

2023（令和5）年度 修士学位論文

レイリー散乱型光ファイバ分布センサを用いた温度分布測定  
による CFRP 積層板の損傷検出

The identification of delamination in CFRP laminates by  
temperature distribution measurement using Rayleigh scattering  
optical fiber distribution sensors

2024年3月1日

高知工科大学大学院 工学研究科基盤工学専攻  
航空宇宙工学コース

1265028 田尻 史弥

指導教員 高坂 達郎

# 目次

第1章 緒言	2
1.1 研究背景	2
1.2 先行研究	2
1.3 研究目的	4
第2章 光ファイバセンサとFRPの健全性モニタリング	5
2.1 光ファイバセンサ	5
2.2 光ファイバセンサを用いた健全性モニタリング	6
2.3 レイリー散乱型光ファイバ分布センサ	7
第3章 試験片および実験方法	9
3.1 CFRP積層板の成形および試験片	9
3.2 温度分布測定の実験方法の概要	15
第4章 内部損傷を持つ一方向CFRP積層板の熱伝導解析	18
4.1 FEM解析	18
4.1.1 解析に用いる数値	18
4.1.2 熱伝達係数	18
4.2 繊維方向90°の一方向CFRP積層板の熱伝導解析	21
4.2.1 Abaqusを用いた繊維方向90°の熱伝導解析	21
4.2.2 温度分布の時間遷移	22
4.3 繊維方向0°の一方向CFRP積層板の熱伝導解析	25
4.3.1 Abaqusを用いた繊維方向0°の熱伝導解析	25
4.3.2 温度分布の時間遷移	26
4.4 クラックのサイズを縮小したモデルでの熱伝導解析	29
4.4.1 クラック厚みを減らした繊維方向90°の熱伝導解析	29
4.4.2 温度分布の時間遷移	30
4.4.3 クラック厚みを減らした繊維方向0°の熱伝導解析	33
4.4.4 温度分布の時間遷移	34
第5章 温度分布測定に基づく一方向CFRP積層板の損傷同定	37
5.1 赤外線サーモグラフィを用いた繊維方向90°試験片の温度分布測定	37
5.2 熱電対を用いた繊維方向90°試験片の温度分布測定	40
5.3 レイリー散乱型光ファイバ分布センサを用いた繊維方向90°試験片の温度分布測定	42
5.4 温度分布の再現性	45
5.5 周期加熱による複数温度分布データの平均・正規化	46
5.6 レイリー散乱型光ファイバ分布センサを用いた繊維方向0°試験片の温度分布測定	48
5.7 繊維方向0°試験片の正規化した温度分布	49
5.8 クラックサイズを小さくした90°試験片での温度分布測定	50
第6章 結言	52
参考文献	53
謝辞	54
付録	55
A.1 レイリー散乱光データ取得および温度分布測定方法	55
A.2 シリコンラバーヒータの設定	58
A.3 加熱表面の温度分布	59
A.4 レイリー散乱型光ファイバ分布センサ	62

## 第1章 緒言

### 1.1 研究背景

近年では複合材料への注目が集まっており、身の回りの物にも利用されるようになってきている。複合材料とは二種類以上の異なる材料を組み合わせ、それぞれの特性を生かした材料のことである。複合材料の歴史は古くから存在しているが、近年注目されるようになったことの要因として、繊維強化プラスチック(Fiber Reinforced Plastic, FRP)の誕生が挙げられる。この複合材料の一つに炭素繊維強化プラスチック(Carbon Fiber Reinforced Plastic, CFRP)という物がある。この材料は軽量かつ高強度、高剛性であり、航空機などの先端構造の材料として用いられており、機体の軽量化や燃費向上に貢献している。しかし、疲労や衝撃によって層間剥離が生じやすいという欠点を持ち、内部損傷であるため表面からの直接観察が困難である。

航空機の安全性は定期検査において保たれており、機体に生じた損傷を発見、追跡、修理する作業が行われている。しかし、現在の検査法では航空機全体を一度に検出手法がないため、検査に多くの時間を要する。また、検査中は機体を運航できないため、検査時間が長くなるほど損失が大きくなっていく。近年ではFRPの大型化、複雑化が進んでおり、航空機運営の損失を抑え機体の信頼性を向上させるためにもより効率的かつ信頼性の高い検査手法の導入が望まれている。

この問題を解決させる手法として、構造システムの安全性・信頼性を確保しつつ、設計・製造からメンテナンス・修理までのライフサイクルコストを低減することを可能とする構造ヘルスマonitoring(Structural Health Monitoring, SHM)システムが認識されてきている。細径で耐熱性に優れるセンサを用いることで、一方向複合材料プリプレグに用意に埋め込むことができるようになり、複合材中に埋め込み時に欠陥になりにくいと考えられている[1][2]。センサを構造物内部に埋め込むことで内装を剥がさずとも機体の状態を常に監視することができるため、安全性、信頼性の向上が期待でき、定期検査を簡易化することによって検査時間を減らすことができると予想される。また、従来の検査法では叶わなかった運航中での検査も可能となるため、検査をするために運航を停止させる必要がなくなり、結果として運航コストを削減することが可能であると考えられる。

SHMシステムを実現するために注目されているセンサが光ファイバセンサである。このセンサは繊維上で柔軟性があり耐熱性も高いため、材料への埋め込みを容易に行うことができる。また、軽量かつ細径であり耐食性も高いことから、母材に埋め込んでも材料の機械特性をほとんど変化させることなくセンサとしての役割を果たすことができる。また、光ファイバセンサは分布測定が可能であるため、一本で複数のデータを取得することができ、構造物全体の健全性モニタリングに適していると言える[1][2]。

センサに用いられる光ファイバセンサは複数あるが、その中でも近年開発されたレイリー散乱型光ファイバ分布センサはひずみと温度を高精度で測定することができ、損傷の長さが数センチなのに対して1mmという高い分解能を持っていて、測定範囲も最高50mと従来のセンサよりも広いため航空機のSHMシステムに適していると考えた。

### 1.2 先行研究

レイリー散乱型光ファイバ分布センサを用いた研究の中に、ひずみ測定からCFRP積層板の損傷の同定を試みる研究が行われている。この研究では、積層板に荷重をかけた際に生じる表面の圧縮によるひずみ分布の極大値が層間剥離端の位置と一致することから層間剥離形状の同定が可能であることが示されている。DCB試験によるモードIき裂進展試験とENF試験によるモードIIき裂進展試験が行われ、どちらの試験でも層間剥離端の位置同定が可能であることが分かった[3]。しかし、この手法ではアウトークラックの先端位置を同定することはできるが、インナークラックはひずみ分布の変化が少ないため発見しづら

く、また、荷重をかけなければ同定することができない。

一方で、構造物を遠隔から非接触で検査できる手法として、赤外線サーモグラフィによる温度分布測定に基づく非破壊検査手法が注目されている。被測定物に外部から熱負荷が与えられた時、欠陥による断熱効果により熱拡散が妨げられた結果、被測定物表面に現れる局所的な温度変化領域を検出する。熱移動が表面から内部に向かう場合には、欠陥付近の被測定物表面には高温領域が現れ、反対に熱移動が内部から表面に向かう場合には、被測定物表面には低温領域が現れる。被測定物表面に生じた温度変化領域の形状は、内部に存在する欠陥形状を反映したものとなるため、温度変化領域の形状をもとに、欠陥の形状を推定することができる。さらに、熱負荷後の温度変化に関する時系列情報をもとに、欠陥の深さ方向の位置を同定できる[4]。

被測定物に熱負荷を与えるための加熱・冷却方法については様々な方法があり、高精度な欠陥検出を行うためには、欠陥による温度場変化が明瞭となる均質な熱負荷、断熱温度場が顕著に現れるような高効率な熱負荷、被測定物の熱拡散性に応じた最適な熱負荷速度の選定などが要求される。金属材料や CFRP のような炭素繊維複合材は熱拡散性が高いため、欠陥により生じた断熱温度場が熱拡散によって消失しないように、急速な熱負荷を与えた直後の短時間の温度場を高速に計測する必要がある。そこで、フラッシュランプ等によるパルス状の熱負荷を与える方法が用いられている。パルス加熱サーモグラフィによれば高い熱流束を瞬時に測定物へ与えることが可能となるため、欠陥による温度変化が被測定物表面に顕著に現れる。この非定常温度場を、熱拡散による温度変化の損失が起こらない短い時間内に計測することにより、高精度な欠陥検出が可能となる[4]。

パルス状加熱と同様に非定常時の温度分布を利用する検査法として、ロックインサーモグラフィ法が挙げられる。物体に一定周期で変動する熱負荷を与えることにより、物体内部に貼同上の熱移動が生じ、物体の表面温度も一定の周期、振幅で変動し、欠陥が存在すれば変動温度分布にも欠陥の影響が現れるというものである。このような表面温度変動を、参照信号による同期信号処理により高精度にロックイン計測し、温度変動振幅や位相遅れ情報をもとに欠陥を検出する[4][5]。

どちらも非接触かつ非破壊で遠隔からの検査を行うことができ、欠陥の位置・形状が視覚的に同定することができる。しかし、この検査法は温度分布の計測にカメラを必要とするため、測定のために被写体とカメラの間に一定の距離を要する。そのため、構造物によって計測のためには内装を剥がす必要がある部位が存在し、その場合は適応が難しい。そこで、カメラの代わりにレイリー散乱型光ファイバ分布センサを用いて温度分布測定に応用するアイデアを考案した。この手法であればカメラが不要となり、材料にセンサを埋め込んで使用するため測定のために距離を確保する必要もなく、狭い隠れた箇所に対して運用中、駐機中のモニタリングが可能になると推察される。また、赤外線カメラはサンプリング周波数が 60Hz[6] や 100Hz[7] で計測されているのに対し、レイリー散乱型光ファイバ分布センサは測定サイクルが最大 5Hz 程度と応答速度が遅いため、パルス加熱による短い温度変化の時系列情報を得ることが困難であると考えられる。複数ある加熱方法の中で、通電時に発生するジュール熱の検出は、サーモグラフィを用いた電気設備、電気回路および電子部品の不良検出に適用されている。通電方法により電流場を調整することが可能で、CFRP の損傷検出をより効果的に行えるようになり、有効的な加熱手段の一つになると考えられる[8]。そこで、通電時のジュール発熱による加熱方法がレイリー散乱型光ファイバ分布センサに適していると考えた。

### 1.3 研究目的

本研究では、レイリー散乱型光ファイバ分布センサを用いた温度分布測定による、CFRP 積層板に生じた損傷の検出方法の可能性を探ることを目的とした。まず、繊維方向が  $0^\circ$ 、 $90^\circ$  それぞれの一方向 CFRP 積層板の室温の  $24^\circ\text{C}$  から  $43^\circ\text{C}$  まで一定時間で表面加熱した場合の裏面の温度分布を汎用有限要素法解析ソフトの Abaqus を用いて有限要素解析によって計算した。その後、温度の調整が容易であるシリコンラバーヒータを用いて CFRP の表面を加熱し、大気開放されている裏面の中央にレイリー散乱型光ファイバ分布センサを直線状に貼り付け温度分布測定を行った。また、損傷の大きさが異なる場合の温度分布の違いを、それぞれ試験片を用意して実験を行い、温度分布の比較により検証した。

## 第2章 光ファイバセンサと FRP の健全性モニタリング

### 2.1 光ファイバセンサ

光ファイバはプラスチックやガラスなどの素材で形成されており、中心部は光を閉じ込めるコア、それを同心円状に囲むクラッド、ファイバ表面を保護するためのポリアミド被膜から構成されており、直径は約 0.125mm である。ポリアミド被膜はファイバの強度を向上させる働きをしており、これによってセンサを母材に埋め込めるようになるなど、ファイバの取り扱いやすさに貢献している。コア部はクラッド部に比べて光の屈折率が高いため、ファイバの端面から入射された光はコアとクラッドの境界面で全反射され、コア内に閉じ込められて伝搬する[9][10]。光ファイバ中を伝搬する光波の位相、損失、散乱などは外的要因によって変化し、これが光ファイバのセンサとして機能する。

光ファイバは情報伝送路による一次元的な広がりを持っており、ファイバの長さ方向の被測定量分布を測定する手法の開発が進められている。その一つに OTDR(Optical Time Domain Reflectometry)手法を用いた分布型のセンサがあり、測定原理を図 2.1 に示す。OTDR は光源から短パルスを入射し、パルスの伝送時間差  $\Delta u$  から後方散乱光が発生する位置を測定する。このとき計測される散乱光の一つにブリルアン散乱光がある。これは入射光に対して周波数が増えるため、散乱が発生した位置での周波数変化から温度およびひずみ測定が可能となる[3]。

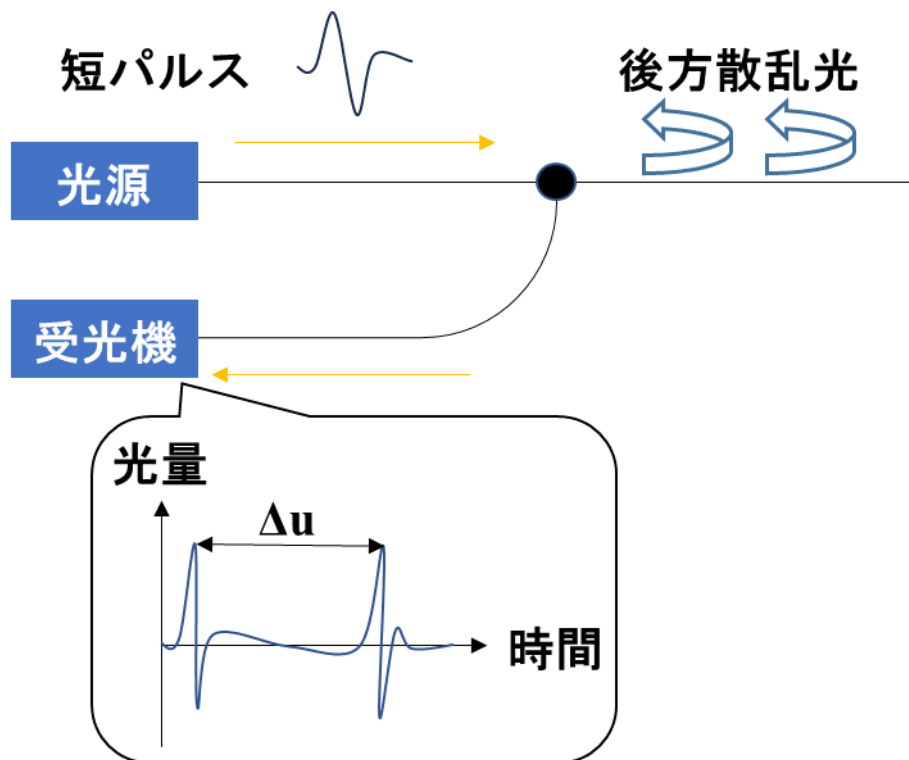


図 2.1 OTDR 法の測定原理

他の分布型センサの手法として、OFDR(Optical Frequency Domain Reflectometry)手法を用いた分布センサがあり、測定原理を図 2.2 に示す。この手法では反射光と散乱光を干渉させる。位相が一致した時に光強度が最も大きくなるため、特定の位置の反射光信号を得ることができる。散乱光の位相を動かす手法としては、ミラー位置を動かす手法や光源波長を動かす手法などがある。受光機から得たデータを FFT 処理することで光ファイバ位置の光量データが得られる。OFDR の特徴として高い空間分解能があり、設定によっては 1 $\mu$ m の高精度な空間分解能で測定することが可能である[参考文献(3)]。

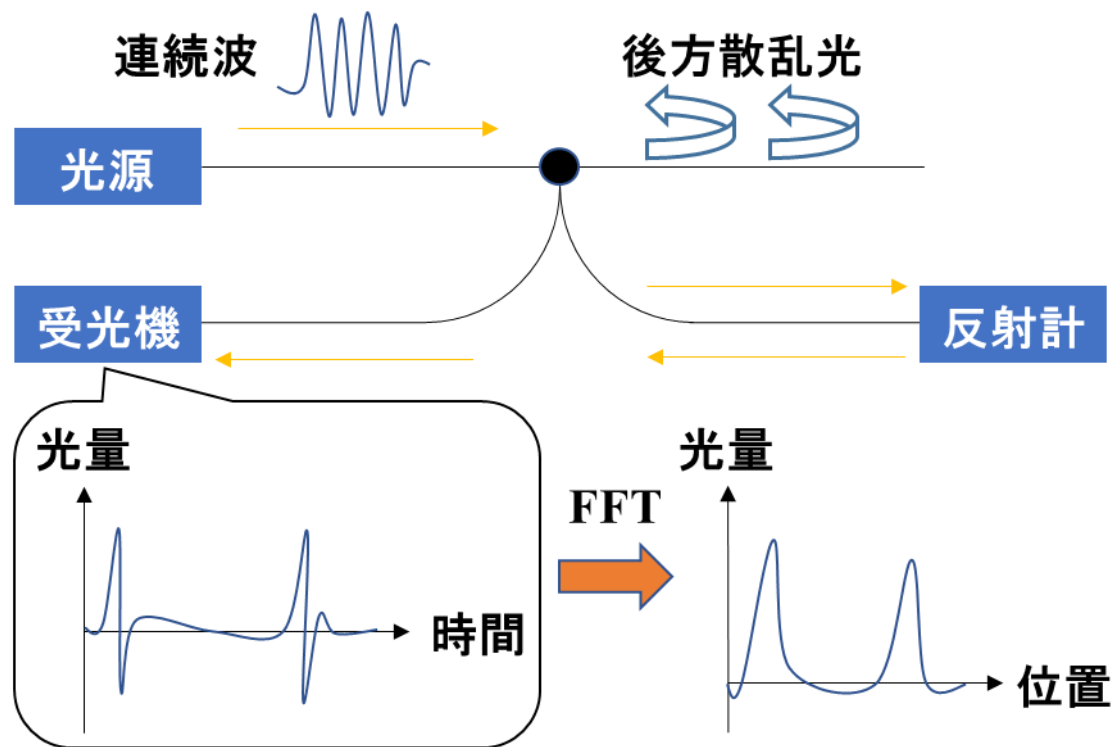


図 2.2 OFDR 法の測定原理

OFDR を用いて後方散乱光の一種であるレイリー散乱光を測定するセンサがレイリー散乱型光ファイバ分布センサである。レイリー散乱光は入射光と同じ周波数を持ち、散乱光の中で最も強いが、散乱体の情報をほとんど持たないため直接ひずみを得ることはできない。光ファイバの中のレイリー散乱は接続部で強く生じるが、コアとクラッドの界面の不整合によっても生じることが知られている。よって、レイリー散乱型光ファイバ分布センサを用いれば、光ファイバ中の界面の不整合や傷の分布を知ることができる [3].

## 2.2 光ファイバセンサを用いた健全性モニタリング

軽量かつ高強度という特性から航空機などの先端構造に用いられている CFRP だが、積層構造という性質上、繊維間の層間剥離によるき裂進展が発生しやすく、損傷の影響で部材の厚みが減ってしまい圧縮荷重や疲労に弱くなるため、運用寿命が大きく変化してしまう。その上、発生した剥離は内部損傷であるため目視による発見が困難であるため、CFRP の構造物内部にセンサを埋め込み、駐機、運用時間問わず部材の状態をモニタリングすることで損傷位置や大きさを同定することができる SHM システム技術の研究が進められている。

これまでの研究で、SHM システム技術に応用できる光ファイバセンサが複数挙げられていたので、過去の研究を参考にセンサをいくつか紹介する。

### (1) FBG(Fiber Bragg Grating)センサ

FBG センサには、コア部に周期的な屈折率変化を持つ格子が作られ、広帯域光を FBG に入射すると、格子間隔に比例した波長を持つ狭帯域光のブラッグ波長を持つブラッグ回折光が反射する。中心波長のシフト量は温度及び軸ひずみの増分に比例するため、波長シフトから温度と軸ひずみを取得することができる [11]. FBG センサは  $1\mu$  の高いひずみ感度と安定性、埋め込み性を持つため、SHM において FRP の内部ひずみ測定で多く利用されている [12][13]. ただし、 $1\mu\epsilon$  あたり  $0.1^\circ\text{C}$  に相当する温度

依存性を持つため、温度変化が伴う場合のモニタリングでは注意が必要である。また、異なるブラッグ波長を持つ FBG センサを一本の光ファイバセンサに多重化させることで、測定点を容易に増やすことができる。

## (2) B-OTDR(Brillouin Optical Time Domain Reflectometer)

光ファイバの片端からレーザーパルス光を入射すると、光の伝搬に伴いファイバの内部で後方散乱光が生じる。この中でエネルギーによってガラスの密度の微小な揺らぎにより発生する散乱光が存在し、ブリルアン散乱光と呼ばれる。この散乱光は負荷された温度とひずみに比例して周波数が変化する特性があり、周波数変化から発生した温度とひずみ量と位置を計測器への戻り時間から求めることができる。また、ブリルアン散乱光は任意の位置で発生するため、光ファイバに沿って温度やひずみ分布を連続的に求めることができる。BOTDR は求められる分布の空間分解能がパルス幅で制限されており、測定間隔を小さくする必要のある構造物には向かないため大規模構造のモニタリングに利用されている[14]。

## (3) EFPI(Extrinsic Fabry-Perot Interferometer)型光ファイバセンサ

このセンサはガラス成分のキャピラリ内で入射用と反射用の 2 本の光ファイバを、特定の長さのギャップ長を挟んで先端が向かい合わせになるよう製作されている。光ファイバの直径が 0.125mm であるのに対しキャピラリは外径 0.570mm、内径 0.140mm である。入射用のファイバ端面と反射用の端面で反射した光による干渉校がセンサから戻る。この干渉校からギャップ長の変化を計算し、それをゲージ長で割ることでひずみが求められる。EFPI センサは埋め込みによる残留応力の影響を受けず、センサの構造を変えることで高い精度を容易に持たせることができるため、様々な測定パターンに応じた EFPI センサの開発が進んでいる[15]。

## 2.3 レイリー散乱型光ファイバ分布センサ

本研究で使用したセンサを図 2.3, 2.4 に示す。図 2.3 は米国の LUNA Technologies 社が開発した ODiSI A-50 で、図 2.4 のレイリー散乱型光ファイバ分布センサを接続して用いる。測定範囲は 1m~50m、最小測定ピッチ 1mm、温度分解能 0.1°C、ひずみ測定範囲 $\pm 10000\mu$ 、ひずみ分解能 1 $\mu$ 、測定サイクルは $\sim 5$ Hz で、ひずみ分布と温度分布を測定することが可能となっている。本システムはレイリー散乱光強度分布を取得した後に解析を行い、ひずみと温度の分布を出力するため、解析に用いるパラメータを変更することにより同じレイリー散乱光強度分布のデータから異なる分布を出力することが可能である。

レイリー散乱光強度分布からひずみ、温度分布を取得する方法の簡略図を図 2.5 に示す。本センサは光ファイバのコアとクラッドの不整合によって生じるレイリー散乱光から分布測定を行っている。レイリー散乱光は最も強い散乱光であり、一か所の散乱光からひずみや温度の情報を得ることはできない。しかし、レイリー散乱光の分布測定を 1 $\mu$ m の高い空間分解能で行うことでファイバ固有の不整合分布からレイリー散乱光強度分布を得ることができる。この分布は温度やひずみの変化によって空間周波数が変化するので、レイリー散乱光強度分布が持つ空間周波数スペクトルの周波数シフトを観測することで温度やひずみが得られる。

任意の区間での温度とひずみを得るため、レイリー散乱光強度分布からゲージ長の区間分のデータを取りだし、得られたデータに FFT 処理をかけることで空間スペクトルを求めることができる。周波数シフト量と温度およびひずみが線形関係であるため、各区分での参照とする空間周波数スペクトルの周波数シフト量の相互関係から温度、ひずみ分布を測定することができる。また、ファイバの変形前後の周波数スペ



クトルの相互関係係数から計算されている[16].

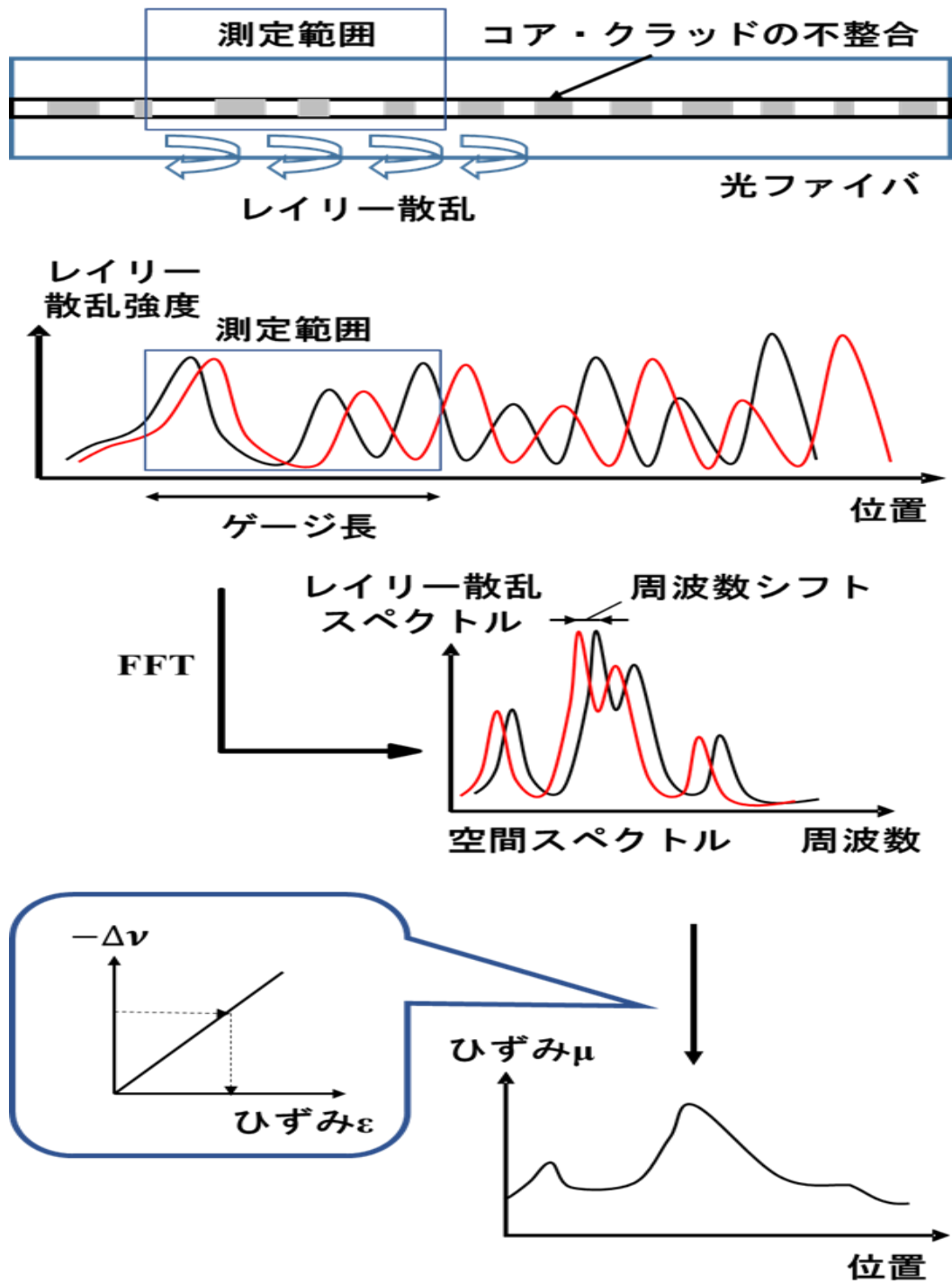


図 2.5 レイリー散乱型光ファイバ分布センサの測定原理

### 第3章 試験片および実験方法

#### 3.1 CFRP 積層板の成形および試験片

本研究では、CFRP プリプレグ(TR350C100S, 三菱ケミカル製, 150×150mm, 厚み 0.096mm)を用いて、ホットプレス成型により一方向 CFRP を製作した。また、積層板に疑似損傷剥離として有限厚さの損傷を導入するために、テフロンシート (170×30mm, 厚さ 0.1mm)を用いた。

##### 3.1.1 積層手順

CFRP プリプレグとテフロンシートの積層手順について解説する。

- (1) CFRP プリプレグを 150×150mm のサイズに切り取りこれを 40 枚用意する。
- (2) 20 枚繊維方向をそろえて積層する。プリプレグ間に空気が残ると成型後に剛性などの機械特性が変化してしまうため、積層はプリプレグを一枚重ねるごとにヘラを用いて空気を抜くよう注意する。
- (3) 20 枚積層したところで 170×30mm のサイズに切り出したテフロンシートを 4 枚重ねて図 3.1.1, または図 3.1.2 のように配置する。これにより成型後、クラックの進展方向に対して繊維方向 90°(図 3.1.1) と 0°(図 3.1.2)の二種類の一方向 CFRP 積層板を製作することができる。
- (4) 残り 20 枚のプリプレグを一枚ずつ下部の CFRP の繊維方向にそろえて上から重ねてヘラで空気を抜いていながら積層する。

