

2022（令和4）年度 修士学位論文

CFRP の繊維および界面の特性が繊維破断 AE に与える影響

Effect of mechanical property and surface treatment of carbon
fibers on fiber-break AE of single fiber composite

2023 年 3 月 3 日

高知工科大学大学院 工学研究科基盤工学専攻
航空宇宙工学コース

1255025 石原 功一

指導教員 高坂 達郎

目次

第1章 緒言	1
1.1 研究背景	1
1.2 先行研究	2
1.3 研究目的	2
第2章 AE測定による損傷同定法	3
2.1 AEとは ²⁻⁴⁾	3
2.1.1 AEとは	3
2.1.2 AEセンサ	3
2.1.3 AE計測システム	4
2.1.4 AE特性	5
2.1.5 FFTによる周波数解析	6
2.1.6 Wavelet解析	7
2.2 FRPの損傷とAE特性	9
2.2.1 FRPの微視的損傷 ¹⁾	9
2.2.2 複合材料の微視的損傷とAE特性	9
2.2.3 フラグメンテーション試験法	11
第3章 材料および計測・試験方法	12
3.1 材料および試験片	12
3.1.1 繊維	12
3.1.2 樹脂	14
3.1.3 試験片	15
3.2 AE測定システム	17
3.3 AE解析システム	17
3.3.1 既存のAE波形パラメータ	17
3.3.2 Wavelet変換によるAE波形解析	18
3.4 実験方法	22
3.4.1 実験方法	22
3.4.2 実験方法(AE測定)	25
3.4.3 実験方法(偏光観察)	26
第4章 実験結果(機械特性と界面処理)	28
4.1 AE波形とWavelet変換によるAE特性の解析	28
4.1.1 AE波形	28
4.1.2 AE波の時間一周波数データ(scalogram)	31
4.2 界面特性と機械特性(試験片平行部25mm)	34

4.2.1	負荷ひずみに対する wavelet 解析による AE 特性	34
4.2.2	中心周波数	34
4.2.3	振幅	37
4.2.4	持続時間	39
4.2.5	高周波 AE と繊維破断カウント数の関係	40
4.3	機械特性(試験片平行部 5 mm と 10 mm)	41
4.3.1	負荷ひずみに対する wavelet 解析による AE 特性	41
4.3.2	中心周波数	41
4.3.3	振幅	43
4.3.4	持続時間	46
4.3.5	高周波 AE と繊維破断カウント数の関係	47
4.3.6	目視観察による繊維破断と周波数特性	48
第 5 章	結言	51
	参考文献	52
	謝辞	53
付録	各試験片の AE 特性	54
	Fig. A 試験片平行部 25 mm	54
	Fig. B 試験片平行部 5 mm・10 mm	74

第1章 緒言

1.1 研究背景

複合材料とは2種類以上の材料を混合することである。その代表的な材料の一つに繊維強化プラスチック (FRP : Fiber Reinforced Plastic) があり、繊維で補強されたプラスチック材料である。FRP は基本的にプラスチック材のため錆や腐食しづらい。その中でも炭素繊維強化プラスチック (CFRP) は高剛性、高強度や軽量性に優れているため、航空機器や自動車、スポーツ用品まで幅広く使用されている。しかし、CFRP は目視できない内部損傷が生じる欠点がある。一般的に複合材料の破壊形態には、母材の割れ (matrix cracking)、繊維樹脂間の界面剥離 (fiber/matrix debonding)、繊維破断 (fiber break)、繊維の引き抜き (pull-out)、層間剥離 (delamination) など多くの形態があり、複雑な破壊様相を示す¹⁾。そのため、CFRP の強度特性を明らかにする上では、破壊がどのような形態で進行するのかを把握することが重要である。そのような微視的な破壊形態を同定する手法として、非破壊試験や破面観察がある。破面観察は最終的な破壊面の様相から、破壊の発展経過を同定する手法であり、事故後の原因究明には大いに役立つものの、破壊面以外の箇所の破壊進展状況は分からない。また、リアルタイムでは情報を得ることが出来ない。それに対して非破壊試験は、リアルタイムで材料内部の破壊状況を得ることが出来る。

非破壊試験には超音波探傷、X線 CT、AE (Acoustic Emission) 法など様々な手法がある。しかし超音波探傷や X線 CT は、構造物の運用を停止して検査をする必要があり、運用中に用いるのは難しい。一方で AE (Acoustic Emission) 法は、破壊に伴う弾性波を測定する手法であり、運用中にも用いることが可能である。

AE とはひずみエネルギーが破壊に伴って弾性波として放出される現象である。AE 法は構造物や部材の動的な損傷をリアルタイムに検出や位置の特定できる検査法で、タンクやダムなどき裂の検査に利用されている²⁻⁴⁾。過去の研究より、CFRP の損傷形態の違いから AE の周波数や振幅、波形、持続時間などの AE 特性が異なることはよく知られており、AE 特性から破壊モードを推定する研究が多く行われている⁵⁾。これらの研究では、AE 法によって破壊モードが推定可能であることが示されているが、例えば損傷モードを特定する周波数の範囲も広く、材料によっても異なっており、やや大雑把に思える。この原因は複数の損傷モードがほぼ同時に起きた時、FFT によって周波数解析を行うと、複数の損傷に起因する AE が重なり、解析周波数に影響を与えてしまうことにある。そのため、wavelet 解析による時間-周波数空間解析を用いた損傷モードの同定に関する研究が近年では行われている⁶⁾。しかし、損傷モードのカテゴリは従来の手法に従った大雑把なものが殆どである。wavelet 解析をより有効に活用するためには、特定の損傷モードで生じる AE 特性を、従来よりも詳細に明らかにする必要があると考える。なお、これらの研究については、2章にて詳細に供述する。

以上から本研究では、基本的なモードである繊維破断とそれに伴う界面剥離、繊維の引き抜きに着目し、その3つのモードが生じる短繊維強化複合材料 (SFC, single fiber composite) の引張試験 (フラグメンテーション試験) を行い、wavelet 解析により AE 特性を得ることを考えた。

1.2 先行研究

これまでに繊維破断と界面剥離による AE の特性を Wavelet 解析で詳細に調べる手法を構築し、AE 特性による損傷モードの特定について研究が行われてきた⁶⁾。従来の特性解析の手法は、高速フーリエ変換 FFT (fast Fourier transform) を用いた周波数解析であった。AE の損傷モード、特に繊維破断と界面剥離の精密な特定には、この手法での AE 特性パラメータはあまり有効ではなかった。これは繊維破断と界面剥離の AE 特性が似ているものがあるためであった。特に繊維破断による高周波 AE の持続時間は短く、FFT による解析では損傷同定が不正確あるので Wavelet 解析が提案された⁷⁾。

単繊維強化 FRP (SFC : Single Fiber Composite) の引張試験 (フラグメンテーション) 試験での炭素繊維およびガラス繊維の破断による AE 特性を Wavelet 解析で明らかにした¹²⁾。この結果、繊維の種類によらず、界面剥離は 300kHz 付近まで分布し、繊維破断は 300kHz~400kHz に分布することが分かった。300kHz 付近の高い周波数の界面剥離 AE は、Wavelet 変換を用いた解析により繊維破断と分離が可能であることが示唆された。ガラス繊維の AE は、振幅が炭素繊維より小さく、繊維破断 AE の周波数は、炭素繊維よりやや低くなることが示唆された。AE センサ 1 つで行われた先行研究では、センサの設置に偏りがあり、損傷源がセンサから離れていた場合、波の伝達中に外乱を受け減衰して高周波帯の AE が正確に検知できない。詳細な損傷同定を行うためには複数のセンサの利用やセンサの配置、試験片形状の変更が必要である。

1.3 研究目的

本研究では、繊維破断と界面剥離による AE の特性を、Wavelet 解析を用いて詳細に調べる手法を構築し、AE 特性による損傷モードの特定方法の確立を目的とする。また、その手法を用いて、炭素繊維の機械特性および界面処理による繊維破断 AE に与える影響を明らかにすることを目的とした。

第2章 AE測定による損傷同定法

2.1 AEとは²⁻⁴⁾

2.1.1 AEとは

AEとは、材料内部の動的なき裂や変形が発生する際に材料に蓄えられていたひずみエネルギーが弾性波として放出される現象である。AEセンサで弾性波を検出することで、損傷をモニタリングする非破壊試験のことをAE法という。AE信号には、突発型と連続型の二種類ある。突発型は破断や破壊によって生じるパルス波で、損傷発生や進展のモニタリングに応用されている。連続型は滑りや摩擦などによって生じる連続的な波で、機械の異常検出に応用されている。

AE法で使用されるAEセンサは一般的にPZT（ジルコン酸チタン酸鉛）などの圧電素子を使っている。検出機構はバネ、質量、ダンパーを組み合わせたバネマスダンパー系である。この系をFig 2.1に示す。質量 m をバネ（弾性定数 k ）とダンパー（ダンパー係数 c ）が支えた構造である。接着面で受けた変位 x から、センサ内の質量は相対変位 y が生じる。圧電素子の圧電効果を利用して、外部から加えられた力（ひずみ）を打ち消す方向に圧電素子内部で電荷を発生させAE信号を検出している。

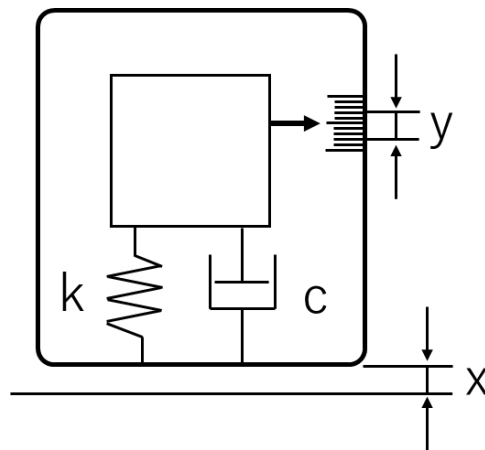


Fig 2.1 Schematic view of AE sensor

2.1.2 AEセンサ

AEセンサには共振型と広域型の二種類がある。共振型は共振周波数付近の感度を向上させたセンサで、ノイズ感度が下がる。時間周波数解析には不向きで、特定の損傷や摩擦挙動をとらえるのに向いている。広域型は数 k ～数MHzまでの帯域で測定可能で、感度は共振型より低くノイズが混入する。しかし様々な損傷の解析に向いており、時間周波数解析が可能である。本研究で使用するのは広域型センサで、NF回路設計ブロック株式会社のAE-900M-WBを使用する。

広域型センサは圧電素子の周りをダンパー材で覆い、共振を抑えることで広域の周波数を得る。広域型AEセンサの構造をFig2.2に示す。

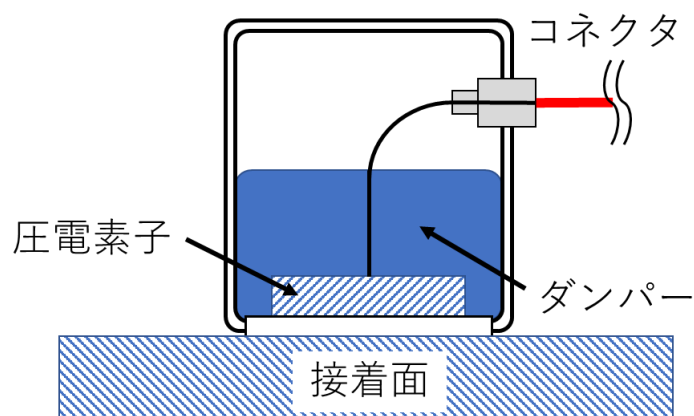


Fig.2.2 Structure of broad-band AE sensor

2.1.3 AE 計測システム

AE 信号の強度は微弱なため、二段のアンプを介して増幅するのが一般的である。き裂などから放出された信号は、材料の表面に接着された AE センサによって検出され、電気信号に変換される。センサの出力信号をプリアンプによって入力に必要なレベルまで増幅させる。プリアンプでは AE 信号は微小なためインピーダンス変換されており、通常 AE センサはプリアンプの使用が前提である。そして、もう一段の直流アンプを通してさらに増幅する。増幅された信号をオシロスコープで観測することで、AE 信号を測定できる (Fig.2.3)。

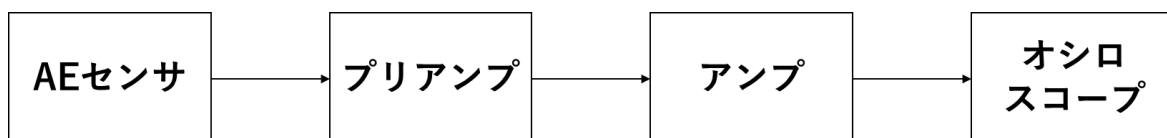


Fig.2.3 AE measurement system using oscilloscope

実用上は、ある一定強度以上の AE 発生数 (AE カウント) のみを測定し、破壊の評価に用いることが多い。その場合、オシロスコープは必要なく、AE の発生のみを特定する弁別器 (ディスクリミネータ, discriminator) を通して、AE カウントを記録する (Fig.2.4)。以前はオシロスコープが高価であり、さらに波形を取り込むための膨大なストレージを用意するのが難しかったため、この構成が多かった。しかし現代では、オシロスコープとストレージが安価となったため、オシロスコープにより波形を取り込む構成も一般的に良く利用されている。

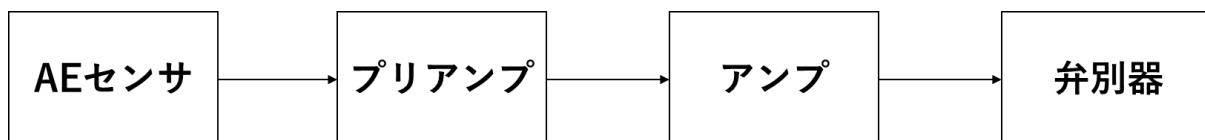


Fig.2.4 AE measurement system using discriminator

ディスクリミネータはそれ自身が直流アンプであり、また AE 信号発生弁別を TTL トリガ信号として外部出力する機能を持つものが多い。TTL トリガ信号は積分回路を通した包絡線 (エンベロープ) の

立ち上がりと立下りで、 V_H を超えた信号のみについて ON/OFF のトリガ信号を発生させる (図 2.5).
 そこで弁別の TTL をトリガ信号としてオシロスコープに取り込む構成が用いられることも多い (図 2.6).

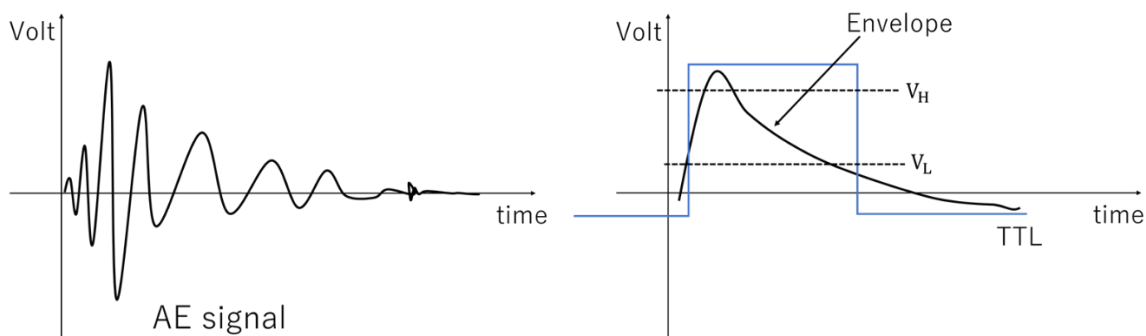


Fig.2.5 AE trigger system of discriminator

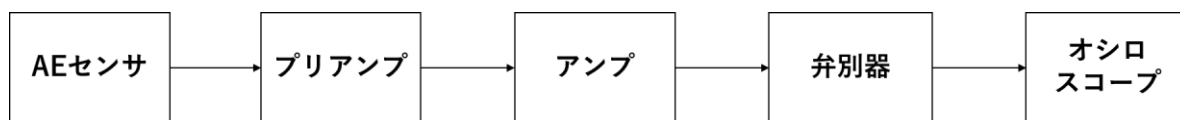


図 2.6 AE measurement system using discriminator and oscilloscope

2.1.4 AE 特性

A E 波形の特性としてよく用いられるのが、周波数、振幅、エネルギー、持続時間である。Fig.2.7 にそれぞれの特性と波形の関係を示す。

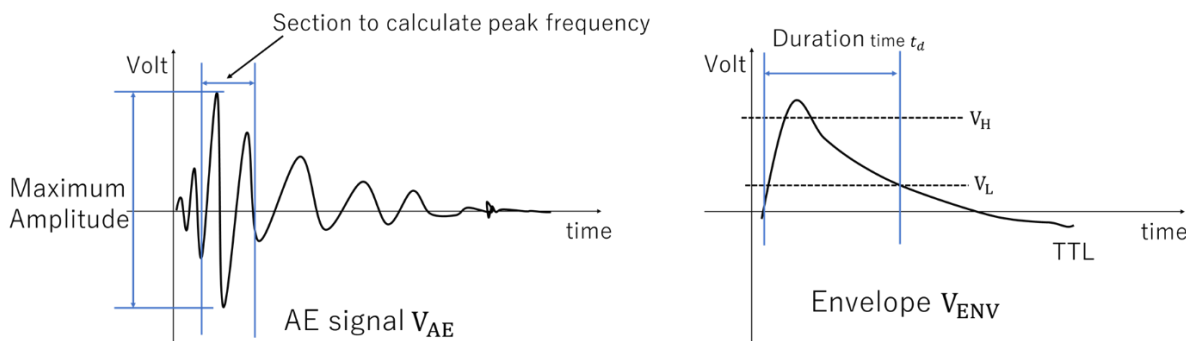


Fig.2.7 Relationship between AE parameters and waveform

- ・ 持続時間

エンベロープ信号の立ち上がりから立下りまでを下限 (V_L) を指定して測定した時間幅を持続時間 (duration time) と呼ぶ。 V_L の指定には、絶対値を用いる手法と、最大値からの相対値 (%) を用いる手法がある。

- ・ 振幅

信号の山から谷までの大きさを振幅と定義する。最大の振幅は、最大振幅またはピーク振幅と呼ばれる。また平均振幅を評価することもあるが、平均振幅は以下の $2\sqrt{2}$ RMS で計算する場合が多い。

$RMS = \sqrt{\frac{1}{t_d} \int_{t_0}^{t_0+t_d} V_{AE}^2 dt}$	(2.1)
$A_{avg} = 2\sqrt{2}RMS$	(2.2)

ここで t_d は持続時間、 t_0 は波形の立ち上がり時間である。

・エネルギー

エネルギーは、AE 信号の振幅の二乗の総和として定義する。

$U = \int_{t_0}^{t_0+t_d} V_{AE}^2 dt$	(2.3)
--	-------

よって、平均振幅とは以下の関係がある。

$U = \frac{t_d}{8} A_{avg}^2$	(2.4)
-------------------------------	-------

・周波数

AE の周波数定義としては、平均周波数 (AF, Average Frequency) とピーク周波数 (PF, Peak Frequency) がある。平均周波数は持続時間内の平均的な周波数であり、FFT により持続時間分のデータの周波数解析を行って得られる周波数である。ピーク周波数はピーク付近の周波数で、異なる周波数の AE が混じった時に、ピーク付近のデータのみ周波数解析を行うことにより最大強度の周波数成分を求める手法である。また、複数の周波数成分が同程度の強さを持つ場合は、周波数スペクトルから複数の周波数成分を捉えることもできる。

2.1.5 FFT による周波数解析

FFT (Fast Fourier Transform, 高速フーリエ変換) とは、離散フーリエ変換を高速に行う手法である。FFT の原理についてはここでは記述しないが、フーリエ変換について記述する。フーリエ変換は、周期的時間データ $f(t)$ に各振動数の複素位相項を掛けて積分する積分変換であり、以下で定義される。

$F(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} f(t)e^{-i\omega t} dt$	(2.5)
---	-------

この変換により、周期時間データは周波数空間の複素データに変換される。なお、正弦関数、余弦関数を掛ける場合は、それぞれフーリエ正弦変換、フーリエ余弦変換と呼ばれ、この場合は実数データとなる。複素データの位相は位相遅れであり、周波数分散によって波の速度が周波数で異なる場合には大きな意味を持つ。周波数成分の大きさは、複素データの絶対値であり、以下の式で表される。

$ F(\omega) = F(\omega)\overline{F(\omega)}$	(2.6)
---	-------

ここで、オーバーバーは複素共役を表す。これをパワースペクトルと呼ぶ。実際のフーリエ変換では、時間は有限幅 T を持つので

$F(\omega) = \int_0^T f(t)e^{-i\omega t} dt$	(2.7)
--	-------

となり、パワースペクトルを積分区間で割った P をパワースペクトル密度 (PSD, Power spectrum density) として扱う。

$P(\omega) = \frac{F(\omega)\overline{F(\omega)}}{T}$	(2.8)
---	-------

パワースペクトル密度は周期性の良い信号に対しては鋭いピークを示し、そのピーク位置が信号の周波数を与える。

2.1.6 Wavelet 解析

ウェーブレット解析とは検出された信号を周波数に応じて自由に時間間隔を変化させる時間-周波数解析である⁷⁾。周波数解析で有名な手法に FFT がある。FFT はすべての信号を周波数成分に時間成分を消して変換してしまう。一方、FFT に用いる時間区間短く区切り、それを移動すればフーリエ変換でも時間-周波数解析を行うことが出来る。これを STFT (Short Time Fourier Transform) と呼ぶ。ただし、周波数成分の波の数が少ないパルス状の信号の場合は、STFT は適さない。破壊に起因する AE 信号はパルス状の音源を持つため、STFT は適していない。その一方で、ウェーブレット解析は短い持続時間を持つ破壊による AE 波形の解析に適している。

解析で基準となるものはマザーウェーブレットというパルス状の波形である。Fig.2.8 は本研究で用いたマザーウェーブレット (Morlet (Gabor) ウェーブレット) であり⁸⁾、以下の複素ウェーブレット関数を用いている。

$\psi_0(t) = \frac{1}{\sqrt[4]{\sigma^2\pi}} \exp\left(-\frac{t^2}{2\sigma^2} + j\omega_0 t\right)$	(2.9)
---	-------

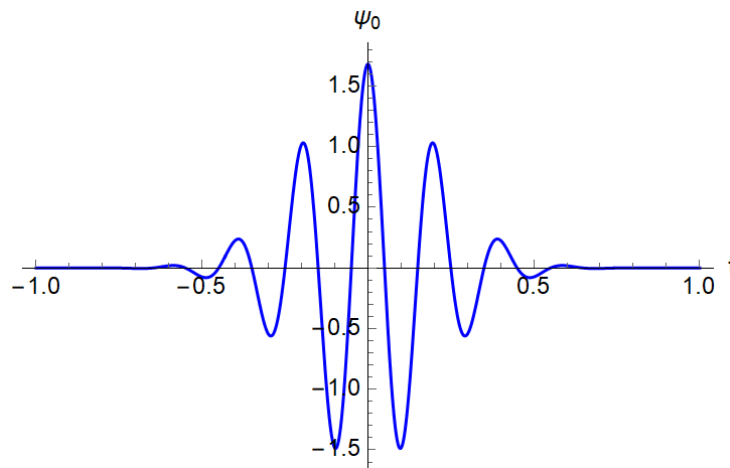


Fig.2.8 Morlet (Gabor) wavelet ($\sigma=0.2, \omega_0 = 10\pi$)

スケール化されたマザーウェーブレットは以下の式で表される。

$\psi_n(\tau) = \frac{1}{\sqrt{n}} \psi\left(\frac{\tau - \tau}{n}\right)$	(2.10)
--	--------

ここで、n はスケール、 τ は wavelet の中心の時間位置である。この基準の波を対象の波に合わせた縮尺に伸縮させ、解析したい信号にあてがって解析する (Fig2.9)。



Fig.2.9 Expansion of mother wavelet

個々のウェブレットを時間軸方向に移動させながら、それぞれの時間座標を解析する。すなわち簡略化すると、解析する信号の中にどれだけウェブレットに近い成分が含まれているのかを調べることである。これは以下で定義される内積によって計算されるのが一般的である。

$\langle f, g \rangle = \int_{-\infty}^{\infty} f(t) \overline{g(t)} dt$	(2.11)
--	--------

スケール n を変えながら信号 $f(t)$ とウェブレット $\psi_n(t)$ との内積を計算し、ウェブレット成分の大きさを表すウェブレット係数 d_n を求める。

$d_n = \langle f, \psi_n \rangle$	(2.12)
-----------------------------------	--------

ここで、ウェブレットの中心周波数は、スケールに対して

$\omega = \frac{\omega_0}{n}$	(2.13)
-------------------------------	--------

となる。

本研究では、変換に LabView の advanced signal processing Toolkit の WA Analytic Wavelet Transform.VI を用いている。ウェブレット変換には離散ウェブレット (DWT, discrete wavelet transform) と連続ウェブレット (CWT, continuous wavelet transform) があるが、本研究で用いた VI は、より詳細な周波数分布を得ることが出来る CWT を用いている。

2.2 FRP の損傷と A E 特性

2.2.1 FRP の微視的損傷¹⁾

FRP は強度、剛性、軽量性などにおいて多くのメリットを持つ材料であるが、一方で破壊過程が複雑であるため、破壊強度の予測が難しいというデメリットがある。Fig.2.10 に、FRP の代表的な損傷モードを示す。樹脂割れ、繊維破断、繊維/樹脂界面剥離、繊維の引き抜きが代表的な微視的損傷モードであり、また FRP は積層板として製造することが多いことから層間剥離が生じ易い。一般的な FRP 積層板では、破壊するまでにこれらの全ての損傷が生じると考えてよい。

FRP を安全に信頼して利用するためには、最終強度に至るまでの破壊過程を把握することは重要である。なぜなら、破壊過程を把握することで寿命予測が可能になり、また破壊を遅らせるための対策を効率的に模索できるようになるためである。

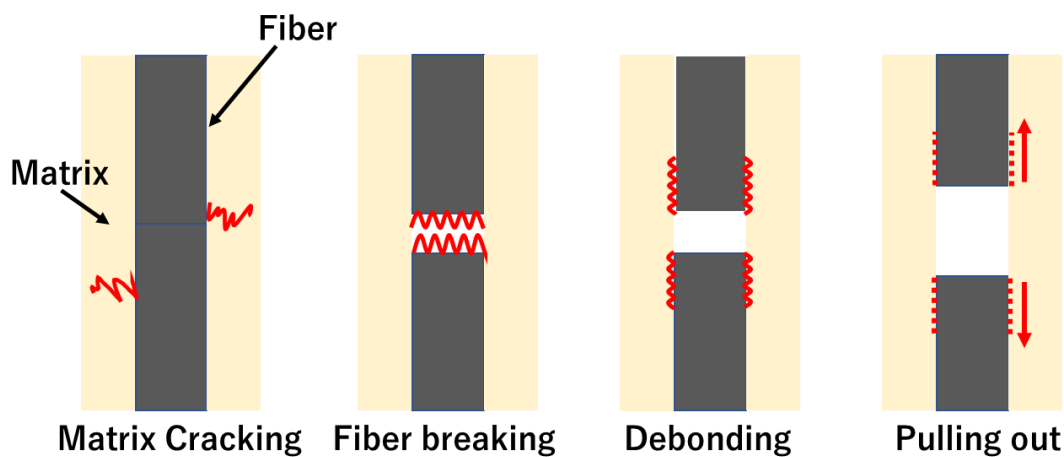


Fig.2.10 Representative damage mode of FRP

2.2.2 複合材料の微視的損傷と AE 特性

複合材料の微視的損傷を観察する手法として、これまで様々な手法が提案されてきた。超音波検査や X 線検査による層間剥離の映像化は標準的な非破壊検査法として、航空機等の FRP 構造の検査に活用されている。また近年では、微視的損傷の観察手法として、マイクロ/ナノフォーカス X 線を用いたマイクロ/ナノフォーカス X 線 CT 技術を用いた研究を多く見ることが出来る。これらは直接的に微視的損傷を捉えるために非常に有効な手法である。しかし、実験室レベルつまり試験片を用意する必要があり、実際の構造物の検査には向いていない。

一方で AE 測定は、微視的損傷を観察するわけではなく、損傷履歴を記録する手法である。履歴を保持することで、どの程度構造がダメージを受けたかを定量化することや運用中にリアルタイムでデータを得ることができ、実際の構造物の検査も容易であるというメリットがある。しかし FRP の損傷過程においては、様々な損傷モードに起因して非常に多くの AE が発生する。よって、損傷モードに応じて AE をカテゴライズできることが望ましい。このため、AE 特性から損傷モードを同定する研究が、これまで多くなされてきており、Ono らが多数の研究成果についてレビューをしている⁵⁾。

Li らのレビューにおいては、AE 特性と損傷モードとの対応について、Table.2.1 にまとめられている⁹⁾。ここで PA はピーク振幅、MTF は波形形状、PF はピーク周波数、AF は平均周波数である。これらの結果では、どのパラメータでもマトリクスクラック、界面剥離、繊維破断の同定は出来るというこ

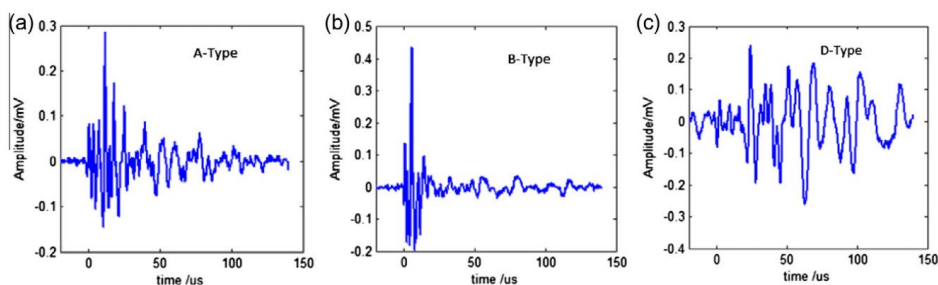
とが報告されている。また、表は鈴木や宅間らに報告された、CFRP¹⁰⁾、GFRP¹¹⁾の破壊機構とAE周波数の関係である。

これらの結果を見ると、マトリクスクラック、界面剥離、繊維破断、プルアウトの順に周波数が大きくなっていることが分かる。大雑把に言うと、マトリクスクラックが30-150kHz、界面剥離が150kHz-300kHz、繊維破断が250-500kHzの周波数を持ち、また周波数に関しては、この関係は強化繊維の種類にあまり依存しないということになる。

Table. 2.1 Summary of cluster results in the literature

(Li Li, S.V. Lomov, X. Yan, V. Carvelli, "Cluster analysis of acoustic emission signals for 2D and 3D woven glass/epoxy composites", Composite Structures, 116, 286-299 (2014)⁹⁾)

AE feature	Matri craling	Debonding	Delamination	Fiber breakage	Fiber pull-out	Materials	Reference
PA(db)	40-50	60-65	-	85-95	65-85	G/PP	Barre
	A-type	B-type	-	-	-	G/PET	Huguet
MTF	A-type	B-type	-	C-type	-	G/PET	Godin
	A-type	B-type	D-type	-	-	G/E	Godin
PF(kHz)	30-150	180-290	-	300-400	180-290	G/PET	Suziki
	80-110	230-250	130-200	250-300	-	G/E	Arumugam
AF(kHz)	100-200	210-310	-	330-450	-	G/PET	Pashmforoush
	<50	200-300	50-150	400-500	500-600	G/E	Gutkin



PA-peak amplitude, PF-peak frequency, AF – average frequency, MTF – multiple time features, G – glass fiber, C – carbon fiber, PP – polypropylene, PET – polyester E -epoxy

Table. 2.2 Damage modes and frequency properties of CFRP and GFR^{10,11)}

破壊形態	周波数[kHz]	
	CFRP	GFRP
試験片・治具摩擦	50以下	30~80
樹脂割れ	50~100	30~80
繊維樹脂界面剥離	150~250	260付近
引き抜き・繊維破断	270~390	390付近
層間剥離摩擦・引き抜き	500	-

2.2.3 フラグメンテーション試験法

フラグメンテーション試験法は、複合材料の繊維強度や繊維/樹脂界面強度の評価方法である。フラグメンテーション法では、単繊維を埋め込んだ樹脂に引張を加えて、繊維破断を生じさせる。この時、荷重は樹脂から界面を通して繊維に伝達するが、破断面では応力フリーとなり、破断面の位置では繊維の垂直応力がゼロとなる。よって、エッジ付近には界面せん断応力が生じる。Fig.2.11 は一定の界面せん断応力が生じているモデルであるが、実際にはエッジで界面せん断応力が最大になる。繊維の破断が進むと、繊維の垂直応力はある値以上には上がらなくなり、繊維破断が生じなくなる。界面せん断応力はせん断強度以上には上がらないので、この繊維破断が生じなくなった時の界面せん断応力は取り得る最大値、つまり界面せん断強度になる。

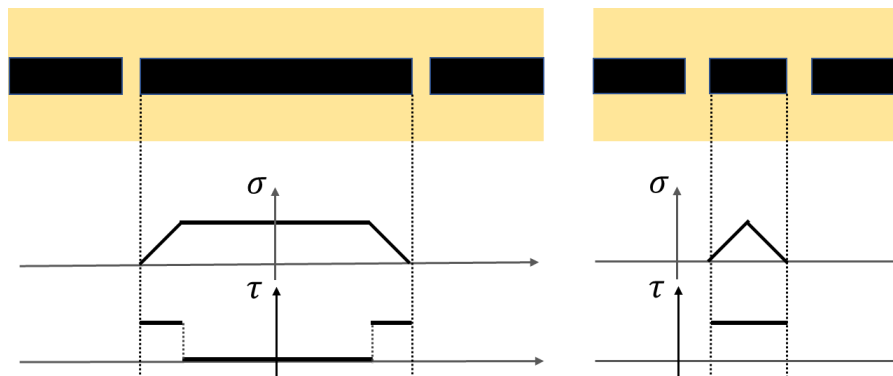


Fig.2.11 Stress distribution of broken fiber in single fiber composite during fragmentation test

フラグメンテーション試験では、繊維破断時に破断エッジ付近から界面剥離を伴う場合がある。また、剥離が生じた付近の繊維の引き抜き、繊維破断時に樹脂割れが生じることがある。樹脂割れはまた、ポイド等による応力集中でも生じる。よって、フラグメンテーション試験で生じる破壊モードは、繊維破断、界面剥離、引き抜き、そして樹脂割れの四種類ということになる (Fig.2.12)。しかし、一般的なFRPとは異なり、界面剥離と樹脂割れが連続して繰り返し起きてき裂が伝搬するようなモードは現れないため、破壊モードが複雑にはならないし、繊維束間の剥離や層間剥離のような破壊モードや、繊維間摩擦によるAEは現れない。

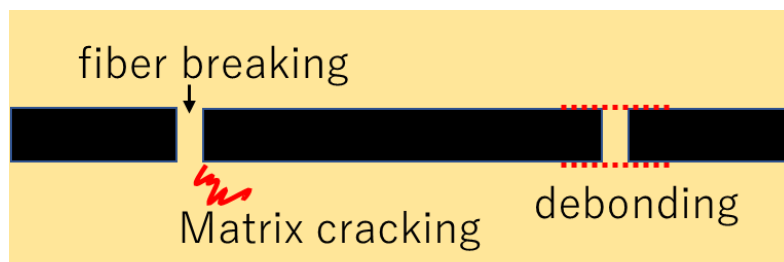


Fig. 2.12 Damage mode in single fiber composite during fragmentation test

第3章 材料および計測・試験方法

3.1 材料および試験片

3.1.1 繊維

炭素繊維はPAN系のT700ASC(東レ), ピッチ系のYSH-50A-20S(日本グラファイトファイバー)とXN-60-A2S(日本グラファイトファイバー)の三種類を用いた. 使用する繊維の機械特性をTable.2.3に示す. 引張弾性率はピッチ系繊維のほうが高く, 引張強度はPAN系のほうが高い特性を持つ. 繊維の界面にはサイジング剤が付着しており, 界面のサイジング剤除去の有無を条件とした実験を行った.

サイジング剤とは, 炭素繊維表面には繊維束の接着や繊維の損傷防止のためにサイジング剤(繊維収束剤)の処理が行われている. サイジング剤未除去の繊維はエタノールで脱脂を行い, サイジング剤除去は以下の手順で行った.

1. 350°Cのマッフル炉(Fig. 3.1-1d)で1時間熱処理をした.
2. 熱処理後, 繊維を1級アセトン(Fig.3.1-1a), 2-プロパノール(Fig.3.1-1b), 精製水の順で超音波洗浄(図3.1-1c)を1分間行いヒートガンで乾燥させる工程を繰り返し行った.
3. 洗浄後, 60°Cの乾燥炉で3時間乾燥させた.

