建築物への高日射反射率塗料の塗装による温度低下の検証

Verification of Decrease of Building Temperature by Painting with High Solar Reflectant Paint

建築・構造物塗料事業部
建築テクニカルサポートグループ
Architectural Coating Division

櫻田 将至
Masashi SAKURADA

高橋 浩二
Kohji TAKAHASHI

島岡　宏
Hiroshi SHIMAOKA

要　旨

東京都内ビル屋上に設置された、ほぼ同一形状・寸法を有する2つの鉄筋コンクリート造建築物について、一方の屋根に高日射反射率塗料を塗布し、他の一方は無塗装のままとして、建築物の屋根表裏面温度および室温の計測を塗装後２年間にわたって行った。

その結果、高日射反射率塗料の塗布により、コンクリート外面・内面の温度上昇を抑制し、コンクリートが周辺地域に及ぼす温度負荷の影響を少なくできることから、ヒートアイランド現象の抑制へ貢献できることを確認した。また、室内温度負荷の低下を可能とすることを実証し、夏季における冷房に必要とするエネルギーを抑制できる可能性を示した。高日射反射率塗料の効果は、２年間維持することを確認した。

Abstract

The temperature of the buildings was measured in order to clarify the effect of the high solar reflectant paint after applying the paint to the roof surface of one of the two identically shaped and dimensional buildings.

The following conclusions were obtained from the experiments (1) It can depress temperature rise of the outer and inner surfaces of the concrete slab and inner surface of ceiling regardless of the season by painting the roof of the building with a solar heat high reflectance paint. (2) The reduction in temperature is different based on the measurement position, and the reduced temperature is greater for the internal and external surface of the concrete slab and less for the internal surface of the ceiling. (3) The effect of the solar heat high reflectance paint on temperature decrease changed with the elapse of time and the effect was confirmed after two years of painting. This being said, the tendency of the temperature to decrease with time has not been confirmed.

1. はじめに

一般的に、高日射反射率塗料の性能評価では、太陽光の下に塗料を塗装した試験体を設置し、塗装した試験体の表面や裏面等の温度を測定することで塗装による温度低下を把握している。しかし、より確実に高日射反射率塗料の温度低下に関する効果を把握するためには、実際の建築物に塗装を行って検証する必要がある。一般的に塗装後の塗膜は、汚染等の影響を受けて日射反射率が低下し、温度低下の幅も塗装直後に比べて小さくなることが懸念されることから、高日射反射率塗料の塗装による温度低下の持続性を把握することは重要である。

現在、高日射反射率塗料は夏季の温度低下が注目されているが、屋根面からの熱流入量減少は空調負荷の増加に繋がることも考えられるため、冬季の温度低下を把握したうえで塗装することは重要である。

本報では、東京都内ビル屋上に設置してある、ほぼ同一形状・寸法の鉄筋コンクリート造の機械室2棟を対象として、高日射反射率塗料を塗装した機械室と塗装していない機械室との比較で、夏季と冬季における温度低下および塗装後2年にわたって測定した温度低下の変化について報告する。

2. 実験

2.1 建築物の概要と測定位置

東京都内ビル2棟の屋上に個別に設置してある1室あたり35㎡のほぼ同一形状・寸法で直線距離が100m程度離れている機械室A、Bに対して、同位置に温度センサーを設置した。高日射反射率塗料の塗装を行った機械室Aと無塗装の機械室Bにおいて、屋根コンクリートスラブ外面・内面および天井面での温度測定と外気温度として機械室Aの出入り口の庇下で雰囲気温度および屋根水平面で全天日射量を計測した。なお、屋根コンクリートスラブ外面の温度は、塩化ビニル樹脂系シート表面に熱電対を貼り付け、屋根コンクリートスラブ内面の温度は、グラスウールを一部剥がしてコンクリートスラブに熱電対を貼り付けて測定した。また、天井面の温度は、グラスウール室内側表面での温度を言う。色彩測定は、夏季の温度測定期間中に熱電対設置箇所の近傍で実施した。測定には温度センサーとして熱電対、記録計としてデータロガー(江藤電気社製)を用いた。また、色彩測定には色彩色差計(KONICA MINOLTA社製)を用いた。全天日射量測定には全天日射量計(プリード社製)を用いた。測定を行った機械室の全体図および断面図(a-a間)を図1に示す。機械室A、B共に隣接する部屋があり、室内は境界線の位置で仕切られている。

