

令和元年6月7日現在

機関番号：82502

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2016～2018

課題番号：16K18251

研究課題名（和文）液中伝播AE波を用いたセラミック複合材料の局所損傷モニタリング手法の開発

研究課題名（英文）Development of local damage monitoring methodology for ceramic matrix composites by underwater acoustic emission waves

研究代表者

野澤 貴史（Nozawa, Takashi）

国立研究開発法人量子科学技術研究開発機構・六ヶ所核融合研究所 核融合炉材料研究開発部・首席研究員（定常）

研究者番号：70455278

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,000,000円

研究成果の概要（和文）：本研究は、損傷時に複合材料から発せられるアコースティックエミッション（AE）の液中伝播挙動に着目し、高精度な位置標定と局所損傷マッピングを可能とする新しい損傷モニタリング手法の確立を目的とした。化学気相浸透（CVI）法で作製されたSiC/SiC複合材料を評価対象に、新たに振幅フィルタリングによる複合材料の破損過程におけるき裂発生位置の三次元位置標定手法を導入し、特にレートプロセス理論（Gutenberg-Richter式）を適用することで、フィルタ閾振幅を客観的に決定する方法を考案した。また、本手法により、破壊に有意なAE信号のみを選択的に抽出し、損傷位置標定の精緻化を実現した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

原子力用SiC/SiC複合材料は高温水または高温液体金属中での使用が検討されているが、適切な損傷モニタリング手法は現状ないことから、本研究で検討する基盤技術の確立は、第一に高温液体共存下での高温材料試験法の確立に貢献する。究極的には、実機での供用中オンライン損傷モニタリング技術開発に資するものであり、複合材料の実用化を強く後押しすることが期待される。また、材料科学的アプローチにより、主要な材料特性とマイクロ・ナノレベルの欠陥組織との相関関係を明らかにし、材料特性の制御、品質保証、安全管理に関する知見を獲得することが可能であり、材料開発においても意義深い。

研究成果の概要（英文）：The acoustic emission (AE) method has widely been applied in composite tests to characterize composite's damage accumulation process. Specifically the underwater AE, which generally travels straightly in water, must be advantageous in damage monitoring for complicated shape materials. This study aims to develop the underwater AE method as a realistic option for composites to raise reliability of damage monitoring. It was found that, for chemical vapor infiltration (CVI) SiC/SiC composites, the high peak amplitude AE data are utilized to determine more accurate failure location and they can be selectively collected by the high-pass filter proposed in this study. In particular, it was clarified that the Gutenberg-Richter equation can be well applicable to define the filtering level. In conclusion, similar to the conventional direct AE method, the underwater AE method could successfully detect cracking events, demonstrating a good potential as a damage monitoring tool of composites.

研究分野：複合材料破壊力学・非破壊検査

キーワード：液中伝播アコースティックエミッション 局所損傷モニタリング セラミック複合材料 位置評定 破損メカニズム分類 非破壊検査 健全性診断 寿命予測

1. 研究開始当初の背景

(1) 原子力用SiC/SiC複合材料は、高結晶性SiCを特徴とする耐照射特性に優れる材料であり、軽水炉の事故耐性燃料被覆管や核融合炉の先進ブランケット材料として開発が進み、これらは高温水または高温液体リチウム鉛金属中での使用が検討されている。このような過酷環境下での使用に際し、機器の健全性診断と寿命予測のため、複合材料の損傷蓄積状態を逐次精度良く把握することが必要不可欠である。

(2) 複合材料の損傷モニタリング技術として、近年、アコースティックエミッション(AE)、超音波探傷法、デジタル画像相関法、電気抵抗測定法などの様々な手法の検討が進み、特にこれらを相補的に活用し、材料挙動を明らかにする試みがある。中でもAE法は複合材料内部の損傷の蓄積過程をモニタリング可能な手法として最も期待される。通常、複合材料のAE発生は微視き裂の発生に伴い開始する。その際、原子力SiC/SiC複合材料では、複合材料に特徴的な擬延性に先立ちAEが検出されることが明らかとなっている[1]。つまり、AE法は機器の異常を早期に検出する上で極めて重要な情報を与える優れた計測手法である。

