

# 粒子分散強化型アルミニウム複合材の破壊機構に関する調査研究

Study on the Fracture Mechanism of the Al-SiC Composite

原田尚紀\* 新家 昇\*\* 宅間正則\*\*

Naoki Harada, Noboru Shinke, Masanori Takuma

Al-SiC 複合材料は多くの優れた特性を有する。しかしながら、その破壊挙動が複雑であり、構造用材料への応用を考えた場合には、その解明が必要である。本調査では、アコースティック・エミッション法によりその破壊挙動の解析を試みた。調査の結果、熱履歴が Al-SiC 複合材料の損傷度や破壊形態におよぼす影響について評価できることが示された。

The Al-SiC composite has various excellent properties, however, the fracture mechanism of the composite is complex. The mechanism must be clarified for applying it to the structural materials. In this research, fracture mechanism was analyzed by the Acoustic Emission method. The obtained results showed it possible that the effect of the thermal history on the damage and the fracture mode of the Al-SiC composite could be evaluated.

## 1. はじめに

本調査で注目したアルミニウム複合材料(以下アルミ複合材)は母材のアルミニウム合金(AC4A 相当材)を微細な硬質セラミックスである SiC で強化した複合材料である。軽量、高強度、制振性が高いなどの優れた特徴から、ブレーキディスク、自動車用エンジンのピストン、工作機械のフレームなどの構造用材料として応用され始めている。しかしながら、母材の耐熱性から、熱履歴を受けた場合、その強度低下(熱疲労)が懸念される。そこでアルミ複合材の熱履歴がおよぼす破壊挙動や、強度の変化について調査した結果について報告する。

## 2. アコースティック・エミッション法

アコースティック・エミッション(以下 AE)法は微小欠陥の発生に伴う弾性波を検出する技術であり、微細レベルの破壊現象に対して高い検出能力を有する。そのため、構造物の破壊診断などに应用されている。本調査では、AE法を用いてマイクロ破壊挙動を検出した。

## 3. 供試材および試験方法

### 3.1 供試材および材料試験

表 1 に示すアルミ複合材、比較材として片状黒鉛鋳鉄(以下鋳鉄)およびアルミ複合材の母材であるアルミニウム合金単体(AC4A)を供試した。アルミ複合材および鋳鉄のマイクロ組織を図 1 に示す。

表 1 供試材

	引張強さ (MPa)	母材融点	母材	第 2 相
アルミ複合材	166	827	AC4A	20 $\mu$ m SiC 粒子
鋳鉄	173	1420	パーライト鋼	片状黒鉛
AC4A	220	827	Al-Si-Mg	-



図 1 供試材の組織写真

### 3.2 熱履歴の付与

熱履歴の温度は供試材母材融点(絶対温度)の約 65% に相当する温度とし、保持時間は 10 分とした。すなわち、アルミ複合材は 300 $^{\circ}$ C、鋳鉄は 650 $^{\circ}$ C で 10 分間保持し、空冷するサイクルを 1 回の熱履歴と定めた。熱履歴を与え、母材の硬さ HV0.025 を測定した結果を図 2-(a) および図 2-(b) に示す。熱履歴を与えていない状態(“熱履歴 0 回”)から、アルミ複合材、鋳鉄ともに“熱履歴 5 回”で大きく硬さが低下し、“熱履歴 25 回”で硬さが低下しなくなった。以下それぞれ熱履歴 0 回材、5 回材、25 回材と表記する。

### 3.3 引張試験

引張試験片を図 3 に示す。破断位置を一定化するためノッチを設けた。引張試験速度は 0.5mm/min とした。アルミ複合材の母材であるアルミニウム合金(AC4A)単体も引張試験した。試験中に供試材が発する AE 信号を AE センサで計測した。AE 計測システムの概略を図 3 に示す。2 つの AE センサを用いることで外部ノイズを遮断した。サンプリング周期は 2 MHz および 5 MHz とし、すべての AE 信号を計測した。

