

論文 同時生起行列を用いた赤外線サーモグラフィ法自動診断支援システムの基礎研究

橋爪 謙治*1・橋本 和明*2・全 邦釘*3

要旨：赤外線サーモグラフィ法は赤外線カメラを用いてコンクリート表面温度を撮影し特異な温度変化領域を浮き・剥離部とする。しかし、コンクリート表面には遊離石灰や異物が付着しており、その遊離石灰等を浮き・剥離領域と誤認識する。本論文は、同時生起行列による4種類の特徴量を用いることで、剥離形状を特徴量とした判別式と比べて検出率が33.2%向上した。打音検査を実施した熱画像を用いて評価実験を行うと浮き領域の的中率が87.8%、剥離領域の的中率が94.5%の結果を得た。

キーワード：赤外線サーモグラフィ法、非破壊検査、コンクリート表面、同時生起行列、欠陥検出、

1. はじめに

コンクリート構造物は、供用年数の経過に伴い、中性化の進行や塩化物イオンの浸透が進むことで、鉄筋が腐食・膨張し、被り部のコンクリート片が落下する。道路管理者は、この落下事故を未然に防ぐため、全面打音検査を実施する。しかし、打音検査は構造物に近接することが必要で、交通規制や高所作業車の手配等が必要となり、時間と費用を要する。

現在、西日本高速道路株式会社の四国支社管内では、コンクリート片落下事故を防ぐため赤外線サーモグラフィ法（以下、赤外線法という）を用いたスクリーニング検査を行った後、打音検査を行っている。赤外線法は、内部欠陥の表面上に特異な温度分布が出現すると浮き・剥離領域と判断し、その結果を利用することで、打音検査面積を削減し、効率的な維持管理を実現している。

しかし、赤外線法は大量の熱画像を読み取り損傷を診断（以下、読影という）する調査員への負担が大きくなる。また、特異な温度分布領域の鑑別診断は容易なものではなく読影する調査員間や同じ読影者でも診断結果に変動があると言われている¹⁾。読影診断を困難としている原因は、コンクリート表面上に付着している異物や表面の凹凸、そして色むらなどが、温度変化領域として検出されることにある。つまり、コンクリート表面は均一な温度でなく、健全領域であっても温度変化領域がある（以下、健全領域に出現する温度変化部をノイズとよぶ）。

林らは、熱画像を対象とした画像フィルター処理技術を用いることで、診断結果を定量的に評価し、診断を支援するシステムを提案している²⁾。解析に用いた熱画像の特徴量は、剥離領域の形状とし、複雑度、円形度、周囲長を算出し、決定木分析により判別式を求めている。この判別方法は、健全領域に発生したノイズと浮き・剥

離領域を精度よく判別することができない。この方法の剥離領域の的中率は、61.3%であった²⁾。

本論文は、特異な温度変化領域内の濃淡であるノイズに着目し、同時生起行列から得られる特徴量を利用して、浮き・剥離領域の的中率向上を目指したものである。判別式はロジスティック回帰を利用し的中率は94.5%の結果を得た。

2. 赤外線画像による診断

2.1 検出したい浮き・剥離領域

赤外線法の目的は鉄筋錆の進行による浮き・剥離領域を検出することにある。冷却型の赤外線カメラで撮影した熱画像の特徴は次のとおりである。

(1) 浮き領域

ここで言う浮き領域とは、点検ハンマー（230g）で打撃すると異音は確認できるが、コンクリート片が剥落しない領域をいう。健全部に異物が付着している熱画像と比較すると、浮き領域の温度変化領域は明瞭に検出しない（図-1）。

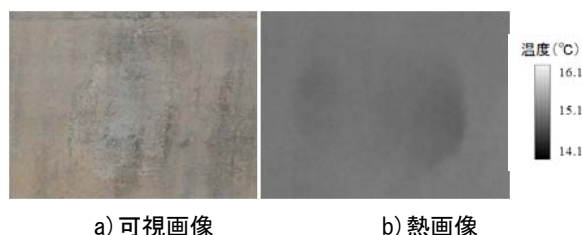


図-1 浮き領域を撮影した事例

(2) 剥離領域

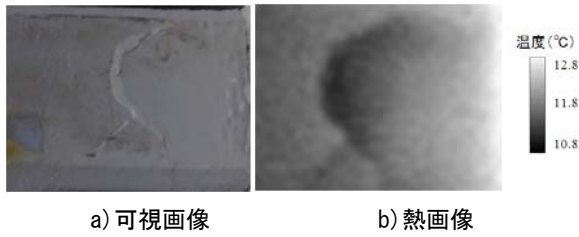
ここで言う剥離領域は、点検ハンマーで打撃するとコンクリート片が落下する領域であり、赤外線法ではこの領域を検出し、判別することを目的とする。剥離領域の

