

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 17 日現在

機関番号：13901

研究種目：若手研究(A)

研究期間：2011～2013

課題番号：23686122

研究課題名(和文) 三次元熱伝導率・放射率分布同時計測法の開発と機能的複合材ラジエータ設計への応用

研究課題名(英文) Development of Simultaneous Measurement of Three Dimensional Thermal Conductivity and Emissivity Distribution and Application for Functional Composite Radiator Design

研究代表者

長野 方星 (Nagano, Hosei)

名古屋大学・工学(系)研究科(研究院)・准教授

研究者番号：10435810

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 21,900,000円、(間接経費) 6,570,000円

研究成果の概要(和文)：前例のない機能的ラジエータを実現するため、マイクロスケールでの熱伝導異方性の温度依存性を精密評価するための装置構築を行い、種々の炭素系材料に適用した。また、機能的ラジエータの提案および性能試算を行い形状を決定した。

次にマクロスケールでの熱伝導率分布を計測するため、ロックインサーモグラフィによる非接触加熱・検知手法を提案・装置構築し、その有効性を検証した。本測定技術を3次元熱伝導測定へ改良し、炭素系複合材料の3次元異方性分布を明らかにした。また、得られた物性データを用いて蓄熱性と放熱可変性を有するラジエータの製作を行い、その蓄熱性、自律放熱制御性能を宇宙模擬環境下で明らかにした。

研究成果の概要(英文)：By combining periodic heating method, lazer-scanning system, and infrared detection system, in-plane thermal diffusivity mapping of pitch based CFRP can be obtained without contact. By using this apparatus, temperature dependence of thermal diffusivity for high thermal conductive graphite material was measured. Phase change materials were selected to add heat storage function to a proposed radiator, and heat of fusion and phase change temperature were evaluated by DSC method. The radiator configuration was reconsidered in order to deploy/stow the radiator fin easily. The optimum configuration from the points of thermal performance and weight was determined and fabricated.

研究分野：航空宇宙工学

科研費の分科・細目：若手研究(A)

キーワード：複合材料・物性 熱伝導 放射 ラジエータ

1. 研究開始当初の背景

宇宙インフラストラクチャの大型・小型化、ミッションの高度化に伴い、従来よりも高度で複雑な熱管理技術が要求される。特に熱環境変動が大きい月面着陸ミッション（-180 ~ +120）や熱環境が未知な小惑星への探査ミッションでは、熱設計の不確かさをパッシブに吸収できる熱制御技術が今後不可欠となる。しかしながら、現在の日本の宇宙開発においては、従来手法の「放熱面」と「ヒータ保温」の組合せに頼っており、電力リソースの厳しい次世代宇宙ミッションの実現にブレークスルーをもたらすような革新的技術が存在しない。

2. 研究の目的

上記背景を受けて本研究は、熱拡散性を有する強化材と、蓄熱性を有するマトリックス材、ならびに放射率可変性を有する表面材を融合させた新しいスマート複合材により、電力を用いることなく大きな熱環境変動にパッシブに対応できる「先進スマートラジエータ」を新たに提案し、省エネかつ高効率な放熱制御技術を確立することを最終目的とし、その基材となる先進スマート複合材の異方的な熱伝導率、放射率分布とその温度依存性を、マイクロおよびマクロスケールで計測する手法を確立し、新概念の機能的ラジエータ設計に応用することを目的とする。

3. 研究の方法

本研究の最終目標は、これまでに前例のないスマートラジエータを開発するために不可欠な、マイクロおよびマクロスケールの熱伝導率分布を計測する手法を確立し、炭素系複合材料の熱物性温度依存性および異方性の精密評価に基づいて機能的ラジエータを実証することにある。一年目は、マイクロスケールでの熱伝導異方性と全半球放射率の温度依存性を精密評価するための装置構築を行う。また、機能的ラジエータの提案および性能試算を行う。二年目は、マクロスケールでの熱伝導率分布を計測するための実験システムを構築し、その有効性を確認する。三年目は、熱伝導率測定技術を3次元熱伝導測定へ改良する。また、これらの技術を融合し、提案の先進スマートラジエータの製作、評価および宇宙実証への提案を行う。

