

平成24年度戦略的基盤技術高度化支援事業

「非磁性・非電導構造物に用いる新しい熱可塑性樹脂連続繊維補強材の開発」

研究開発成果等報告書

平成25年5月

委託者 近畿経済産業局

委託先 関西ティール・エル・オー株式会社

内容

第1章 研究開発の概要	1
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	5
1-4 当該研究開発の連絡窓口	6
第2章 本論	7
2-1 CF, AF等の繊維とナイロン等熱可塑性繊維とコニングル加工によるハイブリッド繊維加工技術・装置の最適化開発（圓井繊維機械株式会社、カジレーネ株式会社、株式会社 KOSUGE、岐阜大学）	7
2-1-1 伸度の異なる強化繊維を用いた場合の加工条件の最適化	7
2-1-2 分散度合い設計手法の最適化	9
2-1-3 繊維収束性の向上	10
2-2 CF, AF等繊維とナイロン等熱可塑性繊維とハイブリッド繊維を用いたハイブリッド繊維組紐加工技術・装置の最適化開発（圓井繊維機械株式会社、カジレーネ株式会社、株式会社 KOSUGE、岐阜大学）	12
2-2-1 ハイブリッド組紐加工技術・装置の最適化開発	12
2-2-2 引抜成形機との連結を考慮した引き取り加工技術・装置の最適化開発 ...	14
2-3 ハイブリッド繊維組紐強化熱可塑性樹脂円筒状等複合材の成形条件の最適化開発研究（圓井繊維機械株式会社、カジレーネ株式会社、株式会社 KOSUGE、岐阜大学）	16
2-3-1 圧縮成形機を用いた最適成形条件の決定	16
2-3-2 引抜成形機を用いた最適成形条件の決定	18
2-4 ハイブリッド組紐強化熱可塑性樹脂円筒状等複合材の加工技術の開発・評価（圓井繊維機械株式会社、カジレーネ株式会社、株式会社 KOSUGE、ファイベックス株式会社、岐阜大学）	22
2-4-1 CF/AF 等ハイブリッド組紐強化樹脂含浸円筒状等複合材（ハイブリッドパイプ）の開発	22
2-4-2 ハイブリッド組紐のマトリックス樹脂と AFRP 等ロッドのマトリックス樹脂との接着向上技術の開発	23
2-4-3 ハイブリッド繊維強化熱可塑性樹脂筒状複合材の接合条件の最適化および評価	23
第3章 全体総括	27

第1章 研究開発の概要

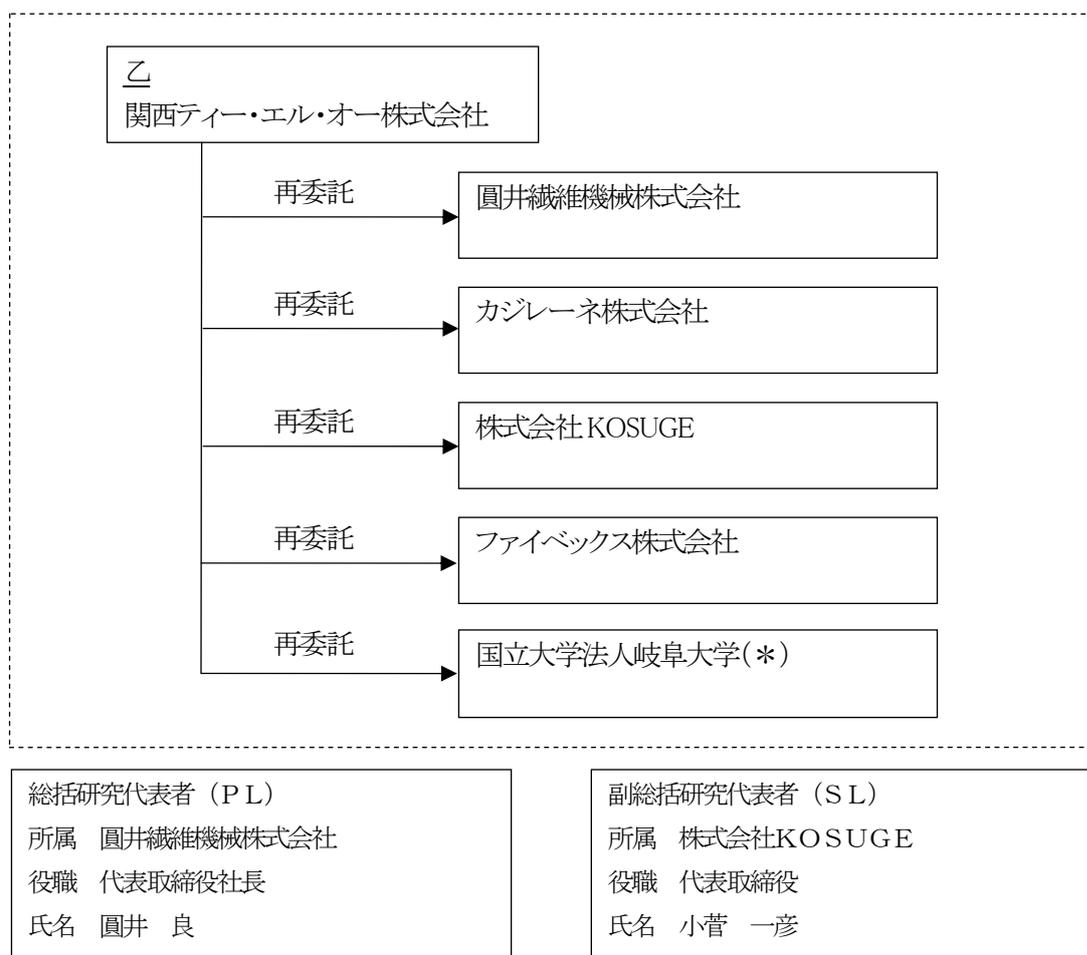
1-1 研究開発の背景・研究目的及び目標

安全・安心の社会の構築や近年のライフサイクルコスト概念の普及により、非磁性・非電導構造用コンクリート構造物の補強材として、「連続繊維補強材」が注目されている。現在の連続繊維補強材は、熱硬化性樹脂が主流であり、土木建築業者などの川下製造業者から、複雑な構造の建造物にも適応できる熱可塑性樹脂が求められている。本事業では、コミングル加工・組紐加工技術を用いて、アラミド繊維（AF）と炭素繊維（CF）からなるハイブリッド組紐熱可塑性樹脂の連続繊維補強材の開発を行う。

1-2 研究体制

1-2-1 研究組織・管理体制

(1) 研究組織（全体）

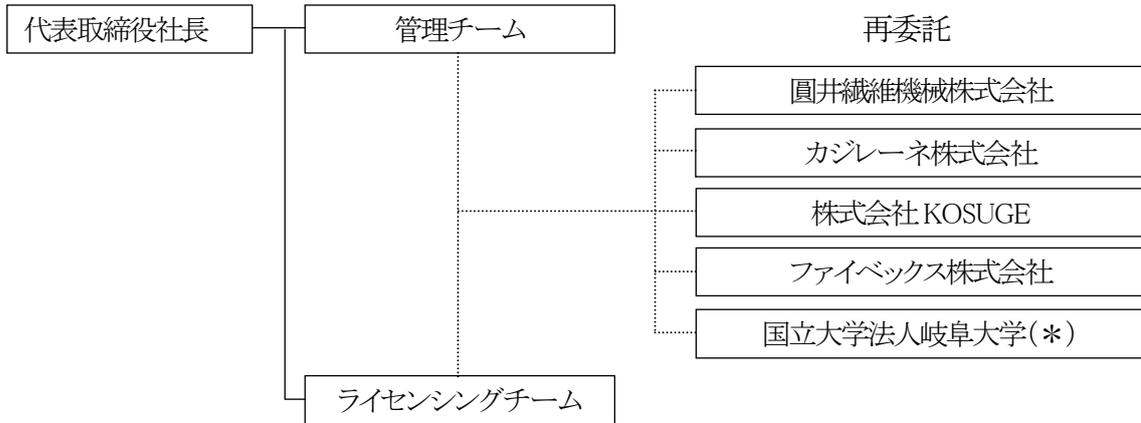


(*) 平成22年度、平成23年度においては、国立大学法人京都工芸繊維大学にて研究を行う。
以下、同じ。

(2) 管理体制

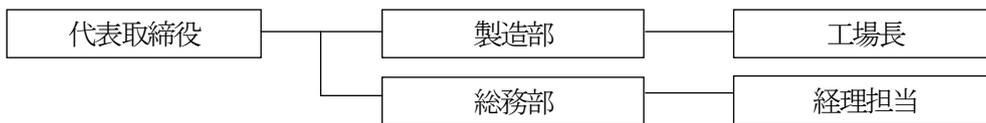
①事業管理機関

関西ティール・エル・オー株式会社

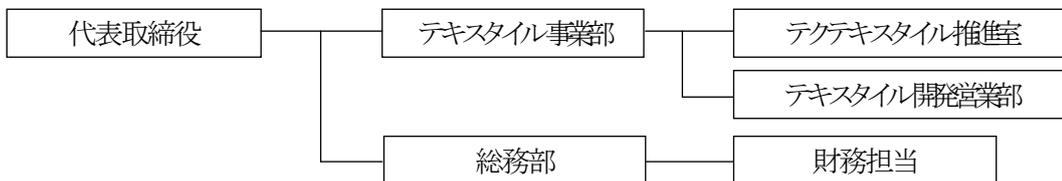


②再委託先

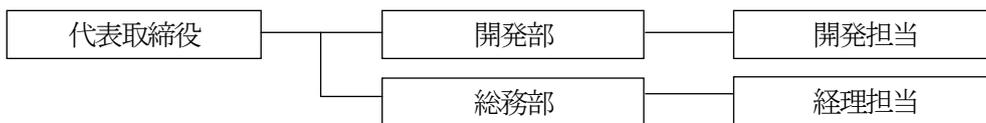
圓井繊維機械株式会社



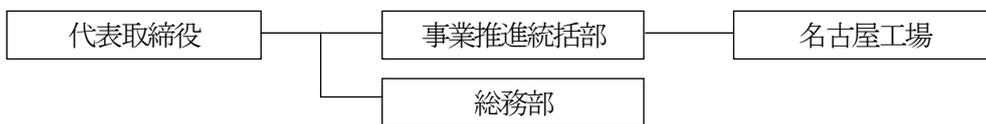
カジレーネ株式会社



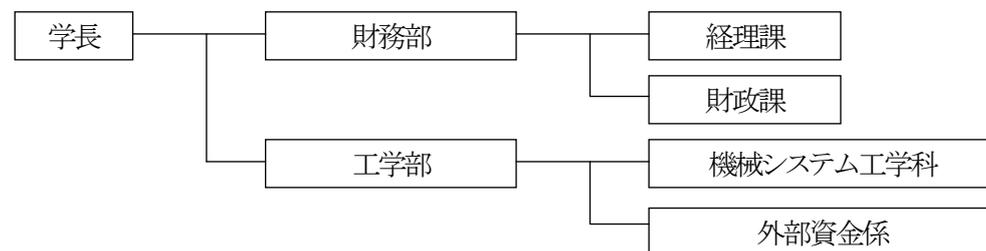
株式会社KOSUGE



ファイバックス株式会社



国立大学法人岐阜大学 (*)



