

平成21年度戦略的基盤技術高度化支援事業

「三次元中空構造編物を用いた環境対応型無機繊維外断熱材の開発」

研究開発成果等報告書

平成22年 3月

委託者 近畿経済産業局

委託先 関西ティー・エル・オー株式会社

目 次

第1章 序論

1-1 研究開発の背景・研究目的及び目標	1
1-2 研究体制	1
1-2-1 研究組織・管理体制	1
1-2-2 研究者氏名	3
1-3 成果概要	4
1-4 当該研究開発の連絡窓口	5

第2章 本論

2-1 編機改良	6
2-1-1 摩擦減少	6
2-1-2 テンション調整	7
2-2 編物設計	9
2-2-1 中空構造を有する条件	9
2-2-2 スキン材構造設計	9
2-2-3 コア材構造設計	9
2-2-4 パラメータ	9
2-2-5 検討	11
2-2-6 新規ハイブリッド材料の製編	16
2-3 断熱性能設計	17
2-3-1 力学的特性評価	17
2-3-1-1 材料	17
2-3-1-2 試験方法	18
2-3-1-3 試験結果	19
2-3-1-4 まとめ	24
2-3-2 断熱特性評価	24
2-3-2-1 熱伝導率測定	23
2-3-2-2 まとめ	28
2-3-3 長期寿命設計	28
2-3-3-1 試験片	28
2-3-3-2 試験方法	28
2-3-3-3 試験結果	29
2-3-3-4 まとめ	30

第3章 結論

3-1 研究開発成果および今後の課題	31
3-2 事業化展開	31

第1章 序論

1-1 研究開発の背景・研究目的及び目標

地球温暖化問題による温室効果ガス排出削減の推進により、建物工法として省エネルギー効果や耐久性のある「外断熱工法」が注目されている。現在の外断熱材は、断熱層、強化層など複数の層を積層した構造を有しており、施工方法が難しく、施工期間が長く、コストが高い。このような状況下において、建材メーカーなどの川下製造業者からは、更に耐火性・耐久性・成形性の高い外断熱基材が求められている。

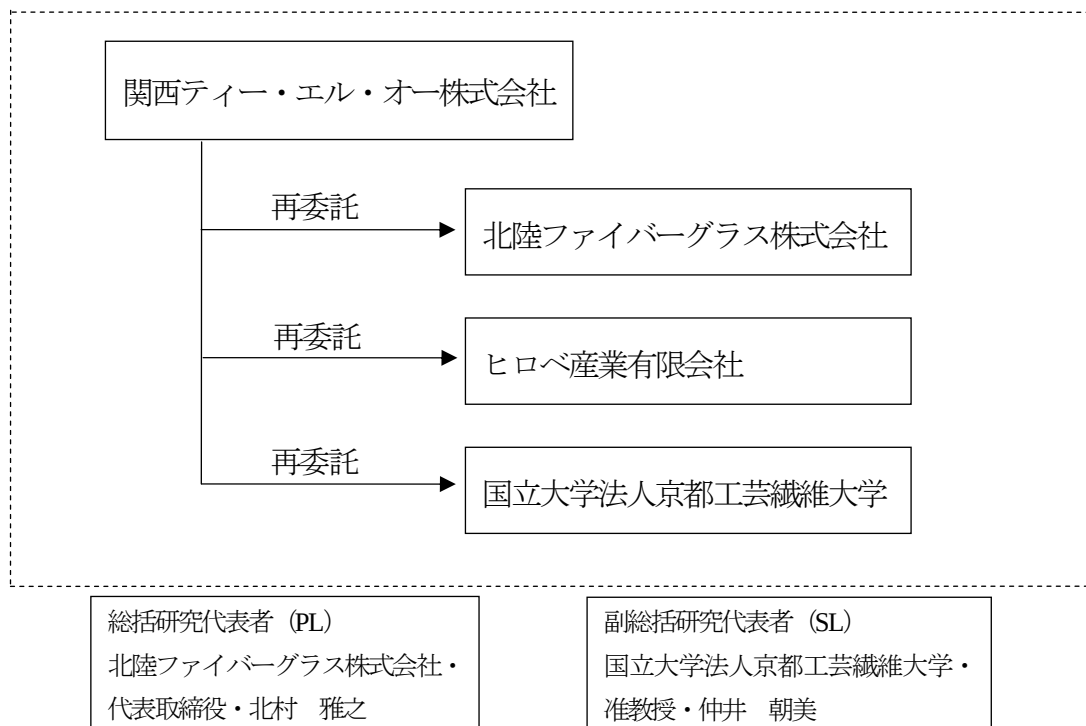
一方、三次元中空編物技術は、軽量かつ力学的特性に優れる三次元中空構造をもつ積層コスト削減が可能なテキスタイルを実現する繊維加工技術である。しかしながら、構造部材等に三次元中空編物を使用することを想定した場合、強度や成形性において、ガラス繊維や炭素繊維などの無機繊維での製編が必要となる。現行の三次元中空編物機械においては、無機繊維は繊維同士、あるいは、繊維機械との摩擦により損傷が起りやすいため、無機繊維の製編は困難である。

そこで、本事業では、ガラス繊維などの無機繊維の製編技術を確立し、三次元中空構造編物を用いた環境対応型無機繊維外断熱材の開発を行う。無機繊維でも編むことのできる編機を開発し、複合材料用繊維(ガラス繊維や炭素繊維などの無機繊維)を用いた製編を行う。次に編物設計を行うことで、要求性能を満たす新規三次元中空編物基材を実現する。とくに、本事業においては外断熱材として使用する構造部材用基材の研究開発を行う。

1-2 研究体制

1-2-1 研究組織・管理体制

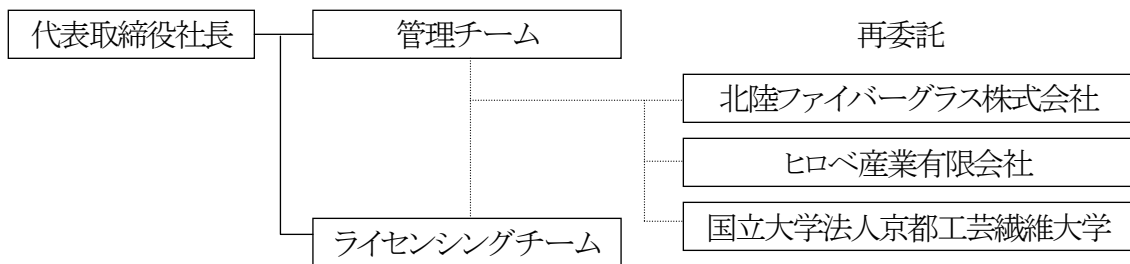
(1) 研究組織 (全体)



(2) 管理体制

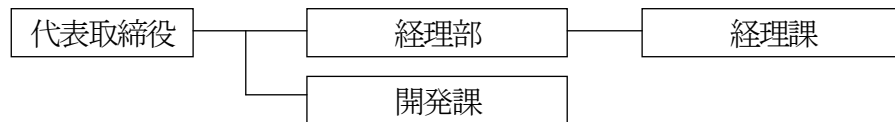
①事業管理者

関西ティー・エル・オー株式会社

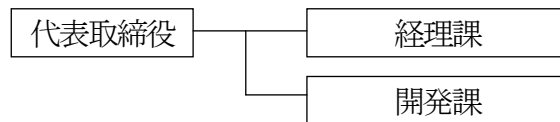


②再委託先

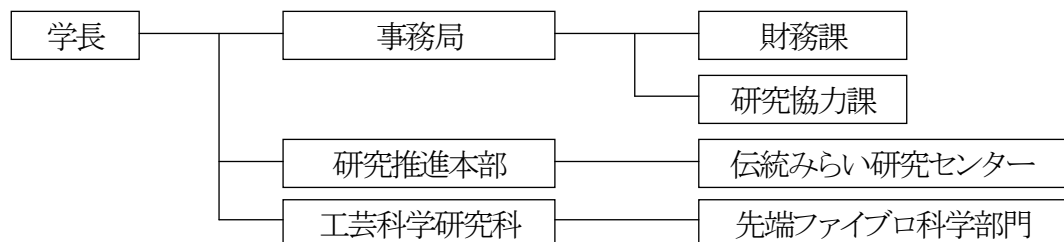
北陸ファイバーグラス株式会社



ヒロベ産業有限会社



国立大学法人京都工芸繊維大学



1-2-2 研究者氏名

(1) 事業管理者

関西ティール・エル・オー株式会社

氏 名	所属・役職
陰山 賢博	代表取締役常務
坂井 貴行	取締役
岡田 裕子	管理チーム

(2) 研究者

北陸ファイバークラス株式会社

氏 名	所属・役職
北村 雅之	代表取締役
北村 裕樹	開発課
河原 明人	開発課

ヒロベ産業有限会社

氏 名	所属・役職
廣部 晋彦	代表取締役
上野 友実	開発課

国立大学法人 京都工芸繊維大学

氏 名	所属・役職
仲井 朝美	伝統みらい研究センター 准教授
岡野 政則	先端ファイブ科学部門 助手

(3) 経理担当者及び業務管理者の所属、氏名

(事業管理者)

