

# AE法を用いたCFRP製圧力容器の健全性評価手法

川崎 拓<sup>\*1</sup> 大森 真実<sup>\*2</sup> 大森 征一<sup>\*3</sup>  
*Kawasaki Hiraku Ohmori Mami Ohmori Seichi*

近年、幅広い用途で利用される炭素繊維強化プラスチック（CFRP：Carbon Fiber Reinforced Plastics）の損傷評価・強度評価に対して、著者らはAcoustic Emission（AE）法における独自の周波数解析手法を提案している。本稿では実際のCFRP圧力容器に対して、AE手法および周波数解析手法の有効性を確認したので報告する。

キーワード：Acoustic Emission(AE)、重心周波数(F.C.O.G)、CFRP

## 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進出がめざましく、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CFRPを用いた容器で信頼性、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ニタリングでは負荷応力中に発生した損傷を明確にすることが望まれているが、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<sup>(1)(2)</sup>。

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おり<sup>(3)</sup>、CFRP材引張試験において取得されたAE信号における重心周波数集中部の変化を監視する方法を提案している。本手法では、試験体が健全であれば負荷した応力に比

例するように重心周波数集中部が高くなり、損傷が発生した際には重心周波数集中部が低くなることを確認した。加えて、AE信号の重心周波数集中部の低下は層間のはく離が発生する直前の現象である可能性を得ている<sup>(4)</sup>。

本稿では、実際のCFRP圧力容器を作製し、耐圧試験における本手法の有効性を確認したので報告する。

## 2. CFRP圧力容器

表1に作製した圧力容器の仕様を示す。圧力容器は樹脂ライナにCFRPを巻き付けたタイプIVタ

表1 圧力容器仕様

炭素繊維巻き厚	20mm
周長	938mm
外形	298mm
全長	1,102mm
炭素繊維	東レ製 T700
ライナ材料	ポリエチレン
口金部材質	AL 6061-T6
成型方法	フィラメントワインディング

\*1：研究開発センター 研究開発グループ

\*2：検査事業部 技術部

\*3：検査事業部 技術部（株式会社 IHI 技術開発本部 生産技術センター 生産基盤技術部 検査・計測グループ 出向中）

ンクとなっており、樹脂ライナはシリンダー部、ドーム部でそれぞれ型取りしたポリエチレンの部品を溶着してタンク型の形状を作製している。それに樹脂を含浸させた炭素繊維をフィラメントワインディング方式で巻き付け、オートクレーブにて熱硬化処理を行い成型した。

図1に示すように、試験体には、AEセンサおよびひずみゲージを設置している。試験体を5つのZONEに分け、試験体ドーム部には3個のAEセンサを1周に等間隔(0°、120°、240°)で設置した。シリンダー部にはAEセンサをドーム部と同様に3個設置した。

この時のAEセンサは150kHzに共振周波数を持つプリアンプ内蔵型のVS150-RICを用いた。ひずみゲージは軸方向および周方向に沿って2軸ひずみゲージを設置し、取り付け位置は試験体ドーム部に2個のひずみゲージを45°、180°に設置した。センサ数はAEセンサ15個、ひずみゲージが6枚となる。

負荷圧力は表2に示すように、およそ20MPaごとに圧力負荷、保持、除荷を繰り返し、試験体が破断するまで実施した。破断圧力は135MPaであった。

表2 圧力パターン

負荷回数	負荷圧力
1	6 MPa
2	20 MPa
3	40 MPa
4	60 MPa
5	75 MPa
6	100 MPa
7	125 MPa
8	135(破断) MPa

### 3. タンク破断の状況とひずみ計測結果

図2にタンク破断写真を示す。図2(a)はタンクの全体図、図2(b)はエンド側破断面、図2(c)はエンド側ライナ部である。全体写真よりエンド側ドーム部が大きく損傷していることがわかる。ライナ溶着部を確認したところ、断面がきれいに切り離されている。このことから、本試験体はエンド側ドーム部ライナ溶着部から破断したと考えられる。ライナの裂け目の位置はタンク下側(CH14、CH15の間)から口金部に近い部分で破裂し、吹き飛んで行ったと考えられる。