引張試験における破壊の進行度をひずみ率、“ひずみ率 = (ひずみ / 全ひずみ)  $\times$  100 (%)”と定義し、ひずみ率に対して、表 2 に示す AE パラメータを評価した。

\* 技術開発本部 ナノ・材料研究所

\*\* 関西大学システム理工学部機械工学科

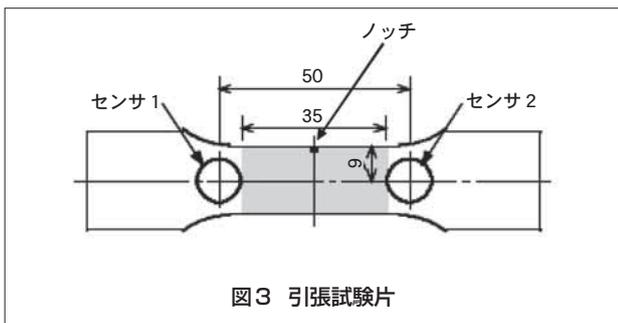
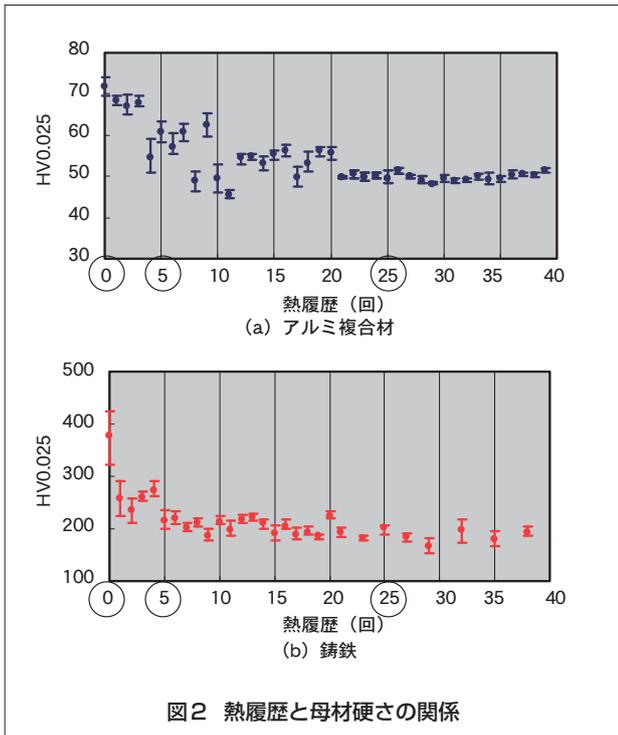