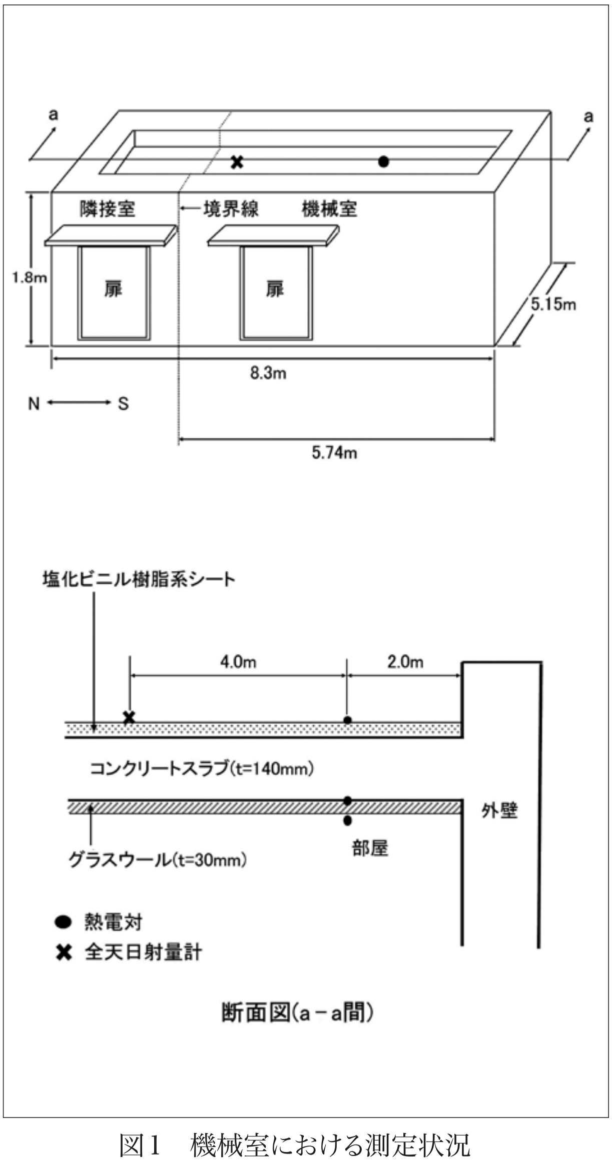

図1 機械室における測定状況

2.2　温度測定期間

機械室A、B棟の個体差を確認するために2006年7月5日から7月30日までの期間で、両機械室とも無塗装の状態で、測定間隔10分で温度測定を行った。高日射反射率塗料の塗装による温度低下を把握するために、夏季の温度測定として2006年8月2日から8月20日(2006年夏季)、2007年8月2日から8月20日(2007年夏季)および2008年8月2日から8月20日(2008年夏季)、冬季の温度測定として2007年1月1日から1月19日(2007年冬季)までの期間において測定間隔5分で温度測定を行った。

2.3　塗装仕様

機械室Aにおける高日射反射率塗料の塗装仕様は、塩化ビニル樹脂系シートの表面に温度センサーを設置した上に2006年7月31日および8月1日の2日間で2液形エポキシ樹脂系塗料白色(標準膜厚:30μm)、2液形ウレタン樹脂系高日射反射率塗料白色(標準膜厚:60μm)の順に塗装した。

3.　結果と考察

3.1　機械室Aと機械室Bの個体差確認

2006年7月5日から30日まで測定した屋根コンクリートスラブ外面・内面および天井面温度の測定結果で日最高・日最低温度の平均値を表1に示す。屋根コンクリートスラブ外面での温度が両室で同程度であることを確認した。日最高温度平均で屋根コンクリートスラブ内面は0.6℃、天井面ついては1.2℃の差が確認され、機械室Aの温度負荷が高いことが確認された。

表1　機械室個体差の確認

機械室	A		B		温度差(B-A)	
温度平均値(℃)	最高	最低	最高	最低	最高	最低
屋根コンクリートスラブ外面	39.0	24.7	39.0	24.8	0.0	0.1
屋根コンクリートスラブ内面	33.9	26.6	33.3	26.8	-0.6	0.3
天井面	31.0	26.6	29.8	26.8	-1.2	0.3

3.2　夏季測定期間中の温度推移

3.2.1　測定期間中の温度変化の概要

3.2.1.1　塗装直後(2006年夏季)

屋根コンクリートスラブ外面・内面、天井面の温度および外気温度の測定結果を図2に示す。屋根コンクリートスラブの外面・内面の温度は測定期間中、高日射反射率塗料の塗装を行っていない機械室Bに比べて、塗装を行った機械室Aの温度が常に著しく低いことが確認された。一方、天井面の温度も機械室Aの方がBより低いことがわかる。但し、温度差はスラブ外面、内面に比べれば小さい。

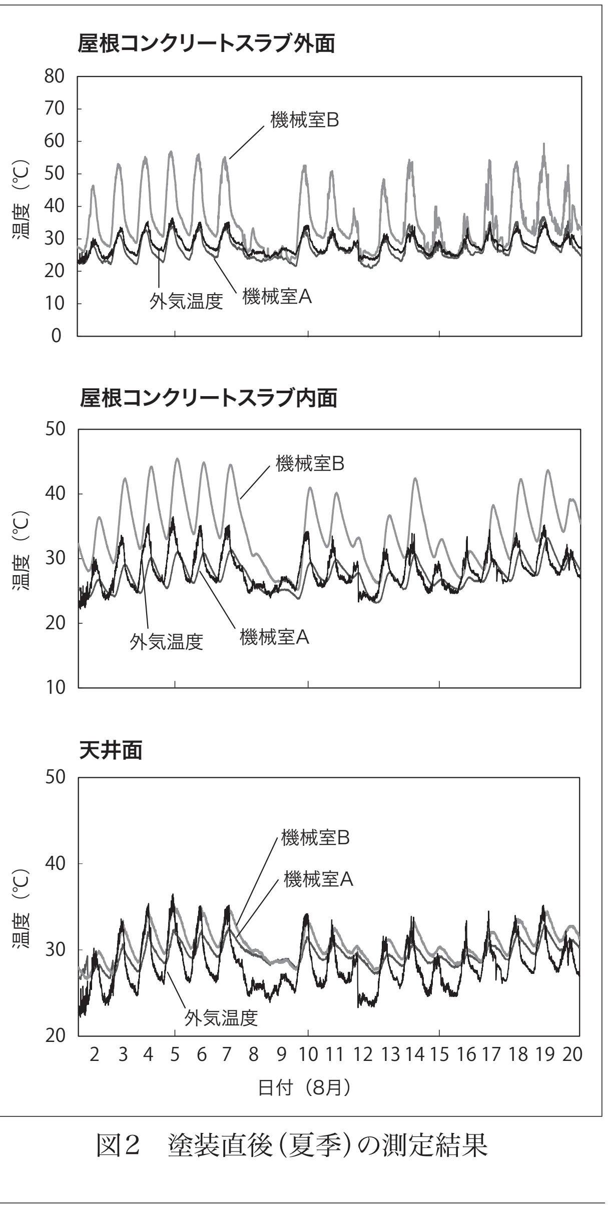

図2　塗装直後(夏季)の測定結果

3.2.1.2　塗装1年後（2007年夏季）および
2年後（2008年夏季）

塗装1年後および2年後における屋根コンクリートスラブ外面・内面温度、天井面温度および外気温度の測定結果を図3および図4に示す。機械室Aと機械室Bの温度測定結果の傾向は、塗装直後と同じであることがわかった。

