

博士論文

光ファイバセンサを用いた遠隔AE計測法に基づく
複合材料中の損傷評価

于 豊銘

論文目録

| | |
|---|-----------|
| 第 1 章：序言 | 1 |
| 1.1 複合材料に対する需要 | 1 |
| 1.1.1 炭素繊維強化プラスチック | 1 |
| 1.1.2 セラミックス基複合材料 | 3 |
| 1.2 複合材料の損傷挙動の評価とアコースティックエミッション法 | 6 |
| 1.3 光ファイバ FBG センサを用いた AE 計測 | 8 |
| 1.3.1 FBG センサの計測原理 | 8 |
| 1.3.2 PSFBG センサと PSFBG バランスドセンシングシステム | 9 |
| 1.3.3 PSFBG センサの機能的特性 | 11 |
| 1.4 本研究の課題と論文構成について | 13 |
| 1.4.1 課題①：PSFBG センサを高温環境に適用可能な設置方法を検討する | 13 |
| 1.4.2 課題②：遠隔的 AE 計測法を用いてより高次の機能を実現する | 14 |
| 第 2 章：再生 FBG センサによる超音波計測 | 16 |
| 2.1 再生 FBG センサ | 16 |
| 2.2 PSFBG を用いて形成した RFBG | 18 |
| 2.3 RFBG センサによる超音波計測 | 20 |
| 2.4 考察 | 23 |
| 第 3 章：遠隔 AE 計測法 | 26 |
| 3.1 光ファイバによる AE 波ウェーブガイドにおける超音波の伝播挙動 | 28 |
| 3.1.1 実験結果 | 28 |
| 3.1.2 シミュレーション | 31 |
| 3.2 ADRM による周波数応答への影響 | 36 |
| 3.3 ADRM における接着点の変化による超音波計測への影響 | 38 |
| 3.4 ADRM による実際の AE 計測 | 43 |
| 3.5 結論 | 45 |

| | |
|--|-----------|
| 第4章：遠隔AE計測法による高温環境下でのAE計測 | 47 |
| 4.1 高温環境下での光ファイバ・ウェーブガイド | 48 |
| 4.1.1 高温環境での遠隔AE計測法の適用可能性 | 48 |
| 4.1.2 高温環境での遠隔AE計測法の耐久性 | 53 |
| 4.2 高温環境下での模擬AE信号の計測 | 55 |
| 4.2.1 高温用接着剤 | 55 |
| 4.2.2 AE計測の実験 | 56 |
| 4.3 まとめ | 59 |
| 第5章：遠隔AE計測法による [90₂/0₂]_s CFRP クロスプライ積層板中の損傷形態の同定 | 60 |
| 5.1 序言 | 60 |
| 5.1.1 AE計測を用いた損傷形態の同定法 | 60 |
| 5.1.2 光ファイバPSFBGセンサに適する同定手法 | 63 |
| 5.2 実験方法 | 66 |
| 5.2.1 AE計測システム | 66 |
| 5.2.2 供試体 | 66 |
| 5.3 異なる損傷形態によるAE信号の特徴 | 67 |
| 5.3.1 各損傷によるAE信号のラム波モードの特徴 | 68 |
| 5.3.2 各損傷によるAE信号の周波数の特徴 | 73 |
| 5.4 AE信号のE/F比とピーク周波数を用いた損傷形態の同定 | 74 |
| 5.4.1 階層クラスタリング法によるAE信号の分類 | 77 |
| 5.5 FEM解析による同定結果の検証 | 79 |
| 5.6 まとめ | 83 |
| 第6章：単独センサによる複合材料試験中のAE発信源の一次元位置標定 | 84 |
| 6.1 単独センサによるAE発信源の距離推定法 | 84 |
| 6.2 模擬AE信号による検証 | 87 |
| 6.3 まとめ | 92 |
| 第7章：結論と今後の展開 | 93 |
| 7.1 結論 | 93 |

| | |
|--|------------|
| 7.2 今後の展開 | 95 |
| 7.2.1 今後の課題①：遠隔 AE 計測法の超高温環境への適用 | 95 |
| 7.2.2 今後の課題③：E/F 比とピーク周波数以外の物理的特徴量に関する検討 | 96 |
| 7.2.3 今後の課題④：AE 計測波形に基づく CMC 中の損傷形態同定手法の確立 | 96 |
| 7.2.4 予想されるインパクト及び将来の見通し | 97 |
| 参考文献 | 98 |
| 謝辞 | 104 |

第 1 章：序言

1.1 複合材料に対する需要

進行する地球温暖化は、地球の気候や生態系に大きく影響を与えると予測されている。こうした自然環境の変化は人間社会にも大きな影響を及ぼすと考えられる。その地球温暖化対策として、二酸化炭素をはじめとする温室効果ガスを削減することは各科学技術分野においての重要な課題となっている。

現在、民間航空輸送により生じる二酸化炭素は、その年間総合排出量の 3%程度を占めており [1]、2050 年まではその割合が三倍ほど増大すると予測されている [2]。そのため、今後、航空機のエネルギーの転換・利用率の更なる向上は、国を超えて求められる課題となっている。そこで、軽量かつ高性能な複合材を航空機構造に適用することが期待されている。

1.1.1 炭素繊維強化プラスチック

現在、炭素繊維強化プラスチック（Carbon fiber reinforced plastic: CFRP）は、航空機の構造、特に、胴体や翼などの一次構造に用いられてきている。

CFRP は、軽くて強い炭素繊維が、樹脂などの母材に埋め込まれた複合材料である。航空機構造に使う CFRP 製部品は、連続炭素繊維を、その繊維との接着力が高く、かつ弾性率が高いエポキシ樹脂に予め一方向に配列した中間基材であるプリプレグを積層してから成形加工することにより作られることが多い。その一方向材の材料特性は、繊維の材料特性、母材の材料特性と、複合材料に占める繊維の割合、すなわち繊維の体積含有率といった 3 つの要素によって複合則で表わされるが、エポキシ樹脂より炭素繊維の方が、比特性（比剛性、比強度など）が遥かに優れるため、CFRP 複合材料の特性は、主に繊維とその体積含有率により決められる。そして、高強度の炭素繊維は、引張強度が 3000 MPa に達するため、それにより強化された一方向材料の引張強度は、アルミや鉄より、3 倍～6 倍高いと言われる。さらに、その一方向 CFRP 材料は、繊維（0°）方向と、繊維と直角（90°）方向に沿って力学特性が異なり、つまり異方性を有する。金属のような等方性材料と違い、その異方性を利用することによって、設計段階では構造の荷重分布や用途に合わせ、その CFRP 積層板の材料特性を適切に設計することも可能である。さらに、アルミなどの軽量

な金属と比較し、CFRP は耐疲労性に優れる。

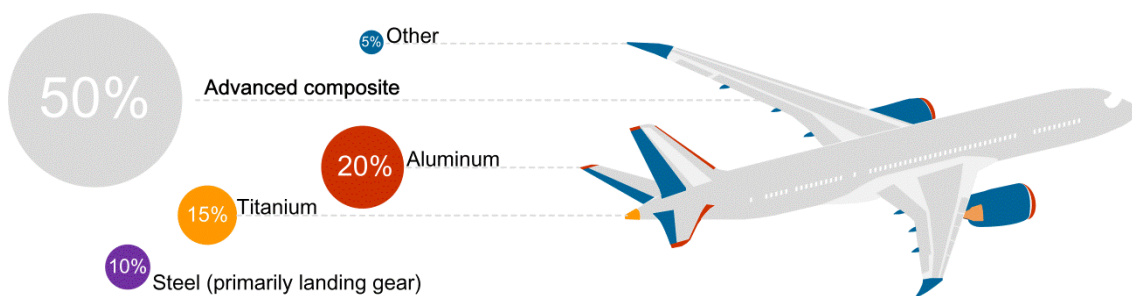


Figure 1-1: Usage rate of advanced composite in the B787.[3]

CFRP 複合材は性能に優れるため、航空機の軽量化を目的とした構造材料として使われてきている。特に、1973年のオイルショックをきっかけとして、航空機の燃費向上を念頭に入れていたアメリカの宇宙機関 NASA は、大手航空機メーカーボーイングなどと共同で CFRP 製部品が航空機に適用可能であることを確認し、それ以来、CFRP の適用が航空機分野において広がりつつある。2011年に日本で運航開始したボーイング 787 の機体構造重量の 50%は、CFRP 複合材が占めるようになった(Figure. 1-1)[3]。これに続き、エアバス社も、CFRP を中心とする複合材料を機体構造重量の 52%に適用した A350XWB の運航を 2015 年に開始した[4]。

そして、CFRP を航空機構造に適用することが大きなメリットをもたらした。ボーイング 787 を例として、運営の面では、機体構造の 50%が CFRP で作られたことにより、燃費の 20%を削減できた。それに加え、1回の給油で航続距離が増加したことが大きな利点となった。環境の面においても、軽量化による二酸化炭素の排出量の低減が実現できている。さらに、CFRP を使用することで胴体構造の強度が増加し、窓を従来の 1.3 倍に大きくできたり、補強材が削減されたことによって機内の荷物入れのスペースをより効率的に利用できたり、機体客室の快適性向上も実現できた。

そして、近年は、胴体だけではなく、軽量化を望むジェットエンジンにも CFRP の適用が検討されている。しかし、150~200℃程度の耐熱性しかないため、CFRP 製部材は、エンジンの比較的温度の低い部位だけに適用されている。ゼネラル・エレクトリック (GE) は、型番 GE90 の超大型エンジンのファンブレードへ CFRP を使用した[5]。さらに、ボーイング 787 に搭載する GEnx エンジンのファンブレードとファンケースとも CFRP により作られ、世界で初めて、エンジン 1 機当たり、約 180 kg の軽量化が達成されている[6]。

さらに、航空機分野だけではなく、軽量化を重視する宇宙分野においても CFRP 複合材料の適用が期待されている。例えば、CFRP 複合材料を利用することによって、宇宙運送システムの構造重量の大きな割合を占める燃料タンクを軽量化できるので、宇宙運送システムの性能を大きく向上させることが期待されている[7]。ただし、ロケットなどの推進剤

には極低温の液体（液体水素、液体酸素など）が用いられるため、CFRP 複合材製構造は低温環境下で稼働することになる。しかし、CFRP は、低温環境においては、常温環境下と比べ、低い引張荷重でもマトリックスクラックが発生する。その生じたクラックによるガス漏れを防止するため、チタン合金箔を CFRP 積層板に挿入した複合材に関する研究が進んでいる[8]。

炭素繊維は熱抵抗率がほぼゼロであるため、CFRP は熱膨張係数や熱伝導率といった熱的特性にも優れる。例えば、CFRP 一方向材は、 0° 方向はゼロに近い熱抵抗率（約 $0.2 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$ ）を有する。これに対して、 90° 方向はエポキシ樹脂の熱抵抗率に近い（約 $35 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$ ）。そのため、この熱的異方性を利用し、積層構造で材料の熱伝導率を設計できる。その応用例として、CFRP により製造される、精密制御の必要な人工衛星用パネル構造が挙げられる[9]。

1.1.2 セラミックス基複合材料

高性能な軽量複合材 CFRP の適用が広がる一方、更なる省エネ、低燃費の民間旅客航空機を創出することを目指し、GE、IHI をはじめとする航空機エンジンの大手メーカーは、燃焼効率に優れるエンジンを追求している。現在、ニッケル系超合金の耐熱性の限界により、それにより作られるエンジンには空冷が必要となる。しかし、その空冷は燃料の燃焼に影響を与え、 CO_2 だけではなく有毒ガス NO_x などが発生する。それらの温室効果ガスや有毒気体の排出量を抑えるため、耐熱性に優れる素材についての研究開発が進んでいる[10]。世界トップレベルの学術論文誌「nature materials」では、2016年8月、Volume 16の解説において、高靱性のセラミックス基複合材料（Ceramics matrix composite: CMC）が高耐熱性・軽量性を持ち、燃費向上を図る航空用エンジンに適用可能な構造材料として期待されていると述べられている[11]。

CMC は、母材のセラミックス材に連続的セラミックス繊維やカーボンファイバなどが埋め込まれた複合材料である。セラミックス系複合材料の複合化の考え方は、プラスチックをマトリックスとする複合材料とは異なっている。CFRP の場合には、炭素繊維の比強度などの特性を重視し、軽量化構造材料を構築するという思想である。一方、CMC の場合には、高温特性を重視しているために耐熱性のある素材のみで材料を構成することが必要であり、複合化による比強度の向上などは期待できない[12]。その代わりに CMC においては、繊維は、脆性材料であるセラミックス母材の靱性を強化する役割を担う。つまり、CMC は繊維で複合化することにより、損傷が発生した際、繊維と母材との界面における摩擦によってクラック面がブリッジングされることでその損傷を止めることで、脆性材料であるセラミックスのようにカタストロフィックな破壊が生じることなく、損傷が徐々に進むことになる。

マトリックスと繊維の特性によって、CMC は酸化物系と非酸化物系に大きく分けられる。酸化物系では、アルミナ (Al_2O_3) に Nextel™720（アルミナ：75%、シリカ：15%）繊維

を埋め込むことにより形成する CMC (N720/A) が挙げられる。非酸化物系では、炭化ケイ素(SiC)セラミックス母材にこの同じ材料から作られた繊維で複合した CMC (SiC/SiC) は高性能であり、実用化が期待されている。

酸化物系 CMC と非酸化物系 CMC はそれぞれ異なる特徴を有する。非酸化物系 CMC、特に SiC/SiC は、力学的特性と機能的特性に優れるため、1500°C以上の超高温環境下でのエンジン部品に適用することが期待されている。しかし、SiC/SiC は酸化するため、実応用のためには材料の表面に耐熱コーティング(environmental barrier coatings: EBC)が必要となる[13]。一方、N720/A のような酸化物系の CMC は、SiC/SiC より強度と耐クリープ性が低い[11]、耐酸化性が高いため、EBC がなくても 1100°Cまでの高温環境下で稼働することが可能となる[14]。

この 2 種類の CMC は、それぞれの特徴を活かしてエンジンの異なる部品に用いられる。例えば、NASA の Environmentally Responsible Aviation (ERA)プロジェクト[15]においては、超高温環境下で稼働するエンジンの燃焼器ライナーと、優れた力学的特性が求められるタービンの羽根は、EBC に保護された非酸化物系 CMC が用いられる。その効果として、NO_xが 40%削減、そして、空冷に必要なエアの量が 60%減少している。一方、燃焼室より低い温度環境で稼働する排気ノズルには、酸化物系 CMC を用いる。ニッケル超合金と同じぐらいの耐熱性を有する酸化物系 CMC により製造されたノズルは、従来の超合金製ノズルと比べて 20%の重量が減少できたとともに、エンジンによる騒音の吸収にも大きな効果をもたらした。

そのため現在、CMC は航空機エンジン用軽量構造材として、NASA のような宇宙研究機関だけではなく、エンジンメーカーからの注目も集まっている[16]。例えば、CMC 製のノズルは、実際に Rolls-Royce のエンジン AE3007 に用いられている[17]。さらに、Boeing も CMC 製のノズルが搭載されたエンジン(Trent 1000, Rolls-Royce)の実応用を検討している[18]。特に、エンジン設計製造大手メーカーGE は、20 年間の CMC に関する研究を重ね、2015 年に CMC を使った次世代航空機エンジン「LEAP」の飛行テストに成功した。その成功を踏まえ、GE は今後、空冷が不要で燃料の利用効率の大幅改善などの革新的なメリットをもたらす CMC を、世界最大の航空機エンジンとなる「GE9X」に本格的に適用することを計画している[19]。そのエンジンは、2020 年に就航予定のボーイング 777X に搭載する予定である。CMC の適用などの改良によって、現在ボーイング 777 に搭載している GE90 と比べ、GE9X は燃焼効率が 10%向上すると予想されている。

さらに、日本の航空機エンジン大手メーカーIHI は、1000°C以上となる航空機エンジンのタービン部への CMC の適用を検討している[20]。そして、2016 年 6 月 17 日の日刊工業新聞[21]は、IHI は GE が開発している「GE9X」の運営事業に参画し、その参画シェアは 10%超になると表明したと報道されている。

CMC は、航空機分野を中心として研究されているが、その成果は、それ以外の分野にも広がっている。例えば、自動車分野においては、レースカー用の CMC 製ブレーキや CMC

製排気管が挙げられる[22]。

以上のように、CFRPのような航空機胴体に適用可能な軽量構造材と、CMCのような耐熱性に優れたエンジン用構造材を開発し、そして実機に適用することが実現できれば、省エネのエコ社会を構築できるとともに、これらの材料技術を基盤に、航空機産業を育成、拡大することが可能となり、大きな経済的インパクトがあると考えられる。

1.2 複合材料の損傷挙動の評価とアコースティックエミッション法

複合材料は力学的特性と機能的特性に優れるが、複合材料における微小かつ複雑な内部損傷が発生しやすいといった問題点がある。しかも、長い研究の歴史を持つ金属と比べ、複合材料における内部損傷は未解明なところが多い。このため、その破壊につながる内部損傷の進展挙動を明確にする必要がある。そしてその損傷挙動の情報を用いて、信頼性の高い複合材料とより安全な複合材料製構造物を設計することが望まれている。

さらに、CFRP製の極低温推進剤タンクや、CMC製のエンジン部品の応用例が示しているように、複合材料は一般的な常温環境だけではなく、極限的な環境に適用することも期待されている。しかし、その未解明な内部損傷形態は極限環境ではより複雑になり、一層評価しにくくなると考えられる。

そこで、複合材料の進展挙動を解明するためには、異なる環境に適用可能な有効な非破壊評価 (non-destructive evaluation: NDE) 手法が望まれている。アコースティックエミッション (Acoustic emission: AE) 法は、複合材料の内部損傷を検知可能な汎用的 NDE 手法として、高温環境を含む極限環境での複合材料の損傷・破壊挙動の評価に適用することが期待されている。

AE 現象は、材料内部に損傷が発生する際に弾性波が励起されるという現象である。その弾性波を AE 波と呼ぶ。AE 計測法とは、センサで AE 波の超音波成分を受信することで、材料内部に生じた損傷をリアルタイムで検知する受動的 NDE 手法である。AE 現象は環境に依存せずすべての損傷に伴うため、AE 計測法を用いることで極限的な環境においても複合材料中の損傷を検知可能であると考えられる。

複合材料における AE は、エネルギーが小さい、そして広周波数帯域にわたって存在するといった特徴がある。その AE 波を正確に計測するため、高感度と広帯域性を有する圧電セラミックス PZT センサは、汎用の AE センサとして使われている。しかし、そのセンサは使用可能温度が 200°C までに限られる。そのため現在、高温環境における AE 計測の対策として、金属製の AE 波ウェーブガイドの一端を高温環境内の試験片に設置し、他の一端に PZT センサを貼り付けて常温環境に設置するように配置する形にしなければならない[23]。この方法においては、まず、ウェーブガイドにおける AE 波の減衰が大きいという問題点がある。そして、AE 波がそのウェーブガイドを伝わる際には反射などの影響を受けるため、ウェーブガイドの形状に依存して、計測した AE 波形が全く異なったものになる。つまり、AE 信号を計測できても、その信号から情報を抽出し複合材料において発生した損傷の形態同定などの高次な機能を果たすことが困難である。更に、高温環境下ではウェーブガイドを供試体に固定することが難しいといった実用上の問題もある。

ウェーブガイドを使わず AE 波を正確に計測するため、耐熱性を有する特殊 PZT センサの研究開発が進んでいる。Kirk et al. [24]はニオブ酸リチウム結晶を耐熱セメントに埋め込み、400°Cの環境で AE を計測できた。さらに、Johnson et al. [25]は $\text{YCa}_4(\text{Bo}_3)_3$ 単結晶を

用いた PZT-AE センサで 1000°C での AE を計測した。しかし、 $\text{YCa}_4(\text{Bo}_3)_3$ 単結晶は温度の変化に依存して感度が低下することが分かった。そして、その結晶による高温センサは周波数帯域が限られるといった性能的問題がある。さらに、高温環境下での耐久性に優れる電極と、その電極と PZT との結合方法の開発など、センサの実用化における課題が残っている[25]。

このように、PZT-AE センサは環境に影響されやすいため、複合材料製構造が働く極限環境、特に高温環境においての AE 計測を実現することが困難である。

一方、光ファイバセンサは、石英ガラス製で耐熱性に優れているので、高温環境下でのセンシング技術に適用することが期待されている。近年、その一種である FBG (fiber Bragg grating) センサは、AE センサとして応用するための研究が多く行われている。そこで、本研究では、高性能光ファイバ FBG センサを用いて、常温環境においても極限環境においても適用可能な AE 計測法を構築することを試みる。

次節から、FBG センサを用いて超音波を計測する原理と、AE 計測に適用する高性能 FBG センシングシステムを紹介する。

1.3 光ファイバFBG センサを用いた AE 計測

1.3.1 FBG センサの計測原理

FBG は、光ファイバのコアに周期的な屈折率変動を形成することで作製される。その FBG のイメージ図と、その周期的な屈折率変動の模式図を Figure 1-2 (a)と(b)に示す。光ファイバに広帯域の光を伝播させると、特定の波長を持つ光成分が FBG により反射される。その一例として、フジクラ製の FBG センサによる反射光スペクトルを Figure 1-2 (c)に示す。式(1)を用いてそのスペクトルにおける中央ピークに対応する光の波長を予測することが可能である。式(1)では、 n が光ファイバのコアにおける有効屈折率、 Λ がグレーティング周期 (グレーティングの間隔 : Figure 1-2(a))、 λ_B は Bragg 波長と呼ばれる [26]。

$$\lambda_B = 2n\Lambda \quad (1)$$

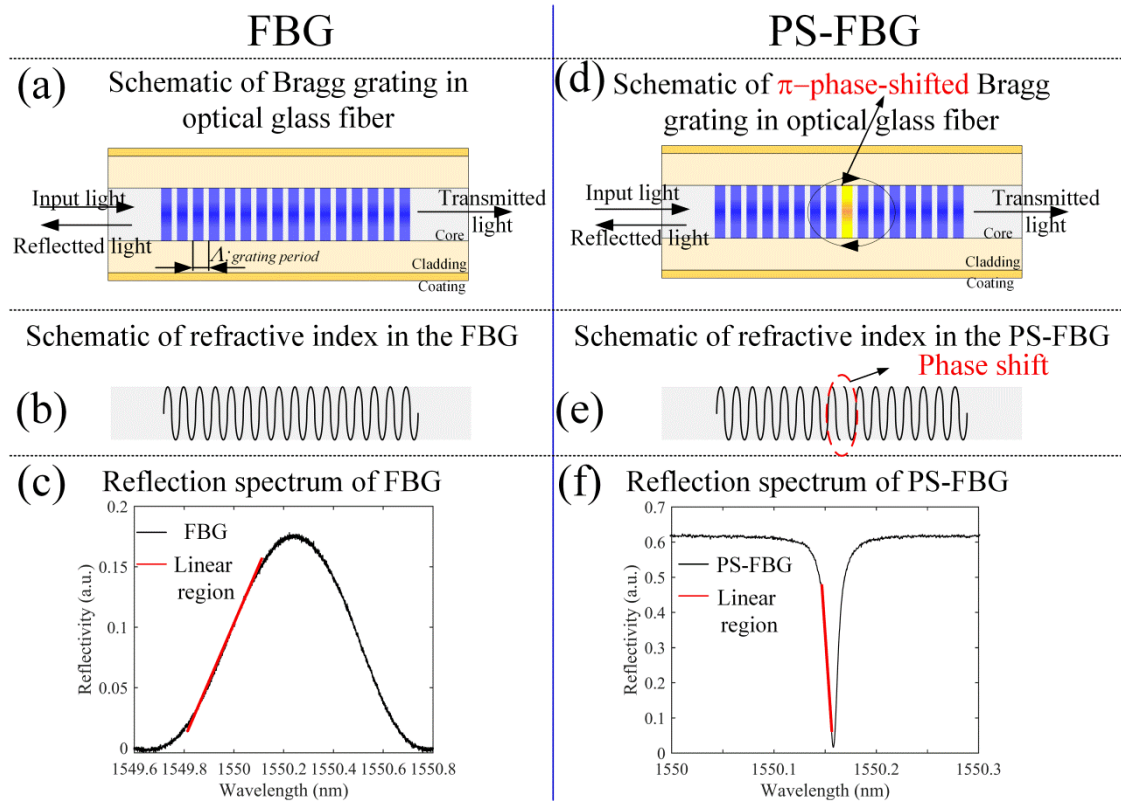


Figure 1-2: The introduction about FBG and PS-FBG.

FBG が構造材料内部の超音波 (弾性波) により生じるひずみを受けると、Bragg 波長がシフトすることになる。式(2)はその Bragg 波長のシフト量と超音波によるひずみとの関係を表す。式(2)における a は、有効屈折率、光弾性による光ファイバの光学指数と光ファイバのポアソン比により決められるが、一定の波長を有する光に対応してその a は定常係数と近似できる [26]。つまり、ひずみ (ϵ) の変動に対して、FBG の Bragg 波長は線形的にシ

フトする。このため、Bragg 波長のシフト量を高速で計測できれば、超音波に伴うひずみの動的な変化を推定することができる。

$$\Delta\lambda_s = a\varepsilon \quad (2)$$

しかし、そのシフト量を直接観察することが難しいため、その Bragg 波長の変化を電圧信号に変換するセンシングシステムが必要となる。その FBG センシングシステムは超音波センサや AE センサとして構築された研究例[27-29]が多いが、それらのセンサは感度が不十分そして周波数帯域が限られるといった問題点があるため、複合材料中に発生した微小な AE 信号を正確に計測することが困難であった。つまり、FBG センサを用いた AE 計測によって、複合材料中の損傷形態の同定などの具体的な機能を実現することが難しかった。

広帯域にわたる AE 波を高感度で計測することを目指し、本研究では、特殊な FBG センサ、位相シフト FBG (Phase-shifted FBG: PSFBG) センサを用いて複合材料中の AE を計測する。

1.3.2 PSFBG センサと PSFBG バランスドセンシングシステム

PSFBG センサは、一般的な FBG の周期的な屈折率に不連続な位相のズレ(Figure 1-2 (d),(e))を入れることによって形成されたものである。その位相のズレを入れることで、Figure 1-2(f)に示すように反射光スペクトルに鋭いピークが生じる。ひずみを計測する際の原理は FBG と同じであるが、その鋭いピークを有するため、PSFBG センサは、FBG センサよりも極めて高い感度を持つことになる[30, 31]。Bragg 波長のシフトを電圧信号に変換する、1 つの変調方法、Edging Filter 法[32]を例として、PSFBG センサがその高感度をもたらした原因を述べる。Edging Filter 法においては、光から電気への変換は式(3)[30]により表わされる。この式においては、 V_s は、 $\Delta\lambda_s$ の変化に対応して変換された電圧信号である。 P は、入射光とするレーザ光パワーである。 R_D と g はそれぞれ光パワーを電圧信号に変換するための受光器の応答係数と、その受光器に付属したアンプのゲインである。ここで、 G は FBG の反射スペクトルのピークにおける線形的な部分のスロープとなる。つまり、 G が高ければ高いほど、Bragg 波長のシフトにより生じる電圧の変化が大きくなる。

$$V_s = \Delta\lambda_s G R_D P g \quad (3)$$

Figure 1-2 (c), (f)で赤い線で示してある、FBG と PSFBG の光スペクトルにおける傾きが線形になる部分を比較してみると、PSFBG と FBG に対応するその直線の傾きはそれぞれ 87、 0.48 nm^{-1} である。つまり、ひずみから電気信号に変換する際には、同じひずみ入力に対してその Bragg 波長シフト量が同じであっても、PSFBG により変調した信号レベルは、FBG によるものと比べ、約 180 倍増大される。そのため、ノイズに対する信号の比 (S/N 比) が改善され、感度が高くなる。

さらに、位相のズレを入れることで、PSFBG センサの感度が向上するだけでなく、計測可能な周波数帯域も大幅に向上する[31]。一般的な FBG は、一定のゲージ長 (例えばグレーティング長 10 mm) を持ち、そのゲージ長より長い波長を有する超音波は、1 波長以

内で、FBG 全体を引張ったり縮めたりするので、正確にその弾性波を計測することが可能となる。しかし、そのゲージ長より短い波長の超音波は、FBG のグレーティング内に不均一なひずみ分布を与え、グレーティング全体の変化は小さいため、FBG はそのような超音波に対して応答が弱くなったり、不正確な計測をする[33]。つまり、FBG センサは、応答周波数の高周波数側に制限がある。一方、PSFBG センサの光スペクトルにおける中央の鋭いピークは、 π の位相のズレでの干渉により生じるため、そのピークの波長シフトは、位相のズレの近傍での伸縮に強く依存する。そのため、PSFBG センサの有効ゲージ長さは、ほぼ点に近い状態となり、非常に短い波長にも応答するため、極めて優れた広帯域性を有する[30]。

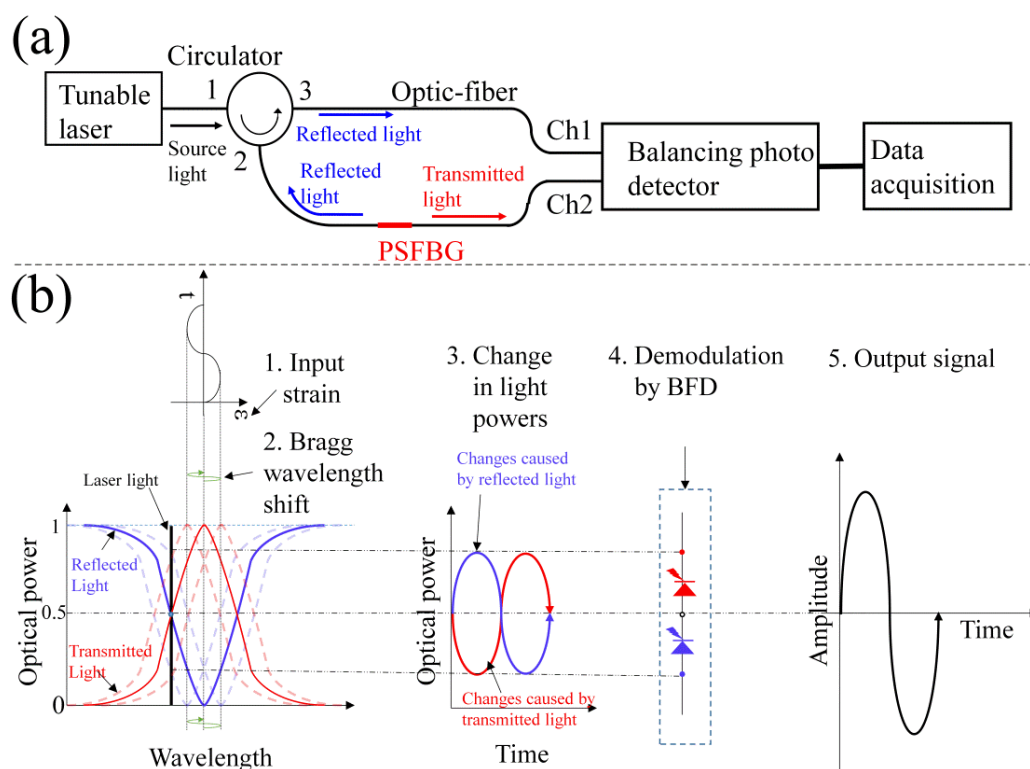


Figure 1-3: Introduction about the PSFBG balanced sensing system: (a) the schematic of the system and (b) working principle.

Wu と Okabe[30]は、PSFBG センサの上記の 2 つ特徴を利用し、更なる高感度を有するセンシングシステムを構築できた。そのシステムの構造と計測原理のイメージ図をそれぞれ Figure 1-3 (a), (b)に示す。式(3)で表した Edging Filter 法を利用して Bragg 波長のシフトを変調するため、Figure 1-3 (a)に示すようにレーザ光をシステムの光源として光ファイバに入射する。レーザは、単一周波数の光を出力するため、Figure 1-3 (b)の左側に示すように、PSFBG の光スペクトルと比べ、そのレーザ光は線状に見える。ここでは、ひずみの

変化を Bragg 波長のシフト量に線形的に変換するため、レーザー光を PSFBG のスペクトルのピークの線形的な領域 (Figure 1-2 (f)での赤い線) に位置するように調整する必要がある。そのため、チューナブルレーザーを使用している。

そして、サーキュレータによって、PSFBG センサは、レーザー光源とバランスドフォトディテクター (Balanced photo detector: BPD) に接続される。BPD 構造は、PSFBG からの反射光と透過光の両方が入力され、それらの差分が電圧信号に変換される。そのため、電圧信号の初期値が 0 になるように、レーザー光波長を常に PSFBG のスペクトルの線形的な領域における中心点 (3dB) に合わせる必要がある。BPD 構造を用いてひずみの変化を電圧信号に変換する原理を説明するため、ここで一定周波数を持つサイン形状のひずみ波形を入力信号とする (Figure 1-3 (b):1. Input strain)。サイン波に従い、PS-FBG の反射スペクトルと透過スペクトルが同時に同じ方向にシフトする (Figure 1-3 (b):2. Bragg wavelength shift)。その際に、その反射されたレーザー光と透過した光のパワーは時間の変化に従いサイン波形状で変化し (Figure 1-3 (b):3. Change in light power)、ただし、その二つの波形は互いに逆位相を持つ。BPD は、その逆位相を有する二つの光成分を引き算する (Figure 1-3 (b):4. Demodulation by BPD) ため、交流成分 (動的なひずみ成分) を 2 倍にするとともに、直流成分 (反射光と透過光のパワーの同じ変動) を排除することが可能となった (Figure 1-3 (b):5. Output signal)。さらに、BPD は、レーザー光源によるノイズを抑えることができる [30]。つまり、PSFBG センサが一般的な FBG センサより感度に優れることに加え、BPD 構造を用いることによってそのセンサによる超音波計測の信号 S/N 比をさらに向上させることができた。

そこで、PSFBG センサを用いて従来の一般的な FBG センシングシステムで計測することが難しかった、広帯域にわたる AE 信号を高感度で計測することが可能となった。PSFBG センサと BPD は本システムの特徴であるため、このシステムを PSFBG バランスドセンシングシステムと名付けている。

1.3.3 PSFBG センサの機能的特性

高感度と広帯域性に優れるだけではなく、PSFBG センサを AE 計測に適用することによって、今までにない高次の機能を有した AE 計測法を構築可能にすることが期待できる。

AE 波は、弾性波として構造体を伝わる時、特に、薄い板状の構造物においては、ラム波理論を用いて AE 波を理論的に解析することが可能である。しかし、現在の PZT-AE センサは、周波数に依存し、超音波により生じるひずみ、変位、加速度、速度といった物理量を同時に計測する。そのセンサにより計測した AE 信号には様々な物理量が混ざっているため、その AE 信号からラム波の特徴を正確に抽出することが難しい。そのため、今までの複合材料分野での AE 解析は、弾性波理論による AE 信号の解析ではなく、AE 信号をパラメータ化し、統計学のような数学的な分析手法が主流となっている。AE パラメータ法は大規模な AE 信号を一括して簡便に処理できる反面、それらの手法で得られた損傷形態などの同

定結果は、物理的に検証することが難しい。

一方、上記で述べたように、PSFBG センサは、純粋なひずみだけを計測することによって、超音波の挙動を正確に捉えることが可能である。つまり、PZT センサと比べ、PSFBG センサで計測した信号は、物理的現象を的確に捉えている。著者ら[34]は、以前の PSFBG センサを用いた AE 計測に関する研究において、AE 信号に含まれるラム波モード A_0 モードと S_0 モードを定性そして定量的に評価することによって、CFRP 複合材料の内部損傷形態を同定可能にした。さらに、その先行研究では、波動伝播の数値解析によってその同定結果を検証し、そして、AE 波形を理論的に説明することもできた。

従って、PSFBG センサを用いた AE 計測では、物理的根拠に基づいてその損傷形態を的確に同定することが期待できる。

1.4 本研究の課題と論文構成について

本研究では、その高性能な PSFBG バランスドセンシングシステムを改良することによって、極限環境下で適用可能な AE 計測法を構築し、そして、複合材料における損傷形態の同定など、すなわちその AE 計測法の機能性を確かめることを目的としている。ただし、極限温度環境と言っても、マイナス 100℃以下の低温と 1000℃前後の高温環境がある。しかし、FBG センサを実際に極低温環境でのひずみ計測に用いた研究例[35]が既に多く存在するのに対して、1000℃の高温環境への FBG センサの応用例が少ない。このため、ここでは、主に高温環境をメインにして研究を行った。

この目的を実現するため、主に下記のような 2 つの課題が存在すると考えられる。

1.4.1 課題①：PSFBG センサを高温環境に適用可能な設置方法を検討する

光ファイバは、石英ガラス製で 1000℃まで安定した性質を持つ。しかし、FBG は光ファイバのコアに周期的な屈折率変動を形成することで作製されており、900℃程度まで加熱していくと熱エネルギーによってその FBG が消失することが知られている。そのため、PSFBG センサを用いて高温環境における AE 計測を実現するには工夫が必要となる。

本研究では、主に 2 つの方法でこの課題を解決しようと考えている。

まず、センサを直接高温環境に設置する場合を考える。FBG は 900℃になると消失するが、近年、消失した後に 1000℃付近まで加熱すると、その消失した FBG が再び出現することが報告されている。この熱処理はアニーリング処理と呼ばれ、その再現 FBG は RFBG (Regenerated FBG) と呼ばれる。RFBG センサは、1000 度まで安定した性質を有するため、高温環境下での温度やひずみの計測に使われている。しかし、その RFBG センサを用いて超音波や AE 波を計測した例はない。そこで、本研究では、PSFBG センサを用いてアニーリング処理を行うことで RFBG を形成し、さらに、その RFBG を用いて 1000 度の高温環境下で超音波を計測することを試みた。その結果、RFBG センサは 1000℃まで安定した性質を持つため、このセンサを用いて、今まで通常の FBG センサで実現できなかった、高温環境下での超音波計測に初めて成功した。その RFBG センサの製作とそれによる超音波計測に関する具体的な内容は第 2 章に述べる。

しかし、PSFBG センサと比べ、RFBG センサは AE を計測するほどの感度がないことが分かった。

そこで、本研究では、センサを高温環境などの極限環境から遠隔に設置し AE 波を計測する方法を提案する。つまり、Figure 1-4 に示すように、石英製光ファイバの一点を試験片に接着して高温環境下に置き、PSFBG センサを常温下に設置するように配置する形で、複合材料中の AE を遠隔的に計測する方法を考えた。こういった接着方法を遠隔計測用接着法 (Adhesive method for remote measurement: ADRM) と名付けた。ADRM 法を用いることで、PSFBG センサは高温に曝されることなく、光ファイバが 1000℃まで安定した性質

を持たば、高温環境下での AE を計測することが期待できる。

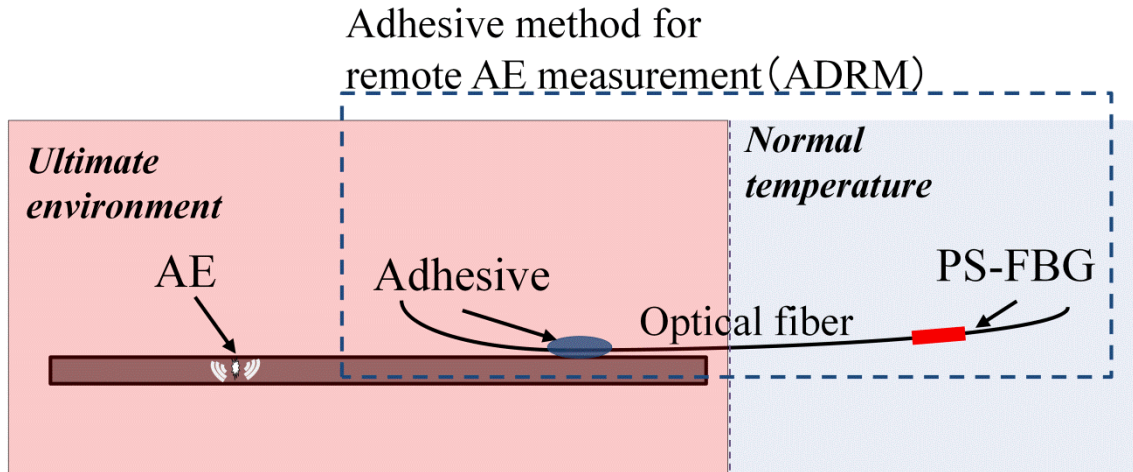


Figure 1-4: Adhesive method for remote AE measurement.

