

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 9 日現在

機関番号：17102

研究種目：基盤研究(B)

研究期間：2010～2013

課題番号：22360052

研究課題名(和文) 高強度UACSの創出と熱応力緩和型CFRP/金属ハイブリッド材への応用

研究課題名(英文) Development of high strength UACS and its application to the CFRP/metal hybrid materials with low thermal residual stress

研究代表者

汪 文学 (Wang, Wen-Xue)

九州大学・応用力学研究所・准教授

研究者番号：40240569

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 9,900,000円、(間接経費) 2,970,000円

研究成果の概要(和文)：本研究は、従来の連続スリット型一方方向チョップドストランド(UACS)炭素繊維強化樹脂(CFRP)積層板より、さらに高強度・高剛性及び成形時に高流動性を有する2種類の新規不連続スリット型UACS積層板の設計を提案し、その作製方法を確立した。続いて、実験およびマルチスケール数値解析を用い、その引張強度特性及び損傷進展メカニズムを明らかにした。実験と数値解析の両面から高強度・高剛性及び成形時に高流動性を有するUACS積層板の開発に関する多くの重要を得た。さらに、UACS/Alハイブリッド材についての研究を行い、スリット角がハイブリッド材の熱残留応力及び引張強度に与える影響を明らかにした。

研究成果の概要(英文)：In this study, two kinds of new UACS laminates are developed. Tensile tests are conducted using a MTS 810 material-testing system. Test results reveal that present UACS laminates have higher strength than that conventional UACS laminates with continuous slits. A multiscale FEM analysis model for the analysis of the damage progression in UACS laminates is developed. The multiscale analysis includes a homogenization analysis and a multiscale damage progression analysis of a microscopic region and a macroscopic region. Numerical results are in good agreement with those obtained from previous experiments. The size effects on tensile properties of UACS laminates are investigated by tensile test and FEM analysis. The stress concentration at the free edge plays a main role for the effects of the specimen width on the tensile properties.

研究分野：工学

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：材料設計 プロセス 物性評価 複合材料 CFRP/金属ハイブリッド材

1. 研究開始当初の背景

(1) 一方向に配列したチョップドストランド(UACS と呼ばれる)は、東レ(株)と東北大学の研究グループ[1]が最近共同で開発した、従来のチョップドストランドをランダムに散布し、半硬化の熱硬化樹脂を含浸させたSMC(sheet molding Component)に代わる力学特性と流動性に優れた新規プレス成形材(図1)であり、2008年の日本複合材料学会の林エンジニアリング賞に選ばれた。図1に示すように一方向連続繊維プリプレグに繊維方向と直交した互い違いの切り込みを入れることによってUACSを作製している。このUACSを積層した擬似等方性複合材は従来のSMCより倍以上の剛性と強度を示し、複雑な局所的な形状変化にも積層構造を保ったままに成形できる。しかし、一方では、切り込みのない複合材の強度に比べ、UACSは半分以下の値を示す。従って、強度の改善を目指し、高強度と流動性に優れた新規UACSを創出し、更にこれを熱残留応力緩和に優れたCFRP/金属ハイブリッド材の開発に応用することは本研究の目標である。航空や自動車など多くの分野で適用が期待される、このような連続繊維を切断する奇抜な発想からの新規複合材の開発は世界にも例のない、日本発の画期的な研究である。

(2) 複合材料は通常金属や高分子材と異なり、微視的な構造と力学特性を制御することによってマクロ的な材料特性をコントロールできる構造材料である。従来のUACSは、切り込みが繊維に直交しており、切り込み先端の応力集中が繊維の破断や層間剥離を引き起こし、強度を低下させたと考えられる。この応力集中を緩和すれば、高強度と流動性に優れたUACSが創出できる。このため、本研究は繊維方向と角度を成す互い違いの切り込みを導入した2種類の新しい不連続切り込みUACS: (a)は切り込みが \pm 角度にあり、単層で利用できる、(b)は切り込みが一方向にあるため、 \pm 角度層を合わせて利用する。このように切り込みが繊維方向と角度を成すことによって先端の応力集中が緩和され、大きな強度改善が期待できる。更に、UACSのアスペクト比と切り込み角による複合材の力学特性、熱変形及び流動性への影響を究明すれば、複雑な形状に適用できる高強度、高剛性及び流動性に優れた不連続切り込みUACSを創出できる。

