

相変化材料を活用した高機能蓄熱装置の最適設計

宮田 喜久子^{*1} 竹澤 晃弘^{*2}

Design Optimization of Phase Change Material Based High-performance Heat Storage Device

Kikuko MIYATA^{*1} and Akihiro TAKEZAWA^{*2}

The heat storage device is the key technology for solutions to thermal and energy problems. Phase change materials (PCMs) are popular to achieve heat storage devices. It utilizes the phase change energy characteristics as the thermal storage function. However, it has some problems in characteristics, such as difficulties in the optimal material implementation and limitations in the mass efficiency caused by low thermal conductivity characteristics. To optimize the heat storage device design, this research clarifies two main aspects. One is the thermal interface and requirement control technique for the PCM device. Generally, the heat storage device works passively and it is important to sort out the requirements of the controlled target, application environments, and interface control methods. The other is the optimal design methods for the thermal path in the PCM. We apply the lattice structure to improve the thermal conductivity in the PCM and optimize the structure utilizing Topology optimization methods. Some useful results are shown for each aspect, and it will help future detailed discussions to design a more realistic application.

1. 背景・目的

蓄熱技術は熱・エネルギーに係る課題を解決する重要技術として注目をあびている。例えば、余剰・不要熱エネルギーを回収し、所望の日時・場所で取り出して利用するエネルギーの利用効率を向上させるシステムや、温度依存性の高いデバイスの機能性能保持システムへの適用が期待される。その蓄熱機能実現に多く用いられる物質が相変化材料(Phase Change Material: PCM)である。温度変化などにより材料の相が変化する物質であり、相変化に要するエネルギーとして蓄熱が可能となる。その効果的な実装には制御対象を考慮した蓄熱システムの設計要求条件の明確化や適切な材料選定が必要になる。また、一般的に用いられる PCM は固液相変化を用いるもので熱伝導率が低く、実装の自由度も低くなっている。熱伝導率の低さは、制御対象の温度変化に対する応答速度に影響し、対象温度が期待される温度制御範囲から逸脱する要因となる。また、材料増による蓄熱量の増加を実質的に阻害し蓄熱性能を制限する要因となっている。

これらの課題の解決のため、我々は大きく2つの項目に取り組む。1つ目は制御対象の特性や環境条件を整理し蓄熱システムの設計要求条件を明確化する手法の解明である。また、制御対象に合わせた PCM の材料特性や実装検討などの情報整理も行う。2つ目としては制御対象の温度状態変化を PCM に速やかに伝えるための伝熱パス構造の検討である。ここでは、ラティス構造の形成を提案する。ラティス構造とは、主たる構造の内部に格子状の多孔質構造を形成する、積層造形特有の高機能構造の総称である。適切な構造を形成し組み合わせることにより、PCM の内部にまで熱を伝わらせ、温度分布の平滑化を促進し制御対象の温度変化に対する応答性を上げることを狙う。また、応答性向上によって PCM の実装質量効率向上を可能とする。この項目に対しては、トポロジー最適化を活用し、任意の性能の蓄熱構造に対し、最適なラティス形状を導出する最適設計法を構築するとともに、それを活用し小型で高性能な蓄熱構造を開発する。

2. 蓄熱システムの設計要求条件の明確化・実装形態の検討

ここでは、具体的なケーススタディを通じた検討を行う。適用対象としてまずは、極限環境の1つであり、高真空状態であり制御対象以外への熱的結合が弱いことから設計デバイス自体の評価を実施しやすいと考えられる宇宙機のリチウムイオンバッテリー温度保持機構を設定する。リチウムイオンバッテリーの特性は温度依存性が極めて高く、低温時には充電ができなくなり、高温では熱暴走の危険性が生じる。よって、0°C以上の常温付近で一番安定した性能を示す。

蓄熱デバイスの設計要求条件整理を行うにあたり、制御対象と外部との熱結合状態の設計を簡易モデルにより実現することを検討した。実現可能性は実機特性をふまえた簡易熱数学モデルを構築することにより検証した。解析モデルは、Thermal Desktop ver. 6.1 と SINDA/FLUENT を用いて構築した。10cm³立方体サイズである 1UCubeSat 衛星を適用対象と

