

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 21 日現在

機関番号：14301

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2013～2015

課題番号：25420850

研究課題名(和文)加熱・展開機能を最適化した宇宙展開構造用複合材料システムの創製

研究課題名(英文)Development of Composite Systems with Optimized Thermally-Induced-Deployment Functions for Space Deployable Structures

研究代表者

西川 雅章(Nishikawa, Masaaki)

京都大学・工学(系)研究科(研究院)・准教授

研究者番号：60512085

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)：宇宙展開構造用途として、加熱機構を組み込んだ形状記憶複合材料システムを提案し、展開性能を材料に付与する温度分布を通じて制御可能であることを実験および有限要素解析を用いて実証した。加熱により形状変化が生じる繊維強化形状記憶複合材料の有する粘弾性特性(温度依存特性)を利用した、加熱パターンに応じて展開率や展開に必要な時間が変化することを実験的に示すとともに、非定常熱伝導解析と材料の粘弾性解析により、展開時間を考慮した展開特性の予測手法を確立した。また、三層モデルを用いたシェル要素シミュレーションを構築し、薄膜複合材料の特性を考慮して展開ダイナミクスを高精度に解析できることを示した。

研究成果の概要(英文)：We proposed shape memory polymer composite systems with an embedded heating mechanism, and demonstrated that deployment properties can be controlled through temperature distributions applied to the materials, using experiments and finite element analyses. The systems utilized viscoelastic properties (temperature-dependent properties) of fiber-reinforced shape memory polymer composites that change their shapes by heating. We experimentally showed that deployment ratio and time changed depending on heating patterns, and established a method to predict deployment properties with consideration of deployment time as well. Moreover, we presented numerical simulations based on shell elements employing three-layer models which allowed us to analyze deployment dynamics with high precision considering the properties of thin composite materials.

研究分野：複合材料工学

キーワード：機能性ポリマー複合材料 展開性能 温度計測 形状固定・形状回復 有限要素解析

1. 研究開始当初の背景

衛星の高機能化・高性能化を背景として、搭載機器への電源供給や排熱要求は高まっており、大型の太陽電池パドルや放熱用ラジエータが活用されたり、通信衛星においては受信機器端末の小型化を目的として静止軌道上で 10m を超える大型アンテナの利用が検討される(例えば、きく8号)など、宇宙構造の大型化が不可避となっている。一方、打ち上げコスト削減を目的として、小型に収納可能な展開構造様式を用いて宇宙用途構造を製作するための研究開発が進んでいる。

従来より、インフレータブル構造と呼ばれるガス圧を用いた簡便な展開構造が検討されていたが、インフレータブル構造では、ガス圧が一樣に膜面に加わる必要があり、これを正常に達成して構造を展開する上での信頼性が劣る点や、軌道上での振動による故障リスク回避に必要とされる構造展開後の剛性に課題があった。また、ソーラーセイルに代表されるような大型膜面の展開には、遠心力を利用した展開方法も検討されているが、膜面の干渉により複雑な構造形状への展開が難しいなど、それぞれ課題がある。

一方、近年では、加熱により形状変化する機能性ポリマーを利用して、熱源のみにより展開する構造材料の研究が国内外で盛んである。この機能性ポリマーとしては形状記憶ポリマー(Shape Memory Polymer, SMP)と呼ばれる固有のガラス転移温度を境に熱力学的特性(粘弾性特性)が大きく変化する材料が検討されており、ロケット搭載時の収納には材料の形状固定特性、展開には形状記憶特性が活用される。この機能性ポリマーを母材として炭素繊維で強化した複合材料(形状記憶複合材料)は、軽量でかつ剛性や強度の面でも有利である。また加熱位置を複数設け、それらの位置の加熱温度を調節することで、複数箇所と同時に展開を進行させたり、展開の順番(シーケンス)を制御することが可能になる。これらにより、極めて単純で、小型軽量の展開システムを創製し、構造展開の信頼性を高めることが可能である。

2012年に、宇宙航空研究開発機構 JAXA が連続繊維強化形状記憶ポリマーの軌道上での展開実証試験に成功するなど、国内外で検討が行われている。一方で、これらの検討は材料レベルの試験にとどまっており、実用構造への適用には課題も多い。

