

平成30年度中小企業経営支援等対策費補助金

(戦略的基盤技術高度化支援事業)

『航空機繊維強化樹脂材料の高効率曲面仕上げを
可能とするフレキシブルメタルシートの実用化開発』

研究開発成果報告書

令和元年 5月

担当局 : 中国経済産業局
事業管理機関 : 公益財団法人ひろしま産業振興機構
研究等実施機関 : 法認定事業者 株式会社オリエント
研究等実施機関 : 株式会社アイテック
研究等実施機関 : 広島県立総合技術研究所

目 次

第1章 研究開発の概要	P1
1. 1 研究開発の背景	P1
1. 2 従来技術の問題点	P2
1. 3 研究の概要	P2
1. 4 開発目標	P4
1. 5 課題と解決方法	P4
1. 6 研究体制	P9
1. 7 管理員及び研究員	P10
1. 8 共同研究推進委員会	P11
1. 9 成果の概要	P12
1. 10 当該研究開発の連絡窓口	P14
第2章 本論	P15
2. 1 【Ⅰ. フレキシブルメタルシート目立て刃形の高度化】	P15
2. 1. 1 【Ⅰ－1】フレキシブルメタルシートの目立て加工機の開発	P15
2. 1. 2 【Ⅰ－2】フレキシブルメタルシート目立て刃形状開発	P15
2. 2 【Ⅲ. フレキシブルメタルシートへの砥粒の強固な付着を実現する高機能 CNT複合メッキ技術の高度化】	P18
2. 2. 1 【Ⅱ－1】CNT複合メッキ液調製法の確立	P18
2. 2. 2 【Ⅱ－2】CNT 複合メッキ条件の確立	P22
2. 3 【Ⅲ. フレキシブルメタルシートの機械的特性の品質基準の構築】	P24
2. 3. 1 【Ⅲ－1】断面組織及び硬度評価	P25
2. 3. 2 【Ⅲ－2】柔軟性評価	P26
2. 3. 3 【Ⅲ－3】耐摩耗性評価(切削性能)	P28
第3章 全体総括	P31
3. 1 補助事業の成果	P31
3. 2 研究内容総括	P31
3. 3 補助事業終了後の技術的課題	P32
3. 4 フレキシブルメタルシートの事業化見通し	P32
3. 5 事業化展開	P33

第1章 研究開発の概要

研究開発では、航空機で使用されている繊維強化樹脂部材の精密仕上げ加工に係る技術分野において、(株)オリエントが保有するやすり技術を適用し、切削能力、耐久性が高く、目詰まりのない高機能性を有し、自由曲面にフレキシブルに沿い切削・研磨できる、世界初の0.5 mmの耐摩耗性・弾性回復力のあるフレキシブルメタルシートの開発及び事業化を図るものである。

1.1 研究開発の背景

航空機製造業界では、高機能化、軽量化を図り大幅な燃料節約を行う目的で、ボディーをはじめ、自由曲面形状に成形された CFRP、アラミド繊維等の繊維強化樹脂部材が多量に用いられている。図 1 は、ボーイング 787 における繊維強化複合材料の使用部位と使用比率を例示したもので、複合材料は機体構造の約 50%に使用され、この比率は今後さらに高まるものと考えられている。

本来、CFRP、アラミド繊維等の繊維強化樹脂は、むき出しで使われるため、なめらかな表面に仕上げられている。仕上げ現場では、切断面や締結用リベットを挿入する穴加工後のエッジ部の仕上げ、繊維強化樹脂成形部材同士や、補強用として取付けるリブを接合した際の接合面にはみ出した接着剤の除去に苦慮している実態がある。図 2 にアラミド繊維強化樹脂の端部がきれいに切断されていない例を示す。

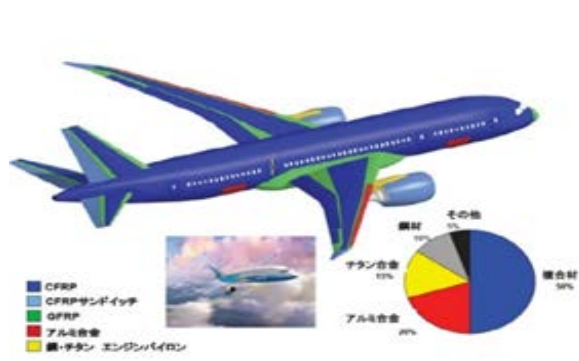


図 1 航空機における繊維強化複合材料の使用例



図 2 アラミド繊維強化樹脂切断部

仕上げ作業は、対象物が大きく自由曲面形状のため、金属やすりは使いづらく、紙やすりを用いた手作業が主体である。繊維強化樹脂の研磨では、織り込まれた繊維に方向性があるため、これが原因で研磨精度を低下させている。

CFRP の繊維は比較的切れ易いが、アラミド繊維強化樹脂に用いられている繊維は切れにくく、目詰まりによる切削性の悪化で、作業性が著しく低下している。そのため、目詰まりが無く、耐摩耗性、耐久性に優れ、精密研磨できる名刺サイズ、はがきサイズで、曲げR10 cm程度の自由曲面に沿い、弾性変形可能なやすりで、将来的には、それを自動加工機の先

端部に取付け、自動研磨できる状態にしたいとの強いニーズがある。

呉市仁方のやすりは、全国シェア 95%(2010 年度)を占める江戸時代から続く伝統的地場産業である。法認定事業者の(株)オリエントは伝統的工法によるやすりづくりを継承しながら、「磨く」をキーワードとした新技術・新製品開発に取り組んでおり、本事業は航空機製造業者のニーズに応える革新的なやすりの提供を行うものである。

1.2 従来技術の問題点

繊維強化樹脂の研磨は手作業で、紙やすりやコンパウンド系のものを布にまぶして使われることが多く、切れ味向上のため、基材にダイヤモンドなどのコーティングを施しているものがある。

また、基材に研磨材を接着したシート状のやすりは、基材にヴァルカナイズド・ファイバー、ポリエチレンテレフタレート、不織布を使用し、研磨材には、ダイヤモンド、炭化ケイ素(SiC)などを用いて、目詰まりしにくく曲面の研磨を容易にしたものがあるが、金属や樹脂の研磨に適用されるもので、繊維強化樹脂を精密に研削できるものはない。

ニーズのある航空機製造企業の作業現場においては、研磨材がアルミナ(Al_2O_3)で 150 番手の紙やすりを使用しているが、目詰まり(図 3)や砥粒の脱落で切削性が低下するため、切削能力が高く、自由曲面に倣い、精密研磨ができ、耐久性のあるやすりを求めている。



図 3 紙やすりの目詰まり

1.3 研究の概要

従来の目立て方法で成形した刃は、図 4 に示すような先端が一方方向に尖った形状のものであるのに対し、新たに考案した刃形状は、図 5 のように、タガネで三方向から目立て(「トリプルカット」と称す)を施すことで刃先方向を変化させ、一つの刃先に異方向に三つの尖った部分が成形された刃形状を新たに考案し、特許申請(特願 2016-110655)を行った。

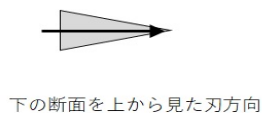


図 4 従来の目立て刃形状

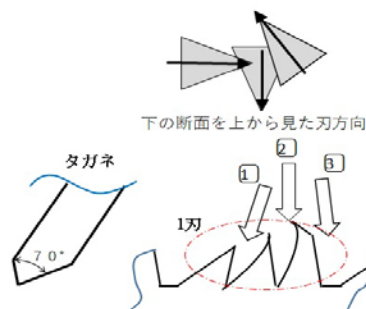


図 5 特許申請 トリプルカット刃

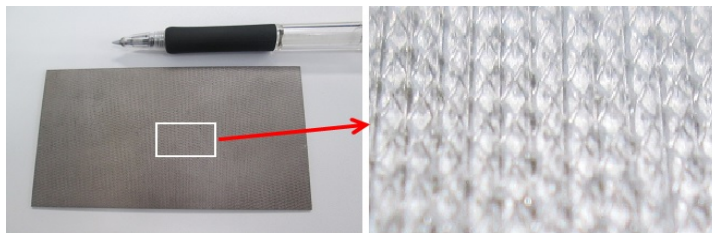


図 6 板厚 1 mm のステンレス板にトリプルカットしたメタルシート

この検証として、既存の目立て加工機を改造し、手作りで厚さ1mmのステンレスの板に、トリプルカットを試みたものを図 6 に示す。結果、繊維の方向に関係なく研削することが可能となり、仕上げ時間を削減できることが実証できたが、航空機製造企業より、特にアラミド繊維強化樹脂の研削に対し、さらに切削性の高いトリプルカット刃形状を要求された。

① 柔軟性確保の検討

1 mm厚さのステンレス製メタルシートでは、全く柔軟性に欠けることは明らかで、航空機製造企業での評価を受けた結果、厚さ 0.5mm 以下のステンレスが柔軟性（以下「フレキシブル性」という）が十分あるとの判断に至った。

② 製造技術に関する検討

事前の取組で、既存の目立て加工機を改造し、板厚 0.5mm のステンレス板に 0.15～0.2mm の切り込み深さの順目と逆目の交差したトリプルカット加工を試みた。その結果、図 7 に示すように、目立ての加圧力でステンレス板が変形し、目立てを高精度に施すことが困難であることが判明し、専用の目立て加工機が必要となった。



図 7 板厚 0.5 mm のステンレスシートへのトリプルカット結果

① 耐久性の検討

耐久性を高めるためトリプルカットした刃に、ダイヤモンド砥粒をコーティングしたものを試作し、繊維強化樹脂材を研削して評価した。その結果、目詰まり、ダイヤモンド砥粒の脱落で耐久性に課題があることが解った。

1.4 開発目標

本事業は、これまでの取組みから得られた知見より、航空機用繊維強化樹脂部材の自由曲面表面を仕上げ加工するやすりにおいて、これまでにはない研削能力が高く、高効率仕上げ加工を可能とする、高耐久性で長寿命なフレキシブルメタルシートを具現化し、航空機製造企業の作業効率の向上と、最終製品の品質向上による国際競争力の強化に貢献できる技術の実用化開発である。

目標とするフレキシブルメタルシートの特徴を以下に示す。

- i) はがきサイズから名刺サイズのメタルシート
- ii) 押付け力で、仕上げ加工対象の自由曲面に柔軟に弾性変形し密着する、弾性のある板厚 0.5 mm のメタルシート。
- iii) 従来のやすりの切削機能と、紙やすりの研磨機能をあわせもつことで、繊維強化樹脂表面を高精度に仕上げられる、これまでにない画期的な目立て刃形状を有する。
- iv) 目詰まりがなく、耐摩耗性、耐久性に優れているメタルシート。

開発目標を以下に示す。

開発目標	➡ <u>切削能力は既存紙やすりの 3 倍。</u> ➡ <u>切削精度は 1 μm。</u> 全面にわたりむらがなく表面粗さ 1 μm を達成。 ※航空機製造企業では、紙やすりによる研磨で 3～6 μm の仕上げ ➡ <u>耐摩耗性、耐久性は既存紙やすりの 15 倍。</u> 紙やすりの 15 倍の耐久性と良好な切削性を維持し、その低下は漸進的である。 ➡ <u>製造時間は 1 枚当たり 1 分間。</u>
------	--

1.5 課題と解決方法

航空機などに用いられている繊維強化樹脂部材(CFRP、アラミド繊維強化樹脂等)の自由曲面表面の仕上げ加工において、切削能力、耐久性、作業性を高め、精密仕上げ可能なフレキシブルメタルシートの開発では、(株)オリエントがこれまでに蓄積してきた目立て技術から、航空機製造企業のニーズに対応しながら課題解決を行う。

