

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成24年5月10日現在

機関番号：12102
研究種目：基盤研究（B）
研究期間：2008～2011
課題番号：20360050
研究課題名（和文） 非相似形等寿命線図に基づく疲労寿命予測法の検証と影響因子に関する基礎研究
研究課題名（英文） Study on verification of the anisomorphic CFL diagram approach to fatigue life prediction and identification of controlling factors
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

研究成果の概要（和文）： 本研究においては、CFRP 積層板の効率的な疲労寿命予測方法を開発・整備するため、応力比が S-N 関係に及ぼす影響を広範囲の条件について実験的に調べた。また、研究代表者が提案した非相似形等寿命線図法の一般的な有効性を検証した。具体的には、実用的に重要な疲労荷重条件（温度、吸湿量、負荷方位）の影響および切欠きの存在による影響を実験によって詳細に調べ、それぞれの条件に対して非相似形等寿命線図法の適用性を評価した。

研究成果の概要（英文）： Effects of stress ratio on the fatigue strength under constant amplitude loading in different hygro-thermal environments have been elucidated to develop and establish a fatigue life prediction method suitable for CFRP laminates.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合 計
2008 年度	5,500,000	1,650,000	7,150,000
2009 年度	6,300,000	1,890,000	8,190,000
2010 年度	1,200,000	360,000	1,560,000
2011 年度	1,400,000	420,000	1,820,000
年度			
総 計	14,400,000	4,320,000	18,720,000

研究分野： 材料力学

科研費の分科・細目： 機械工学、機械材料・材料力学

キーワード： 複合材料、疲労、寿命予測法、等寿命線図、非相似形等寿命線図、影響因子

1. 研究開始当初の背景

(1) 多方向 CFRP 積層板の疲労強度に及ぼす応力比の影響を広範な疲労荷重様式について体系的に調べた研究はまだ多くなかった。また、任意の疲労荷重に対して疲労寿命を予測するための合理的な疲労モデルを開発する試みも少なかった。

(2) 広範囲の応力比による影響を扱った多方向 FRP 積層板の疲労に関する数少ない報告には次のものがあることを認識していた。Ramani と Williams は、対称 Angle-ply CFRP

積層板の S-N 関係を種々の応力比について求め、応力振幅と平均応力を用いて描いた等寿命線図が時間強度の大きさに拘わらず直線的になることを報告している。また、等寿命線図が応力振幅軸に関して非対称になることも見出している。後者は引張強度と圧縮強度の違いによるものと解釈されている。応力振幅と平均応力を用いた等寿命線図が応力振幅軸に関して非対称になることは、Ansell らおよび Harris らによっても報告されている。Harris らは、さらに、対称 Angle-ply CFRP

積層板の等寿命線図が積層板を構成する炭素繊維と Epoxy 樹脂の種類に拘わらず釣鐘状の曲線によって精度よく記述できることを報告している。Harris らの現象論的疲労モデルは任意の応力比に対する疲労挙動を包括的に表現することを可能にする初めての工学的疲労モデルである。しかしながら、釣鐘状等寿命線図に基づく疲労モデルを適用するためには、多くの疲労データとそれに基づく近似材料関数の同定作業が求められる。すなわち、異なるプリプレグや積層形態を含む FRP 構造の疲労解析に応用する場合、多くの時間とコストを要する。

これらのことから、多方向 CFRP 積層板の疲労強度に及ぼす応力比の影響を体系的に明らかにすること、および任意の疲労荷重に対して疲労寿命を予測するための合理的な疲労モデルを研究することが強く求められていた。

2. 研究の目的

研究代表者が提案する非相似形等寿命線図法は、Harris らの疲労モデルに見られる欠点を有しない世界で初めての効率的な手法となっている。

本研究においては、

- (1) 研究代表者が提案した非相似形等寿命線図法の一般的な有効性を検証し、これを通して疲労強度の応力比依存性をさらに深く探求することを目的とした。
- (2) さらに、それを工学的な疲労設計手法へ発展させることも目指した。具体的には、これまでに調べていない実用的に重要な疲労荷重条件（温度、吸湿量、負荷方位）、および損傷部材を模擬した切欠材の種々の疲労に対する適用性をそれぞれの実験によって詳細に調べた。

