

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 5 月 26 日現在

機関番号：14401

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2013～2015

課題番号：25289007

研究課題名(和文) 水素蓄圧複合容器のマルチスケール設計・評価技術の開発

研究課題名(英文) Development of design and estimation method for hydrogen storage vessels based on multi-scale analysis

研究代表者

倉敷 哲生 (Kurashiki, Tetsusei)

大阪大学・工学(系)研究科(研究院)・准教授

研究者番号：30294028

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 13,000,000円

研究成果の概要(和文)：軽量・高強度に優れる繊維強化複合材料(FRP)を用いた水素蓄圧複合容器の設計・評価手法の開発が本研究目的である。FRPをマイクロ・メソ・マクロの階層に分け、各々に関する数値解析技術の構築を行った。マイクロ構造では、粒子法に基づく成形時の繊維・樹脂流動解析手法およびマイクロ構造の不確定性を考慮した強度評価手法を構築した。メソ構造では、繊維束と樹脂を別々にモデル化し、同一スケールで重ね合わせて同時に解く解析手法を構築し、力学的特性ならびに振動減衰特性を評価可能とした。さらに、マクロ構造として圧力容器のモデリングと構造解析を行い、CFRP層へ与える応力の影響を緩和させる口金形状等の評価を可能とした。

研究成果の概要(英文)：The purpose of the study is to develop a design and estimation method for hydrogen storage vessels with Fiber Reinforced Plastics (FRP). The scale of FRP can be classified into micro, meso, and macro structures, and the numerical analytical method in each structure had been developed.

In micro structures, flow behaviors of fiber and resin were evaluated with the moving particle method, and the failure envelope was estimated with considering the randomness of fiber arrangement. In meso structures, mechanical characteristics and vibration damping behaviors for woven composites were estimated with the mesh superposition method. In this method, the numerical models were separated into fiber and resin parts, and can estimate the behaviors of each part by one operation. In macro structures, the numerical models of hydrogen storage vessels were generated and the structural analysis was carried out. As the results, the effects of shape of components on CFRP layer can be estimated.

研究分野：複合材料工学

キーワード：複合材料 マルチスケール解析 有限要素法 粒子法 信頼性評価 数値モデリング 減衰特性 樹脂
流動

1. 研究開始当初の背景

地球温暖化や化石資源枯渇によるエネルギー問題の深刻化を受け、車輦分野では2050年運輸部門のCO₂80%削減に向けて、燃料電池自動車(FCV)200万台、水素ステーション1,000箇所以上の国家目標がある。2015年国内へのFCV本格導入に合わせて水素ステーション100箇所先行整備が決まっているが、高圧水素を大量・安価に輸送する技術が著しく立ち遅れ、大きな課題となっている。

従来の重量が重い鋼製容器に水素を蓄圧しトレーラーにより輸送する方式では、水素よりも鋼を運ぶ非効率な輸送システムであり、物流コストの低減が実現できていない。これに対し、従来の金属製容器から、樹脂ライナーによる複合容器が欧米で主流になりつつある。

2. 研究の目的

従来の鋼製容器による輸送方式に替わり、高強度、軽量性に優れる繊維強化プラスチック(FRP)による水素蓄圧大型複合容器による輸送が望まれる。しかし、複雑な繊維束の交錯形状に起因しき裂やはく離の誘発により十分な強度が発現できない点が指摘されている。さらに、繊維束形状に加えて母材の特性、含有率など種々の因子が力学的特性評価を困難としており、試行錯誤的な設計・製作となっているのが現状である。これらを補い形態・組織等に起因する複雑なマイクロ・メゾ構造が構造物全体(マクロ特性)に及ぼす影響を評価し、FRP製水素蓄圧複合容器の設計・評価手法が確立できれば、精度の高い構造解析・信頼性設計が可能となる。

そこで、水素蓄圧複合容器の設計・評価手法の開発を本研究の目的とし、粒子法に基づく成形時のマイクロ構造の樹脂流動解析手法の構築と、マルチスケール解析技術による炭素繊維のメゾ構造の力学的特性評価、ならびに水素蓄圧複合容器の数値モデリングと構造解析を実施した。