(3) AE計測において、位置標定による破損位置を知ることは、破損の蓄積過程を追跡する、つまり健全性診断と寿命予測を行うために重要である。例えばAE発生位置情報と蓄積するAEエネルギーの変化を評価することで、複合材料の寿命を予測可能である[2]。また、申請者は本手法を進展させ、原子力用SiC/SiC複合材料への適用性検討及び改良を進めてきた[3]。また、得られるAE波の周波数応答の違いから個々の破壊モードに対応した損傷を原理的には分類可能であり、このことは複雑な複合材料の詳細な破損過程を理解するのに役立っている。例えば、申請者は、通常の周波数解析に時間応答を考慮したウェーブレット解析を適用することにより、非主軸引張試験時の破壊に特徴付けられる個々の破壊モードの違いを特定することに成功している[4]。

(4) これまで幅広く行われているAEセンサーを試験片に直接貼り付ける計測手法、つまり材料中に伝播するAE波の音速を評価する手法では、クーポン試験片のような1次元の高精度な位置標定は可能である。しかしながら、板材や管材のような2次元/3次元構造体の場合、複合材料の異方性のため材料中の音速を適切に評価することが困難であり、多くの場合、大まかな破損位置を知るだけのゾーン判定に限られ、現状、必ずしも万全な計測手法でない。

(5) 原子力用SiC/SiC複合材料は高温水または高温液体金属中での使用が検討されているが、機器の健全性診断と寿命予測において、複合材料の損傷蓄積状態を逐次把握することの重要性に反し、少なくとも小型の試験片を用いた場合では、センサーの耐熱性の問題などから高温試験への適用は多くの技術的困難を伴う。つまり、高温液体中での複合材料の非接触かつ高精度な損傷モニタリング手法はない。

< 引用文献 >

Nozawa, et al., Fusion Eng. Des. 88 (2013) 2543.

Maillet et al., Mechanical Properties and Performance of Engineering Ceramics and Composites VII (2012).

野澤 貴史、科研費若手(B)「擬延性セラミックス基複合材料の損傷蓄積モニタリングによる寿命予測に関する研究」2013-2015

Nozawa, et al., J. Nucl. Mater. 455 (2014) 549.

2. 研究の目的

(1) 損傷時に複合材料から発せられるAEの液中伝播挙動に着目し、高精度な三次元位置標定及び局所損傷マッピングを可能とする新しい損傷モニタリング手法を確立する。

(2) 水中伝播AEを用いた破損過程の分類のための解析手法を整理する。

(3) 高温水環境下での液中伝播AEによる損傷評価の適用可能性を明らかにする。

3. 研究の方法

(1) 水中伝播AEを用いた三次元位置標定手法の確立のため、損傷位置標定に及ぼす試験因子の影響評価を進めるとともに、標定位置の精緻化に資する試験データのフィルタリング法について検討した。具体的には、平織Nicalon繊維を強化繊維とし、化学気相浸透(CVI)法で作製したSiC/SiC複合材料からディスク試験片(外径25mm×厚さ1.5mm)を切り出し、支持スパン20mm、荷重スパン10mmの等二軸曲げ試験(ASTM C1499)を行った(図1)。試験は室温水中にて実施し、試験中はき裂の発生・進展に伴い発生・水中を伝播するAE信号を、水槽表面に設置した複数のAEセンサー(図2)でリアルタイムに記録し、試験後にき裂源の位置標定とき裂の蓄積の様子を評価した。

