

サーモグラフィーによる防食塗膜下の劣化評価に関する実験的検討

EXPERIMENTAL STUDY ON EVALUATING OF DEGRADATION UNDER PAINT FILM USING THERMOGRAPHY

本嶋千恵¹・堀幸²・川上哲太郎³

Chie MOTOSHIMA, Yuki HORI and Tetsutaro KAWAKAMI

¹ 学生会員 東海大学大学院海洋学研究科海洋工学専攻 (〒424-8610 静岡県静岡市清水区折戸 3-20-1)

² 工修 静岡市役所 (〒420-8602 静岡市葵区追手町 5 番 1 号)

³ 正会員 工博 東海大学海洋学部海洋建設工学科 (〒424-8610 静岡県静岡市清水区折戸 3-20-1)

It is important to evaluate the degradation under the anti-corrosion paint film for maintenance of offshore and nearshore steel structures. The purpose of this research is to develop the simple method for evaluating degradation under anti-corrosion paint film. The proposed evaluation method is used characteristics of thermal conduction on the surface of steel member with anti-corrosion paint film in this study. The fundamental experiments were carried out using the thermography camera to measure the distribution of temperature on the model surface, for the three kinds of steel plate models with artificial degradations. Consequently the difference of temperature on the steel plate models surfaces for degradation part and nondegradation part were shown. The results of the experiments show that it is possible to detect for degradation under anti-corrosion paint film by proposed nondestructive evaluation method.

Key Words : *Paint film, Degradation, Nondestructive inspection, Thermography, Thermal conduction*

1. 序論

海洋, 海岸の鋼製構造物には劣化を防ぐために塗膜防食が施されるのが一般的である。しかし, この防食塗膜は, 紫外線・温度・微生物・疲労などにより経年変化し, 白亜化・膨れ・剥れ・割れなどの劣化が発生する。さらに, これら防食塗膜の劣化に伴い防食機能が低下し, 下地金属に錆や腐食などの劣化が発生することが知られている。したがって, 塗膜や下地金属の劣化を早期に発見することが, 構造物の維持管理において最も重要な課題である¹⁾。

現在, 構造物の劣化検知は全数目視検査によって行われるのが一般的である。しかし, この目視検査では, 下地金属の初期劣化を発見することが困難であるとともに, 人的・経済的負担が大きいといえる。また, 超音波探傷法や X 線透過検査などの検査手法では, 高度な検査技術や評価技術が必要であったり, 構造物全域にわたる広範囲な検査には不向きであるなどの問題がある^{2), 3)}。

そこで本研究では, 防食塗膜下の劣化部を対象に特殊技術が不要で, 簡便的な劣化部検知手法の開発を目的とし, サーモグラフィーを用いて, 部材の熱伝導特性から, 劣化部検知の可能性を検討すること

とした。近年, サーモグラフィーカメラを用いた非破壊評価手法は, 赤外線サーモグラフィー技術の高度化に伴い, 鋼・コンクリート構造物へも適応されており, 構造物の劣化診断の一手法として確立されつつある⁴⁾。

防食塗膜および防食塗膜下の下地金属の劣化は種々あるが, 本研究では塗膜の剥離と下地金属の錆とクラックを対象に実験的検討を行った。対象とする鋼製部材の実験モデルは, モデルの作成が容易で, 実験結果の解釈が比較的明確であり, 構造部材の一般的な形式である平板を用いた。次に作成した劣化部を有する鋼製平板モデルを 3 種類の熱源により 5 通りの方法で加熱し, モデル表面の温度をサーモグラフィーカメラで計測した。得られたサーモグラフィー画像および, その画像より得られる表面温度の時間的変化より, 劣化部の存在と寸法などの検知の可能性を検討したものである。

2. 実験方法

(1) 実験モデル

図-1 に実験に使用した剥離劣化モデルの断面図を示す。実験モデルは一辺 200 mm, 厚さ 0.5 mm の正

方形平板とし、中央に直径 20 mm の円形切削部を設け剥離部をモデル化した。剥離部深さすなわち空気層厚は 0.0 mm, 0.1 mm, 0.2 mm, 0.3 mm, 0.4 mm の 5 種類である。モデルの作成上、直接塗装が不可能な為、塗膜の代わりに平板の両面にポリエステルシートを全面接着した。そして計測側の片面に熱源以外の外的な熱、たとえば、人などの映りこみの影響を排除するために、黒色の塗装を施した。先に記述した剥離部深さ 0.0 mm とは、切削はしていないが、円形状に未接着部を設けたことを表す。

