

熱赤外線画像による 空港舗装の層間剥離検出法に関する研究

坪川将丈¹・水上純一²

¹正会員 工修 国土交通省国土技術政策総合研究所 空港施設研究室（〒239-0826 横須賀市長瀬 3-1-1）

²正会員 工修 国土交通省国土技術政策総合研究所 空港施設研究室（〒239-0826 横須賀市長瀬 3-1-1）

空港アスファルト舗装の表基層に発生する層間剥離を検出する手法としては、ハンマーで舗装表面を打撃することにより異音部を検出する打音調査が広く用いられているが、広大な面積の空港舗装を正確・迅速に調査するには困難な点が多い。本研究では、赤外線サーモグラフィにより撮影された熱赤外線画像から舗装表面温度を測定し、層間剥離に起因する剥離部と健全部の舗装表面温度差により層間剥離位置を検出する手法について、現地試験ならびに熱収支解析により検討した。その結果、熱赤外線静止画像・動画画像から層間剥離の位置を検出可能であること、層間剥離に起因する舗装表面温度差には気象条件が影響することを示し、熱赤外線画像による調査に適した気象条件を明らかにした。

Key Word : *infrared thermography, de-bonding, flexible pavement, airport*

1. はじめに

空港アスファルト舗装の表基層の層間において、層間剥離が発生した事例が見受けられる¹⁾。層間剥離が発生している箇所では表基層間が付着していないことから、航空機が走行した際に写真-1のようなスリッページが発生する原因となる。このような層間剥離を検出する手法としては、ハンマーで舗装表面を打撃することにより異音部を検出する打音調査が広く用いられている。しかしながら、広大な面積の空港舗装を調査するには、膨大な時間を要すること、異音の検出に個人差があることなど困難な点が多い。

そこで本研究では、コンクリート構造物の剥離検出手法として用いられている²⁾、剥離に起因する剥離部と健全部の表面温度差を赤外線サーモグラフィにより撮影して層間剥離位置を検出する手法について、実際の空港における適用性試験ならびに気象データを用いた熱収支解析により、その適用性を検討した。さらに、調査実施の可否の検討に必要な舗装表面温度差推定式および本手法を用いた調査に適した気象条件を検討した。

2. 赤外線サーモグラフィによる調査の原理

表基層間に層間剥離等による空隙が存在する場合、図

-1に示すように、空隙直上と空隙直下の間の伝熱が遮断される。すなわち、健全部と比較して空隙直上は熱容量が小さくなり、熱しやすく冷めやすい状態になる。これにより、日中には日射や気温の上昇により舗装温度が上昇するため、剥離部の舗装表面温度は健全部のそれよりも高くなる。一方、夜間においては、日射がなくなり気温も低下することで舗装温度が低下するため、剥離部の舗装表面温度は健全部のそれよりも低くなる。

このような原理から、当該手法を用いて空港が閉鎖している夜間に調査を実施する場合は、赤外線サーモグラフィで撮影した舗装表面の熱赤外線画像から舗装表面温度が低下している箇所を検出することとなる。



写真-1 2000年7月の名古屋空港滑走路の破損

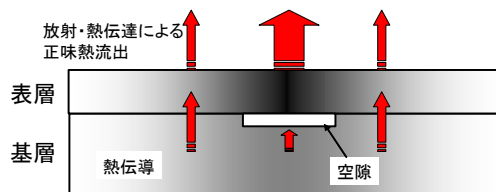


図-1 夜間の熱流と舗装内温度分布図
(黒色が低温部，白色が高温部)

表-1 赤外線サーモグラフィ仕様

項目	仕様
検出素子	非冷却二次元マイクロボロメータ
測定温度範囲	-40 to 500 °C
最小温度分解能	0.06 °C 以上
測定精度	±2 °C
測定視野角	30.6° (H) × 23.1° (V) (22 mm レンズ使用時)
空間分解能	1.68 mrad