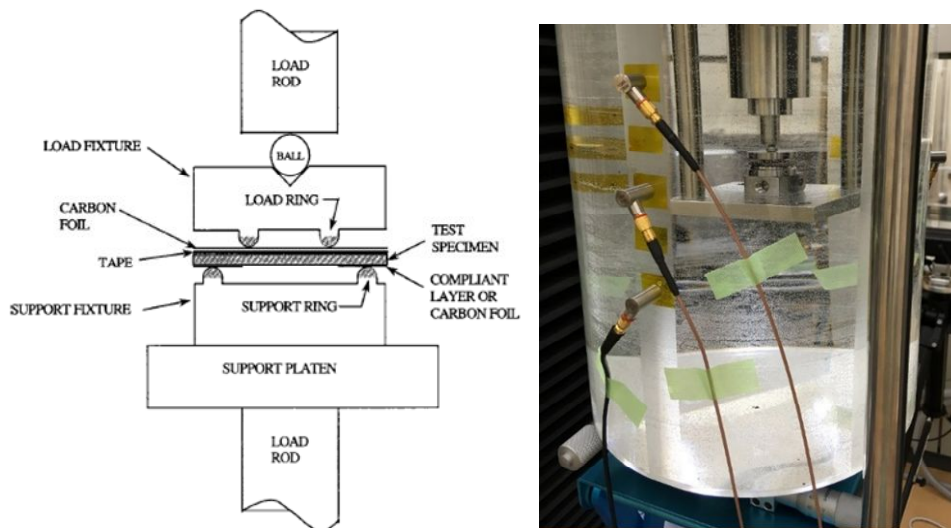


図 1 等二軸曲げ試験による水中伝播 AE 計測の様子

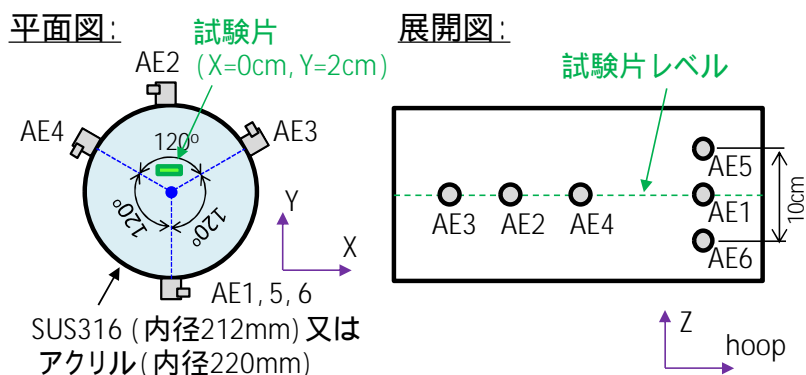


図 2 AE センサーの貼り付け位置と試験位置の関係

(2) 水中伝播 AE を用いた破損過程の分類のため、(1)の実験で得られた AE 信号に対して、重心周波数の経時変化を評価するとともに、AE 信号のパラメーター(図 3)の一つである平均周波数(カウント数を持続時間で除した値)と RA 値(立ち上がり時間を最大振幅で除した値)に着目し、破損モードの分析を実施した。

(3) 高温水環境下での液中伝播 AE による損傷評価の適用可能性を明らかにするため、約 65 (ヒーター加熱無) 約 75 (ヒーター加熱有) の高温水、100 の沸騰水下での位置標定を実施した。

