

アコースティックエミッション技術の 燃料電池自動車用高圧容器損傷解析への適用

Application of Acoustic Emission Technology to Damage Analysis of High-Pressure Container for Fuel Cell Vehicles

鈴木 貴 紀¹
Takanori SUZUKI
原 田 一 郎²
Ichiro HARADA

桑 山 貴 司²
Takashi KUWAYAMA
金 崎 俊 彦¹
Toshihiko KANEZAKI

川 辺 正 道²
Masamichi KAWABE

要 旨

炭素繊維強化樹脂層を用いた車載用高圧容器の設計精度を向上させるため、設計精度確認のため実施される評価試験において、最終的な破裂につながる炭素繊維強化樹脂層の損傷発生状況を解明する手法を開発した。

その際、アコースティックエミッション技術を適用し、計測された結果を無次元化処理することで、破裂の起点となる大きな破壊の発生を判断するしきい値を設定することができた。これにより、破裂直前に試験を停止することが世界で初めて可能となった。

この技術の適用によって、高圧容器の炭素繊維強化樹脂層における損傷状況を精緻に分析できるようになることから、高圧容器の設計技術が改善される。

ABSTRACT

Evaluation tests are conducted in order to verify the design accuracy of vehicle-mounted high-pressure containers that use carbon fiber-reinforced plastic layers. We have developed a method to identify the state of damage generated in carbon fiber-reinforced plastic layers that eventually leads to bursting in these tests, in order to enhance the design accuracy of such containers.

For this method, we used acoustic emission technology and processed the measured results into dimensionless data. This enabled us to set threshold values for the appearance of major damage that is the prelude to bursting. For the first time in the world, this makes it possible to terminate the test directly before the bursting takes place.

Applying this technology will enhance the design of high-pressure containers by enabling a precise analysis of the state of damage in the carbon fiber-reinforced plastic layer of a high-pressure container.

1. 背景と目的

近年、燃料電池システムは電力供給源として、移動体を含めた様々な用途での使用が検討・実施されるようになっている。その中で、自動車への燃料電池の搭載は、走行時に温暖化ガスを放出しない自動車の一形態として、特に期待された適用先と考えられている (Fig. 1 参照)。

近年、車両用途において、燃料となる水素は、70 MPaの高圧ガスとして貯蔵する方法が主流となっている。高圧容器は Fig. 2 に示したように、その構造により Type 1 高

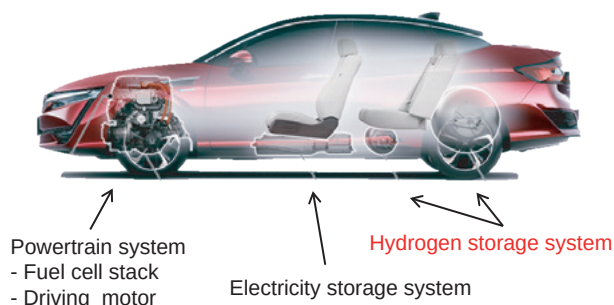


Fig. 1 Layout of major components of fuel cell vehicle

¹ 先進パワーユニット・エネルギー研究所, 博士 (工学)

E-mail: takanori_suzuki@jp.honda

² 先進パワーユニット・エネルギー研究所

圧容器から Type 4 高压容器に分類されている。

Type 1 高压容器は全て金属で構成された高压容器であり、Type 2 高压容器や Type 3 高压容器は、小型・軽量化のため、金属ライナーの外周に、より高強度の炭素繊維複合樹脂 (Carbon Fiber Reinforced Plastics: CFRP) を積層した高压容器である。そして、Type 4 高压容器は樹脂ライナーの外周に CFRP を積層した高压容器である。Type 3 および Type 4 容器は、小型で比較的軽量なため車載高压容器として用いられる。現在では、特に Type 4 高压容器がその主流となっている。

車載される高压容器に関しては、安全性に関する世界統一基準 (Global Technical Regulation No. 13: GTR13)⁽¹⁾、国連規則 (United Nations Regulation No. 134: UNR134)⁽²⁾ など各国際的な規定があり、必要とされる性能が制定されている。国内においては、高压容器は基本的に高压ガス保安法に定められているが、車載高压容器については、道路運送車両法により規制されている。そして、先の各国際規定を批准しており、国内法に適用されている。