写真-2 赤外線サーモグラフィ



(a) 作業車からの静止画撮影



(b) 作業車からの動画撮影

写真-3 赤外線サーモグラフィによる熱赤外線画像撮影状況

3. 空港における適用性調査

(1) 調査概要

那覇空港の滑走路ならびに新潟空港の誘導路において、熱赤外線画像による層間剥離検出法の適用性調査を 2005 年 10 月（那覇空港）ならびに 2006 年 9 月（新潟空港）の深夜に実施した。

舗装表面の熱赤外線画像の撮影には、写真-2 に示すハンディタイプの赤外線サーモグラフィを使用した。この赤外線サーモグラフィの仕様を表-1 に示す。適用性調査を実施した際の気温と日射量は、空港近郊において測定した。

調査手順としては、まず、調査区域（10m×10m）において打音調査により異音を検出し、チョークにより異音部のマーキングを行った。次に、高所作業車を用いて、高さ 10m の位置から赤外線サーモグラフィにより舗装表面の熱赤外線画像を撮影した（写真-3 (a)）。その後、打

音調査による異音部ならびに熱赤外線画像で、周囲よりもおよそ 0.2°C 以上の温度低下箇所と判別された箇所において直径 100mm のコアを採取し、層間剥離の有無とその深さを確認した。また、高所作業車を用いた高所からの静止画の撮影では、全体の調査に長時間を要することから、作業車両に赤外線サーモグラフィを据え付け、走行しながら熱赤外線動画撮影についても実施した（写真-3 (b)）。

(2) 調査結果

a) 静止画像による検出精度の検討

図-2 に、那覇空港の滑走路において撮影した調査区域の熱赤外線画像を示す。図の中で、赤外線画像による低温部と打音調査による異音部を併せて示している。打音調査により異音が確認されたのは 18 箇所であり、そのうち 6 箇所において熱赤外線画像により低温部が確認された。

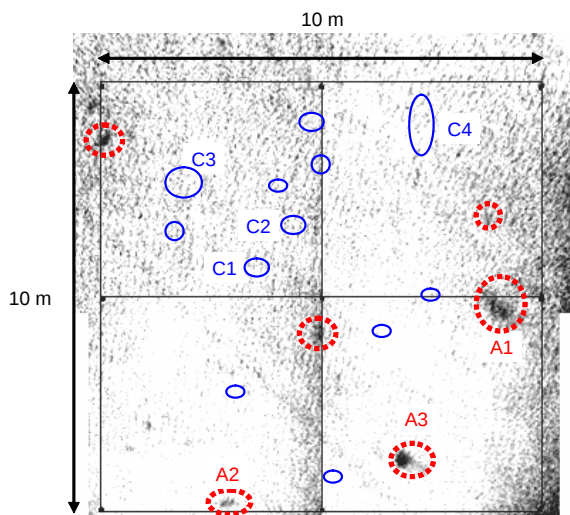


図-2 那覇空港の滑走路における熱赤外線画像
(点線：赤外線による低温部，実線：打音による異音部)

表-2 那覇空港の滑走路における調査結果

地点名	熱赤外線	打音	コア採取による 剥離深さ
A1	低温部	異音	65 mm
A2	低温部	異音	65 mm
A3	低温部	異音	50 mm
C1	異常なし	異音	65 mm
C2	異常なし	異音	68 mm
C3	異常なし	異音	60 mm
C4	異常なし	異音	45 mm

次に、熱赤外線画像による低温部のうち A1～A3 の 3 箇所、ならびに低温部ではないものの打音調査により異音を確認された C1～C4 の 4 箇所からコアを抜き、層間剥離の有無を確認したところ、表-2 に示すように、熱赤外線画像の低温部 (A1～A3) において 50～65mm の深さに層間剥離が発生していることを確認した。しかしながら、熱赤外線画像において低温部ではないものの異音を確認された箇所 (C1～C4) においても 45～68mm の深さに層間剥離が確認された。このように、層間剥離が発生しているにも関わらず温度差が検出されなかった原因としては、以下の理由が考えられる。

