

自動車ボディ反射率向上による ヒートアイランド現象緩和に関する研究

Mitigation of Heat Island Phenomenon
by Raising Body Reflectivity of Automobiles

永山雅之^{*}・井原智彦^{†***}・相田洋志^{**}・吉田好邦^{***}・松橋隆治^{****}
Masayuki Nagayama Tomohiko Ihara Hiroshi Aida Yoshikuni Yoshida Ryuji Matsuhashi
村瀬俊和[‡]・三木勝夫[‡]・長尾五郎[§]・木下正勝[§]
Toshikazu Murase Katsuo Miki Goro Nagao Masakatsu Kinoshita

High light-reflective paint is known as one of technologies for mitigating heat island phenomenon. In the past, high light-reflective paint was understood only as one of the building technologies. Here we apply this high light-reflective paint to automobiles. When the high light-reflective paint is introduced to automobiles, the heat island phenomenon may mitigate, because exhaust heat from automobiles greatly reduces and road surface albedo rises. In this paper, we evaluated an effect of raising body reflectivity of automobiles on the heat island phenomenon.

The amounts of car fuel consumption were assessed during air-conditioning and traveling. Two cars were used for measurement: the one had low light-reflective body painted in dark green, and the other had high light-reflective body painted in white. We found that a high-reflective car consumed fuels from air-conditioning twice as little as did a high-reflective car.

Using urban canopy thermal simulation model, we calculated the reduction of urban canopy temperature resulting from increased body reflectivity of traveling automobiles. We analyzed various Tokyo canopy districts, Otemachi, Ginza, Shinjuku, Kasumigaseki and Roppongi. As a result, the whole day reduction of urban canopy temperature is averaged from 0.07 to 0.13 [K] and that during daytime is from 0.08 to 0.14 [K].

Keywords: High Light-Reflective Paint, Car Air Conditioner, Heat Island Phenomenon, Heat Load

1.はじめに

ヒートアイランド現象は、都市域における局地的温暖化現象であるが、現実に、20世紀の日本の平均気温の上昇幅が約1[K]であるのに対し、大都市の上昇幅は2-3[K]にも達する。都市高温化は、冷房需要増大によるエネルギー消費増すなわちCO₂排出増を招くほか、生活環境の悪化や大気汚染の激化を引き起こすともいわれている。

著者らは、ヒートアイランド緩和対策として、高反射塗料に着目する。

従来、高反射塗料は建築物対策として認識され、建築外表面に塗装することで、冷房需要削減による人工排熱の削減と地表面アルベド向上の両面からヒートアイランド現象の緩和につながるとしてきた(たとえば井原ら¹⁾)。

本稿では、そのスキームを自動車に適用する。すなわち自

動車ボディの反射率を向上させることによって、自動車の冷房負荷が減少し、自動車起源の人工排熱が削減される(間接的な効果)。同時に自動車屋根面の高い反射率によって日射が高い割合で反射される(直接的な効果)。この2つの効果によるヒートアイランド現象の緩和効果について、都市街区熱環境シミュレーションモデルを用いて評価する。なお、反射率を向上させた場合の自動車排熱の変化については、実際に自動車排熱の計測実験をおこなうことでデータを作成した。

2.都市街区熱環境シミュレーションモデル

2.1 1次元都市キャノピーモデル

都市街区の熱環境を評価するために、近藤ら^{2),3)}によって開発された1次元都市キャノピー熱環境シミュレーションモデルAIST-CM-BEMを使用する。都市街区の気象は、地表面付近の熱収支のみならず、建築物の配置や構造物の壁面の材質、人工排熱源の位置、より大きなスケール(メソスケール)の気象などに影響される。AIST-CM-BEMは、そのようなビルが多数集まって構成される都市街区空間内の熱環境を表現するために開発されたモデルである。

街区の建物の配置や形状は複雑な構造となるため、図1のように底面積の同じビルが格子状に配列していると仮定し、ビル幅、道路幅、高さについては統計的に扱って値を与える。

