

高反射率塗料による室内環境改善効果に関する検証 その1 調査方法と冬季測定結果の一部について

Field Survey for the Improvement Effect of Indoor Environment by High Reflectance Coating Part1 -Research Procedure and a Few Results of the Survey in Winter-

藤澤 星* 三田村 輝章** 勅使河原 覚***
Sei FUJISAWA Teruaki MITAMURA Satoru TESHIGAWARA

keywords: High Reflectance Coating, Field Survey, Thermal Flux, Indoor Thermal Environment, Energy Saving
高反射率塗料、現地調査、熱流束、温熱環境、省エネルギー

1. はじめに

高反射率塗料は2011年3月に発生した東日本大震災後に節電対策として注目され、建築物の省エネルギー効果を期待した導入が進むだけでなく、2020年の東京オリンピックでの暑熱対策技術としても期待されている¹⁾。高反射率塗料と呼ばれる塗料は、太陽光エネルギーの約40%を占める近赤外線領域の反射率が高くなっているため、高反射率塗料塗装面はより表面温度が下がり、建物内部に侵入する熱量を減少させる。このいわゆる「遮熱効果」は冷暖房の消費エネルギーの減少、つまり電力使用量、電気代の削減に貢献するため、夏季の省エネルギー技術と位置付けられることが多い²⁾。また、都市のヒートアイランド現象への対策技術という側面もあり、省エネルギーだけでなく都市の快適性向上や気候変動適応にも貢献する技術として期待される³⁾。

東日本大震災以前から、その遮熱性能評価や経年劣化による耐候性などに関する研究⁴⁾が進められていたが、導入が進むにつれてセラミックを配合して放熱性能や熱伝導率を高めた製品が開発されるなど、遮熱性能は反射率だけで説明することが難しい状況が生まれている⁵⁾。高反射率塗料の配合材料に基づく分類を、図1に示す。このように市場に混乱が生じたことから、一般社団法人日本塗料工業会が中心となって「JIS K 5603」⁶⁾が2017年に制定され、現在はこのJIS規格に基づき塗膜の日射吸収率を指標とした統一的性能評価を実施することが可能となっている。

熱性能に関するこのJIS規格は、ある基準に基づく評価結果を提供するが、あくまでもそれは実験環境における結果に過ぎず、実環境における性能評価や経年劣化を評価する手法が確立されていないという問題⁷⁾がある。既往研究では、日射反射率で遮熱性能を評価する事例が多く⁸⁾、建築分野で一般的な熱貫流率などの熱性能で評価された事例は少ないだけでなく、夏季のみに着目した効果検証が多く、特に冬季や夜間の熱性能を実環境にて評価する研究も少ない。また、図1に示す通り、様々な物性を持つ高反射率塗料それぞれの特徴を比較・検証した研究事例も少ない。このように、高反射率塗料は市場導入が進んでいるものの、その遮熱性能が実環境においてどの様に発揮されているのかが明らかにされているとは言い難い状況にある。

そこで本研究では、実環境に数種類の高反射率塗料を施工し、長期間に渡って遮熱性能に関係する各指標や室内温度などを実測することで、高反射率塗料の各季節または昼夜での遮熱性能

