

CFRTP の低コスト成形加工技術の開発（第 2 報）

2 トランスバースメンバーの開発・試作

松永尚徳, 西田裕紀, 山下弘之, 藤井敏男, 大川正巳, 松葉 朗, 河野洋輔

Development of low-cost molding processing technology of CFRTP (2nd Report)

MATSUNAGA Hisanori, NISHIDA Hironori, YAMASHITA Hiroyuki, FUJII Toshio,
OHKAWA Masami, MATSUBA Akira and KOHNO Yousuke

As an example of developing light-weight automotive components, a reinforcement part to improve body stiffness and steering stability, transverse member, was fabricated by press molding using CFRTP(CF/PAG) material. Based on CAE simulation considering anisotropy and nonlinearity, several types of specimens with different stacking sequences were designed optimally, consequently a remarkable weight reduction of approximately 60% was achieved for the CFRTP specimens as compared with the current steel product. In addition, it was revealed that the stiffness properties of the specimens can be adjusted in accordance with the stacking sequence without modifying the shape or dimensions.

キーワード：炭素繊維複合材料，熱可塑性樹脂，プレス成形，トランスバースメンバー

1 緒 言

近年、環境問題、石油価格高騰への対応策として、自動車の燃費向上、エネルギー転換が重要な課題となっており、そのためには車体・部品の軽量化が不可欠である。軽量化のための材料として、炭素繊維複合材料（CFRP）が注目され、自動車の車体や部品として採用される事例も見られるようになってきた。さらに、成形速度やリサイクルの面から、熱可塑性炭素繊維複合材料（CFRTP）の普及が期待されている。このため、平成 21 年度からプロジェクト研究として、CFRTP を用いて自動車部品の生産に適した高速・低コストの成形技術の開発を開始し、一方向材（UD 材）の積層板のプレス成形技術に取り組み、その第 1 報として CFRP の解析技術の確立と、CFRTP の機械的特性に及ぼす成形条件の影響を報告した¹⁾。

平成 23 年度は、これまでの研究で得た知見を基に、株式会社ワイテックと共同で CFRTP 自動車用部品を開発した。具体的には、トランスバースメンバーの開発・試作を行い、その性能について評価した。

2 異方性を活かした設計

2.1 トランスバースメンバーとは

プロジェクト研究では炭素繊維複合材料の強みを活用するため、①UD 材の持つ強い異方性を活かす長尺形状の構造部品、②プレス成形に適する単純な形状の構造部品、という二つの視点から図 1 に示すマツダ RX-8 用トランスバースメンバーを試作対象として選定した。

トランスバースメンバーは、加速・減速・コーナリン

グ時の車体の歪みを抑制し、機敏で安定したハンドリングを実現するための補強部品である。



図 1 トランスバースメンバー

2.2 試作品の構造

今回の開発試作は現行品と同等の性能を確保しつつ、どの程度軽量化が可能となるか検証した。車体への装着を考慮して、現行品と同様の形状とし、限られたスペース内でねじり剛性を確保するため、CFRTP プレス成形品に CFRTP 平板を接着する閉断面構造とした。現行品（スチール製）を図 2 の(a)、試作品（CFRTP 製）を図 2 に示す。

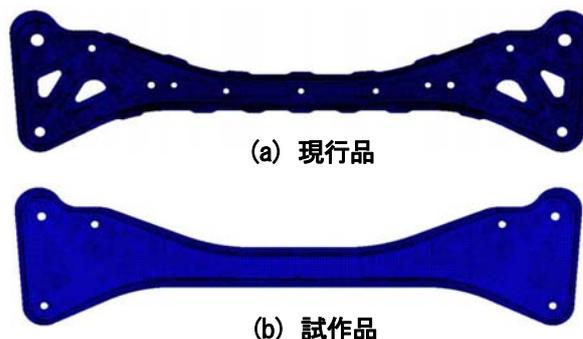


図 2 トランスバースメンバー形状

2.3 接着構造のモデル化

異方性を活かした設計には、解析の精度を向上することが必須である。ここでは、解析ソルバーとして MSC 社の Marc を使用し、前報¹⁾で示した異方性非線形を考慮した計算を行っている。

