日本ヒートアイランド学会論文集 Vol.10 (2015)
Journal of Heat Island Institute International Vol.10 (2015)

高反射率塗料による省エネルギー効果の実測に基づく評価方法に関する研究

Evaluation method of cooling energy savings by the high reflectance paint based on field observation

竹林 英樹*[1]　山田 智博*[1]　石井 悦子-*[1]　三木 勝夫*[2]
Hideki Takebayashi　Chihiro Yamada　Estuko Ishii　Katsuo Miki

*[1] 神戸大学大学院工学研究科 Graduate School of Engineering, Kobe University
*[2] 三木コーティング・デザイン事務所 Miki Coating Design Office

Corresponding author: Hideki TAKEBAYASHI, thideki@koube-u.ac.jp

ABSTRACT

Cooling energy savings in a building with the roof coated by high reflectance paint are examined based on field observation. It is difficult to recognize the cooling energy savings by using the data observed every hour. It is assumed that factors affecting to cooling energy load are the internal heat generation, the set temperature, weather conditions, etc. From the analysis on the relationship between in-outdoor air temperature difference and electric power consumption for air conditioner, which are averaged and integrated into every day, the reduction of electric power consumption by high reflectance paint coating is estimated. Analysis methods of in-outdoor air temperature difference and internal heat generation are discussed for more accurate estimation of cooling energy savings.

キーワード：高反射率塗料，省エネルギー効果，実測
Key Words : High reflectance paint, Cooling energy savings, Field observation

１．はじめに

ヒートアイランド対策技術の一つとして高反射率塗料が注目され，反射率の測定方法，製品としての評価方法，その基準が JIS で規定されている(1)(2). 高反射率塗料によるヒートアイランド対策効果に関しては多くの研究事例があるが(3)，高反射率塗料を塗布したことによる省エネルギー効果については，事務所などの適切に断熱処理が施された建物ではあまり大きくないと指摘されており(4)，実際に施工された物件におけるエネルギー消費量などのデータを用いた検証は，測定の困難さもあり事例が少ない(5)．本研究では，高反射率塗料が実際に施工された建物を対象として，省エネルギー効果の検証に注目して検討を行った．

建物の屋根や壁にヒートアイランド対策技術を導入した場合の省エネルギー効果に関しては，壁面緑化，屋上緑化に関する研究事例がある(6)(7)．これらの研究では，実験用のプレハブを 2 棟準備して，同じ気象条件のもとで，内部発熱の無い状況で, 緑化の有無の違いを比較実験している．実際に高反射率塗料が導入された建物において，冷房エネルギー削減効果を実績値に基づき評価する場合には，上記の様な実験を実施することは困難である．

Akbari らは実際の建物における冷房エネルギー削減効果を，カリフォルニア州の商店，学校，冷凍倉庫を対象として検討し，夏期を通した測定結果より，それぞれ約 70Wh/m^2/day，42-48Wh/m^2/day，57-81Wh/m^2/day と算出した(8)．Akbari らが提案した算出方法は同じ建物の塗装前後の測定結果に基づく方法であり，算出された削減効果は内部発熱などの不確実な要因の影響も受けている．従って，この方法の適用にあたっては算出結果に含まれる誤差要因について考慮する必要がある．

節電対策，省エネルギー対策として，断熱性能の良くない工場，倉庫，体育館などへの高反射率塗料の導入を促進する中で，建物の所有者や管理者などから実証結果を要求される場合があり，実際に使用されている建物における冷房電力消費量の削減効果の算出方法を整備することは重要な課題である．本研究の目的は，Akbari らが提案した算出方法の実測結果への適用に際し，不確実な要因の影響を考察し，算出方法の妥当性を検討することである．屋根面に高反射率塗料を塗装した建物において塗装前後で測定を行い，測定結果を Akbari らが提案した算出方法に適用し，算出結果に含まれる誤差要因について考察した．考察には熱負荷計算も利用した．

２．測定の概要と結果

2.1　大学内の研究建物における測定の概要

神戸大学内の小規模な（床面積約 60m^2）2 階建て（1 階はピロティ）の研究施設を対象とした（図 1）．外壁に対する窓面積の割合は約 15%と小さく，建物表面積に対する屋根面積の割合は 25～30%と大きいため，高反射率塗料の塗布効果を空調用電力消費量のデータを用いて検証できる可能性があると想定した．