尚、フレキシブルな金属シートとして、板厚 0.5 mm で弾性回復力を有するステンレスを選定した。

新技術の課題とその解決のための開発実施プロセスの概略を図 8 に示し、その具体的内容を次に説明する。

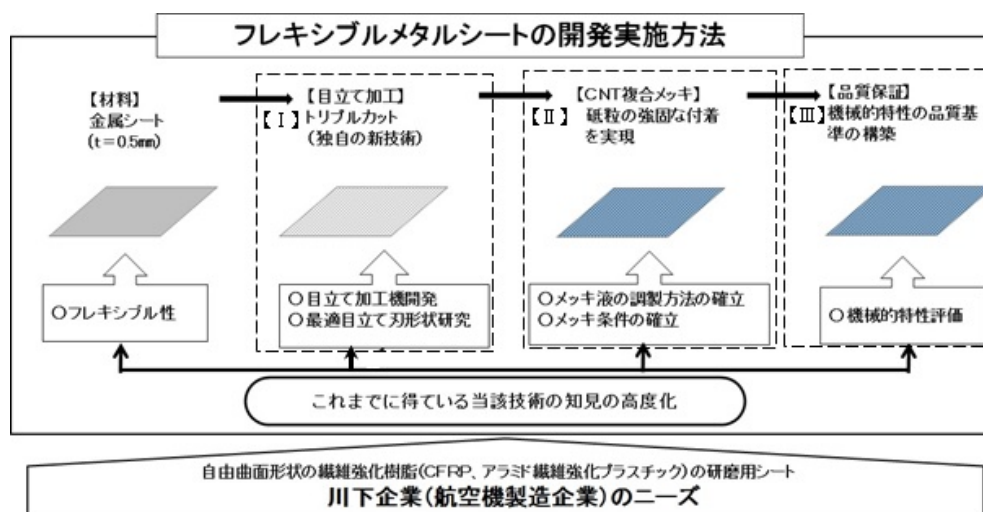


図 8 フレキシブルメタルシートの開発実施プロセス

I. フレキシブルメタルシート目立て刃形の高度化

I-1 フレキシブルメタルシートの目立て加工機の開発

熟練技術者が現有の目立て加工機を用いて、板厚 1 mm のステンレス製シートへの目立ては可能であるが、板厚が 0.5 mm と薄くなると、目立て時の加圧力でシートが変形する。

また、板厚が薄くなると、加圧時の抵抗の影響を受けやすくなるため、既存の目立て加工機では、安定した加圧力の維持とその強さの微調整が困難で、トリプルカットによる刃形状を決める目立て方向、タガネの打込み角度の設定もラフで再現性に欠けるため、求める刃の精密成形加工ができない問題があった。図 9 にやすり製造に使用している既存の半自動やすり目立て加工機を示す。先端を鋭利に尖らせたタガネを、あらかじめ設定したピストン角度と打ち込み力で板材表面に打ち込む。打ち込み深さはカム形状により決まり、打ち込み力はピストン上部のハンドルを回して調整する機構である。目立て深さはやすりの材質とカムの形状とピストンのばね力、打ち込み角度等により複雑かつ微妙に変化するため、熟練技術者がばね力などを経験により調整している。

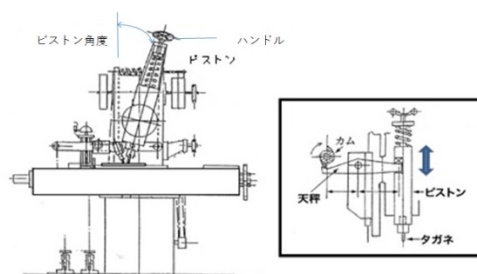


図 9 現状の半自動やすり目立て加工機

この課題解決のため、板厚 0.5 mm の金属シートに、トリプルカットの目立てを行う際の、1) 目立て圧力、2) ピストン角度、方向、3) 目立てピッチの加工条件を数値制御化して精密制御でき

る機構を設け、これまでにはない専用の目立て加工機を新たに開発する。

I-2 フレキシブルメタルシート目立て刃形状開発

研削対象部材である繊維強化樹脂、特に難削なアラミド繊維強化樹脂に対し、切削性能の高い目立て刃形状が要求される。そこで、板厚 0.5 mm の金属シート表面に、紙やすりと同様に、どの方向から磨いても研削可能なフレキシブルメタルシートの目立て刃形状を開発するため、(株)オリエントが独自に考案した、トリプルカットによる目立て加工技術を適用することにした。通常のやすりの目立て刃が 1 枚で独立しているのに対し、トリプルカットによる目立ては 3 枚の刃が異方向に且つ不揃いに成形された特徴を有するものである(図 10)。この不揃いの刃が繊維の切削性を向上させ、異方性が自由方向の研削を可能としている(図 11)。

【I-1】で開発した目立て加工機を用いて、CFRP やアラミド繊維強化樹脂研磨に最適な目立て角度、刃の角度や深さ、ピッチを検討し、切削性の検証と川下業者の要求への適合の両面から、トリプルカット刃形の高度化を図り、必要に応じ、繊維強化樹脂の種類ごとに適した、複数の目立て刃形状を決定する。

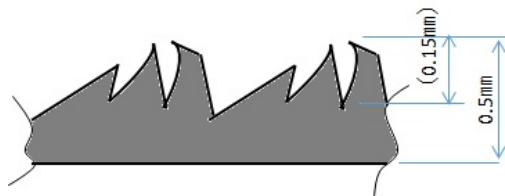


図 10 フレキシブルメタルシートの目立て刃形状

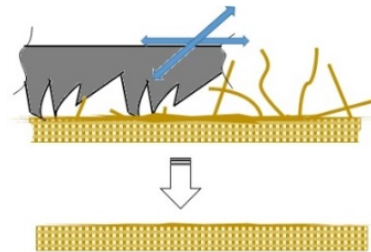


図 11 アラミド繊維強化樹脂の研磨イメージ

II. フレキシブルメタルシートへの砥粒の強固な付着を実現する高機能CNT複合メッキ技術の高度化

トリプルカット刃形を有するフレキシブルメタルシートの切削性を保持するためには、刃面への耐摩耗性の付与や、研削加工時に発生する熱を逃がすための熱伝導性が求められる。これに対して、研削性能の高い砥粒の複合メッキが有効であるが、その耐久性において砥粒の脱落が問題となる。耐摩耗性を高めるダイヤモンド砥粒コーティング技術において、砥粒と化学的結合力が高く、密着性(保持力)を高められるCNT複合メッキが注目されており、開発するフレキシブルメタルシートにもこの技術を適用することにした。しかし、CNT 複合メッキは金属加工向けに開発されたものであり、我々が対象としている繊維強化樹脂部材加工用の複雑・微細形状のメタルシートでの効果の検証はなされていない。砥粒の種類、用途や形状に応じて CNT 複合メッキ条件は変わるものと推定される。

そこで、メッキ技術の課題とそれを解決するために、以下の取組を行う。

II-1 CNT 複合メッキ液調製法の確立

CNT は繊維形状で難溶性のため、メッキ液中で絡み合うという課題がある。そのため分散

剤を含有させるが、対象となる柔軟なメタルシートに成形された、微細でシャープに尖った刃部に強固に付着させるためと、量産性を考慮して、メッキ浴槽内で長期間分散状態を保つことが可能な最適メッキ液調製法の確立が求められる。

そこで、産業技術総合研究所が過去にワイヤーソーに CNT 複合メッキする技術開発で得た CNT の分散剤に関しての知見を活用し、メッキ液中で CNT を分散させる分散剤を、これまでに実績のある界面活性剤、もしくは高分子の中から最適なものを選択し、その処理方法を開発し、CNT 複合メッキ調製直後の分散性、長期安定性を評価する。

II-2 CNT 複合メッキ条件の確立

フレキシブルメタルシートに安定して均一にコーティングするため、選定した分散剤を使用し、CNT サイズ、攪拌方法、浴温度、電流密度等の最適条件を確立しなければならない。

この開発においては、ニッケルを主成分としたメッキ浴に浸漬させ、超音波振動を加えた状態で電解メッキ又は無電解メッキ法によりナノカーボン繊維複合金属メッキ皮膜を基材に形成する製造方法を確立し、「ナノカーボン繊維含有電着工具とその製造方法」に関する特許出願(特開 2007-253318)されている、秋田県立大学の鈴木教授よりアドバイスを得ながら進める。

III. フレキシブルメタルシートの機械的特性の品質基準の構築

開発するフレキシブルメタルシートは、全く新規のものであり、その特性の良否を確認する標準化されたものがない。そのため、繊維強化樹脂表面を精密研削するために求められる特性を、ユーザーである航空機製造企業に確認しながら、以下に示す評価を通じて品質保証するための基準を構築する必要がある。

機械的特性評価は、汎用組やすりの切削性能評価試験機を独自開発し、やすり協同組合と連携して豊富なデータを保有している、広島県立総合技術研究所西部工業技術センター加工技術研究部との連携のもとに実施する。

III-1 断面組織および硬度評価

評価は、デジタルマイクロスコープ(HILOX LH-7700)や光学顕微鏡、走査型電子顕微鏡(日本電子 JSM-6510A)を用い、メッキ層中の砥粒分散度や集中度を評価するとともに、ステンレスシート基材断面の微小硬度(ミツトヨ MVK-G2)を測定。

バネ特性を有する薄板の金属シート基材の種類によっては、目立て加工(塑性加工)条件によって、結晶粒微細化や加工誘起マルテンサイト変態に起因した、独自の表面硬化現象が期待され、そのメカニズムを明らかにする。

III-2 柔軟性評価(フレキシブル性能)

フレキシブルメタルシートを被削材曲面 R に応じて変化するたわみ量の評価は、押し曲げ試験(JIS Z2248)をオートグラフ(島津 AG-25TA)によって実施した。曲げ試験後の曲げ部

について、砥粒脱落やメッキ層の剥離状態を電子顕微鏡で観察し柔軟性限界の評価と、疲労試験機(島津サーボパルサーEHF)などにより、繰り返し曲げの耐久性評価についても最終確認する。

Ⅲ-3 耐摩耗性評価(切削性能)

手作業による仕上げ研削条件を想定し、平面－平面往復摩耗試験機(新東科学 TYPE38)を用いて耐摩耗試験(JIS K7125)を実施する。

平面試験片サイズはJIS規格に準拠し、ユーザーが希望するはがきサイズで、現場での作業環境を反映させる。押し付け力や往復速度などの各摩耗条件によって、試験後の被削重量を計測し、従来SiC紙やすりと比較した飛躍的な切削性能の向上を明らかにする。

試験中は砥粒分布状態や金属シート基材硬度に起因した動的摩擦係数の推移を確認する。試験後は、メタルシートの表面劣化を観察し、切削性の限界について考察するとともに、被削材の表面面粗度は、粗さ計などを用いて調査し、研削精度の評価を行う。

また、被削材とメタルシートそれぞれに、温度モニター装置(キーエンス MR500)を付随させ、複合メッキに分散させたCNTの熱排出(熱伝導性)の効果も併せて確認する。