4. 研究成果

1年目は以下の成果を得た。
 ・周期加熱法とレーザスキャニングシステムを融合させた熱伝導率分布測定装置の開発を行った。クライオスタットに液体窒素とヒータを組み合わせ、温度依存性を測定可能なシステムとした。高熱伝導炭素材料および積層方法の異なるピッチ系 CFRP 試料を数種類試作し、熱拡散率異方性分布の違いを温度依存性も含め定量的に明らかにした。
 ・新規製作した熱物性分布評価装置を用いて高熱伝導炭素材料の熱拡散率とその温度依

存性を明らかにした。また DSC により比熱の温度依存性を調べ、これらより熱伝導率の温度依存性を明らかにした。さらに全半球放射率の温度依存性と太陽光吸収率も明らかにした。

位相遅れの距離依存性測定結果より得られた熱拡散率の温度依存性測定結果を図 1 に示す。熱拡散率は本測定温度範囲において、550 ~ 2750 mm²/s と大きな温度依存性を有していることが明らかとなった。また 25 μm と 40 μm の測定結果は良好な一致を示した。

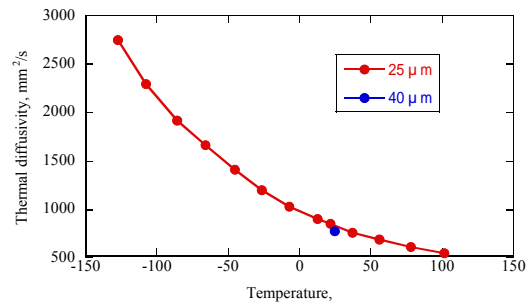


図 1 熱拡散率温度依存性結果

本測定から求まる熱伝導率を図 2 に示す。この結果から熱伝導率は 950 ~ 1490 W/mK と大きな温度依存性を有し、-75 付近で最大となることが明らかとなった。

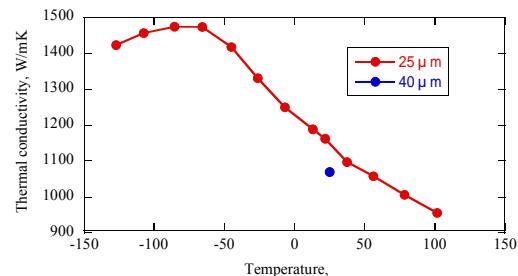


図 2 熱伝導率温度依存性

次に高熱伝導炭素材料および複合材料を基材とする新しい自律概念を有するラジエータを考案した。熱物性計測結果を基に自律熱制御ラジエータを設計し、展開時と収納時の放熱特性の差、フィン効率から最適となる形状を決定した。次に自律熱制御ラジエータを試作し、熱真空チャンバーを用いて性能を調べた。

本ラジエータの設計目標は、搭載機器の性能や現存の熱制御デバイスの性能を考慮し、以下のように定めた。

- 搭載機器形状：200 × 200mm
 - 搭載機器上限温度：60
 - 最大放熱量：100W 以上
 - 比放熱量：150W/kg 以上
 - フィン効率差：0.6 以上
- 解析モデルは、搭載機器（発熱体）とフィンから成り、1/2 領域モデルを構築した(図 3)。

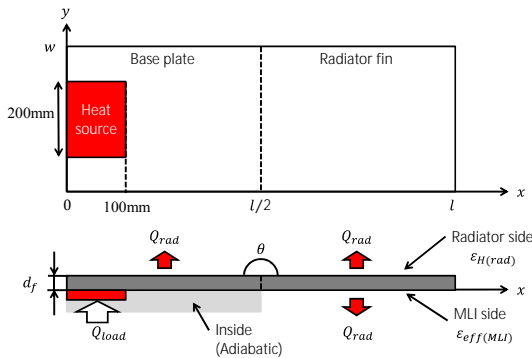


図3 熱解析モデル

アスペクト比と放熱量 (面積一定)

図4にフィン面積一定 ($l \times w = 0.18\text{m}^2$) としたときのアスペクト比 (l/w) と放熱量の関係を示す。この結果から、放熱量はフィン厚みに関係なく 0.7 程度のアスペクト比で最大値をとることがわかった。また、フィン厚みが 0.5mm では 3 以上のアスペクト比で設計目標値を下回った。