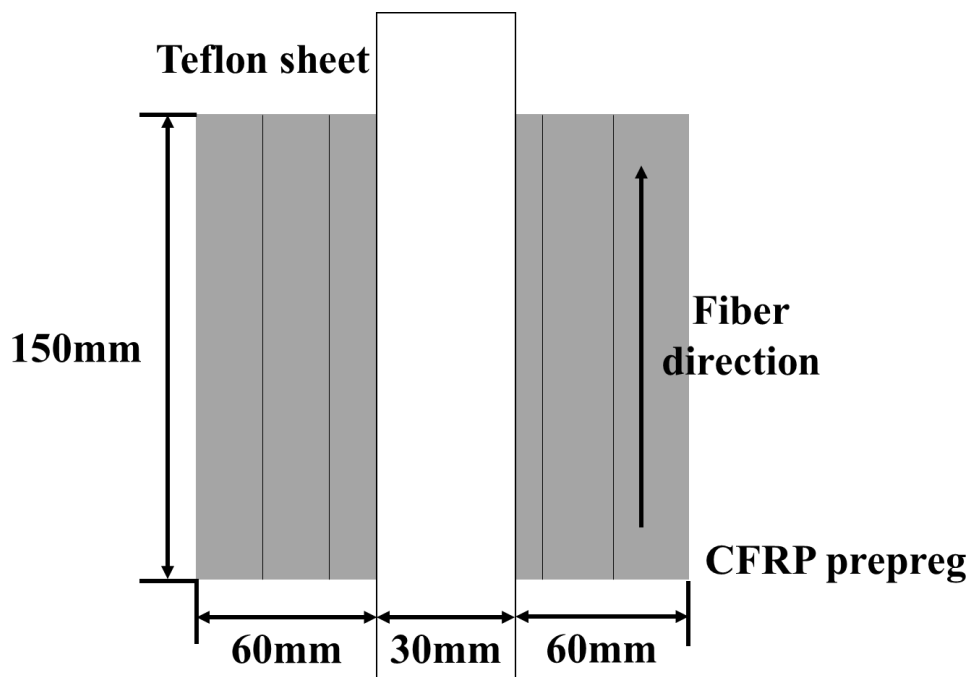


図 3.1.1 テフロンシートの配置位置

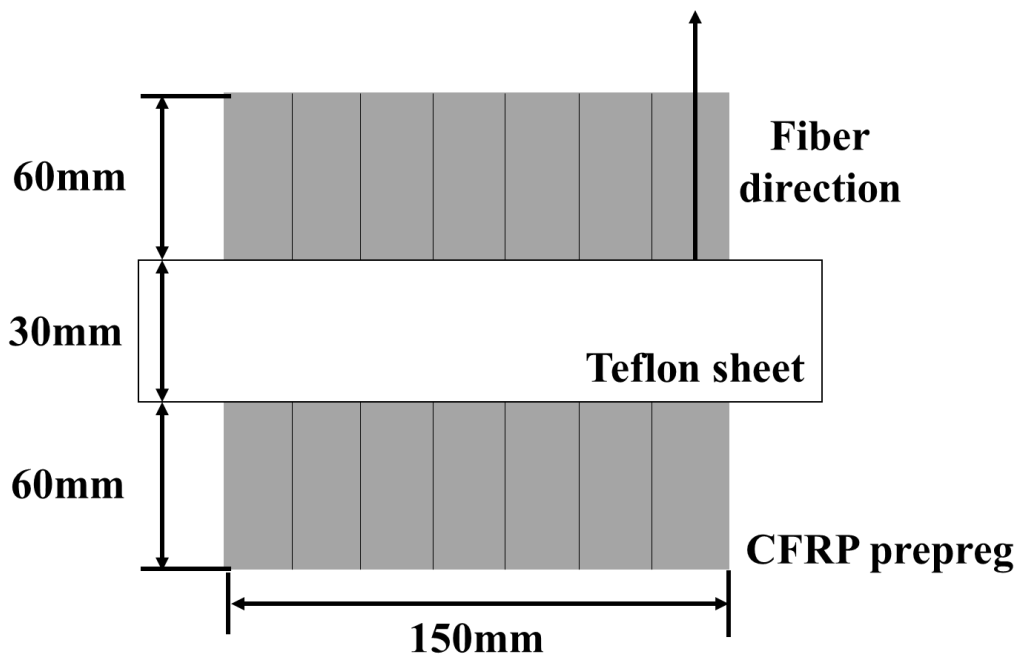


図 3.1.2 テフロンシートの配置位置

### 3.1.2 成形手順

次に加圧成型および切り出しについて記述する．図 3.1.7 から図 3.1.18 は試験片を用意するまでに用いた道具である．

- (1) CFRP から流れ出る樹脂が張り付き剥がせなくなるのを防ぐため，積層板と接触している床板と天板，スペーサーそれぞれに離型剤を塗る．
- (2) スペーサーの穴と床板の穴が重なるように合わせて配置し，そこにねじをはめてスペーサーを固定する．
- (3) CFRP 積層板の両表面に付着している白い紙を剥がし，四方に固定されたスペーサーの左上の角に合わせて積層板を設置する(図 3.1.3)．
- (4) スペーサー間の隙間から樹脂が流れ出るのを防ぐため，間に収まるようカットしたブリーザーを隙間に差し込み，CFRP 積層板全体を覆うように天板を重ね置く．
- (5) 床板の外側四辺にシーラントテープを，床板とシーラントテープおよびシーラントテープ同士の接着間で隙間ができないよう注意しながら接着する．
- (6) 天板全体を覆い隠すようにブリーザーを重ねる．
- (7) 上から床板全体を覆うように真空フィルムを重ね，(5)で接着したシーラントテープに，しわができないよう真空フィルムを引っ張りながら接着して固定する．
- (8) 床板の上部にあるドーナツ状の中心部に位置する真空フィルムに先端がとがった金属材で穴をあけ，上から吸引口をはめて固定する．
- (9) 吸引口に真空ポンプと繋がるホースを接続してフィルム内を真空にし，空気が外側から侵入していないか音で確認した後，ホットプレス機の台座に乗せる．
- (10) ステップ 1 で温度を 1 時間かけて 130°C まで昇温させ，ステップ 2 で 130°C を 2 時間保持するようにホットプレス機を設定する．
- (11) 台座を油圧で持ち上げていき，油圧が 4MPa かかっている状態にしたところで運転を開始させ，台座が 100°C に到達したところで油圧を 40MPa まで上昇させる．

- (12) 運転が停止した後しばらく放置し、室温まで降温したのを確認して床板を台座から取り出す。
- (13) 真空フィルムやブリーザー、天板などを剥がし、CFRP 積層板を取り出した後、ファインカッターで図 3.1.4 に記されている 1, 2, 3 の順で切り出す(図 3.1.5)。
- (14) 切り出した CFRP の内部に挟まっているテフロンシートを細い金属棒で押し出し、損傷部を中空にする。図 3.1.1 の手法で成形から切り出しまで行った場合は繊維方向  $90^\circ$  の一方向 CFRP 積層板が製作でき、図 3.1.2 の手法で行った場合は  $0^\circ$  の試験片ができる(図 3.1.6)。

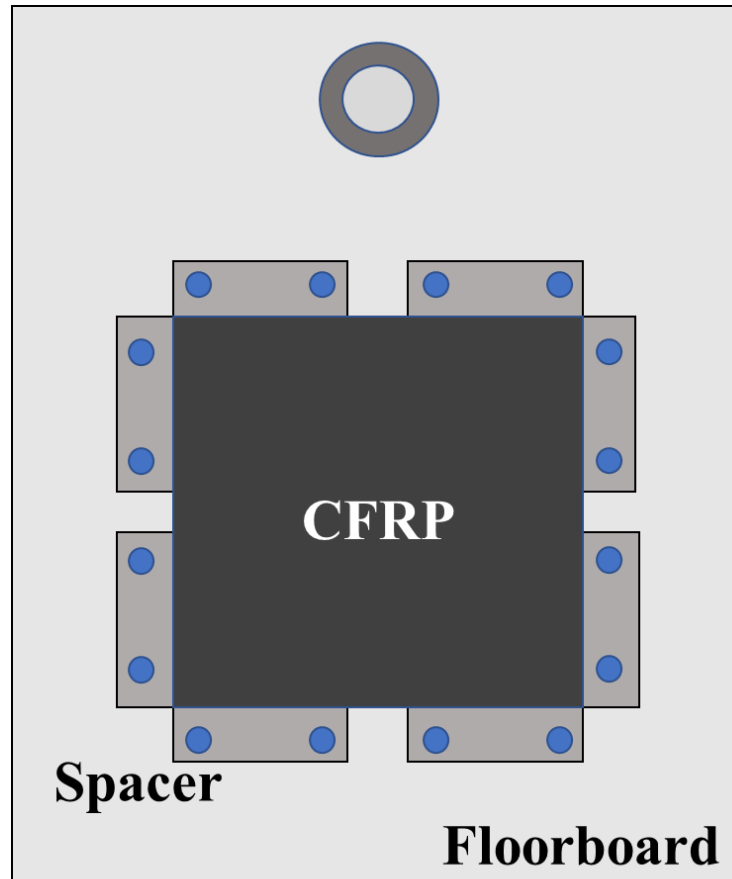


図 3.1.3 CFRP 積層板の設置方法

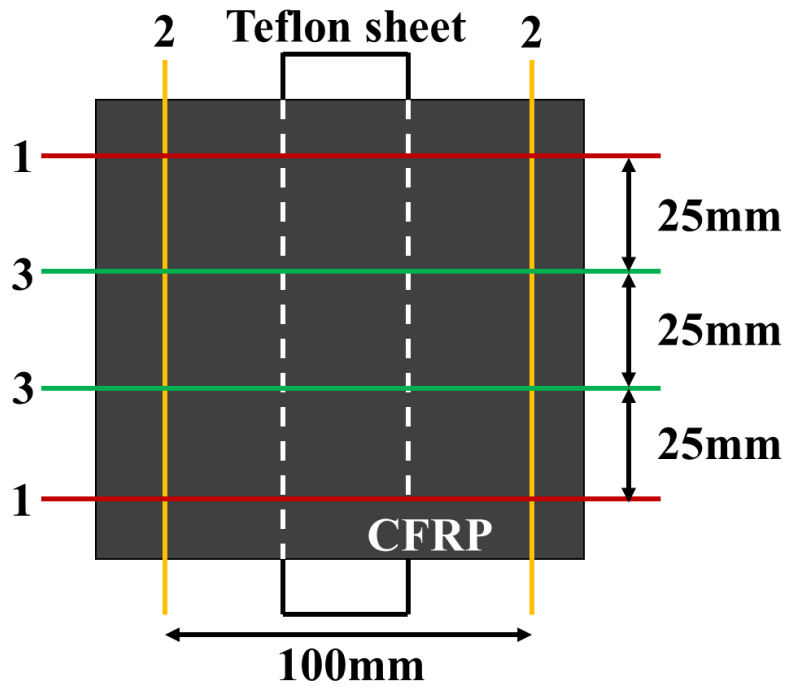


図 3.1.4 ファインカッターの切り出し手順



図 3.1.5 切り出した CFRP 積層板

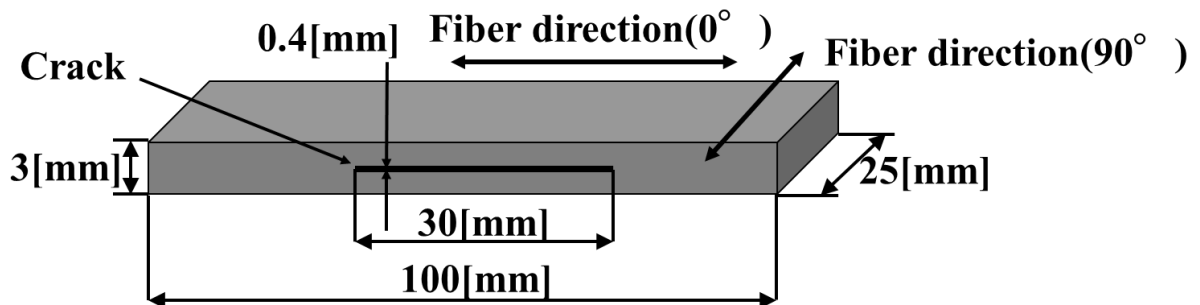


図 3.1.6 完成した CFRP 積層板の寸法



図 3.1.7 床板  
(320 × 250 × 5mm)



図 3.1.8 離型剤  
TR Industries



図 3.1.9 スペーサー  
(40 × 10 × 3mm)



図 3.1.10 スペーサー固定用ねじ



図 3.1.11 天板  
(180 × 180 × 4mm)



図 3.1.12 シーラントテープ

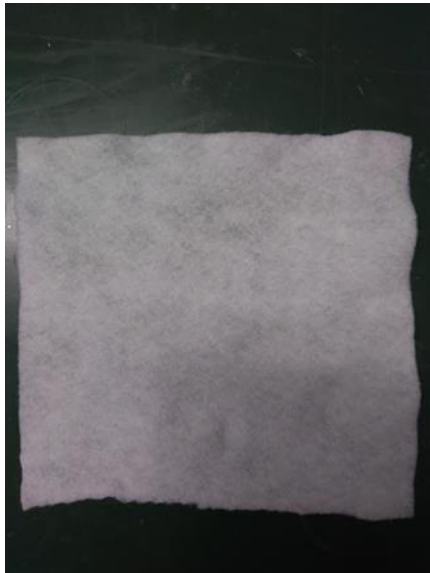


図 3.1.13 ブリーザー  
(230 × 230 mm)



図 3.1.14 真空フィルム  
(400 × 300mm)



図 3.1.15 吸引口



図 3.1.16 真空ポンプ  
ULVAC



図 3.1.17 ホットプレス機  
TESTER-SANGYO



図 3.1.18 ファインカッター  
MARUTO

### 3.2 温度分布測定の実験方法の概要

図に，CFRPの温度分布測定試験の実験装置の概略を示す。シリコンラバーヒータを用いて，CFRP積層板の下面を加熱した。試験片の表面温度測定には，

- (A) 赤外線サーモグラフィ
- (B) 熱電対（図中 Ch1, Ch2, Ch3 の3か所）
- (C) レイリー散乱型光ファイバ分布センサ

の3種類の方法を用いた。なお，全てのセンサを同時に用いてはいない。

本研究では以下の実験を行った。

- (1) 赤外線サーモグラフィによる表面温度分布測定
- (2) 熱電対による表面温度分布測定
- (3) レイリー散乱型光ファイバ分布センサによる表面温度分布測定

全ての試験で，同じ温度条件（一分で目標温度  $40^{\circ}\text{C}$ ）を与えて実験を行った。図 3.2.1 に実際の試験下部の温度の時間履歴を示す。ややハンチングがみられ，また最終温度は目標温度の  $40^{\circ}\text{C}$  よりやや高い温度となったが，本研究では下面温度がこの温度になるような条件で加熱を行った。

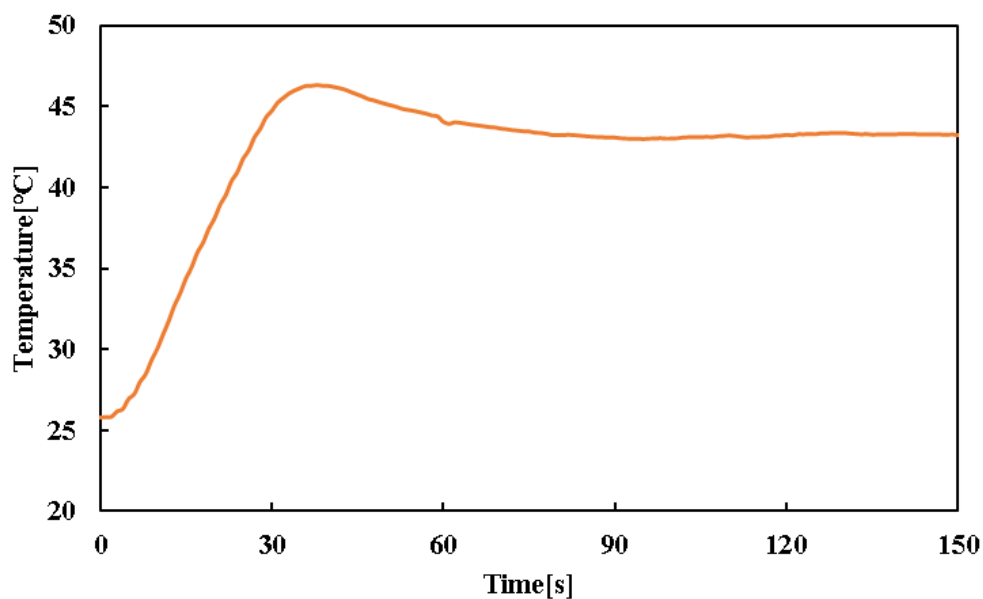


図 3.2.1 加熱表面の温度時間履歴

#### 3.2.1 赤外線サーモグラフィによる表面温度分布測定

図 3.2.2 に，実験時の試験片の設置状態を示す。試験片から  $105\text{mm}$  離れた位置に赤外線サーモグラフィ（TIM038V，AS ONE 製，サーモグラフィ解像度  $80 \times 64$  ピクセル）を設置し，5 秒間隔で写真撮影を行った。

#### 3.2.2 熱電対による表面温度分布測定

図 3.2.3 に熱電対を用いて表面 3 か所の温度時間履歴を測定した時の概略図を示す。3 本の熱電対は試験片の大気開放面の手前から  $15\text{mm}$ ， $50\text{mm}$ ， $75\text{mm}$  の位置かつ幅方向中央 ( $12.5\text{mm}$ ) にそれぞれ固定した。熱電対の固定には瞬間接着剤を用いて所定の位置に張り付けた後に，接着剤が完全硬化されるまで 1 日放置した。



### 3.2.3 レイリー散乱型光ファイバ分布センサによる表面温度分布測定

図 3.2.4 にレイリー散乱型光ファイバ分布センサを用いた表面温度分布測定の概略図を示す。クラックのある試験片の大気開放面に幅方向中央(12.5mm)を長手方向に向かって一直線に通るよう瞬間接着剤を用いて接着した。こちらも熱電対の時と同様に完全硬化されるまで1日放置した。

本研究では、試験片と同じ寸法、つまり同じ熱容量の CFRP を、シリコンラバーヒータの温度調整用熱電対センサの上に配置した。これにより、試験片の下面は、シリコンラバーヒータと隙間ができずに接触し、一様な温度となる。

## 試験装置の概略図

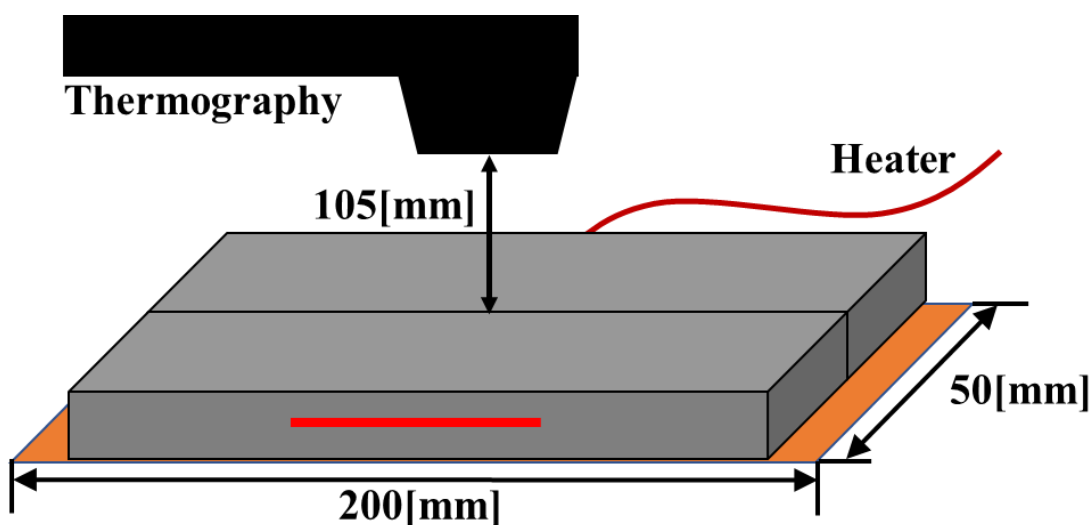


図 3.2.2 赤外線サーモグラフィによる表面温度分布測定の概略図

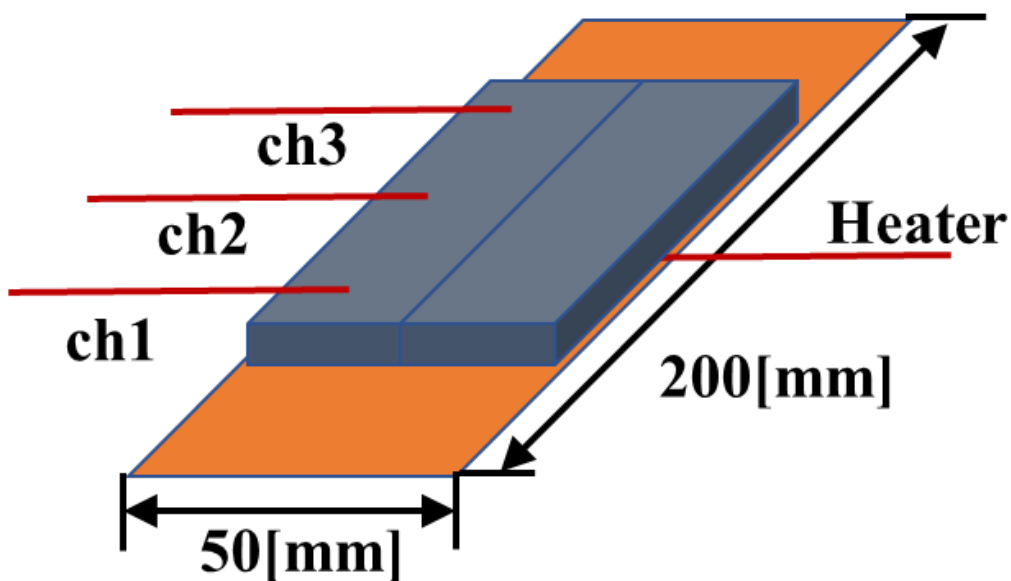


図 3.2.3 熱電対による表面温度分布測定の概略図

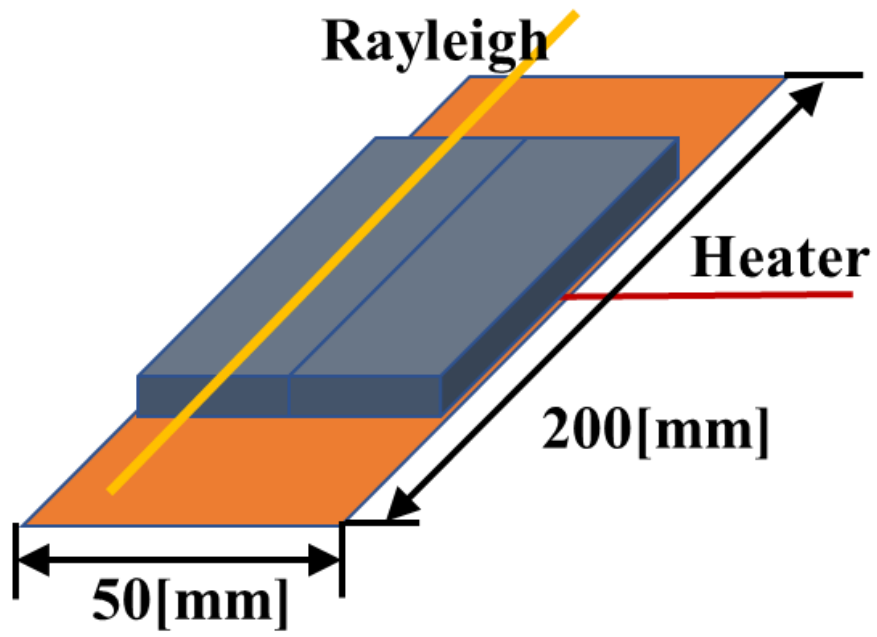


図 3.2.4 レイリー散乱型光ファイバ分布センサによる表面温度分布測定概略図

## 第4章 内部損傷を持つ一方向 CFRP 積層板の熱伝導解析

### 4.1 FEM 解析

#### 4.1.1 解析に用いる数値

温度分布測定を行うにあたり、初めに汎用有限要素法ソフト Abaqus を用いて有限要素法による熱伝導解析を行い、損傷検出可能な実験条件を調査した。解析で用いた代表値を表 4 に示す[17]。また、実験用に製作した試験片は剥離部が厚みを持つ中空となっているため、解析で用いるモデルにも同じ厚みと幅の損傷を適用し、40°Cの時の空気の物性値を代入して計算を行った。CFRP は繊維方向によって違う機械特性を持つ異方性のある材料であるため、熱伝導の速度の違いが温度場変化に与える影響を検証すべく、剥離方向に対して繊維方向が 90°と 0°の場合の 2 パターンの解析を行った。実験ではラバーヒータの上に試験片を置いて温度を与えるため、解析でも同様の条件になるよう下面を加熱表面と仮定して温度の境界条件を設定し、上面を大気開放面として室温 24°Cの場合の CFRP-Air 間の熱伝達係数を代入した。

表 3 CFRP と空気の代表値

Direction	Longitudinal	Transverse	Through-thickness	Air
Thermal conductivity (W/m/K)	11.8	0.609	0.609	0.0272
Specific heat (J/kg/K)		1065		1008
Density (kg/m <sup>3</sup> )		1520		1.091
Heat transfer coefficient (W/m <sup>2</sup> /K)		30.8		

#### 4.1.2 熱伝達係数

熱伝達係数を求めるために用いた実験装置の略図を図 4.1.1 に示す。また、加熱表面の温度時間履歴は前章で取得したデータを用いる(図 3.4.5)。CFRP 積層板の大気解放面中央になるよう長手方向の両端から 50mm の位置に熱電対を瞬間接着剤で張り付け、温度時間履歴を測定した。この結果をもとに CFRP-Air 間の熱伝達係数を求めた。

図 4.1.2 に加熱表面及び大気解放面の温度の時間変化を示す。実験結果から約 110 秒で温度が定常に達することが分かった。これより、定常時の表面温度を T1、大気解放面の温度を T2 とおくと、厚み方向に流れる熱流束は式(1)で表される。

$$q = \lambda \frac{T1 - T2}{t} \quad (1)$$

ここで、t は試験片の厚み、λ は厚み方向の熱伝導率である。周りの空気の温度（室温）を Ta とすると、CFRP と空気間の熱伝達率は式(2)で表される。

$$q = h(T2 - Ta) \quad (2)$$

温度時間履歴から定常時の表面温度(T1)は 43.2°C、大気解放面の温度(T2)は 40.7°Cと示された。試験片の厚み(t)は 3mm であり、厚み方向の熱伝導率(λ)は 0.609W/m/K であるので、それぞれの数値を式(1)に代入して計算を行い、熱流束(q)を求めた。その後、実験を行ったときの室温(Ta)は 24.2°Cであったので、Ta、T2 と先ほど求めた q を式(2)に代入して計算した結果、熱伝達係数は 30.8W/m<sup>2</sup>/K と求まった。

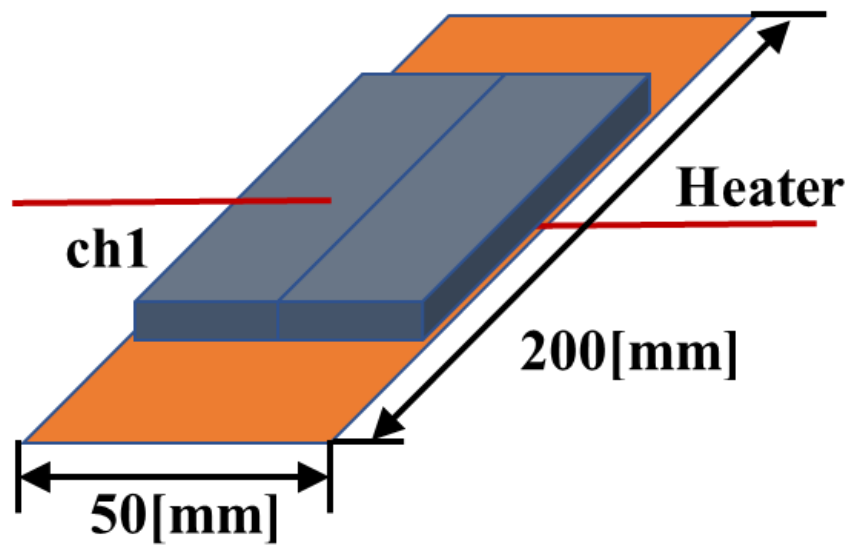


図 4.1.1 実験装置の簡略図

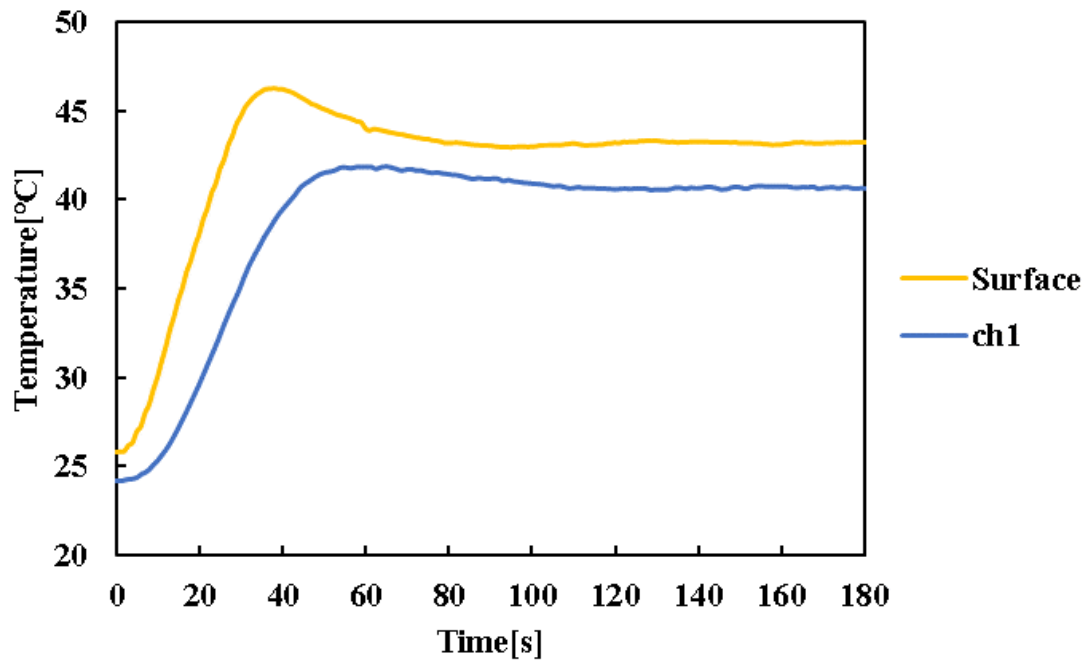


図 4.1.2 大気解放面の温度時間履歴

導出した熱伝達係数の妥当性を評価するため、クラックのないモデルを製作し、大気解放面の温度時間履歴を計算した。解析と実験結果の比較を図 4.1.3 に示す。surface は加熱表面，release は大気開放面のデータであり，点線の(e)は実験結果，実線の(a)は解析結果を表している。熱電対で得た加熱表面の温度時間履歴が実験結果と同じになるように解析の各ステップ数における境界条件を設定した。その後，大気解放面の CFRP-Air 間の熱伝達係数を  $30.8\text{W/m}^2/\text{K}$  として代入し計算を行った。得られたデータを見ると，実験結果と解析結果の一致が確認された。以上より，大気開放面の熱伝達係数が  $30.8\text{W/m}^2/\text{K}$  であることが示された。

