

直射日光下で周辺気温より低温となる日中放射冷却技術

末 光 真 大^{*,**}

Development of Daytime Radiative Sky Cooling Technology that Lowers the Ambient Temperature under Direct Sunlight

Masahiro SUEMITSU^{*,**}

In this paper, we provide an overview of daytime radiative cooling materials, their performance. Daytime radiative cooling materials are innovative materials that have the ability to radiate heat to the cold outer space during the daytime, resulting in a cooling effect without the need for external power or energy input. These materials have gained significant attention in recent years as a potential solution for addressing the challenges of global warming and climate change.

Key words: optics, radiative cooling

はじめに

地球温暖化の進行は世界中の誰もが違和感と危機感を抱く領域に達しており、生活に支障が生じる身近なものとなった。地球温暖化緩和のための温室効果ガス排出量の削減は、人類が取り組むべき喫緊の課題として、世界が力を合わせ解決に取り組んでいる。地球温暖化は、太陽光が地表で熱に変わった後、地球から放出される赤外線を温室効果ガスが吸収し、大気中に熱を閉じ込めることで引き起こされる。近年、この地球を暖める熱源である太陽光の下で、放射冷却の原理を活用することで外気温より低温となる素材が開発された¹⁻⁴⁾。「日中放射冷却素材」とよばれるこの素材は地球温暖化の緩和のみならず、特に適応策に応用できることが期待される。本稿では、日中放射冷却素材について概説するとともに、実現した素材の性能を紹介し、地球温暖化の緩和策、特に適応策として当素材が屋外の電装機器の保護用途に活用された事例について説明する。最後に日中放射冷却素材の有用性と今後の展望について述べる。

1. 日中放射冷却素材の開発

1.1 日中放射冷却の原理と設計

放射冷却現象とは、物体の熱が光エネルギー（赤外線）の形で -270°C と低温の宇宙空間に伝達され、冷える現象のことである。放射冷却現象は昼夜を問わず生じている

が、一般的な素材では日中顕著に現れない。その理由は太陽にある。一般的な素材が吸収する太陽光エネルギーは放射冷却エネルギーよりも大きい。そのため、一般的な素材は直射日光の下では外気温より温度が上昇する。日中放射冷却素材は、外気温と素材温度が同温の際に、太陽光の入熱よりも放射冷却による放熱が大きくなるよう光学設計された素材である。ここでは、素材に求められる光学設計について解説する。

図1に太陽光スペクトル (AM (air mass) 1.5 G) と大気の透過率スペクトルを示す。大気の透過率が高い $8\sim 13\ \mu\text{m}$ の波長範囲は、一般に「大気の窓」とよばれる。熱をもつ物体から放出される赤外線は、大気の窓の波長を介して大気にほとんど吸収されることなく、熱力学の第二法則に従い -270°C の宇宙空間に移動する。大気の窓の波長範囲において大きな放熱を得るためには、この波長範囲の輻射率を大きくする必要がある。なお、輻射率とは物体が熱を赤外線に変換する度合いを示す指標であり、理論限界である黒体放射に対する実際の素材の赤外線放射量の比率である。つまり、日中放射冷却素材は熱を効率的に宇宙空間に放出するために、大気の窓における輻射率を大きくし、この波長で赤外線をより多く放出できるように設計する必要がある。2014年の初めての報告¹⁾以来、さまざまな研究グループから日中放射冷却素材の研究報告がなされているが、同様

*大阪ガス株式会社 (〒554-0051 大阪府大阪市此花区西島 6-19-9) E-mail: m-suemitsu@osakagas.co.jp

**SPACECOOL 株式会社 (〒105-6404 東京都港区虎ノ門 1-17-1 虎ノ門ヒルズビジネスタワー 4階) E-mail: suemitsu@spacecool.jp

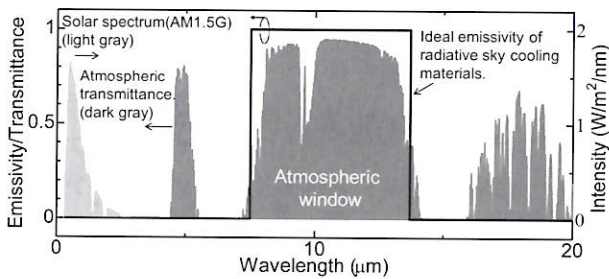


図1 日中放射冷却素材の理想的な輻射率スペクトル（黒実線）と、太陽光スペクトル（AM 1.5 G, 薄灰色）、大気の透過率スペクトルの一部（4 μmより長波長のみ記載、濃灰色）、大気の透過率スペクトルは標高4000 mの快晴時の値。

