

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 17 年度

修士論文

SMAハニカムを用いた形状回復サンドイッチパネルの
加熱技術に関する研究

2006 年 2 月提出
指導教員 武田 展雄 教授

46212 村上 賢

目次

第1章	序論	7
1.1	サンドイッチパネルとは	7
1.2	SMA とは	10
1.3	サンドイッチパネルの損傷回復への SMA の利用	11
1.4	本研究の目的と論文構成	12
第2章	SMA	13
2.1	SMA の種類と各々の持つ特性	13
2.2	形状回復効果のメカニズム	15
2.3	温度ヒステリシス	18
2.4	機械的性質	19
第3章	SMA ハニカムコアサンドイッチの作製	20
3.1	諸元の決定	20
3.1.1	SMA の合金組成の選択	20
3.1.2	SMA 箔厚とハニカムセルサイズの決定	22
3.2	形状の記憶	25
3.3	SMA ハニカムコアサンドイッチパネルの作製	27
3.4	本章についての考察とまとめ	29
第4章	衝撃損傷の回復	30
4.1	面外衝撃損傷回復実験	30
4.1.1	実験の概要	30
4.1.2	実験結果	31
4.2	衝撃損傷及び回復に伴う曲げ剛性の評価	33
4.2.1	梁、平板における曲げ剛性	33
4.2.2	横荷重負荷時のサンドイッチパネル内部の応力	35
4.2.3	サンドイッチパネルの剛性	37
4.2.4	形状回復による剛性回復の評価	38
4.3	本章についての考察とまとめ	38

第 5 章	CFRP 積層板へのニクロム線埋込み実験.....	39
5.1	ニクロム線埋込みの意図.....	39
5.2	埋込み位置による局所的加熱効率の評価.....	41
5.2.1	埋込み位置.....	41
5.2.2	埋込み位置による局所的加熱効率測定実験の概要.....	42
5.2.3	局所的加熱効率測定実験の結果.....	44
5.3	埋込み断面観察.....	45
5.4	通電状況の評価.....	50
5.5	本章についての考察とまとめ.....	54
第 6 章	CFRP 積層板中の熱伝導解析.....	55
6.1	解析手法.....	55
6.1.1	構成式.....	55
6.1.2	物性値.....	56
6.1.3	解析モデル.....	57
6.2	解析結果.....	59
6.3	本章についての考察とまとめ.....	60
第 7 章	SMA ハニカムコアサンドイッチパネルの熱伝導解析.....	61
7.1	解析手法.....	61
7.1.1	構成式.....	61
7.1.2	物性値.....	61
7.1.2	解析モデル.....	63
7.2	解析結果.....	65
7.3	本章についての考察とまとめ.....	67
第 8 章	埋込みニクロム線による SMA ハニカムコアサンドイッチの加熱実験.....	68
8.1	実験の概要.....	68
8.2	実験結果.....	71
8.3	解析との比較.....	72
8.4	本章についての考察とまとめ.....	73
第 9 章	結論および今後の課題.....	74
附録 1	Galerkin 法による有限要素法の定式化.....	76
附録 2	Crank-Nicolson 法による時間積分.....	79
参考文献	80
本論文に関する学会発表など	81
謝辞	81

図目次

図 1.1	サンドイッチ構造.....	7
図 1.2	ハニカム構造.....	8
図 1.3	ハニカムコアサンドイッチパネル.....	8
図 1.4	Boeing787 への先進複合材の適用部位.....	9
図 1.5	衝撃損傷が発生したサンドイッチパネル.....	11
図 1.6	形状回復サンドイッチパネルの概念図.....	11
図 2.1	鉄の冷却時における結晶構造の変化.....	15
図 2.2	双晶導入時とすべり発生時の模式図.....	16
図 2.3	形状記憶効果のメカニズムの模式図.....	17
図 2.4	母相とマルテンサイト相の化学的自由エネルギーの温度依存性とマルテンサイト変態温度の関係.....	18
図 2.5	SMA の応力 - ひずみ線図.....	19
図 3.1	Ti-Ni 合金の組成と変態温度の関係.....	21
図 3.2	ハニカム構造の 1 セル.....	22
図 3.3	形状保持用金型の模式図.....	25
図 3.4	恒温槽.....	26
図 3.5	形状保持用金型と形状記憶後の SMA 箔.....	26
図 3.6	SMA 箔の接着.....	27
図 3.7	接着後の SMA ハニカムコア.....	28
図 3.8	高さ 10 mm に切断後の SMA ハニカムコア.....	28
図 3.9	SMA ハニカムコアサンドイッチパネル.....	29
図 4.1	試験片寸法.....	30
図 4.2	衝撃負荷前の SMA ハニカムサンドイッチパネルの側面画像.....	31
図 4.3	衝撃負荷後の SMA ハニカムサンドイッチパネルの側面画像.....	31
図 4.4	加熱後の SMA ハニカムサンドイッチパネルの側面画像.....	31

図 4.5	衝撃負荷前後および加熱後の試験片表面の変位測定結果	32
図 4.6	曲げモーメントを受ける梁や平板の応力分布	33
図 4.7	軽量構造の考え方	34
図 4.8	曲げモーメントを受けるサンドイッチ板の応力分布	35
図 4.9	せん断力を受けるサンドイッチ板の応力分布	36
図 5.1	CFRP に対するニクロム線埋込み位置	41
図 5.2	測定装置の概要	43
図 5.3	測定点温度の時間変化	44
図 5.4	試験片 A におけるニクロム線埋込み断面	46
図 5.5	試験片 A におけるニクロム線埋込み部の拡大図	46
図 5.6	試験片 B におけるニクロム線埋込み断面	47
図 5.7	試験片 B におけるニクロム線埋込み部の拡大図	47
図 5.8	試験片 C におけるニクロム線埋込み断面	48
図 5.9	試験片 C におけるニクロム線埋込み部の拡大図	48
図 5.10	試験片 D におけるニクロム線埋め込み断面	49
図 5.11	試験片 D におけるニクロム線埋込み部の拡大図	49
図 5.12	電流経路と加熱領域	50
図 5.13	90° 層に挟まれたニクロム線と炭素繊維の接触状況	51
図 5.14	0° 層中に埋められたニクロム線と炭素繊維の接触状況	51
図 5.15	一方向材の電気伝導	52
図 5.16	0° 層と 90° 層の接触部の電気伝導	52
図 5.17	抵抗測定用試験片寸法	53
図 6.1	積層構成[0/0/0/0]の解析モデル	57
図 6.2	積層構成[90/90/90/90]の解析モデル	58
図 6.3	メッシュ分割後の CFRP 解析モデル	58
図 6.4	積層構成[0/0/0/0], ニクロム線直近の C F R P 表面温度解析結果と実験値	59
図 6.5	積層構成[90/90/90/90], ニクロム線直近の C F R P 表面温度解析結果と実験値	60
図 7.1	潜熱の取り扱い	62
図 7.2	解析範囲	63
図 7.3	SMA ハニカムコアサンドイッチパネル解析モデル	64
図 7.4	メッシュ分割後の SMA ハニカムサンドイッチパネル解析モデル	64
図 7.5	t = 0sec における温度分布解析結果	65
図 7.6	t = 60sec における温度分布解析結果	65

図 7.7	$t = 120\text{sec}$ における温度分布解析結果	65
図 7.8	$t = 180\text{sec}$ における温度分布解析結果	66
図 7.9	$t = 240\text{sec}$ における温度分布解析結果	66
図 7.10	$t = 300\text{sec}$ における温度分布解析結果	66
図 8.1	ニクロム線埋込み CFRP	68
図 8.2	ニクロム線を組み込んだ SMA ハニカムサンドイッチパネル	69
図 8.3	面外方向からの面荷重による圧縮	70
図 8.4	圧縮完了時の様子	70
図 8.5	圧縮前の SMA ハニカムコアサンドイッチパネル	71
図 8.6	10% 圧縮後の SMA ハニカムコアサンドイッチパネル	71
図 8.7	300sec 通電後の SMA ハニカムコアサンドイッチパネル	71
図 8.8	加熱による回復範囲の実験と解析の比較	72

表目次

表 2.1	Ti-Ni 合金と Cu-Zn-Al 合金の性質	14
表 3.1	Ti-Ni 合金と Cu-Zn-Al 合金の特長の比較.....	20
表 5.1	各試験片の抵抗測定値と印加電圧設定値	42
表 5.2	抵抗測定値	53
表 6.1	CFRP, ニクロム線の物性値.....	56
表 7.1	SMAハニカムコアサンドイッチの熱伝導解析に用いた物性値	61

第1章 序論

1.1 サンドイッチパネルとは

サンドイッチパネルとは、複合構造の一種で、図 1.1 のように薄くて耐荷能力のある高強度の上下表面材を比較的厚い軽量心材で結合して構造効率を高めた形態であり、軽量化が要求される航空機、宇宙飛翔体に広く応用されている。

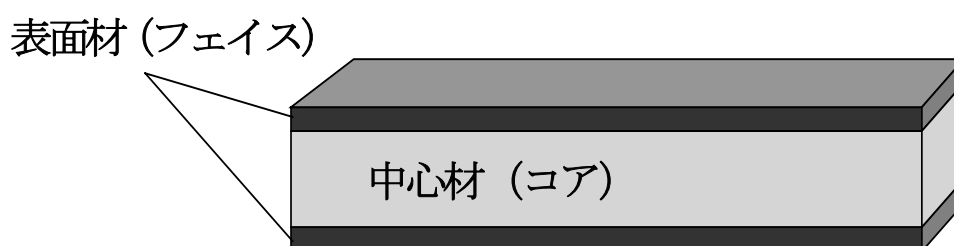


図 1.1 サンドイッチ構造

表面材は面内負荷と曲げ応力を支える役目をし、これにはアルミニウム合金、繊維強化複合材料、チタン、鋼などが用いられる。

心材は、表面材をある一定の幅で分離することにより面に垂直な変形に対する抵抗を与えると同時に、パネル表面に垂直な面に沿う方向に、ある程度のせん断剛性を付与する。心材には発泡ポリマーや合成ゴム、無機セメント、バルサ材のように種々の材質や構造が利用される。

よく用いられる心材の一つに、図 1.2 に示すような“ハニカム構造”がある。これは、薄いホイルを、六角柱型のセルの集合体に加工したもので、六角柱型セルの軸方向がパネル表面に対して垂直になるようにして使用する。用いられる材質は表面材とほぼ同じで、アルミニウム合金、繊維強化複合材料、チタンなどが一般的である。

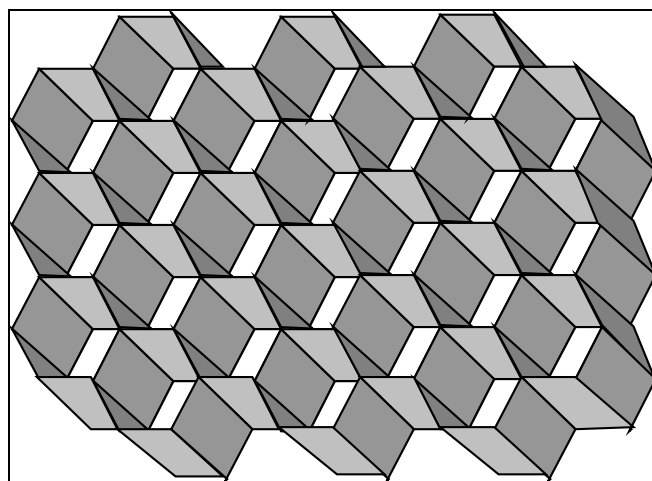


図 1.2 ハニカム構造

このハニカム構造を、上下から表面材で挟んだ構造が、ハニカムコアサンドイッチパネルと呼ばれる構造である。ハニカムコアサンドイッチパネルの模式図を図 1.3 に示す。

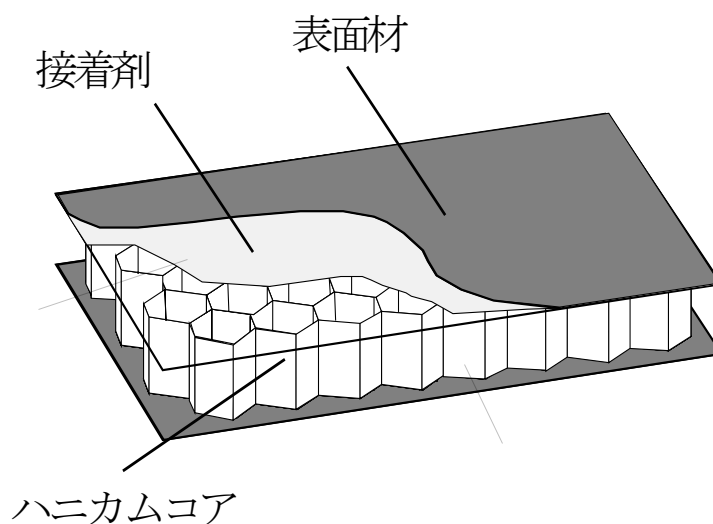


図 1.3 ハニカムコアサンドイッチパネル

サンドイッチパネルの持つ構造材としての特長は、曲げ剛性、面内圧縮強度が優れていることである。この特長を生かして、屋根、床、壁などの建築用から、航空機の翼、胴体、尾翼皮材など多様な部位に利用されている。

サンドイッチパネルの適用例の一つとして、Boeing 社が現在開発中の B-787 における適用部位を図 1.4 に示す。B-787 機において、主翼付け根のフィレット、尾翼外板の一部、フラップ、スポイラーを含む各操縦翼面、レドーム等にサンドイッチパネルが用いられていることがわかる。

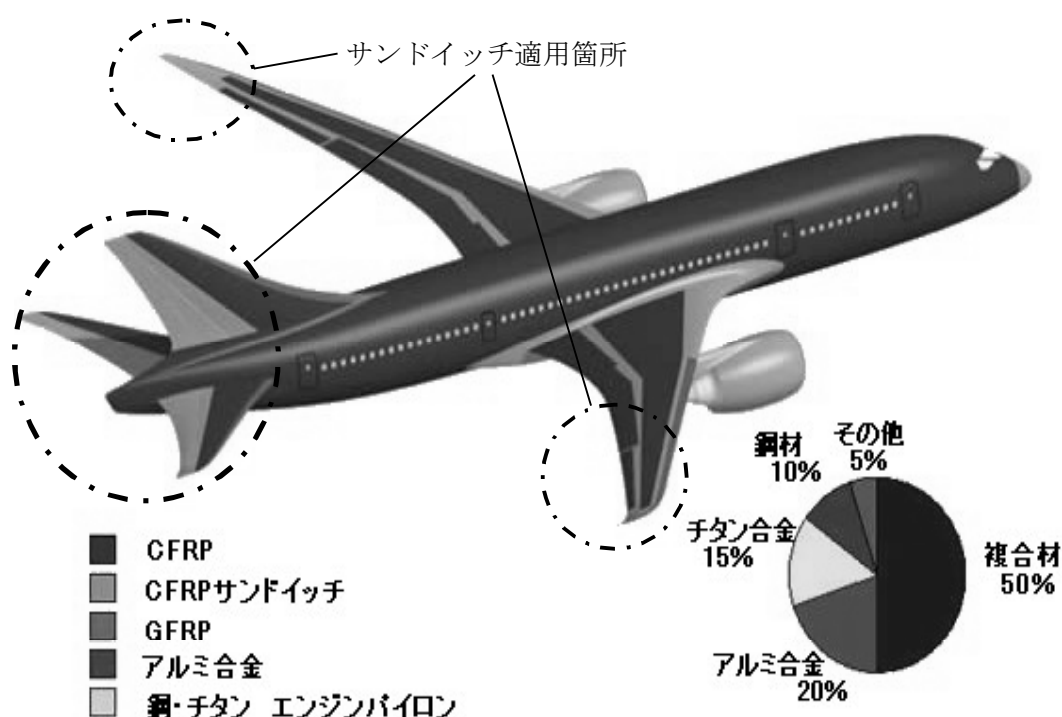


図 1.4 Boeing787 への先進複合材の適用部位

1.2 SMA とは

SMA とは、形状記憶合金 (Shape Memory Alloy) のことで、形状記憶材料の一種である。SMA は通常の金属材料とは異なり、一見塑性ひずみに見える数%のひずみが生じて、熱を加えてやることによりひずみを取り除かれ、元の形状に戻るといった特徴を持っている。

主な形状記憶材料としては、合金 (SMA)・強誘電体・高分子・セラミックスが挙げられる。表 1.1 は、これらの各種形状記憶材料の特性を表している。

表 1.1 形状記憶材料の種類

	SMA	強誘電体	ポリマー (高分子)	セラミックス
形状回復ひずみ (%)	1~10	~0.1	200~1000	1
回復応力 (MPa)	500	50	10~30	40
駆動源	熱	電界	熱	熱

この中で、変形量が大きく、実用化されているものは SMA と形状記憶ポリマーである。SMA の形状記憶現象は、温度および応力に依存して生じるマルテンサイト変態とその逆変態に基づく現象である。形状記憶ポリマーでは、相転移温度の上下の温度における材料の機械的性質の違いに起因する形状固定性を利用する。

表 1.1 から分かるとおり、形状記憶ポリマーの回復ひずみは数百%と大きいので、回復変形の利用に適している。また、形状記憶ポリマーは軽く、安価で、加工性に優れており、熱エネルギー以外の化学エネルギーや光エネルギーなどによっても形状回復効果を示す。

これに対して SMA は、回復応力が数百 MPa と大きいので、回復力の利用に適している。また、疲労強度も高い。これらの特長を活かして、各種家電・ロボット・人工心臓・人工衛星などのアクチュエータとして、回復力を利用したい場面に用いられる。

1.3 サンドイッチパネルの損傷回復への SMA の利用

サンドイッチパネルは優れた曲げ剛性及び面内圧縮強度を持っているが、面外方向から衝撃が加わると、図 1.5 のように、コアが座屈し、表皮に曲がりが生じることがある。そういった衝撃損傷の発生は、曲げ剛性、圧縮強度等の強度の低下に繋がる。剛性および強度の低下が起こると構造材料としての信頼性が損なわれるため、損傷部品の交換が必要となり、多大なコストと手間がかかることになる。

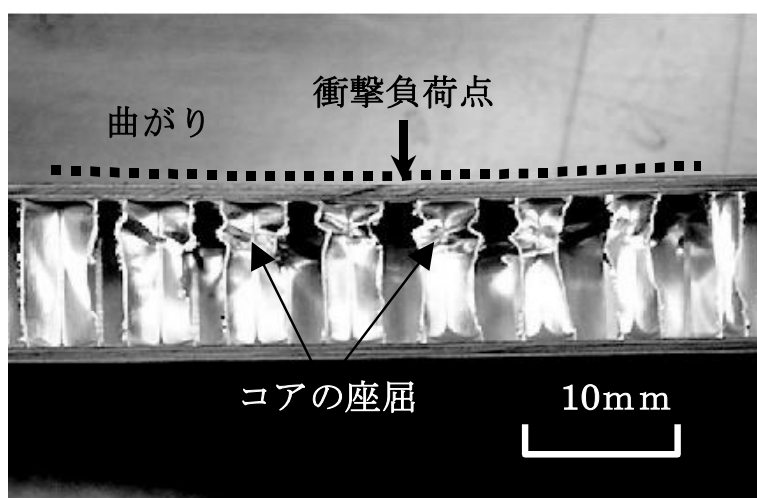


図 1.5 衝撃損傷が発生したサンドイッチパネル

そこで、ハニカムコアの部分の材質をアルミから SMA に置き換えることによって、損傷回復機能を持ったサンドイッチパネルが実現するのではないかと期待できる。形状回復サンドイッチパネルの概念図を図 1.6 に示す。面外からの衝撃が加わった場合、コアが座屈する。しかし、SMA 製のコアならば、外部からエネルギーを加えて加熱することにより形状が回復する。つまり、部品交換ではなく、修理しながら使うことのできる材料となる。

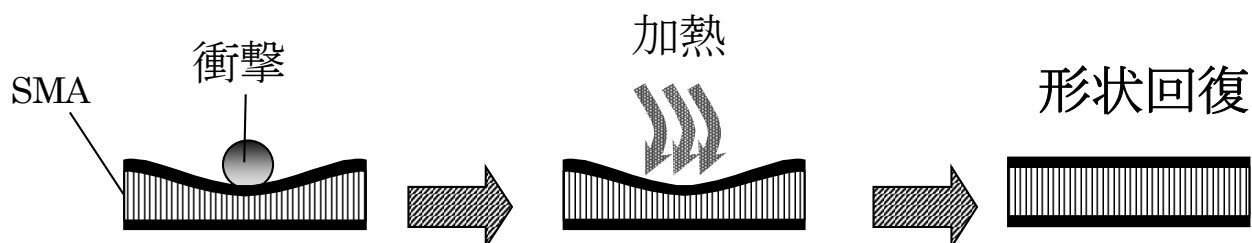


図 1.6 形状回復サンドイッチパネルの概念図

1.4 本研究の目的と論文構成

本研究では、表面材として CFRP 積層板、心材として SMA ハニカムコアを採用したサンドイッチパネルを作製し、面外方向からの衝撃損傷が回復可能であることを示すとともに、回復に必要な熱エネルギーを供給する手段の一つとして CFRP 積層板中に埋め込んだニクロム線を熱源とする方法を提案・評価することを目的とする。

本論文の構成を以下に示す。

第2章では SMA の持つ様々な特性について説明する。第3章では、SMA ハニカムコアサンドイッチの作製方法及び従来材との比較について述べる。第4章では、作製した SMA ハニカムコアサンドイッチに面外衝撃荷重を加え、発生した損傷とその回復について、曲げ剛性の観点から評価する。第5章では、加熱手段として CFRP 積層板中にニクロム線を埋込み、その埋込み位置と局所的な加熱効率についての評価を行う。第6章では、CFRP 積層板中の熱伝導について、有限要素法による数値解析を行う。第7章では、SMA ハニカムコアサンドイッチパネル全体にモデルを拡張して、有限要素法による数値解析を行う。第8章では実際に埋込みニクロム線によって SMA ハニカムコアサンドイッチを加熱し、損傷が回復することを示す。また、第7章の解析との整合性を確かめる。そして最後に第9章で本論文の結論および今後の課題について述べる。

第2章 SMA

2.1 SMAの種類と各々の持つ特性

形状記憶特性を示す合金には、Au-Cd 合金、In-Tl 合金、Cu-Zn-Al 合金、Ti-Ni 合金など、多くの種類がある。その中で、特に良好な形状記憶特性を示す合金として工業上実際に使用されているものは、Ti-Ni 合金、Cu-Zn-Al 合金の2種のみである。

これら2種の合金の持つ特性を比較したものが表 2.1 である。もちろん、合金中の各元素の組成比により、これらの値は変化することに注意されたい。

Ti-Ni 合金は形状記憶特性全般について優れており、繰り返し寿命、耐食性が特に良好である。この特性のため、繰り返し使用回数の多いスイッチや、アクチュエータなどへの用途、医用機器や産業用機器など高い信頼性を要求される分野ではほとんど Ni-Ti 合金が用いられる。

一方、Cu-Zn-Al 合金は低価格であるため、繰り返し使用頻度が低く、コストが重要視される箇所に適している。また、電気伝導率や熱伝導率が高いので、電子材料部品として有望視されている。

表 2.1 Ti-Ni 合金と Cu-Zn-Al 合金の性質

	Ti-Ni 合金	Cu-Zn-Al 合金
密度 (Mg/m^3)	6.45	7.76
縦弾性係数 (GPa) (マルテンサイト相) (オーステナイト相)	15~25 30~60	7~15 18~35
横弾性係数 (GPa) (マルテンサイト相) (オーステナイト相)	5~14 14~27	2~5 10~18
引張強さ (MPa)	1000	700
破断伸び (%)	60	8
膨張係数 ($10^{-6} K^{-1}$)	10.4	18
比熱 ($kJ/(kg \cdot K)$)	0.46	0.39
潜熱 (J/mol)	-1548 ± 84	-297
熱伝導率 (常温) ($W/(m \cdot K)$)	10	120
電気抵抗 ($10^{-8} \Omega \cdot m$)	80	9
磁化率 ($10^{-10} H/m$)	0.8~1.4	非磁性
回復ひずみ (%)	~8	~4
回復応力 (kgf/mm^2)	~40	~20
繰返し寿命	10^5 ($\varepsilon = 0.02$) 10^7 ($\varepsilon = 0.005$)	10^2 ($\varepsilon = 0.02$) 10^5 ($\varepsilon = 0.005$)
耐食性	良い	問題あり、特に応力腐食割れ
加工性	良くない	あまり良くない
形状記憶処理	比較的容易	難しい
コスト	比較的高い	Ti-Ni の約 1/10

