

**H23 年度第 3 次補正**  
**戦略的基盤技術高度化支援事業**

**「炭素繊維強化プラスチック用三次元形状の  
プレス切断金型および成形／切断金型の開発」**

**研究開発成果等報告書**

**平成 24 年 12 月**

**委託者 四国経済産業局**

**委託先 公益財団法人えひめ産業振興財団**

## [目次]

<b>第1章 研究開発の概要</b> . . . . .	<b>1</b>
1-1 研究開発の背景・研究目的及び目標 . . . . .	1
1-2 研究体制 . . . . .	2
1-3 成果概要 . . . . .	6
1-4 該当研究開発の連絡窓口 . . . . .	10
<b>第2章 CFRP 材の切断金型設計設定（基準）技術の研究開発</b> . . . . .	<b>11</b>
2-1 切断金型材質の選定、硬度、表面処理の研究 . . . . .	12
2-2 切断クリアランスの研究 . . . . .	13
2-3 切断圧力、押さえ圧力の研究、及び必要製品形状面積の研究 . . . . .	14
2-4 シャー角の研究 . . . . .	14
2-5 切断時の金型温度の研究 . . . . .	15
2-6 カム切断の研究 . . . . .	16
2-7 連続プレスにおける耐久性研究 . . . . .	16
2-8 特許申請 . . . . .	17
2-9 穴（ピアス）加工の研究 . . . . .	17
<b>第3章 CFRP 材成形/切断金型熱膨張量の予測/解析</b> . . . . .	<b>18</b>
3-1 CFRP 成形シミュレーションによる成形性解析 . . . . .	18
3-2 FEM（有限要素法）を使った熱膨張による金型変形の解析 . . . . .	19
3-3 2と3D-CAD を連動させた熱膨張量シミュレーションの開発 . . . . .	20
3-4 特許申請 . . . . .	21
<b>第4章 CFRP 材切断金型の設計/製作/検証</b> . . . . .	<b>22</b>
4-1 CFRP 材切断金型の構築 . . . . .	22
4-2 CFRP 材カム切断金型の構築 . . . . .	22
4-3 CFRP 材自動車部品用実用化形状金型の構築 . . . . .	23
4-4 ユーザーによる評価 . . . . .	24
<b>第5章 CFRP 材の成形/切断同時工程金型の構築と優位性検証</b> . . . . .	<b>25</b>
5-1 金型設計 . . . . .	25
5-2 金型製作 . . . . .	25
5-3 トライ . . . . .	25
5-4 部品検査 . . . . .	25
5-5 評価検証 . . . . .	25
5-6 金型の補正と精度向上 . . . . .	25
5-7 ユーザーによる評価 . . . . .	26
<b>第6章 全体総括</b> . . . . .	<b>27</b>
6-1 複数年の研究開発成果 . . . . .	27
6-2 研究開発後の課題・事業化展開 . . . . .	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

### 1) 研究の目的

自動車産業における重要課題として「軽量化」がある。現在、軽量素材として炭素繊維強化プラスチック（CFRP）素材が注目されているが、三次元形状等の切断技術及び生産性に大きな課題がある。そこで温度調節した金型のプレス加工をすることにより課題解決を図る。本研究開発では、CFRP 素材関連技術と金型製造技術、複合材解析技術を活用して、難切断材のCFRP 製品をプレス切断する金型及び成形と切断を同時（1つの金型）に実施する金型を開発する。

### 2) 研究の概要

自動車車体の軽量化に関連した金型については、その基盤技術の強化が求められている。本研究開発は、CFRP におけるプレス切断を実現するための金型とその切断技術を開発するものである。

CFRP については切断の必要のない成形方法（オートクレーブによる成形）も存在するが、それらは一般的に航空機や船舶等の大型一品物に適用されている。

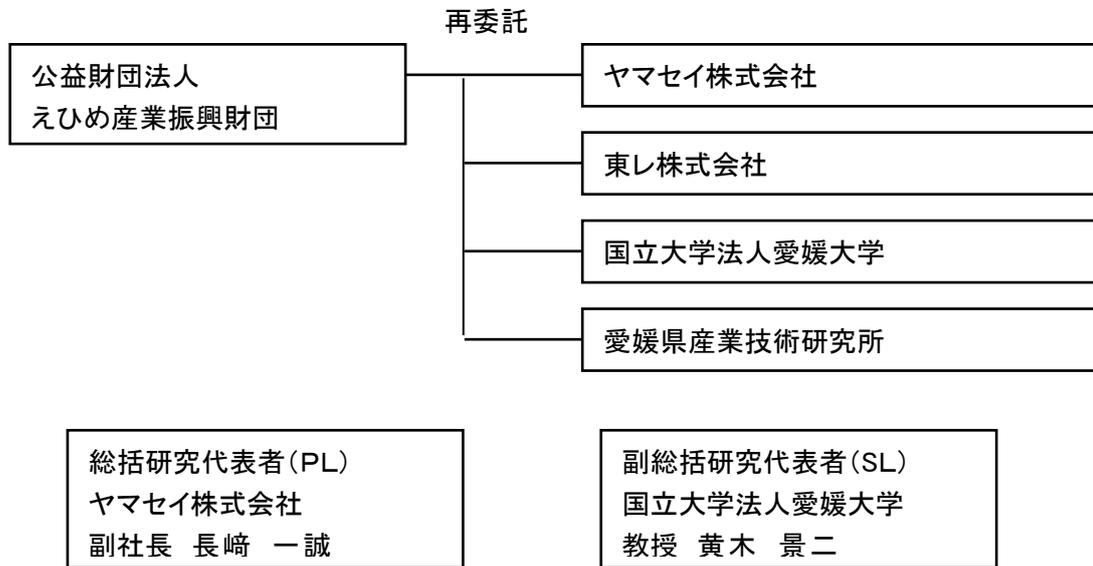
切断が必要な場合は現在、ウォータージェット等で切断を行っている。ウォータージェット切断は切断速度が50mm/min程度（現在は250mm/min）のため、フード（ボンネット）等の一般自動車外板部品では段取り等も含め、切断に4時間程度かかってしまう。これでは従来の鋼板材料の生産性とは比較にならない。

また、ウォータージェット切断機のほとんどが2次元切断（5軸3次元切断機は非常に高価）であり複雑な三次元形状の切断では、切断面の精度と仕上り品質が問題である。

そこで、上記2つの課題を解決するため、ヤマセイ（株）（株）山本製作所で長年構築し、国内外の数多くの自動車メーカーとの取引実績に裏付けされた金型技術を応用して、CFRP を切断する金型及び成形と切断を同時に実施する金型を開発する。最終は、工程時間をプレスの1ショット（5sec程度）で切断可能な金型開発を目指す。

1-2 研究体制

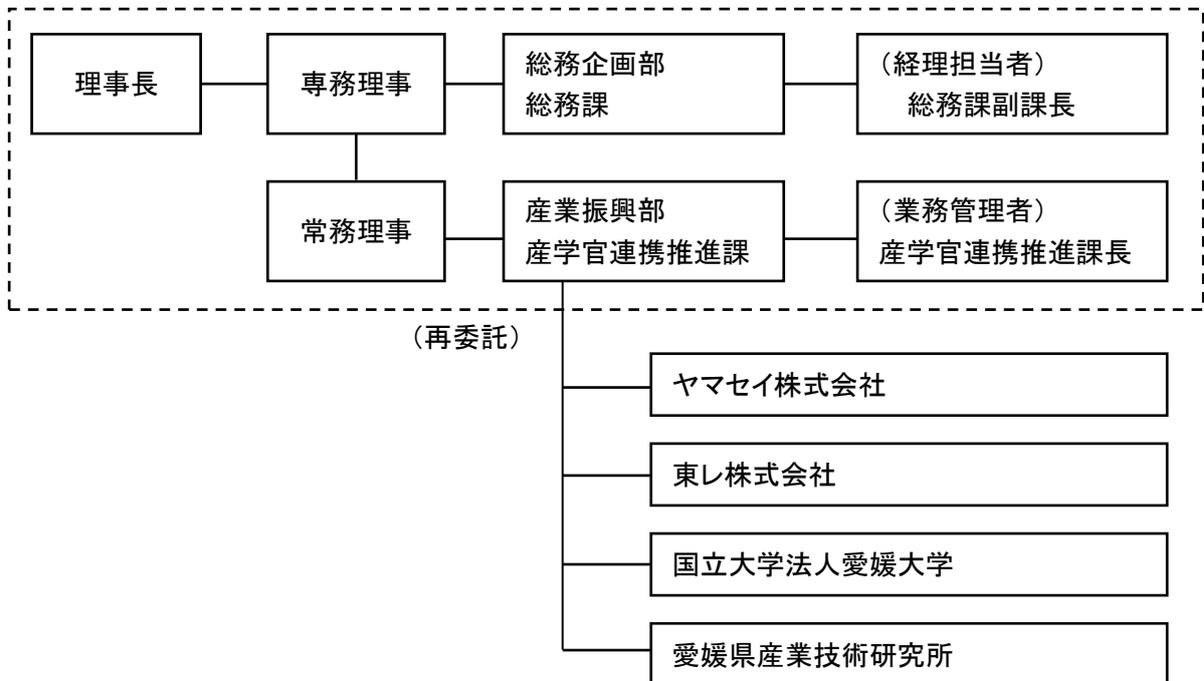
1) 研究組織 (全体)