1.6 研究体制

研究開発体制を図 12 に示す。

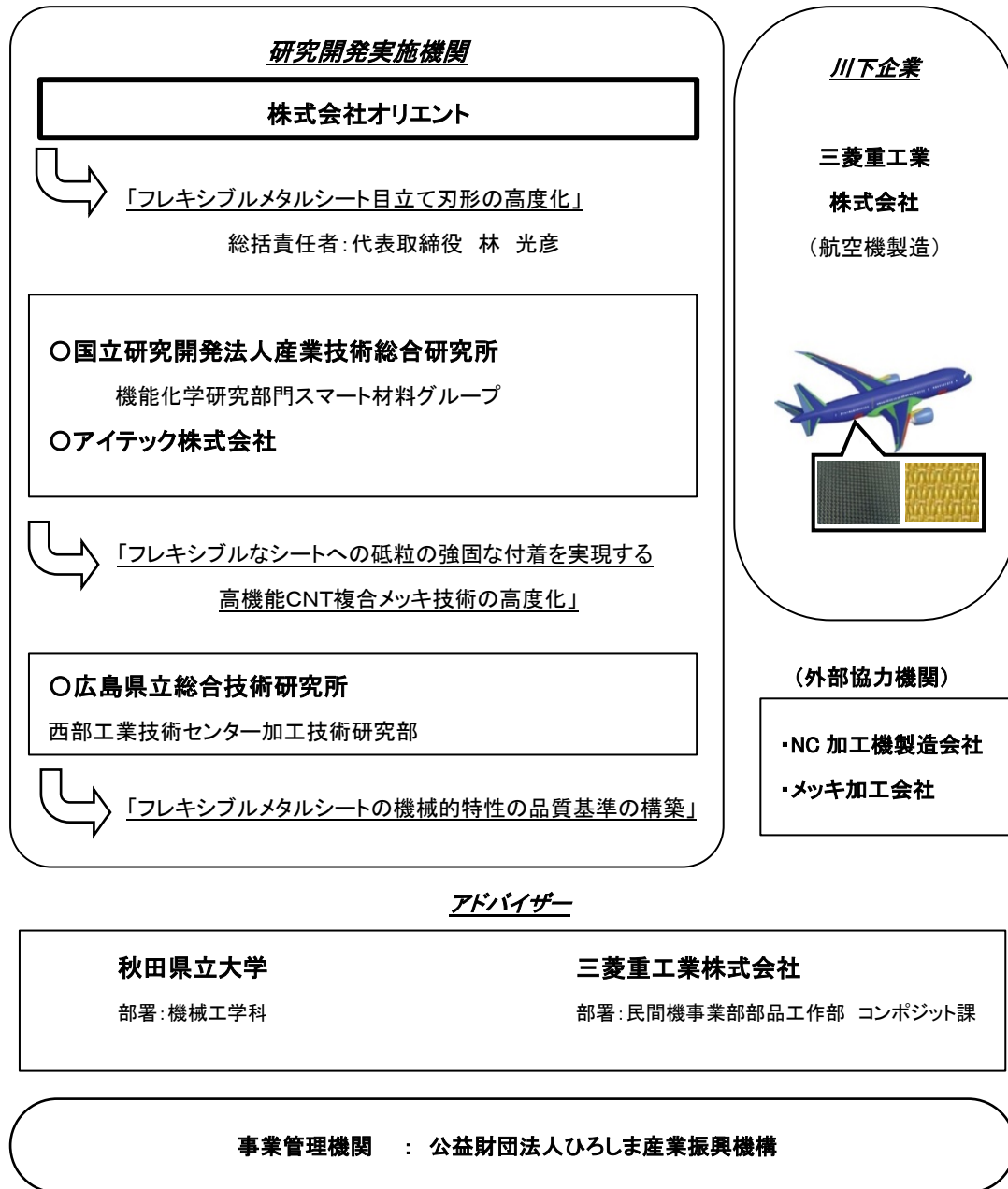


図 12 研究体制

1.7 管理員及び研究員

(管理員)

公益財団法人ひろしま産業振興機構

氏 名	所 属 ・ 役 職	実施内容
神田 敏和	研究開発支援センター 参事	事業全体の 管理と運営
谷村 敏明	研究開発支援センター 推進委員	

(研究員)

株式会社オリエント

氏 名	所 属 ・ 役 職	実施内容
林 光彦	代表取締役	I (I-1、I-2)
矢式 良行	開発部 部長	
井村 千秋	製造部 職長	
上田 智貴	製造部 担当	
岡田 沙織	業務部 企画担当	
小櫻 よしえ	業務部 担当	

国立研究開発法人産業技術総合研究所

氏 名	所 属 ・ 役 職	実施内容
吉田 勝	材料・化学領域機能化学研究部 副研究部門長	II (II-1)
松澤 洋子	スマート材料グループ 研究グループ長	
神徳 啓邦	スマート材料グループ 研究員	

株式会社アイテック

氏 名	所 属 ・ 役 職	実施内容
黒田 泰広	新事業開発本部 本部長	II (II-2)
小泉 将治	新事業開発本部 課長	
高原 彬	新事業開発本部 研究員	

広島県立総合技術研究所西部工業技術センター

氏 名	所 属 ・ 役 職	実施内容
縄稚 典生	加工技術研究部 部長	III (III-1、III-2、III-3)
府山 伸行	加工技術研究部 副部長	
森下 勇樹	加工技術研究部 主任研究員	
長岡 孝	加工技術研究部 研究員	

1.8 共同研究推進委員会

推進委員会委員

所 属	所 属 ・ 役 職	氏 名	摘 要
株式会社オリエント	代表取締役	林 光彦	委員長 (総括研究代表者)
	開発部長	矢式 良行	委 員
	取締役	西岡 賢	オブザーバー
国立研究開発法人 産業技術総合研究所	材料・化学領域 機能化学研究部門 副研究部門長	吉田 勝	副委員長 (副総括研究代表者)
	材料・化学領域 機能化学研究部門 スマート材料グループ 研究グループ長	松澤 洋子	委 員
	材料・化学領域 機能化学研究部門 スマート材料グループ 研究員	神徳 啓邦	委 員
広島県立総合技術 研究所西部工業技術 センター	加工技術研究部 部長	縄稚 典生	委 員
	加工技術研究部 主任研究員	森下 勇樹	委 員
	加工技術研究部 副部長	府山 伸行	委 員
	加工技術研究部 研究員	長岡 孝	委 員
アイテック株式会社	取締役兼執行役員 新事業開発本部 本部長	黒田 泰広	委 員
	新事業開発本部 課長	小泉 将治	委 員
	新事業開発本部 研究員	高原 彬	委 員
三菱重工業株式会社	防衛・宇宙セグメント 航空機・飛翔体事業部 航空機製造部 コンポジット課 課長	長縄 暢	委 員 (アドバイザー)
秋田県立大学	機械工学科 教授	鈴木 庸久	委 員 (アドバイザー)

1.9 成果の概要

I. フレキシブルメタルシート目立て刃形の高度化

フレキシブルメタルシート目立て刃形の高度化は、(株)オリエントが主体となり、フレキシブル性のある SUS304 シートに、トリプルカットの目立て加工が可能な専用の加工機を開発し、その加工機を用いて、繊維強化樹脂を代表する、アラミド繊維と CFRP に対して切削性能が高く、耐久性に優れた刃形状で、名刺サイズ及びはがきサイズのシートを開発した。

I-1 フレキシブルメタルシートの目立て加工機の開発

専用の目立て加工機を製作し、信頼性向上を図るための改造を進めながら、数値制御によるトリプルカットで、名刺サイズ及びはがきサイズのフレキシブルメタルシートを製作可能とする、これまでにはない目立て加工機を完成させた。

I-2 フレキシブルメタルシート目立て刃形状開発

開発した目立て加工機を使用し、フレキシブルメタルシートの試作加工と、その評価を繰り返して実施し、切削性が高く耐久性に優れた刃形状にするための目立て加工条件を見出した。その結果、アラミド繊維に対して、切削量は紙やすりの 2.3 倍、切削精度 $2\mu\text{m}$ 、耐久性は 15 倍以上、CFRP に対して、切削量は紙やすりの 4.6 倍、切削精度 $3.5\mu\text{m}$ 、耐久性は 15 倍以上の性能があるフレキシブルメタルシートを完成させた。

II. フレキシブルメタルシートへの砥粒の強固な付着を実現する高機能CNT複合メッキ技術の高度化

航空機用部材として多く使用されている CFRP を研削するフレキシブルメタルシートには、耐摩耗性及び切削性能を高めるため、無電解 Ni-P で CNT、ダイヤモンド複合させたメッキ処理を行うことにした。この複合メッキ技術の高度化を図るため、産業技術総合研究所において、CNT 複合メッキ液調製法の確立を、アイテック(株)で、その調製された液を用いた最適メッキ条件の確立を行った。

II-1 CNT複合メッキ液調製法の確立

最適な分散剤及び CNT の選定とメッキ液調整法の確立に取り組んだ。選定した CNT について、メッキ液中での CNT 高濃度分散化評価と、CNT 複合メッキにおける長期分散安定性評価を行い、フレキシブルメタルシートに安定して複合メッキ可能な CNT 複合メッキ液調整条件を確立した。

CNT 高濃度化評価では、CNT 全て 8 倍の高濃度化が可能であった。また、これらの CNT を多糖類 4 種類で分散処理し、3 カ月間透過率測定を行った結果、いずれも良好な分散状態にあることを確認した。また、分散状態の安定性を評価する指標として、多糖類に包まれた CNT の表面物性と粒径の測定を行った結果、どの CNT も分散液中で負の表面電位を示すこと、粒径はほぼ同じ大きさに微細化・分散されていることが解った。

これまでに選定したものから、フレキシブルメタルシートへのメッキに適した分散剤を 1 種類、CNT を 3 種類に絞り、複合メッキ液調製して評価した結果、3 カ月間分散して安定状態にあることを確認した。

II-2 CNT複合メッキ条件の確立

(株)オリエントで製作されたフレキシブルメタルシートに、ダイヤモンド砥粒を強固に固着させるため、産業技術総合研究所で調製された複合メッキ液を使用し、CNT 複合メッキ条件を確立した。メッキ被膜構成は、下地、ダイヤモンド複合、ダイヤモンド抑え、CNT 複合の 4 層とし、それぞれの膜厚、温度、攪拌方法等の処理条件を決定し、メッキ品質を確認した。

メッキ層の品質確認では、メッキ被膜中へ CNT が共析されていること確認し、形状の異なる CNT でも共析が可能で、共析率は CNT 添加量で調整出来ることが解った。また、CNT の耐摩耗性評価を行い、無電解 Ni-P のみのメッキ層に対し、CNT を添加したメッキ層の方が、耐摩耗性に優れており、CNT 共析率 1.5vol%が最も摩耗を抑制できることが解った。

この条件でメッキ処理したフレキシブルメタルシートで、CFRP の切削性能を確認した結果、高い切削性能と耐久性があることが実証できた。

III. フレキシブルメタルシートの機械的特性の品質基準の構築

トリプルカット及び CNT 複合メッキの最適化を図るため、(株)オリエントで試作されたフレキシブルメタルシートの断面組織及び硬度評価や柔軟性評価を、広島県立総合技術研究所にて行った。また、品質基準構築のため、性能評価方法を決定し、繊維強化樹脂のうち、航空機部品製造企業から要求が高かった、アラミド繊維、CFRP を研削対象部材とし、フレキシブルメタルシートの耐摩耗性評価(性能評価)を行い、その品質レベルを明確にした。

III-1 断面組織および硬度評価

目立て加工後の刃部の硬度評価から、加工硬化により、高い硬度になっていることを確認した。また、目立て加工時に起こるシート変形を抑制するための資料として、SUS304 シートのプレス加工時の面圧縮率とその硬化硬度の関係を明らかにした。目立て加工試作された刃の断面形状を分析し、最適目立て刃形の開発にフィードバックした。また、CNT 複合メッキされたシートの砥粒の付着状態及び、曲げ部の断面状態を評価し、砥粒の脱落やメッキ層の亀裂などの異常がないことを確認した。

