

ISSN 1346-7328

国総研資料 第653号  
平成23年9月

# 国土技術政策総合研究所資料

TECHNICAL NOTE of  
National Institute for Land and Infrastructure Management

No.653

September 2011

## 空港アスファルト舗装の夜間施工時の 降温時間に関する解析的検討

坪川将丈・水上純一・齊藤泰・前川亮太

Study on Cooling Time during Night Time Construction  
of Airport Asphalt Pavement

Yukitomo TSUBOKAWA, Junichi MIZUKAMI,  
Yutaka SAITOH and Ryota MAEKAWA

国土交通省 国土技術政策総合研究所

National Institute for Land and Infrastructure Management  
Ministry of Land, Infrastructure, Transport and Tourism, Japan

# 空港アスファルト舗装の夜間施工時の 降温時間に関する解析的検討

坪川将丈\*・水上純一\*\*・齊藤泰\*\*\*・前川亮太\*\*\*\*

## 要 旨

空港アスファルト舗装施工時の舗装温度の変化を計算可能な空港舗装温度解析プログラムを開発し、夜間におけるアスファルト舗装施工時の舗装表面温度が交通開放温度以下となるまでの降温時間に対して、種々の条件が及ぼす影響を検討した。その結果、施工時の気温、オーバーレイ層初期温度、一層施工厚、複数層施工の場合の各層の施工時間間隔が降温時間に及ぼす影響程度を定量的に明らかにした。

キーワード：降温時間，舗装温度，熱収支解析，空港アスファルト舗装

---

\* 空港研究部 主任研究官

\*\* 空港研究部 空港施設研究室 室長

\*\*\* 空港研究部 空港施設研究室 研究官

\*\*\*\* 独立行政法人港湾空港技術研究所 構造研究領域 空港舗装研究チーム 主任研究官

## Study on Cooling Time during Night Time Construction of Airport Asphalt Pavement

Yukitomo TSUBOKAWA<sup>\*</sup>, Junichi MIZUKAMI<sup>\*\*</sup>,  
Yutaka SAITOH<sup>\*\*\*</sup> and Ryota MAEKAWA<sup>\*\*\*\*</sup>

### Synopsis

Pavement temperature analysis program was developed to estimate time-series temperature change of asphalt concrete layer of airport asphalt pavement. By using the program, it is clarified that air temperature, initial temperature and thickness of asphalt concrete layer during night time construction affect to cooling time of asphalt concrete layer very much. Furthermore, the effects of those conditions to the cooling time are clarified quantitatively.

**Key Words:** cooling time, pavement temperature, heat balance analysis, airport asphalt pavement

---

\* Senior Researcher, Airport Department

\*\* Head, Airport Facilities Division, Airport Department

\*\*\* Researcher, Airport Facilities Division, Airport Department

\*\*\*\* Senior Research Engineer, Pavement Research Group, Structural Engineering Research Division,  
(Independent Administrative Institution, Port and Airport Research Institute)

## 目 次

|                                |    |
|--------------------------------|----|
| 1. はじめに .....                  | 1  |
| 2. 空港舗装温度解析プログラムの概要 .....      | 1  |
| 3. 空港舗装温度解析プログラムの適用性の検証 .....  | 4  |
| 3.1 供用時のアスファルト舗装温度に関する検証 ..... | 4  |
| 3.2 一層施工時の舗装温度に関する検証 .....     | 8  |
| 3.3 複数層施工時の舗装温度に関する検証 .....    | 10 |
| 4. 夜間施工時の降温時間に関する検討 .....      | 11 |
| 4.1 解析条件 .....                 | 11 |
| 4.2 解析結果 .....                 | 14 |
| 4.3 各条件が降温時間に及ぼす影響の定量的検討 ..... | 16 |
| 5. 結論 .....                    | 17 |
| 参考文献 .....                     | 18 |



## 1. はじめに

空港の滑走路や誘導路などの空港舗装は横断勾配，縦断勾配が厳しく規定されていることから，舗装強度の確保のみならず，勾配修正等の目的から，厚いアスファルトオーバーレイ層が複数層で施工される場合がある．空港におけるアスファルトオーバーレイ施工は主に夜間に実施されるが，施工終了後の早朝には供用を開始することから，初期わだち掘れの発生を防ぐためには，施工直後の加熱アスファルト混合物の温度を，供用開始までに十分に低下させる必要がある．このため，施工中から供用開始までの舗装温度の推移は施工計画や材料の選定にも大きく影響する．しかしながら，施工中の舗装温度は，気温，風速，オーバーレイ層初期温度（アスファルト混合物敷均し時温度），一層施工厚，施工層数，複数層施工における一層目と二層目の施工時間間隔等の気象条件，施工条件に大きく左右されると考えられることから，その予測を精度良く行うことは困難である．

アスファルト舗装施工時の舗装温度の変化を計算するプログラムとしては，Timm<sup>1)</sup>らによる Calcool がある．しかしながら Calcool では，アスファルト混合物や粒状材料等の材料定数がプログラム内で固定されていることから，様々な条件に応じた解析が困難である．

以上の背景から，種々の気象条件，施工条件を基に舗装温度の時系列変化を解析する空港舗装温度解析プログラム（以下，プログラム）を開発し，夜間のアスファルト舗装施工直後の舗装表面温度が交通開放温度以下となるまでに必要となる時間（降温時間）に対して，気象条件，施工条件が及ぼす影響を検討した．

以降では，まず，実測された舗装温度と解析による舗装温度を比較することにより，本プログラムの適用性，解析に使用する材料定数の妥当性について検証した．続いて，夜間施工を想定した種々の条件を用いてプログラムによる解析を実施し，夜間施工のアスファルト舗装施工における降温時間の傾向について定量的に分析した．

## 2. 空港舗装温度解析プログラムの概要

今回開発したプログラムは，一次元もしくは二次元の有限要素法により熱収支解析を実施し，舗装温度の時系列変化を算出するものである．二次元解析については，アスファルト混合物層内に層間剥離が発生した場合の剥離部と非剥離部の舗装表面温度の差<sup>2)</sup>などを検討するために開発したメニューであるため，ここでは一次元解析

についてのみ説明する．

図-1 に熱収支解析モデルを示す．舗装内部の熱の流れを(1)式による熱伝導方程式で，顕熱輸送量を(2)式によるアスファルト混合物表面と大気との間の熱伝達方程式で，舗装表面への日射・舗装表面からの反射日射の影響を(3)式による等価外気温式<sup>3)</sup>でそれぞれ考慮した．なお，赤外放射（雲・水蒸気・大気等から地表面への下向き放射と，地表面から上空へ向けての上向き放射）については本プログラムでは考慮していない．また，潜熱についても，舗装表面に存在する水分が蒸発することによる影響は無視することとして考慮していない．

本プログラムでは，アスファルト混合物の一層施工のみならず，複数層施工の際の舗装温度についても検討することを目的としているため，各層について，施工開始時刻とオーバーレイ層初期温度を設定可能とした．そのため，複数層の施工を想定した解析を行う場合には，解析当初の解析モデルに対して，解析途中でオーバーレイ層の要素を追加することで対応している．

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\lambda}{c\rho} \left( \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) \quad (1)$$

$$Q = h(T_s - T_e) \quad (2)$$

$$T_e = T_a + \alpha \frac{J}{h} \quad (3)$$

ここに，

$T$  : 舗装温度 (K)，

$t$  : 時間 (s)，

$\lambda$  : 熱伝導率 (W/m/K)，

$c$  : 比熱 (kJ/kg/K)，

$\rho$  : 密度 (kg/m<sup>3</sup>)，

$z$  : 空間座標 (m)，

$Q$  : 顕熱輸送量 (W/m<sup>2</sup>)，

$h$  : 熱伝達率 (W/m<sup>2</sup>/K)，

$T_s$  : 舗装表面温度 (K)，

$T_a$  : 気温 (K)，

$T_e$  : 等価外気温 (K)，

$J$  : 日射量 (W/m<sup>2</sup>)，

$\alpha$  : 舗装表面の日射吸収率．

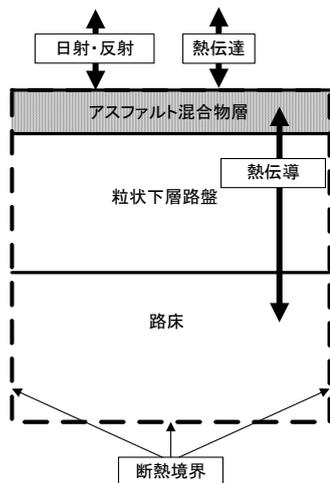


図-1 熱収支解析モデル図

プログラムにより温度解析を行う上で設定が必要な条件を表-1に示す。本プログラムでは、表-1に示す入力条件を基に時系列解析を実施しているが、その計算間隔は10分に設定している。また、1ケースの計算に要する時間は十数秒程度であり、30点までの任意位置の舗装温度の時系列温度を出力することができる。

表-1のうち、材料条件である比熱、熱伝導係数、熱伝達係数、日射吸収率については、表-2～表-9に示すように、既往の研究で様々な値が提案されているため、これらを参考として表-10のとおり設定することとした。