関西ティール・エル・オー株式会社

(経理担当者) 管理チーム

(業務管理者) 代表取締役常務

岡田 裕子

陰山 賢博

(再委託先)

北陸ファイバークラス株式会社

(経理担当者) 経理部 経理課

林 花織

(業務管理者) 代表取締役

北村 雅之

ヒロベ産業有限会社

(経理担当者) 代表取締役

廣部 晋彦

(業務管理者) 代表取締役

廣部 晋彦

国立大学法人 京都工芸繊維大学

(経理担当者) 財務課長

辻 直人

(業務管理者) 伝統みらい研究センター長

濱田 泰以

1-3 成果概要

(1) 編機改良 (北陸ファイバークラス株式会社、ヒロベ産業有限会社)

ラッセル編機および強化材を改良することにより、無機繊維を用いた三次元中空編物が作製可能となった。改良方法は以下の通りである。

- ・無機繊維に負担が掛からないよう摩擦が少なくなる部品に変更した。
- ・原糸のテンションをより繊細に調節し、運動に合わせて張力を最適に調整することを可能とした。

(2) 編物設計 (北陸ファイバークラス株式会社、ヒロベ産業有限会社)

編物設計の条件として、下記のパラメータ A-F を変更し、三次元中空編物の製編可能な範囲や条件を明らかにした。

- A・・・スキン材、コア材の原糸の太さ
- B・・・スキン材の組織
- C・・・コア材の構造
- D・・・打ち込み (縦方向の密度)
- E・・・ゲージ (横方向の密度)
- F・・・カマ間 (パイル糸の長さ、生地の厚み)

(3) 断熱性能設計 (国立大学法人京都工芸繊維大学、ヒロベ産業有限会社)

①力学的特性評価

三次元中空編物を用いて複合材料を作製し、その力学的特性を評価した。得られた複合材料を用いて、静的曲げ特性を評価した。その結果、曲げ弾性率 6.4GPa、曲げ強度 49.6MPa を達成した。この数値は、技術的目標値 (複合材料の強化基材として市販されている三次元中空織物を用いた複合材料の物性値) である曲げ弾性率 2GPa、曲げ強度 20MPa よりもはるかに高い値である。

②断熱特性評価

外断熱部材に適した断熱特性を実現する三次元中空編物を設計することを目的とし、断熱性能を評価した。得られた最小熱伝導率は、0.084W/m・K であり、技術目標値である熱伝導率 0.033 W/m・K を達成できなかったが、繊維密度を制御することにより達成可能であることが示唆された。

③長期寿命評価

本基材を用いた成形品の寿命評価を行うこと目的に、クリープ試験を実施した。さらに試験数を増やして、負荷荷重と破壊時間の関係を検討すれば、50 年後の寿命を評価することも可能であることが示唆された。

1－4 当該研究開発の連絡窓口

関西ティー・エル・オー株式会社
取締役 坂井 貴行

〒600-8216
京都市下京区西洞院通塩小路下がる東塩小路町 939 番地
キャンパスプラザ京都 6F

Tel : 075-353-5890

Fax : 075-353-5891

E-mail : ta-sakai@kansai-tlo.co.jp

第2章 本論

2-1 編機改良

三次元中空編物技術は、軽量かつ力学的特性に優れる三次元中空構造をもつテキスタイルを実現する繊維加工技術である。しかしながら、現在、市販されている編機では、特定の有機繊維を用いた製編のみが可能であり、複合材料の強化材となる無機繊維を用いた三次元中空編物は作製できない。通常ラッセル機で編網する場合、原糸を生地にしていく工程において、原糸は機械の運動に合わせて摩擦や変形を繰り返して編物を形成するが、有機繊維は摩擦や変形に強いことに対し、無機繊維は繊維同士あるいは機械との摩擦により損傷しやすい欠点を有するためである。

そこで、市販されているラッセル編機（図1-1）および強化材を改良することにより、無機繊維を用いた編物を作製できるように改良した。改良方法として、①-1：無機繊維に負担が掛からないよう摩擦が少なくなる部品を選定し、変更する、①-2：原糸のテンションをより繊細に調節し、編機の運動に合わせて張力を最適に調整可能とする、の2点を実施した。



図1-1 ラッセル編機

2-1-1 摩擦減少

(1) スプーン状のガイドの使用

編み生地と原糸の境界を支点とし、原糸の通ったガイドの穴の部分は大きく前後、上下、左右運動を行うため、摩擦が大きくなる。ガイドの穴に対し垂直に原糸が通る通常のガイド（図1-2）に対し、穴の部分にアールを加工したスプーン状のガイド（図1-3）を使用し摩擦を減少させる。



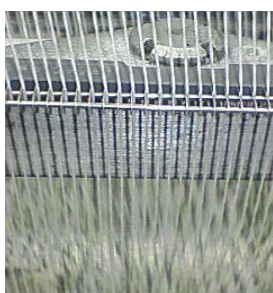
図1-2 通常のガイドおよび原糸の配置



図1－3 スプーンガイドおよび原糸の配置

(2) 細かいセパレータの目を使用した原糸の通し方の工夫

ラッセル編機の糸道において、ガイドの手前で繊維同士のねじれを防ぐためセパレータに原糸を通す。通常はセパレータの目に対し all in で原糸を通すことに対し、目の細かいセパレータに 1 in 1 out で原糸を通し、繊維同士の間隔が開くようにする（図1－4）。



通常のセパレータ通し



1 in 1 out の通し

図1－4 セパレータ通し

2－1－2 テンション調整

機械の上部にある原糸を巻いたビームより、編む部分のニードルやガイドの位置までの原糸には、一定のテンションがかかっていないと編網できない。テンションが強すぎると摩擦が大きくなり原糸が摩耗あるいは切断し、テンションが弱すぎると生地表面に均一性がなくなり構造が不均一になる、原糸同士がねじれ易くなる、ループがニードル（針）から抜けなくなり編網できない、等の問題が発生する。

(1) インバーター制御のロール送り機能の付加

原糸のランナー（一定間での原糸の供給量）のロール送りの際、インバーターの数値設定により、細かく簡単に調節できるよう改良する。通常、編網する力がテンションバーにかかる張力分、原糸を供給する消極送りと、強制的に原糸を送り込む積極送りがある。積極送りの中にロール送りという方法があるが、これにインバーター制御できるモーターを取り付ける（図1－5）。



図1－5 インバーター制御のロール送り装置

(2) テンションバーのスプリングの強さの設定

テンションバーのスプリングの強さ（図1－6 軸スプリング、および図1－7 板バネ）を原糸の数、太さに合わせて設定する。これにより機械の運動に合わせた原糸の張力を確保できる。

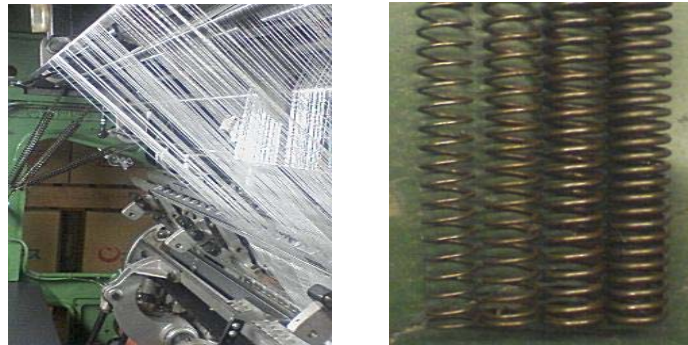


図1－6 テンションバー軸スプリング



図1－7 テンションバー板ばね

2-2 編物設計

2-2-1 中空構造を有する条件

三次元中空編物は、2枚のスキン材（表面材）の間を、厚さ方向に配向したパイル糸（コア材）が通ることによって作製される。パイル部分の織り構造が適切に設計されていないと、複合材料に成形した際に、パイル糸が厚さ方向に配向せず、中空構造が実現しない。そこで、中空構造を有する編物構造作製条件について検討した。

2-2-2 スキン材構造設計

スキン材の構造は密度と表面組織を変更することができる。密度を低くすると、スキンが凸凹になり、密度を高くすると、スキンが滑らかになる。しかしながら一方で、スキン層の厚さが増し、複合材料の重量が増加する。また表面の組織を変更させることは、力学的特性および断熱特性が大きく変化する。そこで、編密度および表面組織（編み構造）を変化させ、製編限界を明らかにした。

2-2-3 コア材構造設計

コア材の構造はパイル糸の密度、高さ、構造を変更することができる。そこで、パイル糸の密度、高さ、構造を変化させ、製編限界を明らかにした。

2-2-4 パラメータ

三次元中空編物の構造上、前述した2-2-1、2、3を個別に検討することは不可能であるため、まとめて検討した。編物設計の条件として、下記のパラメータA-Fを変更した。

