

## 付録 B

### 欠陥検査法

本章では、応力・ひずみ測定法について文献 1) を引用する。

#### B.1 欠陥の種類と検査法

##### B.1.1 欠陥の種類

構造材料に生じる欠陥には、製造工程で生じる欠陥(初期欠陥)と供用中に生じる欠陥がある。鉄鋼をはじめとする金属材料に関して代表的な初期欠陥を表 B.1 に示す。鑄造では、主に凝固時の収縮応力、プロセス中に混入する非金属介在物が欠陥のもととなる。鍛造・圧延では、鑄塊の欠陥が十分に圧着されずに残ったものに加えて、不適切な鍛造・圧延条件による欠陥が生じる。溶接では、溶接金属の凝固、および熱影響部の硬化、延性低下によりき裂が生じる。また、供用中に生じる欠陥としては、疲労、応力腐食割れ、クリープなどにより進行するき裂状欠陥が重要である。セラミックスでは、材料焼成時の気孔、異物混入、結晶粒の異常成長などの欠陥があるが、強度上の観点からはき裂状欠陥が特に重要である。セラミックスでは金属材料と比較して破壊靱性が 1 桁程度小さいため、破壊の起点となるき裂寸法も小さく、50 ~ 100  $\mu\text{m}$  程度のき裂が強度上、問題となる。

特性の異なる複数の材料で構成される複合材料では、繊維配列の乱れ、繊維破断、母材樹脂の割れ、気泡空洞、異物混入、樹脂過多・過少部、層間はく離、接着不良など、製造時から多数の初期欠陥が存在する。また、使用中の過大負荷や疲労、衝撃により、繊維破断、界面はく離、樹脂き裂など複数の損傷が累積的に進行することが特徴である。

コンクリート構造では施工不良による初期欠陥や鉄筋の腐食、アルカリ骨材反応などによる劣化がある。また、腐食した鉄筋の膨張圧などによるひび割れはコンクリートのはく落をもたらすから、はく離欠陥に対する検査が重要である。

##### B.1.2 欠陥の検査法

種々の物理原理に基づく非破壊的な欠陥検出手法を非破壊試験 (nondestructive testing:NDT) といい、引張・疲労試験等の破壊的材料試験と対比される。また、非破壊試験結果から、試験対象に対する判定基準に基づいて使用可能性を判定することを非破壊検査 (nondestructive inspection:NDI) と称して区別することもある。さらに、構造物の負荷・環境条件と破壊力学の知識から、使用材料の安全性や寿命を予測し、構造健全性を評価することまでを含めて非破壊評価 (nondestructive evaluation:NDE) と呼ぶことが多い。

表 B.1: 金属材料中の代表的な初期欠陥

プロセス	名称	内容
鑄造	ピンホール, ブローホール	溶湯中の水素などが凝固時に放出されてできた空孔
	引け巣	押湯不足により生じる凝固時の収縮孔
	砂かみ	注湯時に侵食されまきこまれた鑄型砂の介在物
	のろかみ	溶融炉あるいは溶湯中のスラグがまきこまれた状態
	熱間き裂 (高温割れ)	凝固時の体積収縮にともなう引張応力による粒界き裂
	低温き裂 (冷却割れ)	冷却時の不均一な内部応力によるき裂
	そのほか	すくわれ, しぼられ, 焼きつき, 差しこみ, 湯境, 湯回り不良など
鍛造・圧延	砂きず	鑄造塊中の非金属介在物が変形されて残留したもの
	ザクきず	凝固時欠陥の圧着不足による微小空孔
	白点 (偏析きず, 毛割れ)	水素, 変態・冷却応力, 偏析などによる冷却時のき裂
	もみ割れ	不適切な加熱・圧力条件による内部き裂
	ラミネーション (2枚割れ, 2枚板)	非金属介在物・水素による薄い層状のき裂
	折りこみ	前段ロールによるはみ出し部が畳みこまれた表面のきず
	スケールきず	表面に圧着されたスケール
	そのほか	線状きず, へげ, しわきず, はだ荒れ, ロールきずなど
溶接	高温割れ (凝固割れ, 溶接金属割れ)	溶接金属の凝固時に生じる粒界のき裂
	低温割れ (遅れ割れ, 熱影響割れ)	残留・拘束応力, 水素拡散・濃化環境下の熱影響部で生じるき裂
	ラメラティア	T継手, かど継手部の板厚方向収縮応力による階段面上のき裂
	再加熱割れ (SR割れ)	応力除去焼鈍時に止端部, 熱影響部粗粒域に生じるき裂
	そのほか	スラグまきこみ, 溶けこみ不良, アンダカット, オーバラップなど

非破壊検査は主に製品, 構造物の品質評価および寿命評価に用いられる。このうち品質評価は, 素材や製品の製造時あるいは供用前に行われ, 規格または仕様を満たしていることを確認するためのものである。非破壊試験とともに品質保証技術を構成するものに保証試験がある。これは, 最大使用応力を超える負荷を使用前に加えてスクリーニングを行い, その製品の使用を保証するものである。ただし, 疲労や応力腐食割れなどの負荷条件下では最大使用応力以下の範囲でもき裂成長が起こる可能性があり, 保証試験のみで信頼性を確保することは難しい。

供用中あるいは稼働中に行われる非破壊検査は寿命評価を目的として行われることが多く, 使用条件下で新たに発生, 成長した欠陥を検出し, 補修あるいは廃却の必要性を判断することが主な内容である。寿命評価を行うためには, 検出された欠陥の種類, 形状, 寸法, 位置と方向を正確に評価し, 破壊力学的取扱いに基づいて成長量を予測することが必要とされる。このため, 欠陥の検出感度の向上とともに, より定量的な評価を行うために各種の先端的な非破壊検査手法が研究されており, 定量非破壊評価 (quantitative nondestructive evaluation:QNDE) という分野を形成している。

欠陥の検査法は, 利用する物理現象によって以下のように大別できる。

#### (1) 放射線による方法

放射線透過試験では, 材質の違いにより X 線,  $\gamma$  線, 中性子線などの放射線の透過特性が異なることを利用して, 透過像から内部欠陥の検出を行う。X 線および  $\gamma$  線の透過特性は物質の原子番号, 密度に依存することから, 内部の不均質部や欠陥の識別が可能である。中性子線は, 水素, 水など特定の物質に対して強い吸収を示し, 金属材料内部の水素化合物の検出などに適用される。また, 全周方向から透過 X 線データを収集して, コンピュータにより断層画像を構築する X 線 CT(computed tomography) も適用されている。

## (2) 弾性波 (超音波) による方法

超音波探傷試験では、欠陥からの超音波の反射波を検出することにより、欠陥の位置や寸法を推定する。また、材料中を透過した超音波の波形は材料固有の性質を反映した情報を含んでおり、例えば、減衰特性から結晶粒径や気孔率を評価することができる。

ほかの音響的欠陥検出法として、固有振動の振動数、モード、減衰率に基づく振動励振法 (モーダル解析法)、打撃による発生音に基づく打音法 (ハンマ法、コインタップ法)、表面センサで受信した弾性波信号の振幅、減衰、周波数特性に基づく衝撃弾性波法あるいは音響超音波法、表面と欠陥の間における弾性波の共鳴を利用したインパクトエコー法などがある。

また、欠陥の検出を目的とする以上の方法に対して、アコースティックエミッション法では、欠陥の発生、進展にともなって放出される弾性波を検出し、波形特徴解析による破壊モードの判別、複数センサによる欠陥位置の評定や、AE 原波形解析による破壊素過程の定量的評価が行われる。

