

社会の安全を守るための非破壊検査

Nondestructive Testing for Maintaining Social Safety

加藤 寛
Hiroshi KATO

概 要

本稿では、機械や構造物の安全性を維持するとともに機械類に対する社会の安心感を確保するために重要な役割を果たしている非破壊検査法について概説する。非破壊検査法には、部材の内部に存在するきずの検査を主体とする放射線検査および超音波検査があり、部材の表面ないしは表層部に存在するきずの検査を主体とする浸透検査、渦流検査、磁粉検査がある。各検査法には個々の特徴があり、きずの検出感度向上のために研究が進められてきている。この中でも、超音波測定に関する研究が精力的に進められており、部材内部に存在するき裂検出のみならず表面き裂の深さを推定したり、閉じたき裂を検出するための測定法が開発され、それらの一部はすでに実用化されている。本稿の後半では、筆者の研究室で最近実施された超音波測定に関する研究の一部について紹介する。

1. はじめに

最近、大型設備あるいは機械類の事故が多く報道されている。例えば、トラックのタイヤ脱落事故、原子力発電所の配管等設備のき裂発生、航空機の車輪事故、エレベータ事故など、枚挙に暇がないほどである。更に、今年（平成 19 年）5 月 5 日にジェットコースターの脱線事故があり、人命が失われた。これらの事故の大半は日常の点検が十分に行われていなかったためであり、定められた手順を遵守できない人間の不完全性に起因するものと言えるが、一方では点検が正しく行われていれば防げたはずの事故であろう。

現在、日常の点検はその大半が目視でおこなわれており、部材のきずの有無を目で確認している。しかし、きずの中で最も危険なき裂は目

視で見出すことは非常に困難である。また、微細なきずは他のきずとの識別が困難なものが多い。最も確実な検出法は破壊検査であるが、実機には用いられず、また測定などに時間を要する場合が多い。このため、非破壊的な手段によってきずの検出を行う必要がある。

本稿では、最近その重要性が認識されてきた非破壊検査技術について、その概要を述べるとともに、筆者の研究室で実施された研究の一端を紹介していく。

2. きずと欠陥

部材に存在するき裂や空孔、あるいは異種介在物などは部材の強度特性を低下させる要因でもあり、できるだけ排除しなければならない。しかし、そのすべてを除くことはできず、このため、ある基準を設けて、基準値を超える寸法

のものを排除している。(社)日本非破壊検査協会では、これらを区別するため、「きず」と「欠陥」を以下のように定義している¹⁾。

きず (flaw) : 非破壊試験の結果, 明らかに異常と判断される不連続部。

欠陥 (defect) : 仕様書などで規定された判断基準を超え, 不合格となるようなきず。

以下の説明ではこれらの用語を適時用いていく。なお, 上記の「不連続部」とは, 「非破壊試験における指示が, きず, 組織, 形状などの影響によって健全部と異なって現れる部分」と規定されている。不連続部ときずの関係を図1に概略的に示す。

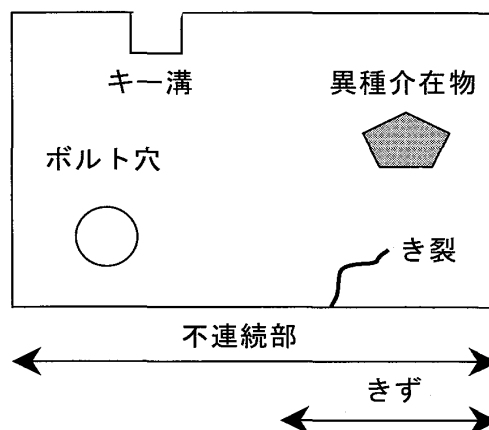


図1 不連続部ときずの関係

表1 非破壊検査法の分類

きずの種類	非破壊検査法	略記号
内部きず	放射線透過試験	RT
	超音波探傷試験	UT
	アコースティックエミッション検査	AT
表面きず	磁粉探傷試験	MT
	浸透探傷試験	PT
	渦流探傷試験	ET
	赤外線サーモグラフィ	IT
	目視検査	

