

感温材料を用いた受動型スマート熱制御の可能性検証と 宇宙環境適応性評価に基づく改善提案

九州工業大学 大学院 工学府 先端機能システム工学専攻
学籍番号：13350902 氏名：石原 弘士

1. 研究背景

宇宙空間を飛行する人工衛星は、日照や日陰の影響を受けて非常に厳しい熱環境に晒される。特に小型衛星では、大型衛星と比較し熱容量が小さい為に、軌道上熱環境に依存して大幅な熱変化を伴う。

一般的な熱制御として広く使われているものとして、ヒータやヒートパイプが挙げられる。しかし、これらは能動的な熱制御方法であり、多くの電力、スペースを費やしてしまうといった課題がある。その為熱制御では、電力を消費しない受動的な熱制御が好まれる。特に温度変化により垂直放射率が変化する垂直放射率可変素子 (SRD: Smart Radiation Device) などは次世代の受動的熱制御を担うスマート材料として注目されており、今後様々な素子が開発されていくと考えられる。

2. 目的

我々は温度変化に伴い、光の吸収量（色）が変化する感温材料を用いた新しい熱制御方式の開発を進めている。この熱制御方式は、高温環境下では太陽光吸収率が低くなり熱入力を低下させ、対照的に低温環境下では太陽光吸収率が高くなり熱入力を増やすことで、電力や複雑なシステムを使用することなく、宇宙機に対する熱入力を受動的に制御することが出来る。

本研究では、感温材料を新たな受動型熱制御方式の提案とする為に、基礎研究により宇宙での有用性を示すことが目的である。

3. 感温材料

感温材料とは、塗装面の色が環境の温度に依存して変化する塗料である。本研究では、PILOT社により開発されたフリクションボールペンのインクに使用されている塗料をベースとした感温材料を用いている。

この塗料はメタモカラーと呼ばれるインキであり、インク内のマイクロカプセルに、ロイコ染料（発色剤）、顕色剤（発色させる成分）、変色温度調整剤を均一に混合し、封入したインクである。ロイコ染料とは、色を決める成分であるが、ロイコ染料単体では発色せず、顕色剤と結合することにより発色をするという特徴を有している。また、発色が変化する仕組みは、温度により顕色剤の結合がロイコ塗料と変色温度調

整剤に代わることで、変色を行う仕組みとなっている。図1にメタモカラーの原理を示す。また、図2, 3に発色時のサンプル、消色時のサンプルの外観、表1に各サンプルの発色消色温度を示す。

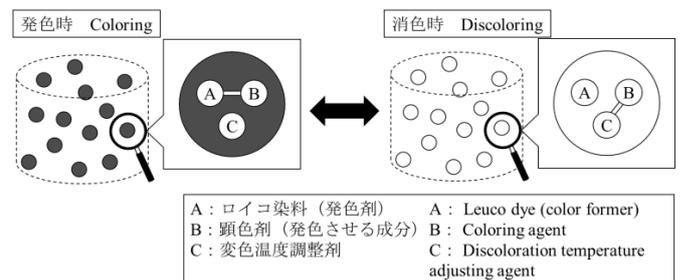


Fig.1 Principle of Metamo color

図1 メタモカラーの原理

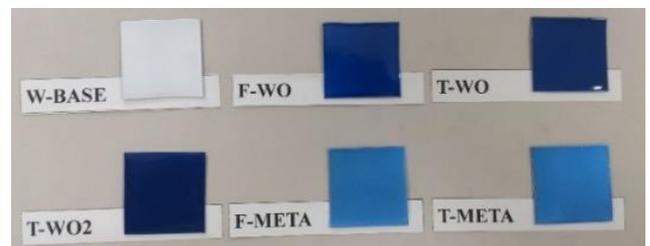


Fig.2 Sample at the time of coloring of the temperature-sensitive material

図2 感温材料の着色時のサンプル



Fig.3 Sample at the time of discoloring of the temperature-sensitive material

図3 感温材料の消色時のサンプル

Table.1 Sample of color and discoloration temperature

表1 各サンプルの着色と着色・消色温度

Sample	変化色 Change color	消色温度 Discoloring temperature	着色温度 Coloring temperature
W-BASE	白	----	----
F-WO	青⇄白	約 65℃	約-20℃
T-WO	青⇄白	約 90℃	約-30℃
T-WO2	青⇄白	約 90℃	約-30℃
F-META	メタリック ブルー⇄白	約 65℃	約-20℃
T-META	メタリック ブルー⇄白	約 90℃	約-30℃