- A・・・スキン材、コア材の原糸の太さ
- B・・・スキン材の組織
- C・・・コア材の構造
- D・・・打ち込み（縦方向の密度）
- E・・・ゲージ（横方向の密度）
- F・・・カマ間（パイル糸の長さ、生地の厚み）

A. スキン材、コア材の原糸の太さ

有機繊維では、スキン材の原糸の太さは100dTex～500dTex、コア材は300dTex～1100dTexが一般的である。本事業では、無機繊維のガラス原糸として以下を選定した。

G75-1/0 (675 dTex)

G75-1/2 (1350 dTex)

G75-1/4 (2700 dTex)

B. スキン材の組織

ラッセル機における基本組織は大きく二つに大別され、角目組織（図2-1）と菱目組織（図2-2）がある。

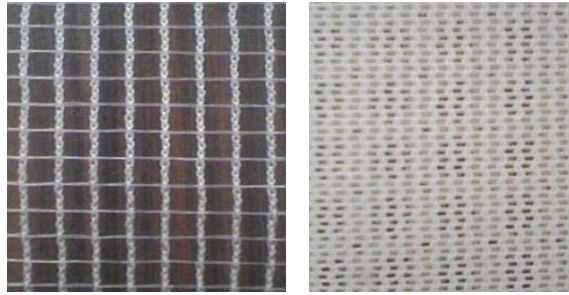


図2-1 角目組織

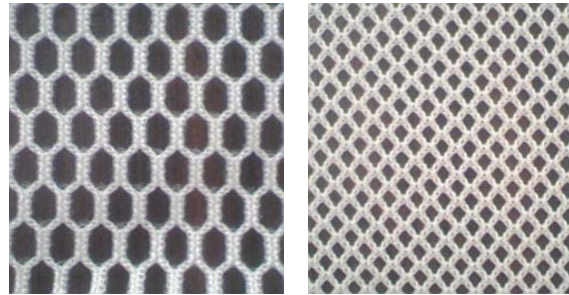


図2-2 菱目組織

複合材料としてのスキン材に適している組織は、表面性を考慮して両面角目組織の密度の高い組織が適していると予想され、表菱目、裏面角目と両面角目組織で無機繊維での試作をしていく。

C. コア材の構造

コア材の構造として代表的な構造として図2-3に示す4つの構造がある。無機繊維での試作として、筋違い構造を軸としてストレート構造、トラス構造も作製し、パイル糸の立ち方を検証した。

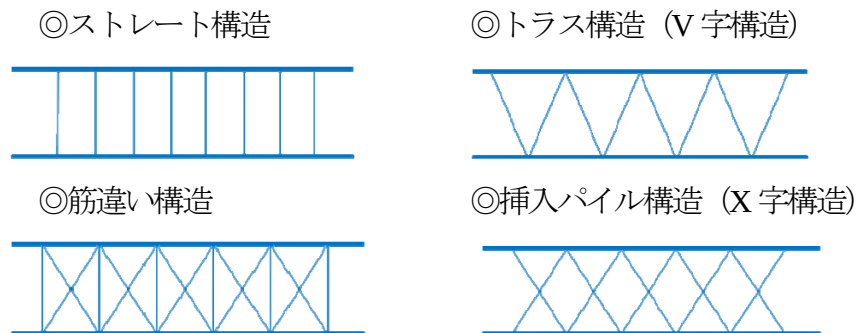


図2-3 コア材の構造

D. 打ち込み (縦方向の密度)

今回の使用原糸が 75-1/0~75-1/4 であり、打ち込みはゲージと原糸の太さによって制限されるため、表面性と生産性等を考慮して、6.5 回/インチ~13 回/インチの中で調節する。

E. ゲージ (横方向の密度)

ゲージの設定は、9 ゲージ、12 ゲージ、18 ゲージにて試作を行うが、9 ゲージは表面密度が粗くなるため適していないと判断した。

F. カマ間（パイル糸の長さ、基材の厚さ）

厚さ設定は、4mm から 10mm を基本として、どこまで厚さを増加させることが可能か検討する。スキン材とコア構造を同条件で製編し、厚さを 4mm、8mm、12mm とした編物を作製し、特性を比較する。

2-2-5 検討

まず、有機繊維を用いて、織度・スキン材の組織・基材の厚さが極端に異なる三次元中空編を作製し、複合材料の強化形態としての製編限界を検討した。

(1) 構造1 (図2-4)

スキン材表	綿 60/2 菱目 2 in 2 out
スキン材裏	PET167 dTex 角目 all in
コア材	N55 dTex ストレート

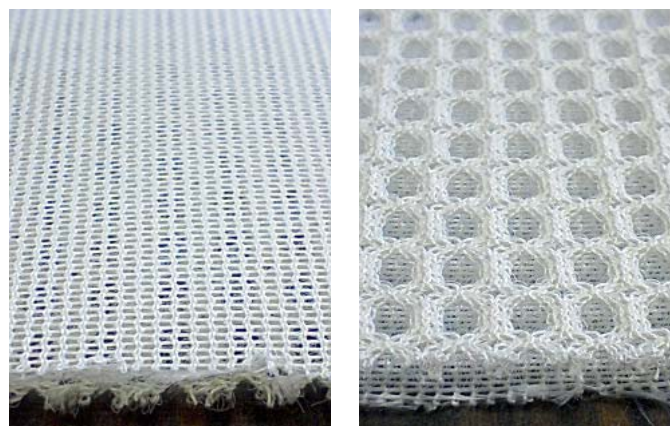


図2-4 有機繊維を用いた編物限界構造1

(2) 構造2 (図2-5)

スキン材表裏	PET330 dTex、菱目 2 in 2 out 半目ずらし
コア材	PET1100 dTex ストレート

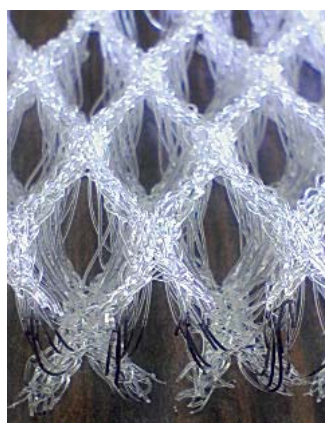


図2-5 有機繊維を用いた編物限界構造2

編物設計の条件として、上記のパラメータ A-F を変更し、14 種類の三次元中空編物を製編した。製編した三次元中空編物の名称は、下記のように命名する。

例) KNE170E12 (F1/2 H2-2) (P1/2 X0-0) (B1/4 C0-0) 10-9	
KNE	三次元中空編物
170	目付 (単位 10 g/m^2)
12	ゲージ (よこ密度)
F	F フロント、B バック、P パイル
1/2	糸種 : 75-1/2、75-1/0、75-1/4
H	スキン材組織 : H 菱目、C 角目
X	コア材構造 : I ストレート、V トラス、X 筋かい
10	カマ間 (厚さ)
9	打ち込み (たて密度)