表2 AEパラメータ

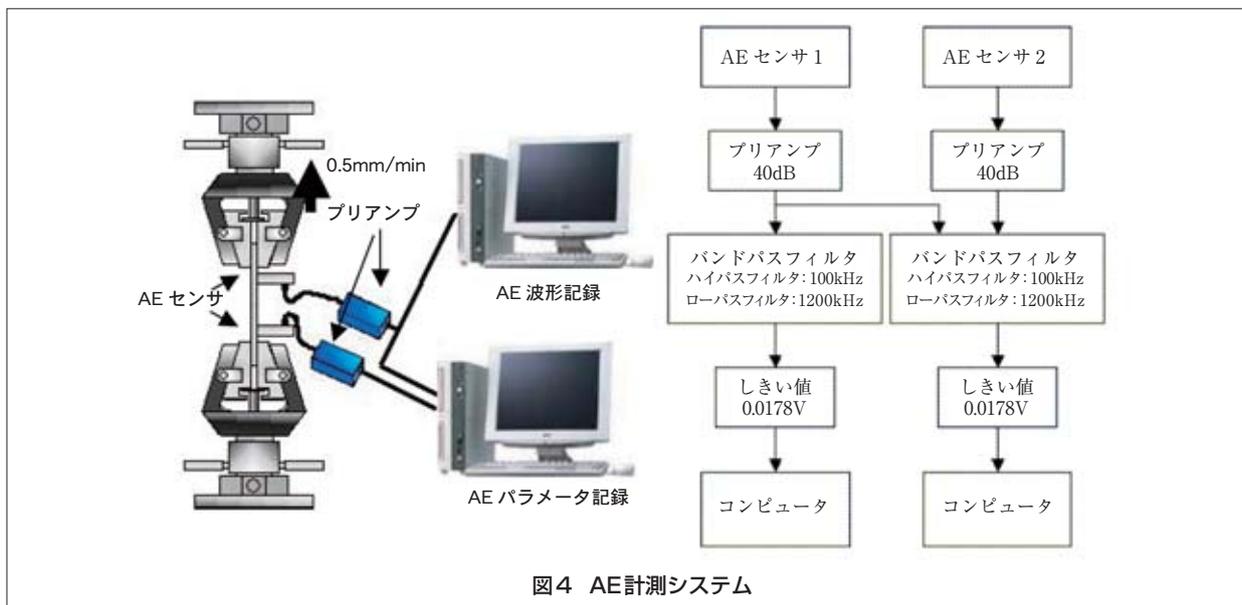
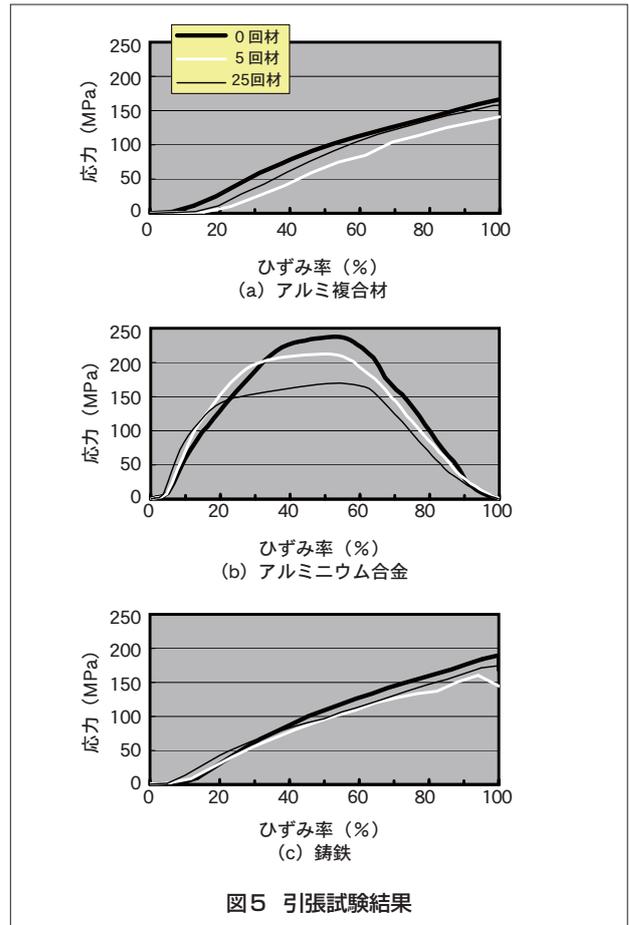
パラメータ	定義
累積 AE 事象数	試験中に集積された検出 AE 信号の数
AE 事象率	単位時間あたりの AE 信号の数

#### 4. 試験結果および考察

##### 4.1 引張試験

##### 4.1.1 引張試験結果

アルミ複合材、アルミニウム合金および鋳鉄の引張試験結果(応力-ひずみ線図)を図5-(a)~図5-(c)に示す。図5-(a)および図5-(c)から、アルミ複合材および鋳鉄は熱履歴を受けることによる引張強さの低下はほとんどない。一方、図5-(b)から、アルミニウム合金は熱履歴が多くなるにしたがって、引張強さは低下している。



