

# 空港アスファルト舗装施工時の 舗装温度解析プログラムの開発

坪川将丈\*

## 1. はじめに

空港の滑走路や誘導路などの空港舗装は、表面の勾配に厳しい制限が課されていることから、舗装支持力の回復を目的とした場合以外にも、勾配修正を目的として、一日で厚いアスファルトオーバーレイ層を複数層で施工する場合がある。一般的に、空港におけるオーバーレイ施工は夜間に実施されるが、工事終了直後の早朝から供用を開始する必要があることから、初期わだち掘れの発生を防ぐためには、供用開始までに舗装温度を十分に低下させる必要がある。このため、施工計画の立案や材料の選定の段階において、施工直後の舗装温度に十分配慮する必要がある。しかしながら、施工直後の舗装温度の状況は、舗装施工厚、施工層数、混合物敷き均し温度、気温、風速等に大きく左右されることから、その予測を精度良く行うことは困難である。

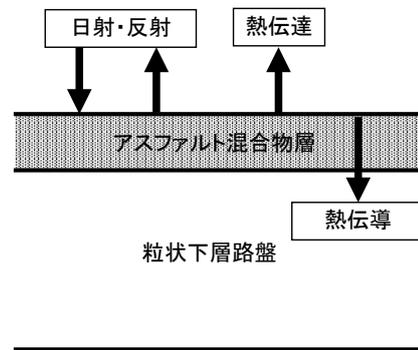
以上の背景から、本研究ではアスファルト舗装を対象として、気温や風速などの気象条件、層厚、層数、混合物敷き均し温度などの施工条件から、施工直後の舗装温度を解析することを目的とした舗装温度解析プログラムを開発した。また、施工時の実測舗装温度と本プログラムにより解析した舗装温度を比較することで、本プログラムの適用性を検証した。

## 2. 舗装温度解析プログラムの概要

今回開発した舗装温度解析プログラムは、一次元もしくは二次元の有限要素解析により舗装温度の時系列解析を行う。二次元解析は特殊な目的で用いるものであるため、以降では一次元解析についてのみ記す。

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>1)</sup>でそれぞれ考慮した。なお、地表面に水分が無いと仮定し、潜熱は考慮していない。本解析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。



路床  
図-1 熱収支解析モデル図

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

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

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

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>),

$z$  : 表面からの深さ(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

Development of software to predict time-series temperature of airport asphalt pavement during construction.

表-1 設定条件

設定条件	設定項目	備考
舗装条件	層数	10層まで設定可能。
	層厚 (cm)	各層厚を設定。
	初期温度 (°C)	オーバーレイ層については、施工開始時刻におけるアスファルト混合物の敷き均し温度。その他の層については、計算開始時刻における温度
	比熱 (kJ/(kg・K))	各層の比熱を設定。
	密度 (t/m <sup>3</sup> )	各層の密度を設定。
	熱伝導率 (W/(m・K))	各層の熱伝導率を設定。
	熱伝達率 (W/(m <sup>2</sup> ・K))	一時的にでも舗装表面となる層の熱伝達率を設定。
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設定。
	施工開始時刻	オーバーレイ層についてのみ設定。
	気温変化の設定	①気温一定 (入力固定温度を使用) ②気温変化 (空港での実測時系列気温データを使用) ③気温変化 (入力した時系列気温データを使用) を選択。
解析条件	時系列気温	「気温変化の設定」で③を選択した場合に設定。
	日射考慮の設定	日射の影響を考慮するか否かを設定。
	時系列日射量	日射の影響を考慮する場合に日射量を設定。
	日射吸収率	日射の影響を考慮する場合に日射吸収率を設定。
	計算開始日時 (日・時・分)	計算を開始する時刻を設定。
	計算終了日時 (日・時・分)	計算を終了する時刻を設定。
	出力時間間隔 (分)	出力データの時間間隔を設定。
	出力点の深さ (m)	着目する舗装表面からの深さを設定。