Table. 2.3 Mechanical properties of fiber used in this paper

	Filament	Tensile Modulus (Gpa)	Tensile Strength (Mpa)	Elongation (%)	Density (g/cm ³)	Yield (g/1000m)
T700SC	12000	230	4900	2.1	1.8	800
YSH-50A-20S	2000	520	3830	0.7	2.1	250
XN-60-A2S	12000	620	3430	0.6	2.12	1780

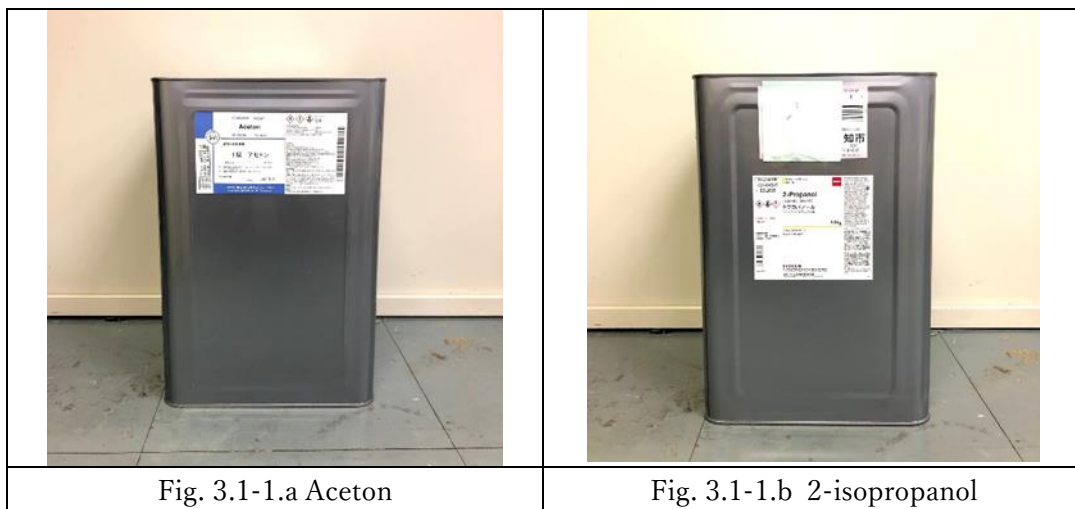


Fig. 3.1-1.a Aceton

Fig. 3.1-1.b 2-isopropanol



Fig. 3.1-1.c Ultrasonic cleaning machine



Fig. 3.1-1.d Furnace

3.1.2 樹脂

試験片は母材をエポキシ樹脂として、試験片中央に単繊維のカーボンを埋め込む。エポキシ樹脂は主剤 ARALDITE LY5052(Fig.3.1-2a)と硬化剤 ARADUR5052CH(Fig.3.1-2b)を使用し、その配合比(主剤:硬化剤)は 100:38 で混合した。樹脂は均一に約 5 分間泡が入らないように混ぜ、真空ポンプ(Fig.3.1-2c)で約 20 分脱泡を行った。



Fig. 3.1-2.a Monomer

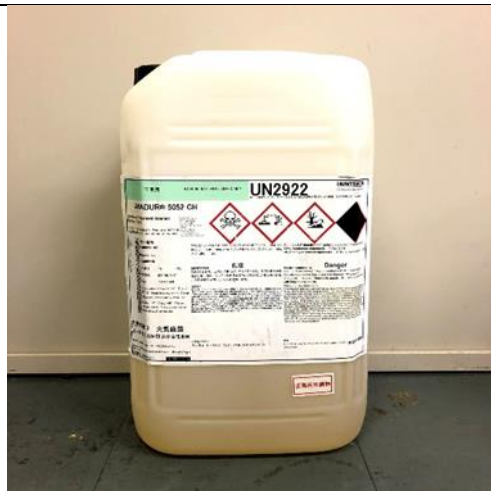


Fig. 3.1-2.b Curing agent

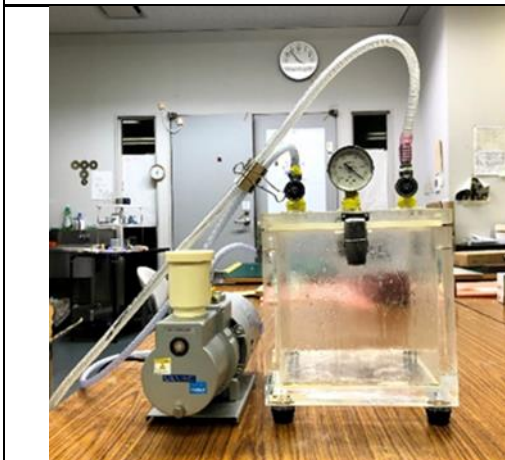


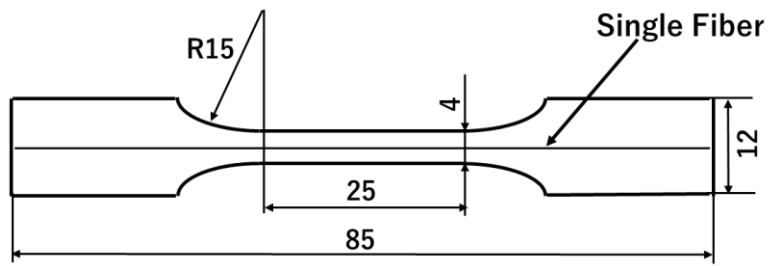
Fig. 3.1-2.c Vacuum pump

3.1.3 試験片

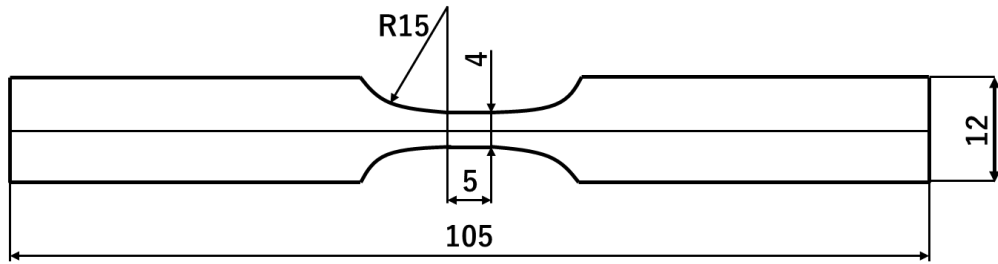
予備実験の試験片は自ら作成を行い、本実験で用いる試験片は、日本製鉄株式会社から提供していただいた。試験片の型は形状に切り抜かれたテフロンの型(Fig.3.2.b)を使用した。繊維は試験片長手方向(引張方向)の型の中心に張り、たわみを防ぐために 0.1mN の張力で固定した。繊維の片端を粘着テープで固定して、もう片端に取り付け約 1 g の重りで張力をかけ固定した。そして、脱泡処理した樹脂を予め繊維が張られた試験片の型に流し込み硬化させた。この時、泡が混入しないように可能な限り低い位置からゆっくりと流し込んだ。流し込んだ後、型の上にシートをかぶせ、型の試験片上部が平らになるようにその上から分銅をのせた。

主剤と硬化剤の混合後から硬化が始まるため、混合から型に流し込むまでの過程を 40 分以内に完了させた。エポキシ樹脂の硬化時間は、常温で 24 時間、乾燥炉(Fig.3.2.c)で 80°C までの昇温 30 分と定温 80°C で 2 時間とし作製した。試験片形状と寸法を Fig.3.2a に示す。試験片の繊維方向に直線である平行部は断面積が等しく、試験の測定範囲に当たる。試験片(a)は平行部が 25 mm、試験片(b)は 5 mm、試験片(c)は 10 mm と異なる寸法のものを用いた。試験片(a)の繊維は、PAN 系の T700ASC、ピッチ系の YSH-50A-20S と XN-60-A2S の 3 種類で、サイジング剤除去の有無の条件で作製した。試験片(b)(c)では PAN 系の T700ASC とピッチ系の YSH-50A-20S の 2 種類で作製した。

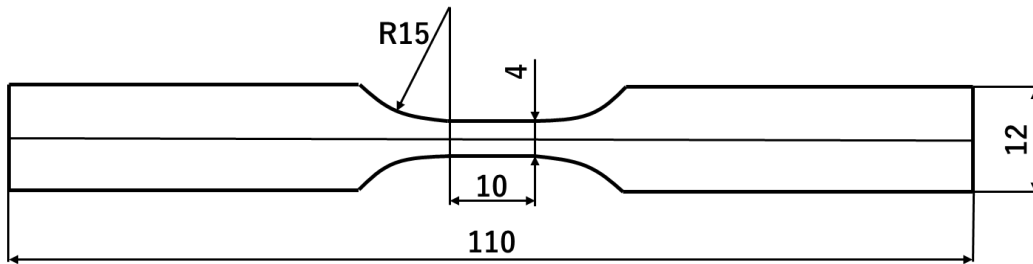
試験片の平行部 25 mm と比べ、寸法変更した平行部 5 mm と 10 mm では AE センサ間の距離が狭まり AE 波の減衰が抑えられることで、詳細なモード特定ができると考えた。目視観察によるマイクロスコプでの観察領域でセンサ間の全ての繊維破断を把握できるため、検出された AE 波との照合ができる。観察された繊維破断と AE 波を一つ一つ照らし合わせて、繊維破断の AE 特性を明らかにするために平行部 5 mm と 10 mm での実験を行う。



(a) Specimen with parallel region length of 25mm



(b) Specimen with parallel region length of 5mm



(c) Specimen with parallel region length of 10mm

Fig. 3.2.a Dimensions of specimens



Fig. 3.2.b Mold of specimen



Fig. 3.2.c Drying furnace

3.2 AE 測定システム

Fig.3.3 に本研究で構成した計測システムを示す。本システムは、ディスクリミネータ AE9922 (NF 回路設計ブロック株式会社) とプリアンプ 9917 (NF 回路設計ブロック株式会社), 広帯域 AE センサは AE-900M-WB (NF 回路設計ブロック株式会社) と, それを PC に取り込む USB デジタルオシロスコープ PA-S2000(P&A Technologies Inc.) そしてそれを記録するソフトウェアから構成される。データ取得および解析ソフトウェアは, LabView を用いて当研究室で作成した。

ディスクリミネータから出力される信号は, 波形信号, エンベロープ信号, そしてトリガ TTL, である。デジタルオシロスコープは 2 チャンネルであり, 外部トリガとしてトリガ TTL を接続し, それをトリガとして波形信号とエンベロープ信号を日時(1ms 単位)と共に取得・記録する。

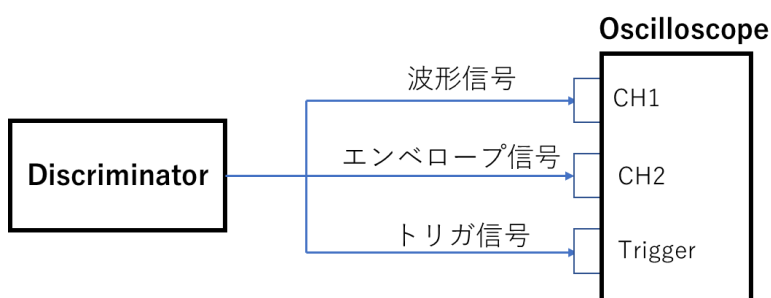


Fig. 3.3 AE measurement system

3.3 AE 解析システム

3.3.1 既存の AE 波形パラメータ

LabView を用いて AE 解析システムのプログラミングを行った。2 章で示した AE パラメータについては, その定義に従ってプログラミングを行い, (平均) 周波数, 持続時間, 最大振幅, 平均振幅, エネルギー密度を計算するようにした。例えば Fig.3.4 の例では, しきい値を $V_L=0.230V$, $V_H=0.4V$ に設定して, エンベロープ信号 (図中の ENV, 白線) から持続時間を求める。さらに, 持続時間中のデータを取り出し, 2 章の定義に従って, 平均振幅 (RMS), エネルギー密度を計算した。ただしピーク周波数の解析については, しきい値を相対指定によりピーク付近になるように設定することで求めるようにしている。例えば Fig.3.5 の例では, しきい値を $V_L=60\%$, $V_H=90\%$ に設定して, 観測区間を狭めている。



Fig.3.4 Analysis window of AE properties on the application (Threshold levels were set by Volt)

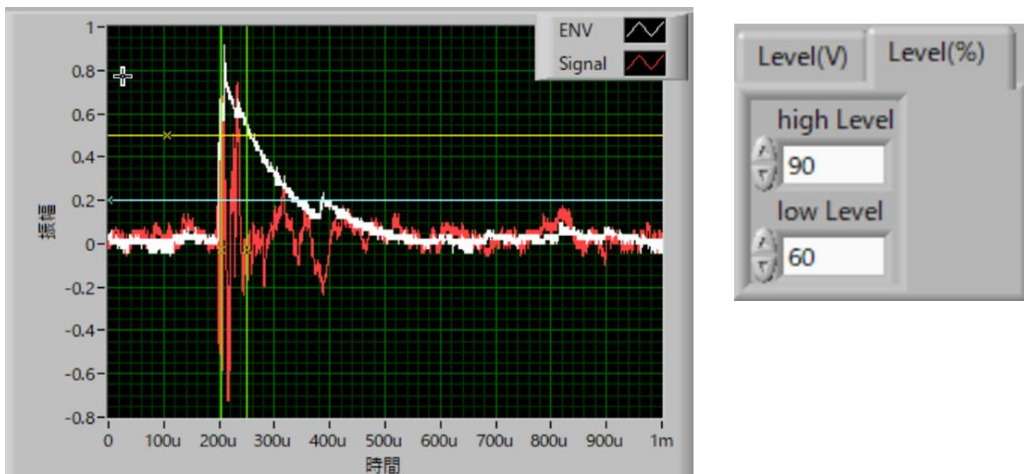


Fig. 3.5 Analysis of AE properties on the application (Threshold levels were set by percent)

3.3.2 Wavelet 変換による AE 波形解析

本研究では、AE 波形に Wavelet 変換を行い、時間-周波数データを計算した。Fig.3.4 で示した波形データの時間-周波数データを Fig.3.6 に示す。図より、この信号は 300kHz 付近に大きな周波数成分を持つことが分かる。これは、Fig.3.4 で示した FFT による周波数解析結果の 28.5kHz とは大きく異なるものとなることが分かる。このように複数の主要な周波数成分が混在した波形においては、Wavelet 変換による解析が非常に役立つことが分かる。

本研究で開発したソフトウェアは、ある任意の周波数範囲を切り出して最大値をとる時間位置を求め、その時間での周波数スペクトルについてピークカウントを行い、ピーク周波数を計算する。Fig.3.7 は、Fig.3.6 のデータについて 250k-600kHz の範囲で切り出し、周波数スペクトルを求めた結果である。さらにピーク周波数における時間グラフを Fig.3.8 に示す。この時間データで閾値を超える時間幅を求めて、Wavelet 変換による持続時間とする。

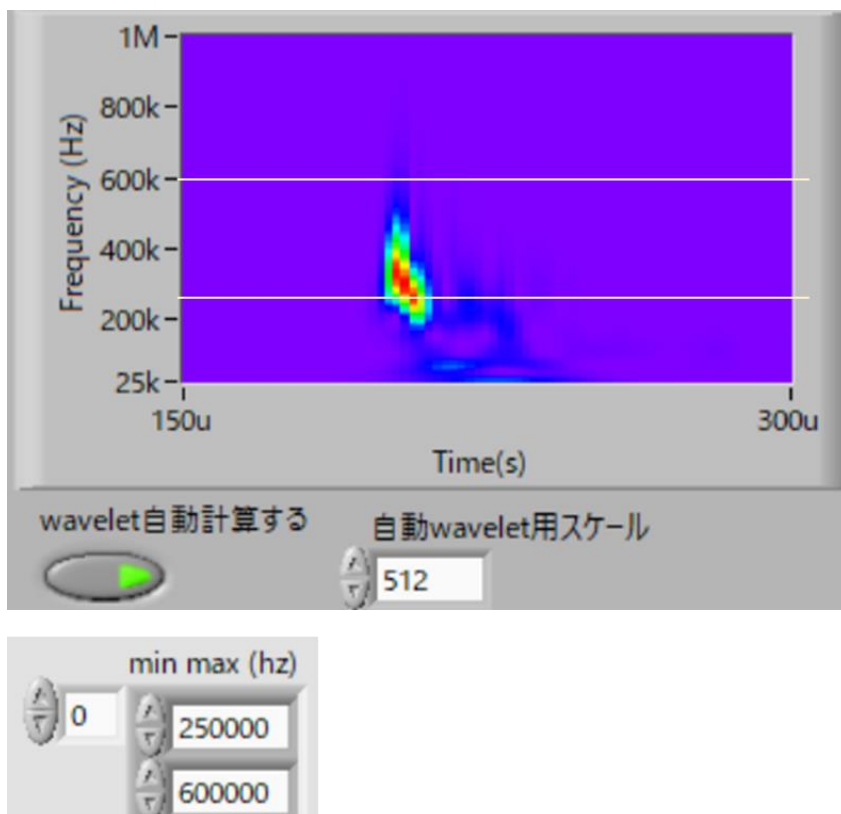


Fig. 3.6 Time-frequency scalogram obtained by wavelet transform

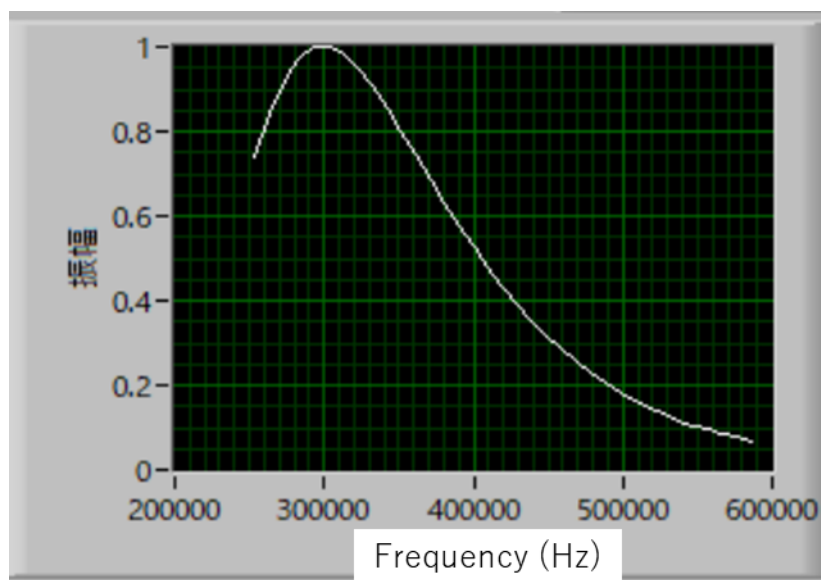


Fig. 3.7 Frequency spectrum at peak time of AE

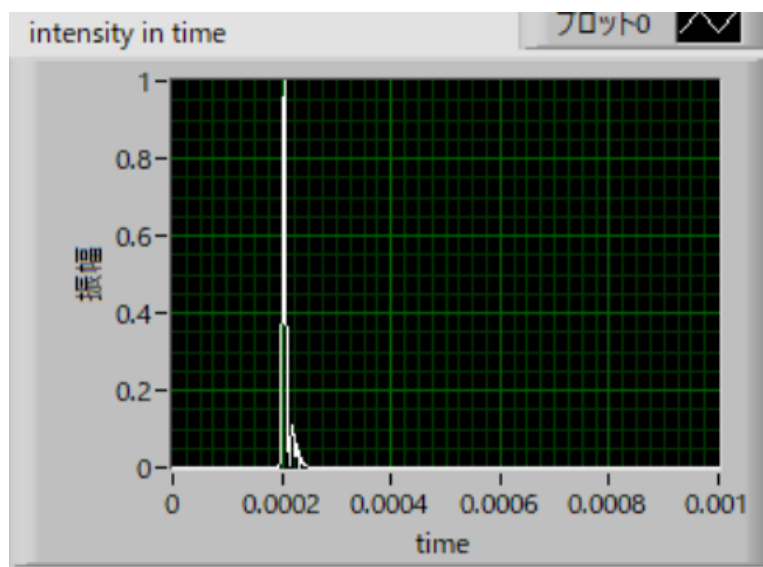


Fig. 3.8 Time history of Wavelet transformed data at the peak frequency

本研究では、繊維破断 A E の周波数として特徴的な 200-400kHz の繊維破断および界面剥離 A E と、800kHz 付近の引き抜きによる A E に着目した。これらが同時に生じることが多いため、150-550 kHz (領域 A) および 550-1200kHz (領域 B) に切り分けて解析を行うソフトウェアを作成した。

- (1) まず、時間周波数グラフを最大値で正規化する。
- (2) 次に、Fig.3.9 に示すように時間周波数グラフを 550kHz の閾値で分割し、150-550 kHz (領域 A) および 550-1200kHz (領域 B) で正規化された時間周波数グラフについて解析を行う。
- (3) 各領域で最大ピークが生じる時間を求めて、時間での周波数分布を取り出し、周波数分布の最大ピークに二次曲線を当てはめて中心周波数を求めた。Fig.3.9 に対して得られた周波数分布を Fig.3.10 に示す。
- (4) 各領域で閾値を設定して、ピーク周波数における時間データから持続時間を求める。Fig.3.11 は、Fig.3.9 に対して得られた各領域のピーク周波数における時間データである。

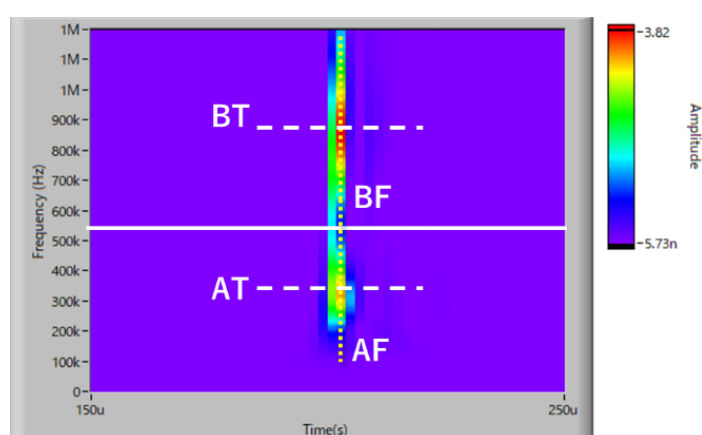


Fig. 3.9 Analyzing regions for AE in this paper

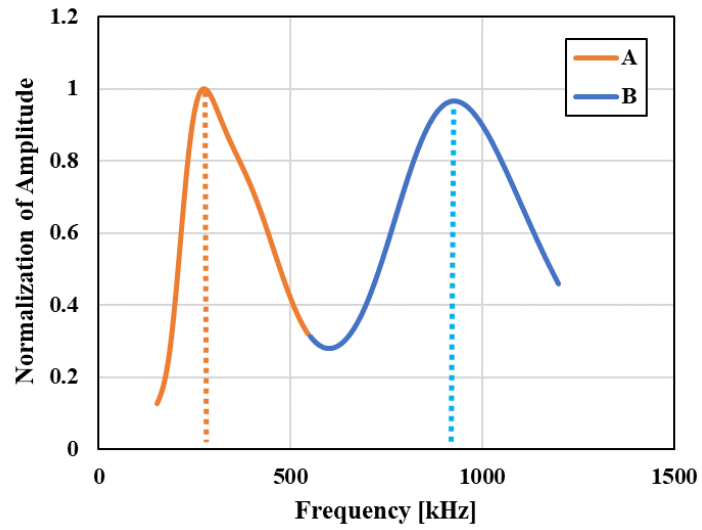


Fig. 3.10 Normalized frequency spectra in the regions of A and B

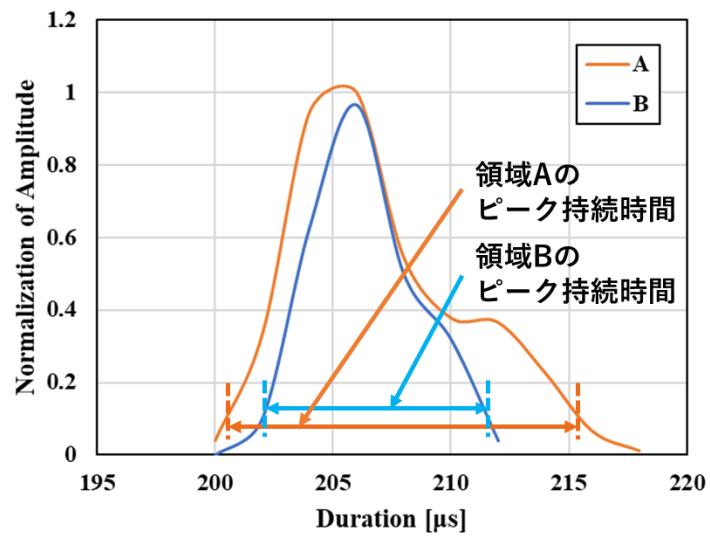


Fig. 3.11 Time histories of Wavelet data at the peak frequencies in the regions of A and B

3.4 実験方法

3.4.1 実験方法

本研究で行うフラグメンテーション試験の概要を Fig.3.12 に示す。試験には油圧サーボ式疲労試験機 (Fig.3.14.a および Fig.3.14.b) を使用して、変位制御で単調的に引張を行った。引張速度は 0.2mm/min で行った。試験片表面には AE センサ (AE-900M-WB, Fig.3.14.c) 2 個を設置し、ひずみゲージ (KFGS-2-120-C1-11 L1M2R, Fig.3.14.e) を接着させた。使用したひずみゲージ特性を Table 3.1 に、AE センサの形状や特性を表 3.2 に示す。ひずみゲージは試験片の長手方向両面に瞬間接着剤で、AE センサはボンドガンを使って試験片の測定領域 (平行部) 外の両端に熱可塑接着剤で貼り付けた。発生した AE 信号は高周波数で空気中では大幅に減衰するため、試験片の密着性が重要である。センサ接地面の裏側から密着されているのかを確認した。AE センサは、試験片の測定領域の両端から 5 mm 離れた位置で二個とも片方の表面に設置した。二個のセンサ間の距離は、Fig.3.13 より試験片 (a) で 35 mm, (b) で 15 mm, (c) で 20 mm とした。試験片 (b) (c) においては (a) に比べ平行部が短く、ひずみゲージを接着すると繊維観察の妨げになってしまう。そのため、ひずみゲージは試験片 (b) (c) においては接着せず、試験片 (a) の実験で得られた物性値から FEM 解析を用いて負荷ひずみを推定した。

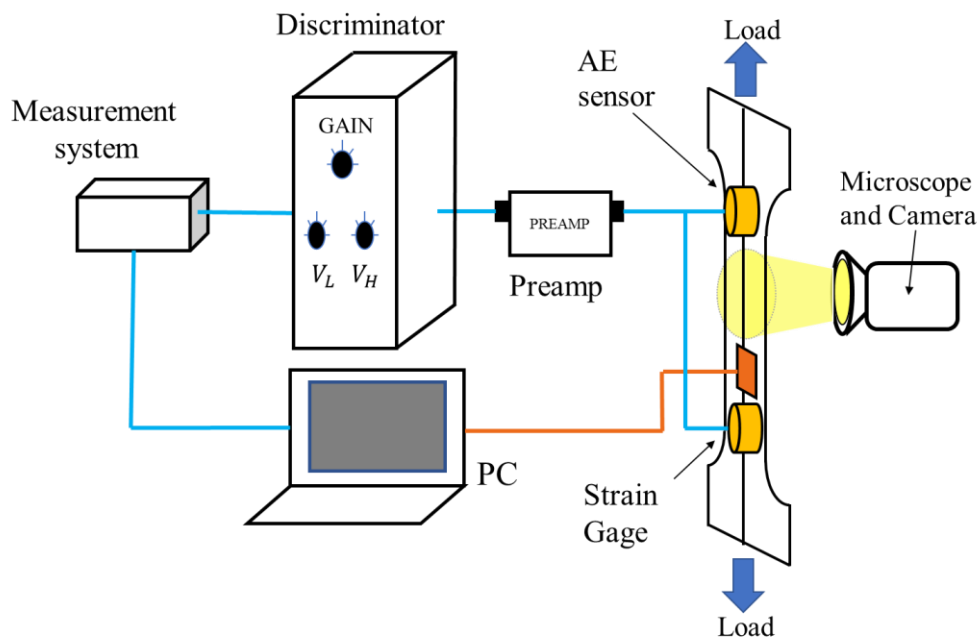
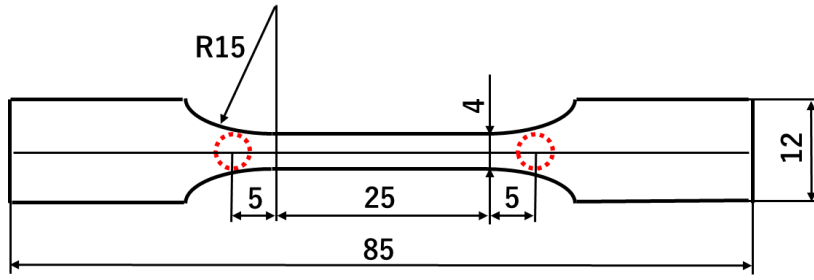
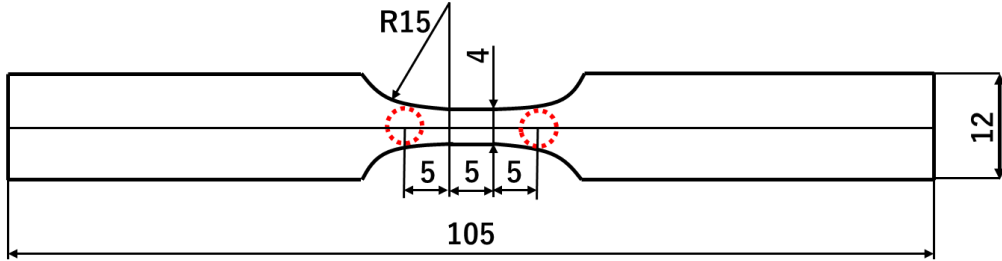


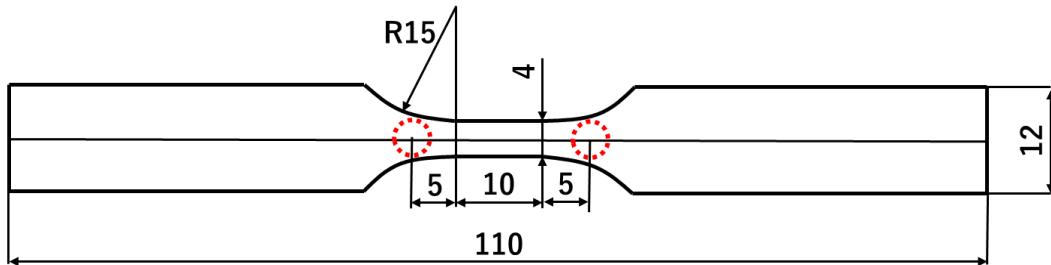
Fig. 3.12 Experimental set-up of fragmentation test with measuring AE and observing development of fiber breakage



(a) Sensor position for specimen with parallel region length of 25mm



(b) Sensor position for specimen with parallel region length of 5mm



(c) Sensor position for specimen with parallel region length of 15mm

Fig. 3.13 Sensor position for each specimen

Table. 3.1 Properties of strain gauges

ゲージ率	ゲージ長	ゲージ抵抗	横感度比
$2.11 \pm 1.0\%$	2mm	$120.4\Omega \pm 0.4\%$	$(0.8 \pm 0.3\%)$

Table. 3.2 Properties of AE sensor

形状		周波数特性	感度
直径(mm)	高さ(mm)		
5	3.2	1M~4MHz(-10dB)	$34\text{dB} \pm 6\text{dB}(2\text{MHz})$



Fig.3.14.a Tensile test machine



Fig.3.14.b Controller



Fig.3.14.c AE sensor



Fig.3.14.d Magnification view of AE sensor
sensor

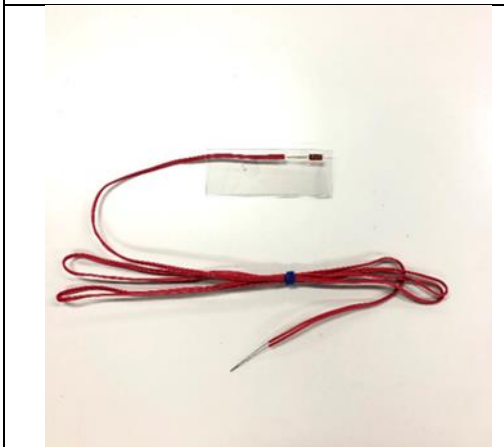
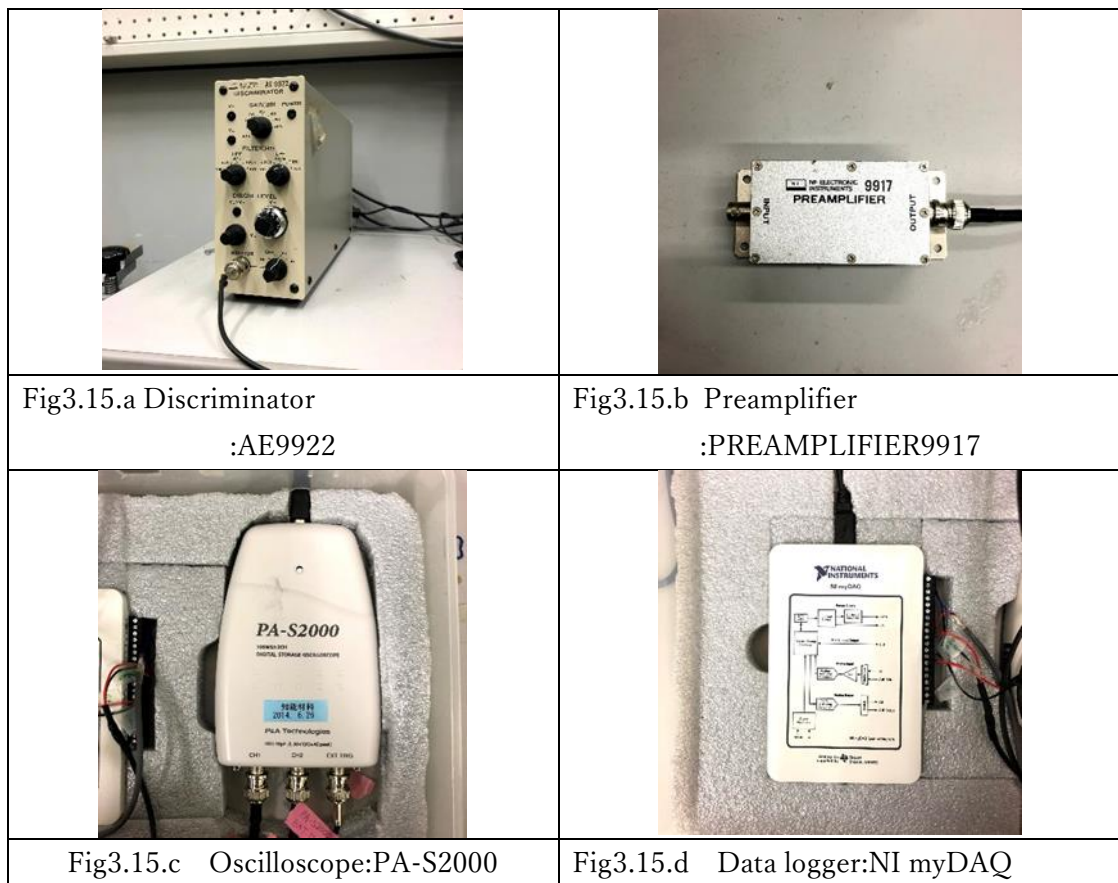


Fig.3.14.e Strain sensor

3.4.2 実験方法 (AE 測定)

試験では、本研究室で構成した AE 計測システムを用いて、AE 信号を測定した。本システムは、ディスクリミネータ AE9922 (NF 回路設計ブロック株式会社) とプリアンプ 9917 (NF 回路設計ブロック株式会社)、広帯域 AE センサは AE-900M-WB (NF 回路設計ブロック株式会社) と、それを PC に取り込む USB デジタルオシロスコープ PA-S2000 (P&A Technologies Inc.) そしてそれを記録するソフトウェアから構成される。マルチセンサで実験するため、AE センサ、プリアンプとディスクリミネータの 2 個を用いてデジタルオシロスコープに接続した。プリアンプのゲインは 40dB、ディスクリミネータのゲインは 30dB とし、周波数フィルタをかけないで計測した。また、ディスクリミネータからの TTL トリガ信号を用いて、AE が検出された場合のみ波形の記録を行った。記録波形の時間分解能は $0.1\mu\text{s}$ 、時間幅は 1ms であった。AE 測定で用いた装置を Fig.3.15 に示す。ディスクリミネータを Fig.3.15.a, プリアンプを Fig.3.15.b, USB デジタルオシロスコープ Fig.3.15.c, 実験用計測器を Fig.3.15.d に示す。



3.4.3 実験方法（偏光観察）

偏光観察を用いたビデオマイクروسコープを用いて、目視による繊維破断の発生と進展のモニタリングを行い、ビデオ録画した。Microlinks 社製 UM12 の卓上型デジタル顕微鏡(Fig.3.16.a)と光源(Fig.3.16.b)を使用した。試験片の繊維破断が確認できる焦点で、最大 13 mm角が撮影可能な範囲であった。平行部 25 mmの試験片は平行部の半分の範囲を目視観察した。平行部 5 mmと 10 mmの試験片は平行部の測定範囲だけでなく範囲外も撮影を行った。偏光観察で繊維の状況を確認が可能なのは複屈折という現象を使っている。複屈折とは、光線が方解石や水晶などの異方性結晶を透過することで二つの光に分けられることである。試験片のような異方体でないものは、変形などによって生じ複屈折により色が変わる。本実験では繊維や繊維樹脂界面から光が差す時に繊維破断と判断した。偏光観察の原理を Fig.3.17 に示す。また、マイクروسコープで撮影した繊維の損傷を Fig.3.18 に示す。

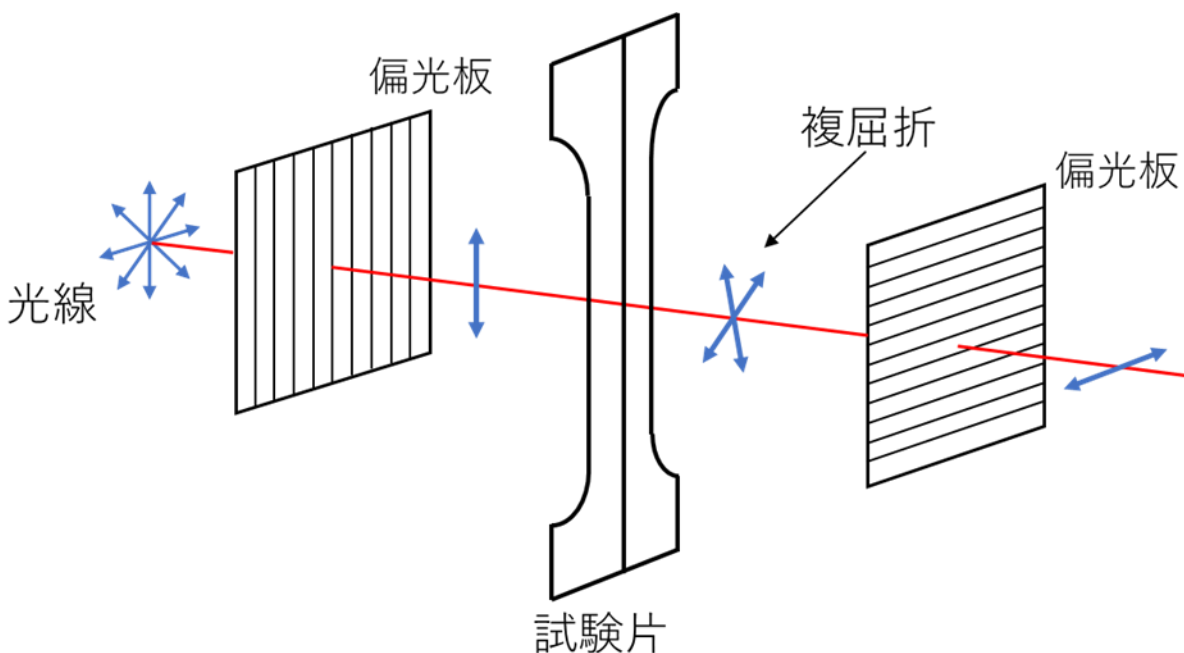
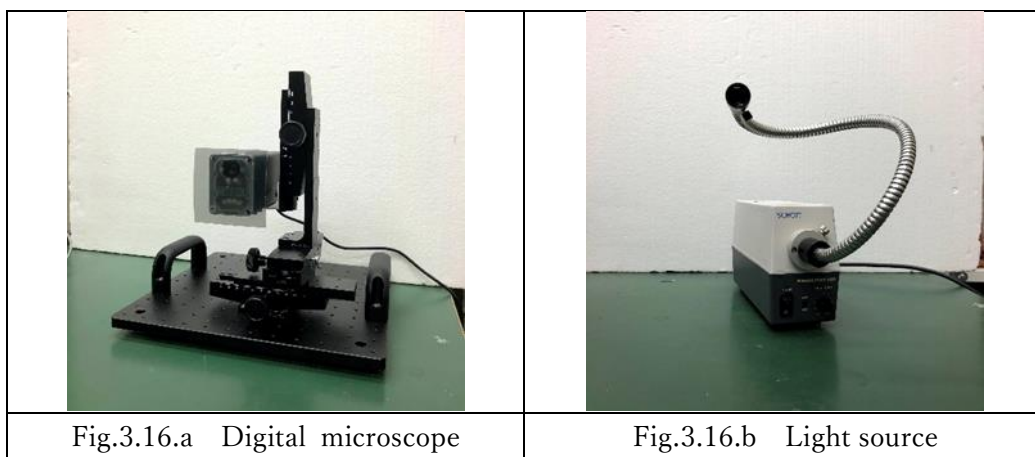


Fig. 3.17 Polarized light observation

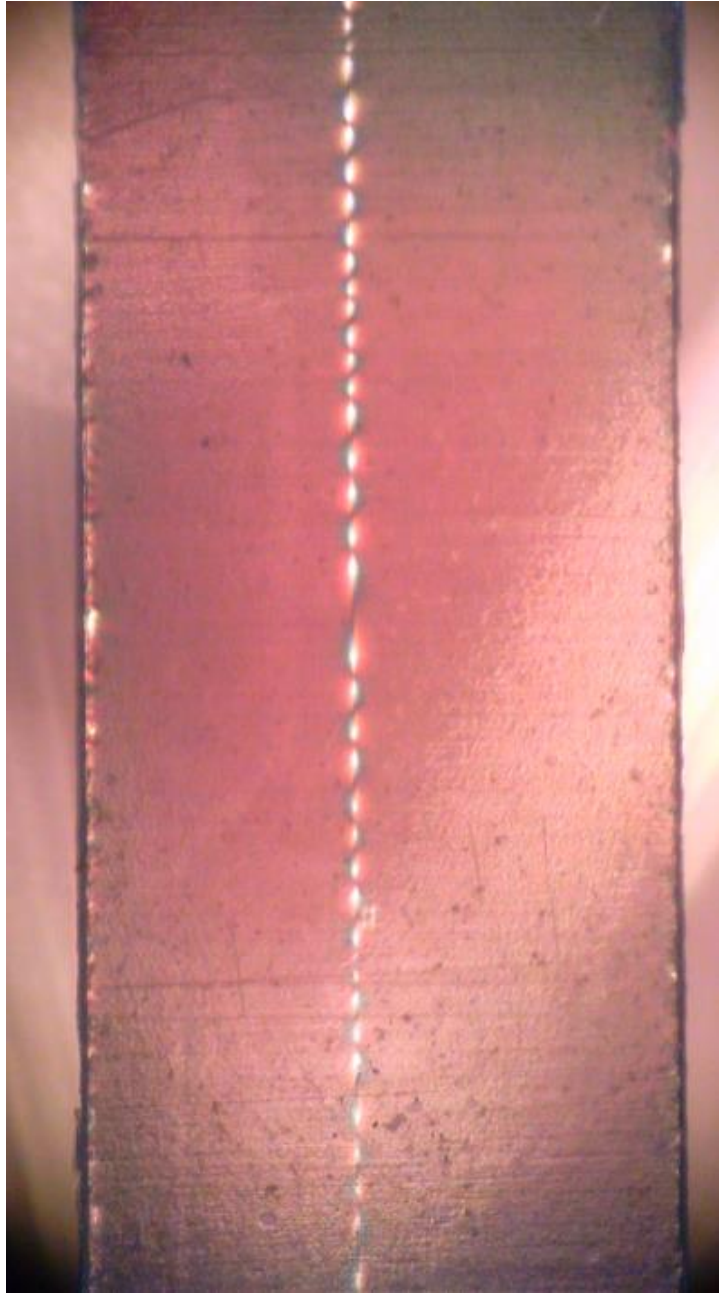


Fig. 3.18 Photograph of broken fiber in resin by polarized light observation

第4章 実験結果(機械特性と界面処理)

