

東京大学大学院 新領域創成科学研究科  
基盤科学研究系  
先端エネルギー工学専攻

平成 26 年度

修士論文

# 自己感知・自己修復可能な CFRTP スマート・ストリンガーの提案

2015 年 2 月提出  
指導教員 小笠原 俊夫 教授

47-136056 久木田 泰記

# 目次

第1章. 序論 .....	8
1.1. 炭素繊維複合材料(CFRP).....	8
1.2. 光ファイバーセンサーによる構造ヘルスマニタリング .....	10
1.3. セルフヒーリング .....	11
1.4. 研究目的 .....	15
第2章.コンセプト .....	16
2.1. ストリンガーのランアウト.....	16
2.2. 熱可塑性 CFRP(CFRTTP) .....	17
2.3. スマート・ストリンガーの構想 .....	18
2.4. 評価基準と達成目標 .....	19
第3章. CF/PA6 の無加圧での剥離の融着.....	21
3.1. 示差走査熱量測定(DSC)と CF/PA6 試験片 .....	21
3.2. 双片持ち梁(DCB)試験.....	24
3.3. 修復具合の評価方法 .....	26
3.4. ヒーリング条件によるヒーリング効果.....	30
3.5. 総括.....	40
第4章. ジュール熱による局所加熱.....	42
4.1. 機能層と試験片.....	42
4.2. 加熱実験方法 .....	42
4.3. FEM 解析モデル.....	44
4.4. 加熱実験結果と解析結果.....	56
4.5. 解析モデルにおける数値実験 .....	60
4.6. 総括.....	64

第 5 章. ジュール加熱で剥離面のみを熔融させた場合の修復率 .....	65
5.1. 絶縁層 .....	65
5.2. 絶縁効果の検証実験 .....	66
5.3. ヒーリング効果の検証方法 .....	68
5.4. 積層構成とヒーリング率 .....	70
5.5. 総括 .....	82
第 6 章. ストリンガーへの応用 .....	83
6.1. ストリンガーモデル .....	83
6.2. 局所加熱の可能性 .....	84
6.3. ヒーリング可能な面積を向上させるために .....	86
6.4. 総括 .....	88
第 7 章. 結論 .....	89
付録. 熱電対による局所発熱する CF RTP 温度測定 .....	90
1. 緒言 .....	90
2. 熱電対モデル .....	91
3. 導線部への熱伝導と輻射の影響 .....	93
4. 発熱体の温度測定 .....	95
5. 絶縁処理の影響 .....	97
6. 結言 .....	98
参考文献 .....	99
本研究に関する発表 .....	106
謝辞 .....	107

## 図目次

Fig.1-1	CFRP の成形 .....	8
Fig.1-2	積層板における層間剥離 <sup>[6]</sup> .....	9
Fig.1-3	CFRP における衝撃後圧縮強度 <sup>[13]</sup> .....	9
Fig.1-4	CFRP 積層板における修理方法 <sup>[10]</sup> .....	9
Fig.1-5	光ファイバーセンサーの神経系 .....	10
Fig.1-6	光ファイバーセンサーの原理 .....	10
Fig.1-7	マイクロカプセルによるヒーリング .....	11
Fig.1-8	キャピラリーによるヒーリング .....	12
Fig.1-9	複雑な Micro-Vascular ネットワーク .....	13
Fig.1-10	熱的に可逆なディールス・アルダー反応 .....	14
Fig.1-11	テトラフランとビスマレイミド .....	14
Fig.2-1	航空機の翼のストリンガー .....	16
Fig.2-2	Boing787-8 のストリンガーランアウト部 <sup>[48]</sup> .....	17
Fig.2-3	スマート・ストリンガー .....	18
Fig.2-4	スマート・ストリンガーにおけるヒーリング方法 .....	18
Fig.2-5	各モードの破壊靱性 <sup>[64]</sup> .....	19
Fig.3-1	CF/PA6 プリプレグの DSC 結果 .....	21
Fig.3-2	示差走査熱量計 .....	22
Fig.3-3	ホットプレス .....	23
Fig.3-4	成形時の温度及び圧力の時間履歴 .....	23
Fig.3-5	切り出した DCB 試験片 .....	23
Fig.3-6	万能試験機と DCB 試験治具 .....	24
Fig.3-7	T800H/#3633 の荷重－変位線図及び R-Curve .....	25
Fig.3-8	CF/PA6 の荷重－変位線図及び R-Curve .....	25
Fig.3-9	CFRP と CFRTP の成形時の様子 .....	26

Fig.3-10	Stick-Slip 現象が起きる直前の試験片 .....	26
Fig.3-11	DCB 試験片におけるヒーリング率の評価方法 .....	27
Fig.3-12	イナートオープンと急冷の様子 .....	28
Fig.3-13	試験片#2～#6 の温度履歴 .....	29
Fig.3-14	水中超音波探傷 .....	29
Fig.3-15	各試験片のヒーリング率 .....	31
Fig.3-16	試験片#1 (a)DCB (b)R-Curve (c)超音波探傷結果(d)ヒーリング後の試験片 .....	32
Fig.3-17	試験片#2 (a)DCB (b)R-Curve (c)超音波探傷結果(d)ヒーリング後の試験片 .....	33
Fig.3-18	試験片#3 (a)DCB (b)R-Curve (c)超音波探傷結果(d)ヒーリング後の試験片 .....	34
Fig.3-19	試験片#4 (a)DCB (b)R-Curve (c)超音波探傷結果(d)ヒーリング後の試験片 .....	35
Fig.3-20	試験片#5 (a)DCB (b)R-Curve (c)超音波探傷結果(d)ヒーリング後の試験片 .....	36
Fig.3-21	試験片#6 (a)DCB (b)R-Curve (c)超音波探傷結果(d)ヒーリング後の試験片 .....	37
Fig.3-22	試験片#7 (a)DCB (b)R-Curve .....	38
Fig.3-23	試験片#8 (a)DCB (b)R-Curve .....	38
Fig.3-24	試験片#9 (a)DCB (b)R-Curve .....	39
Fig.3-25	試験片#10 (a)DCB (b)R-Curve .....	39
Fig.3-26	試験片#11 (a)DCB (b)R-Curve .....	39
Fig.3-27	試験片#12 (a)DCB (b)R-Curve (c)ヒーリング後の試験片 .....	40
Fig.3-28	亀裂進展長が長い場合のヒーリング条件と $\eta_D$ 及び $\xi$ の関係 .....	41
Fig.4-1	銅箔電極と機能層 .....	42
Fig.4-2	試験片の電極配置 .....	43
Fig.4-3	熱電対による試験片表面の温度測定 .....	43
Fig.4-4	試験片と電源装置 .....	43
Fig.4-5	導電率計測のための試験片とインピーダンスアナライザー .....	46
Fig.4-6	等価直列抵抗 $R_s$ の周波数特性 .....	47
Fig.4-7	位相角 $\theta$ の周波数特性 .....	48
Fig.4-8	下面からの熱伝達 .....	50
Fig.4-9	導電率測定に用いた試験片の加熱実験方法 .....	50

Fig.4-10 加熱シミュレーションにおける温度分布と電位分布.....	50
Fig.4-11 実験及び解析結果の一例.....	51
Fig.4-12 銅箔電極と導線への熱伝導.....	52
Fig.4-13 電極部の解析モデル.....	52
Fig.4-14 電極にハンダ付した導線の解析モデル.....	53
Fig.4-15 各解析モデルにおける温度分布.....	53
Fig.4-16 電極への熱伝導のシミュレーション結果.....	54
Fig.4-17 [0/F0/0] <sub>s</sub> の DCB 試験片モデル.....	55
Fig.4-18 電極部における繊維うねりとうねりのモデル化.....	55
Fig.4-19 試験片①の加熱実験結果及び解析結果.....	56
Fig.4-20 試験片②の加熱実験結果及び解析結果.....	57
Fig.4-21 試験片④及び⑤の試験片寸法.....	58
Fig.4-22 試験片④及び⑤の加熱実験結果及び解析結果.....	58
Fig.4-23 試験片④及び⑤の加熱実験後の溶融の様子.....	59
Fig.4-24 $X$ の影響をシミュレーションするためのモデル.....	60
Fig.4-25 $X$ が電圧に与える影響.....	60
Fig.4-26 $Y$ の影響をシミュレーションするためのモデル.....	61
Fig.4-27 $Y$ が電圧に与える影響.....	61
Fig.4-28 面内及び面外の温度分布.....	62
Fig.4-29 面外の温度分布の評価モデル.....	62
Fig.4-30 板厚が上面と剥離面の温度差にもたらす影響.....	63
Fig.4-31 板厚が電圧にもたらす影響.....	64
Fig.5-1 樹脂層とガラスファブリック層.....	65
Fig.5-2 絶縁層の積層.....	65
Fig.5-3 [0/F0/GFR/0 <sub>I3</sub> ]のジュール加熱.....	67
Fig.5-4 ジュール加熱後の試験片.....	67
Fig.5-5 マイクロフォーカス X 線 CT.....	68
Fig.5-6 ヒーリング時の温度計測.....	68

Fig.5-7 ジュール熱を用いたヒーリングを施す試験片寸法 .....	69
Fig.5-8 大きな試験片から切り出した試験片と一本ずつ成形した試験片 .....	70
Fig.5-9 積層構成[0/F0/GFR/0 <sub>13</sub> ] <sub>s</sub> 、電極配置 X=40mm,Y=14mm の試験片のヒーリング ....	71
Fig.5-10 積層構成[0/F0/GFR/0 <sub>13</sub> ] <sub>s</sub> 、電極配置 X=40mm,Y=14mm の試験片の DCB 試験 ....	72
Fig.5-11 樹脂が剥離を満たしきれていない状態 .....	72
Fig.5-12 積層構成[0/F0/GFR/0 <sub>13</sub> ] <sub>s</sub> 、電極配置 X=60mm,Y=14mm の試験片のヒーリング ..	73
Fig.5-13 積層構成[0/F0/GFR/0 <sub>13</sub> ] <sub>s</sub> 、電極配置 X=60mm,Y=14mm の試験片の DCB 試験 ....	74
Fig.5-14 積層構成[0/F90/GFR/0 <sub>13</sub> ] <sub>s</sub> 、電極配置 X=60mm,Y=14mm の試験片のヒーリング ..	75
Fig.5-15 積層構成[0/F90/GFR/0 <sub>13</sub> ] <sub>s</sub> 、電極配置 X=60mm,Y=14mm の試験片の DCB 試験 ..	76
Fig.5-16 試験片断面の CT 画像 .....	76
Fig.5-17 積層構成[0/F0/GFR/0 <sub>32</sub> ] <sub>s</sub> 、電極配置 X=60mm,Y=14mm の試験片のヒーリング ..	78
Fig.5-18 積層構成[0/F0/GFR/0 <sub>32</sub> ] <sub>s</sub> 、電極配置 X=60mm,Y=14mm の試験片の DCB 試験 ....	79
Fig.5-19 ヒーリング前後の試験片断面の CT 画像 .....	80
Fig.5-20 2 回目のヒーリング .....	80
Fig.5-21 3 回目のヒーリング .....	81
Fig.5-22 複数回のヒーリング後の R-Curve .....	81
Fig.5-23 複数回のヒーリング後のヒーリング率 .....	82
Fig.6-1 ストリンガーモデル .....	83
Fig.6-2 ストリンガーモデルにおける電極配置 .....	84
Fig.6-3 X=50mm,Y=34mm とし 1.3A の電流を 5 分間投入した場合の温度分布 .....	84
Fig.6-4 電流がもたらす影響のシミュレーション結果 .....	85
Fig.6-5 電極が 4 つ埋め込まれたストリンガーモデル .....	86
Fig.6-6 電極の組み合わせによるヒーリング可能な面積への影響.....	87
Fig.A-1 熱電対による温度計測.....	90
Fig.A-2 ハンダゴテに熱電対を貼り付けた様子 .....	91
Fig.A-3 熱電対モデル .....	92
Fig.A-4 熱電対溶接部内の温度分布 .....	92

Fig.A-5 ステップ関数状の投入温度 .....	93
Fig.A-6 溶接部と導線部のモデル .....	94
Fig.A-7 投入温度に対する最大誤差 .....	94
Fig.A-8 発熱を模擬した CF RTP 円盤 .....	95
Fig.A-9 CF RTP の下面の測定 .....	95
Fig.A-10 モデルの作成方法と接触面積 .....	96
Fig.A-11 接触面積と投入温度に対する最大誤差 .....	96
Fig.A-12 ハンダゴテとホットプレスの温度測定 .....	97
Fig.A-13 絶縁処理による影響 .....	98

## 表目次

Table 2-1. 複合材におけるモード I 破壊靱性値 .....	20
Table 2-2. セルフヒーリング条件とヒーリング効果 .....	20
Table 3-1. ヒーリング条件 .....	28
Table 3-2. 各試験片のモード I 破壊靱性値及びヒーリング率 .....	30
Table 4-1. 解析に用いる物性値 .....	49
Table 5-1. 絶縁効果の検証に用いた試験片 .....	66
Table 5-3. ジュール熱でのヒーリング率 .....	70
Table A-1. クロメルとアルメルの物性値 .....	92



# 第 1 章. 序論

## 1.1 炭素繊維複合材料(CFRP)

強くて軽い材料の追究は、構造物や道具のパフォーマンス向上のために重要な研究課題の一つである。炭素はその結合力の強さ故に、古くから注目されており、繊維状にすることによってその強さを十分に発揮できることが知られている。炭素繊維に樹脂を含浸させ、半硬化させた中間材(プリプレグ)を積層し、加熱・加圧することで、二次元及び三次元部材へと応用したものが炭素繊維複合材料(Carbon Fiber Reinforced Plastics : CFRP)である(Fig.1-1)。CFRP は軽く強く(鉄の 1/4 の軽さで 10 倍の強度)、低熱膨張率で錆びないことから金属の代替材料として近年非常に注目されている。また積層構成を変化させることで、力学的・熱的・電気的特性を容易に変えられることも魅力の一つである。その利用は軍用機や宇宙機から始まり、現在は民間機や自動車、スポーツ用品にまで拡大している[1][2][3]。

しかし、これらの利点の反面、CFRP は従来の金属材料には見られない複雑な損傷形態を有することが開発当初から問題視されている[4][5]。例えば、積層板における層間剥離(Fig.1-2)がその代表である[6]。通常金属であれば、物が衝突すると表面に塑性変形による損傷ができ、目視検査で損傷の発見が可能である。しかし従来の金属材料とは異なり CFRP は、小さな衝撃が加わった時にも外部からでは発見できない内部損傷(層間剥離)が生じてしまう。面外衝撃荷重が加わることで層間剥離が生じると、その規模によって衝撃後圧縮(Compression After Impact : CAI)強度が激減してしまうことが特に深刻な問題である(Fig.1-3)[7][8][9]。

現在航空機等では、目視検査で発見できる損傷は、その周りを超音波等で探傷し特定した内部損傷領域を切り取り、そこに新たなプリプレグを積層して硬化させている[10][11](Fig.1-4)。そして、目視検査で発見できない損傷は放置しても安全なように過剰設計されている[12]。

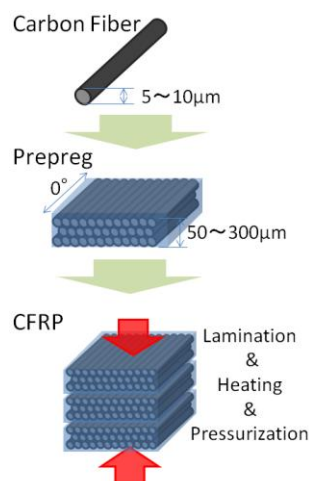


Fig.1-1 CFRP の成形

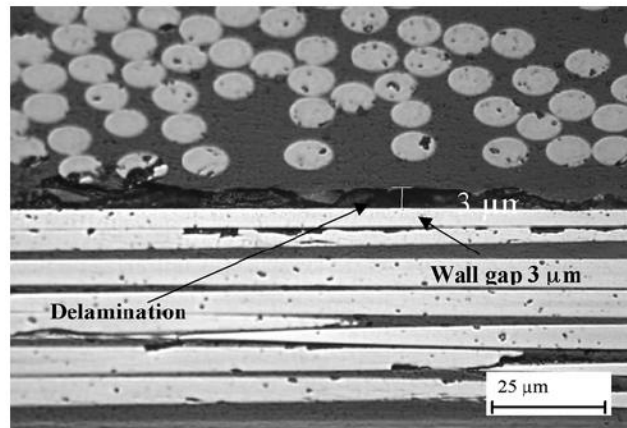


Fig.1-2 積層板における層間剥離<sup>[6]</sup>

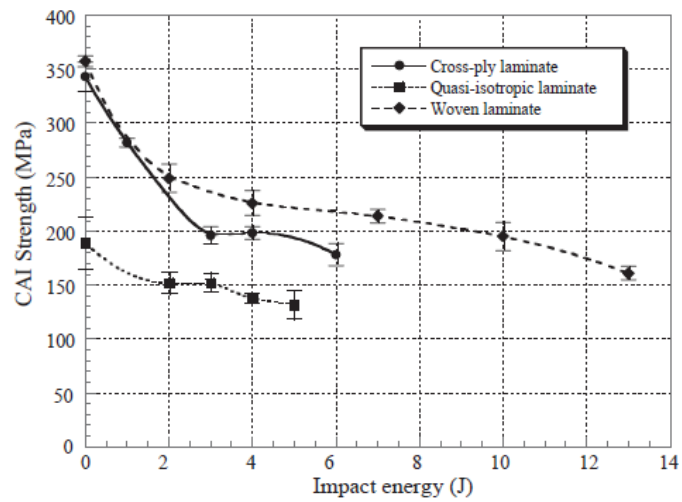


Fig.1-3 CFRP における衝撃後圧縮強度<sup>[13]</sup>

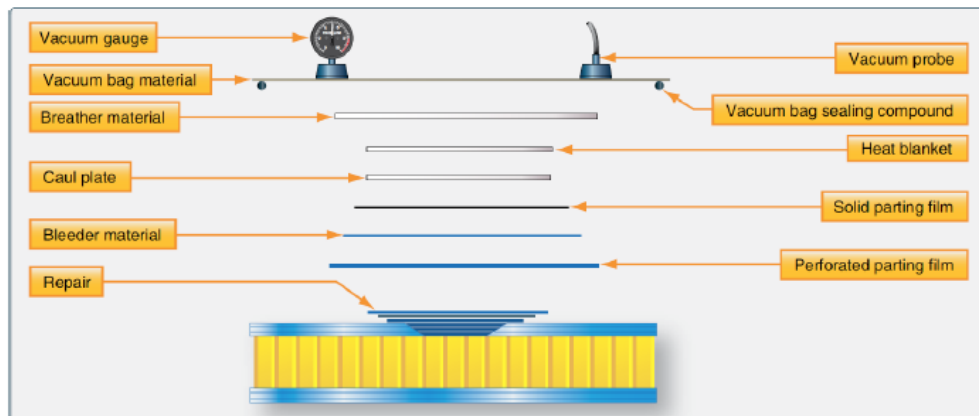


Fig.1-4 CFRP 積層板における修理方法<sup>[10]</sup>

## 1.2 光ファイバーセンサーによる構造ヘルスモニタリング

破壊や損傷過程を設計段階で推測し対策するだけでは信頼面は勿論、過剰設計によるコスト面からも不十分であると言える。このため、航空機等における運用時の材料の健全性を保証するために、構造ヘルスモニタリング(Structural Health Monitoring : SHM)が非常に重要である<sup>[14]</sup>。SHM や非破壊検査方法としては、超音波<sup>[15][16]</sup>、電気<sup>[17]</sup>、熱<sup>[18]</sup>を用いたものなどがあるが、中でも光を用いたものが近年非常に注目されている<sup>[19][20][21]</sup>。

光ファイバーセンサーを CFRP 内部に神経系のように張り巡らせることで、材料自体が損傷を感じられるような知的複合材料の実現が提案されている(Fig.1-5)。ファイバーセンサーには、センシング部にグリッドが切っており、応力や熱によって生じるグリッドからの反射光や散乱光の変化を計測することで、その程度を計測する(Fig.1-6)。

損傷の早期発見が可能になることによって、安全性の向上や薄肉化による製造コストの削減、燃費の向上繋がると考えられている。また、CFRP の成形時から運用時までライフサイクルモニタリングができることから、製造段階での欠陥の発見もできるというメリットも有している<sup>[22][23]</sup>。

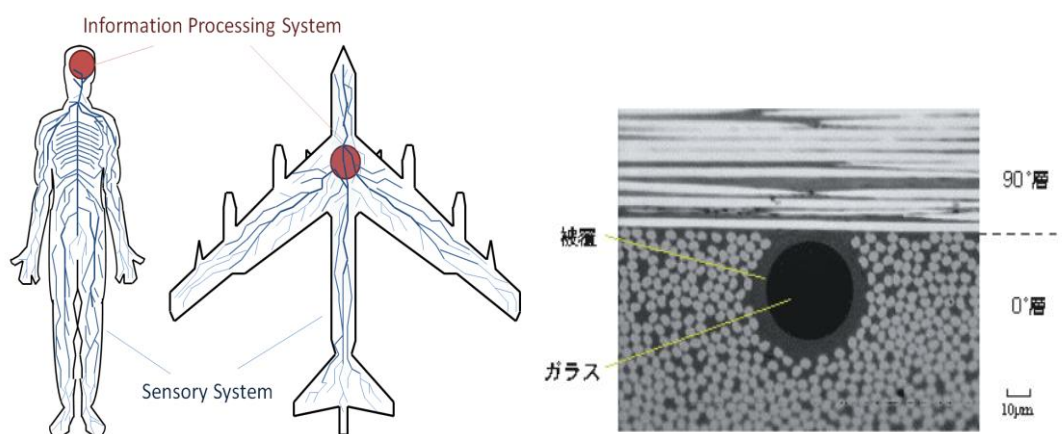


Fig.1-5 光ファイバーセンサーの神経系<sup>[24]</sup>

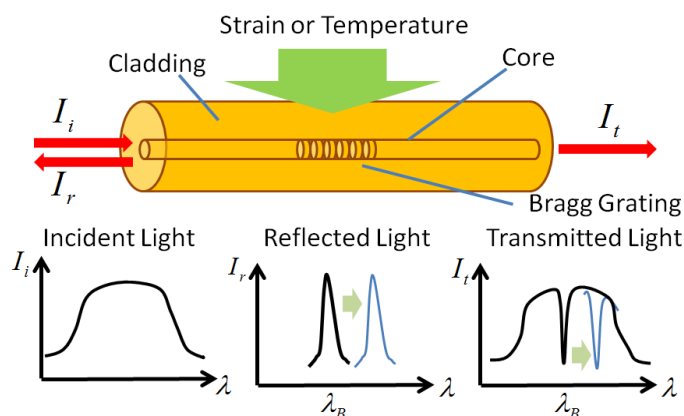


Fig.1-6 光ファイバーセンサーの原理

### 1.3 セルフヒーリング

生物が怪我をすると自然治癒するように、自己修復(セルフヒーリング)可能な知的複合材料に関する研究も最近盛んに行われている<sup>[25][26][27][28]</sup>。マイクロカプセル、キャピラリー、修復可能ポリマーの3つが現在の自己修復方法の主流である。自己修復材料が実現すれば安全性の向上は勿論、人間による整備や修理回数の低減、材料の寿命向上も見込まれている。工業用複合材料のセルフヒーリングという概念は、1990年代初期にDry<sup>[29]</sup>によって研究が始まり、2001年のWhiteら<sup>[30]</sup>の研究で注目され始めた未だ歴史の浅い研究分野である。

#### 1.3.1 マイクロカプセル

セルフヒーリングの注目のきっかけとなった修復方法が、樹脂の中にマイクロカプセルを埋め込むという方法である。この方法は、生物のように怪我をした所から血が出て固まるようなイメージである。ヒーリング剤を内包したカプセルと触媒を母材の樹脂の中にあらかじめ混ぜておく。層間剥離等、樹脂に亀裂が生じた際に、マイクロカプセルが破れ、ヒーリング剤が亀裂に流出し、触媒と反応して、硬化するという原理である(Fig.1-7)。特徴として、損傷に対し瞬時に修復を開始することができ、損傷位置に関わらず、いかなる位置でもヒーリングを行うことができる。しかし、カプセルに入れることができるヒーリング剤の量が制限されているため、十分な量のヒーリング剤が亀裂に供給できないという報告もされている<sup>[31][32]</sup>。カプセルを大きくしすぎると、損傷前の健全材の力学的特性の低下に繋がるため、難しさがあるようである<sup>[33]</sup>。

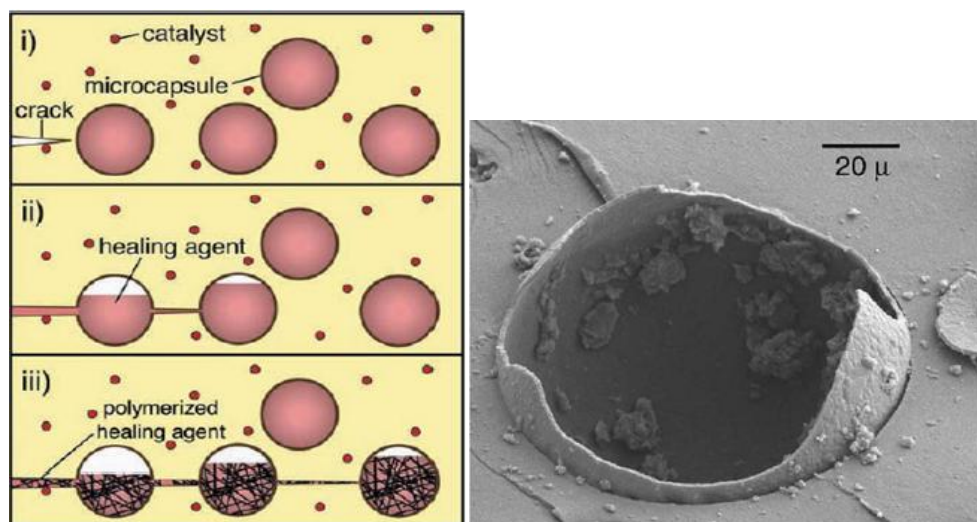


Fig.1-7 マイクロカプセルによるヒーリング<sup>[26]</sup>

### 1.3.2 キャピラリー

ヒーリング剤を亀裂に流出させる方法として最初に考案された手法が、キャピラリーを用いたものである<sup>[34][35]</sup>。外径 15～60 $\mu\text{m}$  程度の中空硝子繊維(Hollow Glass Fiber : HGF)に、2種類のヒーリング剤を内包または循環させ、損傷により管が破れて流出した2種類のヒーリング剤が反応し、硬化するという原理である(Fig.1-8)。供給できるヒーリング剤の量に制限がない点が最大の特徴である。

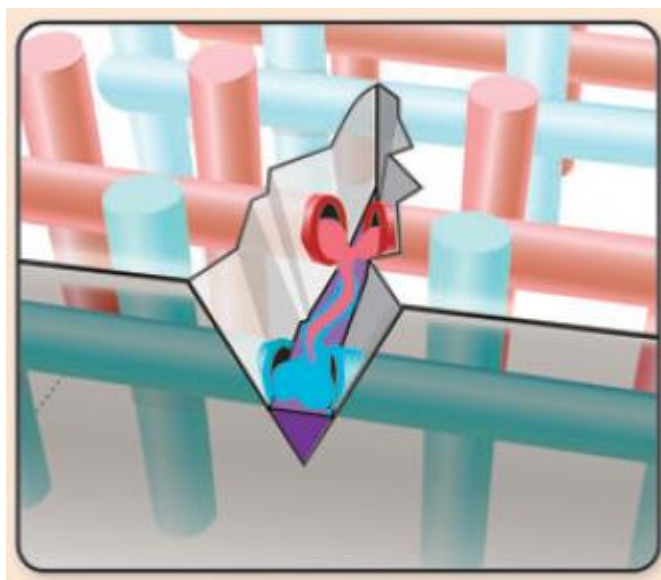


Fig.1-8 キャピラリーによるヒーリング<sup>[36]</sup>

最近では、中空繊維を用いずに、ヒーリング剤を循環させるための空洞(Micro-Vascular)を三次元的に張り巡らせ、ヒーリングを行ったという報告がある<sup>[37][38]</sup>。CFRPのプリプレグ積層時に、ポリ乳酸のダミー繊維を縫込み、CFRPの硬化及びポリ乳酸の昇華温度以上CFRPの劣化温度以下で成形することで、ダミー繊維が気化し繊維を縫い込んだ場所が空洞になる(Fig.1-9)。この空洞中にヒーリング剤を循環させることでヒーリングを行っている。HGFによる重量の増加や、張り巡らせ方による死角の多さなどを軽減させられるアイデアである。



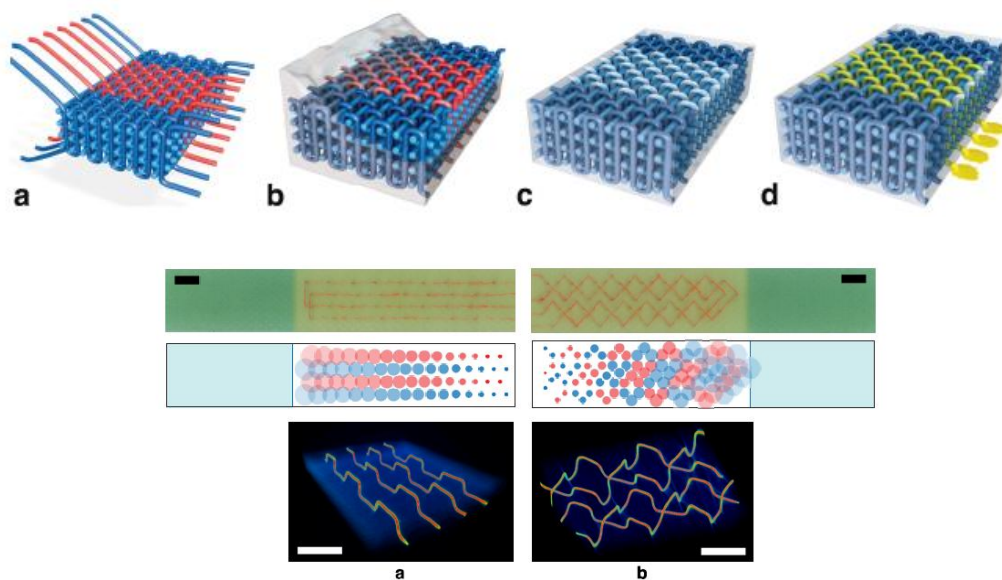


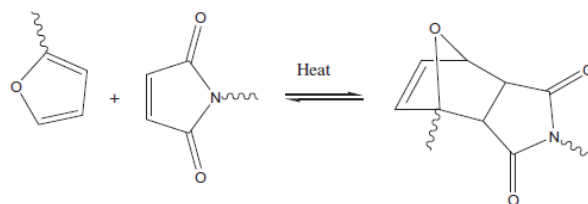
Fig.1-9 複雑な Micro-Vascular ネットワーク [39]

### 1.3.3. 修復可能ポリマー

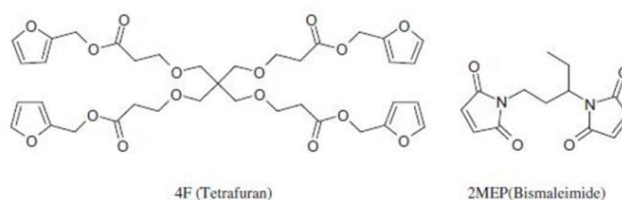
母材を特殊な樹脂にし、母材自体に化学的なヒーリング機能を持たせる方法も近年注目されてきている[25][36]。様々な特殊な素材があるが、最も注目されているのが、熱的可逆なディールス・アルダー(Diels-Alder : DA)反応を用いた修復可能な樹脂である[40][41]。DA反応とは、共役ジエンにアルケンが付加して 6 員環構造を生じる有機化学反応であり、その中に熱的に可逆なものと不可逆なものが存在する。この特殊な樹脂(高分子)は、力が加わった際に壊れやすい化学結合の位置と、加熱によって生じる可逆反応が起こる位置が同じであるため、損傷箇所の熱のみでの修復が可能である(Fig.1-10)。

このような特殊な反応を示すいくつかの高分子材料には、トリスマレイミドテトラフラン(3ME4F)、Mendomer シリーズ(Mendomer400、Mendomer401、Mendomer602)などがある[41][42][43]が、中でもビスマレイミドテトラフラン(2MEP4F : Fig.1-11)は、力学的特性がエポキシ樹脂に匹敵し、修復効果が高いため最も有力視されている。

母材自体にヒーリング機能を持たせることで、ヒーリング剤の必要性を除去できるため、母材の力学的特性に影響を及ぼす余計なシステム要素を取り除くことが出来る。さらに、加熱するだけで複数回のヒーリングが出来るという特徴を持つ。



**Fig.1-10** 熱的可逆なディールス・アルダー反応<sup>[44]</sup>



**Fig.1-11** テトラフラン と ビスマレイミド<sup>[44]</sup>

2MEP4F を母材に応用した、CFRP を作り、修復効果の実証を行った例もある<sup>[44]</sup>。靱性の回復以外にも、形状記憶特性による永久ひずみの回復、複数回のヒーリングの可能性が実証されている。また加熱により引き離されたフラン基とマレイミド基のうち、最も近い位置の両者が再結合するため、破断面のミスマッチも生じない。今後は、逆反応を誘起させるための加熱方法の開発やコストへの対応が課題である。

## 1.4. 研究目的

上述したセンシング技術とセルフヒーリング技術は、各々発展を遂げ、近年では CFRP への応用例も数多く存在する。しかし、両者を融合した研究や実際の部材への応用を行った例はほとんどない。そこで本研究では、センシング技術とヒーリング技術を融合させることで、既存のセルフヒーリング手法よりも優れた新たなセルフヒーリング手法の提案を行う。特に、マイクロカプセルとキャピラリーの欠点である、大量の余計なシステムの埋め込みによる力学的特性の低下、同じ箇所の再修復が不可能な点、ヒーリング過程をモニタリング・制御できない点。ビスマレイミドテトラフランを用いた場合の欠点であるコスト、あるいは加熱方法の問題の克服に焦点を当てている。また、修復時間、修復環境等、提案手法が実際の利用環境下でも実現可能であることを実験的に実証する。さらに、提案手法の実際の部材への応用の可能性まで評価する。

本論文ではまず、2 章で提案するセルフヒーリングシステムを適用した部材のコンセプト及びその必要性を示す。3 章では、熱の面からそのシステムの実現の可能性を評価した実験結果を示す。4 章では、電気の面から実現の可能性を実験と解析から検討する。5 章では、電気でのヒーリング効果を検証する。そして 6 章では、部材に適応した場合の可能性を解析する。最後に 7 章で結言としてまとめる。



## 第 2 章. コンセプト

### 2.1. ストリンガーのランアウト

Fig.2-1 に示すように、航空機の主翼や尾翼、胴体にはストリンガー(縦通材)と呼ばれる T 字型の補強材が用いられている。ストリンガーは、スキン(外板)に加わる引張力や圧縮力を分担し、強度を向上させる働きをしている。一方で、パーツの境目やボルト締結の穴、リブの交差点等によって、ストリンガーには端部(ランアウト部)ができてしまう(Fig.2-2)。ランアウト部は幾何学的影響と機械的な応力集中によって、非常に脆弱な箇所である<sup>[45]</sup>。そのため、ストリンガーはランアウト部において剥がれやすく、且つストリンガーが剥がれると全コンポーネントのパフォーマンスを低下させるため危険性が高いという問題を抱えている<sup>[46][47]</sup>。特に翼の根元部は、修理のための解体にも時間やコストがかかるため、SHM 及び自己修復が最も効果的な部位と考えられる。

そこで本論文では、熱可塑性樹脂を用いた自己感知・自己修復可能なスマート・ストリンガーを提案する。スマート・ストリンガーの可能性を評価するために、実験と解析の両面からアプローチを行った。

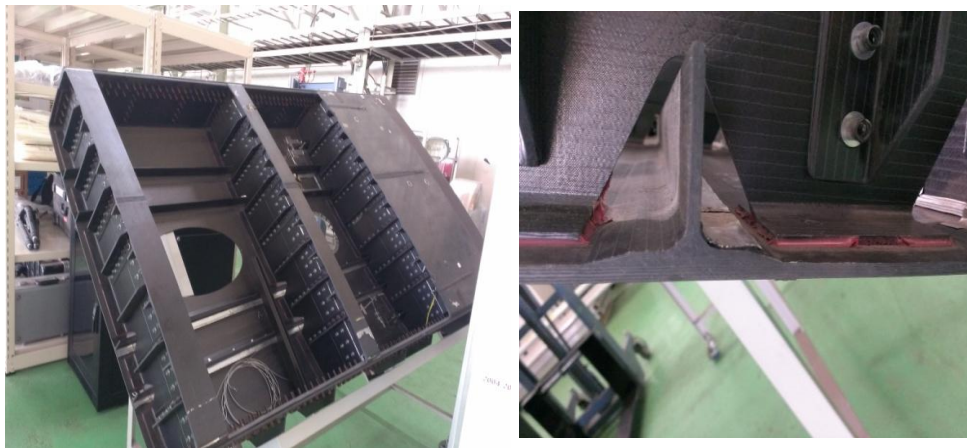


Fig.2-1 航空機の翼のストリンガー

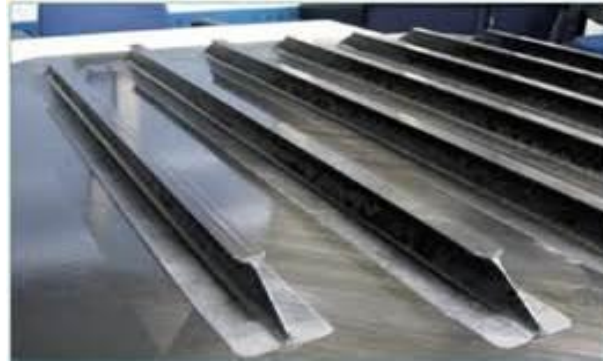


Fig.2-2 Boeing787-8 のストリンガーランアウト部<sup>[48]</sup>

## 2.2. 熱可塑性 CFRP(CFRTP)

現在航空機の一次構造として主に用いられている CFRP のマトリックス材は、熱硬化性のエポキシ樹脂である。それに対し、マトリックス材に Polyamide(PA)や Polyphenylene Sulfide(PPS)、Polyether Ether Ether Ketone(PEEK)等の熱可塑性樹脂を用いた炭素繊維複合材料を CFRTP(Carbon Fiber Reinforced Thermoplastics)と呼ぶ。熱可塑性樹脂は鎖状の高分子が不規則な絡み合いや、種類によっては規則的な配置を有した結晶を構成しており、ファンデルワールス力を主とする二次結合で凝集している<sup>[49][50]</sup>。そのため、熱による分子運動で流動性を示したり<sup>[51]</sup>、外力を加えると分子鎖同士がずれたり絡み合いが解けることで塑性変形が生じたりするという特徴がある。一方、熱硬化性樹脂は高分子同士が架橋し硬化しているため、不溶であり熱可塑性樹脂のような機構は働かない。このため、一般的に CFRTP は CFRP よりも靱性及び CAI 強度に優れている<sup>[52][53][54]</sup>。

また、成形時間が短い<sup>[55][56]</sup>、プリプレグの常温保存が可能<sup>[57]</sup>、リサイクル可能<sup>[3]</sup>などの特徴を有している。さらに、熱可塑性を利用した熱融着の可能性<sup>[58]</sup>や亀裂の接着と靱性に関する検討<sup>[59]</sup>、積層板における内部損傷の修復<sup>[60][61]</sup>も研究されている。分子鎖の絡み合いによって熱融着することから、理論的には樹脂の破壊に起因する損傷は何度でも修復できると考えられている<sup>[50]</sup>。

そして、光ファイバーセンサーにおける CFRP の二次接着のモニタリング<sup>[62]</sup>や CFRTP の成形モニタリングの研究<sup>[63]</sup>も近年活発になされており、原理的に類似である修復過程のモニタリングも十分期待できると考える。