- ①調査を行った際の一日の気温差が5℃程度と小さく、特に C1～C4 以外の異音部は、直径 20cm 程度以下の面積の小さな異音部のため、層間剥離に起因する舗装温度差が小さい。
- ②付着はしていないものの、両層が互いに密着している場合は、両層間での熱伝導条件は健全部のそれと大きく異なることはなく、層間剥離に起因する舗装温度差が小さい。

表-3 新潟空港の誘導路における調査結果

地点名	熱赤外線	打音	コア採取による 剥離深さ
AA1	低温部	異音	35 mm
AA2	低温部	異音	35 mm
AA3	低温部	異音	30 mm
CC1	異常なし	異音	層間剥離なし
CC2	異常なし	異音	層間剥離なし

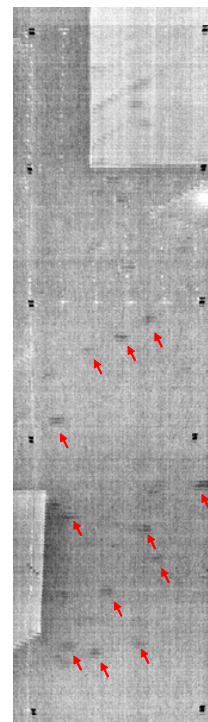


図-3 動画像から得られた舗装表面温度分布
(矢印部は低温部)

新潟空港の誘導路における調査では、打音調査により異音を確認されたのは 12 箇所であり、そのうち 6 箇所において熱赤外線画像により低温部が確認された。

次に、熱赤外線画像による低温部のうち AA1～AA3 の 3 箇所、ならびに低温部ではないものの打音調査により異音を確認された CC1 と CC2 の 2 箇所からコアを抜き、層間剥離の有無を確認した。結果を表-3 に示す。熱赤外線画像の低温部 (AA1～AA3) においてのみ 30～35mm の深さに層間剥離が発生しており、打音調査により異音を確認された CC1 と CC2 では層間剥離が確認されなかった。異音部で層間剥離が確認されなかった原因は不明である。

以上のことから、熱赤外線画像によって全ての層間剥離を検出できるわけではないものの、表基層間に存在する層間剥離の多少をある程度判定することは可能であると考えられる。実際の調査では、全ての空港舗装に対して打音調査を行うのではなく、赤外線調査により区画毎の低温部の位置を調査し、特に低温部が多く検出された区画では打音調査を行うなど、各々の調査手法を組み合わせることで、効率的な調査が可能になると考えられる。