図3にひずみ計測結果を示す。図3(a)に周方

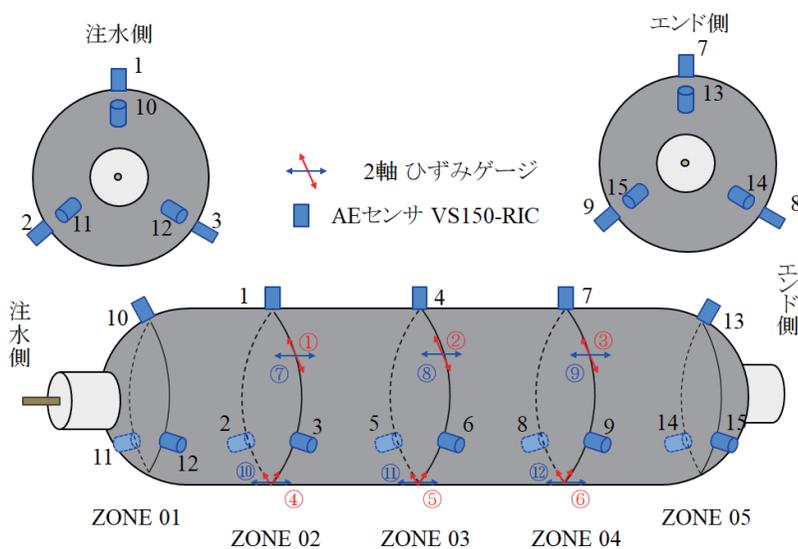


図1 センサ配置図



(a) タンク外観

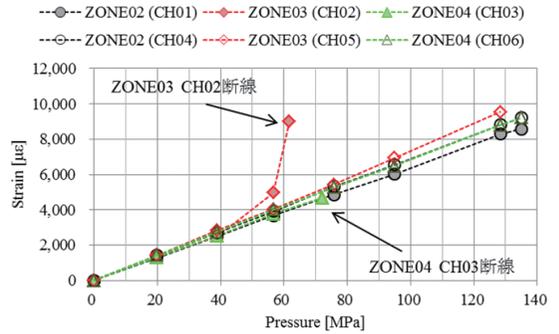


(b) エンド側破断面 (c) エンド側ライナ

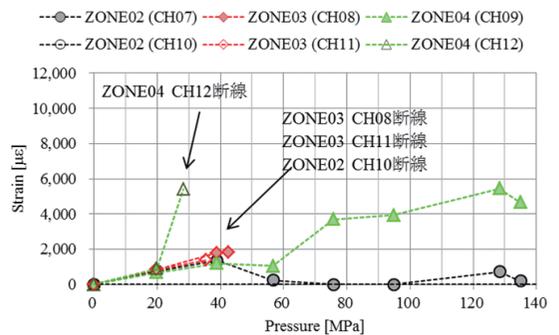
図2 タンク破断写真

向に設置したセンサを、図3(b)に軸方向に設置したセンサの結果を示す。結果は各負荷サイクル中の最大ひずみ値を示しており、ZONE02に設置したセンサを黒、ZONE03を赤、ZONE04を緑で示している。

図3(a)より、周方向の最大ひずみはおよそ8000～9500 $\mu\epsilon$ であり、最も変形量が大きかったのはタンク中央部に位置するZONE03(CH05)であった。破断箇所に近いZONE04においても、他点と異なる点は確認されなかった。次に、図3(b)軸方向の最大ひずみ量に着目すると、ZONE02およびZONE03にておよそ2000 $\mu\epsilon$ であり、周方向に比べて小さい。圧力容器は加圧されると周方向に膨らむため、予想通りの結果が得られた。一方で破断箇所に近いZONE04(CH12)では圧力30MPaにおいて他点に比べて高いひずみ量が計測されている。CH12は30MPaで断線したため、その後の経過は確認できなかった。同じZONE04(CH09)では、60MPaから破断に至るまで、ひずみ量が高くなっている。このことから、破断箇所近傍では試験の早い段階から軸方向に対する負荷がかかっていたと考えられる。