## (3) 電磁気現象による方法

強磁性材料を導電することなどによって磁化すると、表面にきずのあるところでは磁束線が乱れ、磁束の一部が外部空間に漏洩する。磁粉探傷試験では強磁性体粉末粒子による磁粉模様観察により、一方、漏洩磁束探傷試験では、ホール素子、磁気抵抗素子、サーチコイルなどを用いた漏洩磁束密度の分布測定により、表面欠陥を評価する。

渦電流探傷試験は導電性材料における電磁誘導を利用した欠陥検出法で、電磁誘導試験とも呼ばれる。高周波の交流電流を流したコイルにより、導電性材料材部に誘導電流 (渦電流) を発生させたときの欠陥や不均質部による電流分布の乱れをコイルのインピーダンス変化として検出する。材料の表皮効果により渦電流は表面層に集中するので、この試験法も表層部の欠陥を対象としている。

電位差試験法 (電気ポテンシャル法) は、導電性材料を直流あるいは交流で通電し、電位分布を測定することにより主に表層部の欠陥検出を行う方法で、電気抵抗法とも呼ばれる。

## (4) 熱現象による方法

赤外線サーモグラフィでは、試験体に与えた表面温度場の欠陥による乱れを赤外線エネルギーの測定により画像表示して欠陥検出を行う。温度場を与える方法としては、通電、パネルヒータ、振動による内部摩擦などが用いられる。材料の熱弾性効果を利用して、繰返し負荷での温度変化を検出する方法も用いられる。

## (5) そのほか

そのほかの欠陥検査法として、表面欠陥を対象とした浸透探傷試験がある。表面欠陥に対して、着色塗料や蛍光塗料を含む液 (浸透液) を塗布すると欠陥内部に浸透する。表面の余分な液を除去 (洗浄) した後、微粉末を含んだ現像剤を塗布すると、毛管現象により欠陥内部の浸透液が微粉末間隙に吸い上げられ、目視観察できる欠陥の指示模様ができる。高価な設備が不要で簡単なため、定量性には劣るものの広く普及している。

密封容器や配管などでは、流体の漏出や流入、流出を調べる目的でもれ試験が行われる。もれ試験には、発泡により圧力差を観察する発泡もれ試験、加圧 (減圧) 後の圧力変化を計測する放置法、およびアンモニア、ハロゲン化合物、ヘリウムなどのガスを封入しそのもれを検出する方法がある。

## B.2 ラジオグラフィ

### (1) 放射線の発生と吸収

放射線には X 線,  $\gamma$  線, 電子線, 陽電子線, 中性子線などがあるが, 放射線透過試験には主に X 線,  $\gamma$  線, 中性子線が使われる。以下にこれらの放射線の発生と吸収について述べる。

X 線は電磁波の一種であり, 2 極真空管 (X 線管) の陰極 (タングステンフィラメント) から熱電子を陽極 (主に, タングステンターゲット) に衝突させることにより発生する。図 B.1 にこの模式図を示す。陰極フィラメントを通電加熱すると熱電子が放出, 両極間の高電圧により加速され, (陽極に衝突して運動エネルギーの大部分は熱に変わるが) 一部が X 線となって放射される。発生する X 線は広いエネルギースペクトルをもつ白色 X 線で, スペクトル分布は加速電圧とターゲットの材質で決まり, 波長の最小値  $\lambda_{min}$  は加速電圧  $E$  と

$$E [kV] = \frac{1.24}{\lambda_{min} [nm]} \quad (B.1)$$

の関係にある。

X 線が物質中を伝わるとき, 光電効果による吸収, トムソン (レイリー) 散乱 (弾性散乱), コンプトン散乱 (非弾性散乱) により, 直接透過線の強さは減弱する。強さ  $I_0$  の単色 X 線が物質中を距離  $T$  透過した後の強さ  $I$  は,

$$I = I_0 \exp(-\mu T) \quad (B.2)$$

と表される。線吸収係数 (減弱係数)  $\mu$  は放射線のエネルギーが小さいほど大きく, また, 物質の原子番号, 密度が大きいほど大きくなる。この関係は白色 X 線については厳密には成り立たないが, 透過距離がある程度長くなれば上式が近似的に用いられる。

図 B.2 のように厚さ  $T$  の試験体中に大きさが  $\Delta T$  の中空な欠陥がある場合, この部分を透過した X 線の強さ  $I'$  は,

$$I' = I_0 \exp\{-\mu(T - \Delta T)\} \quad (B.3)$$

となり, 健全部よりも強い透過線となる。これを試験体背後に置いたフィルムの濃度差によって検出するのが直接撮影法の原理である。

線も X 線と同様の電磁波であるが, 放射性物質の原子核内で起こる壊変現象にともなって放出される点が異なる。例えば, 放射性同位元素の  $^{60}\text{Co}$  (コバルト 60) を用いる場合, 天然に存在する  $^{59}\text{Co}$  に原子炉内で中性子を吸収させてできる  $^{60}\text{Co}$  を線源容器に収納する。 $^{60}\text{Co}$  は不安定なため, 壊変して  $\gamma$  線を放射する。放射性同位元素の線源の強さは時間とともに弱くなり,  $^{60}\text{Co}$  の場合, 半減期は約 5.3 年である。

このほかに  $\gamma$  線源としては,  $^{192}\text{Ir}$  (イリジウム 192),  $^{137}\text{Cs}$  (セシウム 137) が用いられる。物質中での線の透過特性は X 線と同様であるが,  $\gamma$  線は線スペクトルからなり, 物質によって決まったエネルギーをもつ。

中性子線にはエネルギーレベルにより, 高速中性子線, 熱中性子線, 冷中性子線があるが, 主に熱中性子線が用いられ, 原子炉炉心から出る中性子を減速材で減速するか, 小型サイクロトロン, あるいは  $^{252}\text{Cf}$  (カリフォルニウム 252) などの放射性同位元素を用いて発生させる。中性子線は水素, 水, ホウ素などの特定物質に対して吸収が非常に大きく, 逆に, 鉄, 鉛などの金属では吸収が小さく透過しやすい。

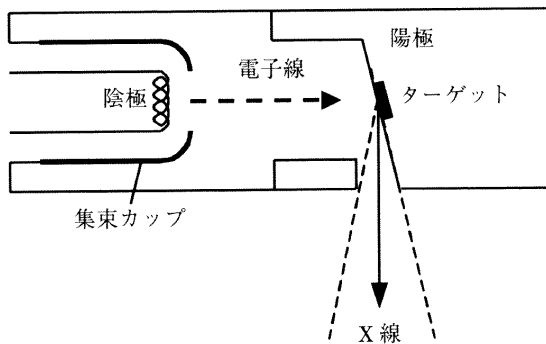


図 B.1: X線発生 の原理

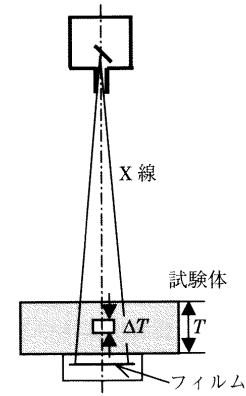


図 B.2: X線透過試験の原理

## (2) 放射線透過試験

放射線透過試験の概要を図 B.5 に示す。X線装置はX線管を利用した低エネルギーX線装置と加速器を利用した高エネルギーX線装置に分かれるが、一般には低エネルギー装置が用いられる。高エネルギー装置は大型で重量が大きくなるため、適用は100mmを超えるような極厚試験体などに限られる。線は小型、軽量で特別の電源を必要とせず、放射線発生部が小さいため狭所での使用に適するが、一般にはX線のほうが実効エネルギーを低くでき、その結果、線吸収係数が大となって像質が向上することから優先して使用される。中性子線装置は原子炉、加速器など大型で現場での保守には適さないが、放射性同位元素を用いるものは一部現場での検査に適用されている。放射線透過試験では、これらの放射線を試験体に照射し、透過線を検出・撮像する。図 B.4 は鋳鋼品の非破壊検査の例で、砂かみや介在物など、透過方向にある程度の厚みをもつ欠陥は容易に検出される。

