

令和 6 年 6 月 13 日現在

機関番号：33919

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2020～2023

課題番号：20K04920

研究課題名（和文）CubeSatの熱伝達の不確実性低減と温度制約を考慮した運用計画立案手法の提案

研究課題名（英文）Mitigation of thermal interface uncertainty for CubeSat and proposal for operational planning method with thermal constraints

研究代表者

宮田 喜久子（Miyata, Kikuko）

名城大学・理工学部・准教授

研究者番号：00733156

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,300,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では超小型人工衛星の開発・運用の更なる効率化のため、世界的に研究開発が遅れており不確実性が確認されている温度管理機能の改善およびその数値モデルの高精度化を目指した。問題解決の手段として、不確実性を低減可能な機器設計手法の提案と温度制約を含んだ宇宙機運用計画系の構築の2つの手段を検討した。

提案手法は、全体的なシステム設計を考慮し、ハードウェア・ソフトウェアの両面の対策を有し、それらの検証は数値解析および実機関連実験を通じて検証されている。また、実際の宇宙実験も近日中に実施予定である。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本成果は、宇宙機熱設計・状態推定において、不確実性を低減するハードウェアとソフトウェアの対策を提案し、それらの対策を効果的に融合させる手法を提案した。これらの成果を実装することにより、超小型宇宙機システムの開発期間の短縮、高機能化、運用時間の拡大などが見込まれる。これらの成果を発展させていくことは、今後の宇宙利用拡大、しいては関連する人々の生活の向上に役立っていくことにつながる。

研究成果の概要（英文）：This study proposed ways to reduce the spacecraft temperature uncertainties and improve the satellite temperature simulator model management system. This technique will lead to shorten the development period, reduce the development cost, and achieve efficient operations planning. This study proposes the system design and verification method to reduce the uncertainties and a novel autonomous spacecraft operations planning method. The proposed method includes both hardware-related measures and software-related measures. The methods are verified numerically and experimentally, and the actual space experimentation will be performed shortly.

研究分野：航空宇宙工学

キーワード：超小型人工衛星 宇宙機熱設計 運用計画 熱伝導 宇宙システム

1. 研究開始当初の背景

超小型人工衛星による研究開発は CubeSat という構造的な規格の世界的浸透もあり、活発化してきており、規格に則し機能単位ごとに独立なモジュールとして設計された搭載機器も多く提供されている。機器間インターフェイスについても規格化が始まっており、詳しい知識がなくとも電気・構造的に機器を接続することが可能となってきている。これにより開発期間が短縮化し、宇宙開発に新規参入する国家や企業の増加に貢献している。

しかし、機器の温度管理という観点においては単純な機器接続のみで機器の温度環境条件を担保することは難しく、厳密な試験や解析が必要であり開発期間短縮の妨げとなっていた。温度関連のパラメータには製造における誤差が存在しており、類似宇宙機においても構成要素間の熱伝達条件には個体差が見受けられる。従来のヒーター等を用いた能動的な熱制御手法では、モジュール間の独立性維持ができなくなり汎用性が低下する可能性を指摘する報告もある。さらに、このサイズの宇宙機は電力・質量リソース制約から姿勢制御性能に乏しいことも多いが、姿勢制御における不確実性も搭載機器温度の変動要因となる。宇宙機熱入力条件は太陽などに対する相対姿勢によって変動し、わずかに数キロで熱容量が小さい CubeSat の搭載機器温度は姿勢変動に大きく依存する。よって、姿勢が安定している従来衛星より軌道上データから構成要素間の熱伝達の条件における不確実性を解明することが難しい。

また、開発・運用コスト低減のためには、宇宙機開発や運用計画の立案において、宇宙機模擬モデルを活用していく流れができていくが、現状は他の要素に比べ温度予測モデルの確度は低い。よって、他の要素より大きなマージンを設定する必要性が生じている。今後より高度化していくミッション要求に対応するためには、特に運用計画立案時のマージン低減が必須である。不確実性の高さからくる運用制約条件はこれまでの技術実証的なミッションでは許容されても質の高いミッションを達成する上では大きな妨げになる。

