（論文）

赤外線サーモグラフィ試験による効率的な配管検査

Efficient Inspection of Gas Pipes by Infrared Thermography

遠藤英樹[*1]
Hideki ENDO

日下卓也[*1]
Takuya KUSAKA

Gas pipe failure caused by inner corrosion defects is one of the risk factors leading to unscheduled shutdown of a plant. The pipes must be inspected in order to reduce the risk, but this requires a great amount of time and money, since gas pipes are quite long. This research proposes an efficient screening method of inspecting gas pipes for aqueous corrosion. The screening method consists of three stages and includes thermographic and ultrasonic testing. We have developed new thermographic tests to find sludge in pipes and to measure the relative distribution of pipe thickness. The measuring principle and examples of the application of thermographic testing are introduced in this paper.

まえがき＝1960年代の高度経済成長期に建設されたプラントは，既に数十年間稼働を続けている。主要な設備が老朽化すると，一般的に構成機器の故障発生確率が高まり，補修費用が増大するとともに，設備の停止に伴う生産機会損失のリスクが高まる。そのため，故障が発生する前に，設備保全計画を立案して実施するとともに，故障の兆候を可能な限り早期に検出する検査技術がものづくり現場で重要となってきている。

製鉄所の主要な鉄鋼生産設備は，補修や更新を計画的に実施している。一方，配管の健全性は，その肉厚を超音波厚さ計などで残厚を確認することによって担保される。しかし，製鉄所の配管は全長数十km以上に及ぶうえに設置場所が高所であることが多く，配管全面を検査して健全性を評価するには莫大な時間と費用が必要となる。

本稿では，検査対象であるガス配管に対して遠隔から面的に非接触で試験できる赤外線サーモグラフィと，点測定であるが定量性に優れる超音波厚さ測定を組み合わせて，配管の効率的な検査方法を検討した結果を紹介する。

1．配管検査の課題に対するアプローチ

本稿で対象とした配管は，地上に設置された一系統が数kmの長さを持つ大口径の金属製ガス配管とした。ガス配管が破裂に至る原因の一つに，水を主成分とする堆積物が配管内部に長期間蓄積したことによる水溶液腐食が挙げられる。また，実際に破裂した配管を観察したところ，堆積物と内部ガス流体の界面が接する配管壁面付近で特に腐食が進行している事例が見受けられ，堆積物の界面付近で発生する減肉を把握しておく重要性がうかがわれる。これらの知見から，堆積物の有無と，界面の位置及びその付近の減肉分布を計測できれば補修の優先順位を決定する大きな助けとなることが期待できる。

従来，配管の劣化診断法として，目視点検や超音波による厚さ測定が行われてきた。しかし，目視点検では配管内面の腐食は確認できず，また，超音波による厚さ測定は代表点のみとなるため，界面付近で局所的に進行した内面腐食を見逃しやすいという問題があった。さらに，内部流体の圧力が高い場合，配管が減肉部から破裂する危険性があり点検作業が制限されるため，従来の検査手法だけでは効率的なスクリーニングを実現できなかった。

これらの問題を解決するために，以下の３段階で試験を進めることとした。

第Ⅰ段階：

管内堆積物の存在の有無を赤外線サーモグラフィ装置によるパッシブ法（測定対象物に人為的な温度変動を与えずに測定対象物からの赤外線放射を利用する試験方法）で確認する。堆積物が検出されれば第Ⅱ段階に進む。検出されない場合は「保留」とする。

第Ⅱ段階：

堆積物の界面付近で腐食が進行し，「直ちに補修を要する肉厚」以下で破裂の危険性が高い部位の有無を赤外線サーモグラフィ装置によるアクティブ法（測定対象物を加熱または冷却し，人為的に温度変動を作り出して試験する方法）で検出する。減肉部位を検出した場合には破裂の危険があるため，超音波による厚さ測定は省略する。検出されない場合は第Ⅲ段階に移る。