放射線の検出方法として最もよく使われるのはX線フィルムで、感度を高めるためフィルムの両面に写真乳剤を塗布し、さらに増感紙を密着させて用いる。像質を優先する場合には金属箔増感紙(主に鉛箔)、露出感度を優先する場合には蛍光増感紙が用いられる。中性子線は感光作用をもたないため、中性子との核反応で2次電子を放出する蛍光板(コンバータ)をフィルムに密着させ、蛍光発光によりフィルムを感光させる。

上に述べたように、試験体中に欠陥があれば、透過写真上で健全部との間に濃度差(コントラスト)を生じる。コントラスト $\Delta D$ は、

$$\Delta D = \frac{0.434}{\gamma \mu \sigma \Delta T} \quad (\text{B.4})$$

で与えられる。ここで $\gamma$ はフィルムコントラスト、 $\sigma$ は幾何学的補正係数、 $n$ は散乱係数である。この関係から、高いコントラストを得るために、高コントラストのフィルムを用いる( $\gamma$ を大きくする)、低エネルギーのX線を用いる(線吸収係数 $\mu$ を上げ、散乱係数 $n$ を下げる)ことのほか、 $\sigma$ を最大値の1に近づけるため焦点寸法を小さくすることなどが必要となる。X線の焦点寸法は、熱電子ビームがターゲットに衝突するスポット径の大きさに比例し、通常のX線管ではmmオーダーである。これに対してマイクロフォーカスX線管では、収束レンズ(コイル)の磁界を利用して電子ビーム径をしぼりこみ、5~10 $\mu\text{m}$ の焦点寸法となっている。

X線フィルムのアナログ情報をデジタル化してコントラスト強調、輪郭強調などの画像処理を行う技術も開発されている。また、X線フィルムに代わる撮像方法として、イメージングプレート、イメージイン

テンシファイヤ、X線ビジコンカメラ、ラインセンサ、フラットパネルセンサなどを用いて放射線画像をデジタルデータとして扱うデジタルラジオグラフィの開発、適用が進んでいる。このうち、イメージングプレートは、蛍光体をプラスチック板に塗布したものであり、放射線照射により蛍光を発生し、照射後急激に蛍光は減衰するが、これに可視光あるいは赤外線を照射すると再び蛍光が増加する性質（輝尽蛍光現象）を利用する。この蛍光の強さは最初に照射された放射線量に比例するため、X線フィルムと同様の記録媒体として使用でき、露出時間が短く、暗室が不要な手段として実用化されている。

