

博士論文（要約）

熱可塑性 CFRP の力学特性発現メカニズムと
構造部材への適用性に関する研究

松 尾 剛

目次

第 1 章 序論.....	- 1 -
1.1 研究の背景.....	- 2 -
1.1.1 自動車用構造部材の軽量化と主要な設計要件.....	- 2 -
1.1.2 自動車用軽量材料の研究開発動向.....	- 11 -
1.1.2.1 鉄鋼のアプローチ.....	- 11 -
1.1.2.2 アルミ合金・非鉄金属のアプローチ.....	- 14 -
1.1.2.3 樹脂材料のアプローチ.....	- 17 -
1.1.2.4 繊維強化複合材料のアプローチ.....	- 17 -
1.1.3 炭素繊維強化複合材料による軽量化への可能性と課題.....	- 21 -
1.1.3.1 軽量化ポテンシャル.....	- 21 -
1.1.3.2 CAE による構造設計と力学メカニズム解明の難しさ.....	- 23 -
1.1.3.3 材料モデルのための特性評価.....	- 24 -
1.1.3.4 曲げ・圧縮メカニズムへの着眼.....	- 25 -
1.1.4 熱可塑性 CFRP の基盤技術・生産技術と実用化への課題.....	- 26 -
1.1.4.1 基材化技術 ー連続繊維系・マット系・チョップドテープ系ー.....	- 26 -
1.1.4.2 炭素繊維と樹脂の接着技術.....	- 29 -
1.1.4.3 圧縮成形による部材製造技術と生産速度.....	- 31 -
1.1.4.4 構造部材設計における熱可塑性 CFRP の材料力学.....	- 32 -
1.1.4.5 温度・時間・速度に依存する力学特性.....	- 34 -
1.2 研究の目的.....	- 37 -
1.3 本論文の構成.....	- 38 -
参考文献.....	- 41 -
第 2 章 熱可塑性樹脂単体の弾塑性変形と粘弾性挙動（要約）.....	- 45 -
2.1 緒言.....	- 46 -
2.2 結言（要約）.....	- 46 -
参考文献.....	- 47 -
第 3 章 一方向熱可塑性 CFRP の引張特性（要約）.....	- 48 -
3.1 緒言.....	- 49 -
3.2 結言（要約）.....	- 49 -
参考文献.....	- 50 -
第 4 章 熱可塑性 CFRP の繊維方向せん断特性とその温度依存性（要約）.....	- 51 -
4.1 緒言.....	- 52 -
4.2 結言（要約）.....	- 52 -

参考文献.....	- 53 -
第 5 章 一方向熱可塑性 CFRP の繊維方向圧縮破壊メカニズム（要約）	- 54 -
5.1 緒言.....	- 55 -
5.2 結言（要約）	- 57 -
参考文献.....	- 57 -
第 6 章 一方向熱可塑性 CFRP の繊維方向曲げ特性と樹脂粘弾性（要約）	- 59 -
6.1 緒言.....	- 60 -
6.2 結言（要約）	- 61 -
参考文献.....	- 62 -
第 7 章 一方向熱可塑性 CFRP の面外強度（要約）	- 63 -
7.1 緒言.....	- 64 -
7.2 結言（要約）	- 64 -
参考文献.....	- 65 -
第 8 章 不連続テープランダム積層材の力学特性と中空フレームの設計および性能評価（要約）	- 66 -
8.1 緒言.....	- 67 -
8.2 結言（要約）	- 69 -
参考文献.....	- 69 -
第 9 章 結論（要約）	- 71 -

第1章 序論

1.1 研究の背景

1.1.1 自動車用構造部材の軽量化と主要な設計要件

自動車は人間社会の生活基盤を支える移動手段としてますます不可欠な機械となってきた。昨今は、先進諸国のみならず、BRICS など今後経済が急速に発達すると言われる諸国においても、個人や家族単位で所有することが当然のように浸透してきている他に例がない大型機械である。一方、自動車が普及拡大するにしたがって、排ガスによる地球規模での環境汚染や石油などのエネルギー消費量の増大による資源不足がクローズアップされ^{[1-1][1-2][1-3][1-4][1-5]}、また、高齢化社会時代の到来も相まって、交通安全性に対する社会的責任も追及されるようになってきた^[1-6]。このような背景から、自動車が将来も人間社会に貢献していくためには、解決しなければならない課題が常に眼前に存在しているとも言えよう。Fig.1.1^[1-7]は、エネルギー資源の割合とその用途の部門ごとの割合を示したものであり、Fig.1.2^[1-7]は、各種消費財ごとに、原料・製造・搬送・運用にライフサイクルを分類した際のエネルギー消費比率を示す。自動車の運用時、すなわち、走行時のエネルギー消費比率の高さがうかがえる。次に、Fig.1.3^[1-8]に国産乗用車の個々の市販車名毎に、車体重量に対する燃費の関係を示す。車重の軽量化によって如何にエネルギー消費低減が可能であるか、その効果が示される。こうして、環境保護および低エネルギー消費、さらには、安全性・信頼性への意識の高まりから、自動車製造部門においては、走行時の性能や安全性を損なうことなく、燃費を向上させる様々な先進技術が投入され^{[1-4][1-5]}、動力源や制御機器の電動化だけでなく、車重の軽量化にも注目が集まってきている^[1-9]。企業が社会的責任を果たすため、または、経済発展に貢献していくため、さらには、国家が持続型環境調和を企図するため、自動車の軽量化を達成する基盤技術開発は、いずれの企業においても国においても最重要プロジェクトの一つとして取り組まれている^{[1-10][1-11]}。

自動車は、ドアパネルやルーフ、フード、トランクも含めたボディ部分、エンジンおよびトランスミッションを含む駆動系部品、また、サスペンション、ステアリング、ブレーキ、タイヤなどを含む足回り部分、シートやインスツルメントパネルを含む内装部品、といった、様々なアセンブリ機械や電装部品の総合力で一個の自動車としての性能を発揮する^{[1-12][1-13]}。

その中で、自動車の重量の比較的大きな部分を占めるのが上記ドアパネルなども含めたボディ部分である^{[1-12][1-14]}。従って、ボディは軽量化の主要ターゲットとして捉えられつつも、要求機能を満たすべき役割も大きい。第一に、人や物を乗せる空間を保持していることが最低限必要な機能であり、乗員数や搭載する物などの用途に合わせて一定以上の大きさの骨格構造を形成していなければならない。そして、移動中には乗員や搭載物の安全性・安定性を確保することが求められる。また、走行するのに必要なエンジンや足回り部品を支える役割もある。続いて、次に重量割合の大きい部分が、地面に対して「走る・曲がる・止まる」を実現し、ボディ骨格の動きを制御する役割を担う足回り品である^{[1-13][1-14]}。最も普及台数が多い一般的な4輪自動車について、その各構成部品の重量内訳を、文献^[1-14]や WorldAutoSteel が主導している自動車軽量化プロジェクトのデータベース^{[1-15][1-16]}を参考に概算を見積もると、

Fig.1.4 に示す分析結果が得られる。これを見ると、パネル類も含めたボディと足回り部品で全重量の半分以上を占めていることが分かる。ここからさらに、モータやギア部品などの回転機構や摺動機構を除くと、主に「移動空間を提供し、安定走行を支える骨格と外殻」として、パネル構造とフレーム構造で構成されたボディ構造と足回り構造が抽出される。ボディ構造の構成部材の実例を Fig.1.5^[1-12]に、足回り構造の外観図を Fig.1.6^[1-17]にそれぞれ示す。パネル部材とフレーム部材がほとんど占めていることが見受けられる。

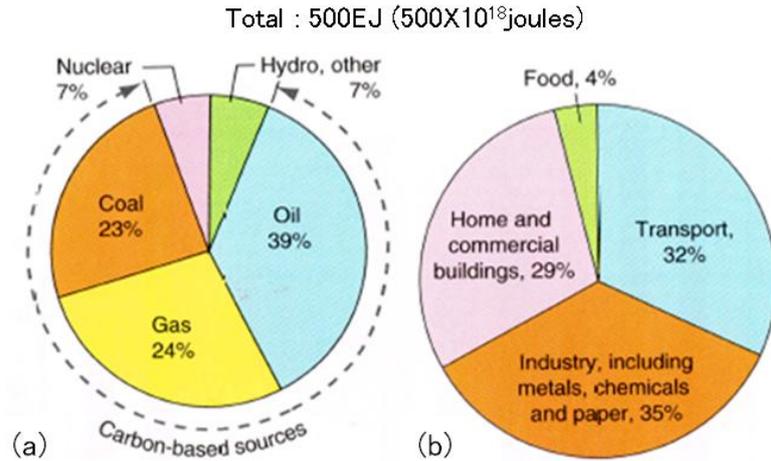


Fig.1.1 World energy consumption (a) by source and (b) by use^[1-7].

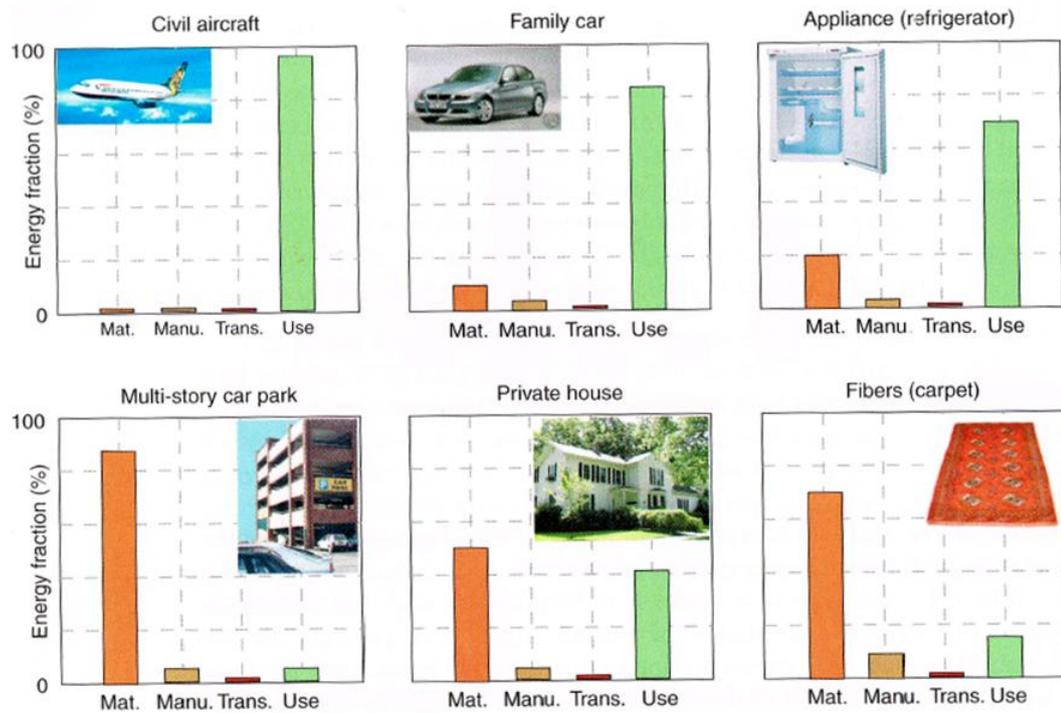


Fig.1.2 Approximate values for energy consumed at each phase of life-cycle of products^[1-7].

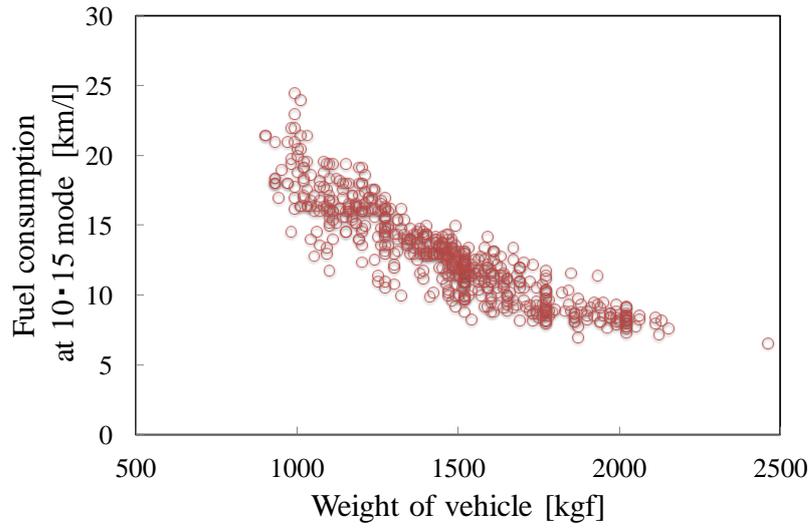


Fig.1.3 Vehicle weight vs fuel consumption of family car in Japan^[1-8].

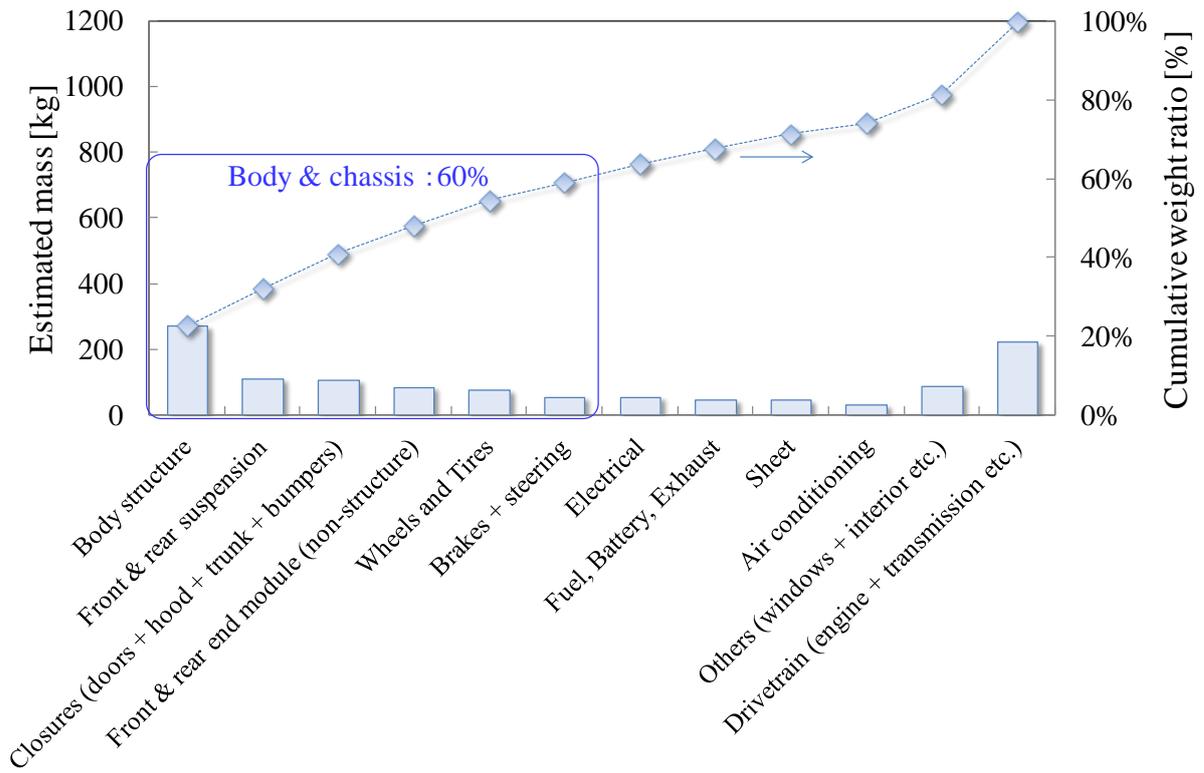


Fig.1.4 Estimated weight ratio of each component of present steel vehicle.

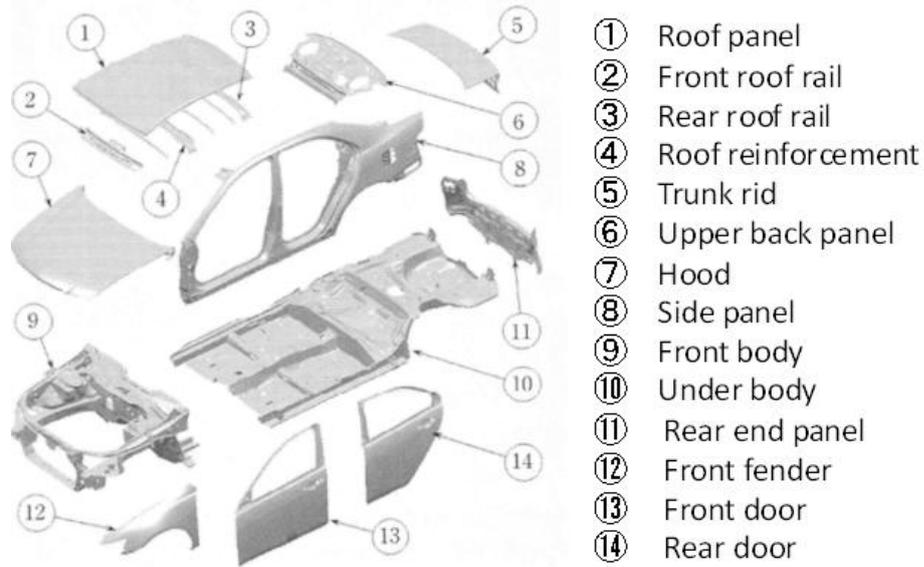


Fig.1.5 Body structure^[1-12].

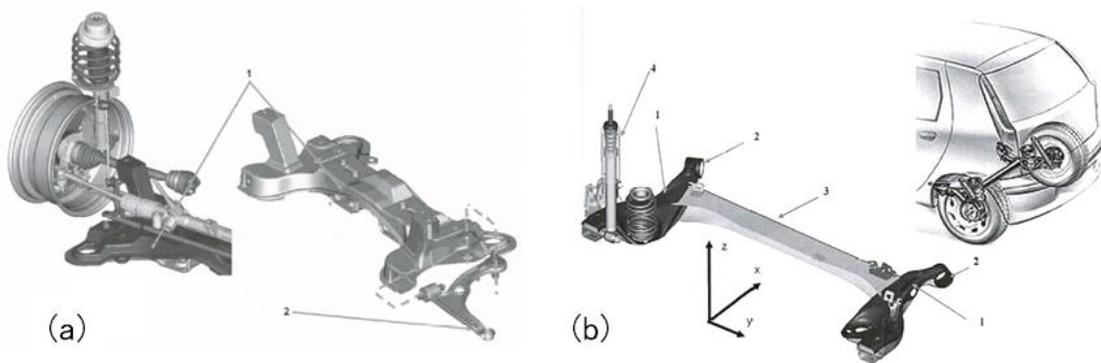


Fig.1.6 (a) Front suspension and (b) rear suspension^[1-17].

ここで、Fig.1.4 で示す重量内訳から、最も重量配分の大きいものを順に示すと、パネル類を除いたボディ骨格、次に、サスペンションと続く。サスペンションは Fig.1.6 に示すようにサブフレームも含み、サブフレームとボディ骨格を連結して「走る」と「載る・乗る」をつなぐ役割を担う。このボディ骨格およびサブフレームは、乗員だけでなくエンジンやトランスミッションなど重量物を支え、走行安定性を支える主要骨格を形成する。それぞれの構造を具体的に見ると、ボディ骨格は Fig.1.7^[1-17]に示す通り、主に乗る領域を支持するアンダーパネルに対し、剛性を強化するために様々な断面形状のフレーム構造が連結して、内側に必要な空間を保持したかご型構造を有している。また、サブフレームも、Fig.1.8^[1-17]に示すように、基本的には中空フレーム構造を連結した骨格を形成していることが分かる。つまり、人が載る空間を保持して、かつ、走行時の全体剛性を保証するために、フレーム構造を多用していると考えられる。したがって、基本構造である中空フレームの剛性を軽減することなく、軽量化を果たすことができれば、車体全重量の軽減を大きく前進させることができる。

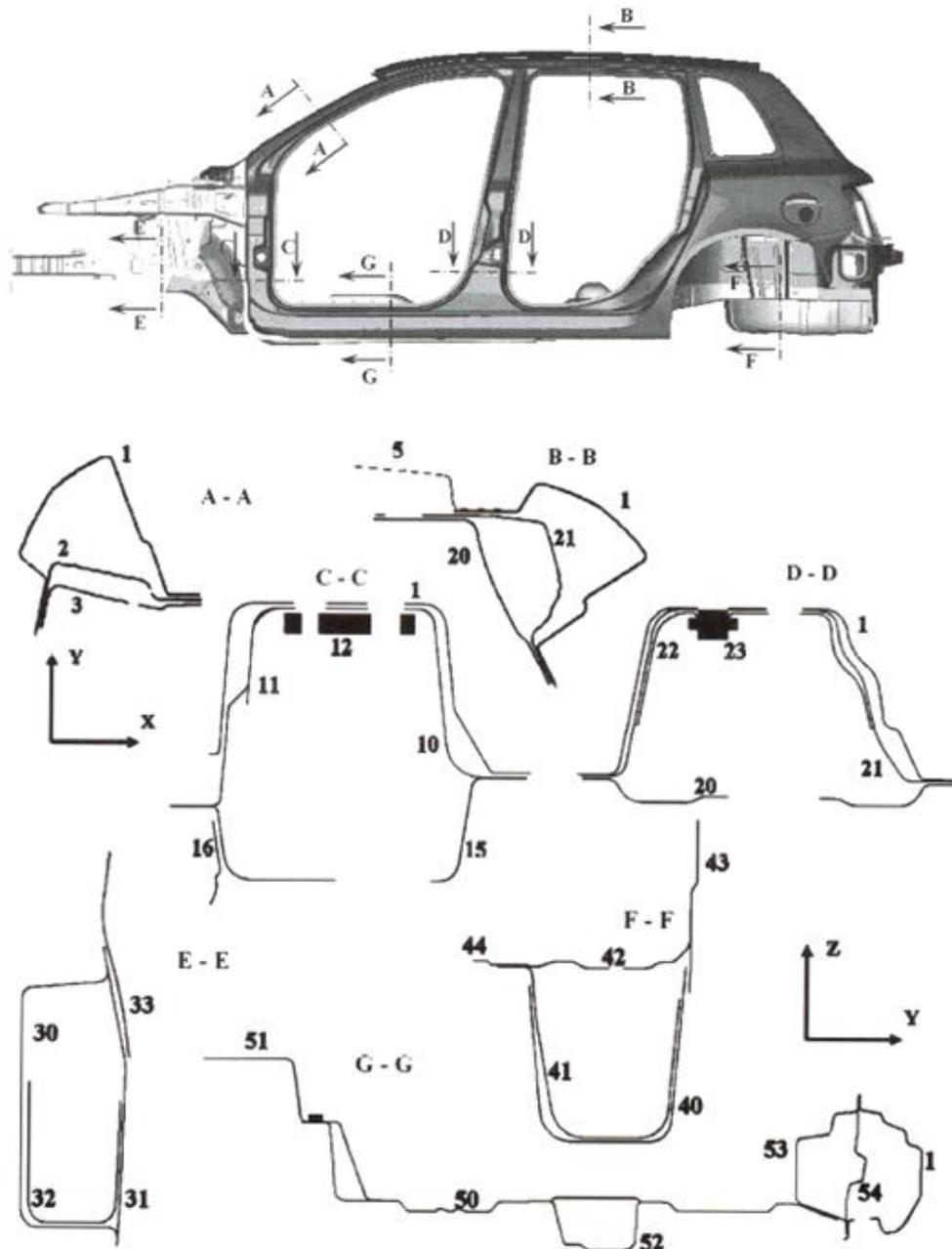


Fig.1.7 Example for body structure and its cross sections^[1-17].

ところで、これら構造部材は、剛性以外にも特に走行中の乗員の安全面を保証する重要な性能を備えている必要がある。それらを整理すると、①衝突安全性、②走行安定性、③高耐久性に大別される。他にも NVH（騒音・振動・乗り心地）、意匠性、気密性なども商品性を高める重要な性能である^{[1-18][1-19]}が、ここでは、これらについては詳しく述べない。一方、上記3つの性能に限っては、構造としての性能が不足すると直接的に乗員の安全面に影響を及ぼすことが危惧され、軽量化を目指す上で重要なスペックとなる。したがって、本節では、これら3つの性能に関して、構造信頼性に関わる重要な設計指針を考慮して説明する。

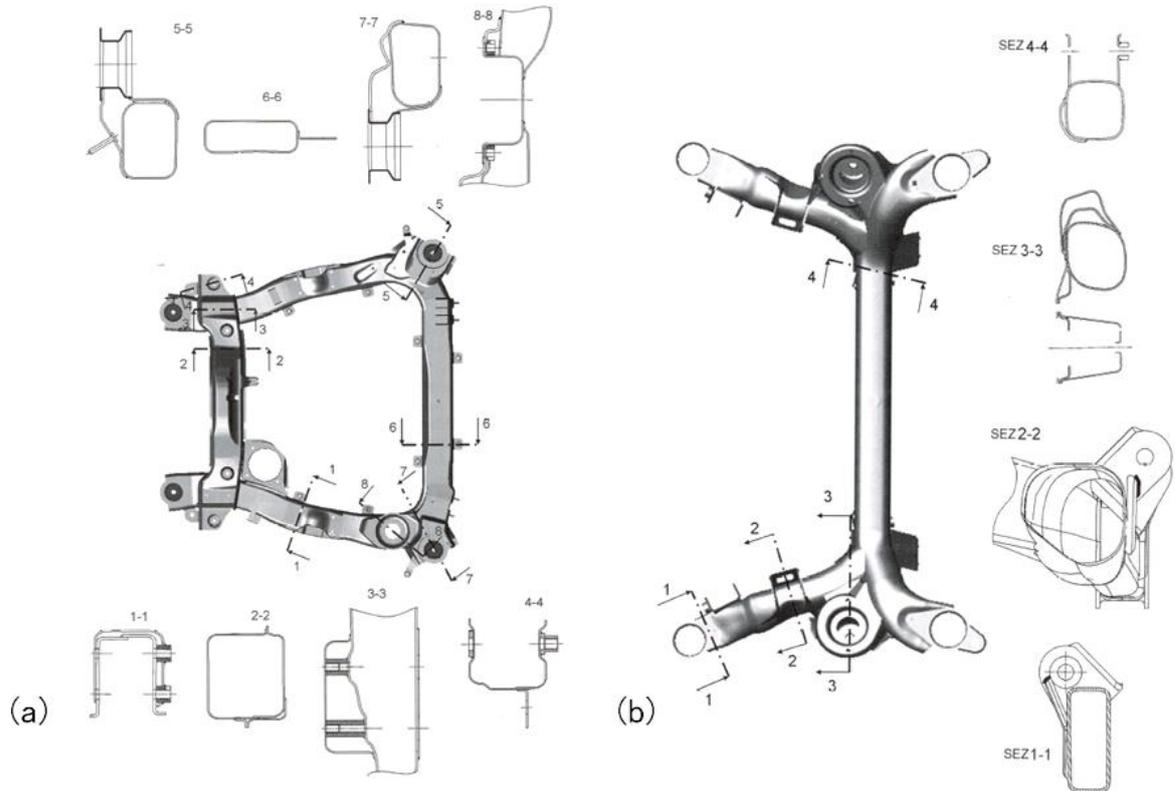


Fig.1.8 Example for front sub-frame and rear sub-frame with their cross sections^[1-17].

