

霊友会弥勒山エアードーム解体に伴う空気膜構造屋根の性能確認試験

丹野 吉雄*¹、山本 秀一*²、高橋 拓*³
斉藤 嘉仁*⁴、小泉 慎*⁵、鈴木 実*⁶
大塚 徹*⁷

はじめに

霊友会弥勒山エアードームは、1984年10月に我が国初の恒久空気膜構造建築物として静岡県賀茂郡東伊豆町大川の地に建設された、膜屋根の規模が約36m×28mという小規模な建物である。当時、建設各社が技術開発のために建設した仮設実験施設などと比較しても、規模においてそれ程大きな差異は無いが、建築物の位置付けとしては従来の仮設建築物から恒久建築物へと大きく飛躍する建築であった。

霊友会弥勒山エアードームの設計及び施工の経験は、同時期に並行して設計が進められていた（仮称）後樂園エアードーム（現東京ドーム）への貴重な経験として受け継がれた。我が国の大規模空気膜構造実現の重要なマイルストーンとして位置付けられる建物といえるが、建設後29年間を経た2013年5月にその役割を終え解体されることとなった。

本報告は解体に先立ち、空気膜構造を構成する各要素の耐久性や、建設当時立案した膜材の維持補修計画等の妥当性の確認などを目的として調査及び検証を行ったものである。

1. 霊友会弥勒山エアードームの概要

1.1 建築の概要

建築主	霊友会
建築地	静岡県賀茂郡東伊豆町大川字本野
建物用途	体育館
設計者	株式会社 竹中工務店
施工者	株式会社 竹中工務店
工期	1983年9月～1984年10月
建築面積	1,924 m ²
延べ床面積	2,029 m ²
軒高	7.6m
階数	地上2階
構造種別	主体構造 RC造
屋根構造	低ライズケーブル補強空気膜構造
屋根スパン	36.49m×28.00m

1.2 屋根構造の概要

①屋根形状

ケーブル間隔	6.75m、対角方向各3本配置
ロングケーブル	スパン 34.823m ライズ 3.500m
ショートケーブル	スパン 29.319m ライズ 3.013m

②ケーブル仕様

構造用スパイラルロープ	1×37 34φ (A種1級)
断面積	6.93 cm ² 、切断荷重 95.6 ton
解析用弾性係数	常時用 E1=1.0×10 ⁶ kg/cm ²
	その他 E2=1.6×10 ⁶ kg/cm ²

③膜材

PTEFコーティングガラス繊維布	t=0.8mm
タテ糸方向：一軸引張強度	150 kg/cm
解析用引張剛性	1540 kg/cm
ヨコ糸方向：一軸引張強度	120 kg/cm
解析用引張剛性	680 kg/cm
解析用せん断剛性	86 kg/cm



写真 1-1 竣工当時の霊友会弥勒山エアードーム (1984)

* 1 ㈱竹中工務店 設計本部
* 2 ㈱竹中工務店 先進構造エンジニアリング本部
* 3 ㈱竹中工務店 技術研究所 建設材料部
* 4 太陽工業(株) 空間デザインカンパニー 設計本部

* 5 中興化成工業(株) アーク・エクスポートプロダクト部
* 6 神鋼鋼線工業(株) エン지니어リング事業部
* 7 ㈱タケチ 技術部 タイヤロックケーブル

1.3 屋根構造の設計概要

- ①設計荷重 屋根自重 約 8kg/m²
 風荷重 設計用速度圧
 $q=60 \cdot H^{1/2}=220 \text{ kg/m}^2$
 風圧係数 風洞実験に基づき設定
 積雪荷重 最大積雪深 60 cm、
 120 kg/m²の均等分布荷重を設定
- ②解析手法 膜材とケーブル材のリンクリング及び
 膜材の異方性を考慮した幾何学的非線形解析

③融雪能力

二重膜内に 40~50℃の温風供給により、積雪 39cm を 1 日で融雪可能な能力を有している

④内圧制御

風速計、降雪計、積雪計、ケーブル張力計、差圧計のセンサー群による自動内圧維持制御

⑤非常用電源

商用電源停電時のために、24 時間の継続運転可能な非常用発電機を装備

1.4 内圧制御の概要

①内圧設定値

平常時	25 mmAq
強風時 (平均風速が 15m/秒を越える場合)	60 mmAq
積雪時 (降雪を感知した場合)	60 mmAq
(積雪が約 17cm を超えた場合)	100 mmAq
(積雪が約 30cm を超えた場合)	145 mmAq

全節点数	437
自由節点数	321
ケーブル要素数	116
膜要素数	732

②送風設備

- ターボファン型外調機 2 台、
 各能力：200 m³/分×230mmAq×15kw，
 回転数制御による可変風量
- 予備送風機 1 台
 能力：200 m³/分×225mmAq×15kw，定風量型
- 予備機を含めた総送風量合計 600 m³/分

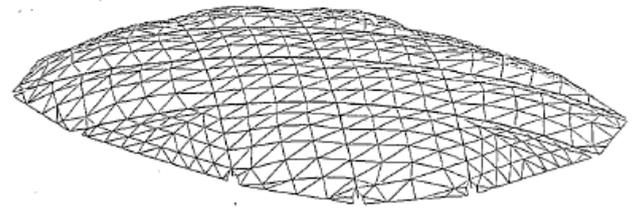


図 1-2 屋根設計時の解析モデル

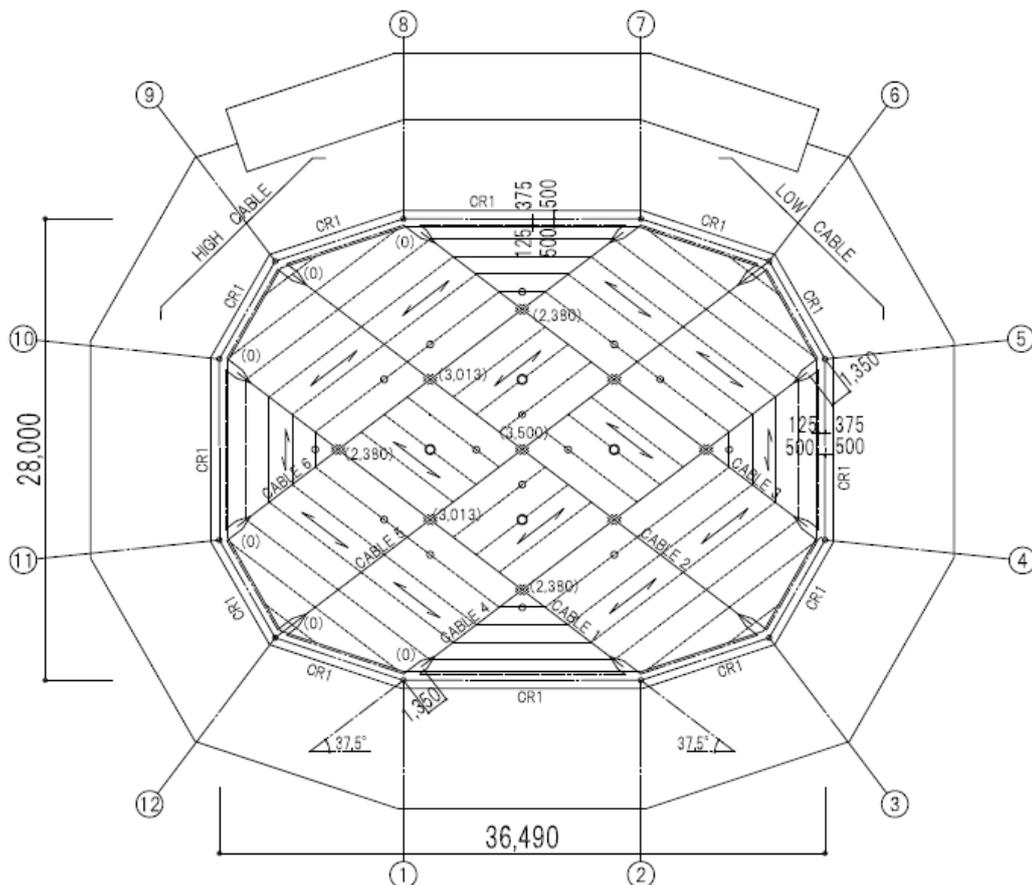


図 1-1 屋根伏図

2. 空気膜構造に関する維持管理の経過

2.1 屋根のデフレートなど

建設地は伊豆半島東部であるが、標高 865mの地にあり、関東の平野部に比べると積雪量は多い地域である。特に関東南岸を発達した低気圧が通過する際には、多くの降雪を記録しており、積雪による数回のデフレートを経験している。

①1986年 3月：

膜端部のコンクリート造の歩廊部分に、屋根面より滑落した雪が堆積し、端部の膜パネルでボンディング（膜の部分的な垂れ下がり）で、除雪しない限り回復が出来ない状況が発生。

基本的な原因は、端部歩廊部分の形状が雪の堆積し易い形状であるため、融解した雪がこの堆積部分で再凍結し、雪溜りが成長したためである。また、内圧管理システムではこのような部分的なボンディングは想定外の事象であったため、状況を正確に把握出来ず、降雪終了後システムは内圧降下の判断を行い、結果としてボンディングをより進行させる結果となった。

このため建築的な対策としては、端部歩廊部分に融雪のためのヒータパネルを設置した。内圧管理システムとしては、降積雪後の減圧に対する制御フローを見直すと共に、減圧に関しては管理者の指示を再確認することに改めた。

②1995年 3月：

大雪によりシステムが自動制御で昇圧出来る最大内圧（100mmAq）まで達し、以降の昇圧は管理者の判断に委ねるべく「警報」を発令したが、管理者が「警報」の意味を誤解し手動にて降圧したため、屋根全体のデフレートに至った。

③1996年 3月：

降雪時に、システムが手動モード（25mmAq）のままとなっており、雪荷重の増加と共に、25mmAq のままで屋根全体のデフレートに至った。

④2011年：

落雷による商用電源喪失で全施設停電となる。非常発電が立ち上がったが、使用中の他の主要施設に優先給電したため、送風停止となりデフレートに至った。

2.2 屋根の主要なメンテナンス

定期的な点検や部分的な改修以外の、維持管理に係わる主要な記録を以下に記す。

①2000年 8月：

冬季積雪期のデフレート事故を防止することを目的として「霊友会弥勒山エアードームの内圧管理システムの改善」を提案。

その骨子は、センサー群の総点検による健全性の確保、維持管理御担当の方々への空気膜構造の内圧管理システムに関する再度の周知、システムと管理者とのインターフェースを更新充実することによる、維持管理のブラックボックス化の防止などである。

②2000年 9月：

エアードームの漏水漏気対策を中心とした、維持保全計画「霊友会弥勒山エアードーム改修計画」を作成し一部実施。

③2006年 8月：

エアードームの屋根部分に関して、以下の項目の総合的な保全工事を実施した。

- ・膜屋根面の傷、コーティングの損傷の調査及び補修
- ・カバーゴムの一部交換
- ・カバーゴム両サイドに水密性確保のサイドシート接着

④2012年 2月：

霊友会弥勒山建立 50周年を記念した「平成の大改築」に着手。

⑤2012年 8月：

「平成の大改築」の一環として、エアードームに代わる「小谷ホール」が着工。

⑥2013年 5月：

「小谷ホール」の完成に伴い、エアードーム解体に着手。解体に際して空気膜構造に係わる一連の調査及び実験を実施した。

2.3 維持管理者へのヒアリング

本建物は小規模であるが、敷地内には霊友会の主要な施設群があり、維持管理は十分な体制で行われてきた。以下に維持管理担当者に空気膜構造に関して直接ヒアリングを行った際のコメントを項目ごとに整理して示す。

①内圧の管理について

- ・積雪に伴う数度のデフレートを経験し、冬季1月～2月の夜間は常時融雪モードとしていた。
- ・降雪時は手動モードにて早めに昇圧を行う管理としていた。
- ・強風時には外部風速の変動により、自動制御の設定値が頻繁に変更される（バタリング）ので、手動にて安定させることも少なくなかった。