さらに、接着による閉断面構造を精度良く解析するためには、接着剤の応力-ひずみ特性を測定し、接着構造をモデル化する必要がある。接着剤の応力-ひずみ特性の同定のため、**図 3**の(a)に示す接着試験片を作成してせん断引張試験を行った。試験片の材質は Steel, CFRTP(UD 材)の 2 種類とし、試験片の表裏面にひずみゲージを貼り付け、接着部の変位量 δ は変位計で測定した。接着剤のせん断変形を求めるため、(b)に示すように変位 δ を仮想的に分解する。試験片の弾性率は既知であるため、荷重から試験片の部分的変位 δ_{S1} , δ_{S2} , δ_{SW} は概算でき、 δ から減ずることで接着剤のせん断変形による変位 δ_B が近似的に求まる。荷重 F とせん断変形による変位 δ_B から、接着剤の相当応力-相当ひずみ線図を求め、解析に組み込むことで接着構造を考慮した計算が可能となる。せん断引張試験の実験結果と解析結果は、**図 4**に示すようによく一致している。

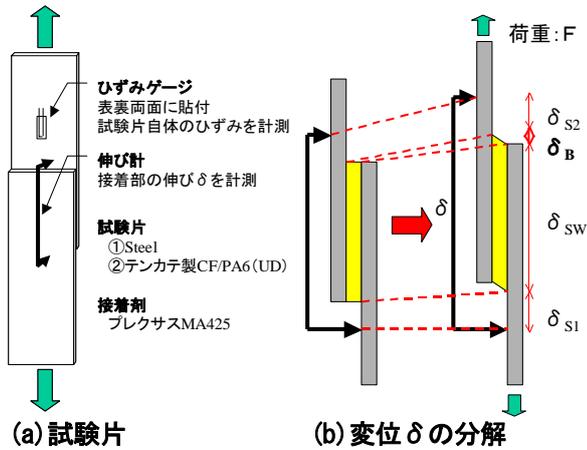


図 3 接着剤の物性同定方法

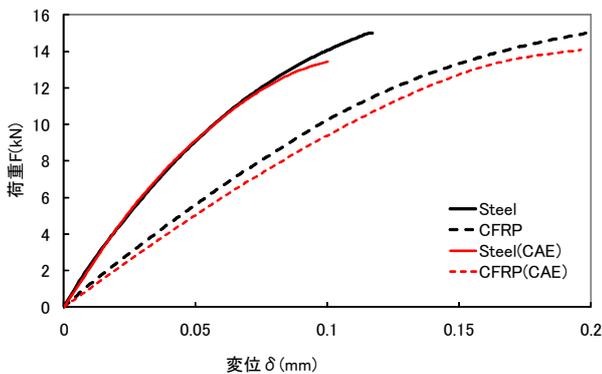


図 4 せん断引張試験 変位-荷重曲線

2.4 3 種類の剛性特性

鋼材に代表される等方性の材料では、構造部材の剛性は材質と部品形状により決定される。一方、UD 材を積層した CFRP では、積層構成の調整により、同一の形状でも異なる剛性特性が実現可能であり、それが CFRTP 異方性を考慮したプレス成形の特長の一つである。

今回の開発試作では、比較対象となる現行品の剛性を基準として、**表 1**に示す剛性特性を有する 3 種類の積層構成を設計し試作し、それらの剛性を評価した。

表 1 試作品の剛性一覧 (設計値)

剛性特性	剛性(現行品比)	
	引張・圧縮	ねじり
引張圧縮重視	153%	56%
バランス	120%	108%
ねじり剛性重視	96%	126%

3 プレス成形

3.1 成形材料および成形条件

成形材料として、TENCATE 社のナイロン 6 (PA6) を母材とした CF/PA6 の UD プリプレグを使用し、3 種類の積層構成で、あらかじめオートクレーブ成形により予備成形板を成形して、十分に乾燥させた。それを赤外線加熱器により 250°C の雰囲気中で 10 分間予備加熱した。