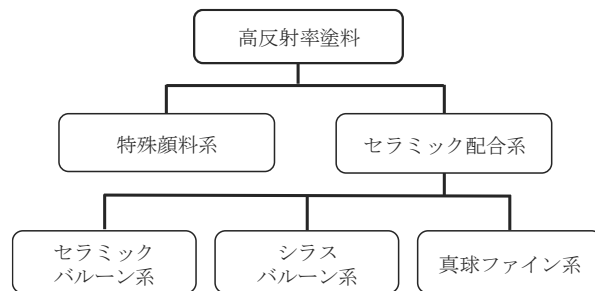


図1 高反射率塗料の材料による分類⁹⁾

を評価することを目的とする。本報では、それぞれの高反射率塗料の特徴、長期的な調査方法や、冬季の実測結果の一部について報告する。

2. 高反射率塗料の概要

2.1 高反射率塗料の仕組み¹⁰⁾

高反射率塗料の最大の特徴は、日射反射率が高いことである。より具体的には、太陽光エネルギーの約43%を占める近赤外線領域（780nm～2500nm）の光を反射する性能が高い塗料である。太陽光エネルギーの約54%を占める可視光領域（380nm～780nm）の反射率が低い暗色相塗料では、近赤外線領域の反射率を高めることで見た目を変化させず、全体の日射反射率を向上することが可能となる。なお、反射率が100%に近い白色相の塗料は日射反射率が確実に約54%以上となるため、一般塗料でもその遮熱効果は高い。つまり、高反射率塗料は日射反射率を向上させることで、塗料もしくは基材に吸収されて熱エネルギーに変換される光エネルギーを減少させている。この反射性能に影響を与える塗料成分は顔料成分であり、樹脂成分はほとんど反射に関係しない。よって、赤外線領域の反射スペクトルを測定・考慮し、赤外線をより効率的に反射する顔料選択を行う。

上記の光学的性能だけでなく、高反射率塗料は熱力学的性能によって表面温度を更に低下させていると考えられる。熱エネルギーの移動は「伝導」「放射」「対流」の3つの現象によって起こり、高反射率塗料は特に「伝導」「放射」性能を高めていることが多い。特に塗料の赤外放射率はそもそも高い（0.9以上）ため、金属基材に塗装するだけで放射率は向上する。この放射性能は、夜間の放射冷却にも影響を与えていると考えられる。

* 前橋工科大学大学院環境・生命工学専攻 博士後期課程・修士(環境学)
Doctoral Program, Environment and Life Engineering, Maebashi Institute of Technology, M. Env Sc.

** 前橋工科大学・工学部 准教授・博士(工学)
Assoc. Prof. Faculty of Engineering, Maebashi Institute of Technology, Dr. Eng.

*** 株式会社栄光製作所 代表取締役
Eikoh Seisakusyo Co.,Ltd. CEO.

この塗装面表面温度は伝導によって建物内部に移動するため、塗装面の熱伝導率が影響を与える。建築分野では「熱貫流率(=熱伝導率/材料厚さ)」という指標で表現されることが多く、断熱材は低熱伝導率の材料で厚みを持たせることで熱流入を低下させるが、高反射率塗料の厚みはマイクロメートル単位であるため、低熱貫流性能を期待することは難しい。この厚み問題より、断熱塗料と呼ばれる製品では、ミリメートル単位まで膜厚を厚くする。

以上より、高反射率塗料の遮熱メカニズムは「日射反射率(特に赤外線領域)」「赤外放射率」「熱伝導率」の3つの指標が関係しており、光学的な日射反射率が最も支配的とはいえ、熱力学的な赤外放射率と熱伝導率が複雑に絡み合って遮熱性能を構成していると考えられる。

2.2 原材料による遮熱性能の差異

図1に示す通り、高反射率塗料は「特殊顔料系」「セラミック系」の2種類に分類される。特殊顔料系は太陽光反射性能と赤外線放射性能によって遮熱性能を高めているが、セラミック系はその構造によって熱伝導率を高く、もしくは低くすることによって遮熱性能に特徴を与えている。

微小セラミック球を混入した「真球ファイン系」では、ファインセラミックによる高熱伝導率だけでなく、近赤外線と同調してミー散乱を起こすことが解析され¹⁴⁾、日射反射率についてもファインセラミックが高めていることが明らかになっている。つまり、真球ファイン系では高日射反射率、高熱伝導率、高赤外放射率の3要素が組み合わさって、高い遮熱性能を発揮していると考えられる。その一方で、セラミック球内に空気を含む空隙が存在する「セラミックパール系」「シラスパール系」では、空気による低熱伝導率が特徴となっており、熱を伝わりにくくすることによって遮熱効果を高めていると考えられる。