2. 研究の目的

形状記憶複合材料(Shape Memory Polymer Composite, SMPC)を用いて宇宙用展開構造を創製するにあたり、加熱・展開機能の制御や最適化は必要不可欠である。このような複合材料システムは、ガラス転移温度を超えて高温になるほど剛性が低下し、材料としての熱的安定性は必ずしも保たれない。したがって、ガラス転移温度近傍の変形特性を材料設計で精密に制御した上で、システム運用時に

は、ガラス転移温度をわずかに超える程度に高効率に加熱を制御し、展開完了部位からすばやくガラス転移温度以下に戻すことが重要となる。展開過程において、材料を柔軟化する部位を極力最低限に保ちながら安定的に構造の展開を進行させることが、加熱の効率化・展開性能向上の観点から望ましい。このような宇宙展開構造用複合材料システムの実現にあたっては、以下の課題がある。

(1) 形状記憶ポリマーの形状変化機能について、繊維強化を施した場合、展開時の変形は繊維の弾性回復変形を用いるため比較的容易となるが、繊維強化に伴う新たな損傷(繊維・樹脂界面はく離等)の発生や樹脂の機能劣化が避けられない。

(2) 宇宙空間では熱源は限られており、アクティブに展開を制御するためには、最適な展開性能をもたらす加熱方法やそれに適した材料システムについて検討する必要がある。

上記の観点から、SMPCを用いた展開構造の製作にあたっては、剛性の必要な部材は膜面で構成し、単層の炭素繊維織物による強化形態を利用することで、比較的曲げ変形に対しても柔軟で、かつ、炭素繊維の熱伝導特性によって、材料内の加熱むらを低減し、均一に加熱することが可能である。したがって、加熱機構を組み込んだ展開構造用複合材料システムにおいては、熱源の配置や放熱の状況をモデル化することで温度分布を把握し、その制御によって形状変化(展開量)を制御することが重要になる。このような制御に必要な力学モデルを適切に構築することにより、限られた熱源による高効率な加熱方法や最適化につながる。

そこで、本研究では、加熱機構を内蔵した形状記憶複合材料システムを提案し、赤外線サーモグラフィによる温度計測や展開試験により、加熱機構の構成によって変化する加熱特性と展開性能との関係性を評価するとともに、展開性能を制御するための解析評価法を確立することを目的とした。

3. 研究の方法

本研究では、加熱圧縮プレス成形法を用いて SMPC の製作を行い、ニクロム線を用いた通電加熱による加熱機構を取り付けることで、加熱により形状変化する複合材料システムを提案した。研究開始段階の検討では、材料入手が容易であったガラス繊維織物を用いて製作し、評価した。ガラス繊維は炭素繊維と比して熱伝導特性が劣ることから、材料による展開特性の違いについても付随的に評価した。また、加熱温度と形状展開率の関係性についての実験的評価と、熱伝導と材料の温度依存特性(粘弾性特性)を考慮したシミュレーションの構築により、加熱条件により展開率が制御できることやシミュレーションにより展開率を予測できることを実証した。最後に、実際の展開構造適用時における展開のダイナミクスを解析的に模擬するた

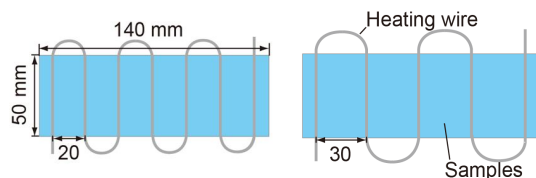
めのシェル要素シミュレーションについて検討し、薄膜複合材料の特性を導入して高精度な解析を実施する方法を確立した。以下、具体的な方法について述べる。

(1) ガラス繊維 SMPC の展開性能に及ぼす加熱温度分布の影響に関する実験的評価

SMPC の製作には圧縮成形を用いた。母材樹脂には、熱可塑性ポリウレタン SMP MM 5520((株)SMP テクノロジーズ, T_g : 約 55 °C) の厚さ 47 μ m のフィルムを使用し、強化繊維には、平織ガラス繊維織物(丸勝, GF ヤーン 135 tex, 目付: 200g/m²)を使用した。長さ 260mm, 幅 150mm の SMP フィルム 9 枚とガラス繊維織物 2 枚を積層し、ホットプレスにより成形した(温度 180 °C, 成形時間 30 分, 圧力 1.68 MPa, 板厚 $t=0.55$ mm, $V_f=28.1$ %)。

