

屋根改修工事における高日射反射率塗料の遮熱効果

Heat Shielding Effect of High Reflectance Paint for Roof Repairing

高松 誠^{*1} 北中 勉^{*2}
Makoto Takamatsu Tsutomu Kitanaka
橋本 和彦^{*2} 波多野 純^{*3}
Kazuhiko Hashimoto Jun Hatano

要旨

省エネ・ヒートアイランド対策として屋根に遮熱塗装を行うケースが増えている。自社施設の屋根改修工事において、8種類の屋根用高日射反射率塗料を施工し、塗装前後の屋根面温度実測により遮熱改修効果の確認を行った。また、耐候性試験、促進汚染試験により高日射反射率塗料の熱特性に関する性能評価を行った。白色系の高日射反射率塗料では、夏期の屋根面温度において15℃の低減効果がみられた。また、熱特性の評価指標となる日射反射率および熱流量は、温度実測値と高い相関関係にあった。さらに、塗膜の耐汚染性が遮熱性能に大きく関与することが確認された。

キーワード：高日射反射率塗料 金属屋根 改修工事 遮熱性能

1. はじめに

近年、屋根の老朽化に伴う改修や室内の温熱環境の改善、さらに省エネ対策として、高日射反射率塗料を使用した改修塗装を行う事例が増えており、特に大面積の屋根や屋上を有する工場や倉庫での需要が多く、国内だけでなく海外においても普及が進んでいる。¹⁾

高日射反射率塗料は、太陽光エネルギーの約50%を占め、物質に吸収されて熱に変換される近赤外線波長領域(780~2500nm)の光を反射することで塗装面の温度上昇を抑える機能性塗料である。特に夏場には、室内の冷房負荷の低減や、都市部でのヒートアイランド対策としても期待されている。また、多くの種類の塗料が上市されている中、2011年には屋根用高日射反射率塗料のJIS規格²⁾が制定され、遮熱性能とともに塗料としての品質・性能が明確となった。

今般、自社施設での屋根改修工事の機会を利用し、高日射反射率塗料の遮熱効果を実験的に検証することとした。本報告では、高日射反射率塗料の基本特性を把握するために行った耐候性試験や促進汚染試験による性能評価の結果、および実建物における塗装前後の屋根面温度の測定結果について報告する。

2. 実験概要

2.1 実験対象塗料

実験では、表1に示す高日射反射率塗料を検証対象とし

表1 実験対象の高日射反射率塗料

番号	種類	色	塗装建物
F1	フッ素樹脂系	白色	D棟
F2	フッ素樹脂系	灰色	C棟
F3	フッ素樹脂系	灰色	C棟
As1	アクリルシリコン樹脂系	白色	D棟
As2	アクリルシリコン樹脂系	灰色	D棟
As3	アクリルシリコン樹脂系	灰色	C棟
As4	アクリルシリコン樹脂系	灰色	C棟
As5	アクリルシリコン樹脂系	灰色	K棟

た。フッ素樹脂系3種類、アクリルシリコン樹脂系5種類の合計8種類で、全て弱溶剤形2液タイプの艶有り、塗料色は白色と灰色(マンセル値:N5~N7)の2種類とした。

2.2 性能評価試験

性能評価試験では、高日射反射率塗料の遮熱性能、耐候性および耐汚染性に関する評価を目的に、屋外暴露耐候性試験、促進耐候性試験、促進汚染試験および熱流量の測定を行った。

2.2.1 屋外暴露耐候性試験

屋外暴露耐候性試験は、屋根改修建物(大阪市此花区)と同じ敷地内に建つ別棟(平屋建て)の屋上において2016年9月5日より開始し、暴露4ヶ月後に、表2に示す項目について測定を行った。試験体は、JIS K 5600-1-4³⁾に準拠した基板(鋼板:70×150×0.8mm)に、塗料メーカーの改修塗装仕様に従って下塗りと上塗りを行ったものを使用した。試験体の屋外暴露状況を写真1に示す。

*1 技術研究所 *2 大阪本店 建築部 *3 東京本店 建築部

表2 測定項目

番号	測定項目	概要
1	日射反射率	JIS K 5675に準拠し、分光光度計を使用して日射反射率を測定。
2	測色	JIS K 5600_4 6 ⁴⁾ および JIS K 5675に準拠し、測色計を使用して色差 (ΔE^*ab)、明度 (L^*) を測定。
3	光沢度	JIS K 5675に準拠し、光沢度計を使用して鏡面光沢度 (60度) を測定。

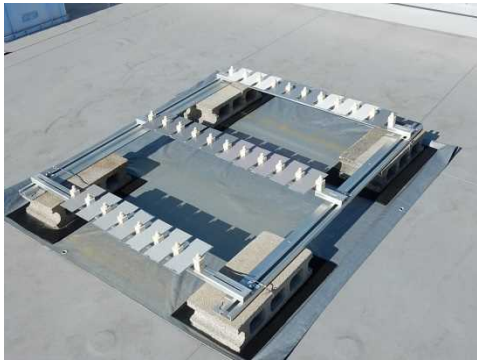


写真1 屋外暴露耐候性試験

2.2.2 促進耐候性試験

促進耐候性試験は、JIS K 5600-7-7⁵⁾ に準拠し、キセノンウェザーメーターを使用して、表3に示す条件で促進試験を行った。促進試験終了後は、表2に示す項目について測定を行った。試験体は、前項と同様に塗装したものをを使用した。促進耐候性試験の状況を写真2に示す。