表-1 プログラムにおける設定条件

| 条件   | 設定項目                       | 備考  |
|------|----------------------------|---|
| 構造条件 | 層数                         | 最大10層まで入力可能。  |
|      | 層厚 (cm)                    | 各層厚を入力。ただし、路床厚については、舗装全体厚が250cmとなるように自動設定される。         |
| 材料条件 | 初期温度 (°C)                  | オーバーレイ層については、混合物敷均し時温度を入力。その他の層については、計算開始時刻における温度を入力。 |
|      | 比熱 (J/kg/K)                |   |
|      | 密度 (t/m <sup>3</sup> )     |   |
|      | 熱伝導率 (W/m/K)               |   |
|      | 熱伝達率 (W/m <sup>2</sup> /K) | 一時的にでも舗装表面となる層にのみ入力。                                  |
|      | 日射吸収率                      | 日射を考慮する場合で、一時的にでも舗装表面となる層に入力。                         |
| 施工条件 | オーバーレイフラッグ                 | オーバーレイ層であるか否かを選択。                                     |
|      | 各層施工開始時刻                   | オーバーレイ層についてのみそれぞれ入力。                                  |
| 気象条件 | 気温設定                       | ・気温一定（個別入力した固定気温を使用）<br>・気温変化（個別入力した時系列気温を使用） を選択。    |
|      | 固定気温 (°C)                  | 「気温設定」で気温一定を選択した場合に入力。                                |
|      | 時系列気温 (°C)                 | 「気温設定」で気温変化を選択した場合に入力。                                |
|      | 日射フラッグ                     | 日射を考慮するか否かを選択。  |
|      | 時系列日射量 (W/m <sup>2</sup> ) | 日射を考慮する場合に入力。   |
| 解析条件 | 計算開始時刻                     | 計算を開始する時刻を入力。   |
|      | 計算終了時刻                     | 計算を終了する時刻を入力。   |
|      | 出力点の深さ (m)                 | 解析結果を出力する舗装表面からの深さを入力。                                |

表-2 アスファルト混合物の比熱

| 出典                            | 比熱 (J/kg/K) |
|-------------------------------|-------------|
| 青木ら <sup>4)</sup>             | 1280        |
| 小作ら <sup>5)</sup>             | 830~850     |
| 椎名ら <sup>6)</sup>             | 880         |
| 福田ら <sup>7)</sup>             | 900         |
| 著者らによる室内試験値<br>(断熱法, 35~70°C) | 890         |

表-3 粒状路盤材の比熱

| 出典                | 比熱 (J/kg/K) |
|-------------------|-------------|
| 椎名ら <sup>6)</sup> | 840         |
| 福田ら <sup>7)</sup> | 1200        |

表-4 路床材料の比熱

| 出典                | 比熱 (J/kg/K) |
|-------------------|-------------|
| 椎名ら <sup>6)</sup> | 1840        |
| 福田ら <sup>7)</sup> | 1200        |

表-5 アスファルト混合物の熱伝導率

| 出典                            | 熱伝導率 (W/m/K) |      |
|-------------------------------|--------------|------|
| 青木ら <sup>4)</sup>             | 2.34         |      |
| 小作ら <sup>5)</sup>             | 20~40°C      | 1.60 |
| 椎名ら <sup>6)</sup>             | 1.45         |      |
| 著者らによる室内試験値<br>(JIS A 1412-2) | 0°C          | 1.06 |
|                               | 20°C         | 1.08 |
|                               | 40°C         | 1.11 |
|                               | 60°C         | 1.18 |

表-6 粒状路盤材の熱伝導率

| 出典                | 熱伝導率 (W/m/K) |
|-------------------|--------------|
| 椎名ら <sup>6)</sup> | 2.51         |

表-7 路床材料の熱伝導率

| 出典                | 熱伝導率 (W/m/K) |
|-------------------|--------------|
| 椎名ら <sup>6)</sup> | 0.52         |

表-8 アスファルト混合物の熱伝達率

| 出典                               | 熱伝達率 (W/m <sup>2</sup> /K)   |
|----------------------------------|--|
| Jürges<br>(ユルゲス) 式 <sup>8)</sup> | 普通面, v を風速(m/s)として<br>5.8+3.9v (v ≤ 5m/s)<br>7.1v <sup>0.78</sup> (v > 5m/s) |
|                                  | 粗面, v を風速(m/s)として<br>6.2+4.2v (v ≤ 5m/s)<br>7.5v <sup>0.78</sup> (v > 5m/s)  |
| 青木ら <sup>4)</sup>                | 6.13   |
| 椎名ら <sup>6)</sup>                | 5.8  |
| 姫野ら <sup>9)</sup>                | 乾燥路面, v を風速(m/s)として<br>-1.75v <sup>2</sup> +14.85v+15.18                     |
|                                  | 湿潤路面, v を風速(m/s)として<br>-8.38v <sup>2</sup> +75.46v+28.12                     |

表-9 アスファルト混合物の日射吸収率

| 出典                | 日射吸収率 |
|-------------------|-------|
| 椎名ら <sup>6)</sup> | 0.9   |
| 姫野ら <sup>9)</sup> | 0.91  |

表-10 材料条件

| 材料            | 比熱<br>(J/kg/K) | 密度<br>(t/m <sup>3</sup> ) | 熱伝導率<br>(W/m/K) | 熱伝達率<br>(W/m <sup>2</sup> /K)  | 日射吸収率 |
|---------------|----------------|---------------------------|-----------------|--------------------------------|-------|
| アスファルト<br>混合物 | 890            | 2.35                      | 1.10            | 平均風速と<br>Jürges 式 (粗面)<br>から算出 | 0.9   |
| 粒状路盤          | 840            | 2.00                      | 2.51            | -                              | -     |
| 路床            | 1840           | 1.80                      | 0.52            | -                              | -     |

### 3. 空港舗装温度解析プログラムの適用性の検証

#### 3.1 供用時のアスファルト舗装温度に関する検証

東京国際空港において測定された供用中のアスファルト舗装温度データを使用し、昼間及び夜間の舗装温度に対するプログラムの適用性、解析に使用する材料定数の妥当性を検証することとした。

##### (1) 計測概要

検証に使用する実測舗装温度は、東京国際空港 J 誘導路の舗装内に設置された熱電対により、2010 年 3 月から 11 月にかけて測定されたものを使用した。当該舗装の断面図を図-2 に示す。表層は厚さ 7cm のストレートアスファルト混合物（密粒度，骨材最大粒径 20mm），基層は厚さ 8cm のストレートアスファルト混合物（再生粗粒度，骨材最大粒径 20mm）である。

熱電対の設置位置は表層中央（舗装表面からの深さ 3.5cm），表層下面（舗装表面からの深さ 7cm）及び基層下面（舗装表面からの深さ 15cm）の 3 点である。



##### (2) 解析条件

解析は、当該空港において 2010 年の年間最高気温を記録した 2010 年 7 月 22 日の昼間と深夜を対象とした。解析対象時間は、昼間の舗装温度の検証では 7 月 22 日午前 6 時から午後 5 時まで、夜間の舗装温度の検証では 7 月 23 日午前 0 時から午前 6 時までとした。

解析に使用する気温、風速、日射量は、当該空港最寄りの AMeDAS 観測点（気温と風速は羽田，日射量は羽田での記録がないため東京）のデータを用いた。気温は毎時の気温を、日射量も毎時の日射量を用いるが、夜間の舗装温度の検証では日射量を考慮しないものとした。風速については、アスファルト混合物層の熱伝達率を Jürges 式（粗面）から決定するために使用するが、解析対象時間の平均風速を採用した。設定した気温、風速、日射量を表-11、表-12 に示す。

既設舗装の初期温度については、解析開始時刻（昼間の解析では午前 6 時，夜間の解析では午前 0 時）に舗装表面近傍の熱電対（表面からの深さ 3.5cm）で測定された温度を用いた。

舗装を構成する各層の厚さについては、図-2 のとおり設定した。なお、路床厚については、路床・路盤・アスファルト混合物層の厚さの合計が 250cm となるように自動設定される。これは、プログラム開発の過程で、有限要素モデル最下部の断熱境界の位置が舗装表面から 250cm であれば、断熱境界の位置が解析で着目するアスファルト混合物層の温度へ及ぼす影響が無視できる程度であることを確認し、プログラムで統一的に用いている設定である。

表-11 昼間の解析に使用した気温、風速、日射量（網掛けは設定値）

| 年月日                    | 時刻  | 気温 (°C) | 風速 (m/s) | 日射量 (W/m <sup>2</sup> ) |     |
|------------------------|-----|---------|----------|-------------------------|-----|
| 2010<br>年<br>7月<br>22日 | 6   | 26.8    | 1.5      | 33                      |     |
|                        | 7   | 27.9    | 2.1      | 189                     |     |
|                        | 8   | 28.5    | 2.5      | 322                     |     |
|                        | 9   | 29.4    | 2.9      | 556                     |     |
|                        | 10  | 30.1    | 3.0      | 719                     |     |
|                        | 11  | 32.0    | 3.9      | 808                     |     |
|                        | 12  | 33.9    | 5.0      | 828                     |     |
|                        | 13  | 35.6    | 6.0      | 825                     |     |
|                        | 14  | 35.1    | 6.6      | 761                     |     |
|                        | 15  | 34.7    | 7.8      | 642                     |     |
|                        | 16  | 33.1    | 8.7      | 494                     |     |
|                        | 17  | 31.8    | 8.3      | 306                     |     |
|                        | 平均值 |         | 31.6     | 4.9                     | 540 |

表-12 夜間の解析に使用した気温、風速、日射量（網掛けは設定値）

| 年月日                    | 時刻 | 気温 (°C) | 風速 (m/s) | 日射量 (W/m <sup>2</sup> ) |
|------------------------|----|---------|----------|-------------------------|
| 2010<br>年<br>7月<br>23日 | 0  | 28.1    | 4.2      | 0                       |
|                        | 1  | 26.4    | 2.2      | 0                       |
|                        | 2  | 26.2    | 2.3      | 0                       |
|                        | 3  | 26.1    | 2.3      | 0                       |
|                        | 4  | 26.5    | 0.3      | 0                       |
|                        | 5  | 26.7    | 1.0      | 0                       |
|                        | 6  | 27.5    | 0.6      | 0                       |
| 平均值                    |    | 26.8    | 1.8      | 0                       |