製作した SMPC を長さ 140mm, 幅 50mm の短冊形状の試験片とした。通電加熱による加熱機構として、長さ 1200 mm, 線径 0.23mm のニクロム線 Ni80023 (坂口電熱, 長さ 1200 mm に対する質量 0.2 g, 抵抗値 26.23 Ω /m) を図 1 に示す通りに直列、等間隔に貼り付けた。表 1 に示すように、電熱線間隔 d , 印加電圧 ϕ の 3 種類のパターンに対して加熱時の温度分布と SMPC の形状変化を比較した。

加熱による展開試験の手順は以下のとおりである。まず、形状固定過程として、試験片を 80°C の水中で 20 秒間加熱し、直径 67mm の円筒に沿わせて 1 分固定した(加熱機構は凹面側)。その後、室温に戻し、除荷後の形状を形状固定率の測定のため、紙上にトレースした。次に形状回復による形状展開を行うため、電熱線に電圧を印加し、10 分後の形状と 1 時間後から 1 時間おきに 24 時間後までの形状を紙上にトレースした。同時に、試験片表面(凸面側)の温度分布を赤外線サーモグラフィ(Optris PI200, 温度分解能 0.1 K, 空間解像度 0.5 mm/pixel)により計測した。試験片が薄いため、厚さ方向熱伝導は考える必要がなく、概ね一次元的な熱伝導となっている。展開試験により得られたトレース形状から、曲率半径を算出し、形状固定率 R_f と形状回復率 R_r を求め、加熱条件による違いを評価した。



(a) パターン(A)と(C) (b) パターン(B)

図 1 試験片への加熱機構の貼り付け方法

表 1 加熱・展開試験における加熱条件

	d [mm]	ϕ [V]	加熱部温度[°C]
(A)	20	10	100
(B)	30	10	100
(C)	20	8	80

さらに、測定した温度分布と展開率との関係性を評価する方法を検討した。この目的のため、 T_g 未満の領域は完全に展開せず、 T_g 以上の領域は完全に展開すると仮定することで、以下の式(1)を導出し、展開率の予測を行った。サーモグラフィの空間解像度 a と T_g 未満の点数 n から、試験片の展開していない領域が計算でき、この展開しない領域では、形状固定後の曲率 ρ_1 が残る。また、2 本の電熱線間長さ L のうち、上記の展開していない領域を除く領域では、曲率のない平面形状に完全に回復しているとすると、幾何的に曲率半径 $\rho_{2,r}$ が次式で計算できる。

$$\rho_{2,r} = \rho_1 + \frac{L - \rho_1 \theta}{2 \tan \theta} \quad (1)$$

$$\theta = \arcsin\left(\frac{an}{2\rho_1}\right)$$

(2) 炭素繊維織物を用いた SMPC の展開試験と展開時間を考慮した力学モデルの構築

次に、展開時間を考慮したモデル化を行い、加熱条件と材料特性から展開挙動を予測するモデルを確立するために、非定常熱伝導解析による温度分布の予測、および、SMP の時間的挙動を特徴づける熱粘弾性特性と、繊維の弾性力を考慮したモデル化を行った。この検討では、炭素繊維織物を用いて前項と同様の温度分布測定と展開試験を実施したので、付随的にガラス繊維織物を用いた場合との違いについても評価した。

試験片の製作には、母材樹脂は前項と同じポリウレタン SMP フィルムを用い、強化繊維に平織炭素繊維織物((株)丸勝, 使用糸 3K 200 tex, 繊維密度 12.5 \times 12.5 本/25mm, 質量 200g/m²)を使用した。長さ 240mm, 幅 150mm の SMP フィルム 10 枚と炭素繊維織物 1 枚を積層し、圧縮成形により SMPC (厚さ約 0.6mm) を作製した。

次に、SMP 単体の試験片(厚さ 0.65mm)を同様に作製し、材料の粘弾性特性(温度依存特性)を、動的粘弾性試験(Dynamic Mechanical Analysis, DMA)により測定した。試験装置は Q800(TA Instruments 製)、試験片は長さ 30 mm, 幅 5 mm, 試験条件は、引張方向負荷、最大ひずみ 0.05%、測定周波数 1 Hz で、約 30°C から 100°C まで昇温速度 3°C/min で計測した。SMPC においても同様に DMA 試験を行い、炭素繊維織物の引張弾性率を同定した(試験片の V_f は 23.7%)。

