る耐熱性と 1.8 程度の低密度は垂涎ともいうべきである。しかし、反面きわめてリスクな材料でもある。剪断強度不足は多次元化で補えるが、500°C 以上で顕著になる酸化は、きわめて大きな問題である。

必然的に耐酸化コーティングということになるが、コーティング物質に難がある。まったくの私見だが、1,200°C は手が届かないところではなく、1,600°C 程度は何らかのコーティング材が存在しうると思われるが、これを越えて 2,000°C 以上になるときに、C/C と組み合わせうる材料が存在するののかという不安がある。加熱冷却サイクル中にマイクロクラックを発生せず、エロージョンや衝撃力を受け表面が損傷しても酸化が進行しないことが必要で、これは表面コーティングの域を越え、たとえば自己修復性といった耐酸化システムが要求され

る。このような材料が C/C と定義できる範疇に納まるか否かは別として、耐酸化性・耐環境性が未来のエンジン構造材の鍵を握っている。参考までに、C/C 製ノズルを図 15 に示す。

4. おわりに

文中に幾度も述べたように材料が航空エンジンの進歩に寄与するところ甚大であり、2000 年に向かう 10 余年ほど新素材が求められる時代はないのではあるまいか。そのなかでも複合材料の占める位置は大きく、われわれはそれらを必要としている。

長所と短所がともに際立ち、実用化に幾多の障害のある材料を多く含む複合材料は、材料そのものから、設計技術、成形加工技術を経て検査技術まで問題は山積されているが、あるいはそれゆえに構造物の試作と実働状態での評価から各プロセスへの研究課題を提起する必要があると考えている。

参考文献

- 1) 青木千明：日本ガスタービン学会第 1 回特別シンポジウム予稿 (1986), p. 17.
- 2) IHI 広報部：「IHI の先端技術」PART IV (ジェットエンジン) (1983), p. 1.
- 3) 坂田公夫、ほか：第 27 回航空原動機に関する講演会 (1987), p. 72.
- 4) 正木彰樹：日本ガスタービン学会誌, 14, 55 (1986), 14.

図 15 C/C 製ノズル

解 説

エアードームにおける複合材料の適用

渡辺 博司*, 坪内 信朗**

1. はじめに

建物の目的はその使用者に快適な空間を提供することであるという言葉がある。その点、わが国で最近施工例が増えつつあるエアードームは他の建物にないユニーク

で明るい魅力的な空間を創り出すことができる。また、その形態は丸みを帯び柔らかさを感じさせる。エアードームの発祥の地は米国で、空軍のレーダードームとして提案され、1950 年にはほぼ球形の「レドーム」が建設された。その後、体育館や博覧会会場、スタジアムなどの用途に大小さまざまなエアードームが建てられているが、これらのうちでも大規模なスパン 200 m にも達するスポーツ施設がエアードームのメリットを最も有効に

* Hiroshi WATANABE, ** Nobuo TSUBOUCHI : (株) 竹中工務店技術研究所 (136 東京都江東区南砂 2-5-4)

活用しているといえよう。一般に鉄骨構造では屋根重量がスパンの2乗に比例するといわれるのに対し、エアードームではその原理上単位面積当たりの屋根重量はスパンと無関係であり、スパンが大きい建物ほど有利となるわけである。

エアードームの屋根には織布にコーティングを施した複合材料(膜材)が用いられており、エアードームの最も重要な構成材料となっている。本稿ではこの膜材について東京ドーム(図1)を例にその概要を述べることにする。

2. エアードームとは

エアードームは膜材で覆われた空間に空気を送り込むことによって内部の空気圧力を高め、膜を張力状態とし自荷重および外力に対して抵抗する構造である。その種類を図2に示す。これらのうち、二重膜構造では外膜と内膜の間の空気の断熱効果が期待でき、また融雪用の温風のダクトとして両者の間の空間が利用できる。さらに内膜に吸音効果をもたせることができるなどの利点がある。したがって中〜大規模の恒久建築物(仮設でない建物)には二重膜構造が採用されている。一重膜あるいは

