解説シリーズ

自動車の安全設計と信頼性向上に貢献する複合材料技術—VI. ——「NEDO プロジェクト 3」：車体安全設計技術の開発——

邊 吾 一*, 濱田 泰以**, 八角 恭介†, 青木 義男*, 仲井 浅見**,
金 炯 秀*, 杉 本 直*, 陽 玉 球**

1. は じ め に

近年, 地球環境問題への意識の高まりの中, 自動車の燃費向上による地球温暖化ガスの削減が強く求められている。自動車の燃費改善策として車体軽量化は重要な技術であり, その切り札として軽量化効果が最も高い構造材料である炭素繊維強化プラスチック (CFRP) の自動車構造への適用を目的とした開発・研究が NEDO プロジェクトとして, 現在実施されている。

本報告では, CFRP を自動車構造へ適用した場合の車体安全設計技術の開発のために, 2 章では日産自動車株式会社がやっている車体全体の安全設計技術の確立, 3 章では日本大学の自動車要素部材の衝撃応答シミュレーション技術の確立, 4 章では京都工芸繊維大学の衝撃圧縮吸収用 CFRP 部材の開発について, 以下に紹介する。

2. CFRP を用いた自動車の安全性技術の確立

自動車の骨格である車体は様々な要求性能を満たすよう設計されている。万が一の衝突の時に乗員へのダメージを軽減する性能は最も重要な性能の一つである。本プロジェクトでは CFRP の持つエネルギー吸収特性を車体に適用するための設計技術として, CFRP のエネルギー吸収技術の研究開発に日産自動車(株)は取り組んでおり, ここではその概要について述べる。

2.1 CFRP 成形方法と車体構造

CFRP 製の車体を使った市販車は本解説シリーズの II で木本氏からも紹介があったようにすでに存在する。現在一般的に高強度な構造部材向けの製法としては, 航空・宇宙領域で使われてきたオートクレーブ工法が主流である。オートクレーブ工法は予め樹脂を含浸させ半硬化状態にしたプリプレグを型に合わせてカットし, 1 枚 1 枚型に積層していく。指定の板厚まで積層した後バッキングフィルムで全体を覆い, オートクレーブと呼ばれる圧力炉の中で加圧・加熱し硬化させる。この方法は過酷な条件下で使用されるレーシングカーの車体の製作工法に適用されている。上述の市販 CFRP 車はほとんどがオートクレーブ工法で製作されており, レーシングカーの製作技術を市販車に適用したものといえる。

オートクレーブ工法は積層作業に時間がかかり, プリプレグの硬化時間が長いこと生産性が低く, 1,000 台/月規模以上の CFRP 量産車を考えた場合, 対応がきかない。これを解決するために本プロジェクトではハイサイクル成形に取り組んでいるが, 工法として RTM 工法を選んでいる。RTM 工法は CF 基材を型にセットし樹脂を型内に流し込むという成形工法であり, 樹脂の流動や型構造を考慮に入れた形状, 積層構成にする必要がある。RTM 工法は, ハニカムサンドイッチ構造の適用や製品取り出し方向に対するアンダーカット形状の適用などが困難となり, 従来のオートクレーブ工法を前提とした CFRP 車体部品形状を見直さなければならない。

一方, 自動車の衝突形態は, 図1に示すように前面(後面)衝突と側面衝突に大きく分けられ, 前面衝突では, 主にエンジン周りの部材が圧縮方向に変形していくことによりエネルギーを吸収し, また側面衝突では, 主にドア周りの部材が曲がることによりエネルギーを吸収する。本プロジェクトではこのようなエネルギー吸収部位への部分的な CFRP 適用も考慮し, スチール車体での代表的なエネルギー吸収部位であるフロントサイドメン

Goichi BEN,* Hiroyuki HAMADA,** Kyouosuke HAKKAKU,† Yoshio AOKI,* Asami NAKAI,** Hyong-soo KIM,* Nao SUGIMOTO* and Yuqiu YAN**

* 日本大学 (275-8575 習志野市泉町 1-2-1)

** 京都工芸繊維大学 (606-8575 京都市左京区松ヶ崎上町 1 番地)

† 日産自動車(株)車両生産技術本部要素技術開発グループ (243-0192 厚木市岡津古久 560-2)

図1 エネルギー吸収部材の適用

バーを題材に圧縮型CFRP製エネルギー吸収部材の適用、ドアガードビーム、センターピラーを題材に曲げ型CFRP製エネルギー吸収部材の適用を前述のRTM工法での成形を前提に検討している。