(a) 周方向設置センサ



(b) 軸方向設置センサ

図3 ひずみ計測結果

#### 4. AE 計測結果

まずはじめに、一般的なAE解析手法であるフェリシティ比(FR)を用いて解析を行った。FRとは、AEが発生した荷重を先行荷重で除した値となり、CFRPに代表される複合材料における健全性評価手法として普及している。FRを用いた方法はASME規格にも制定されており、FRが0.95以上で合格としている<sup>(5)(6)</sup>。

圧力負荷4～8回目(破断)において、横軸を試験圧力、縦軸を0.1MPaごとに発生したAEの発生数(AE Hit)に整理した結果を図4に示す。本結果は、計測したすべてのセンサを用いている。本試験結果では、圧力負荷6回目まではFRが1.0であったが、圧力負荷7回目にて0.7に低下した。このことから、圧力負荷6回目の75～100MPaにおいてASME規格上許容できなくなる損傷が発生したと予想される。

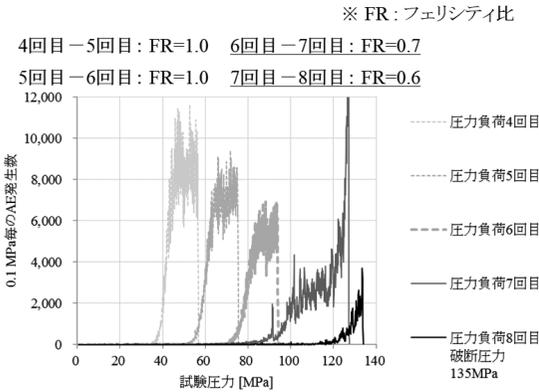


図4 全CHを用いたAE発生数の圧力履歴

次に、各ZONEにおいて、負荷回数とFRを整理した結果を図5に示す。各ZONEにおいても、圧力負荷回数7回目以降でFRはASME合格ラインである0.95を下回った。特に、破断位置に最も近いZONE05では、他ZONEに比べて著しく低下している。しかし、負荷回数8回目では、試験体中央部に位置するZONE03においてもFRの急激な低下が確認できるため、本結果からは耐圧試験中に破断位置を推定することは難しい。

### 5. F.C.O.G 結果

次に、当社の独自手法である重心周波数(F.C.O.G：Frequency Center Of Gravity)を用いた解析を行った。重心周波数とは、AE信号の周波数解析結果におけるスペクトルの代表値である。重

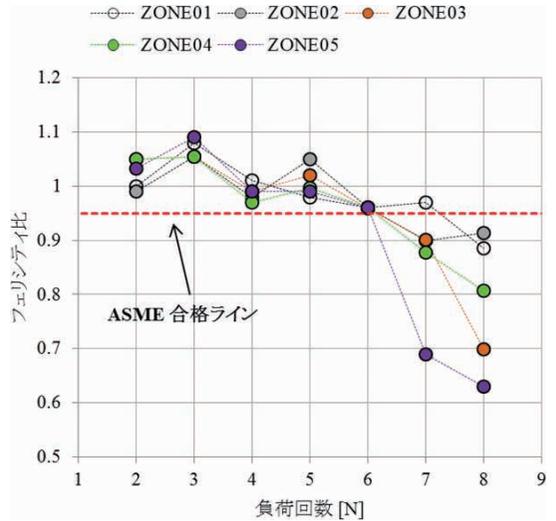


図5 各ZONEにおけるフェリシティ比

心とは、加重平均を指しており、周波数 $f_i$ における成分強度 $A(f_i)$ の積和を、成分強度の総和で割った値となる(式(1))。

$$F, C, O, G = \frac{\sum_i A(f_i) * f_i}{\sum_i A(f_i)} \quad (1)$$

図6に全15CHを用いて計算したF.C.O.G結果を示す。横軸に試験圧力、縦軸に重心周波数、色合いは2MPa×2kHz内に標定されるAEの発生数を示している。F.C.O.Gは破断圧力135MPaに対して低い圧力30MPaで変化した。30～80MPaにかけてF.C.O.Gは60kHzまで低下した。FRが低下し