*1 西日本高速道路エンジニアリング四国（株） 技術部技術課主査（正会員）

*2 西日本高速道路エンジニアリング四国（株） 技術部副部長（正会員）

*3 愛媛大学大学院理工学研究科 助教 工博（非会員）

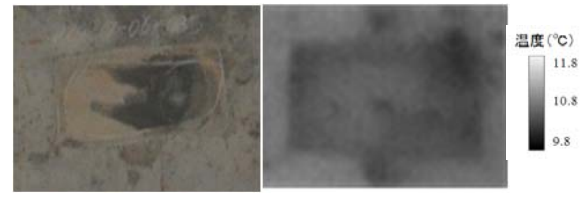
熱画像は、浮き領域と比較すると明瞭に検出できる（図-2）。



a) 可視画像 b) 熱画像

図-2 剥離領域を撮影した事例

図-5で示した事例は、断面修復をした跡が温度差となって検出された事例である。この場合は、長方形となって検出されているため補修跡と判断できる。



a) 可視画像 b) 熱画像

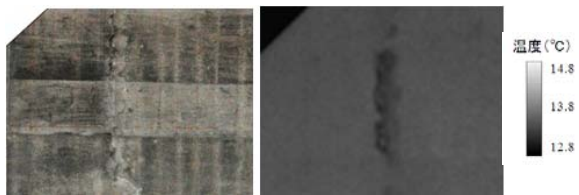
図-5 補修跡の補修材を撮影した事例

2.2 読影診断が困難となる事例

コンクリート表面に遊離石灰やノロの付着、断面修復のための補修材をノイズとして検出する。これらについて誤診断をしやすい例を以下に示す。

(1) ノロが付着

コンクリート打設時に型枠目地などに付着したノロは、厚さが2~5mmであるため、赤外線法では型枠目地に沿った細長い温度変化として明瞭に検出される（図-3）。熱画像では明瞭に検出できるため、浮き・剥離領域として、誤診断する。



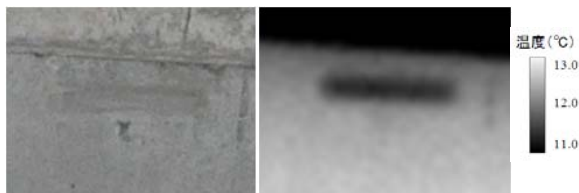
a) 可視画像 b) 熱画像

図-3 ノロが付着した事例

(2) 異物の混入

被り部分に、木片等の異物が混入している場合、赤外線法では、この異物を浮き・剥離領域と誤検出する。

図-4で示した画像は木片が混入していた個所である。目視では、木片の表面にモルタルが付着しているため異物が混入しているとは判断できない。



a) 可視画像 b) 熱画像

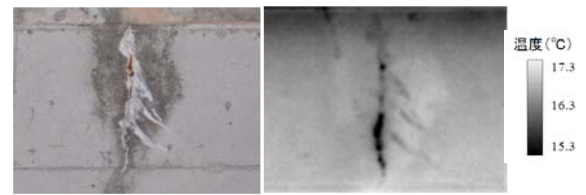
図-4 異物が混入した事例

(3) 補修跡

鉄筋が腐食して浮き・剥離領域が出現すると、その領域を撤去して、無収縮モルタル等の材料で断面修復を実施する。この補修で使用する材料がコンクリートと異なる熱伝導率であると、特異な温度差となって検出する。

(4) 遊離石灰

コンクリート表面に遊離石灰が付着すると特異な温度変化として検出する（図-6）。これは、遊離石灰の反射率・熱伝導率が、健全部のコンクリートと異なることや、遊離石灰とコンクリートの間に隙間が介在していることが原因である。熱画像の中心に温度差が検出されているが、これは遊離石灰（t=1mm程度）が浮いている状態である。



a) 可視画像 b) 熱画像

図-6 遊離石灰領域を撮影した事例

(5) 健全領域（色むら）

可視画像からコンクリート表面に色むら（茶色）が確認できる。その茶色の領域が特異な温度差となって検出する事例を図-7に示す。コンクリート表面の色むらを浮き・剥離領域として誤鑑別する 경우가非常に多い。



a) 可視画像 b) 熱画像

図-7 色むらを浮き・剥離領域として誤検出した事例

2.3 熱画像の濃淡

本論文は、読影診断が困難となる熱画像のコントラストに着目し、浮き・剥離領域を判別することとする。以下に熱画像の拡大図を示す。拡大図の寸法は、高さ130mm、幅170mmとした。