これらのことから、アルミ複合材および鋳鉄はアルミニウム合金に比べ、熱影響を受けにくいことがわかる。

#### 4.1.2 AE計測結果

AE計測結果を次頁図6-(a)～図6-(c)に示す。

##### a) アルミ複合材

図6-(a)から、アルミ複合材は試験初期にはAE信号がほとんど検出されず、ひずみ率30%付近から、徐々に検出され、破断直前に集中的にAE信号が発生するという傾向が観られた。アルミニウム合金の累積AE事象数が10000events以上と多い{図6-(b)}に対し、アルミ複合材は100events程度と少ない。これは転位移動を第2相であるSiCが妨げるピン止め効果が作用していることを示している。また、熱履歴の増加に伴い、AE信号のパラメータに変化がないことから、アルミ複合材は熱履歴による影響を受けにくいことがわかる。

##### b) アルミニウム合金

図6-(b)から、アルミニウム合金は試験初期からAE発生率が増加していることがわかる。しかし、試験後期ではAE事象率が減少している。これは、試験初期ではアルミニウム合金に転位移動の障害がほとんどないことを示している。しかし、変形が進んだ試験後期ではすでに発生した転位が新たな転位移動を妨げていることを示している。また、熱履歴の増加に伴い、累積AE事象数が増加していることがわかる。

##### c) 鋳鉄

図6-(c)から、アルミ複合材同様、鋳鉄は破断直前にAE信号が集中的に発生していることがわかる。また、アルミ複合材に対し、鋳鉄は累計AE事象数が多い。例えば、熱履歴0回材ではアルミ複合材の累積AE事象数がおおよそ70eventsであるのに対し、鋳鉄は800eventsである。鋳鉄の第2相が粗大な片状黒鉛であり、アルミ複合材のようなピン止め効果が作用しなかったためと考えられる。また、熱履歴の増加に伴い、破壊の初期からAE信号の発生が認められるため、アルミ複合材に比べ、熱履歴の影響を受けやすいと考えられる。

#### 4.2 AE解析結果 (次頁図7参照)

引張試験中に計測されたAE信号を高速フーリエ変換によって周波数の発生率に分類し、さらにその周波数について加重平均周波数分布図を作成した。この統計手法により、高い頻度で発生する周波数成分を重み付けし、破壊の特徴を抽出できる<sup>1)</sup>。本項ではアルミ複合材の熱履歴0回材および25回材の引張試験中のAE波形について加重平均周波数分布図を作成し、その熱履歴が破壊形態におよぼす影響を検証した。

応力-ひずみ線図の傾きが変化すれば、破壊形態が変化すると考えることができる。応力-ひずみ線図の傾きで3つ{区間(A): 1未満、区間(B): 1以上2未満、区間(C): 2以上}に区分しておのおのの区間について加重平均周波数分布図を作成した。その結果を図7-(a)および図7-(b)に示す。

なお、別の試験および検討により、以下の周波数を持

つAE波形の破壊形態を認識している。

- ・母材の変形 = 250kHz 付近
- ・母材の破断 = 500 kHz 付近
- ・SiCの破壊 = 750kHz 付近と1MHz 付近
- ・母材-SiC界面のはく離 = 950MHz 付近

図7-(a)から熱履歴0回材のピーク変化は以下のようになった。

区間(A)において、250kHz 付近、750kHz 付近および1MHz にピークが観られる。

区間(B)において、500kHz 付近および1 MHz 付近のピークが増加し始めている。

区間(C)において、1MHz 付近のピークがさらに増加し、950kHz 付近のピークが発生し始める。

つまり、応力を負荷し始めると母材の変形とSiCの破壊が起こり、さらに応力を加えると、母材が破断し、SiCの破壊が盛んに起こり、破断直前では、母材とSiC界面のはく離と粒子の破壊がともに発生し破壊に至ると考えられる。

図7-(b)から熱履歴25回材のピーク変化は以下のようになった。

区間(A)において、250kHz 付近のピーク以外はほとんど観察されない。

区間(B)において、500kHz 付近のピークが増加し、750kHz 付近および900kHz ~ 1 MHz のピークのわずかな増加が観られる。

区間(C)において、500 kHz、750 kHz および900 kHz ~ 1 MHz 付近のピークが増加する。

つまり、応力を付加し始めると母材の変形が支配的に起こり、さらに応力を加えると、母材が破断し、SiCの破壊と母材-SiC界面のはく離が生じ、破断直前では、すべての破壊形態が生じるものと考えられる。

