実測と熱収支解析による道路舗装面からの顕熱放散量の検討 道路舗装面の高反射率化によるヒートアイランド緩和（その1）

FIELD MEASUREMENTS AND HEAT BUDGET ANALYSIS ON SENSIBLE HEAT FLUX FROM PAVEMENT

Reduction of sensible heat emission by cool pavement
as countermeasure of heat island (Part 1)

近藤 靖史*, 小笠原 岳**, 金森 博***

Yasushi KONDO, Takeshi OGASAWARA and Hiroshi KANAMORI

The mean air temperature in urban areas has risen due to a change of urban structure in a long term. High reflective paints can reduce a cooling load of buildings and may also improve the thermal environment in urban areas. In this paper, field measurements were carried out on pavement where two areas of surface were coated with high reflective paint and ordinary material. Then, the heat flux on the urban surface was calculated on the basis of heat budget equation with the measured data, and the result was compared with the artificial heat release from buildings etc. in 23 wards of Tokyo. The results of this paper show that high reflective paint is effective to resolve heat island problem.

Keywords: Cool Pavement, High Reflective Paint, Heat Island, 1-D Heat Budget Analysis

クールペイブメント、高反射率塗料、ヒートアイランド、熱収支解析

1 序

近年、都市における人工排熱の増加や、舗装面および建築物増加による都市被覆の変化、都市形態の変化による都市内部の弱風化などにより、都市の気温が上昇するヒートアイランド現象が都市部特有の環境問題として関心を集めている。2004年3月、ヒートアイランド対策関係府省連絡会議からヒートアイランド対策大綱¹⁾が発表され、そのなかで人工排熱の低減、地表面被覆の改善、都市形態の改善などがヒートアイランド対策として挙げられている。人工排熱を低減させる手法としては、電化製品、自動車等の省エネルギー化や未利用エネルギーの使用などが考えられる。地表面被覆の改善手法としては、日射反射率の高い塗料(以降、高反射率塗料と記す)を建物屋根面や道路舗装面に塗布することで昼間の地表面・建物躯体への蓄熱を抑え、都市大気への顕熱放散量を削減を図ることや、日射熱を蒸発潜熱として変化させて顕熱放散量を削減することができる緑化や保水性建材の使用などが挙げられる。また都市形態の改善については、建物配置等を考慮して川風・海風を積極的に取り入れるなどの対策が考えられる。

地表面被覆の改善手法である高反射率塗料の屋根面への適用や

屋上緑化についての検討は、既往の研究^{2)~4)}に多く見ることができる。筆者ら^{5)~9)}は夏期において高反射率塗料を屋根面に塗布して熱的性状を把握するための実測やシミュレーションを実施し、顕熱放散削減量を試算した。また東京都23区を対象に、23区面積の約28.8%を占める屋根表面すべてを高反射率化すると仮定した場合の顕熱放散削減量を算出し、東京都23区から排出される人工排熱量と比較することで、建物屋根面の高反射率化によるヒートアイランド現象緩和効果を確認した⁹⁾。

上記のように、既往の研究では建物屋根面の高反射率化に着目していたが、本研究では道路舗装面の高反射率化について検討する。すなわち、舗装面に高反射率塗料を塗布し、日射反射率を高めた道路(以降、クールペイブメントと記す。図1参照。)では、路面温度

図1 クールペイブメントの概念

本論文は、2007年度日本建築学会大会(九州)学術講演会において発表した論文に基づいて加筆・修正したものである。

* 武蔵工業大学工学部 教授・博士(工学)

** 東京理科大学工学部 嘱託助教・博士(工学)
(研究当時、武蔵工業大学工学部 客員研究員)

*** 日本ペイント(株) R&D 本部

Prof., Faculty of Engineering, Musashi Institute of Technology, Dr. Eng.
Assistant Prof., Tokyo University of Science, Dr. Eng.
(Visiting Researcher, Faculty of Eng., Musashi Institute of Technology)
Nippon Paint Co., Ltd.

の上昇が抑えられ、道路表面から都市大気への顕熱放散量が削減され、ヒートアイランド緩和が期待できる。また、舗装面の高反射率化により昼間の日射熱の蓄熱が抑制され、夜間も道路表面温度は低くなる傾向があり、熱帯夜の低減に有効であると考えられる。特に、道路舗装材として一般に用いられるアスファルトコンクリートは熱容量が大きく、また通常の舗装面は日射吸収率が高いため、舗装面の高反射率化の効果が期待できる。なお、道路舗装面に高反射率塗料を塗布する場合、車両通行の安全性、舗装面の耐久性を確保する必要がある。検討に用いた高反射率塗料は道路舗装面に塗布した状態での動摩擦係数が別途測定されており、安全性に問題ないことが確認されている。また屋根面に塗布する塗料と比べ塗膜強度を高めることで耐久性が確保されている。