図1 東京ドーム

図2 エアードームの種類

二重膜構造の屋根重量は補強ケーブル等も含めて $10 \sim 15 \text{ kg/m}^2$ 程度であり、一方、室内には $25 \sim 30 \text{ kg/m}^2$ 程度の空気圧をかける。これらの差である約 15 kgf/m^2 が屋根を保持し形状を保つのに働く圧力となる。なお、室内圧 30 kg/m^2 は海拔差約 23 m の2地点の気圧差に相当し、人体への影響はない。

構造設計からみたエアードームの特徴は、通常の建物と異なり屋根に働く地震力は小さい代りに、強風時には屋根が大きな負圧を受けることである(図3)。場所によっては数百 kgf/m^2 にも達するため、屋根は変形し、膜材は大きな張力を受ける。なお、二重膜構造ではこの張力を外膜が負担しており、したがって外膜には高強度が要求される。膜屋根を補強しかつ剛性を高めて強風時の大変形を抑えるためにスチールまたはステンレス製のケーブルが張られる。ケーブルと膜材とは金物を介して固定されるが、膜材端部には穴開けなどの加工を施すことが多い。そのため他の複合材料と同様、このような接合個所での耐力低下を防ぐ対策が重要である。

3. 膜材に求められる性能

エアードームの特長を十分に生かすためには高性能の膜材が必要であり、膜材への要求性能は多様かつ高度なものとなる。恒久建築物を想定したおもな要求性能を表1に示したが仮設構造物や特殊な用途に供されるエアードームでは若干の違いが生じると思われる。

引張り強度は膜材の最も基本的な性能であり、エアードームの規模が大きいほど高強度が求められる傾向にある。エアードームの室内圧によって生ずる膜材の張力は $1 \sim \text{数 kgf/cm}$ と小さいが、強風時には数十 kgf/cm の張力が生ずる。このとき、直交する二方向の糸がこの膜面内の張力に耐えなければならない。したがって、外力に対する力学的特性は二軸応力下で評価する必要がある。しかし、破断強度を試験する際には二方向の張力を加えることが困難なので一軸引張り応力下における試験を行なっている。基材だけでなく、接合などの加工が施された個所の強度が確保されることも重要である。

引裂き強度は膜材に何らかの損傷が生じた場合の傷口

図3 強風時の屋根面の変形と張力の発生

の拡大しにくさに関係し、エアードームの安全性を左右する。

内膜の吸音性はエアードームの音響空間に大きく影響し、快適な音場を得るために吸音率の高い膜材が求められることが多い。

わが国ではエアードームは建築基準法第 38 条の「特殊の材料又は構法」にあたるため、恒久建築物を建設するに際して事前に建設大臣の認可を得なければならない。その際には、使用する膜材に関して表 1 の項目をはじめとする各種のデータを基にその膜材が使用に支障のないものであることを示す必要がある。そのため、恒久建築物には過去に使用実績のある膜材が用いられることが多いのが実状である。

4. 膜材の種類

複合材料としての膜材は織布とコーティング層からなり、両者の組合せによって種々の膜材ができる。米国では織布にガラス繊維、ナイロン、ポリエステルが使用さ

表 1 エアードーム用膜材料に求められる性能

性能項目	外膜	内膜
引張り強度	○	△
引裂き強度	○	△
水密性、気密性	○	△
透光性	○	○
吸音性	△	○
不燃性	○	○
耐候性	○	△
加工性（接合の容易さなど）	○	○
耐疲労性	○	△
メンテナンスが容易	○	△

○：とくに要求される、△：ある程度要求される

表 2 おもなコーティング樹脂の比較

	塩化ビニル PVC	フッ素樹脂		シリコン樹脂 SiR
		TFE	FEP (接合用)	
融点 (°C)	150~180	327	250~290	—
連続最高使用温度 (°C)	70	260	200	280
燃焼性	自己消火性	不燃	不燃	自己消火性
接合の容易さ	◎	○	○	△
耐候性	×	◎	◎	◎
耐薬品性	×	◎	◎	◎

れ、またコーティングには塩化ビニル、フッ素樹脂、シリコン樹脂が一般的である。クロロブレン、クロロスルホン化ポリエチレンも特殊用途に用いられたことがある。現在、広く使われているのは塩化ビニルとポリエステルとの組合せである。不燃性の要求から塩化ビニル-ガラス繊維布が使用されることも多く、昭和 45 年大阪万国博のアメリカ館の屋根に採用されたのはこの膜材である。