熱履歴0回材および25回材の比較から、熱履歴を受けた場合、母材の軟化により、試験初期では母材の変形が大きくなること、および試験中期から母材-SiC界面のはく離の発生頻度に大きな特徴があることがわかった。しかしながら、熱履歴を受けた場合であっても、引張強さの低下はほとんどなく、SiCによる強化機構が維持されている、つまり母材-SiC界面のはく離の程度はわずかであると推察される。

## 5. まとめ

熱履歴がアルミ複合材の損傷度や破壊形態におよぼす影響をAE法によって調査した結果、以下のことがわかった。

- ・熱履歴に対し、アルミ複合材と鋳鉄を比較すると、アルミ複合材の方が安定である。
- ・アルミ複合材のSiCによる強化機構は熱履歴を受けた後も維持されていて、強度低下はほとんどない。
- ・アルミ複合材の破壊形態が推定できた。

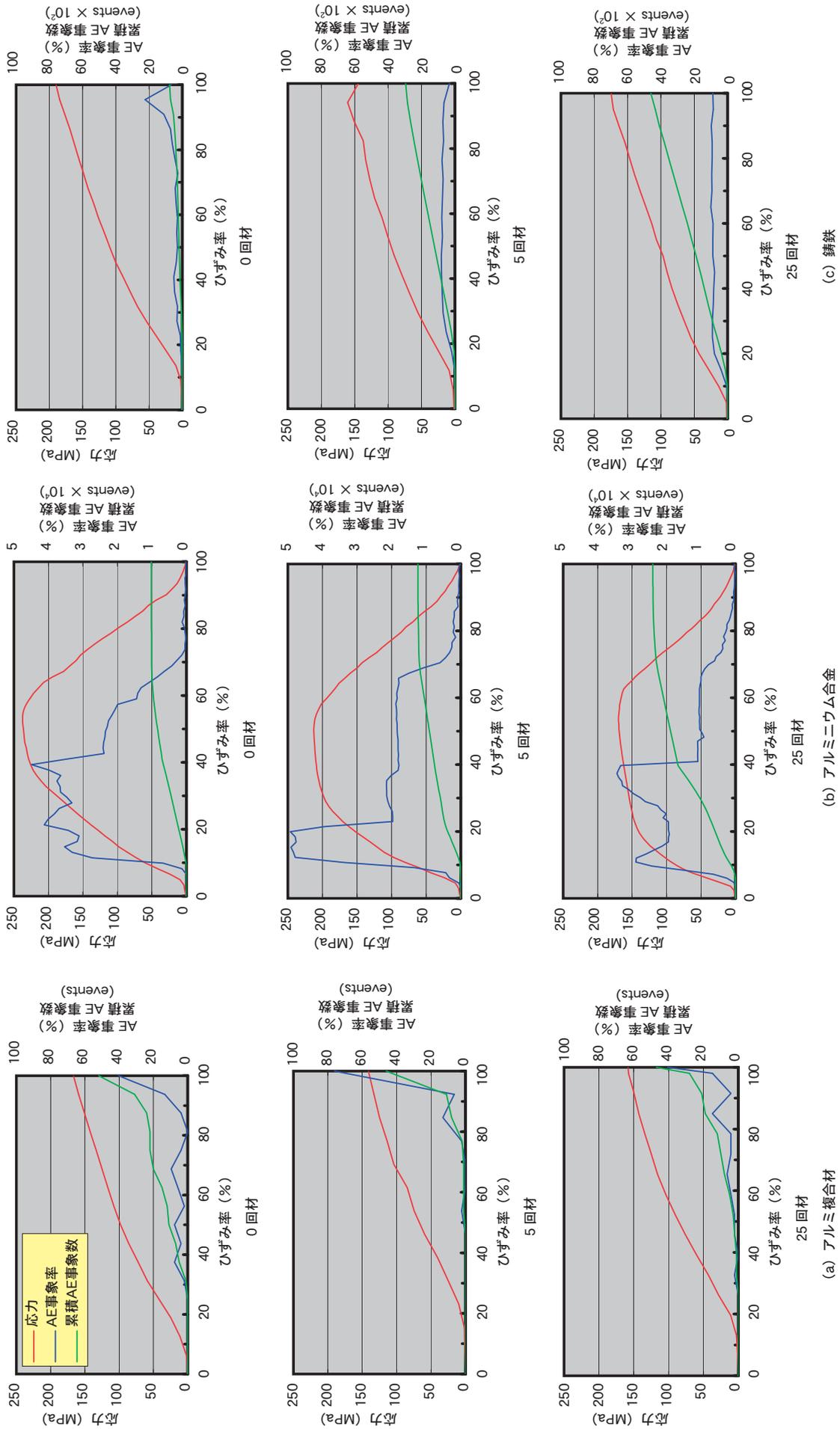
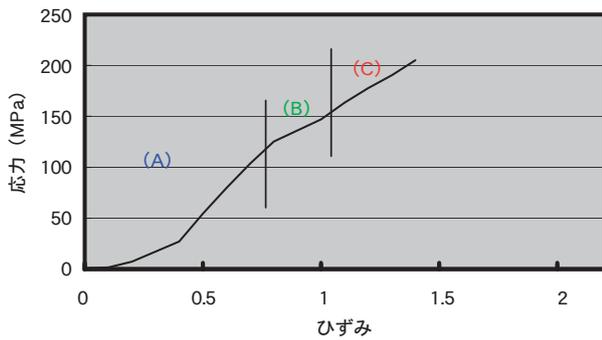
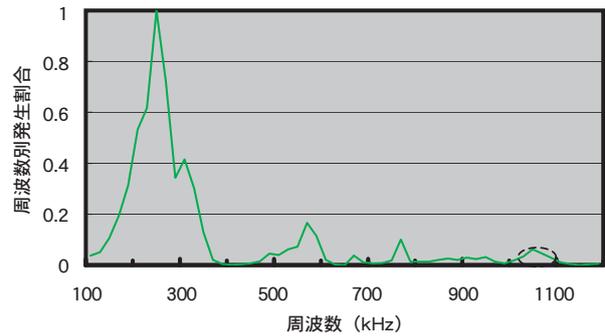