表3 促進耐候性試験条件

項目	条件
光源	キセノンアークランプ、水冷式7.5kW
光フィルター	インナー：石英、アウター：#275
放射露光量	155.52MJ/m ²
放射照度	180W/m ² (300~400nm)
ブラックパネル温度	63±3℃
試験サイクル	連続運転、照射102分、照射+降雨18分
相対湿度 (照射時)	50%R.H.
試験時間	2,500時間



写真2 促進耐候性試験

2.2.3 促進汚染試験

促進汚染試験は、日建連式塗装材料促進汚染試験方法⁶⁾に準拠し、前処理、カーボンブラック (FW-200) の懸濁液による汚染処理、超音波洗浄機 (周波数 37kHz) を使用した洗浄処理の順で行った。促進汚染試験終了後、表2に示す項目について測定を行った。試験体は、70×150×0.8mmのアルミニウム板 (アロジン処理) を基板に、2.2.1項と同様に塗装したものをを使用した。促進汚染試験の状況を写真3に示す。



汚染処理



洗浄処理

写真3 促進汚染試験

2.2.4 熱流量測定

高日射反射率塗料の塗膜を通過する熱流量の測定は、恒温恒湿室 (25℃、50%R.H.) において、人工光源 (赤外線ランプ) と約 1 m² の断熱ボックス (910×1,000×1,165mm) を使用して行った。500×500×0.2mm のガルバリウム鋼板 (脱脂処理) に 2.2.1 項と同様に塗装した試験体を断熱ボックス上面に水平に設置し、試験体塗装面の輻射熱量が約 1,000W/m² となるように人工光源と試験体の間隔を調整した。温度と熱流量の測定には、T 型熱電対と熱流計をそれぞれ使用した。測定状況を写真4に示す。



測定状況



計測センサーの貼付

写真4 熱流量測定

2.3 屋根改修建物

高日射反射率塗料による屋根改修を行った建物は、S 造平屋建ての3棟 (C 棟、D 棟、K 棟) で、屋根は金属折板 [カラー鋼板+ポリエチレンフォーム裏貼]、外壁はALC 塗装仕上げである。改修塗装は2016年8月3日~18日に掛けて行った。表1に示した高日射反射率塗料の塗り分けは、図1に示す通りの区分とした。C 棟には比較用の無塗装面を設けた。写真5、写真6に改修塗装後の屋根面の外観を示す。

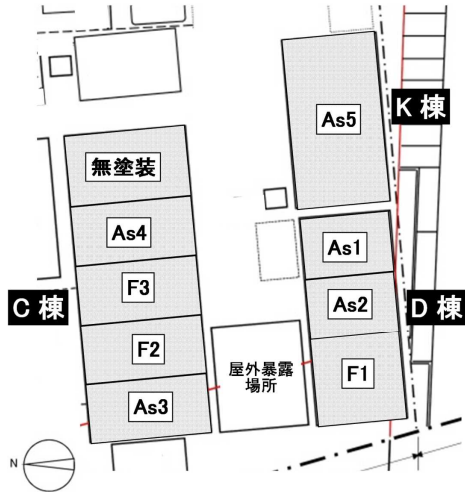


図1 高日射反射率塗料の屋根面塗り分け区分

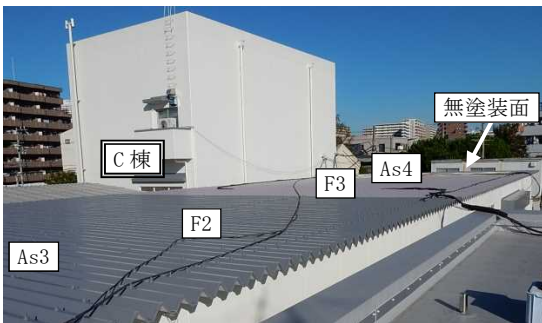


写真5 屋根改修塗装面 (C棟:4種類+無塗装)

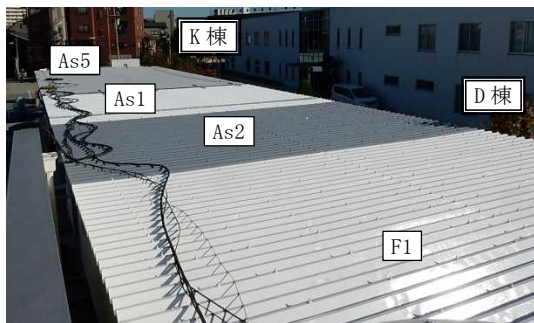
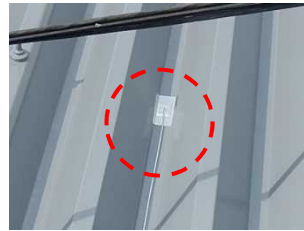


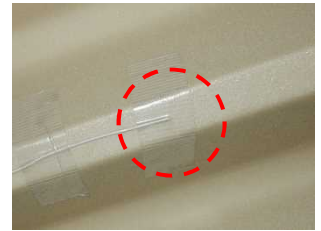
写真6 屋根改修塗装面 (D棟:3種類、K棟:1種類)

