

解
説

特集 非破壊検査を取り巻く国際動向

構造物の性能規定型設計・管理における
検査技術の動向

湯山 茂徳 日本フィジカルアコースティクス(株)

社団法人 日本非破壊検査協会

特集 非破壊検査を取り巻く国際動向

構造物の性能規定型設計・管理における検査技術の動向

湯山 茂徳 日本フィジカルアコースティクス(株)

Current Status of NDT Techniques for Evaluation of Structural Integrity

Shigenori YUYAMA Nippon Physical Acoustics Ltd.

キーワード 性能規定, 仕様規定, 健全性診断, 構造物, RBI, FFS

1. はじめに

現在我が国において、各種構造物の設計・維持管理を行うために、「性能規定」の概念が広く取り入れられつつある。平成13年4月に配付された資料¹⁾によれば、性能規定とは、「対象設備の構造などの詳細な仕様や満たすべき特定の数値、特定の試験等を細かく規定する仕様規定とは異なり、保安の確保上必要な性能や履行すべき手順等の大枠のみを規定するものである。」としている。さらに、仕様規定のように、材料、試験方法等を特定した形で規定していないため、技術開発により新しい材料、試験方法等が開発された場合でも規定されている性能を満足しているのであれば、これらの材料、試験方法等を用いることができる。とある。

性能規定は、航空機において、「損傷許容設計」として適用され、最新型の大型旅客機をはじめ、複合材料製の回転翼ヘリコプタに至るまで、基本設計思想として、一般化されている。また土木構造物では、「耐震設計法」としてこの概念が取り入れられ、地震により構造物が被る被害のレベルをⅠ～Ⅲに分類し、使用者が要求する耐震性能のレベルに対応して設計を行い、構造物を建設することが行われている。

一方、主に金属製構造物で構成される製油所、化学プラントなどにおいては、海外ですでに一般的に適用されているが、我が国では「自主保安」の形で性能規定の概念が実行されようとしている。これは、「構造物の設計・維持管理において、最終的に所定の機能・性能さえ満足すれば、それに至るための方法・プロセス等は問わず、関係者の自主性にすべて委ねられる。」とするものである。これの典型的な適用例として、RBI (Risk Based Inspection API 580²⁾)、および

2000年の1月に発布されたAPI 579³⁾に提示される、FFS (Fitness For Service)の指針がある。FFSによれば、压力容器において、たとえ欠陥があったとしても、その形状、寸法を正確に把握でき、これをもとに破壊力学的に計算される破壊進行過程が評価できるなら、許容欠陥として認め、正しい管理下のもとで特別な作業を行うことなしに操業を継続することができる、ということになる。したがって、仕様規定的に原則として一切欠陥の存在を許さないとする従来の我が国における保守・管理思想とは大きく異なるものである。

本稿では、各種構造物に対する性能規定適用の海外および我が国における動向について簡単にまとめ、それに対する検査技術、そして技術者のあり方について考察してみる。

2. 構造物における性能規定適用の動向

2.1. 航空機

飛ぶためにぎりぎりまで設計を合理化し、機体を軽くするという宿命を背負っている航空機では、使用材料の疲労劣化を避けることができない。航空機の発達は、金属疲労との戦いの歴史であった。航空機の設計思想⁴⁾は、初期の、疲労は防止できる、生じないという安全寿命設計(破壊防止設計)から、部分的に生じたとしても致命的にならない、簡単に交換できるというフェイルセーフ設計に、さらに疲労は避けられないとして設計段階で対策を講ずると同時に、運用中の検査でこれを検出し、修理・交換することを主眼とする損傷許容設計^{5), 6)}へと変遷してきた⁷⁾。

航空機の設計・維持管理は、空を飛ぶという性能を満たすことを最終目的としているため、仕様規定は実情に全く合わず、当然性能規定的に行われている。

2.2 土木構造物

阪神・淡路大震災を契機として、土木構造物の耐震設計法の検討が行われ、耐震設計の性能規定化が行われている⁸⁾。

耐震設計で想定する地震動は想定地震の規模、想定地震源と建設地点との距離、建設地点における地形、地質、地盤などの特性を考慮して定められる。一般の場合、以下の二つのレベルの地震動を設計地震動としてよいとしている。