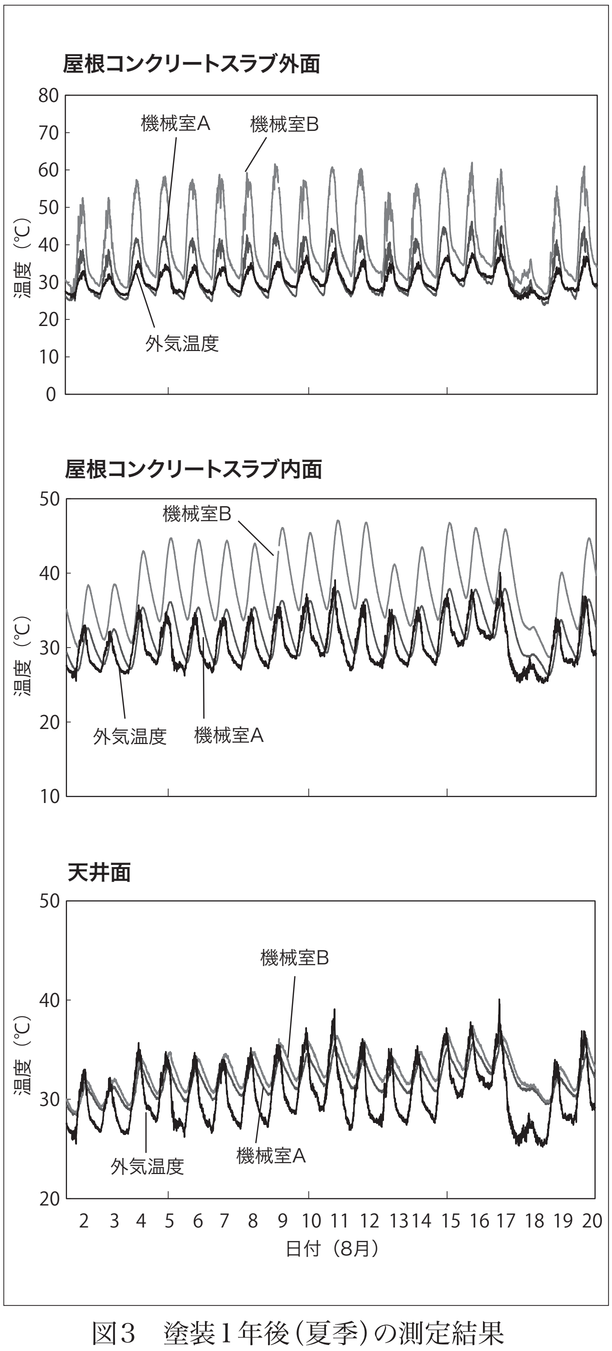

図3　塗装1年後（夏季）の測定結果

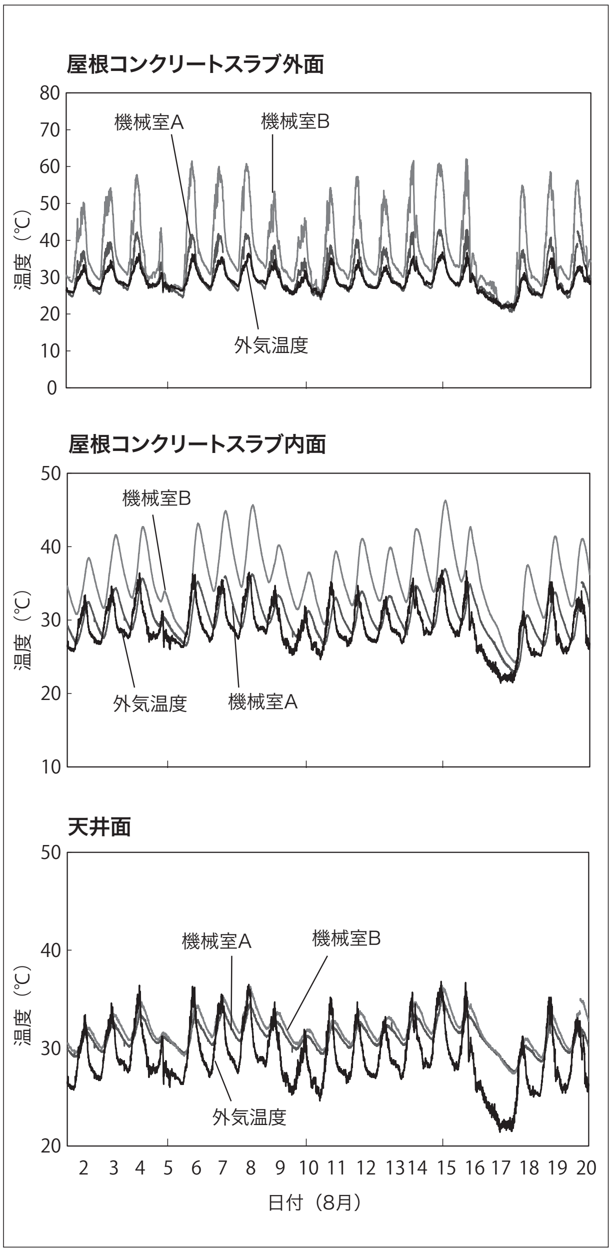

図4　塗装2年後（夏季）の測定結果

3.2.2　1日内の温度変化と最大温度差

3.2.2.1　塗装直後（2006年夏季）

測定期間中で最も外気温度の高かった2006年8月5日の屋根コンクリートスラブ外面・内面温度、天井面温度および外気温度の測定結果を図5に示す。全ての測定部位において機械室Aは機械室Bより1日を通して温度が低いことを確認した。屋根コンクリートスラブ