①衝突安全性

衝突時の乗員保護を目的とした規格・規制の厳格化は、特にモーターゼーションが20世紀後半に劇的に進んだ国々で先行して進められてきた。昨今、エアバッグは標準搭載となり、さらには自動停止システムの実用化など、様々な安全技術が搭載されるようになってきている。一方で、ボディ構造を成り立たせる構造や材料の設計において、その高強度化・高耐衝撃技術の投入が、着々と衝突安全性能を高めてきたことには相違ないであろう。これら安全技術の複合的な作用も一助となり、実際に交通事故による死亡率は年々減ってきている^[1-6]。

通常、全く同じ材料を同じ形状・寸法で軽量化を達成するには、部材の肉厚を薄くして、材料の量を減らすことでしか対処出来ないが、構造としての強度、耐衝撃性能は肉厚の低下とともに当然劣化する。しかし、高強度の材料に置き換えることができれば、まず減肉化による耐衝撃性能の低下を防ぐことができると考えられる。ここで重要なのは、強度だけ向上させても、脆性的に破壊してしまうと、衝撃吸収性能は強度の向上に逆行してむしろ低下してしまう。すなわち、新規に適用する材料の応力ひずみ特性において、最大応力到達後に脆性的か延性的かを示す一つの指標である伸び率が、車体構造部材用の材料設計において重要なポイントとなる^{[1-18][1-19][1-20][1-21]}。例えば、Fig.1.9に示すように、側突時の乗員保護は、サイドピラーやドアパネルが衝突物によって変形させられる過程で、どれだけ衝突エネルギーを吸収できるかによって設計されなければならない。また、Fig.1.10に概要を示す前面衝突時には、キャビン（室内空間）より前に位置するエンジンルーム等で衝突エネルギーを吸収する

一方で、キャビンを形成するボディ骨格の変形がほとんど無いように設計しなければならない。Fig.1.10(a)には、前面衝突時に乗員を保護する役割を担う主要なフレーム部材を示す。また、Fig.1.10(b)に示すように、このような衝突安全設計を実現するために、有限要素法を用いた数値シミュレーションが有効と考えられており、従来より、材料特性パラメータを有限要素に実装し、部材全体の衝撃荷重に対する変形をコンピュータ上で予測する CAE (Compute Aided Engineering) 技術の精度向上が求められている^{[1-21][1-22][1-23]}。

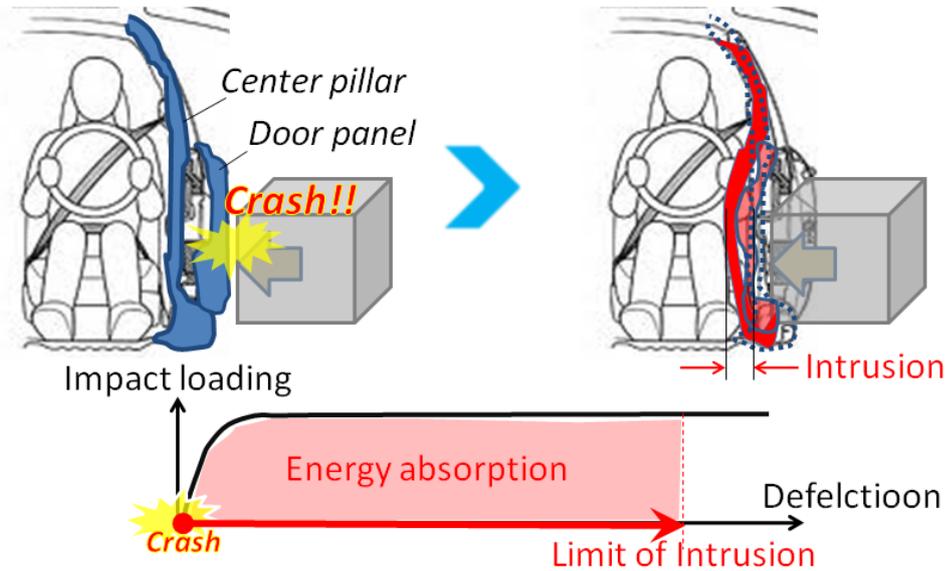


Fig.1.9 Side impact safety by absorbing side collision energy.

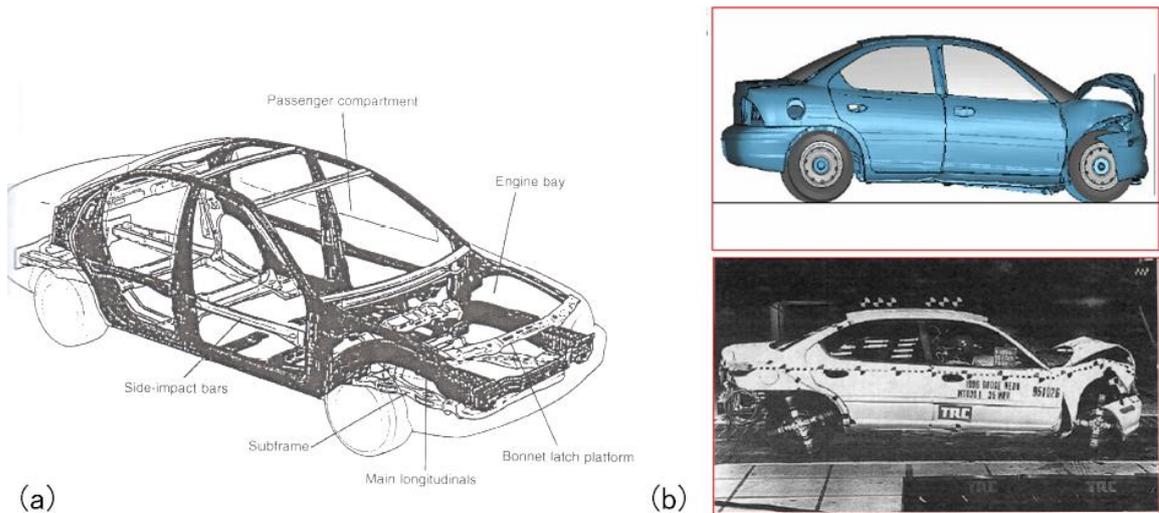


Fig.1.10 (a) Main longitudinal members for absorbing a frontal collision^[1-18] and (b) comparison of FEM simulation and experimental collision test^[1-22].

②走行安定性

衝突安全性がパッシブセーフティだとすると、走行安定性はアクティブセーフティと言える。つまり、走行中に、他の走行車両や障害物が突発的に前方に現れた際、衝突する危険を如何に回避するかを表す性能である。当然ながら、「曲がる・止まる」を実現する各種機構とそれをサポートする安全技術、例えば、ブレーキ力制御機能やコーナリング時の横滑り防止機能などの技術革新が回避性能の向上に一役買っているが、前後および左右のタイヤの接地力のバランスは、Fig.1.11 にモデル図を示すように、ボディ剛性とサブフレーム剛性によっても保証されなければならない。ボディ剛性には様々な指標があり、主に前後左右のタイヤからの力の入力に応じて、曲げモードとねじりモードに大別される。これに関連して、ボディ剛性を実測するための台上試験も行われている。特に、走行時はタイヤからの入力は一動的に与えられるため、剛性が低くてボディが変形しやすいと突如タイヤ反力を失う。例えば、緊急回避でハンドルを切って突発的にコーナリングに移行する瞬間、動的な操舵入力によって、車体に遠心力(横力)および車体を回転させようとするヨーモーメントが過渡的に発生する。この時、ボディやサブフレームのねじり剛性が低いと、ボディが変形しやすくなり、左右タイヤどちらかが路面から離れて接地力を脱してしまう。こうなると、他の接地しているタイヤが横力やヨーモーメントを支え切れなくなり、ハンドリングに抗って車が意図しない方向に滑ってしまう可能性がある^{[1-24][1-25]}。最近では、Fig.1.12 に示すように、ボディ骨格のフレーム構造を有限要素の Wire frame でモデル化し、走行時の横加速度とボディ変形すなわちボディ剛性の関係を数値解析シミュレーションによって設計する試みが行われている^[1-26]。ここでも CAE 技術が構造設計や性能評価をアシストしており、横加速度が高ければボディ変形も大きくなることが実験とシミュレーションにより説明されている。このように、走行性能に影響を与えるボディ剛性の役割を精度良く定量化できるようになりつつあり、走行安定性を担保する信頼性設計に活かされている。

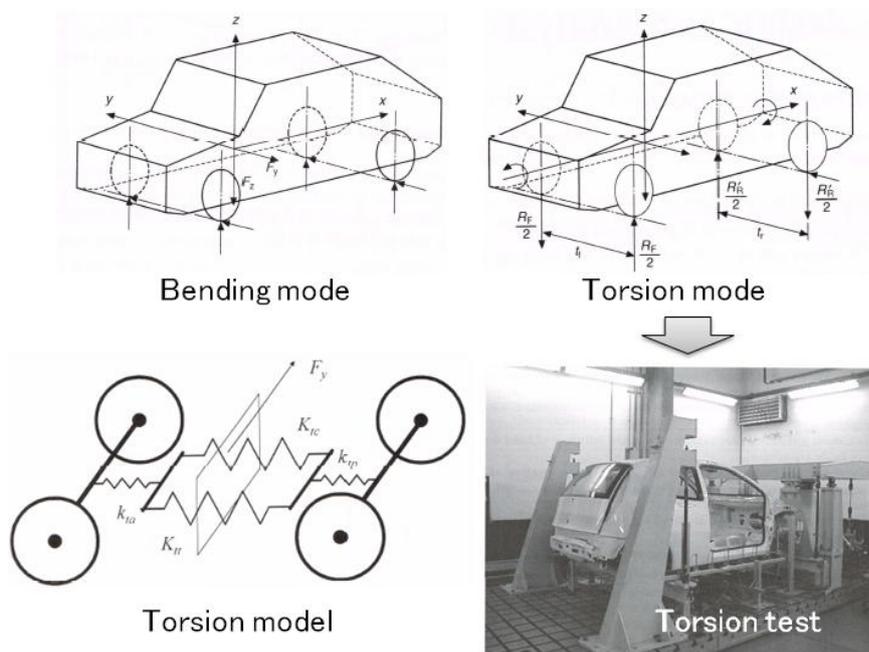


Fig.1.11 Loading mode for-body and chassis structure and torsion test for body structure ^{[1-17][1-18]}.

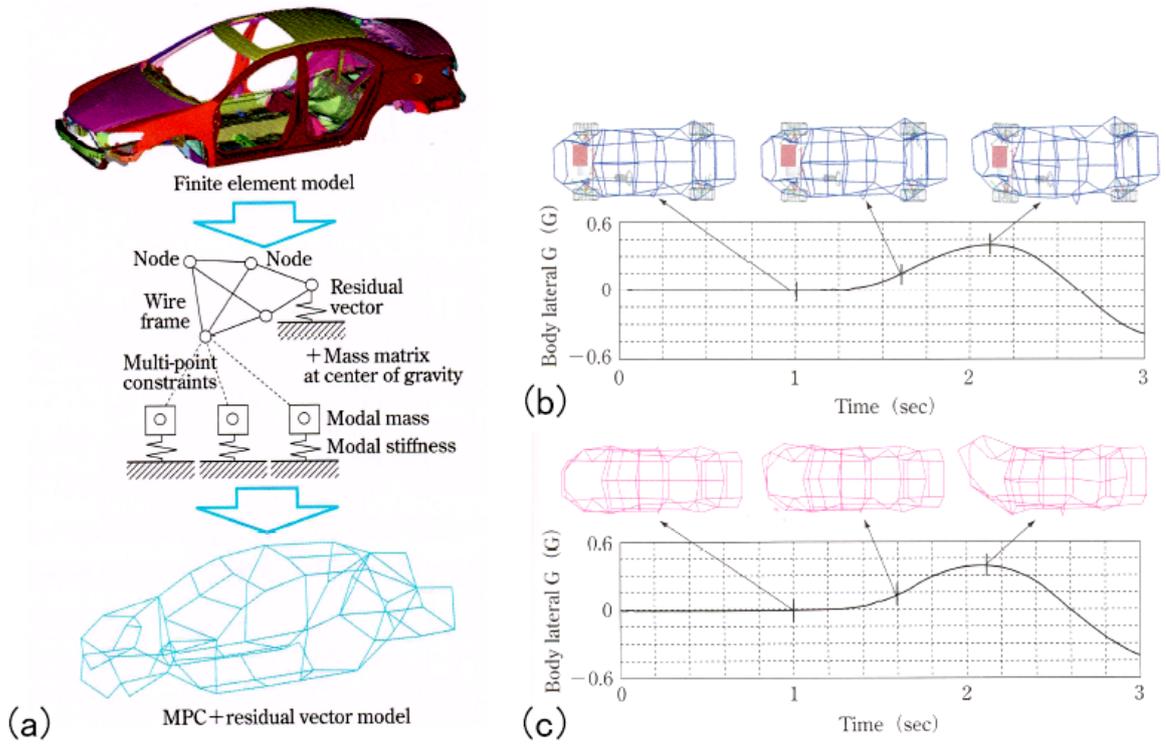


Fig.1.12 (a) Multi-body dynamic model with structural element, (b) simulation results of body deformation during slalom maneuver and (c) test results ^[1-26].

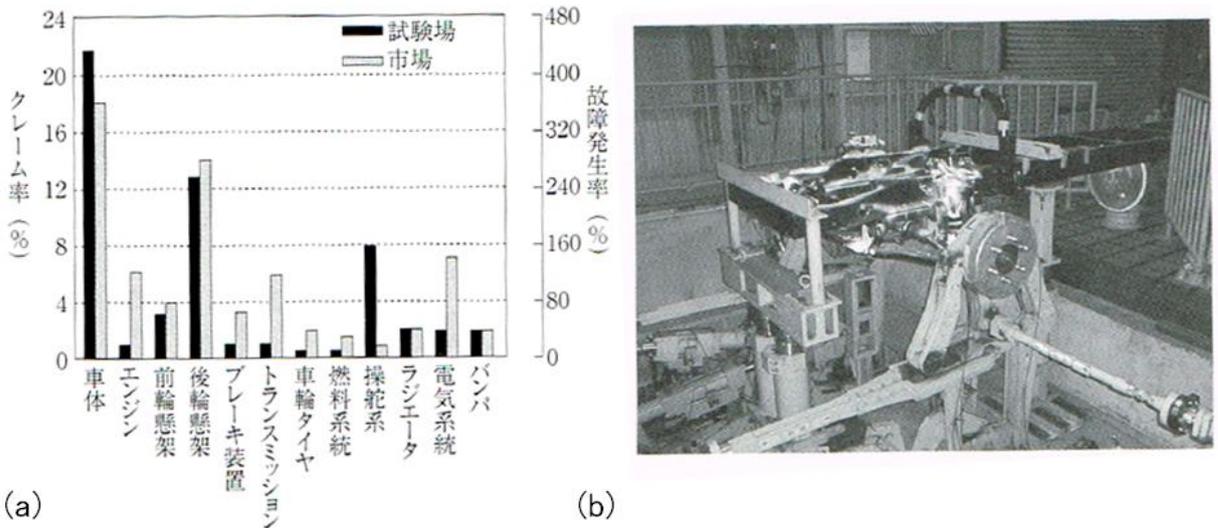


Fig.1.13 (a) Failure incidence rate at rough road test and claim rate from market and (b) fatigue test of suspension ^[1-28].

③耐久性

②で述べたように、走行時には絶えずボディ骨格、足回り部材に走行路面からの反力が及ぼされている。四輪ともタイヤには常に路面から力が及ぼされ、その力はタイヤホイールと接続されたサスペンションを介し、さらには、接合部を伝わってボディにも与えられ、ボディそのものが曲げられたり振られたりする。ボディがサスペンション機構のダンパーとバネによって、いくらかタイヤ反力を軽減するのに対し、足回り部品は直接的に走行地面からの反力を受ける。当然、これら走行中に構造部材に与えられる力やモーメントでは、衝突によって極限荷重が及ぼされる場合と違い、それだけで壊れることはまずない。しかし、走行中は常に路面からの反力や加減速・ヨー運動による慣性力を受けているため、繰り返し荷重の入力に対する耐久性の維持が課題となる。耐久性に関しては、たとえ安全運転しかされない自動車であっても、市販され使用される全ての自動車が直面する問題と言え、信頼性開発の中で最も重要な要素の一つである^[1-27]。耐久性がもし足りなければ、走行時に突如部材・部品が疲労破壊し、走行不能、最悪の場合には、走行制御不能となり、二次的に衝突事故を起こす危険性がある。このようなことから、Fig.1.13(b)に示すように、部材単体の耐久性を評価する様々な台上試験、および、実車走行耐久テストが実車開発段階で行われている^[1-27]。さらには、Fig.1.13(a)で示すように、市場調査によりどの部品が壊れやすいかその頻度を調べ、悪路走行テストによる故障発生率との相関性をみて、耐久性に関する弱点を明らかにする試みが行われている^[1-28]。これによると、ボディや足回り部品が特に耐久性で問題となっていることが分かっている。このことは、ボディや足回り部品が、走行安定性を保証するために他の部材より高い剛性を確保しているため、路面からの絶え間ない力の入力に対し、その反作用としての反力を高い配分率で受け持っていることが要因であると示唆される。したがって、様々なモードの力の繰り返しに対する、ボディや足回り部品の高い耐久性能が、自動車の品質や信頼性を決める最重要スペックであると言える。

1.1.2 自動車用軽量材料の研究開発動向

以上、説明してきたように、自動車のボディ・シャシなど、重量の大半を占める構造部材は、自動車の信頼性とパフォーマンスを保証する重要な役割を担っている。一方で、自動車の保有台数は今後も数十年以内に劇的に伸びることが予想され、一台一台の走行時の消費エネルギーを極限まで低減することが企業や国家の義務である。そのような状況において、従来も現在も、自動車の構造部材に適用される各種材料は多種多様な技術が開発されてきており、対軽量化性能の向上に大いに貢献してきた。今後もさらに軽量化技術の開発は活発化していくことが予想される。本項では、鉄鋼・非鉄金属（アルミ合金・マグネシウム）・樹脂・繊維強化プラスチック（FRP）といった主力材料または有力材料の、車体構造軽量化へ向けた取り組みについて調査し分析する。

1.1.2.1 鉄鋼のアプローチ

中でも、鋼板材料の高強度化技術とそれに伴う成形加工技術の高度化は、衝突安全性能と軽量化の両立に最も貢献してきたコア技術であり、世界中の関連部門を巻き込んで、今も各

国、各企業間で開発競争が繰り広げられている。

特に目を引くのが、世界の主要な鉄鋼業界と自動車業界が手を組んで進められた、自動車軽量化のための共同開発プロジェクト、ULSAB (Ultra Light Steel Auto Body) において、その研究成果がまさに実用化されるに至っている点である^{[1-29][1-30][1-31][1-32][1-33][1-34]}。このプロジェクトでまず最初に進められたのが、Fig.1.14 に示すように、ボディを各部材毎に抽出して、それぞれに適材適所に組成すなわち強度や伸びといった力学パラメータの異なる様々な鉄鋼材料を採用し、全体剛性や強度の性能を従来自動車ボディと同等以上を目指すように設計することである。開発された鉄鋼材料の応力ひずみ特性、および、主な適用部材の割り当てを Fig.1.15 に示す。ただし、ULSAB プロジェクトでは、単に鉄鋼材料のハイテン化を目指し、それを衝突部材に適用して性能を上げることを目的とするだけでなく、その部材形状に対応した製法についても新技術を投入している。通常、強度を上げるだけでは延伸性が下がって加工しにくくなり、それによって製造コストが上がってしまう。そのため、加工方法についても一工夫が必要となる。例えば、Fig.1.16(a)に示すように、ハイドロフォーミングという製法が、サイドメンバーのシームレス化の実現に貢献している。これによって、パイプの断面形状と曲げ形状をある程度任意に形づくることができ、接合数の低減と要求に応じた剛性設計の両立が可能となる。また、Fig.1.16(b)に示すテーラードブランクは、板厚や強度の異なる鉄鋼材料を同時にプレス成形する製法であり、不必要な肉厚、強度を極力少なくするよう、それぞれの材料の適所を見極めることによって、軽量化を実現することができる。このような、高強度化と多品種の材料開発、さらに、自由度の高い設計を可能とする新たな加工技術の組み合わせによる、技術のブレークスルーによって、実際にボディ重量の大幅な軽量化を達成することが可能となった。この関連のプロジェクトは、さらにドアやフードなどのパネル類、足回り部材の軽量化へと開発段階を進めてきた^{[1-31][1-32]}。そして、最近では、FSV (Future Steel Vehicle) というプロジェクトへと名前を改め、今なお新しい技術開発が進められている^{[1-15][1-16]}。FSV では、電気自動車 (BEV) やプラグインハイブリッド自動車などもターゲットに加え、ボディ構造の根幹を見直して、各種鉄鋼材料の適用部材に対する細分化と一体成形加工の多用途展開を進めている (Fig.1.17)。また、CAE においても新たな開発技術を導入しており、それが最適トポロジー設計という、ボディ骨格の各部材毎の断面や形状を、数値解析によって最適化する手法である。ここでは例えば、前項で説明したようなボディ剛性や衝突安全性、それに加えて、重量などを目標値に設定し、それぞれに係数を付与して重み付けしたものを様々な最適化理論によってあるポテンシャル関数として、それが最大化するように、ボディ構造の形状を次々と変えてより良い形状が探索される。その最適化プロセスの概要を Fig.1.18 に示す。昨今のコンピュータ処理速度の向上や、計算プロセス理論の適用が、こういった手法の実用化に貢献していることが想像できる。

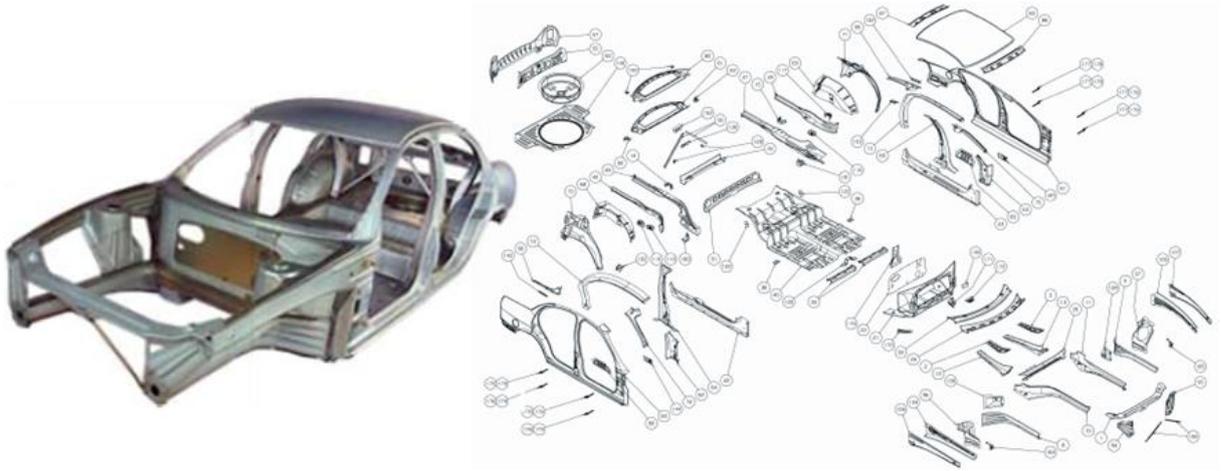


Fig.1.14 ULSAB model and structural parts [1-29].

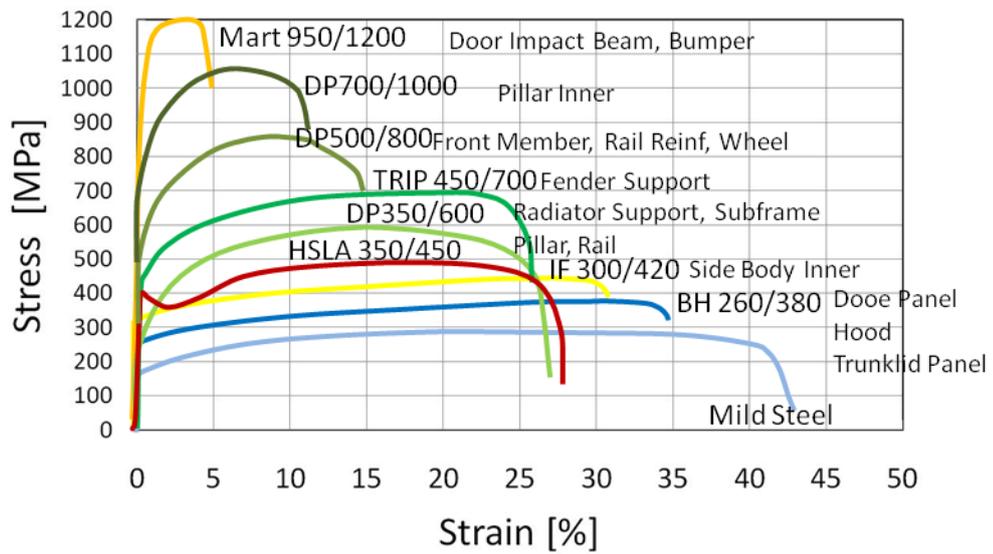


Fig.1.15 Developed high-strength steel and applied parts [1-29][1-30].

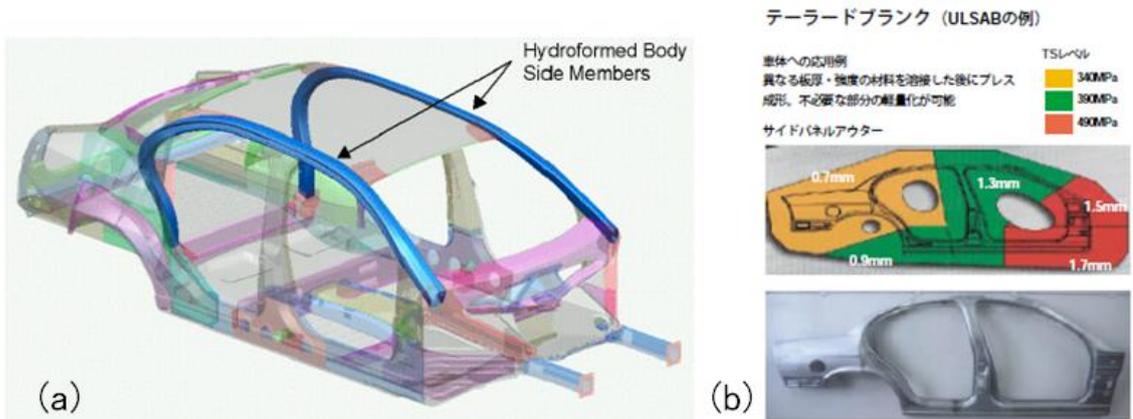


Fig.1.16 (a) Hydroforming for side rail and (b) Talored blank for side body [1-28][1-29].