測定は図 1 の室 1,2 を対象として実施した．両室ともに連続空調で使用されていた．室の使用状況は，室 1,2 ともに週に平均 3 回程度（平日のみ）約 2～3 時間使用される．使用人数は平均 1 人で，室 1,2 の照明は 288W，576W である．室 1 では，80W の装置が 24 時間稼働しており，1500W の装置が月に 2～3 回 5 時間程度稼働する．6000W の装置も同様に稼働するが外部に排熱されている．室 2 では，158W の装置が 24 時間稼働しており, 2800W の装置が月に 2～3 回夜間に 10 時間程度稼働し，1320W の装置が月に 1～2 回日中に 5 時間程度稼働する．なお，使用状況は塗装前後で概ね変化していない．空調機の設定温度は，室 1 では塗装前から塗装後にかけて 26℃であったが，塗装後の 8 月 8 日 16 時に 25℃に変更された．1 年後，2 年後は 24℃であった．室 2 では塗装前の 7 月 22 日 9 時に 27℃から 26℃に変更された．1 年後，2 年後は 25℃であった．

屋根は主にコンクリートスラブ（100mm），天井裏空間（700mm），天井（天井高さ 2,730mm）で構成され，断熱材は施工されていない．外壁は軽量気泡コンクリートパネル（125mm），内壁は軽量気泡コンクリートパネル（100mm），床は塩化ビニル（2.5mm）＋軽量気泡コンクリートパネル（110mm），窓は網入り磨き板ガラス（6.8mm）である．スラブ上下面温度，天井上下面温度，室温（高さ 1,200mm），空調用電力消費量を測定した．温度測定点の断面分布を図 2 に示す．日射の影響を受ける屋上表面温度は赤外線熱電対により，その他はサーミスタ温度計により測定した．室 1,2 の空調機の定格冷房能力は 7.1kW，14.5kW である．電力測定は，クランプ電力計（HIOKI3168-98）により各分電盤において実施した．測定は 1 分間隔で実施し，解析には 10 分平均値（電力は積算値）を用いた．

高反射率塗料の塗装は 2011 年 8 月 2 日に行われ, 測定は 2011 年 7 月 12 日～9 月 26 日に行った．1 年後，2 年後の同期間の電力消費量の測定結果も併せて解析する（表 1）．屋上面において，村田らが提案する標準板を用いる方法[9]により測定した日射反射率は, 塗装直前 16.9%, 直後 86.9%, 1 年後 76.1%，2 年後 73.7%であった．屋上面 3 箇所で測定した平均値である．

高反射率塗料の塗装前後晴天日の室 1 の天井内，室内の温度を図 3 に示す. スラブ下側温度が最大 40℃から 27℃程度まで低下している. 最高温度が出現する時間は 18 時頃であり，空調用電力消費量への影響も夕方から夜間にかけて生じると予想される．なお，屋上表面温度では最大 30℃程度の温度低下が確認された．塗装前後の空調用電力消費量を図 4 に示す．日射量が同程度の特定日の比較のみでは，電力消費量の削減効果を特定することは困難である．

2.2　工場内の事務所建物における測定の概要

大阪府摂津市の工場内の事務所建物を対象とした（図 5）．北側を工場と接する平屋の建物である（写真前面の平屋部分が対象）. 大学内の研究建物と比較すると外壁の断熱性は低いが，天井裏に断熱材が施工されている．実際に高反射率塗料の塗布が想定される，典型的な工場建物における冷房エネルギー削減効果を，空調用電力消費量のデータを用いて検証できる可能性があると想定した．

測定は図 5 の会議室，恒温室を対象として実施した．両室ともに連続空調で使用されていた．室の使用状況は，会議室は平日のみ 9～12 時と 13～18 時に使用され, 使用人数は 3～10 人とばらつきがある．照明 400W，コンピュータ 140W，プロジェクタ 500W が使用される．恒温室は平日のみ 9～12 時と 13～19 時に使用され, 使用人数は平均 1 人である．照明 320W，コンピュータ 140W 又は 90W が使用される．2100W の装置が週に 1～2 回夜間に 14 時間程度稼働する．なお，使用状況は塗装前後で概ね変化していない．空調機の設定温度は，期間を通して会議室 26℃，恒温室 23℃であった．