- (1) レベル1地震動：構造物の耐用期間内に数回発生する大きさの地震動
- (2) レベル2地震動：構造物の耐用期間内に発生する確率の極めて小さい強い地震動

構造物が保有すべき耐震性能は、設計地震動のほか、構造物の損傷が人命に与える影響、地震発生後における避難活動、救急活動、救援活動、生活活動、経済活動等に与える影響、復旧の難易度と工費などを考慮して定めるべきとされる。一般の土木構造物では、地震動レベル1に対して下記の耐震性能1、地震動レベル2に対して耐震性能2または3を満足すればよいとしている。

- (1) 耐震性能1：地震後にも機能は健全で、補修をしないで使用可能な性能
- (2) 耐震性能2：地震後に機能が短時間で回復でき、補強を必要としない性能
- (3) 耐震性能3：地震によって構造物全体が崩壊しない性能

こうした構造物の耐震性能は、構造物を適切な構造にモデル化することで性能規定的に評価される。

2.3 製油所、化学プラント等の金属製構造物

欧米において、構造物の設計・維持管理は従来から自主保安が原則として適用されている。こうした性能規定方式を実現し、一般化するために、多くの年月をかけてデータベースが作成され、例えばAPIにより、RBI、FFSとして、その概念、手順、評価方法等が提示されている。

2.3.1 RBI

現在、存在するリスクを適切に評価し、装置の安全性、信頼性を高め、さらに経済効率を追求しながら検査の最適化を図るための手法として、RBIが注目を浴び、自主保安を実行するための手段として、様々な分野で適用されようとしている。こうした適用例の一つとして、タンク底板の腐食損傷診断がある⁹⁾。

タンク底板の状態評価にAE試験を適用しようとする試みは、欧米各国で1980年代末ごろよりかなり頻繁に行われてきた。こうした中で、今日確立されている試験法、評価法が発達したのは、主としてイギリス/オランダを中心とするグループにおいてである。1989年、イギリスのPhysical Acoustics Ltd. (PAL)社は、メジャー系石油会社の要請により、タンク底板の状態を評価する手法として、AE試験の適用を試みた。これにより、適切なAEセンサー/計測法を用いれば、底板で発生する微弱なAE信号を検出できること、またそれは底板の腐食損傷状態と強い相関を持つことが明らかになった。この知見の公表は大きな反響を呼び、1990年代半ばまでには、石油メジャー各社、また大手化学会社の十数社からなるAEユーザーズクラブが結成され、試験結果のデータベース化が精力的に行われるようになった。1998年には、シェル社、ダウケミカル社などの百数十例の試験事例からなるデータベースをもとに、タンク解放前に実施されたAE試験結果と、開放後の磁束漏洩試験(MFL)による全面検査結果の照合が行われ、両者には非常に良好な相関のあることが確認された¹⁰⁾。この結果をもとに、AE試験の信頼性は検証されたものと考えられ、以後その適用数は世界各国で急速に増加している。

一方、我が国では、石油公団/HPI、NEDO、消防研究所を中心とする研究グループなど、三つの研究グループ/機関により、直径10m程度の小型製品タンクから、直径80mを超える大型原油タンクまで二十基余りのタンクに対してAE試験が行われている。現在我が国独自のデータベース化を行う動きもあり、今後その試験数は、急速に増加するものと考えられる。

欧米では上述のデータベースをもとに、AE試験結果と底板全面探傷結果との比較対照を行い、グレードAと判定されたタンクは補修を必要とせず、開放検査を行う必要がないと判断されるため、RBIの第1段階として、開放検査が不必要なタンクのスクリーニングに適用し、検査が必要となるタンク数を限定することにより、メンテナンス費用の大幅な削減を可能にしている。

しかしながら、我が国では事情が異なり、またメンテナンスに対する考え方も欧米とは異なる点があることから、RBI/自主保安の手段として欧米で構築されたデータベースをそのまま適用するには無理があるとの指摘がなされている。したがって、欧米の事例を参考にしながら、国情にあったデータベースを構築するために、できる限り多くの試験を行うことが急務と考えられている。