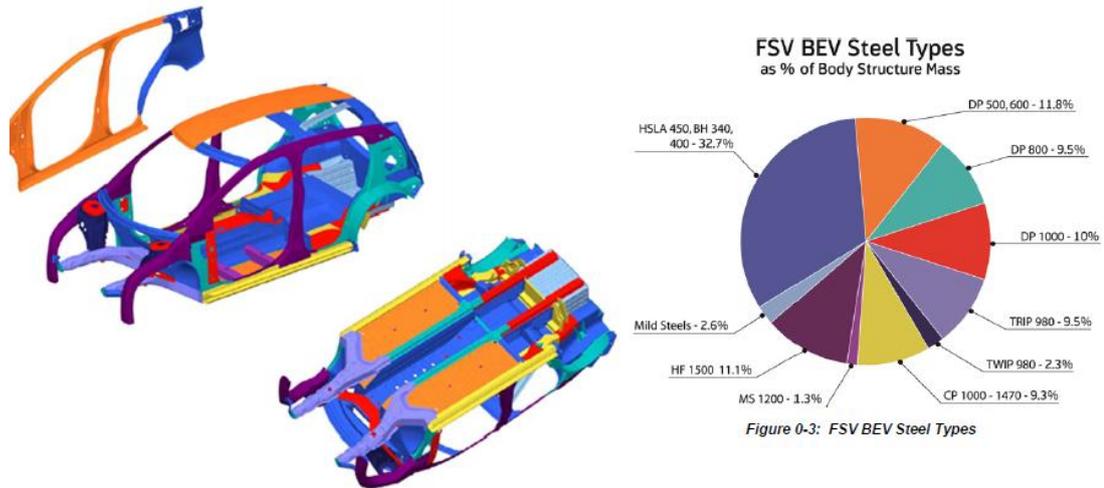


Fig.1.17 Future steel vehicle project and ratio of steel types for body structure [1-15][1-16].

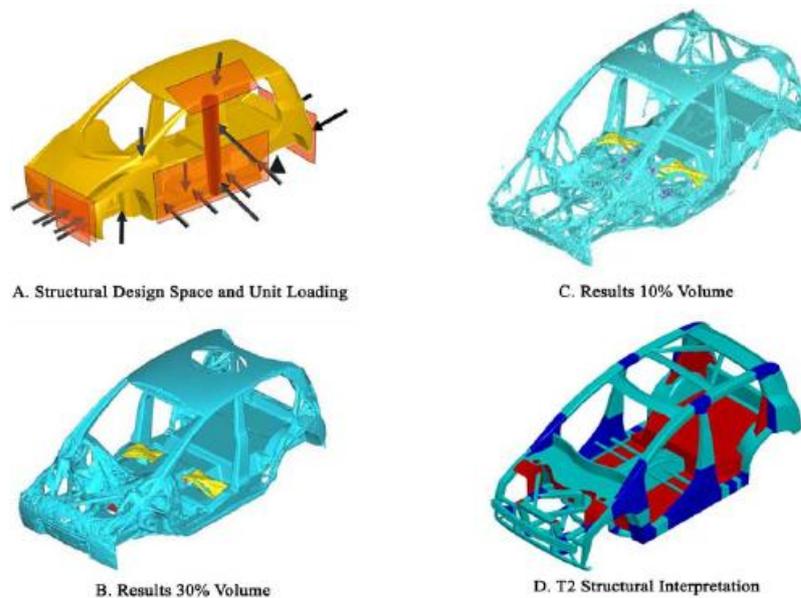


Fig.1.18 Topology optimisation procedure [1-15][1-16].

1.1.2.2 アルミ合金・非鉄金属のアプローチ

アルミニウムは鉄の 1/3 の比重であり，他の元素（Cu, Mn, Sn など）との合金や熱処理によって強度を高めることができる．そのため，比強度で鉄鋼材料を上回る種類のものも存在し，鉄鋼材料に置き換わって軽量化に貢献できる材料として，従来より自動車の様々な構成部品に適用されてきた^[1-35]．特に，押し出し成形によって複雑な断面を有するフレームを連続して造ることができるのが特徴としてあげられる．Fig.1.19 に示すように，押し出し成形材は，長尺にも対応して，その形状を様々な加工方法によって曲げることができるため，任意のボディ骨格をシームレスで形作ることができる^[1-35]．これによれば，部品点数を削減でき，剛性低下を招くためにどうしても補強しなければならない接合部を軽減でき，結果的に軽量ボディを実現することができる．Fig.1.20^[1-36]にアルミ押し出し材をボディ骨格に適用した実例を示

す。また他にも、アルミ合金を用いたプレス成形材によるパネル部材への適用例 (Fig.1.21(a)) や、鍛造材のサブフレームへの適用による軽量化の実用例 (Fig.1.21(b)) もあり、主要な構造部材の軽量化に貢献している。しかしながら、これらはまだ高級車クラスへの適用にとどまっているのも事実である。最もネックなのはその成形速度であり、高生産速度の実現には、プレス成形が望ましいと考えられているが、鉄鋼材料に比べると成形不良が生じやすく、破断やしわを起こさない成形条件の見極めが難しいと言われている^[1-35]。

マグネシウムはアルミニウムよりさらに軽い金属であるが、製造時に発火しやすいなどの問題を抱えており、コスト増・製造難に対する打開策が望まれている。鋳造合金として、エンジンやトランスミッション周りに主に用いられることがある。他にも、チタンは軽くて強く錆びないといった特徴を有するが、アルミニウムより高価で鉄鋼のように大量生産には向かず適用箇所は限られる。

やはり非鉄金属の中ではアルミ合金が最も有力な軽量材料と言え、今後も成形技術の高度化によって、鉄鋼材料とシェア争いを繰り広げることになると考えられる。

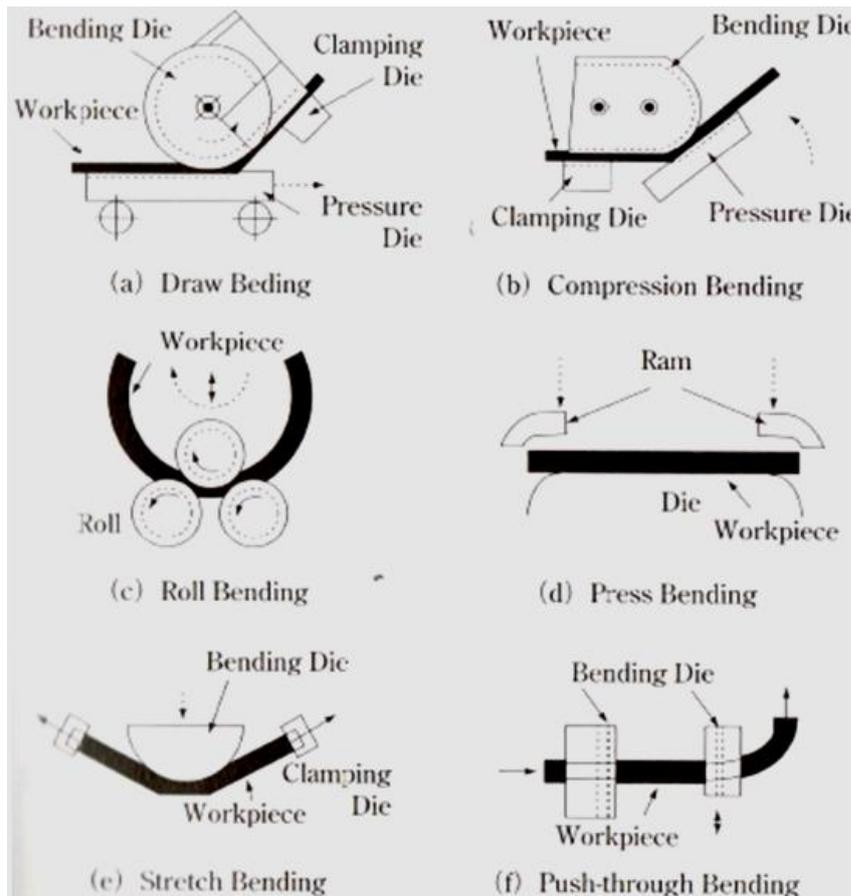


Fig.1.19 Forming patterns of various shapes made from aluminum alloy^[1-35].

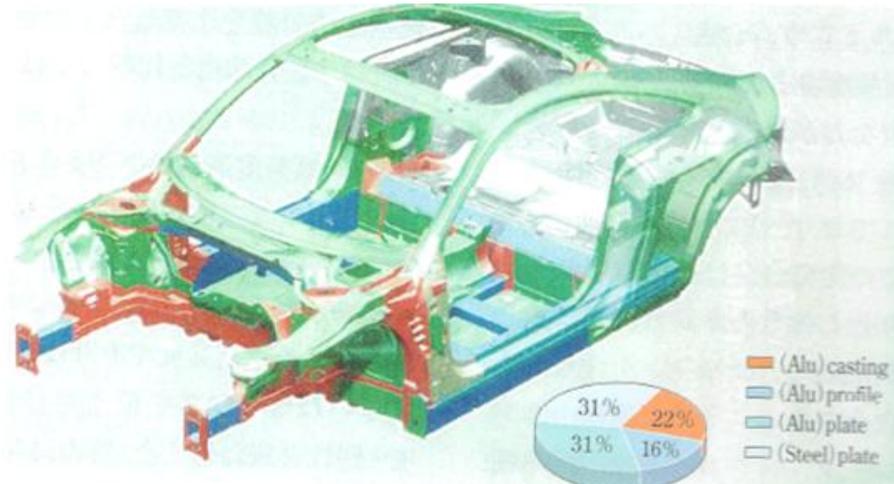


Fig.1.20 Hybrid space frame of steel and aluminum alloy ^[1-36].



Fig.1.21 Front hood, door panel and sub-frame ^{[1-36][1-37]}.

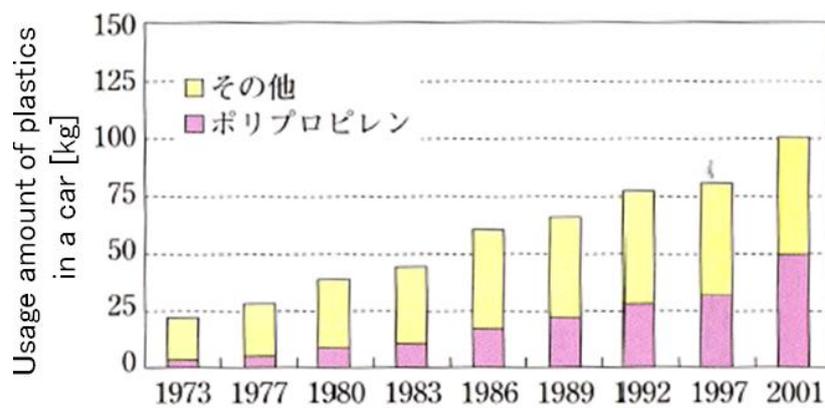


Fig.1.22 Trend of applicable ratio of plastics ^[1-9].

1.1.2.3 樹脂材料のアプローチ

プラスチック類は、Fig.1.22 に示すように、自動車部材への適用量が年々増え続けており、様々な部品への採用が広がっている。特に、安価で汎用性の高いポリプロピレン（PP）の適用拡大が目立つ。最近では、自動車用途の軽量性への意識の高まりから、プラスチック本体に別種のプラスチックやゴム、無機物などを加える複合化が進められるようになり、中でもポリマーアロイと呼ばれる技術が注目されるようになってきた。ポリマーアロイ化の目的は様々あるが、耐衝撃性を向上させるためにゴム粒子を樹脂中に分散させる手法が主流である。この材料物性の制御に最も重要なのが、樹脂とエラストマーの界面接着力のコントロールである^[1-38]。現在も、様々な手法でベースとなるプラスチックの物性を向上させる研究、材料開発が行われている。

このように様々な樹脂が開発され、使用されてきている中で、構造用途への展開として、高剛性・高耐衝撃性・低コストであるポリプロピレン系の材料が注目されつつある^{[1-9][1-39]}。特に、バンパーには、エラストマーや無機フィラーにより強化された複合ポリプロピレンが用いられるようになってきた。例えば、耐衝撃性に優れる高分子量のPPをコア層に、塗装性と成形性に優れる低分子量のPPをスキン層にサンドイッチ構造を形成し、薄肉軽量でありながらも、成形性と剛性・耐衝撃性能に優れるバンパー材が開発されている^[1-39]。

1.1.2.4 繊維強化複合材料のアプローチ

上記のように、プラスチック単体の性能はその目的に応じて改良されてきた。また、一部、短繊維によって強化され、射出成形により製造される部品も徐々に増えてきている。しかしながら、樹脂そのものは高分子材料であるため、鉄鋼やアルミ合金に簡単に置き換えられるほど、弾性率や強度といった機械特性の高い材料ではない。繊維強化材と言っても、長さ1mm以下の短いものであれば、射出成形が主な製法であるため繊維含有率は限られ、高強度・高剛性化の上限は決して高くない。したがって、車体構造の一部としてバンパーなどには採用されてきてはいるものの、主流は内装品や電装関連など、元々車重に占める割合の少ない部品であるため、車体全体の大幅な重量軽減には貢献しない。

そこで昨今注目を浴びているのが、連続繊維や長繊維系の繊維強化プラスチック（FRP）である。数十年程前から、レーシングカーや高級車には、炭素繊維と熱硬化性樹脂を用いた複合材料は採用されていたが、成形に時間がかかるため、量産車には不向きであるとされてきた。ところが最近では、一般車への適用に向けた動きが盛んになってきている。例えばFig.1.23に示すような、熱硬化性樹脂を用いたRTM（Resin Transfer Molding）という製法が開発されている。この製造プロセスでは、基材賦形、搬送、そして、樹脂注入して、プレスしながら硬化させる、というように、流れ作業的にものが作れるので、各工程にかかる工数を削減できる^{[1-40][1-41]}。さらに、樹脂の注入速度を速めて、成形速度を上げる技術も取り込まれるようになってきた。このような研究開発では、熱硬化性樹脂の硬化条件を最適化する材料開発も同時進行で進められている。

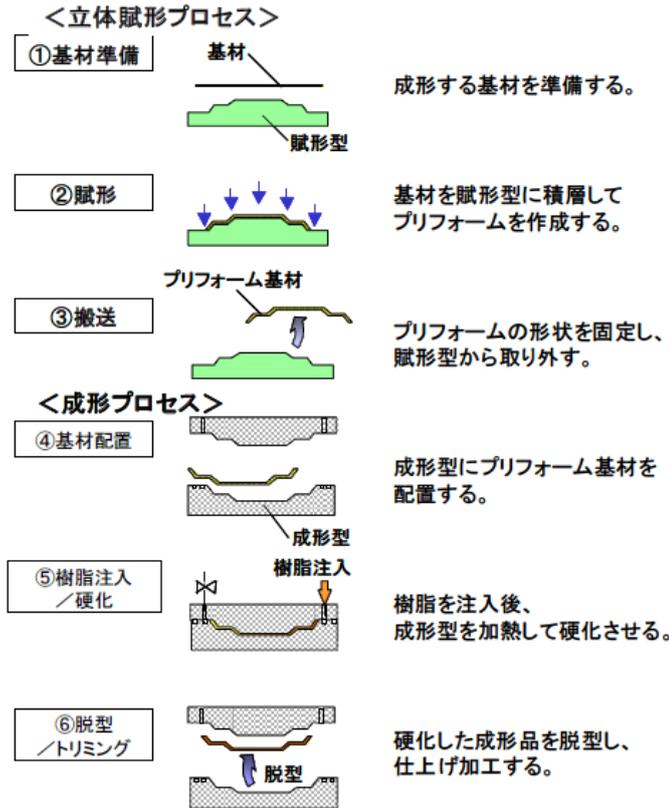


Fig.1.23 Resin transfer molding process ^[1-40].

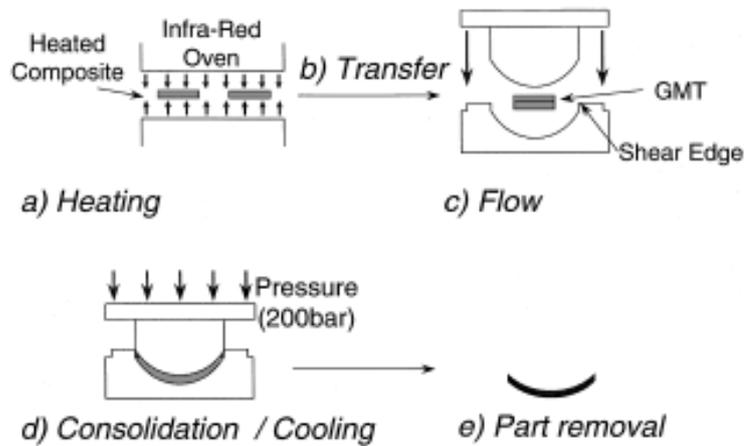


Fig.1.24 Hot flow compression molding schematic ^[1-42].

一方、工程のより簡略な方法として、SMC (Sheet Molding Compound) や GMT (Glass Mat Thermoplastics) などの製法も活用されるようになってきた。これらは、Fig.1.24 に示すように、切れた繊維がある程度の長さを保ったまま不織布のようにランダムに絡んだ状態の樹脂含浸シートを IR ヒーターなどで加熱し、金型に搬送して、プレス成形によって金型のキャビティに応じた形状を獲得する方法である。熱硬化性樹脂に限らず、どちらかという、樹脂粘度の比較的高い熱可塑性樹脂にも適した成形法として注目されている ^{[1-42][1-43][1-44][1-45]}。Fig.1.25 に示すように、連続繊維系の場合にも、同様の製法が用いられることがある。ただし、

連続繊維系の場合は基材を金型内で流動させる必要がないので、ラバー状の金型を用いたり、フィルムを被せて真空引きしたり、圧縮成形をベースとしつつも、圧力の与え方の異なった製法が用いられることもある。Fig.1.25 には、そのような圧縮成形を主体とする様々な成形法について記している。また、長繊維強化系の熱可塑性樹脂は、Fig.1.26 に一例を示すように、連続繊維系プリプレグと複合化して1工程で圧縮成形することも可能であり、連続繊維を補強材として用いて、より剛性のあるプレス品を造ることができる^[1-46]。

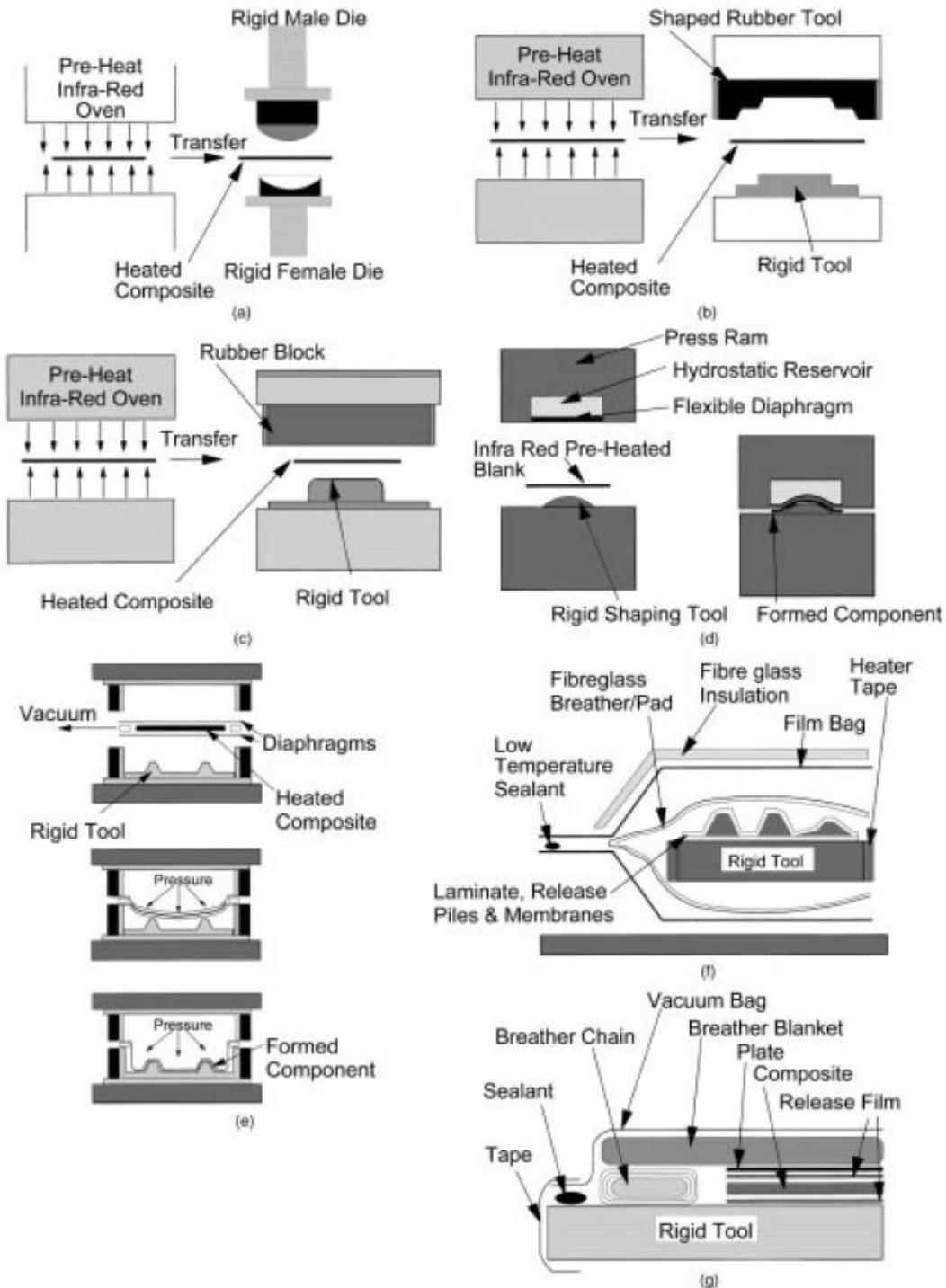


Fig.1.25 Consolidation techniques for continuous fiber materials ^[1-43].

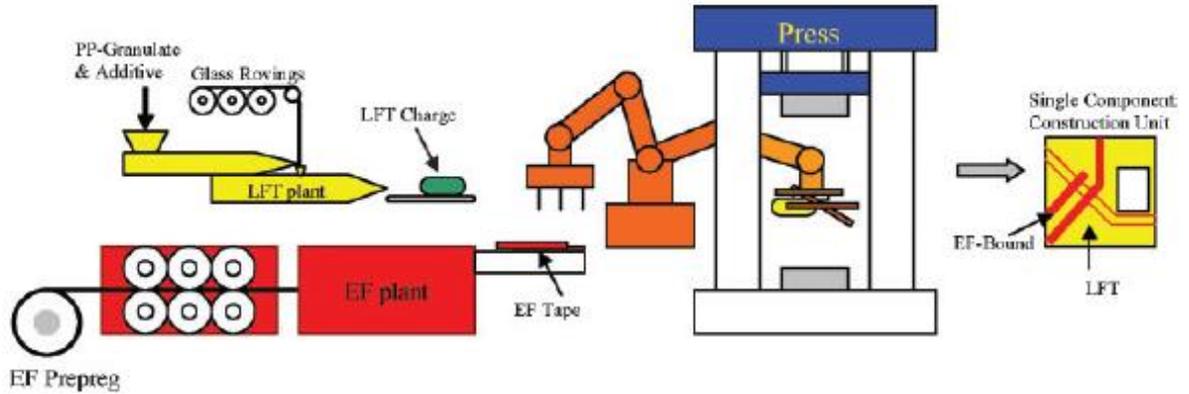


Fig.1.26 Schematic of E-LFT production process^[1-46].

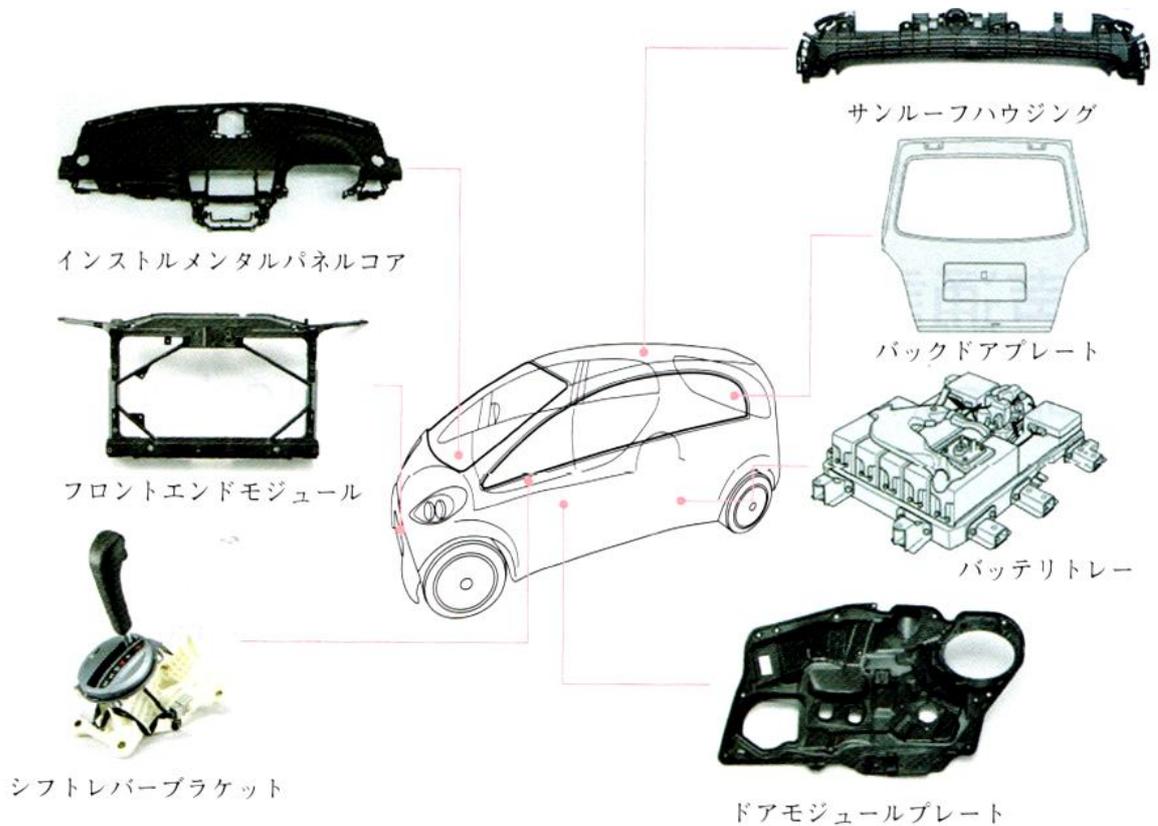


Fig.1.27 Application examples for vehicle structural parts by glass LFT^[1-47].