外面では、機械室Aと機械室Bの温度差が最も大きかった12時35分の時点で機械室Aは33.0℃、機械室Bは57.0℃であったことから、高日射反射率塗料の塗装によって24.0℃の温度低下が確認された。また、機械室Bでは1日を通して外気温度より高く、機械室Aでは昼間は外気温度とほぼ一致し、夜間は外気温度より低い傾向にある。これらのことから、高日射反射率塗料を塗装することによって周辺地域への温度負荷低減ができると考えられる。屋根コンクリートスラブ内面では、最高温度が屋根コンクリートスラブ外面より遅れて計測されていることから、コンクリートスラブの温度上昇は、外面側から徐々にコンクリートスラブ内面へ熱が伝わっていると考えられる。

また、屋根コンクリートスラブ内面においては、機械室Aと機械室Bの温度差が最も大きかった18時00分の時点で機械室Aは30.9℃、機械室Bは45.4℃であったことから、高日射反射率塗料の塗装によって14.5℃の温度低下が確認された。従って、高日射反射率塗料の塗装により室内での温度負荷を低減できると言える。これらのことから、高日射反射率塗料を塗装することによって屋根コンクリートスラブにおける温度負荷を低減できると考えられる。天井面では、最高温度が屋根コンクリートスラブ外面より遅れて計測されているが、屋根コンクリートスラブ内面より早いことから、屋根コンクリートスラブ内面の温度のほか、出入り口の開け閉めや、外壁温度の影響を受けていると考えられる。また、機械室Aと機械室Bの温度差が最も大きかった11時50分の時点で機械室Aは30.5℃、機械室Bは34.0℃であったことから、高日射反射率塗料の塗装によって3.5℃の温度低下が確認された。これらのことから、高日射反射率塗料を塗装することによって、断熱材を用いた建築物においても室内における温度負荷を低減できると考えられる。

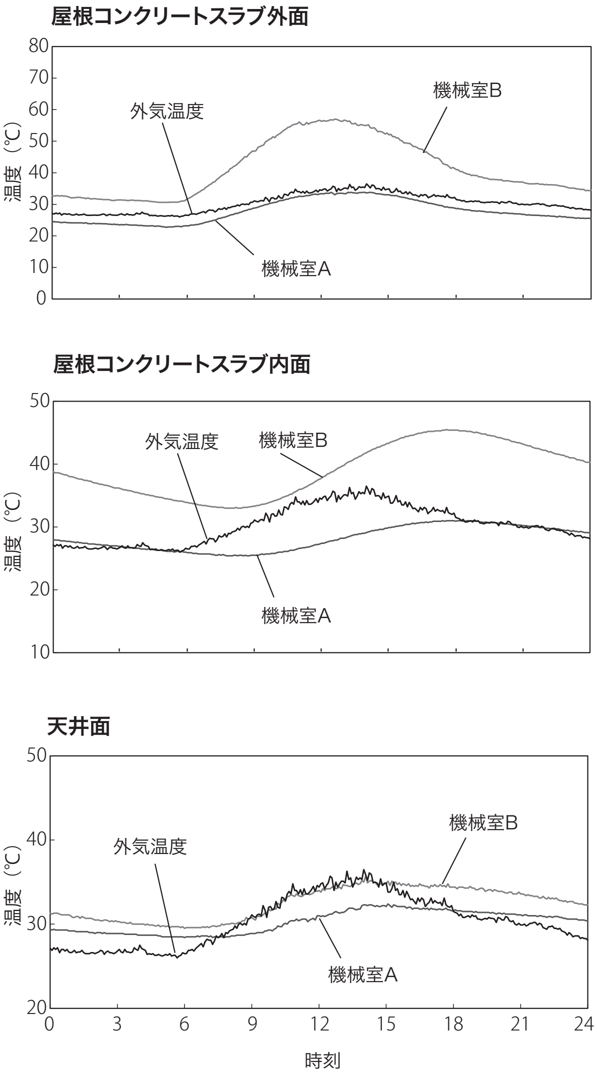

図5　塗装直後（夏季）の代表日における測定結果

3.2.2.2　塗装1年後（2007年夏季）および2年後（2008年夏季）

それぞれの測定期間中で最も外気温度の高かった2007年8月17日および2008年8月15日の屋根コンクリートスラブ外面・内面、天井面温度および外気温度の測定結果を図6および図7に示す。全ての測定部位において、塗装直後と同様に、機械室Aは機械室Bより1日を通して温度が低いことを確認した。各測定部位における機械室Aと機械室Bの温度差が最も大きい

時刻および温度差を、塗装直後（2006年夏季）を含めて表2に示す。なお、各測定部位において、機械室AとBの温度差が大きくなる時刻には時差があり、最大温度差となる時刻が1点とは限らない。例えば、塗装1年後の屋根コンクリートスラブ内面の温度差は、17時55分から18時50分の間に3回計測されている。また、塗装2年後の天井面の最大温度差は朝と夕方に生じている。屋根コンクリートスラブ外面・内面の最大温度差は、塗装直後が最も大きく、次いで2年後が大きく、1年後が最も小さかった。天井面については、塗装直後が最も大きく、次いで1年後が大きく、2年後が最も小さかった。