(3) 解析結果

表面から3.5cmの舗装温度について、実測結果と解析結果を図-3、図-4に示す。昼間の実測結果と解析結果を比較すると、解析では午前中の温度上昇傾向は再現されているものの、解析による舗装温度は実測温度よりも10℃程度低いことがわかる。一方、夜間の実測結果と解析結果を比較すると、解析による舗装温度は実測温度と概ね一致していることがわかる。

夜間の解析結果が実測結果と概ね一致するにも関わらず、昼間の解析結果が実測結果と乖離している原因としては、昼間と夜間の解析条件の相違点が日射量の有無であることから、(3)式により日射の影響を考慮する際に必要とするアスファルト混合物の熱伝達率及び日射吸収率の設定が影響しているものと考えられる。そのため、以降では表-10で設定した材料定数の妥当性について検証することとした。

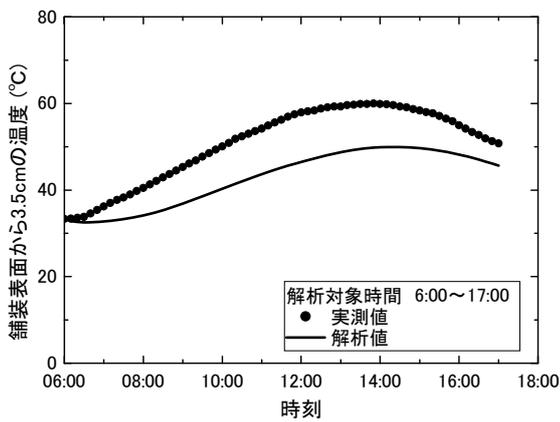


図-3 昼間の実測温度と解析温度の比較

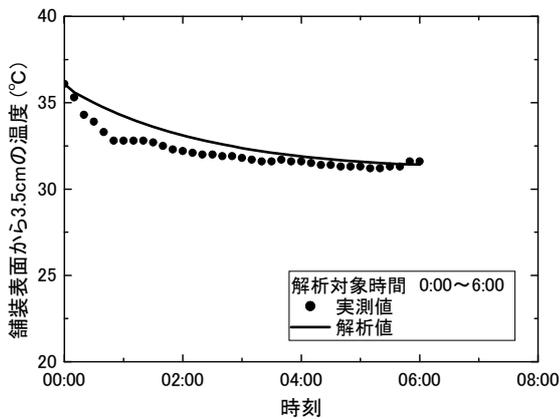


図-4 夜間の実測温度と解析温度の比較

(4) 材料定数の妥当性の検証

a) 熱伝達率の影響

アスファルト混合物の熱伝達率については、表-8に示したとおり種々の方法が提案されているが、前項の昼間の解析で使用した平均風速(4.9m/s)を用いて熱伝達率を算出した結果(表-13)を見ると、提案されている熱伝達率は非常にばらついていることがわかる。そこで、熱伝達率の設定値が解析結果に及ぼす影響を検証した。

図-5に、熱伝達率を15.0、20.0、26.8 W/m<sup>2</sup>/Kと変化させた場合の昼間の解析結果を示す。これらの値は、Jürges式(粗面)と風速から算出したと仮定して風速を逆算すると、風速はそれぞれ2.1 m/s、3.3 m/s、実測平均値の4.9m/sの場合に相当するため、風速1m/s強程度の違いであるにもかかわらず、舗装温度には最大で5℃程度の影響がある。また、熱伝達率を小さくすると、解析による舗装温度は高くなり、実測値に近くなることわかる。

表-13 アスファルト混合物の熱伝達率

| 出典                    | 風速4.9m/sとした場合の熱伝達率(W/m <sup>2</sup> /K) |
|-----------------------|---|
| Jürges式 <sup>8)</sup> | 24.9(普通面)                               |
|                       | 26.8(粗面)                                |
| 青木ら <sup>4)</sup>     | 6.13(風速は影響しない)                          |
| 椎名ら <sup>6)</sup>     | 5.8(風速は影響しない)                           |
| 姫野ら <sup>9)</sup>     | 45.9(乾燥面)                               |

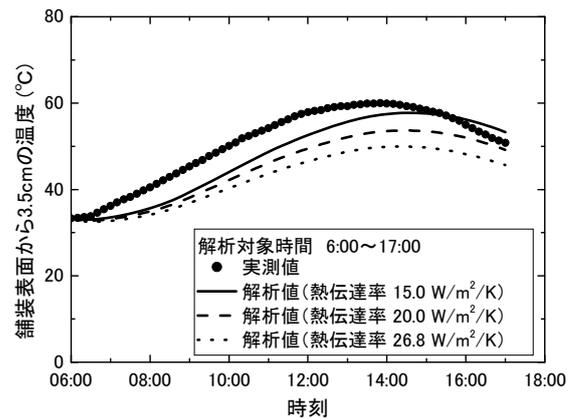


図-5 熱伝達率が昼間の舗装温度に及ぼす影響

図-6に、熱伝達率を6.2, 13.9, 20.0 W/m<sup>2</sup>/Kと変化させた場合の夜間の解析結果を示す。これらの値は、Jürges式（粗面）と風速から算出したと仮定して風速を逆算すると、風速はそれぞれ0.0 m/s, 実測平均値の1.8 m/s, 3.3 m/sであり、2m/s弱程度の違いであるにも関わらず、舗装温度には大きな差は生じていないことがわかる。

b) 日射吸収率の影響

アスファルト混合物の日射吸収率については、表-9に示したとおり、既往の文献では0.9程度と言われている。しかしながら前述のとおり、昼間の解析において日射を考慮する場合に解析結果に大きな影響を及ぼす可能性がある。そこで、日射吸収率の設定値が解析結果に及ぼす影響を検証した。

図-7に、日射吸収率を0.8, 0.9, 1.0と変化させた場合の昼間の解析結果を示す。熱伝達率と同様に、日射吸収率についても昼間の解析結果に及ぼす影響は無視できないものの、熱伝達率よりは影響が小さいことがわかる。

c) 熱伝導率の影響

アスファルト混合物の熱伝導率の設定値が解析結果に及ぼす影響を検証した。図-8, 図-9に、熱伝導率を1.1 J/kg/K, 1.3 J/kg/K, 1.5 J/kg/Kと変化させた場合の昼間と夜間の解析結果を示すが、解析による舗装温度への影響は非常に軽微であることがわかる。

d) 比熱の影響

アスファルト混合物の比熱の設定値が解析結果に及ぼす影響を検証した。図-10, 図-11に、比熱を800 W/m/K, 890 W/m/K, 1000W/m/Kと変化させた場合の昼間と夜間の解析結果を示すが、解析による舗装温度への影響は非常に軽微であることがわかる。