屋根は主に鋼材と木毛セメント板（25mm），天井裏空間（200～300mm），押出ポリスチレンフォーム（50mm），石膏ボード（天井高さ 2,700mm）で構成される．外壁は鋼材（0.4mm）＋コンクリート（150mm）＋中空層（30mm）＋石膏ボード（12.5mm），内壁は石膏ボード（12.5mm）＋コンクリート（150mm）＋石膏ボード（12.5mm），床はタイル（3mm）＋コンクリート（150mm），窓は透明ガラス（6mm）である．屋根上下面温度，天井上下面温度，室温（高さ 1,200mm），空調用電力消費量を測定した．温度測定点の断面分布を図 6 に示す．日射の影響を受ける屋上表面温度は赤外線熱電対により，その他は熱電対により測定した．会議室，恒温室の空調機の定格冷房能力は 8.0kW，3.6kW である．電力測定は，クランプ電力計（HIOKI3168-98）により各分電盤において実施した．測定は 1 分間隔で実施し，解析には 10 分平均値（電力は積算値）を用いた．

高反射率塗料の塗装は 2012 年 8 月 8,9 日に行われ，測定は 2012 年 7 月 18 日～9 月 27 日に行った．一年後の同期間の電力消費量の測定結果も併せて解析する（表 1）．屋上面において，村田らが提案する標準板を用いる方法[9]により測定した日射反射率は, 塗装直前 19.9%, 直後 83.7%, 82.5%, 一年後 71.6%，76.8%であった．それぞれの部屋の屋上面 3 箇所で測定した平均値である．