① KNE170E18 (F1/0 C0-0) (P1/2 I0-0) (B1/0 C0-0) 10-14

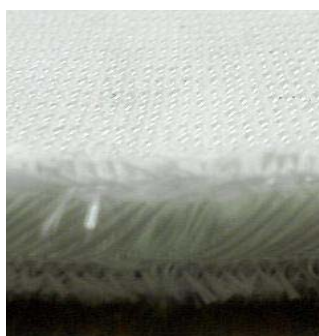


図 2-6 三次元中空編物構造①

編み評価・・・18 ゲージ、厚さ 10 mm

スキン構造：表面性は良好

コア構造：ストレート構造のため、圧縮負荷を加えると、パイル糸が傾倒する。
複合材料に成形後、中空構造を形成しにくいと考えられる。

② KNE200E18 (F1/0 C0-0) (P1/24 X0-0) (B1/0 C0-0) 10-14



図 2-7 三次元中空編物構造②

編み評価・・・①のパイルを4針筋違い構造で製編したもの。

スキン構造：表面性は良好

コア構造：コア材の中空構造が維持しやすい。

③ KNE260E18 (F1/0 H2-2) (P1/2 I0-0) (B1/0 C0-0) 5-10

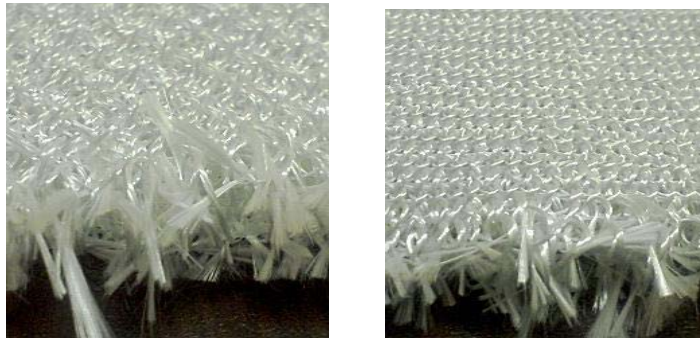


図2-8 三次元中空編物構造③

編み評価・・・スキン材の表を菱目組織にした結果、コア材がトラス構造となるが表面性が悪くなる。

④ KNE185E12(F1/2 H2-2) (P1/2 I0-0) (B1/4 C0-0) 10-6.5

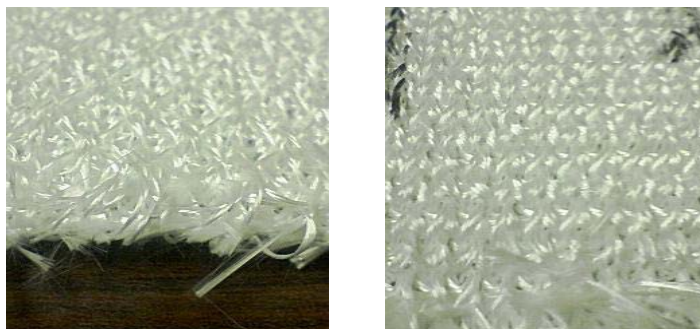


図2-9 三次元中空編物構造④

⑤ KNE210E12(F1/2 H2-2) (P1/2 I0-0) (B1/4 C0-0) 10-7.2

⑥ KNE270E12(F1/2 H2-2) (P1/2 I0-0) (B1/4 C0-0) 10-9.0

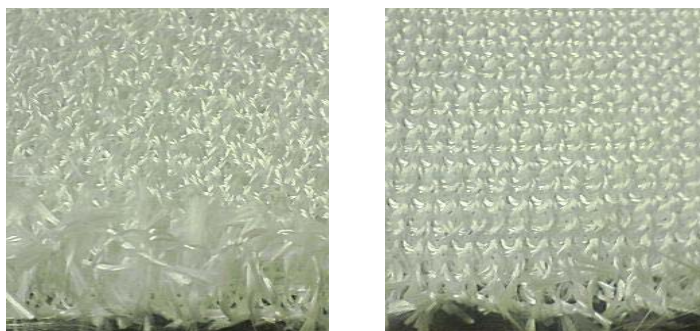


図2-10 三次元中空編物構造⑥

- ⑦ KNE270E12 (F1/4 H2-2) (P1/4 I0-0) (B1/4 C0-0) 10-6.5
- ⑧ KNE310E12 (F1/4 H2-2) (P1/4 I0-0) (B1/4 C0-0) 10-7.2
- ⑨ KNE345E12 (F1/4 H2-2) (P1/4 I0-0) (B1/4 C0-0) 10-8.3

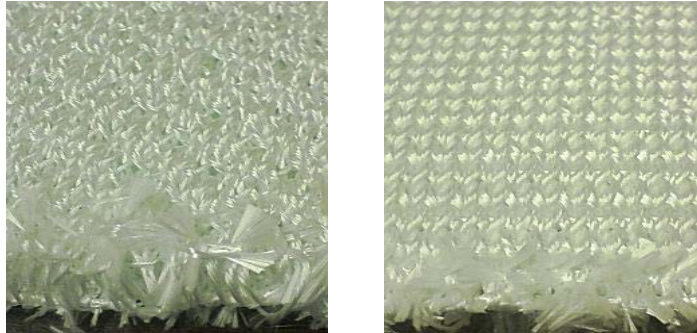


図 2－1 1 三次元中空編物構造⑨

④～⑨編み評価・・・ゲージを 12 ゲージに固定し、打ち込みと原糸の太さを変更した。打ち込みが小さく、織度が小さいほど、編物構造の収縮性が高く、構造が不安定で、目付も軽いことが明らかとなった。1/4 の原糸での打ち込みは、8.3 回が限界であり、それ以上になると突き上がり、編網不可であった。

- ⑩ KNE140E18 (F1/0 C0-0) (P1/22 X1-2) (B1/0 C0-0) 4-13



図 2－1 2 三次元中空編物構造⑩

- ⑪ KNE170E18 (F1/0 C0-0) (P1/22 X1-2) (B1/0 C0-0) 8-13



図 2－1 3 三次元中空編物構造⑪

⑫ KNE200E18 (F1/0 C0-0) (P1/22 X1-2) (B1/0 C0-0) 12-13



図 2-14 三次元中空編物構造⑫



図 2-15 三次元中空構造⑩⑪⑫の側面写真

⑩～⑫編み評価・・・スキン材の条件を同じにして、コア材の厚みを4mm、8mm、12mmと変化させた三種類の編物構造を作製した。12mmに関しては、突き上がりや、かぶりを抑える為、テンションやニードル、ガイドのタイミング調整がシビアであった。この組織と原糸使いでは、12mmが限界のコア材厚みであると考えられる。

⑬ KNE140E18 (F1/0 C0-0) (P1/22 X1-4) (B1/0 C0-0) 4-1



図 2-16 三次元中空編物構造⑬

編み評価・・・⑩のコア材であるパイルを半分の本数にした。表面性は良好であり、コア材の中空構造も維持している。

⑭ KNE350E9 (F1/4 H2-2) (P1/4 IO-0) (B1/4 CO-0) 10-9



図 2-17 三次元中空編物構造⑭

編み評価・・・9 ゲージにて目付の限界を検討することを目的とし、原糸を all 1/4 で作製した。ループがニードルから抜けず、製編不可能であった。スキン材の表面も、ガラス繊維の毛羽立ちが多く、表面性が悪い。以上より、生産不可であると判定した。

【総合評価】

通常の有機繊維と比較して、ガラス繊維は摩擦と湾曲に弱いため、より繊細なランナー調整とテンション調整が必要である。また、有機繊維はループが締まりやすいのに対し、ガラス繊維は反発して編んだ後のループが広がろうとする特性がある。そのため、ゲージにおけるよこ密度と打ち込みによるたて密度とスキン材の組織、原糸の太さによって編める条件が限定される。コア材がスキン材の表面において飛び出しやすく、通常ではないループの動きと、同じ進入方向でコア糸を入れなければ、表面性が悪くなることが明らかとなった。

2-2-6 新規ハイブリッド材料の製編

熱硬化性樹脂を用いる場合には、三次元中空編物を製編後、熱硬化性樹脂を含浸させる事により複合材料の成形を行う。一方、熱可塑性樹脂を用いる場合には、樹脂の熔融粘度が高いため、繊維集合体への含浸が困難であるという問題点が新たに発生する。この問題を解決するため、あらかじめ強化材（ガラス繊維、炭素繊維等）、および、熱可塑性樹脂繊維（ポリプロピレン繊維、ナイロン繊維等）を、複合材料用混織機を用いて混織した繊維状中間材料を用いることとした。

本研究で用いた複合材料用混織機を図 2-18 に示す。強化材と熱可塑性樹脂は伸度が大きく異なるため、最適な混織条件を決定することが重要な課題となる。様々な繊維を組み合わせで繊維状中間材料を作製し、混織条件を検討した。



図 2－18 複合材料用混繊機

2－3 断熱性能設計

2－3－1 力学的特性評価

2－2－6より得られた三次元中空編物を用いて、複合材料を作製し、その力学的特性を評価した。中空構造を有するため、従来の繊維強化複合材料の成形手法では成形が行えないため、特殊な成形設備を有する成形メーカーに外注し、成形板を作製した。得られた複合材料成形板から試験片を切り出し、静的3点曲げ特性を評価した。

複合材料の強化基材として市販されている三次元中空織物を用いた複合材料の物性値以上の値を目標とし、技術的目標値を曲げ弾性率 2GPa、曲げ強度 20MPa と設定した。

2－3－1－1 材料

複合材料を作製するにあたり、使用した強化基材は9種類である。表3－1、表3－2、表3－3に選定した強化基材の組み合わせを示す。④～⑨は強化基材の目付量と織度を変え、⑩～⑫は④～⑨よりもスキン構造が細かく、パイル構造も変化している。また、それぞれの強化基材の厚みも変化した基材である。

表 3－1 使用基材（1/2 で織度を変化させたもの）

使用基材
④KNE185 E12 (F1/2 H2-2) (P1/2 I0-0) (B1/4 C0-0) 10-6.5
⑤KNE210 E12 (F1/2 H2-2) (P1/2 I0-0) (B1/4 C0-0) 10-7.2
⑥KNE270 E12 (F1/2 H2-2) (P1/2 I0-0) (B1/4 C0-0) 10-9.0