4.1 AE 波形と Wavelet 変換による AE 特性の解析

4.1.1 AE 波形

過去の研究から、繊維破断の AE 信号ではパルス状の高周波で振幅が高く持続時間が短い、樹脂割れや剥離は繊維破断より周波数が低く振幅は小さいかつ持続時間は長いことがわかっている。本研究では、5種類の特徴的な AE が得られた。その結果を Fig.4.1(a)~(e)に示す。

Type A (Fig.4.1(a)) は突発型のパルス波であるため、繊維破断より生じた波形であると考えられる。この AE は3周期程度の持続しかなく、高周波であることが図より分かる。

Type B (Fig.4.1(b)) は Type A と同時に得られた AE であるが、振幅がやや低く持続時間が長い波形であった。Type A と同様に繊維破断で、伝達中に減衰したと思われる。

Type C (Fig.4.1(c)) は Type A と比べて持続時間が長く減衰が緩やかな波形が含まれており、界面剥離だと考えられる。

Type D (Fig.4.1(d)) の波形は検出時に持続時間が短い高周波が現れ、周期と持続時間が長い波が続いた。検出された信号の波形には異なる周期の波が含まれているが、波の重ね合わせが起きたと思われる。これは繊維破断と界面剥離がほぼ同時に生じたものと考えられる。

Type E (Fig.4.1(e)) は周期が長く持続時間が長い波形で、Type A と比べて立ち上がり時間が長いので、樹脂割れだと思われる。

Type F (Fig.4.1(f)) は Type A と同様に高振幅の波形を持ち、波長が短く高周波であることが図より分かる。

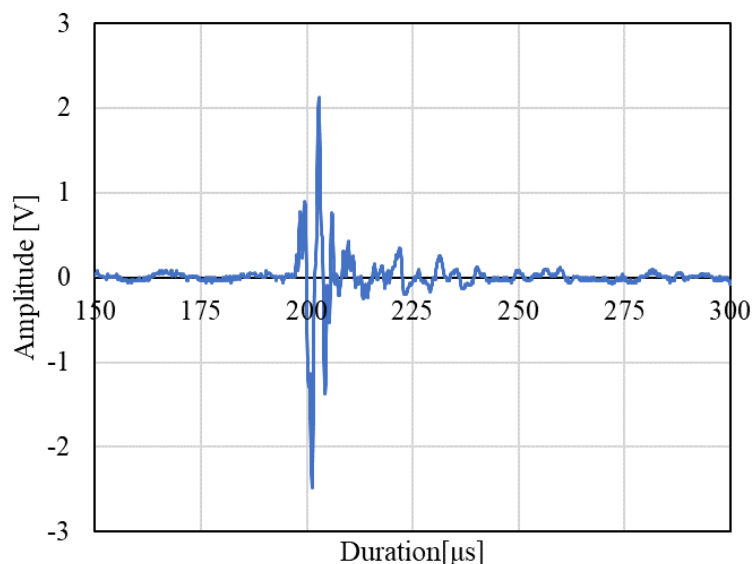


Fig. 4.1(a) Representative AE waveform: Type A

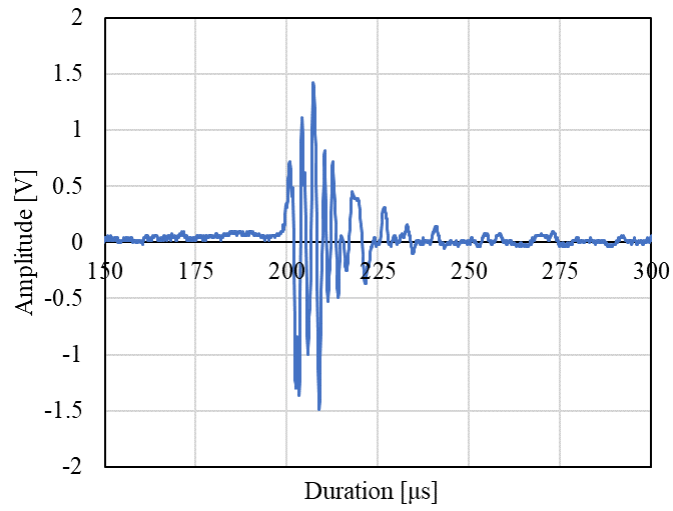


Fig. 4.1(b) Representative AE waveform: Type B

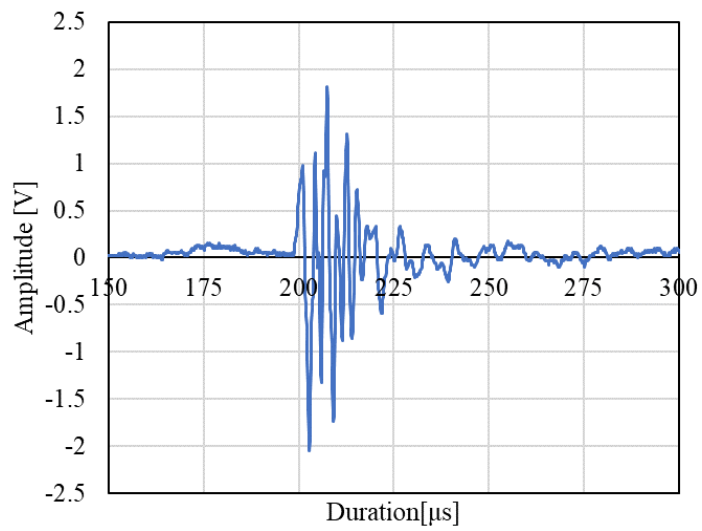


Fig. 4.1(c) Representative AE waveform: Type C

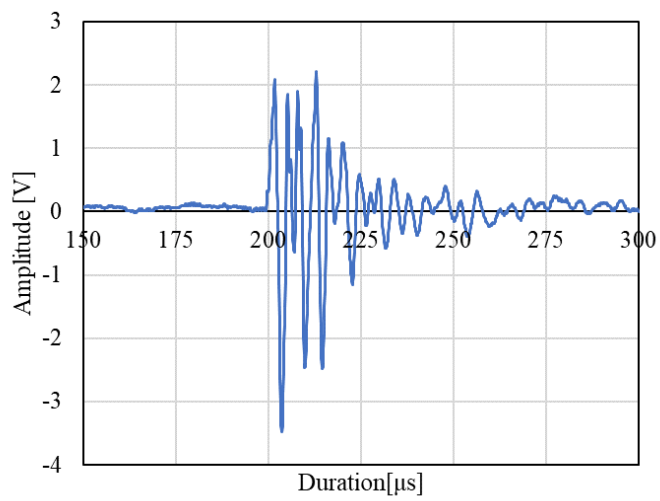


Fig. 4.1(d) Representative AE waveform: Type D

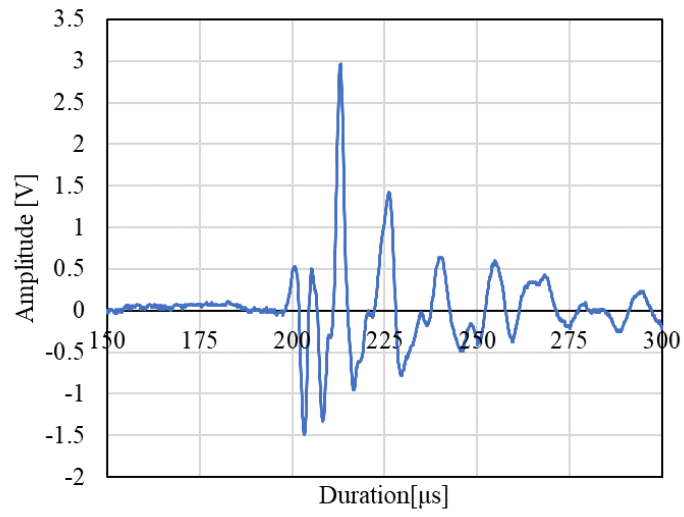


Fig. 4.1(e) Representative AE waveform: Type E

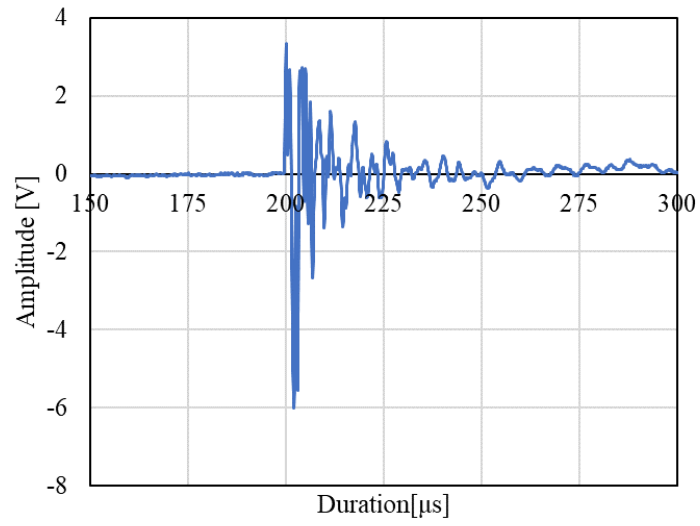


Fig. 4.1(f) Representative AE waveform: Type F

4.1.2 AE 波の時間一周波数データ (scalogram)

4.1.1 節で示された、検出された AE 信号 (Fig4.3(a)-(e)) についてウェブレット解析した結果を Fig4.11(a)~(f)に示す。縦軸周波数成分、横軸時間を表しており、波形の振幅の大きさが色で表示されている。

Type A (Fig 4.12(a))では赤色を示した 300~400kHz 近傍の周波数帯において最大振幅で、持続時間が短い信号が検出された。よって過去の文献から、繊維破断による AE と考えられる。

Type B (Fig 4.12(b))では 300~400kHz 近傍の周波数帯において最大振幅で、Type A と比べ持続時間が長い信号が検出された。Type A と同時に検知された AE であるため、繊維破断だと考える。

Type C (Fig 4.12(c))では、200~300kHz 付近の帯において最大振幅で、Fig.4.12(a)と比べ持続時間が長い信号が検出された。この信号は 200kHz 近傍の帯では持続時間が長いことがわかる。よって過去の文献から、繊維/樹脂界面剥離による AE と考えられる。

Type D (Fig 4.12(d))では、200kHz と 300kHz の近傍で最大振幅の周波数帯が二つ見られた。300kHz 帯の後に 200kHz 帯が現れた後、Fig 4.12(c)で見られたような持続時間の長い 200kHz 付近の周波数帯が表れた。Fig 4.12(a)~(c)の結果を踏まえると、繊維破断の後に少し遅れて界面剥離が生じたと考えられる。

Type E (Fig 4.12(e))では、周波数が 100~200kHz 付近で高振幅を示しており、樹脂割れや摩擦などが生じたと思われる。

Type F (Fig 4.12(f))では、周波数が 800kHz 付近を示し、持続時間が他の Type と比べると短いことから、繊維破断による樹脂の振動、繊維界面の摩擦や繊維の引き抜きなどが生じたと考えられる。

このようにウェブレット解析では、破壊モードとその進展をより詳細に知ることが出来る。

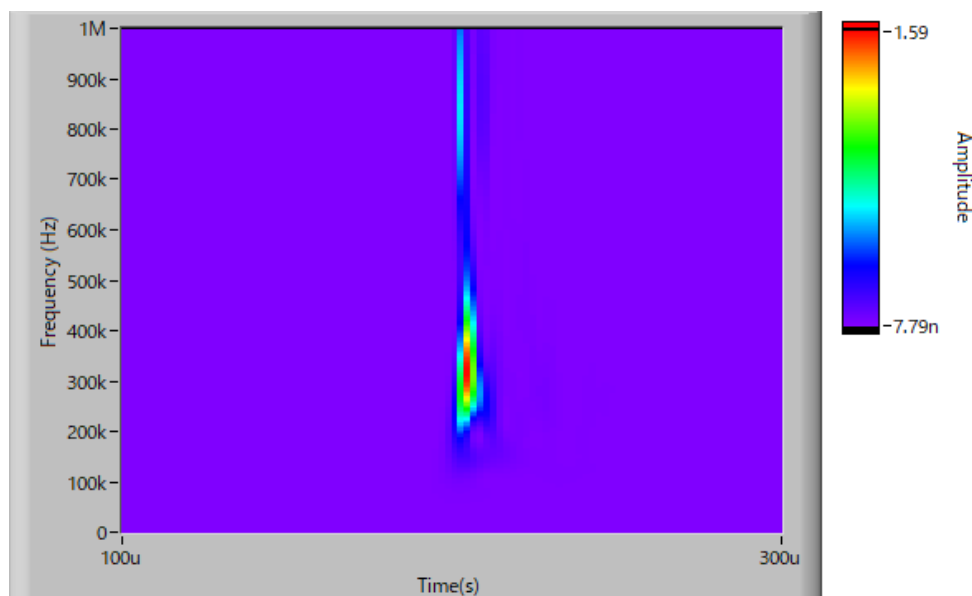


Fig. 4.1.2(a) Representative AE scalogram: Type A

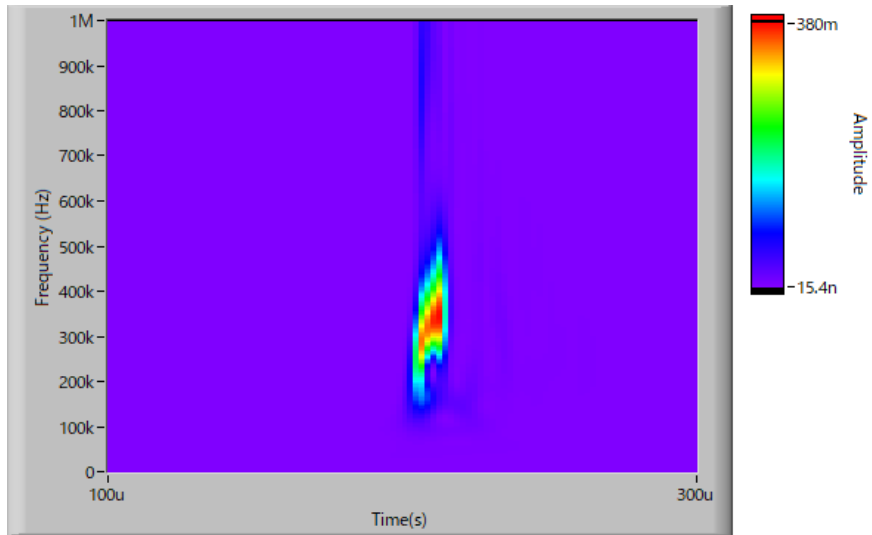


Fig. 4.12(b) Representative AE scalogram: Type B

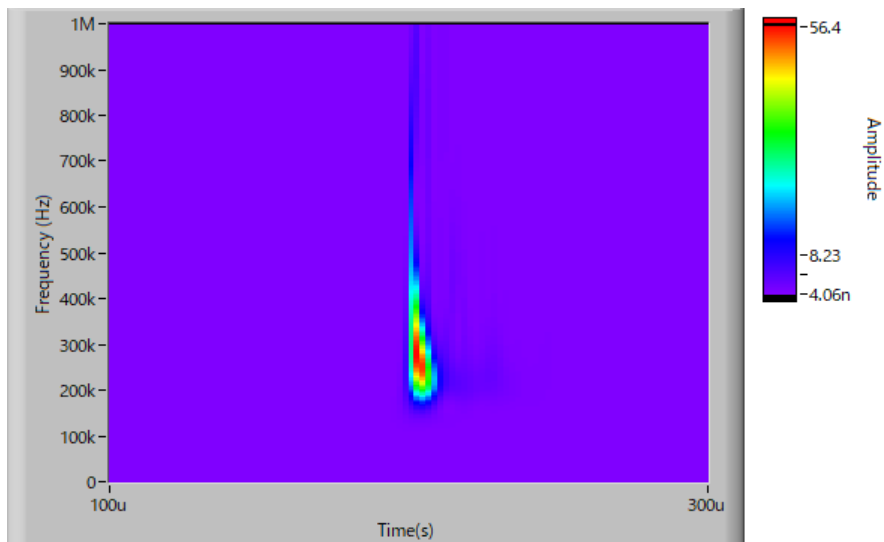


Fig. 4.12(c) Representative AE scalogram: Type C

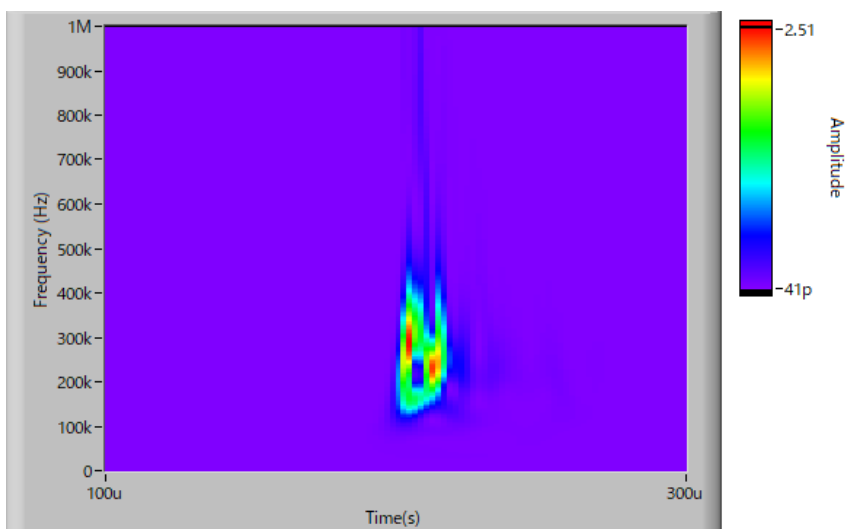


Fig. 4.12(d) Representative AE scalogram: Type D

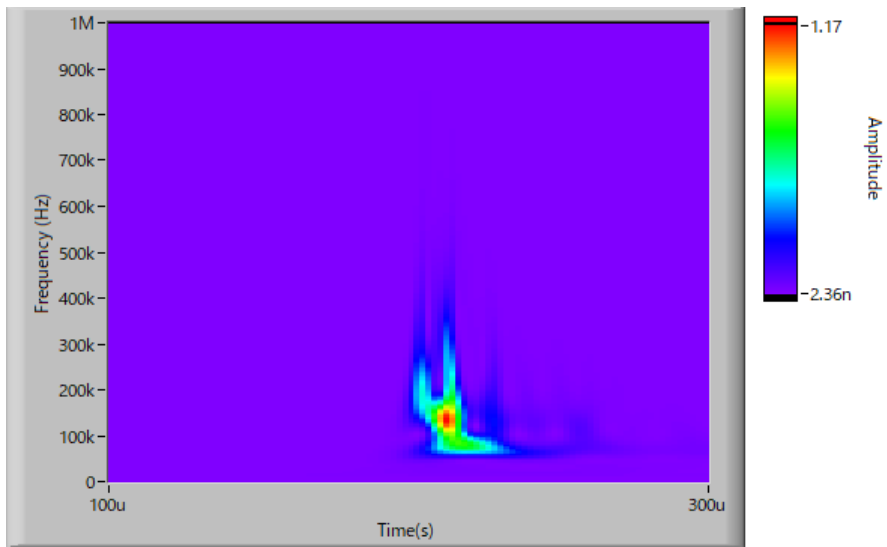


Fig. 4.12(e) Representative AE scalogram: Type E

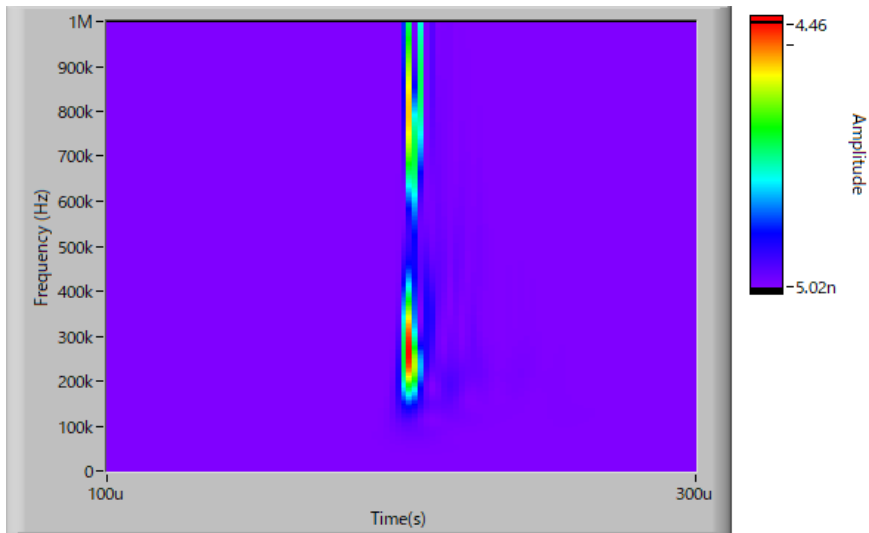


Fig. 4.11(f) Representative AE scalogram: Type F

4.2 界面特性と機械特性(試験片平行部 25 mm)

4.2.1 負荷ひずみに対する wavelet 解析による AE 特性

時間一周波数データは視覚的にも理解しやすいが、全ての AE データについて人間のオペレータが判断するのは効率的ではない。そこで本研究では繊維破断による AE に着目するため、時間一周波数データから周波数区間を区切って中心周波数と wavelet 振幅、ピーク持続時間を取り出し、それぞれの特性と破壊モードの関係を明らかにしていく。各試験片について解析したデータを、付録にまとめて示す。

4.2.2 中心周波数

本研究では繊維破断による AE に着目するため、150kHz 以上の AE 高周波成分を取り出し、そのピーク周波数を求めた。代表的な結果を、高周波 AE の周波数と負荷ひずみの関係として、T700SC を Fig 4.2.1, YSH-50A-20S を Fig 4.2.2, XN-60-A2S を Fig 4.2.3 に示す。(a)acetone はサイジング剤除去、(b) ethanol はサイジング剤未除去の結果になる。Fig. 4.2.1(a)は先行研究で測定された結果であるため、1つの AE センサで検出されたものである。

150kHz 以上の AE に注目し、Wavelet 変換を用いて高周波 AE 信号の特性解析を行った。以前の研究で得られた Fig 4.2.1(a)の結果では 300kHz~400kHz に繊維破断による AE の分布が見られた。一方で Fig 4.2.1 (b)では、300kHz~400kHz の繊維破断 AE に加えて、800kHz 付近の引き抜きと考えられる高周波 AE が多く見られた。繊維破断 AE の周波数は(a)のサイジング除去の方がやや低い傾向がある。ただし Fig 4.2.1(a)は AE センサ 1 つの結果であるので、この違いが界面処理の違いによるものかは断言できない。

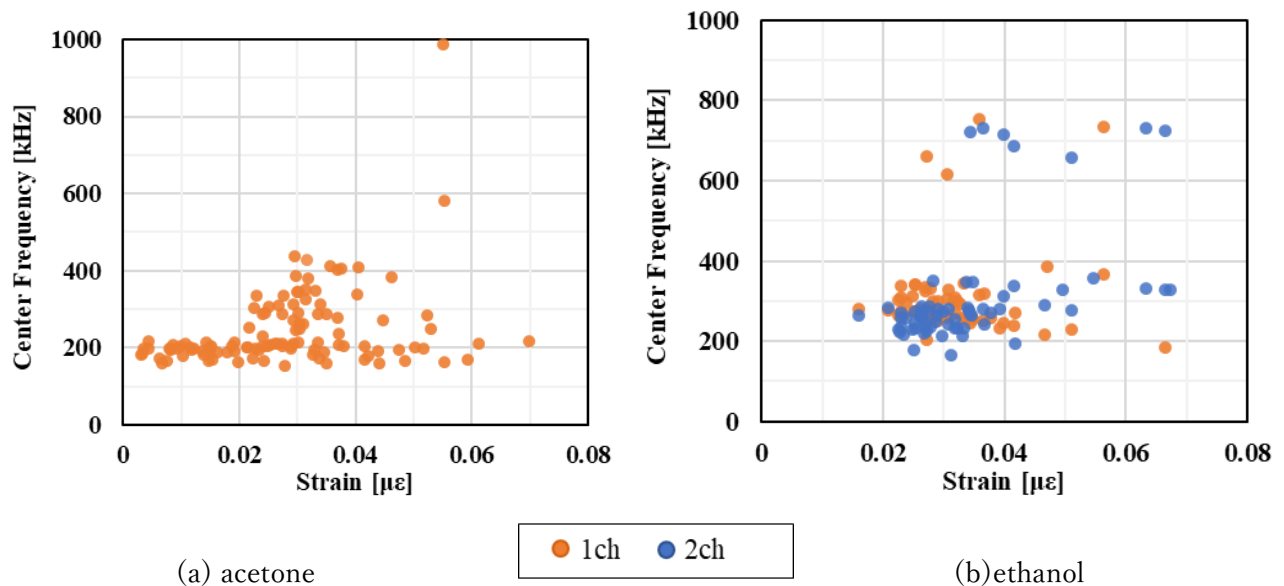


Fig. 4.2.1 Relationship between frequency and strain of T700SC

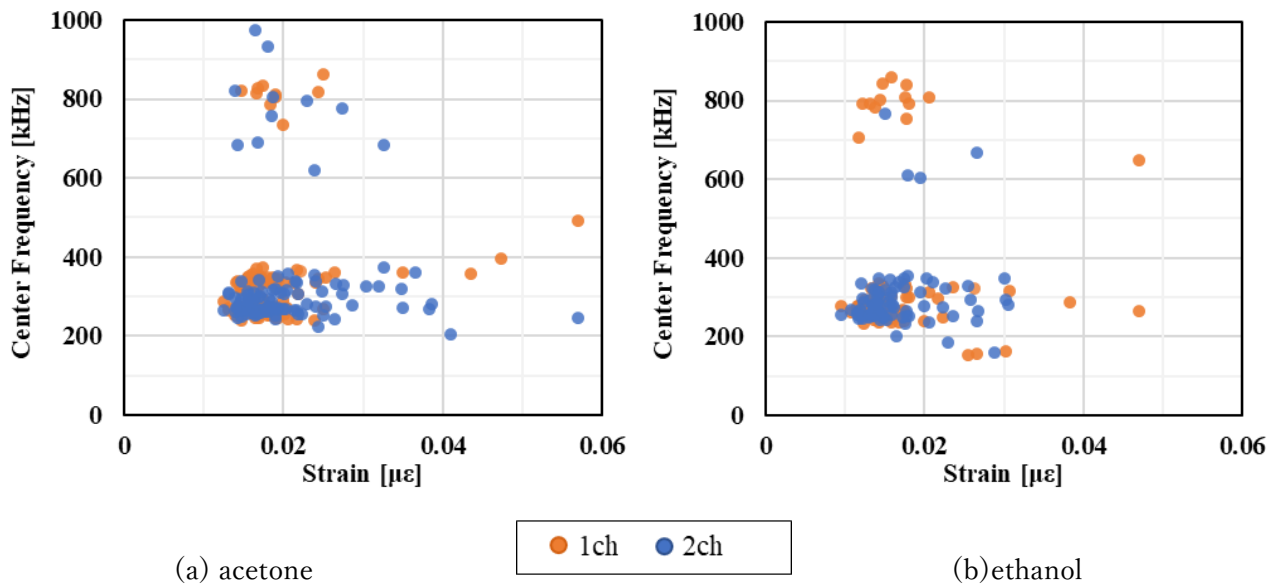


Fig. 4.2.2 Relationship between frequency and strain of YSH-50A-20S

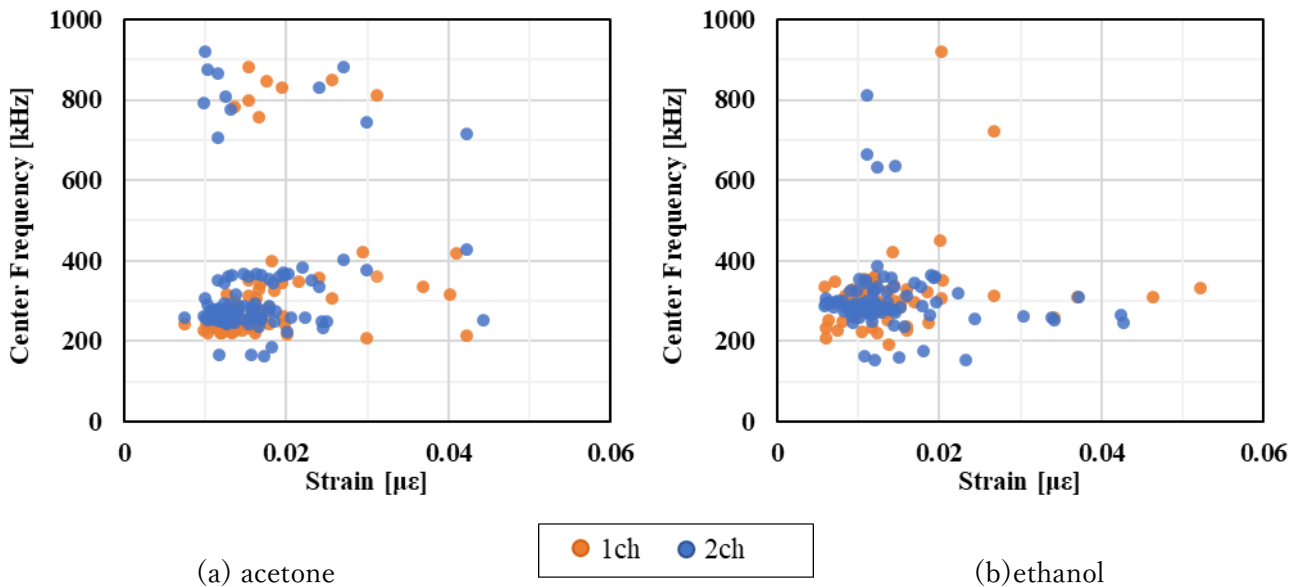


Fig. 4.2.3 Relationship between frequency and strain of XN-60-A2S

Fig 4.2.2 と Fig 4.2.3 とともにひずみ 0.01~0.03 の範囲で 250~400kHz に繊維破断 AE が、800~900kHz 付近に引き抜きによる高周波 AE が分布していることが分かった。250~400kHz 帯は 300kHz 以下の AE が生じ少し遅れて 300kHz 以上の繊維破断 AE が生じている傾向があった。また、300~400kHz と 800kHz 付近の高周波 AE は同タイミングで生じる傾向があった。XN-60-A2S は、YSH-50A-20S と比べ引張強度が低いため、繊維破断 AE が生じる初動のひずみがやや小さかった。

T700SC とピッチ系を比較すると、T700SC は引張強度が高いため、繊維破断が発生するひずみが遅れていることが分かる。一方で、AE 周波数に関しては、繊維破断、高周波 AE 共に T700 とピッチ系繊維で明確な違いは見られなかった。この理由は、AE センサで取得できる周波数範囲では繊維破断の瞬間に生じる弾性波は捉えられず、繊維を支える樹脂の振動が繊維破断 AE として捉えられているためだと考えられる。

また、引き抜きによる AE について T700 とピッチ系繊維を比較すると、T700 では広いひずみ範囲で引き抜きが生じているが、ピッチ系では繊維破断と同時に多く生じる傾向があることが分かる。これはピッチ系では T700SC より剥離が生じやすく、引き抜きが起きやすいためではないかと思われる。

ピッチ系繊維の AE 周波数について、サイジング除去のアセトン処理とエタノール処理を比較すると、繊維破断 AE の周波数がやや低い傾向が見える。これは、繊維破断時の界面剥離長がサイジング除去により長くなり、繊維破断付近の樹脂部の共振特性がやや異なるためではないかと予想される。より定量的には、これらのデータから適切なパラメータを抽出する必要があるだろう。

4.2.3 振幅

サイジング剤の有無による界面特性が AE の周波数に影響を及ぼさないことが 4.2.2 節で分かった。振幅も同様にあまり違いはなかったため、サイジング剤未除去の結果を用いて Fig 4.2.4 に T700, YSH-50A-20S と XN-60-A2S の AE 振幅と負荷ひずみの関係を示す。

振幅の大きさに着目すると、T700SC では最大振幅で 10V であるが、ほとんどが 2V 以下であるのに対して、ピッチ系繊維では 0.5V 付近から大きいものでは検知可能な最大振幅 10V に達することが分かる。すなわち、これは明らかに繊維の弾性率の違いによるものであり、YSH-50A-20S や XN-60-A2S のピッチ系繊維の弾性率は PAN 系と比べ大きく AE 振幅に大きく影響することが分かった。

4.2.2 節より繊維破断 AE と考えられる AE が生じたひずみの範囲において、ひずみが大きくなるにつれて高振幅の AE が生じた。ピッチ系ではひずみ 0.02 を超えると高振幅の 8-10V の AE 波が生じた。これは、臨界繊維破断後の繊維の引き抜き等によるものだと考えられる。

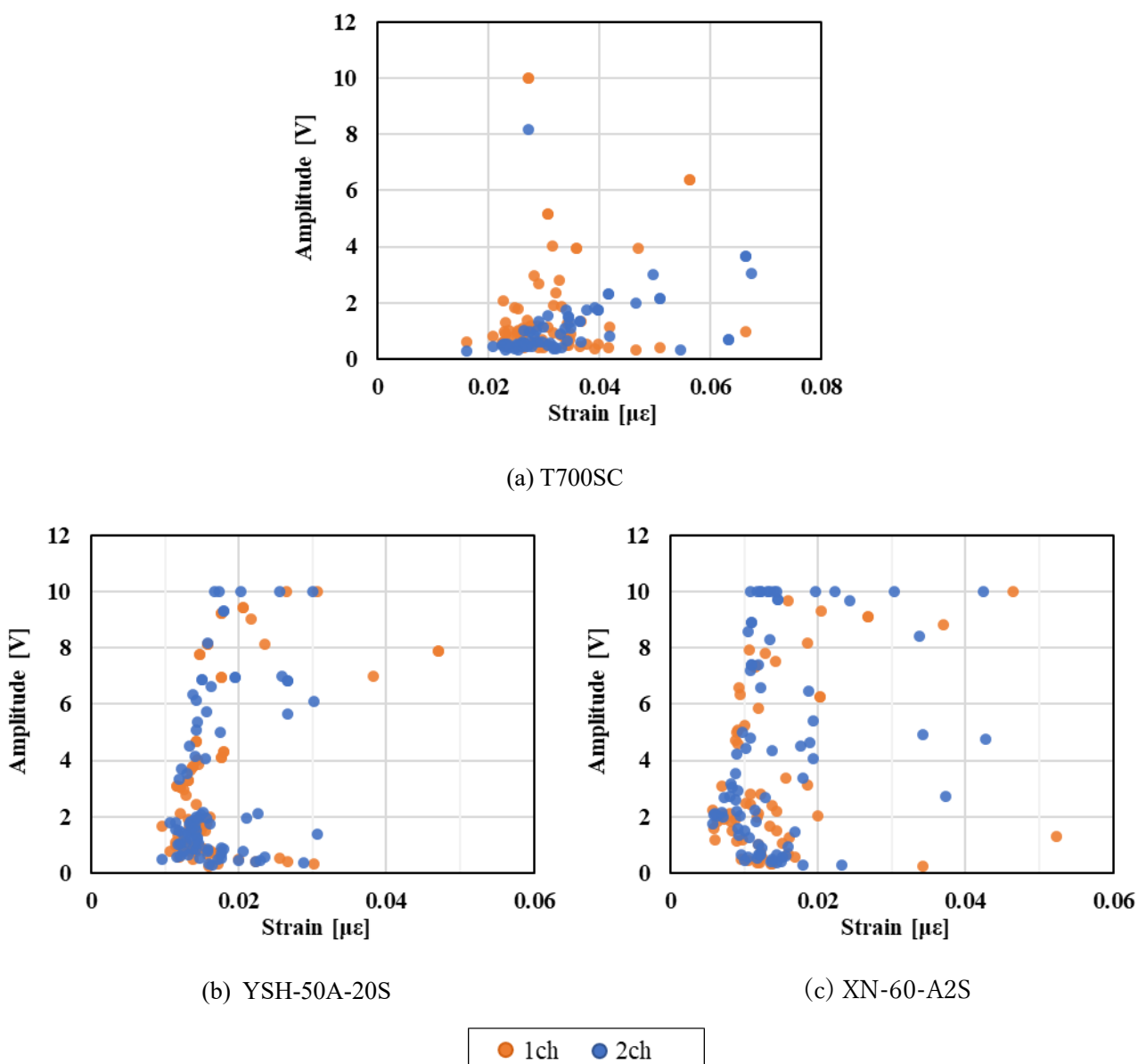
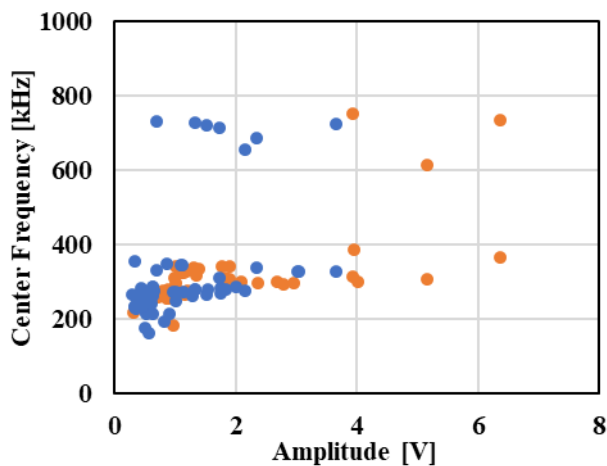
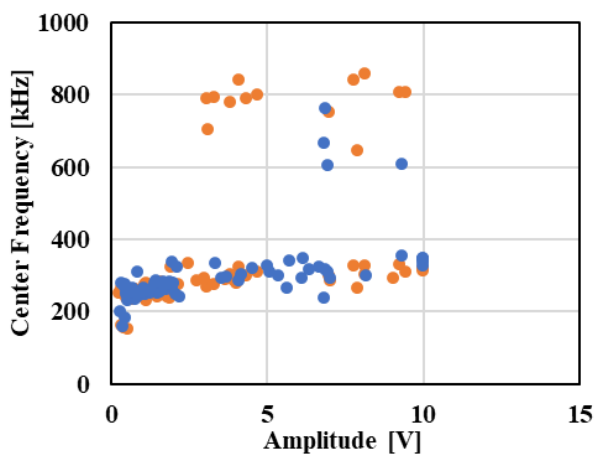


Fig. 4.2.4 Relationship between AE amplitude and strain

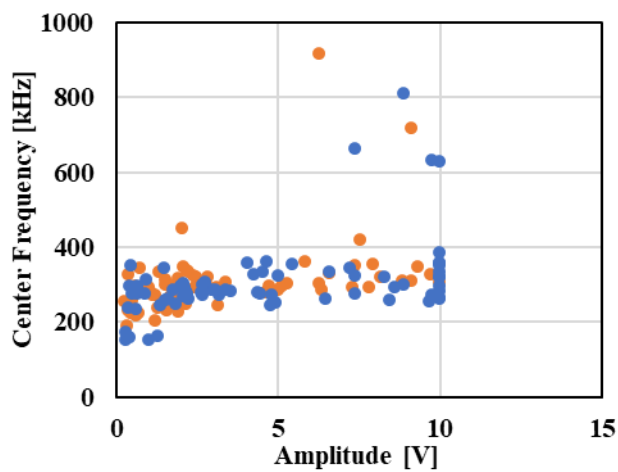
次に振幅に対しての中心周波数の関係を Fig 4.2.5 に示す。T700SC は 300~400kHz と 800kHz 付近ともに 1~6V, 300kHz 以下の低周波は 2 V 以下であった。ピッチ系は 800kHz 付近の高周波 AE は 7~10 V と高振幅で、200~400kHz 帯は幅広く分布しており、250kHz 以下は 5 V 以下であった。高周波 AE は高振幅が発生するとは限らず低振幅もあった。これは、センサと損傷源の距離や、繊維破断時繊維界面での減衰が起きたことが原因だと考えられる。



