

非破壊検査の改善についての1提案

江川 幸一*

(平成12年10月31日 受理)

A Suggestion for Improving Nondestructive Inspection (NDI) Method

Koichi EGAWA*

Here, the author gives a suggestion for improvement of present NDI method, putting emphasis on introducing new concepts: one is fracture mechanics and another one intelligent materials / structures. The former will serve for establishing a new judgement rule of inspection results and the latter for developing a new maintenance inspection.

Key words: nondestructive inspection (NDI), improvement, fracture mechanics, intelligent structures

1. はじめに

非破壊検査は検査対象である製品、主として部品や部材、を破壊せずにその良否を判断できる優れた特徴を持つために、広く産業界で使用されている。これは自然界に存在する素材を加工して新しく形のあるものを生産する工業技術によって市場に出される製品が、必ず経済的な特性を持つことを要求される、すなわち、ある一定の性能を満たし、しかもその生産に要する費用は可能な限り低減することが求められるためである。非破壊検査はその運用上から3種の用途に分けられる。1つは工業製品製作の各ステップ、例えば鋳造、鍛造、圧延、溶接、切削などの加工、を進めるごとにその半製品が要求に合致するものであるか否かを検査する、すなわち品質管理に利用する場合である。第2は発注者やユーザが、求める製品が設計された性能を持って安全に使用しうることを受取り時に確認するために行う受入検査、すなわち品質保証としての使用である。第3は最終使用者が、製品や設備の使用中にその安全性を確認するために常時または定期的に行うもので、破損による危険を未然に防ぎ、災害を無くすために行う保守検査、あるいはメンテナンスとしての使用である。

2. 現用の非破壊検査に対する改善の要求

現存の技術は実際に実用性があるために使用されているのであるから、これが不十分と

*機械制御システム工学科 教授

されるのは、次のような新しい事態の発生による。

(1) 適用範囲の拡大

たとえば鉄鋼などの金属材料の溶接部の検査では十分であった装置や技術が、新しく複合材料が出現したために、そこで要求される非破壊検査に適用できない、あるいは満足する検査結果が得られないなどの理由で不十分となった。

(2) 要求精度の増大

たとえばファインセラミックスの出現によりきずやボイドの検出精度を大幅に向上させることが要求され、従来の技術では適応できずに不十分となった。

(3) その他

・測定環境の拡大

たとえば材料の耐熱度の増大に伴うより高温域での測定の要求に適応できない。

・測定物の形状の複雑化

たとえば三次元曲面の自動検査の要求が新たに発生した。

・検査速度の増大

検査の機械化、自動化の要求が新しく発生した。

・データ処理の迅速化など

これらの新事態に対応するべき要求の一例として、新材料の出現により求められている非破壊検査の例を表1に示す。

表1 新材料に求められる非破壊検査¹⁾

各種材料とその製品	検出すべき欠陥
〔ファインセラミックス〕 高温用タービンブレード シリンダーライナー ターボチャージャー メカニカルシール ベアリング 軸受 工具 糸道	曲面形状を持つ材料の表面および内部に存在する各種の微小欠陥（～10μm、空孔・異物・割れ・粗大結晶粒等）の検出、 セラミックスコーティングの剥離、密着度等の検出、グリーンステート（焼結前）セラミックス中のボイド、介在物、異常粒等の検出、 パウダー中の異物の検出
〔複合材料〕 宇宙・航空・自動車用部材 電磁シールド材 プレーキシュー ピストンリング	内部の多様な欠陥の検出（空孔、異物、マトリックスの割れ、繊維とマトリックスの解離、層間の非接着、剥離、繊維破断等）、 ハネカム、構造の剥離部・密着度等の検出、 衝撃力により生じた微細クラック等の検出。
〔コーティング〕 耐摩耗、耐腐食、耐熱用のメタリック、 セラミックス、TiN、ダイヤモンド等のコーティング	コーティングの剥離、密着度、クラックの検出
〔金属系新素材〕 箔金属 傾斜機能材料 繊維強化金属 粉末冶金合金 表面改質金属 アモルファス金属	内部および表面の各種欠陥（ボイド、割れ、疲労き裂等）の検出