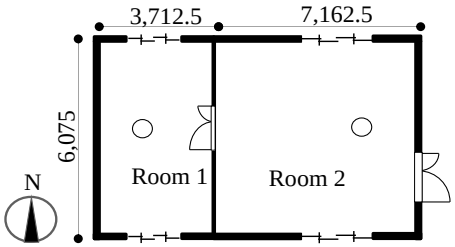

図 1　大学建物の外観と平面図（2 階）（○:図 2 の測定位置）

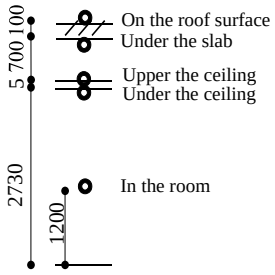

図 2　大学内研究建物の温度測定点の断面分布

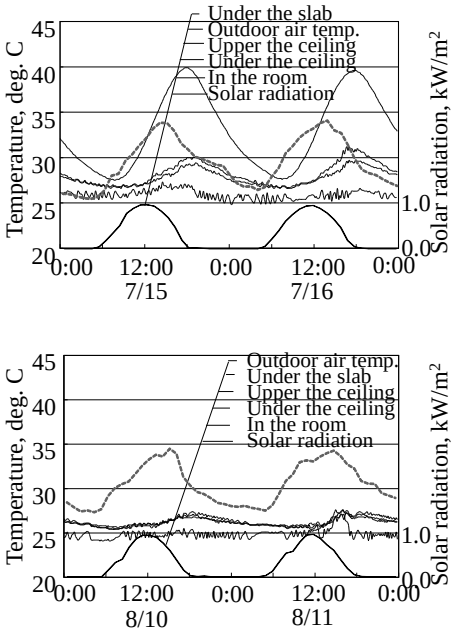

図 3　大学建物室 1 の屋根スラブ下，天井上下，室内，外気の温度と日射量の測定結果（上：塗装前，下：塗装後）

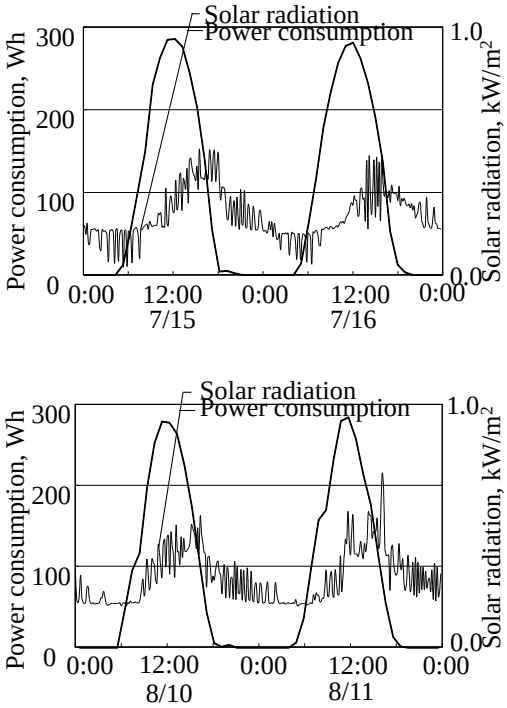

図 4　大学建物室 1 の空調用電力消費量と水平面全天日射量の測定結果（上：塗装前，下：塗装後）

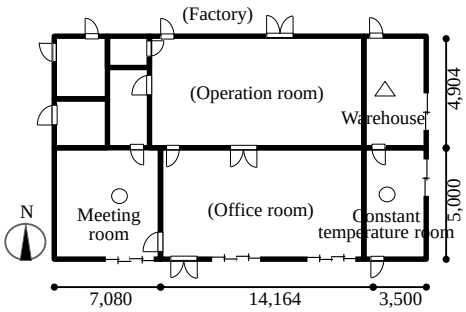

図 5　工場内事務所の外観と平面図（○:図 6 の測定位置）

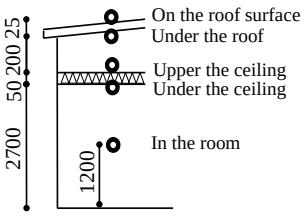

図 6　工場内事務所建物の温度測定点の断面分布

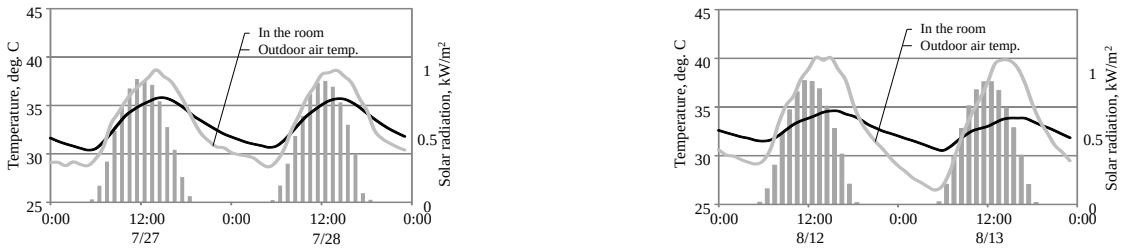

図 7　工場内事務所の倉庫（図 5Δ）の自然室温，外気温，水平面全天日射量の測定結果（左：塗装前，右：塗装後）

表 1　測定期間と塗装前後の日射反射率

	Before painting	Painting and curing	After painting	One year after painting	Two year after painting
Observation period of Research Building	Jul.12 to Jul.31, 2011	Aug.1 to Aug.4, 2011	Aug.5 to Sep.26, 2011	Jul.14 to Aug.7, 2012	Jul.12 to Sep.30, 2013
Solar reflectance on Rooms 1 and 2	16.9 %	-	86.9 %	76.1 %	73.7 %
Observation period of Factory Building	Jul.18 to Aug.7, 2012	Aug.8 to Aug.15, 2012	Aug.16 to Sep.27, 2012	Jul.1 to Sep.31, 2013	-
Solar reflectance on Meeting room	19.9 %	-	83.7 %	71.6 %	-
Solar reflectance on Cons. temp. room	19.9 %	-	82.5 %	76.8 %	-

高反射率塗料の塗装前後晴天日の倉庫の自然室温，外気温，日射量を図 7 に示す．空調機は設置されていない．塗装後の外気温が塗装前より若干高いにも関わらず，自然室温は 2～3℃程度低くなった．会議室，恒温室の屋根断面温度，空調用電力消費量は，研究建物における測定結果とほぼ同様の傾向になった．

３．冷房エネルギー削減効果の評価方法

冷房エネルギー削減効果は塗装前後の空調用電力消費量の差により評価する．大学建物の室 1 における 1 時間毎の外気温と室温の差と空調用電力消費量との関係を図 8 に示す．下図は日射のみを考慮した相当外気温と室温の差を横軸に取ったものである．塗装前を黒色，塗装後を白色で示している．日射を考慮すると塗装前後で相当外気温は大きく変化するが，電力消費量はあまり変化しない．横軸の気温差は 1 時間毎の平均値，縦軸の電力消費量は 1 時間毎の積算値である．スラブ下側温度は夕方頃に最大となっており，時々刻々（1 時間毎）のデータを用いて気温差と電力消費量の関係を考察することは困難であると判断される．