本報では、クールペイプメントの効果を実測および熱収支解析より検討する。まず、実際の道路の一部に高反射率塗料を塗布してクールペイプメントとし、熱的性状の実測を行い、一般舗装道路と比較する。次に、実測結果および熱収支式を用いて道路表面での熱収支を計算することにより、舗装面の高反射率化による顕熱放散削減量を計算する。次に、東京都23区面積の約21.1%を占める道路表面全面に高反射率塗料を塗布してクールペイプメントとした場合の顕熱放散削減量を試算し、人工排熱量と比較することでヒートアイランド現象緩和効果を検討する。さらに、日本各地の標準気象データおよび熱収支式を用いて、舗装面の高反射率化によるヒートアイランド現象緩和効果を各都市で評価することを試みる。

なお、道路表面を高反射率化した場合、一般舗装道路より日射放射量が多くなるために歩行者の温熱感に対する悪影響が懸念される。この歩行者の温熱感への影響に関しては次報以降で報告する予定である。

2 クールペイプメントおよび一般舗装道路の熱的性状に関する夏期実測

ここでは、実際の道路舗装面の一部をクールペイプメントとし、道路表面温度、道路内部温度などの実測結果を示す。

2.1 夏期実測概要

東京都某事業所内の道路舗装面の一部(約8.8m×28m)に高反射率塗料を塗布してクールペイプメントとし、クールペイプメントと一般舗装道路の温度分布などを夏期(2006年7月7日～9月23日)に測定した。各道路舗装面の日射反射率^{注1)}を表1に、また実測対象道路を写真1に示す。

2.2 測定項目および測定位置

測定項目および測定位置などを表2に示す。道路内部の温度分布および伝導熱量測定のため、道路をダイヤモンドカッターで掘削(直径300mm、深さ約300mm)し、掘削により現れた円筒形の穴の側面にドリル等で孔を開けて熱電対・熱流計を設置した後、埋め戻した(写真2、3参照)。また設置した熱流計の周囲の隙間には無収縮モルタルを充填した。なお、熱電対・熱流計の設置は2006年6月29日に実施した。このため、測定代表日(表3参照)までにはかなり時間がおり、掘削作業が地中温度などの実測結果に与える影響は無視できると考えられる。

2.3 実測結果および考察

実測期間中の晴天日および曇りがちな日(以降、曇天日と記す)を

選び、これらを代表日として検討する。表3に検討に用いた代表日の最高・最低気温、日積算日射量を示す。測定代表日は晴天日を2006年8月18日、曇天日を2006年9月23日とした。晴天日の測定結果を図2に、曇天日の測定結果を図3に示す。

(1) 全日射量および道路表面温度(図2(a)、3(a)参照)

全日射量および道路表面温度を図2(a)、図3(a)にそれぞれ示す。まず晴天日に注目すると、全日射量は最大で約880W/m²であった。道路表面温度は、クールペイプメントの方が一般舗装道路より最大約10℃低く、日中の温度上昇が大きく抑制されている。またクールペイプメントの表面温度は一般舗装道路より明け方で約1℃、夜間で約3℃低く、一日を通して表面温度を低く保つことが確認された。このように道路面を高反射率化してクールペイプメントとした場合、

写真1 夏期実測対象道路

写真2 道路掘削状況

写真3 熱電対埋設状況

図1 内部温度、伝導熱流測定位置

表1 各道路の日射反射率^{注1)}

道路	地表面の日射反射率[-]
一般舗装道路	0.07
クールペイプメント	0.34

表2 測定項目および測定位置

測定項目	測定位置[mm]	測定点数	測定機器
道路表面温度	道路表面	各舗装面当り1点	T型熱電対
道路内部温度	GL-50, -100, -150, -200	各舗装面当り1箇所	T型熱電対
日射量	GL+100	1点	日射計(MS-801, 英弘精機)
放射量	GL+400	各舗装面当り1点	長短波放射計(MR-50, 英弘精機)
風速・風向	GL+2100	1点	風向・風速計(WS-001, ゼファー)
伝導熱量	GL-30	各舗装面当り1箇所	熱流計(MF-180, 英弘精機)

表3 検討対象日の外界条件

検討対象日	最高気温[℃]	最低気温[℃]	日積算日射量[MJ/(m ² ・日)]
2006年8月18日(晴天日)	34.3	26.1	23.3
2006年9月23日(曇天日)	27.1	18.8	12.3