燃料電池自動車 (Fuel Cell Vehicle: FCV) の普及に向けては、依然として高压容器のコスト課題が残っている⁽³⁾。高压容器の低コスト化のためには、高価な CFRP の使用量を減らすというのが最も効果的である。また、使用量削減は高压容器の軽量化にも寄与することもあり、様々な取り組みがおこなわれている。

CFRP の使用量は、基本的に想定圧力とカーボンファイバー (Carbon Fiber: CF) の強度の比に依存する。高压容器は法規によって性能や耐久性が規定されており、それらを満足した上で CFRP 量を可能な限り少なくする必要がある。そして、その実現には CFRP 層の設計技術の高いレベ

ルで確立することが、重要な開発項目となっている。

本開発は、高压容器 CFRP 層の設計精度向上のための高压容器損傷解析技術を確立することを目的とした。

2. 技術開発のねらい

高压容器の CFRP 層における強度推定や寿命予測の精度は高くないことから、十分な安全率を持たせた CFRP 層厚さで設計されており、精度向上による改善の余地がある。

CFRP 層の強度設計においては、コンピュータシミュレーションを利用した事前予測 (Computer Aided Engineering: CAE) が実施される。それに基づき試作された高压容器を試験評価し、推算値との比較検証をおこなうことで、その予測精度を改善してきた。つまり、Fig. 3 に示したようなトライアンドエラーを繰り返すことで開発をおこなってきた。

多くの場合、高压容器は粉々に破損し、試作高压容器破裂の起点や損傷の進行など、詳細な原因解析は容易でない状態であった。そのため、損傷解析結果を設計予測技術へフィードバックする技術的ハードルは高く、CFRP 層強度予測技術の向上における大きな課題であった。

よって、高压容器の破裂直前で評価試験を終了し、最終的な破裂につながる損傷の発生状況を理解できるようにすることが重要である。ここで、液圧による高压容器の破裂試験や耐久試験の方法は、GTR において規定され、試験における最大加圧速度は 1.4 MPa/s とされている。しかしな

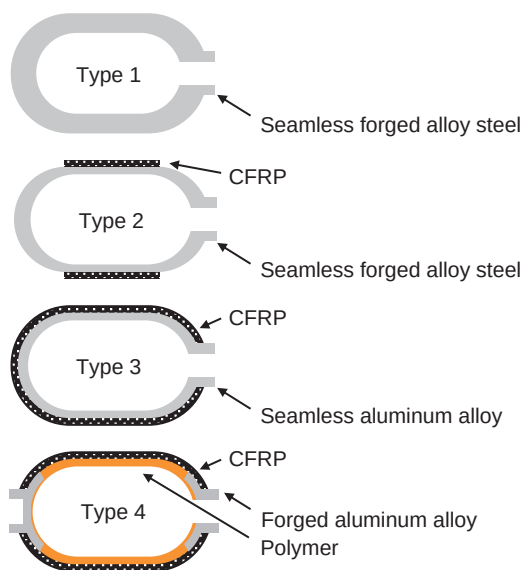


Fig. 2 Types and structures of high-pressure containers

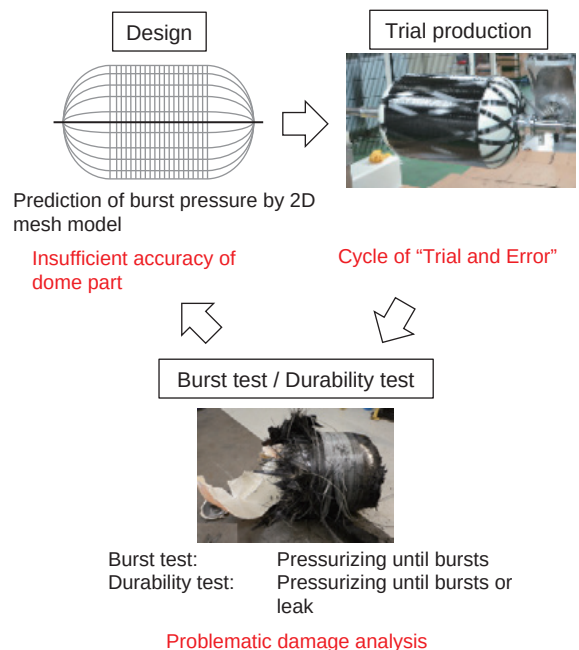


Fig. 3 Conventional high-pressure container development process

がら、試験中容器の多くは前触れなく唐突に破裂し、特に破裂試験では、破裂直前で中止することは容易なことではない。

そこで、以下の技術が新たに必要と考えられた。

- (1) 破裂前に試験を停止する技術
- (2) 損傷個所を特定する技術

そこでそれらの実現のため、ここではアコースティックエミッション (Acoustic Emissions: AE) 技術に着目し、Fig. 4 に示す破損過程を詳細に計測可能な開発プロセスに改善した。本報告では、特に重要な (1) 破裂前に試験を停止する技術について紹介する。

