

鉄損と赤外線映像装置を利用した鉄鋼材料の表面欠陥の可視化

Visualization of Surface Defects of Steel Using Iron Loss And Infrared Thermography

京都大学エネルギー科学研究科 山田 真也 Shinya YAMADA
京都大学エネルギー科学研究科 松本 英治 Eiji MATSUMOTO Member
京都大学エネルギー科学研究科 琵琶 志朗 Shiro BIWA Member

This paper proposes a new flaw inspection technique by use of hysteresis heating and an infrared imaging device. If a periodical magnetic field is applied to a ferromagnetic material, it is heated by iron loss due to the magnetic hysteresis as well as the Joule heat due to the eddy current. When the frequency of the magnetic field is not high and the magnetic permeability is large, the hysteresis heating is dominant, which enables us to uniformly heat a larger part of the specimen up to the deep region. In the case of a specimen with surface flaws, variation of the heat conductivity around the flaws generates the temperature distribution on the specimen surface. This paper attempts to detect artificial surface flaws of low carbon steel specimens by the hysteresis heating and the infrared images. Numerical simulation by FEM is also done to verify the new inspection technique.

Keywords: Nondestructive Testing, Infrared Thermography, Inspection of Defect, Hysteresis Heating, Iron Loss

1. 緒言

近年構造物の維持管理の重要性が強調され、非破壊的に構造部材の欠陥を検出あるいはサイジングすることが重要な課題となっている。構造物の欠陥の非破壊検査法として、超音波や電磁場を用いる方法が研究・応用されている。これらの方法は、何らかのプローブを対象物に接触あるいは近づけて走査することが必要である。一方構造部材に欠陥や異物、不均質等が存在すると内部の熱伝導や外部との熱伝達が均一ではなくなるので、加熱・冷却中の材料表面には欠陥等の影響による温度分布が生じる。このような温度分布を温度計測の分解能や精度・速度が向上した高精度な赤外線サーモグラフィによって計測し、欠陥および損傷を非破壊的に検査する赤外線サーモグラフィ法[1]に注目が集まっている。

赤外線サーモグラフィ法の長所としては次のようなものが挙げられる。

- ・ 大がかりな設備を必要とせず、赤外線サーモグラフィと加熱装置のみで計測が可能
- ・ 非破壊・非接触での測定が可能
- ・ 欠陥の位置と形状が温度分布から推測可能
- ・ 短時間に広範囲を遠隔測定することが可能
- ・ 測定データの処理が不要

赤外線サーモグラフィ法では、欠陥部の放熱・断熱性の不均質により被測定物に生じた熱の拡散が変化すること、あるいは欠陥部に熱源が発生することによる表面温度変化を測定する。そこで、被測定物を加熱するためには、被測定物に人為的に熱負荷を加える方法と、被測定物に生じる熱源や熱散逸による温度上昇を利用する方法などがある。前者の加熱方法としては次のような研究が行われてきた。阪上[2]はジュール熱による瞬時加熱温度場の計測に基づき裂同定に成功した。Reynoldsら[3]は、光照射により物体表面を加熱した際の温度分布を用いて欠陥の検出を行った。伊藤ら[4]は、ランプ加熱によるセラミックス被膜材の界面欠陥検出に関して、数値解析的および実験的解析を行った。一方、後者の方法としては、白鳥ら[5]が高周波磁場やレーザーによる加熱に加えて、繰り返し負荷中の塑性変形による発熱を利用して欠陥の可視化を行った。

本研究では後者の加熱方法として低周波磁場によって被測定物（強磁性材料）に生じる鉄損による内部発熱を利用した方法を提唱する。この方法では上で述べた第一の方法に比べて材料内部で均一に発熱が行われるので表面欠陥だけでなく内部や背面の欠陥も表面の温度変化によって可視化できる可能性がある。また、磁気回路を構成する部材を簡便な磁化装置により広範囲に均一に加熱することも容易にできるという利点もある。

連絡先:山田真也、〒606-8501 京都市左京区吉田本町、
電話: 075-753-3565、e-mail:
ahinya.y-ha.go.21st@hooker.mbox.media.kyoto-u.ac.jp

本論文では、低周波磁場下における鉄鋼材料の鉄損による発熱を利用して表面あるいは背面に存在する欠陥を赤外線サーモグラフィ法によって可視化することを試みる。

2. 欠陥を有する材料の非定常伝熱解析

2.1 表面欠陥と周囲の温度分布との関係

本論文において提案する手法において、ヒステリシス加熱された材料表面の温度分布が欠陥の存在や形状によってどのように変化するか検証する。そのために、次節と同じ形状の試験片に浅い欠陥と深い欠陥が存在する場合の伝熱解析を行う。