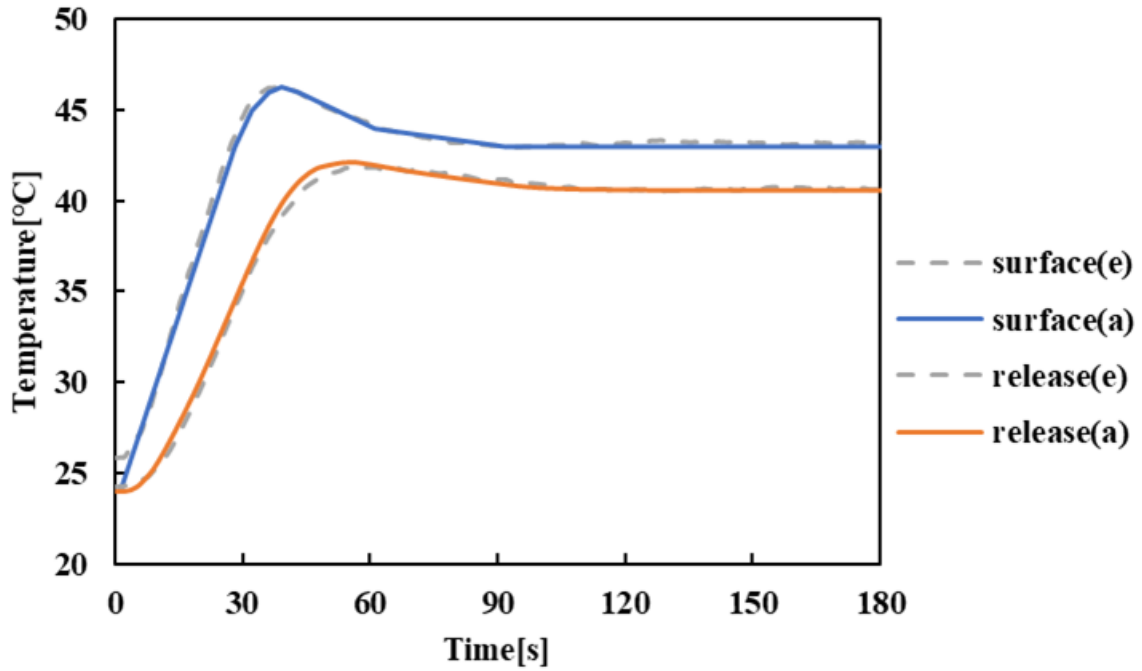


図 4.1.3 解析と実験結果の比較

## 4.2 繊維方向 90°の一方方向 CFRP 積層板の熱伝導解析

### 4.2.1 Abaqus を用いた繊維方向 90°の熱伝導解析

解析に用いたモデルを図 4.2.1 に示す。寸法は用意した試験片と同じ短辺を 25mm、長辺を 100mm、厚みを 3mm とし、剥離は厚み 0.4mm、幅 30mm とした。剥離は先端が長手方向の手前から 35mm、厚み方向を上から 1.3mm の位置に製作した。

図 4.2.1 のモデルを用いて室温の 24°C から定常状態になるまでの温度場変化を FEM 解析により求めた。モデルの大気開放面の長手方向の手前から 15mm の位置と 50mm の位置での温度時間履歴を図 4.2.2 に示す。50mm の位置はクラックの真上に位置しており、損傷による温度場変化の影響を受けて昇温に遅れが生じていることが分かった。また、温度上昇の遅れにより発生した温度差は加熱開始 43 後に 8.5°C 生じており、定常到達後も 4.4°C の温度差が生じることが予想された。

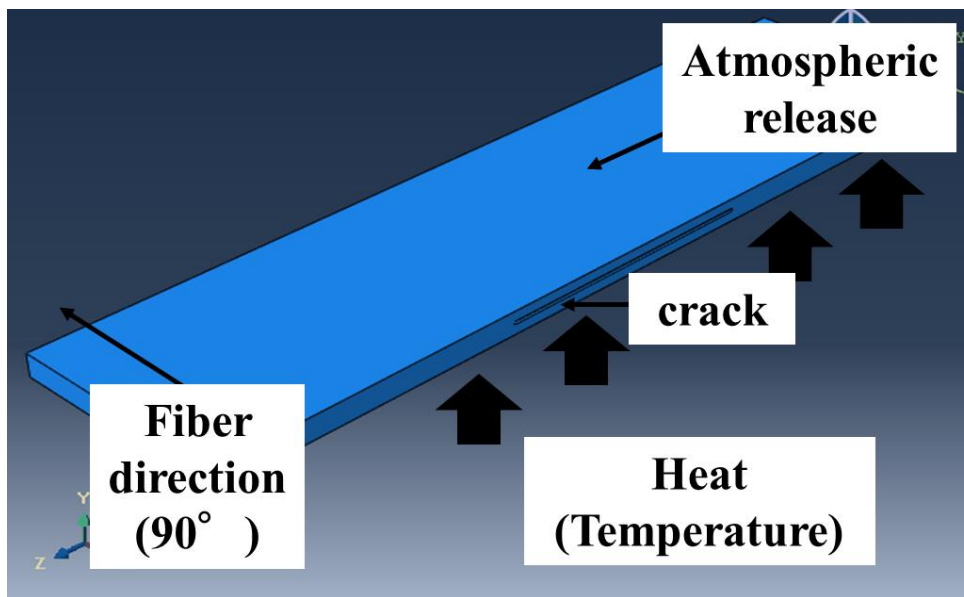


図 4.2.1 FEM 解析で用いたクラックのある CFRP 積層板のモデル

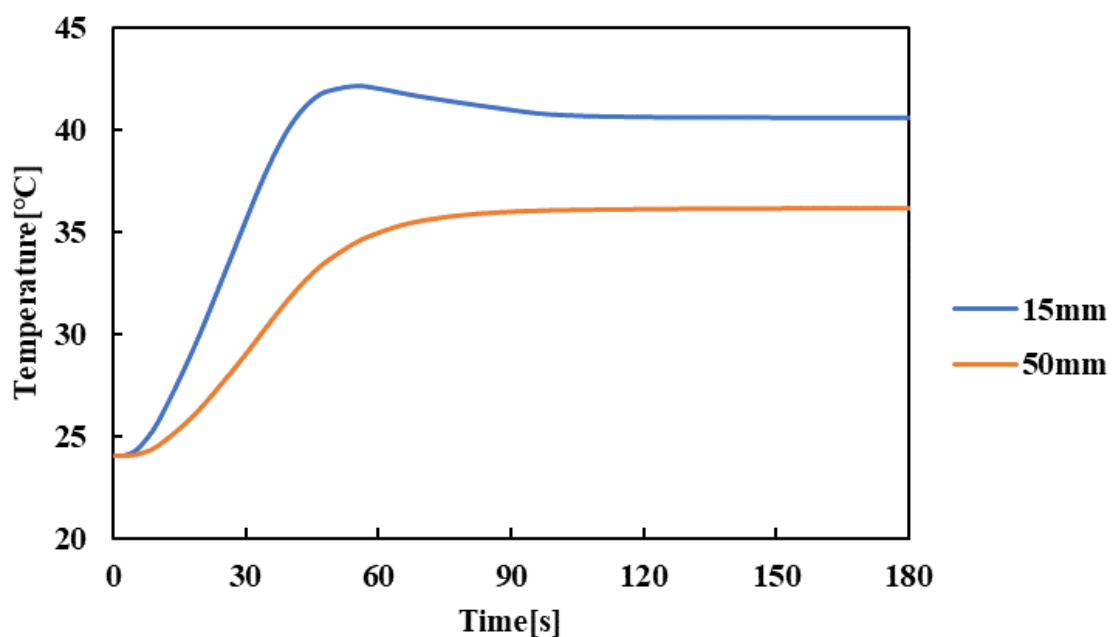
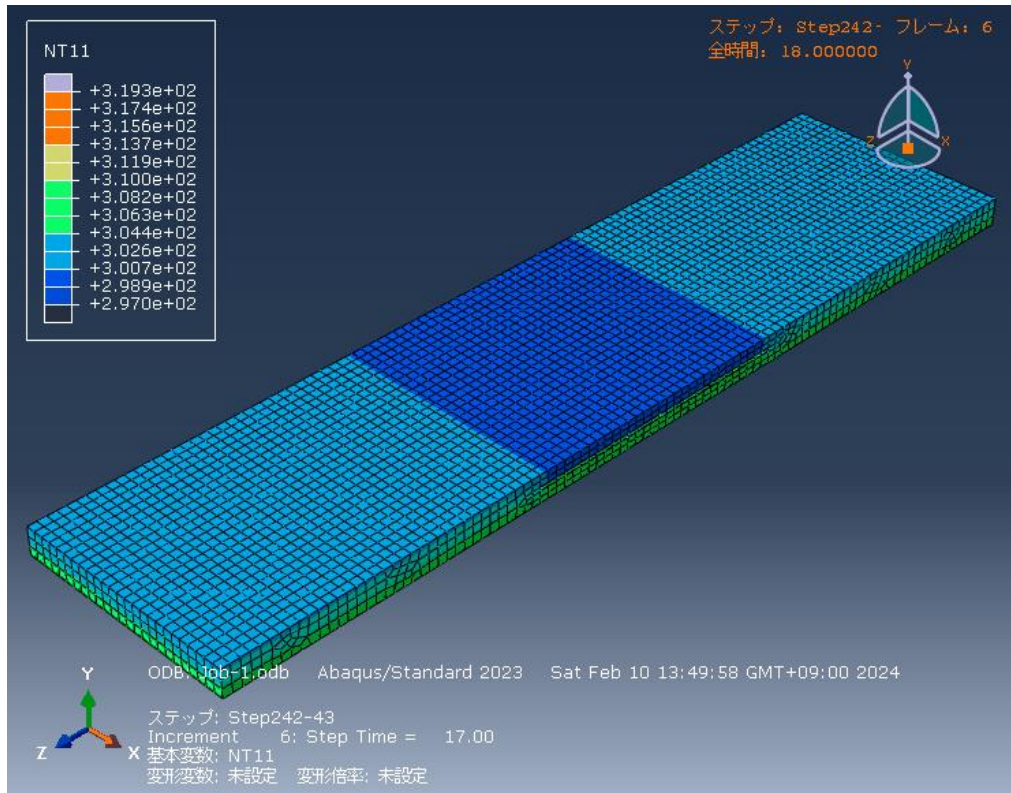


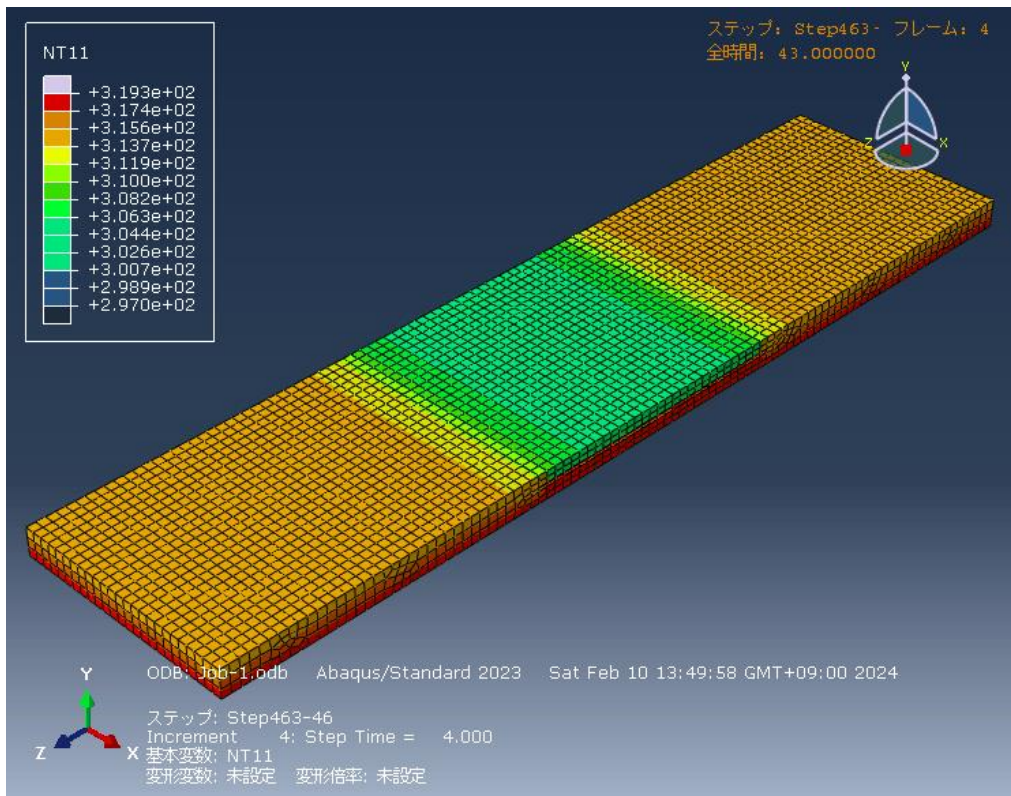
図 4.2.2 FEM 解析による大気開放面の 2 点での温度時間履歴

## 4.2.2 温度分布の時間遷移

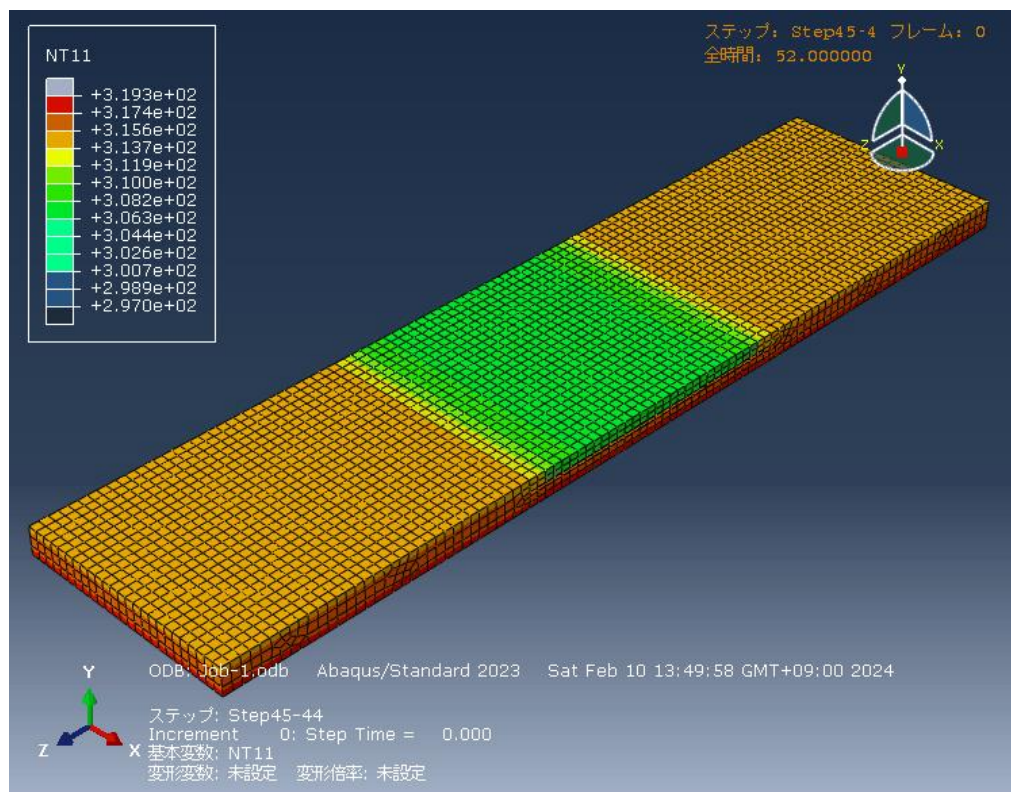
時間経過による試験片全体の温度場変化をコンター図で確認していく。加熱開始から大気解放面に熱が伝わり始めた 18 秒後(a)，温度差が最大となった 43 秒後(b)，試験片全体が最も熱された 52 秒後(c)，定常状態に到達した 101 秒後(d)を図 4.2.3 に示す。熱が大気解放面に伝わり始めてから 43 秒経つまでは温度差が大きくなり続けていた。その後、徐々に温度場変化が落ち着いていき、定常到達後にも低温領域と高温領域で別れて見られた。52 秒から 101 秒の間で温度が下がっているが、これは実験で用いたシリコンラバーヒータのオーバーシュートを考慮した加熱面の境界条件を解析に用いているためであると考えられる。



(a) 18 秒後

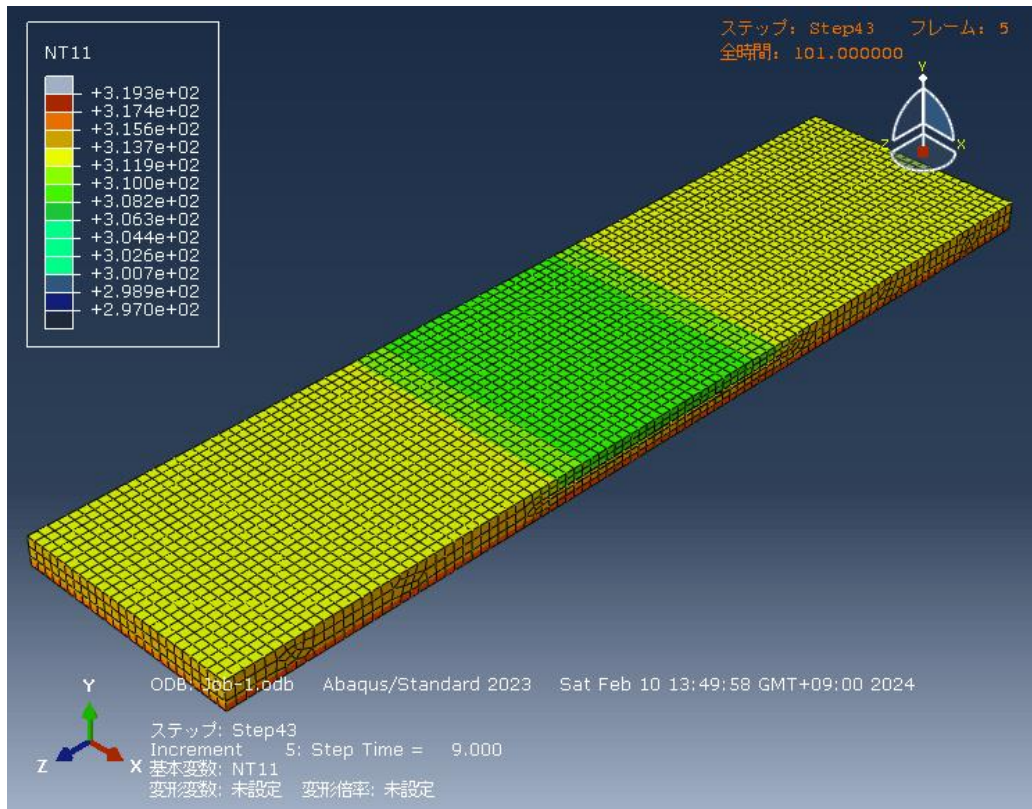


(b) 43 秒後



(c) 52 秒後





(d) 101 秒後

図 4.2.3 90°モデルの熱伝導解析による温度分布の時間遷移

また、生じる温度差が最大であり、損傷検出に最も適していると考えられる加熱開始 43 秒後の非定常時の温度分布測定を行った。温度分布からクラック範囲の上面では低温領域が発生していることが分かる。また、クラック範囲付近の大気開放面の昇温速度はそこまで遅れておらず、繊維方向 90°の場合はクラックの位置がはっきりと見えるような結果が得られた。以上より、この加熱条件で繊維方向 90°の場合の温度分布測定を行うと損傷検出が可能であることが期待された。

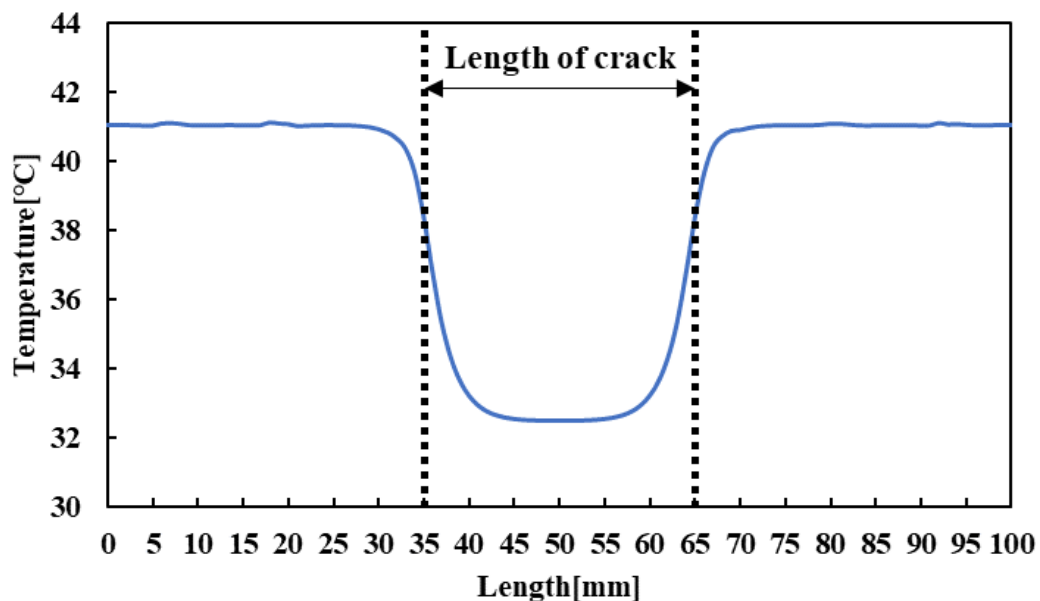


図 4.2.2 加熱開始 43 秒後の大気開放面の温度分布

### 4.3 繊維方向 0°の一方方向 CFRP 積層板の熱伝導解析

#### 4.3.1 Abaqus を用いた繊維方向 0°の熱伝導解析

前章で述べた繊維方向 90°の有限要素解析と CFRP および損傷の寸法，加熱条件，熱伝達係数などは同じ値を用い，繊維方向だけ変更するため長手方向が繊維方向となるよう代入する熱伝導率を変えて計算を行った(図 4.3.1). 同じ 2 点の位置での温度時間履歴を図 4.3.2 に示す. クラック範囲内の大気解放面に位置する 50mm では繊維方向 90°と同様に温度上昇に遅れが見られた. また，加熱開始 39 秒後に温度差は最大となり，その差は 5.6°Cであり，定常到達後は 2.3°Cの差で安定していた. 90°の結果と比較すると，最大の温度差，定常到達後の温度差共に低くなるのが熱伝導解析により示された. これは，繊維方向の熱流量が直交方向に比べて大きいことが挙げられる. 繊維方向 90°の CFRP は厚み方向，長手方向ともに熱伝導率は同じである. それに対し，繊維方向 0°は厚み方向に比べ長手方向への熱伝導が大きいいため大気解放面に温度場変化が現れるまでに長手方向へ熱が素早く伝わって行ってしまい，結果としてクラック周辺での温度場変化による影響が表面に現れにくくなったためであると考えられる.

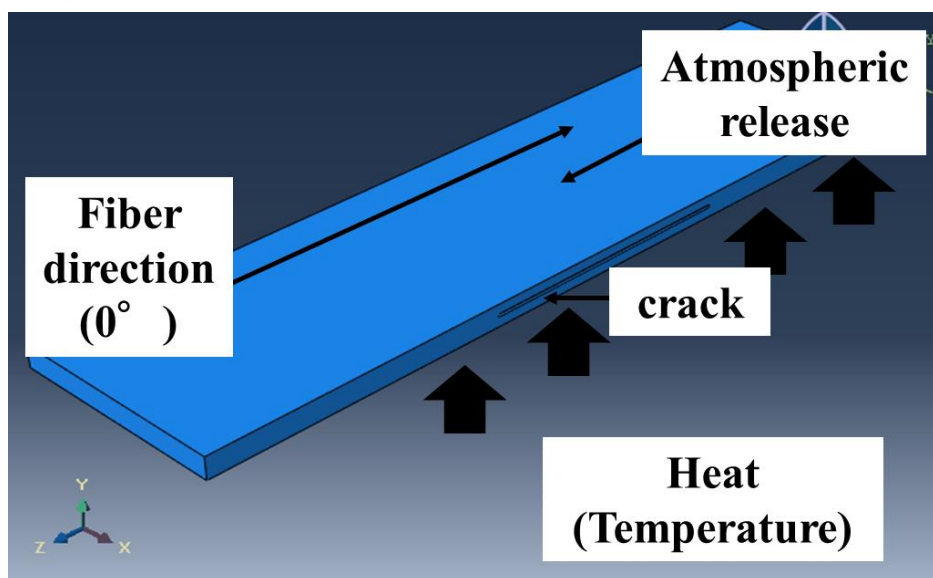


図 4.3.1 解析に用いた繊維方向 0°のモデル

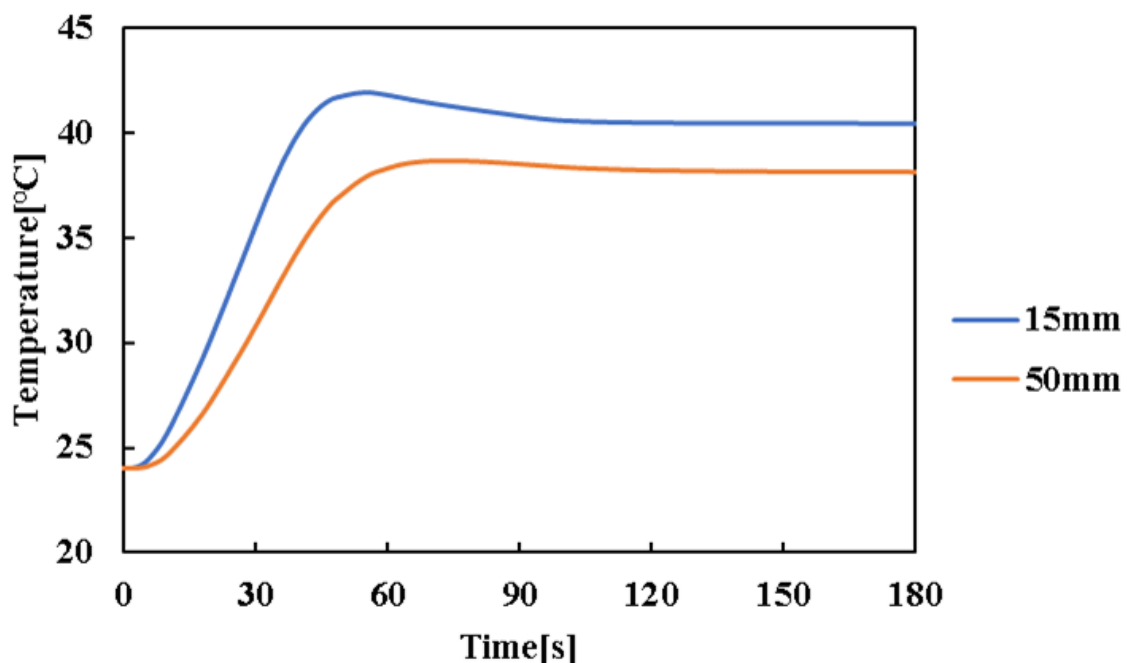
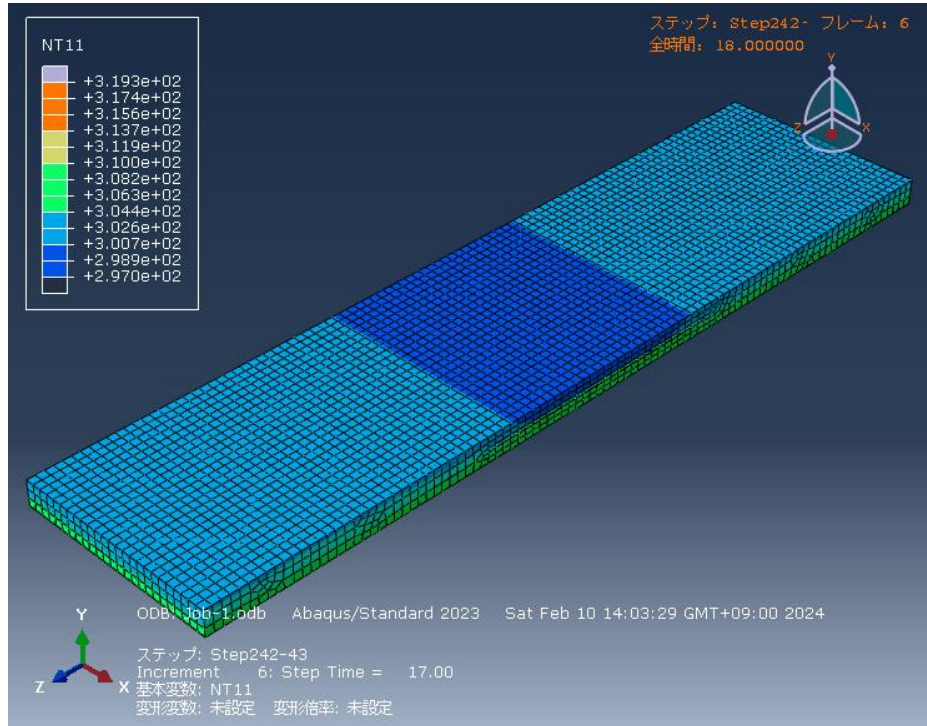