2. 3. 2 FFS

API 579 によれば、FFS の定義として、「Fitness - for - service is defined as the ability to demonstrate the structural integrity of an in - service component containing a flaw or damage.」とある。すなわち、直訳するなら「FFS とは欠陥あるいは損傷を有する供用中の装置における構造物健全性を説明する能力」となる。また、その目的として、検査で確認された欠陥を有する加圧機器において安全操業の継続を保障するために、運転・補修・取り換えなどの決定をする手段として使用されたと述べている。さらに、欠陥や損傷がある場合でも、FFS 評価により、現在の操業条件で問題を生じないなら、適切な検査方法あるいはモニタリング法を適用することにより、引き続き操業を継続できると述べている。したがって、FFS は、装置に存在する欠陥を性能定期的に解析し、許容欠陥寸法等を評価することにより、運転継続、補修、取り換え等を合理的に判断し、安全性、効率性を高めるための概念・方法であるといえる。

こうした考え方は、すでに我が国において、特定屋外貯蔵タンクの内部点検等の検査方法に関する消防法¹⁰において導入されている。この法令ではタンク底部溶接部探傷装置によりコーティング上から溶接部試験をした場合に、側板とアニュラ板の溶接継手について許容欠陥寸法が示されており、この寸法以下なら火災予防上支障がないと認め、法令の規定を適用して、補修を行わなくても引き続き使用可能であるとしている。こうした許容欠陥寸法を認めた事例は今のところほかになく、この概念の適用は、極めて先進的なものと考えられる。

さて、API 579 のセクション 3 では、FFS を行う上で欠陥の検出確率の重要性が強調されている。すなわち、その評価の精度を大きく左右するのは、適用される検査法における最小欠陥寸法の検出限界であり、精密かつ正確な検査の必要性が指摘されている。図 1 に、UT、MT、AE など各種検査法に対して、欠陥深さとその検出確率との関係が、模式的に示されている。この図で、AE と UT の組合せによる検査が欠陥の小さい場合に検出確率が最も高いことが示され、興味深い。

セクション 9 では、装置に存在するき裂状欠陥の評価手順が示されている。評価レベルは、評価を行う技術員の能力や、解析内容に応じ、レベル 1 からレベル 3 まで区分けされる。

レベル 1 は簡便であり、構造不連続部は対象外となり、単純な平板または円筒状の構造に対してのみ評価が行われる。

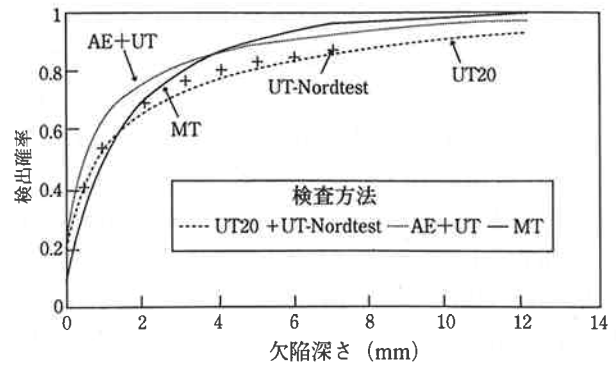


図 1 各種非破壊検査法における欠陥深さとその検出確率との関係 (API の好意により API 579 の Figure 3.5E を引用)

レベル 2 では、図 2 に示す FAD (Failure Assessment Diagram) を用いた解析が行われる。FAD 線図で横軸は、降伏応力に対する負荷応力の比 (荷重比: L_r)、また縦軸は破壊靱性値に対する応力拡大係数の比 (靱性比: K_r) である。評価は、レベル 1 の場合と同様に、運転条件、荷重条件から欠陥にかかる一次応力、二次応力 (残留応力) を決定し、 L_r および K_r を計算することにより実施される。FAD 線図において、計算値が区分線の外か内かで欠陥が許容可能か否かが判定される。