材料表面に浅い欠陥が存在すると、Fig.1 のように表面積が増加し放熱が多くなる。そのため、材料の熱散逸を用いて加熱をした場合材料全体で熱が発生しているのに欠陥開口部において表面積の増加することによりその部分の温度が周囲に比べて低くなると考えられる。この局所的低温領域は、表面欠陥の形状を反映したものになるので、温度分布を測定することにより欠陥の同定が可能となる。また同様に欠陥が存在する面の反対側も外界との熱伝達の違いにより表面温度が周囲に比べて低い領域が形成されると考えられる。したがって、背面からであってもこの局所的低温領域を検出することにより欠陥の同定ができると考えられる。

一方、Fig.2 のように材料表面に深い欠陥が存在すると、表面積が増加して放熱が多くなるのに比較して欠陥内部に存在する空気による断熱性が増加することが考えられる。さらに、温度が高い材料内部に欠陥が達していることにより欠陥の深部の温度は材料表面よりも高くなる(Fig.2)。このような場合にも高温領域によって欠陥の存在や形状が推定できると期待される。

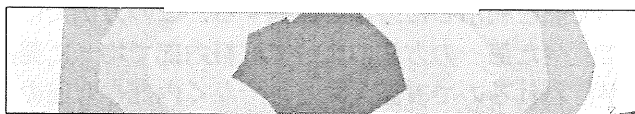


Fig.1 Simulated temperature distribution in cross section around narrow defect

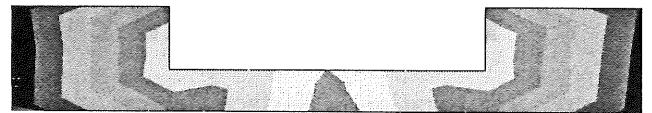


Fig.2 Simulated temperature distribution in cross section around deep defect

2.2 加熱・冷却中の鉄鋼材料の非定常伝熱解析

深さの異なる表面欠陥を持つ鉄鋼材料を加熱・冷却した時の温度分布を求めるために、汎用有限要素解析ソフト ANSYS を用いて 2 種類の非定常伝熱解析を行った。試験片の初期温度を 60°C に保ち初期雰囲気温度を 20°C として冷却過程をシミュレーションして、100 秒後の温度分布を求めた。

実験では Fig.3 のような幅 30mm、長さ 300mm、厚さ 5mm の鉄鋼材料を使用した。片面に等間隔に幅 4mm、長さ 15mm の欠陥が入っている。欠陥の深さは左から 3.0mm、1.0mm、0.2mm となっている。シミュレーションでは簡単のために、これらのうちのひとつの欠陥だけが存在するとして、温度分布を求める。

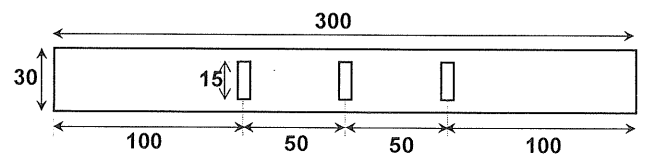


Fig.3 Scale of specimen

まず、Fig.3 の深さ 0.2mm の欠陥だけが存在するとして、温度分布を求めた。Fig.4 は欠陥が存在する面の欠陥付近の温度分布を表す。前節で予想した通り浅い欠陥底部の温度が周囲よりも低くなっており、欠陥の位置および形状が温度分布から同定できる。Fig.5 は深さ 0.2mm の場合の同じ解析結果の欠陥背面の温度分布を表す。この場合には、欠陥に起因するであろう温度分布は現れているが、欠陥の位置および形状を推定することは難しいと考えられる。

次に、Fig.3 の深さ 3.0mm の欠陥だけが存在するとして、温度分布を求めた。Fig.6 は欠陥が存在する面の欠陥付近の温度分布を表す。前節で予想した通り比較的深い欠陥底部の温度が周囲よりも高くなっており、欠陥の位置および開口部の形状が温度分布から同定できる。Fig.7 は深さ 3.0mm の欠陥の場合の同じ解析結果の欠陥背面の温度分布を表す。この場合にも欠陥付近の温度が高く、背面の欠陥の存在