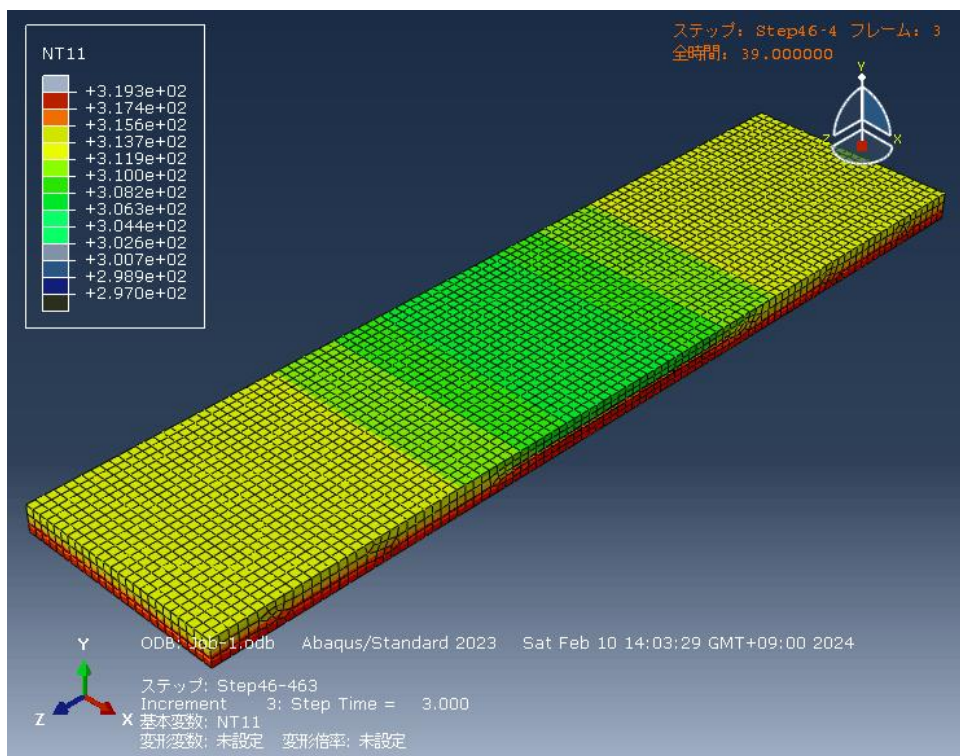
図 4.3.2 FEM 解析による大気開放面の 2 点での温度時間履歴

### 4.3.2 温度分布の時間遷移

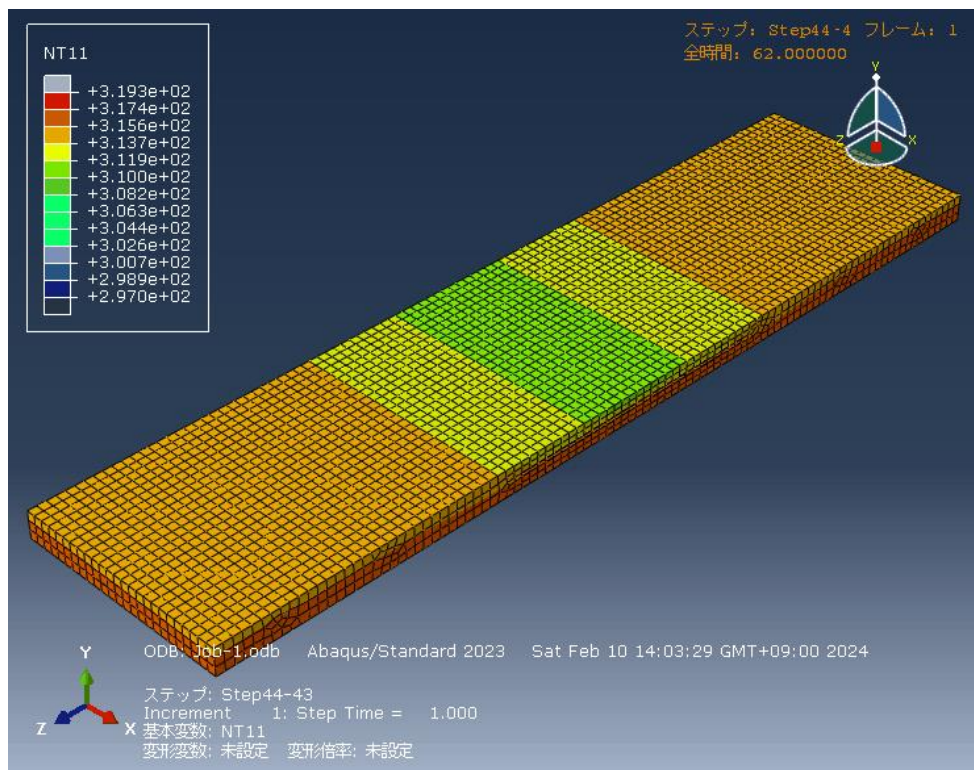
時間経過による試験片全体の温度場変化をコンター図で確認していく。加熱開始から大気解放面に熱が伝わり始めた 18 秒後(a), 温度差が最大となった 39 秒後(b), 試験片全体が最も熱された 62 秒後(c), 定常状態に到達した 125 秒後(d)を図 4.3.3 に示す。90°モデルでは低温領域と高温領域の境界がはっきりと見られたのに対し, 0°モデルではクラックによる温度場変化の影響はみられるものの, 低温領域と高温領域の境界はやや曖昧となっていた。



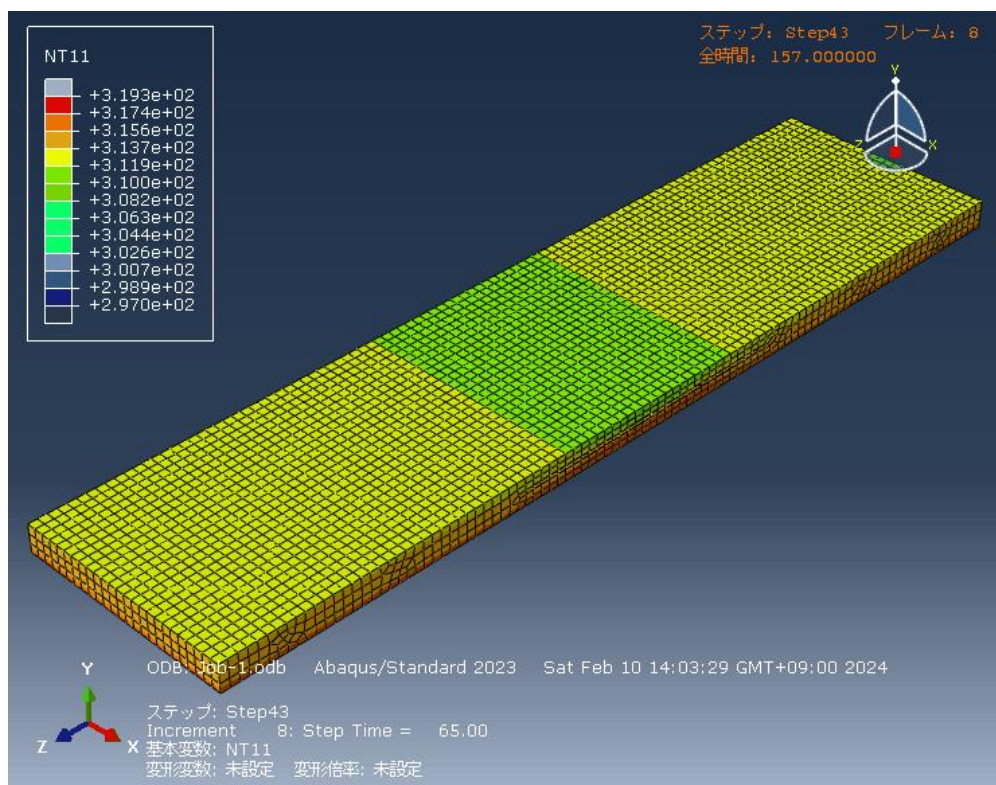
(a) 18 秒後



(b) 39 秒後



(c) 62 秒後



(d) 125 秒後

図 4.3.3 0°モデルの熱伝導解析による温度分布の時間遷移

次に、生じる温度差が最大であり、損傷検出に最も適していると考えられる加熱開始 39 秒後の非定常時の熱伝導解析による温度分布を取得した。FEM 解析を用いた温度分布測定による大気開放面の温度場変化の温度分布を図 4.3.3 に示す。こちらでも前章と同様に温度分布からクラック範囲に位置する大気解放面では低温領域が発生していることが分かる。以上より、 $0^\circ$  の場合はクラック周辺の温度場変化が  $90^\circ$  と比較して曖昧であり、損傷同定の精度が落ちることが予想されたが、クラックの発見が可能となるデータが得られることが示された。

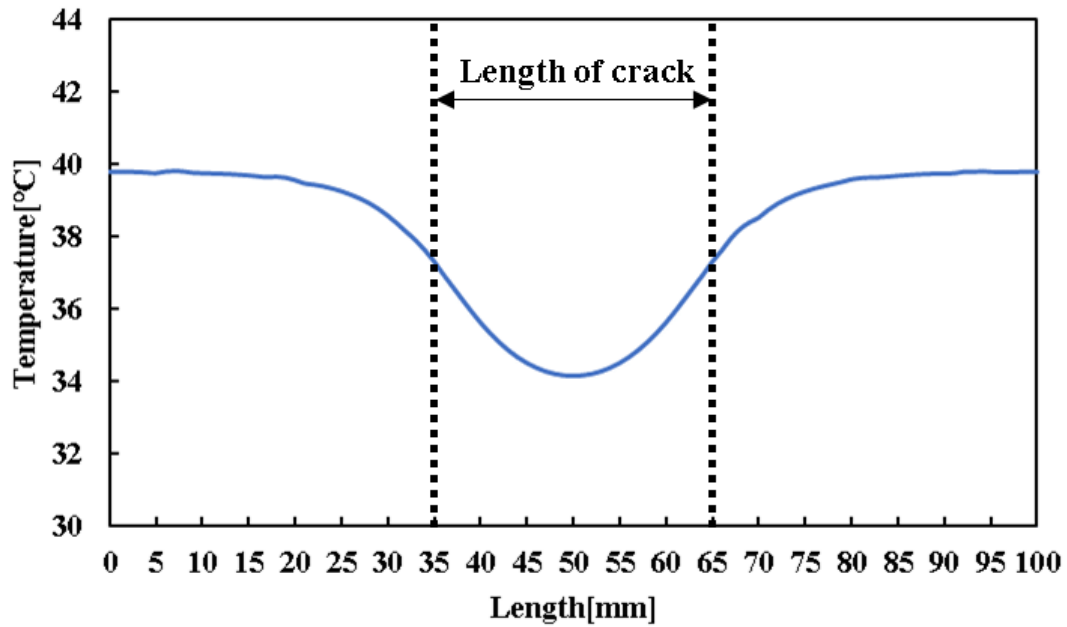


図 4.3.3 加熱開始 39 秒後の大気開放面の温度分布

#### 4.4 クラックのサイズを縮小したモデルでの熱伝導解析

##### 4.4.1 クラック厚みを減らした繊維方向 90°の熱伝導解析

前章までで用いた CFRP 積層板のモデルの損傷厚さを 0.4mm から 0.1mm へと変更し、厚み方向の損傷サイズが減少した場合の影響を調査した。解析に用いたモデルを図 4.4.1 に示す。損傷の位置が側面の中央に配置するため、長手方向手前から 35mm、厚み方向は上から 1.45mm の位置に製作した。

長手方向手前から 15mm、50mm の 2 点の位置での温度時間履歴を図 4.4.2 に示す。クラック範囲内の大気解放面に位置する 50mm では温度上昇が遅れが見られた。また、加熱開始 39 秒後に温度差は最大となり、その差は 3.5°C であり、定常到達後は 1.3°C の差で安定していた。前章で示した厚み 0.4mm の結果と比較すると、最大の温度差、定常到達後の温度差共に低くなることが熱伝導解析により示された。また、クラック範囲内である 50mm の位置の温度時間履歴には加熱表面のオーバーシュートの影響が見られ、損傷の厚みが減ったことで、損傷間で熱の伝搬が生じたことが原因であると推察した。

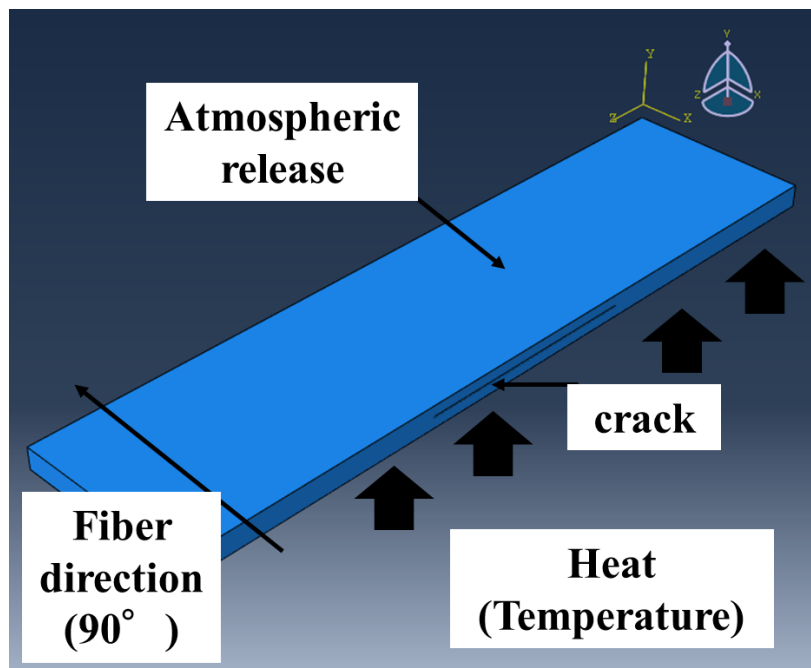


図 4.4.1 クラック厚み 0.1mm の繊維方向 90°モデル図

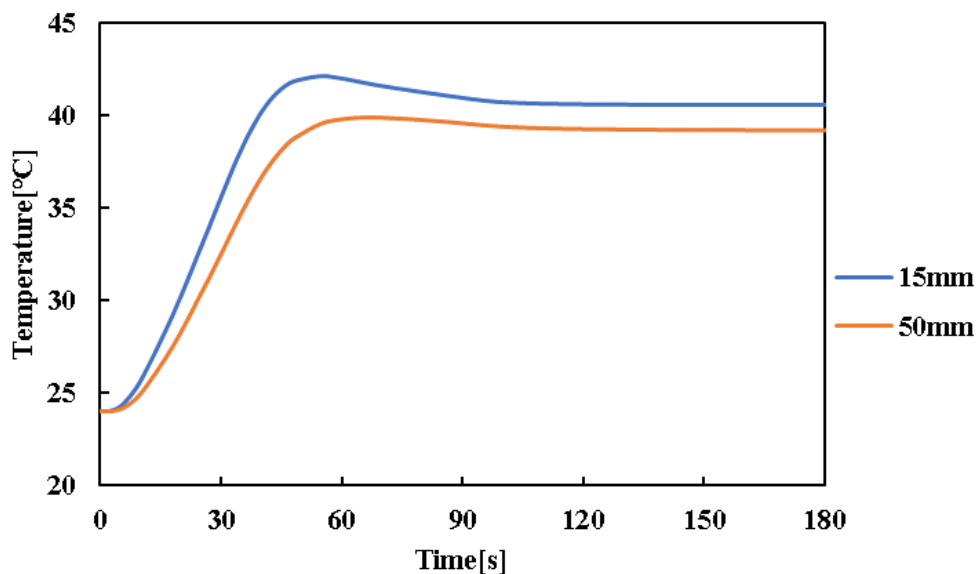
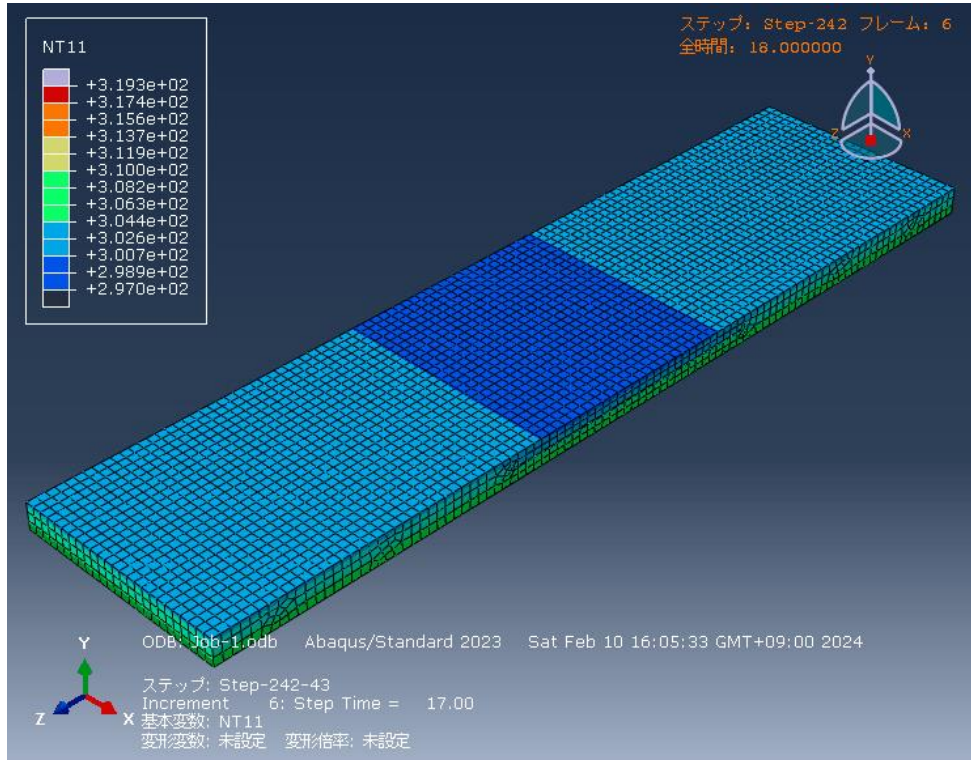


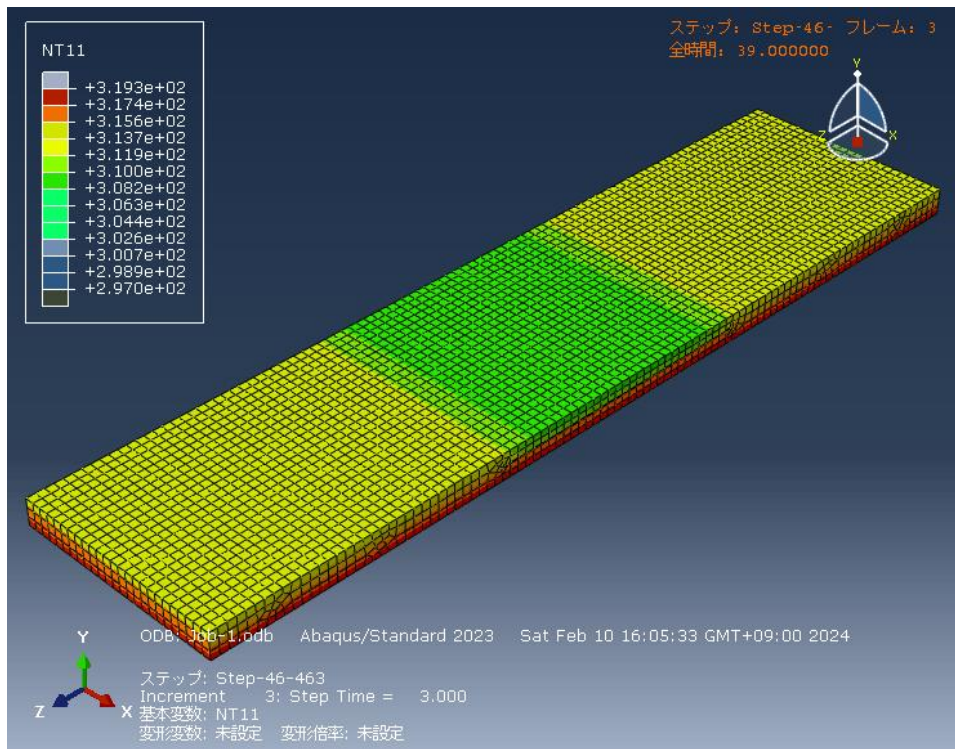
図 4.4.2 厚み 0.1mm の損傷を製作したモデルの温度時間履歴

#### 4.4.2 温度分布の時間遷移

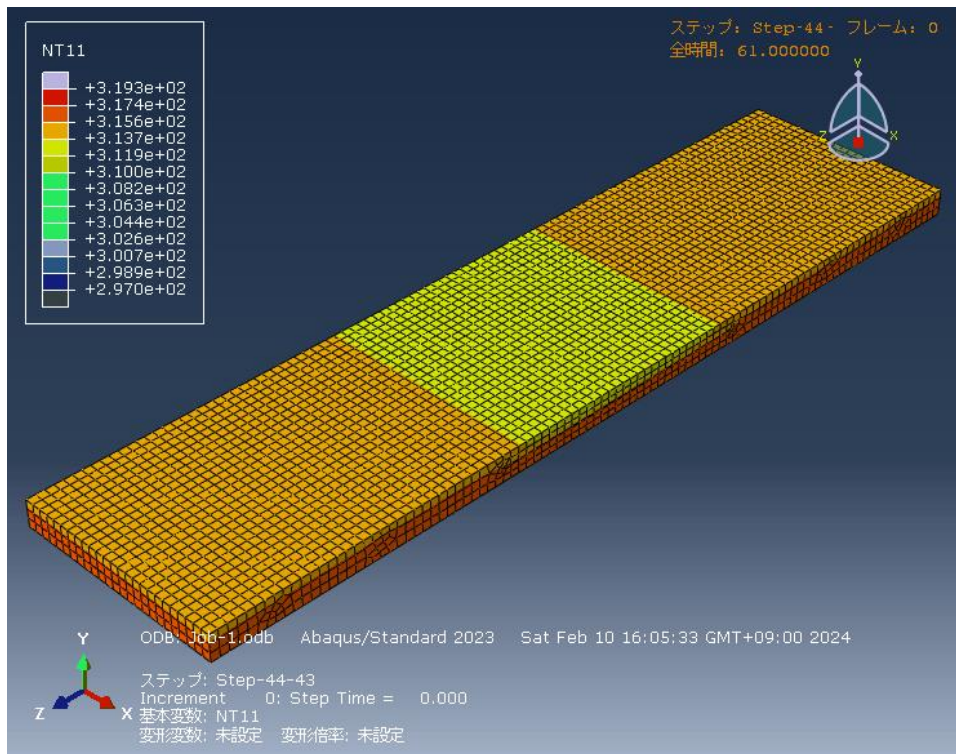
時間経過による試験片全体の温度場変化をコンター図で確認していく。加熱開始から大気解放面に熱が伝わり始めた 18 秒後(a), 温度差が最大となった 39 秒後(b), 試験片全体が最も熱された 61 秒後(c), 定常状態に到達した 125 秒後(d)を図 4.4.3 に示す。厚み 0.4mm に比べ温度差は減少しているが、高温領域と低温領域の境界が明瞭であるため、正確な損傷位置の同定が可能であると予想された。



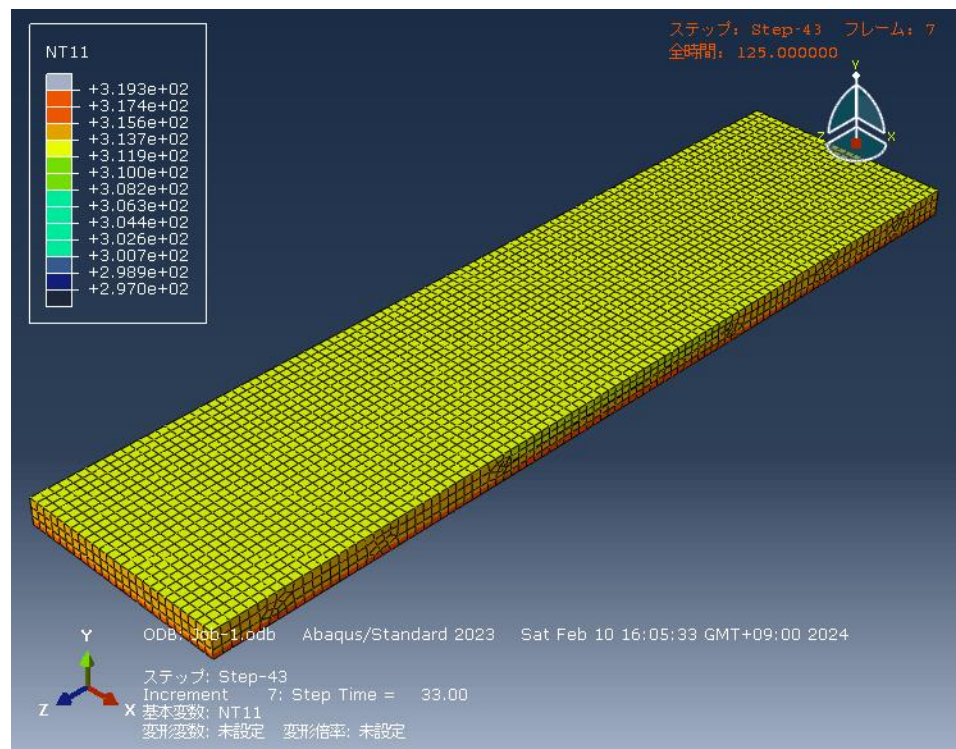
(a) 18 秒後



(b) 39 秒後



(c) 61 秒後



(d) 125 秒後

図 4.4.3 クラック厚み 0.1mm の 90°モデルの温度時間遷移



次に、生じる温度差が最大であり、損傷検出に最も適していると考えられる加熱開始 39 秒後の非定常時の熱伝導解析による温度分布を取得した。FEM 解析を用いた温度分布測定による大気開放面の温度場変化の温度分布を図 4.4.4 に示す。クラックの厚みが減少したことで温度差が小さくなっていることが示されているが、高温領域と低温領域の境界が明瞭であり、クラック範囲外の大気解放面への損傷部による温度場変化の影響はほとんど見られなかった。以上より、厚みが減少してもクラック範囲で温度上昇に遅れが生じ、損傷同定の可能性が示された。

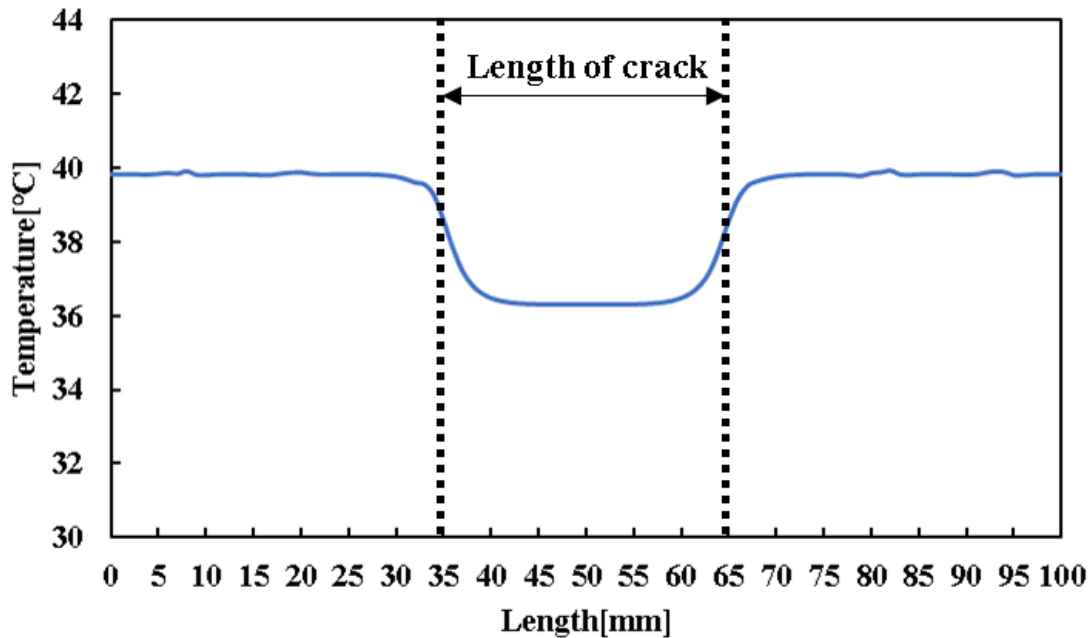


図 4.4.4 加熱開始 39 秒後の大気開放面の温度分布

#### 4.4.3 クラック厚みを減らした繊維方向 0°の熱伝導解析

前章で述べた繊維方向 90°の有限要素解析と CFRP および損傷の寸法，加熱条件，熱伝達係数などは同じ値を用い，繊維方向だけ変更するため長手方向が繊維方向となるよう代入する熱伝導率を変えて計算を行った(図 4.4.5). 同じ 2 点の位置での温度時間履歴を図 4.4.6 に示す. クラック範囲内の大気解放面に位置する 50mm では繊維方向 90°と同様に温度上昇に遅れが見られた. また，加熱開始 36 秒後に温度差は最大となり，その差は 2.7°Cであり，定常到達後は 1.0°Cの差で安定していた. 厚みが 0.4mm の時の結果から示されていたように繊維方向 90° に対して 0°の温度の遅れは小さくなっていたが，温度差は生じていることが分かった.