3. 非破壊検査とは

きずなどを非破壊的・非侵襲的に検出する技術を「非破壊検査 (NDT)」と総称するが, この非破壊検査技術を学術的立場から発展させていくための組織として (社) 日本非破壊検査協会が設立されている。「協会」の名称ではあるが, 文部科学省認可の学術団体である。非破壊検査協会では, 機関紙の発行, 春秋の学術講演会などの学術活動とともに, 「非破壊検査技術者」の認証を行っている。すなわち, 春夏2回の資格試験を実施し, 資格を認証している。平成18年度では年間25,000名を超える受験者があり, 延べで66,000件を超える認証資格を与えている。日本非破壊検査協会, あるいは非破壊検査技術者の認証に関しては, 協会のホームページ²⁾を参照されたい。

さて, 非破壊検査技術 (NDT) であるが, NDTには種々の方法があり, 検出すべききずの位置により, 表1に示すように分類される³⁾。

(1) 内部きずの検出

○放射線透過試験: ガンマ線, X線などの放射線を透過させて試験体内部のきずを検査する方法である。物質による放射線の減衰能の違いにより透過した放射線の強度が場所によ

って異なることを利用している。X線フィルムや2次元センサーなどを用いて2次元測定が可能である。

○超音波探傷試験: 超音波を試験体中に伝播させ, 試験体内部に存在するきずなどを調べる方法である。高い周波数の音波は指向性に優れ, 異種物質の表面から反射してくることを利用している。超音波測定には, 固体内部を伝播する縦波や横波が用いられるが, この他に固体表面を伝播する表面弾性波 (レーリー波) や薄い板材を伝播する板波 (ラム波) などがある。レーリー波やラム波を用いることにより表面に出現したき裂も検出される。

○アコースティックエミッション検査: 材料の損傷に伴って生じる音 (音を発生することをア

コースティックエミッションという)を検出して内部の損傷状態を推定する方法である。音は、物質内部で微視的な割れが発生したり、物質が塑性変形する際に発生する。

(2) 表面きずの検出

○磁粉探傷試験：きずに集積した磁粉を観察して表面きずを検出する方法である。鉄鋼材料のような強磁性体を磁化すると、試験体の表面に散布した磁粉がきずに集まり、きずが見やすくなることを利用している。

○浸透探傷試験：表面に液体を塗布すると表面のきずに浸透し、きずが見やすくなることを利用して、表面きずを検出する方法である。

○渦流探傷試験：渦電流の変化より、表面きずを検出する方法である。コイル等を用いて試験体に生じさせた渦電流が表面きずにより変化することを利用している。電磁誘導試験とも称される。

○赤外線サーモグラフィ：物体表面から放出される赤外線の強度分布が表面あるいは表面近傍の状態に依存することを利用して表層部のきずを検出する方法である。

○目視検査：試験体表面におけるきずの有無を肉眼で検出する方法である。直接観察する場合と拡大鏡を用いて観察する場合がある。

非破壊検査法の中でも、超音波検査法は機器の取り扱いも比較的容易であることから、現場計測に多く用いられてきている。最近では、表面に露出したき裂のサイジング、すなわちき裂深さを評価するための手法が種々開発されている。また、従来は不可能と思われてきた先端の閉じたき裂（閉口き裂）の深さを、超音波の非線形応答を利用して評価しようとする試みも行われている。超音波の非線形応答に関しては、最近、「非破壊検査」の特集号⁴⁾として出されたので参照されたい。

非破壊検査法はき裂計測に多く用いられているが、それ以外の用途にも威力を発揮している。

例えば、自動車部品に用いられる球状黒鉛鋳鉄の強度評価である。球状黒鉛鋳鉄の強度は黒鉛の球状化度に大きく依存しているが、超音波の速度も球状化度に依存しており、球状化するほど音速は速くなる。そこで、音速測定により球状黒鉛鋳鉄の強度判定が行われている。

