論文　内部温度測定を併用した赤外線サーモグラフィ法に関する研究

中村　士郎*1・阪上　隆英*2・久保　司郎*3・内田　美生*4

要旨：赤外線サーモグラフィを用いたコンクリート構造物の非破壊検査において，信頼性の高い検査結果を得るためには検査時の気候，天候，立地条件などの検査環境の影響を考慮する必要がある。本研究では，赤外線サーモグラフィを用いた非破壊検査にコンクリートの内部温度測定を併用することにより，検査環境に応じて変化する構造物内部の熱の流れを定量的に検出し，内部欠陥検出の確実性を向上できることを明らかにした。

キーワード：赤外線サーモグラフィ，検査環境，内部温度測定，面外方向熱流，剥離欠陥

1.　はじめに

赤外線サーモグラフィを用いた内部欠陥検査法は，非破壊かつ非接触で効率良く広範なコンクリート構造物を検査可能な手法と考えられ，近年適用事例も多い。しかし，日射や外気温変動により自然発生的に生じる温度分布に基づくパッシブな検査の場合，気象条件によっては内部欠陥が検出できない場合もあり，運用上の制約となる点が問題となっている [1)]。これは**図-1**の模式図に示すように，コンクリートの深さ方向に温度勾配が生じない場合には，内部欠陥が存在しても熱流に変化が無く，表面温度差が生じないことから説明できる。渡部らは欠陥検出の可否には日射量が最大の影響を与えること [2)]，また，込山らは季節や風の影響も無視できない要因であること [3)]などを報告している。

筆者らは，日射，風，立地条件など全ての環境要因の影響を受けて変化するコンクリートの内部温度を測定することにより検査環境を評価する方法を検討している [4)]。これまでの検討により，深さ 20 ～50mm の内部欠陥を検出する場合，赤外線サーモグラフィによる欠陥検出の可否の指標となる表面温度差の推定に，深さ 10，50mm のコンクリート内部温度差が有用である事を明らかにしている。本研究では，深さ 20mm 以下の剥離欠陥に関する実験的検討，表面温度差の推定精度向上を目的とした解析的検討及び実検査への適用方法の検討を行った。

2.　実験的検討

2.1　実験概要

剥落の危険性の高いごく浅い深さ 5mm の欠陥から赤外線法で検出可能な欠陥深さの限界値付近である深さ 50mm までの深さの異なる人工欠陥の検出実験を屋外日射環境下で内部温度測定を併用して行った。

(1)　人工欠陥供試体

供試体は埋設する人工欠陥の深さに応じて 2

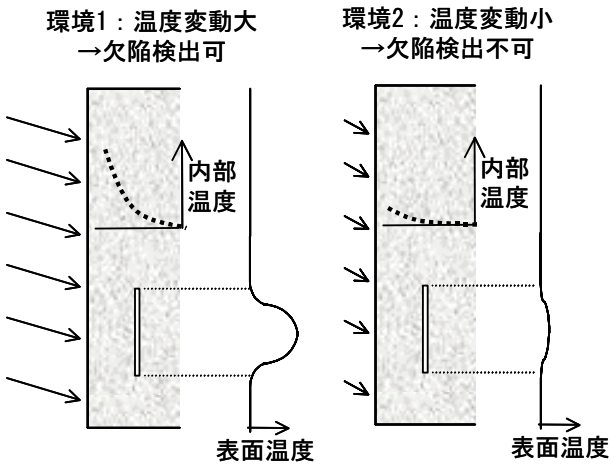

図-1　赤外線法の測定原理

*1 住友大阪セメント㈱　セメント･コンクリート研究所　工修　（正会員）
*2 大阪大学大学院助教授　工学研究科機械システム工学専攻　工博　（正会員）
*3 大阪大学大学院教授　工学研究科機械システム工学専攻　工博
*4 住友大阪セメント㈱主任研究員　セメント･コンクリート研究所　工博　（正会員）

