

磁気探傷法による鋼の欠陥評価技術の 現状と問題点

関 根 和 喜*

Present Status and Some Problems in Defect Evaluation Using Magnetic Inspection

Kazuyoshi SEKINE

1. はじめに

磁気探傷法は強磁性物質の被検体を磁化し、被検体中に存在する磁気的不連続部（欠陥）より漏洩する空間磁場を検知・計測して欠陥を認知する非破壊検査技術（Nondestructive inspection technique, NDI 技術）である。特に、鉄鋼材料やそれらの溶接部の表面開口欠陥に対し優れた検出能を有する。この探傷法では、磁気的不連続部から生ずるいわゆる「漏洩磁束」の検出方法がどのようなものかによつて、いくつかの技法が存在する。しかし、それらの基本的原理は同一である。なかでも、検知媒体に強磁性の微粒子を用いる磁粉探傷法（Magnetic particle testing MT 法）は、簡便でかつ品質検査や溶接部の保守検査などに多用されている。MT 法は現在一応確立されたきわめて古典的な NDI 技術としてとらえる向きも多いようであるが、必ずしもそうではなく、多くの問題点、未解決部分を含んでいるように思える。とくに、最近では、破壊力学による構造物・部材の強度信頼性解析や寿命予測の精度向上の要求に呼応して、いわゆる「検査の信頼性」に多くの基本的問題点が指摘されている¹⁾²⁾。

保守検査を中心とした非破壊検査の最終目標は、欠陥の検知や計測のみにあるのではなく、部材や構造物の強度信頼性や安全性の確保にあることを考えるとき、欠陥の「見逃し現象」を含む検査の確率論的要因に関わる問題はきわめて重要である。

本報では、保全工学的立場から磁気探傷法による表面開口欠陥の評価技術、および検査の信頼性に関する現状と問題点について述べてみたい。

2. 磁気探傷法の基本原理

磁気現象を利用した強磁性被検体の表面開口欠陥あるいは表面のごく近傍に存在する欠陥に対する検出・評価技術の基本原理はつぎのごとくである。すなわち、Fig. 1 に示されるように、表面がなめらかな被検体を何らかの手法で磁化すると、内部に磁束が生ずる。この時、図に示すような欠陥（磁気的不連続部）が存在すると、磁気抵抗差により磁束の乱れが生じ、その一部は被検体外部へ漏洩する。これが、「欠陥漏洩磁束」（Magnetic leakage flux）である。欠陥の検出・評価にはこの欠陥漏洩磁束を計測する。

最も単純な方法は強磁性の微粉末を散布し、それを漏洩磁場近傍に付着させ欠陥を探知する磁粉探傷法である。それに対し、磁粉を利用せず、磁気感应素子を用いて、漏洩磁束の強度と分布を定量的に計測するのが、いわゆる漏洩磁束探傷法（Magnetic leakage flux testing, MLFT 法）である³⁾。磁気検出素子としては、サーチコイル、ホール素子、磁気ダイオード、磁気抵抗素子、SMD 素子などがある。最近ではさらに感度のよい検出素子が開発され、これらの素子をセンサーとして利用す

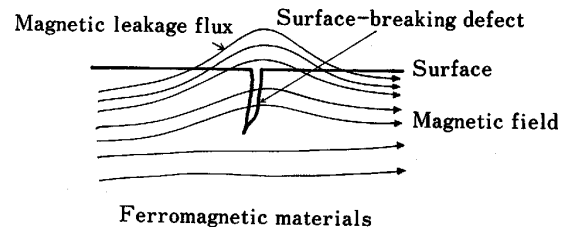


Fig. 1. Magnetic leakage flux from a surface-breaking defect.

昭和 63 年 6 月 17 日受付 (Received June 17, 1988) (依頼解説)

* 横浜国立大学工学部助教授 工博 (Faculty of Engineering, Yokohama National University, 156 Tokiwadai Hodogaya-ku Yokohama 240)

Key words : magnetic inspection ; magnetic particle inspection ; magnetic leakage flux ; defect evaluation ; reliability of nondestructive inspection.

ることも考えられている⁴⁾。

MT 法及び MLFT 法のいずれにおいても、欠陥漏洩磁束の強さと分布に関する精度のよい情報が必要である。幾何学的形状の明確な欠陥に対し、ホール素子や磁気抵抗素子などを用いて漏洩磁場を実験的に求めることは可能であり、種々の測定が行われてきている。しかし、素子の大きさや厚さなどの制約があり、欠陥の幅が比較的大きい(例えば、0.1 mm 以上)人工欠陥はともかくとして、欠陥幅がきわめて小さな、き裂のような自然欠陥における正確な磁場がこの方法によつて得られているとはいひ難い。最近になつて磁気抵抗素子の薄膜をセンサーとしてき裂状欠陥の漏洩磁場を計測しようとする試みの例が報告されてはいる⁵⁾。

一方、き裂近傍の漏洩磁場を理論的に予測するには、欠陥の形状や材料の B-H 曲線の非線形性をも考慮する場合、数値解析に頼らざるを得ず、差分法⁶⁾や有限要素法^{7)~10)}による解析がいままでなされている。しかし、このような、数値解析でも、欠陥直上の磁場分布まで精度良く求めた研究はないようである。