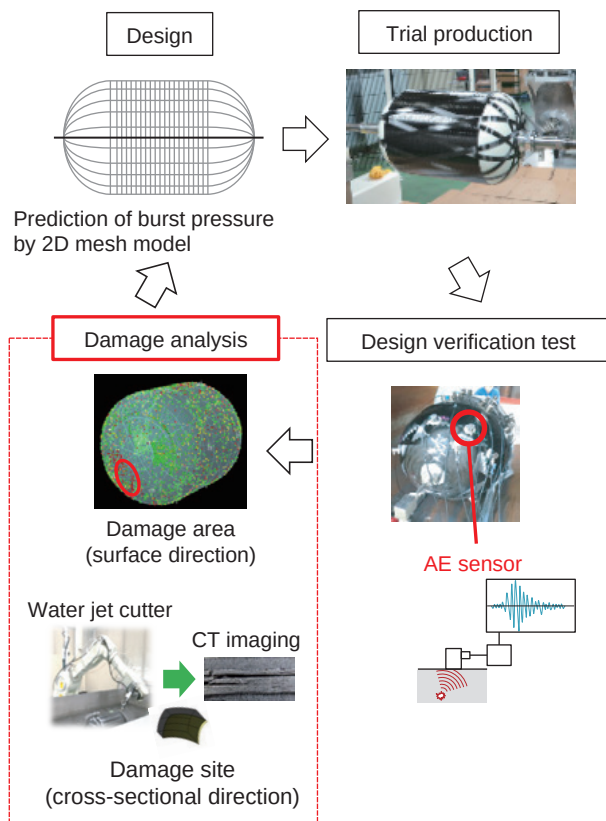


Fig. 4 Enhanced high-pressure container development process

3. AE 技術

建築構造物や貯槽など、物体の非破壊検査に用いられている技術に、AE 技術⁽⁴⁾⁻⁽⁸⁾がある。AE とは、物体が変形または破壊する際、内部に蓄えてられていた弾性エネルギーが音波として放出される現象である。そして、対象物を伝わり検出された弾性波が AE 波とされる。また、破壊の規模や材料の違いにより、音波の強度や周波数が異なることから、強度部材の破壊メカニズムの解明に多く用いられている。

AE 波は高压容器表面に取付けられた感圧センサーにより検知され、Fig. 5 のような複数の波の合成波として検出される。そして、しきい値を適切に設定することにより計測ノイズを取り除くことができ、そのしきい値を超えた小さな波の数をカウント数と定義している。また AE 波のエネルギーは、AE 波の継続時間と振幅から算出される面積に相当する。

高压容器の CFRP 層は、CF の束 (フィラメント) とその繊維間を含侵された樹脂で構成されている。CFRP 層の損傷は、Fig. 6 のような過程を経て進展すると考えられる。すなわち、高压容器使用の初期段階は、樹脂クラックや剥