2) 管理体制

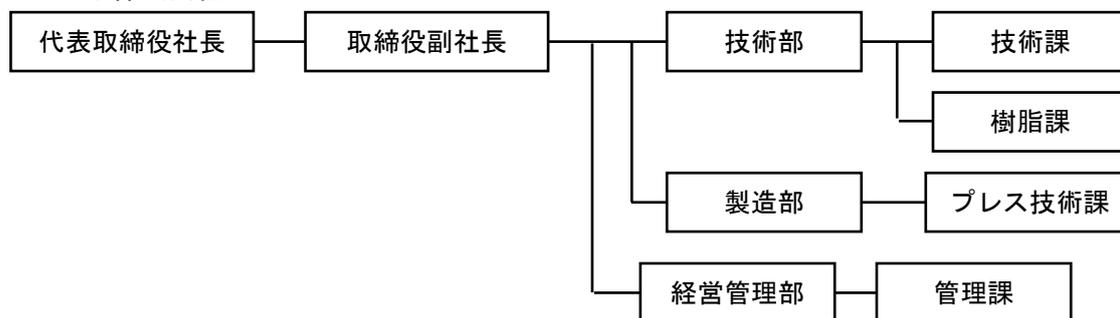
①事業管理者

[公益財団法人えひめ産業振興財団]

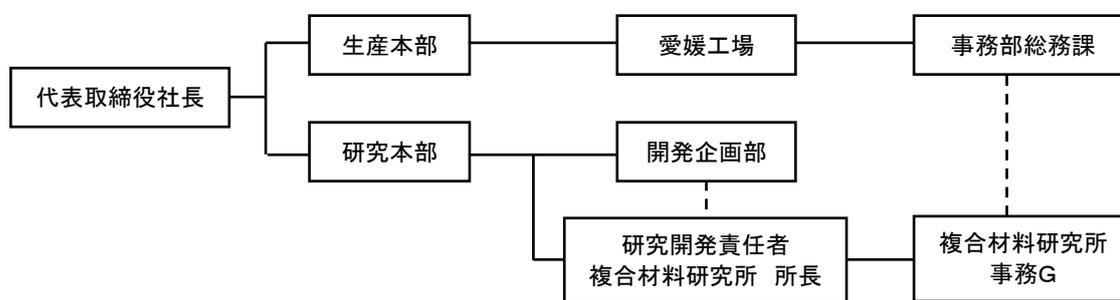


②再委託先

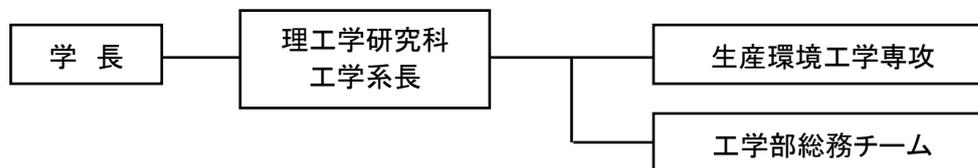
ヤマセイ株式会社



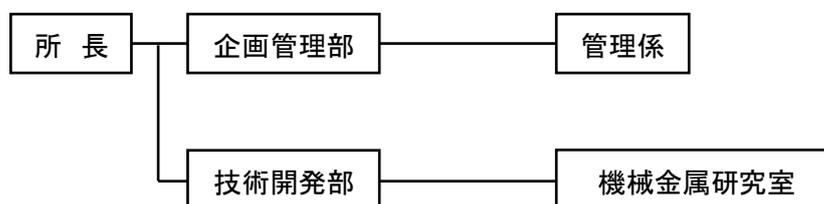
東レ株式会社



国立大学法人愛媛大学



愛媛県産業技術研究所



3) 管理員及び研究員

【事業管理者】公益財団法人えひめ産業振興財団  
管理員

氏名	所属・役職
青野 洋一	産業振興部 産学官連携推進課 課長
清家 さつみ	総務企画部 総務課庶務係 副課長
竹村 宏	総務企画部 中小企業支援課 副課長
木下 学	産業振興部 産学官連携推進課 担当係長
松島 正	産業振興部 産学官連携推進課 主任
小平 琢磨	産業振興部 産学官連携推進課 主任
明上 奈緒美	産業振興部 産学官連携推進課 プロジェクト管理員
今井 節子	産業振興部 産学官連携推進課 プロジェクト管理員

【再委託先】※研究員のみ  
ヤマセイ株式会社

氏名	所属・役職
長崎 一誠	副社長
木村 明彦	経営管理部部長
藤田 和男	技術部部長
山中 英明	製造部部長
宇野 正志	製造部 プレス技術課長
森川 清司	技術部 樹脂課長
武田 秀徳	技術部 樹脂課 技術係長
大谷 秀幸	技術部 樹脂課 技術係
曾我部 哲和	技術部 樹脂課 樹脂係長
木下 幸助	技術部 技術課 技術係長
武田 正也	技術部 技術課 設計係長
岡田 哲也	技術部 技術課 設計係
篠崎 孝治	管理課 管理係長
武田 勉	管理課 技術アドバイザー

東レ株式会社

氏名	所属・役職
北野 彰彦	複合材料研究所・所長
土谷 敦岐	複合材料研究所主任研究員

国立大学法人 愛媛大学

氏名	所属・役職
黄木 景二	愛媛大学大学院理工学研究科 教授
高橋 学	愛媛大学大学院理工学研究科 教授

愛媛県産業技術研究所

氏名	所属・役職
藤本 俊二	技術開発部 主任研究員
仙波 浩雅	技術開発部 主任研究員
中村 仁	技術開発部 研究員

4) 経理担当者及び業務管理者の所属、氏名

(事業管理者)

公益財団法人えひめ産業振興財団

(経理担当者)	総務課副課長	清家 さつみ
(業務管理者)	産学官連携推進課長	青野 洋一

(再委託先)

ヤマセイ株式会社

(経理担当者)	業務部 課長	影浦 孝志
(業務管理者)	経営管理部 部長	木村 明彦

東レ株式会社

(経理担当者)	複合材料研究所 事務G主任	山極 小夜美
(業務管理者)	複合材料研究所 所長	北野 彰彦

国立大学法人 愛媛大学

(経理担当者)	工学部事務課総務チームリーダー	戒能 直樹
(業務管理者)	愛媛大学大学院理工学研究科 教授	黄木 景二

愛媛県産業技術研究所

(経理担当者)	企画管理部 管理係長	城下 厚
(業務管理者)	技術開発部 副部長	門家 重治

### 1-3 成果概要

#### ①CFRP材の切断金型設計設定（基準）技術の研究開発

##### ①-1 切断金型材質の選定、硬度、表面処理の研究

CFRPは難切削材であり、炭素繊維による切断刃の摩耗も激しいと予測されるため、刃には高い硬度が必要と考える。その要求を満たす材質と、硬度及びそれをもたらす表面処理を研究した。

##### ①-2 切断クリアランスの研究

炭素繊維は非常に細いため、その切断には切刃間の隙間が「0」であることが望ましい。そのため、CFRPの切断も同様と考えるが、現実には切刃間の隙間全てが「0」の金型を製作することは不可能である。どの程度の隙間まで許容できるか、その値を研究した。

##### ①-3 切断圧力、押さえ圧力の研究、及び必要製品形状面積の研究

CFRPの切断にはどの程度の力を要するのか、生産設備等を考慮する上では必要な情報である。また切断加工において、その切断精度を高めバラツキを抑止するためには、製品をしっかりと押さえる必要があるが、間雲に過剰な力で押さえれば、CFRPが破損してしまう。よって、これらの最適値を求めた。

##### ①-4 シャー角の研究

単位時間当たりの切断力を低減するためにシャー角を設けるという手法は、CFRPの切断においても有効と思われるが、その効果の程度は不明である。よって、その効果と最適な値を求めた。

##### ①-5 切断時の金型温度の研究

熱硬化性CFRPの場合、成形直後のCFRPは100℃を超えた状態である。この状態のCFRPを繰り返し切断するうちに切断用金型は徐々に熱せられてしまう。金属が主材料である金型は、熱膨張によって寸法精度が大きく変化し、切断不良の要因となるため、それを見越した一定の温度で金型を保持する必要がある。よって、金型の温度状態と切断結果の関係について研究した。

##### ①-6 カム切断の研究

物を切断する場合、形状によっては、必ずしも切断面に対して垂直に刃が当たるとは限らない。CFRPは、どの角度まで精度の高い切断を行うことができるのか、どの角度からカム構造を必要とするのか、その境界を確定させるべく研究した。

##### ①-7 連続プレスにおける耐久性研究

CFRPを切断した場合の切刃の摩耗は激しく、鋼板を切断した際のその比ではないと考える。よって量産を意識した場合には、高い耐摩耗性と修復等のメンテナンス性が要求される。耐久性、製作性、熱処理、コスト等を含め、最適な切刃材質の選定を実施した。