種類作成した。最小深さ 5mm の人工欠陥を埋設した小型モルタル供試体（供試体 1）と深さ 20，30，50mm の人工欠陥を埋設した大型コンクリート供試体（供試体 2）である。供試体の概要を**図-2** 及び**図-3** に示す。人工欠陥には厚さ 5mm のポリエチレンシートを使用した。測定時には供試体の面内方向の熱伝導を抑制するため，側面に厚さ 100mm の発泡スチロールを貼り付けた。

(2) 内部温度測定

日射環境下における内部温度変化を測定するため，人工欠陥供試体の表面から 10,30,50mm の位置に熱電対を埋設した。

(3) 測定方法

赤外線サーモグラフィで供試体 1，2 の表面温度分布画像を 15～30 分間隔，熱電対で各深さの内部温度を 5 分間隔で測定した。赤外線サーモグラフィは非冷却マイクロボロメータセンサを搭載したもので，画素数は 320×240，温度分解能は NETD 値で 0.1℃である。測定距離は 2m とし、空間分解能は約 5mm/pixel である。欠陥検出の可否を定量的に検討するため，指標となる欠陥部と健全部の赤外線強度差を算出した。健全部の赤外線強度には供試体全体の平均値を、各欠陥部の赤外線強度には欠陥部分の平均値を用いた。本実験で用いたサーモグラフィは温度表示機能を有さないので，これが欠陥部と健全部の温度差に対応する。

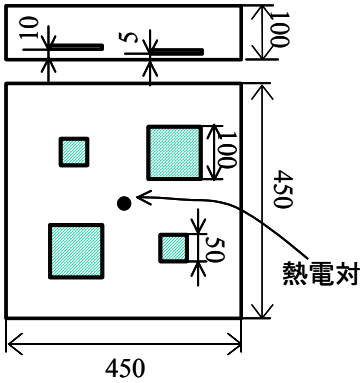

図-2 人工欠陥供試体（供試体1）

(4) 測定環境

測定日時は 10 月下旬の 10：00～18：00 とし，人工欠陥供試体 1，2 を屋外南向きに設置した。測定当日の天候は晴れ時々曇りであり，12：00 頃までは断続的に日射があり，それ以降は建物の影に入り日射の無い環境であった。