は推定できるが、その形状は明確にはわからない。

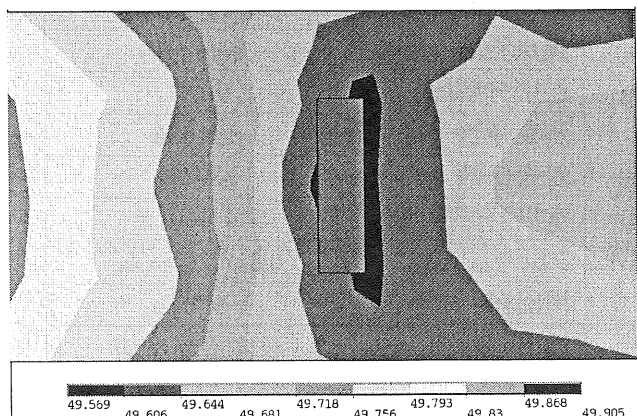


Fig.4 Temperature distribution on the surface around defect with 0.2mm depth

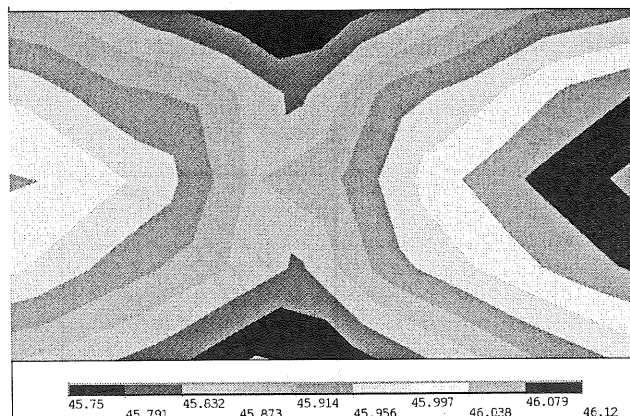


Fig.7 Temperature distribution on the back surface around defect with 3.0mm depth

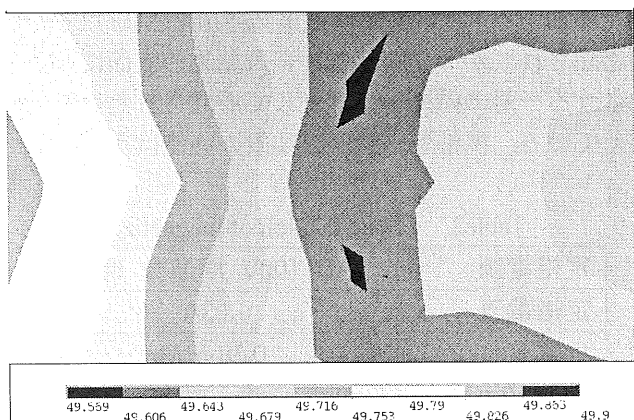


Fig.5 Temperature distribution on the surface around defect with 0.2mm depth

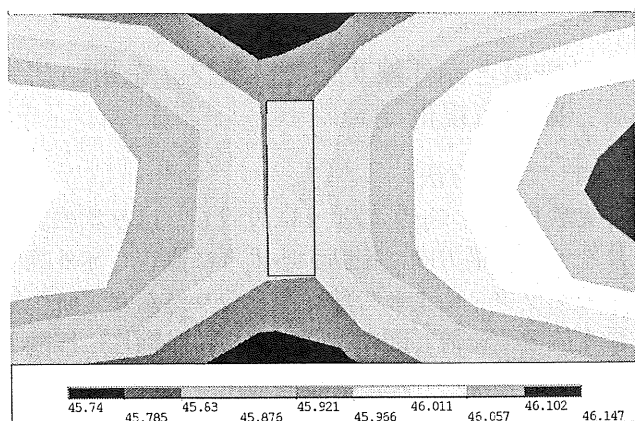


Fig.6 Temperature distribution on the surface around defect with 3.0mm depth

2.3 ヒステリシス損失を利用した加熱

磁化されていない強磁性体を消磁状態から一定振幅 H_0 の磁場で磁化すると、Fig.8 のように曲線 OA に沿って磁束密度 B が増加して B_0 に達する。次に H を $-H_0$ まで減少させ、再び H_0 まで増加させると、 B は先の曲線 OA をたどらないで曲線 ABCDEFA の経路を辿る。