②屋根の積雪状況について

- ・竣工後端部歩廊部分にヒーターの増設を行ったが、十分な除雪効果が得られず、消火栓からの水で雪を飛ばすことも必要であった。夜間作業となることが多く苦勞した。
- ・積雪によるデフレート後の除雪作業では、膜面を傷つけ易く細心の注意が必要であった。
- ・竣工当初に比べると膜面からの滑落雪の性能が低下したように感じる。

③内部環境について

- ・膜面の結露は殆ど無く、内部の換気状況も良好であった。
- ・静寂時には回転扉からの漏気音が聞こえる。
- ・屋根面に吊り物が無いので、強風時に揺れによる不安は感じなかった。
- ・降雨時には膜面を叩く雨音で、室内では話が聞き取り難かった。
- ・昼間の使用時には、雲が流れると膜面に影がチラつくこともあった。

④安全管理について

- ・回転扉には常時誘導員を配置していたので、入退場に伴う事故は無かった。
- ・身障者などが利用するバランス扉は、インターロックの同調など調整を必要とした。

3. 膜屋根面の劣化・損傷に関する目視調査

膜屋根は竣工後に数度の総合点検を行っているが、今回の解体に伴い 29 年後の膜面全体の現況を目視にて再確認した。対象は屋外に露出している膜材とカバーゴムの目視調査とした。

3.1 膜材及びカバーゴムの損傷目視調査

図 3-1 に膜材、図 3-2 にカバーゴムの目視調査による劣化及び損傷部位の位置及び分布を示す。

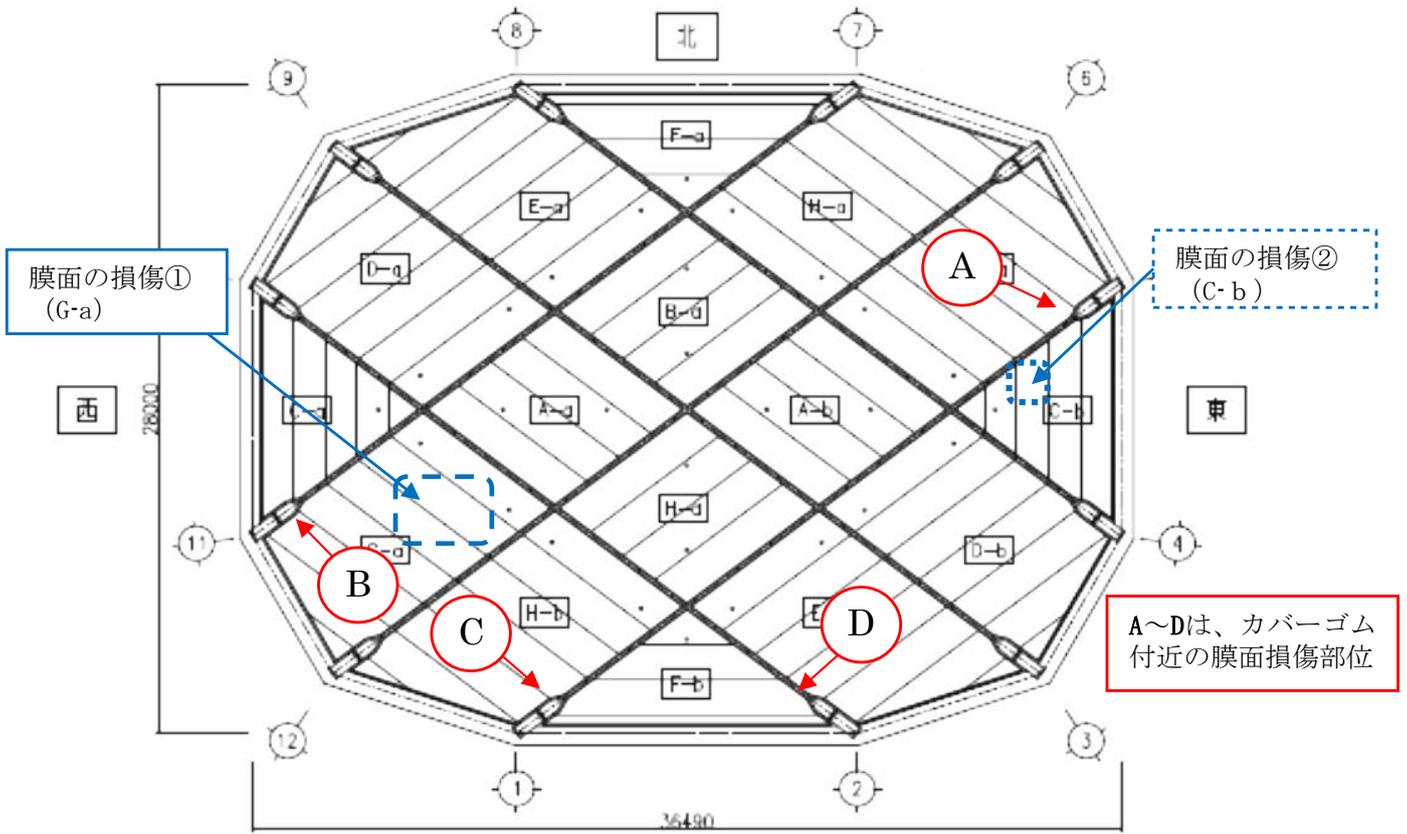


図 3-1 膜材の目視調査結果

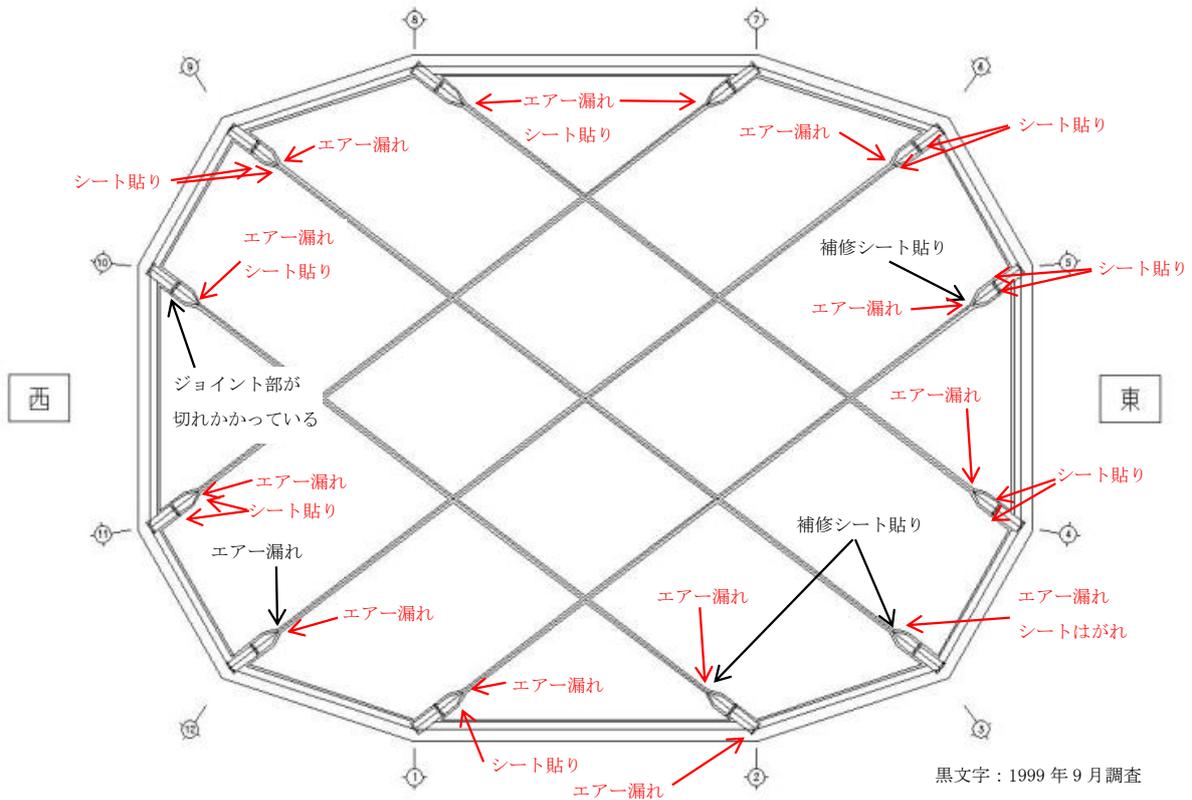


図 3-2 カバーゴムの目視調査結果

3.2 損傷部位の状況

写真 3-1 から写真 3-6 に、膜面及びカバーゴムの不具合部分の状況を示す。膜材の損傷①部分（写真 3-1）は、傷の状況などから雪下ろし時の除雪作業時に生じたものと考えられる。損傷②部分（写真 3-2）は原因の特定はできないが、基布に達しないコーティング表面の長い傷であった。

屋根面中央部のカバーゴムは 2006 年に取り換え工事を行っており、全体的に健全で、表面上の目立った劣化は見られず、交点部においてもエアール漏れは無かった。一方、ケーブル端部定着部は、竣工時のままのカバーゴムであり平面形状の変化する殆どの部位で、シールやゴムパッチの補修が行われている。ケーブル定着部先端の分岐部では、その殆どでエアール漏れが生じている（写真 3-3～3-6）。

空気膜構造においては、建設時のインフレート、および外荷重の影響によるケーブルの動きに追従するために、ケーブル定着部には特有なヒンジ機能が設けられている。このヒンジの回転軸に対するディテール上の微小な偏心、および面外ねじれなどが繰返し作用したことで、カバーゴムや膜面に不具合が集中する結果となっている。ディテール上この部分のカバーゴムの交換は容易では無く、設計上の改良が求められる部位である。



写真 3-3 カバーゴム付近の損傷 A 部



写真 3-4 カバーゴム付近の損傷 B 部



写真 3-5 カバーゴム付近の損傷 C 部



写真 3-1 膜面の損傷① (G-a) 部分

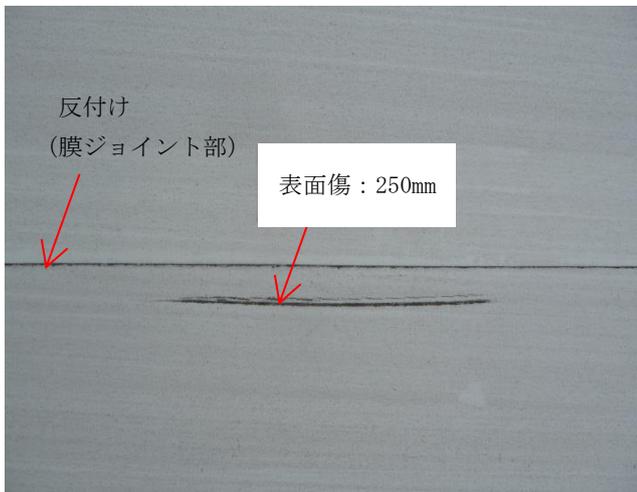


写真 3-2 膜面の損傷② (C-b) 部分



写真 3-6 カバーゴム付近の損傷 D 部

4. ケーブル材の耐久性調査結果

4.1 概要

空気膜構造屋根に使用していたケーブル材の耐久性についての調査内容およびその結果を以下に示す。

4.2 ケーブル

ケーブルに使用しているワイヤロープは全て同一径で同一仕様であり、その基本諸元を表 4-1 に示す。

表 4-1 ワイヤロープの諸元

規格	JSS 規格 A 級 1 種
構成	1×37
公称径	34 mm
許容差	0～1.7 mm
より方	Z より
めっきの有無	溶融亜鉛めっき
切断荷重	95.6 ton
単位重量	5.68 kg/m
断面積	693 mm ²

