膜利用構造物に使われる繊維膜材料[†]

南 宏 和^{*}

Membrane Materials Composed of Fabric for Use of Membrane Structures

by

Hirokazu MINAMI^{*}

Key words : Membrane material, Membrane structure, Coated fabric, Mechanical property

1 はじめに

力学的理論解析をする上での膜の定義は、すでに Lord Raileigh によって “The Theory of Sound” (1894 年) の中で的確に述べられている。¹⁾ 本稿では構造物の強度部材の一つとしての膜を取扱うのであるが、この場合には膜の定義を「引張力と面内せん断力に抵抗して、曲げモーメントと圧縮力には抵抗しないシート状の強度部材である」と表現することがわかりやすいと思われる。一般に構造物に使われる実際の膜材料は布を主要素とするものや樹脂フィルムであるが、これらはもちろん所要の引張剛性をもつものの、面内せん断変形がほどほどに生じる布に似て小さめのせん断剛性をもつものが多い。

古来、人類は、獣皮や天然繊維の織物を膜の材料に用いることから始めて、様々な構造物を造り、それを効果的に使ってきた。構造部材にはほかに柱、梁、板、殻があるが、これらは一般に石、木材、鉄、コンクリートを材料にして造られることから、膜を使わずにこれら構造部材だけで構造物を造ればそれはそれなりの重さの構造物になる。その重さが、時には構造物を効果的でないもの、つまり使い物にならないものにする。そもそも、膜を使った構造物が古来から効果的に使われてきたことの根本的理由の一つは、膜を使うことによって構造物を軽く造ることができるということである。軽く造ることができるというその有利性は、近年に到って、構造物のライフサイクルを通じてのエネルギー消費量と資源投入量を低減できて環境負荷を抑えることができる、ということをも意味するようになっていく。まさに今日においては、「膜を使う」と表現するよりも、「膜を利用する」と表現するほうが適切であろう。

遊牧民のテントは、膜を利用することで構造物を軽く造り効果的に使用している、すなわち住居構造物を家畜で運搬して移設することを可能にしている例である。また、チベットで現在も使われているコワと呼ばれる皮舟も、膜を利用して構造物を軽く造り効果的なものとした例の一つである (図 1)。この舟は 10 人余りが乗れ、重さが 500N ほどの一人がかついで運べるものである。³⁾ ほかにも、航空機体構造物も、1903 年にライト兄弟が動力

飛行に成功してから 1920 年頃までは、翼や胴体に膜すなわち布を張り軽く造られたことから実用が進んだ。

本稿では、まず現代の膜利用構造物の例を幾つかあげてその膜材料について概説し、次に、建築分野で使われている代表的な膜材料を取り上げて各種の力学的特性を紹介する。そして、膜利用構造物の地球環境時代の位置付けについて言及しておきたい。

2 膜利用構造物と繊維膜材料

現代の膜利用構造物を幾つかあげて、布を強度上の主要素とする膜材料を紹介する。これら膜材料を本稿では繊維膜材料と定義したい。

フレキシブル・ダムは、主としてナイロン繊維の布を何層も重ねて厚くゴム引きした繊維膜材料で造られる、空気圧あるいは水圧で膨らませる起伏ダムである。²⁾ 図 2 はその実例である。この繊維膜材料は、水密性があり耐磨耗性の優れた合成ゴムの膜がまずあって、それに不足する引張強度を強い合成繊維布を多重にして補った、いわば繊維補強ゴム膜ともいうべき繊維膜材料である。参考に、2 層の平織物で成る繊維補強ゴム膜の例 (厚さ 6.3mm, 1cm 膜幅あたり引張強度 1250N) を図 3 に示す。

図 1 チベットで今も使われている皮舟コワ³⁾

[†] 原稿受理 平成 16 年 4 月 16 日 Received Apr. 16, 2004

^{*} 正 会 員 太陽工業㈱研究開発本部 〒532-0012 大阪市淀川区木川東, R & D Dept., Taiyo Kogyo Corp., Yodogawa-ku, Osaka, 532-0012