### 2.3. スマート・ストリンガーの構想

自己感知・自己修復可能なスマート・ストリンガーを実現するにあたり、Fig.2-3 のように CFRTP に電極と光ファイバーセンサーを埋め込んだストリンガーを作成する。光ファイバーセンサーで剥離を感知すると (Fig.2-4(b))、電極から炭素繊維を直接経由して電流を流すことで、ジュール熱を生じさせ、電極間のみが発熱する (Fig.2-4(c))。損傷箇所のみを溶融させ、剥離部を融着することで強度の回復を図る (Fig.2-4(d))。ここで、無加圧での接着性が強いこと、融点が高いこと、また比較的安価でコスト削減に寄与することから、CFRTP としては CF/PA6 複合材料を用いた。

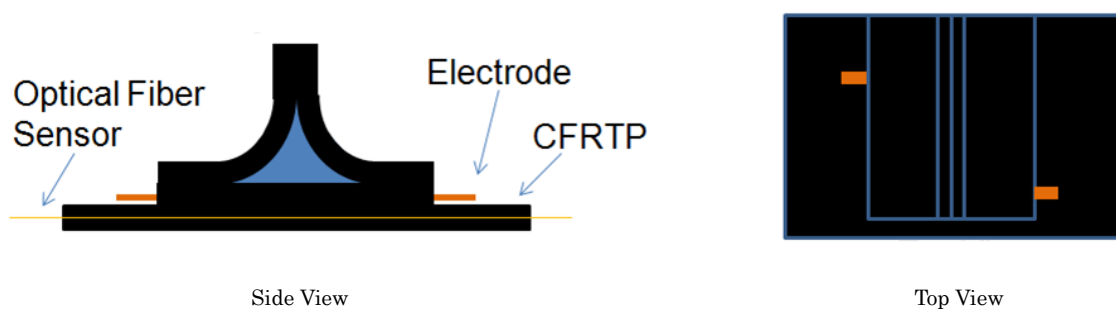


Fig.2-3 スマート・ストリンガー

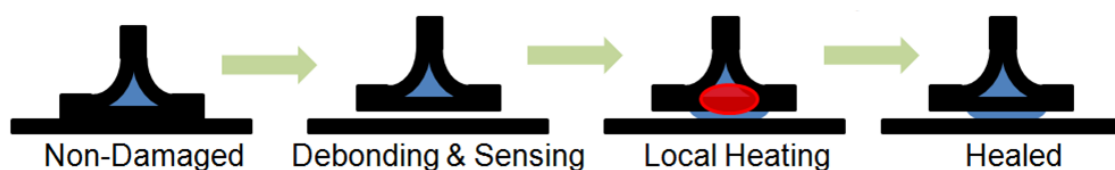


Fig.2-4 スマート・ストリンガーにおけるヒーリング方法

## 2.4. 評価基準と達成目標

ヒーリングを施さなければ、時間とともに材料は劣化や疲労をし、やがて寿命を迎える。そして、寿命を迎える前に損傷を発見し完全補修を施さなければならない。セルフヒーリングの概念は、完全補修を行うのではなく、完全補修を補う急速補修として、材料の寿命向上、完全補修回数や定期点検回数の削減、安全性の向上を目的とする。

治ったか治っていないかを判断するパラメータとして、様々なことを考慮しなくてはならないが、本研究では特にモード I 破壊靱性値に注目する(Fig.2-5)。モード I 破壊靱性値  $G_I$  は、層間の剥がれにくさを表す指標として、材料特性を評価する上で頻繁に用いられている。Table 2-1.に各複合材料の破壊靱性値を示す。ここで、CF/PA6 の実測値は、第 3 章で行った CF/PA6 の健全材の全試験結果(成形圧力 5MPa、積層構成[0<sub>24</sub>])の平均値である。また、T800H/#3633 の実測値の試験データは、3.2 節に示す。熱硬化性の CFRP に比べ、熱可塑性樹脂の CF/PA6 が圧倒的に高いことが分かる。つまり、CF/PA6 を数十%程度修復した場合でも、CFRP を 100%修復した場合の破壊靱性値に匹敵する。また、第 1 章に示した各セルフヒーリング手法におけるヒーリング率及びヒーリング条件を、Table 2-2.に示す。ヒーリング効果の評価方法は、著者が各々定義しており、用いる試験方法も Double Cantilever Beam 試験(DCB)、Compression After Impact 試験(CAI)、3 point bend, End Notched Flexure 試験(3ENF)、Double Cleavage Drilled Compression 試験(DCDC)、Compact Tension 試験(CT)など様々である。どの手法においても、90%程度のヒーリングを行うのに数時間から数日かかることが分かる。また、外部から加熱したり、圧力をかけたり、窒素環境下で行ったりと、非現実的なヒーリング条件である。そこで、本提案手法でのヒーリングでは、無加圧、大気中における、急速ヒーリングを目標とし、既存のヒーリング手法に対しての優位性を示していく。

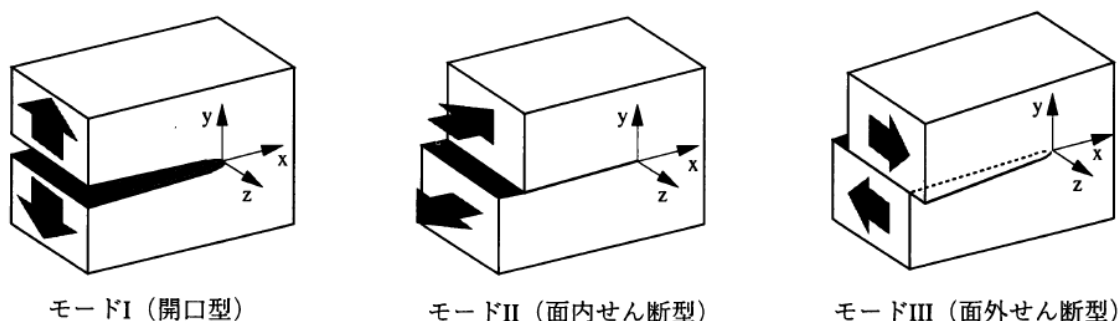


Fig.2-5 各モードの破壊靱性<sup>[64]</sup>

Table 2-1. 複合材におけるモード I 破壊靱性値

Material	$G_I$ [kJ/m <sup>2</sup> ](Reference <sup>[54][65]</sup> )	$G_I$ [kJ/m <sup>2</sup> ](Measured)
CF/Epoxy(P3060-12)	0.094	—
CF/Epoxy(T800H/#3633)	0.20	0.24
CF/Epoxy(T800S/#3900-2B)	0.54	—
CF/PA6	—	1.05

Table 2-2. セルフヒーリング条件とヒーリング効果

Healing Method	Material	Healing Efficiency	Healing Conditions	Test	Reference
Micro-Capsules	2D Woven GFRP	20~67%	24h(RT)+24h(40°C)	DCB	[31]
Capillaries (HGF)	CFRP	95%	1h(175°C, 700N/m <sup>2</sup> ) +4h(190°C)	CAI	[34]
Capillaries (Micro-Vascular)	2D Woven GFRP	30~90%	48h(30°C)	DCB	[39]
Mendable Polymer	CF/2MEP4F	93.8~97.8%	3h(100°C) (without CF breakage)	3ENF	[44]
	2MEP4F	≥ 100%	10h(85°C, 0.35MPa) +3h(95°C, 0MPa)	DCDC	[66]
	3ME4F	57%	2h(90~120°C)	CT	[42]
	CF/Mendomer401	94%	5h~20h(150°C)	3ENF	[43]

## 第3章. CF/PA6 の無加圧での剥離の融着

本章では、圧力をかけずに熱のみで CF/PA6 の剥離が融着するのかなど、どのような条件であればより治せるのか、あるいはどの程度治るのかを DCB 試験を用いて半定量的に評価する。

### 3.1. 示差走査熱量測定(DSC)と CF/PA6 試験片

CF/PA6の試験片は、CF/PA6プリプレグ(サカイオーベックス製、HTS40(東邦テナックス製)/PA6(三菱樹脂製)、一方向、繊維体積含有率 $V_f = 42\%$ 、繊維目付 $100\text{g/m}^2$ )を積層し作成する。CF/PA6プリプレグの示差走査熱量測定(Differential Scanning Calorimetry : DSC)の結果を Fig.3-1 に示す。測定には Fig.3-2 に示す示差走査熱量計(島津製作所製、DSC-60)を用いた。基準物質として $24.7\text{mg}$ のアルミナを用い、 $12.3\text{mg}$ の試料を測定した。 $30^\circ\text{C}$ から昇温速度 $1.00^\circ\text{C}/\text{min}$ で $240^\circ\text{C}$ まで加熱し、5分間保持した後、 $-1.00^\circ\text{C}/\text{min}$ で冷却した。DSC結果より、昇温過程における吸熱のピークが $48^\circ\text{C}$ 付近と $225^\circ\text{C}$ 付近、昇温過程及び冷却過程における放熱のピークが $200^\circ\text{C}$ 付近に見られることから、本研究で用いる試験片のガラス転移温度( $T_g$ )は $48^\circ\text{C}$ 、結晶化温度( $T_c$ )は $200^\circ\text{C}$ 、融点( $T_m$ )は $225^\circ\text{C}$ とした。またPA6は $250^\circ\text{C}$ 以上で僅かに酸化劣化し始め、急激な劣化が $300^\circ\text{C}$ 以上で起こる<sup>[67]</sup>ため、成形温度は $240^\circ\text{C}$ とする。

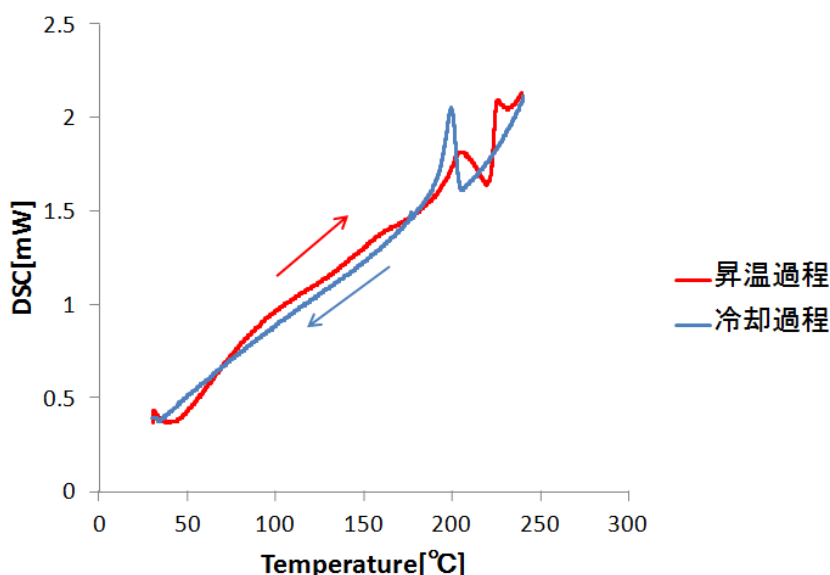


Fig.3-1 CF/PA6プリプレグのDSC結果



Fig.3-2 示差走査熱量計

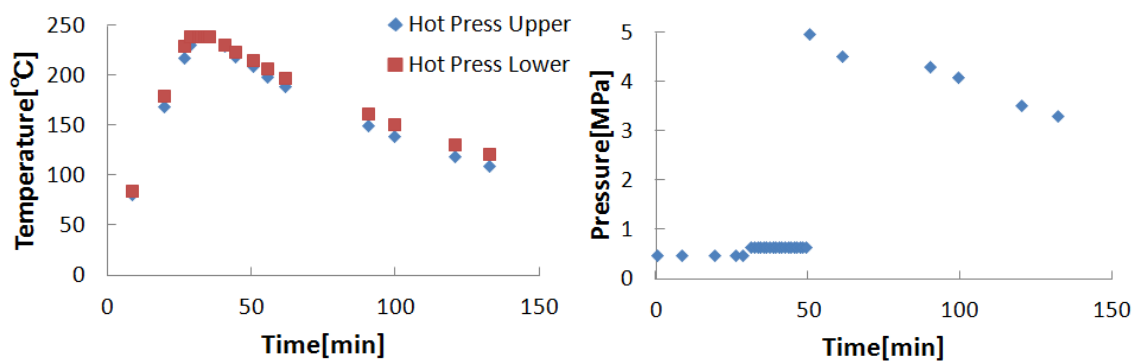
本研究で用いる試験片は、非常に薄い銅箔電極や非常に細い光ファイバーセンサーを任意の場所に埋め込むことを想定しているため、治具は使わずに成形を行った。まず、熱硬化性樹脂のプリプレグとは異なり、熱可塑性樹脂のプリプレグはタック性・ドレープ性がないため、積層時にはプリプレグの角を繊維方向に沿ってハンダゴテを用いて溶融させ、仮止めすることで固定する。次に厚さ $25\mu\text{m}$ のポリイミドフィルム(宇部興産製、UPILEX<sup>®</sup>-25S)を巻きつけ、カプトンテープで固定する。その後、ホットプレス(東洋精機製作所製、MP-WCH)を用いてFig.3-4に示すように加熱・加圧する。Fig.3-4(a)は室温( $21^{\circ}\text{C}$ )から20分間で $240^{\circ}\text{C}$ に達するように設定し、実際に上下のプレートが $240^{\circ}\text{C}$ になってから5分後にヒーターを切った時の、上下のプレートの実際の温度履歴である。設定温度・時間に対し、上下のプレスの実際の温度に差が生じているが、設定温度を成形温度、実際に上下のプレートが最高温度を保持した時間を成形時間、結晶化温度付近での冷却速度を成形時の冷却速度と定義する。室温下において、加熱速度は約 $10^{\circ}\text{C}/\text{min}$ 、自然冷却の速度( $200^{\circ}\text{C}$ 付近)は $-2^{\circ}\text{C}/\text{min}$ であった。また、Fig.3-4(b)に示すように圧力に関しても同様に、変位制御で設定した設定値と、実際の圧力間に差が生じてしまう。熱膨張や溶融による軟化等が生じることが原因である。成形の際、最初は圧力をかけずにプレス面を試験片に触れさせているだけの状態( $0.5\text{MPa}$ )で、加熱及び溶融させ試験片を融着させる。その後の冷却過程において、固体の状態で且つ分子鎖が動ける $T_g$ 付近( $210^{\circ}\text{C}$ )で圧力を一気にかける。 $T_g$ 付近でかけた設定圧力を成形圧力と定義する。

本章における試験片は全て成形温度 $240^{\circ}\text{C}$ 、成形時間5min、成形圧力 $5\text{MPa}$ 、冷却速度 $-2^{\circ}\text{C}/\text{min}$ (徐冷)で成形した。積層構成は $[0]_{24}$ で、双片持ち梁(DCB)試験を行うために、12層目と13層目の間に厚さ $25\mu\text{m}$ のポリイミドフィルムをFig.3-5のように途中まで挟み、成形した。 $155\text{mm} \times 160\text{mm}$ の試験片を成形し、 $20\text{mm} \times 155\text{mm}$ のテープ状の試験片を長手方向が繊維方向になるようにダイヤモンドカッターで切り出した(Fig.3-5)。





Fig.3-3 ホットプレス



(a)成形時の温度履歴

(b)成形時の圧力履歴

Fig.3-4 成形時の温度及び圧力の時間履歴

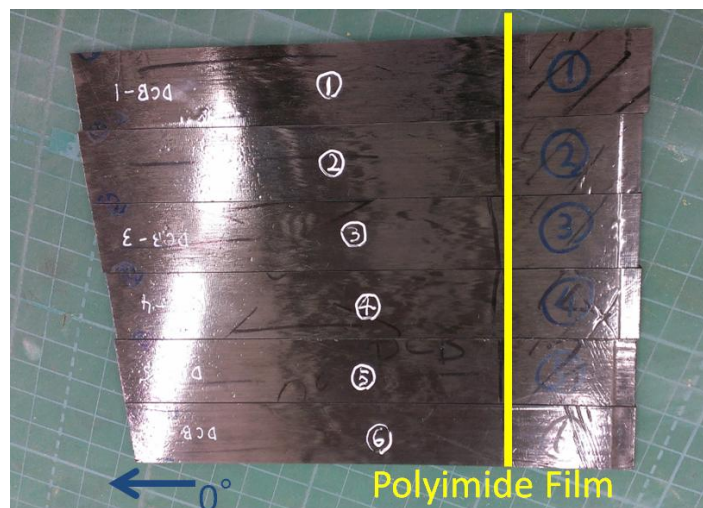


Fig.3-5 切り出した DCB 試験片



### 3.2.双片持ち梁(Double Cantilever Beam : DCB)試験

モードI破壊靱性値を算出する試験方法として、DCB試験が最も一般的である。DCB試験には1kNのロードセルで万能試験機(インストロン製、インストロン万能試験機5882型)を用いて、Fig.3-6に示すブロック状の治具を試験片に取り付け試験した。また、荷重及び開口変位(Crack Opening Displacement : COD)の測定、試験機操作にはTouch Panel ソフトを用いた。試験片の側面には亀裂進展の様子が見えやすいようにホワイトマーカを塗布し、目盛を書き込む。フィルム亀裂の亀裂先端は鈍いため、亀裂にカッターナイフの刃を刺し込み、亀裂を少し進展させることで亀裂を鋭くし、これを初期亀裂とする。亀裂進展長 $a$ 、及びその際の荷重 $P$ とCOD  $\delta$ を計測し、式(3-1)に示す修正コンプライアンス法(Modified Compliance Calibration Method)からモードI破壊靱性値 $G_I$ を算出した。

$$G_I = \frac{3P^2 C^{2/3}}{2A_1 B H} \quad (3-1)$$

ここで、 $C$ はコンプライアンス( $\delta/P$ )、 $B$ は試験片の幅、 $H$ は試験片の厚さ、 $A_1$ は $a/H - \sqrt[3]{C}$  直線の傾きである。修正コンプライアンス法は、亀裂先端付近での局所変形を考慮するため、Williamsら<sup>[68][69]</sup>の端補正(end correction)の考えから、厚さ $H$ の定数倍だけ余分に長い片持ち梁が2本合わさっている試験片を考え、エネルギーを算出している<sup>[64]</sup>。

負加速度を5mm/minとし、亀裂が10mm進展する毎にCODが0mmとなる位置まで除荷する。試験条件は、ASTM(D5528-01(2007))に極力沿って行っており、一部JIS(K7086)を取り入れている。



Fig.3-6 万能試験機とDCB試験治具

ここで、Fig.3-7及びFig.3-8に本試験条件でのDCB試験における、T800H/#3633(東レ製)及びCF/PA6の荷重－変位線図及び剥離亀裂進展曲線(R-Curve)を示す。T800H/#3633と比較しCF/PA6は、R-Curveにばらつきがあること、また荷重－変位線図がノコギリ状になっていることが分かる。熱硬化性のCFRPは加熱時に樹脂が硬化するため、層間に強度の弱い樹脂リッチ部ができ、樹脂リッチ部に沿って亀裂が進展する(Fig.3-9(a))。一方、熱可塑性のCFRTPは加熱時に樹脂が溶融するため、層と層の間が明確でなくなる(Fig.3-9(b))。そのため、亀裂進展時には常にブリッジングしている繊維の破断が伴う。また、Fig.3-10に示すように亀裂進展時に亀裂が他の層へと進展することがあり、亀裂が急激に進展する(この非定常亀裂進展挙動をStick-Slip現象と呼ぶ<sup>[54]</sup>。)ことがあり、上述したような違いが生じる。

$G_I$ を算出する際、計測点でStick-Slip現象が起きた場合はその計測点におけるデータを除外している。また、亀裂進展10mm毎に行う除荷には、①原点に戻らない実際のコンプライアンスが分かる、②Stick-Slip現象の抑制できる、③荷重－変位線図から亀裂進展長が分かる、という目的がある。

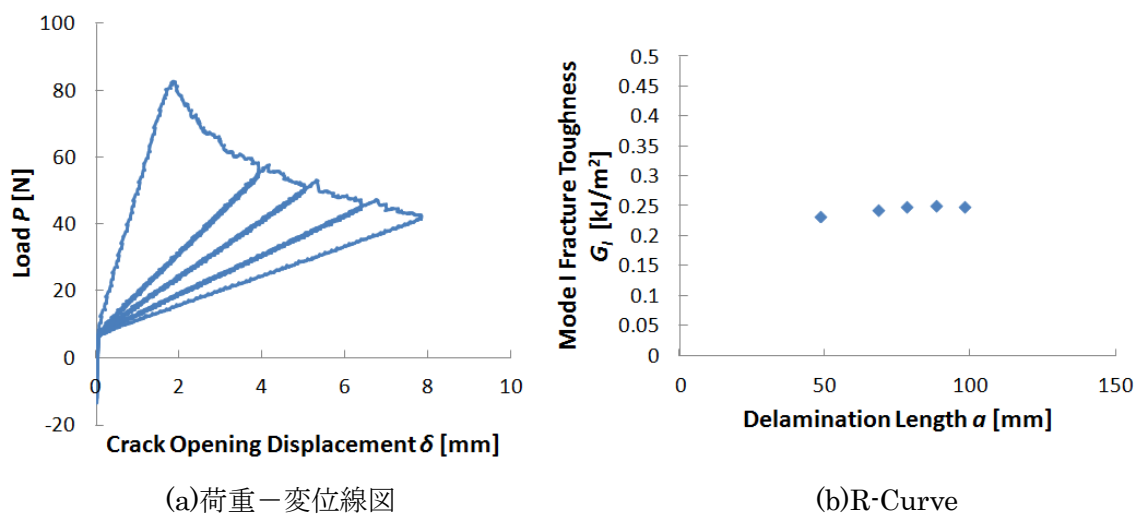


Fig.3-7 T800H/#3633の荷重－変位線図及びR-Curve

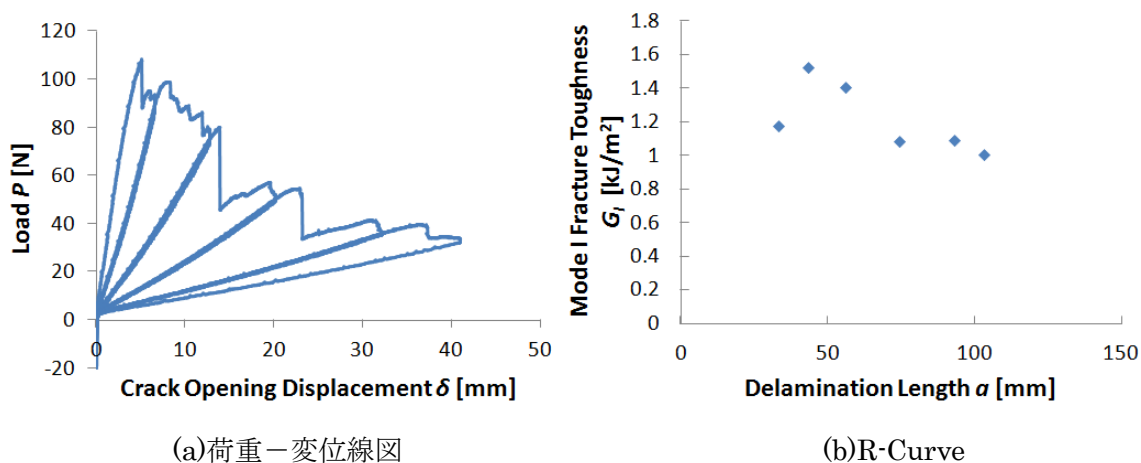


Fig.3-8 CF/PA6の荷重－変位線図及びR-Curve

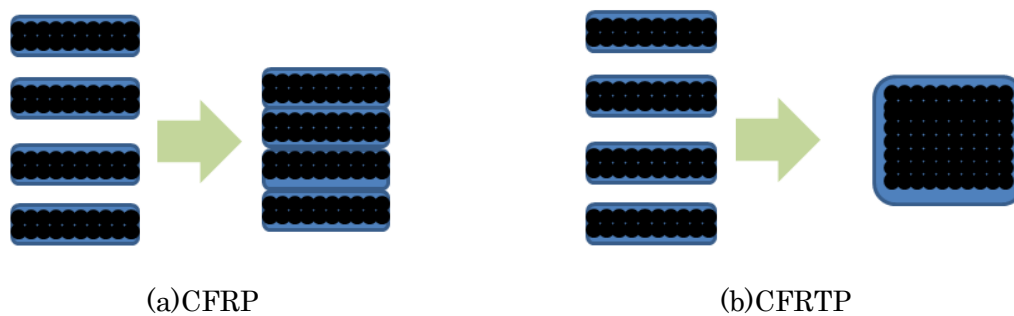


Fig.3-9 CFRP と CFRTP の成形時の様子

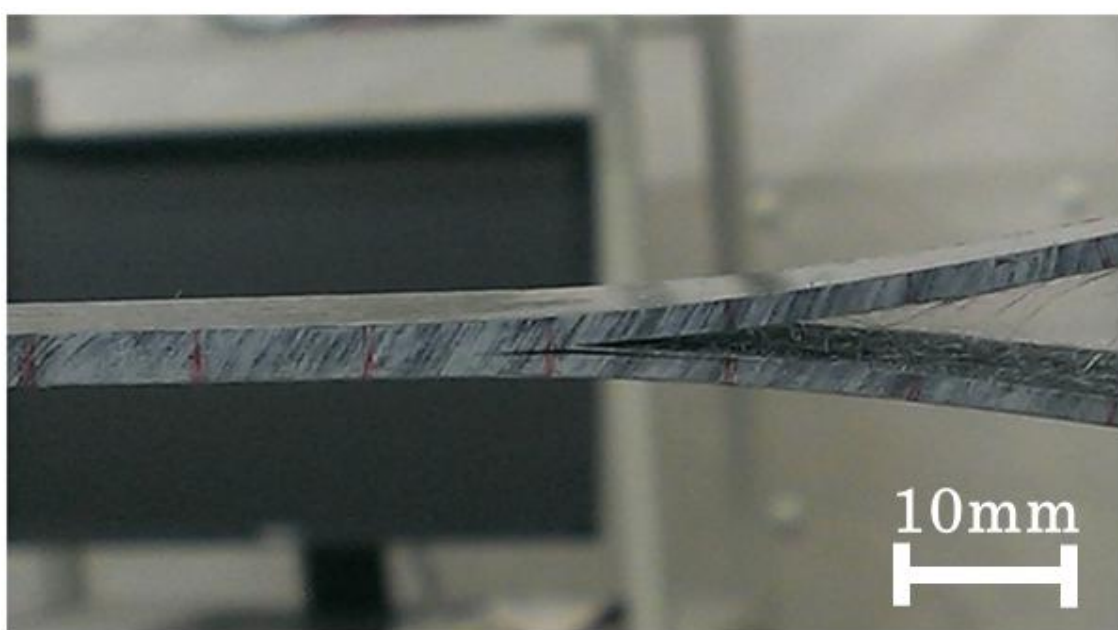


Fig.3-10 Stick-Slip 現象が起きる直前の試験片

### 3.3. 修復具合の評価方法

修復具合を評価するために、以下の操作を行う。Fig.3-11に示すように、試験片のフィルム亀裂の位置を点Aとする。点Bの位置まで初期亀裂を入れ、点Bから点Dまで一回目のDCB試験を行い、健全状態(Virgin)の破壊靱性値を求める。DCB試験後の試験片に対しヒーリングを施し、ヒーリング後の亀裂の位置を点Cとする。Fig.3-11に示す実際の写真からも、点Cまで亀裂が融着している様子が分かる。ヒーリングの前には試験片を一度200℃で10分間熱し、接着剤を軟化させることで治具を取り外しておく。そしてヒーリングは成形時同様、ポリイミドフィルムを巻きつけて行った。その後、試験片の寸法を再度測定した後、再び治具を取り付け、点Cから点Dまで再度DCB試験をし、ヒーリング後(Healed)の破壊靱性値を得る。健全状態の破壊靱性値とヒーリング後の破壊靱性値の比をエネルギー的なヒーリン

グ率 $\eta$ と定義し、評価する。

$$\eta = \frac{G_{IC,Healed}}{G_{IC,Virgin}} \quad (3-2)$$

特に、亀裂の厚さが最も狭く治りやすい点Dにおけるヒーリング率 $\eta_D$ と、最も治りにくい点Cにおけるヒーリング率 $\eta_C$ を評価の対象としている。式(3-3)に示すように点Dにおけるエネルギー的なヒーリング率 $\eta_D$ を定義する。

$$\eta_D = \frac{G_{IC,Healed,D}}{G_{IC,Virgin,average}} \quad (3-3)$$

ここで、健全状態での破壊靱性値の平均値を分母に取っている理由は、Fig.3-8(b)からも分かるように各計測点における破壊靱性値に大きなばらつきがあるためである。さらに、距離的な修復具合を評価するために、式(3-4)に示す距離的なヒーリング率 $\xi$ も導入する。

$$\xi = \frac{\text{CD間距離}}{\text{BD間距離}} \quad (3-4)$$

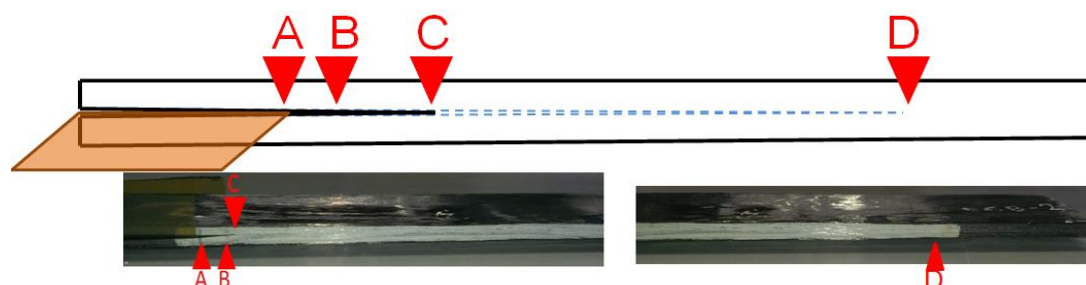


Fig.3-11 DCB試験片におけるヒーリング率の評価方法

各試験片の試験条件及びヒーリング条件をTable3-1.に示す。試験条件としては、BD間距離が長く修復しにくい条件(Table3-1.(a))と、BD間距離が短く修復しやすい条件(Table3-2.(b))を設けた。ヒーリング条件としては、圧力、ヒーリング温度、最高温度保持時間(ヒーリング時間)、冷却速度の4つをパラメータとする。加熱速度は、全ての試験片に対し、成形時と同じ10°C/minとする。無加圧でのヒーリングにはイナートオープン(ヤマト科学製、DN4101)を用い、徐冷時は扉を閉じたまま冷却し、急冷時には扉を開き、扇風機で送風することで冷却した(Fig.3-12)。無加圧での各試験条件における、オープン内の温度履歴をFig.3-13に示す。

また、DCB 試験後(Damaged)とヒーリング後(Healed)の剥離の様子を比較するために、水中超音波探傷機(日本クラウトクレマー製、HIS-3HF)を用いて、超音波探傷を行った。超音波探傷機の操作等には SDS-Win7800R ソフトを用いた。プローブは 3.5MHz のものを用いて、上面と下面の両方から検査した。



Fig.3-12 イナートオープンと急冷の様子

Table3-1. ヒーリング条件

(a)BD間距離=70～90mmの場合

Specimen Number	Pressure [Mpa]	Maximum Temperature[°C]	Healing Time [min]	Cooling Rate[°C/min]
#1	5	240	5	2 (Slow Cooling)
#2	0	240	60	2 (Slow Cooling)
#3	0	240	30	2 (Slow Cooling)
#4	0	240	60	25 (Quench)
#5	0	240	30	25 (Quench)
#6	0	220	60	25 (Quench)

(b)BD間距離=20～30mmの場合

Specimen Number	Pressure [Mpa]	Maximum Temperature[°C]	Healing Time [min]	Cooling Rate[°C/min]
#7	5	240	5	2 (Slow Cooling)
#8	0	240	60	2 (Slow Cooling)
#9	0	240	30	2 (Slow Cooling)
#10	0	240	60	25 (Quench)
#11	0	240	30	25 (Quench)
#12	0	230	60	25 (Quench)



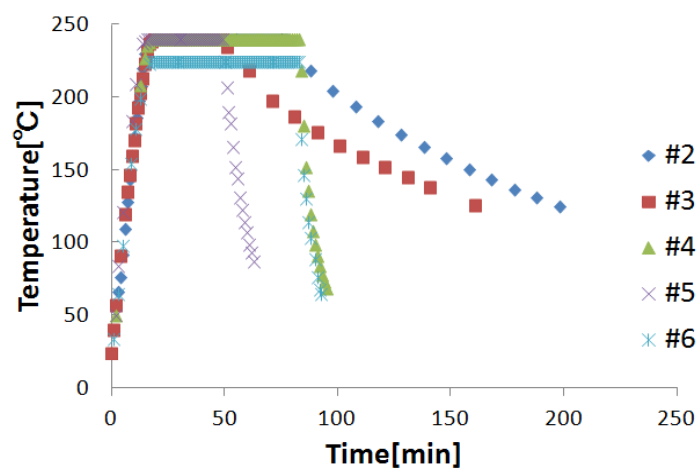


Fig.3-13 試験片#2～#6の温度履歴



Fig.3-14 水中超音波探傷

### 3.4.各ヒーリング条件によるヒーリング効果

Table 3-2.及び Fig.3-15 に、各試験片のヒーリング率を示す。また、各試験片の健全状態 (Virgin)とヒーリング後(Healed)の DCB 試験結果及び R-Curve を Fig.3-16～Fig.3-27 に示す。さらに、超音波探傷の結果及び側面の写真も示す。

Table 3-2. 各試験片のモード I 破壊靱性値及びヒーリング率

Specimen Number	$G_{I, virgin}$ [kJ/m <sup>2</sup> ]	$G_{I, healed\ C}$ [kJ/m <sup>2</sup> ]	$G_{I, healed\ D}$ [kJ/m <sup>2</sup> ]	$\eta_C$ [%]	$\eta_D$ [%]	$\eta_{ave}$ [%]	$BC$ [mm]	$BD$ [mm]	$g$ [%]
#1	0.91	0.99	0.92	134.8	126.1	130.4	-	80.0	100.0
#2	1.08	0.22	0.42	20.5	39.1	29.8	1.5	80.0	98.1
#3	1.02	0.14	0.68	13.5	66.8	40.2	4.0	70.0	94.3
#4	1.10	0.045	0.42	4.1	37.7	20.9	3.5	87.0	96.0
#5	1.53	0.12	1.02	8.1	66.6	37.3	16.0	70.0	77.3
#6	1.23	-	-	0.0	0.0	0.0	70.0	70.0	0.0
#7	0.64	1.04	0.74	161.8	114.9	138.3	-	28.0	100.0
#8	1.03	0.47	0.80	46.0	77.6	61.8	0.0	22.0	100.0
#9	1.00	0.24	0.93	24.4	93.3	58.8	4.5	20.0	77.5
#10	1.09	0.16	0.77	14.8	71.1	43.0	4.0	20.0	80.0
#11	1.07	0.21	0.28	19.2	25.7	22.4	4.5	20.0	77.5
#12	0.78	-	-	0.0	0.0	0.0	25.0	25.0	0.0

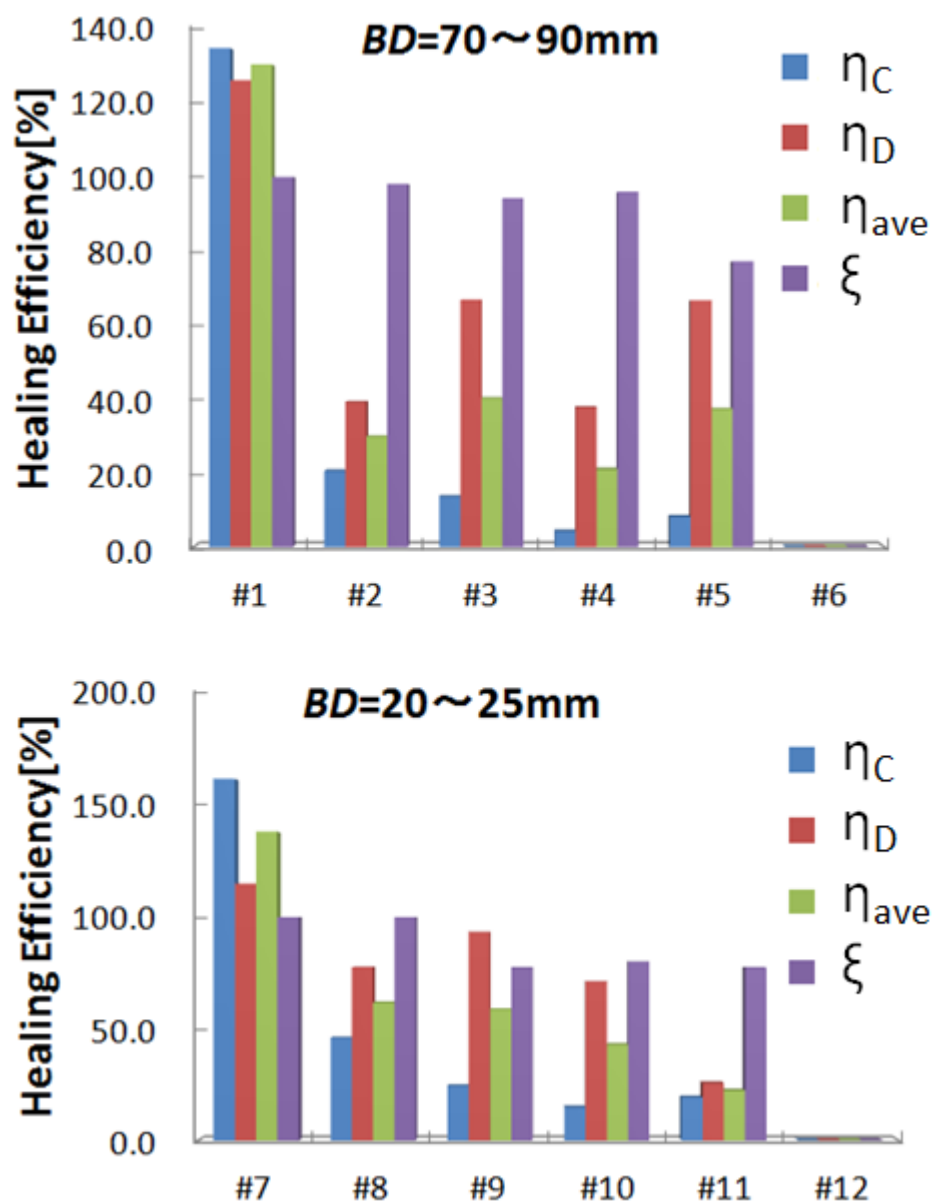


Fig.3-15 各試験片のヒーリング率



試験片#1の試験結果を Fig.3-16 に示す。加圧した試験片#1に関しては、エネルギー的にも距離的にも 100%以上回復を示すことが分かる。 $\eta$  が 100%を超えているが、式(2)の分母が平均値であることが原因であり、誤差範囲と考える。Fig.3-16(c)の超音波探傷からも分かるように、明らかに剥離していた試験片が、ポリイミドフィルムをの除いて、融着していることが確認できる。また、ヒーリング後の表面は、健全材同様に樹脂リッチになっており、光沢があり滑らかである。