3. 研究の方法

本研究においては、研究代表者が提案した「非相似形等寿命線図法」の一般的な有効性を検証することを主目的とし、それを工学的な疲労設計手法へ発展させる上で考慮すべき事柄の抽出も併せて行った。

具体的には、次の 4 つの因子〔(Ⅰ) 試験温度、(Ⅱ) 吸湿量、(Ⅲ) 積層板の厚さ方向の面外疲労荷重、(Ⅳ) 切欠等の損傷発生源〕が応力比の異なる定常疲労強度に及ぼす影響を詳細に調査した。これらの異なる疲労条件に対して取得した疲労データに基づいて等寿命線図を作成し、研究代表者の提案する非相似形等寿命線図法を用いた予測と比較することによって、予測精度と適用範囲を明

らかにした。適用限界が認められる場合は、可能な一般化についても研究することとした。

4. 研究成果

- (1) 試験温度がドライ材／ウェット材の等寿命線図に及ぼす影響の解明：

擬似等方 CFRP 積層板のドライ試験片およびウェット試験片を用いて異なる応力比の疲労試験を室温と高温で行い、試験温度の違いが等寿命線図に及ぼす影響を明らかにした。また、得られた試験結果に基づいて、研究代表者が提案する非相似形等寿命曲線の異なる湿熱条件での適用性を評価した。この結果、以下の成果が導かれた。

- ① 試験温度が高くなるに伴い、臨界応力比（＝圧縮強度／引張強度）の値が大きくなる。これに呼応して、実験等寿命線図は右側に傾きながら、入れ子状の形状に遷移する。