3. 研究の方法

(1)粒子法に基づく成形時のマイクロ構造の樹脂流動解析手法の構築

FRPを成形する際、樹脂の含浸不良が生じ強度低下を招く。特にマイクロ構造では、繊維束周りが樹脂で満たされると、繊維束周りから繊維束内への圧力勾配は小さくなるため、繊維束内への浸透や、繊維束内で発生した気泡の離脱には微視的因子の影響が無視できない。そこで、粒子法の中でもMPS法を用いて樹脂流動の評価手法を構築し、マイクロな樹脂流れに及ぼす繊維配置、樹脂温度や粘性の影響を解明する。

(2)マイクロ構造の不確定性を考慮した強度評価手法の構築

FRPを構成する繊維束においてマイクロ構造については一方向繊維強化複合材料(UD材)

とみなすことができる。特に、損傷の起点が多数本の中で最も弱いマイクロ構造である2本の繊維間の樹脂や界面の損傷が支配的である場合には、最小単位である2本の繊維間の力学的挙動を評価することが重要である。そこで、2本の繊維配置を扱う傾斜ユニットモデルを用いて、従来の規則配置モデルでは困難な繊維配置のランダム性を考慮したUD材の力学的特性を評価する。

(3)マルチスケール解析技術によるFRPのメゾ構造の力学的特性評価

構造物を対象とするマクロ構造、樹脂と繊維を対象とするマイクロ構造に対し、その中間である繊維束の平織りや綾織りといった織り構造をメゾ構造として扱う場合、材料特性や幾何形状などの設計パラメータが豊富であり、効率の良いモデリング手法が重要である。本研究では、織り構造の樹脂部と繊維束部を別々にモデリングし、重ね合わせて同時に解析が可能な重合メッシュ法を用いて、種々の織り構造を有するFRPの力学的特性評価を行う。

(4)マルチスケール解析技術によるFRPのメゾ構造の振動減衰評価

構造物の振動制御を行うためには、FRP自体の振動減衰特性を把握し、それらを考慮した材料・構造設計が重要である。しかし、複雑な織り構造を有するメゾ構造では、単純な曲げ変形時にも内部では多軸応力場となり、エネルギーの消散現象である減衰特性評価を困難にしているため、数値シミュレーションによる評価法に関する研究はほとんど行われていないのが現状である。

そこで、ひずみエネルギー理論と有限要素法に基づいて直交異方性材料の材料減衰モデルを定式化し、織物複合材料に適用できることを確認し、重合メッシュ法を適用して振動減衰モデルの解析プログラムを構築し、FRPの振動減衰評価を行う。

(5)FRP製水素蓄圧複合容器の設計評価

アルミ合金製の口金を有し、樹脂ライナーにCFRPフィラメントワインディング層を巻き付けたType4構造の水素蓄圧容器を解析対象とする。内圧100MPaを超える高圧容器は内容物の気密性を確保することに加え、強度評価が重要となる。特に、複雑構造を有する口金部の設計パラメータの最適化を行うことは、高圧容器の耐圧性・信頼性に寄与すると考える。そこで、口金部における気密性を向上させる目的から、ライナーに口金の一部を埋没した埋没型口金構造を有する蓄圧容器を提案し、有限要素解析を用いて口金構造がCFRP層に与える影響の評価を行う。

4. 研究成果

(1)粒子法に基づく成形時のマイクロ構造の樹脂流動解析手法の構築

MPS法を用いて、樹脂内に繊維が配置されたモデルでのプレス成形シミュレーションを行った。なお、MPS法には、中間速度計算に対する陰解法の適用、剛体運動計算アルゴリズムを導入することで、高粘性流体および繊維の流動の扱いを可能とした。

プレス成形時に、樹脂内に配置された繊維が樹脂流動に及ぼす影響を検証するため、樹脂内に繊維50本を配置し、解析を行った。解析モデルをFig.1に示す。上部のプレスプレート等を等加速度 12mm/s^2 で降下させてプレスする。繊維径 1mm 、繊維長 4mm 、樹脂長さ 60mm 、樹脂高さ 50mm とした。各粒子間隔 $\Delta x, \Delta y$ は 1mm であり、外力として重力(9.8m/s^2)を与える。主な解析パラメータをTable 1に示す。時間刻み幅 Δt は $1.0 \times 10^{-4}\text{s}$ としている。