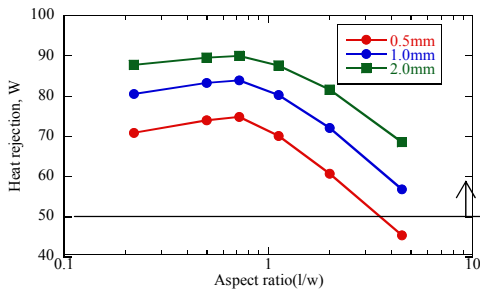


図4 アスペクト比と放熱量の関係

放熱面積と放熱量 (アスペクト比一定)

アスペクト比を 0.7 としたとき、放熱面積が $0.06 \sim 0.18\text{m}^2$ の範囲での放熱量を図5に示す。この結果からフィン厚みが 0.5~2.0mm において 0.1m^2 以上の放熱面積で設計目標値を満足することがわかる。また、このときの比放熱量は、厚み 0.5mm のとき 300W/kg 以上、厚み 1.0mm のとき 170W/kg 以上と設計目標値を満たしたが、厚み 2.0mm では 100W/kg 程度であり設計目標値を満たさなかった。

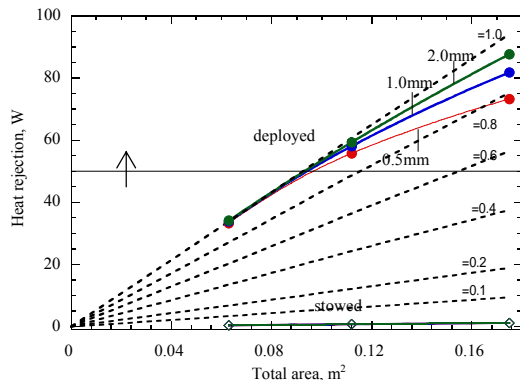


図5 放熱面積と放熱量の関係

フィン長さ・厚みと放熱量の関係 (幅一定)

フィン幅を一定としたときのフィン全長と放熱量の関係を図6に、比放熱量を図7に示す。これらから、厚み 0.5mm では $0.37 \sim 0.63\text{m}$ 、厚み 1mm では $0.32 \sim 0.6\text{m}$ で設計値を満たす。同様に幅が 200~500mm での設計許容範囲を図8に示す。

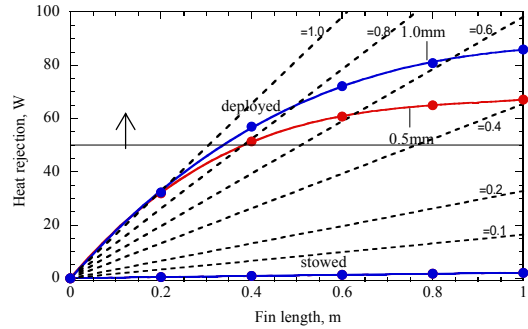


図6 フィン全長と放熱量の関係 (幅 300mm)

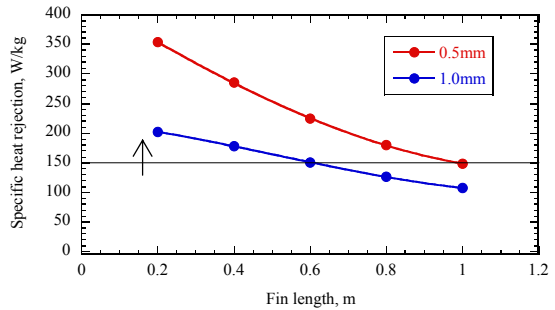


図7 フィン全長と比放熱量の関係 (幅 300mm)

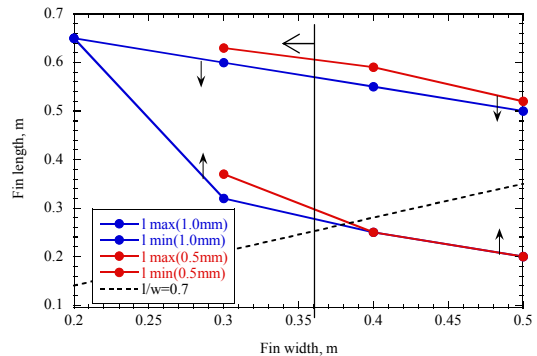


図8 設計許容範囲

現在入手可能な炭素原料幅から製作できるフィン幅は 360mm が最大となる。また、フィン積層作業の削減と可動部のフィン柔軟性向上のため、フィン厚みを薄く設定した。以上から試験モデルを以下の形状に決定した。