第Ⅲ段階：

第Ⅱ段階の試験の結果，堆積物の界面付近で「経過観察を要する肉厚」以下に属する減肉部位が検出されれば，当該部位の肉厚を超音波厚さ計によって定量化する。な

[*1] 神鋼検査サービス株式会社　技術部

お，「経過観察を要する肉厚」以下の減肉部位が検出されなければ「保留」とする。

ここで，「直ちに補修を要する肉厚」や「経過観察を要する肉厚」を検出する条件は，事前に模擬試験片で決めておく。

上記の3段階の試験を行い，被検体である配管を「直ちに補修する」，「経過観察する」，「保留する」の三つにスクリーニングした。この考え方は，医療分野で多数の傷病者が発生した際に，救命の順序を決める「トリアージ」の手法を参考にした[1), 2)]。リスクの大きな配管から適切に補修できればプラント停止のリスク低減に大きい効果をもたらすことが期待できる。つぎに，分類の判定基準として用いた赤外線サーモグラフィ装置による堆積物の検出方法と減肉分布の測定方法について述べる。

2. 堆積物の検出方法

配管の内部では堆積物とガスが存在する領域は分離しており，配管に与えられる熱負荷が変動すれば，それぞれの領域で熱的応答が異なる。そのため，配管の外表面に生じた非定常温度分布を赤外線サーモグラフィ装置で測定することによって，堆積物の界面の位置を取り出すことができる。配管に与えられる熱負荷変動としては以下の二つが考えられる。

（a）配管を流れるガスの流量，温度の変化に起因した，配管の内部から与えられる熱負荷が変動する場合

（b）太陽による放射エネルギーや気温変動などの外的環境の変化に起因した，配管の外部から与えられる熱負荷が変動する場合

ここでは，実際に計測可能な機会が多い後者，すなわち（b）について，伝熱解析及び模擬ガス配管を用いた基礎実験を実施し，試験条件を検討した。

2.1 有限要素法による伝熱解析

配管内部の堆積物を配管の外表面の温度分布として計測可能となる条件について定性的な傾向を明らかにするため，有限要素法（FEM）による伝熱解析を行った。管の肉厚，管外面に与える熱流束を変化させ，その影響を定性的に検討した。

（1）解析モデル及び解析条件

堆積物の有無による温度差が最も大きくなる条件で，熱画像による界面の検出可能性を確認するため，配管表面に生じる温度分布をFEMによる二次元定常熱伝導解析によって推定した。管壁の形状は平板として近似し，解析モデルを**図1**，用いた物性値を**表1**に示す。

堆積物の主成分が水であることは確認されていたため，水の物性値を用いた。解析では，空気と水の温度上昇は考慮していない。また，配管と空気及び水との間の熱伝達は考慮したが，空気と水との間の熱伝達は考慮しなかった。肉厚は6 mmと12mmとした。また，熱流束は7月の晴天時の実測値である800W/m^{2}と，薄曇り時の200W/m^{2}を採用した。

（2）解析結果

まず，熱流束値の影響について検討した。厚さ6 mmの平板に入射する熱流束を200W/m^2，800W/m^{2}とした時の管の外表面温度分布を**図2**に示す。熱流束値が大きいほど空気と水の温度差が大きくなり，堆積物の検出が容易である。

つぎに，配管の肉厚の影響について検討した。熱流束を800W/m^{2}とした時，肉厚6 mm及び12mmの場合の管の外表面温度分布を**図3**に示す。平板の肉厚が薄いほど空気と水の温度差が大きく，検出が容易であることが分かる。しかし，今回解析した全ての条件で，界面の位置に温度勾配があり，表面温度分布から堆積物の界面位置を求めることは困難であることが分かった。