また、より複雑な形状を形作るための材料として、長繊維系のペレットを用いた射出成形などが注目されている。この成形法では、コスト重視の観点からガラス繊維とPPを用いたものが開発品としてよく紹介されている^{[1-37][1-47][1-48]}。Fig.1.27に示すような、バックドアやドアモジュールなどがその実用例である。

1.1.3 炭素繊維強化複合材料による軽量化への可能性と課題

以上、説明を試みてきたように、自動車のボディや足回り部品を軽くしようとして、様々な材料がその目的を果たすべく技術開発が目指されており、今後も開発競争は継続していくと想像できる。その開発過程の中では、いかなる材料であっても、その代表的な力学特性である弾性率・強度・耐衝撃性を向上させつつ、材料の使用量を削減して軽量化を図り、かつ、低コスト・低サイクルタイム、あるいは、一体加工によって部品点数を削減する、など、新提案の加工技術を構築していくことが重要であると分かる。

先述の不連続繊維系の強化プラスチックも有望な材料の一つであり、長い成形時間と高い製造コスト、という一般車にとってネガティブな概念を覆そうと、多種多様な成形手法が提案されている。しかしながら、強化する繊維がガラス繊維の場合、繊維方向の弾性率はせいぜい 70GPa とアルミニウム並であり、繊維長さのコントロールによって最大限繊維の性能を発揮したとしても、比剛性・比強度でアルミニウム以上の性能は実現できない。さらに、一方向のみではなく面内方向に等方性を有するように繊維がランダムな方向に配置されていると、全体的な面内剛性はますます低くなる。ガラス繊維を用いた長繊維強化プラスチックは、モジュール部材のように複雑な形状を一体成形で製造したいとき、かつ、剛性が低くても走行性能などに影響しない部材に対してのみ有効な材料と言える。

このように考えると、繊維強化複合材料の中で軽量化の見込みが最も高いのが炭素繊維による強化プラスチックであると言えよう。炭素繊維は、その繊維方向の弾性率が一般的なもの（ここでは PAN 系を指す）で 230GPa 程度もしくはそれ以上あり、面内ランダムな方向に繊維を配置してもある程度剛性を維持できる。さらに、密度が 1.8g/cm³ 程度と非常に軽く、鉄鋼製部材と同等の剛性を達成するために板厚を 2 倍 3 倍に厚くしたとしても、鉄鋼材料より軽くできる可能性がある。つまり、ボディや足回りの主要な構造部材に適用でき、それら重量比率の高い部材群の飛躍的な軽量化を果たせる見込みのある材料は、炭素繊維を用いた繊維強化複合材料であると言える。本項では、炭素繊維強化プラスチックの力学特性に着目して、車体構造部材の軽量化を達成する際の適用可能性について説明する。ただし、熱可塑性樹脂をマトリックスとした場合の固有の可能性と課題については、次項で詳しく述べる。

1.1.3.1 軽量化ポテンシャル

炭素繊維強化プラスチック (CFRP) の軽量化ポテンシャルとその考え方を、Fig.1.28 に示すような中空フレーム形状を構造部材の代表として解説する。Fig.1.28 では、例えば、外形 1 辺が 50mm、厚さ 1mm の鉄鋼製中空フレームに対して、CFRP 製中空フレームの断面形状をどうすれば軽量化率 50% を達成できるかを示している。ここで仮に、CFRP は、マトリックスに密度 0.9g/cm³ のポリプロピレンを用い、繊維体積含有率 V_f を 50% のものを適用すると仮定する。すると、平均密度は 1.35g/cm³ となり、繊維方向弾性率は複合則により約 110GPa と決定される。Fig.1.28 の表中に、仮想 CFRP 製フレームの鉄鋼製フレームに対する各設計パラメータの比率を併記する。Fig.1.28 より、中空フレームの外形寸法と曲げ剛性を鉄鋼製フレームと同等にし、かつ、重量を 1/2 にするには、板厚を鉄鋼製フレームの 2.9 倍とすれば良い

ことが分かる。この時、中空フレームの長手方向の平均弾性率 E_C を 77GPa と設計すれば等剛性と軽量化率 $1/2$ を達成できる。CFRP の繊維方向弾性率が 110GPa であることから、積層構成や断面形状の工夫によって、目標達成の見通しが得られることが示唆される。

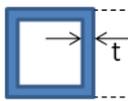
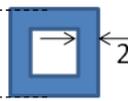
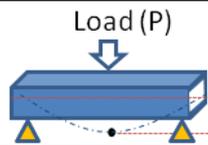
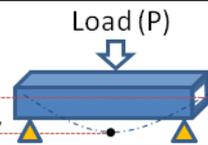
	Steel hollow beam	CFRP hollow beam	Ratio to Steel
Elastic Modulus (E)	$E_s = 200\text{GPa}$	$E_c = 77\text{GPa}$ ($V_f=0.5$)	1/2.6
Thickness (t)			2.9
Outside size (h)	h	h	1
Volume ($V \propto t$)	V	2.9V	2.9
Second moment of area ($h=50, t=1$)	$I_s = \frac{h^4 - (h - 2t)^4}{12} = 78500$	$I_c = \frac{h^4 - (h - 2 \cdot 2.9t)^4}{12} = 203000$	2.6/1 ($\approx 203000/78500$)
Flexural stiffness	$E_s I_s$	$E_c I_c (=1/2.6 * E_s * 2.6/1 * I_s)$	1
Deformation ($\delta \propto P/EI$)			1 same flexural performance
Density (ρ)	7.8	1.35	1/5.8
Weight (W)	7.8V	1.35 * 2.9V	1/2

Fig.1.28 Weight reduction design for equal stiffness of structural member by CFRP.

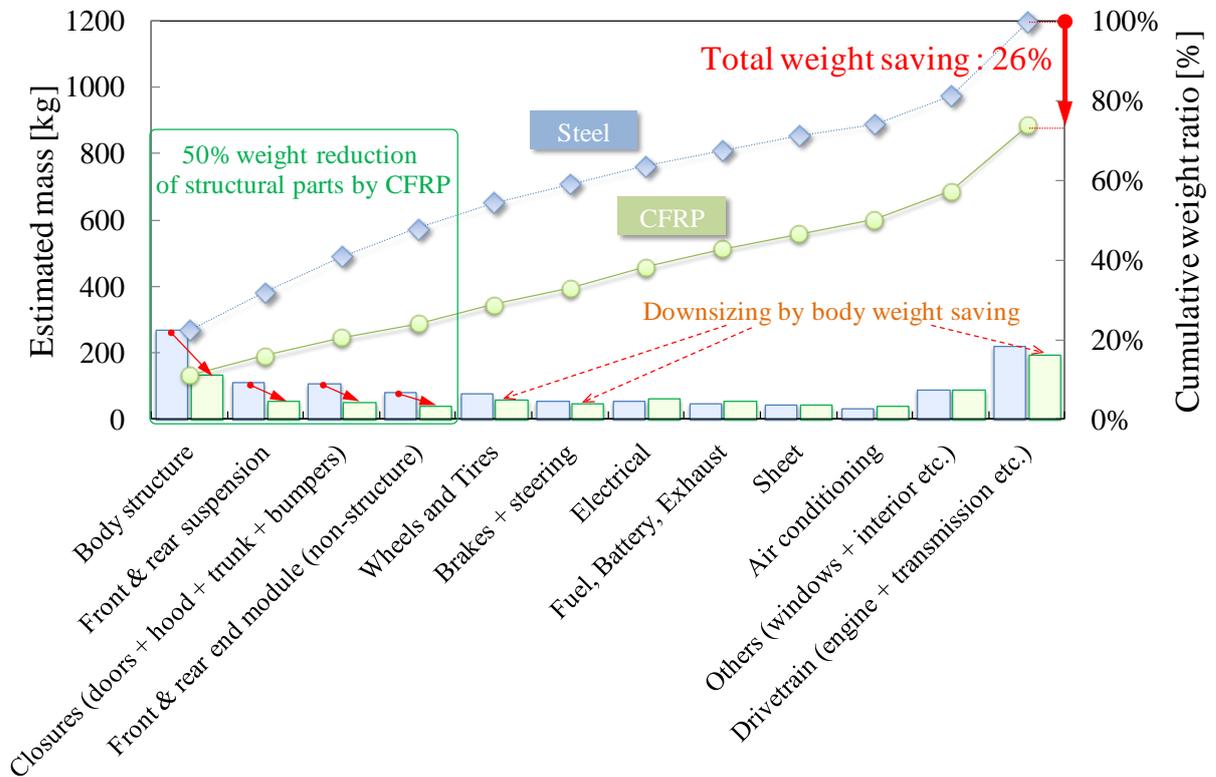


Fig.1.29 Estimated weight reduction effect by CFRP.

ここで、Fig.1.7 や Fig.1.8 で示したように、ボディや足回りには中空閉断面形状のフレーム構造が多用されている。つまり、上述の等剛性設計に限って性能を追求すれば、CFRP 製の構造部材は、鉄鋼製に対して重量半分の設計ポテンシャルがあると言える。これを前提として、Fig.1.4 で示した構造部材内訳から、重量比率の高い順に、ボディ骨格、フロント&リアサスペンション、ドアパネル類、モジュール部材をそれぞれ CFRP 製に置き換えて重量を半減させれば、Fig.1.29 に示すように、標準車重 1200kg の乗用車を 300kg 以上軽くすることができる。アルミ合金や超ハイテンでも達成し得ない軽量化を果たせる実力があることが伺える。

1.1.3.2 CAE による構造設計と力学メカニズム解明の難しさ

まず剛性を基準に部材や材料を設計すれば、おおよそ軽量化の見通しが得られることが分かった。しかし、1.1.1 項で説明したように、自動車の安全性・信頼性の確保は、少なくとも衝突安全性・走行安定性・耐久性が保証されることによって初めて実現できるため、決して剛性だけで性能を満足できる訳ではない。まして、Fig.1.28 で説明された設計の考え方は、単純な断面形状フレームの曲げ剛性のみを目標スペックにした、材料力学基礎理論に則った概算でしかない。実際には、曲げ変形だけが与えられることはなく、自動車のコーナリング時には捩れ変形も加わるし、接合部の剛性も全体剛性に大きな影響を与える。さらに、衝突事故の際には衝撃荷重が加わるため、衝突安全性を設計的に予測する必要が出てくる。衝突安全性や耐久性に関する信頼性設計は、剛性設計よりさらに踏み込んで、部材や材料の弾性域をオーバーした非線形挙動も考慮しなければならない。こういった複合的に関わってくる様々な挙動を、コンピュータ上でシミュレーションして高い精度で予測して構造信頼性を向上させるとともに、最適な構造・形状を新たに設計するため、最近では CAE (Computer Aided Engineering) 技術を積極的に開発に取り入れる傾向が強くなってきている。

コンピュータによる計算スピード・処理能力が著しく向上してきた昨今、開発ステージにおける CAE 技術の活用が、衝突安全技術の向上に大きく寄与してきたと考えられている^[1-49]。また、安全性だけでなく快適性に関するシミュレーションを、人体モデルを CAE 技術によって構築して評価したり^[1-50]、構造解析と機構解析などの連成解析を行い、車両全体の運動性能をシミュレーションしたりする技術も設計段階で取り入れられている^[1-26]。

このように設計をアシストする CAE 技術は、構造部材単体の設計においても大いに役立っている。部材単体は、その開発段階では設計とテストの比較を繰り返し吟味しながら部材形状や材料選定を実施すべきものであり、最終的には台上テストによって品質および性能を保証しなければならないが、過去の設計ノウハウを有効活用しつつ、さらなる高性能化と軽量化を目指すとなると、CAE 技術を用いた新たな設計指針の探索が開発の一助となることは多い。例えば、部材の耐衝撃吸収性能を設計する場合、材料のひずみ速度依存性などの材料パラメータを基礎実験によって検出し、それを Cowper-Symonds 式などで定式化した材料モデルを、三次元 CAD で作成した部材形状モデルの有限要素に割り当てて、部材の衝撃曲げ現象をコンピュータ上で模擬する^[1-23]。こうして、衝撃吸収性能に対する断面形状やコーナー部の影響を検証することができ、部材の衝撃吸収性能を高めるための、より高性能な構造・形状を

詳細に設計できる。

ところが、このような数値解析シミュレーションを用いた構造設計技術も、鉄鋼材料をターゲットとした場合によく再現精度が上がってきたばかりである。繊維強化複合材料 (FRP) への適用は一部の簡易モデル (例えば[1-51]参照) に留まっており、未だ発展途上であると言わざるを得ない。この要因の一つが、FRP は基本的には繊維方向のみ強化された材料であり、それ以外の力学特性は強化繊維の貢献を受けないために、著しい異方性が生ずることであると考えられる。一方向のみの挙動に対しては、その方向の材料特性のみ考えれば良いが、CAE、ここでは主に有限要素解析 (FEA : Finite Element Analysis), を用いて複雑な挙動を予測しようとする、複数軸の変形や荷重に対して、異方性を有するそれぞれの方向の材料特性が複合的に作用するので、その組み合わせに応じて材料モデルが異なることが多々ある。一方向材ですら、材料の破損を規定する降伏条件がいくつも存在する^[1-52]。つまり、一つの材料モデルで、しかも三次元的に部材全体挙動を予測できるような統一的な方法論は未だ確立されていない。さらに、予測精度の検証には、その異なった材料モデル毎に妥当性を考慮しなければならないが、実験とシミュレーションの比較検証をするにしても、そもそも実験的に得られた材料特性の評価値が妥当なものかどうか疑わしい場合がある。例えば、FRP は面外方向にはほとんど強化されないために、層間剥離や内部損傷が生じやすいことは実現象では良く言われており、おそらく局所的な内部損傷が発端となって亀裂が進展することは間違いないと考えられるが、その局所的な損傷の発生因子をマクロな実験で正確に捉えることはかなり難しい。加えて、この局所的な挙動を説明するのにマイクロメカニカルシミュレーションが有効であると考えられ数々の研究が進められているものの^[1-53]、そのモデルをそのまま、よりマクロな構造としての有限要素モデルへ一律に変換して適用できる万能な方法論が存在していない。

このように見ていくと、FRP、特に、炭素繊維を用いた強化プラスチック (CFRP) は、その力学特性が車体の主要構造部材に適用し得るほど高く、軽量化に大きく貢献できる材料であるとされながら、その力学特性の発現メカニズムの複雑さを根本原因として、本来は一律の材料モデルで設計できるからこそ有効であるはずの CAE 技術が活用しにくいために、汎用的かつ設計的に扱える材料と認識されず、開発に時間がかかり、実用化レベルに中々到達できない問題を抱えていると考えられる。

1.1.3.3 材料モデルのための特性評価

以上より、繊維強化複合材料を CAE 技術に適用し、任意形状の構造部材を設計できるようにするには、まずは材料本来の力学メカニズムの精緻な解明が重要であろう。そして、多くの技術者・設計者に対する障壁を下げるために、できるだけ統一的な解釈ができる材料モデルを構築する必要がある。そのためにも、力学メカニズムが発現する主要な影響因子を明らかにし、限りなくパラメータ数の少ない理論モデルによって、各種力学特性を説明できることが望ましい。

基本的に、繊維強化された複合材料の一方積層材の各方向弾性係数については、様々な文献（例えば[1-52]や[1-54]）で論じられているように、比較的簡易なモデルによって解釈されている。これら文献によると、繊維方向の弾性率はもちろんのこと、繊維直角方向の弾性率もある程度予測できることが分かっている。しかしながら、強度に関しては様々に議論されており、繊維方向の引張強度であっても単純に説明できない局面がある。その理由の一つが、繊維そのものの強度にばらつきが存在し、その頻度がワイブル分布に従っているという点であろう。例えば Rosen^[1-55]は、束になった繊維が樹脂によって固められたストランド状のものを引っ張って全体破断するときの強度を、ワイブル分布を基にした繊維単糸レベルの破断確率と、繊維一本の破断点近傍の界面に働くせん断応力分布との関係性を見出して、統計処理を考慮した損傷モデルを構築して説明した。これにより、マトリックスのせん断弾性率が樹脂含浸ストランドの繊維方向引張強度に少なからず影響を与えることが示唆された。このことを利用して、Nakada ら^[1-56]は、一方積層材 CFRP の繊維方向引張強度の時間と温度の依存性を、マトリックスの粘弾性挙動を考慮した理論モデルを構築して実験的に検証した。

一方、各方向全ての力学特性が把握できたとして、今度は複数軸の変位や応力によって、二次元あるいは三次元の物体がどの応力状態で破損するかについては、Hill の降伏関数に代表されるような、様々な降伏条件が提案されている。複合材料の破損則については、Tsai-Wu 則^[1-57]などが FEA 用のソルバーに組み込まれるようになり、繊維方向の引張強度と圧縮強度の違いを考慮できるため、繊維強化複合材料の破壊挙動を説明するのに、FEA が有用になってきている。それぞれ破損則に必要な固有パラメータについては、例えば Tsai-Wu 則の場合、非主軸の引張試験や圧縮試験によって得ることが提唱されている。次に、一方積層材を単層として様々な方向に積層された複合材料全体については、全体剛性と変形挙動は積層板理論^[1-54]により求められ、ある変形挙動時の層毎の応力状態から最弱層を上記破損則によって割り出すことにより、構造材としての全体強度を求めることができる。複雑な積層構成や形状を有する構造の場合、上記 FEA による数値解析シミュレーションが大いに役立つ。

1.1.3.4 曲げ・圧縮メカニズムへの着眼

このように、繊維強化複合材料、特に、連続繊維系の積層材を対象とした破損則はいくつも提案されており、それぞれの有用性は様々な研究によって証明されてきた。しかし、大抵の場合、上記破損則の適用は平面応力状態を仮定して用いられることが多く、破壊挙動は面内方向の問題に帰結しており、一般的に面外方向の破損について議論されていない。

その一方で、Fig.1.9 に示したような自動車の衝突現象を解析する場合には、平面に対して垂直方向に衝撃物が入力されることも想定する必要がある。つまり、面外方向の静的あるいは動的な荷重の入力は避けられず、衝突安全設計を CAE 技術で補うためにも、面外挙動のメカニズム解明が重要である。例えば、植村^{[1-58][1-59]}は、一方積層材の3点曲げ試験において、圧子直下の表層に面外方向の高いせん断応力が発生することを論じて、3点曲げ方式の問題点を指摘した。つまり、3点曲げでは圧子直下の面外せん断の影響を無視できないため、曲げ強度の正確な評価には不適であると説明している。しかし、逆に捉えれば、面に対して垂

直方向に押す力が働いた場合、面外せん断の影響も含んだ破損が生じる、ということである。すなわち、曲げ挙動において面外せん断特性で強度が決定されるのであれば、このメカニズムを把握することは、面に対する耐衝撃性を論じる上で重要である。

さらに Fig.1.10 に示すように、自動車が前面衝突する際、主に黒色で表示されたボディ骨格のメインフレームは軸圧縮方向に衝撃荷重が加えられる。それ以外にもフレーム構造に曲げ変形やねじり変形が及ぼされると、必ず圧縮応力が与えられる面がフレーム内に存在する。繊維強化複合材料に関してよく言われるように、繊維方向の圧縮強度は引張強度の半分以下である。これは、繊維方向の引張強度は繊維そのものの引張強度に大きく依存しているのに対し、圧縮強度については繊維強度の影響をほとんど受けずに、マトリックスのせん断弾性率の方が支配的であることに起因する^[1-60]。つまり、圧縮方向にどれだけ繊維で強化しようと試みても、適用されたマトリックスの物性を変えなければ設計的に改善することができない。さらに、繊維方向の圧縮破壊はキンクバンドの形成に拠るところが大きいことはよく知られている^{[1-61] [1-62] [1-63] [1-64]}。ここから懸念されるのは、キンクバンドの形成は繊維方向のせん断変形に拠るとすると、連続繊維系あるいは長繊維系の強化プラスチックを薄肉構造部材に適用する場合に、決して強化されない面外方向のせん断変形の生じやすさによって、圧縮強度が想定外に低くなってしまうことである。前述のフレームに与えられる軸圧縮荷重、あるいは、曲げやねじり変形によるフレーム面の圧縮応力、これらが構造部材における材料の圧縮破壊の起点となり得る時、材料のどのような力学メカニズムによって破壊が生ずるかを把握し、形状設計・材料設計にフィードバックすることが構造信頼性設計にとって重要である。

1.1.4 熱可塑性 CFRP の基盤技術・生産技術と実用化への課題

以上、炭素繊維強化プラスチック (CFRP) の車体構造部材への適用に対する期待と、それを実現するための力学特性の観点からの課題について説明を試みた。これらは、マトリックスが熱硬化性樹脂であっても熱可塑性樹脂であっても共通の課題である。ここで、熱硬化性樹脂を用いた CFRP については、部材成形時の成形時間短縮に対するアプローチが今なお進められているものの、先述したように、速硬化性の樹脂開発や RTM 成形の高速樹脂注入方法、圧縮成形における流動性向上など、製造に関わる様々な技術的課題が残っている。一方、熱可塑性樹脂を用いた CFRP の場合、この成形に関わる高速度化および複雑形状に対する適応性についてはある一定の技術が確立してきており^[1-65]、量産型構造部材への実用化の見通しが一層高まってきている。本項では、熱可塑性 CFRP がそもそも量産型に向いている材料として注目されてきた背景について、これまでの技術課題に対するアプローチを踏まえて説明し、加えて、熱可塑性 CFRP ならではの力学メカニズム解明に関する課題について、熱硬化性 CFRP との違いに注目して論点を述べる。

1.1.4.1 基材化技術 —連続繊維系・マット系・チョップドテープ系—

連続繊維系あるいは長繊維系の炭素繊維強化プラスチックが力学特性の観点から構造部材

への適用性が高いことは先に述べたとおりである。また、熱可塑性樹脂を用いた繊維強化プラスチックの場合、高速成形を実現するには、Fig.1.24 や Fig.1.25 に示すようにシート状の基材を予熱したものを、プレス機などに搬送して即座に圧縮成形する方法が最も有効であることも述べた。この時、どのような繊維強化形態の基材を用いるかで成形部品の性能は異なる。また、成形品の形状は、基本的には金型に依存するが、流動性は材料によってそれぞれ異なる。このような観点で、3つの異なる強化形態の基材をそれぞれ、①連続繊維系、②マット系、③チョップドテープ系として、その製法と特徴について概要を説明する。

① 連続繊維系

連続繊維系の熱可塑性基材の製造技術は従来から様々な手法が開発されてきた。採用する樹脂の特性によって大きく、熔融法（ホットメルト）、パウダー法、溶剤法、樹脂フィルム含浸法、などがあり、製造される形態には、一方向テープまたはシート、さらに織物などがある^[1-66]。また、樹脂を繊維にほぼ完全に含浸させたものをプリプレグと呼び、成形後もボイドが少なく力学特性は高いが、比較的固い基材なので積層などの作業性が悪い。一方、セミプレグと呼ばれるテープやシートは、含浸が不十分であるもののドレープ性が良くて取り扱いが容易であるため、プリフォームの段階で金型形状への賦形性が比較的高いと言われている。ただし、成形時に再度樹脂を含浸させる必要があり、含浸が不十分の場合に性能が劣化することが懸念される。

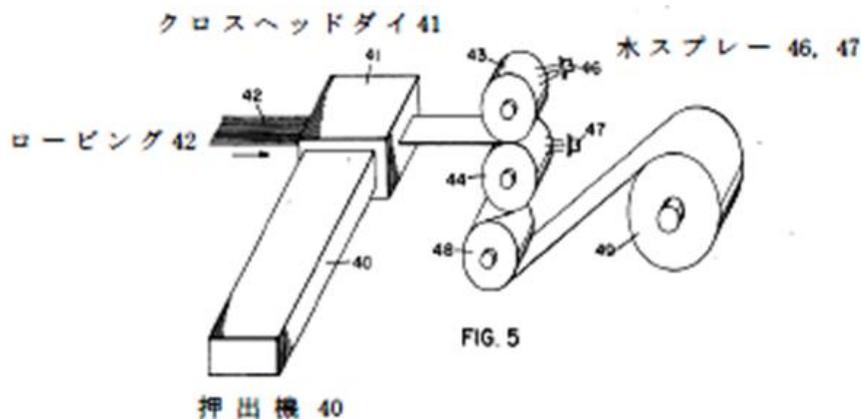


Fig.1.30 Manufacturing process of thermoplastic prepreg by hot-melt impregnation^[1-66].

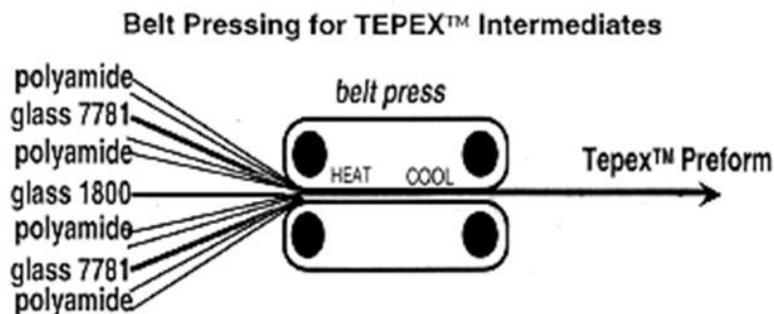


Fig.1.31 Manufacturing process of thermoplastic prepreg by belt press with resin film^[1-66].

Fig.1.30 にホットメルト法による基材製造工程について示す。この方法は、押出機で熱可塑性樹脂を溶融して含浸シリンダの中に押し出し、含浸シリンダ内のいくつかのローラーに這うように繊維束を通過させて、樹脂を繊維に含浸していく方法である。樹脂の溶融時の粘度によって適用可否が分かれ、通常よく用いられる樹脂に、ナイロン(PA: Polyamide)系やポリプロピレン (PP: Polypropylene) 系がある。他の基材製造工程では、ホットメルト法と同系統の樹脂が用いられる樹脂フィルム含浸法について Fig.1.31 に一例を示す。この例はガラス繊維系のものであるが、炭素繊維系も同様に製造可能である。繊維織物や一方向繊維シートと、あらかじめ製作されていた樹脂フィルムを、それぞれボビンを介して重ね合わせた状態のままベルトプレス内に投入し、プレス圧をかけつつ加熱ゾーンと冷却ゾーンを通過させ成形していくことで、樹脂含浸シートを製造することができる。いずれにしても、樹脂の加熱溶融時にどれだけ繊維束に含浸できるかによって、基材の出来具合が変わってくる。その他、溶剤法には PEEK や PEI、パウダー法には PPS などが用いられており、それぞれ樹脂の特質に合った成形方法により製造工程が組まれる。

② マット系

マット系の熱可塑性樹脂基材は、不織布のようにカットされた繊維一本一本が面内ランダムに配向して樹脂で固められている。ここでは、最近開発された、不連続炭素繊維が面内均質になるように分散された熱可塑性スタンパブルシート^[1-67]について説明する。このマット系基材は、炭素繊維をある長さにチョップして面内方向に均質に分散させて得られた CF マットにマトリックス樹脂(ここではポリプロピレン)を含浸させて製造される (Fig.1.32(a)参照)^[1-67]。Fig.1.32(b)にその完成品の実物写真を示す。このとき、樹脂の含浸工程では Fig.1.31 で説明したようなベルトプレスなどが用いられる。本開発材料の要素技術は、チョップされた長繊維を面内均一に分散させること、炭素繊維と樹脂の接着性を高めること、ベルト移動速度やプレス圧力、温度条件などを適切にコントロールしてしっかり樹脂が繊維マット内に含浸すること、繊維長さや界面せん断強度による適切な強度設計、などとされる^{[1-65][1-67]}。この基材は、圧縮成形によってリブや絞りなどの形状を付与できるという特長を有する。

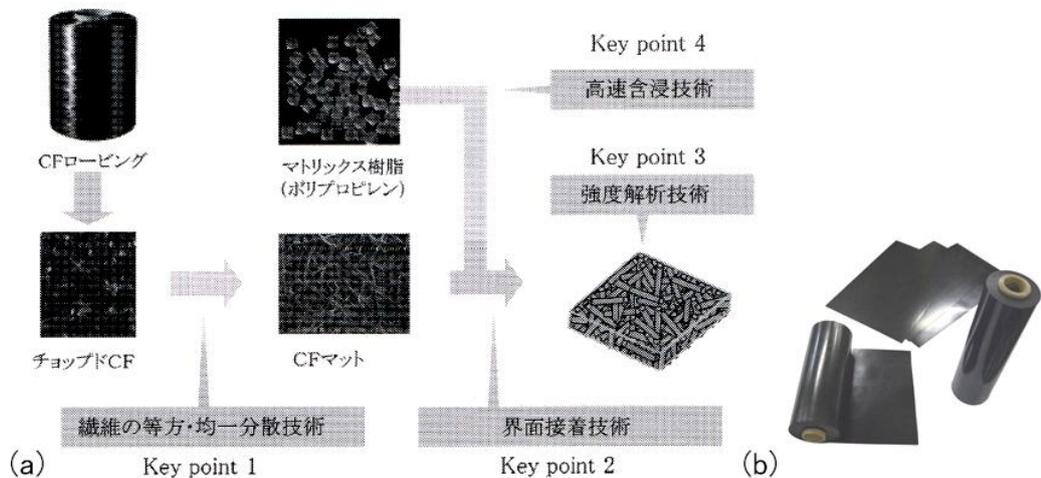


Fig.1.32 (a) Manufacturing process of thermoplastic mat-type CFRP and (b) its product^[1-67].