表 3－2 使用基材（1/4 で繊維度を変化させたもの）

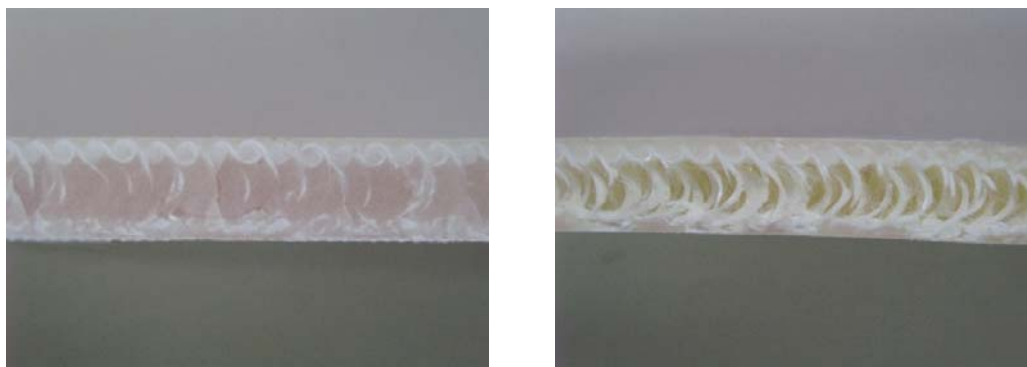
使用基材
⑦KNE270 E12 (F1/4 H2-2) (P1/4 I0-0) (B1/4 C0-0) 10-6.5
⑧KNE310 E12 (F1/4 H2-2) (P1/4 I0-0) (B1/4 C0-0) 10-7.2
⑨KNE345 E12 (F1/4 H2-2) (P1/4 I0-0) (B1/4 C0-0) 10-8.3

表 3－3 使用基材（厚さを変化させたもの）

使用基材
⑩KNE140 E18 (F1/0 C0-0) (P1/2 X1-2) (B1/0 C0-0) 4-13
⑪KNE170 E18 (F1/0 C0-0) (P1/2 X1-2) (B1/0 C0-0) 8-13
⑫KNE200 E18 (F1/0 C0-0) (P1/2 X1-2) (B1/0 C0-0) 12-13

強化基材に表 3－1、表 3－2、表 3－3 に示す材料を用い、マトリックスに不飽和ポリエステル樹脂、硬化剤としてメチルエチルケトンパーオキシドを 0.7 wt% 添加、攪拌し、ハンドレイアップ法により成形板を作製した。成形後、恒温槽で 100 度、2 時間で後硬化を行った。

すべての基材に対して、コア層が樹脂で満たされている中実状態（図 3－1（A））および中空状態（図 3－1（B））の二種類を検討した。



(A) 中実構造

(B) 中空構造

図 3-1 中実構造と中空構造

2－3－1－2 試験方法

試験片寸法は 200×20 mm、スパン間距離 L は $L = 16 \times \text{厚さ}$ から算出し、試験を行った。試験片切り出し方向は、たて糸方向とした（図 3－2）。インストロン型万能試験機（Type55R4206）を用い、試験速度を 3 mm/min として、3 点曲げ試験を行った。

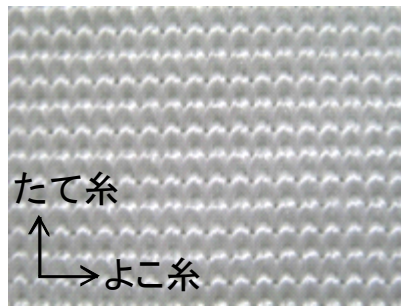


図3-2 スキン構造

2-3-1-3 試験結果

図3-3に基材④-⑥、図3-4に基材⑦-⑧を用いた中空複合材料の荷重-たわみ線図を示す。いずれの試験片においても、最大荷重を示したのち若干荷重は低下するが、その後もほぼ一定値を保ったまま変形する。⑧において最も高い荷重値を示した。

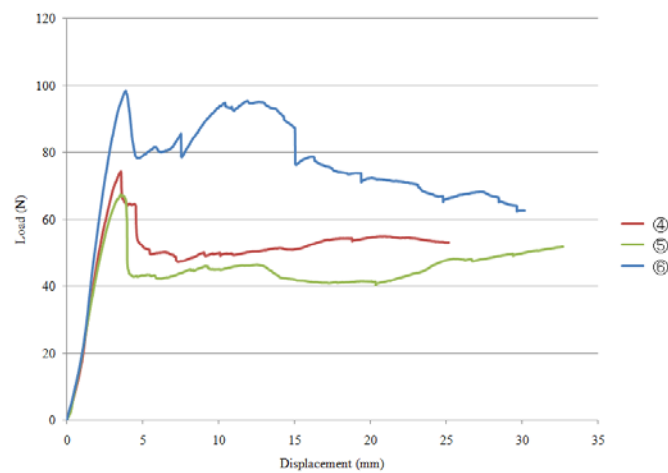


図3-3 荷重-たわみ線図 (中空)

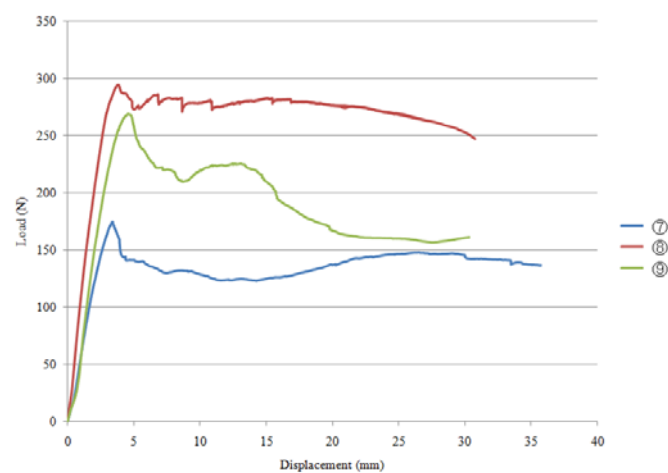


図3-4 荷重-たわみ線図 (中空)

次に、図3-5に基材④-⑥、図3-6基材⑦-⑧を用いた中実複合材料の荷重-たわみ線図を示す。いずれの試験片においても、最大荷重を示したのち脆性的に荷重は低下した。中実の場合、荷重は⑥で最も高い値を示した。

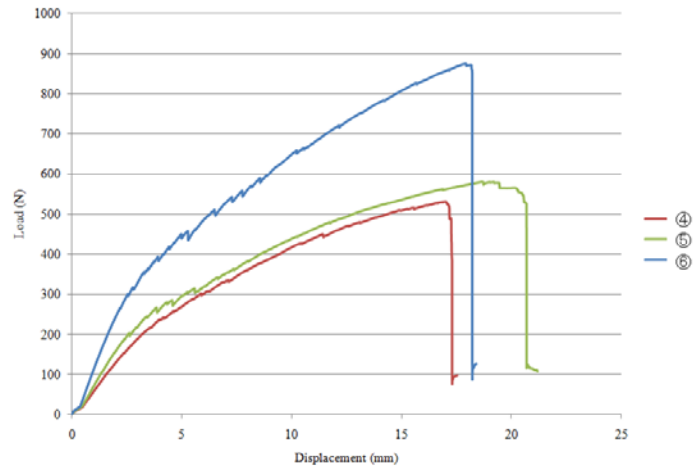


図3 - 5 荷重 - たわみ線図 (中実)

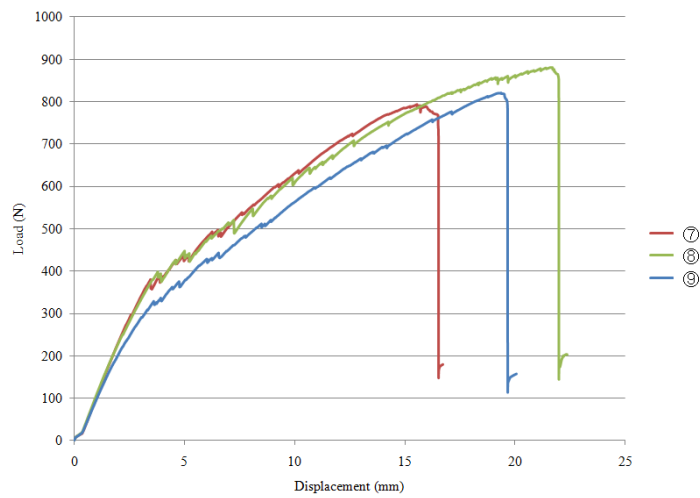


図3 - 6 荷重 - たわみ線図 (中空)

これらの値を用いて算出した曲げ弾性率および曲げ強度を表3-4、表3-5に示す。

表3-4 曲げ弾性率および強度 ④-⑥

		曲げ弾性率 (GPa)	曲げ強度 (MPa)
中空	④KNE185 E12 (F1/2 H2-2) (P1/2 IO-0) (B1/4 C0-0) 10-6.5	1.4	13.7
	⑤KNE210 E12 (F1/2 H2-2) (P1/2 IO-0) (B1/4 C0-0) 10-7.2	1.4	10.7
	⑥KNE270 E12 (F1/2 H2-2) (P1/2 IO-0) (B1/4 C0-0) 10-9.0	2.0	14.0
中実	④KNE185 E12 (F1/2 H2-2) (P1/2 IO-0) (B1/4 C0-0) 10-6.5	5.2	115
	⑤KNE210 E12 (F1/2 H2-2) (P1/2 IO-0) (B1/4 C0-0) 10-7.2	5.6	114
	⑥KNE270 E12 (F1/2 H2-2) (P1/2 IO-0) (B1/4 C0-0) 10-9.0	7.8	128

