土木, 特にアスファルト舗装における熱画像解析の応用

APPLICATION OF INFRARED SENSING ANALYSIS FOR CIVIL ENGINEERING

森吉 昭博*

By Akihiro MORIYOSHI

This paper describes the infrared sensing analysis of asphaltic mixture and asphaltic pavement and presents the various application of infrared sensing analysis for civil engineering. In this study, it is concluded that surface temperature of asphaltic pavement depend upon the load of vehicle, materials of pavement components, climate of region and structure of pavement.

Keywords: infrared sensing analysis, surface temperature, asphaltic mixture, asphaltic pavement, civil engineering

1. ま え が き

土木構造物や土木施工機械は厳しい自然環境の中で、環境の変化に対応する材料で造られ、その材料は鋼、コンクリート、土およびアスファルトが主体となって単独または複合材で構成されている。土木材料は比熱、熱伝導率、表面放射率、などの違いにより、表面からその材料に応じた熱放射をする。化学プラント、電子産業、自動車産業等は比較的簡易な熱画像撮影カメラで熱画像を撮影し、この熱画像解析を利用する手法（以下これを簡易な熱画像の方法という）を材料や工場の熱管理やエネルギー節約のために用いている^{1),2)}。舗装や土木施工機械ではエネルギー節約や混合物の締め固め向上のために温度計測はスポット的にかつ瞬間的に行われていた³⁾。このため従来の方法は測定点の特異点かどうかの判定をすることが難しく、情報も局部的で得られる情報量も少なく、かつ土木構造物や材料の内部の状態を把握することが困難であった。最近熱画像撮影カメラを用いて土木構造物や土木施工機械で使用される材料について二次元的かつ時系列的に材料の特性を把握しようとする動きがみられるようになった^{4),5)}。従来から人工衛星や飛行機

によるリモートセンシング技術はこれと同様の性質を利用して、国土のさまざまな情報を得ているが、この航空機等を用いる方法は大気の補正等が必要で装置が大かりで測定に膨大な費用を要していた⁶⁾。これに対して簡易な熱画像の方法は土木構造物に対して非接触で間接的に時系列でかつ幅が1 mm以下で長さが20~30 cmのようなクラックから幅が2~3 cmで長さが数 kmにもわたるクラックに至るまでさまざまな状態が現地で観察ができ、構造物の表面温度分布からただちに構造物の内部の状態も推定が可能である。このためこの簡易な熱画像の方法は人工衛星からの情報と異なり直接構造物の材料の性質が把握でき、そのデータを肉眼でも観察できるため現場の状況を直ちに構造物の維持や施工管理に反映できる。またこの簡易な熱画像の方法は道路構造物の一部であるトンネル、橋梁等のような長い構造物でもこのカメラを車上に搭載することにより車を移動しながら短時間にこれらの構造物の診断が交通規制なしで可能であり、道路の陥没についても同様の診断が可能と思われる⁹⁾。著者はこの簡易な熱画像の方法が表-1に示すごとく土木のさまざまな構造物に対して利用可能であると考え、その一部について測定を実施した。アスファルト舗装のこの種の研究はアスファルト混合物の作成時から混合、転圧、供用時、維持補修時に至るまで温度にして300℃

* 正会員 工博 北海道大学助教授 工学部土木工学科
(〒060 札幌市北区北13西8)