図2 フレキシブル・ダムの例

図3 ゴム・コーティング加工繊維膜材料

ただし、これはフレキシブル・ダム用に製造されたものではない。

気球や飛行船も膜利用構造物の仲間で、その総数は非常に少ないけれども研究機関や企業で取扱われ運用されている。一例として、日本でも運用された有人飛行船の皮膜を図4に示す。⁴⁾このような飛行船皮膜は、船体の浮揚ガス（ヘリウムガス）圧と運動時曲げモーメントに耐え得るしかも軽い材料としてまず平織布が膜として採用され、それにヘリウムガス・バリアー性確保と布繊維を保護することのための表裏面樹脂加工（ラミネート加工やコーティング加工）がされた繊維膜材料とみることができる。また、図5は、成層圏まで固体ロケットを吊り

図4 有人飛行船のエンベロープ皮膜

運び上げることに成功した大型気球の皮膜を示す。^{5), 6)}この皮膜は、まず薄いポリエチレン皮膜が選択されて、つぎにそれをより大きな引張強度と引裂強度をもつものにするために布（スーパー繊維といわれる高強度ポリエチレン繊維の非常に目の粗い布）をサンドウィッチ状にして補強した繊維膜材料とみることができる。

膜利用構造物として最も身近なものはテント構造物であろう。今日その一定規模以上のものは、建築基準法の枠組み内で“膜構造の建築物”と表現され、構造や繊維膜材料が規定されている。⁷⁾そして“膜構造”は、“骨組膜構造”と“サスペンション膜構造”に分けて規定されている。また、倉庫の用途に供するテント構造物は“テント倉庫建築物”と表現され、やはり構造と繊維膜材料が規定されている。図6は、膜構造の建築物に使われている繊維膜材料の例である。この繊維膜材料は、工業的に製造されているものでは最も細い公称直径 $3\mu\text{m}$ のガラス繊維で高強度で耐熱性にすぐれた平織物をつくり、その両面に防水やガラス繊維を保護する目的のためのフッ素樹脂（四フッ化ポリエチレン樹脂）コーティング加工をして製造された繊維膜材料である。この繊維膜材料は引張強度が高く、また耐候性に非常に優れており、今日まで大型の膜構造の建築物には特に多く採用されてきている。

3 建築分野の膜利用構造物と繊維膜材料

前述のとおり、建築分野では法規上で膜利用構造物は膜構造の建築物、その繊維膜材料は膜材料と呼ばれている。

3・1 膜構造の建築物と膜材料

膜構造の建築物の進歩には歴史的なものがあり、²⁾今日のその形態は建築空間の用途に応じて多様である。建築構造の基本的方式でみると、膜面の周辺であらかじめ引張力をかけて膜を常時緊張状態にして膜面を安定にする張力膜構造方式と、空気で膨らませて常時緊張状態にする空気膜構造方式とがある。前述の骨組膜構造とサスペンション膜構造は前者の構造方式に入る、近年建設されている膜構造の建築物のほとんどはこの張力膜構造であって、後者の空気膜構造方式が採用されることは非常に少なくなっている。また、規模的には、野球場の屋根のような大スパン膜構造はもちろん、屋根単体としては世界

図5 成層圏大型気球の繊維補強皮膜

図6 膜構造の建築物に使われる繊維膜材料(たて糸の縦断面をみる(上), よこ糸の縦断面をみる(下)).

最大である直径320メートルで被覆面積8万平方メートルの巨大膜構造の建築物もすでに建設(1999年)されている(図7に示すミレニアムドーム). 図8は野球場に採用された骨組膜構造の屋根の例を示す. これら膜構造の建築物に採用された膜材料は, 図6に示したものと同類のフッ素樹脂コーティング加工ガラス繊維平織物である.

今日の膜材料の主な種類は, 軟質塩化ビニールコーティング加工のポリエステル繊維平織物と, 図6に例を示したフッ素樹脂コーティング加工ガラス繊維平織物である. これらは, 建築基準法施行令の規定に基づいて定められた告示⁷⁾の規定に対応して認定された膜材料である. こ

図8 大スパン膜構造の建築物“西武ドーム”
(設計施工: 鹿島建設, 膜加工: 太陽工業)

の告示では, 膜材料の耐火性能の面から基布に使用する繊維糸について3種類に分けて, またコーティング材料について2種類に分けて規定がされている. そして, 基布のことは“繊維糸を使用した織布または網目状織物”であると, コーティング材料のことは“基布の摩損防止などのために基布に塗布し又は張り合わせた樹脂又はゴムをいう”と括弧書きで記述されている.