##### ①-8 特許申請

これら既存の CFRP 切断加工技術とは異なる手法の金型とその製作技術を出願及び審査請求を行った。

#### ①-9 穴（ピアス）加工の研究

事業化に向けた市場調査により、外周の切断のみならず穴（ピアス）加工のニーズも高いことが分かった。しかし、外周の切断とは少し条件が異なると考えるため、改めてその研究を行った。

#### ①の総括

切断に必要と思われる数種類の値を求め、常に最適な条件によって切断するための技術構築を行うことができた。

### ② CFRP 材成形/切断金型熱膨張量の予測/解析

#### ②-1 CFRP 成形シミュレーションによる成形性解析

金型製作において、精度向上及び補正回数削減のためにはシミュレーションの活用が欠かせない。その有効性を立証するため、実際に成形した物とシミュレーションによる解析結果との比較検証を行った。

#### ②-2 FEM（有限要素法）を使った熱膨張による金型変形の解析

熱硬化性 CFRP の成形には金型から CFRP へ熱を供給するが、その熱により金型が変形（膨張）するため、常温で製作した形状と成形時の形状が異なる。150℃に昇温した状態での金型製作は現実的ではないため、昇温による変形量を予測した金型製作が必要となる。FEM（有限要素法）を用いた解析が最も効率的な手法と考えられ、静的温度 - 変位連成解析を行い、実際に昇温した金型の測定結果と比較することにより、その有効性を確認した。

#### ②-3 CFRP 成形 CAD・CAE システムと FEM 解析システムを連動させた熱膨張量シミュレーションの開発

FEM 解析ソフトによる解析結果を 3D-CAD に取り込むことにより、予め熱による膨張量を考慮した金型の設計を行うための熱膨張量シミュレーションのシステムを開発した。

#### ②-4 特許申請

プリプレグ（予めシート状の炭素繊維に樹脂を含浸させ半硬化状態にした CFRP の中間材料）をプレスによって成形する場合、成形型投入直後におけるプリプレグの温度分布は不均一なため、成形のし易さも不均一となっている。このため、成形によって得られる形状を精度よく解析して予測することは、大変困難なものとなっていた。しかしながらその手法を研究開発し、結果を特許として出願した。

#### ②の総括

各解析技術は、金型製作において今や必須の技術である。それらを高いレベルで構築することができた。

### ③CFRP 材切断金型の設計/製作/検証

#### ③-1 CFRP 材切断金型の構築

##### ③-1-1 金型設計

本金型は、①の各項の検証に用いるため、それぞれの内容に応じた検証実験が行える構造とした。

##### ③-1-2 金型製作

設計した型モデルに基づき、金型を製作した。

##### ③-1-3 トライ（部品取得）

300ton プレス、55ton プレス、オートグラフにて、①-1～①-7 及び①-9 の検証実験を行った。

##### ③-1-4 部品検査

各切断実験において取得した試料をマイクロ스코プ、電子顕微鏡、軟X線写真撮影機等を使用して精査した。

##### ③-1-5 評価検証

-4にて検査した結果を、新たに制定した評価基準に基づき評価した。

##### ③-1-6 金型の補正と精度向上

数多くの実験を行うため、都度補正を行った。また、新たな検証を行うために切刃の追加や構造変更等を行った。

##### ③-1 の総括

本金型による実験・トライにより、①の内容をほぼ解き明かすことができた。

#### ③-2 CFRP 材カム切断（プレス方向に対し垂直方向への切断）を可能とする金型の構築

##### ③-2-1 金型設計

プレス方向（鉛直方向）では切断できない形状をカム構造によって切断する金型を設計した。

##### ③-2-2 金型製作

設計した型モデルに基づき、金型を製作した。

##### ③-2-3 トライ（部品取得）

300ton プレスにて、検証実験を行った。

##### ③-2-4 部品検査

本事業により製作した検査具に載せ、製品端面の状態や精度等を確認した。

### ③-2-5 評価検証

検査結果に基づき問題点を抽出し、その改善手法等を検討した。

### ③-2-6 金型の補正と精度向上

検討した改善手法を型構造に反映し、摩耗した切刃を補正及びクリアランスの調整を行った。

### ③-2 の総括

本金型により、プレス方向（鉛直方向）では切断できない形状をカム構造によって切断する技術は確立されたと考える。

## ③-3 CFRP 材自動車部品用実用化形状金型の構築

### ③-3-1 金型設計

これまでの金型よりも更に実用化を意識し、パネルの取得に重点を置いた金型を製作した。

### ③-3-2 金型製作

設計した型モデルに基づき、金型を製作した。

### ③-3-3 トライ（部品取得）

300ton プレスにて、検証実験を行った。

### ③-3-4 部品検査

本事業により製作した検査具に載せ、製品端面の状態や精度等を確認した。

### ③-3-5 評価検証

検査結果に基づき問題点を抽出し、その原因を推測した。

### ③-3-6 金型の補正と精度向上

推測された原因に対する改善方法を検討し、金型に織込んだ。

### ③-3 の総括

解決すべき制約や課題が僅かに残るものの、概ね要求事項を満たす部品を取得することが可能となった。

## ③-4 ユーザーによる評価

本金型にて取得したサンプル品を、自動車メーカー及び自動車部品量産メーカーへ持ち込み、評価をして頂いた。

#### ④CFRP 材の成形/切断同時工程金型の熱膨張量の構築と優位性検証

##### ④-1 金型設計

CFRP の成形と切断を同一工程で行うことが可能ならば、生産性の向上に大きく寄与する。これまでに得た知見を基に、そのための機構を備えた型を設計した。

##### ④-2 金型製作

設計した型モデルに基づき、金型を製作した。

##### ④-3 トライ（部品取得）

300ton プレスにて、検証実験を行った。

A（賦形→切断→硬化）と B（賦形→硬化→切断）という 2 種類の手順を想定し検証を行った結果、B の手順が効率的であることが判明した。

##### ④-4 部品検査

本事業により製作した検査具に載せ、製品端面の状態や精度等を確認した。

##### ④-5 評価検証

検査結果に基づき問題点を抽出し、その原因を推測した。

##### ④-6 金型の補正と精度向上

推測された原因に対する改善方法を検討し、金型に織込んだ。

##### ④-7 ユーザーによる評価〔ヤマセイ（株）〕

本金型による成果物は、自動車部品量産メーカー及び、CFRP 関連の事業をされている方にも評価して頂いた。

##### ④の総括

型構造上の問題、成形手法に関わる問題等、色々な問題を抽出することができ、貴重な知見を得た。

#### 1-4 当該研究開発の連絡窓口

公益財団法人えひめ産業振興財団（最寄りの駅：伊予鉄道横河原線鷹ノ子駅）

連絡担当者名・所属役職：産学官連携推進課 課長 青野 洋一

〒790-1101 愛媛県松山市久米窪田町 337-1

TEL：089-960-1100 FAX：089-960-1105

E-mail：s-info@ehime-iinet.or.jp

# 第2章 CFRP材の切断金型設計設定(基準) 技術の研究開発

まず、研究する技術を『良好な切断を行うための条件(手法)』と『実用化に向けての許容値』に区分した。(図1)

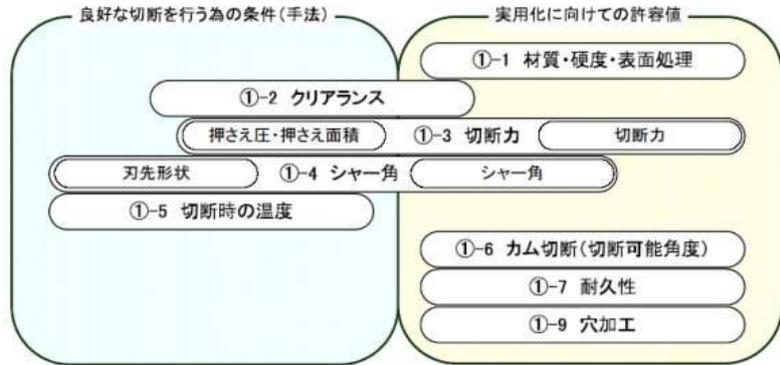


図1 研究項目の区分

このことにより、研究の目的をより具体的に定めることが可能となり、明確となったターゲットに向かい研究を進めた

また、実験に使用される呼称を定義した。

(図2)

試料	実験に用いる CFRP
スクラップ	切断後の非製品とみなす側
上刃	試料の上面に接触する刃
下刃	試料の下面に接触する刃
押さえ板	試料を押さえる板 (型の場合は PAD と呼ぶ)
圧力源	力を発生させる部品／機構
シム	面積や厚み等を調整するために用いる薄い鉄板
クリアランス	上刃と下刃の距離
切断荷重	切断に必要な力
押さえ力	試料を押さえる力
押さえ圧	単位面積あたりの試料を押さえる力
刃先角度	刃の断面方向 (ZX 方向) の角度
シャー角	刃の正面方向 (YZ 方向) の角度
刃先	刃の先端、試料を切断する箇所
峰	シャー角が変化する境界 (凸側)
谷	シャー角が変化する境界 (凹側)