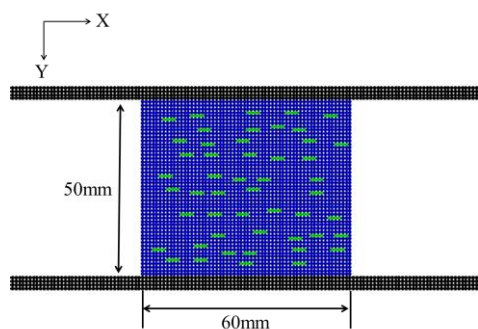


Fig.1 Numerical model (Resin and 50 Fibers)

Table 1 Parameter of press model

プレス加速度 a_p	$12.0 [\text{m/s}^2]$
重力加速度 g	$9.8 [\text{m/s}^2]$
粘度 μ	$1.0 \times 10^3 [\text{m}^2/\text{s}]$
時間刻み幅 Δt	$1.0 \times 10^{-5} [\text{s}]$

6.0×10^{-2} 時での流動状況および圧力分布をFigs.2, 3に示す。繊維に圧力が集中し、繊維が分散配置されていることによりさらに低下している様子が見られた。繊維の流動について、樹脂表面付近に初期配置されていた繊維は、樹脂から飛び出していき様子が見られ、樹脂の表面形状は繊維の流動に応じて変化している。さらに、樹脂内部では繊維が集中している様子が表現できている。

X軸方向の繊維配置が繊維の移動に及ぼす影響について検証した。Fig.4に示すように上部2本の繊維の間の初期繊維間水平間隔 L に異なる値を与え、繊維および樹脂の流動を評価する。

初期配置でモデル右上部に位置していた繊維の 0.045s 時における、X軸正方向およびY軸正方向の移動量をFig.5に示す。Y軸方向の移動量は、大きな差がない。一方、X軸方向は、樹脂表面と繊維の初期配置との距離

が小さくなるほど繊維の移動量が大きくなる。以上より、繊維の初期配置が繊維の挙動に影響を及ぼし、繊維が樹脂表面に近い初期配置であるほど、移動量が大きくなること示された。以上より、本研究により構築したMPS法はFRPのプレス成形シミュレーションにおいて、有効であると考えられる。

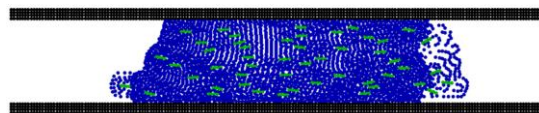


Fig.2 Analysis result of resin and fiber flowage

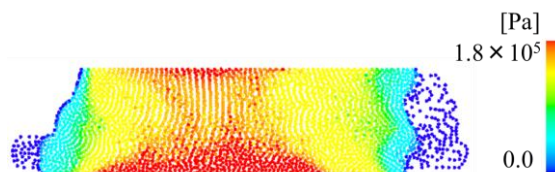


Fig.3 Analysis result of pressure distribution

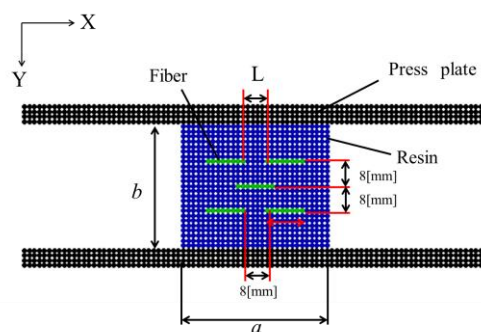


Fig.4 Numerical model (5 fibers)