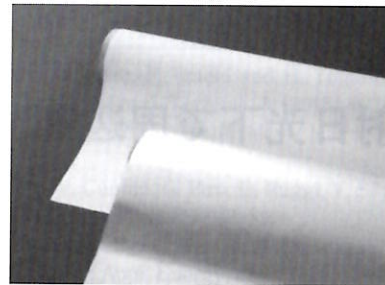


図2 開発した日中放射冷却素材の外観。白色（上）とシルバー（下）の2種類。性能はおおむね同一。

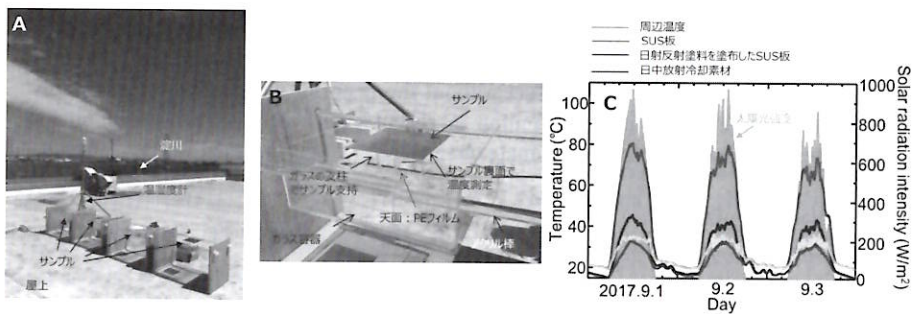


図3 日中放射冷却素材の評価。(A) 測定の外観、(B) 測定系の詳細、(C) 実証結果。

の光学特性を狙った光学設計がなされている。日中の冷却を実現するためには、赤外線の放出に併せて太陽光からの熱エネルギーをできるだけ遮蔽することも同時に必要となる。キルヒホッフの法則により、輻射率と吸収率は等しいことが知られている。つまり、太陽光エネルギーをなるべく多く遮断するためには、太陽光スペクトルが分布する波長帯において輻射率を0%に近づけると同時に、反射率を100%に近づけることが必要である。要するに、日中放射冷却素材は、図1黒実線のように紫外線から近赤外線帯域で輻射率が小さく太陽光の反射を最大化し、大気の窓領域の赤外線放射を最大化した素材である。

1.2 日中放射冷却素材の実証

光学多層構造によって、0.1 mm程度の薄膜で、太陽光の95%以上の反射と大気の窓領域における95%以上の放射の両立を実現した。図2に開発した日中放射冷却素材の

外観を示す。樹脂製の柔軟性の高いシート状の素材である。当素材の放射冷却性能を計測した結果を示す。測定は図3(A)のように、大阪市此花区に位置する大阪ガス(株)エネルギー技術研究所の2階建ての建屋の屋上にて実施した。測定装置を図3(B)に示す。サンプルをガラス製の支柱で支持し、風による対流伝熱の影響を排除するためにポリエチレン製のフィルムで天井面を覆った。なお、ポリエチレンフィルムは放射冷却現象を阻害しない観点で、大気の窓の波長範囲の赤外線を透過する性質をもつものを活用した。温度は、サンプル裏面に熱容量の小さな测温抵抗体を貼り付け計測した。2017年9月1日から3日間にわたって実施した試験結果を図3(C)に示す。なお、この3日間は最大の太陽光強度が1000 W/m²程度、周囲気温が日中35°C程度となる日を選定している。当試験では日中放射冷却素材、ステンレス(SUS)板、日射反射塗料(建物外壁温度を下げる目的の塗料)を塗布したSUS板で温度比較を行った。3日間にわたり、SUS板の温度は日中約80°C程度まで上昇した。一方、日射反射塗料を施工したSUS板については日中約45°C程度となり、外気温より約10°C高温となった。これらに対し、日中放射冷却素材の温度は外気温よりも常に2~6°C低温となった。既存の遮熱素材である日射反射塗料と比較して、日中放射冷却素材の温度は日中の温度が10~15°C低温となることがわかった。

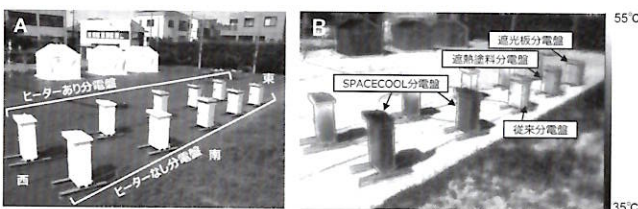


図4 分電盤試験。(A) 南側から撮影した外観。手前左側からCOOL分電盤①、COOL分電盤②、従来分電盤、遮熱塗料分電盤、遮光板付分電盤。(B) 南側から撮影したサーモグラフィー画像。