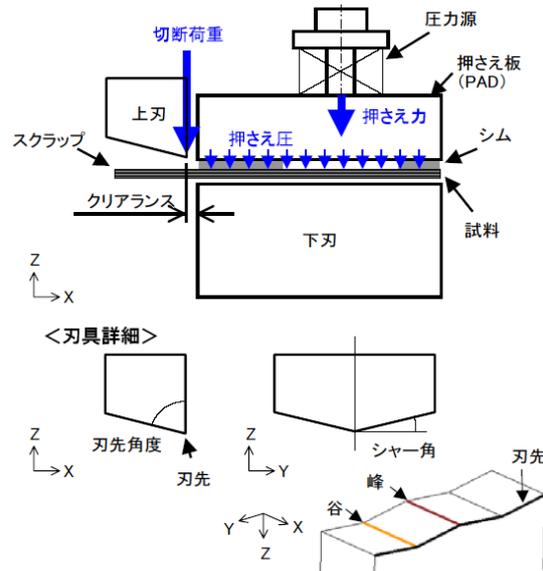


図2 呼称概略図

## 2-1 切断金型材質の選定、硬度、表面処理の研究

### -1 切断金型材質の選定

まず、21種の候補を抽出した。それらをA. 熱処理後の硬度、B. 価格、C. 製作性、D. 耐久性 の4項目にて選別した。

#### 1) 候補の抽出

以下の材質を候補として抽出した。

##### ◇ 鋳鉄・鋳鋼

- ・ ねずみ鋳鉄 (FC250 又は FC300)
- ・ 合金鋳鉄 (GM241)
- ・ 球状黒鉛鋳鉄 (FCD500、FCDFH)
- ・ 鋳鋼 (GM190 又は ICD-5)

##### ◇ 工具鋼

- ・ 炭素工具鋼 (SKS93、SK3)
- ・ 合金工具鋼 (SKD11)
- ・ 火炎焼入鋼 (HMD5、SX105V 又は G05)
- ・ プリハードン鋼 (HPM2T)
- ・ 粉末高速度工具鋼 (SKH40)
- ・ 高速度工具鋼 (SKH51)

##### ◇ クロムモリブデン鋼 (SCM440)

##### ◇ ステンレス鋼 (SUS420C)

##### ◇ 超鋼合金 (V40)

##### ◇ 一般圧延鋼 (SS400)

##### ◇ 機械構造用圧延鋼 4種類 (S45C+無処理、同+高周波焼入、同+浸炭焼入、S55C)

##### ◇ 盛刃 ※溶接肉盛部を刃としたもの

#### 2) 選別

前述の4項目によって候補を絞り込んだ。

##### A. 熱処理後の硬度

CFRPの切断には、自動車用鋼板(主にSPCC)を切断する切刃と同程度以上の硬度が必要と考える。自動車用鋼板の切断型に使用される切刃の硬度はHRC50~65であるので、それに到達しない候補を除外した。

##### B. 価格

単位重量(1kg)当たりの単価が2000円を超える素材(注:ヤマセイ(株)での入手価格)での型製作は型費の高騰を招くため、現実的ではないと判断した。

##### C. 製作性

実際に型を製作するにあたり、『入手の容易さ』『被削性の良さ』『熱処理後のメンテナンス性』に的を絞り、それぞれに不適格と判断された以下の候補を除外した。

##### D. 耐久性

熱処理を施した場合、靱性が低下し耐久性が低下するものを除外した。

#### 3) 最終選定

ここで、CFRPの切断に最も適した硬度を調査すべく、硬度の範囲を3種に細分化し、残った候補からそれぞれの硬度に最も適した材質及び熱処理を選定した。

- ・ HRC50~55                      盛刃                      : FC250 + 盛刃 (W.L)
- ・ HRC55~60                      火炎焼入鋼              : HMD5 + 火炎焼入 (F.H)
- ・ HRC60~                        合金工具鋼              : SKD11 + 総焼入 (O.Q)

これらの素材にて切刃を作成し、検証実験により選定を進める。

尚、素材の選定及び硬度は耐久性とも密接に関わるため、結論は『2-7 連続プレスにおける耐久性研究』の結果を踏まえて判断する。

## -2 硬度・表面処理の研究

ダイヤモンドライクカーボン（以下 DLC）コーティング処理は CFRP 切削刃物等に採用されており、非常に有効な手段と考える。よって、その効果を検証した。

### 1) 切断結果の観察

SKD11（+0.0 : HRC60 以上）に DLC コーティング（厚さ  $1\mu\text{m}$  : Hv3000~5000）を施した切刃を作成し、800 回の切断試験を行い、切断した試料の正面中央及び右側面を観察した。

その結果、1~800 回間にて切断された試料に目立った変化は表れなかった。

### 2) DLC 皮膜の状況確認

DLC 皮膜の状況を確認するため、①. DLC 皮膜無、②. DLC 皮膜有（未使用）、③. DLC 皮膜有（800 回後）をそれぞれ電子顕微鏡にて観察し、炭素元素の分布（濃度）を測定した。その観察結果より、以下のことが判明した。

○切断前には DLC 皮膜がしっかり形成されていた

○800 ショット後には DLC 皮膜が破損している

### 3) DLC 皮膜の耐久性

次に、DLC 皮膜の耐久性を調査した。

DLC コーティングされた切刃にて 30 回 CFRP を切断し、圧縮変位に対する荷重を記録した。また、1/5/10/20/30 回の切刃の刃先をマイクログラフにて撮影し、さらには使用前後に電子顕微鏡による撮影結果及び炭素元素の分布状況を比較した。

結果、1~30 回の切断では試料及びスクラップや切断荷重には変化がなかったが、切刃の刃先は 5 回目程度から白く反射して見える様になり、30 回後の電子顕微鏡での観察及び炭素元素の分布調査により DLC 皮膜が破損していることが判明した。

よって、DLC 皮膜が破損しても切断経過及び結果に変化がないため、DLC コーティングは全く効果がないと判断しても良いと考える。また、DLC 皮膜に求めた低摩擦・低摩耗・平滑性は、切断に影響を与えたとは言い難く、刃先には硬度のみが必要であると判断した。

## 2-2 切断クリアランスの研究

クリアランスは「0」が理想だが、それには熟練工による微細な調整等を必要とし、製作期間及びコストが非常に高くなるため現実的ではない。よって、どこまで「0」に近付ければ許容される結果を得られるのか、と検証した。

1 層が 0.14mm であるプリプレグを 8 層積層した CFRP を、クリアランスを 1.00mm、0.075mm、0.050mm、0.025mm、0mm と変化させ、それぞれ 2 回ずつ切断し、その切断面及び側面を比較した。その結果、0.050mm が最も良い切断面を得た。よって、今回の厚さ、積層構成をもつ CFRP 板に対してのクリアランスは、0.050mm が最適であると判断した。このこと等により、CFRP の切断には【剪断】と【曲げ（引張）】のバランスが肝要であり、クリアランス「0」からは良い結果が得られず、多少の隙間が必要であることが判明した。

次に、同じく 1 層が厚さ 0.14mm であるプリプレグを、それぞれ 4 層、8 層、16 層と積層し、クリアランスを 0.075mm、0.050mm、0.025mm と変化させ、それぞれ 2 回ずつ切断した。各クリアランスにおける、ケバおよびバリの量をマイクログラフによる切断面の観察にて、層間剥離の量を軟 X 線による観察にて、切断時の荷重

の推移を考慮しながらそれぞれ評価した。

これらにより、

①積層数が少ない等剛性が低い場合は、僅かなクリアランスでも容易に『撓み』が生まれ層間剥離の発生を抑止するが、広すぎるクリアランスはケバやバリの発生が多くなる。

②積層数が多い、厚い等剛性が高い場合は、クリアランスによる『撓み』の量にあまり違いがないので、ケバやバリを抑えることを優先し、比較的狭いクリアランスが良い。

と考えられる。

そしてその値とは、8層以下では0.050mm、16層以上では0.025mmと考える。

## 2-3 切断圧力、押さえ圧力の研究、及び必要製品形状面積の研究

### -1 切断力

これまでの実験結果から以下の計算式を導き出した。

最大切断力  $P$  (N) =  $360$  (N/mm<sup>2</sup>) × 板厚 (mm) × 加工長 (mm)  
(上式は 0° /90° クロスプライ、積層比率 50% : 50% の材料の場合とする。)

### -2 押さえ圧力

強く保持しすぎる（大きな押付圧を与える）と、切断時に剪断力が付加されることで内部に大きな圧縮応力が生じ、結果として層間クラックを誘発することが危惧される。CFRP の切断には、“剪断力” と “曲げモーメント” が作用するため、これらの大きさのバランスに適応する押付力が必要と考え、適切な押さえ圧を求めた。

1層が0.14mmであるプリプレグを8層積層し硬化させたCFRPを、1MPa～12MPaの圧力で押さえた状態で切断し、評価した結果、

①剥離長さには、2MPa～12MPaが許容値、5MPa～9MPaが推奨値

②誤差には、3MPa～12MPaが許容値、5MPa～9MPaが推奨値

③ケバ長さには、1MPa～12MPaが許容値、2MPa未満、又は11MPa以上が推奨値と考えられる

これらにより押さえ圧は

推奨値 5MPa～9MPa（許容値 3MPa～10MPa）とした。

### -3 必要製品形状面積

上記の「押さえ圧」を求める際に圧力に変化を与えるため、切断位置より5mm、10mm、30mmと、押さえる長さ（面積）を変化させた。その結果、5mmでは、ほとんどの評価項目においてあまり良い結果を示していない。一方、10mmと30mmでは、あまり差異がない。よって、押さえ幅は10mm以上必要と考える。