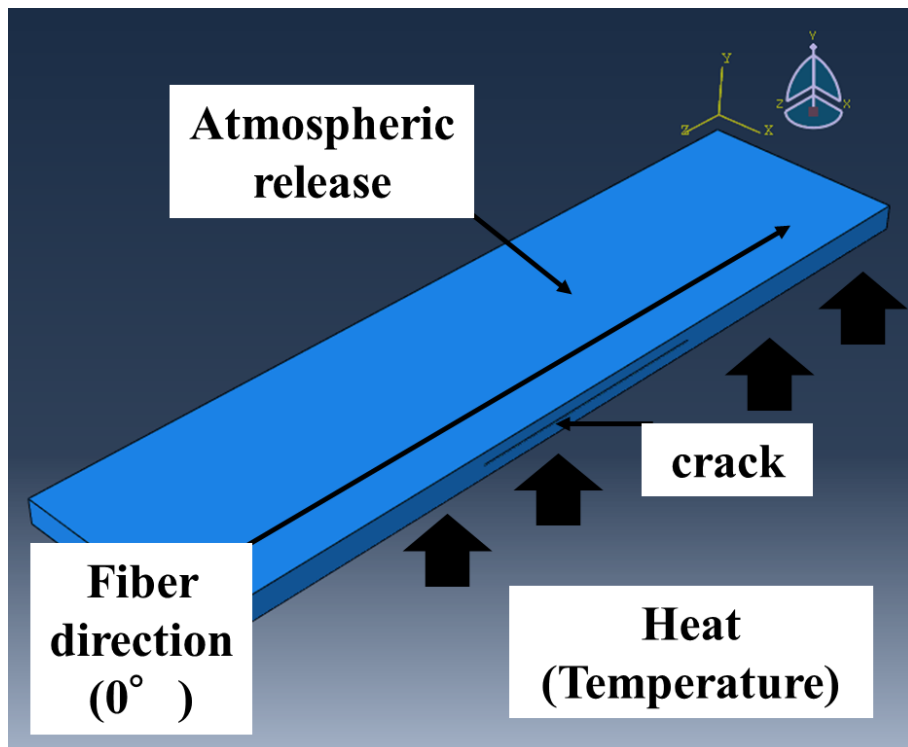


図 4.4.5 クラック厚み 0.1mm の繊維方向 0°モデル図

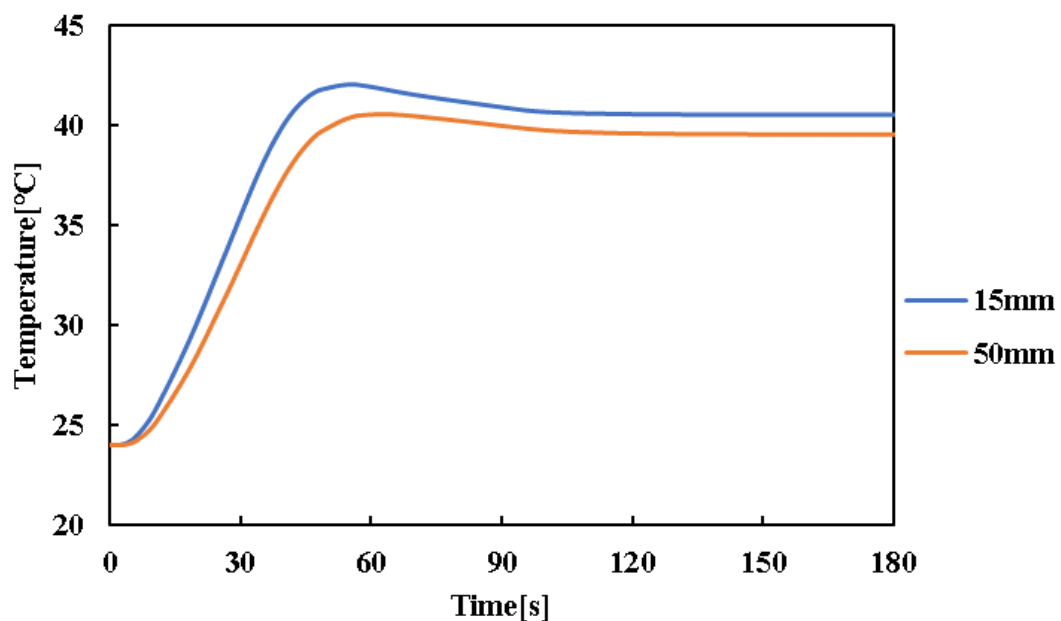
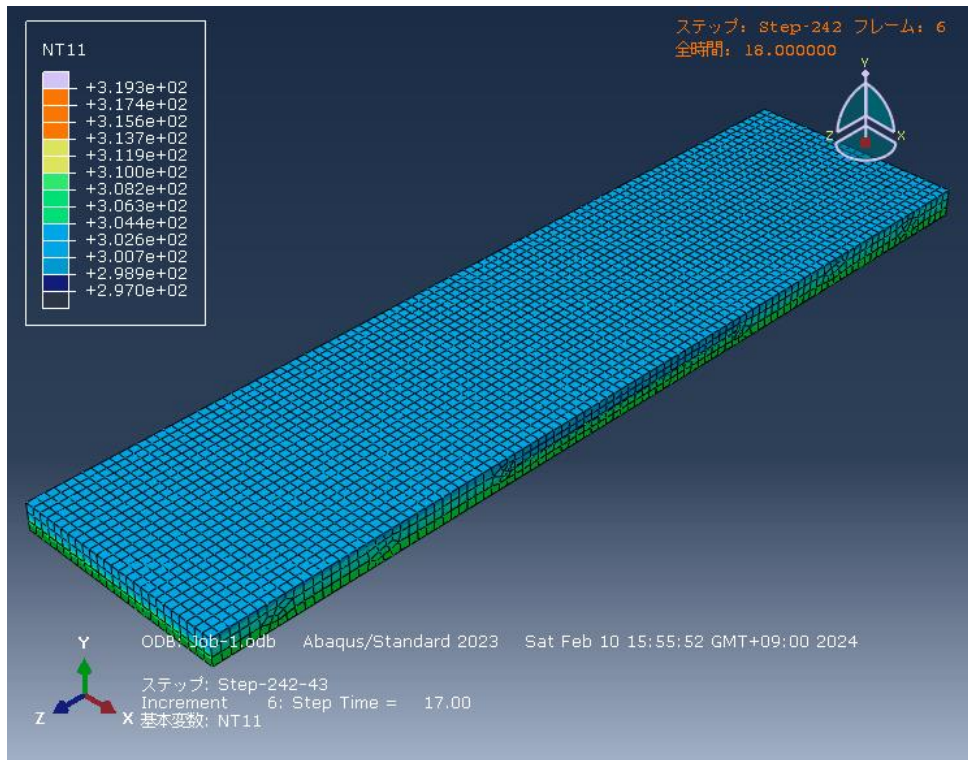


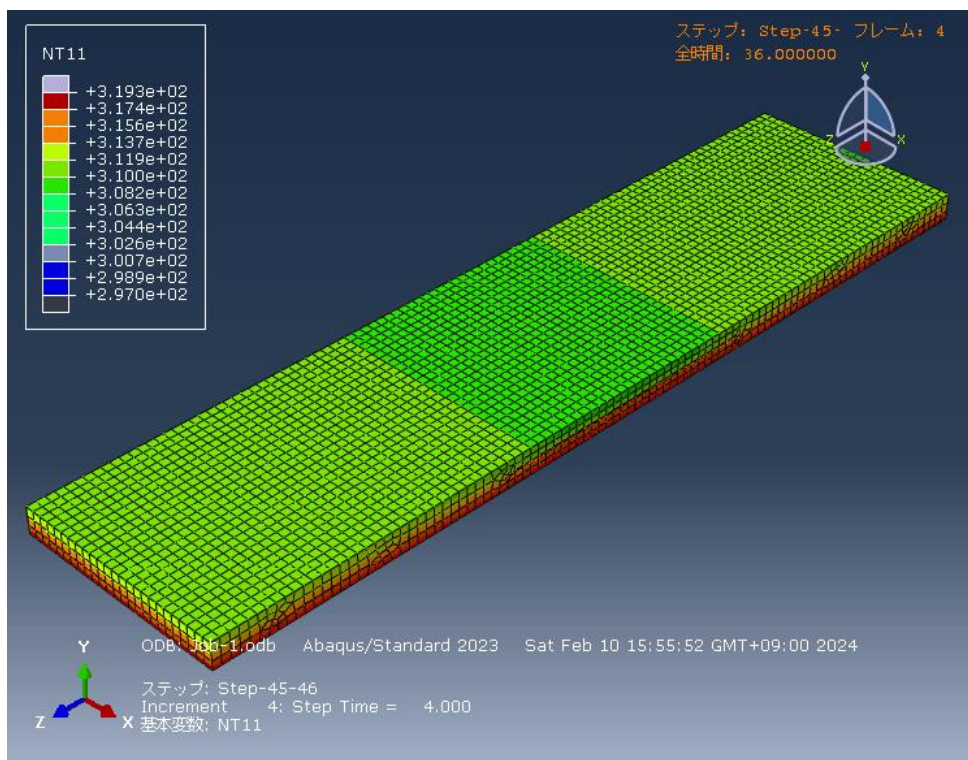
図 4.4.6 繊維方向 0°の 2 点における温度時間履歴

#### 4.4.4 温度分布の時間遷移

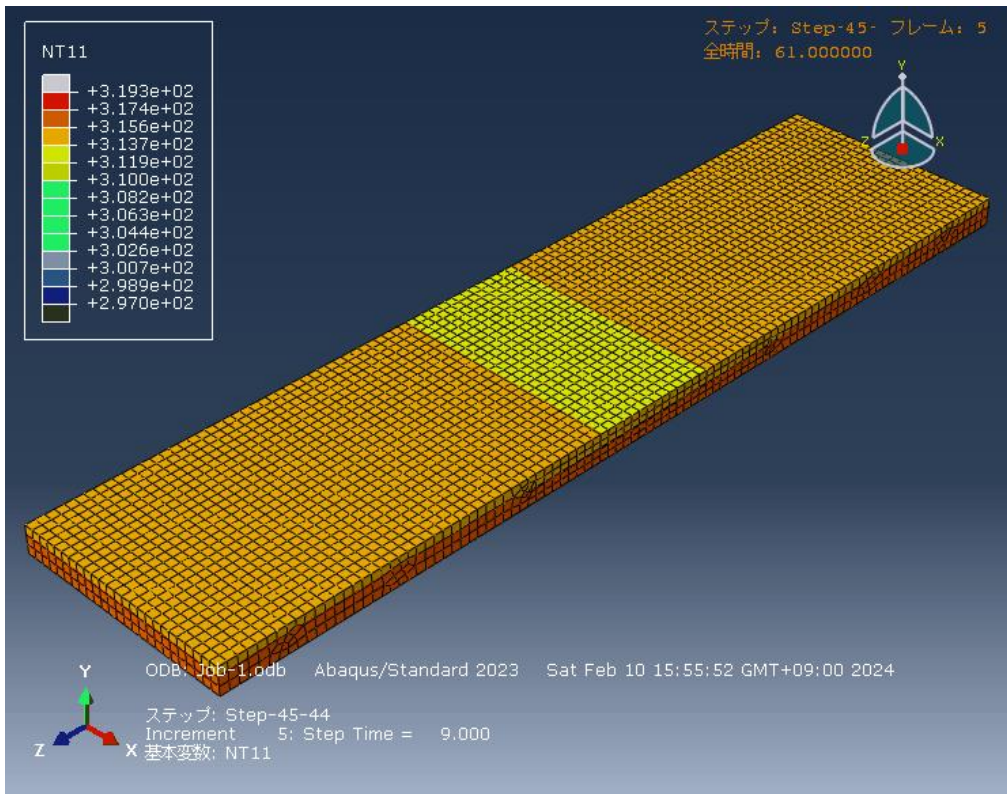
時間経過による試験片全体の温度場変化をコンター図で確認していく。加熱開始から大気解放面に熱が伝わり始めた18秒後(a)、温度差が最大となった36秒後(b)、試験片全体が最も熱された61秒後(c)、定常状態に到達した125秒後(d)を図4.4.7に示す。この条件では大気解放面に熱が伝わり始めた18秒後の時点のコンター図では低温領域が見られず、一様な温度分布となっていた。また、その後の各時間での温度分布も温度差がほとんどないことが分かった。



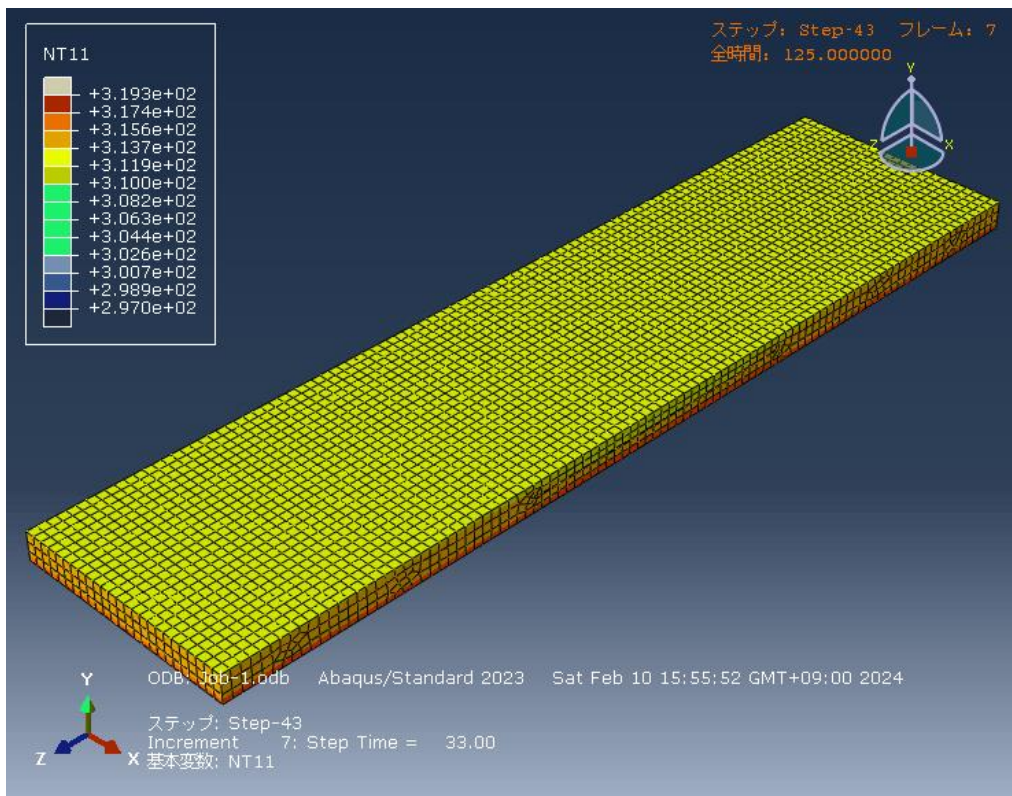
(a) 18



(b) 36



(c) 61



(d) 125

図 4.4.7 クラック厚み 0.1mm の 0°モデルの温度時間遷移

次に、生じる温度差が最大であった加熱開始 36 秒後の非定常時の熱伝導解析による温度分布を取得した。FEM 解析を用いた温度分布測定による大気開放面の温度場変化の温度分布を図 4.4.8 に示す。クラックの厚みが減少したことで温度差が小さくなっていることが分かり、温度の遅れによって損傷位置は視認されたものの、高温領域と低温領域の境界も曖昧であるため損傷の検出が困難である可能性が考えられる。

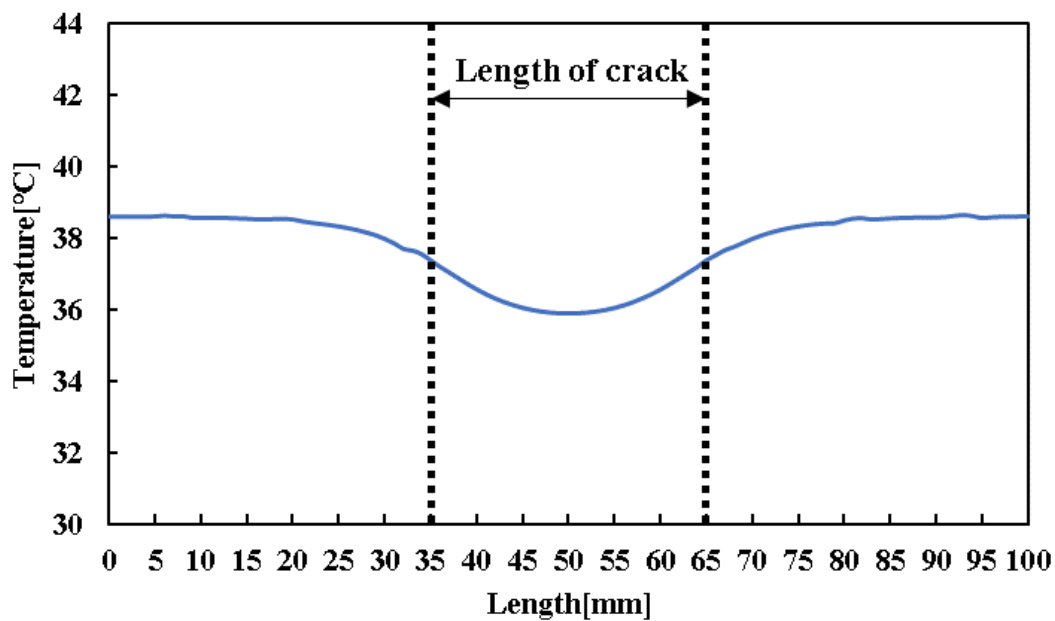
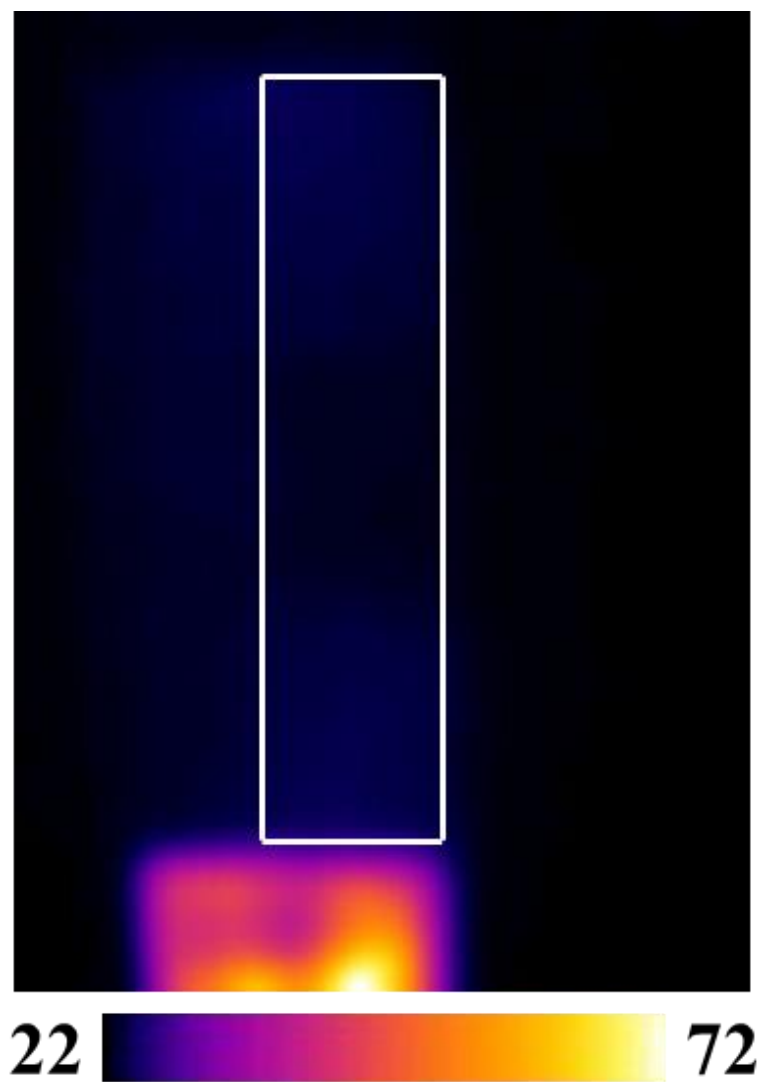


図 4.4.8 加熱開始 36 秒後の大気開放面の温度分布

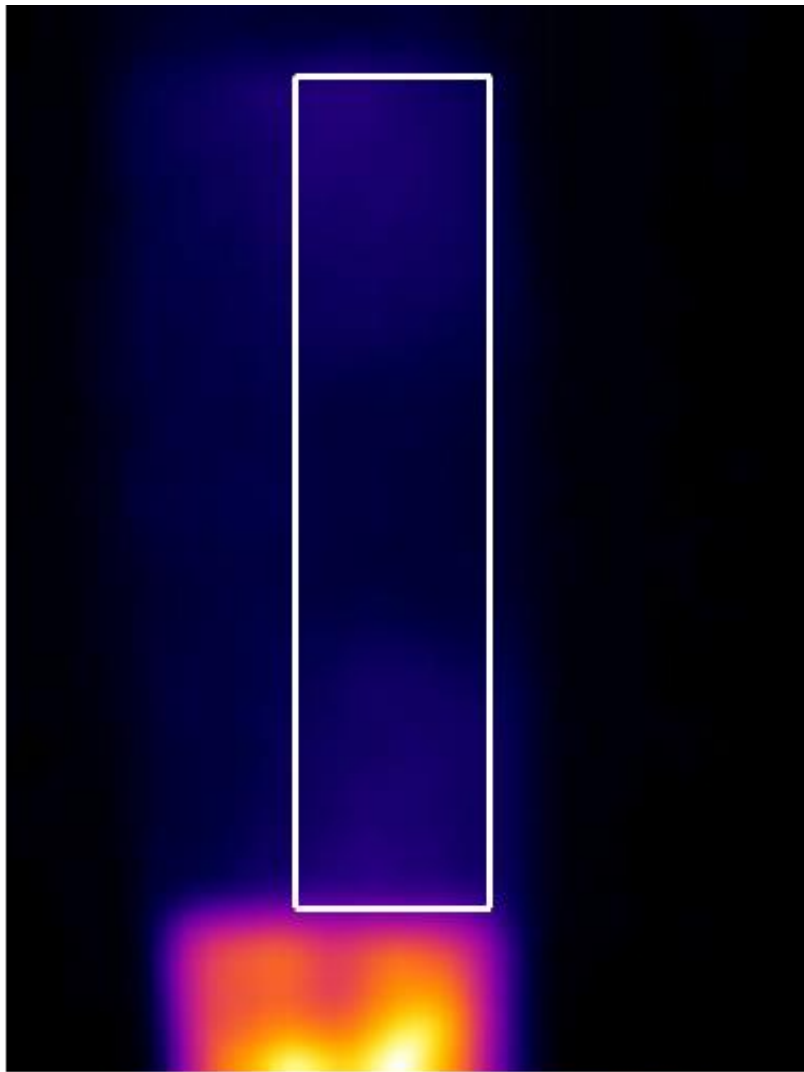
## 第5章 温度分布測定に基づく一方向 CFRP 積層板の損傷同定

### 5.1 赤外線サーモグラフィを用いた繊維方向 90°試験片の温度分布測定

温度分布の時間遷移を図 5.1.1 に示す。白い枠線で囲っている部分がクラックを持つ試験片である。(a)は加熱開始 30 秒後、(b)は 40 秒後、(c)は 230 秒後の大気開放面である。温度分布を写真で見るとクラック上面とそれ以外の面での温度に差はあまり見られなかった。また、赤外線サーモグラフィで得られた各時間の温度分布を図 5.1.2 に示す。非定常である 30 秒後、40 秒後では温度の遅れが見られたが、低温領域と高温領域の境界が曖昧でノイズや試験方法の不備による加熱面の温度勾配の影響とも捉えられる結果となっていた。125 秒後では温度の遅れがほぼなくなっており、試験片が定常に達したため一様な温度分布になったと言える。これは解析で予測された結果とは異なっており、計算で用いた条件が実際に実物を用意して行う実験と合っていないことが考えられた。画像による温度分布では 230 秒後だけ試験片全体の色彩から非常に高い温度になっているように見えたが、グラフから数値上で確認すると大差ないことが分かる。以上より、赤外線サーモグラフィの取得した画像およびグラフから損傷位置の同定は難しいことが分かった。



(a) 30s

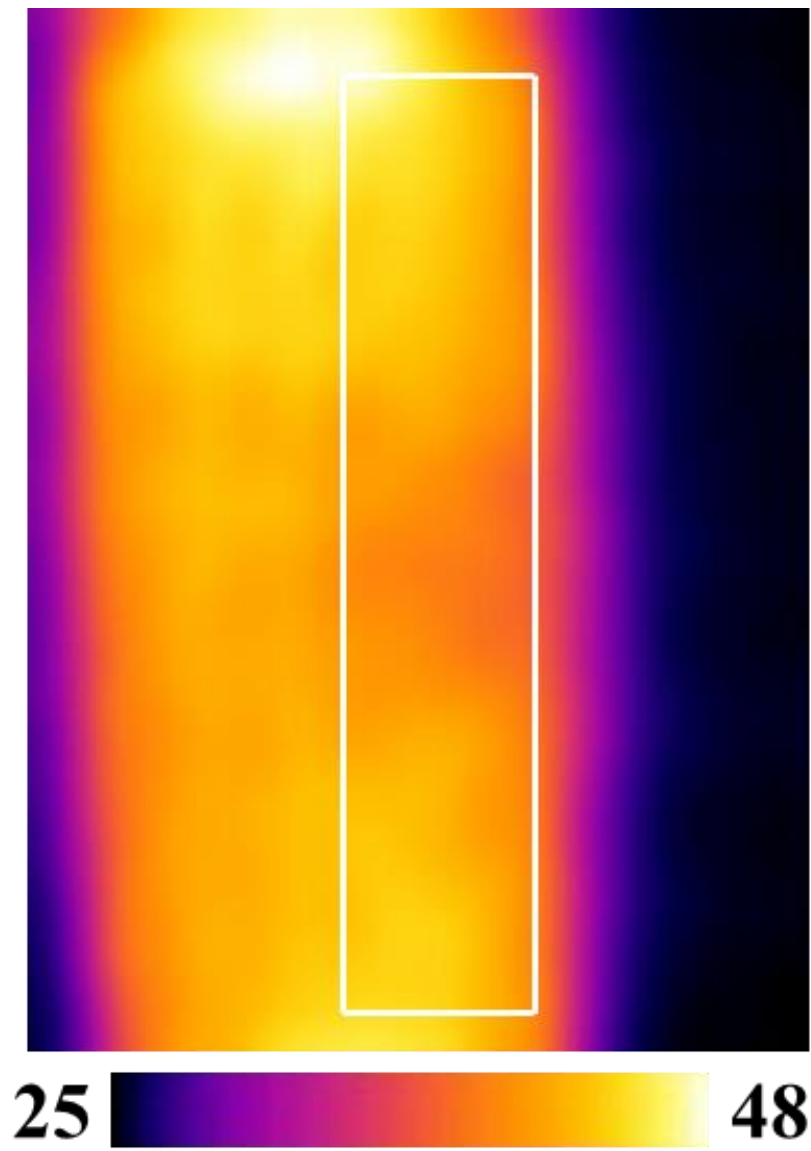


23



71

(b) 40s



(c) 230s

図 5.1.1 サーモグラフィによる温度分布の時間遷移



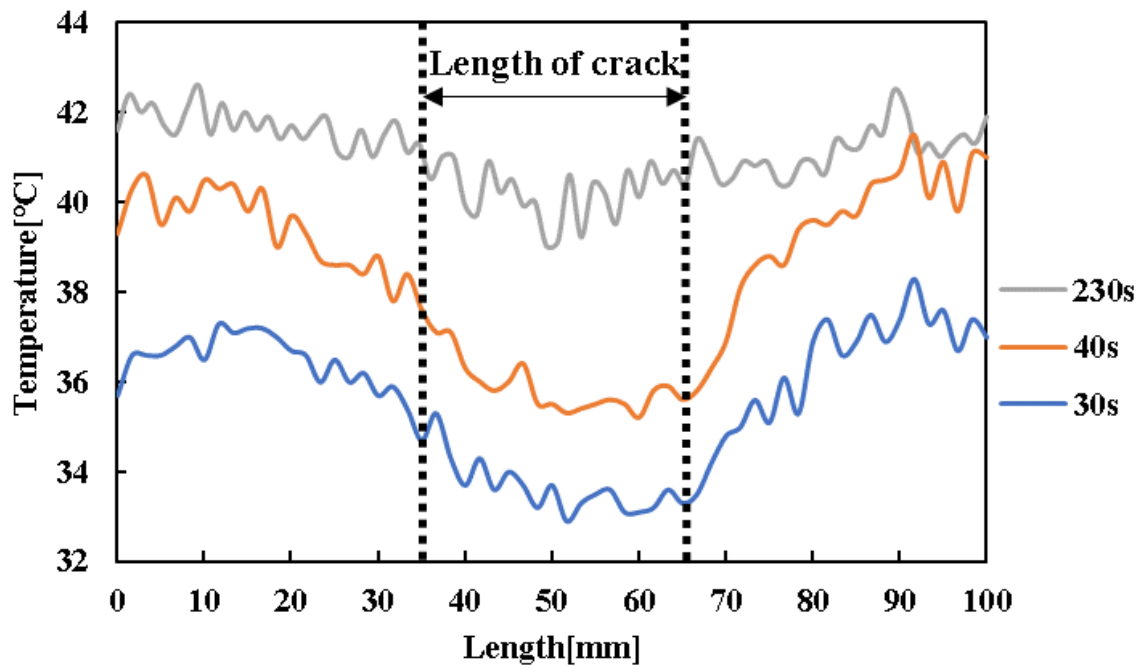


図 5.1.2 赤外線サーモグラフィによる各時間での温度分布

## 5.2 熱電対を用いた繊維方向 90°試験片の温度分布測定

熱電対による試験片表面の手前から 15mm(ch1), 50mm(ch2), 75mm(ch3)の位置の温度時間履歴を図 5.2.1 に示す。加熱開始 41 秒後に温度差が最大となり、3.9°Cであった。また、161 秒後以降は温度差が 0.8°Cで安定しており、定常状態であることが示された。