3. 非破壊検査技術の改善と新開発

現実を使用している技術から一歩前進する方法としては、次の3つが考えられる。

- (1) 現存の技術の不十分な点を克服する目的で、周辺の科学や技術の成果を取入れ、改善する。
- (2) 従来から知られていた物理現象を、最新の技術を適用して新しい非破壊検査技術とする。
- (3) 全く新しい考え方に基づいて技術を組立て直す。

この3つの方法のやや具体的な説明と実現の可能性および影響についてまとめたものを表2に示す。また改善および開発を求められている非破壊検査技術を表3に示す。これら個々の詳細については文献²⁾に依っていただきたい。ここではその1例としてサーモグラ

表2 非破壊検査の3つの改善法

区分	内 容	実現の可能性	影響する範囲
(1)	例えば超音波法の内の1種類の技術の改良・改善	大	小
(2)	例えばA Eのような1種類の非破壊検査技術の新規開発	中	中
(3)	例えば保守検査全体に及ぶような1分野の非破壊検査技術全体または全非破壊検査技術の改変, 改良	小	大

表3 開発や改善を求められている非破壊検査技術¹⁾

超音波分野	<ul style="list-style-type: none"> ・ピコ秒超音波法 ・SLAM ・超高周波超音波法 ・共振法 ・レーザー超音波法 ・電磁超音波法 ・総合化A E法 	<ul style="list-style-type: none"> ・マルチビュー超音波法 ・開口合成法 ・超音波顕微鏡法 ・フェーズドアレイ超音波法 ・超音波スペクトラム分析法 ・超音波音速測定法 ・超音波減衰測定法
放射線分野	<ul style="list-style-type: none"> ・マイクロフォーカスX線拡大投影法 ・超高分解能X線CT法 ・中性子ラジオグラフィ ・ポジトロンCT法 ・SOR-CT法 	<ul style="list-style-type: none"> ・X線後方散乱法 ・中性子CT法 ・X線応力測定法 ・X線回析法
光・熱利用分野	<ul style="list-style-type: none"> ・レーザー顕微鏡法 ・ミラージュ法 ・レーザースペックル法 ・ホログラフィー法 	<ul style="list-style-type: none"> ・サーマルウェーブ法 ・赤外線TV法 ・PAS ・パルスレーザーサーモグラフィ
電磁気・電磁波分野	<ul style="list-style-type: none"> ・高分解能NMR-CT法 ・マイクロ波法 ・保磁力測定法 ・ファーフールド過流法 ・マルチ周波数過流法 	<ul style="list-style-type: none"> ・磁粉探傷法 ・静電容量法 ・透磁率測定法 ・モアレ干渉法 ・バルクハウゼン法
その他	<ul style="list-style-type: none"> ・三次元曲面物体自動探傷装置 	

ファイ法について触れる。これは従来から知られていた物理現象を最近のエレクトロニクス技術を援用して実用化した例で、表面やその近くの内部に割れ、ポイド、介在物が存在すると、その部分の温度が他と異なることを利用したものである。この区分に入る例としては、他にアコースティックエミッション法がある。

ここで述べた例や表3に示した非破壊検査技術の改善と新規開発とは、薄膜、貼り合わせ板材、複合材料などの新材料の出現、高温中のような測定環境の拡大、そのほか非接触測定や任意形状の自動化測定などの要求に対して出現したものである。これらはいずれも電子技術やコンピュータ技術を導入して、従来の非破壊検査技術では不十分であった点の改善を計る、あるいは古くから知られた物理現象を非破壊検査技術に取り入れて実用化を計るものである。