図2 晴天日における実測結果

図3 曇天日における実測結果

晴天日の日中は表面温度上昇を大幅に抑制すると同時に、道路への蓄熱を低減させ、日没後においても表面温度を低く保つことができる。なお日射量のピークが12時ごろであるのに対し、表面温度のピークは14時ごろで約2時間遅れてピークがみられる。次に曇天日に注目すると、道路表面温度は晴天日と同様にクールペイプメントの方が低いが、日射量が少ないために温度差は最大約3℃であった。また夜間の表面温度は約1℃クールペイプメントの方が低く、曇天日においても日中の蓄熱を低減させる効果が認められる。

(2) 日射反射量(図2(b)、3(b)参照)

日射反射量を図2(b)、図3(b)にそれぞれ示す。晴天日におけるクールペイプメント上での日射反射量は最大約280 W/m²、一般舗装道路は最大約80 W/m²であり、クールペイプメントの方が最大で約200 W/m²大きい。曇天日においてもクールペイプメントの方が高く、その差は最大約150 W/m²であった。

(3) 道路内部温度(図2(c)、3(c)参照)

道路内部温度を図2(c)、図3(c)にそれぞれ示す。晴天日における道路内部温度は、一日を通してクールペイプメントの方が一般舗装道路より低く、GL-50mmでは最大で約6.5℃、GL-200mmでは約5℃低くなっており、測定点が深くなるにつれて温度差が小さくなる。曇天日のGL-50mmでの温度差は、最大で約2℃であり、道路表面温度と同様に晴天日より温度差は小さい。

(4) 道路表面温度と道路内部温度の比較(図2(a)(c)、3(a)(c)参照)

晴天日に着目すると、日中は道路表面温度が最も高く、道路内部で深い位置になるにつれて温度が低い。日没後その傾向は逆転し、GL-200mmの温度が最も高く、表面温度が最も低くなっている。さらに、それぞれの深さでの温度のピークは測定地点が深くなるにつれて順に遅れる。また、一般舗装道路では表面温度とGL-200mmの同時刻での差が最大で約24.5℃となっているのに対し、クールペイプメントではその差は最大約19℃となり、蓄熱が抑えられている。なお、曇天日の傾向も晴天時と同様であるが、温度差は小さい。

図4 熱収支の概要

3 道路表面の熱収支解析

舗装面の高反射率化は、ヒートアイランド現象の緩和対策として有効であると考えられる。それを検証するため、ここでは、まず熱収支式および実測結果を用いて道路表面に関して熱収支を解き、都市大気への顕熱放散量を求める。次にその結果を用い、高反射率塗料を道路表面に塗布し、高反射率化することによる都市気候への影響を検討する。ここでは、実測代表日として考察を行った晴天日、曇天日の両日について検討を行い、気象条件が異なる場合の効果の差異についても検討する。また、次章において、顕熱放散削減量を人工排熱量と比較することにより都市における高反射率塗料の適用の効果を検討する。なお夏期実測を行った各道路面において、終日日影となる部分はなく、表面温度などのデータが得られなかった。したがって道路表面が建物などの日影となる場合の顕熱放散削減効果については検討していない。これについては5章で検討する。

3.1 熱収支式を用いた道路表面の熱収支解析^{2)、10)、11)}(図4参照)

以下に道路表面における熱収支式(図4参照)を示す。

$$R_n = V + LE + A \quad \cdots(1)$$

$$R_n = R_s + R_L = R_s + (L_a - L_o) \quad \cdots(2)$$

$$A = -\lambda \frac{\partial T_s}{\partial x} \quad \cdots(3)$$

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\lambda}{C_p \rho} \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \quad \cdots(4)$$

ここでは終日晴天もしくは曇天を想定し、水蒸気の蒸散はないものとして潜熱輸送量 LE を0と仮定する。式(4)を前進差分で離散化

(a) 一般舗装道路

(b) クールペイプメント

図5 晴天日における道路表面の熱収支

図6 晴天日における道路表面の顕熱輸送量

(a) 一般舗装道路

(b) クールペイプメント

図7 曇天日における道路表面の熱収支

図8 曇天日における道路表面の顕熱輸送量

し地中温度分布を求め、式(3)により道路面における伝導熱量 A を算出する。このとき差分計算の境界条件として、実測で得られた道路表面温度と $GL-100mm$ の地中温度を与える^{注2)}。この伝導熱量の算出結果($GL\pm0mm$)は熱流計による $GL-30mm$ の測定値や $GL-50mm$ の地中温度実測値と整合していることを別途確認している。算出した伝導熱量 A と正味放射受熱量 R_n を用いて式(1)の残差として顕熱輸送量 V を算出する。なお、本研究では晴天日もしくは曇天日における舗装面の含水は無視できると考え、潜熱輸送量 LE を 0 とした。本研究は一般舗装道路とクールペイプメントの都市大気への顕熱放散量の差異に着目しており、顕熱放散量の差異が小さいと考えられる降雨時を除外してもほぼ妥当な検討になると考えている。