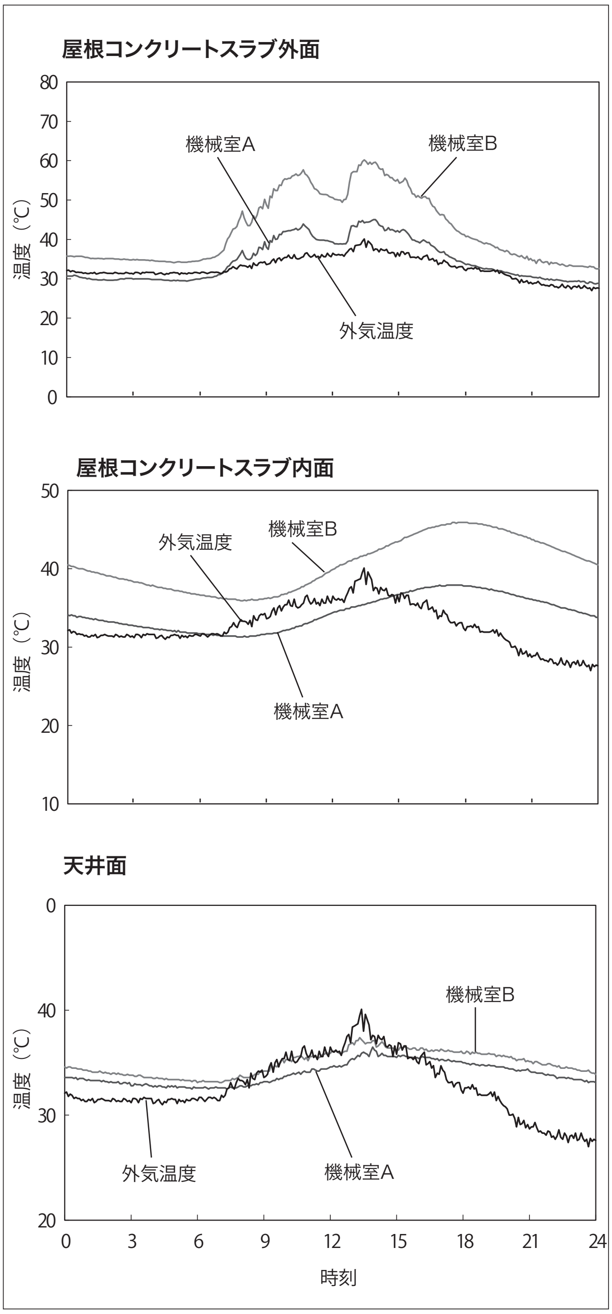

図6　塗装1年後（夏季）の代表日における測定結果

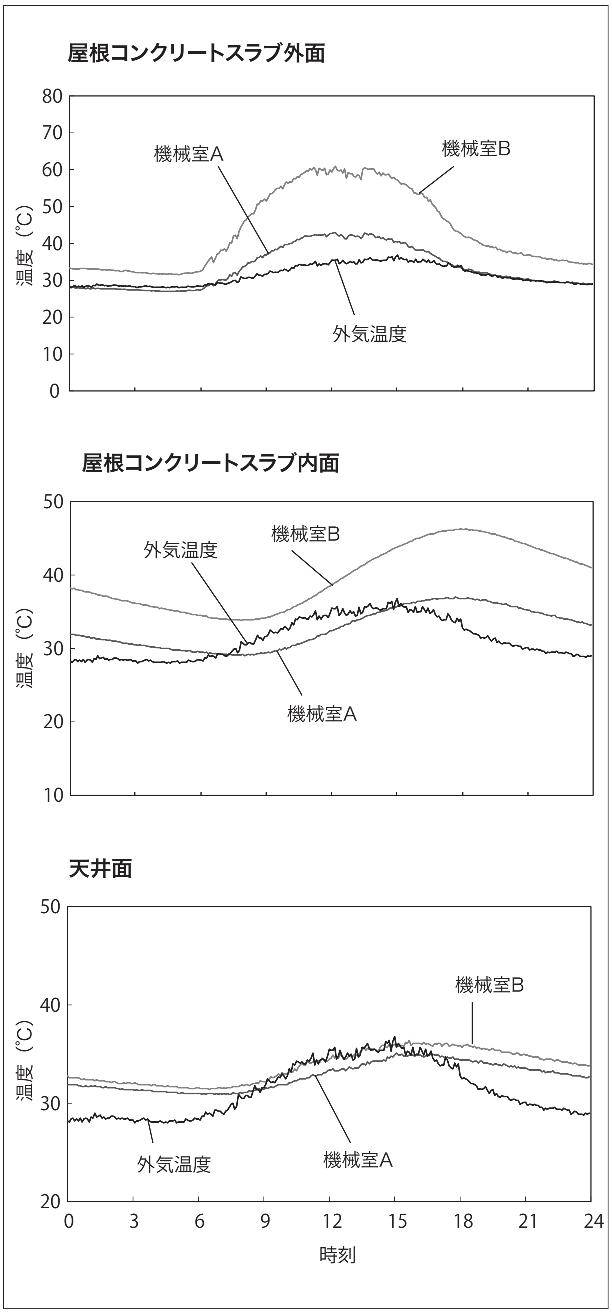

図7　塗装2年後（夏季）の代表日における測定結果

表2　最高気温計測日における各測定部位の最大温度差

	塗装直後（2006年8月6日）				塗装1年後（2007年8月17日）				塗装2年後（2008年8月15日）			
	時刻	機械室温度（℃）		温度差	時刻	機械室温度（℃）		温度差	時刻	機械室温度（℃）		温度差
		A	B	B-A		A	B	B-A		A	B	B-A
屋根コンクリートスラブ外面	12:35	33.0	57.0	24.0	13:25	44.2	60.2	16.0	12:35	41.3	60.2	18.9
屋根コンクリートスラブ内面	18:00	30.9	45.4	14.5	18:30	37.6	45.8	8.2	17:55	36.8	46.3	9.5
天井面	11:50	30.5	34.0	3.5	9:50	33.5	35.4	1.9	11:00	32.6	34.3	1.7

3.2.3　日最高温度・日最低温度平均値

2006年、2007年および2008年の夏季測定結果で、各測定部位における1日の最高温度の平均値（以下、日最高温度平均値と略記）、1日の最低温度の平均値（以下、日最低温度平均値と略記）、1日の最高日射量の平均値（以下、日最高日射量平均値と略記）を表3に示す。屋根コンクリートスラブ外面の日最高温度平均値における温度低下幅は、2006年には16.9℃であったのに対して、2007年には15.2℃、2008年には15.5℃となり、日最低温度平均値における温度低下幅は、2006年には4.0℃であったのに対して、2007年には4.4℃、2008年には2.9℃となった。