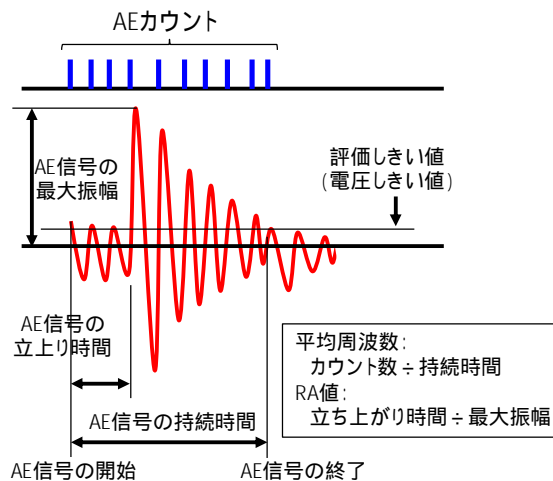


図 3 AE 信号における波形パラメーター

4. 研究成果

(1) 等二軸曲げ試験時の個々の AE 信号について、重心周波数または最大振幅を基準に整理したところ(図 4)。前者では有意な信号の絞り込みができなかったのに対して、後者では約 60dB 超の AE 信号を抽出評価した場合に限り、標定位置結果が試験片位置とも良く一致することが明らかとなった。高エネルギー AE 信号は破壊に直接的に寄与したき裂の発生によるものと考えられ、振幅フィルタの適用によって、より確からしいデータを選別可能となり、このことで位置標定の精緻化が可能となった。

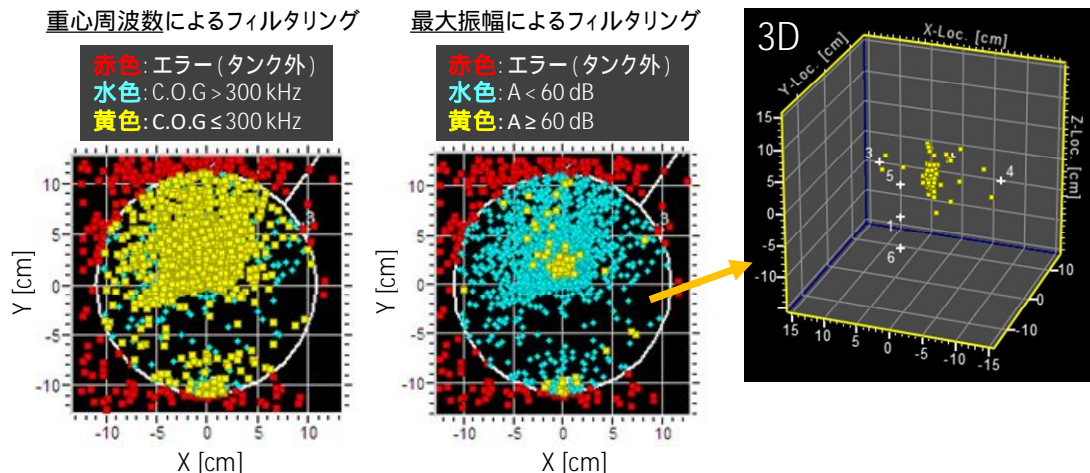


図4 異なるフィルタリング手法による二次元/三次元位置標定結果

(2) 振幅フィルタリング法の閾値について、特に地震解析で多く活用されるレートプロセス理論[5]を適用し、下方累積 AE 数と最大振幅の関係 (図 5) を得ることで、その変化点 (破壊機構が大きく変化する点) から客観的に特定できる見通しを得た。なお、水槽の材質が異なる場合、得られる AE データの数的・質的な違いはあるが、振幅フィルタリングの適用により、いずれの場合もおおむね同等の位置標定が可能であることを確認した。ただし、アクリル水槽ではレートプロセス理論で比較的良く記述可能も、高振幅側で明瞭なズレを確認し、このことから混合破壊メカニズムの影響の可能性が示唆された。一方 SUS316 水槽では、より顕著な非線形性が確認されたことから、水/SUS316 タンク界面での高周波 AE 信号の減衰の可能性が懸念される。