2. 研究の目的

上述のように、宇宙機開発および運用時の効率化のためには、温度環境条件の不確実性を低減し、その推定精度を向上させることが必要となる。本研究課題では、宇宙機の構成要素間の熱伝達条件における不確実性を低減し、短い開発期間を維持したまま厳密な運用制約条件を定義する方策と条件を満たす機器運用計画を立案する手法の解明に焦点をあて、質の高いミッション実現を可能とする知見を得ることを目的とする。

3. 研究の方法

(1) 熱伝達における不確実性要因の解明

実機データの解析および、予備実験の実施により、機器構成要素間の熱伝達条件に起因する不確実性および運用条件に伴う不確実性の2点から、不確実性の要因を解明する。

また、不確定パラメータの推定手法についても検討を実施する。

(2) 熱伝達における不確実性を低減可能な機械的構造の提案と実験的検証

抽出した不確実性の要因となりうる項目に対し、主に組立手法や実装時のハードウェア的な対策を活用する受動的なアプローチにより低減する手法を検討する。また、その効果については実験的にも検証する。

(3) 温度制約を考慮した最適な機器運用計画の構築

抽出した不確実性のあるパラメータを反映したより現実的な熱数学モデルを組みこんだシステムシミュレータを構築し、運用計画を検討する。この際、提案する不確実性低減手法を反映した検討も実施し、その効果についても議論する。

4. 研究成果

(1) 熱伝達における不確実性要因の解明

- ① 熱パラメータの不確実性に起因する温度変動について複数の実機データをもとに熱数学モデルを構築しパラメータ感度に対する解析的な検討を行った。
- ② 解析に基づいて詳細検討が有効と考えられた機械的結合条件と機器間の接触熱抵抗の関係性について実験的検証を行った。また、接触熱抵抗推定手法を構築し、その妥当性の評価を行った。図1に一部実験の様子を示す。

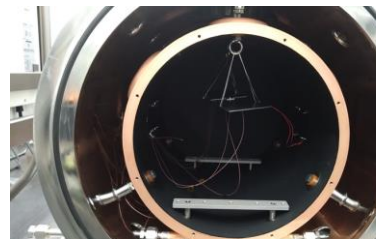


図1 接触熱抵抗推定実験の様子

本成果の一部は、34th International Symposium for Space Technology and Science, and the 12th Nano-Satellite Symposium や第32回スペース・エンジニアリング・コンファレンスなどで報告した。

- (2) 熱伝達における不確定性を低減可能な機械的構造の提案と実験的検証
- ① 不確実性の評価をもとに、温度クリティカルな機器においては、ハードウェアのみでの対策では、熱対策の限界が発生する可能性があることを抽出
 - ② 特に温度変動の影響が大きい機器に対しては、温度依存性のモデル化を実施、モデル化しやすい温度範囲に温度変動を抑える個別の熱対策機器を実装し、補正モデルを併用する手法を検討
 - ③ 相変化蓄熱材に着目し、効果の最大化を狙った実験的および解析的評価を実施
 - i) 複数の種類の相変化材料に対して潜熱密度、実装の容易性、相変位温度の調整に着目して評価を実施
 - ii) 減圧環境下で溶媒の気化や体積変化が起こらないことなどから、固固相変化を伴う二酸化バナジウム(VO_2)を主材料として選定。組成物の一部の V を異種金属元素(タングステン, W)で置換し、そのドーピングの割合を複数変化させた実験を行い、相転移点の変化の評価も実施。常温付近から -20°C までの複数の相転移点を実現。
 - ④ 相変化蓄熱材を活用し、実機搭載がしやすい形での実装形態をとった温度安定化デバイスを設計・製作し、図2に示すように各種評価試験も実施した。
 - ⑤ 相変化蓄熱材を用いた温度安定化デバイスについては、実機によるデモンストレーションを実施可能なデバイスを完成。2024年中に宇宙環境下での実験を実施予定