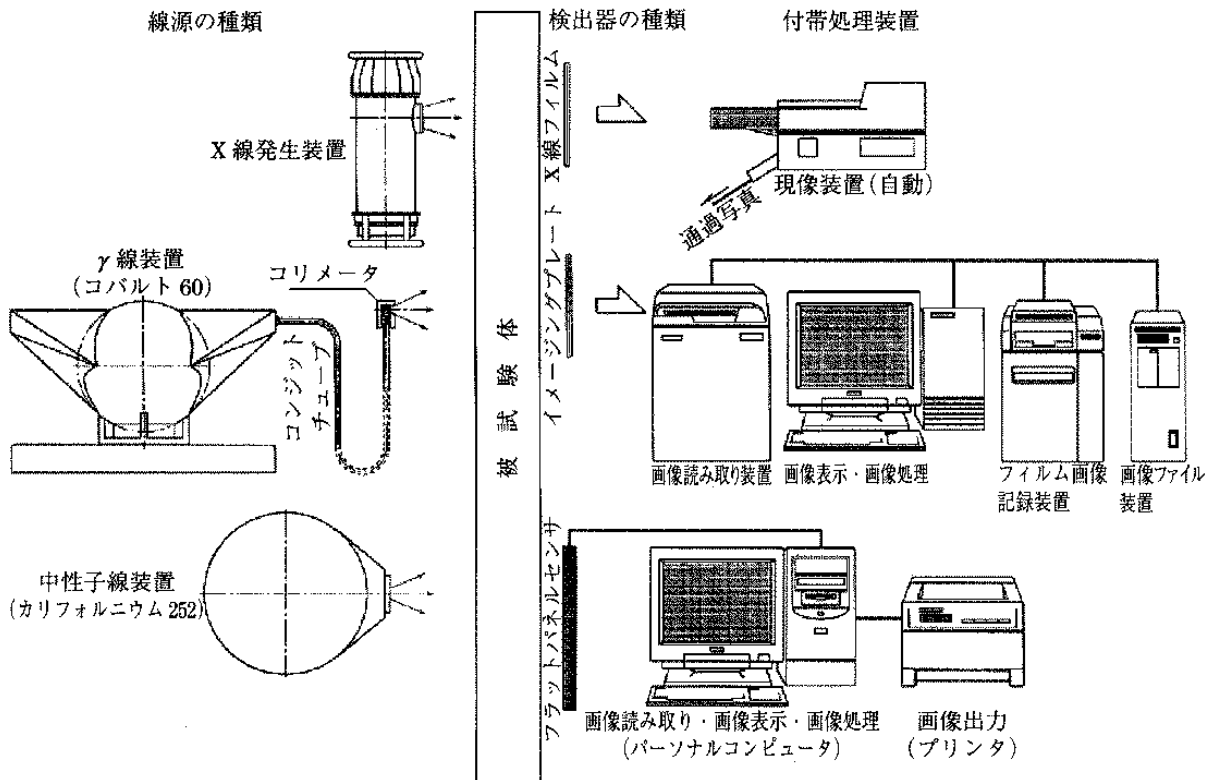


図 B.3: 放射線透過試験の概要

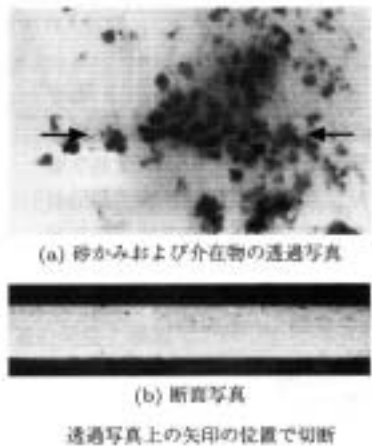


図 B.4: X線による鋳鋼品の欠陥観察例

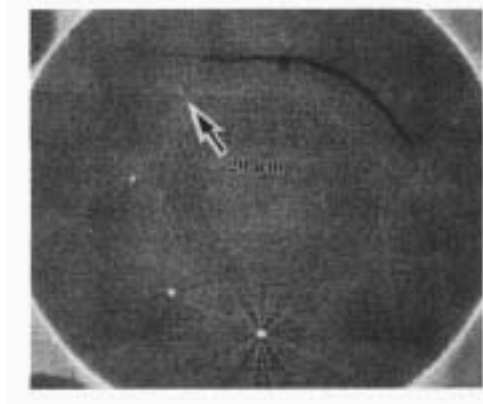


図 B.5: マイクロフォーカス X線 CT による、ターボチャージャモデルの欠陥観察例

## (3) X線 CT

1 方向からの平面透過像を与える直接撮影法に対して，X線 CT では透過 X線を多方向から撮影し，コンピュータによる画像処理で内部の X線吸収値に対応した断層像を再構成する．一般の X線 CT では画像分解能およびスライス厚みは数百  $\mu\text{m}$  程度であるが，マイクロフォーカス X線 CT ではマイクロフォーカス X線管を線源に用い，投影像を拡大することによって分解能，スライス厚みを 5~20  $\mu\text{m}$  程度まで向上させている．マイクロフォーカス X線 CT による窒化ケイ素製ターボチャージャモデルの観察例 (図??) では，拡大率 8 倍の CT 像で製造時のき裂が黒く映って検出されているとともに，タングステンワイヤによる人工欠陥 (径 20~100  $\mu\text{m}$  の 4 個) が検出できている．マイクロフォーカス X線 CT は，複合材料の微視的な損傷の観察手段としても有力である．近年では，X線管に比べ桁違いに輝度が高い単色 X線を取り出せるシンクロトロン放射光を利用して，エネルギーを連続的に可変できる単色 X線を用いた CT 技術が複合材料中の微小欠陥の観察などに適用されている．

## B.3 超音波法

## B.3.1 超音波の伝播特性

固体材料を伝播する超音波 (弾性波) の形態としては，縦波，横波，表面波が代表的である (図 B.6)．縦波と横波は，境界の影響を受けずに固体内部を伝播する弾性波で，バルク波 (実体波) と呼ばれる．等方弾性体中では縦波は振動方向が伝播方向と平行で，速度は

$$c_L = \sqrt{\frac{(\lambda + 2\mu)}{\rho}} \quad (\text{B.5})$$

横波は振動方向が伝播方向と垂直で，速度は

$$c_T = \sqrt{\frac{\mu}{\rho}} \quad (\text{B.6})$$

である (ここに， $\lambda$ ， $\mu$ :Lame の定数， $\rho$ :密度)．一方，境界付近では超音波は縦波，横波の組合せによる特有の波として伝播し，自由表面を伝播する表面波 (レイリー波) がよく知られている．等方弾性体のレイリー波速度  $c_R$  は横波速度よりもやや低く，近似的に

$$c_R = \frac{0.87 + 1.12\nu}{1 + \nu} c_T \quad (\text{B.7})$$

と与えられる ( $\nu$ :ポアソン比)．縦波や横波と異なり，表面波は表面から 1 波長程度の深さまでにエネルギーが集中しており，深さ方向に拡散しないことから遠方まで伝わる．複数の境界面をもつ固体中のほかの超音波モードとして，板波 (Lamb 波)，円筒波なども欠陥評価に用いられる．

異なる媒質の境界に入射した超音波の音圧反射率は，両媒質の音響インピーダンスを  $Z_1$ ， $Z_2$  として

$$R = \frac{Z_2 - Z_1}{Z_1 + Z_2} \quad (\text{B.8})$$

で与えられる ( $Z_1$  の媒質からの入射のとき)．一般に，固体材料は空気よりも 4 桁以上高い音響インピーダンスをもつから，固体と空気の境界での反射率は 100 % に近く，固体中の欠陥による反射はきわめて大きい．また，縦波あるいは横波が異種媒質界面に入射したとき，反射，屈折の方向は Snell の法則により決まる (図 B.7)．このとき，縦波，横波どちらの入射に対しても一般に反射波，屈折波には縦波と横波の両者

が生じる (モード変換) . しかし, 臨界角を超える入射角に対しては屈折波が存在しない . また, 臨界角での入射に際しては表面波が励起される .

超音波は媒質中を伝播する際に, 微視構造 (結晶粒, 強化材) による散乱や媒質固有の粘性の影響で減衰する . 一般に減衰は周波数が高いほど顕著であり, このため超音波パルスの中心周波数は伝播とともに低周波数側にシフトする . また, 受信波形の振幅はビームの拡散や底面, 異材界面での反射の際の損失によっても低下する . 高減衰材料や複合材料を伝播する波, および板波や円筒波では, 伝播速度が周波数に依存する分散特性がみられる .

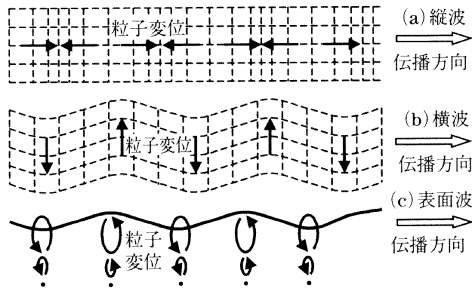


図 B.6: 代表的な超音波モード

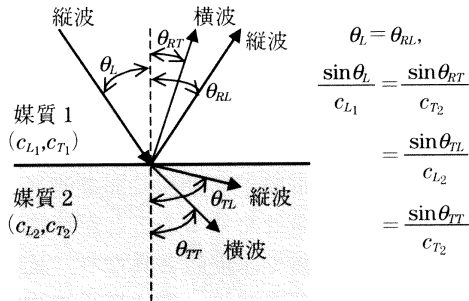


図 B.7: 等方弾性体における Snell の法則

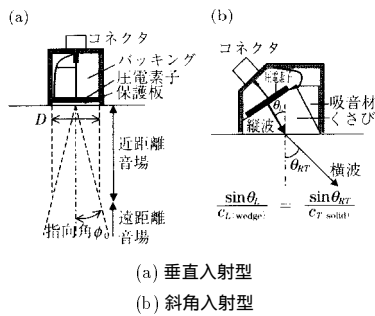


図 B.8: 超音波探触子

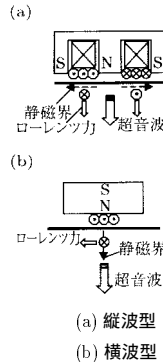


図 B.9: EMAT の例

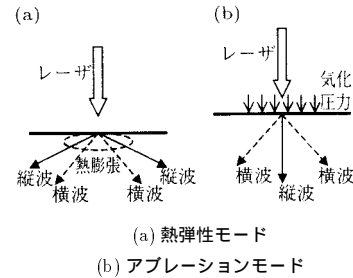


図 B.10: レーザ超音波の発生原理

(2) 超音波の発生と検出

欠陥検査のための超音波の発生, 検出の原理としては圧電材料を用いるものが最も一般的であり, PZT などの圧電セラミックスや PVDF などの圧電高分子が用いられる . 超音波送受信センサ (探触子, 図 B.8) は, 圧電素子の両面に電極を貼りつけた構造が基本であり, これに電気的スパイクを加えると素子の振動により超音波が発生し, 逆に超音波振動を電気信号として検出する . 発生 (検出) する超音波の周波数は主に素子の共振周波数で決まり, また素子の振動モードにより縦波型と横波型がある . 裏側につけたバックキング材 (主に金属粉を樹脂で固めたもの) は, 素子の共振を抑えて広帯域パルスを送信する役目を果たす . 試験体に超音波を入射する方法としては, 試験体を水中に浸し水中から縦波を入射する方法 (水浸法) と, 探触子を直接接触させて励振する方法 (接触法) がある . 後者の場合, 固体どうしの接触では伝達効率が悪いことから, 通常, グリセリンなどの接触媒質を介して密着させる . 斜角探触子では, 試験体の音響特性に対して調節した角度のくさび (材質: アクリルなど) により, 素子から発生した縦波をモード変換して横波を試験体に入射する .

