

顕熱モデル・大気放射モデルと舗装表面温度

東京電機大学

(株)NIPPO コーポレーション

東京電機大学

学生会員

正会員

フェロー会員

○福田裕子

吉中 保

松井邦人

1. はじめに

大都市における夏のヒートアイランド現象は大きな社会的問題となっている。その対策として遮熱性舗装や保水性舗装に注目され、各地で実験が行われ、その効果が確認されている。舗装表面温度に影響を与える因子は日射量、赤外放射量、大気温度、相対湿度、アルベド、射出率、熱伝達係数、熱伝導率、熱容量などがある¹⁾。アメダスのような基本的な気象データより舗装体の温度を精度良く予測できるモデルを構築することが本研究の最終目的である。小沼ら²⁾は大気放射に注目し実測データを最も良く説明できる放射モデルを提案している。

本研究では、舗装表面の大気放射モデルおよび顕熱モデルの違いが舗装表面温度に及ぼす影響について検討する。

2. 熱伝導解析

舗装の内部温度は気象の変化の影響を大きく受けている。数学モデルで記すと下記ようになる。

$$\rho C \frac{\partial T}{\partial t} = k \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \quad (1a)$$

初期値

$$T(z, 0) = T_0(z) \quad (1b)$$

境界条件

$$z = 0: -k \frac{\partial T}{\partial z} = q_{cov} + q_{sol} + q_{rad} \quad (1c)$$

$$z = z_b: -k \frac{\partial T}{\partial z} = 0 \quad (1d)$$

ここに、 ρ は密度[kg/m³]、 C は比熱[J/(kg・K)]、 k は熱伝導係数[W/(m・K)]である。また、 q_{cov} は顕熱輸送量[W/m²]、 q_{sol} は正味全日射量[W/m²]、 q_{rad} は正味長波放射量[W/m²]である。

これらの熱量はそれぞれ下記のようにモデル化を考えている。

$$q_{con} = h(T_a - T_s) \quad (2)$$

$$q_{sol} = S \downarrow - S \uparrow = (1 - \alpha) S \downarrow \quad (3)$$

$$q_{rad} = L \downarrow - L \uparrow \quad (4)$$

ここに、 T_a は大気温度、 T_s は舗装の表面温度、 $S \downarrow$ は下向きの全日射量、 α はアルベド、 $L \downarrow$ は下向き赤外放射量である。 $L \downarrow$ は大気射出率 ε_{sky} を用いて、一般に下記のように書くことができる。

$$L \downarrow = \varepsilon_{sky} \sigma T_a^4 \quad (5)$$

ここに、 σ はステファン・ボルツマン定数(=5.07×10⁻⁸ W/(m²K⁴))である。また、 $L \uparrow$ と $L \downarrow$ の間には、下記の関係がある。

$$L \uparrow = \varepsilon \sigma T_s^4 + (1 - \varepsilon) L \downarrow \quad (6)$$

ここに、 ε は舗装表面の射出率である。

3. 顕熱モデルと表面温度

舗装表面と大気間の熱伝達による熱輸送は、しばしば熱伝達係数でモデル化され、これまで数多くの提案式が存在する。本研究では、表-1に記した6種類の熱伝達モデルを用いて温度解析を行い、表面温度を算出した。ここに、 h : 熱伝達係数[W/(m²・K)]、 v : 風速[m/s]である。

表-1 熱伝達係数と風速との関係式

モデル番号(提案者)	関係式
【1】 姫野ら	$h = -1.75v^2 + 14.85v + 15.18$
【2】 南出ら	$h = -1.236v^2 + 12.823v + 15.117$
【3】 ASHRAE Handbook	$h = 5.7 + 3.8v$
【4】 Australian Standard	$h = 3.1 + 4.1v$
【5】 Watmuff, Duffie and Beckman	$h = 2.8 + 3.0v$
【6】 Molineaux, Lachal and Guisan	$h = 3.1 + 2.1v$

表-2 熱特性値³⁾

層	層厚 [m]	密度 [kg/m ³]	比熱 [J/kg・K]	熱伝導係数 [W/m・K]	初期温度 [℃]	アルベド	射出率
1 (表・基・As安)	0.25	2307.0	1190	2.35	20	0.1	0.9
2 (路盤)	0.35	2144.0	920	2.00			
3 (路床)	3.00	2000.0	1500	2.00			