1-2-2 研究者氏名

(1) 事業管理者

関西ティーン・エル・オー株式会社

氏名	所属・役職
広野 秀之	管理部長
高橋 好範	管理課長
岡田 裕子	管理チーム

(2) 研究者

圓井繊維機械株式会社

氏名	所属・役職
圓井 良	代表取締役
西川 潔	工場長

カジレーネ株式会社

氏名	所属・役職
高木 光朗	常務取締役
沖野 雅弘	テクテキスタイル推進室長
中橋 晴雄	テキスタイル開発営業部長

株式会社KOSUGE

氏名	所属・役職
小菅 一彦	代表取締役
山本 勉	開発部 開発担当 主任部員

ファイバックス株式会社

氏名	所属・役職
松原 澄行	取締役名古屋工場長
小杉 一正	事業推進統括部長
小林 宣博	名古屋工場 製造主任

国立大学法人岐阜大学（＊）

氏名	所属・役職
仲井 朝美	工学部 機械システム工学科 教授
大谷 章夫	工学部 機械システム工学科 特任准教授

(3) 経理担当者及び業務管理機関の所属、氏名

(事業管理機関)

関西ティール・エル・オー株式会社

(経理担当者) 管理チーム

岡田 裕子

(業務管理者) 管理課長

高橋 好範

(再委託先)

圓井繊維機械株式会社

(経理担当者) 経理担当

圓井 裕子

(業務管理者) 代表取締役

圓井 良

カジレーネ株式会社

(経理担当者) 財務担当

北山 春夫

(業務管理者) 常務取締役 テキスタイル事業部長

高木 光朗

株式会社KOSUGE

(経理担当者) 経理担当

小菅 佳子

(業務管理者) 代表取締役

小菅 一彦

ファイバックス株式会社

(経理担当者) 総務部長

南 隆一

(業務管理者) 事業推進統括部長

小杉 一正

国立大学法人岐阜大学（＊）

(経理担当者) 工学部外部資金係

長屋 好美

(業務管理者) 工学部機械システム工学科

仲井 朝美

1-3 成果概要

(1) CF, AF等の繊維とナイロン等熱可塑性繊維とコミングル加工によるハイブリッド繊維加工技術・装置の最適化開発 (圓井繊維機械株式会社、カジレーネ株式会社、株式会社KOSUGE、岐阜大学)

伸度の異なる強化繊維を用いた場合の加工条件の最適化として、混織ユニットに強化繊維を導く役割を果たしているニップローラーの材質変更及び強化繊維に接触するローラーの数を出来るだけ減らす糸道構成を行った。さらに混織を目的とした混織機構の条件変更を行い、強化繊維近傍に樹脂繊維を効率的に配置することが可能となった。この結果、繊維離反の少ない混織糸を得ることが出来た。このようにして作成した混織糸において分散率 79.6%と最終年度目標である 70%以上を達成した。また、混織後の繊維束強度低下に対しては、2条件の混織糸と混織前の炭素繊維の引張強度の比較を実施し、それぞれの強度低下率 4.3%、0.4%という結果を得た。こちらも目標である 5%以内を達成できた。

(2) CF, AF等繊維とナイロン等熱可塑性繊維とハイブリッド繊維を用いたハイブリッド繊維組紐加工技術・装置の最適化開発 (圓井繊維機械株式会社、株式会社KOSUGE、岐阜大学)

ハイブリッド組紐加工技術・装置の最適化開発では、組紐作製時の繊維強度低下 3%以下の目標値に対し、リワインド工程内における繊維摩擦抵抗抑制対策の最適化を進めた結果、供給されたコミングルヤーンをブレイダー用ボビンに巻返した際の繊維強度低下はほぼ 0%を達成した。

また、引抜成形機との連結を考慮した引き取り加工技術・装置の最適化開発では、製紐時の組糸張力および組角度の最適化、引抜成形に使用するマンドレルおよび引抜成形型内径面の表面粗度の最適化、成形温度の微細調整条件を構築することが出来た。

以上、本事業で得た知見をもとに製紐、成形条件の最適化を図ることによって製紐連続引抜成形が可能であることが示唆された。

(3) ハイブリッド繊維組紐強化熱可塑性樹脂円筒状等複合材の成形条件の最適化開発研究 (圓井繊維機械株式会社、株式会社KOSUGE、岐阜大学)

PA66 繊維を母材樹脂とした AF/CF 繊維ハイブリッド組物の引抜成形における最適設計を構築できた。本研究の成果により、組物強化基材が十分加熱され、含浸に必要な真の成形時間を満たせる成形速度 30 (mm/min) の成形条件にて硬質クロムメッキ処理された金型を用いて引抜成形は以下の未含浸率を示し、本研究における目標値を達成することができた。

- ・組糸の未含浸率 : 0.81 (%)
- ・中央糸の未含浸率 : 0.94 (%)

また、上記の未含浸率の引抜成形品を用いて引張試験をおこなうことで、積層理論より算出された理論弾性率に対する実験値が占める割合である理論弾性率達成率の、本研究における目標値である、90 (%) を達成することができた。

(4) ハイブリッド組紐強化熱可塑性樹脂円筒状等複合材の加工技術の開発・評価 (圓井繊維機械株式会社、株式会社KOSUGE、ファイベックス株式会社、岐阜大学)

ハイブリッドパイプの三点曲げ衝撃吸収エネルギーが AFRP ロッドと同等で、ロッドとパイプ接着後の引張弾性率が 36GPa 以上で、かつ継手部引張試験時の引張強度がロッドの引張強度以上となるように研究開発を実施し、接着剤中へのアラミド粉末等の混入、パイプの内壁面の処理などについて検討した。その結果、パイプの内壁面をアセトンで洗浄した後に特殊樹脂塗布したものや、パイプの内壁面をヤスリで目荒らしたものは上記目標を達成した。特にパイプの内壁面に特殊樹脂塗布したものは接着効果が大きかったため、今後内壁面目荒しと特殊樹脂塗布の組み合わせなどの条件を検討

することによりさらに接着力を向上することが推測され、パイプの継ぎ手長さをより短くして実用化を図ることが期待できる。

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
管理課長 高橋 好範

〒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 : takahashi@kansai-tlo.co.jp

第2章 本論

2-1 CF, AF等の繊維とナイロン等熱可塑性繊維とコミングル加工によるハイブリッド繊維加工技術・装置の最適化開発（圓井繊維機械株式会社、カジレーネ株式会社、株式会社KOSUGE、岐阜大学）

2-1-1 伸度の異なる強化繊維を用いた場合の加工条件の最適化

伸度の異なる2つの繊維を1本の繊維にするためには、両者のテンションをコントロールする必要がある。伸度差が残留したままの混繊糸は、ポビンからの解舒時点で互いの繊維が離反することが確認されており、そのような状態では次工程通過性に難がある。特に伸度の少ない炭素繊維（CF）やアラミド繊維（AF）に対し、伸度を有する熱可塑性繊維を混繊する際には、熱可塑性繊維を多めに送り込むオーバーフィード状態を作り出すことが重要で、それによりCFやAFに熱可塑性繊維がより絡みやすく、繊維間に入り込みやすい環境が整う。本事業では、その装置である混繊機を製作し、混繊の加工条件を最適化するために、装置の改良及び加工条件の模索・確立を行った。

混繊装置の最適化

混繊糸の模式図を図1-1-1に示す。過去の事業より、強化繊維（黒）と樹脂繊維（白）の距離が短くなると含浸性が向上するという研究成果が得られており、その結果、成形品では未含浸率が減少し、力学的特性が向上するという結果も得られている。従い、模式図のような理想的な混繊度合いを装置の最適化により導く必要がある。

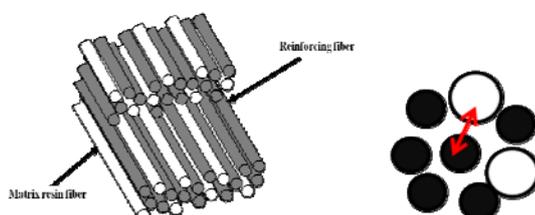


図1-1-1 混繊糸の模式図

本事業では、図1-1-2 模式図を示す混繊機を作成した。従来技術はフランスSHAPPE社が保有する、短くカットした炭素繊維を樹脂繊維と混紡する技術であったが、作製した混繊機では連続した炭素繊維に樹脂繊維を混ぜ合わせる事が可能となった。

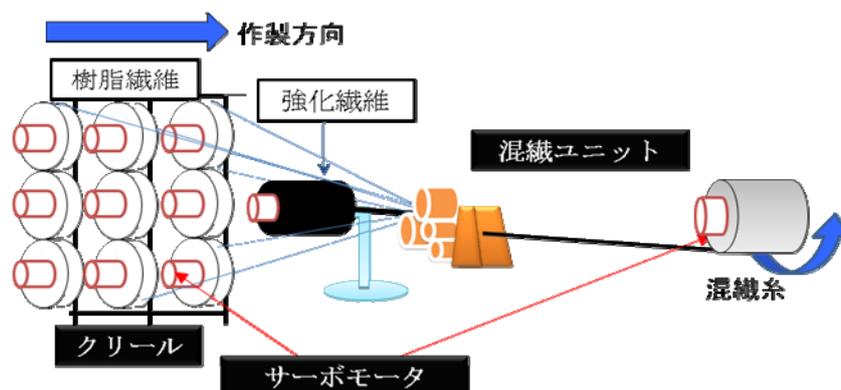


図1-1-2 混繊装置の模式図

初年度に装置作製を行い、次年度はノズル形状や筈の変更等で混織度合いの向上を実施したものの、結果は図 1-1-3 にあるように白黒が分離して見えるような混織糸しか再現性が得られず、しかもこの状態では次工程で強化繊維と樹脂繊維の離反が生じた。そこで、強化繊維（炭素繊維）のクリール配置の見直し、混織ユニットに強化繊維を導く役割を果たしているニップローラーの材質変更及び強化繊維に接触するローラーの数を出来るだけ減らす糸道を構成し、混織ユニットの機構改造を行った。