以下に、筆者の研究室で最近行われている研究の中で、超音波を用いた研究について2, 3紹介する。

4. 事例紹介

4.1 ボルト締結部の疲労き裂の検出

大型構造物や航空機などではボルト締結やリベット締結が多く用いられているが、ボルト穴やリベット穴は応力集中源であり、ここを起点として疲労き裂が発生する危険性がある。また、これらの締結部では、板材同士の擦れ合いによりフレットング損傷を生じ、穴近傍にフレットングに起因するき裂を生じ、破断に至ることがある。これらのき裂発生を検出することは、機器類の安全性から重要であるが、問題はき裂の発生位置がボルト頭やリベット頭により覆われており、き裂発生が目視で観察されないことである。このため、ボルト頭等で隠された位置でき裂を非破壊的に検出する必要がある。

筆者らは、表面弾性波を用いて、ボルト締結部に生じるき裂を非破壊的に検出することを試みてきている。

その結果、ボルト締結力が小さい場合、図2(a)⁵⁾に示すように、ボルト穴縁から疲労き裂が進展していき、破断に至る。これに対して締結力が大きくなると、図2(b)に示すように、ボルト穴近傍のフレットング損傷を受けた領域の端部に複数の微細き裂を生じ、合体して成長していき、破断に至ることがわかった。

そこで、図3に示すように、試験片に超音波探触子を取り付け、疲労試験中の超音波測定を行った。この結果、き裂の発生位置がボルト頭

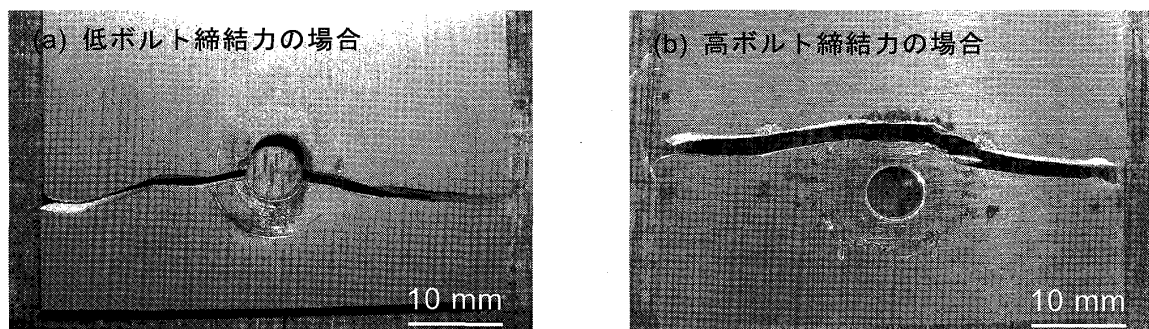


図2 ボルト締結部からのき裂発生・進展状況

に隠されているにもかかわらず，表面弾性波により検出できることがわかった．図4に，フレッシング損傷き裂を超音波検出した例を示す．表面弾性波の強度分布には，試験片端部 (E)，ボルト穴縁 (BH) などからの反射波が観察される．疲労回数 12.5 万回で，ボルト穴の手前にき裂からの反射波が出現している．

4.2 Al 合金ダイカスト中の破断チル層の検出

近年，アルミニウム合金ダイカストが自動車用エンジン等に用いられてきているが，ダイカスト中に鑄造時の欠陥が含まれるとその欠陥を起点としてき裂を生じ，破壊に至る危険性がある．このため，ダイカスト中の鑄造欠陥を除去するための努力が行われてきているが，完全に除去するには至っていない．鑄造欠陥の中でも，異常組織の一種である破断チル層はダイカスト製品の機械的性質を大きく低下させることから多方面の研究が進められてきているが，その検出は困難であった．図5に，破断チル層の例を示す．

著者らは超音波を用いて破断チル層を検出することを試み，その可視化に成功した⁶⁾．Al 合金ダイカスト平板 (板厚: 4 mm) のほぼ板厚中央部を，超音波顕微鏡を用いて撮影した例を図6に示す．音響画像中に分散する細かい白点は，Al 合金の成分である珪素 (Si) の結晶粒である．また，白い (すなわち，高輝度の) 切片状の部