表一 土木で考えられる熱画像解析の応用例

舗装	高温領域	骨材およびアスファルトの加熱	ドライアーの性能、骨材の水含有量、プラント全体の温度管理、アスファルト加熱タンク、廃水温度、フィルターバックの点検
		混合物の混合	ドライアーの性能、ミキサーの性能、
		運搬	幌の有無、ダンプの保温、到着時の混合物の保温、タン
		敷均し	フィニッシャーの保温、タンパーの加熱、スクリードの冷却、混合物敷付け時の温度分布、路盤温度
		転圧	ローラの加熱、ローラ転圧時の舗装温度（ローラ種別）、目地部温度、混合物の冷却状況
		舗装のヒータ加熱	適正温度、局部加熱、加熱冷却特性
		局部的補修	混合物の温度、転圧後の冷却特性、鉄筋配置、シール効果、補修部の温度
	常温領域	車両走行	走行部の軌跡および温度上昇、停止部および曲線部の舗装温度、橋梁部の舗装温度、タイヤの温度
		日射	舗装の加熱冷却特性、白線部の温度、すべり止め部の温度分布
		ヒーティング	効率、温度分布と舗装厚、断熱、断熱材の効果
低温領域		橋梁部	舗装の温度分布、ジョイント部
		舗装	亀裂、樹部の温度、切削時の温度
		舗装	亀裂部の空洞、幅、摩耗部
		舗装	樹部の温度、スパイクタイヤによる舗装の温度、タイヤの温度、凍上部、路肩部の温度、除雪後の舗装温度、白線の摩耗、断熱材の効果、マンホール付近、雨水
		舗装	樹部の凍結
		雪、水	温度分布、融雪剤の効果、タイヤによる融雪、信号機の温度分布による融雪、信号機の温度分布
		坑門部	コンクリートの亀裂、漏水と凍結、裏込め効果
		側壁部	空洞、断熱材の効果、鉄筋の位置、排水溝の凍結
		頂部	裏込め効果
		ヒーティング	ヒーティング効果、排水溝
トンネル		舗装	空洞、亀裂
		モルタル部	地漏り
		一般部	コンクリートの亀裂、打撃
		橋脚部	杭の温度
		床板	コンクリートの亀裂、ヒーティング効果、鉄筋の溶接
			クロスアスファルトによる熱ひずみ、塗装の剝離
		桁	リベット、溶接箇所の熱変化
			コンクリート部の老化、亀裂、マスコンクリートの温度上昇
		堤体部	水の熱応力推定、氷の亀裂
		水面	水温分布（取水制御）、水質管理
火力発電 原子力発電			冷却水、熱管理
			冷却水、放水温度（温度管理）
			漏水、湿潤箇所調査
			表面温度分布（流速分布、流砂量分布）
			雪混入水の温度（投入量制限）
			鋼板の溶接、鋼板のひずみ
			水温、コンクリート部材の温度
			レールの溶接、架線のスパーク、ブレーキ温度、雪や氷の付着、融雪、ポイントのヒータ、寒冷地用車両、通過時のレールの温度
河川		堤防	
		流れ	
流雪溝			
石油備蓄 融雪機			
鉄道			

から-40℃程度まで幅広い温度領域が対象となると考えられる。トンネル、ダム、河川、発電所等は対象となる構造物の温度幅が常温領域から低温領域と比較的狭いものの、このような構造物は構造物の安全性の面から熱画像解析を行う研究が望まれていると考えられる。また土木施工機械は除雪車のように-20℃以下からアスファルト舗装施工機械のように150℃以上の温度にさらされるため施工機械にもいろいろな温度トラブルが生じる。このような土木分野はこの簡易な熱画像の方法の応用が望まれる。本研究はアスファルト舗装で特に低温領域の亀裂箇所の特定化およびその損傷の程度ならびにホイールトラッキング試験におけるアスファルト混合物の供試体の走行車両による温度上昇について検討した結果のみについて報告する。

2. 測定法および測定箇所

使用した3種類の熱画像撮影カメラの主な仕様は表一2のとおりである。

野外の測定はワゴン車の内部から熱画像撮影カメラを手持ちの状態で路肩部を約15 km/h の速度で走行しながら、走行車線のほぼ一車線分を水平方向から約30度下に向けて撮影し、器械本体の過度の冷却を避けながら行った。測定箇所は北海道縦貫自動車道千歳～苫小牧間とし、測定は外気温がいずれも-5℃のときで舗装路面上に雪のない状態で行った。北海道縦貫自動車道の測定箇所は寒冷期に熱応力により生ずるアスファルト舗装の横断亀裂現象が著しい区間である。熱画像解析は撮影した熱画像をビデオテープに撮りこの画像のデータを用いて行った。そのとき舗装表面温度は熱画像収録時にアスファルト舗装の放射率は1.0の一定値とし、この値から求めたので数値は絶対温度ではなく相対温度と考えた⁷⁾。舗装の表面温度は接触型の温度計で確認したところこの相対温度とほぼ対応していることが確認されている。