本プログラムの大きな特徴は、アスファルト舗装の一日の施工の中で、複数層に分けてアスファルト混合物層を施工する際の舗装温度の推移について解析を行うことが可能なことである。それぞれの層について、施工開始時刻及びアスファルト混合物の敷き均し温度を設定可能であり、既に施工が終了しているアスファルト混合物層の上に別のアスファルト混合物層を施工する際には、舗装表面の境界条件を変化させ、新たに要素を付加することとしている。

### 3. 空港アスファルト舗装の施工時温度

#### 3.1 開発したプログラムの実用性の検証

空港アスファルト舗装を対象として、夜間から早朝にかけて実施されたアスファルトオーバーレイ施工時の実測温度と、施工時の気象条件、施工条件を用いて本プログラムにより算出した解析温度とを比較し、本解析プログラムの実用性を検証した。検証に用いた実測温度は、施工開始時刻が異なる二層施工（7cmの新設基層を施工後、8cmの新設表層を施工）における実測した舗装温度を用いた。

施工断面図を図-2に、当日の気象条件と施工条件を表-2に示す。舗装温度は、一層目である新設基層の中央（完成舗装表面から11cmの深さ）、二層目である新設表層の中央及び表面（完成舗装表面から4cmおよび0cmの深さ）において測定している。

解析に使用した熱特性値を表-3に示す。アスファルト混合物の比熱、密度、熱伝導率については、密粒度アスファルト混合物を用いた室内試験による実測値を使用し、熱伝達率については施工時の風速から推測<sup>2)</sup>した。また、路盤・路床については文献<sup>3)</sup>を参考にした。なお今回の解析では、夜間を想定した解析であることから、日射は考慮していない。

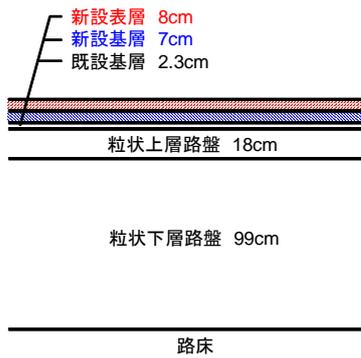


図-2 施工断面図

表-2 気象及び施工条件

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℃
施工条件	施工時期		10月
	基層	敷き均し時刻	2:50
		敷き均し時の混合物温度	144℃
	表層	敷き均し時刻	4:20
		敷き均し時の混合物温度	143℃

表-3 解析に用いた熱特性値

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))
新設表層	143	890	2.35	1.10	$7.8+4.5v^2$ v: 風速(m/s)
新設基層	144				—
既設基層	25				—
粒状路盤	25	840 <sup>3)</sup>	2.00	2.50 <sup>3)</sup>	—
路床	25	1,840 <sup>3)</sup>	1.80	0.52 <sup>3)</sup>	—

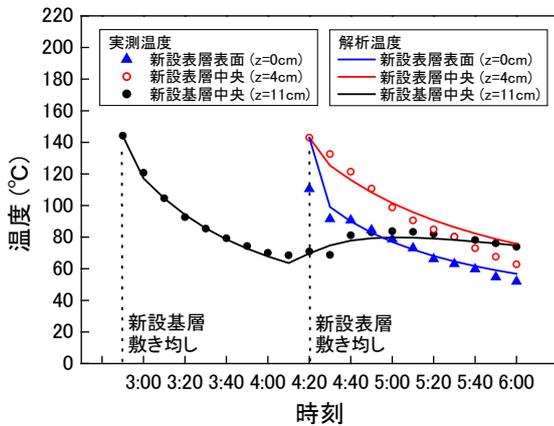


図-3 時系列の実測温度と解析温度

図-3に実測温度と解析温度を時系列で示す。一層目である新設基層中央の実測温度は、敷き均し温度である144℃から徐々に低下した後、二層目である新設表層の施工開始と同時に上昇しているが、解析結果では、温度の推移が概ね再現されている。また、一層目のみならず二層目の舗装温度についても、実測温度と解析温度は概ね一致していることがわかる。このように、今回開発した舗装温度解析プログラムにより、施工中の舗装温度を精度良く推定することが可能である。