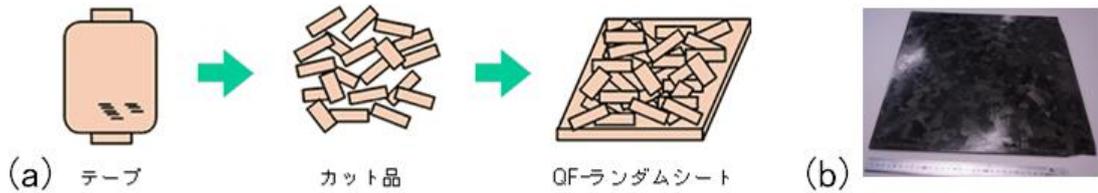


Fig.1.33 (a) Manufacturing process of thermoplastic chopped-tape CFRP and (b) its product^[1-68].

③ チョップドテープ系

チョップドテープ系の基材は、①の工程を経て作製された連続繊維系プリプレグシートやプリプレグテープを、ある長さ（必要な場合はある幅にも）にチョップして、テープの配向がランダムになるように敷き詰めてプレス成形などによって製造される（Fig.1.33(a)参照）。樹脂含浸プリプレグを基に製造されるので、繊維体積含有率をマット系以上に高められる上、熔融時の流動性を確保できるので、力学性能と生産性を高いレベルで実現できる製法である。マット系と同様、基材厚さが均一になるようにテープを分散させる技術が重要とされる。

1.1.4.2 炭素繊維と樹脂の接着技術

上述のとおり、基材化技術の発展とともに、様々な繊維強化形態の熱可塑性基材が開発されるようになり、その成形し易さが注目されるようになってきた。一方、1.1.2項でも説明したように、熱可塑性樹脂の中でもとりわけポリプロピレンは安価で入手しやすく、破断伸びが高いことにより耐衝撃性に優れた高分子材料であり^[1-46]、さらに、ポリマーアロイ化などで様々な特性を付与することができるなどメリットも多く、自動車への採用比率が高まってきている。しかしながら、炭素繊維の高い性能を活かすために、連続繊維系や長繊維系の基材に適用しようとする時、炭素繊維とポリプロピレンの界面接着性の低さが際立って、力学特性を著しく低下させてしまうことが懸念される。このことが原因で、従来はポリプロピレンを用いた熱可塑性CFRPは積極的に開発されてこなかった経緯がある。これを解決しようと、まずは炭素繊維とポリプロピレンの界面接着性を高める要素技術の開発が行われてきた。

例えば、最近の研究開発プロジェクト^[1-65]では、Fig.1.34に示すとおり、市販の炭素繊維の界面を様々に改質したり、ポリプロピレンそのものに酸変性を施したりした際の、界面接着強度の傾向が調べられている。表面改質炭素繊維と酸変性ポリプロピレンのそれぞれの組み合わせで製作された一方向CF/PP成形材の、繊維直角方向の曲げ強度をFig.1.35に示す。これによると、改質しないポリプロピレン（PP-A）を用いた場合はいずれも強度が低く、強酸変性を施したポリプロピレン（PP-C）では、いずれも強度の大幅な向上がみられ、かつ、酸変性用に表面改質を施した炭素繊維（CF-C）の組み合わせが最も強度が高いことが分かる。この傾向は、繊維と樹脂の界面強度を直接評価する、マイクロドロプレット法^[1-69]や、フラグメンテーション法^[1-65]によっても確かめられている。CF/PPの破面を観察するとFig.1.36のように整理され、繊維周りの樹脂の接着量からも界面接着性の向上が確認できる。

炭素繊維サンプル		マトリックス樹脂サンプル		
サンプル名	表面改質	サンプル名	ポリマー	MFR
CF-A	既存グレード	PP-A	未改質ポリプロピレン	45
CF-B	未改質ポリプロピレン 用改質	PP-B	酸変性ポリプロピレン #1	110
CF-C	開発した酸変性ポリプロピレン 用改質	PP-C	強酸変性ポリプロピレン #2	80

Fig.1.34 Types of carbon fiber and polypropylene for improving interfacial strength^[1-65].

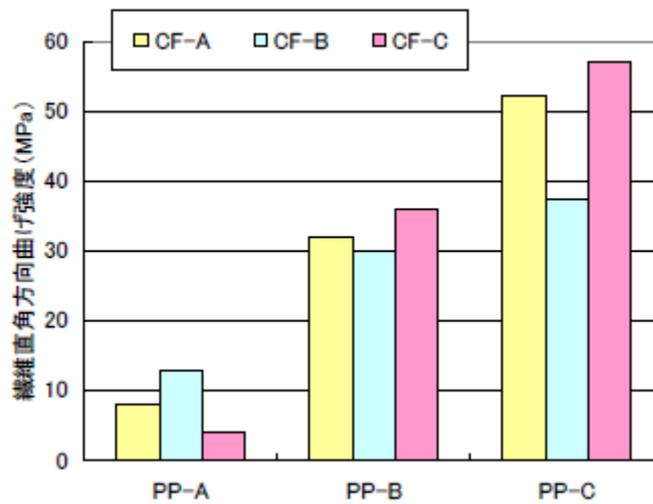


Fig.1.35 Comparison of flexural strength in transverse direction of each CF/PP^[1-65].

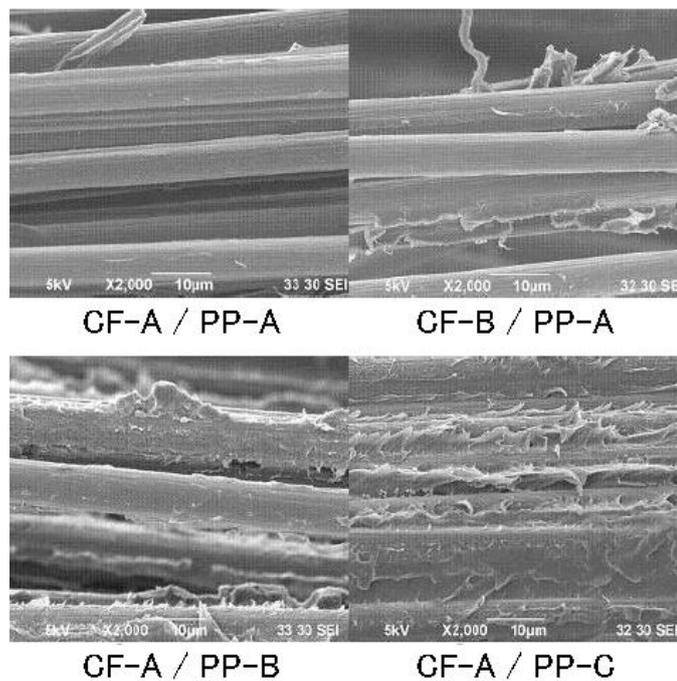


Fig.1.36 Comparison of fractograph of each combination by SEM^[1-65].

1.1.4.3 圧縮成形による部材製造技術と生産速度

次に、高強度界面接着技術により力学特性が向上した炭素繊維強化ポリプロピレン (CF/PP) の、マット系およびチョップドテープ系のそれぞれの基材による部材成形について説明する。

いずれの基材も、長繊維でありながらも適切な長さにチョップされた不連続繊維系であるため、圧縮成形時の樹脂の熔融状態と成形圧力、金型温度に応じて、金型内キャビティ形状に沿って流動または曲げ・延伸成形することが可能である。これによって、圧縮成形でありながらも複雑形状の部材を高速に製作することができる。マット系基材を用いた成形品の一例を Fig.1.37 に、チョップドテープ系基材を用いた成形品の一例を Fig.1.38 にそれぞれ示す。いずれも、リブなど複雑な断面形状を形作られることが確認できる。ここで、圧縮成形技術において注目すべき点の一つは、IR ヒーターなどで予め加熱して熔融状態にした基材を、加熱炉内から瞬時に取り出し、冷えて固化しないうちに、金型上に高速搬送し、プレス機で高速型締めを行う、という一連の工程を、高度な制御技術で実現する製造装置群の働きであろう。1分1台という量産速度を実現するためには、基材の流動性や成形条件の適正化だけでなく、高機能な製造装置の役割も重要である。このような技術の総合力の結果として、金型占有時間1分という量産速度に匹敵する高速成形を実現できるようになってきている。



Fig.1.37 Sample of panel-type module member by mat-CF/PP^[1-65].



Fig.1.38 Sample of frame-type structural member by chopped-tape CF/PP.

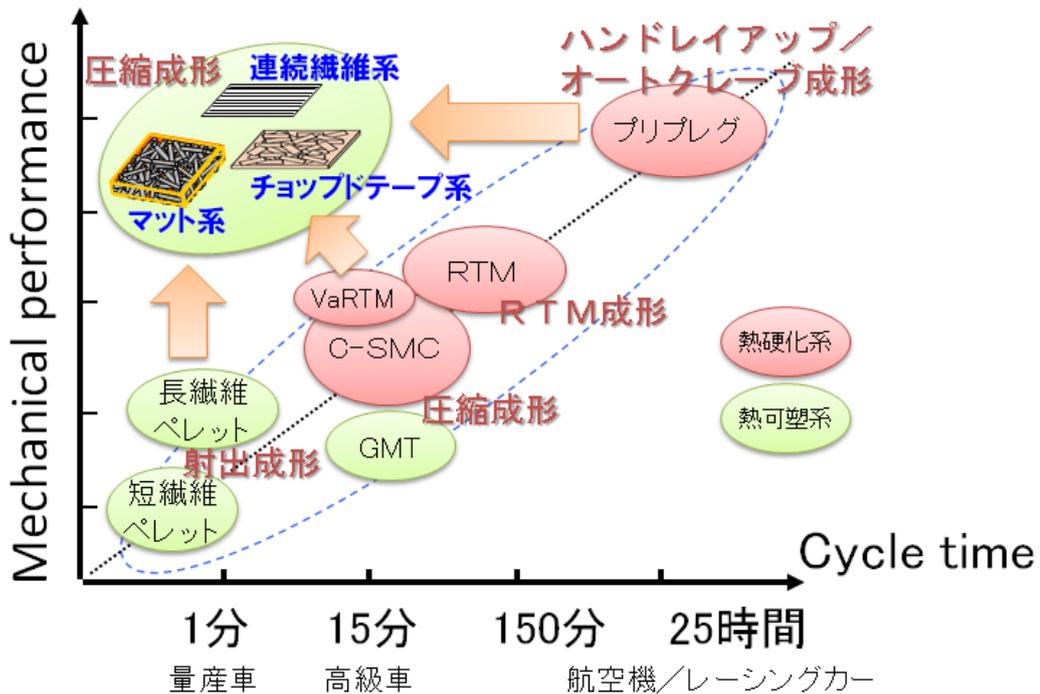


Fig.1.39 Technology mapping for several types of FRP.

こういった技術的背景により、熱可塑性 CFRP は量産型の乗用車にも適用できる可能性が高まってきている。このことは、Fig.1.39 に示す技術比較マップでも表現できる。図の横軸は左の方に行くほど生産速度が速く量産向きであり、縦軸は上の方が強度や剛性といった力学特性が高いことを表している。また、赤色の丸印が熱硬化性、緑色の丸印が熱可塑性の繊維強化プラスチックを示す。本項で述べてきた熱可塑性 CFRP、特に、不連続繊維系の強化プラスチックは、図中左上の方に位置づけられ、力学性能は従来の航空機用途の熱硬化性のものと同等でありながら、部材形状の自由な設計が可能、かつ、高速成形を実現できるため、量産型自動車のボディや足回りといった、高い機械性能が要求される主要構造部材にも適用できることが期待される。つまり、熱可塑性 CFRP は、高性能・高生産性を両立し、車体重量の大幅な軽減に貢献できる新しい材料であると考えられる。

1.1.4.4 構造部材設計における熱可塑性 CFRP の材料力学

このように見ていくと、新しい材料とされる熱可塑性 CFRP は、すぐにでも現行自動車の鉄鋼製構造部材に置き換えられ、量産速度で製作されたものを実車に組み入れて、次期市販車モデルとして開発ステージに進んでも問題無いように思われる。

しかし、前項でも述べたように、熱可塑性に限らず熱硬化性であっても、構造信頼性を高レベルで確保するには、材料そのもののメカニズムの把握と、それを理論展開してアルゴリズムや構成則として材料モデルに実装された CAE 技術の構築が欠かせない。加えて、熱可塑性 CFRP による構造部材は、高級車やレーシングカーで採用されてきた製法とは異なり、圧

縮成形を積極的に利用した成形部材になると予想される。この製法の違いが成形材としての力学特性に与える影響を考慮すべきである。そしてさらに、繊維強化形態に関しては、連続繊維系であれば従来の研究実績が役に立つ側面が多々あるだろうが、マット系もチョップドテープ系も、概念は従来よりあったとしても、基材化技術の発達によってようやく実用レベルの材料として扱えるようになってきたばかりである。言い換えると、これら熱可塑性基材は比較的新しい強化形態を有し、未だ体系的な研究成果に乏しい。ここにきて、熱可塑性樹脂をマトリックスとする強化プラスチックを構造部材へ適用しようという動きが始まったばかりであるため、熱可塑性に特有な力学特性の発現メカニズムについては明らかになっていない。例えば、一般的な熱硬化性樹脂よりも非線形性が強いとされる高分子系樹脂（ポリプロピレンなど）の場合、その非線形挙動が、前項で説明した曲げ変形・圧縮変形における非強化方向の力学特性へ与える影響は無視できない。

このようなことから、熱可塑性 CFRP の力学特性を、特に熱可塑性であるからこそ精密に把握しなければならない特性について、その発現メカニズムを明らかにすることは重要である。Fig.1.40 に、これまでの説明を整理した研究の位置づけを示す。この図のように、基材化技術と成形技術の進化によって、実構造部材を新しい熱可塑性基材から製作し構造を造ることが可能であることは明らかになってきた。一方で、それら製作された材料や部材が、果たして自動車の走行安定性・衝突安全性・耐久性といった各種要求性能を満足するかどうか、どのように形状を設計し材料を選定していけば品質を保證できるか、については全く分かっていない。まさにここに焦点を当て、それら課題を解決することが求められている。

また、このような研究アプローチについて、その動機付けをさらに明確にし、かつ、先見性を説明する図を Fig.1.41 に示す。図中、現行スチール製の一般乗用車の車重 1200kg（ここでは動力は全て内燃機関とする）に対し、1.1.2 節で調べた鉄鋼業界が主導する軽量化プロジェクト、FSV (Future Steel Vehicle) が目指す車重は、2020 年に約 1000kg～1100kg 弱とされる。これに対し、熱可塑性 CFRP 製のボディ・足回り部材を適用した際の車重は、Fig.1.29 で示した分析結果より、約 900kg 弱を達成できる見込みがあり、部材設計の段階において軽量化率で大きな優位性がある。前述の新しい熱可塑性基材の開発が 2000 年代後半からスタートし、現在から今後は基礎研究がますます進むと考えられる。期待されるとおり、2020 年頃から一部の部材に熱可塑性 CFRP が採用され、2030 年頃に主要構造へと適用範囲が拡大していけば、FSV プロジェクトの目指す軽量ボディ以上に競争力があると言えそうである。さらに、熱可塑性 CFRP 独自のメカニズムが今後明らかになっていくと、それを設計にフィードバックし積極的に活用した、新しい設計理論を提案する機運が生じるだろう。それに乗じて、一体成形技術や最適構造設計技術の研究開発を先行して進めていければ、車体構造そのものが大きく変わるような技術進化も見込めるのではないかと期待される。

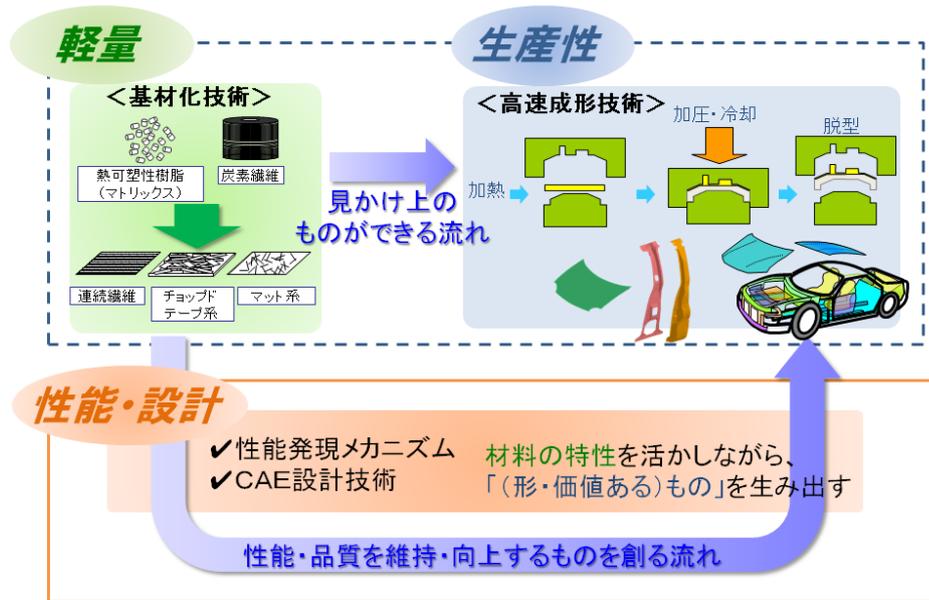


Fig.1.40 Focus of research and peripheral technology.

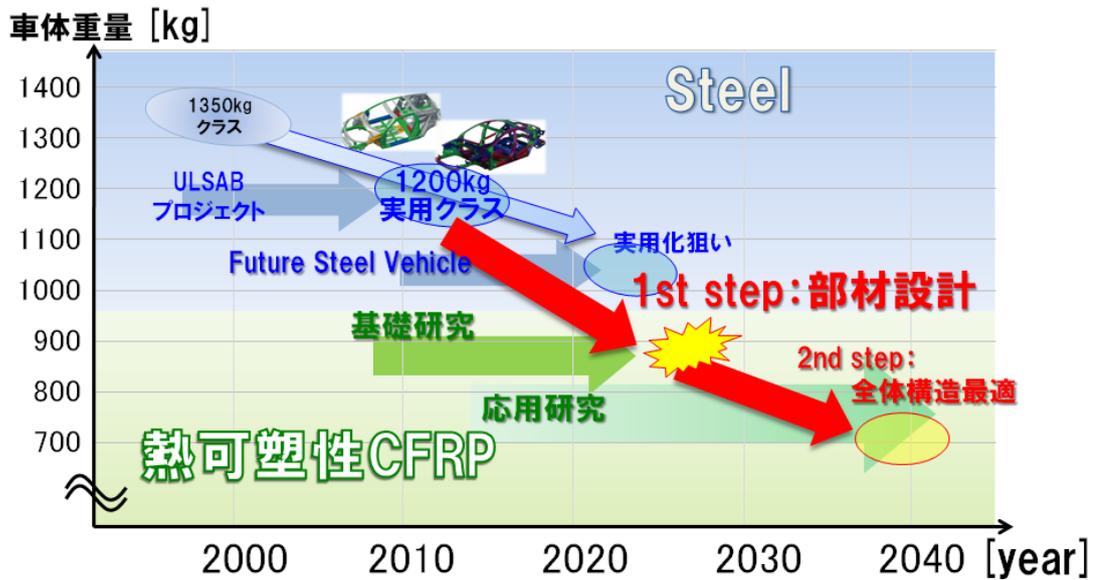


Fig.1.41 Vehicle light-weight progress, steel vs thermoplastic CFRP.

1.1.4.5 温度・時間・速度に依存する力学特性

ここで力学メカニズム解明の足がかりとして、熱可塑性樹脂をマトリックスとして用いることによって、どのような力学特性に着目すべきかについて過去の研究実績から考察する。

熱可塑性樹脂単体、特に最近、自動車用パーツとして採用比率が増加傾向にあるポリプロピレンについては、力学特性に関する研究も数々発表されている。中でも、衝突解析シミュレーションの重要性、さらには、結晶性樹脂であることに焦点を当て、応力ひずみ特性の速度依存性および温度依存性について論じている研究報告例が多くある^{[1-70] [1-71] [1-72] [1-73]}。例えば、Fig.1.42 に示す実験結果では、3つの異なる速度条件で温度を様々に変えた時のポリプロ

ピレンの応力ひずみ曲線と、ひずみ速度に対する降伏応力の関係を示しており、ポリプロピレンの速度依存および温度依存の傾向が明らかにされている。この結果を基に、樹脂の粘弾性挙動から、時間温度換算則を利用した構成方程式の導出が試みられている。

次に、繊維強化複合材料に関しては、従来から熱硬化性樹脂を用いた強化プラスチックについて、その時間・温度の依存性を検証した研究事例が注目に値する^{[1-74][1-75][1-76][1-77]}。例えば、Barreら^[1-75]は、過去の研究論文を集め、様々な繊維強化形態の熱硬化性FRPに関して、その速度依存性についてまとめて報告している。これによると、炭素繊維やアラミド繊維を用いた時は、一方向材であれ織物材であれ、弾性率や破断強度に速度依存性は認められず、ガラス繊維の織物系の強化プラスチックを用いた時にのみ、弾性率と破断強度に明確な速度依存性が現れることを確認している。一方、Nakada^{[1-76][1-77]}らの研究実績によると、熱硬化性の炭素繊維強化プラスチックには、強度に関する温度依存性が発現することを、樹脂の粘弾性挙動とそれによる時間温度換算則によって検証している。Fig.1.43は、熱硬化性樹脂単体の動的粘弾性試験結果から検出した貯蔵コンプライアンスと、その樹脂を用いたCFRPの繊維方向引張強度に相関関係があることを示している。つまり、ある程度以上の変形速度過程の熱硬化性樹脂は、低温時のように分子間のつながりがガラス状で最大限強固になり、速度に依らず一定の力学特性を有するのに対し、高温状態では分子間の結合力が弱まる傾向にあり、温度に依存してその結合力が変化すると推測される。よって、樹脂粘弾性の影響は高温になるほど強く現れると言える。同様に、クリープ強度は時間経過につれて低下することも実験的に検証されている^[1-77]。

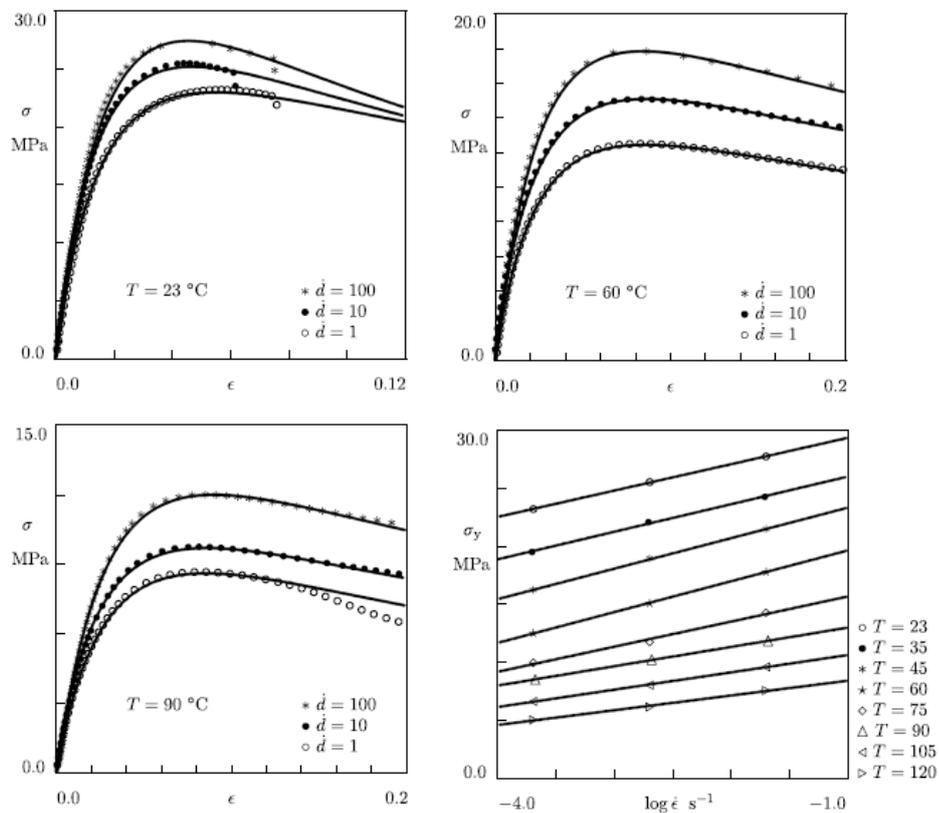


Fig.1.42 Strain-rate- and temperature- dependent property of polypropylene^[1-71].

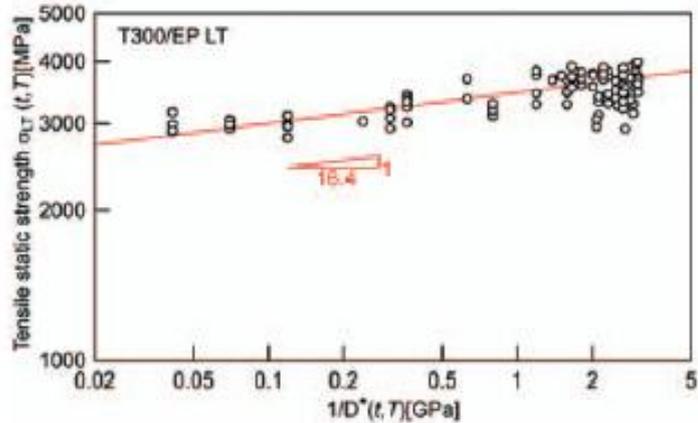


Fig.1.43 Tensile static strength of thermosetting CFRP vs the inverse of viscoelastic compliance of matrix resin^[1-76].