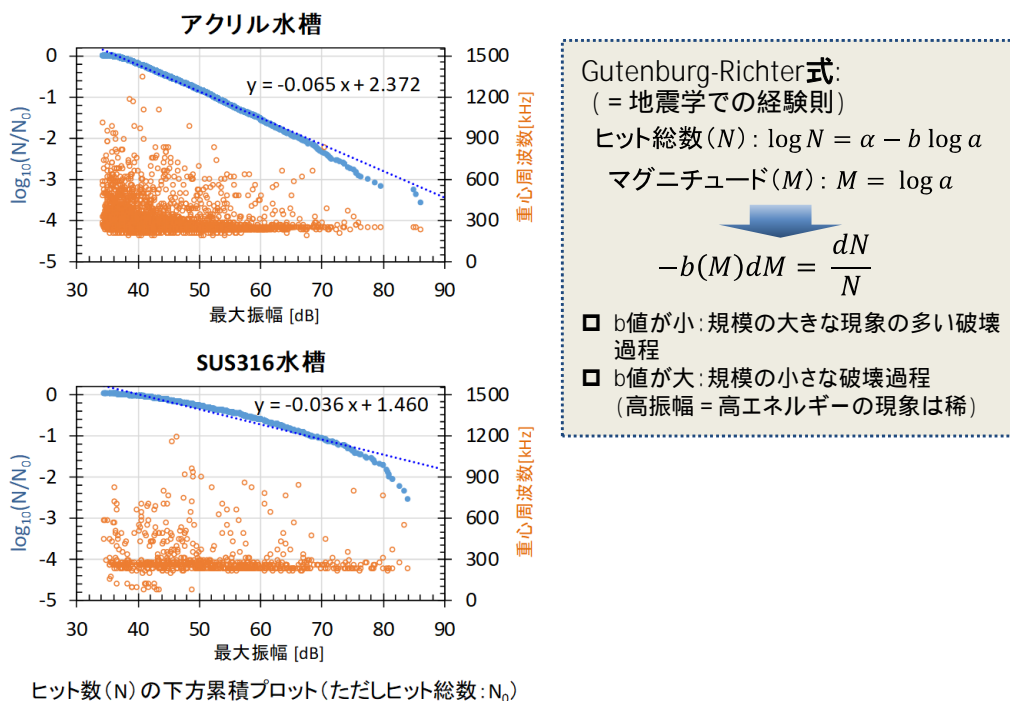


図5 AE ヒット数と最大振幅の関係

(3) 負荷レベルの違いによる損傷蓄積挙動の特徴を明らかにするため、アクリル水槽での試験結果について、ヒット数及び重心周波数の経時変化を評価した (図 6)。比例限度応力 (PLS) 超で、低振幅・高周波信号の増加傾向にあり、このことから繊維すべりの可能性が示唆された。一方、低周波 (約 250kHz) 信号は試験全体を通して検出され、これはき裂発生によるものと予想された。そこで、重心周波数 300kHz の AE データのみを抽出し、平均周波数と RA 値で整理 (図 7) することで、き裂の発生メカニズムについて考察した。一般に、平均周波数が高い場合は引張型、RA 値が高い場合はせん断型のき裂発生であることが知られており、SiC/SiC 複合材料の位置標定を決定づけるデータは引張型の破壊信号であることが予想される。逆に、微視き裂の発生と考えられるせん断型き裂を示す低い最大振幅の AE 信号では位置標定の高精度化は困難との結論を得た。