3・2 膜材料の力学的特性

膜材料として軟質塩化ビニールコーティング加工ポリエステル繊維平織物も多く使われているが, 大型の膜構造の建築物にはフッ素樹脂コーティング加工ガラス繊維平織物(図6の膜材料はその一例)が多く使われている. ここでは後者をとりあげて, 膜構造の設計に留意しておくべき膜材料の種々の力学的特性を以下に紹介する. なお, これらの特性にある傾向は, 前者の膜材料でも類似に見られるものである.

以下の解説で用いるたて糸(経糸)方向あるいはよこ糸(緯糸)方向の膜材料の応力は, それぞれよこ糸方向あるいはたて糸方向の変形前の単位幅当たりの引張力と定義されたものである.

図7 ロンドン近郊に建てられたミレミアム・ドーム(建築デザイン: Sir Richard Rogers, 設計: Buro Happold, 膜施工: Birdair, Inc.)

(a) 1軸伸長特性^{8),9)}

各糸方向について3cm幅のストリップ試験片を切り出して1軸伸長試験を行い、得られた破断までの応力-ひずみ関係の例を図9に示す。応力は荷重を初期試験片幅で割った値で、ひずみは標線間5cmの光方式で測定した値である。

周知のとおり、平織物を構成するたて糸とよこ糸は、それぞれクリンプ (crimp) と呼ばれる波状の曲がりをもって交差している。図6の上の写真からたて糸の、下の写真からよこ糸のクリンプをみてとることができる。この図の膜材料の場合は、たて糸のクリンプよりもよこ糸のクリンプの方が大きい。この膜材料のようにコーティング樹脂が軟質で薄く加工されたものであると、布変形の研究分野では常識である交差糸構造の変形現象、つまり一つの糸方向に引張を受けて伸長していくと、引張方向の糸のクリンプが直交方向の糸のクリンプに転移するようにして小さくなって行く現象が生じる。さらに伸長が進むと、引張方向の糸のクリンプはなくなり、糸はまっすぐになって伸長する。この過程で、交差する直交方向の糸は最大限のクリンプをもつようになる。このように、一つの糸のクリンプが小さくなり、これと交差する糸のクリンプが大きくなる現象はクリンプ交換と呼ばれる。初期のクリンプが大きい方の糸の方向への一方方向伸長において、このクリンプ交換は最も強く生じる。互いに交差しつつたて糸部材とよこ糸部材がクリンプ交換を起こしながら成すこの交差糸構造の変形は、一種の幾何学的非線形の変形である。交差部近傍での糸の変形のこの非線形性を重要要因にして、これに糸自体とコーティング樹脂の材料非線形性などが加わった結果として、図9に示したように応力-ひずみ曲線は顕著な非線形性をもつと考えることができる。この曲線では、非線形性は立ち上がり部分つまり最初の小さな応力の範囲で特に強い。その範囲は、二つの糸方向曲線について共通で、破断応力のおよそ15%までである。この範囲では、よこ糸方向伸

図9 破断までの1軸応力-ひずみ曲線

長曲線についてはたて糸方向曲線に比べてひずみはかなり大きく出ており、非線形性はより強い。

1軸伸長曲線についての以上の考察から、平織物を基布とする膜材料の伸長特性として、特に低応力域における顕著な非線形性と、その強さがたて糸方向とよこ糸方向で大きく異なるいわば顕著な異方性とをまず指摘できる。この材料特性は、膜構造の建築物の設計で許容応力が破断応力の4分の1の範囲に定められていることを考えると、注視しておくべき特性である。

(b) 2軸伸長特性^{8),10)}

膜構造の建築物の設計で、膜面に風や雪の荷重が作用する時の膜応力・変形の弾性解析が実施されている。ここでは、材料定数として膜材料の弾性定数が算定されていることが必要になる。一般に、膜面の応力状態は、たて糸方向応力とよこ糸方向応力が同時に発生している2軸応力状態である。そして当然ながら、各糸方向の応力の大きさおよび両糸方向応力の比率（以後これをたて糸方向応力：よこ糸方向応力と定義する応力比で表す）は膜面上の場所によって異なる。したがって、2軸応力状態にある膜の解析には、顕著な非線形性と異方性の伸長特性をもつ膜材料の弾性定数が、どのような応力比の2軸応力-ひずみ関係にも適合するように算定されることが必要になる。構造設計においては、前述の1軸伸長曲線は引張破断強度（引張破断応力に同等とする）を把握するために欠かせないが、この曲線を得ることだけでは不十分であって、いろいろな応力比の下での2軸伸長曲線が弾性定数の妥当な算定をするためにまず必要となる。またほかに、2軸伸長曲線は、膜曲面を構成する裁断パターンの寸法決定にも必要になる。それは、膜面施工時に導入される常時作用膜応力（初期応力と呼ばれる）に対応する伸びの分だけ、あらかじめ裁断パターンを小さめに製作しておく必要があるからである。