一般的な接着法と大きく異なり、本研究で提案する ADRM 手法では、AE 波が光ファイバに沿って伝播する必要がある。金属のウェーブガイドと異なって、本手法は正確に AE 波を計測できることを証明しなければならない。しかし、光ファイバのような細い糸状構造を伝わる AE 波動を検討した前例がない。そこでまず、実験によって ADRM で接着された PSFBG センサが正確に AE 波形を計測することができるかを検証する。ここでは、計測結果が正確かどうかの判断基準は、計測した波形が、AE 波に含まれるラム波モードを正しく捉えているかどうかということである。さらに、数値解析によって ADRM 構造にある PSFBG センサの AE 波及び超音波の計測原理を明らかにした。これらの内容を第 3 章で述べる。

第 4 章では、ADRM 法を用い 1000°C の環境下で AE を計測できることを検証した。ただし、ADRM 法を用いて高温環境下での複合材料の材料試験中に AE を計測するためには、長時間にわたってその環境に設置しなければならないため、検証実験によって、ADRM 法の耐久性を確かめた。

1.4.2 課題②：遠隔的 AE 計測法を用いてより高次の機能を実現する

本研究では、遠隔的 AE 計測法を用いて高温環境下での AE 信号を検知することだけでなく、その AE 計測法を利用することによって、複合材料の内部損傷形態の同定などより高次の機能を実現することも目標となっている。

ここで、本章第 1.3.3 節で述べているように、PZT-AE センサと比べ、PSFBG センサを利用した AE 計測の一番大きな、信号分析上のメリットは、PSFBG センサは純粋な動的ひずみを広帯域にわたって計測するという点にある。つまり、計測結果は弾性波の物理的

特性を正確に反映できる。この計測上の特性を利用し、板状構造における波動伝播の解析に適用するラム波理論を用いて、物理的根拠に基づく、複合材料の内部損傷による AE を的確に同定する手法を検討する。これらの内容を第 5 章に述べる。

ただし、ラム波モード解析を行うためには、各信号の波形ごとに分析しなければならない。しかし、複合材料の材料試験においては AE 信号が大量に発生する。つまり、ここで確立した手法には、AE 信号解析の実用的な効率の面で問題がある。この問題の対策として、第 5 章では、AE 信号に含まれるラム波モードの特徴を定量的に評価することで得られたパラメータを機械学習で分析することによって、大量な AE 信号を簡便に同定する手法を提案する。

さらに、AE 計測においてももう 1 つの重要な課題である、損傷発生位置の標定に関する内容を第 6 章で述べる。一般的な位置標定手法は、少なくとも二つのセンサが必要となる。一方、ADRM 法で設置した PSFBG センサで計測した場合には、AE 波に含まれるラム波の S_0 モードと A_0 モードを正確に識別することが可能であり、両者の速度も異なる。そこで本研究では、単独センサによる AE 計測中の位置標定法を提案した。この手法では、ラム波の分散性、つまり、 A_0 モードと S_0 モードの群速度差を利用し、1 つのセンサで計測した AE 信号から損傷の位置を推定可能にした。

以上の課題に従い、本研究の構成を Figure 1-5 に示す。

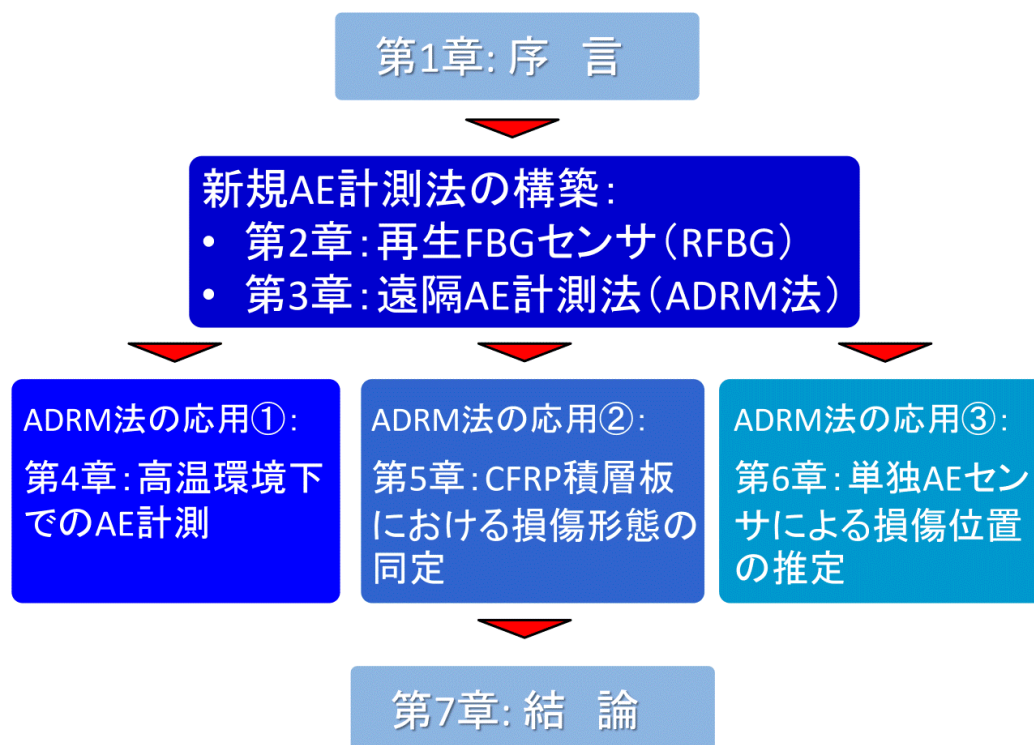


Figure 1-5: Construction of this thesis.

第2章：再生 FBG センサによる超音波計測

第1章で述べたように、光ファイバセンサの一種である、FBG センサは、ガラス製で耐熱性に優れるため、高温環境下でのセンシング技術に適用可能なセンサとして注目されている。本章では、FBG センサ、特に PSFBG センサを高温環境に直接設置する場合、超音波や AE 波を計測可能な方法を検討する。

2.1 再生 FBG センサ

汎用の Type I の FBG は、ゲルマニウム添加石英ガラス製光ファイバ (H-loaded germanosilicate fiber) のコアに紫外線を照射することによって作製される。その UV 照射によるガラス屈折率変調の微視的なメカニズムはまだ解明されていない[36, 37]が、ガラス結晶においては酸素欠乏ゲルマニウムセンタ (Germanium-oxygen-deficient center: GODC) をはじめとする電子的欠陥が生成することによって、ガラスの屈折率が変化するという仮説で解釈されている[36, 38]。しかし、熱エネルギーによって、それらの欠陥が変化し、つまり屈折率が変化することで、Type I の FBG が消失することが知られている。ハイパワー紫外線パルスレーザ (High peak power pulsed ultraviolet laser) を用いて光ファイバコアに傷を入れることにより作製される Type II の FBG センサは 1000°C の環境にも適用可能である[39]が、その傷によるグレーティングは、分散損失が大きいことと、光ファイバの力学的強度に影響するという欠点がある[40, 41]。そこで、FBG センサを高温環境に設置して超音波や AE を計測することに工夫が必要となる。

一方、M. Fokine [42]は、900°C の高温環境下で熱エネルギーを受けることで UV 照射により作製された Type I の FBG が消失するが、その後、1000°C 前後まで加熱すると消失したグレーティングが再び出現してくるという現象を報告した。そのグレーティング、つまり屈折率の変調は、GODC のような電子的欠陥や、歪んだ化学結合などの形成が原因ではなく、化学成分によるものであると推測されているため、chemical composition grating (CCG) と呼ばれている[43]。CCG による FBG は、一度消失したのから再び出現するため、リジェネレーティッド FBG (Regenerated FBG: RFBG) と呼ばれている。さらに、RFBG は耐熱性に

優れるため、1000℃まで加熱しても消失しないということが検証された。特に、1295℃の環境においても RFBG センサが稼働できるという報告もあった[44]。

RFBG センサを形成するための加工プロセスを熱アニーリング処理という。この熱アニーリング処理によって、多種類の添加物の光ファイバに存在する FBG から RFBG を形成できることが分かった。M. Fokine [45]は、フッ素添加光ファイバ FBG から CCG を形成できることを発見した後、S. Bandyopadhyay et al. [46]は、ホウ素を添加物とした光ファイバに存在する FBG を用いて RFBG を作製することに成功した。そして、B. Zhang と M. Kahrizi[47]は、汎用のゲルマニウム添加光ファイバ FBG からでも RFBG を作成できることを証明した。

以上述べたように、RFBG センサは耐熱性に優れると共に、汎用の光ファイバ中でも形成可能であるため、高温環境下でのセンシング技術に使用されることが期待できる。しかしこれまで、RFBG センサは、1100℃とそれ以上の環境において温度センサとして用いられてきている[48-50]が、著者らの知る限り、高温環境下でこのセンサを用いて超音波を計測した例は無い。そこで、本研究では、超音波計測に、汎用のゲルマニウム添加系光ファイバを用いて作製した RFBG センサを適用することを試みる。特に、高感度で超音波を計測するため、まず感度に優れる PSFBG センサに対して、アニーリング処理を行うことで RFBG センサを形成してみる。

2.2 PSFBG を用いて形成した RFBG

RFBG は、FBG を形成している石英ガラスが、加熱時に熱平衡状態に移る際に起こる化学反応によるものである[43]。ただし具体的な化学物質の拡散などを測ることが難しいため、仮説によってその RFBG の形成が説明されている。B. Zhang と M. Kahrizi [47]は、一般的なゲルマニウム添加石英ガラスを用いて、RFBG を形成できることを検証した。そのメカニズムとして、FBG を作製する際に UV 光によって生じた化合物 Si-OH と Ge-OH がガラスの屈折率変調、つまり FBG の反射率の変化に作用する[51]が、熱エネルギーによってその水酸基が分離し、水素と反応して水分子が発生する[37, 41, 47]。そして、熱アニーリング処理によってその水分子が拡散することによってガラスの屈折率が再び変調された結果、RFBG が形成されると解釈している。水分子は、再度 Si や Ge と反応することなく、温度の再上昇でも拡散しにくいといった安定的な性質を有するため、水分子により形成された RFBG センサは、1000°Cまで加熱しても消失し難い。

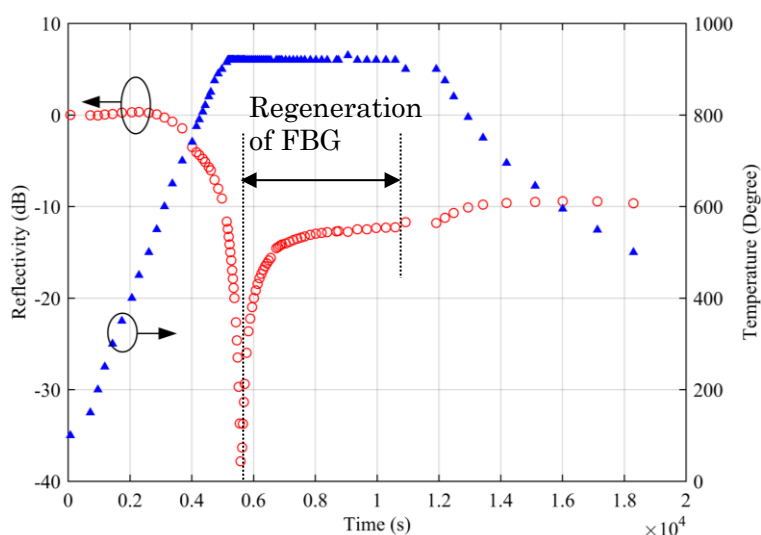


Figure 2-1: Change in the reflectivity of PSFBG during thermal regeneration process.

ここでは、株式会社フジクラ製の PSFBG を用いて、熱アニーリング処理を行うことで RFBG センサを形成する。この PSFBG は、直径 0.15 mm の、ポリイミドをファイバ被覆にしたシングルモードファイバのコア（直径：0.01 mm）に刻まれている。そして、そのファイバのクラッドの直径は 0.125 mm である。グレーティング周期が 0.5 μm である。この PSFBG の反射スペクトル（Figure 2-2）における中心波長は、1550 nm 前後にある。

アニーリング処理は、1200 $^{\circ}\text{C}$ まで加熱可能な高温炉内で行われた。そして、RFBG センサが形成される過程を確認するため、温度変化の時間履歴に従う PSFBG センサの反射率の変化を計測した。その Figure 2-1 に示す結果より、室温から 700 $^{\circ}\text{C}$ までの間には、反射率が徐々に低下しているが、700 $^{\circ}\text{C}$ から 900 $^{\circ}\text{C}$ までの間には、反射率が急劇に低下している。そ

して、920°Cまで温度を上げて保持すると、消失した PSFBG の反射率が徐々に回復していくことがわかる。さらに、そのまま約 30 分保持すると、反射率が-12.28 dB まで戻り、その後は一定値を保っていた。この過程において、常温から 700°Cまでの間には、化学結合が比較的弱い Ge-OH の水酸基が分離するため、反射率が徐々に低下し、700°C以上になると、主に Si-OH の水酸基が分離し始めるため、反射率が急劇に減少したと考えられる。その後、920°Cで熱エネルギーを与え続けることで、水分子が十分拡散し、RFBG センサが形成される。

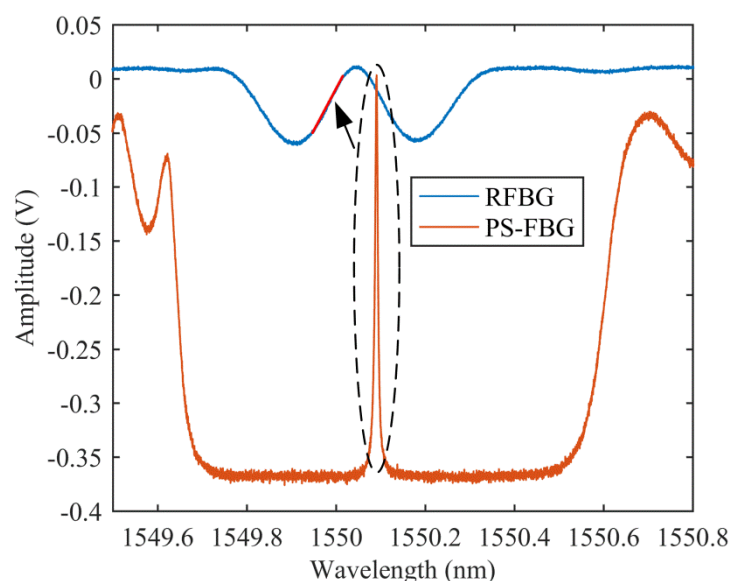


Figure 2-2: Comparison between the spectra of the PSFBG and the RFBG.

この RFBG と元の PSFBG の透過光スペクトルを、室温下で計測した結果を Figure 2-2 に示す。PSFBG から形成した RFBG の透過光スペクトルにおける中央ピークは、元の PSFBG のピークと比較すると、かなり緩やかになることが分かった。Figure 2-2 で赤い線で示してある、光スペクトルにおける線形になる部分の傾きは 0.76 nm^{-1} となる。1.3.2 節で言及した、その直線の傾きが大きければ大きいほど感度が良いという FBG センシング法の特徴に基づき、そして、PS-FBG センサ (87 nm^{-1}) と一般的な FBG センサ (0.48 nm^{-1}) と比較することによって、PSFBG センサにより形成された RFBG センサは、超音波センサとしての感度が元の PSFBG センサより低下しているが、通常の FBG センサより良いと考えられる。

次には、RFBG センサの耐熱性を検証した上で、このセンサは超高温環境下での超音波計測に実際に適するかどうかを検証する。

2.3 RFBG センサによる超音波計測

まず始めに、高温環境下における RFBG センサの安定性を確かめた。室温から 1100 °C まで再び加熱しながら計測した RFBG の反射率を Figure 2-3 に示す。この結果を見ると、温度の上昇に伴って RFBG の反射率は低下する傾向が見られるが、Figure 2-1 と比較すると、元の PSFBG のような消失は生じていない。つまり、RFBG は 1000 °C 前後の環境下では比較的安定した性質を持つことが分かる。

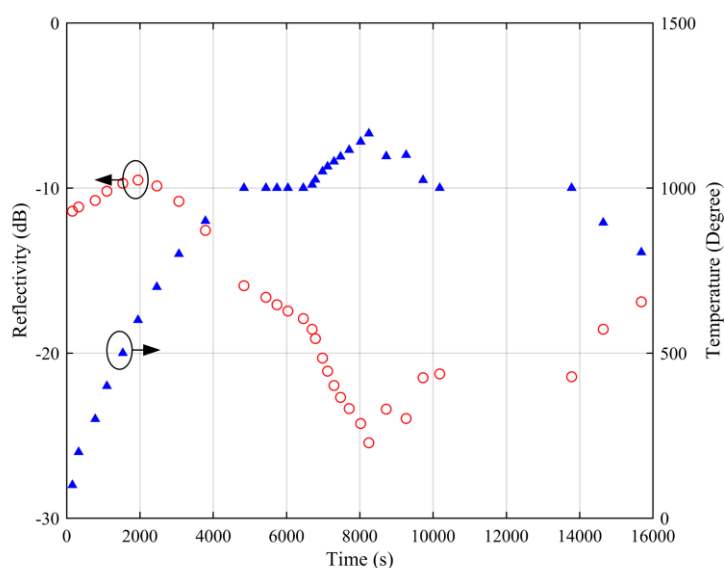


Figure 2-3: Evaluation of the reflection of RFBG during reheating.

Figure 2-2 に示すように、RFBG センサは PSFBG センサより感度がかかなり低いため、AE 計測に適用することが難しいが、通常の FBG センサより感度が高いため、そのセンサを用いて超音波計測を試みた。実験のセットアップは Figure 2-4 に示す。ここでは、極狭帯域のレーザ光を用いる Edge filtering 法で、超音波の微弱な動的ひずみ変動によって生じる RFBG のブラッグ波長シフト量を電圧に変換して計測した。ただし、超音波発信用の圧電アクチュエータを 1000 °C で駆動させることはできないため、光ファイバを高温炉から引き出し、常温環境下に設置した圧電アクチュエータに接着して、RFBG センサ部は高温環境下に設置した状態で、その圧電アクチュエータで励起して光ファイバを伝播した超音波を計測した。ただし、PSFBG と比べて透過スペクトルにおける中央ピークのスロープが緩やかなため、RFBG センサの超音波に対する感度が低下しているため、計測した信号のホワイトノイズを除去する目的で 8000 回の計測波形の平均化を行った。ここでの 8000 回という平均回数は経験によって定めた。平均回数が増えれば多いほど、ホワイトノイズの除去効果が良くなるが、その回数の増加は実験の効率に影響するので、平均回数が少ないほ

うが望ましい。そこで本実験においては、1000回から10000回までの平均化を試し、その結果、一番適切な平均化回数は8000回であった。

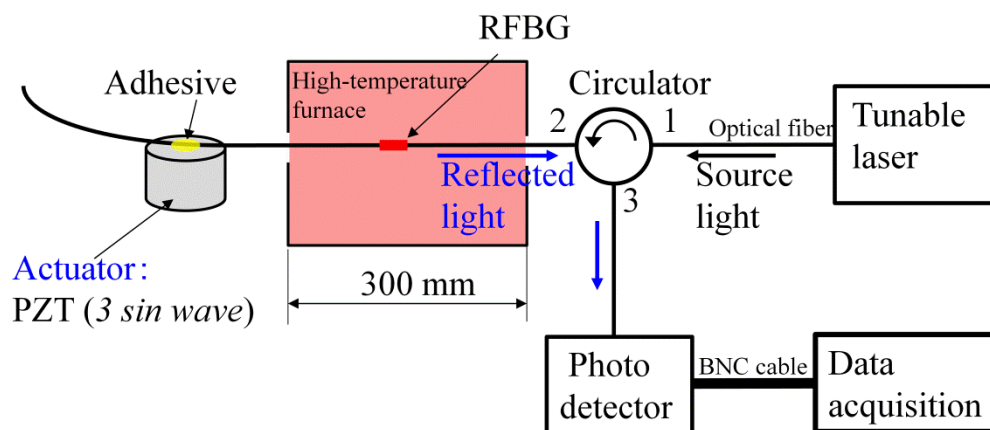


Figure 2-4: Experimental setup for ultrasonic detection using RFBG sensor.

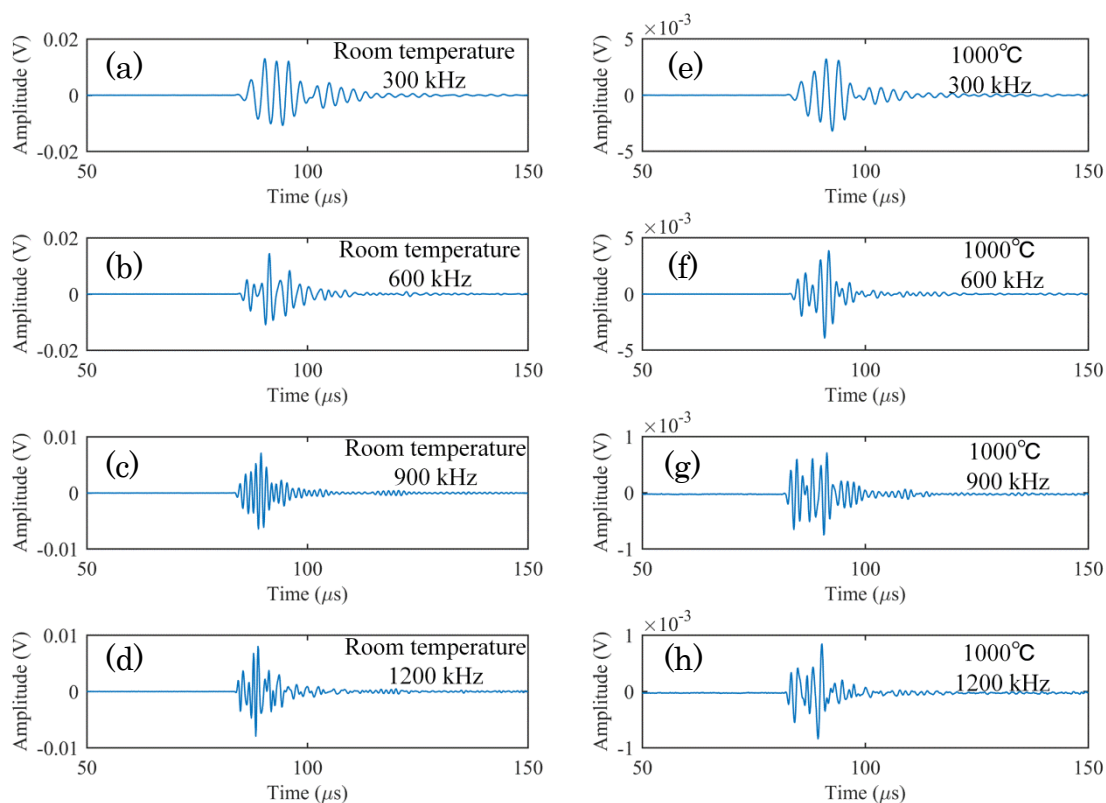


Figure 2-5: Ultrasonic waveforms detected by the RFBG sensor at various frequencies in different temperatures.

圧電アクチュエータへの入力信号に中心周波数 300 kHz、600 kHz、900 kHz と 1200 kHz を持つ 3 周期バースト波形を用いた場合の、RFBG での計測波形を Figure 2-5 に示す。1000 °C の高温環境下での計測と比較するために、常温環境下で計測した超音波波形をそれぞれ Figure 2-5(a)~(d) に示す。そして、1000 °C の温度条件で計測した波形をそれぞれ (e)~(h) に示す。

Figure 2-5 に示す結果より、RFBG センサは 1000°C の環境下で安定した性質を有しており、このセンサを用いて、今まで通常の FBG センサでは実現できなかった、高温環境下での超音波計測に成功した。

ただし、高温環境下で RFBG センサにより受信した超音波信号の波形には、以下の不完全な点があることも確認できる。

まず各周波数で、常温と高温で計測した波形を比較すると、高温環境において計測した結果の電圧振幅が低くなっている。これは、Figure 2-3 に示すように RFBG センサの反射率は高温環境下でも消失はしないが、常温環境の場合と比べて低下しているためである。

さらに、Figure 2-5 より、300 kHz と 600 kHz の周波数条件では、高温に設置した RFBG センサは、常温に設置した RFBG センサとほぼ同じ波形を計測できている。しかし、900 kHz と 1200 kHz の周波数を持つ入力信号に対しては、常温での RFBG センサの応答と比べ、1000°C の環境下での RFBG センサが高周波数成分を計測できていないように見える。その 1 つの原因として、熱アニーリングにより得られた RFBG は、水分子の拡散により有効ゲージ長が長くなり、そのゲージ長より短い波長、すなわち高周波数成分の波長に対して感度が低下したと考えられる。

2.4 考察

以上の実験によって、RFBG センサは超高温環境下においても超音波を計測できることが分かった。しかし、このセンサは、超音波に対する感度、特に高周波数成分に対する感度が低下するため、PSFBG センサのように、広帯域にわたる微小なエネルギーを有する AE 波を高感度で計測することが難しい。その原因として、熱アニーリング処理によって PSFBG から RFBG を形成する際には、水分子の拡散によって、グレーティングの形状と、Figure 2-2 に示した通り、光スペクトルが大きく変化したためであると考えられる。

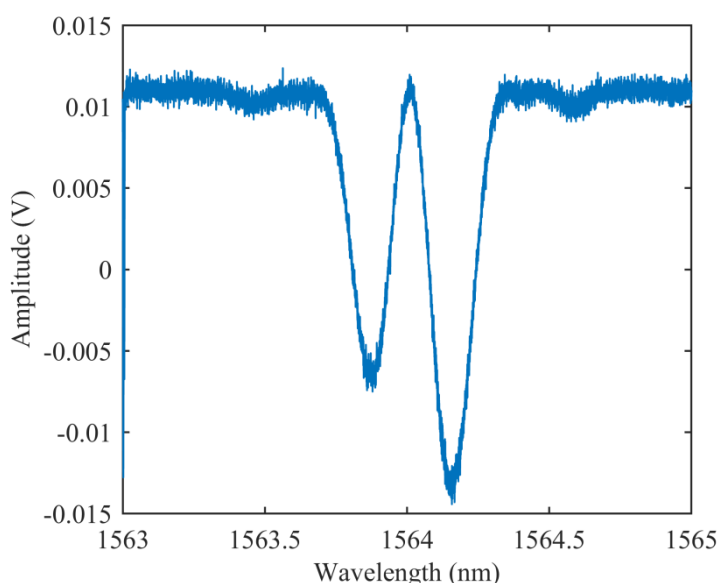


Figure 2-6: The spectra of the RFBG at temperature of 1000 °C.

今後、より高感度な RFBG センサを作成するためには、アニーリング処理の前に、元のグレーティングの配列（グレーティング周期など）に事前に工夫を凝らし、PSFBG センサのような鋭い中央ピークを有するスペクトルを RFBG に持たせられる可能性がある。しかし、現在、仮説によって解釈された、RFBG の形成過程における化学反応は完全に解明されていないため、RFBG のスペクトルを的確にコントロールすることが非常に困難である。

PSFBG により作成した RFBG センサのもう 1 つの問題点は、異なる温度環境下における安定性にある。Figure 2-3 に示す、RFBG センサの耐熱性を調べた結果においては、RFBG センサは 1100°C まで消失しなかったが、温度の上昇に従って反射率が低下することが分かった。ここでは、レーザ掃引で得られた、1000°C での RFBG スペクトルを Figure 2-6 に示す。それを Figure 2-2 に示す常温環境下での RFBG のスペクトルと比較すると、反射率の低下に加えて、RFBG センサのスペクトル全体の形状が変わっていることも分かる。

今まで、RFBG センサを温度センサとして使う際には、反射光スペクトルの形状と関係せずに、温度の変化に従い中心波長が線形的にシフトすれば、そのシフトを計測することによって温度を的確に推測できている。しかし、超音波や AE 波を計測する際、温度の変化に従ってスペクトルの形状が変わると、超音波に対する感度や周波数帯域も変化し、計測に不安定な影響を与えると考えられる。

さらに複合材料の疲労試験などのような材料試験は、長時間にわたって超音波センサもしくは AE センサを同じ温度環境に設置しなければならない。そのためセンサには耐久性が必要となる。しかし、今回の検証試験で得られた Figure 2-3 は、PSFBG センサにより作製された RFBG センサの耐久性が良くないということを示している。例えば、Figure 2-3 での時間軸においての 5000 秒から 6500 秒までの間の温度と反射率の変化からわかるように、同じ 1000°C において RFBG を保持しても、その反射率が低下していく傾向が現れた。

以上の問題点を解決できれば、RFBG センサは高温環境下での非破壊検査技術に適用できる有望なセンサとして期待できる。しかし、それらの課題を解決するのは、現時点では困難である。そこで、RFBG の他に、高温環境に直接設置可能な光ファイバ FBG センサに関する技術を考察する。

近年進歩してきたフェムト秒レーザによる加工技術[52]で作製された FBG センサ[40, 53]が、高温環境下で適用可能なセンサとして候補となる。UV 加工がカラーセンター (Color-center) を形成することでガラスの感光性を調整する原理と異なり、フェムト秒レーザによるグレーティングは、非線形の多光子吸収過程と多光子イオン化過程において、ガラス材料の圧縮もしくは欠陥が生じることにより形成される[53]。この方法で作られた FBG は耐熱性に優れる[40]。フェムト秒レーザは、シリコン系のファイバだけではなく、サファイアファイバを加工することも可能である。近年、サファイアファイバに刻まれた FBG は、2000°C までの超高温環境においても使えるという報告もあった。[54]しかし、フェムト秒レーザを用いて位相シフトを有する PSFBG センサを製作した前例がないため、本研究にはその技術を適用することが難しい。

石英ガラスファイバ FBG センサでもサファイアファイバ FBG センサでも、1000°C 以上の高温環境での構造物中の超音波や AE の計測に適用する際、そこまでの耐熱性を有する、ファイバを保護するためのコーティングがないという実用上の問題がある。検証実験においては、現在の汎用のポリイミド被覆は 400°C から酸化し始め、1000°C まで加熱すると溶けて揮発してしまう。しかし、光ファイバが裸になると、石英ガラスファイバでもサファイアファイバでも脆くて、超音波センサを実際に試験片に貼り付ける必要のある一般的な超音波計測手法においては、それらのセンサの取扱いが難しいと考えられる。

FBG 以外に、高温環境下で適用可能な光学系デバイスとして、ファブリーペローが挙げられる。J. Wang[55]はサファイアファイバを用いて 1050°C 環境での温度計測用のファブリーペローを構築することに成功した。しかし、ファブリーペローは AE 計測に用いた先行研究例がない。さらに、D. Grobnic[54]は、同じサファイアファイバで作っても、ファブリー

ーペローと比べ、FBG が耐熱性にはるかに優れると指摘している。そこで、ファブリーペローを本研究に適用することも難しい。

以上の考察により、PSFBG センサを直接高温環境下で設置し、超音波や AE 波を計測するのに数多くの課題が残っている。そこで、次節から、より簡便で的確に PSFBG センサを AE 計測に適用可能な計測構成を提案する。

第 3 章 : 遠隔 AE 計測法

第 2 章では、PSFBG センサを直接高温環境下に設置して AE を計測するのが困難であることを実験によって示した。本章では、PSFBG センサを用いて高温環境における AE を正確に計測するための方法、遠隔 AE 計測法を提案する。

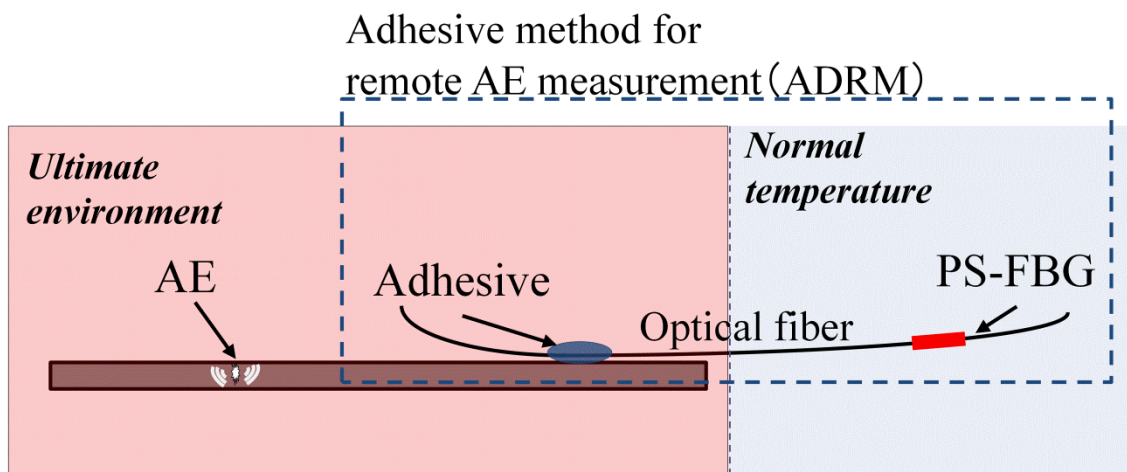


Figure 3-1: Adhesive method for remote AE measurement.