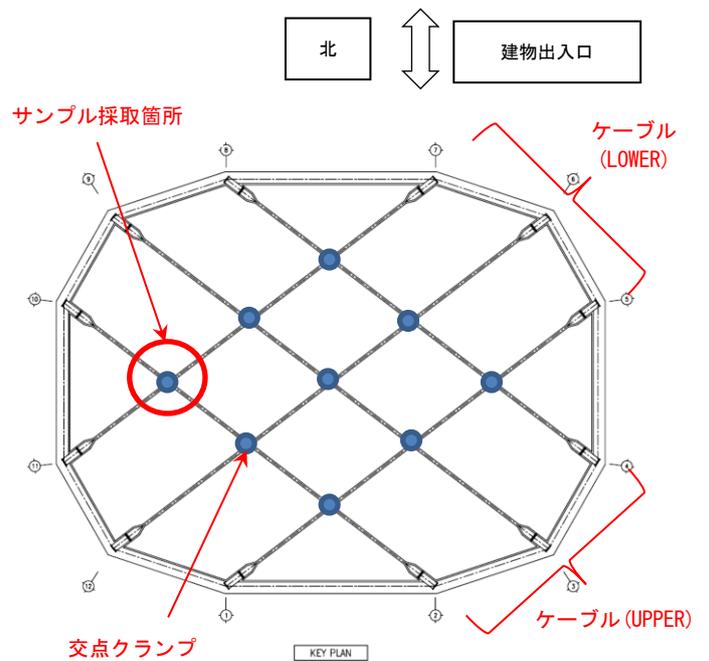


図 4-1 サンプル採取箇所

4.3 サンプル採取

1) サンプル採取箇所

インフレート・デフレート作業時(平成 25 年 5 月 13 日実施)に、目視にてケーブルの表面状況を観察したところ、発錆は確認できなかった。そのため、発錆部分を対象にせず、交点クランプで常時締め付けられている部分をサンプルの対象とした。また、その中でも滑動力が大きいと考えられる外周部を対象とし、図 4-1 に示す交点クランプ(写真 4-1)近傍のケーブルをサンプル採取箇所として決定した。

2) サンプル採取

デフレート時にテープでマーキング(写真 4-2)を行い、解体時にマーキング部を切断してサンプルを採取した。採取したサンプルを写真 4-3 に示す。交点クランプの上側(膜面側)にあったサンプルを『上』、下側にあったサンプルを『下』と表示している。

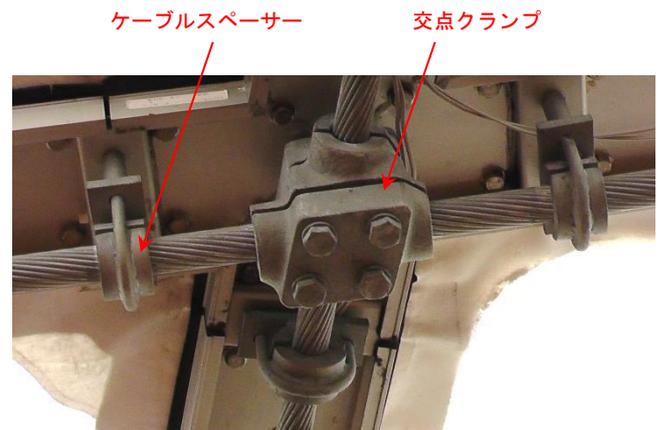


写真 4-1 交点クランプ

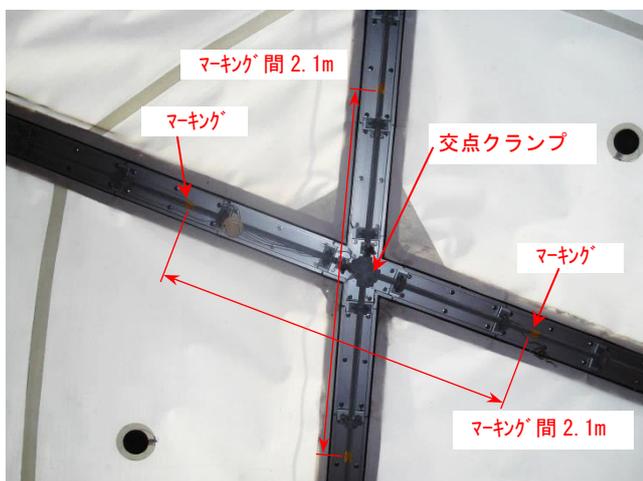


写真 4-2 マーキング(室内からの見上げ)



写真 4-3 採取サンプル



写真 4-4 サンプル状況 1



写真 4-5 サンプル状況 2



写真 4-6 サンプル状況 3



写真 4-7 サンプル状況 4

3) サンプル状況

サンプルの状況を写真 4-4~4-7 に示す。緑色のペンキが付いている箇所は、建設ときに交点クランプ位置をマーキングした部分であり、交点クランプを締め付けた跡が確認される。写真 4-1 に示されるケーブルスペーサーの跡が、周囲に比べて白っぽくなっており、締め付けた跡が確認できた。2 本ともに錆は確認できず、表面状況に顕著な差は無かった。

4) 試験用サンプル製作

採取した 2 本のサンプルに顕著な差が無かったことから、1 本はロープ試験、1 本は素線試験を行うものとした。以下に示す試験を実施するため試験用サンプルの製作を行った。

① ロープ試験

< 試験サンプル >

『上』側のサンプルを使用し、図 4-2 に示す両端亜鉛コーンを铸込んだサンプルを製作

< 試験項目 > ロープ径測定、引張荷重、外観

② 素線試験

< 試験サンプル >

『下』側のサンプルを使用し、図 4-3 に示す箇所から素線試験用サンプル [1], [2] を採取

[1]: 交点クランプ、ケーブルスペーサー跡を含むサンプル (写真 4-8)

[2]: 金物跡を含まないサンプル (写真 4-9)

< 試験項目 > 素線径測定、引張荷重、めっき付着量、外観

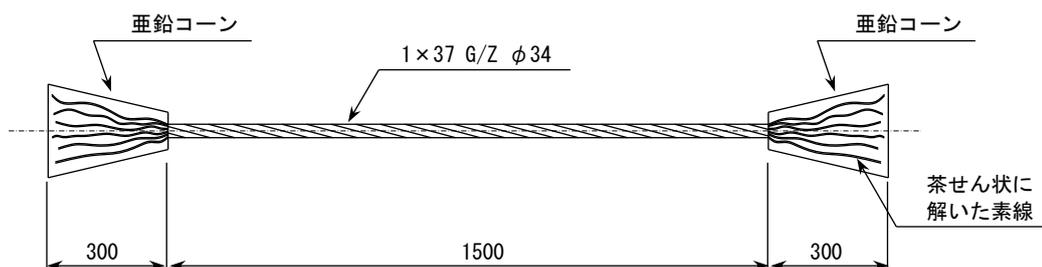


図 4-2 ロープ試験サンプル

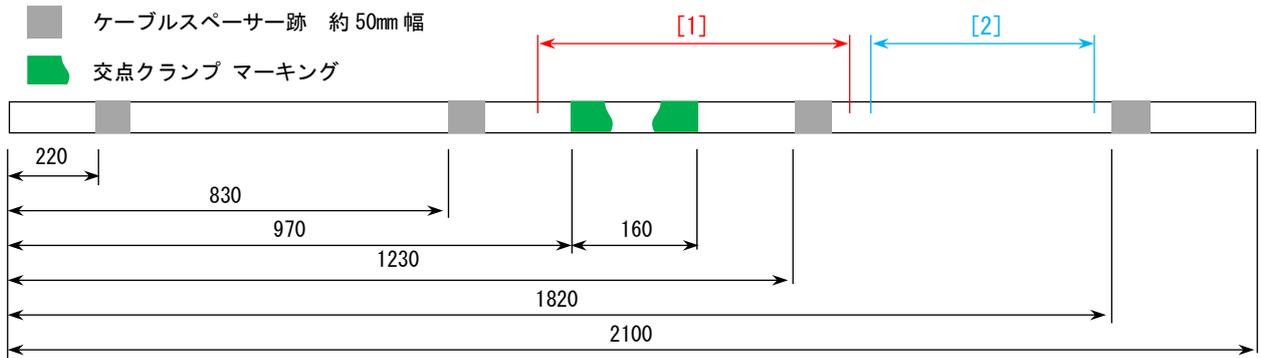


図 4-3 ロープの状況と素線サンプル採取箇所



写真 4-8 [1]サンプル採取



写真 4-9 [2]サンプル採取

4.4 ロープ試験

1) 外観状況

ロープ試験サンプルの外観状況を写真 4-10～-15 に示す。



写真 4-10 交点クランプ部



写真 4-11 交点クランプ部拡大



写真 4-12 交点クランプとケーブルスペーサー跡



写真 4-13 ケーブルスペーサー跡拡大



写真 4-14 金物跡が無い部分



写真 4-15 金物跡が無い部分拡大

2) 引張試験

アムスラー型 2000kN 引張試験機を用いて図 4-2 に示すロープ試験サンプルの引張試験を行った。試験時に計測したロープ径の計測結果を表 4-2、試験機への設置状況を写真 4-16、試験後の状況を写真 4-17~4-19 に示す。また引張試験時荷重-伸び関係を図 4-4、引張試験結果を表 4-3 に示す。

表 4-2 ロープ径計測結果

		平成 25 年 7 月 9 日 実測値	昭和 59 年 6 月 27 日 試験成績表
ロープ の径	公称	—	34mm
	実測	34.2mm	34.3mm
平均値		34.2	
実測値		34.20	
		34.19	
		34.24	
		34.23	
		34.20	
		34.18	