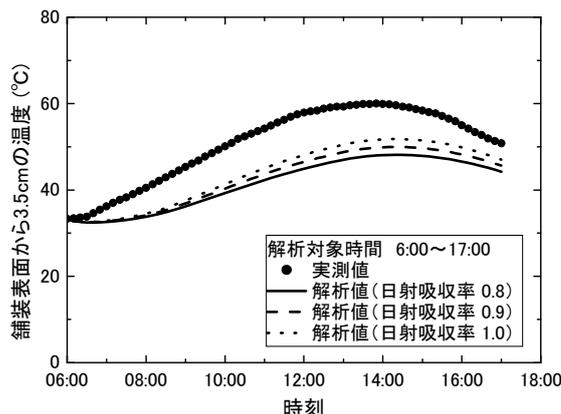


図-7 日射吸収率が昼間の舗装温度に及ぼす影響

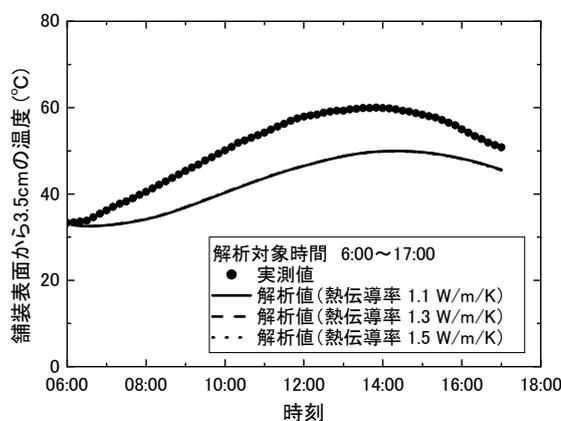


図-8 熱伝導率が昼間の舗装温度に及ぼす影響

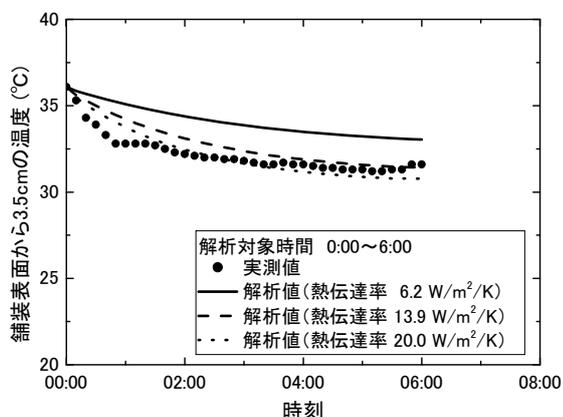


図-6 熱伝達率が夜間の舗装温度に及ぼす影響

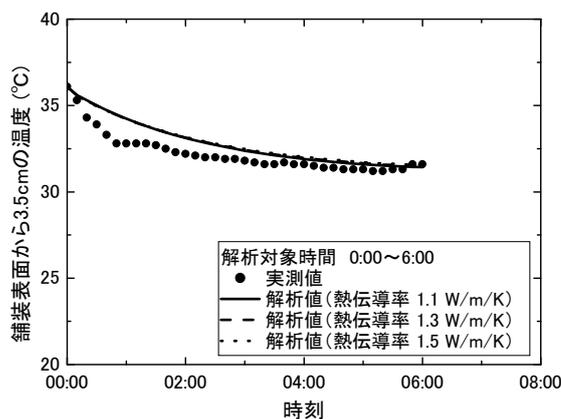


図-9 熱伝導率が夜間の舗装温度に及ぼす影響

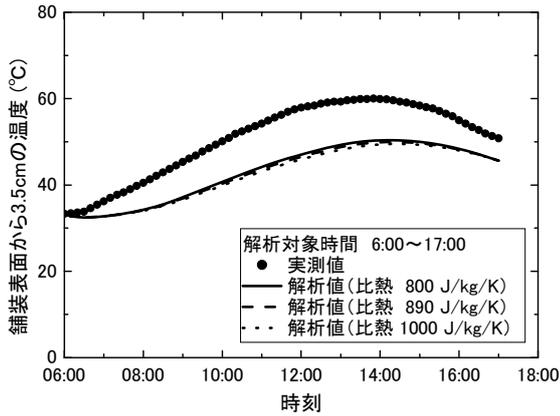


図-10 比熱が昼間の舗装温度に及ぼす影響

以上の検証結果を踏まえ、以降の夜間を対象とした解析においても、引き続き表-10 に示した材料条件を用いることとした。

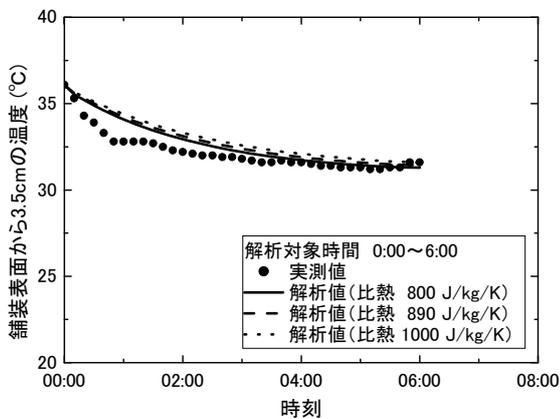


図-11 比熱が夜間の舗装温度に及ぼす影響

(5) まとめ

以上の結果から、供用時の舗装温度を対象としたプログラムの適用性、材料定数の妥当性については、以下の通りまとめられる。

- ① 夜間については、プログラムを用いることで舗装温度を精度良く推定することが可能である。なお、アスファルト混合物の熱伝達率が解析結果に影響を及ぼす傾向があるが、平均風速と Jürges 式 (粗面) から計算される熱伝達率を使用することで、解析結果は実測結果と概ね一致する。
- ② 昼間におけるプログラムの解析結果は、夜間に比べて精度が劣る。これは、日射の有無が影響していると考えられ、特にアスファルト混合物の熱伝達率が解析結果に大きく影響することから、熱伝達率の設定に注意を要する。
- ③ アスファルト混合物の熱伝導率及び比熱については、昼間・夜間を問わず解析結果に及ぼす影響は軽微である。

### 3.2 一層施工時の舗装温度に関する検証

独立行政法人港湾空港技術研究所により実施された、既設舗装に対するオーバーレイ工事で測定された舗装温度データを使用し、一層施工時の舗装温度に対するプログラムの適用性を検証することとした。

#### (1) 施工概要

施工断面図を図-12 に示す。この施工は、既設アスファルト舗装を切削し、骨材最大粒径 20mm のアスファルト混合物を、一層施工厚 3~10cm で施工したものであり、12月の夕方に実施された。施工時の舗装温度は、施工層表面の温度を接触温度計により計測された。また、施工時気温については熱電対により計測された。

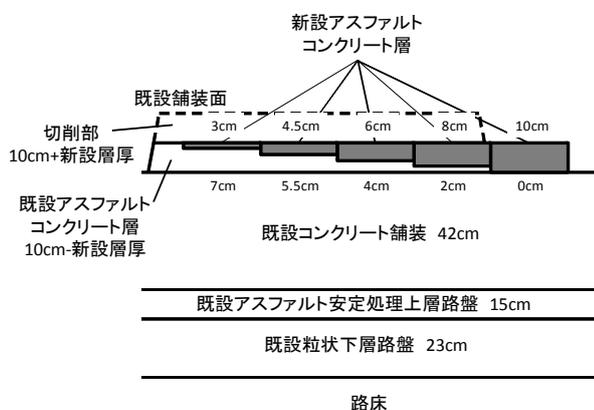


図-12 施工断面図

#### (2) 解析条件

気象条件及び施工条件については表-14、材料条件については表-15 のとおり設定した。なお、施工日の天候が曇りであり、施工開始時刻 (16:10) が日没時刻 (16:30 前後) に近いことから、日射は考慮しないものとした。

舗装を構成する各層の厚さについては、図-12 のとおり設定した。ただし、本プログラムでは層厚を 1cm 単位で入力する必要があるため、新設層厚 4.5cm のケースについては除外した。なお、路床厚については、前述の通り路床・路盤・アスファルト混合物層の厚さの合計が 250cm となるように自動設定される。

既設舗装の初期温度については、施工開始前の既設層表面温度を用いた。また、新設層の初期温度については混合物敷均し時温度の平均値を用いた。

#### (3) 解析結果

一層施工厚を変えた場合のオーバーレイ層表面温度の実測結果と解析結果を図-13 に示す。一層施工厚の違

いに関わらず、舗装表面温度の急激な低下状況を精度良く再現できていることがわかる。

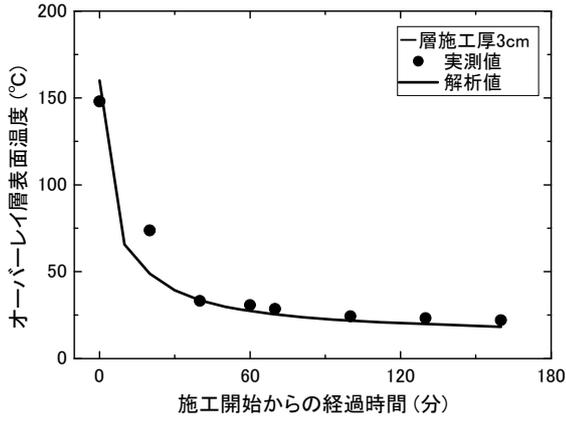
以上の結果から、本プログラムにより、様々な一層施工厚における施工中の舗装温度を精度よく算出することが可能であると考えられる。

表-14 気象条件及び施工条件

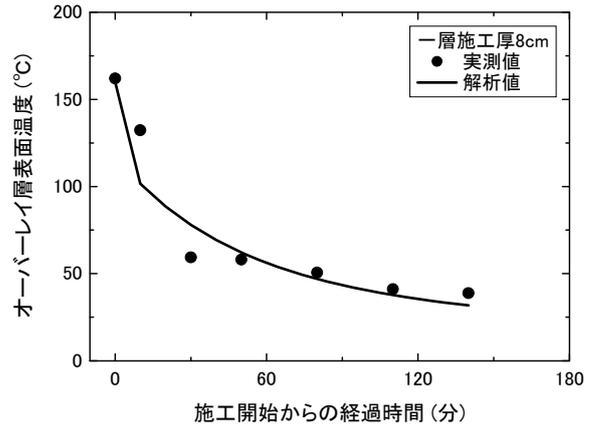
|                |           |                |
|----------------|-----------|----------------|
| 気象条件           | 天候        | 曇り             |
|                | 施工時平均風速   | 4m/s           |
|                | 施工時気温     | 16 時台 : 14.2°C |
|                |           | 17 時台 : 13.7°C |
|                |           | 18 時台 : 13.4°C |
| 19 時台 : 12.2°C |           |                |
| 20 時台 : 10.9°C |           |                |
| 施工条件           | 施工時期      | 12 月           |
|                | 敷均し開始時刻   | 16:10          |
|                | 敷均し時混合物温度 | 160°C          |

表-15 材料条件

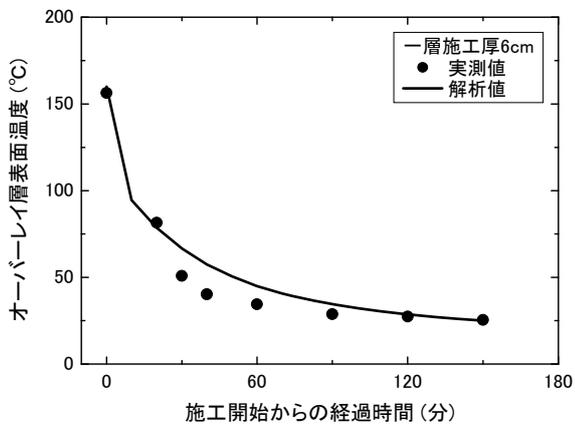
| 層              | 初期温度 (°C) | 比熱 (J/kg/K)         | 密度 (t/m <sup>3</sup> ) | 熱伝導率 (W/m/K)        | 熱伝達率 (W/m <sup>2</sup> /K) |
|----------------|-----------|---------------------|------------------------|---------------------|----------------------------|
| 新設アスファルト混合物層   | 160       | 890                 | 2.35                   | 1.10                | 23.0                       |
| 既設アスファルト混合物層   |           |                     |                        |                     |                            |
| コンクリート版        |           | 1050 <sup>10)</sup> | 2.40                   | 2.56 <sup>10)</sup> | 23.0                       |
| アスファルト安定処理上層路盤 | 13.2      | 890                 | 2.35                   | 1.10                | -                          |
| 粒状路盤           |           | 840                 | 2.00                   | 2.51                | -                          |
| 路床             |           | 1840                | 1.80                   | 0.52                | -                          |