2.2 CFRP製エネルギー吸収部材

連続繊維を使ったCFRPは、他の繊維を使ったFRPや短繊維を使ったFRPに比べて高い強度・剛性を持っており、軽量化とエネルギー吸収性能を高いレベルで実現するために有利である。

圧縮型エネルギー吸収部材は、柱状部材の軸方向への荷重を部材が逐次破壊することでほぼ一定の反力を発生する。学術的には円筒形の部材の研究が見られるが、車体への適用を考えた場合、剛性部材としての役割も持たせたいため、角柱形の適用を検討している。

曲げ方向のエネルギー吸収へのCFRPの適用は困難である。金属に比べると、CFの特性により破壊時の伸びが少ないためである。このため、曲げ方向のエネルギー吸収には引張りや圧縮による破壊をうまく使う、あるいは他の材料との併用も考慮して対応する必要がある。ここでは、従来より研究されているアルミ/CFRPハイブリッドエネルギー吸収部材を強化材として選定し、車体部品に適用することを検討している。

2.3 CFRPの動的解析

自動車の新車開発段階ではCAE解析を活用した性能設計がプロセスとして組み込まれており、新しい商品を早く市場に提供できるようになっているため、車体へのCFRPの適用を考えたときにこのCAE解析による性能予測は不可欠である。本誌をお読みの方々のご存知と思うが、CFRPに限らずFRPはマトリックス樹脂の物性、強化繊維の物性、繊維含有率、繊維の形態など多くのパラメータによってその機械的物性が異なり、それらのパラメータがFRPの挙動にどのような影響を及ぼすかは解明しきれていない。特に部材破壊時のCFRP部材の挙動の精度の高い予測は未だ困難であることから、

本プロジェクトではCFRPの動的なCAE解析技術を確立し、円滑な製品設計ができるようにすることを検討している。

2.4 本プロジェクトの目標

以上のような課題を踏まえ、本プロジェクトの安全設計技術の開発として以下の内容に取り組んでいる。

①動的解析技術の開発

自動車の安全性を確保するために不可欠な衝撃破壊シミュレーション方法を検討し、要素部材による衝撃試験との対比で、その計算精度を検証する。

②スチール、アルミ等/複合材料ハイブリッド構造体の設計・解析技術の開発

実構造部材の形状に即した3次元構造物の衝突解析手法を確立し、自動車プラットフォームのモデル設計を行う。

③エネルギー吸収技術の開発

一体成形したフロントサイドメンバを試作し、実車による前面台車衝突試験を行う。

3. 自動車部材の衝撃応答シミュレーション技術の確立

日本大学では、圧縮破壊型エネルギー吸収部材としてCFRP角柱筒、曲げ破壊型エネルギー吸収部材としてCFRP/アルミ合金ハイブリッド材、それぞれの動的破壊挙動を精度よくシミュレーション可能とする解析手法の確立を行っている。実物大部材の衝撃実験結果、有限要素法による解析結果、両者の比較・検討により、シミュレーション技術確立の進捗状況を報告する。

3.1 CFRP角柱筒の衝撃圧縮破壊に関するシミュレーション技術¹⁾

3.1.1 衝撃圧縮実験

試験体として、一方向配向炭素繊維プリプレグ(東レ(株)製P3052s-20、マトリックス樹脂:エポキシ)を用いてシートワインディング法により長方形CFRP角柱筒を製作した。試験体の角柱部分の積層構成は $[(0/90)_6/0]_S$ とした。また、補強リブ部分の場合は 0° 方向繊維のみとなっている。試験体の先端には安定的な衝撃破壊挙動を得るために角度 45° のテーパ加工を施した。試験体の形状および寸法を図2に示す。

落錐衝撃試験は高さ12m(衝突スピード:約55km/h)から質量105kgの落錐体を自由落下させることにより行った。衝撃荷重はロードセルを試験体の下に取付けて計測し、高速度カメラにより落錐体の変位と衝撃圧縮破壊プロセスも観察した。落錐体の変位とロードセルの

図 2 試験体の形状および寸法

得られた荷重-変位線図の面積から求めた衝撃エネルギー吸収量，最大衝撃荷重および最大変位に関する 5 つの試験体の平均値はそれぞれ 12.8 kJ，172.8 kN および 138.1 mm であった。破壊の様子を見ると，破壊の大半は外側に向けて進展しているが，内側にも破片が詰まっている場合もあった。