強磁性体の $B-H$ 曲線は、このように H が増加した場合と減少した場合とで違った曲線をたどるヒステリシスが存在する。よって周期的な磁場を加えるとこのヒステリシスにより磁場が材料に対して仕事をを行いそれが材料中の熱源となって散逸する。このような磁場の1サイクルによって磁場が行う仕事は単位体積あたり次式で与えられる。

$$w_h = \oint HdB \quad [J/m^3] \quad (1)$$

上の積分は一周期の時間変化に対する積分で図においてヒステリシスループ ABCDEFA が囲む面積に等しい。このエネルギーは熱として散逸し（鉄損）、材料を加熱する。磁場および磁束密度が場所によって異なると式(1)の熱量も異なる値をとる。一般に磁気回路を形成するような一定断面の強磁性材料を磁化する場合、広い範囲にわたって磁場および磁束密度がほぼ一樣となることが知られている。したがって周期的磁場による鉄損を用いた加熱では材料の広い範囲にわたって一樣な熱を発生させることが可能と

なる。

もし、1秒間に f サイクルの磁場を印加すると $P = f w_h [W/m^3]$ だけの熱が材料の磁化領域の単位体積・単位時間あたりに発生することになる。

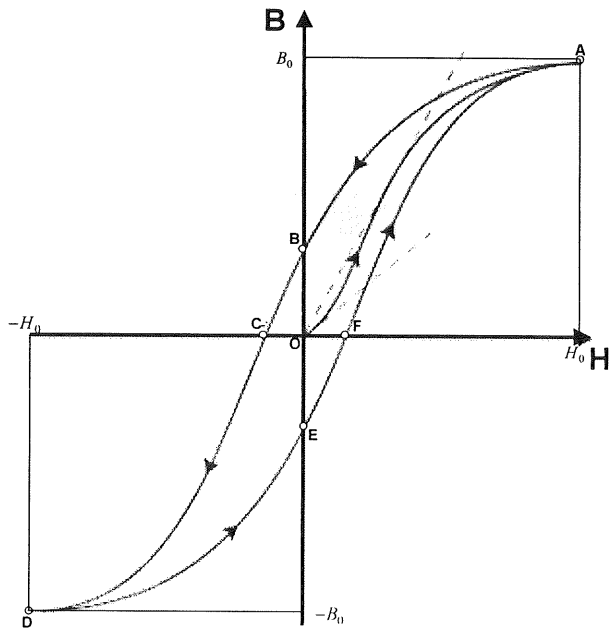


Fig.8 Sketch of hysteretic B-H curve

3. 実験装置

3.1 試験片

試験片は2章の解析と同様 Fig.3 のようなスケールの鉄鋼材料 SS400 を使用した。幅 30mm, 長さ 300mm, 厚さ 5mm となっており, 等間隔に片面に等間隔に幅 4mm, 長さ 15mm の欠陥を設けている。欠陥は深さの順に並んでおり, それぞれ深さは 3.0mm, 1.0mm, 0.2mm である。

3.2 赤外線サーモグラフィ

実験に使用した赤外線サーモグラフィは NEC 三栄株式会社製 TH3101MR で, 測定物からの赤外線放射エネルギーを検出器 (HgCdTe) により電気信号に変換し, 光学走査する事により, カラーまたは白黒の熱画像として表示する。以下に TH3101MR の性能を示す。

Table.1 Specification of infrared thermography

測定温度範囲	-50°C~250°C
測定波長	8~13 [μ m]
焦点距離	20cm~ ∞
温度分解能	0.1°C
測定視野	$\pm 0.5\%$
走査線数	239 本
水平解像度	344 本以上
フレーム時間	0.8s/フレーム
検出器	HdCdTe
検出器冷却	液体窒素冷却

3.3 加熱に用いる磁化器

本手法は鉄鋼材料の鉄損による加熱を利用する。そこで鉄鋼材料 SS400 に栄進化学株式会社製の携帯型磁粉探傷装置を磁化器として用いて周期的な磁場を印加する。携帯型磁粉探傷装置[6]は励磁コイルが巻回され, かつ先端部が検査対象物の表面にセットされる一対の磁極ヘッドとして形成されたコアを備えている。携帯型磁粉探傷装置の性能は次に示す。

Table.2. Specification of magnetizer

定格電源	AC-100V 周波数 60Hz
定格電流	3.3A
全磁束	0.68 mWb
リフティングパワー	7kg 以上
磁極間隔	140 mm
絶縁抵抗	100M Ω 以上