以上より，樹脂の粘弾性挙動が顕著な環境条件では，炭素繊維の繊維方向引張強度であっても，明らかにその影響を受けていることが分かる．熱可塑性樹脂，特にポリプロピレンのように，常用温度範囲ならびに実事象で起こり得る速度領域で粘弾性挙動が比較的現れやすい樹脂をマトリックスとする CFRP の場合，その力学特性の発現メカニズムは樹脂粘弾性との関連性で論じる必要がある．特に，先述のように，いかなる強化形態の FRP でもほぼ等しく非強化となる面外方向は，繊維よりも樹脂の力学特性が支配的であることは言うまでもない．したがって，面外方向の破損が起点となり得る曲げ破壊や圧縮破壊では，樹脂粘弾性挙動の影響が大きくなることが推察される．

新しい材料である熱可塑性 CFRP の力学特性を様々な実験方法により検出し，そのメカニズムを明らかにするとともに，樹脂粘弾性の影響を追究することは，材料の性能を過不足なく発揮させる材料・構造の設計理論の構築にとって非常に有意義である．

1.2 研究の目的

本研究では、車体構造部材用の最有力軽量材料として、熱可塑性 CFRP に着目する。中でも、安価で汎用性が高いポリプロピレンをマトリックスとする炭素繊維強化ポリプロピレン (CF/PP) は、樹脂の破断伸びが他の樹脂と比べて高く、一般的に脆性破壊を示すとされる熱硬化性樹脂を用いた CFRP と比べて、より延性的な破壊挙動が期待でき、高い衝撃吸収性能が要求される構造部材にも適用され得る。さらに、熱間あるいは冷間プレスにより圧縮成形する直前に、ある温度まで加熱して溶融することによって流動性・延伸性を発現でき、金型上に搬送した直後、プレス成形とともに急冷・固化させて、複雑な形状を高速に実現できるという特徴がある。従来は、炭素繊維とポリプロピレンは接着強度が低く、熱硬化性 CFRP よりも機械特性が著しく劣っていたが、現在は、ポリプロピレンに酸変性を施すなどの接着強化技術によって大幅に改善され、構造部材への適用可能性が高まってきた。

一方、圧縮成形を主な製造方法とする連続繊維系または長繊維系の熱可塑性 CFRP は、その破壊メカニズムや粘弾塑性挙動など、自動車の構造信頼性を裏付ける力学メカニズムが明らかになっていない。特に、ポリプロピレンをマトリックスとして適用する場合には、樹脂そのものの粘弾塑性挙動が、繊維強化された複合材料の力学特性へ与える影響を無視できない。とりわけ、炭素繊維によって繊維引張方向には著しい特性の向上が発揮されるものの、圧縮方向やせん断方向・面外方向の強度向上にはさほど寄与しない。つまり CF/PP の場合、これら力学特性は、ポリプロピレンそのものの影響が支配的であると考えられる。力の与えられる方向やモードに応じた強度・耐久性設計を可能とするには、樹脂特性がこの非強化方向の複合材料強度に与える影響を把握しなければならない。

このような動機から、本研究では、熱可塑性 CFRP を代表して、炭素繊維強化ポリプロピレン (CF/PP) を用い、その基礎的な力学特性の把握とメカニズムの解明に主眼を置いて、実験的な検証や理論的な説明を試みる。留意すべきは、マトリックスにポリプロピレンを採用していることであり、その粘弾塑性挙動が繊維強化された連続繊維系 CF/PP の様々な力学特性に与える影響を明らかにすることである。そして次に、その検証結果を基に、生産性を重視した同種材の不連続繊維系 CF/PP による構造部材への適用性を検証する。本材料の特徴は形状設計自由度の高さであり、高強度化が進んでいる鉄鋼材料以上に、如何に設計的に対軽量性能を達成すべきかを検討する。そのため、実際に中空フレームを題材に取り上げ、材料試験により取得した各種パラメータを CAE 設計に取り入れて、高性能化のための設計方針を構築する。そして、その効果を検証するために、実際に設計した断面形状および積層構成の中空フレームを試作して性能評価まで行う。

1.3 本論文の構成

以上、第1章では、研究の背景と目的について説明した。まず、車体構造に求められる主要な性能について説明し、構造部材に実際に適用されている既存の材料に関して、軽量化を目指した最近の技術開発動向について調査・分析を行った。とりわけ、主流として扱われている鉄鋼材料の取り組みは注視すべきことが示され、熱可塑性 CFRP を自動車の構造部材に適用する際に、その要求性能を鉄鋼材料より劣ることなく、さらに、鉄鋼と比較して如何に軽量化効果が達成されるべきか、または、達成の見込みがあるか、を分析した。さらに、過去の文献の調査結果を踏まえ、繊維強化複合材料の設計自由度の高さの半面、力学メカニズム解明の難しさ・重要性について論じた。続いて、熱可塑性 CFRP の最近の研究開発動向について述べ、その車体構造部材への適用可能性について解説した。

これより、本研究における、熱可塑性 CFRP の力学特性発現メカニズムの解明に対する動機付けがされた。さらに、実物相当の構造部材を設計・試作・評価の題材とすることで、実態として鉄鋼材料以上の対軽量性能を発揮できるかどうか、より具体的な道標を本論文にて示唆することが設計者・技術者への一助になると考えた。

第2章では、本研究で扱う炭素繊維強化ポリプロピレン (CF/PP) の力学メカニズムの把握のための第一歩として、マトリックスとして採用されたポリプロピレン単体の弾塑性挙動と粘弾性挙動を基礎実験によって明らかにすることから開始した。通常の引張試験によって弾塑性パラメータの検出を行い、また、動的粘弾性測定によって、温度と時間に依存する力学パラメータと粘弾性に関わる時間温度シフト関係を見出すことを試みる。

第3章では、一方向 CF/PP 積層材の繊維方向及び繊維直角方向の引張特性を検証し、破壊メカニズムとマトリックスであるポリプロピレンの力学特性との依存関係について考察する。特に、繊維方向引張試験による材料パラメータの正確な検出の難しさと、解決の方向性について、高速度カメラによる破壊現象の観察結果を基に論じる。

第4章では、樹脂の粘弾塑性挙動の影響が明確に現れる繊維方向せん断特性を、連続繊維 CF/PP プリプレグテープを用いた $\pm 45^\circ$ 積層材の引張試験によって検証した。その際、温度条件を様々に変えて試験を行い、第2章での樹脂単体の動的粘弾性測定試験の結果との比較から、温度変化に対するせん断挙動の変化が、樹脂の粘弾性挙動に応じてどのように現れるか考察する。

第5章では、熱可塑性 CFRP に適した、新しい繊維方向圧縮試験法の開発とともに、圧縮破壊時に面外方向に発生するキンクバンドに着目した新たな理論式を提案した。そして、繊維方向圧縮破壊メカニズムが繊維方向せん断特性から理論的に説明できるかどうかを検証する。さらに、その結果を基に、第4章で検証した、温度変化に伴う繊維方向のせん断特性の変化が、圧縮強度の温度依存性に直接的に影響を与えるかどうかを明らかにし、繊維方向圧縮強度のマトリックスの粘弾塑性の依存性について論じる。ここで、キンクバンド発生の要因分析の一助にするため、界面接着性の低い従来型の無変性ポリプロピレンをマトリックスとする一方向 CF/PP を用いて圧縮試験を行い、その破壊メカニズムについて比較を行った。

続いて第6章では、一方向CF/PP積層材の、繊維方向の曲げ破壊が常に圧縮側の破壊から生じることに注目し、第5章で証明した圧縮強度の温度依存性の発現根拠から、曲げ強度についても樹脂の粘弾性に依存するという仮説を検証する。このため、第2章で検出した樹脂単体の時間温度シフト関係を利用して、曲げ強度の温度依存・速度依存・時間依存を統一された理論で説明できるかどうか調べる。そして、それを検証するために様々な実験を行った。具体的には、温度条件を変えた静的曲げ試験、圧子のストローク速度を変えた動的曲げ試験、負荷荷重を一定にして破断するまでの時間を測定する曲げクリープ試験を実施し、各種依存性の妥当性を評価した。

第7章では、繊維方向圧縮破壊の根本要因として考えられる面外強度を評価して、マトリックスの降伏応力との比較を行って剥離強度の発生要因について考察した。面外引張強度の評価には、連続繊維CF/PPプリプレグテープを繊維方向直角に湾曲させたL型試験片を成形し、両アームを引っ張る試験法を採用した。また、面外せん断強度の評価には、目違い切欠き溝を設けた試験片による圧縮試験法を用いた。

第8章では、以上の一連の力学特性を調べた連続繊維CF/PPのプリプレグテープを、ある一定の長さにカットし、繊維配向がランダムになるように配置させて積層させた、不連続テープ系のランダム積層材に焦点を当てる。そして、それを用いて、実物の構造部材に近い代表的な形状を有する中空フレームを設計し、試作及び性能評価を実施した。しかし、実際には、不連続ランダム積層材の面内方向の弾性率を標準試験法によって評価し、構造設計パラメータとして用いようとする、有限長さのテープのランダム配向を原因とした、評価値の不確実性が存在することが認められた。この不確実性を確率論的に説明するために、評価範囲の大きさに敷き詰められた有限数の一方向テープそれぞれにランダムに配向を与えて剛性値を算出する、という計算モデルを構築した。そして、実際に評価寸法を変えた引張試験を行って、計算モデルによる統計結果と比較および仮説検定することによって、その計算モデルの妥当性を検証する。よって、不連続ランダム積層材を適用した実際の構造設計に際しては、部材の大きさが十分であるために、マクロで見れば弾性率の不確実性を考慮しないで済むことが示唆されるだろう。こうして、中空フレーム部材を題材として、弾性率パラメータを3次元の有限要素に均一かつ一意に割り当てた数値シミュレーション解析を実施する。シミュレーションでは、中空フレームの有限要素モデルに対し外部曲げ変形を入力し、フレームの変形および反力の予測を行ってモデルの再現性を検証する。この有限要素解析モデルを基に、中空フレーム部材の高剛性化のための設計手法を提案した。具体的には、熱可塑性CFRPの設計自由度の高さを活用して、異方性を発現する連続繊維CF/PPとのハイブリッド構造をモデル化し、断面形状さらに連続/不連続の構成比の最適解を求める。この設計の流れの有効性を確認するために、実際に製造プロセスを検討して中空フレームを試作し、性能評価まで実施する。新たに設計され試作された中空フレームが、目標通りに軽量かつ高性能を達成し得るかどうかを立証する。

最後に第9章では、本研究の成果について総括した。

本研究で用いた材料は全て同種の炭素繊維（三菱レイヨン製 TR50），同種のポリプロピレン（東洋紡製 酸変性 PP）から構成され，比率も全て同等の Vf50%である．そのマテリアルフローと試験片形状の概要を Fig.1.44 に示す．図中，試験片毎に，どの力学特性や性能評価に使用したかを章番号とともに記す．ただし，第5章で用いた，従来型ポリプロピレンについては補足的な扱いなのでここでは言及しない．

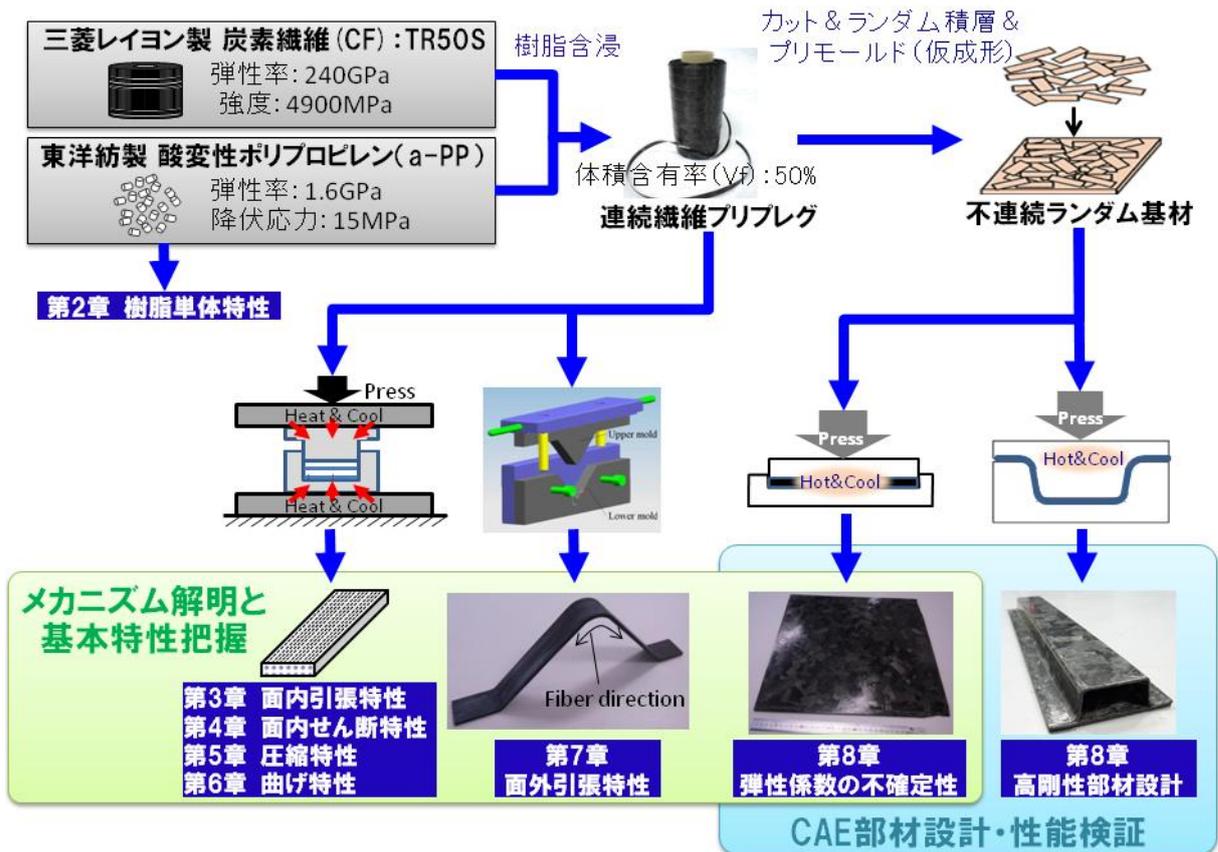


Fig.1.44 Material flow and its specimen for each thematic chapter.

参考文献

- [1-1] IEA International Energy Agency : World Energy Outlook Special Report 2013, (online), <<http://www.worldenergyoutlook.org/>>.
- [1-2] IPCC : Fifth Assessment Report 2013, (online), <<http://www.ipcc.ch/report/ar5/wg1/>>.
- [1-3] 自動車技術会 : 年鑑, **67**, 8 (2013).
- [1-4] 大聖 泰弘 : 環境・規制動向この10年, 自動車技術会, **64**, 1 (2010), 18-25.
- [1-5] 芳川 恒志 : エネルギー政策の潮流, 自動車技術会, **67**, 11 (2013), 10-15.
- [1-6] 国土交通省 : 交通政策審議会陸上交通分科会自動車交通部会, “交通事故のない社会を目指した今後の車両安全対策のあり方について” 平成 23 年 6 月 (オンライン), <http://www.mlit.go.jp/policy/shingikai/jidosha01_sg_000007.html>.
- [1-7] M. F. Ashby : Materials and the Environment: Eco-Informed Material Choice, Butterworth-Heinemann, (2009).
- [1-8] 国土交通省 : 自動車関係統計データ, 自動車燃費一覧, 平成 20 年 (オンライン), <http://www.mlit.go.jp/statistics/details/jidosha_list.html>.
- [1-9] 石田 恭聡 : 車体軽量化の新たな必要性, 自動車技術会, Vol.64, 07 (2010), 40-45.
- [1-10] 新エネルギー・産業技術総合開発機構 (NEDO) : 成果報告書データベース, “平成 24 年度～平成 25 年度 世界各国の技術開発振興機関の機能・マネジメント等に関する調査”, 平成 25 年 6 月 (オンライン), <http://www.nedo.go.jp/library/database_index.html>.
- [1-11] 新エネルギー・産業技術総合開発機構 (NEDO) : 成果報告書データベース, “平成 21 年度 エネルギー分野の技術戦略マップの策定に関する調査”, 平成 22 年 3 月 (オンライン), <http://www.nedo.go.jp/library/database_index.html>.
- [1-12] 自動車技術ハンドブック 3. 設計 (デザイン・ボディ) 編, 自動車技術会, 2008.
- [1-13] 自動車技術ハンドブック 5. 設計 (シャシ) 編, 自動車技術会, 2005.
- [1-14] 高 行男, アルミ VS 鉄ボディ[自動車用材料の秘密] 山海堂
- [1-15] WorldAutoSteel : Future Steel Vehicle – Phase I. Executive Summary, (online), <<http://www.worldautosteel.org/>>.
- [1-16] WorldAutoSteel : Future Steel Vehicle Overview report April 2011, (online), <<http://www.worldautosteel.org/>>.
- [1-17] G. Genta, L. Morello : The Automotive Chassis, Volume1:Components Design, Springer, (2009).
- [1-18] J. Happian-Smith : An introduction to Modern Vehicle Design, Butterworth-Heinemann, (2006).
- [1-19] J.C. Brown, A.J. Robertson, S.T. Serpento : Motor Vehicle Structures: Concepts and Fundamentals, Butterworth-Heinemann, (2002).
- [1-20] 福富洋志 : 自動車軽量材料の開発技術, シーエムシー出版, (2006).
- [1-21] B. Cantor, P. Grant, C. Johnston : Automotive Engineering Lightweight, Functional, and Novel Materials, Taylor & Francis, (2008).
- [1-22] NCAC National Crash Analysis Center : Finite Element Model of Dodge Neon, 2006, (online),

<<http://www.ncac.gwu.edu/>>.

- [1-23] 衝突解析ワーキンググループ編, 構造強度部門委員会, 部材曲げ強度向上のための最適構造研究, 自動車技術会, 2001年10月.
- [1-24] 西方 浩人: アクティブセイフティ技術の最前線, 自動車の限界性能試験方法, JSAE Symposium, 自動車技術会, No.04-03 (2003), 19-24.
- [1-25] 野口 博史, 宮川 哲, 影山 雄介: 車両運動性能設計を支えるシミュレーション技術, 自動車技術会, **65**, 1 (2011), 47-52.
- [1-26] 久世 正文, 梅原 康平: 走行時のボデー過渡変形予測技術, 自動車技術会, **64**, 7 (2010), 87-91.
- [1-27] 中丸 敏明: 自動車車体及びシャシ部品の耐久性評価, 自動車技術会, **66**, 7 (2012), 71-76.
- [1-28] 自動車技術ハンドブック 7. 試験・評価(車両)編, 自動車技術会, 2006.
- [1-29] WorldAutoSteel: ULSAB-UltraLight Steel Auto Body Reports, ULSAB-UltraLight Steel Auto Closures Reports, ULSAB-UltraLight Steel Auto Suspensions Report, and ULSAB-AVC Advanced Vehicle Concepts Report, (online), <<http://www.worldautosteel.org/>>.
- [1-30] WorldAutoSteel: Advanced High-Strength Steel Applications – Design and Stamping Process Guidelines, Jan. 2010 (online), <<http://www.worldautosteel.org/>>.
- [1-31] 栗山 幸久, 山崎 一正, 橋本 浩二, 大橋 浩: ULSAB-AVC の開発の経緯と成果, 溶接学会誌, **71**, 8 (2002), 554-558.
- [1-32] 岩谷 二郎: ULSAB-AVC の車体構造の特徴と衝突性能, 溶接学会誌, **71**, 8 (2002), 564-569.
- [1-33] 新日鉄自動車鋼板のグローバル展開とスチール・ソリューション, 新日鉄月報, 2002.7.
- [1-34] 栗山 幸久, 谷口 裕一, 大橋 浩: 世界鉄鋼協会の次世代車の鋼製車体プログラム, 自動車技術, **64**, 11 (2010), 10-16.
- [1-35] 吉田 正敏: 自動車車体用アルミニウム合金の特性と適用事例, 自動車技術, **64**, 11 (2010), 17-22.
- [1-36] 伊藤 清文, 熊谷 正樹: 自動車用アルミニウム合金押出材について, 自動車技術, **64**, 11 (2010), 47-51.
- [1-37] 自動車材料・加工技術のすべて 2007, 日経 BP 社, 2006.
- [1-38] 草川 紀久 監修: 自動車と高分子材料, シーエムシー出版, 2006.
- [1-39] 朝野 千明, 藤 和久, 原 正雄, 大西 正明, 古田 和広: 超薄肉軽量バンパの開発, 自動車技術, **67**, 6 (2013), 4-5.
- [1-40] 独立行政法人 新エネルギー・産業技術総合開発機構 (NEDO), 成果報告書データベース “平成 15 年度～平成 19 年度 自動車軽量化炭素繊維強化複合材料の研究開発”, 平成 20 年 5 月 (オンライン), <http://www.nedo.go.jp/library/database_index.html>.
- [1-41] Presentation of Polyscope in JEC 2014 Paris, ICS program. 2014.3.
- [1-42] M.D. Wakemana, T.A. Cainb, C.D. Ruddb, R. Brooksb, A.C. Longb: Compression moulding of glass and polypropylene composites for optimised macro- and micro-mechanical properties II. Glass-mat-reinforced thermoplastics, Composite Science and Technology, **59** (1999),

709-726.

- [1-43] M.D. Wakeman, T.A. Cain, C.D. Rudd, R. Brooks, A.C. Long : Compression moulding of glass and polypropylene composites for optimized macro- and micro- mechanical properties -1 commingles glass and polypropylene, *Composite Science and Technology*, **58** (1998), 1879-1898.
- [1-44] K. Balaji Thattai parthasarathy, S. Pillay, H. Ning, U.K. Vaidya : Process simulation, design and manufacturing of a long fiber thermoplastic composite for mass transit application, *Composite Part A*, **39** (2008), 1512-1521.
- [1-45] 馬場 俊一 : 連続繊維熱可塑性材料の射出成型技術, *プラスチック*, **65**, (2011), 7-11.
- [1-46] U. K. Vaidya and K. K. Chawla : Processing of fibre reinforced thermoplastic composites, *International Materials Reviews*, **53**, 4 (2008), 185-218.
- [1-47] 畑田 浩一, 下鶴瀬 政史 : 自動車のモジュール化, 軽量化に貢献するガラス長繊維ポリプロピレン, *自動車技術*, **68**, 6 (2014), 87-91.
- [1-48] 奥村 欽一, 浅井 俊博 : 長繊維強化熱可塑性樹脂の自動車部品への適用, *神戸製鋼技報*, **47**, 2 (1997), 73-76.
- [1-49] 横山 敦士, 江頭 裕二, 水野 良造 : 自動車設計を支える衝突安全シミュレーション技術, *自動車技術*, **65**, 1 (2011), 59-65.
- [1-50] 櫻井 俊彰, 榎 徹雄, 竹原 昭一郎, 中野 公彦, 須田 義大 : 快適性向上レイアウト乗用車における前面衝突安全性の検討, *自動車技術*, **67**, 5 (2013), 59-64.
- [1-51] H. Ning, U. Vaidya, G.M. Janowski, G. Husman : Design, manufacture and analysis of a thermoplastic composite frame structure for mass transit, *Composite Structures*, **80**, (2007), 105-116.
- [1-52] 福田 博, 邊 吾一 : 複合材料の力学序説, 古今書院, (2009).
- [1-53] 高野 直樹, 上辻 靖智, 浅井 光輝 : マイクロメカニカルシミュレーション, コロナ社, (2008).
- [1-54] D. ハル, T. W. クライン, (訳 宮入裕夫, 池上皓三, 金原勲), 複合材料入門[改訂版], 培風館, (2003).
- [1-55] B.W. Rosen : Tensile Failure of Fibrous Composites, *AIAA Journal*, **2**, 11 (1964), 1985-1991.
- [1-56] M. Nakada, Y. Miyano, M. Kinoshita, R. Koga, T. Okuya : Time-Temperature Dependence of Tensile Strength of Unidirectional CFRP, *Journal of Composite Materials*, **36**, 22 (2002), 2567-2581.
- [1-57] S.W. Tsai, E.M. Wu : A General Theory of Strength for Anisotropic Materials, Technical Report AFML-TR-71-12, (1972).
- [1-58] 植村 益次 : FRP の力学的特性試験法の問題点と設計基準 (I), *日本複合材料学会誌*, **7**, 1 (1981), 32-37.
- [1-59] 植村 益次 : FRP の力学的特性試験法の問題点と設計基準 (II), *日本複合材料学会誌*, **7**, 2 (1981), 74-81.
- [1-60] R.G. Gibson : Principles of Composite Material Mechanics, 2nd edition, CRC Press, (2007).
- [1-61] B. W. Rosen : Fiber Composite Materials, American Society of Metals, (1965), 37-75.

- [1-62] A. S. Argon : Treatise on Material Science and Technology, Volume 1, Academic Press, (1972), 79-114.
- [1-63] B. Budiansky : Micromechanics, Computers & Structures, **16**, (1983), 3-12.
- [1-64] B. Budiansky & N. A. Fleck : Compressive failure of fibre composites, Journal of Mechanical Physics and Solids, **41**, (1992), 183-211.
- [1-65] 新エネルギー・産業技術総合開発機構 (NEDO), 成果報告書データベース, “平成 20 年度～平成 24 年度 サステナブルハイパーコンポジット技術の開発”, 平成 25 年 2 月 (オンライン), <http://www.nedo.go.jp/library/database_index.html>.
- [1-66] 日本機械工業連合会, 次世代金属・複合材料研究開発協会, “平成 19 年度 熱可塑性樹脂複合材料の機械工業分野への適用に関する調査報告書”, 平成 20 年 3 月.
- [1-67] 平野 啓之, 土谷 敦岐, 橋本 雅弘, 本間 雅登, 岡部 朋永 : 熱可塑性スタンパブルシートの研究開発, 日本複合材料学科誌, **40**, 2 (2014), 81-86.
- [1-68] 東洋紡, クイックフォーム^(R)ランダムシート, (オンライン), <<http://www.toyobo.co.jp/>>.
- [1-69] M. Yamauchi, Y. Kan, I. Ohsawa, K. Uzawa, J. Takahashi : Improvement of interfacial shear strength between carbon fiber and polypropylene, 11th Japan International SAMPE Symposium & Exhibition, Tokyo, Japan (2009).
- [1-70] 前 博行 : ポリプロピレンにおけるひずみ速度及びガラス転移温度に対するひずみ挙動について, 第 12 回機械材料・材料加工技術講演会講演論文集, 日本機械学会, (2004).
- [1-71] A.D. Drozdov : Effect of temperature on the viscoelastic and viscoplastic behavior of polypropylene, Mechanical Time-Dependent Material, **14**, (2010), 411-434.
- [1-72] 有山 堯, 森 保成, 金子 堅司 : ポリプロピレンの変形特性に及ぼすひずみ速度および温度の影響, 日本機械学会論文集 (A 編), **62**, 595 (1996), 193-198.
- [1-73] H. Mae, K. Kishimoto : Modeling and Simulation of Impact Failure Characteristic of Polypropylene by Elastoviscoplastic Constitutive Law, Journal of Solid Mechanics and Materials Engineering, **1**, 1 (2007), 35-46.
- [1-74] A. Gilat, R.K. Goldberg, G.D. Roberts : Experimental study of strain-rate-dependent behavior of carbon/epoxy composite, Composites Science and Technology, **62**, (2002), 1469-1476.
- [1-75] S. Barre, T. Chotard, M.L. Benzeggagh : Comparative study of strain rate effects on mechanical properties of glass fibre reinforced thermoset matrix composites, Composites Part A, **27A**, (1996), 1169-1181.
- [1-76] M. Nakada, Y. Miyano : Formulation of time- and temperature- dependent strength of unidirectional carbon fiber reinforced plastics, Journal of Composite Material, **47**, 15 (2012), 1897-1906.
- [1-77] M. Nakada, Y. Miyano, M. Kinoshita, R. Koga, T. Okuya : Time-temperature dependent tensile strength of unidirectional CFRP, Journal of Composite Material, **36**, 22 (2002), 2567-2581.