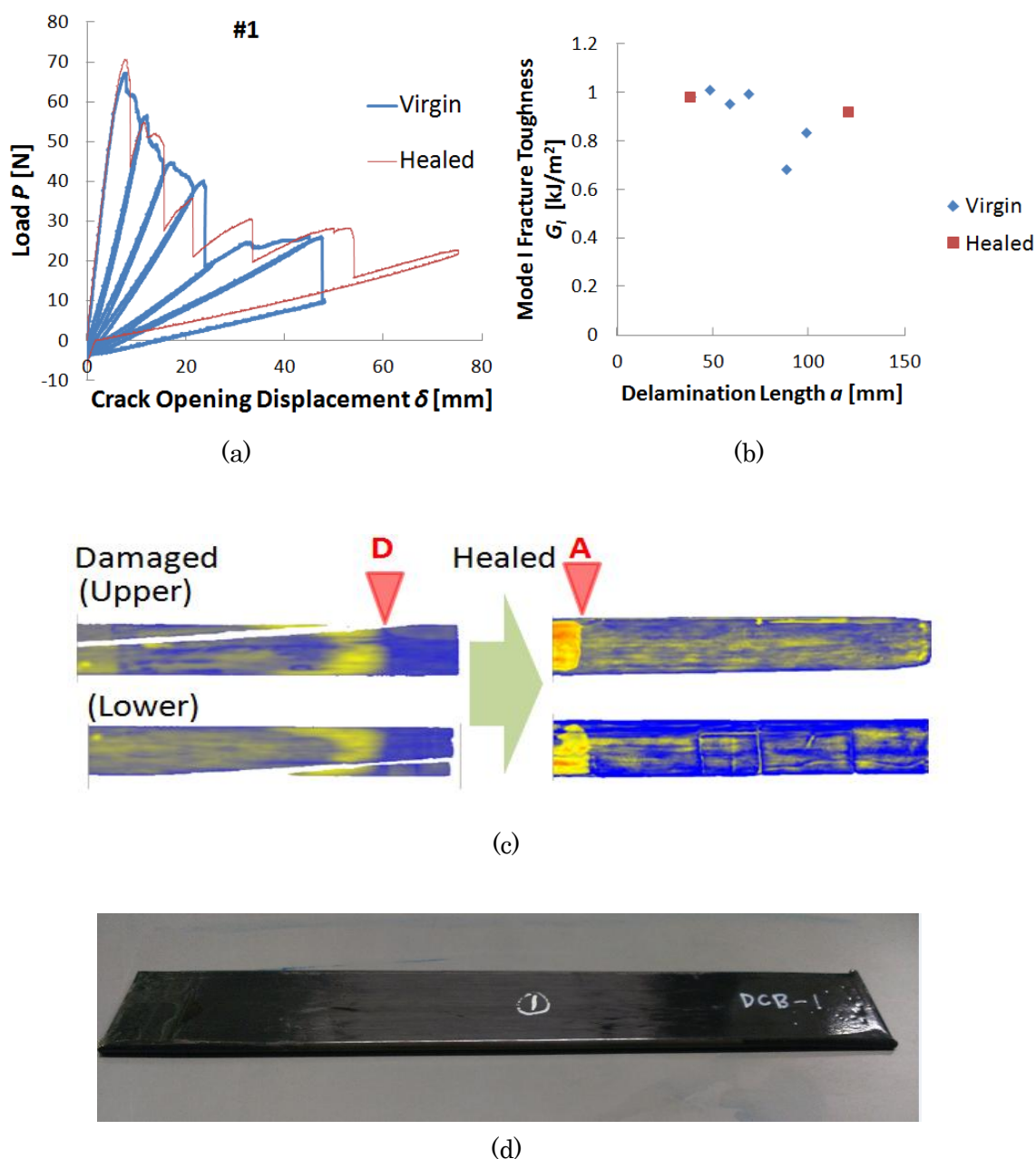


Fig.3-16 試験片#1 (a)DCB (b)R-Curve (c)超音波探傷結果(d)ヒーリング後の試験片

無加圧でヒーリングした試験片#2～#5の結果を Fig.3-17～Fig.3-20 に示す。無加圧の場合においても、視覚的にもエネルギー的にも剥離の融着を確認することができた。距離的なヒーリング率  $\xi$  は、ヒーリング時間が長いほど、冷却速度が遅いほど高くなることが分かる。つまり、ヒーリング可能な範囲は、高温域である時間に依存する。 $\eta_C$  は各々の試験片の点 C の位置が異なるため、一概に比較することができないが、 $\eta_D$  や  $\eta_{ave}$  を見ると、ヒーリング時間が短いほど高く、冷却速度の影響は空冷の範囲では小さいと考えられる。ヒーリングの際にポリイミドフィルムを巻きつけた影響で、試験片は変形をしており、ヒーリング後の超音波探傷はできなかった。また、荷重－変位線図において点 D の位置は一致していない。さらにヒーリング後の試験片表面は樹脂枯れしていることが確認できた。

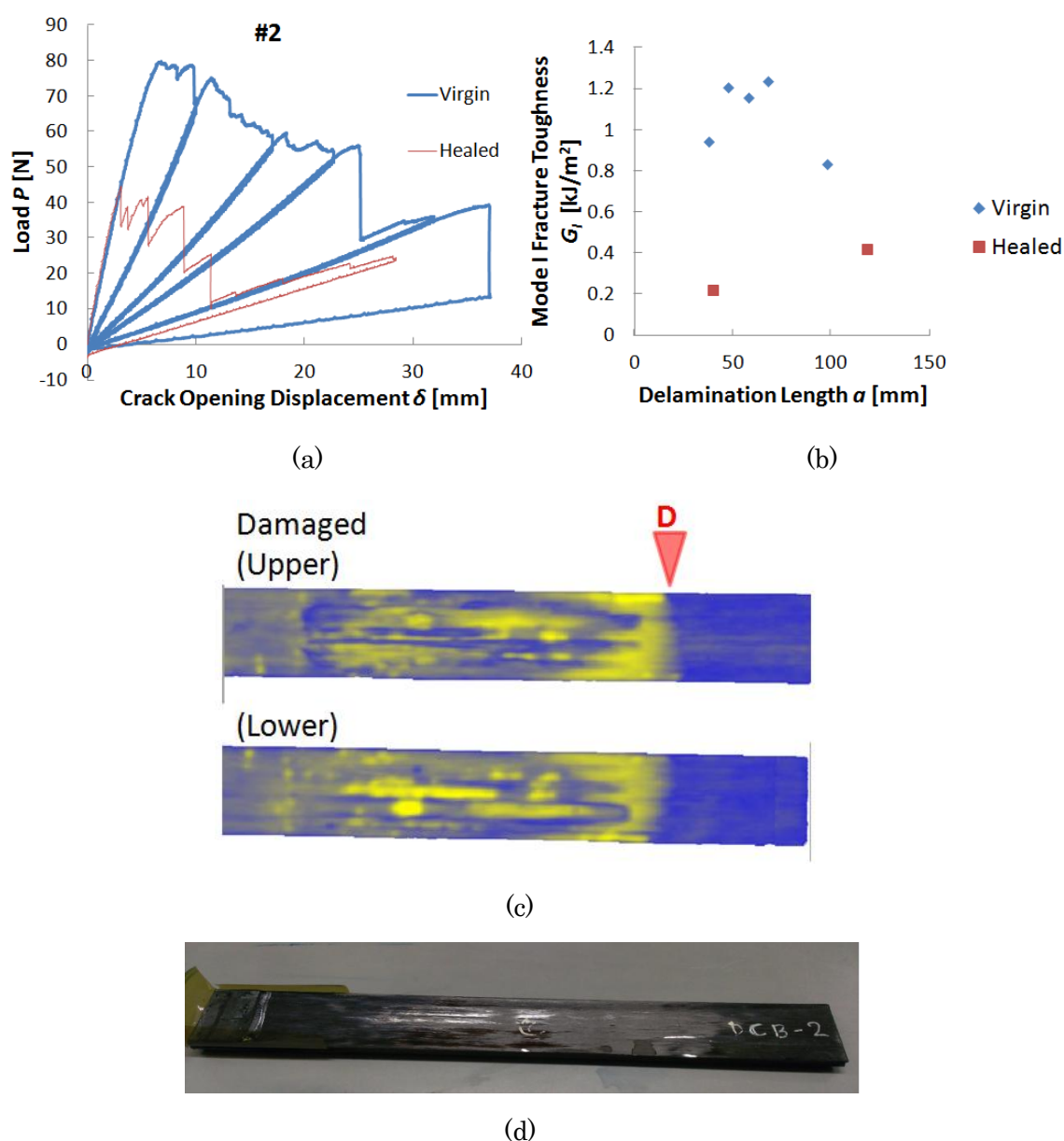


Fig.3-17 試験片#2 (a)DCB (b)R-Curve (c)超音波探傷結果(d)ヒーリング後の試験片

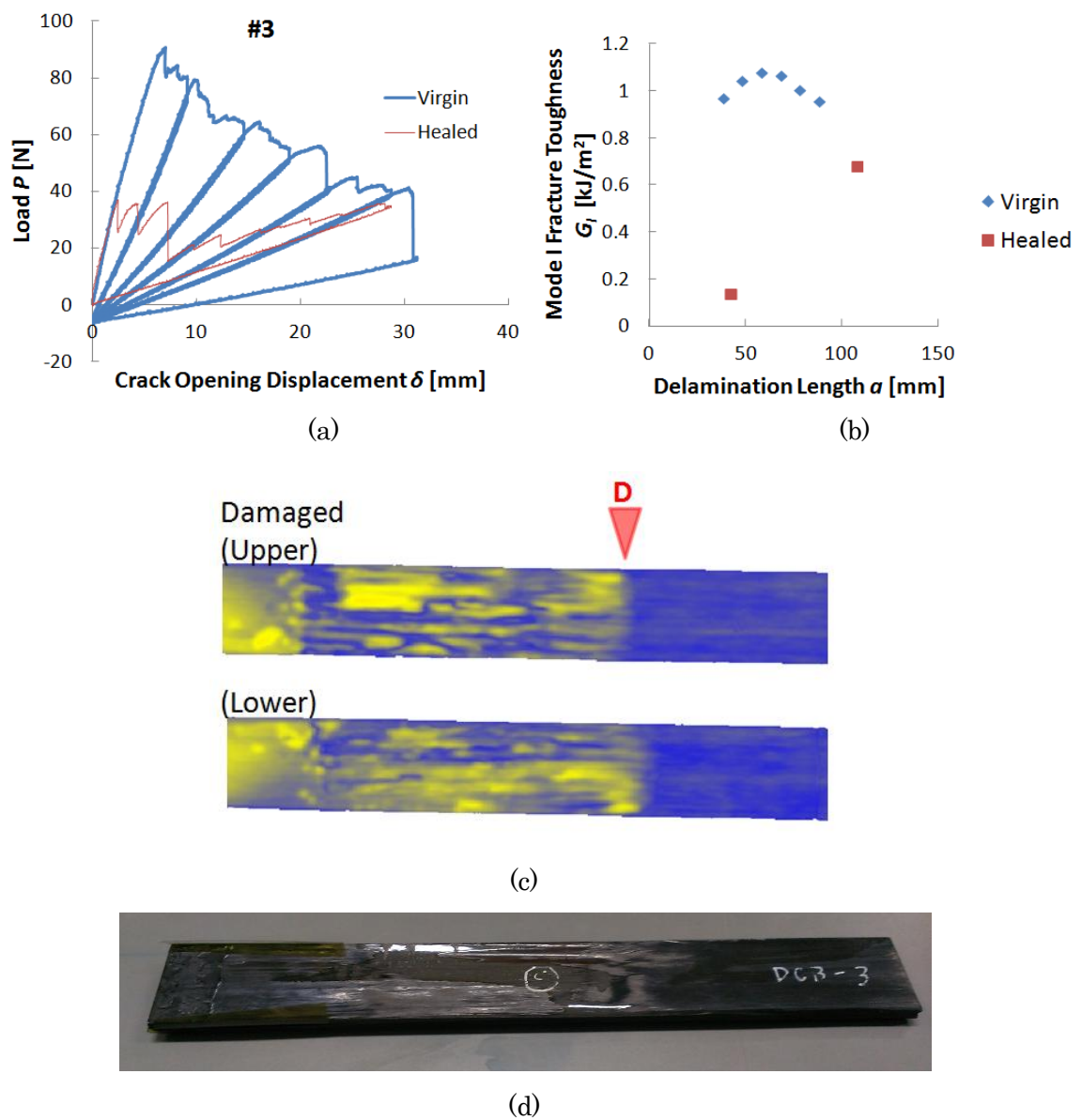


Fig.3-18 試験片#3 (a)DCB (b)R-Curve (c)超音波探傷結果(d)ヒーリング後の試験片

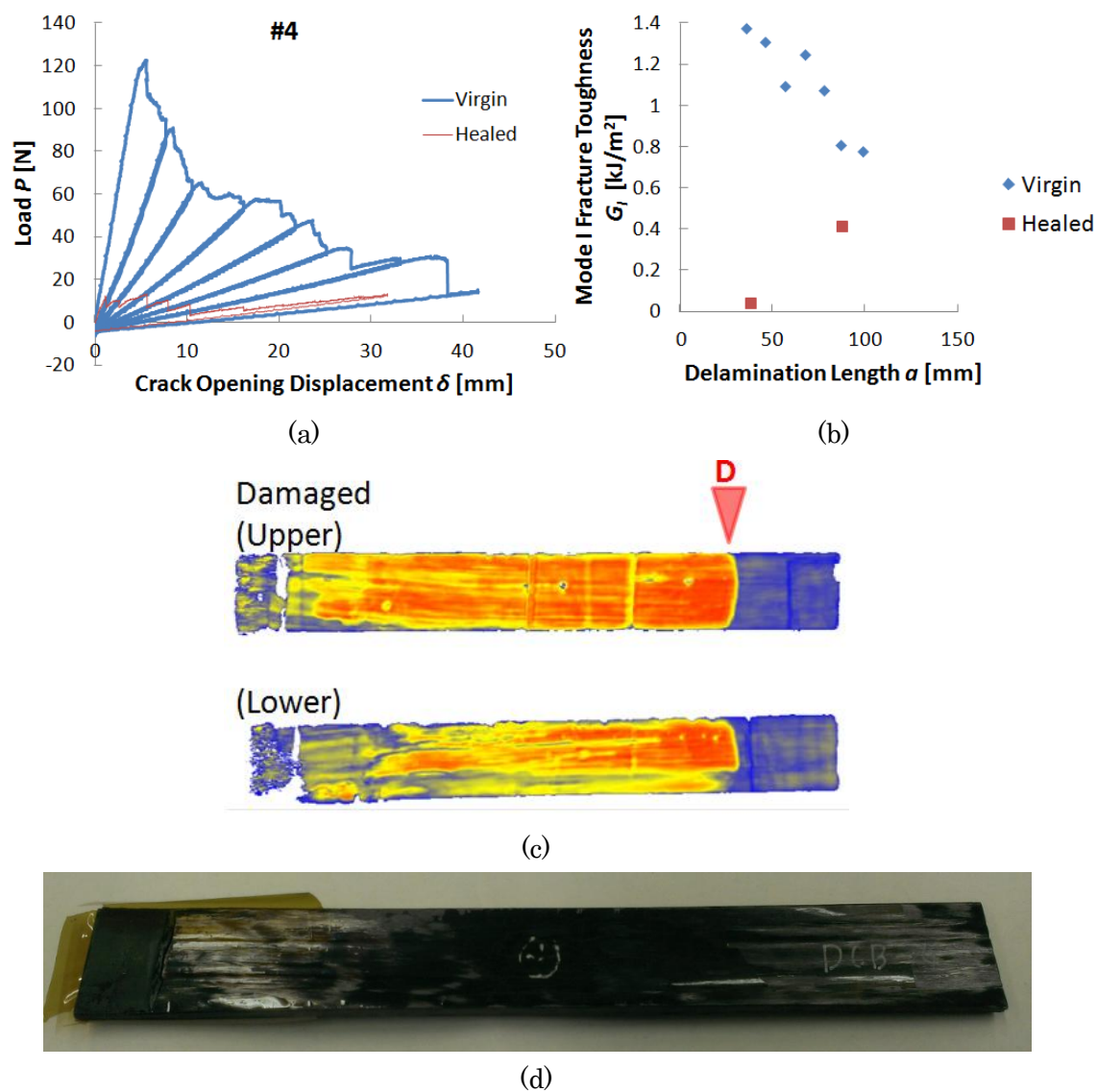


Fig.3-19 試験片#4 (a)DCB (b)R-Curve (c)超音波探傷結果(d)ヒーリング後の試験片

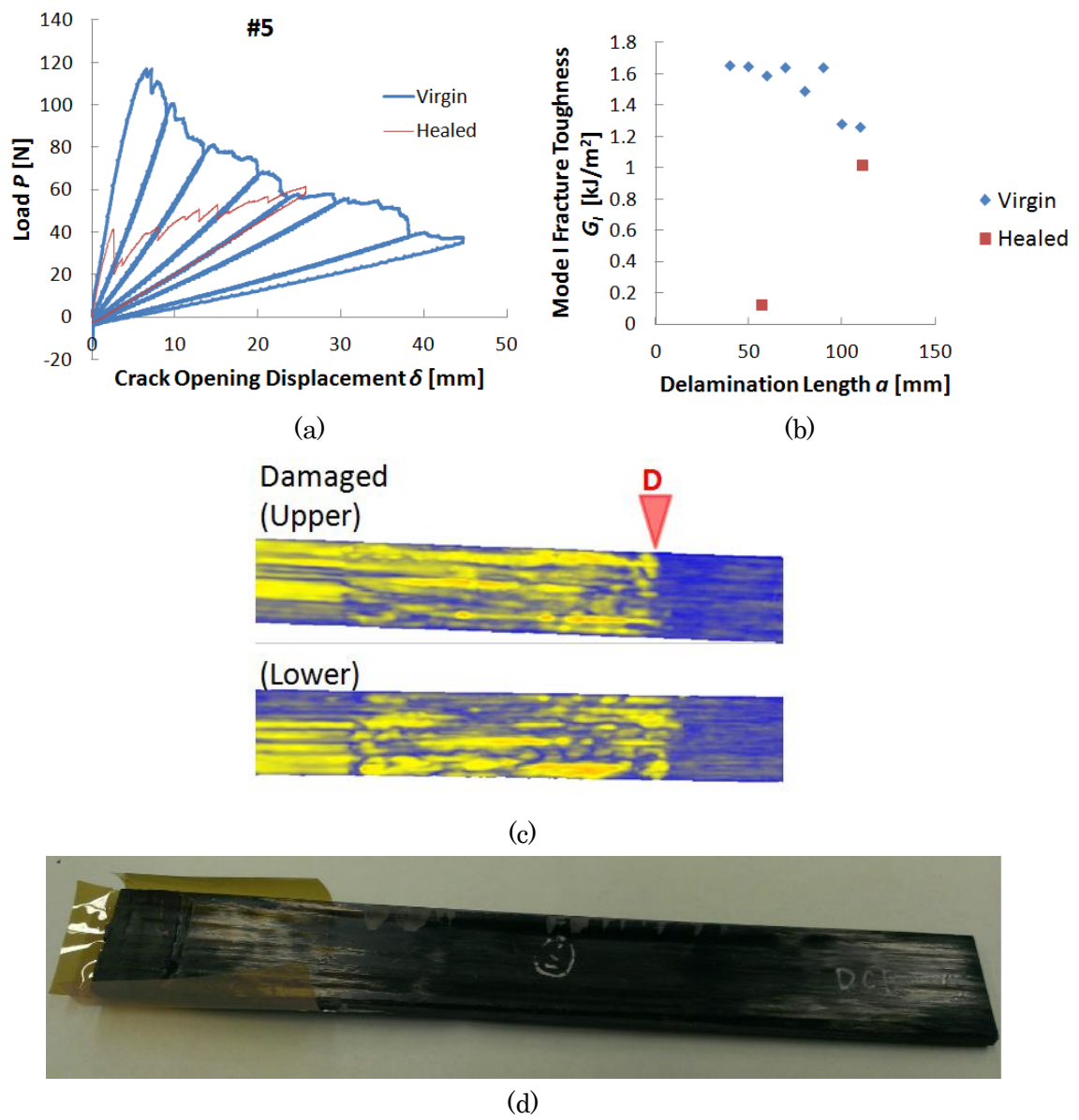


Fig.3-20 試験片#5 (a)DCB (b)R-Curve (c)超音波探傷結果(d)ヒーリング後の試験片

200℃でのヒーリングを試みた試験片#6の試験結果を Fig.3-21 に示す。荷重－変位線図からも超音波探傷結果からも剥離が全く融着できていないことが分かる。また、ヒーリング後の試験片表面及び形状は、ヒーリング前の試験片と比較しても変化が見られず、樹脂が全く溶融しなかったことが分かる。

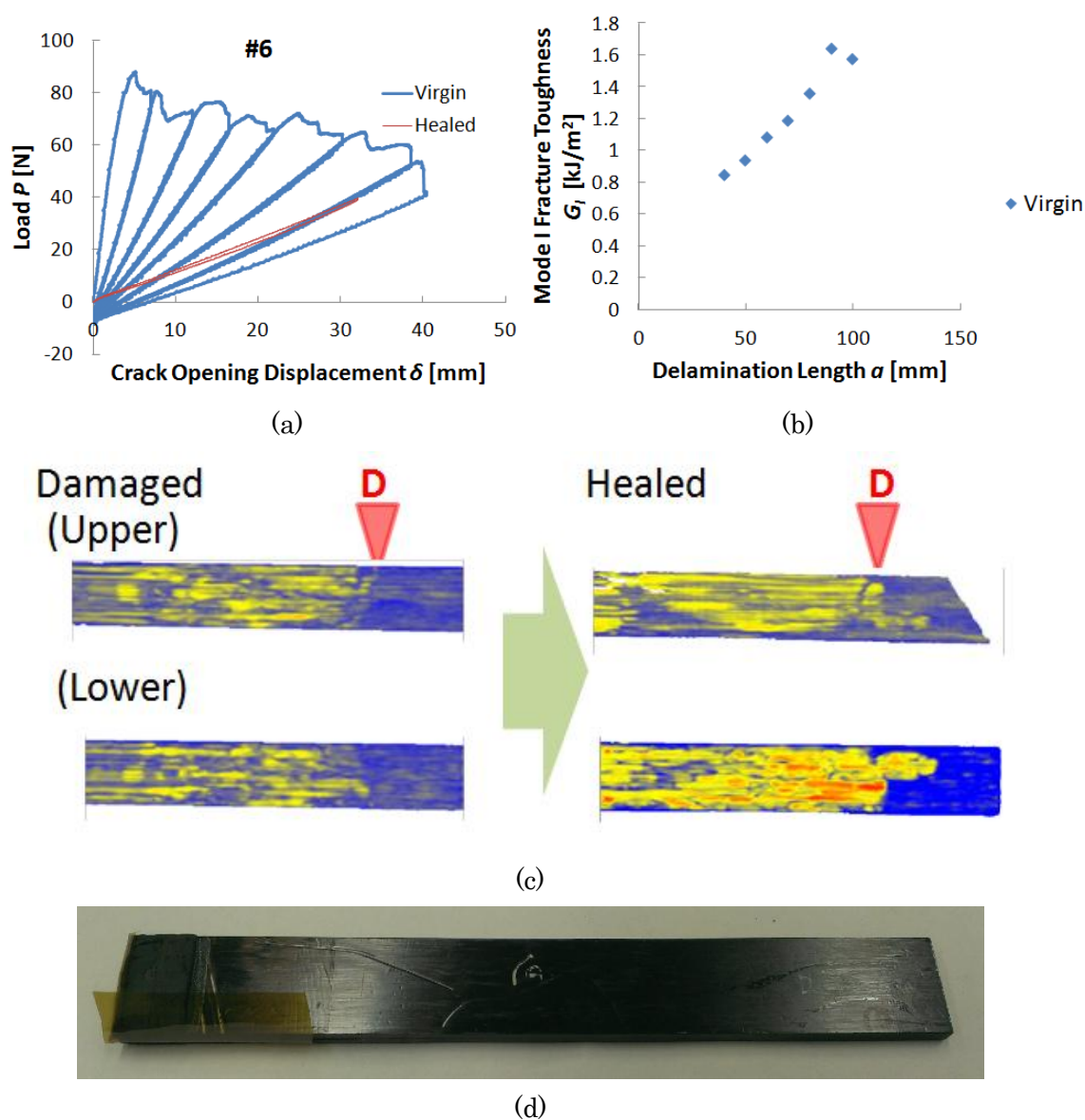


Fig.3-21 試験片#6 (a)DCB (b)R-Curve (c)超音波探傷結果(d)ヒーリング後の試験片

亀裂進展長を短くした試験片#7～#12の試験結果をFig.3-22～Fig.3-27に示す。亀裂進展長が短い場合の方が長い場合よりも高いヒーリング率を得ることができており、ヒーリング条件による影響は $\eta$ 、 $\xi$ ともに亀裂進展長が長い#1～#6と同様の傾向が見られる。230℃でのヒーリングを試みた試験片#12は、エネルギー的には回復は見られなかったが、試験片表面が樹脂枯れ状態になっていた。230℃では表面は溶融するが、剥離の融着はできないことが実験的に示された。

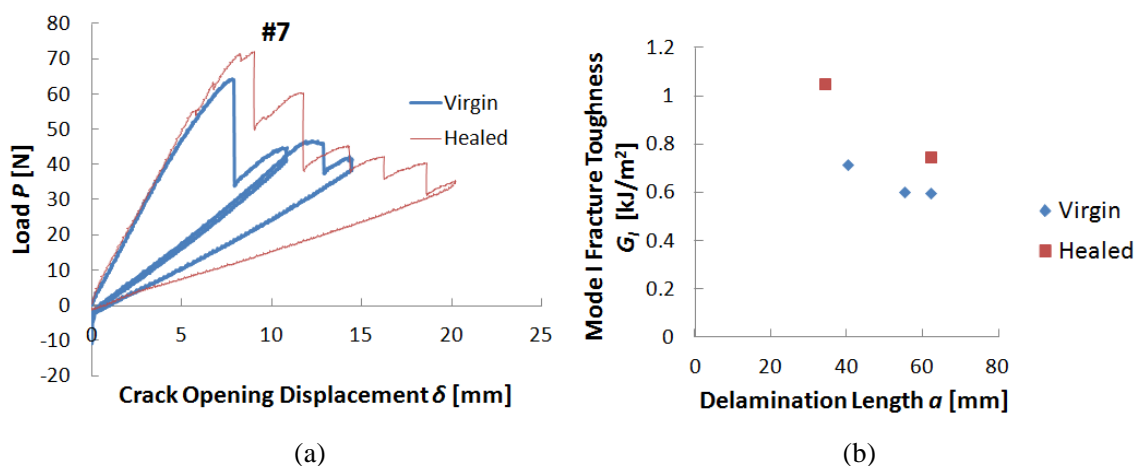


Fig.3-22 試験片#7 (a)DCB (b)R-Curve

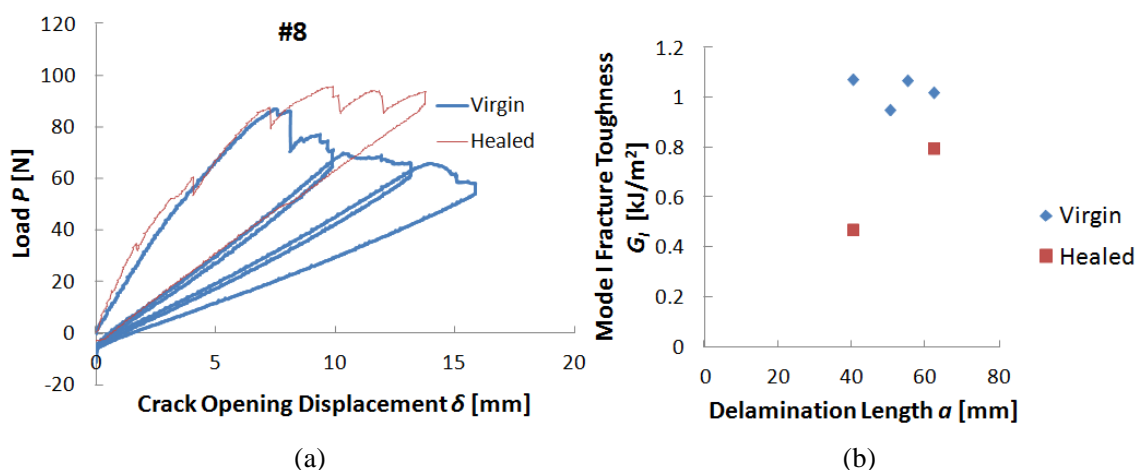


Fig.3-23 試験片#8 (a)DCB (b)R-Curve



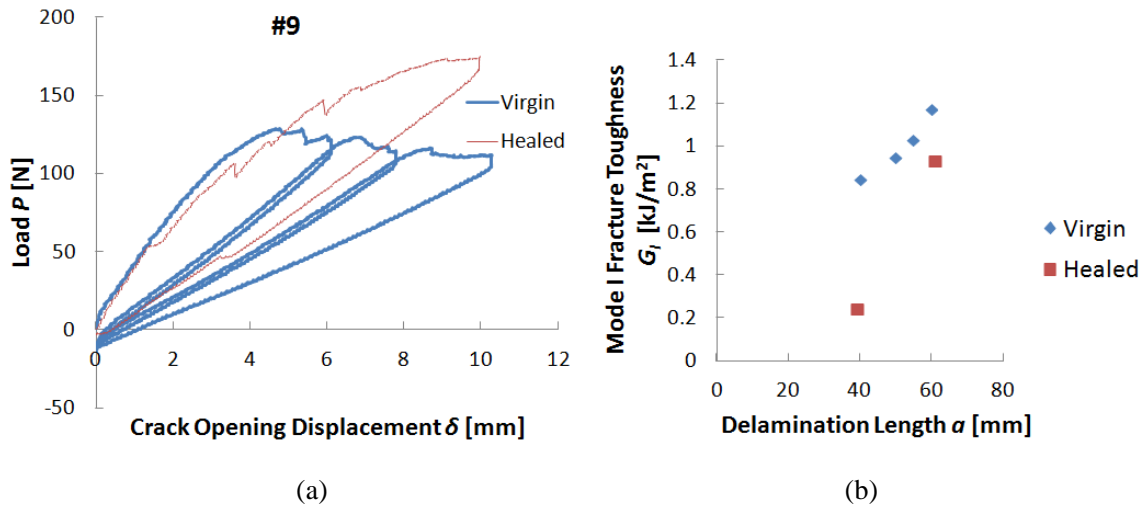


Fig.3-24 試験片#9 (a)DCB (b)R-Curve

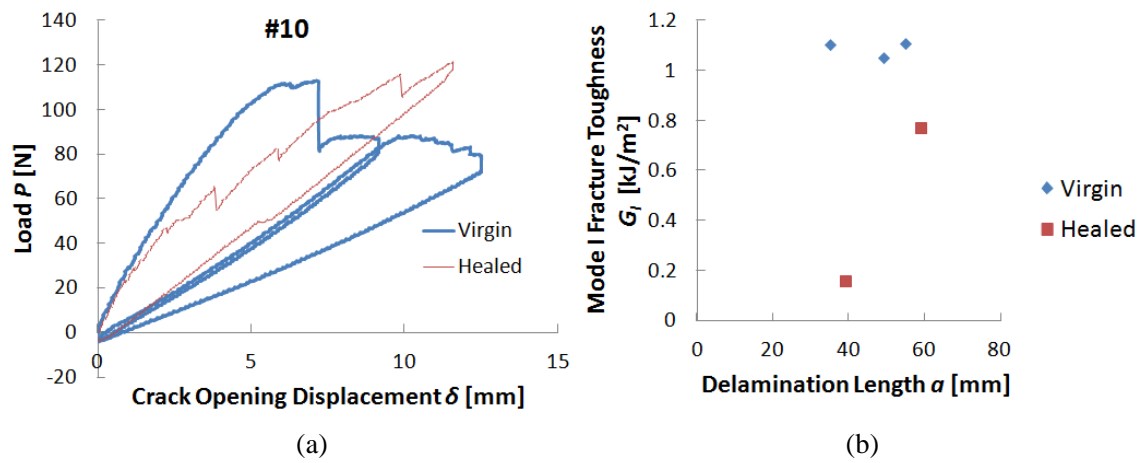


Fig.3-25 試験片#10 (a)DCB (b)R-Curve

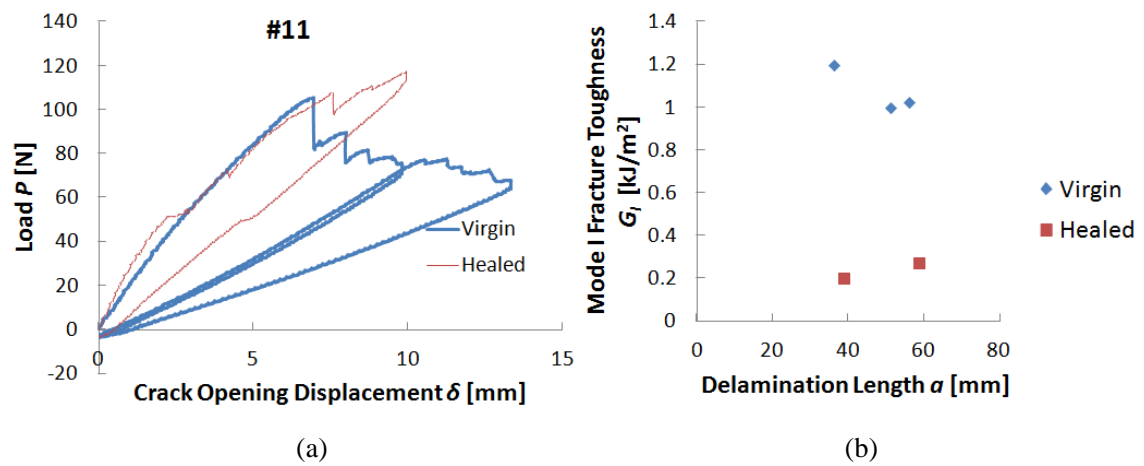
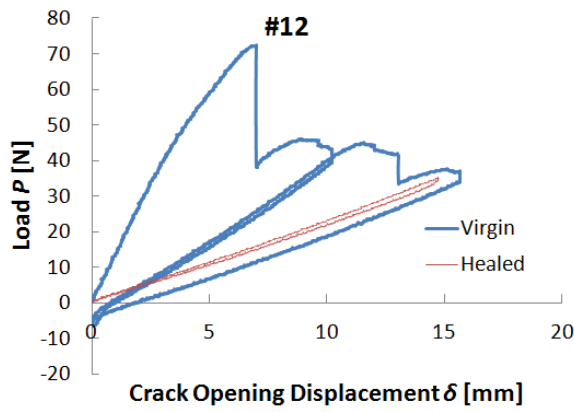
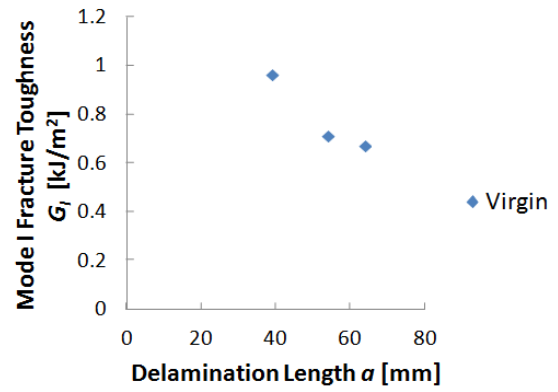


Fig.3-26 試験片#11 (a)DCB (b)R-Curve

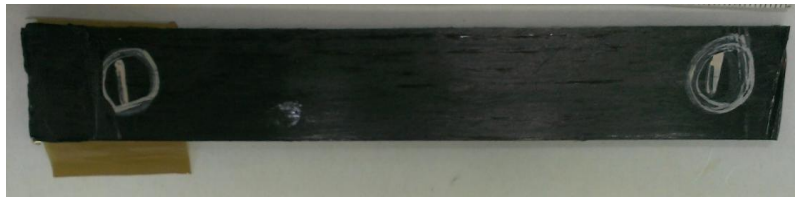




(a)



(b)



(c)

Fig.3-27 試験片#12 (a)DCB (b)R-Curve (c)ヒーリング後の試験片

### 3.5.総括

本章では、無加圧での熱のみでの剥離の融着を試み、半定量的に評価した。Fig.3-28には剥離進展長が長い場合のヒーリング条件と $\eta_D$ と $\xi$ の関係をまとめている。本実験により圧力をかければ100%以上の回復を示すことが分かった。無加圧の場合でも、ある程度のヒーリング効果を得ることができた。また、剥離の融着には240℃以上の熱が必要であり、225℃以下ではヒーリングも溶融もできなかった。空冷の範囲では、冷却速度の影響は少ないと考えられ、ヒーリング時間も30分もあれば十分である。そして修復可能な距離(面積)は、高温である時間に依存するため、ヒーリング時間及び冷却時間が長い方が大きくなる。これらの傾向は剥離の進展長が短くした場合にも見られたが、亀裂進展長が長い場合に比べ短い場合の方が融着しやすい。ヒーリングの際に、本実験のように材料外部から熱を与えると、材料全体が溶融してしまい、変形や樹脂枯れ等を引き起こす。このため、剥離面のみを溶融する必要性がある。

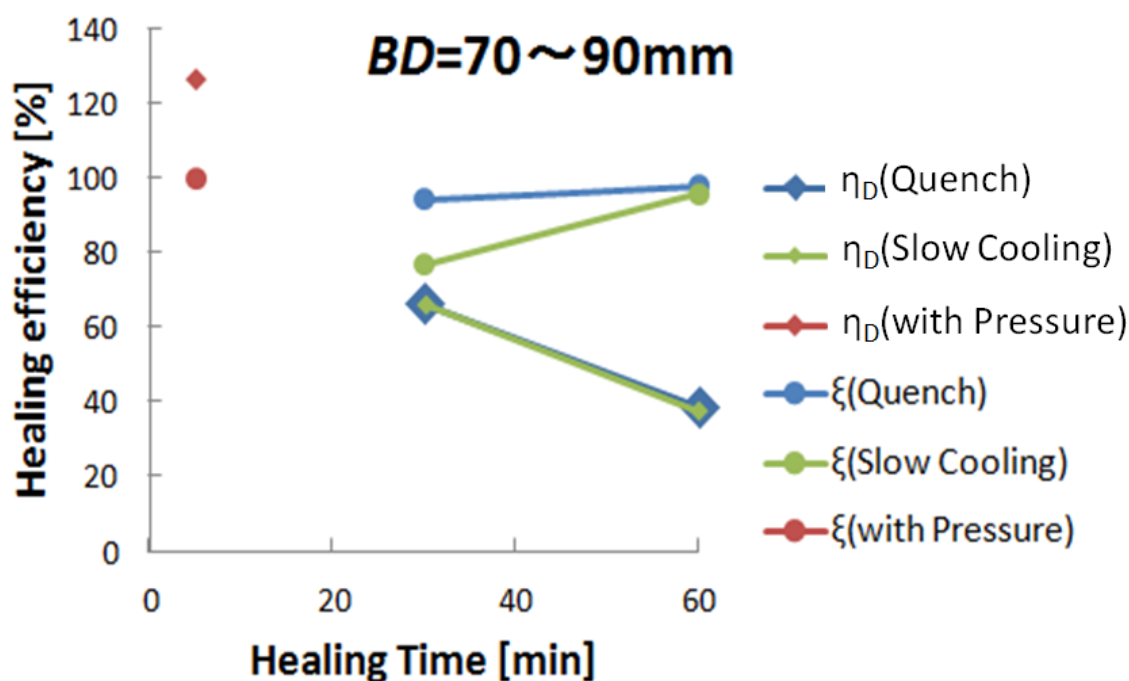


Fig.3-28 亀裂進展長が長い場合のヒーリング条件と $\eta_D$ 及び $\xi$ の関係

## 第4章. ジュール熱による局所加熱

本章では、電気を用いることで材料内部から局所的に、ヒーリングに必要な熱を供給できるのかどうかを、実験と有限要素法(Finite Element Method : FEM)による熱—電気連成解析の両面から検証した。また、解析モデルから電極の配置や試験片寸法等が温度分布に与える影響をシミュレーションした。本論文での FEM 解析は全て、ABAQUS6.12(Dassault Systèmes 製)を用いて行った。

### 4.1. 機能層と試験片

材料を内部から発熱させるために、Fig.4-1 に示すような、銅箔電極とプリプレグの混在している層を導入し、これを機能層と呼ぶこととする。銅箔には銅(岩崎商店製、C1100P(TCuP)、300mm×10mm×0.1mm)を切断して使用し、0°層のプリプレグと銅箔からなる層を F0°層、90°層のプリプレグと銅箔からなる層を F90°層と呼ぶこととする。機能層は普通のプリプレグ同様に積層し、ポリイミドフィルムを巻きつける際には電極部に穴を開けて成形する。ポリイミドフィルムの穴の空いている部分は、成形時に樹脂が漏れにくくなるようにカプトンテープで補強した。本章で用いる全ての試験片は、3章の DCB 試験片同様に、240℃、5MPa で成形し、寸法もプリプレグの状態では 20mm×155mm と統一している。大きな板から切り出して作成した 3章での DCB 試験片とは異なり、一本一本ポリイミドフィルムを巻きつけて成形するため、寸法のばらつきは比較的大きい。