2.2 実験結果

(1) 赤外線サーモグラフィの測定結果

屋外環境下における人工欠陥供試体の表面温

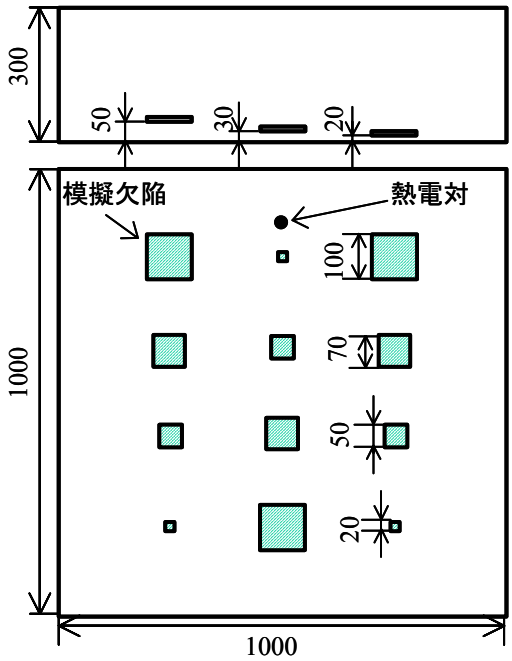

図-3 人工欠陥供試体（供試体2）

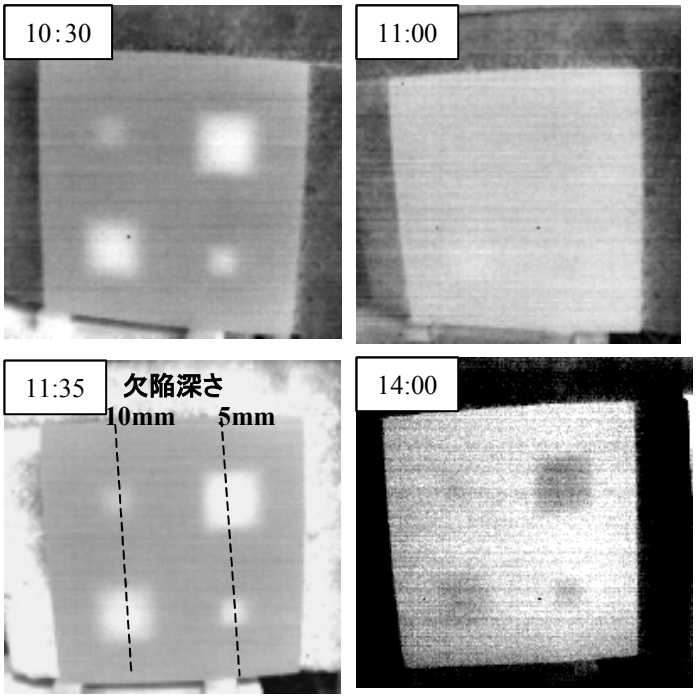

図-4 赤外線測定結果（供試体1、高温部→白色、低温部→黒色）

度分布画像の一例を**図-4** に示す。画像からは深さ 5，10mm の人工欠陥が周辺健全部との温度差により認識可能であるが，その検出状況は測定時刻によって変化した。例えば，深さ 10mm の人工欠陥は測定開始直後から高温部として現れ，11：00 に一旦消滅するが，11：30 から再び温度差が生じて検出可能となる。その後，13：00 に再度消失するが 14:00 以降は低温部として検出が可能であった。

最も寸法の大きい 100×100mm の欠陥部と健全部の赤外線強度差の経時変化を**図-5** に示す。赤外線強度差は欠陥深さが増加するとともに減少し，周辺健全部との画像コントラストが小さくなるため，相対的に画像から欠陥を検出することが困難になる。また，欠陥深さに関わらず赤外線強度差は時刻とともに大きく変化するため，欠陥の検出可能な時点を時刻の範囲で指定することは困難であった。

(2) 内部温度の測定結果

深さ 5，10mm の欠陥を埋設した供試体 1 の内部温度を**図-6** に示す。内部温度は 13:00 頃まで上昇，それ以降は減少する傾向にあるが，10:30～12:00 の間は，時々曇りのため日射が無くなり，内部温度も急激に下降，上昇している。内部温度の変化量は表面に近い位置ほど大きく，13:30 頃までは表面から内部への温度勾配が生じ，それ以降は逆向きの温度勾配が発生していた。なお，供試体 2 の内部温度も供試体 1 とほぼ同様の挙動を示した。

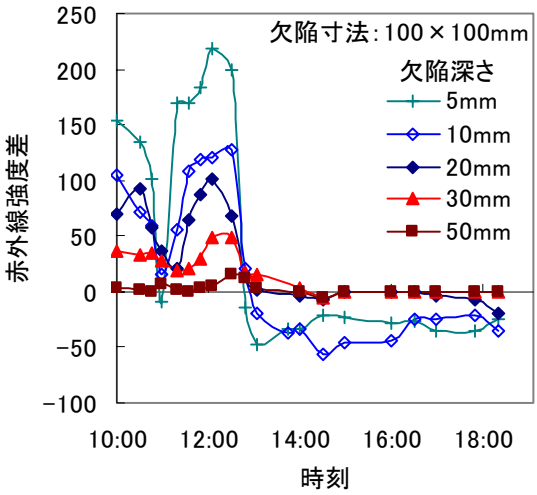

図-5 欠陥部赤外強度差の経時変化

(3) 内部温度分布と欠陥部温度差の関係

図-6 の内部温度分布には，検査時の環境における対象物の面外方向に生じた熱流の向き及び強さに関する情報が含まれている。これらの情報より，内部欠陥が存在した場合に生じる欠陥部温度差の推定を行った。