(a) T700SC



(b) YSH-50A-20S



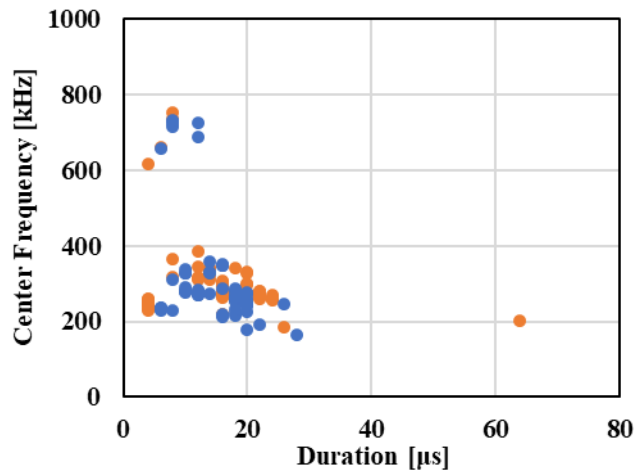
(c) XN-60-A2S



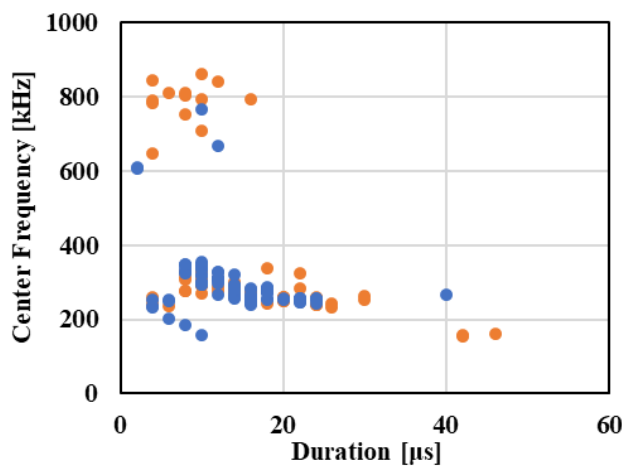
Fig. 4.2.5 Relationship between frequency and amplitude

4.2.4 持続時間

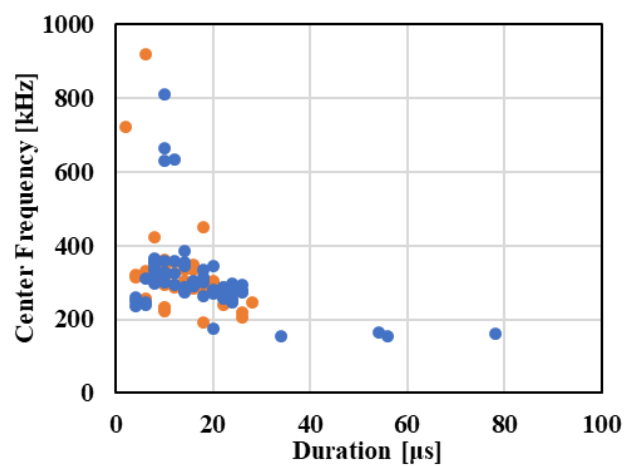
Fig 4.2.6 に持続時間と AE 周波数の関係を示す。持続時間の大きさに関して PAN 系とピッチ系ともに繊維破断 AE は $4 \sim 30 \mu s$ に多くが分布して、 900kHz 付近の高周波 AE は $20 \mu s$ 以下であった。繊維破断 AE の持続時間が幅広い理由は、繊維破断と界面剥離が混在した信号が多いためであると考えられる。 300kHz 以上の繊維破断 AE の持続時間と比べ 300kHz を下回ると持続時間が大きい傾向があった。持続時間の大きさから 300kHz 以上は繊維破断で、 300kHz 以下は多くが界面剥離だと考えられる。



(a) T700SC



(c) YSH-50A-20S



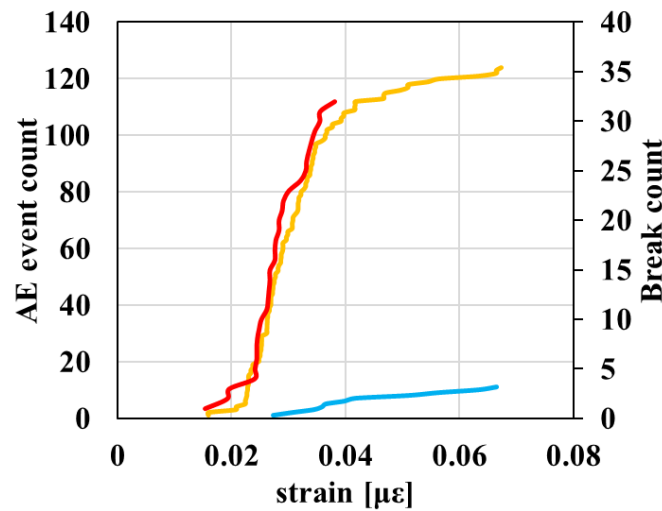
(c) XN-60-A2S



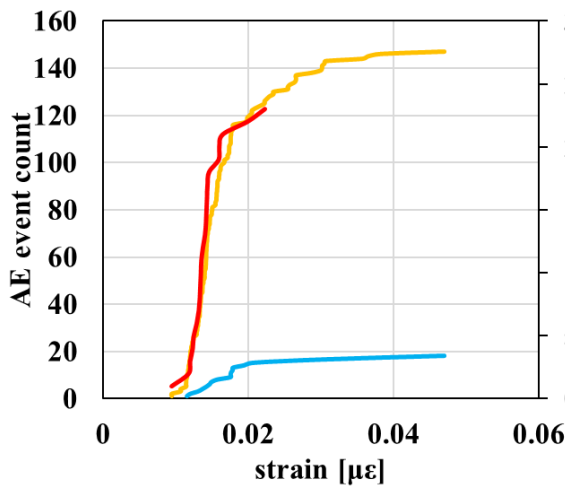
Fig. 4.2.6 Relationship between frequency and duration time

4.2.5 高周波 AE と繊維破断カウント数の関係

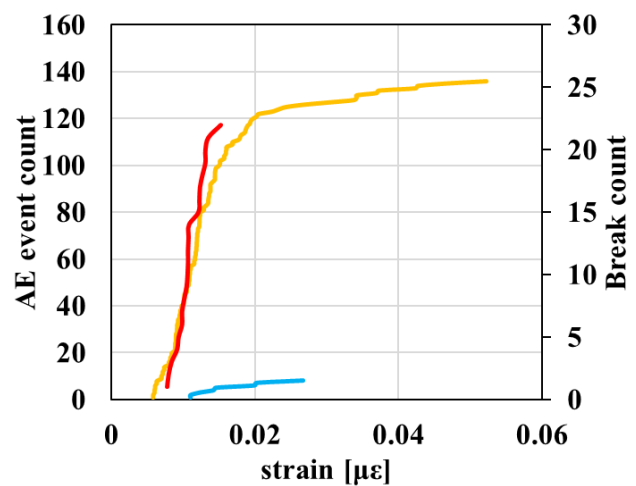
検出された高周波 AE が繊維破断によることを明確に示すために、顕微鏡を用いた目視観察による累積破断数と高周波 AE のカウント数を縦軸にひずみを横軸にして、Fig 4.2.7 に示す。図では、150~400kHz の AE と 550~1 MHz の AE , 目視観察による累積繊維破断のカウント数を示している。Fig 4.2.7 より、PAN 系とピッチ系ともに 150~400kHz の AE のカウント数と目視観察による累積破断数の傾向が一致していた。PAN 系とピッチ系ともに 150kHz~400kHz 帯では、目視観察による繊維破断のカウント後も検出されているため、測定領域外での繊維破断や界面剥離が生じたと考えられる。



(a) T700SC



(b) YSH-50A-20S



(c) XN-60-A2S

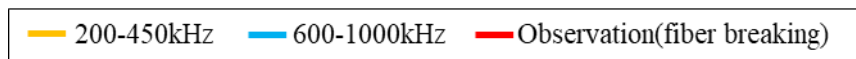


Fig. 4.2.7 Relationship between strain and AE counts measured by the AE sensor and visual inspection

4.3 機械特性(試験片平行部 5 mm と 10 mm)

4.3.1 負荷ひずみに対する wavelet 解析による AE 特性

時間一周波数データは視覚的にも理解しやすいが、全ての AE データについて人間のオペレータが判断するのは効率的ではない。そこで本研究では繊維破断による AE に着目するため、時間一周波数データから周波数区間を区切ってピーク周波数と wavelet 振幅、ピーク持続時間を取り出し、それぞれの特性と破壊モードの関係を明らかにしていく。各試験片について解析したデータを、付録にまとめて示す。

4.3.2 中心周波数

150kHz 以上の AE に注目し Wavelet 変換を用いて高周波 AE 信号の特性解析を行った。同時に複数の損傷が生じた場合を考慮して、解析は 150kHz~550kHz と 550kHz~1200kHz の区間で切り分けて解析した。Fig 4.3.1(a)に PAN 系の T700SC、Fig 4.3.2(b)にピッチ系の YSH-50A-20S の AE 周波数と負荷ひずみの関係を示す。Fig 4.3.1(a)の結果より、300kHz~400kHz に繊維破断の分布が見られ、900kHz 付近で引き抜きによる高周波の AE が生じた。繊維破断や 900kHz の高周波 AE は、ひずみ 0.02~0.04 付近で多く生じており、繊維破断と高周波 AE は同タイミングで生じていることが分かった。繊維破断後のひずみ 0.04 から試験片破壊までは AE があまり検知されなかった。平行部 5 mm と 10 mm で周波数に違いはなかったが、AE 波が生じるひずみが 10 mm のほうが小さかった。これは、FEM 解析でひずみを推測しているため、解析にずれが少し生じたと思われる。

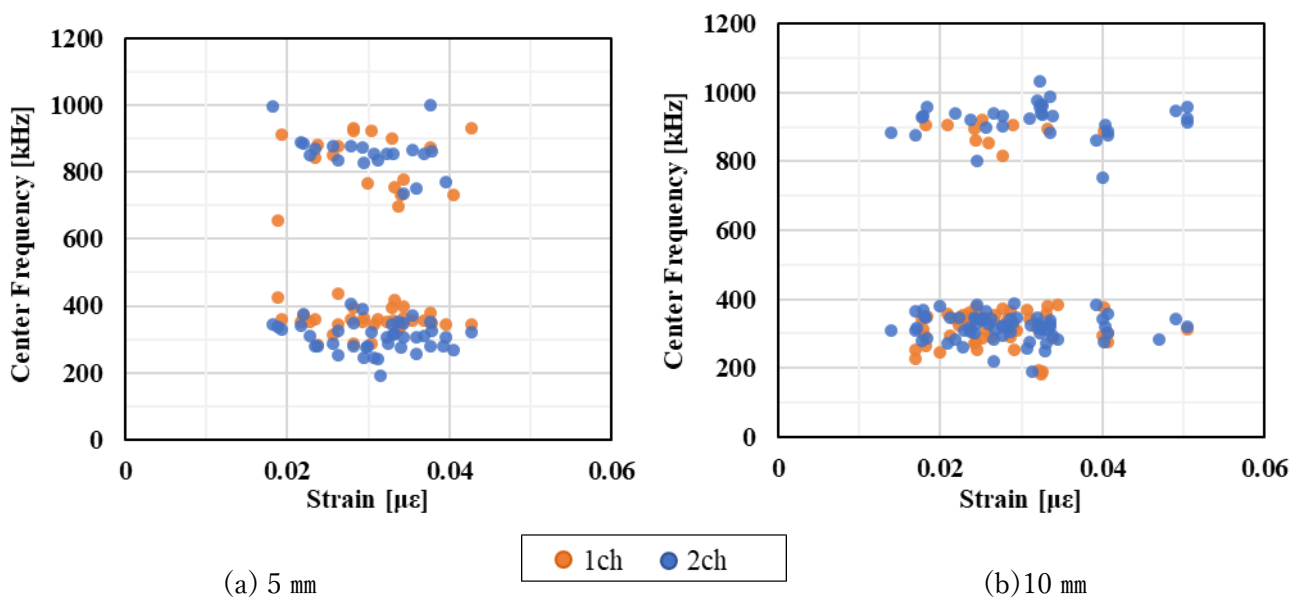


Fig. 4.3.1 Relationship between frequency and strain of T700SC (Narrow parallel region)

Fig 4.3.2(a)の平行部 5 mmの結果より、繊維破断が含まれる AE は 200~400kHz 付近で、引き抜きと考えられる高周波 AE が 900kHz 付近で分布していることが分かった。250~400kHz の AE は、ひずみ 0.02~0.03 の範囲で特に多く得られ、ひずみ 0.05 まで生じた。900kHz 近傍の AE はひずみ 0.02~0.03 の範囲に集中しており、繊維破断 AE と同範囲で分布していた。繊維破断 AE と 900 kHz 付近は同じタイミングで生じていると考えられる。Fig 4.3.2(b)の平行部 10 mmより、250~400kHz の AE は、ひずみ 0.01~0.02 の範囲で特に多く得られ、ひずみ 0.05 付近まで生じた。900kHz 近傍の AE はひずみ 0.02~0.03 の範囲に集中していた。PAN 系 T700SC 同様に平行部 5 mm と 10 mm を比べると、AE 波が生じるひずみが 10 mm のほうが小さかった。

繊維破断 AE と 800 kHz 近傍の高周波 AE が生じたのち、300kHz 以下の AE が多く検知された。300kHz 以下の AE は、平行部 5 mm ではひずみ 0.04~0.05、平行部 10 mm でひずみ 0.03~0.04 の範囲で生じた。これは、繊維破断 AE ではなく界面剥離が生じたと考えられる。

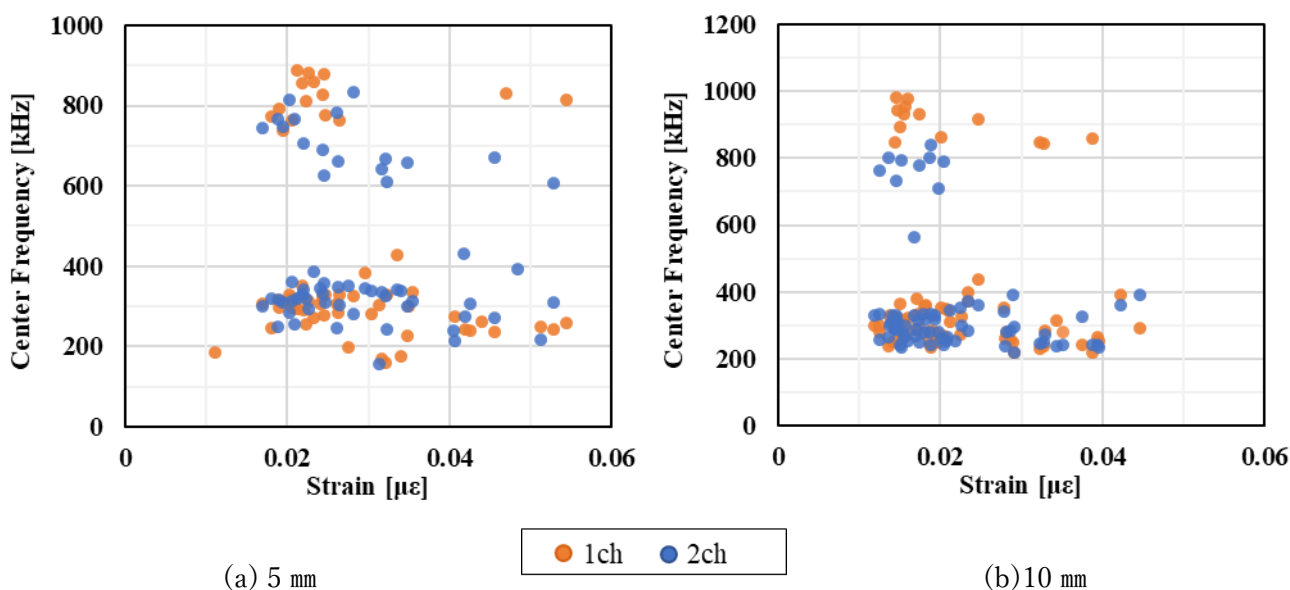


Fig. 4.3.2 Relationship between frequency and strain of YSH-50A-20S (Narrow parallel region)

PAN 系とピッチ系を比較すると、引張強度が高い PAN 系は繊維破断 AE が生じるひずみが大きいと考えられる。引き抜きと考える高周波 AE に関しては、PAN 系で広範囲で生じるのに対してピッチ系では繊維破断 AE と同時に多く生じていた。ピッチ系は臨界繊維破断後も 300kHz 以下の界面剥離が生じていると思われる。これはピッチ系が PAN 系と比べ剥離が起きやすく、引き抜きが起きやすいと考えている。

PAN 系とピッチ系繊維で AE 周波数に明確な違いは見られなかった。これは、AE センサで取得できる周波数範囲では繊維破断の瞬間に生じる弾性波は捉えられず、繊維を支える樹脂の振動が繊維破断 AE として捉えられているためだと考えられる。また、繊維の機械特性ではなく、樹脂の剛性や粘性、樹脂と繊維の相性が AE 周波数に影響するのではないかとと思われる。

4.3.3 振幅

AE 振幅と負荷ひずみの関係を Fig 4.3.3 に T700SC, Fig 4.3.4 に YSH-50A-20S を示す。

振幅の大きさに着目すると、T700SC では最大振幅で 10V であるが、多くが 2V 以下であるのに対して、ピッチ系繊維では 0.5V 付近から最大振幅 10V に達することが分かる。すなわち、これは明らかに繊維の弾性率の違いによるものであり、YSH-50A-20S のピッチ系繊維の弾性率は PAN 系 T700SC と比べ大きく AE 振幅に大きく影響することが分かった。

AE の周波数と振幅の関係を Fig 4.3.5 に T700SC, Fig 4.3.6 に YSH-50A-20S を示す。

Fig 4.3.5 の結果より、PAN 系では繊維破断 AE と考えられる AE が生じたひずみの範囲において、振幅は 1~3V 付近であった。Fig 4.3.6 より、ピッチ系では繊維破断が生じるひずみの範囲で 2V から高振幅の 10V の AE 波が生じ、繊維破断後も高振幅の AE が発生している。これは、ピッチ系は剥離が起きやすいため繊維破断後の繊維の引き抜き等によるものだと考えられる。

PAN 系とピッチ系ともにひずみが大きくなるにつれて高振幅の AE が生じており、引き抜き等による高周波 AE ではないかと考えている。ピッチ系は PAN 系と比べ高弾性率のため、高振幅の傾向があった。

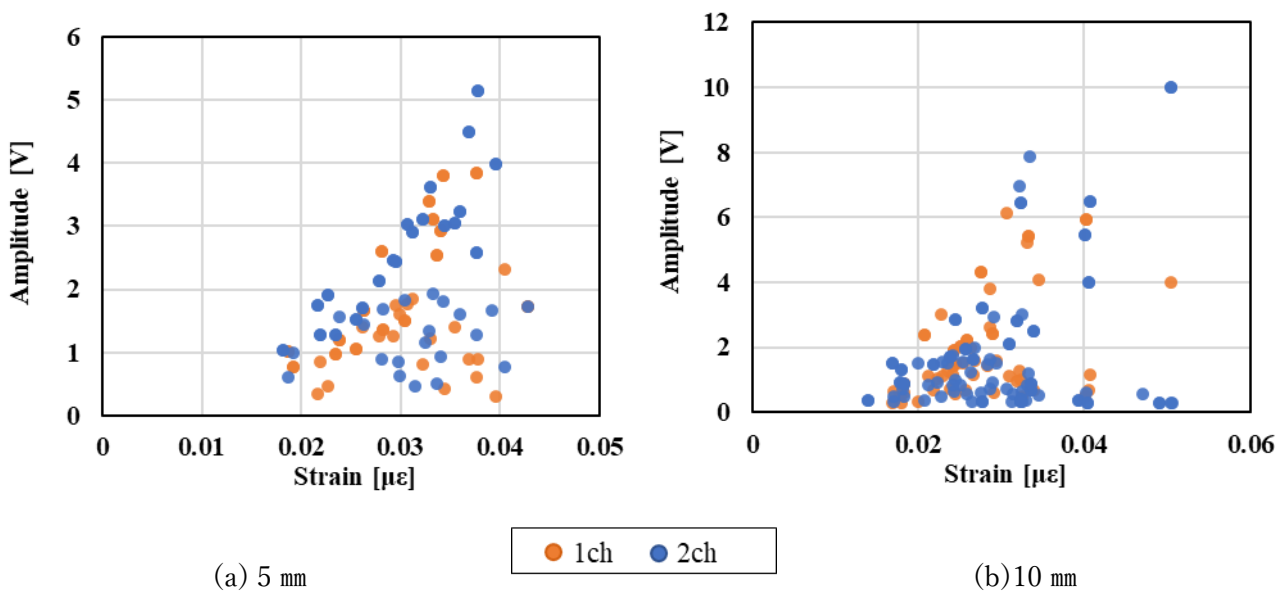


Fig. 4.3.3 Relationship between amplitude and strain of T700SC (Narrow parallel region)

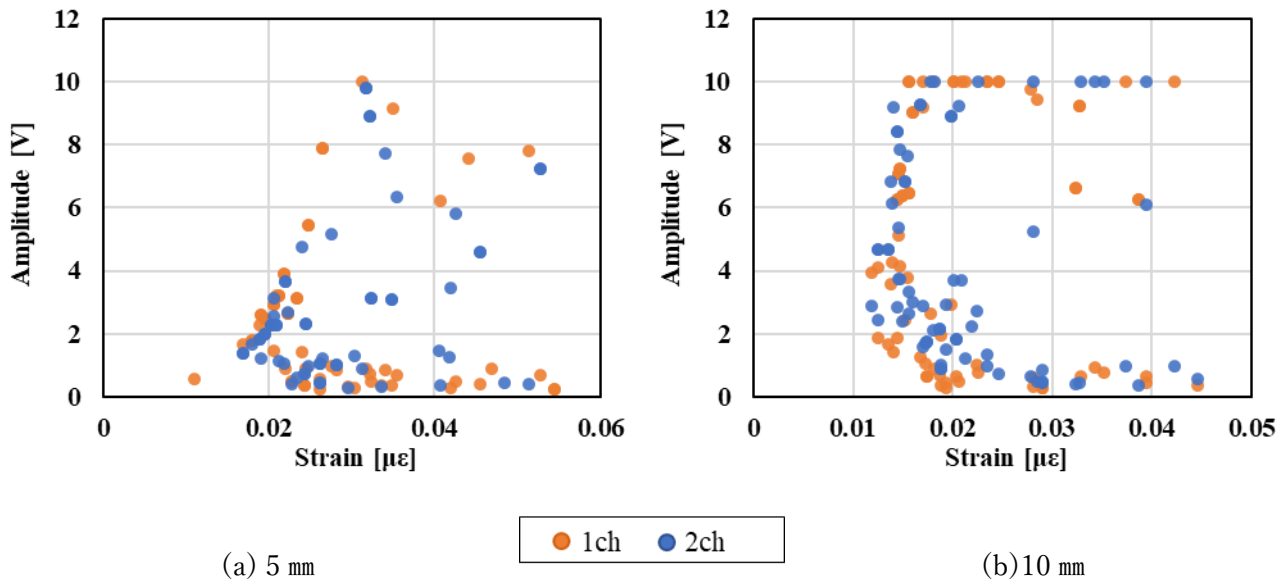


Fig. 4.3.4 Relationship between amplitude and strain of YSH-50A-20S (Narrow parallel region)

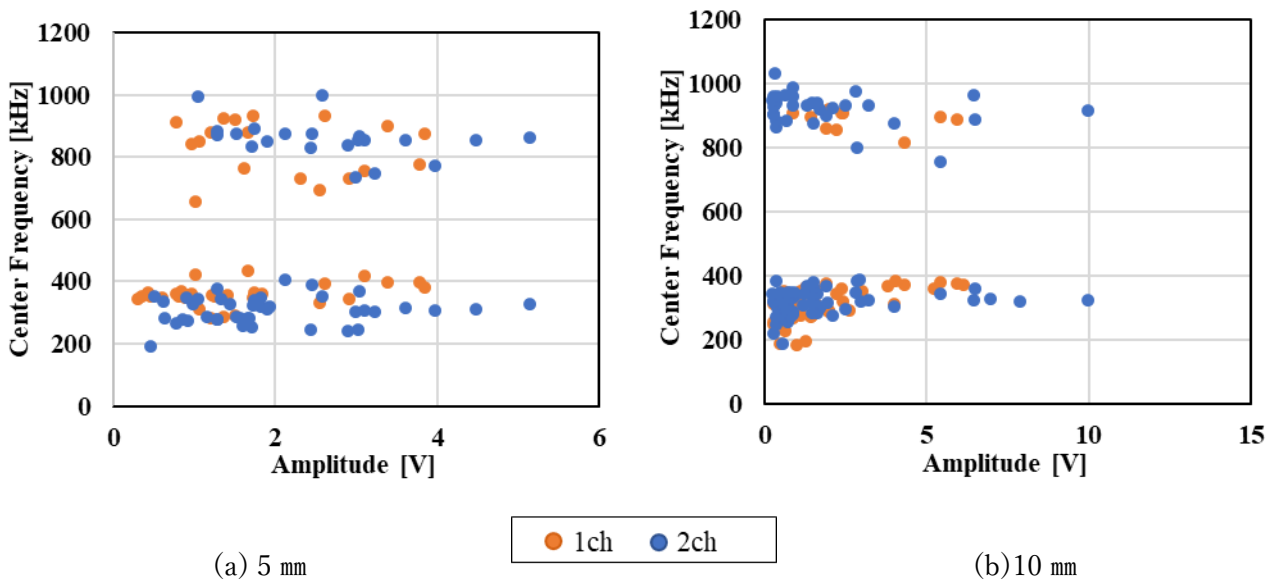


Fig. 4.3.5 Relationship between frequency and amplitude of T700SC (Narrow parallel region)

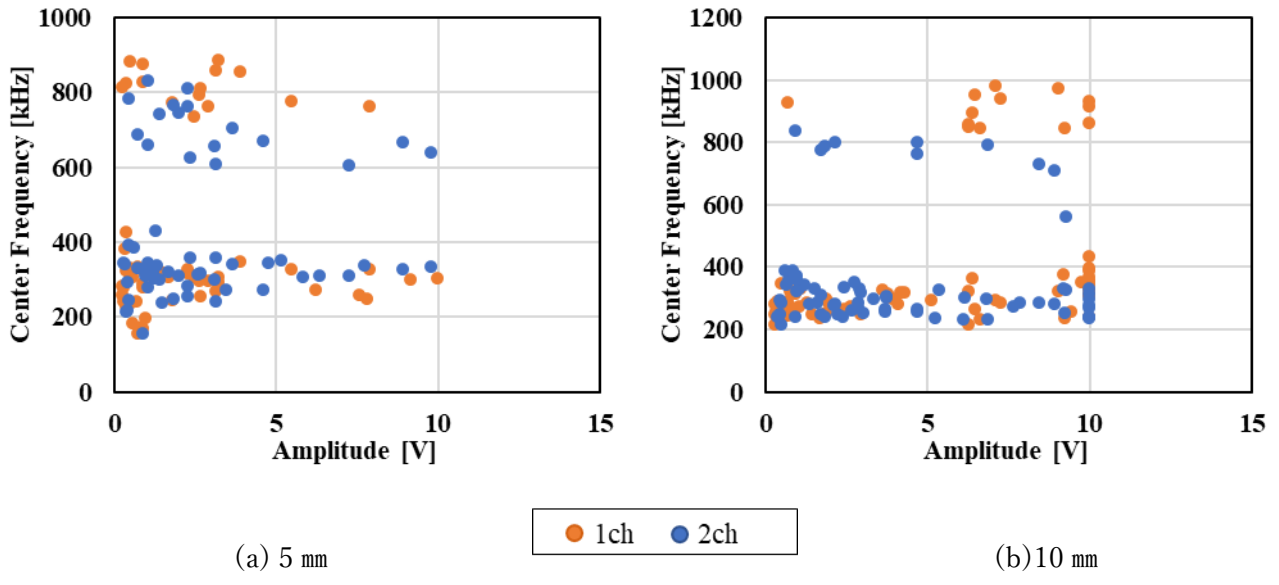


Fig. 4.3.6 Relationship between frequency and amplitude of YSH-50A-20S (Narrow parallel region)

4.3.4 持続時間

持続時間と AE 周波数の関係について T700SC を Fig 4.3.7 に YSH-50A-20S を Fig 4.3.8 に示す. 持続時間の大きさに関して PAN 系ではほとんどが $24\mu\text{s}$ 以下であった. それに対してピッチ系では最大 $40\mu\text{s}$, PAN では見られなかった $20\sim 40\mu\text{s}$ の分布があり, 多くは $200\sim 250\text{kHz}$ の AE であった. これは繊維破断の周波数帯ではないため, 界面剥離だと思われる. しかし, 300kHz 付近の繊維破断 AE は $6\mu\sim 30\mu\text{s}$ で, 300kHz 以下は繊維破断と界面剥離が混在しているのではないかと考えられる. 900kHz 付近の高周波 AE は PAN 系ピッチ系ともに最大で $12\mu\text{s}$ で得られほとんど違いはなかった. PAN 系とピッチ系の持続時間は繊維破断では違いがなかったが, 界面剥離と考えられる AE ではピッチ系のほうが長かった.

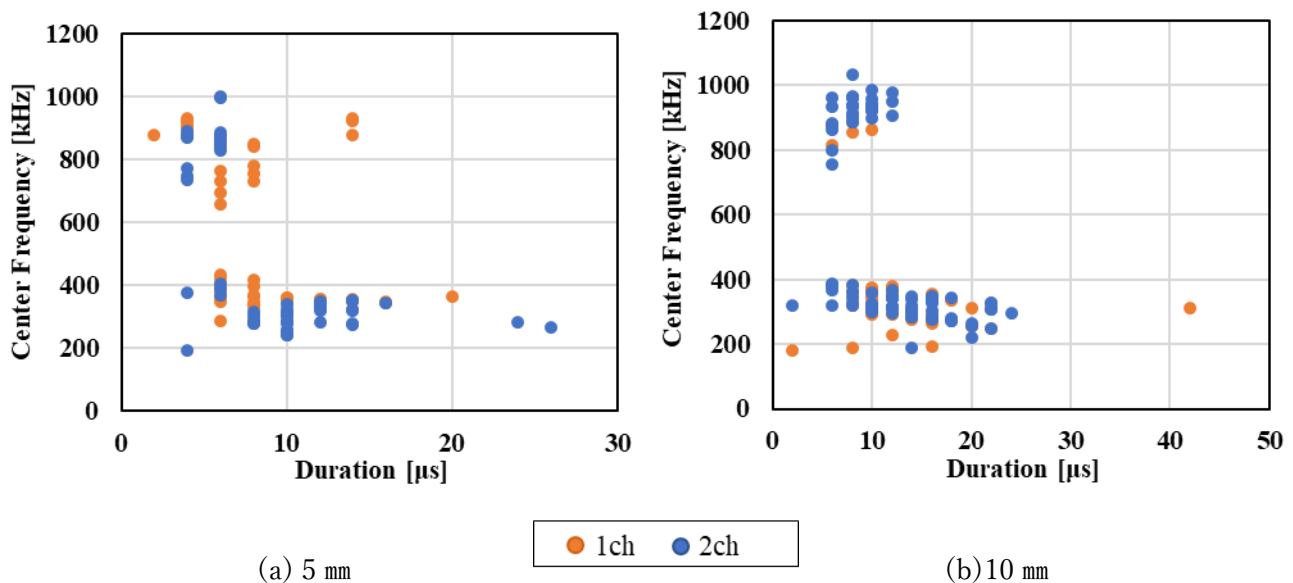


Fig. 4.3.7 Relationship between frequency and duration time of T700SC (Narrow parallel region)

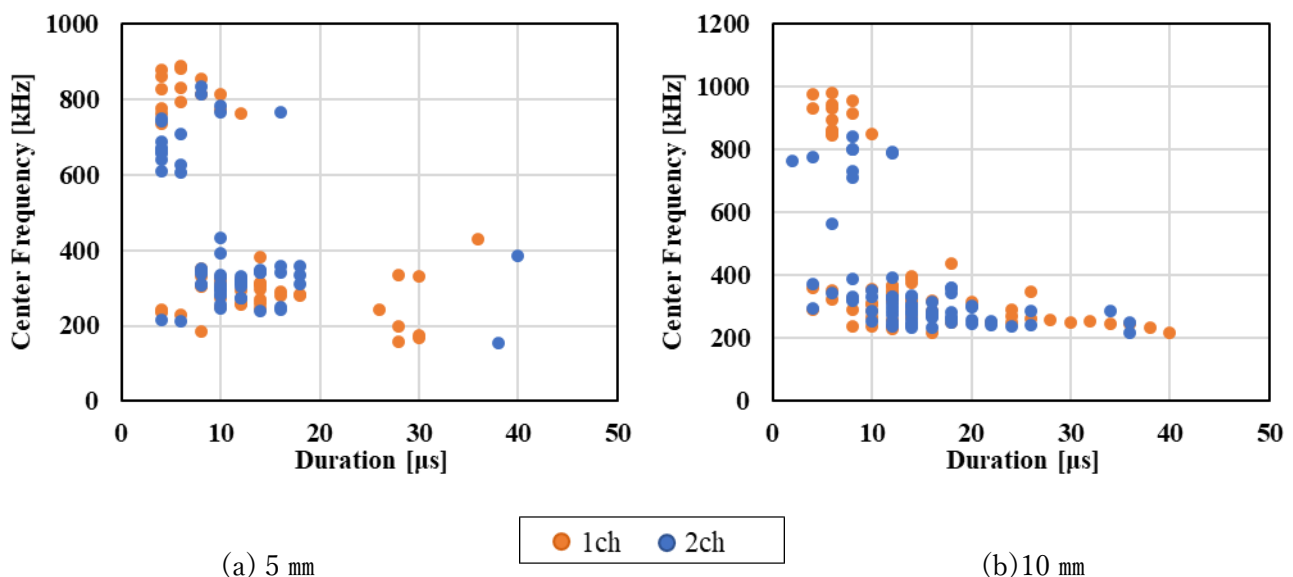


Fig. 4.3.8 Relationship between frequency and duration time of YSH-50A-20S (Narrow parallel region)

4.3.5 高周波 AE と繊維破断カウント数の関係

検出された高周波 AE が繊維破断によることを明確に示すために、顕微鏡を用いた目視観察による累積破断数と高周波 AE のカウント数を縦軸にひずみを横軸にして、T700SC を Fig 4.3.9 に、YSH-50A-20S を Fig.4.3.10 に示す。図では、240~400kHz の AE と 550~1 MHz の AE、目視観察による累積繊維破断のカウント数を示している。目視観察の繊維破断と照合すると、250~400kHz 帯の AE の検出時間は目視観察による繊維破断の確認時間が多く一致したため、この周波数帯で分けてカウントを行った。図では、240~400kHz の AE のカウント数と目視観察による累積破断数の傾向が非常によく一致していた。Fig 4.3.9 と Fig.4.3.10 より、PAN 系とピッチ系ともに 240~400kHz の AE と累積破断数がほぼ一致した。

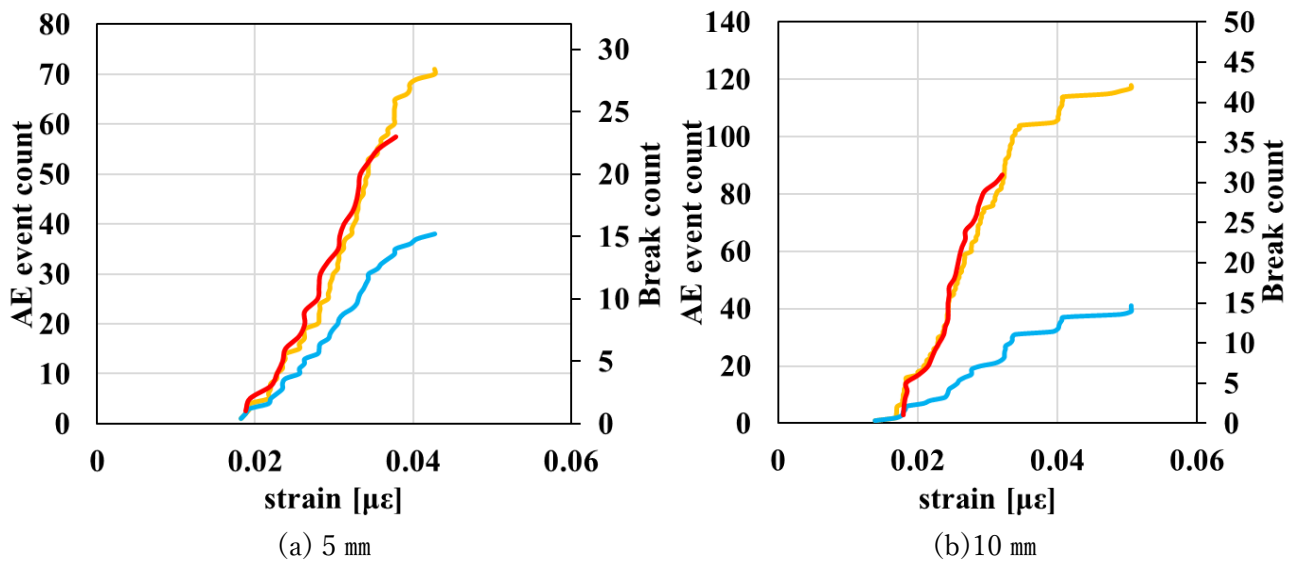


Fig 4.3.9 Relationship between strain and AE counts measured by the AE sensor and visual inspection of T700SC

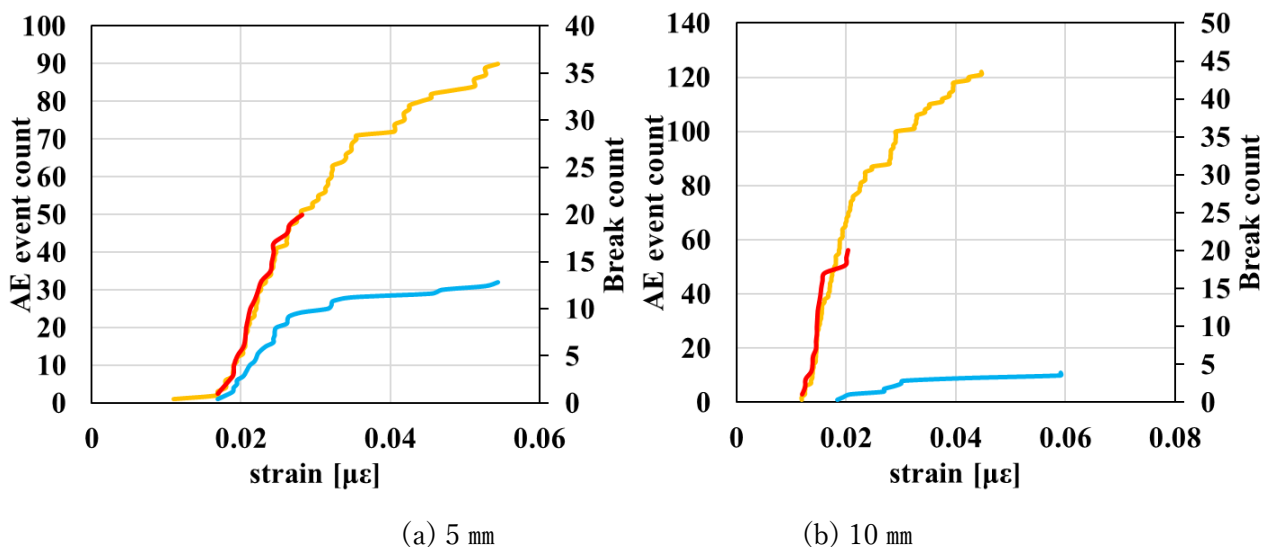
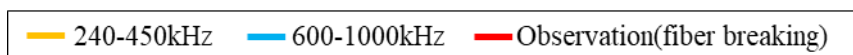


Fig 4.3.10 Relationship between strain and AE counts measured by the AE sensor and visual inspection of YSH-50A-20S