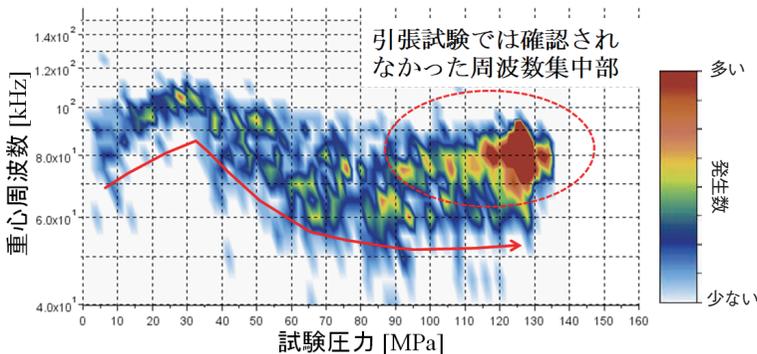


図6 全CHを用いた重心周波数解析結果

た 70～100MPa 近傍で F.C.O.G は 60kHz 近傍に集中した。これは 1 章で解説した引張試験の結果と同じ傾向であった。一方で、破断直前の 100～135MPa において F.C.O.G は 90kHz 近傍に集中し、過去に報告している短冊形の引張試験時の結果と異なる傾向を示した<sup>(7)</sup>。

図 7 に各 ZONE における F.C.O.G の解析結果を示す。破断位置に最も遠い ZONE01 における F.C.O.G の結果は、圧力 30MPa から破断に至るまで F.C.O.G は約 90kHz に集中し、F.C.O.G の低下は確認されなかった。その他の位置では、ZONE05 に近くなるごとに低周波数成分が増加していることが確認でき、ZONE05 に設置したセンサでは低い圧力の時から F.C.O.G は低いままであった。損傷のない箇所 (ZONE01) から発生される AE 信号

の F.C.O.G は破断に至るまで 90kHz 近傍に集中することが予想される。このことから、各部位に設置されたセンサで解析することにより損傷位置を捉えることができると考える。

## 6. 最後に

本稿では、CFRP 製圧力容器における健全性評価手法に、一般的な FR とは異なる独自の周波数解析方法を適用した。ASME 規格に制定されている FR と F.C.O.G の低下はよい一致を示した。健全性評価手法としては F.C.O.G が 60kHz まで低下すると ASME 規格に基づく合格ラインを下回ることが確認できた。