以上より、セラミック系では熱伝導率に対するアプローチが異なっており、この熱伝導率の差が遮熱性能にどのように影響を与えているのかは明確ではない。特にセラミックパール系ではその低熱伝導率性から断熱性能をアピールする製品が散見されるが、薄膜である高反射率塗料の断熱性能は高いとは言えず、日射反射率が最も支配的である¹²⁾。

3. 調査方法

3.1 調査対象建物

調査対象は、群馬県富岡市にある基盤実装工場の2階会議室の屋根である。図2に調査対象屋根の屋根伏図を示す。本建物は、築30年以上が経過している木造の建物である。外壁は外気側が鋼板と構造用合板、室内側はベニヤ板であり、断熱材としてグラスウール50mmが施されている。天井仕上げは化粧用石膏ボードであり、その裏側に外壁と同様に袋入りグラスウール50mmが敷かれている。屋根は、折半鋼板の裏側にウレタン材3mmが施されている。窓は、単板の型板ガラスとアルミサッシが使用されている。

高反射率塗料を塗装する屋根は折半屋根で、周囲に日射を遮る建築物などは存在しない。折半屋根の水平面積は約144.5㎡であり、この折半屋根を5等分し、普通塗料と遮熱塗料3種類を2019年12月に塗装した。各塗装水平面積は、約28.9㎡である。高反射率塗料は顔料系、真球ファイン系、セラミックパール系の3つを選定し、塗料ごとの熱性能を比較できるようにした。なお、日射反射率に最も影響を及ぼす塗料色は「白」に

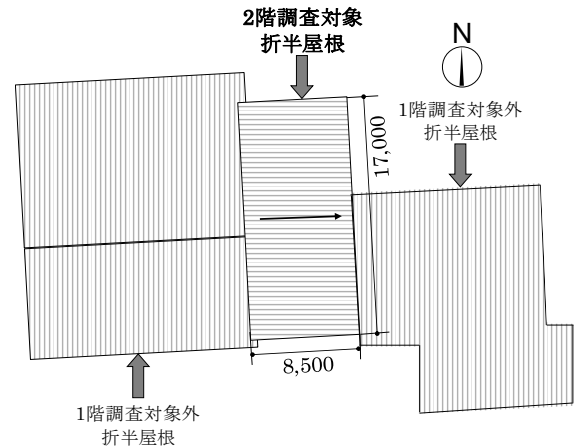


図2 調査対象建物の屋根伏図



図3 塗装後の屋根状況

統一した。白色は最も遮熱効果、すなわち日射反射率が高い色であり、日射反射率は高反射率塗料と普通塗料に大きな差異はない。それぞれの塗料について、表1に示す。なお、一番北側の「無塗装エリア」については、あくまでも今回塗装を行っていないということであり、10年以上前に青色の普通塗料を塗装したとのことである。図3に、塗装後の屋根状況を示す。

3.2 測定方法

測定項目は、熱流束、表面温度、気温・湿度(屋根裏、室内、外気)、全天日射量、風向風速である。熱流束、表面温度にて遮熱効果を直接測定しつつ、屋根裏温度や室内温度にて遮熱効果を間接的に測定する。2019年12月から実測を開始しており、熱流束、表面温度、温湿度、全天日射量、風向風速はワイヤレスロギングステーション(HIOKI製LR8410)にて収集している。図4に、各塗料の塗装エリアと各測定機器の設置状況を示す。2階室内の面積は約107.9㎡である。屋根裏については、各塗装エリアのほぼ中心部に測定機器を設置しているが、高反射3エリアのみ中心部が1階からの階段の直上となってしまうため、中心から東に寄った位置に設置している。

熱流束と表面温度については、熱流センサー(江藤電気製M55A)を天井裏側の折半屋根面に貼り付けて測定している。折半屋根にはウレタン材が施されているため、熱流センサー貼り付け部のみウレタン材を剥がしている。金属屋根であるため、外気側(表面)温度と屋根裏側(裏面)温度はほぼ同等であると仮定している。無塗装、塗装エリアごとに合計5個設置しており、折半屋根には南北面が存在しているため、エリアごとに南北1個ずつ設置することとした。つまり、折半屋根には合計