この後、**図 5**に示すように、金型温度を母材となる PA6 の融点以上とするホットプレスと、融点以下とするコールドプレスの 2 通りの成形条件でプレス成形した。

ホットプレスでは、剛性評価用の試作品を成形した。金型温度を 250°C に調整して加圧力 200ton で 3 分間プレスした後、加圧力を保持したまま、金型を冷却してプレス開始から 14 分後に成形品を取り出している。取り出し時の金型温度は約 130°C であった。次の成形のための金型加熱を含めると、サイクルタイムは約 120 分となる。なお、冷却・昇温時間を短縮する技術については別途検討し特許出願しており、詳細は次報以降に報告する。

コールドプレスは、しわの発生状況把握と量産の可能性を検証する目的で行っている。金型温度を 150°C で一定とし、加圧力 2,000kN で 3 分間プレスして成形品を取り出した。予備加熱を含めて 13 分のサイクルタイムとなるが、予備加熱をプレス成形と並行して行うと数分程度で成形可能となり、量産の可能性が示唆された。

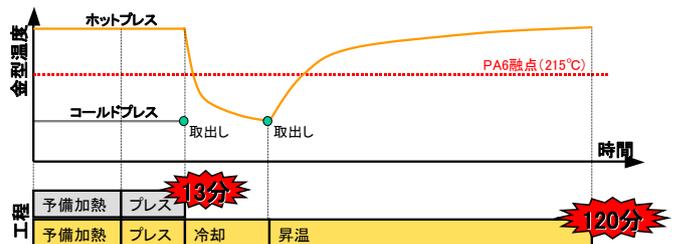


図 5 ホットプレスとコールドプレス

3.2 軽量化効果

ホットプレスにより成形した試作品の重量と板厚の一覧を表2に示す。現行品 2.4kg のトランスバースメンバーがCFRP化により約 1.0kg となり、約 60%の軽量化を達成した。

なお、異なる剛性特性を実現するため、同じ積層数で積層構成が異なる 3 種類の試作品をプレス成形したが、引張圧縮重視タイプ、バランスタイプでは板厚が薄くなる傾向が認められた。プレス成形中の材料挙動が変化するためと考えられ、その挙動の違いの解明は今後の課題である。

表2 試作品の重量と板厚

No.	剛性特性	総重量(g)	板厚(mm)			備考
			プレス	平板	接着層	
1	引張圧縮重視	-	1.73	3.10	-	評価のため未接着
2	引張圧縮重視	935	1.88	3.15	0.53	
3	バランス	981	2.30	3.19	0.43	
4	バランス	973	2.09	3.15	0.52	
5	ねじり剛性重視	1,051	2.54	3.12	0.38	
6	ねじり剛性重視	1,097	2.86	3.13	0.49	

3.3 積層構成によるシワの影響

コールドプレス成形品のシワの発生状況を写真1に示す。シワの位置を明確に示すため写真に線を書き加えている。積層構成によりシワの発生位置、範囲は大きく異なり、特定方向に配向された引張圧縮やねじりに比べ、多方向に積層したバランスでは、広範囲にわたってシワが発生した。なお、ホットプレスではコールドプレスと比較してシワが目立たないが、これは金型温度が母材の融点よりも高く流動しやすいため、一旦シワが発生しても表面が滑らかになるためと考えられる。