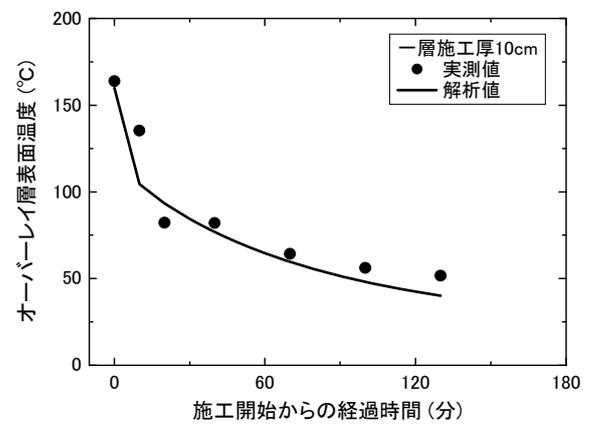
(a) 一層施工厚 3cm の場合



(c) 一層施工厚 8cm の場合



(b) 一層施工厚 6cm の場合

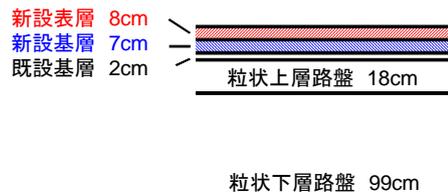


(d) 一層施工厚 10cm の場合

図-13 実測温度と解析温度の比較

### 3.3 複数層施工時の舗装温度に関する検証

那覇空港の滑走路において夜間に切削オーバーレイ（二層施工）が実施された際の舗装温度データを使用し、複数層施工時の舗装温度に対するプログラムの適用性を検証することとした。



路床

図-14 施工断面図

#### (1) 施工概要

施工断面図を図-14に示す。この施工は、既設の表層・基層を切削し、既設基層上に新設基層、新設表層を施工するものであり、10月の夜間から早朝にかけて実施された。施工時の舗装温度は熱電対により計測された。熱電対の位置は1層目である新設基層の中央（完成舗装表面からの深さ11cm）、2層目である新設表層の中央（完成舗装表面からの深さ4cm）及び新設表層の表面（完成舗装表面近傍）である。

#### (2) 解析条件

気象条件及び施工条件については表-16、材料条件については表-17のとおり設定した。なお、気温については施工時間内ではほぼ一定であることから、施工時平均気温を固定気温として設定した。

表-16 気象条件及び施工条件

|           |         |           |        |
|-----------|---------|-----------|--------|
| 気象条件      | 天候      |           | 晴れ     |
|           | 施工時平均風速 |           | 3m/s   |
|           | 施工時平均気温 |           | 23.3°C |
| 施工条件      | 施工時期    |           | 10月    |
|           | 基層      | 敷均し開始時刻   | 2:50   |
|           |         | 敷均し時混合物温度 | 144°C  |
|           | 表層      | 敷均し開始時刻   | 4:20   |
| 敷均し時混合物温度 |         | 144°C     |        |

表-17 材料条件

| 層    | 初期温度 (°C) | 比熱 (J/kg/K) | 密度 (t/m <sup>3</sup> ) | 熱伝導率 (W/m/K) | 熱伝達率 (W/m <sup>2</sup> /K) |
|------|-----------|-------------|------------------------|--------------|----------------------------|
| 新設層  | 144       | 890         | 2.35                   | 1.10         | 18.8                       |
| 既設基層 | 30        |             |                        |              |                            |
| 粒状路盤 | 30        | 840         | 2.00                   | 2.51         | -                          |
| 路床   | 30        | 1840        | 1.80                   | 0.52         | -                          |

舗装を構成する各層の厚さについては、図-14のとおり設定した。なお、路床厚については、前述の通り路床・路盤・アスファルト混合物層の厚さの合計が250cmとなるように自動設定される。

既設舗装の初期温度については、施工開始前の既設層舗装温度が不明のため、平均気温（23.3°C）より若干高い30°Cと設定した。また、新設層の初期温度については混合物敷均し時温度の平均値を用いた。

#### (3) 解析結果

オーバーレイ層温度の実測結果と解析結果を図-15に示す。実測結果を見ると、1層目（新設基層）中央の温度は初期温度から急激に低下し、その後、2層目（新設表層）の施工開始と同時に上昇している。一方、本プログラムによる解析結果と実測結果を比較すると、1層目施工後の温度低下状況のみならず、2層目施工後の両層の温度を精度良く再現できている。

以上の結果から、本プログラムにより、一層施工の場合のみならず、複数層施工の場合についても舗装温度を精度よく算出することが可能であると考えられる。

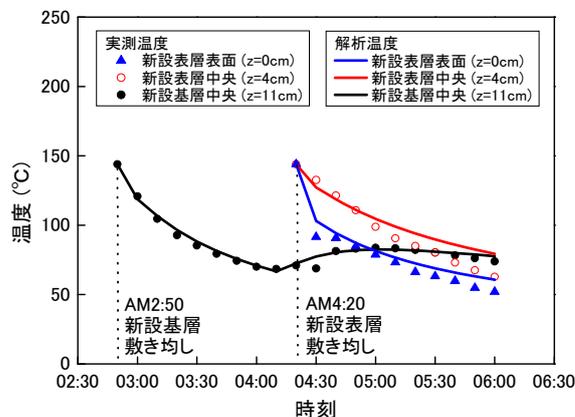


図-15 実測温度と解析温度の比較

#### 4. 夜間施工時の降温時間に関する検討

3章において、今回開発したプログラムの適用性及び材料定数の妥当性が確認できた。4章では、施工時の気温、オーバーレイ層初期温度（混合物敷均し時温度）、一層施工厚、施工層数、複数層の施工時間間隔に着目し、これらの条件がアスファルト舗装施工後の降温時間に及ぼす影響を検討した。なお、以降では、ストレートアスファルト混合物、中温化混合物を想定した解析では交通開放温度を50℃<sup>11)</sup>、改質アスファルト混合物を想定した解析では交通開放温度を60℃又は70℃<sup>11)</sup>とした。また降温時間は、図-16に示すように、オーバーレイ層施工開始時刻を起点として、オーバーレイ層表面温度（二層施工の場合は二層目の表面温度）が交通開放温度以下となるまでに要する時間と定義した。なお、プログラムにおける計算時間間隔を10分と設定しているため、降温時間についても10分単位で決定した。

##### 4.1 解析条件

###### (1) 舗装構造条件

解析に使用する既設舗装断面としては、路床の設計CBRを10%とした場合の滑走路端部中央帯の断面の設計例<sup>12)</sup>を用いることとし、図-17のとおり決定した。

###### (2) 気象条件

空港では、供用中の昼間よりも夜間の舗設工事が多いことから、夜間の施工を対象とした。そのため、日射の影響は考慮しないこととした。また、施工中の気温の設定については、表-18に示す条件でAMeDASから検索した午前0時から午前6時までの毎時の気温を参考とした。検索結果を表-19に示すが、この時間帯の気温は変動が小さいことから、解析における気温条件は午前0時から午前6時までの平均気温を基に、固定気温を表-20の通り設定した。

###### (3) 材料条件

アスファルト混合物層、粒状下層路盤、路床のそれぞれに対する材料定数は、1章で整理した表-10のとおりとした。また、アスファルト混合物層の熱伝達率については、表-19に示した各地点の年間平均風速を参考に、Jürges式（粗面）に入力する風速を4m/sとして熱伝達率を23.0W/m<sup>2</sup>/Kとした。

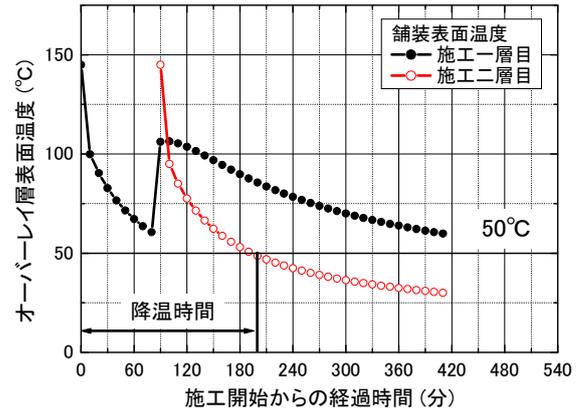


図-16 降温時間の定義

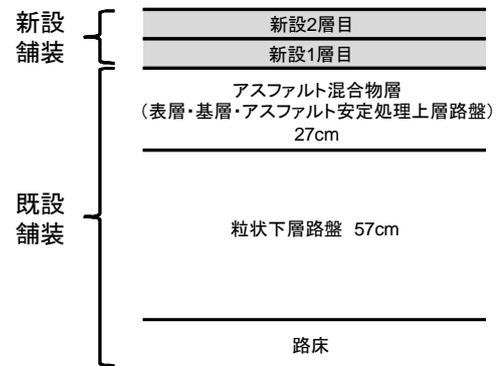


図-17 舗装断面図

表-18 AMeDASにおける気温データ検索条件

| 項目                 | 検索条件  |
|--------------------|---|
| 地点<br>(カッコ内は近傍の空港) | 千歳（新千歳空港）<br>羽田（東京国際空港）<br>豊中（大阪国際空港）<br>博多（福岡空港）<br>那覇（那覇空港） |
| 年月日                | 2010/1/1～10<br>2010/4/1～10<br>2010/8/1～10<br>2010/10/1～10     |
| 時刻                 | 午前0～6時まで  |