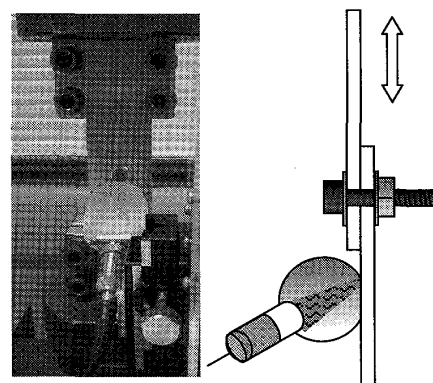


図3 ボルト締結試験片における疲労試験中の超音波測定

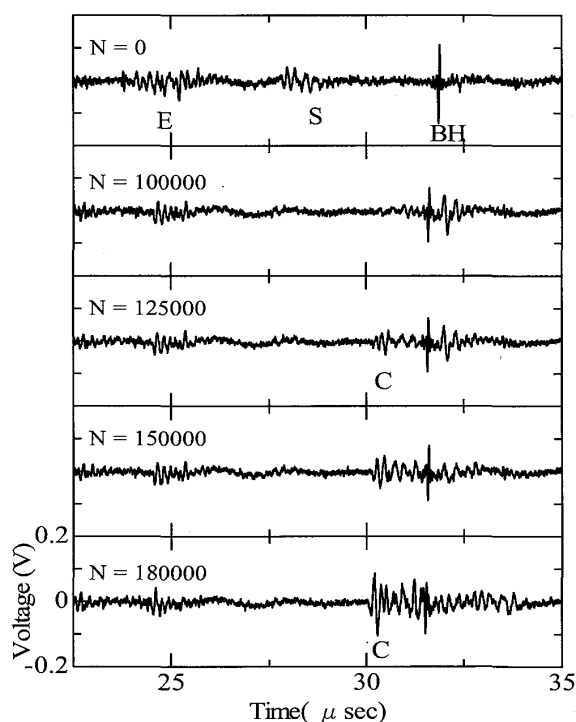


図4 疲労試験中の超音波波形の変化

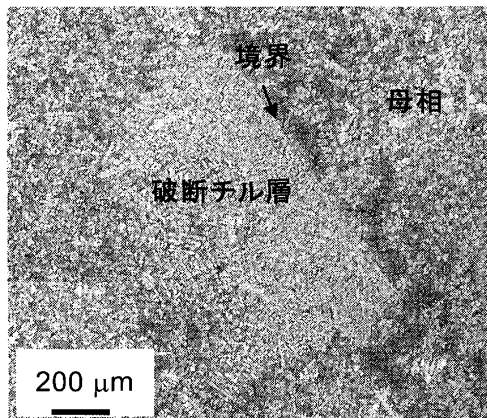


図5 破断チル層の例

分が見られるが、断面観察と比較した結果、この部分は破断チル層の初期凝固面に形成された酸化被膜であることがわかった。すなわち、酸化膜は母相と音響特性が大きく異なることから、大きく反射して画像中で白く観察される。酸化膜に隣接する黒い（すなわち、低輝度の）領域は、破断チル層の本体部分である。破断チル層はAl合金溶湯が急速に冷却されてできるため、母相にくらべて微細な組織となっている。このため、超音波の散乱が少なく、音響画像中に暗い領域として観察される。

超音波顕微鏡を用いてダイカスト平板内に存在する破断チル層が可視化できることがわかったので、破断チル層を中央部に有する試験片を製作し、引張試験⁷⁾を行った。その結果、図7に示すように、破断チル層の面積が増加するに従って引張強さは低下していった。特に、破断チル層が表面に露出している場合にはその低下割合は内部のそれに比して大きいことがわかる。図8に破断面を示すが、破断チル層から放射状に筋状組織が広がっており、破断チル層を起点として破壊が進行していったことがわかる。