3.1.2 解析技術の開発

衝撃実験結果と比較のために有限要素ソルバー LS-DYNA (Ver.970, LSTC 社) のシェル要素を使用して解析モデルを作成した。図 3 に有限要素モデル (Model 1) の詳細を示すが，メッシュは解析時間をセーブするためにモデルの上部は細かく，また，下部は荒く分割した。その結果，総節点数は 9,784，総要素数は 9,656 である。

積層構成は角柱筒本体および補強リブ部がそれぞれ $[(0/90)_s/0]_s$ と $[0]$ である。試験体の先端のテーパ部の中心線が垂直な場合を Model 1，実際の場合に対応させて中心線を角柱筒の内側に傾けた場合を Model 2 とした。落錘体は剛体とし，Z 軸変位のみを許し，初速度 15.27 m/s (55 km/h) を与えて解析を行った。試験体の最下部は完全固定し，また，最下部から 40 mm までは Z 軸変位のみを許し，それ以外の部分はフリーとした。接触条件は落錘体と試験体の間には面-面接触条件を，試験体には自己接触条件を与えた。また，要素の破壊規則には，Chang-Chang 破壊規則を用い衝突時の破壊進展過程をシミュレートした。

3.1.3 解析結果と実験値との比較・検討

図 4 に CFRP 角柱筒の解析結果 (Model 2) と実験値との比較を示す。図中の実線は Model 2 の解析結果を，破線は 5 本の実験結果をそれぞれ示す。モデルの最上部

図 3 有限要素解析モデルの詳細

図 4 解析結果と実験結果の比較

表 1 解析結果と実験結果の要約

	EXP (Ave.)	Model 1	Model 2
Maximum load [kN]	172.8	215.0	174.0
Final displacement [mm]	138.1	136.0	140.0
Absorbed energy [kJ]	12.8	11.9	12.1

のテーパ部の中心線を内側に傾けた Model 2 の結果は，初期衝撃荷重で実験結果とよく一致し，全体的に実験の衝撃応答挙動と同じ傾向が得られた。

表 1 に CFRP 角柱の解析結果 (Model 2) と衝撃実験結果 (平均値) の要約を示す。Model 2 のエネルギー吸収量は実験結果とよい一致を示し，また，最大衝撃荷重値および最大変位に関してもよい一致を示した。

図5 実験装置の概略図

3.2 CFRP/アルミ合金ハイブリッド材の衝撃曲げ破壊に関するシュミレーション技術²⁾

3.2.1 衝撃曲げ実験

全長1 mのアルミ合金ビームの引張応力が作用する面のみに、高い引張強さを持つCFRPを接着することにより、衝撃曲げ吸収エネルギーを飛躍的に向上させることを狙ってハイブリッド材を考案したが、CFRP材の種類と厚さ、幅を変え、さらにアルミ合金材とCFRP材間の接着剤を変えて16種類を用意した。

実物大のハイブリッド・インパクトビームの衝撃曲げ実験の概略図を図5に示す。落錘体を高さ12 m(衝突速度約55 km/h)からガイドは使用せず自由落下させて、ビームに衝突させたが、試験体支持部に埋めたロードセルで衝撃荷重を、高速度カメラにより落錘体の変位を計測した。また、衝撃荷重と変位の応答曲線の面積積分から、変位が150 mmまでの吸収エネルギーを算出した。これは、側面衝突エネルギー吸収部材として考えたとき変位量の最大値として150 mm以内でエネルギーを吸収させることを目安としているためである。性能目標値であるスチールビームの吸収エネルギーは、1,500～1,900 Jであるが、ハイブリッドビームの吸収エネルギーは、16種類の中で最も高いもので1,822 Jとなり、スチールビームとほぼ同じ値となった。また、単位重量当たりの吸収エネルギーは、スチールビームが1,027～1,301 J/kgに対し、ハイブリッドビームは1,510 J/kgであり、ハイブリッド・インパクトビームの優位性を示すことが出来た。

3.2.2 有限要素法による衝撃解析

解析には衝撃解析に特化した“PAM-CRASH SOLVER 2006”を使用した。すべてをシェル要素でモデル化し

図6 応答曲線の実験結果と解析結果の比較

図7 破壊モードの実験結果と解析結果の比較

ている。CFRPはアルミ合金のように、1枚のシェル要素ではなく、複数のシェル要素を使用している。そして、CFRPの層間は「強度」のみ入力する“LINK MATERIAL 301”を使用して、CFRP同士を繋いでいる。また、アルミ合金とCFRPの間の接着層には、「強度」、「弾性率」を入力できる“LINK MATERIAL 303”を使用してモデル化を行った。このように、CFRPを1枚のシェル要素ではなく、複数のシェル要素とした理由として、1枚のシェル要素でCFRPを表現した場合、CFRPの中立面に接着することになるので、実験結果との差異が生じるためである。CFRPが1枚のシェル要素の解析結果では、CFRPに圧縮応力が生じてしまい、実験と比べて、かなり早いタイミングで破壊してしまったが、シェル要素を増やしていけば、CFRPの上面がアルミ合金の面に接着することになるので、解析結果は、実際の試験体に近づくという結果が得られた。