さらに、作製した SMPC を用いて、曲げ変形を与え、形状固定した試験片の温度分布計測及び試験片の展開率の時間推移を調べる展開性能試験を行った。作製した SMPC を長さ 140mm, 幅 50mm に切り出し、電熱線を図 1 のパターン(a)の通り、試験片に貼り付けた。その後、放射率 0.94 の黒体スプレーを試験片に両面に塗布し、試験片とした。試験片厚みは 0.62 mm, V_f は 17.9%であった。

展開試験の手順は以下の通りである。まず、

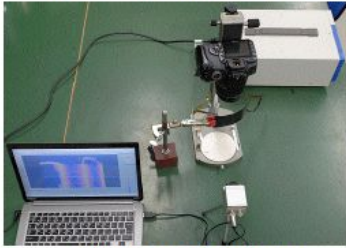


図2 展開試験の様子(雑誌論文 :Naito et al.)

実験用ホットプレートにより75°Cで2分間試験片を加熱し、直径74mmの円筒に沿わせて固定した。その後、室温(22°C)まで自然冷却した時点で除荷し、形状固定率を測定した。その後、展開試験を図2に示すように行った。電熱線に電圧を24V印加し、3時間後まで、温度分布をサーモグラフィで、試験片形状をカメラで測定した。

展開挙動を解析で再現するため、有限要素法解析プログラムMSC.Marcを用いて、熱伝導特性と上述の実験で得た粘弾性関数を導入した、熱伝導解析と材料の粘弾性解析の連成解析を実施した。SMPの応力-ひずみ関係を線形粘弾性および熱レオロジー的に単純であることを仮定した一般化Maxwellモデル(Prony級数近似)により与えた。緩和スペクトルはTschoeglの2次近似式、シフトファクターはAzraらの手法を用いてSMP単体のDMAの結果から導出した。一方、単層の炭素繊維織物は、引張弾性率と曲げ弾性率が大きく異なることが知られているため、三層モデルを用いて炭素繊維織物をモデル化した。厚みを断面観察から定め、三層モデルにおける各層の弾性係数を、織物の引張弾性率 E_t 、曲げ弾性率 E_b から算出した。SMPCのDMA結果から $E_t = 56.37 \text{ GPa}$ と同定し、 E_b は形状固定率を再現するように定めた。このモデルをさらに積層させ、SMPCのモデルを作成した(詳細はNaito et al.(雑誌論文)に記載)。

また、温度分布を与える非定常熱伝導解析は変形解析と同じ二次元モデルを用いて、輻射と自然対流を考慮した解析を実施し、上記の変形解析に連成させた。実験結果を再現するように、熱伝達係数と比熱、電熱線位置の熱流束をフィッティングパラメータとして値を定めた(雰囲気温度は室温とした)。

このモデルを用いて、実験と同様の展開挙動を模擬し、形状固定率、および、展開の時間推移を予測し、実験結果との対比を行った。

(3) 薄膜複合材料の展開ダイナミクスの解析法の検討

薄膜複合材料は均質連続体としてモデル化すると引張弾性率と曲げ弾性率が大きく異なる。引張・曲げの特性が異なる材料特性を表現する手法として提案されている三層モデルと、変形自体を引張変形・曲げ変形に分離して別々に構成則を付与する手法とで比較することで、薄膜複合材料を三層モデルとして表現することの妥当性を検討した。ま

た、埋め込み座標系を用いたシェル要素の定式化について検討し、動的陽解法で展開挙動のような大変形を解析する上での解析精度の検証を実施した。

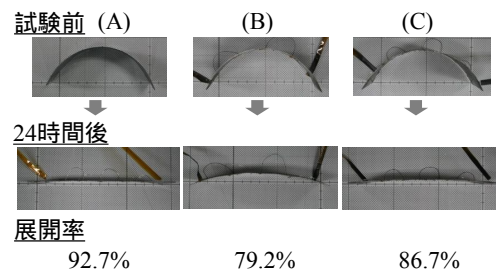
ここでは、埋め込み座標系を用いた大変形動的陽解法解析を実施した。前項の解析は準静的な解析であるが、この解析法では動的効果(慣性項の影響)も考慮可能である。特に、宇宙構造応用では外乱による振動の減衰など、動的効果が重要となるため、大変形・動的解析において安定な解析方法を構築した。