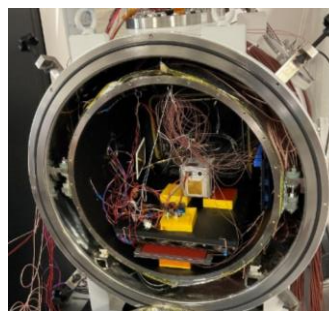


図2 温度安定化デバイス
宇宙環境模擬装置による評価試験の様子

本成果の一部は、Thermal Science and Engineering Progress や 74th International Astronautical Congress などでも報告した。また、発展検討に関して今後国際学会にて発表する予定である (75th International Astronautical Congress に採択済)

(3) 温度制約を考慮した最適な機器運用計画の構築

- ① 実機運用データや各種実験データをベースに衛星システムシミュレータを構築
- ② 数理最適化を用いた運用計画自律立案手法の提案
- ③ 運用計画立案時の安全制約として、電源状態を選定(図3に示すようにバッテリー等は内部パラメータの温度依存性が高いため、そのモデル化も実施)
- ④ 高精度電源推定機能と組み合わせ、自律補正を可能とすることにより安全かつ効率的な運用計画立案を実現
- ⑤ 衛星システムシミュレータと提案手法を組み合わせた手法の妥当性評価の実施
- ⑥ 対外発表の結果、外部のプロジェクトからも利用の打診が来ている。

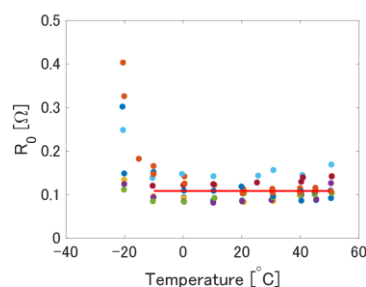


図3 バッテリー内部パラメータの温度依存性

本成果の一部は、IEEJ Journal of Industry Applications や第 67 回宇宙科学技術連合講演会などで報告した。また、発展検討に関して今後国際学会にて発表する予定である (75th International Astronautical Congress に採択済)

本研究課題における主要な成果は下記2点となる。

- (1) 熱伝達条件の不確定性を低減する手法として、容易に実装可能な様式での相変化蓄熱材を活用した温度安定化システムを提案した。実宇宙機によるデモンストレーションを実施予定。
- (2) 最適な機器運用計画を実現するために、数理最適化を用いた運用計画自律立案システムを構築。他大学衛星プロジェクト等からも活用依頼が来ており、実利用環境における評価計画が着々と進んでいる。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計4件（うち査読付論文 4件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 2件）

1. 著者名 Miyata Kikuko, Kawazoe Yuta, Hara Susumu	4. 巻 12
2. 論文標題 Proposal for Shape Memory Alloy Positioning Actuator using Electric Parameter Based Controller	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 IEEJ Journal of Industry Applications	6. 最初と最後の頁 153 ~ 154
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1541/ieejjia.122000583	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -
1. 著者名 Yamagata Masaki R., Wakita Yurina, Tsuruda Yoshihiro, Miyata Kikuko	4. 巻 37
2. 論文標題 Feasibility study of low-temperature operable electric power supply for CubeSats using passive thermal control with V02-based solid?solid phase change material	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Thermal Science and Engineering Progress	6. 最初と最後の頁 101601 ~ 101601
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.tsep.2022.101601	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Miyata Kikuko, Takaki Arata, Hara Susumu	4. 巻 11
2. 論文標題 Model-Based Efficient and Safe Spacecraft Operations Planner Focusing on Battery State Management	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 IEEJ Journal of Industry Applications	6. 最初と最後の頁 447 ~ 457
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1541/ieejjia.21006980	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -
1. 著者名 MIYATA Kikuko, TOMIOKA Kota, YAMAOKA Kazutaka	4. 巻 69
2. 論文標題 Establishment and Practical Results Report of the Spacecraft Thermal-Design Hands-on Training Program for General Public	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Journal of JSEE	6. 最初と最後の頁 2_75 ~ 2_80
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.4307/jsee.69.2_75	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計27件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 5件）