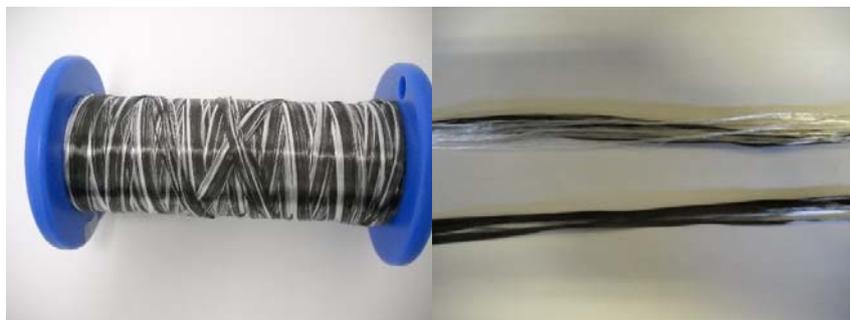


図 1-1-3 初年度混織糸

ニップローラーの改良について、強化繊維は混織ユニット前にローラーに背触することで物理的に開織される。その隙間に樹脂繊維を配置することで混織が完了するのであるが、ローラーを減らすことはつまり、強化繊維の開織性を下げることになる。一方でローラーに接触することで、強化繊維に抵抗が加わり、繊維束自体に損傷が入ることで毛羽立ちや成形品での力学的特性が低下することが過去の研究で明らかとなっている。従い、適度な開織性を保ちながら繊維束損傷を出来るだけ抑える条件設定を目指した。



図 1-1-4 混織機ニップローラー

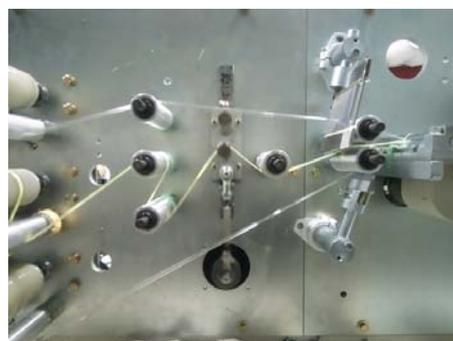


図 1-1-5 糸道ローラー

図 1-1-4 にニップローラーの写真を示す。従来ステンレス金属性であったが、ニップ力を高める為にウレタン系のソフトロールに材質変更を実施した。ウレタン系ローラーは炭素繊維に含まれる糸切れ毛羽を拾って巻き付きを起こすことがあり、これを見逃すと糸切れが発生する。よって作業時には、その巻き付きを落とす工程が必要となり、今回は作業者が付きっきりで対応した。この点は量産に向けて更なる改良が必要な点である。一方、糸道ローラー（図 1-1-5）は材質変更を行わず、従来は糸の流れに合わせて回転させていたものを固定した。これにより繊維束との摩擦力が生じることで開織性を上げることができた。

混織ユニットの機構改造を実施したことで、図 1-1-6 に示すような外観の混織糸を継続的に作製することが可能となった。樹脂繊維の PA66 が適度な間隔で配置されている為、混織糸自体が一見するとグレーに見えることがわかる。



図 1-1-6 本年度事業で作製した混繊糸外観

2-1-2 分散度合い設計手法の最適化

繊維均一分散率を従来の 20%から、70%と飛躍的に向上させ、かつ、コミングル（混繊）加工時の繊維の損傷による強度低下を従来 10%であったものを 5%以下とさせるために、以下の開発を行った。

サイジング剤量及び混繊条件が中間材料の特性に及ぼす影響

サイジング剤量の異なる強化繊維を用いること、および混繊速度を変えて作製することで、これらが、分散率、繊維損傷の度合い、強化繊維と樹脂との界面接着性といった中間材料の特性に与える影響について検討した。混繊機構の条件 A、B を設定し以下のとおり混繊を実施した。

強化繊維にサイジング剤量の異なる炭素繊維(T700-12000-60E、800tex、T700-12000-50C、800tex 東レ(株)製)を用いた。サイジング剤量は 60E が 0.2wt%、50C が 1.1wt%である。母材樹脂繊維にはナイロン 66 繊維 (235dtex)を用いた。強化繊維束 1 本に対して、母材樹脂繊維束を 23 本混繊することにより中間材料を作製した。混繊機には強化繊維、樹脂繊維それぞれの糸道を設けてあり、繊維のテンションを均一にすることにより混繊が可能となっている。サイジング剤量 0.2wt と 1.1wt%の繊維を使用し、それぞれ混繊条件を変えて混繊糸を作成した。

結果、サイジング剤量 0.2wt%の方が 1.1wt%よりも高い分散率を示した。1.1wt%の分散率が低かった理由としては、サイジング剤により収束が強く、炭素繊維の開繊が抑制されたことが考えられる。また、条件 A よりも B の方が高い分散率を示した。

混繊条件	A	B	参考
T700-12000-60E (0.2wt%)	 No.1 62.5%	 No.2 79.6%	No.3 -
T700-12000-50C (1.1wt%)	 No.4 53.4%	 No.5 52.2%	 No.6 59.4%

図 1-2-1 分散率測定結果

繊維束強度と分散率の関係は 0.2wt%、1.1wt%のいずれにおいても、繊維束強度は分散率に関わらずほぼ等しい値であった。これらの結果より、0.2wt%、1.1wt%いずれにおいても混織条件 B では繊維は、ほぼ損傷しないことが明らかとなった。

2-1-3 繊維収束性の向上

サイジング剤量の少ない炭素繊維は混織の際に受けるクランク振幅やローラーとの接触により繊維が損傷しやすいこと、一方で開織性においては優れていることが分っている。この開織された状態に樹脂繊維を配置し、巻き取りの際に収束させることで炭素繊維と樹脂繊維の間隔が狭くなり、結果、収束性の向上につながるという仮説を立てた。

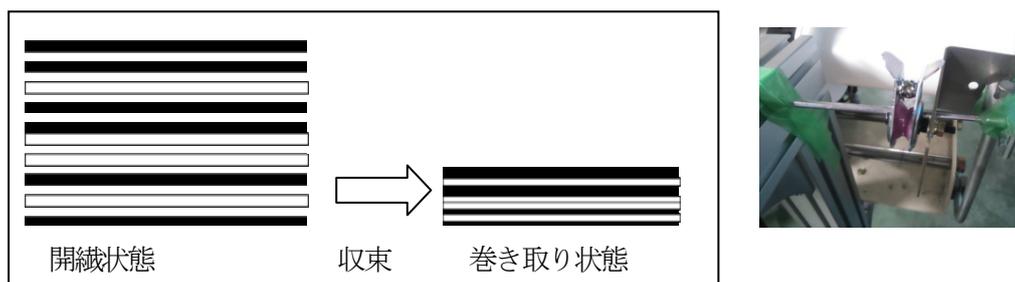


図 1-3-1 混織糸の開織・巻き取りの際の模式図と収束ガイド

図 1-3-1 に示す模式図のように、適度に空いた炭素繊維（黒）の隙間に樹脂繊維（白）をうまく配置すれば、巻き取りの際の収束ガイドを通過することで混織状態が固定出来る。



図 1-3-2 収束性の向上した混織糸

図 1-3-2 に写真を示す。従来はポビンから解舒した段階で繊維離反が生じていたが、図でもわかる通り、収束性を大幅に向上することができた。

結果及び考察・数値目標（分散率及び繊維束強度低下）の達成について

一連の混織手法の最適化により、成形品の力学的特性や次工程通過に優れる条件として、炭素繊維のサイジング剤量 0.2wt%、最適混織条件で分散率 79.6%との結果を得ることが出来た。

また、混織後の繊維束の強度低下率 5%以下という目標に対しては、混織前後での炭素繊維の強度と比較するため、混織過程を経っていない炭素繊維に対しても以下の試験を実施し比較した。材料は同様に T700-12000-60E および 50C の 2 種類、母材樹脂繊維には PA66 繊維（L-235T35B、235dtex、旭化成せんい(株)製）を使用し、混織はクランク振幅 6mm で実施した。試験片長さを 110mm、スパン間長さを 10mm、試験速度 1mm/min とし、紙製のタブを使用、試験機はイン

ストロン万能試験機 (Type4206) を用いた。最大荷重を炭素繊維のフィラメント数およびフィラメント径から求めた炭素繊維束の断面積で除した値を繊維束強度と定義した。

図 1-3-3 に示す通り、炭素繊維 50C および 60E いずれにおいても、混織前後での繊維束強度に大きな差はなかった。50C では混織前後での強度低下は 4%程度、60E では 1%弱という結果となり、本混織過程での繊維損傷は非常に小さいことが明らかとなった。

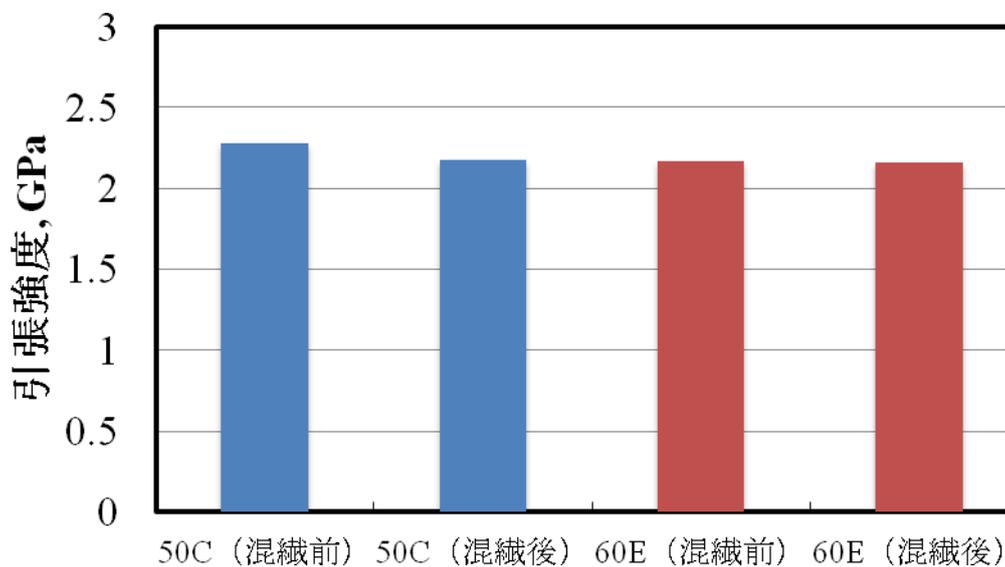


図 1-3-3 混織前後における引張強度の比較

2-2 CFAF 等繊維とナイロン等熱可塑性繊維とハイブリッド繊維を用いたハイブリッド繊維組紐加工技術・装置の最適化開発（圓井繊維機械株式会社、カジレーネ株式会社、株式会社 KOSUGE、岐阜大学）

単一材料を用いた組紐加工装置は既存しているが、炭素繊維のように極細長繊維が束になった繊維の摩擦や屈曲による繊維損傷が起因した強度低下を抑制するための工夫がされている組紐加工装置は存在しない。さらに、熱可塑性繊維とのハイブリッド繊維の組紐加工機と連結して長尺物の連続生産が可能な引抜成形機の開発は他に類を見ない。

そこで、本事業では炭素繊維、アラミド繊維等の強化繊維とナイロン等熱可塑性繊維のハイブリッド繊維を用いた組紐加工技術の最適化開発をおこない、加工時の繊維の損傷に伴う強度低下を抑制するための工夫や、引抜成形機との連結を考慮した装置の開発も併せて実施するもので、従来技術では加工時の繊維損傷による強度劣化が 10% 程度であったことに対し、本事業での目標は、加工時の繊維強度劣化を 3%以下に抑えることである。