※6 回の実測値の平均値をロープの径の実測としている。

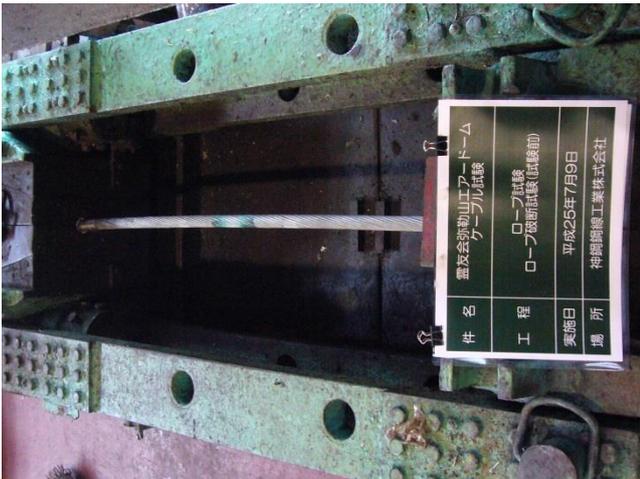


写真 4-16 試験機設置状況



写真 4-17 引張試験後の状況

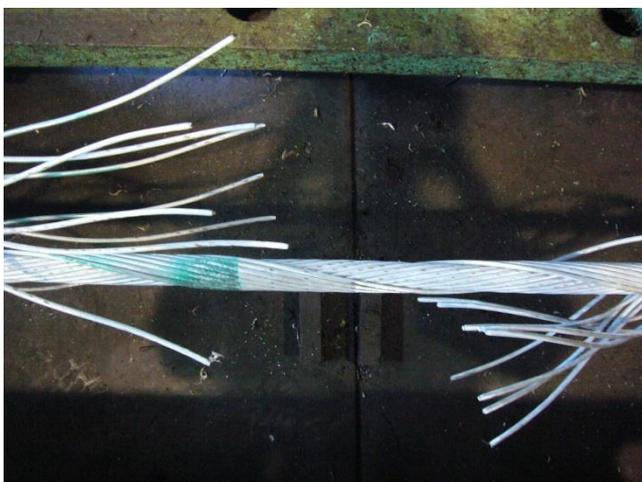


写真 4-18 破断部の状況

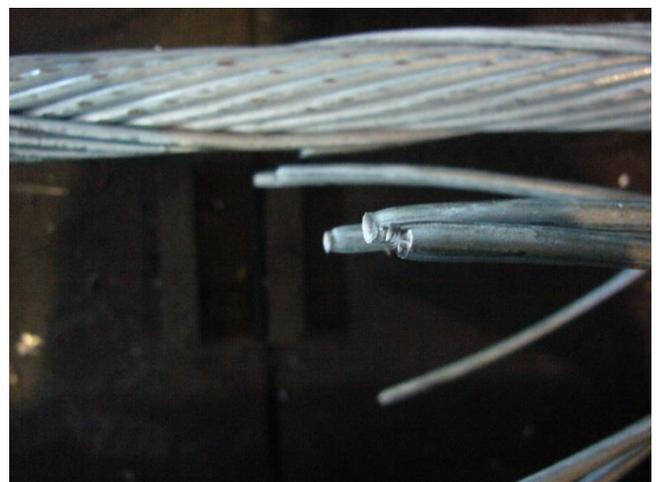


写真 4-19 破断部の状況拡大

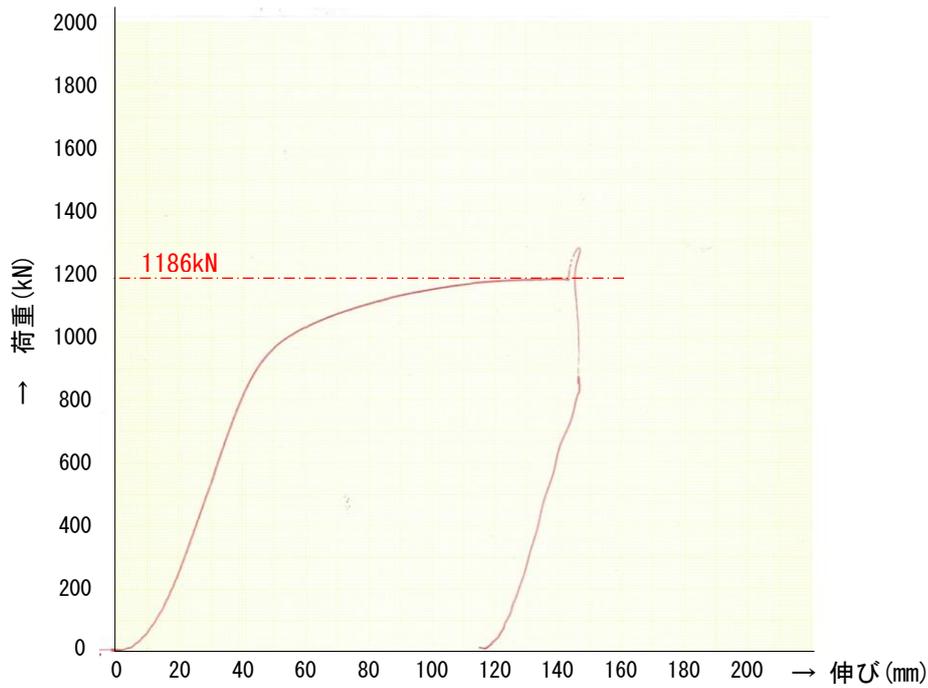


図 4-4 荷重 (kN) - 伸び (mm) 関係

3) 試験結果

外観状況は、写真 4-11、4-13 に示される交点クランプおよびケーブルスペーサー部の跡以外は、写真 4-14、4-15 に示されるように、発錆は確認できなかった。溶融亜鉛めっきも残っている健全な状況であると考えられる。

引張試験における破断位置はケーブルスペーサー部の近傍(写真 4-18)となったが、切断荷重は建設時の成績表の数値と同等の結果(表 4-3)になった。そのため、交点クランプおよびケーブルスペーサーのボルトの締め付けによる跡は、切断荷重に対して大きな影響は与えていないと判断される。

表 4-3 引張試験結果

		平成 25 年 7 月 9 日 実測値	昭和 59 年 6 月 27 日 試験成績表
規定切断荷重		—	95.6 ton (938kN)
実際切断荷重		1186kN	116ton (1138kN)
破断 状況	位置	ロープ部	
	本数	10 本(素線)	
	心の 状況	破断せず	

4.5 素線試験

素線試験は、写真 4-8、4-9 に示すサンプル[1]、[2]をそれぞればらし、1本ずつの素線にして、各種試験を行った。サンプル[1]、[2]を素線にばらした状況を、写真 4-20~4-27 に示す。素線試験については、表 4-4 の試験項目および試験本数で実施した。以下に各試験について示す。

表 4-4 素線試験項目・試験本数

	最外層	内層 (2層目)	内層 (1層目)	心線	
素線数	18	12	6	1	
引張試験	6	4	2	1([1])	
めっき付着量試験	6	4	2	1([2])	

※心線のサンプルは[1]、[2]の1本ずつしかないため、[1]のサンプルを引張試験、[2]のサンプルをめっき付着量試験に用いた。



写真 4-20 サンプル[1]ばらし状況

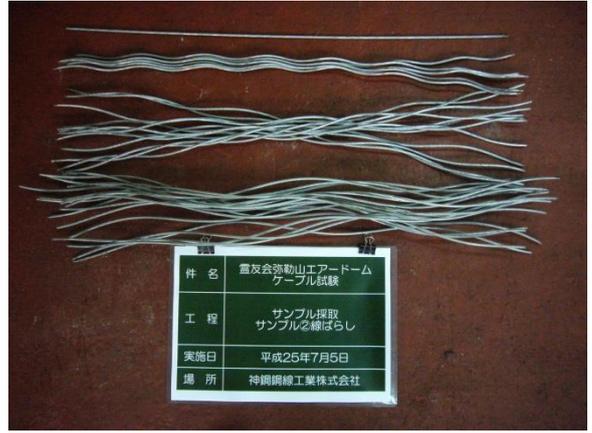


写真 4-21 サンプル[2]ばらし状況



写真 4-22 サンプル[1]内層 2 層目表面



写真 4-23 サンプル[2]内層 2 層目表面



写真 4-24 サンプル[1]内層 1 層目表面



写真 4-25 サンプル[2]内層 1 層目表面



写真 4-26 サンプル[1]心線表面



写真 4-27 サンプル[2]心線表面

1) 外観状況

素線サンプルの外観状況を、交点クランプ部について写真 4-28、ケーブルスペーサー部について写真 4-29、金物の跡を含まない部分について写真 4-30 に示す。



写真 4-28 交点クランプ部素線拡大



写真 4-29 ケーブルスペーサー部素線拡大

2) 引張試験・めっき付着量試験

引張試験、めっき付着量試験について、計測項目、計測方法を表 4-5 に、サンプル[1]の結果を表 4-6 に、サンプル[2]の結果を表 4-7 に示す。

表 4-5 計測項目、計測方法

計測項目	計測方法
素線径	マイクロメーター (写真 4-31)
引張荷重	アムスラー型引張試験機 (写真 4-32)
めっき付着量	塩化アンチモン法



写真 4-30 素線拡大

表 4-6 素線サンプル[1]試験結果

	実測値				昭和 59 年 6 月 27 日 試験成績表			
	No.	素線径 (mm)	引張荷重 (N)	めっき 付着量 (g/m ²)	No.	素線径 (mm)	引張荷重 (N)	めっき 付着量 (g/m ²)
心線	1	5.18	36,200	338	心線 1H	5.17	35,200 (3,590kg)	339
					心線 1T	5.17	35,400 (3,610kg)	380
内層 (1層目)	1	4.87	33,100	328	側線 1H	4.89	31,100 (3,170kg)	349
	2	4.87	33,000	341	側線 1T	4.89	31,500 (3,210kg)	340
内層 (2層目)	1	4.86	33,400	335				
	2	4.87	33,500	328				
	3	4.87	33,200	334				
	4	4.87	33,000	321				
最外層	1	4.87	33,500	334				
	2	4.87	33,100	310				
	3	4.87	32,900	329				
	4	4.87	33,700	347				
	5	4.87	33,600	375				
	6	4.87	33,500	322				
		平均値	33,292					
		最大値	33,700					
		最小値	32,900					

表 4-7 素線サンプル[2]試験結果

	実測値				昭和 59 年 6 月 27 日 試験成績表			
	No.	素線径 (mm)	引張荷重 (N)	めっき付着量 (g/m ²)	No.	素線径 (mm)	引張荷重 (N)	めっき付着量 (g/m ²)
心線	1	5.17	36,600	342	心線 1H	5.17	35,200 (3,590kg)	339
					心線 1T	5.17	35,400 (3,610kg)	380
内層 (1層目)	1	4.89	33,300	333	側線 1H	4.89	31,100 (3,170kg)	349
	2	4.87	33,400	325	側線 1T	4.89	31,500 (3,210kg)	340
内層 (2層目)	1	4.87	33,500	315				
	2	4.87	33,400	332				
	3	4.88	33,500	327				
	4	4.87	33,500	318				
最外層	1	4.87	33,400	309				
	2	4.86	33,100	328				
	3	4.87	33,200	317				
	4	4.87	33,500	346				
	5	4.86	33,500	362				
	6	4.87	33,400	339				
		平均値	33,392					
		最大値	33,500					
		最小値	33,100					



写真 4-31 素線径の計測



写真 4-32 素線引張試験

3) 試験結果

素線の外観状況は、素線をばらした内層の表面では、素線同士が接触している部分に圧痕が見られる。最外層が Z より、内層が S よりであるため、内層 2 層目は点接触している跡が見られ(写真 4-22~4-23)、内層 1 層目および心線については線接触している跡が確認できる(写真 4-24~4-27)。最外層は、交点クランプおよびケーブルスペーサーの金物接触部以外は、写真 4-30 に示すような健全な状況であった。

素線の引張試験は、サンプル[1]、[2]に関わらず、いずれの素線においても成績表の数値と同等の引張荷重となり、上述の圧痕や金物の接触部の影響は見られない結果となった。めっき付着量においても成績表と同等の結果が得られ、現在でも規格値の 300g/m² を超えるめっき付着量であることが確認できた。

4.6 ケーブル材の耐久性調査結果のまとめ

ロープ試験、素線試験において、引張強度の低下は見られず、めっき付着量についても竣工時の規格値を満足する結果であった。ロープの表面に錆は確認できず、素線をばらした内層の素線表面においても錆は確認できなかった。

ケーブルの端末付近の調査を行っていないため、ケーブル全体としての評価はできないが、ケーブルの設置環境は基本的に屋内空調環境下であり、素線段階で亜鉛メッキを施している本ケーブルでは、耐久性上問題となるような劣化は認められなかった。

今後も同様の環境で使用される状況であれば、より長期の継続使用に対しても問題が無いと考えられる。

5. カバーゴム材の耐久性調査結果

5.1 カバーゴム施工、改修、解体経緯

- ・ 竣工時施工：1984年6～7月
- ・ 改修工事：2006年7月（ケーブル定着部、外周部を除く中央部全て）
- ・ 解体検査日：2013年5月13日 約29年経過

5.2 試験項目

表 5-2-1 目視調査結果

検査項目	部 位	方 法
外観検査	現場にて屋根の全範囲	目視
物性試験 硬さ 引張強さ 伸び	回収した4箇所から サンプリングし試験 室にて試験	JIS A 5756
表面観察	回収した4箇所から サンプリングし試験 室にて観察	マイクロスコープ による表面観察

5.3 回収部位

カバーゴム材の材質は、すべて 黒色のクロロプレンゴム (CR)である。カバーゴム材については1999年、2006年に現地から回収した製品の一部分について試験を実施している。今回は過去の回収とほぼ同じ部位を対象とした。「EXP ゴム」とは、ケーブル端部でケーブルの回転移動に追従させる機能の蛇腹状のゴムの略称である (図 5-3-4)。

表 5-3-1 回収部位

部 位	平面 図内 No	部品名称		
		カバーゴ ム室外側	カバーゴ ム室内側	EXP ゴム
頂部側 交点周辺	F	○	○	
ケーブル 定着部周辺	②	○	○	○
〃	⑥	○	○	○
〃	⑧	○	○	○