## 2-4 シャー角の研究

1層が0.14mmであるプリプレグを8層積層し硬化させたCFRPを、平刃（0°）と3°・5°・15°の一方方向シャー角の刃とで切断した結果を比較したところ、シャー角を付けることにより切断荷重及びその極端な変動を低減させ、切断面に発生したクラックの伝播や内部の剥離発生を抑制することが判明した。切断荷重を低減させるには単位時間あたりの切断量を減少させる必要があるため、大きな角度を付ければ良い。しかしながら、あまりにも大きなシャー角はスクラップ（切り落とし側）

にねじれや変形を発生させ、製品（切り残し側）に悪影響を及ぼす。これらを考慮の上、限界値を $10^{\circ}$ と定めた。

また、シャール角を延々と設置することは不可能で、必ず俯角から仰角又は仰角から俯角へと変化する点が存在する。その点の形状をどの様にするべきか検証した。

まず、シャール角の変化点を凸形状とした刃を用意した。その変化点《峰》が角く尖った刃と円弧（R）にて丸く繋いだ刃とで切断結果を比較した。すると、峰が丸い刃では切断面に剥離がないが、切断に要する荷重が増加しており、内部に剥離を発生させていた。一方、峰が角である刃は切断荷重が低く、内部に剥離は発生していないが、導入部又はその近郊に荷重が集中してしまうため、その部分に剥離が発生していた。

よって峰は、切断面の剥離を防止するために荷重が集中しない様丸くすべきであるが、低い荷重で切断し内部の剥離を防止するためには切れ込む鋭さを保持する必要がある、あまり大きな『R』は望ましくない、ということが判明した。

では、具体的にどれほどの『R』が峰に必要なのであるのか、峰がR1～R100である13種の刃を作成し、その切断結果を比較した。その結果、

①峰のRが小さい場合、初期接触量が少ないため、初期荷重は低くなるが集中してしまい、接触面近傍に剥離を発生させてしまう。また、切断開始から終了までの加工時間が長くなり、スクラップ側の変形による損傷を引き起こし易い。

②峰のRが大きい場合、切断するための荷重は分散するため表層近くの剥離は抑えられる。しかし、ある点より切断が一気に進行するため、バリやケバ等切断面の不良が多くなり、内部の破損も発生させてしまう。

と考えられる。よって、それら双方を解決するためには、刃先（峰）の形状が鋭すぎず丸すぎず、中庸であるべきと考えられる。

そして、今回の実験結果により、その中庸な丸さとはR50であると考えられる。

## 2-5 切断時の金型温度の研究

熱硬化性CFRPの場合、成形直後のCFRPは $100^{\circ}\text{C}$ を超えた状態であるので、この状態のCFRPを繰り返し切断するうちに切断用金型は徐々に熱せられる。金属が主材料である金型は熱膨張によって寸法精度が大きく変化するため、切断不良の要因となる。しかし、成形後のCFRPを常温まで冷却するには時間及びエネルギーを必要とし、生産効率が悪化する。よって、それを見越した一定の温度で金型を保持し、金型及びCFRPが高温下でも切断できることが望ましい。本項では、金型の温度状態と切断結果の関係について検証した。

昇温した金型に2分程度試料を置き、試料に熱を伝え温度を上昇させ、定常状態であることを確認した後、切断した。すると、切断面の状態が劇的に向上した。このことにより、切断時にCFRPを加熱することは、悪影響を及ぼすのではなくむしろ良い影響を及ぼすことと考えられる。また、このCFRPの“ガラス転移点”は $105^{\circ}\text{C}$ 程度であるため、その近傍であったことが何か関係しているのではないかと推測される。

CFRPは、温度の上昇に伴い弾性率が低下し層間剥離靱性が増加することはよく知られている。切断時においても、そのことが良い影響を及ぼす様である。また、CFRPに含浸させた樹脂に熱を加えた場合、徐々に柔軟性が増し、ガラス転移点で急激に

その柔軟性が増加する。

では、どのような温度領域が適しているのか、80℃～210℃まで 10℃ピッチに加熱した状態での切断結果を比較した。

温度が高くなるにつれ剥離に対する靱性が増加し剥離量が減少する。また、撓みの許容量が増え、単位時間あたりの切断量が減少し、切断荷重による損傷も減少する。しかし、ある温度を超えると、変形量が多くなり、そのことによる損傷が大きくなる。よって、切断荷重による損傷及び変形による損傷が少ない温度：80℃～110℃が適した切断温度と考えられる。

それでは、ガラス転移点の異なる CFRP ではどうであろうか。ガラス転移点が約 140℃の CFRP にて同様の実験を行うと、

- ・ 60℃～80℃も層間剥離は見られない。ケバ・バリも少なくなり端面も多少良くなっているもののまだ不十分と考える。
- ・ 90℃～140℃では、層間剥離もなくケバ・バリも随分減少した。また、端面の誤差も極めて小さくなっている。
- ・ 160℃以上では層間剥離部が発生し、端面の精度も悪い。

という結果となり、この試料の切断に適した温度は 90℃～140℃と考えられる。

これらの結果より、CFRP の切断に適した温度は、「ガラス転移点より 30℃低い温度からガラス転移点の温度まで」と推測される。

## 2-6 カム切断の研究

これまでの各実験は、試料に対して垂直に切断されている。しかし、事業化の対象としている自動車部品は様々な角度の面、それも平面に限らず曲面で構成されており、その面に対して垂直に切断できるケースは非常に稀である。だが、工程の簡素化及び型構造の簡略化の観点から言えば、極力同一方向、しかもプレス機の可動方向から加工できることが望ましい。よって本項では、被切断面に対する刃の角度が何度までなら切断可能か検証し、プレス方向での切断（鉛直方向）とカム機構を用いた切断（斜め方向）との分岐角度を決定した

刃先強度の観点より加工限界を 65° 又は 115° とし、上刃に対して CFRP を 65°・70°・75°・105°・110°・115° に保持する下刃にて切断を実施した。（図 3）

結果、90° 未満では 3 種とも切断面の状態は良好であったが、90° より大きな角度では、3 種とも両端に剥離が発生した。これは、加工角度が 90° 未満では、CFRP の変形が微小であるので良好な切断結果が得られるが、対して加工角度が 90° より大きくなれば、CFRP の変形量も多くなるため、結果に悪影響を及ぼすものと考えられる。また、曲げモーメント及び切断の分力も、切断結果に少なからず影響を及ぼすものと考えられる。

よって加工推奨角度は、75° 以上 90° 以下と定める。

## 2-7 連続プレスにおける耐久性研究

どれほど美しく切断できる刃でも、その刃が量産に耐えうるものでなければ、工

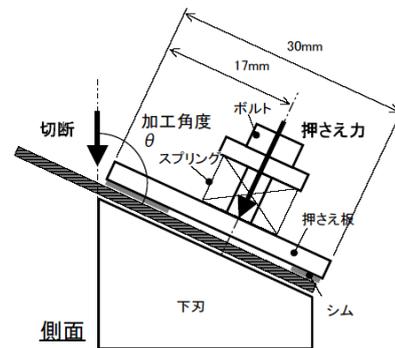


図 3 切断状態概略図

具としては役に立たない。本項では、研究開発した切断の技術が生かせる様、切刃となる素材の耐久性を検証した。

2-1にて選定した3種（FC250+W.L、HMD-5+F.H、SKD11+0.Q）の刃にて、それぞれ800回試験片を切断し、切断荷重の変化や刃先の摩耗具合を比較した。すると、刃先の状態を観察すると、各切刃ともに摩耗していることが分かった。また、FC250+W.Lの切刃は150回程度でスクラップを切り離すことが出来なくなったが、HMD5+F.H及びSKD11+0.Qは800回まで切れた。さらに、FC250+F.H及びHMD-5+F.Hは切断回数に応じて食い込み量（圧縮変位）が徐々に増加しているが、SKD11+0.Qは800回目も、スクラップの状態及び食い込み量（圧縮変位）にあまり変化がなかった。

よって、切断予定数が800回未満であれば、コストやメンテナンス性等を考慮しHMD-5+F.Hが、800回以上であれば耐久性を重視しSKD-11+0.Qが適していると判断する。

## 2-8 特許申請

「炭素繊維強化プラスチック部品用金型及び炭素繊維強化プラスチック部品の製造方法」で、平成24年11月16日にPCT（Patent Cooperation Treaty：特許協力条約）に基づく国際出願を行った。（国際出願番号：PCT/JP2012/079795 審査請求中）

## 2-9 穴（ピアス）加工の研究

自動車部品を含む色々な製品に於いて、“穴”を有さないものは稀である。よって、既存の加工技術（切削やウォータージェットによる切断）からの脱却を図るのであれば、外周の切断のみならず、穴（ピアス）加工も行う必要がある。本項では穴加工の可能性に関して検証した。