表 3-5 曲げ弾性率および強度 ⑦-⑨

		曲げ弾性率 (GPa)	曲げ強度 (MPa)
中空	⑦KNE270 E12 (F1/4 H2-2) (P1/4 I0-0) (B1/4 C0-0) 10-6.5	3.6	30.9
	⑧KNE310 E12 (F1/4 H2-2) (P1/4 I0-0) (B1/4 C0-0) 10-7.2	6.4	49.6
	⑨KNE345 E12 (F1/4 H2-2) (P1/4 I0-0) (B1/4 C0-0) 10-8.3	6.0	40.9
中実	⑦KNE270 E12 (F1/4 H2-2) (P1/4 I0-0) (B1/4 C0-0) 10-6.5	6.4	124
	⑧KNE310 E12 (F1/4 H2-2) (P1/4 I0-0) (B1/4 C0-0) 10-7.2	5.3	120
	⑨KNE345 E12 (F1/4 H2-2) (P1/4 I0-0) (B1/4 C0-0) 10-8.3	6.8	120

基材④～⑨を用いた中空複合材料および中実複合材料の曲げ弾性率と目付量の関係を、それぞれ図 3-7 および図 3-8 に示す。中空複合材料の場合、目付量が増加すると、曲げ弾性率は線形的に増加した。中実複合材料の場合においても、目付量が増加すると、曲げ弾性率は線形的に増加するが、その傾きは小さく、曲げ弾性率はほとんど変化しないことが明らかとなった。

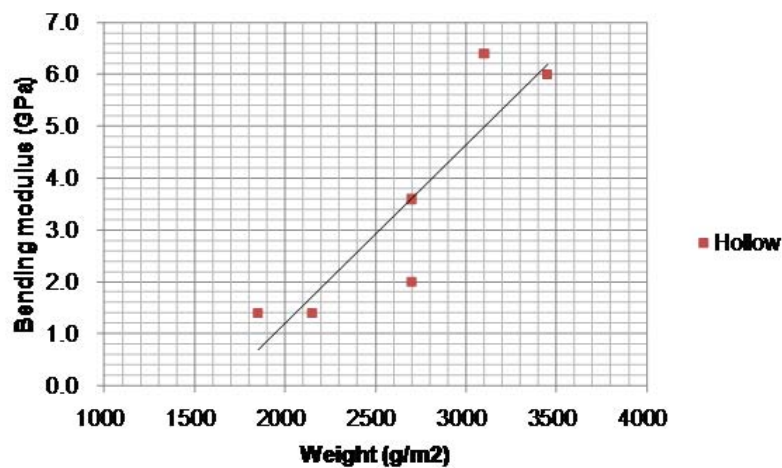


図 3-7 曲げ弾性率と目付量の関係 (中空)

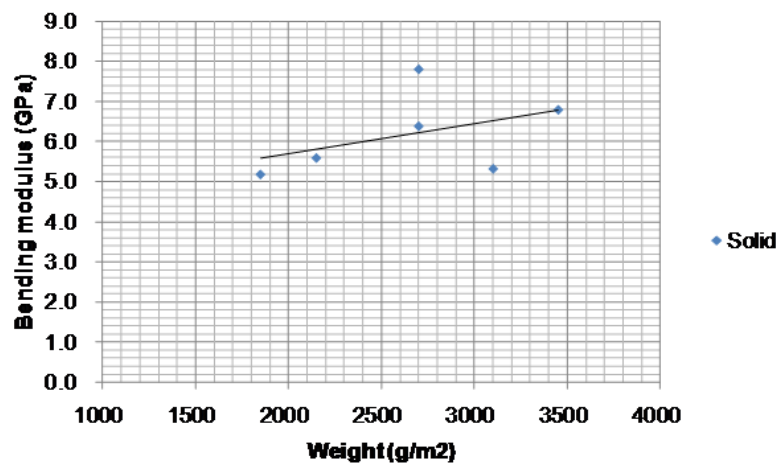


図 3-8 曲げ弾性率と目付量の関係 (中実)

次に、基材④～⑨を用いた中空複合材料および中実複合材料の曲げ強度と目付量の関係を、それぞれ図3-9および図3-10に示す。中空複合材料および中実複合材料のいずれにおいても、目付量が増加すると、曲げ強度は線形的に増加した。

このことから目付量が多くなると、曲げ弾性率および強度ともに向上することがわかった。

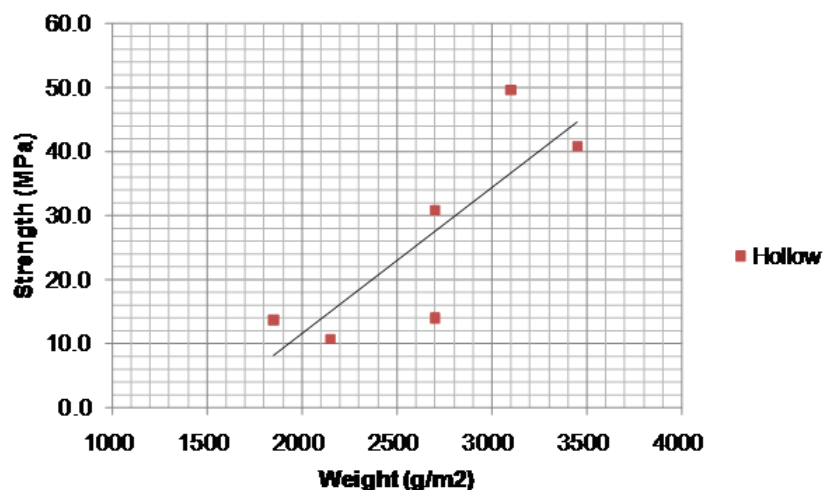


図3-9 目付量と曲げ強度の関係（中空）

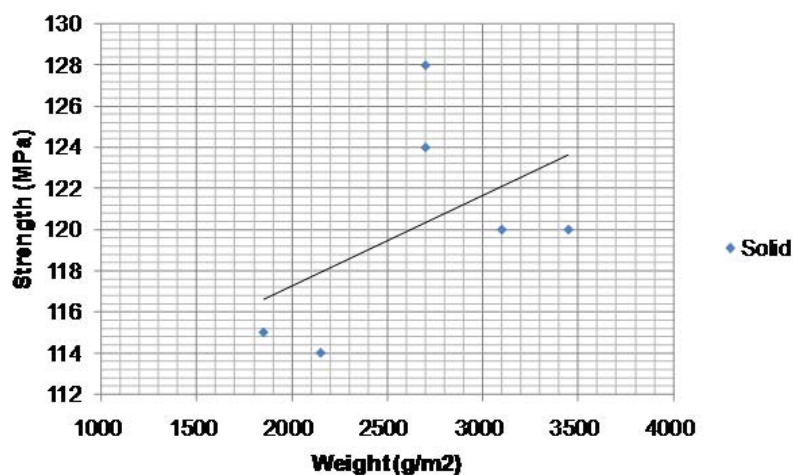


図3-10 目付量と曲げ強度の関係（中実）

次に、基材⑩～⑫を用いた中空複合材料および中実複合材料の荷重－たわみ線図を、図3-11および図3-12に示す。中空複合材料の場合、最大荷重を示したのち荷重は緩やかに低下する。中実複合材料の場合、最大荷重を示したのち脆性的に荷重は低下した。中空の場合は基材⑫、中実の場合は基材⑩で最大荷重値を示した。

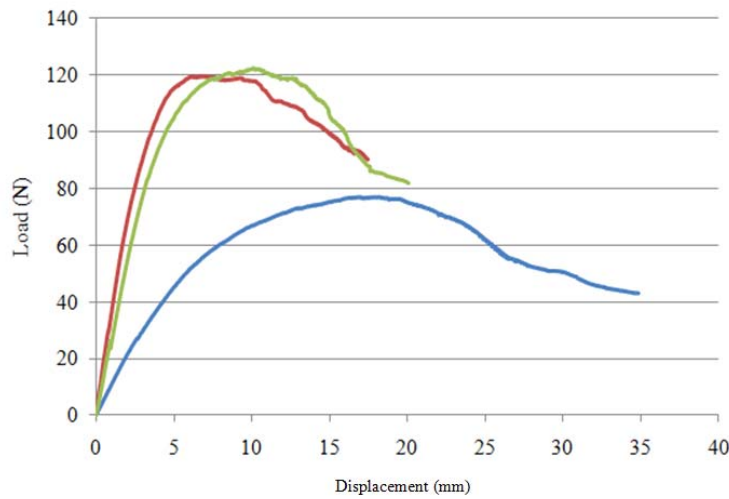


図3－1 1 荷重 - たわみ線図（中空）

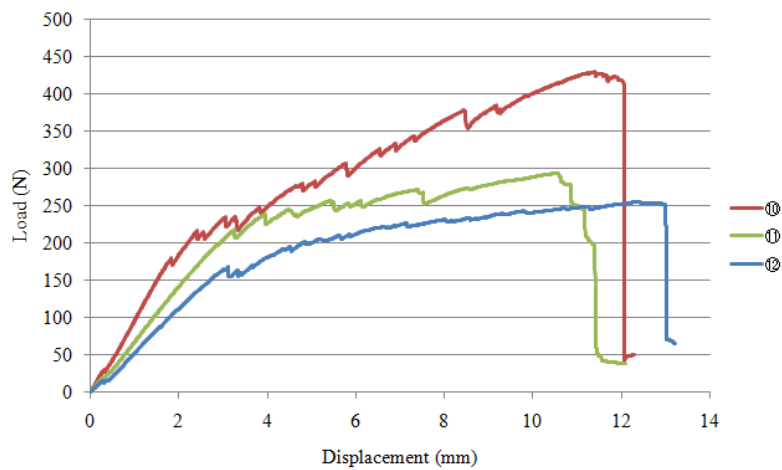


図3－1 2 荷重 - たわみ線図（中実）

これらの値を用いて算出した曲げ弾性率および曲げ強度を表3－6に示す。中空複合材料および中実複合材料のいずれにおいても、厚さが増加すると、曲げ弾性率および曲げ強度は大きく低下した。