2-2-1 ハイブリッド組紐加工技術・装置の最適化開発

伸度および最少曲率半径の異なる繊維からなるハイブリッド繊維を用いた組紐の加工を可能にするため、まずは供給されたハイブリッド繊維を組機で使用するために組機専用ボビンに巻返す際の繊維損傷を抑制するため、繊維が接触するガイド部品にローラーガイドを採用し、糸ガイドは定位置に固定し、回転するボビンをトラバースさせながら糸を巻返すボビントラバース方式を採用した。また、元糸解舒時の繊維損傷を抑制する対策として元糸ボビンを横取り方式に改良すると共に、元糸ボビンに非接触方式でブレーキをかけながら解除することにより、ハイブリッド繊維解舒時に発生する繊維のたるみと突っ張りを機械的に吸収することによって、ハイブリッド繊維のテンションの安定化を図り、繊維巻き返し方法の最適化を実施した。

次に、16 打ちブレーダーでは、ブレーダー専用ボビンからアラミド+ナイロン混織糸を引き出す部位の動滑車を 2 連とし、製紐時の繊維張力のバラツキを最小限にする改良を実施し、カーボン+ナイロン混織糸を使用する中央糸では、混織糸の強度劣化を抑制するため、専用ボビンから混織糸を横取りしガイドローラーで製紐部に導入する仕組みに改良し、製紐時の繊維強度劣化の抑制に努めた。使用したコミングルヤーンは、組糸にアラミド+ナイロン 66、中央糸にカーボン+ナイロン 66 とし、ブレーダー専用ボビンに巻き替え、引抜成形機用マンドレル上に 3 層の組物を作成した。

(1) ワインダーの改良

繊維のガイド部品は全てベアリングを内蔵したガイドローラーを採用し、トラバース方法も、繊維の解舒時点から巻取り部位までの間、繊維が極力直線になるようガイドローラーの位置を固定し、回転するボビンをトラバースさせるボビントラバース方式とした。そのため、トラバースユニットとして、ボビンを回転させるモーターも同時にトラバースする仕組みとした。(図 2-1-1 参照)

さらに、巻返し前の繊維が巻かれたボビンを横向けに配置し、ボビンの両端をボビンホルダーで挟んで保持し、片側のボビンホルダーに磁力式可変負荷付与装置を設置することによって、繊維を解除する際のボビン回転に対し、任意の抵抗力を付与することが可能な仕組みとし、同時に繊維の解除撚りを無くすことが可能となった。(図 2-1-2 参照)

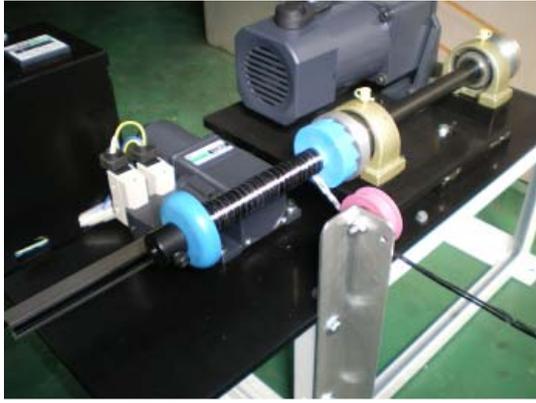


図 2-1-1 ボビントラバースワインダー

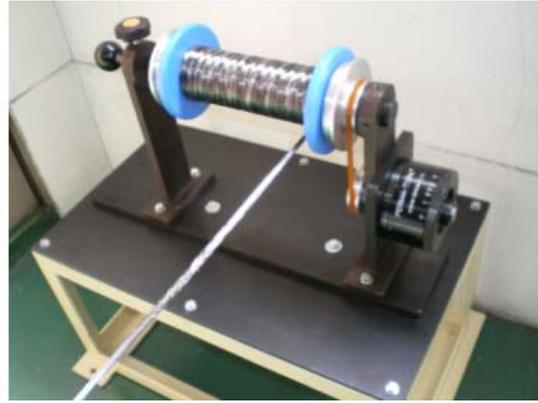


図 2-1-2 ボビンホルダー

(2) 巻返し前後の繊維強度評価試験

巻返し前の繊維をトラバース式ワインダー、ドラム式ワインダー、ボビントラバース式ワインダーで巻返し、巻返した繊維をそれぞれ L=300mm に切り出し、W=20mm x L=50mm のタグ状にカットした厚紙に、スパン間距離が 150mm になるよう挟み、エポキシ系接着剤（アラルダイト／昭和高分子製）にて接着した試験片を各 10 個作製した。

引張試験はインストロン万能試験機（Type4466）でチャック間距離 150mm、試験速度 20mm/min で実施した。

引張試験より得た引張荷重値を繊維の断面積で除し、応力を算出した結果を、巻返し前のハイブリッド繊維 Sample ID=V、トラバース方式で巻返したハイブリッド繊維 Sample ID=T、ドラム方式で巻返したハイブリッド繊維 Sample ID=D、ボビントラバース方式で巻返したハイブリッド繊維 Sample ID=R として表示した結果を 図 2-1-3 に示す。

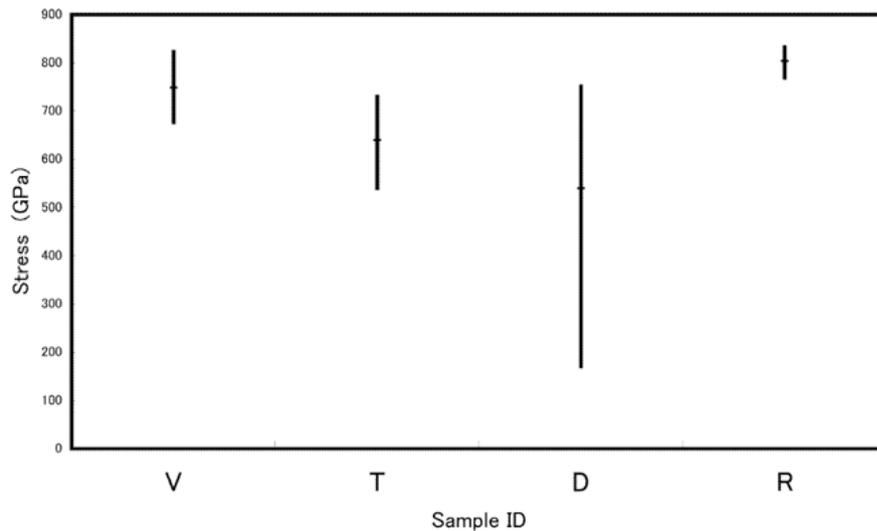


図 2-1-3 応力比較線図

表 2-1-1 応力の平均値、バラツキと巻返し前の繊維に対する劣化度合い

	Sample ID No.			
	V	T	D	R
平均値	749	639	540	804
VIに対する割合	100	85	72	107
バラツキ	147	190	581	64
VIに対する割合	100	130	396	44

巻返し前の繊維の Sample ID をV、トラバース方式で巻返した繊維をT、ドラム方式で巻返した繊維をD、ポビントラバース方式で巻返した繊維をRで示した。また、同じく応力の平均値とバラツキを巻返し前の繊維Vを100として対比した結果を表2-1-1に示す。

この結果より、ポビントラバース方式で巻返した後の繊維Rの強度は巻返し前の繊維Vとほぼ同等であることが確認された。

2-2-2 引抜成形機との連結を考慮した引き取り加工技術・装置の最適化開発

本事業で導入した引抜成形機では、ブレードと連結し製紐連続引抜成形の基盤を検討するため、組紐引抜装置は引張力の高いシリンダー形式となっている。また、引抜成形機用マンドレルに製紐された組紐と引抜シリンダーを連結させるため、成形する組紐の先端には2mほどの混織糸束を余分に配置させた状態で製紐し、シリンダーに固定した。引抜成形機のマンドレルは、成形開始時には成形型の中央付近に位置させ、引抜開始後、成形型のストレート部分端までは組紐と同期して成形型内を移動し、成形型出口端まで移動した時点でストッパーによってマンドレルは固定され、成形された組紐のみが外部に引き抜かれていく構造になっている。

本事業で試作したアラミド繊維、カーボン繊維とナイロン繊維とのコミングルヤーンを使用した組物の引抜成形によるパイプの試作では、引抜成形時に使用するマンドレル上に直接組紐を形成することおよび、マンドレルや成形金型内壁の表面粗さが引抜性に大きく影響することが明らかとなった。

(1) 組糸張力と引抜荷重との関係

引抜成形機とブレードを連結した製紐連続引抜成形を実現させるための条件のひとつとして、引抜荷重の低減あげられる。本試験では組糸張力と引抜荷重の関係を明らかにするため、ブレードキャリアのスプリング張力が2水準の組紐を作成し、それぞれ引抜成形機で引き抜く際の引抜シリンダーモーター出力を確認した。

ブレードキャリアのスプリングは、スプリングの押さえ込み位置を決定するカラーの固定位置で調整する構造になっており、本試験では、カラー固定位置を39mmにセットした場合と、カラーを取り外した場合の2水準とし、それぞれの場合の組み糸引き出し張力をプッシュプルゲージで測定した。

引抜成形機の引抜荷重として、引抜速度調整装置に表示される電圧、電流値から電力値を換算し、比較評価した。(表2-2-1参照)

組糸張力は、スプリング位置固定用カラーが無い場合、平均で5.89N、カラー位置38mmの場合では8.05mmと35%ほど張力の上昇が確認された。次に、それぞれの条件で製紐した3層構造の組紐の引抜荷重を確認したところ、組糸張力が高い場合、電力値として2.3w荷重が上昇することを確認することが出来た。

表 2-2-1 組糸張力と引抜加重の関係

	カラー無し								カラー位置 38mm							
張力(N)	6.1	7.1	5.3	4.5	6.6	5.9	6.8	4.8	6.8	7.9	9.0	9.2	8.5	8.5	7.5	7.0
平均(N)	5.89								8.05							
電圧(V)	42.0								42.8							
電流(A)	1.86								1.88							
電力(W)	78.1								80.4							

まとめ

炭素繊維/ナイロン繊維からなるハイブリッド繊維のボビンへの巻返し前後における引張強度劣化抑制対策として、巻き返し工程における繊維のガイド部品としてボールベアリング内蔵ローラーガイドを採用、トラバース方式は巻取る繊維の軌道が極力直線に配向するよう、ボビンをトラバースさせながら巻取るボビントラバース方式に改良した。さらに、繊維解舒時の張力付与方法として磁力式可変負荷付与装置を採用することにより、巻返し後の繊維強度は巻返し前の繊維とはほぼ同等であることを確認した。