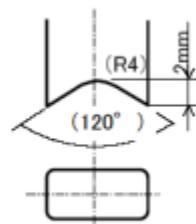


図4 刃先形状概略図

穴のサイズを固定とし、刃との距離をそれぞれ0mm・0.025mm・0.050mm、刃先が平坦な物とシャープ角を設けた（図4）計6種のパンチにて、0.14mmのプリプレグを5層積層し硬化させたCFRPに穴加工を実施した。

特に大きな損傷は確認されなかった。しかしシャープ角有りの場合、切り終わり部に剥離と思われる損傷が見受けられる。これは、スクラップの変形が多いために発生したと推測される。また、クリアランス0.050mmに比較的ケバが多く見られるが、クリアランス0mmと0.025mmにはさほどのケバは無かった。

次に、同様の工法にて、表層の炭素繊維方向の影響について検証した。表層の繊維方向に対して、0°・45°・90°・135°の角度にて穴加工を実施した。すると、表層の炭素方向に対して斜めに穴加工を施しても、垂直又は並行に加工した場合と違いはなかった。これらの結果により、穴加工は炭素繊維の方向に影響を受けないことが次のとおり確認できた。

- ・ 鋼板と同様の工法にて穴加工は可能である
- ・ 本研究開発におけるCFRP切断の特徴である【剪断】と【曲げ】の相乗効果はあまり期待できないため、クリアランスは狭い（0～0.025mm）方が良い
- ・ 急激なシャープ角は不要であり、小径であれば無くとも問題はない
- ・ 穴加工は繊維方向に影響を受けない

# 第3章 CFRP 材成形/切断金型熱膨張量の予測/解析

## 3-1 CFRP 成形シミュレーションによる成形性解析

製品形状とシワ及びワレ・亀裂との関係を探ると共に、実際にプレス成形した製品と、3次元弾塑性有限要素解析ソフト PAM-FORM を用いた解析結果とを比較し、解析ソフトの有用性を検証した。

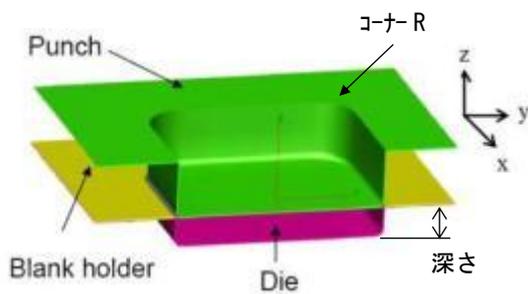


図5 解析形状概略図

解析モデルは図5のとおり、1) 上型 [Punch]、2) 下型 [Die]、3) 製品押さえ [Blank holder]、4) CFRP 積層板 [sheet] の4パートから成る3次元モデルである。ダイを完全固定とし、ダイの上にシートを設置し、シート上の外周にブランクホルダー、中央にパンチを配置する。取得製品形状は320mm×250mmの直方体とし、4コーナーにそれぞれ10mm・20mm・30mm・40mmのRを設けた。また、成形深さを15mm・20mm・25mmの3種とした。

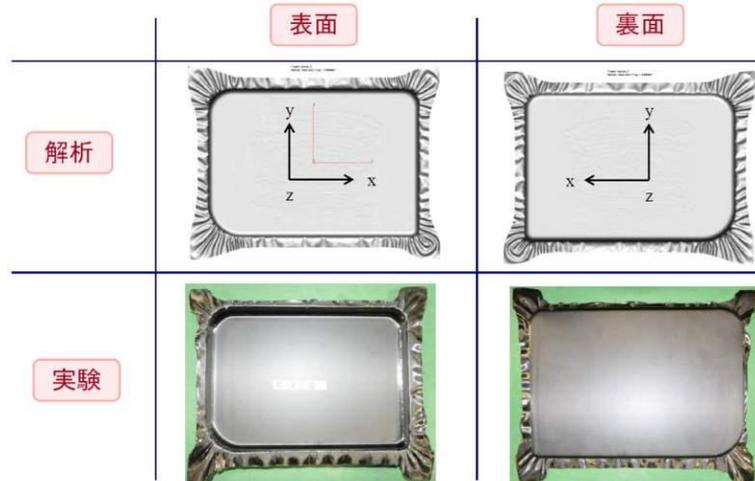


図6 解析結果（外観）

3次元弾塑性有限要素解析ソフト PAM-FORM の解析結果と、実際に成形した物とを比較検証した。これらは差がほとんど認められない程一致した結果が得られ、本シミュレーションソフトがプレス成形における解析ツールとして非常に有効であることが確認された。

また、成形性に関する、製品形状とシワ及びワレ・亀裂との関係を探った。

### -1 板厚増減の評価

R10 底部の板厚減少量が多い。これは成形深さが影響しているものと思われる。

よって、ワレ・亀裂の要因は成形深さによると考えられる。

## -2 シワの評価

シワの本数及び寸法（長さ・幅・高さ）とその位置は、コーナーR 及び成形深さの影響によるものと考えられる。よって、実物と解析による成形過程等を比較しながら検証した。すると、以下のことが判明した。

- ・ シワの平均長さはコーナーR の大きさに影響されない。シワの数が増加するのは、コーナーR が大きくなるとコーナー部に該当する面積が増加するためである。また、成形深さが浅くなるとシワの長さも短くなる傾向が認められた。
- ・ シワの幅や高さには、コーナーR の大きさは無関係の様である。
- ・ コーナーR が大きくなると、シワが存在する範囲が広がる。その範囲は、45° を中心とし、15° ~75° の間となる。またシワの位置は、成形深さに依存しない。

以上の各結果により、シワの長さ、幅、高さはコーナーR の大きさに影響を受けない。数の増加は該当面積の増加と比例しており、成形性の問題ではない。むしろ、成形深さが大いに影響を与えていると判断できる。

これらの結果により、CFRP を成形する際に発生する不良の要因は、成形深さに因る割合が高いと考えられる。

## 3-2 FEM（有限要素法）を使った熱膨張による金型変形の解析

CFRP の成形には熱を必要とするため、金型を 150℃程度まで昇温し CFRP へ熱を供給するが、その昇温により金型が変形（膨張）してしまうため、常温で製作した型の形状と成形時の形状が異なってしまう。それならば、昇温した状態で型を製作すれば良いのだが、150℃での加工及び仕上げ作業は現実的ではない。よって、昇温による変形量を予測し、その予測を織込んだ型製作が必要となり、FEM（有限要素法）を用いた解析が最も効率的な手法と考えられる。

本項では、汎用非線形有限解析ソフトである Abaqus を用いて静的温度 - 変位連成解析を行い、実際に昇温した金型の測定結果と比較することにより、その有効性を確認する。

底面を完全固定とし、形状部下の穴に 180℃の水蒸気を循環させ、定常状態になるまで解析する。解析結果の妥当性を検証するため、実際に金型を定常状態になるまで昇温し、その温度を測定し解析結果と比較した。（図 7）

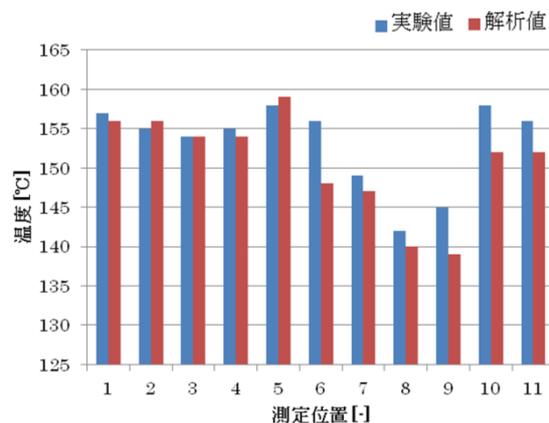


図 7 上型温度 実測値と解析値

測定位置 No. 9~11 に差があるが、形状面 (No. 1~5) ではさほどの差は無かった。下型も同様の結果で、構造部では温度差があったが、形状部ではさほどの差は無かった。

また膨張量も、実測値と解析値の差は0.008mmと非常に小さな値であり、誤差の範疇と判断した。(図8)

これらの結果より、本ソフトによる解析結果の信憑性は非常に高く、熱膨張量の予測に有効であることが確認された。

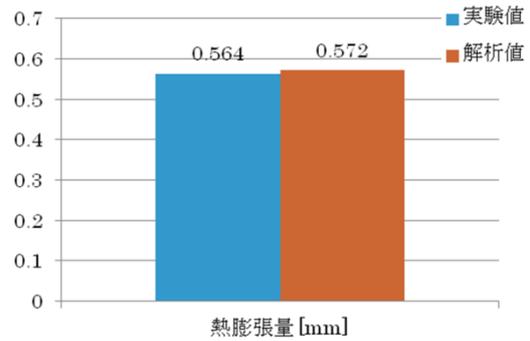


図8 下型測定点の熱膨張量 実測値と解析値の比較

### 3-3 CFRP 成形 CAD・CAE システムと FEM 解析システムを連動させた熱膨張量シミュレーションの開発

前項での検証により、汎用非線形有限解析ソフト Abaqus による解析が高精度であることが確認された。よって、その FEM 解析ソフトによる解析結果を 3D-CAD に取り込むことにより、予め熱による膨張量を考慮した金型の設計を行うための熱膨張量シミュレーションのシステムを開発した。そのシステムの概要を図9に示す。