4. 研究成果

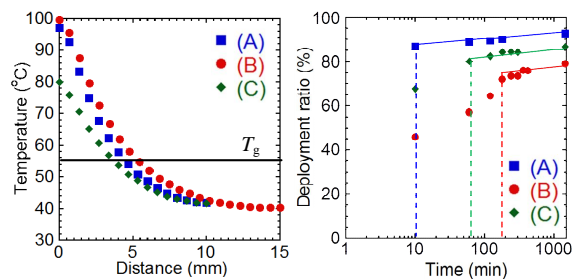
(1) ガラス繊維 SMPC の展開性能に及ぼす加熱温度分布の影響に関する実験的評価

図3(a)に、3つの加熱パターンに対する試験片の展開試験前、24時間加熱後の形状を示した。また、図3(b)に平衡状態と見なせた9分後の温度分布を示した(電熱線の場所を原点とした電熱線間の中心までの分布)。加熱パターンの違いによって温度分布が異なり、展開率に明らかに差異が生じている。計測した温度分布を用いて式(1)により予測した展開率は、それぞれ、(A)39.5%、(B)31.6%、(C)32.8%であり、全ての試験片で実験の展開率の方が大きい結果が得られた。式(1)は T_g を基準とし、 T_g 未満では全く展開しないと仮定していたが、実際にはこのSMPのガラス転移領域は $40^\circ\text{C} < T < 70^\circ\text{C}$ であることが知られているため、このガラス転移領域における低温側の領域でも繊維の弾性力によって展開が進み、SMP単体よりも展開に要する温度が低下したものと考えられる。

次に、展開率の時間推移を図3(c)に示す。展開率が飽和し始める時間はそれぞれ、(A)10分、(B)180分、(C)60分であった。つまり温



(a) 展開試験結果



(b) 温度分布測定

(c) 展開率推移

図3 温度分布と展開率の測定結果

度分布の差異によって展開に要する時間も変化する。先述の通り、ガラス転移領域における低温側の領域でも展開が進行するが、この温度域ではSMPは T_g を超えていないため、繊維の弾性力による展開の進行をSMPが阻害し、展開速度は遅いと考えられる。したがって、 T_g よりも低温領域の多い(B)において最も展開時間を要したものと結論づけられる。このように、加熱パターンは展開率のみならず、展開に要する時間にとっても重要である。また、繊維強化に伴うSMPCの温度依存特性を適切に把握して、モデル化する必要があることが分かった。

(2) 炭素繊維繊維を用いたSMPCの展開試験と展開時間を考慮した力学モデルの構築

図4(a),(b)に温度分布および電熱線間の最高・最低温度の時間変化の実験と解析の比較結果を示す。図4(c),(d)に形状固定率および展開率の時間変化の実験と解析の比較を示す。炭素繊維繊維の曲げ弾性率はあまり展開率や展開に要する時間を変化させないが、形状固定率に関してはその影響が大きい。曲げ弾性率を12 MPaとしたときに、ほぼ形状固定率が実験値を再現し、このとき、展開率についても実験値をよく予測できることが分かった。今回用いたような単層の炭素繊維繊維強化形状記憶複合材料の場合には、展開率や展開時間にはSMPの温度依存特性の寄与が大きく、温度分布と母材の温度依存特性を精度よく同定することが重要であることが分かった。また、曲げ弾性率は形状固定性に主に影響することから、曲げ弾性率を繊維の構造等によって変化させることで、構造材としての強度・剛性に重要な引張強度を保ちながら、より高い収納性を持つ展開構造を実現できることが考えられる。