2.2 形状回復効果のメカニズム

金属を高温状態から徐冷すると、高温で安定な結晶構造から、低温で安定な結晶構造へと変化する。鉄を例にとってみると、高温では面心立方晶が安定であるが、徐々に温度を下げていくと低温で安定な体心立方晶へと変化する。しかし、急激に温度を下げた場合、低温で安定な結晶構造へと変化するのではなく、高温時の結晶構造を基にした新たな結晶構造が作られる。これが“マルテンサイト”と呼ばれる状態である。鉄の例では、マルテンサイト状態は体心正方晶である。

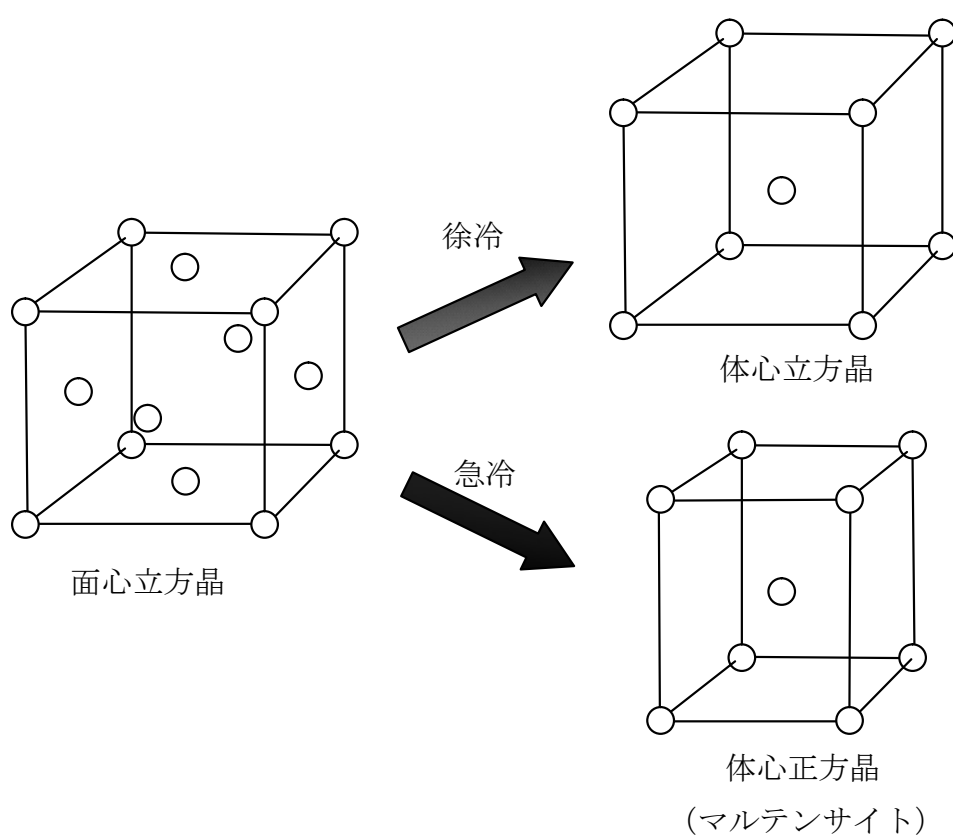


図 2.1 鉄の冷却時における結晶構造の変化

マルテンサイト相に対して、元の状態を“母相”あるいは“オーステナイト相”と呼ぶ。母相からマルテンサイト相へと相変態することを“マルテンサイト変態”、マルテンサイト相から母相へと相変態することを“逆変態”と呼ぶ。

マルテンサイト変態が起こると、マルテンサイト相と母相との界面を、無理なひずみを作らず結合させる必要がある。その際に、鉄などの通常の金属では、多量の転位が発生する。一方、Ti-Ni合金などのSMAでは、転位は発生せず、“双晶”と呼ばれる微細構造が発生する。転位が発生し、すべりが起こると原子同士の隣接関係が崩れてしまうのに対し、双晶は隣接関係を維持したまま、格子が変形している状態である。

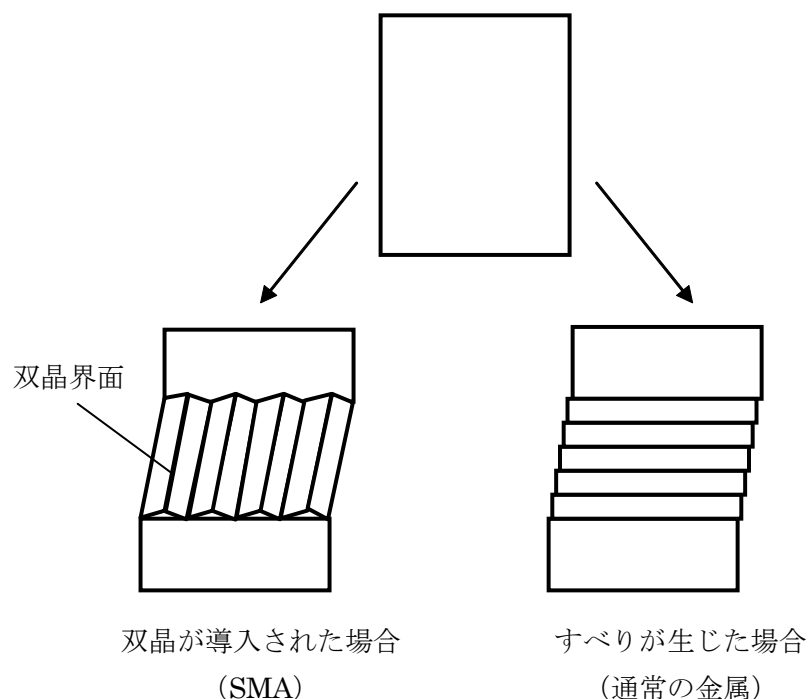


図 2.2 双晶導入時とすべり発生時の模式図

双晶はマルテンサイト変態時に発生し、逆変態時に消滅する。双晶においては原子間の隣接関係が維持されているため、双晶が消滅した後にできる母相の結晶構造は、元の母相の結晶構造と同じである。よって、双晶の状態での変形は、逆変態によって元に戻ることができる。これが形状記憶効果のメカニズムである。一連の状態変化を図 2.3 に模式的に示す。

マルテンサイト変態は、合金ごとに異なる“マルテンサイト変態点”より低い温度まで冷却することにより起こる。しかし、マルテンサイト変態点よりも少し高い温度においても、負荷を加えることで起こる。このような、負荷によって起こるマルテンサイト変態を、“応力誘起マルテンサイト変態”と呼ぶ。

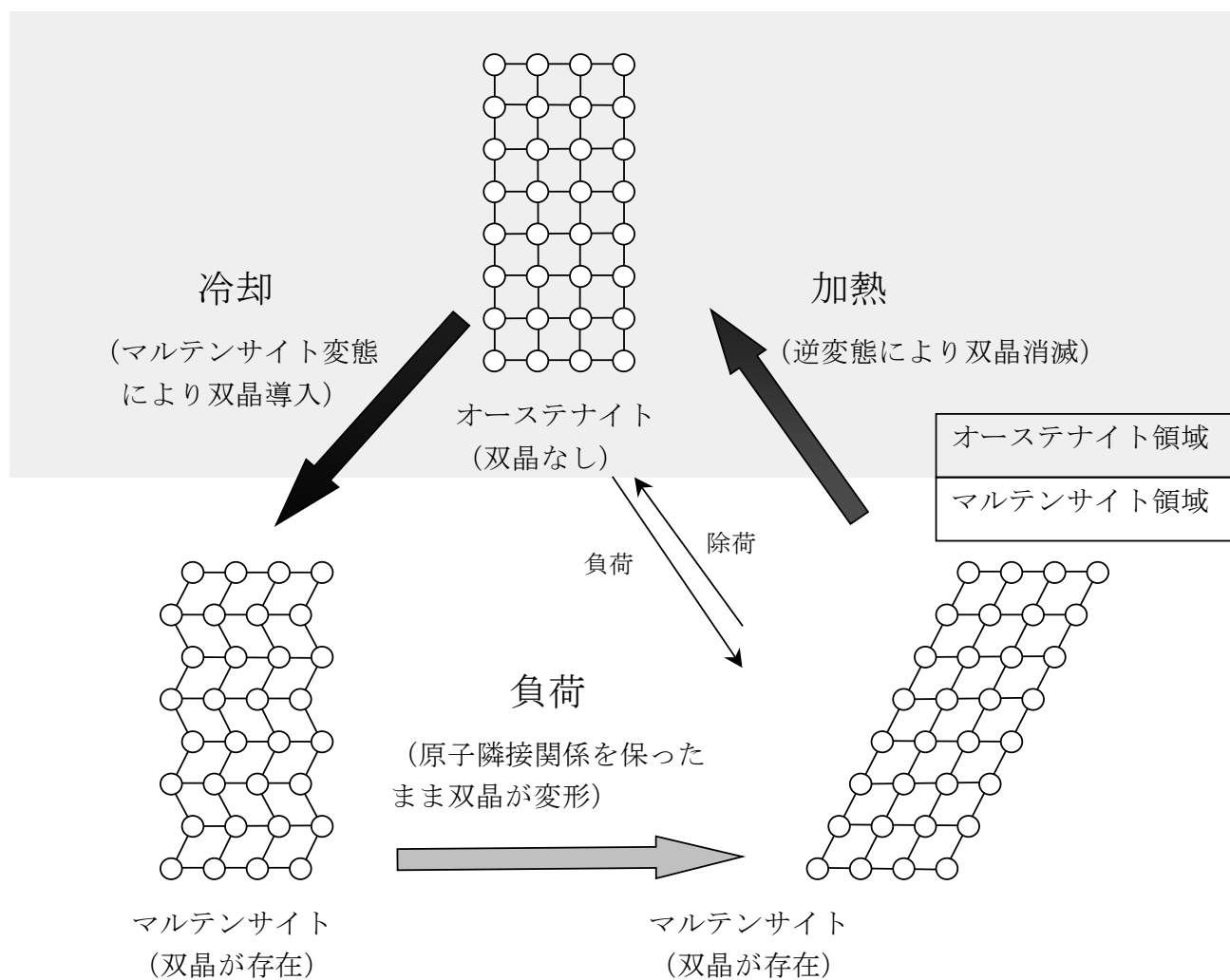


図 2.3 形状記憶効果のメカニズムの模式図

2.3 温度ヒステリシス

一般に、二つの相が共存する際、その温度において化学的エネルギーが低い相の方が安定となる。つまり、図 2.4 のように、化学的エネルギーが逆転する温度 T_0 を境に、二つの相が安定領域を分かち合っている。

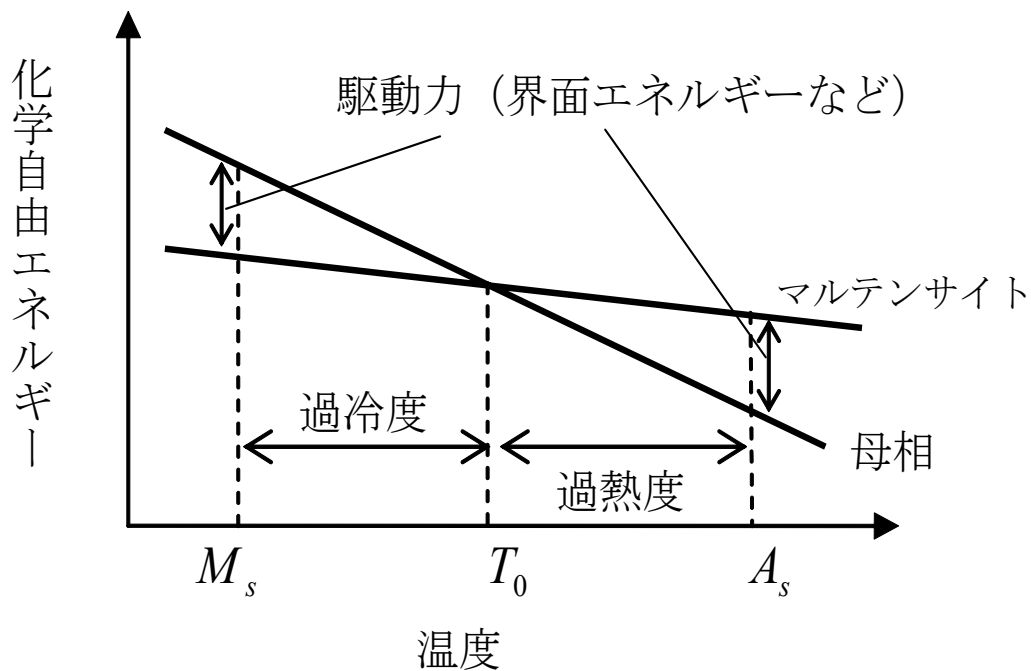


図 2.4 母相とマルテンサイト相の化学的自由エネルギーの温度依存性とマルテンサイト変態温度の関係

平衡温度 T_0 以上で母相が安定に、 T_0 以下でマルテンサイト相が安定になる。しかし、マルテンサイト変態のように一次の相変態の場合には、変態ひずみエネルギー、界面エネルギーなどの非化学的自由エネルギーが生じるので、両相の化学的自由エネルギーの差がこのエネルギー以上になる M_s 点まで過冷却しなければ、変態は開始しない。逆変態の際も同様に、 A_s 点までの過加熱が必要となる。よって、同じ温度 T においても、それまでの温度履歴によって異なる状態となることがある。以下、 M_s とはマルテンサイト変態開始温度、 A_s とは逆変態開始温度のことを指す。この温度ヒステリシスは、SMA の場合は数度～数十度である。

2.4 機械的性質

SMAは、温度により2通りの応力 - ひずみ線図を描く。その応力 - ひずみ線図を図2.5に示す。

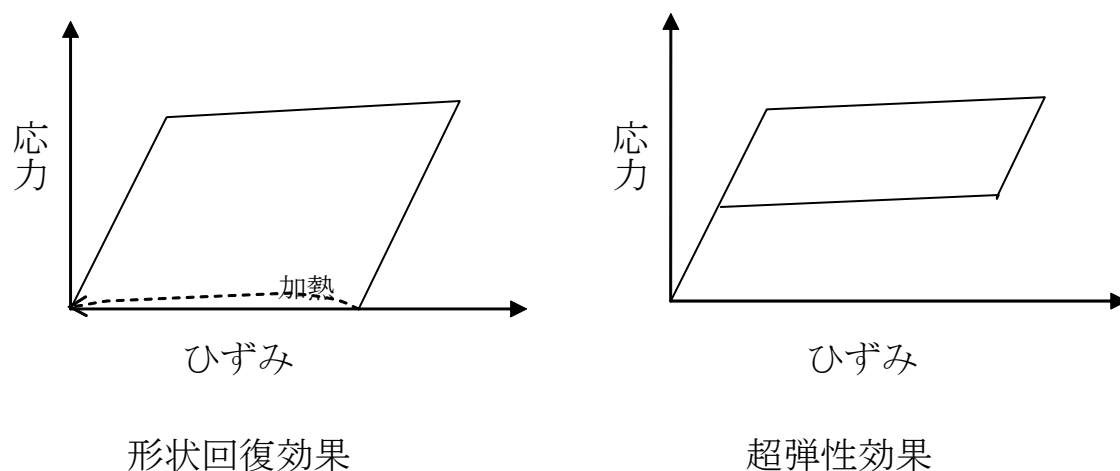


図 2.5 SMA の応力 - ひずみ線図

逆変態開始温度 A_s よりも低い温度においては、マルテンサイト相の状態にあるため、図 2.5 の左図のように形状回復効果を示す。逆変態終了温度 A_f よりも少し高い温度においては、母相の状態にあるが、応力誘起マルテンサイト変態を起こすため、図 2.5 の右図のような応力 - ひずみ曲線を描く。このような効果を、超弾性効果と呼ぶ。

A_s から A_f の間の温度においては、両図の特徴が組み合わさった線を描き、 A_f よりもはるかに高い温度においてはマルテンサイト変態がまったく起こらないため、回復効果は一切現れない。

第3章 SMA ハニカムコアサンドイッチの作製

損傷回復機能を持ったサンドイッチパネルを実現するため、材料に SMA 箔を使ったハニカムコアサンドイッチを作製した。本章では諸元の決定から完成に至るまでの SMA ハニカムコアサンドイッチの作製過程について述べる。

3.1 諸元の決定

3.1.1 SMA の合金組成の選択

2.1 節で述べたように、現在工業的に利用されている SMA は Ti-Ni 合金と Cu-Zn-Al 合金の 2 種類である。両者を比較したときの各々の特長をもう一度、表 3.1 にまとめる。

表 3.1 Ti-Ni 合金と Cu-Zn-Al 合金の特長の比較

Ti-Ni 合金の特長	Cu-Zn-Al 合金の特長
比剛性、比強度が高い 最大回復応力が大きい 最大回復ひずみが大きい 繰り返し寿命が長い 耐食性が良い 形状記憶処理が容易	安価である 熱伝導率、電気伝導率が高い

表 3.1 より、Cu-Zn-Al 合金の方が安価であるという点を除くと、Ti-Ni 合金の方が様々な特性の点で優れていることが分かる。特に、SMA ハニカムサンドイッチへの適用を考えると、比剛性及び比強度、最大回復ひずみ、耐食性の点で優れているのは大きな魅力である。また、Ti-Ni 合金は確かに現時点では高価ではあるが、その高価なコストの大部分が製造コストであることから、今後の製造過程の改良や、大量生産などによりコストの削減が期待できる。

以上の理由から、Ti-Ni 合金を採用した。

次に、Ti-Ni の合金組成を考える。合金組成により様々な特性が変化するが、最も大きく影響するのは変態温度である。Ni 量と A_f 点の関係は図 3.1 の通りである。変態温度を 60°C に設定するため、Ni 量を $50.2\text{at}\%$ と決定した。

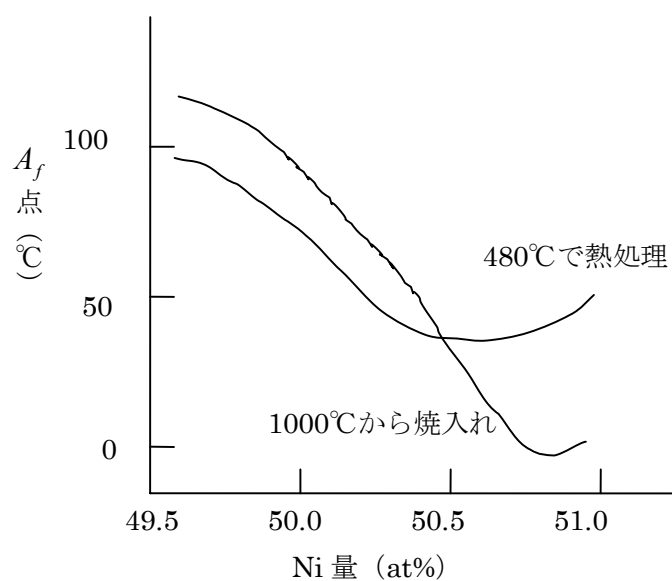


図 3.1 Ti-Ni 合金の組成と変態温度の関係

3.1.2 SMA 箔厚とハニカムセルサイズの決定

3.1.1 節で決定した合金組成に従って、今回の SMA ハニカムコアサンドイッチパネルに用いる SMA 箔として、Ti-50.2at%Ni 箔（古河電気工業）を選んだ。

残るハニカムコアの諸元として、SMA 箔厚とハニカムセルサイズがある。比剛性の観点から、最適な箔厚とセルサイズを決定する。

図 3.2 に示すように x - y 座標軸を設定し、実線部を 1 セルと考える。箔厚を t_H 、六角形の一边を a とする。箔の密度を ρ とする。このとき、

$$b = \sqrt{3}a$$

であり、1 セルの単位高さの重量 w は、

$$w = 4at_H\rho = \frac{4}{\sqrt{3}}bt_H\rho$$

となる。

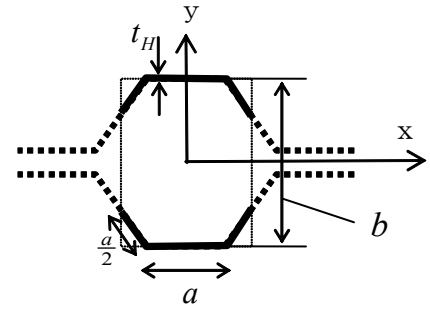


図 3.2 ハニカム構造の 1 セル

断面積 A は、

$$A = \frac{3}{2}ba = \frac{\sqrt{3}}{2}b^2$$

である。

上記 2 式より、等価密度 ρ_a は、

$$\rho_a = \frac{8}{3\sqrt{3}}\left(\frac{t_H}{a}\right)\rho = \frac{8}{3}\left(\frac{t_H}{b}\right)\rho$$

と表される。

サンドイッチパネルの心材は、直接荷重を負担するというより、2 枚の表面材の結合媒体として、それらの支持と安定化の役割が要求される。その役割には、板面に垂直な方向の心材の等価縦弾性率 E_c 、せん断弾性率 G_c が重要な因子となる。

まず、等価縦弾性率 E_c は、箔の縦弾性率を E とすると、

$$E_c = E\left(\frac{\rho_a}{\rho}\right) = \frac{8}{3\sqrt{3}}\left(\frac{t_H}{a}\right)E = \frac{8}{3}\left(\frac{t_H}{b}\right)E$$

と表せる。

せん断弾性率は、 x 軸方向と y 軸方向のせん断に対して異なる値を持ち、 x 軸方向に関しては表面材の剛性によっても多少異なる。

x 軸方向の等価せん断弾性率 G_{xc} は、箔のせん断弾性率を G とすると、表面材の剛性が 0 のとき、

$$G_{xc} = \frac{\sqrt{3}}{2} \frac{t_H}{a} G = \frac{3}{2} \frac{t_H}{b} G$$

となり、表面材の剛性が無限大のとき、

$$G_{xc} = \frac{5}{3\sqrt{3}} \frac{t_H}{a} G = \frac{5}{3} \frac{t_H}{b} G$$

となる。

y 軸方向の等価せん断弾性率 G_{yc} は、表面材の剛性に関係なく、

$$G_{yc} = \frac{1}{\sqrt{3}} \frac{t_H}{a} G = \frac{t_H}{b} G$$

となる。

以上から分かるとおり、等価密度、等価縦弾性率、等価せん断弾性率のいずれもが、パラメータ $\alpha = \left(\frac{t_H}{a} \right)$ に比例する。

現在において、サンドイッチパネルの心材として最もよく使われているのはアルミニウム合金であるので、従来材の代表としてアルミニウム合金を選び、Ti-Ni 合金と比較を行い、検討する。

Ti-Ni 合金の密度は $6.45 \text{ (g/cm}^3\text{)}$ であり、アルミ合金の密度は $2.7 \text{ (g/cm}^3\text{)}$ である。すなわち密度において、Ti-Ni はアルミ合金の 2.4 倍である。

マルテンサイトにおける Ti-Ni 合金の縦弾性率は 26 GPa であり、アルミ合金は 72 GPa である。すなわち、縦弾性率の比は 0.36 である。

マルテンサイトにおける Ti-Ni 合金のせん断弾性率は 14 GPa であり、アルミ合金は 28 GPa である。すなわち、せん断弾性率の比は 0.50 である。

以上より、比縦弾性率において Ti-Ni はアルミ合金の 0.15 倍、比せん断弾性率において 0.21 倍の値となることが分かる。

比重の増大を覚悟の上で、アルミ合金と同様の縦弾性率を得るためには、パラメータ $\alpha = \left(\frac{t_H}{a} \right)$ を、アルミ合金の場合の 2.7 倍とすることが必要である。

同様に、アルミ合金と同様のせん断弾性率を得るためには、パラメータ $\alpha = \left(\frac{t_H}{a} \right)$ をアルミ合金の場合の 2.0 倍とすることが必要である。