(3) ガラス繊維強化プラスチック/アルミ合金ハイブリッド材GlareがA380航空機に成功に応用された以来、高比強度、高比剛性及び高疲労強度のCFRP/金属(アルミ、チタン、マグネシウム)ハイブリッド材は新規複合材として世界各国が競って研究開発を行っている。この開発を成功させるためには、異材間の電位差に生じるガルバニック腐食の防止と異材間の熱膨張係数の差による大きな熱残留応力の緩和を実現しなければならない。申請者らはこれまでにガルバニック腐食

に強いCFRP/アルミと熱応力緩和についての研究で、一定の研究成果を挙げてきた。しかし、申請者らの研究を含め、今までの熱残留応力を緩和する方法は、2回成形プロセスとポストストレッチによる方法に限られており、エネルギーコストが高い、または、複雑の形状に適用できないなどの問題がある。このため、申請者らは、新しい熱残留応力緩和の方法として、流動性に優れた高強度と高剛性のUACS角度を利用する方法を提案し、高強度と熱残留応力緩和に優れたCFRP/金属ハイブリッド材を開発することを考案した。

2. 研究の目的

本研究は、一方向連続炭素繊維強化プラスチック(CFRP)のプリプレグに繊維方向と角度を成す互い違いの不連続切り込みを導入した一方向に配列したチョップドストランド(Unidirectionally Arrayed Chopped Stands)不連続切り込みUACSと呼ぶ成形材を新しく提案し、チョップドストランドのアスペクト比と切り込み角度による複合材の力学特性、熱変形及び流動性への影響についての実験及び数値解析の研究を行い、高強度、高剛性及び流動性に優れた不連続切り込みUACSの設計指針を確立すると共に、チョップドストランドの角度を制御することにより、常用金属の熱変形にマッチした高強度UACSを創出し、更にこれを利用した熱残留応力緩和に優れたCFRP/金属ハイブリッド材を開発することを目的とする。研究期間において主に以下の3つの研究目標を掲げる。

(1) 2種類のチョップドストランド不連続切り込みUACSのアスペクト比と切り込み角によるUACS複合材(擬似等方性積層板)の強度、剛性、熱変形及び流動性への影響を明らかにし、高強度、高剛性及び流動性に優れたUACSの設計指針を確立する。

(2) 上記研究で得られたアスペクト比と切り込み角による複合材の熱膨張係数への影響を利用し、表1に示す各種金属の熱変形にマッチしたUACSのアスペクト比と切り込み角を明らかにする。

(3) 上記の研究成果をベースに、アルミ合金とステンレスの熱変形にマッチした不連続切り込みUACSを用いた熱残留応力緩和型CFRP/金属ハイブリッド積層板を作製し、力学特性試験及び数値解析によって積層板の強度、剛性及び熱残留応力を調べ、高強度かつ低熱残留応力のCFRP/アルミ合金ハイブリッド材の作製方法を確立する。

3. 研究の方法

本研究は以下の数値解析および実験の研究方法を用いて研究を進める計画である。

(1) 先ず、数値解析によって不連続切り込みUACSのアスペクト比と切り込み角によるUACSの積層板(擬似等方性積層板)の強度、剛性、熱変形及び流動性への影響を明らかに

し、続いて代表的な不連続切込み UACS の積層板を作製して実験で数値解析の結果を検証し、高強度、高剛性及び流動性に優れた新規不連続切込み UACS の設計指針を確立する。
 (2) 上記研究で得られたアスペクト比と切り込み角による複合材の熱膨張係数への影響を利用し、熱膨張係数に関する数値解析と実験を行い、各種金属の熱変形にマッチした不連続切込み UACS のアスペクト比と切り込み角を明らかにする。
 (3) 不連続切込み UACS を用いた熱残留応力緩和型 CFRP/金属ハイブリッド積層板を作製し、疲労試験によって高強度と低熱残留応力のハイブリッド積層板の作製方法の有効性を検証する。