表1 比較対象塗料の概要

	普通塗料	高反射率塗料1	高反射率塗料2	高反射率塗料3
塗料種類 (上塗材)	弱溶剤系バイオマス シリコン変性樹脂塗料	弱溶剤系シリコン 変性樹脂塗料	水系変性アクリル シリコン樹脂塗料	弱溶剤系シリコン 樹脂塗料
高反射率塗料分類	—	特殊顔料系	真球ファイン系	セラミックバルーン系
赤外線領域日射反射率 (カタログ値)	— (記載なし)	86.4	85.7	— (記載なし)
塗装回数	下1回+上2回	下1回+上2回	下1回+上2回	下1回+上2回

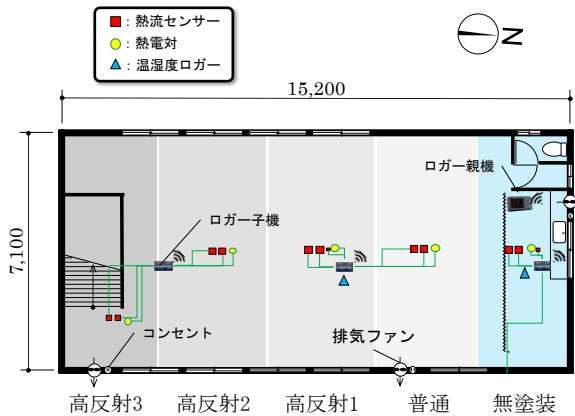


図4 調査対象建物の2階平面図 (各塗装エリア)

10個の熱流束計が設置されており、塗装エリアごとに南北面の熱流束、表面温度を測定している。また、天井石膏ボード屋根裏側にも熱流束計を2個設置して、天井裏から2階室内への熱移動を測定している。いずれも5分間隔でデータを記録する。

気温については、屋根裏気温を熱電対と温湿度ロガー (HOBO製 MX1101、精度±0.21℃) の両方で測定する。但し、室内気温は温湿度ロガーのみ、外気温は温湿度計 (英弘精機製 OSK48-6-F、精度±0.5℃) のみで測定している。熱電対と外気温温湿度計は5分間隔で、室内温湿度ロガーは15分間隔でデータを記録する。

全天日射計 (英弘精機製 MS-602) を実測屋根上に設置し、遮熱効果に最も影響を与える全天日射量を測定する。対流熱移動に影響を与える風向・風速については、2軸型超音波風速計 (ブリード製 PGWS-100、風速精度±2%) を全天日射計と一緒に設置した。いずれも5分間隔でデータを記録する。

調査対象とした2階会議室は、工場従業員の休憩や会議などに利用する部屋であるため、常時利用されている訳ではない。また、エアコンは部屋に1台のみが設置されており、扇風機と併用して室温調整に使われている。窓にはカーテンが設置され、東・西日を遮ることができる。ただ、利用については一切制約を設けず、通常通りに会議室を使って頂いていることが特に室内温度に影響を与えることには留意する必要がある。

4. 調査結果

4.1 測定データの試験的分析

本報では2020年1月までの約1ヶ月間のデータのみを回収している状態であり、その冬季データの分析を試験的に実施した。本研究では普通塗料も含めると4種類の物性の異なる塗料の熱流束を比較することができるが、まずは熱流束・表面温度と全

表2 分析実施日の AMEDAS データ (群馬県西野牧)

日付	平均気温 [℃]	日照時間 [h]	降水量 [mm]
2019年 12月23日	3.9	6.8	4.5

天日射量の関係について分析するため、高反射率塗料のみのデータを分析した。

測定対象近辺の群馬県西野牧の AMEDAS データを入手し、晴れ日の2019年12月23日を選定した。明け方まで降水量が記録されているが、日中は晴れていた。この12月23日の主要天候データを、表2に示す。なお、夕方から明け方に掛けての全天日射量はゼロとなるため、6:30~16:30までの測定データで分析を実施している。