(1) ノロが付着した領域を対象とした熱画像の拡大

ノロが付着している熱画像の拡大を図-8に示す。こ

の拡大画像ではコントラストが大きいことがわかる。対象ピクセルの隣接するピクセル間の温度差は少なく、3〜4ピクセル隣になると濃淡の変化が大きい。

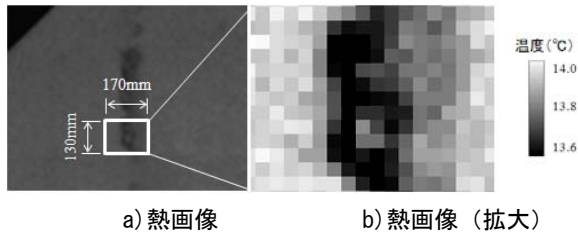


図-8 ノロが付着した領域を拡大した事例

(2) 異物が混入した領域を対象とした熱画像の拡大

異物とコンクリートとの温度差は大きい温度変化領域内の温度差は小さい(図-9)。この現象は、異物(ここでは木片)の温度を捉えていることが原因と推察する。

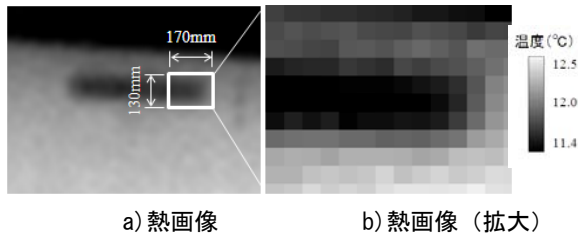


図-9 異物混入の領域を拡大した事例

(3) 補修跡を対象とした熱画像の拡大

補修跡の拡大図は異物混入と比較すると濃淡の変化を確認できる(図-10)。ただし、ノロと比較すると黒いピクセルが少ない。ただし、対象ピクセルと隣接するピクセルとの間のコントラストは大きい。補修跡は、補修材の熱伝導率がコンクリートと異なることが原因で出現するものである。そのため、隣接するピクセル間のコントラストが大きくなったものと推察する。

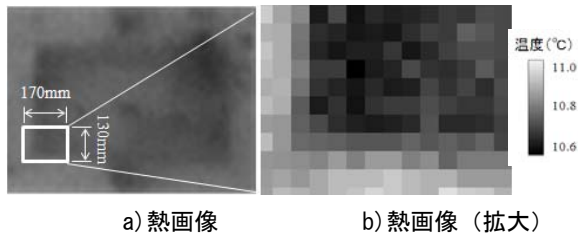


図-10 補修跡の領域を拡大した事例

(4) 遊離石灰領域を対象とした拡大

遊離石灰部の温度変化領域内は濃淡の変化が小さい(図-11)。温度変化が小さい異物混入の拡大図と比較しても遊離石灰のほうが小さい。ただし、黒色のピクセルは、異物混入の画像と比較して多い。これは遊離石灰がコンクリート表面に付着していることが原因であると推察する。異物混入の場合は、異物の表面コンクリ

ート(ノロ)が覆いかぶさっているため、濃淡が若干出現すると推察する。

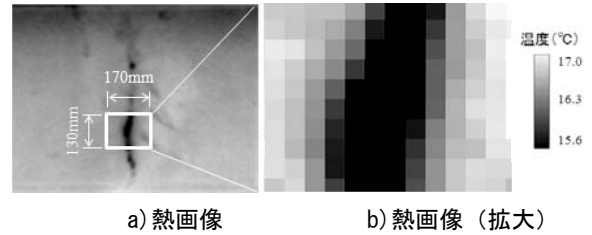


図-11 遊離石灰の領域を拡大した事例

(5) 健全(色むら)を対象とした熱画像の拡大

色むらが原因の熱画像は、補修跡の濃淡に近似している(図-12)。両者とも熱移動によって特異な温度変化領域が検出することが原因だと推察する。このため、隣接するピクセル間のコントラストが大きくなる。

