

# 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

国土技術政策総合研究所 ○坪川将丈, 水上純一

## 背景・目的

空港アスファルト舗装に生じた層間剥離の検出方法



打音法



Chain drag



熱赤外線画像による層間剥離検出法の適用性確認

## 検討手法

1. 夜間の実空港における適用性試験
2. 適用可能な気象条件の検討



赤外線法

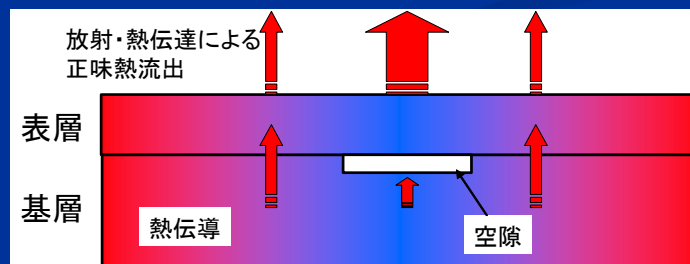
## 赤外線法

剥離部／健全部の温度差

剥離部の空気層により断熱されるため、  
剥離直上部は「熱しやすく冷めやすい」状態

- ・昼間(温度上昇期) 剥離部温度 > 健全部温度
- ・夜間(温度下降期) 剥離部温度 < 健全部温度

夜間の舗装温度例(赤色:高音部, 青色:低温部)



## 適用性試験

- ・那覇空港(2005年10月)及び新潟空港(2006年9月)で実施
- ・高所作業車からの静止画撮影, 走行作業車からの動画撮影
- ・可視画像も同時に撮影
- ・打音調査, コア採取による剥離深さ確認を実施

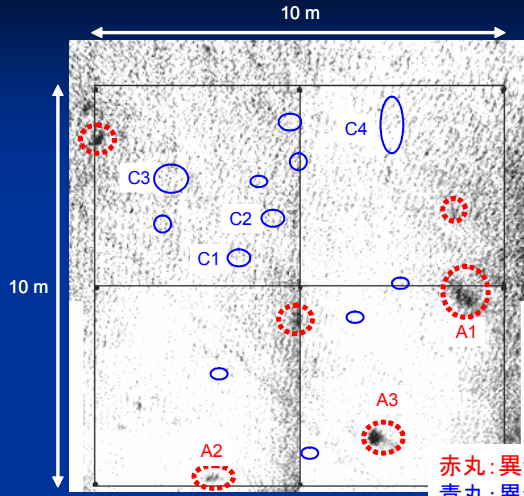
## 熱赤外線カメラ



静止画・動画の撮影が可能  
測定温度範囲  
最小温度分解能

- 40 ~ 500 °C  
0.06 °C以上

## 適用性試験結果(那覇空港)



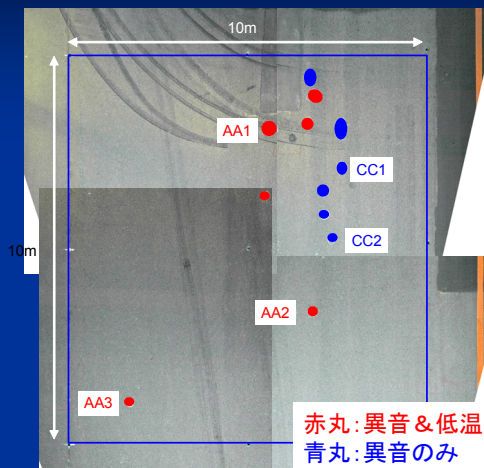
地点名	熱赤外線	打音	コア採取による剥離深さ
A1	低温部	異音	65 mm
A2	低温部	異音	65 mm
A3	低温部	異音	50 mm
C1	異常なし	異音	65 mm
C2	異常なし	異音	68 mm
C3	異常なし	異音	60 mm
C4	異常なし	異音	45 mm