図-2 に錆劣化モデルの断面図を示す。実験モデルは、一辺 200 mm, 厚さ 0.5 mm の正方形平板を 4 枚張り合わせて作成したが、そのうちの最上部 1 枚はあらかじめ中心部に直径 20 mm の穴をあけたものを使用し、その穴に錆片を挿入して、深さ 0.5 mm の錆劣化をモデル化した。モデルの表面は、剥離劣化モデルと同様に、平板両面に PE シートを接着し計測側の片面に黒色の塗装を施した。また、同様の方法で深さ 1.0 mm の錆劣化モデルも作成した。

図-3 にクラック劣化モデルの断面図を示す。実験モデルは、縦 200 mm, 横 100 mm, 厚さ 0.5 mm の長方形平板を 2 枚並べて貼り合わせるによりクラック部をモデル化した。クラック幅は張り合わせた 2 枚の長方形平板の間に隙間を設けクラック幅を 0.0 mm, 0.1 mm, 0.3 mm の 3 種類製作した。ここでのクラック幅 0.0 mm とは、隙間はないが 2 枚の平板は未接着であることを表す。またクラック深さは平板 1 枚に

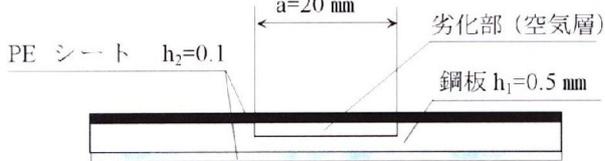


図-1 剥離劣化部を有する平板モデル

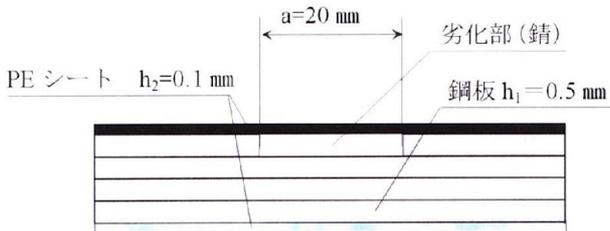


図-2 錆劣化部を有する平板モデル

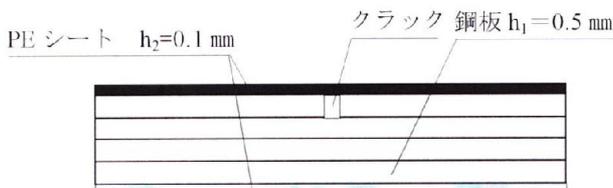


図-3 クラック劣化部を有する平板モデル

クラックを設けたモデルを 0.5 mm, 2 枚にクラック

を設けたモデルを 1.0 mm, 3 枚にクラックを設けたモデルを 1.5 mm とする。モデル全体としては、錆劣化モデルと同様に張り合わせた 4 枚の平板の両面に厚さ 0.1 mm のポリエステルシートを接着し、片面に黒色の塗装を施した。また、表-1 に上記の各平板モデルの諸元をまとめて示す。

(2) 実験装置

写真-1 に基本的な実験装置の全景を示す。実験装置の基本的な構成は、実験モデル、熱源、及び赤外線サーモグラフィカメラである。

表-2 に実験に用いた計測機材の仕様を示す。赤外線サーモグラフィカメラの仕様は、観測温度範囲

表-1 実験モデルの諸元
線サーモグラフィカメラの仕様は、観測温度範囲

劣化部径	20	(mm)
剥離劣化モデル	劣化部径	20
	劣化部深さ	0.0, 0.1, 0.2, 0.3, 0.4
錆劣化モデル	劣化部径	20
	劣化部深さ	0.5, 1.0
クラック劣化モデル	劣化部幅	0.0, 0.1, 0.3
	劣化部深さ	0.5, 1.0, 1.5