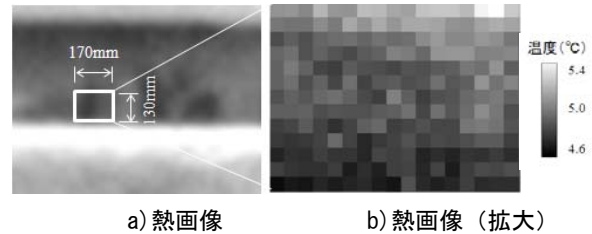


図-12 色むら領域を拡大した事例

(6) 浮き領域を対象とした熱画像の拡大

浮き領域の濃淡は健全(色むら)と同じ傾向にあるが、色が黒いピクセル数が少なく白いピクセル数が多い(図-13)。浮き領域の特異な温度領域は、明瞭に検出しないため白いピクセル数が多い。

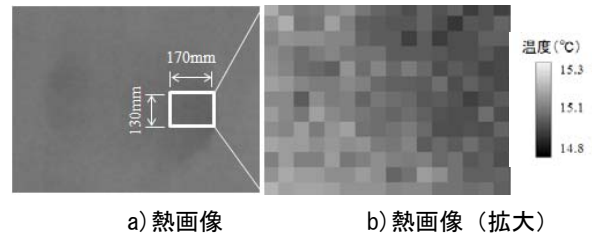


図-13 浮き領域を拡大した事例

(7) 剥離領域を対象とした熱画像の拡大

健全(色むら)と近似した画像となっている(図-14)。ただし、対象ピクセルの2ピクセル隣とのピクセル間との温度差が大きい。

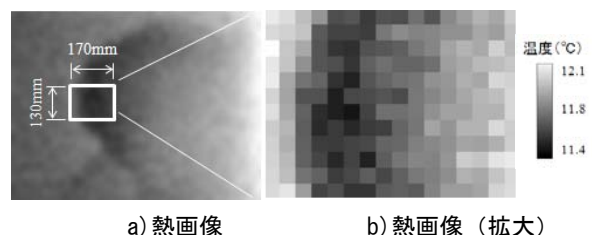


図-14 剥離領域を拡大した事例

3. 同時生起行列から得られる特徴量の検討

3.1 同時生起行列

前項で述べたように、コンクリート表面に現れるノイズを拡大すると濃淡が少ない。一方、浮き・剥離領域については、濃淡があることが観察できた。しかし、人の目で、その変化量を定量的に識別することは困難である。これらのことから、画像の濃淡変化を定量化することができるテクスチャ解析のうち、同時生起行列を用いることとした。同時生起行列とは、**図-15**のようにコントラストが*i*の点から一定の変位 $\delta=(r, \theta)$ だけ離れた点のコントラストが*j*である確率 $P_{\delta}=(i, j)$ を要素とする行列（以下、確率行列という）を求め、その行列からいくつかの特徴量を計算するものである。確率行列の値は画像例に対する頻度で表してあるが、実際には全体の個数が1になるように正規化する³⁾。

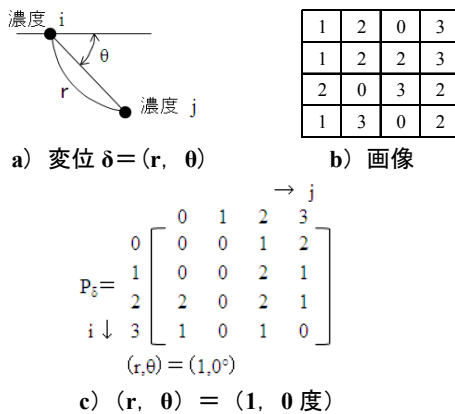


図-15 同時生起行列の例

上記の同時生起行列から、Angular second moment, Contrast, Correlation, Sum of square : variance, Inverse difference moment, Sum average, Sum variance, Sum entropy, Entropy, Difference variance, Difference entropy, Information measure of correlation1, Information measure of correlation2, Maximal correlation coefficient の合計 14 種類の特徴量を算出する³⁾。なお、変位 δ の値を $r=1, 2$ とし、 θ を 0 度, 45 度, 90 度, 135 度, 180 度, 225 度, 270 度とした。濃淡については 32 階調とし、同時生起行列の作成は熱画像解析専用の J ソフトを使用した。