また、解析結果との比較したグラフを図 5.2.2 に示す。ここで、ch1 と 15mm、ch2 と 50mm はそれぞれ同じ位置の熱電対データと解析データであり、ch1 と ch3 はそれぞれ試験片両端から 15mm の位置である。解析結果と比較すると端から 15mm の位置の ch1,ch3 の温度時間履歴はともに解析による予測と同じ結果となっていたのに対し、クラックの上面に位置する ch2 は予測と大きく異なっていたものの、昇温中の非定常時ではクラックの影響により温度の遅れが生じており、その差は加熱面の温度が高くなるにつれ増大し続けていた。しかし、解析で低温領域が生じると予測されていた定常到達後の表面の温度は温度差がほぼなくなっており、計算とは異なる結果となっていた。これより、試験片のクラック間での熱伝導が設定したクラック内での熱移動の速度よりも大きかったため、温度時間履歴に差が生じてしまったと推察される。この結果をもとに解析のクラック間の熱伝導について再検討し、修正した値を用いて熱伝導解析を行う必要がある。

以上より、内部損傷を持つ CFRP 積層板を表面加熱した時の大気解放面での温度時間履歴を熱電対により測定すると、解析とは異なる温度分布ではあるものの損傷部での温度上昇の遅れが見られ、熱負荷が大きくなるにつれ温度差も増大していくことが分かった。また、定常到達後の温度分布では解析で予測された結果とは異なり一様になっていることが分かった。

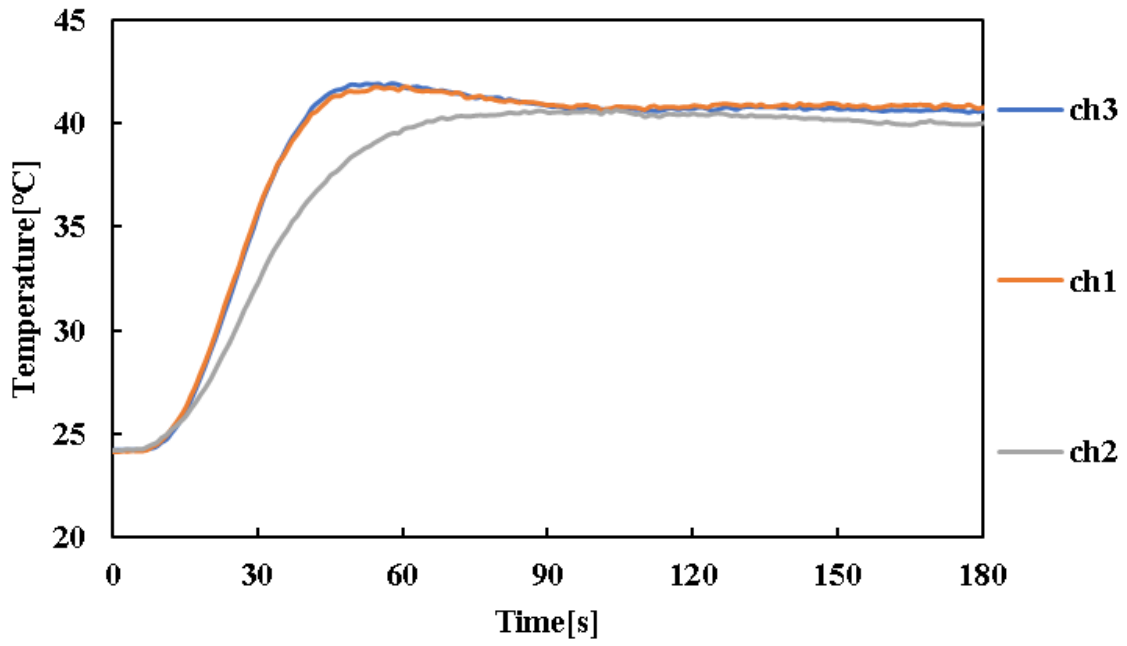


図 5.2.1 熱電対 3 点での温度時間履歴

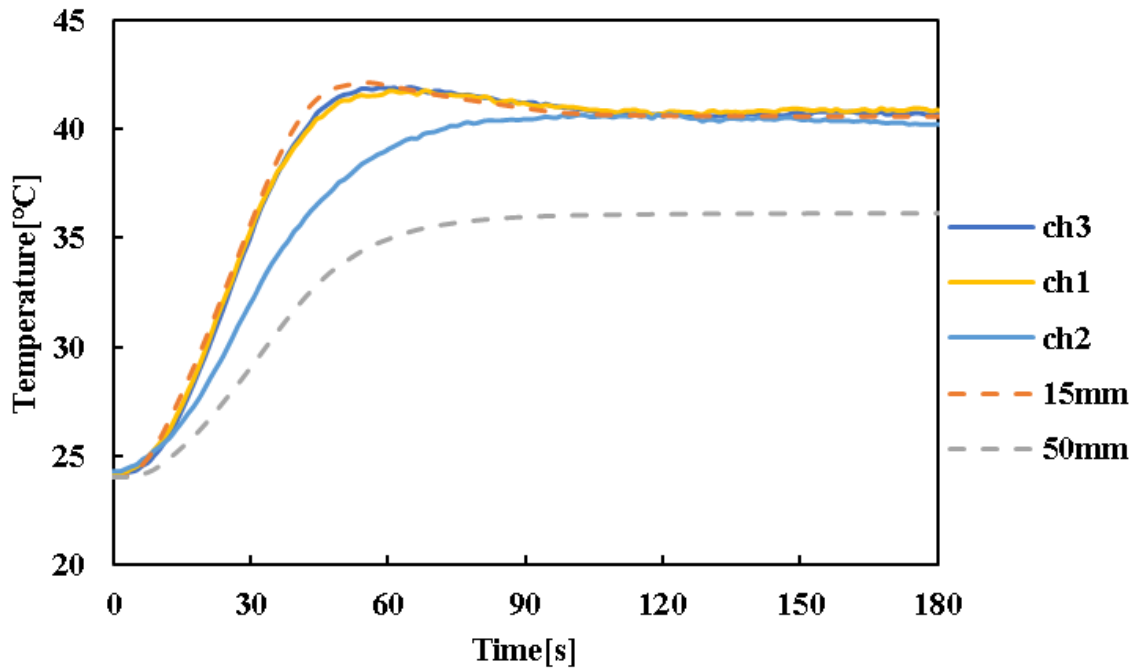


図 5.2.2 解析と熱電対の温度時間履歴の比較

### 5.3 レイリー散乱型光ファイバ分布センサを用いた繊維方向 90°試験片の温度分布測定

レイリー散乱型光ファイバ分布センサから取得したエッジから 15mm と 50mm の位置の温度時間履歴を図 5.3.1 に示す。センサは空間分解能 1mm, ゲージ長 5mm, サンプルングタイムを 2 秒と設定して測定を行った。ただし, この温度には熱ひずみによる膨張が温度として加わっており, CFRP の繊維に対して直交方向では熱ひずみ  $23\mu\epsilon$  が  $1^{\circ}\text{C}$  に相当する。図の縦軸に注目すると, クラックの影響を受けない 15mm の点では 120 秒後に  $81.0^{\circ}\text{C}$  となっていた。ここで, 熱ひずみの影響を計算してみる。試験開始時の CFRP の温度は  $24.0^{\circ}\text{C}$  であり, 加熱 120 秒後の大気開放面の温度は図 5.2.1 にも示した熱電対の結果から約  $40.7^{\circ}\text{C}$  であることが分かっている。ここで上昇した温度変化量は  $16.7^{\circ}\text{C}$  であり, これを熱ひずみに変換すると  $384\mu\epsilon$  となる。本研究で使用したセンサの説明が記載された章で記したように, レイリー散乱型光ファイバ分布センサではひずみ  $1\mu$  が温度  $0.1^{\circ}\text{C}$  に相当するので, 今回の温度分布では  $38.4^{\circ}\text{C}$  の温度が加算されていることになる。実際の温度は  $40.7^{\circ}\text{C}$  であることが熱電対の実験から分かっているため, 熱ひずみの影響を加算すると  $79.1^{\circ}\text{C}$  となり, レイリー散乱型光ファイバ分布センサの測定結果は妥当であると言える。以上を踏まえて結果を見てみると, クラック上面に位置する 50mm の点では温度が大きく遅れていた。しかし, 定常到達付近の 150 秒後でも温度差は生じており, 熱電対やサーモグラフィによる結果と異なっていた。

ここで, 加熱開始 30 秒後, 40 秒後, 150 秒後の大気解放面の温度分布を図 5.3.2 に示す。グラフを見ると 30 秒後, 40 秒後共にクラック上面での昇温が遅れており低温領域が現れていた。しかし, それ以外の面で温度勾配が見られ, 150 秒後ではその影響で損傷位置が見られないような結果となっており, 定常到達時の温度分布から損傷同定が可能とは言い難い結果となっていた。

この原因として, 加熱面に一様な熱負荷が与えられていなかったために温度勾配が生じてしまったと推察した。そこで, クラックのない試験片を用いてレイリー散乱型光ファイバ分布センサで温度分布測定を行ってみた。その結果を図 5.3.3 に示す。本来クラックが無ければどの点で時間履歴を測定しても差は出ないはずだが実験結果から遅れが生じてしまっていることが分かった。この結果をもとに各時間での生じた遅れを算出し, クラックを持つ試験片での結果に加算すると図 5.3.4 のようになった。温度勾配の影響を減少させたことによって熱電対で得られた結果と近い温度分布が得られた。以上より, レイリー散乱型光ファイバ分布センサで温度分布測定を行った結果, 温度が上昇していくにつれ遅れが大きくなり, 定常到達後では温度差がほぼ失われることが分かった。

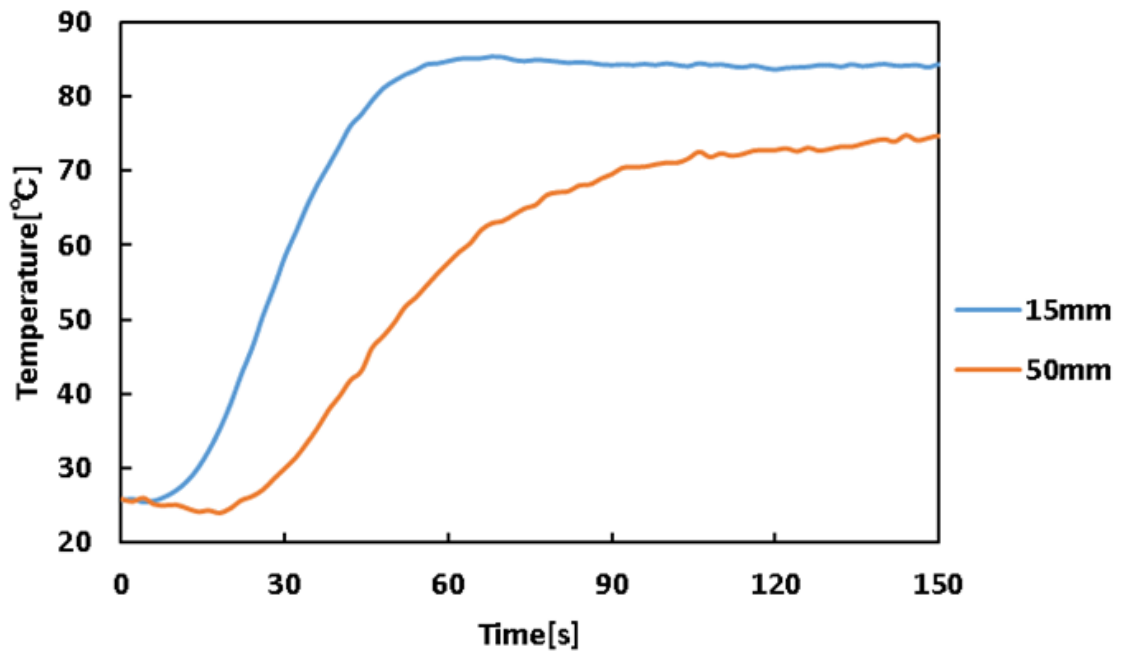


図 5.3.1 レイリー散乱型光ファイバ分布センサによる 2 点の温度時間履歴

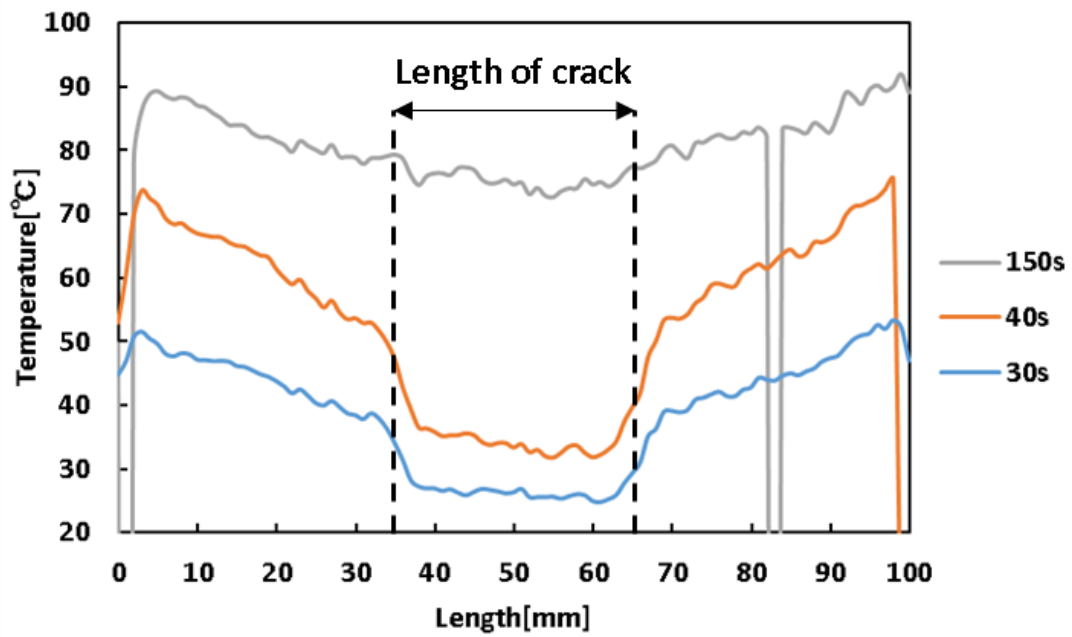


図 5.3.2 レイリー散乱型光ファイバ分布センサによる各時間での温度分布

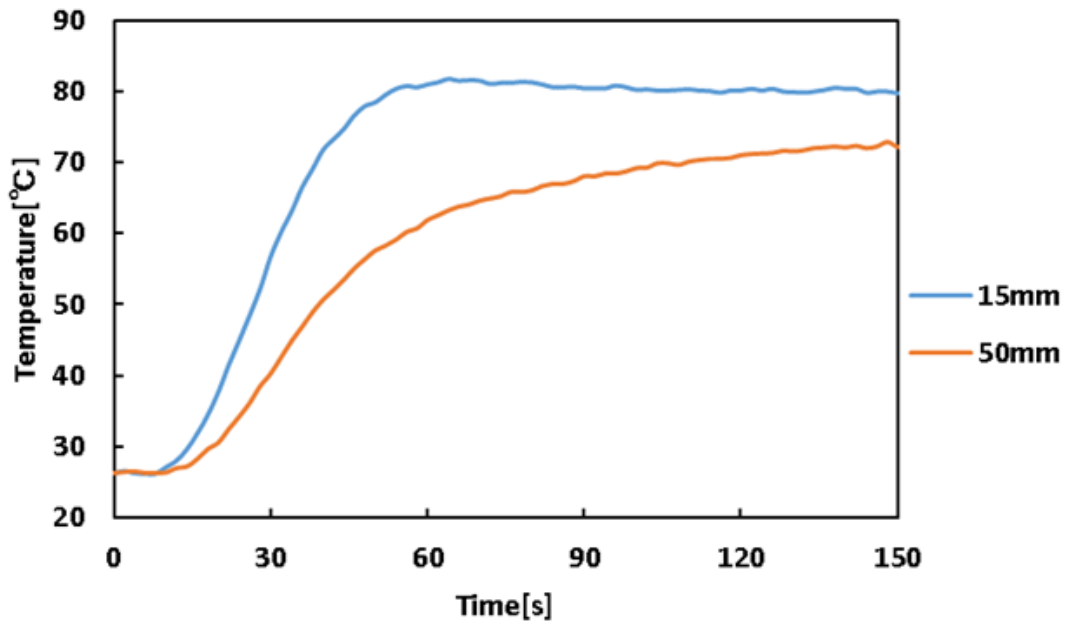


図 5.3.3 クラックのない試験片の温度時間履歴

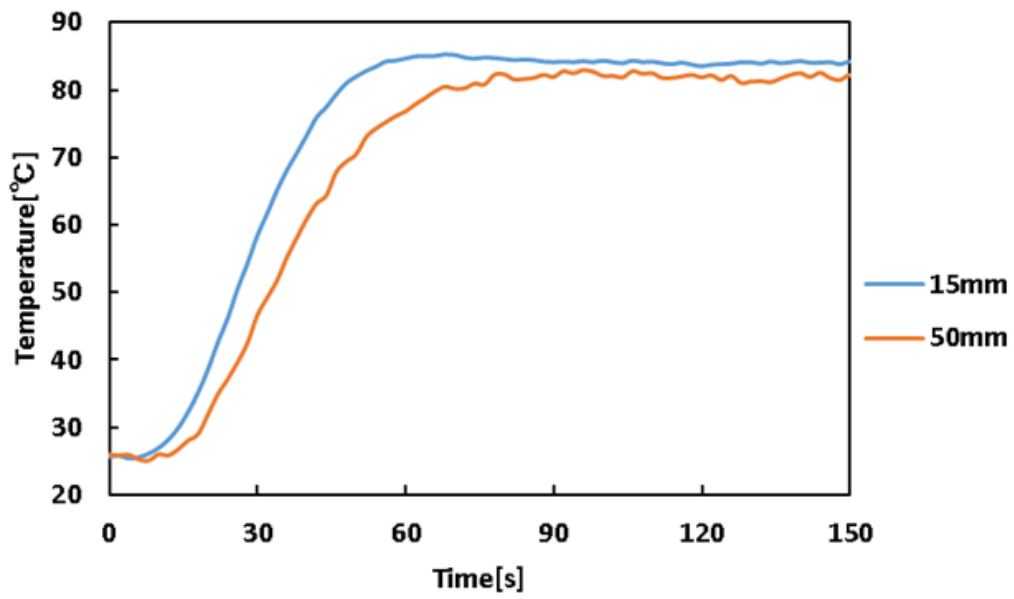


図 5.3.4 補正した温度時間履歴

#### 5.4 温度分布の再現性

この手法には再現性があるかを確認するため、同じ寸法、損傷形状の試験片を追加で2つ用意し、同様の加熱条件で実験を行った。前章の試験片を1枚目とし、1, 2, 3枚目の加熱42秒後の温度分布を図5.4.1, 5.4.2, 5.4.3に示す。3回とも温度勾配が見られたが、クラック範囲の大気開放面で低温領域が見られた。以上より、この手法での温度分布の再現性が確認されたが、温度勾配の発生原因を追求し、修正することでより正確な温度分布を取得して検証する必要があると考えられる。

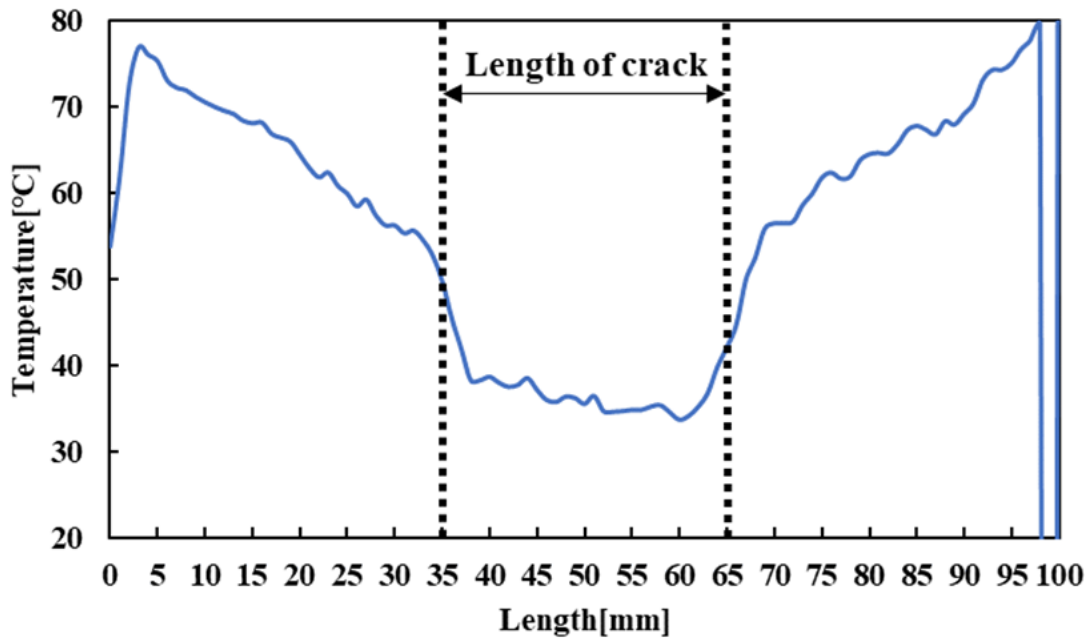


図 5.4.1 1回目の加熱試験による温度分布

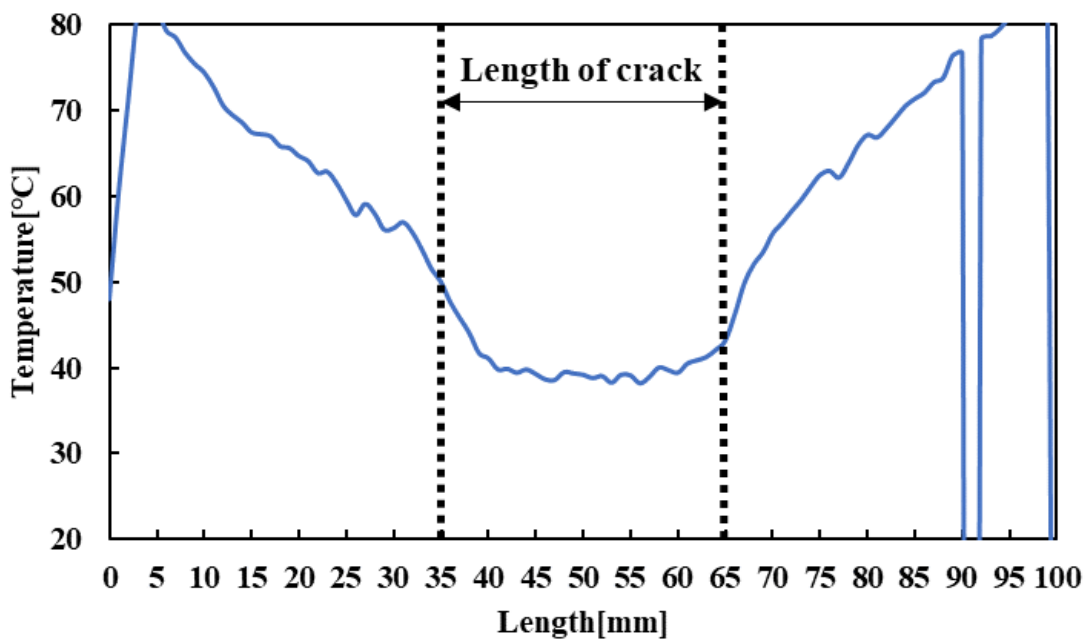


図 5.4.2 2回目の加熱試験による温度分布

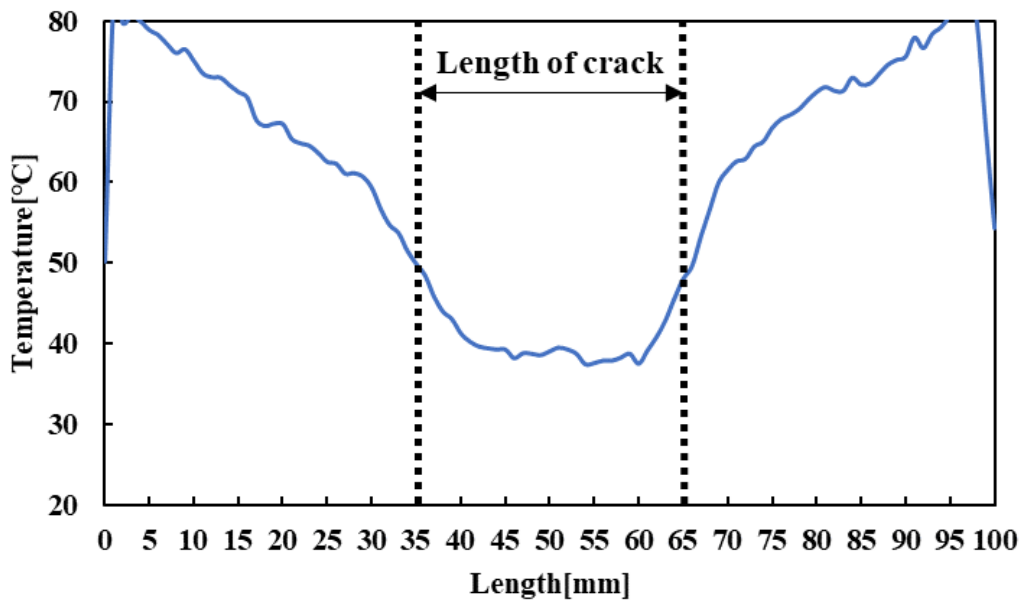


図 5.4.3 3 回目の加熱試験による温度分布

### 5.5 周期加熱による複数温度分布データの平均・正規化

前章までで加熱面に与える熱負荷に温度勾配が生じていることが示されたので、それを解消するために周期加熱を与える手法を試みた。加熱面に与える熱負荷の簡略図を図 5.5.1 に示す。また、実験装置は前章と同じものを用了。初めに 150 秒加熱し温調器の運転を停止させ、センサの測定を開始する。420 秒かけて自然冷却させ再度 150 秒加熱する。この動作を 1 周期とし、3 周期分の温度分布を測定した。その後、昇温時の温度分布を平均化し、最小値 0 から最大値 1 にスケーリングし正規化を行った。

加熱 30 秒後、40 秒後、150 秒後の正規化した温度分布を図 5.5.2 に示す。正規化し熱伝導の遅れにのみ注目したことで温度勾配が減少しており、クラック上面での低温領域がより明瞭に確認することができた。また、2 点の温度時間履歴を図 5.5.3 に示す。クラック上面に位置する 50mm の点で昇温に大きく遅れが生じており、本実験で設定した昇温速度で遅れが生じることが示された。