赤丸: 異音 & 低温  
 青丸: 異音のみ

### 推測される原因

- ・気温差が小, 面積が小のため, 温度差が小さかった
- ・剥離していても層間が密着している状態であった

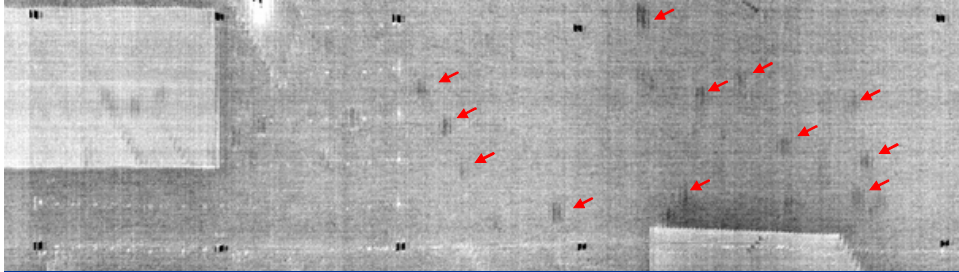
## 適用性試験結果(新潟空港)



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

赤丸: 異音 & 低温  
 青丸: 異音のみ

## 動画による撮影結果

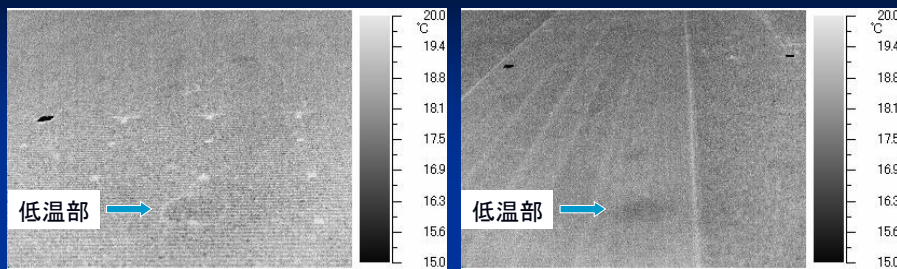


### 撮影条件

走行速度	時速10km
撮影高さ	3.1m
フレーム数	30フレーム/秒

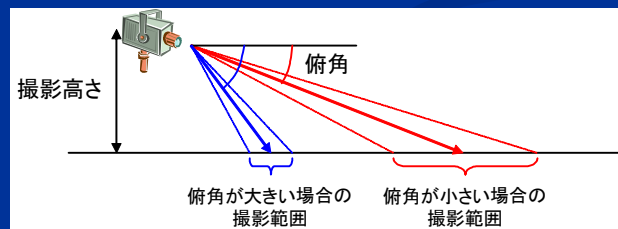
時速10km程度であれば、動画による判定も可能

## グラービングの影響



俯角20度

俯角10度



## 熱収支解析による温度差解析

赤外線法が適用可能な気象条件の検討



2次元FEMによる舗装温度解析

入力項目: 実際の気象条件(気温, 風速, 日射量)