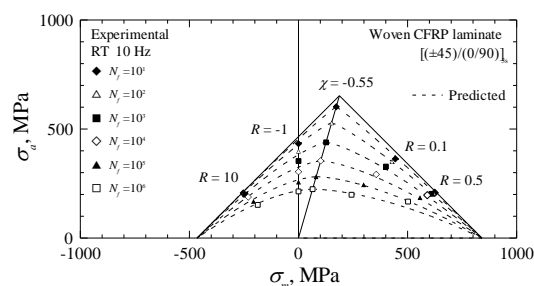


図1 室温ドライ条件における非相似形等寿命線図

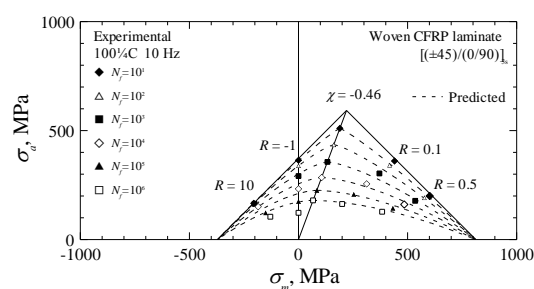


図2 高温ドライ条件における非相似形等寿命線図

- ② 試験温度に拘わらず、予測した非相似形等寿命線図は実験から求めた等寿命線図と良好に一致する（図1、図2）。

- ③ 温度に拘わらず、吸湿によって圧縮強度が約 5%低下する。疲労強度は 5～10%低下する。

- ④ 提案した非相似形等寿命線図法は、吸湿の有無、温度の違いに拘わらず、有効に利用

できる。

(2) 積層方向の室温／高温疲労荷重がドライ材の等寿命線図に及ぼす影響の解明：

厚さ（プライ枚数）の異なる一方向積層板 $[90]_n$ の疲労挙動と等寿命線図を調べた。この結果、以下の成果が導かれた。

① 引張-引張疲労は応力比の影響を強く受けるが、圧縮-圧縮疲労に及ぼす応力比の影響は小さい。

② 板厚の違いが疲労挙動に及ぼす影響は、引張疲労については顕著であるが、圧縮疲労については小さい。

③ 非相似形等寿命線図をトランスバース疲労に応用した場合、圧縮疲労について記述精度が低くなる。

④ 上記③の問題を克服するため、修正された非相似形等寿命線図を開発した。これらの成果は非相似形等寿命線図が有効となるメカニズムのヒントを与えている。

⑤ 室温の積層方向疲労挙動に基づいて提案された修正非相似形等寿命線図（4領域形の非相似形等寿命線図）（図3）は高温における積層方向疲労挙動に適用できる。

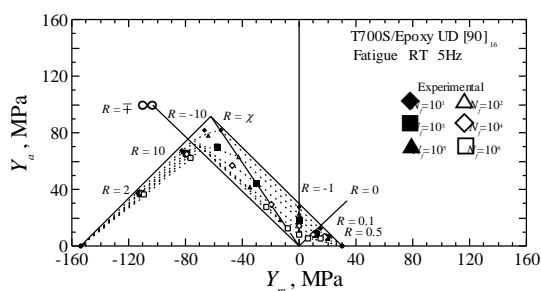


図3 トランスバース疲労に対する4領域形の非相似形等寿命線図

(3) 切欠きがドライ材の等寿命線図に及ぼす影響の解明：

平織 CFRP 積層板のドライ条件下における主軸疲労強度の切欠き（円孔）寸法効果と応力比依存性を実験によって調べた。得られた S-N 関係に基づいて切欠き材の等寿命線図を同定し、試験温度の違いによる影響を評価した。また、応力比依存性を考慮した切欠きモデルを開発し、その適用性を検討した。この結果、以下の成果が導かれた。

① 引張荷重の影響が大きい応力比の場合、切欠き材の S-N 関係は平滑材のそれに急速に近づく傾向を示す（図4）。

② 圧縮荷重の影響が大きい応力比の場合、切欠き材の S-N 関係は平滑材のそれから低強度側に一定量のずれを呈する。

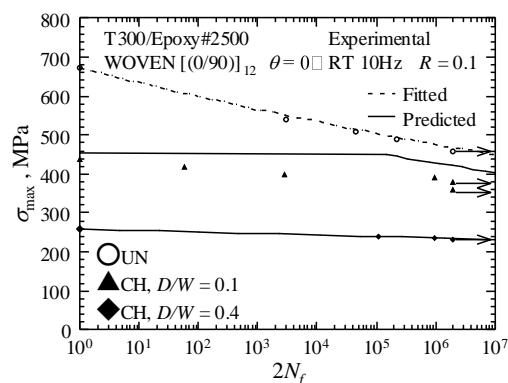


図4 引張疲労荷重を受ける切欠き材の S-N 関係

③ 室温および高温のいずれの条件においても、上記①、②の特徴が認められる。

④ 観察された切欠き材の疲労挙動の応力比依存性に基づいて定式化した切欠き疲労モデルは精度の高い予測を与える。

(4) 積層方向の室温疲労荷重がウェット材の等寿命線図に及ぼす影響の解明：

飽和するまで吸水させた一方向 CFRP 試験片（ウェット材）の繊維垂直方向（トランスバース方向）に異なる応力比による疲労試験を室温で行い、ウェット材の疲労挙動と等寿命線図を同定した。さらに、前年度に取得済みのドライ材に対する結果と比較することによって、吸水がトランスバース方向の疲労強度と等寿命線図に及ぼす影響を明らかにした。この結果、以下の成果を得た。

① 応力比に拘わらず、ウェット材の疲労強度はドライ材の疲労強度よりも低くなる。

② 応力比が小さくなるとともに、ウェット材の引張疲労強度が明瞭に低下する。一方、圧縮-圧縮疲労強度の応力比依存性は小さいウェット材の特徴はドライ材のそれと類似している。