実験室の温度測定はホイールトラッキング試験中にアスファルト混合物の供試体の表面を熱画像撮影カメラで水平方向から約45度下に傾けた状態で行った。実験は

表一2 熱画像撮影カメラの主な性状

	インフラ メトリックス (株)	日本電気 三栄 (株)	日本アビオ ニクス (株)
測定温度範囲(℃)	-20～1300	-20～1600	-40～200
測定可能最小温度差(℃)	0.1	0.1	0.1
全面走査時間 (sec)	1/60	2	1/20
赤外線波長域 (μ)	8～12	3.5～5.6	3～5.4
赤外線検出器	HgCdTe	Ⅰ-Ⅲ	Ⅰ-Ⅲ
走査線 (本)	200	230	60
表示画素数 (本)	256x200	512x240	256x120

測定は実験室と野外の両方で行った。

密粒度アスファルトコンクリート（バインダー量 5.8%）タイプの混合物を用いた。アスファルト混合物の混合はアスファルトの粘度が 2 ポアズ (0.2 Ns/m^2) の温度のときとし、転圧はこれをアスファルトの粘度が 30 ポアズ (3 Ns/m^2) の温度のとき $30 \times 30 \times 5 \text{ cm}$ の鋼製型枠の中に投入し、ローラーコンパクタを用い、線圧 18 kgf/cm (176.4 N/cm) で 24 回行った。その後ホイールトラッキング試験はこの供試体を用いて 45°C の部屋の中で接地圧 5.5 kgf/cm^2 (0.54 MPa)、トラッキング速度 42 回/分の状態で行った。このとき供試体内部の温度計測は埋め込まれた熱電対で行うとともに、供試体表面の温度は熱画像撮影カメラを用いて計測した⁸⁾。

3. 結果および考察

(1) 低温時の舗装表面の温度分布

表一3 は赤外線放射温度計で撮影した画面の中央部水平線上の舗装表面温度をほぼ 2 秒ごとに平均し、この温度を一画面の平均温度とし、この操作を繰り返し数百 m ごとにほぼ同一時間に撮影した結果を区間の平均温度とした。撮影にあたり横断亀裂の多少等により区間を分け、日射の影響は十分考慮した。アスファルト舗装の表層材は密粒度アスファルトコンクリートで粒度、アスファルト量とも全区間ほぼ同一である。表面の温度がこうに異なるのは同一路線でも切土区間、盛土区間があるだけでなく地下水位の高さ、気象条件や使用してい

る材料の熱的性状等が微妙に異なるためと思われる。アスファルト舗装の横断亀裂現象は舗装温度が $2 \sim 3^\circ\text{C}$ 異なるだけでも破壊形態が異なることが知られているので、このような区間温度の差はこの現象に大きな影響を与えていると考えられる。

写真一1 は横断亀裂部の温度分布を示す。この箇所は一般の舗装部と比較してこの場合 2.5°C 低くなっている。写真一1 において目で観察される斜め方向に走るような亀裂幅（幅約 1 cm）と赤外線放射温度計で測定された横方向にみえる白線（幅約 15 cm）や斜め方向に走る亀裂部の低温帯（ $10 \sim 20 \text{ cm}$ ）から判断して亀裂部の低温の幅が異なるのは亀裂内部の状況等により、亀裂部の冷却特性が正常部と比較して異なるためと考えられる⁹⁾。

(2) アスファルト混合物の供試体の温度測定

ホイールトラッキング試験中、アスファルト混合物の表面から深さ 5 cm までのすべての箇所の温度は時間経過とともに上昇する¹⁰⁾。これを熱画像撮影カメラで表面を撮影すると写真一2 の結果が得られた。この画面の温度スケールは 35.0 から 41.4°C まで 0.4°C 刻みで 16 階調とした。

実験の初期の状態はアスファルト混合物の表面温度が同一なためすべて水色の約 37°C の一定値なのに対して、20 分経過後ではタイヤ接地部分のみならず付近の混合物やソリッドタイヤまで温度が上昇している。ここで中央カーソルの交点の温度は 38.4°C で中央部水平線部の温度分布は下部の折れ線グラフで示す。ここでは 1 目盛が 1.6°C であることから、特に供試体表面中央部が他の部分より 20 分経過で約 2°C 程度高くなっていることがわかる。供試体中央部表面の温度を接触型の表面温度計で測定した結果もこの結果と対応することが確認されている。夏期においても特に車両走行軌跡部付近の舗装表面温度の上昇が著しい。このようなアスファルト舗装の表面温度の上昇はアスファルト舗装の波うちやわ