4.3.6 目視観察による繊維破断と周波数特性

試験片の平行部 25 mm と比べ、寸法変更した平行部 5 mm と 10 mm ではセンサ間の距離が狭まり AE 波の減衰が抑えられることで、詳細なモード特定ができると考えた。目視観察によるマイクロスコープでの観察領域でセンサ間の全ての繊維破断を把握できるため、検出された AE 波との照合ができる。観察された繊維破断と AE 波を一つ一つ照らし合わせて、繊維破断の AE 特性を明らかにした。

4.3.2 節の Fig 4.3.1, 4.3.2 の結果をもとに目視観察による繊維破断と一致した AE とその他の AE 波として分類し、中心周波数とひずみの関係について T700SC を Fig 4.3.11, YSH-50A-20S を Fig 4.3.12 に示す。PAN 系とピッチ系ともに繊維破断 AE は 300kHz 付近の 1 つの成分だけ持つ場合と高周波 900kHz 付近と低周波 250~400kHz の 2 つの成分を持つ場合の波が検出された。また、高周波 800kHz 付近のほとんどが低周波成分との組み合わせで検出された。繊維破断 AE は 240~400kHz であり、同時に検出される高周波成分は、繊維破断が発生した際の繊維破断付近の樹脂の振動ではないかと考えられる。PAN 系は繊維破断と同定した AE と繊維破断と一致していない AE が幅広いひずみの範囲で混在して生じる傾向があった。それに対して、ピッチ系は繊維破断と同定した AE が発生したのち、少し遅れて繊維破断と一致しなかった AE が生じる傾向があった。

これらのことから PAN 系は繊維破断や界面剥離が混在して発生すると思われる。また、ピッチ系は繊維破断が生じたのち繊維破断付近から界面剥離が進み、臨界繊維破断後も界面剥離が発生していると考えられる。ピッチ系は PAN 系より樹脂との接着性が悪くて剥離しやすく引張強度が低いことが起因していると思われる。しかしながら、界面剥離と考えられる AE は、試験片の平行部外すなわち観察領域以外で生じた繊維破断も含まれているのではないかと推測される。

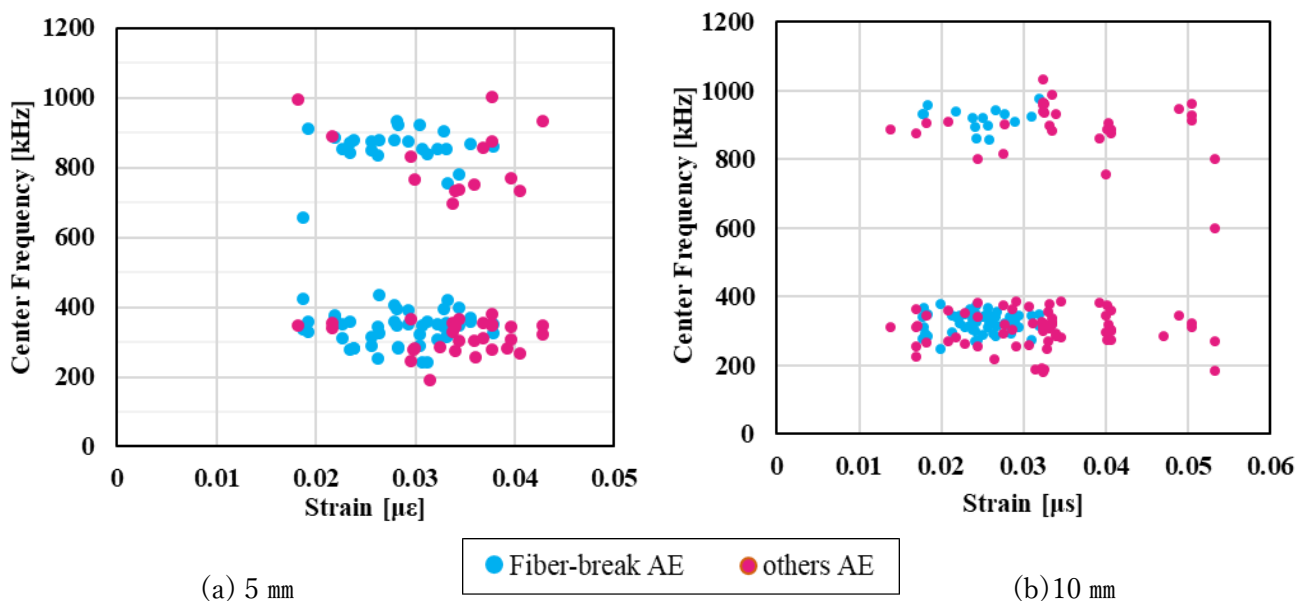


Fig 4.3.11 Relationship between frequency and strain of T700SC (Narrow parallel region)

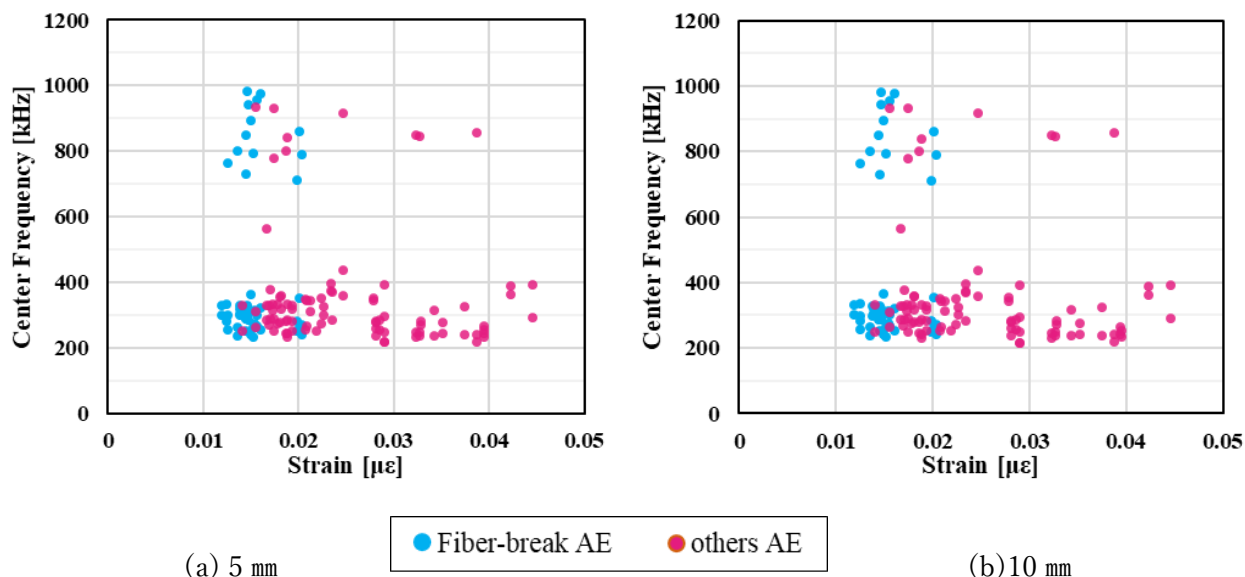


Fig 4.3.12 Relationship between frequency and strain of YSH-50A-20S (Narrow parallel region)

繊維破断 AE に関して、1ch と 2ch で同時に検出された AE 波を詳細に調べると、2つのチャンネルで 20～100kHz の周波数差があった。これは、損傷源とセンサの距離が離れることによって波の減衰が生じるためだと考えられる。1ch と 2ch で同時に検出された繊維破断 AE 波形を Fig.4.3.13, 界面剥離と考えられる AE 波形を Fig.4.3.14 に示す。同時に検出された繊維破断 AE に関して、2つチャンネルのうち減衰の影響が少ない AE を抽出すると、繊維破断 AE として 300～400kHz 付近の周波数が得られた。また、界面剥離と考えられる AE の波形は、繊維破断 AE より低振幅で持続時間が長い特徴があるものの、減衰された 300kHz 以下の繊維破断 AE の波形と同様の特徴を持っていた。同タイミングでの AE を 2チャンネルで検出することで繊維破断 AE の特定ができるようになったため、その他の損傷として 300kHz 以下の界面剥離等の特定につながれると考えられる。

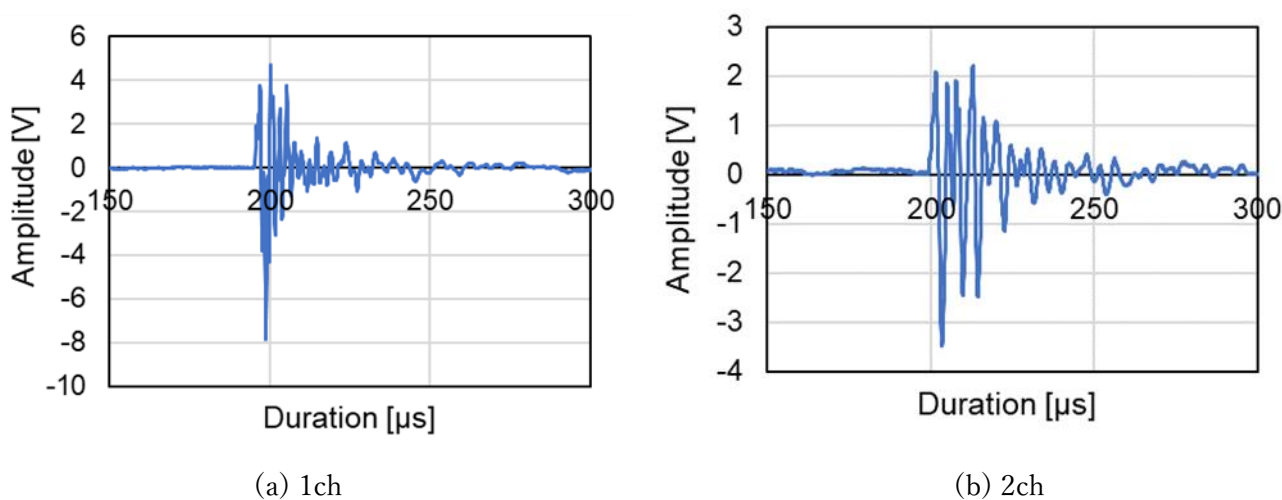
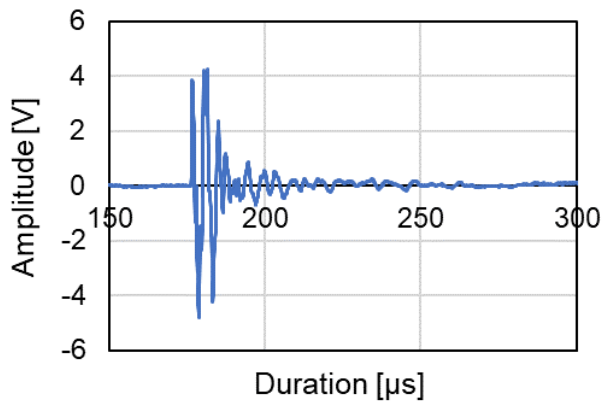
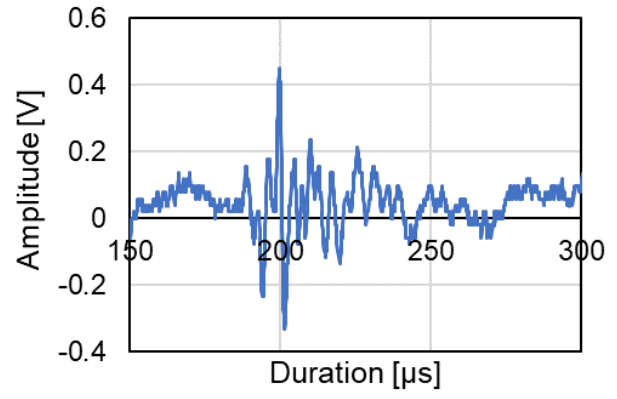


Fig.4.3.13 waveform of fiber-break



(a) 1ch



(b) 2ch

Fig.4.3.14 waveform of debonding

第5章 結言

本研究では、カーボン単繊維強化複合材料 (SFC : Single Fiber Composite) の引張試験 (フラグメンテーション) 試験で生じる AE 信号を取得し、Wavelet 変換を用いてその特性を詳細に調べた。本研究では弾性率と強度が大きく異なる PAN 系繊維 (T700SC) とピッチ系繊維 (YSH-50A-20S と XN-60-A2S) を用いて試験片を作製し、また2つの広帯域 AE センサで波形を取得した。その結果以下の知見を得た。

- (1) Wavelet 変換を用いた解析結果から、240~300kHz, 300~400kHz, 800~1000kHz に中心周波数を持つ AE が生じることが分かった。これは Li らや孫らによる過去の研究で得られた成果と同様であり、また過去の研究成果から、本研究で得た AE の周波数範囲はそれぞれ界面剥離、繊維破断、引き抜きの損傷モードに相当すると考えられる。
- (2) PAN 系とピッチ系を比較すると、AE 周波数にはあまり違いが見られなかった。繊維弾性率が異なるにも関わらず AE 周波数が変わらない理由は、AE センサで捉える AE 波が破断まわりの樹脂の共振によるものであると考えられる。
- (3) 界面処理の異なる繊維を用いた実験結果からは、周波数分布には明確な違いが見られなかった。しかしこれについては、実際に生じる剥離長を確認した上で議論すべきだろう。
- (4) 平行部長さ 25mm の試験では、800~1000kHz の高周波信号の数が少なく、2つのセンサで同時に捉えることが出来なかった。一方で、平行部長さ 5, 10mm の試験では、多くの高周波信号を得られた。これはセンサと音源の距離が長い場合、引き抜きによる 800~1000kHz の高周波信号が減衰で消滅することを意味する。
- (5) 振幅については PAN 系とピッチ系で明確に異なり、ピッチ系の AE 信号の振幅がより大きくなることが分かった。これは破断時に解放されるひずみエネルギーが、強度は低い弾性率の高いピッチ系の方が大きいためと考えられる。
- (6) 持続時間については、800~1000kHz の高周波信号は短く、240~300kHz の低周波数信号は長くなる傾向が見られた。ピッチ系では持続時間の長い低周波数信号が PAN 系よりも多く見られ、このことから、ピッチ系では試験においてより多くの界面剥離が生じたと考えられる。
- (7) 光学観察結果と併せることにより、繊維破断時の AE を特定した。その結果、繊維破断時には 300~400kHz と 800~1000kHz の周波数成分を併せ持つ AE が生じることが分かった。PAN 系では繊維破断数が飽和した後に生じる AE は少なかったが、ピッチ系では繊維破断数が飽和した後も多くの AE が生じた。その多くが低周波 AE であったため、ピッチ系では繊維破断数の飽和後にも界面剥離が多く生じると思われる。

参考文献

- (1) 末益 博志ほか, 日本複合材料学会 (監修), “入門 複合材料の力学”, 培風館 (2009)
- (2) (社)日本非破壊検査協会, 編集委員長水谷義弘, “アコースティック・エミッション試験Ⅱ” (2008)
- (3) 仲佐博裕, “アコースティック・エミッションの理論と実際”, 地人書館 (1994)
- (4) 大津政康, “アコースティック・エミッションの特性と理論 (第 2 版) - 構造物の診断と破壊現象解析 -”, 森北出版株式会社 (2005)
- (5) K. Ono and A. Gallego, “Research and applications of ae on advanced composites”, J. Acoust. Emiss, vol.30, pp.180-220 (2012)
- (6) 宅間 正則, 新家 昇, 鈴木 健, 藤井 俊行, AE 信号のウェーブレット変換による FRP 積層板の曲げ疲労損傷評価, 精密工学会誌 Vol.68, No.10, 2002, 1309-1315
- (7) 戸田浩, 章忠, 川畑洋昭, “最新ウェーブレット実践講座入門と応用 信号処理の基礎から最新理論まで”, ソフトバンククリエイティブ (2005)
- (8) ” Detail of WA Analytic Wavelet Transform VI”, LabView 2017 Help, National Instruments. Co.Ltd (2017)
- (9) Li Li , S.V. Lomov, X. Yan, V .Carvelli, “Cluster analysis of acoustic emission signals for 2D and 3D woven glass/epoxy composites”, Composite Structures, 116, 286-299 (2014)
- (10) 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(492) (1987), 1459-1465
- (11) 孫 峰, 鈴木 恵, 中西 博, 岩本 正治, 自念 栄一, モデル GFRP 材の破壊機構と AE 特性の関係, 材料, 37(416), 517-522 (1988)
- (12) 石原 功一, ”FRP 繊維の機械特性が繊維破断 AE に与える影響”, 高知工科大学学士卒業論文(2021)

謝辞

本研究を進めるためにあたり，ご指導をしてくださった指導教員の高坂達郎教授に心より感謝申し上げます。共に研究を行った先端機械・航空材料工学研究室の皆様に感謝の意をお伝え申し上げます。

付録 各試験片の AE 特性

Fig. A 試験片平行部 25 mm

Fig. A.1 T700SC (ethanol)

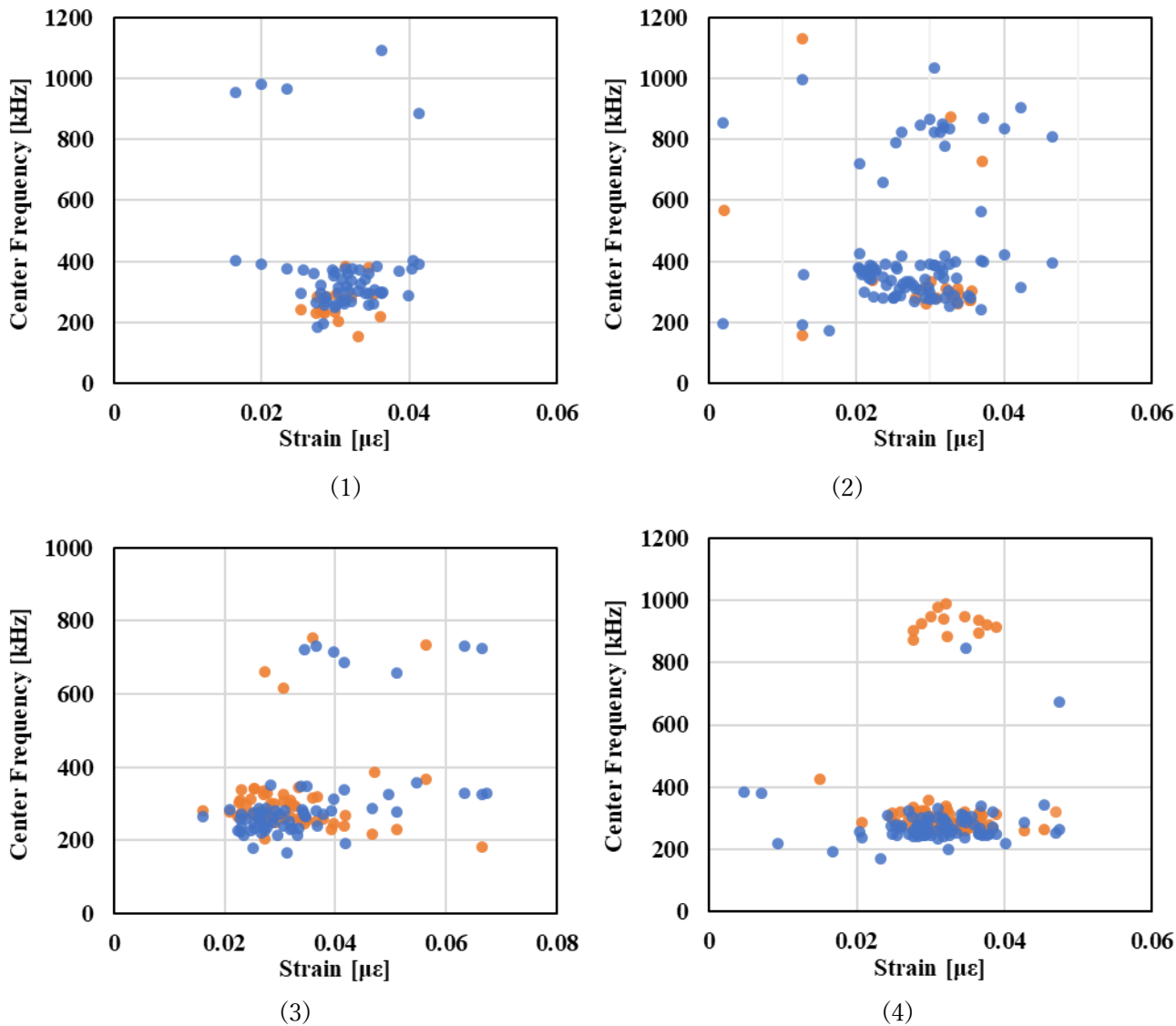
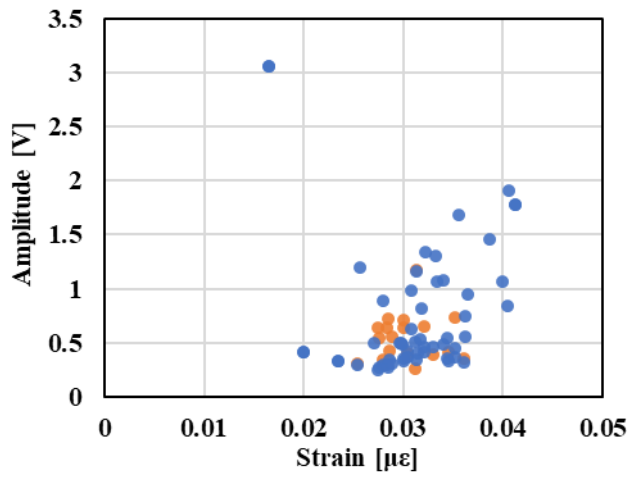
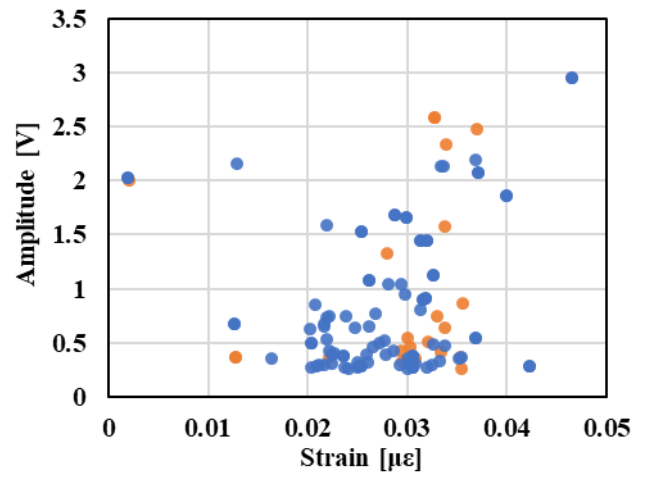


Fig. A.1.a Relationship between frequency and strain of T700SC (Narrow parallel region)

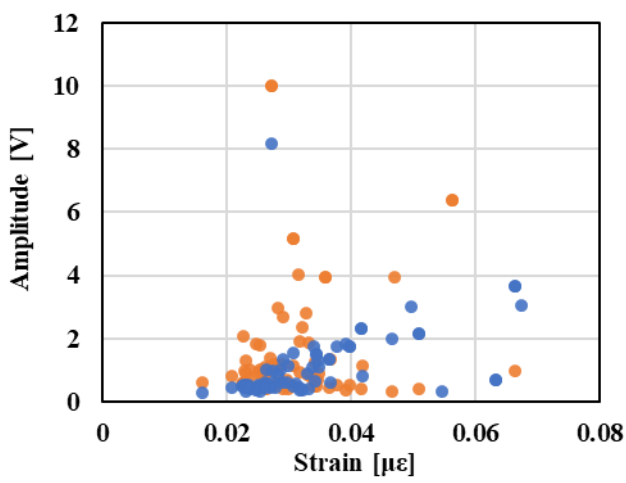




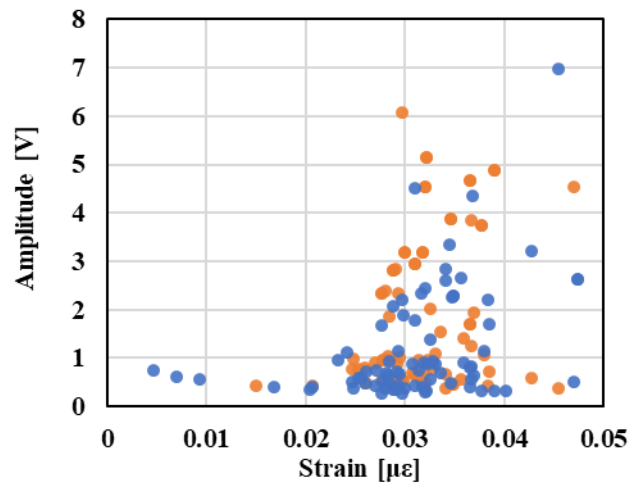
(1)



(2)

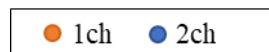


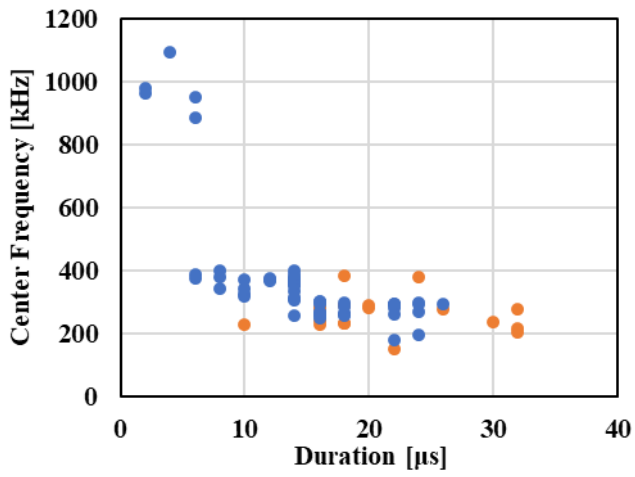
(3)



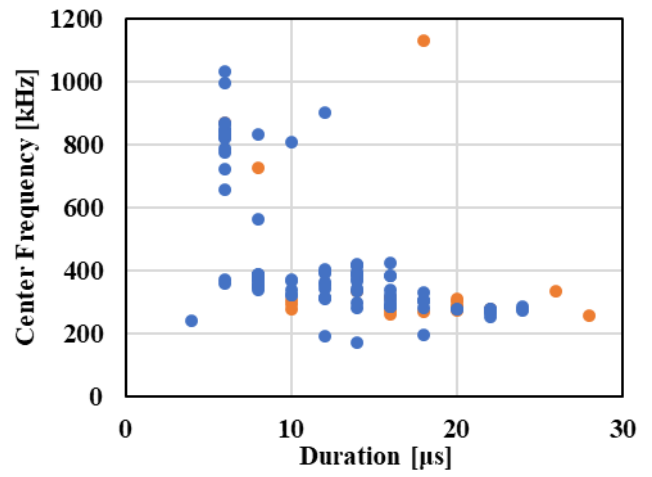
(4)

Fig. A.1.b Relationship between AE amplitude and strain of T700SC (Narrow parallel region)

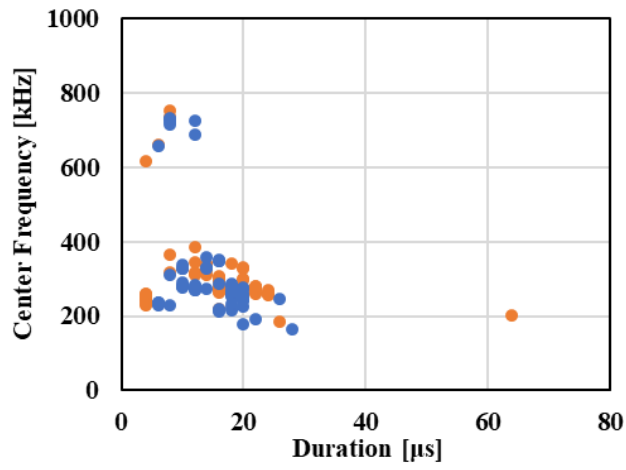




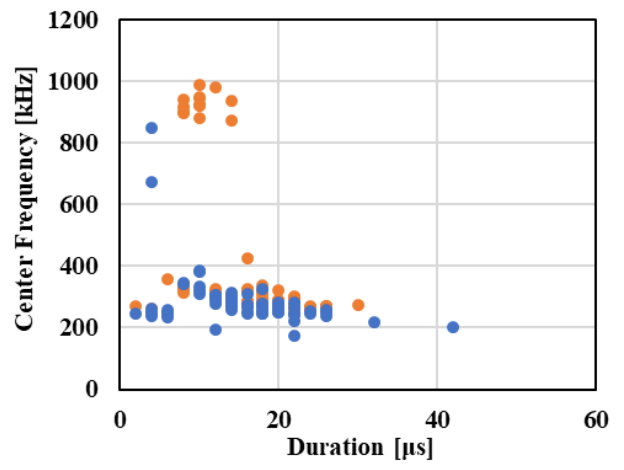
(1)



(2)



(3)



(4)

Fig. A.1.c Relationship between frequency and duration time of T700SC (Narrow parallel region)



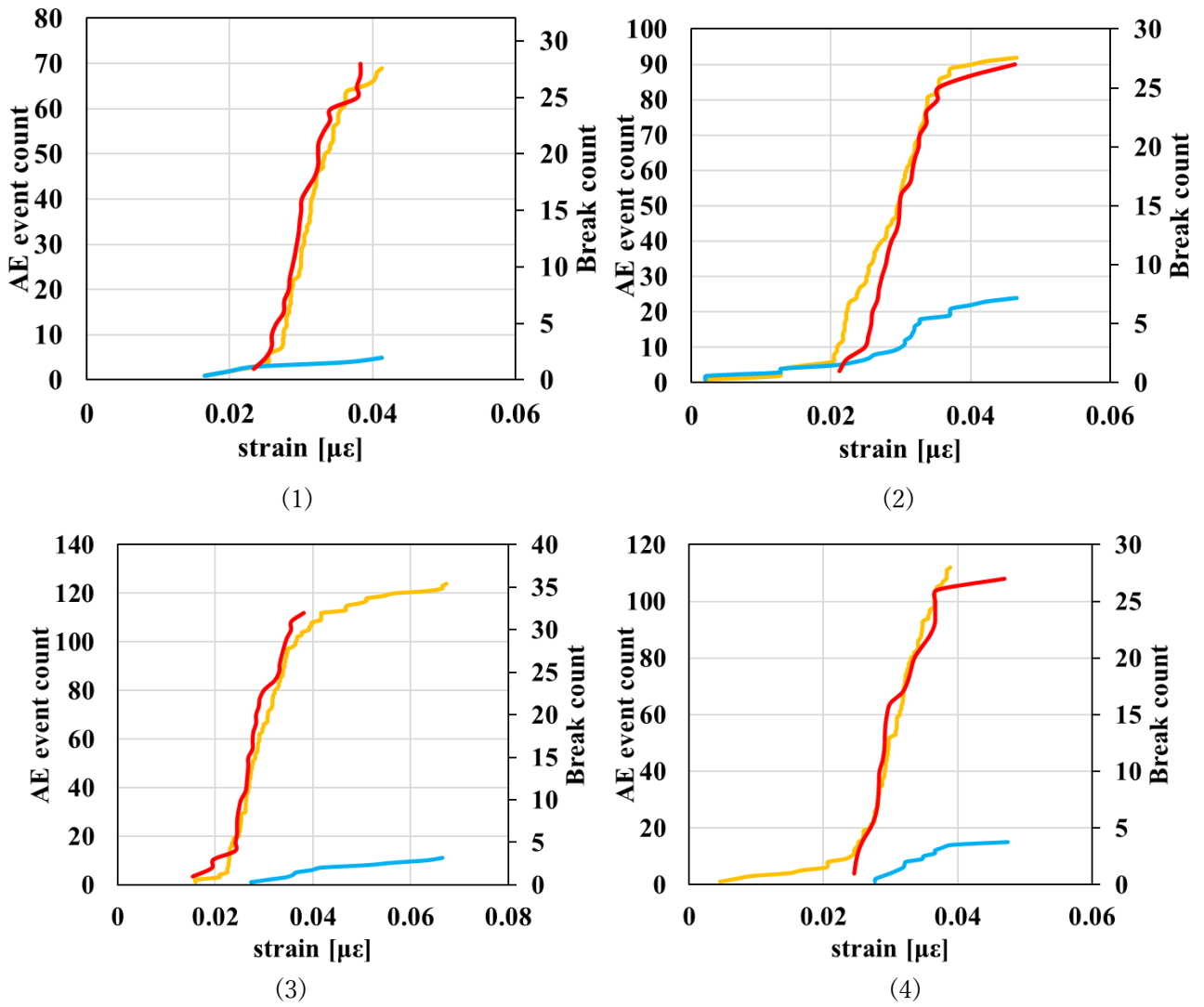


Fig. A.1.d Relationship between strain and AE counts measured by the AE sensor and visual inspection (Narrow parallel region)

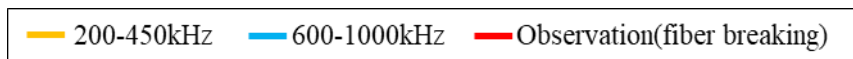


Fig. A.2 YSH-50A-20S (acetone)

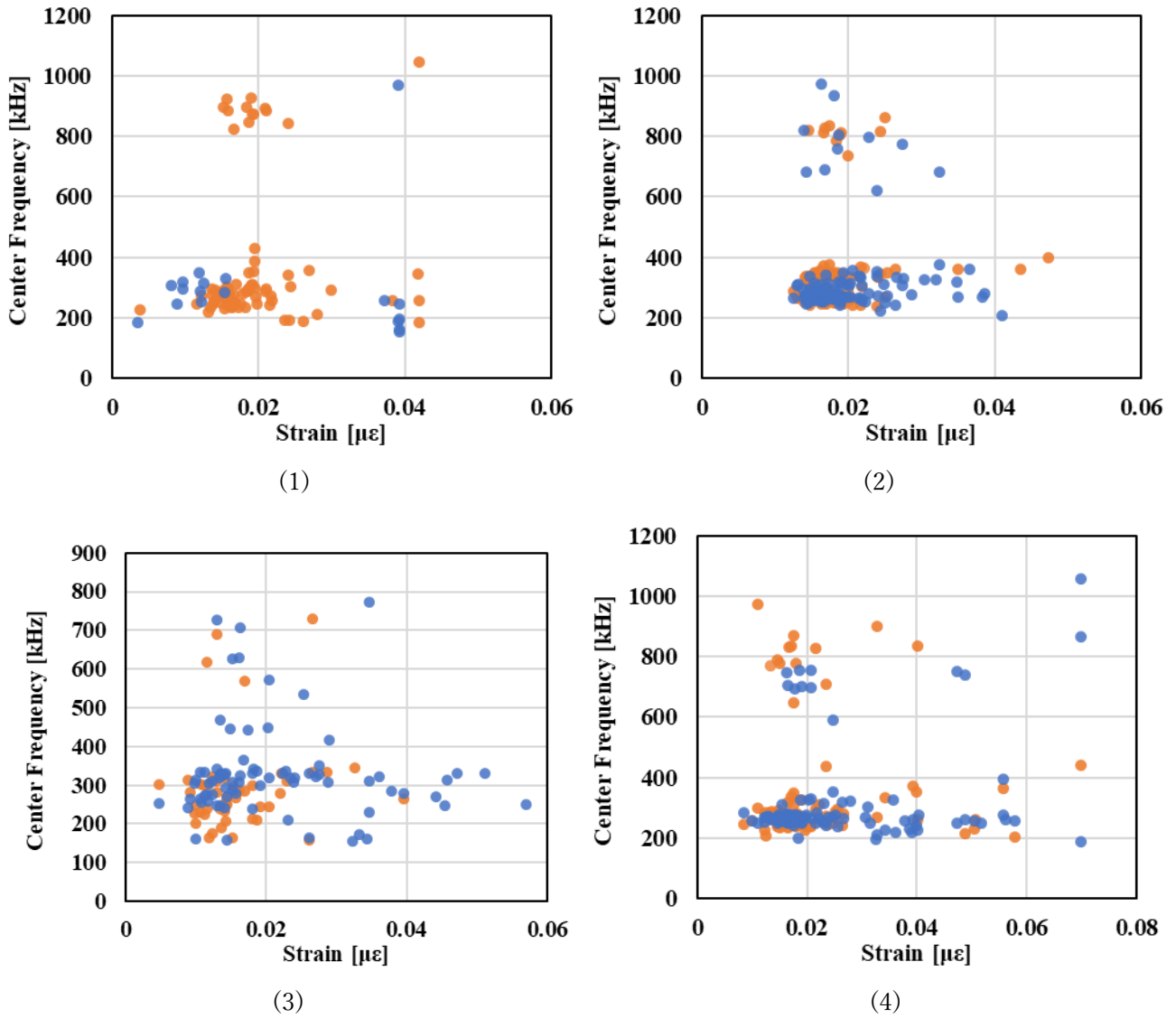
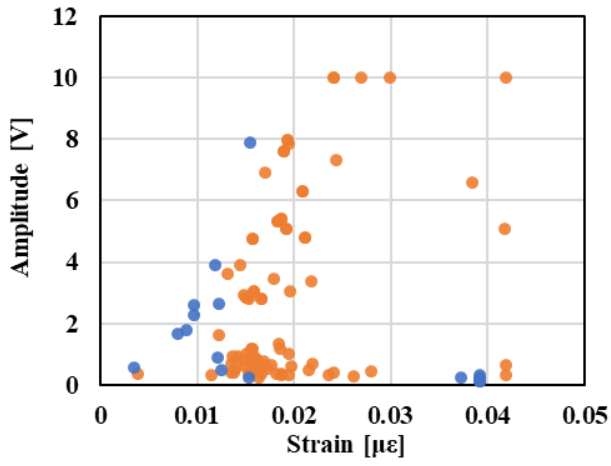
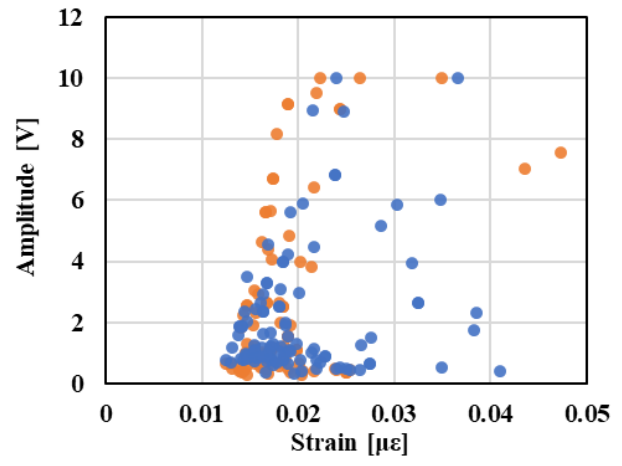


Fig. A.2.a Relationship between frequency and strain of YSH-50A-20S (Narrow parallel region)

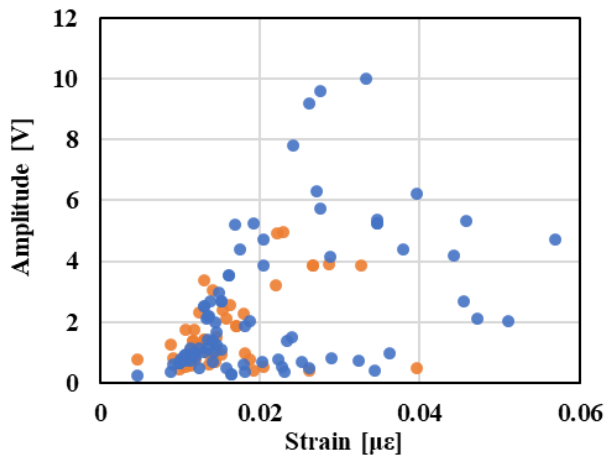




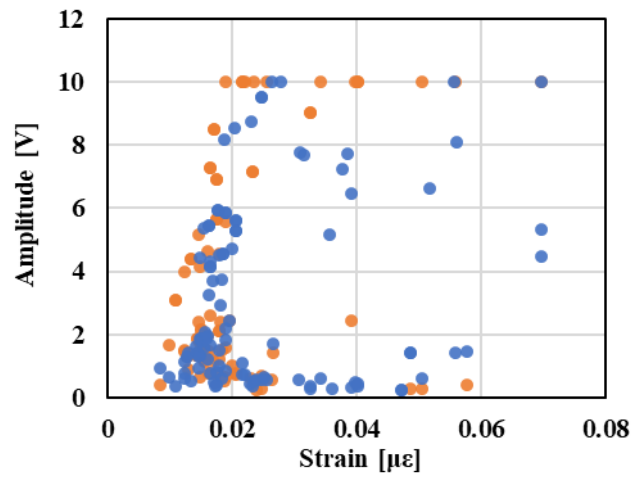
(1)



(2)