引抜成形用の組紐を作成する場合は、引抜成形用マンドレルを組機に設置し、その上に直接組紐を形成する。さらに、成形温度を繊細に管理することにより、引抜成形性が向上することが明らかになった。さらに、マンドレルや成形金型内壁の表面粗さが引抜成形性に大きく影響することが明らかとなった。

組紐引抜成形機とブレードを連結した製紐連続引抜成形を実現させるための条件検討のひとつとして、製紐時の組糸張力と引抜荷重の関係を確認した、その結果、組糸張力が引抜荷重のあいだに密接な関係があることが明らかになった。さらに、成果物の外見観察から、組糸張力が低い場合、成果物の直線性は高いが、組糸張力が高い場合、成果物が H3mm/L1200mm も湾曲していることが確認された。

今後、組紐引抜成形機とブレードを連結した製紐連続引抜成形を実現させるためには、内壁粗さを改善した成形金型とマンドレルを使用し、製紐角度、製紐張力の適正化を図り、金型温度の最適化調節を実施したうえで、必要積層数に応じたブレードを引抜成形機の入口に配置し、長尺マンドレル上に直接製紐しながら成形金型内を引き抜くことによって、製紐連続引抜成形が可能であることが示唆された。

2-3 ハイブリッド繊維組紐強化熱可塑性樹脂円筒状等複合材の成形条件の最適化開発研究（圓井繊維機械株式会社、カジレーネ株式会社、株式会社 KOSUGE、岐阜大学）

2-3-1 圧縮成形機を用いた最適成形条件の決定

1 分散率が一方向材成形品の力学的特性に及ぼす影響

異なる混織条件で作製した混織糸を用いて、加熱圧縮成形により一方向繊維強化複合材料（以下、一方向材料と記す）を作製し、サイジング剤量および混織プロセスの違いが一方向材料の含浸状態および力学的特性に及ぼす影響について検討した。

2 材料および混織条件

材料にはサイジング剤量の異なる炭素繊維(T700-12000-60E、800tex、T700-12000-50C、800tex 東レ(株)製)を用いた。サイジング剤量は 60E が 0.2wt%、50C が 1.1wt%である。母材樹脂繊維にはナイロン 66 繊維 (235dtex) を用いた。混織糸は混織ユニット内に含まれる炭素繊維の開織を目的としたクランクの振幅を 0、6、30mm の 3 条件に変更して作製した。

3 成形方法

成形品の含浸状態および力学的特性を評価するため、一方向繊維強化複合材料を作製した。中間材料を金属フレームに引き揃えながら一方向に 12 回巻き取り、加熱圧縮成形法により成形圧力 3MPa、成形温度 290°C、成形時間 5min で成形をおこなった。得られた成形品は、幅 20mm、長さ 200mm の一方向繊維強化平板となる。なお、なお 0.2wt%における振幅 30mm の条件では炭素繊維が混織機に絡みつき、混織が不可能であった。

4 成形品含浸状態

成形品の含浸性および内部構造を明らかにするため成形品を繊維軸方向に対して垂直に切断し、熱硬化性樹脂内に包埋した後、研磨機を用いて断面を研磨し光学顕微鏡にて断面観察をおこなった。二値化をおこない、樹脂が強化繊維束に含浸していない領域の面積を測定し、成形品断面積で除した値を未含浸率とした。図 3-1-1 に 0.2wt%、1.1wt%それぞれの未含浸率と分散率の関係について示す。分散率が増加すると、未含浸率は減少した。これは分散率が増加したことにより、樹脂を繊維束に含浸させるための流動距離、いわゆる含浸距離が減少したためと考えられる。逆に、分散率が低いと含浸距離が増加し、樹脂を繊維束に含浸させるために必要な時間、いわゆる含浸時間が長くなる。そのため、分散率が低いと成形時間 5min では含浸時間が成形時間よりも長くなり、未含浸率が増加したと考えられる。したがって、分散率を増加させることで含浸時間の短縮化が図れることが明らかとなった。

5 引張試験

成形品の力学的特性を明らかにするために、作製した試験片の引張試験を下記に示す条件でおこなった。試験片の厚さは、成形条件により変化するものの約 1mm である。スパン間距離 100mm とし、試験片中央部にはゲージ長 10mm のひずみゲージを貼り、引張速度 1mm/min の条件で引張試験をおこなった。試験機はインストロン万能試験機 (Type4206) を用いた。

図 3-1-2 に弾性率と未含浸率の関係について示す。未含浸率が減少すると弾性率は線形的に増加した。図 3-1-3 に引張強度と未含浸率の関係を示す。弾性率と同様に、未含浸率が減少すると引張強度

は線形的に増加した。すなわち、弾性率、引張強度ともに向上させるには、未含浸率を減少させることが重要であることが明らかとなった。しかし、繊維束強度が低下した 1.1wt%、振幅 30mm の混織糸で作製した成形品の引張強度はこの直線上に乗らず低下した（図中矢印）。したがって、成形品の力学的特性には、未含浸率の影響に加えて、強化繊維の繊維束強度が影響すると考えられる。以上より、混織糸の繊維束強度低下を抑制可能な混織条件であれば、含浸性および力学的特性は分散率を増加させれば向上すると考えられる。

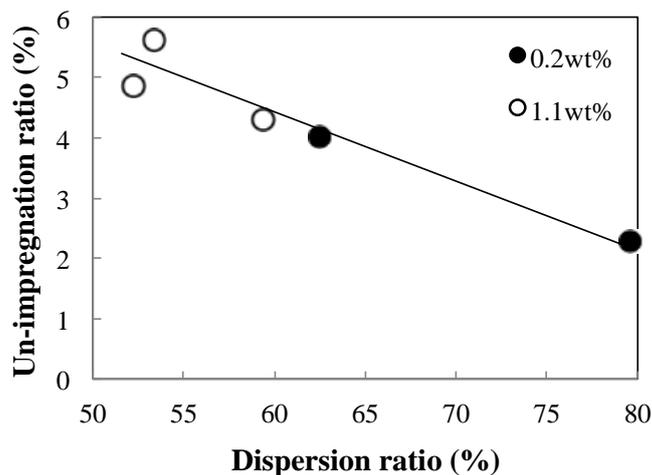


図 3-1-1 未含浸率と分散率の関係

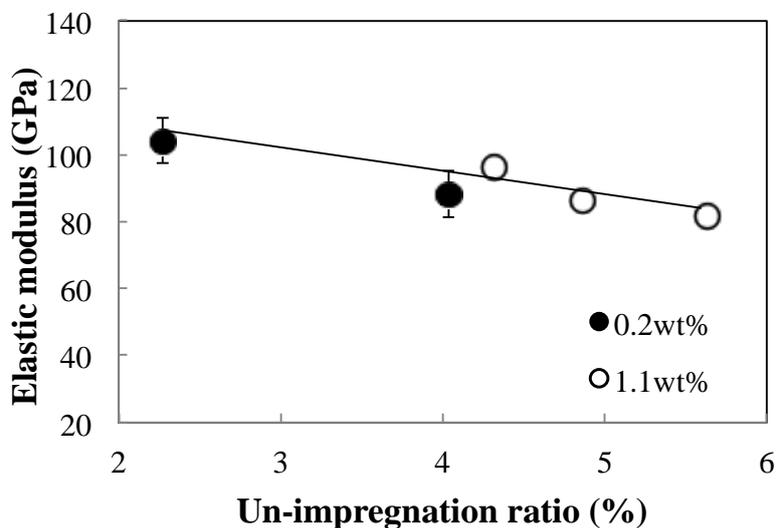


図 3-1-2 弾性率と分散率の関係

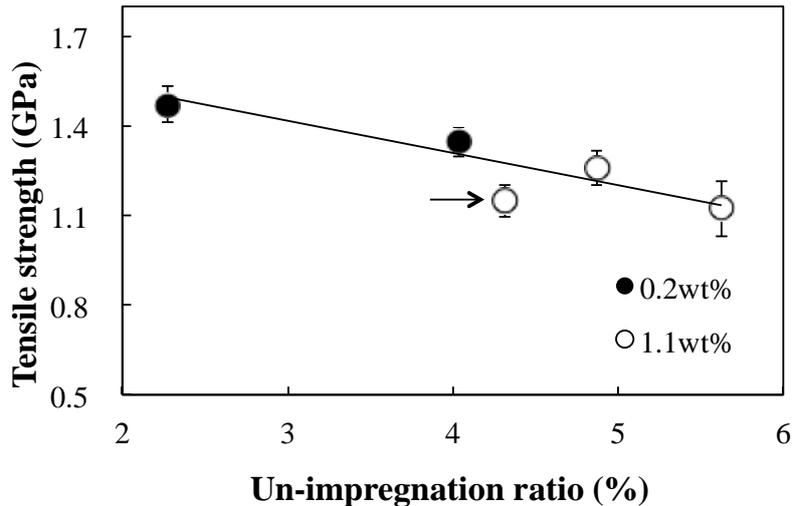


図 3-1-3 引張強度と分散率の関係

2-3-2 引抜成形機を用いた最適成形条件の決定

1 繊維ハイブリッド組物の含浸プロセス

繊維ハイブリッド組物の含浸プロセスを明らかにするため、引抜成形が定常状態となった際に引抜成形を中断させ、十分な冷却を経た後に金型より取り出した成形品（途中止め成形品）を作製した。この途中止め成形品の金型入口部から金型出口部までの断面を観察することで繊維ハイブリッド組物の含浸プロセスの検討をおこなった。

2 材料および成形条件

本研究では強化繊維として、アラミド繊維(Kevlar29-6K 東レデュポン(株製) およびサイジング剤量 0.2wt%の炭素繊維(T700-12k-60E (0.2wt%) 東レ(株製)を用いた。樹脂繊維には PA66 繊維(レオナ 66 旭化成(株製)を使用した。これらの繊維を用いて混織糸を作製した。これらの混織糸を用いて組糸、中央糸の組み合わせを変化させ、強化形態となる組糸 24 本、中央糸 12 本の丸打組物を作製した。組物構成は組角度 30° とし、積層数は 3 層である。作製した組物の一覧を表 3-2-1 に示す。本項目で用いた成形条件を図 3-2-1 に示す。

3 実験方法

はじめに表 3-2-1 で作製した組物を用いて引抜成形をおこない、成形品内部に挿入した熱電対を用いて温度履歴を測定した。次に円筒引抜成形における成形品の含浸プロセスを検討するために、円筒引抜成形における途中止め成形品を作製した。途中止め成形品とは引抜成形が定常状態となった後、成形を中断し、十分に冷却された後に成形機より取り出された成形品である。

以下に途中止め成形品作製法を示す。はじめに引抜成形機よりマンドレルを取り外し、取り外したマンドレルに十分にシリコン系離型剤を塗布した。その上に長さ 30cm に切り出した厚さ 0.025mm のカプトンフィルムを巻き付けた。冷却後の成形品の離形は PA66 と金属材料の界面強度が引取のための成形品の引張強度を上回り、離形が困難となるために離形性の向上のために本工程を設けた。この作製したカプトンフィルム付きマンドレル上に組物を作製し、積層させた。その後、定常状態になるまで引抜成形をおこなった後、成形品が室温程度になるまで 5 時間程度の冷却をおこない、成形品の金型入口部および金型出口部にマーカを打ち、金型より取り出した。この途中止め成形品を金型入口部より 9cm 刻みに切断し、輪切り断面を観察することで各繊維束の未含浸率を測定し