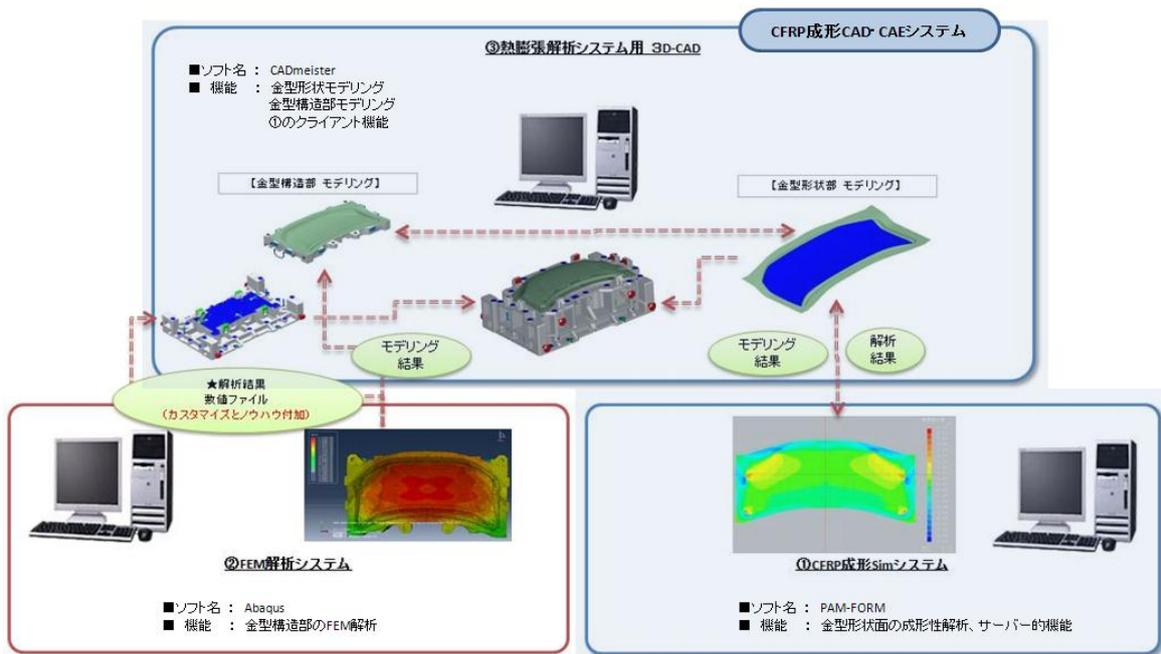


図9 CFRP 用金型解析システム概要

以下に CFRP 用金型解析システムの手順を示す。

手順 1: PAM-FORM により成形性が確認された製品形状にて、3D-CAD ソフト “CADmeister” にて型設計を行う。(図10①)

手順 2: 設計された型モデルを “Abaqus” に取込み解析し、熱膨張量を算出する。(図10②)

手順 3: 算出された熱膨張量を “CADmeister” に取込み、製品形状と比較し変形量を求める。(図10③)

手順 4: その結果を見込みとして、設計した型モデルへ加える。(図10④)

手順 5：見込みが加味されたモデルを再度“Abaqus”にて解析する。(図 10②)

この手順②から手順④のサイクルを繰り返すことにより、熱膨張時の形状を正規の製品形状へ限りなく近付ける。

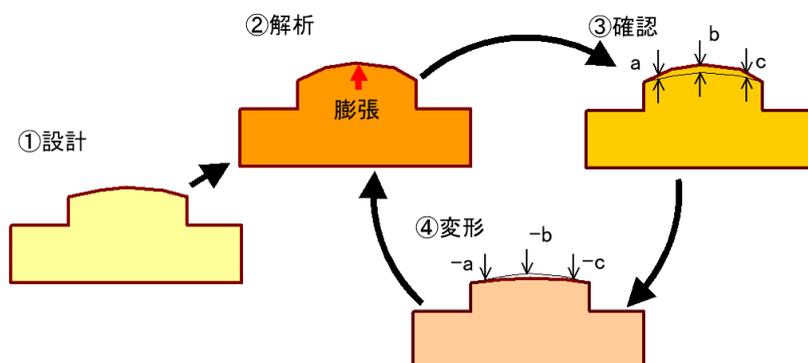


図 10 CFRP 用金型解析手順

初期解析結果による膨張形状と正規形状の差異は、0.35～0.90mmであった。これが、1 回目の見込変形後形状が膨張した形状と正規形状との差異は-0.15～+0.15mmとなった。その後、解析～確認～変形のサイクルを2回・3回と繰り返すうち、徐々に正規形状へと近付き、11 回目には±0.10mm未滿にまで近付いた。この結果より、この解析～確認～変形のサイクルを繰り返せば繰り返すほど限りなく正規形状に近付くが、その近付く量は回数を重ねる毎に減少することが判明した。

これらの作業により、本システムが滞りなく機能することが確認された。

### 3-4 特許申請

GFRP は物性の異なる複数の素材により構成された複合材であり、また、温度によってもその物性値が異なる。その中間材料であるプリプレグをプレスによって成形し CFRP を作成する場合、成形型投入直後におけるプリプレグの温度分布は不均一なため、成形のし易さも不均一となっている。ため、成形によって得られる形状を精度よく解析して予測し、成形型の設計精度を高くすることは、大変困難なものとなっていた。しかしながら、本研究開発において、特定の状態の物性値を用いて解析すると、その結果と実物とが良く一致することが解った。「炭素繊維強化プラスチックの成形時の解析方法、及び解析装置」で、平成 24 年 12 月 4 日に特許出願を行った。(出願番号 特願 2012-265442)

# 第4章 CFRP材切断金型の設計/製作/検証

## 4-1 CFRP材切断金型の構築

### -1 金型設計

本金型は、第2章の各項を検証するため、以下の機能を有する金型を設計した。

- ・ 各項の検証実験が可能であること
  - A) 複数の素材による比較検証が可能である切刃
  - B) クリアランス可変機構
  - C) 押さえ圧可変機構
  - D) 切断角度可変機構
  - E) 温度調節機構
  - F) 連続切断可能機構
  - G) 穴開け加工機構
- ・ 複数（愛媛大学、愛媛県産業技術研究所、ヤマセイ）の試験機又はプレスに設置可能であること

### -2 金型製作

上記を元に金型製作を実施した。

### -3 トライ（部品取得）

完成した金型で切断実験を行った。ヤマセイ(株)の300tonプレス及び産業技術研究所のオートグラフにて、第2章の各項を検証するために実験を行った。

### -4 部品検査

愛媛県産業技術研究所及びヤマセイ(株)のマイクロスコープ、本金型用検査具、愛媛大学での軟X線撮影にて検査を行った。切断部の寸法精度・層間剥離の有無・ケバの長さ等を詳細に検査した。

### -5 評価検証

本金型は、第2章の各項を検証するための金型であり、その内容に応じて評価検証を行った。その経過及び結果は第2章の各項にて述べており、本項では割愛する。

### -6 金型の補正と精度向上

刃先の研磨等の一般的なメンテナンスや、シャープ角の検証等のために異なる刃先形状の刃を追加製作した。また、金型温度の検証に対応するため、カートリッジヒーター用の穴や熱電対の取り付け構造及び断熱板の追加設置を行った。

## 4-2 CFRP材カム切断（プレス方向に対し垂直方向への切断）を可能とする金型の構築

### -1 金型設計

プレス方向ではない方向からの切断が可能であることを立証するために、第2章の各項の経過を基に金型を設計した。

プレス成形切断する製品は、四方を壁で囲まれた箱状のものとし、全周をカム機構で切断する構造とし、穴加工を実証するための穴を設置した。なお、切断されるCFRPを成形するための温度調節機構及びその形状（取替式ブロック）も備えた。

## -2 金型製作

設計した型モデルに基づき、金型を製作した。

## -3 トライ（部品取得）

300ton プレスにて、数回にわたるトライを行った。

## -4 部品検査

本金型用検査具に載せ、マイクロスコープ等により剥離の有無、ケバの発生量、切断面の寸法精度等を検査した。

## -5 評価検証

検査結果により、切断結果を評価し良否を判断した。

## -6 金型の補正と精度向上

理論値を実際の金型で表現することは非常に困難であり、当初は満足な結果を残すことができなかった。しかし、補正を重ねると共に品質も向上した。

カムは可動物であり、可動部には動くための僅かな隙間が必要である。そのため、カム構造での切断はクリアランスにばらつきが生まれる。これを回避するためには、可動部を鋼板用の金型より高い精度で製作し、隙を可能な限り小さくする必要がある。しかし、その分可動時の摩擦等も大きくなるので、スムーズに可動させるための配慮も必要であった。

### 4-3 CFRP 材自動車部品用実用化形状金型の構築

#### -1 金型設計

4-1、4-2 の金型は試験用としての色合いが濃く、取得されるパネル形状や金型構造が各種の検証すべき事項に対応した、言わば基礎技術の確立を目的とした金型となっている。本項では、より実践を意識した技術を確認しノウハウを蓄積するために、パネルの取得に重点を置いた金型とした。