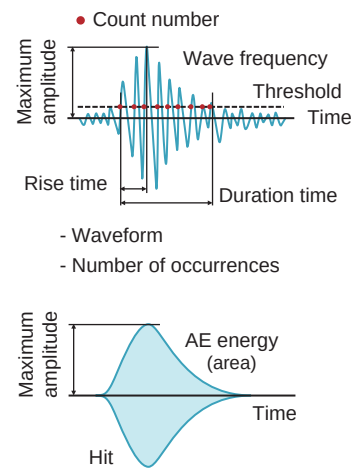


Fig. 5 AE waves and parameters

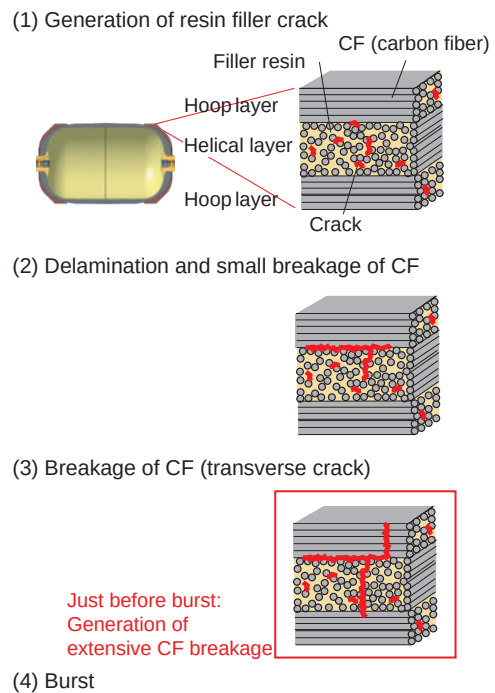


Fig. 6 Images of damage process in CFRP layer of high-pressure container

離を中心に損傷が発生し、それらが増加・拡張していく中でCFの断裂に進展し、最終的に大量のCFが断裂することで破裂に至ると推測される。その際に発生するAE波を検出することで、CFRP層の破壊の過程を解析することが可能であると考えた。

4. 技術の適用と結果

AEにより破裂直前に試験を停止する技術を開発するために、車載用高压容器の水圧破裂試験を実施した。水圧破裂試験では、高压容器内に一定の速度で圧力が変化するように液体を高压ポンプで充填もしくは放出することで、高压容器の強度や耐久性が評価される。その際の条件は、高压容器の規格により指定されている。

試験には、ライナーは共通でCFRP層が異なる二つの仕様の高圧容器 (Type A: 外径 530 mm × 塔長 920 mm, Type B: 外径 550 mm × 塔長 920 mm) を使用した。ここで本報告では、AE測定器と計測および解析ソフトウェア、そしてAEセンサーは市販品を使用し、測定対象物の基本的な形状や伝搬速度の設定など、計測に必要なテンプレートは用意されたものを利用した (計測器: Vallen System MB19, ソフトウェア: Vallen VisualAE R2019.0926.3, AEセンサー: Vallen System VS150-RIC)。

Fig. 7 は、高压容器 Type A の内部を一定速度で昇圧した際に検出された AE 波の継続時間、カウント数、AE エネルギーの変化の一例を示した。横軸は高压容器内圧力、縦軸は上から検出された AE 波の AE エネルギー、カウント数、継続時間である。ここで、後述する式 (1) で定義される無次元 AE エネルギーが 20 以上かつ 100 未満の AE 波

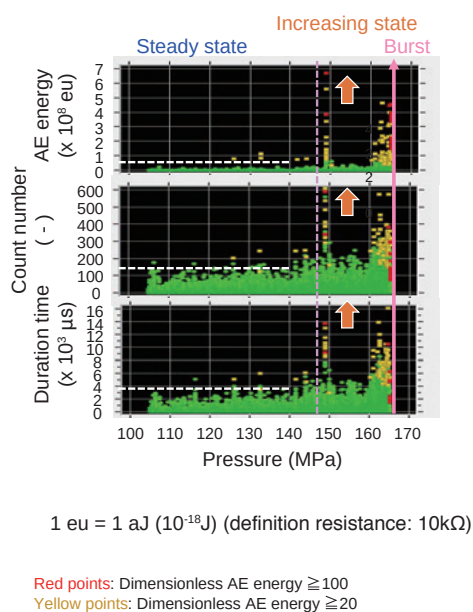


Fig. 7 AE detection status in burst test (high-pressure container: Type A)

を黄点、100 以上の AE 波を赤点、それ以外を緑点で表記した。

この結果より、昇圧に伴うそれらの数値は、各々の図に白色の破線で指示したように、桃色の破線で示した 150 MPa 付近まで、各縦軸の最高値がほぼ一定の水準となることが分かった。そして、150 MPa 付近で突発的な数値上昇が見られた後、徐々に数値が高い AE 波が検出されて黄色の点が増加する上昇状態となった。最終的に、極めて大きな数値上昇とともに桃色実線で示した約 167 MPa で破裂に至るといった経過をたどった。

ここで、破裂に至る状況をより理解しやすくするため、Fig. 8 に積算カウント数と積算 AE エネルギーの結果を示した。青色の実線でその際の高压容器内圧力を示した。点の色は Fig. 7 と同様である。

圧力約 150 MPa 以下の範囲においては白色の実線で示したように、一定の傾きで連なる点として表現されることが分かった。

その後、突発的に上昇し、それ以降徐々に増大し、最終的には赤色の上方向の実線に見えるような急上昇を見せた後に破裂に至った。

この Fig. 8 の積算カウント数約 1.3×10^5 (圧力約 150 MPa) までの初期における直線の傾きは、AE 波を構成する小さな波の平均 AE エネルギーを意味している。以降、この試験開始初期の段階に見られた直線関係にある状態を定常状態と定義する。