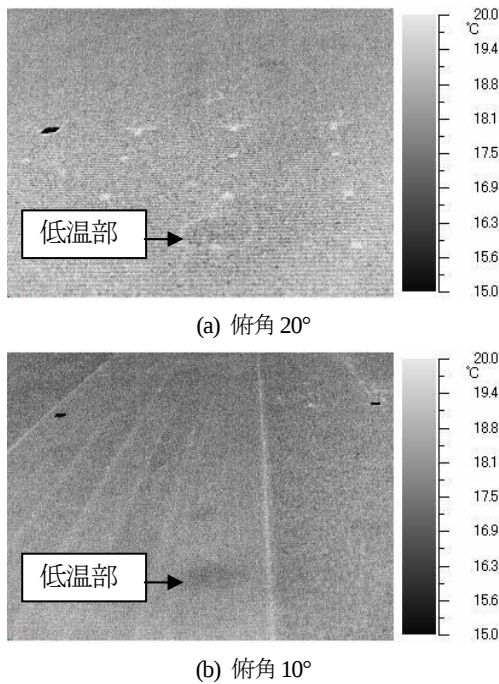


図-4 グルーピングのある滑走路の熱赤外線画像

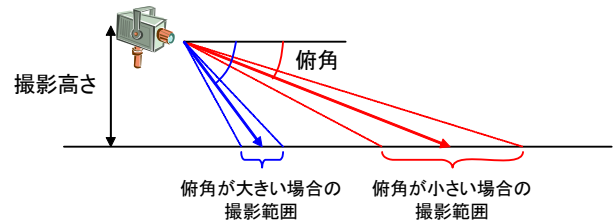


図-5 俯角と撮影範囲の関係

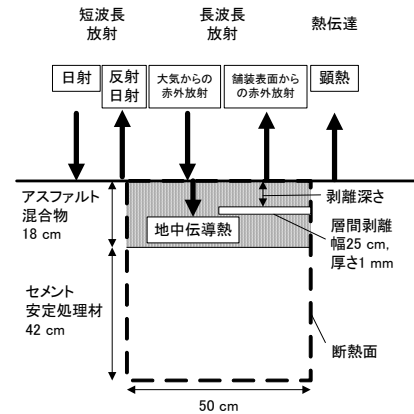


図-6 熱収支解析モデル図

b) 動画像による検出精度の検討

高所からの静止画の撮影では、広大な面積を有する空港舗装の調査に膨大な時間を要するため、作業車両に赤外線サーモグラフィを据え付け、走行しながら熱赤外線動画像の撮影も試みた。この際の赤外線サーモグラフィの位置は舗装表面から約 3m の位置であり、走行速度は 10km/h、調査幅は 2.5m、調査延長は 100m とした。

撮影された動画像から自動画像処理を施して得られた温度分布画像を図-3 に示す。この程度の走行速度であれば、静止画像と同等程度で低温部の判別が可能であることから、空港の広範囲を効率的に調査するためには、動画像の撮影を行うのが望ましいと考えられる。

c) グルーピングによる影響の検討

我が国の滑走路には、幅 6mm、深さ 6mm、中心線間隔 32mm のグルーピングが付されていることから、グルーピングが熱赤外線画像における低温部の検出精度に及ぼす影響を検討した。

滑走路において、高さ 1.5m から撮影した熱赤外線画像を図-4 に示す。撮影時の俯角が 20° の場合はグルーピングによる縞模様が明瞭に確認されたが、俯角が 10° の場合には縞模様はほとんど無く、低温部を明瞭に確認することができる。これは、図-5 に示すように、同じ高さであれば小さな俯角で撮影するほど撮影範囲は広くなり、熱赤外線画像の解像度は低くなるために、グルーピングによる影響が小さくなるためと考えられる。これは角度のみならず撮影高さも影響することから、グルーピングの寸法と使用する赤外線サーモグラフィの解像度を考慮して撮影高さや俯角を調整することで、グルーピングの影響を無視することが可能になると考えられる。

4. 熱収支解析による検討

前章において、空港アスファルト舗装の層間剥離は、熱赤外線画像による舗装表面温度分布からある程度検出可能であることを明らかにした。しかしながら、層間剥離に起因する舗装表面温度差は、アスファルト混合物内の熱伝導特性の違いによるものであることから、この温度差の大きさには気象条件が大きく影響するものと考えられる。そこで、熱伝導、熱伝達、放射の影響を考慮した有限要素法による熱収支解析を実施し、層間剥離に起因する舗装表面温度差と気象条件との関係を検討した。さらに、那覇空港と新潟空港における経験から、熱赤外線画像より低温部を容易に判別するためには、目安として少なくとも 0.2°C 以上の温度差が生じていることが望ましいと考えられたことから、この目安値以上の舗装温度差が発生すると考えられる調査可能日数について検討した。

(1) 解析手法

図-6 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・大気からの赤外放射・舗装表面からの赤外放射の熱収支による正味放射量を(3)式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。

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

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

$$E = S\alpha + \varepsilon\sigma(T_a^4 - T_s^4) \quad (3)$$

ε : 輻射率,
 σ : ステファン・ボルツマン定数
 $(= 5.67 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2/\text{K}^4)$.