-40°C~500°C, 最小温度分解能 0.05°C 以下である。実験に使用した熱源の種類は、ヘアドライヤー、遠



写真-1 基本的な計測装置

表-2 計測機材の仕様

器具名・製造元	仕様
赤外線サーモグラフィカメラ (NEC Avio 赤外線株式会社) (TVS-500EX)	・温度分解能: 0.05°C ・観測温度範: -40°C~500°C ・測定距離: 30cm~∞ ・フレームタイム: 1/60 秒

表-3 熱源の種類と仕様

器具名	仕様
ヘアドライヤー	消費電力 1200W
遠赤外線カーボンヒーター	消費電力 800W
太陽光	2008年11月19日, 20日 11:00~13:00

赤外線カーボンヒーター太陽光の3種類であり、それぞれの仕様は表-3に示す。

(3) 計測方法

防食塗膜下の下地金属における劣化部検知のための計測方法を図-4に示す。劣化部中心に劣化部計測点を取り、劣化部より30mm離れたところを健全部計測点とし、加熱に伴う表面温度変化を赤外線サーモグラフィーカメラにより計測した。

表-4に実験に使用した、加熱方法および計測時間を示す。ドライヤー、カーボンヒーターは平板モデルの前面と背面の2方向から加熱、太陽光は平板モデルの前面から加熱を行い、加熱した時の温度上昇と加熱停止後の温度降下を計測した。

なお、結論から言うと、全ての劣化モデルにおいて、全ての加熱方法で劣化部と健全部で温度差が計測され、劣化部検知の可能性が得られたが、本論文では紙面の都合上、最も顕著に劣化部と健全部の温度差が示された、前面ドライヤー加熱の場合についてのみ以下説明することとする。

3. 実験結果及び考察

最初に、剥離劣化モデルでの実験結果を示す。写真-2は剥離深さ0.1mmの剥離劣化モデルでのサーモ

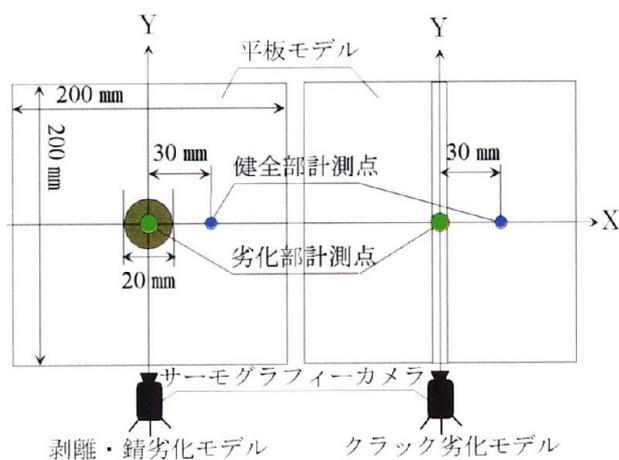


図-4 劣化部検知の為の計測法

表-4 加熱方法及び計測時間

熱源	加熱時間	計測時間
前面ドライヤー加熱	90s	240s
背面ドライヤー加熱		
前面カーボンヒーター加熱	210s	300s
背面カーボンヒーター加熱		
前面太陽光加熱	120s	120s

グラフィー画像である。加熱時間0s、6sでは平板モデル内の劣化部の存在はわからないが、加熱時間9s

になると平板モデルの中心に、赤く温度の高い劣化部が見え始め、12s、15s、18sと時間を追うごとに、劣化部が高温になっていることがわかる。また、加熱時間9sでの劣化部径よりも加熱時間18sでの劣化部径が約35%大きく映っている。これは、劣化部内が高温になると、劣化部の温度が周辺の健全部にも伝わったためだと考えられる。以上のことから0.1mmとごく浅い空気層厚であっても検知が可能であり、加熱時の比較的早い段階の写真を見ることで、劣化部の正確な位置および形状が検知可能であると考えられる。

次に、写真-3に剥離深さ0.2mmと0.4mmの剥離劣化モデルでの加熱時間12sにおけるサーモグラフィー画像を示す。写真から(a)の剥離深さ0.2mmでは劣化部内に赤く温度の低い部分があるが、(b)の剥離深さ0.4mmでは劣化部内部が白く高温であること