出力項目: 層間剥離に起因する舗装表面温度差



調査当日に発生する舗装温度差予測式の検討

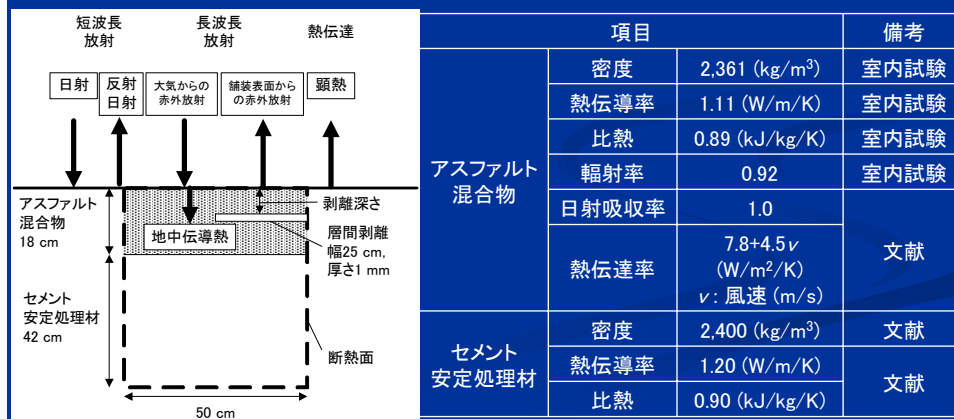
都市別/月別の調査可能日数の検討

## 舗装温度解析

対象都市: 札幌, 仙台, 新潟, 東京, 大阪, 那覇

気象条件: 夏季(6-8月), 秋季(9-11月)の晴天時, 曇天時

解析手法: 2次元FEMにより熱伝導, 熱伝達, 放射を考慮



## 舗装温度解析

熱伝導

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

熱伝達

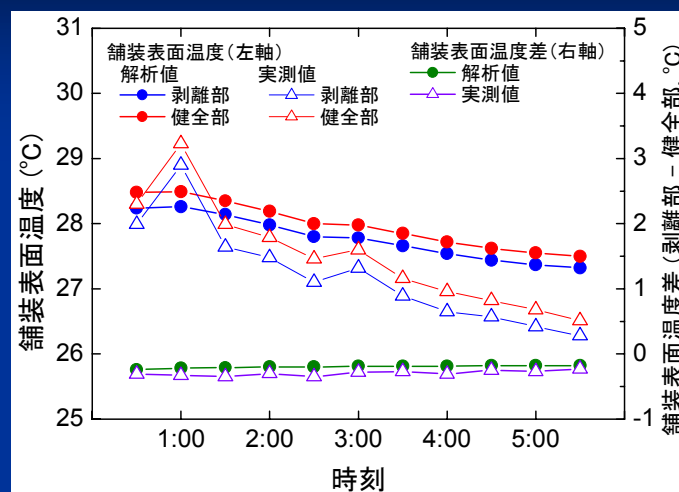
$$Q = h(T_s - T_a)$$

放射

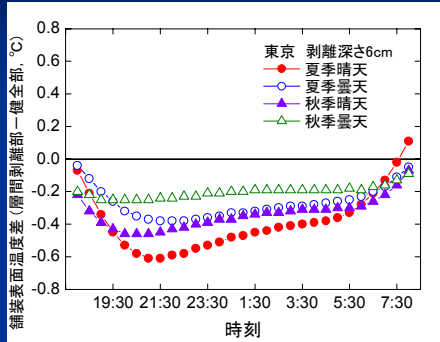
$$E = S\alpha + \varepsilon\sigma(T_a^4 - T_s^4)$$

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>),  
 x,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<sub>s</sub>: 舗装表面温度(K),  
 T<sub>a</sub>: 気温(K),  
 E: 舗装面が吸収する正味放射量(W/m<sup>2</sup>),  
 S: 日射量(W/m<sup>2</sup>),  
 $\alpha$ : 日射吸収率,  
 $\varepsilon$ : 輻射率,  
 $\sigma$ : ステファン・ボルツマン定数  
 (= 5.67 × 10<sup>-8</sup> W/m<sup>2</sup>/K<sup>4</sup>).

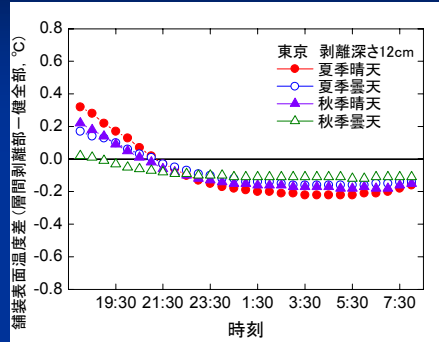
## 実測値と解析値の比較



## 天候・季節・剥離深さの影響



深さ6cm



深さ12cm

層間剥離による発生温度差

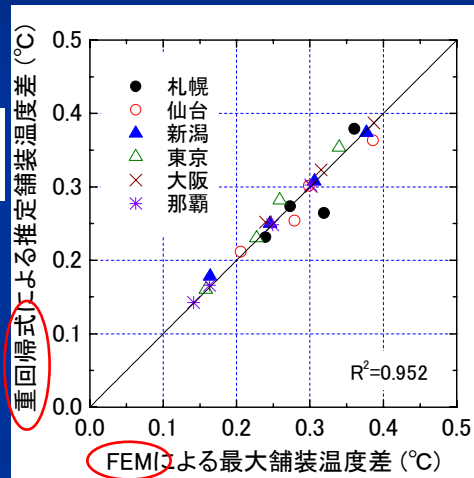
- ・天候            晴天 > 曇天
- ・季節            夏季 > 秋季
- ・剥離深さ      6cm > 12cm