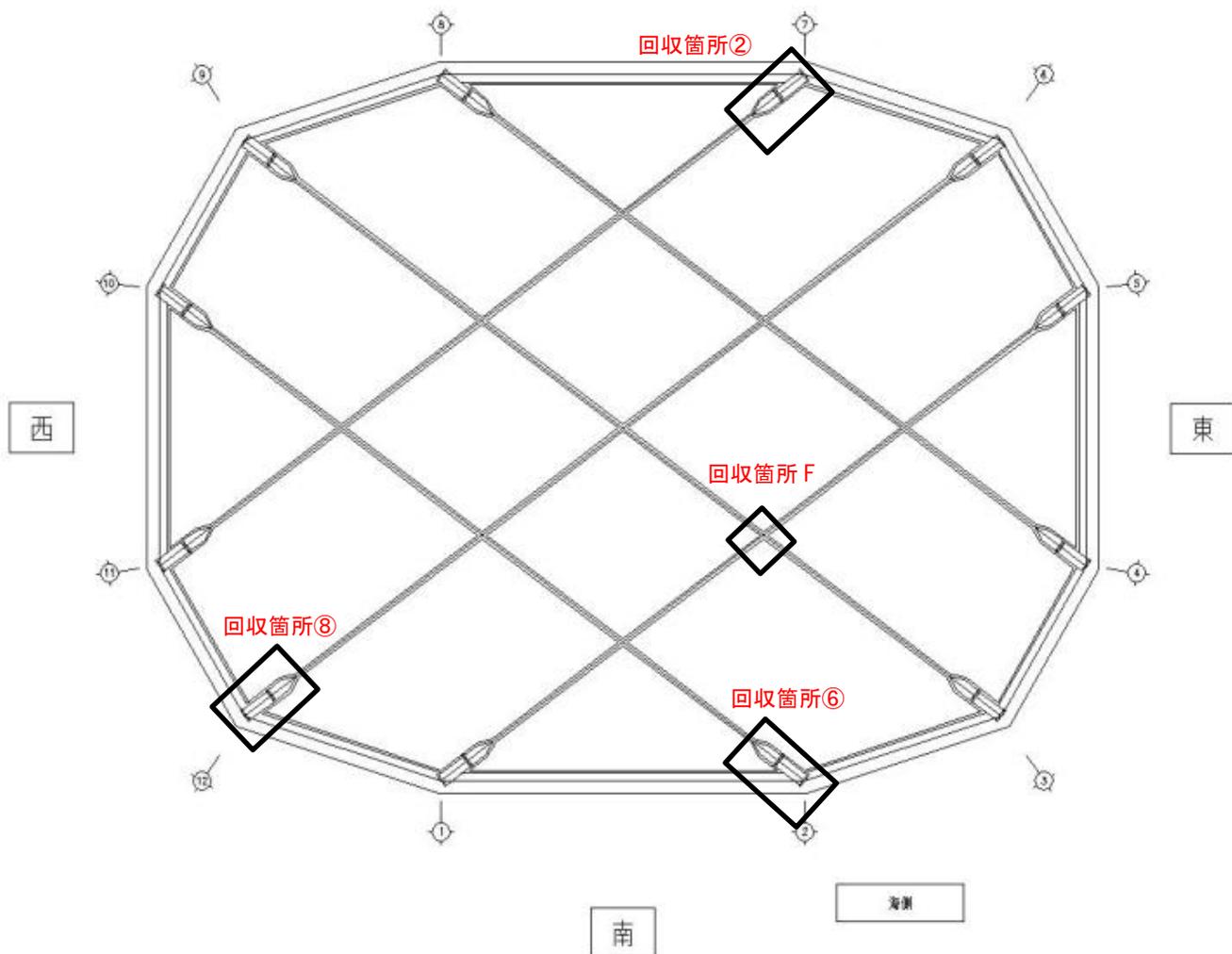


図 5-3-1 回収部位伏図

5.4 試験片

室外側のゴム表面に汚れや微小な傷が見られたので、表面に紙やすりをかけて試験片とした。試験片の採取位置を図5-4-1～5-4-2、写真5-4-1～5-4-4に示す。

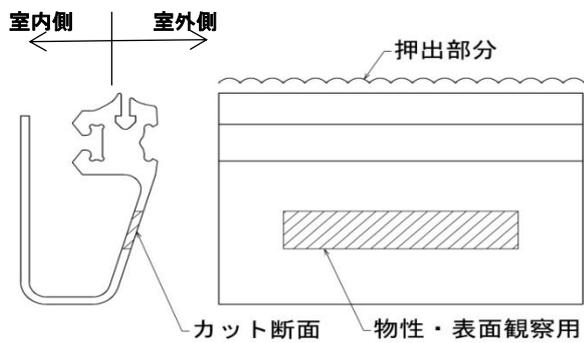


図 5-4-1 回収部位図

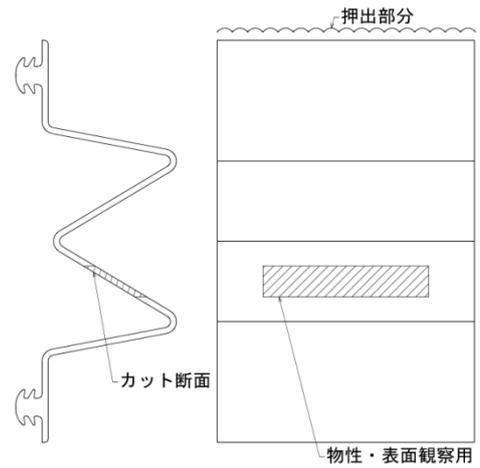


図 5-4-2 回収部位図



写真 5-4-1 頂部側交点周辺 F カバーゴム室内側サンプリング位置

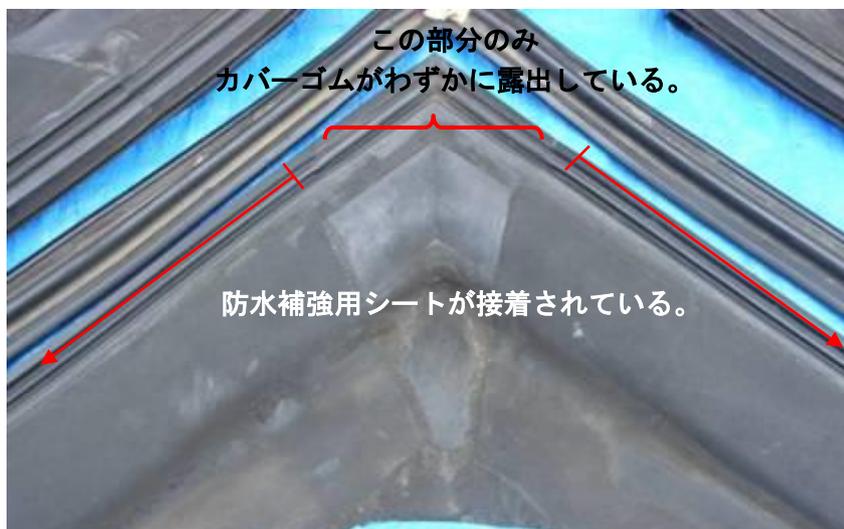
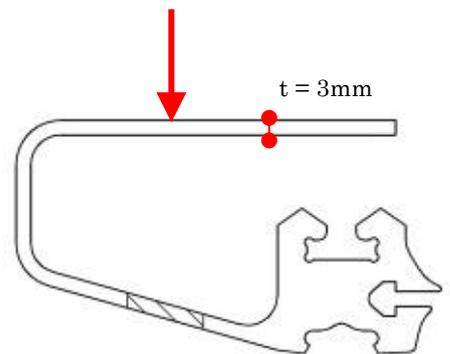


写真 5-4-2 頂部側交点周辺 F カバーゴム室外側サンプリング位置

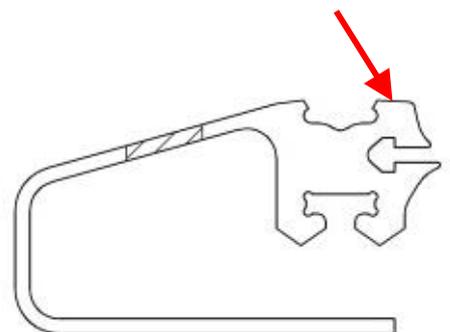




写真 5-4-3 ケーブル定着部 ②⑥⑧カバーゴムサンプリング位置



写真 5-4-4 ケーブル定着部 EXP ゴムサンプリング位置

回収試験部位の外観写真を写真 5-4-5～5-4-8 に示す。



写真 5-4-5 交点 F



写真 5-4-6 ケーブル定着部⑥先端



写真 5-4-7 ケーブル定着部⑥



写真 5-4-8 ケーブル定着部⑧

5.5.1 カバーゴム部分の物性試験

表 5-5-1～5-5-2 に物性試験結果を示す。なおカバーゴムは 2006 年の回収品の値も記載する。表中の () 内の数値は、硬さでは変化数、その他は残率を示す。

図 5-5-1～5-5-2 には、伸びと硬さについての变化を示す。

表 5-5-1 ケーブル定着部のカバーゴムの外部側物性

試験片 (経過年)	新品 初期値 1984年	1999年 (15.4年)	2006年 (22年)	2013年(29年)		
		No. ⑥ 南	No. ⑩ 南頂部	No. ② 北東	No. ⑥ 南	No. ⑧ 南西
試験項目						
硬さ デュロメータ A	75	86 (+11)	89 (+14)	88 (+13)	89 (+14)	89 (+14)
引張強さ (MPa)	16.3	14.1 (87%)	14.5 (89%)	14.9 (91%)	14.8 (91%)	15.7 (96%)
伸び(%)	220	130 (59%)	120 (55%)	100 (45%)	105 (48%)	95 (43%)

表 5-5-2 ケーブル定着部のカバーゴムの内部側物性

試験片 (経過年)	新品 初期値 1984年	2013年(29年)		
		No. ② 北東	No. ⑥ 南	No. ⑧ 南西
試験項目				
硬さ デュロメータ A	75	84 (+9)	84 (+9)	84 (+9)
引張強さ(MPa)	16.3	15.2 (93%)	15.3 (94%)	14.9 (91%)
伸び(%)	220	155 (71%)	175 (80%)	155 (71%)

カバーゴム材料は、1987年(東京ドーム用ガスケット製作)以降耐久性(動的)、耐候性向上を図ったものに改良している。表 5-5-3 に改修工事を行った(改良材料)カバーゴムの物性試験結果を示す。

表 5-5-3 交点 F 部(改修工事後)のカバーゴムの物性

試験片 (経過年)	新品 初期値 2006年	2013年 (7.0年)	2013年 (7.0年)
		No. F 南東 外部側	No. F 南東 内部側
試験項目			
硬さ デュロメータ A	76	77 (+1)	76 (0)
引張強さ(MPa)	13.8	15.4 (112%)	15.9 (115%)
伸び(%)	250	200 (80%)	245 (98%)