2024年3月1日 受理

^{*1}名城大学理工学部交通機械工学科

^{*2}早稲田大学理工学術院基幹理工学部機械科学・航空宇宙学科

し、過去・将来衛星のプロジェクト情報から衛星形状、表面特性、発熱量、軌道情報などを設定した。外部からの熱入出力模擬のため、最外装の材質と熱光学特性は実機を模擬するが、内部搭載機器については制御対象とその他の機器を規定の発熱量と物性値を持つ等価質量モデルで定義することにより検証の簡略化をはかった。複数の条件に対して同様の検討を実施し、手法の汎用性を確認した。図1で示す将来国際宇宙ステーションから放出される予定の衛星⁽¹⁾に対して構築した簡易モデルを利用して機器間の熱結合パラメータを設計した結果の例を図2に示す。衛星全体を衛星構体、内部機器等価モデル、PCM制御機器等価モデルの3つ構成要素で模擬し、それぞれの構成要素間の熱結合パラメータを調整することにより、適切な機器間熱結合パラメータの傾向を取得した。図2の例は内部機器と構体の熱結合パラメータ変更時の機器温度に与える影響を確認した際のものである。これらの結果は、衛星実機モデルにて取得されたデータと比較することにより妥当性を評価した。

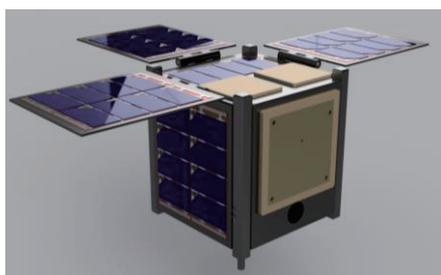


図1 適用先衛星イメージ図。

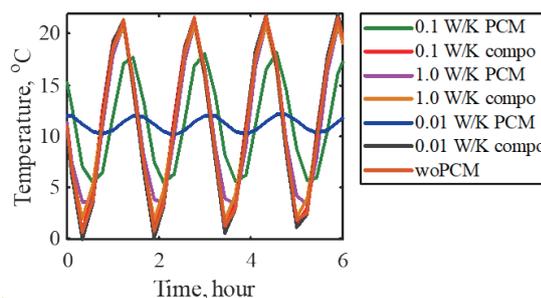


図2 熱結合パラメータの感度解析結果。

また、検討したPCMの条件を実現する材料および成型方法と製作した機構をシステム設計に組み込むための手法についても詳細な検討を行った。昨年度の豊田理研スカラーにおいては、二酸化バナジウム(VO_2)の一部のVをタングステン(W)で置換し、そのドーピング割合を変更し相転移点を変更したものをエポキシで固めて実装する手法を提案した。²⁾しかし、構成要素の個別の熱特性評価を行ったのみで、システムとして成型したものに対する評価は不足していた。よって、システムとして実装したものに対して試験を実施し、実験結果と合致する熱数学モデルを構築することにより、今後のシステム設計に知見を適用することを可能とした。さらに、軽量化を狙い新たに図3のようなマイクロカプセル化したノルマルパラフィンのエポキシで固めて実装した供試体も作成し、簡易加熱試験及びその熱数学モデルの構築を通して物性パラメータの同定を行った。さらに、銅テープの挿入パターンを変更するベンチマーク問題を設定し、同定した物性値を用いた機器設計の妥当性を評価した。複数の銅テープの挿入パターンを模擬したモデルを構築し、条件を併せた供試体による実験結果と比較することにより、構築した熱数学モデルの妥当性を評価した。ある供試体に対する解析と実験の結果を比較したものを図4に示す。

詳細については別途公表予定であるが、設計に係る各種条件を簡略化モデルで適切に整理する手法の提案および検証を行うとともに、設計要求に見合うPCMを設計・製作するための各種基礎検討を実施することができた。



図3 ノルマルパラフィンマイクロカプセルを適用した供試体。

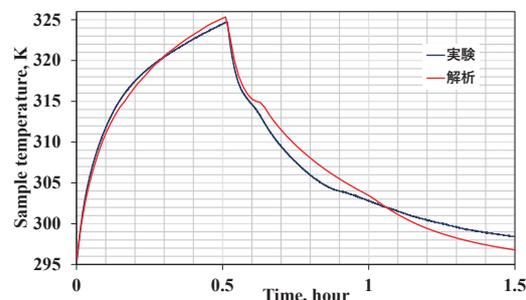


図4 PCM熱数学モデルの妥当性評価。

3. PCMに効率よく熱を蓄えるための蓄熱構造の最適化

ここでは、蓄熱にかかる時定数を向上するため非定常の熱伝達現象を考慮したトポロジー最適化を行った。想定する設計領域を図5に示す。一辺40mmの正方形領域であり、奥行きも40mmと想定する。設計領域の左下の境界に30Wの加熱

部分を設定, それ以外の外周は断熱条件とする. 設計領域の内部で熱伝導の良いアルミニウム(HCM)とPCMを配分する.