### 3.2 中温化混合物の施工時間短縮効果の検証

空港アスファルト舗装の施工では、舗装温度が高い施工直後に供用を開始することに起因する初期わだちを防ぐために、供用開始までに舗装温度を50℃以下にすることとしている。そこで、3.1に示した実際の施工条件において、供用開始までの時間を短縮するために表層に中温化混合物（特殊添加剤を混入することにより温度が低い場合の施工性を改善し、施工時の敷き均し温度を低減させることが可能なアスファルト混合物）を使用することによる効果を、本解析プログラムを用いて検証した。

オーバーレイ層の材料及び施工層数の違いに応じて、以下の4ケースについて施工直後の舗装温度について設定した。

ケースA：既設基層の上に、通常混合物による基層7cmを施工後、通常混合物による表層8cmを施工する。表層・基層の敷き均し温度は144℃とする。

ケースB：既設基層の上に、通常混合物による基層7cmを施工後、中温化混合物による表層8cmを施工する。基層の敷き均し温度は144℃とし、表層の敷き均し温度は114℃とする。

表-4 敷き均し温度、層数を変えた場合の交通開放時間

ケース名	施工条件	基層敷き均し温度 (°C)	表層敷き均し温度 (°C)	冷却必要時間 (分)	時間差 (分)
ケースA	既設基層の上に 基層7cm (2:50施工開始) 表層8cm (4:20施工開始)	144 (通常混合物)	144 (通常混合物)	139	47
ケースB		144 (通常混合物)	114 (中温化混合物)	92	
ケースC	既設基層の上に 表層8cm (4:20施工開始)	—	144 (通常混合物)	101	30
ケースD		—	114 (中温化混合物)	71	

ケースC：既設基層の上に、通常混合物による表層8cmのみを施工する。表層の敷き均し温度は144°Cとする。

ケースD：既設基層の上に、中温化混合物による表層8cmのみを施工する。表層の敷き均し温度は114°Cとする。

ケースA～Dのそれぞれについて、表層施工開始時刻（各ケースとも早朝4：20）から表面温度が50°C以下となる時刻までの「冷却必要時間」を試算した。結果を図-4、表-4に示す。一層施工よりも二層施工の方が冷却必要時間は長くなるものの、中温化混合物を使用することによる冷却必要時間の短縮効果については、一層施工よりも二層施工の場合の方が大きいことがわかる。

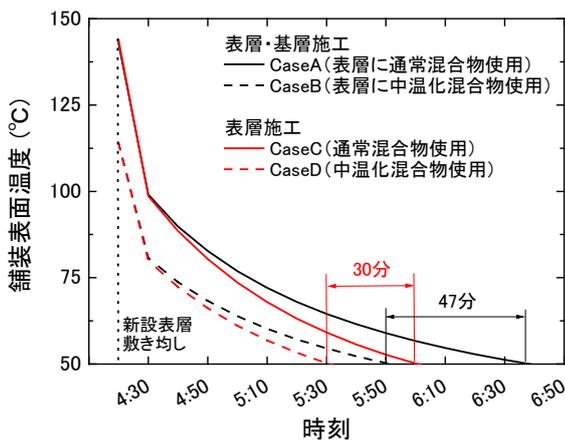


図-4 各ケースの舗装表面温度の推移

ける実測結果との比較を行い、精度向上のための改良を行う予定である。

なお、本解析プログラムは施工時温度のみならず、通常時の舗装温度の時間変化を計算することも可能であり、コンクリート舗装についても解析可能である。

参考文献

- 1) 清水昭男、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.
- 2) 日本建築学会：建築設計資料集成 環境、pp.97～134、1987.
- 3) 椎名貴快、松井邦人、Smith, T.F.：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.
- 4) 土木学会舗装工学委員会：舗装標準示方書、(社)土木学会、p.35、2007.

坪川将丈\*



国土交通省国土技術政策総合研究所  
空港研究部 主任研究官、博士 (工学)  
Dr. Yukitomo Tsubokawa

4. まとめ

本解析プログラムにより、施工時の舗装温度を精度良く行うことが可能となり、効率的な施工計画立案が可能となる。今後も種々の舗装条件にお