4. 研究成果

本研究は、従来の連続スリット型一方向チョップドストランド (Unidirectionally Arrayed Chopped Strands (UACS)) 炭素繊維強化樹脂 (CFRP) 積層板より、さらに高強度・高剛性及び成形時に高流動性を有する 2 種類の新規不連続スリット型 UACS 積層板の設計を提案し、その作製方法を確立し、さらに、実験およびマルチスケール数値解析を用い、その引張強度特性及び損傷進展メカニズムについて研究を行ったものである。実験と数値解析の両面から高強度・高剛性及び成形時に高流動性を有する UACS 積層板の開発に関する多くの重要な新しい知見を得ている。要約すると以下のような主な研究成果が得られた。

(1) 2 種類の新規不連続スリット型 UACS 積層板を提案し、従来の UACS 積層板に比べ、10%~15%の引張強度の向上及び高成形流動性を実現した。

(2) マイクロスケールモデルと均質法を利用したマクロスケールモデルを結合したマルチスケール数値解析モデルを提案し、数値シミュレーション結果により、各 UACS 積層板の損傷進展メカニズムを明確に示した。

(3) 引張荷重下における各種 UACS 積層板の力学特性における試験片サイズの影響を明らかにした。

(4) UACS/AI ハイブリッド材の熱残留応力及び引張強度についての研究を行い、スリット角がハイブリッド材の熱残留応力及び引張

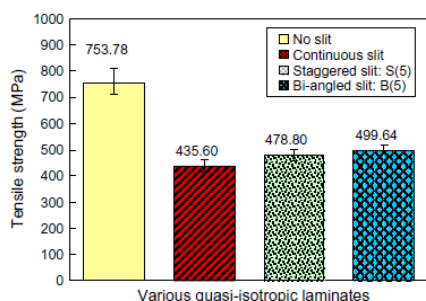


図 1 各種積層板の引張強度

強度に与える影響を明らかにした。

(5) 図 1 は実験結果の一例を示す。縦軸は引張強度、横軸は各種積層板を示す。

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 21 件)

1. Hang Li, Wen-Xue Wang, Terutake Matsubara, Multiscale analysis of damage progression in newly designed UACS laminates, *Composites: Part A* 57 (2014) 108–117. 査読あり

2. Dongmei Luo, Hong Yang, Yiyang Xiao, WENXUE WANG, A closed-Form Solution of Effective Young's Modulus for Composites including Multi-Shape Inclusions Using Improved Mori-Tanaka Method, *Advanced Materials Research* Vol. 704 (2013) pp 343-348.,2013.06. 査読あり

3. Hang Li, WENXUE WANG, Terutake Matsubara, Damage Progression in Unidirectionally Arrayed Chopped Strands Laminates with Different Slit Patterns under Tension, *Advanced Materials Research* Vol. 704 (2013) pp 307-312.,2013.06. 査読あり

4. 中村俊一郎, 松原 監壮, 高雄 善裕, WANG WENXUE, 航空機複合材料構造の修理法 - 供試体設計と破断荷重, 日本宇宙航空学会論文集, Vol.39 No. 2 (2013), pp.65-71.,2013.06. 査読あり

5. H.M. Ning, N. Hu, T. Kamata, J.H. Qiu, X. Han, L.M. Zhou, Christiana Chang, Y. Liu, L.K. Wu, H.L. Ji, WENXUE WANG, Y. Zemba, A. Atobe, Alamusi, H. Fukunaga, Improved piezoelectric properties of poly(vinylidene fluoride) nanocomposites containing multi-walled carbon nanotubes, *Smart Mater. Struct.* 22 (2013) 065011 (9pp), *Smart Mater. Struct.* 22 (2013) 065011 (9pp),2013.04. 査読あり