た。未含浸率とは繊維束断面積に対する未含浸領域が占める割合と定義した。

表 3-2-1 各組物構造

Sample name	A/A	C/C	A/C
Braiding yarn	Aramid fiber	Carbon fiber	Aramid fiber
Middle end yarn	Aramid fiber	Carbon fiber	Carbon fiber

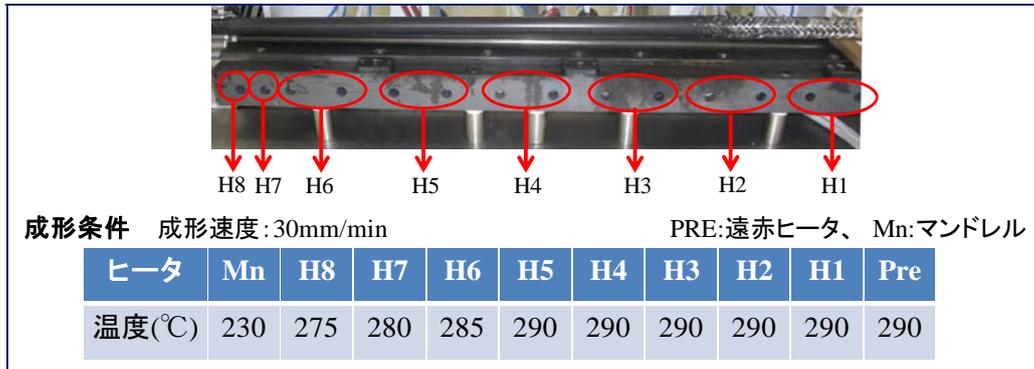


図 3-2-1 引抜成形条件

4 実験結果

温度履歴測定 結果を図 3-2-2 に示す。温度履歴より組物に設置した熱電対の金型内の通過位置を算出することが可能であり、算出した結果、図に示す位置が得られた。ここで、真の成形時間＝組物が金型内テーパー領域内に存在し、かつ必要成形温度以上であった時間と定義すると、本温度履歴より真の成形時間は 9(min) であった。

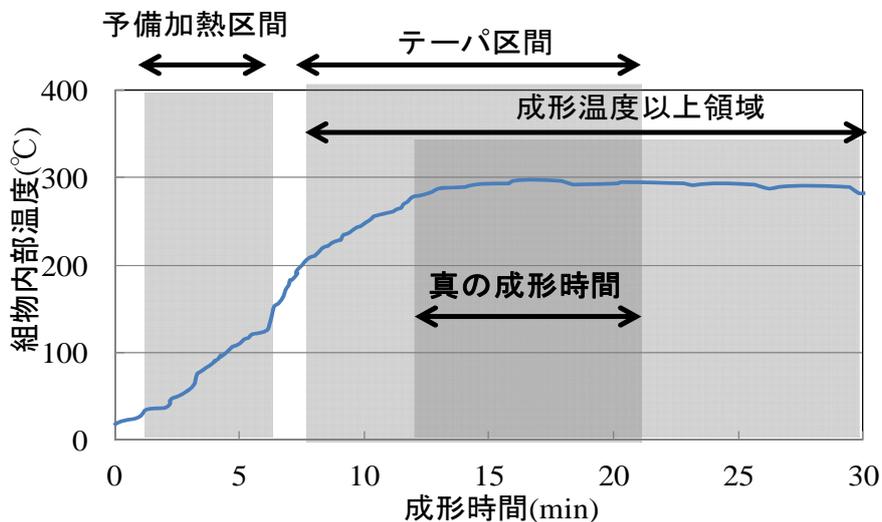


図 3-2-2 測定した温度履歴および金型内通過位置との対応

断面写真から算出した繊維ハイブリッド組物 A/C の未含浸率および、測定した温度履歴から未含浸率と真の成形時間の経過時間の関係を図 3-2-3 に示す。これらのグラフから真の成形時間の開始時刻以前では含浸はほとんど進行していなかったこと、テーパー部では含浸が進行したが、ストレート部では一定の値を示したことから、AF/CF 繊維ハイブリッド構造では、組糸のアラミド繊維による中央糸である炭素繊維への断熱効果が生じていることが明らかとなった。断熱効果が生じる原因としては AF の熱伝導率(2~4(W/mK))が CF の熱伝導率(80~800(W/mK))より低いこと、中央糸である炭素繊維

維の周囲に位置するアラミド繊維が断熱材の役割を果たし、単一材料と比較して炭素繊維束近傍の樹脂が十分に溶融する温度に達する時間が増加したことが考えられる。

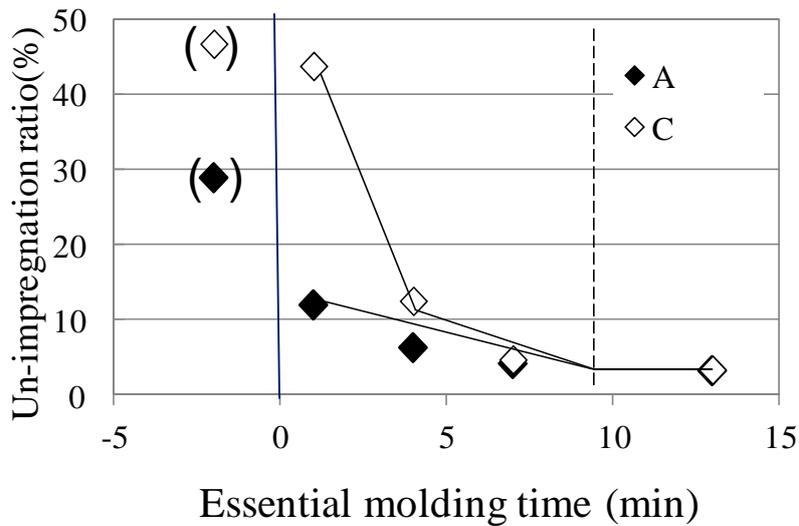


図 3-2-3 A/C の未含浸率と真の成形時間の関係

5 引抜速度が成形品含浸状態におよぼす影響

引抜速度が成形品含浸状態におよぼす影響を検討するため、引抜速度を変更して引抜成形をおこない、成形品断面を評価した。組物強化基材は 1-A の A/C を使用し、引抜速度を 30、50、100、150 (mm/min) と変更して引抜成形品を作製した。

各成形品断面より算出した組糸、中央糸の各繊維束における未含浸率と引抜速度の関係を図 3-2-4 に示す。組糸、中央糸ともに引抜速度の増加にともない、未含浸率は増加した。また、成形品断面の観察において、引抜速度 100、150 (mm/min) 条件下で作製されたものは引抜抵抗の増加により、成形時に組物が 1 層欠損していたことが明らかとなった。また、これらの成形品外周樹脂部は平滑でなく、これは成形品が金型から出てきた際の冷却不足が原因と考えられる。

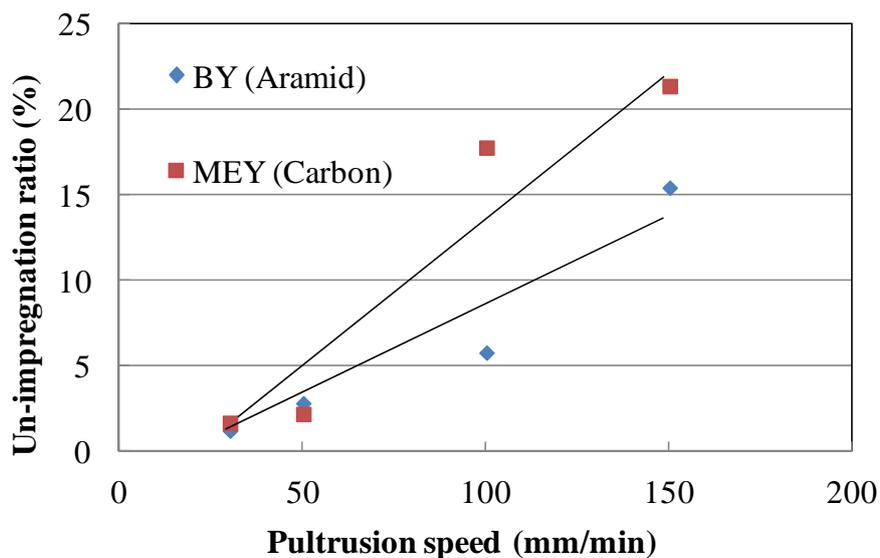


図 3-2-4 引抜速度 100(mm/min) での成形品断面

以上を鑑みた結果、今後量産に向けて引抜速度をさせる方法は2通り考えられる。1つ目は金型長さを延長させる方法であるが、これは現在の成形システムを構築するにあたって、その有用性は確認できている。2つ目は引抜抵抗を抑制させる方法であり、以降でこの方法について検討した。

6 引抜抵抗抑制のための硬質クロムメッキ処理

引抜抵抗を抑制する方法としては、組物強化基材が金型に接触する部分の摩擦を低下させる方法が考えられる。そこで金型内部およびマンドレルに硬質クロムメッキ処理を施し、この有用性について検討した。組物はA/CLを使用し、成形条件は2.の引抜速度30 (mm/min) と同等のものを用いた。

成形品断面より算出した各未含浸率を図3-2-5に示す。これよりメッキ処理をおこなった金型を用いた引抜成形品はおこなっていないものと比較して、未含浸率が低いことがあきらかとなった。この原因としては、樹脂-金型間のせん断応力の減少によりメッキ処理無のものと比較して、金型外に樹脂が向かうマクロ流動より繊維束内含浸方向に向かうマイクロ流動が支配的になったことが考えられる。マイクロ流動とマクロ流動の概念を図および図に示す。