* 東京大学工学部システム創成学科

e-mail masya-n@sd6.so-net.ne.jp

** 東京大学大学院工学系研究科地球システム工学専攻

*** 東京大学大学院工学系研究科地球システム工学専攻 助手

**** 東京大学大学院新領域創成科学研究科環境学専攻 教授

〒113-8656 東京都文京区本郷7-3-1 東京大学工学部4号館

† (独)産業技術総合研究所ライフサイクルアセスメント研究センター

〒305-8569 茨城県つくば市小野川16-1 産総研つくば西事業所

‡ 三木コーティング・デザイン事務所

〒330-0834 埼玉県さいたま市大宮区天沼町2-809-4

§ 日本ペイント株

〒140-8675 東京都品川区南品川4-1-15

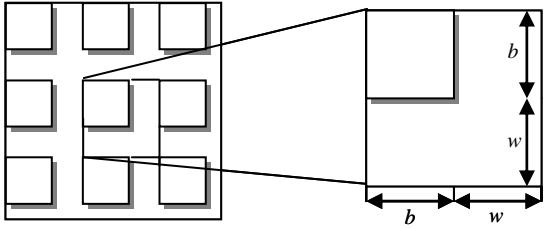


図 1 想定する街区モデル(b :ビル幅, w :道路幅)

本稿では、自動車の存在を考慮した時刻別道路面反射率と時刻別自動車排熱量を考慮できるように、AIST-CM-BEM を改良し、自動車ボディ反射率向上による街区熱環境の評価をおこなう。

2.2 時刻別自動車排熱量および道路面反射率

新たに必要となる時刻別の道路面反射率と自動車排熱量の算出式を作成する。

自動車の存在を考慮した道路面反射率 $A[-]$ は、自動車ボディ反射率 $A_{car}[-]$ と道路面反射率 $A_{road}[-]$ を、街区内の道路上における自動車占有面積 $S_{car}[m^2]$ とそれ以外の面積 $S_{road}[m^2]$ を用いて加重平均すれば求まる。 S_{car} は、1 台の自動車占有面積 $s_{car}[m^2]$ と街区内の自動車の存在台数 n_{car} [台]から計算される。ここで n_{car} のみ時間変化し、次式により算出される。

$$n_{car} = KL_{road}$$

ここで、 K は単位道路延長あたり何台の自動車が存在するかを表す交通密度[台/km]であり、 L_{road} は街区の道路総延長[km](=2 $b+w$) (図 1 参照)である。

また、街区の自動車総排熱量 $E_{car}[J]$ を求めるには、街区内の自動車の存在台数 n_{car} に 1 台あたりの排熱量 $e_{car}[J]$ を乗じればよい。1 台あたりの排熱量は、後述の計測実験による。

2.3 時刻別交通密度

時刻別の道路面反射率、自動車排熱量とも算出するために、交通密度 K が必要となる。

越ら⁴⁾によれば、交通量 Q [台/h]と速度 V [km/h]、交通密度 K には次の関係がある。

$$Q = KV$$

$$Q = K_{jam}V \exp(-K_{jam}V / eQ_{max})$$

ここで、 K_{jam} は最大交通密度[台/km]、 Q_{max} は可能交通容量[台/h]である。 K_{jam} は道路交通センサスより、 Q_{max} は道路の形状や状況より、文献⁴⁾をもとにそれぞれ求めることが可能である。また各時間の分析対象街区の交通量は、道路交通センサスおよび文献⁵⁾より求めることができる。上記の手法により、各時間の交通量から時刻別交通密度を算出できる。

3. 自動車排熱量算出のための計測実験

3.1 エアコン稼働による排熱量(静置比較実験)

エアコン稼働による排熱量を算出するため、2003 年 12 月 1 日から 2004 年 1 月 10 日まで日本ペイント(株)東京事業所敷地内(東京都品川区)にて、同車種同年式でボディ反射率の異なる 2 台の自動車(T 社製バン)の静置比較実験をおこなった(図 2、表 1 参照)⁶⁾。

この実験では、走行させずにアイドリングさせることで、晴天日における自動車各部温度、室内温度、エアコンの使用状況、燃料消費量および日射量・気温などの気象条件を計測し、エアコン稼働による排熱量およびボディ反射率の違いに起因する排熱量の差異を明らかにした。なお、計測値は、自動車からの排熱量計算に用いる動的熱負荷シミュレーションモデル(後述)の検証にも用いた。



図 2 静置比較実験(左:低反射率車、右:高反射率車)