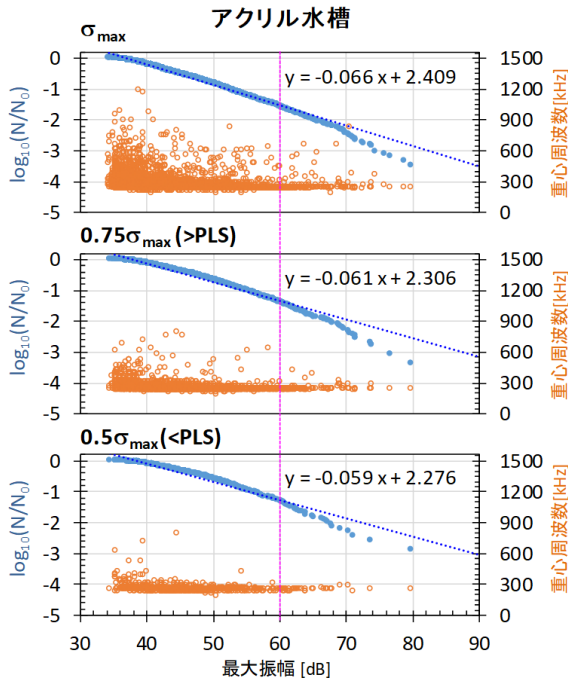


図6 負荷レベルの違いによる損傷蓄積挙動の特徴

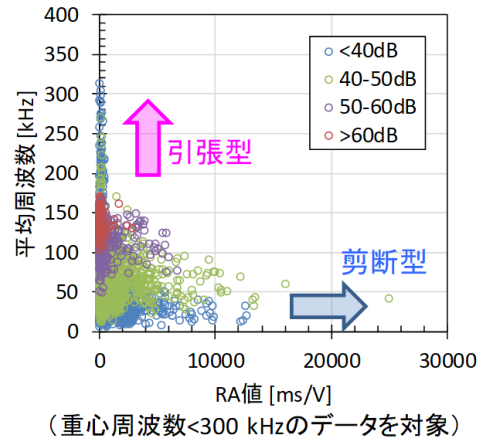


図7 平均周波数とRA値の関係

(4) タンク材質によらず、負荷開始の早期から継続的にAE信号が蓄積(数万~数十万点)するが、複数のセンサーによる位置標定と本研究で提案した振幅フィルタリングの併用により、破壊に有意なAE信号を大幅に絞り込むことが可能となる。フィルタリング前後のAEヒット数と累積エネルギーの時間依存性を図8に示す。フィルタリング前においても破損の開始を示すAE検出強度や有意な破壊過程を示す比例限度応力を良く検出可能であったが、フィルタリング後においても本解釈を損ねることなくAEデータの絞り込みが達成された。このことは、この後に続く個々の波形解析において大幅な効率化を図ることが可能となる点で意義深い。