Figure 3-1 に示すように、ここで提案する遠隔 AE 計測法は、石英製光ファイバの一点を試験片に接着して高温環境下に置き、PSFBG センサを常温下に配置する形で、試験片に発生した AE 波を遠隔で計測する方法である。この手法に用いられているセンサの接着方法を遠隔計測用接着法 (Adhesive method for remote measurement: ADRM) と名付ける。ADRM 構成を用いることで、PSFBG センサは高温環境に曝されることがなく、そして、光ファイバは石英ガラス製で 1000°C までの耐熱性を有するため、遠隔 AE 計測法は高温環境下での AE 計測に適用することが期待できる。

遠隔 AE 計測法では、AE 波が光ファイバに沿ってセンサ部まで伝播する。しかし、今まで、超音波のウェーブガイドとして用いる糸状の光ファイバを伝わる超音波の伝播挙動を検討した前例がない。そこで本研究では、ADRM 構成で遠隔で設置された PSFBG センサ

は、金属製の導波棒により設置される PZT センサと異なり、AE 波形を遠隔で正確に計測できることを示す必要がある。

板状の複合材料試験片を伝わる超音波は、ラム波の理論によって解析されることが多い。特に、著者らの先行研究では、そのラム波の物理的な伝播挙動は AE 信号の解析にも適用可能であることを示している。このため、本研究では、遠隔設置構成における PSFBG センサが、ラム波のモード、特に S_0 モードと A_0 モードを正確に計測できるかどうかを実験によって評価する。さらに、FEM 解析を利用し糸状の光ファイバを伝播する波動の特徴を解明することによって、遠隔 AE 計測法の計測原理を明らかにする。

また、AE 波は広帯域にわたって存在する。それを正確に計測するためには、広周波数帯域応答特性を有するセンサが必要となる。そこで、遠隔で設置された PSFBG センサの周波数特性を実験によって調べた。

そして、ADRM 接着構成を用いて遠隔 AE 計測を実現する際には、光ファイバの他に、接着点における接着材の材質や、長さなどの形状も、超音波の伝播に影響を与える可能性がある。その影響をシミュレーションによって調べた。

最後には、CFRP 複合材料の三点曲げ試験中に発生した AE を計測することによって、遠隔 AE 計測法が実際の損傷による AE 信号を計測できることを証明する。この試験においては、ADRM 構成における接着点とセンサとの距離を 50 cm にした。この距離は、材料試験用の小型高温槽に遠隔法を使用可能な距離と考えている。

3.1 光ファイバによる AE 波ウェーブガイドにおける超音波の伝播挙動

始めに、ADRM で設置された PSFBG センサによる超音波計測の特徴を調べるため、Figure 3-2 に示す実験を行った。まず、アルミ板表面にフィルム状の圧電素子である MFC アクチュエータを接着し、一定の中心周波数を持つ 3 周期サインバースト波を励起する。そして、伝播してきたラム波を ADRM 構成と直接的な接着構成とで計測する。

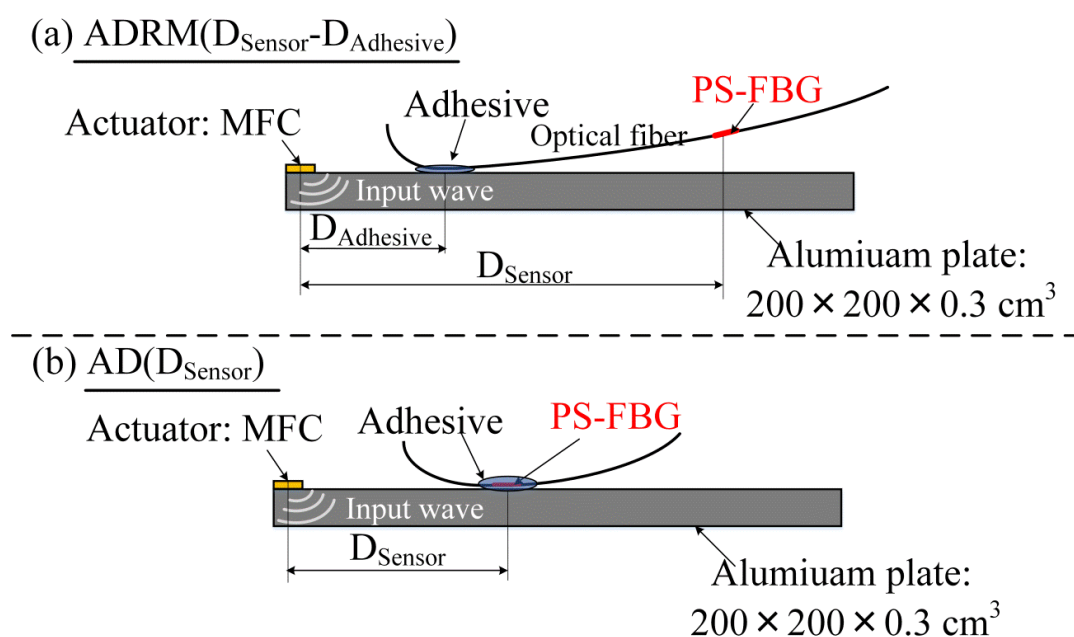


Figure 3-2: Experimental setup: (a) adhesive method for remote measurement (ADRM) and (b) normal adhesive method (AD).

ここで、実験結果を簡便に述べるため、Figure 3-2(a)の「ADRM b-a」は、光ファイバを MFC から a cm 離れた位置で接着し、PS-FBG センサを MFC から b cm 離れた位置に配置していることを表す。そして Figure 3-2 (b)の「AD c」は、センサ部の直接的な接着、つまり MFC から c cm 離れた位置でセンサ部を接着することを表す。本実験では、ADRM40-20、ADRM60-20 と AD20、AD40 の条件で設置した PSFBG センサを第 1 章で紹介したバランスセンシングシステムで復調することによって超音波を計測する。

3.1.1 実験結果

Figure 3-3(a)から(d)までは、それぞれ AD40、AD20 と ADRM40-20、ADRM60-20 の接着条件で、中心周波数が 300 kHz の入力波に対する PSFBG センサの応答を示す。但し、ここでは、それらの波形の時間軸の 0 点をアクチュエータで励起した信号の立ち上がり時刻（つまり、入力信号の開始時刻）にした。そうすることによって、時間軸にはアクチュ

エータからセンサまで伝播してきた超音波の到達時間が示される。さらに、より明確にラム波モードを同定するため、Figure 3-3(a) - (d)に示す時間波形に対して連続的ウェーブレット変換 (Continuous wavelet transform: CWT) を行うことによって、時間-周波数域におけるそれらの超音波の挙動を考察する。Figure 3-3(a) - (d)に対応する、CWT 変換結果をそれぞれ Figure 3-3(e)-(h)に示す。

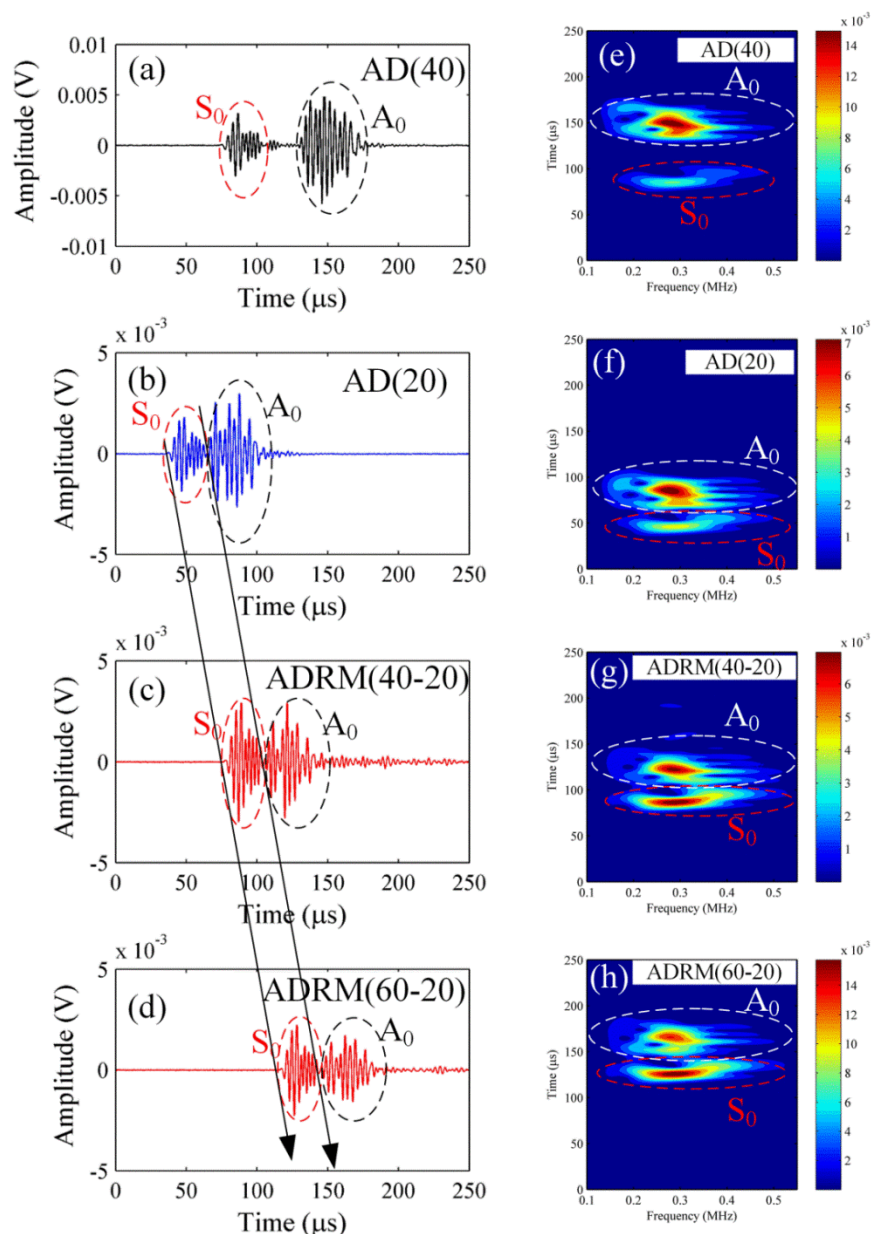


Figure 3-3: Response to the input signal of a three-cycle sinusoidal wave with Hamming window in (a) AD(40), (b) AD(20), (c) ADRM(40-20), and (d) ADRM(60-20). Continuous wavelet transform (CWT) results corresponding to the temporal waveforms in (e) AD(40), (f) AD (20), (g) ADRM(40-20), and (h) ADRM(60-20).

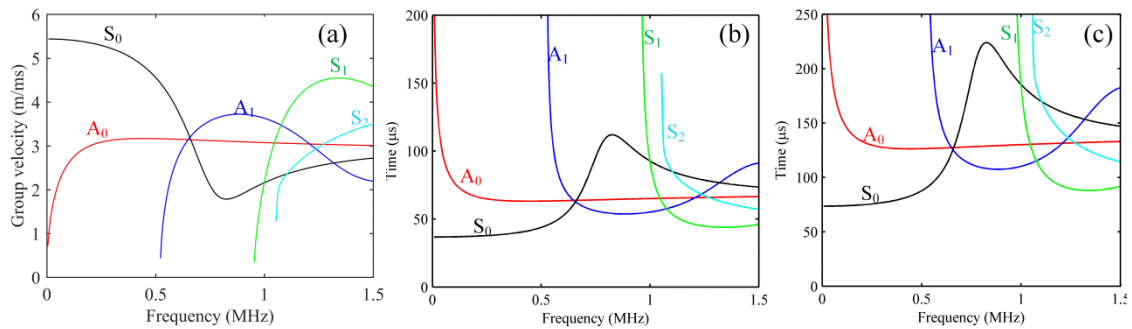


Figure 3-4: Theoretical dispersion curves: (a) group velocity against frequency for modes of Lamb waves in aluminum plate with thickness of 3.4 mm, (b) arrival time against frequency in a propagation distance of 20 cm and (c) in a propagation distance of 40 mm.

Figure 3-3 に示す超音波計測結果において厳密にモードを同定するため、商用ソフトウェア DISPERSE を用いて、Table 3-1 に示すアルミの物性値で厚さ 3 mm の板におけるラム波理論分散曲線を算出した。その結果を Figure 3-4 に示す。ここで、Figure 3-4 (a)は、1.5 MHz までの周波数域における、異なるラム波モードの周波数-群速度理論分散曲線を表す。この結果から、中心周波数 300 kHz 付近には S_0 モードと A_0 モードが存在することが確認できる。しかし、Figure 3-3(e)-(h)の CWT 結果は波形の周波数-到達時間に関する情報を示すため、群速度の理論分散曲線と比較することが難しい。そこで、波動の伝播距離が分かった上で、Figure 3-4(a)に基づき、ラム波のモードの周波数-到達時間理論分散曲線を計算した。ここでは、PSFBG センサの直接的な接着の場合、すなわち AD20 と AD40 構成で得られた受信結果からモードを同定するため、伝播距離をそれぞれ 20 cm と 40 cm にすることによって算出された到達時間の理論分散曲線を、Figure 3-4 (b)と(c)に示す。

この Figure 3-4(b)と(c)に現れたラム波モードの周波数-到達時間の挙動に基づき、AD40 と AD20 の構成で得られた CWT 結果 Figure 3-3 (e)と(f)から S_0 モードと A_0 モードを同定できた。そして、 S_0 モードと A_0 モードは群速度が異なるため、これらの結果には、伝播距離に依存して二つのモードの到達時間差が変化する傾向が現れた。さらに、それらの CWT 結果に見られる到達時間（縦軸）より、AD40 と AD20 に対応する受信波形 Figure 3-3 (a) と Figure 3-3 (b)において、 S_0 モードと A_0 モードを分離できた。

その AD20 に対応する Figure 3-3(b)に現れた S_0 モードと A_0 モードの形状の特徴に基づき、ADRM40-20 と ADRM60-20 の構成で設置した PSFBG センサにより受信された波形、Figure 3-3 (c)、(d)においても、その S_0 モードと A_0 モードに対応する波形成分が存在することを確認できる。そこで CWT 変換結果 Figure 3-3 (f)、(g)と(h)を比較することによって、より明確に 2 つのモードに対応する成分を同定できた。

しかし、Figure 3-3 (b)-(d)において矢印で示しているように、AD20、ADRM40-20 と

ADRM60-20において、 S_0 モードと A_0 モードのそれぞれの到達時間は、光ファイバ中の伝播距離に比例して同じ割合で増加している。つまり、板において異なる群速度を有する S_0 モードと A_0 モードは、光ファイバによる導波路を同じ速度で伝播していることが分かった。従って、ADRM法では、接着点におけるラム波を、正確な波形を保ったまま遠隔で計測できている。ではなぜ、光ファイバ中では全てのモードが同じ速度で伝播しているのか、その理由を明らかにする必要がある。そこで次に、有限要素法解析（Finite element analysis: FEA）を行うことで、そのADRMによる遠隔AE計測法の計測原理を解明する。

3.1.2 シミュレーション

ここでは、実験結果を再現するため、前節の実験セットアップを参照し、Figure 3-5に示す三次元有限要素法モデル（Three-dimensional finite element method model: 3D-FEM model）をLS-DYNAで作成した。このモデルでのx軸、y軸とz軸は、それぞれ板の長さ方向、厚さ方向と幅方向に設定している。そして、そのFEMモデルはソリッド要素を用いて作成した。まず、アルミ板に対応するモデルにおけるソリッド要素の寸法は、 $0.05\text{ cm} \times 0.05\text{ cm} \times 0.05\text{ cm}$ （= $x \times y \times z$ ）である。モデルの要素数を減らすため、実験で使った試験片の実際の寸法とは異なり、長さ方向、厚さ方向と幅方向におけるアルミ板モデルの寸法を、それぞれ30 cm、0.3 cmと5 cmにした。さらに、モデルの両サイドとエッジからの反射を防ぐため、板のz軸とx軸方向の境界条件を無限に設定した。また、MFCアクチュエータ($x \times y \times z = 0.6\text{ cm} \times 0.1\text{ cm} \times 1\text{ cm}$)は、アルミ板と同じくソリッド要素で構成した。そして、LS-DYNAで提供されている熱膨張効果を用いて、MFCの圧電効果を模擬した。

光ファイバは、直径0.15 mmのガラス円柱でモデル化する。この円柱の軸方向はX軸方向に合わせた。そして、この軸方向には、モデルのソリッド要素の寸法を0.05 cmにした。Figure 3-5(a)に示すように、この円柱の断面では、円周方向と直径方向においてそれぞれ24ノードと17ノードに分割している。さらに、ADRM構成をモデル化するために、光ファイバに対応する円柱のモデルを、接着剤に対応する直方体のモデルに埋め込み、その底面をアルミ板に接合した。接着剤モデルの寸法は、 $0.5\text{ cm} \times 0.02\text{ cm} \times 0.1\text{ cm}$ （= $x \times y \times z$ ）である。そのモデルにおけるソリッド要素のサイズは、円柱モデルの要素サイズに合わせて設定した。ここで実験におけるアクチュエータと接着点との距離を再現するため、ADRMの接着点に対応するモデルをMFCに対応するモデルから20 cm離れたところに設置した。このモデル化に使用したアルミ板、ガラス、接着剤の物性値をTable 3-1に示す。

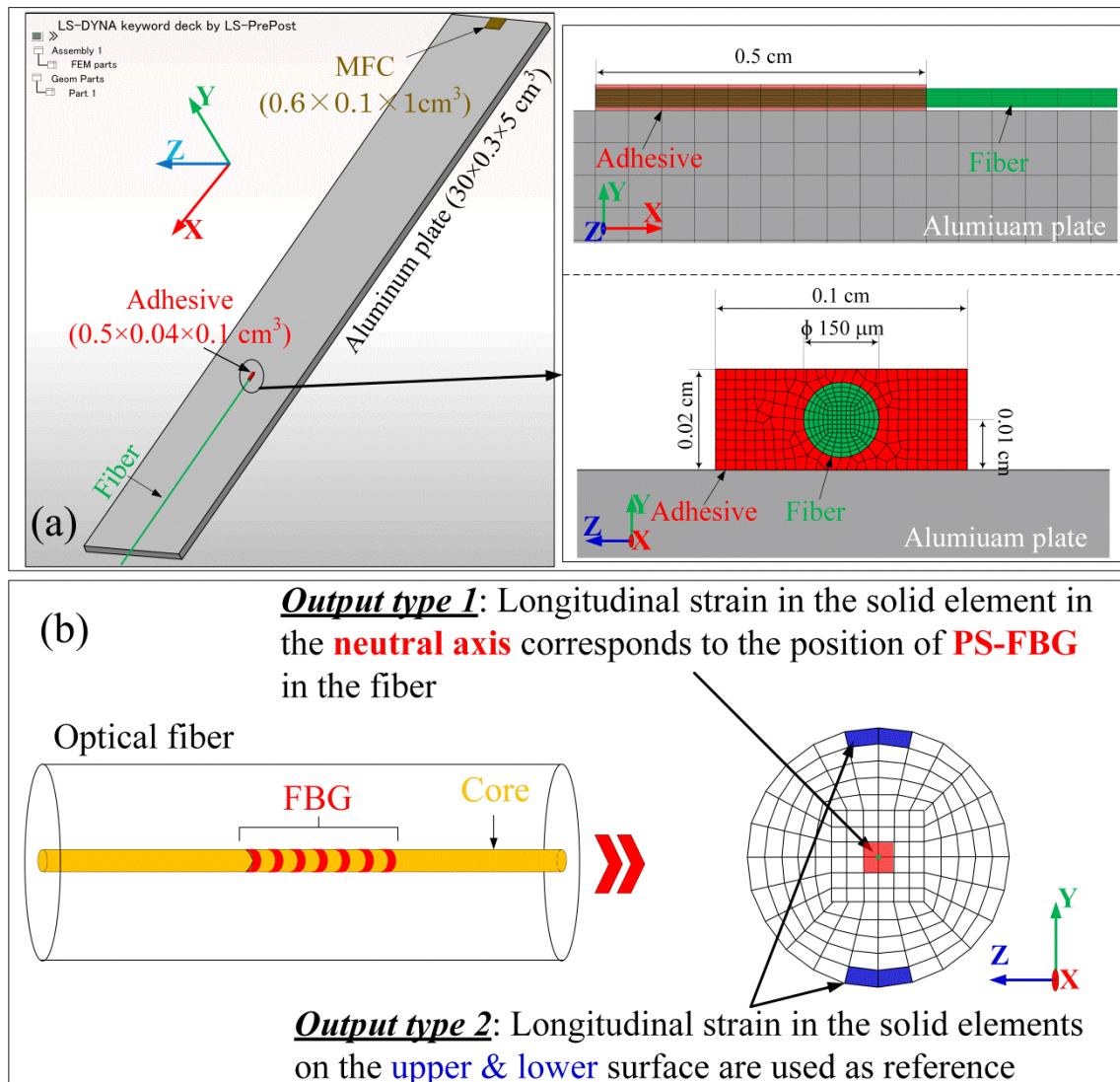


Figure 3-5. (a) 3-D FEM model and (b) outputs in the simulation.

Table 3-1. Mechanical properties used in FEM analysis

| | Aluminum plate | Glass fiber | Adhesive |
|---------------------------------------|----------------|-------------|----------|
| Density ρ (kg m^{-3}) | 2700 | 2200 | 1146 |
| Young's modulus E_x (Gpa) | 70 | 71 | 4.83 |
| Poisson's ratio ν_{xy} | 0.35 | 0.17 | 0.36 |

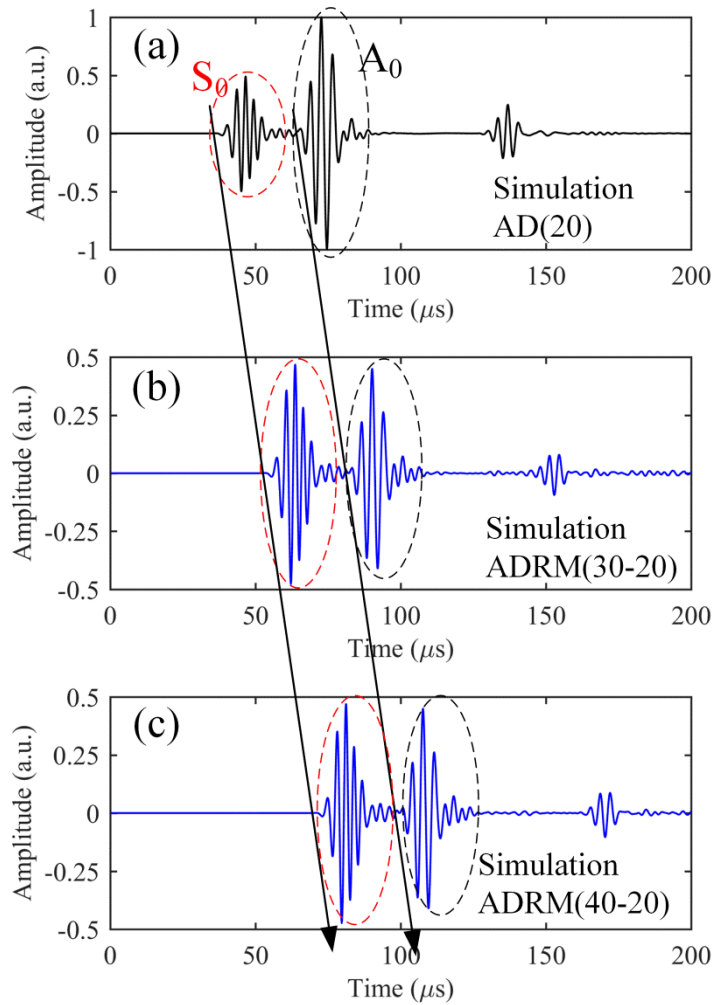


Figure 3-6: Calculation results corresponding to (a) AD(20), (b) ADRM(30-20), and (c) ADRM(40-20).

本数値解析においては、MFCに対応するモデル部を、実験と同じ波形を持つ入力信号で熱膨張・熱収縮させることで、板に加振する。また、PSFBGセンサのグレーティングは光ファイバのコアに存在し、そのコアの直径が0.005 mmであるため、PSFBGセンサは光ファイバの中心軸付近にだけ存在すると考えられる。そして、PSFBGセンサは軸方向ひずみに応答する。以上の理由より、Figure 3-5 (b)に示すように、円柱の中心軸近傍にあるソリッド要素のx軸方向ひずみの変化を、PSFBGによる超音波の受信結果として出力する。

以上の計算により得られた結果をFigure 3-6に示す。まず、Figure 3-6 (a)には、接着剤内部の光ファイバの中心軸付近でのソリッド要素における、ひずみ波形を示す。この要素はAD(20)の接着条件に相当する。次のFigure 3-6 (b)と(c)には、ADRM(30-20)とADRM(40-20)に相当する光ファイバモデル中の要素でのひずみ波形を示す。この3ヶ所での計算結果を比較すると、本シミュレーション結果は実験で観察された現象を良く再現できていることがわかる。つまり、 S_0 モードと A_0 モードに対応する成分は、直接的なセンサ

接着構成においても ADRM によるセンサ遠隔設置においても現れ、なおかつ、2つのモードは糸状の円柱光ファイバを同じ群速度で伝わっている。

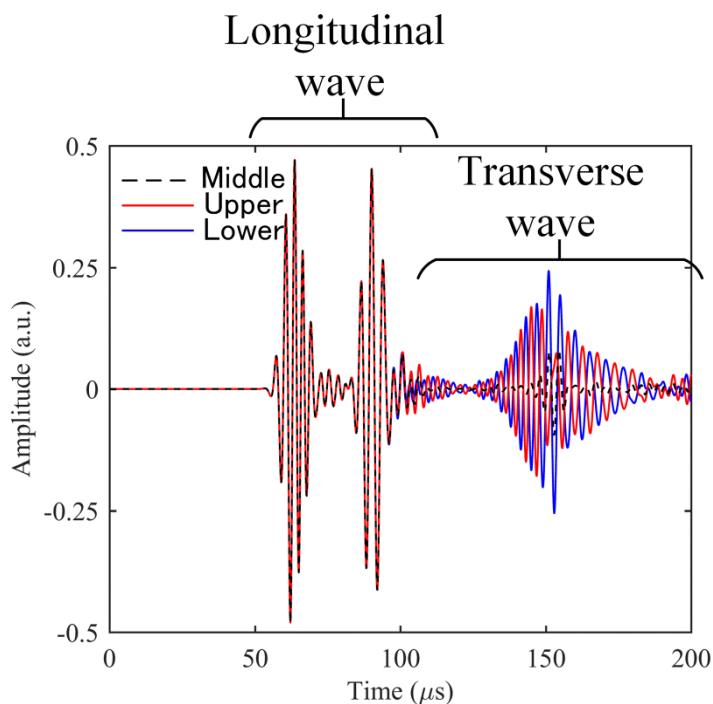


Figure 3-7: Overlap of the outputs of the three calculation results from the solid elements in the condition corresponding to ADRM(30-20).

そこで、この 3D-FEM を用いて、光ファイバ・ウェーブガイドにおける超音波の伝播挙動を考察する。そのために、Figure 3-5(b)に示すように、中心軸近傍のソリッド要素 (Output 1) だけでなく、円柱の外周上での上下対称位置にあるソリッド要素 (Output 2) におけるひずみの変化も比較用に抽出する。ここでは、ADRM(30-20)における中心軸と、外周上の上下端での軸方向ひずみ波形を、重ねて Figure 3-7 に示す。この結果における先頭から 2 個の波束、すなわち 50~110 μs における成分では、3ヶ所での計算結果の位相および振幅が一致しているため、縦波であることがわかる。これに対して、その後に到達する超音波成分は、上下端において逆位相を持つため、横波であると判断される。前半の縦波は断面内全ての位置で同じ軸方向ひずみ成分を持つが、後半の横波は、中心軸における軸方向ひずみ成分が極めて小さい。この理由として、横波における軸方向ひずみは光ファイバの曲げひずみなので、中心軸には発生しないと考えられる。

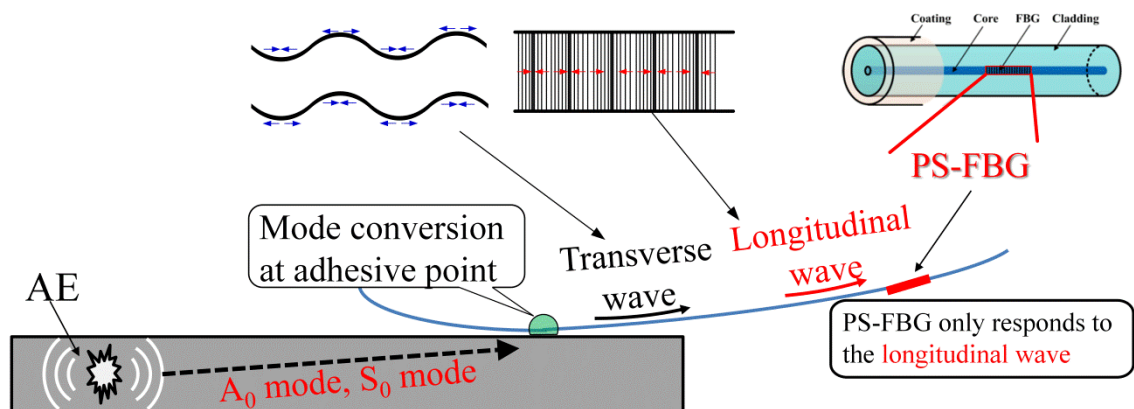


Figure 3-8: Detection property of PS-FBG sensor in the ADRM configuration.

以上の超音波伝播挙動のシミュレーション結果によって解明された遠隔 AE 計測法の計測原理を、Figure 3-8 にまとめる。アルミ板を伝わってきた S_0 モードと A_0 モードは共に、接着点において糸状の光ファイバを伝わる純粋な縦波と横波に変換され伝播する。そして、光ファイバ内に現れる軸方向ひずみ成分は、中心軸上では縦波による成分のみである。つまり、光ファイバの中心軸にある PSFBG センサによって受信されるモードは、光ファイバを伝わる純粋な縦波のみとなる。よって、接着点での S_0 と A_0 を含むラム波は、その波形を保ったまま分散性の無い純粋な縦波として PSFBG センサまで届く。これにより、 S_0 と A_0 が同じ速度で光ファイバを伝わって見える原因が明らかとなった。

以上の数値解析により、糸状の光ファイバを伝わる超音波の伝播挙動を解明することで、本遠隔 AE 計測法の計測原理は、従来の金属製ウェーブガイドとは全く異なる波動伝播挙動に基づいているため、遠隔でも正確に波形を計測できることが明らかとなった。

3.2 ADRM による周波数応答への影響

前節では、ADRM で設置される PSFBG センサは、AE 波に含まれるラム波モードを遠隔でも正確に計測可能であることを明らかにした。本章の実験とシミュレーションでは、300 kHz 付近の超音波波形の特徴を調べてきたが、損傷による AE 信号は広帯域にわたって存在するため、全ての AE 波形を正確に計測するには、広帯域性に優れたセンサが必要となる。構造物に直接接着した PSFBG センサは、広帯域にわたって AE を計測可能であることを、既に検証している。そこで本節では、ADRM 構成における PSFBG センサの周波数応答性を調べる。

本節でも、Figure 3-2 と同一のセットアップで実験を行った。ただし本実験では、MFC アクチュエータを用いて、一定の周波数を持つ連続サイン波で板を伝わる超音波を励起する。そして、伝播してきた超音波を ADRM で設置した PSFBG センサで計測する。ここでは、MFC から 60 cm 離れたところに PS-FBG センサを置き、接着点をそれぞれ MFC から 20 cm と 40 cm 離れたところに設置した ADRM(60-20)と ADRM(60-40)で超音波を受信する。さらに ADRM 構成と比較するために、MFC から 20 cm と 40 cm 離れたところに PS-FBG センサ部を直接接着した AD20 と AD40 による計測結果も用いる。それらの連続サイン波に対する受信結果を電気スペクトラム・アナライザで解析することにより、各周波数における応答感度を調べた。その際、応答感度は、PS-FBG センサでの SN 比を、MFC をセンサに用いて受信した場合の SN 比で割った、相対感度として求めている。

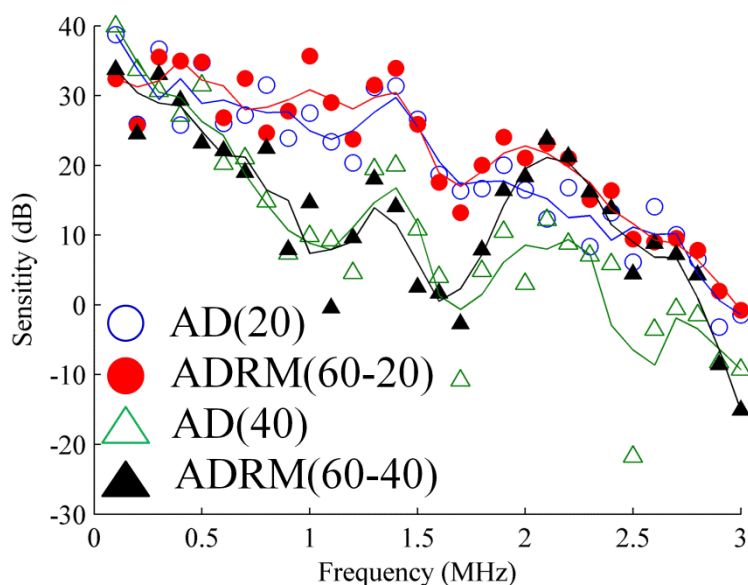


Figure 3-9: Ultrasonic sensitivities.

ここでは、各接着条件で設置された PSFBG センサの、0.1 MHz から 3 MHz までの周波数成分に対する相対感度を、0.1 MHz 間隔で評価した。その結果を Figure 3-9 に示す。まず、AD20 と AD40 の結果を比較することによって、MFC からセンサまでの距離が長くなるに従って PSFBG センサの相対感度が低下することが分かった。その感度の低下は、主に材料中における超音波の減衰により生じたと考えられる。

一方、遠隔設置の ADRM(60-20)は、直接的な設置の AD20 とほぼ同じ傾向で周波数の変化に対して応答することが分かった。よって Figure 3-2 の実験構成を考慮すると、AD20 での結果から評価された周波数応答は、ADRM(60-20)における接着点での応答と等しいと考えられる。つまり、ADRM 構成で設置された PSFBG センサの周波数応答は、その接着点における周波数応答とほぼ同じであることが分かる。その現象は、AD40 と ADRM(60-40)との応答でも確認でき、特に複合材料中の損傷に伴う AE 波の多くが存在する 2 MHz 以下の周波数帯域における応答において顕著である。

従って、ADRM により設置された PS-FBG センサの感度は、発信源から接着点までの距離に強く依存することが明らかとなった。その原因として、3.1 節で示したように、ADRM で設置される PSFBG センサは接着点における超音波を波形を保ったまま受信するため、接着点から超音波発信源までの距離が同じであれば、遠隔設置でも直接的な設置でも、PSFBG センサで計測された信号に含まれる周波数情報もほぼ同じである、ということが挙げられる。しかも、ウェーブガイドに用いた光ファイバ中では波動の減衰が少ないため、PSFBG センサを接着点から遠隔設置しても、超音波はエネルギーをほとんど損失せずに、センサ部まで伝播する。以上より、ADRM 構成は、PSFBG センサの応答周波数特性に対して影響が少ないと考えられる。

3.3 ADRM における接着点の変化による超音波計測への影響

前節において、糸状の光ファイバ・ウェーブガイドは、超音波が接着点から PSFBG センサまで正確に届く理想的な導波ツールであることを証明できた。しかし、ADRM 接着構成を用いて遠隔 AE 計測を実現する際には、光ファイバの他に、接着点における接着材の材質や、長さなどの形状も、超音波の伝播に影響を与える可能性がある。特に、ADRM 接着構成を高温環境に設置する場合には、耐熱性に優れた接着剤を使用する必要があり、そのような接着剤は、常温環境下で使用するシアノアクリレート系瞬間接着剤等と比べて物性値が大きく異なる。それに加え、ADRM 接着構成を施工する際には、接着部の形状を意図的に調整することが難しい。したがって、接着部の長さが超音波計測にどのような影響をもたらすかをあらかじめ調べておく必要がある。そこで本節では、接着剤の物性と接着部の長さを変えながら数値解析シミュレーションを実施することにより、これらが受信波形に及ぼす影響を調べる。

まず始めに、接着点の物性の違いによる影響を調べた。3.1 と 3.2 節での実験では一般的なシアノアクリレート系接着剤を使用していたが、その物性値を正確に把握できていない。そのため、前節のシミュレーションでは、エポキシ系接着剤を使用していると仮定して、接着部にエポキシ樹脂の物性値 (Table 3-1, Adhesive) を与えて計算した。そして本節では、その接着剤の物性のうち、縦波の伝播挙動と強い関係のあるヤング率と密度を変化させる。そのヤング率および密度の設定値を Table 3-2 に示す。ここで、Material 1 が前節で使用したエポキシ系接着剤の物性である。そして、Material 2 はアルミの物性値に相当する。さらに、Material 3 の密度とヤング率は、CFRP 一方向材の密度と繊維方向の縦弾性率に該当する。

Table 3-2 に示す Material 1、2、3 の物性値を、それぞれ、Figure 3-5 に示した FEM モデルの接着部に対応するパートに与えてシミュレーションを実施した。そして、それらの接着モデルで得られた PSFBG による受信波形の計算結果を、Figure 3-10 に示す。これらの計算結果を見ると、接着部の物性値が変わっても、受信波形にはほとんど変化が生じていない。つまり、接着点でのラム波の伝播挙動は、接着剤の物性の変化にほとんど影響を受けないことが分かる。

Table 3-2 Material properties used for adhesive model

| | Material 1 | Material 2 | Material 3 |
|--------------------------------------|------------|------------|------------|
| Density ρ (kg m ⁻³) | 1146 | 2700 | 1146 |
| Young's modulus E_x (Gpa) | 4.83 | 70 | 130 |

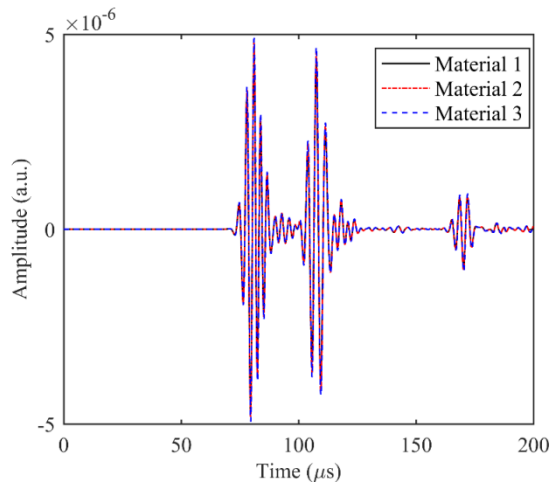


Figure 3-10 Calculation results of the received waves in PSFBG, corresponding to the three kinds of adhesive materials listed in Table 3-2.