表 1 対象自動車のボディ反射率

	ボディカラー	日射反射率 [%]
低反射率車	ダークグリーン 692-A/B	6.43
高反射率車	ホワイト 040-A/B	73.69

*日射反射率: 350-2100[nm]の波長別反射率を日射分光強度で重み付けした値

計測値を解析した結果、高反射率車は低反射率車と比べて、日射吸収量が小さいため、エアコンによって車内温度を 25[](実験では 23-27[])に保持した場合、高反射率車はエアコン稼働量が少なく、自動車からの全排熱量も 10%近く小さくなることが分かった(2003 年 12 月 14 日 11:00-13:00 における計測の平均値)。図 3 に詳細を示す。

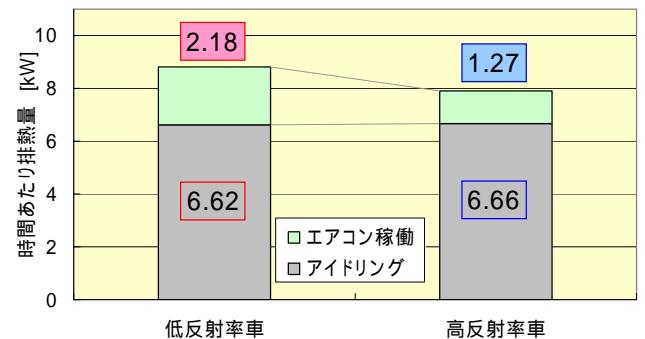


図 3 時間あたり排熱量の内訳(2003/12/14 11:00-13:00)

また、エアコン連続運転時の排熱量は、3.28[kW]と算出された。ここでは、排熱量を次のようにして求めている。まず、インジェクタの噴射時間、エンジン回転数およびインジェクタの単

位噴射量(満タン法より算出)より燃料(ガソリン)消費量を計算、続いて、ガソリンの発熱原単位(3520[kJ/L])を乗じ、それを自動車からの排熱量としている。

3.2 走行による排熱量(走行実験)

次に、自動車を実際に走行し、速度別の排熱量を算出した。排熱量の算出方法は前節と同じである。

走行実験より得られた走行による速度別 1 時間あたりの排熱量のグラフを図 4 に示す。

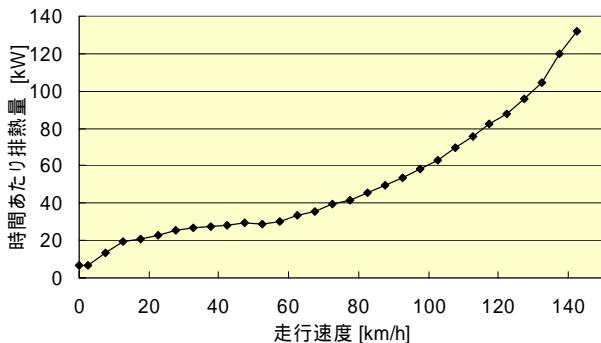


図 4 走行による 1 時間あたり排熱量

4. 热環境シミュレーションによるヒートアイランド緩和評価

4.1 自動車熱負荷計算モデルによる排熱量の算定

著者らが開発した建築熱負荷計算モデル⁷⁾を改良し、自動車熱環境および自動車からの排熱量を計算できるようにした。具体的な改良点は、車速による対流熱伝達率の変化式の組み込み、自動車構成材料の熱物性データの整備などである。

始めに、今回おこなった計測実験で測定した気象要素を入力し、計算される車内温度と計測で得られた車内温度と比較したところ、2 車ともよい水準で一致し、モデルの妥当性が検証された⁶⁾。また、カーエアコンにて車内温度を 25[]に設定したときの計測実験および実験を模擬した熱負荷計算より、除去熱量と燃料消費量(すなわち排熱量)の関係を調べた。そのところ、カーエアコンの実COPは 1.32 と算出された。つまり、カーエアコンが 1[W]の熱量を車内から除去するたびに、(1+1/1.32)[W]だけ車外への排熱が生じる。

次に、検証された計算モデルを用いて、都内を走行する自動車からの、夏の代表的な晴天日(2002 年 7 月 28-31 日)における時刻別排熱量を、低反射率車と高反射率車の場合それについて分析した。分析対象街区には、ヒートアイランド現象が顕著に観測されると予想される、大手町(中心部と東側)、西新宿、六本木、霞ヶ関、銀座を選定した。なお、車速は、都内各所における道路交通センサデータを前述の越らの式に代入することによって求めた。ここでは、大手町中心部における計算結果を図 5 に示す。