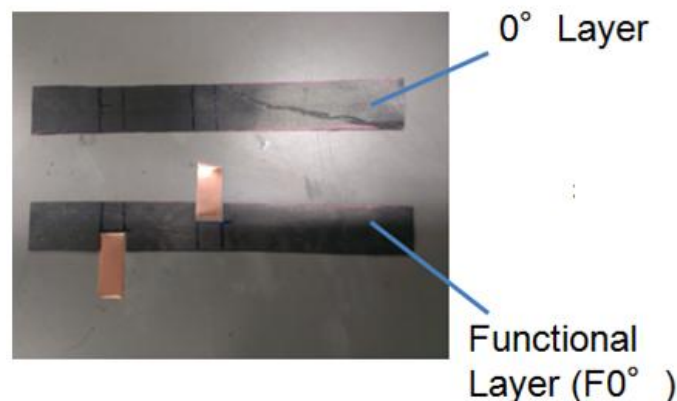


Fig.4-1 銅箔電極と機能層

### 4.2. 加熱実験方法

Fig.4-2 に示すように、電極間の長手方向の距離を  $X[\text{mm}]$ 、幅方向の距離を  $Y[\text{mm}]$  とし、様々な電極配置での発熱状況を観察する。電極間の中央部を計測点とし、熱電対で試験片表面の温度を測定する。この時、熱電対に投入した電流が流れないようにカプトンテープを一枚噛ませて熱電対を貼り付けた(Fig.4-3)。また、室温は 21℃に設定している。さらに、

試験片全体の温度分布をサーモカメラ(FLIR SYSTEMS 製、FLIR i5)を用いて観察した。サーモカメラは測定距離によって温度が変わる他、計測可能領域が 270℃以下であるため、温度分布の観察のみに使用する。机の上に厚さ 1mm のアルミ板と厚さ 75 $\mu$ m のポリイミドフィルム(宇部興産製、UPILEX<sup>®</sup>-75S)を置き、その上に試験片を乗せて加熱実験を行った。銅箔電極に導線をハンダ付けし、電源装置(Agilent Technologies 製、E3643A)を用いて直流電流を投入した。電源装置の投入可能な電流の上限は 1.4A、電圧の上限は 36V である。

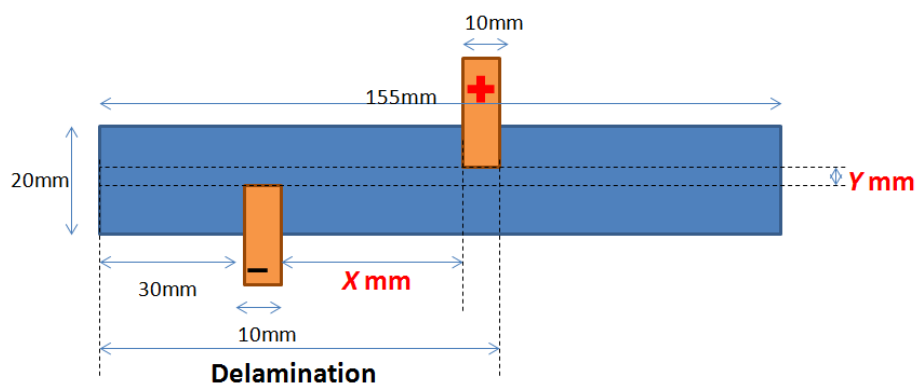


Fig.4-2 試験片の電極配置

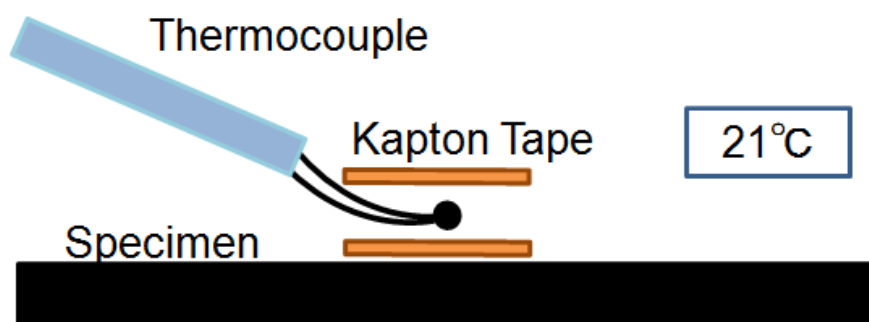


Fig.4-3 熱電対による試験片表面の温度測定



Fig.4-4 試験片と電源装置

### 4.3. FEM 解析モデル

#### 4.3.1. 熱－電気連成解析

本論文での解析は全て有限要素法(FEM)に基づいて行っており、全ての FEM 解析において ABAQUS6.12(Dassault Systèmes 製)を用いている。FEM とは、解析モデルを微小な要素に区切り、各要素で方程式を解いていく数値シミュレーション手法である。本研究で用いた全ての解析モデルは 3 次元ソリッドモデルで作成しており、メッシュ形状は曲線を含むパートは 4 面体フリーメッシュ、6 面体構造メッシュを適用した。

ABAQUS6.12.において、電位の場合と温度の場合が連成するために、両方の場合を同時に解析しなければならない時には、熱－電気連成解析を行う<sup>[70]</sup>。本解析機能では、節点における温度場と電場の連成方程式を直接解析することで、電場、温度場、そしてそれらの連成した場を解析することができる。連成は、温度依存の導電率と、電流密度依存の内部発熱によって発生するが、本解析では物性値の温度依存は考慮していない。本章におけるジュール加熱時は熱－電気連成解析を行い、冷却時は連成のない伝熱の解析を行う。

導体内の電場の基礎方程式は、電荷の保存則である。直流の定常電流に対する方程式は、式(4-1)で表される。

$$\int_S \mathbf{J} \cdot \mathbf{n} dS = \int_V r_c dV \quad (4-1)$$

ここで、 $V$ は任意の検査体積、 $S$ はその表面、 $\mathbf{n}$ は $S$ の外向き法線ベクトル、 $\mathbf{J}$ は電流密度、 $r_c$ は単位体積あたりの内部電流である。

電流の流れは、Ohm 則で表される。

$$\mathbf{J} = \mathbf{S}^E \cdot \mathbf{E} = -\mathbf{S}^E \cdot \frac{\partial \varphi}{\partial \mathbf{x}} \quad (4-2)$$

ここで、 $\mathbf{x}$ は位置座標ベクトル、 $\mathbf{E}(\mathbf{x})$ は電場の強さ、 $\varphi$ は電位、 $\mathbf{S}^E_{(T, f^a)}$ は電気伝導マトリックス、 $T$ は温度、 $f^a, a=1,2,\dots$ は規定場の変数である。材料物性としては導電率が必要となり、本解析では温度依存性のない、場の変数の数が 0 である直交異方性の材料物性を考える。

Ohm 則を保存則に用いて変分形式で表すと、FEM における電場の基礎方程式が得られる。

$$\int_V \frac{\partial \delta \varphi}{\partial \mathbf{x}} \cdot \mathbf{S}^E \cdot \frac{\partial \varphi}{\partial \mathbf{x}} dV = \int_S \delta \varphi \mathbf{J} \cdot \mathbf{n} dS + \int_V \delta \varphi r_c dV \quad (4-3)$$

ここで、 $\mathbf{J} \equiv -\mathbf{J} \cdot \mathbf{n}$  は、 $S$ を通過して検査体積に流入する電流の密度である。

導体内を流れる電流によって散逸する電気エネルギー $P_{ec}$ は、Joule の法則で表される。

$$P_{ec} = \mathbf{J} \cdot \mathbf{E} = \frac{\partial \varphi}{\partial \mathbf{x}} \cdot \mathbf{S}^E \cdot \frac{\partial \varphi}{\partial \mathbf{x}} \quad (4-4)$$

この散逸エネルギーのうち、物性値として与えるエネルギー変換係数  $\zeta_v$  との積が物体内で発生する熱  $u$  に変換される。

$$u = \zeta_v P_{ec} \quad (4-5)$$

また、伝熱の基礎方程式は次のように表すことができる。

$$\int_V \rho \dot{U} \delta T dV + \int_V \frac{\partial \delta T}{\partial \mathbf{x}} \cdot \boldsymbol{\lambda} \cdot \frac{\partial T}{\partial \mathbf{x}} dV = \int_V \delta T u dV + \int_S \delta T q dS \quad (4-6)$$

ここで、 $\rho$  は質量密度、 $\dot{U}$  は内部エネルギーの時間微分、 $\boldsymbol{\lambda}$  は熱伝導マトリックス、 $q$  は物体内に流入する単位面積当たりの熱流束である。よって、材料物性としては、熱伝導率、質量密度、比熱 ( $c = \frac{dU}{dT}$ ) が必要となる。

固相—液相間の相転移が生じる解析においては潜熱が必要となる。潜熱は、固相線温度 (220℃) から液相線 (230℃) までの温度範囲にわたって解放されると仮定している。

また、周囲への輻射により発生する表面の熱流束は以下の式で表される。

$$q_r = \sigma \varepsilon \{ (T - T^Z)^4 - (T^0 - T^Z)^4 \} \quad (4-7)$$

ここで、 $q_r$  は輻射によって表面を通過する熱流束、 $\varepsilon$  は表面の輻射率、 $\sigma$  は Stefan-Boltzmann 定数 ( $5.67 \times 10^{-14} [\text{W}/\text{mm}^2/\text{K}^4]$ )、 $T$  は任意の点での温度、 $T^0$  は雰囲気温度、 $T^Z$  は絶対零度 (−273.15℃) である。

さらに、相互作用として表面熱伝達を考慮する場合は、以下の式の通りに計算を行う。

$$q_c = k(T - T^0) \quad (4-8)$$

ここで、 $q_c$  は熱伝達によって表面を通過する熱流束、 $k$  は熱伝達係数を表している。

本解析において、電気の非定常性は無視されるが伝熱部分を非定常問題として解析している。非定常伝熱問題は、後退 Euler 法 (修正 Cank-Nicholson 法) によって時間積分されている。この方法は、線形問題に対しては無条件安定である。時間増分は、初期時間増分  $\Delta t_0 = 5 \times 10^{-7} [\text{s}]$  とし、その後の時間増分は  $\Delta t = 1 \times 10^{-14} \sim 10 [\text{s}]$  の範囲で、最大許容温度変化量 (=10000)、最大許容輻射率変化量 (=0.3) に基づいて自動的に選択される自動増分を用いた。

### 4.3.2. 物性値

解析モデルを作成するにあたり、各物性値を定義する。まず、導電率に関して実測値の測定を行った。Fig.4-5(a)に示すように、積層構成 $[0_{16}]$ の一方方向材を 5MPa で成形し、30mm×30mm×2mm に切り出した。銀ペースト(藤倉化成製、D-550)を断面全域に塗り、導線を固定した。ここで、厚さ方向の測定を行う試験片は、表面の樹脂リッチ部を研磨してから銀ペーストを塗った。計測には、Fig.4-5(b)に示すインピーダンスアナライザー(日置電機製、3522LCR ハイテスタ)を用いた。

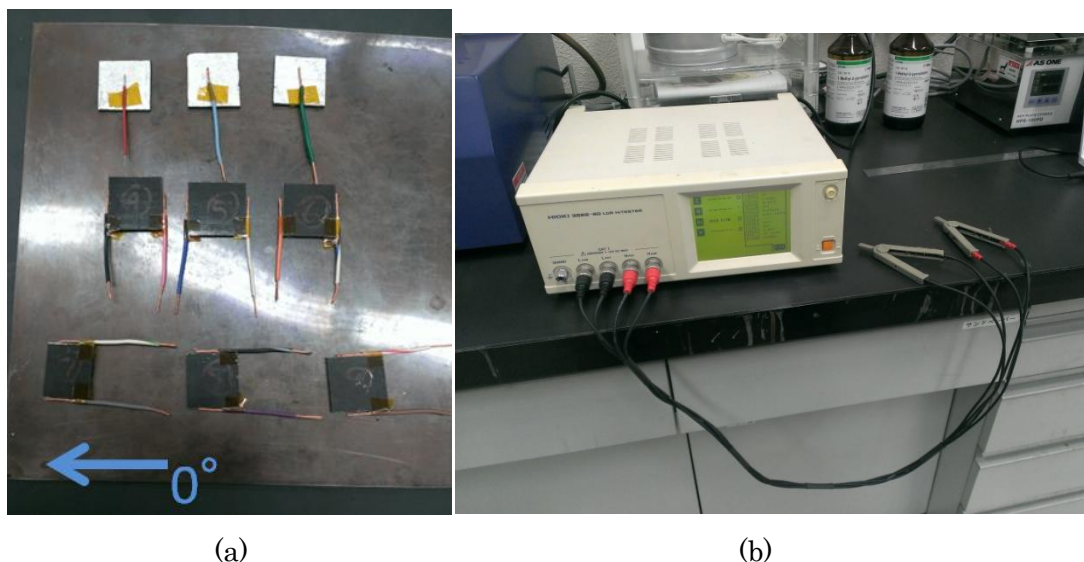


Fig.4-5 導電率計測のための試験片とインピーダンスアナライザー

インピーダンスの実測値を Fig.4-6 及び Fig.4-7 に示す。繊維方向、繊維直交方向、厚さ方向の 3 方向に対し 3 回ずつ測定を行い、その平均値を算出する。等価直列抵抗  $R_s$  は周波数に寄らず一定なのに対し、高周波数帯域では位相角  $\theta$  が増大し、コンデンサーとしての性質が出てくることが分かる。直流における等価直列抵抗  $R_s$  の平均値から計算した単位体積あたりの導電率は、繊維方向  $S_x$  が  $7.75 \times 10^{-4} [\Omega/\text{mm}]$ 、繊維直交方向  $S_y$  が  $1.62 \times 10^{-2} [\Omega/\text{mm}]$ 、厚さ方向  $S_z$  が  $4.88 \times 10^{-4} [\Omega/\text{mm}]$  であった。本論文では直流電流のみを扱う。

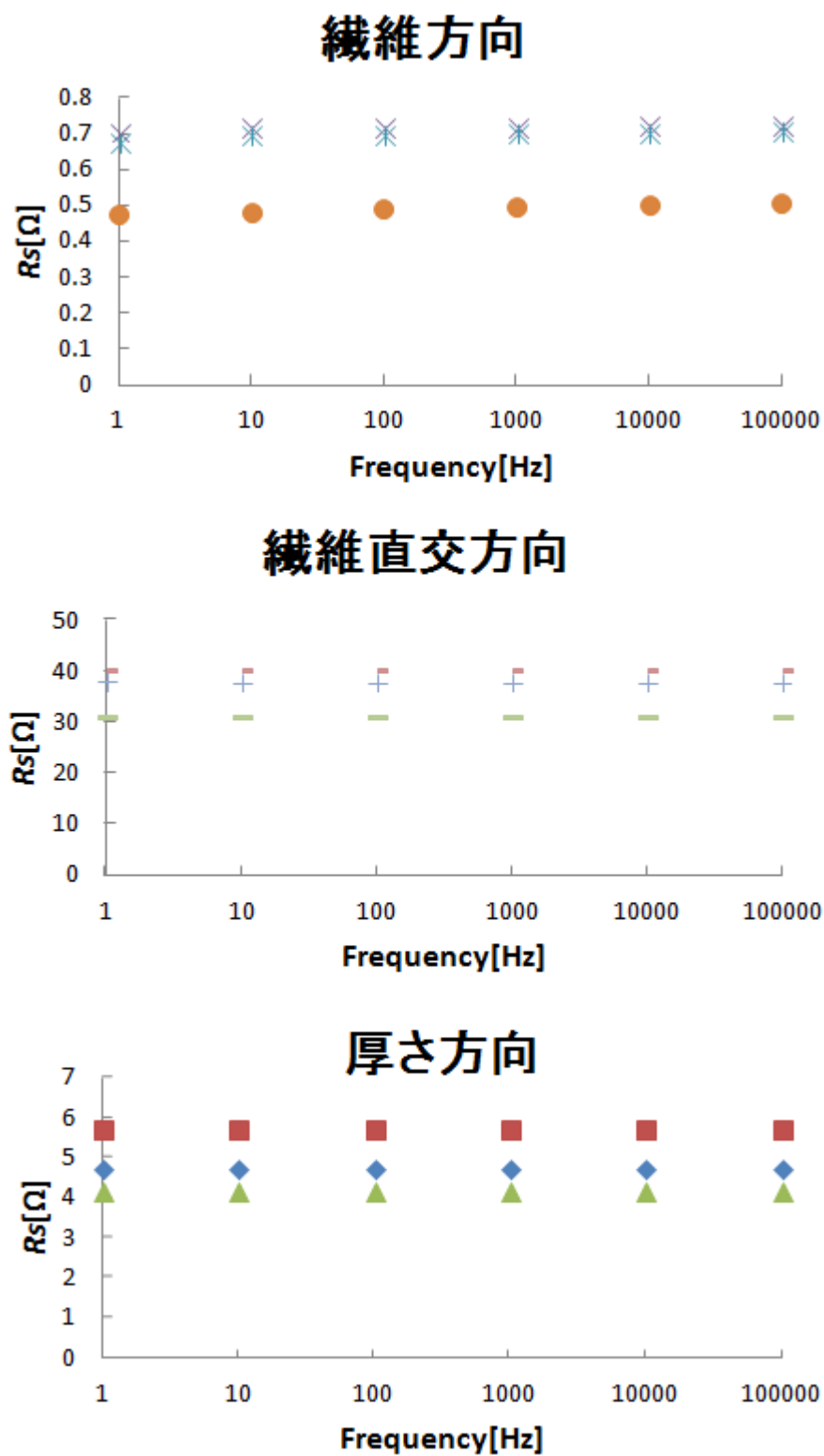


Fig.4-6 等価直列抵抗  $R_s$  の周波数特性



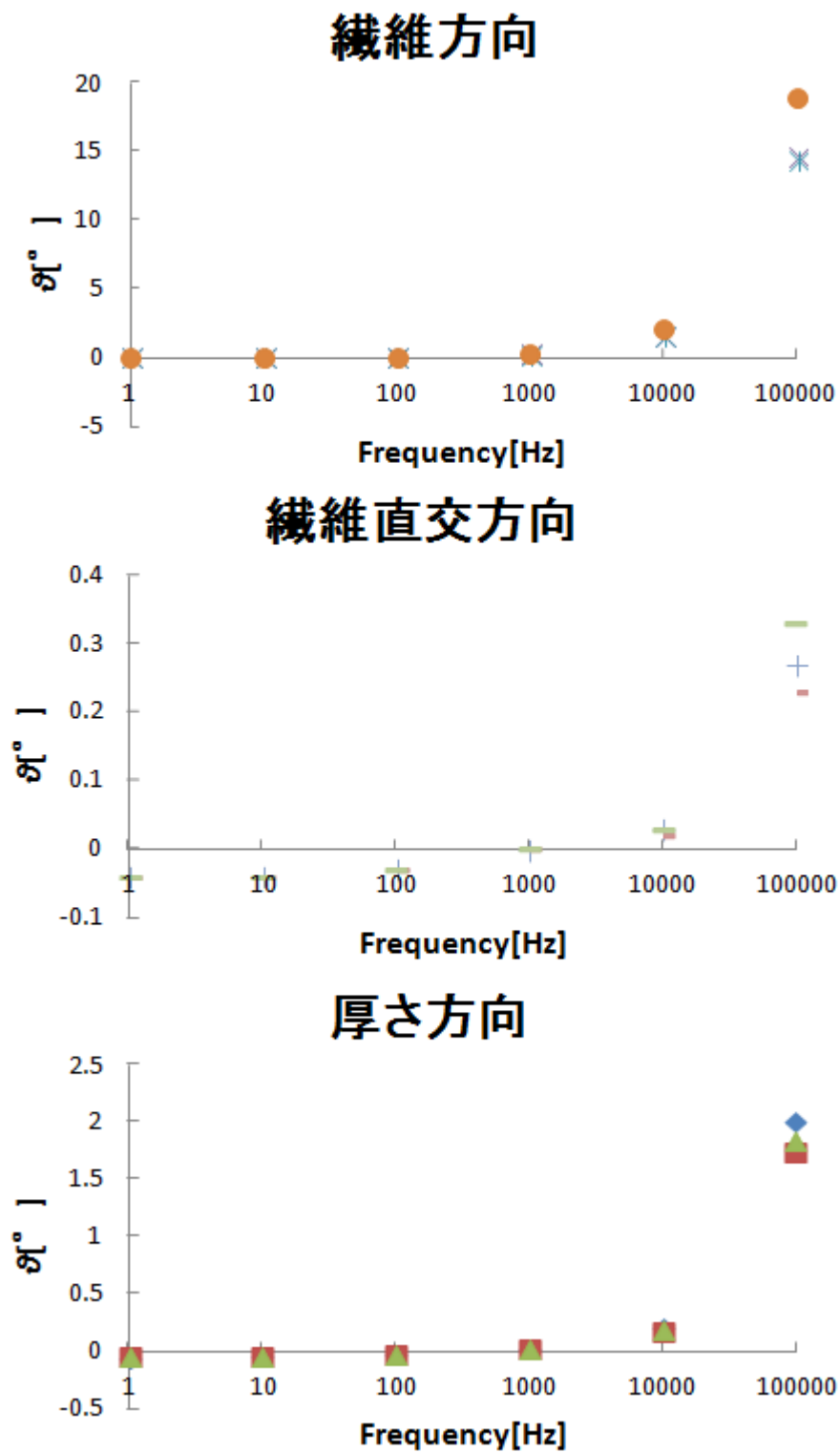


Fig.4-7 位相角  $\theta$  の周波数特性

その他の物性値は、文献値<sup>[71][72]</sup>及び  $V_f$  (=42%)と密度から計算した計算値を用いる。解析で用いる物性値を Table4-1.に示す。剥離のある試験片に関しては、剥離面の面外方向への導電率を  $0[\Omega/\text{mm}]$ とし、その他の物性値は剥離のない CFRTP の物性値と同じ値に定義している。

Table 4-1. 解析に用いる物性値

	導電率 [ $\Omega/\text{mm}$ ]			熱伝導率 [W/mm/K]			密度 [mg/mm <sup>3</sup> ]	比熱 [J/kg]	Joule熱変換率	潜熱 [kJ/kg]	輻射率
	$S_x$	$S_y$	$S_z$	$\lambda_x$	$\lambda_y$	$\lambda_z$	$\rho$	$c$	$\zeta_r$	$H$	$\varepsilon$
CFRTP	775 $\mu$	16m	488 $\mu$	12m	609 $\mu$	609 $\mu$	1.4	1187	1	107	0.85
剥離部	775 $\mu$	16m	0	12m	609 $\mu$	609 $\mu$	1.4	1187	1	107	0.85
PA6	10f	—	—	256 $\mu$	—	—	1.1	1680	0	230	0.85
電極	100	—	—	0.4	—	—	8.9	419	0	—	0.5

#### 4.3.3. 下面への熱伝達

Fig4-8 に示すように、試験片下面からは表面輻射よりも大きな熱が逃げていくと考えられる。この熱の逃げを解析では表面熱伝達として近似する。導電率計測で用いた試験片に電流を投入し、ジュール加熱を行う。Fig.4-9 に示すように、加熱実験では表面にカプトンテープを一枚噛ませ、試験片中央部に熱電対を貼り付け温度の測定を行った。試験片温度が 30℃程度に加熱されるように、繊維方向、繊維直交方向、厚さ方向にそれぞれ、500mA、100mA、350mA の電流を 5 分間投入した。これを上述した物性値に基づいて作成した解析モデルで再現する(Fig.4-10)。導線を取り付けた側面の一つに均一分布の表面電流を加え、もう片面を境界条件で電位 0 を定義する。

導電率の測定を行った試験片であるため、解析から求めた電圧は実験結果と一致している。しかし、Fig.4-11 に示すように 9 個(3 方向×3 個ずつ)の試験片の全てにおいて、試験片全面を表面輻射にした解析結果よりも、実験結果の温度が低くなった。これは、下面から逃げている熱を考慮していないためである。そこで、下面に相互作用として表面熱伝達を定義し、実験結果と一致するように近似した。その結果、実験結果と解析結果が最もよく一致した、熱伝達係数  $5.0 \times 10^{-5}$  [W/mm<sup>2</sup>/K]の表面熱伝達を DCB 試験片モデルにおいても適用することとする。

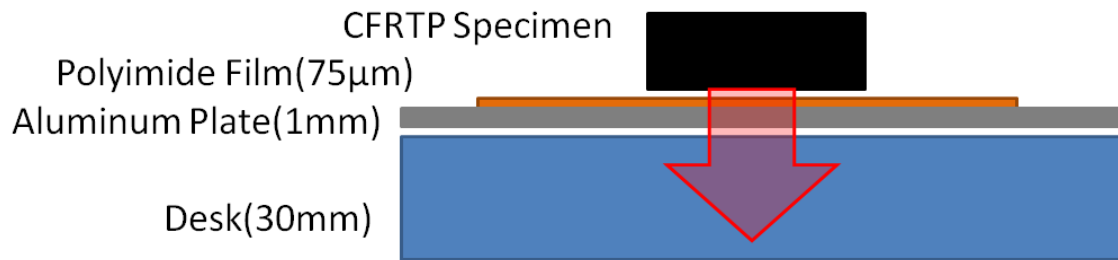


Fig.4-8 下面からの熱伝達

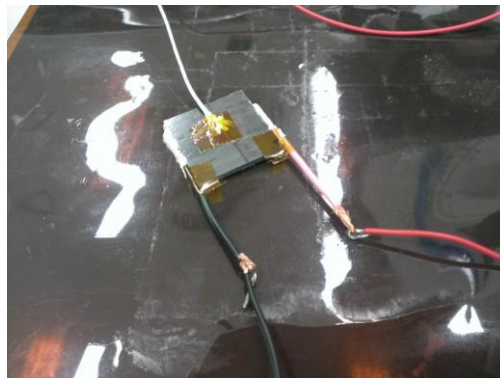
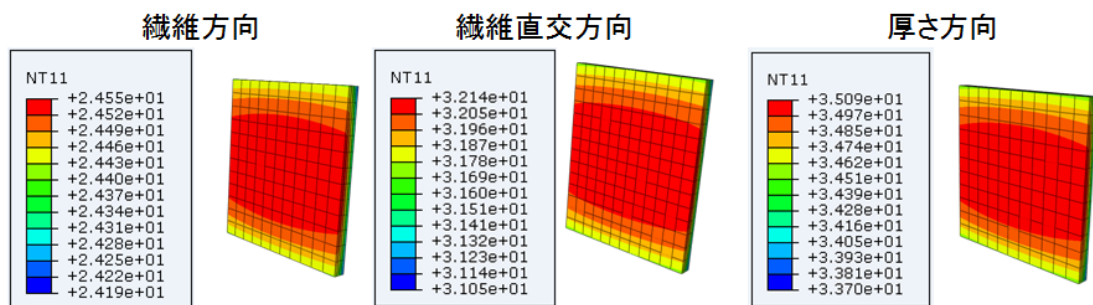


Fig.4-9 導電率測定に用いた試験片の加熱実験方法

## 温度分布



## 電位分布

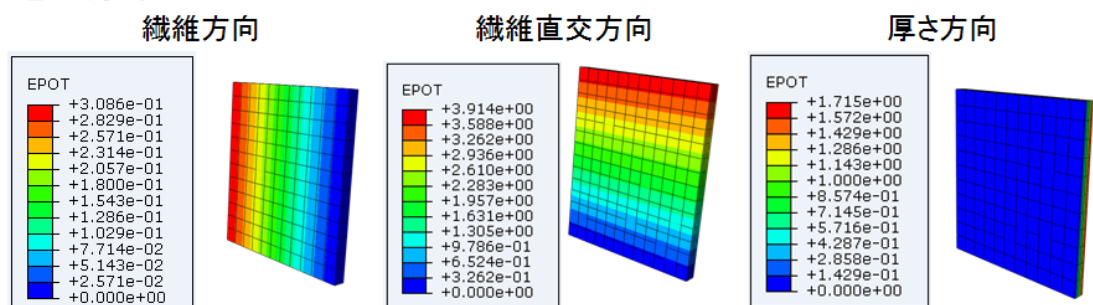


Fig.4-10 加熱シミュレーションにおける温度分布と電位分布

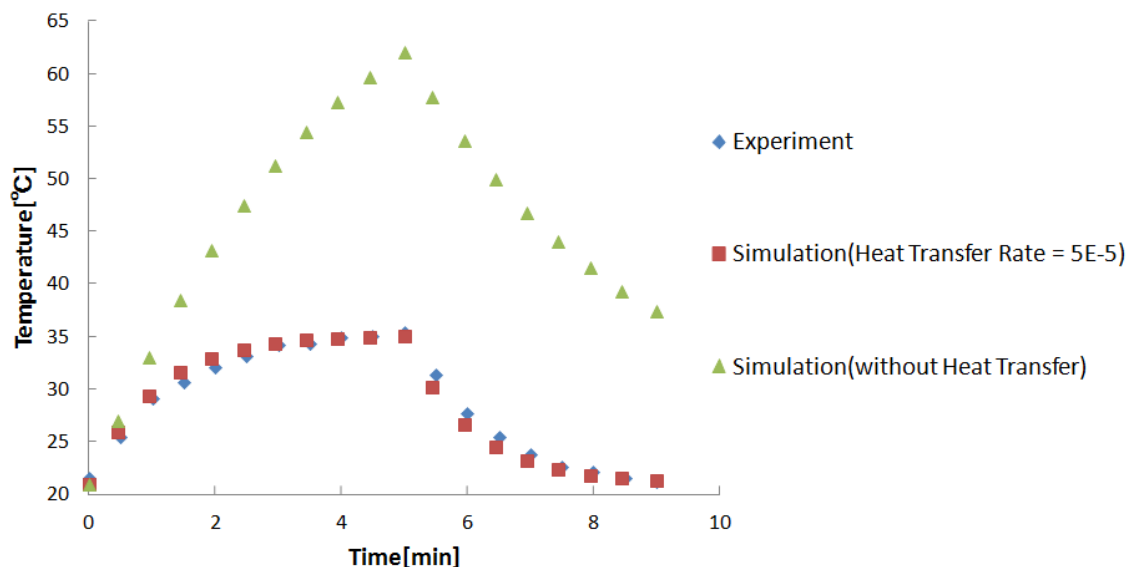


Fig.4-11 実験及び解析結果の一例

#### 4.3.4. 電極への熱伝導

Fig.4-12に示すように、熱伝導率が非常に高く、非常に薄い銅箔電極からは、試験片内の熱が逃げていくことが考えられる。また導線への熱伝導も生じ、CFRTPの温度は低くなる。そこで、Fig.4-13に示すようなCFRPと電極のモデルを作成し、境界条件で温度を10分間与えた場合、CFRTPの端で温度がどれくらい低下するのかをシミュレーションした。またFig.4-14に示すような、電極に導線をハンダ付けしてある状態を模擬したモデルも作成した。電極への熱伝導を評価するための全モデルにおいて、CFRTP部は下面への熱伝達を考慮している。電極と導線を含むモデル、電極のみのモデル、電極を切り落とし熱伝達で近似したモデルにおける温度分布をFig.4-15に示す。解析の温度分布からも、CFRTPから電極や導線に熱が伝導している様子が分かる。またFig.4-16には各投入温度に対して計測点での温度が何度になるかを示した。銅箔電極を切り落としたモデルと比較して、銅箔電極のみのモデルは投入温度300°Cの際に3%程度低くなる。また、銅箔電極に導線が付いている場合、投入温度300°Cの際には6.5%程度低くなっており、この影響を下面への熱伝達を近似した時と同様に、電極と導線を含むモデルでのシミュレーション結果と一致するように、熱伝達係数を決定した。その結果、熱伝達係数を5[mW/mm<sup>2</sup>/K]とした際に結果がよく一致することから、DCB試験片モデルにおいてもこの熱伝達係数を適用する。

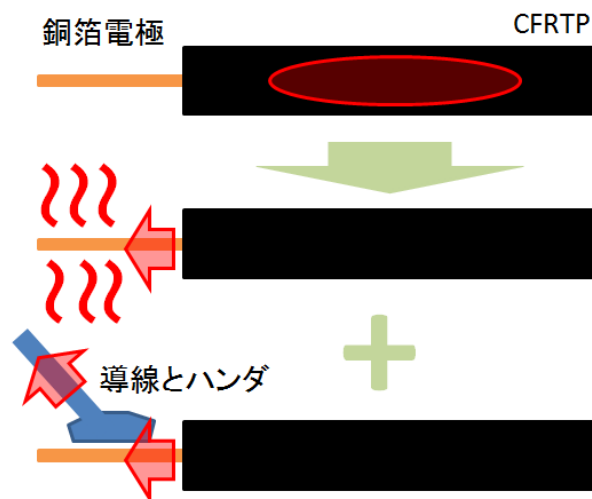


Fig.4-12 銅箔電極と導線への熱伝導

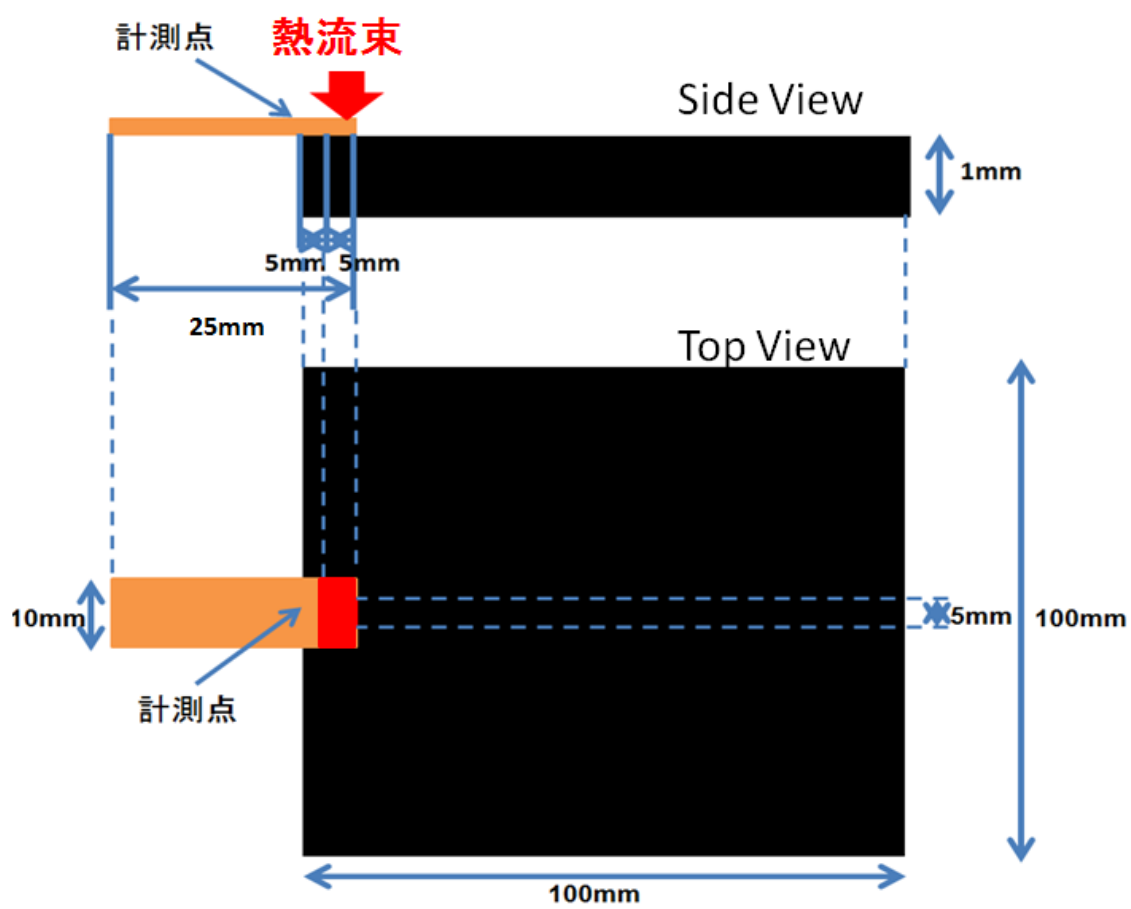


Fig.4-13 電極部の解析モデル

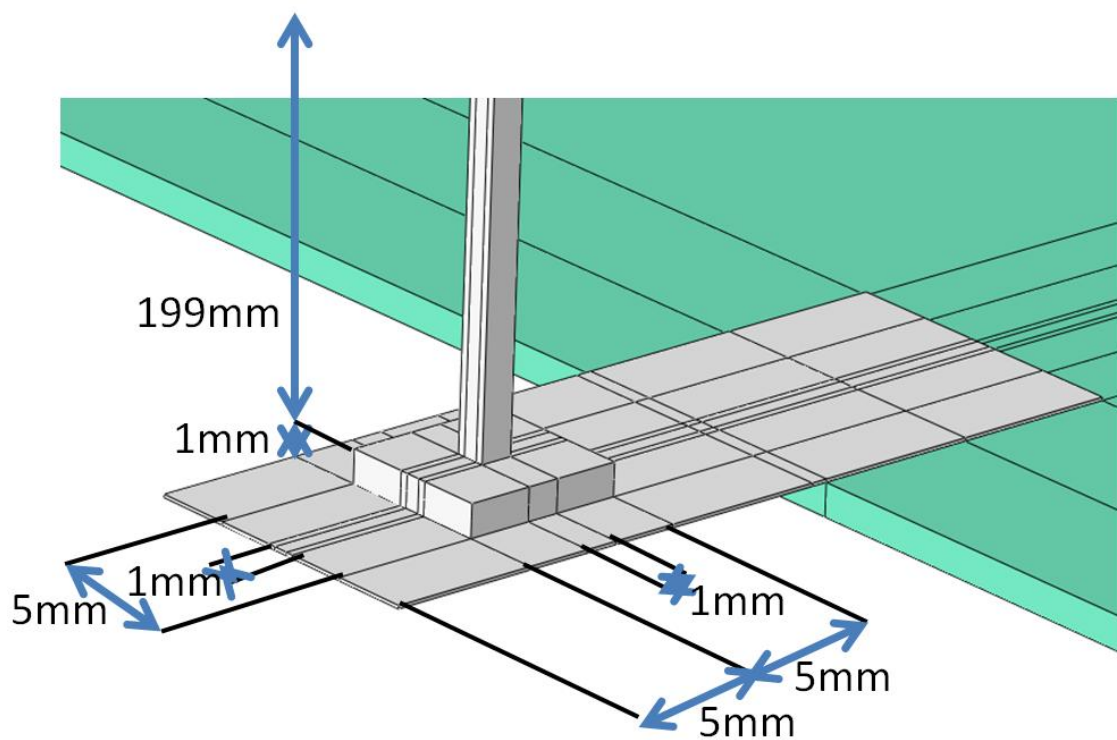
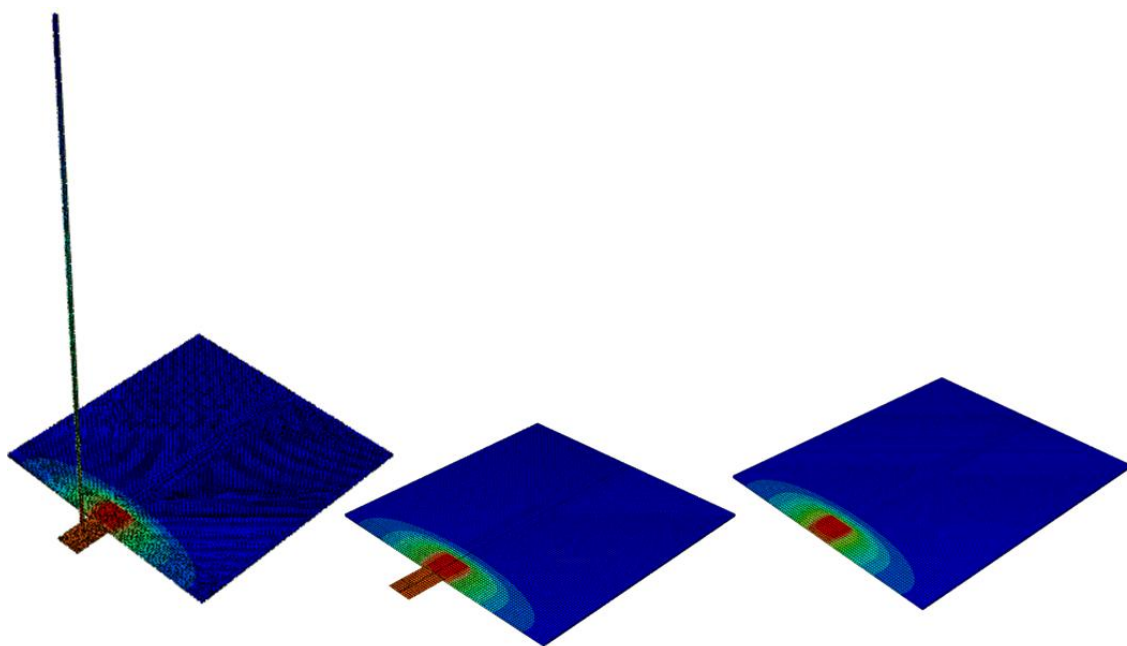