SUS316水槽

生データ: 66,531 → 位置標定: 774 → 振幅フィルタリング: 166

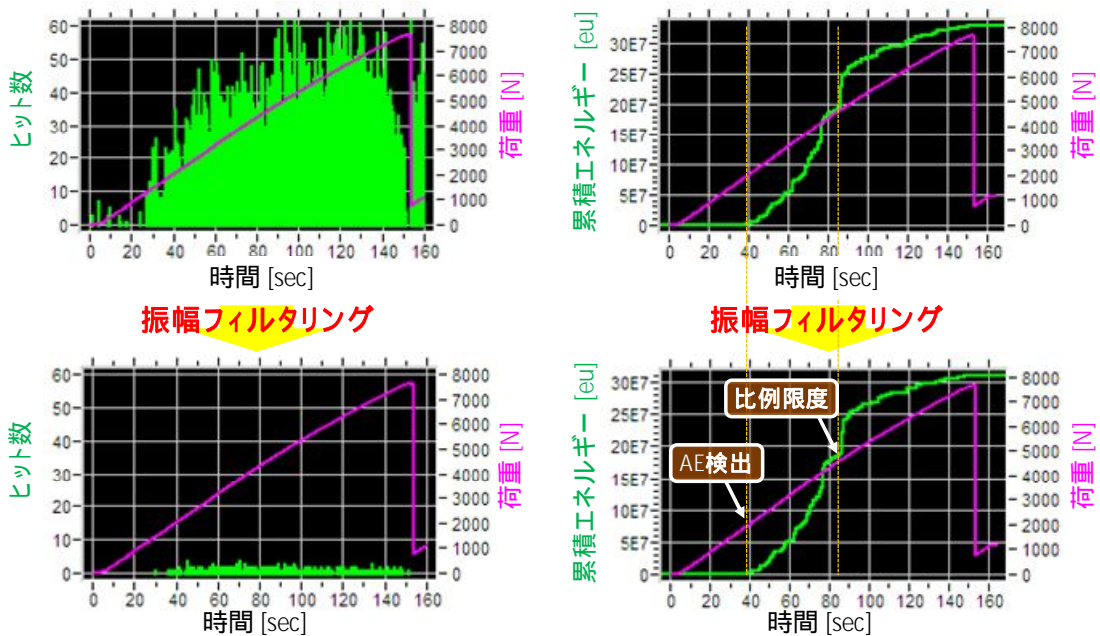


図8 データ解釈における振幅フィルタリングの影響

(5) 高温試験の結果(図9)から、沸騰下及び約75のヒーター加熱下での試験では、ノイズのため、信号の分離が著しく困難な状況であった。一方、約65のヒーター加熱が無い条件では有意なノイズは発生せず、位置標定が可能であった。このことから加熱方式の最適化(+沸

騰下では気泡による影響の除去) という試験技術の課題は認められたが、原理的には高温においても水中伝播 AE 法による十分な位置標定と破損評価が可能との結論を得た。

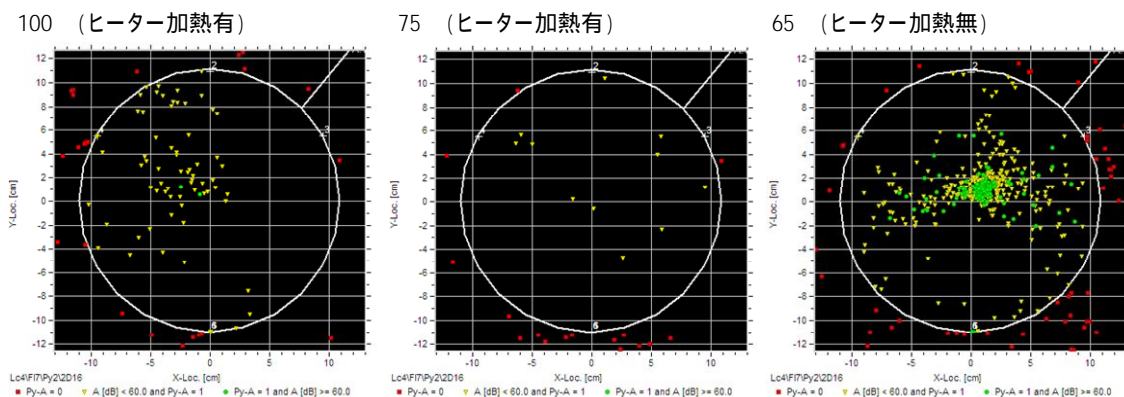


図9 高温水環境での水中伝播 AE 法による破損評価

< 引用文献 >

大津政康、アコースティック・エミッションの特性と理論、森北出版株式会社、2005 年

5 . 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 0 件)

〔学会発表〕(計 4 件)

野澤 貴史、谷川 博康、「水中伝播アコースティックエミッション法による SiC/SiC 複合材料の損傷位置標定とデータフィルタリング法に関する研究、日本原子力学会 2017 年春の年会、2017

Takashi Nozawa, Hiroyasu Tanigawa, “ Damage monitoring of silicon carbide and its composites by underwater acoustic emission waves, ” 12th Pacific Rim Conference on Ceramic and Glass Technology (国際学会), 2017

Takashi Nozawa, Hiroyasu Tanigawa, “ Development of the underwater acoustic emission technique for composite damage characterization, ” 42nd International Conference and Expo on Advanced Ceramics and Composites (招待講演)(国際学会), 2018

野澤 貴史、谷川 博康、水中伝播アコースティックエミッション法による SiC/SiC 複合材料の損傷位置標定とデータフィルタリング法に関する研究、日本原子力学会 2018 年秋の大会、2018

〔図書〕(計 0 件)

〔産業財産権〕

出願状況 (計 0 件)

取得状況 (計 0 件)

〔その他〕

特になし。