4.2 熱流束と全天日射量の関係

図5に、熱流束と全天日射量の関係を示す。上段が折半屋根南面、下段が折半屋根北面のデータである。熱流束ベクトルのプラス側は外気に放出している状態で、マイナス側は天井裏内に侵入している状態になる。点線は、各塗料の近似直線である。図5より、全天日射量が高いときの熱流束ベクトルが全く異なっており、南面では全天日射量が約200[W/m²]以上では熱流束

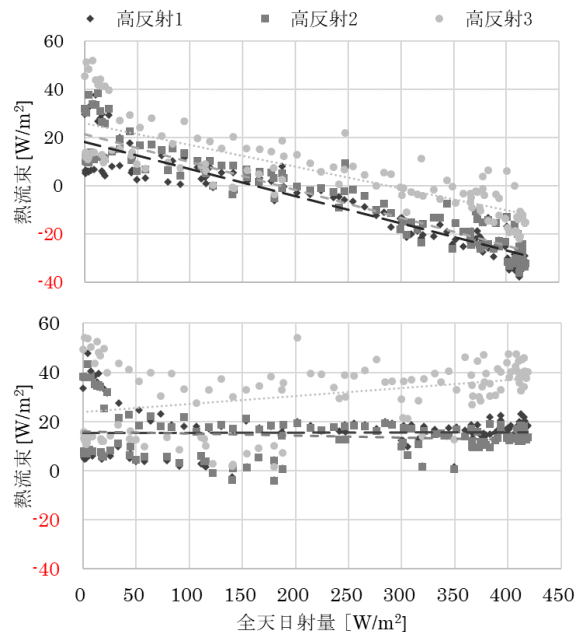


図5 熱流束と全天日射量の関係 12月23日 (晴)
(上: 南面 下: 北面)

がマイナスになる、すなわち天井裏に熱侵入が起こるのに対し、北面では全天日射量が 200[W/m²]を超えたとしても熱流束はプラスのまま、すなわち大気中に熱が放出されている。

南面においては、全天日射量が増加するに従い、天井裏への熱侵入が起こり、天井裏気温は上昇する。しかし、同時に折板屋根の北面では塗料の高赤外放射率による放射、大気気温の方が低いことによる熱伝達などが起こり、北面から常に熱放出が起こっていることが確認できた。

また、高反射率塗料ごとで比較してみると、高反射率塗料 3 が最も性能が良い。つまり、南面の全天日射量が高いときは熱侵入量が少なく、全天日射量が低いときは熱放射量が多く、北面においては常に熱放射量が多い。たった一日分の分析結果であるために、今後の長期実測によって統計的解析などによって塗料ごとの遮熱性能を明らかにする予定である。

4.3 表面温度と全天日射量

図 6 に、表面温度と全天日射量の関係を示す。上段が折半屋根南面、下段が折半屋根北面のデータである。図 6 より、太陽高度が高くなるに従って規則的に表面温度は上昇し、約 410[W/m²]でピークを迎える。その後は太陽高度が低くなるに従って表面温度も不規則に低下し始め、最終的には朝と同様の約 3°Cに落ち着いている。ピーク温度が南面の方が約 3°C高くなっており、これが熱流束ベクトルの差であるのかは現時点では評価し切れていない。