ここに,

T : 舗装温度(K),
 t : 時間(s),
 λ : 熱伝導率(W/m/K),
 c : 比熱(kJ/kg/K),
 ρ : 密度(kg/m³),
 x, z : 空間座標(m),
 Q : 顕熱輸送量 (W/m²),
 h : 熱伝達率(W/m²/K),
 T_s : 舗装表面温度(K),
 T_a : 気温(K),
 E : 舗装面が吸収する正味放射量(W/m²),
 S : 日射量(W/m²),
 α : 日射吸収率,

解析モデルは 2 次元モデルとした。各層の厚さならびに剥離の直径は実際の空港舗装におけるものを参考とした。層間剥離の厚さについては不明であることから、採取したコアの層間の状況からここでは 1mm と設定した。また、図-6 に示す舗装構造は、那覇空港における調査区域の舗装構造としたが、上層路盤材料種類や路盤厚の違いが層間剥離に起因する舗装表面温度差に及ぼす影響が小さいことを確認している。舗装表面温度に大きく影響すると考えられるアスファルト混合物の熱特性値については、表-3 に示すように、文献調査によるもののほか、試験舗装から切り出した密粒アスファルト混合物（最大骨材粒径 20mm、アスファルト量 5.6%、空隙率 3.2%）を用いて室内試験により測定した値を使用した。

表-3 熱収支解析に使用したパラメータ

項目			備考
アスファルト 混合物	密度	2,361 (kg/m ³)	室内試験による実測値
	熱伝導率	1.11 (W/m/K)	室内試験による実測値 (JIS A 1412-2, 40°C)
	比熱	0.89 (kJ/kg/K)	室内試験による実測値
	輻射率	0.92	室内試験による実測値 (JIS R 3106, 3107)
	日射吸収率	1.0	文献 ³⁾
	熱伝達率	7.8+4.5v (W/m ² /K) v: 風速 (m/s)	
セメント 安定処理材	密度	2,400 (kg/m ³)	文献 ⁴⁾
	熱伝導率	1.20 (W/m/K)	文献 ⁵⁾
	比熱	0.90 (kJ/kg/K)	

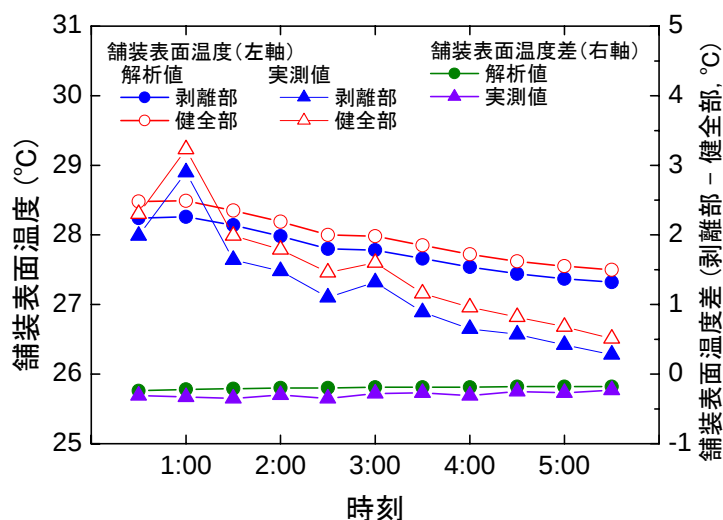


図-7 舗装表面温度の実測値と解析値

表-4 熱収支解析に使用した気象条件データ

対象都市	札幌, 仙台, 新潟, 東京, 大阪, 那覇
季節	夏季: 6~8 月 秋季: 9~11 月
天候	晴天: 昼夜ともに「晴」もしくは「快晴」 曇天: 昼夜ともに「曇」「薄曇」「曇時々晴/雨」 「曇一時晴/雨」のいずれかで、日降水量が 0mm
データ種類	気温, 風速, 日射量

熱収支解析では、非定常有限要素解析により舗装表面温度の経時変化を算出するため、以下の理由から前日の午前 8 時を計算開始時刻とし、この時刻における気温ならびにアスファルト混合物平均温度を初期値として設定した。

- ① 今回の検討で着目する翌日深夜の時間帯まである程度の計算助走期間が必要である。
- ② 昼間の日射により上昇した舗装温度が、日没後に低下する状態を考慮する必要がある。
- ③ 熱電対を埋設したアスファルト試験舗装の温度測定結果から、アスファルト混合物層内部の深さ別温度が最も均一となる時間帯である。