現在用いられているアルミハニカムの、主要なセルサイズと箔厚を調べた。その結果、セルサイズは $b = 1/8, 3/16, 1/4, 3/8, 3/4$ [in]であり、箔圧は $t_H = 0.001, 0.0015, 0.002, 0.003, 0.004$ [in]であった。その中で実際に用いられている組み合わせのうち、 $\alpha = \left(\frac{t_H}{a}\right)$ の値が最大のものは $\alpha = 0.0277$ で、最小のものは $\alpha = 0.0046$ であった。これを踏まえると、アルミハニカムと同様の強度および剛性を SMA で実現するには $\alpha = 0.02 \sim 0.05$ 程度が必要である。

しかし、今回の研究は必ずしもアルミハニカムと同等の強度および剛性が重要であるわけではなく、アルミハニカムとの様々な比較を行う上で有利なサイズに設定することの方がメリットが大きい。そこで、アルミハニカムでの主流であるセルサイズ $b = 1/4$ [in]、箔厚 $t_H = 0.001$ [in]のもの ($\alpha = 0.00693$) を参考にして、 $t_H = 40(\mu m)$, $a = 4.0(mm)$, $\alpha = \left(\frac{t_H}{a}\right) = 10^{-2}$ という値を選択した。

3.2 形状の記憶

厚さ $42\mu\text{m}$ 、幅 4cm 、長さ 12cm の SMA 箔 (Ti-50.2%Ni, 古河電気工業) を図 3.3 に示す形状の金型に挟み、恒温槽に入れて 400°C で 1 時間保持した。使用した恒温槽を図 3.4 に示す。

1 時間経過後、金型に挟んだまま送風機で急冷し、六角形形状を記憶させた。常温まで冷却した後、金型から SMA 箔を取り出した。取り出した時の状態を図 3.5 に示す。この状態で、箔厚は $40\mu\text{m}$ となった。

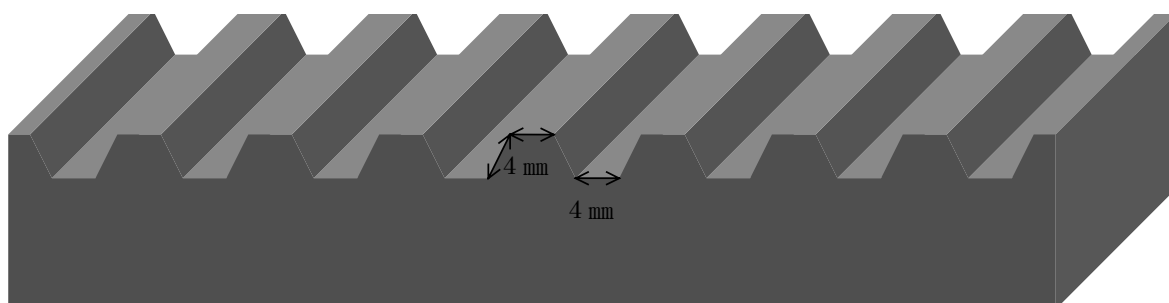


図 3.3 形状保持用金型の模式図



図 3.4 恒温槽

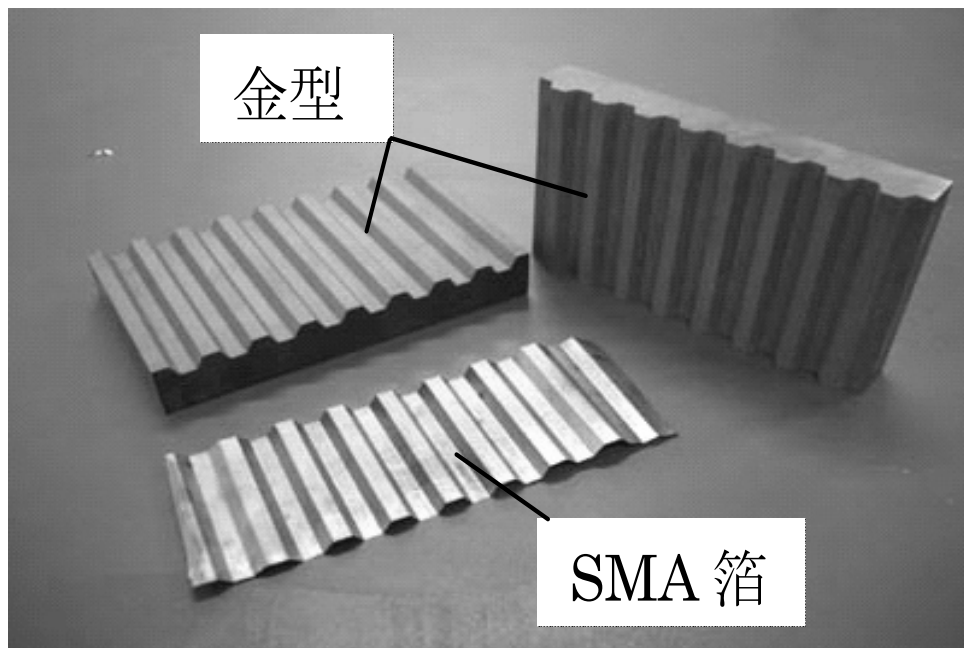


図 3.5 形状保持用金型と形状記憶後の SMA 箔

3.3 SMA ハニカムコアサンドイッチパネルの作製

3.2 節で形状を記憶させた SMA 箔を、図 3.6 のように接着剤（変性シリコーン）を用いて接着し、ハニカムコアを作製した。接着後の様子を図 3.7 に示す。

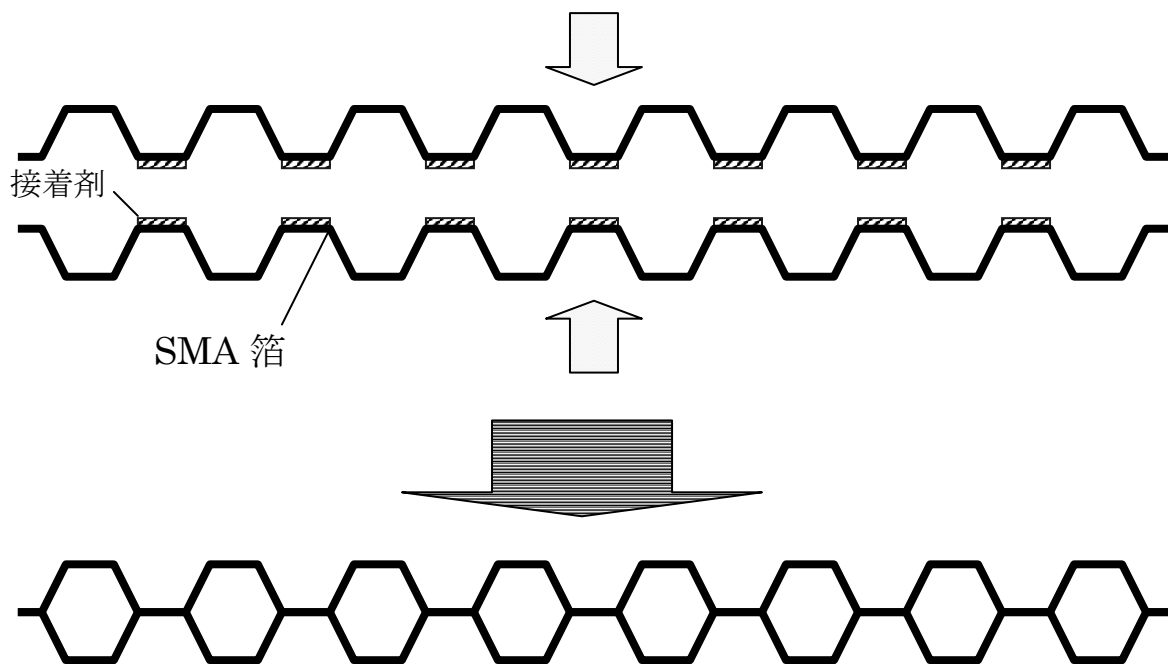


図 3.6 SMA 箔の接着



図 3.7 接着後の SMA ハニカムコア

SMA 箔 10 枚を接着した SMA ハニカムコアを、ファインカッターで高さ 10 mm となるように切断した。完成した高さ 10 mm の SMA ハニカムコアを図 3.8 に示す。

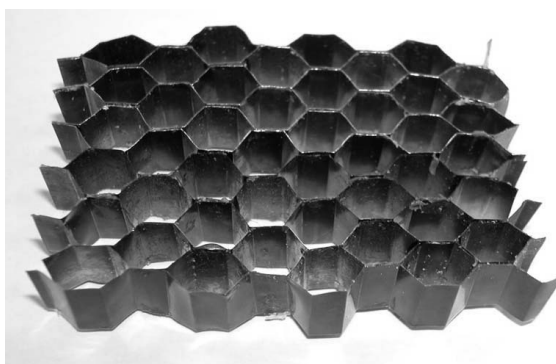


図 3.8 高さ 10 mm に切断後の SMA ハニカムコア

完成した SMA ハニカムコアを CFRP の表面材で挟み、シート状の接着剤で接着することにより、SMA ハニカムコアサンドイッチパネルを作製した。作製した SMA ハニカムコアサンドイッチパネルの寸法図を図 3.9 に示す。表面材である CFRP は、トレカプリプレグ P3052S-15 (T700/2500, 東レ(株)) を 4 層積層したものを用いた。積層構成はクロスプライ積層[0/90/90/0]とした。プリプレグ 1 層の厚さは 0.125mm なので、積層板の厚さは 0.5mm である。

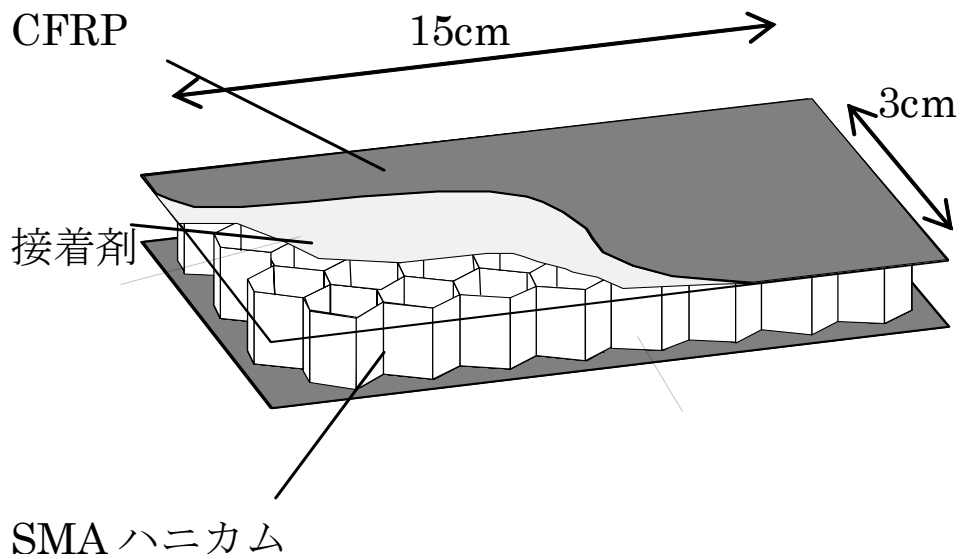


図 3.9 SMA ハニカムコアサンドイッチパネル

3.4 本章についての考察とまとめ

本章では、SMA の性質を考慮してハニカムコアに適した合金組成を選択し、アルミ合金と比較しながら諸元を決定した。そして決定した諸元に基づいて、実際に SMA ハニカムコアサンドイッチパネルを作製した。

第4章 衝撃損傷の回復

心材として SMA ハニカムコアを用いることにより、面外方向からの衝撃を受けてサンドイッチパネルに損傷が発生しても、加熱により元の形状を回復させることが可能であると期待できる。

本章では、第3章で作製した SMA ハニカムコアサンドイッチパネルが面外方向からの衝撃損傷を回復させる機能を持つことを実験により確認し、その損傷回復機能がサンドイッチパネルの剛性維持のためにどのように寄与するのかを、材料力学の視点から評価する。

4.1 面外衝撃損傷回復実験

第3章で作製した SMA ハニカムコアサンドイッチパネルに対し、面外方向からの落錘衝撃試験を行い、パネルに衝撃損傷が発生させ、その後加熱することによって衝撃損傷を回復させるという実験を行った。本節ではその実験について述べる。

4.1.1 実験の概要

実験に用いた SMA ハニカムコアサンドイッチパネルの試験片寸法を図4.1に示す。

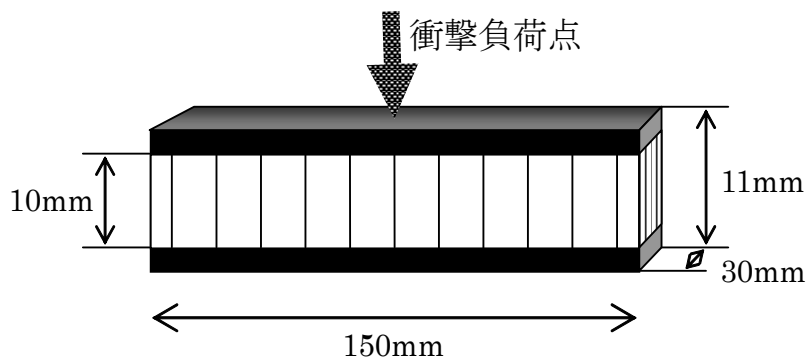


図 4.1 試験片寸法

まず、無傷の状態の試験片の表面形状をレーザー変位計で測定した。その後、試験片中央部に落錘衝撃試験機(INSTRON, Mini-tower)によって3Jの面外衝撃負荷を与えた。衝撃負荷後の表面形状を再びレーザー変位計で測定した。次に、試験片を恒温槽に入れて A_f 点以上である80℃に加熱した。十分時間が経った後、試験片を恒温槽から取り出し、再度レーザー変位計で表面形状を測定した。

4.1.2 実験結果

衝撃負荷前、衝撃負荷後、加熱後の試験片の側面画像をそれぞれ図 4.2、図 4.3、図 4.4 に示す。図 4.3 から、衝撃負荷によって発生した衝撃点付近のコアの座屈変形および表面材の曲がりが見視できる。それに対し、加熱後の図 4.4 では、発生していた座屈変形が無くなり、表面材の曲がりも元に戻っていることが分かる。



図 4.2 衝撃負荷前の SMA ハニカムサンドイッチパネルの側面画像

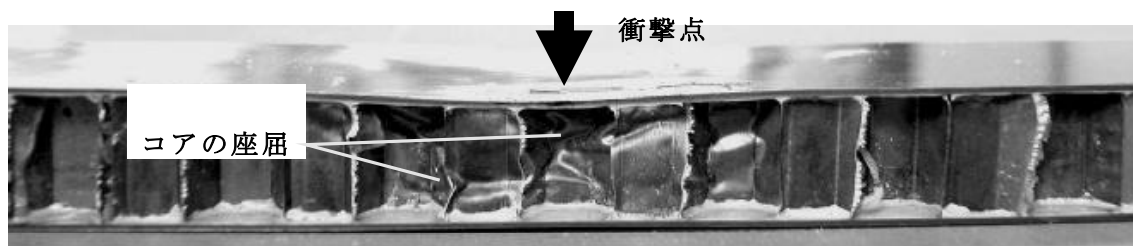


図 4.3 衝撃負荷後の SMA ハニカムサンドイッチパネルの側面画像

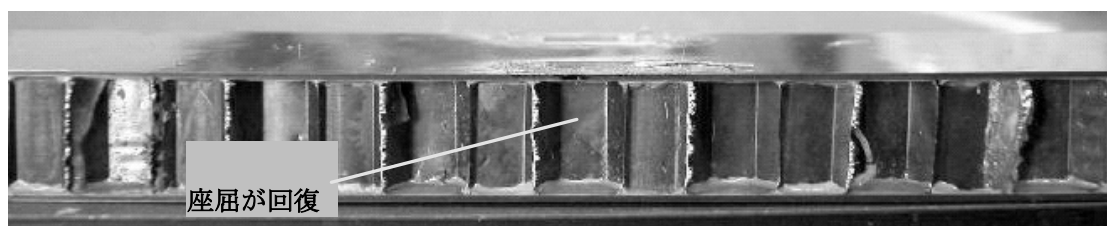


図 4.4 加熱後の SMA ハニカムサンドイッチパネルの側面画像

衝撃負荷前後および加熱後にレーザー変位計で測定した試験片表面の変位を図 4.5 に示す。衝撃負荷後に最大 2 mm の変位が生じているが、加熱後には衝撃負荷前の状態にほぼ戻っていることが分かる。

衝撃負荷前の時点で既に中央付近が 0.4 mm ほど窪んでいるが、これは SMA ハニカムコアを高さ 10 mm に切りそろえる際の加工精度の問題だと思われる。

この結果から、作製した SMA ハニカムコアサンドイッチパネルが、面外衝撃負荷による最大約 16% の変位を回復させる機能を持つことが確認された。

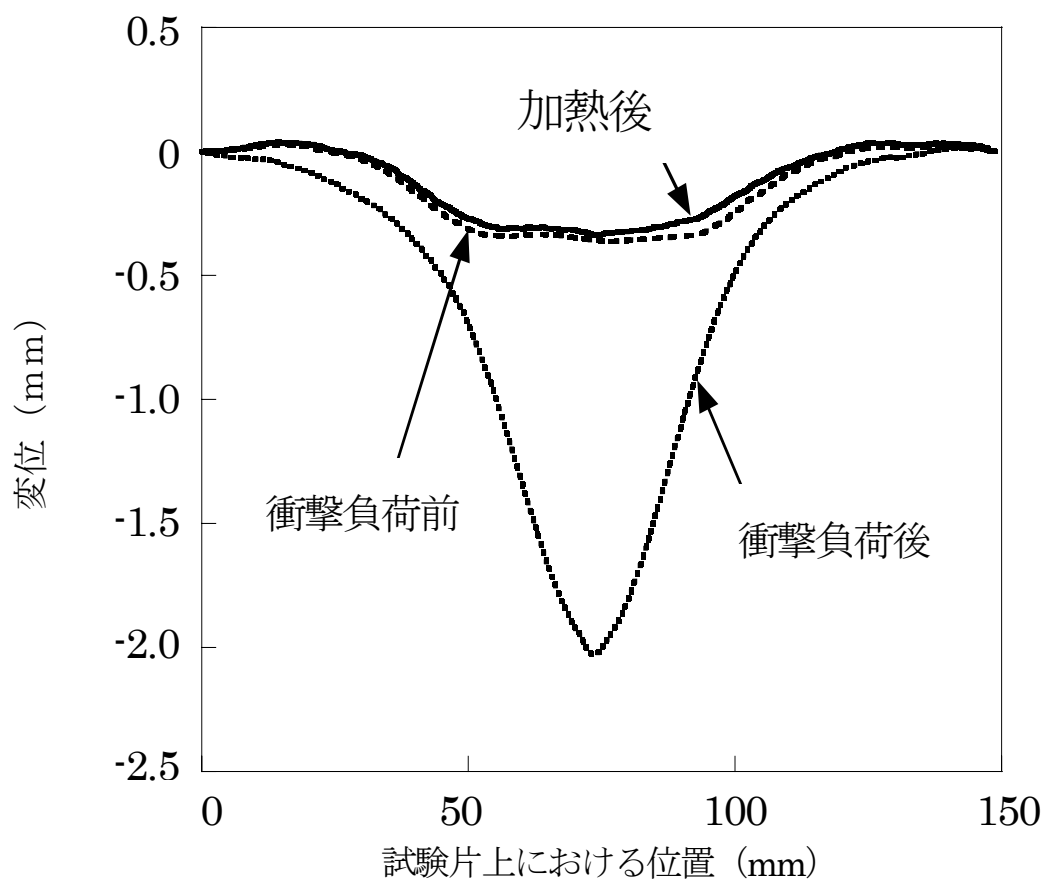


図 4.5 衝撃負荷前後および加熱後の試験片表面の変位測定結果

4.2 衝撃損傷及び回復に伴う曲げ剛性の評価

本節では、面外衝撃損傷がサンドイッチパネルにどのような剛性低下を招くかを材料力学により評価し、形状回復が剛性の回復にどういった寄与を与えるかを示す。

4.2.1 梁、平板における曲げ剛性

軽量な材料を用い、優れた強度と剛性が発揮できれば、航空分野などの各種輸送関連の材料として、あるいは超高層の建築用材料としても有用である。しかし、軽量な材料は一般に強度も剛性も低いため、様々な工夫が必要である。

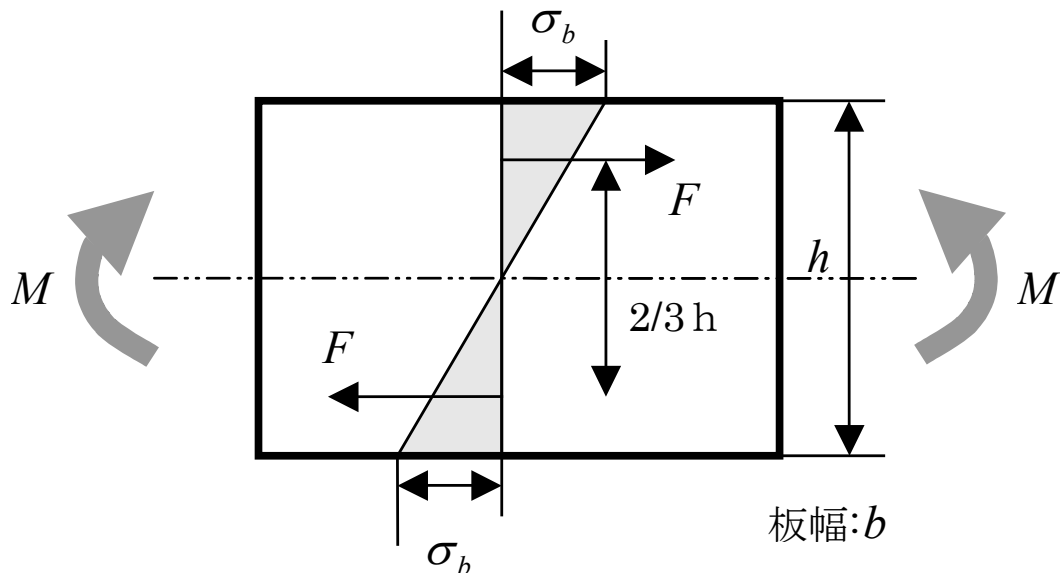


図 4.6 曲げモーメントを受ける梁や平板の応力分布

図 4.6 のように、梁や平板に曲げモーメントが加わる際の、断面に生じる曲げ応力の分布とその合力 F について考える。表面層に生じる最大応力を σ_b とする。図より、 F は、

$$F = \frac{1}{2} \times \frac{h}{2} \times b \times \sigma_b = \frac{bh}{4} \sigma_b$$

と求まる。曲げモーメント M との釣合いを考えると、

$$M = \frac{2}{3} h \times F = \frac{bh^2}{6} \sigma_b$$

となる。

表面層に生じる最大応力は材料の強さで決まる値であり、式より、同じ強さを有する材料でも板厚 h を増大させることで耐荷モーメント M は h の 2 乗で増大させることができる。

しかし、板厚 h を増大させることは使用する材料が増えるだけでなく、重量の増大につながる。そこで、I型、T型、L型ビームのような、中心層の板幅を削った構造や、中央部に別の材料や構造を挟んで役割を分担させるサンドイッチパネルが考案された。