3.2 熱収支の解析結果^{注3、4)}

(1) 晴天日における解析結果(図5、6 参照)

晴天日における道路表面の熱収支を図5に、道路表面の顕熱輸送量のみに着目した解析結果を図6に示す。伝導熱量の変化に着目すると、一般舗装道路では10時30分頃に最大となり、約 340 W/m^2 であるのに対し、クールペイプメントは正午頃に最大となり、約 220 W/m^2 であった。顕熱放散量に着目すると日の出から徐々に増加し、クールペイプメントの13時における顕熱放散量は約 280 W/m^2 であった。この値を同時刻における一般舗装道路の顕熱放散量と比較すると約16%少ない。

(2) 曇天日における解析結果(図7、8 参照)

晴天日における道路表面の熱収支を図7に、道路表面の顕熱輸送量のみに着目した解析結果を図8に示す。検討対象日は時折強い日差しが雲の間から差し込んでいたために測定値が安定せず、傾向がつかみづらい結果となった。

(3) 晴天日と曇天日における顕熱放散削減量の比較(表4 参照)

晴天日と曇天日における顕熱放散削減量を表4に示す。これによると道路舗装面を高反射率化した場合、晴天日の顕熱放散削減量は $2.7 \text{ MJ/(m}^2 \cdot \text{日)}$ であり、一般舗装道路の顕熱放散量の約26%に相当する。また曇天日における顕熱放散削減量は $1.7 \text{ MJ/(m}^2 \cdot \text{日)}$ であり、一

表4 晴天日と曇天日における顕熱放散削減量

検討対象	日積算日射量 [MJ/(m ² ・日)]	顕熱放散量[MJ/(m ² ・日)]		顕熱放散削減量 [MJ/(m ² ・日)]	削減率 [%]
		一般舗装道路	クールペイプメント		
晴天日	23.3	10.4	7.7	2.7	26.1
曇天日	12.3	5.5	3.8	1.7	30.9

表5 東京都23区における道路舗装面の高反射率化による顕熱放散削減量と人工排熱量¹²⁾の比較(ただし建物などによる日影の影響は考慮していない。)

地区	道路面積率 [%]	高反射率化による 顕熱放散削減量 [MJ/(m ² ・日)]		人工排熱量 [MJ/(m ² ・日)]	人工排熱との割合 [%]	
		晴天日	曇天日		晴天日	曇天日
千代田区	27.3	0.74	0.46	5.63	13.2	8.2
中央区	30.6	0.83	0.52	6.00	13.9	8.6
港区	23.3	0.63	0.39	4.41	14.4	8.9
新宿区	20.4	0.56	0.34	3.70	15.0	9.3
文京区	19.0	0.52	0.32	2.76	18.7	11.6
台東区	28.4	0.77	0.48	3.90	19.8	12.3
墨田区	25.0	0.68	0.42	3.03	22.4	13.9
江東区	19.4	0.53	0.33	2.03	26.0	16.1
品川区	23.3	0.63	0.39	3.86	16.4	10.2
目黒区	18.1	0.49	0.31	2.32	21.2	13.1
大田区	31.1	0.85	0.52	1.87	45.4	28.1
世田谷区	17.1	0.47	0.29	1.62	28.7	17.8
渋谷区	20.7	0.56	0.35	3.06	18.4	11.4
中野区	18.3	0.50	0.31	1.77	28.1	17.4
杉並区	17.5	0.48	0.30	1.64	29.0	18.0
豊島区	22.3	0.61	0.38	2.90	20.9	13.0
北区	21.7	0.59	0.37	1.89	31.2	19.4
荒川区	22.7	0.62	0.38	2.09	29.6	18.3
板橋区	20.0	0.54	0.34	2.31	23.6	14.6
練馬区	17.7	0.48	0.30	1.33	36.2	22.5
足立区	19.8	0.54	0.33	1.95	27.6	17.1
葛飾区	19.1	0.52	0.32	2.12	24.6	15.2
江戸川区	20.1	0.55	0.34	1.81	30.3	18.8
23区平均	21.1	0.57	0.36	2.32	24.7	15.3

般舗装道路の顕熱放散量の約31%に相当する。このように道路舗装面を高反射率化した場合の顕熱放散削減量は比較的大きく、日射の少ない曇天日においても、高反射率塗料の有効性が確認できる。

4 都市レベルにおける顕熱放散量の試算

3章では高反射率塗料を道路舗装面に塗布した場合の顕熱放散削減量を示したが、高反射率化によるヒートアイランド現象緩和効果は地理的条件などによって大きく左右されることが考えられる。ここでは東京都23区を検討対象とし、各区の道路舗装面すべてを高反射率化したと仮定して顕熱放散削減量を算出する。さらにヒートアイランド現象の一因とされている人工排熱量と顕熱放散削減量を比較することで、舗装面の高反射率化のヒートアイランド緩和効果を検証する。