表-19 AMeDASにおける気温と風速

| 地点 | 月  | 午前0～6時の平均気温(°C) | 時間帯最大気温差の平均(°C) | 年間平均風速(m/s) |
|----|----|-----------------|-----------------|-------------|
| 千歳 | 1  | -4.2            | 2.4             | 4.2         |
|    | 4  | 1.1             | 1.8             |             |
|    | 8  | 20.9            | 1.1             |             |
|    | 10 | 10.6            | 1.9             |             |
| 羽田 | 1  | 4.7             | 3.1             | 5.2         |
|    | 4  | 10.8            | 1.3             |             |
|    | 8  | 26.9            | 0.8             |             |
|    | 10 | 19.4            | 0.8             |             |
| 豊中 | 1  | 2.5             | 1.9             | 2.9         |
|    | 4  | 9.9             | 2.9             |             |
|    | 8  | 27.0            | 1.4             |             |
|    | 10 | 18.0            | 1.4             |             |
| 博多 | 1  | 3.5             | 1.8             | 3.5         |
|    | 4  | 10.8            | 1.6             |             |
|    | 8  | 26.7            | 1.5             |             |
|    | 10 | 18.8            | 1.9             |             |
| 那覇 | 1  | 14.8            | 1.4             | 5.3         |
|    | 4  | 20.0            | 1.4             |             |
|    | 8  | 28.1            | 0.9             |             |
|    | 10 | 24.7            | 1.3             |             |

表-20 気温条件（網掛けは標準条件）

| ケース名  | 気温(°C) |
|-------|--------|
| 気温 15 | 15     |
| 気温 20 | 20     |
| 気温 25 | 25     |
| 気温 30 | 30     |

表-21 一層施工厚と施工層数条件（網掛けは標準条件）

| ケース名   | 一層施工厚と施工層数           |
|--------|----------------------|
| 一層 5   | 表層 5cm を施工           |
| 一層 8   | 表層 8cm を施工           |
| 二層 5+5 | 基層 5cm, 表層 5cm の順に施工 |
| 二層 8+8 | 基層 8cm, 表層 8cm の順に施工 |

表-22 施工時間間隔条件（網掛けは標準条件）

| ケース名   | 施工時間間隔(分) |
|--------|-----------|
| 間隔 60  | 60        |
| 間隔 90  | 90        |
| 間隔 120 | 120       |

表-23 オーバーレイ層初期温度条件（網掛けは標準条件）

| ケース名 | 初期温度(°C) | 備考                |
|------|----------|-------------------|
| 中温化  | 115      | 中温化混合物を想定         |
| ストアス | 145      | ストレートアスファルト混合物を想定 |
| 改質   | 170      | 改質アスファルト混合物を想定    |

(4) 一層施工厚と施工層数条件

既設舗装上に施工するオーバーレイ層の一層施工厚と施工層数については、表-21 のとおり設定した。

(5) 複数層施工における施工時間間隔条件

複数層施工の場合、一層目の施工開始から二層目の施工開始までの時間を「施工時間間隔」と定義し、表-22 のとおり設定した。

(6) 初期温度条件

オーバーレイ層初期温度としては、ストレートアスファルト混合物、中温化混合物、改質アスファルト混合物の敷均し時温度を想定し、表-23 のとおり設定した。

一方、既設舗装の各層の初期温度については、計算開始時刻の舗装温度を設定する必要があるが、気温や表面

からの深さの影響を受けるため、一律に設定することは困難である。そこで、独立行政法人港湾空港技術研究所が所有する野比実験場に製作した温度観測用アスファルト舗装（アスファルト混合物層厚 42cm）の 2011 年 2 月から 6 月までの温度観測データを用い、既設舗装の初期温度設定方法を検討した。

2011 年 2 月から 6 月の、毎月 10 日午前 0 時の深さ方向温度分布を図-18 に示す。これによると、午前 0 時時点のアスファルト混合物温度は、季節によらず表面に最も近い深さ 3cm の温度が最も低く、深さとともに温度は上昇し、21cm より深い位置においては概ね温度が一定であることがわかる。このことから、深さ 21cm の位置における温度を、既設舗装全体（既設アスファルト混合物層、粒状路盤、路床）の初期温度として設定することとした。

2011年2月から6月の毎日午前0時から午前6時までに測定された、深さ21cmの位置のアスファルト混合物温度と気温の関係を図-19に示す。これによると、深さ21cmの温度は、気温を説明変数とした回帰式で推定可能である。しかしながら、この回帰式から求めた温度は、実測値とは最大で±5℃程度の差がある場合もあることから、既設舗装の初期温度が解析結果に及ぼす影響を検討した。

気温30℃、オーバーレイ層初期温度145℃、一層施工厚8cmの条件において、既設舗装初期温度を変えた3ケース（図-19の回帰式と気温から計算した34.2℃、これとは5℃異なる29.2℃、39.2℃）について、オーバーレイ層表面温度の時系列変化を解析した結果を表-24に示す。既設舗装初期温度の±5℃程度の違いが解析結果に及ぼす影響は軽微であることから、図-19において算出した回帰式により求めた温度を既設舗装全体の初期温度として設定することに支障がないと判断した。

表-24 オーバーレイ層表面温度の解析結果

| 施工開始からの経過時間(分) | オーバーレイ層表面温度(℃) |       |       |
|----------------|----------------|-------|-------|
|                | 既設舗装           | 既設舗装  | 既設舗装  |
|                | 温度             | 温度    | 温度    |
|                | 29.2℃          | 34.2℃ | 39.2℃ |
| 50             | 58.2           | 59.2  | 60.2  |
| 100            | 45.2           | 46.4  | 47.5  |

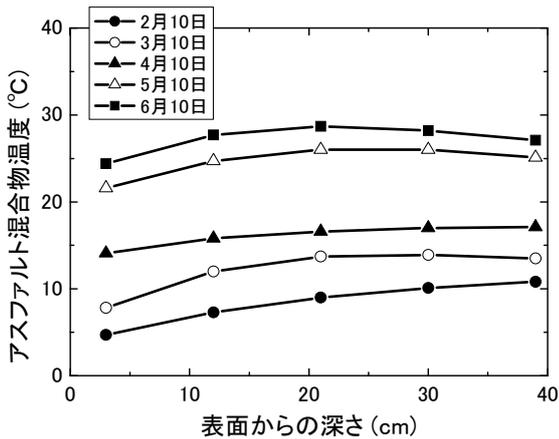


図-18 午前0時のアスファルト混合物深さ方向の温度分布

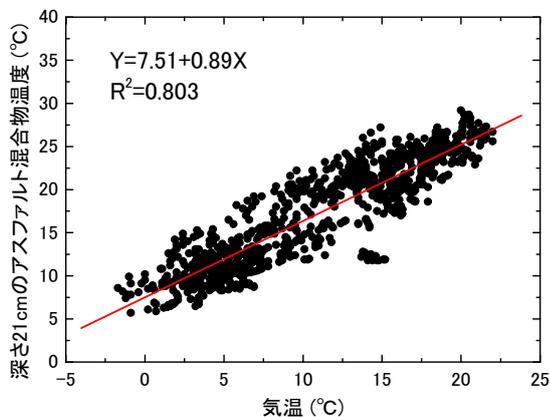


図-19 午前0時から午前6時の21cm深さ温度と気温の関係

## 4.2 解析結果

### (1) 気温の影響

気温が降温時間に及ぼす影響を検討した。気温条件は表-20の4通りとし、これ以外の条件については表-21、～表-23の標準条件とした。

オーバーレイ層表面温度の時系列変化を図-20、図-21に、降温時間を表-25に示す。気温が降温時間に及ぼす影響は非常に大きく、気温が30℃から15℃へ低下することで、降温時間は一層施工の場合で60分程度、二層施工の場合で90分程度短縮される。

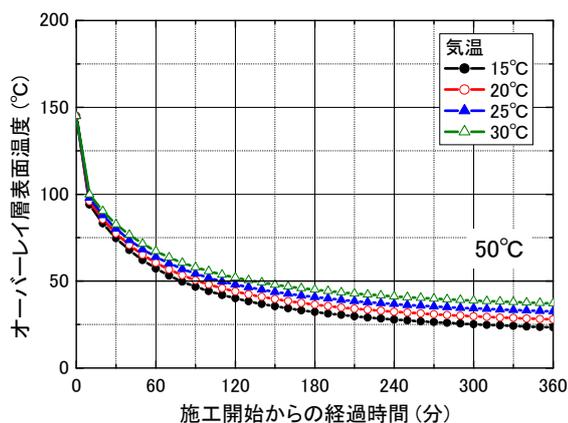


図-20 気温と表面温度の関係（一層施工）

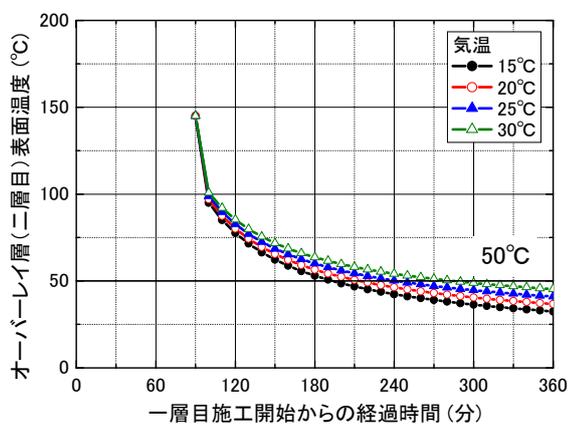


図-21 気温と表面温度の関係（二層施工）

表-25 気温と降温時間の関係

| ケース名  | 降温時間 (分) |      |
|-------|----------|------|
|       | 一層施工     | 二層施工 |
| 気温 15 | 80       | 200  |
| 気温 20 | 100      | 220  |
| 気温 25 | 110      | 250  |
| 気温 30 | 140      | 290  |

### (2) オーバーレイ層初期温度の影響

オーバーレイ層初期温度が降温時間に及ぼす影響を検討した。オーバーレイ層初期温度は表-23に示す3通りとし、これ以外の条件については、表-20～表-22の標準条件とした。

一層施工におけるオーバーレイ層表面温度の時系列変化を図-22に、降温時間を表-26に示す。オーバーレイ層初期温度の違いが降温時間に及ぼす影響は非常に大きく、気温30℃の条件下で中温化混合物を使用した場合は、ストレートアスファルト混合物を使用した場合に比べ、降温時間が40分程度短縮されることがわかる。また、改質アスファルトを想定して初期温度を170℃とした場合では、降温時間を算出するための交通開放温度を60℃又は70℃と設定したため、オーバーレイ層の初期温度が最も高いにも関わらず、ストレートアスファルト混合物を使用した場合より降温時間が短縮されることがわかる。