アロジン	0.24	--	0.05	--	4.80
黒色塗装	0.92	--	0.83	--	1.11
白色塗装	0.25	--	0.83	--	0.30

感温材料を使用した場合には温度が消色温度である 65℃ に達した時点より温度上昇が減少していることがわかる。これは、太陽光吸収率が小さくなり、熱入力が増減し、最高温度及び温度上昇が抑制された為である。図 4 に各熱制御材料における温度変化を示す。

4. 宇宙適応性試験

感温材料の宇宙環境適応性の評価を行う。宇宙の環境は真空、熱サイクルおよび紫外線等、多くの外的要因により劣化が発生する。そこで、宇宙環境適応性について評価を行い、素子の実用可能性について検証を行った。

その結果、急激な温度変化に追従できる F 系塗料が宇宙用候補として有望であることが分かった。温度変化追従性を除いて、各適応性試験前後で太陽光吸収率および垂直放射率の変化は認められず、高い宇宙環境適応性に期待できる結果となった。表 2 に宇宙環境適応性試験前後の太陽光吸収率を示す。

Table.2 After adaptability test solar absorptance

表2 宇宙環境適応性試験後太陽光吸収率

Sample	Before Test 着色時 Coloring	Before Test 消色時 Discoloring	Vacuum Test Coloring	Thermal cycle Test Coloring	Ultraviolet Test Coloring
W-BASE	0.36	0.36	0.36	0.36	----
F-WO	0.60	0.39	0.60	0.60	0.60
T-WO	0.60	0.42	0.59	----	----
T-WO2	0.62	0.44	0.61	----	----
F-META	0.47	0.34	0.47	0.47	0.47
T-META	0.48	0.37	0.47	0.47	----

5. 宇宙環境における温度解析

次に、新しい受動型熱制御方式としての有用性評価を行う。感温材料を用いた受動型熱制御方式の有用性を示す為、他の熱制御材料との比較を行い、衛星の熱設計での感温材料の設計指向を思案する。感温材料は F-WO および、5 つの熱制御材料と比較を行った。表 3 に解析に用いた光学特性を示す。

Table.3 Thermo-optical properties

表3 各熱制御材の熱光学特性

	太陽光吸収率		垂直放射率		α/ϵ
感温材料	0.6	0.42	0.93	0.93	--
アルミニウム	0.5	--	0.06	--	8.33
ブラックアルマイト	0.66	--	0.81	--	0.81

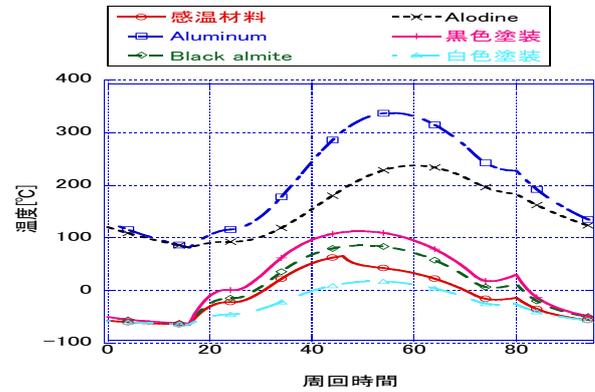


Fig.4 The temperature change in each thermal control material

図4 各熱制御材料における温度変化

6. まとめ

現在研究中の感温材料においては、まだ実用性に乏しく、問題も多く存在する。そこで、本研究で行った試験や解析で起きた問題点について述べ、問題を解決する為の改善案を提示することとする。以下に問題点を挙げ、これらの問題に対して、解決案を提示し、将来新しい受動型熱制御としての確立を目指す。

① 軌道上での日陰時、垂直放射率が高いため、表面温度が低下する。

この原因は下面層の白色塗料に影響を受け、垂直放射率が高くなったことにある。感温材料の垂直放射率は変化しないため、日陰時には低温に陥ってしまう。改善案として、下地材を垂直放射率の低い材料へと変更することが挙げられる。また下地材に垂直放射率が可変である素子を用いれば、太陽光吸収率及び垂直放射率が共に変化する受動型熱制御材を確立できる可能性もある。

② 温度変化に対する変色性が低い。

この現象は T 系の塗料のみで確認された事象である。これらに関しては、PILOT 社との今後の研究方針において、温度反応性の高い塗料の開発を進めていく。

7. 今後の課題

感温材料を新しい受動型熱制御材と提案するにあたり、垂直放射率が大きな問題となった。現在日照時には感温材料の特性を生かすことが出来ているが、日陰時には、垂直放射率が非常に高く、多くの熱が逃げている。今後、垂直放射率の改善を進めていくことが、新しい受動型熱制御材と提案に最も重要であると考えられる。