III-2 柔軟性評価(フレキシブル性能)

フレキシブルメタルシートの柔軟性評価方法を決定し、CNT 複合メッキ処理して切削性能の高かった試作シートの曲げ試験を行った。その結果、目標としていた、弾性変形限界の曲げ R (曲率半径)100 mm に対し、曲げ R144mm であったが、曲げ R100mm で塑性変形はしたものの、その変形量は僅かで、フレキシブル性はあると判断した。

Ⅲ-3 耐摩耗性評価(切削性能)

フレキシブルメタルシートの切削性能評価項目を、切削量、切削精度、耐久性とし、その評価方法を決定した。アラミド繊維と CFRP を研削対象部材とし、アラミド繊維に対しては、メッキ処理なしのシートで、CFRP に対しては CNT 複合メッキしたシートを用いて性能及び耐久性評価を行った。フレキシブル性のある板厚 0.5 mm シートのアラミド繊維に対する評価では、切削量が紙やすりの 3 倍以上の目標に対し 2.5 倍前後、切削精度目標 $1\mu\text{m}$ に対し $2\mu\text{m}$ 、耐久性は紙やすりの 15 倍目標に対し 20 倍以上となり、CFRP に対する評価では、切削量が紙やすりの 4 倍以上、切削精度 $3\mu\text{m}$ 、耐久性は 20 倍以上の性能となった。

1. 10 当該研究開発の連絡窓口

(公財)ひろしま産業振興機構 研究開発支援センター

参事 神田 敏和

〒730-0052 広島県広島市中区千田町 3-7-47

電話 : (082)240-7712 FAX:(082)242-7709

E-mail : t-kanda@hiwave.or.jp

株式会社オリエント

代表取締役 林 光彦

〒737-0154 広島県呉市仁方棧橋 1511

電話 : (0823)79-1155 FAX:(0823)79-1616

E-mail : m.hayashi@orient-files.jp

第2章 本論

2. 1 【Ⅰ. フレキシブルメタルシート目立て刃形の高度化】

フレキシブルメタルシート目立て刃形の高度化においては、数値制御式の目立て加工機を開発し、トリプルカットによる目立て加工の試作とその評価から、アラミド繊維、CFRP に対し切削性能の高い刃形状のフレキシブルメタルシートを完成させた。

2. 1. 1 【Ⅰ-1】フレキシブルメタルシートの目立て加工機の開発

加工機全体の大きさは、横 1860 mm・奥行 1500 mm・高さ 1900 mmで、テーブル機構部、タガネ打込機構部、操作盤、制御ボックスで構成された、数値制御の目立て加工機を開発した(図 1)。

製作した目立て加工機により、図 2 に示す名刺サイズ及びはがきサイズ用のフレキシブルメタルシートを加工することが可能になった。

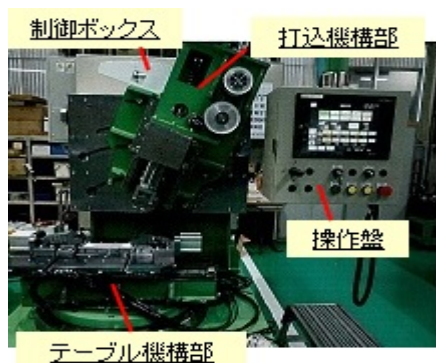


図 1 開発した目立て加工機

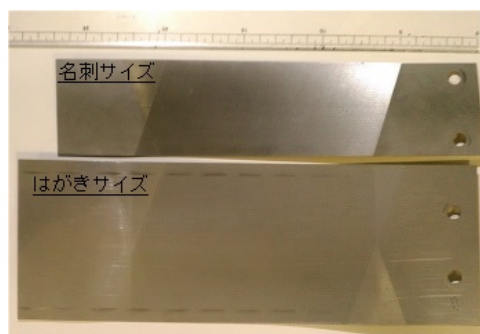


図 2 フレキシブルメタルシート

2. 1. 2 【Ⅰ-2】フレキシブルメタルシート目立て刃形状開発

繊維強化樹脂に対して切削性の高い刃形状を見出すため、【Ⅰ-1】で開発した目立て加工機を使用し、板厚 1 mmとフレキシブル性のある 0.5 mmの SUS304 シートにトリプルカットの目立てを行い、名刺サイズ及びはがきサイズのシートを試作し、アラミド繊維、CFRP に対する切削性能、耐久性を、川下企業及び【Ⅲ. フレキシブルメタルシートの機械的特性の品質基準の構築】で評価しながら、以下の目標レベルにある、フレキシブルメタルシートの最適刃形状を見出した。

目標	切削量＝紙やすりの 3 倍以上 切削精度＝1 μ m 耐久性＝紙やすりの 15 倍以上
----	---

(1) 材料の選定と硬化方法

本事業の事前の取組では、マルテンサイト系ステンレスである SUS420J2 板厚 1 mmシートに目立て加工し、熱処理により HRC40～45 (HV392～446)と硬化させた。しかし、この材料では、フレキシ

ブル性のある板厚 0.5 mmシートの市場性がなく入手困難のため、材料選定の見直しを行い、最終的には、市場性があり SUS420J2 材料と比べて価格が 1/4 から 1/5 と安価な SUS304 を選択した。

目立てした刃先を鋭くし、耐摩耗性を向上させるためには、材料表面の硬度が高い方が好ましいが、SUS304 は HV200 以下と低い。そこで、SUS304 が加工硬化で加工誘起マルテンサイト変態する性質を利用し、SUS304 シートにサンドブラストで表面硬化を行い、更にそれを目立て加工することにより、SUS420J2 に熱処理を行ったときの硬度と同等レベルにした。

しかし、目立て加工後、加工機から取り外すと、シート全体が三次元的に塑性変形する。特に板厚 0.5 mmシートの変形度が大きくなる問題を生じた。

曲がり直しの工法として、図 3 に示すように、変形したシートをウレタンゴムで挟んで、上下ローラの上に数回通過させることを試みた結果、目立てした刃を潰すことなく変形を修正できることを確認できた。

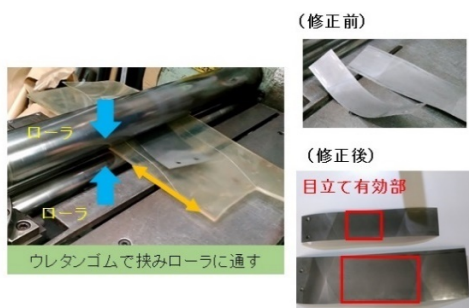


図 3 目立て後のシート変形の修正方法

(2) 最適目立て刃形状の開発

選定した SUS304 シート材料に、切削性能の高い刃を形成させるため、試作加工と、性能評価を繰り返し実施し、トリプルカットの最適目立て条件を決定した。目立て条件には、図 4 に示すように、タガネを打込むシート平面におけるやすり目の角度である「なばえ」、タガネを一定の間隔で打込んで行く「送りピッチ」、「打込角」、「打込深さ」と「タガネ刃先の角度」がある。

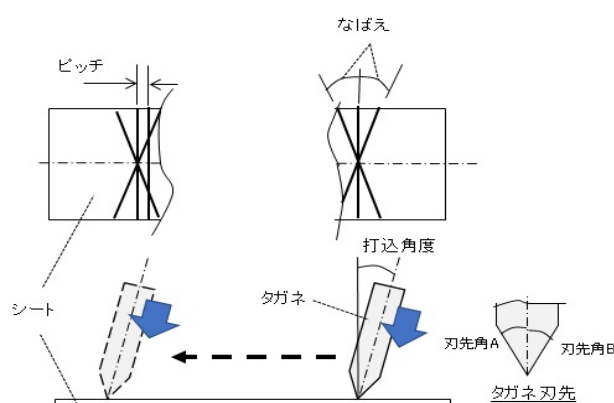


図 4 目立て条件

本事業では、特許出願したトリプルカット工法による目立てで、切削性能の高い刃形状を見出した。図 5 にその目立てしたシートと、図 6 に刃部分を 3 次元計測した画像を示す。

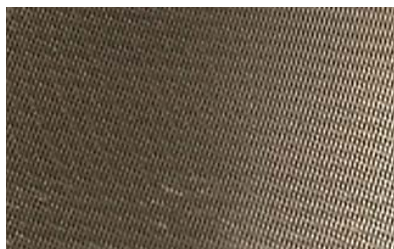


図 5 目立てしたシート

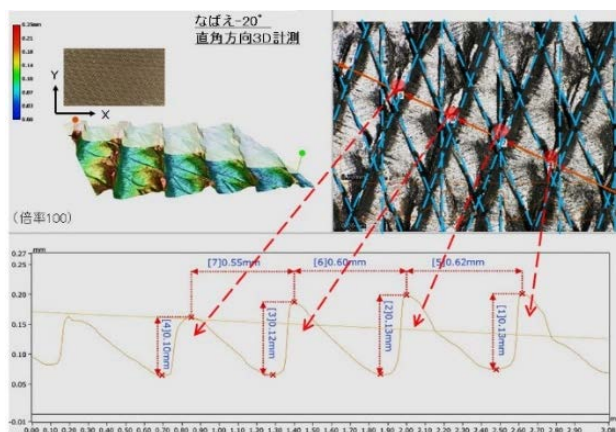


図 6 目立てした刃形状(3次元計測)

後述する、「Ⅲ. フレキシブルメタルシートの機械的特性の品質基準の構築」にて試作シートの切削性能評価を行った。アラミド繊維に対する切削性能評価は、表 1 に示す通り、紙やすり(SiC #240)が使用限界となる摺動距離 18m において、板厚 1 mmシートでは、切削量は目標である紙やすりの 3 倍であるが、板厚 0.5 mmシートは、2 倍強と若干低くなった。

表 2 に示す切削精度は、目標の $1\mu\text{m}$ にはならなかったが、板厚 1 mm及び 0.5 mmシート共 $2\mu\text{m}$ で、紙やすりの精度 $3\mu\text{m}$ より精度が高く、これまで試作した中で、最も優れた性能のシートになった。また、耐久性評価でも、紙やすりの 20 倍以上あることを確認した。

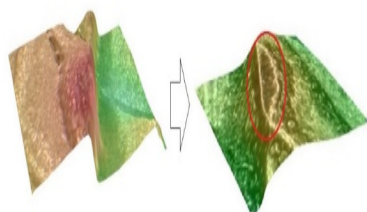
表 1 試作シート 対アラミド繊維

切削量(対紙やすり)		
摺動距離	18m	30m
1 mmシート	3.4 倍	5.2 倍
0.5 mmシート	2.3 倍	2.6 倍

表 2 試作シート 対アラミド繊維

切削精度(μm)		
摺動距離	18m	30m
1 mmシート	1.9	1.9
0.5 mmシート	2	2
SiC #240	3.3	—

次に、対 CFRP で評価を行ったが、非常に硬い材料のため、図 7 に示すように、刃先の摩耗が早く耐久性に問題があった。



(研削前) (研削後)

図 7 CFRP 研削前後の刃先

そのため、対 CFRP 用シートには、無電解 Ni-P メッキで CNT とダイヤモンド砥粒を複合させた処理を施すことで、耐久性と切削性能を向上させることにした。ダイヤモンド砥粒の大きさは、当初想定していた $1\mu\text{m}$ では、切削性能が低い結果となったため、比較対象としている #240 の紙やすりで使用されている同サイズの砥粒で、目立てした刃の高さの約 1/2 の大きさとなる $60\mu\text{m}$ に変更し、メッキ後、ベーキング処理($400^\circ\text{C}/1\text{H}$)で HV1000 と硬度を高めた。