深さ 10，30，50mm の内部温度 T_{10mm}，T_{30mm}，T_{50mm} から面外方向の熱流パラメータ ΔT_1，ΔT_2，ΔT_3 を以下のように算出した。

$$\Delta T_1(t) = T_{10mm}(t) - T_{30mm}(t) \quad (1)$$

$$\Delta T_2(t) = T_{10mm}(t) - T_{50mm}(t) \quad (2)$$

$$\Delta T_3(t) = T_{30mm}(t) - T_{50mm}(t) \quad (3)$$

赤外線サーモグラフィによる表面温度分布画像から得られた 100×100mm の欠陥部の赤外線強度差と式(1)～(3)で求めた各パラメータ間の相関係数を**表-1** に示す。深さ 50mm の欠陥の場合を除く欠陥部の赤外線強度差と面外方向の熱流パラメータの間には相関が見られる。深さ 50mm の欠陥で相関が見られないのは，欠陥部に生じる赤外線強度差の絶対値が小さく，誤差が大きいためだと考えられる。また，**表-1** の相関係数が最も高い熱流パラメータは欠陥深さ毎に異なり，浅い欠陥である 5，10mm では浅い部分の熱流を表すパラメータである ΔT_1，比較的深

表-1 面外方向の熱流パラメータと欠陥部における赤外強度差の相関係数

	欠陥深さ(mm)				
	5	10	20	30	50
ΔT_1	0.81	0.91	0.83	0.61	0.00
ΔT_2	0.76	0.88	0.90	0.70	0.06
ΔT_3	0.68	0.81	0.94	0.76	0.11

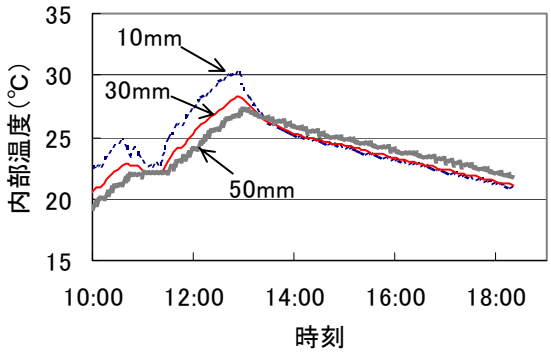

図-6 内部温度変化（供試体1）

い 20,30mm の欠陥ではより深い部分の熱流パラメータ ΔT_3 と欠陥部の赤外線強度差の相関性が高いことが明らかになった。

両者の関係を**図-7** 及び**図-8** に示す。**図-8** には同一機器を用いて別の日時に行った既報[4)]のデータも併せてプロットしている。**図-7** 及び**図-8** より，日射，気温変化などの影響により変動する熱流パラメータから，欠陥部が高温部あるいは低温部として検出できるだけの温度差が生じるか否かが推定できると考えられる。

また，**図-7** 及び**図-8** は寸法 100×100mm の人工欠陥に関する結果であるが，70×70，50×50mm の欠陥については近似直線の傾きが若干減少する傾向が見られ，20×20mm の欠陥では熱流パラメータに関わらず温度差がほとんど生じなかった。これは，欠陥寸法が小さい場合，欠陥部の断熱効果に比べて面内方向の熱拡散が支配的になり，欠陥部の表面温度差が減少したためと考えられる。また，本研究では検討していないが，欠陥の厚さも欠陥部の表面温度差を変化させる因子の一つと考えられる。これらの要因はいずれも**図-7** 及び**図-8** の近似直線の傾きを変化させると考えられ，今後補正方法を検討し，欠陥が存在する場合に生じる表面温度差を熱流パラメータから推定する手法を確立する予定である。

一方，**図-7** 及び**図-8** 中の近似直線から大きく外れたデータは，日射の変化により内部温度及び赤外線強度差が急激に変化した 11:00，12:00～13:00 頃に集中していた。環境が急激に変化した場合の内部温度と表面温度の関係に関しては，次章で温度解析による検討を行う。