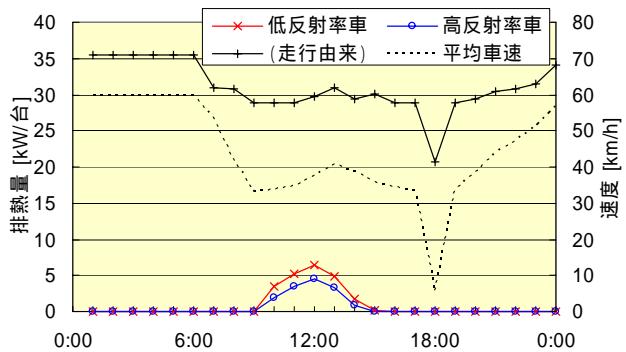


図 5 1 台あたりエアコン由来時刻別排熱量(大手町中心部)

図 5 の結果に、交通密度と街区内的道路延長・道路面積を考慮すると、自動車由来の人工排熱が算出できる。人工排熱の算出結果を図 6 に示す。反射率を向上させることにより、日中においては最大 30[kW/m²]弱の自動車排熱が削減されるが、日射のない夜間においてはほとんど削減されない。

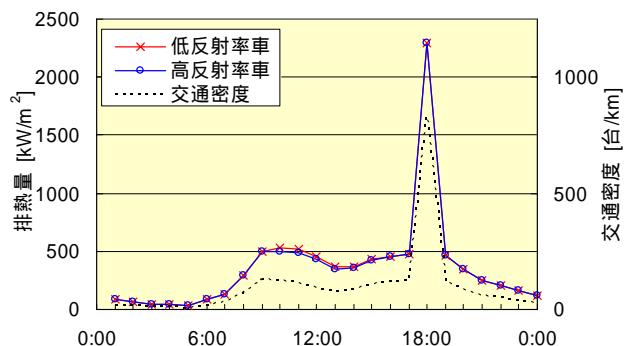


図 6 反射率の違いによる自動車排熱の変化(大手町中心部)

4.2 都市街区熱環境計算モデルによる気温低減効果の算定

都市街区を走行する自動車をすべて低反射率車であると仮定し、それをすべて高反射率車に置き換えた場合、ヒートアイランド緩和に寄与する要因としては、

- A. カーエアコン使用削減による人工排熱の削減
 - B. 自動車屋根面高アルベド化による日射の高反射化
- の 2 つが考えられる。本研究では、A については前項の熱負荷計算モデルによって算定し、また B については交通密度より算出される自動車による路面占有率を考慮することで、都市街区計算モデルの入力条件を作成した。

入力条件を都市街区モデルに代入し、夏季の代表的晴天日の条件下でシミュレーションをおこなうことで、自動車ボディの反射率向上による都市気温低減効果のポテンシャルを算定した。大手町中心部における気温低減効果を高度別に示す。図 7 は地上 6[m]、図 8 は地上 3[m]におけるポテンシャル(2002 年 7 月 28-31 日の時刻別最大値)である。

それぞれのグラフより、自動車ボディの反射率向上によるヒートアイランド緩和効果は 0.1[K]程度のポテンシャルを保有していることが分かった。また、地表面付近より排出される人工

排熱を削減するため、歩行者が歩行する高度での気温低減効果が大きいことが判明した。

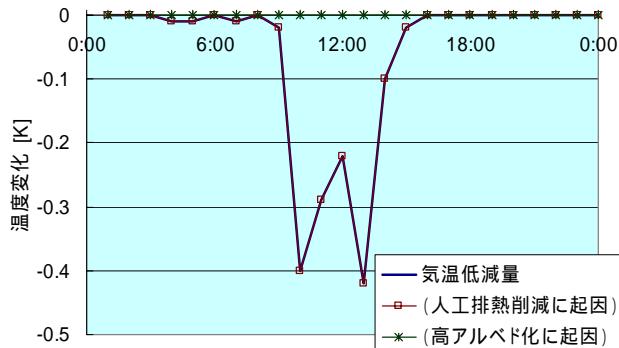


図7 気温低減効果(地上6[m])(大手町中心部)