2.2 階差数列を利用した界面推定法

これまで石油タンクなどの底部に堆積するスラッジのレベル推定において，ある瞬間に撮影した熱画像から堆積物の界面を推定することが行われてきた[3)]。しかし，あくまで作業者が熱画像上で界面を定めるため，境界が不明瞭な場合，作業者によって界面の位置がばらつく可

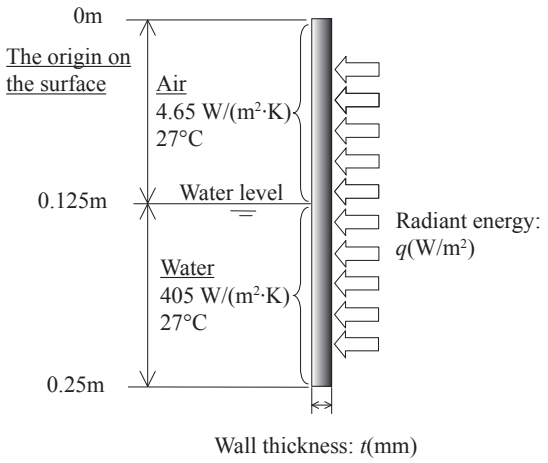


図1 有限要素解析モデル
Fig. 1 FEM model

表1 FEM解析に用いた物性値
Table 1 Material constants used in simulation

Mild steel	Density	7860 kg/m³
	Specific heat	473 J/(kg·K)
	Thermal conductivity	51.6 W/(m·K)

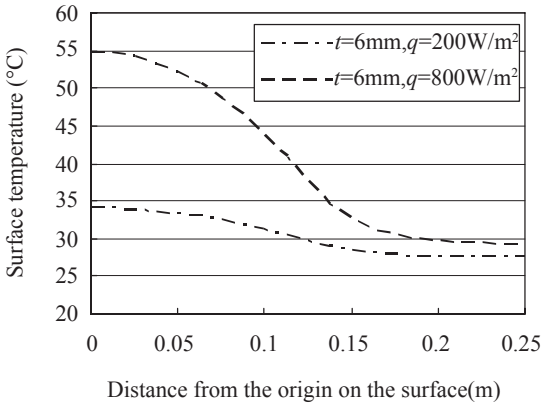


図2 熱流束と配管表面の温度分布との関係
Fig. 2 Relation between radiant energy and temperature difference on surface

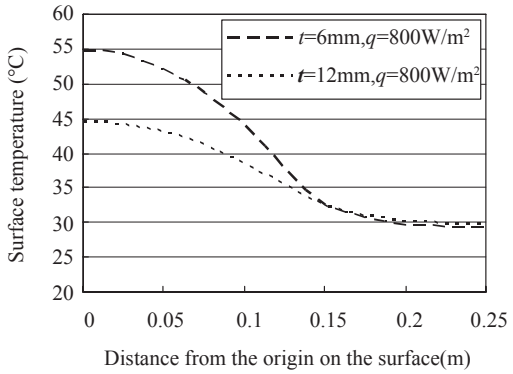


図3 配管の肉厚と配管表面の温度分布との関係

Fig. 3 Relation between wall thickness and temperature difference on surface

能性がある。そこで，簡便な界面決定手法として，熱画像上に設定した直線上に分布する温度値数列に対して第一階差数列を計算し，その極小もしくは極大点から推定する方法を考案した。

（1）数値シミュレーションに基づく検討

2.1節の（2）で得られた表面温度分布から，界面を決定するため第一階差数列を計算した結果を**図4**に示す。全ての条件で，界面と極小点の位置が一致している。階差数列処理は，微分処理と同様の特徴を有しており，表面温度分布で温度変化が最も大きい界面で極小もしくは極大値を持つ。熱画像において界面を横断するライン上の温度分布を取得し，第一階差数列を計算することによって，界面の検出が可能となることが分かった。