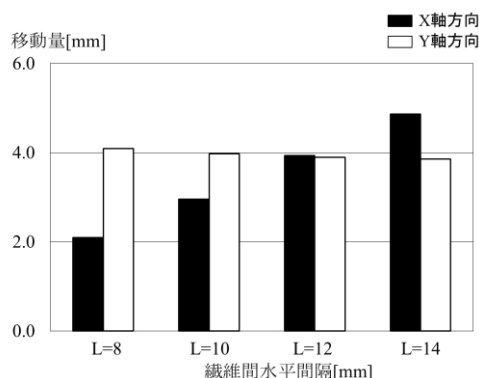


Fig.5 The amount of movement of the fiber at 0.045s

(2) ミクロ構造の不確実性を考慮した強度評価手法の構築

Fig.6に示す2本の繊維配置のミクロ構造を取り扱う傾斜ユニットモデルを用いて、繊維配置のランダム性を考慮した一方向繊維強化複合材料の力学的特性を評価する。

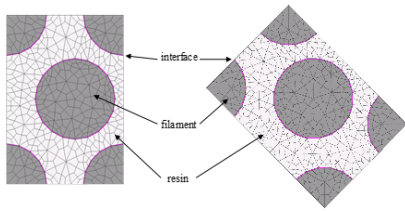


Fig.6 Oblique random unit model

樹脂/繊維界面の挙動を取得するため、1本の繊維を埋蔵した単繊維埋蔵試験片を作成し、単軸引張試験を行った。さらに、単繊維埋蔵試験の結果から、逆解析により界面強度を同定した。次に、得られた材料物性値を用いて、傾斜ユニットモデルにより組み合わせ応力下における破壊包絡線を評価した。組み合わせ応力は、一定面内せん断負荷を与えた状態で、引張負荷を与える解析を行った。比較として実験との整合性が確認されている50本ランダムモデル(Fig.7)で破壊包絡線も評価した。

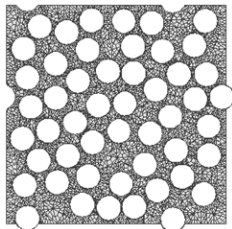


Fig.7 Random unit model (N=50)

Fig.8に50本ランダムモデルおよび傾斜ユニットモデルにより評価した破壊包絡線を示す。ただし、プロット点は各条件におけるモデルに初期損傷が発生した際の応力値の平均値であり、スクエッターバーは破壊確率5%から95%までを示している。

図より、傾斜ユニットモデルの破壊確率5%付近の応力値と、50本ランダムモデルの平均値に近い値を示している。これより、計算コストが大幅に短縮できる傾斜ユニットモデルを用いて評価した破壊包絡線の破壊確率5%付近の応力値を参照することで、一方向繊維強化複合材料の破壊包絡線評価が可能になるものと考えられる。

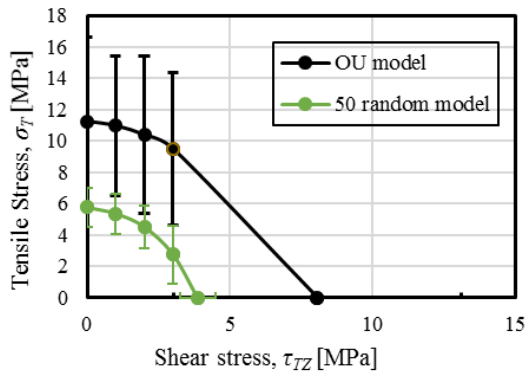


Fig.8 Failure envelope

(3) マルチスケール解析技術によるFRPのメゾ構造の力学的特性評価

織り方の異なる3種類の3次元織物複合材料を対象とし、Table 2に重合メッシュモデルを示す。左からグローバルモデルの樹脂、ローカルモデルの繊維束のモデルを示している。ここで、x軸方向に配置されている黄色で表している繊維束を経繊維束、y軸方向に配置されている青色の繊維束を緯繊維束、そして2層以上にわたってz軸方向に配置されている赤色の繊維束をZ繊維束と呼ぶこととする。Model Aは2次元織物を積層させた構造であり、Model BはModel Aの経繊維束をZ方向に1層分織り込んだ構造である。Model CはModel AとModel Bを組み合わせたモデルである。

Table 2 Mesh-superposition model

	Global model	Local model	Size (Unit : mm)
model A			6.0 x 8.4 x 4.0
model B			6.0 x 8.4 x 4.0
model C			9.0 x 8.4 x 4.0