4. 新しい考え方に基づく非破壊検査技術の新展開(1) —非破壊評価—

非破壊検査では、検査対象物を破壊せずにその中の割れ、ポイド、粗粒、介在物、繊維の方向、接着性、密着性、剥離などを調べるが、非破壊の語から、対象の多くが製品であること、検査の語からは、異常の有無、その大きさと形状、および位置と種類について調べるものであることがわかる。

検査の結果で異常が発見された場合、検査者はその合否、すなわちそのまま販売してよいのか否かを決めねばならず、その判定のためには合否判定基準が存在することが必要とされる。

従来の非破壊検査では検査技術のレベルが十分でなかったため、検査は主として異常の有無の検出に留まり、その大きさや位置が正確に捉えられなかったことと、さらに検査後の欠陥を含む製品の使用の可否を判定する明確な基準が無かったことが大きな原因となって、検査の判定は最も安全側の“異常の発見されたものは全て不良品とする”ことで行われてきた。

しかし、非破壊検査技術の進歩により、現在は検査水準として異常の大きさと位置とをほぼ検出できるようになってきた。

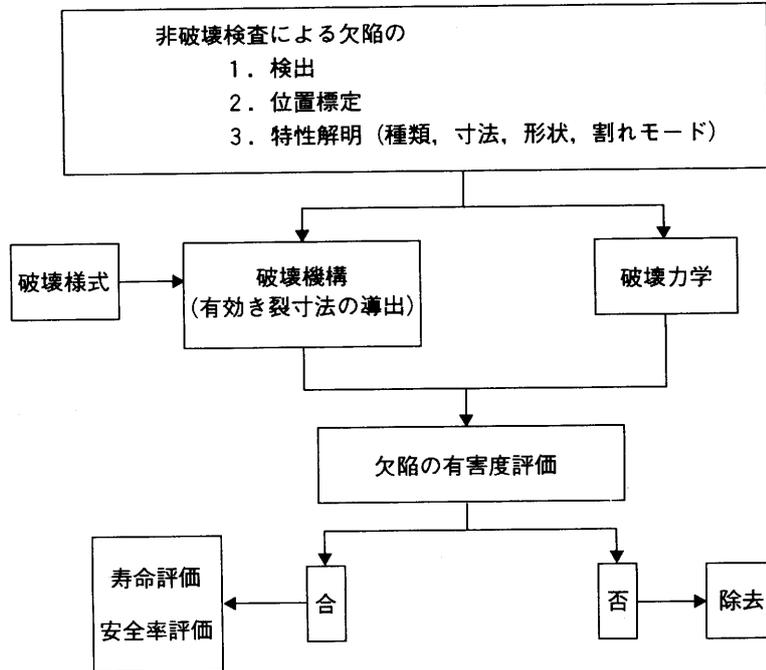
一方、検出した欠陥が材料(製品)の強度に及ぼす影響については、破壊力学の出現により材料中の欠陥が繰返し荷重を受けてき裂を生じて進展する様子を予測し、最終的には部品や部材の寿命をある程度予想することができるようになった。

一つの製品の製作は、先ずその強度と機能の設計から始まるが、ここでは非破壊検査の目的である強度保全の観点から話を強度に限定して進める。強度設計ではまず材料として“きず”の無い完全な材料を取り、その破壊強さを基準として、材料力学によりその形状と寸法とを決定する。

一方、破壊力学は欠陥(き裂)を含む材料を対象とし、そのき裂の近傍のみに適用しうる条件下で①欠陥を持つ材料の破壊応力、②1つの設計応力の下で許容される欠陥の最大寸法、③欠陥が疲労などにより成長する場合にそれが破壊を起こす迄の寿命、などを計算する。

このような検査技術の進歩と破壊力学の出現により、我々は非破壊検査を単なる欠陥検出技術から検査結果の判定をも含む非破壊評価技術へと進展させることが可能となったのである。