（2）模擬ガス配管による試験

模擬ガス配管（直径：300mm，管軸方向長さ：1,000mm，厚さ：3.2mm）内に水を底面から60mmの位置まで注入し，堆積物を模擬した。熱画像は10時から15時まで1時間ごとに，配管の下から斜め45°の角度で撮影した。**図5**に代表的な測定例を示す。図5（b）に熱画像，図5（c）に図5（b）のデータ処理ライン（点線で示す）上の温度分布を示す。また，図5（c）の階差数列を計算した結果を図5（d）に示す。図5（d）では極小点と水の界面がよく一致している。しかし，配管は曲面であるため，画像上の配管端部では放射率の角度依存性により反射による外乱の影響を受けやすく，本来の界面の左側にも極小点が現れている。そのため，界面を決定する際には，斜め45°だけでなく，角度を変えて撮影した複数枚の熱画像から総合的に判断する必要がある。

（3）実配管試験による評価

図6に実際に使用されているガス配管を計測した事例を示す。φ1,200mmで底面から250mmの位置まで堆積物が存在していることを放射線透過試験で確認している。模擬ガス配管と同様に太陽で加熱されている領域の中央部Aの第一階差数列を計算すると，底面から約230mmの位置に極小点が見られ，放射線透過試験の結果とほぼ一致した。熱画像では界面が傾いているように見えるため，Aの右に新たにデータ処理ラインBを設けて，両者を比較した。図6（d）に示す通り，A，Bともほぼ同じ界面の位置が得られた。この結果から，第一