また、数値解析例のすべては、いわゆる一様磁化の条件を満たす直流磁場中のものであり、被検体中に生ずる渦電流を考慮しなければならない交流磁場に対する計算例はないようである。数値解析で得られる結果は、実際の部材での漏洩磁場そのものの理解という点では有効ではあるが、MLFT 法のように磁場計測結果から欠陥サイズの定量的評価を行う場合などには、近似の良い解析的な関数型が与えられていると、それは実用上利用価値の高いものとなる。

漏洩磁場の解析的表現の代表例は、いわゆる「双極子モデル」¹¹⁾¹²⁾によるものである。これは、Fig. 2 に示すように、一様に磁化された材料中の溝状欠陥両端面に反極性の磁荷を一様に分布させ、漏洩磁場はそれらのつくり出す空間磁場で近似できるとするものである。欠陥長さが無限大と考える二次元モデルについて、Fig. 2 のよ

うに座標系を定めると、点 (X, Y) における空間磁場 $H=(H_x, H_y)$ は、以下ようになる¹¹⁾。

$$H_x = \frac{m}{2\pi} \left(\tan^{-1} \frac{X-a}{Y} - \tan^{-1} \frac{X+a}{Y} - \tan^{-1} \frac{X-a}{Y+d} + \tan^{-1} \frac{X+a}{Y+d} \right) \dots\dots\dots (1)$$

$$H_y = \frac{m}{4\pi} \left(\ln \frac{(X+a)^2 + Y^2}{(X-a)^2 + Y^2} - \ln \frac{(X+a)^2 + (Y+d)^2}{(X-a)^2 + (Y+d)^2} \right) \dots\dots\dots (2)$$

式(1)と(2)で与えられる結果は、漏洩磁場の第一次近似として、MT 法や MLFT 法の基本原理の理解と評価に用いられてきた¹⁰⁾。しかし、これを欠陥の定量的寸法評価に利用する場合、つぎのような不備がある。もちろん材料の透磁率や磁気飽和の影響に考慮が払われていないという点にもあるが、その一つは、式(1)と(2)は欠陥端面上の単位面積当たりの磁荷量 m という不確定パラメーターを含むことであり、他の一つは、リフトオフ量 Y 、正確には溝状欠陥の幅 $2a$ で除したいわゆる「規格化リフトオフ ($Y/2a$)」というべきものが小さくなる時、すなわち欠陥直上では、式(1)と(2)は良い近似を与えない、ということである。この物理的理由は、いわゆる古典双極子モデルでは、欠陥の空隙両端面のみに一様磁荷分布を考えるが、実際には欠陥近傍の被検体表面にも磁極が発生すると考えねばならないからである。

前者の問題点については、最近、EDWARDS と PALMER¹³⁾ が、一様磁化を受ける強磁性体(比透磁率 μ)中に存在する回転楕円体の空隙(長軸 $2d$ 、短軸 $2a$)の内部磁場に対する古典電磁気学的解を利用し、近似的に、

$$m = H_0 \frac{\pi n(\mu-1)}{2 \tan^{-1} n(n+\mu)} \dots\dots\dots (3)$$

という形を誘導している。ただし、 H_0 は励磁のための外部磁場の強さで、 n は欠陥のアスペクト比で、 $n = d/a$ である。式(3)を用いれば、被検体の磁気特性のうち、透磁率を平均透磁率という形で考慮することもできる。

欠陥直上の漏洩磁場のより近似の高い関数形は、関根、岡田、上原¹⁴⁾¹⁵⁾によつて提案された。古典双極子モデルは、溝状欠陥の空隙内では磁界は一定(すなわち、Fig. 2 で考えると、空隙内での磁位関数は座標 X の一次関数となる)とするものと等価であるが、この仮定は、深い空隙内部では正しいが、自由表面の影響を受ける被検体表面近傍では、正しくない。それは、前述のごとく、欠陥近傍の被検体表面に生ずる磁荷を考慮する必要があるからである。欠陥長さを無限大とする二次元問題で、仮に深さ d を十分大きくとれば、その空間磁場の問題はリング形磁気ヘッドの磁界問題に帰着する。2次元リング形磁気ヘッドのギャップ上面に生ずる磁界分布の厳

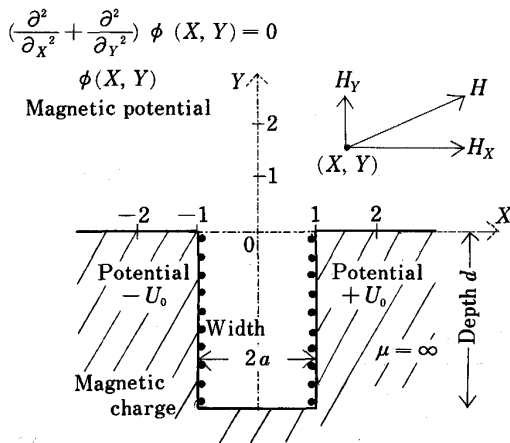


Fig. 2. Two dimensional dipole model for rectangular slot.