本章では、対象地区1m²・1日あたりの顕熱放散削減量を3章で算出した顕熱放散削減量(晴天日 2.7MJ/(m²・日)、曇天日 1.7MJ/(m²・日))に東京都各区の道路面積率を乗じて算出し、人工排熱の対象地区総量¹²⁾と比較した。試算結果を表5に示す。各区の道路舗装面すべてを高反射率化した場合、晴天日における顕熱放散削減量は23区平均では0.57MJ/(m²・日)で、人工排熱の24.7%に相当しており、比較的大きな割合で顕熱放散量を削減できることが期待される。また曇天日における顕熱放散削減量は23区平均で0.36MJ/(m²・日)となり、晴天日における人工排熱の15.3%に相当する^{注5)}。ただし、本章での試算結果は3章で算出した顕熱放散削減量を用いて検討を行ったため、道路面が建物などの日影になる状況を考慮していない。これについては5章で検討する。

5 標準気象データを用いた全国各地における顕熱放散量の試算

3、4章では実測結果と熱収支式を用いて検討を行ってきたが、ここでは実測結果の代わりに標準気象データを用いることで全国各地での道路の高反射率化による顕熱放散削減量を試算し、異なる気象特性を持つ都市におけるヒートアイランド現象緩和効果を定量的に評価することを試みる。

5.1 熱収支解析の概要

3章と同様に道路表面における熱収支式を用いて都市大気への顕熱輸送量を求める。このとき、式(1)中の顕熱輸送量Vは式(5)により算定する。

$$V = \alpha (T_{air} - T_s) \quad \cdots(5)$$

式(5)中の対流熱伝達率αは標準気象データの風速^{注6)}からユルゲスの実験式より算出する。式(2)中の短波放射による受熱量R_Sは標準気象データの日射量と道路表面の日射反射率から算出し、長波放射による受熱量R_Lは、プラントの式による大気放射量と長波放射率0.9を仮定した道路表面からの長波放射量から算出する。また、降雨の影響のない晴天日および曇天日についてのみを検討対象とし、潜

熱輸送量LEは0と仮定する。また、伝導熱量Aは3章と同様に式(4)を前進差分で離散化して地中温度分布を求め、式(3)により算出する。また地中内部の境界条件として日中の変動が無視できる深さGL=600mmの地中温度を、年平均気温および気温の年較差から推定する式(6)により算出する¹³⁾。

$$T = T_{ave} + \frac{1}{2} T_{ran} e^{-0.3156} \cos \left(\frac{n - n_{mx} - 18.3336}{365} 2\pi \right) \quad \cdots(6)$$

以上の熱収支解析により道路表面温度T_sを逐次算出し、式(5)から顕熱輸送量Vを求める。すなわち、全国各地の標準気象データと、道路表面の日射反射率や道路内の熱物性値を想定することにより、道路表面から都市大気への顕熱放散量が算出でき、各都市における舗装面の高反射率化によるヒートアイランド緩和効果を検討することが可能となる。

2006年8月18日および19日について、東京管区気象台(千代田区大手町)が提供する気象データを用いて上記の方法で解析を行い、計算結果と実測結果との比較を行った。計算は助走期間を5日間とし、8月13日0時の気象データを初期条件として行った。道路表面温度の実測値と計算値の比較を図9(a)に、道路内部温度の実測値と計算値の比較を図9(b)に示す。また8月18日12時から13時の各項目における平均値について、3章における結果(実測値使用)と本章の結果を表6に示す。これらによると実測値と計算値は概ね対応しており^{注7)}、ここで示した解析手法はほぼ妥当であると考えられる。

5.2 熱収支解析の解析結果

全国7都市(札幌、仙台、東京、名古屋、大阪、福岡、鹿児島)を対象に、標準気象データを用いて7、8月の62日間の顕熱輸送量を

図9 気象データを用いた道路表面温度等の計算値と実測値の比較

表6 気象データを用いた道路表面温度等の計算値と実測値の比較(晴天日(8月18日)の12時から13時までの平均値)

計算データ	外気温 [°C]	風速 [m/s]	J [W/m ²]	L _a [W/m ²]	一般舗装道路					クールペイプメント				
					表面温度 [°C]	R _S [W/m ²]	R _L [W/m ²]	A [W/m ²]	V [W/m ²]	表面温度 [°C]	R _S [W/m ²]	R _L [W/m ²]	A [W/m ²]	V [W/m ²]
実測値	33.7	1.3	867.4	445.6	57.4	782.9	-195.6	344.2	243.2	49.4	596.0	-149.3	258.5	188.2
計算値(実測データ)	32.0	1.2	850.4	494.4	60.0	787.5	-122.5	359.8	293.4	52.3	560.4	-69.8	270.2	212.3