屋根コンクリートスラブ内面の日最高温度平均値における温度低下幅は、2006年には10.2℃であったのに対して、2007年には8.2℃、2008年には7.2℃となり、日最低温度平均値における温度低下幅は、2006年には4.5℃であったのに対して、2007年には4.7℃、2008年には3.8℃となった。

天井面の日最高温度平均値における温度低下幅は、2006年には1.8℃であったのに対して、2007年には1.1℃、2008年には1.0℃となり、日最低温度平均値における温度低下幅は、2006年には0.6℃であったのに対して、2007年には0.7℃、2008年には0.4℃となった。

これらのことから、日最高温度平均値での温度低下幅は、塗装直後および2年後に比べ、1年後の2007年に減少することが確認された。日最低温度平均値は、いずれの測定部位においても塗装直後および2年後に比べ、1年後の2007年における温度低下幅が最も大きいことが確認された。日最高温度平均値については、塗装1年後が小さくなるものの、日最低温度平均値については、塗装1年後が大きい結果となった。ヒートアイランド現象の緩和には、建築物から放出される熱を小さくすることが重要であり、とくに熱帯夜等を引き起こす夜間における熱放出を小さくすることでの効果が大きいといわれている。この様に、塗装後2年目まで、高日射反射率塗料の塗布がヒートアイランド現象の緩和に貢献することを確認した。

高日射反射率塗料の温度低下に関する効果は、塗

表3　測定期間中（夏季）の日最高温度、日最低温度、日最大日射量平均値

	機械室		A		B		温度差（B-A）	
	温度平均値（℃）		最高	最低	最高	最低	最高	最低
塗装直後（2006年8月6日）	屋根コンクリートスラブ外面		32.0	23.2	48.9	27.2	16.9	4.0
	屋根コンクリートスラブ内面		29.6	25.4	39.8	29.9	10.2	4.5
	天井面		30.9	28.3	32.7	28.9	1.8	0.6
	外気温度	最高	32.8					
		最低	25.0					
	最大日射量平均値		848 W/㎡					
塗装1年後（2007年8月）	屋根コンクリートスラブ外面		41.8	26.0	57.0	30.4	15.2	4.4
	屋根コンクリートスラブ内面		35.6	28.5	43.8	33.2	8.2	4.7
	天井面		33.9	30.3	35.0	31.0	1.1	0.7
	外気温度	最高	35.4					
		最低	27.0					
	最大日射量平均値		775 W/㎡					
塗装2年後（2008年）	屋根コンクリートスラブ外面		39.1	25.1	54.6	28.0	15.5	2.9
	屋根コンクリートスラブ内面		33.8	27.5	41.0	31.3	7.2	3.8
	天井面		32.8	29.8	33.8	30.2	1.0	0.4
	外気温度	最高	34.2					
		最低	25.7					
	最大日射量平均値		732 W/㎡					

膜表面の色調変化に影響される部分も多いことを考慮し、高日射反射率塗料の塗装を行った機械室Ａと機械室Ｂにおいて、塗装直後、１年後および２年後に測定した色彩測定結果を表４に示す。Ｌ値が大きくなると白色、小さくなると黒色に、ａ値は大きくなると赤色、小さくなると緑色に、ｂ値は大きくなると黄色、小さくなると青色になることを示す。塗装初期と比べて塗装１年後、２年後の色調変化は、機械室Ｂの変化が少ないのに対して機械室ＡではＬ値に大きな変化が確認された。Ｌ値の減少は黒色への変化を表すことから、塗膜に汚れが付着したと考えられる。しかし、2007年と2008年の結果を比較するとＬ値は逆に増加しており、雨水による洗浄の効果によって汚れの付着度合いが変化していると考えられる。また、ａ値、ｂ値に関しては、大きな変化は確認されなかった。このように、高日射反射率塗料の塗布により、塗装２年後迄、各測定部位における日最高温度平均値および日最低温度平均値を確実に低下できることが示される一方、時間経過に伴う効果の変化、色調の変化については、明確な方向性を確認できなかった。高日射反射率塗料の効果は、塗膜に排気ガスや土等の汚染物質が付着したことによる日射反射率低下の影響のほか、各年の気象条件も影響する等複雑であることから、高日射反射率塗料の効果の持続性を見極めるためには、さらに測定を行っていく必要がある。

表4　色彩測定結果

	測定時期	L 値	a 値	b 値
機械室 A	初期値（2006年）	97.93	-1.32	1.71
	塗装1年後（2007年）	84.82	0.25	3.18
	塗装2年後（2008年）	89.62	-0.01	2.53
機械室 B	初期値（2006年）	61.30	0.20	3.13
	塗装1年後（2007年）	60.62	0.36	3.22
	塗装2年後（2008年）	61.72	0.21	2.83

3.2.4　全天日射量および外気温度に対する各測定部位の温度

2006年夏季の測定結果において、日射量の多い時間帯である6時から18時までの測定温度と同時刻の全天日射量の関係を、屋根コンクリートスラブ外面温度については図8に示す。また、外気温度と屋根コンクリートスラブ外面温度については図9に示す。なお、測定数が多いため1時間毎の測定値とした。機械室Aは機械室Bと比較して、同一の全天日射量および外気温度に対する屋根コンクリートスラブ外面温度が低いことを確認した。これは、太陽光を吸収して屋根コンクリートスラブ外面の温度が上昇するのであるから、機械室Aの方が太陽光を吸収していないことによるものと理解できる。なお、屋根コンクリートスラブ外面温度は、全天日射量に対する回帰直線の寄与率よりも、外気温度との回帰直線の寄与率が大きかった。コンクリートの熱伝導率が小さく、日射を受けても直ちには温度上昇しないことによるものと考えられる。このことは、全天日射量および外気温度に対する屋根コンクリートスラブ内面および天井面温度の関係からも確認された。