探触子から放射される音場は, 干渉のため, 複雑に音圧が分布する近距離音場と音圧変化が単調となる

遠距離音場に分かれ、その境(近距離音場限界距離)はほぼ  $D^2/(4\lambda)$  で与えられる( $D$ : 振動子直径,  $\lambda$ : 波長)。また、超音波の指向性は、音圧が0となる中心軸からの角度(指向角)  $\theta$  で表し、 $\theta = 70^\circ \sqrt{\lambda/D}$  である。したがって、周波数が高いほど(波長が短いほど)、超音波は指向性がよく拡散しにくい。音響レンズまたは球面形振動子を用いた集束型探触子を用いる場合、焦点のビーム幅はほぼ  $2.44 \lambda F/D$  で与えられる( $F$ : 焦点距離)。また、多数の振動子を配置し、個々の振動子の励振時間を適当にずらすことにより、任意方向に超音波を放射したり、任意の点に集束させたりすることが可能なアレイ型探触子も開発されている。

接触法や水浸法と異なり、試験体に対して非接触で超音波を発生、検出できる方法として、空気結合超音波法、電磁超音波法、レーザ超音波法などがある。空気結合超音波法は、接触法における接触媒質や水浸法における水を使わず、圧電型または容量型の探触子から空中を通じて超音波を入射、受信する方法である。電磁超音波探触子(electromagnetic acoustic transducer: EMAT)による超音波発生法には、高周波電流を流したコイルによる渦電流と静磁場によるローレンツ力を用いる方法(図 B.9 に例を示す)、コイルの誘導磁場による磁歪を用いる方法がある。ローレンツ型は磁性、非磁性を問わず金属材料に適用でき、磁歪型は磁性材料が適用対象となる。いずれの場合にも電磁誘導でコイルに発生する起電力により超音波を検出する。レーザ超音波法は、パルスレーザを試験体表面に入射して超音波を発生させるもので、熱弾性モードとアブレーションモードがある(図 B.10)。前者はレーザによる局所的な温度上昇と熱膨張を、後者は高出力レーザからの、急激過熱による表面部の溶融、気化の反作用としての圧力を利用している。超音波振動の検出にはレーザ干渉計測が適用されており、光ファイバを用いた遠隔測定法も開発されている。

### (3) 超音波探傷試験

超音波探傷試験では、主に接触法か水浸法により試験体に超音波を送信し、欠陥からの反射波を計測する。試験体の超音波伝播速度を既知として、反射波の到達時間から欠陥までの距離が測定できる。探傷面上で探触子を移動させながら反射波計測を行い、A スコープ(深さ方向の反射波振幅の表示)、B スコープ(縦断面での断層像)、C スコープ(横断面での断層像)として映像化させるのが一般的である(図 B.11)。鍛鋼品などの探傷では、基準反射源からの反射波について距離(distance)、増幅感度(gain)、寸法(size)の関係を整理した DGS 線図(または、独語の頭文字で AVG 線図)を用いて、反射波振幅から欠陥の寸法を評価している。

試験体表面からモード変換を利用して横波を斜角入射することにより、き裂などの面状欠陥の検出を目的とする斜角探傷法では、き裂先端部からの反射波に基づく端部エコー法が欠陥高さ測定法として代表的である。また、高精度のき裂高さ測定法として TOFD(time-of-flight diffraction)法がある。TOFD 法では、試験体上に送信探触子と受信探触子を一定距離で対向配置して縦波を送信し、受信探触子で検出したラテラル波(表面を伝わる縦波)、き裂上端および下端からの回折波、底面反射波の到達時間差からき裂の位置と寸法を評価する(図 B.12)。

表層部の検査には表面波が、薄板や配管の検査には、それぞれ板波、円筒波などが用いられる。板波や円筒波は被導波あるいはガイド波(guided wave)の一種であり、表面波と同様に有限領域にエネルギーが集中して伝播するため、長距離まで伝わり、広領域の検査を短時間で行うことができる。このほかに、クリッピング波(固体表層を伝わる縦波)、表面 SH 波(表面に平行に振動する横波)など、さまざまな超音波モードが欠陥評価に用いられている。

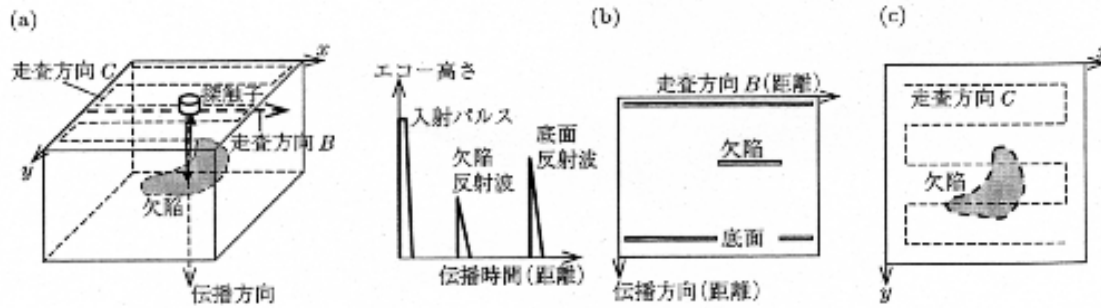


図 B.11: 超音波による欠陥の画像化 (a)A スコープ, (b)B スコープ, (c)C スコープ

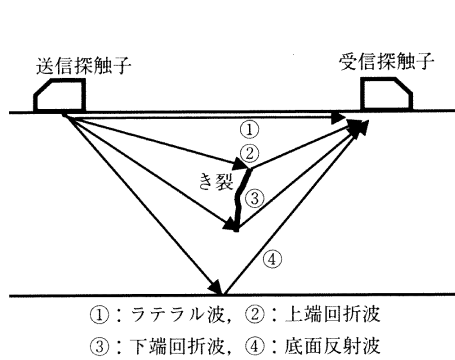


図 B.12: TOFD 法による欠陥評価

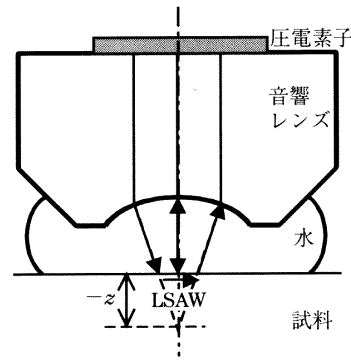


図 B.13: 超音波顕微鏡による V(z) 曲線の評価

(4) 透過特性に基づく欠陥評価

材料中の欠陥の状態が超音波の伝播速度や減衰特性に反映される場合には、試験体中を透過した超音波の波形を解析することによって欠陥の情報が得られる。透過波形により与えられる超音波特徴量としては、伝播速度、減衰特性、後方散乱強度などがあり、周波数依存性を解析する超音波スペクトロスコピーの適用分野である。これによる評価対象としては、金属材料の結晶粒径、クリープ損傷、水素侵食、鋭敏化、熱時効、疲労損傷、繊維強化複合材料やセラミックスの空孔率などがある。また、材料中の転位運動や微視欠陥の開閉口にともなう生じる高調波の振幅が、音速や減衰などの線形特性量よりも早い段階で疲労などの損傷を検出する特徴量として研究されている。

(5) 超音波顕微鏡

超音波顕微鏡は高周波数の超音波により物質表面または表面下の微視構造や弾性特性を画像化する装置である、レーザ走査型と機械走査型の2方式があり、後者のほうが広く普及している。欠陥検出用には10~100MHz帯域の超音波探傷映像装置が開発されている。超音波顕微鏡による画像計測では、音響レンズにより集束させた超音波パルス水を介して試験体に入射し、表面あるいは表面下からの反射波を検出して2次元映像化する。画像の方位分解能  $r$  は

$$\Delta r = \frac{\lambda F}{D} \tag{B.9}$$

で与えられ ( $\lambda$ :水中の波長,  $F$ :焦点距離,  $D$ :開口直径), 例えば開口角  $60^\circ$  のとき 200MHz で  $5\mu\text{m}$ , 1GHz で  $1\mu\text{m}$  の方位分解能となる。