計算する。標準気象データには降雨情報が含まれていないため、日射量 120W/m²未満かつ相対湿度 85%以上の時間帯を降雨とみなし、日積算顕熱放散量の算出から除外した^{注8)}。また計算は周辺建物の日影によって直達日射を受けない道路部分の影響を考慮するため、2通りの状況を想定して解析を行った。すなわち、直達日射と天空日射を考慮する日照部と、天空日射のみを扱う日影部について計算した。東京を対象に行った計算結果を図10に示す。まず日照部における結果に着目すると、日積算日射量と日積算顕熱放散量は高い相関を示しており、日積算日射量が多くなるほどに日積算顕熱放散量も多くなる。図中に示す回帰式から晴天日の実測結果である日積算日射量 23.3 MJ/(m²・日)を用いて顕熱放散量を算出し、高反射率化による顕熱放散削減量を試算すると約 3.2 MJ/(m²・日)となり、3章で試算した顕熱放散削減量(約 2.7 MJ/(m²・日)、表4参照)と大きな差はない。次に日影部に着目すると、日積算日射量が多くなっても日積算顕熱放散量の変化は小さい。日照部と同様に曇天日の実測結果である日積算日射量 12.3 MJ/(m²・日)を用いて顕熱放散量を算出し、高反射率化による顕熱放散削減量を試算すると 1.7 MJ/(m²・日)となり、3章で試算した顕熱放散削減量(1.7 MJ/(m²・日)、表4参照)と同様である。

5.3 想定街区での顕熱放散削減量の試算

道路表面の日射受熱量は周辺建物の影の影響を受けるため、道路表面を高反射率化した場合の顕熱放散削減量を算出する場合は、この影響を考慮することが望ましい。ここでは街区モデルを想定し、日影の影響を考慮した場合の高反射率化によるヒートアイランド緩和効果を各都市において検討する。すなわち、幅員 25m の東西道路および南北道路に囲まれた 350m×225m の街区に幅 100m で高さ 16m の建物が 6 棟あると想定し、この街区の道路表面での日影の状

図10 東京(夏期)での顕熱放散量の計算結果

況を表した平均日影率を算出する。ここで、平均日影率は想定街区道路の日影部分の面積率を可照時間各時刻について計算し、単純平均して求めることとする。次に 5.2 節で算出した日影部における日積算顕熱放散量に平均日影率を乗じた値と、日照部における日積算顕熱放散量に(1-平均日影率)を乗じた値を足し合わせ、全国各都市における日影の影響を考慮した顕熱放散削減量を算出する。前述の 7 都市において平均日影率を算出したところ、0.36~0.43 となった。本研究では全ての都市で平均日影率を 0.4 として顕熱放散削減量を試算した。これは、想定した街区モデルにより平均日影率の値は異なり、一般性のある値を見出すのが困難であるため、暫定的な値として 0.4 を用いた^{注9)}。

全国 7 都市について行った計算結果の夏期平均値を表 7 に示す。これによると平均日影率を考慮した顕熱放散削減量は約 1.5~2.3 MJ/(m²・日)であり、全国的にヒートアイランド緩和効果が見込め、特に緯度の低い都市においてより大きな効果があるものと考えられる。

6 結論

道路舗装面を高反射率化した場合の熱的性状およびヒートアイランド現象緩和効果を把握するため、実測および熱収支解析による検討を行った。また標準気象データを用い、全国 7 都市における顕熱放散削減量を試算した。その結果得られた知見を以下に示す。

- (1) 夏期に行った実測において、クールペイプメントの表面温度は一般舗装道路表面と比較して最大約 10℃低くなり、日中の温度上昇が大きく抑制された。また夜間では約 3℃低く、昼間の蓄熱を低減させる効果が確認された。
- (2) 熱収支式および夏期実測結果を用いて、道路表面における熱収支解析を行った結果、晴天日におけるクールペイプメントの顕熱放散量削減量は一般舗装道路の顕熱放散量の約 26%に相当する。
- (3) 東京 23 区を対象として道路舗装面すべてを高反射率化した場合に削減される顕熱放散削減量は、晴天日の日照部で各区から排出される人工排熱の約 13~45%に相当し、比較的大きな割合で顕熱放散量を削減できることが期待される。
- (4) 日影の影響を考慮し、全国 7 都市を対象として行った顕熱放散削減量は約 1.5~2.3 MJ/(m²・日)となり、低緯度地域のほうがやや大きくなる傾向があるが、全国的に高反射率化の効果が期待