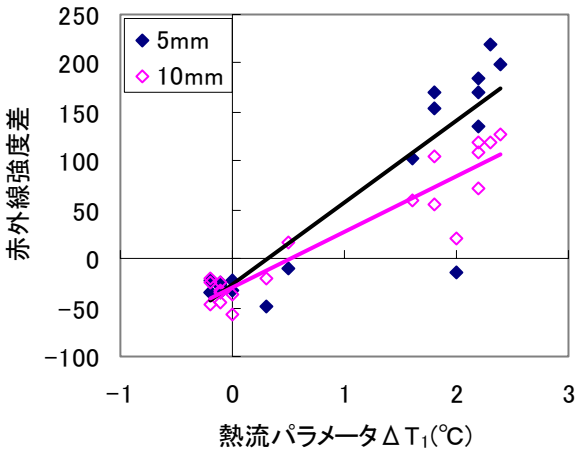

図-7 熱流パラメータと赤外強度差の関係
（欠陥深さ5、10mm、寸法100×100mm）

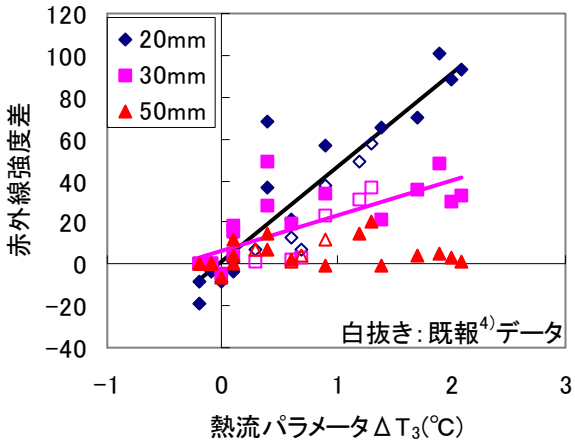

図-8 熱流パラメータと赤外強度差の関係
（欠陥深さ20、30、50mm、寸法100×100mm）

3. 解析的検討

検査環境が急激に変化した場合の熱流パラメータと赤外線強度差の関係について，自然環境とは異なるが，最も顕著な例としてアクティブによる赤外線サーモグラフィ法を想定した強制加熱を行った場合の温度解析を実施した。

3.1 解析方法

図-9 に示す模擬欠陥を含む 2 次元対称モデルで FEM 解析を実施した。**表-2** に解析条件を示す。初期温度 20℃から外気温を 30 分間 30℃に，その後再び外気温を 20℃に設定することにより強制加熱を模擬した。人工欠陥の深さは 10 及び 30mm の 2 種類とした。解析結果から欠陥部と周辺健全部の表面温度差及び熱流パラメータ ΔT_1，ΔT_3 を算出した。

