特集

繊維科学の未来を切り開く新展開

繊維のコンポジットへの応用

前川 善一郎

繊維科学の未来を切り開くコンポジットとして、最近注目されているソフト・コンポジットに焦点を合わせて、その現状と展開について述べ、21世紀の諸問題を解決するためのコンポジットの役割を言及する。

1. はしがき

近年、優れた機能性を有する繊維材料が次々と登場してきた。しかしながら、繊維材料がその優れた機能性を発揮するためには、繊維材料単独ではむずかしく、他の材料と併用することを要求されることが多い。特に、繊維材料の力学的特性を追求する場合に、複合材料（コンポジット）として用いることが一般的である。繊維材料と組み合わせる材料は、

繊維材料を埋め込む母材として用いられるが、その材質により、高分子系複合材料、金属系複合材料、セラミック系複合材料に分けられる。その中で、高分子系複合材料が圧倒的に多く用いられているのが現状である。本稿では、繊維科学の未来を切り開くコンポジットとして、最近注目されているソフト・コンポジットに焦点を合わせて、その現状と展開について述べ、次に、21世紀の諸問題を解決するためのコンポジットの役割を言及するものとする。

図1 ハードコンポジットの発展の歴史

Application of fiber material to composites, MAEKAWA Zenichiro, 京都工芸繊維大学大学院先端ファイブ科学専攻, Kyoto Institute of Technology, Division of Advanced Fibro-science

2. ハード・コンポジットとソフト・コンポジット

今日、高分子系複合材料（Polymer Composite, 以後PMCと称する.）は有用な工業材料として高く評価されているが、軽くて、強く、剛い特性を有するPMCに限られている。この範疇のPMCは約50年の歴史を有しており、優れた多くのPMCを世に登場させている。

その発展の歴史をまとめると、図1に示すように3つの世代に分かれる¹⁾。第1世代のPMCは、ガラス繊維と不飽和ポリエステル樹脂の熱硬化性樹脂の組み合わせ、第2世代のPMCは、炭素繊維、アラミド繊維とエポキシ樹脂の熱硬化性樹脂の組み合わせで代表される。さらに、第3世代のPMCは、繊維は従来のものを用い、母材として熱可塑性樹脂が組み合わせられる。

一方、同じ程度の歴史を持つ繊維強化ポリマーであって、軽くて、強く、柔らかい複合材料もまた大活躍している。剛性の大小の違いによってこれらの複合材料を分類できるので、前者をハード・コンポジット、後者をソフト・コンポジットと呼ぶことができる。

3. ソフト・コンポジットの発展と力学的特性

ソフト・コンポジットの力学的特性は、ハード・コンポジットと同様に、構成素材の種類と強化材の強化形態に大きく依存する。ソフト・コンポジットは力学的特性の観点から、図2に示すように2つの世代に分けられる¹⁾。第1世代のソフト・コンポジットは、膜材料のために開発されたもので、約50年の歴史を有している。次に、第2世代のソフト・コンポジットは1990年代に注目され出したもので、大

図3 ハードコンポジットとソフトコンポジットの力学的特性の特徴

変形に特徴のある材料であるが、応用分野の開拓はこれからである。

ハード・コンポジットとソフト・コンポジットの共通点は軽さの追求であるが、力学的特性のターゲットは異なる。ソフト・コンポジットの力学的特徴をハード・コンポジットと比較してペンタゴンで表現すると図3のようになる¹⁾。

ハード・コンポジットは5項目の柱の中で、強度、剛性が大きくて、変形が小さい特徴を持つが、第1世代のソフト・コンポジットは、強度、引張剛性、変形はやや大きい、曲げや圧縮に対する抵抗は極端に小さく変形しやすい特性を有している。第2世代のソフト・コンポジットは、引っ張り、曲げ、圧縮に対する抵抗が小さく変形が極めて大きい特性を有している。