密度法によるトポロジー最適化を考えるにあたり, 材料密度 ρ_s に対する材料特性の補完を考える必要がある. ここでは, 一般的に用いられる SIMP 法による補完を考える. 熱伝導率に対する補完には, 指数関数的なペナルティとして(1)を与える.

$$k = k_{HCM} + (k_{HCM} - k_{PCM})\rho_s^p \quad (1)$$

比熱に関する項についての補完も同様の手法を用いるが, 潜熱の影響によりこの項の非線形性は強くなってしまいうために, 密度に対しては線形に補完する. 比熱に対する補完は, 指数関数的なペナルティとして(2)を与える.

$$\rho C_p = (\rho C_p)_{HCM} + \left((\rho C_p)_{HCM} - (\rho C_p)_{PCM} \right) \rho_s^p \quad (2)$$

さらに潜熱に対して以下の補完関数を設定する.

$$L = L_{PCM}(1 - \rho_s) \quad (3)$$

本解析で想定する材料と物性値の設定を Table 1 にまとめる. PCM 密度は固相と液相において同じであると仮定する.

Table 1. Material properties

	HCM (Aluminum)	PCM (RT44)
Thermal Conductivity [W/mK]	200	0.2
Density [kg/m ³]	800	2700
Specific heat capacity [kJ/kg/m ²]	2000	920
Latent heat storage [kJ/kg]	N/A	165

最適化問題では, 以下の目的関数を考える. 熱が流入する箇所の温度を最小化するような目的関数を考える. 提案デバイスが冷却対象である発熱体に取り付けられると, 設計した構造を通して PCM に熱が伝わる. ヒートシンクの性能評価の指標として, ある熱量が流れた時の温度の上昇幅を考える熱抵抗という指標があり, 環境温度としての空気の温度から, 熱が流入する箇所の温度を低く保ち, 熱抵抗を小さくすることが重要とされている. よって今回の目的関数として熱流入部の温度の境界積分を考え, それを最小化する最適化を行う. 非定常の解析における最終時刻において目的関数を評価する. ここで体積制約は総領域の 30%とした. 有限要素法およびトポロジー最適化には COMSOL Multiphysics を使用した. COMSOL において計算した感度をもとにして, MMA を用いて設計変数の最適化を行った.

最適化の結果として図 6 に示す形状を得た. 設計領域左下から設計領域全体につながった状態で HCM が分布している形状が得られていることがわかる. 左下の境界から系内に流入する熱流束を, 設計領域のすみずみまで広めるための形状が導かれていることがわかる.

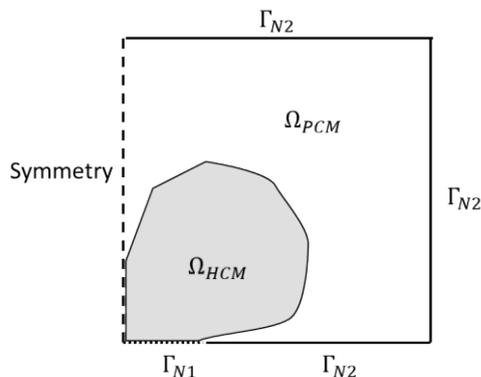


図5 解析モデル.

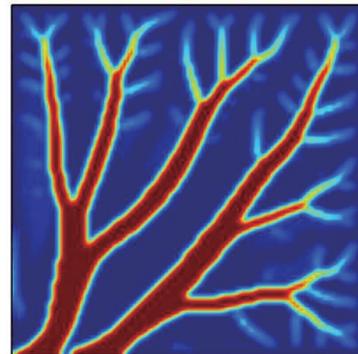


図6 トポロジー最適化結果.