また、プローブと試験体との距離を変えながら反射波を計測すると、表面からの反射波と、モード変換で生じる漏洩弾性表面波 (leaky surface acoustic wave: LSAW) から漏洩した縦波が干渉し (図 B.13)、距離  $z$  に対して振動する出力 ( $V(z)$  曲線) が得られる。この振動周期  $\Delta z$  から LSAW 速度

$$c_{LSAW} = \frac{c_w}{\sqrt{1 - \left(1 - \frac{c_w}{2f\Delta z}\right)^2}} \quad (\text{B.10})$$

が求められ ( $c_w$  = 水中の音速,  $f$ : 周波数),  $V(z)$  曲線の包絡線から LSAW の減衰率がわかるので、表面弾性特性の定量計測が可能となる。

#### (6) アコースティック・エミッション

固体材料中で微視き裂が発生、進展する際に、弾性波が放出される現象をアコースティックエミッション (acoustic emission: AE) という。AE を検出することにより、損傷の進展過程をリアルタイムで観察することが可能である。AE はき裂発生、進展のほか、塑性変形、相変態、磁化などによっても生じる。通常の AE 計測では 100kHz ~ 1MHz 程度の周波数帯に感度をもつ圧電センサを用い、プリアンプを通じて増幅した後、しきい値電圧を超えた AE 波数の計数や AE 事象の持続時間、最大振幅の処理などを行う。塑性変形による AE では、一度応力を負荷すると、その応力に再負荷するまで AE が観察されないカイザー (Kaiser) 効果があり、応力履歴推定や構造健全性評価に用いられる。また、複数のセンサを設置し、到達時間差から損傷の発生位置を評定できる。

AE 原波形解析では検出信号  $V(t)$  を、き裂発生による弾性波 (原波形)  $D(t)$ 、媒質内の伝播特性を表す動的グリーン関数  $G(t)$ 、計測系の伝達関数  $S(t)$  の、畳みこみ積分

$$V(t) = D(t) * G(t) * S(t) \quad (\text{B.11})$$

と考え、 $V(t)$  から原波形  $D(t)$  を求めることにより、微視的なき裂の寸法や平均き裂生成速度など、破壊の素過程に関する定量的データを提供している。

### B.3.2 電磁気的手法

電磁気を利用した非破壊試験技術としては、物体を磁化させたときの欠陥による磁場の変化を検出する方法、および物体に電流場を与えたときの欠陥による電場の変化を検出する方法がある。前者には磁気探傷法があり、後者には電位差法および渦流探傷法がある。以下に、それぞれの試験法の概要について示す。

#### (1) 磁気探傷法

磁気探傷法は、鉄鋼など強磁性材料の試験体を磁化したとき、試験体表面あるいは表面近傍に存在する欠陥により磁束が妨げられた結果、表面にもれ出てくる磁束すなわち漏洩磁束を検出する非破壊検査手法である。磁気探傷法は、漏洩磁束の検出方法の違いによって、磁粉探傷法と漏洩磁束探傷法に分類される。欠陥のない試験体を磁化したときには、内部には一様な磁束が発生する。しかし、図 B.14 のように表面あるいは表面近傍に欠陥が存在すると磁束線には乱れが生じ、磁束の一部は外部空間に漏洩する。磁粉探傷法では磁粉を混ぜた液体を試験体に散布することにより漏洩磁束を可視化し、欠陥付近に付着した磁粉の模様から欠陥を検出する。漏洩磁束探傷法では、磁気センサを用いて漏洩磁束密度の分布を計測し、欠陥の検出を行う。

試験体を磁化する方法にはさまざまなものがあり、対象物により使い分けられている。磁化するための電流としては、直流および交流電流が用いられる。交流電流を用いた場合には、磁束が試験体表面に集中する表皮効果を生じることに注意する必要がある。また、磁気探傷においては、欠陥の方向が磁場の方向と直角のとき、最も欠陥が検出されやすい。したがって、磁化方法と試験体に生成される磁場の方向を理解しておく必要がある。漏洩磁束探傷法において用いられる漏洩磁束の検出素子としては、ホール素子、磁気抵抗素子、サーチコイル、SMD 素子などがある。近年では、磁気光学素子や超電導量子干渉素子 (SQUID) などを用いる方法も検討されている。漏洩磁束密度の計測においては、材料の磁気特性が同じ場合にも、漏洩磁束密度は欠陥の幅および深さ、サーチコイルと試験体表面間の距離 (リフトオフ) の影響を受けることに注意が必要である。通常の漏洩磁束探傷法では、試験体表面に開口する欠陥による漏洩磁束すなわちニアサイド (nearside) 漏洩を検出する。これに対し、欠陥開口側と反対側に漏洩する磁束を検出するのが、ファーサイド (farside) 漏洩磁束探傷法である。ファーサイド漏洩磁束探傷法は、石油タンク底板の裏面腐食部の検出などに有効である。

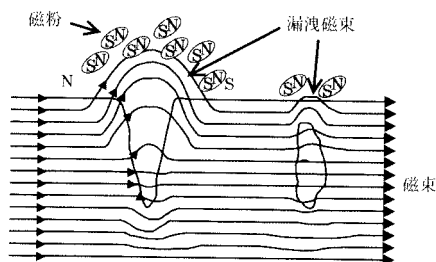


図 B.14: 磁気探傷法

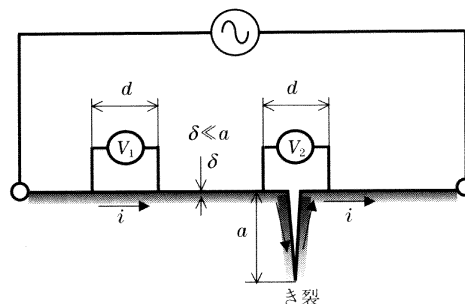


図 B.15: 交流電位差法における表皮効果とき裂長さ測定

## (2) 電位差法

電位差法は、導電性を有する試験体に電流を流したときの試験体表面の電位分布をもとに、欠陥を検出する試験法であり、電気ポテンシャル法、電気抵抗法とも呼ばれる。電位差法では、通常、き裂をはさんで配置した2つの電極間の電位差を測定する。き裂長さに関する定量評価を行うためには、き裂長さとの電位差変化に関する較正関係を実験的あるいは数値解析的に求めておく必要がある。

電位差法は、直流電位差法および交流電位差法に分類される。直流電位差法は、き裂長さとの電位差に関する較正関係をもとに精度よくき裂長さを評価できることから、実験室レベルにおけるき裂進展試験におけるき裂長さ測定に実績を上げた。実験装置が簡単である、較正関係が境界要素法などの数値解析により高精度に求められるなどの特長を有する一方、電位計測の際にプローブで発生する熱起電力の影響を取り除く必要があるという問題もある。直流電位差法では、通常、計測に十分な電位差を得るために大電流を流さなければならない。しかし最近では、小さな電流で高感度にき裂評価を行う、近接端子による直流電位差法が提案されている。また、高温環境下などでは複数き裂が隣接して発生することがあるが、電位差法により複数き裂を評価する手法が提案されている。一方、交流電位差法は、ロックインアンプを用いた計測によりノイズの影響を軽減できる、表皮効果を利用して小電流で十分な電位差を得ることができる、試験体の温度変化による熱起電力の影響がないなどの特長を有している。近年、交流電場解析技術が進歩し、高精度に交流電流場の数値解析を行うことが可能となっている。