3.2.3 実験結果と解析結果の比較・検討

図6に実験結果の中で一番吸収エネルギーが高かった、ハイブリッドビーム材の荷重-変位線図に解析値を重ねた結果を示す。衝撃荷重のピーク値とCFRP破断(×印)後に若干の差が見られるが全体的な傾向はよい一致を示している。また、図7に図6の実験結果と解析結果の破壊モードを比較した図を示すが、両図より、衝撃曲げ応答挙動のみならず、破壊モードの解析結果は実

図 8 金属と複合材料の破壊現象および荷重-変位曲線の比較

図 9 従来組機と 3D 組機のスピンドル移動軌道

験結果とよい一致を見た。さらに、16 個のハイブリッド試験体の変位が 150 mm までの衝撃吸収曲げエネルギーに関する実験値と有限要素法を比較した結果、両者の誤差は平均で 3.7 % となり、本プロジェクトの目標値 5 % を、達成することができた。

4. 衝撃圧縮吸収用 CFRP 部材の開発

京都工芸繊維大学は、圧縮型エネルギー吸収部材の開発を行っている。静的および動的（時速 60 km/h）荷重に対する比エネルギー吸収量（ E_s 値）、すなわち単位質量当たりに吸収されたエネルギー量が 110 kJ/kg の角柱の開発を目的としている。図 8 に軸方向圧縮時、金属材料と複合材料の破壊現象および荷重-変位曲線を比較する。金属材料は荷重が大きな増加減少の変動を繰り返すのに対して、複合材料は高荷重下で安定的な破壊現象を示す。このように安定的に進展する破壊は progressive crushing と呼ばれ、衝突時衝撃エネルギーが有効的に吸収されるだけでなく、衝突後減速度の急激な増加を抑えられると考えられる。

4.1 強化形態—組物³⁾

繊維強化複合材料の強化形態の一つとしての組物の特長は、円筒形状や角柱筒形状など様々な形状のプリフォームを自動製造できることである。また繊維を FRP 構造物内で連続して配向させており、すべての繊維が荷重分担をできるため、破壊時には多くの繊維破断を生じ、高いエネルギー吸収性能が期待される。薄肉の基材を積層した積層材は層間はく離の発生により、材料の性能を十分に発揮できないことがある。この問題点を改善するため、本研究では、3D 組機を用いた。図 9 に従来の組機と 3D 組機のスピンドルの移動軌道を示す。3D 組機の特徴は従来の組機と違い、二層が連結した円形軌道を移動することである。

3D 組機を用いた角柱筒のエネルギー吸収特性を調べるために、まず組糸および中央糸にガラス繊維、母材にエポキシ樹脂を用いた。成形工程は従来の丸打組機および 3D 組機を用い、長方形断面を有する角柱形のマンドレルに組角度 25 度の T（従来の組機で作製）および D（3D 組機で作製）の角柱筒の組物を作製した。組物の上

図10 荷重-変位線図

にさらに組物を作製し、積層構造の角柱筒プリフォームを作製した。その後、VARTM法で樹脂を含浸させ、硬化した。作製した角柱筒から試験片を切り出し、一端に45°のテーパ加工を施した。軸方向静的圧縮試験(圧縮速度5 mm/min)を行い、エネルギー吸収特性を調べた。

図10に示す代表的な荷重(単位面積当たり)-変位曲線により、3D組機製の試験片は、従来組機製の試験片より、荷重が安定し、値がより高いことが分かった。 E_s 値はそれぞれ59.3, 67.0であり、3D組機で作製した試験片は、従来の丸打組機で作製した試験片と比較すると、 E_s 値は約13.0%増加したことが分かった。

圧縮した試験片の断面観察により、き裂の中央部への進展に伴い、破壊部分がfrondsとなり、角柱筒の内側と外側に展開するsplaying modeの様相を示した。しかし、3D組機で作製した試験片の中央き裂はより短いことが分かった。3D構造を有する組物は、組糸が厚さ方向に配向することで、層内はく離が進展しにくく、破壊した部分(fronds)が小さい曲げ半径で展開した。さらに、二層の繊維量は一層のそれより多く、したがって、組物の剛性が上昇し、曲げ変形に伴い、frondsの圧縮および引張側に高い曲げ応力が発生し、多数の繊維破断が発生し、エネルギーが多く吸収されたと考えられる。