メッキ液中における CNT の長期分散状態を保持する開発内容及び最適メッキ方法の内容は、後述の「Ⅱ. フレキシブルメタルシートへの砥粒の強固な付着を実現する高機能CNT複合メッキ技術の高度化」に記述する。

メッキ処理した表面状態を図 8 に、CFRP に対する切削量を表 3 に、切削精度を表 4 に示す。

切削量は、比較対象としている紙やすりが摺動距離 12m で使用限界となるのに対し、板厚 1 mm シートは、摺動距離 18m 以降で紙やすりの 3 倍に、板厚 0.5 mm シートは摺動距離 12m で 4.6 倍と高い結果となった。切削精度は、紙やすりが 1.3 μm に対し、板厚 1 mm シートが 5 μm 、板厚 0.5 mm シートが 3.5 μm 前後と、目標の 1 μm には至らなかったが、板厚 1 mm、0.5 mm シート共に良い精度となった。



図 8 目立て後メッキした表面

表 3 メッキ処理試作シート CFRP 切削量

(対紙やすり)

摺動距離	12m	18m	24m
1 mm シート	1.9 倍	2.8 倍	3.3 倍
0.5 mm シート	4.6 倍	5.2 倍	5.5 倍

表 4 メッキ処理試作シート CFRP 切削精度

(μm)

摺動距離	12m	18m	24m
1 mm シート	5.2	5.0	5.2
0.5 mm シート	3.5	3.6	3.3
SiC #240	1.3	—	—

また、耐久性評価でも、紙やすりの 20 倍以上の摺動距離においても、切削能力があることを確認した。

切削性能評価の詳細は、「Ⅲ. フレキシブルメタルシートの機械的特性の品質基準の構築」に記述する。

2. 2 【Ⅱ. フレキシブルメタルシートへの砥粒の強固な付着を実現する高機能CNT複合メッキ技術の高度化】

CFRP を研削するフレキシブルメタルシートは、耐摩耗性と耐久性を付加するため、ダイヤモンド砥粒と CNT を複合したメッキ処理を行う。メッキ方法としては、均一な膜厚で SUS304 にも処理が可能な無電解 Ni-P メッキを選択し、CNT の長期(目標 3 カ月以上)分散状態を保つことが可能な分散剤とメッキ液の調整法、及び最適メッキ条件を確立した。

2. 2. 1 【Ⅱ-1】CNT複合メッキ液調製法の確立

CNT は、繊維形状で難溶性であり、メッキ液中で絡み合うことから、分散剤を含有させる必要がある。ここでは、フレキシブルメタルシートの複雑・微細な刃部への CNT 複合メッキを行う上で重要となるメッキ液、分散剤等の最適メッキ液調製法の確立に取り組んだ。

具体的には、CNT を良好に分散する多糖類の選定と、共析量増を目指した CNT 高濃度化検討等を行い、CNT 複合メッキ液組成の最適化を行った。また、分散安定性評価の評価精度と作業効率を高めるため、分光評価システムを立ち上げ、および、CNT 複合メッキ液の長期分散安定性評価を行った。

(1) CNT 複合めっき液の長期分散安定性評価

【実験】

メッキ液(アイテック(株)提供)に、複数評価したなかから、絞り込んだ CNT (N、F、W-4) と多糖類 (D-1、D-2、S-1、S-2) を、それぞれ 1:1 の重量比で投入し、バス型超音波 (37 kHz, 30 min) により分散の前処理を行った。引き続き、ホーン型 (19kHz、1h) を行い、分散を促した。一晩放置したあと、複合メッキ液の様子を目視観察、及び透過率により評価した。その後、3 カ月にわたって透過率の評価を行い(図 9)、分散状態を確認した。

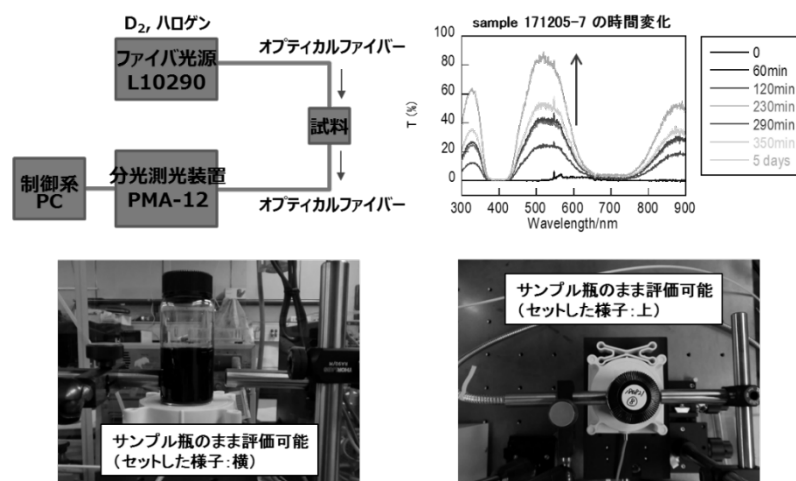


図 9 透過率変化を利用した分散安定評価システム

【結果】

1) CNT-N と 4 種類の多糖類の混合比が 1::1 となるように調製した CNT 複合メッキ液の透過率変化を図 10 に示す。何れも、良好な分散状態を 3 カ月保持可能であることが解った。

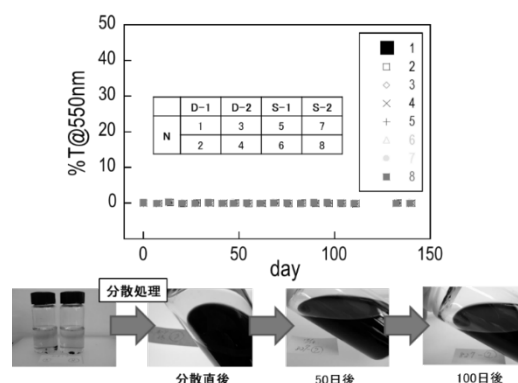


図 10 CNT-N を用いた複合メッキ液の分散安定性

2) CNT-F と多糖類(D-1、D-2、S-1、S-2)の混合比が 1:1 となるように調製した CNT 複合メッキ液の透過率変化を図 11 に示す。何れも、良好な分散状態を 3 カ月保持可能であることが解った。

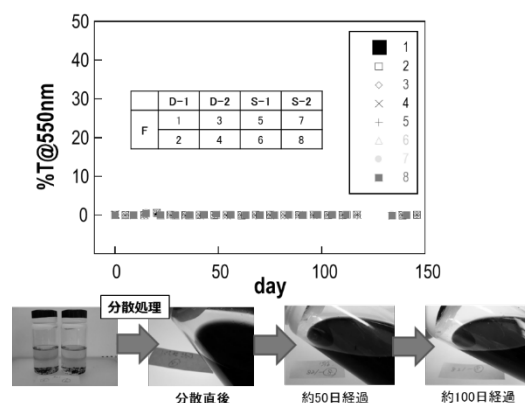


図 11 CNT-F を用いた複合メッキ液の分散安定性

3) CNT-W-4 と多糖類(D-1、D-2、S-1、S-2)の混合比が 1:1 となるように調製した CNT 複合メッキ液の透過率変化を図 12 に示す。何れも、良好な分散状態を 3 カ月保持可能であることが解った。

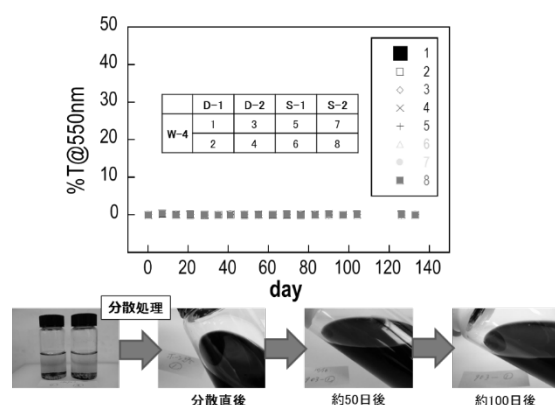


図 12 CNT-W-4 を用いた複合メッキ液の分散安定性

(2) CNT 複合メッキ液条件の確立

フレキシブルメタルシートに安定して均一に CNT 複合メッキをするためのメッキ浴の種類、CNT のサイズ、攪拌方法、浴温度、電流密度の最適条件を確立した。

CNT は種類によって径が異なるため、本用途に適用可能な CNT を見極める必要がある。最終的には、適用可能な CNT を選定し、複合メッキ液中の CNT の状態について分光評価を行った。

1) 適用可能な CNT の選定

各多糖類(D-1、D-2、S-1、S-2)と CNT(V、W-1、W-2、W-3、W-4、A、M、F、K)を用いて CNT 複合メッキ液を調製し、CNT-N 以外で適用可能な CNT の選定を行った。

【実験】

メッキ液(アイテック(株)提供)に CNT(V、W-1、W-2、W-3、W-4、A、MF、K)と多糖類(D-1、D-2、S-1、S-2)を、それぞれ 1:1 の重量比で投入し、バス型超音波(37 kHz、30 min)により分散の前処理を行った。引き続いて、ホーン型(19kHz、1h)を行い、分散を促した。一晩放置したあと、複合

メッキ液の様子を目視観察および透過率により評価した。

【結果】

新たに 5 種類の CNT (W-1、W-2、W-3、W-4、F) が複合メッキ液に適用可能なことがわかった。

図 13 に、分散が不均一となる CNT-V、M と、均一になる CNT-F を示す。



図 13 CNT の分散性評価

2) 分散状態の分光評価

分散状態の安定な CNT 複合メッキ液を得るための指標として、本検討で使用する多糖類に含まれた CNT の表面物性ならびに粒径の簡易測定を行った。

【実験】

超純水に CNT (N、F、W-4) と多糖類 (D-1、D-2、S-1、S-2) を、それぞれ 1:1 の重量比で投入し、バス型超音波 (37 kHz、30 min) により分散の前処理を行った。引き続いて、ホーン型 (19kHz、1h) を行い、分散を促し分散液とした。マルバーン製動的光散乱測定装置を用いて、分散液中の CNT の表面電位及び、CNT の粒径に依存する自己相関関数を測定した。

【結果】

何れの CNT も分散液中で負の表面電位を示すことがわかった (図 14)。分散剤に用いた多糖類の効果によるものと考察される。さらにその数値も大きく、多糖類に覆われていることで分散安定性が十分に付与されていることが示唆された。さらに、各種 CNT と各多糖類のいずれの組み合わせでも、同一の分散処理によって、ほぼ同じ大きさに微粒子化・分散されていることが、自己相関関数の測定から考察された。そして、分散が充分でなかったものや、経時変化により分離したものは、自己相関関数が全体的に右にシフトする傾向がみられ、粒径の増加により分離がおきていることが示唆された (図 15)。