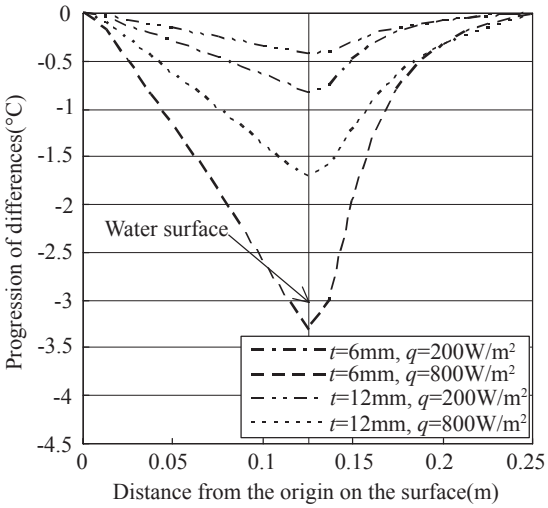


図4 不連続点と界面の関係

Fig. 4 Relation between local minimum point and water surface

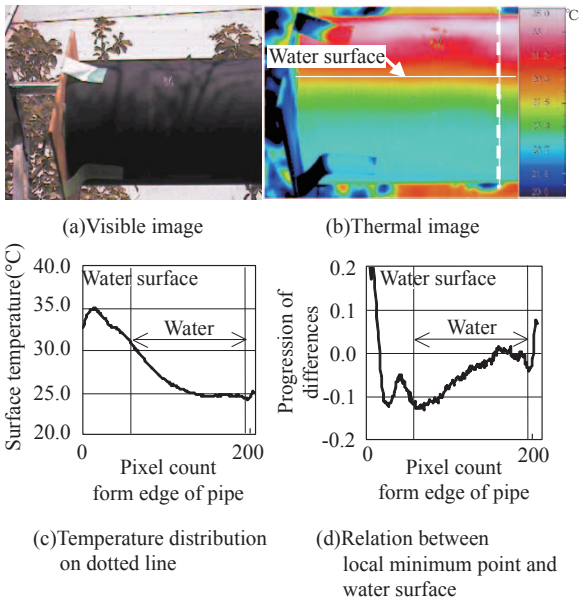


図5 模擬ガス配管での測定例

Fig. 5 Measurement example of simulated gas pipe

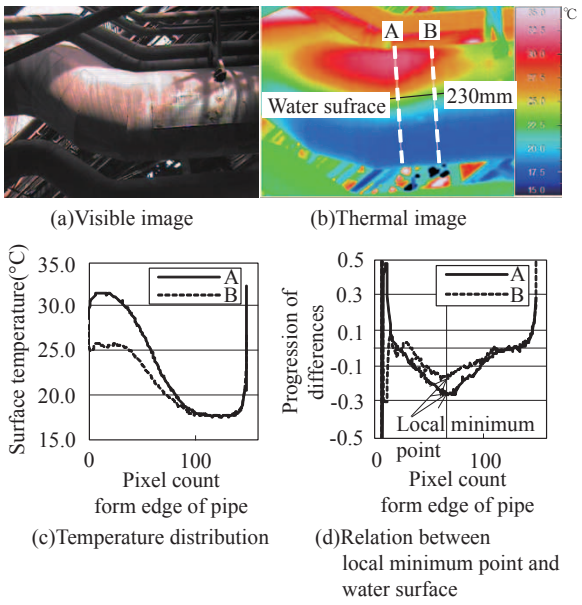


図6 実ガス配管での測定例

Fig. 6 Measurement example of gas pipe

階差数列を使って推定する方法の有効性が確認できた。

3. 減肉分布の測定方法

近年，赤外線サーモグラフィ装置の温度分解能の向上によって，ある特定の瞬間の非定常温度分布を撮影し，内部の欠陥を推定することが比較的容易となった。しかし，特定の熱画像から欠陥を推定するため，周囲からの反射などの影響を受け，欠陥の推定が困難となる場合もある。そのため，時系列に計測した熱画像を信号処理して欠陥を推定する様々な方法が検討されている[4)]。外乱の影響を軽減し，簡便に減肉分布を得られる方法として，時系列に計測した熱画像の画素間での温度変化の相関係数を計算し，相関係数の分布として著しく減肉している部位を検出する方法を考案した。

3.1　相関係数を用いた減肉分布計測の妥当性検討

減肉欠陥を模擬した平底穴欠陥を有する試験片を用いて，減肉分布計測における課題とその対策について検討した。 **図7**に検討に用いた試験片の仕様を示す。試験片から約0.2mの位置に2.3kWのハロゲンヒータを設置し，約20秒のステップ加熱を行った。加熱中及び加熱後の熱画像は，赤外線サーモグラフィ装置によって毎秒5フレームで連続記録した。加熱を始めてから3秒後の熱画像を**図8**に示す。試験片中央にある平底穴欠陥では断熱効果によって周囲より温度の高い領域が生じ，減肉を検出できている。しかし，その上部にハロゲンヒータに起因する反射の影響が帯状に観察され，見かけの温度が高く計測されている。これは，映りこむ物体がハロゲンヒータで，試験片の温度に比べて著しく高いので，試験片からの反射を無視できないことによる。欠陥と外乱を区別するため，次の信号処理を行った。