以上より、繊維方向 90°の CFRP 積層板に周期加熱を与え、正規化することでより精度の良い損傷同定が可能であることが分かった。

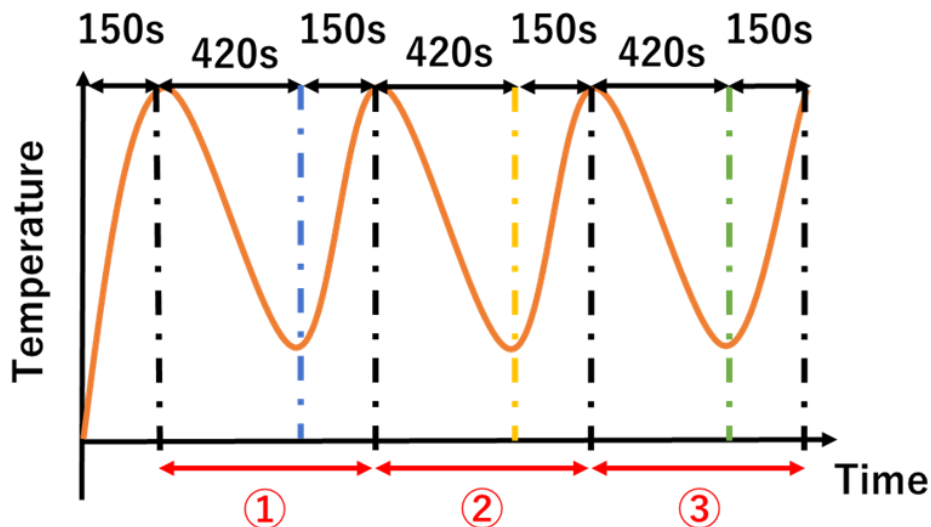


図 5.5.1 与える熱負荷の簡略図

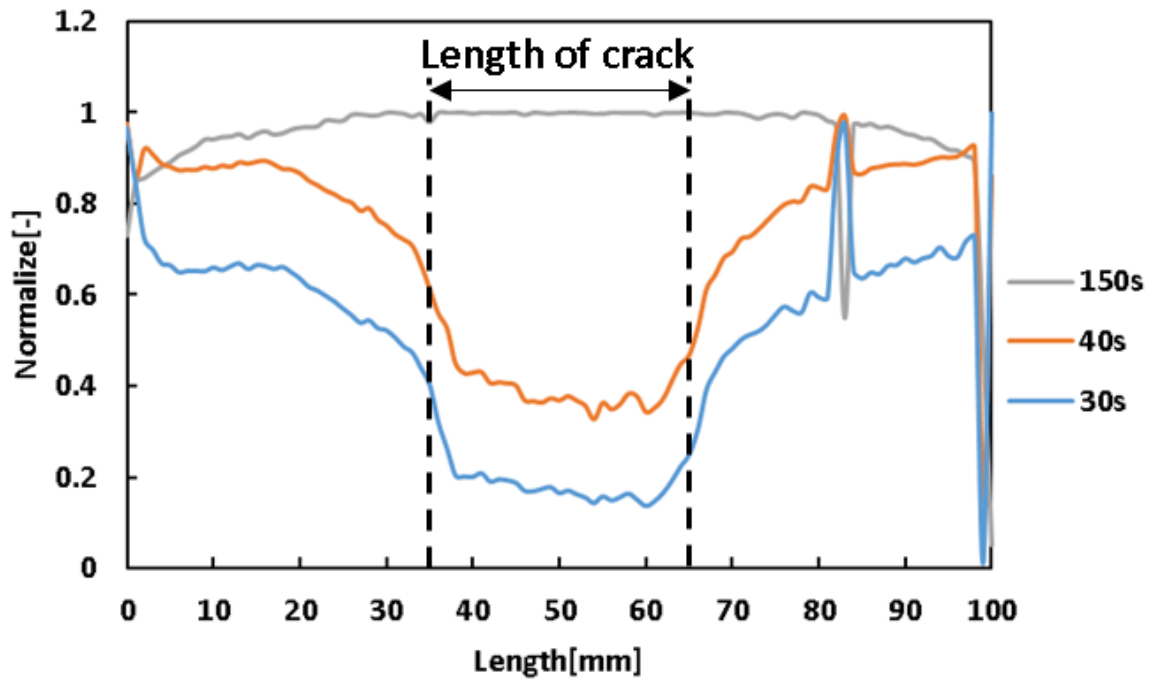


図 5.5.2 正規化した各時間の温度分布

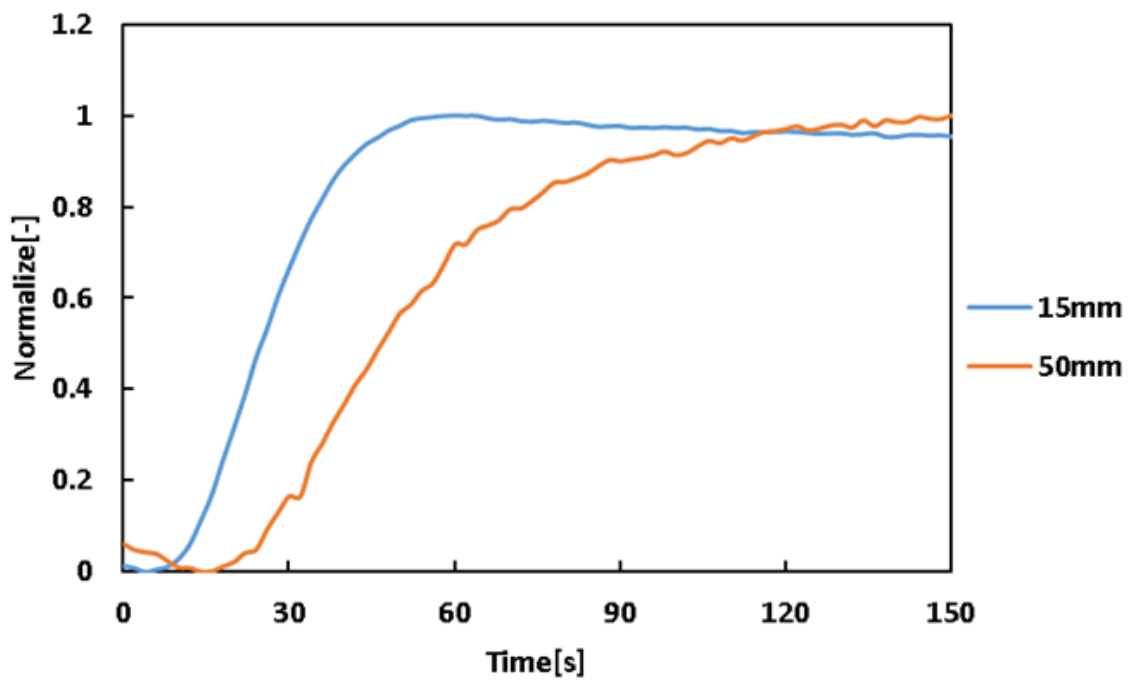


図 5.5.3 正規化した2点の温度時間履歴



## 5.6 レイリー散乱型光ファイバ分布センサを用いた繊維方向 0°試験片の温度分布測定

レイリー散乱型光ファイバ分布センサによって測定した繊維方向 0°の CFRP 積層板の加熱 30 秒後, 40 秒後, 150 秒後の温度分布を図 5.6 に示す. クラック上面に位置する 35mm から 65mm の範囲にはどの時間をとっても低温領域は見られず, 昇温の遅れは確認できなかった. また, 加熱面の温度勾配を修正した 2 点の温度時間履歴を図 5.6.2 に示す. 時間履歴で見ると温度に遅れが生じていたが, その差は小さく熱負荷の不均一やセンサのノイズの影響で遅れが生じている可能性もあり, 損傷を同定することが困難であることが示唆された. そして 90°の時と同様に定常到達後には温度差が失われており, 解析で予測された結果と異なっていることが分かった.

次に, 温度勾配が 90°の時より小さくなった要因について考察する. CFRP は炭素繊維の方向の熱伝導が高く, 熱が伝わりやすい性質を持つ. そのため, 剥離の方向に繊維が沿っている繊維方向 0°の試験片では, クラックによる厚み方向の熱伝導の断熱効果によって生じた温度の遅れが, センサに伝わるまでに熱拡散によって失われてしまい, 平衡状態になってしまったためであると考えられる.

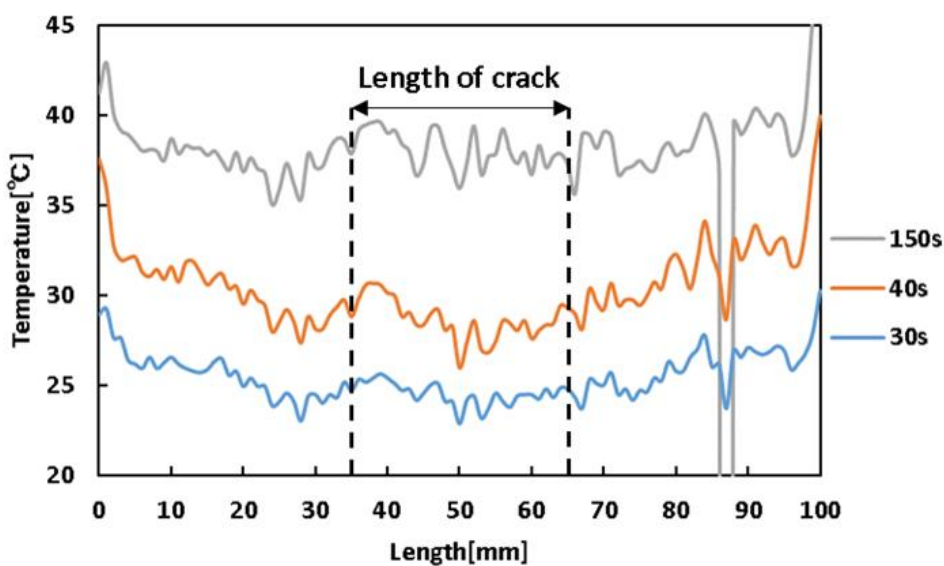


図 5.6.1 レイリー散乱型光ファイバ分布センサによる各時間での温度分布

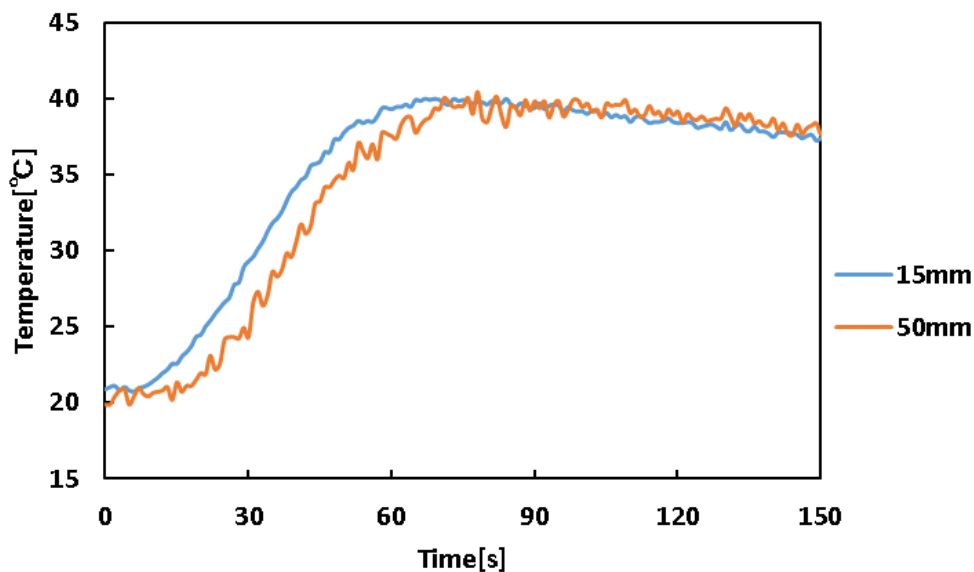


図 5.6.2 補正後の 2 点の温度時間履歴

### 5.7 繊維方向 0°試験片の正規化した温度分布

前章と同様に周期加熱を繊維方向 0°の CFRP 積層板に与え正規化した加熱 30 秒後、40 秒後、150 秒後の温度分布を図 5.7.1 に示す。低温領域と高温領域の境界が繊維方向 90°の結果よりも曖昧となっており、正規化された数値の上限と下限の差が小さくなっているが、昇温に遅れが生じていることが確認された。また、2 点の温度時間履歴を図 5.7.2 に示す。90°と比較して遅れの幅は小さくなっているがクラック上面で温度の上昇が遅れていることが示された。

以上より、周期加熱を与え正規化することで、繊維方向 0°でも損傷同定の可能性が示唆された。

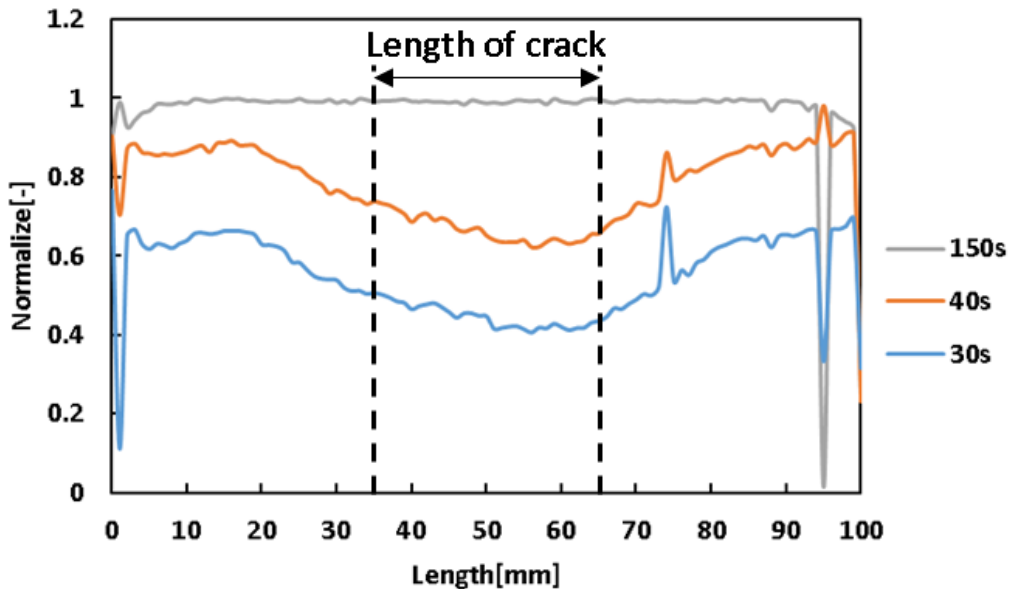


図 5.7.1 正規化した各時間の温度分布

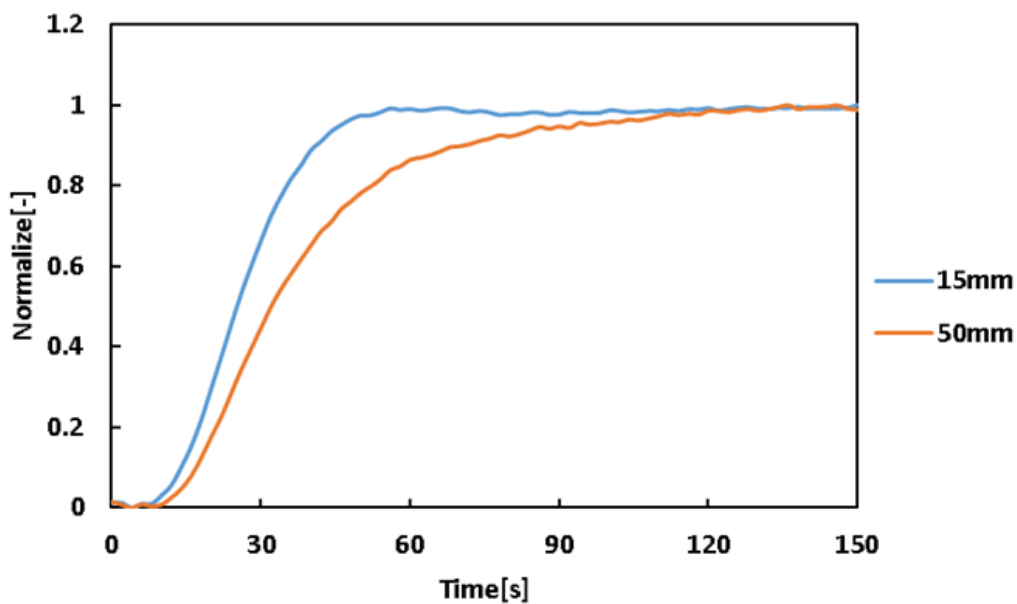


図 5.7.2 正規化した 2 点の温度時間履歴

### 5.8 クラックサイズを小さくした 90°試験片での温度分布測定

前章までの手法でどれほどの精度の測定が可能であるか調査するため、クラックサイズを小さくした試験片を用意して温度分布測定を行った。用いた試験片の簡略図を図 5.8.1 に示す。CFRP 積層板の幅、厚み、長さは以前用いたものと同じ寸法である。クラックの厚みを 0.4mm から 0.1mm に減らし、長さも 30mm から 20mm に変更した。

クラック上面の 50mm とそれ以外の面に位置する 15mm の 2 点の正規化した温度時間履歴を図 5.8.2 に示す。このグラフは前章で行った周期加熱を与える手法を適用した温度分布である。50mm 地点の昇温に遅れが見られた。また、クラック厚みが 0.4mm の時間履歴と比較するとほぼ一定の遅れを維持したまま昇温していることが見られた。これは、クラックの厚みが減ったことで加熱面から伝わってきた熱がクラック間で伝達しやすくなり、遅れが生じにくくなったことが要因であると考えられる。

次に、加熱開始から 20 秒後、30 秒後、150 秒後の正規化した温度分布を図 5.8.3 に示す。非定常時である加熱開始 20 秒後、30 秒後でクラックが存在する 40mm から 60mm の間で温度の遅れが生じていることが確認された。厚み 0.4mm の結果と比較して低温領域と高温領域の正規化された温度の差が小さくなっており、30 秒後の温度分布では、厚み 0.4mm のクラックを有する場合に 0.5 程度であったのに対し厚み 0.1mm になると温度差は 0.2 程度と減少していた。

以上より、クラックの厚みが小さくなることで生じる温度の遅れが減少し、長さが小さくなることで低温領域の範囲が狭まることが分かった。

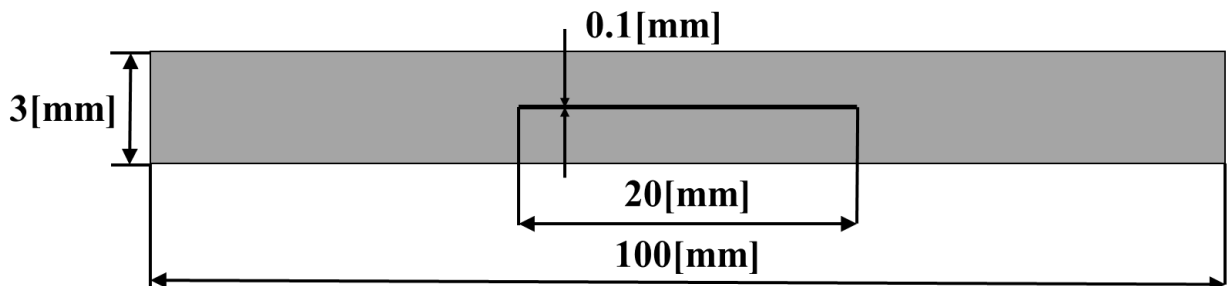


図 5.8.1 試験片の寸法

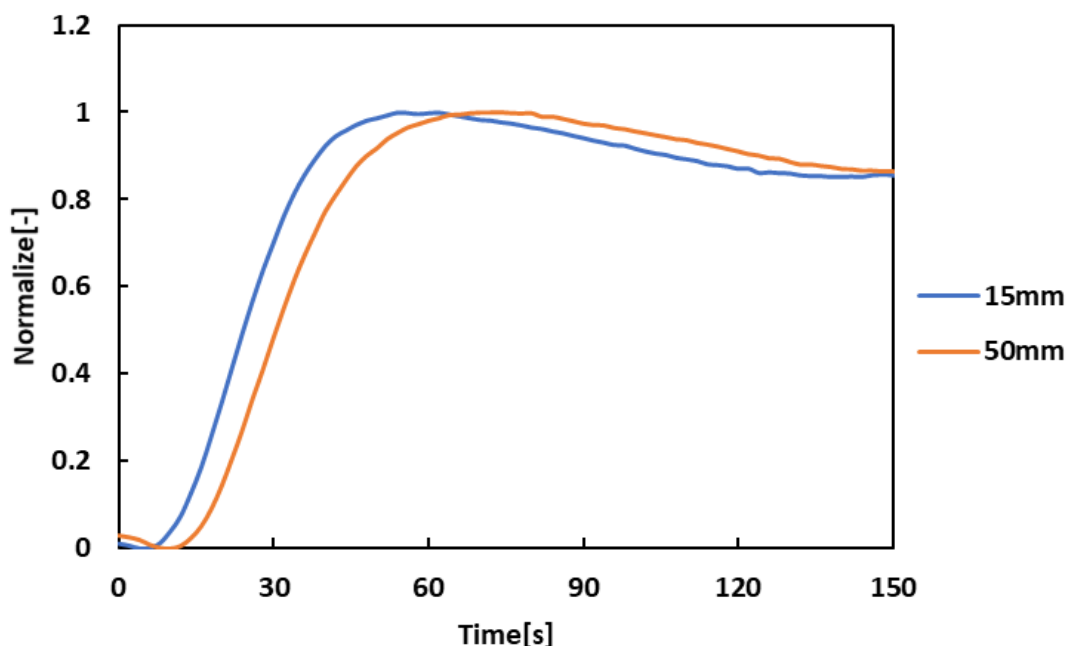


図 5.8.2 正規化した 2 点の温度時間履歴

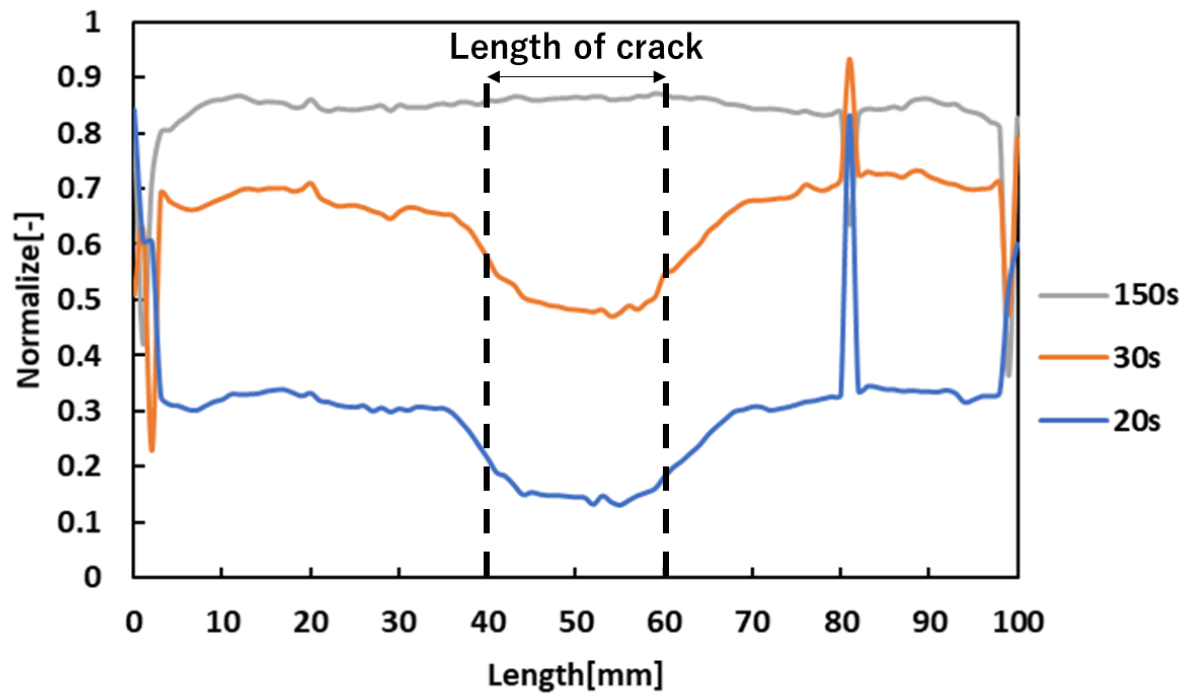


図 5.8.3 正規化した各時間での温度分布

## 第6章 結言

本研究では、汎用有限要素法ソフト Abaqus による熱伝導解析から複数の実験条件での損傷同定の可能性を模索した後、レイリー散乱型光ファイバ分布を用いた温度分布測定から厚み 0.4mm、幅 30mm の内部損傷が生じた試験片の損傷同定を試みた。その結果、以下の結論を得た。

- (1) Abaqus を用いた熱伝導解析により、厚み 0.4mm、幅 30mm のクラックがあるモデルを加熱開始から定常到達後まで温度分布測定すると、非定常時、定常時ともにクラック上面で低温領域が生じることが示された。また、繊維方向 90°、0°ともに温度上昇の遅れは見られたが、0°方向の試験片の方が高温領域と低温領域の境界が曖昧であり、温度差が小さくなることが分かった。
- (2) 厚みを 0.4mm から 0.1mm に縮小して熱伝導解析を行った結果、繊維方向 90°、0°ともに非定常時に生じる温度差は小さくなったが、クラック位置の大気解放面で低温領域が見られ、損傷の影響が現れることが分かった。
- (3) 赤外線サーモグラフィによる温度分布測定により、非定常時の低温領域を画像、グラフの両方から確認することができたが、その差は小さくノイズも大きく出ているため損傷の位置を検出することは困難であることが分かった。
- (4) 熱電対を用いて大気解放面の長手方向手前から 15mm、50mm、75mm の三点の温度時間履歴を測定した結果、クラック上面に位置する 50mm の位置で温度上昇に遅れが生じることが分かった。しかし、定常到達後は温度が一樣となり、解析で予測された低温領域が見られないことが分かった。
- (5) レイリー散乱型光ファイバ分布を用いた温度分布測定の結果より、90°の CFRP 積層板のクラック位置で温度上昇に遅れが見られ、損傷の同定が可能であることが分かった。なお、熱ひずみの影響から実際の温度分布よりも高い温度を示すことも分かった。一方で繊維方向 0°の試験片では、低温領域が確認しづらく、損傷同定が困難であることが分かった。
- (6) CFRP 積層板に周期加熱を与えて取得した温度分布を、定常地で正規化することで、熱伝導の遅れにのみ注目した。その結果、90°の CFRP 積層板については、損傷位置で明確な遅れを見ることができ、精度の良い損傷同定が可能であることが分かった。また、繊維方向 0°の試験片でも温度上昇の遅れが確認されたため、損傷同定の可能性が示唆された。
- (7) 繊維方向 90°の試験片が有するクラックの厚みと長さを小さくした結果、クラック上面での温度の遅れが小さくなり、低温領域の範囲が狭まることが分かった。

## 参考文献

- (1) 武田展雄, “構造ヘルスマニタリング技術の研究開発”, 日本航空宇宙学会誌, Vol. 52, No. 605 (2004), pp. 142-148
- (2) 武田展雄, 水口周, “光ファイバセンサの航空機構造ヘルスマニタリング技術への応用”, 計測と制御, Vol. 51, No. 3 (2012), pp. 234-240
- (3) 大西一輝, “分布型センサを用いた FRP の層間剥離検出”, (2020), 高知工科大学卒業論文
- (4) 阪上隆英, “赤外線サーモグラフィによる構造物の非破壊検査”, 溶接学会誌, Vol. 72, No. 4 (2003), pp. 251-255
- (5) 大野洋, 阪上隆英, 久保司朗, “自己相関ロックイン赤外線サーモグラフィ法に基づく CFRP 複合材料の層間剥離損傷検出”, 関西支部講演会講演論文集, Vol. 85, (2010)
- (6) 石川真志, 椎谷有紀, 向後保雄, 八田博志, 羽深嘉郎, 福井涼, 宇都宮真, “位相解析を利用した誘導加熱励起サーモグラフィ法による CFRP 積層板の非破壊検査”, 日本機械学会論文集, Vol. 81, No. 829 (2015), pp. 15-17
- (7) 近藤拓郎, “赤外線サーモグラフィを用いた非破壊検査技術に関する研究”, 山口県産業技術センター, 研究報告 No. 33, pp. 7-11, (2021)
- (8) 阪上隆英, 小倉敬二, “ジュール熱による瞬時加熱温度場のサーモグラフィ計測に基づく非破壊欠陥計測”, 日本機械学会論文集 A 編, Vol. 58, No. 555 (1992), pp. 2224-2231
- (9) 大越孝敬, “光ファイバセンサ”, オーム社, PP15, PP196-201, (1986)
- (10) 光防災センシング振興協会, “光ファイバセンサ入門”, 光防災センシング振興協会, PP52, (2013)
- (11) 高坂達郎, “複合材料成型技術の最前線 3.近年の FRP 成型モニタリング技術とその応用”, 日本材料学会, Vol.67, No.8 (2018), pp. 819-825
- (12) 梶川拓也, “FRP 効果・損傷モニタリング用 FBG センサシステムの開発”, (2011), 高知工科大学卒業論文集
- (13) Xavier Chapeleau, Monsef Drissi-habti, 富山 禎仁, “土木構造物における FRP の健全性モニタリングのための埋設光ファイバ・センサ”, 日本複合材料学会誌, Vol. 36, No. 1 (2010), pp. 25-30
- (14) 藤原力, 伊原木幹成, 長井謙宏, 鎗孝志, “航空機構造健全性モニタリング技術の開発” 三菱重工技報, Vol. 41, No. 1 (2004), pp. 10-11
- (15) 板谷覚子, “CFRP の微小熱ひずみ測定のための埋め込み EFPI センサの開発”, (2020), 高知工科大学卒業論文集
- (16) 半田裕樹, “レイリー散乱型光ファイバセンサを用いた FRP の成形および健全性モニタリング”, (2017), 高知工科大学大学院修士論文
- (17) 小笠原速夫, 平野義鎮, 吉村彰紀, “模擬雷撃を受ける炭素繊維複合材料の熱—電気連成解析”, 日本航空宇宙学会論文集, Vol 57, No. 667 (2009), pp. 336-343

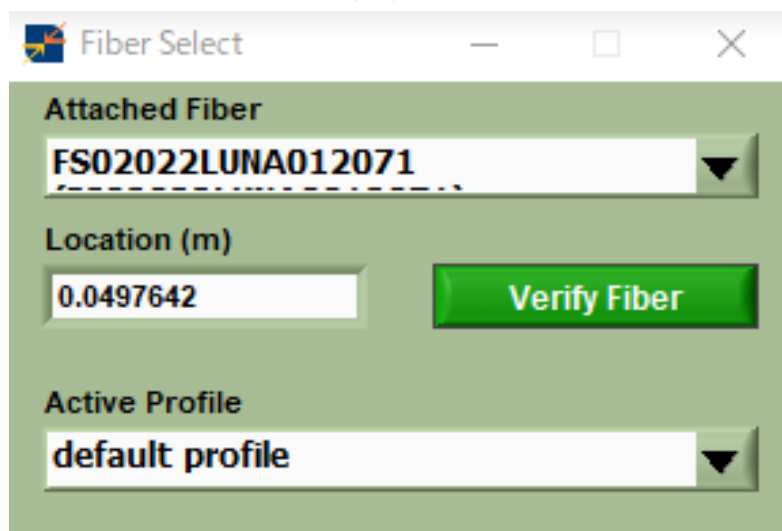
## 謝辞

本研究を行うにあたって、多くの助言やご指導くださった高坂達郎教授に深く感謝いたします。また、日頃の議論を通じて多くの知見や示唆を頂いた先端機械・航空材料工学研究室の皆様にも感謝いたします。本研究は科研費（20K04182）の助成を受けたものである。