加えて、F.C.O.G は破断圧力 135MPa に対して、圧力 30MPa から変化するため、供試体破断に対し

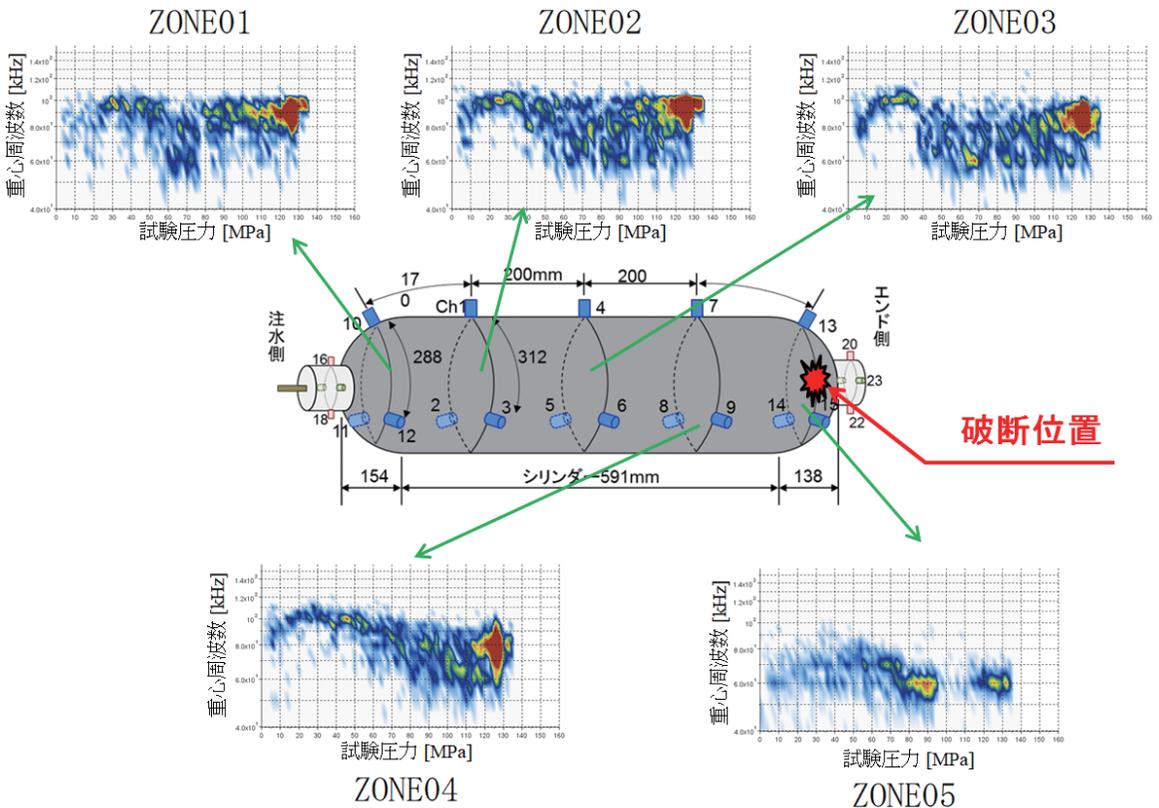


図 7 各 ZONE における重心周波数解析結果

て20%近傍の圧力から破断までの変化を監視することが可能である。

一方で、短冊形の引張試験とは異なり、広範囲を監視するため、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。今後は実機適用を踏まえ、本手法は必要なセンサ数と各センサの監視範囲を明確にすることで十分な有効性がある。

### 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) D. Baccar and D. Soffker, Proc. : Identification and classification of failure modes in laminated composites by using a multivariate statistical analysis of wavelet coefficients, Mechanical Systems and Signal Processing, Vol.96, 2017, pp.77-87
- (3) 川崎拓、滝沢真実、中島富男、中村英之、岡崎順二、中川幸次郎：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
- (4) Hiraku Kawasaki and Mami 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
- (5) 上野谷敏之、水谷義弘:Monitoring and Evaluation of Damages and Fractures in Composite Materials, Journal of the Society of Materials Science, Japan, Vol.55, No.3、2006、pp.341-347
- (6) ASME Boiler and Pressure Vessel Code, Section V, Article 11 : Acoustic Emission Examination of Fiber Reinforced Plastic Vessel, American Society for Mechanical Engineers, Latest edition
- (7) Mami Takizawa and Hiraku Kawasaki : Study of the Damage Evaluation method for the CFRP Material Using F.C.O.G part 1, Proc. in Acoustic Emission XV II , 2014, pp.105-110



研究開発センター  
研究開発グループ

川崎 拓

TEL. 045-791-3522  
FAX. 045-791-3547



検査事業部  
技術部

大森 真実

TEL. 045-791-3523  
FAX. 045-791-3547



検査事業部 技術部  
(株式会社 IHI 技術開発本部  
生産技術センター 生産基盤技術部  
検査・計測グループ出向中)

大森 征一

TEL. 045-791-3523  
FAX. 045-791-3547