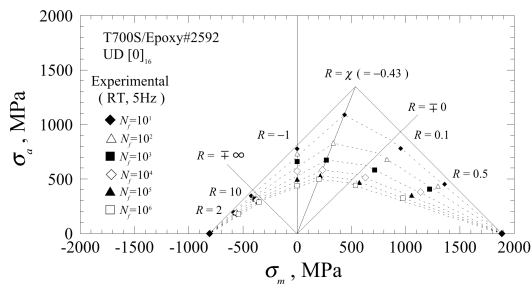
マトリックス支配形の疲労挙動を呈する $\theta = 10, 15, 30, 45, 90^\circ$ の方位の疲労に対しては、2領域形のモデルを用いて等寿命線図を精度良く予測することができない。これらの方位については、臨界応力比に対応する両振り疲労から圧縮疲労にかけて応力比依存性が大きく変化するため、臨界応力比に対する疲労挙動のみを参照して圧縮支配形の疲労に対する応力比依存性を記述しきれないことが2領域モデルの C-C 疲労側での記述精度が

不十分となる原因である。

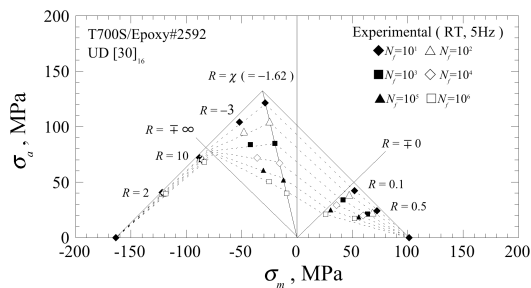
2領域モデルの臨界応力比の左右どちらかに応力比に対する感度変化を考慮するための遷移域を追加的に設けることによって拡張が施された3領域モデルは、繊維配向角に拘わらず、非主軸等寿命線図の予測精度を大きく改善することができる。

2領域モデルの臨界応力比の左右両側に応力比に対する感度が遷移する緩衝域を追加的に設けることを仮定する4領域形の非相似形等寿命線図法を提案した。

4領域形の非相似形等寿命線図法は、参照する試験データが増えることが欠点となるが、得られる特徴として繊維配向角に拘わらず非主軸等寿命線図を精度良く記述することができる。区分線形近似を仮定した場合、4領域モデルによって予測した非主軸S-N関係は3領域モデルによる予測結果よりも安全側の予測を与える。



(a) $\theta = 0^\circ$



(b) $\theta = 30^\circ$

図1 一方向CFRPの非主軸等寿命線図

②切欠きを有する一方向積層板の室温における非主軸等寿命線図の同定：

切欠きによる応力集中を伴う一方向CFRP積層板の室温における非主軸疲労挙動を調べた。この結果、以下の成果が導かれた。

相対切欠き寸法が増大するほど非主軸引張切欠き強度が低下すること（切欠き寸法依存性）を確認した。

繊維配向角 30° と 45° に対して引張強度が切欠き不敏感となった。このため、すべての繊維配向に有限の切欠き感度を予測する非主軸切欠き感度モデルはすべての方位について観察された特徴を精度よく予測することができない。

Hashin-Rotem 則を適用した非主軸切欠き感度モデルを開発した。これを用いることで、任意の繊維配向角および任意の相対切欠き寸法に対する切欠き強度を精度良く予測することができる。

切欠き感度を示す繊維配向に対しては、切欠き疲労モデルを用いてS-N関係を良好に予測することができる。

主軸方位と非主軸方位の疲労損傷進展式を独立に定式化することで、一方向CFRP積層板の疲労寿命を全方位について精度よく予測することができる。

マイクロスコープによる破面観察から、切欠き敏感および切欠き不敏感に対応する破壊様式に違いが認められた。

(2) 多方向積層板のプライベース疲労解析法の開発

一方向CFRP積層板の任意の繊維配向角および応力比について非主軸S-N関係を合理的かつ効率的に予測する方法について検討した。この研究から次の成果が得られた。

一方向CFRP積層板の繊維方向 ($\theta = 0^\circ$) の等寿命線図は、非相似形等寿命線図法が適用でき、引張強度、圧縮強度および臨界応力比による疲労試験から求めた時間強度を利用して同定することができる。