そこで，Akbari らの方法に倣い，日平均の外気温と室温の差と日積算の空調用電力消費量との関係を分析する．高反射率塗料塗布による空調用電力消費量の削減効果を抽出しようとすると，以下の 3 点が誤差要因として指摘される．

・塗装前後の内部発熱の違い
・塗装前後の設定温度の違い
・塗装前後の気象条件の違い

本研究では，実使用下において冷房エネルギー削減効果を評価するため，室の使用者に対して使用方法に関する指示や制約は行っていない．従って，測定結果は上記 3 要因の影響を含んだものとなっている．

内部発熱，設定温度，気象条件を考慮した空調用電力消費量の推定式を以下に示す．

$$E = A \times I + B \times \Delta T + C \qquad (1)$$

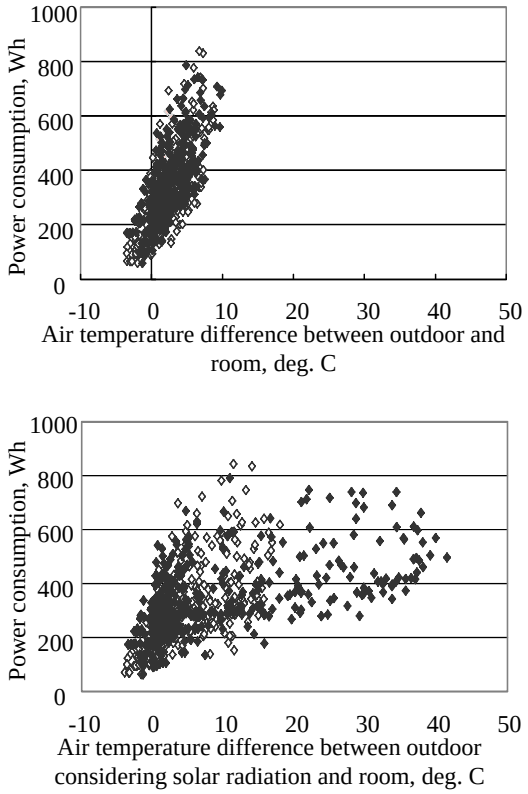

図 8　大学建物の室 1 における 1 時間毎の内外気温差と空調用電力消費量の関係（塗装前：黒色，塗装後：白色）（上：外気温と室温の差，下：相当外気温と室温の差）

ここで，E は日積算空調用電力消費量（Wh/day），I は日積算日射量(Wh/day)，ΔT は日平均の外気温と室温の差(℃)であり，A は日射吸収率と関係する係数，B は熱貫流率及び換気回数と関係する係数，C は内部発熱と関係する係数であり，これらの係数が大きくなると電力消費量も大きくなる．ΔT については，エンタルピー差を用いるのが適当であるが，一般に普及している空調機では厳密な湿度制御が行われていないこともあり，より簡易な方法として温度差

を用いている．冷房負荷と空調用電力消費量の間には，空調機の効率が介在するが，一日毎のデータを用いた分析であるため，その変動は考慮していない．本研究では，*E*, *I*, *ΔT* を測定している．*B* と *C* は塗装前後でほぼ同じ値になると想定される．設定温度の影響は *ΔT* に，気象条件の影響は *I* と *ΔT* に反映される．次章では，式(1)に沿って測定結果の考察を行う．

４．冷房エネルギー削減効果の考察

大学建物の室 1 における日平均の外気温と室温の差 *ΔT* と日積算の空調用電力消費量 *E* の関係を図 9 の上図に示す．両者に相関関係が確認され，塗装前後の回帰式の傾き（式(1)の係数 *B*）がほぼ等しいため，外気温の影響が評価されていると考えられる．なお，測定期間中に設定温度が一度変更されており，その影響も反映した結果となっている．下図に上図の切片と日積算日射量 *I* との関係を示す．塗装後は日積算日射量 *I* が増加しても電力消費量 *E* は変化しない（式(1)の係数 *A* がほぼ 0）が，塗装前は日積算日射量 *I* とともに増加する傾向が確認され，日積算日射量 *I* の大きい条件では，約 1.6kWh/day（72Wh/m^2/day）程度の差になっている．下図において塗装前後で回帰式の切片（式(1)の係数 *C*）が同程度とならない理由は，測定時の内部発熱の条件が一致していなかったことなどが考えられる．

