

AE法を用いたCFRP製品の健全性評価手法

1. はじめに

繊維強化プラスチック (Fiber Reinforced Plastics: FRP) は、近年機械や構造物の材料として急速に普及しており、航空宇宙、船舶海洋など多くの分野で使用されている。水素貯蔵技術に着目すると、水素自動車や水素ステーションに設置される燃料タンクは炭素繊維強化プラスチック (CFRP) を用いた容器となっており、信頼性、安全性が要求されている。

CFRP材料の強度評価やCFRPを用いた製品の供用中ヘルスマonitoringでは応力負荷中に発生した損傷の種類を明確にする必要があるが、CFRPの損傷には樹脂割れ、繊維と樹脂のはく離、繊維破断、層間のはく離などがあり、非常に複雑である⁽¹⁾。

当社では、複雑な破壊形態を有するCFRP材料に対して、微小破壊に伴い発生する音(弾性波)に

着目したAE(Acoustic Emission)法を用いた健全性評価手法を検討している⁽²⁾⁽³⁾。本稿では、CFRP板の引張試験やCFRP製圧力容器の耐圧試験時のAE評価方法を紹介する。

2. AE法を用いたCFRP板の引張試験

材料内部の微小な損傷の発生や変形に伴って放出される弾性波はAEと総称される。AE法とは、この波を検出し、その特性を調べることにより材料内部で発生する損傷を解析する方法である。

図1にCFRP板の引張試験において取得されたAE信号波形例を示す。破断荷重に対して(a)17%、(b)25%、(c)37%の荷重で検知されたAE信号の波形を示す。周波数解析結果には、およそ150kHzを境に二つのピーク周波数が現れる。このうち、150kHz以上の高い周波数帯域では、ピーク周波数が荷重とともに高くなっているのがわか

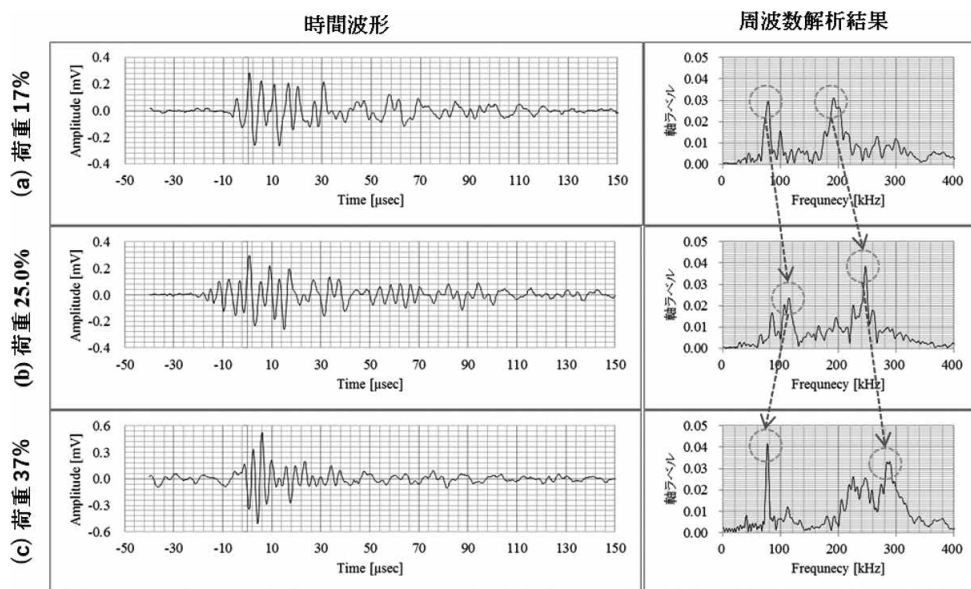


図1 AE取得波形例

る。これは、試験体が弦の代わりになり、張力(荷重)が高くなることにより周波数が高くなっていると考えられる。一方で、150kHz以下の低い周波数帯では、荷重25%まではピーク周波数が高くなっているが、37%になるとピーク周波数が低下しているのが確認できる。