図10に、膜材料の2軸引張試験の状況を示す。この試験では、あらかじめ設定した応力比で決まる大きい方の応力が生じる糸方向に一定速度（4mm/min.）で引張りつつ、応力比が設定値に常に維持されるように、直交する他方の糸方向に変速しつつ引張る方式が採られている。

初期クランプ間距離を76cmとし、正方形交差部辺長40cmの十字形試験体を用いて、5ケースの応力比（1：1，2：1，1：2，1：0，0：1）での2軸引張試験を実施

図10 膜材料の2軸引張試験

して、初回の引張時に測定した応力-ひずみ曲線を図 11 に示す。ここで便宜上の応力比の表現として用いた 1:0 と 0:1 を付した応力-ひずみ曲線は、それぞれたて糸方向およびよこ糸方向の 1 軸引張試験（これには十字形ではなく矩形の試験体を用いた）の測定結果である。これら 2 軸引張試験は、応力が最大でほぼ 30kN/m に達するまでの間で実施された。この最大応力の大きさは、1 軸引張破断強度（一例として図 9 の伸長曲線から読み取れる）のおよそ 25% である。

各応力比での伸長曲線をみると、前述のように 1 軸引張破断応力の 15% までの応力区間で顕著な非線形性を認めることができる。さらに仔細にみると、たて糸方向とよこ糸方向の伸長曲線のどちらも、応力が 3 ~ 4kN/m に達したところで小さな傾きから大きな傾きに急に変化している。応力比が 2:1 や 1:2 のケースの応力が小さい方の引張軸の伸長曲線では、その 1/2 の応力に達したところで同様に変化している。応力が 4kN/m をこえてさらに増加すると、伸長曲線はどの応力比の下でも急速に線形性を増すようになっている。これらの伸長曲線の応力範囲に限れば、応力 10kN/m を超える範囲ではほぼ線形とみなすこともできる。

上述のように、軟質コーティング樹脂で加工された平織物の膜材料には、低応力域の非常に狭い応力区間（図 11 の膜材料では 3 ~ 4kN/m）で急激に伸長曲線の傾きを変える変形特性があるようである。そのことによって、この膜材料の顕著な非線形特性が作りだされていると考えることができる。

図 11 に示した 2 軸伸長曲線は 1 回だけの引張をしたときの測定結果であるが、図 12 に示した伸長曲線は応力比が 1:1 の 2 軸引張を繰返し実施した時の測定結果である。どの糸方向の伸長曲線も、初回除荷の後の残留ひずみが大きく出て、その後の除荷時の残留ひずみ増分は急減する。こうして伸長曲線は収斂するが、それまでの繰返し引張回数は、たて糸方向の伸長曲線ではわずか

図 11 2 軸応力-ひずみ曲線

図 12 繰返し 2 軸伸長の応力-ひずみ曲線

2 ~ 3 回、よこ糸方向については 8 ~ 10 回である。そして、初回引張の伸長曲線にみられた顕著な非線形性も、繰返し回数に応じて弱まっていくが、収斂伸長曲線には依然として非線形性は残る。

繰返し伸長で現れるこのような特性には膜材料がもつ粘弾性特性が関係しているが、2 軸クリープ特性および 2 軸応力緩和特性を次に紹介する。

(c) 2 軸クリープ特性^{8), 11)}

応力比を 1:1 に維持して観測時間 24 時間の 2 軸クリープ試験を実施した結果を図 13 に示す。この図には、3 ケースの一定応力値についての結果を示した。これら応力値は、前述した伸長曲線の傾きが急変する狭い応力区間の近傍にある値である。

この図のよこ糸方向についての結果をみると、伸長曲線の傾きが急変する応力区間の低応力側の近傍である一定応力 3.2kN/m の場合はクリープは生じていないようにみえるが、高応力側の近傍である一定応力 4.9kN/m および 6.6kN/m の場合はクリープが生じていることが確認できる。一方、たて糸方向についての結果をみると、ど