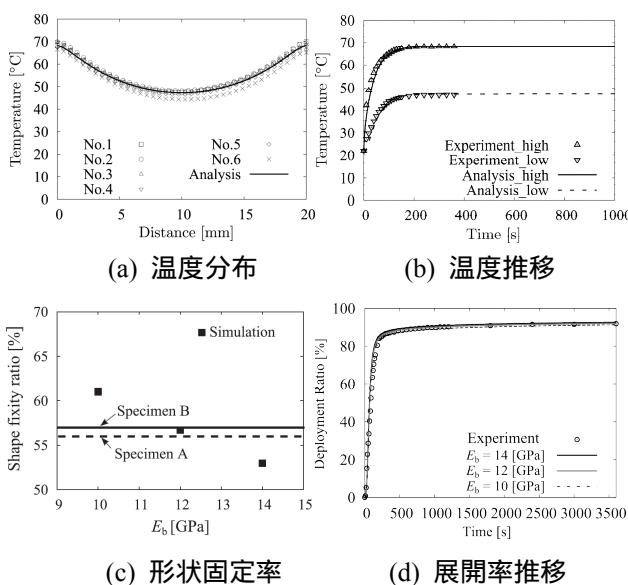


図4 非定常熱伝導解析と材料の粘弾性解析の連成解析によるSMPCの熱伝導特性および展開特性の予測結果(雑誌論文)

また、炭素繊維繊維を用いた場合、前項までのガラス繊維繊維を用いた場合(図3(c))に比べて、展開に要する時間は短い。これは炭素繊維の優れた熱伝導特性によるものであり、図4(b)に示したように温度分布が定常状態になるまでの時間が短い。また、図4(a)に示したように、温度分布が図3(b)と比べてなだらかであり、加熱むらを低減できることが示された。このように、単層の炭素繊維繊維で強化した薄いSMPCは、優れた熱伝導特性と曲げに対する可とう性から、展開性能にとって有利となることが分かった。

展開性能は、温度分布とガラス転移領域における材料の温度依存特性(温度に依存する形状非回復率)との両方を考慮することで適切に予測できることが分かった。また、1つのパラメータ値で異なる加熱パターンの実験結果を再現可能であった。このことは、形状記憶複合材料を用いた展開構造の最適化の観点では、必ずしも全体を均一加熱せずに加熱を効率化する上で有用なモデルとなる。

(3) 薄膜複合材料の展開ダイナミクスの解析法の検討

図5に、薄膜複合材料の展開ダイナミクスをモデル化する際に、材料特性を三層モデル・分離モデルの2種類で導入した場合の比較結果を示す。境界条件として一方の端点にy軸まわりの曲げモーメント: $8N \cdot mm/s$ を付与した場合の変形状の一例を示す。まず、分離モデルについて等価節点力{Q}を求める際の数値積分に対し、完全積分・次数低減積分の2種類の方法を用いて比較検討した結果(図5(a))、完全積分を行った場合に生じるmembrane lockingの影響を低減するために、次数低減積分が有効であることが分かった。また、分離モデル・三層モデルを用いて同一の境界条件を設定して解析した結果(図5(b))、両者の結果はほぼ一致した。この結果から、複合材料を均質連続体としてモデル化する上で、三層モデルでも精度よく変形を取り扱えることが明らかとなった。

実際には織り構造など複雑な材料構造を有しており、巨視的な均質複合材料モデルにおける材料特性を付与する方法については定まった方法が確立されておらず、特に薄膜複合材料の曲げ特性に関しては、繊維束のうねりに大きく影響を受けるため、従来から織

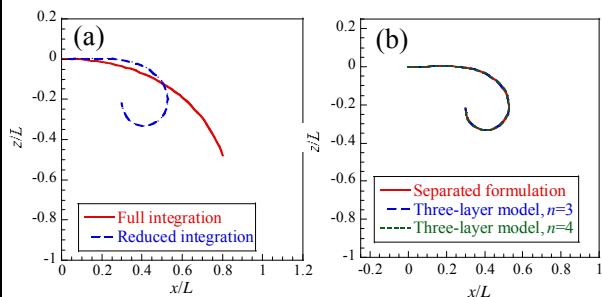


図5 薄膜複合材料をモデル化した展開ダイナミクスのシミュレーション例

物複合材料の巨視的特性の簡易評価法として知られるモザイクモデルによる予測が実験値をよく再現できない場合があることも確認している。このような薄膜複合材料に関する物性評価法の確立やそれを援用したさらなる力学モデルの構築が必要である。