表3-6 曲げ試験結果

		曲げ弾性率 (GPa)	曲げ強度 (MPa)
中空	⑩KNE140 E18 (F1/0 C0-0) (P1/2 X1-2) (B1/0 C0-0) 4-13	2.6	36.2
	⑪KNE170 E18 (F1/0 C0-0) (P1/2 X1-2) (B1/0 C0-0) 8-13	2.8	31.1
	⑫KNE200 E18 (F1/0 C0-0) (P1/2 X1-2) (B1/0 C0-0) 12-13	1.2	17.6
中実	⑩KNE140 E18 (F1/0 C0-0) (P1/2 X1-2) (B1/0 C0-0) 4-13	5.8	100
	⑪KNE170 E18 (F1/0 C0-0) (P1/2 X1-2) (B1/0 C0-0) 8-13	4.3	40.4
	⑫KNE200 E18 (F1/0 C0-0) (P1/2 X1-2) (B1/0 C0-0) 12-13	3.1	25.1

2-3-1-4 まとめ

以上の結果から、三次元中空編物構造の目付量を増加させることで曲げ弾性率、強度は向上することが明らかとなった。また、厚さが小さいほど、曲げ弾性率、強度は向上することが明らかとなった。④、⑤、⑥、⑫以外の試験片では、技術的目標値である、曲げ弾性率 2GPa、曲げ強度 20MPa を達成した。三次元中空編物構造を最適に設計することにより、力学的特性の観点から、断熱材として要求される性能を有する基材の製編が可能であることが示唆された。

2-3-2 断熱特性評価

外断熱部材に適した断熱特性を実現する三次元中空編物を設計することを目的とし、断熱性能を評価した。現行工法において用いられている外断熱材の熱伝導率を目標とし、技術的目標値を熱伝導率 $0.033 \text{ W/m}\cdot\text{K}$ (JIS A 9511)と設定した。

2-3-2-1 熱伝導率測定

2-3-1-1 で作製した各試験片を用いて、熱伝導率を測定した。熱伝導率測定には迅速熱伝導率計 (QTM-500 ; 京都電子工業株式会社) を使用した。

また、本節においては、基材①KNE170E18 (F1/0 C0-0) (P1/2 I0-0) (B1/0 C0-0) 10-14 およびフェノール樹脂を用いた試験片も作製し、断熱特性を評価した。フェノール樹脂複合材料試験片のスキンには、ガラスマットを貼付した試験片および貼付していない試験片があるため (図 3-13 ~ 図 3-17)、両表面とも熱伝導率を測定し、評価した。



図 3-13 フェノール成形品 1



図3-14 フェノール成形品2



図3-15 フェノール成形品3



図3-16 フェノール成形品4



図 3-17 フェノール成形品 5

表 3-7 および表 3-8 に基材④～⑥および基材⑦～⑨を用いたガラス繊維強化中実複合材料および中空複合材料の熱伝導率測定結果を示す。いずれの試験片においても、中実構造よりも中空構造の方が低い熱伝導率を示した。

表 3-7 熱伝導率 (④～⑥)

	熱伝導率(W/mK)	
	中実	中空
④KNE185 E12 (F1/2 H2-2) (P1/2 IO-0) (B1/4 CO-0) 10-6.5	0.165	0.137
⑤KNE210 E12 (F1/2 H2-2) (P1/2 IO-0) (B1/4 CO-0) 10-7.2	0.200	0.145
⑥KNE270 E12 (F1/2 H2-2) (P1/2 IO-0) (B1/4 CO-0) 10-9.0	0.190	0.169

表 3-8 熱伝導率 (⑦～⑨)

	熱伝導率(W/mK)	
	中実	中空
⑦KNE270 E12 (F1/4 H2-2) (P1/4 IO-0) (B1/4 CO-0) 10-6.5	0.187	0.136
⑧KNE310 E12 (F1/4 H2-2) (P1/4 IO-0) (B1/4 CO-0) 10-7.2	0.225	0.185
⑨KNE345 E12 (F1/4 H2-2) (P1/4 IO-0) (B1/4 CO-0) 10-8.3	0.283	0.178

図 3-18 に、基材④～⑨を用いた中空複合材料および中実複合材料の熱伝導率と目付量の関係を示す。中空複合材料および中実複合材料のいずれにおいても、目付量が増加すると、熱伝導率は線形的に増加した。

このことから目付量が多くなると、熱伝導率が向上することがわかった。

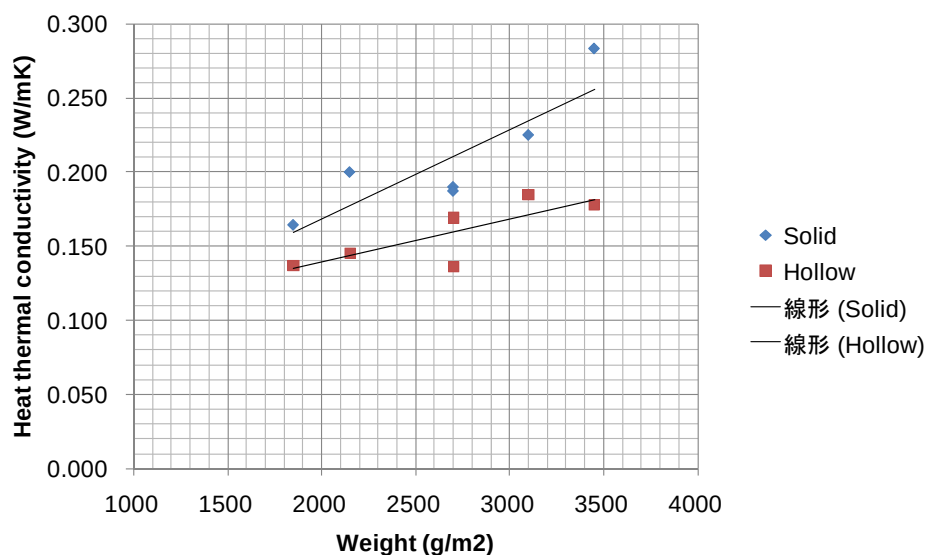


図 3-18 熱伝導率と目付量の関係

3-9に基材⑩～⑫を用いたガラス繊維強化中実複合材料および中空複合材料の熱伝導率測定結果を示す。いずれの試験片においても、中実構造よりも中空構造の方が低い熱伝導率を示した。この材料は④～⑨に比べ、スキン構造が細かく、パイル構造が変化している。中実構造の熱伝導率は④～⑨に比べ高く、中空構造の熱伝導率は④～⑨に比べ低い値を示した。⑩～⑫の間で値の差はほとんど見られず、この条件で厚さを変化させても熱伝導率の値に変化はなかった。

表 3-9 熱伝導率 (⑩～⑫)

	熱伝導率(W/mK)	
	中実	中空
⑩KNE140 E18 (F1/0 C0-0) (P1/2 X1-2) (B1/0 C0-0) 4-13	0.236	0.098
⑪KNE170 E18 (F1/0 C0-0) (P1/2 X1-2) (B1/0 C0-0) 8-13	0.228	0.096
⑫KNE200 E18 (F1/0 C0-0) (P1/2 X1-2) (B1/0 C0-0) 12-13	0.224	0.099

次に、表 3-10 にフェノール樹脂複合材料の熱伝導率測定結果を示す。ここでは、中空複合材料のみを測定対象とした。

表 3-10 熱伝導率測定結果 (フェノール成形品)

	熱伝導率(W/mK)	
	中空	
	表	裏
フェノール成形 1	0.293	0.220
フェノール成形 2	0.113	0.084
フェノール成形 3	0.111	0.112
フェノール成形 4	0.104	0.102
フェノール成形 5	0.090	0.098

2-3-2-2 まとめ

いずれの試験片においても中実構造より中空構造において良い断熱特性（低い熱伝導率）が得られた。本研究で得られた最小熱伝導率は、 $0.084 \text{ W/m}\cdot\text{K}$ であり、技術目標値である熱伝導率 $0.033 \text{ W/m}\cdot\text{K}$ を満たすことはできなかった。