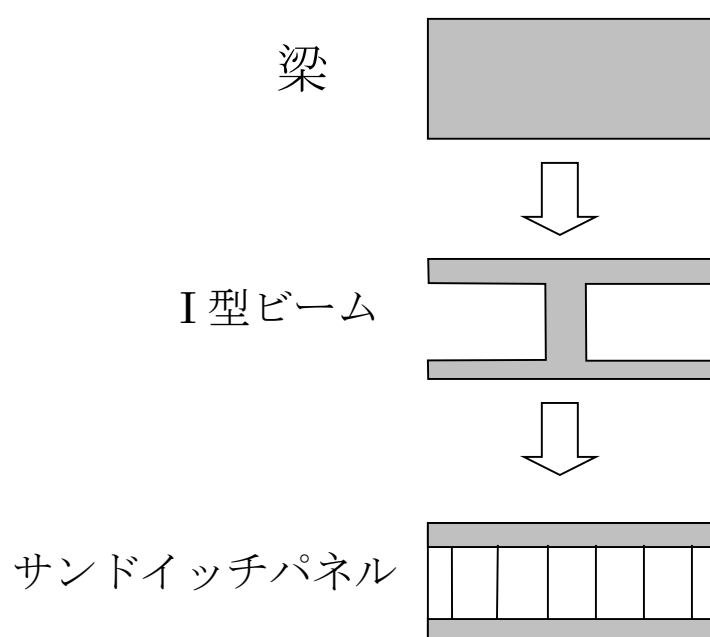


図 4.7 軽量構造の考え方

4.2.2 横荷重負荷時のサンドイッチパネル内部の応力

サンドイッチパネルに横荷重が加わると、パネルの内部には曲げモーメントに抵抗する垂直応力と、せん断力に抵抗するせん断応力が生じる。

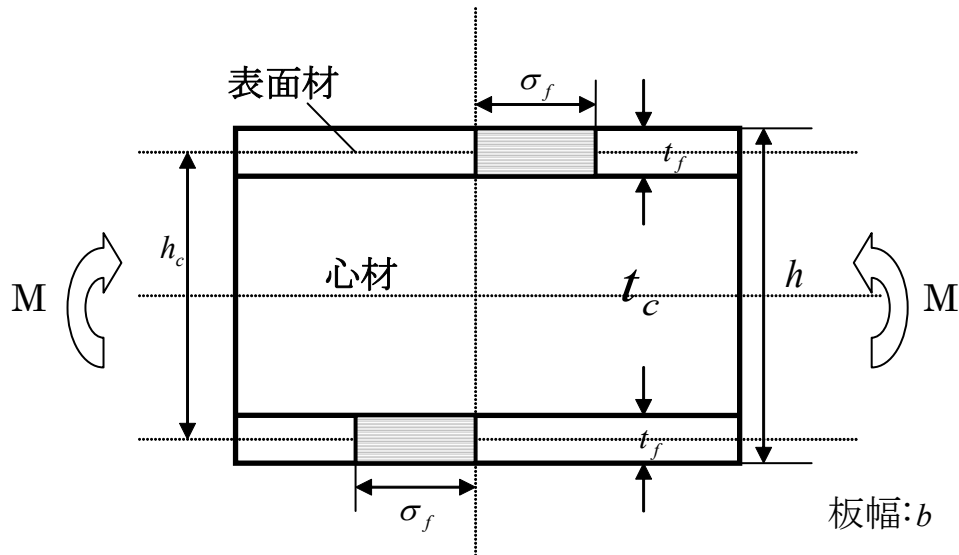


図 4.8 曲げモーメントを受けるサンドイッチ板の応力分布

まず、パネルに曲げモーメントが加わった状況について考える。図 4.8 は曲げモーメント M が加わった時のサンドイッチパネルの垂直応力の分布を示したものである。表面材の縦弾性係数は心材よりはるかに大きく、垂直応力を受け持つのは表面材のみであると仮定している。図より、 M は、

$$M = b \times 2 \int_{\frac{t_c}{2}}^{\frac{t_c}{2} + t_f} \sigma_f x dx = \sigma_f t_f b (t_c + t_f) = \sigma_f t_f \times b \times h_c$$

よって、表面材の垂直応力 σ_f は、

$$\sigma_f = \frac{M}{t_f b h_c}$$

となる。

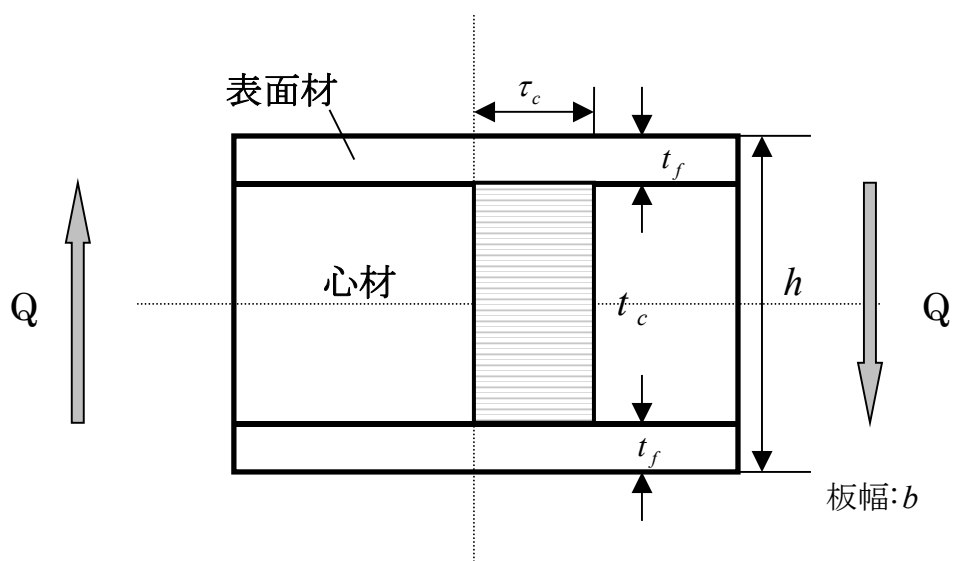


図 4.9 セン断力を受けるサンドイッチ板の応力分布

次に、パネルにせん断応力が加わった状況について考える。図 4.9 はせん断応力 Q が加わった時のせん断応力の分布を示したものである。表面材は心材に比べて十分薄く、せん断応力を受け持つのは心材のみであると仮定している。図より、 Q は、

$$Q = bt_c \times \tau_c$$

となり、心材のせん断応力 τ_c は、

$$\tau_c = \frac{Q}{bt_c}$$

となる。

4.2.3 サンドイッチパネルの剛性

まず、サンドイッチパネルの曲げ剛性について考える。曲げ剛性 D は、弾性率 E と断面 2 次モーメント I の積によって求められる。サンドイッチパネルの単位幅あたりの曲げ剛性 D を定義に従って求めると、

$$\begin{aligned} D &= EI = E_f I_f + E_c I_c \\ &= E_f \frac{1}{12} (h^3 - t_c^3) + \frac{E_c t_c^3}{12} \\ &\approx \frac{1}{12} \{ 6E_f t_c t_f (t_c + 2t_f) + E_c t_c^3 \} \\ &\approx \frac{1}{12} \{ 6E_f t_c^2 t_f + E_c t_c^3 \} \end{aligned}$$

(ここで、 $t_f \ll t_c$)

となる。

心材は垂直応力を全く受け持たない ($E_c = 0$) と仮定すると、曲げ剛性 D は、

$$D = \frac{E_f}{2} t_c^2 t_f$$

となる。

次に、サンドイッチパネルのせん断剛性について考える。せん断剛性 U は、材料のせん断弾性率 G と断面積 A の積によって求められる。単位幅のパネルのせん断剛性 U を定義に従って求めると、

$$U = GA = G_f t_f + G_c t_c$$

となる。

4.2.4 形状回復による剛性回復の評価

4.2.3 節で導出したサンドイッチパネルの剛性についての式を用いて、4.1 節で行った面外衝撃実験によるパネルの剛性低下と、形状回復によるパネルの剛性回復について評価する。

SMA ハニカムコアサンドイッチに面外衝撃を加えることによって生じた最大変位は 1.6 mm である。変位はすべてコアの座屈により起こり、表面材の厚さ t_f は変化しないと仮定すると、10 mm のコアが 1.6 mm すなわち 16% の変形を起こしたことになる。コアが 16% の変形を起こした場合、変形後のパネルの曲げ剛性 D' は、

$$D' = 0.84^2 D = 0.71D$$

となり、29% の曲げ剛性の低下が起こる。

実験により、SMA ハニカムコアは少なくとも 16% の変形を回復させる能力を持っていることが確認された。すなわち、SMA ハニカムコアサンドイッチパネルは、面外衝撃を受けて発生する約 30% の曲げ剛性の低下を防ぐことが可能であるといえる。

4.3 本章についての考察とまとめ

本章では、第 3 章で作製した SMA ハニカムコアサンドイッチパネルが面外衝撃損傷を回復する能力を持っていることを実験により確かめ、その回復能力がどの程度の剛性低下を防ぐ効果があるかを材料力学により計算した。その結果、作製した SMA ハニカムサンドイッチパネルは少なくとも、3J の衝撃によって生じた 16% の変形を回復する能力を持つことが分かった。この 16% の変形は、曲げ剛性にして約 30% の低下に繋がり、それを防止することができる SMA ハニカムコアサンドイッチパネルの効果が示された。

また、この SMA ハニカムコアサンドイッチパネルは、3J の衝撃エネルギーを吸収したという見方も可能で、衝撃吸収能力の利用も期待できる。

第5章 CFRP 積層板へのニクロム線埋込み実験

本章では、SMA ハニカムコアサンドイッチパネルの加熱機構として CFRP 表面材へのニクロム線の埋込みを提案し、CFRP の積層構成に対する最適な埋込み位置を実験により示す。その後、埋込み断面観察、抵抗測定を通して、CFRP 内部の電気伝導の状態を調べる。

5.1 ニクロム線埋込みの意図

SMA ハニカムコアサンドイッチパネルの実用上の問題として、回復力の発生に必要な熱量をどのようにして与えるかという問題がある。前章の回復実験の際は高温炉に SMA ハニカムコアサンドイッチパネル全体を入れて加熱したが、構造材料として使用する場合、外部装置から加熱することができない場面が想定される。そういった状況に対し、サンドイッチ構造内部に加熱機構を備えることで解決を試みる。

加熱機構を検討する上で、考慮した項目は以下の3点である。

- [1] 加熱効率が良いこと
- [2] 構造強度の低下が小さいこと
- [3] 局所的な加熱が可能であること

加熱効率の追求、構造強度の維持の重要性は言うまでもないが、局所的な加熱が可能となることで、局所的な損傷に対し、最小の装置及びエネルギーで損傷を回復させることができるだけでなく、SMA コアの局所加熱により、意図的に部分的構造変形を起こさせる可能性を模索するという意義もある。また、損傷モニタリング技術と組み合わせることによって、損傷が発生した部分のみをピンポイントに加熱することが可能となれば、加熱効率の向上につながる。

考えうる内部加熱機構としては、

- [a] 電熱線・電熱箔等をサンドイッチパネル内部に組み込み、通電ジュール加熱を行う方法
- [b] SMA ハニカムコアに直接通電加熱を行う方法

の2通りが考えられる。

[b]の方法は電気エネルギーが直接 SMA ハニカムコアの熱エネルギーに変換されるので、加熱効率は高いと考えられるが、一続きの SMA ハニカムコアの一部分のみに通電することが難しく、全体が加熱されてしまうため、局所的に加熱することは不可能である。そこで[a]の方法を採用する事とした。

電熱線、電熱箔をサンドイッチパネル内部に組込む場合、組込み位置は、

- [i] CFRP 表面材の内部
- [ii] 表面材と心材の間の接着層部
- [iii] SMA ハニカムコアの内部

の 3 通りが考えられる。

加熱効率は、SMA により近い方が良いと思われるため、[i] < [ii] < [iii] である。

しかし、[ii]、[iii]の位置に組み込む場合、絶縁を施さなくてはならない。絶縁を施すためには電熱線、電熱箔のサイズが大きくなってしまうため、構造強度に悪影響を及ぼすことを否定できない。すなわち、[ii]、[iii]の組込み位置に、構造強度の低下を招かないように加熱機構を組込むことは技術的に非常に困難であると考えられる。そこで、[i]の位置を採用することとした。

構造強度に与える悪影響を最小にとどめるという観点から、表面材である CFRP の、1 層の厚さ 0.125 mm よりも細いニクロム線（直径 0.100 mm）を表面材中に埋め込む方法を考案した。

5.2 埋込み位置による局所的加熱効率の評価

SMA ハニカムコアサンドイッチパネルの表面材内部に加熱機構としてニクロム線を埋込み、形状回復に必要な熱量を与える方法について考える。加熱に際して重視すべきことは、狭い範囲をエネルギー効率よく、迅速に加熱することである。1 本あたりの加熱可能範囲は重要ではない。なぜなら、広範囲を加熱したいときには多数のニクロム線を使えばよいからである。1 本あたりの加熱範囲を狭く設定することにより、局所的な変形を受けた場合に対し局所的な加熱を行うことができるし、高い加熱応答性も期待できる。材料の局所的変形をセンシングする技術については現在研究が進んでおり、そういった技術と組み合わせることで、局所的な変形に対し、最小限のエネルギーで効率よく修復することができる。

本節では、局所的加熱効率と応答性が最も高くなるような、最適な埋込み位置を実験により調べる。

5.2.1 埋込み位置

表面材である CFRP の積層構成は 4 層クロスプライ積層[0/90/90/0]なので、ニクロム線を埋込む場合には、図 5.1 の A～D のように 4 通りの埋込み位置が考えられる。

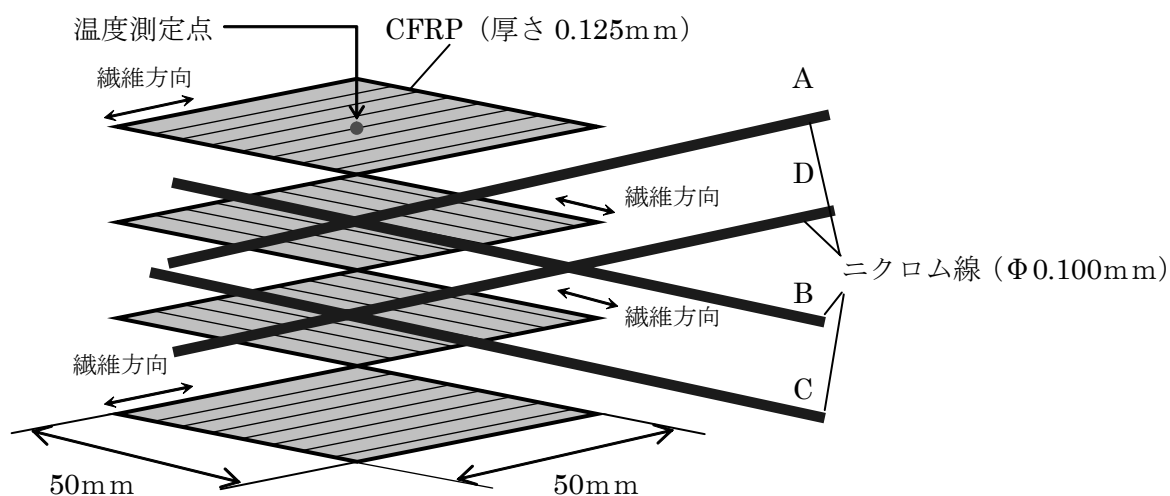


図 5.1 CFRP に対するニクロム線埋込み位置

A, B はいずれも 1 層目と 2 層目の間であり、A は 1 層目の繊維方向に平行に、B は 2 層目の繊維方向に平行に配置している。

C, D はいずれも 2 層目と 3 層目の間であり、C は 2 層目および 3 層目の繊維方向に平行に、D はそれらに対し垂直に配置している。

5.2.2 埋込み位置による局所的加熱効率測定実験の概要

A～D の 4 通りの位置にニクロム線を配置した試験片を作成し、ニクロム線に電圧を印加して表面温度の変化の測定を行った。試験片寸法は $50\text{ mm} \times 50\text{ mm} \times 0.5\text{ mm}$ で、ニクロム線の水平方向の位置は CFRP の面の中央を通過する位置である。温度測定点は 1 層目の外表面中央で、ニクロム線埋込み位置の真上に位置する。使用したニクロム線は NTK No.1 ($\Phi 0.100\text{ mm}$, $138\text{ }\Omega/\text{m}$, 坂口電熱) である。

A～D の各試験片について、ニクロム線両端の抵抗を測定した。その結果、A は $4.9\text{ }\Omega$ 、B は $4.6\text{ }\Omega$ 、C は $6.6\text{ }\Omega$ 、D は $3.9\text{ }\Omega$ であった。ニクロム線単体の抵抗は、 $138\text{ (}\Omega/\text{m)} \times 0.05\text{ (m)} = 6.9\text{ (}\Omega\text{)}$ であるから、CFRP への埋込みによって抵抗値が下がっていることが分かる。

与えるエネルギーを 0.6 W に統一するため、印加する電圧を A には 1.71 V 、B には 1.66 V 、C には 1.99 V 、D には 1.52 V と設定した。温度上昇による抵抗の上昇の効果は無視した。ニクロムの抵抗の温度係数は $100\text{ ppm} \sim 200\text{ ppm}$ 程度であるため、 100 K の温度上昇に対して $1 \sim 2\%$ の抵抗上昇となり、今回の測定実験に関しては無視できるほど十分に小さいと考えられるためである。

各試験片の抵抗測定値および電力・電流・電圧設定値を表 5.1 にまとめる。

表 5.1 各試験片の抵抗測定値と印加電圧設定値

	抵抗測定値 (Ω)	電力設定値 (W)	電流設定値 (A)	電圧設定値 (V)
試験片 A	4.9	0.6	0.350	1.71
試験片 B	4.6	0.6	0.361	1.66
試験片 C	6.6	0.6	0.302	1.99
試験片 D	3.9	0.6	0.392	1.52

測定装置の概要を図 5.2 に示す。試験片の両端における電位差を電圧計により測定し、測定値が目標の値となるように電源装置の印加電圧を調節する。試験片表面温度は熱電対により測定する。

各試験片に、表 5.1 で示した電圧設定値が印加されるように電源電圧を設定し、温度測定機に表示される試験片表面温度を 180 秒間に渡り記録した。

なお、実験は空気中で行い、この時の気温は 22℃であった。

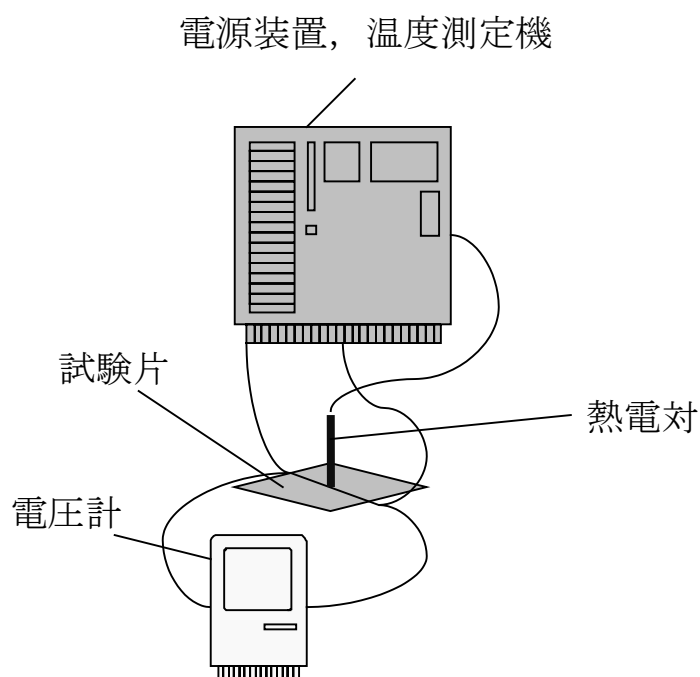


図 5.2 測定装置の概要

5.2.3 局所的加熱効率測定実験の結果

測定の結果を図 5.3 に示す。各試験片ともに初期温度は室温の 22℃で、ニクロム線への通電加熱により時間とともに測定点温度が上昇している。しかし、時間が経つにつれて勾配は緩やかになり、180sec あたりでは温度上昇はほぼ止まっている。これは、測定部への熱の流入量と、測定部からの熱の流出量がほぼ釣り合っていることを意味している。測定部への熱の流入は、測定部に接する測定部より高温の部分からの流入であり、流出は、測定部に接する測定部より低温の部分への流出と、空気への流出である。測定部の温度が安定していることから、試験片全体の温度状態が安定したと考えると、試験片全体へのエネルギー流入量は電源装置からの 0.6W であり、流出量は空気への熱伝達で、これも大きさは 0.6W であるはずである。よって、180sec における測定点温度が高い試験片は、測定点から離れた点における温度は他の試験片より低く、逆に測定点温度が低い試験片は、測定点から離れた点における温度は高いはずである。

図 5.3 から分かるとおり、最も測定点温度の上昇が著しいのは試験片 C であり、それに続いて試験片 B と試験片 A がほぼ同程度、試験片 D が最低という結果になった。温度測定点とニクロム線との距離は $A < B < C = D$ であるが、距離は関係ないということが分かる。