同様に，各室の塗装前後の日平均の外気温と室温の差 *ΔT* と日積算の空調用電力消費量 *E* の関係式を表 2 に示す．各室の電力消費量を比較するため，表 2 の電力消費量 *E* は各室の床面積で除した値を用いている．室 1,2 と会議室では塗装前と塗装後の回帰式の傾き（係数 *B*）が比較的一致しており，外気温と室温の差 *ΔT* の電力消費量 *E* に対する影響は同程度であると考察される．

恒温室においても回帰式の決定係数は他室と同程度であるが，回帰式の傾きの差が大きい．恒温室では設定温度が23℃と低く設定されており，外気温の高い日中に設定温度が満足されない時間が確認され，空調機の能力不足であると考察された．外気温と室温の差 *ΔT* が大きいにも関わらず，電力消費量 *E* は頭打ちとなり，特に塗装前において回帰式の傾き（係数 *B*）が小さくなった．塗装後には設定温度が満足される日が増加した．

５．誤差要因の分析

日平均の外気温と室温の差 *ΔT* と日積算の空調用電力消費量 *E* の関係の誤差要因を分析するため，熱負荷計算プログラム SMASH を用いて冷房負荷 *Q* を算出した．測定対象建物の外皮物性値，気象条件，内部発熱等のスケジュールを与えて計算した．内部発熱は室の使用者へのアンケート結果に基づき，平均的な使用状況を設定した．式(1)の *E* を計算結果の *Q* に置き換えて，外気温と室温の差 *ΔT* との関係式を表 2 に示す．

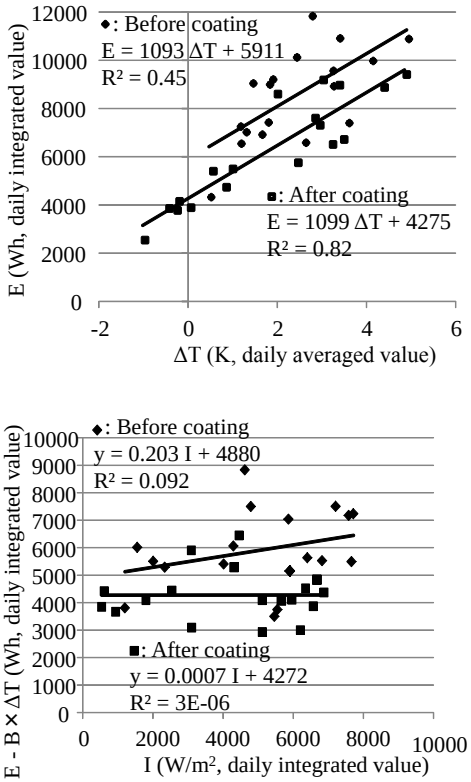

図 9　大学建物の室 1 における日平均の内外気温差（上），日積算日射量（下）と空調用電力消費量の関係

表 2　各室の日平均の外気温と室温の差 *ΔT* と日積算空調用電力消費量 *E* 及び空調負荷 *Q* の関係式

Room	Period	Regression formula for *E*	Regression formula for *Q*
Room 1	Before coating	$E=49\Delta T+263$ ($R^2=0.45$)	$Q=117\Delta T+558$ ($R^2=0.95$)
	After coating	$E=50\Delta T+191$ ($R^2=0.82$)	$Q=116\Delta T+399$ ($R^2=0.97$)
	One year after	$E=48\Delta T+172$ ($R^2=0.82$)	$Q=108\Delta T+472$ ($R^2=0.95$)
	Two year after	$E=49\Delta T+190$ ($R^2=0.95$)	$Q=117\Delta T+398$ ($R^2=0.97$)
Room 2	Before coating	$E=27\Delta T+151$ ($R^2=0.54$)	$Q=101\Delta T+446$ ($R^2=0.97$)
	After coating	$E=28\Delta T+117$ ($R^2=0.60$)	$Q=93\Delta T+301$ ($R^2=0.98$)
	One year after	$E=27\Delta T+143$ ($R^2=0.77$)	$Q=94\Delta T+334$ ($R^2=0.96$)
	Two year after	$E=34\Delta T+89$ ($R^2=0.86$)	$Q=95\Delta T+308$ ($R^2=0.97$)
Meeting room	Before coating	$E=69\Delta T+195$ ($R^2=0.69$)	$Q=145\Delta T+605$ ($R^2=0.91$)
	After coating	$E=56\Delta T+193$ ($R^2=0.71$)	$Q=125\Delta T+528$ ($R^2=0.91$)
	One year after	$E=55\Delta T+203$ ($R^2=0.81$)	$Q=126\Delta T+542$ ($R^2=0.94$)
Const. temp. room	Before coating	$E=81\Delta T+278$ ($R^2=0.43$)	$Q=199\Delta T+858$ ($R^2=0.94$)
	After coating	$E=110\Delta T+96$ ($R^2=0.74$)	$Q=205\Delta T+746$ ($R^2=0.92$)
	One year after	$E=126\Delta T-11$ ($R^2=0.85$)	$Q=186\Delta T+798$ ($R^2=0.97$)