Fig.4-14 電極にハンダ付した導線の解析モデル



(a) 電極と導線を含むモデル (b) 電極のみのモデル (c) 熱伝達で近似したモデル

Fig.4-15 各解析モデルにおける温度分布

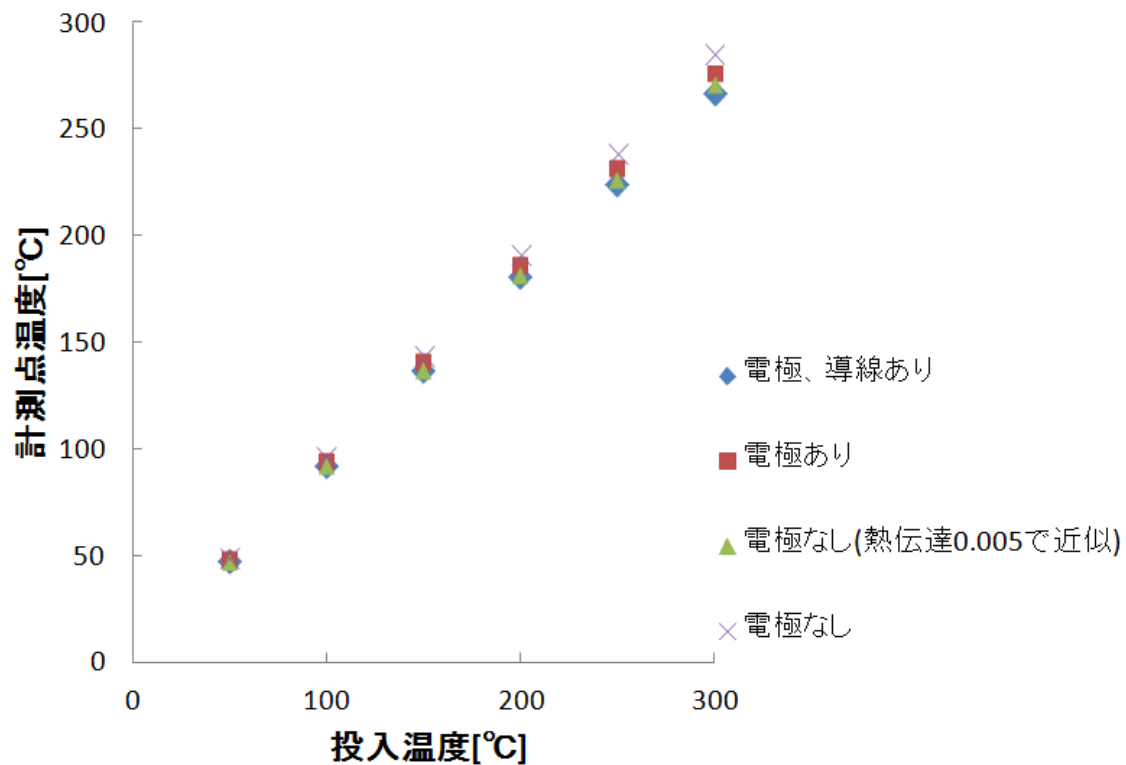


Fig.4-16 電極への熱伝導のシミュレーション結果

#### 4.3.5. DCB試験片モデル

上述した物性値、下面への熱伝達、電極への熱伝導を考慮し、作成した $[0/F0/0]_s$ のDCB試験片モデルをFig.4-17に示す。下面への熱伝達係数を算出する際に用いたモデル同様に、正極側面に均一分布の表面電流を加え、陰極側面を境界条件で電位0Vを定義することで電流を投入した。また、Fig.4-18(a)に示すように、実際に試験片を成形すると、成形時にポリイミドフィルムに空けた穴から樹脂が漏れ、それに釣られ電極部付近の繊維のうねりが生じる。CFRTPの物性は繊維方向に大きく依存するため、このうねりによる繊維方向の変化は無視できない。そこで、Fig.4-18(b)に桃色で示す領域の繊維方向を円筒座標系で定義し、繊維のうねりを模擬した。メッシュは面内には1mm間隔で、面外には層の枚数分切ることとする。



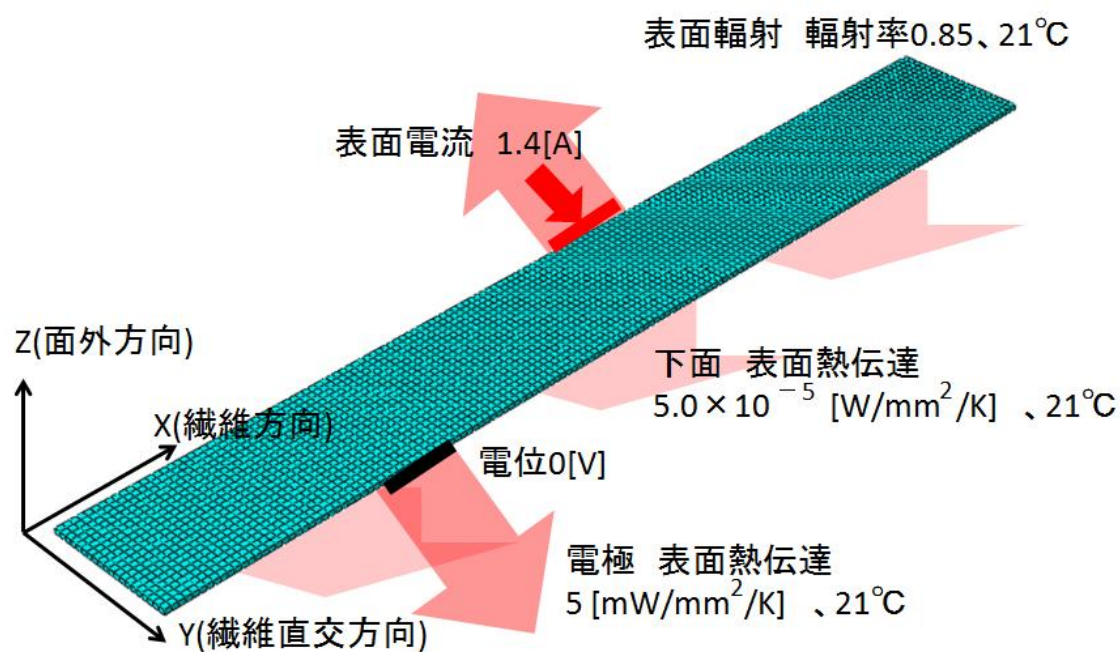


Fig.4-17 [0/F0/0]<sub>s</sub>のDCB試験片モデル

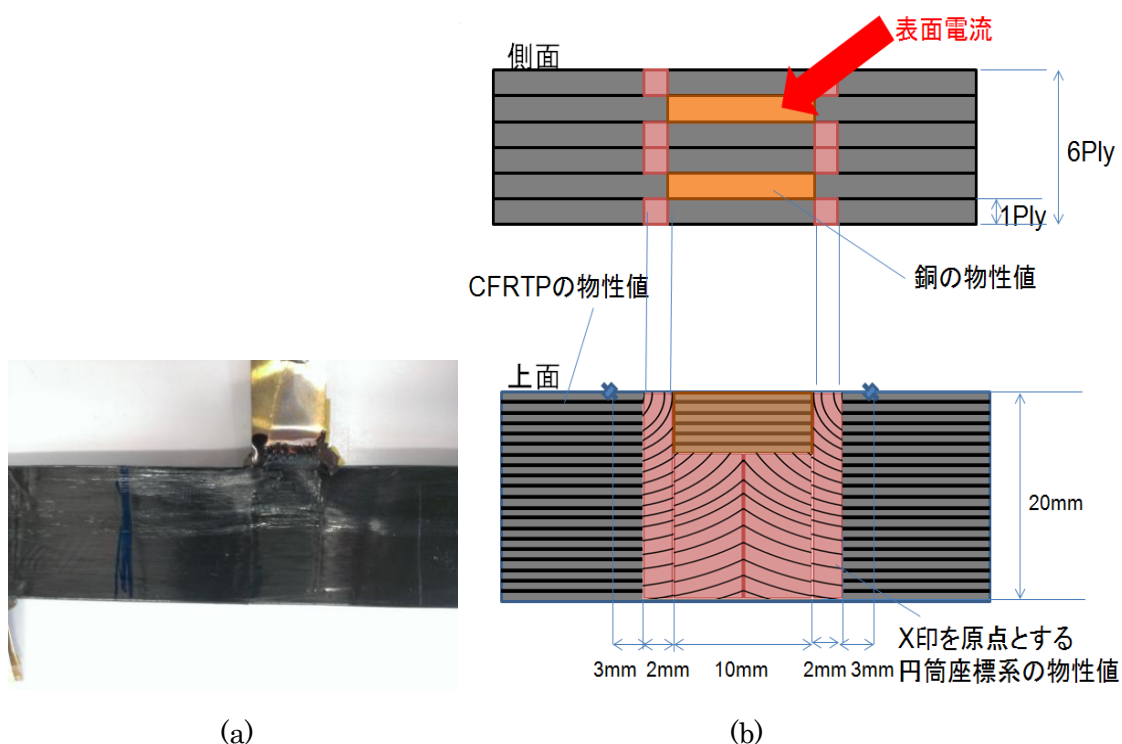
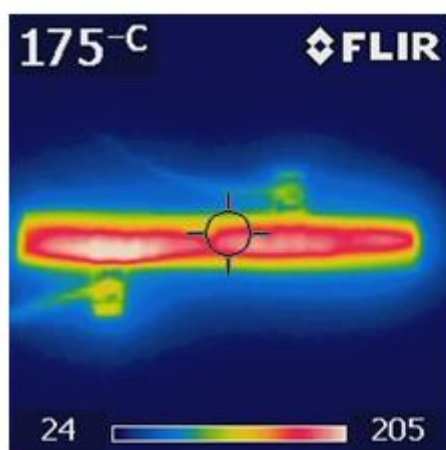


Fig.4-18 電極部における繊維うねりとうねりのモデル化

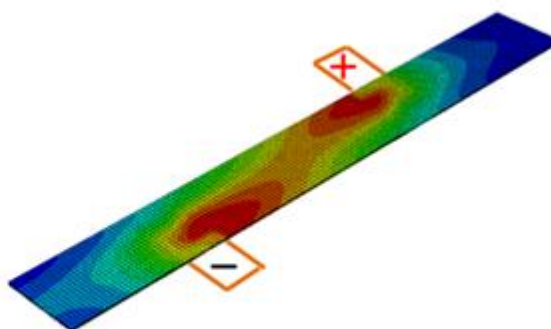


#### 4.4. 加熱実験結果と解析結果

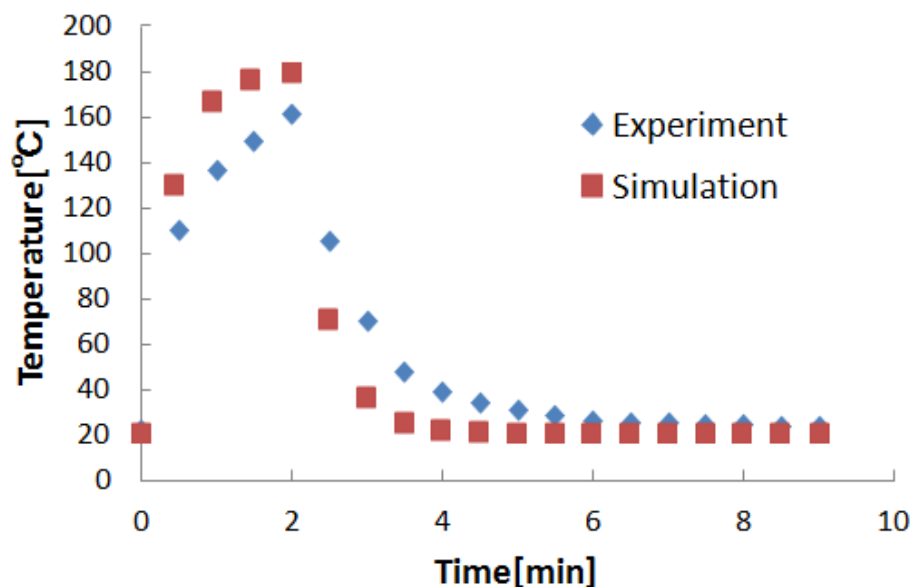
4.2節で述べた加熱実験と、それを4.3節で述べた解析モデルを用いて計算した解析結果をFig.4-19～Fig.4-22に示す。Fig.4-19、Fig.4-20、Fig.4-22の(a)は加熱実験におけるサーモグラフィ、(b)は解析における温度分布、(c)は電極間中央部の熱電対での計測温度と、解析での温度変化を示している。Fig.4-19は、積層構成が[0/F0/0]<sub>s</sub>、電極配置がX=60mm、Y=14mmの試験片①の結果である。試験片①には、1.4A(17.55V)の電流を2分間投入した。



(a)加熱実験におけるサーモグラフィ



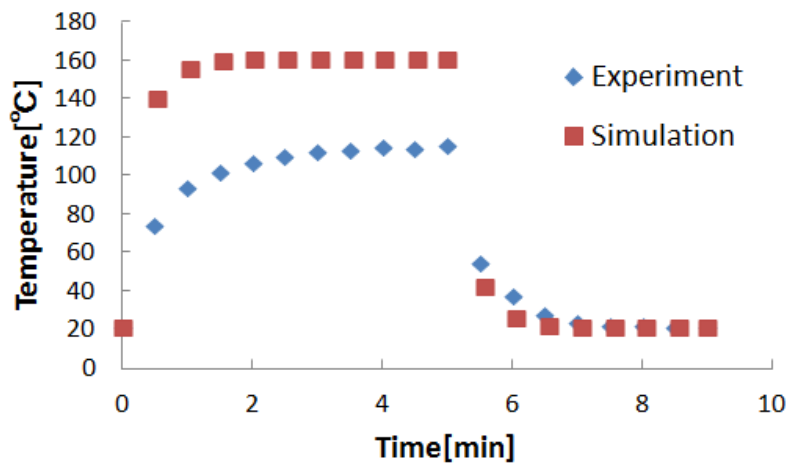
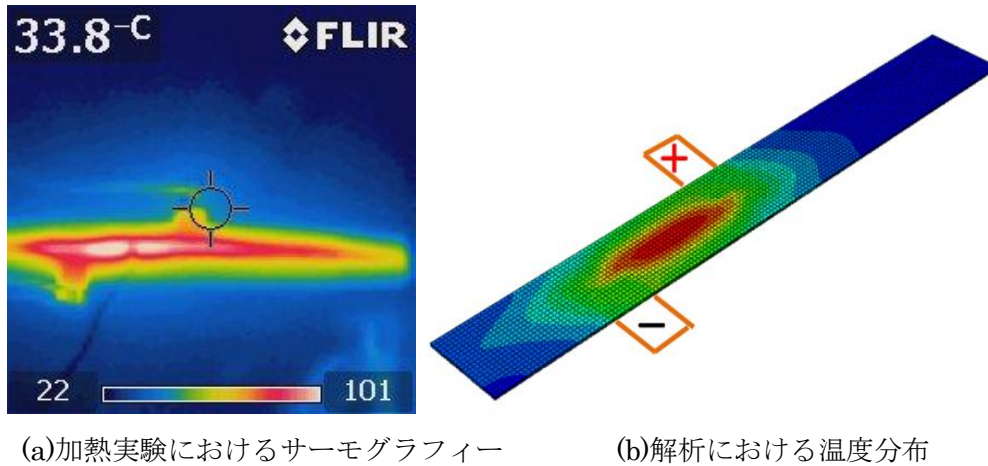
(b)解析における温度分布



(c) 電極間中央部の熱電対での計測温度及び解析での温度変化

Fig.4-19 試験片①の加熱実験結果及び解析結果

Fig.4-20は、積層構成が[0/F0/O<sub>3</sub>]、電極配置がX=30mm、Y=8mmの試験片②の結果である。試験片②には、1.2A(4.16V)の電流を5分間投入した。



(c) 電極間中央部の熱電対での計測温度及び解析での温度変化

Fig.4-20 試験片②の加熱実験結果及び解析結果

試験片③及び④は、積層構成が[0/F0/O]<sub>s</sub>、電極配置がX=40mm、Y=14mmである。Fig.4-21に示すように、3層目と4層目の間に90mm剥離があり、厚さ25μmのポリイミドフィルムを60mmの位置まで挟んだまま、1.4A(22.55V及び24.70V)の電流を2分間投入し加熱した。試験片③は熱電対を貼り付け温度測定を行ったが、試験片④には熱電対を貼り付けず、温度分布及び溶融の様子のみを観察した。Fig.4-22に示すサーモグラフィーや解析結果から局所加熱ができていることが分かる他、Fig.4-23に示す実際の電流投入後の写真からも、電極間のみが溶融し、局所加熱できていることが分かる。また、実際に無加圧で剥離が融着できていることが確認できた。

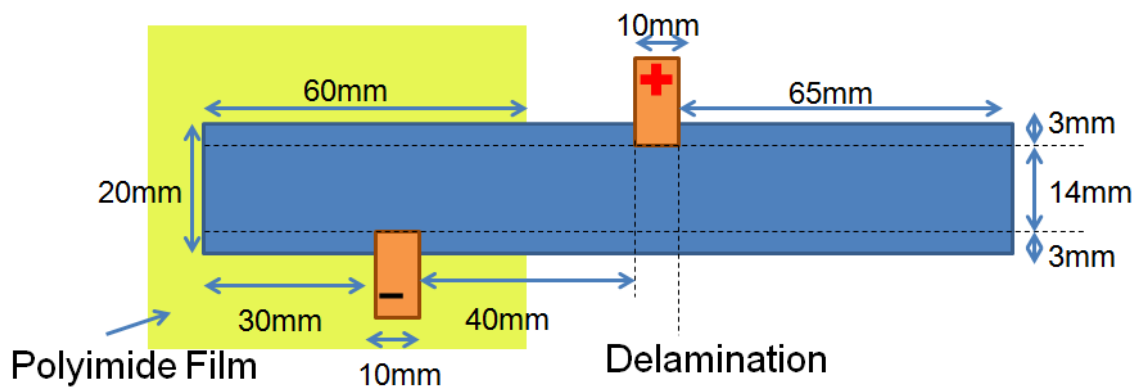
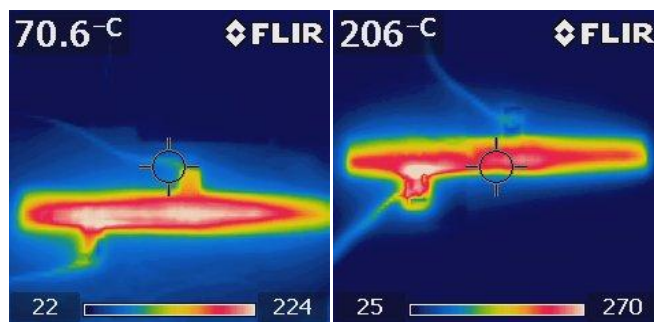
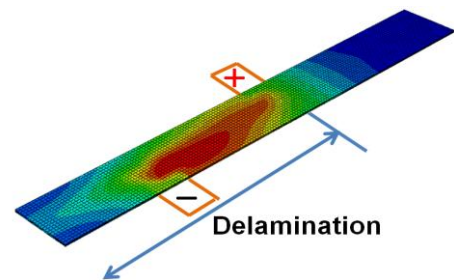


Fig.4-21 試験片④及び⑤の試験片寸法

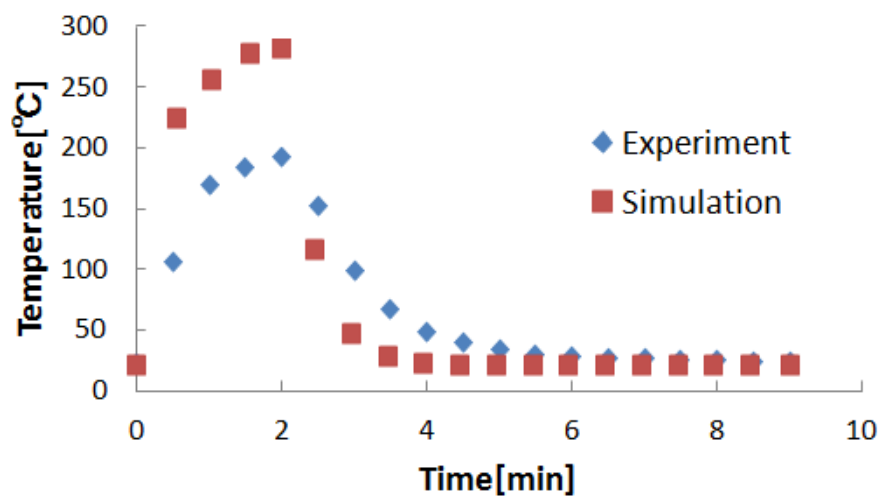


試験片④(熱電対なし)      試験片⑤(熱電対あり)

(a)加熱実験におけるサーモグラフィー



(b)解析における温度分布



(c) 電極間中央部の熱電対での計測温度及び解析での温度変化

Fig.4-22 試験片④及び⑤の加熱実験結果及び解析結果

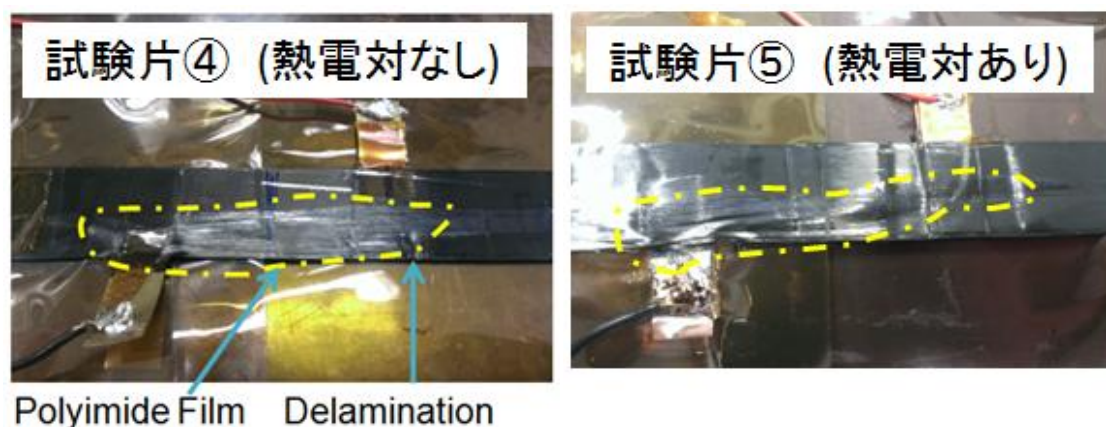


Fig.4-23 試験片④及び⑤の加熱実験後の溶融の様子

以上より、加熱実験と解析結果は、温度分布、時間履歴ともに概ね良い対応がとれていることが分かる。実験結果の方が解析結果よりも低くなっている原因としては熱電対での測定値が正確ではないことが挙げられる。熱電対による局所的に発熱する発熱体の表面温度の測定は、非常に大きな測定誤差を生む可能性があることが解析からも分かっている(付録参照)。薄板において、電極配置や電流の投入条件を変えることで、発熱量や温度分布を変化させられることが実験及び解析から明らかとなり、面内の局所加熱ができることを実証できた。さらに、条件によっては剥離の融着を無加圧でできることも確認できた。

## 4.5. 解析モデルにおける数値実験

### 4.5.1. 電極配置が抵抗値にもたらす影響

解析モデルを基に、電極配置が抵抗値にもたらす影響を検証した。まずFig.4-24に示すように、積層構成 $[0/F0/0]_s$ 、 $Y=14\text{mm}$ 、3層目と4層目の間に正極の位置まで剥離がある試験片に対し、 $X$ の値を変化させた際の抵抗値に及ぼす影響をシミュレーションした。1.4A、3.0A、5.0Aの電流を投入した際に、 $X$ を変化させた場合における電圧をFig.4-25に示す。

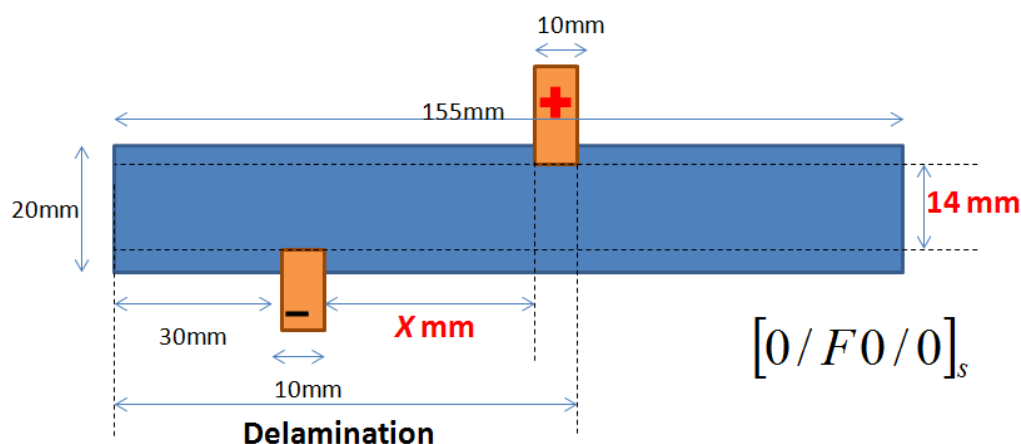


Fig.4-24  $X$ の影響をシミュレーションするためのモデル

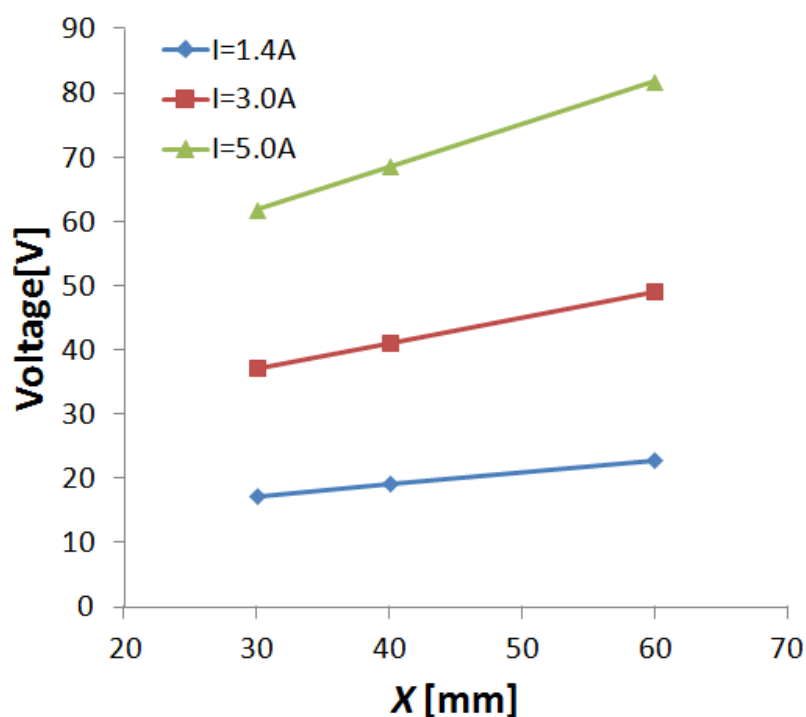


Fig.4-25  $X$ が電圧に与える影響

次にFig.4-26に示すように、積層構成[0/F0/0<sub>3</sub>]、 $X=30\text{mm}$ 、剥離のない試験片に対し、 $Y$ の値を変化させた際の抵抗値に及ぼす影響をシミュレーションした。1.4A、3.0A、5.0Aの電流を投入した際に、 $Y$ を変化させた場合における電圧をFig.4-27に示す。

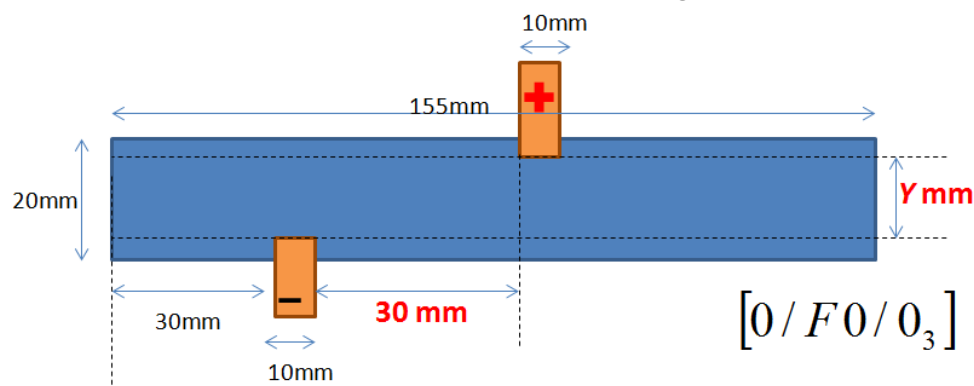


Fig.4-26  $Y$ の影響をシミュレーションするためのモデル

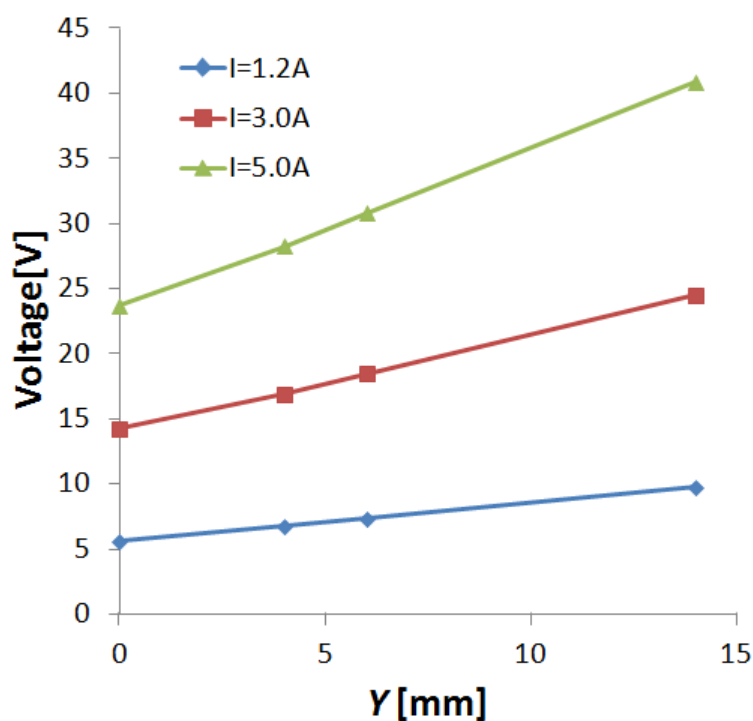


Fig.4-27  $Y$ が電圧に与える影響

$X$ を変化させた場合においても、 $Y$ を変化させた場合においても、電極間距離を大きくするほど抵抗値は大きくなる。また、導電率の小さい繊維直交方向に電極を移動させた場合の方が、全体の抵抗値に大きな影響を及ぼす。電極配置による影響は、繊維方向、繊維直交方向共に、距離に対して線形的に抵抗値に影響を及ぼす。

#### 4.5.2. 厚さ方向の温度分布

Fig.4-28に示すように、面内だけではなく、板厚方向にも温度分布を生じさせられるかどうかを数値実験した。板厚方向に温度分布を生じさせることで、試験片表面を溶かすことなく、剥離面のみを熔融させることができる可能性を検証した。

本解析で行うシミュレーションの方法をFig.4-29に示す。積層構成 $[0/F0/0_N]$ ( $N$ は定数)、 $X=40\text{mm}$ 、 $Y=14\text{mm}$ 、試験片中央に長さ90mmの剥離のある試験片(試験片の上面図はFig.4-17と同じ)に対し、試験片板厚が与える温度分布や抵抗値への影響をシミュレーションする。剥離及び機能層を含む中央の4層は固定し、上下の層の枚数 $N$ を変化させることで、試験片全体の板厚を変化させる。最も温度が上昇する負極部における剥離面の温度を $T_D$ 、同じ面内座標位置における上面の温度を $T_U$ 、下面の温度を $T_L$ とする。

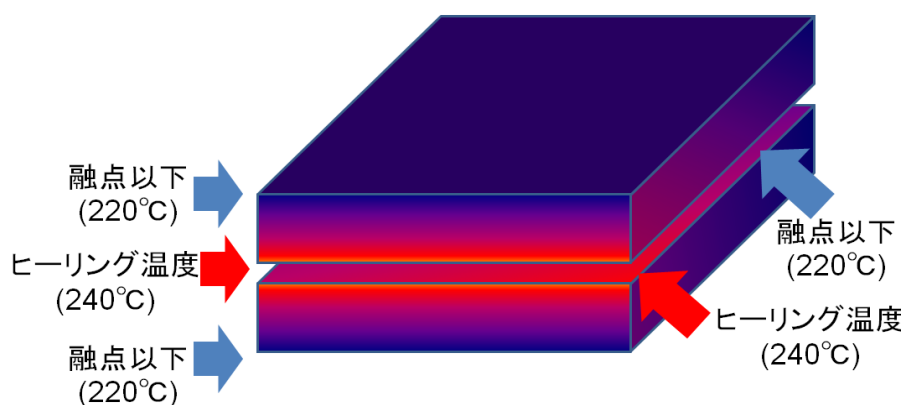


Fig.4-28 面内及び面外の温度分布

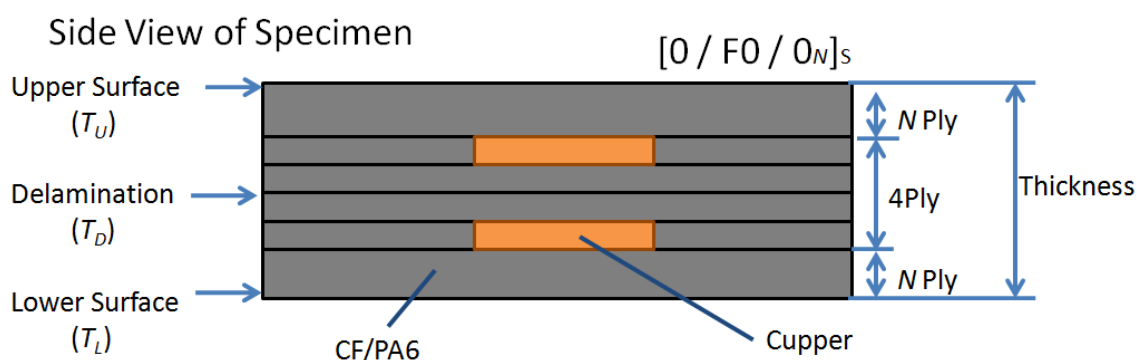


Fig.4-29 面外の温度分布の評価モデル

$T_D$ が $250 \pm 10^\circ\text{C}$ に達した際の $T_U$ との温度差 $T_D - T_U$ に、板厚が及ぼす影響をFig.4-30に示す。板厚が大きくなるほど、あるいは大きな電流量を投入し短時間で加熱するほど、大きな温度差を生じさせることができることが分かる。そして条件によっては、 $30^\circ\text{C}$ 以上の温度差を生じさせることができることが分かる。下面は熱伝達を考慮しているため、 $T_U$ よりも $T_L$ の方が低温になる。よって、上下面を熔融させずに、剥離面をヒーリング可能な温度に到達させることができることを解析上で示すことができた。

Fig.4-31には板厚が電圧に及ぼす影響を示す。電極の配置を変化させた場合と異なり、板厚が大きくなると急激に抵抗値が減少する。よって、抵抗値をデザインするためには電極の配置よりも、板厚の方を主に考慮しなければならないことが分かる。板厚が $1.3\text{mm}$ より大きくなると、電圧が小さくなりすぎてしまい、 $1.4\text{A}$ の電流を投入しても試験片の温度を $250 \pm 10^\circ\text{C}$ 以上にすることができなくなった。

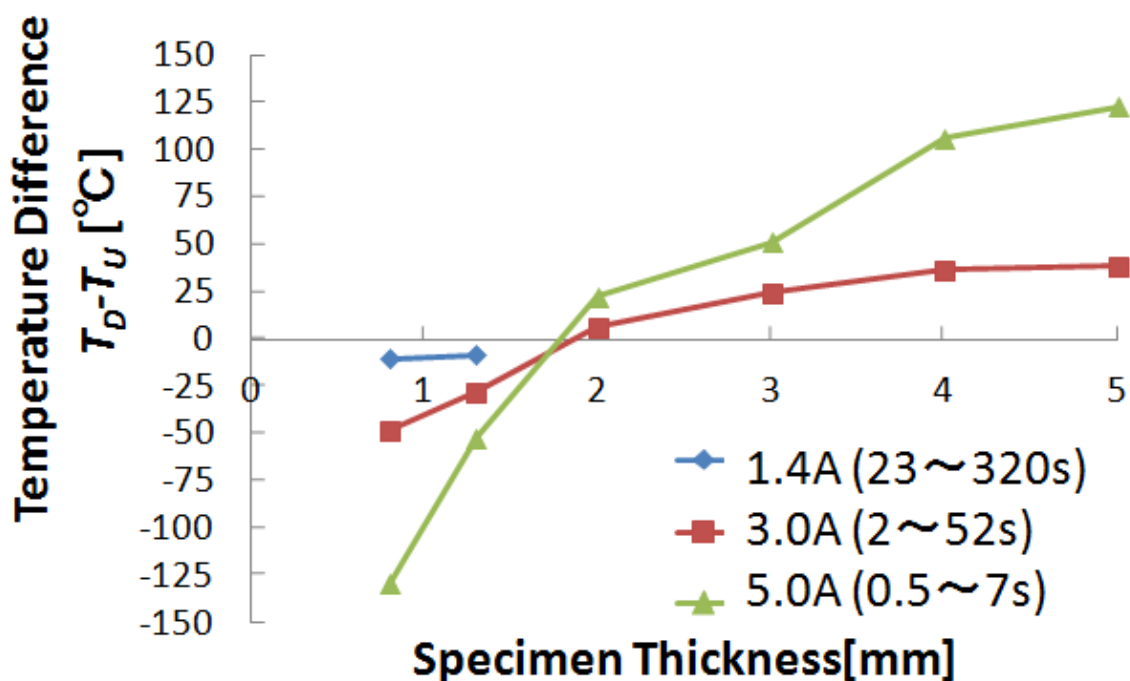


Fig.4-30 板厚が上面と剥離面の温度差にもたらす影響



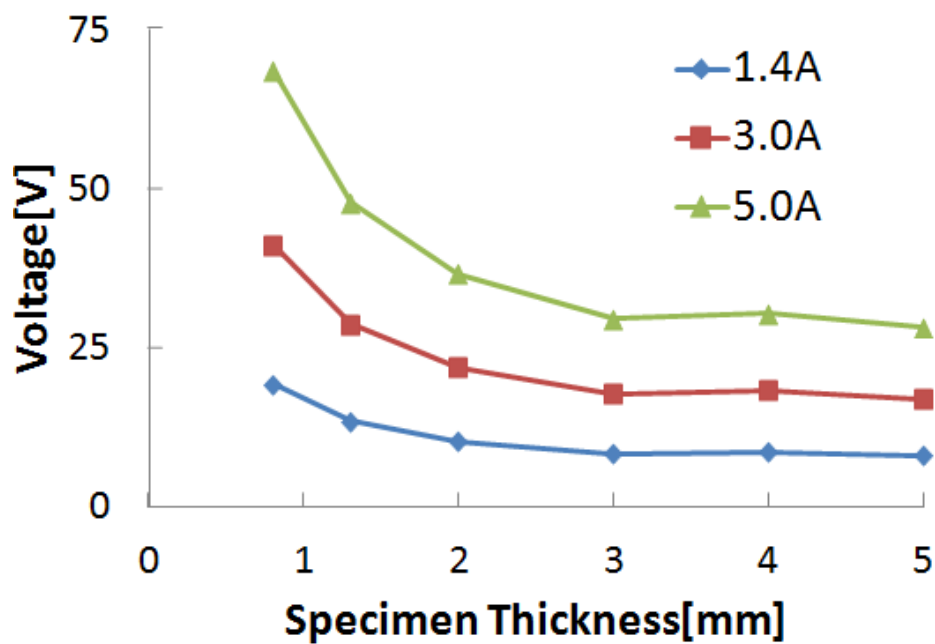


Fig.4-31 板厚が電圧にもたらす影響

#### 4.6. 総括

本章では、ジュール熱によって面内及び面外に対し局所的に、ヒーリングに必要な温度を供給することが可能であるか実験と解析から検証を行った。電極の配置や試験片寸法、積層構成、電流の投入条件を変えることで、温度分布や到達温度を変化させることが分かった。一方、電源の投入可能な最大電流量(1.4A)では、試験片を分厚くすると抵抗値が落ちてしまい、必要な電力が得られないという結果となった。板厚を大きくできなければ、厚さ方向の温度分布を生じさせられない他、DCB試験によるヒーリング効果の検証もできなくなってしまうため、抵抗値を落とさずに板厚を増加させられる工夫が必要である。