密解は、WESTMIJZE¹⁶⁾ や、FAN¹⁷⁾ によつて与えられており、それらの解を利用して有限深さ d を有する溝状欠陥直上の磁場分布を近似解に求めることができる。 d が十分大きいときの欠陥近傍表面磁荷を考慮した溝空隙上部の磁位関数を

$$\phi(X, 0) = \frac{U_0 X(1+AX^2)}{1+A} \quad (-1 \leq X \leq 1) \quad \dots\dots\dots (4)$$

と近似すると¹⁴⁾¹⁵⁾、深さ d の欠陥漏洩磁場分布の垂直成分 H_X と水平成分 H_Y は以下のようになる¹⁴⁾¹⁵⁾。

$$H_X = \frac{U_0}{\pi(1+A)} \left(\tan^{-1} \frac{X-a}{Y} - \tan^{-1} \frac{X+a}{Y} \right) - \frac{U_0}{\pi} \left(\tan^{-1} \frac{X-a}{Y+d} - \tan^{-1} \frac{X+a}{Y+d} \right) - \frac{3U_0AXY}{\pi a^2(1+A)} \ln \frac{(X-a)^2+Y^2}{(X+a)^2+Y^2} + \frac{3U_0A(X^2-Y^2)}{\pi a^2(1+A)} \left(\tan^{-1} \frac{X-a}{Y} - \tan^{-1} \frac{X+a}{Y} \right) - \frac{6U_0AY}{\pi a(1+A)} \quad \dots\dots\dots (5)$$

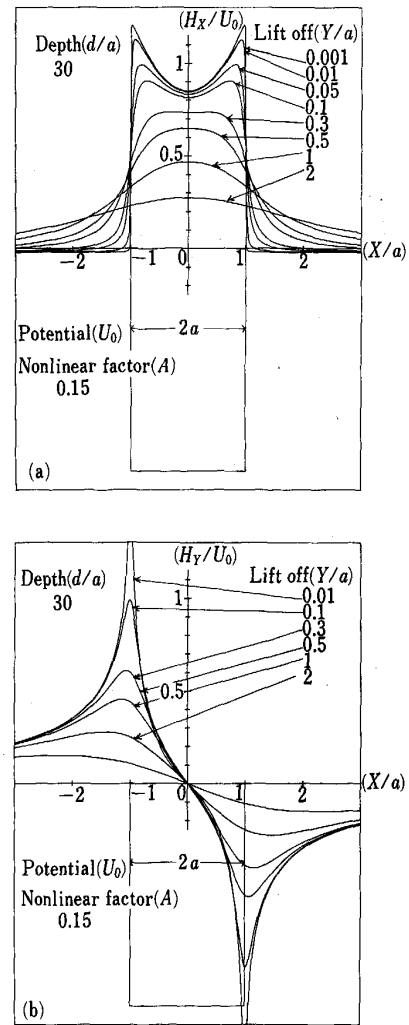
$$H_Y = -\frac{U_0}{2\pi(1+A)} \ln \frac{(X-a)^2+Y^2}{(X+a)^2+Y^2} + \frac{U_0}{2\pi} \ln \frac{(X-1)^2+(Y+d)^2}{(X+1)^2+(Y+d)^2} - \frac{3U_0A(X^2-Y^2)}{2\pi a^2(1+A)} \ln \frac{(X-a)^2+Y^2}{(X+a)^2+Y^2} - \frac{6U_0AXY}{\pi a^2(1+A)} \left(\tan^{-1} \frac{X-a}{Y} - \tan^{-1} \frac{X+a}{Y} \right) - \frac{6U_0AX}{\pi a(1+A)} \quad \dots\dots\dots (6)$$

ただし、 A は、磁位関数の補正項を規定するノンリニア係数で、 $A=0$ とおけば、上式は古典解¹¹⁾ に一致する。上式には、溝をはさむ左右の強磁性被検体内の磁位 ($+U_0, -U_0$ で一定である) が不確定定数として含まれているが、これを PALMER らの式(3)を利用して評価すると、近似的に

$$U_0 = H_0 \frac{(d/a)(\mu-1)}{(d/a)+\mu} \quad \dots\dots\dots (7)$$

となる。

規格化深さ (d/a) が 30 の場合のとき、規格化リフトオフ (Y/a) をパラメータとして、式(5)および(6)の解析的表示を用いて計算した H_X と H_Y を Fig. 3 に示す。ただし、補正係数 A は、磁気ヘッドに関する FAN のフーリエ級数解¹⁷⁾ との対応から $A=0.15$ として計算したものである。漏洩磁場の垂直成分 H_Y の分布の形は古典双極子モデル¹¹⁾¹²⁾ のそれと同様のものとなっているが、水平成分 H_X については、規格化リフトオフが小さい場合 ($Y/a < 0.2$)、すなわち欠陥表面直上では、溝中心上 ($X=0$) の近傍で「くぼみ」を有する



(a) Tangential component (b) Normal component
Fig. 3. Calculated magnetic leakage field profiles for the slot with a width of $2a$ and a depth of d .