設計領域左下の境界部分の温度を指標に，一般的な形状と最適化された構造を比較して性能の評価を行う．設計領域の左下に HCM で構成される非設計領域を設定し，その非設計領域を通して熱流束が加えられる環境下において比較を行った．比較対象の一般的によく用いられる形状として，Advanced Cooling Technologies 社の PCM ヒートシンク³⁾を参考にした．最適化形状とベンチマーク形状に対して最適化と同様の境界条件を与えて解析を行ったところ，図 7 に示す結果を得た．アルミ部分の温度が低く抑えられていることから PCM への蓄熱量がより大きくなっていることを確認できた．

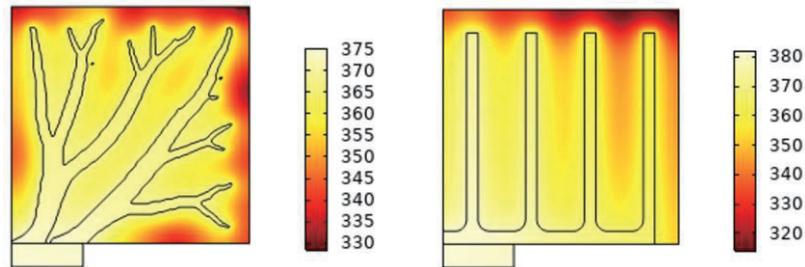


図 7 最適化形状（左）とベンチマーク形状（右）の比較.

図 8 に示す装置を用いて実験検証を行った．最適化形状とベンチマークモデルを放電加工機によりアルミブロックから切り出した．アクリルでできた 3 つのパーツからなる筐体に供試体を入れ，根本部分からカードリッジヒーターで熱を供給し，更にもその近傍で温度を計測した．融解した構造に充填し蓋をし，常温になった後に加熱を開始した．図 9 に温度計測結果を示す．同じ熱量を加えているにもかかわらず，最適化形状の方が 3 °C 程度低くなっており，PCM に効率よく熱が蓄えられていることがわかった．

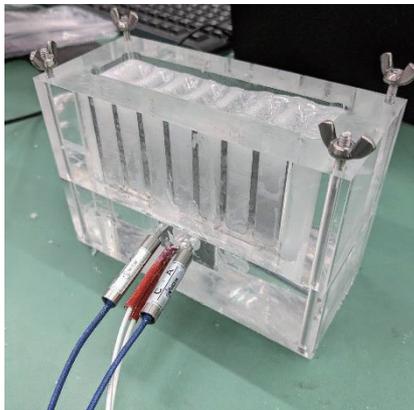


図 8 実験装置.

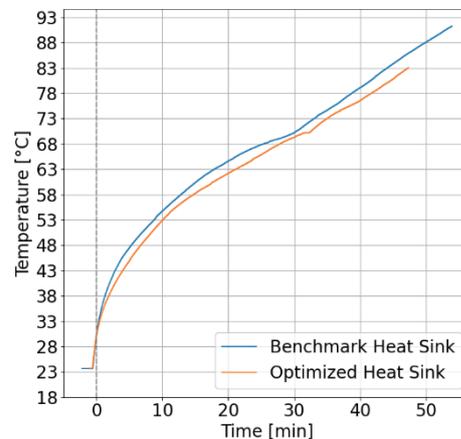


図 9 温度計測結果.

4. まとめと今後の展望

本研究を通して，ケーススタディを通じた蓄熱システムの設計要求整理手法の解明と，要求に合わせた PCM デバイスの設計補助ツールの確立，PCM に速やかに対象の温度変化を伝える最適なラティス構造を持つ蓄熱デバイス構造を導出するトポロジー最適化を用いた最適設計法の構築に取り組んだ．今後，これらの知見を活かし小型で高性能な蓄熱構造を開発することを目指す．

REFERENCES

- 1) 山縣雅紀, 脇田悠利名, 宮田喜久子, 青柳賢英, 第44回日本熱物性シンポジウム, **B131** (2023).
- 2) M. R. Yamagata, Y. Wakita, Y. Tsuruda and K. Miyata, *Thermal Science and Engineering Progress*, **37** (2023) 101601.
- 3) Advanced Cooling Technologies inc. 'PCM heat sinks', <https://www.l-act.com/products/pcm-heat-sinks/>, Retrieved: 2023/08/03.