内部発熱に平均的なスケジュールが設定され，主な変動要因が気象条件に限定されるため，回帰式の決定係数は実測値の電力消費量 E の場合より大きい．塗装前の回帰式の傾き（係数 B）が塗装後より大きい傾向が確認される．工場内事務所の会議室における日平均の外気温と室温の差 ΔT と日積算の空調用電力消費量 E, 空調負荷 Q の関係を図 10 に示す．気温と室温の差 ΔT が大きい場合に電力消費量 E，空調負荷 Q の塗装前後の差が大きい．気温と室温の差 ΔT が小さい場合には，相対的に日射量も小さく，塗装前後の電力消費量 E，空調負荷 Q に差が生じない．従って，回帰式の傾き（係数 B）は，気温と室温の差 ΔT が小さいデータを多く含むほど，小さくなる．省エネルギー効果の観点からは, ΔT の大きいデータを用いて分析するのが適当であると考えられる．

工場内事務所の会議室では，平日，休日の内部発熱を，ヒアリング調査等に基づき，それぞれ 2,322kJ/m^2/day，0 kJ/m^2/day と与えた．図 11，12 に工場内事務所の会議室における平日休日別の日平均の外気温と室温の差 ΔT と日積算の空調用電力消費量 E，空調負荷 Q の関係を示す．平日の冷房負荷は休日の 1.24 倍となり，休日に対する平日の空調電力消費量の割合 1.21 倍とほぼ整合した．この関係は塗装前後でほぼ同じであった．従って，ヒアリング等により内部発熱の実態を把握し，その状況を踏まえて電力消費量を考察することで，より高い精度で冷房エネルギー削減効果が抽出されると考えられる．

６．まとめ

本研究では，Akbari らが提案した実測データに基づく冷房エネルギー削減効果の算出方法を実際の建物に適用する際の誤差要因について考察した．

空調機により設定温度が満足されない状態では，冷房負荷に見合った熱量が室に供給されず，冷房用電力消費量 E が相対的に小さく見積もられる．この様な条件のデータは削減効果の算出に適さない．

外気温と室温の差 ΔT が小さい場合には，相対的に日射量も小さく，塗装前後の電力消費量 E に差が生じない．省エネルギー効果の観点からは, ΔT の大きいデータを用いて分析するのが適当である．解析対象に ΔT の大きいデータが十分に含まれると妥当な算出結果が得られるといえる．

ヒアリング等により内部発熱の実態を把握し，その状況を踏まえて電力消費量を考察することで，より高い精度で冷房エネルギー削減効果が抽出される．内部発熱による影響の考察には，熱負荷計算を用いることが想定される．

以上より，本研究の方法により冷房エネルギー削減効果を実測データに基づいて算出する際には，塗装前後に日射量が多く，外気温の高い期間が含まれるように塗装，測定計画を立てる必要がある．実使用下での測定であっても，内部発熱の状況が把握できれば，平日と休日を区分して分析するなどの対策が可能である．