恒久建築物のとくに外膜に対する多様な要求に最もよく応えることのできるのはフッ素樹脂 (TFE, tetra fluore ethylene) とガラス繊維の膜材 (以下、GF-TFE 膜材と略称) である。高強度で不燃性のガラス繊維と耐久性に優れた TFE の特長を兼ね備えた、現時点で最も高性能な膜材といえよう。GF-TFE 膜材は 1974 年米国で最初にエアードームに使用されて以来、中規模以上の恒久建築に不可欠の材料となっており、本年 3 月の完成をめざして現在工事が進められている東京ドームにもこの GF-TFE 膜材が使われている。そこで本稿ではこの膜材を中心にその概要を紹介することにする。

なお、シリコンコーティングされたガラス繊維織布は他の膜材にない高い透光性を有するが (図 4)、まだ使用例は少ない。

5. GF-TFE 膜材の製造法

5.1 ガラス繊維

ガラス繊維は直径が細くなるに従って抗張力が増大し (図 5)、また屈曲性も改善される。この点からわが国では B ヤーンが GF-TFE 膜材には用いられており、現在のところ工業的に安定した製品としては B ヤーンの約 3 μm が下限といわれている。一方、直径が小さいことは単位重量当りの表面積増大を意味し、空気中に曝露された場合にはより風化しやすくなる。したがって、高強度を保つためには耐久性の高いコーティング層が必要で

図4 フッ素樹脂コーティングされたガラス織布膜材の断面写真

図5 ガラス繊維の抗張力¹⁾

あり、フッ素樹脂はこの要求をほぼ満たしているといえよう。

ガラス繊維は図6に示す方法で製造される。熔融されたガラスが高速で細孔から引き出されフィラメントとなる。フィラメントはセルロース系の集束剤で平行に束ねられストランドとなる。ストランドは次工程でよりをかけられ、最後により糸となる。

GF-TFE 膜材は当初米国で開発されたもので、米国産の膜材にはβヤーンと呼ばれる直径約3μmのガラス繊維が使われている。わが国の規格のBファイバーはこのβヤーン同等品で、ユニチカ、旭ファイバーグラス、日東紡の3社が製造している。

5.2 織 布

GF-TFE膜材に使われるガラス織布の織り方は平織りである。織布の長手方向の糸をたて糸、幅方向の糸をよこ糸と呼んでいる。よこ糸の密度(本数/単位長さ)はたて糸より2~3割小さく、またよこ糸はたて糸より蛇行が大きい。したがって、膜材の力学的特性はたて糸・よこ糸方向で異なり、さらに織布構造であることから強い

図6 ガラス繊維の製造法¹⁾

図7 GF-TFE 膜材の二軸引張り特性²⁾

非線形性を示す。図7に二軸応力下のたて糸・よこ糸方向のS-Sカーブを例として示した。

ある幅の膜材を裁断図に従ってカットしてゆくとき、歩止まりを上げるためには広幅の膜材が有利であるし、設計の自由度も高い。そこで、広幅の織布を織る織機が導入され、現在幅5m程度のガラス織布が製造可能となっている。

5.3 コーティング

ガラス織布へのコーティングにはTFEのディスパージョンが使われる。ガラス織布にこれを含浸させ、焼成炉で加熱すると水分が蒸発しTFEの微粒子が残って凝集し薄い層が形成される。これを数回繰り返すと厚さ100~150μmのコーティング層が得られ、十分な気密・水密性を有するようになる。ただし、吸音性が要求される内膜では織布の通気性が残る程度にコーティングの回

数を減らし吸音性を確保する。

なお、コーティング層中にはガラスパールを混入し耐摩耗性の向上を図っている。さらに、後述する溶着接合を容易にするためにコーティングの表面には FEP (fluorinated ethylene propylene) が使われる。

6. GF-TFE 膜材の接合

6.1 膜材相互の接合

塩化ビニールコーティングの膜材は高周波溶着接合が広く行なわれているが、GF-TFE 膜材では専用の熱溶着装置を用いて接合する。図8に示すように、コーティング層 (TFE) より軟化点の低い FEP テープをラップジョイントにはさみ、加熱板でプレスして FEP テープを融かす。適切に溶着接合されたジョイントではこれらが一体化し、実験室内では溶着幅 50 mm で母材の 90% 以上の引張り強度が得られる。しかし、実建物では安全側に立って溶着幅を 75 mm としている。