また解析では埋め込み座標系を用いて大変形を扱っており、特に、埋め込み座標系で材料の構成則を正しく評価することが重要であった。宇宙展開構造のような展開過程をモデル化するためには、前項のような材料特性や熱伝導特性を考慮することが重要であると同時に、展開ダイナミクスに伴う変形による薄膜構造の剛性方向の変化を適切に考慮して展開の信頼性をシミュレーションにより把握することが展開の信頼性の観点からは重要である。

宇宙展開構造物への適用が進展している複合材料は、力学特性を設計することができる利点を有しており、その特性を活かして展開構造物の展開挙動を制御できる可能性が期待される。柔軟に変形する複合材料の力学特性が展開構造物の展開挙動に与える挙動を適切に解析することにより、最適な展開構造用複合材料システムの創製につながる。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計1件)

Y. Naito, M. Nishikawa, and M. Hojo, “Effect of reinforcing layer on shape fixity and time-dependent deployment in shape-memory polymer textile composites,” *Composites A*, Vol. 76, (2015), pp. 316-325. DOI:10.1016/j.compositesa.2015.06.011

〔学会発表〕(計10件)

内藤悠太, 西川雅章, 北條正樹, “形状記憶複合材料の展開性能に加熱温度が及ぼす影響”, 日本機械学会 M&M2013 材料力学カンファレンス, 岐阜大学 (岐阜県岐阜市), 2013年10月12日。

関谷優太, 西川雅章, 北條正樹, “形状記憶複合材料を用いたモーフィングスキンにおける材料特性分布の最適化”, 日本機械学会 M&M2013 材料力学カンファレンス, 岐阜大学 (岐阜県岐阜市), 2013年10月12日。

内藤悠太, 西川雅章, 北條正樹, “形状記憶複合材料の展開のための加熱温度分布の検討”, 第5回日本複合材料会議 (JCCM-5), キャンパスプラザ京都 (京都府京都市), 2014年3月6日。

内藤悠太, 西川雅章, 北條正樹, “展開時間を考慮した形状記憶複合材料の展開モデルの検討”, 第58回宇宙科学技術連合講演会, 長崎ブリックホール (長崎県長崎市), 2014年11月13日。

永田恵輔, 西川雅章, 北條正樹, “シェル要素を用いた展開膜の展開挙動の解析”,

第58回宇宙科学技術連合講演会, 長崎ブリックホール (長崎県長崎市), 2014年11月13日。

永田恵輔, 西川雅章, 北條正樹, “シェル要素によるCFRP膜面の展開挙動の解析”, 第6回日本複合材料会議 (JCCM-6), 東京理科大学 葛飾キャンパス (東京都葛飾区), 2015年3月4日。

M. Nishikawa, Y. Naito, Y. Sekiya, and M. Hojo, “Finite element analysis for application of shape memory polymer composite to flexible active components of future aerospace structures,” 2nd Turkey-Japan Workshop (TJC) on Polymeric Composite Materials, Altinyunus Hotel, Cesme/Izmir, Turkey, 2015年5月9日。

M. Nishikawa, I. Taketa, K. Ueda, and M. Hojo, “Micromechanical finite element analysis on compressive strength of carbon fiber-reinforced plastics,” 14th Japanese-European Symposium on Composite Materials, Ohgigaoka Campus, Kanazawa Institute of Technology, Kanazawa, Japan, 2015年9月18日。

永田恵輔, 西川雅章, 北條正樹, “モード合成法を用いたCFRP薄膜の変形挙動の解析”, 第40回複合材料シンポジウム, 金沢工業大学 扇が丘キャンパス (石川県野々市市), 2015年9月18日。

西川雅章, 武田一朗, 上田桂, 北條正樹, “せん断破壊を考慮した一方向繊維強化複合材料の圧縮強度に関する有限要素解析”, 第1回材料WEEK, 京都テルサ (京都府京都市), 2015年10月15日。

〔その他〕

・研究室ホームページ

<http://ams.me.kyoto-u.ac.jp>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

西川 雅章 (NISHIKAWA, Masaaki)
京都大学・大学院工学研究科・准教授
研究者番号: 60512085

(2) 研究分担者

北條 正樹 (HOJO, Masaki)
京都大学・大学院工学研究科・教授
研究者番号: 70252492