## 第 5 章. ジュール加熱で剥離面のみを溶融させた場合の修復率

本章では、電気を用いて面内及び面外に局所加熱を施した際の、剥離の融着の可能性を DCB 試験を用いて検証する。

### 5.1. 絶縁層

第 4 章で述べたように、板厚をある程度大きくできなければ、厚さ方向の温度分布を生じさせられない他、DCB 試験によるヒーリング効果の検証もできなくなってしまうため、抵抗値を落とさずに板厚を増加させられる工夫が必要である。そこで、Fig.5-1 に示すようなポリアミドフィルム(三菱樹脂製)とガラスファブリック(ユニチカ製、E 06E SK)を用いて厚さ方向の絶縁及び断熱を試みた。それぞれの層を樹脂層(R 層)とガラスファブリック層(GF 層)と称す。R 層と GF 層を機能層と剥離に対し、Fig.5-2 のように積層することによって、剥離面近傍の板厚の薄い領域のみに電流を流すことができ、剥離面近傍のみの温度を上昇させることができる。以後、[R/GF/R/GF/R/GF/R]の層を[GFR]と略す。



Resin(R)(PA6)      Glass Fabrics(GF)(E 06E SK)

Fig.5-1 樹脂層とガラスファブリック層

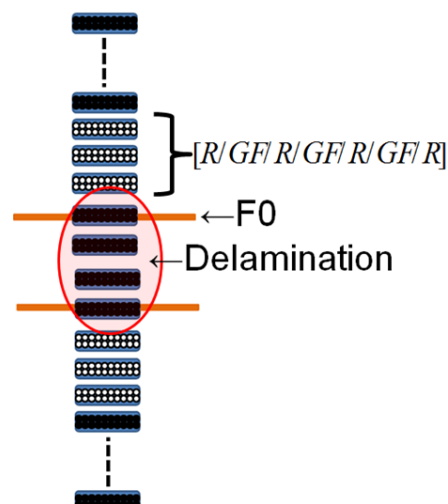


Fig.5-2 絶縁層の積層

## 5.2. 絶縁効果の検証実験

絶縁層によって絶縁効果が得られるのか実験した。絶縁層によって電気が流れない層の積層構成を変えた複数の試験片に対し、電極配置を同じ条件にしてジュール加熱を行った。樹脂層を埋め込むことで、樹脂の量が多くなり、高い圧力をかけての成形が不可能となるため、試験片の成形圧力は 0.5MPa で成形した。成形温度、成形時間、冷却速度は全て、第 3 章及び第 4 章で用いた試験片同様、240℃、5 分、-2℃/min である。試験片寸法はプリプレグの状態では 20mm×155mm である。ジュール加熱を行った際の抵抗値(電圧 / 投入電流量)を算出し、絶縁できているかどうかを検証した。

Table 5-1 に実験に用いた試験片の積層構成、成形圧力、電極配置、投入電流量、電圧、抵抗値を示す。樹脂層のみで絶縁した[0/F0/0/R<sub>2</sub>/0<sub>2</sub>]と[0/F0/0/R<sub>2</sub>/90<sub>2</sub>]は、[0/F0/0/R<sub>2</sub>/0<sub>2</sub>]に対して[0/F0/0/R<sub>2</sub>/90<sub>2</sub>]の抵抗値が非常に小さいことから、90° 層の影響を受けていると考えられる。よって、2 層の樹脂層のみでは絶縁ができていないことが分かる。一方、樹脂層と GF 層を用いた[0/F0/0/GFR/0]と[0/F0/0/GFR/90]の場合では、両者とも高い抵抗値を示しており、90° 層の影響を受けていないことが分かる。よって、GFR 層では絶縁ができていることを示すことができた。

Table 5-1. 絶縁効果の検証に用いた試験片

積層構成	成形圧力 [MPa]	X [mm]	Y [mm]	投入電流量 [A]	電圧 [V]	抵抗値 [Ω]
[0/F0/0] <sub>s</sub>	5	60	14	1.400	17.55	12.54
[0/F0/0/R <sub>2</sub> /0 <sub>2</sub> ]	0.5	40	14	1.339	17.56	13.11
[0/F0/0/R <sub>2</sub> /90 <sub>2</sub> ]	0.5	40	14	1.400	2.05	1.46
[0/F0/0/GFR/0]	0.5	40	14	1.250	35.17	28.14
[0/F0/0/GFR/90]	0.5	40	14	1.092	35.26	32.29

さらに、GFR 層によって厚さ方向に温度分布を生じさせることができるかどうかの検証を行った。積層構成[0/F0/GFR/0]<sub>13</sub>、電極配置 X=40mm、Y=14mm、成形圧力 0.5MPa の試験片に対し、1.4A(36.02V)を 2.5 分間投入した。Fig.5-3 に示すように、機能層側を試験片下面、電流が通らない層側を試験片上面とする。電流投入後の試験片上下面の溶融の様子を Fig.5-4 に示す。Fig.5-4 から明らかなように、ジュール加熱後、試験片下面の方が黄色の点線で囲まれた溶融面積が大きいことが分かる。つまり、下面の方が高温になっており、厚さ方向に温度分布を生じさせることができていたことが示された。

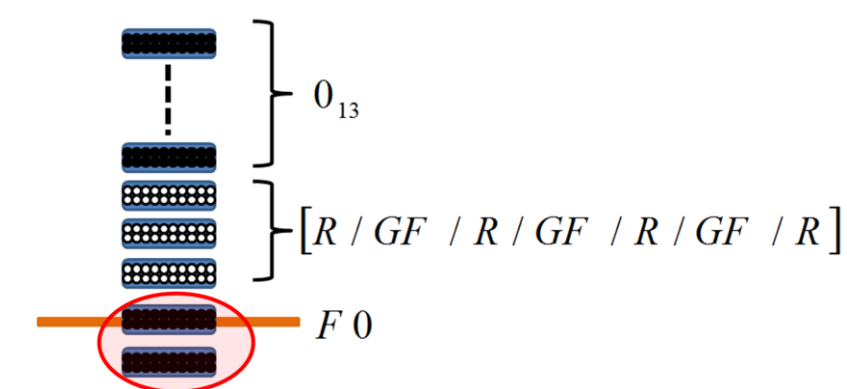


Fig.5-3 [0/F0/GFR/0<sub>13</sub>]のジュール加熱

(a)試験片上面



(b)試験片下面

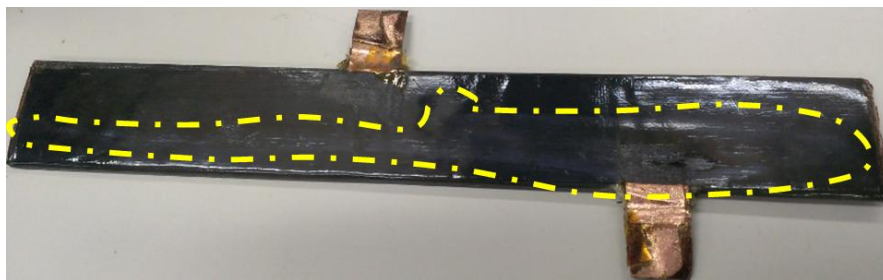


Fig.5-4 ジュール加熱後の試験片

### 5.3. ヒーリング効果の検証方法

ヒーリング効果を検証するために、第3章と同様に、DCB試験からエネルギー的なヒーリング率 $\eta$ (式(3-2))を算出し評価する。また、超音波探傷及びX線CTを用いて、剥離面の様子を観察する。X線CTには高分解能マイクロCTスキャナ(東芝コントロールシステム製、TOSCANER-32300 $\mu$ FPD)及びダブルオブリークソフトウェアを用いて行った。電極部はX線が光って見えなくなるため、電極間を長手方向に1024分割し、試験片断面を撮影した。超音波探傷及びX線CTは、DCB試験後とヒーリング後に行った。DCB試験の治具は、ヒーリング時も、非破壊検査時も常に取り付けたままにしておく。

ヒーリング時は、Fig.5-6に示すように試験片上面で最も加熱されるであろう負極電極部の温度を熱電対で、全体の温度分布をサーモカメラで観察した。サーモカメラが示す最高温度は、電極の温度であり、Fig.5-2からも分かるように、電極は剥離面の温度と近い温度になっている。つまり、剥離面は少なくともサーモカメラの示す最高温度以上の温度になっており、間接的に剥離面の温度を測定している。熱電対で計測している上面の温度が200℃以上にならない範囲の時間で、1.4Aの電流を投入した。



Fig.5-5 マイクロフォーカスX線CT

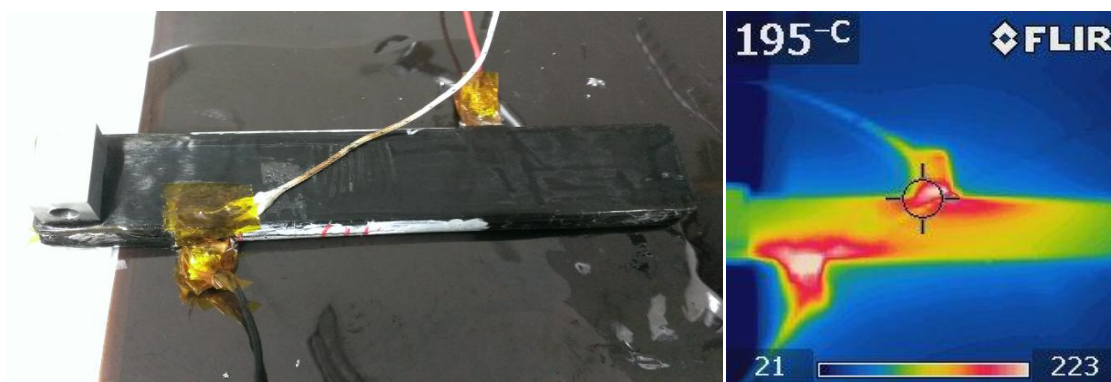


Fig.5-6 ヒーリング時の温度計測

電気でのヒーリングを試みた試験片の積層構成をTable 5-2. に示す。試験片は全て、成形温度240℃、成形圧力0.5MPa、成形時間5分、冷却速度-2℃/minで成形した。試験片寸法はプリプレグの状態で20mm×155mmに統一してある。全ての試験片において、Fig.5-7に示すように負極電極部の位置まで厚さ25μmのポリイミドフィルムを噛ませて成形した。

積層構成[0/F0/GFR/0<sub>32</sub>]<sub>s</sub>、電極配置X=60mm、Y=14mmの試験片のみ、2回目及び3回目のヒーリングも行い、計4回のDCB試験を実施した。また、[0/F0/GFR/0<sub>32</sub>]<sub>s</sub>は板厚が他の試験片と比べて大きいので、負加速度を2mm/minでDCB試験を行った(他の試験片は第3章同様に5mm/min)。

Table 5-2. ジュール熱を用いたヒーリングを施す試験片

積層構成	X[mm]	Y[mm]	最大剥離進展長[mm]
[0/F0/GFR/0 <sub>13</sub> ] <sub>s</sub>	40	14	100
[0/F0/GFR/0 <sub>13</sub> ] <sub>s</sub>	60	14	100
[0/F90/GFR/0 <sub>13</sub> ] <sub>s</sub>	60	14	100
[0/F0/GFR/0 <sub>32</sub> ] <sub>s</sub>	60	14	75

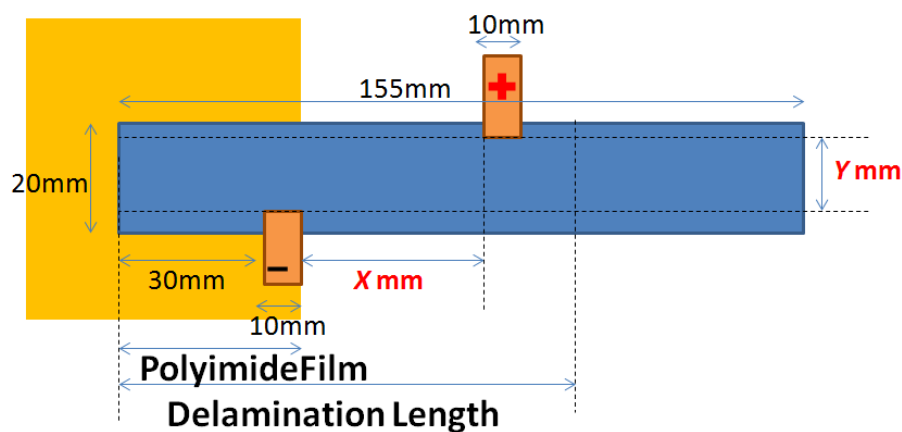


Fig.5-7 ジュール熱を用いたヒーリングを施す試験片寸法

#### 5.4.積層構成とヒーリング率

各試験片の健全状態の破壊靱性値、ヒーリング後の破壊靱性値、ヒーリング率をTable 5-3.にまとめる。健全状態の破壊靱性値が第3章の試験片における破壊靱性値よりも高いのは、大きな試験片から切り出すのではなく、一本一本成形したため、Fig.5-8に示すように、側面に樹脂リッチ部ができているためであると考える。

Table 5-3. ジュール熱でのヒーリング率

積層構成	$G_{I, Virgin}$ [kJ/m <sup>2</sup> ]	$G_{I, Healed, C}$ [kJ/m <sup>2</sup> ]	$G_{I, Healed, D}$ [kJ/m <sup>2</sup> ]	$\eta^C$ [%]	$\eta^D$ [%]	$\eta_{ave}$ [%]
[0/F0/GFR/0 <sub>13</sub> ] <sub>s</sub>	1.41	0.00	—	0.00	—	—
[0/F0/GFR/0 <sub>13</sub> ] <sub>s</sub>	1.40	0.001	1.03	0.09	79.96	36.87
[0/F90/GFR/0 <sub>13</sub> ] <sub>s</sub>	1.33	0.00	—	0.00	—	—
[0/F0/GFR/0 <sub>32</sub> ] <sub>s</sub>	1.37	0.04	1.01	2.98	74.56	37.46
		0.32	0.98	23.31	72.19	59.44
		0.19	1.18	14.01	86.31	58.28

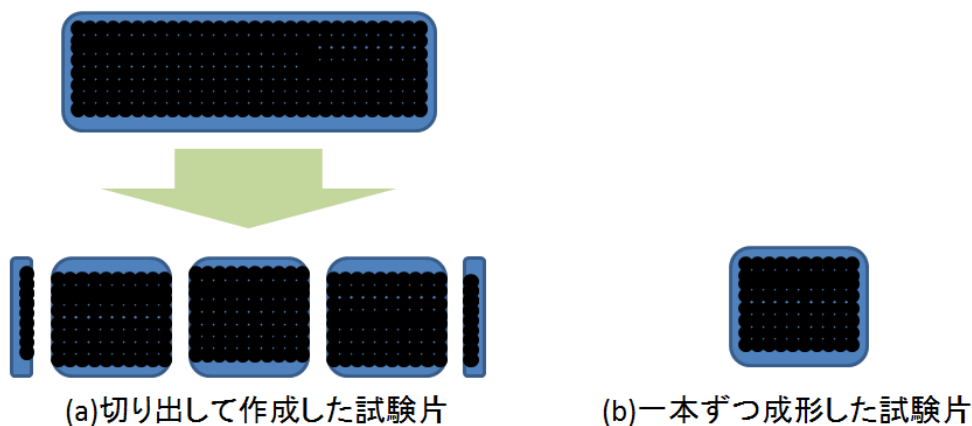
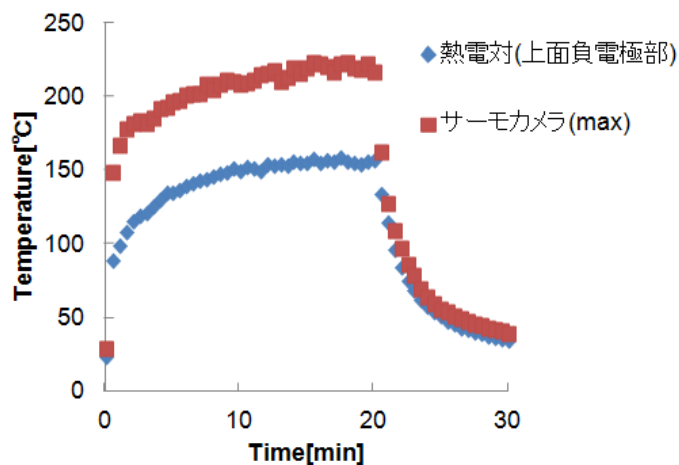


Fig.5-8 大きな試験片から切り出した試験片と一本ずつ成形した試験片

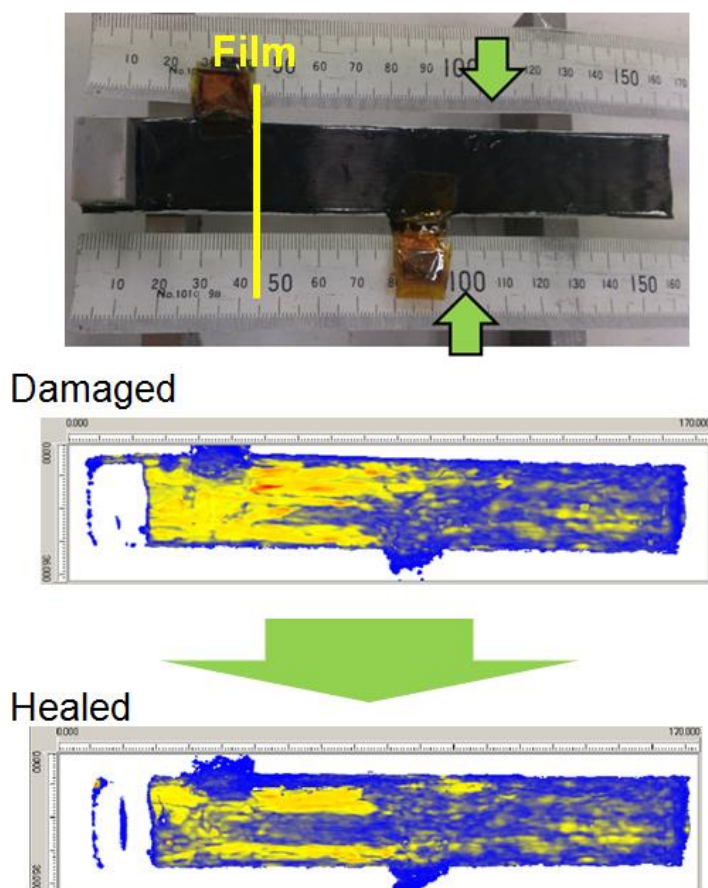
積層構成[0/F0/GFR/0<sub>13</sub>]<sub>s</sub>、電極配置X=40mm、Y=14mmの試験片の試験結果をFig.5-9及びFig.5-10に示す。本試験片に対しては、1.4A(25.20V)の電流を20分間投入して、ヒーリングを試みた。Fig.5-9(a)はヒーリング時における温度履歴、(b)はヒーリング後の試験片及びヒーリング前後の超音波探傷結果、Fig.5-10は健全材とヒーリング後のDCB試験結果を示している。Fig.5-9(b)の写真の矢印は、外から見た剥離の先端を指している。超音波探傷結果では、赤や黄色で示す剥離部の面積が減少しているように見える。しかし、DCB試験結果を見ると全く回復していないことが分かる。これはFig.5-11に示すように、熔融した樹脂が剥



離面に垂れ、剥離の幅は小さくなっているが、完全に埋まり融着できていないためであると考えられる。



(a) ヒーリング時の温度履歴



(b) ヒーリング後の試験片及びヒーリング前後の超音波探傷結果

Fig.5-9 積層構成 $[0/F0/GFR/0_{13}]_S$ 、電極配置 $X=40\text{mm}$ 、 $Y=14\text{mm}$ の試験片のヒーリング



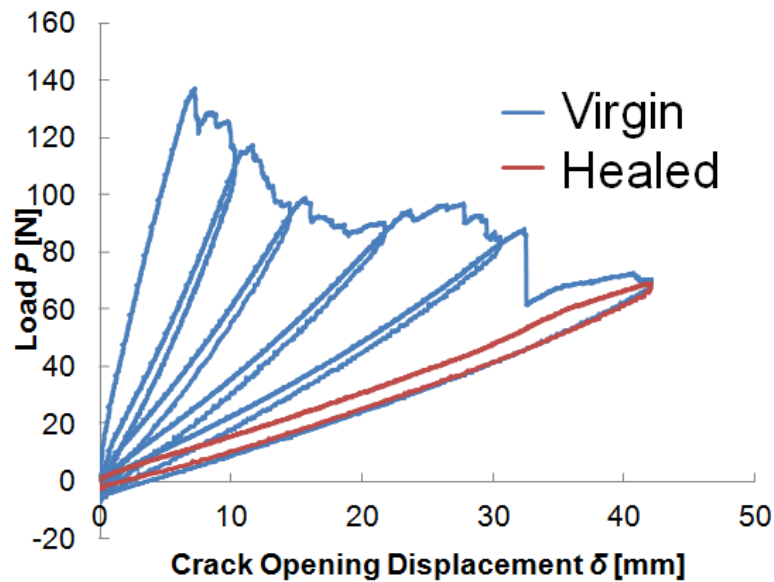


Fig.5-10 積層構成[0/F0/GFR/0<sub>13</sub>]<sub>s</sub>、電極配置X=40mm、Y=14mmの試験片のDCB試験

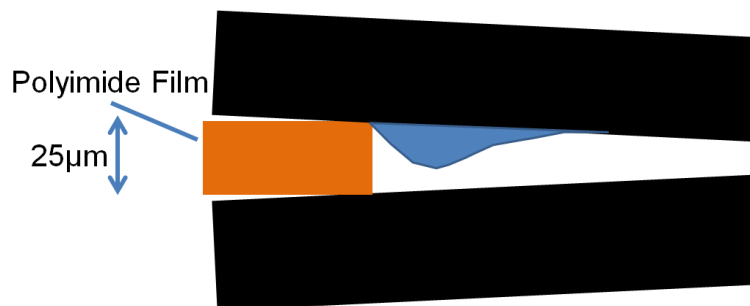
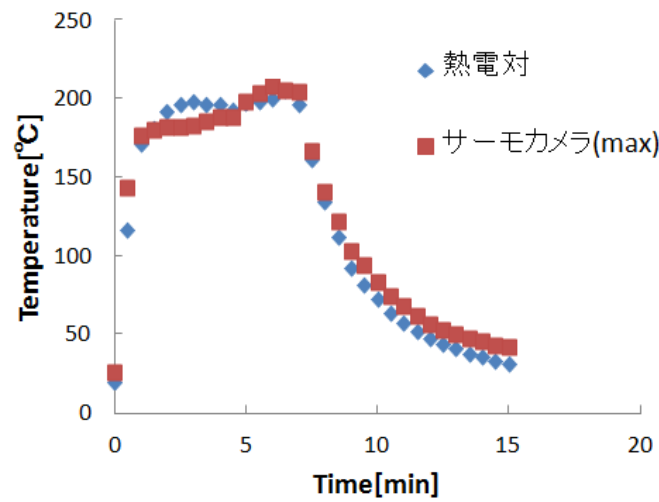
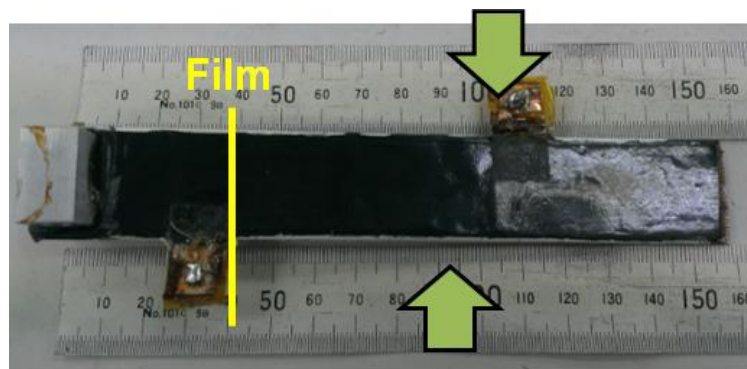


Fig.5-11 樹脂が剥離を満たしきれていない状態

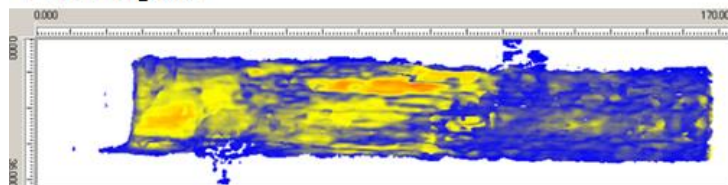
Fig.5-12及びFig.5-13には、[0/F0/GFR/0<sub>13</sub>]<sub>s</sub>、電極配置X=60mm、Y=14mmの試験片の試験結果を示している。この試験片は、電極の配置を離すことにより、抵抗値を上げ、剥離面がより溶融するようにした。ヒーリング時は、1.4A(29.60V)の電流を上面温度が200℃を超えるまでの7分間投入した。Fig.5-12(a)はヒーリング時における温度履歴、(b)はヒーリング後の試験片及びヒーリング前後の超音波探傷結果、Fig.5-13(a)は健全材とヒーリング後のDCB試験結果、(b)はヒーリング後のDCB試験結果の拡大図を示している。DCB試験結果から分かるように、僅かに剥離が融着している。



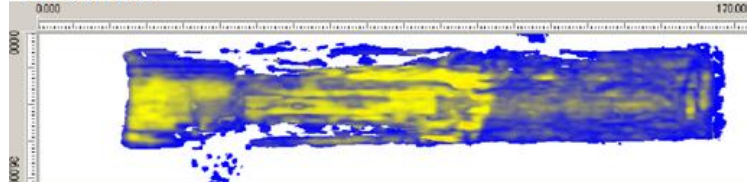
(a)ヒーリング時の温度履歴



Damaged

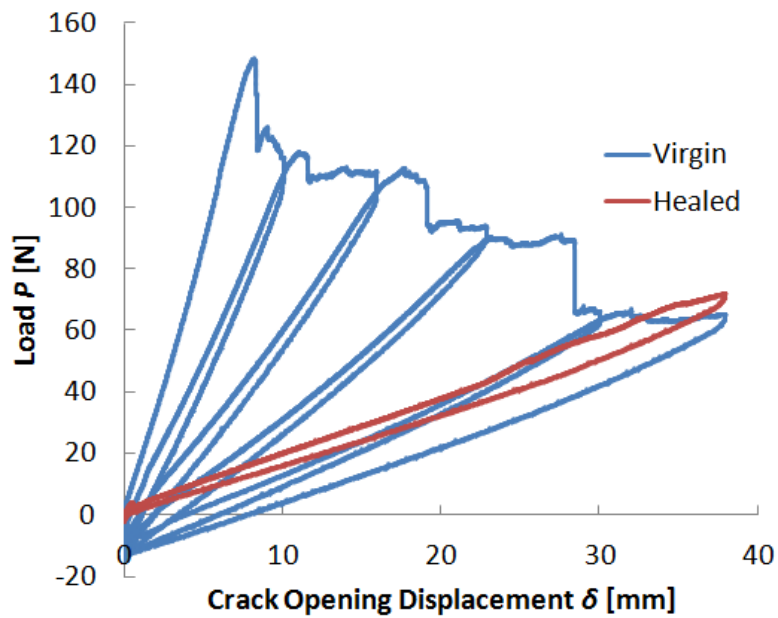


Healed

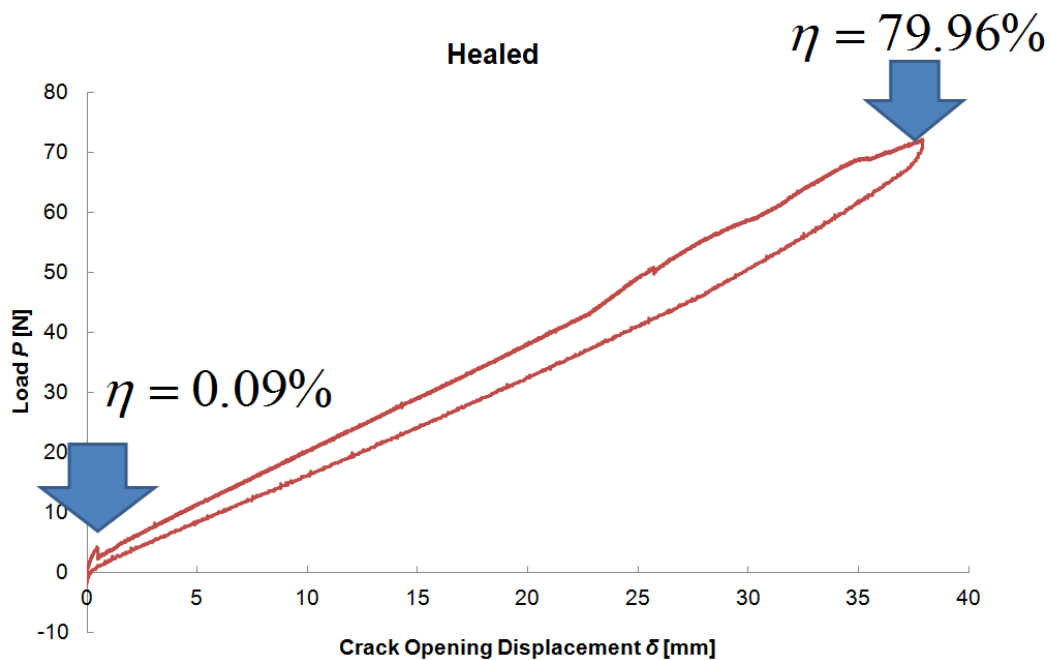


(b) ヒーリング後の試験片及びヒーリング前後の超音波探傷結果

Fig.5-12 積層構成 $[I_0/F_0/GFR/0_{13}]_S$ 、電極配置 $X=60\text{mm}$ 、 $Y=14\text{mm}$ の試験片のヒーリング



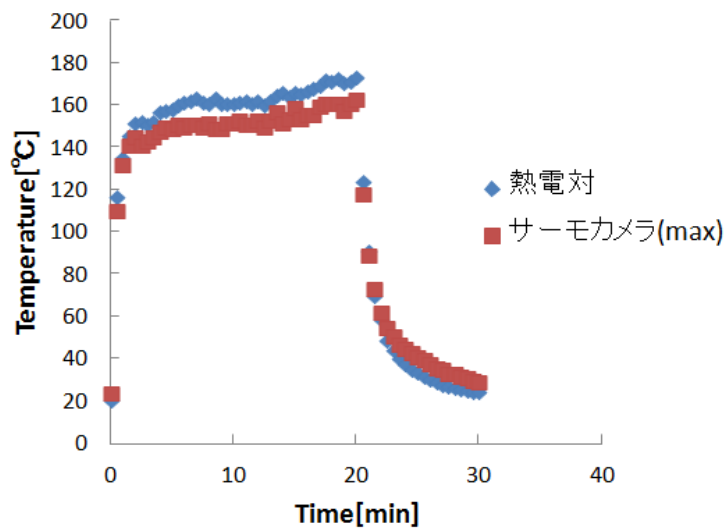
(a)DCB試験結果



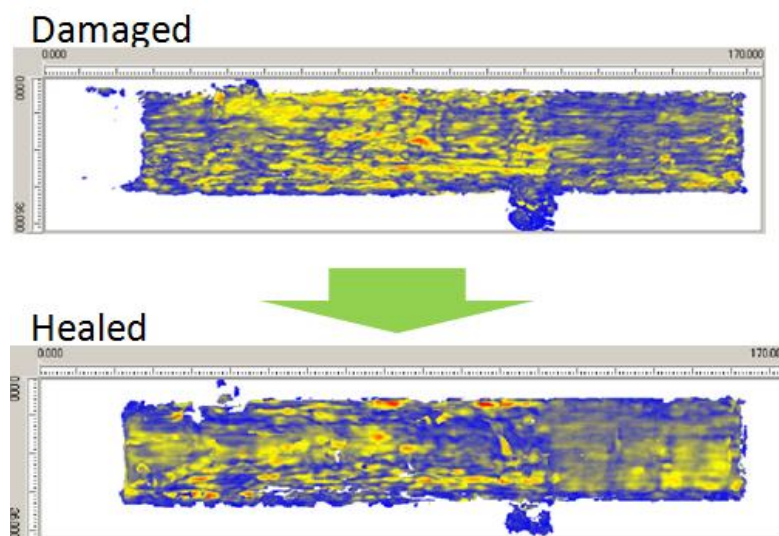
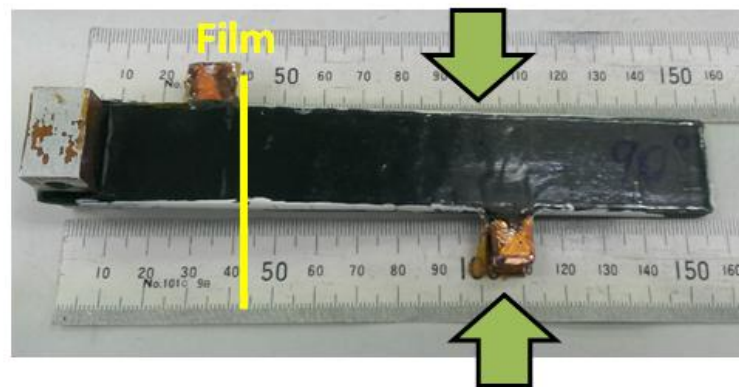
(b)ヒーリング後のDCB試験結果の拡大図とヒーリング率

Fig.5-13 積層構成[0/F0/GFR/0<sub>13</sub>]<sub>S</sub>、電極配置X=60mm、Y=14mmの試験片のDCB試験

Fig.5-14及びFig.5-15は、[0/F90/GFR/0<sub>13</sub>]<sub>S</sub>、電極配置X=60mm、Y=14mmの試験片の試験結果を示している。本試験片には1.4A(11.34V)を20分間投入した。しかし90°層を混ぜることで発熱量が上がらなくなり、修復はできなかった。



(a)ヒーリング時の温度履歴



(b) ヒーリング後の試験片及びヒーリング前後の超音波探傷結果

Fig.5-14 積層構成[0/F90/GFR/0<sub>13</sub>]<sub>S</sub>、電極配置X=60mm、Y=14mmの試験片のヒーリング

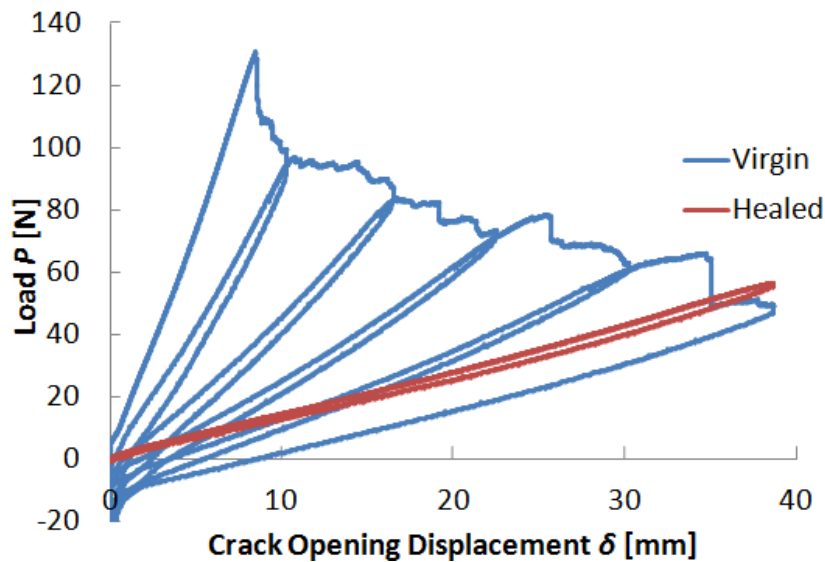
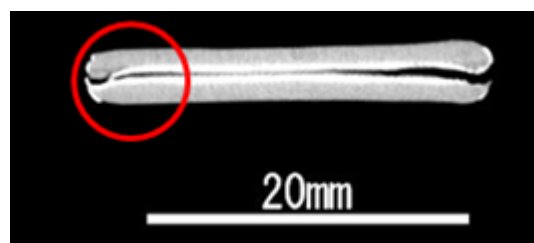
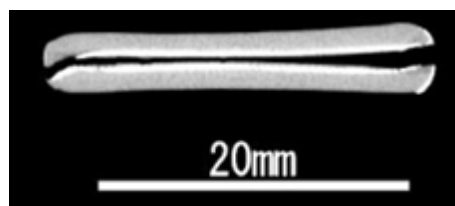


Fig.5-15 積層構成[0/F90/GFR/0<sub>13</sub>]<sub>S</sub>、電極配置X=60mm、Y=14mmの試験片のDCB試験

Fig.5-16は上の試験片のヒーリング前のCT画像を示している。ヒーリングが僅かにしかできない原因として、CT画像からも分かるように、Stick-Slip現象によって生じた破断した繊維が亀裂先端部に挟まっていることが挙げられる。そのため、最も加熱される負極部近傍での亀裂開口幅が1mm程度にもなってしまい、剥離を樹脂で埋めることが困難な状況になっている。