1. 発表者名 脇田 悠利名, 宮田 喜久子, 鶴田 佳宏, 山縣 雅紀
2. 発表標題 固-固相転移材料を活用した高信頼性宇宙機用電源の検討とその低温特性評価
3. 学会等名 日本機械学会 2022年度年次大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 山本 悠史, 青木 竜也, 宮田 喜久子, 鶴田 佳宏, 山縣 雅紀
2. 発表標題 民生二次電池の内部抵抗に基づく超小型衛星搭載バッテリーの状態推定の最適化
3. 学会等名 日本機械学会 2022年度年次大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Yurina Wakita, Kikuko Miyata, Yoshihiro Tsuruda, Masaki R. Yamagata
2. 発表標題 Low-temperature operatable electric power supply for CubeSats using VO ₂ -based phase change material
3. 学会等名 13th Asian Thermophysical Properties Conference (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 脇田悠利名, 宮田喜久子, 鶴田佳宏, 山縣 雅紀
2. 発表標題 超小型衛星用電源の熱制御に適した潜熱蓄熱材およびその実装方法の検討
3. 学会等名 第43回日本熱物性シンポジウム
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 脇田悠利名, 宮田喜久子, 鶴田佳宏, 山縣雅紀
2. 発表標題 固-固相転移材料を用いた宇宙機用蓄熱ブロックの最適化とその保温特性評価
3. 学会等名 第59回日本航空宇宙学会中部・関西支部合同秋期大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 脇田悠利名, 宮田喜久子, 鶴田佳宏, 山縣雅紀
2. 発表標題 潜熱蓄熱材を活用した超小型衛星用電源の受動的熱制御の提案とその材料検討
3. 学会等名 第31回スペース・エンジニアリング・コンファレンス(SEC'22)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 脇田悠利名, 宮田喜久子, 鶴田佳宏, 山縣雅紀
2. 発表標題 潜熱蓄熱材の活用による電力不要の宇宙機用電源熱制御システムの提案
3. 学会等名 第15回宇宙ユニットシンポジウム
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 脇田 悠利名, 鶴田 佳宏, 宮田 喜久子, 山縣 雅紀
2. 発表標題 宇宙機用低温作動電源実現のための 潜熱蓄熱材の適用可能性の検討
3. 学会等名 第58回日本航空宇宙学会関西・中部支部合同秋季大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 青木 達也, 宮田 喜久子, 鶴田 佳宏, 山縣 雅紀
2. 発表標題 電流休止法による民生二次電池の内部抵抗評価とその超小型衛星用電源の軌道上特性推定への適用
3. 学会等名 第58回日本航空宇宙学会関西・中部支部合同秋季大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 宮田喜久子, 山岡和貴, 田島宏康, 松下幸司, 渡部豊喜
2. 発表標題 太陽中性子およびガンマ線観測衛星SONGSの開発状況
3. 学会等名 第65回宇宙科学技術連合講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Kikuko Miyata, Yusuke Ogawa, Masaki Yamagata
2. 発表標題 Proposal and evaluation for passive temperature stabilization system for battery performance management
3. 学会等名 72nd International Astronautical Congress (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 青木 達也, 松山 哲也, 宮田 喜久子, 鶴田 佳宏, 山縣 雅紀
2. 発表標題 電流休止法を用いた民生電池の内部抵抗評価および超小型衛星用電源の軌道上特性推定
3. 学会等名 日本機械学会2021年度年次大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 脇田 悠利名, 遠藤 大地, 鶴田 佳宏, 宮田 喜久子, 山縣 雅紀
2. 発表標題 軌道上材料曝露試験のための低温作動電源実現可能性の検討
3. 学会等名 日本機械学会2021年度年次大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Kikuko Miyata, Kota Tomioka, Kazutaka Yamaoka, Hidetaka Tanaka, Hiroyasu Tajima
2. 発表標題 Lecture Series for Encouraging Commercial Space Utilization for the General Public
3. 学会等名 71st International Astronautical Congress (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 松山哲也, 中村和弘, 鶴田佳宏, 宮田喜久子, 山縣雅紀