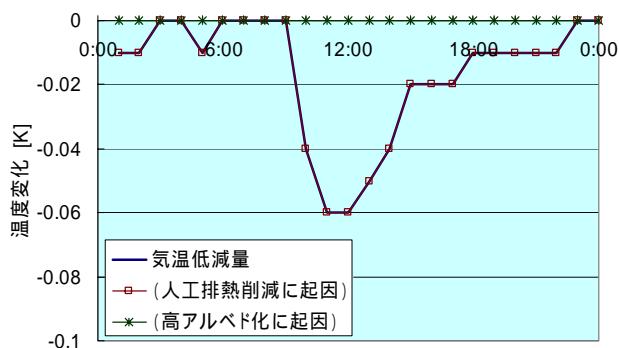


図8 気温低減効果(地上3[m])(大手町中心部)

ここで現れた自動車ボディの反射率向上による気温低減効果には、冒頭に述べたように、人工排熱削減(A)による間接的な効果と高アルベド化(B)による直接的な効果とが含まれる。そこで、

- A. すべての自動車の反射率を低反射率車と同等に、排熱量を高反射率車と同等にした場合
- B. すべての自動車の反射率を高反射率車と同等に、排熱量を低反射率車と同等にした場合

の2通りを考え、どちらがより大きな影響を与えているかをシミュレーションにより分析し、結果をそれぞれの図に加えた。図を見れば分かるように、自動車の反射率向上による気温低減効果としてはAの間接的な効果が圧倒的に大きく、Bの直接的な効果はわずかに過ぎない。

5. おわりに

自動車ボディの反射率向上によるヒートアイランド緩和効果について分析した。本研究では、反射率の違いによる燃料消費量の変化を実際に実験で求め、それをもとに熱環境シミュレーションをおこなうことで、気温低減効果を算出した。

その結果、自動車ボディの反射率向上は、大手町中心部において日平均0.1[K]、日中には最大0.4[K]程度の気温低減効果をもたらす可能性があることがわかった。分析した他の街区

でも同様であった。そして、気温低減効果は、人間の歩行空間で起こるため、外部熱環境の向上に大きく寄与すると考えられた。また、気温低減効果には、自動車の反射率変化の直接的な寄与は小さく、自動車排熱変化の寄与がほとんどであることがわかった。ただし、自動車排熱という観点からのヒートアイランド緩和効果に関する既往の研究は少なく、この気温差をただちに評価するのは難しいと考えられる。

今後の課題としては、夏場における計測実験および自動車データの整備、そして温熱環境改善効果の定量化が挙げられる。

謝辞

本研究で都市街区熱環境シミュレーションをおこなうにあたり、(独)産業技術総合研究所の近藤裕昭氏および(株)富士総合研究所の亀卦川幸浩氏には AIST-CM-BEM の使用を快く承諾して頂いた。また、同モデルで使用した都内各所の街区データは、同じく亀卦川氏にご提供頂いたものである。関係各位に対しここに記して謝意を表す。

参考文献

- 1) 井原智彦、松尾雅子、吉田好邦、松橋隆治、近藤裕昭; 光高反射熱高放射塗料導入による建築-都市連成環境におけるCO₂排出削減効果の評価、第20回エネルギー・経済・環境コンファレンス、(2004), 355-358.
- 2) 近藤裕昭、劉発華; 1次元都市キャノピーモデルによる都市の熱環境に関する研究、大気環境学会誌、33-3 (1998), 179-192.
- 3) 亀卦川幸浩、玄地裕、吉門洋、近藤裕昭; 建築物空調エネルギー需要への影響を考慮した都市高温化対策評価手法の開発、エネルギー・資源、22-3 (2001), 235-240.
- 4) 越正毅、明神証; 土木学会編 新体系土木工学 61 道路(I) 交通流、技法堂出版、(1983).
- 5) 工藤祐揮; 運輸部門における都市・地球環境改善のためのハイブリッドトローリーバスに関する研究、東京大学博士論文、(2002).
- 6) 相田洋志、井原智彦、永山雅之、吉田好邦、松橋隆治、村瀬俊和、三木勝夫、長尾五郎、木下正勝; 自動車室内の熱環境改善による省エネ効果に関する研究、第20回エネルギー・システム・経済・環境コンファレンス講演論文集、(2004), 431-434.
- 7) 井原智彦、半田隆志、松橋隆治、吉田好邦、石谷久; 行列計算を改良した多室室温計算手法の提案と高反射高放射塗料によるCO₂排出削減効果の評価、電気学会論文誌C、123-8 (2003), 1493-1501.