また、アスファルト試験舗装の温度測定結果から、この時刻における気温とアスファルト混合物平均温度の関係を検証し、初期値として設定するアスファルト混合物平均温度を、この時刻の気温+6°C と設定した。

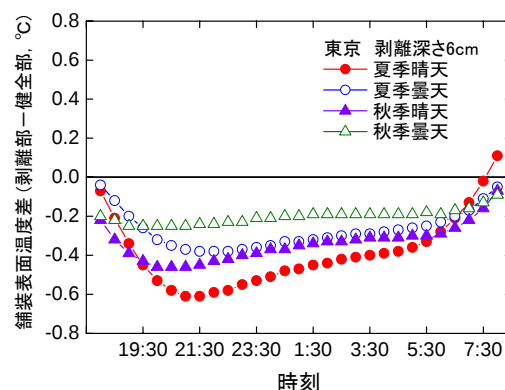
(2) 解析手法の妥当性の検証

前章における那覇空港での適用性調査時に測定した気象条件（気温、日射量、風速）を使用し、調査時に実測した舗装表面温度と熱収支解析により求めた舗装表面温度を図-7 に示す。表面温度の実測値と解析値との誤差は最大 1°C 程度であり、剥離部と健全部との間の温度差については実測値と解析値がほぼ一致している。このことから、当該解析手法により、剥離部と健全部との間の表面温度差を非常に精度良く推定できると考えられる。

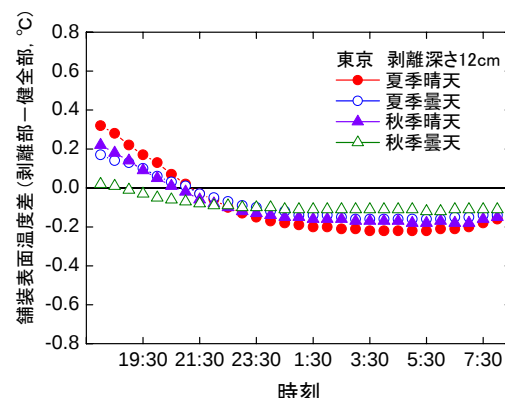
(3) 剥離深さと気象条件が舗装表面温度差に及ぼす影響

国内 6 都市（札幌、仙台、新潟、東京、大阪、那覇）の気象条件を使用して、剥離部と健全部との間に生じる表面温度差を熱収支解析により算出した。季節・天候条件としては、表-4 に示す 4 ケースについて、AMeDAS のデータを使用した。

まず、層間剥離の深さによる影響を検討した。熱収支解析により求めた東京における剥離部と健全部との表面温度差の経時変化を図-8 に示す。層間剥離の深さは 6cm ならびに 12cm に設定した。層間剥離の位置が深い場合は、浅い場合に比べて表面温度差は小さくなり、適用性調査の経験による目安値である 0.2°C 以上の温度差が発生するのは、夏季晴天時の天候においてのみ、非常に短時間に限られることがわかる。