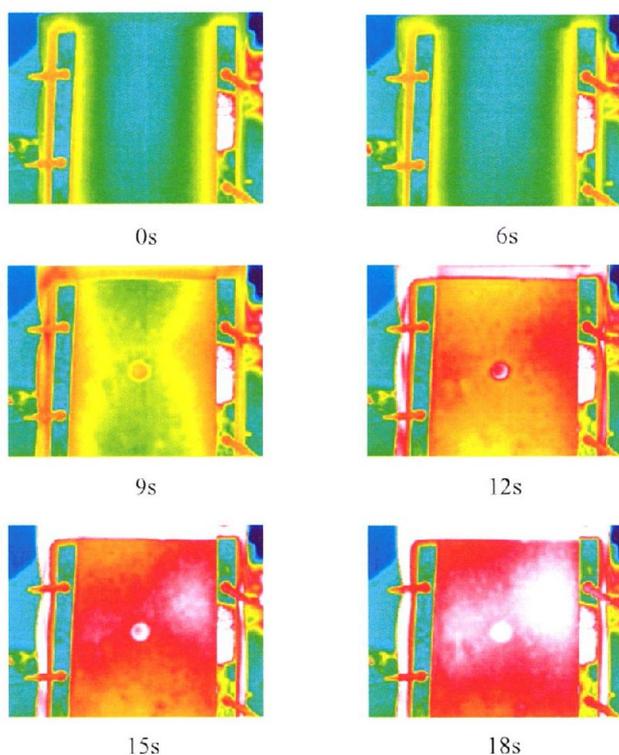
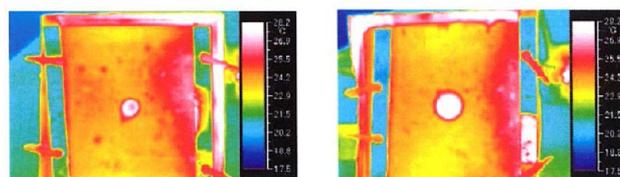


写真-2 サーマグラフィー画像
(剥離劣化モデル 剥離部深さ0.1mm)



(a)剥離深さ0.2mm (b)剥離深さ0.4mm

写真-3 サーマグラフィー画像
(剥離劣化モデル 加熱時間12s)

がわかる。このことから、この実験のように前面か

ら加熱した場合に剥離部深さが深いほど、劣化部内の温度が高く健全部との温度差が大きくなると考えられる。

そこで、剥離劣化モデルでの劣化部と健全部での時間温度変化を図-5、6に示す。ここでの劣化部温度とは劣化部中心に位置する劣化部計測点での温度であり、健全部温度とは劣化部中心から30mm離れたところに位置する健全部計測点での温度である。両

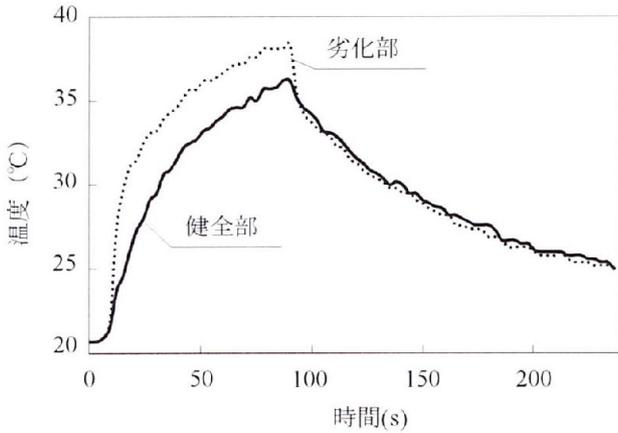


図-5 剥離劣化モデルにおける温度変化 (剥離深さ 0.2 mm)

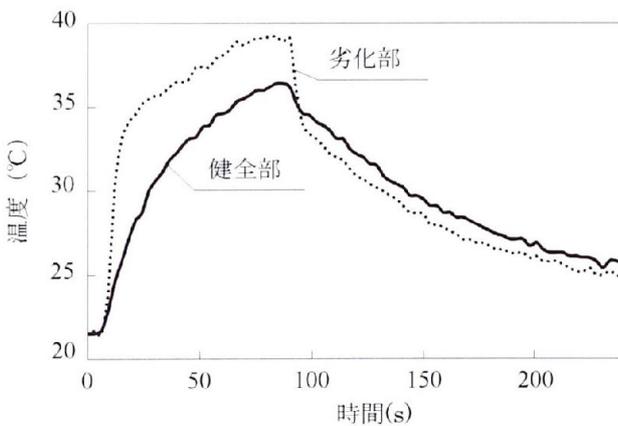


図-6 剥離劣化モデルにおける温度変化 (剥離深さ 0.4 mm)