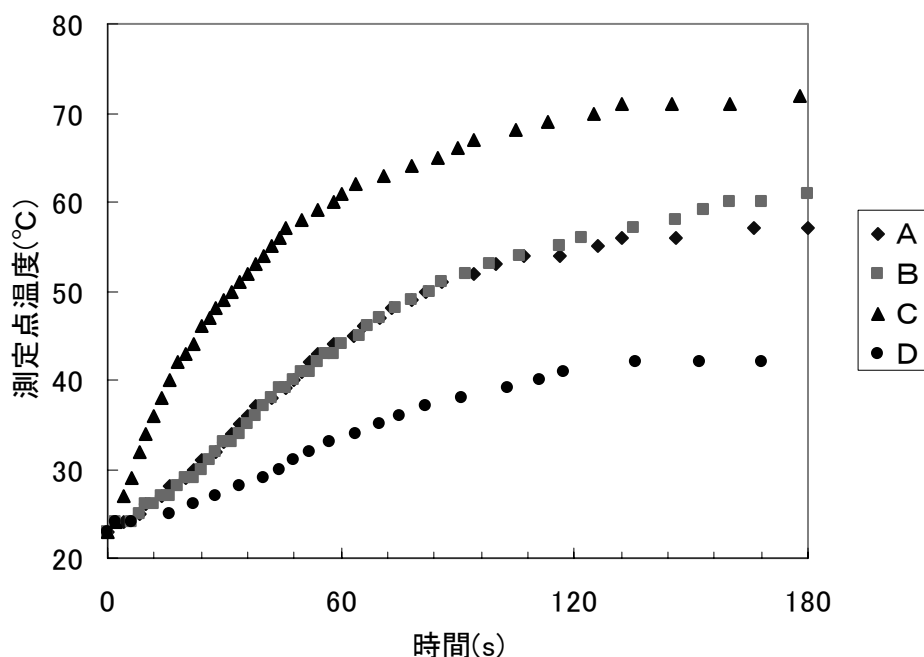


図 5.3 測定点温度の時間変化

5.3 埋込み断面観察

ニクロム線の埋込み部の詳細な状況を調べるため、断面観察を行った。その様子を以下の図 5.4～5.11 に示す。

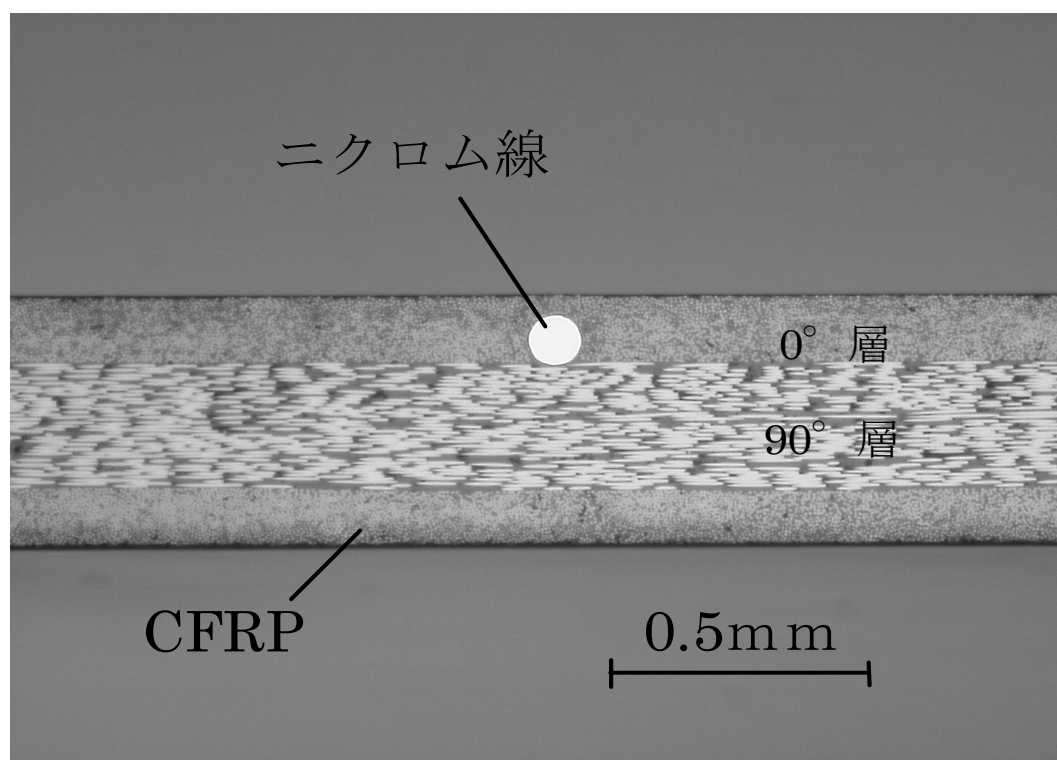


図 5.4 試験片 A におけるニクロム線埋込み断面

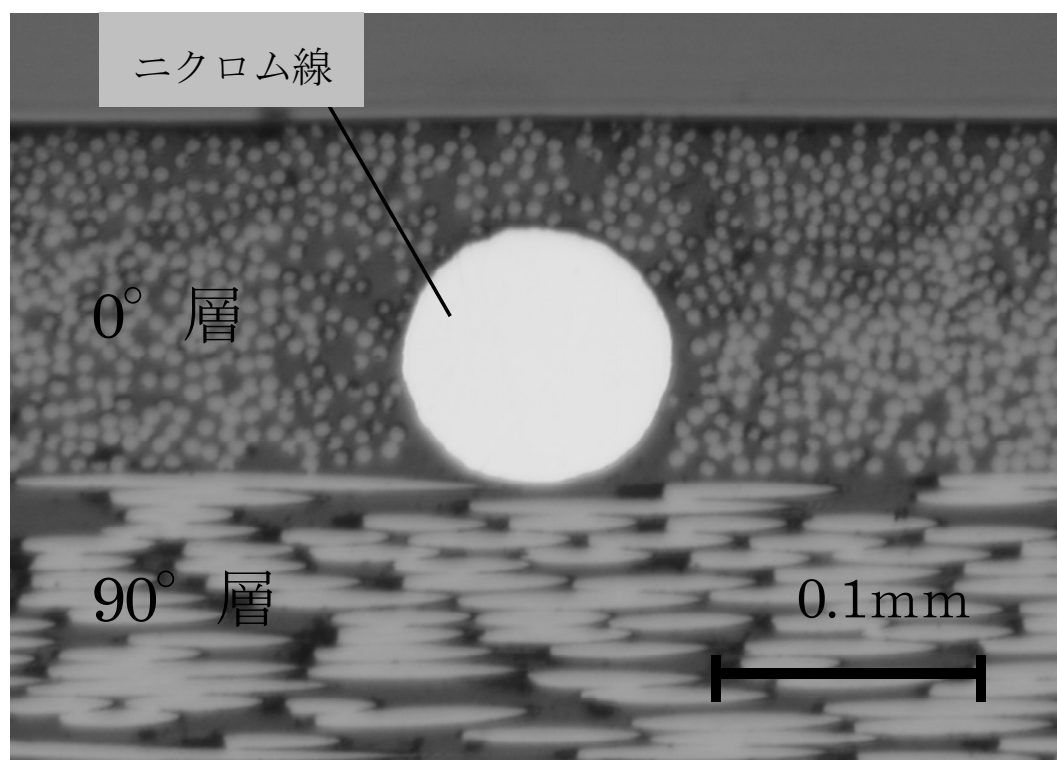


図 5.5 試験片 A におけるニクロム線埋込み部の拡大図

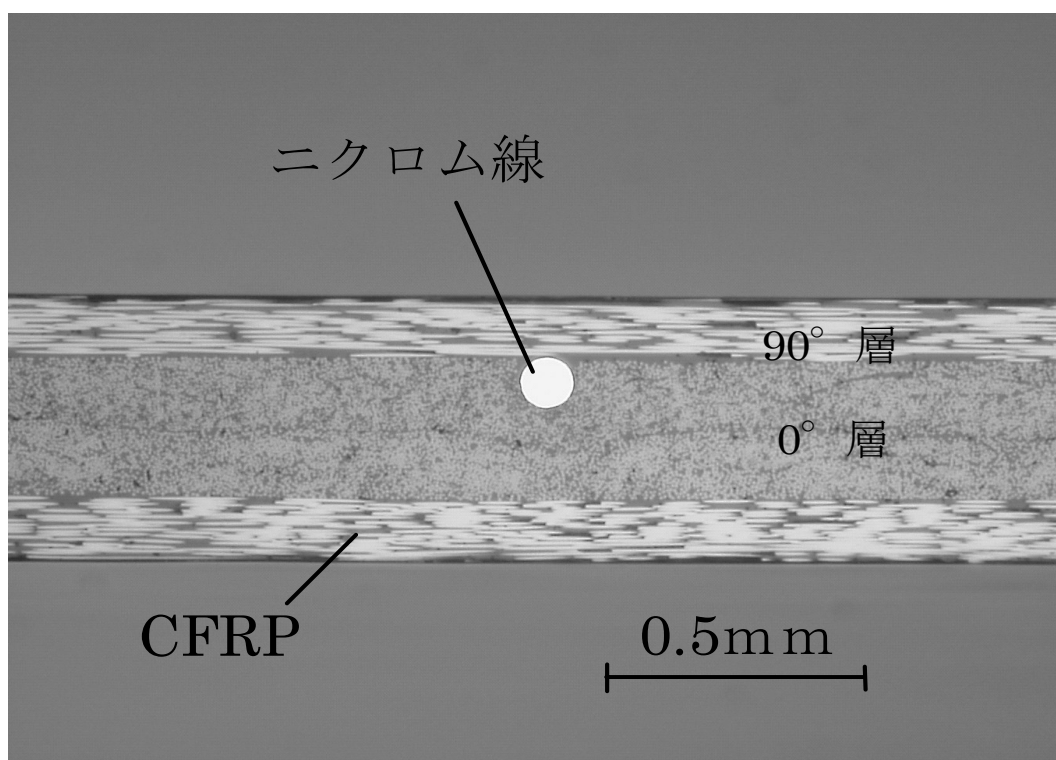


図 5.6 試験片 B におけるニクロム線埋込み断面

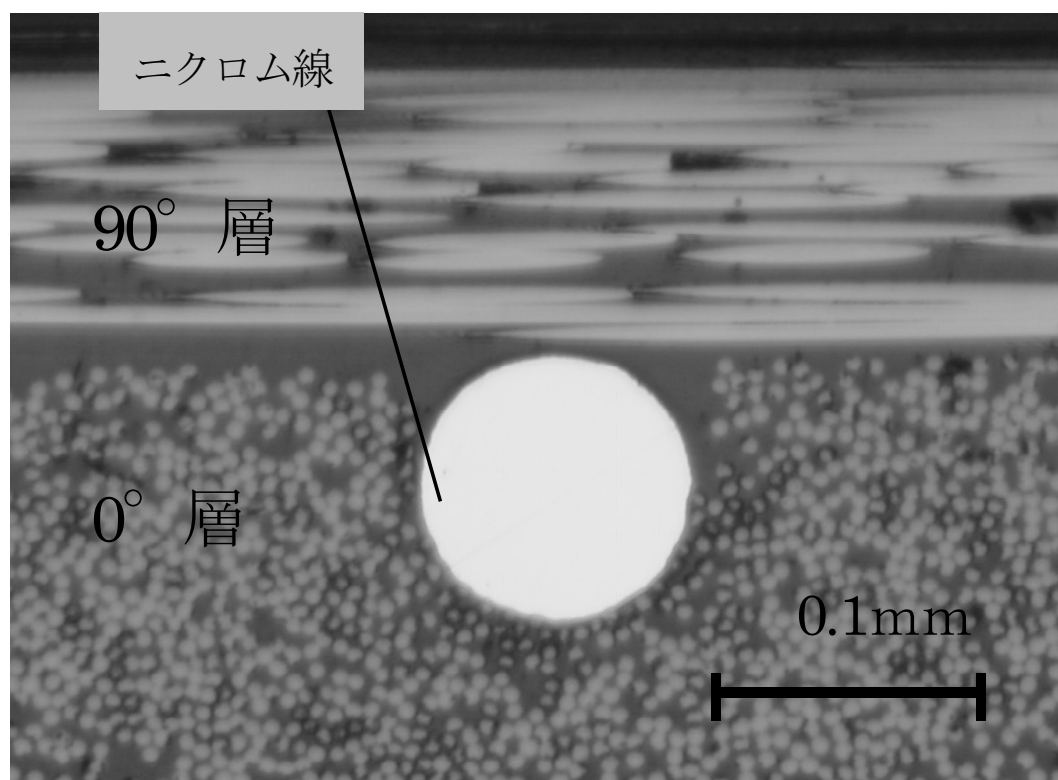


図 5.7 試験片 B におけるニクロム線埋込み部の拡大図

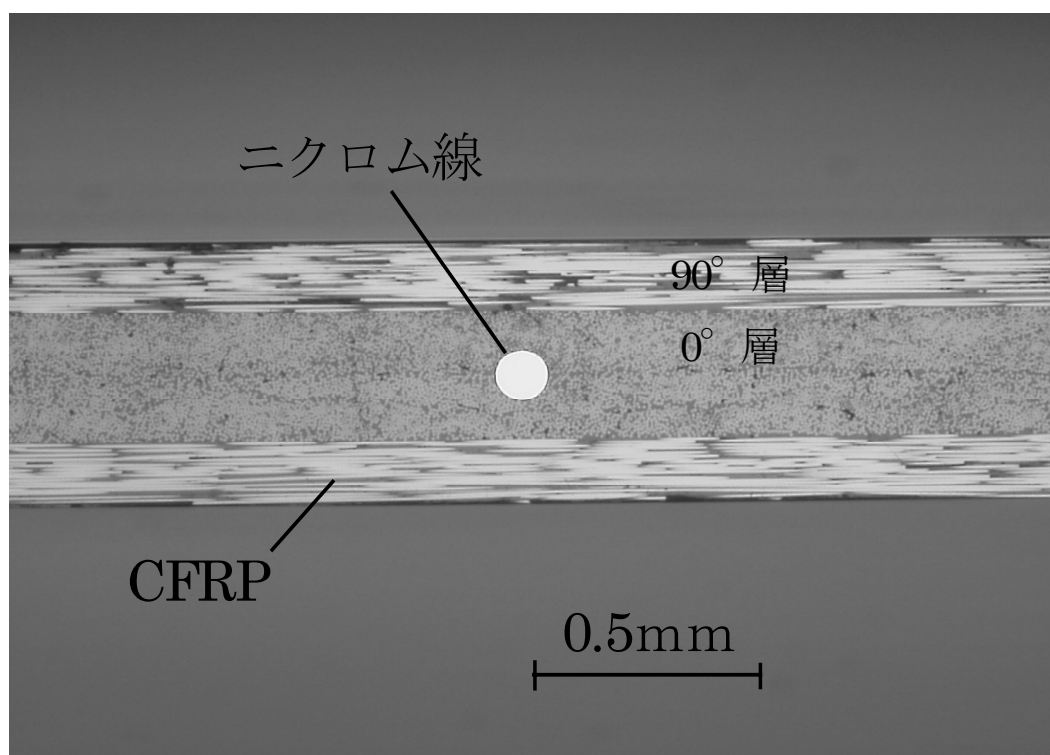


図 5.8 試験片 C におけるニクロム線埋込み断面

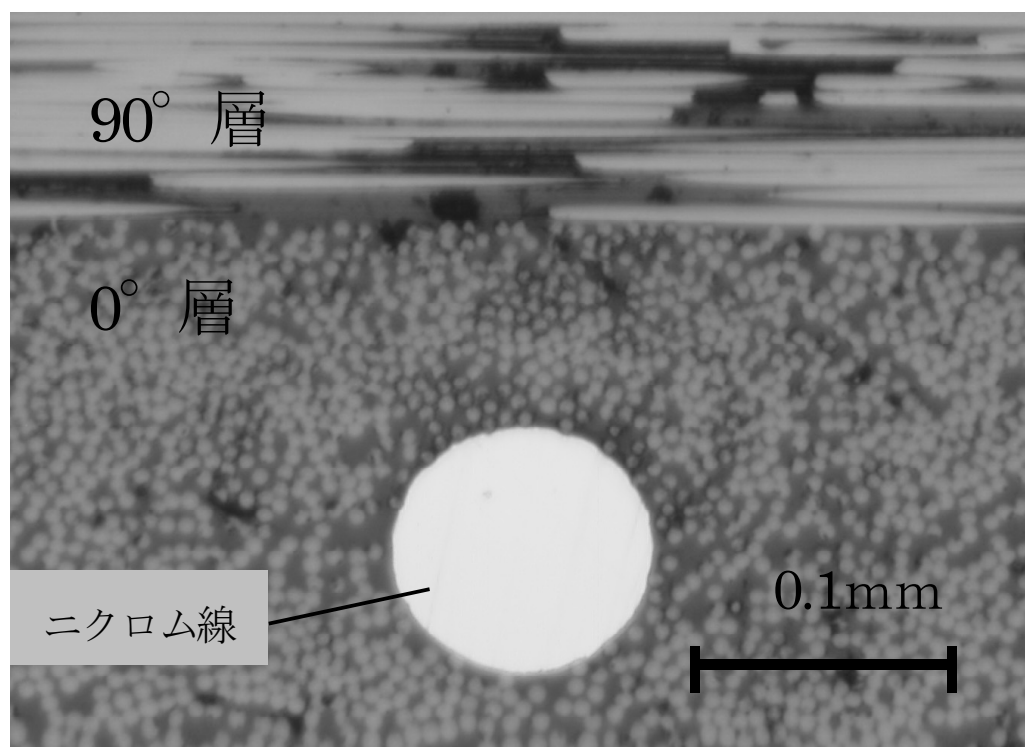


図 5.9 試験片 C におけるニクロム線埋込み部の拡大図

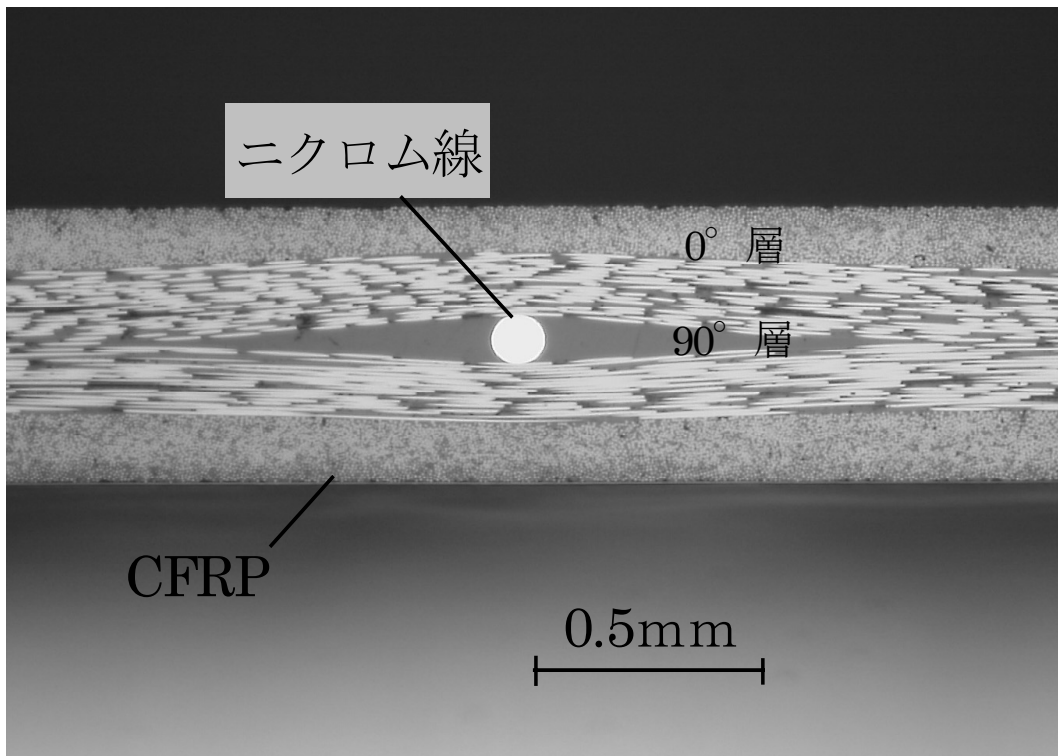


図 5.10 試験片 D におけるニクロム線埋め込み断面

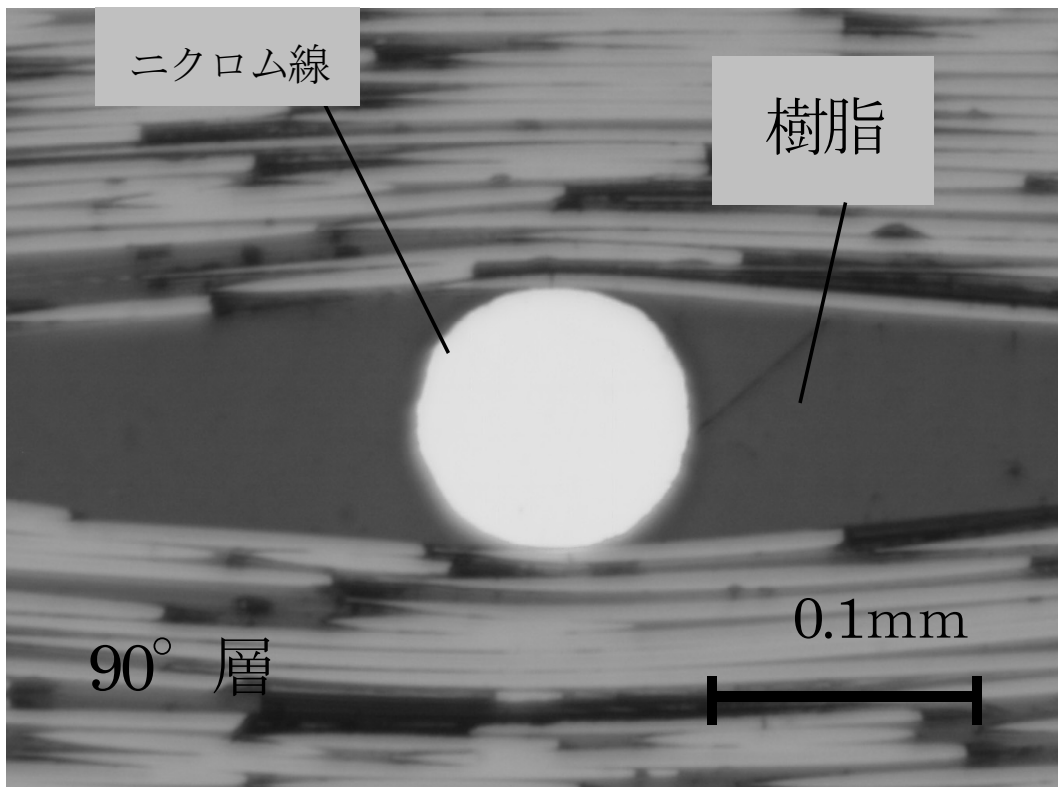


図 5.11 試験片 D におけるニクロム線埋込み部の拡大図

5.4 通電状況の評価

ニクロム線埋込み位置による加熱状況の違いは、電流経路の違いであると思われる。図 5.12 に示すように、電流経路が狭い場合、通電によるエネルギーはニクロム線近傍に集中するため、ニクロム線近傍の温度は大きく上昇し、ニクロム線から離れた部分はあまり加熱されない。一方、電流経路が広い場合は、通電によるエネルギーが広い範囲に行き渡るため、ニクロム線近傍の温度上昇は小さく、試験片全体が満遍なく加熱されることになる。

つまり、試験片 C は最も電流経路が狭く、試験片 D は最も電流経路が広いのではないかと推察できる。

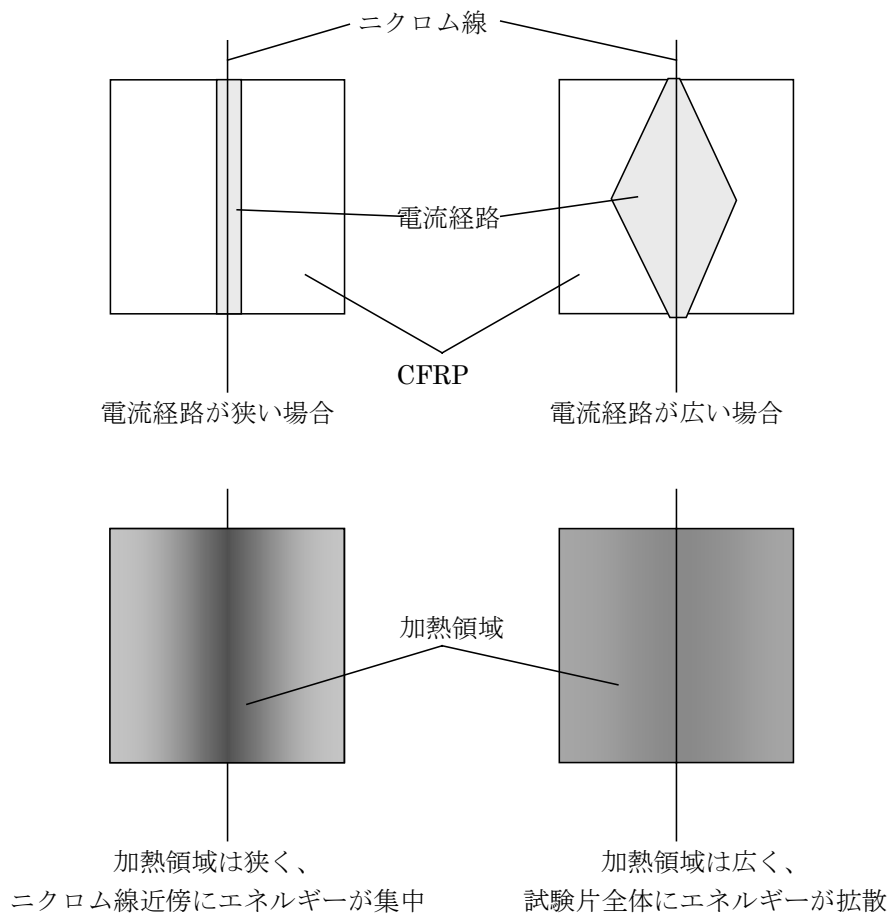


図 5.12 電流経路と加熱領域

CFRP中の電流経路について、断面写真から考える。

90° 層の間に埋め込まれたニクロム線は、図 5.13 のような状態にある。図から分かるように、炭素繊維はニクロム線に、曲がった状態で接触している。曲がっているということは相応の力でニクロム線に押し付けられているということであり、接触部における電気伝導性は良いと考えられる。また、樹脂はニクロム線と炭素繊維の間に挟まれた部分に集中している。つまりその分樹脂集中部以外の周辺部における樹脂は減っているはずで、炭素繊維同士が接触していると考えられる。以上のことから、90° 層の間に埋められた場合、ニクロム線－炭素繊維間の電気伝導性は良い。

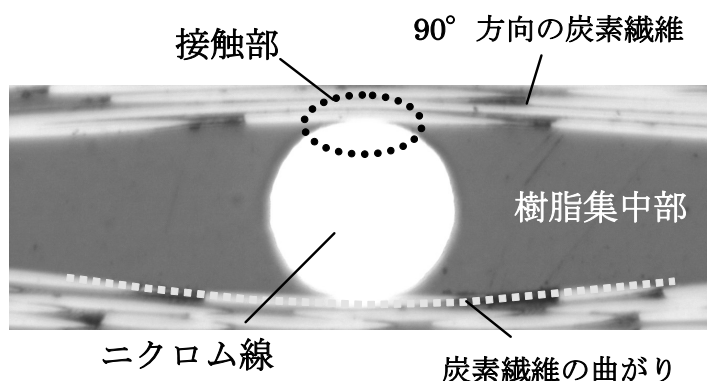


図 5.13 90° 層に挟まれたニクロム線と炭素繊維の接触状況

それに対し、0° 層の間に埋め込まれたニクロム線は、図 5.14 のような状態にあり、炭素繊維がニクロム線に押し付けられることもなく、樹脂がニクロム線と炭素繊維の間に入り込むことも容易である。そのため、0° 層中に埋められたニクロム線－炭素繊維間の電気伝導性はあまり良くない。