厚み × 幅 × 全長 : $0.5 \times 360 \times 400[\text{mm}]$

2年目は以下の成果を得た

- ・周期加熱法とレーザーキャニングシステムと赤外検知システムを融合させ、非接触でピッチ系 CFRP 材料の面内熱拡散率マッピングを作成することに成功した。また、新規レーザーの導入により PAN 系 CFRP などの低熱伝導

材にも適用可能となることを実証した．その結果を基に，試料厚みによる適用限界を明らかにした．

図 9 に新たに構築した実験装置の概略図を示す．本装置は，ダイオードレーザー，音響光学変調器 (AOM)，ビームエキスパンダー，光学顕微鏡，CCD カメラ，試料支持装置，サーモグラフィ，ファンクションジェネレーター (FG)，およびコンピューターから構成される．ダイオードレーザーから熱源となる加熱光が照射され，

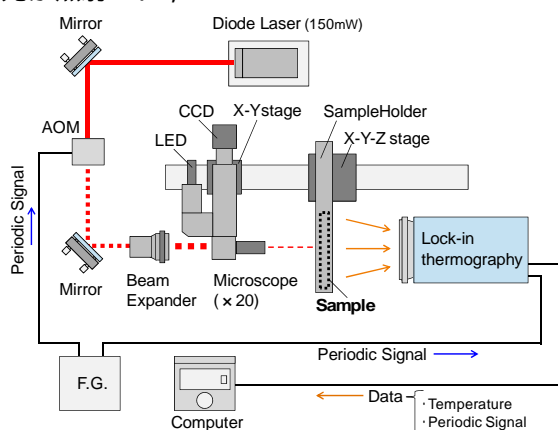


図 9 Schematic of the experiment

AOM で周期変調される．AOM は FG の設定周波数によりコントロールされる．変調された加熱光はビームエキスパンダーで直径を拡大された後に光学顕微鏡で集光され，試料支持装置に取り付けられた試料を周期的にスポット加熱する．レーザーのスポットの形成は CCD カメラの映像から確認する．試料温度は，加熱面と反対側に設置したサーモグラフィで計測する．サーモグラフィには，FG から参照信号が送られている．サーモグラフィは測定温度と参照信号をコンピューターに送っている．コンピューターが，送信されてきたデータから，測定温度と参照信号の位相差を解析する．ダイオードレーザーの最大出力は 150mW で，ビーム直径は 1.28mm，ビーム形状はガウス分布である．レーザーから照射されたビームは複数の光学部品を通過するため減衰し，試料到達時のビーム強度は 37.6mW となった．また，パワーメーターを用いてレーザースポットの強度分布を測定した結果，スポットの直径は約 $7\mu\text{m}$ であった．装置の評価は試料を高純度アルミニウム (純度 99% 以上) を用いて行い，熱拡散率の推奨値に対して $\pm 2\%$ 以内で一致した．

熱拡散率を計算するために，撮影された温度動画の 1 ピクセル当たりの長さを計算する必要がある．本測定では，長さが既知のテープを試料に貼り付けて撮影を行い，画面上のテープのピクセル数から，1 ピクセル当たりの長さを計算した．

D_d は一方向材の繊維直交方向の面内熱拡散率の値を用いた．測定の初期段階では D_d および D_L は未知であるため，初期値としてメーカーから提供される熱伝導率参考値を元に算出した熱拡散率を用いて，いくつか周波数を変えながら測定を行い，反復的に D_d ， D_L および適正周波数範囲を決定する．撮影は 1 回の測定時間を加熱周期の 5 倍以上とし，それを 7 回繰り返した．