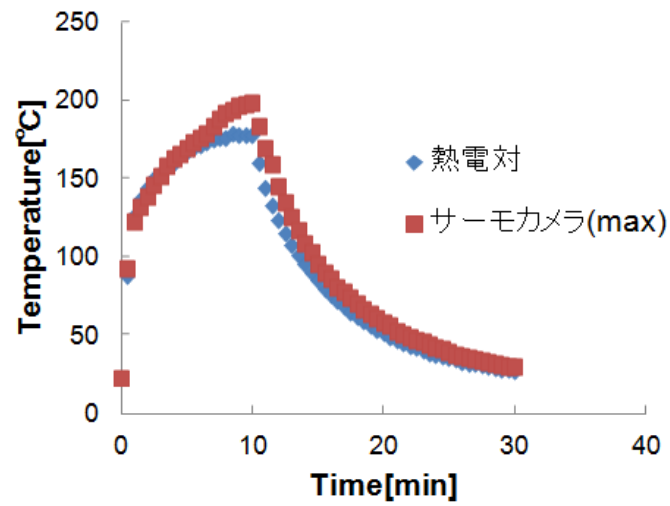
(a)電極間における亀裂先端部



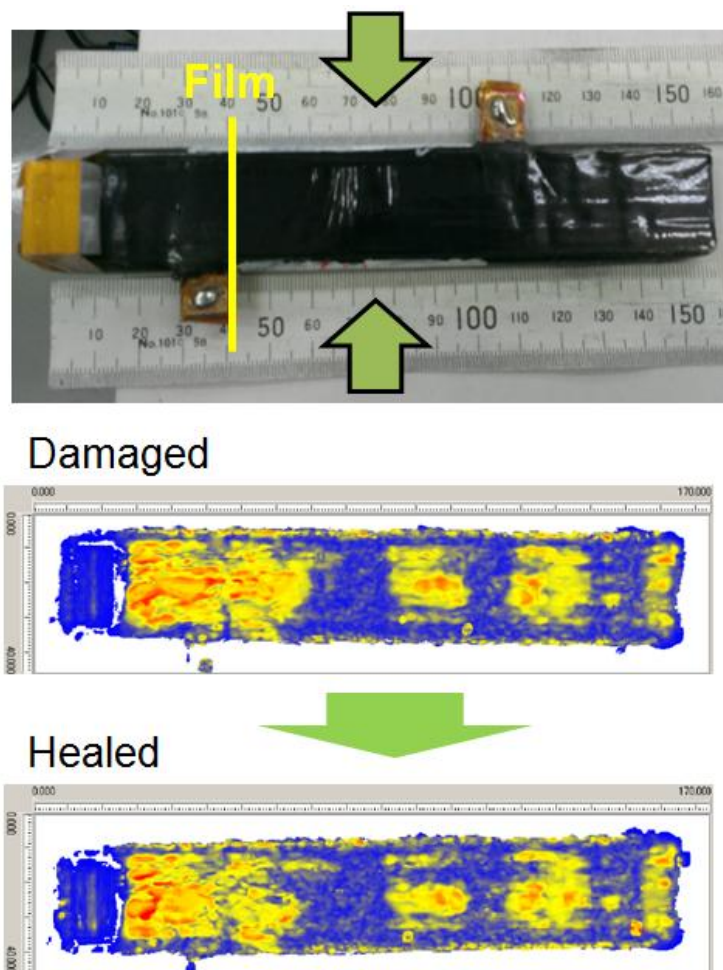
(b)電極間における初期亀裂近傍部

Fig.5-16 試験片断面のCT画像

積層構成 $[0/F0/GFR/0_{32}]_S$ 、電極配置 $X=60$ 、 $Y=14\text{mm}$ の試験片の試験結果をFig.5-17～Fig.5-19に示す。本試験片は、亀裂の幅が広がってしまう影響を軽減させるために、板厚を非常に分厚くし、また最大亀裂進展長を短くしている。積層枚数を多くしたため、成形後の試験片幅は30mm近くまで広がってしまい、上述した同じ電極配置の他の試験片よりも抵抗値が大きくなっている。ヒーリングには、1.4A(34.34V)を10分間投入した。Fig.5-17(a)はヒーリング時における温度履歴、(b)はヒーリング後の試験片及びヒーリング前後の超音波探傷結果、Fig.5-18(a)は健全材とヒーリング後のDCB試験結果、(b)はヒーリング後のDCB試験結果の拡大図、Fig.5-19はヒーリング前後のCT画像を示している。他の試験片と異なり、非常に高いヒーリング率を示していることが分かる。またCT画像を見ても、試験片の外形を崩さずに剥離面を融着できていることが分かる。ここで、CT画像からも分かるように、試験片内部しか融着できないため、図(d)におけるヒーリング率のうち $\eta_C$ 及び $\eta_D$ 以外は $G_{I,Healed}$ を算出する際に亀裂進展長 $a$ の値が外部から分からない。そのため、健全材のコンプライアンスとそれと同じヒーリング後のコンプライアンスが同じ亀裂進展長における値であるという仮定のもと、逆算的に $G_{I,Healed}$ を算出している。

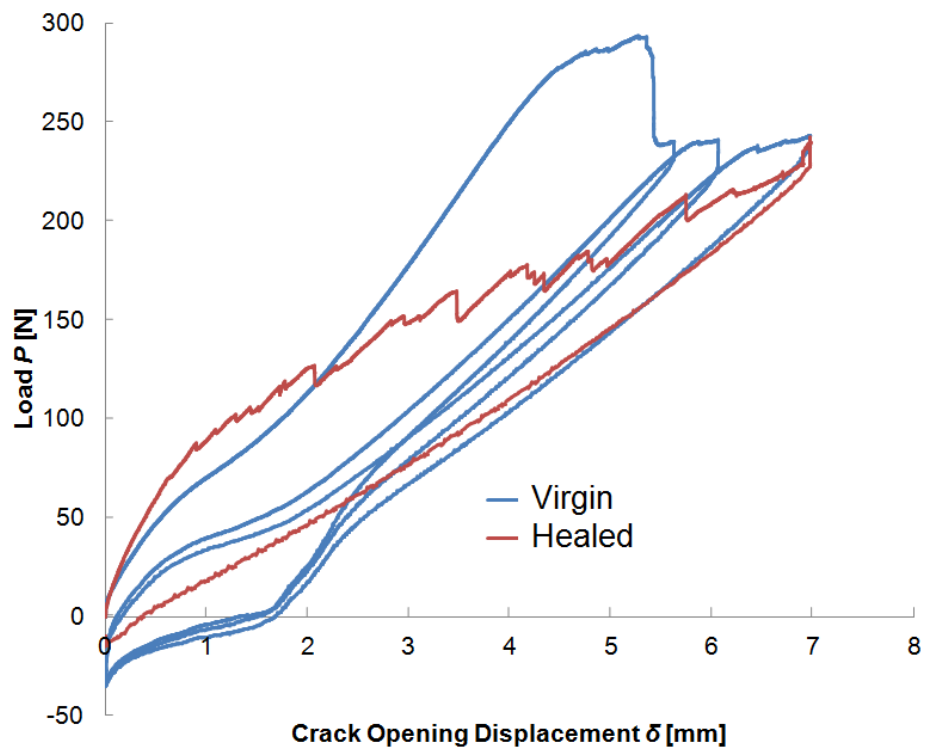


(a) ヒーリング時の温度履歴

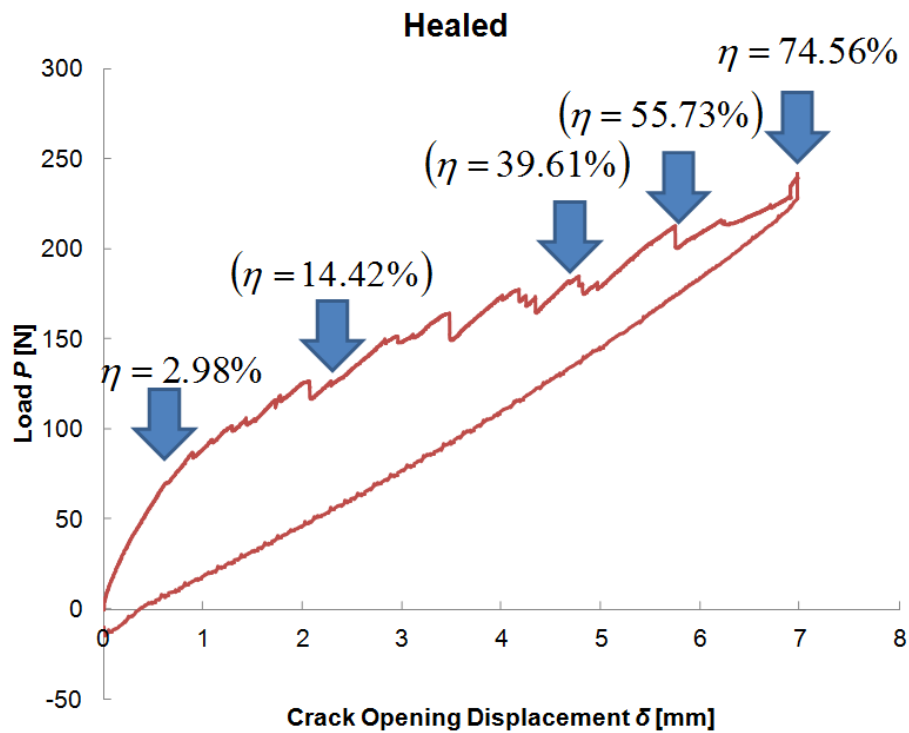


(b) ヒーリング後の試験片及びヒーリング前後の超音波探傷結果

Fig.5-17 積層構成 $[I_0/F_0/GFR/0_{32}]_S$ 、電極配置 $X=60\text{mm}$ 、 $Y=14\text{mm}$ の試験片のヒーリング



(a)DCB試験結果



(b)ヒーリング後のDCB試験結果の拡大図とヒーリング率

Fig.5-18 積層構成 $[0/F0/GFR/0_2]_S$ 、電極配置 $X=60\text{mm}$ 、 $Y=14\text{mm}$ の試験片のDCB試験



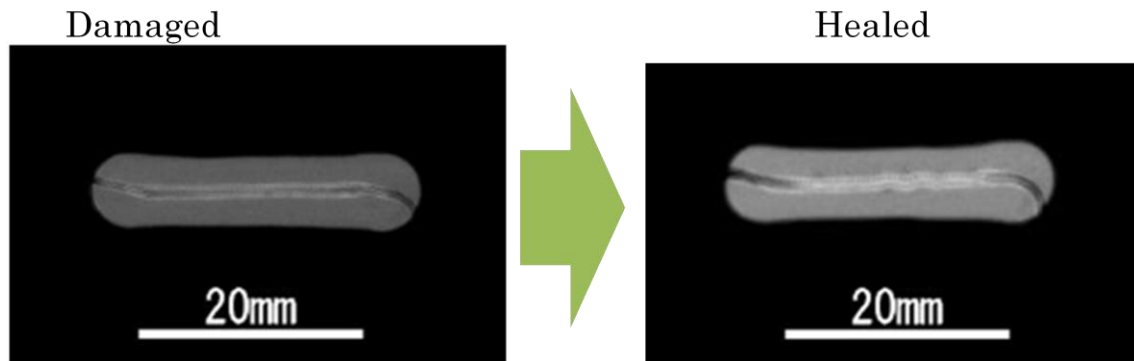


Fig.5-19 ヒーリング前後の試験片断面のCT画像

さらに、積層構成 $[0/F0/GFR/0_{32}]_s$ 、電極配置 $X=60$ 、 $Y=14\text{mm}$ の試験片に対し、2回目、3回目のヒーリングを施したDCB試験結果をFig.5-20及びFig.5-21に示す。2回目、3回目のヒーリングも、1回目のヒーリング同様に、1.4Aを10分間投入した。また、Fig.5-22及びFig.5-23にはR-Curveとヒーリング率を示している。亀裂先端に近づくほどヒーリング率は増加する傾向にある。フィルム亀裂の位置まで融着しているため、 $\eta_d$ は小さな値となっているが、初期亀裂位置以降は非常に高いヒーリング率を示している。2回目、3回目のヒーリングでは、亀裂面に1回目のヒーリングでの樹脂が残っているため、1回目よりも高いヒーリング率を示している。

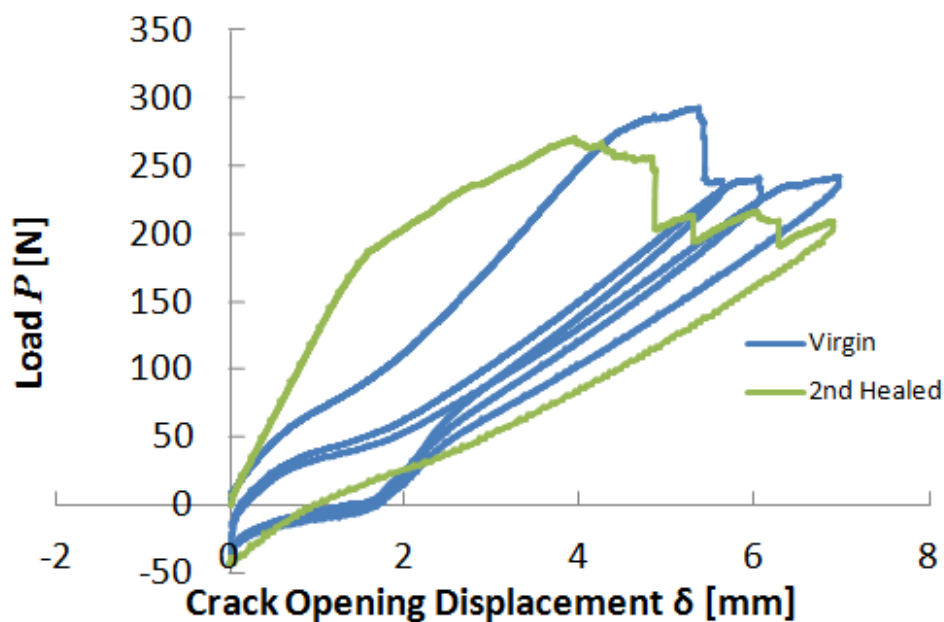


Fig.5-20 2回目のヒーリング

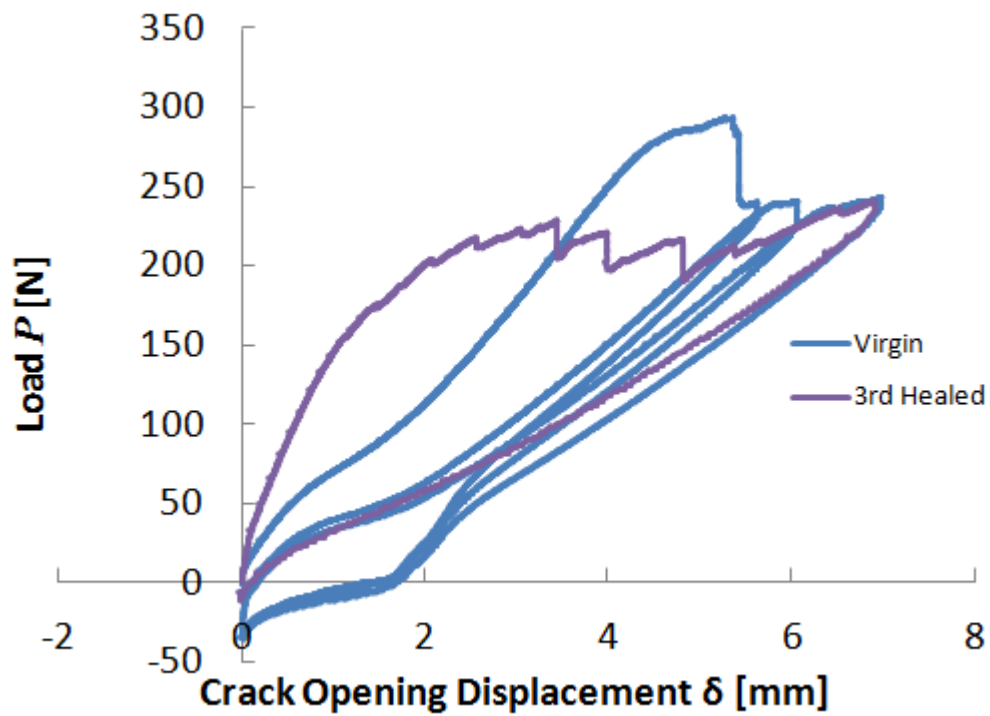


Fig.5-21 3回目のヒーリング

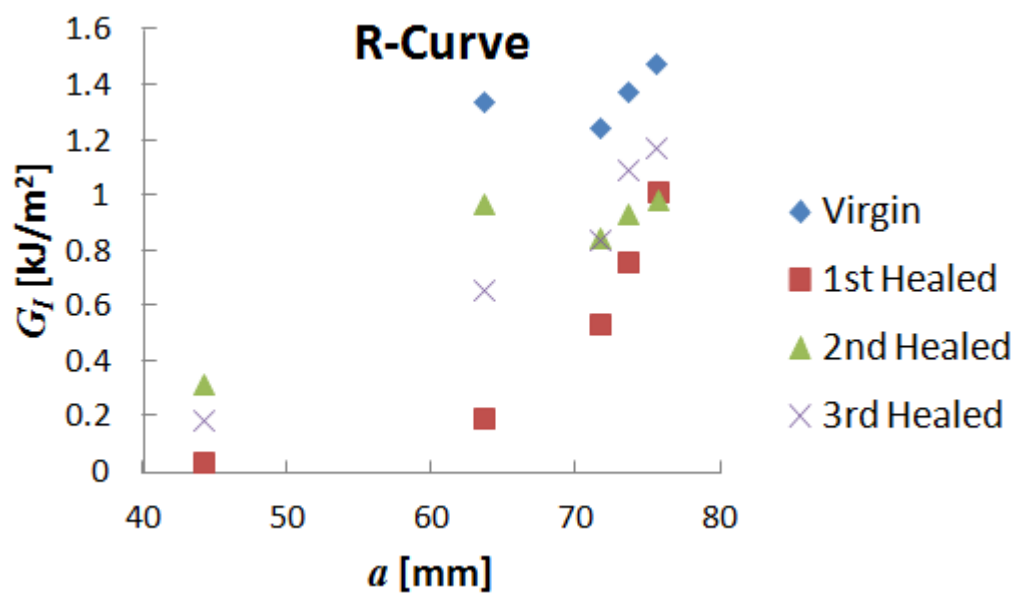


Fig.5-22 複数回のヒーリング後のR-Curve

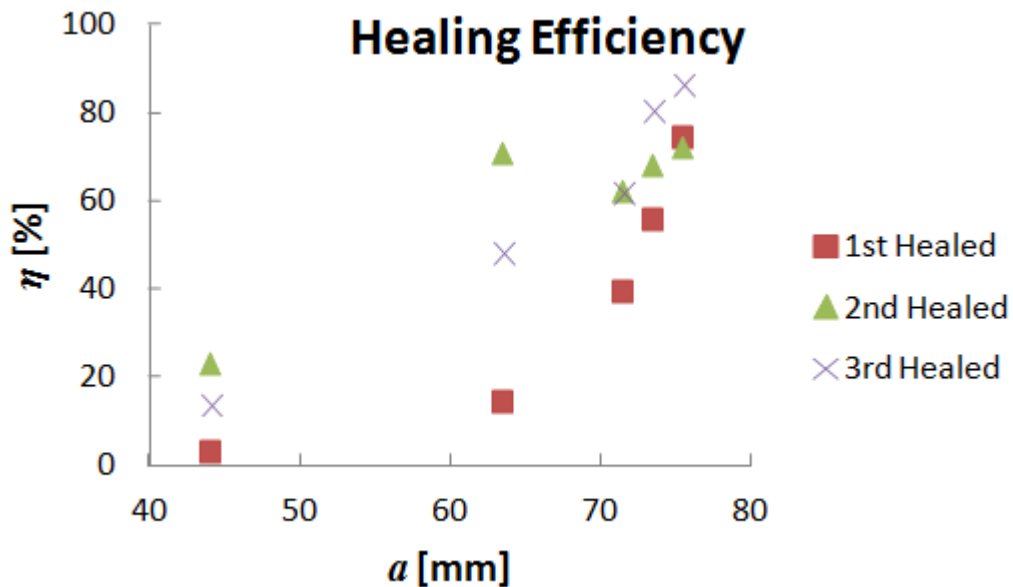


Fig.5-23 複数回のヒーリング後のヒーリング率

## 5.5. 総括

本章では、絶縁層を積層することで電気を用いて剥離面のみを溶融し、DCB試験でヒーリング率を算出した。積層構成を $[0/F0/GFR/0_{32}]_S$ にした試験片では、最高温度まで加熱する時間と最高温度保持時間を含め、僅か $1.4A \times 10$ 分間の通電で初期亀裂以降の位置では70～86%の非常に高いヒーリング効果が得られ、複数回のヒーリング効果を実証することができた。電源の制限によって、本章での実験では絶縁層を導入したが、その制限がなければ、第4章に示したように、高電流を短時間流すことで温度差を生じさせ、剥離面の融着することが可能であると考えられる。

## 第6章. ストリンガーへの応用

本章では、第2章でコンセプトを示したストリンガーのランアウト部に、本提案システムを導入した場合の可能性をシミュレーションにより検証する。

### 6.1. ストリンガーモデル

Fig.6-1 に示すように、クロスプライでできたスキンとストリンガーの間に、機能層の入ったスキinstリンガーモデルを作成した。スキンとストリンガーの間は、長手方向に 2/3 の位置まで剥離している。CFRTP、剥離部、電極、樹脂リッチ部の物性値は第4章で用いたものと同じ値(Table4-1)を用いる。DCB 試験片同様に、長手方向の電極間の距離を  $X$ 、幅方向の距離を  $Y$  とする。尚、本モデルにおいては繊維のうねりと電極からの熱伝導は考慮せず、モデル全表面に相互作用として表面輻射を定義している。

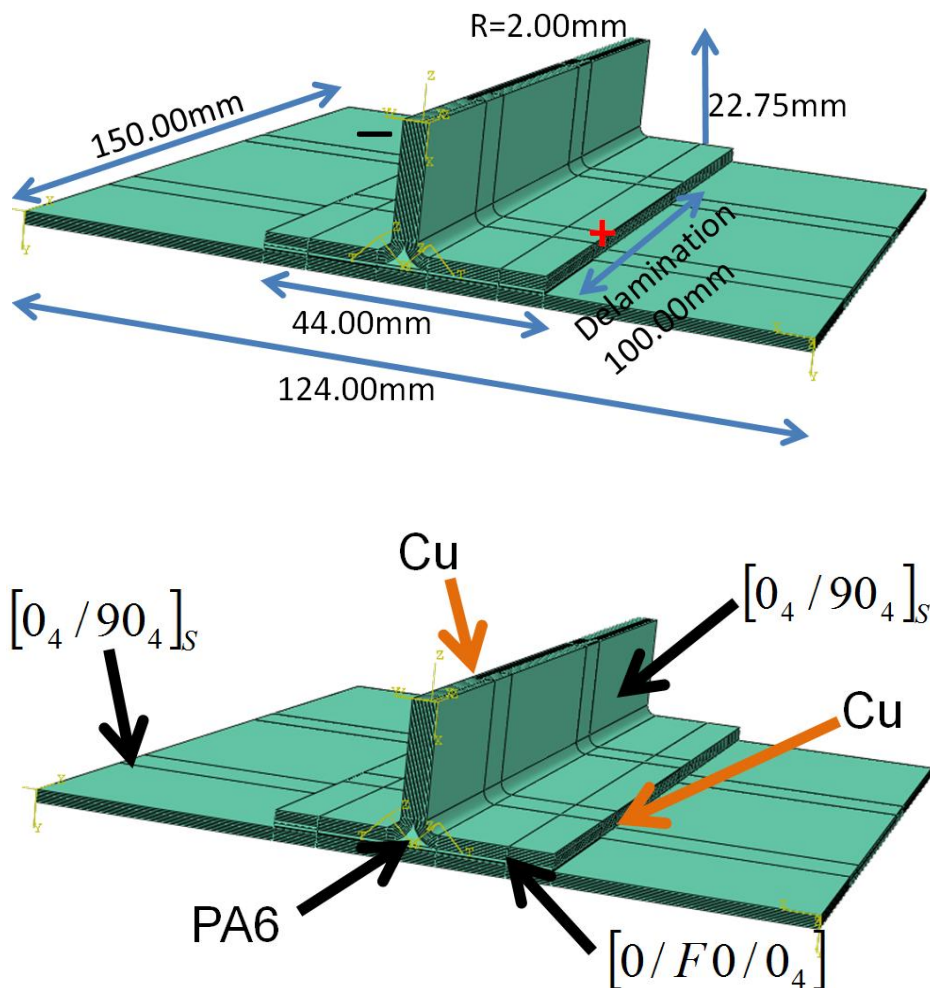


Fig.6-1 ストリンガーモデル

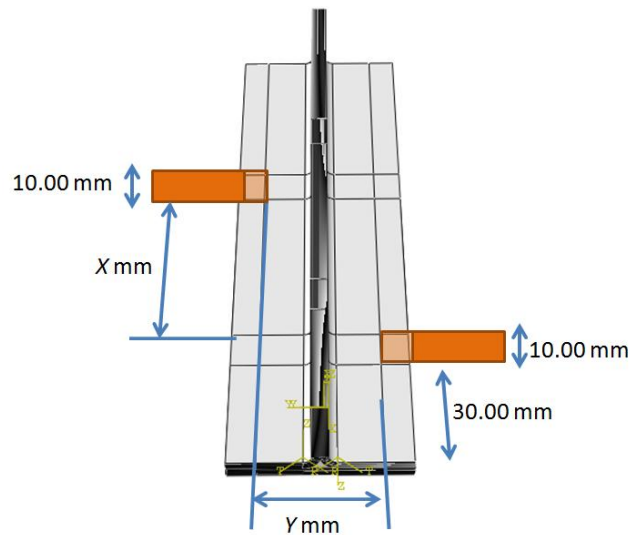


Fig.6-2 ストリンガーモデルにおける電極配置

## 6.2. 局所加熱の可能性

電極配置を  $X=50\text{mm}$ 、 $Y=34\text{mm}$  とした場合のシミュレーションを行う。Fig.6-3 はストリンガーモデルに対し、1.3A の電流を 5 分間投入した際の面内及び面外の温度分布を表している。面内の温度分布には電極の配置等改良の余地があるが、この場合においても面外に温度分布を作ることができ、剥離面のみを局所加熱することができている。Fig.6-4 には投入電流量が上下面と剥離面の温度差、加熱時間、電圧に与える影響を示している。投入電流量が 1.3A の場合でも時間をかければ温度差を生じさせることができるが、3A、4A といった大電流を投入すれば、一瞬で温度差を生じさせることができ、上下面を常温に保ったまま剥離面を溶融できることが示された。

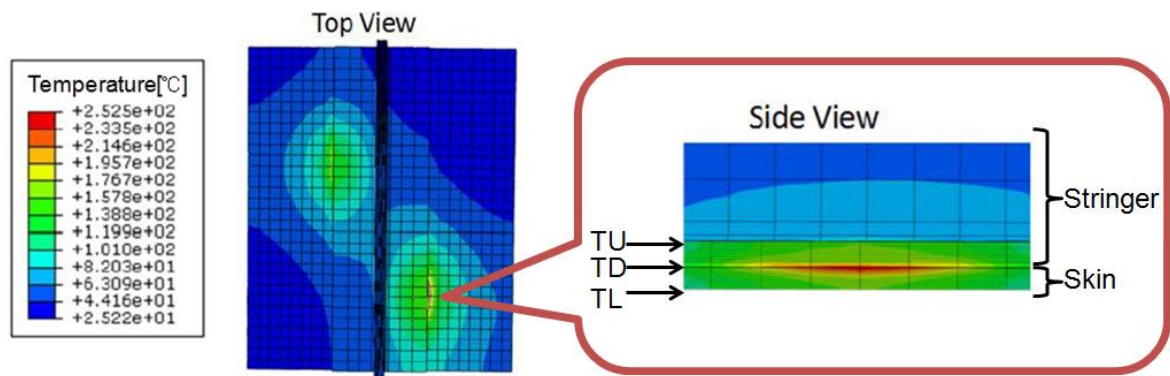
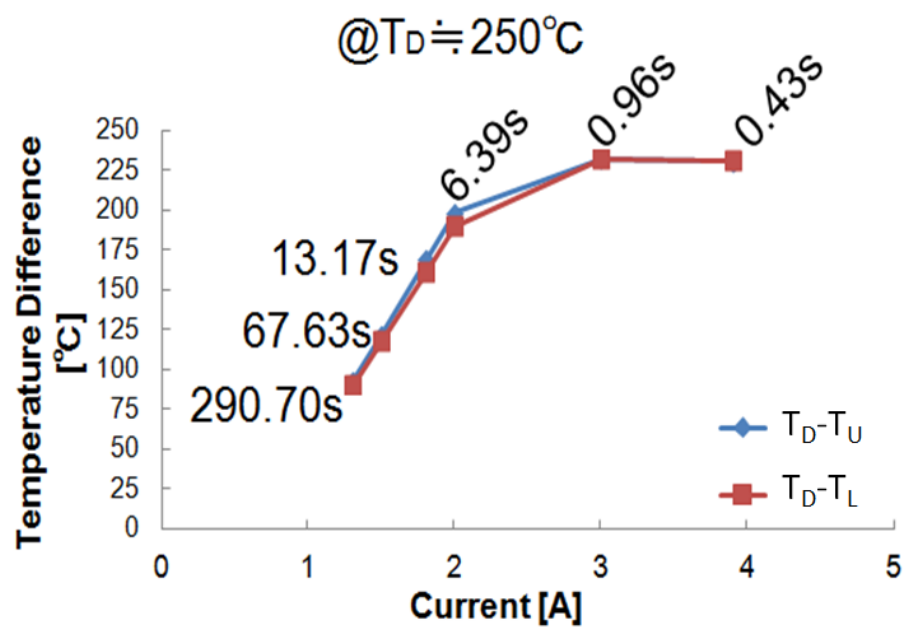
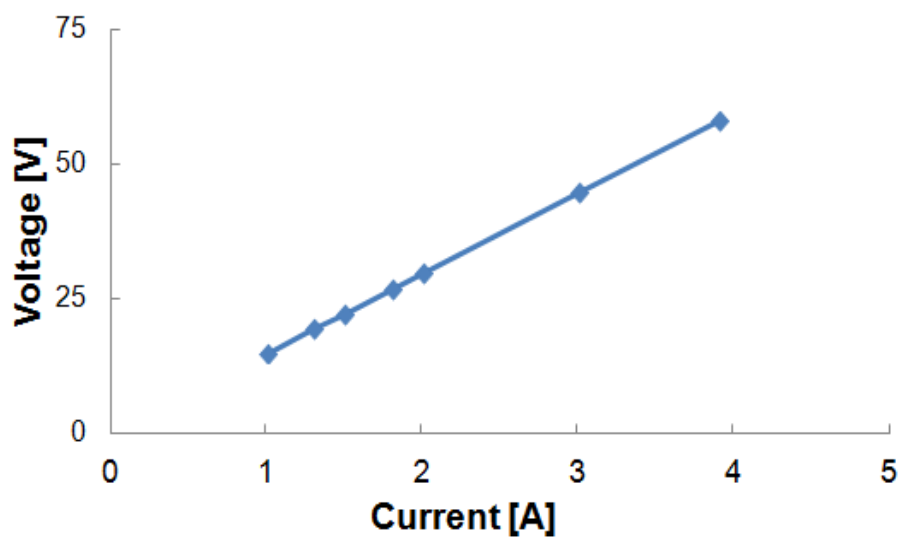


Fig.6-3  $X=50\text{mm}$ 、 $Y=34\text{mm}$  とし 1.3A の電流を 5 分間投入した場合の温度分布



(a)電流が温度差及び昇温時間にもたらす影響



(b)電流が電圧にもたらす影響

Fig.6-4 電流がもたらす影響のシミュレーション結果

### 6.3. ヒーリング可能面積を向上させるために

4章では、電極配置をデザインすることでヒーリング可能な面積を変化させられると述べたが、ストリンガーモデルにおいては他の方法でヒーリング可能な面積を向上させることを考える。Fig.6-5に示すように、電極を4つ埋め込んだストリンガーについて解析を行った。4つの電極をそれぞれ電極A、電極B、電極C、電極Dとし、 $X=50\text{mm}$ 、 $Y=34\text{mm}$ とする。表面電流を与える電極と、電位0Vと定義する電極を変えることによって、加熱可能な領域にどのような影響が出るのかをシミュレーションした。シミュレーション結果をFig.6-6に示す。Fig.6-6(a)は正極をA、負極をBとした場合、Fig.6-6(b)は正極をC、負極をBとした場合、Fig.6-6(c)は正極をD、負極をBとした場合において、2.0Aの電流を5分間投入した際の温度分布を示している。温度分布からも分かるように、正極と負極に選択する電極の組み合わせによって、加熱可能な範囲を自由に変えることができ、組み合わせを切り替えていくことで剥離面を死角なくヒーリングできることが分かる。

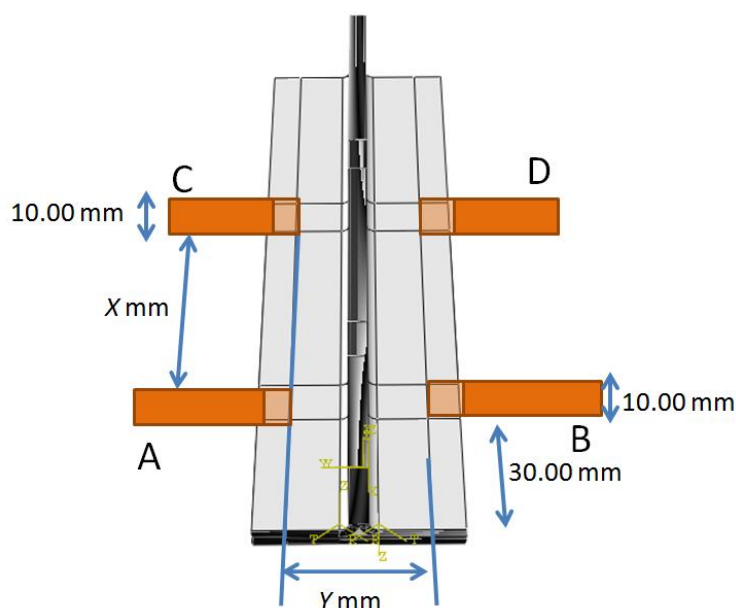
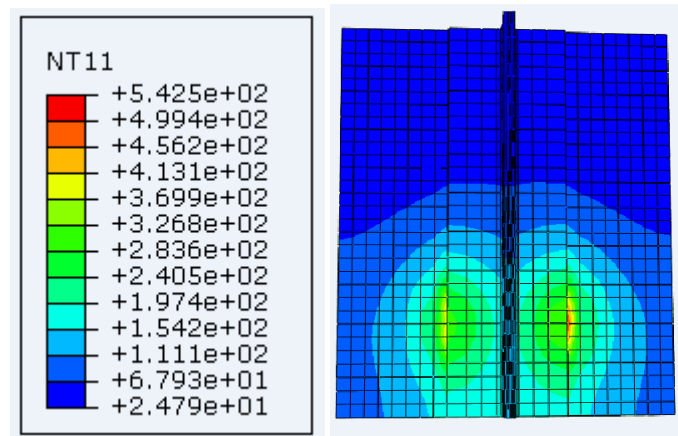
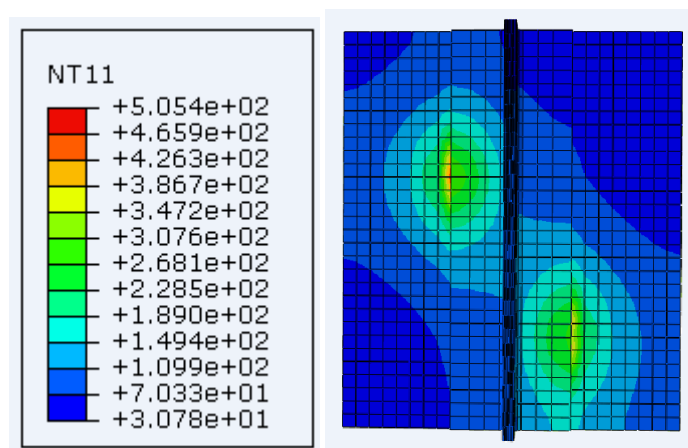


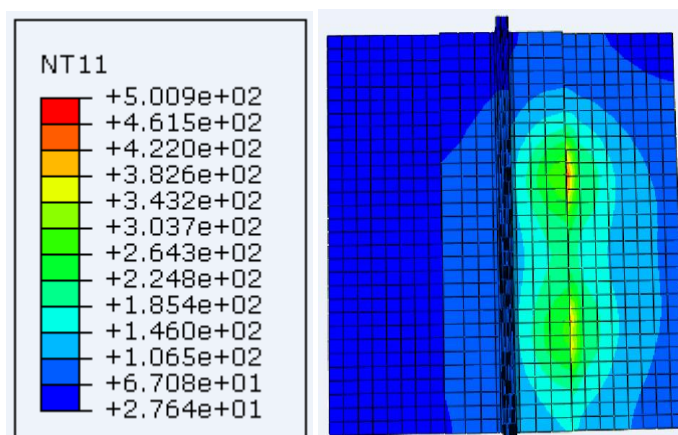
Fig.6-5 電極が4つ埋め込まれたストリンガーモデル



(a) 正極 : A、負極 : B



(b) 正極 : C、負極 : B



(c) 正極 : D、負極 : B

Fig.6-6 電極の組み合わせによるヒーリング可能な面積への影響



#### 6.4. 総括

本章では、解析上で提案するヒーリング手法の可能性を検証した。ストリンガーモデルにおいても、剥離面のみを局所的に溶融することができ、電流量及び電圧に制限がなければ構造の表面は常温に保ったまま剥離面をヒーリングできる可能性を実証した。急速加熱した後、電流を上手く制御し、ON/OFFを繰り返すことで、剥離面の温度を必要なヒーリング時間だけ保持することが可能であると考ええる。また、電極を複数埋め込むことで、面内に死角なくヒーリングを施せることを示すことができた。

## 第7章. 結論

本論文では、光ファイバーセンサーによるセンシング技術とセルフヒーリング技術を融合させることで、既存のセルフヒーリング方法では達成できないメリットを有した新たなヒーリング方法の提案を行った。

第3章では、CF/PA6複合材料の無加圧での剥離の融着の可能性の検証をDCB試験を通して行った。外部から加熱すると、表面の樹脂枯れや試験片の変形を生じさせるが、無加圧でも剥離が融着し、破壊靱性値が回復することを実験的に示すことができた。

第4章では、ジュール熱による局所加熱の可能性を実証した。電極の配置や積層構成、試験片寸法、電流の投入条件を変えることで、ヒーリング可能な面積や到達温度などを変化させられることが、実験と解析の両面から実証できた。

第5章では、剥離面のみをジュール熱で融着し、強度の回復をDCB試験を用いて評価した。その結果、機能層、絶縁層を含んだ積層構成[0/F0/GFR/0<sub>32</sub>]<sub>s</sub>の試験片において、試験片表面を溶かすことなく剥離面のみを熔融し、70~86%の非常に高いヒーリング率を得ることができた。ヒーリング条件は、大気中、無加圧で、最高温度まで加熱する時間と最高温度保持時間を含め僅か10分という簡便かつ短時間なもので、既存のヒーリング方法と比較し優位性を示すことができた。

第6章では、実際にストリンガーに適用した場合についても解析上でシミュレーションを行った。ストリンガーにおいても、剥離面のみを熔融することができ、電極を複数埋め込むことで、面内に死角なく修復できる可能性を示すことができた。

以上より、本提案手法でのストリンガーのセルフヒーリングが可能であることを実証することができた。ヒーリング可能な破壊靱性値、無加圧でのヒーリング、ヒーリング時間など、既存のヒーリング方法と比べて優位性を示すことができた。また、光ファイバーセンサーを用いることで、修復過程のモニタリングもできる可能性がある。本提案手法を発展させるために今後は、より高いヒーリング率を得るための、電極の配置や積層構成、試験片寸法、電流の投入条件など最適化を行っていく必要があると考える。また、ジュール熱によるCFRTP及びCFRPの内部からの局所加熱は、数百℃に急速加熱できるため、本提案手法以外にも応用できる可能性を大いに秘めている。

## 付録. 熱電対による局所発熱するCFRTPの温度計測

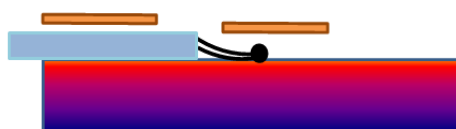
### 1. 緒言

熱電対は工業用温度測定に広く利用されている温度センサーである。異種金属における2つの接点間の温度差によって熱起電力が生じるゼーベック効果を利用している。本研究で用いたK熱電対は、ニッケルとクロムを中心とした合金であるクロメル線と、ニッケルとアルミニウムを中心とした合金であるアルメル線を溶接しており、溶接部の温度を測定することができる。

熱電対によってCFRPの表面温度を測定する場合、通常はFig.A-1に示すようにほぼ一様な温度分布の試験片に対して行う。その際には、溶接部と導線部を試験片に貼り付けて行う。これは溶接部と導線部の温度差を少なくし、溶接部から導線部への熱伝導の影響を抑制するためである。一方、試験片が小さい場合や試験片に温度分布がある場合には、導線部の温度が低くなってしまい、導線部への熱伝導の影響が大きくなってしまう。つまり、測定温度として表示される溶接部の温度が、実際の温度よりも低くなってしまう。Fig.A-2はハンダゴテに熱電対を貼り付けた時の様子である。サーモグラフィーから分かるように、導線部の方へ熱が逃げて行っている様子が確認できる。また、その影響によって、ハンダゴテの右側よりも、熱電対の付いている左側の方が温度が低くなっている。導線部への熱伝導の影響で、溶接部の温度が低下するだけでなく、発熱体自体の温度も低下させてしまうことが分かる。

本研究では、熱電対で局所的に発熱するCFRTPを測定する場合にどの程度の誤差が生じるかをFEMに基づく数値解析によって検証した。また、第4章のFig.4-3に示したように、カプトンテープを噛ませることによる絶縁処理を施した影響を実験的に検証した。