以上のことから金型内の組物強化基材が接触する部位に硬質クロムメッキ処理をおこなうことで引抜抵抗の抑制のみならず、含浸性も向上することが明らかとなった。

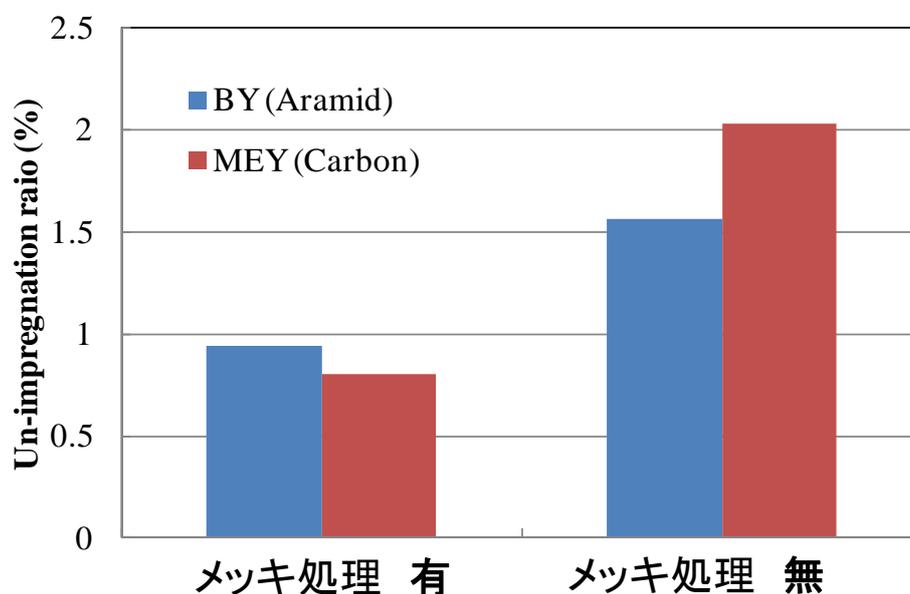


図3-2-5 メッキ処理の違いによる未含浸率の違い

2-4 ハイブリッド組紐強化熱可塑性樹脂円筒状等複合材の加工技術の開発・評価（圓井繊維機械株式会社、カジレーネ株式会社、株式会社 KOSUGE、ファイベックス株式会社、岐阜大学）

従来、AFRP（アラミド繊維強化樹脂）ロッドを接合させる加工技術がなかったものを、本開発において開発した新規ハイブリッドパイプを特殊樹脂等の接着剤により接合させ、目標値 40GPa 以上の AFRP 接合ロッドの引張弾性率、および AFRP ロッドと同等の三点曲げ衝撃吸収エネルギーを得る。

2-4-1 CF/AF 等ハイブリッド組紐強化熱可塑性樹脂円筒状等複合材の開発

ハイブリッドパイプの三点曲げ衝撃吸収エネルギーが AFRP ロッドと同等となるように、パイプ軸方向の CF と組紐の AF との比率と弾性率との相関性を評価し、最大弾性率となる最適配合比率にて三点曲げ衝撃試験を行った。

1. ハイブリッドパイプの三点曲げ衝撃試験

ハイブリッドパイプの三点曲げ衝撃吸収エネルギーが AFRP ロッドと同等となることを確認のため外径 18mm、内径 14.5mm の((CF/AF)RTP)ハイブリッドパイプと、本パイプを用いて接合する AFRP ロッド(ファイベックス社製 RA7 直径 7.8mm) の三点曲げ衝撃試験を実施した。

(1) 試験方法

A. 比較サンプル

ファイベックス社製 AFRP ロッド(RA7)

B. 試験用ハイブリッドパイプ

外径：18mm φ， 内径：14.5mm φ， 組角度：30 度

C. 三点曲げ衝撃試験装置

落錘型衝撃試験機 (図 4-1-1)

Dynatup 9210、インストロン社製 京都工芸繊維大学

D. 落錘条件

衝撃エネルギー：60J 重り：7.182 kg

衝撃速度：4.1 m/sec 抑え具(圧子)：直径 22mm

支点間距離：105mm

E. 衝撃吸収エネルギー

10mm 変形時の衝撃吸収エネルギーにて評価。



図 4-1-1

(2) 試験結果

ハイブリッドパイプと AFRP ロッド(RA7) の衝撃試験結果を表 4-1-1 に示し、衝撃前と衝撃後の写真を図 4-1-2 に示す。ハイブリッドパイプの三点曲げ衝撃吸収エネルギーは AFRP ロッドの衝撃吸収エネルギーより高かった。

表 4-1-1 衝撃試験結果

	Impact energy-1 (J)	Energy to max load-1 (J)	Energy to 10mm Deflection (J)	Deflection at max load-1 (mm)	Maximum load-1 (kN)	Deflection at max load-1 (mm)
RA 7 (AFRP Rod 7mm)	37.1	0.9	6.1	11.3	13.1	11.3
(AF/CF)RTP Pipe	37.4	23.9	6.0	15.7	4.0	15.7

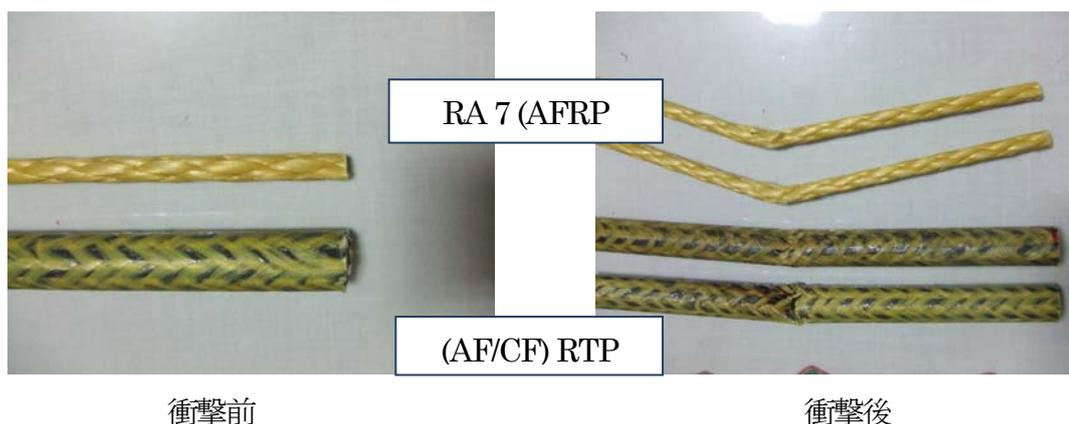


図 4-1-2 衝撃試験前後の写真

2-4-2 ハイブリッド組紐のマトリックス樹脂と AFRP 等ロッドのマトリックス樹脂との接着向上技術の開発

当初計画のアラミド等粉末入りエポキシ樹脂や AFRTIP パイプの端部をかしめる方式を検討したが、目標の引張弾性率を得ることが出来なかった。視点を変えて特殊樹脂による接着層を設けることにより、2-4-3 項で示すように目標の引張弾性率を得ることができた。

2-4-3 ハイブリッド繊維強化熱可塑性樹脂筒状複合材の接合条件の最適化および評価

AFRP ロッド間を新規ハイブリッドパイプにて接合させ、目標値 36GPa 以上の引張弾性率を得るように、高周波誘導加熱等や特殊接着剤等による加熱接着加工技術・条件の最適化検討を、2-4-2 項での技術開発と併せて行った。

1. 外圧成形パイプによるロッドの継手強度

ロッドの継手強度は接着剤、接着性を高めるための添加物、パイプの内壁面状態、パイプの長さなどにより異なると考えられる。板状の AFRP、AFRTIP などで試験し、エポキシ樹脂同士の接着性に若干効果の見られたアラミド粉末やアルミナ粉末添加について、パイプ形状での接着性確認をすべく外圧成形パイプ中に AFRP ロッドを挿入し、エポキシ樹脂にケブラー粉末、アルミナを添加して接着性試験を実施した。

(1) 試験体

A. 試験体作製に使用した材料

(a) AFRP ロッド：ファイベックス社 RA13（直径 13.7mm）。

(b) 外圧成形パイプ

パイプの軸方向を 0 度、円周方向を 90 度とした GF 0/90 度 / AF 0 度 / CF 0/90 度のエポキシ樹脂含浸布を用いた構成で、内径 20mm、外径 27mm、長さ 300mm の外圧成形パイプ。

(c) エポキシ樹脂

ファイベックス社で使用している常温硬化型 2 液エポキシ樹脂(主剤：三菱化学社製 JER827、硬化剤：東ソー社製 TETA)

(d) アラミド粉末：デュボン社製の平均粒径 25.5 μ m の粉末を樹脂量に対して 5% 添加した。

(e) アルミナ粉末：テクノライズ社製 #400 を樹脂量に対して 10% 添加した。

B. 試験体

試験体形状を図 4-3-1 に示す。

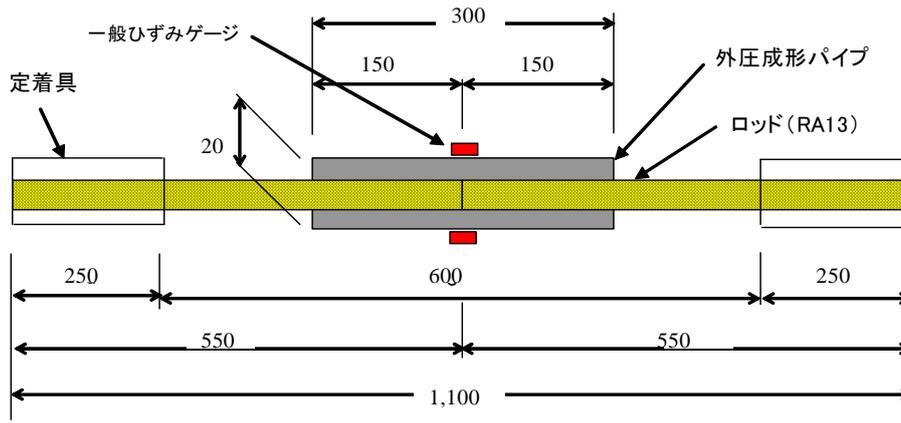


図 4-3-1 試験体形状

(2) 試験結果

ロッド RA13 の保証耐力 172kN に対し、サンプルの最大引張荷重はいずれも約 20~50kN と低く、すべてがパイプの内面と樹脂との界面から抜け接着性が低かった。サンプルに添加したアラミド粉末とアルミナ粉末を比較するとほとんど差が見られず、粉末添加なしに比べ約 10%程度向上が見られた。またロッドのエポキシ樹脂との馴染みをよくするために、ロッドの表面にアラミド粉末を添加したエポキシ樹脂を事前に塗布したものは、粉末なしに比べ約 45%向上が見られた。

2. パイプ内面に処理をした継手試験

AFRP ロッドに使用しているエポキシ樹脂と AFRTIP パイプの N66 樹脂との接着性をより高める方法について、図 4-3-2 に示すようにパイプ内面に予め特殊樹脂層を設け、特殊樹脂とエポキシ樹脂との接着性をみる特殊処理試験、およびパイプ内面をヤスリで摩耗して表面を荒らし、エポキシ樹脂との接着性向上を図るもの、パイプ内面をアセトンで洗浄したものについて、AFRTIP パイプと AFRP ロッドとの接着性を試験した。

(1) 試験体および試験体作製条件

A. 特殊処理

外径 18mm、内径 15mm、組角度 30 度の 3 層積層パイプ内面をアセトンで洗浄後風乾し、予め 400mm 長さの AFRTIP パイプの外周を樹脂液が漏れないようにテーピングし、特殊樹脂液をパイプ内に流し込んだあと樹脂液を廃棄し、乾燥機で 120℃× 60 分間乾燥して特殊処理パイプを得た。