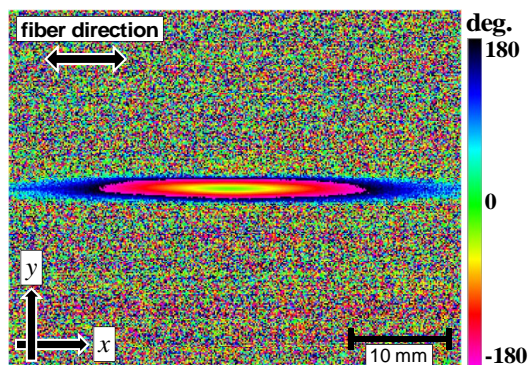


図 10 Mapping of phase-lag of UD sample

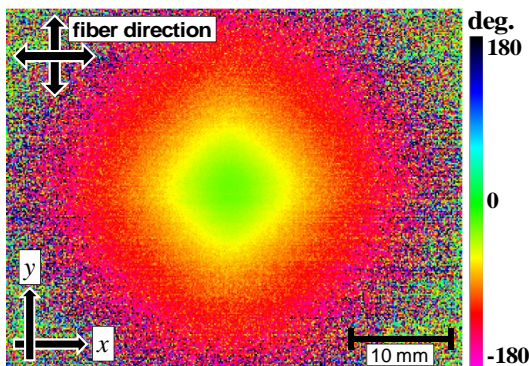


図 11 Mapping of phase-lag of CP sample

(異方性分布)

図 10, 11 にそれぞれ，1 方向材，2 方向材の位相遅れ分布図を示す．ロックイン・サーモグラフィを用いることで CFRP の異方性分布を瞬時に可視化することができる．

図 10 の 1 方向材は x 方向が繊維方向 (UD_{//})， y 方向が繊維方向と直交方向 (UD_⊥) である．加熱中心である画面中央から外側に向かって位相遅れが大きくなっていることが見て取れる．ただし -180° 以下の位相遅れは一周ずれて 360° 加わって表示されていることを注記しておく．等方性材料の場合，位相遅れは円形に分布する．それに対して 1 方向材の場合，位相遅れは横長に分布し，外の方はノイズが観測されている．熱拡散率が小さい場合は，短い距離で位相遅れが大きくなる．従って図 10 より，繊維が配向されている x 方向に熱拡散率が大きく，それ以外の方向で熱拡散率が小さいことが確認された．

図 11 の 2 方向材は， x ， y 方向が繊維方向 (CP_{//}) である．画面中央から外側に向かって

位相遅れが大きくなっている。2方向材の場合、位相遅れはひし形に分布し、外の方はノイズが観測されている。位相遅れ分布図の様子から、 45° 、 135° 、 225° 、 315° 方向に熱拡散率が小さく、繊維が配向されている x 、 y 方向に熱拡散率が大きいことが明らかとなった。

(熱拡散率の角度依存性)

続いて繊維方向に対する異方比の角度依存性を算出した。異方比は、試料内の最大熱拡散率に対する、任意の方向での熱拡散率の比で定義される。1方向材および2方向材の熱拡散率異方比の角度依存性算出結果を図12および図13にそれぞれ示す。これより1回の試料セッティングで、面内熱拡散率の角度依存性が、材料の不均質性も含め計測できることが示された。図12に示す1方向材の熱拡散率は、繊維方向(0°)で極端に大きく、繊維方向以外では大幅に小さくなることが明らかとなった。一方、2方向材の熱拡散率は、繊維の配向されていない $\pm 45^\circ$ 方向で小さく、等方性材料ではないことが確認された。 $\pm 45^\circ$ 方向の熱拡散率は、繊維方向の75%程度であることが分かった。さらに、方向に依存する異方比のバラツキは、CFRPの内部構造の不均質性に起因すると考えられる。したがって、高精度な熱設計を行うためには、個々のCFRP部材の各箇所に対して熱拡散率測定を行う必要がある。その際に、非接触で簡易迅速で、さらに広範囲に測定が可能な本測定手法が有効であると考えられる。