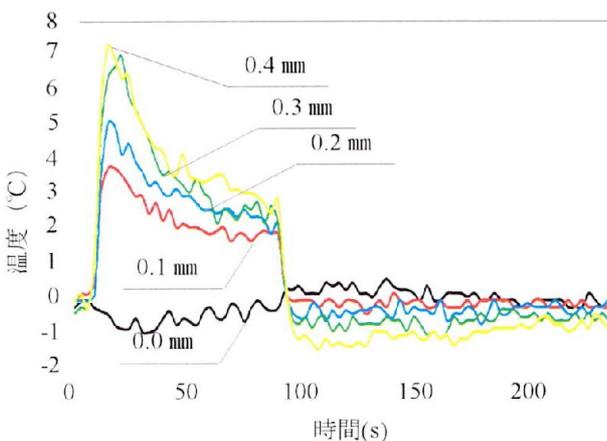


図-7 剥離深さと健全部と劣化部の温度差の関係

図より劣化部温度が健全部温度に比べ顕著に高く

なっていることがわかる。本来、鉄より熱伝導率の低い空気層を含む劣化部は温度が低くなるはずであるが、本実験では平板の前面から加熱しているため、表面に接着したPEシートが熱せられ、その熱がPEシート下の鋼製平板と空気層に伝わることになる。この時に、熱伝導率の低い劣化部よりも熱伝導率の高い健全部のほうがPEシートの熱をより多く吸収するので平板モデル表面では、劣化部温度が健全部温度よりも高くなると考えられる。

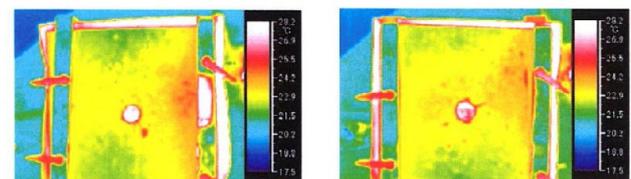
また、図-5の剥離深さ0.2mmに比べ図-6の剥離深さ0.4mmのほうが劣化部と健全部の温度差が大きくなっている。さらに、温度上昇時と温度下降時を比べると、温度上昇時のほうが劣化部と健全部の温度差が大きいことがわかる。また加熱時の初期段階にその差が大きいこともわかる。

図-7に剥離部深さごとの健全部と劣化部の温度差と時間の関係を示す。図より剥離深さ0.0mmでは温度差がほとんどないが、剥離深さ0.1mm以上では温度差が加熱時に2°C以上あり、剥離深さが深いほど温度差が大きいことがわかる。この特性を利用すれば剥離劣化の度合いが同定できる可能性があるといえる。また、加熱時と非加熱時を比べると、加熱時のほうが健全部温度と劣化部温度の差が大きく、特に加熱時の初期段階でその差が大きいことがわかる。よって、劣化部検知には加熱時の比較的早い段階での温度差を利用するのが有効だと考えられる。

次に錆劣化モデルでの実験結果を示す。写真-4は錆劣化モデルでの加熱時間12sにおけるサーモグラフィ画像である。写真から(a)の錆深さ0.5mmでは劣化部内が白く高温であることがわかる。一方、(b)の錆深さ1.0mmでは劣化部内に赤く低温の部分が残っている。

そこで、錆劣化モデルでの劣化部と健全部での時間温度変化を図-8、9に示す。図-8の錆深さ0.5mmのほうが図-9の錆深さ1.0mmに比べ、劣化部と健全部の温度差が大きくなっていることがわかる。また、温度上昇時と温度下降時を比べると、温度上昇時のほうが劣化部と健全部の温度差が大きいこともわかる。特に加熱時の初期段階でその差が大きく、劣化部検知には加熱時の比較的早い段階での温度差を利用するのが有効だと考えられる。

図-10に錆劣化部深さごとの健全部と劣化部の温度差を示す。この図からも錆深さ0.5mmの方が、錆



(a)錆深さ 0.5 mm

(b)錆深さ 1.0 mm

写真-4 サーモグラフィ画像 (錆劣化モデル 加熱時間 12s)