3.2 コンクリート表面状態と特徴量の関係

14 種類の特徴量の効果を確認するために、コンクリート表面状態（ノロ、異物混入、補修跡、遊離石灰、健全部、浮き領域、剥離領域）との関係を確認した。一元配置分散分析を実施し、各特徴量の中から有効な特徴量を確認した。14 種類の特徴量は、それぞれ、変位 $r=1, r=2$ と $\theta=(0$ 度, 45 度, 90 度, 135 度, 180 度, 225 度, 270 度) を算出した。熱画像を参照すると、撮影方向が一定でなく斜めから撮影したものが 7 割を占めているた

め、 θ を変更して特徴量を検出することは難しいと判断し、変位 $\delta(r, \theta)$ で算出した各特徴量の平均を用いることにした。しかし、遊離石灰は水が流れる方向に付着するため、 θ の値が大きく影響を与えるものとする。 θ については、今後の検討課題とする。

確認に使用したデータは、1 ピクセル 10mm×10mm の大きさで、日較差 10 度以上の夜間に撮影された 148 枚の熱画像を使用した。14 種類の特徴量の中で有効な特徴量は 4 種類となった（表-1）。解析に使用したソフトは SPSS とした。表中の有意確率は、各グループ間内の自由度から求められる F 分布内の F 値の確率を示す。

有意な差（1%未満で有意）が確認できた特徴量は、Sum of square : variance, Sum average, Sum variance, Contrast で F 値はそれぞれ、12.4, 6.2, 25.4, 35.9 であった。なお、同時生起行列から求めた 14 種類の特徴量のそれぞれの有意確率を表-2 に示す。

表-1 一元配置分散分析結果

特徴量		平方和	自由度	平均平方	F 値	有意確率
Contrast	グループ間	93,140	6	15523	35.9	0.000
	グループ内	60,980	141	432		
	合計	154,120	147			
Sum of Square : variance	グループ間	29,354	6	4892	12.4	0.000
	グループ内	55,836	141	396		
	合計	85,191	147			
Sum Average	グループ間	3,386	6	564	6.2	0.000
	グループ内	12,783	141	91		
	合計	16,169	147			
Sum Variance	グループ間	460,964	6	76827	25.4	0.000
	グループ内	426,501	141	3025		
	合計	887,465	147			

表-2 各特徴量における有意確率

特徴量	有意確率
Angular Second Moment	0.405
Contrast	0.000 ※※
Correlation	0.108
Sum of Square:variance	0.000 ※※
Inverse Difference Moment	0.109
Sum Average	0.000 ※※
Sum Variance	0.000 ※※
Sum Entropy	0.140
Entropy	0.374
Difference Variance	0.160
Difference Entropy	0.135
Information Measure of Correlation1	0.045 ※
Information Measure of Correlation2	0.871
Maximal Correlation Coefficient	0.621

※:5%未満で有意, ※※:1%未満で有意

上記の 4 種類の特徴量と赤外線法で、コンクリート表面状態と関係があるのか多重比較（その後の検定）を実施した。その結果を図-16 に示す。棒グラフは特徴量の平均値を示し、図中の※は多重比較（Tukey-Kramer 法）で算出した有意な差（有意確率 5%未満）を示す。

Sum of square : variance の値が 60 以上となると、異物混入か健全（色ムラ）となる。Sum Average の値が、20 以下は、剥離領域となる。Sum Variance の値が 150 を超えると異物混入、健全（色むら）となり、Contrast は 60 以上が健全（色むら）で、30 以上 60 以下の範囲にあると浮き領域となる。単純比較だけで、異物混入、健全（色むら）、剥離領域、浮き領域が判別できる。しかし、ノロ、補修跡、遊離石灰が判別できない。判別できないノロ、補修跡、遊離石灰の熱画像（拡大）を参照すると、変位 δ が関係している（図-8, 10, 11）。ここでは δ ($r=1, 2$) を算出して、平均したものを特徴量として計算した。この変位量 δ の r 値を 1 から、増加させて判別可能な特徴量を検討することが必要になる。