(a) 層間剥離深さ 6cm



(b) 層間剥離深さ 12cm

図-8 東京における舗装表面温度差の経時変化

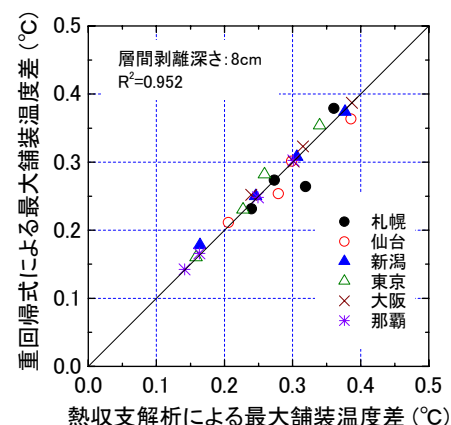


図-9 最大舗装温度差の重回帰分析結果

次に、調査に適した気象条件について検討した。図-8をみると、剥離部と健全部との間の表面温度差は天候や季節に大きく左右され、比較的大きな温度差が生じるのは晴天時であり、且つ秋季よりも夏季の方が温度差は大きくなる傾向が確認できる。これは、曇天時よりも晴天時、秋季よりも夏季の方が、日中に舗装表面温度が大きく上昇し、日没後に大きく低下することから、熱伝導特性の違いによる剥離部と健全部との温度差が顕著に現れると考えられる。つまり、日射量が少ない曇天時のように昼夜の舗装温度差が小さい場合には、熱赤外線画像による剥離の検出は困難になると考えられる。

(4) 調査可能な気象条件の検討

前節で示したとおり、層間剥離に起因する舗装表面温度差の大きさは気象条件に大きく左右されることから、調査可能な気象条件を事前に推定できることが望ましい。そこで、国内 6 都市の気象条件を用いた熱収支解析結果（剥離深さ 8cm の場合）から、深夜の最大舗装表面温度差 ΔT_{pav} を目的変数、一日の気温差 ΔT_{air} 、日中の積算日射量 Q 、一日の平均風速 v を説明変数として重回帰分析を行った。重回帰分析結果を図-9 に、重回帰式を(4)式に示す。なお、それぞれの説明変数同士の相関は低いことを確認している。

$$\Delta T_{pav} = 0.01335\Delta T_{air} + 0.02944Q - 0.01743v + 0.12282 \quad (4)$$

ここに、

ΔT_{pav} : 最大舗装表面温度差（絶対値、℃）
 ΔT_{air} : 一日の気温差（最高気温－最低気温、℃）
 Q : 日中の積算日射量（ $\text{kW}\cdot\text{h}/\text{m}^2$ ）
 v : 一日の平均風速（ m/s ）

この重回帰式により推定した各都市の最大舗装表面温度差と、熱収支解析により得られた最大舗装表面温度差の相関は非常に高いことから、この重回帰式により、一日の気温差、日射量、風速を入力することにより、深夜に生じうる最大舗装表面温度差を精度良く推定することが可能であると考えられる。

さらに、実際に調査可能な日数について検討した。実際の空港での調査では、深夜に制限区域内に入場し、早朝には退場しなければならない。図-7、図-8 に示すように、舗装表面温度差は早朝に近づくにつれて小さくなる傾向があることから、夜間から早朝まで効率的に調査を

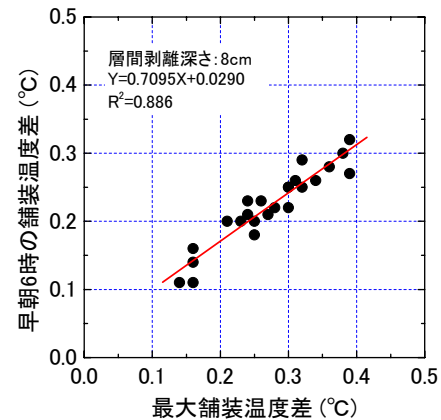


図-10 早朝と最大の舗装温度差の関係

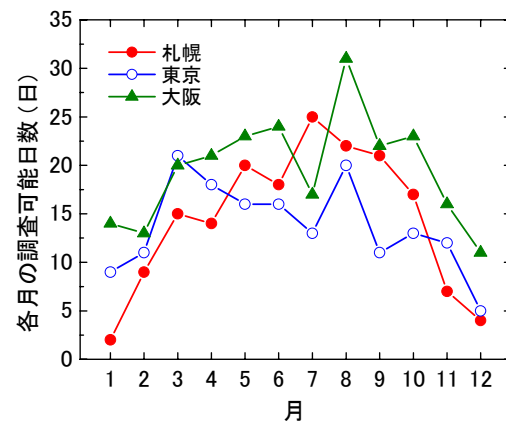


図-11 月別の調査可能日数

実施するためには、調査終了時点である早朝でも 0.2°C 以上の温度差が発生していることが望ましい。図-10 は熱収支解析により算出した深夜に生じる最大舗装表面温度差と午前 6 時の舗装表面温度差を比較したものであるが、これによれば、深夜に発生する最大舗装表面温度差が 0.25°C 以上あれば、早朝 6 時の時点においても 0.2°C 以上の温度差が生じていることとなる。