第2章 熱可塑性樹脂単体の弾塑性変形と粘弾性挙動（要約）

<詳細は5年以内に出版予定>

2.1 緒言

第1章で述べたように、熱可塑性樹脂をマトリックスとする熱可塑性 CFRP は、その繊維方向の力学特性がハイテンと呼ばれる高張力鉄鋼材料にも匹敵することが分かってきており、軽量化が望まれる製品に適用する際に、生産性と性能を両立できる新しい材料として注目されている。特に、汎用プラスチックであるポリプロピレンは、他のプラスチックよりも入手しやすく安価であるため、コストパフォーマンスを考慮した場合に非常に実用的で汎用性の高い樹脂として有望視されている^[2-1]。

しかしながら、いざ繊維強化させて複合材料として様々な製品や構造部材に適用しようとすると、品質保証を如何に設計するかが課題となるが、特に耐環境性能や耐久性などについて把握するまでは到達していない。炭素繊維そのものは従来の熱硬化性 CFRP と同等のものをを用いても、それを界面接着性を向上させたポリプロピレンなどの樹脂材料と複合化させると、果たして樹脂の耐久性や温度依存性などの力学特性が、繊維強化された時にどのようにメカニズムを発現するか、その影響度合いが明らかになっていないためである。ポリプロピレンの場合は他の樹脂と比べてそれ自体の耐熱性が低く、高温環境下における力学特性の低下は無視できない。また、ポリマーとしての時間温度換算則が成り立つとすると、すなわち、長時間外部から力が及ぼされた状態での破損、例えばクリープ破断強度の低下も、耐久性が重要視される製品を設計する場合には大いに懸念される。それが繊維強化された複合材料であったとしても無視することはできない。なぜなら、マトリックス樹脂単体の弾性率の温度依存性や時間依存性が、繊維方向の強度に影響を与えることは、熱硬化性樹脂をマトリックスとする繊維強化プラスチックにおいて説明されているためである^{[2-2][2-3][2-4]}。これらの研究によると、マトリックス樹脂の粘弾性挙動が、繊維強化された一方向複合材料の繊維方向引張と曲げ、さらには、繊維直角方向の曲げのそれぞれの静的強度に影響を与えることが理論的に検証されている。したがって、ポリプロピレンをマトリックスとする炭素繊維強化プラスチックの力学特性をメカニズムの観点から説明するには、その母材として機能するポリプロピレン単体の力学特性、特に、温度と時間に関係する特性を把握することが重要である。本章では、熱可塑性 CFRP の力学特性に影響を及ぼすポリプロピレン単体の特性を実験的に検証する。

2.2 結言（要約）

本章では、熱可塑性 CFRP の耐久性や耐環境性能に大きく影響を及ぼすと考えられる、マトリックス樹脂単体の弾塑性挙動と粘弾性挙動を実験的に検証した。酸変性したポリプロピレンであっても、単純引張によって変形を与えると、弾性領域から塑性領域への遷移の仕方は従来のポリプロピレンと大きく異なることは無く、ポリプロピレンが本来持っている延性

的な挙動, つまり, 破断伸びが高いという特徴が現れるように樹脂設計されていることが分かった. また, 動的粘弾性試験によって, 本マトリックス樹脂の時間や温度に依存する, 微小ひずみ範囲での弾性率の変化を明らかにすることができた. 特に, ガラス転移点温度以下の低温時にガラス状弾性体としての力学挙動を示すことや, 高温時に分子間の流動性が高くなり見かけ上弾性率が低くなる挙動も説明できる結果が得られた. このような特徴がある一方, ポリマーに適用可能とされる時間温度換算則に従って, 温度と時間に対するマスター曲線を滑らかな線で描けることも証明でき, 時間温度シフト因子を定量的に評価できる関係曲線を抽出することができた.

参考文献

- [2-1] 新エネルギー・産業技術総合開発機構 (NEDO), 成果報告書データベース, “平成 20 年度～平成 24 年度 サステナブルハイパーコンポジット技術の開発”, 平成 25 年 2 月 (オンライン), <http://www.nedo.go.jp/library/database_index.html>.
- [2-2] M. Nakada, Y. Miyano : Formulation of time- and temperature- dependent strength of unidirectional carbon fiber reinforced plastics, *Journal of Composite Material*, **47**, 15 (2012), 1897-1906.
- [2-3] M. Nakada, Y. Miyano, M. Kinoshita, R. Koga, T. Okuya : Time-temperature dependent tensile strength of unidirectional CFRP, *Journal of Composite Material*, **36**, 22 (2002), 2567-2581.
- [2-4] Y. Miyano & M. Nakada : Time and temperature dependent fatigue strengths for three directions of unidirectional CFRP, *Experimental Mechanics*, **46**, (2006), 155-162.
- [2-5] JIS K7113, プラスチックの引張試験方法, 日本規格協会, (1995).
- [2-6] 材料システム 第6巻, 特集 粘弾性, 金沢工業大学 材料システム研究所, (1987).
- [2-7] R.M クリステンセン (國尾 武, 宮野 靖 訳), 粘弾性力学の基礎, 雄松堂出版 (2000).
- [2-8] D. Hatori, M. Nakada & Y. Miyano : Evaluation of viscoelastic behavior of matrix resin for CFRP, 12th Japan International SAMPE Symposium & Exhibition, Tokyo, Japan (2011).

第3章 一方向熱可塑性 CFRP の引張特性（要約）

<詳細は5年以内に出版予定>

3.1 緒言

第1章で述べたように、繊維強化複合材料の繊維方向圧縮強度は引張強度に対して著しく低い値を示すことが知られている。そこで本章では、圧縮強度との対比を示すために、まずは熱可塑性 CFRP を用いて繊維方向引張特性の検証を行う。ただし、引張強度を正確に計測するには、試験機に搭載するグリップやチャックフェイスの影響を無視できず、タブなどの影響によってグリップ部で試験片が破損することが懸念される。このような観点で適切な引張破壊が生じているか確認するために、繊維方向の破壊現象を視覚的に捉えることが求められる。そのために有効なツールとして、高速度ビデオカメラによる高速撮影を試みる。文献^[3-1]によれば、熱硬化性樹脂（ここではエポキシ）を用いた一方向 CFRP の引張試験において、引張破壊時に試験機の荷重が一気に落ちる瞬間をトリガーとして、その前後の破壊現象を高速度カメラによって撮影することで、一方向 CFRP の引張破壊における亀裂がどのように進展するかを明らかにした。本研究においても同様の計測系を組み立て、高速度カメラによって、一方向熱可塑性 CFRP の繊維方向引張の破壊現象を撮影する。さらに、試験後の試験片の破壊の様子から、その破壊挙動が、熱硬化性 CFRP と比べてどのように異なるか、また、グリップする際のタブの影響が破壊挙動にどう影響を与えるかについて考察を行う。

次に、今度は、繊維直角方向の引張特性について検証する。繊維直角方向の引張強度は、繊維方向の引張強度よりは著しく低く、つまり、高い繊維強度の影響を受けず、通常、マトリックス樹脂の破断ひずみや降伏応力の影響を受けやすい。このようなことを議論するためにも、繊維直角方向の引張特性を実験的に検証して、その検出された特性値について、前章の樹脂単体の引張特性からの説明を試みる。さらに発展的な課題として、第1章でも述べたように、繊維直角方向の引張特性、特に、引張弾性率は、繊維方向の圧縮破壊時のキンクバンド発生メカニズムに寄与するパラメータであるため、その特性値を抽出しておく必要がある。

以上より、本章では、熱可塑性 CFRP を用いた一方向プレス積層材の、繊維方向の引張試験及び繊維直角方向の引張試験を行い、その破壊現象や特性値について考察する。

3.2 結言（要約）

本章では、炭素繊維に酸変性ポリプロピレンを含浸させて作製した連続繊維 CF/PP プリブレグテープを、ホットプレスによる圧縮成形によって一方向 CF/PP プレス積層材を作製し、その繊維方向引張特性と繊維直角方向引張特性を実験的に検証した。

参考文献

- [3-1] 草野 英昭, 青木 雄一郎, 平野 義鎮, 永尾 陽典 : 高速度撮影による一方向 CFRP の破壊観察, 日本複合材料学会誌, **37**, 2 (2011), 63-69.
- [3-2] 三菱レイヨン株式会社, 製品情報, “炭素繊維・複合素材 PYROFIL”, 更新 2007-12 (オンライン), <<https://www.mrc.co.jp/pyrofil/product/pdf/cf.pdf>>.
- [3-3] JIS K7165, プラスチックー引張特性の試験方法ー第 5 部 : 一方向繊維強化プラスチック複合材料の試験条件, 日本規格協会, (2008).
- [3-4] K. Suzuki, I. Ohsawa, K. Uzawa, K. Nagata, T. Matsuo, M. Yamane and J. Takahashi : Joint efficiency of ultrasonic welding of CFRTP for structural applications, Proceeding of ECCM15, Venice, Italy, (2012).
- [3-5] D. ハル, T. W. クライン, (訳 宮入裕夫, 池上皓三, 金原勲), “複合材料入門[改訂版]”, 培風館, (2003).

第4章 熱可塑性 CFRP の繊維方向せん断特性とその温度依存性 (要約)

<一部, 下記学会誌に掲載済み>

- [1] 松尾 剛, 影山和郎: 熱可塑性 CFRP の繊維方向圧縮強度の温度依存性に関する一考察, 日本複合材料学会誌, **40**, 5 (2014), 218-226.

<その他, 詳細は5年以内に出版予定>

4.1 緒言

第3章で検証されたように, 熱可塑性 CFRP の一方向プレス積層材の繊維方向引張特性は, 強化繊維の高い力学特性によって高い剛性, 強度を達成できるのに対し, 繊維直角方向の引張特性は, 繊維の高剛性・高強度物性の寄与率がほとんど 0 に等しく, 弾性率も強度もマトリックスに大きく依存することが示唆される. すなわち, 弾性変形に関しては, 複合材料の基礎力学モデルである, 等応力モデルやスラブモデルによって定性的あるいは近似的に説明でき^{[4-1][4-2]}, 強度に関しては, マトリックスの塑性挙動が大きく破壊強度に影響を与えることが推測できた. したがって, 一方向材の繊維方向せん断特性についても繊維直角方向の引張特性と同様のモデルを用いて少なくとも定性的に説明できるため, マトリックスの影響が大きく現れると予測できる.

ここで, 第2章で説明したように, マトリックスであるポリプロピレンはその粘弾性挙動によって, 環境温度の変化に応じて弾性率が大きく変化するポリマーであることが分かっている. よって, 繊維方向せん断特性の弾塑性挙動も温度変化の影響を強く受けるだろうことは容易に想像できる. 車の構造部材への適用を考えた場合, フレームやパネルの薄肉構造によって部材全体の剛性や強度といった性能を保証するためには, 使用温度環境下での積層板の面内せん断特性の把握は欠かせないことは第1章序論で述べたとおりである.

加えて, 繊維方向の圧縮強度のメカニズムを説明する場合, キンクバンドモデルを用いることによって, 繊維方向のせん断特性が直接的に圧縮破壊に影響を与えることは従来研究^{[4-3][4-4][4-5][4-6][4-7]}においても指摘されている. 上述のように, せん断特性が温度変化の影響を受けるならば, 圧縮強度も環境温度によって変化することが推測できる.

以上より, 本章では繊維方向せん断特性を実験的に検証し, その温度依存性を明らかにすることによって, マトリックスの粘弾性挙動の影響を調べる. そして, 次章で述べる圧縮強度の温度依存性を説明するのに重要な各温度毎のせん断弾性率の基礎データを揃える.

4.2 結言 (要約)

本章では, 熱可塑性 CFRP の繊維方向せん断特性を調べるために, 連続繊維 CF/PP プリプレグテープから作製した $\pm 45^\circ$ 積層材の引張試験を実施した. さらに, 材料の使用環境を想定した, 低温から高温までの実用温度範囲において, せん断特性の変化を実験的に検証した.

繊維方向せん断特性は、前章で述べた繊維直角方向の引張特性と同様、強化繊維の力学特性よりもマトリックス樹脂の力学特性に大きく依存する材料パラメータであることが示された。そして、温度毎にせん断特性を調べたことによって、酸変性ポリプロピレン単体の粘弾性挙動が、繊維強化された複合材料のせん断特性に直接的な影響を及ぼすことが明らかになった。一方で、試験後の試験片を観察しても、樹脂割れや繊維破断のような明確な破壊現象は見られず、ポリプロピレンの比較的延性的な塑性挙動が、繊維方向せん断変形における見かけ上のひずみ硬化現象にも寄与していることが推測された。

参考文献

- [4-1] D. ハル, T. W. クライン, (訳 宮入裕夫, 池上皓三, 金原勲), “複合材料入門[改訂版]”, 培風館, (2003).
- [4-2] 福田 博, 邊 吾一: 複合材料の力学序説, 古今書院, (2009).
- [4-3] R. G. Gibson : Principle of Composite Material Mechanics, 2nd edition, CRC Press, (2007).
- [4-4] B. W. Rosen : Fiber Composite Materials, American Society of Metals, (1965), 37-75.
- [4-5] A. S. Argon : Treatise on Material Science and Technology, Volume 1, Academic Press, (1972), 79-114.
- [4-6] B. Budiansky : Micromechanics, Computers & Structures, **16**, (1983), 3-12.
- [4-7] B. Budiansky & N. A. Fleck : Compressive failure of fibre composites, Journal of Mechanical Physics and Solids, **41**, (1992), 183-211.
- [4-8] JIS K7019 : 繊維強化プラスチック $\pm 45^\circ$ 引張試験による面内せん断特性の求め方, 日本規格協会, (1999).
- [4-9] 新エネルギー・産業技術総合開発機構 (NEDO), 成果報告書データベース, “平成 20 年度～平成 24 年度 サステナブルハイパーコンポジット技術の開発”, 平成 25 年 2 月 (オンライン), <http://www.nedo.go.jp/library/database_index.html>.
- [4-10] 材料システム 第 6 巻, 特集 粘弾性, 金沢工業大学 材料システム研究所, (1987).

第5章 一方向熱可塑性 CFRP の繊維方向圧縮破壊メカニズム (要約)

<一部、下記学会誌に掲載済み>

- [1] 松尾 剛, 影山和郎: 熱可塑性 CFRP の繊維方向圧縮強度の温度依存性に関する一考察, 日本複合材料学会誌, **40**, 5 (2014), 218-226.
- [2] 松尾 剛, 影山和郎: 熱可塑性 CFRP の繊維方向圧縮破壊メカニズムに関する一考察, 日本複合材料学会誌, **40**, 3 (2014), 98-105.

<その他、詳細は 5 年以内に出版予定>

5.1 緒言

一般的に市販されているポリプロピレンは、他の樹脂と比べてそれ自体の耐熱性が低く、ポリプロピレンを適用した製品の品質保証においては、その使用環境における上限温度が比較的低いことが知られている。本研究で扱う酸変性ポリプロピレンも、第 2 章の検証結果から分かるように、一般のポリプロピレンと同様、高温環境下における品質の低下、力学特性の低下については注意を払わなければならない。加えて、ポリプロピレンは結晶性樹脂であり、ガラス転移点温度が 0°C からマイナス付近に存在しているため、低温環境下において特性が大きく変化する可能性がある。このようなことから、熱可塑性 CFRP を構造部材に適用する際、製造時の成形性を重視しつつも、製品の常用温度範囲における材料の力学特性を理論的な側面から把握し、仕様設計に活用することが要求される。

繊維強化複合材料の温度依存性の解明にアプローチしている研究の一つに、Nakada ら^{[5-1][5-2]}によるものが挙げられる。この研究では、マトリックス樹脂の粘弾性挙動が、繊維強化された一方向複合材料の繊維方向の引張と曲げおよび繊維直角方向の曲げの静的強度に影響を与えることが理論的に検証された。

ところで、繊維強化された複合材料では、繊維強化方向の引張強度よりも圧縮強度にマトリックスの粘弾性挙動が大きく影響することが文献^[5-3]からも推測される。ところが、繊維方向の純粋な圧縮強度に絞って過去の研究実績を調べてみると、有限要素法によって温度と時間の依存性を説明した研究^[5-4]があるが、室温以上 60°C 以下に限定されているため実用範囲に限られる。また、繊維方向圧縮強度は、繊維の座屈強度や樹脂のせん断弾性率などの機械特性、繊維/樹脂界面の接着性などの状態により大きく異なることは過去の研究において論じられているが^{[5-5][5-6]}、樹脂の粘弾性挙動に起因する温度依存性に絞って一律に検証された研究例は報告されていない。

第 2 章より、ポリプロピレンは他の樹脂と比べてそれ自体の弾性率が低く、かつ、比較的低い応力で塑性挙動を示すことが確認された。しかも、動的粘弾性測定試験によって、温度変化が直接的に弾性挙動に影響を与えることが分かった。したがって、炭素繊維との界面接着強度を向上させて含浸性を高めた基材化技術を実施したとしても^{[5-7][5-8]}、繊維方向圧縮強度の大幅な改善にはつながらないことが予測される。さらに、連続繊維プリプレグを用いた一方向熱可塑性基材を積層してプレス成形すると、積層方向に決して小さくないプレス圧力が掛

かり、圧縮成形時の樹脂流動によって繊維の直進性が損なわれる可能性がある。このようなことが原因となり、繊維方向圧縮強度が引張強度より著しく低い特性を示し、かつ、温度変化によって予測に反して特性が増減すれば、構造材の予想外の破壊の起点となり得る。したがって、熱可塑性 CFRP を用いた一方向積層材の繊維方向圧縮強度を適切に評価し、温度依存性も考慮して理論的に検証することによって、圧縮強度に影響を与える要因を明らかにする必要がある。

そこで第一に、異なる温度条件下でも圧縮強度を適切にかつ簡易的に評価できる試験法を調査する。まず、規格化されているいくつかの圧縮試験法を実施して、標準圧縮試験法に関する問題点を指摘する。そして、それらの問題点を解決するための、新たな簡易圧縮試験法を考案し、圧縮強度が適切に検出できるかどうか見極める。

一方、理論的な検証は、圧縮強度を解析的に求める理論式を展開することによってアプローチする。上述した文献^{[5-3][5-6]}によると、一方向積層材の繊維方向圧縮破壊には様々なパターンが存在することが示されている。

まず、繊維と樹脂の界面接着性が低い場合、圧縮破壊は繊維直角方向の引張破断モードによって生ずる^[5-6]。そこで、炭素繊維との接着性が低い、無変性ポリプロピレンを含浸させた一方向 CF/PP を用いて、上記新圧縮試験法によって圧縮強度と破壊モードを確認する。そして、軸方向圧縮ひずみに対するポアソン効果によって横方向引張ひずみが発生し、それが繊維直角方向の引張破断ひずみに到達して圧縮強度が決定されるかどうか検証する。

次に、酸変性ポリプロピレンの一方向 CF/PP を用い、界面接着強度が十分確保された場合の破壊モードについて理論的な検証を踏まえて考察する。界面接着が十分である時、圧縮破壊はキンクバンドの形成によって生じるせん断破壊モードが支配的であることが知られている。Rosen^[5-9]は、圧縮強度が繊維方向のせん断剛性の不安定性から生ずる局所的な繊維座屈に因るものであると指摘し、線形弾性モデルを用いて、圧縮強度がマトリックス樹脂のせん断弾性率を樹脂の体積含有率で除した値と等価であることを論じた。その後、Argon^[5-10]は、圧縮荷重方向に対する繊維の初期不整配向が、せん断降伏応力に依存する圧縮強度を低下させることを見出した。Budiansky^[5-11]は、キンクバンドの形成過程において完全弾塑性体を仮定して、Argon が導いた関係式をより一般化した形式に拡張した。これによると、繊維方向のせん断降伏ひずみが与えられると、圧縮強度は繊維の初期不整配向と複合材料のせん断弾性率の関係式として導かれている。さらに、Budiansky と Fleck^[5-12]は、キンクバンド形成時の局所繊維座屈によるせん断変形は、大局的に塑性挙動が占めることを利用し、キンクバンド形成に伴う圧縮強度の発現理論を、塑性変形も考慮したより汎用性の高い構成則に拡張して実験的に検証した。

しかし、Budiansky らが導出した構成式を用いる際には、母材のせん断降伏ひずみをあらかじめ定義する必要があるが^[5-12]、第4章で説明されたように、せん断弾塑性挙動は樹脂の依存度が高いため、特に熱可塑性樹脂の場合においては、明確なせん断降伏ひずみを実験的に検出することが困難である。そこで本研究では、Budiansky と Fleck による拡張構成則の導出過程において、繊維方向せん断特性を Ramberg-Osgood 則を用いて表現した点に着目し、それを

第 4 章で得られたせん断応力ひずみ曲線に適用することによって、せん断降伏ひずみを用いずに、繊維方向圧縮強度に対する塑性せん断特性および面外方向の繊維初期不整配向の依存性を記述する新しい方法を提案する。さらに、この関係式が、ポリプロピレンをマトリックス樹脂とする熱可塑性 CFRP において、異なる温度条件下においても一律に適用できるかどうかを検証する。

5.2 結言（要約）

本章では、一方向 CF/PP 積層材を用いて、繊維方向の圧縮強度を適切に評価できる試験法を提案するとともに、その圧縮破壊メカニズムを検証し、圧縮強度に影響を与える材料パラメータおよび繊維の初期不整配向やキックバンドの影響、さらには、温度依存性を理論的に説明することを試みた。同時に、界面接着強度が低い場合の圧縮破壊メカニズムについても理論的な検証を行った。その結果、一方向 CF/PP 積層材の繊維方向圧縮強度の発現メカニズムが明らかになった。

参考文献

- [5-1] M. Nakada & Y. Miyano : Formulation of time- and temperature- dependent strength of unidirectional carbon fiber reinforced plastics, *Journal of Composite Material*, **47**, 15 (2012), 1897-1906.
- [5-2] M. Nakada, Y. Miyano, M. Kinoshita, R. Koga & T. Okuya : Time-temperature dependent of tensile strength of unidirectional CFRP, *Journal of Composite Material*, **36**, 22 (2002), 2567-2581.
- [5-3] R.G. Gibson : *Principles of Composite Material Mechanics*, 2nd edition, CRC Press (2007).
- [5-4] M.G. Violette & R.A. Schapery : *Mechanical Time-Dependent Materials.*, **6** (2002), 133-145.
- [5-5] S.L. Bazhenov & V.V. Kozey : *Journal of Material Science*, **26**, (1991), 6764-6776.
- [5-6] M.S. Madhukar & L.T. Drzal : *Journal of Composite Material*, **26**, 3 (1992), 310 – 333.
- [5-7] U.K. Vaidya & K.K. Chawla : *International Materials Reviews*, **53**, 4 (2008), 185-218.
- [5-8] 平野啓之, 土谷敦岐, 橋本雅弘, 本間雅登, 岡部朋永 : *日本複合材料学会誌*, **40**, 2 (2014), 81-86.
- [5-9] B. W. Rosen : *Fiber Composite Materials*, American Society of Metals, (1965), 37-75.
- [5-10] A. S. Argon : *Treatise on Material Science and Technology*, Volume 1, Academic Press, (1972), 79-114.
- [5-11] B. Budiansky : *Micromechanics, Computers & Structures*, **16**, (1983), 3-12.
- [5-12] B. Budiansky, N. A. Fleck : Compressive failure of fibre composites, *Journal of Mechanical Physics and Solids*, **41**, (1992), 183-211.
- [5-13] 小笠原 俊夫, 石川 隆司 : 宇宙航空研究開発機構研究開発資料, JAXA-RM-08-010, (2008).

- [5-14] 小笠原 俊夫, 石川 隆司: 日本複合材料学会誌, **36**, 2 (2010), 33-40.
- [5-15] SACMA Recommended Method for Compressive Properties of Oriented Fiber-Resin Composites, SRM 1R-94, Suppliers of Advanced Composite Materials Association (SACMA), (1994).
- [5-16] JIS K7018: 繊維強化プラスチック積層板の面内圧縮特性の求め方, 日本規格協会, (1999).
- [5-17] D. ハル, T.W. クライン, (訳 宮入裕夫, 池上皓三, 金原勲), 複合材料入門[改訂版], 培風館, (2003).