6.2 他部材との接合

エアードームの膜材と他の構造部材とは一般に金物を介して接合され、引張り力が伝達される。図9にケーブル補強二重膜エアードームにおけるケーブルとの接合の例を示す。工場で膜材端部にロープを折り込んで溶着し

図8 GF-TFE 膜材の接合方法

図9 ケーブルと膜材の接合方法の例

た後、穴開け加工する。次に膜材端部をアルミ製の金物ではさみ、ボルトで固定するが、膜材と金物の間には成形された合成ゴムを入れて膜材の摩耗を防ぐとともに気密・水密性を確保する。このような接合個所の設計はエアードームごとに若干異なりとくに標準化されたものはなく、現在も種々の改良案が提示されている。

7. おもな性能の試験方法

7.1 引張り強度

JIS の L1096「一般織物の試験方法」のカットストリップ法に準じて強度が測定される。これは幅 25 mm または 30 mm の短冊状のテストピースの両端を治具ではさみ、伸長させて破断時の荷重を求めるものである。なお、引張り応力を均等にかけることは困難が伴い、使用する治具などを十分に検討しないと材料本来の強度が得られない。

GF-TFE 膜材の引張り強度をみると (表3)、たて糸とよこ糸の糸密度の差が強度の大小となって現われている。破断時の伸び率はたて糸方向で 5~9%、よこ糸方向で 9~12% の範囲であり、ガラス繊維の糸自体より相当大きくなっている。また、溶着接合部の強度もテストピースの中央に接合部を設けて同じ方法で試験を行なう。

引張り強度は膜材の耐久性などを評価する際の基準となる重要な性能であるが、治具、引張り速度、雰囲気温度、試験担当者の熟練度などの影響を受けやすい。したがって、試験はこれらの項目が十分管理された状態で行

表3 GF-TFE 膜材の性能 (公称値の例)

		外膜用製品	内膜用製品
重量	(kg/m ²)	1.3	0.5
厚さ	(mm)	0.8	0.35
製品幅	(mm)	3,200	3,200
引張り強度	たて糸方向(kgf/3 cm)	450	150
	よこ糸方向(kgf/3 cm)	360	100
破断伸び率	たて糸方向(%)	3~10	7以下
	よこ糸方向(%)	6~15	7以下
引裂き強度	たて糸方向(kgf)	30	8
	よこ糸方向(kgf)	30	8
糸密度	たて糸 (本/2.5 cm)	25	32
	よこ糸 (本/2.5 cm)	19	22
透光率	(%)	13	21

なうべきである。

7.2 引裂き強度

JIS L1096 のトラペゾイド法に沿って引裂き強度が測定される。この方法は、図 10 に示すように台形の印をつけてさらに切込みを入れたテストピースを平行な治具に固定し、切込みから徐々に引き裂くときの荷重を求めるものである。この他シングルタング法などの試験方法がある。

7.3 透光率

分光光度計で求めた GF-TFE 膜材の透光率は外膜で 10~15%、内膜で 15~25% 程度であり、エアードームの用途によって調節可能である。二重膜構造では合成された透光率は 5~7% となる。

7.4 不燃性

建築に使用する材料の不燃性に関する試験はその使用部位や目的によって多岐に分かれる。膜材についても使用する建物の用途や規模に応じた不燃性試験に合格することが求められる。

膜材の不燃性評価に関連する試験方法を以下に列挙する。

- JIS-A-1321 建築物の内装材料および工法の難燃性試験方法
- JIS-A-1312 屋根の防火試験方法
- JIS-A-1322 建築物薄物材料の難燃試験
- 建設省告示第 1231 号 模型箱試験、ガス有害性試験

7.5 耐候性

膜材の耐候性は主として引張り強度の保持率で評価されている。米国における GF-TFE 膜材の 12 年間屋外曝露データによると引張り強度に大きな低下はない。これ以上の長期に渡るデータは得られないが、材料安全率を算定する際に経年劣化による強度低下率を見込むことによって耐用年数を 20~30 年程度とみなしている。