2.4 温度測定

温度測定は、屋根表面（屋外側）と屋根裏面（屋内側）で行い、2016年2月17日より開始した。測定には、サーミスタを温度センサーとする測定器を使用し、アルミテープでセンサーを貼り付けた。測定インターバルは10分とし、同時に外気温と全天日射量の測定も行った。写真7に温度測定状況を示す。



屋根表面（屋外側）



屋根裏面（屋内側）

写真7 表面温度測定

3. 実験結果

3.1 性能評価

屋外暴露耐候性試験、促進耐候性試験および促進汚染試験による日射反射率他の測定結果をまとめて表4に示す。また、試験終了後の試験体外観（一部）を写真8に示す。

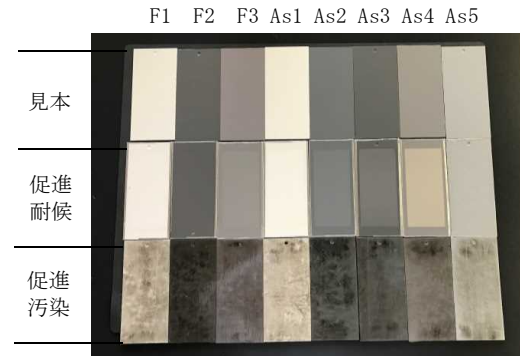


写真8 試験終了後の試験体外観

表4 性能評価試験測定結果

	初期値		屋外暴露耐候性試験(大阪4ヶ月)								促進耐候性試験(キセノン2,500時間)						促進汚染試験									
	日射反射率		明度	光沢	日射反射率		明度	明度差	色差	光沢	光沢変化率	日射反射率		明度	明度差	色差	光沢	光沢変化率	日射反射率		明度	明度差	色差	光沢	光沢変化率	
	全波	近赤	度	度	全波	近赤	度	差	差	度	率	全波	近赤	度	差	差	度	率	全波	近赤	度	差	差	度	率	
	長域	外域	L*	%	長域	外域	L*	ΔL*	ΔE*ab	%	%	長域	外域	L*	ΔL*	ΔE*ab	%	%	長域	外域	L*	ΔL*	ΔE*ab	%	%	
F1	白	85.8	84.6	96.3	74.1	80.0	81.4	90.7	-5.6	6.0	55.7	75	85.0	83.9	95.7	-0.6	1.4	54.1	73	48.6	56.2	68.6	-27.8	28.3	97.5	132
F2	灰	33.9	51.8	50.7	70.8	33.7	52.5	47.6	-3.1	1.6	52.7	74	35.8	56.1	49.2	-1.5	0.8	52.7	74	23.7	34.2	45.8	-4.9	6.5	110.0	155
F3	灰	55.6	81.8	60.7	73.4	51.9	76.5	58.6	-2.1	2.2	57.1	78	56.0	81.9	62.0	1.3	2.7	55.5	76	31.8	45.7	50.8	-9.9	10.3	101.6	138
As1	白	86.2	83.9	96.6	74.7	77.9	78.0	91.2	-5.4	6.0	58.3	78	84.6	81.4	94.8	-1.8	1.6	34.7	47	49.7	55.8	71.7	-25.0	25.4	89.5	120
As2	灰	43.6	67.0	55.1	77.1	42.4	65.4	52.4	-2.7	1.7	63.8	83	44.6	66.5	57.4	2.3	1.7	30.6	40	26.1	38.7	47.3	-7.8	9.0	96.7	125
As3	灰	36.0	55.9	51.4	76.4	34.6	53.5	48.0	-3.4	1.2	62.8	82	38.1	56.7	54.9	3.5	2.5	26.1	34	28.8	44.4	47.2	-4.1	4.7	89.8	118
As4	灰	58.0	82.8	61.4	80.8	53.6	75.3	60.0	-1.4	1.9	54.1	67	62.7	80.5	71.6	10.2	10.5	50.2	62	37.6	53.2	53.4	-8.0	8.2	98.9	122
As5	灰	53.7	68.1	69.1	11.5	51.1	65.1	69.1	0.0	2.3	9.5	82	53.8	67.9	70.9	1.8	0.5	6.6	57	38.0	50.3	60.8	-8.3	8.9	14.2	123

3.1.1 日射反射率

近赤外線波長領域（以下、近赤外域と称す）の日射反射率と明度L*の測定結果を図2、図3に示す。

日射反射率（近赤外域）の初期値は51.8～84.6%の範囲で、白色系と一部の灰色系の塗料が80%を超えていた。

屋外暴露4ヶ月後の日射反射率（近赤外域）は、一部を除いて、初期値よりも低くなる傾向を示した。また、明度は暴露4ヶ月で1.4～5.6低下し、塗膜の汚れが進んでいることが窺える。

キセノンウェザーメーター2,500時間後では、塗膜劣化による変色や光沢度の低下が進み、フッ素樹脂系と比べてアクリルシリコン樹脂系の劣化が著しかった。一方、日射反射率（近赤外域）は56.1～83.9%の範囲で、樹脂の種類に関係なく初期値とほとんど変わらず、田村らによる既報⁷⁾の研究結果と同様の傾向を示した。