深さ 1.0 mm に比べ劣化部と健全部の温度差が大きいことがわかる。この結果は、剥離劣化モデルでの結果と異なるが、劣化部温度の出現に、劣化部内に含まれる空気の量が関与していると考えられることから、この結果は、錆劣化モデルの製作段階において、錆深さ 1.0 mm のモデルの方が劣化部内の空気量が少なくなったためだと考えられる。

次にクラック劣化モデルでの実験結果を示す。写

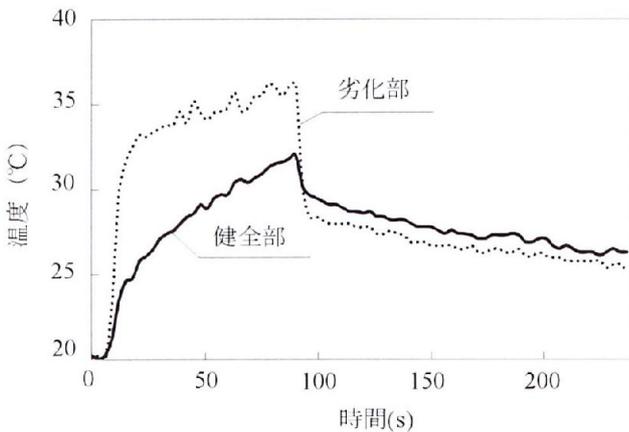


図-8 錆劣化モデルにおける温度変化
(錆深さ 0.5 mm)

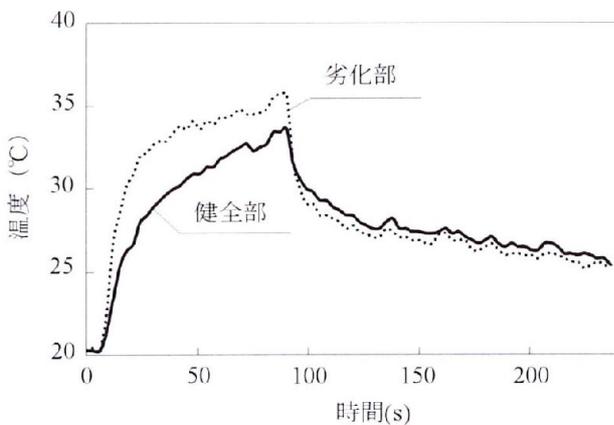


図-9 錆劣化モデルにおける温度変化
(錆深さ 1.0 mm)

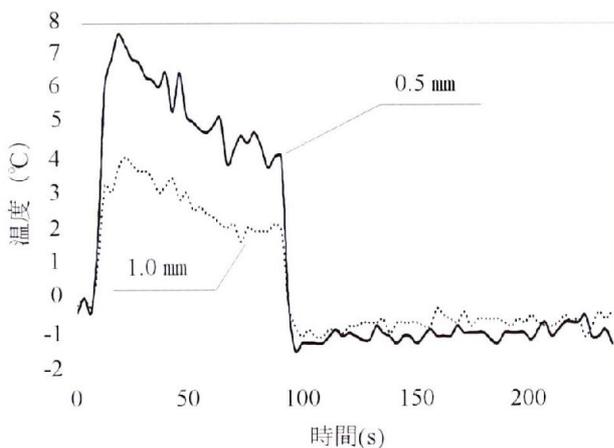
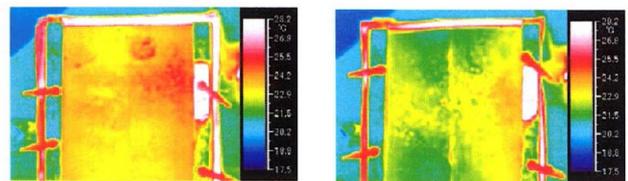


図-10 錆深さと健全部と劣化部の温度差の関係

真-5 はクラック幅 0.1 mm のモデルでの加熱時間 12s におけるサーモグラフィー画像である。写真から (a) のクラック深さ 0.5 mm では、平板の中心付近にうっすらと筋状のクラック部が見えるが、健全部との色の差はほとんどない。一方、(b) のクラック深さ 1.0 mm の写真では平板の中心付近に赤く高温の部分があり、クラック部と健全部との色の差がはっきり出ることからクラック部と健全部の温度差が大きいことがわかる。