なお、大規模な空気膜構造ではその建設地における膜材の劣化状況をモニタするため、隣接敷地に膜材を曝露し定期的にサンプリングして強度を確認することも行なわれている。

8. エアードームの施工

膜屋根の施工の流れを図 11 に示す。補強ケーブルで区画される膜面をパネルと呼び、工場で膜材の裁断から接合等の工程を経て製作される。膜材に生じたシワや傷は強度低下の原因となるので、取扱いには十分な注意が必要である。

工事現場では補強ケーブル、金物、ゴムの取付工事の

図 10 引裂き試験方法（トラペゾイド法）

図 11 膜屋根の施工の流れ

図 12 膜材の取付け工事

後、ロールに巻かれた膜パネルの搬入、取付けを行なう。図 12 に東京ドームでの取付け状況を示す。次に、気密性などをチェックし、送風機で空気を送り込んで膜

面を持ち上げ (インフレート), エアードームの屋根が完成する。

9. お わ り に

エアードームの歴史は浅く、今後新たな用途が見いだされるとともにさまざまな形態の屋根が出現する可能性を秘めた構造である。これまで以上に優れた性能をもつ膜材が開発されればこれが刺激となってエアードームがいつそう発展すると思われ、新しいタイプの膜材の出現に期待したい。

最後に、写真等の資料を提供していただいた(株)竹中工務店後楽園エアードーム新築工事作業所および KAD 共同設計室に謝意を表します。

参 考 文 献

- 1) 日東紡績 (株): グラスファイバー, その材料としてのポジション.
- 2) 小川テント (株) 提供.
- 3) 勝畑安雄, 坪内信朗, 渡辺博司: 空気膜構造用膜材料の検討 (その1) 一軸引張特性の試験方法, 日本建築学会学術講演梗概集 (1984).
- 4) 同上 (その2) 引裂特性の検討と膜屋根の耐飛来物性.
- 5) 石井一夫: 空気膜構造, 工業調査会 (1977).
- 6) (株) 日本膜構造協会: 膜構造 — その現状と展望 — (1986).
- 7) 南 宏和, 中原義雄: 材料, 29, 324 (1980), 916-921.
- 8) 石井一夫: 施工, No. 237 (1985), 27-35.

解 説

《バイオニックデザイン—II》

貝 殻 お よ び 蝶 番 靱 帯

小 野 勝 道*

1. は じ め に

生体組織は複合材料のすぐれたお手本である。理想の複合材料の姿がそこにあり、複合素材が巧妙に組み合わせられて複合組織が形成され、目的にかなった力学的性質や機能を発現することが可能となっている。また、「生命活動」という生物本来の目的から考えるといっさいの無駄が省かれていること、たとえば不必要な素材は用いられていないこと、必要以上の強度がないことなども複合材料としてみた生体組織の大きな特徴である。

筋肉のように生命活動に能動的に関わっている生体組織の複合効果の発現のメカニズムはきわめて複雑で、人工材料のとうてい及ぶところではない。しかし、骨、貝殻、靱帯などの構造組織については、複雑な構造をもってはいるものの基本的には人工材料と同じような考え方で複合効果を理解できるものと思われる。その意味で、このような生体の構造組織を「まねる」ことによって、

従来とは異なった発想に基づく複合材料の設計を行なう指針が得られることが期待できる。

さて、生体組織を構築する素材は主に有機成分であるが、脊椎動物における骨や歯の象牙質、軟体動物における貝殻のように多量の無機成分を含むいわゆる硬組織も生命活動の維持に重要な役割を果たしている。硬組織以外にも鉱物質の生体内への沈積 (biomineralization) は広くみられる現象で、Lowenstam¹⁾によれば 24 種類もの無機化合物の沈積が報告されている。このうち量的にみて最も重要であるのは海産動物における炭酸カルシウムの沈積 (石灰化) である。

石灰化は一般に有機物マトリックスであるタンパク質中における結晶成長とみなすことができる。後で述べるように、無機成分が圧倒的に多い貝殻においてもその複合化過程においてタンパク質マトリックスがきわめて重要な働きをしている。すなわち、複合材料という観点から眺めると石灰化組織は高分子マトリックスに無機質を分散させた複合材料と同様なものと考えることができる。ここでとりあげる二枚貝の蝶番靱帯は二枚の貝殻の

* Katsumichi ONO: 東北大学非水溶液化学研究所 (980. 仙台市平戸 2-1-1)