促進汚染試験後では、汚れの付着により明度が大きく低下し、アクリルシリコン樹脂系と比較してフッ素樹脂系の方が明度の低下は大きい傾向にあった。日射反射率（近赤外域）は34.2～56.2%の範囲で、明度の低下と比例して大きく低下し、特に白色塗料の低下が顕著であった。

屋外暴露耐候性試験と促進汚染試験の結果より、塗膜の日射反射率は、汚れが起因した明度の変化と比例して変化することから、塗膜の耐汚染性は遮熱性能に大きく関与するものと判断される。

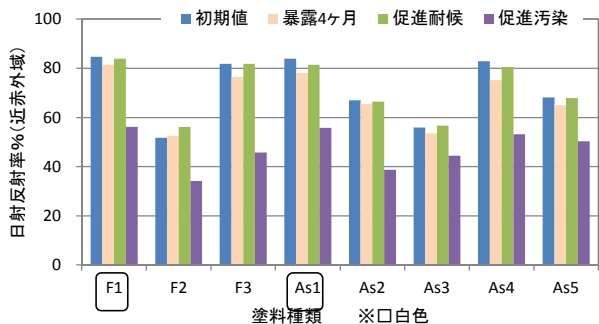


図2 日射反射率の測定結果

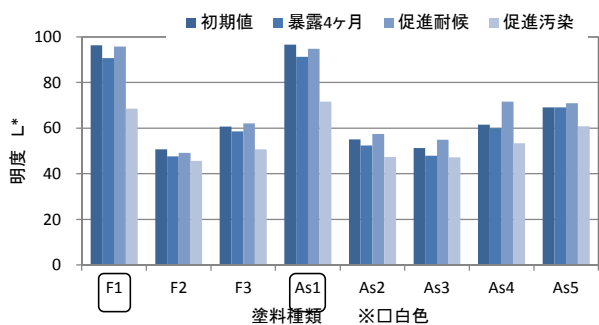


図3 明度L*の測定結果

3.1.2 熱流量

図4に熱流量の測定結果を、図5に熱流量と日射反射率（全波長域、近赤外域）の関係を示す。

熱流量は、白色系の塗料が118～130W/m²、灰色系の塗料は136～188W/m²であった。また、比留川による既報⁸⁾にも示されているように、熱流量と日射反射率の関係には負の相関関係がみられ、相関係数(R)は全波長域が-0.89、近赤外域は-0.95であり、高い相関関係を示した。日射反射率と同様に、熱流量についても、高日射反射率塗料の熱特性の評価値として使用することが可能と推察される。