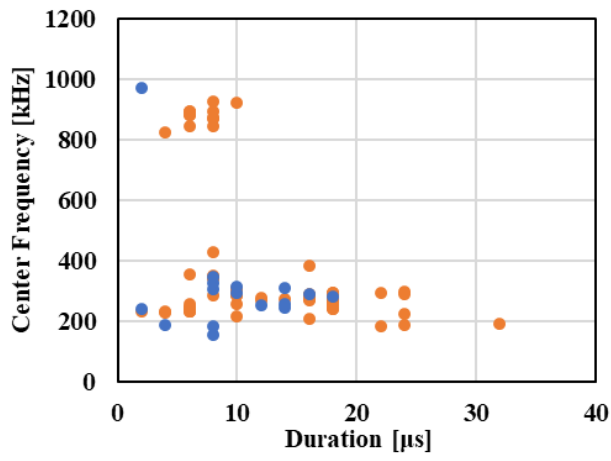
(3)



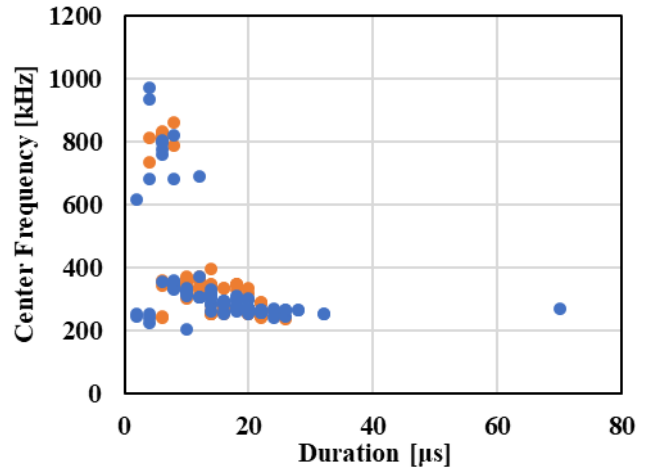
(4)

Fig. A.2.b Relationship between AE amplitude and strain of YSH-50A-20S (Narrow parallel region)

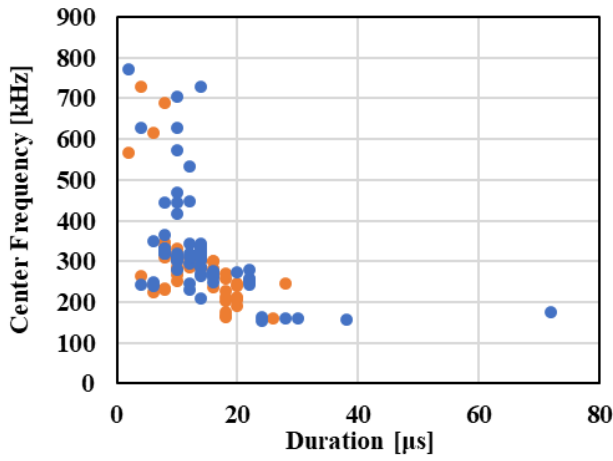




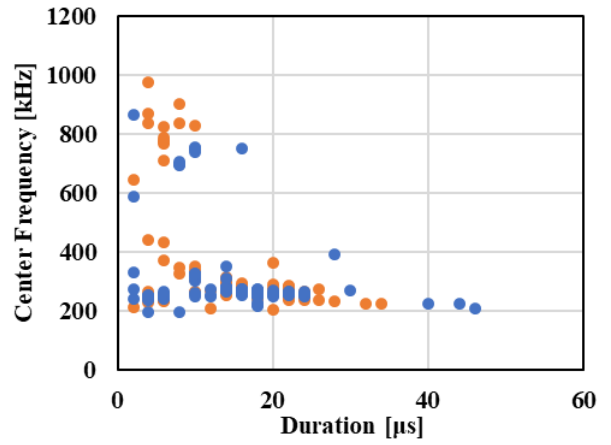
(1)



(2)



(3)



(4)

Fig. A.2.c Relationship between frequency and duration time of YSH-50A-20S (Narrow parallel region)



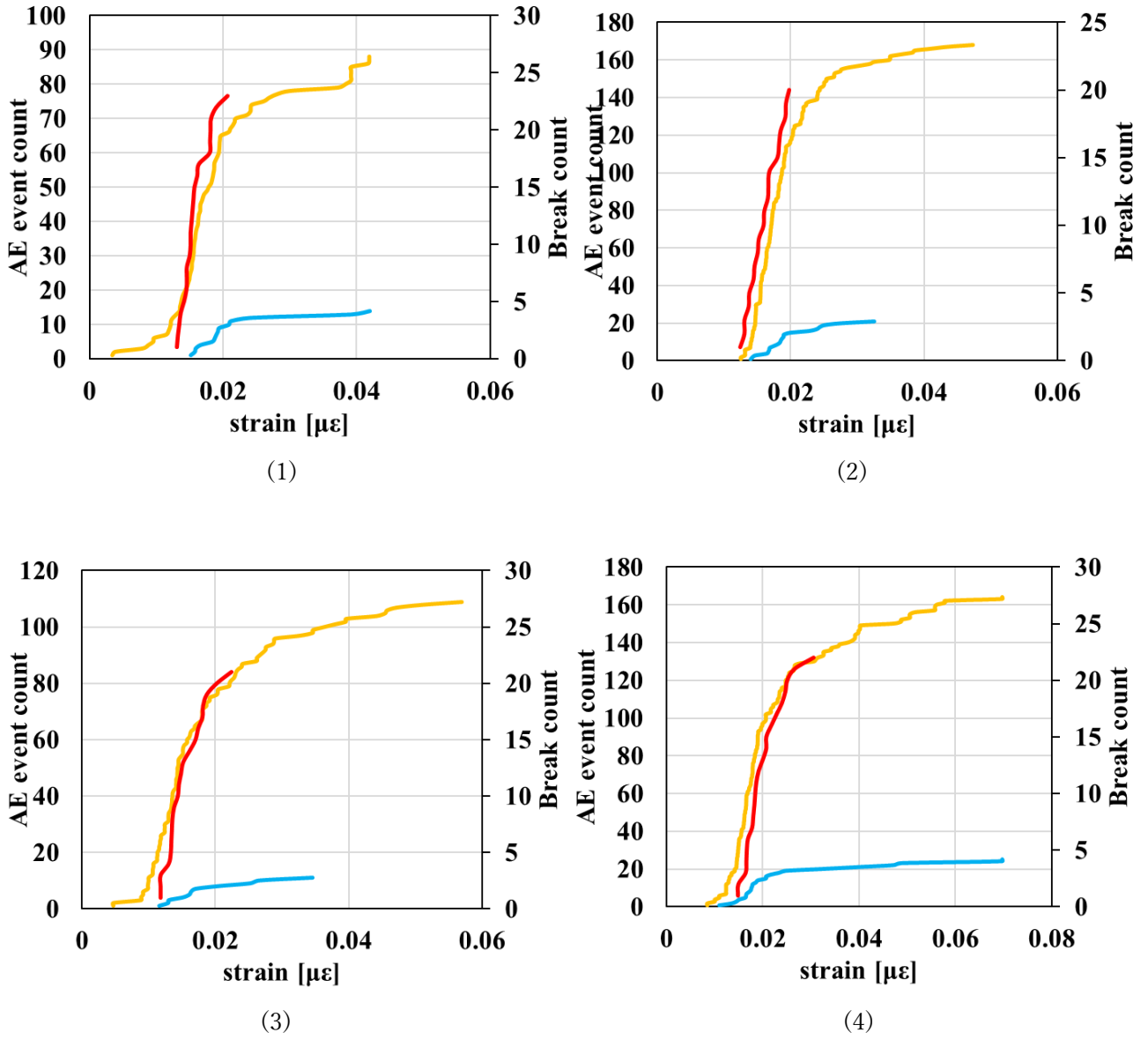


Fig. A.2.d Relationship between strain and AE counts measured by the AE sensor and visual inspection (Narrow parallel region)

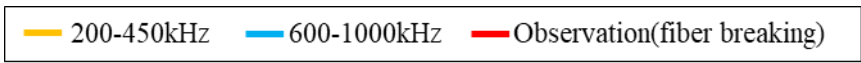


Fig. A.3 YSH-50A-20S (ethanol)

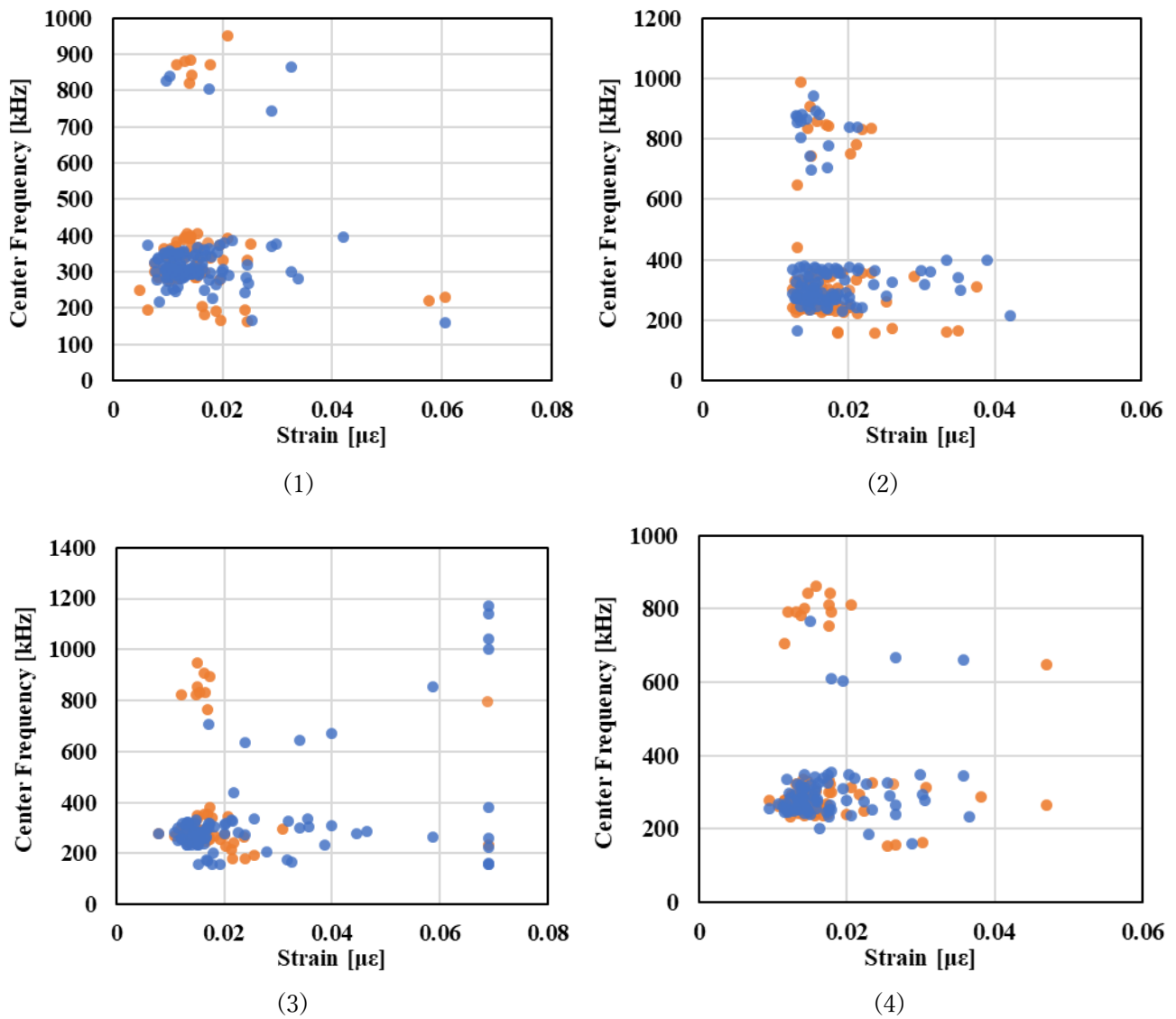
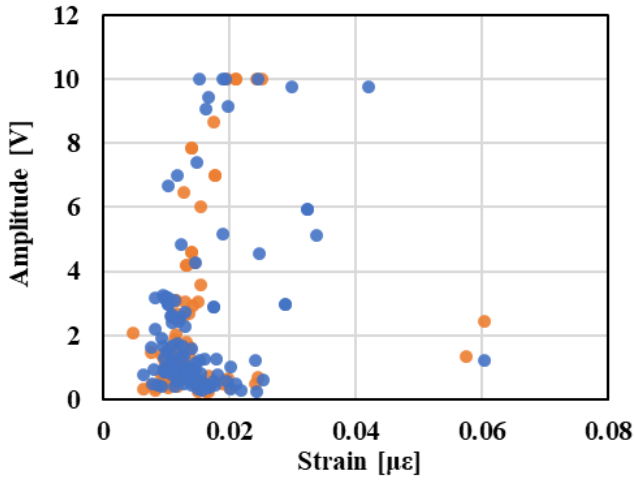
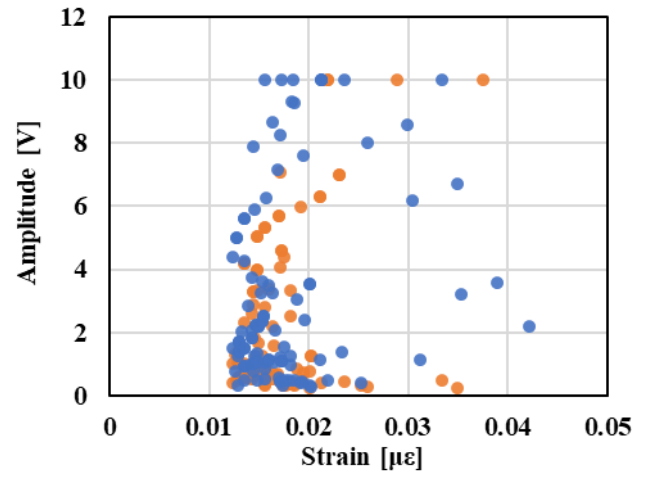


Fig. A.3.a Relationship between frequency and strain of YSH-50A-20S (Narrow parallel region)

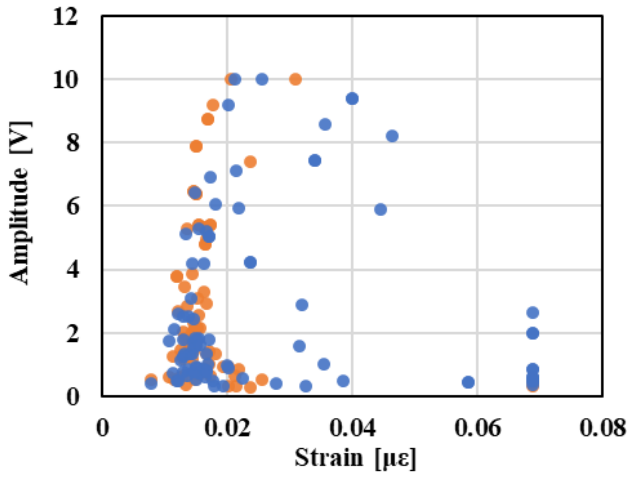




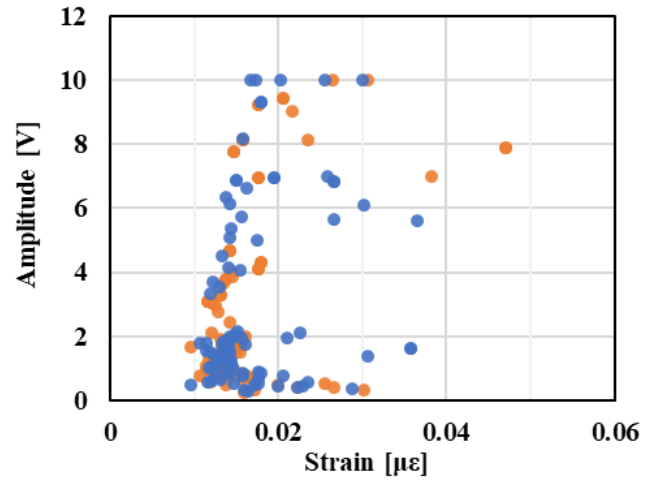
(1)



(2)



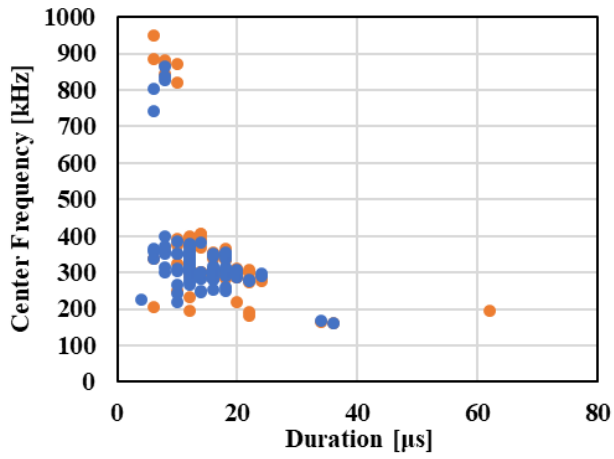
(3)



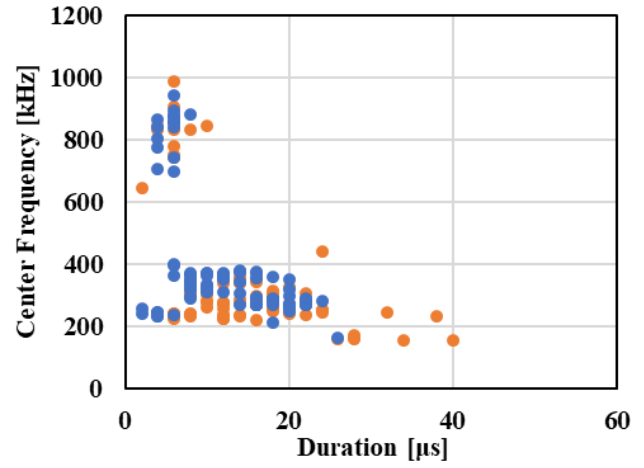
(4)

Fig. A.3.b Relationship between AE amplitude and strain of YSH-50A-20S (Narrow parallel region)

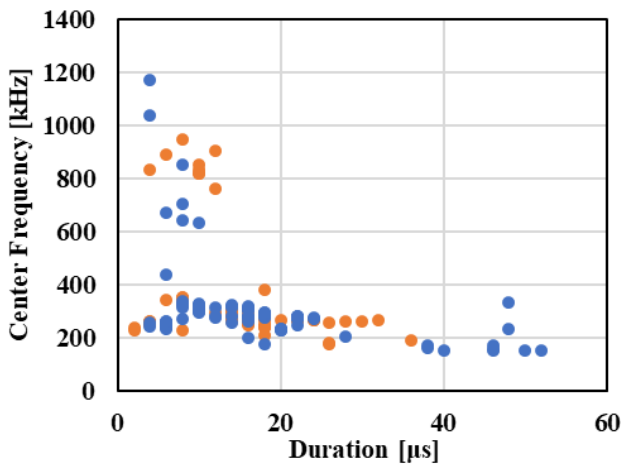




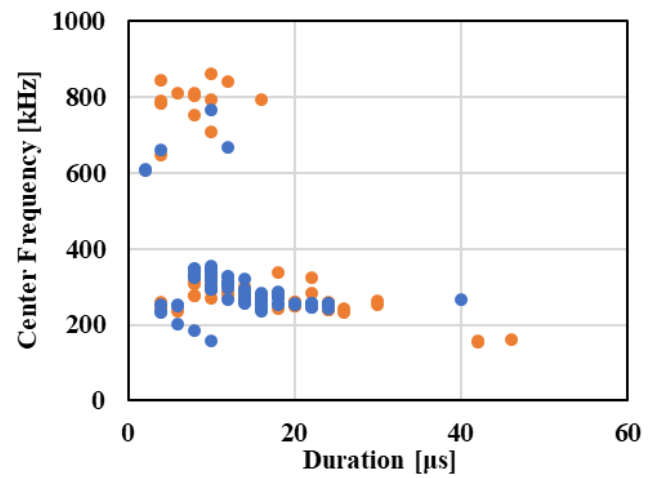
(1)



(2)



(3)



(4)

Fig. A.3.c Relationship between frequency and duration time of YSH-50A-20S (Narrow parallel region)



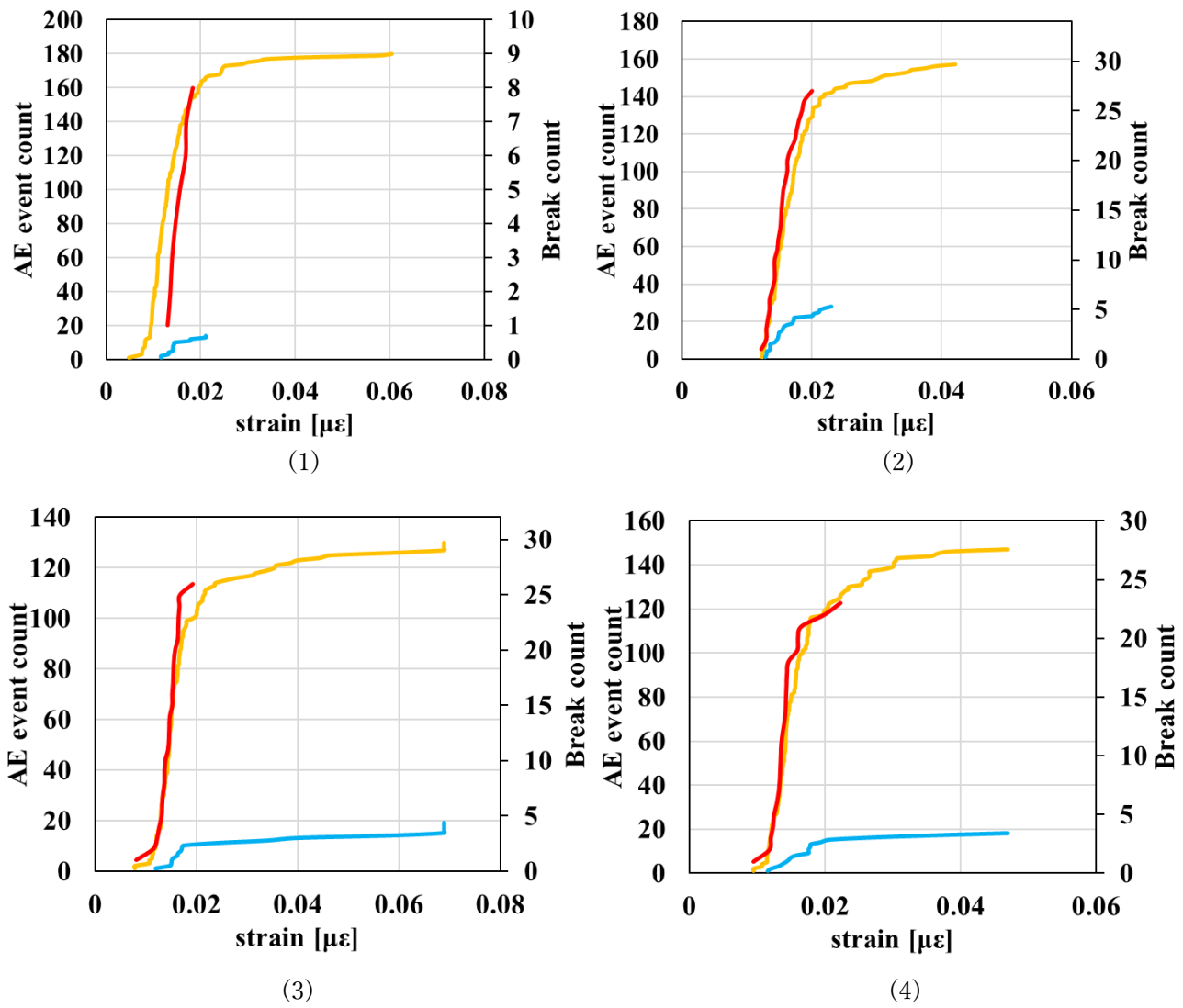


Fig. A.3.d Relationship between strain and AE counts measured by the AE sensor and visual inspection (Narrow parallel region)

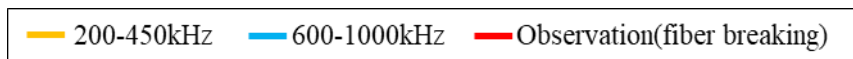


Fig. A.4 XN-60-A2S (acetone)

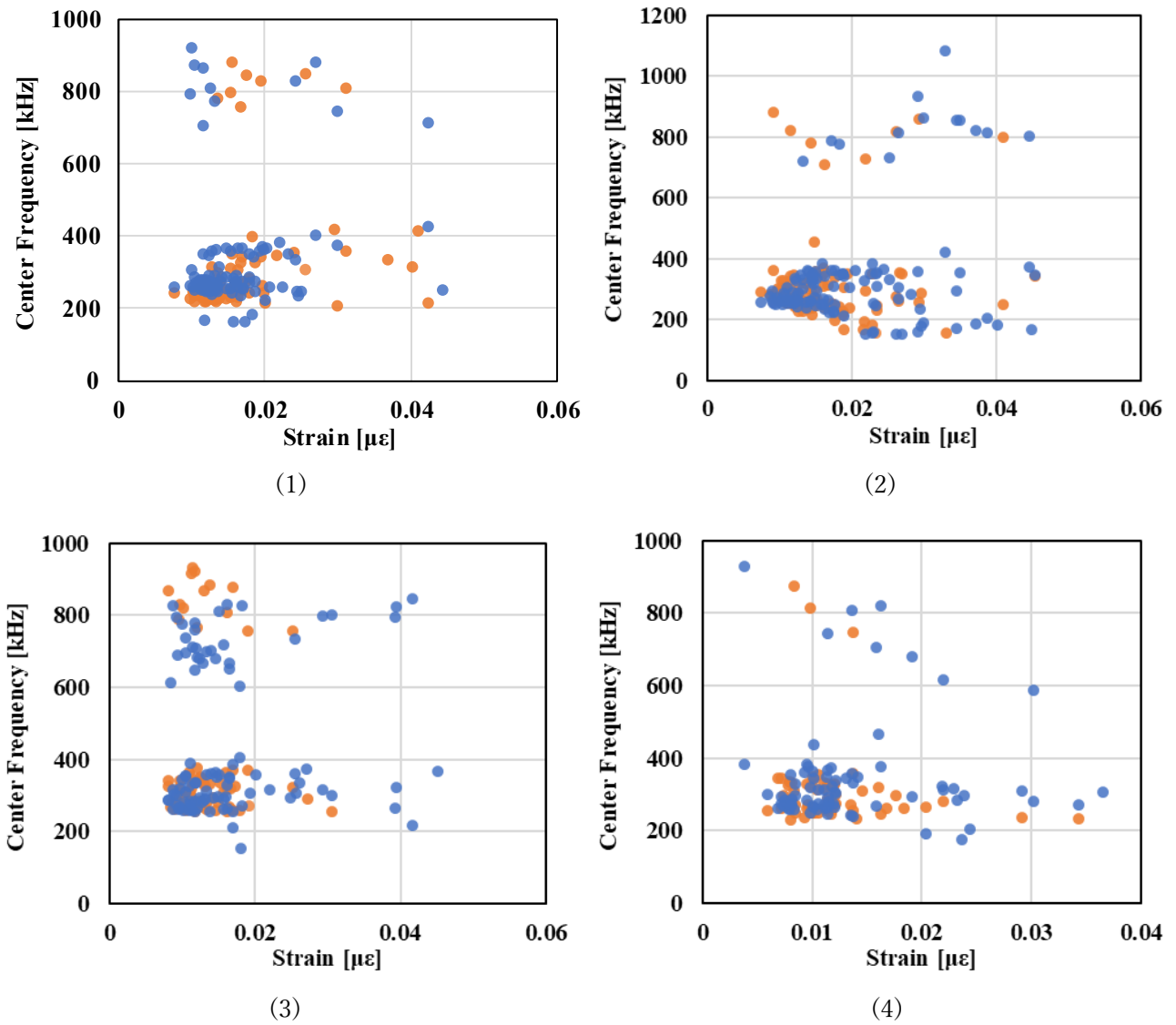


Fig. A.4.a Relationship between frequency and strain of XN-60-A2S (Narrow parallel region)



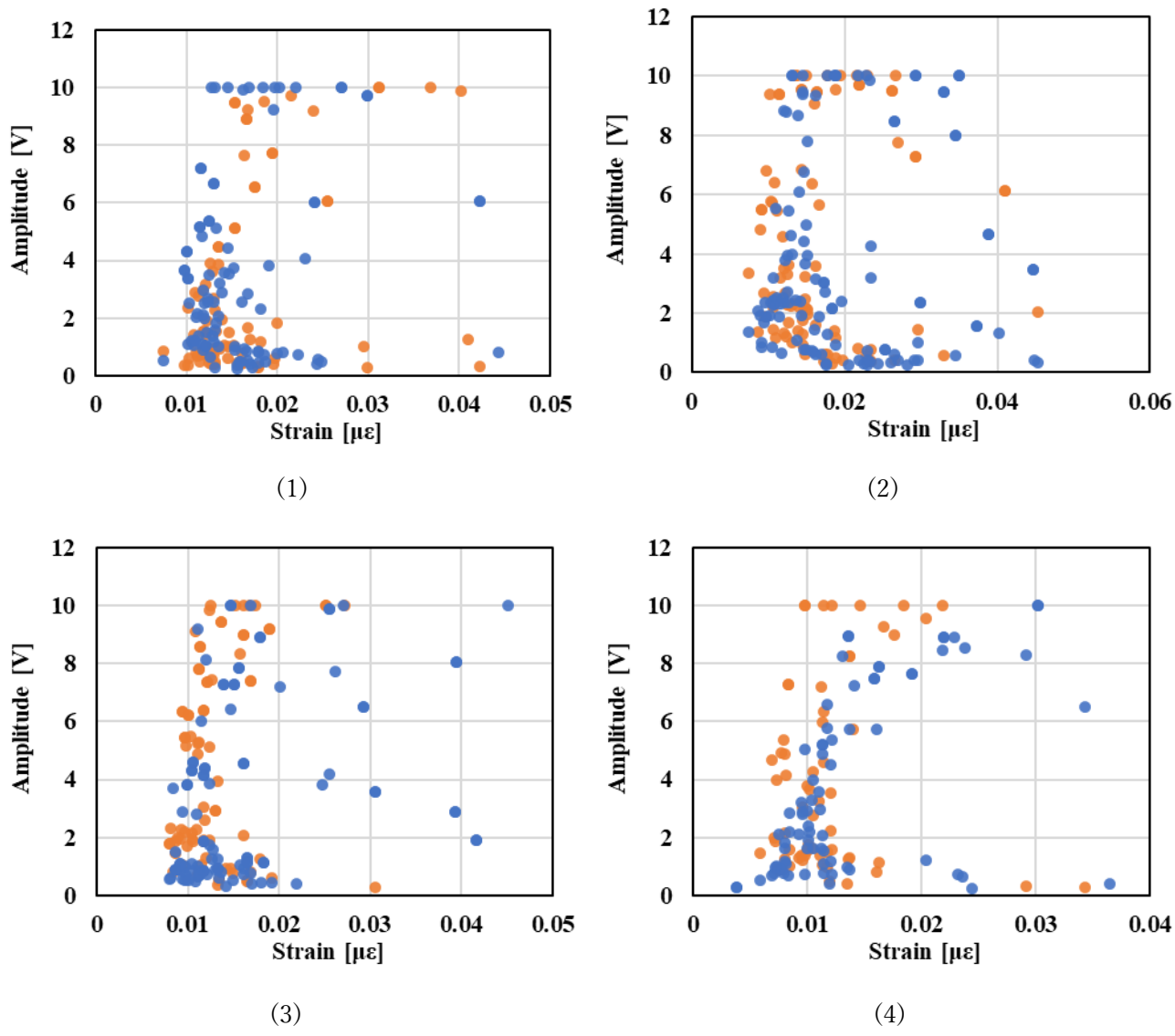
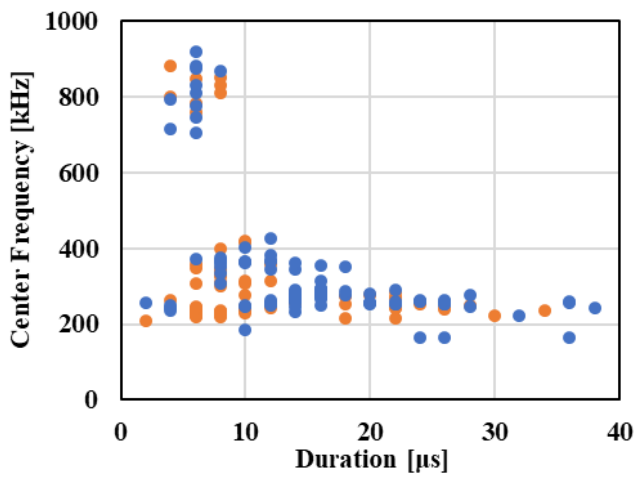
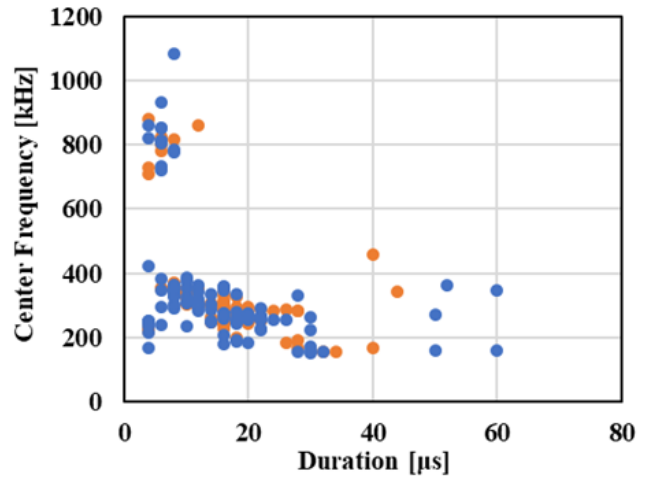


Fig. A.4.b Relationship between AE amplitude and strain of XN-60-A2S (Narrow parallel region)

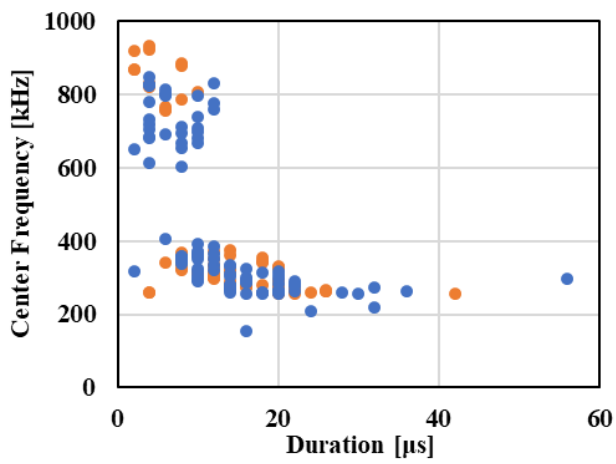




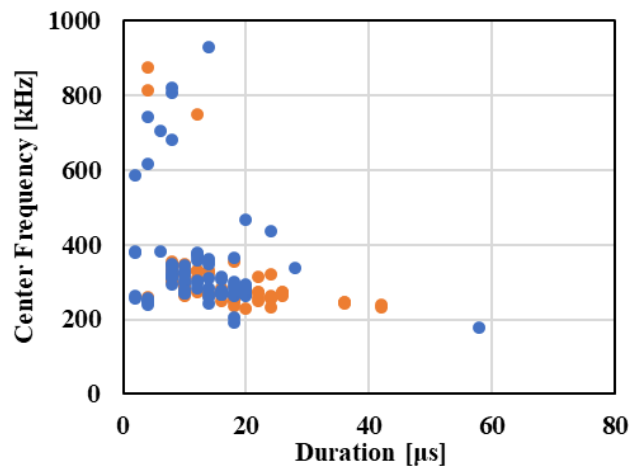
(1)



(2)



(3)



(4)

Fig. A.4.c Relationship between frequency and duration time of XN-60-A2S (Narrow parallel region)



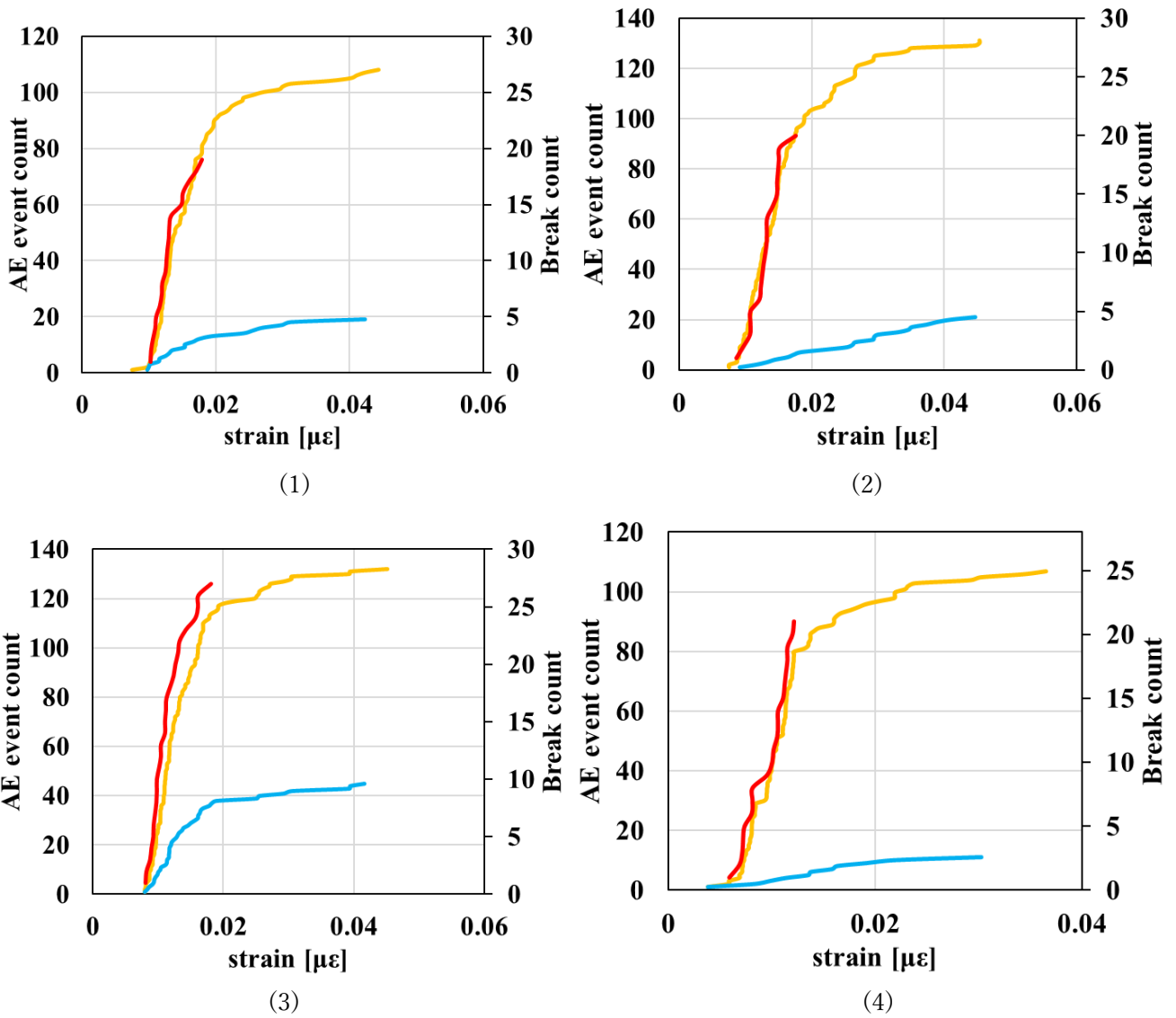


Fig. A.4.d Relationship between strain and AE counts measured by the AE sensor and visual inspection (Narrow parallel region)

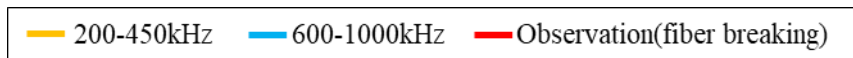


Fig. A.5 XN-60-A2S (ethanol)