次に、引張試験のどの段階で破断チル層からき裂が生じるのかを測定⁸⁾した。このため、図9に示すように、水袋を用いて超音波探触子を試験片側面に取り付け、試験片を引張変形させながら、連続的に超音波測定を行った。その結

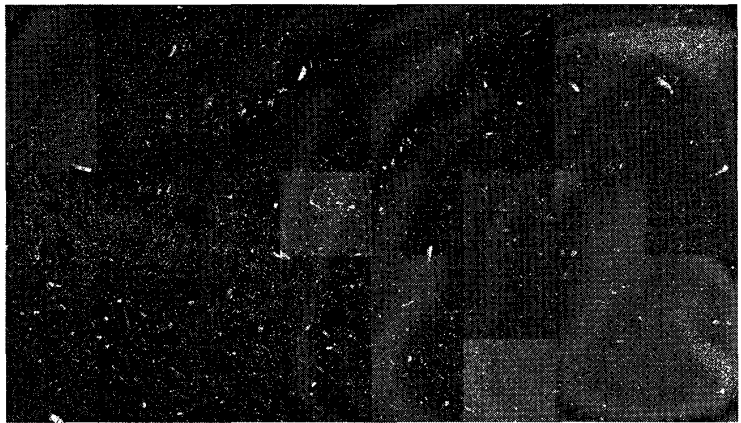


図6 音響画像の例

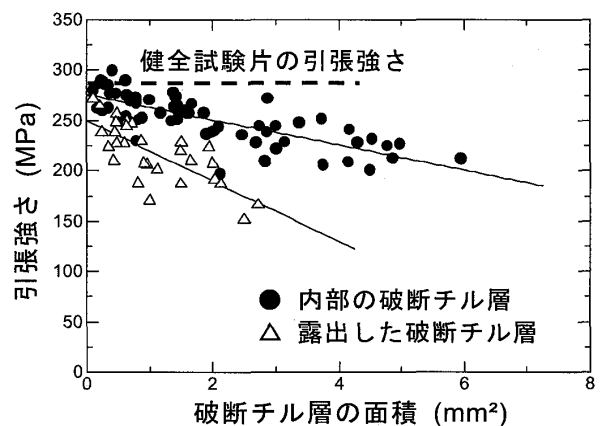


図7 引張強さと破断チル層面積との関係

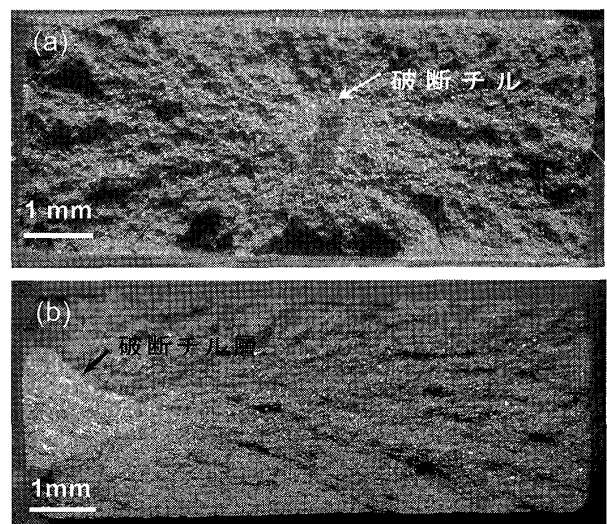


図8 内部の破断チル層(a)および露出した破断チル層(b)を起点とする破壊の例

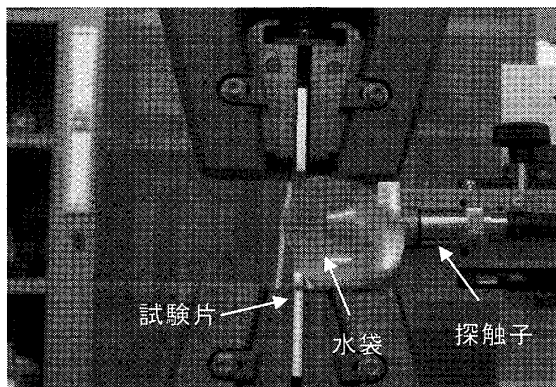


図9 ダイキャスト試験片の引張試験中における超音波測定

果, 図10に示すように, 破断チル層からの反射波の向きが引張試験の途中 (191 MPa 前後の引張状態) で逆転しており, この段階で破断チル層が母相から剥離し, き裂を生じたことがわかった。