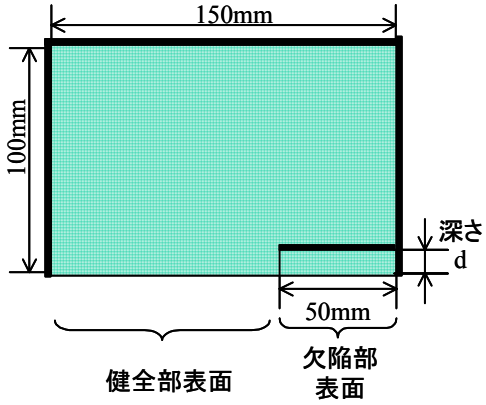

図-9 温度解析モデル

3.2　解析結果

欠陥深さを 10,30mm とした場合の欠陥部温度差と熱流パラメータの経時変化の解析結果を**図-10** 及び**図-11** に示す。欠陥深さ 10mm の場合には両者の変動に時間のずれはほとんど見られない。一方，欠陥深さ 30mm の場合には，加熱開始または加熱終了に伴い熱流パラメータ ΔT_3 が急激な変動をしてから約 4 分遅れて欠陥部温度差にその影響が表れることがわかった。これは，内部温度変動の影響が表面温度差として現れるまでの時間差であり，深い欠陥ほどこの時間差が大きくなると考えられる。実際の検査環境の変動はこの解析条件ほど単純ではないものの，熱流パラメータの急激な変動に対して，時間遅れを伴って欠陥部温度差が追従する現象が**図-8** における誤差の原因の一つであると考えられる。また，既報[4]に示したように，晴天日の日中のように単調かつ緩やかな温度変動下においても，欠陥部温度差と熱流パラメータの非線形性は時間補正によってある程度改善可能であった。結局，どんな環境においても内部温度変動が表面に影響を及ぼすまでの時間遅れを考慮することにより，欠陥部温度差の推定精度が向上すると考えられる。具体的には，時間 t における欠陥部温度差の推定に,式(4)に示す時間 t-X における熱流パラメータ ΔT_3' を用いた。**図-12** は X=5 分とした場合の ΔT_3' と深さ 20，30，50mm の欠陥部温度差の関係であり，相関係数は 20mm で 0.97，30mm で 0.84 となり,**図-8** に示した ΔT_3 を用いた場合の相関係数 20mm で 0.94,30mm で 0.76 よりも向上した。本実験では内部温度の測定を 5 分毎でしか実施しなかったため X=5 分としたが、X を欠陥深さに応じて最適化することにより更に推定精度を向上できる可能性もある。

$$\Delta T_3'(t) = T_{30mm}(t-X) - T_{50mm}(t-X)$$
$$(X = 5\,\mathrm{min}) \qquad (4)$$

表-2　解析方法

メッシュ	2×2mm四角形	
模擬欠陥	50×4mm、深さ d=10、30mm	
熱物性	コンクリート	熱伝導率 2.6W/m/℃
		比熱 1.05kJ/kg/℃
		密度 2.3×10^{3}kg/m^3
	欠陥	熱伝導率 0.04W/m/℃
		比熱 1.05kJ/kg/℃
		密度 23kg/m^3
外部環境	加熱(30分)	外気温30℃
	冷却(30分)	外気温20℃
境界条件	表面:熱伝達境界 熱伝達率 20W/m^2/℃	
	その他:断熱境界	

4.　実構造物への適用方法の検討

これまでの検討より，任意の環境下で内部欠陥が存在する際に生じる表面温度差が，内部温

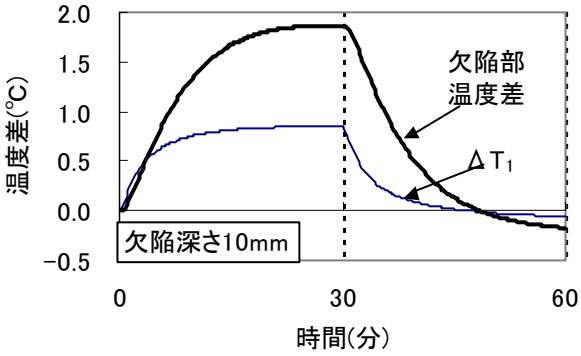

図-10　欠陥部温度差と熱流パラメータの経時変化(解析;欠陥深さ10mm)

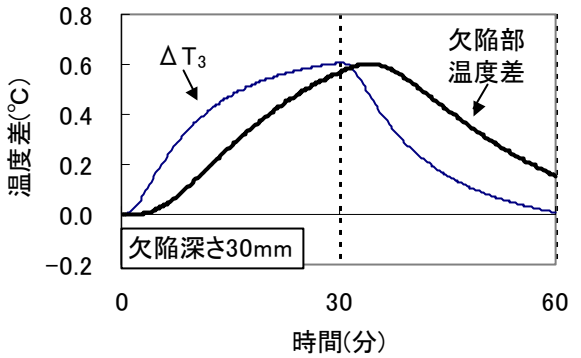

図-11　欠陥部温度差と熱流パラメータの経時変化(解析:欠陥深さ30mm)

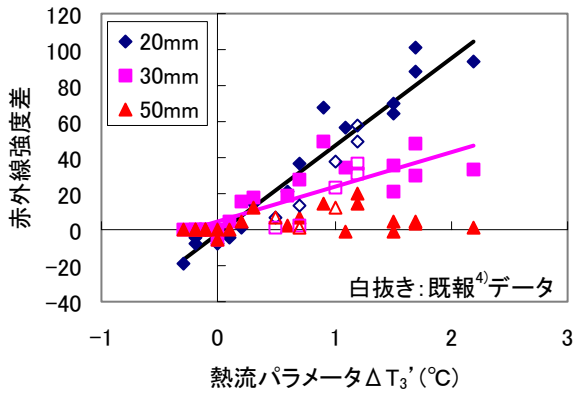

図-12　熱流パラメータと赤外強度差の関係
(実測、欠陥深さ20、30、50mm、時間補正)