2 連の山形をなし、古典双極子モデルによる解とは大きく異なるものとなっている。これが近似を上げることによって得られる漏洩磁場分布の特徴である。

3. 保守検査における漏洩磁束探傷法 (MLFT 法) の問題点

前節で示された欠陥からの空間磁場分布を定量的に計測し、欠陥寸法評価を行うのが MLFT 法である。構造物の強度信頼性の立場から、最も危険な欠陥はき裂であるが、その際、き裂深さに関する情報が必要となる。

実用的な観点から、MLFT 法による欠陥評価には、検出素子としてホール素子を使用するものが実験データも多く、一般に普及しているようである。通常、漏洩磁場成分のうち、Fig. 3(b) で示されるような垂直成分を検出する機会が多い。ホール素子による実測例を Fig. 4¹⁸⁾ と Fig. 5¹⁹⁾ に示す。Fig. 4 は励磁電流を変化したときの漏洩磁束の垂直成分のプロフィール変化である。ま

た, Fig. 5 は植竹ら¹⁹⁾ によつて測定されたもので, 漏洩磁束の垂直成分信号の Peak to peak 値を欠陥深さ別に, リフトオフ量で整理したものである. さて問題は測定した磁場分布と強度から欠陥のサイジングを行う際の考え方である. 例えば, Fig. 3(b) の垂直成分をホール素子で計測し, その出力値の Peak to peak 値を用いるのが最も簡便であるが, 式(5), (6)あるいは Fig. 5 から理解されるごとく, 信号の強度と分布は, 材料の磁気特性が一定であるとしても, 基本的に欠陥の幅 $2a$, 欠陥の深さ d , 及びリフトオフ量という三つのパラメータに支配される. したがつて, 深さ d の情報を得るには他の二つのパラメータを固定するか, またはそれらの値を推定する他の情報が必要となる. さらに, 例えば, リフトオフ量をとつてみても, それは表面から検出素子までの距離の絶対値ではなく, その値を欠陥幅で除

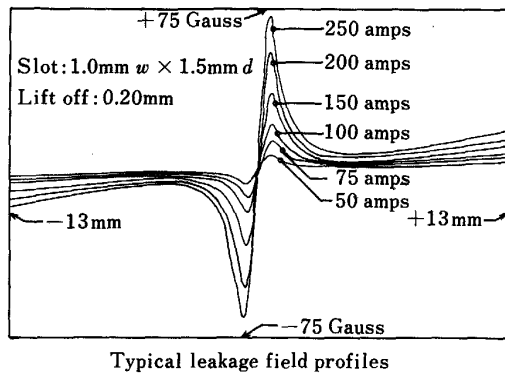


Fig. 4. Measured normal component profiles of magnetic leakage field with various dc excitation currents¹⁸⁾.

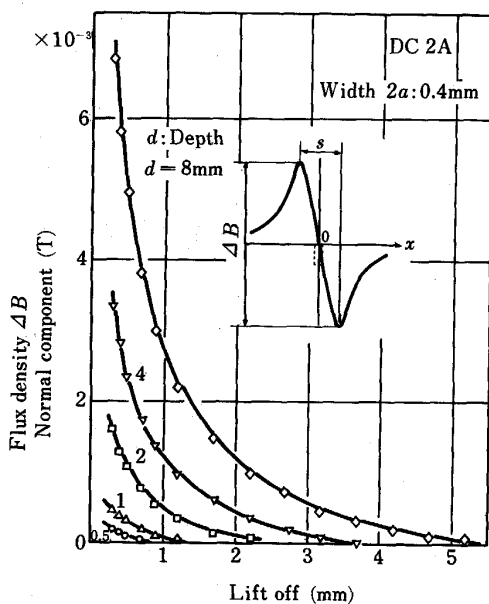


Fig. 5. Peak to peak magnitudes of normal component of leakage field measured by Hall probe for the slots having various depth, as a function of lift off¹⁹⁾.

した, (Y/a) によつて信号出力値が大きく規定されるということにも留意する必要がある. 保全技術上対象とされる欠陥は, 開口幅が数 μm ~ 百 μm というオーダーのき裂であることを考えるとき, 上記のことは, MLFT法による欠陥評価技術上の決定的な問題となる³⁾.

この技術のもう一つの問題は, 磁気検出素子の形状と大きさに制限があることである. 素子による計測値は素子の占有する体積中に存在する磁束の平均値であり, その厚さなどはリフトオフ効果の影響を強く受ける. したがつて, き裂のような開口幅の狭い自然欠陥を対象にして, 欠陥幅, 深さ, リフトオフの影響を考慮し, 磁気検出素子による漏洩磁場測定から欠陥サイジングを明確に行う手法はまだ確立されていないのが現状である. ただし, 人工欠陥などに対する測定例や, 薄いホール素子を一定間隔に重ねておき, それら二つの素子の出力信号から, リフトオフ量を評価し, 欠陥寸法を推定しようとするもの¹⁹⁾, あるいは差動形のプロブによつて欠陥深さを測定しようとする試みなど²⁰⁾, いくつかの実験的研究はなされている. 以上のことは保守検査の観点からであるが, 自動化を強く要求される鋼のピレット, 鋼管の表面疵などの一定性状の欠陥を対象にするような中間検査や製品検査などには磁粉探傷に代わつて MLFT 法が現場で使用され, 実績もある.