図 13 2 軸クリープ曲線（応力比 1:1, 室温 21℃）

の一定応力の場合でもクリープは生じていない。

なお、実際には一般に、膜構造の建築物の膜施工時に導入される初期応力の大きさは、上述の一定応力値のような伸長曲線の傾きが急変する狭い応力区間の近傍の応力値に設定されることが多いようである。

(d) 2 軸応力緩和特性^{8), 11)}

次に、初期に応力比を 1:1 に設定して観測時間 24 時間の 2 軸応力緩和試験を実施した結果を図 14 に示す。やはり、3 ケースの初期応力値についての結果を示した。

この図の結果をみて、伸長曲線の傾きが急変する応力区間の低応力側近傍か高応力側近傍かによらず、どちらの糸方向についてもまたどの初期応力値ケース (2.9, 4.9, 6.9 kN/m) の場合も応力緩和現象が顕著に生じることがわかる。また、その応力緩和は初期応力値に依存して生じるのであり、初期応力値が大きいほど応力緩和速度は大きくなる。

膜構造の建築物の設計では、建設後の膜面が風などの荷重の変動にも安定であり続けるために、膜応力が常に適正な大きさに維持されるように考慮される。前述した張力膜構造方式の建築物においては、その建設後に膜応力が低下する因子として応力緩和が重要である。実際に、膜の施工時に初期応力が導入された後、建設後に膜応力が適正な大きさにもどるように膜周辺で張力の再導入が実施されることがある。

設計でのその検討の資料として、応力比 1:1 の下で初期応力 2.9kN/m の 2 軸応力緩和を開始し、10 分ごとに緩和した応力を記録して初期の 2 軸応力状態にもどす繰返し応力緩和試験 (室温 21℃) を実施した結果を図 15 に示す。この結果によると、10 分後の緩和後応力は 3 ~ 4 回の繰返しでかなり初期応力に近く回復すると見ることができ、回復度の収斂には 8 回程度の繰返しを要している。

(e) クラック引裂強度特性^{8), 12), 13)}

平織物の基布に軟質樹脂を薄くコーティングして製造された膜材料は、初期に糸方向のクラックがあると、その直角の方向に引張られたときにクラックが大きく開口して先端から引裂きが生じて急速伝ばをする性質をもつ。そ

図 14 2 軸応力緩和曲線 (応力比 1:1, 室温 21℃)

図 15 10 分間 2 軸応力緩和繰返し回数と緩和応力

して、そのクラック引裂伝ばが発生するときのクラックに直角な糸方向の応力 (クラック引裂強度と呼ぶことにする) が、前述の 1 軸引張破断強度 (図 9 にその例を示した) に比べてかなり小さいということが特徴である。このようなクラック引裂特性は、膜構造の建築物に限らず他分野の膜利用構造物の設計、特に飛行船のような膨らましてつくる構造物の設計では留意すべきものといえる。

40cm の幅をもつ矩形あるいは十字形試験体を用意し、各試験体の中央に 5cm までの初期長さの一つのクラックを糸方向につくった。これらの試験体について 1 軸、あるいは 2 軸引張試験をそれぞれ 2 ケースの引張速度で実施した。クラックに直交する糸方向の応力が次第に大き

図 16 初期クラック長さとクラック引裂強度の関係

くなってクラックの開口が進むと、クラック先端から急に引裂伝ぱが発生する。その瞬間の応力が上述のクラック引裂強度で、これを測定した。図 16 は、1 軸引張強度に対するこのクラック引裂強度の比がクラック初期長さによってどう変わるかを示したものである。

この図の結果によれば、引張速度や 1 軸引張か 2 軸引張かということにあまり依らずに、初期長さ 5mm のクラックがあるとクラック引裂強度は 1 軸破断強度のおよそ半分にまで落ちる。さらに大きな初期クラック、たとえば 5cm であれば 20% ないし 30% にまで落ちる。そして、この図の曲線を初期クラック長さのさらに大きいところへ外挿して推測すると、クラック引裂強度は 1 軸引張強度の 20% 程度に収斂するように思われる。なお、このような強度低下の度合いは、繊維膜材料の基布の繊維密度および試験体幅により異なると思われる。