表一3 区間ごとの舗装表面の平均温度 ($^\circ\text{C}$)

区間長 (m)	平均温度 ($^\circ\text{C}$)	亀裂本数 (本)
1000	1.3	9
900	1.3	0
800	-0.3	0
900	-0.1	0
700	-2.3	7

写真一1 横断亀裂部付近の温度分布

写真一2 ホイールトラッキング試験の温度分布（20分後）

だち掘れ現象と密接な関係があると思われる。この実験でソリッドタイヤの幅が5 cm にもかかわらずタイヤ付近の供試体の温度が上昇するのは繰り返し荷重によりアスファルト混合物が粘弾性体のため応力-ひずみ曲線がヒステリシスループを描き、このループ内の面積相当のエネルギーが熱として外部に放散されること、またタイヤと供試体表面との摩擦熱が主な原因と思われる。

4. ま と め

以上で述べたことをまとめると次のようである。

(1) アスファルト舗装で赤外線放射温度計は低温の横断亀裂現象の評価から比較的高温領域の車両走行に伴う舗装の温度分布まで測定可能と思われる。

(2) 非接触の赤外線放射温度計は土木構造物の評価や診断に手軽に利用できるように思われる。

本研究は表一に示すような土木において簡易な熱画像の方法の応用例が数多く考えられるが、ここではごく一部の例を示したにすぎない。この研究は緒についたばかりなのでまだ十分とはいえない。特に常温以下の温度測定は機械の性能からカメラの角度、温度刻み、測定条件等考慮すべき点が多い。読者の皆様のご意見、ご叱責をいただければ幸いです。

アスファルト舗装の亀裂の幅、深さおよび亀裂内部の空洞の診断は現在低温のメタノールをアスファルト亀裂に注入し、熱画像撮影カメラで撮影することも考えている。この分野の研究がこれからますます盛んになることを希望します。

謝 辞：本研究は北海道クリアパルス（株）、日本電気三栄（株）札幌支店および日本アピオニクス（株）から熱画像撮影装置一式をお借りし、これらの器械を用

いて種々の対象物の熱分布を計測した。舗装表面の温度は測定するにあたり日本道路公団札幌建設局の方々に、一方熱画像解析においては本学電気工学科 深井一郎教授、榎戸武揚助教授に大変お世話になった。また河川、発電関係の応用例は本学土木工学科 長谷川和義博士の考えに沿ったものである。関係の皆様方にここに感謝致します。

参 考 文 献

- 1) 日本写真測量学会編：熱赤外線リモートセンシングの技術と実際、鹿島出版会、1986年11月。
- 2) 渡辺比佐雄：赤外線放射を利用した測温装置の応用実例について、画像技術、1972年9月。
- 3) アスファルト舗装要綱：(社)日本道路協会。
- 4) 森吉昭博・深井一郎・榎戸武揚：アスファルト舗装の横断ひびわれ現象の温度解析、第17回日本道路会議一般論文集、pp.435~436、昭和62年。
- 5) 森吉昭博・深井一郎・榎戸武揚：低温時における赤外線放射温度計によるアスファルト舗装の温度計測、寒地技術シンポジウム'87講演論文集、pp.135~137、1987年11月。
- 6) P. Ruiz-Azuara : Detecting Hydrobiological Parameters with LANDSAT 3 Summer 1981 Data, The ERIM Nineteenth International Symposium on Remote Sensing of Environment, October 21-25, 1985.
- 7) 5) ibid.
- 8) 新田 登・森吉昭博・高橋 将：繰り返し走行荷重下におけるアスファルト混合物の温度変化、第17回日本道路会議一般論文集、pp.326~327、昭和62年。
- 9) 田代徹雄・日裏 徹・青柳志郎：赤外線熱画像装置を用いたシミュレーションによる建築物の熱的、構造的特性の解析システム、寒地技術シンポジウム'85講演論文集、pp.65~70、1985年11月。
- 10) 8) ibid.

(1989.3.31・受付)