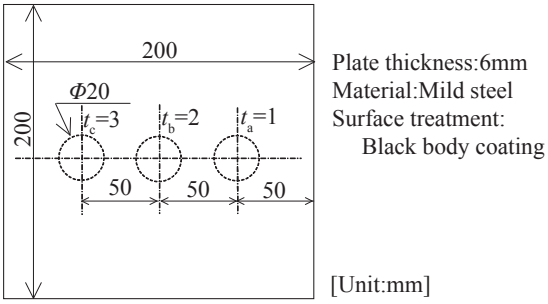


図7　平底穴欠陥を有する試験片の形状
Fig. 7　Dimension of specimen with flat bottom hole defects

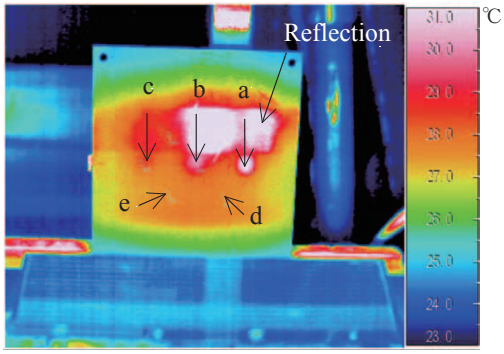


図8　ステップ加熱3秒後の熱画像
Fig. 8　Thermal image at 3sec after step heating start

図8の熱画像におけるa～e点の時系列温度変化を**図9**に示す。健全部では加熱開始時にステップ的に温度が上昇し，その後は一定の傾きで直線的に昇温するが，平底穴欠陥部では加熱開始時は緩やかに温度が変化し，最終的には一定の傾きに収束する傾向を示す。また，平底穴欠陥部の肉厚が薄くなるほど一定の傾きに収束するまでに必要な時間が長くなる傾向を示す。この傾向の違いを数値化するため，健全部を1点選び，他の画素との加熱過程における時系列温度変化の相関係数rを求めた。相関係数rの計算式を式（1）に示す。

$$r=\frac{\sum_{i=1}^{n}(x_i-\bar{x})(y_i-\bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^{n}(x_i-\bar{x})^2}\sqrt{\sum_{i=1}^{n}(y_i-\bar{y})^2}} \quad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots (1)$$

ここで，x_iは健全部の時系列温度変化，y_iは各画素の時系列温度変化とする。また，$\bar{x}$, $\bar{y}$はそれぞれx_i, y_iの平均値を表す。相関係数rはx_i, y_iをそれぞれ平均が0，分散が1になるように正規化し，その共分散を求めることを意味している。反射の影響は温度変化が正規化されることによって除かれる。

ステップ加熱中の20秒間の熱画像で，e点の時系列温度変化を健全部の時系列温度変化として与え，各画素の相関係数分布を求めた結果を**図10**に示す。信号処理では，健全部でステップ的に温度が変化する加熱開始前後と加熱終了前後の時間帯は除外し，ステップ加熱中の緩やかな温度変化を用いた。図10では試験片の中央部に3箇所の平底穴欠陥が観察されており，板厚が薄くなるほど，相関係数が小さくなることが分かる。図8と図10を

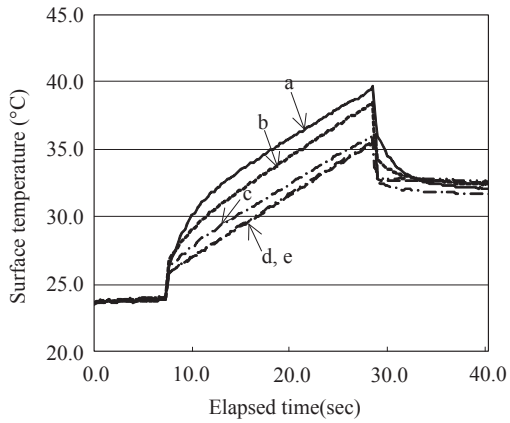


図9　表面温度の時系列変化
Fig. 9　Relation between surface temperature and elapsed time

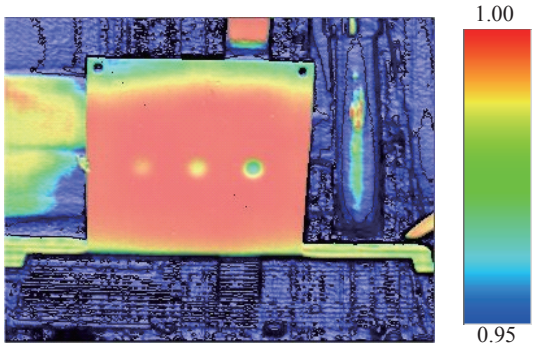
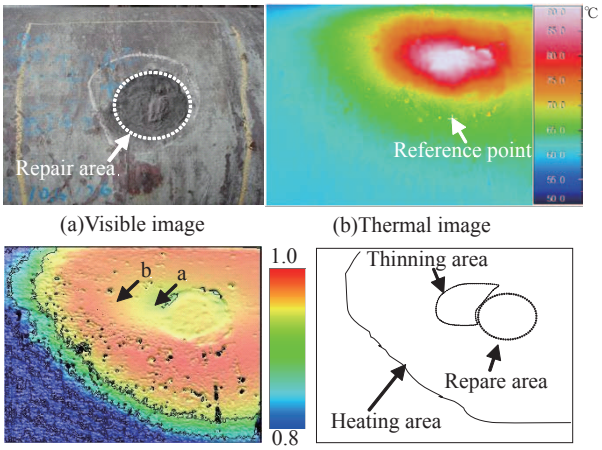