3・3 膜材料の弾性パラメタの算定法

前述のとおり、膜構造の建築物の設計で実施される膜応力・変形弾性解析のために、膜材料の弾性定数の算定が、どの応力比での 2 軸応力-ひずみ関係にも適合するように成されることが必要である。図 11 や図 12 に示したように、膜材料は特有の非線形性と異方性を伸長特性として持っている。これに対し、歴史的にはさしあたり線形弾性応力解析を実施していく取り組みが成された。算定が必要とされた弾性定数は、線形弾性板の直交異方性解析の場合でいえば二つのヤング率と二つのポアソン比に相当する弾性定数である（相反定理を認めるので未知数としての弾性定数の数は 3 個）。なお、膜材料は平織物がほとんどの膜張力を負担することとその平織物の厚さが定義しにくいものである関係で、膜応力の定義は膜の単位断面積当たりではなく前述のように単位幅当たりの引張力として膜の力学的検討が行われている。それで、ヤング率に相当する膜材料の弾性定数は、次元がヤング率とは異なり単位幅当たりの力で表され扱われている。

こうして今日も一般に、その弾性定数の算定法が標準法¹⁵⁾として実用されている。この標準法は、評価対象として採用した幾つかの異なる応力比（普通はその数は弾性定数の未知数 3 個より多く設定される）の下での伸長曲線（規定の繰返し引張が与えられた後に測定する）に割線を引いて、すべてのその傾きをデータとして最小 2 乗法を適用して算定するものである。この算定法の基本になった最小 2 乗算定法¹⁴⁾は、1983 年に発表された。

なお、前述した 2 軸伸長曲線の非線形特性に対して線形弾性近似をするのではなく、それをできるだけ考慮して膜の材料非線形応力・変形解析を実用的にすることを目指した研究も行われている。^{17), 18)}それは、幾つかの採用された応力比の下で測定された多くの伸長曲線が、たて糸方向およびよこ糸方向の応力の座標軸と、たて糸あるいはよこ糸方向のひずみの座標軸の計 3 本の座標軸がつくる空間に形成する 2 軸伸長特性曲面を提案し、その曲面上に多段に分割した応力の区間ごとに線形近似をして弾性定数を算定して材料非線形性を考慮する多段線形近似法である。

せん断弾性定数については、膜材料でシリンダー試験体を作製して振り試験を行ってこの弾性定数を算定し、その大きさを提示して論じた研究がまず成されている。¹⁹⁾その後、せん断弾性定数についても標準法¹⁶⁾がつくられ今日実用されている。

4 膜利用構造物の位置付け

前節に解説した繊維膜材料は今日膜構造の建築物に使われている一般的材料の一つであり、厚さがおよそ 1mm で 1m² 当たりの重量がおよそ 12.7N である。そして、図 9 の 1 軸伸長曲線の例でみると、およそ 140kN/m つまり 1m 幅当たりおよそ 14 トンの引張強度をもっている。図 8 に示した大スパン膜屋根構造や図 7 に示した巨大膜ドーム“ミレニアムドーム”に使われているのがこの種の繊維膜材料である。

今日の膜利用構造物は、2 節で一部の産業分野での実用例を紹介したが、いろいろの産業分野で活用されている。²⁾ただし、建築物はもちろん船舶、航空機、ダム、タンクなど、膜を使わず鉄やコンクリートによる構造方式で造られている構造物（一般構造物と呼ぶことにする）の多さに比べると、膜利用構造物の数は圧倒的にあるいは無視できるほどに少ない（国内の粉粒体輸送分野で年間数百万個が製造されているフレキシブル・コンテナも一種の膜利用構造物といえるが、これは例外である）。しかし、上述のように、繊維膜材料は極めて軽くまた非常に強い構造部材である。1 節にも述べたように、膜を利用することによって、一般構造物よりも一段と軽く構造物を造ることができる。

その具体例を、大型ドーム建築物の場合で示すことができる。スパン 187m のナゴヤドームの全鉄骨構造屋根の 1m² 当たりの重さはおよそ 3.68kN で、図 8 に示したスパンおよそ 150m の西武ドームの屋根周囲部分鉄骨構造は同 3.63kN である。これらの重量値は、野球場屋根のような大型屋根構造を全鉄骨構造で造ると 1m² 当たりの重量（ほぼ鉄鋼材料の重量といえよう）は 3kN を超えることを示している。これに対し、西武ドーム屋根でスパンの 70% 弱を占める屋根中央部分に採用された膜利用スペースフレーム構造屋根部分は同 1.15kN（前述のとおり膜材料の重量は非常に小さいので、これもほぼ鉄骨材料の重量といえよう）であって、鉄骨構造屋根の場合の 1/3 以下になっている。