解析に用いた舗装断面と熱特性値を表-2に示す。また、解析に必要な気象データは2004年10月～2005年8月の期間で、春、夏、秋、冬から比較的天気安定した1週間に東京電機大学鳩山校舎で観察された値を用いている。その中から昼夜を通して快晴であった1日について夏と冬の舗装表面温度の変化を図-1に記した。

モデル番号【6】の表面温度のピーク値は62であり、モデル番号【1】を用いると舗装温度のピーク値は43と約20もの差がある。冬季でもモデル番号【6】で計算した表面温度が一番高く、モデル番号【1】の結果が一番低い。この結果より、熱伝達モデルが表面温度に及ぼす影響は非常に大きいことが明らかとなった。また、図-1には測定した表面温度も併記したが、表-1のモデルのいずれも測定温度との一致度は良いとはいえない結果である。熱伝達モデルを改定するのは今後の課題である。

キーワード：大気射出率、熱伝達係数、熱伝導解析、舗装表面温度

連絡先：〒350-0394 埼玉県比企郡鳩山町大字石坂、TEL：0492(96)2911、FAX：0492(96)6501

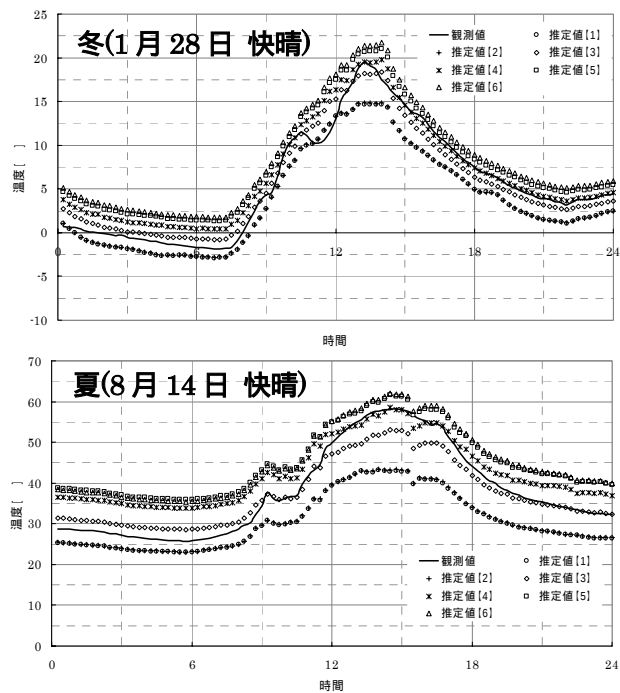


図-1 顕熱モデルによる舗装表面温度の比較

4．大気放射モデルと表面温度

大気放射 ε_{sky} の値は経験的に求められており、数多くのモデルが提案されている。既往の研究では、 ε_{sky} を定数、 T_a : 大気温度[K]の関数、 V_a : 地表面近くの水蒸気圧[KPa]、 T_d : 露点温度[]、RH: 相対湿度 [%]などを用いてモデル化している(表-3)。

表-3 大気放射モデル

モデル	モデル番号(提案者)	ε_{sky}
外気温	<1>Ohmura(1981)	$8.733 \times 10^{-3} T_a^{0.788}$
	<2>Swinbank(1963)	$9.365 \times 10^{-6} T_a^2$ ($T_a > \text{freezing}$)
	<3>Zillman(1972)	$9.2 \times 10^{-6} T_a^2$
混合型	<4>Andreas and Ackley(1982)	$0.601 + 5.95 \times 10^{-5} V_a \exp(1500/T_a)$
	<5>Brutsaert(1975)	$1.24 (V_a/T_a)^{1/7}$
	<6>Idso(1961)	$0.7 + 5.95 \times 10^{-5} V_a \exp(1500/T_a)$
	<7>Prata(1996)	$1 - \left\{ 1 + 46.5 \left(\frac{V_a}{T_a} \right) \right\} \exp \left\{ - \sqrt{1.2 + 3.0 \left\{ 46.5 \left(\frac{V_a}{T_a} \right) \right\}} \right\}$
	<8>Satterlund(1979)	$1.08 \{ 1 - \exp(-V_a^{Ta/2016}) \}$
水蒸気圧	<9>Brunt(1932)	$0.61 + 0.05 V_a^{1/2}$
	<10>Efimova(1961)	$0.746 + 0.0066 V_a$
	<11>Marshunova(1966)	$0.67 + 0.05 V_a^{1/2}$
露点温度	<12>Berdahl and Fromberg(1982)	$0.741 + 0.0062 T_d$
	<13>Berdahl and Martin(1984)	$0.711 + 0.56 (T_d/100) + 0.73 (T_d/100)^2$
	<14>Bliss(1961)	$0.8 + 0.004 T_d$
	<15>Chen et al (1991)	$0.736 + 0.00577 T_d$
	<16>拡張アメダス(2000)	$0.707 + 0.518 (T_d/100) + 0.695 (T_d/100)^2$
提案式	<17>小沼ら ²⁾ (2006)	$0.635 + 0.00421 T_a + 0.00256 RH$