表面に開口しているき裂長さの計測には、図 B.15 に示すような表皮効果を利用した交流電位差法が用いられる。表皮効果により、電流が試験体の表層に集中して流れるため、計測に十分な電位差を小さな負荷

電流で取り出すことができる。浸透深さ  $\delta$  に比べてき裂長さ  $a$  が十分に大きい場合においては電流は欠陥に沿って流れるため、欠陥形状を展開することにより、電流分布について 2 次元き裂は 1 次元問題として、3 次元き裂は 2 次元問題として取り扱うことができる。図 B.15 に示したような 2 次元き裂の場合には、き裂長さ  $a$  を次式により求めることができる。

$$a = \frac{d}{2} \left( \frac{V_2}{V_1} - 1 \right) \quad (\text{B.12})$$

さらに、3 次元表面き裂の場合には、表面き裂部分を展開してできる平面図形に対する 2 次元直流電流場の解析により、き裂形状・寸法と電位場の較正関係を得ることができる。同様の方法を用いた誘導電流による検査方法として、集中誘導型交流電位差法が開発されている。

近年、試験体に複数の電極を配置することにより多点の電位分布を計測し、これらから欠陥の位置、寸法を定量的に計測する試みがなされている。また、多点の電位計測データを逆問題解析により処理することにより、欠陥の位置、形状および寸法に関する複数の欠陥パラメータ同定を行い、欠陥の定量評価を行う電気ポテンシャル CT 法が開発されている。き裂パラメータが増えた場合に解の一意性を保障するため、複数の電流負荷の下での電気ポテンシャル分布からき裂を同定する手法も開発されている。さらに、電流負荷を必要としないピエゾ材料を用いたパッシブ電気ポテンシャル CT 法が提案されている。

### B.3.3 (3) 渦流探傷法

高周波交流電流を負荷したコイルを、導電性材料の試験体に近づけると、電磁誘導により試験体内部には渦電流が発生する。試験体に欠陥が存在すると、渦電流分布には乱れが生じる。欠陥の存在による渦電流分布の変化を、コイルのインピーダンス変化として検出する方法が渦流探傷法である。試験体上部にコイルを置く上置コイル法、コイルの内部に丸棒、管などの試験体を挿入する貫通コイル法、および管などの試験体の内部にコイルを挿入する内挿コイル法がある。励磁と検出を 1 つのコイルで行う自己誘導形、励磁コイルと検出コイルを別々にした相互誘導形がある。インピーダンス変化の検出方法としては、コイルのインピーダンス変化そのものを検出する方法、および 2 つのコイルを用いて各コイルのインピーダンス変化の差を測定する方法がある。

渦電流分布の変化は、試験体の導電率、透磁率、試験体形状・寸法、リフトオフなどの影響を受ける。このため、試験コイルのインピーダンス変化は、これら諸因子の影響が総合されたものとなる。コイルのインピーダンスを空心コイルのリアクタンスで除した正規化インピーダンスの実数成分を横軸に、虚数成分を縦軸にとったインピーダンス平面に描く、コイルのインピーダンス変化を示すインピーダンス曲線を解析することにより欠陥評価を行う。

近年、渦流探傷法に用いる新しいセンサの開発が進められている。原子力発電設備の蒸気発生器配管の検査など、高速かつ高精度な探傷が要求される箇所には、マルチコイルプローブが用いられる。マルチコイルプローブは、周方向に複数の検出コイルを取り付けたものであり、周方向および軸方向の探傷を行うことができる。さらに、従来の上置コイルに代わるものとして、励磁コイルと検出コイルを組み合わせることにより、欠陥から発生する渦電流信号のみを取り出すことができるプローブが開発されている。プローブは円環状の励磁コイルと励磁コイル内に設置された矩形の検出コイルから構成される。プローブを用いることによりリフトオフの影響を受けない探傷を行うことができる。さらに、前述の交流電場解析同様に、渦流探傷法における数値解析技術も進歩を遂げ、欠陥信号に関する高精度な数値シミュレーションを可能にしている。

### B.3.4 赤外線サーモグラフィ法

赤外線サーモグラフィは物体から放射される赤外線強度分布を計測し、物体の表面温度分布を画像表示する装置である。本項では、赤外線サーモグラフィによる表面温度計測結果をもとに、物体に内在する欠陥・損傷を検出、評価する非破壊試験法、すなわち赤外線サーモグラフィ法について解説する。

#### (1) 赤外線サーモグラフィ法の原理

赤外線サーモグラフィ法は、熱負荷を与えたときの欠陥による断熱効果のもたらす温度変化を検出する方法、欠陥自体の自己発熱(吸熱)による温度変化を検出する方法、および空洞放射効果に基づく手法に分けられる。

##### (i) 断熱温度場検出法

き裂やはく離などの欠陥部は通常、空気層を形成しているため、断熱効果により欠陥部では熱拡散が妨げられる。その結果、被測定物表面には局所的な温度変化が現れる。例えば、被測定物内部にはく離欠陥が存在するとき、表面から内部に向かう面外方向の熱移動を与えると、欠陥付近の被測定物表面には局所的高温領域が現れる。この形状は内部に存在するはく離形状を反映したものとなるため、温度変化領域の形状をもとに、はく離形状を推定することができる。熱負荷後の非定常温度変化に関するデータからは、欠陥深さを同定することもできる。被測定物表面に開口するき裂の場合には、き裂と交差する面内方向の熱移動を与え、き裂の断熱効果によるき裂面間の温度差を赤外線サーモグラフィで検出することによりき裂の検出が可能となる。しかしながら、表面に開口するき裂に対しては、他にも有用な検査法があるため、あえて赤外線法を適用するとすれば、塗装膜下のき裂など、表面から目視などで確認できない場合であろう。

##### (ii) 自己発熱温度場検出法

欠陥自身が発熱(吸熱)源となっている場合や、外的負荷により欠陥部位で発熱を起こさせた場合に、被測定物の表面温度変化から欠陥を検出する方法である。

##### (iii) 空洞放射効果に基づく手法

表面に開口する空洞状の欠陥が存在するとき、空洞部分における放射率は周囲に比べて高くなる。これは、空洞放射効果と呼ばれている。空洞放射効果による欠陥部分での赤外線計測値の差異を検出することにより、表面欠陥を検出することができる。

#### (2) 赤外線サーモグラフィ法の特長

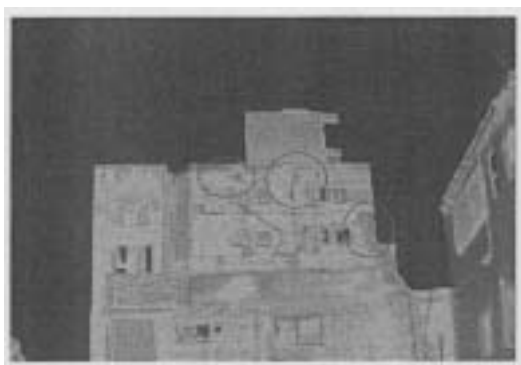
赤外線サーモグラフィ法の特長としては、次のような事柄を挙げることができる。

- 非破壊かつ非接触に、遠隔からの欠陥検査が可能である。
- 短時間に広範囲にわたる検査を行うことができる。
- 光学的計測法であるため、適当な広角、望遠、拡大光学系を選ぶことにより、検査対象の大きさによる制限を受けない。
- 欠陥の位置・形状が温度分布から視覚的に同定できる。
- サーモグラフィと加熱装置以外には、特別な検査設備・環境を必要としない。
- 有害物質を使用しないので、人体と環境にやさしい試験法である。
- 検査対象の材質による制限を受けにくい。
- 表面下のはく離欠陥に対して、特に検出感度が高い。