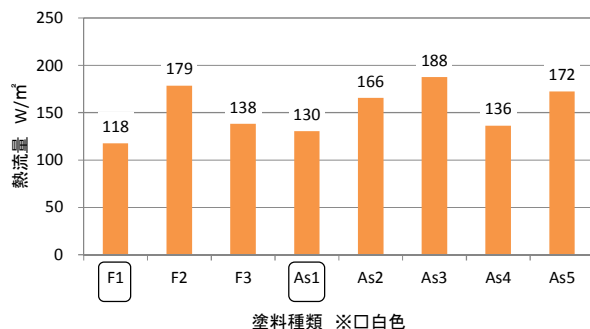


図4 熱流量測定結果

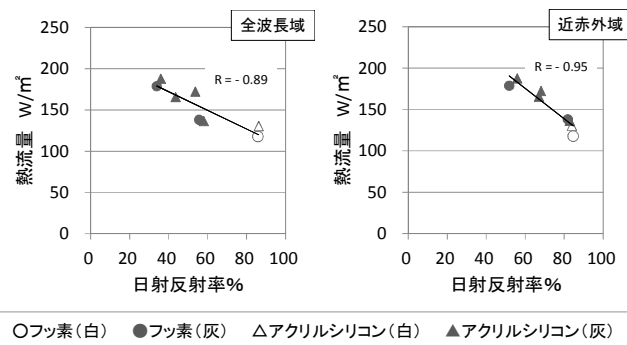


図5 熱流量と日射反射率の関係

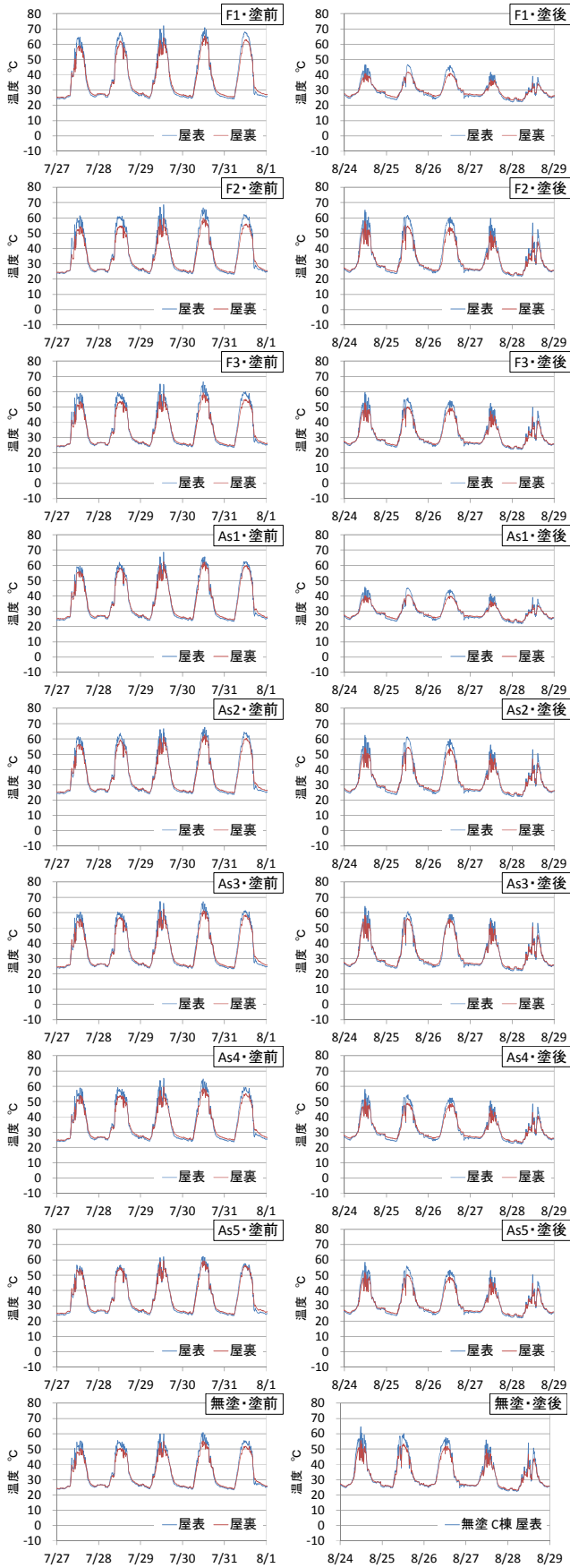
3.2 改修屋根面温度

3.2.1 測定結果と塗装前後の比較

高日射反射率塗料の塗装前後における屋根表面および屋根裏面の温度測定結果を図6、図7にそれぞれ示す。なお、図6、図7で示した測定期間は、夏期および冬期ともに、図8、図9に示す通り、外気温と日射強度が塗装前後において比較的近似した連続5日間を抽出したものである。また、改修塗装後の夏期に撮影した赤外線サーモグラフィカメラによる熱画像の一例を図10に示す。

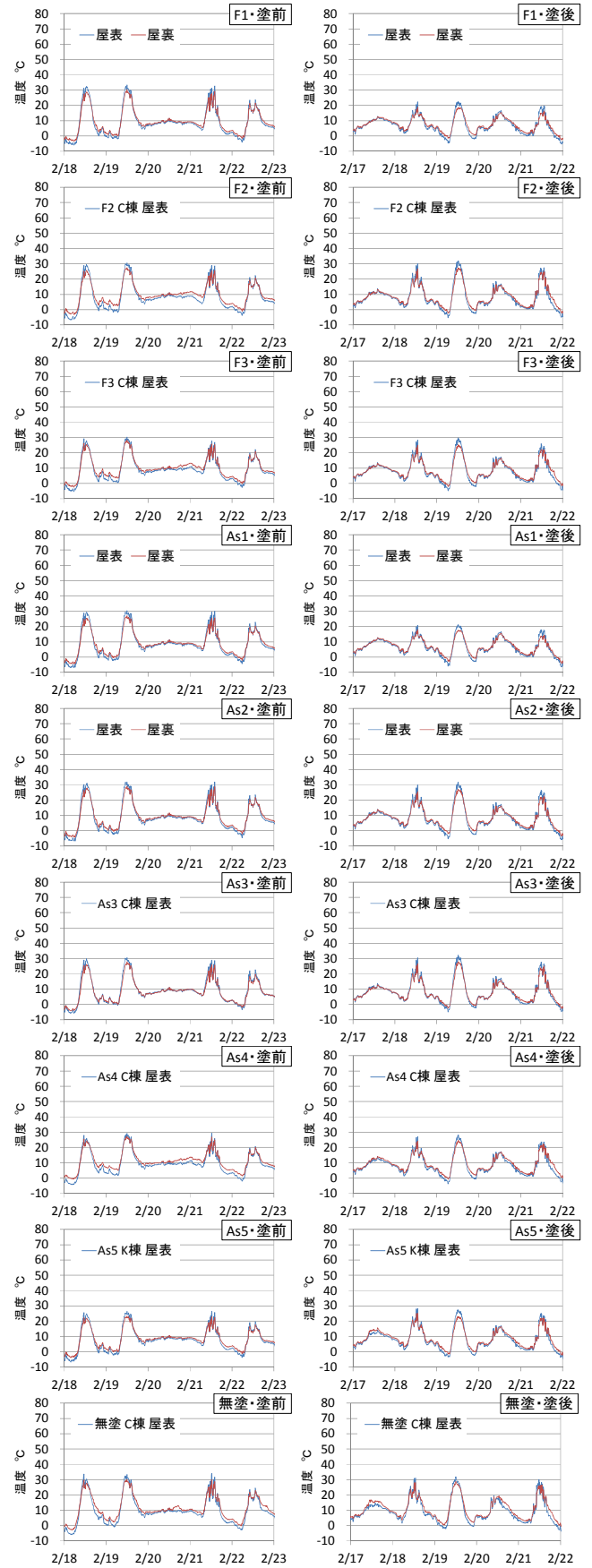
夏期の測定結果では、高日射反射率塗料の種類により性能差はみられるものの、全般を通して塗装前と比較して塗装後の温度（屋根表面・裏面ともに）は低下し、特に白色