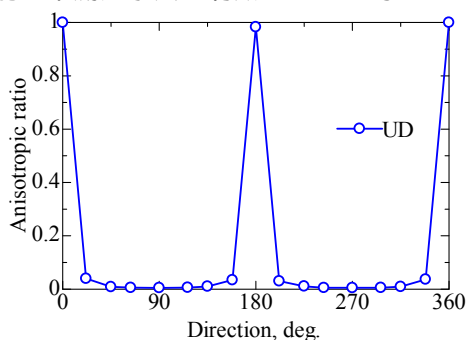


図12 Direction dependence of anisotropic ratio of UD

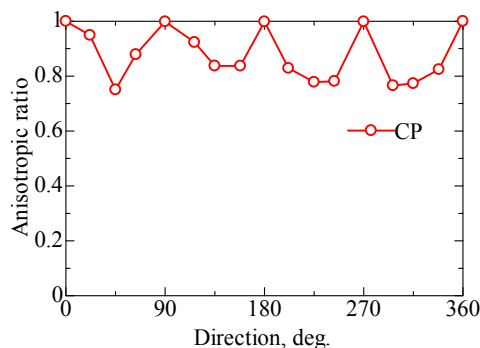


図13 Direction dependence of anisotropic ratio of CP

比熱容量を DSC 法で測定し、密度を試料形状と質量から計算して、それらを熱拡散率と掛け合わせて熱伝導率を計算した。本測定で用いた DSC 装置を用いて アルミナの比熱容量を測定したと、推奨値に対して 3.5%以内で一致した。CFRP の常温での比熱容量は、1方向材が $841\text{J}/(\text{kg}\cdot\text{K})$ 、2方向材が $828\text{J}/(\text{kg}\cdot\text{K})$ であった。密度はどちらも $1761\text{kg}/\text{m}^3$ であった。熱伝導率の計算結果を以下に示す。なお、本熱拡散率装置および DSC 装置の測定の不確かさを合成して得られる熱伝導率の不確かさは 4%程度と見積もられた。

1方向材 繊維方向 : $340\text{ [W}/(\text{m}\cdot\text{K})]$

1方向材 直交方向 : $2.81\text{ [W}/(\text{m}\cdot\text{K})]$

2方向材 繊維方向 : $204\text{ [W}/(\text{m}\cdot\text{K})]$

1方向材の繊維方向の熱伝導率は、高熱伝導材料の純銅よりも 15%程度小さく、純アルミニウムよりも 43%程度大きかった。また、2方向材についても、アルミニウムの熱伝導率に近い熱伝導率となり、本研究で用いたピッチ系 CFRP が高い熱伝導率を有することが確認された。

・提案するラジエータに蓄熱性を持たせるため、蓄熱材料候補を選定し、DSC 法により潜熱量と相変化温度を調べた。並行して、複合材料と蓄熱材を組み合わせたスマート構造型放熱板を提案した。ラジエータの展開フィンを容易に可逆展開できるようにラジエータ形状を見直し、熱性能と重量が最適となる形状を決定した。次に、設計結果に基づくラジエータを製作した。

3年目は以下の成果を得た

・昨年度までに構築したロックイン式サーモグラフィを用いたあたらしい熱拡散率計測技術をさらに3次元測定可能に改良した。解析方法および測定可能条件を明らかにし、標準試料による検証およびピッチ系 CFRP 材料への適用を行い、面内および厚さ方向の異方性分布を簡易かつ迅速に測定できることを実証した。本件に関しては特許を出願した。・蓄熱機能付き CFRP パネルを設計、製作し、宇宙環境模擬装置を用いてその熱拡散性と蓄熱性の効果を検証した。蓄熱材には相変化温度と潜熱量の観点からエイコサンを選定し、高熱伝導 CFRP 容器を自作して内包させた。また高熱伝導炭素系材料を用いた可逆展開ラジエータに関しては形状記憶合金とバイアスばねを組み合わせた二方向素子を新たに提案し、恒温槽による可逆開閉特性評価と宇宙環境模擬装置による性能実証を行った。また、モータによる開閉収納との性能比較を行い、軽量で、外部環境に伴う性能可変特性を実験的に明らかにした。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 3 件)

- (1) 栗原理也, 長野方星, “ロックイン・サーモグラフィを用いた高熱伝導炭素系複合材料の熱的異方性評価装置の開発,” 熱物性, Vol. 28, No. 2 (2014) pp. 82-88 .
- (2) 野津亮太, 長野方星, 小川博之, “月面長期滞在方法に関する一提案 (月面模擬環境装置の構築と有効性の実験的検証),” 機械学会論文集 (掲載決定)
- (3) R. Notsu, H. Nagano, H. Ogawa, “A proposal of Lunar Long-duration Method by Using High Heat storage Capability of Regolith,” J. Thermophys. & Heat Transf., (Accepted) .