材料別、内部外部別の伸びの経年変化

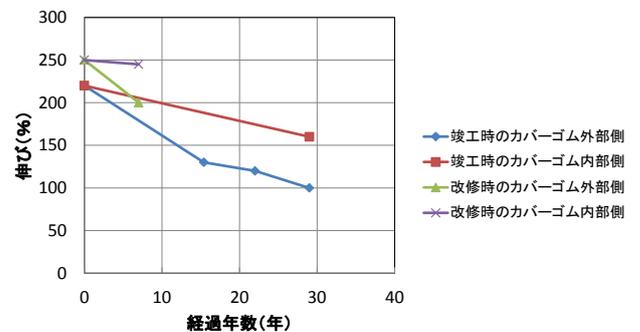


図 5-5-1 材料別、内部外部別の伸びの経年変化

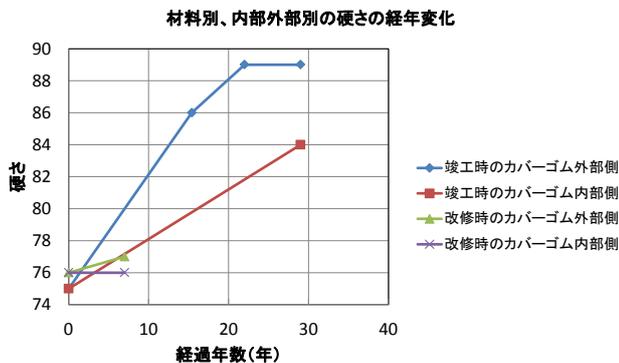


図 5-5-2 材料別、内部外部別の硬さの経年変化

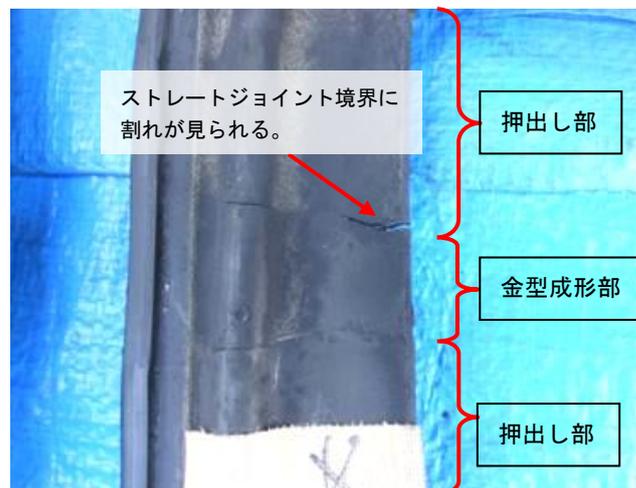


写真 5-6-1 No⑥ケーブル定着部ジョイントゴム

5.5.2 ケーブル定着部 (EXP ゴム) の物性試験

表 5-5-4 にケーブル定着部 (EXP ゴム) の物性試験結果を示す。表中の () 内の数値は、残率を示す。

表 5-5-4 ケーブル定着部 (EXP ゴム) の外部側物性

試験項目	試験片 (経過年)	新品 初期値 1984年	2013年 (29年)		
			No. ② 北東	No. ⑥ 南	No. ⑧ 南西
硬さ デュロメータ A		65	79 (+14)	78 (+13)	79 (+14)
引張強さ (MPa)		17.8	15.1 (85%)	15.4 (87%)	14.7 (83%)
伸び (%)		540	305 (56%)	325 (60%)	295 (55%)

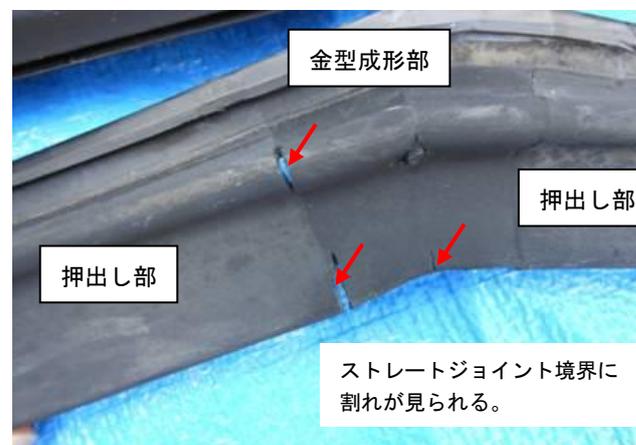


写真 5-6-2 No⑥ケーブル定着部ジョイントゴム

5.6 表面観察

カバーゴム、EXP ゴムの表面および断面を観察する。

5.6.1 目視表面観察

①いずれのサンプルも室外側の表面を触るとうっすら黒くなる。これは『チョーキング』と呼ばれ、紫外線・熱・水分・風等でゴムの表面が劣化し、ゴム中の配合剤がチョーク (白墨) のような粉状になってしまう現象や状態を示す。今回の程度は過去の回収品と比較するとあまりひどくなく、室内側にはこの現象は見られなかった。

②金型成形部と押し出し部の境界に割れがある (写真 5-6-1~5-6-2)。ジョイント部分が強度的に一番の弱点になっている。

5.6.2 拡大鏡による表面・断面観察

拡大鏡で外部側と内部側の表面を撮影した (写真 5-6-3~5-6-8)。

①外部側

表面に浅い亀裂が見える。亀裂の深さは $50\mu\sim 100\mu$ 程度と極浅い。このようなゴムの亀裂をクレージングと呼ぶ。ゴムの亀裂の代表的なもので劣化の要因が紫外線による場合、このような浅い亀裂が全面に見られるケースが多い。深さが浅いので、厚みが 3mm ある製品の場合では、大きく性能に影響しない場合が多い。

②内部側

外部側のような亀裂は見られず健全である。



写真 5-6-3 No⑧EXP ゴム外部側表面

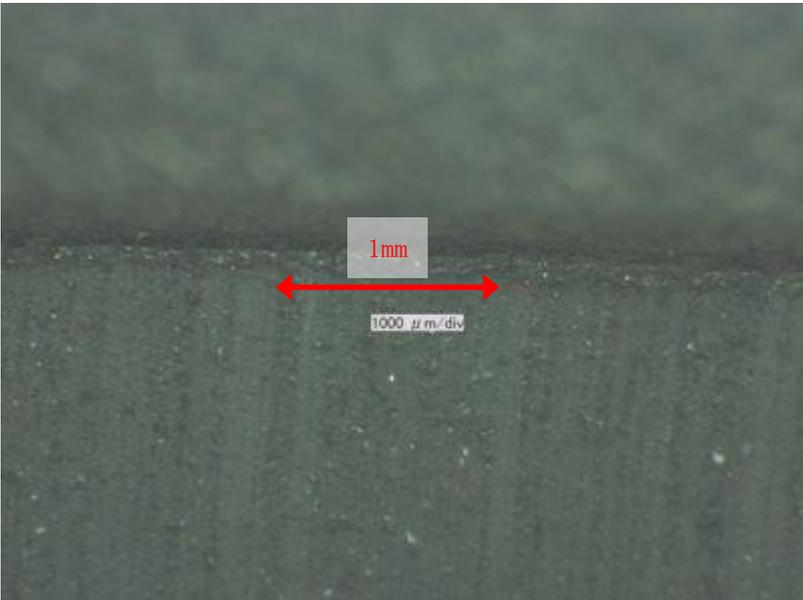


写真 5-6-4 No⑧EXP ゴム 断面

表面から 0.1 mm程度の浅い亀裂（クレージング）

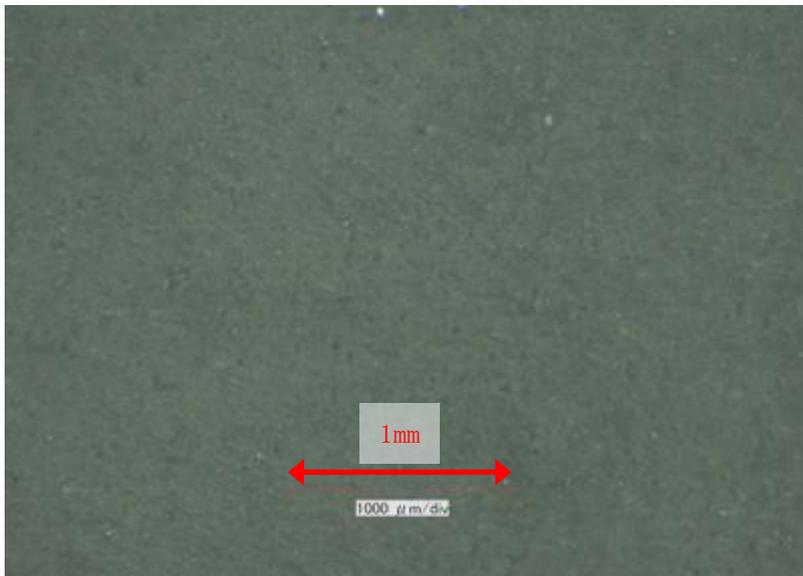


写真 5-6-5 No⑧EXP ゴム 内部側表面

異常なし



写真 5-6-6 No⑧カバーゴム 外部側表面



写真 5-6-7 No⑧カバーゴム 断面

表面から 0.1 mm程度の浅い亀裂（クレージング）

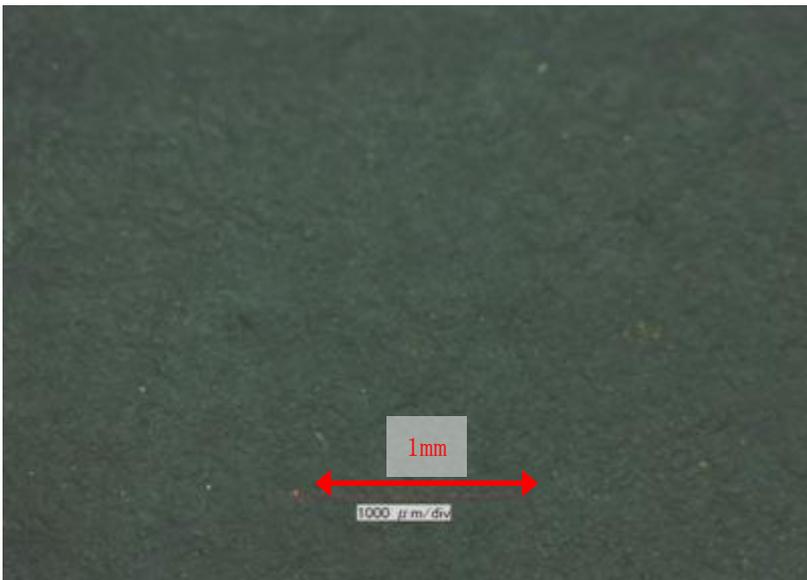


写真 5-6-8 No⑧カバーゴム 内部側表面

異常なし

5.7 補足試験

7年前の改修工事で、カバーゴムと膜材を跨ぐ形で貼った、防水シートのカバーゴムとの接着強度を測定した。試験片のサイズを図5-7-1、試験方法を図5-7-2に示す。接着強度と剥離の状態を表5-7-1～5-7-2に示す。破壊状態の記号は以下の状態を示す。接着剤には、2成分形変成シリコンが用いられている。

CF シーリング材の凝集破壊

TCF シーリング材の薄層凝集破壊

AF シーリング材とゴム間での界面剥離

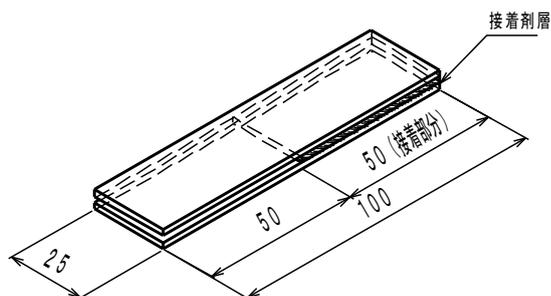


図5-7-1 接着試験片

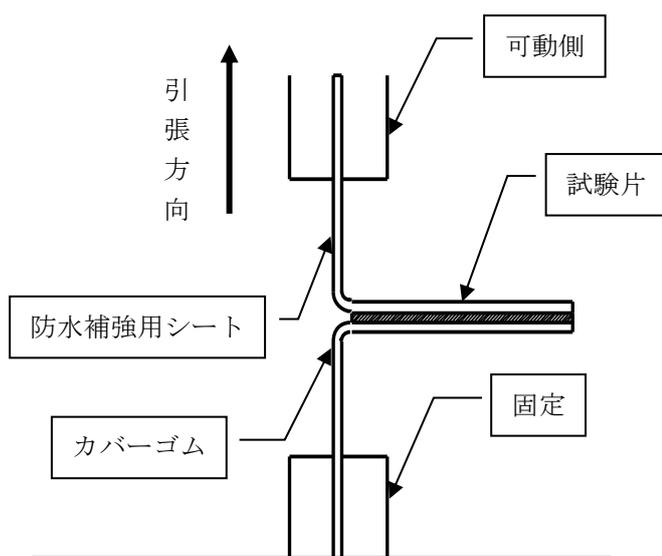


図5-7-2 接着強度の測定

表5-7-1 カバーゴムと防水補強シートの接着強

No.	接着強度 N/mm
1	1.5
2	1.4
3	1.6
4	1.5
平均	1.5

表5-7-2 接着試験の破壊状態 (n=4の平均)