取得すべきパネルは、自動車のドアアウターとした。ドアアウターは一見ならかな形状をしており成形が容易と思われるが、キャラクターラインやサッシ部等に小さな R の折れがあり、またドアノブ部の凹凸等、成形困難な部分も併せ持つ。この形状での切断技術を確認すれば、CFRP を他の部品へ適用することも容易であると考えられる。

#### -2 金型製作

設計した型モデルに基づき、金型を製作した。

#### -3 トライ（部品取得）

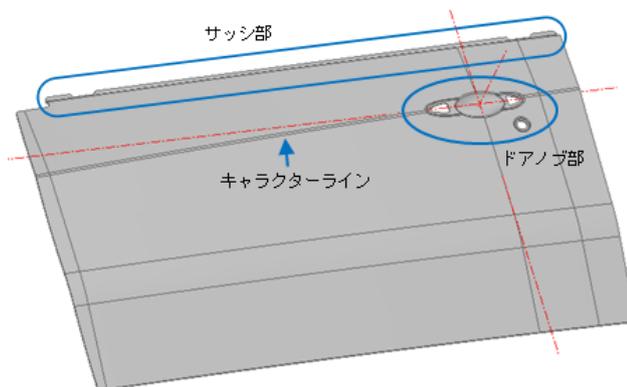


図 11 ドアアウター形状



写真 1 取得パネル

300ton プレスにて、数回にわたるトライを行った。

#### -4 部品検査

検査具に載せ、マイクロスコープ等により剥離の有無、ケバの発生量、切断面の寸法精度等を検査した。

#### -5 評価検証

検査結果により、切断結果を評価し良否を判断した。

#### -6 金型の補正と精度向上

数度の調整及び補正にて、型製作にあたり設定した確認項目は、ほぼ達成できたと考える。しかしながら、実用化を考え、更なる品質向上を目指すには、クリアしなければならない新たな課題も発見された。

##### A) 穴加工不良

成形／切断同時工程金型にて穴加工部を開放構造とした場合、成形不良が原因と思われる不良が発生した。よって、本金型では、穴加工部の成形性を優先した。そのため、穴加工用の切刃に第 2 章にて得た技術を十分に織り込むことができていなかった。今後は、高いレベルでの成形と切断との両立を実施したい。

##### B) 外周部樹脂溜まり

成形と切断とを両立させる過程において、切断部上面を切刃の待機スペースとして開放構造としたために、成形時に圧力を受けた樹脂が流動しそこに押し出され発生している。解消するためには、切断部の成形構造は開放とせず、後方へ退避する等特定の箇所に樹脂が集中しない構造が望まれる。

##### C) エッジ部樹脂・エア溜まり

成形時に板厚が減少し隙間が生まれたため、そこに樹脂が溜まってしまったと思われる。また、流動した樹脂がエアの排出経路を塞いだために、その隙間へエアも閉じ込められたものと思われる。意匠側に隙間を作らない金型の形状設定及び排出経路の確保・詰まりを発生させない構造が必要である。

これらの問題を解消することが、当面の課題である。

#### 4-4 ユーザーによる評価

本金型にて取得したサンプル品を、自動車メーカー及び自動車部品量産メーカーへ持ち込み、評価をした。外観検査が中心ではあったものの、一部不良部分を除き「綺麗にできている」と定性的ではあるが、高い評価を頂いた。また、これらのサンプルを各展示会などのイベントに出展したところ同様に高い評価をいただいた。まだ一部不十分である部分を改良することにより、より高い精度を追求する。

# 第5章 CFRP材の成形/切断同時工程金型の熱膨張量の構築と優位性検証

## 5-1 金型設計

鋼板用の金型は、通常成形工程用と切断工程用に、それぞれ別の金型を製作する。CFRP用金型の工程も同様に設定するのが無難である。しかしながら、成形工程と切断工程を同一の金型にて行うことができれば、型製作コストの低減・少設備での生産・製品生産時間の短縮・同一型による製品の寸法精度保証等、多大なメリットがある。本項では、その同一工程化が可能であることを立証するための検証を行った。

成形/切断の同時工程型（本型）にて形作られた製品と、成形/切断を別の工程で行った製品との比較を容易にするため、「第4章-2 カム切断型」と同じ形状とした。よって、切断機能はカム切断型と酷似した機構であるが、成形機能を付加した構造となっている。また、カム切断型にて得た知見を基に、カムガイドブロックの位置変更、カムリターンスプリングの構造変更等、細部に色々と手を加えた。

## 5-2 金型製作

設計した型モデルに基づき、外注メーカーにて金型を製作した。

## 5-3 トライ（部品取得）

300tonプレスにて、トライを行った。

## 5-4 部品検査

検査具に載せ、マイクロスコープ等により剥離の有無、ケバの発生量、切断面の寸法精度等を検査した。

## 5-5 評価検証

検査結果により、切断結果を評価し良否を判断した。

## 5-6 金型の補正と精度向上

前年度を含め、10回のトライを行った。当初は切断不良が多発した。それらの原因は、型構造に起因する被切断材の硬化不良ならびに切刃喰い込み不足と考えられる。しかし、“ストレート”タイプ（UD）のプリプレグのみの積層構成（層数及び表層の繊維方向等）では切断できなかったが、“クロス”タイプ（C）のプリプレグが含まれる場合には切断できた。この結果を追究したならば、前述した切断不良原因の解消にも繋がると考え、“クロス”が与える切断への影響について検証した。まず、クロスの効果を以下の3点に絞り、それぞれの検証を行った。

- A) 樹脂含有量の高さ（炭素繊維含有量の低さ）
- B) 含まれる繊維強度の低さ
- C) 炭素繊維が編まれていることによる疑似等方向性

これらの事項を、それぞれ異なる材料にて検証した結果、クロスの効果は等方向性によって得られる成形性の向上であると判断した。

これらの検証実験によって、以下の重要な点を理解した。

#### ○型の剛性

型の剛性が不十分であると、刃の喰い込み不足、クリアランスの変動等、色々な不具合が発生する。特に、カム切断の場合は機構上不利であるため、十二分に留意する必要がある。

#### ○成形性

成形状態が不良であると、切断時に層間剥離や繊維のバラケによるケバが発生する。今回の型は、トリムラインより外側がフリーであったために硬化が不十分である場合が多かった。『切る』構造のみならず『成形する』構造も十分配慮する必要がある。

これらの今回得た知見を、今後製作する金型に活かしたい。

### 5-7 ユーザーによる評価

本金型による成果物は、自動車部品量産メーカーに評価を頂いた。また、CFRP関連の事業をされている方にも評価して頂いた。その結果、コーナー部に繊維のヨレがあるものの、相対的には高い評価を頂いた。

# 第6章 全体総括

## 6-1 複数年の研究開発成果

研究開発成果として、CFRP の切断金型設計設定（基準）技術が確立できたことが非常に大きいと考える。特に、酒井国際特許事務をはじめ各参画機関のご支援の結果、本技術の成果物として特許を出願し審査請求したことが、今後の事業化に向けても有効な武器となり、川下ユーザーへの PR に役立っている。

本研究開発を開始した頃は、まだ CFRP は一般的ではなく、競合技術や競合メーカーも非常に少なかった。しかし、震災からの復旧・復興へむけた社会の動向がボーイング 787 のリリースと重なり、CFRP が一気にポピュラーなものへと変化を遂げた。それに合わせて競合技術の研究開発も進んだが、本技術は加工のサイクルタイムという面で圧倒的なアドバンテージを保持していると考えている。今後も本テーマを改良し、一日も早く事業化へ繋げたい。

## 6-2 研究開発後の課題・事業化展開

2年目の下旬に特許申請の目処が立ったころより事業化に向けての動きが加速し、現在も自動車メーカーを中心とした川下メーカーへの採用へアプローチを進めている。未だ正式採用には至っていないが、「第4章-3 CFRP 材自動車部品用実用化形状金型」や「第5章 CFRP 材成形/切断同時工程金型」の成果物をご覧頂くことによりユーザーメーカーの反応は良くなって来ていると感じている。

一方で研究成果物は「金型」とその「製作技術」であるが、今後の事業化戦略としては金型そのもの及び製作技術を秘匿し、その金型を使って取得する物を「商品」にしたいと考えている。なぜならば、特許等々で技術権利を取得・保護しても、金型はコピーが容易な商品である。これまでは設備を含む環境の制限により見合わせていた部品生産を、ヤマセイ(株)が Vuteq グループの一員となることで、今後は考慮することが可能となった。そのことも商品の実現性に繋がり、ユーザーの反応を良くした一因となっている。

事業化に向けての最大の課題は重量単価が鉄の 10 倍というコスト面である。これは川上メーカー殿の課題であり、部品製造者としては如何ともし難い。しかし、我々もその結果を待つのではなく、部品製造工程の前工程と後工程（組立作業、接着工法、部品強度 UP による構造見直し・部品点数削減）を含め、部品単体ではなくユニットとして、そのコスト課題を吸収したいと考え、これらの技術開発も今後の課題と捉えている。

今後の事業化及び課題に対する研究開発には川下ユーザーを巻き込む必要があり、CFRP 製造技術の信頼性を真の商品として、CFRP 部品の採用に向けて川下ユーザーと共に事業化へ邁進したい。