X軸方向に引張荷重を作用させた解析を実施した。Fig.9にModel A~Cの繊維束に作用するミーゼス応力を示す。図より、引張方向(x軸方向)に配置されている繊維束が平滑であるほど応力が高くなるため、Model AおよびModel Cでは高いミーゼス応力が生じている。それに対し、Model Bでは周期的に一樣なうねりを有しているため、全体的にミーゼス応力が分散されている。繊維束全体で比較すると、Model Bでは内部層が、Model Cでは最外層がミーゼス応力の値が高くなり、1つの列に配置される繊維束が同数であっても織り方の違いで傾向が異なることが判る。

以上の結果より、本手法により種々の織り構造の有限要素モデルを作成し解析を行うことが可能であり、FRPの所望の特性を実現するメゾ構造の選定に有用であると考えられる。

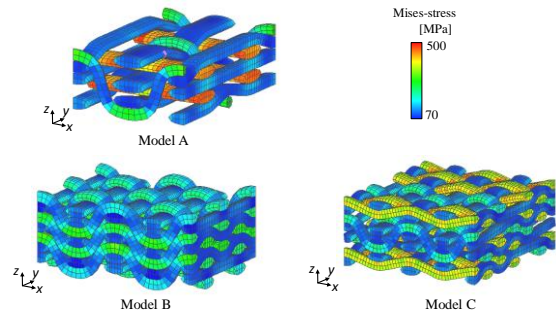


Fig.9 Distribution of Mises-stress

(4) マルチスケール解析技術による FRP のメゾ構造の振動減衰評価

重合メッシュ法を適用して振動減衰モデルの解析プログラムを構築し、その有効性を検証した。ガラス繊維強化複合材料の織り構造と母材の樹脂をモデル化し、重ね合わせることで織物複合材料の Fig.10 に示すモデル化を行った。比較として、繊維束と樹脂部を 1 つの有限要素メッシュでモデル化した不均質モデルを用いた解析も実施した。解析により得られたモード図を Fig.11 に示す。これらの結果より、提案手法は織物複合材料の振動特性を十分評価できており、材料減衰評価手法としての精度と有効性を明らかにした。

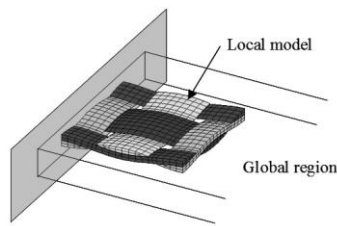


Fig.10 Mesh-superposition model

Table 3 Vibration mode shape

	1st	2nd	3rd
Heterogeneous model (Detail model)			
Proposed mesh-superposition method			

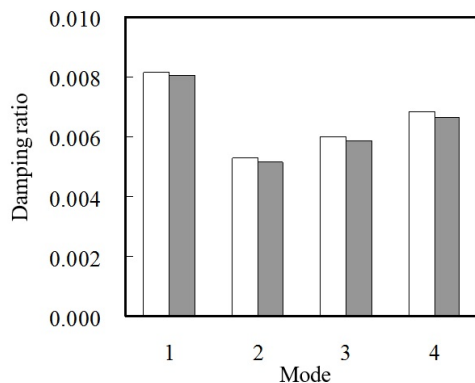


Fig.11 Comparison of heterogeneous model and proposed model

(5) FRP 製水素蓄圧複合容器の設計評価

上述の(1)~(4)で構築した手法ならびに解析結果の知見に基づき、水素蓄圧複合容器に内圧が作用した場合の応力解析を実施した。Fig.10 に解析モデルの外観、Fig.11 に解析モデルを示す。構造上、脆弱な容器胴部から口金側を評価する。容器は軸対称を考慮し、8分の1モデルとした。胴部の CFRP 層は積層構成を $[\theta/-\theta/\theta/-\theta]$ とする一方向繊維強化材としてモデル化を行っている (θ は繊維配向角)。ドーム部における CFRP 層は内圧 106MPa を作用させ、拘束条件は各断面を面拘束として