周知のとおり、今日の鉄（粗鋼）生産はおよそ 1 億トンであって、そのための炭酸ガス排出量は約 1.7 億トンである。それは、日本の炭酸ガス年間排出量 12.1 億トン余り（2001 年度）の 14% 程度に達している。上述の大型ドーム建築物のように、多くの産業分野で構造物を一部なりとも膜利用によってより軽くあるいは格段に軽く造ることができれば、その分、すべて鉄だけで構造物を造る場合よりも資源・エネルギー消費を削減できることになり、炭酸ガス排出量削減に貢献できることになるであろう。²⁾今日の地球環境時代において、その貢献が期待される構造物として膜利用構造物を位置付けることができると考えられる。

5 お わ り に

産業革命以来、一部の伝統的構造物を除いて、何か構造物を造る必要が生じる度に、人類はそれをためらいなく鉄やコンクリートを材料にして造ることを続けてきたように思われる。そのいわば“習性”は、地球環境の時代に入った現在も、変化の気配をみせていないように思われる。結果として、構造物というものは鉄やコンクリートを材料に使う梁、板や柱を部材にして造るもの（つまり前述の一般構造物）であるということが常識になっているといえるのではないだろうか。しかし、地球環境もよく考えなければならない今日の時代においては、鉄、コンクリート、それにアルミニウムなどの構造材料は、製造のためのトン当たりエネルギー消費が上位にあるので、環境負荷低減を目指した重点削減対象材料であると位置付け認識すべきであろう。

鉄やコンクリートを用いる構造物が重厚長大と形容されることがある。しかし、長大な構造物であっても、一部なりとも膜を利用するように設計を見直して軽薄長大な構造物に接近していくことができることも多いのではないだろうか。前節に述べたように、今や建築分野ではそれは実績として幾つか存在している。著者は、鋼鉄など金属材料で造られるのが常識になっているたとえば船、飛行機、車両なども、一部分なりとも膜利用構造を採用した構造物に転換することがこれからの研究によって可能になると考えている。そして、ここに繊維膜材料の応用・開発の研究課題、およびその構造物への利用研究の課題が未だ残されているように思われる。

参 考 文 献

- 1) 南 宏和, “膜構造物設計のための一膜の弾性理論”, p.3 (1998) 日刊工業新聞社.
- 2) 南 宏和, “膜利用構造物の未来—飛行船・巨大膜ドームからあらゆる構造物へ”, p.68, p.99 および p.127 (2003) 日刊工業新聞社.
- 3) 江本嘉伸, 季刊「民族学」(国立民族学博物館), **24**, 114 (1983).
- 4) 南 宏和, 日本航空宇宙学会誌, **48**, 432 (2000).
- 5) 南 宏和, 多賀 正, 豊田 宏, 瀬川信哉, 呉 鶯, 膜構造研究論文集 '96 (日本膜構造協会), **10**, 93 (1996).
- 6) 南 宏和, 瀬川信也, プイアント航空懇談会誌, **24**, 6 (1997).
- 7) 国土交通省告示第 666 号 (2003).
- 8) 南 宏和, 膜構造研究論文集 '91 (日本膜構造協会), **5**, 61 (1991).
- 9) 南 宏和, 豊田 宏, 呉 鶯, 材料, **41**, 445 (1992).
- 10) 南 宏和, 瀬川信哉, 材料, **41**, 451 (1992).
- 11) 南 宏和, 豊田 宏, 瀬川信哉, 日本建築学会構造系論文報告集, **408**, 1 (1990).
- 12) 南 宏和, 豊田 宏, 呉 鶯, 材料, **41**, 913 (1992).
- 13) 南 宏和, 日本複合材料学会誌, **4**, 81 (1978).
- 14) 南 宏和, 日本建築学会大会学術講演梗概集 (構造系) (関東), 303 (1983).
- 15) 社 日本膜構造協会試験法標準, MSJAJ/M-M02-1995, 18 (1995).
- 16) 社 日本膜構造協会試験法標準, MSJAJ/M-M01-1993, 2 (1993).
- 17) 南 宏和, 日本建築学会構造系論文報告集, **436**, 13 (1992).
- 18) 南 宏和, 山本千秋, 瀬川信哉, 河野義裕, 膜構造研究論文集 '96 (日本膜構造協会), **10**, 45 (1996).
- 19) 南 宏和, 本林信哉, 日本複合材料学会誌, **9**, 147 (1983).