### 正しい熱電対の使い方



### 正しく使えない場合

試験片が小さい

局所的な温度分布がある

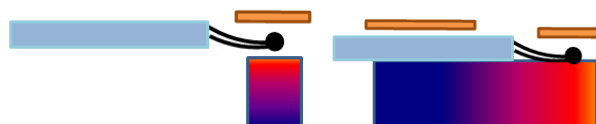


Fig.A-1 熱電対による温度計測

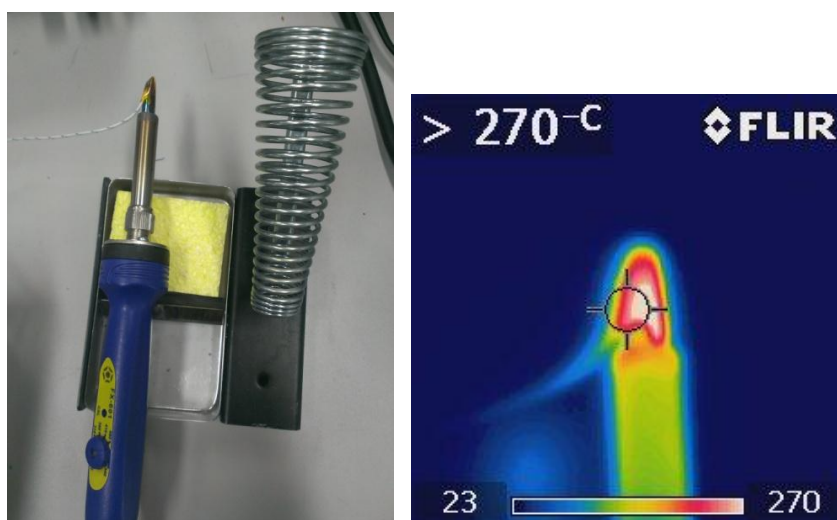


Fig.A-2 ハンダゴテに熱電対を貼り付けた様子

## 2. 熱電対モデル

熱電対導線部の直径を計測したところ0.25mmであったため、溶接部0.5mm(0.25mm×2)、導線部0.35mm(0.25mm×√2)のFig.A-3に示すような簡易化した熱電対モデルを作成した。本モデルの物性値は、半分がクロメル、半分がアルメルとなっており、それぞれの物性値をTable A-1.に示す。本モデルを用いて、モデルの溶接部の温度をシミュレーションする。ここで、溶接部内においてもFig.A-4に示すように温度分布が生じる。この時、測定したい温度は溶接部内の最大温度であるが、実際には最低温度を測定してしまう可能性がある。そこで、測定したい温度(=投入温度  $T$ )に対し、溶接部内の最低温度  $T_{min}$ がどの程度であるのかを、式(A-1)に示すような最大誤差を指標にシミュレーションする。

$$(\text{最大誤差}[\%]) = \frac{T - T_{min}}{T} \times 100 \quad (\text{A} - 1)$$

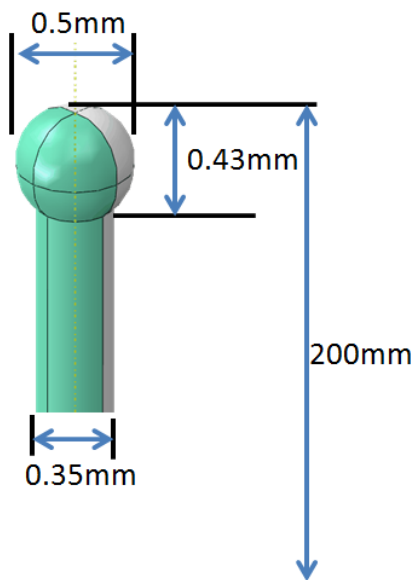


Fig.A-3 熱電対モデル

Table A-1. クロメルとアルメルの物性値

	熱伝導率 $\lambda$ [mW/mm/K]	密度 $\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]	比熱 $c$ [J/kg/K]	輻射率 $\epsilon$
クロメル	13.8	8300	444	0.87
アルメル	29.7	8150	444	0.37

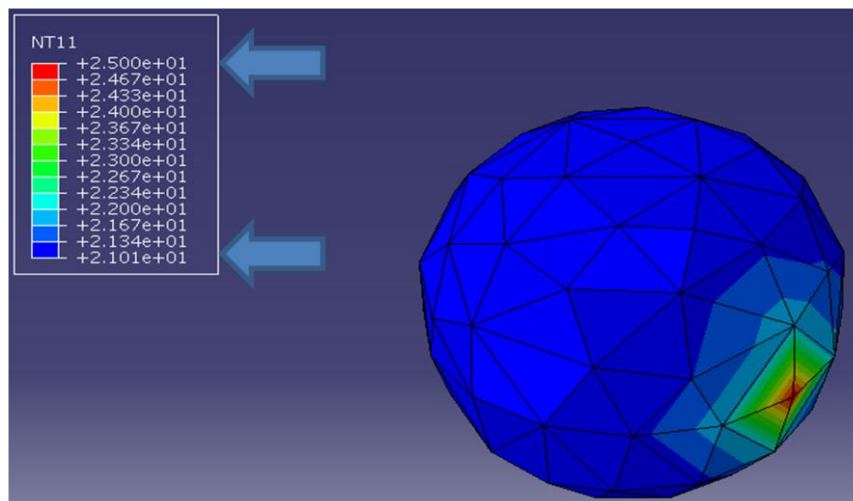


Fig.A-4 熱電対溶接部内の温度分布

### 3. 導線部への熱伝導と輻射の影響

まず、熱電対の溶接部は球状であるため、熱源と直接接触するのは球表面の一点であると考えられる。そして、その他の表面は室温(21℃)に接している。実際にはカプトンテープで球面全体を貼り付けるため、この仮定よりも誤差は少ないはずであるが、この時に球内の最低温度が計測温度として表示されてしまう可能性がある。そこで、Fig.A-4に示すように熱電対の溶接部のみを切り出したモデルにおいて、表面輻射がどの程度最大誤差に影響を与えるかをシミュレーションした。

溶接部モデルには、クロメルとアルメルの境界線上の一点に、境界条件として投入温度  $T$  を与える。投入温度はFig.A-5に示すように、ステップ関数的に10分ずつ温度上昇をさせていく。各投入温度において、10分間で球内の最低温度が変化しなくなった時の温度を、その投入温度における最低温度とし、最大誤差を計算する。

さらに、緒言で述べたように導線部への熱伝導の影響が考えられる。Fig.A-6に示したような溶接部と導線部を持つ熱電対モデルに対し、溶接部のみのモデルでのシミュレーション同様に、クロメルとアルメルの境界線上の一点にステップ関数的に温度を投入し、最大誤差の算出を行った。熱電対モデルの溶接部及び導線部の表面は、表面輻射を定義している。

Fig.A-7にシミュレーション結果を示す。投入温度が大きいほど、室温との温度差が大きくなるため、輻射や熱伝導の影響が大きくなる。溶接部モデルにおいて輻射を考慮しない場合、 $T_{min}$ は $T$ と同じ温度まで上昇し、最大誤差は0%となる。それに対し輻射を考慮した場合、0.5%以下の誤差が生じることが分かる。さらに、輻射と導線部への熱伝導まで考慮した場合、5%以下の誤差が生じることが示された。モデルを簡略化しているため、実際はモデルよりも導線部の輻射が生じる面積が大きくなるので、より大きな誤差が生じる。以上より、試験片表面温度を熱電対で測定する場合、輻射による影響はほとんどないが、導線部への熱伝導の影響は大きいことが実証された。

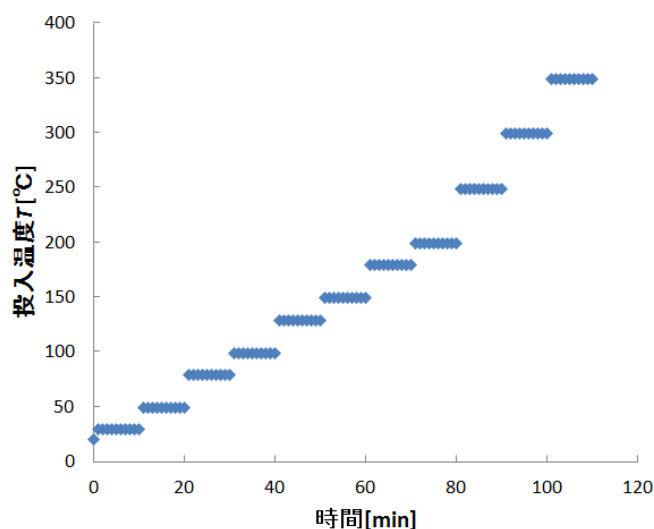


Fig.A-5 ステップ関数状の投入温度

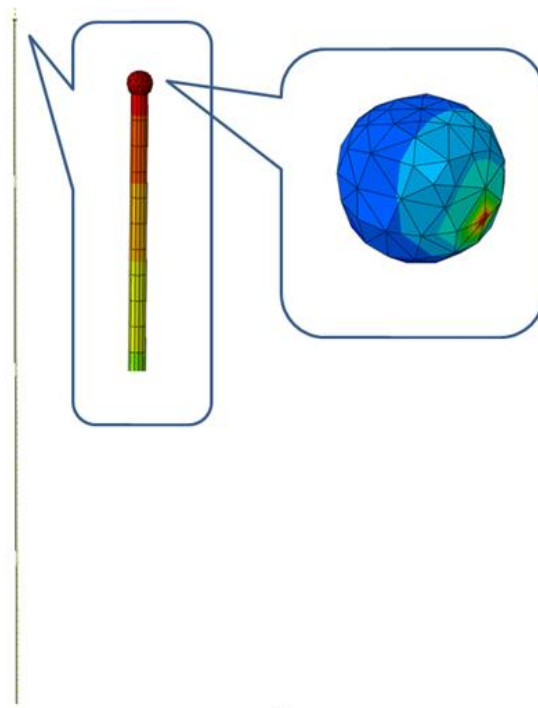


Fig.A-6 溶接部と導線部のモデル

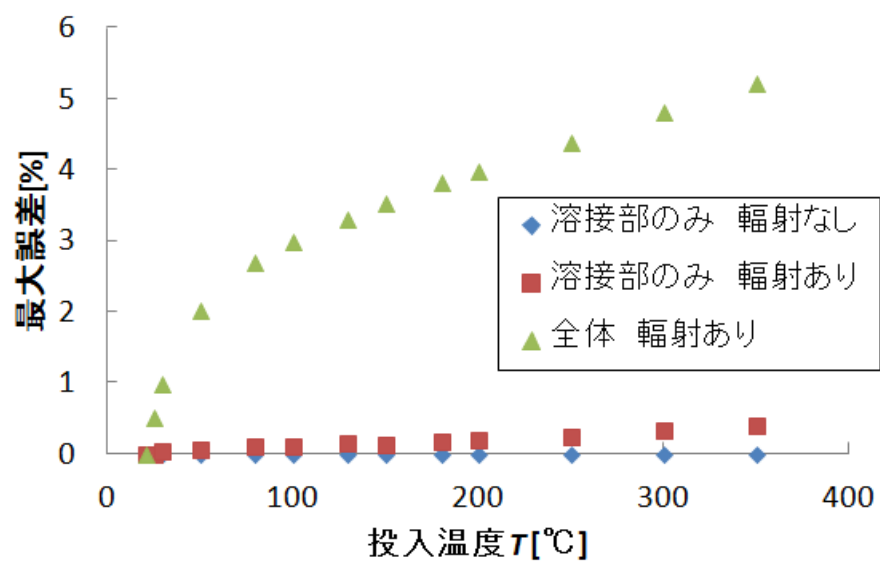


Fig.A-7 投入温度に対する最大誤差

#### 4. 発熱体の温度測定

温度計測を行う試験片が発熱体である場合、Fig.A-2にも示したように、導線への熱伝導等の影響で発熱量自体が減少してしまう。そこで、CFRTPにステップ関数的に温度を与え、それを熱電対で計測する場合をシミュレーションした。CFRTPはFig.A-8に示すように円盤状の薄板の一方方向材を用い、上面に境界条件で温度を与える。CFRTPの寸法及び加熱面積は、第4章の加熱実験等で用いたDCB試験片とほぼ同じ面積になるように設定している。CFRTP下面に熱電対を接触させ、熱電対溶接部の温度をシミュレーションした(Fig.A-9)。CFRTPと熱電対の接触面積としては、接触面の半径 $r$ が0.01mmの場合、0.03mmの場合、0.5mmの場合を設け、モデルはFig.A-10のように回転させて作成した。実際にはカプトンテープで溶接部を覆っていたり、溶接部が完全な球ではなかったりするため、 $r$ を決定することは難しい。

Fig.A-11にそれぞれの $r$ におけるシミュレーション結果を示す。熱電対を取り付けず、CFRTPのみの場合、上面に温度を与えるとやがて下面の温度も投入温度と同じ温度になる。しかし熱電対を取り付けると、熱伝導等の影響により溶接部の温度は投入温度よりもかなり小さくなる。 $r$ が0.03mm以上になると、考えられる $r$ の最大値である0.5mmの場合とほとんど変わらず6~8%以下である。しかし、 $r$ が小さい場合には最大誤差は非常に大きくなり、23%程度になりうることを示された。

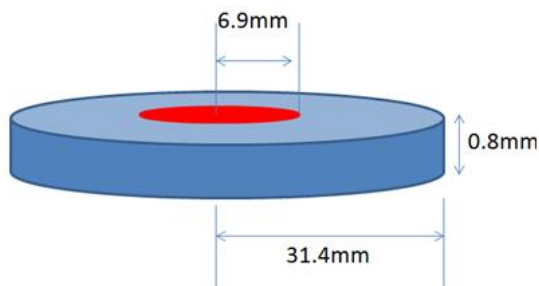


Fig.A-8 発熱を模擬したCFRTP円盤

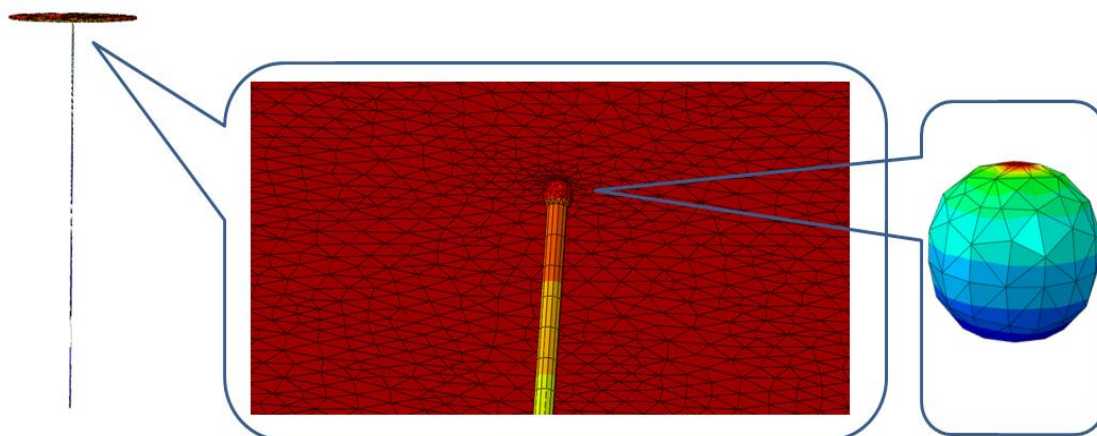


Fig.A-9 CFRTPの下面の測定



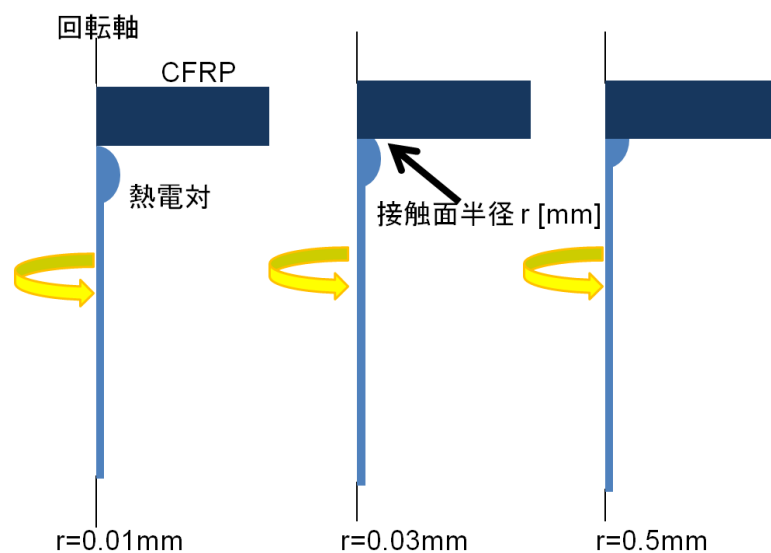


Fig.A-10 モデルの作成方法と接触面積

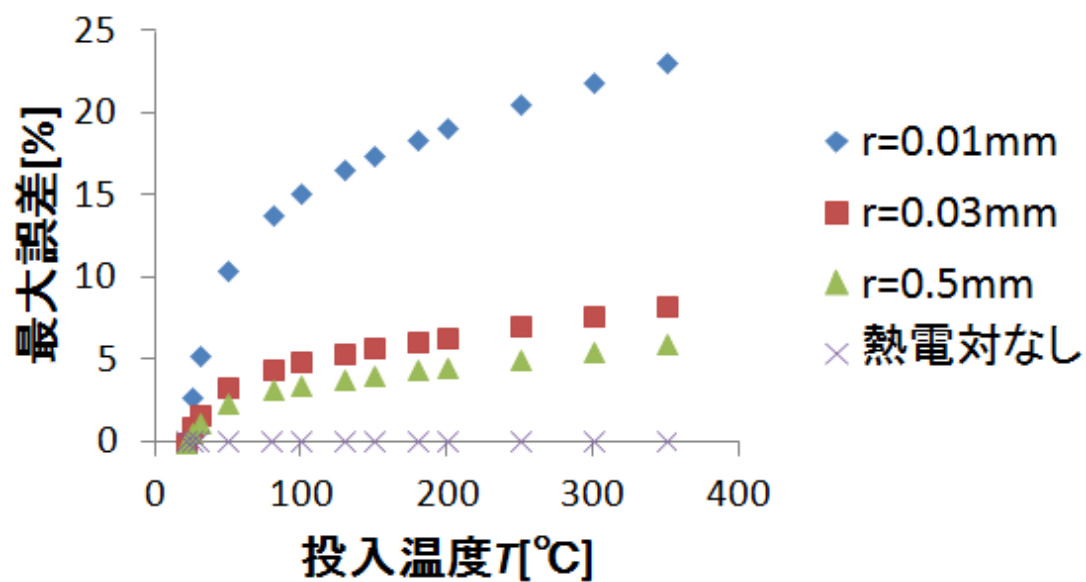


Fig.A-11 接触面積と投入温度に対する最大誤差

## 5. 絶縁処理の影響

絶縁処理の影響を調べるために、ハンダゴテやホットプレスの温度を熱電対で計測した。ハンダゴテは、絶縁処理をせずに熱電対を貼り付け、常温から10分間熱した。その後、10分間1分間隔で温度を計測し、その平均値を計測温度とした。その後、常温まで冷却し、絶縁処理を施して熱電対を貼り付け、同様の計測を行った。ホットプレスは、プレス表面に絶縁処理をした熱電対としていない熱電対を取り付け、FEMでのシミュレーション同様に、ステップ関数的に温度を上昇させた際のそれぞれの温度を計測した。ホットプレス内蔵の温度計の温度が設定温度に到達してから10分間それぞれの温度を計測し、その平均値を計測温度とした。

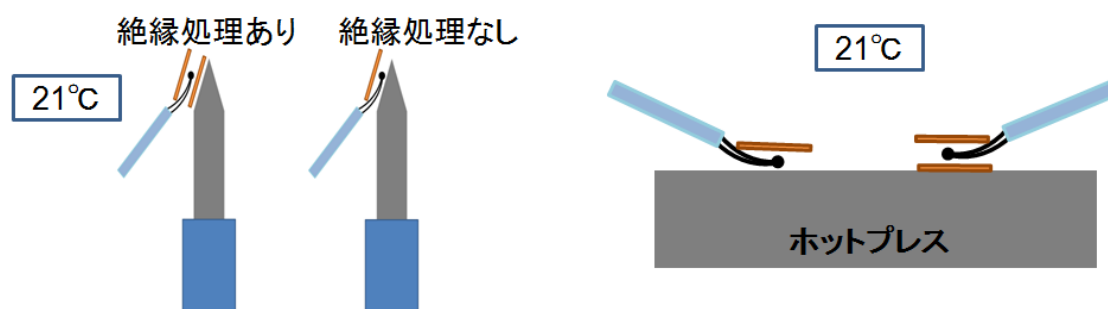


Fig.A-12 ハンダゴテとホットプレスの温度測定

実験結果をFig.A-13に示す。式(A-2)に示すように、絶縁処理のない場合とある場合の温度の比を $\alpha$ と定義する。

$$\alpha \equiv \frac{T_{\text{絶縁処理あり}}}{T_{\text{絶縁処理なし}}} \quad (\text{A} - 2)$$

絶縁処理なしの場合の計測温度が50°C以下の時は、 $\alpha$ はほぼ1であるが、50°Cを超えると絶縁処理の影響が顕著に現れ、その際の $\alpha$ は温度に依存せず0.976程度である。以上より、高温域においては、絶縁処理の影響も数%程度あることが実証された。

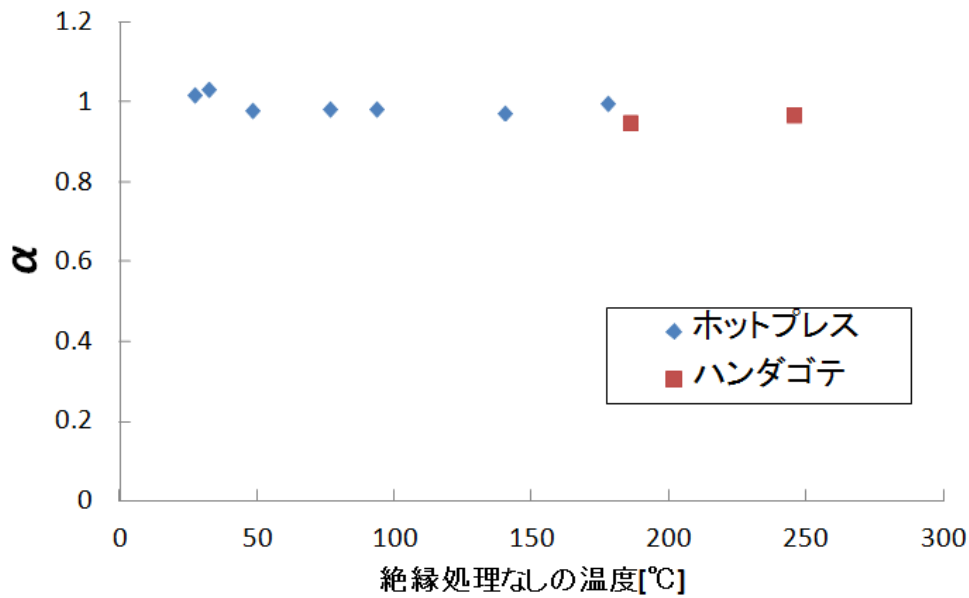


Fig.A-13 絶縁処理による影響

## 6. 結言

付録では、熱電対で発熱体の温度を測定する場合に生じる誤差を、解析と実験から検証した。輻射の影響は小さいが、発熱体から導線部への熱伝導や絶縁処理の影響まで考慮すると、30%近い誤差が生じる可能性を定性的に示すことができた。また、溶接部内で最高温度がある温度に達しても、最低温度がその温度になるまでの時差も考えられ<sup>[73]</sup>、計測される温度が最低温度であった場合、実際の温度よりも低い値が表示される。この時差の影響の評価は今回は触れないが、時差も考慮するとより大きな誤差が生じる可能性が考えられる。

## 参考文献

- [1] (財)機械システム振興協会, 委託先 (財)金属系材料研究開発センター, “航空機用等の炭素繊維強化プラスチック (CFRP) の加工技術の開発に関するフィージビリティスタディ”, 平成 23 年 3 月
- [2](株)三菱化学テクノリサーチ, “炭素繊維複合材料の加工技術に関する実態調査 調査報告書”, 平成25年1月
- [3](社)日本機械工業連合会, (財)次世代金属・複合材料研究開発協会, “平成19年度 熱可塑性樹脂複合材料の機械工業分野への適用に関する調査報告書”, (社)日本機械工業連合会, 2008.
- [4] Xiang-Fa Wu, Alexander L. Yarin, “Recent Progress in Interfacial Toughening and Damage Self-Healing of Polymer Composites Based on Electrospun and Solution-Blown Nanofibers: An Overview”, Journal of Applied Polymer Science 2013, pp.2225-2237.
- [5] D. ハル, T.W. クライン, 宮入 裕夫(訳), 池上 皓三(訳), 金原 勲(訳), “複合料入門”, 培風館,2003.
- [6] Channa Nageswaran, Colin R Bird and Reiko Takahashi, “Phased array scanning of artificial and impact damage in carbon fibre reinforced plastic (CFRP)”, Insight Vol.48, No.3, pp.155-159, 2006.
- [7] (財)高分子素材センター, “石油代替電源用新素材の試験・評価方法の標準化に関する調査研究成果報告書”, JHPC6-2(1994).
- [8] W. Cantwell, and J. Morton, “The influence of varying projectile mass on the impact response of CFRP”, Composite Structures, 13(2), pp.101–114, 1989.
- [9] Serge Abrate , “Impact on Laminated Composite Materials”, Appl. Mech. Rev. , 44 , 4(1991) , pp.155–190,2009.
- [10] Federal Aviation Administration, “Aviation Maintenance Technical Handbook Airframe Volume 1”, FAA-H-8083-31,2012.

- [11] Kiyotaka Obunai, Tadao Fukuta, Koichi Ozaki, Rei Yamagishi, Masahiro Yamamoto, “Study on Patch Bonding for Recovery of Damaged Carbon Fiber Reinforced Thermoplastics by Four-Point Bending Method”, *Journal of Materials Science Research*; Vol.2, No.3, 2013.
- [12] Federal Aviation Administration, “Composite Aircraft Structure”, AC 20-107B, 2009.
- [13] S. Sanchez-Saez, E. Barbero, R. Zaera, C. Navarro , “Compression after impact of thin composite laminates”, *Composites Science and Technology* 65 (13), 1911-1919, 2005.
- [14] N Guo , P Cawley , “Lamb waves for the NDE of composite laminates” , *QNDE* , Vol.11B , pp.1443-1450 , July 1991.
- [15] Yongju Jun , Usik Lee, “Computer-aided hybrid time reversal process for structural health monitoring”, *Journal of Mechanical Science and Technology*, Vol.26(1), 53~61, 2012.
- [16] Hyun-DoYun, Won-ChangChoi, Soo-YeonSeo, “Acoustic emission activities and damage evaluation of reinforced concrete beams strengthened with CFRP sheets”, *NDT&E International*, Vol.43, 615–628, 2010.
- [17] Todoroki A. , Tanaka Y. , and Shimamura Y. , “Delamination monitoring of graphite/epoxy laminated composite plate of electric resistance change method” , *Composites Science and Technology* , 62(9) , (200) , pp.1151-1160, 2002.
- [18] Takahide Sakagami , Shiro Kubo , “Development of a new non-destructive testing technique for quantitative evaluations of delamination defects in concrete structures based on phase delay measurement using lock-in thermography” , *Infrared Physics & Technology* , Vol.43 , pp.311-316, 2002.
- [19] M.Surgeon and M.Wevers , “The influence of embedded optical fibers on the fatigue damage progress in quasi-isotropic CFRP laminates” , *Journal of Composite Materials*, 35(11), pp.931-939, 2001.

- [20] 武田展雄, “知的複合材料システムのための構造ヘルスマニタリング技術”, 日本航空宇宙学会誌, vol.48, no.556 pp.307-312, 2000.
- [21] 平野憲芳, 吉村涼介, 木元順一, 伊藤徹, 倉石晃, 武田展雄, 榎本清志, “複合材構造健全性診断技術開発 第5章 光ファイバセンサによる衝撃損傷検知システムの開発”, 日本複合材料学会誌, 40, 3, 89-97, 2014.
- [22] Shu Minakuchi, Nobuo Takeda, Shin-ichi Takeda, Yosuke Nagao, “Alessandro Franceschetti, Xiaolin Liu, Life cycle monitoring of large-scale CFRP VARTM structure by fiber-optic-based distributed sensing”, Composites: Part A 42 (2011) 669–676.
- [23] 高垣和規, 水口周, 武田展雄, “肉厚 CFRP パイプ板厚方向ひずみの光ファイバライフサイクルモニタリング”, 日本複合材料学会誌, Vol. 39, No. 4, 2013, PP. 143-151.
- [24] “Takeda Lab. Homepage”, <http://www.smart.k.u-tokyo.ac.jp/>, 2014
- [25] Self-healing Materials: Recent Development and Application, Polymers vol.. 62, July 2013
- [26] Kazuaki SANADA, “Self-Healing of Interfacial Debonding in Fiber Reinforced Polymers”, JOURNAL OF THE SOCIETY OF RUBBER SCIENCE AND TECHNOLOGY, JAPAN Vol. 85, No. 8(2012), pp.271-276.
- [27] Joseph G. Smith, Jr., Langley Research Center, Hampton, Virginia, “An Assessment of Self-Healing Fiber Reinforced Composites”, NASA/TM–2012-217325
- [28] Soo Hyoun Cho, Scott R.White, Paul V.Braun, “Self-Healing Polymer Coatings”, Advanced Materials 2009, 21, 645-649.
- [29] Dry, C. M. MRS Proc. 1992, 276, 311.
- [30] White, S. R.; Sottos, N. R.; Geubelle, P. H.; Moore, J. S.; Kessler, M. R.; Sriram, S. R.; Brown, E. N.; Viswanathan, S. Nature 2001, 409, 794.

- [31] M.Kessler, S.White, “Self-activated healing of delamination damage in woven composites”, *Composites:Part A*, 32,683-699, 2001.
- [32] A.Patel, N.Sottos, E.Wetzel, S.White, “Autonomic healing of low-velocity impact damage in fiber-reinforced composites”, *Composites:Part A*, 41, 360-368, 2010.
- [33] L.Bao, Y.Kurota, A.Xu, K.Kemmochi, “Effect of Hollow Filler Dispersed into FRP to Inter-Laminar Fracture Toughness”, *日本複合材料学会誌*, 38(3), 101-106, 2012.
- [34] G.J.Williams, I.P.Bond, R.S.Trask, “Compression after impact assessment of self-healing CFRP”, *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, Vol.40,Issue 9, September 2009, Pages 1399–1406.
- [35] Jody W.C. Pang, Ian P. Bond, “A hollow fibre reinforced polymer composite encompassing self-healing and enhanced damage visibility”, *Composites Science and Technology* 65 (2005) 1791–1799.
- [36] B.J. Blaiszik, S.L.B. Kramer, S.C. Olugebefola, J.S. Moore, N.R. Sottos, and S.R.White, “Self-Healing Polymers and Composites”, *Annual Review of Materials Research*, Volume 40, 179-211, 2010.
- [37] Hefei Dong, Aaron P. Esser-Kahn, Piyush R. Thakre, Jason F. Patrick, Nancy R. Sottos, Scott R. White, Jeffrey S. Moore, “*Chemical Treatment of Poly(lactic acid) Fibers to Enhance the Rate of Thermal Depolymerization*”, *ACS Applied Materials & Interfaces* 2012,4,503-509.
- [38] 孫 登昊, “拡張型階層システムを用いた複合材層間剥離の検知と修復”, 東京大学大学院修士論文, 2013
- [39] J.F.Patrick, K.R.Hart, S.R.White, J.S.Moore, N.R.Sottos, “Self-Healing in Fiber-Reinforced Polymer Composites via Bioinspired Microvascular Networks”, *Proceedings of the American Society for Composites 2012-Twenty-Seventh Technical Conference*
- [40] Sheba D. Bergman and Fred Wudl, “Mendable Polymers”, *Journal of Materials Chemistry*, 2008, 18, 41-62.

- [41] Jong Se Park, Kosuke Takahashi , Zhanhu Guo, Ying Wang, Ed Bolanos, Christine Hamann-Schaffner, Erin Murphy, Fred Wudl and H.Thomas Hahn, “Toward Development of a Self-Healing Composite using a Mendable Polymer and Resistive Heating”, *Journal of COMPOSITE MATERIALS*, Vol. 42, No. 26, 2869-2881, 2008.
- [42] Xiangxu Chen, Matheus A.Dam, Kanji Ono,Ajit Mal, Hongbin Shen, Steven R.Nutt, Kevin Sheran and Fred Wudl, “A Thermally Re-mendable Cross-Linked Polymeric Material”, *Science*, Vol.295, 1698-1702, 2002
- [43] Jong Se Park, Hak Sung Kim,H. Thomas Hahn, “Healing behavior of a matrix crack on a carbon fiber/mendomer composite”, *Composites Science and Technology* 69 (2009) 1082–1087
- [44] Jong Se Park, Thomas Darlington, Anthony F.Starr, Kosuke Takahashi, Joseph Riendeau, H.Thomas Hahn, “Multiple healing effect of thermally activated self-healing composites based on Diels-Alder reaction”, *Composites Science and Technology* 70 (2010) 2154–2159
- [45] V.A. Imperiale, E. Cosentino, P.M. Weaver, I.P. Bond, “Compound joint: A novel design principle to improve strain allowables of FRP composite stringer run-outs”, *Composites: Part A* 41 (2010) 521–531.
- [46] Emile Greenhalgh, Manuel Huertas Garcia, “Fracture mechanisms and failure processes at stiffener run-outs in polymer matrix composite stiffened elements”, *Composites: Part A* 35 (2004) 1447–1458.
- [47] Sridhar Chintapalli, Mostafa S.A. Elsayed, Ramin Sedaghati, Mohammed Abdo, “The development of a preliminary structural design optimization method of an aircraft wing-box skin-stringer panels”, *Aerospace Science and Technology* 14 (2010) 188–198.
- [48] “Kairos Composites Engeneering HP”,  
<http://www.kairoscomposites.com/services/structural-analysis/boring787-analysis-memo> ,2014.



- [49] 小野木重治(訳), L.E.NIELSEN, “高分子と複合材料の力学的性質”, 化学同人, 1976年
- [50] 金崎真人, “熱可塑性を利用した薄層化CFRTP 積層板の衝撃損傷修復と圧縮強度の関係”, 京都大学博士学位論文, 2014
- [51] 成澤郁夫, “プラスチック材料強度シリーズⅠ プラスチックの機械的性質(初版)”, シグマ出版, 1994
- [52] 成澤郁夫, “プラスチック材料強度シリーズⅡ プラスチックの破壊靱性(初版)”, シグマ出版, 1993
- [53] J.C.Prichard, P.J.Hogg, “The role of impact damage in post-impact compression testing”, Composites, 21(6), pp.503-511, 1990.
- [54] 松嶋正道, 石川隆司, 林洋一, 小林繁夫, “DCB試験片による炭素繊維強化熱可塑樹脂及び熱硬化樹脂複合材料の層間破壊靱性に関する実験的研究”, 航空宇宙技術研究所報告 1096号, 1991
- [55] (社)日本機械工業連合会, (財)次世代金属・複合材料研究開発協会, “平成20年度 熱可塑性樹脂複合材の航空機分野への適用に関する調査報告書”, (社)日本機械工業連合会, 2009.
- [56] 同志社大学研究開発推進機構 複合材料研究センター, “先進複合材料の開発とその応用—先端複合材料技術による自動車開発—”, 2013.
- [57] A.Yousefpour, M.Hojjati, J.P.Immarigeon, “Fusion Bonding/Welding of Thermoplastic Composites”, Journal of Thermoplastic Composite Materials, 17(4), pp.303-341, 2004.
- [58] F.Yang, R.Pitchmani, “Interlaminar Contact Development During Thermoplastic Fusion Bonding”, Polymer Engineering & Science, 42(2), pp.424-438, 2002.
- [59] 石川隆司, 野口義男, 松嶋正道, “炭素繊維強化熱可塑性樹脂複合材の成形とその高靱性力学特性に関する実験的研究”, 日本複合材料学会誌, 13(2), pp.63-71, 1987.
- [60] G.Reyes, U.Sharma, “Modeling and damage repair of woven thermoplastic composites subjected to low velocity impact”, Composite Structures, 92(2), pp.523-531, 2010.

- [62] Shu Minakuchi, Keigo Uhira, Yutaka Terada, Nobuo Takeda, “Quality Control of Composite Bonded Joints Using Fiber-Optic-Based Process Monitoring”, SAMPE Journal Vol.51, No.1, pp.44-51, 2015.
- [63] L. Sorensen, T. Gmur, J. Botsis, Residual strain development in an AS4/PPS thermoplastic composite measured using fibre Bragg grating sensors, Composites Part A: Applied Science and Manufacturing 37 (2) (2006) 270–281.
- [64] 影山和郎, “複合材料力学入門 第5章 複合材料の破壊力学の初歩”, 日本複合材料学会誌, 22, 5 (1996), 193-199.
- [65] “JAXA 先進複合材料特性データベース”, <http://www.jaxa-acdb.com/>, 2014
- [66] Thomas A. Plaisted, Sia Nemat-Nasser, “Quantitative evaluation of fracture, healing and re-healing of a reversibly cross-linked polymer”, Acta Materialia 55 (2007) 5684–5696.
- [67] 永井直人, 岡田英樹, “樹脂の熱特性分析の基礎技術確立”, 工業技術研究報告書, No.41, 2012
- [68] J. G. Williams : The Fracture Mechanics of Delamination Tests", J. Strain Analy, Vol.24, No. 4, (1989), 207- 214.
- [69] S. Hashemi, A. J. Kinloch and J. G. Williams : The Analysis of Interlaminar Fracture in Uniaxial Fibre-Polymer Composites, Proc. R. Soc. Lond., A427 (1990), 173.
- [70] Dassault Systems SIMULIA, “Abaqus 6.12 Theory Manual”, 2012.
- [71] Toshio Ogasawara, Yoshiyasu Hirano, Akinori Yoshimura, “Coupled thermal-electrical analysis for carbon fiber/epoxy composites exposed to simulated lightning current”, Composites:Part A, 41(2010), 973-981.
- [72] Umesh Gaur, Suk-fai Lau, Brent B. Wunderlich, Bernhard Wunderlich, “Heat Capacity and Other Thermodynamic Properties of Linear Macromolecules. VIII. Polyesters and Polyamides”, J. Phys. Chem. Ref. Data, Vol.12, No.1, 1983.

[73] Warren H. Giedt, 横堀進(訳), 久我修(訳), “基礎伝熱工学”, (株)丸義, pp.244-259, 昭和48年

## 本研究に関する発表

久木田泰記, 小笠原俊夫, 武田展雄, “ジュール熱を用いたCFRTP自己修復システムの提案 (Proposal for the Self-Healing System in CFRTP using Electrical Heating)”, 第39回複合材料シンポジウム, 2014

## 謝辞

本研究を執筆するに当たり、数多くの方の助言・協力をいただきました。

指導教官である小笠原俊夫教授には、実験方法や色々な改善案等、研究に詰まった際、相談に乗っていただき、大変お世話になりました。特に本研究の集大成とも言える実験は氏の協力なしには達成できませんでした。この場を借りて心よりお礼申し上げます。また、JAXAの設備や実験装置等を自由に使える恵まれた研究環境で研究生生活を送れたことはとても貴重な経験となりました。さらに、研究設備の使い方や試験方法等をご指導いただいた、JAXAの職員並びにIJSの職員の方々にも合わせて厚くお礼申し上げます。

武田展雄教授、水口周准教授には、武田研輪講に参加させていただき、数々の助言をいただきました。様々な教授や学生からの意見を聞く機会を設けていただき、まだまだ稚拙ながらも大いに見識を広げることができました。深く感謝申し上げます。

武田研特任研究員のJuho Siivola氏、武田研博士課程の高垣和規氏、東田拓平氏、灘部岳晃氏、武田研卒業生の伊藤悠策氏、宇平圭吾氏、真田輝久氏、孫登昊氏、津田皓正氏、Park Sang Chul氏、武田研同期の櫻山直也氏、鈴木貴恵氏、寺田愉考氏、横田和樹氏、武田研修士課程の丹羽翔麻氏、武田研学部生の岩永健太郎氏、久田深作氏、JAXAの同期である綾部信吾氏、伊井慎悟氏、塩田一馬氏、花光悟氏、林亮佑氏、福田翔氏、三上恵仁氏を初めとする研修生の方々には公私共に大変お世話になり、非常に楽しい大学院生活を送ることができました。深くお礼申し上げます。

2015年2月 久木田 泰記