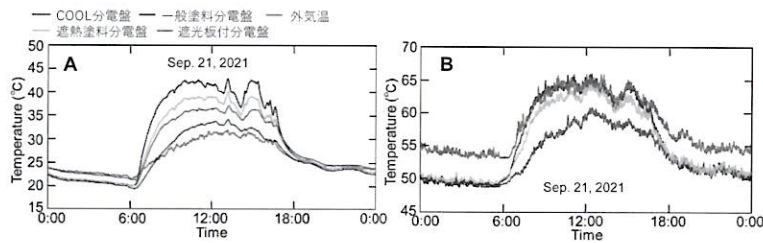


図5 2021年9月21日の分電盤内部温度。(A) 発熱体なし、(B) 発熱体あり。

2. 電装機器の温暖化への適応

社会インフラの要である電装機器は熱に弱い。地球温暖化の影響で頻発する熱波により、電子機器が故障するトラブルが今後急増することが予想されている^{5,6)}。例えば製品の故障統計に関する研究においては、電装機器のレギュレーターや整流器といった電子回路の故障確率は季節によって変動し、特に夏季に故障が頻発することが報告されている⁸⁾。電装機器の故障確率の増加と温度上昇に相関があることには、アレニウス則による科学的な裏付けもある。アレニウス則によれば、電子機器に欠かせないコンデンサーなどは、10°Cの環境温度上昇で2倍程度劣化が早くなる。設計時に想定していなかった水準の高温（熱波など）が社会インフラを構成する電装機器を襲う中、迅速かつ簡便に屋外の電装機器を高温に適応させることが求められている。

2.1 分電盤を用いた実証実験

日中放射冷却素材を分電盤の外側に施工した分電盤（以下、COOL分電盤）を作製し、比較として、一般塗料を塗布した分電盤（以下、一般塗料分電盤）、遮熱塗料を塗布した分電盤（以下、遮熱塗料分電盤）、遮光板を設置した分電盤（以下、遮光板付分電盤）を同一形状で作製し、内部温度を測定した。分電盤の大きさは高さ1,100 mm、幅650 mm、奥行き450 mmであり、素材は鋼板を選定した。試験は、大阪市此花区に位置する大阪ガス（株）エネルギー技術研究所にて実施した。図4（A）に試験の外観写真を示す。西日および朝日由来の入熱を最大化する観点で、分電盤の長辺が東西に向くよう配置した。全10台の分電盤のうち、写真奥（北側）5台にはインバーターを模して200 Wのヒーターが盤内部に搭載されており、手前（南側）5台はヒーターが搭載されていない。

2.2 分電盤を用いた実証実験の結果

図4（B）にサーモグラフィー画像を示す。西側からCOOL分電盤（2台）、一般塗料分電盤、遮熱塗料分電盤、遮光板付分電盤の順に配置した。サーモグラフィーより、COOL分電盤の筐体温度が最も低いことがわかる。ヒーターが搭載されていない分電盤の内部温度を図5（A）に示す。COOL分電盤の内部温度は一般塗料分電盤より最大

約10°C低下し、遮光板付分電盤との比較で最大約5°C低下した。COOL分電盤の内部温度が日中外気より少し高温となった理由は、分電盤の形状が細長く、放射冷却現象によって外気より低温となりやすい天井面積に比べ、天空率が低く外気より高温となりやすい壁の面積が大きいことに由来する。図5（B）に、ヒーターを搭載した分電盤のヒーターから15 cm離れた内部気温を示す。なお、この温度はインバーターの環境温度に相当する。一般塗料分電盤、遮熱塗料分電盤、遮光板付分電盤の内部温度に日中大差が生じない一方で、COOL分電盤のみが平均5°C、最大9.5°C、他の盤より温度低下することがわかった。また、遮光板付分電盤は遮光板とキャビネットの間で熱がこもることで、内部に熱源が存在する場合に、夜間の温度が5°C程度ほかの分電盤より高くなることがわかった。これらの結果より、日中放射冷却素材は特に内部の熱を排出することに長けていることがわかる。この実証試験の結果は、分電盤のみならず屋外に設置された電装機器全般にとって、日中放射冷却素材が地球温暖化への適応策となることを示唆している。

3. 将来展望

地球温暖化は人命にも影響が出ている。日中放射冷却素材は地球温暖化の中で多様な人々が安全に働ける労働環境を提供することにも貢献する。例えば、工事現場の事務所や熱中症対策設備、災害現場の仮設住宅、医務室、更衣室や休憩室への活用が期待される。

文 献

- 1) A. P. Raman, M. A. Anoma, L. Zhu, E. Rephaeli and S. Fan: *Nature*, **515** (2014) 540-544.
- 2) Y. Zhai, Y. Ma, S. N. David, D. Zhao, R. Lou, G. Tan, R. Yang and X. Yin: *Science*, **355** (2017) 1062-1066.
- 3) 末光真大, 齋藤 禎: 特願 2017-62894.
- 4) 末光真大, 齋藤 禎: “直射日光下で周辺気温より低温となる受動的放射冷却材料の実現”, 第80回応用物理学会秋季学術講演会, 21a-E208-11 (2019).
- 5) C. Fant, B. Boehlert, K. Strzepek, P. Larsen, A. White, S. Gulati, Y. Li and J. Martinich: *Energy*, **195** (2020) 116899.
- 6) 松本光崇: “製品の故障統計情報利用の可能性と課題”, 精密工学会秋季大会学術講演会講演論文集 (2019) pp. 86-87.

(2023年4月21日受理)