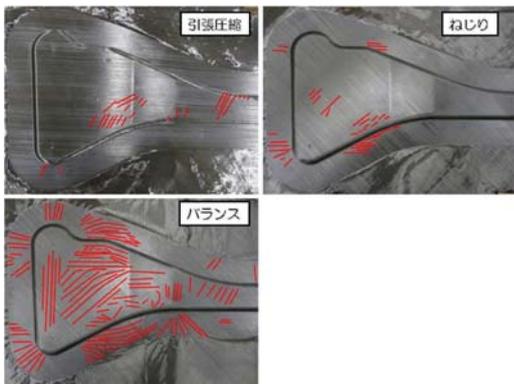


写真1 コールドプレスのシワ発生状況

4 機能評価

4.1 引張・圧縮剛性試験

ホットプレスにより試作したトランスバースメンバーをボルト各 3 本で 1 対の治具に固定し、片方の治具を固

定、もう一方の治具に荷を加えるとともに治具に締結したボルトの変位を測定する方法で剛性を評価した。

また、試験方法と治具を模擬し図6に示すように6面体要素でモデル化して解析を行い、実験と解析との相関を確認した。治具の変形量は無視できるほど小さいことから計算負荷低減のため剛体とした上で試験体との接触の影響を考慮した。

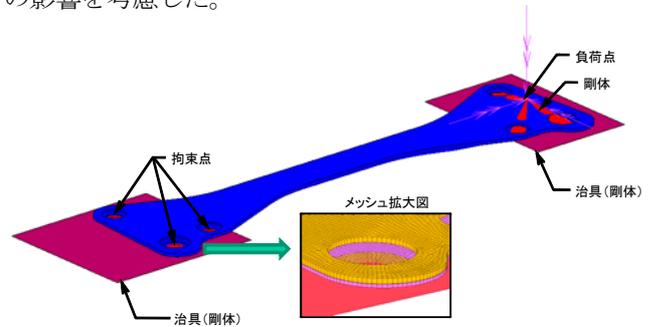


図6 剛性試験の解析モデル

±3,000N 負荷時のボルトの変位を表3に示す。ここでは同一負荷で変位を比較しており、変位が小さいほど剛性は高くなる。実験と解析では、バランスタイプとねじり剛性重視タイプの関係が逆転する結果となったが、3種類の剛性特性の特徴が確認できた。

引張側では実験と解析の誤差が 10%程度となり、比較的良好に一致した。これに対し、圧縮側では実験よりも解析の方が大きな変位、すなわち、剛性が低くなり、誤差が大きくなる傾向を示した。

引張/圧縮時にトランスバースメンバーに発生する変形の様子を図7に示す。図に示すように上下方向に曲げ変形が発生し、試作品ではこの曲げ変形を小さくするように形状を設計している。

引張時の曲げ変形は、現行品は大きく試作品は小さいという傾向が実験と解析でよく一致している。一方、圧縮時には、試作品の解析で曲げ変形を過大に計算する傾向が見られ、これが圧縮側の剛性について実験と解

表3 引張圧縮剛性の実験・解析結果

【-3,000N負荷(引張)】

		現行	引張圧縮	バランス	ねじり
変位(mm)	実験 δ_e	-0.130	-0.093	-0.131	-0.117
	解析 δ_s	-0.119	-0.101	-0.126	-0.133
誤差 $(\delta_s - \delta_e) / \delta_e$		-8.69%	8.23%	-4.04%	13.49%
現行比	実験	100.00%	71.54%	100.77%	90.00%
	解析	100.00%	84.79%	105.90%	111.86%

【3,000N負荷(圧縮)】

		現行	引張圧縮	バランス	ねじり
変位(mm)	実験 δ_e	0.122	0.096	0.138	0.115
	解析 δ_s	0.136	0.123	0.137	0.139
誤差 $(\delta_s - \delta_e) / \delta_e$		11.78%	28.62%	-0.66%	21.07%
現行比	実験	100.00%	78.69%	113.11%	94.26%
	解析	100.00%	90.55%	100.53%	102.10%