6. 中村俊一郎, 松原 監壮, 高雄 善裕, WANG WENXUE, 接着修理した CFRP 構造の破損モード, 日本複合材料学会誌, Vol.39 No. 2 (2013), pp.65-71.,2013.03. 査読あり

7. H. Li, W.X. Wang, Y. Takao and T. Matsubara, New designs of unidirectionally arrayed chopped strands by introducing discontinuous angled slits into prepreg, *Composites Part A*, Volume 45, (2013), pp.127-133.,2013.02. 査読あり

8. J. Hu, W. Wang, Y. Nakahara, S. Zhu, Crack Healing Behavior of SiC Whiskers Reinforced Si₃N₄ Composites, *Materials Science Forum* Vol. 750 (2013) pp 15-18.,2013.01. 査読あり

9. H. Li, W.X. Wang, Y. Takao and T. Matsubara, Effects of Slit Patterns on the Tensile Properties of Unidirectionally Arrayed Chopped Strands Composites,

Materials Science Forum Vol. 750 (2013) pp 208-211.,2013.01. 査読あり

10. J. Xue, W.X. Wang, Y. Takao and T. Matsubara, Thermal Residual Stress and Tensile Strength of UACS/Al Laminate with Different Slit Angles, Materials Science Forum Vol. 750 (2013) pp 204-207.,2013.01. 査読あり

11. LUO Dongmei, WANG Wenxue, CHEN Qiu-yan, YANG Hong, ZHOU Ying-long, LI Bangding, Effective mechanical properties for composites with three-phase randomly distributed aggregates predicted by Multi-step Mori-Tanaka method, Applied Mechanics and Materials Vol. 232 (2012) pp 73-77.,2012.10. 査読あり

12. Z.X. Chen, W.X. Wang, Y. Takao, T. Matsubara and L.M. Ren, Changes in surface characteristics of anodized titanium arising from water immersion, 粉体および粉末冶金, Vol.59, No.7 pp. 415-420 (2012.7),2012.07. 査読あり

13. Noriyoshi Hirano, W.X. Wang, Y. Takao, The Effect of temperature on Bearing Strength of CFRP Bolted Joint with Washer Constraining, 応用力学研究所報 (Reports of Research Institute for Applied Mechanics, Kyushu University) No.142, 21-27 (2012). 査読なし

14. Z.X. Chen, W.X. Wang, Y. Takao, T. Matsubara, L.M. Ren, Surface characteristics and indentation deformation of porous anodic TiO₂ layer before and after hot water treatment, Rare Metal Materials and Engineering, 41(S1), pp. 38-42 (2012).,2012.02. 査読あり

15. Z.X. Chen, W.X. Wang, Y. Takao, T. Matsubara, L.M. Ren, Microstructure and shear fracture characteristics of porous anodic TiO₂ layer before and after hot water treatment, Applied Surface Science, 257 (2011) 7254-7262.,2011.04. 査読あり

16. Jia Xue, Wen-Xue Wang, Yoshihiro Takao, and Terutake Matsubara, Reduction of thermal residual stress in carbon fiber aluminum laminates using a thermal expansion clamp, Composites Part A, 42 (2011) 986-992.,2011.04. 査読あり

17. W.X. Wang, T. Matsubara, Y. Takao, Y. Imai, C.N. Xu, A new smart damage sensor using mechano-luminescence material, Materials Science Forum, Vols. 675-677 (2011) pp 1081-1084.,2011.01. 査読あり

18. Wenliang Zhu, Dongmei Luo, Yinglong Zhou, Wenxue Wang, An Analytical Model of Stress-Transfer in the Nano-Composites with Debonding Interface, Advanced Materials Research, Vols. 163-167 (2011) pp 4599-4603.,2011.01. 査読あり