4. 鋼溶接部の磁粉探傷(MT法)とその信頼性

4.1 欠陥の見逃し現象と MT 法の信頼性

大型溶接構造物の溶接部の保守検査には, Fig. 6 に示すようなハンディタイプの磁化器 (Magnetic yoke) を利用して, 被検体の一部を磁化する極間法が多く用いられる. 欠陥漏洩磁場の検出媒体は, 鉄や酸化鉄の磁性微粒子 (磁粉) である. 通常, この磁粉を液体の分散媒にまぜた湿式法がよく使われる (これを検査液という). けんだく液には, 水か白灯油が実用され, 磁粉にはコントラストをつけるため蛍光塗料をぬつたもの (蛍光磁粉) と黒色型のものがある. 被検体の磁化には商用周波数の交流電流が用いられる. 交流磁化では, 磁束が被検体表面層に集中するという「表皮効果」のため, 表面開口欠陥を被検体の板厚とは関係なく効率よく検出できるという利点があるが, 漏洩磁場などの理論的解析はきわめて複雑・困難になる.

MT 法の基本は, 欠陥漏洩磁場と磁粉の磁氣的相互作用により, 漏洩部に磁粉指示模様を形成させ, 通常これを検査員の目視作業で観察・記録し欠陥の存在・長さ・形状を検知する. この方法では, 欠陥の深さに関する情報は得られない. MT 法による鋼溶接部の探傷作業プロセスは, 前処理, 励磁 (通電), 検査液 (磁粉) の適用, 磁粉指示模様の観察, 記録, 脱磁 (後処理) からなり, 対象とする欠陥の大きさに応じて, 探傷条件を設定するようになっている¹⁾.

保守検査においては、検査後に見逃され、残留した欠陥分布が強度と寿命を左右する。従つて、MT法の欠陥検出確率がどのようなものであるか、また、ある基準値以上の大きさの欠陥を見逃さないようにするには、いかなる探傷条件を設定すべきかが問題となる。このような点に関し、MT法による欠陥検出向上のためのマニュアル作りを目的に、日本非破壊検査協会内に313小委員会が設立され、昭和57年から、溶接部のMT試験に関し調査研究を行つている¹⁾。そこでの共同実験結果として得られたMT法の欠陥検出確率のデータをFig. 7に示す²¹⁾²²⁾。図中A~Fは資格を有する検査員2名で構成される各検査チームを意味し、横軸は指示模様から得られた欠陥長さである。

Fig. 7に示されるような欠陥の検出性・検出確率は、形成された磁粉指示模様のコントラスト、太さ、長さなどの模様の「見やすさ」と、これを識別する検査員自体

の技量や注意力といった「模様識別能力」の二つの要因によつて決まる²³⁾。MT検査は、きわめて微細なき裂まで検知できるNDI技術である反面、特に現場作業に意外なほどの見逃しも認められ¹⁾、その信頼性の低下の要因をすべて「検査員の識別能力」の不確定性によるものとして処理されがちであつた。しかし、指示模様の形成は、後述するように、種類の探傷要因の複雑な影響下で行われるので、同一の欠陥に対し、作業要領を厳しく一定に抑えたとしても、指示模様自体の「見やすさ」にもかなりの統計的ばらつきを有することが分かつてきた。その実験結果の一例をFig. 8に示す²³⁾。この図は、SS41鋼板の溶接部に存在する一定の溶接割れ欠陥に対し、交流極間式磁化器を用いて得られる磁粉指示模様を自動画像処理装置を用いてその濃度プロファイルを測定し、結果をまとめたものである。実験では探傷作業条件をすべて一定に揃え、各条件下で十数回の探傷を行つた。形成された線上模様の長手方向に対し垂直方向への濃度プロファイルを計測し、その積分値(単位長さ当たり付着磁粉量に相当するもの)を「模様の見やすさ(Visibility)」と定義して、それらの値を正規確率紙にプロットした。Fig. 8から模様の見やすさの統計的ばらつきは正規分布にしたがうことがわかる。すなわちMT法における指示模様の形成は一つの確率現象として捉える必要があり、その主要原因は「検査液の適用」と「励磁と検査液散布操作のタイミング」にある。

以上のようなことから、一定の識別限界をもつ検査員が、「模様の見やすさ」の平均値は同一だが、その変動係数が異なるような二つの探傷条件での検査を行つた場合、両者の検出確率は異なる、という事情が生ずる。すなわち、MT検査の信頼性向上には、このような、模様の見やすさのばらつきの抑制ということに、注意を払うべきであろう。

4・2 欠陥指示模様形成に及ぼす要因

実作業におけるMT法は前述のような手順によつて行われるが、指示模様の見やすさは、欠陥近傍での磁粉の付着量とその形態とに支配される。これには、磁粉と欠陥漏洩磁場の磁氣的相互作用による吸引力、磁粉の形

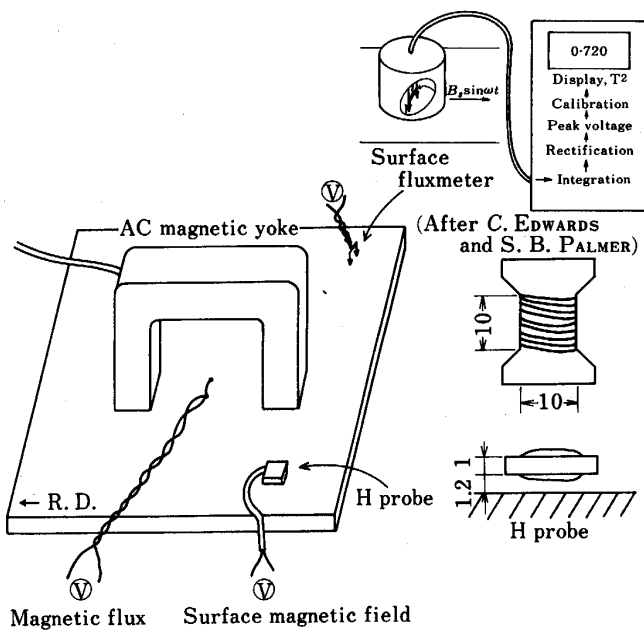


Fig. 6. Experimental arrangement for measurements of internal magnetic flux and surface magnetic field strength.