二層施工におけるオーバーレイ層（二層目）表面温度の時系列変化を図-23に、降温時間を表-27に示す。二層施工の場合も一層施工と同様の傾向であるが、中温化混合物を使用した場合の降温時間短縮効果は、一層施工よりも大きいことがわかる。

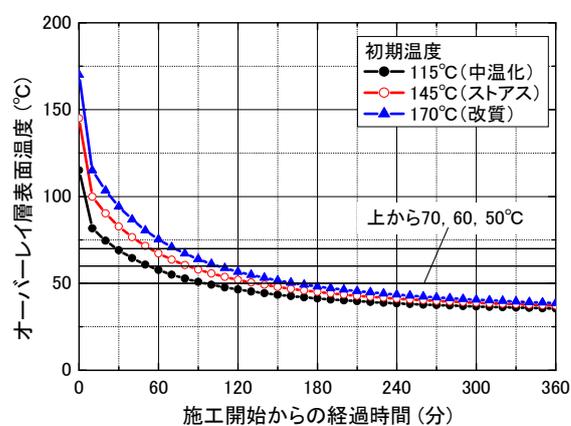


図-22 初期温度と表面温度の関係（一層施工）

表-26 オーバーレイ層初期温度と降温時間の関係（一層施工）

| ケース名 | 降温時間 (分) | 交通開放温度条件(°C) |
|------|----------|--------------|
| 中温化  | 100      | 50           |
| ストアス | 140      |              |
| 改質   | 110      | 60           |
|      | 80       | 70           |

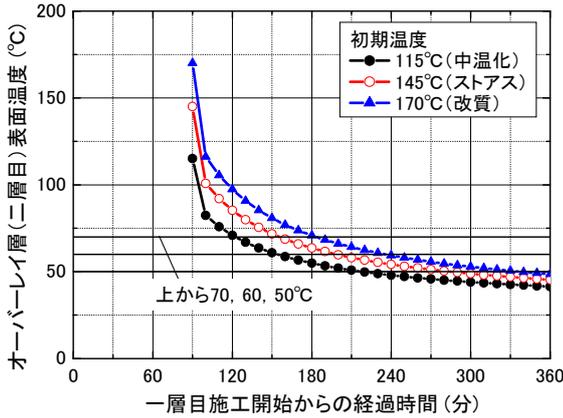


図-23 初期温度と表面温度の関係 (二層施工)

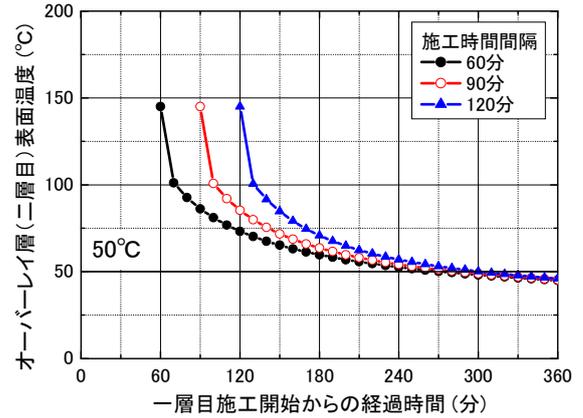


図-24 施工時間間隔と表面温度の関係 (二層施工)

表-27 オーバーレイ層初期温度と降温時間の関係 (二層施工)

| ケース名 | 降温時間 (分) | 交通開放温度条件(°C) |
|------|----------|--------------|
| 中温化  | 220      | 50           |
| ストアス | 290      |              |
| 改質   | 240      | 60           |
|      | 190      | 70           |

表-28 施工時間間隔と降温時間の関係

| ケース名   | 降温時間 (分)   |            |
|--------|------------|------------|
|        | 一層目施工開始を起点 | 二層目施工開始を起点 |
| 間隔 60  | 280        | 220        |
| 間隔 90  | 290        | 200        |
| 間隔 120 | 310        | 190        |

表-29 二層目施工開始直前の一層目表面温度

| ケース名   | 二層目施工開始直前の一層目表面温度 (°C) |
|--------|------------------------|
| 間隔 60  | 71.5                   |
| 間隔 90  | 60.6                   |
| 間隔 120 | 53.7                   |

(3) 複数層施工における施工時間間隔の影響  
 複数層施工における施工時間間隔が降温時間に及ぼす影響を検討した。施工時間間隔は表-22 に示す 3 通りとし、これ以外の条件については、表-20、表-21、表-23 の標準条件とした。

オーバーレイ層 (二層目) 表面温度の時系列変化を図-24 に、降温時間を表-28 に示す。施工時間間隔 60 分と 120 分のケースを比較すると、後者の降温時間は前者のそれに比べて、二層目の施工開始が 60 分遅れているにも関わらず、最終的な降温時間は 30 分程度の差でしかないことがわかる。

そこで、一層目施工開始ではなく、二層目施工開始を起点とした際に、二層目表面温度が 50°C 以下になるまでの降温時間を計算した結果を表-28 に合わせて示した。これを見ると、施工時間間隔が長くなるほど、すなわち一層目の施工開始に対して二層目の施工開始が遅れるほど、二層目の表面温度は早く交通開放温度に到達する結果となった。これは、表-29 に示す通り、施工時間間隔が長くなるほど、二層目を施工開始する時点の一層目表面温度は低くなることから、より温度の低い一層目の上に施工された二層目の舗装温度の方が早く低下するものと考えられる。

(4) 一層施工厚と施工層数の影響  
 一層施工厚と施工層数が降温時間に及ぼす影響について検討した。一層施工厚及び施工層数は表-21 に示す 4 通りとし、これ以外の条件については、表-20、表-22、表-23 の標準条件とした。

オーバーレイ層表面温度の時系列変化を図-25、図-26 に、降温時間を表-30 に示す。一層施工の場合、施工厚が降温時間に及ぼす影響は非常に大きく、施工厚が 5cm と 8cm では、後者の方が 50 分程度長い降温時間となる。また、二層施工の場合も傾向は同様であり、施工厚が 5+5cm と 8+8cm では、後者の方が 90 分程度長い降温時間となることから、施工厚が降温時間に及ぼす影響は、一層施工よりも二層施工の方が顕著であることがわかる。

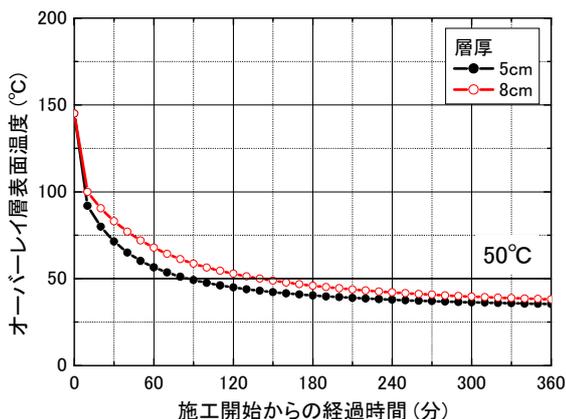


図-25 層厚と表面温度の関係（一層施工）

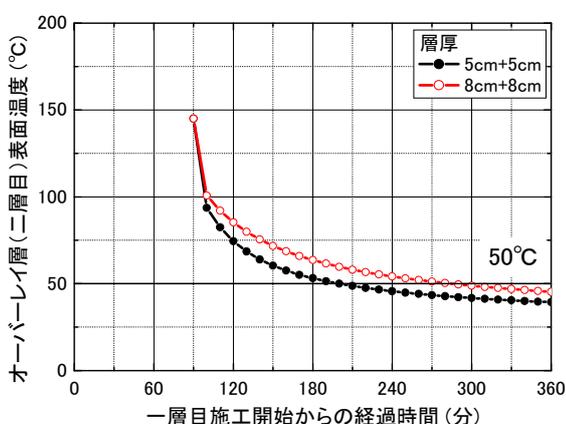


図-26 層厚と表面温度の関係（二層施工）

表-30 一層施工厚・施工層数と降温時間の関係

| ケース名   | 一層目施工開始からの<br>降温時間 (分) |
|--------|------------------------|
| 一層 5   | 90                     |
| 一層 8   | 140                    |
| 二層 5+5 | 200                    |
| 二層 8+8 | 290                    |

### 4.3 各条件が降温時間に及ぼす影響の定量的検討

前節で検討した気象条件、施工条件を対象に、各条件が降温時間に及ぼす影響について、重回帰分析を用いて定量的に分析した。

表-31 に示す条件でプログラムによりオーバーレイ層表面温度の時系列変化を計算し、交通開放温度を 50°C として、各ケースの降温時間を算出した。計算ケース数は、一層施工の場合は 80 ケース(気温 5 条件×オーバーレイ層初期温度 4 条件×施工厚 4 条件)、二層施工の場合は 240 ケース(一層施工の 80 ケース×施工時間間隔 3 条件)である。次に、プログラムで算出した降温時間を目的変数とし、説明変数を、一層施工の場合は気温、オーバーレイ層初期温度、一層施工厚、二層施工の場合は気温、オーバーレイ層初期温度、合計施工厚、施工時間間隔として、各々の説明変数から降温時間を算出する回帰式を重回帰分析により検討した。

得られた回帰式を(4)式、(5)式に示す。得られた回帰式の各説明変数の係数を見ると、一層施工で 30 分程度、二層施工で 45 分程度の降温時間短縮に相当する条件は表-32 のとおりまとめられる。