2. 発表標題 キューブサットに利用する民生用電池の特異的な低温挙動と種々の内部抵抗診断法による検証
3. 学会等名 第64回宇宙科学技術連合講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 松山哲也, 中村和弘, 鶴田佳宏, 宮田喜久子, 山縣雅紀
2. 発表標題 キューブサット用電源の軌道上特性分析に用いる民生用リチウムイオン電池の内部抵抗評価法の検討
3. 学会等名 日本機械学会2020年度年次大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Yuta Kawazoe, Kikuko Miyata
2. 発表標題 Improvement of Thermal Contact Resistance Model for Thermal Design of Nano-Satellites
3. 学会等名 The 34th International Symposium for Space Technology and Science, and the 12th Nano-Satellite Symposium (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 脇田 悠利名, 宮田 喜久子, 鶴田 佳宏, 山縣 雅紀
2. 発表標題 固-固相転移型潜熱蓄熱材を活用したキューブサット用電源のための熱制御およびその実装検討
3. 学会等名 日本機械学会 2023年度 年次大会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Kikuko Miyata, Masaki Yamagata
2. 発表標題 Temperature Stabilization Device ' s Design and Implementation Method for Nanosatellite System
3. 学会等名 74th International Astronautical Congress (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 脇田悠利名, 宮田喜久子, 鶴田佳宏, 山縣雅紀
2. 発表標題 固-固相変化型潜熱蓄熱材を用いた受動的熱制御システムおよびその宇宙機への実装検討
3. 学会等名 第13回 CSJ化学フェスタ2023
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 佐藤 優真, 鶴田 佳宏, 宮田 喜久子
2. 発表標題 超小型人工衛星のバッテリー充電率制約を考慮した運用計画の立案手法に関する研究
3. 学会等名 第67回宇宙科学技術連合講演会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 山縣 雅紀, 脇田 悠利名, 宮田 喜久子, 青柳 賢英
2. 発表標題 V02系潜熱蓄熱材を活用した宇宙機用電源とその軌道上実証のためのキューブサットDENDEX-01の開発
3. 学会等名 第44回日本熱物性シンポジウム
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 脇田 悠利名, 宮田 喜久子, 鶴田 佳宏, 山縣 雅紀
2. 発表標題 V02系PCMを活用した超小型衛星用電源の熱制御および搭載を想定したPCMブロック組成の検討
3. 学会等名 第44回日本熱物性シンポジウム
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 佐藤優真, 山縣雅紀, 鶴田佳宏, 宮田喜久子
2. 発表標題 超小型人工衛星の効率的な運用計画立案に対する精密バッテリーモデルの適用
3. 学会等名 第32回スペース・エンジニアリング・コンファレンス
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 宮田喜久子, 山縣雅紀, 脇田悠利名, 青柳賢英
2. 発表標題 1U CubeSat Denden-01の熱設計と評価について
3. 学会等名 第32回スペース・エンジニアリング・コンファレンス
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 山縣 雅紀, 脇田 悠利名, 松本 健, 宮田 喜久子, 青柳 賢英
2. 発表標題 革新的エネルギー技術実証1UキューブサットDENDEX-01の開発
3. 学会等名 第60回関西・中部支部合同秋期大会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 脇田悠利名, 宮田喜久子, 青柳賢英, 山縣雅紀
2. 発表標題 潜熱蓄熱材を活用した電源温度安定化デバイスと軌道上実証のための1UキューブサットDENDEX-01の開発
3. 学会等名 第17回宇宙ユニットシンポジウム
4. 発表年 2024年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

名城大学理工学部交通機械工学科航空宇宙機システム研究室 https://www1.meijo-u.ac.jp/~kmiyata/asel/index.html
--

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
--	---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------