また、顕熱モデルと同様に鳩山キャンパスでの気象観測データと表-4の熱特性値を用いて1次元熱伝導解析を行い、表-3の各大気放射モデルに対する表面温度を算出し、測定温度と比較した。この結果の一部を図-2に記した。また、実測値と推定値の標準偏差を表-5に記した。同表から、Brutsaert、Prataのモデルが比較的良好な結果であることがわかる。なお、どのモデルも実測値と一致していることが確認できた。

表-4 熱特性値³⁾

層	層厚 [m]	密度 [kg/m ³]	比熱 [J/kg・K]	熱伝達係数 [W/m ² ・K]	熱伝導係数 [W/m・K]	初期温度 []	アルベド	射出率
1 (表・基・As安)	0.15	2302.4	1280	6.13	2.34	20	0.1	0.9

表-5 実測値と推定値の標準偏差

提案者	標準偏差	提案者	標準偏差
<1>Ohmura	2.02	<10>Efimova	1.78
<2>Swinbank	1.83	<11>Marshunova	1.77
<3>Zillman	1.88	<12>Berdahl and Fromber	1.66
<4>Andreas and Ackley	1.89	<13>Berdahl and Martin	1.72
<5>Brutsaert	1.66	<14>Bliss	1.78
<6>Idso	1.75	<15>Chen et al	1.69
<7>Prata	1.67	<16>拡張アメダス	1.76
<8>Satterlund	1.75	<17>小沼 ⁵⁾	1.80
<9>Brunt	1.72		

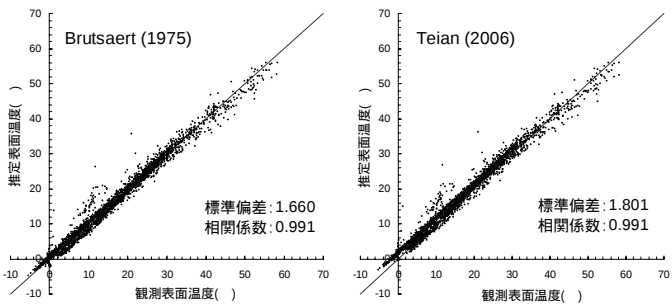


図-2 大気放射モデルによる舗装表面温度の比較

なお、比較的精度の良かった Brutsaert のモデルにおいても、10～14 時の一定の時間帯に±2 以上の大きな誤差が見られる。この原因としては、天候や熱収支の影響が関係している事が挙げられる。Brutsaert、Prata のモデルは混合型であるため、水蒸気量や大気温度に対応できていると考えられる。以上の結果より、大気放射モデルである小沼ら²⁾の提案式にも水蒸気量や大気温度を考慮した式を提案することができれば、更に良い結果が得られるのではないかと推測される。

5．おわりに

本研究は、気象変動の影響を受ける舗装体の温度予測システムを構築する上で必要となる顕熱モデルと大気放射モデルについて検討した。その結果、舗装表面温度は敏感に顕熱モデルの影響を受けることが明らかとなった。

大気放射モデルの違いが舗装表面温度に及ぼす影響は比較的小さい事が判った。小沼ら²⁾の提案式に水蒸気量や大気温度も対応させる事により、今以上に良い結果が得られるのではないかと考えられる。

【参考文献】

- 1) 近藤純正：地表面に近い大気の科学—理解と応用—，東京大学出版会
- 2) 小沼幸訓，吉中保，藤波潔，松井邦人：鳩山試験サイトで観測した気象データを用いた大気放射モデルの検証，土木学会舗装工学論文集，第 11 巻，2006.12.
- 3) 青木大介，吉中保，藤波潔，井上武美，松井邦人：舗装の熱パラメータ推定に関する考察，土木学会舗装工学論文集，第 10 巻，2005.12.