## 付録

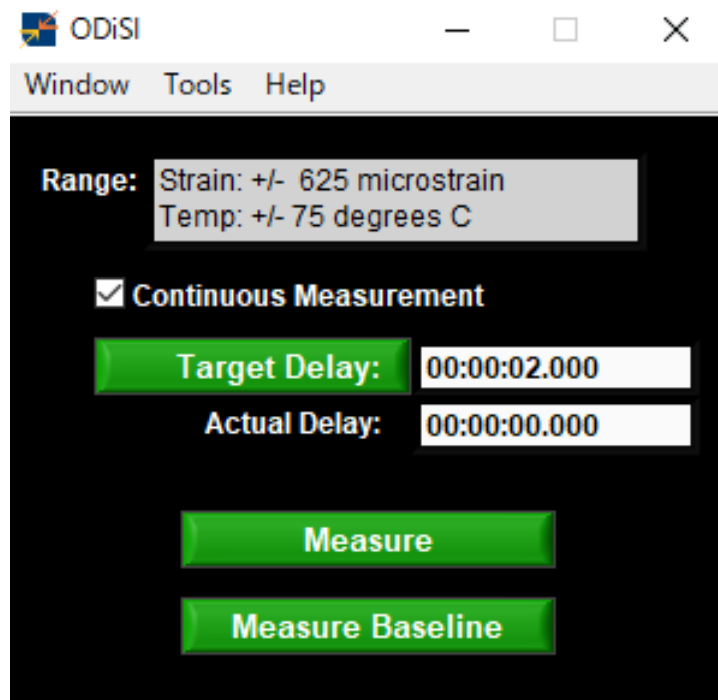
### A.1 レイリー散乱光データ取得および温度分布測定方法

図 A.1 に温度分布測定までに使用するウィンドウを示す。本研究で使用するレイリー散乱型光ファイバ分布センサは、測定後に取得したレイリー散乱強度のデータを解析して温度分布を出力する。まず、図 2.6(a)のウィンドウで使用するセンサの型番を選択し、Verify Fiber をクリックすることでファイバの位置を確認する。こうすることで測定時にアクティブとなるファイバとプロファイルが設定される。次に図 2.6(b)のウィンドウで Measure Baseline をクリックし、ファイバが変形していない状態でのファイバ全長のレイリー散乱データを取得する。このデータは光ファイバ変形後に得られる光データとの相互相関の計算に使用されるため、温度測定を開始する前にベースラインを取得しておく必要がある。Measure Baseline を選択するとひずみと温度の測定範囲を選ぶことができ、最大で $\pm 10000\mu$  までのひずみ範囲を選択することができる。また、ひずみ  $1\mu$  は温度  $0.1^{\circ}\text{C}$  に相当する。ただし、記録される光データ量は測定範囲に依存しており、最大測定範囲を選択した場合に 1 回の測定データを記録するのに約 68MB のデータ量を必要とする。そのため、記録開始前にデータ容量に空きがあるか確認を行う必要がある。Target Delay でサンプリングタイムを設定し、Continuous Measurement にチェックを付けることによってサンプリングタイムの間隔で続けて光データを測定することができる。測定サイクルも測定範囲に依存しているため、細かなサイクルで計測を行うためには最大測定範囲を小さくする必要がある。最大の $\pm 10000\mu$  のひずみ範囲で測定した場合の最短サンプリングタイムは 2 秒であった。Measure を押すとレイリー散乱光の測定が開始し、図 2.6(c)のグラフに温度分布が表示されるが、光データの記録は図 2.6(d)にある Start Logging を選択するまで開始されない。グラフの上部に表記されている Temperature を Strain に変更することでひずみ分布を表示することが可能である。横軸はセンサの接続されている開始点からの距離を表しており、使用したい範囲のセンサの端にひずみや温度を与えてグラフから位置を読み取ることで、距離範囲を小さくし測定サイクルの短縮を可能にする。次に、図 2.6(e)のウィンドウにある Baseline に前もって取得したファイバ変形前の全長のレイリー散乱データを選択する。Measurement には温度分布を測定するので Temperature を選択する。Start Location と End Location に温度分布を出力する開始位置、終了位置を指定する。測定距離を短くすることで解析時間の短縮が見込める。Gage length でゲージ長を、Spacing で測定間隔を設定する。ゲージ長を小さくすることにより短周期で変動するデータを出力することが可能となり、測定間隔を短くすることでゲージが移動する距離が縮まるので解析を行う箇所が増加する。これにより細かにデータを出力することが可能となるが解析時間は長くなる。以上より、解析時間は距離範囲と位置間隔の距離によって決まる。

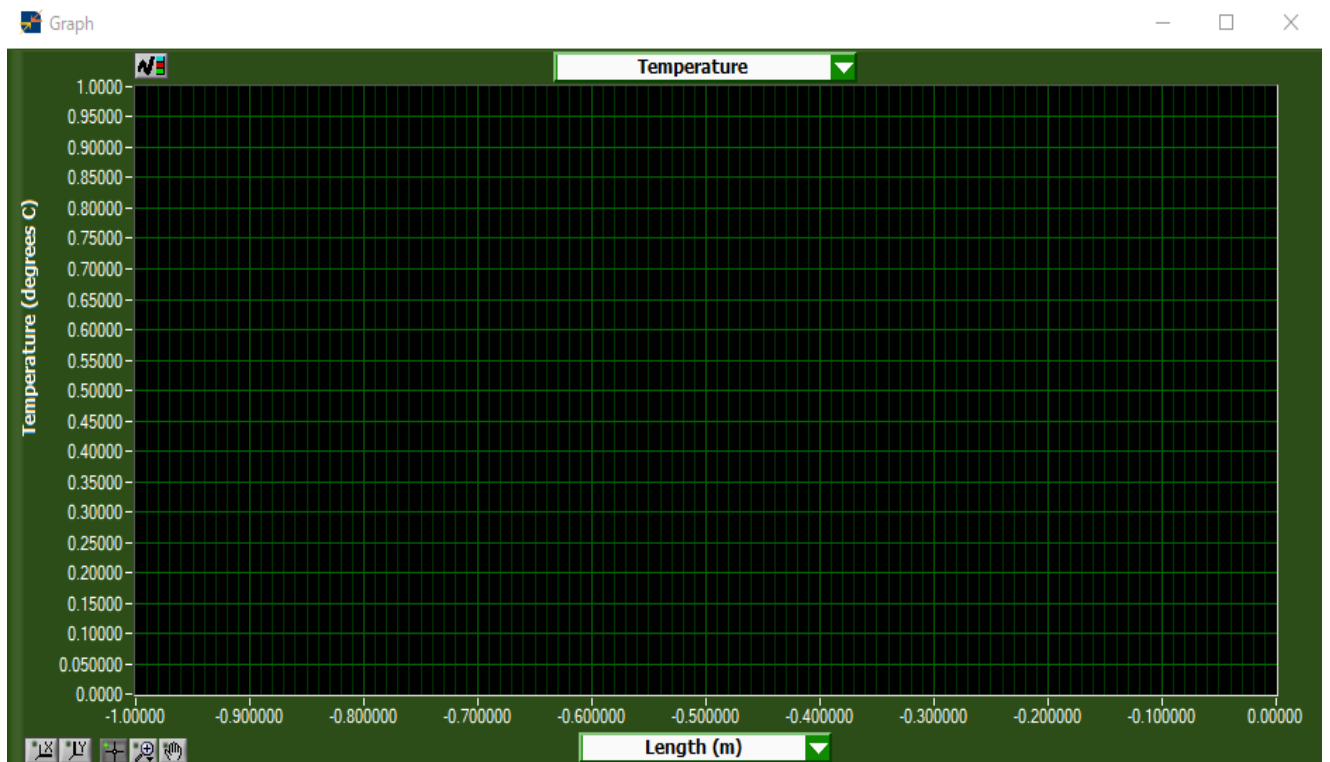


(a) ファイバ選択ウィンドウ

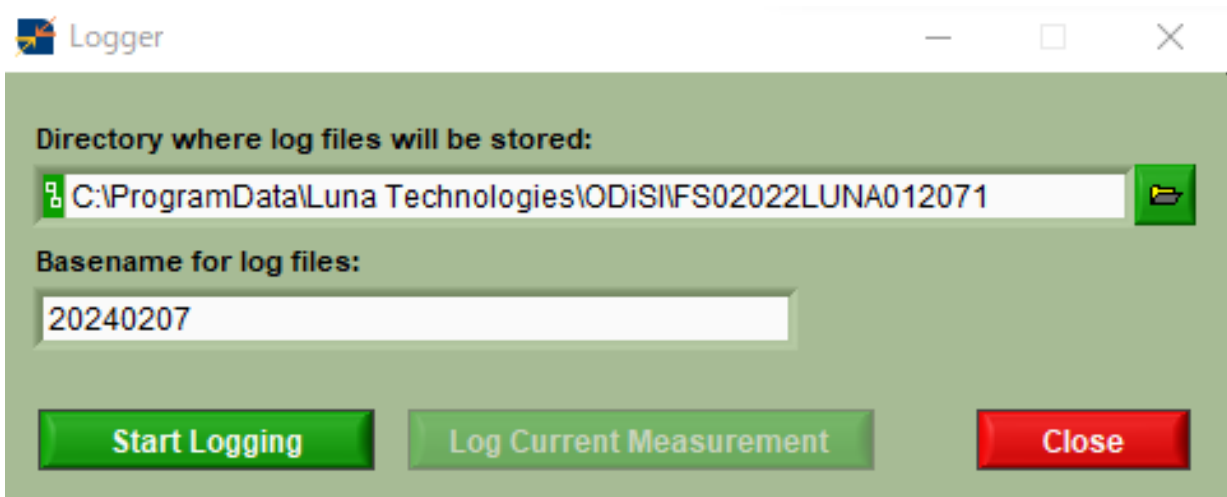




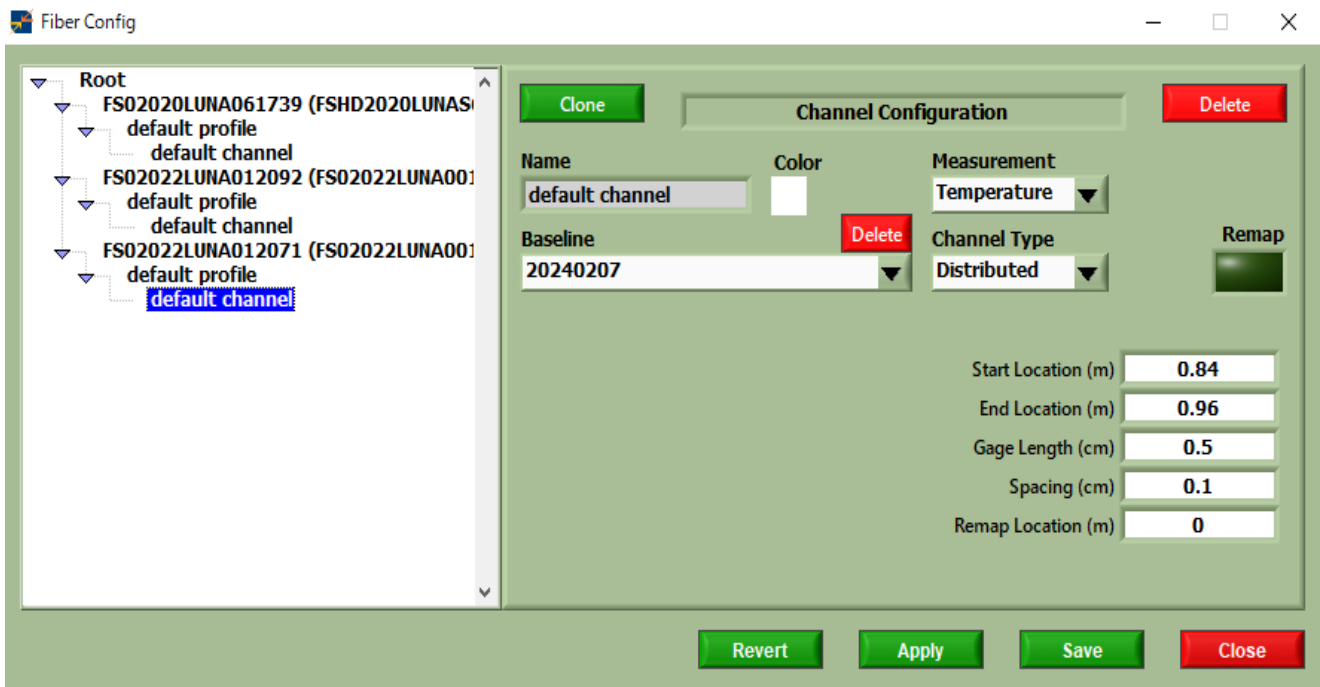
(b) ベースライン設定ウィンドウ



(c) グラフウィンドウ



(d) 記録開始ウィンドウ



(e) 測定条件設定ウィンドウ

図 A.1 温度分布測定で使用するウィンドウ

## A.2 シリコンラバーヒータの設定

使用したシリコンラバーヒータとデジタルマルチ温調器を図 A.2.1, 図 A.2.2 に示す. シリコンラバーヒータはガラスクロスにカレンダー加工した 2 枚のシリコンシート間に抵抗線をパターン化させた構造になっており, 柔軟性に優れていて被加熱物にフィットさせることができる. また, 今回使用したヒータの厚さは 1.5mm と薄いため, 熱応答性にも優れている. デジタルマルチ温調器は最大 16 ステップのプログラムを記憶できるプログラム制御機能を装備しており, PID 制御で温度の調節を行っている. PID 制御の参照元となる温度は熱電対を用いて行うため, 被加熱物とシリコンラバーヒータの間に熱電対を挟み温調器に接続する必要がある. プログラムの設定はステップごとの温度と時間を設定することができ, 異なるステップ毎で温度勾配を付けての温度・時間管理が可能である.



図 A.2.1 シリコンラバーヒータ  
(AS ONE Corporation)



図 A.2.2 デジタルマルチ温調器  
(AS ONE Corporation)

ステップの最小時間単位が 1 分であったので, 1 分で 40°C まで昇温し, 40°C を 1 時間保持するよう設定して実験に用いた. CFRP を上記の設定で 180 秒加熱した時の表面の温度の時間履歴を図 A.2.3 に示す. 27 秒から 41°C を超えはじめオーバーシュートを起こし 37 秒後には 43.1°C まで昇温されていたが, 78 秒後には 41°C を下回り 144 秒後に 40.3°C で安定した. 予測とは異なる挙動を示したが, この程度のズレであれば非定常時の温度分布測定にはあまり影響を与えないと考え, この条件での損傷検出を試みた.

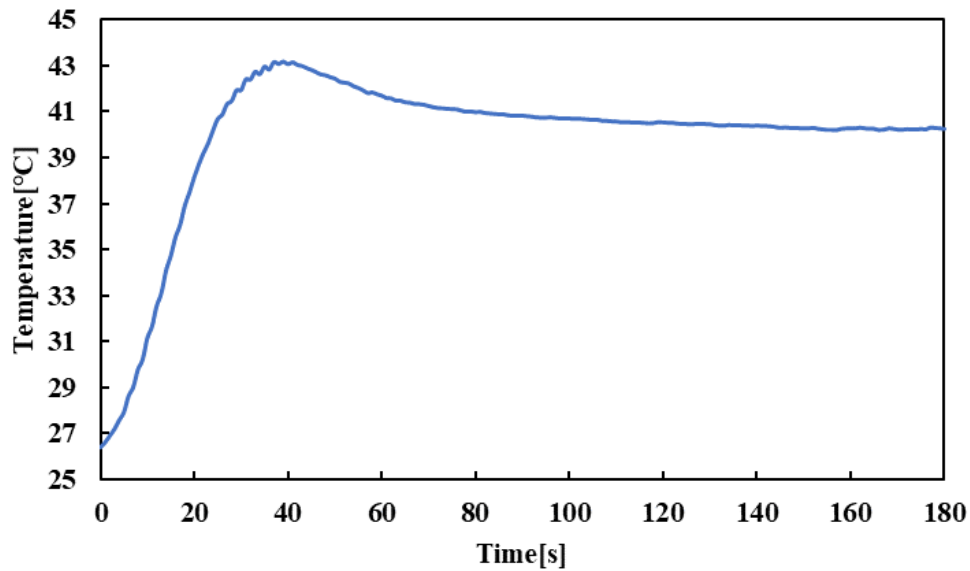


図 A.2.3 CFRP の加熱表面の温度時間履歴

### A.3 加熱表面の温度分布

損傷のある試験片を用いて大気開放面のクラック範囲に 1 点，範囲外かつ等間隔に 2 点の位置に熱電対を接着し温度時間履歴測定を行ったところ，クラック範囲での温度の遅れが見られたが再現性に欠ける結果となっていた．そこで，CFRP の加熱表面とシリコンラバーヒータの間に挟んである熱電対の厚みによって加熱面に均質な熱負荷がかかっておらず，温度勾配が生じてしまっていると仮説を立てた．

特定の位置に故意的に隙間を用意した実験装置の簡略図と熱電対 2 本による大気開放面の温度時間履歴を図 A.3.1，図 A.3.2 に示す．ch1，ch2 の熱電対を両端からそれぞれ 15mm 離れた位置に瞬間接着剤で接着した．それとは別に CFRP とラバーヒータ間に温調器へ接続する熱電対を挟むための試験片を用意した．ch2 の位置(黒丸)に凸部を製作し温度を与えていくと大気開放面では ch2 の時間履歴に温度上昇の遅れが見られた．

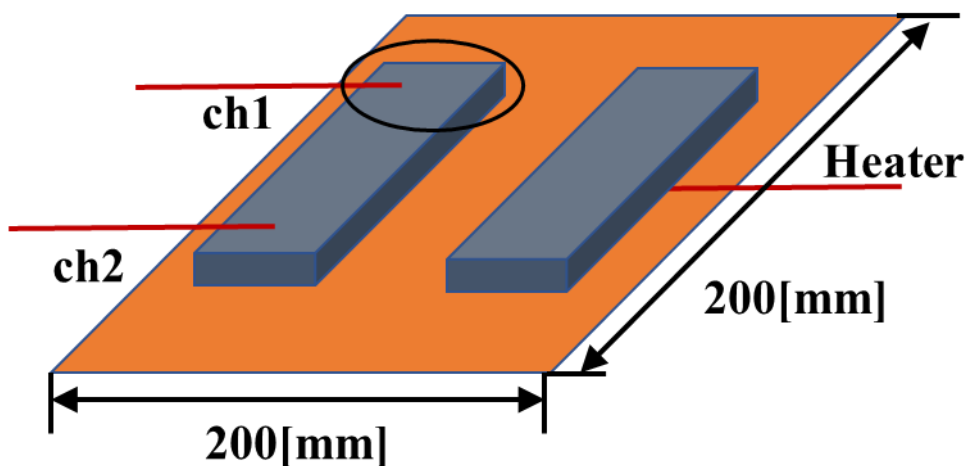


図 A.3.1 ch1 位置に隙間を形成した実験装置の略図

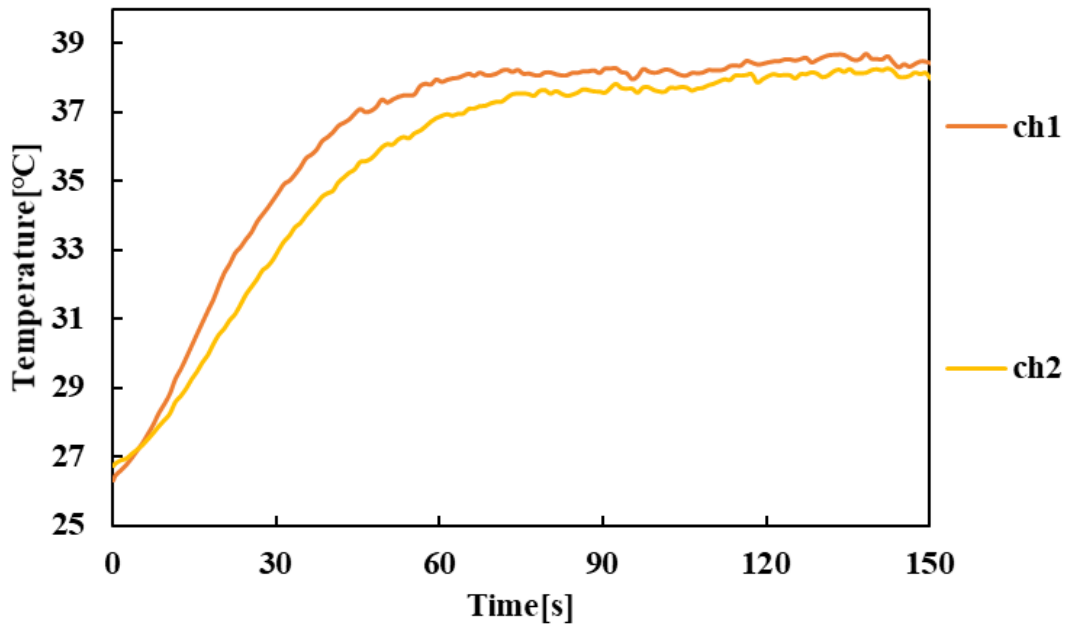


図 A.3.2 熱電対を用いた温度時間履歴

ch1, ch2 の接着位置を反対にした場合の温度時間履歴を図 A.3.3 に示す. 凸部によって加熱面に隙間がある位置の ch1 では温度変化に遅れが見られ, 図 A.3.2 の温度履歴の逆の結果となっていた. 以上 2 つの実験結果から, ヒータと CFRP の間に隙間がある方の温度上昇に遅れが生じることが示され, 熱電対を加熱面に挟むことによって生じる隙間の影響で温度勾配が生じていることが分かった.

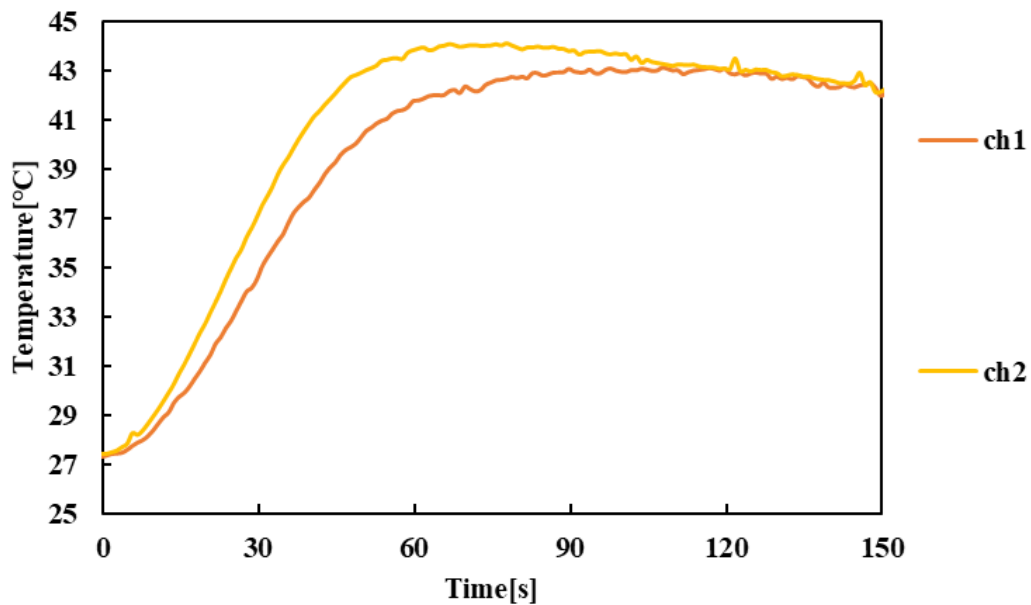


図 A.3.3 熱電対を用いた温度時間履歴

前章の結果から加熱表面の温度分布が均質となるように装置への工夫を施す必要があることが示された. そこで, 熱電対を CFRP-シリコンラバーヒータ間に挟むことのできる隙間の影響を無くすため, 熱電対を挟む試験片とは別に大気解放面の温度分布を測定するための試験片を用意することで加熱面に与える熱負荷の均質化を試みた.

前章で行った実験の凸部をなくし, 温度時間履歴の測定を行った(図 A.3.4). 図を見ると各点での昇温に

大きなズレや遅れはなく、加熱表面により均質的な熱負荷をかけることができたことを示していた。

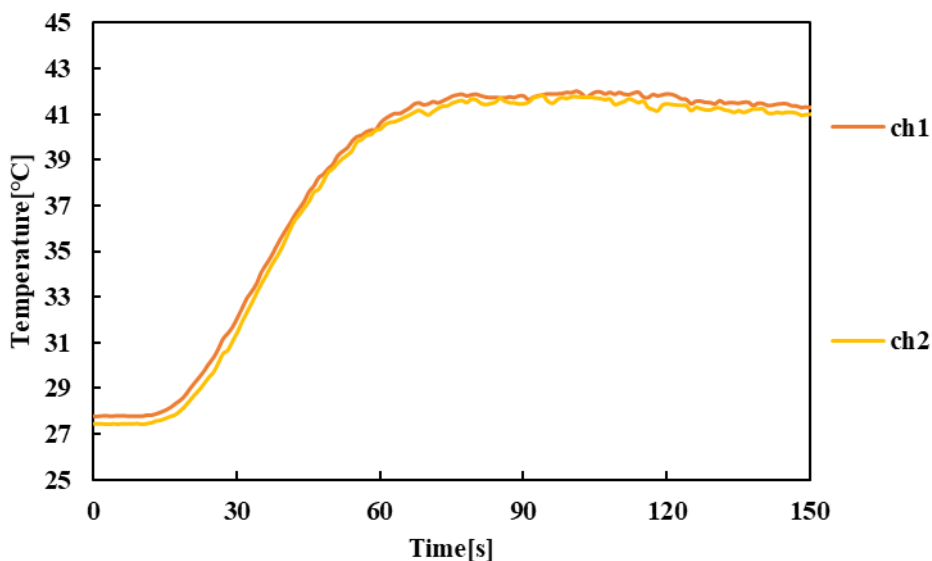


図 A.3.4 大気開放面の温度時間履歴

次に、シリコンラバーヒータと試験片の面積比が異なる場合の大気解放面の温度分布を測定し、温度変化に影響を与えるか比較・検証を行った(図 A.3.5)。異なるシリコンラバーヒータを用いた大気解放面の温度時間履歴を図 A.3.6 に示す。こちらでも温度の時間変化に遅れやズレは生じておらず、加熱表面により均質な熱負荷を与えられたことが示された。また、同じ加熱条件であるのにも関わらず大気開放面の到達温度が大きいラバーヒータを用いた場合は最大 41.8°Cであったのに対し、小さいラバーヒータでは 39.5°Cであり、最大到達温度は 2.3°Cほど低かった。これは、CFRP が占めていないラバーヒータの面が温調器によって加熱され、温まった空気が CFRP の大気開放面に伝搬され、温度分布に影響を与えたと考えられる。以上より、ラバーヒータと CFRP 積層板の面積比が小さいほど大気開放面の正確な温度場変化が得られることが示された。

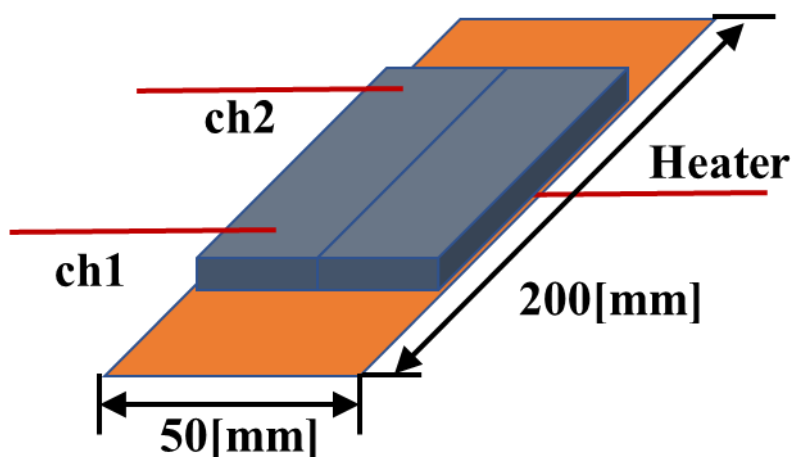


図 A.3.5 面積の異なるシリコンラバーヒータを用いた測定の略図

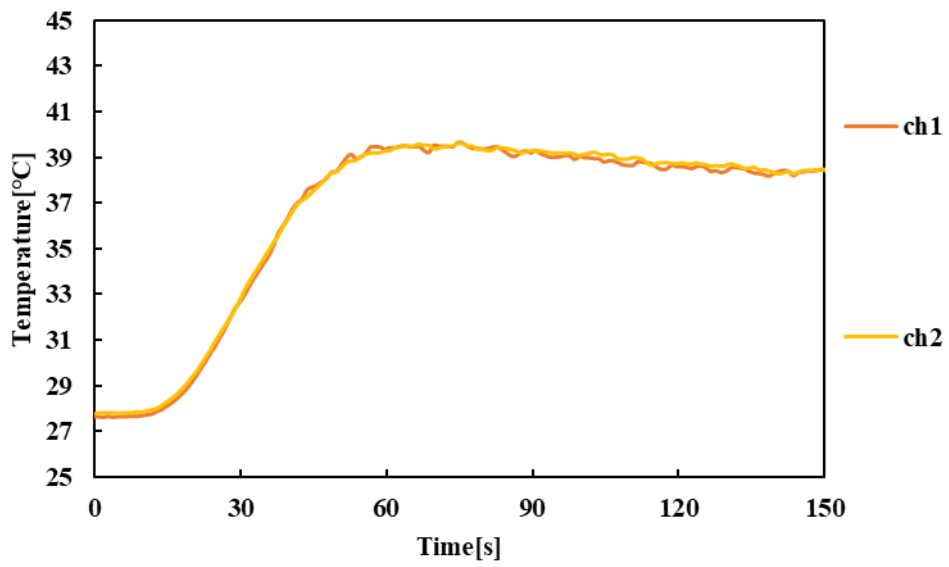


図 A.3.6 大気開放面の温度時間履歴

#### A.4 レイリー散乱型光ファイバ分布センサ



図 A.4.1 ODISI A-50



図 A.4.2 レイリー散乱型光ファイバ分布センサ