第6章 一方向熱可塑性 CFRP の繊維方向曲げ特性と樹脂粘弾性 (要約)

<詳細は5年以内に出版予定>

6.1 緒言

本研究で用いる一方向 CF/PP 積層材の力学特性は、第5章までの理論検討及び実験による検証によって、その面内方向の特性については明確になってきた。特に、繊維方向の圧縮強度はマトリックスの粘弾塑性の影響が支配的であることが示唆された。これにより、マトリックスの粘弾塑性の影響は、繊維強化された複合材料の温度依存性だけでなく、速度依存性や時間依存性にも範囲を拡張して説明できると考えられる。したがって、マトリックスの粘弾塑性という一つの力学パラメータを基盤として、本材料の耐衝撃性や耐久性に関わる速度依存や時間依存の力学特性を統一的に論じることができかどうか検証することは非常に意義がある。

ところで、繊維強化複合材料の繊維方向の力学特性を実験によって調べる際、主に引張試験、圧縮試験、そして、曲げ試験がよく採用される。そして、それぞれの試験において材料本来の強度を正確に計測しようと、先述したように引張試験は、試験片に接合するタブやグリップでの掴み方、チャック歯の形状に依存し、タブ切れを起こさないようにするのが非常に難しい試験法である。また、圧縮試験も、様々な規格が存在しており^[6-1]材料や形状によって場合分けして、どの試験法が適当か試行錯誤しなければならない。つまり、万能な試験法は未だ存在していないと言っても良い。それに対して、曲げ試験は、円柱状の2つの支点と、同じく円柱状の1つ、または、2つの圧子によって試験片に曲げ変形を与えるだけで試験を行え、支点間距離を増減させて曲げモーメントの調整をすれば、比較的小さな荷重で所望の応力を材料に与えることができる。よって、材料に関わらず、強度を計測する試験法として特別な配慮をしなくて済み、画一的に実施できる一般的な手法として認識されている。したがって、曲げ試験であれば、衝撃試験やクリープ試験も JIS で規格化されているように^{[6-2][6-3]}、支点間距離や板厚を調整するだけで、試験片に与えるひずみ速度や曲げ応力を様々に変えられるので、先述のような様々な力学特性を統一的に説明するのに便利である。

ところが、汎用的な手法として広く認知されてはいるものの、そこに盲点があり、曲げ試験における問題点は様々に指摘されてきた^{[6-4][6-5][6-6]}。その最大の理由が、繊維強化複合材料に特徴的な強い異方性であり、曲げ試験において決して無視できない面外方向の剛性の低さである^[6-4]。植村^{[6-4][6-5]}の研究によると、曲げ荷重を与える圧子直下には面外方向に応力が集中して発生し、特に、板厚に対して支点間距離 (L/t) が小さい場合に、面外せん断も面外引張圧縮も、その応力が圧子直下に集中する。つまり、曲げ強度を測るために見かけ上曲げ破壊させたとしても、実際には面外の局所的な変形によって破壊される場合が多く、圧子の半径や L/t の影響によってその大きさは変動する。第4章で繊維方向のせん断弾性率を評価・考察したように、マトリックスの弾性率が比較的低いポリプロピレンなどを用いた場合、面外剛性はそれに応じて低い値を示すと言える。このことは、曲げ試験において L/t を様々に変化させることによって、一方向積層材の面外せん断弾性率を評価した過去の研究実績^[6-7]からも明らかである。そのため、本研究で使用する CF/PP に関しても、曲げ弾性率及び曲げ強度の

計測には十分注意する必要がある。

一方、上記のような圧子直下の面外変形を破壊の起点とする破壊様相は、第5章でも説明した圧縮破壊時のキックバンド発生によるメカニズムと同じであると考えられる。本研究で使用する一方向 CF/PP 積層材の、繊維方向の引張強度は第3章の検証結果より、曲げ破壊は間違いなく圧縮側から発生すると推測できる。つまり、曲げ破壊は圧子直下から発生し、上記のように面外変形によって生ずるものであるため、繊維方向曲げ強度と繊維方向圧縮強度は1対1で対応付けできるはずである。このような考えから、曲げ強度もマトリックスの粘弾性挙動の影響を直接的に受けることは容易に予測できる。

以上のような考察から、本章では、曲げ試験における圧縮破壊という現象を、マトリックスの粘弾性挙動という観点から統一的に論じるために、曲げ衝撃試験、曲げクリープ試験、そして、恒温槽を使用した静的曲げ試験を実施して、様々な条件下における曲げ強度について検証する。

6.2 結言（要約）

本章では、一方向 CF/PP 積層材を用いて、繊維方向の曲げ強度を様々な試験法を用いて検証し、第2章で明らかにしたマトリックスであるポリプロピレンの粘弾性挙動の影響について調べた。その結果、一方向 CF/PP 積層材の繊維方向曲げ強度は、樹脂の粘弾性挙動が支配因子であることが明らかになった。特に、自動車の使用環境を想定した場合、品質や安全性を保証する強度を、上記、樹脂粘弾性を基盤とした統一モデルで説明する試みは、部材や材料を設計する上で非常に有効であると言えそうである。

参考文献

- [6-1] 小笠原 俊夫, 石川 隆司 : 宇宙航空研究開発機構研究開発資料, JAXA-RM-08-010 (2008).
- [6-2] JIS K7084:炭素繊維強化プラスチックの3点曲げ衝撃試験方法, 日本規格協会, (1993).
- [6-3] JIS K7088:炭素繊維強化プラスチックの曲げクリープ試験方法, 日本規格協会, (1996).
- [6-4] 植村 益次 : FRP の力学的特性試験法の問題点と設計基準 (I), 日本複合材料学会誌, **7**, 1 (1981), 32-37.
- [6-5] 植村 益次 : FRP の力学的特性試験法の問題点と設計基準 (II), 日本複合材料学会誌, **7**, 2 (1981), 74-81.
- [6-6] 岩井 宏, 植村 益次, 林 徹 : 先進複合材料の曲げ試験法における3点, 4点曲げ方式の問題点, 日本複合材料学会誌, **18**, 2 (1992), 60-65.
- [6-7] 山下 慎一郎, 大澤 勇, 松尾 剛, 張 昕, 高橋 淳 : 3点曲げ試験によるCFRTPの縦弾性率および面外せん断弾性率に関する評価, 日本複合材料学会誌, **39**, 6 (2013), 221-230.
- [6-8] JIS K7074 : 炭素繊維強化プラスチックの曲げ試験方法, 日本規格協会, (1988).
- [6-9] 材料システム 第6巻, 特集 粘弾性, 金沢工業大学 材料システム研究所, (1987).
- [6-10] M. Nakada, Y. Miyano : Formulation of time- and temperature- dependent strength of unidirectional carbon fiber reinforced plastics, *Journal of Composite Material*, **47**, 15 (2012), 1897-1906.

第7章 一方向熱可塑性 CFRP の面外強度（要約）

<一部, 下記学会誌に掲載済み>

- [1] T. Matsuo, T. Goto, J. Takahashi : Investigation about the Fracture Behavior and Strength in a Curved Section of CF/PP, *Advanced Composite Materials*, DOI:10.1080/09243046.2014.886754, (2014).

<その他, 詳細は5年以内に出版予定>

7.1 緒言

第1章で説明したように、繊維強化複合材料は、車体の大部分の構造部材に適用される場合、フレーム部材にしてもパネル部材にしても大抵薄肉構造であり、繊維が短繊維でない限りは繊維方向と薄板面内方向はほぼ一致する。したがって、繊維は面内方向の強化に貢献するものの、面外方向に対してはほとんど強化することができない。それが故に、第5章で説明したように、繊維方向の圧縮変形過程におけるキンクバンドの形成、すなわち、面外せん断変形を誘発しやすい状況が生じる。他にも、構造部材には必ず湾曲部が存在し、コーナー形状に沿って積層される場合が想定されるが、そのコーナー部を開くように構造に変形荷重が与えられると、コーナー部において、積層された各プライに垂直な方向、すなわち、面外方向に引張応力が発生し、層間剥離が起きる。過去の研究においても、コーナー部の強度設計に面外方向の力学特性が重要であることが示唆されてきた^{[7-1][7-2][7-3]}。つまり、圧縮破壊のみならず、直接的に面外方向に損傷が発生する応力や変形モードは構造上存在し得る。この場合には、どうしても繊維強化材のメリットを享受できない。このように、繊維強化複合材料の安全設計をより精度の高いものにするには、面外方向の力学特性を常に意識し、その影響を理論的に説明できることが求められる。本章では、本研究で扱ってきた熱可塑性 CFRP に関して、その面外破壊・剥離破壊の発生起源となり得る、面外引張強度と面外せん断強度の特性を実験的に調べて考察を加える。

7.2 結言 (要約)

本章では、一方向 CF/PP 積層材の面外特性に着目し、その面外強度を評価する試験を実施した。特に、面外引張強度を評価する試験法の場合は、実用的に設計され得る構造に近い薄肉構造に適用されることを意図し、薄肉の L 型試験片によるヒンジ型治具を用いた引張試験法を採用した。ここで、面外引張強度を計算式で求める際、試験片が薄肉であることによる試験中の有限変形を考慮して、従来扱われてきた応力算出式を修正した。これを修正応力算出式として提案し、FEM 解析結果と比較して、その解法の妥当性を検証した。次に、面外せん断強度を求める試験法として、目違い切欠き圧縮法を用いて、試験を実施した。その結果、面外強度はいずれにしても繊維によって強化されることなく、主にマトリックス樹脂の力学特性の影響を受けやすいことが示された。構造部材強度を設計する際には、このマトリック

ス樹脂を支配要因とする材料特性に注意して安全性を評価する必要があると言える。

参考文献

- [7-1] K. T. Kedward, R. S. Wilson, S. K. Mclean : Flexure of simply curved composite shapes, *Composites*, **20**, (1989), 527-536.
- [7-2] S. Feih, H. R. Shercliff : Quality assessment of curved composite components in peel joint structures, *Composites Part A, Appl. Sci. Manuf.*, **36**, (2005), 397-408.
- [7-3] R. Olsson : A survey of test methods for multiaxial and out-of-plane strength of composite laminates, *Composites Science and Technology*, **71**, (2011), 773-783.
- [7-4] P. A. Lagace, D. B. Weems : A Through-the-Thickness Strength Specimen for Composites, *Test Methods for Design Allowables for Fibrous Composites, ASTM STP1003*, **2**, (1989), 197-207.
- [7-5] ASTM D7291, Standard Test Method for Through-Thickness "Flatwise" Tensile Strength and Elastic Modulus of a Fiber-Reinforced Polymer Matrix Composite.
- [7-6] W. C. Jackson, R. H. Martin : An Interlaminar Tension Strength Specimen, *Testing and Design, ASTM STP1206*, **11**, (1993), 333-354.
- [7-7] W.C. Jackson, P.G. Ifju : Through-the-Thickness Tensile Strength of Textile Composites, *Testing and Design, ASTM STP1274*, (1996), 218-238.
- [7-8] C.C. Hiel, M. Sumich, D.P. Chappell : A Curved Beam Test Specimen for Determining the Interlaminar Tensile Strength of a Laminated Composite, *Journal of Composites Materials*, **25**, (1991), 854-868.
- [7-9] ASTM D6415, Standard Test Method for Measuring the Curved Beam Strength of a Fiber-Reinforced Polymer-Matrix Composite.
- [7-10] W. Hufenbach, A. Hornig, B. Zhou, A. Langkamp, M. Gude : Determination of strain rate dependent through-thickness tensile properties of textile reinforced thermoplastic composites using L-shaped beam specimens, *Composites Science and Technology*, **71**, (2011), 1110-1116.
- [7-11] R.A. Sheno, W. Wang : Through-thickness stresses in curved composite laminates and sandwich beams, *Composites Science and Technology*, **61**, (2001), 1501-1512.
- [7-12] S.G. Lekhnitskii : *Anisotropic Plates*, Gordon and Breach Science Publishers, New York, (1968).
- [7-13] K.N. Shivakumar, H.G. Allen, V.S. Avva : Interlaminar tension strength of graphite/epoxy composite laminates, *Journal of AIAA*, **32**, (1994), 1478-1484.
- [7-14] D. ハル, T. W. クライン, (訳 宮入裕夫, 池上皓三, 金原勲), *複合材料入門*[改訂版], 培風館, (2003).
- [7-15] JIS K7078:炭素繊維強化プラスチックの層間せん断試験方法, 日本規格協会, (1991).
- [7-16] JIS K7092 : 炭素繊維強化プラスチックの目違い切欠き圧縮による層間せん断強さ試験方法, 日本規格協会, (2005).

第8章 不連続テープランダム積層材の力学特性と中空フレーム の設計および性能評価（要約）

<詳細は 5 年以内に出版予定>

8.1 緒言

熱可塑性 CFRP を実際の量産型構造部材として実用化するには、現行量産ラインにのる成形速度を実現できる必要がある。第 1 章で述べたように、不連続テープ系ランダム積層材であれば、この成形速度を達成できる可能性がある。成形加工前の中間基材は、一定幅の連続繊維系プリプレグテープを一定長さにカットして、その繊維方向が面内ランダムな方向に分散・積層され、予備成形されて製作される^[8-1]。これを、赤外線ヒーターなどで適度な温度になるまで加熱して、その直後、マトリックス樹脂が熔融状態を維持したまま、プレス機にセットした金型上に搬送し圧縮成形すれば、金型によって冷やされて材料が固化するまで、金型キャビティ形状に応じて基材が流動し、所望の複雑形状を有する部材を金型占有時間 1 分間程度で製造することが可能である^{[8-1][8-2]}。この製作工程においては、成形される所望の部材形状に形づくられた金型キャビティ内に、基材が十分に流動し充填することが重要とされ、繊維長や予熱時の樹脂の粘度に応じて、適切に金型温度や成形圧力がコントロールされる必要がある^[8-3]。こうして、炭素繊維と熱可塑性樹脂を用いた不連続テープ系ランダム積層材による成形部材は、面内等方に高い力学特性を確保しながらも、流動成形によって速い生産速度を実現することができ、一般量産車の車体構造への適用が期待される。

カットされたテープ 1 枚 1 枚は、繊維方向には弾性率も強度も強化されるものの、繊維直角方向やせん断方向はさほど強化されない。すなわち、連続繊維系の単層材本来の異方性が備わっている^[8-4]。この不連続テープが、面内ランダムな方向に分散配置され積層されることによって、マクロな領域において面内方向に等方性が付与されていると仮定すれば、FEM 解析においてシェル要素を用いた場合に、全ての要素に等方性の力学パラメータを一意に設定することができる。このように、FEM 解析技術を適用した数値解析シミュレーションによって、実際のフレーム構造部材の性能を予測できることが、本材料を用いた部材設計を容易とし、材料の適用範囲拡大に貢献すると期待できる。

ところが、現行の CFRP 用の標準試験規格では、一般的に数十 mm オーダーの試験片幅の試験片を用い、さらに計測系によってはゲージ長が狭い範囲に限定されて引張試験や曲げ試験を行うため、不連続テープのサイズに比べて狭い範囲の、局所的なひずみ値を計測してしまうことになる。カットされたテープがランダムな方向に配置され、かつ、その構成単位が著しい異方性を有している本材料の場合、局所範囲の測定系では、その範囲内に位置するテープ群の配向が偏ってしまう確率が存在するため、評価範囲毎に計測値が分散する。このように、標準試験規格で規定された試験条件では、狭い評価範囲あるいは少ない試験数では、材料特性を一意に検出できないことが懸念される。例えば、ある評価範囲の伸び量を計測する場合、その評価範囲内における不連続テープ群が、それぞれの繊維方向が引張方向に偏って配置されると、その範囲においては剛性が高く見積もられてしまう。つまり、評価範囲内の不連続テープが、それぞれ一様確率でランダムに配向角度が与えられていることによって、評価範囲内に限定した剛性パラメータは、ある確率分布で異方性を発現し得る。本章ではま

ず、この異方性の発生確率が、理論的かつ統計的に妥当であるかどうかを検証して、実物大の部材のマクロな変形挙動のばらつきに影響を与えるかどうかを判定する。これによって、本材料の FEM 解析を用いた部材設計への適用性について検討する。

そこでまず、剛性評価値の統計的な理論検討のため、評価範囲や試験片の板厚などの試験条件の違いによって生じるであろう弾性率の平均値と分散を数値シミュレーションによって計算する。その手法は、測定範囲において有限数の不連続テープの配向が一様確率で分布するという仮説を置き、引張方向に対して不連続テープ 1 枚 1 枚の配向に乱数を発生させて、それらが積層された積層板としての全体引張剛性を積層板理論^[8-4]と重ね合わせの原理によって計算する。この一連の計算を一試験として、これを十分な数の母集団と見立てるために、1000 個分の試験数を繰り返し、一つ一つ繰り返し計算して求めた弾性率の 1000 個分の集合の平均弾性率と分散を求める。次に、実際にそのモデルと同等の試験条件で引張試験を行い、測定された弾性率を標本集合として、その平均値と分散を求める。実際の試験では試験数 1000 は現実的では無いため、実際に試験を行って取得した限られた弾性率評価数の平均と分散を求め、上述の計算過程によって得られた 1000 個分の母集団モデルで説明できるかどうか、分散の程度を比較する母分散検定によって調べる。これによって、不連続テープの配向が一様確率で分布するという仮説と、それを基に積層板理論を用いて測定範囲毎に弾性率を算出する計算モデルが、実試験による弾性率の不確定性（分散の程度）に対応するかどうかを検証する。母分散検定によって仮説が棄却されないとすれば、少なくとも不連続テープが一様確率分布でランダムに配向されていることが影響して、弾性率評価値に不確定性が存在していることが解釈可能となる。測定範囲にどれだけテープが配置され積層されているかを考慮した、簡易計算モデルの正当性を論じることができる。

次に、上記計算モデルを用いれば、実物大の部材の全体変形を予測するのに、標準試験法によって検出された弾性率を一律に適用できるかが分かる。実際に、引張試験による面内方向の縦弾性率だけでなく、面内せん断弾性率についても計算モデルと実際の試験結果とを比較して、一律に適用しても妥当なせん断弾性率を調べる。それら線形挙動範囲の力学特性パラメータを、FEM で作成した中空フレームモデルの有限要素に一意に割り当てて、その曲げ変形を数値解析シミュレーションによって予測する。この時、材料の強度パラメータである引張強度とせん断強度も、上記標準試験により得られた値を実装する。そして、実際にランダム積層材を用いた中空フレームを試作して、有限要素モデルによる曲げ挙動の再現性を検証する。

最後に、曲げ変形、特に、初期の曲げ剛性を再現できることが確認できれば、より高剛性なフレームを実現するための、有限要素モデルによる CAE 設計方法を検討する。ランダム積層材のみでは、軽量化率 50%を保持したままで鉄鋼並の剛性を実現できないが、形状及び成形自由度を考慮すると、一方向材とのハイブリッド積層による高性能化を設計に取り入れることに考えが及ぶ。これを実際に有限要素モデルを用いて設計し、剛性が最大化される断面形状とハイブリッド構成を量的に見出す。そして、実際に設計どおりのハイブリッド中空フレームを試作し、その曲げ性能を実証して、有限要素モデルを用いた設計手法の有用性を考察する。

8.2 結言（要約）

本章では、高速連続成形が可能な不連続テープ系ランダム積層材（Chopped-CF/PP）を用いて、その基本的な力学特性の評価値の妥当性を確率論的な観点から説明した。さらに、構造部材の代表モデル部材として、片ハット断面の中空フレームを設定し、同材料の力学パラメータを用いた FEM 解析を実施して、鉄鋼材料と比べて、軽量かつ高性能を達成する設計手法を提案した。その結果、確率論的に妥当性を検証した力学パラメータを FEM 解析による構造設計に取り込み、本材料の成形自由度を念頭に入れた、断面寸法の最適設計・ハイブリッド設計を行うことによって、目標とする軽量化と性能を実現することができた。このように、CF/PP 積層材のハイテン以上の軽量化効果の実現、さらには、有限要素モデルを用いた設計手法の有用性について明らかにすることができた。

参考文献

- [8-1] 独立行政法人 新エネルギー・産業技術総合開発機構（NEDO），成果報告書データベース，“平成 20 年度～平成 24 年度 サステナブルハイパーコンポジット技術の開発”，平成 25 年 2 月（オンライン），<http://www.nedo.go.jp/library/database_index.htm>.
- [8-2] M.D. Wakeman, T.A. Cain, C.D. Rudd, R. Brooks, A.C. Long : Compression moulding of glass and polypropylene composites for optimized macro- and micro-mechanical properties II. Glass-mat-reinforced thermoplastics, *Composites Science and Technology*, **59**, (1999), 709-726.
- [8-3] K.B. Thattai parthasarathy, S. Pillay, H. Ning, U.K. Vaidya : Process simulation, design and manufacturing of a long fiber thermoplastic composite for mass transit application, *Composites Part A*, **39**, (2008), 1512-1521.
- [8-4] D. ハル, T.W. クライン, (訳 宮入裕夫, 池上皓三, 金原勲), 複合材料入門[改訂版], 培風館, (2003).
- [8-5] JIS K7164, プラスチックー引張特性の試験方法ー第 4 部：等方性及び直交異方性繊維強化プラスチックの試験条件, 日本規格協会, (2005).
- [8-6] 統計学入門, 東京大学出版会, (1999).
- [8-7] JIS K7021, 繊維強化プラスチックー平板ねじり法による面内せん断特性の求め方, 日本規格協会, (2007).
- [8-8] JIS K7079, 炭素繊維強化プラスチックの面内せん断試験方法, 日本規格協会, (1991).
- [8-9] ASTM D5379, Standard Test Method for Shear Properties of Composite Materials by the V-Notched Beam Method, (2005), 2011 Annual Book of ASTM Standards, Section 15, Volume 15.03.
- [8-10] ASTM D7078, Standard Test Method for Shear Properties of Composite Materials by V-Notched Rail Shear Method, (2005), 2011 Annual Book of ASTM Standards, Section 15, Volume 15.03.
- [8-11] D.O. Adams etc. : Development and Evaluation of the V-Notched Rail Shear Test for

Composite Laminates, U.S. Department of Transportation Federal Aviation Administration, (2003).

- [8-12] 衝突解析ワーキンググループ編, 構造強度部門委員会, 部材曲げ強度向上のための最適構造研究, 自動車技術会, 2001 年 10 月.

第9章 結論（要約）

本研究では、車体構造部材の大幅軽量化を目指す最有力軽量材料として、熱可塑性 CFRP に着目した。

第1章では、鉄鋼やアルミ合金、樹脂材料など、他材料に関して従来技術動向を調査・分析した。いずれの材料であっても、ウェイトパフォーマンスの向上のためには、高剛性・高強度、および、時にはそれと技術的に相反する加工性・生産性の向上という、トレードオフの解消を求められ続けていることが分かった。中でも、鉄鋼材料は、鉄鋼業界全体を巻き込むビッグプロジェクトを継続して立ち上げており、材料組成の工夫と加工装置の高度化などにより、高強度化と加工性向上の両立を目指して、実際に軽量化に貢献し続けていることが示された。

しかし、クルマの軽量化への要望がますます強くなっていく昨今、熱可塑性 CFRP を構造部材に適用した際の、軽量かつハイパフォーマンスでありながら、さらには高速成形が可能という技術要素の総合力を見ると、他材料以上の優位性が備わっていることが明確になった。このような背景には、型締め速度やプレス荷重を高度に制御可能なプレス成形装置の技術進化や、炭素繊維と熱可塑性樹脂を複合させる含浸技術、また、繊維と樹脂の高強度界面接着技術、さらには、繊維長さを適切に保ち、十分な力学性能を保持しながら流動性も確保する基材化技術、など、様々なコア技術の総合力に依るところが大きい。これによって、コストパフォーマンスが要求される一般乗用車にも、大幅な車体構造の軽量化が可能で新しい材料、熱可塑性 CFRP を実用化できる見通しが得られるようになってきた。ただし、あくまで所望の形状を付与した構造部材を“具現化できる”見通しが出てきたばかりである、ともいえ、車体構造が要求するパフォーマンスを実際に満足できるかどうか、満足させるためにはどのように設計すれば良いか、については、まだ明らかになっていないことが示された。つまり、材料そのものの力学特性のメカニズムを明らかにすること、そして、それを基に CAE に取り入れて材料モデルを実装できる設計技術の構築が望まれている。

特に、繊維方向圧縮や面外方向の力学特性については、繊維よりも樹脂の特性による影響が大きい。このことは熱硬化性 CFRP でも同様であったが、粘弾性挙動や塑性挙動が大きく異なる熱可塑性樹脂においてはより深く追及する必要があることが分かった。

そして、熱可塑性 CFRP に関して、その力学特性の発現メカニズムの解明を試みた。その結果、重要な力学特性について、マトリックスの粘弾塑性の影響を明らかにできた。さらに、熱可塑性 CFRP の形状設計の柔軟性を利用して、高性能なフレーム構造を設計するプロセスを提案し、その効果を検証した。この新しい材料を車体構造に実用化するためには、環境条件が力学特性に与える影響や非強化方向の性能限界に注意しつつ、断面形状やハイブリッド構成の柔軟性を有効活用して、性能を最適化する設計を実行すべきことを説明した。

研究業績リスト

学術誌論文（査読付き）

- [1] 松尾 剛, 影山和郎: 熱可塑性 CFRP の繊維方向圧縮強度の温度依存性に関する一考察, 日本複合材料学会誌, **40**, 5 (2014).
- [2] 松尾 剛, 影山和郎: 熱可塑性 CFRP の繊維方向圧縮破壊メカニズムに関する一考察, 日本複合材料学会誌, **40**, 3 (2014), 98-105.
- [3] T. Matsuo, T. Goto, J. Takahashi : Investigation about the Fracture Behavior and Strength in a Curved Section of CF/PP, *Advanced Composite Materials*, DOI:10.1080/09243046.2014.886754, (2014).
- [4] 山下慎一郎, 大澤 勇, 松尾 剛, 張 昕, 高橋 淳: 3点曲げ試験による CFRTP の縦弾性率および面外せん断弾性率に関する評価, 日本複合材料学会誌, **39**, 6 (2013), 221-230.
- [5] 山下慎一郎, 大澤 勇, 松尾 剛, 高橋 淳: CF/PP のソフトスキン効果に関する研究, 日本複合材料学会誌, **39**, 5 (2013), 176-183.
- [6] 松尾 剛, 清水康夫: EPS (電動パワーステアリング) 用ラックアンドピニオンの高強度化に関する一考察, 日本機械学会論文集 (C 編), **75**, 754 (2009), 1837-1844.

口頭発表（査読付き）

- [1] T. Matsuo, K. Takayama, J. Takahashi, S. Nagoh, K. Kiriya, T. Hayashi : Design and Manufacture of Anisotropic Hollow Beam using Thermoplastic Composites, ICCM19, Canada (2013).
- [2] T. Matsuo, J. Takahashi, K. Uzawa, M. Yamane : New design approach for high stiffness and high impact-absorbing structure by carbon fiber reinforced thermoplastic composites, ECCM15, Italy (2012).
- [3] T. Matsuo, J. Takahashi, K. Uzawa, T. Asakawa : Investigation about Dynamic Flexural Fracture Properties of Carbon Fiber Reinforced Thermoplastics, ICCM18, Korea (2011).

その他口頭発表

- [1] 松尾 剛, 影山和郎: 熱可塑性 CFRP のための繊維方向圧縮試験法の提案と圧縮強度に関する一考察, 第 38 回複合材料シンポジウム, 日本複合材料学会, (2013).
- [2] 松尾 剛, 高橋 淳, 鶴沢 潔, 霧山 晃平, 名合 聡: 高速度カメラを用いた炭素繊維チョップドテープ強化熱可塑性樹脂複合材料の衝撃曲げ破壊現象に関する考察, 第 37 回複合材料シンポジウム, 日本複合材料学会, (2012).
- [3] T. Matsuo, J. Takahashi, K. Uzawa, M. Tamaru, T. Asakawa : Investigation about Strain-Rate Dependence of the Flexural Behavior of Carbon Fiber Reinforced Polypropylene, JISSE-12, (2011).

- [4] T. Matsuo, J. Takahashi, K. Uzawa, T. Goto, X. Zhang : Investigation about light-weight structural design for automobile body using carbon fiber reinforced thermoplastic composites, 12th Japan-Euro Conference on Composite Materials, (2011).
- [5] T. Matsuo, K. Uzawa, Y. Orito, J. Takahashi, H. Murayama, K. Kageyama, I. Ohsawa, M. Kanai : Investigation about Shear Strength at Welding Area of the Single-lap Joint and the Scarf Joint for Carbon Fiber Reinforced Thermoplastics, 14th US-Japan Conference on Composite Materials 2010, (2010).
- [6] T. Matsuo, J. Takahashi, K. Uzawa, I. Ohsawa : Development of Carbon Fiber Reinforced Thermoplastic for Mass Produced Automobile, STAC-4, (2010).
- [7] 松尾 剛, 清水康夫 : EPS 用ラックアンドピニオンの高強度化に関する一考察, 第 17 回 交通・物流部門大会, 日本機械学会 交通・物流部門, (2008).