4.2 構造部材への提案⁴⁾

すでに述べたように繊維強化複合材料は、一端にテーパ加工を施すことにより、軸方向圧縮時、破壊がテーパ先端から徐々に進展し、高荷重下でprogressive crushing 安定破壊現象を示す。しかしながら、このテーパは、加工に関するコストが増える上に、構造部材として利用する場合、他の部品との接続が困難である。従って、ここで、デバイスを用い、テーパを持たない

図11 圧縮器具と圧縮試験の概略図

複合材料にprogressive crushingを生じさせる手法を提案する(図11)。

強化材に一方炭素繊維、母材に不飽和ポリエステル樹脂を用い、引抜成形法で角柱筒を作製した。試験速度5および500 mm/minで、デバイスを用いて試験片D5, D500の軸方向圧縮試験を行った。比較のため、デバイスを用いず、一端に45度のテーパ加工を施した試験片(T5, T500)についても圧縮試験を行った。

図12に結果をまとめた。いずれの試験片とも、荷重は初期変位において急激に上昇し、ピークに達した後、やや減少している。その後、ほぼ一定の値で比較的安定して破壊が進行するprogressive crushingの破壊挙動を示した。圧縮速度によらず、デバイスを用いる場合の試験片は、初期最大荷重および平均荷重がより高い特徴が見られた。T5, T500およびD5, D500の E_s 値はそれぞれ55.3, 66.7, 80.0, 94.9 kJ/kgである。デバイスを用いる場合の試験片は、テーパを有する試験片と比較すると、静的および高速度の圧縮試験において、 E_s 値が約43%増加した。T5とT500試験片は、破壊した部分が周方向に展開する花弁状の様相を示すのに対して、D5とD500試験片は、デバイスの拘束で、破壊した部分が角柱筒の内側のみに曲げられた。

さらに詳細な断面観察によると、デバイスを用いた場合、試験片の圧縮側すなわち筒壁の内側において、多く繊維破断が発生することが分かった。また、筒壁の中心部に多数のせん断破断も見られた。試験片の筒壁が等しければ、一方向に曲がること(すべての厚さで)が両側に曲がること(半分の厚さで)よりも、曲げに効果的だけでなくせん断力による破壊もエネルギー吸収に貢献が大きいと考えられる。これは曲げ変形に伴うせん断応力の発生によるものであり、変形部分の厚さの増加によるものである。

図 12 試験結果

設計したデバイスは、繊維強化複合材料の破壊時のエネルギー吸収メカニズムを制御し、曲げ変形に伴う圧縮、せん断応力によりそれぞれに対応した繊維破壊を起こさせ、高いエネルギー吸収特性が得られたと考えられる。さらに、デバイスは構造材料としても接続に便利であるため、複合材料をエネルギー吸収部材として用いる際に有効であることが明らかになった。

5. おわりに

NEDO プロジェクトでは現在の自動車用軟鋼板構造に対して、車重を 50% 軽量化し、かつ 1.5 倍の安全性を備えた CFRP 製車体構造を開発すると共に、安全設計技術の確立、自動車の成形サイクル時間を 10 分以内とし、低コスト、大量生産対応の製造技術を確立し、LCA に基づくリサイクル技術の開発を目指しているが、安全設計技術に関しては、前述のように、当初の計画通

りに開発・研究が進んでいる。

CFRP の応用が、従来の航空・宇宙、スポーツ用品などの限られた産業分野から脱して、本安全設計技術の確立で得られた研究成果によって、自動車を始めとする幅広い分野に応用するための一助になることを期待したい。

参考文献

- 1) H.S. Kim, G. Ben & Y. Aoki : Proceedings of the 12th U.S.-Japan Conference on Composites Materials (2006), pp. 367-378.
- 2) G. Ben, Y. Aoki & H.S. Kim : Proceedings of the 12th U.S.-Japan Conference on Composites Materials (2006), pp. 379-389.
- 3) Y. Yang, A. Nakai & H. Hamada : International Crashworthiness Conference 2006, 2006-24, Greece.
- 4) Y. Yang, T. Uozumi, A. Nakai & H. Hamada : Proceedings of 12th US-Japan Conference on Composite Materials (2006), pp. 808-813.