いる。Fig.11 中の口金の傘部長さ t を 70, 85, 100mm の 3 つに設定し、応力解析を実施した。

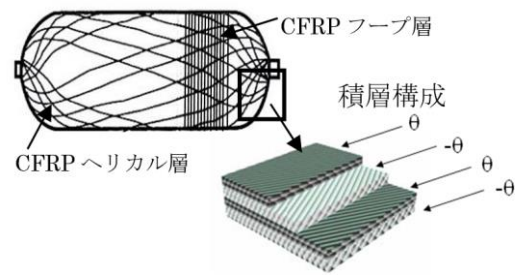


Fig.10 Filament winding vessel

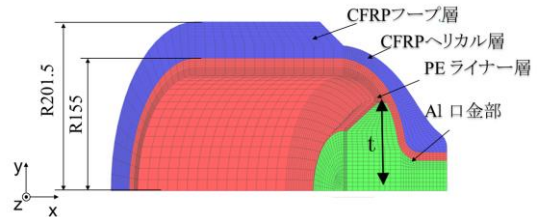


Fig.11 Numerical model

CFRP 層の繊維方向応力分布を Fig.12 に示す。口金傘部径が小さくなるに伴い、繊維方向(L 方向)応力は緩和されることが確認できる。Fig.13 は、30 倍に拡大した変形図に CFRP 層の面内せん断応力分布を示した結果である。口金傘部径 $t=100\text{mm}$ モデルにおいて、傘部上端近傍に CFRP 層の面外せん断応力が発生している。

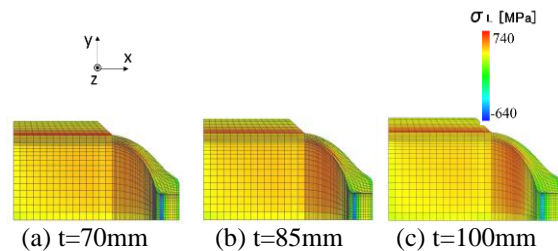


Fig.12 Distribution of stress in fiber direction

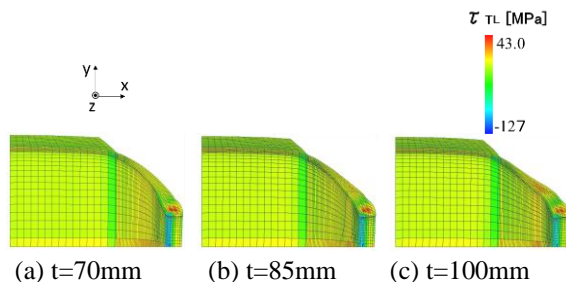


Fig.13 Deformation and distribution of in-plane shear stress

また、他の応力成分に関して Fig.15 に整理して示す。Figs.13~15 より、高い剛性を示す口金傘部径が大きいモデルでは、ドーム部の内圧を受け持つアイソテンソイドの干渉となり CFRP 層に応力集中箇所が発生してしまうと考えられる。以上の結果より、口金傘部径が小さくなるほど良好な結果が得られた。

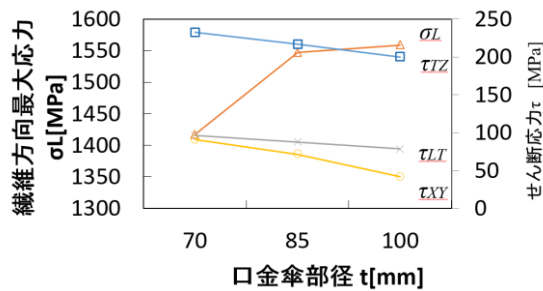


Fig.15 Stress distribution in various models

以上より、本研究で構築した手法ならびに解析結果の知見に基づき、繊維の巻き角度、積層構成、口金の形状等の設計パラメータを変えた場合の複合容器のマクロ構造モデルを作成し、CFRP 層へ与える応力の影響を緩和させる口金形状等の評価を可能とした。本研究成果は水素ステーション用 Type4 高压容器の設計・評価に寄与するものと考えられる。

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 14 件)