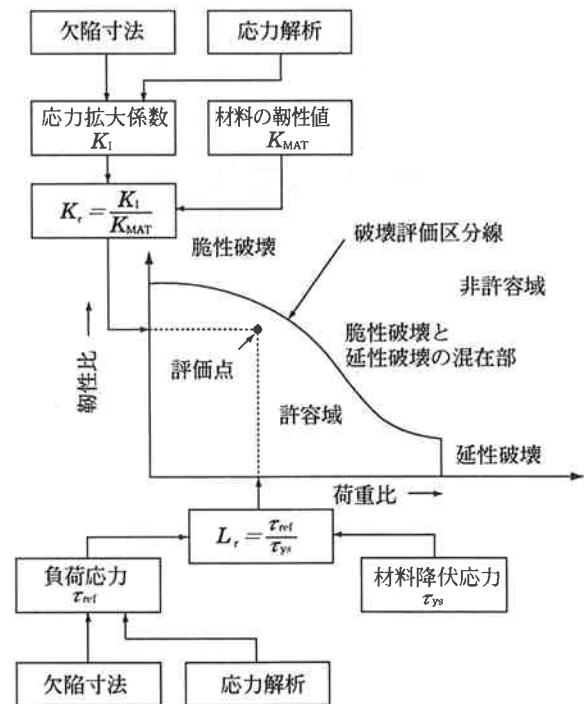


図 2 API の FFS における FAD (Failure Assessment Diagram) 解析 (API の好意により API 579 の Figure 2.2 を引用)

レベル3は、最も高度な評価であり、運転中に疲労やSCCなどの原因で連続的な欠陥成長が予見される場合に必要となる。さらに、こうした成長性欠陥の存在が許容される場合、適切な非破壊検査手法を用いて、作業中のモニタリング、あるいは作業停止時の検査が必要であるとしている。

現在アメリカにおいて、PERF (Petroleum Environmental Research Forum) を中心に AE 法を FFS に適用しようとする試みが行われている¹²⁾。図3にそのブロック図を示す。まず第1段階として欠陥の発生・進展に敏感でそのおおよその位置を評価可能なAE法により、構造物のグローバル診断が行われる。次に検出された欠陥に対してUT法などを適用し、寸法、形状、方向などの定量的評価を実施し、そのデータをもとにレベル2評価 (FAD解析) を行う。こうして許容欠陥と非許容欠陥が識別され、作業中に連続的成長が予見される許容欠陥に対してはレベル3評価を適用し、AE法による連続監視を実施して、実時間でその欠陥が許容

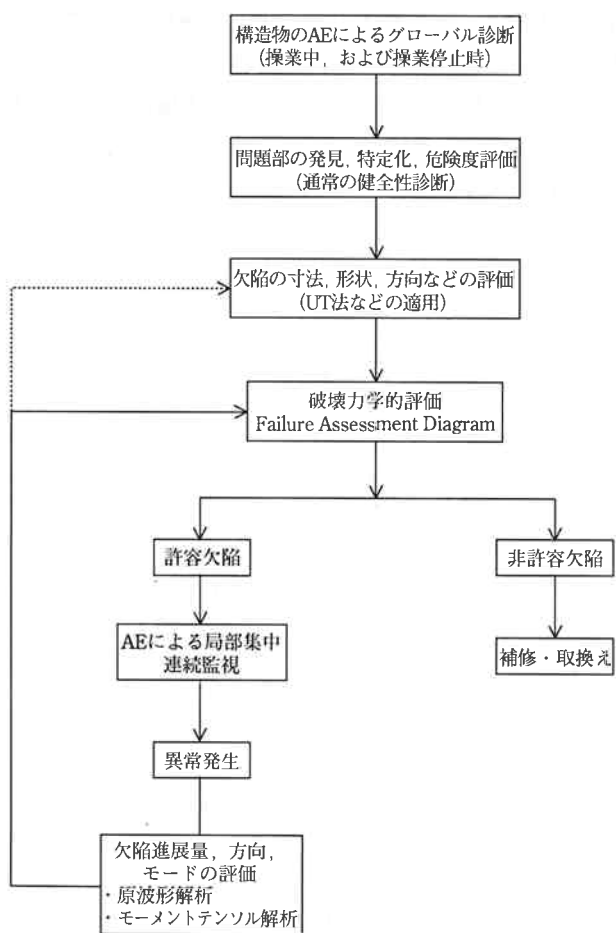


図3 連続作業中の構造物における安全確保を目的とするAE法適用によるFFS

範囲にあるか否かを検証する。

こうした試みは最近始まったところであり、まだ研究段階にある。しかしながら、許容欠陥を有する構造物において、不要な作業停止を行わず、安全かつ効率的に連続作業を実施するための有力かつ合理的な評価法として、発展が大いに期待されている。