また、同様の試験を Type A・Type B 両仕様の複数の高压容器について実施した結果を Fig. 9 に示した。

Fig. 8 と同様に、Fig. 9 においても原点からある程度の積算カウント数までは、傾きが一定となる傾向が見られた。

しかしながら、様々な高压容器から得られた定常状態での直線の傾きは、各々大きく異なった。これは、センサーの設置状態やそれに伴う感度、AE 伝搬特性などの相違による影響と推察された。よって、統一して比較評価するため、Fig. 8 や Fig. 9 の昇圧開始初期に見られた直線の傾きを用いて正規化することを試みた。

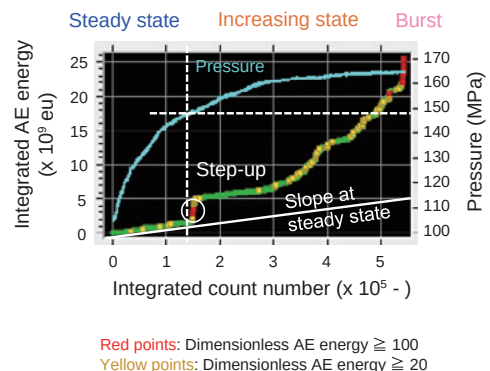


Fig. 8 Changes of integrated energy and pressure in burst test (high-pressure container: Type A)

Fig. 5 に示した計測された AE 波を構成する全ての波の平均 AE エネルギーに注目し、定常状態での AE 構成波の平均 AE エネルギーに対する比率を比較することにより、CFRP 層の破壊の深刻さを判断できると推定した。

すなわち、定常状態における AE エネルギーのカウンタ数当たりの平均値を用いて無次元 AE エネルギーを次式のように定義した。

$$\text{Dimensionless AE energy} = \left(\frac{E'}{\text{Count number}} \right) / \left(\frac{\sum E'}{\sum \text{Count number}} \right)_{\text{Steady state}} \quad (1)$$

ここで、 E' は、計測された AE 波から算出された AE エネルギーであり、真の AE エネルギー (E) に対して、試験・計測における様々なノイズ要因を含んだ見かけの AE エネルギーである。

Fig. 10 に、Fig. 8 で示した計測結果を圧力と無次元 AE エネルギーの関係に再整理した結果を示した。高压容器の破裂圧力など様々なデータを総合的に考察し、破裂につながる大きな損傷が発生する際の無次元 AE エネルギーを 100 と設定した。また、約 150 MPa までの定常状態において、無次元 AE エネルギーはほぼ 20 未満であった。そこで、Fig. 7、Fig. 8 と同様に Fig. 10 も、定常状態である 20 未満の無次元 AE エネルギーを緑点、大きな損傷の発生を示す 20 以上かつ 100 未満を黄点、そして 100 以上を赤点で表記した。

破裂試験を様々な高压容器についておこなった際の破裂圧力に対して、測定された AE 波で無次元 AE エネルギーが 100 を超える点が出現した圧力と破裂圧力を比較した結果を Fig. 11 に示した。この図からわかるように、それらの比はすべて 1 未満となっていることから、無次元 AE エネルギーの破裂判定のためのしきい値を適切に設定すれば、破裂直前に試験を停止できることが確認できた。本技術により、破裂直前の状態の試験体を確保することができるようになり、詳細な CFRP 層の分析から破壊過程の解析ができるようになった。

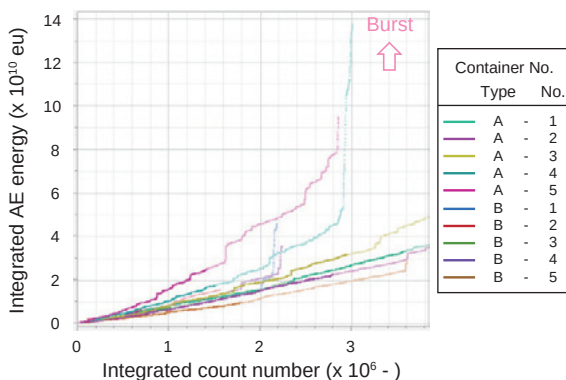


Fig. 9 Changes of integrated energy in burst tests of various high-pressure containers