屋根改修工事における高日射反射率塗料の遮熱効果



塗装前 (2016/7/27~7/31) 塗装後 (2016/8/24~8/28)

図6 屋根表面・裏面温度の測定結果 (夏期)



塗装前 (2016/2/18~2/22) 塗装後 (2017/2/17~2/21)

図7 屋根表面・裏面温度の測定結果 (冬期)

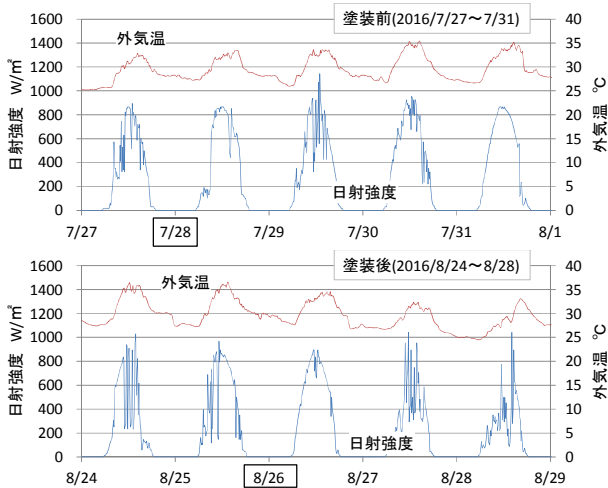


図8 夏期の外気温と日射強度

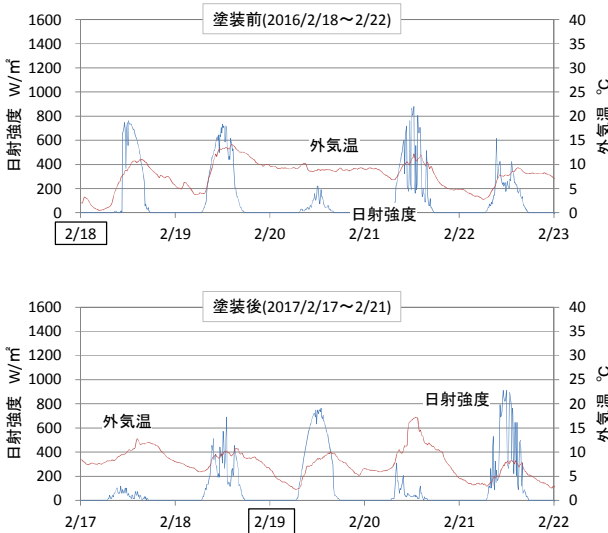


図9 冬期の外気温と日射強度

表5 屋根表面・裏面温度の塗装前後比較（夏期）

		屋根表面				屋根裏面							
		塗装前 (16/7/28)		塗装後 (16/8/26)		塗装前 (16/7/28)		塗装後 (16/8/26)		塗装前後			
		平均	最大	平均	最大	平均	最大	平均	最大	Δ平均	Δ最大		
F1	白	62.2	67.5	43.4	46.1	-18.8	-21.4	57.9	62.0	39.4	41.1	-18.5	-20.9
F2	灰	57.9	61.0	57.0	60.4	-0.9	-0.6	52.4	54.7	51.3	53.8	-1.1	-0.9
F3	灰	55.7	59.5	51.2	54.1	-4.5	-5.4	51.4	53.6	47.2	49.2	-4.2	-4.4
As1	白	57.3	62.0	42.1	44.0	-15.1	-18.0	55.2	58.1	38.6	39.8	-16.6	-18.3
As2	灰	58.8	63.7	55.8	59.8	-3.0	-3.9	55.7	59.5	50.9	53.8	-4.7	-5.7
As3	灰	57.0	60.4	55.3	58.9	-1.7	-1.5	54.3	56.9	53.1	55.7	-1.2	-1.2
As4	灰	55.1	59.2	49.8	52.4	-5.3	-6.8	51.5	54.0	46.4	48.7	-5.1	-5.3
As5	灰	53.2	56.5	50.7	53.4	-2.5	-3.1	52.2	55.2	46.9	48.8	-5.3	-6.4
無塗装		52.0	55.6	54.3	57.4	2.3	1.8	48.5	50.5	49.7	51.9	1.2	1.4
外気温度		32.1	32.9	33.4	34.6	-	-	-	-	-	-	-	-
積算日射量		14.2	MJ/m ²	14.0	MJ/m ²	-	-	-	-	-	-	-	-