4.3 はんだ接合界面における界面き裂の観察

自動車等の機械類には制御のために電子機器が搭載されているが, 電子回路の導通部であるはんだ接合部は繰り返しの負荷や温度サイクルを受け, 次第に劣化していく。場合によっては, 疲労き裂を生じ, 断線する場合もある。このような事故を防止するために, はんだ接合部の疲労特性や熱疲労特性に関して多くの研究が進められてきている。

著者らも, 2枚の銅板を Sn-Ag-Cu 合金はんだ材 (5 × 5 mm 程度) で接合させ, 接合界面にせん断荷重を繰り返し与えて, 接合部の疲労損傷状況を調べてきている。超音波顕微鏡により得られたはんだ接合界面の音響画像を, 破面の走査型電子顕微鏡 (SEM) 写真と比較して図11に示す⁹⁾。図中のNは疲労繰り返し数を示す。音響画像と SEM 写真を比較することにより, 接合領域中の未接合部分は白色領域として観察されることがわかる。接合領域の外周部にき裂が観察されるが, この外周き裂の進展状況を明

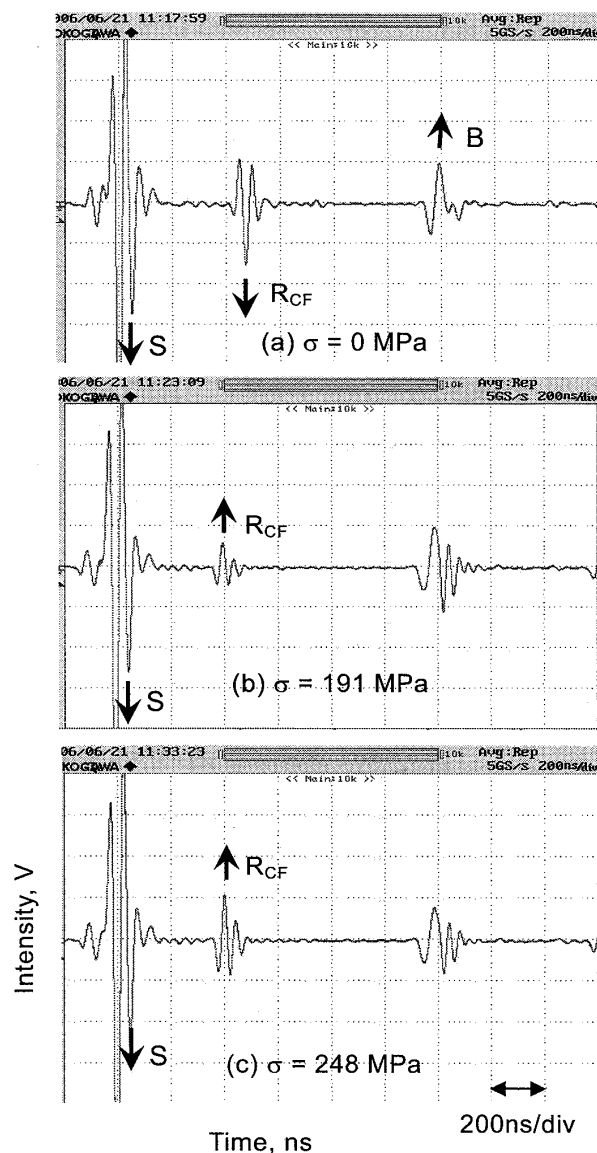


図10 破断チル層を内在する試験片における引張試験中の超音波波形の変化

確にするため, 初期の音響画像との差を取った。結果を ΔI_N として図中に示しているが, 疲労回数の増加に従って外周き裂が内部に向かって進行していく状況が明確に観察される。