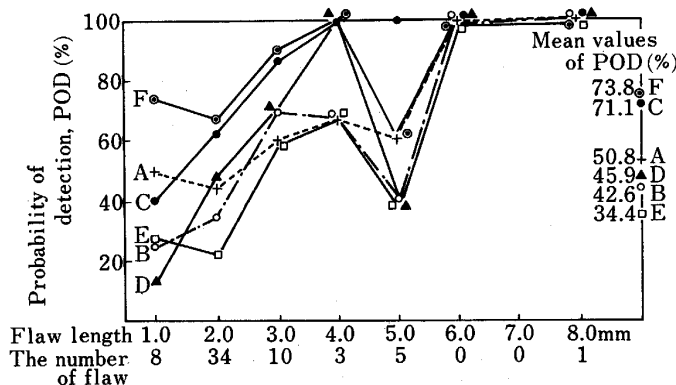


Fig. 7. Probability of detection as a function of flaw length by magnetic particle inspection in welds of gas storage tank. The inspection teams are denoted by A-F.

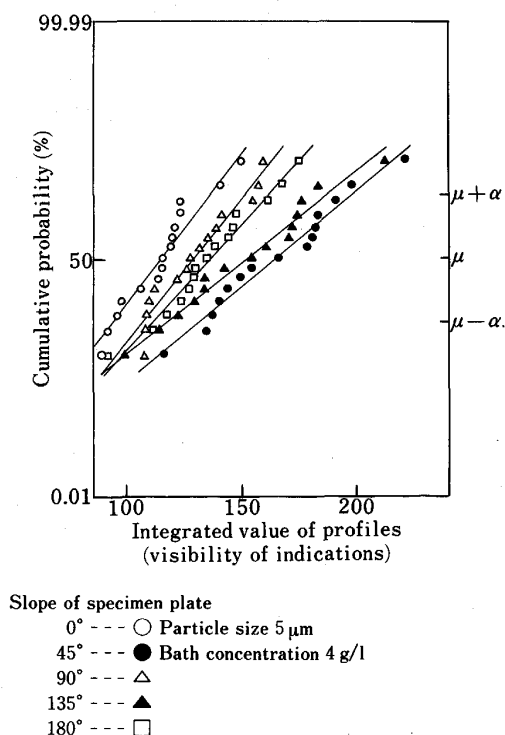


Fig. 8. Statistical distribution of visibility for magnetic particle indication of the crack under a constant condition of inspection. All of the data approximately follow the normal distributions.

状と重さ、湿式法の場合溶媒中での磁粉の流体力学的挙動、など複雑に関与するが、最大要因は、磁粉に働く磁氣的吸引力である。このことは、欠陥漏洩磁場によつて生ずる磁粉への磁氣的な力が、検出可能な模様を形成するに足る大きさとなる必要があることを意味する。磁場 H の中におかれた磁粉には双極子モーメントが生じ、それらの相互作用によつて体積 v の磁粉には次のような力 F が働く。

$$F \propto \mu_0 \mu_r v H \cdot \text{grad } H$$

ただし、 μ_0 は空間の透磁率、また μ_r は磁粉の比透磁率である。

正確には、上式に磁粉の形状による自己減磁率を考慮しなければならないが、静磁場中での磁氣的吸引力は、大雑把にいつて、(磁場の強さ) \times (磁場の勾配) \times (磁粉の体積) \times (磁粉の透磁率) に比例するといえる。もし、磁粉の性質が一定なら、欠陥検出能は欠陥近傍の磁場の強さとその勾配の積となる。ただし、この場合の H は式(4)と(5)で示される漏洩磁場そのものでなく、磁化器からもれる磁場 H_s (Stray field) も加算されねばならぬが、交流極間法の場合、各磁場の位相をも同時に考慮せねばならず、解析は複雑となる。磁場の強さ H は欠陥が一定のものなら被検体内部表面層を通る磁束密度 ϕ_s と被検体の透磁率の大きさに直接依存する。換言すれば、割れ状欠陥の検出能は表面直下の磁束密度 ϕ_s の

欠陥長手方向との直行成分の大きさによつて決まる。

以上のことから、例えば、最近の磁粉探傷に関する英国規格 (BS 6072)²⁴⁾ では、磁束密度は 0.72 テラス以上、これに達するためには比透磁率 240 以上の材料なら起磁力が 2400 A/m 以上であることが推奨されている。

Fig. 6 のような交流極間式磁化器で鋼板を励磁する場合、被検体内部の表面付近の磁束密度 ϕ_s は磁極近く及びその中心線上で大きく、それからはなれるに連れて小さくなる。