	破壊状態の占有率
CF	90%
TCF	10%
AF	0%

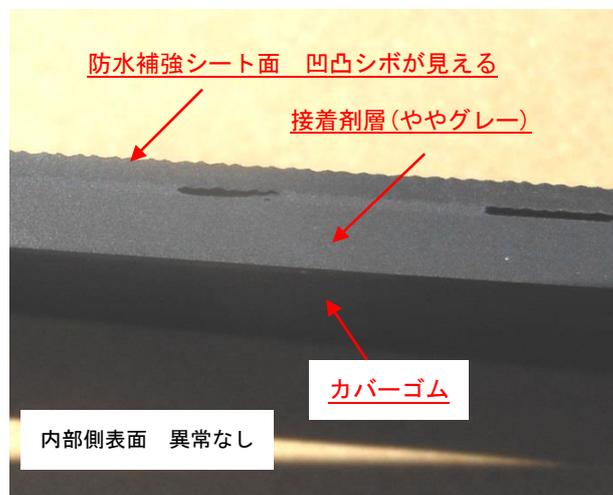


写真5-7-1 試験片の断面カバーゴム

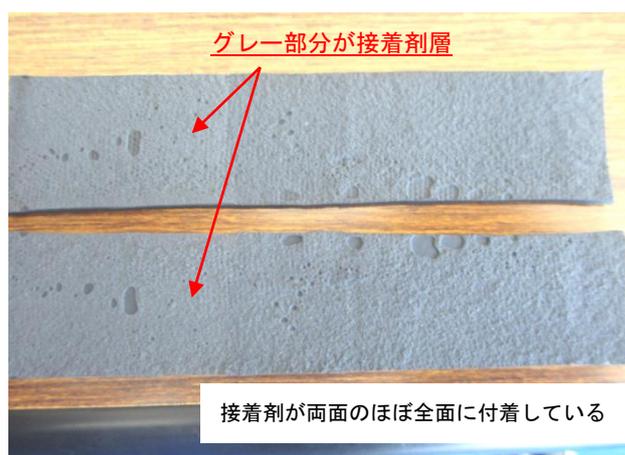


写真5-7-2 試験後の断面

5.8 考察

5.8.1 カバーゴム物性値

- ・位置（方角）による明確な物性差は見られない。
- ・29年経過したものは、伸びが半分になっており、材料としては劣化がかなり大きいと判断される。
- ・交点F部については、図5-5-1から改修工事に使ったカバーゴム改良材料は、7年経過時だけの伸びの変化率からは目立った効果は見られない。硬さ変化は、改修後防水シートを貼っていることもあり少なかった。
- ・竣工時からのカバーゴムの外部側硬さは、22年以降29年まで変化がなく、ほぼ架橋が進む劣化と主鎖切断が平衡しているように判断される。

5.8.2 EXP ゴム物性値

- ・位置（方角）による明確な物性差は見られない。
- ・29年経過で伸びが300%あり、変形に対する追従性に余裕がある。
- ・カバーゴムに較べて日射方向が有利であったと推定する。

5.8.3 目視表面観察

- ・ジョイント部分は、殆どの部位で割れが発生しており、気密及び水密機能に支障が生じている。
- ・ケーブル定着部先端のカバーゴムは、その大部分で漏気が発生しており、動的応力（伸び）が発生するところでの劣化が進んでいる。

5.8.4 拡大鏡による表面、断面観察

- ・外部側は、浅い（0.1mm）亀裂が発生しており紫外線による劣化（クレージング）と考えられる。
- 内部側は、紫外線の影響が少なく異常は見られなかった。

5.8.5 補足試験

- ・2006年に実施された改修工事で使用した防水補強シートとカバーゴムの接着部は、破壊状態が全て接着剤の凝集破壊で、強度も1.5N/mmと良く接着していた。

5.8.6 空気膜構造用カバーゴムと一般ビルの壁面に使われるガスケットとの劣化程度の比較¹⁾

- ・比較対象とするビルの概要
 住所：東京都港区
 階高：地上25階
 竣工：1973年
 解体：2010年
 ガスケット回収時期 竣工後15年、23年、37年（解体時）
 ガスケット種類：Y型構造ガスケット
 開口寸法：1615W×1725H

霊友会エアードームとビル壁面のカバーゴム、構造ガスケットの劣化の程度を図5-8-1に抗張積残率という指標で表す。

抗張積残率とは、 $\text{抗張積残率} = (\text{経年後の伸び} \times \text{経年後の引張強さ}) / (\text{初期の伸び} \times \text{初期の引張強さ})$ で表す。ゴム材料の持っているエネルギーの簡易的指標でS-S曲線の面積を表す。

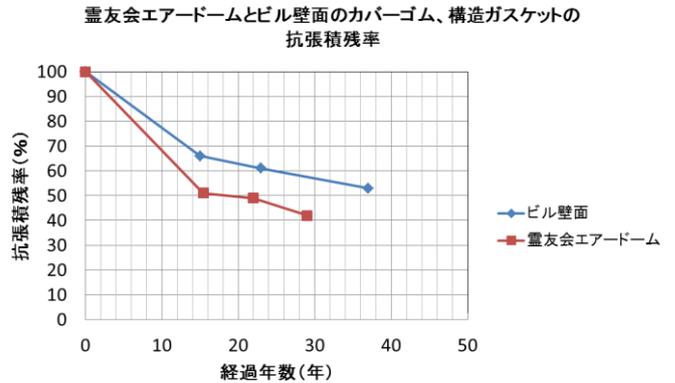


図 5-8-1 経年変化と抗張積残率

抗張積残率が、50%となる年数は、霊友会エアードームで18年、ビル壁面で42年（外挿して）となる。この差は、日射量の差が大部分とガスケットの肉厚の違い（ドーム用は3mm、ビル壁面用は、10mm）などが影響していると推定できる。これは、ゴム材料にとって屋根面での使用環境が、ビル外壁の使用環境の2倍程度厳しい環境であると言える。

但し、一般ビルのガスケットは風圧力を伝達する構造部材であり、気密と水密性能のみを期待する空気膜構造のカバーゴムとは要求される性能が異なる。経年変化に伴う抗張積残率に関しても要求性能に見合った評価が必要であろう。

引用文献 1) 池田ら：構造ガスケットの耐久性評価、日本建築学会 大会学術講演梗概集（関東）2011年9月、P.935

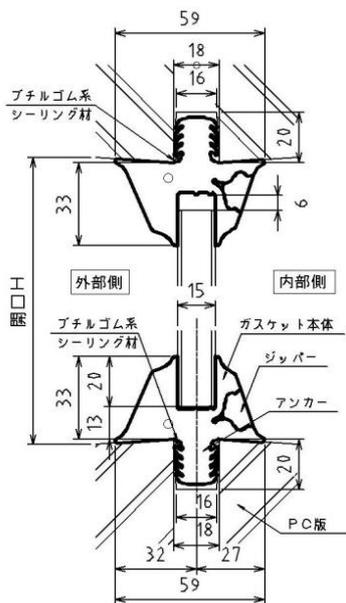


図 5-8-1 ガスケットの納まり

6. 膜材の耐久性調査結果

これまで曝露試験体における耐久性評価結果等が報告されてきたが、今回のように実物件で竣工後 29 年経過した膜材の耐久性を調査した報告は初めてのものとなる。

今回、採取した材料をさまざまな観点から分析を行った。

6.1 外膜被覆樹脂層の耐久性分析

外膜材の耐久性を被覆樹脂の面から分析を行った。

6.1.1 拡大観察

電子顕微鏡にて屋外面、屋内面の表面状態、断面観察により樹脂層の状態を確認した。

表面状態を電子顕微鏡にて 50 倍で観察した。

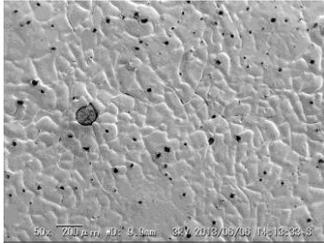


写真 6-1-1 採取膜材屋外面



写真 6-1-2 採取膜材屋内面

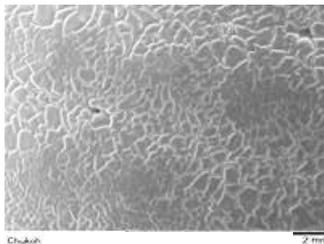


写真 6-1-3 未使用品

屋外面 (写真 6-1-1) には屋内面 (写真 6-1-2) より汚れの付着が多い。また表層模様の溝が若干薄くなっているように観察され、最表面層に形成されているふっ素樹脂の摩耗が若干進行していることが確認できる。しかし、屋外屋内面との差も小さく、現行未使用品とも大きな差はない。このことより大きく摩耗しているとは言えず、十分な耐久性を維持していると言える。

続いて断面状態を電子顕微鏡にて 70 倍で観察した。

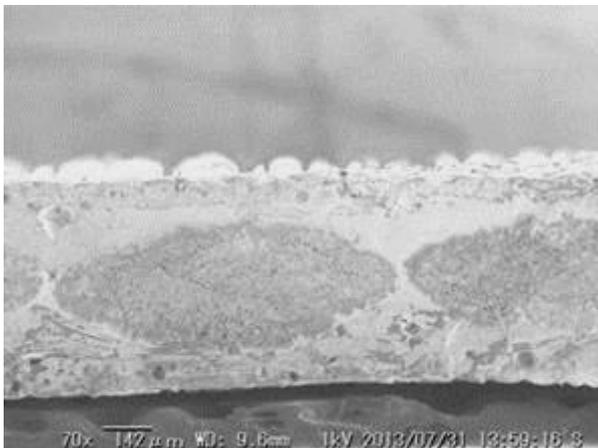


写真 6-1-4 採取膜材断面

表面状態同様に著しい摩耗は観察されず、十分な樹脂層を維持していた。以上より、外観からは著しい摩耗は観察されず十分な耐久性を維持していると言える。

6.1.2 熱分析による樹脂層の確認

加熱した際の特性を測定し、樹脂層の変化を分析した。

6.1.2.1 TG 測定

TG 測定により摩耗などにより被覆樹脂層の減量具合を定量的に判断した。

TG: 熱重量測定 (Thermo Gravimetry) は加熱による重量変化を連続的に測定する熱分析の手法。

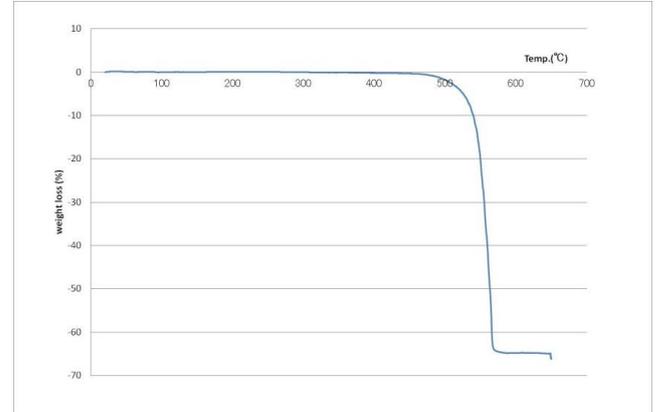


図 6-1-1 TG 測定結果

650°C まで加熱した際の減量率は 65% であった。製品の材料構成比率から見て被覆樹脂が摩耗などにより減量しているとは言えず、ほぼ初期値と変わっていない。また、減量は 400°C 付近から徐々に始まっており、減量成分はふっ素樹脂のみと言える。

6.1.2.2 DSC 測定

DSC 測定で摩耗等による樹脂構成への影響を確認した。

DSC: 示差走査熱量測定 (Differential scanning calorimetry) は、測定試料と基準物質との間の熱量の差を計測することで、融点やガラス転移点を測定する熱分析手法。