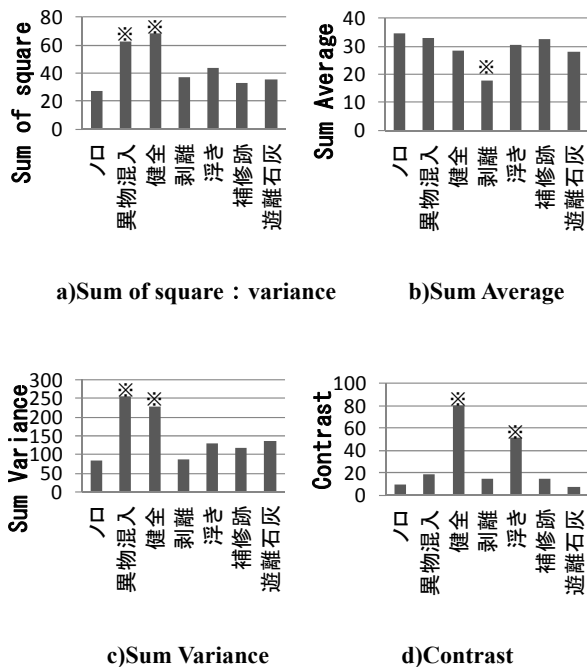


図-16 Tukey-Kramer 法による多重比較

3.3 有効な特徴量

一元配置分散分析の結果から有効な特徴量は 4 種類とした。以下にその特徴量の関係式を示す。

Sum of square : variance は画像全体での分散の大きさを表しているの、濃淡のばらつきを評価することができる（式-1）。Sum average は 2 点の濃淡の合計値である k とその時の確率 $P_{x+y}(k)$ とを乗算しているため濃淡の高い画像ではその値は大きくなる（式-2）。

Sum variance は、 k と Sum average との差の二乗をとっているため、一樣な画像であればその値は小さくなる

（式-3）。Sum of square:variance は局所的な濃淡の変動をもとに評価しているのに対し、Sum variance は画像全体の濃淡の平均を基に評価している。Contrast は画像の局所的な濃淡の変化量を評価する（式-4）。

Sum of square:variance

$$\sum_{i=0}^{n-1} \sum_{j=0}^{n-1} (i - \mu_x)^2 P_{\sigma}(i, j) \quad (1)$$

Sum average

$$\sum_{k=0}^{2n-2} k \cdot P_{x+y}(k) \quad (2)$$

Sum variance

$$\sum_{k=0}^{2n-2} (k - \text{sum average})^2 P_{x+y}(k) \quad (3)$$

Contrast

$$\sum_{k=0}^{n-1} k^2 P_{x-y}(k) \quad (4)$$

ここで、 n は諧調であり、

$$P_{x+y}(k) = \sum_{i=0}^{n-1} \sum_{j=0}^{n-1} P_{\sigma}(i, j) \quad k = 0, 1, \dots, 2n-2$$

$$P_{x-y}(k) = \sum_{i=0}^{n-1} \sum_{j=0}^{n-1} P_{\sigma}(i, j) \quad k = 0, 1, \dots, n-1$$

$$\mu_x = \sum_{i=0}^{n-1} i P_x(i), P_x(i) = \sum_{j=0}^{n-1} P_{\sigma}(i, j)$$

である。

本論文は同時生起行列から得られる特徴量は上記の 4 種類が妥当と判断した。富田らによると 14 種類の中で Angular second moment などは同時生起行列の要素がどのくらい密集して分布しているかを測定するのに用いられている。これによりテクスチャの一樣性が測定できるとされている。しかし、同時生起行列の要素がその対角以外に密集しているときにはテクスチャは一樣でない。このように物理的に何を測定しているかわからない場合が生じる可能性がある。このため、本論文では、熱画像の拡大図を確認して説明できる特徴量（4 種類）を判別に用いることとした⁴⁾。

4. 多項ロジスティック回帰による判別

4.1 判別分析手法の選択

判別手法はニューラルネットワーク、判別分析、決定

木分析，ロジスティック回帰分析等が挙げられる。同時生起行列から得られる特徴量の性質から多重共線性の問題があることと，演算速度が速い判別式を利用することを目的としたため，分析手法はロジスティック回帰分析とし，解析には SPSS Modeler ソフトを使用した。

従属変数を剥離領域，浮き領域，ノロ，異物混入，補修跡，健全（色むら），遊離石灰領域とし，独立変数は熱画像の同時生起行列の特徴量とした。同時生起行列のデータを利用する場合，1 ピクセルの大きさが重要なカテゴリとなる。このため，四国支社管内の 20 万 m²分のコンクリート橋梁を対象に平成 22 年に撮影した熱画像から，撮影距離が 9m±2m の熱画像を抽出した結果，データ数は 1,253 枚となった。なお，1,253 箇所は打音検査を実施して損傷状態を確認した。