表6 屋根表面・裏面温度の塗装前後比較（冬期）

		屋根表面				屋根裏面							
		塗装前 (16/2/18)		塗装後 (17/2/19)		塗装前 (16/2/18)		塗装後 (17/2/19)		塗装前後 の差			
		平均	最大	平均	最大	平均	最大	平均	最大	Δ平均	Δ最大		
F1	白	28.5	32.4	19.6	22.7	-8.9	-9.7	25.5	28.8	16.8	18.5	-8.7	-10.3
F2	灰	25.7	29.5	27.5	31.9	1.8	2.4	22.4	25.7	24.2	27.4	1.8	1.7
F3	灰	24.4	29.2	25.6	29.8	1.3	0.6	22.5	26.2	22.3	25.3	-0.2	-0.9
As1	白	26.1	29.4	18.4	21.2	-7.7	-8.2	22.8	25.5	16.0	17.6	-6.8	-7.9
As2	灰	27.5	31.1	27.2	31.7	-0.3	0.6	24.7	28.0	24.3	27.1	-0.5	-0.9
As3	灰	25.4	29.9	27.6	32.1	2.2	2.2	22.8	26.0	24.4	27.9	1.7	1.9
As4	灰	23.0	27.9	24.3	28.1	1.3	0.2	21.8	25.4	21.9	24.6	0.1	-0.8
As5	灰	21.9	25.6	24.2	27.4	2.3	1.8	19.5	22.2	20.6	23.0	1.0	0.8
無塗装		27.4	33.6	27.9	31.8	0.5	-1.8	25.4	29.7	25.9	28.6	0.5	-1.1
外気温度		9.3	10.8	8.4	9.7	-	-	-	-	-	-	-	-
積算日射量		10.3	MJ/m ²	12.0	MJ/m ²	-	-	-	-	-	-	-	-

系 (F1、As1) でその傾向が顕著にみられた。一方、冬期の測定結果では、塗装前後の屋根表・裏面温度は白色系で低くなる傾向はみられるが、灰色系では塗装前後の温度差は小さかった。

次に、図8、図9で示した夏期および冬期それぞれ5日間の中で、10時から15時の外気温と積算日射量が塗装前後で近似した日として、夏期における塗装前「2016/7/28」、同塗装後「2016/8/26」、冬期における塗装前「2016/2/18」、同塗装後「2017/2/19」をそれぞれ選択し、10時から15時の屋根表面・裏面温度に関する塗装前後の比較結果を表5、表6および図11にそれぞれ示す。

夏期では、白色系において屋根面温度の平均値の差は15℃を超え、塗装後に大きく低下している。これに対し、灰色系では0.9~5.3℃の低下に留まっており、色の違いにより顕著な差がみられた。冬期では、白色系が塗装前よりも塗装後に5℃を超えて低くなっている。灰色系では同等、若しくは1~2℃高くなっており、これは塗装前後の日射強度の差による影響と推察される。

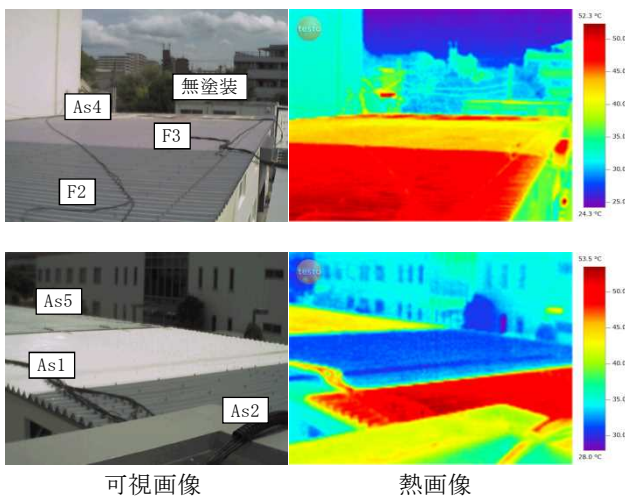


図10 改修塗装後の熱画像
(上段：C棟、下段：D棟・K棟)

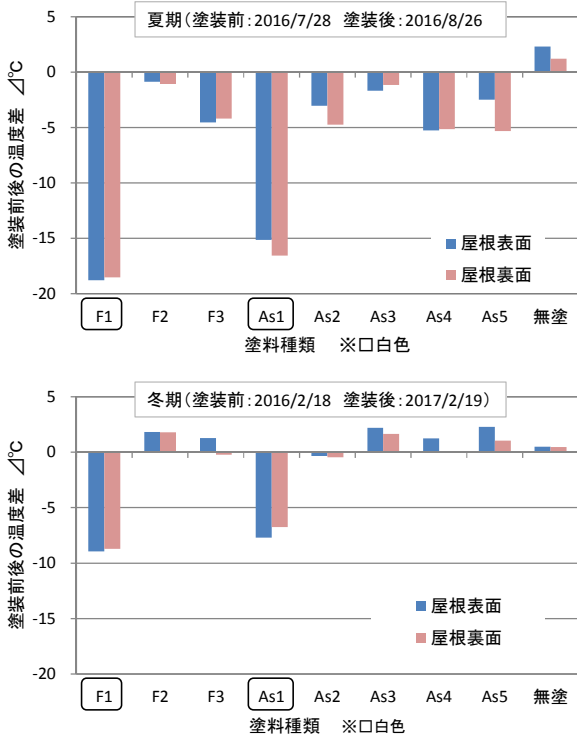


図 11 塗装前後の比較 (10 時～15 時の平均値)

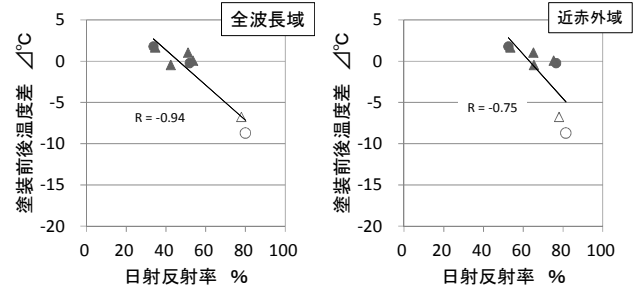


図 13 塗装前後の屋根裏面温度差と日射反射率(冬期)の関係
○フッ素(白) ●フッ素(灰) △アクリルシリコン(白) ▲アクリルシリコン(灰)