繊維垂直方向および繊維に沿う面内せん断方向の主軸等寿命線図はそれぞれ $\theta = 90^\circ$ および $\theta = 10^\circ$ の疲労データに基づいて同定できる。しかし、その形状は複雑なため、2領域形の非相似形等寿命線図法では十分な精度で記述できない。(図2)

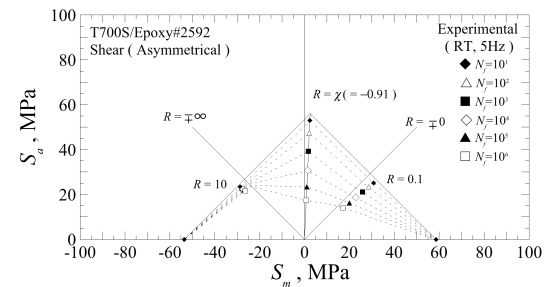


図2 面内せん断応力成分に関する非相似形等寿命線図

非主軸疲労データに基づいて同定したせん断等寿命線は応力振幅軸に関して非対称の形状を呈し、非主軸圧縮疲労に不随するせん断疲労の応力比に対する感度が非主軸引張疲労に不随するそれよりも小さい。この特徴は、トランスバース応力の符号によってせん断疲労の応力比に対する感度が影響を受けることを示すもので、この特徴を考慮したせん断等寿命線図の導入が非主軸S-N関係を精度良く予測するための必須条件となる。

繊維方向、繊維垂直方向、および繊維に沿う面内せん断方向のすべての主軸等寿命線図を精度よく記述する方法として4領域形の

非相似形等寿命線図法が有効である。

引張強度と圧縮強度の違いが予測できる修正 Tsai-Hill 則を疲労強度則に拡張することを考え、主軸等寿命線図から計算できる主軸疲労強度と組み合わせることによって任意の繊維配向角および応力比について非主軸疲労寿命の予測を可能にする新しい方法を提案した。

提案した疲労モデルを用いて予測した一方向 CFRP 積層板の非主軸 S-N 関係は繊維配向角および応力比に拘わらず実験結果と精度よく一致し、提案する手法の有効性が確認された。(図 3)

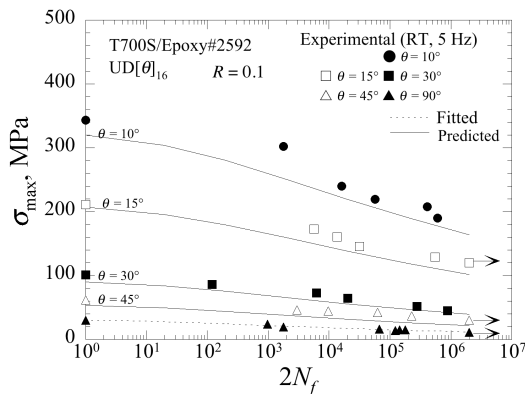


図 3 主軸等寿命線図を用いて予測した非主軸 S-N 関係と実験結果の比較

(3) 異なる多方向積層板の等寿命線図に及ぼす温度と切欠きの影響の解明

①多方向積層板の室温における非主軸等寿命線図の同定：

クロスプライ CFRP 積層板 (平滑材) の等寿命線図の繊維配向角依存性とその温度依存性を調べた。この結果、以下の成果が得られた。

クロスプライ CFRP 積層板の非主軸 S-N 関係は繊維配向角だけでなく、応力比および温度に大きく依存する。

クロスプライ CFRP 積層板の非主軸等寿命線図は、4 領域形の一般化された非相似形等寿命線図を用いることによって精度よく記述できる。

クロスプライ CFRP 積層板の非主軸疲労に対する等寿命線図の繊維配向角依存性と温度依存性を記述することができる統合化された非相似形等寿命線図法の可能性が示唆されている。

同じ応力比で異なる繊維配向に対して求めた S-N 関係は、試験温度に拘わらず、疲労強度比を用いて整理することで、主軸疲労 (繊維方向) と非主軸疲労 (繊維方向から偏る方向) に分けることができ、それぞれについて疲労強度ベースのマスター S-N 関係を同定することができる。