ソフト・コンポジットの力学的特性は強化材の特性に依存する傾向は大きい。本材料では、マトリックス材はコーティングとして使用することが多いた

図2 ソフトコンポジットの発展の歴史

図4 テキスタイル・コンポジットの応力－ひずみ関係の模式図

め、強化材自体で形状を保持できることが要求される。そのためには、強化材相互のからみによって強化形態を保持できるテキスタイル（織物、組物、編物）がソフト・コンポジットには有効である。3種類のテキスタイル・コンポジットの応力－ひずみ関係の模式図を図4に示すが、強化形態の違いによって破断ひずみと破壊強度も大きく異なり、ハードなタイプからソフトな応力－ひずみ関係が得られる！

4. 第1世代のソフト・コンポジット

第1世代のソフト・コンポジットは膜構造物を中心に発展した。膜構造物の定義は“構造の一部またはすべてに膜を力学的構造要素として有する構造物”であり、膜構造物には、骨組膜構造物、サスペンション膜構造、空気膜構造の3種類がある。

第1世代のソフト・コンポジットの強化形態では、織物が用いられている。膜構造物の織物に用いている主たる膜材料を表1に示す。強化材はガラス

図5 ガラス繊維平織 /PTFE の場合の作製模式図

表1 主要な膜材料

材料構成	長 所	短 所
ポリエステル繊維	全体のバランス良好 着色性良好	防炎性 防汚性
塩化ビニル樹脂 コーティング		
ガラス繊維	難燃性、着色性 透光性、加工性 良好 比較的安価	耐折り曲げ性 耐引裂性 防汚性
塩化ビニル樹脂 コーティング		
ガラス繊維	不燃性、透光性 耐候性、防汚性 良好	耐折り曲げ性 耐引裂性 加工性
四ふっ化エチレン樹脂 コーティング

図6 ガラス繊維平織/PTFEとポリエステル繊維平織/PVCの引張応力-ひずみ曲線

繊維が用いられ、前述の特定膜構造建築物技術基準には、膜材料の規格があり、A, B, Cの3種類があり、A種膜材料は基準が最もきびしく不燃性を要求されており、表1のガラス繊維/PTFE(4ふっ化エチレン)がこれに当たる。

膜織物の作製法の一例としてガラス繊維平織/PTFEの場合の模式図を図5に示す。織物がディッピング槽を通り、100℃前後で乾燥し、370℃前後で焼結した後、冷却して、織物にPTFEの1回のコーティングが完了する。この工程を繰り返し、膜織物の作製が完了する。ソフト・コンポジットの作製はハード・コンポジットに比べて簡単である。図6に、ガラス繊維平織/PTFE(4ふっ化エチレン)とポリエステル繊維平織/PVCの引張応力-ひずみ曲線を示す。マトリックスの厚みが薄いので、織物の引張応力-ひずみ曲線の特徴が表れ、下に凸の曲線となる。また、破断ひずみもハード・コンポジットに比べて大きい⁹⁾。

次に、世界と日本の膜構造の歴史を概観すると表2のようにまとめられる。本表で示すように、Frei Ottoが斬新なケーブル膜構造を持つモントリオールEXPO西ドイツ館を発表して以来、アメリカ大陸で次々に大型膜構造物が作られた。1975年には空気膜方式のシルバードームが製作され、以後この方式が主流となる。しかし、常時送風というメンテナンスや密閉空間などの問題で、空気膜方式が1984年に作られたフィージャードームを最後に姿を消した。そして、サスペンション構造が、現在のアメリカの大空間架橋の中心となっている。さらに、イベントは室内で雨と気温を制御し、スポーツは自然の

図7 酸化チタン光触媒技術を用いた膜材料の汚れ防止法

風と光のもとで行う膜構造開閉屋根をもつ大ドームが次々と発表されている。

一方、日本では、1984年に空気膜方式の東京ドームが製作された。しかし、以後はきびしい設計基準のもとで、固い骨組みに覆われた大構造物が作られ、開閉屋根をもつ大ドームの建設が開始されている。日本の特徴を生かした木構造の出雲ドーム(1992年)があり、大阪ドーム(1997年)、名古屋ドーム(1997年)の骨組膜構造、小松ドーム(1997年)開閉屋根の骨組膜構造などが一例としてある。