19. L.M. Ren, W.X. Wang, Y. Takao, and Z.X. Chen, Effects of Cementum-dentine Junction and Cementum on the Mechanical Response of Tooth Supporting Structure, Journal of Dentistry, Volume 38, Issue 11, November 2010, Pages 882-891 (2010),2010.11. 査読あり

20. L.M. Ren, W.X. Wang, Y. Takao, and Z.X. Chen, Evaluation of the biomechanical characteristic of tooth supporting structure under occlusal load, 粉体および粉末冶金, 57巻5号, 298-305(2010).,2010.05. 査読あり

21. Z.X. Chen, W.X. Wang, Y. Takao, T. Matsubara and L.M. Ren, Surface treatments of titanium anodized in phosphoric acid solution and in vitro cell responses, 306-313(2010), 粉体および粉末冶金, 57巻5号, 306-313(2010).,2010.05. 査読あり

「国際学会発表」(計8件)

1. 松原 監壮, WENXUE WANG, 高雄 善裕, 安田 賢三, 林 良輔, Effects of the cure pressure on the interlaminar shear strength of CFRP-steel hybrid laminate cured by hot pressing for a short time, Proceedings of THE 19TH INTERNATIONAL CONFERENCE ON COMPOSITE MATERIALS (ICCM-19), Paper ID WAN80433, pp.1-8, Montreal, Canada, (2013.7.28-8.2). 査読なし

2. Wen-Xue Wang, Hang Li, Yoshihiro Takao, Terutake Matsubara, New unidirectionally arrayed chopped strands composites by introducing discontinuous angled slits into prepreg, Proceedings of 15th European Conference on Composite Materials, Venice, Italy, 24-28 June, Paper ID 1467 pp. 1-8 (2012).,2012.06. 査読なし

3. W.X. Wang, C. Li, Y. Sakata, R. Momoda, and C.N. Xu, Visualization of stress concentration around inclined crack-like notch using mechano-luminescence film sensor, Proceedings of International Forum on Mechano-luminescence and Novel Structural Health Diagnosis 2011, 2011.11. 査読なし

4. T. Matsubara, Y. Takao, W.X. Wang, Microscopic damage evaluation of bolt joint in carbon fiber reinforced metal laminate, Proceedings of ICCM-18, paper IF0958, (2011) 1-2.,2011.08. 査読なし

5. H. Li, W.X. Wang, Y. Takao, T. Matsubara, Mechanical properties of unidirectional arrayed chopped strands (UACS) with different slit patterns, Proceedings of ICCM-18, paper IF0397, (2011) 1-6.,2011.08. 査読なし

6. J. Xue, W.X. Wang, Y. Takao, T.

Matsubara, Effects of slit angle of unidirectionally arrayed chopped strands (UACS) on the thermal residual stress in UACS/Al laminate, Proceedings of ICCM-18, paper IF0402, (2011) 1-4.,2011.08. 査読なし

7. Z.X. Chen, W.X. Wang, Y. Takao and T. Matsubara, Surface nanostructure, biological performance, and mechanical properties of anodized titanium based water treatment, Proceedings, of The 2nd International Conference on Nanomechanics and Nanocomposites, pp.143-146, 2010.,2010.10. 査読なし

8. Y. Harita, W.X. Wang, Y. Takao, T. Matsubara, Development of CFRP/AL Hybrid laminates, Proceedings of The 9th China-Japan Joint Conference on Composite Materials, Hohhot, China, Sept. 6-9, pp.11-13, (2010).,2010.09. 査読なし

〔その他〕

ホームページ等

<http://hyoka.ofc.kyushu-u.ac.jp/search/details/K001833/index.html>

6. 研究組織

(1)研究代表者

汪 文学 (WANG, Wen-Xue)

九州大学・応用力学研究所・准教授

研究者番号：4 0 2 4 0 6 6 9

(2)研究分担者

高雄 善裕 (TAKAO, Yoshihiro)

九州大学・応用力学研究所・教授

研究者番号：3 0 1 0 8 7 6 6

(平成22年度～平成23年度)

(3)連携研究者

該当なし()

研究者番号：