しかしながら、繊維度にかかわらず、目付量が減少すると、熱伝導率は線形的に減少したことから、繊維密度を制御することにより達成可能であることが示唆された。

2-3-3 長期寿命設計

材料を長期的に使用する場合、必ず劣化による破壊が起こるため、寿命評価を行う必要がある。そこで、本基材を用いた成形品の寿命評価を行った。試験方法には FRP の評価方法として一般的に用いられているクリープ試験を採用した。

2-3-3-1 試験片

用いた試験片は③-1に示す6種類の複合材料の中から5種類を選定した。選定した複合材料の強化基材を表3-11に示す。試験片の寸法は、幅 20 mm ×長さ 200 mm とした。

表3-11 試験片の強化基材

強化基材
KNE 215E(12-1/2-10-7.2) たて糸
KNE 270E(12-1/2-10-9.0) たて糸
KNE 270E(12-1/4-10-6.5) たて糸
KNE 310E(12-1/4-10-7.2) たて糸
KNE 345E(12-1/4-10-8.3) たて糸

2-3-3-2 試験方法

図3-19に、本評価で用いたクリープ試験機とその模式図を示す。クリープ試験の評価方法は引張モードとした。ここで、試験片の固定方法については、評価対象である成形品は中空品であるため、掴み部分では中空部が存在しなくなるまで圧縮し、試験片を固定することとした。評価は以下の手順で行った。掴み具間距離は 100 mm とした。

- (ア) 試験片を掴み具で固定した後、まず 120 kgf を負荷し、その後 102 kgf ずつ荷重を負荷していき、破断した場合の荷重値を算出した。
(ここでの破壊荷重値を0時間における破壊荷重値とする)
- (イ) 次に試験片を掴み具で固定した後、 120 kgf の荷重を負荷し続け、600 時間までに破断するかどうかを検討した。
(破断しなかった場合は破断時間を600時間とする)
- (ウ) (ア) と (イ) で検討した負荷荷重と破断時間の関係を直線で結び、長時間後における物性の低下挙動を検討した。

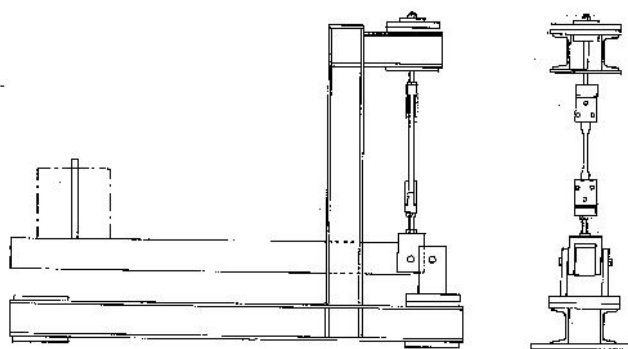


図 3-19 クリープ試験機

2-3-3-3 試験結果

2-3-3-2の（ア）により算出した各試験片の破壊荷重値を表 3-12 に示す。
KNE270E 1/2 の破壊荷重値が 426 kgf で一番高く、次いで KNE215 が 324 kgf、KNE270 1/4、
KNE310E および KNE345E は同等の荷重値であった。

表 3-12 各試験片の破壊荷重値

	破壊荷重値 (kgf)
KNE215	324
KNE270E 1/2	426
KNE270E 1/4	222
KNE310E	222
KNE345E	222

2-3-3-2の（イ）では、120 kgf の荷重を負荷した場合、いずれの試験片においても 600 時間で破壊には至らなかった。ここで、120 kgf での破壊時間を 600 時間として、各試験片において、耐久性の違いを検討することとした。

図 3-20 は破壊荷重と破壊時間の関係を示している。KNE215 では 0 時間から 600 時間になると、荷重の低下が一番大きい結果を示した、KNE270E 1/4、KNE310E、KNE345E では、0 時間から 600 時間における荷重の低下が一番小さい結果を示した。このことから、強化基材の目付重量が大きくなれば、寿命が長くなる可能性を示唆する結果を得た。

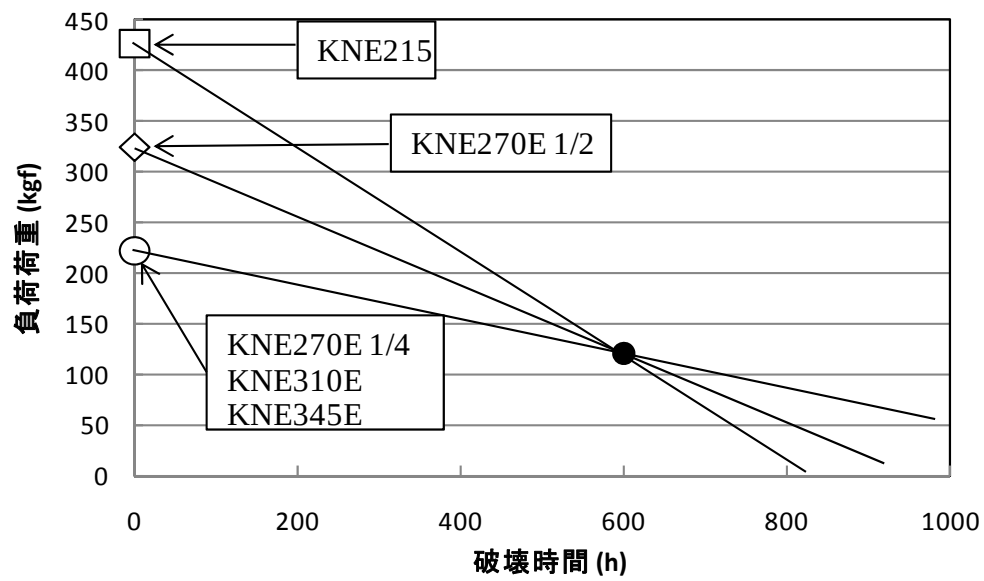


図3-20 破壊荷重と破壊時間の関係

2-3-3-4 まとめ

本試験結果からは、強化基材の違いが耐久性に及ぼす影響を検討したが、目付重量の増加が長期寿命を達成する可能性を示唆した。さらに試験数を増やして、負荷荷重と破壊時間の関係を検討すれば、50年後の寿命を評価することも可能である。

第3章 結論

3-1 研究開発成果および今後の課題

ラッセル編機および強化材を改良することにより、無機繊維を用いた三次元中空編物が作製可能となった。これにより、三次元中空構造を有する複合材料の強化基材が作製可能となった。編物設計のパラメータとして、スキン材およびコア材の原糸の太さ、スキン材の組織、コア材の構造、打ち込み（たて方向の密度）、ゲージ（よこ方向の密度）、カマ間（パイル糸の長さ、生地の厚み）を設計することにより、様々な構造を有する三次元中空編物が作製可能である。

三次元中空編物を用いて複合材料を作製し、その力学的特性を評価した。その結果、技術的目標値である曲げ弾性率 2 GPa、曲げ強度 20 MPa（複合材料の強化基材として市販されている三次元中空織物を用いた複合材料の物性値）を達成した。一方、断熱性能を評価した結果、得られた最小熱伝導率は、0.084 W/m・K であり、技術目標値である熱伝導率 0.033 W/m・K を達成できなかった。しかし、繊維密度を制御することにより達成可能であることが示唆された。

力学的特性の向上と熱伝導率の低下は、相反する編物設計が必要となることが明らかとなったため、今後の課題として、両方の要求性能を満たす最適な編物作製条件を見付け出す必要がある。また、製造コストについても併せて検討する必要がある。

3-2 事業化展開

本研究開発で事業化目標は、「三次元中空構造編物を用いた環境対応型無機繊維外断熱材の開発」である。現在、外断熱には多数の工程が必要であり、三次元中空編物にすることにより、新しい無機繊維断熱材の市場を創出する。上記研究開発成果には記載していないが、既に、三次元中空構造編物および難燃性樹脂を用いた建築現場での施工技術についても目処が立っており、要求性能を満たす編物構造の設計が可能となれば、ただちに事業化が可能となる。

事業展開については、建材分野を第 1 目標とし、自動車部品分野、その他分野に順次展開する予定である。建材分野については、外断熱建材として、平成 24 年度から、各販売先に対しサンプル出荷を開始する。主な販売先は、本研究開発事業のアドバイザーである「ダウ化工株式会社」を想定しており、平成 24 年度において、数量 10 m²、販売高 25 百万円を目標としている。自動車部品分野については、自動車外装部品であるエアスポイラー、リアスポイラーをターゲット商品として、平成 24 年度から施工性／接着性の品質評価を行い、平成 25 年度からサンプル出荷を行う。主な販売先は、本研究開発事業のアドバイザーである「ダイキョーニシカワ株式会社」を想定している。その他分野については、平成 22 年度～平成 23 年度において新たな使用分野をマーケティングし、事業性検討を行う。