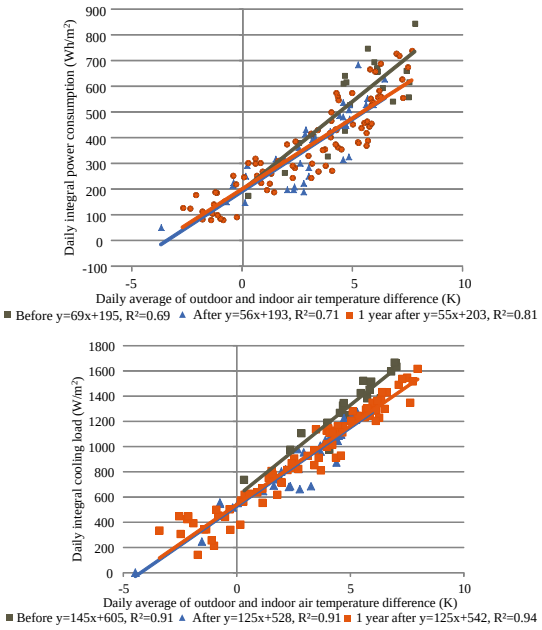

図 10　工場内事務所会議室の日平均の内外気温差 ΔT と日積算の空調用電力消費量 E（上），空調負荷 Q（下）の関係

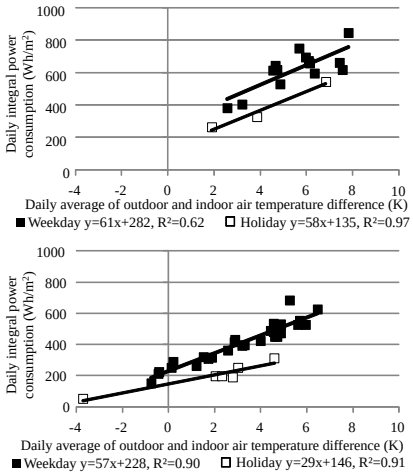

図 11　工場内会議室の平日休日別の日平均内外気温差 ΔT と日積算電力消費量 E の関係（上：塗装前，下：塗装後）

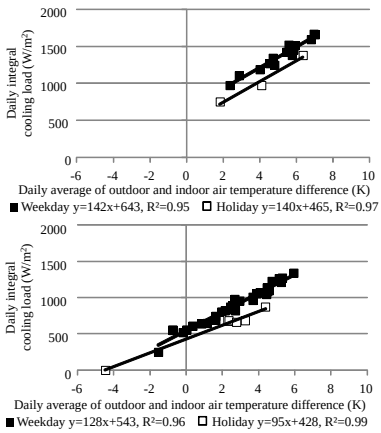

図 12　工場内会議室の平日休日別の日平均内外気温差 ΔT と日積算空調負荷 Q の関係（上：塗装前，下：塗装後）

謝辞

測定にあたり神戸大学環境管理センター，株式会社カネカの関係者にご協力頂いた．記して謝意を示します．

参考文献

(1) 日本規格協会，JIS K 5602 塗膜の日射反射率の求め方(2008)

(2) 日本規格協会，JIS K 5675 屋根用高日射反射率塗料(2011)

(3) 竹林英樹・近藤靖史，クールーフ適正利用 WG，クールルーフの適正な普及のための簡易評価システムの検討（その 2）パブリックベネフィット評価ツールの開発，日本建築学会技術報告集，第 33 号(2010)，pp.589-594.

(4) 近藤靖史・長澤康弘・入交麻衣子，高反射率塗料による日射熱負荷軽減とヒートアイランド現象の緩和に関する研究，空気調和・衛生工学会論文集，No.78(2000)，pp.15-24.

(5) 村田泰孝・石原修・三木勝夫．屋根高反射化による建物冷暖房用エネルギーへの影響に関する研究－金属折板屋根建物での冷暖房用電力消費の検討，太陽/風力エネルギー講演論文集（2010），pp. 63-66.

(6) 川島久宜・加藤千尋・鑓田祥啓・黒岡秀次・石間経章，植生マットを用いた屋上緑化に関する実証実験－夏期における冷房の消費エネルギ削減効果－，日本ヒートアイランド学会論文集，Vol.6(2011)，pp.1-7.

(7) 山崎真理子・水谷章夫・大澤徹夫，熱的薄い壁体建物の屋上・壁面緑化による冷房負荷低減効果，日本建築学会技術報告集，第 29 号（2009），pp.155-158.

(8) Hashem Akbari, Ronnen Levinson, Leo Rainer, Monitoring the energy-use effects of cool roofs on California commercial buildings, Energy and Buildings, 37(2005), pp.1007-1016.

(9) 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（2008），pp.1209-1215.

(Received February 26, 2014, Accepted July 3, 2015)