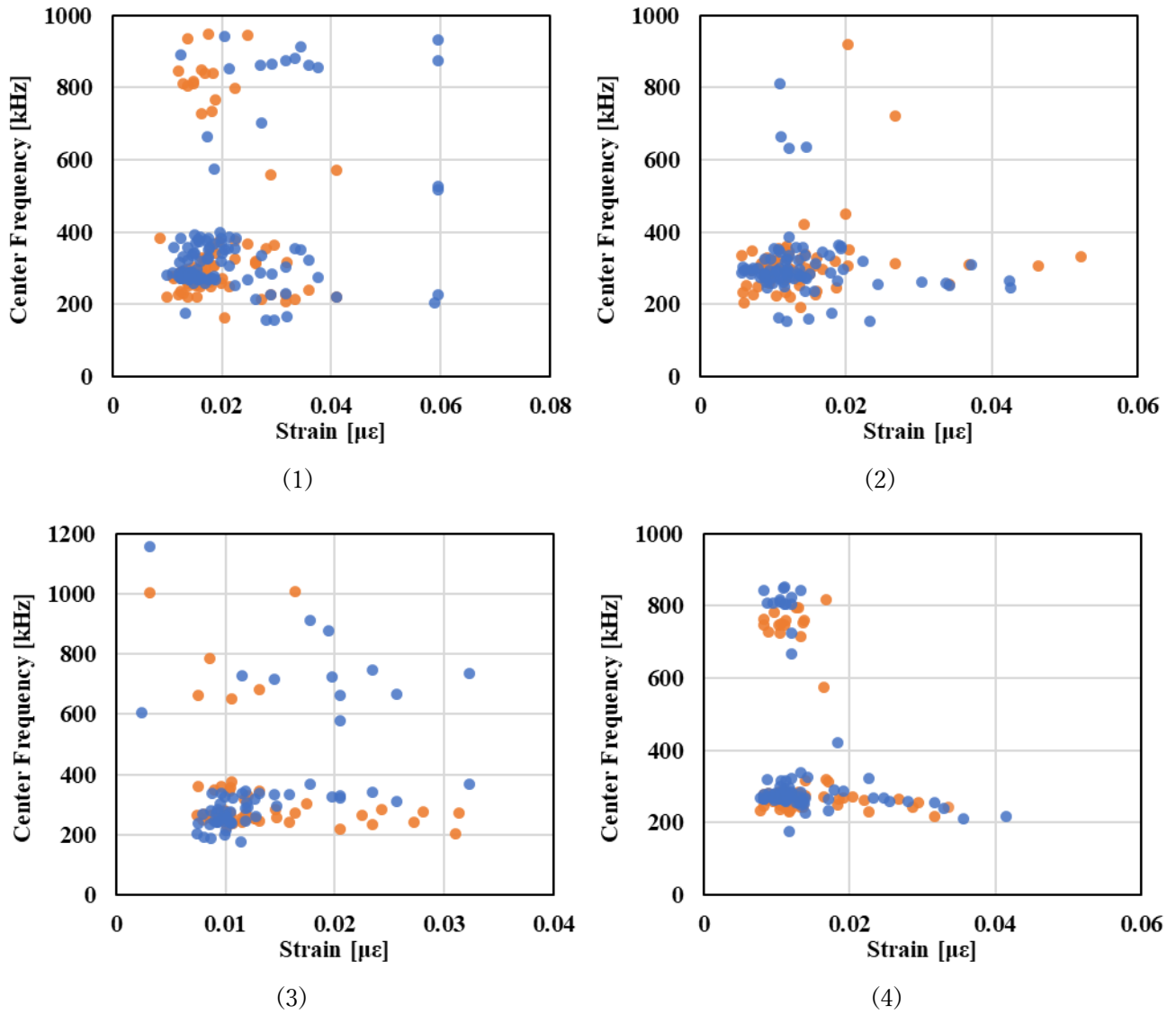
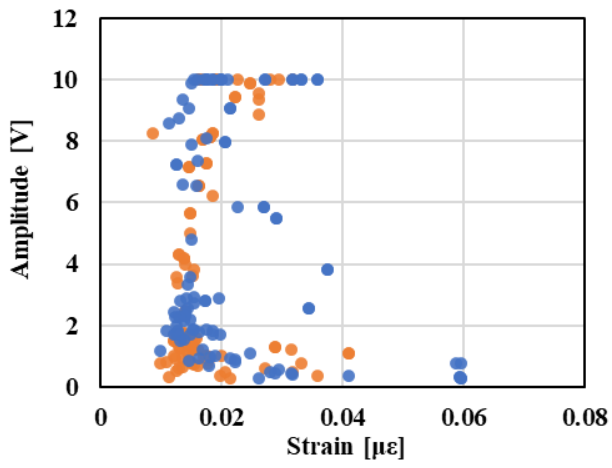
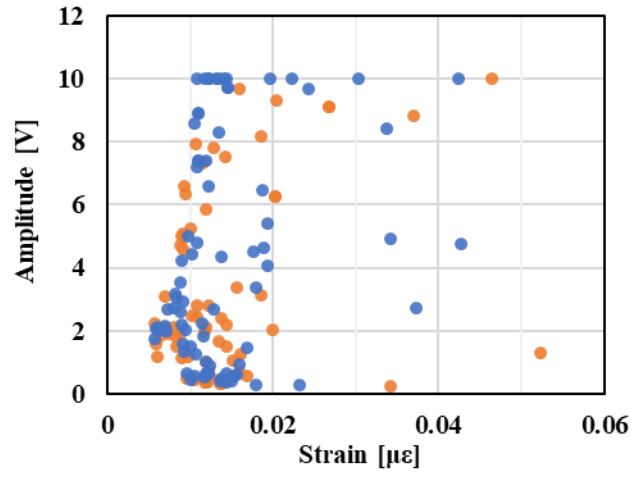


Fig. A.5.a Relationship between frequency and strain of XN-60-A2S (Narrow parallel region)

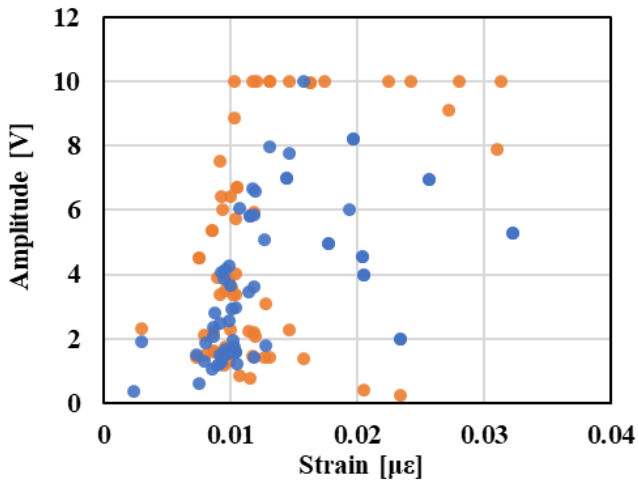




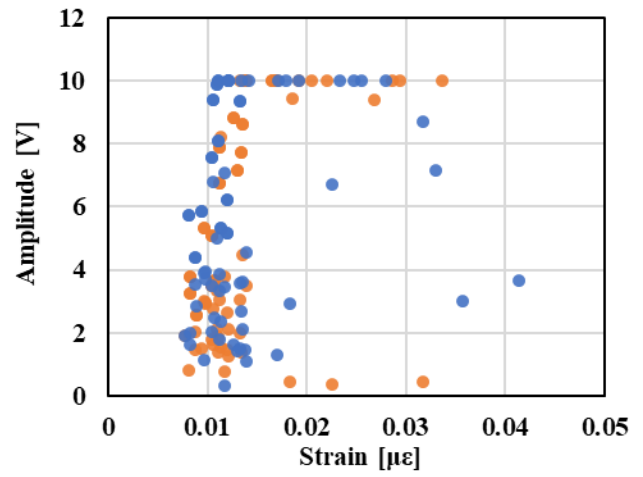
(1)



(2)



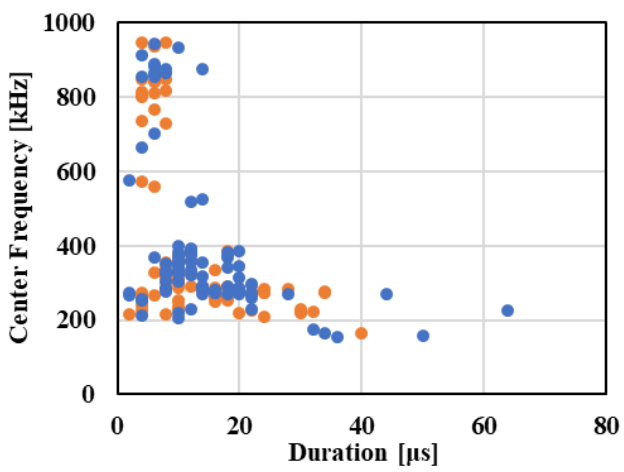
(3)



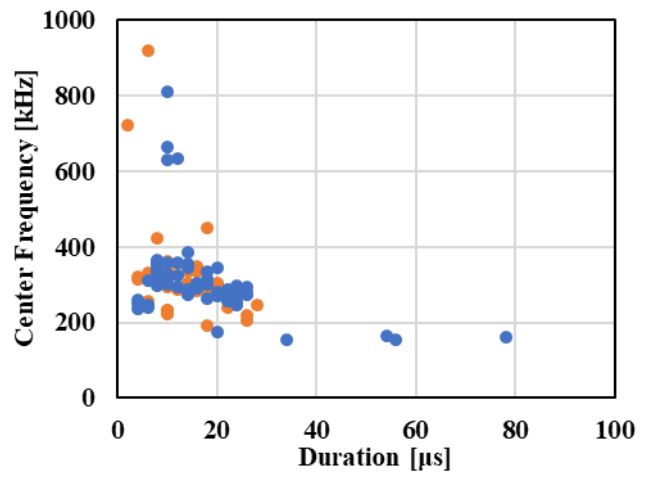
(4)

Fig. A.5.b Relationship between AE amplitude and strain of XN-60-A2S (Narrow parallel region)

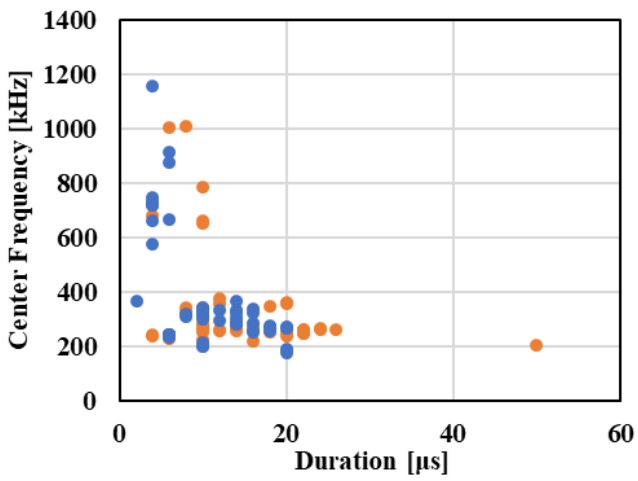




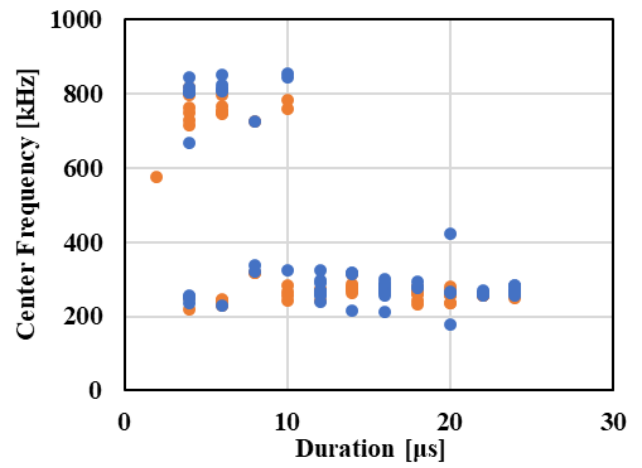
(1)



(2)



(3)



(4)

Fig. A.5.c Relationship between frequency and duration time of XN-60-A2S (Narrow parallel region)



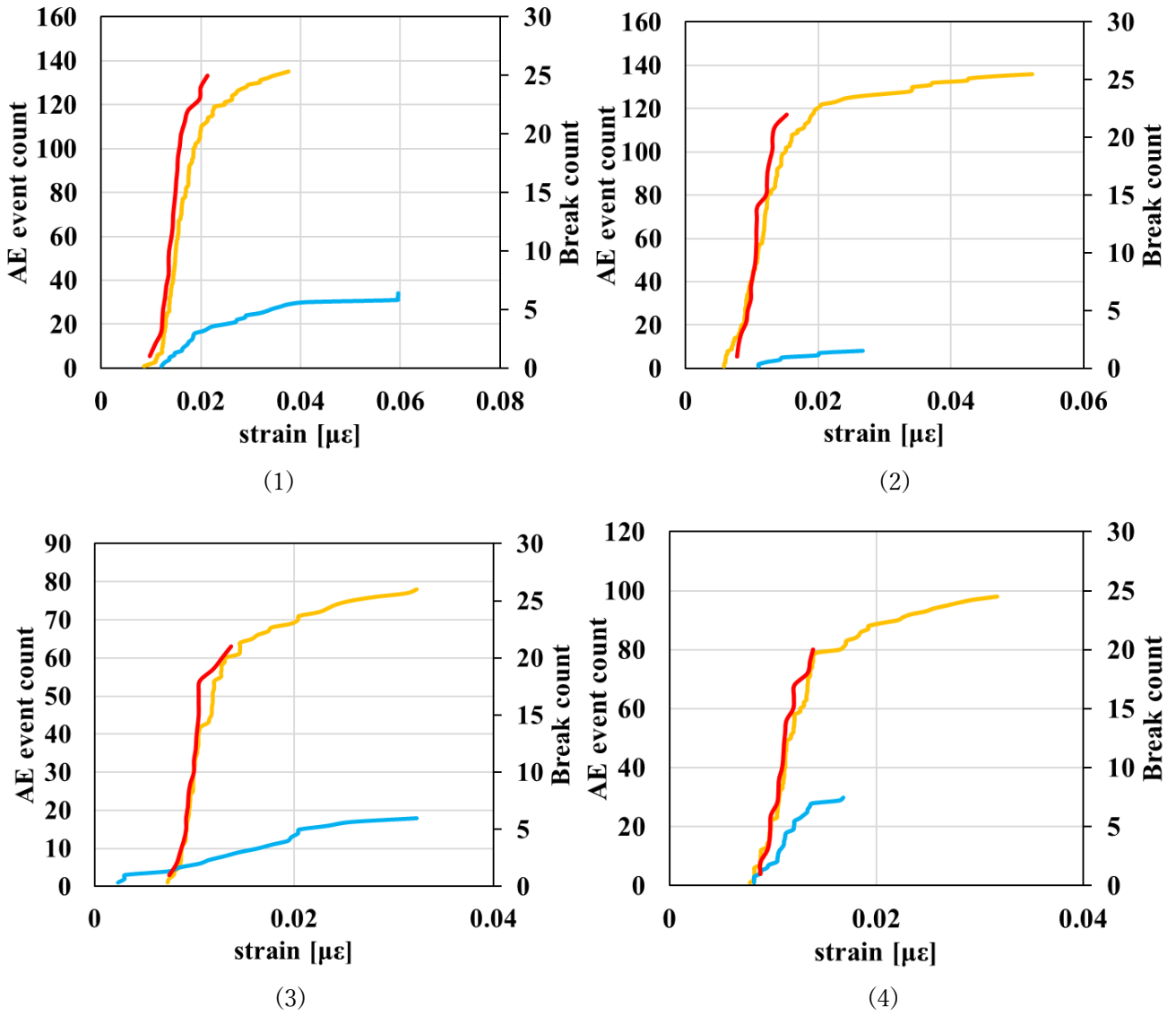


Fig. A.5.d Relationship between strain and AE counts measured by the AE sensor and visual inspection (Narrow parallel region)

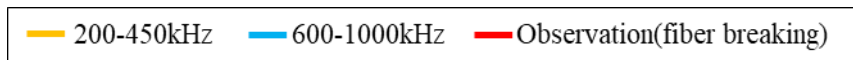


Fig. B 試験片平行部 5 mm · 10 mm

Fig. B.1 T700SC (5 mm)

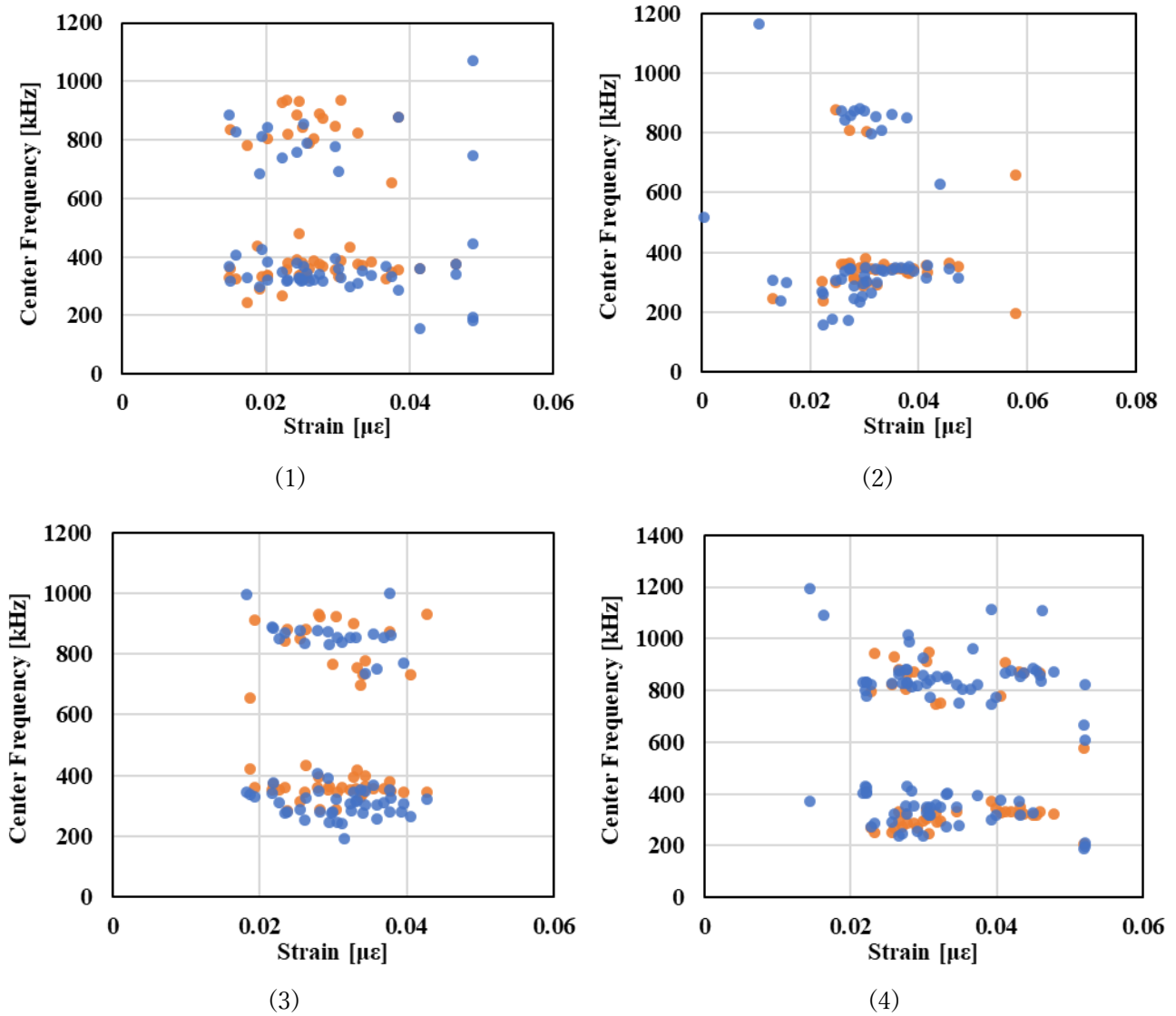
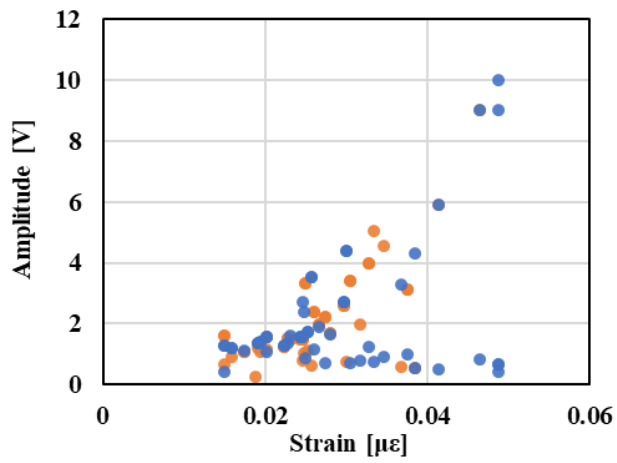
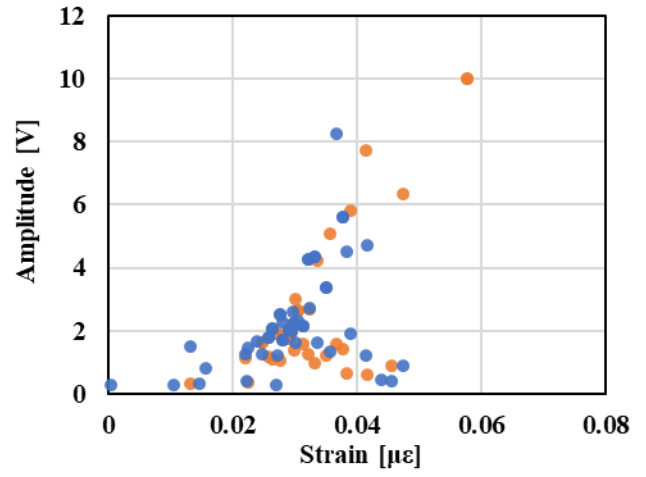


Fig. B.1.a Relationship between frequency and strain of T700SC (Narrow parallel region)

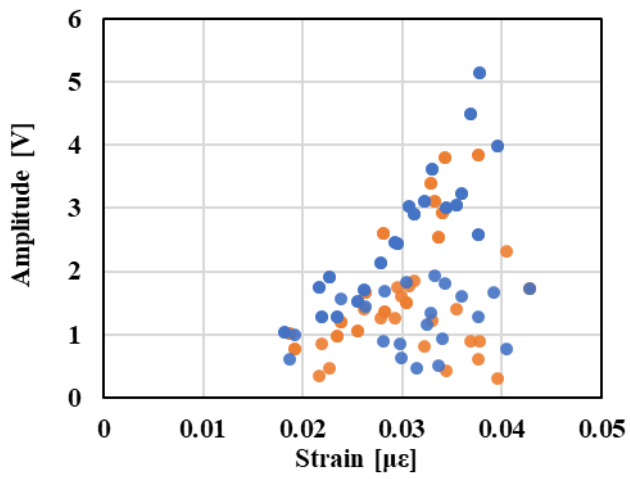




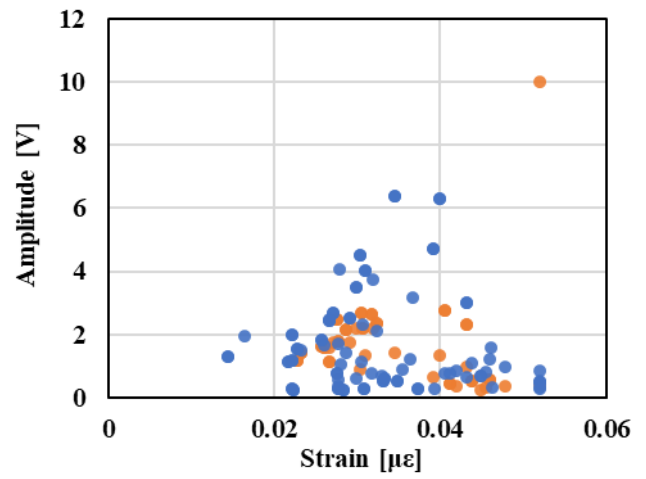
(1)



(2)



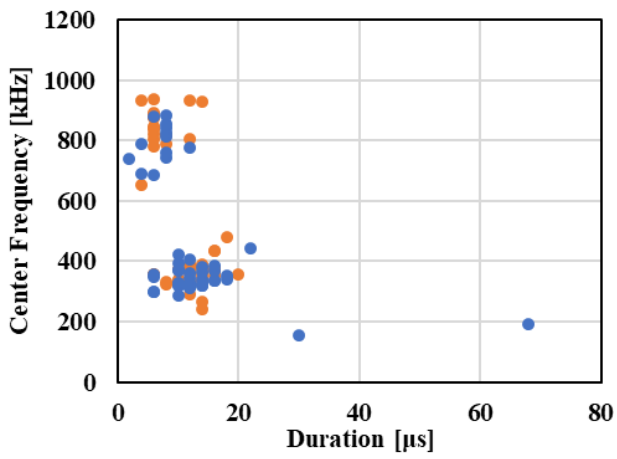
(3)



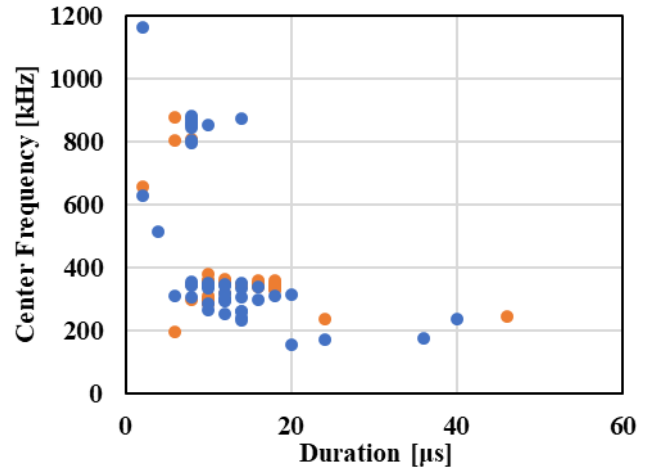
(4)

Fig. B.1.b Relationship between AE amplitude and strain of T700SC (Narrow parallel region)

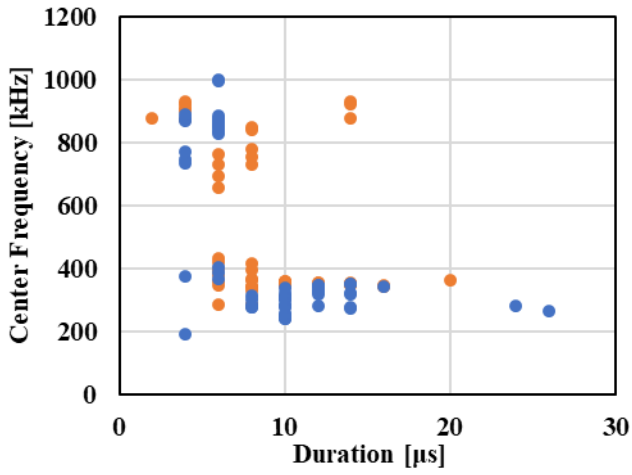




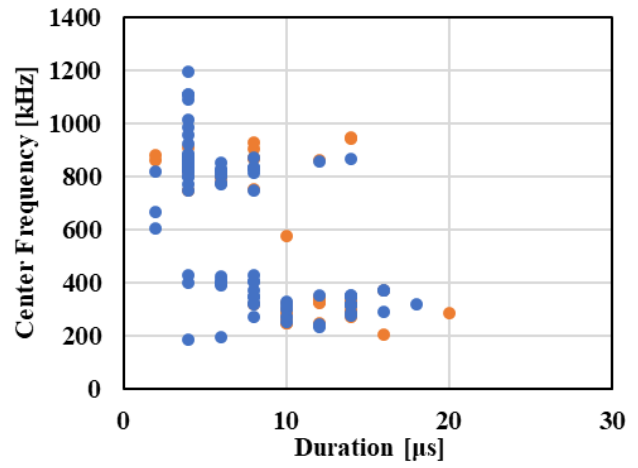
(1)



(2)



(3)



(4)

Fig. B.1.c Relationship between frequency and duration time of T700SC (Narrow parallel region)



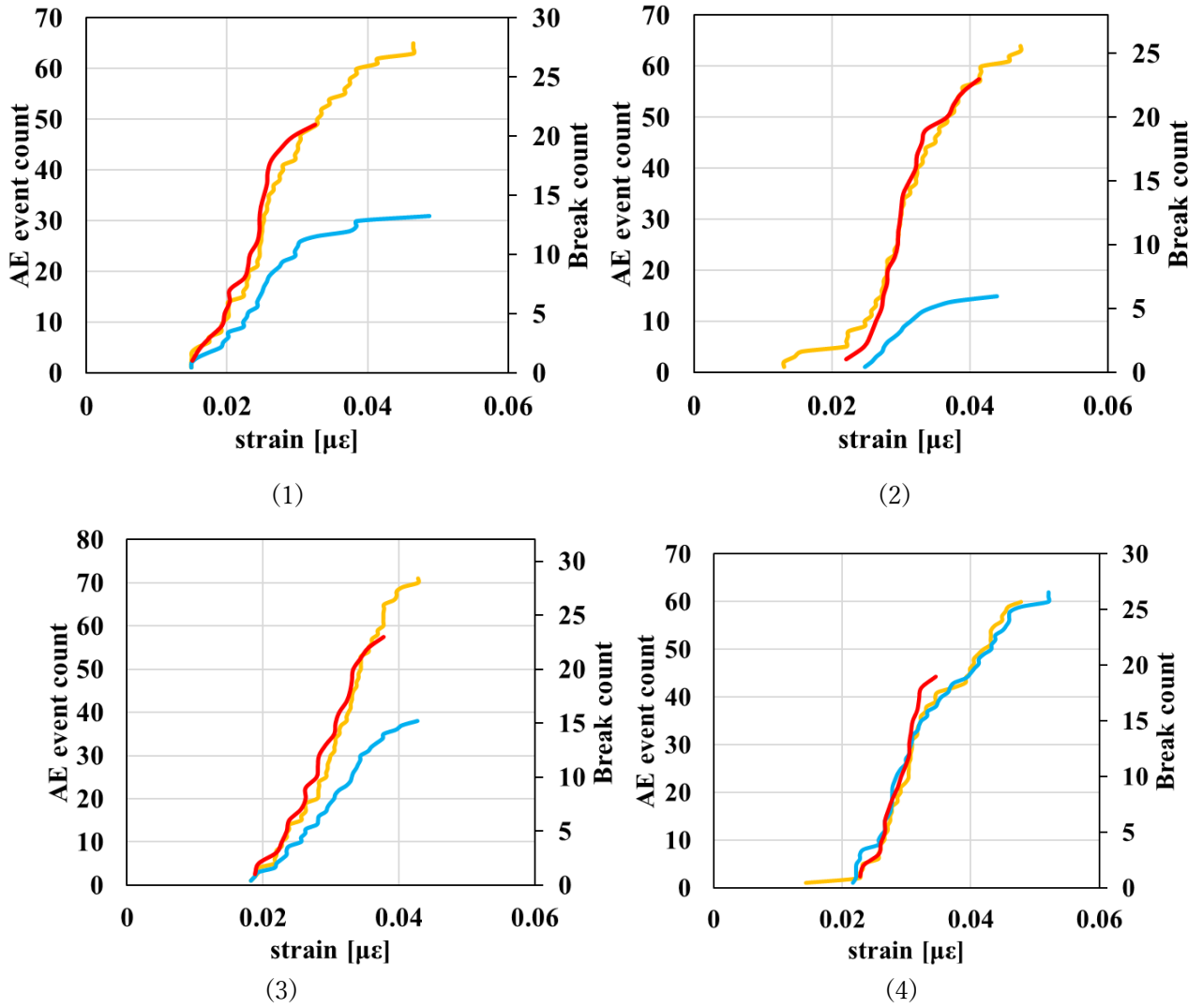


Fig. B.1.d Relationship between strain and AE counts measured by the AE sensor and visual inspection (Narrow parallel region)

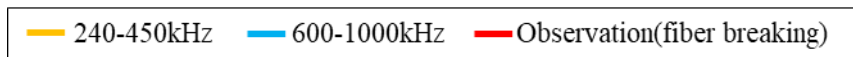


Fig. B.2 T700SC (10 mm)

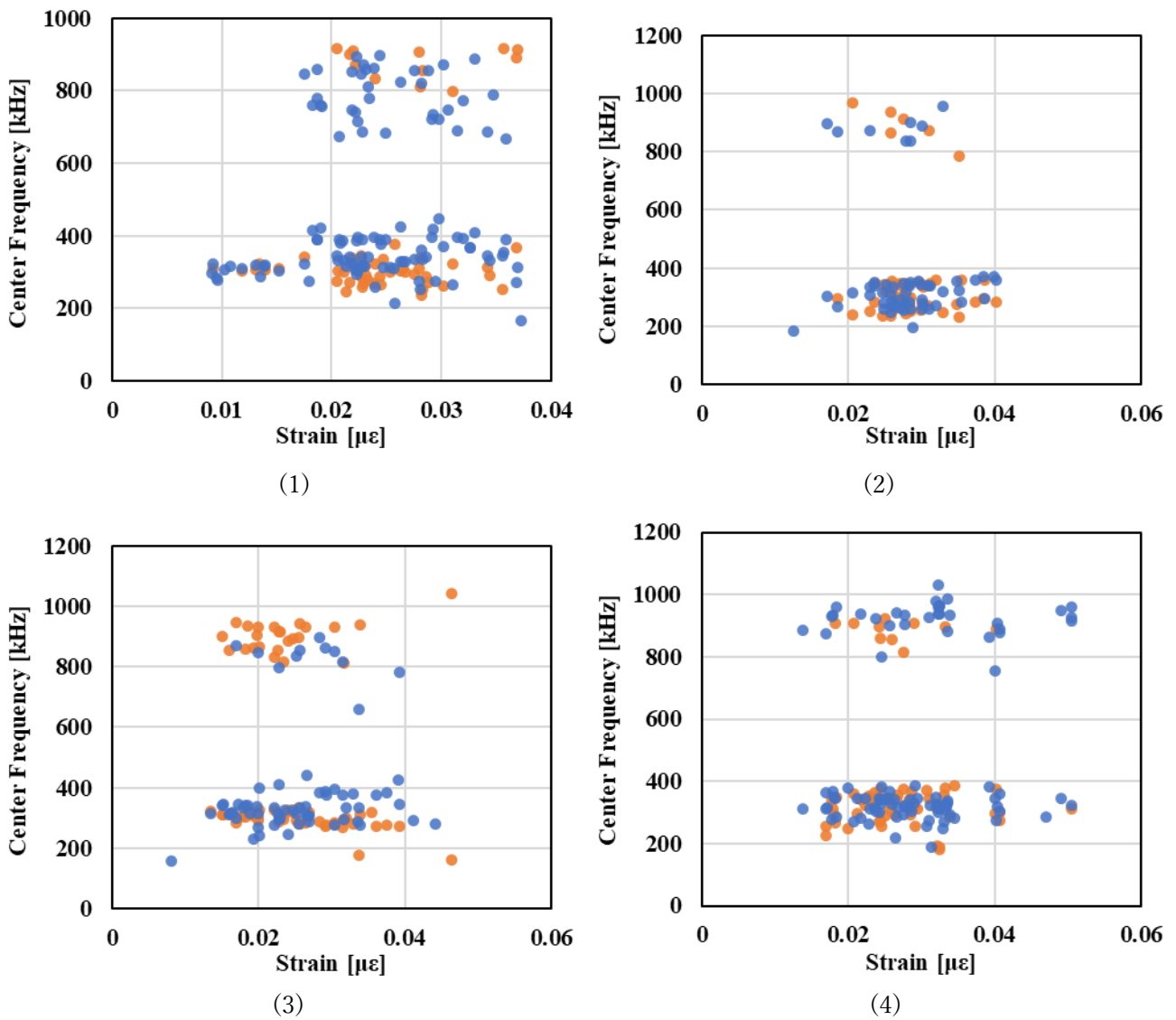
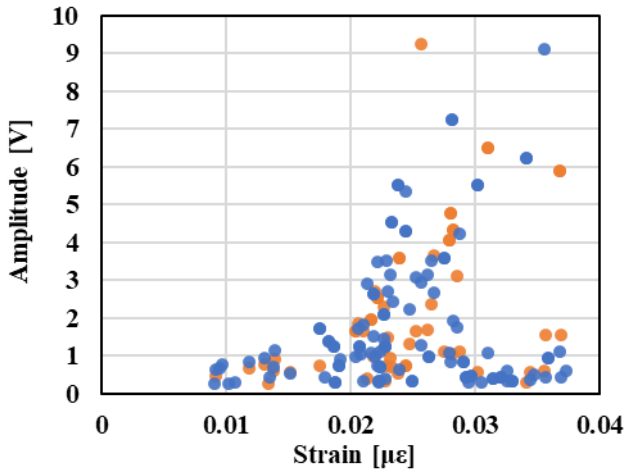
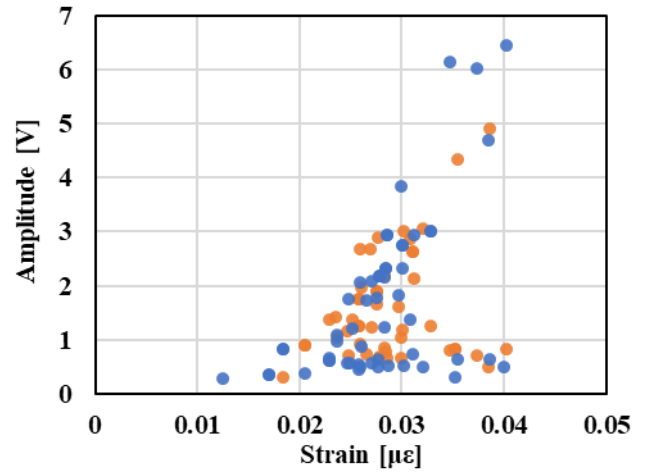


Fig. B.2.a Relationship between frequency and strain of T700SC (Narrow parallel region)

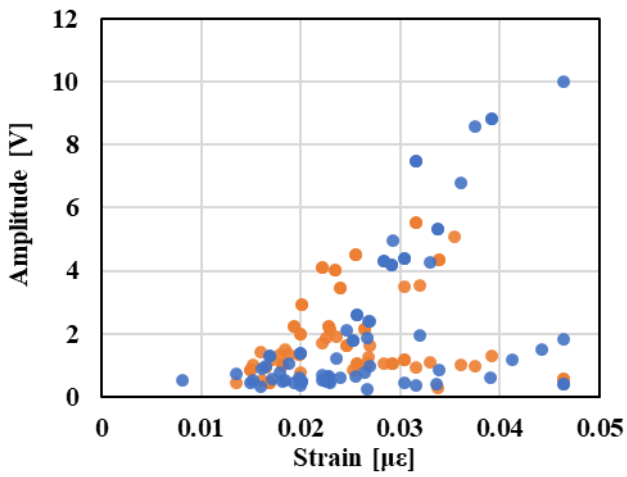




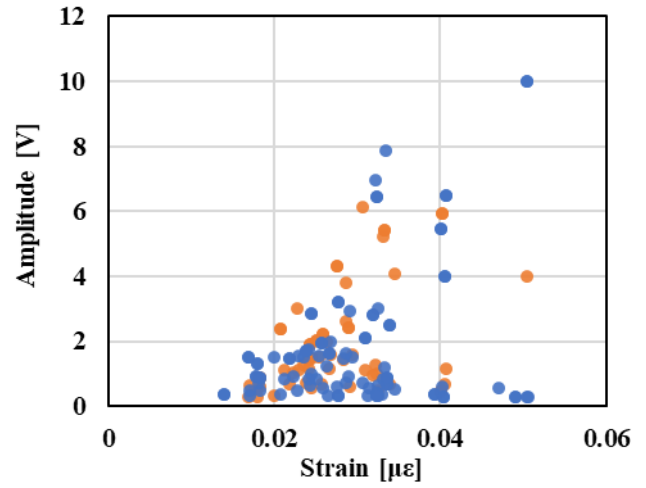
(1)



(2)



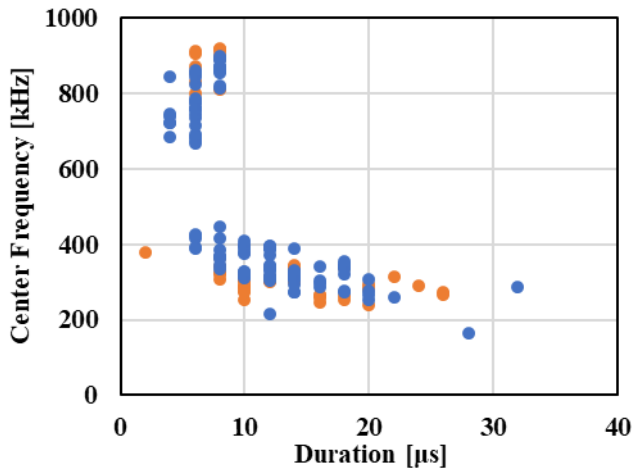
(3)