それゆえ、いわゆる「探傷有効範囲」を定めることが重要になるが、この探傷有効範囲の管理と設定は原理的には ϕ_s の分布の測定が基本となる。しかしながら、被検体表皮層 (表皮の厚さ $\delta = 1/\sqrt{\pi\mu f\sigma}$, (σ : 導電率, f : 励磁周波数, μ : 透磁率) における磁束密度分布を決定するには、現場的にも、実験室的にも容易ではない。そこで、被検体の表面に近接する位置での空間磁場の強さでこれを代用するとの考えがある。日本の磁粉探傷の規格²⁵⁾ では現在まで、極薄の電磁用鋼板に円形や直線状の人工溝を付した「A型またはC型標準試験片」を被検体に貼付け、その指示模様から、探傷条件や探傷有効範囲を求めるよう推奨している。この考え方は、標準試験片による模様と割れ状欠陥の検出能とに一对一の対応があることを前提にしているわけであるが、この辺のことはいまだ確認されているわけではない。最近では、Fig. 6 の右下図にあるような薄い板状コイルをセンサーにした、いわゆる H プローブ²⁶⁾ を用いて、被検体表面から 1~2 mm の位置での空間磁場を測定し、探傷有効範囲の設定を行うとの考えがある。その根拠は、Fig. 9 に示すごとく、鋼板中の内部磁束密度と H プローブで測定した被検体表面の空間磁場が 1 対 1 に対応するという事実にある。なお、Fig. 9 は、Fig. 6 に示されているような十分広い鋼板中心部に約 10 mm 間隔にあけた二つの細い穴によつてつくった磁束測定用コイルに誘起される電圧出力波形の $1/2$ 周期に対する積分値により、鋼板中の磁束の平均値を求め、それを縦軸に、さらに磁束測定的位置と磁化器配置の幾何学的関係が同等な位置での H プローブ出力値を横軸にとつたものである。図中の Phase (α) の線は二つの磁極には含まれる領域の値で、Phase ($\alpha + 180$) はその外側の領域のものである。この手法は標準試験片にかわるべきものとして注目されるが、次の点に留意する必要がある。一つは交流磁化であるので、位相の変化の問題があり、他は、磁化器等からの漏れ磁場 (Stray field) の影響を受けることである。これらの点に関し、最近、英国の研究者²⁷⁾ により被検体表皮層における磁束密度の大きさを、Surface fluxmeter と称する計器の出力で直接評価する手法が提案されている²⁷⁾。この原理はつぎのごとくである。Fig. 6 に示されるごとく、約 1 cm 離れた位置に二つの端子を配し、それらの 2 端子を被検体表面に接触、その電

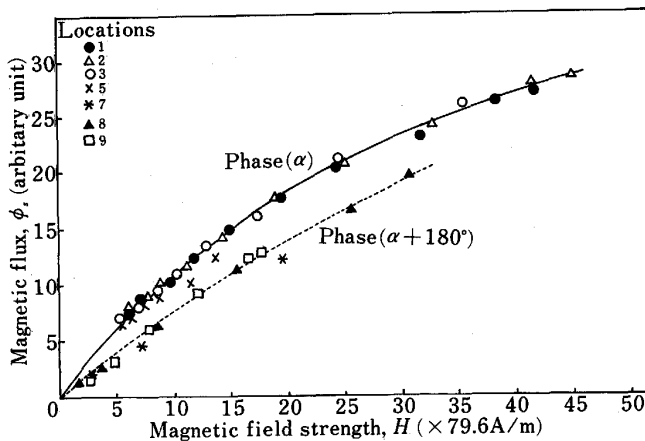


Fig. 9. Relation between internal magnetic flux and surface magnetic field strength.

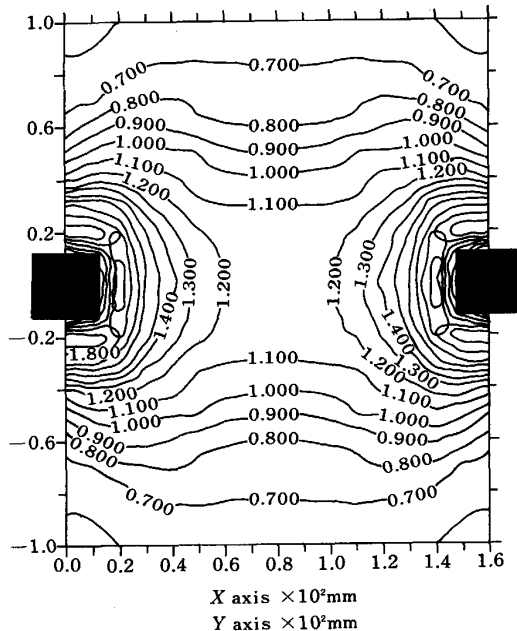


Fig. 10. Flux distribution (T^*) measured with the surface fluxmeter for a magnaflux Y6 electromagnet²⁷⁾.