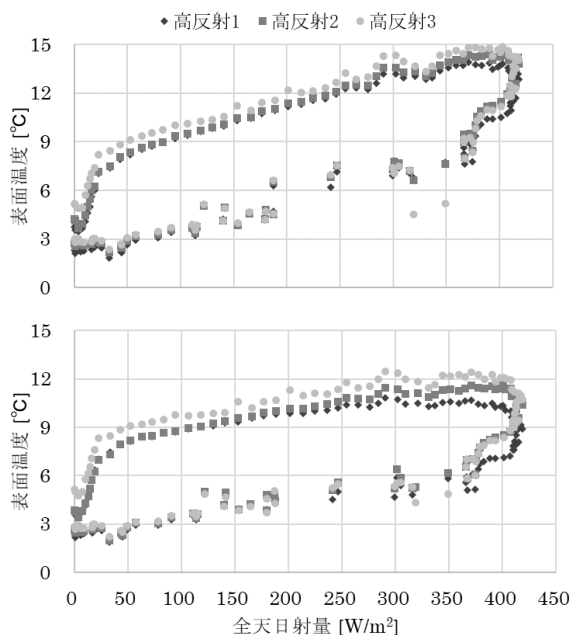


図 6 表面温度と全天日射量の関係 12月23日(晴)
(上：南面 下：北面)

5. まとめ

本報では、高反射率塗料の近年の状況をまとめ、特にセラミック系高反射率塗料の素材特性による遮熱性能への影響を検証するため、既存建物屋根での実測調査を開始した。冬季から実測を開始することになったため、最も重要となる夏季の実測データはこれから分析・評価することとなる。

また、折半屋根に南北面が存在していたため、南北それぞれ

の熱流束・表面温度を測定したところ、北面では全天日射量には関係なく、大気への放熱が確認された。季節が変化しても北側の放熱状況に変化がないかの確認は必要であるが、折半屋根に南北面を作ることで、より屋内への熱流入が低減できる可能性があることが示唆された。

今後も実測調査を継続し、中間期、夏期を含めて評価を行い、詳細に分析する予定である。

謝辞

実測調査にあたり、株式会社栄光製作所の皆様にご多大なるご協力を頂きました。ここに記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 一般社団法人環境情報科学センター：平成 28 年度製造基盤技術実態等調査(都市部における暑熱対策・技術と化学産業の貢献可能性に関する調査報告書(2017)).
- 2) 例えば、入交麻衣子, 近藤靖史：高反射率塗料による省エネルギー効果および都市気温への影響, 空気調和・衛生工学会学術講演会発表用論文集, pp1449-1452(1999).
- 3) 例えば、井原智彦, 岡和孝, 他 4 名：建築被覆を利用したヒートアイランド対策のライフサイクルアセスメント, 日本 LCA 学会研究発表会講演論文集, pp292-293(2006).
- 4) 田村昌隆, 他 4 名：高日射反射率塗料の性能に関する研究 その 7 耐候性試験後の日射反射率について, 日本建築士上学会学術講演会研究発表論文集, pp16-19(2012).
- 5) 本橋健司：JIS K 5603：2017(塗膜の熱性能—熱流経速報による日射吸収率の求め方)の制定, Vague(日塗研ニュース), pp1(2018).
- 6) 一般社団法人日本規格協会：JIS K 5603 塗膜の熱性能—熱流計測法による日射吸収率の求め方(2017).
- 7) 例えば、村田泰孝, 他 12 名：高反射率塗料施工面の日射反射率現場測定法に関する研究—標準板二点校正法の提案および水平面における精度確認—, 日本建築学会環境系論文集第 632 号, pp1209-1215(2008).
- 8) 竹林英樹, 他 6 名：高反射率塗料の日射反射率の経時変化に関する研究, 熱物性 29-3, pp122-128(2015).
- 9) NCK 販売株式会社, 遮熱・断熱塗料とは, <https://www.nck-sales.co.jp/toryou/>.
- 10) 松尾陽監修：高反射率材料の新展開, シーエムシー出版(2010).
- 11) 大川理恵, 他 5 名：微小セラミック球による電磁波の散乱に関する研究, 物理探査学会第 118 回学術講演会論文集, pp146-149(2008).
- 12) 例えば、八重樫涼：遮熱断熱塗料の表面性状と断熱性に関する研究, 日本建築学会大会学術講演梗概集(東海), pp995-996(2012).