析の誤差が大きい要因となった。これは、実験方法や治具類を解析の境界条件に厳密に反映できていないためと考えられる。

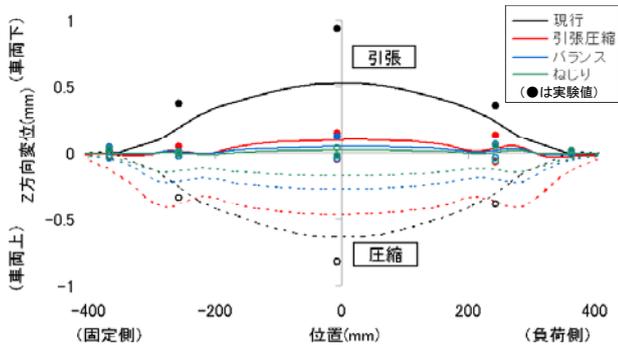


図7 引張/圧縮時の曲げ変形

に示すが、試作した3種類の剛性特性について、明確な違いを確認でき、積層構成の調整により特性を改善・向上できる見通しが得られた。



写真2 実車走行試験の様子

4.2 ねじり剛性試験

引張・圧縮剛性と同様に片方の治具を固定して、もう一方の治具に回転を与えた。5°の回転角を与えた時の負荷トルクの測定結果を表4に示す。ねじり剛性についても、3種類の剛性特性の特徴を確認できた。

なお、ねじり剛性重視タイプのものについては、実験と解析の誤差が大きい。成形品の断面観察等により積層構成の確認が必要と考える。

引張圧縮剛性の評価を含めて、積層構成の変化により、同一形状でも異なる特性を実現できることが確認できた。これにより、例えば形状的にねじり剛性の確保が困難な場合において、積層構成でねじり剛性を確保するといった工夫が可能となる。CFRPの異方性を活用することで設計自由度の拡大が期待できる。

表4 ねじり剛性の実験・解析結果

【回転角:+5°】

		現行	引張圧縮	バランス	ねじり
負荷トルク (N・m)	実験 Me	116.20	48.50	89.10	147.20
	解析 Ms	124.07	44.90	83.62	110.22
誤差 (Ms-Me)/Me		6.77%	-7.42%	-6.16%	-25.13%
現行比	実験	100.00%	41.74%	76.68%	126.68%
	解析	100.00%	36.19%	67.39%	88.83%

【回転角:-5°】

		現行	引張圧縮	バランス	ねじり
負荷トルク (N・m)	実験 Me	-116.30	-51.70	-92.40	-154.00
	解析 Ms	-124.31	-44.83	-83.74	-110.26
誤差 (Ms-Me)/Me		6.89%	-13.29%	-9.38%	-28.40%
現行比	実験	100.00%	44.45%	79.45%	132.42%
	解析	100.00%	36.06%	67.36%	88.70%

4.3 実車走行試験

写真2に示すように、マツダRX-8に試作したトランスバースメンバーを装着して実車走行試験を行い、CFRTPプレス成形部品が自動車用部品として適用可能であることを実証した。走行試験時の官能評価結果を表5

表5 実車走行試験の評価結果

剛性特性	現行品と比較しての総評
引張圧縮重視	軽快感があり印象が良い。 コーナリング中のアンダーステアが目立つ。
バランス	現行品の乗り味に良く似ている。 若干応答性が劣る。
ねじり剛性重視	大きく車両とのバランスを崩しており、乗った印象は良くない。 ねじり剛性の影響と思われる現象が随所に感じられる。 他部品のチューニング次第で、バランスさせるのは可能。

5 結 言

本研究により、次のことを明らかにした。

- (1) 自動車部品への適用の一例として、CFRPトランスバースメンバーを開発試作し、軽量化効果を確認した。約60%の軽量化を達成した。
- (2) 積層構成により、剛性特性を調整できることを確認した。CFRPの異方性の活用により製品設計の自由度拡大が期待できる。
- (3) 積層構成が変わると、プレス成形中の材料挙動が変わることを明らかになった。そのメカニズムの解明、事前予測が今後の課題である。

謝 辞

この開発試作は、株式会社ワイテックと共同で行った。また、株式会社オーエイプロト、株式会社広島マツダの協力を得て実車走行試験を実施した。関係者に謝意を表する。

文 献

- 1) 松永他, CFRTP解析技術の確立と機械的特性に与える成形条件の影響の考察, 広島県西部工技研究報告, 54(2011), 1-4