膜材料の機能向上の研究も活発になされており、透光率向上を目指した繊維の織り構造の研究³⁾、図7に示すように、汚れのつきにくい酸化チタン光触媒層をコーティング層の表面に重ねた新素材の研究など活発に行われている⁹⁾。

5. 第2世代のソフト・コンポジット

第2世代のソフト・コンポジットの特徴はフレキ

表2 世界と日本の膜構造の歴史

(アメリカ)		1987年	モントリオールオリンピックスタジアム 膜構造開閉屋根 鉄構造 最大スパン：305×260m
1967年	モントリオール EXPO 西ドイツ館 ケーブル膜構造（オットー設計） スパン：約100m		
1975年	スーパードーム アメリカ ニューオルリンズ 鉄骨トラス構造 最大スパン：207m		(イベントは室内で雨と気温を制御し、スポーツは自然の風と光のもとでおこなえる膜構造密閉屋根が世界的広がりを見せている。)
1975年	シルバードーム アメリカ ミシガン州ポンティアック エアードーム 最大スパン：220m	1996年	アムステルダムスタジアム 鉄構造開閉屋根 最大スパン：180×250m
1976年	キングドーム アメリカ シアトル コンクリートシェル構造 最大スパン：202m	1998年	フェニックスドーム 鉄構造密閉屋根 最大スパン：229m
	(これ以後経済的理由によるエアードーム方式となる)	1999年	ブサンドーム（予定） ケーブル軽構造開閉屋根 最大スパン：300m
1984年	フィージャードーム アメリカ インディアナポリス エアードーム 最大スパン：210m	(日本)	
	(アメリカでは、これ以後エアードーム方式は消える。理由：度重なる構造事故、常時送風というメンテナンス問題、密閉空間)	1984年	東京ドーム（ビッグエッグ） ケーブル補強エアードーム 最大スパン：201m
1990年	サンダードーム フロリダ州セントピーターズバーグ ケーブル軽構造（B、フラー設計） 最大スパン：208m		(これ以後は、固い骨組みに支えられたものとなった。台風：設計風速60m/sec、設計積雪加重450kgf/m ²)
1992年	ジョージアドーム アトランタ ケーブル軽構造 最大スパン：240m	1992年	出雲ドーム 木造によるドーム構造 最大スパン：141m
	(テンセグリティ構造（Tension+Integrity）（ケーブル軽構造）がアメリカでの大空間架橋の中心となる。)	1997年	大阪ドーム 鉄構造 最大スパン：166.5m
		1997年	ナゴヤドーム 鉄構造 最大スパン：187.5m
		1997年	こまつドーム 鉄骨組膜構造開閉屋根 最大スパン：160m
			(日本にも、但馬ドーム、大分ドーム、仙台ドームと開閉屋根をもつドーム建設が開始される)

シブルで大変形な挙動である。テキスタイルのなかで編物の変形は繊維それ自身の変形よりも形状のたゆみを取る場合の変形の方が大きく全体の変形が大きくなり、第2世代のソフト・コンポジットにおいて重要な役割を果たす。この材料は新しく、この分野の応用は今後の課題であるが、自然界には第2世代のソフト・コンポジットを多く見ることができる。一例として、人体の消化管膜を取り上げる。消化管は中空性器官と呼ばれ、図8に示すように、食道、胃、小腸、大腸から成る。構造はよく似ており、

粘膜、筋層、外膜で構成され、部位によって各層の厚さや粘膜の形態が異なる。そのなかで、筋層は縦走筋、輪走筋の2層からなり、その間に自律神経性の筋層間神経叢があって、両者の筋肉に作用して収縮と弛緩を行う。すなわち、食塊の進む前方の筋肉が弛むと同時に、後方の筋肉が収縮し、食塊の移動を進めるぜん動運動を行っている。部位によっては、斜走筋が加わって3層になっている。消化管はフレキシブルで大変形な挙動を示すソフト・コンポジットの一種であることがわかる⁵⁾。