4. 鉄損と赤外線サーモグラフィを用いた欠陥の可視化

4.1 実験方法

実験装置は Fig.9 のように設置し, はり状の試験片を万力で横方向に振動するように固定し赤外線サーモグラフィによって熱画像を取り込んだ。磁化器に交流電流を流し図のように磁極を試験片に接触させて磁場を印加した。15秒間通電した後に磁化器を放し熱画像を保存する。実験は欠陥表面と欠陥背面の両方について行い, 共に欠陥の同定を目指した。

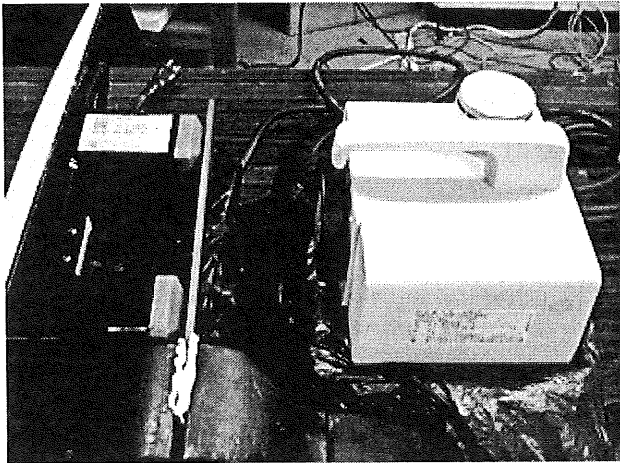


Fig.9 Experimental setup

4.2 実験結果

最初に、試験片の欠陥が存在する面の熱画像によってその検出を試みる。Fig.10 では赤外線サーモグラフィで映した深さ 3.0mm と 1.0mm の欠陥の像が見えている。3.0mm の深さのものははっきりと欠陥底部で温度が他よりも高くなっていることがみてとれる。欠陥側面では急激な温度変化があり、欠陥の開口部の形状をよく表している。欠陥底部で温度が高い理由は欠陥内の空気が断熱効果を及ぼし、外界への熱伝達が妨げられることが考えられる。

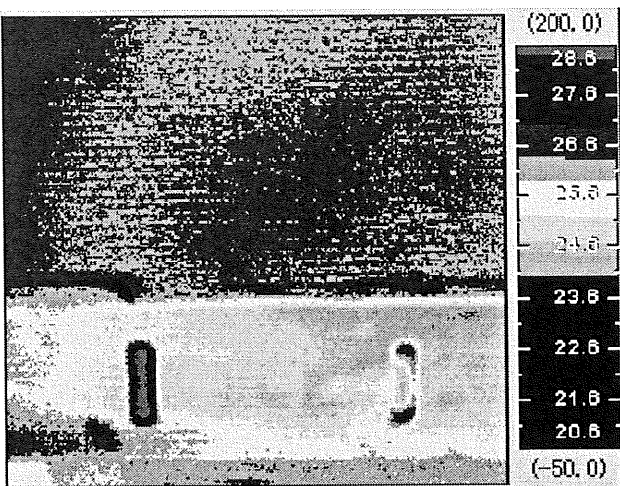


Fig.10. Infrared image of specimen surface around defects with 3.0mm and 1.0mm depths

Fig.11 は深さ 1.0mm と 0.2mm の欠陥の像が見えている。深さ 1.0mm のものは欠陥底部で表面の他の部分よりも温度が高くなっていることがみてとれ、欠

陥の形状を同定することができる。一方深さ 0.2mm の欠陥の底部は周囲よりも低い温度となっておりこの場合にも欠陥の形状を同定することができる。

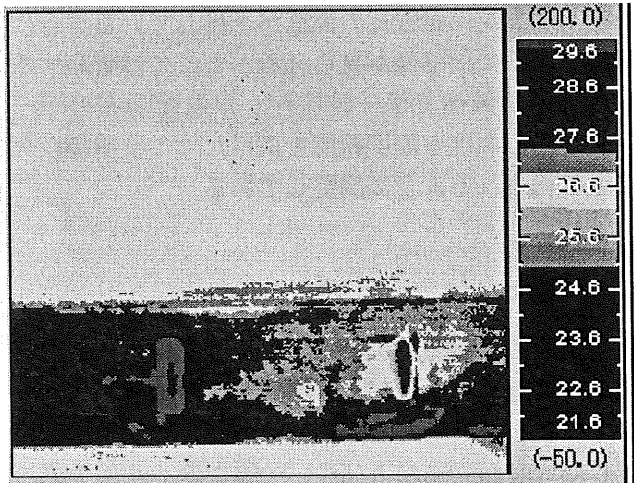


Fig.11 Infrared image of specimen surface around defects with 1.0mm and 0.2mm depths