度測定から算出される熱流パラメータにより推定できる可能性を示した。これを，赤外線法を用いたコンクリート構造物の非破壊検査に適用する方法を検討した。**図-13** は，内部温度測定を赤外線法と併用した場合の診断フローの一案であり，網掛け部分が内部温度測定の併用により追加される。**図-13** では，検査を実施する期間中，内部温度の測定及び熱流パラメータの算定を行い，予め設定した熱流パラメータに関する判定基準より検査実施の可否を判定する。この判定基準は，本研究で明らかになった熱流パラメータと欠陥温度差の関係を基に，要求される検査精度，使用する機材の性能などに応じて決定すると考えられ，式(5)のようなものが考えられる。

$$\left|\Delta T_3'(t)\right| \geq \theta\min \qquad (5)$$

$\theta\min$：最低内部温度差

式(5)を満たさない検査環境では，検査対象構造物の面外方向に十分な熱流が生じておらず，検査を実施しても内部欠陥を検出できない。日射，風，立地条件など種々の検査環境の影響に応じて変化する熱流パラメータを判定基準に用いることにより，検査環境を総合的に評価できると考えられる。また，検査時の熱流パラメータが既知であれば，検出された欠陥の深さ範囲を推定でき，検査結果の信頼性が向上するとともに構造物の健全性を診断する上で有用な情報になると期待される。

5. まとめ

赤外線法を用いたコンクリート構造物の非破壊検査に内部温度測定を併用する手法について検討を行った結果，以下の知見が得られた。

(1) 深さの異なる複数点の内部温度から算出される熱流パラメータより，欠陥表面部に生じる温度差を推定できる可能性がある。

(2) 日射，風，立地条件などにより変化する検査環境を総合的に評価し，検査結果の精度を保証するツールとして使用できる。

今後の課題として，欠陥寸法，厚さを考慮して欠陥表面部に生じる温度差を推定する手法を確立する必要がある。さらに，本手法を適用した実構造物の検査を行うことにより，種々の環境下での有効性を検証する予定である。

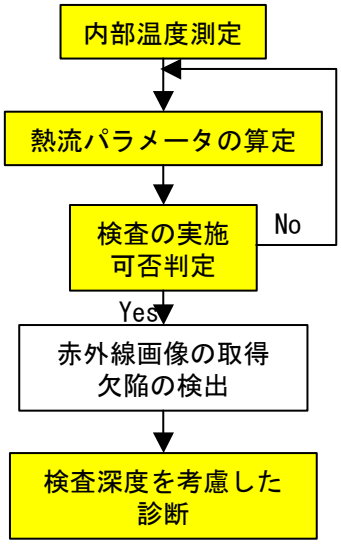

図-13　内部温度測定を併用した赤外線非破壊検査の適用方法案

参考文献

1) 例えば長田文博ほか：赤外線カメラによる高架橋コンクリートの剥離診断手法，土木学会第 56 回年次学術講演会，V-56，pp.836-837，2001.10

2) 渡部哲巳ほか：サーモグラフィ法によるコンクリートの内部欠陥の推定に関する研究，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.15，No.1，pp.589-594，1993

3) 込山貴仁，谷川恭雄：スムージング技術を用いた熱画像シミュレーションによるサーモグラフィ法の適用限界に関する解析的研究，コンクリート工学論文集，Vol.8，No.1，pp.95-106，1997.1

4) 中村士郎ほか：赤外線サーモグラフィを用いたコンクリート構造物の検査環境の評価に関する研究，コンクリート構造物の補修・補強・アップグレードシンポジウム論文報告集，Vol.2，pp.147-152，2002