図10　熱画像の相関係数分布
Fig.10　Correlation coefficient distribution on thermal image

比較すると，相関係数分布画像では反射による外乱が著しく軽減されており，欠陥が鮮明に現れている。

3.2　実配管への適用

実際のプラントに用いられている配管の減肉分布を評価した事例を**図11**に示す。計測部位には減肉があり，既に外部から補修されている。しかし，補修した領域が減肉領域の全てを覆えていない恐れがあったため，本手法を用いて評価した。熱画像を撮影する際には，測定面に付着した埃などによって疑似黒体処理した場合と同様の効果が期待できるため，疑似黒体処理は施していない。図11（b）に赤外線サーモグラフィ装置を補修領域とほぼ正対する位置に設置して撮影した熱画像を示す。この時，補修領域はその周囲と比較して見かけの表面温度が著しく高く測定されており，そのため，補修領域の周囲で画像のコントラストが低く表示されている。また，ハロゲンヒータを熱源として用いると，照射領域の熱流束が一様ではないため，加熱むらも生じている。外乱としてこれらの影響が熱画像に現れるため，図11（b）だけでは減肉による微小な表面温度変化を捉えることは困難であった。加熱による温度変化が5℃以上ある画素から図11（b）に矢印で示す点を健全部として選定して相関係数処理した画像を図11（c）に示す。相関係数処理によって，時系列温度変化は正規化されるため，ハロゲンヒータによる加熱むらの影響は軽減されており，補修領域の周囲に存在する減肉が疑われる領域を明瞭に認識できる。後日，超音波厚さ計で肉厚を測定したところ，滑らかに肉厚が補修部に向けて減少していく様子が確認できた。この時，a点の肉厚は，健全部の約13%，また，その左部のb点の肉厚は，健全部の約45%であった。この結果から相関係数分布を求めることで，著しく減肉している部位を検出できることが確認できた。今後，配管内部の堆積物や配管表面状態などが表面温度に及ぼす影響を検討し，適用範囲を拡大する予定である。



(a)Visible image　(b)Thermal image

(c)Correlation coefficient image

図11　実配管の検査事例

Fig.11　Measurement example of pipe

むすび＝製鉄プラントで用いられているガス配管の健全性を効率的に確認するために，医療分野におけるトリアージ手法を参考にして，赤外線サーモグラフィ装置と超音波厚さ計による試験結果を判定基準としたスクリーニング方法を提案した。配管内の堆積物が原因となる水溶液腐食による減肉を評価するために，赤外線サーモグラフィ装置を用いた配管内の堆積物の検出方法と，減肉分布の計測方法について試験条件や信号処理法などを開発し，実配管に適用して有効性を確認した。

参　考　文　献

1）阪上隆英. ペトロテック. 2009, Vol.32, No.3, p.153.
2）佐賀県緊急医療協議会災害部会 災害時医療マニュアル策定委員会. 佐賀県災害時医療救護マニュアル. 平成15年, p.29-42.
3）阪上隆英ほか. 日本機械学会第15回設計工学・システム部門講演会講演論文集. 2005, p.480-481.
4）日本非破壊検査協会 赤外線サーモグラフィによる非破壊評価特別研究委員会. 非破壊評価ハンドブック. 2004, p.169-175.