ニクロム線と平行に走る炭素繊維

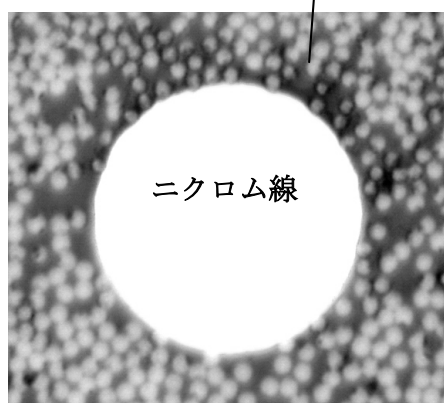


図 5.14 0° 層中に埋められたニクロム線と炭素繊維の接触状況

次に、CFRPの積層構成と電気伝導性との関係について考える。図 5.15 のように、炭素繊維が一方向のみを向いている場合、炭素繊維に直交する方向に電気が流れるためには樹脂部を通過せねばならず、抵抗が大きい。

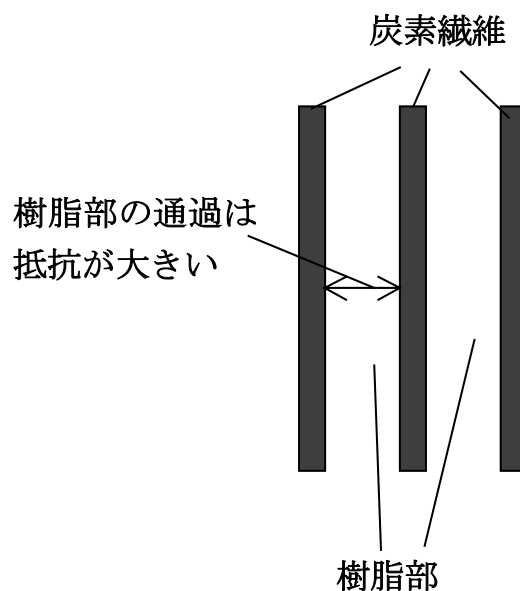


図 5.15 一方向材の電気伝導

それに対し、積層構成がクロスプライ積層である場合、 0° 層と 90° 層の部分では、図 5.16 のように格子状に炭素繊維が存在するため、電流経路が上下左右に広がっており、この面においては電流は比較的低い抵抗で流れることができる。

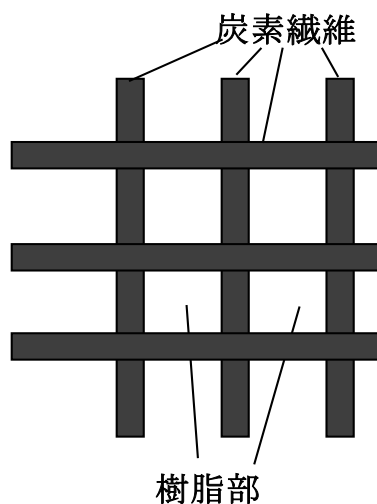


図 5.16 0° 層と 90° 層の接触部の電気伝導

以上のことから、

- ・ ニクロム線が、炭素繊維と直交して接しているかどうか
- ・ 積層構成において、 0° と 90° が接している部分があるかどうか

という 2 点で電流経路の広さが決定すると考えられる。

そこで、積層構成がそれぞれ[0/0/0/0]、[90/90/90/90]、[90/0/0/90]、[0/90/90/0]であり、2 層目と 3 層目の間にニクロム線を埋めた積層板を作製し、ニクロム線間の電気抵抗を調べた。試験片寸法は図 5.17 に示すとおりで、 $X=2, 4, 8$ の 3 種類のサイズの試験片計 12 枚を作製した。

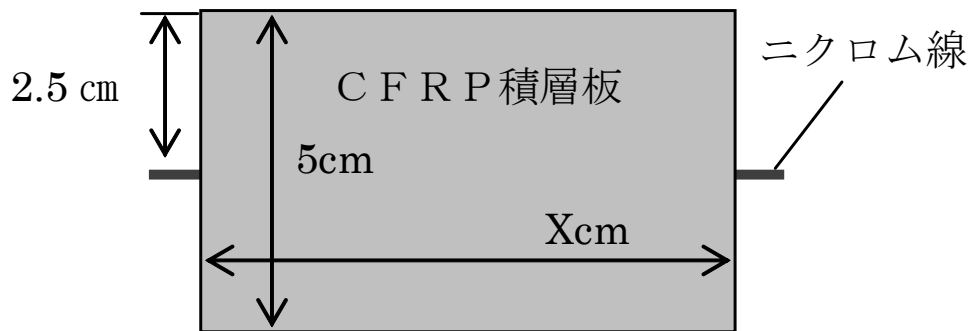


図 5.17 抵抗測定用試験片寸法

測定結果を表 5.2 に示す。この表から分かるとおり、 0° 層と 90° 層が接触している部分がある場合は抵抗が下がっており、一方向材の場合は抵抗があまり下がっていない。また、ニクロム線が炭素繊維に沿う方向に埋められている[90/0/0/90]よりも、炭素繊維に直交するように埋められている[0/90/90/0]の方がより抵抗の低下が著しい。この実験結果からも、先に述べた 2 つの条件で電流経路の広さが決定することが示された。

表 5.2 抵抗測定実験結果

	2 cm	4 cm	8 cm
ニクロム線単体の理論値	2.76	5.52	11.04
0/0/0/0	2.8	5.1	9.8
90/90/90/90	2.7	5.2	10
90/0/0/90	2.6	4.6	7.9
0/90/90/0	2.1	2.6	3.1

(単位 : Ω)

5.5 本章についての考察とまとめ

本章では、ニクロム線の埋込み方向と炭素繊維方向の位置関係が局所的加熱効率に及ぼす影響を実験により調べた。その結果、試験片Cの埋め方、すなわち[90/0/ニクロム線/0/90]という埋め方が最も局所的加熱効率が良いことが分かった。試験片Cは試験片A、Bに比べて表面から埋込み部までの距離が大きいにも拘らず、試験片A、Bよりも優れた局所的効率を示した。つまり、表面から埋込み部までの距離は支配的ではなく、他の要素がより重要であると考えられた。

そして、埋込み断面観察と抵抗の測定実験により、

- ・ 0° 層と 90° 層が接触している部分が存在するかどうか
- ・ ニクロム線と炭素繊維が直交して触れているかどうか

の2点で、ニクロム線からCFRPに電気が流れやすいかどうかが決まることが分かった。

以上のことを考慮して、クロスプライ積層の中では最も局所的加熱効率が優れている、[90/0/ニクロム線/0/90]という埋め方を採用することにする。

第6章 CFRP 積層板中の熱伝導解析

本章では、有限要素解析ソフトウェア ABAQUS を用いて、ニクロム線に通電することにより生じるジュール熱が CFRP 積層板中を伝わる様子を数値シミュレーションにより求める。CFRP 内部は炭素繊維と樹脂が混在しており、非常に複雑な熱伝導形態を示す。そのため、CFRP 積層板内部の熱伝導の厳密な数値解析を行うのは困難である。今回の解析においては、CFRP 内部を均質な直交異方性材料と考える。

6.1 解析手法

6.1.1 構成式

3次元非定常熱伝導を支配する方程式は、次式で与えられる。

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} + u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y} + w \frac{\partial T}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial x} \left(k_x \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k_y \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k_z \frac{\partial T}{\partial z} \right) + Q$$

ここで、

T : 温度 ρ : 密度 c : 比熱 k_x, k_y, k_z : 熱伝導率 Q : 内部発熱 u, v, w : 流速 である。

今回は固体の熱伝導問題であるため、左辺第2項～第4項は無視できる。

境界条件については、

ある境界 S_1 上で熱伝達がある場合、 S_1 上で、単位面積あたりの熱流束 q について、

$$q = \alpha_c (T - T_c) \quad \alpha_c: \text{熱伝達係数} \quad T_c: \text{外部温度}$$

が成り立つ。

ある境界 S_2 上で熱放射がある場合、 S_2 上で、単位面積あたりの熱流束 q について、

$$q = \varepsilon \sigma F (T^4 - T_r^4)$$

が成り立つ。

ここで、 ε : 放射率 σ : Stefan-Boltzman 定数 F : 形状係数 T_r : 放射源である高温物体の温度 である。

熱流束 q は、Fourier の法則により、

$$q = - \left(k_x \frac{\partial T}{\partial x} l_x + k_y \frac{\partial T}{\partial y} l_y + k_z \frac{\partial T}{\partial z} l_z \right)$$

である。

ここで、 l_x, l_y, l_z は、境界に垂直なベクトルの方向余弦である。

上記の式を、Galerkin 法により定式化し、Clank-Nicolson 法を用いて時間積分を行う。(附録 1, 2 参照)

6.1.2 物性値

解析に用いた各物性値を表 6.1 に示す。CFRP は炭素繊維方向と繊維直交方向で熱伝導率の値が大きく異なる直交異方性材料である。CFRP への通電は、微量であることが実験により分かっていることと、流路が非常に複雑であり、解析が現状では困難であることから、無視することとした。よって導電率は 0 としている。また、ニクロムの抵抗の温度係数は 100~200ppm 程度であり、解析範囲が 100K 程度のオーダーであるから、温度上昇による抵抗の上昇は 1~2% 程度と見積られる。この影響は小さいと判断し、ニクロムの導電率は温度にかかわらず一定であるとした。また、熱膨張の影響も考慮しておらず、密度は温度に関わらず一定値である。熱伝導率についても同様で、温度に関わらず一定値としている。

表 6.1 CFRP, ニクロム線の物性値

	CFRP	ニクロム
密度 $[kg/m^3]$	1791	8670
比熱 $[J/g \cdot K]$	0.8679	0.444
熱伝導率 (繊維方向) $[W/m \cdot K]$	4.605	17.4
熱伝導率 (繊維直交方向) $[W/m \cdot K]$	0.7118	
導電率 $[/\Omega m]$	0	923000

6.1.3 解析モデル

作製した解析モデル寸法を図 6.1 に示す。積層構成は[0/0/0/0]の一方向材で、ニクロム線埋込み位置は 2 層目と 3 層目の間、すなわち中心面とし、方向は炭素繊維と同方向とした。なお、対象性を考慮して、4 分の 1 モデルとしてある。積層構成を一方向材とした理由は、5.4 節で示したように、CFRP への電気伝導の影響を最小とするためである。

ニクロム線の半径は 0.050 mm、CFRP 1 層の厚さは 0.125 mm、解析範囲は 40 mm × 0.500 mm × 0.250 mm とした。CFRP 及びニクロム線の物性値は表 6.1 の値を使用した。

境界条件、時間幅等は次のように設定した。

- ・ 50 mm (6.9Ω) の長さのニクロム線で 0.6W の電力となるように、モデル内の長さ 0.500 mm のニクロム線両端の電位差を 0.020347V と設定した。
- ・ 外表面にあたる面の熱伝達係数 α_c をパラメータとし、 $\alpha_c = 0, 5, 10 [W / m^2 \cdot K]$ の場合について解析を行った。
- ・ 雰囲気温度 $T_c = 20^\circ\text{C}$ とした。
- ・ CFRP の性質から輻射の影響は小さいと判断し、輻射項は無視した。
- ・ 時間増分 $\Delta t = 0.5\text{sec}$ とし、解析の時間範囲は通電開始時刻 0sec から時刻 180sec までとした。

同様に、図 6.2 のように積層構成[90/90/90/90]のモデルも作製し、上記の境界条件の元で、解析を行った。

メッシュ分割後のモデルの端部を図 6.3 に示す。

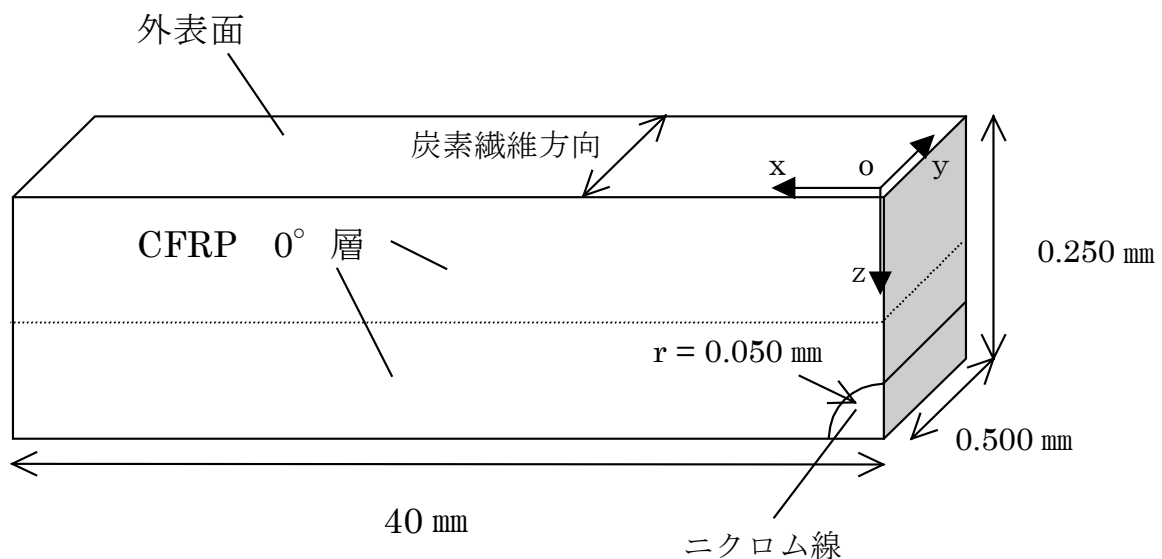


図 6.1 積層構成[0/0/0/0]の解析モデル

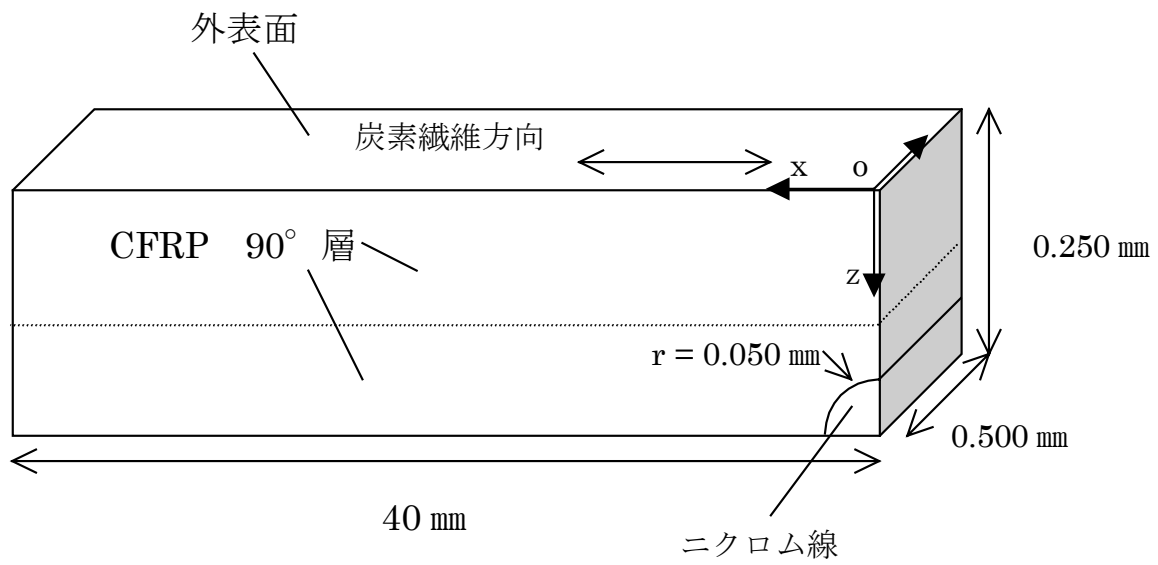


図 6.2 積層構成[90/90/90/90]の解析モデル

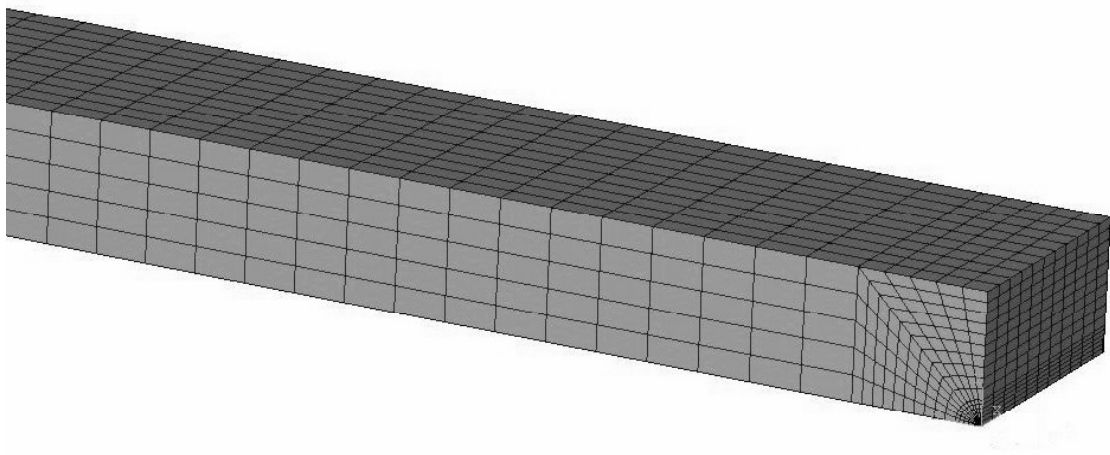


図 6.3 メッシュ分割後の CFRP 解析モデル

6.2 解析結果

[0/0/0/0]のモデルのニクロム線直近のCFRP表面、つまり図6.1の原点Oにおける温度の解析結果を図6.4に示す。実験値は、5.2.3の実験と同様にして、50 mm×50 mm×0.5 mmのCFRP [0/0/0/0]一方向積層板の2層目と3層目の間にニクロム線を埋め込み、0.6Wのエネルギーを加えて測定した値である。

表面の熱伝達係数 $\alpha = 5[W/m^2 \cdot K]$ と設定したときの解析結果が、最もよく実験値の傾向を表している。実験と解析の誤差は約20%である。

先に述べたように、CFRPは、炭素繊維と樹脂が混在する複雑な内部構造をしており、完全に均一ではないため、内部の熱伝導の厳密な評価は困難である。しかし、モデルを簡略化し、均質な直交異方性材料と考えて行った解析でも、傾向が十分一致する結果が得られることが分かる。

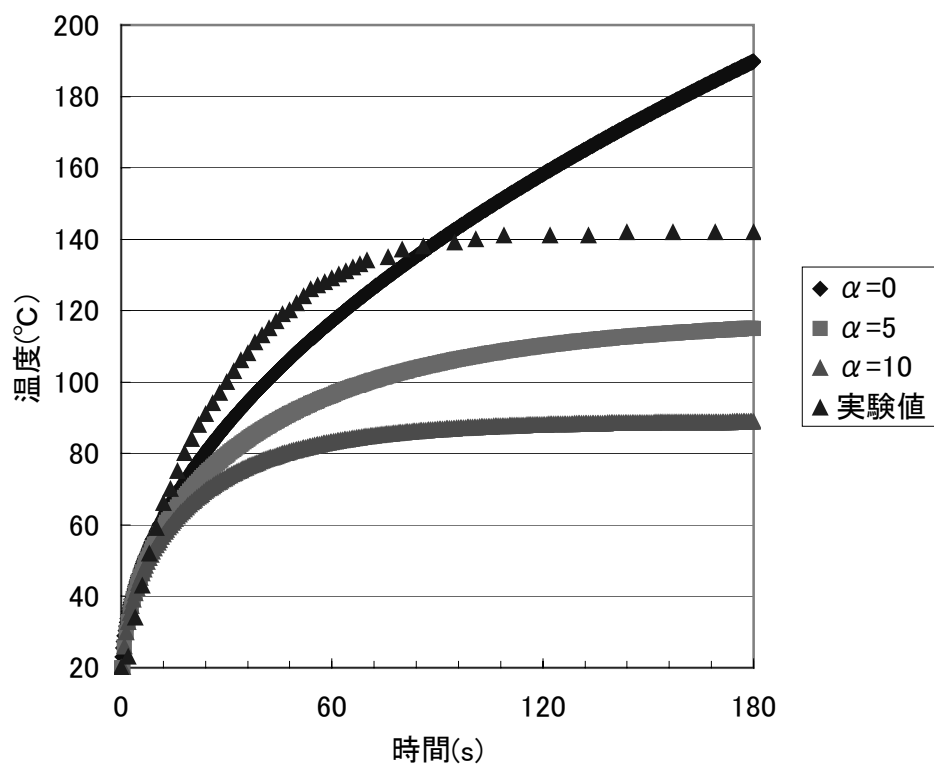


図 6.4 積層構成[0/0/0/0]，ニクロム線直近のCFRP表面温度解析結果と実験値

次に、[90/90/90/90]のモデルのニクロム線直近のCFRP表面、つまり図 6.2 の原点Oにおける温度の解析結果を図 6.5 に示す。実験値は[0/0/0/0]の場合と同様に、CFRP一方向積層板の2層目と3層目の間に、繊維方向と直交するようにニクロム線を埋め込み、0.6Wのエネルギーを加えて測定した値である。

このグラフからも、 $\alpha = 5 [W/m^2 \cdot K]$ と設定したときの解析結果は、実験値の傾向と非常によく一致している。誤差は 0° モデルと同程度である。

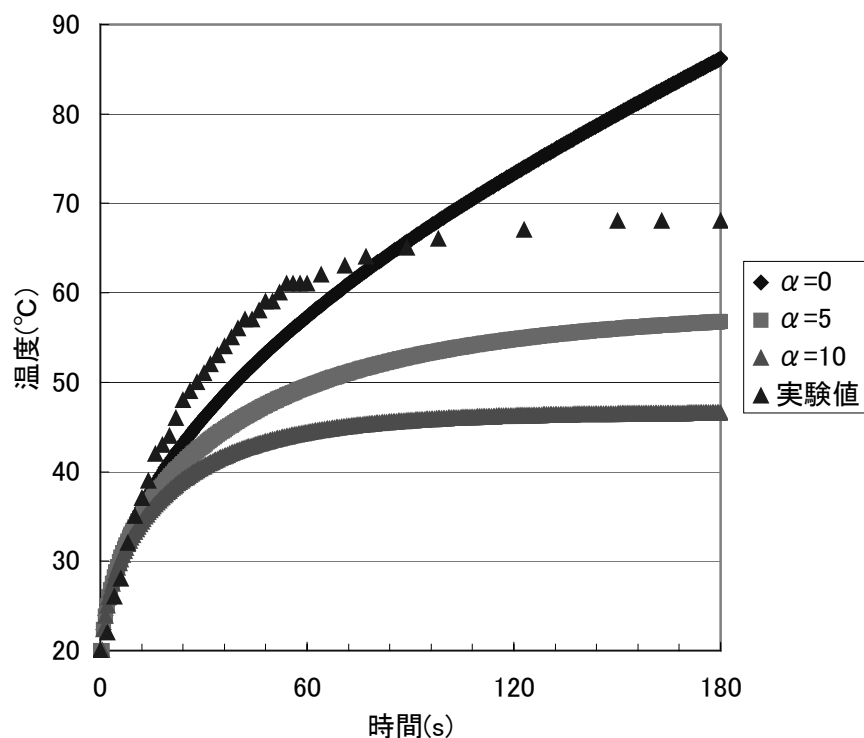


図 6.5 積層構成[90/90/90/90]，ニクロム線直近のCFRP表面温度解析結果と実験値

6.3 本章についての考察とまとめ

本章では、ニクロム線埋込みCFRPの熱伝導解析モデルを作成し、有限要素法解析を行った。解析結果と実験結果は15%~20%ほどの誤差があるものの、傾向は一致している。また、解析結果と実験結果の比較から、CFRP積層板と空気との間の熱伝達係数 $\alpha = 5 [W/m^2 \cdot K]$ と決定した。