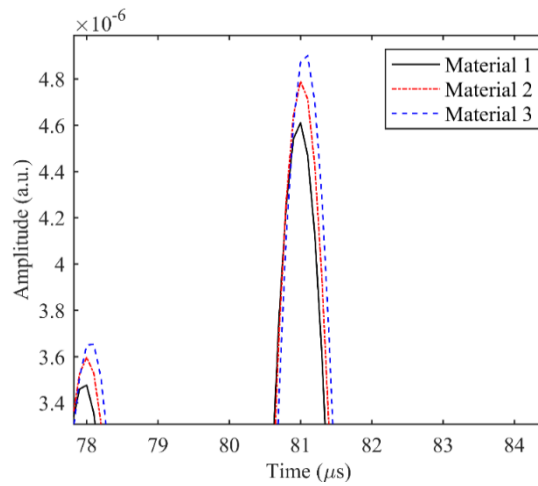


Figure 3-11 Magnification of the waveforms shown in the Figure 3-10 in the time region from 77.8 to 84.3 μs .

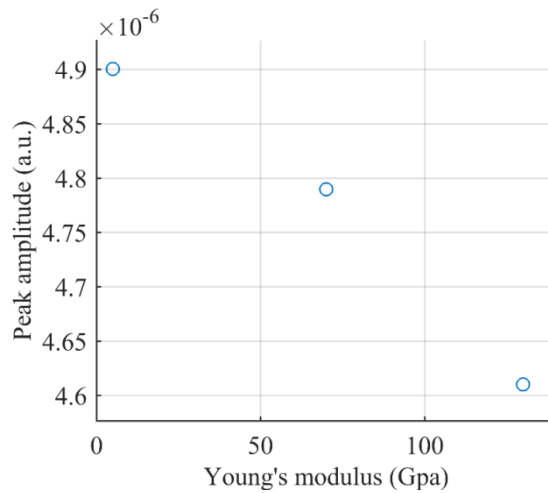


Figure 3-12 Peak amplitudes obtained from the simulation results against Young's modulus of the adhesive materials.

そこで、より詳細に観察するため、それらの波形のピーク振幅値が存在する 77.8 ~ 84.3 μ s の時間領域における波形を拡大して Figure 3-11 に示す。このグラフを見ると、わずかながら、波形の振幅値が変化していることが確認できる。この結果は、接着部の物性に依存して、アルミ板と接着部との界面、および接着部と光ファイバ・ウェーブガイドとの界面における音響インピーダンスに変化が生じたため、アルミ板から光ファイバまでの超音波の透過率に若干の変化が生じたことを示している。そこで、そのピーク振幅の変化を明確にするため、Material 1、2、3 のヤング率を横軸にとり、それらの接着部モデルで得られた波形のピーク振幅値を縦軸にとり、Figure 3-12 にプロットした。この結果から、ヤング率の増大に伴い、ピーク振幅値が低下していることが確認できる。しかし、その変化は非常に小さいため、超音波計測に与える影響も小さいと考えられる。例えば、Material 3 は Material 1 と比べ、ヤング率が約 27 倍増加しているが、その Material 3 の場合のピーク振幅値は Material 1 の場合の結果と比べ、わずか 5.9 % の変化に留まっている。

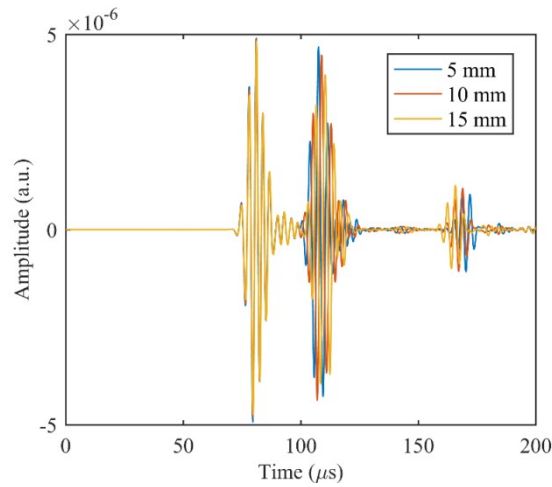


Figure 3-13 Calculation results of the received waves in PSFBG, corresponding to the adhesive lengths of 5, 10 and 15 mm.

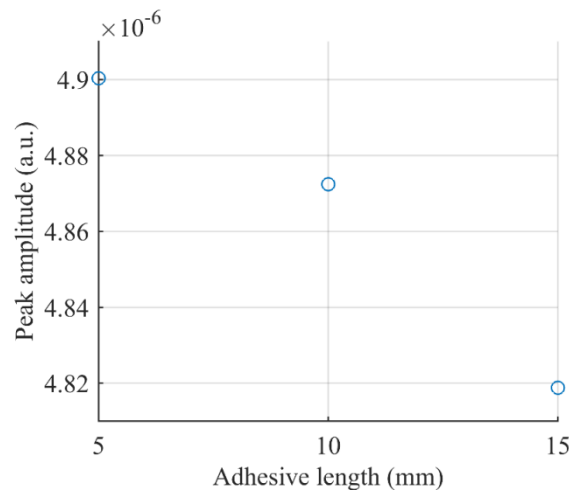


Figure 3-14 Peak amplitudes obtained from the simulation results against adhesive lengths.

次に、接着部の長さが超音波計測に及ぼす影響をシミュレーションによって調べる。3.1節でのシミュレーションでは、接着部の長さを PSFBG のゲージ長に合わせ、5 mm に設定した。そして本節では、接着部の長さの影響を調べるため、Figure 3-5 のモデルにおける接着部の端面と MFC との距離を一定にしたまま、接着部の長さを 10 mm と 15 mm に変えたモデルでシミュレーションを行った。以上の 3 種類の接着部長さにおいて得られた受信結果の計算を Figure 3-13 に示す。これらの結果を見ると、3つの波形の S_0 モードの形状は一致しているが、 A_0 モードは、接着部が長いほど到達時間に若干の遅れが生じている。これは、接着部が長くなるにつれ、接着部の重心が超音波の伝播方向に沿って MFC から離

れることによるものと推察される。特に、 A_0 モードは S_0 モードよりも速度が遅いため、長さの変化に対して到達時間の変化が現れやすい。しかし、その到達時間の遅れはわずかであり、ラム波モードを識別する上ではほとんど問題が無い。

さらに、Figure 3-13 の計算結果から波形のピーク振幅値を抽出して Figure 3-14 にプロットした。この結果から、接着部の長さの増大に伴い、波形のピーク振幅値がわずかに低下していく傾向が見られる。しかしながら、長さが 5 mm から 15 mm に変化した場合でも、そのピーク振幅値の低下はわずか 1.6 % である。よって、接着点の長さも、構造材の板から光ファイバ・ウェーブガイドまで伝わる超音波の透過率に与える影響は極めて少ないと考えられる。

以上のシミュレーション結果より、接着部の物性の変化や形状の変化は、遠隔 AE 計測の信頼性にほとんど影響しないと考えられる。このシミュレーションで得られた結果は、第 4 章の 4.2 節で述べる、超高温耐熱カーボンペーストおよびシアノアクリレート系瞬間接着剤を ADRM 構成に用いた場合の計測結果の比較によっても検証できる。

更に、本節と 3.2 節での実験結果とシミュレーション結果によって、ADRM 接着構成を用いた遠隔 AE 計測法に関わる 2 つの重要な要素、接着点と光ファイバ・ウェーブガイドは、PSFBG センサによる超音波計測にほとんど影響しないことを証明できた。つまり、ADRM によって接着される光ファイバセンサが持つ、感度や受信周波数帯域性といった性能は、本 ADRM 構成センシングの性能そのものとなる。言い換えれば、本研究での遠隔 AE 計測法が広帯域にわたる AE 信号を高感度で計測できるのは、通常の FBG センサよりも高感度と広帯域性に優れた PSFBG バランスセンシングシステムを使用していることによる。

3.4 ADRM による実際の AE 計測

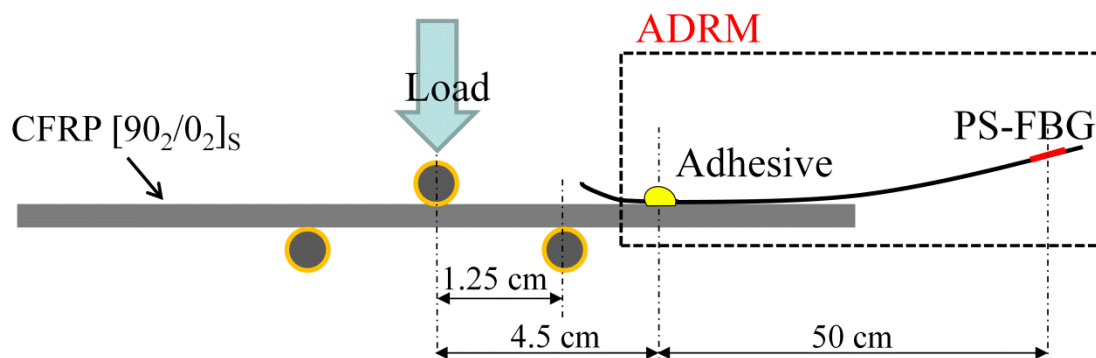


Figure 3-15. Experimental setup in the three-point bending test.

そこでさらに、ADRM 構成を用いて、複合材料中の実際の損傷発生に伴う AE を計測することを試みる。ここでは、積層構成 $[90_2/0_2]_s$ の CFRP 直交積層板に対して三点曲げ試験を実施中に発生した損傷による AE を計測した。この試験片は、T700S/2500 (Toray Inc.) プリプレグを積層することにより作製された。三点曲げ試験のセットアップは Figure 3-15 に示すように、2つの支点が圧子から 1.25 cm 離れた距離で左右対称に設置されている。また、ADRM 構成における接着点と圧子との距離は 4.5 cm に設定した。そして、PSFBG センサは接着点から 50 cm 離れたところに配置した。この接着点とセンサとの距離は、材料試験用の小型高温炉でも遠隔計測が可能な距離である。

三点曲げ試験において計測した 2つの AE 信号波形の例を Figure 3-16(a)と(c)に示す。そして、フーリエ変換によって得られた AE 信号の周波数スペクトルを Figure 3-16(b)と(d)に示す。これらの結果より、ADRM で設置した PSFBG センサは、実際の損傷による AE 信号に対しても、感度良く計測できていることがわかる。

次に、ラム波モードと周波数の特徴から、計測した AE 信号を考察する。一般的な AE 信号では、 S_0 モードは高周波数で先頭に現れるのに対して、その後には到達する A_0 モードは低周波数域に存在する。この AE 信号における S_0 モードと A_0 モードの挙動に基づき、Figure 3-16(a)における 2つのモードを識別できる。これは、ADRM により設置した PSFBG センサで計測した、実際の損傷による AE 信号から、ラム波モードの情報を抽出することが可能であることを示している。

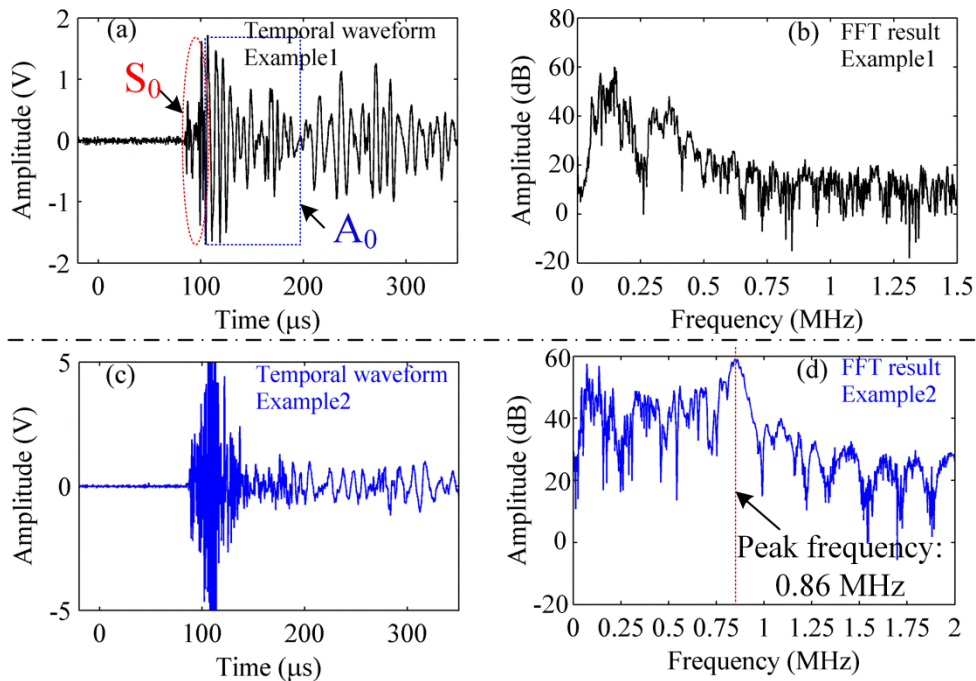


Figure 3-16: AE signals detected during the three-point bending test: Two types of AE temporal waveform were shown in the (a) and (c), and the corresponding FFT results were shown in (b) and (d), respectively.

しかしながら、Figure 3-16(b)に示す AE 信号では、Figure 3-16 (a)と異なるラム波モードの挙動を示している。そこで、Figure 3-16(b)と(d)を比較してみると、2つの信号のピーク周波数の値も異なることが分かる。つまり、Figure 3-16(d)から求めたピーク周波数が 0.86 MHz であるのに対して、Figure 3-16(b)におけるピーク周波数は 0.2 MHz 以下にある。これらのフーリエ変換結果は、PSFBG センサの応答周波数帯域が広いため、AE 信号毎の異なる周波数特性も捉えることが十分可能であることを示している。

このように、ADRM により設置した PS-FBG センサは、AE 計測特性に優れ、AE 波に含まれるラム波モードと周波数の特徴を明確に捉えられる。後の第 5 章において詳細を示すが、AE 信号の物理的特徴は損傷形態によって異なるので、PSFBG センサの優れた AE 計測性能は、AE 計測に基づいて複合材料の内部損傷形態を同定する際に、重要な役割を果たす。

3.5 結論

本章では、まず実験により、ADRM 構成で遠隔設置された PSFBG センサは、光ファイバの接着点における AE 波を遠隔で正確に計測できることが分かった。これは、ADRM の遠隔設置法自体は、PSFBG センサの広帯域応答性といった、AE 計測にとって重要な計測性能に影響を及ぼさないためである。そのため、PSFBG センサは実際に複合材料中に発生した損傷にともなう AE 信号も、正確に計測することができた。

一方、第 1 章で言及したように、金属製の導波棒で設置した PZT 製の AE センサでは、正確に AE 波形を得ることができない。同じ遠隔計測であるのに、なぜ光ファイバを介して遠隔設置した PSFBG センサは正確に AE 波形を得ることができるのかを解明するため、3.1.2 節では、ADRM 構成により接着された PSFBG センサの計測原理を、波動伝播の数値シミュレーションにより調べた。

その結果わかった原因は、下記の通りである。

まず、糸状の光ファイバは、超音波の理想的な伝播経路になるという点である。金属導波棒の場合は、AE 波は棒の内部で干渉しながら伝播するため、棒の端に設置した PZT 製 AE センサにより計測した AE 信号は、複雑なモード変換を経て全く異なった波形になっている。しかしながら、糸状の光ファイバにおける AE 波は、純粋な縦波と横波に変換されて伝播している。しかも、その糸状の光ファイバにおいては超音波の減衰が少ないため、伝播距離が長くても、PSFBG センサは高感度で広帯域に亘って AE 波を受信可能となる。

加えて、光ファイバ・ウェーブガイドの内部におけるセンサの位置も大きく寄与している。PSFBG センサは、光ファイバのコア、つまり中心軸近傍に存在するため、糸を伝わる縦波のみを選択的に受信することになる。その純粋な縦波は分散性がないため、試験片を伝わるラム波モードが、光ファイバの接着点で純粋な縦波に変換された後は、そのままの波形を保って PSFBG センサ部まで届くことができる。しかも、光ファイバの直径が 0.15 mm で、その中心のコアの直径が約 0.005 mm であることを考えると、純粋な縦波と横波が伝播可能な極めて細い糸状の金属導波棒を作製したとしても、その棒の中心軸近傍に集中して設置することが可能な、つまり分散性のない縦波のみを受信可能な PZT センサを導入することができない。

さらに、数値解析によって ADRM 接着構成における接着剤の物性の変化や、接着部の長さなどの形状の変化は、超音波計測にほとんど影響しないことが分かった。そのため、高温環境下に適用可能な接着剤や接着条件が極端に異ならなければ、遠隔 AE 計測法を高温環境で使用する際にも、接着剤の影響は気にしなくて良いと考えられる。

従って、PSFBG センサは PZT センサよりも遠隔計測に適した優れた計測性能を有している。しかも、光ファイバは 1000°C の高温に耐えることができ、耐環境性にも優れているため、ADRM により設置された PSFBG センサは、高温などの特殊環境下での AE 信号も的確に計測できることが期待される。

次の章では、ADRM 構成を用いて、PSFBG センサにより、1000°C以上の高温環境下での超音波及び AE 波を計測することを試みる。

第 4 章：遠隔 AE 計測法による高温環境下での AE 計測

第 3 章では、ADRM 構成で設置する PSFBG センサは、その接着点におけるラム波の挙動を正確に捉えられるといった遠隔 AE 計測法の特徴と、その計測法の計測原理を解明した。それに加え、遠隔 AE 計測構成における、石英ガラス製光ファイバ・ウェーブガイドの耐熱温度は 1000°C であるため、この手法は高温環境下での AE 計測に適用できると考えられる。そこで本章では、実験によって、高温環境における遠隔 AE 計測の適用可能性を検証する。

前章の実験と解析によって、ADRM 構成における光ファイバ・ウェーブガイドは、正確な AE 計測に極めて有効な働きをすることがわかった。そこで 4.1 節では、光ファイバのみを高温環境に配置する形で、ADRM 構成で超音波を計測することによって、1100°C までの温度変化による、超音波の導波路としての光ファイバへの温度の影響を調べる。また、高温環境下での疲労試験などの、材料試験中の損傷検知に遠隔 AE 計測法を適用する場合には、光ファイバはその環境に長時間にわたって設置しなければならないため、高温環境下での耐久性が必要となる。そこで、上記の実験によって、1100°C の環境での耐久性も確かめた。

4.2 節では、実際の AE 計測に近い状態で、遠隔 AE 計測法の高温適用性を検証するため、高温環境下でのアルミナ板に ADRM 構成で PSFBG センサを設置し、シャープペンシルの芯の圧折 (PLB: pencil lead break) により励起する模擬 AE を計測する。

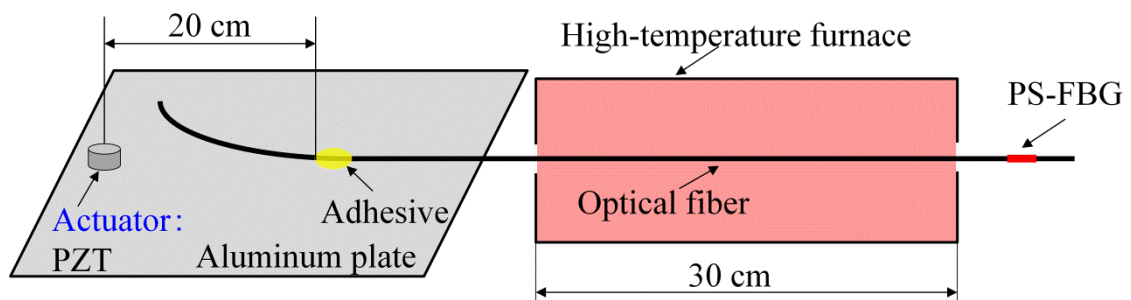


Figure 4-1: Ultrasonic detection using the optical fiber-waveguide in high temperature

4.1 高温環境下での光ファイバ・ウェーブガイド

前章で述べたように、AE 波ウェーブガイドとして用いられている光ファイバは、ADRM 構成による AE 計測にとって重要である。そこで始めに、温度の変化による、光ファイバにおける波動伝播への影響を評価する必要がある。

そこで、Figure 4-1 に示す実験を実施した。この実験では、PSFBG センサは ADRM 構成でアルミ板に設置する。その接着点と PSFBG センサとの距離を約 45 cm にした。超音波に対する PSFBG センサの応答を評価するため、アルミ板にバースト波を励起させるための PZT アクチュエータを接着点から 20 cm 離れたところに設置した。そして、光ファイバのみを、長さ 30 cm の 1200°C まで加熱可能な管状高温炉に通す。アクチュエータと接着点は高温炉の外側に設置することによって、温度変化がアクチュエータ、接着剤にもたらす影響を考慮せずに、光ファイバへの影響だけを評価可能にする。

4.1.1 高温環境での遠隔 AE 計測法の適用可能性

Figure 4-1 に示す高温適用可能性の検証実験では、100°C から 1100°C まで、200°C 間隔で温度を変え、中心周波数が 300 kHz、600 kHz と 900 kHz の入力波に対する、PSFBG センサの応答を調べることによって、温度変化による光ファイバ・ウェーブガイドへの影響を調べる。その結果得られた 3 つの中心周波数に対する応答を、それぞれ Figure 4-2、Figure 4-3、Figure 4-4 に示す。

異なる温度条件下で得られた、同じ中心周波数での受信波形を比較してみると、1100°C まで温度が変化しても、超音波の受信波形はほぼ同じであることが分かった。特に、前章の超音波計測実験の結果を参考にすることで、中心周波数 300 kHz における計測結果から S_0 モードと A_0 モードを明確に同定できた。さらに、同じ中心周波数を持つ超音波への応答に対応するフーリエ変換結果も、各温度条件において同じ周波数分布を持つことが確認できた。

従って、本実験によって、光ファイバは耐熱性に優れ、1100°C までの高温環境においても安定した力学的特性を持つため、温度が変化しても超音波はウェーブガイドを同じ挙動で伝播し、遠隔で設置された PSFBG まで届くことがわかった。

Response to ultrasonic wave with
center frequency of 300 kHz

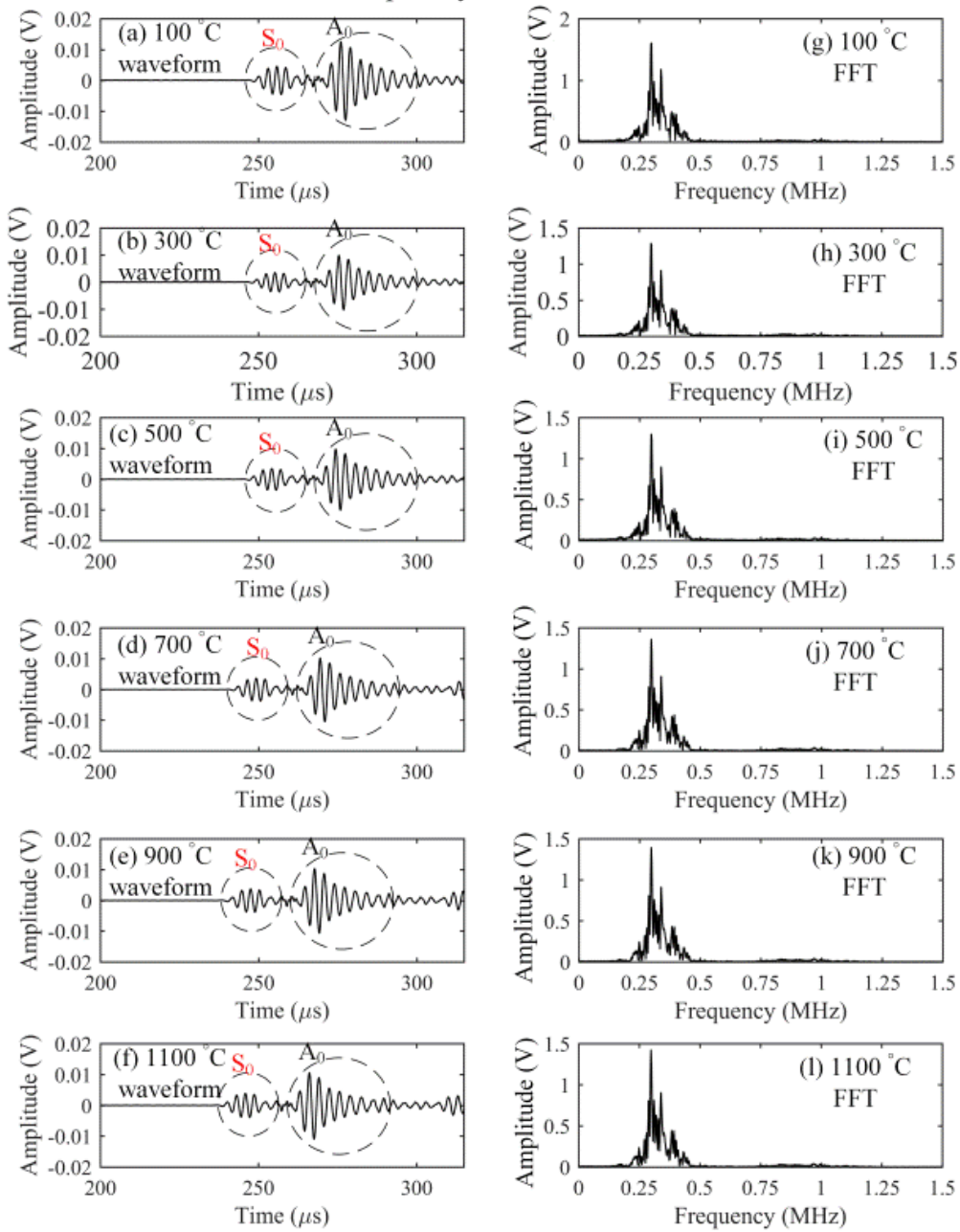


Figure 4-2: Responses to ultrasonic wave with center frequency of 300 kHz

Response to ultrasonic wave with
center frequency of 600 kHz

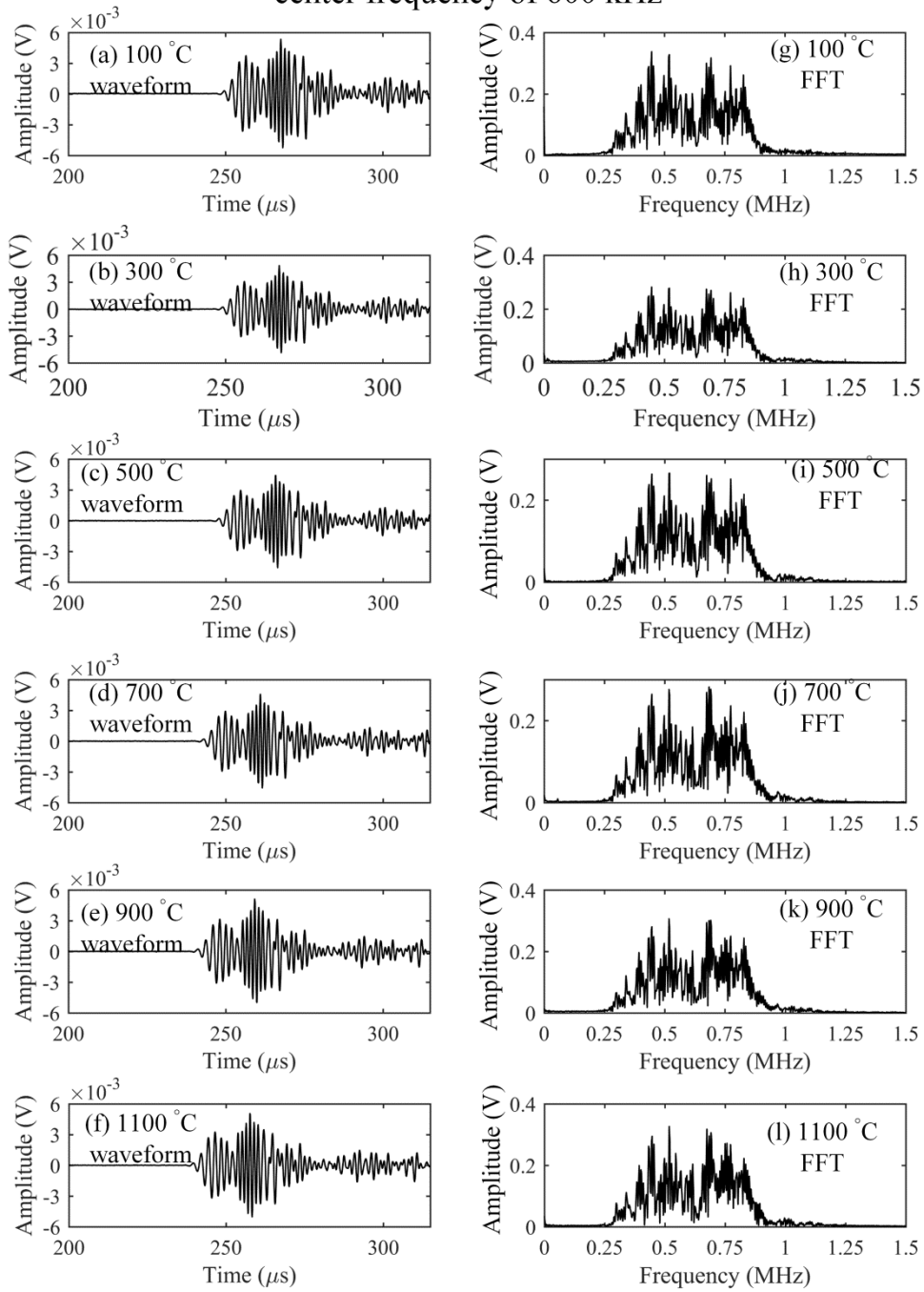


Figure 4-3: Responses to ultrasonic wave with center frequency of 600 kHz

Response to ultrasonic wave with
center frequency of 900 kHz

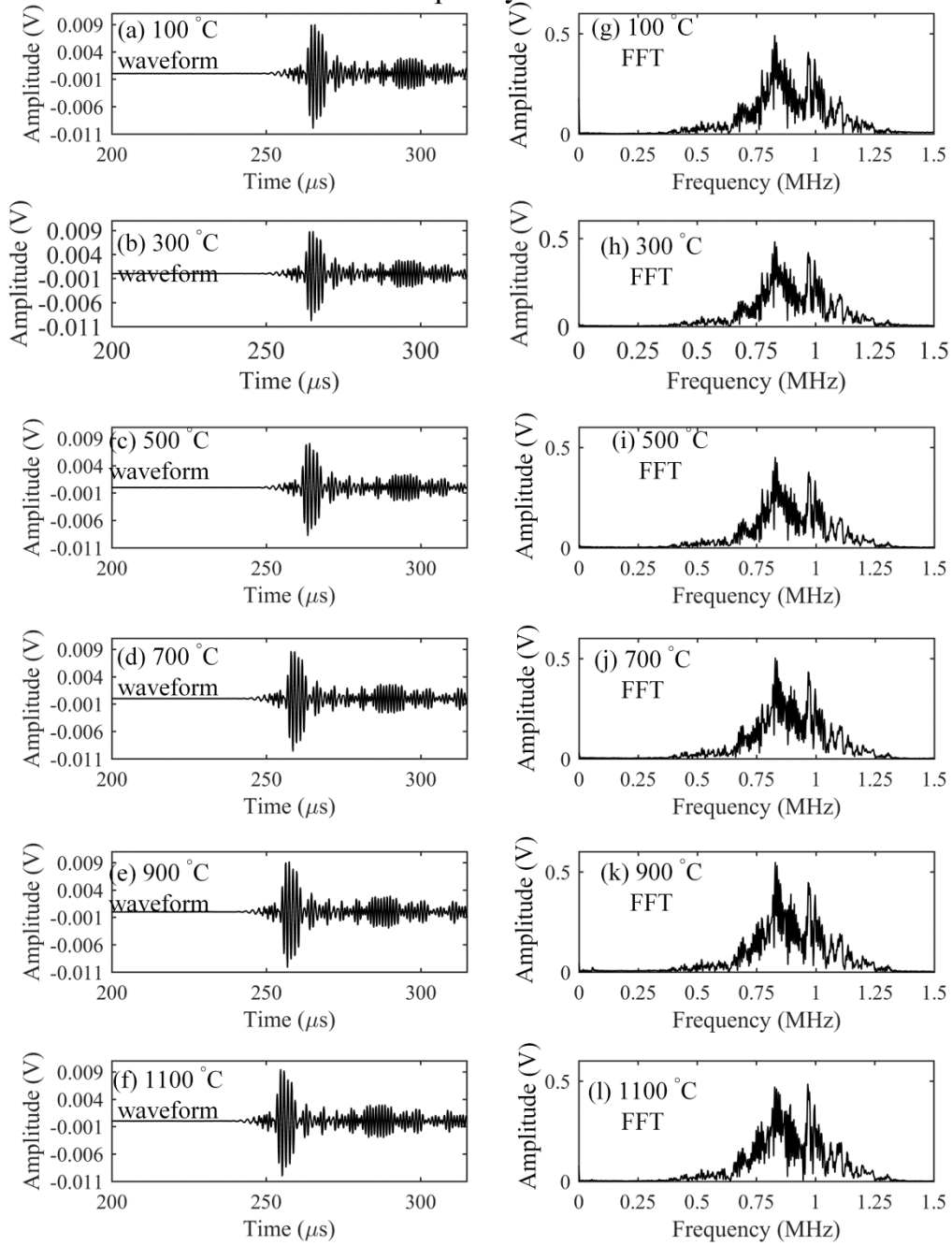


Figure 4-4: Responses to ultrasonic wave with center frequency of 900 kHz

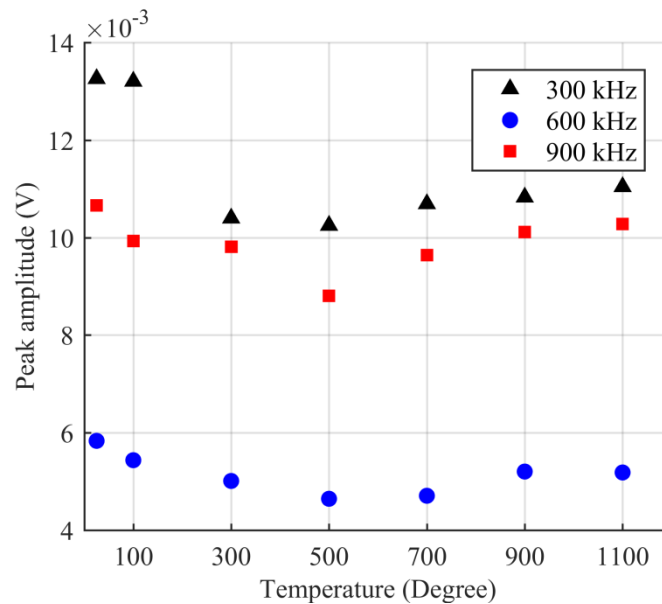


Figure 4-5: Peak amplitude of the waveforms in Figure 4-4

次に、Figure 4-2、4-3、4-4 に示す受信波形におけるピーク振幅値を抽出することによって、光ファイバ・ウェーブガイドを伝播する超音波の振幅の温度による変化を評価してみた。周波数別でまとめた各温度における超音波波形のピーク振幅値を Figure 4-5 に示す。ここでは、参照のため、常温で計測した受信波形での結果も加えた。

この結果から、温度の上昇に従い、計測した波形のピーク振幅値にはわずかな変動が見られる。まず、100°Cから 500°Cまでの間には、3つの周波数成分に対応する結果は、ピーク振幅値は温度の増大に従って徐々に弱くなる傾向を示す。一方、700°Cから 1100°Cまでの温度範囲においては、そのピーク振幅値は少し回復してくる傾向が見られる。

石英ガラスは 1000°Cまで性質が安定しているため、100°Cから 500°Cまでの間の温度変化により生じたピーク振幅値の減衰は、主に光ファイバのポリイミドコーティングと関係すると考えられる。1100°Cの実験が終了した後、高温炉に設置した光ファイバを引き出して確認してみると、ポリイミドコーティングが既に熱エネルギーによって分解されていることが分かった。つまり、ガラスファイバが露出している状態になっていた。そして、ポリイミドの熱分解温度は 500°Cであるため、この温度付近まで加熱していく間に、ポリイミドコーティングが徐々に変質すると考えられる。これは、500°Cにおいて各周波数でのピーク振幅値が一番低くなった原因であると考えられる。さらに、500°C以降はポリイミドが分解し始め、900 もしくは 1100°Cまでになると、コーティングが完全に分解され、光ファイバは裸のガラスファイバになる。このため、Figure 4-5 に示すように、光ファイバを伝わる超音波のピーク振幅値が、少しずつ回復してくる傾向が現れたのではないかと考えられる。

さらに、ポリイミド被覆は熱膨張係数が非常に小さい上に薄いため、被覆の熱膨張によ

るガラスファイバの力学特性への影響は小さいと考えられる。このため、被覆の分解過程は、PSFBG センサが受信する、ガラスファイバにおける縦波の伝播挙動に影響しにくい。従って、温度の変化によって信号の強度が少し変動しても、その受信波形自体は全く同じであったと考えられる。

4.1.2 高温環境での遠隔 AE 計測法の耐久性

次に、高温環境下で光ファイバをウェーブガイドとして用いる際の耐久性を調べるため、上記の実験から引き続き、光ファイバを 1100°C の高温環境において長時間保持し、一定の時間間隔で超音波を計測した。

ここでは、1100°C になってから、0.5、1、3、6、7、8 時間後に、300 kHz、600 kHz、900 kHz の中心周波数を持つ超音波を計測した。そして、前節と同じように、受信波形の形状、周波数分布、ピーク振幅値を考察することによって耐久性を評価する。

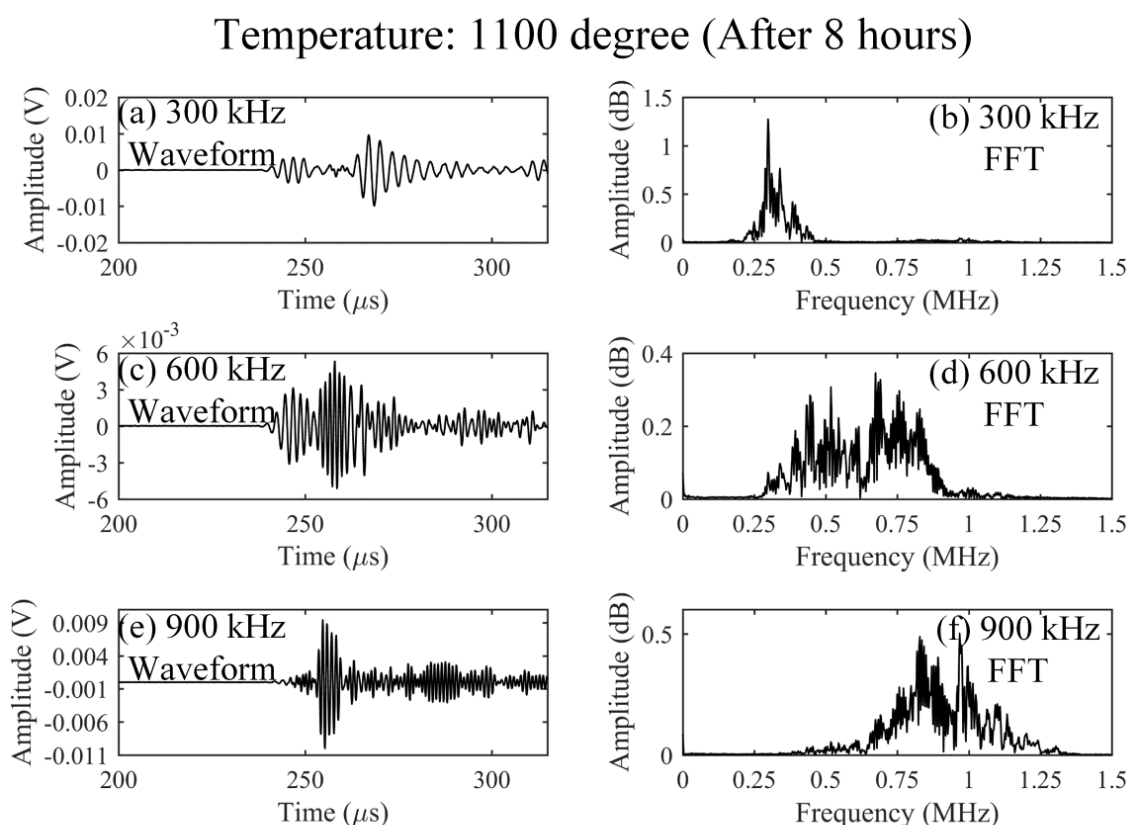


Figure 4-6: Ultrasonic detections at the temperature of 1100 degree with a duration time of 8 hours.