表-31 解析条件（網掛けが変動条件）

| 条件                    | 設定値  |                      |
|-----------------------|--|----------------------|
| 舗装構造                  | 図-16 のとおり  |                      |
| 熱伝達率                  | Jürges 式(粗面)で風速 4m/s<br>として 23.0 W/m <sup>2</sup> /K |                      |
| 比熱、密度、熱伝導率            | 表-10 のとおり  |                      |
| 交通開放温度                | 表面温度 50°C  |                      |
| 気温                    | 22, 24, 26, 28, 30°C                                 |                      |
| オーバーレイ層初期温度           | 115, 125, 135, 145°C                                 |                      |
| 施工厚                   | 一層施工の場合  | 5, 6, 7, 8cm         |
|                       | 二層施工の場合  | 5+5, 6+6, 7+7, 8+8cm |
| 施工時間間隔<br>(二層施工の場合のみ) | 60, 90, 120 分  |                      |

表-32 降温時間を短縮するための条件

| 条件     | 一層施工で降温時<br>間を 30 分程度短<br>縮するための条件 | 二層施工で降温時<br>間を 45 分程度短<br>縮するための条件 |
|--------|------------------------------------|------------------------------------|
| 初期温度   | 30°C 程度の低下                         |                                    |
| 気温     | 9°C 程度の低下                          |                                    |
| 一層施工厚  | 2cm 程度の減厚<br>(二層施工では合計 4cm 程度の減厚)  |                                    |
| 施工時間間隔 | —                                  | 60 分程度の短縮                          |

一層施工の場合、

$$t_{cool} = -213 + 0.96T_i + 3.3T_a + 13a \quad (4)$$

二層施工の場合、

$$t_{cool} = -314 + 1.48T_i + 5.0T_a + 10b + 0.71c \quad (5)$$

ここに、

$t_{cool}$  : 降温時間 (分),

$T_i$  : オーバーレイ層初期温度 (°C),

$T_a$  : 気温 (°C),

$a$  : 一層施工厚 (cm),

$b$  : 合計施工厚 (一層施工厚の2倍, cm)

$c$  : 施工時間間隔 (分),

ここで、重回帰分析により得られた回帰式の精度について検証した。

回帰式から算出した降温時間と、プログラムから算出した降温時間の比較を図-27 に示す。二つの方法による降温時間はほぼ一致していることがわかる。また、プログラムにより得られた降温時間と回帰式により得られた降温時間との誤差のヒストグラムを図-28、図-29 に、最大誤差と誤差の標準偏差を表-33 に示す。これらを見ると、降温時間の誤差は、一層施工の場合は概ね±5 分以内、二層施工の場合は概ね±10 分以内の範囲に集中していると言えるが、4 章の冒頭で述べた通り、回帰式を算出する際に目的変数としたプログラムによる降温時間は10分単位で定義していることから、回帰式とプログラムの結果に10分未満の誤差が発生することは当然の結果であり、このことを考慮すれば、回帰式により得られた降温時間は、プログラムにより得られた降温時間を忠実に再現していることが分かる。

なお、これらの回帰式は、表-31 の気象条件、施工条件の範囲内で適用可能であることに留意する必要がある。

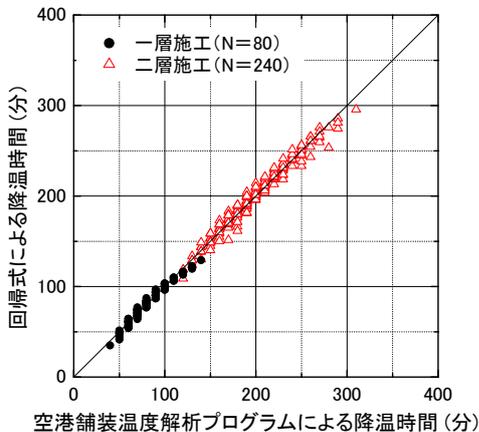


図-27 回帰式とプログラムによる降温時間の比較

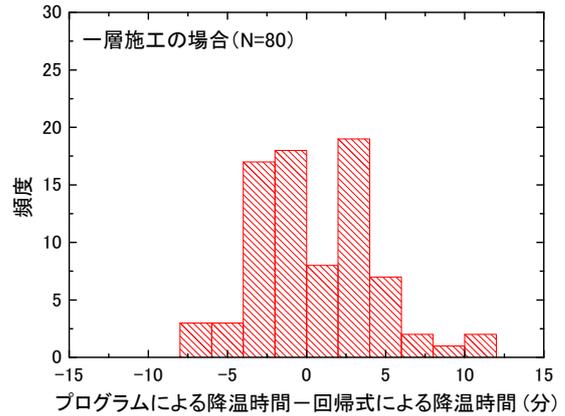


図-28 降温時間の誤差 (一層施工)

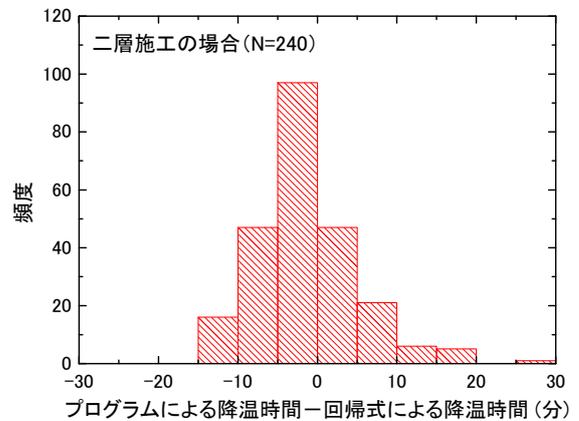


図-29 降温時間の誤差 (二層施工)

表-33 最大誤差と誤差の標準偏差

|         | 一層施工 | 二層施工 |
|---------|------|------|
| 最大誤差    | 11 分 | 27 分 |
| 誤差の標準偏差 | 4 分  | 6 分  |

## 5. 結論

空港アスファルト舗装の夜間施工時の降温時間について検討した結果は、以下のようにまとめられる。

- (1) 夜間の施工を想定した解析では、プログラムを用いることで舗装温度を精度良く推定することが可能である。なお、アスファルト混合物の熱伝達率が解析結果に影響を及ぼす傾向があるが、平均風速と Jürges 式 (粗面) から計算される熱伝達率を使用することで、解析結果は実測結果と概ね一致する。
- (2) 昼間の施工を想定した解析では、夜間に比べて精度が劣る。これは、日射の有無が影響していると考え

られ、特にアスファルト混合物の熱伝達率が解析結果に大きく影響することから、熱伝達率の設定に注意を要する。

- (3) アスファルト混合物の熱伝導率及び比熱については、昼間・夜間を問わず解析結果に及ぼす影響は軽微である。
- (4) 気温、オーバーレイ層初期温度及び一層施工厚が降温時間に及ぼす影響は大きく、複数層施工の場合の一層目と二層目の施工時間間隔については、前述の条件と比較して降温時間に及ぼす影響は小さい。
- (5) 気温、オーバーレイ層初期温度、施工厚、施工時間間隔が降温時間に及ぼす影響を、プログラムによる解析結果と重回帰分析から定量的に明らかにした。

#### 謝辞

本研究を遂行するにあたり、国土交通省東京航空局東京空港事務所及び内閣府沖縄総合事務局那覇港湾・空港整備事務所より舗装温度データを提供頂いた。両事務所の関係者の皆様に感謝いたします。

(2011年8月31日受付)

#### 参考文献

- 1) David H. Timm, Vaughan R. Voller, Eul-bum Lee and John Harvey: Calcool: A multi-layer Asphalt Pavement Cooling Tool for Temperature Prediction during Construction, International Journal of Pavement Engineering, Vol.2, Issue 3, pp.169-185, 2001.
- 2) 坪川将丈, 水上純一: 熱赤外線画像による層間剥離検出法に関する研究, 土木学会舗装工学論文集, 第12巻, pp.154-164, 2007.
- 3) 清水明男, 伊藤洋, 坂口雄彦: マッシブなコンクリート構造物の温度ひび割れ発生に及ぼす日射の影響, コンクリート工学年次講演会論文集, Vol. 8, pp. 13-16, 1986.
- 4) 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, pp.225-231, 2005.
- 5) 小作好明, 廣島実, 峰岸順一: 保水性舗装の比熱・熱伝導率・放湿性の測定, 土木学会第61回年次学術講演会, pp.321-322, 2006.
- 6) 椎名貴決, 松井邦人, T. F. Smith: 地上気象観測データを用いたアスファルト舗装の内部温度推定, 土木学会舗装工学論文集, 第2巻, pp.105-112, 1997.
- 7) 福田萬大, 浅枝隆, 藤野毅: 冬季自然状態における保水性舗装の熱環境特性に関する実験的研究, 土木学会論文集, 第634号/V-45, pp.243-254, 1999.
- 8) 田中俊六, 武田仁, 足立哲夫, 土屋喬雄: 最新建築環境工学[改訂2版], pp.180-181, 井上書院, 1999.
- 9) 姫野賢治, 渡辺隆, 勝呂太: アスファルト舗装の内部温度の推定に関する研究, 土木学会論文集, 第366号/V-4, pp.123-132, 1982.
- 10) 土木学会舗装工学委員会: 2007年制定舗装標準示方書, 1-35p., 2007.
- 11) 国土交通省航空局・国土交通省国土技術政策総合研究所監修, (財) 港湾空港建設技術サービスセンター発行: 空港舗装補修要領及び設計例, 2011.
- 12) 国土交通省航空局・国土交通省国土技術政策総合研究所監修, (財) 港湾空港建設技術サービスセンター発行: 空港舗装設計要領及び設計例 (平成22年4月一部改訂), 2010.

---

国土技術政策総合研究所資料

TECHNICAL NOTE of NILIM

No. 653                      September 2011

編集・発行   ©国土技術政策総合研究所

---

本資料の転載・複写のお問い合わせは

〒239-0826 神奈川県横須賀市長瀬 3-1-1  
管理調整部企画調整課      電話:046-844-5019