表 7 各都市における顕熱放散削減量の試算結果(7、8月のうち降雨時間帯を除いて集計した平均日積算値)

都市	日積算日射量 [MJ/(m ² ・日)]	道路種別	日照部		日影部		平均日影率(0.4)を考慮	
			日積算顕熱放散量 [MJ/(m ² ・日)]	顕熱放散削減量 [MJ/(m ² ・日)]	日積算顕熱放散量 [MJ/(m ² ・日)]	顕熱放散削減量 [MJ/(m ² ・日)]	日積算顕熱放散量 [MJ/(m ² ・日)]	顕熱放散削減量 [MJ/(m ² ・日)]
札幌	14.8	一般舗装道路	8.3	2.0	5.6	1.2	7.2	1.7
		クールペイプメント	6.3		4.4		5.5	
仙台	14.3	一般舗装道路	7.4	1.8	4.7	1.1	6.3	1.5
		クールペイプメント	5.6		3.6		4.8	
東京	14.2	一般舗装道路	8.7	2.0	6.3	1.3	7.7	1.7
		クールペイプメント	6.7		5.0		6.0	
名古屋	17.0	一般舗装道路	9.9	2.4	6.0	1.3	8.4	2.0
		クールペイプメント	7.5		4.7		6.4	
大阪	18.3	一般舗装道路	12.0	2.9	7.3	1.5	10.1	2.3
		クールペイプメント	9.1		5.8		7.8	
福岡	17.4	一般舗装道路	10.7	2.6	6.3	1.3	9.0	2.1
		クールペイプメント	8.1		5.0		6.9	
鹿児島	18.4	一般舗装道路	11.4	2.7	7.1	1.5	9.7	2.2
		クールペイプメント	8.7		5.6		7.4	

できる。

以上の結果から、高反射率塗料を道路舗装面に塗布した場合のヒートアイランド現象緩和効果を確認することができた。次報以降において、道路を高反射率化したことによって増大する日射反射量が歩行者の温熱感へ与える影響について検討を行う予定である。

謝 辞

研究を進めるにあたり、マイクロベース・阿部有希子氏、武蔵工業大学大学院生・有働邦広氏、同学生・軽部亮氏(当時)、中島由佳里氏(当時)、永江崇彦氏(当時)をはじめとする多くの方々に協力を賜った。ここに記して、謝意を表します。

本論文に関する既発表論文

- ① 小笠原岳・近藤靖史・金森博：道路面の高反射率化によるヒートアイランド緩和効果 その1 夏期実測と熱収支解析による顕熱削減量の検討：日本建築学会大会学術講演梗概集(九州)D-1、pp.623-624、2007年8月
- ② 金森博・近藤靖史・小笠原岳：道路面の高反射率化によるヒートアイランド緩和効果 その2 標準気象データに基づく全国各地における顕熱削減量の推定：日本建築学会大会学術講演梗概集(九州)D-1 pp.625-626、2007年8月

参考文献

- 1) ヒートアイランド対策関係府省連絡会議：ヒートアイランド対策大綱，http://www.env.go.jp/press/file_view.php?serial=5450&hou_id=4837 2004年3月
- 2) 竹林・森山・野上ら：屋上緑化及び高反射塗料の表面熱収支結果：日本建築学会学術講演梗概集(近畿)D-2 環境工学Ⅱ，pp.41-44. 2005年9月
- 3) 西村・松尾・三木・村瀬：太陽熱高反射塗装の日射熱防除効果：日本建築学会学術講演梗概集(東海)D-2 環境工学Ⅱ，pp.377-378. 2003年9月
- 4) 一之瀬・石野・郡・永田：ヒートアイランド低減手法としての屋上緑化の実測評価：日本建築学会環境系論文集 No.605，pp.47-54. 2006年7月
- 5) 近藤・長澤・入交：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緩和に関する研究：空気調和・衛生工学会論文集 No.78，pp.15-24. 2000年7月
- 6) 近藤・長澤・大南：黒色高反射率塗料による住宅屋根の日射反射性能の向上：日本建築学会大会学術講演梗概集(北陸)D-2 環境工学Ⅱ，pp.117-118. 2002年8月
- 7) 近藤・大木・光本：実測による高反射率塗料の遮熱性能に関する研究：日本建築学会大会学術講演梗概集(近畿)D-2 環境工学Ⅱ，pp.261-262. 2005年9月
- 8) 近藤・大木：実測と数値シミュレーションによる高反射率塗料の遮熱性能に関する研究：空気調和・衛生工学会大会学術講演論文集(札幌)，pp.217-220. 2005年8月
- 9) 大木・近藤：都市部における建築屋根面の高反射率化によるヒートアイランド緩和効果 その1 都市表面の熱収支解析による顕熱削減効果：日本建築学会大会学術講演梗概集(関東)D-1 環境工学Ⅰ，pp.669-670. 2006年9月
- 10) 近藤純正：地表面に近い大気科学：東京大学出版会，2000年9月
- 11) 近藤純正：水環境の気象学：朝倉書店，1994年4月
- 12) 足永・李・尹：顕熱潜熱の違いを考慮した東京23区における人工排熱の排出特性に関する研究：空気調和・衛生工学会論文集 No.92，pp.121-130. 2004年1月
- 13) 宇田川光弘：パソコンによる空気調和計算法：オーム社，1986年12月