位差を測定する。そして、それが被検体表皮層の磁束密度変化 dB/dt に比例するということから、 ϕ_s を評価しようとするものである。

交流極間型の磁化器で鋼板を励磁したときの Surface fluxmeter による、磁束密度分布の測定例を Fig. 10 に示す。この測定は、鋼板表面各点でプローブを回転させ、その出力が最大となる方向、すなわち鋼板表面層内を通る磁束線に垂直方向の電圧ピーク値出力を取り、等高線としてかいたものである。この技法は原理的に Stray field の影響を受けず、直接 ϕ_s を評価できる一つの有効な方法と考えられる。

検出能に及ぼす磁粉そのものの形状と特性という点で

は、式(7)から理解されるごとく、透磁率の高いもの、また、それを回転楕円体としたとき、自己減磁率の関連からアスペクト比(長軸/短軸)の大なるものほど、磁氣的吸引力が大になる。湿式法を用いた極間式磁化器による溶接部の MT 検査の場合、定置式磁化器やプロット式の励磁に比べ、磁粉に加わる力の及ぶ範囲が狭く、検査液の流動で欠陥近傍にきた磁粉の付着及び確保のプロセスを重ね、識別可能な模様が成長(Build-up)するものと考えられる。そこで、検出能は、検査面の傾き、表面の粗さ、磁粉の濃度、検査液の適用方法とその励磁時間とのタイミング、などによつて大きく影響されることになる。このようなことから、検査液中での磁粉の検出能に対応する磁気特性の管理とそれを定量的に評価する適切な試験方法が望まれるところである。

5. おわりに

鉄鋼部材とその溶接部に存在する表面欠陥を、磁気探傷法を用いて検出・評価する技術につき、その現状と問題点の一部を保全工学的立場から概観した。欠陥の定量的評価が可能な MLFT 法では、得られる漏洩磁束の信号が多様な因子によつて影響を受け、これらの影響因子を分離し、欠陥評価のみに必要な情報を取り出さねばならないという大きな制約がある。しかし、今日、磁気検出素子や磁場計測技術の著しい発展があり、MLFT 法は今後さまざまな角度からの研究が進み、材料非破壊評価の一つの有望な技術として開発が進むものと予想される。

また、影響因子が多様かつ複雑であるという事情は MT 法でも同じである。この技術では、対象とされる構造物・部材の強度から定まる「有害な欠陥」のみを見逃しなく検出する、という「検査の信頼性」にかかわる要因の解明が今後より重要な課題となるであろう。

筆者の能力や紙面の都合から、本稿が大雑把な解説となり、磁気探傷技術に関する他の多くの重要な問題が見落とされていると思われる。読者の御教示と御叱正をいただければ幸いである。

文 献

- 1) 日本非破壊検査協会 313 小委員会: 日本非破壊検査協会 第 3 分科会資料 No. 3799 (1985), p. 147
- 2) M. G. SILK, A. M. STONEHAM and J. A. G. TEMPLE: The Reliability of Nondestructive Inspection (1987), p. 93 [Adam Hilger]
- 3) G. DOBMAN, G. WALLE and P. HÖLLER: NDT International, 20 (1987), p. 101
- 4) 細原靖治, 山岸隆男, 安井香一, 藤沢友二, 安藤静吾: 日本非破壊検査協会 第 3 分科会資料 No. 3879 (1987), p. 31
- 5) P. J. BLAKELEY, J. SIMKIN and S. T. BROWN: IEEE Trans. on Magnetics, 21 (1985), p. 2420
- 6) B. BRUDAR: NDT International, 18 (1985), p. 353
- 7) J. H. HWANG and W. LORD: J. Testing and Evaluation, 3 (1975), p. 21

- 8) N. IDA and W. LORD: IEEE Trans. on Magnetics, **19** (1983), p. 2260
- 9) 加藤光昭: 日本金属学会会報, **20** (1981), p. 394
- 10) F. FÖRSTER: NDT International, **19** (1986), p. 3
- 11) N. N. ZATSPIN and V. E. SHCHERBININ: Defektoskopiya, **2** (1966), p. 50
- 12) 白岩俊男, 広島瀧夫: 非破壊検査, **21** (1972), p. 166
- 13) C. E. EDWARDS and S. B. PALMER: J. Phys. D., **19** (1986), p. 657
- 14) 関根和喜, 岡田慎一, 上原 徹: 非破壊検査, **37-2 A** (1988), p. 174
- 15) 関根和喜, 岡田慎一, 上原 徹: 日本非破壊検査協会 第 3 分科会資料 No. 3874 (1988), p. 47
- 16) W. K. WESTIMJE: Philips. Rep., **8** (1953), p. 148
- 17) G. J. FAN: IBM J. Res. Dev., **5** (1961), p. 321
- 18) W. LORD and L. SRINIVASAN: Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation, **3B** (1984), p. 855
- 19) 植竹一蔵, 伊藤秀之: 非破壊検査, **33** (1984), p. 788
- 20) 横田 理, 石井勇五郎: 非破壊検査, **33** (1984), p. 923
- 21) 丸山 温, 寺岡英喜, 萩原 明: 非破壊検査, **31** (1982), p. 158
- 22) 関根和喜: 金属, **56** (1986) 8, p. 6
- 23) 関根和喜, 本間 昭, 野中勝信, 中村林二郎: 日本非破壊検査協会 第 3 分科会資料 No. 3763 (1984), p. 1
- 24) British Standard: Method for Magnetic Particle Flaw Detection, BS 6072 (1981) [British Standards Institution]
- 25) 日本工業規格: 鉄鋼材料の磁粉探傷試験方法及び欠陥磁粉模様の等級分類, JISGD 565 (1982)
- 26) 木村勝美, 植竹一蔵: 日本非破壊検査協会 第 3 分科会資料 No. 3770 (1984), p. 44
- 27) C. EDWARDS and S. B. PALMER: British J. NDT, **29** (1987), p. 304