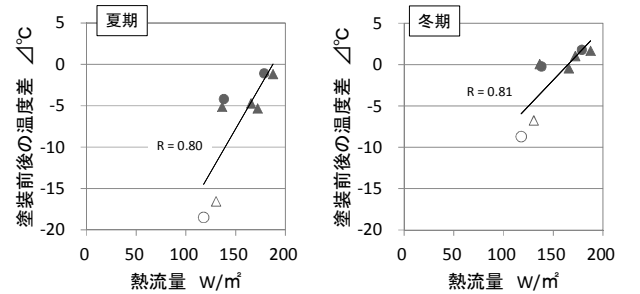


図 14 塗装前後の屋根裏面温度差と熱流量の関係
○フッ素(白) ●フッ素(灰) △アクリルシリコン(白) ▲アクリルシリコン(灰)

3.2.2 塗装前後の温度差と日射反射率、熱流量の比較

表 5 および表 6 で示した塗装前後における屋根裏面温度の平均値の差と、表 4、図 4 で示した初期値の日射反射率(全波長域・近赤外域)および熱流量との関係について図 12～図 14 にそれぞれ示す。

塗装前後の屋根裏面の温度差と日射反射率との関係を見ると、夏期、冬期ともに負の相関関係を示し、相関係数 (R) は夏期の全波長域が-0.96、同近赤外域は-0.72、冬期の全波長域は-0.94、同近赤外域は-0.75 であった。塗装前後の屋根裏面の温度差と熱流量との関係では、正の相関関係にあり、相関係数 (R) は夏期が 0.80、冬期は 0.81 を示した。日射反射率(全波長域・近赤外域)と熱流量は、ともに屋根面温度と高い相関関係にあった。

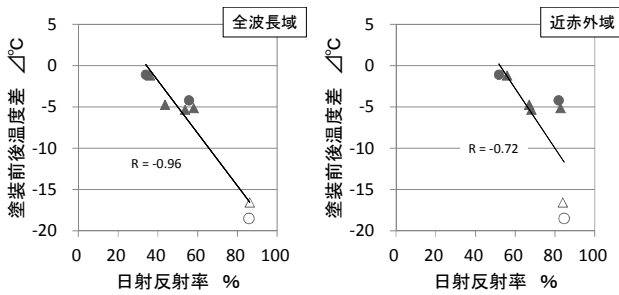


図 12 塗装前後の屋根裏面温度差と日射反射率(夏期)の関係
○フッ素(白) ●フッ素(灰) △アクリルシリコン(白) ▲アクリルシリコン(灰)

4. まとめ

屋根用高日射反射率塗料による遮熱効果の検証実験として、8種類の高日射反射率塗料を改修建物の屋根面に施工し、塗装前後において屋根面の温度測定を連続して行った。さらに、耐候性試験および促進汚染試験により高日射反射率塗料の熱特性の評価を行った。

以下に得られた知見を示す。

- ① 高日射反射率塗料の塗装前後の屋根面温度差は、色の違いによる差が大きく、夏期では白色系が 15℃を超えて大きく低下した。一方、灰色系では 0.9～5.3℃の低下に留まった。
- ② 日射反射率と熱流量についても、色の違いによる影響がみられ、この両者の熱特性値は、塗装前後の屋根面温度の実測値と高い相関関係にあった。
- ③ 汚れの付着により明度が低下した塗料は、日射反射率も比例するように低下し、塗膜の耐汚染性が遮熱性能に大きく関与することが確認された。
- ④ 本実験においては、フッ素樹脂系の方がアクリルシリコン樹脂系よりもやや汚れやすい傾向を示した。
- ⑤ 高日射反射率塗料の熱特性について、長期的な持続性を十分に把握するまでには至っていない。そのため、

今後も温度実測を継続するなど、引き続き検証を行っていく予定である。

参考文献

- 1) シーエムシー出版：【特集】遮熱(省エネ)塗料の新展開、月刊ファインケミカル 2016年4月号、2016.4.15
- 2) 日本規格協会：JIS K 5675「屋根用高日射反射率塗料」
- 3) 日本規格協会：JIS K 5600-1-4「塗料一般試験方法-第1部：通則-第4節：試験用標準試験板」
- 4) 日本規格協会：JIS K 5600-4-6「塗料一般試験方法-第4部：塗膜の視覚特性-第6節：測色（色差の計算）」
- 5) 日本規格協会：JIS K 5600-7-7「塗料一般試験方法-第7部：塗膜の長期耐久性-第7節：促進耐候性及び促進耐光性（キセノンランプ法）」
- 6) 建築技術開発委員会 技術研究部会 材料施工専門部会 外装材の汚れ評価に関するWG：日建連式 塗装材料促進汚染試験方法、日本建設業連合会、2017年2月
- 7) 田村昌隆ほか：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、日本建築仕上学会 2012年大会 学術講演会 研究発表論文集、pp.71-74、2012.10.18
- 8) 比留川伸司：平成25年度 遮熱塗料における熱特性評価方法及び装置の検討、日塗検ニュース No.136 2015、pp.2-7、平成27年1月