### (3) 建築・土木構造物への適用

赤外線サーモグラフィ法は、上述のように巨大な構造物の効率的な検査に特に有効に用いられる。その代表例が建築・土木構造物である。建築・土木構造物では、日照や外気温変化によるパッシブ(受動的)に発生する熱移動の下での断熱温度場検出法が、モルタルやコンクリートのはく離欠陥検出に用いられる。日中は日照や外気温上昇により、構造物には表面から内部への熱移動が生じる。図 B.16 に示すように、構造物にはく離が存在すれば、はく離部分の表面温度は健全部と比較して高温になる。逆に夜間には放射冷却や外気温下降により、構造物には逆方向の熱移動が生じ、同図に示すようにはく離部分の温度は健全部分に比べて低くなる。

経年劣化した構造物に多発したコンクリート片はく落事故により、赤外線サーモグラフィ法はコンクリート構造物における第三者被害防止のための有効な構造物診断技術として注目されている。コンクリート高架橋床版下面の検査では、従来の打音検査法と同等の検査精度を保ったまま、検査所要時間を 1/5 以上に短縮できるという試験結果が報告されている。また、トンネルなどパッシブ検査が適用できない構造物に対しては、アクティブな熱負荷による検査が可能である。ハロゲンランプによる強力な加熱装置と赤外線サーモグラフィを搭載した、地下鉄トンネルの検査車両がすでに実用化されている。ただし、コンクリート構造物に対するアクティブ加熱法の適用に際しては、コンクリートの低い熱拡散性に十分に注意する必要がある。検出したい深さのはく離欠陥に熱移動が及ぶ十分な時間経過の後、測定を行う必要がある。アクティブ加熱の特性を活かした手法として、ロックインサーモグラフィ法によるはく離深さ測定法が提案されている。加熱後の温度変動データを正弦波参照信号に同期信号処理した場合の位相情報をもとに、欠陥深さの測定が可能となる。



(a) 昼間の温度分布画像



(b) 夜間の温度分布画像

図 B.16: タイル壁面のはく離検出結果

### (4) 航空・宇宙構造物への適用

航空機のサンドイッチ構造における水浸入部の検出には、自己発熱(吸熱)温度場検出法が効果的に用いられている。航空機の機体は飛行中、低温にさらされるため、浸入した水が氷結する。着陸後機体は徐々に暖められるが、氷結した部位はしばらくの間低温を保ち、温度分布画像において水が浸入した欠陥部位は局所的低温部として検出される。この技術はすでに実用レベルに達しており、試験法に関する認証を航空機メーカーから取得し、旅客機の定期整備に活用している民間航空会社もある。

赤外線サーモグラフィ法は、航空・宇宙構造物に多用されている先進複合材料の欠陥・損傷検出に有用な検査法として注目されている。特に宇宙関連産業の先進国である米国においては、宇宙構造物の非破壊

検査へ赤外線サーモグラフィ法の適用が早くから試みられてきた。図 B.17 は、赤外線サーモグラフィ法を用いた宇宙構造物の検査の様子を示している。

CFRP(炭素繊維複合材料)のように高い熱拡散性を有する材料に対しては、パルス状熱負荷を被測定物に与えた直後の非定常温度分布をもとに欠陥を検出するパルス加熱サーモグラフィ法が有効である。パルス加熱によれば、高い熱流束を瞬時に被測定物に与えることが可能となるため、欠陥による温度変化が被測定物表面に顕著に現れる。この非定常温度場を、熱拡散による温度変化の消失が起こらない短い時間内に計測することにより、高精度な欠陥検出が可能となる。パルス加熱サーモグラフィ法では、熱が被測定物を伝わり欠陥に到達する過程の被測定物表面の温度変動をもとに、欠陥の深さの推定が可能である。

図 B.18 は、衝撃により発生した CFRP のはく離損傷を検出した例である。キセノンフラッシュランプでパルス状の熱負荷を与えてから、0.25 秒後および 0.4 秒後に取得した赤外線画像を示しており、白く見える部分がはく離損傷である。時間の経過とともに熱が深部に拡散するにつれて、深い位置にあるはく離損傷が検出されている。

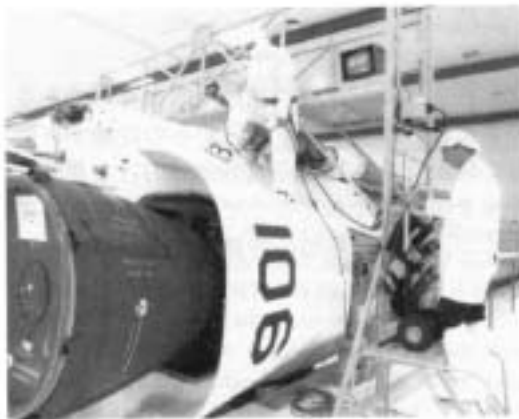


図 B.17: 赤外線サーモグラフィ法による宇宙構造物の検査風景

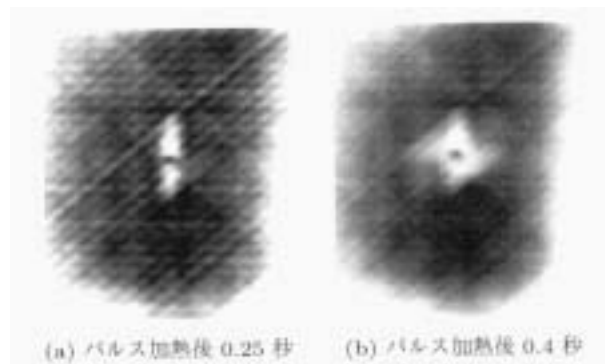
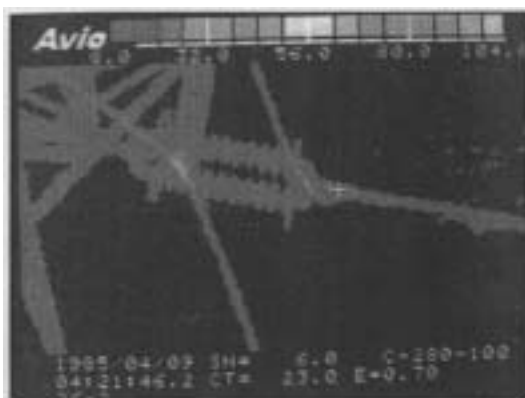


図 B.18: パルス加熱赤外線サーモグラフィ法による CFRP の衝撃はく離損傷検出



(a) 正常な状態



(b) 異常発熱を検知した状態

図 B.19: 送電設備の保守点検への赤外線サーモグラフィ法の適用

### B.3.5 (5) プラント保守への適用

導電性材料に対しては、欠陥部での抵抗変化に起因するジュール発熱検知も有用である。電力設備における送電・配電設備の異常発熱検知による保守検査法は、遠隔からの計測が可能な赤外線サーモグラフィ法が成功を収めた事例の1つである。図 B.19 は送電設備における異常発熱を検出した事例である。あらかじめ正常時の温度分布を測定しておくことで、異常の発生のモニタリングが可能である。き裂の特異電流場に起因するジュール発熱場の特異性に基づく検査手法も提案されている。

### 参考文献

- 1) 矢川元基編：構造工学ハンドブック，pp.460-481，丸善 ，2004