同じ応力比で異なる温度に対して求めた S-N 関係は、繊維配向角に拘わらず、疲労強度比を用いて整理することで温度依存性を

近似的に取り除くことができる。

同じ温度で異なる繊維配向角に対して求めた臨界応力比による非主軸 S-N 関係の繊維配向角依存性と応力比依存性は修正疲労強度比によって統一的に整理することができる。

②平滑 CFRP 積層板の主軸疲労強度の切欠き寸法効果と応力比依存性の解明：

切欠き (円孔) 寸法の異なる 4 種類の中央円孔試験片の主軸疲労強度および破壊様式を調べた。この結果に基づいて、平滑 CFRP 積層板の切欠き材の S-N 関係の特徴を明らかにし、併せて応力比依存性を考慮した切欠き疲労モデルの適用性を評価した。この結果、以下の成果が導かれた。

引張荷重の影響が大きい応力比の疲労試験から得られた切欠き材の S-N 関係は、疲労損傷の累積に伴って、平滑材の S-N 関係に急速に近づく傾向を示す。

圧縮荷重の影響が大きい応力比の疲労試験から得られた切欠き材の S-N 関係は、今回実験を行った荷重繰返し数の範囲では、平滑材から一定の強度低下によるずれを呈した。

上記①と②の応力比グループの間の応力比に対応する切欠き材の S-N 関係は、両者の中間の特徴を示す。また、このような特徴を示す応力比の範囲は切欠き材の臨界応力比を含む非常に狭い範囲に限定される。

切欠き材の臨界応力比を中心に疲労挙動の特徴が引張支配と圧縮支配に急速に遷移する切欠き材の S-N 関係を予測するモデルを提案した。

提案した切欠き疲労モデルを用いて、切欠き材の S-N 関係の予測を行った。切欠き疲労モデルは、実験を行った応力比と切欠き寸法に対して精度の良い予測を与えた。(図 4)

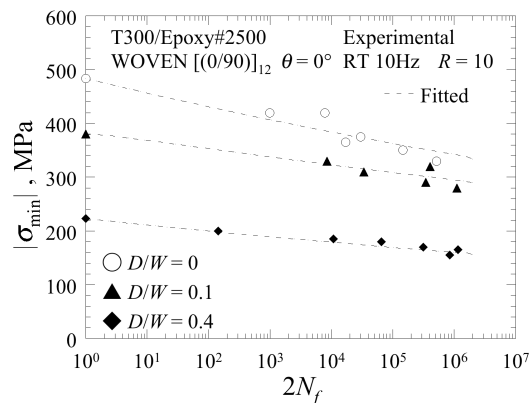


図 4 切欠きを有する平滑織り材の繊維方向の圧縮疲労による S-N 関係とその予測 (室温)

③切欠きを有する多方向積層板の非主軸等寿命線図の温度依存性の同定：

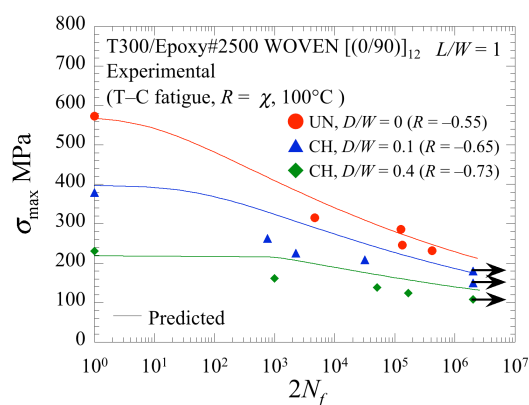
異なる温度で切欠き疲労試験を行い、多方向積層板の非主軸切欠き疲労挙動に及ぼす応力比と温度の影響を調べ、以下の成果を得た。

2領域および4領域形の非相似形等寿命線図を構築し、多方向積層板の異なる応力比に対するS-N関係を予測した。2領域形から4領域形へと拡張することによって、精度の良い予測結果が得られた。