次いで, 音響画像から接合領域の面積を求めた。結果を図12に示すが, 初期接合面積 (図中の N_f は疲労寿命) によらず, 疲労回数の増加に従って一様に減少していき, ほぼ一定の接合面積で破壊を生じている。

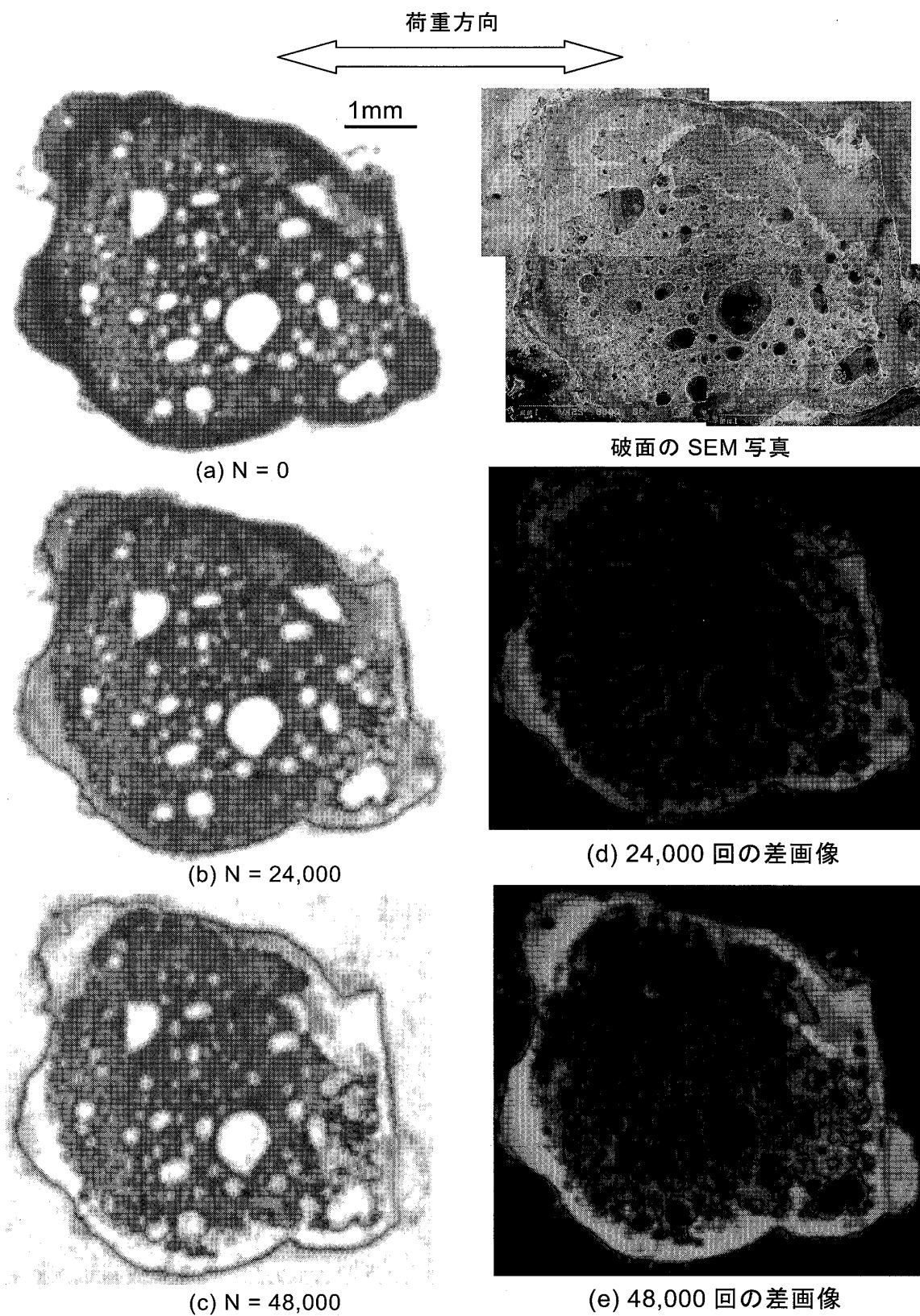


図 11 はんだ接合部の音響画像と SEM 写真の例

5. まとめ

機械や構造物は経年的に劣化していき、ある時期になるとき裂を生じて、最終的に破壊に至る。従って、き裂の発生の有無、あるいは発生したき裂の寸法を非破壊的に評価することは、事故の発生を防止するために必要不可欠である。このため、種々の非破壊検査法が考案され、実用化されてきているが、特に超音波測定法は現場測定の容易さのため、多くの現場で使われてきている。本稿では、非破壊検査の概要と、筆者の研究室で行われている最近の事例を紹介してきたが、これらが非破壊検査に対する読者の理解に対して少しでもお役に立てば幸いである。

参考文献

- 1) 日本非破壊検査協会編：非破壊試験用語辞典，養賢堂，p. 34, p. 44 (1990.5)
- 2) <http://www.soc.nii.ac.jp/jsndi/>
- 3) 例えば，日本非破壊検査協会編：新非破壊検査便覧，日刊工業新聞社，p. 3 (1992.10)
- 4) 琵琶志朗ら：「特集 非線形超音波法による非破壊検査・評価」，非破壊検査，第 56 巻第 6 号，pp. 273-302 (2007.6)
- 5) S. Wagle, H. Kato and K. Kageyama: "Ultrasonic detection of the fatigue crack initiated at a deep notch and a bolt hole", Proc. Advanced Technol. Exp. Mech., Fukuoka, (2007.9), (in press)