図8 消化管の膜構造と機能

図9 水中で活躍するフレキシブルマウンド

実用化されているものの例として、図9に示すように、構造物の形態を利用してフレキシブルで大変形な挙動を示すことにより消波効果を狙った、水中で活躍するフレキシブルマウンドを取り上げる。これは、海底に埋めた空気膜が波浪エネルギーを受けて大変形することで、波浪エネルギーを吸収するものであり、長崎ハウステンボス湾の入口に設置されて活躍している。

6. ソフト・コンポジットの今後の展開

6.1 第1世代ソフト・コンポジットの今後の展開

第1世代のソフト・コンポジットの応用分野は膜構造を中心として発展してきたが、構造は今後、デザインの自由度を最大限に活かし、構造様式と用途の多様化が今後ますます進むものと思われる。これからの膜構造として、いろいろな夢が語られているが、その1つに超大型膜構造物が上げられている。Frei Otto は、図10に示すように、すでに1971年にグリーンランドの都市の全体を覆う3kmの空気膜構造の設計案を作っているし、Edmund Happoldらはカナダのアルバータ州の地域14haの全体を覆う空気膜構造物を作っている。寒冷地域の巨大空間そのものを温暖地域なみの緑なす快適な環境に変える技術の追求は、人類に新しい居住空間を提供する¹⁾。

さらに、インテリジェント化された快適なテント住居は、人口問題に苦しむアフリカ、アジアに、すばらしい貢献を果たすことになる。今後の展開として、第1世代のソフトコンポジットを膜材料として用い、テント形式の屋根をもつ住宅を作製することはできないだろうか。低コストで設計の自由度が大きいカラフルな膜構造の屋根をもつ住居は、我が国では難しいとしても、アフリカ民族に受け入れられる公算が大きい。屋根、壁材料にインテリジェント複合材料を用いることで快適な住居空間が実現できる²⁾。

その他、空中や水中にも膜構造物は応用が広がっている。例えば、飛行船や気球、消波効果を狙う水中で活躍するフレキシブルマウンドなどもあり、今後、用途はますます広がるものと考えられる。

図10 1971年にグリーンランドの都市の全体を覆う3kmの空気膜構造の設計案

6.2 第2世代ソフト・コンポジットの今後の展開

大変形が可能でフレキシブルなソフト・コンポジットの応用分野として、動的な変形挙動を示す個所、変形が時間とともに大きくなる個所で、強度が要求される分野などが考えられる。自然界の多くの事例を学べるように、柔軟でエネルギー吸収が必要な製品に数多く利用できると考えられる。

7. コンポジットの今後の展開

20世紀における科学技術は、豊かで快適で安全な生活を実現してくれたが、一方で、多くの問題を人類に残したのも周知の事実である。先進国においては、大量生産、大量消費、大量廃棄からの方向転換を余儀なくされているし、発展途上国では、‘population’（人口）‘poverty’（貧困）‘pollution’（汚染）で表される3pセットが地域社会を襲っている。

図11 地球白書データによる2050年までに世界人口

人口問題は、図11に示す地球白書データより、2050年までに世界人口は100億弱となり、2020年にはアフリカで2倍、アジアで1.5倍の増加が見込まれる⁹⁾。また、大量生産、大量消費のパターンは、ごみの大量発生をもたらしている。そこで、資源浪費型社会から循環型社会への転換が図られ、リサイクル問題が重要問題となっている。リサイクル法として、エントロピーの小さい順にリユース、マテリアル・リサイクル、ケミカル・リサイクル、サーマル・リサイクル法があり、リユース法が最も環境にやさしい。さらに、エネルギー資源と二酸化炭素問題も深刻である。エネルギー消費の増力加は二酸化炭素の排出量の増加を導き、地球の温暖化につながることになる。表3に、世界エネルギー会議（WEC）のエネルギーの消費予測を示す。WECではいくつかのケースを想定しているが、二酸化炭素の排出量を1990年と同じに押さえた‘エコ指向’ケースでも、30%のエネルギー消費が上昇する²⁾。