さらに、7時から18時までの1時間おきの測定結果で、対象となる測定温度の1時間前から積算した日射量の平均値に対する屋根コンクリートスラブ外面温度の関係を図10に示す。この結果より、図8と比べると回帰直線式の寄与率が高くなり、積算した日射量に対する測定部位の温度として示す方が良いことが確認された。

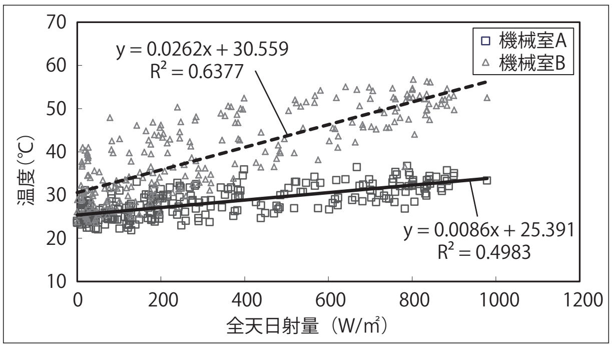

図8　全天日射量に対する屋根コンクリートスラブ外面温度

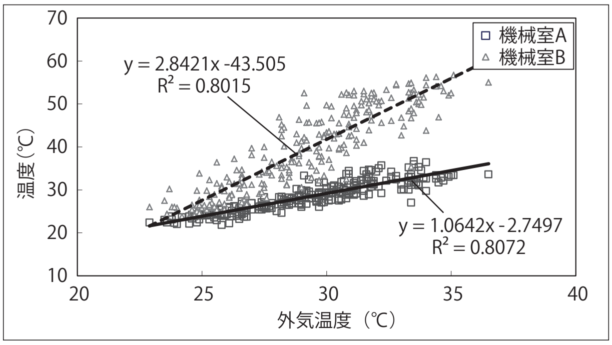

図9　外気温度に対する屋根コンクリートスラブ外面温度

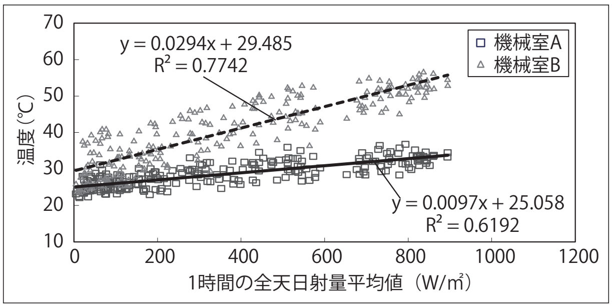

図10　1時間の積算全天日射量の平均値に対する屋根コンクリートスラブ外面温度

3.3　冬季における温度測定結果

3.3.1　測定期間中の温度変化の概要

塗装してから4ヶ月後の冬季(2007年1月)に温度測定を行った。屋根コンクリートスラブ外面・内面温度、天井面温度および外気温度の測定結果を図11に示す。屋根コンクリートスラブ外面・内面では、高日射反射率塗料の塗装を行っていない機械室Bに比べて、塗装を行った機械室Aの方がいずれの測定部位においても温度が低いことを確認した。天井面では、機械室Aと機械室Bで夜間に温度差はほとんどなく、日最高温度平均値では機械室Aで15.4℃、機械室Bで17.2℃となり1.8℃の温度低下が確認された。一方、塗装直後の夏季における日最高温度平均値では機械室Aで30.9℃、機械室Bで32.7℃となり1.8℃の温度低下であったが、夏季の温度差の方が長いこと、夏季と冬季において、室内温度1℃当たりに必要となるエネルギー量は夏季の方が高く、1℃の温度変化に伴って変化するエネルギー消費量は、夏季冷房時の方が冬季暖房時より大きいことが報告されている[1]。このことを考慮すれば、高日射反射率塗料の塗装は年間全体での空調負荷を低減できる。