表4 非破壊評価の順序³⁾



非破壊評価の流れは表4に示すように、先ず、①材料内部の欠陥の有無を検出し、②その位置を明らかにし、③欠陥の種類を区別し、④個々の欠陥の大きさ、⑤形状（向きを含む）を明らかにする。次に⑥負荷（環境を含む）条件を考慮した破壊様式の下での破壊の機構を明確にして、破壊力学での取扱いにより欠陥の有害度を決定する。続いて、⑦その結果を用いて合否の判定を行ない、⑧合格した製品については安全度や寿命評価を行う、となる。新しい非破壊検査、すなわち非破壊評価を2つに分ければ①～⑤までが非破壊検査の、⑥～⑧までが破壊力学的評価の領域となる。

さらに非破壊評価技術を材料の開発、製造および使用に適用することによって、

- ①新材料開発のスピードアップ
 - ②材料製造のコストダウン
 - ③出荷前および使用中の材料および構造物の品質管理、品質保証、安全性保証
 - ④返品された材料や部品の不良解析
- が可能になるものと予測されている。

5. 新しい考え方に基づく非破壊検査技術の新展開(II) —構造健全性監視—

インテリジェントあるいはスマート（知的）材料・構造と呼ばれる、材料と構造につい

ての新しいコンセプトが出現した。これは一言でいえば、本来、生命の無い工業材料や構造に生体（人体と考えると分かりやすい）と同じ機能を持たせようとするものである。これは現存する航空機、船舶、橋梁、各種の土木構造物やインフラストラクチャなどに生体と同じ機能を持たせることを目標とするものである。（注、これは生体の代用品を作ろうとするロボット工学の行き方とは異なるものであることに注意されたい。）

さて、非破壊検査技術は、すでに述べたように、①製造の各工程ごとに不良品をなくすために行う品質管理、②工場出荷時あるいは受入時に行う受入検査、および③使用中に行う保守検査に分けられるが、①と②を併せて製造管理、③を状況監視とする分け方もある。これらの用途別の分類についてその特徴と主な検査対象とを考えると、およそ表5に示すようにまとめられる。

表5 非破壊検査の種別ごとの特徴と検査対象

	種別	検査者	検査時期	検査回数	検査期間	自動化						
1	品質管理	メーカー	製造の各工程ごと	1回	短期	進展大						
2	受入検査	〃	工場出荷時 製品受入時	1回	短, 中期	—						
3	保守検査	最終使用者	定期的に観察	多数回	長期	—						
	種別	検査対象										
1	品質管理	小型で多量の製品										
2	受入検査	小型, 中型, 大型の組立品										
3	保守検査	大型, 超大型の組立品										
		<table style="border: none; margin-left: 20px;"> <tr> <td style="font-size: 2em; vertical-align: middle;">}</td> <td style="font-size: 2em; vertical-align: middle;">{</td> <td style="vertical-align: middle;">各種プラント, タンク類</td> </tr> <tr> <td style="font-size: 2em; vertical-align: middle;">}</td> <td style="font-size: 2em; vertical-align: middle;">{</td> <td style="vertical-align: middle;">長大橋や高架高速道路など</td> </tr> </table>					}	{	各種プラント, タンク類	}	{	長大橋や高架高速道路など
}	{	各種プラント, タンク類										
}	{	長大橋や高架高速道路など										

非破壊検査技術の革新のために知的材料・構造のコンセプトの導入を考える場合、これらの内のどの分野が最適であろうか。それは大型・超大型の組立品に対して長期間にわたり多数回の検査を必要とする保守検査であると考えられる。

我々はこの新しいコンセプトの導入により現在の保守検査が持っている主要な欠点、すなわち、多くの人手を要する定期検査方式に依っている、費用と工期がかかりすぎる、検査と検査の間の期間に発生する事故に対して対応ができない、警報発生機能が無いなどの改善を計るのである。

このためちょうど人体に神経網があるように対象構造物にセンサ網を張り巡らし、これによって機械や構造物の作動中にも常時監視を行ない、警戒時には警報を発生できるようにする。