そこで、ハード・コンポジットをリユースしやすい手法として、ハード・コンポジットを部品または部材に用いる場合に、徹底したユニット化をはかり、ユニットを組み合わせることより部品または部材を製作する設計の確立を提案したい。このシステムでは、リサイクルする際に、ユニットに分解し、そして組み合わせることでリユースされた商品が生まれる。製作に当たり、エネルギーが最小でCO₂を発生させない最高の方式となる。FRP船では、船体は何度も利用して船装のみを取り替える。家屋の解体では、梁や柱をユニット化して再利用することが上げられる²⁾。

21世紀の技術は、上述した21世紀における諸問題を解決するために貢献するものでなければならない

表3 世界エネルギー会議（WEC）のエネルギーの消費予測

	世界エネルギー会議（WEC）シナリオ			
	高度成長	修正基準	基準	エコ指向
予測期間	1990-2020	1990-2020	1990-2020	1990-2020
経済成長（%/年）	高度	中位	中位	中位
OECD加盟国	2.4	2.4	2.4	2.4
旧ソ連・中央ヨーロッパ	2.4	2.4	2.4	2.4
開発途上国	5.6	4.6	4.6	4.6
世界	3.8	3.3	3.3	3.3
予測期間内の世界のエネルギー需要の伸び（%）	98	84	54	30
二酸化炭素の年間排出量の伸び（1990年レベルに対し）	93	73	42	5

が、ハード・コンポジットとソフト・コンポジットをうまく組み合わせることによりその可能性は極めて大きい。

参考文献

- 1) 前川善一郎; 強化プラスチック, 43, p424, (1997)
- 2) 前川善一郎; 31回機械学会東海支部, 関西支部座談会資料, 28 (1998)
- 3) NIKKEI ARCHITECTURE, 126, (1997年5月19日号)
- 4) 豊田宏; 工業材料, 48, 6, 110 (1998)
- 5) 堺章; 目で見えるからだのメカニズム, 医学書, 65 (1994)
- 6) 地球白書1997-8, p27
- 7) 甫宏和; 成形加工, 2, 3, p107 (1990)

前川善一郎 (まえかわ ぜんいちろう)

昭和45年大阪市立大学大学院修士課程修了, 現在, 京都工芸繊維大学大学院ファイプロ科学専攻教授, 繊維材料の機能性向上の研究, ソフトコンポジットの開発研究, 染織文化財のデータベースの構築と保存の研究。(京都工芸繊維大学大学院ファイプロ科学専攻, 〒606-8585 京都市左京区松ヶ崎御所海道町, TEL. & FAX. 075-724-7845)

研究会, 研究委員会のご案内

(社)日本繊維機械学会には次の研究会, 研究委員会が設置されています。会員各位におかれましては, ご関係の深い部門への積極的なご参加をお待ちします。

産業資材研究会 (委員長 松本喜代一)

産業用繊維資材全般を対象とした研究活動

運営分担金 企業関係 年額30,000円, 大学官庁関係 年額10,000円

生活環境と繊維の研究会 (委員長 軍司 敏博)

インテリア, 寝装関係を主体とした研究活動

運営分担金 企業関係 年額30,000円, 大学官庁関係 年額10,000円

アパレル問題研究会 (委員長 二宮 清延)

テキスタイルとアパレルの結びつきに重点をおいて研究活動

運営分担金 企業関係 年額27,000円, 大学官庁関係 年額10,000円

織機研究委員会 (委員長 近岡 和英)

織機に関するあらゆる研究活動

運営分担金 企業関係 年額40,000円, 大学官庁関係 年額10,000円

不織布研究会 (委員長 矢井田 修)

不織布に関する学術的な研究活動

運営分担金 企業関係 年額40,000円, 大学官庁関係 年額10,000円

被服心理学研究会 (委員長 藤原 康晴)

被服心理学に関する総合的な研究活動

運営分担金 そのつど徴収

コンポジット研究委員会 (委員長 座古 勝)

繊維強化複合材料に関する研究活動

運営分担金 企業関係 年額40,000円, 大学官庁関係 年額10,000円

申し込み, お問い合わせは, 日本繊維機械学会事務局 (TEL. 06-443-4691, FAX. 06-443-4694) まで