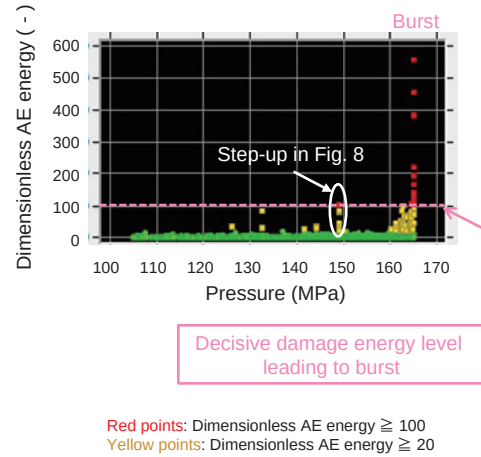


Fig. 10 Results of damage analysis using dimensionless AE energy (high-pressure container: Type A)

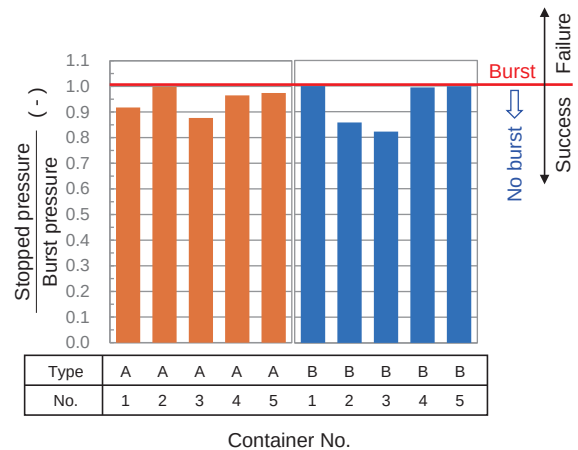


Fig. 11 Validation results of shutdown technology just before burst

5. まとめ

燃料電池システムの移動体への搭載において、高压容器の軽量・低コスト化のため、高い精度の CFRP 層設計技術が必要とされた。そこで、本開発では設計精度の向上のため、高压容器の破裂を伴う試験において、最終的な破裂につながる CFRP 層損傷の発生状況を解明する手法を AE 技術の適用により提案した。

その際、AE エネルギーの無次元化に着目し、実験的手法により高压容器や試験毎のばらつきを除外することで、様々な仕様の高圧タンクに対応できる停止判断のしきい値を設定できた。その値を用いることで、破裂直前停止技術を世界で初めて実現できた。

この技術により、高压容器の CFRP 層における損傷過程を精緻に知ること、高压容器の設計技術を改善し、高压容器軽量・低コスト化や、開発期間を削減することが期待できる。

また、2章で述べたように、実験で得られた AE 波の到達時間差を解析することにより、損傷個所を特定する技術や、さらに AE 波の周波数を解析することで損傷した材料の推定する技術も検討している。これらの AE 技術によって、より詳細な CFRP 層の破壊過程の理解が進むことが、更なる設計精度向上に寄与すると考えている。

参考文献

- (1) <https://unece.org/sites/default/files/2023-07/ECE-TRANS-180-Add.13-Amend1e.pdf>, (2023/7/17)
- (2) <https://unece.org/sites/default/files/2022-07/R134am4e.pdf>, (2022/3/21)
- (3) <https://www.nedo.go.jp/content/100956710.pdf>, (2023/2/9)
- (4) 丹羽義次, 小林昭一, 大津政康:アコースティックエミッションによる破壊源探査, 土木学会論文報告集, 1978 巻 (276 号), p. 135-147, (1978)
- (5) 鈴木恵, 中西博, 岩本正治, 自念栄一, 前川善一郎, 森旭, 孫峰:AE 法による CFRP の破壊機構に関する研究, 日本機械学会論文集 A 編, 53 巻 (492 号), p. 1459-1466, (1987)
- (6) 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, p. 23-28, (2014)
- (7) 大森真実, 川崎拓, 大森征一, 中村英之, 佐々木孝明: AE 波重心周波数を用いた CFRP 材の損傷評価研究, 強化プラスチック, 第 63 巻 (第 9 号), p. 434-439, (2017)
- (8) 中島富男, 川崎拓, 佐藤明良:薄肉 CFRP 圧力容器耐圧試験における AE 音源位置標定に関する実験的考察, 日本機械学会論文集 A 編, 79 巻 (797 号), p. 115-118, (2013)

■ 著 者 ■



鈴木 貴紀



桑山 貴司



川辺 正道



原田 一郎



金崎 俊彦