次に、クラック幅 0.1 mm のモデルでの劣化部と健全部での温度変化を示す。ここでの劣化部温度とは、クラック部中心に位置する劣化部計測点での温度で



(a)クラック深さ 0.5 mm (b)クラック深さ 1.0 mm

写真-5 サーモグラフィー画像
(クラック劣化モデル)
(クラック幅 0.1 mm 加熱時間 12s)

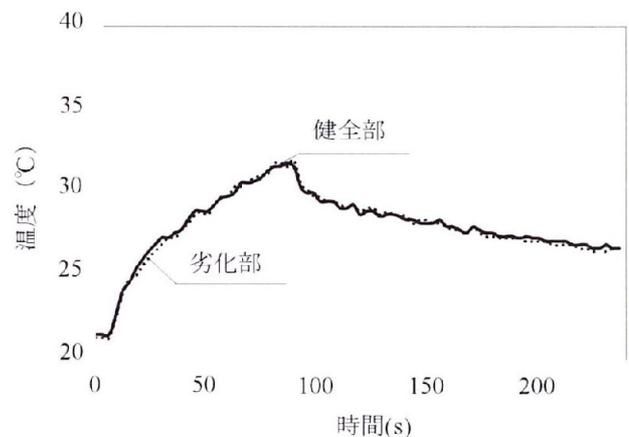


図-11 クラック劣化モデルにおける温度変化
(クラック幅 0.1 mm 深さ 0.5 mm)

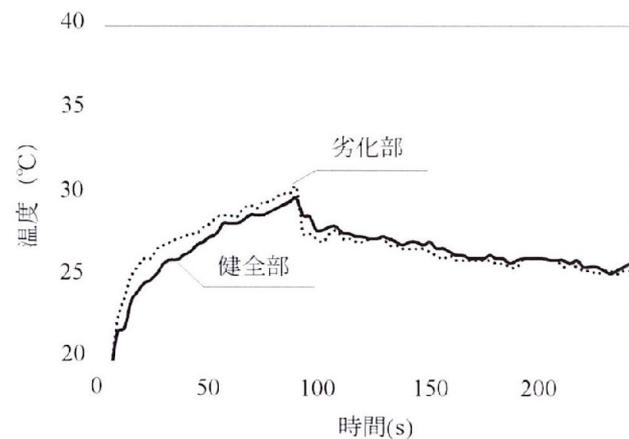


図-12 クラック劣化モデルにおける温度変化
(クラック幅 0.1 mm 深さ 1.0 mm)

あり、健全部温度とは、劣化部中心から 30 mm 離れたところに位置する健全部計測点での温度である。

図-11 のクラック深さ 0.5 mm では劣化部温度と健全部温度にほとんど違いがない。一方、図-12 のクラック深さ 1.0 mm では劣化部温度が健全部温度より高くなっていることがわかる。

そこで、図-13 にクラック幅 0.1 mm のモデルでのクラック劣化部深さごとの健全部と劣化部の温度差と時間の関係を示す。この図からクラック深さ 0.5 mm のモデルでは温度差がほとんどないが、クラック深さ 1.0 mm では加熱時に 0.5~1°C、クラック深さ 1.5 mm では 1.5~2°C あり、クラック深さが深いほど健全部と劣化部の温度差が大きいことがわかる。また加熱時と非加熱時を比べると、加熱時が劣化部と健全部の温度差が大きいこともわかる。

図-14 にクラック深さ 1.0 mm のモデルでの、クラック幅ごとの健全部と劣化部の温度差を示す。この図から四角で囲んだ加熱時間 20s 付近では、クラック幅が広いほど健全部温度と劣化部温度の温度差が大きくなっている。しかし加熱時間 30s を過ぎたあたりから、本来、温度差がほとんどなくなると考えら