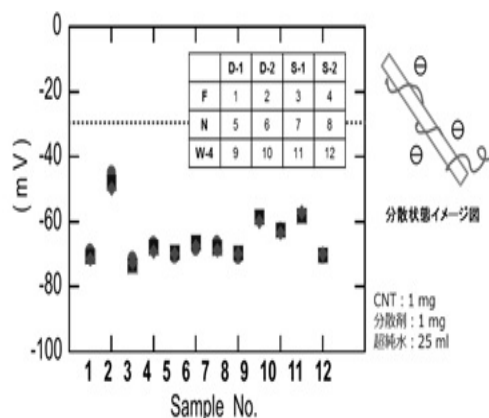


図 14 分散液中の CNT の表面電位

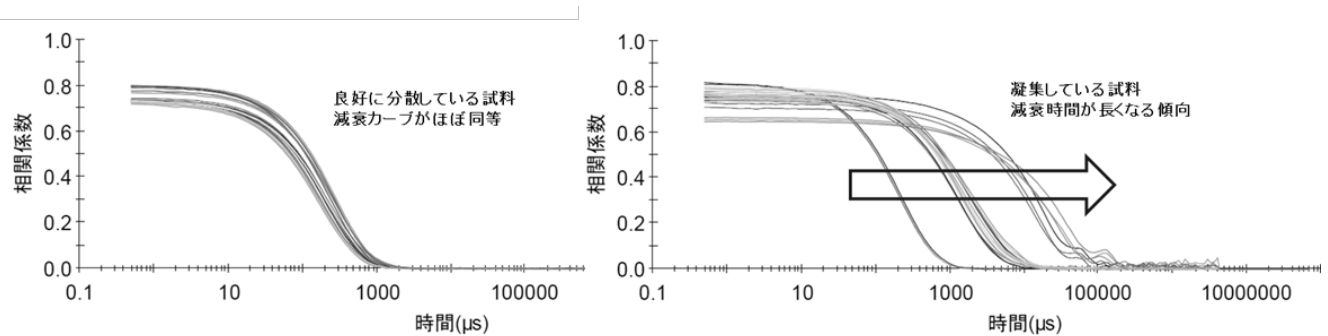


図 15 分散液中の CNT 粒子の自己相関関数

左: 良好に分散している状態。右: 経時変化等で分離がみられる状態。

2. 2. 2 【Ⅱ-2】CNT 複合メッキ条件の確立

【Ⅱ-1】で選定した分散剤と CNT の調製液を使用し、【Ⅰ-2】で試作したフレキシブルメタルシートに、無電解 Ni-P でダイヤモンドを複合するメッキ条件を決定した。CNT 複合メッキ被膜の有効性を検証するため、耐摩耗性評価を行った結果、従来技術の無電解 Ni-P ダイヤモンド複合メッキより、摩耗が小さいことが実証できた。CFRP の切削性能は、「Ⅲ. フレキシブルメタルシートの機械的特性の品質基準の構築」にて評価し、目標としていた性能にあることを確認した。

(1) CNT 複合メッキ条件

選定した分散剤と CNT の調製液を用いた、無電解 Ni-P でダイヤモンド複合メッキ条件は、CFRP の切削性能評価を確認しながら決定した。

切削性能向上のため、粒子径 $60\mu\text{m}$ 程度のダイヤモンド砥粒を固着させた。図 16 に示すメッキ模式図のように、砥粒を固着しているメッキ被膜の耐摩耗性向上と、砥粒の脱落を防ぎ、切削能力の持続力向上を図るため、被膜の最表面 4 層目を CNT 複合被膜にした。メッキ仕様を表 5 に示す。尚、最適膜厚を確認するため、砥粒サイズに対し $2/3$ の $40\mu\text{m}$ と、 $1/3$ の $20\mu\text{m}$ の 2 種類のメッキ膜厚シートを試作した。

この試作シートの SEM 画像を図 17 に示す。図 17 より、メッキ被膜中への CNT の共析が確認できた。

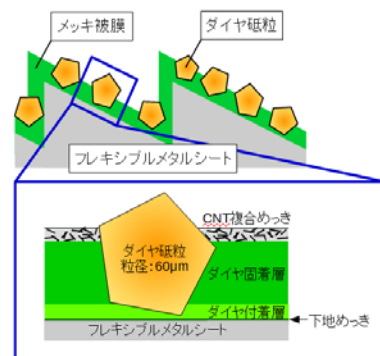


図 16 CFRP 切削向けシートのメッキ模式図

表 5 CFRP 切削用メッキ仕様

	1 層目	2 層目	3 層目		4 層目	総膜厚 (μm)
種 類	下地メッキ	ダイヤモンド複合 (砥粒 $60\mu\text{m}$)	ダイヤモンド抑え		CNT 複合 共析率 1.5vol%	
	Ni ストライク	無電解 Ni-P	電解 Ni		無電解 Ni-P	
膜厚 (μm)	0.1	2.5	試作 1	33.5	4	40
			試作 2	13.5		20
液温 ($^{\circ}\text{C}$)	室温	85	60		85	
攪拌方法	無し	無し	攪拌子		エアレーション	

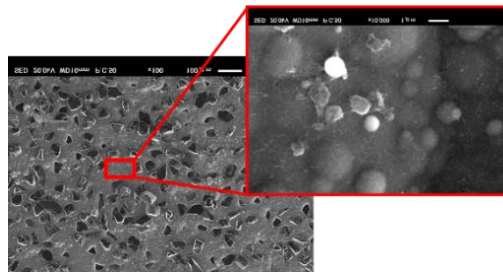


図 17 複合メッキ試作の被膜表面 SEM 観察像

総膜厚 $20\mu\text{m}$ と $40\mu\text{m}$ で CFRP の切削量を比較した結果、図 18 に示すように、膜厚 $20\mu\text{m}$ のシートが紙やすり同等で低かったのに対し、膜厚 $40\mu\text{m}$ シートは、摺動距離が増しても高い切削量を維持していたため、CNT 複合メッキの膜厚は $40\mu\text{m}$ とした。

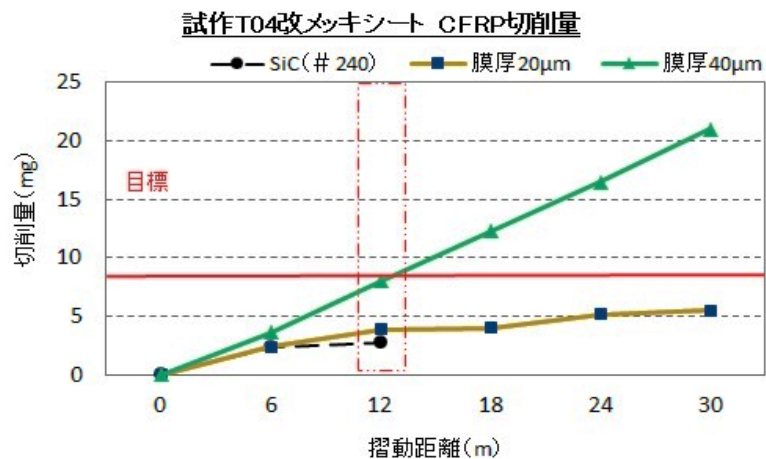


図 18 メッキ膜厚と切削量 (砥粒 $60\mu\text{m}$)

(2) 被膜の耐摩耗特性及び CFRP 切削性能評価

CNT 複合メッキ被膜の耐摩耗性向上の効果を確認するため、摺動動試験を行った。試験の内訳

を表 6 に示す。複合する CNT については【Ⅱ-1】で選定した「F」、「N」の 2 種類を用いた。CNT の共析率は 0.5vol%、1.0vol%、1.5vol% の 3 条件、比較として CNT を複合しない無電解 Ni-P メッキの計 7 種類にて試験を行った。試験に用いた往復動摩擦摩耗試験機の模式図を図 19 に示す。

表 6 摺動試験条件内訳

	1	2	3	4	5	6	7
CNT の種類	F			N			なし
CNT 共析率	0.5vol%	1.0vol%	1.5vol%	0.5vol%	1.0vol%	1.5vol%	0 vol%

試験結果を図 20 に示す。図 20 より、CNT 複合被膜は Ni-P と比較して摩耗量が少ない傾向が見られた。CNT の種類による摩耗量への大きな影響は見られなかったが、CNT の共析率では 1.5vol% の時に最も摩耗量が抑えられていた。この結果より、CNT 複合による被膜の耐摩耗性向上の傾向が確認された。

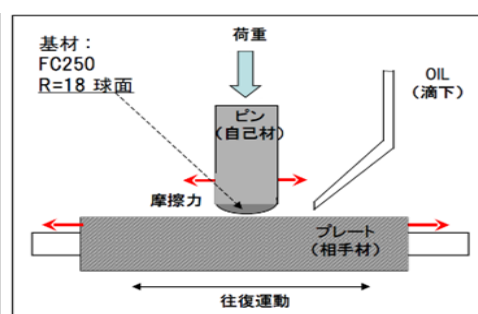


図 19 往復動摩擦摩耗試験機による摺動動試験

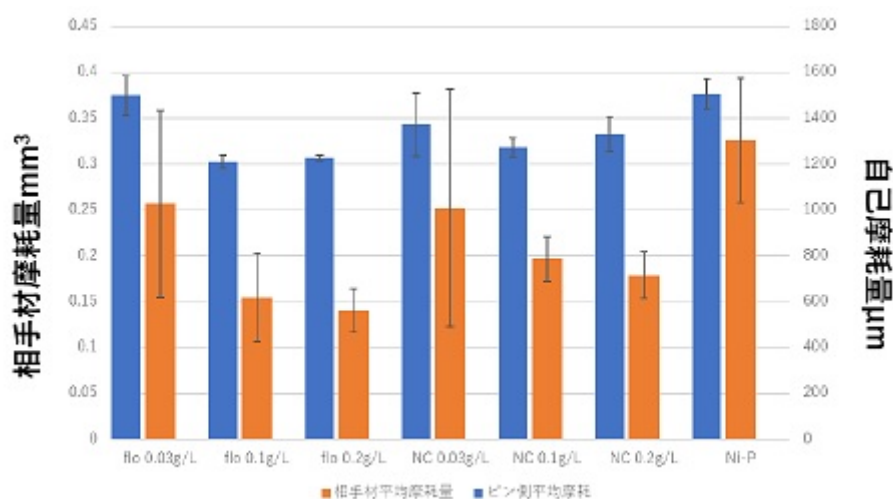


図 20 摺動試験による CNT 複合被膜の摩耗量

2. 3 【Ⅲ. フレキシブルメタルシートの機械的特性の品質基準の構築】

【Ⅰ-2】、【Ⅱ-2】で製作されたフレキシブルメタルシートの断面組織及び硬度評価と、柔軟性評価、耐摩耗性評価（切削性能）を行いながら、目標としていた性能レベルのシートに仕上げ、繊維強化樹脂表面仕上げ研削における品質基準を明確にした。

2. 3. 1 【Ⅲ-1】 断面組織及び硬度評価

(1) 断面組織評価

○目立て後の刃形状

同一目立て加工条件で試作した、板厚 1 mm と 0.5 mm のシートを観察した結果、板厚 1 mm シートは正常に刃が形成されているのに対し、板厚 0.5 mm シートでは刃のない箇所があった。この問題を目立て加工にフィードバックし、タガネ刃先角度を変更する処置をとったところ、この問題を解決することができた(図 21)。



図 21 目立て後の刃形状

○アラミド繊維研削表面

試作したフレキシブルメタルシートで、アラミド繊維表面を研削した断面を観察した結果、図 22 に示すように、アラミド繊維が正常に切断されていることを確認した。

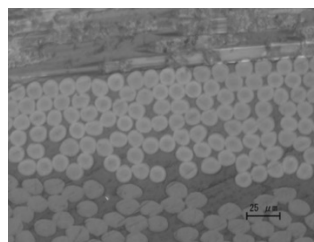


図 22 アラミド繊維研削後の断面(SEM)