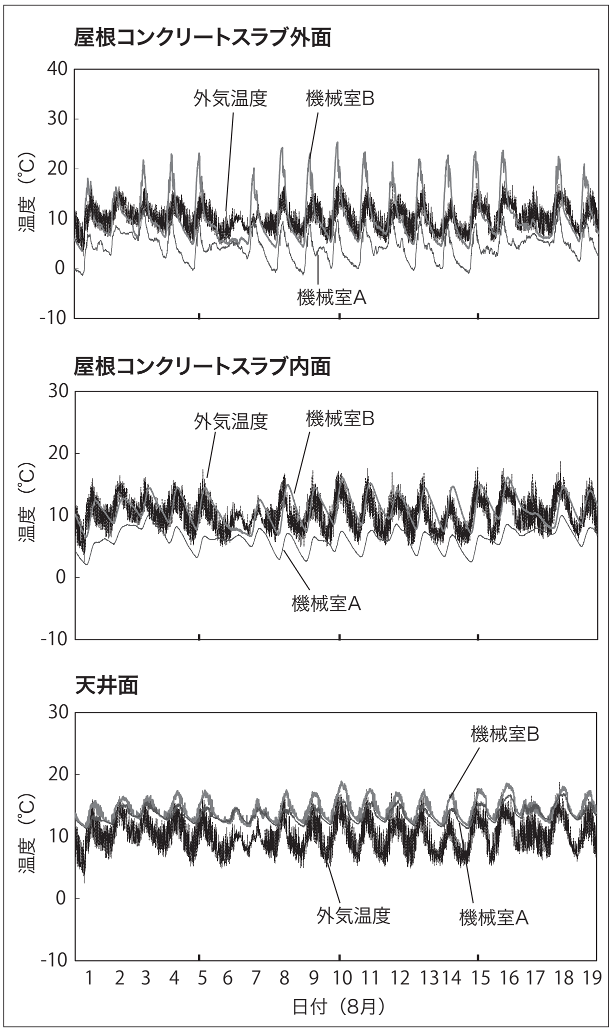

図11　塗装4ヶ月後(冬季)の測定結果

3.3.2　1日内の温度変化と最大温度差

測定期間中で最も外気温度の低かった2007年1月1日の屋根コンクリートスラブ外面・内面温度、天井面

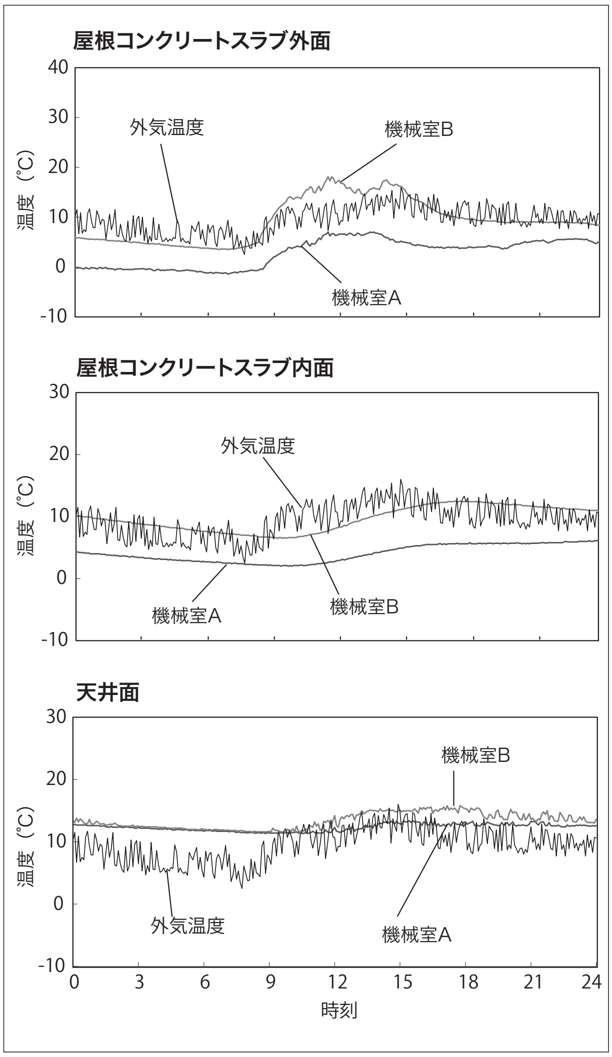

図12　塗装4ヶ月後(冬季)の代表日における測定結果

温度および外気温度の測定結果を図12に示す。屋根コンクリートスラブ外面では、機械室Aと機械室Bの温度差が最も大きかった10時45分の時点で機械室Aは4.2℃、機械室Bは16.1℃であったことから、高日射反射率塗料の塗装によって11.9℃の温度低下が確認された。屋根コンクリートスラブ内面では、機械室Aと機械室Bの温度差が最も大きかった17時25分の時点で機械室Aは5.6℃、機械室Bは12.5℃であったことから、高日射反射率塗料の塗装によって6.9℃の温度低下が確認された。天井面では、機械室Aと機械室Bの温度差が最も大きかった17時10分の時点で機械室Aは12.8℃、機械室Bは15.8℃であったことから、高日射反射率塗料の塗装によって3.0℃の温度低下が確認された。なお、天井面では0時から9時頃の間では機械室Aと機械室Bの間に温度差は確認されなかったことから、高日射反射率塗料の塗装による冬季における天井面の温度低下は、1日のなかで一定の時間に限られることが確認された。

3.3.3　日最高温度・日最低温度平均値

各測定部位および外気温度の日最高温度の平均値、日最低温度の平均値、日最高日射量の平均値を表5に示す。屋根コンクリートスラブ外面・内面では、機械室Bと比べて機械室Aにおいて、日最高温度、日最低温度共に温度低下が確認された。天井面温度では、日最高温度で温度低下が確認されたが、日最低温度では同程度となった。

表5　測定期間中(冬季)の日最高温度、日最低温度、日最大日射量平均値

	機械室		A		B		温度差(B-A)	
	温度平均値(℃)		最高	最低	最高	最低	最高	最低
塗装4ヶ月後(2007年1月)	屋根コンクリートスラブ外面		9.6	1.2	20.8	5.3	11.2	4.1
	屋根コンクリートスラブ内面		7.8	4.6	14.3	8.1	6.5	3.5
	天井面		15.4	12.1	17.2	12.2	1.8	0.1
	外気温度	最高	16.4					
		最低	5.5					
	最大日射量平均値		473 W/㎡					

4.　まとめ

東京都内ビル屋上に設置してある、ほぼ同一形状・寸法の鉄筋コンクリート造機械室２棟について、屋根面に高日射反射率塗料の塗装した棟と塗装していない棟の比較で、塗装２年後までの夏季における温度測定と温度低下の持続性、塗装４ヶ月後の冬季における温度測定の結果から得られたことを要約すると以下の通りである。

①夏季および冬季共に、高日射反射率塗料の塗装による屋根コンクリートスラブ外面・内面および天井面で温度低下が確認された。

②温度低下幅は部位により変化し、屋根コンクリートスラブ外面・内面温度では大きく、天井面ではコンクリートスラブの温度変化に比べると小さい。天井面の場合、冬季における温度低下は日中および日没後の数時間に限られる。

③塗装後２年を経ても高日射反射率塗料の塗布による温度低下が確認された。時間経過に伴う温度低下の変化や塗膜の色彩測定値と温度低下との関係については明確な傾向は認められなかった。

④暖房に要するエネルギーよりも冷房に要するエネルギーの方が大きいことを考慮すると、高日射反射率塗料の塗装はエネルギー消費量の削減に繋がるものと考えられる。

参考文献

1）堀越哲美：気候学・気象学研究、16、p92（1991）