各時刻での受信波形を比較したところ、各周波数成分において、受信波形がほぼ同じであったため、8時間後の受信波形のみを例として Figure 4-6 に示す。Figure 4-2~5 に示す波形と比較すると、1100°Cの高温環境においては、8時間がたっても受信波形が同じであることが分かった。特に、300 kHz 成分において、S₀モードとA₀モードの挙動が全く変わっていない。この現象は、波形のフーリエ変換に示される周波数分布でも確認できる。

この実験結果により、光ファイバは超音波の導波路として、1100°Cの環境下で8時間保持しても安定した力学的特性を保ち、超音波の伝播挙動に影響を与えないことがわかった。

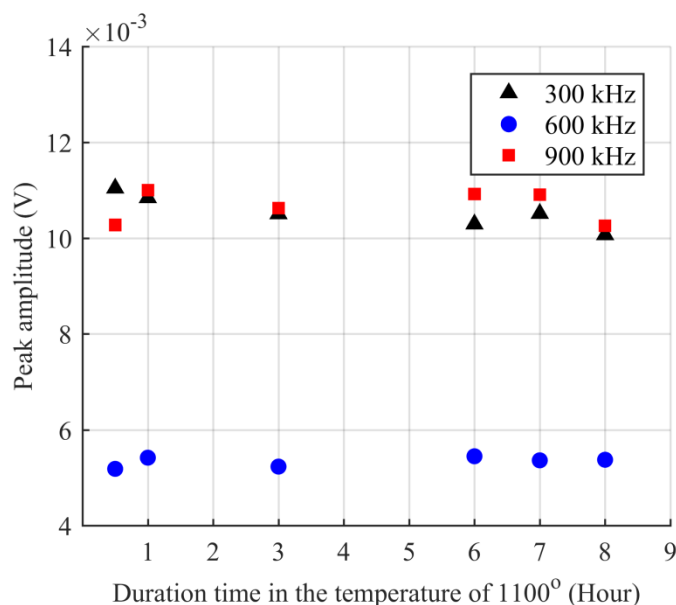


Figure 4-7: Maximum amplitude of the ultrasonic waveforms detected in the experiment to evaluate durability of optical fiber based waveguide under the temperature of 1100°C.

さらに、各時刻に計測した受信波形からピーク振幅値を抽出し、周波数別にまとめた結果を Figure 4-7 に示す。Figure 4-5 と異なり、この結果では、ピーク振幅値の変動が極めて小さく、同じ 1100°C環境においては8時間がたってもウェーブガイドを伝わる超音波の強さがほぼ同じであることが分かった。これは、1100°Cになると、ポリイミドが完全に分解され、ガラスファイバのみの状態では、超音波の伝播挙動に影響を与えないためであると考えられる。

従って、光ファイバは、高温環境下での耐久性に優れると考えられる。そこで、ADRM構成で設置する PSFBG センサは、長時間にわたる高温環境での材料試験における AE 計測にも適用することが十分可能であると考えられる。

4.2 高温環境下での模擬 AE 信号の計測

前節においては、光ファイバのみを高温炉に設置し、PZT アクチュエータから発信した超音波を計測した。本節では、実際の AE 計測により近い状態で、ADRM 構成を用いた遠隔 AE 計測法の高温適用可能性を検証する。Figure 4-8 に示すように、耐熱性のアルミナ板に ADRM 構成で PSFBG センサを設置し、その板を管状高温炉に配置して、その板の高温炉から出ている部分で PLB によって励起した模擬 AE 信号を計測する。

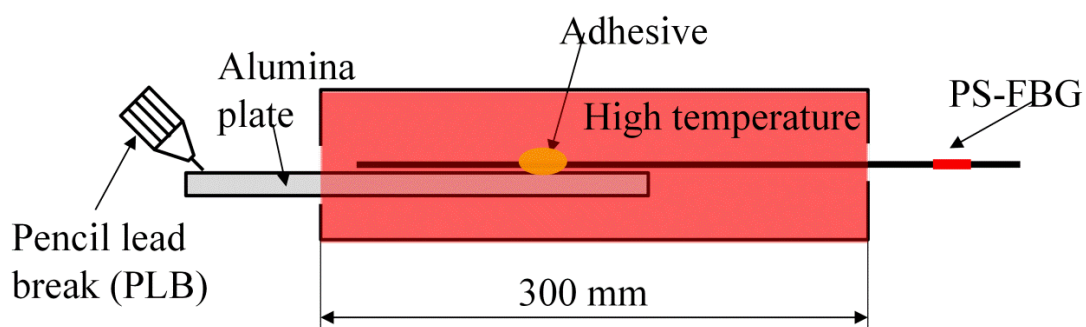


Figure 4-8: Experiment for detecting the simulated AE signals generated using PLB

4.2.1 高温用接着剤

これまでの超音波や AE 計測の実験では、接着点は常温環境下に位置していたため、通常のコシアクリレート系瞬間接着剤を使用した。しかし、高温環境下での模擬 AE 計測実験では、接着点を高温炉に設置するため、2000°Cまでの耐熱性を有するある種の接着剤(共同研究上の守秘義務でその接着剤の型番に関する情報を省略する)を用いた。

第3章の3.3節では、数値解析によって接着点における接着剤の材料材質と長さの変化による超音波への影響を評価した。そのシミュレーション結果によって、超音波計測は接着点の変化にほとんど影響を受けないことが分かった。その結果を検証するため、まず、その高温用接着剤を ADRM 接着構成に用いて、予備の超音波計測を実施した。この実験では、前章の Figure 3-2 に示す実験セットアップのように、この接着剤と一般的な接着剤を適用した ADRM30-10 構成でアクチュエータから発振する一定周波数を持つ連続 Sin 波を受信し、各周波数に対する応答を評価した。ここでは、PSFBG センサの受信波形から SN 比を求めた結果を Figure 4-9 に示す。この評価結果から、耐熱性接着剤を用いた ADRM 構成は、一般的な接着剤を用いた ADRM 構成と同じ応答性能で、超音波を受信できることが分かった。

次に、本実験では、100°Cから 1000°Cまで、100°Cずつ高温炉の温度を上げながら、各温度における PSFBG センサのスペクトルと、PLB により励起した模擬 AE 信号を計測する。

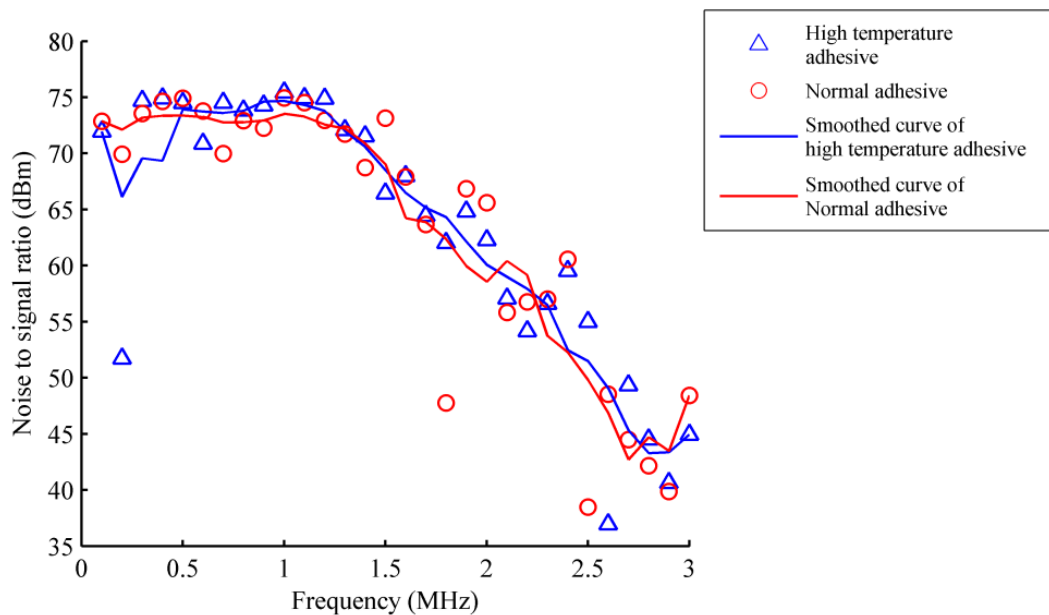


Figure 4-9: Influence of the high temperature adhesive on the ADRM

4.2.2 AE 計測の実験

始めに、チューナブルレーザの波長掃引により計測した PSFBG センサの光スペクトルを Figure 4-10 に示す。この結果より、ADRM 構成における PSFBG センサは、常温環境に設置するため、第 2 章で紹介した RFBG センサと異なり、1000°C になってもそのスペクトルが変化しないことが確認できた。但し、Figure 4-10 では、PSFBG センサの中央ピークがシフトしているように見える。しかし、そのシフトの量は、高温炉内の温度変化に依存しないため、高温炉による影響ではなく、PSFBG センサが設置されている常温環境での温度変化による影響であると考えられる。

次に、100°C から 1000°C までの各温度において、PLB により励起した模擬 AE 信号に対する応答を Figure 4-11 に示す。この結果から、各温度条件で計測した AE 信号はほぼ同じ電圧信号レベルを保つことが確認できた。アクチュエータによる超音波発振と異なり、模擬 AE 発信源は不安定であるため、形状が全く一致した AE 信号を取得することが難しいが、Figure 4-11 に示す、各温度条件での信号から、定性的に S_0 モードと A_0 モードを確認することができた。

従って、ADRM 構成によって常温環境下に設置された PSFBG センサは、1000°C までの高温環境下での AE 信号に含まれる、ラム波モードの特徴を正確に計測することが十分可能であると考えられる。

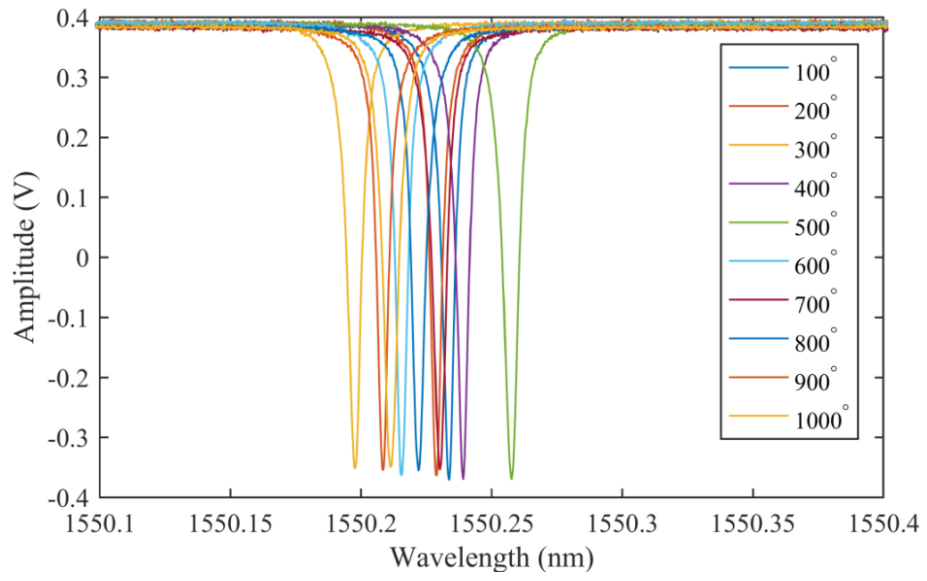


Figure 4-10: Spectrum of PSFBG in high temperature environment

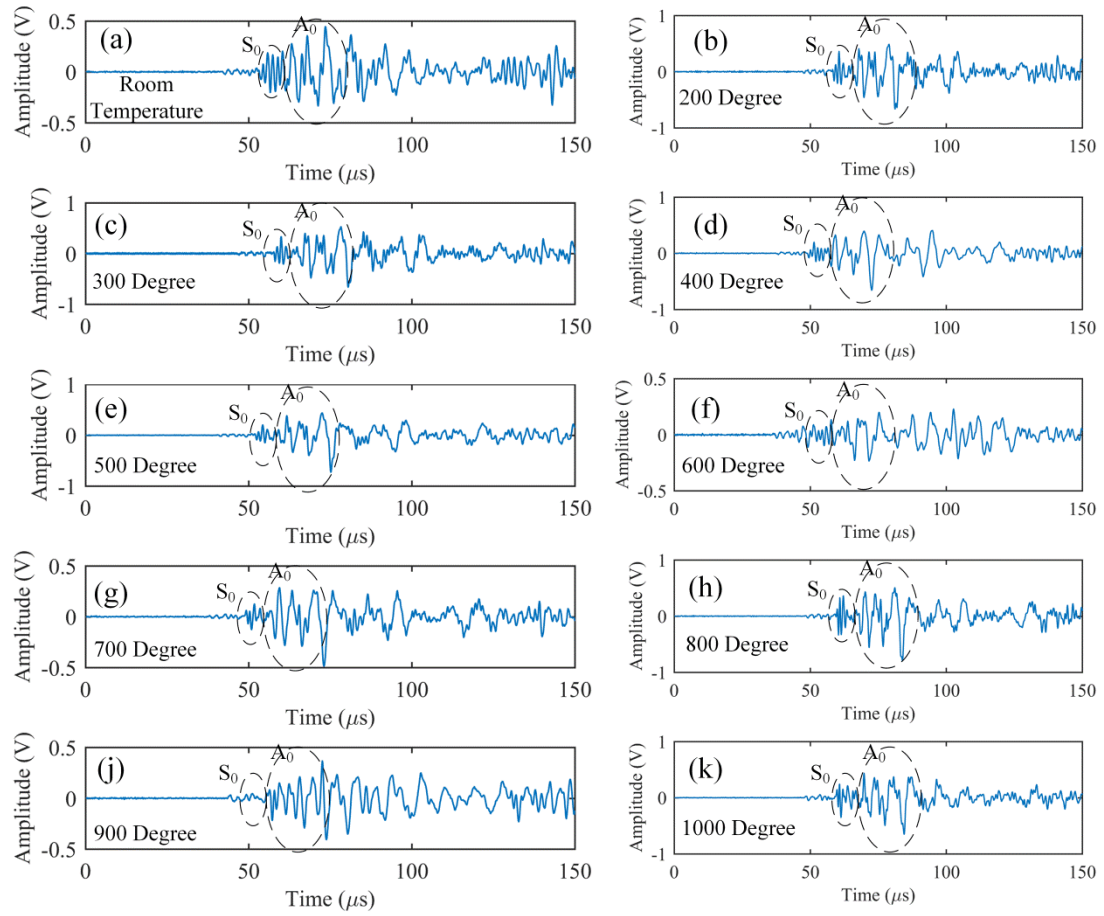


Figure 4-11: Response of PSFBG sensor in the ADRM configuration to the simulated AE at different high temperatures.

4.3 まとめ

以上の実験結果によって、石英ガラス製光ファイバは、AE 波の導波路として 1000℃までの高温環境に設置しても安定した力学的特性を持つため、ADRM 構成を用いて、1000℃の環境における模擬 AE 計測に成功した。

これに加え、ガラスファイバは、熱環境における耐久性にも優れるため、長時間にわたって設置しても安定した性質を保持され続けられると考えられる。

従って、本研究で提案した遠隔 AE 計測法は、高温環境下での複合材料の内部損傷進展挙動を評価するための有効な非破壊検査手法として期待できる。

第 5 章：遠隔 AE 計測法による $[90_2/0_2]_s$ CFRP クロスプライ積層板中の損傷形態の同定

前章までは、遠隔 AE 計測法の計測性能と特徴を評価し、その方法を用いて高温環境下での AE 信号を計測してきた。本研究では、遠隔で設置する PSFBG センサを用いて単に AE 信号を検知することだけではなく、より高次の機能を実現することも目標としている。複合材料の AE 計測分野においては、一番重要な機能として複合材料における内部損傷形態の同定が挙げられる。そこで、本章では、遠隔 AE 計測法で計測した AE 信号から、 $[90_2/0_2]_s$ 積層構成を持つ CFRP クロスプライ積層板における内部損傷形態を、的確に同定するための方法を確立することを試みる。

5.1 序言

現在、AE 計測に基づく、複合材料の内部損傷形態の同定手法として、AE パラメータ法、ピーク周波数をはじめとする単独パラメータによる損傷形態の同定法、Modal AE 解析法、といった 3 つの手法が挙げられる。それらの手法を紹介した上で、PSFBG センサによる AE 計測に適した方法について考える。

5.1.1 AE 計測を用いた損傷形態の同定法

AE パラメータ法は、複合材料の AE 計測において、良く用いられている損傷形態の同定法である。これは、AE 信号から抽出した、カウント数、立ち上がり時間、ピーク振幅値などの AE パラメータに対して、機械学習のような統計的な処理手法で分析を行うことにより、一定の特徴を有するデータ群を特定の損傷形態による AE のパターンとして推測する手法である。この方法は、CFRP や CMC などの複合材料に対する材料試験中に発生した大量な AE データを、一括して簡便に処理可能である [56, 57]。しかし、AE パラメータ法により分類された AE を特定の損傷形態に結び付ける過程は、物理的に解釈・検証することが難しい。そのため、この手法により得られた同定結果は、物理的な裏付けが弱い。

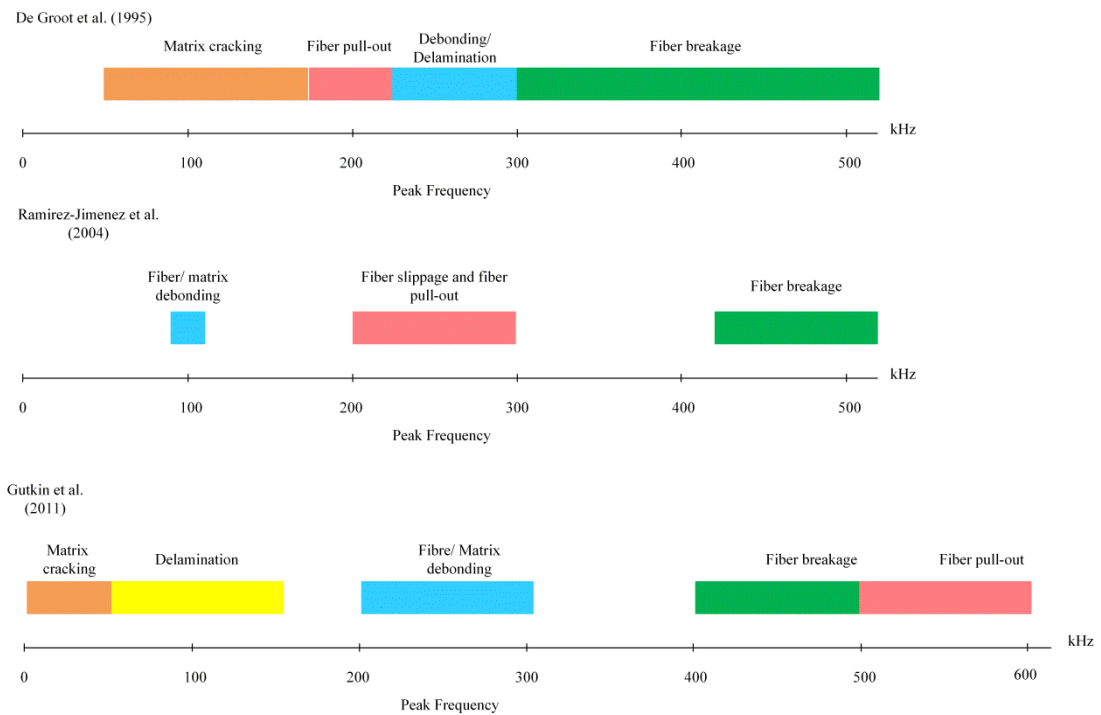


Figure 5-1: Frequency ranges defined in de Groot et al.[58], Ramirez-Jimenez et al. [59]and Gutkin et al[60].

AE パラメータ法では、通常、複数の情動的パラメータが用いられるが、ピーク周波数をはじめとする、AE 信号に含まれている物理的パラメータを単独で利用することによって損傷形態を同定する手法もある。このような方法では、トランスバースクラック、層間剥離や繊維破断などの損傷が AE 発信源として AE 波を励起する際には、同じ損傷形態による AE 信号が一定の周波数範囲において支配的に存在すると推測されている。そこで、ピーク周波数といったパラメータを用いて AE 信号の周波数特徴を定量的に評価することによって、複合材料の内部損傷形態を同定する。ピーク周波数による損傷形態の同定が提案される前までは、AE 信号のピーク振幅値やエネルギーなどを単独パラメータとして、損傷形態の同定に用いられることが試みられていた[61, 62]が、同じ発信源により励起される AE 信号でも、これらの特徴量は波動の伝播距離に依存して変化するため、正確な同定結果を得ることが困難であった[60]。一方で、AE 信号の周波数の特徴は、AE 波の伝播距離に依存しない[63]ため、AE 信号のピーク周波数を用いることによって、一般性のある損傷形態の同定手法の構築が期待されていた。De Groot et al. [58]は、初めてピーク周波数による損傷形態の同定手法を提案した。この先行研究では、トランスバースクラックのみを発生させる、繊維直交方向の試験片の引張試験や、層間剥離のみを発生させる、Double cantilever beam (DCB)試験などを行うことによって、その特定の損傷による AE 信号のピーク周波数が調べられた。その後、Ramirez-Jimenez et al. [59]は、異なるピーク周波数を有する AE 信号が発生した時刻における荷重の情報を考慮することによって、損傷形態をより明確に

同定することを試みた。さらに、R. Gutkin et al. [60]は、AE パラメータ法と一緒に用いることによって、異なる損傷による AE の周波数の特徴をまとめた。しかし、一般性を求める手法として研究されていたものの、Figure 5-1 に示すように、以上の先行研究で得られた各損傷による AE 信号のピーク周波数の範囲を示す同定結果には、それぞれ異なる部分がある。

このような不一致の要因として、PZT センサの広帯域性などの計測的特性や、CFRP 材料の材質、積層構成などが異なることによって、同じ損傷形態でも発生の仕方が異なることが挙げられる。そこで、より安定した同定結果を得るためには、ピーク周波数と AE 信号との物理的関係を解明しなければならない。つまり、ピーク周波数の相違に基づいて AE 信号を分類するための、物理的根拠を明確にすることが重要であると考えられる。しかし、現在、ピーク周波数は主に AE 信号のフーリエ変換により抽出されており、そのフーリエ変換の結果から AE 波の伝播挙動を正確に考察することが難しい。

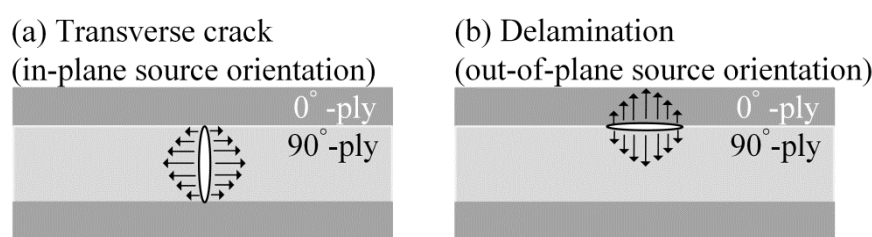


Figure 5-2: Schematic illustration of (a) in-plane AE source orientation caused by transverse crack and (b) out-of-plane AE source orientation caused by delamination

一方、3番目の損傷形態の同定手法、Modal AE (MAE) 法は、ラム波理論に基づき AE 信号を解析することによって、その信号に対応する発信源、すなわち損傷の形態を同定する。具体的には、板状の試験片を伝わる AE 波に含まれる、ラム波の基本対称モード (S_0 モード) と基本非対称モード (A_0 モード) を観察し、それらのモードの伝播挙動と損傷形態との関連性を導く。そして、その物理的関連性を踏まえ、損傷形態を同定する。Gorman and Prosser[64]は、シャープペンシルの芯が折れること (Pencil lead break: PLB) により励起された模擬 AE 信号を利用して、発信源の方向性が基本モードに影響を与える現象を発見した。それを踏まえ、Surgeon and Wevers[65]と Mizutani et al.[66]は、トランスバースクラックと層間剥離が、発信源として、異なる AE 波の励起方向性を持つことに基づき (Figure 5-2)、 $[0_2/90_2]_s$ におけるトランスバースクラックと層間剥離による AE 信号の物理的特徴を解明し、2つの損傷を同定できた。Johnson and Gudmundson [67]は、ラム波の対称性と非対称性を利用し、試験片の上下面の同じ位置に広帯域性 PZT センサを設置することで、多種類の構成の CFRP 積層板において、損傷による AE 波から比較的厳密に S_0 モードと A_0 モードを抽出することによって、異なる AE 信号に含まれるモードの特徴をまとめた。Scholey JJ et al. [68]は、試験片の両側とエッジ端の反射などの影響を抑えることで、

AE 信号に含まれる S_0 モードと A_0 モードを明確に観察するため、サイズの大きな試験片を用いて、引張試験で発生させたトランスバースクラックと層間剥離を同定できた。さらに、時間波形に対して、ウェーブレット変換[63, 69]で解析を行うことによって、過渡的な波である AE 波を時間・周波数域で調べることで、 S_0 モードと A_0 モードに関する情報をより明確に捉えることが可能となった。そして、MAE 法は弾性波の伝播の観点から AE 波を解析するので、FEM による数値解析[70-72]も、AE 波に含まれるラム波モードの伝播挙動と損傷形態との関連性を考察するための有効なツールとなる。従って、MAE 法は、AE パラメータ法やピーク周波数による損傷形態の同定法と比べ、同定結果の物理的信頼性に優れる。

しかしながら、今までの MAE 法を損傷形態の同定に適用する際には、AE 信号毎の波形を調べなければならないため、効率の面で問題点がある。そして、非破壊検査用の PZT-AE センサは周波数に依存して、試験片との界面での、AE 波に伴って生じるひずみ、変位、加速度、速度の複数の物理量に応答するため、AE 信号から S_0 モードと A_0 モードの情報を定量的に抽出するのが困難である。以上の問題が存在するため、MAE 法は、他の 2 種類の同定手法と比べ、実用面で遅れている。

以上、3 種類の同定手法とその現状を紹介してきた。Table 1 にまとめたように、それらの方法は、それぞれ長所と短所を持つ。それらの特徴と PSFBG センサの計測特性を考慮した上で、本研究に最適する手法を選ばなければならない。

Table 1. 損傷形態の同定手法とその特徴

| | メリット | デメリット |
|--------------|--|--|
| AE パラメータ法 | 大量のデータを一括して処理できる簡便な手法 | 物理的信頼性がない |
| ピーク周波数による同定法 | 単独パラメータで処理の手間が少ない、簡便な手法 | ①ピーク周波数変化の物理的根拠が解明されていない ②結果の再現性が低い |
| MAE 法 | ①波動の物理的挙動に基づくため、同定結果の信頼性が良い。 ②FEM 解析をはじめとする数値解析で同定結果を検証可能 | ①効率が悪い ②PZT センサにより、正確な AE 波形を検知することが難しい |

5.1.2 光ファイバ PSFBG センサに適する同定手法

一般的な FBG センシングシステムは感度が低いため、現在、そのセンサを用いた AE 計測に関する研究では、主に AE 計測への適用性を検証するだけで、損傷形態の同定などの高次な機能を実現することができていない。そのため、参考できる先行文献は限られている。

本研究で用いる PSFBG バランスドセンシングシステムが開発されてから、初めて光ファ

イバ FBG 系のセンサが、AE 信号に対して、PZT センサ並みの高感度を持つようになった。著者ら[73, 74]は、PSFBG センサを用いて、CFRP 積層板の引張試験や三点曲げ試験で発生させた、実際の内部損傷による AE 信号を計測することに成功し、より高次の機能を実現することを試みている。

第 1 章で述べたように、PSFBG センサは、純粋な軸方向ひずみに応答するという計測上の特徴を持つ。つまり、複数の物理量が混在して計測される PZT センサと比べ、PSFBG センサにより計測した AE 信号には、ラム波の物理的特徴がより明確に現れることが期待できる。それに加えて、PSFBG センサは、広帯域性にも優れる。さらに、PSFBG センサは指向性を有するため、短冊試験片の両側面からの反射による影響を受けにくい。以上の理由で、5.1.1 節で紹介した、物理的根拠に基づき損傷形態を同定する MAE 法は、PSFBG センサによる AE 計測に適用することによって、異なる損傷による AE 信号に含まれるラム波モードの特徴を正確に解明し、よりの確に損傷形態を同定することが期待できている。

そこで、著者らの先行研究[34]では、模擬 AE 信号を用いた実験によって、PZT センサで計測した AE 信号と同じように、PSFBG センサで計測した AE 信号に現れるラム波モードの挙動は、発信源の方向性に関することを証明した。この発信源に関する実験結果を踏まえ、 $[0_2/90_2]_s$ における内部損傷形態、すなわち、内部の 90° 層において発生したトランスバースクラックと、 0° 層と 90° 層との界面において発生した層間剥離による AE 信号を識別できた。この先行研究では、MAE 法の効率性を改善するため、E/F 比というパラメータで S_0 モードと A_0 モードの振幅の関係を定量的に評価することによって、大量な AE データから損傷形態を同定することを試みた。この先行研究での E/F 比は、AE 波形中の A_0 モードのピーク振幅値に対する S_0 モードのピーク振幅値の比である。しかし、これだけを単独なパラメータとして利用したため、明確に損傷形態を同定することが困難であった。

そこで、本研究では、E/F に加え、それ以外の物理的特徴量を利用することで、より明確な損傷形態の同定手法を確立することを試みる。2 つの物理的パラメータを利用することによって、損傷形態の同定をより明確に実施することが可能になると考えている。それと共に、AE パラメータ法のように、その 2 つのパラメータにより構成される 2 次元データをパターン認識法で分析することによって、簡便に大量なデータから異なる物理的特徴を有する AE 信号を同定可能にすることも期待できる。つまり、MAE 手法の本来の物理的信頼性を失わずに、処理効率が低いという欠点を補う手法を確立する。

ここでは、波動伝播の重要な情報として、ピーク周波数に着目した。その理由は、まず、本章で紹介したように、ピーク周波数は既に単独パラメータとして損傷形態の同定に用いられている。さらに、PSFBG センサが PZT センサより広帯域性に優れるため、このセンサを用いることで、異なる損傷形態による AE 信号のピーク周波数の特徴を正確に評価することが期待できる。

しかし、E/F 比は、実際に AE 波に含まれるラム波モードと関係する、つまり物理的意味を有するパラメータであることに対して、ピーク周波数を用いて AE 信号を同定するための

物理的根拠がまだ解明されていないという問題点がある。そこで本研究では、的確に損傷形態を同定するためには、ピーク周波数の変化とラム波モードの挙動との関係を解明する。

ここでは、今まで提案してきた遠隔 AE 計測法を用いて、上記で考えた損傷形態の同定手法を確立することを試みる。5.3 節では、異なる損傷形態、トランスバースクラック、層間剥離と繊維破断による AE 信号においての、ラム波モードと周波数の特徴を明確にするため、CFRP クロスプライ積層板の三点曲げ試験で発生したその 3 種類の損傷形態による AE 信号を計測する。そして、E/F 比とピーク周波数を用いてラム波モードと周波数の特徴を定量的に評価する。さらに、5.4 節では、AE イベントをその 2 つのパラメータにより構成される 2 次元データとして表現し、それらのデータに機械学習の手法を適用することによって、一括して大量の AE 信号を同定する方法を述べる。5.5 節では、AE 波伝播の FEM 解析によって同定結果を考察する。

5.2 実験方法

5.2.1 AE 計測システム

PSFBG センサで計測した AE 電気信号は、プリアンプ (MISTRAS, 0/2/4) により増幅され AE データ収集システム (Physical Acoustics, PCI-2) に計測・保存される。このシステムのサンプリングレートは 10 MHz に設定した。遠隔設置された PSFBG センサとの比較のため、0.3MHz から 1.5MHz までの広帯域性 PZT センサ (NF Co. AE-900M) も用いた。

5.2.2 供試体

供試体は、T700S/2500 (Toray Inc.) プリプレグにより製造した。ここでは、三点曲げ試験において、トランスバースクラックを最初に発生させるため、90°層を外側に配置した、 $[90_2/0_2]_S$ クロスプライ構成の CFRP 積層板をホットプレスで製作した。材料試験で発生した損傷を観察するため、試験片の側端面を鏡面研磨した。一方向材の物性値を用いて理論的に計算した積層板全体の力学的特性を Table 5-2 にまとめた。この物性値は、FEM 解析に使用される。

Table 5-2: Mechanical properties of $[90_2/0_2]_S$ laminates

| E_{11} (GPa) | E_{22} (GPa) | E_{33} (GPa) | G_{12} (GPa) | G_{23} (GPa) | G_{31} (GPa) | ρ (kg/m ³) |
|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|--------------------------------|
| 69.3 | 10 | 69.3 | 3.4 | 3.4 | 4.8 | 1530 |
| ν_{21} | ν_{31} | ν_{32} | | | | |
| 0.067 | 0.036 | 0.4643 | | | | |

5.3 異なる損傷形態による AE 信号の特徴

Figure 5-3 に示す試験構成で、 $[90_2/0_2]_S$ 試験片 ($L \times W \times H = 180 \times 20 \times 1.2 \text{ mm}^3$) の三点曲げ試験を実施した。PSFBG センサは ADRM 構成により遠隔設置した。光ファイバの接着点は圧子から 50 mm 離れた位置に設定した。接着点と PSFBG センサとの距離は 200 mm である。

更に、超音波を受信する時、PSFBG センサは指向性を有する。その指向性は ADRM 接着構成においても変わらないと考えられる。つまり、PSFBG センサは光ファイバの軸方向に沿って伝わってきた超音波を高感度で計測する。そして、 $[90_2/0_2]_S$ 積層構成の板において発生するトランスバースクラックにより励起した AE は、試験片の長手方向に伝播することを予想できる。そこで、その AE 波を感度良く計測するため、糸状の光ファイバ・ウェーブガイドは、クーポン試験片の長手方向、すなわち $[90_2/0_2]_S$ における 0° 層の繊維方向に平行に設置する。

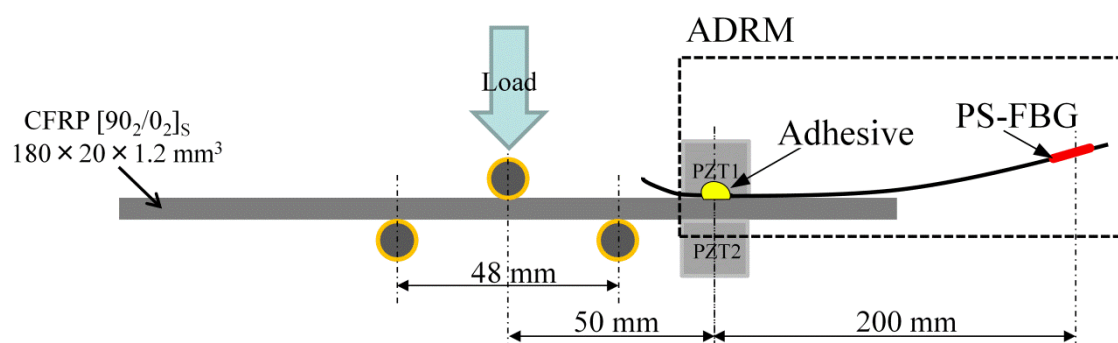


Figure 5-3: Experimental setup of the three-point bending test

さらに、PSFBG センサで計測した AE 信号から分離するラム波モードをより厳密に検証するため、2 個の PZT センサを、試験片の上下面の同じ位置に対称に設置する。そうすることによって、ラム波の対称性と非対称性を分離でき、 S_0 モードと A_0 モードを同定することが可能となる。前章までの研究で判明したように、遠隔で設置した PSFBG センサは接着点におけるラム波の挙動を計測するので、その PZT センサペアを ADRM の光ファイバ接着点の近傍に設置した。

さらに、ここでは、圧子と試験片との摩擦によるノイズ信号を除くため、PSFBG センサと PZT センサが接続された AE データ収集システムの各チャンネルの閾値をそれぞれ 75 と 55 dB に設定した。そして、明確に S_0 モードと A_0 モードを観察するため、後処理として、すべての AE 信号に 150 kHz から 2 MHz までのバンドフィルターを掛けた。

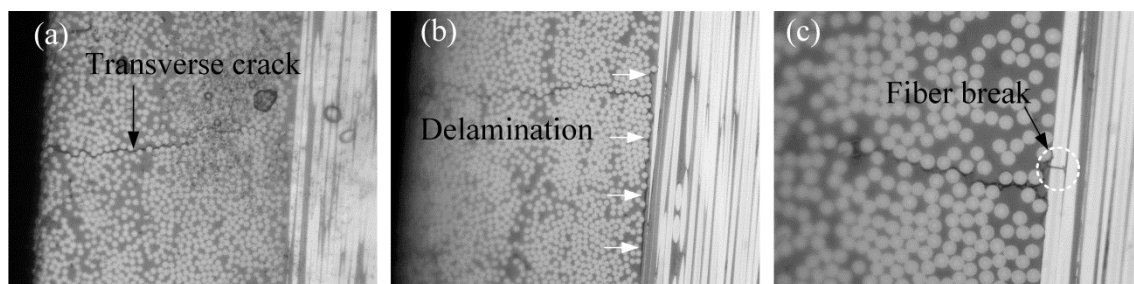


Figure 5-4: Typical damage types occurring in the three-point bending test.