○CNT 複合メッキ表面

無電解 Ni-P CNT、ダイヤモンド複合メッキしたシート表面を観察し、砥粒が均一にコーティングされていることを確認した(図 23)。

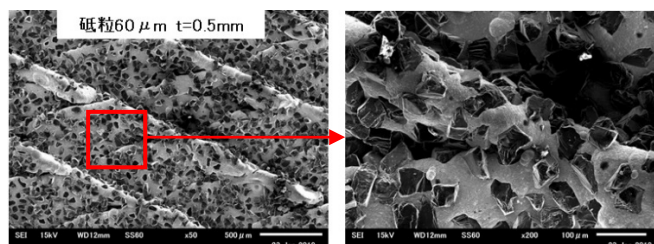
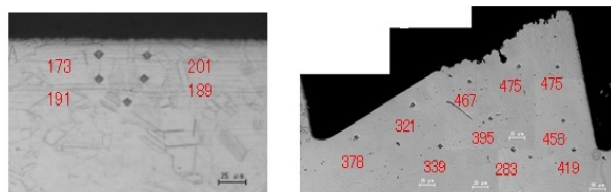


図 23 ダイヤモンド砥粒 60 μm (板厚 0.5 mm シート)

(2) 硬度評価

フレキシブルメタルシート用材料として選定した SUS304 シートに、タガネを打込んで刃を形成させる工程で、加工硬化した刃部の硬度を確認した(図 24)。目立て前の材料表面の硬度が HV200 弱に対し、目立て加工後の刃部の硬度は、HV470 前後と 2 倍以上の硬さになった。



目立て前表面硬度(HV) 目立て後表面硬度(HV)

図 24 加工硬化硬度

しかし、目立て加工でシートが塑性変形を起こす問題を生じた。そこで、タガネを打込んで HV470 に硬化したとき、どの程度の面圧縮を生じているのかを確認するため、SUS304 シート表面にプレスで力を加え、面圧縮率と硬度の関係を明確にした(図 25)。

硬化硬度 HV470 近くになるときの面圧縮率は、9%から 10%であった。今後、シートの塑性変形を小さくする対策を実施する時に、この結果を活用する。

例えば、CFRP 用シートで使用するシートは、目立て加工後、CNT 複合メッキ処理したのち、ベーキング処理で表面硬 HV1000 とするため、面圧縮率を小さくして硬度を下げる目立て条件に変更し、変形を抑制する。

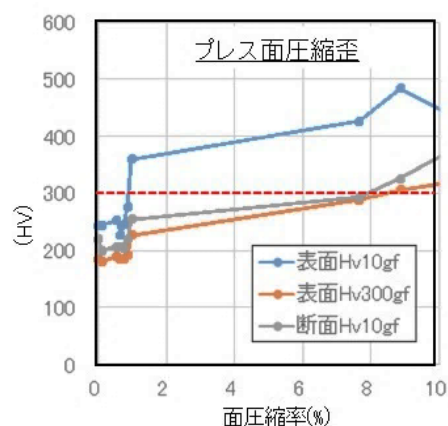


図 25 SUS304 面圧縮率と硬度

2. 3. 2 【Ⅲ-2】 柔軟性評価

柔軟性評価として、フレキシブル性の目標としていた、弾性変形限界の曲げ R100 mmを確認した。評価は、板厚 0.5 mmに目立て加工したメッキ無しシートと、無電解 Ni-P CNT、ダイヤモンド複合メッキ後ベーキング処理したシートを用いて曲げ試験を行った。

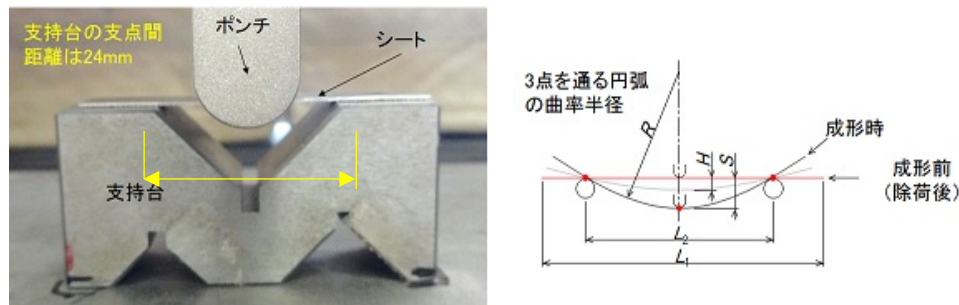


図 26 柔軟性(フレキシブル性)評価方法

曲げ試験の方法を図 26 に示す。シートの目立て表面を支持台側(下側)に向け、目立てしていない面をポンチで押し込み、そのストローク(S)ごとの曲率半径(R)と、ポンチを戻し押し込みを止めた後のシートの変形高さ(H)、弾性限界と塑性変形量を計測した。また、メッキ処理シートは、塑性変形した局部を SEM で、砥粒の脱落やメッキ層の剥離状態を観察した。

柔軟性評価結果を図 27、図 28 に示す。図 27 はメッキ無しシートの曲げ試験結果で、弾性限界の曲率半径は 73 mmと目標の曲げ R100 mmをクリアできており、曲率半径 37 mmとさらに小さくしても塑性変形量(高さ)は 0.038 mmと僅かであった。

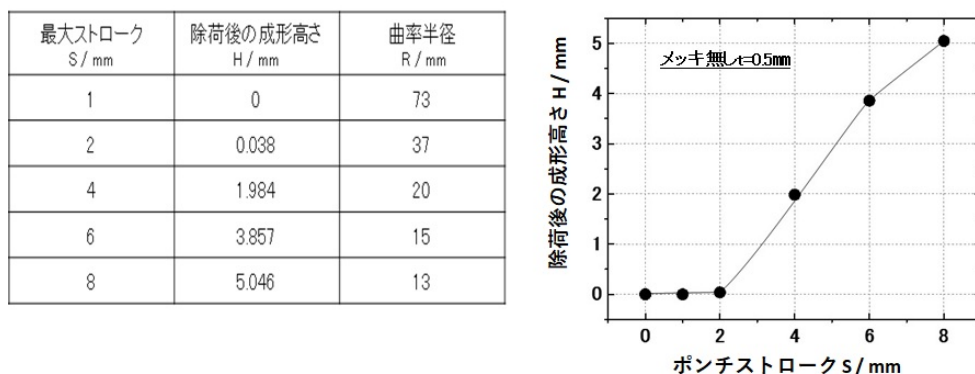


図 27 メッキ無し目立てシートの曲げ試験結果

図 28 は、メッキありのシートの曲げ試験結果で、弾性限界の曲率半径は 144 mmであったが、塑性変形量の大きさは 0.077 mmと僅かであった。また、曲率半径 20 mmで塑性変形させた曲げ部のメッキ層を観察したところ、図 29 に示す通り、ダイヤモンド砥粒の脱落や、メッキ膜の異常は見られなかった。

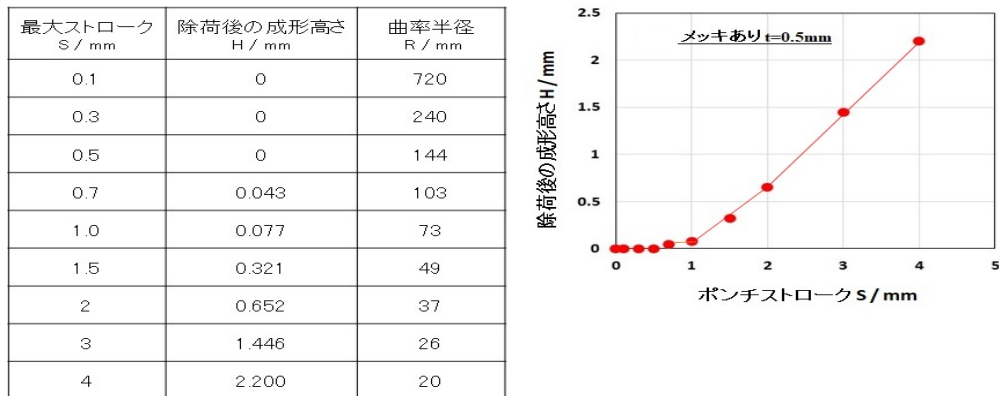


図 28 メッキあり目立てシートの曲げ試験結果

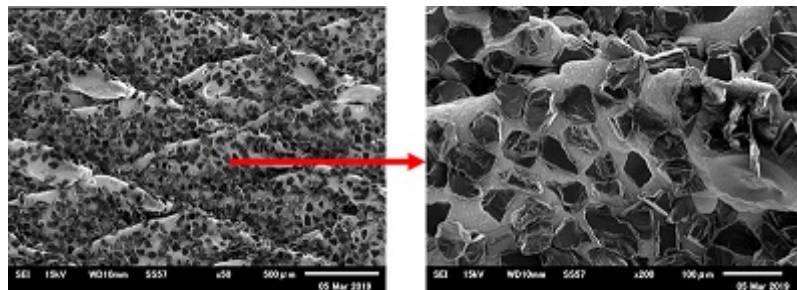


図 29 曲率半径 20mm で塑性変形した箇所のダイヤモンド砥粒状態

2. 3. 3 【Ⅲ-3】 耐摩耗性評価(切削性能)

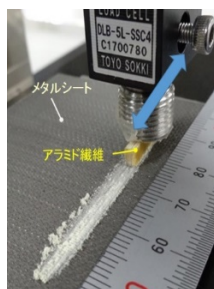


図 30 切削性能評価方法

切削精度と切削能力の評価は、図 30 に示す平面往復式摩耗試験機で行った。下側にフレキシブルメタルシート又は紙やすりを固定し、上側の摺動部分には研削対象物(アラミド繊維、CFRP)を取付け、荷重 1kg、摺動距離 60 mm/cycle、摺動スピード 3,600 mm/min、で往復運動させ、100 サイクルごとに切削対象物の重量と表面粗さを計測することで切削性能の確認を行い、耐久性は、その性能がどの位の摺動距離まで維持できるかで評価した。

本事業では、研削対象部材として、航空機部品製造企業より提供されたアラミド繊維と CFRP を用い、アラミド繊維に対しては、メッキ無しの板厚 1 mm ($t=1\text{ mm}$) と板厚 0.5 mm ($t=0.5\text{ mm}$) のシートで、CFRP に対しては、無電解 Ni-P CNT ダイヤモンド複合メッキした板厚 1 mm と板厚 0.5 mm シートで性能評価を行った。

以下に、最終試作シートで切削性能及び耐久性評価した結果を示す。

◆アラミド繊維—切削性能

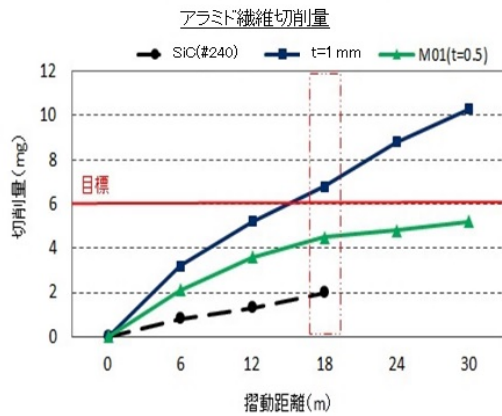


図 31 対アラミド繊維切削量

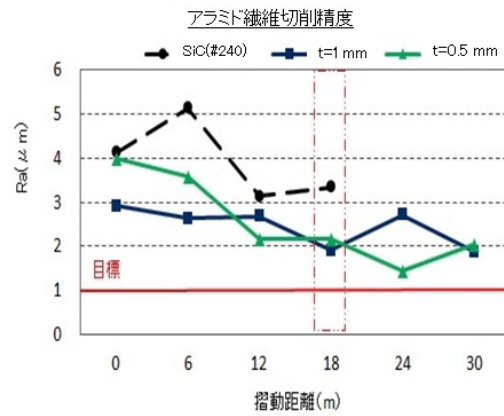


図 32 対アラミド繊維切削精度

板厚 1 mm、板厚 0.5 mmシート共切削精度が $2\mu\text{m}$ 前後と向上したが、板厚 0.5 mmシートの切削量が紙やすりの 2 倍と若干低下。