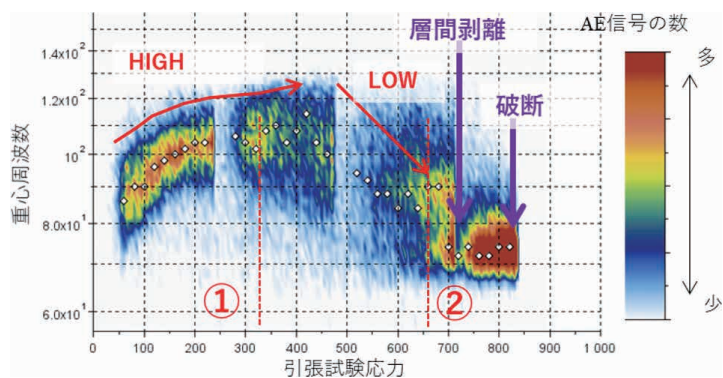
図1より、150kHz以下の周波数成分に着目すると、AE信号の周波数スペクトラムは複数のピーク周波数が確認できる。そのため、周波数変化を時間や荷重履歴で確認することを目的に、当社では、周波数スペクトラムの加重平均を使って評価する方法を提案している。この加重平均を重心周波数という。CFRP引張試験中に取得された各AE信号の重心周波数を計算し、引張応力(横軸)と重心周波数(縦軸)に整理した(図2)。図2(a)に解析結果を示す。カラーマップはAE信号の数を示している。図2(b)には、異なる試験体を用い、図中①②

の応力で試験を中止し、断面を観察した結果を示す。図2(b)より、試験体の損傷は、①(300MPa)までは、小さな樹脂割れであるマイクロクラックのみの発生、①~②(300~650MPa)では繊維間の樹脂割れであるマトリクスクラックの発生が確認できる。

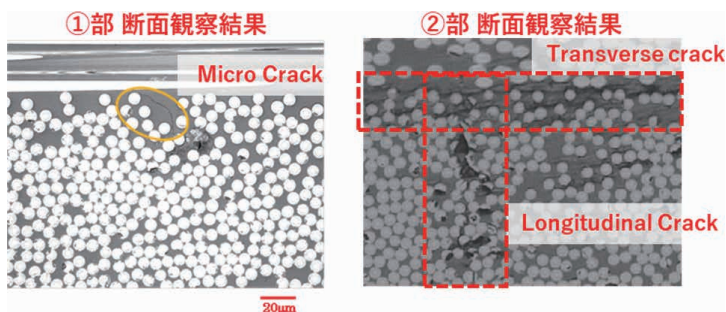
これらのことから、試験体にほとんど損傷がない場合、重心周波数は応力に伴い高くなり、損傷が発生すると周波数が低くなるのが確認できる。

3. CFRP 圧力容器における水耐圧試験

CFRP製圧力容器の水耐圧試験を通して、AE解析法の適用性を確認した。圧力容器は、Φ300mm、全長1,100mm、樹脂ライナを採用したタイプIV CFRPタンクである(図3)。図3(a)に示すように、AEセンサは150kHzに共振周波数を持つプリアンプ内蔵型のAEセンサVS150-RICを使用し、タン



(a) 重心周波数解析結果

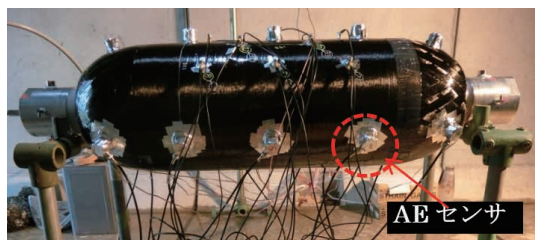


(b) 断面視察結果

図2 AE取得信号重心解析結果

ク周方向に3個、軸方向に5箇所の計15個設置した。

図3(b)に水耐圧試験後のタンク外観を示す。破断位置は図中右側に示す水注入エンド側であった。図3(c)にエンド側破断部の拡大写真と、タンク破断後に分離したライナ部の写真を示す。分離したライナ部を確認したところ、溶着部から破断



(a) タンク外観



(b) 水耐圧試験後タンク外観



(c) 破断面

図3 試験体破断写真

していた。このことから、本供試体の破断位置は、エンド側ドーム部のライナ溶着部であった。その他のCFRP部分に目立った損傷は見られなかった。

図4に設置した全てのセンサから得られた信号を用いて計算した重心周波数解析結果を示す。横軸に試験圧力(内圧)、縦軸に重心周波数、色合いはAE発生数を示している。重心周波数は、内圧が30MPaに達するまで上昇し、その後、30～80MPaにかけて低下した。このことから、タンクの損傷は30MPaから発生していると考えられる。

内圧90MPa以上では、重心周波数80kHz近傍にAEが集中している。これは、引張試験では確認されなかった集中部である。

圧力容器の各位置における重心周波数を解析するため、15個のセンサのうち、タンク軸方向の位置が同じ3個を1組とし、注水側に近い組からZONE01～ZONE05と仮称した。各ZONEにおける重心周波数の解析結果を図5に示す。破断位置に最も遠いZONE01では、圧力30MPaから破断に至るまで周波数は約90kHzに集中し、周波数の低下は確認されなかった。その他の位置では、ZONE05に近くなるごとに、損傷発生のサインである低周波数成分が増加していることが確認できる。ZONE05に設置したセンサでは低い圧力から周波数は低いままであった。これらのことから、ZONE05では、試験の早い段階から損傷が発生していたと考えられる。