3. おわりに

これまで我が国において構造物の保守・検査は、仕様規定的に行われてきた。これは、例えばある部材において、それが満足すべき寸法や形状、そして検査法に至るまで、あらかじめ仕様規定的に定められており、検査技術者は定められた仕様を検査対象が満足しているかどうか調査し、保守は定められた仕様を満たすために行われる。

一方、欧米においては、APIのRBI、FFSに関する指針に見られるごとく、維持・管理は合理化、効率化の目的で性能規定的に実施されている。性能規定において、求められるのは最終的な結果であり、それに至る手段・プロセスの選択はすべて関係者の自主性に任される。したがって、管理者は最も効率的で有効な手法を利用し、最も安全性・信頼性の高い管理を自主的に行うことができるようになる。

仕様規定下において検査技術者に求められたのは、基本的には例えば欠陥の寸法や形状を正確に評価しそれを報告することであり、その後の対応については、仕様規定的に定められた管理方法に従い、管理者が行ってきた。しかしながら、性能規定下の保守・管理において、検査技術者に必要とされる能力は、当然のことながら欠陥を正確に評価することのみにとどまらず、管理者と協力しながらその欠陥が持つ本来の意味を理解し、現在そして将来にわたる安全性・リスクを評価できる総合的エンジニアリング力なのではなかろうか。

参考文献

- 1) 「高圧ガス保安法における技術基準の性能規定化について」、経済産業省、原子力安全・保安院保安課、平成13年4月17日配付資料
- 2) Recommended Practice for Risk-Based Inspection, API 580, API, (2001)
- 3) Recommended Practice for Fitness - For - Service, API 579, API, (2000)
- 4) 小林英男：リスクベースの工学/技術、日本非破壊検査協会、保守検査シンポジウム講演論文集、pp.31-44, (2001年6月28, 29日)

- 5) 石川隆司, 林 洋一, 松嶋正道, 杉本 直: 航空宇宙用複合材構造の疲労等による損傷の可視化, 可視化技術, 12(47), pp.21-28, (1992).
- 6) 板東舜一, 松原 剛, 西川弘泰, 座古 勝: ヘリコプター・ローターシステムの損傷許容設計法に関する考察, 日本複合材料学会誌, 27(1), pp.77-84, (2001)
- 7) 湯山茂徳: 航空機における非破壊評価技術としてのAE法適用の現状と将来, 非破壊検査, 44(10), pp783-790, (1995)
- 8) 岡村 甫: 性能照査型基準について(耐震設計), コンクリート工学(特集*仕様規定から性能規定へ), 35(11), pp.6-7, (1997)
- 9) 関根和喜, 橘川重郎, 山田 實, 湯山茂徳: タンク底板のAE法による腐食損傷診断, 日本非破壊検査協会, 保守検査シンポジウム講演論文集, pp.77-82, (2001年 6月28,29日)
- 10) P.T.Cole and P.J.Van de Loo: Listen to Your Storage Tanks to Improve Safety and Reduce Cost, Acoustic Emission - Beyond the Millennium, Kishi, T., Ohtsu, M., and Yuyama, S. editors, Elsevier, pp.169-178, (2000)
- 11) 特定屋外貯蔵タンクの内部点検等の検査方法に関する適用について, 消防危第93号, (2000年 8月24日)
- 12) M. F. Carlos, S. J. Vahaviolos and W. D. Wang: Advanced Acoustic Emission for On - Stream Inspection, Acoustic Emission - Beyond the Millennium, Kishi, T., Ohtsu, M., and Yuyama, S. editors, Elsevier, pp.159 - 168, (2000)



湯山 茂徳 日本フィジカルアコースティックス(株)(150-0011 渋谷区東2-17-10-8F)代表取締役

1982年東京大学大学院修了。工学博士(金属材料学)。1983年現社設立, 各種構造物のAE試験を行う。1999年コンクリート診断学で熊本大学より博士(学術)を授与される。

<趣味>フルート演奏, 芸術鑑賞, 溪流釣り