三点曲げ試験を実施することによって、トランスバースクラック、層間剥離、繊維破断の3種類の損傷形態を発生させた。端面から観察された、その3種類の損傷形態の例をFigure 5-4に示す。そして、本研究では、これらの損傷形態によるAE信号を同定することを目的とする。

三点曲げ試験における負荷の初期段階では、AE信号が計測される度に、除荷して試験片を試験機から取外し、顕微鏡で側面を観察することにより、各AE信号に対応する損傷を特定した。これにより得られた、AE信号の計測例を通じて、ラム波モードと損傷形態との関係性を明確にする。

5.3.1 各損傷によるAE信号のラム波モードの特徴

[90₂/0₂]_sの外側の90°層において発生したトランスバースクラックによるAE信号をFigure 5-5に示す。Figure 5-5(a)と(b)は、それぞれ遠隔で設置されたPSFBGセンサと、PZTセンサペアによる応答である。始めに、Figure 5-5(b)を参照し、PSFBGセンサで計測したAE信号からS₀モードとA₀モードを分離した。まず、S₀モードとA₀モードの伝播の特徴を見ると、Figure 5-5(b)においての前半の波形は同位相を有するため、S₀モードと判断された。その後、到達する成分は、逆位相を有するため、A₀モードと判断された。PZTセンサペアはADRMにおいての接着点付近に設置しているため、PSFBGセンサで計測したAE信号に含まれている成分がその接着点でのS₀モードとA₀モードに対応すると考え、Figure 5-5(a)からモードを分離した。

そのモードの挙動をより明確にするため、連続ウェーブレット変換(CWT)を用いて、時間-周波数域におけるAE波の挙動を観察する。Figure 5-5(a)と(b)の波形結果に対応するCWT結果をFigure 5-6(a)と(b)に示す。そして、上下面に設置したPZTセンサペアで計測した信号から、それぞれ足し引きすることにより、対称モードと非対称モードを分離した。その結果をFigure 5-6(c)と(d)に示す。これらの結果を参照し、Figure 5-6(a)と(b)の、片面のみに設置したPS-FBGとPZTでの計測結果においても、S₀モードとA₀モードがより厳密に特定できる。

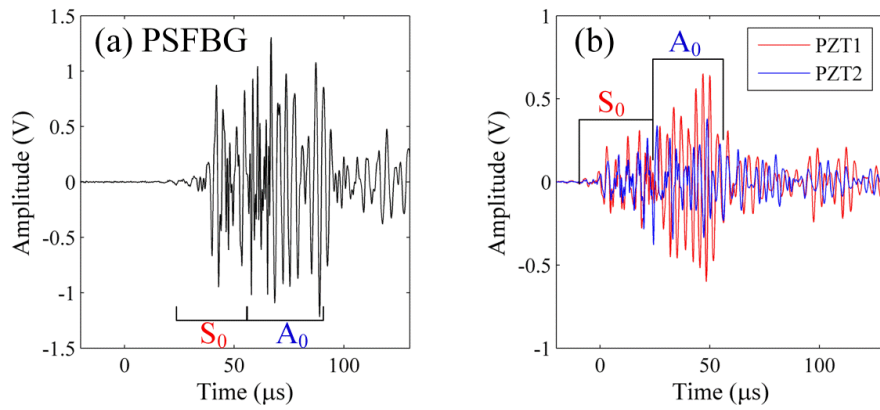


Figure 5-5: Response of (a) PSFBG sensor and (b) PZT sensor to AE generated by the transverse crack.

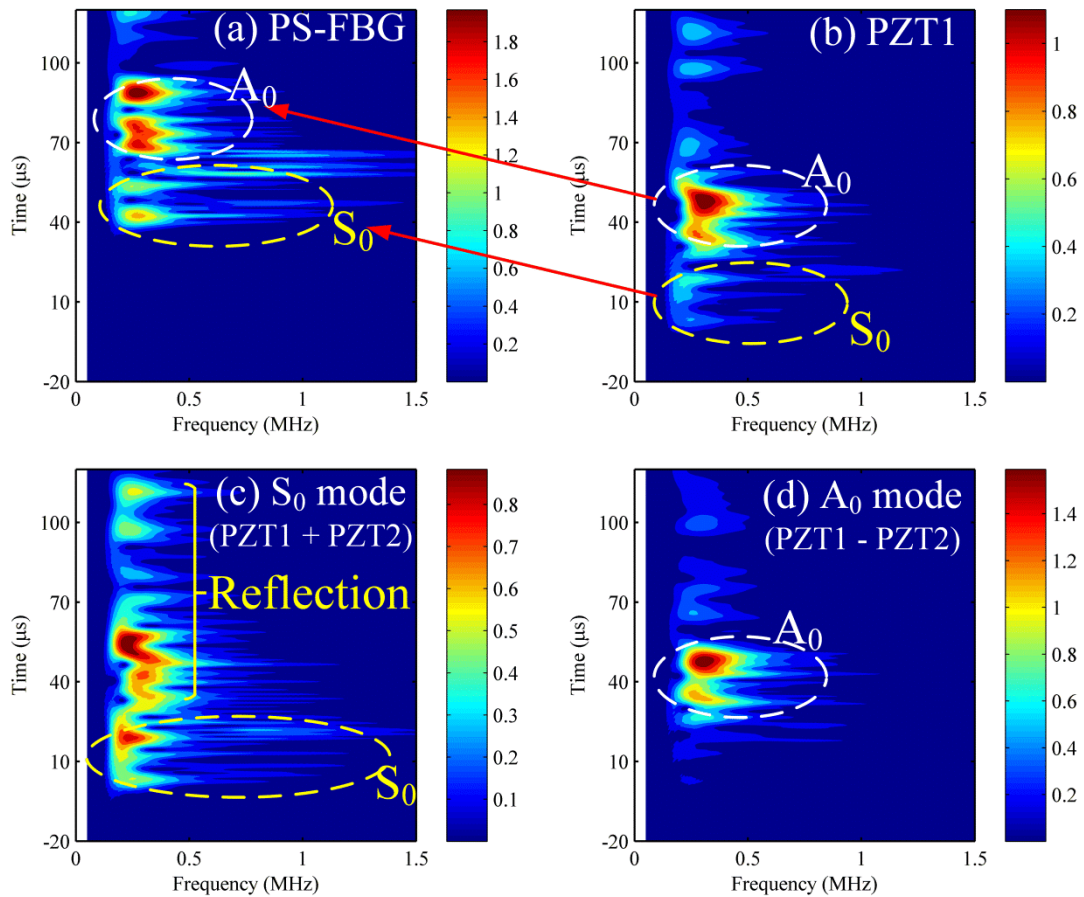


Figure 5-6: Detections corresponding to a transverse crack event: continuous wavelet transform (CWT) result for waves detected by (a) the PS-FBG sensor in the ADRM configuration, (b) the PZT sensor on the upper surface of the specimen, and the separated (c) S0 mode and (d) A0 mode components from the detection by the PZT sensor pair.

Figure 5-6(a)と(b)との結果を比較することによって、PSFBG センサが接着点におけるラム波モードをそのまま計測できることが、再び検証できている。さらに、Figure 5-5(a)とFigure 5-6(a)とを比較することによって、AE 波に含まれているラム波モードの挙動は、波形結果と比べ、CWT 結果の方により明確に現れることが分かった。つまり、単なる時間域での波形信号と比べ、その波形から得られた時間-周波数域での CWT 変換結果の方が、AE 波に含まれるモードを解析するのに適していると考えられる。

さらに、ウェーブレット変換結果でのカラーバーを参照し、Figure 5-6(a)で示されている S_0 モードと A_0 モードとを比較することによって、 A_0 モードのエネルギーが S_0 モードのエネルギーより大きいことが確認できた。よって、 $[90_2/0_2]_S$ の CFRP クロスプライ積層板における、トランスバースクラックによる AE 波形には、 A_0 モードが支配的であると考えられる。

ここで、 S_0 モードと A_0 モードとの強さの関係をより定量的に評価するため、E/F 比を導入する。従来の E/F 比は波形から直接求めたが、上記に述べたように、CWT 変換結果からラム波モードの挙動をより明晰に抽出できるため、本研究での E/F 比は、 A_0 モードのウェーブレット変換係数の最大値に対する S_0 のウェーブレット変換係数の最大値の比で定義する。すると、Figure 5-6 (a)から求めた E/F 比は 0.59 となる。

次に、 0° 層と 90° 層との間に層間剥離が発生した際に計測された AE 信号を Figure 5-7 に示す。まず、 S_0 モードが高周波で先頭に現れ、その後の低周波成分が A_0 モードに対応するという、AE 波形信号での典型的な S_0 モードと A_0 モードの挙動に基づき、PSFBG センサの応答波形である Figure 5-7(a)から、 S_0 モードと A_0 モードを識別できた。この波形から、 S_0 モードの方が強いことも分かる。一方、PZT センサペアにより計測した結果でも同位相の S_0 モードが大きく現れたが、波形の後半部分からは A_0 モードを明確に判別することができなかった。この原因については、この後の CWT 結果に基づき検討する。

Figure 5-8 (a)に示すのは PSFBG センサで計測した AE 波形に対応する CWT 結果である。この結果においては、 S_0 モードと A_0 モードの挙動を示す成分が現れている。そして、波形結果と同じように、 A_0 モードより S_0 モードの方が強く現れることを確認できた。そのため、その E/F 比が高く 1.35 となった。

一方、片面に設置した PZT センサの結果からは、モードを分離することが難しかった。そのため、上下 2 個の PZT センサによって対称・非対称モードの分離を行った Figure 5-8(c)と(d)の結果を参考にすることで、 S_0 モードと A_0 モードを同定し、その結果、 S_0 モードが比較的強いエネルギーを持つことが確認された。しかしながら、その強い S_0 モードの反射成分が A_0 モードの観察に影響を与えてしまっている。一方、ADRM で設置した PSFBG センサは強い指向性を有するため[30]、PSFBG センサで計測した結果では、その反射の影響を受けなかった。

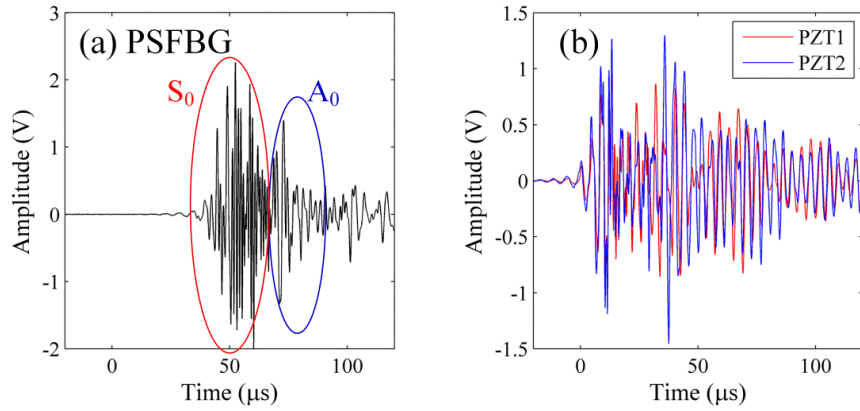


Figure 5-7: Response of (a) PSFBG sensor and (b) PZT sensor to AE generated by the delamination.

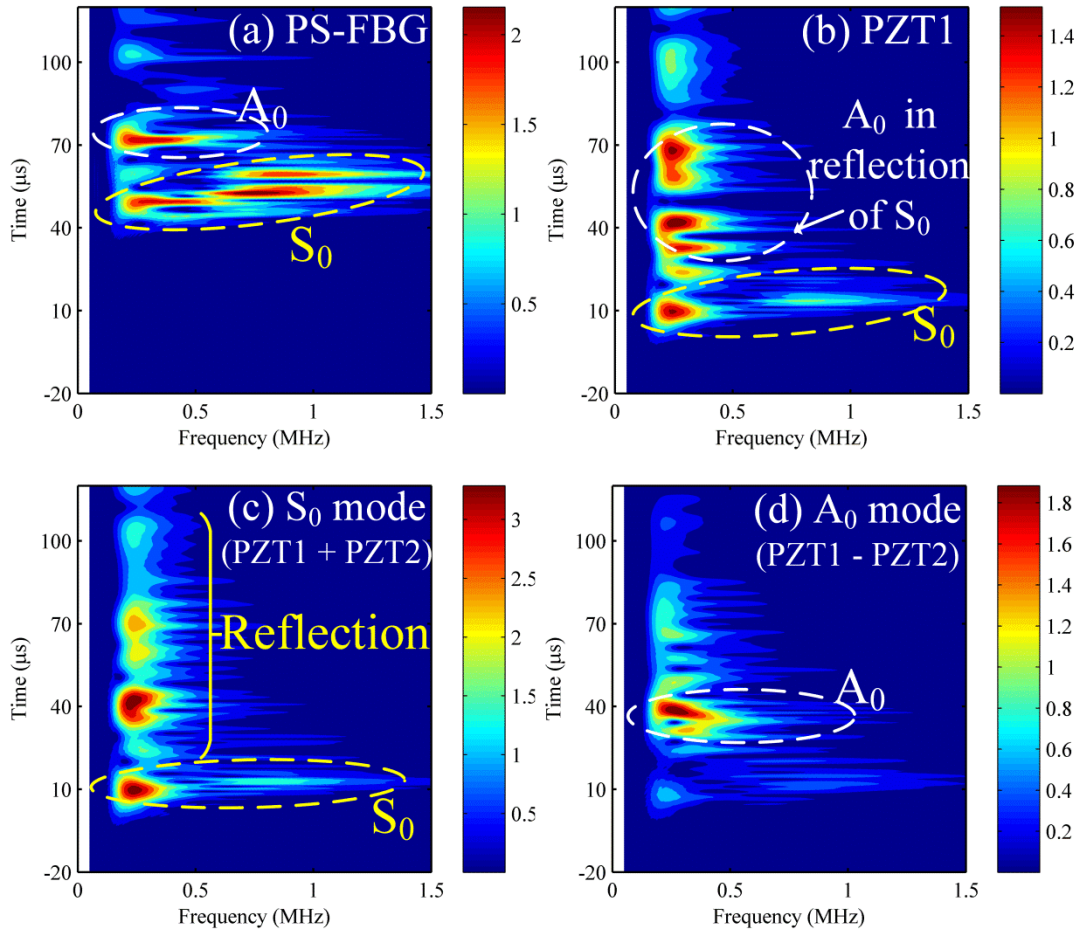


Figure 5-8: Detections corresponding to a delamination event: CWT result for waves detected by (a) the PS-FBG sensor in the ADRM configuration, (b) the PZT sensor on the upper surface of the specimen, and the separated (c) S_0 mode and (d) A_0 mode components from the detection by the PZT sensor pair.

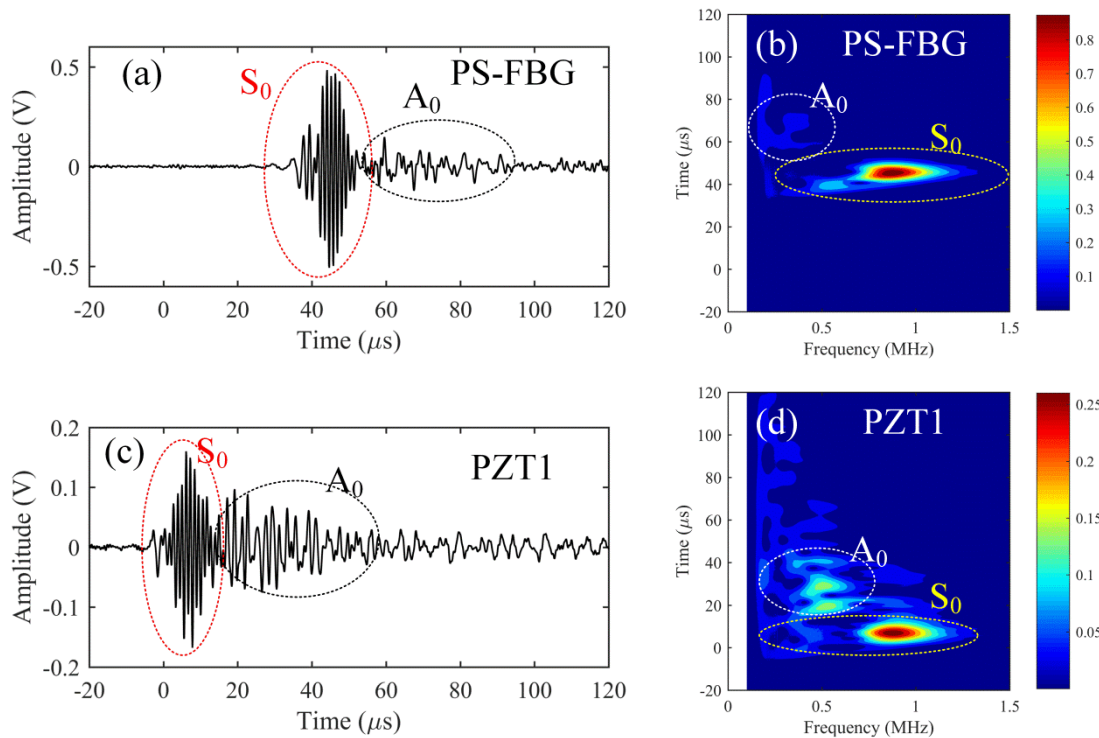


Figure 5-9: AE signals caused by a fiber break: (a) temporal waveform measured by the PS-FBG sensor and (b) the corresponding CWT result; (c) the temporal waveform measured by the PZT sensor and (d) the corresponding CWT result.

次に、Figure 5-9 (a)と(b)は、上記の PSFBG センサで計測した 2 種類（トランスバースクラックと層間剥離）の AE 信号と異なるラム波モードの挙動を示している。波形においては、 S_0 モードと A_0 モードが両方現れたが、 S_0 モードが A_0 モードより遥かに大きいことが分かる。そのため、CWT 結果から得られた E/F 比は 6.2 となった。トランスバースクラックと層間剥離による AE 信号と大きく異なるため、この AE 信号は他の損傷形態によるものであると推察される。

ここで、先行研究[34]では、FEM 解析と実験によって、板の中立軸付近にある層で面内方向に沿って AE を励起する発信源は、強い S_0 モードを励起させることがわかっている。今回の三点曲げ試験で使われている試験片の構成[90₂/0₂]_s を考えると、 S_0 モードが支配的となる AE 信号を発生させることが可能な損傷は、0°層における繊維破断である。ゆえに、Figure 5-9(a)と(b)は繊維破断による AE 信号であると考えられる。

PSFBG センサにより計測した繊維破断の AE 信号と比較すると、Figure 5-9 (c)と(d)に示す、PZT センサにより計測した AE 信号も S_0 モードが強いが、PSFBG センサで計測した場合の A_0 モードの挙動と異なり、PZT センサでは A_0 モードも比較的明確に現れている。2 種類のセンサで計測した AE 信号におけるモード挙動の相違は、主に 2 種類のセンサの計

測原理の差によるものと考えられる。PSFBG センサは面内ひずみを計測することに対して、PZT センサは面外の物理量を計測する。そこで、PSFBG センサは、面内挙動の強い S_0 モードを計測するが、PZT センサは、面外挙動も比較的大きな A_0 モードを感度良く計測する。しかし、 A_0 モードが強くなると、繊維破断による AE 信号から求めた E/F 比が、層間剥離による AE 信号から求めた E/F 比に近づくため、2 種類の損傷形態を明確に識別することが難しくなる。

従って、ラム波の挙動に基づいて、 $[90_2/0_2]_s$ 構成のクロスプライ積層板における AE 信号を同定する場合には、PZT センサと比べ、PSFBG センサの方がより有効であると考えられる。

5.3.2 各損傷による AE 信号の周波数の特徴

次に、3 種類の損傷形態による AE 信号の周波数特性を考察する。ここでは、ピーク周波数というパラメータで、周波数特性を定量的に評価する。ただし、従来の研究のように、フーリエ変換からピーク周波数を求めるのではなく、本研究においては、ピーク周波数は CWT 結果におけるウェーブレット係数の最大値が存在する周波数として抽出する。

始めに、Figure 5-6(a)に示すトランスバースクラックによる AE 信号においては、 S_0 モードと A_0 モードは、共に 0.5 MHz 以下の周波数帯域において存在する。そして、 A_0 モードの方が強いため、最大ウェーブレット係数は A_0 モードから得られ、その最大係数が存在する周波数は 0.29 MHz となる。

次に、Figure 5-8(a)に示す層間剥離による AE 信号においては、 A_0 モードが 0.7 MHz 付近まで存在するに対して、 S_0 モードは 1.5 MHz までの広帯域にわたる範囲を占めていることが分かる。そして、そのピーク周波数は、エネルギーが強い S_0 モードの成分において存在し、0.8 MHz となる。

さらに、Figure 5-9(b)に示す繊維破断による AE 信号においては、弱い A_0 モードは 0.2 MHz から 0.4 MHz までの範囲に現れ、 S_0 モードは主に 0.5 MHz から 1 MHz までの間に存在する。そして、 S_0 モードの方が強いため、そのピーク周波数は、3 種類の損傷形態の中で最も高く 0.89MHz となった。

以上の結果は、ピーク周波数がラム波モードの挙動に依存して変化することを明らかにしている。具体的には、 S_0 モードが強くなるに連れて、ピーク周波数が高い周波数成分へ移動する。逆に、 A_0 モードが強くなると、ピーク周波数が低くなる。そのため、ラム波モードの特徴と同じように、AE 信号の周波数特性からでも損傷形態を同定できる可能性があると考えられる。5.1.1 節で言及したように、PZT-AE センサを用いた従来の研究では、ピーク周波数を用いて損傷形態を同定することが試みられているが、その同定可能な物理的根拠を考察した例はない。一方、本研究では、ピーク周波数とラム波モードとの関連性を明確にすることで、そのピーク周波数によって損傷形態の同定を実現する、物理的な根拠を示すことができた。

5.4 AE 信号の E/F 比とピーク周波数を用いた損傷形態の同定

前章で提案した、AE 波形からの損傷形態同定法は、ラム波理論解析に基づいて確立されているため、物理的裏付けがある反面、信号解析に労力を要す。しかし、複合材に対する実際の AE 計測では、大量な AE データから損傷形態を同定する必要がある。そのため、5.1 で述べたように MAE 法は、信頼性が高いものの、実用性が低い。そこで、いかに大規模のデータからの的確かつ簡便に損傷形態を同定するかが課題となる。

前述のように、大規模なデータを一括して処理可能な AE パラメータ法は、情報分析の観点から多変数パラメータを利用し AE 信号を識別する簡便な手法である。そこで本研究では、MAE 法の効率面での問題の解決策として、AE パラメータ法で使われている機械学習法に着目した。

前節では、異なる損傷形態に対応する AE 信号には、モード間の強さ関係、そして、周波数特性に相違が存在することがわかった。そして、その 2 つの特徴を定量的に評価するパラメータである、E/F 比とピーク周波数は、AE 信号から抽出することができる。よって、各 AE イベントは、その 2 つの特徴量によりデータ化することが可能となる。さらに、情報処理用の汎用機械学習法を用い、それらの物理的なパラメータにより構成されている 2 次元データを分析することによって、理論的裏付けを保ちつつ、簡便に損傷形態を同定する手法を構築できると考えられる。

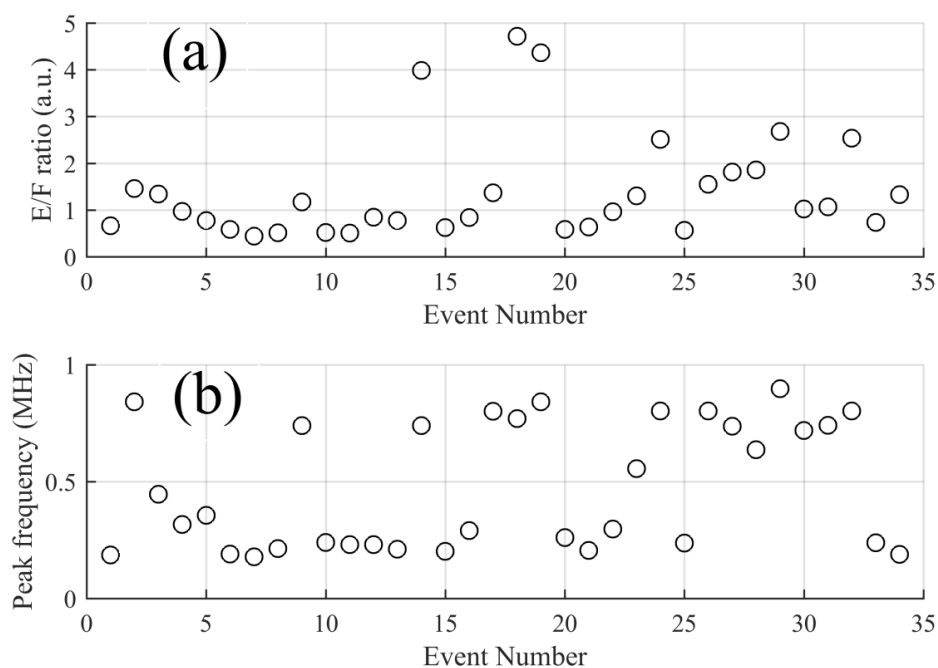


Figure 5-10: Damage identification on the basis of a single physical parameter: (a) E/F ratios and (b) peak frequency.

損傷形態を同定するために、もう一度[90₂/0₂]s試験片を用いて三点曲げ試験を行った。その結果、この試験では、34個のAE信号が計測できた。本節では、それらのAE信号を一括して処理することによって、損傷形態を同定することを試みる。

まず、各損傷イベントに対応するAE信号のCWT変換結果から、E/F比とピーク周波数を抽出する。Figure 5-10(a)と(b)にはそれぞれ、各イベントに対応する、E/F比とピーク周波数を示している。しかし、これらの単独パラメータで示されている結果から、3種類の損傷形態を同時に同定するのは困難であることがわかる。例えば、5.3.1節で説明したラム波モードの特徴に基づき、繊維破断によるAEは、トランスバースクラックと層間剥離によるAEと比べ、E/F比ははるかに高いため、Figure 5-10(a)から繊維破断を同定することが可能であるが、残りのE/F比からその他の2種類の損傷形態を明確に同定することが困難である。そして、Figure 5-10(b)では、低ピーク周波数のAEはトランスバースクラックによるものであると判断できるが、層間剥離と繊維破断によるピーク周波数の差が小さいため、その2つの損傷を同定することができない。

そこで、E/F比とピーク周波数の2個のパラメータを同時に用いることによって表現した、AEデータの2次元空間分布をFigure 5-11に示す。そして、このデータ分布に対して、階層クラスタリング法と呼ばれる機械学習法を適用することで、Figure 5-11に示す結果から損傷形態を同定することを試みる。

ここで、その機械学習手法を用いて2次元データを分類する手順を紹介する。

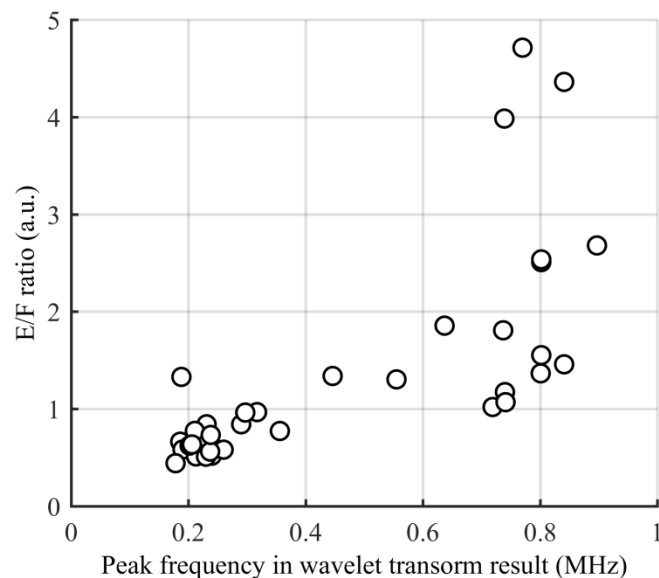
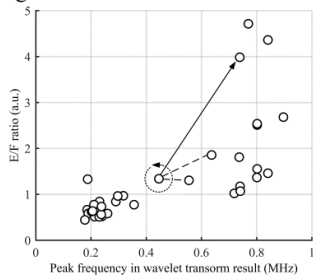
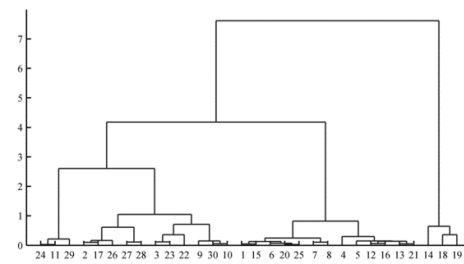


Figure 5-11: AE data expressed using E/F ratio and peak frequency

Step 1: Calculating the distances between the points for evaluating the degree of relatedness between them



Step 2: Based on the calculated distances matrix, a Cluster tree was plot for determining the trigger for grouping the 2-D data



Step 3: From the analysis on the AE signals generated in the three point bending testing, The AE signals should be separated into three clusters from the 2 dimensional data. Hence, the trigger for the clustering was set at the heights between 3 and 4 in the Cluster tree.

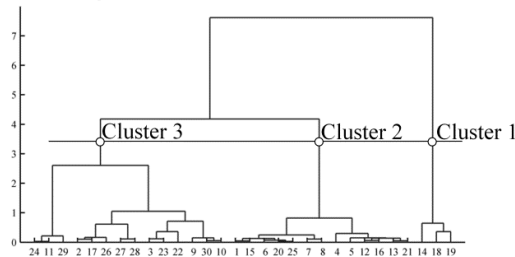


Figure 5-12 : The process of hierarchical clustering method for evaluating the AE data in the Figure 5-11

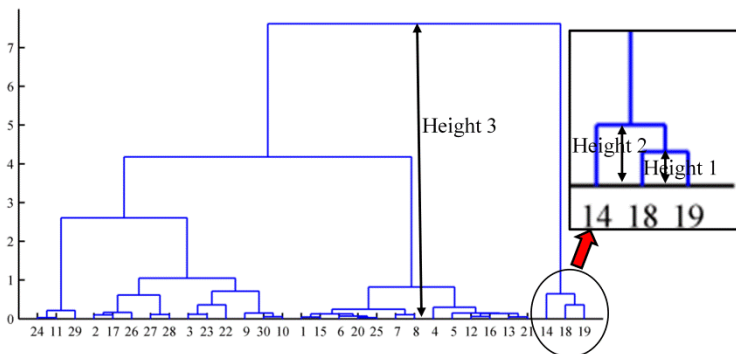
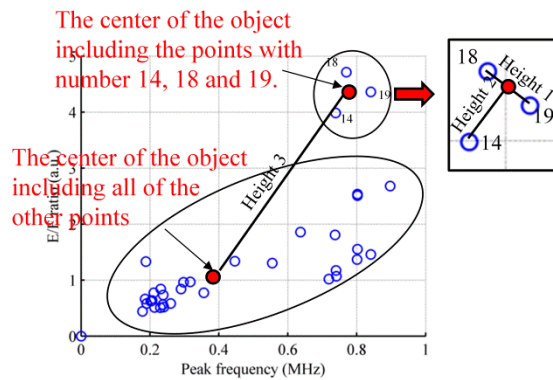


Figure 5-13: Schematic illustration to explain the height in the cluster tree.