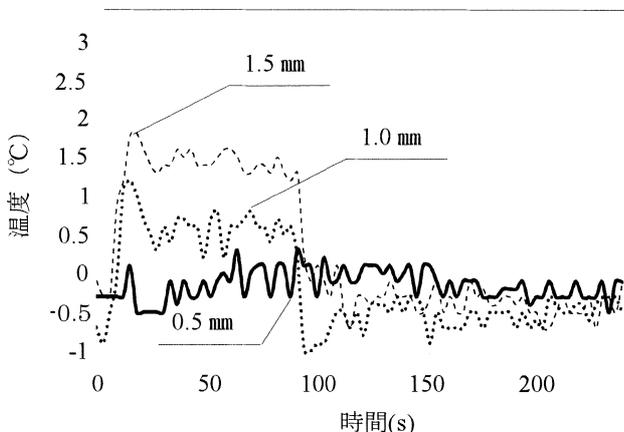


図-13 クラック深さと健全部と劣化部の温度差の関係 (クラック幅 0.1 mm)

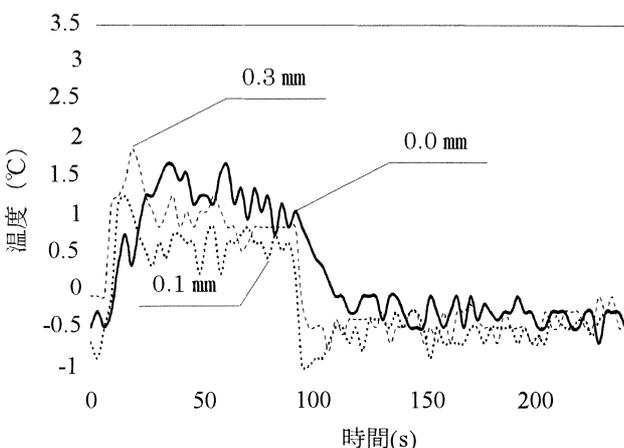


図-14 クラック幅と健全部と劣化部の温度差の関係 (クラック深さ 1.0 mm)

りから、本来、温度差がほとんどなくなると考えら

れるクラック幅 0.0 mm のモデルで、温度差が最も大きくなっている。この原因は不明であり、今後の課題である。

以上のことから、加熱時の比較的早い段階での温度差を利用することで、クラック劣化の度合いが同定できる可能性があると考えられる。

4. 結論

本研究は、防食塗膜下の劣化部を対象に、簡便的な劣化部検知手法の開発を目的として、サーモグラフィカメラによる熱伝導特性を利用した劣化部検知手法を提案し、その基礎的特性を把握するための実験を行ったものである。本研究において得られた結論をまとめると、以下とおりとなる。

- ① 塗膜防食を施した鋼製部材の熱伝導特性を利用して、劣化部を検知できる可能性が示された。
- ② サーモグラフィ画像から劣化部の正確な位置及び形状が評価可能であることが示された。
- ③ 急速加熱時の初期段階で健全部と劣化部の温度差が大きく、劣化部検知に有効であると考えられる。
- ④ 剥離劣化部深さすなわち、空気層が 0.1 mm 以上であれば劣化部検知が可能であり、また、剥離劣化の度合いが同定できると考えられる。
- ⑤ 錆劣化部内に空隙が発生した場合は、錆劣化の検知が可能であると考えられる。
- ⑥ 劣化部がクラックの場合では、クラックの存在の検知は可能であり、また、クラック劣化の度合いが同定できると考えられる。

今後の課題として、本研究において提案した劣化部検知手法の実構造物への適用法の検討がある。実構造物に対して直接的に本手法を実施することは、加熱方法やカメラの解像度と計測範囲など未解決の問題がある。そこで、構造物の適所に構造物本体と同様な防食塗膜を施した暴露サンプルを設置し、その暴露サンプルの簡便的な劣化評価法として本手法を用いることにより、迅速かつ効率的な構造物全体の劣化診断を行うことができると考えられる。

参考文献

- 1) 大日本塗料(株): 塗装による重防食への手引き, pp. 7-18.
- 2) 石原 只雄: 最新・腐食事例解析と腐食診断法, pp. 396-403, 2008.
- 3) (社)日本海洋開発建設協会: 海洋構造物の補修・補強・更新技術, pp120-126, 2008.
- 4) (社)日本非破壊検査協会, 監修 寺田博之, 阪上隆英: 赤外線サーモグラフィによる設備診断・非破壊評価ハンドブック, pp. 70-75, 2007.