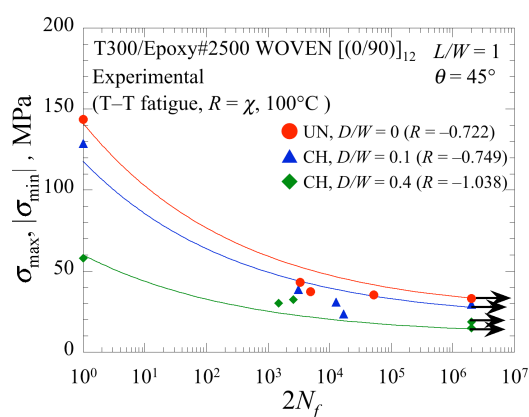
異なる繊維配向角について、修正疲労強度比を用いて臨界応力比によるS-N関係を整理すると、温度依存性を取り除くことができ、一本のマスター曲線を同定することができた。このマスター曲線を利用すれば、任意の温度における臨界応力比のS-N関係を予測することができる。

切欠き材の臨界応力比を境に疲労挙動が引張支配型から圧縮支配型へ遷移する特徴を表現することができる切欠き疲労モデルを開発した。開発した切欠き疲労モデルは、異なる繊維配向角および応力比に対して、精度の良い予測結果を与えることを確認した。

(図5(a), (b))



(a) $\theta = 0^\circ$



(b) $\theta = 45^\circ$

図5 切欠きを有する平織り材の臨界応力比に対する非主軸材 S-N 関係とその予測 (100°C)

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計8件)

① Kawai, M., Takeuchi, H., Taketa, I. and

Tsuchiya, A., Effects of temperature and stress ratio on fatigue life of injection molded short carbon fiber-reinforced polyamide composite, Composites Part A, 2017, Vol. 98, pp. 9-24. <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2017.03.008> 査読有.

② Kawai, M. and Yano, K., Anisomorphic Constant Fatigue Life Diagram of Constant Probability of Failure and Prediction of P-S-N Curves for Unidirectional Carbon/Epoxy laminates, International Journal of Fatigue, Vol. 83, 2016, pp. 323-334. <https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2015.11.005> 査読有.

③ Kawai, M. and Yano, K., Probabilistic Anisomorphic Constant Life Diagram Approach to Prediction of P-S-N Curves for Woven Carbon/Epoxy Laminates at Any Stress ratio, Composites Part A, Vol. 80, 2016, pp.244-258. <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2015.10.021> 査読有.

④ Kawai, M., Anisotropic size effect law for notched strength of unidirectional carbon/epoxy laminates – Part 1: Formulation –, Journal of Composite Materials, 2017, Vol. 51 (5), 593-602. 査読有.

⑤ Kawai, M. and Kasuga, A., Anisotropic size effect law for notched strength of unidirectional carbon/epoxy laminates – Part 2: Comparison with experiment –, Journal of Composite Materials, 2017, Vol. 51 (5), 603-621. 査読有.

⑥ Kawai, M. and Mitani, S., A Size Effect Law for Notched Tensile Strength of Woven Carbon/Epoxy Laminates, Advanced Composite Materials (ACM), Vol. 25, No. 2, 2016, pp. 177-207. <http://dx.doi.org/10.1080/09243046.2014.988926> 査読有.

⑦ Kawai, M., Yang, K. and Oh, S., Effect of alternating R-ratios loading on fatigue life of woven fabric carbon/epoxy laminates, Journal of Composite Materials, Vol. 49, No. 27, 2015, pp. 3387-3405. DOI: 10.1177/0021998314562847 査読有.

⑧ Kawai, M. and Itoh, N., A failure-mode based anisomorphic constant life diagram for a unidirectional carbon/epoxy laminate under off-axis fatigue loading at room temperature, Journal of Composite Materials, Vol. 48, No. 5, 2014 (March), pp. 571-592. doi:10.1177/0021998313476324 査読有.

[学会発表] (計61件)

① Kawai, M., Funaki, S., Taketa, I., and Hirano, N., Fatigue Strength of Stampable Short Carbon Fiber Reinforced Thermoplastic Composite, ECCM17, Munich, 26 – 30 June 2016, ICM – Internationales Congress Center München Messengelände 81823 München, Germany.