## 重回帰分析結果

各都市の気象条件から解析した  
 最大温度差を目的変数として重回帰分析を実施

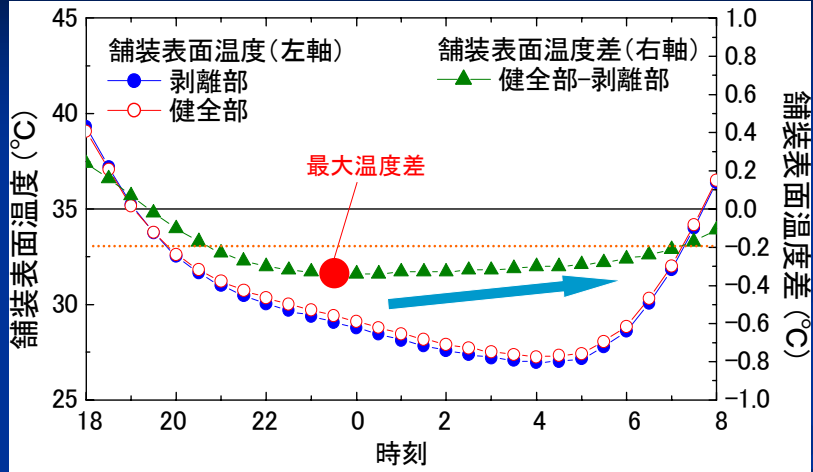
$$\Delta T_{pav} = 0.01335\Delta T_{air} + 0.02944Q - 0.01743v + 0.12282$$

- $\Delta T_{pav}$  最大舗装表面温度差(°C)
- $\Delta T_{air}$  一日の気温差(°C)
- $Q$  日中の積算日射量(kW・h/m<sup>2</sup>)
- $v$  一日の平均風速(m/s)
- (層間剥離深さ8cmの場合)



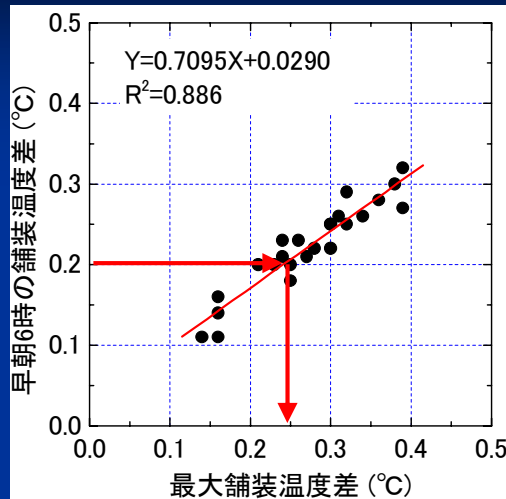


## 舗装表面温度の変化



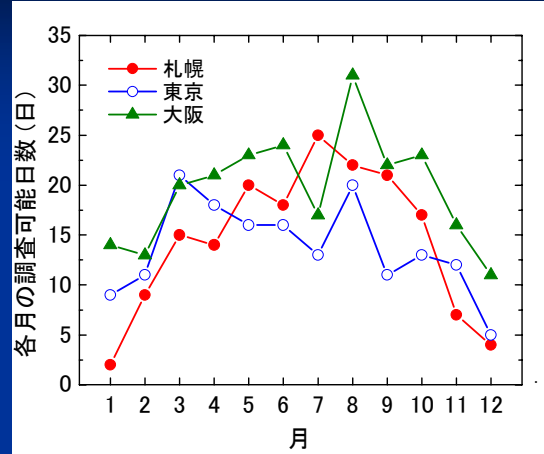
舗装温度差は深夜から早朝にかけて低下傾向

## 最大温度差と早朝温度差との関係



最も厳しい早朝でも0.2°Cの温度差が確保されるためには、  
深夜の最大温度差が0.25°C程度以上であることが必要

## 調査可能日数の検討



調査可能日 : 早朝6時の時点で0.2℃以上の  
舗装温度差が生じている日(雨天含む)

## 結論

- 熱赤外線画像により, ある程度の剥離検出が可能. また, 10km/h程度の走行撮影による動画でも検出可能.
- 撮影角度や撮影高さの調節により, グルーピングの影響は無視できる程度となる.
- 層間剥離の位置が浅い場合や, 昼夜の気温差の大きい晴天時に舗装温度差は大きくなる.
- 気温差, 積算日射量, 平均風速から, 層間剥離に起因する温度差を推定することが可能.
- 比較的高緯度の空港においても, 春から秋にかけて適用可能.