- ① 今奥亜希, 廣澤覚, 倉敷哲生, 中西康雅, 花木宏修, 向山和孝, 3次元織物複合材料の有限要素モデリング手法の構築と力学的特性評価, スマートプロセス学会誌, 査読有, Vol.5, 2016, pp.39-45
- ② 菊池隼太, 向山和孝, 鈴木拓也, 福重進也, 島村和夫, 花木宏修, 倉敷哲生, 繊維強化複合材料の傾斜ユニットモデルに基づく母材の材料非線形性を考慮した破壊包絡線評価, 構造物の安全性および信頼性 (JCOSSAR 論文集), 査読有, 2015, pp.414-419
- ③ S.Matsuzawa, K.Mitsufuji, Y.Miyake, K.Hirata, and F.Miyasaka, Numerical analysis of electromagnetic levitation employing meshless method based on weighted least square method, J. of Manufacturing Science and Production, 査読有, Vol.1, 2015, pp.29-34
- ④ 向山和孝, 花木宏修, 倉敷哲生, 梅津浩一, 損傷進展解析に基づく織物複合材料の疲労寿命分布推定法, 材料, 査読有, Vol.63, 2014, pp.387-394

[学会発表] (計 42 件)

- ① 寺谷真皓, 向山和孝, 松澤周平, 光藤健太, 宮坂史和, 花木宏修, 倉敷哲生, 粒子法に基づく短繊維強化複合材料の繊維および樹脂流動性の評価, 第 7 回日本複合材料会議, 2016 年 3 月 16 日~18 日, 京都
- ② 井村亮哉, Li Xingsheng, 向山和孝, 花木宏修, 倉敷哲生, Type 4 高压容器の口金構造が CFRP 強化層に及ぼす影響の評価, 日本繊維機械学会第 68 回年次大会, 2015 年 6 月 5 日~6 日, 大阪
- ③ 井上遼祐, 中西康雅, 向山和孝, Li

Xingsheng, 花木宏修, 倉敷哲生, ヒステリシスエネルギーに着目した織物複合材料の疲労特性および減衰特性評価, 日本繊維機械学会第 68 回年次大会, 2015 年 6 月 5 日~6 日, 大阪

- ④ H. Kikuchi, K. Mukoyama, T. Suzuki, K. Shimamura, S. Fukushige, K. Hanaki, and T.Kurashiki, An estimation of failure envelope for FRP using oblique unit model, 12th International Conference on Textile Composites, 26-29, May, 2015, North Carolina State Univ., USA
- ⑤ A.Imaoku, K.Ikuta, T.Kurashiki, S.Hirosawa, Y.Nakanishi, Meso-scale modeling and numerical simulation of mechanical for 2D and 3D woven composites on mesh superposition method, 12th International Conference on Textile Composites, 26-29, May, 2015, North Carolina State Univ., USA
- ⑥ S.Murao, K.Hirata, F.Miyasaka, Analysis of variable stiffness magnetorheological elastomer employing particle method and FEM, IEEE COMPUMAG 2015, 28 June -2 July, 2015, Montreal, Canada
- ⑦ 納富翔太, 倉敷哲生, 宮坂史和, 吉川岳, 粒子法による FRP ミクロ構造の 3 次元樹脂流動評価, 第 5 回日本複合材料会議, 2014 年 3 月 4 日~6 日, 京都
- ⑧ 倉敷哲生, マルチスケール解析に基づくテキスタイル複合材料の設計・評価, 2013 年 11 月 25 日, CAE POWER 2013 招待講演, 東京
- ⑨ 中西康雅, 倉敷哲生, テキスタイル複合材料の材料減衰に関する数値モデルの構築, 日本繊維機械学会第 66 回年次大会, 2013 年 5 月 31 日~6 月 1 日, 大阪

[図書] (計 0 件)

[産業財産権]

- 出願状況 (計 0 件)
- 取得状況 (計 0 件)

[その他]

6. 研究組織

(1) 研究代表者

倉敷 哲生 (KURASHIKI TETSUSEI)
大阪大学・大学院工学研究科・准教授
研究者番号: 30294028

(2) 研究分担者

中西 康雅 (NAKANISHI YASUMASA)
三重大学・教育学部・准教授
研究者番号: 00378283

宮坂 史和 (MIYASAKA FUMIKAZU)
大阪大学・大学院工学研究科・准教授
研究者番号: 80304012