5.4.1 階層クラスタリング法による AE 信号の分類

パターン認識の手法として知られている階層クラスタリング法 (hierarchical clustering method) とは、2 次元またはそれ以上の次元のデータの類似度関係に基づき、クラスターツリーを作成することによって、様々なスケールで階層的なクラスタリンググループに分類する方法である。

その手法を用いて Figure 5-11 から AE 信号を分類する際の手順を Figure 5-12 に示す。本手法では、点と点の間の直線距離で 2 次元空間におけるデータ点間の類似度を評価するため、まず各点について、その他の点との距離を計算する。例えば、Figure 5-12 において Step1 に示すように、34 個の AE イベントデータが存在し、各イベントとその他の 33 個のイベントとの距離を一つずつ計算する。計算した結果は、 34×34 のマトリックスになる。そのマトリックスをデータベースにし、一番近い距離を有する点のペアを求める。そのペアリングに基づき、Figure 5-12 の Step2 に示すクラスターツリー (cluster tree) を作成する。クラスターツリーの横軸はイベントナンバー、縦軸はリンクの高さを示す。リンクの高さとは、2 つのオブジェクト間の距離を示す。リンクの高さ (Height) をわかりやすく説明するため、イベントナンバー 14、18、19 に対応するデータ (繊維破断による AE 信号) を例として挙げる。Figure 5-13 においての Height 1 は、第 1 層、すなわちペアデータを求める際に算出された 18 と 19 との距離である。次に、18 と 19 との距離が近いこと、それらの点により構成されたものは 1 つのオブジェクトとして認識される。そのオブジェクトの重心と 14 との距離は Height 2 となる。また、14、18、19 は、他の点の群から離れているため、この 3 つの点が 1 つのオブジェクトを構成する。そのオブジェクトの重心と、他の点が構成するオブジェクトの重心との距離は、Height 3 となる。このような手順によって、クラスターツリーは一層ずつ描かれる。このため、この方法は階層クラスタリング法と呼ばれている。

次に、Figure 5-12 における Step3 に示すように、クラスターツリーを切り取る位置、つまり、クラスターを作成するための閾値を決める。階層クラスタリングは、教師ありの手法であり、すなわち、一定のデータベースに基づき適切な閾値を決めなければならない。5.3 節で述べたように、三点曲げ試験では、3 種類の損傷が発生したため、ここでは、3 つのクラスターが存在すると仮定して、しきい値を定めた。それにより得られた AE 信号の分類結果を Figure 5-14 に示す。

まず、5.3 節で明らかとなった、3 種類の損傷による AE に含まれるラム波モードの特徴と周波数の特徴に関する知見を踏まえると、クラスターが 3 つある場合に得られた分類結果 Figure 5-14 におけるクラスター 1、2、3 は、それぞれ、繊維破断、層間剥離、トランスバースクラックによる AE 信号のデータ群であるといえる。

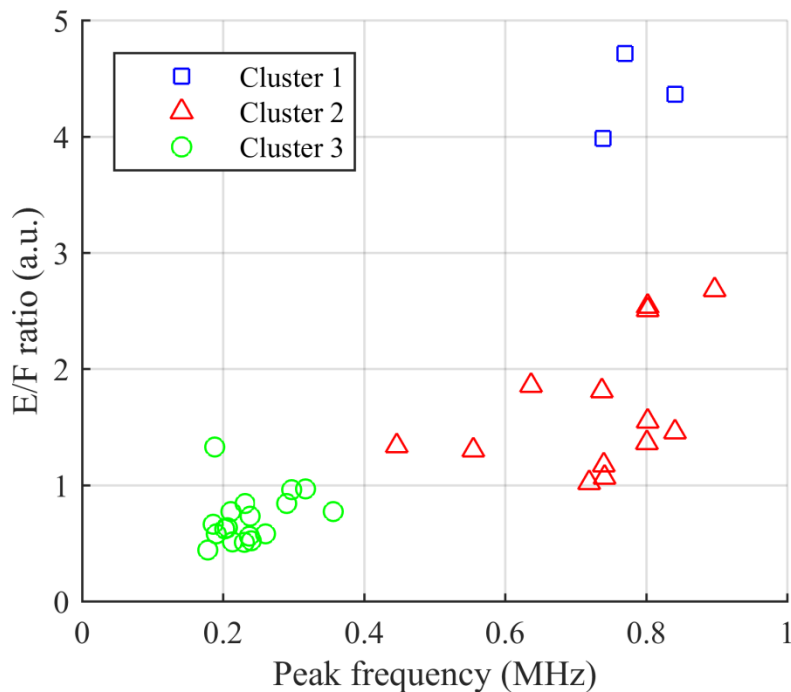


Figure 5-14: Damage identification based on utilizing the E/F ratios and the peak frequency simultaneously.

Table 5-3 Information about each cluster

| | E/F ratio | Peak Frequency (MHz) | Damage type |
|-----------|-----------|----------------------|------------------|
| Cluster 1 | 3.5 ~ | 0.7 ~ 0.9 | Fiber break |
| Cluster 2 | 1 ~ 2.5 | 0.6 ~ 0.9 | Delamination |
| Cluster 3 | 0.5 ~ 1 | 0.2 ~ 0.4 | Transverse crack |

ここで、Figure 5-14 の結果における、150 kHz から 2 MHz までのフィルタをかけて処理した AE 信号より、 $[90_2/0_2]_s$ の三点曲げ試験において発生した 3 種類の損傷形態を同定するための、定量的な評価基準を Table 5-3 にまとめる。E/F 比が 3.5 以上、ピーク周波数が 0.7MHz から 0.9 MHz までにわたって存在する AE 信号は繊維破断によるものであると判断できる。そして、層間剥離による AE 信号は、E/F 比が 1 から 2.5 までの間、ピーク周波数が 0.6 MHz から 0.9 MHz までの間に現れる。さらに、これら二種類の損傷と比べて、トランスバースクラックによる AE 波は 0.5 から 1 までの比較的低い E/F 比を有する。それに加え、 A_0 モードが強いため、ピーク周波数が 0.2 から 0.4 までの低い帯域に存在する。

以上、統計的な手段によって、AE の物理的な特性から、 $[90_2/0_2]_s$ の CFRP クロスプライ積層板における複数の AE を一括して分類でき、さらにラム波理論解析に基づき、その分類した結果から損傷形態を同定することを実現できた。

5.5 FEM 解析による同定結果の検証

本研究で解明した、 $[90_2/0_2]_s$ 積層構成のクロスプライ積層板におけるトランスバースクラックにより励起する AE 信号においては、 S_0 モードより A_0 モードの方がエネルギーが大きい、すなわち E/F 比が小さい。一方、先行研究[65]では、 $[0_2/90_2]_s$ におけるトランスバースクラックによる AE 信号は、 A_0 モードに比べ S_0 モードの方がエネルギーが大きい。そして、著者らの先行研究[34]でも、トランスバースクラックが $[0_2/90_2]_s$ の 90° 層、すなわち中間層において発生する場合には、 S_0 モードが支配的になるという現象を FEM 解析で再現できた。そのため、なぜ同じ 90° と 0° のクロスプライで、しかも同じ損傷形態による AE 信号なのに、 90° 層が内部と表面側という厚さ方向での位置が異なるだけで、ラム波モードの挙動が大きく変わるかについて、物理的に説明をする必要がある。

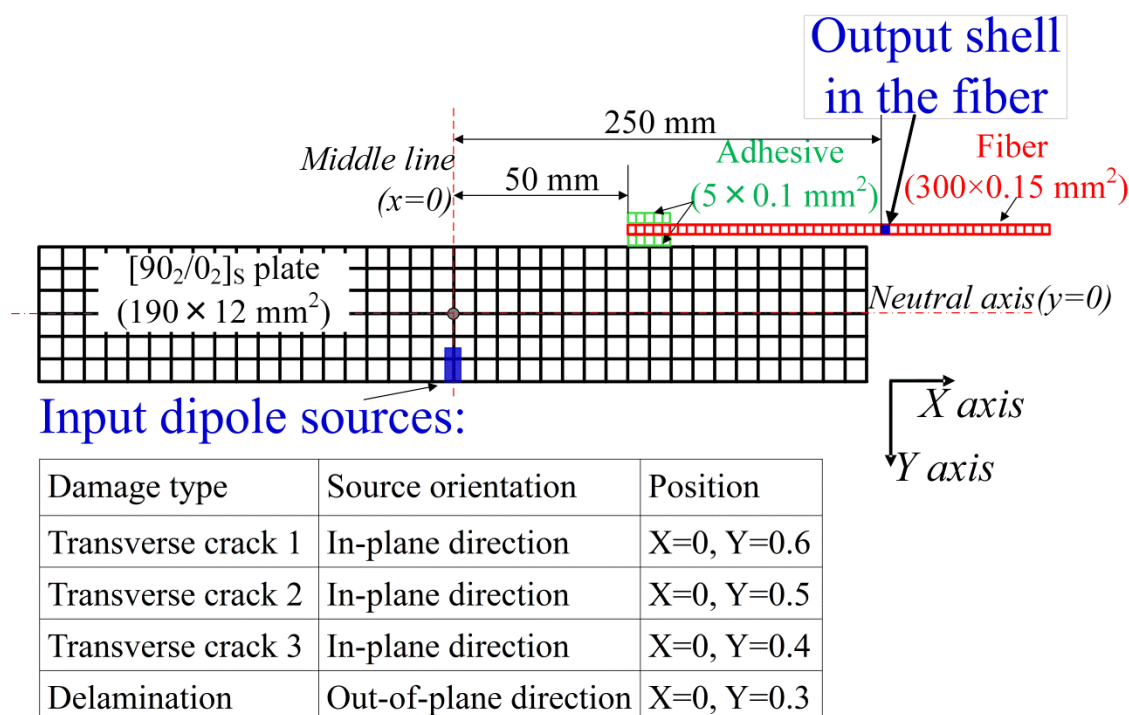


Figure 5-15: Dimensions and configuration of 2D FE simulation model.

そこで、損傷形態、特にトランスバースクラックによる AE 発生挙動を検証するため、2次元 FEM 解析を LS-DYNA を用いて行った。それと同時に、層間剥離によって励起される AE 信号も検証する。ここで、3点曲げ試験を再現するために、Figure 5-15 に示すモデルを作成した。長さ 190 mm、厚さ 1.2 mm の $[0_2/90_2]_s$ CFRP 積層板は、 $0.1 \times 0.1 \text{ mm}^2$ の平面ひずみシェル要素でモデル化した。ここでは、長手方向を X 軸とし、厚さ方向を Y 軸とし、座標の原点を板の重心に置く。そして光ファイバは、厚さ $150 \mu\text{m}$ の薄板とし、0.01

×0.01 mm²の要素で細かく分割した。また、光ファイバに対応するモデルを、接着剤に対応する板状のモデルに埋め込み、その底面を積層板に接合した。

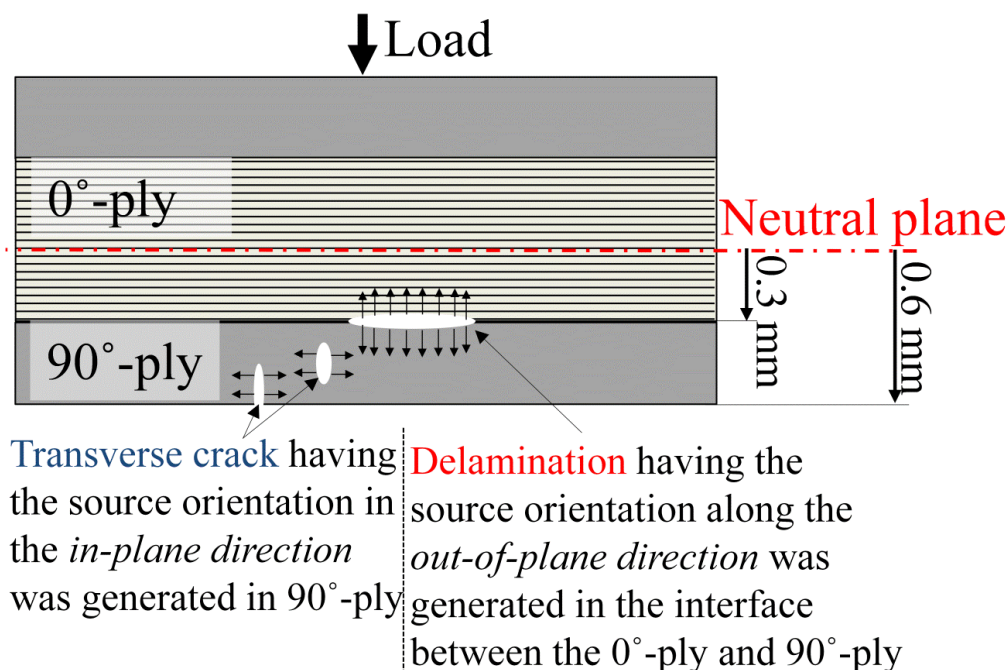


Figure 5-16: Schematic of the damage (input sources) in the $[0_2/90_2]_s$ generated during a three-point bending test

ここでは、双極子体積力発信源をAE発信源として解析モデルに入力する。3点曲げの場合、Figure 5-16に示しているように、損傷は主に荷重をかけた面とは反対側の面に生じる。そして、トランスバースクラックは90°層に発生し、層間剥離は0層と90層との界面において発生する。つまり、厚さ1.2 mmの板とすると、トランスバースクラックは主に板の中立軸から0.3~0.6 mm離れた範囲に発生し、層間剥離の発生位置は中立軸から0.3 mm離れた界面にあると考えられる。さらに、発信源の方向を考えると、トランスバースクラックは、面内方向に沿ってAEを励起させるのに対して、層間剥離は、厚さ方向に沿ってAEを励起させる。そして、Figure 5-3に示しているように、PS-FBGセンサが負荷点と同じ上面側にある。そこで、本モデルにおいては、光ファイバモデルのある上面に対して、AEの入力子を下面側に置く。その入力子と接着部の中心との距離は、三点曲げ試験における圧子と接着点との距離と同じく50 mmにした。そして、トランスバースクラックをシミュレーションするため、中立軸から0.6、0.5、0.4 mm離れた位置に入力子を用いてそれぞれ計算を行った。ただし、それらの発信源方向は、X軸方向に沿う。さらに、中立層から0.3 mm離れたところに設置する、体積力の発生方向がY軸に沿う入力子で、層間剥離をモデル化し計算を行った。

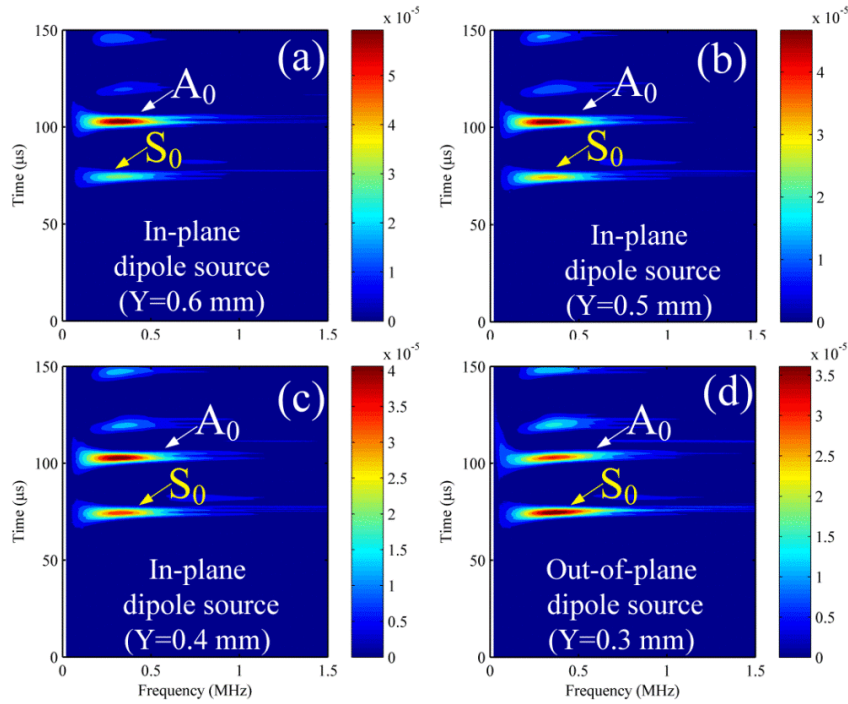


Figure 5-17: Numerical results calculated from the 2D FE model: CWT results for waves calculated numerically from the input sources (a) with in-plane direction 0.6 mm away from the neutral axis, (b) with in-plane direction 0.5 mm away from the neutral axis, (c) with in-plane direction 0.4 mm away from the neutral axis, and (d) with out-of-plane direction 0.3 mm away from the neutral axis

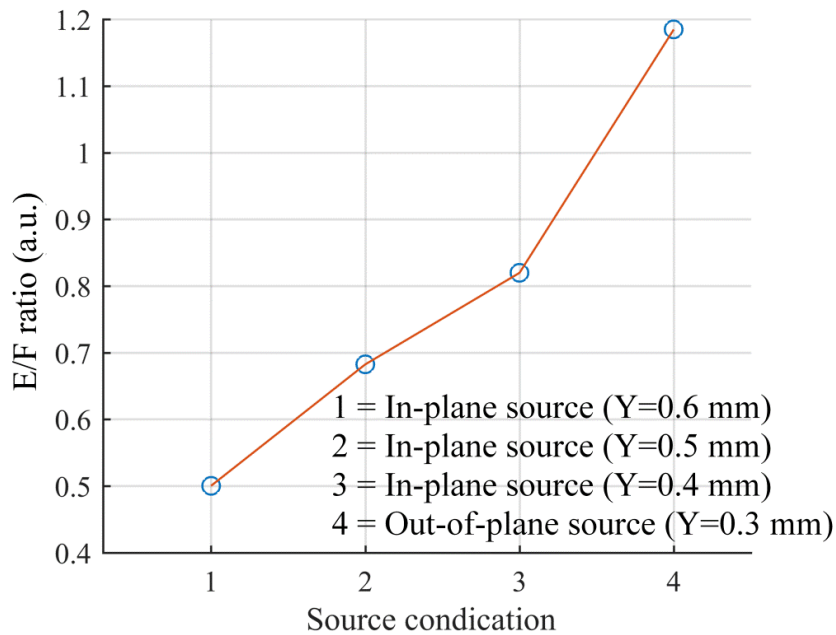


Figure 5-18: E/F ratio summarized from the CWT results shown in the Figure 5-17

ADRM25-5 の計測条件に一致するシェル要素の軸方向 (X 方向) ひずみの変化を受信波形として出力し、その波形に CWT を行なった結果を Figure 5-17 に示す。これらの結果から、トランスバースクラックによる AE は、 S_0 モードより、 A_0 モードの方が強いことが分かる。ただし、発信源が中心軸に近づくにつれて、 S_0 モードが強くなる傾向が見られる。これに対して、層間剥離による AE 信号では、 S_0 モードの方が強い。そこで、E/F 比でモード間の強さ関係を表した結果を、Figure 5-18 に示す。この結果より、トランスバースクラックによる AE での E/F 比は 1 より小さいのに対して、層間剥離による AE での E/F 比は 1 を超えていることがわかる。

この現象の原因として、 $[90_2/0_2]_s$ の積層板においては、トランスバースクラックは外側の 90° 層に発生するため、中立軸に対して比較的大きな曲げモーメントを生じ、それにより横波に近い A_0 モードが支配的になっていると考えられる。これに対して、層間剥離は、 90° 層と 0° 層の界面において発生し、主に厚さ方向にエネルギーが解放されるため、中立軸に対する曲げモーメントは小さく、その結果、縦波に近い S_0 モードが相対的に大きくになっていると考えられる。

以上のトランスバースクラックによる AE に関する数値解析結果と先行研究[34, 65]で得られた結果を比較することにより、 $[0_2/90_2]_s$ と $[90_2/0_2]_s$ における AE に含まれるラム波モードの特徴の相違を解釈できた。それと共に、本節で述べたシミュレーションによって、ADRM を用いて計測した AE 信号に含まれる S_0 モードと A_0 モードの強さの関係、特にその関係を定量的に評価可能である E/F 比は、Figure 5-14 での実際の実験で得られた E/F 比と同じ傾向を示している。以上より、積層構成 $[90_2/0_2]_s$ の CFRP クロスプライ積層板に発生するトランスバースクラックと層間剥離を、AE 信号から同定することが可能であることを検証できた。

5.6 まとめ

本章では、遠隔で設置した PSFBG センサを用いて、 $[90_2/0_2]_s$ 構成の CFRP クロスプライ積層板の三点曲げ試験において発生したトランスバースクラック、層間剥離、および繊維破断による AE 信号を計測できた。そして、PSFBG センサは、純粋な単一物理量（ひずみ）のみに応答するといった計測性能を有するため、AE 信号とそれに含まれるラム波モードの挙動との関係性を明らかにすることができた。

さらに、現在の PZT-AE センサと比べ、PSFBG センサは広帯域性を有するため、AE 信号の周波数特性も明らかにできた。特に、CWT 変換を利用することで、ピーク周波数の変化がラム波モードの変化に依存することが分かった。つまり、ピーク周波数による損傷形態同定法の物理的根拠を明らかにできた。

その後、E/F 比とピーク周波数の物理的パラメータにより、AE 信号の特徴を定量的に評価した。それらの AE イベントはこの 2 個のパラメータにより構成される 2 次元データで表し、機械学習法をその 2 次元データの解析に適用することによって、大量のデータから一括して簡便に損傷形態を同定できた。つまり、ここで提案した手法は、物理的な信頼性を有したまま、効率良く解析可能な手法であると考えられる。

本研究では、クロスプライの一種類の積層構造での損傷形態を同定した。今後は、本章で提案した手法を用いて、より複雑な積層構成を持つ CFRP 積層板や、三次元織物の CFRP、CMC 複合材においても AE 信号を考察することにより、大量のデータからでも、的確かつ簡易的に損傷形態を同定すること試みたい。

本手法に適用された遠隔計測構成は、特殊環境での AE 計測だけではなく、通常環境での AE 計測にも大きな意味をもたらす。なぜなら、ADRM 構成では、光ファイバ接着点を試験環境に置き、PSFBG センサを安定した環境に設置することによって、材料試験に伴う準静的ひずみや、材料試験機の振動に起因する雑音信号を除去することで、AE 信号を正確に計測できるためである。従って、本研究で提案した遠隔 AE 計測法と損傷形態の同定手法とを組み合わせることによって、実用性と信頼性に優れた、複合材料の新たな損傷進展評価手法となることが期待できる。

第 6 章: 単独センサによる複合材料試験中の AE 発信源の一次元位置標定

第 5 章では、遠隔 AE 計測法を用いて、複合材料中の損傷形態を同定可能な新規手法を検討してきた。本章では、この計測法の付加価値をさらに高めるため、複合材料の AE 計測において重要な機能となる、損傷の位置標定を単独センサで実現可能な手法を提案する。

6.1 単独センサによる AE 発信源の距離推定法

現在、PZT センサを用いる AE 計測法では、1 点の発信源により励起された AE 波を、2 個以上の複数のセンサで計測し、それらの AE 信号間の到達時間差を抽出することによって、センサに囲まれた範囲内の発信源を推測している。

今までの FBG 系光ファイバセンサは、AE 信号に対する感度が低いため、AE 発信源の位置推定に関する参考研究例がないが、構造ヘルスマモニタリング技術としての衝撃荷重の位置推定に関する研究例[75, 76]においては、PZT センサを用いた手法と同じく、複数のセンサを構造物に貼り付けて、衝撃荷重により励起された波動の到達時間差からその衝撃位置を推測する。

一般に、構造ヘルスマモニタリング技術用に開発された FBG センシングシステムは感度が低い、多重性に優れる。つまり、一本の光ファイバに複数の FBG を導入することが可能である。これに対して、本研究で用いている PSFBG センシングシステムは、非常に感度が高いが、多重化が困難である。つまり、1 セットのシステムで複数のセンサを同時に用いることが難しいため、本研究では、材料試験において短冊試験片中に発生する損傷を対象とし、単独 AE センサで損傷の一次元での位置標定法を確立することを試みる。

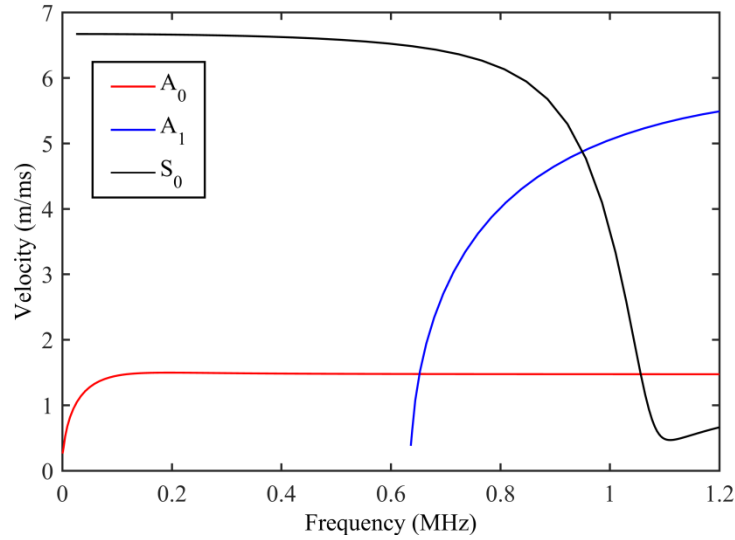


Figure 6-1: Theoretical dispersion curve: group velocity against frequency for modes of Lamb waves in $[90_2/0_2]_S$ laminate with thickness of 1.2 mm

この手法を実現する手段として、ラム波の複数モードを用いる。前章での研究対象となっていた $[90_2/0_2]_S$ 積層構成のクロスプライ積層板を伝わるラム波の群速度理論分散曲線を Figure 6-1 に示す。この結果より、 S_0 モードと A_0 モードは、群速度が大きく異なることが分かる。その速度差によって、同じ AE 信号に含まれる S_0 モードと A_0 モードは、その AE 発信源から計測点までの到達時間差が、伝播距離に比例して大きくなる。つまり、1 つの AE 信号からその S_0 モードと A_0 モードとの到達時間差を正確に抽出できれば、1 つの AE センサを用いても発信点とセンサとの間の直線距離を推定できると考えられる。

数式(1) (2) (3)で上記の方法を説明する。式(1)と(2)においては、発信源から接着点までの伝播距離を L とする。そして、 S_0 モードと A_0 モードとの群速度を、 V_{S_0} 、 V_{A_0} とおき、伝播時間を T_{S_0} と T_{A_0} とおく。さらに、式(1)と(2)によって、モード間の伝播時間差と2つのモードの群速度で伝播距離を表す式(3)を導くことができる。すなわち、 A_0 モードと S_0 モードの群速度を理論分散曲線から算出した上で、1つのAE波に現れる2つのモードの到達時間差を把握できれば、 L 、すなわちAE波の伝播距離を推定可能となる。

$$L = V_{S_0} \times T_{S_0} \quad (1)$$

$$L = V_{A_0} \times T_{A_0} \quad (2)$$

$$L = \frac{(T_{S_0} - T_{A_0}) \times V_{S_0} \times V_{A_0}}{(V_{A_0} - V_{S_0})} \quad (3)$$

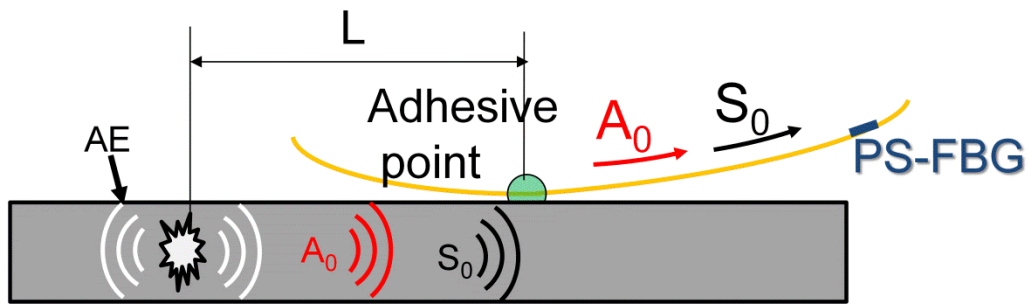


Figure 6-2: ADRM configuration in the linear location method using one single sensor

さらに、第3章に示しているように、遠隔AE計測法では、AE波の A_0 モードと S_0 モードは、接着点において光ファイバを伝わる縦波成分に変換され、その後同じ縦波速度で光ファイバを伝播しPSFBGセンサまで届く。つまり、Figure 6-2に示すように、PSFBGセンサは、AE発信源から接着点まで板を伝わってきた、2つのモードの到達時間差を正確に捉えられる。このため、ADRM構成におけるPSFBGセンサにより計測されたAE信号によって、接着点から発信源までの距離を推定することが可能となる。

本研究で提案している、単独センサによる、接着点と発信源との距離を推定する方法は、大規模の構造物における損傷の二次元的な位置標定に適用することが難しい。というのも、発信源と接着点との直線距離を推定できても、大規模構造物の二次元平面内においては、その発信源が、接着点を中心とし、その直線距離を半径とする円周上の、どの位置にあるかを決定できない。このため、本研究での位置標定という言葉は、主に短冊試験片に対する負荷試験中の損傷位置の標定に限定される。

6.2 模擬 AE 信号による検証

本節では、模擬AE信号を用いて、前節で提案している単独センサによる損傷の位置標定法を検証する。

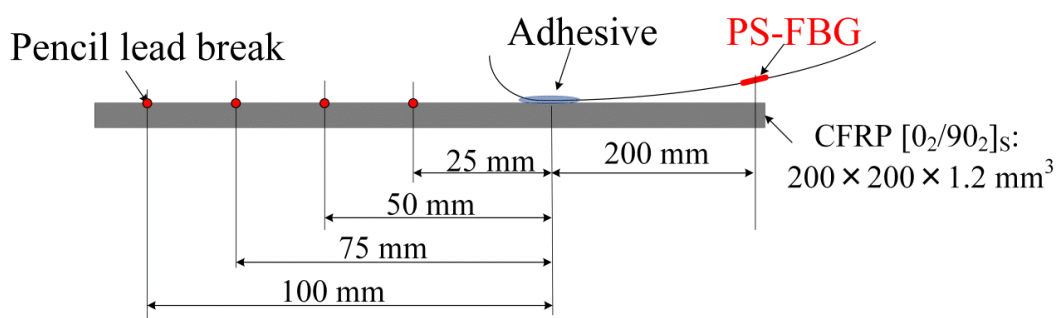


Figure 6-3: Experimental setup for verifying the location method using one single PSFBG sensor in the ADRM configuration

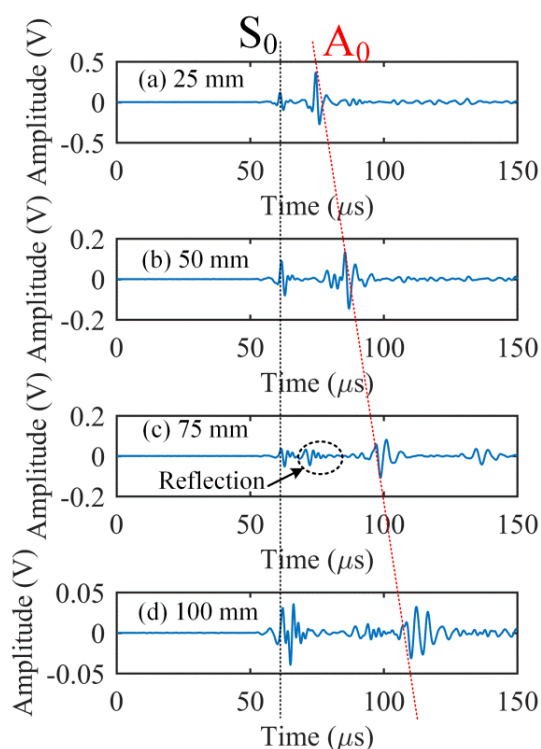


Figure 6-4: Response of PSFBG sensor to the simulated AE source generated at the position (a) 25 mm, (b) 50 mm, (c) 75 mm and (d) 100 mm away from the adhesive point in the ADRM configuration.

ここでは、Figure 6-3に示すように、積層構成 $[90_2/0_2]_S$ のCFRP積層板 ($L \times W \times H = 200 \times 200 \times 1.2 \text{ mm}^3$) 上で、シャープペンシルの芯の圧折 (Pencil lead break: PLB) による模擬AE源を用いて検証実験を行った。この実験での発信点はそれぞれ、接着点から25、50、75、100 mmと離れた距離に配置する。そして、励起されたAE波は、接着点とPSFBGセンサとの距離を200 mmにしたADRM構造で計測する。さらに、そのAE信号から S_0 と A_0 との到達時間差を抽出することによって、模擬AE源と接着点との距離を推定する。

4ヶ所の実施点で得られた計測波形をFigure 6-4に示す。2つモードの到達時間差の変化を強調するため、しきい値の設定によって、時間軸においては、4つのAE信号での先頭に現れる S_0 モードの時刻をそろえている。その結果、発信点と接着点との距離の増大に従って S_0 モードと A_0 モードとの到達時間差も大きくなる傾向が見られる。

しかし、Figure 6-4から正確に A_0 モードと S_0 モードの到達時間を抽出することが難しい。というのも、2つのモードに対応する成分には、複数の周波数成分が混在する。ラム波の分散性によって、同じモードにおいても各周波数成分は群速度が異なる。そのため、正確に伝播距離を評価するためには、1つの周波数成分における S_0 と A_0 の到達時間差を抽出する必要がある。

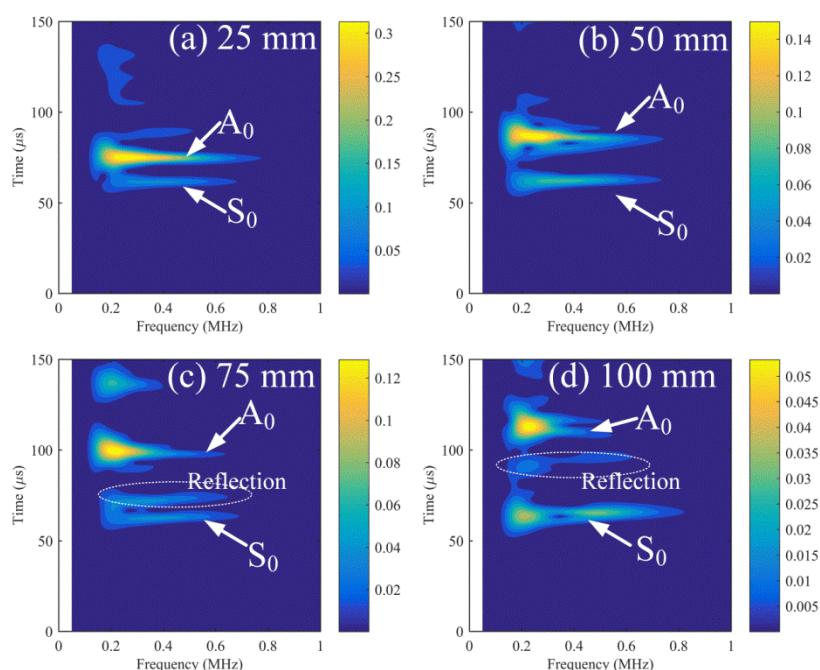


Figure 6-5: Wavelet transform results of the detected AE signals corresponding to the AE source at the positions (a) 25 mm, (b) 50 mm, (c) 75 mm and (d) 100 mm away from the adhesive point.