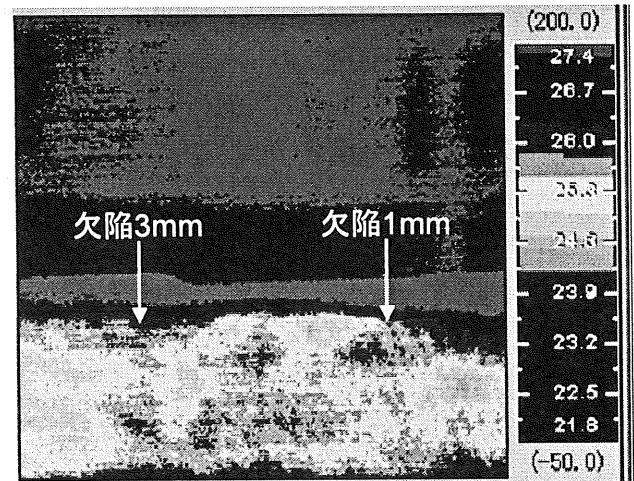


Fig.12. Infrared image of back surface around defects with 3.0mm and 1.0mm depths

次に試験片の欠陥が存在する面の背面の熱画像によってその検出を試みる。2章で示したように、欠陥の深いものは周りよりも温度が高いことにより背面にも高温の領域が現れ、欠陥の検出ができると期待される。浅い欠陥は欠陥の存在する面の温度分布も小さいので背面からの同定は難しいと考えられる。Fig.12 は 3.0mm と 1.0mm の熱画像を表したものである。二つの欠陥は検出できるが深さ 3.0mm の欠陥の像の方が 1.0mm の深さの欠陥よりも明瞭であ

る。深さ 0.2mm の欠陥については温度低下が明瞭には見られず、欠陥位置の推定を行うことはできなかった。

また、実際にはリアルタイムで熱画像を測定しており、加熱時に試験片の温度が上昇している場合にはより明瞭に欠陥像が見られるがここでは省略する。

以上の熱画像では一旦保存した温度分布のデータを、中心温度と温度範囲を指定してより明瞭な欠陥増が得られるように調整してある。

5. 結言

磁化器によって、鉄鋼材料 SS400 を磁化することによって起こる鉄損による加熱と赤外線サーモグラフィによって欠陥の位置や形状を同定する手法を提案した。表面欠陥および浅い欠陥を除く背面欠陥の検出および形状の同定に成功した。磁粉探傷装置や試験片に巻いた励磁コイル等の簡便な磁化方法により鉄鋼材料を比較的広範囲均一に加熱することができ、熱画像は広範囲を一度に検査できるので、実機への応用が期待できる。

浅い背面欠陥やより小さい欠陥の同定およびき裂やはく離などの他の欠陥への応用はこれからの課

題である。またより複雑な形状の欠陥の場合や試験材料が他の磁性材料にも応用できるのかを今後の課題としたい。

参考文献

- [1] 阪上隆英, “赤外線サーモグラフィによる構造物の非破壊検査”, 溶接学会誌, Vol.74, No.4, 2003, pp.251-255.
- [2] 阪上隆英, 小倉敬二, “ジュール熱による瞬時加熱温度場のサーモグラフィ計測に基づく非破壊欠陥計測”, 日本機械学会論文集(A 編), Vol.58, No.555, 1992, pp.214-221.
- [3] W N Reynolds and G M Wells, “Video-Compatible Thermography. (Retroactive Coverage)”, British Journal of Non-Destructive Testing, Vol. 26, No.1, 1984, pp. 40-44.
- [4] 伊藤義康, 斉藤正弘, 柏谷英夫, 大石誠之, 金子正, “界面き裂の熱画像解析とその評価”, 日本セラミックス協会学術論文誌, Vol.97, No.1131, 1989, pp. 1358-1364.
- [5] 白鳥正樹, 三好俊郎, 野田哲司, 中西孝, “赤外線映像装置によるき裂の検知”, 日本機械学会論文集(A 編), Vol.55, No.511, 1989, pp.538-542.
- [6] 日本非破壊検査協会, “磁粉探傷試験 I”, 2007.