③ トランスバース疲労に対する等寿命線図は、吸水の有無に拘わらず、上記②の特徴のために、引張疲労側と圧縮疲労側で形状が顕著に変化する（図5）。

④ この特徴を精度よく記述するためには、拡張された4領域形の非相似形等寿命線図を用いる必要がある。

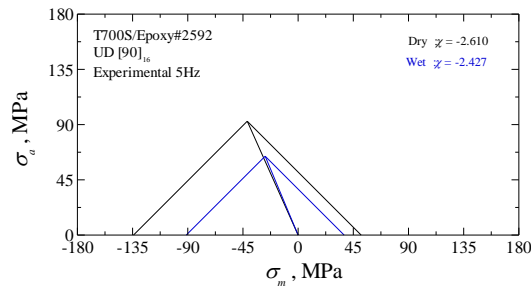


図5 室温等寿命線図の概形に及ぼす吸水の影響

(5) 積層方向の高温疲労荷重がウェット材の等寿命線図に及ぼす影響の解明：

上記研究(4)を高温条件で行い、トランスバース疲労に及ぼす吸水と温度の重畳効果を調べた。この結果、以下の成果を得た。

- ① ウェット材の疲労強度は高温に曝されることによってさらに低下する。
- ② 高温における非相似形等寿命線図は室温におけるそれと同様の特徴を呈する (図6)。

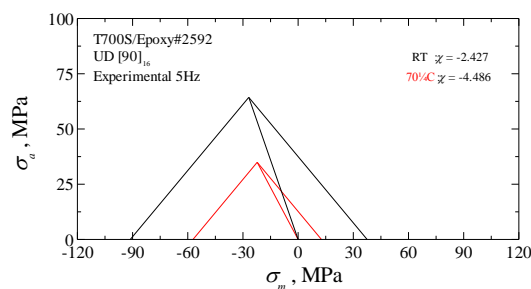


図6 高温等寿命線図の概形に及ぼす吸水の影響

(6) 切欠きがウェット材の等寿命線図に及ぼす影響の解明：

飽和するまで吸水させた中央円孔試験片を用いて異なる応力比の疲労試験を室温で行い、等寿命線図の特徴を明らかにした。この結果、以下の成果を得た。

- ① 切欠きによる強度低下は吸水によって低下する。このことは切欠き強度が正味断面支配形となることを意味する。
- ② ウェット切欠き材のS-N関係はドライ切欠き材のそれと類似の応力比依存性を示す。
- ③ ウェット切欠き材の等寿命線図はドライ切欠き材のそれと類似しており、拡張された非相似形等寿命線図法が適用できる (図7)。

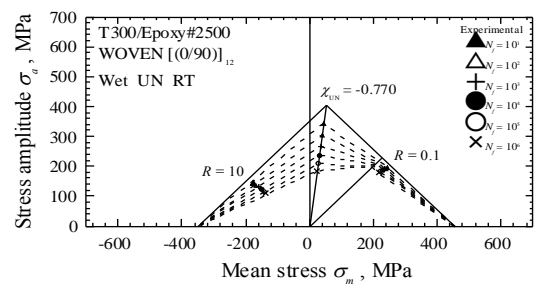


図7 吸水した切欠き材の等寿命線図

これらの研究成果は CFRP の湿熱環境下における疲労寿命の理解と解析の高精度化に大きく寄与する。

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 20 件)

- ① Kawai, M., Matsuda, Y., Anisomorphic Constant Fatigue Life Diagrams for a Woven Fabric Carbon/Epoxy Laminate at Different Temperatures, Composites Part A, 査読有, 2012, Vol. 43, pp. 647-657. <http://dx.doi.org/10.1016/j.compositesa.2012.01.009>
- ② Kawai, M., Matsuda, Y., Yoshimura, R., A General Method for Predicting Temperature-Dependent Anisomorphic Constant Fatigue Life Diagram for a Quasi-Isotropic Woven Fabric Carbon/Epoxy Laminate, Composites Part A, Vol. 43, 査読有, 2012, Vol. 915-935. <http://dx.doi.org/10.1016/j.compositesa.2012.01.025>
- ③ Kawai, M. and Murata, T., A Three-Segment Anisomorphic Constant Life Diagram for the Fatigue of Symmetric Angle-Ply Carbon/Epoxy Laminates at Room Temperature, Composites Part A, 査読有, Vol. 41, 2010, pp. 1498-1510. <http://dx.doi.org/10.1016/j.compositesa.2010.06.012>
- ④ Yoshimura, R., Kawai, M. and Matsuda, Y., Anisomorphic Constant Life Diagram Approach Taking Account of the Temperature Dependence of Fatigue of CFRP Laminates, Proc. of The Seventh Asian-Australasian Conference on Composite Materials (ACCM-7), 査読有, 2010, CDROM.
- ⑤ Yagihashi, Y., Kawai, M., Hoshi, H. and

Iwahori, Y., Effect of Water Uptake on the Fatigue Behavior of a Quasi-Isotropic Woven Fabric Carbon/Epoxy Laminate at Different Stress Ratios, Proc. of Asian Pacific Conference for Materials and Mechanics and Mechanics (APCMM2009), 査読有, 2009, USB.