注

- 注1) 長短波放射計の測定値より算出した。
- 注2) 曇天日におけるGL-100mmの実測値が欠損していたため、解析領域をGL-150mmまでとし、GL-150mmの実測値を与えた。なお実測対象道路はGL-100mmまでがアスファルトコンクリート、GL-100mm以下は砂利・土であった。よって晴天日の差分析ではアスファルトコンクリート(100mm)一層として計算を行い、曇天日の差分計算ではア

[記号表]

A : 伝導熱量 $[\text{W}/\text{m}^2]$	
C_p : 比熱 $[\text{kJ}/\text{kg}\cdot\text{K}]$	アスファルトコンクリート:0.92 砂利・土:1.61
J : 全天日射量 $[\text{W}/\text{m}^2]$	
LE : 潜熱輸送量 $[\text{W}/\text{m}^2]$	
L_a : 大気放射量 $[\text{W}/\text{m}^2]$	
L_e : 道路表面からの長波放射量 $[\text{W}/\text{m}^2]$	
R_n : 正味放射受熱量 $[\text{W}/\text{m}^2]$	
R_s : 短波放射による受熱量 $[\text{W}/\text{m}^2]$	
R_L : 長波放射による受熱量 $[\text{W}/\text{m}^2]$	
T_{air} : 外気温度 $[\text{°C}]$	
T_s : 地表面温度 $[\text{°C}]$	
T : 地中温度 $[\text{°C}]$	
T_{ave} : 年平均気温 $[\text{°C}]$	札幌:8.0, 仙台:11.9, 東京:15.3, 名古屋:14.9, 大阪:16.2, 福岡:16.0, 鹿児島:17.3
T_{ram} : 気温の年較差 $[\text{°C}]$	札幌:34.8, 仙台:30.7, 東京:30.3, 名古屋:32.6, 大阪:30.2, 福岡:29.3, 鹿児島:29.8
V : 顕熱輸送量 $[\text{W}/\text{m}^2]$	
n : 通し日	
n_{mx} : 地表面温度が最大となる日の通し日(=213)	
α : 対流熱伝達率 $[\text{W}/\text{m}^2\cdot\text{K}]$	
ρ_r : 日射反射率 [-](クールペイプメント: 0.34, 一般塗料: 0.07)	
ρ : 密度 $[\text{kg}/\text{m}^3]$	アスファルトコンクリート:2195 砂利・土:2000
λ : 熱伝導率 $[\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})]$	アスファルトコンクリート:1.2 砂利・土:1.6

- スファルトコンクリート(100mm)+砂利・土(50mm)の二層として計算を行った。これら部材の物性値は記号表中に記す。
- 注3) 顕熱放散量は大気側への熱移動を、伝導熱量は地中への熱移動を正(+)とする。
- 注4) 一般舗装道路の結果に見られる数値の突出は、測定地点が建物や木によって影になったため、伝導熱量が小さくなった影響である。この影響は顕熱放散削減量の算出の際に排除している。
- 注5) 人工排熱量は晴天日の値を用いている。
- 注6) 気象データの風速を1/4乗則を用いて高さGL+2100mmに補正して用いている。
- 注7) 実測結果と計算結果を比較すると、夜間の値がやや異なった。実測を行った場所は臨海地域に位置しているため風速が強い傾向がある。夜間において現れた実測結果と計算結果の差異は、風による影響が夜間において顕著に現れたものと考えられる。
- 注8) この方法で求めた降雨時間は146時間となり、実際の降雨時間(127時間:2006年夏期の気象庁観測資料(東京))より15%程度多く見積もっている。また実際の7、8月の降雨量は291mmであったが、推定降雨時間における降雨量は236mmであり、19%程度少ない。このことから本報で用いた方法の誤差は2割程度と考えられる。
- 注9) ここで示した平均日影率の算出方法では、朝方および夕方の日射量が少ない時間帯における影の影響を強く反映させるため、顕熱放散削減量を少なめに評価することとなる。一方、道路面の天空日射の受熱量は天空率の影響を受けるが、試算結果にはこれを考慮しておらず、顕熱放散削減量をやや大きめに評価している。

(2007年9月10日原稿受理，2008年2月22日採用決定)