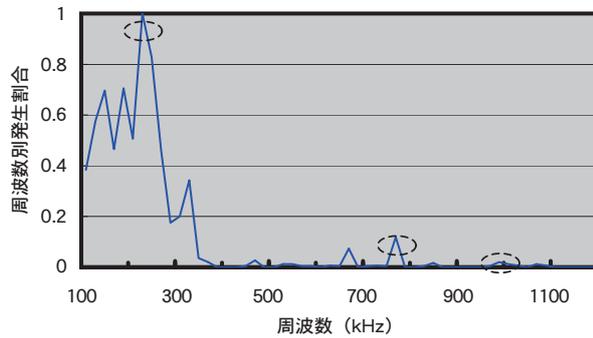
図6 AE計測結果



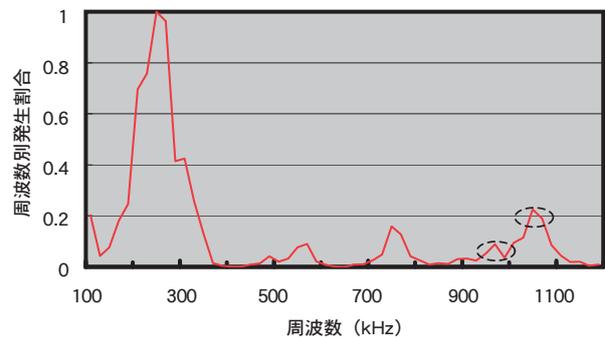
応力 - ひずみ線図



区間 (B)