以上より、CFRP積層板の熱伝導解析を行うことが可能になった。

第7章 SMA ハニカムコアサンドイッチパネルの熱伝導解析

本章では、第6章のCFRP積層板中の熱伝導解析を拡張し、SMAハニカムコアサンドイッチパネル全体の熱伝導解析を行う。ニクロム線への印加電圧から、SMAハニカムコアが逆変態を起こす範囲を、時間とともに調べることを目的とする。このような解析手法が確立できれば、損傷回復に最適な印加電圧を計算することも可能となる。

7.1 解析手法

7.1.1 構成式

構成式は6.1.1と同様である。

7.1.2 物性値

解析に用いた物性値を表7.1に示す。6.1.2と同様に、密度・比熱・熱伝導率・導電率は温度に関わらず一定値であるとした。CFRPおよびSMAへの通電はないものと考えているので、導電率は設定していない(0である)。

表 7.1 SMAハニカムコアサンドイッチの熱伝導解析に用いた物性値

	CFRP	ニクロム	SMA (Ti-Ni)
密度 [kg/m^3]	1791	8670	6450
比熱 [$J/g \cdot K$]	0.8679	0.444	0.46
熱伝導率 (繊維方向) [$W/m \cdot K$] (繊維直交方向)	4.605 0.7118	17.4	10
導電率 [$\Omega \cdot m$]		923000	

SMAの温度が上昇すると、低温時のマルテンサイト相から高温時のオーステナイト相へと相変態が起こる。この相変態に伴って、潜熱が存在するため、その影響を考慮しなくてはならない。

そこで、図 7.1 のように、逆変態開始温度 A_s から逆変態終了温度 A_f までの温度範囲において、潜熱に相当する熱量を吸収するように設定した。つまり、 A_s から A_f までの見かけ上の比熱を変化させていると言い換えることもできる。

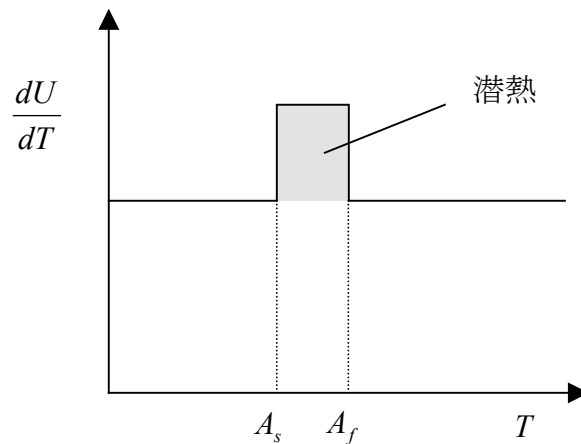


図 7.1 潜熱の取り扱い

ここでは、逆変態開始温度 $A_s = 48^\circ\text{C}$ 、逆変態終了温度 $A_f = 60^\circ\text{C}$ と設定した。この値は Ti-Ni 合金の組成比から推算される値である。また、潜熱は文献値より、 1548 J/mol とした。

7.1.2 解析モデル

解析モデルを作成するにあたり、図 7.2 のように、対称面を考慮して解析範囲を決定した。解析範囲は $3.5\text{ mm} \times 42\text{ mm}$ の大きさとした。

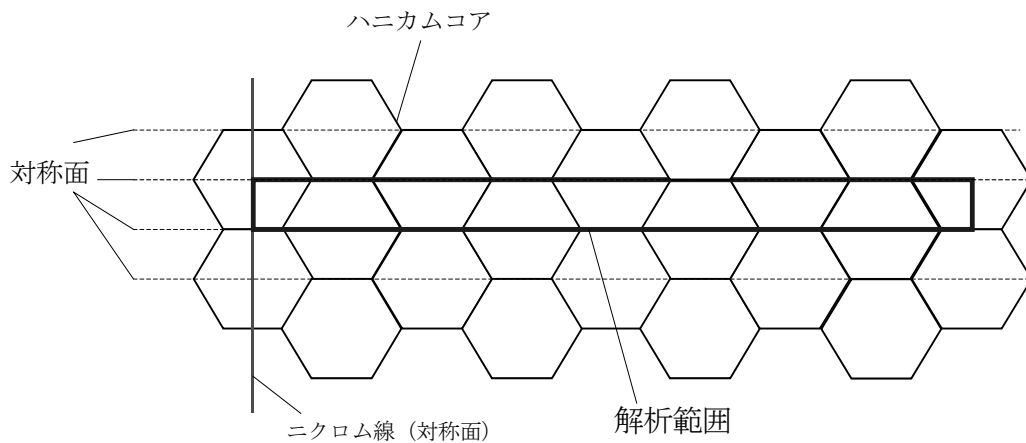


図 7.2 解析範囲

解析モデルを図 7.3 に示す。CFRPの積層構成は $[90/0/0/90]$ で、全寸法は $48\text{ mm} \times 11\text{ mm} \times 3.5\text{ mm}$ である。

境界条件、時間幅等は次のように設定した。

- ・ ニクロム線での発熱量が、 0.024 W/mm の電力となるように、モデル内の長さ 3.5 mm のニクロム線両端の電位差を 0.202 V と設定した。
- ・ 外表面にあたるCFRPの面の熱伝達係数 $\alpha = 5$ とした。
- ・ 雰囲気温度 $T_c = 20^\circ\text{C}$ とした。
- ・ 輻射項は無視した。
- ・ 時間増分 $\Delta t = 0.5\text{ sec}$ とし、解析の時間範囲は 300 sec とした。

メッシュ分割後のモデルを図 7.4 に示す。

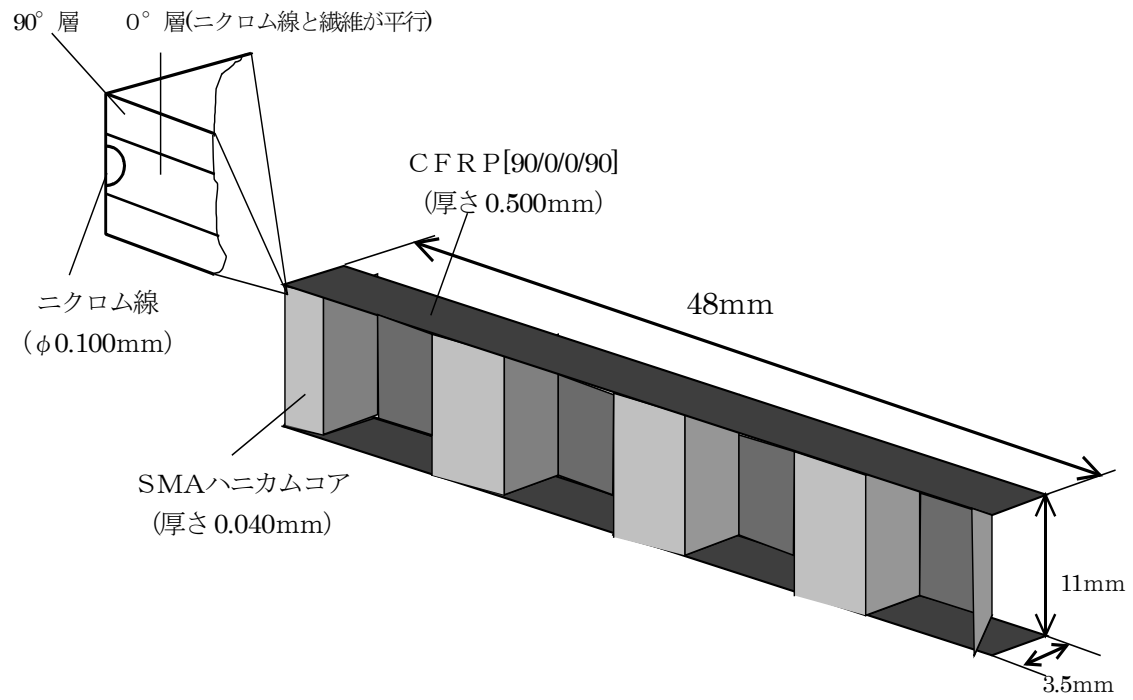


図 7.3 SMAハニカムコアサンドイッチパネル解析モデル

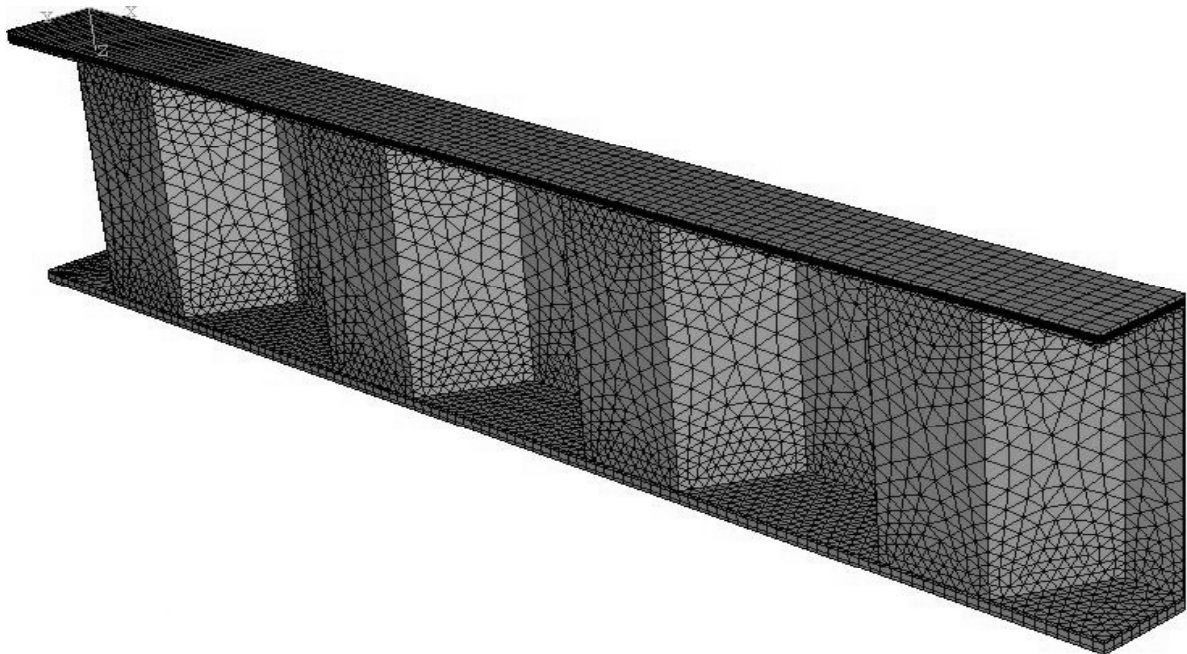


図 7.4 メッシュ分割後のSMAハニカムサンドイッチパネル解析モデル

7.2 解析結果

時刻 $t=0$, 60, 120, 180, 240, 300sec 時の温度分布解析結果をそれぞれ図 7.5, 図 7.6, 図 7.7, 図 7.8, 図 7.9, 図 7.10 に示す。

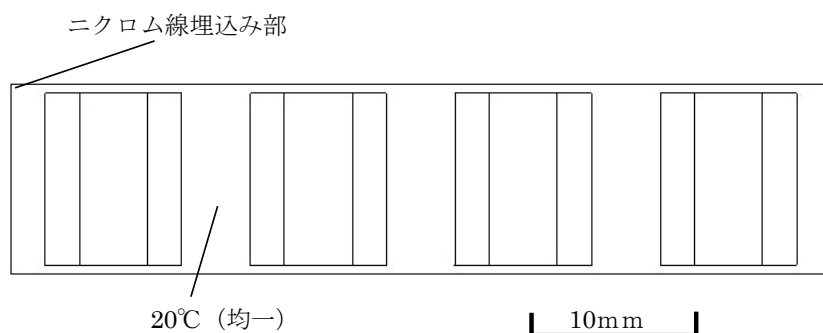


図 7.5 $t = 0\text{sec}$ における温度分布解析結果

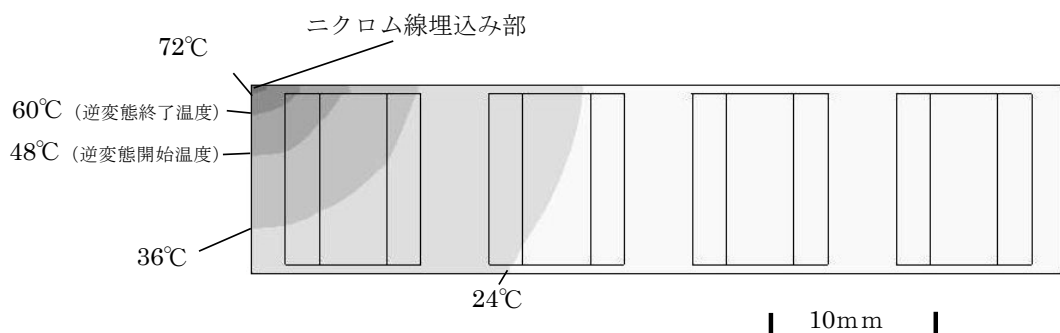


図 7.6 $t = 60\text{sec}$ における温度分布解析結果

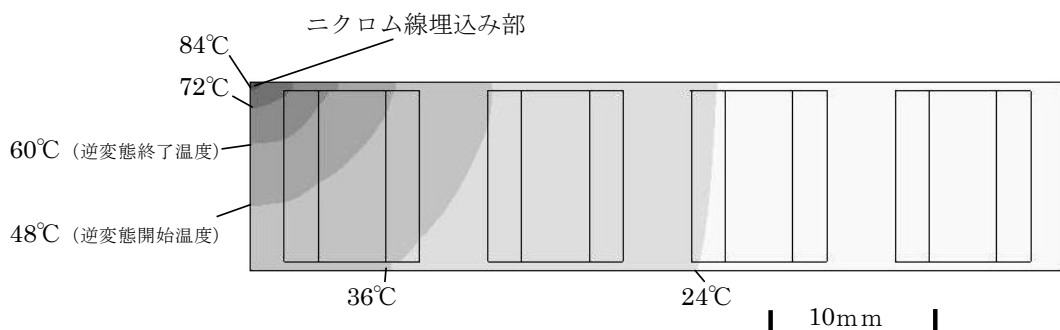


図 7.7 $t = 120\text{sec}$ における温度分布解析結果

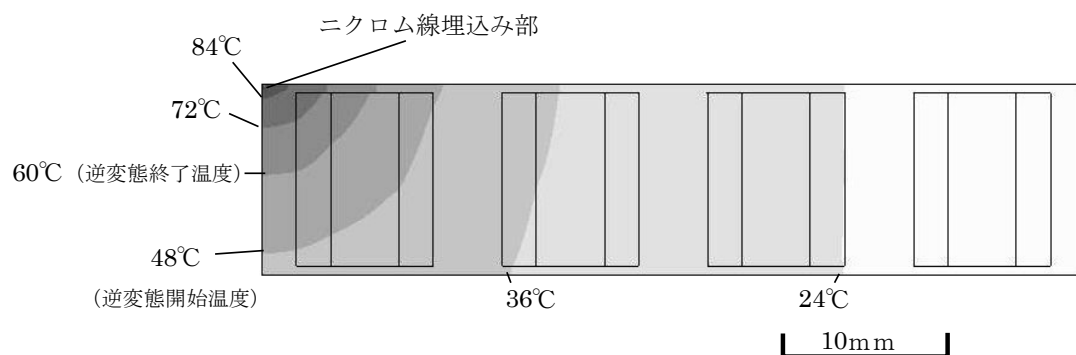


図 7.8 $t = 180\text{sec}$ における温度分布解析結果

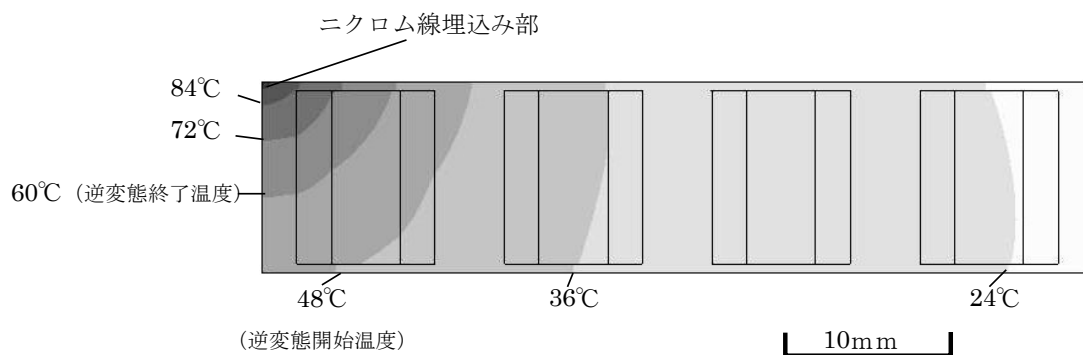


図 7.9 $t = 240\text{sec}$ における温度分布解析結果

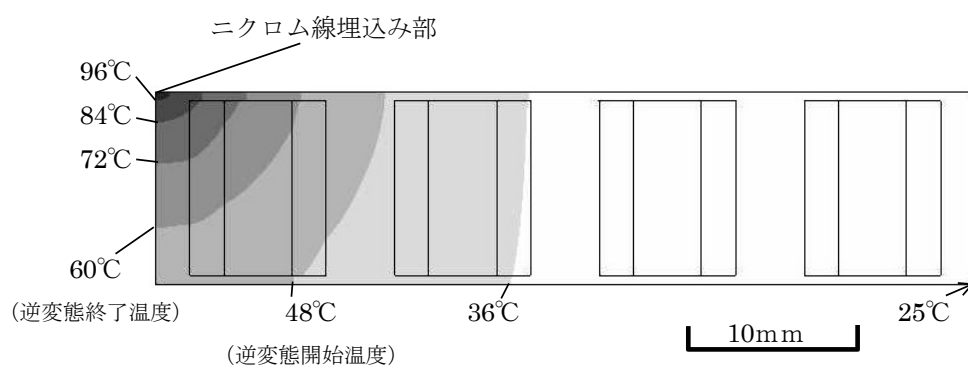


図 7.10 $t = 300\text{sec}$ における温度分布解析結果

7.3 本章についての考察とまとめ

本章では、第 6 章で行った熱伝導解析のモデルを SMA ハニカムコアサンドイッチ全体に拡張して、有限要素法による熱伝導解析を行った。

SMA の変形回復は、マルテンサイト相からオーステナイト相に相変態する際に起こる。よって、相変態開始温度 A_s に達した部分は変形が回復し始め、相変態終了温度 A_f に達した部分は回復が完了していると考えられる。

ただし、変形が回復しようとするときに、未回復の部分に引っ張られるため、回復しつつある部分には応力が加わる。応力が加わると、逆変態に逆行する応力誘起マルテンサイト変態が起こるため、逆変態が抑制され、 A_f 点は若干上がることになる。この影響は今回のモデルでは考慮していない。

また、マルテンサイト相からオーステナイト相への相変態に伴い、ある大きさの熱量が潜熱として吸収される。Ti-Ni の潜熱の大きさは $1548 J/mol = 29.04 J/g$ である。この値は、比熱 $0.46 J/g \cdot K$ に対して、無視できないほどの大きさである。相変態の前後では潜熱だけでなく、様々な性質が変化する。つまり、この解析の精度の鍵を握るのは、この相変態前後の SMA の物性に関する取り扱いであるといえる。今回の解析でもこの潜熱は考慮しているので、ある程度の精度は期待できるが、さらなる精度向上のためには、相変態前後の SMA の性質を詳細に調べ、モデル中に組み入れる必要がある。

第8章 埋込みニクロム線による SMA ハニカム コアサンドイッチの加熱実験

第5章でニクロム線の最適埋込み位置を決定した。本章では、実際に表面材にニクロム線を埋め込んだ SMA ハニカムコアサンドイッチパネルを作製し、ニクロム線への通電により形状回復を試みる。

8.1 実験の概要

表面材として、直径 0.100 mm のニクロム線 5 本を埋め込んだ CFRP 積層板を作成した。積層構成、寸法等を図 8.1 に示す。ニクロム線の間隔は 12 mm とした。これはハニカムコアの 2 セル分の幅に対応している。

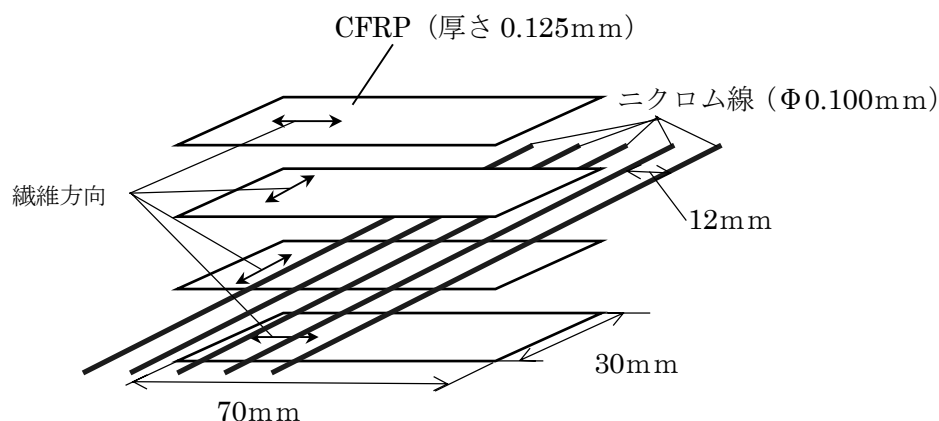


図 8.1 ニクロム線埋込み CFRP

作製したニクロム線埋込み CFRP 積層板 1 枚と、ニクロム線なしの CFRP 積層板 1 枚を用いて、SMA ハニカムコアサンドイッチパネルを作製した。完成したパネルを図 8.2 に示す。

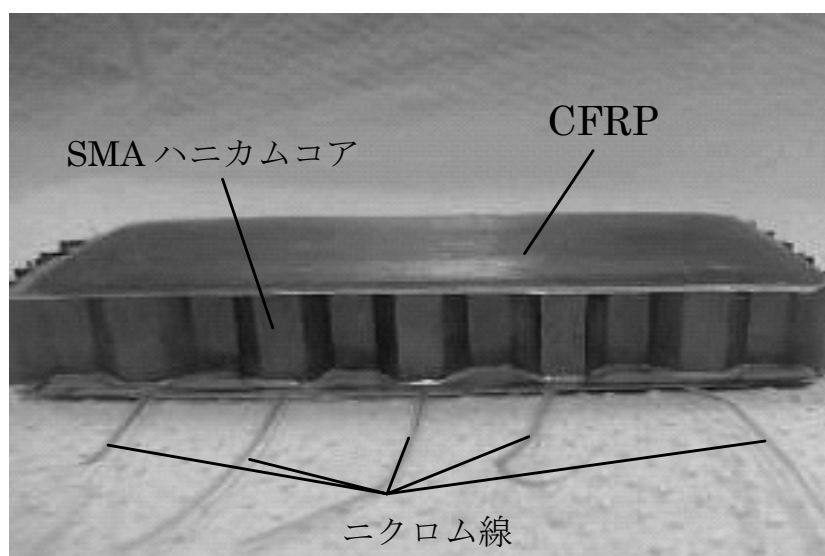


図 8.2 ニクロム線を組み込んだ SMA ハニカムサンドイッチパネル

作製したパネルに、図 8.3 のように、面外方向から面荷重を加え、1.0 mm（ハニカムコアの10%）変位させた。1.0 mmの変位が完了した時点での様子を図 8.4 に示す。