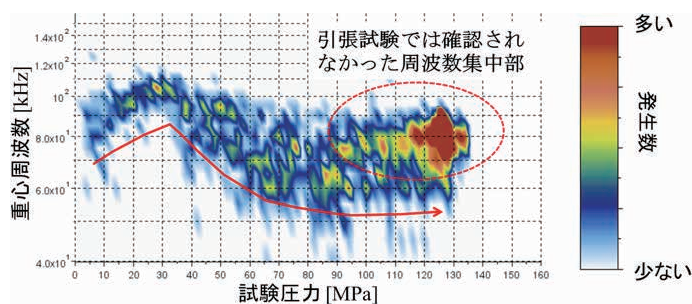


図4 全CHを用いた重心周波数解析結果

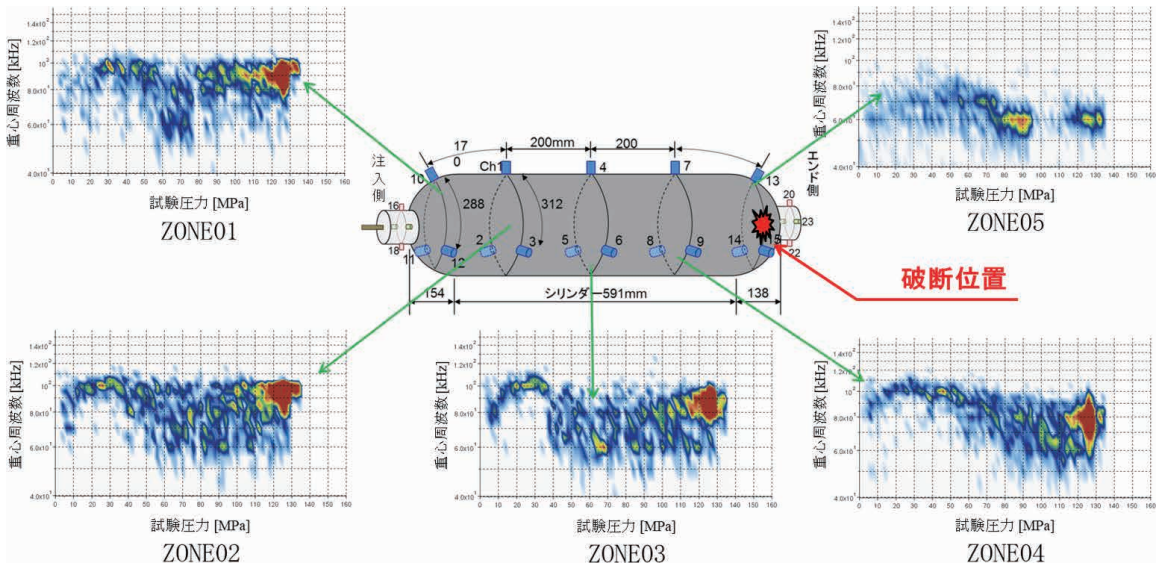


図5 各ZONEにおける重心周波数解析結果

4. おわりに

本稿では、CFRP 製品における健全性評価手法に、AE 法を用いた手法を紹介した。引張試験や耐圧試験時に発生する AE 波の重心周波数を解析することにより、試験体の損傷を検知することが可能である。

実際の圧力容器を用いた試験では、重心周波数の変化を監視することで、損傷傾向を捉えることが確認され、本手法は十分な有効性があると考えられる。

一方で、小さな試験体を用いた引張試験と異なり、圧力容器では広範囲の損傷有無を監視するため、損傷に起因した AE 信号と、健全部から発生する AE 信号が複合されて検知されることが確認された。

今後はセンサの監視範囲を明確にすることで、着目箇所の情報を確実に得る方法や、損傷位置の推定方法を確立し、より精度の高い実機計測サービスを提供していく。

文責

研究開発センター 研究開発グループ

川崎 拓

参考文献

- (1) F. Lissek, A. Haeger, V. Knoblauch, S. Hloch, F. Pude and M. Kaufeld : Acoustic emission for interlaminar toughness testing of CFRP: Evaluation of the crack growth due to burst analysis, Composites, part B, 2018, pp.55-62
- (2) 川崎拓, 滝沢真実, 他 : 水圧疲労試験による高圧水素用 CFRP 蓄圧器への AE 試験適用性検討, IIC REVIEW, No.52, 2014/10, pp.23-28
- (3) H. Kawasaki and M. Takizawa : Study of the Damage Evaluation method for the CFRP Material Using F.C.O.G part 2, Proc. in Acoustic Emission XV II, 2014, pp.111-116