パイプの端面から樹脂液が漏れないように漏れ止めを施したのち、このパイプの長さ方向の真ん中で、かつ断面方向の中心に直径 5mm の AFRP ロッド(ファイベックス社製 RA5)を通し、パイプの片面からエポキシ樹脂を注入した後、さらにパイプのもう一端からロッドの先端が接するように AFRP ロッドを挿入して 60℃で 6 時間乾燥し、パイプの中のロッドを固着した。

B. 内面摩耗処理

パイプの内面を棒ヤスリにサンドペーパー #80 を巻きつけて摩耗し、摩耗層などをエアで飛ばした後パイプをアセトンで洗浄、風乾し上記 A サンプルと同様にエポキシ樹脂を注入硬化させてロッドを固着した。

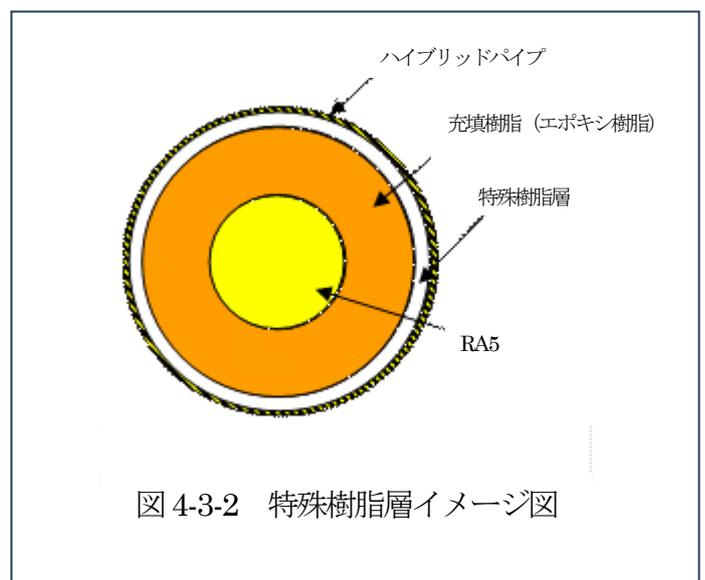


図 4-3-2 特殊樹脂層イメージ図

C. アセトン洗浄処理

パイプをアセトンで洗浄後風乾し、上記A サンプルと同様の方法でエポキシ樹脂を注入硬化させてロッドを固着した。

(2) 継手部引張試験

引張試験前のサンプルを図 4-3-3 に示す。サンプルには歪ゲージをパイプ中央部に 2 ケ所貼り、引張弾性率を測定した。試験体寸法を図 4-3-4 に示す。引張試験機を図 4-3-5 に示す。



図 4-3-3 継手部引張試験前

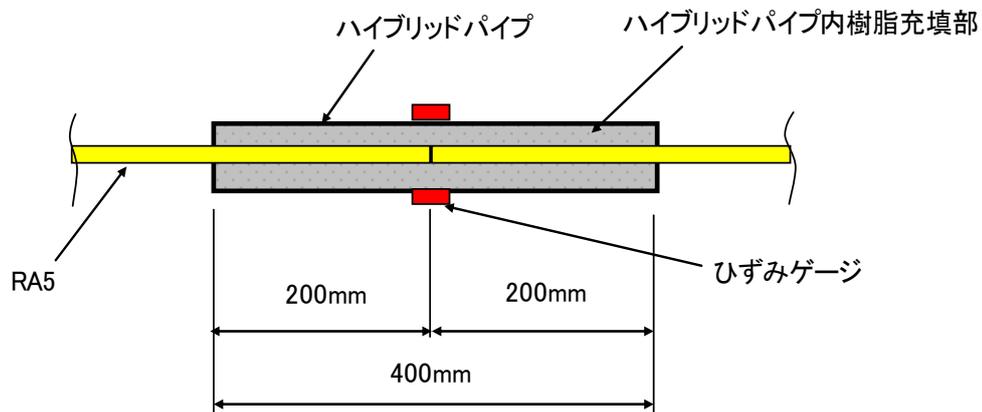


図 4-3-4 試験体形



図 4-3-5 500kN アムスラー型引張試験機

(3) 継手引張試験結果

試験結果を表 4-3-1、図 4-3-6 に、また試験後のサンプル写真を図 4-3-7 に示す。サンプルはいずれも引張弾性率が目標の 36GPa より高く、特に特殊処理したもの、およびサンドペーパーで目荒らししたものは写真に見られるようにロッドが破断しており、最大荷重がロッドの保証耐力 32kN 以上であり、引張弾性率、引張荷重(接着力)ともに優れていた。今後さらにパイプの内面摩耗した後さらに特殊処理することにより、パイプとロッドとの継手長さをより短くできる可能性があると考えられる。

表 4-3-1 継手引張試験結果

No.	パイプ 断面積	最大荷重 (kN)	引張強度 (MPa)	引張弾性率 (GPa)
	(mm ²)			
目標値		32.0		36.0
アセトン	75.5	15.4	204	52.5
目荒し	75.5	33.7	446	57.1
特殊樹脂	75.5	37.1	491	61.6

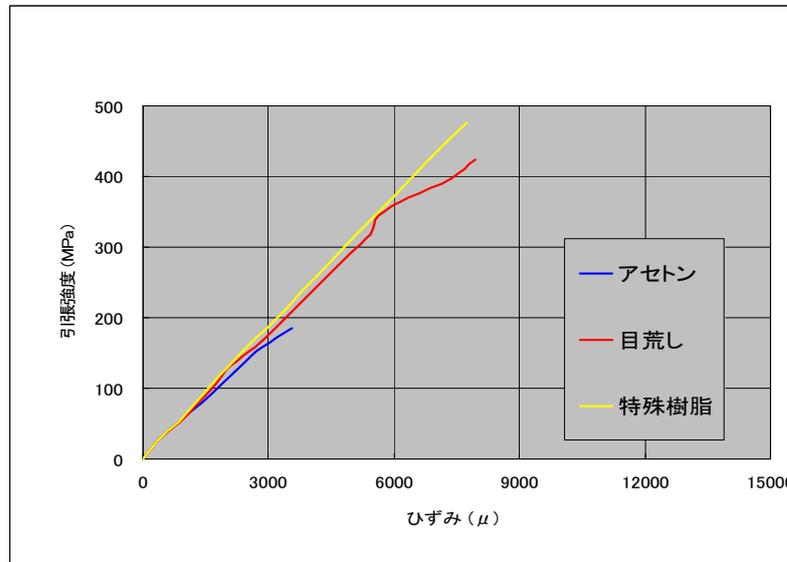


図 4-3-6 ハイブリッドパイプ継手引張試験結果

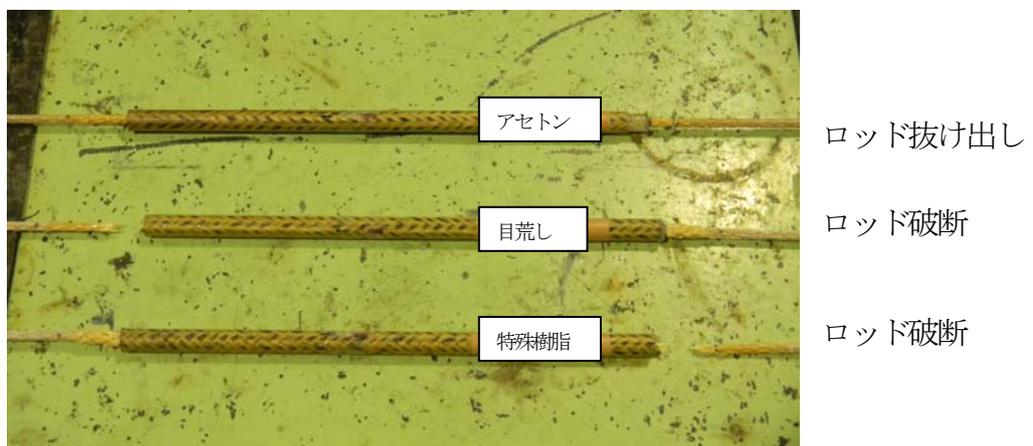


図 4-3-7 試験後サンプル

第3章 全体総括

AF/CF 等の繊維とナイロン等熱可塑性繊維のコミングル加工によるハイブリッド繊維加工技術・装置の最適化開発では、極端に伸度の異なるハイブリッド繊維における混織糸加工条件の最適化として、混織ユニットのニップローラーの材質変更、ローラー数の低減および混織機構の条件変更等を実施した結果、繊維離反の少ない混織糸を得ることが出来、本研究における繊維分散率 70%以上の目標値を達成した。また、混織後の繊維束強度低下に対しては、2水準の混織糸と混織前の炭素繊維の引張強度を比較した結果、目標である 5%以内を達成した。

- ・ 繊維分散率：79.6 (%)
- ・ 繊維強度低下率：4.3 (%)、0.4 (%)

ハイブリッド組紐加工技術・装置の最適化開発では、リワインド工程内における繊維摩擦抵抗抑制対策の最適化を進めた結果、繊維強度低下 3%以下の目標値を達成した。

- ・ 繊維強度低下：0 (%)

また、引抜成形機との連結を考慮した引き取り加工技術・装置の最適化開発では、製紐時の組糸張力および組角度の最適化を図ることにより製紐連続引抜成形が可能であることが示唆された。

ハイブリッド繊維組紐強化熱可塑性樹脂筒状等複合材の成形条件の最適化開発研究では、PA66 繊維を母材樹脂とした AF/CF 繊維ハイブリッド組物における引抜成形における最適設計を構築できた。本研究の成果により、組物強化基材が十分加熱され、含浸に必要な真の成形時間を満たせる成形速度にて硬質クロムメッキ処理された金型を用いた際の引抜成形は以下の未含浸率を示し、本研究における目標値を達成することができた。

- ・ 組糸の未含浸率：0.81 (%)
- ・ 中央糸の未含浸率：0.94 (%)

また、積層理論より算出された理論弾性率に対する実験値が占める割合である理論弾性率達成率は、本研究における目標値である、90 (%) を達成することができた。

ハイブリッド繊維強化熱可塑性樹脂筒状複合材の接合条件の最適化および評価では、ハイブリッドパイプの三点曲げ衝撃吸収エネルギーが AFRP ロッドと同等で、ロッドとパイプ接着後の引張弾性率が 36GPa 以上、かつ継手部引張試験時の引張強度がロッドの引張強度以上という目標に対し、パイプ内壁面に特殊樹脂を塗布した試験片、およびパイプ内壁面を目荒らした試験片において、上記目標を達成した。

- ・ 三点曲げ衝撃吸収エネルギー：37.4 (J)
- ・ 引張弾性率：目荒らし 57.1 (GPa)、特殊樹脂 61.6 (GPa)

特にパイプ内壁面に特殊樹脂を塗布した場合の接着効果が大きく、今後、内壁面目荒らしと組み合わせる条件を検討することにより、さらなる接着力の向上が推測され、パイプ長さをさらに短縮し、実用化を図ることが期待できる。