さらに人体が神経→脳→筋肉と連繫しているように、検査対象構造物についてもセンサ→電算機能（コンピュータ）→アクチュエータの連繫を作り、コンピュータでは、①安全（緑）、②警戒（橙）、③緊急事態発生（赤）の判断を行ない、警戒段階では精密診断、一時停止、分解修理、補強などを行って第3段階に到らないようにし、緊急時にはアクチュ

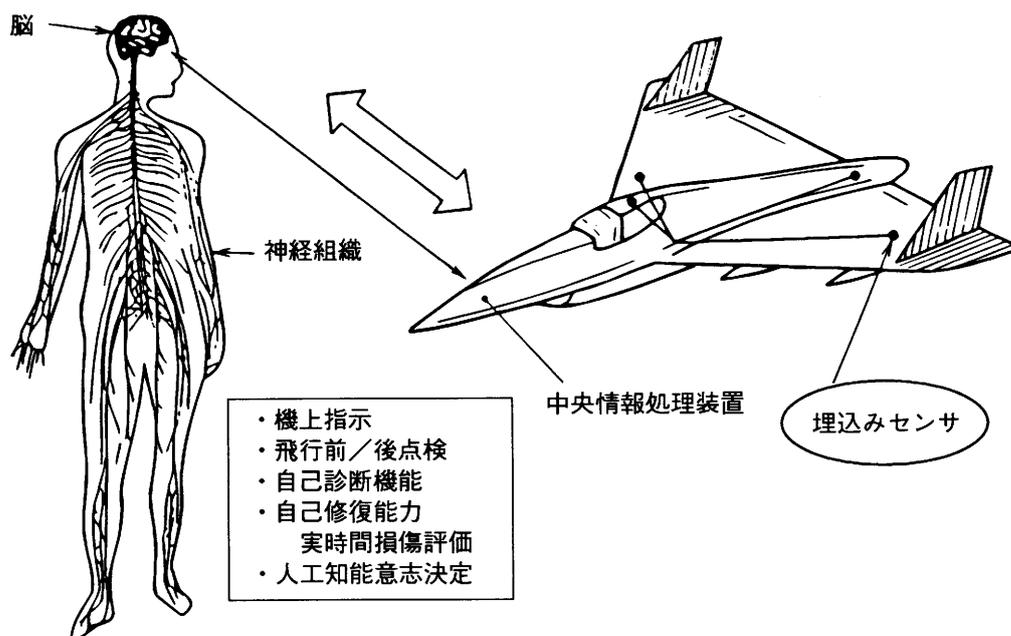


図1 ヘルスモニタリング航空機概念⁴⁾

エータを作動して緊急停止などの処置を取り、検査対象物の使用中の安全性を常時確保しようとする、すなわち構造物の知能化を計るのである。

これらのコンセプトは知的材料・構造の分野で構造健全性監視（略してヘルスマニタリング）と呼ばれているが、その一例を図1に示す。この航空機では製造・運航中の荷重や破損のデータを全て搭載電算機に持ち、自ら点検、診断して修理するなどを指示し、最終的には廃機までを自己決定するもので、まさに無生物である構造物の“揺り籠から墓場まで”の面倒を見るのである。

これは構造物の生体化（これがインテリジェントの意味）の1つの行き方を示すもので、同時にこれこそが多くの人手と時間と費用を要した定期検査方式の保守検査を脱して新しい保守検査（状況監視）とする革新的な目標の1つなのである。

参考文献

- (1) 川島捷宏：超音波 TECHNO, 4 (11), P.15, (1992)
- (2) 非破壊検査協会：新非破壊検査便覧, 日刊工業新聞社, p.626, (1992)
- (3) 榎学：非破壊評価工学, 日本非破壊検査協会, p.21 (1998)
- (4) Gerardi, T. : Health Monitoring Aircraft, J. of Intell. Mater. Syst. & Struc., 2-1 p.375 (1991)