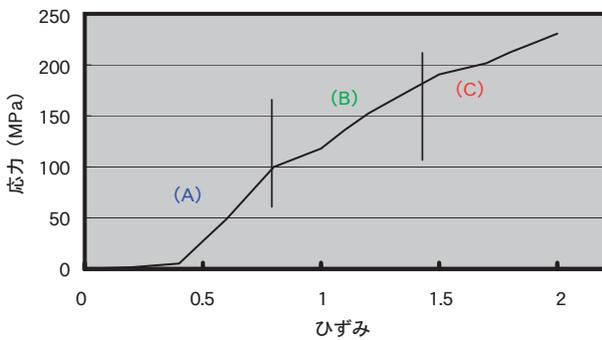


区間 (A)

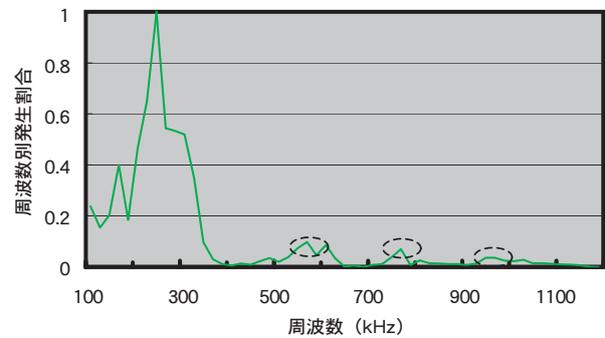


区間 (C)

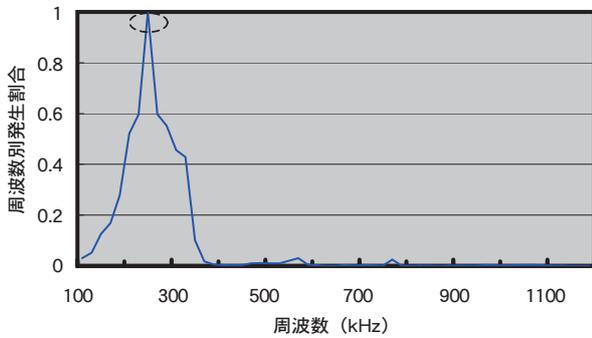
(a) アルミ複合材熱履歴0回材



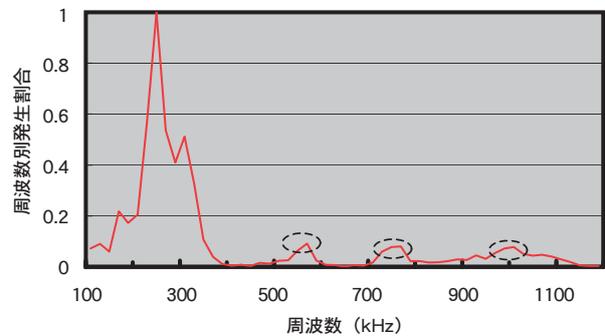
応力 - ひずみ線図



区間 (B)



区間 (A)



区間 (C)

(b) アルミ複合材熱履歴25回材

図7 加重平均周波数分布図

## 6. 今後の課題

本報ではアルミ複合材の引張試験結果の検討に留まった。アルミ複合材の用途拡大には疲労など種々の破壊に対してAE法による評価を行う必要がある。また、AE法のみならず他の検査法との比較や併用も試みる予定である。

### 謝辞

本試験研究の実施において、ご尽力いただいた関西大学システム理工学部機械工学科材料工学研究室の学生の皆様に対し、誌上ではありますが心中より御礼申し上げます。

### 参考文献

1) 宗宮詮、浅野哲、杉山拓、AFPRの破壊音の周波数分布特性と破壊機構の関連性、日本機械学会論文集A編62巻598号 (1996.06)

### 執筆者

原田尚紀

Naoki Harada

平成10年入社

新材料の研究・開発に従事



### 新家 昇

Noboru Shinke

関西大学教授



### 宅間正則

Masanori Takuma

関西大学教授