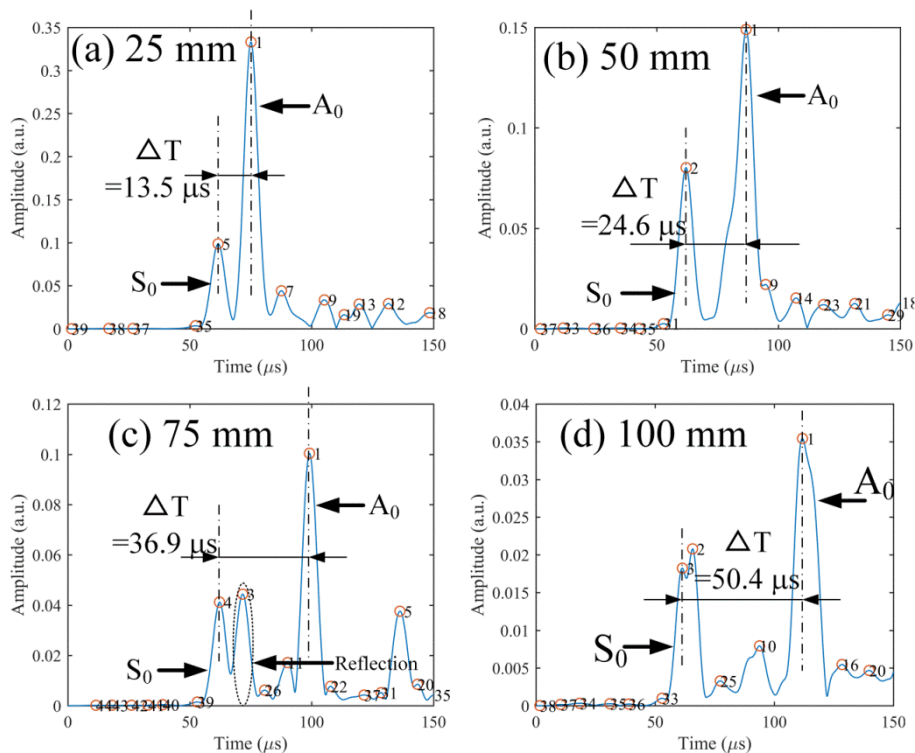


Figure 6-6: Waveform components at 300 kHz extracted from the wavelet transform results shown in the Figure 6-5

よって、受信波形にウェーブレット変換を施し、時間-周波数域における波の成分の分布を求める。そして、そのウェーブレット変換結果から、単一の周波数成分での時間変化を抽出することが可能となる。

そこで、Figure 6-4の波形結果をウェーブレット変換で解析した。その変換結果をFigure 6-5に示す。Figure 6-5において、明確に S_0 モードと A_0 モードを分離することができている。よって、これらのウェーブレット変換結果から、任意単一の周波数成分を抽出することが可能であるが、抽出した結果から2つのモード間の伝播時間差を正確に評価するため、 S_0 モードと A_0 モードのみが存在する周波数域における波形成分を選ぶ必要がある。そこで、Figure 6-1に示す理論分散曲線を参考にし、300 kHzの周波数成分を抽出することにした。

その抽出した結果をFigure 6-6に示す。さらに、これらの結果から、簡便かつ正確に到達時間差を評価するため、波形中の S_0 モードと A_0 モードの成分のピーク振幅に対応する時間を到達時間として抽出し、時間差を求めた。さらに、安定した結果を得るため、各位置において、10回のPLBによる模擬AE発振を行うことによって得られた到達時間差を、平均化した結果をFigure 6-7に示す。

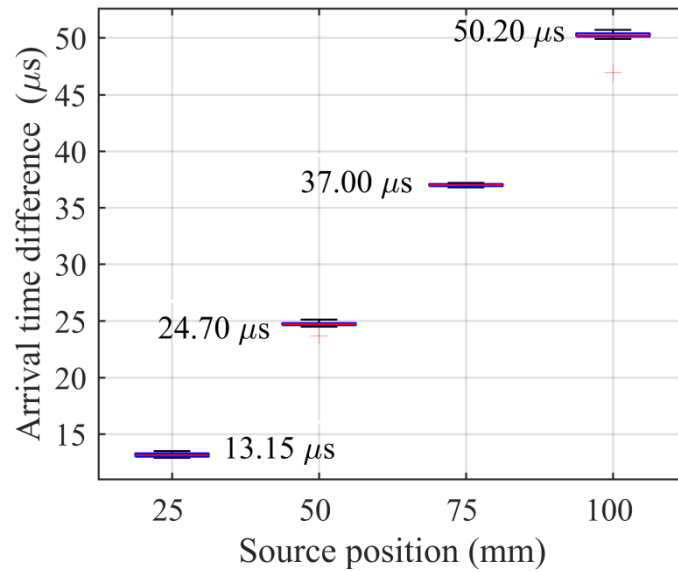


Figure 6-7: Time difference of arrival between the S0 and A0 corresponding to the distance between the adhesive point and the simulated source

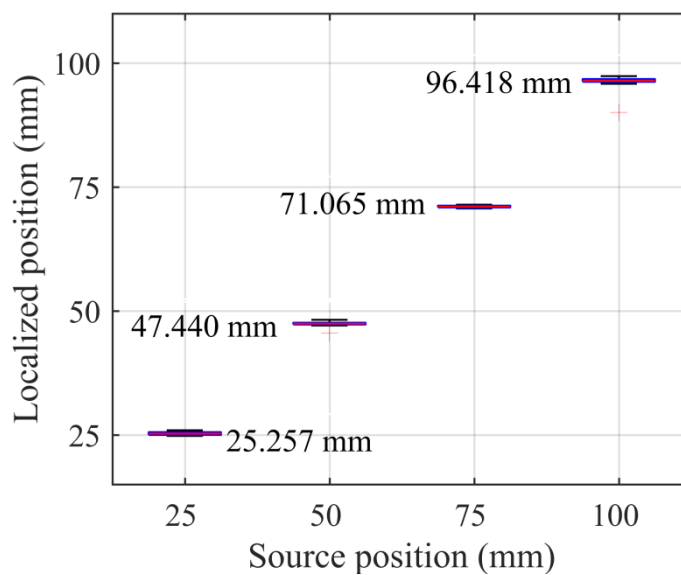


Figure 6-8: Source location results

Figure 6-7の横軸は実際の発信源と接着点との距離であり、縦軸は本手法で求めた時間差である。この結果に示すように、発信源と接着点との距離の増加に比例して、到達時間差も増加することが分かった。

そして、理論分散曲線から、300 kHzにおけるS₀モードとA₀モードの群速度は、それぞれ6710 m/s、1503 m/s であることが分かる。そこで、Figure 6-7に示す、各位置での到達時間

差と群速度を式(3)に代入し、発信源までの距離を推定した。その結果をFigure 6-8に示す。横軸に示す実際の実施点と比較することによって、本手法での距離推定は、100 mmまでの範囲において、およそ4 mmの推定精度を持つことが分かる。つまり、推定結果はほぼ正確な位置を反映している。

そこでさらに、その誤差が生じる原因について考察してみた。実際の実施位置の距離から、Figure 6-8での10回平均化で求めた距離を差し引いた結果をFigure 6-9に示す。この図により、距離の増大に従い、誤差がほぼ線形的に変化することがわかった。ここで、式(3)を見ると、理論値の群速度と実際の群速度との間に誤差が存在すれば、伝播距離にも線形的な誤差を生じる可能性があることがわかる。

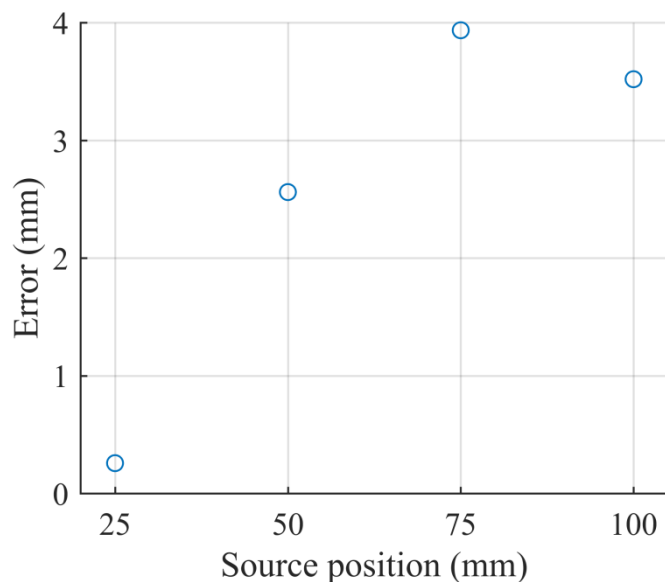


Figure 6-9: Error analysis

6.3 まとめ

ラム波の異なるモードは群速度に差があるため、AE 波に含まれる S_0 モードと A_0 モードが同じ伝播距離を伝わった場合に、到達時間に差が生じるという現象を活かし、単独センサを用いて損傷の発生点と計測点との距離を推定可能な手法を提案した。特に、ADRM 構成で設置される PSFBG センサは、接着点においてのラム波の挙動、すなわちモード間の到達時間差を正確に捉えられるため、模擬 AE 信号を用いた実験で、その接着点と発信源との距離を実際に標定することができた。

ただし、ここで提案した、単独センサで計測した AE 信号から損傷位置を推定する手法は、適用範囲に制約がある。Figure 6-5 に示す模擬 AE 信号の周波数特性を見ると、 S_0 モードと A_0 モードのどちらも 300 kHz 付近に現れているので、その 300 kHz の成分を抽出することによって 4 mm の誤差で損傷と接着点との距離を標定することができた。第 5 章で挙げたトランスバースクラックによる AE 信号のウェーブレット変換結果(Figure 5-6)にも、300 kHz 付近に S_0 と A_0 が両方現れていた。つまり、本手法は、 $[90_2/0_2]_S$ におけるトランスバースクラックの AE 信号から、その損傷と接着点との距離を推定することに適用することが可能であると考えられる。一方、同章の Figure 5-9 に示す繊維破断による AE 信号においては、 S_0 モードと A_0 モードは異なる周波数帯域に現れた。つまり、そのような AE 信号から 1 つの周波数成分のみを抽出しても、2 つのモードが必ずしも存在するとは限らない。その場合に、単独 AE センサによる損傷の距離推定法を適用することが難しくなる。

しかし、 $[90_2/0_2]_S$ におけるトランスバースクラックの損傷位置だけでも推定できることは、有意義であると考えられる。まず、トランスバースクラックは微小な損傷で、一般的な非破壊検査法で検出することが難しい。更に、CFRP 積層板における通常の破壊過程では、まずトランスバースクラックが発生し、そのクラックチップでの応力集中により層間剥離が誘起される。つまり、材料試験中の初期段階で発生したトランスバースクラックの位置を推定することによって、層間剥離が発生する可能のある位置を把握できると考えられる。

よって、この手法により、遠隔 AE 計測法は、材料試験中に複合材料に発生した損傷の形態の同定だけでなく、その損傷位置の推定も可能となることが期待できる。

第7章：結論と今後の展開

7.1 結論

本研究では、極限環境下での複合材料における内部損傷進展挙動を、非破壊検査で実際の実験観察に基づいて解明したいという航空機産業界のニーズを出発点として、高感度な光ファイバ PSFBG センサを用いて 1000°C 前後までの高温環境に適用可能な超音波計測法及び AE 計測法を構築することを試みた。

始めにまず、光ファイバ PSFBG センサを高温環境に直接設置する形で超音波を計測するために、熱アニーリング処理を行うことで、その PSFBG センサから 1000°C までの耐熱性を有する RFBG センサに形成した。RFBG センサは温度センサとして実用化した前例があったが、本研究で初めて、その RFBG センサを用いて 1000°C の温度環境での超音波計測に成功した。今後、RFBG センサの感度と高温環境下での安定性を向上することができれば、このセンサによる AE 計測法は、高温環境下での材料試験中の非破壊検査法として有望であると考えられる。

さらに、高感度な光ファイバセンサの特殊遠隔設置法である ADRM 構成を提案することで、1000°C までの高温環境に適用可能な遠隔 AE 計測法を構築した。その遠隔 AE 計測法は、耐熱性に優れる光ファイバの一点を高温環境に設置し、その光ファイバに沿って AE 波を伝播させ、高温から離れたところに設置した PSFBG センサでその AE 波を受信する。遠隔で設置した PSFBG センサは高温に曝されることなく、高温環境において発生した AE に対しても、高感度かつ安定して応答することができる。なぜなら、PZT センサを高温環境下での AE 計測に適用する際に使われている金属製の導波棒とは異なり、光ファイバ・ウェーブガイドは、耐熱性に優れるだけでなく、理想的な超音波の伝播媒体でもあるためである。その理由として、直径が 0.15 mm と十分小さい糸状である光ファイバ・ウェーブガイドにおいては、金属製導波棒内部のような反射や散乱による波形の変形や伝播中の減衰が生じないため、計測対象の板材を伝わる超音波ラム波は、ADRM 構成における接着点において、糸を伝わる純粋な縦波と横波に変換されて伝播する特徴を有する。さらに、PSFBG センサは、光ファイバのコア、すなわち中心軸付近に位置するため、縦波のみを選択的に受信する。つまり、板材を伝わるラム波は、その波形を保ったまま分散性のない縦波とし

て光ファイバを伝わり、遠隔で設置された PSFBG センサまで届く。そのため、PSFBG センサを高温環境から遠隔で設置しても、その環境における AE 波を遠隔で正確に計測することができる。

さらに本研究では、高温環境下で発生した AE 波を検知するだけでなく、複合材料の内部損傷進展挙動を評価するため、損傷形態の同定といった、より高次の機能を実現することも目標とした。ここでは、 $[90_2/0_2]_s$ の CFRP クロスプライ積層板の三点曲げ試験中に発生した、トランスバースクック、層間剥離、および繊維破断による AE 信号を識別することを試みた。PZT センサは AE 波に伴う変位、ひずみ、加速度などを混在して計測するのに対し、PSFBG センサは AE 波伝播に伴うひずみの変化のみを計測する。つまり、PSFBG センサによる受信波形は計測物理量が明確である。その優れた計測特性を利用し、AE 信号に含まれているラム波モードと損傷形態との関連性を解明した。さらに、PSFBG センサは広帯域性を有するため、AE 信号のピーク周波数とラム波モード振幅比との関連性も明らかにできた。従って、周波数特性とラム波モード特性は、AE 信号から損傷形態を定性的に同定するための、適切な物理的根拠になるといえる。

さらに、本手法におけるデータ解析プロセスの効率化を図るためには、定量的に AE 信号の特性を評価することが望まれる。そこで、それらの物理的特性を E/F 比とピーク周波数といった特徴的な数値で評価し、AE 信号をパラメータ化した。そして、AE 信号はそれらの 2 次元のデータで表現した。そして、三点曲げ試験中に検出した全ての AE イベントの 2 次元データセットに機械学習を適用した結果、それらの AE イベントを、3 種類の損傷による AE 信号に的確に分類できた。これらの AE 信号の発信源である損傷形態は、ラム波モードの挙動の相違に基づいて分類されたため、本研究で確立した同定手法は、物理的な信頼性に優れているといえる。それと共に、2 次元データで表現した AE 信号に機械学習を適用することによって、データ分析の高効率化も図れ、大規模な AE 信号データセットを簡便に処理することが可能となった。よって本研究では、信頼性と実用性の高い、複合材料における内部損傷形態の同定方法を提案できたと考えている。

さらに、遠隔 AE 計測法の付加価値を高めるため、この方法を用いた損傷位置標定手法も考案した。この手法は、2 個以上のセンサを使用する一般的な位置標定法とは異なり、単独センサで捉えた複数モードを利用することで実現できる。具体的には、ADRM 構成における PSFBG センサは、接着点におけるラム波モードをそのまま遠隔で計測できるため、群速度が異なる S_0 モードと A_0 モードの接着点での到達時間差を、1 個のセンサによる計測結果からの的確に抽出でき、損傷の位置と接着点との距離を推定可能にした。

以上、 1100°C の高温環境に適用可能な遠隔 AE 計測法を構築し、さらに、その方法を用いて、複合材料における内部損傷形態の同定や損傷の位置標定などの高次の機能も実現できた。従って、本手法は、特殊環境で使用される複合材料の信頼性を向上するための非破壊検査 AE 計測法として活用されることが期待できる。

7.2 今後の展開

複合材料の適用は航空機の胴体や一般的部品に止まらず、飛行機の心臓であるエンジンにまで広がりつつである。2016年に CMC 製部品を使用した、世界最大の航空機エンジンとなる「GE9X」の初期試運転は成功した。この試運転は、CMC 複合材料を商用ジェットエンジンへ適用する幕開けと言えるであろう。そのため今後は、CMC 製部材の安全性・信頼性を向上することが必須となる。高温環境下で航空機エンジン部材が稼働している時の損傷をモニタリングすることにより、エンジンの安全性・信頼性を高めることが望まれるが、実現するのは困難である。そのため、まず AE 計測などの非破壊検査によって、クーポン試験片レベルでの材料試験における損傷進展挙動を解明することによって、実稼働中の CMC 製エンジン部品の損傷進展挙動を予測するためのデータベースを構築することが、現段階では現実的であると考えられる。

本研究で提案した遠隔 AE 計測法を用いれば、エンジン内部の高温実環境を模擬して実施する材料試験においても、リアルタイムで損傷発生を検知可能な非破壊検査法を構築することが可能となる。更に、本研究では、損傷検知だけではなく、複合材料における内部損傷進展挙動を解明することを目的とした損傷形態の同定法も構築した。以上の本研究の成果を踏まえ、非破壊検査によって極限環境下での CMC などの複合材料における内部損傷形態を評価可能にするためには、下記の課題の解決が必要であると考えている。

7.2.1 今後の課題①：遠隔 AE 計測法の超高温環境への適用

本研究では、遠隔 AE 計測を用いて 1100°C までの高温環境下における AE 信号を計測できた。この温度範囲は、酸化系 CMC 製エンジン部品が稼働可能な最高温度条件に近い。そのため、高温環境下で引張試験などの材料試験を実施し、酸化系 CMC に発生した AE を計測することによって、損傷進展挙動を評価可能にすることが期待できる。

しかしながら、石英ガラス製光ファイバは、1000°C 前後まで安定した性質を持つが、非酸化系 CMC が稼働する 1500°C~2000°C の超高温環境に適用することは難しいと考えられる。その超高温の極限環境での AE 計測を実現するためには、サファイアファイバなどの、耐熱性の極めて優れた光ファイバが必要となる。しかし、サファイアファイバに精密に FBG センサを加工することは難しい。そこで、サファイアファイバを、PSFBG センサが形成された石英ガラス製ファイバに融着した上で、その耐熱ファイバの一点を高温環境に設置し、石英ガラスファイバを常温環境に配置するといった拡張が必要となる。ただし、二つの物性値すなわち超音波インピーダンスの異なる光ファイバを融着することにより構成された光ファイバ・ウェーブガイドにおける、その融着界面は、超音波の伝搬挙動に影響を与えると考えられる。そのため、異種ファイバの融着点の影響を評価することが、この課題の重要なポイントとなる。

7.2.2 今後の課題③：E/F 比とピーク周波数以外の物理的特徴量に関する検討

ラム波の挙動は、損傷の相違によって変化するだけではなく、他の要因にも依存する。このため、大規模な数の AE 信号に機械学習法を用いて損傷形態を的確に同定するには、損傷形態以外の要因も明らかにしておく必要がある。そして、E/F 比とピーク周波数以外のパラメータも導入することによって、それらの他の要因が損傷形態の同定にもたらす影響も考慮しなければならない。

例えば本研究では、AE 信号から損傷形態を同定する際には、1 個の AE 信号が 1 個の損傷に対応すると仮定している。しかし実際には、複数の損傷が同時に発生し、1 つの AE 信号として計測されるケースも少なくない。例えば、[90₂/0₂]_s の三点曲げ試験においては、トランスバースクラックが 90 度層に発生し、そのクラックが 0 度層と 90 度層との界面まで進展して層間剥離を発生させた結果、1 個の AE 信号に 2 個の異なる損傷形態による AE 波が重なっている可能性がある。この場合は、E/F 比とピーク周波数を利用しただけでは、同定結果に誤った判断が生じると考えられる。そこで、そのような誤診を最小に抑え、より安定した損傷形態の同定法を構築するため、E/F 比とピーク周波数以外に、他の物理的パラメータを加え、2 次元だけではなく多次元で AE データを表現する必要がある。例えば、AE 信号のエネルギーを用いることで、1 つの AE イベントに複数の損傷が入っているかどうかを判断することが挙げられる。

今後、本研究で提案した損傷形態の同定方法の実用性を高めていく上では、より複雑な現象に直面することが予想でき、それらの問題を解決するためには、より多くの条件での実験と、様々な条件でのシミュレーションの実行により、その他の適切なパラメータを検討することが望まれる。

7.2.3 今後の課題④：AE 計測波形に基づく CMC 中の損傷形態同定手法の確立

CFRP 積層板における内部損傷形態の同定手法を踏まえ、今後は、母材き裂、繊維破断、母材-繊維間の剥離、といった CMC の代表的な損傷が AE 発信源となる場合のそれぞれの特徴（発信源の方向性と周波数特性など）を探る。そして、実験と数値解析によって、それらの特徴が AE 波に含まれる波動モードの挙動に与える影響を調べ、波動モードと損傷形態の関連性を明らかにする。そして、その関係に基づき、AE 計測から損傷形態を同定する方法を確立する。

ただし、実用化が期待されている 3 次元織物の CMC における波動モードの伝播挙動は、一方向プリプレグから成形した CFRP 積層板とは大きく異なると考えられる。その波動伝播の相違は、AE 信号からの損傷形態の同定にどのような影響を与えるのか、十分な検討が必要である。しかも、CFRP クロスプライ積層板比べると、CMC における損傷進展挙動は遥かに複雑であるため、AE 信号も複雑になると考えられる。その複雑な AE 信号からどのよ

うな物理的パラメータを抽出できるのかも重要となる。

以上のような問題点は、本研究で提案した手法だけを用いて解決することは、難しいと考えられる。上記の 7.2.2 節と 7.2.3 節で言及した課題を検討しつつ、CMC 中の損傷形態を同定する手法を着実に確立することが必要である。

7.2.4 予想されるインパクト及び将来の見通し

以上の課題を解決していくことによって、常温環境から超高温などのような極限環境までに適用可能な AE 計測法を構築することが期待できる。それと共に、複合材料における損傷形態をよりの確に同定することは、構造材料工学の分野への貢献も大きいと考えられる。そして、極限環境における複合材の破壊過程を実験的に明らかにできれば、複合材料自身の開発と複合材料構造の設計の両面における寄与も大きい。これにより、安全性と信頼性が高く、燃費に優れた航空機エンジンの実現への貢献も大きいと考えている。

参考文献

- [1] Lee DS, Fahey DW, Forster PM, Newton PJ, Wit RCN, Lim LL, et al. Aviation and global climate change in the 21st century. *Atmospheric Environment*. 2009;43:3520-37.
- [2] Boucher O. Atmospheric science: Seeing through contrails. *Nature Clim Change*. 2011;1:24-5.
- [3] Hale J. Boeing 787 from the ground up. *Aero*. 2006;4:17-24.
- [4] Marsh G. Airbus takes on Boeing with reinforced plastic A350 XWB. *Reinforced Plastics*. 2007;51:26-9.
- [5] Marsh G. Aero engines lose weight thanks to composites. *Reinforced Plastics*. 2012;56:32-5.
- [6] Marsh G. Composites get in deep with new-generation engine. *Reinforced Plastics*. 2006;50:26-9.
- [7] Yoshimura A, Ogasawara T, Suemasu H. Validation of thermal stress reduction design of CFRP cryogenic propellant tank by LN2 immersion test. JAXA research and development memorandum. 2013;JAXA-RM-12-012:8.
- [8] Ogasawara T, Arai N, Fukumoto R, Ogawa T, Yokozeki T, Yoshimura A. Titanium alloy foil-inserted carbon fiber/epoxy composites for cryogenic propellant tank application. *Advanced Composite Materials*. 2014;23:129-49.
- [9] 庄司 香, 臼井 基, 磯部 大. 日陰時における宇宙用大型展開アンテナの熱変形補正に関する数値解析的検証 (第1報, 熱変形補正の基礎的検討および熱変形再現解析). *日本機械学会論文集*. 2015;81:15-00351-15-.
- [10] No easy solutions for aerospace. *Nat Mater*. 2016;15:803-.
- [11] Padture NP. Advanced structural ceramics in aerospace propulsion. *Nat Mater*. 2016;15:804-9.
- [12] 香川 豊. セラミックス系複合材料へ期待してきたことと現状. *まてりあ*. 1999;38:408-11.
- [13] Naslain R. Design, preparation and properties of non-oxide CMCs for application in engines and nuclear reactors: an overview. *Composites Science and Technology*. 2004;64:155-70.

- [14] Mehrman JM, Ruggles-Wrenn MB, Baek SS. Influence of hold times on the elevated-temperature fatigue behavior of an oxide-oxide ceramic composite in air and in steam environment. *Composites Science and Technology*. 2007;67:1425-38.
- [15] Michael H, Martha J, James K, Dongming Z. Evaluation of Ceramic Matrix Composite Technology for Aircraft Turbine Engine Applications. 51st AIAA Aerospace Sciences Meeting including the New Horizons Forum and Aerospace Exposition: American Institute of Aeronautics and Astronautics; 2013.
- [16] Dever JA, Nathal MV, DiCarlo JA. Research on High-Temperature Aerospace Materials at NASA Glenn Research Center. *Journal of Aerospace Engineering*. 2013;26:500-14.
- [17] Kiser JD, Bansal NP, Szelagowski J, Sokhey JJ, Heffernan T, Clegg J, et al. Oxide/Oxide Ceramic Matrix Composite (CMC) Exhaust Mixer Development in the NASA Environmentally Responsible Aviation (ERA) Project. ASME Turbo Expo 2015: Turbine Technical Conference and Exposition: American Society of Mechanical Engineers; 2015. p. V006T02A2-VT02A2.
- [18] Continuous Lower Energy, Emissions and Noise (CLEEN) Technologies Development: Boeing Program Overview. 2010.
- [19] GE Aviation fired up on CMCs. http://www.geaviation.com/press/ge90/ge90_20150908.html.
- [20] 中村 武, 岡 尚, 今成 邦. 航空機エンジン用 CMC タービン部品の開発 (ジェットエンジン特集号). *IHI 技報 = Journal of IHI technologies*. 2013;53:34-7.
- [21] I H I、G E の新型エンジン「G E 9 X」で参画シェア 1 0 % 超が確実に. 2016.
- [22] Raether F. CERAMIC MATRIX COMPOSITES- AN ALTERNATIVE FOR CHALLENGING CONSTRUCTION TASKS.
- [23] Momon S, Godin N, Reynaud P, R'Mili M, Fantozzi G. Unsupervised and supervised classification of AE data collected during fatigue test on CMC at high temperature. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*. 2012;43:254-60.
- [24] Kirk KJ, Scheit CW, Schmarje N. High-temperature acoustic emission tests using lithium niobate piezocomposite transducers. *Insight - Non-Destructive Testing and Condition Monitoring*. 2007;49:142-5.
- [25] Johnson JA, Kim K, Zhang S, Wu D, Jiang X. High-temperature (> 1000 °C) acoustic emission sensor. 2013. p. 869428--12.
- [26] Kersey AD, Davis MA, Patrick HJ, LeBlanc M, Koo KP, Askins CG, et al. Fiber grating sensors. *Journal of Lightwave Technology*. 1997;15:1442-63.
- [27] Perez IM, Cui H, Udd E. Acoustic emission detection using fiber Bragg gratings. SPIE's 8th Annual International Symposium on Smart Structures and Materials: International Society for Optics and Photonics; 2001. p. 209-15.

- [28] Jiang M-s, Sui Q-m, Jia L, Peng P, Cao Y. FBG-based ultrasonic wave detection and acoustic emission linear location system. *Optoelectronics Letters*. 2012;8:220-3.
- [29] Tsuda H, Sato E, Nakajima T, Nakamura H, Arakawa T, Shiono H, et al. Acoustic emission measurement using a strain-insensitive fiber Bragg grating sensor under varying load conditions. *Opt Lett*. 2009;34:2942-4.
- [30] Wu Q, Okabe Y. High-sensitivity ultrasonic phase-shifted fiber Bragg grating balanced sensing system. *Opt Express*. 2012;20:28353-62.
- [31] Rosenthal A, Razansky D, Ntziachristos V. High-sensitivity compact ultrasonic detector based on a pi-phase-shifted fiber Bragg grating. *Opt Lett*. 2011;36:1833-5.
- [32] Arie A, Lissak B, Tur M. Static Fiber-Bragg Grating Strain Sensing Using Frequency-Locked Lasers. *Journal of Lightwave Technology*. 1999;17:1849.
- [33] Minardo A, Cusano A, Bernini R, Zeni L, Giordano M. Response of fiber Bragg gratings to longitudinal ultrasonic waves. *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control*. 2005;52:304-12.
- [34] Yu F, Wu Q, Okabe Y, Kobayashi S, Saito K. The identification of damage types in carbon fiber-reinforced plastic cross-ply laminates using a novel fiber-optic acoustic emission sensor. *Struct Health Monit*. 2016;15:93-103.
- [35] 水谷 忠, 武田 展. 光ファイバセンサによる極低温でのひずみ計測技術とその航空宇宙分野における応用. *日本航空宇宙学会論文集*. 2010;58:24-30.
- [36] Hill KO. Fiber Bragg grating technology fundamentals and overview. *Journal of lightwave technology*. 1997;15:1263-76.
- [37] Kashyap R. *Fiber bragg gratings*: Academic press; 1999.
- [38] Starodubov DS, Grubsky V, Feinberg J, Kobrin B, Juma S. Bragg grating fabrication in germanosilicate fibers by use of near-UV light: a new pathway for refractive-index changes. *Opt Lett*. 1997;22:1086-8.
- [39] Askins CG, Putnam MA, Williams GM, Friebele EJ. Stepped-wavelength optical-fiber Bragg grating arrays fabricated in line on a draw tower. *Opt Lett*. 1994;19:147-9.
- [40] Mihailov SJ. Fiber Bragg grating sensors for harsh environments. *Sensors*. 2012;12:1898-918.
- [41] Fokine M. Formation of thermally stable chemical composition gratings in optical fibers. *J Opt Soc Am B*. 2002;19:1759-65.
- [42] Fokine M. Thermal stability of chemical composition gratings in fluorine-germanium-doped silica fibers. *Opt Lett*. 2002;27:1016-8.
- [43] Fokine M. Underlying mechanisms, applications, and limitations of chemical composition gratings in silica based fibers. *Journal of Non-Crystalline Solids*. 2004;349:98-104.

- [44] Canning J, Stevenson M, Bandyopadhyay S, Cook K. Extreme Silica Optical Fibre Gratings. *Sensors*. 2008;8:6448.
- [45] Fokine M. Growth dynamics of chemical composition gratings in fluorine-doped silica optical fibers. *Opt Lett*. 2002;27:1974-6.
- [46] Bandyopadhyay S, Canning J, Stevenson M, Cook K. Ultrahigh-temperature regenerated gratings in boron-codoped germanosilicate optical fiber using 193 nm. *Opt Lett*. 2008;33:1917-9.
- [47] Zhang B, Kahrizi M. High-Temperature Resistance Fiber Bragg Grating Temperature Sensor Fabrication. *IEEE Sensors Journal*. 2007;7:586-91.
- [48] Laffont G, Cotillard R, Ferdinand P. Multiplexed regenerated fiber Bragg gratings for high-temperature measurement. *Measurement Science and Technology*. 2013;24:094010.
- [49] Åslund ML, Canning J, Canagasabay A, de Oliveira RA, Liu Y, Cook K, et al. Mapping the thermal distribution within a silica preform tube using regenerated fibre Bragg gratings. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2012;55:3288-94.
- [50] Wang T, Shao L-Y, Canning J, Cook K. Temperature and strain characterization of regenerated gratings. *Opt Lett*. 2013;38:247-9.
- [51] Grubsky V, Starodubov DS, Feinberg J. Photochemical reaction of hydrogen with germanosilicate glass initiated by 3.4–5.4-eV ultraviolet light. *Opt Lett*. 1999;24:729-31.
- [52] Davis KM, Miura K, Sugimoto N, Hirao K. Writing waveguides in glass with a femtosecond laser. *Opt Lett*. 1996;21:1729-31.
- [53] Smelser CW, Mihailov SJ, Grobnic D. Formation of Type I-IR and Type II-IR gratings with an ultrafast IR laser and a phase mask. *Opt Express*. 2005;13:5377-86.
- [54] Grobnic D, Mihailov SJ, Smelser CW, Huimin D. Sapphire fiber Bragg grating sensor made using femtosecond laser radiation for ultrahigh temperature applications. *IEEE Photonics Technology Letters*. 2004;16:2505-7.
- [55] Wang J, Dong B, Lally E, Gong J, Han M, Wang A. Multiplexed high temperature sensing with sapphire fiber air gap-based extrinsic Fabry–Perot interferometers. *Opt Lett*. 2010;35:619-21.
- [56] Moevus M, Godin N, R'Mili M, Rouby D, Reynaud P, Fantozzi G, et al. Analysis of damage mechanisms and associated acoustic emission in two SiCf/[Si–B–C] composites exhibiting different tensile behaviours. Part II: Unsupervised acoustic emission data clustering. *Composites Science and Technology*. 2008;68:1258-65.
- [57] Godin N, Huguet S, Gaertner R. Integration of the Kohonen's self-organising map and k-means algorithm for the segmentation of the AE data collected during tensile tests on cross-ply composites. *NDT & E International*. 2005;38:299-309.
- [58] De Groot PJ, Wijnen PA, Janssen RB. Real-time frequency determination of acoustic

emission for different fracture mechanisms in carbon/epoxy composites. *Composites Science and Technology*. 1995;55:405-12.

[59] Ramirez-Jimenez CR, Papadakis N, Reynolds N, Gan TH, Purnell P, Pharaoh M. Identification of failure modes in glass/polypropylene composites by means of the primary frequency content of the acoustic emission event. *Composites Science and Technology*. 2004;64:1819-27.

[60] Gutkin R, Green CJ, Vangrattanachai S, Pinho ST, Robinson P, Curtis PT. On acoustic emission for failure investigation in CFRP: Pattern recognition and peak frequency analyses. *Mech Syst Signal Pr*. 2011;25:1393-407.

[61] Valentin D, Bonniau P, Bunsell A. Failure mechanism discrimination in carbon fibre-reinforced epoxy composites. *Composites*. 1983;14:345-51.

[62] Berthelot J, Rhazi J. Acoustic emission in carbon fibre composites. *Composites Science and Technology*. 1990;37:411-28.

[63] Ni Q-Q, Iwamoto M. Wavelet transform of acoustic emission signals in failure of model composites. *Eng Fract Mech*. 2002;69:717-28.

[64] Gorman MR, Prosser WH. AE source orientation by plate wave analysis. 1991.

[65] Surgeon M, Wevers M. Modal analysis of acoustic emission signals from CFRP laminates. *Ndt&e Int*. 1999;32:311-22.

[66] Mizutani Y, Nagashima K, Takemoto M, Ono K. Fracture mechanism characterization of cross-ply carbon-fiber composites using acoustic emission analysis. *NDT & E International*. 2000;33:101-10.

[67] Johnson M, Gudmundson P. Broad-band transient recording and characterization of acoustic emission events in composite laminates. *Composites Science and Technology*. 2000;60:2803-18.

[68] Scholey JJ, Wilcox PD, Wisnom MR, Friswell MI. Quantitative experimental measurements of matrix cracking and delamination using acoustic emission. *Composites Part A*. 2010;41:612-23.

[69] Hamstad M, O'GALLAGHER A, Gary J. A wavelet transform applied to acoustic emission. *Journal of Acoustic Emission*. 2002;20:39-61.

[70] Prosser WH, Hamstad MA, Gary J, O'Gallagher A. Finite Element and Plate Theory Modeling of Acoustic Emission Waveforms. *Journal of Nondestructive Evaluation*. 1999;18:83-90.

[71] Sause MGR, Müller T, Horoschenkoff A, Horn S. Quantification of failure mechanisms in mode-I loading of fiber reinforced plastics utilizing acoustic emission analysis. *Composites Science and Technology*. 2012;72:167-74.

[72] Okabe Y, Fujibayashi K, Shimazaki M, Soejima H, Ogisu T. Delamination detection in

composite laminates using dispersion change based on mode conversion of Lamb waves. *Smart materials and structures*. 2010;19:115013.

[73] Wu Q, Yu F, Okabe Y, Kobayashi S. Application of a novel optical fiber sensor to detection of acoustic emissions by various damages in CFRP laminates. *Smart Materials and Structures*. 2015;24:015011.

[74] Wu Q, Yu F, Okabe Y, Saito K, Kobayashi S. Acoustic emission detection and position identification of transverse cracks in carbon fiber–reinforced plastic laminates by using a novel optical fiber ultrasonic sensing system. *Struct Health Monit*. 2014:1475921714560074.

[75] Frieden J, Cugnoni J, Botsis J, Gmür T. Low energy impact damage monitoring of composites using dynamic strain signals from FBG sensors – Part II: Damage identification. *Composite Structures*. 2012;94:593-600.

[76] Culshaw B, Thursby G, Betz D, Sorazu B. The Detection of Ultrasound Using Fiber-Optic Sensors. *IEEE Sensors Journal*. 2008;8:1360-7.

謝辞

本研究を行うにあたり、多くの方のご指導とご協力をいただきました。ここで謝辞を述べさせていただきます。

岡部洋二准教授には、IHI（株）との共同研究に参加する、貴重な機会を与えていただきました。その共同研究から、極限環境下での AE 計測に関する研究テーマが生まれることで、最先端の研究開発に触れる機会を得ることができました。さらに、快適かつ迅速に研究を進めることができる、恵まれた整備環境も与えて頂きました。また、研究を進めていく上で多くの助言やご指導を頂きました。私の研究のために夜遅くまでご指導いただくことも少なくありませんでした。先生の研究に対する真摯な姿勢からは、多くのことを学ばせて頂きました。そして、日本語が上達していない私に対して、言語についても丁寧にご指導いただきました。また、研究・勉強だけではなく、研究職を目指す私の進路や生活などの面でもアドバイスをして下さいました。この場を借りて深く感謝致します。ありがとうございました。今後ともご指導ご鞭撻のほどよろしくお願いします。

IHI（株）の篠原健一様、野村武弘様、重田尚樹様には、共同研究を行っていく上で、色々とお世話になりました。特に、研究の方向性を明確にする上で必要な、産業界で実際に存在するニーズについてお教えいただき、そして研究に対する実用面からの改善方針などについて、いつも迅速なフィードバックをしていただきました。深く感謝致します。

また、研究室の皆さんにも、研究を進めるにあたって多大なご協力を頂きました。

斎藤一哉助教には、研究を始めるにあたり多くのご助言とご協力を賜りました。また、研究だけでなく日頃の研究室生活でも大変お世話になり、色々な相談に親身になって乗って下さいました。深く感謝いたします。

呉奇氏には、高性能光ファイバセンサを開発していただきました。そのセンサを土台にして、現在の研究を継続的に進めることができました。深く感謝いたします。

斎藤理特任研究員には、超音波などに関する専門知識や理論について、いつも丁寧に分かりやすく、説明して下さいました。深く感謝いたします。

五十嵐明子氏には、事務の面で多大な協力を賜りました。深く感謝いたします。

そのほか、研究室の学生同士である、鄧培文氏、郭歆氏、藤本明伸氏、孔文勝氏、蔡佳恒氏、西本涼介氏、蘇暢氏、唐朝氏には、ミーティングやゼミなどで深い議論をさせてい

ただくとともに、多大な協力を賜りました。深く感謝いたします。これからも有意義な学生生活を送れることを願っています。

この博士課程の 3 年間は非常に有意義であり、研究活動を通して人間的に大きく成長できたと確信しております。私にとって非常に貴重な 3 年間でした。今後も、極限環境下での複合材料の損傷検知に関する研究が進展していくことを心から願っております。

最後に、様々な面で学生生活をサポートしてくれた両親にこの場を借りて深く感謝いたします。ありがとうございました。