◆アラミド繊維—耐久性

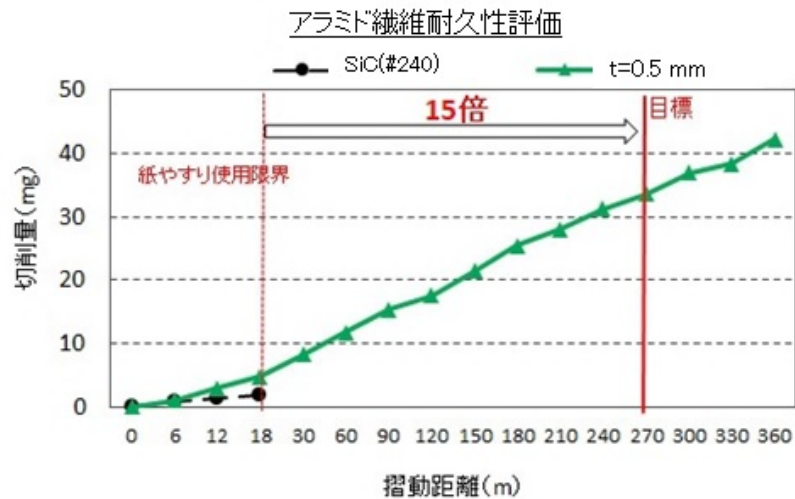


図 33 t=0.5 mmシート耐久性評価(切削量)

紙やすりが摺動距離 18m で、砥粒の脱落や目詰まりにより、使用限界となるのに対し、板厚 0.5 mmシートは、目標の 15 倍である摺動距離 270m を超えても切削能力を保っている。

◆CFRP—切削性能

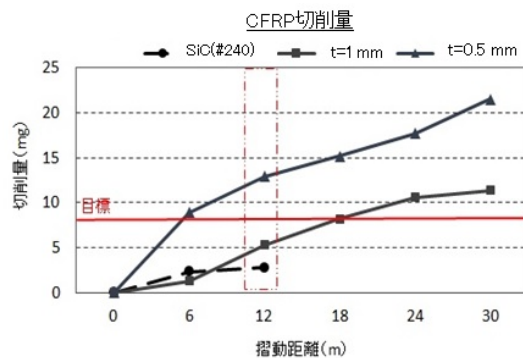


図 34 対 CFRP 切削量

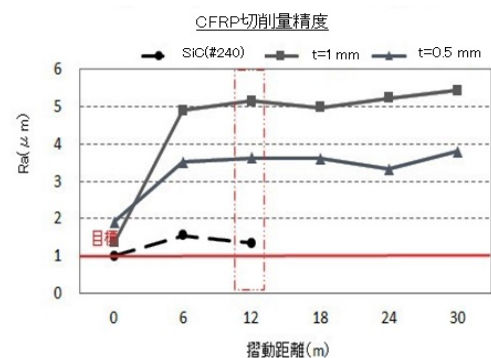


図 35 対 CFRP 切削精度

紙やすりが砥粒の脱落や目詰まりにより、使用限界となる摺動距離 12m で、板厚 1 mmシートは、紙やすりの約 2 倍、板厚 0.5 mmシートは 4 倍以上の切削量がある。また、切削精度は、板厚 1 mmシートが 5 μm、板厚 0.5 mmシートが 3.6 μm レベルである。

◆CFRP—耐久性

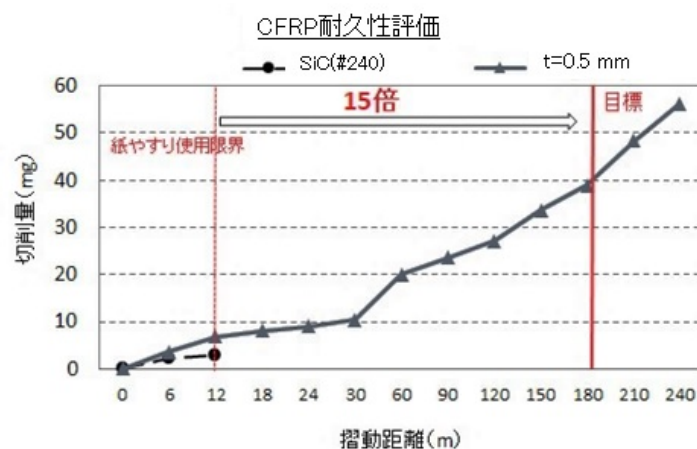


図 36 t=0.5 mmシート耐久性評価(切削量)

紙やすりが摺動距離 12m で、砥粒の脱落や目詰まりにより、使用限界となるのに対し、板厚 0.5 mmシート、目標の 15 倍である摺動距離 180m を超えても切削能力を保っている。

以上より、アラミド繊維に対して、板厚 0.5 mmのフレキシブルメタルシートの品質基準を、「切削量は紙やすりの 2 倍以上」、「切削精度の目安は 2 μm」、「摺動距離 270m 以上でも切削能力があること」、CFRP に対しては、「切削量は紙やすりの 3 倍以上」、「切削精度の目安は 4 μm」、「摺動距

離 180m 以上でも切削能力があること」、とすることができる。また、試作と切削性能評価を繰り返し実施した結果、対アラミド繊維用シートでは、目立てした刃形状と切削性能に、表 7 に示すような関係性があることが解った。刃先 R は切削量と切削精度両方に影響し、刃一つあたりの体積と刃の平均高さは切削量に、単位面積あたりの刃数は切削精度に影響する。

表 7 刃形状が切削性能に及ぼす影響

刃 形 状	切削量	切削精度
刃先 R	○	◎
角度	△	△
単位面積あたりの刃数	×	◎
刃一つあたりの体積	◎	×
刃の平均高さ	◎	×

相関がみられるパラメータを分析した結果、

$$\text{切削量} = 1.87 - 56.7 \times R + 31.6 \times (H) \quad (R \text{ が小さく、} H \text{ が大きい程切削量大が大きい})$$

$$\text{切削精度} = -4.64 + 583.5 \times R - 0.95 \times N \quad (R \text{ が小さく、} N \text{ が大きい程切削精度が良い})$$

の関係式を導き出した。 N: 単位面積当たりの刃数 R: 刃先 R H: 刃の平均高さ

第3章 全体総括

3. 1 補助事業の成果

第 2 章で記載した各サブテーマに対する成果については、1-9の成果の概要に掲載している。

3. 2 研究内容総括

本事業では、これまでには無かった、数値制御式の目立て加工機開発と、関連する治具類の製作により、SUS304 で板厚 0.5 mmシート表面に、トリプルカットの目立て加工を行うことが可能になった。この目立て加工機を用いて、試作加工を繰り返し実施し、航空機用部材として使われている、繊維強化樹脂のアラミド繊維と CFRP に対して切削性能が高く、耐久性のあるフレキシブルメタルシートを製品化レベルまでに完成させることができた。

CFRP 研削用フレキシブルメタルシートに、耐摩耗性、切削性能を向上させるために行う、無電解 Ni-P で、CNT ダイヤモンド複合メッキ技術開発では、複合メッキ液の調製において、分散性評価用分光システムを立ち上げたことによって、評価期間を短縮することが可能になり、複数の分散剤や CNT の組み合わせのなかから、常温で 3 カ月間分散状態を保つことが可能なものを絞り込むことができた。そのなかから、フレキシブルメタルシートへのメッキ処理評価を行い、最適な CNT と分散剤を決定することができた。また、性能評価から、CNT 共析率、ダイヤモンド砥粒の大きさ、メッキの膜厚などの最適なメッキ条件を確立することができた。

性能評価項目は、柔軟性(フレキシブル性)、アラミド繊維と CFRP に対する切削量、切削精度と

耐久性とし、その評価方法と条件を決定した。最終試作シートの評価では、当初目標としていた性能レベルにあることを確認した。結果、フレキシブルメタルシートのアラミド繊維と CFRP に対する品質特性を、曖昧な官能評価ではなく、具体的な基準として構築することが可能になった。

3.3 補助事業終了後の技術的課題

本事業を通じて明らかになった課題は、以下の通りである。

- ①トリプルカットの目立て加工で塑性変形したシートの変形抑制または修正方法。
- ②切削精度の向上。

3.4 フレキシブルメタルシートの事業化見通し

フレキシブルメタルシートは、繊維強化樹脂材料用の切削・研削用工具として、航空機部品製造メーカーM社、H社、自動車部品製造メーカーT社、D社などに加え、繊維強化樹脂材料以外のアルミ製品、木工製品、皮製品、3D造形製品メーカーなど、多分野への営業展開ができる。シートは顧客の要求に応じ、専用の治具、電動工具、ロボットなどに取付けられる形状にカットした状態で商品化する。

2019年（令和元年）より、暫定工程で製作しテスト販売を開始。令和2年には残課題を解決し、正規工程にて量産を開始し、5年後の売上目標として5億円見込んでいる。

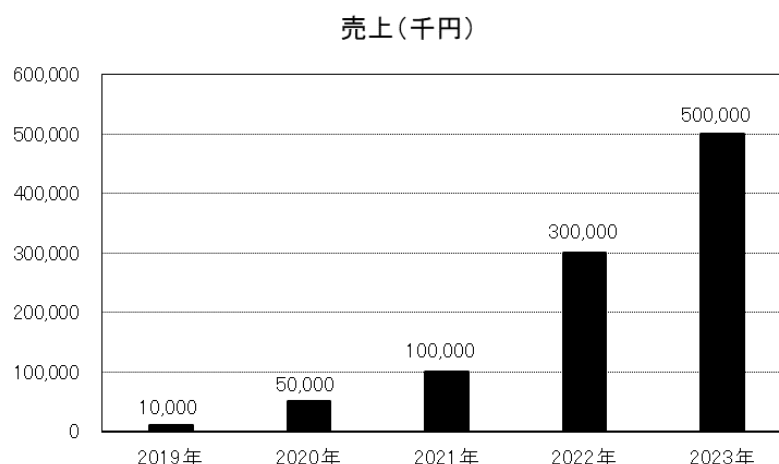


図37 フレキシブルメタルシート売上目標

販路は、既に取り引がある航空機製造、自動車部品製造業者を中心に、直接販売を3～4割とし、ホームセンタやネット通販業者などによる代理店販売を6～7割とする。販売促進方法としては、総合展示会出展（機械要素技術展、道工具作業用品EXPO、他）、ホームページの他、顧客への直接訪問（カタログ配布、デモンストレーション等）を考えている。

3.5 事業化展開

2019 年度を目途に残課題を解決する。シート変形修正方法として、ローラ通し又は引張り方式による技術を確立する。変形抑制方法として、材質変更や目立て条件の最適化を図る。本研究では、中目のフレキシブルメタルシートを主体に取り組んできたが、荒目や仕上精度を高められる細目などのシートを完成させる。また、必要な設備を導入し、2020 年度より量産を開始する。

表 8 フレキシブルメタルシート事業化計画

事業年度	2019年	2020年	2021年	2022年	2023年
テスト販売・評価	————→				
課題解決	————→				
量産工程の整備	————→				
商品化・販売		————→	————→	————→	————→