分析に使用する特徴量は，同時生起行列から得られた 4 種類（Sum of square:variance, Sum average, Sum variance, Contrast）とした。さらに，変位 δ の r=1 と r=2 の 2 種類を用意した。

4.2 コンクリート表面状態別の判別精度

同時生起行列から得られた特徴量を用いて多項ロジスティック回帰分析を実施すると，判別精度は 91.7% となった。判別精度をクロス集計表で示す（表-3）。表中数字は度数で，多項ロジスティック回帰分析結果と打音結果が的中している度数を太字で示す。太字を集計すると 1,149 箇所となる。すなわち，太字以外の度数は誤判別となる。剥離領域の検出率は 94.5%（156÷165），浮き領域の検出率は 87.8%（194÷221）となった。

表-3 分析結果と打音検査結果のクロス集計

		多項ロジスティック回帰結果							合計
		ノロ	健全	剥離	浮き	異物混入	補修跡	遊離石灰	
打音結果	ノロ	75	0	1	0	0	1	0	77
	健全	4	369	6	25	0	6	4	414
	剥離	0	5	156	1	0	3	0	165
	浮き	0	27	2	194	0	1	6	230
	異物混入	0	1	0	0	47	0	0	48
	補修跡	0	1	0	0	0	100	0	101
	遊離石灰	0	9	0	1	0	0	208	218
	合計	79	412	165	221	47	111	218	1,253

健全であると判断した 412 箇所のうち，打音検査での確認結果によると剥離領域は 5 箇所，浮き領域が 27 箇所，異物混入が 1 箇所であった。自動診断を行うには，健全と判定した個所に，剥離領域が存在してはいけない。

同時生起行列での各特徴量はコントラストの大きさに大きく依存する。そのため，対象となる画像のコントラストを現在使用している 32 階調から，減少させて検討する必要がある。同時生起行列をコントラストの高い画

像で検討すると，その結果は幅の広い分散値を持った行列が作成される。そのため，同時生起行列から得られる各特徴量は比較的小さい値を示し，判別することが困難となる。このため，熱画像の階調数を減少させたほうが解析上，有利になる。以上の事項が，今後の課題である。

5. まとめ

本研究で得られた知見と今後の課題を以下に示す。

- (1) 異物が付着した熱画像と浮き・剥離領域の熱画像を拡大すると温度濃淡が異なることを確認した。
- (2) 同時生起行列で求めた特徴量 14 種類のうち，Sum of square : variance, Sum average, Sum variance, Contrast の 4 種類が判別に有効な特徴量である。
- (3) 変位 δ の距離 r となす角 θ をそれぞれ 2, 3, 4…また 45 度，90 度，135 度と変化させて有効な特徴量を探索することが必要である。ただし，角 θ は，撮影角度に影響をうけるため，撮影方法を一定にすることが重要である。
- (4) テクスチャ解析のうち，同時生起行列を用いるとノロ領域，健全（色むら），剥離領域，浮き領域，異物混入箇所，補修跡，遊離石灰の 7 つに分類することが可能となる。
- (5) テクスチャ解析は有効であるが熱画像の 1 ピクセルの大きさを一定にすることが重要であり，撮影する際には注意が必要となる。また，1 ピクセルの大きさを小さくすれば，判別精度が向上する可能性がある。今後の赤外線カメラの性能向上に期待するところである。
- (6) 解析結果より健全，補修跡，遊離石灰と判断したものに打音検査による剥離・浮き領域をなくすために，どのようにすべきか検討していきたい。

参考文献

- 1) 橋本和明・林詳悟・明石行雄：赤外線サーモグラフィ法の技術的な問題点と画像処理技術の研究，コンクリート構造物の非破壊検査論文集，Vol.4，pp389-398，2012
- 2) 林詳悟・橋本和明・明石行雄：赤外線サーモグラフィ法によるコンクリート損傷の検出精度向上，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.35，pp. 1813-1818，2013
- 3) 新編画像解析ハンドブック，高木幹雄，下田陽久，pp.1260-1268，東京大学出版会
- 4) 富田文男，白井良明，辻三朗，テクスチャの解析，情報処理，Vol.19，no.2，pp173-182，1978