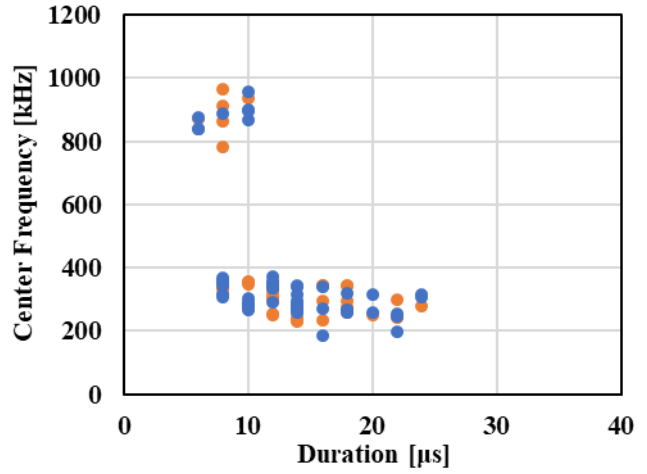
(4)

Fig. B.2.b Relationship between AE amplitude and strain of T700SC (Narrow parallel region)

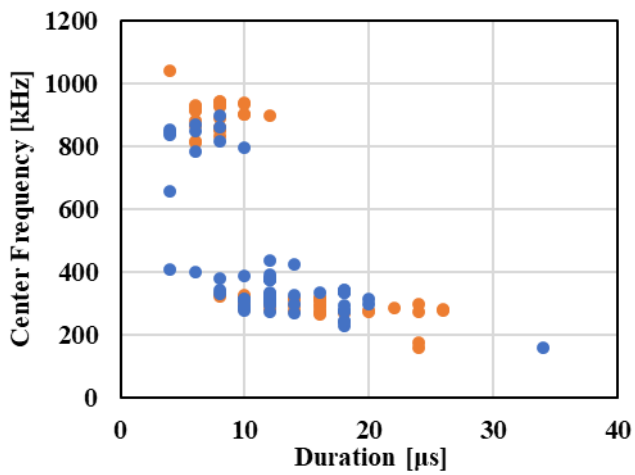




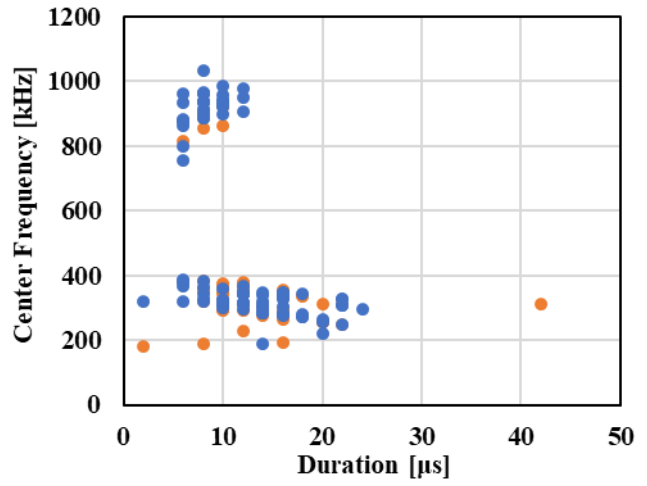
(1)



(2)



(3)



(4)

Fig. B.2.c Relationship between frequency and duration time of T700SC (Narrow parallel region)



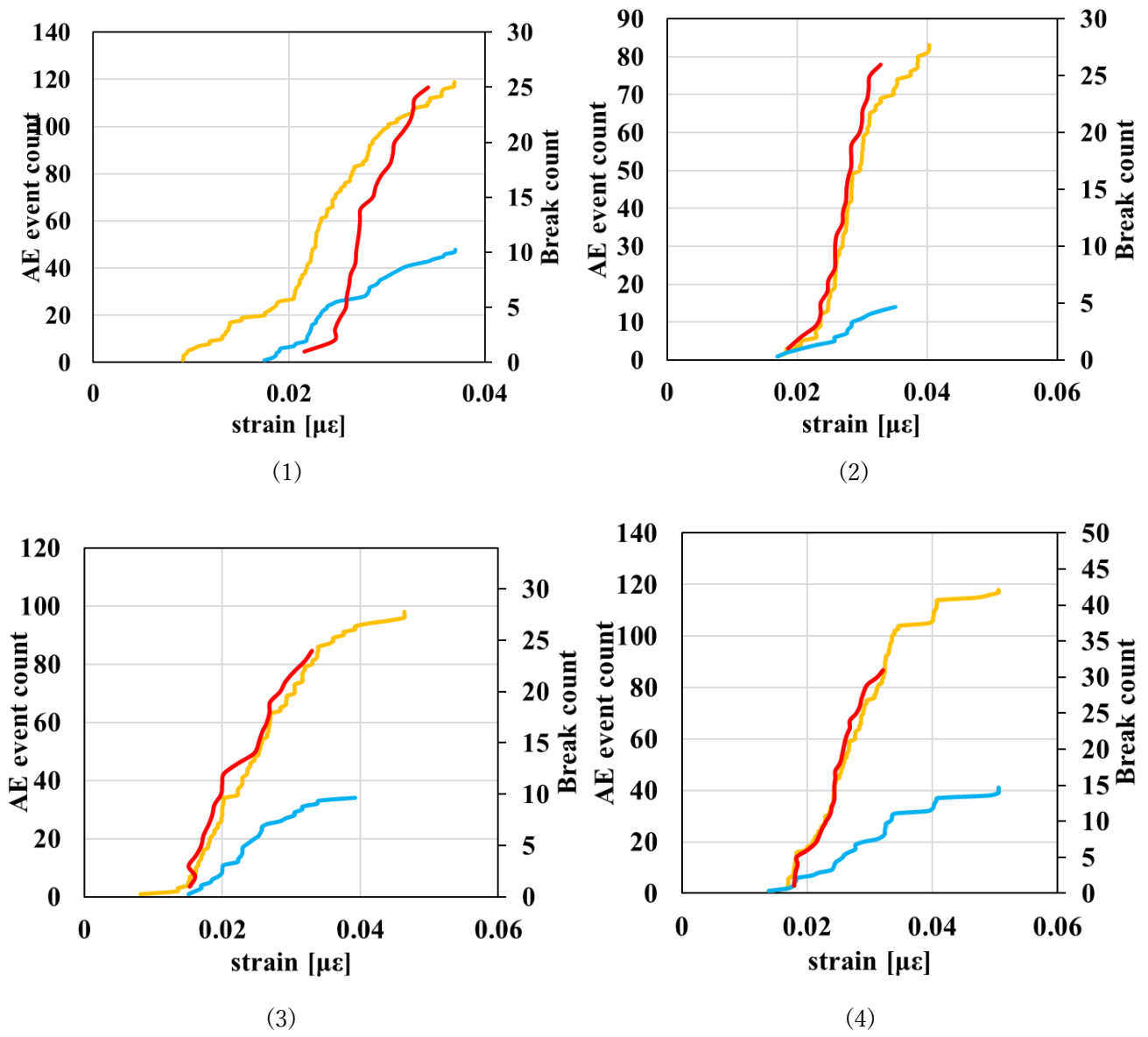


Fig. B.2.d Relationship between strain and AE counts measured by the AE sensor and visual inspection (Narrow parallel region)

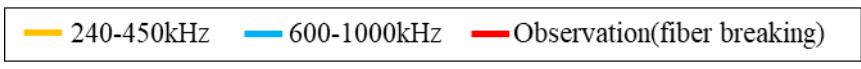


Fig. B.3 YSH-50A-20S (5 mm)

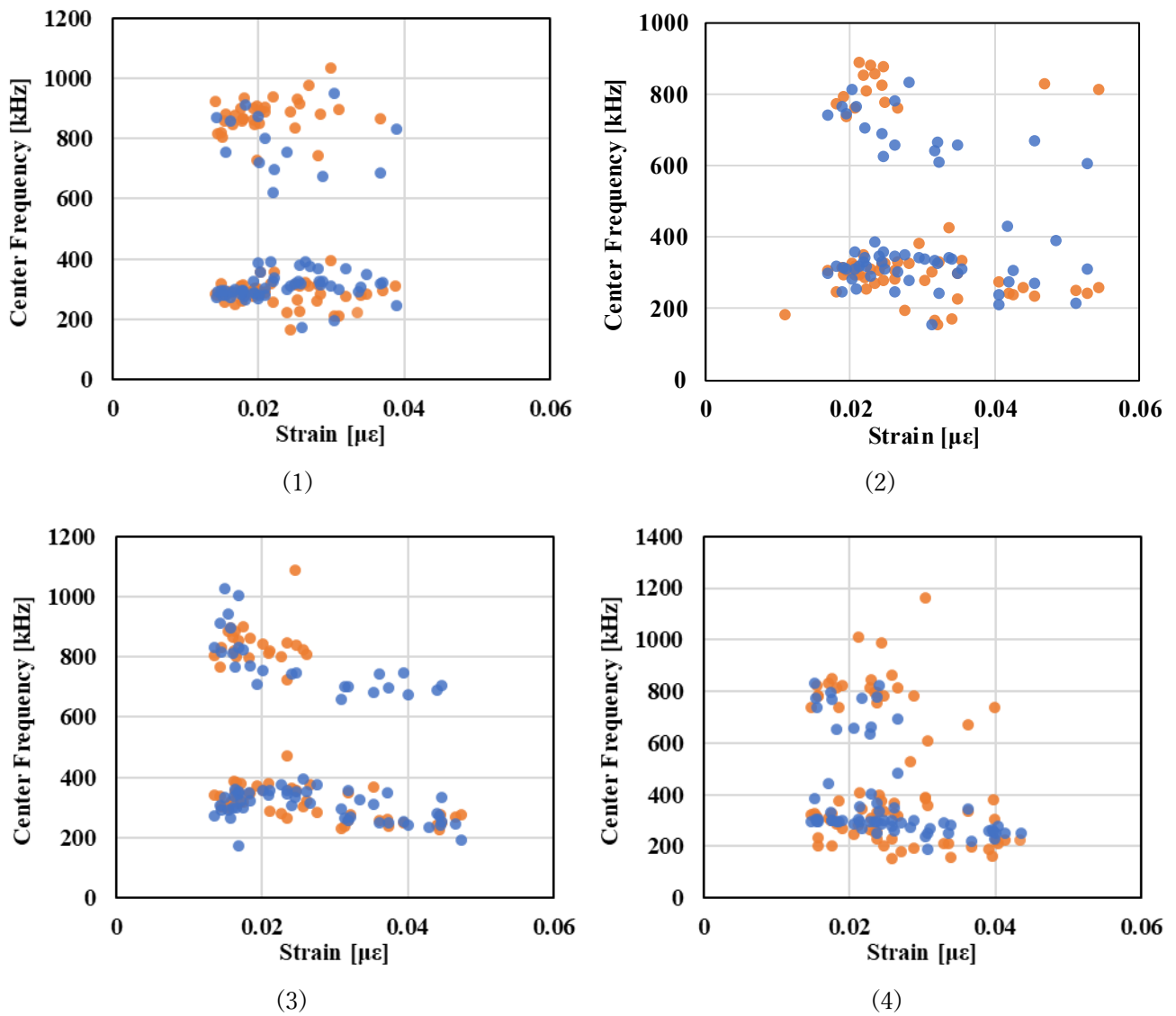
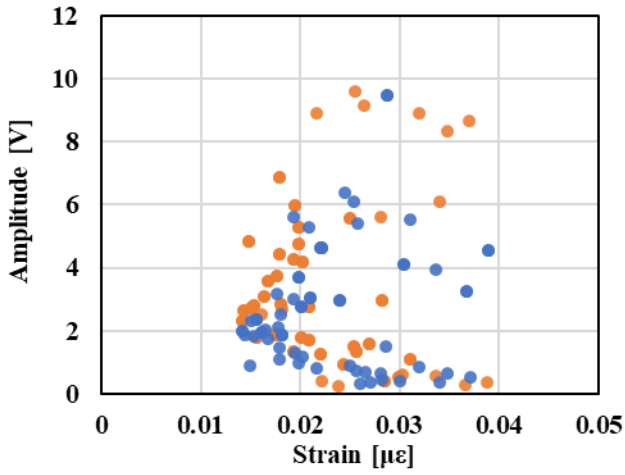
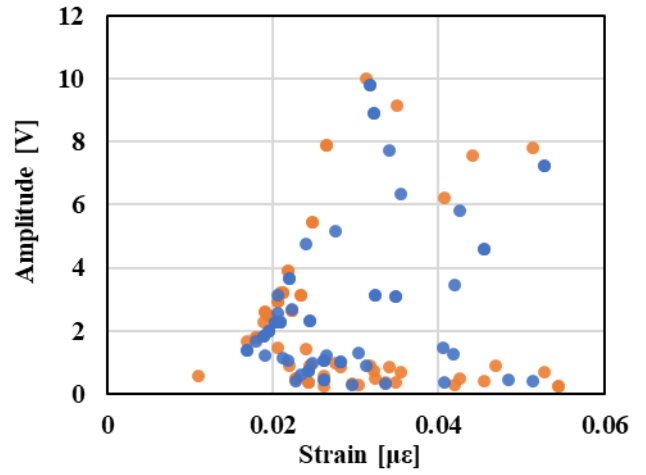


Fig. B.3.a Relationship between frequency and strain of YSH-50A-20S (Narrow parallel region)

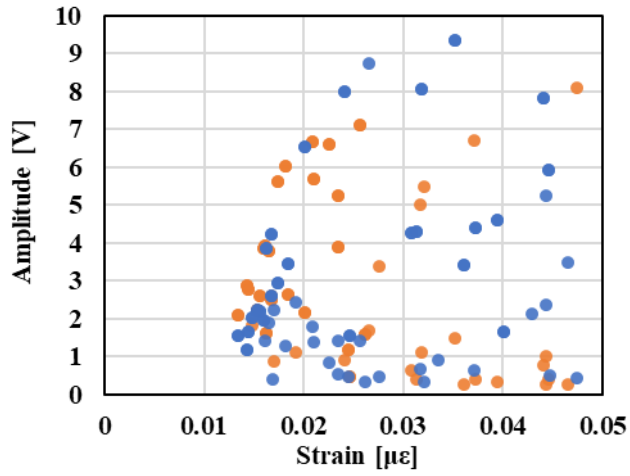




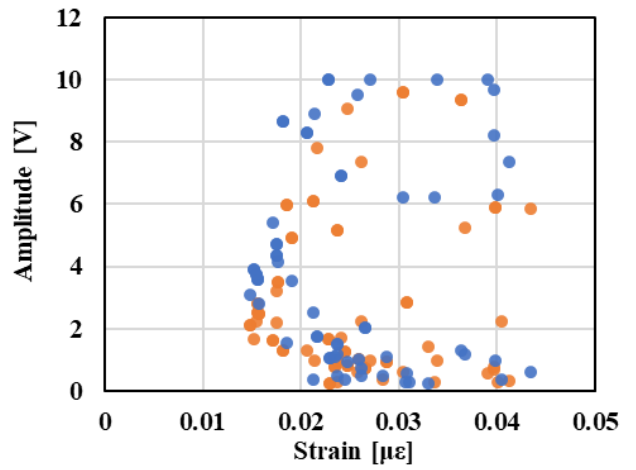
(1)



(2)



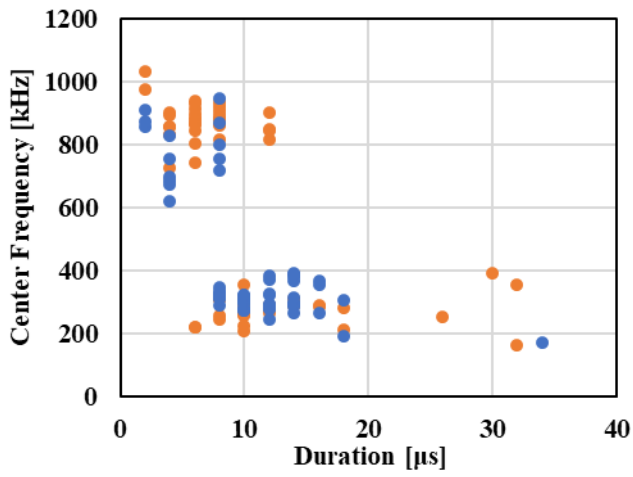
(3)



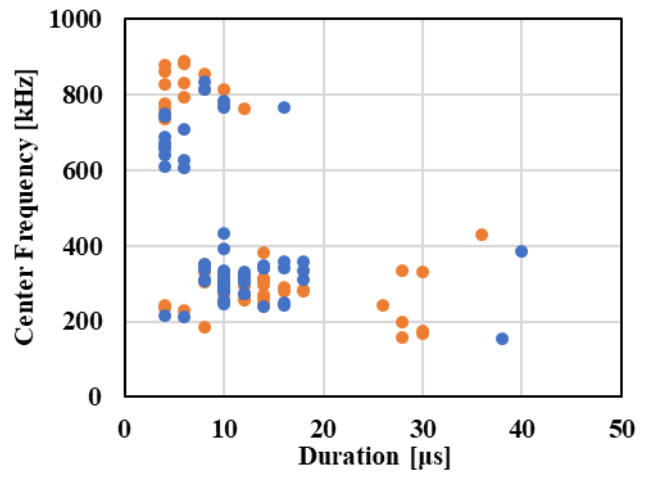
(4)

Fig. B.3.b Relationship between AE amplitude and strain of YSH-50A-20S (Narrow parallel region)

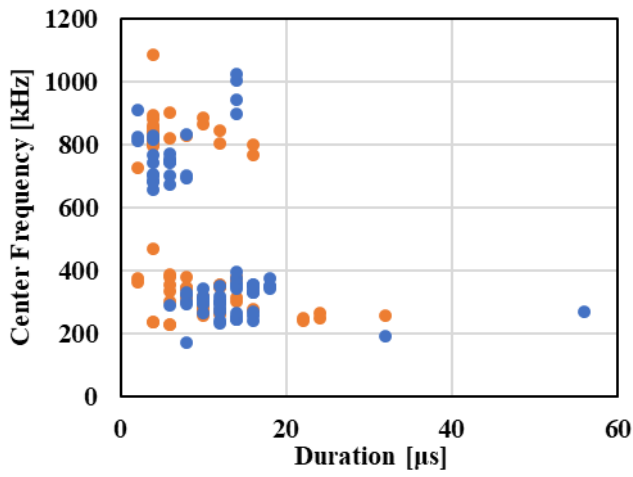




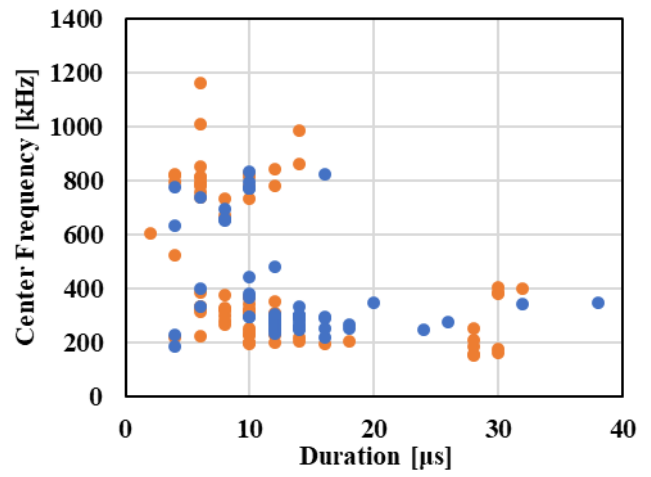
(1)



(2)



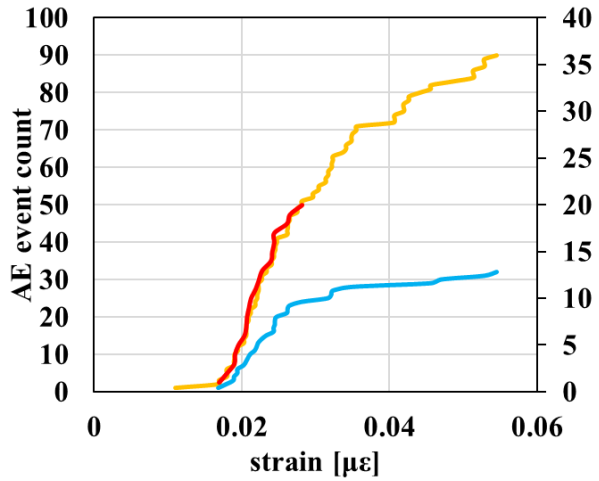
(3)



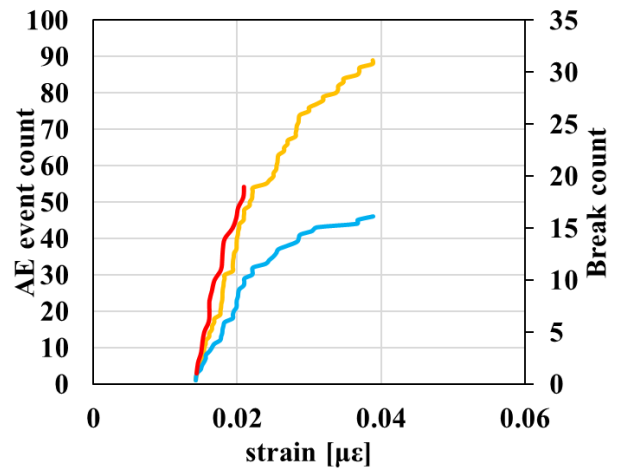
(4)

Fig. B.3.c Relationship between frequency and duration time of YSH-50A-20S (Narrow parallel region)

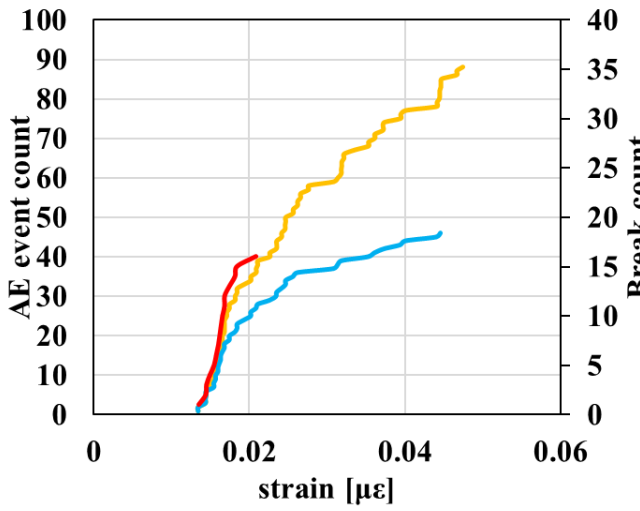




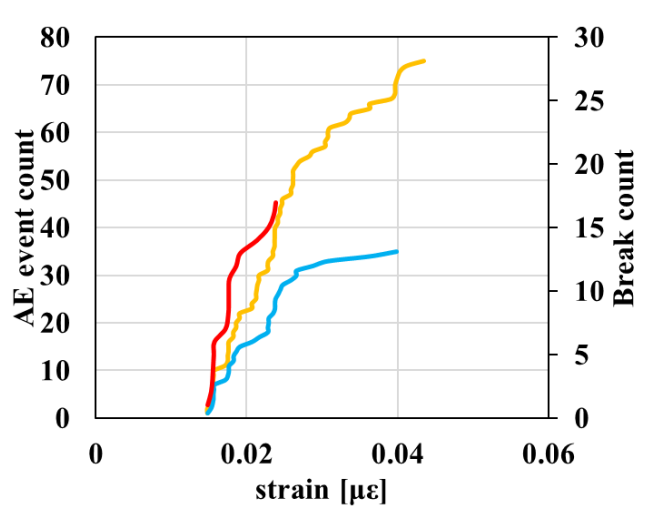
(1)



(2)



(3)



(4)

Fig. B.3.d Relationship between strain and AE counts measured by the AE sensor and visual inspection
(Narrow parallel region)

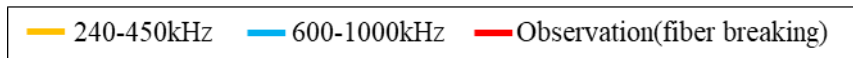


Fig. B.5 YSH-50A-20S (10 mm)

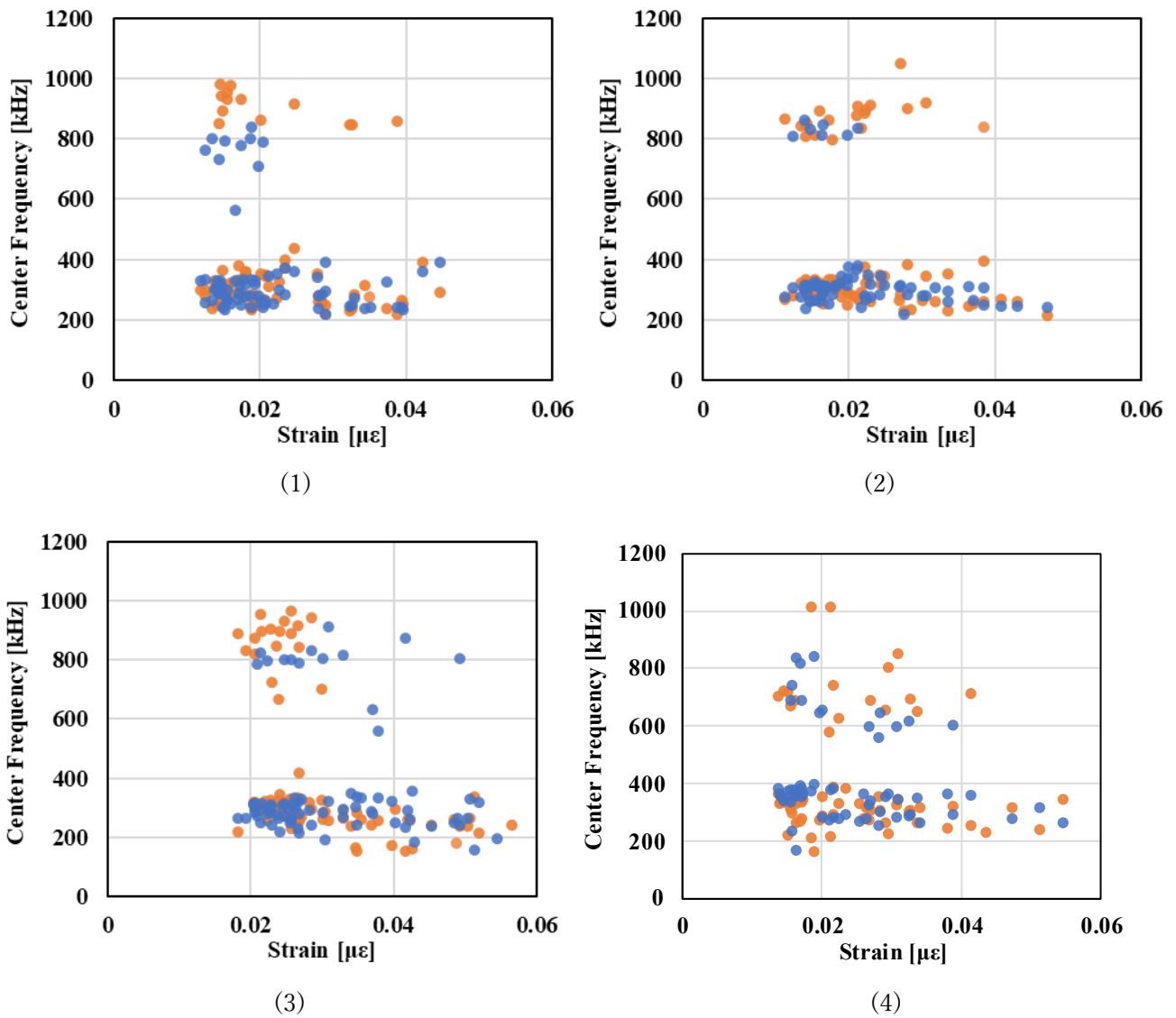
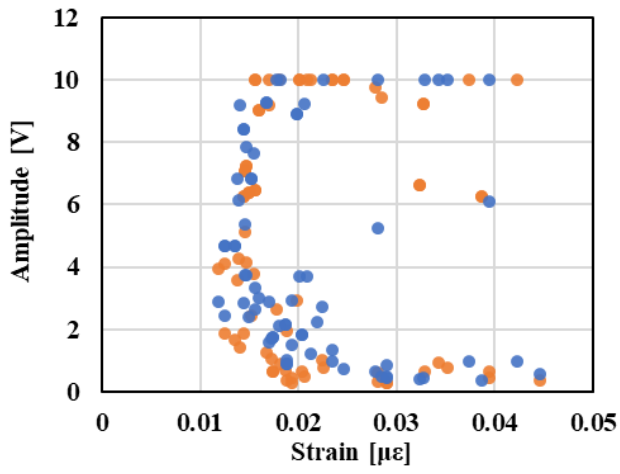
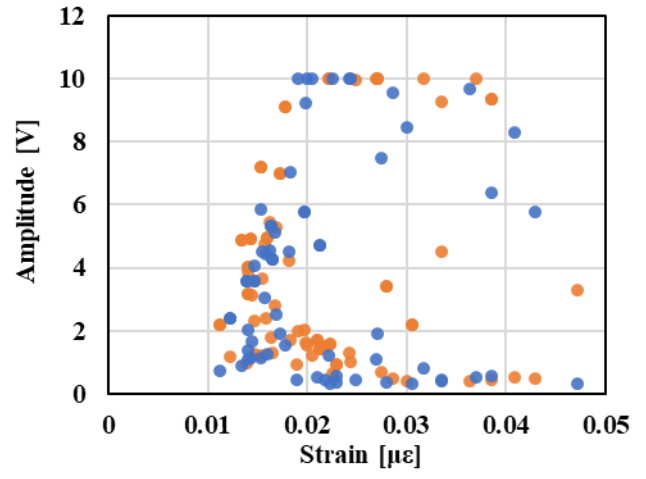


Fig. B.5.a Relationship between frequency and strain of YSH-50A-20S (Narrow parallel region)

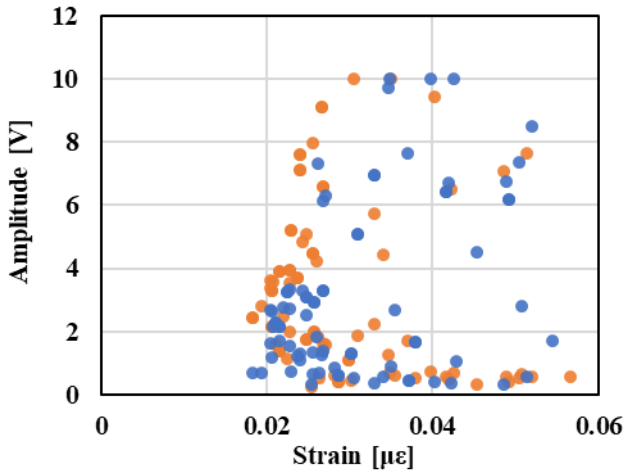




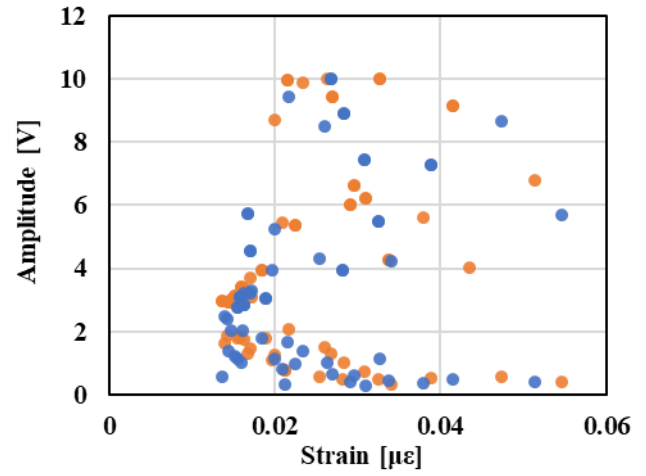
(1)



(2)



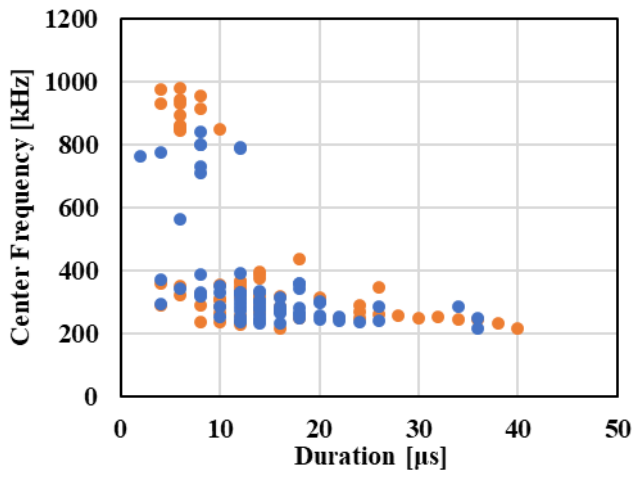
(3)



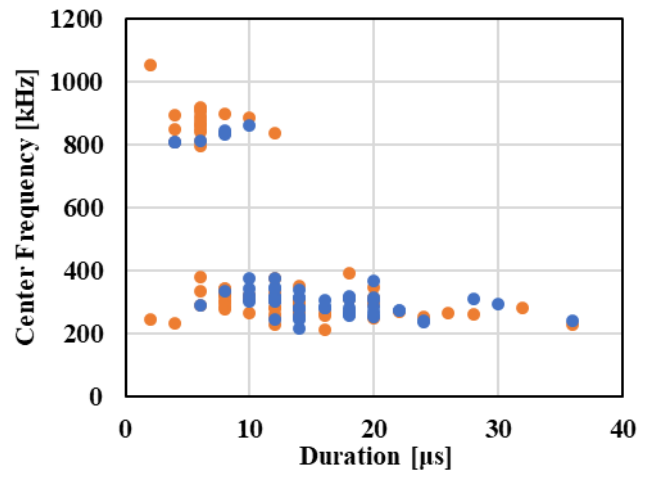
(4)

Fig. B.5.b Relationship between AE amplitude and strain of YSH-50A-20S (Narrow parallel region)

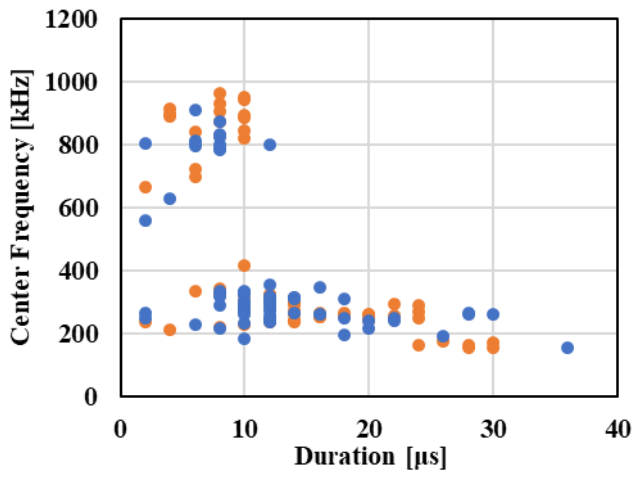




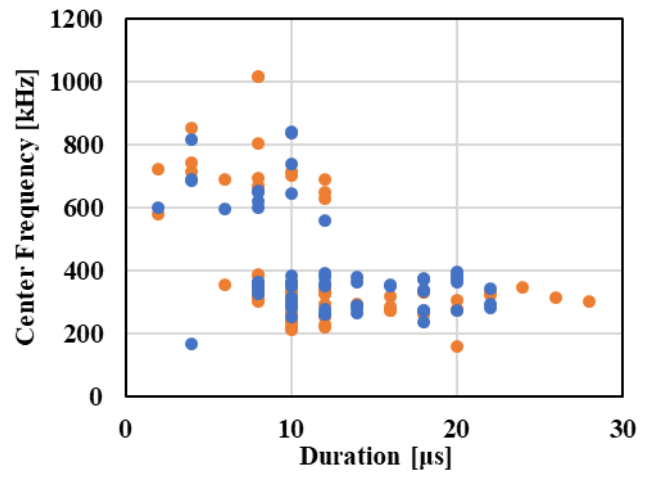
(1)



(2)



(3)



(4)

Fig. B.5.c Relationship between frequency and duration time of YSH-50A-20S (Narrow parallel region)



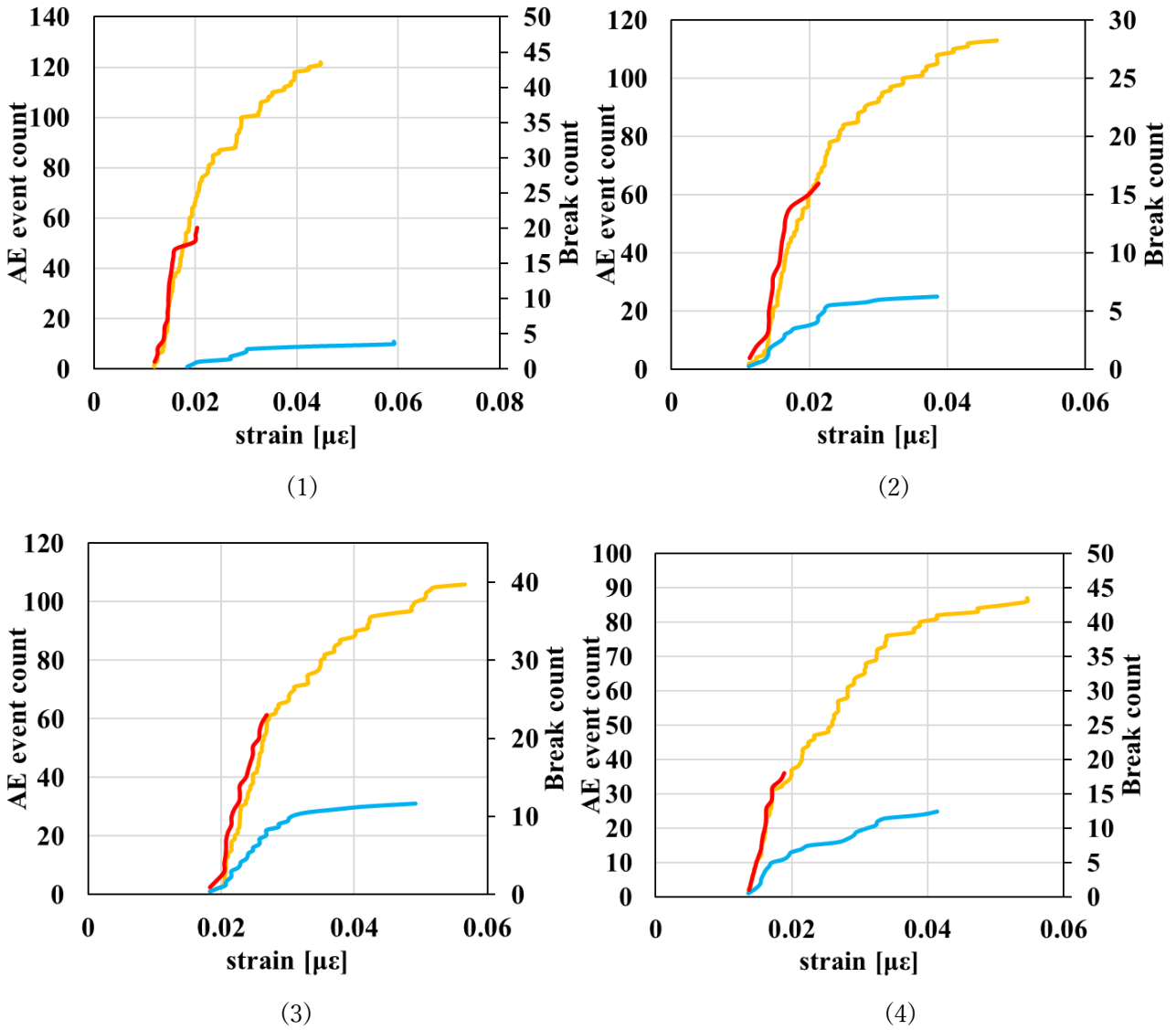


Fig. B.5.d Relationship between strain and AE counts measured by the AE sensor and visual inspection (Narrow parallel region)