〔学会発表〕(計 14 件)

- (1) T. Ishizaki, and H. Nagano, “Development of an in-plane thermal diffusivity measurement method with a lock-in thermography and application to high thermal conductive CFRPs,” International Heat Transfer Conference 15 (Kyoto, Japan, 2014).
- (2) K. Yamada, H. Nagano, and T. Totani., “Development of a Heat Storage Panel Using a Phase-change Material encapsulated in a High-thermal conductive CFRP for Small Satellites,” 44th ICES, (Tucson, USA, 2014).
- (1) K. Yamada, H. Nagano, Y. Kobayashi, T. Totani., “Development of a Heat Storage Panel using a Phase-Change Material Encapsulated in a High-Thermal-Conductive CFRP for Small Satellites,” Fifth Nano-Satellite Symposium (Tokyo, Japan, 2013).
- (2) T. Ishizaki, and H. Nagano, “Measurement of Three-Dimensional Anisotropic Thermal Diffusivities for Carbon Fiber Reinforced Plastics using a Lock-in Thermography,” The 10th ATPC, (Jeju, Korea, 2013).
- (3) S. Ohno, H. Nagano, S. Tachikawa, H. Ogawa, Yasushi Nishikawa, “Study on an Advanced Deployable Radiator with High-Thermal-Conductive Graphite Sheets for Small Satellites,” 43rd ICES, (Vail, USA, 2013).
- (4) R. Notsu, H. Nagano, H. Ogawa, “A proposal of Lunar Long-duration Method by Using High Heat storage Capability of Regolith,” 43rd ICES, (Vail, USA, 2013).
- (5) S. Ohno, H. Nagano, S. Tachikawa, H. Ogawa, Yasushi Nishikawa, “Study on a Deployable/Stowable Radiator With Extremely High-Thermal-Conductive Graphite Sheets,” 29th ISTS, (Nagoya, Japan, 2013).
- (6) R. Notsu, H. Nagano, H. Ogawa, “A Long-duration Method for Lunar Exploration Lander by Using Thermal

Characteristics of Regolith,” 29th ISTS, (Nagoya, Japan, 2013).

- (7) M. Kuribara, and H. Nagano, “Anisotropic Thermal Diffusivity Measurements in High Thermal Conductive CFRP Composites,” 18th Symposium on Thermophysical Properties, (Colorado, USA, 2012).
- (8) 野津亮太, 長野方星, 小川博之, “月面長期滞在方法の研究 -レゴリス熱伝導率深さ依存性の考察と有効性評価-,” 第 57 回宇宙科学技術連合講演会, (2013).
- (9) 山田紘平, 長野方星, 戸谷剛, “高熱伝導 CFRP と相変化物質を用いた小型衛星用蓄熱パネルの開発,” 第 57 回宇宙科学技術連合講演会, (2013).
- (10) 大野翔也, 長野方星, 太刀川純孝, 西川泰司, “高熱伝導性グラファイトシートの熱伝導性評価と超小型衛星用機能的ラジエータへの応用,” 第 49 回日本航空宇宙学会 中部・関西支部合同秋期大会 (2012).
- (11) 長野方星, 岡崎裕幸, 野津亮太 “月面長期滞在方法に関する一提案,” 第 56 回宇宙科学技術連合講演会 (2012).
- (12) 栗原理也, 長野方星, “ピッチ系 CFRP の熱的異方性マッピング技術の開発,” 第 37 回複合材料シンポジウム (2012).
- (13) 栗原理也, 長野方星, “ロックインサーモを用いたピッチ系 CFRP の異方的熱拡散率測定,” 第 33 回日本熱物性シンポジウム (2012).
- (14) 大野翔也, 長野方星, “インフレータブル機構を用いた超小型衛星用ロール式ラジエータの研究,” 第 54 回構造強度に関する講演会 (2012).

〔図書〕(計 2 件)

- (1) 宇宙機の熱設計, 名古屋大学出版会, 2014 年 (共著)
- (2) サーマルマネジメント~余熱・排熱の制御と有効利用, エヌティエス, 2013 年 (共著)

〔産業財産権〕

出願状況 (計 1 件)

名称: 熱拡散率測定装置

発明者: 長野方星, 関根誠, 羽鳥仁人

権利者: 名古屋大学, ベテル

種類: 特許

番号: 2013-251209

出願年月日:

国内外の別: 国内

6. 研究組織

(1) 研究代表者

長野方星 (NAGANO HOSEI)

名古屋大学・大学院工学研究科・講師

研究者番号: 10435810