⑥ Kawai, M. and Saito, S., Off-Axis Strength Differential Effects in Unidirectional Carbon/Epoxy Laminates at Different Strain Rates and Predictions of Associated Failure Envelopes, Composites Part A, 査読有, Vol. 40, 2009, pp. 1632-1649.

<http://dx.doi.org/10.1016/j.compositesa.2009.08.007>

⑦ Kawai, M. and Arai, Y., Off-Axis Notched Strength of Fiber Metal Laminates and a Formula for Predicting Anisotropic Size Effect, Composites Part A, 査読有, Vol. 40, 2009, pp. 1900-1910.
<http://dx.doi.org/10.1016/j.compositesa.2009.07.014>

〔学会発表〕(計 40 件)

① Kawai, M., A New Approach to Life Prediction of Composites Under Multiaxial Fatigue Loading at Any Stress Ratio, The 3rd ECCOMAS Thematic Conference on the Mechanical Response of Composites, 21-23 September 2011, Hannover, Germany, Leibnitz University Hannover.

② Kawai, M. and Teranuma, T., Principal Master Diagrams approach to Fatigue Life Prediction of Composite Laminates, International Conference on Composite Materials (ICCM18), Jeju, Korea, August 21-26, 2011.

③ Kawai, M. and Uchinuma, A., A New Fatigue Life Prediction Model for Notched CFRP Laminates, International Conference on Composite Materials (ICCM18), Jeju, Korea, August 21-26, 2011.

④ Kawai, M., Matsuda, Y., Yoshimura, R., Hoshi, H. and Iwahori, Y., Constant Fatigue Life Diagrams for a Woven CFRP Laminate at Room and High Temperatures, The Fifth International Conference on Fatigue of Composites (ICFC-5), October 16-19, 2010, Nanjing, China.

⑤ Kawai, M., Yagihashi, Y., Hoshi, H. and Iwahori, Y., Effect of Water Uptake on the Fatigue Behavior of a Quasi-Isotropic

Woven Fabric Carbon/Epoxy Laminate at Different Stress Ratios, The Fifth International Conference on Fatigue of Composites (ICFC-5), October 16-19, 2010, Nanjing, China.

⑥ Teranuma, T. and Kawai, M., Principal Master Diagrams for Fatigue of a Unidirectional CFRP Laminate at Room Temperature, The Seventh Asian-Australasian Conference on Composite Materials (ACCM-7), November 15-18, 2010, Taipei, Taiwan.

⑦ Kawai, M., Matsuda, Y., Hoshi, H. and Iwahori, Y., Anisomorphic Constant Fatigue Life Diagram for a Woven CFRP Laminate at Room and High Temperatures, International Conference on Composite Materials (ICCM-17), July 27-31, 2009, Edinburgh, UK.

⑧ Kawai, M., Multiaxial Modeling of Notch Sensitivity of Orthotropic Composites in the Ductile-to-Brittle Transition Region, The 2nd ECCOMAS Thematic Conference on the Mechanical Response of Composites (Composites2009), April 1-3, 2009, London, UK.

〔図書〕(計 2 件)

① Kawai, M. (第 7 章執筆, 単著), Woodhead Publishing Limited (UK), Creep and Fatigue in Polymer Matrix Composites (編者 Guedes, R.M.), 査読有, 2011, pp. 234-272.

② Kawai, M. (第 6 章執筆, 単著), Woodhead Publishing Limited (UK), Fatigue Life Prediction of Composites and Composite Structures (編者 Vassilopoulos, A.P.), 査読有, 2010, pp. 177-219.

〔その他〕

ホームページ等

<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

松田 哲也 (MATSUDA TETSUYA)
筑波大学・システム情報系・講師
研究者番号: 90345926