以上の検討を踏まえ、AMeDAS の 2006 年 1 月から 12 月までの毎日の気象データ（ただし雨天時のデータを含む）と(1)式を用い、札幌、東京、大阪における調査可能日数を検討した結果を図-11 に示す。これによれば、比較的高緯度の札幌においても、春から秋にかけて、熱赤外線画像を用いた層間剥離の検出が可能であることがわかる。

5. まとめ

熱赤外線画像による層間剥離検出法の適用性について、現地試験ならびに熱収支解析により検討した結果は、以下のようにまとめられる。

- (1) 赤外線サーモグラフィを用いた深夜の調査により、熱赤外線画像により層間剥離をある程度検出することが可能である。また、時速 10km/h 程度の走行速度で

あれば、走行しながら撮影した動画像から層間剥離の検出が可能である。

- (2) 撮影角度や撮影高さを調整することにより、舗装表面のグルーピングの影響を小さくすることが可能である。
- (3) 層間剥離の位置が浅い場合、舗装温度が日中に大きく上昇し日没後に大きく低下する夏季や晴天時に、層間剥離に起因する舗装表面温度差が大きくなる。
- (4) 一日の気温差、日中の積算日射量、一日の平均風速から、層間剥離に起因する舗装表面温度差を推定することが可能である。
- (5) 調査実施可能日を検討した結果、比較的高緯度の空港においても、春から秋にかけて調査が可能である。

6. おわりに

今回、適用性試験を実施した調査区域内において、コアの採取による層間剥離深さの確認を行ったが、7cm よりも深い位置にある層間剥離が存在しなかったことから、熱赤外線画像により検出可能な層間剥離の最大深さなど、定量化が困難であった項目については、今後調査を重ねることで、明らかにしていく所存である。また、屋外において非常に小さな温度差を測定することから、舗装表面に水溜りや障害物が無いことが必要であり、さらに撮

影角度や動画撮影時の走行速度に十分留意することが必要であると考えられる。

謝辞：適用性調査では、内閣府沖縄総合事務局那覇港湾・空港整備事務所ならびに国土交通省北陸地方整備局新潟港湾・空港整備事務所の皆様にご協力頂いた。また、アスファルト試験舗装の長期温度観測では、独立行政法人港湾空港技術研究所空港研究センターにご協力頂いた。ここに改めて謝意を表します。

参考文献

- 1) 久保宏，八谷好高，長田雅人，平尾利文，浜昌志：最近の空港アスファルト舗装の損傷と改良工法について，土木学会舗装工学論文集，第9巻，pp.35-40，2004.
- 2) 例えば，長田文博，山田裕一，虫明成生，赤松幸生：熱画像による鉄道高架橋コンクリートの剥離診断手法の開発，土木学会論文集，No.760/V-63，pp.121-133，2004.
- 3) 日本建築学会：建築設計資料集成 環境，pp.97-134，1987.
- 4) セメント協会重交通専門委員会：重交通専門委員会報告書，(社)セメント協会，239p.，1995.
- 5) 日本機械学会：伝熱工学資料改訂第4版，pp.320-322，1986.

STUDY ON INFRARED THERMOGRAPHIC INSPECTION OF DE-BONDING OF AIRPORT ASPHALT PAVEMENT

Yukitomo TSUBOKAWA, Junichi MIZUKAMI

This paper presents the results of field trials and thermal analysis conducted to verify the applicability of infrared thermographic inspection method to airfield pavements. As the results of field trials, it was confirmed that de-bonding can be found by infrared thermography. As the results of thermal analyses, it was clarified that amount of solar radiation, wind velocity and air temperature difference between day and night affected the surface temperature difference due to the existence of de-bonding, and appropriate time for the infrared thermographic inspection was also verified.