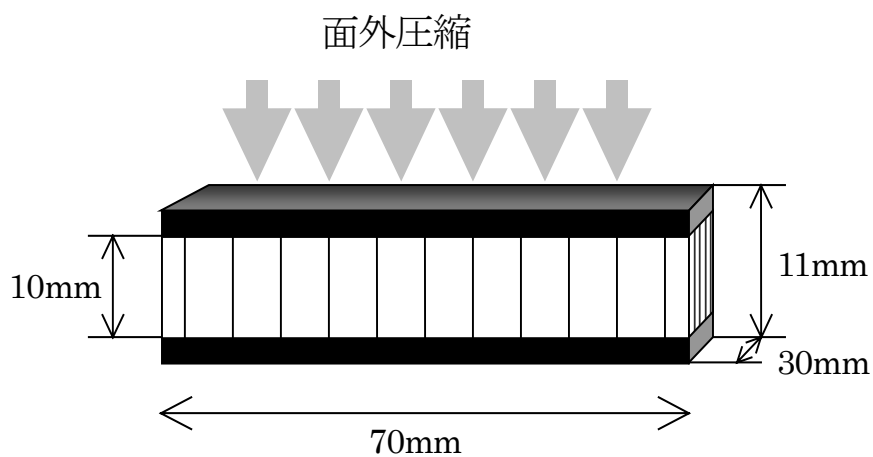


図 8.3 面外方向からの面荷重による圧縮

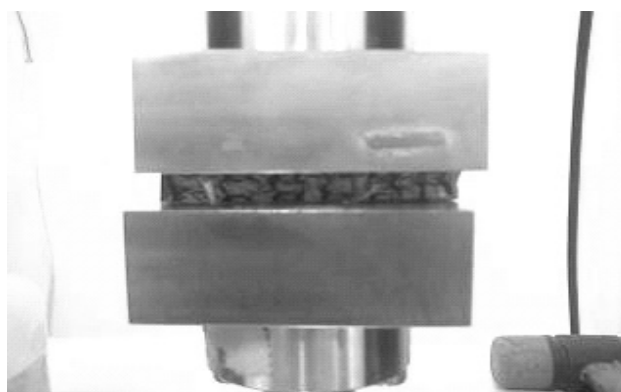


図 8.4 圧縮完了時の様子

その後、試験片を取り出し、中央部のニクロム線に通電を行った。通電により与えるエネルギーは、ニクロム線1mmあたりの発熱量が第7章の解析と同じ値である 0.024W/mm となるように調節した。通電は300秒間行った。

8.2 実験結果

圧縮前、圧縮後、通电加熱終了後の試験片の様子を図 8.5、図 8.6、図 8.7 に示す。
0.024W/mm、300sec の通电により、ニクロム線埋め込み部から周囲 2 セルにわたって回復が見られる。

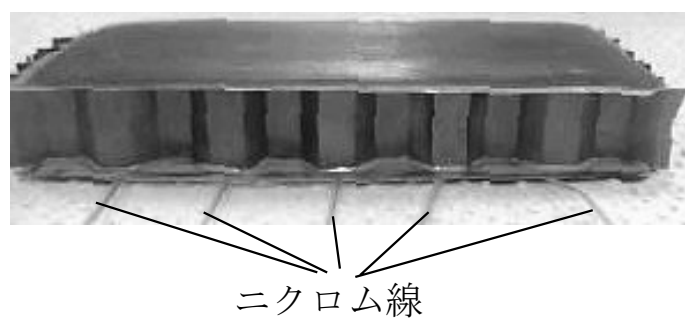


図 8.5 圧縮前のSMAハニカムコアサンドイッチパネル



図 8.6 10%圧縮後のSMAハニカムコアサンドイッチパネル

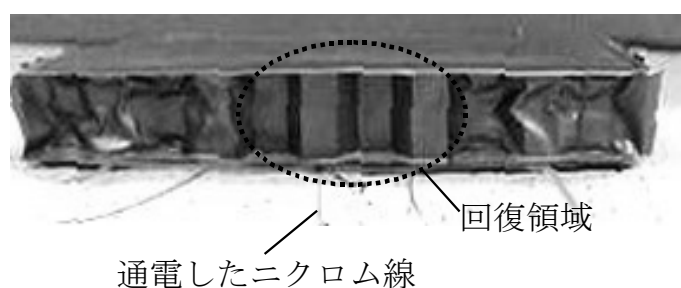


図 8.7 300sec 通电後のSMAハニカムコアサンドイッチパネル

8.3 解析との比較

第7章で行った解析との比較を行った。ニクロム線に加えた電気エネルギーは 0.024W/mm 、加熱時間は 300sec で統一されている。但し、解析は無傷の状態のモデルであるのに対し、実験は10%の圧縮変形を加えているので、形状は異なっている。

回復範囲の比較図を図8.8に示す。この図は、実験の写真と解析の結果図を、縮尺を揃えて対称的に貼り合わせたものである。解析結果から逆変態開始温度 A_s にあたる 48°C 線と、逆変態終了温度 A_f にあたる 60°C 線を描いた。この 48°C 線の外側ではSMAはマルテンサイト相であり、 48°C 線と 60°C 線の間領域においてはマルテンサイト相とオーステナイト相が混在している。そして、 60°C 線の内側では、完全に逆変態が完了し、オーステナイト相の状態である。

実験の結果を見ると、 60°C 線の内側はSMAハニカムコアが座屈から完全に回復しており、 60°C 線と 48°C 線の間領域は回復した部分と回復していない部分が存在している。そして、 48°C 線の外側はほとんど回復が見られない。

以上より、実験の結果は第7章の解析の結果と非常に良い一致を見せていると言える。

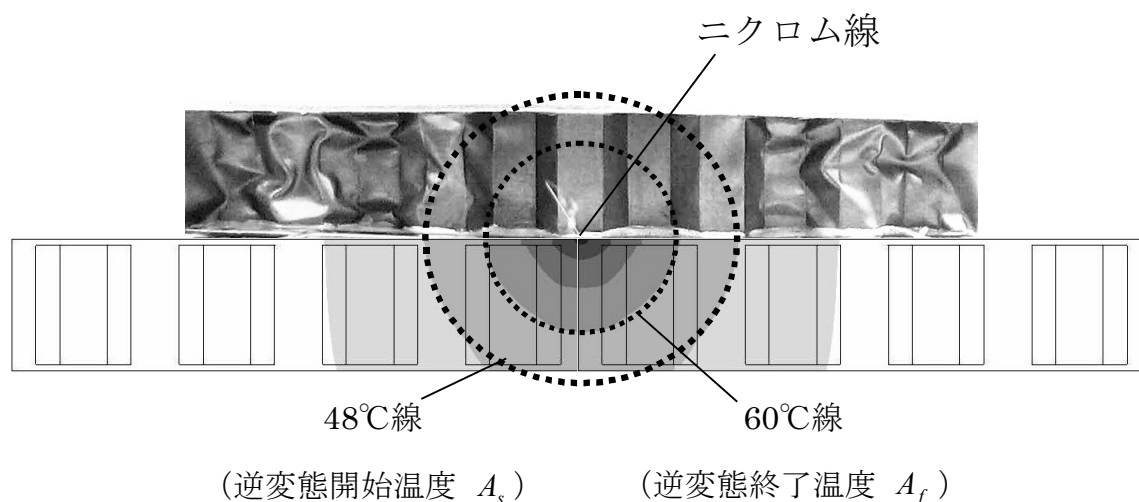


図 8.8 加熱による回復範囲の実験と解析の比較

8.4 本章についての考察とまとめ

本章では、第 7 章で行った SMA ハニカムコアサンドイッチパネルの熱伝導解析に相当する実験を行い、解析結果と比較した。得られた結果は非常に良い一致を見せており、第 7 章のモデルで SMA ハニカムコアサンドイッチの回復範囲を計算により求めることが十分に可能であることが示された。

第9章 結論および今後の課題

本研究では、損傷によるサンドイッチパネルの剛性・強度低下の防止のためにSMAハニカムコアを用いたサンドイッチパネルを作製し、形状回復機能の実現を確認するとともに、加熱機構としてニクロム線を埋め込む方法を提案・評価した。具体的に行ったことおよびその結果を以下にまとめる。

まずSMAでハニカムコアを作成するにあたって、SMAの材料特性と従来材のアルミ合金と材料物性の比較から、適切な箔厚－セルサイズ比を求めた。その結果に基づいて設定した箔厚、セルサイズで実際にSMAハニカムコアサンドイッチパネルを作製し、衝撃損傷が回復することを実験により実証した。その実験から、コアは少なくとも約15%の座屈を回復する能力を持つことが確認された。サンドイッチパネルの曲げ剛性とコア厚の関係式を導き、この15%の座屈回復能力は30%の曲げ剛性の低下防止に繋がることが分かった。

SMAハニカムコアサンドイッチパネルの加熱方法として、CFRP積層板へのニクロム線埋込みという手法を提案し、ニクロム線周辺の狭い範囲に注目して最も効率良く電気エネルギーが熱エネルギーに変換される埋め方を実験により調べた。その結果、炭素繊維に沿った方向にニクロム線を埋め込むことが重要であることが分かった。

ニクロム線に加える電気エネルギーからSMAハニカムコアサンドイッチパネルの回復範囲を求めるため、熱伝導に関するモデルを作製し、有限要素法による数値解析を行った。まず第一段階としてニクロム線を埋め込んだCFRP積層板の熱伝導解析モデルを作製し、外表面の、空気への熱伝達係数 α をパラメータとして数値解析を行い、 $\alpha = 5 [W/m^2 \cdot K]$ という値が最も良く実験値との傾向の一致を見せることが分かった。これにより、多少の誤差はあるものの、CFRP積層板の熱伝導をある程度シミュレーションできることが分かった。その結果を用いて、モデルをSMAハニカムコアサンドイッチパネル全体に拡張し、解析を行った。ニクロム線に0.024 W/mmの電気エネルギーを加えることで、300秒後にはニクロム線の周囲およそ14 mm以内の範囲で逆変態が起り、8 mm以内の範囲では完全に逆変態が完了するという結果が得られた。この解析結果に対し、解析条件と同じ条件で実験を行って結果を比較したところ、非常に良い一致が得られた。

得られた成果を再度、以下に整理する。

- ・ SMAハニカムコアサンドイッチパネルが面外荷重による変形を元通りに回復させる機能を持つことが確認された。
- ・ CFRP積層板中にニクロム線を埋め込み通電する場合に、与えた電気エネルギーが効率よく埋め込み部周辺の熱エネルギーとなるための最適な埋め込み方が分かった。
- ・ CFRP積層板中にニクロム線を埋め込み、通電することによりSMAハニカムコアを加熱することができ、サンドイッチパネルの形状回復が可能であることを実証した。
- ・ ニクロム線への通電条件からSMAハニカムの回復範囲を有限要素解析により求めるモデルを作製し、そのモデルの妥当性を実験との比較により示した。

本研究では以上のことが成果として得られたが、今後の課題も多く残っている。今後の課題について以下に列挙する。

- ・ SMAハニカムコアサンドイッチパネルの回復能力の定量的評価として、回復可能な最大変位を実験・解析両面から調べる。また、形状回復後のSMAハニカムコアサンドイッチが剛性・強度の2点において実際に元通りあるいはそれに近い状態まで戻っているかどうか、実験により確かめる。
- ・ 熱伝導解析モデルについて、考慮していない項目のうち影響が大きいと考えられるものを新たにモデル中に組み込み、更なる精度向上を図る。影響が大きいと考えられるものは、座屈による変形が熱伝導に及ぼす影響、逆変態進行領域が生み出す回復応力と逆変態が起こっていない領域が変形回復に逆らおうとして発生する弾性力との相殺の影響、相変態に伴う各種物性の変化の影響などである。
- ・ CFRPへのニクロム線の埋め込み以外の加熱方法について、可能性を検討する。

附録 1 Galerkin 法による有限要素法の定式化

3次元非定常熱伝導を支配する方程式は、移流項を無視できる場合、次式で与えられる。

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(k_x \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k_y \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k_z \frac{\partial T}{\partial z} \right) + Q \quad (1)$$

この式を、Galerkin 法に基づいた定式化を行う。

まず、解析対象の連続体を有限個の要素に分割し、要素内温度 T を次のように表現する。

$$T(x, y, z, t) = [N(x, y, z)] \{\phi(t)\} \quad (2)$$

ここに、 $[N]$ は内挿関数マトリックス、 $\{\phi\}$ は時刻 t における要素節点温度ベクトルである。

式 (1) に $[N]$ を重み関数として Galerkin 法を適用すると、

$$\int_{V^e} [N]^T \left\{ k \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) + Q - \rho c \frac{\partial T}{\partial t} \right\} dV = 0 \quad (3)$$

ここに、 V^e は要素領域を表す。また簡単のため $k_x = k_y = k_z = k$ (一定値) とおいた。

Green-Gauss の定理より、

$$\begin{aligned} \int_{V^e} k [N]^T \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) dV \\ = - \int_{V^e} k \left(\frac{\partial [N]^T}{\partial x} \frac{\partial T}{\partial x} + \frac{\partial [N]^T}{\partial y} \frac{\partial T}{\partial y} + \frac{\partial [N]^T}{\partial z} \frac{\partial T}{\partial z} \right) dV + \int_{S^e} k [N]^T \frac{\partial T}{\partial n} dS \end{aligned} \quad (4)$$

ここに、 S^e は要素の境界、 $\frac{\partial}{\partial n}$ は要素の境界に立てた外向き法線方向の偏微分を表す。

Fourier の法則より、

$$q = - \left(k_x \frac{\partial T}{\partial x} l_x + k_y \frac{\partial T}{\partial y} l_y + k_z \frac{\partial T}{\partial z} l_z \right) \quad (5)$$

ここに、 l_x, l_y, l_z は境界に垂直なベクトルの方向余弦を表す。

式 (2) および (5) を用いると、式 (4) の右辺はさらに次のように書ける。

$$- \int_{V^e} k \left(\frac{\partial [N]^T}{\partial x} \frac{\partial [N]}{\partial x} + \frac{\partial [N]^T}{\partial y} \frac{\partial [N]}{\partial y} + \frac{\partial [N]^T}{\partial z} \frac{\partial [N]}{\partial z} \right) dV \cdot \{\phi\} - \int_{S^e} q [N]^T dS \quad (6)$$

式 (6) 及び (2) を式 (3) に代入すると、次式が得られる。

$$\begin{aligned}
& - \int_{V^e} k \left(\frac{\partial[N]^T}{\partial x} \frac{\partial[N]}{\partial x} + \frac{\partial[N]^T}{\partial y} \frac{\partial[N]}{\partial y} + \frac{\partial[N]^T}{\partial z} \frac{\partial[N]}{\partial z} \right) dV \cdot \{\phi(t)\} \\
& - \int_{S^e} q[N]^T dS + \int_{V^e} Q[N]^T dV - \int_{V^e} \rho c[N]^T [N] dV \cdot \frac{d\{\phi\}}{dt} = 0
\end{aligned} \quad (7)$$

式 (7) を整理することにより、非定常熱伝導問題に対する熱量バランスの有限要素式は次のようになる。

$$[c] \left\{ \frac{\partial \phi}{\partial t} \right\} + [k] \{\phi\} = \{f\} \quad (8)$$

ここに、 $[c]$ 、 $[k]$ 、 $\{f\}$ はそれぞれ熱容量マトリックス、熱伝導マトリックス、熱流束ベクトルと呼ばれ、次のように与えられる。

$$[c] = \int_{V^e} \rho c [N]^T [N] dV \quad (9)$$

$$[k] = \int_{V^e} k \left(\frac{\partial[N]^T}{\partial x} \frac{\partial[N]}{\partial x} + \frac{\partial[N]^T}{\partial y} \frac{\partial[N]}{\partial y} + \frac{\partial[N]^T}{\partial z} \frac{\partial[N]}{\partial z} \right) dV \quad (10)$$

$$\{f\} = \int_{V^e} Q[N]^T dV - \int_{S^e} q[N]^T dS \quad (11)$$

式 (8) をすべての要素について集めると、全体の有限要素式を求めることができるわけだが、式 (11) の右辺第 2 項は要素と要素の境界で互いに相殺して、結局、解析対象の外部境界を持つ要素からの寄与分のみが残る。これらの寄与分、すなわち境界条件の導入について述べる。

- (a) 境界 S_1 上で温度が規定される場合、すなわち、 S_1 上で $T = \bar{T}$ (\bar{T} : 規定温度) であるとき、
境界 S_1 上で実際のプログラムに組み込む。

- (b) 境界 S_2 上で熱流束 q_0 が流出 (入) する場合、すなわち、 S_2 上で $q = q_0$ であるとき、

式 (11) の右辺第 2 項の q を q_0 とおく。すなわち、外部境界 S_2 をもつ要素について、式 (11) の右辺第二項を、

$$- \int_{S_2^e} q_0 [N]^T dS \quad (12)$$

とおく。ここに、 S_2^e は S_2 の一部を意味する。

断熱境界においては単に $q_0 = 0$ とおけばよいので、式 (11) 右辺の表面積分は考慮しなくて良い。

(c) 境界 S_3 上で熱伝達がある場合、すなわち、

$$S_3 \text{ 上で } q = \alpha_c (T - T_c) \quad \alpha_c : \text{熱伝達係数} \quad T_c : \text{外部温度} \quad (13)$$

であるとき、

式 (11) の右辺第 2 項を、

$$- \int_{S_3^e} \alpha_c (T - T_c) [N]^T dS \quad (14)$$

と置き換える。ここに S_3^e は S_3 の一部を意味する。式 (2) を用いると、上式はさらに次のように変形される。

$$- \int_{S_3^e} \alpha_c [N]^T [N] dS \cdot \{\phi\} + \int_{S_3^e} \alpha_c T_c [N]^T dS \quad (15)$$

(d) 境界 S_4 上で熱放射がある場合、すなわち、

$$S_4 \text{ 上で } q = \varepsilon \sigma F (T^4 - T_r^4) \quad (16)$$

ε : 放射率 σ : Stefan-Boltzman 定数 F : 形状係数 T_r : 放射源である高温物体の温度であるとき、

$$\alpha_r = \varepsilon \sigma F (T + T_r) (T^2 + T_r^2) \quad (17)$$

とおくことで線形化した式

$$q = \alpha_r (T - T_r) \quad (18)$$

を式 (11) の右辺第 2 項に導くことにより、次式を得る。

$$\int_{S_4^e} \alpha_r (T - T_r) [N]^T dS \quad (19)$$

ここに S_4^e は S_4 の一部を意味する。上記 (c) と同様に、式 (19) はさらに次のように変形される。

$$- \int_{S_4^e} \alpha_r [N]^T [N] dS \cdot \{\phi\} + \int_{S_4^e} \alpha_r T_r [N]^T dS \quad (20)$$

以上の境界条件に関する式 (12)、(15) および (20) を用いると、式 (8) のマトリックス $[k]$ および $\{f\}$ は次のように修正される。

$$\begin{aligned} [k] = & \int_{V^e} k \left(\frac{\partial [N]^T}{\partial x} \frac{\partial [N]}{\partial x} + \frac{\partial [N]^T}{\partial y} \frac{\partial [N]}{\partial y} + \frac{\partial [N]^T}{\partial y} \frac{\partial [N]}{\partial y} \right) dV \\ & + \int_{S_3^e} \alpha_c [N]^T [N] dS + \int_{S_4^e} \alpha_r [N]^T [N] dS \end{aligned} \quad (21)$$

$$\{f\} = \int_{V^e} Q[N]^T dV - \int_{S_2^e} q_0 [N]^T dS + \int_{S_3^e} \alpha_c T_c [N]^T dS + \int_{S_4^e} \alpha_r T_r [N]^T dS \quad (22)$$

以上のようにして個々の要素に対する有限要素式を、各種の境界条件をも含めた形で導出することができれば、系全体に対する有限要素式の導出は構造解析の場合と同じで、次の形で表現できる。

$$[C] \left\{ \frac{\partial \phi}{\partial t} \right\} + [K] \{\phi\} = \{F\} \quad (23)$$

ここに、 $[C]$ 、 $[K]$ 、 $\{F\}$ はそれぞれ $[c]$ 、 $[k]$ 、 $\{f\}$ を全要素について重ね合わせたものである。また $\{\phi\}$ も系全体の節点温度である。

附録 2 Crank-Nicolson 法による時間積分

式 (23) を実際に解く場合、一般に時間方向に差分近似を行うことが多い。

式 (23) に対する一般化 Crank-Nicolson 法は次式で与えられる。

$$\left(\beta [K] + \frac{1}{\Delta t} [C] \right) \{\phi\}_{t+\Delta t} = \left(-(1-\beta) [K] + \frac{1}{\Delta t} [C] \right) \{\phi\}_t + \beta \{F\}_{t+\Delta t} + (1-\beta) \{F\}_t \quad (24)$$

ここに Δt は時間増分、 β は 0 から 1 までの値をとるパラメータであり、 $\beta = 0.5$ の場合を Crank-Nicolson 法と呼んでいる。また、 $\{\cdot\}_t$ は時刻 t における値を意味する。

参考文献

- [1] D.Hull,T.W.Clyne “An Introduction to Composite Materials” Cambridge University Press
- [2] 宮入裕夫 “機能材料 高機能化と複合設計” 技報堂出版
- [3] William D. Callister,Jr. “Materials Science and Engineering An Introduction” John Wiley & Sons,Inc.
- [4] 邊 吾一, 石川隆司 共編著 “先進複合材料工学” 培風館
- [5] 坂田勝, 田坂英紀 “伝熱工学” 森北出版株式会社
- [6] 斉藤武雄 “数値伝熱学” 養賢堂
- [7] 日本機械学会 “知的複合材料と知的適応構造物” 養賢堂
- [8] 鷺津久一郎, 宮本博, 山田嘉昭, 山本善之, 川井忠彦 “有限要素法ハンドブック” 培風館
- [9] 田中喜久昭, 戸伏寿昭, 宮崎修一, “形状記憶合金の機械的性質”, 養賢堂
- [10] 林 毅, “軽構造の理論とその応用”, 日本科学技術連盟
- [11] 鈴木雄一, “実用形状記憶合金”, 工業調査会
- [12] 大阪科学技術センター形状記憶合金用途開発委員会編, “形状記憶合金とその使い方”, 日刊工業新聞社
- [13] 天野正太郎, “細径 FBG センサ及び SMA 箔アクチュエータを用いた損傷制御機能を持つスマート複合材料の構築”, 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修士論文, 2003
- [14] 荻原慎二, 大喜多真人, 千葉敬仁, 清水淳一, 岡部洋二, 武田展雄, “一方向 CFRP における熱伝導率の実験的評価, 2005

本論文に関する学会発表など

Shu Minakuchi, Nobuo Shiraishi, Ken Murakami , Yoji Okabe, Nobuo Takeda, Tatsuro Kosaka, “Structures with Damage Detection and Suppression Function using Small-diameter FBG sensors and SMA Honeycomb Core”,
Proceeding of the 9th Japan International SAMPE Symposium, 2005

謝辞

本論文を完成させるにあたって、本当に多くの方々に支えていただきました。

指導教官である武田展雄教授には、非常にやりがいのある題材を与えていただきました。また、実験・解析ともに申し分のないほど素晴らしい研究環境を提供していただき、心より感謝しております。

岡部洋二講師には、本論文を執筆するにあたり非常に多くの有用な助言を頂きました。いつも熱意を持って親身に相談に乗ってくださり、本当にありがとうございました。

水口周氏（東京大学大学院博士課程）には、研究に関する実を射た多くの助言を頂きました。また、研究以外の面においても、数え切れないほどの助力を頂いたことに、感謝しております。白石信夫氏（東京大学大学院修士課程）は、実験を中心として、多くの面で協力して下さいました。本当にありがとうございました。お二人の助力無しにはこの論文は完成しなかったと思います。感謝の気持ちを記すと同時に、今後のますますのご活躍をお祈りしております。

天野正太郎氏（東京大学大学院博士課程）、高橋市弥氏（東京大学大学院博士課程）、西川雅章氏（東京大学大学院博士課程）、水谷忠均氏（東京大学大学院助手）、矢代茂樹氏（東京大学大学院博士課程）、吉村彰記氏（東京大学大学院博士課程）には、研究に関する豊富な知識に基づく助言を数多く頂きました。その他様々な点でもお世話になりました。本当にありがとうございました。

西隆史氏（東京大学大学院修士課程）、桑原淳一郎氏（東京大学大学院修士課程）、新井健夫氏（東京大学大学院修士課程）、中尾知晃氏（東京大学大学院修士課程）、には、研究はもちろん、研究室での活動全般において色々なことを教えていただきました。心より感謝しております。

最後に、研究生生活でお世話になった皆様をはじめ、家族、友人など、私を支援して下さいました多くの方々に深く感謝を申し上げます。

2006 年 2 月

村上 賢