- 6) A.K.M. Aziz Ahamed, H. Kato and K. Kageyama: "Acoustic visualization of cold flakes and crack propagation in aluminum alloy die-cast plate", Mater. Sci. Eng. A, vol. 423 (2006), pp. 313-323 (2006)
- 7) A.K.M. Aziz Ahamed, H. Kato and K. Kageyama: "Effect of casting defects on mechanical properties of aluminum alloy die-casts (ADC 12)", Proc. WFO Technical Forum, Düsseldorf, (2007.6)

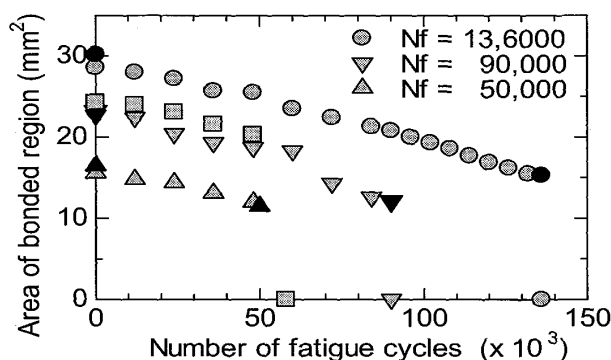
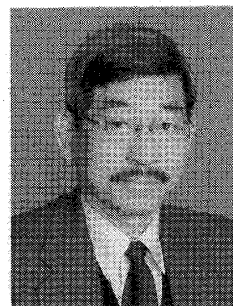


図 12 音響画像から推定したはんだ接合部面積の変化

- 8) A.K.M. Aziz Ahamed, 加藤 寛：「引張試験中の ADC12 アルミニウム合金ダイカストにおける破断チル層を起点とするき裂開口の超音波検出」，鋳造工学（印刷中）
- 9) 加藤 寛，小林寛嗣，蔭山健介：「鉛フリーはんだ接合材における疲労き裂の音響可視化」，銅及び銅合金，第 45 巻，第 1 号，223-336 (2006)

（かとう ひろし／埼玉大学）



加藤 寛

埼玉大学大学院理工学研究科教授。1976 年 3 月東京大学大学院博士課程修了。1976 年 4 月埼玉大学理工学部機械工学科助手を経て，2006 年 4 月から現職。材料の力学特性評価，材料接合，などに関する研究に従事。工学博士。日本非破壊検査協会，日本鋳造工学会，他会員。日本非破壊検査協会会長，日本鋳造工学会理事