② Kawai, M., Saito, K., Taketa, I., and Tsuchiya, A., Temperature Dependence of Creep Rupture

Time of Short Carbon Fiber Reinforced Polyamide Composites, 17th US-Japan Conference on Composite Materials, 1-2 August, 2016, Hokkaido University, Hokkaido Prefecture, Sapporo, Japan.

③ Kawai, M. and Ishizuka, Y., Variable Loading Fatigue Life of Woven Fabric Carbon/Epoxy Laminates Under Alternating Equal-Life Waveforms of Different R-Ratios, 20th International Conference on Composite Materials (ICCM 20), 19-24th July 2015, Copenhagen, Denmark.

④ Kawai M. and Watanabe K., Size effect on longitudinal splitting in geometrically similar specimens of unidirectional carbon/epoxy composite laminates, V ECCOMAS Thematic Conference on the Mechanical Response of Composites COMPOSITES 2015, S.R. Hallett and J.J.C. Remmers (Editors), Composites 2015, 7-9 September 2015, Bristol, UK.

⑤ Kawai, M. and Watanabe, K., Size effect in notched strength of unidirectional carbon/epoxy composite laminates, 14th Japan International SAMPE Symposium & Exhibition, 7-9 December 2014, Shiinoki Cultural Complex, Ishikawa Prefecture, Kanazawa, Japan.

⑥ Kawai, M. and Ishizuka, Y., Effect of variable waveform loading on fatigue life of woven fabric carbon/epoxy laminates, 14th Japan International SAMPE Symposium & Exhibition, 7-9 December 2014, Shiinoki Cultural Complex, Ishikawa Prefecture, Kanazawa, Japan.

⑦ Kawai, M., Kumazawa, Y., and Udo, H., Effect of alternate change in stress ratio on fatigue strength of woven fabric CFRP laminate and life prediction using the anisomorphic CFL diagram, Proceedings (USB) of the 16th European Conference on Composite Materials – ECCM16, June 22-June 26, 2014, Seville, Spain.

⑧ Kawai, M., Yang, K. and Oh, S., Effect of variable R-ratio loading on fatigue life and damage accumulation in plain-weave fabric carbon/epoxy laminates, Proceedings of the American Society for Composites 29th Technical Conference, 16th US-Japan Conference on Composite Materials, and ASTM D30 meeting, 8-10th September 2014, CD-ROM, 12 pages, DEStech Publications, Inc., SanDiego, USA.

⑨ Kawai, M. (基調講演), Anisomorphic master diagram approach to fatigue life prediction of composites for any stress ratio at any temperature, 第11回日中複合材料交流会、開催日：2014年10月18(土)～23日(木)、会場：重慶大学、重慶市、中国。

⑩ Kawai, M. (Invited Talk), Anisomorphic master diagram approach to fatigue life prediction of composites for any stress ratio at any temperature, Workshop “Composite Fatigue (CompFat)”, February 6, 2014. Augsburg, Germany.

〔図書〕(計2件)

① 河井昌道 (第15章第14節、単著) CFRPの破壊挙動とその温度依存性、「高分子における劣化・破壊現象の写真・データ事例集」、技術情報協会、2014年3月24日、pp.619-631.

② Kawai, M. (第8章、単著) 2D woven fabric composites under fatigue loading of different types and in different environmental conditions In: Fatigue of Textile Composites, Editors: Professors Valter Carvelli, Politecnico di Milano, Italy and Stepan Lomov, KU Leuven, Belgium, Elsevier (Woodhead Publishing Limited), 2015, pp. 149-191.

〔産業財産権〕

○出願状況 (計0件)

○取得状況 (計0件)

〔その他〕

<http://www.kz.tsukuba.ac.jp/~mkawai/>

6. 研究組織

(1)研究代表者

河井 昌道 (KAWAI MASAMICHI)

筑波大学・システム情報系・教授

研究者番号：90169673

(2)研究分担者

なし

(3)連携研究者

なし

(4)研究協力者

なし