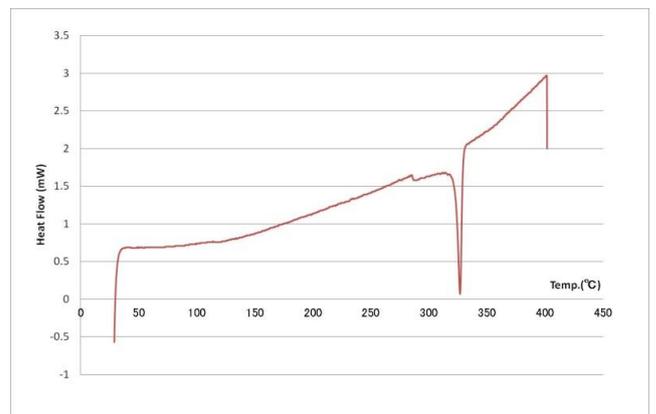


図 6-1-2 DSC 測定結果

今回の分析で 285°C と 326°C にピークがみられる。これより最表面層にある特殊ふっ素樹脂と主構成成分のふっ素樹脂が検出されたことがわかる。

以上の結果より、被覆樹脂であるふっ素樹脂の厚さ、構成に変化はなく、29 年経過した時点でも耐久性に問題のないことが言える。

6.2 外膜材の力学特性試験

外膜材の耐久性を確認するために、29年経過した本体膜から直接サンプルを採取して調査すると共に、建設当初から同一敷地内に設置されている屋外曝露試験体の調査も併せて実施し、相互の比較検討も行う。

6.2.1 サンプル採取試験体の採取

図6-2-1にサンプル採取部位を示す。サンプルは、一般部として東西南北の4ヵ所、膜定着部として南面の1ヵ所とした。

6.2.2 本体膜材の試験結果

写真6-2-1～6-2-4に本体膜材のカットサンプルの状況を、表6-2-1に各種強度試験結果の一覧を示す。

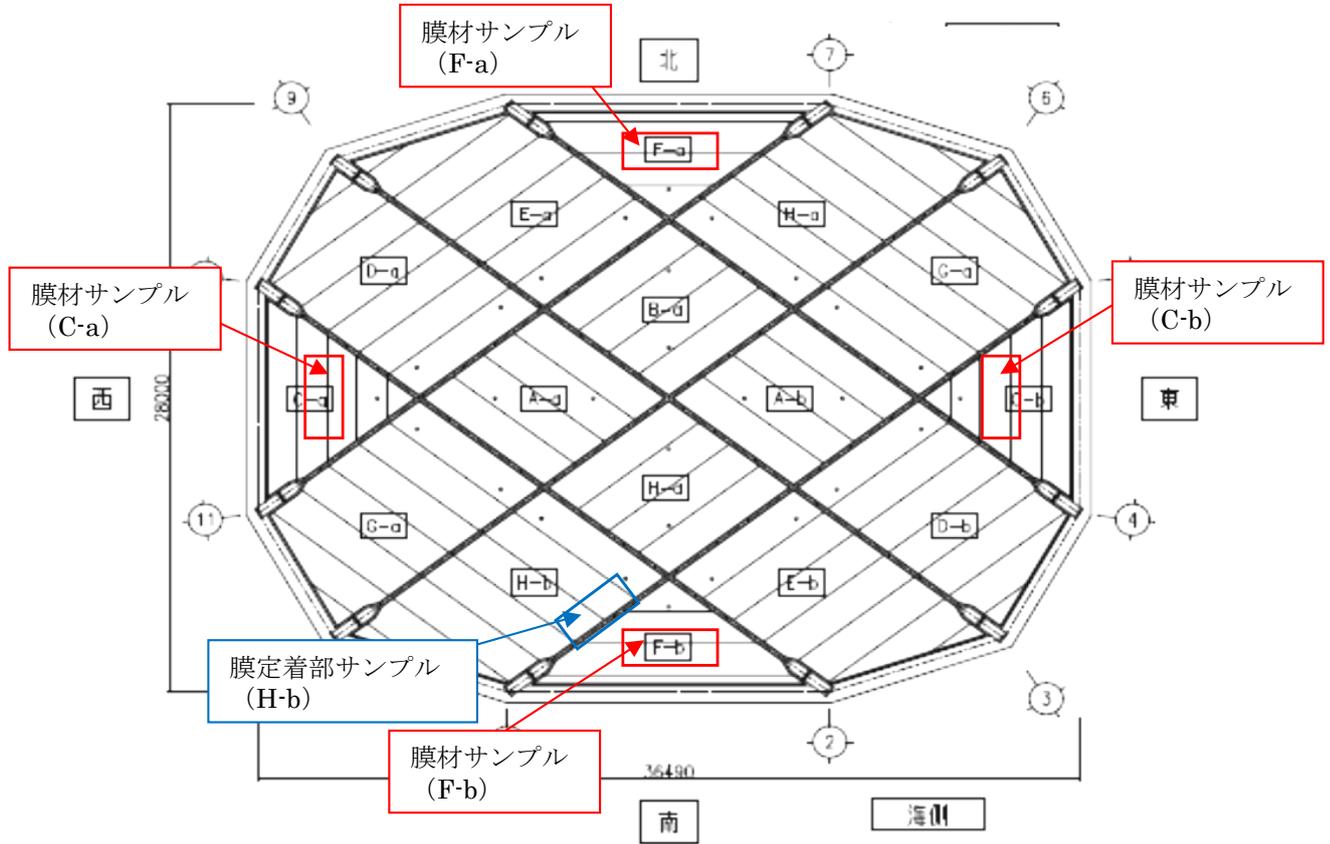


図6-2-1 膜材のサンプル採取試験体の採取位置

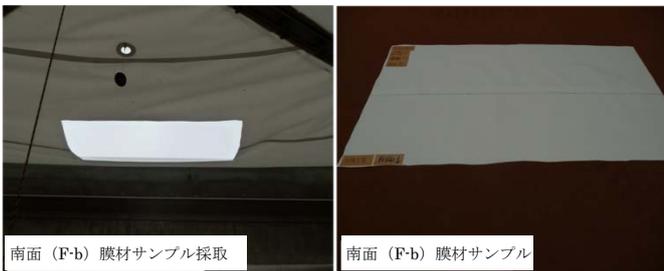


写真6-2-1 南面 (F-b) 膜材サンプル

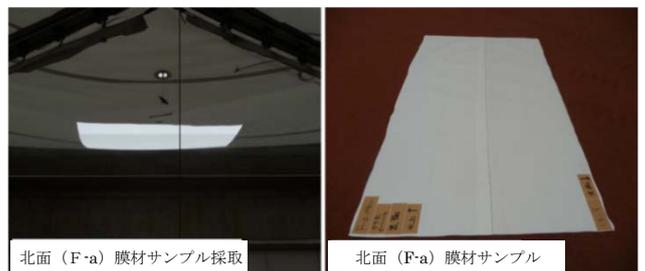


写真6-2-2 北面 (F-a) 膜材サンプル

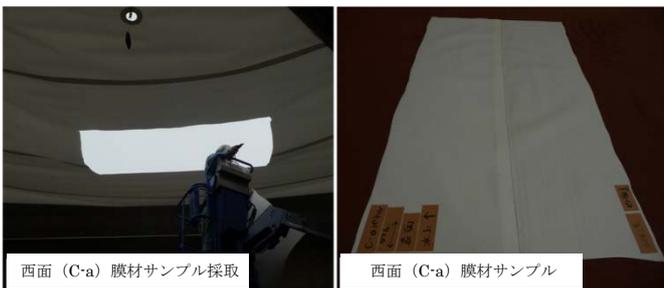


写真6-2-3 西面 (C-a) 膜材サンプル

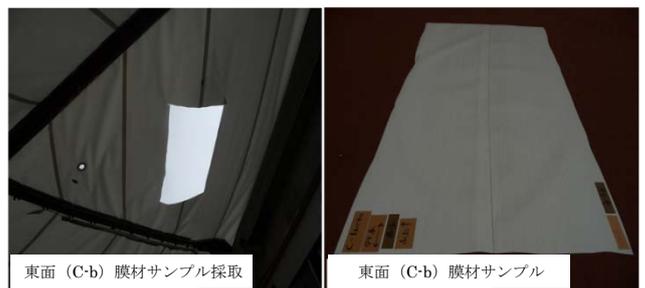


写真6-2-4 東面 (C-b) 膜材サンプル

表 6-2-1 本体膜材の試験結果一覧

試験項目	方向	南面	北面	西面	東面	平均
膜材料の質量 (g/m ²)		1206	1195	1215	1221	1209
厚さ (mm)		0.72	0.72	0.74	0.73	0.73
織糸密度 (本/25.4mm)	タテ	25.4	25.4	25.4	25.7	25.5
	ヨコ	18.6	18.6	18.6	18.6	18.6
引張強さ (N/3cm)	タテ	3020 61%	3090 63%	2770 56%	3260 66%	3035 62%
	ヨコ	2500 70%	2770 77%	2360 66%	2540 71%	2543 71%
破断伸び率 (%)	タテ	6.2	6.3	5.8	5.3	5.9
	ヨコ	8.0	8.7	8.7	11.0	9.1
引裂強さ (N)	タテ	112.0 29%	130.3 33%	109.5 28%	127.2 33%	119.8 31%
	ヨコ	121.6 32%	140.6 37%	120.2 31%	133.4 35%	129.0 34%
接合部引張強さ (N/3cm)	ヨコ	2260 63%	1540 43%	1930 54%	1990 56%	1930 54%
接合部耐剥離強さ (N/2cm)	タテ	55.0 81%	65.2 96%	63.4 93%	58.8 86%	60.6 89%

下段の数値は、枚方工場受入検査〔1984年ST-201〕に対する強度保持率：％

表中の各試験結果は、供試体各5体の平均値を示したが、試験結果から以下の知見が得られた。なお、ここで示した強度保持率（％）は、建設時に膜体加工工場で行った膜材受け入れ検査時の試験結果に対する比率である。

- ①引張強さの強度保持率の平均値は、タテ 62% (56～66%)、ヨコ 71% (66～77%) であった。ヨコ糸方向に比較してタテ糸方向の強度保持率が低い傾向にある。また設置方位に関しては西面と南面の保持率が低い傾向であった。
- ②破断伸び率の平均値は、タテ 5.9% (5.3～6.3%)、ヨコ 9.1% (8.0～11.0%) であった。
- ③引裂強さの強度保持率の平均値は、タテ 31% (28～33%)、ヨコ 34% (31～37%) と低下が大きく、引張強さと同じく西面と南面の保持率が低い傾向にある。
- ④接合部引張強さは、初期の接合部強さのデータが無いために、初期の母材強さに対する強度保持率で示している。接合部引張強さの強度保持率の平均値は(ヨコのみのデータ) 54% (43～63%) で、部位によるバラツキが大きく北面が最小値であった。現在のヨコ糸方向の残存強度と比較すると、約 76% の値である。
- ⑤接合部剥離強さの強度保持率の平均値は(タテのみのデータ)、89% (81～96%) で南面が最小値であったが、他の強度指標に比較すると、強度保持率の低下は少ない。
- ⑥試験結果からは、設置方位による差異が読み取れる様であり、南面及び西面の強度保持率が全体に低い傾向にある。

6.2.3 膜定着部サンプルの引張試験結果

現場採取した定着部サンプルを用いて、幅 60cm の試験体 3 体による定着部引張耐力の確認を行った。採取したサンプルの状況を写真 6-2-5 に、試験結果を表 6-2-2 に示す。

膜定着部の強度保持率は設計当時の初期定着部強度に対して約 60% 程度であり、膜本体の強度保持率 62% とほぼ同等であり、特に定着部に起因する特異な耐力低下は、確認されなかった。



写真 6-2-5 膜定着部膜材 (H-b) サンプル

表 6-2-2 膜定着部試験結果

試験体	最大耐力 (KN/60cm)	破断箇所
1	28.0	溶着キワ
2	26.1	本体部分
3	22.6	溶着キワ
平均値 (保持率)	25.6 (61%)	—

注) 保持率は設計当時の試験値 (41.7kN/60cm) との比較

6.2.4 曝露試験体の試験結果

建設当初に同一敷地内に設置された曝露試験体（写真6-2-6、6-2-7）の強度を確認し、過去に実施した15年目および22年目のデータとの経年的な変化を把握すると共に、前節の調査による本体膜の試験結果との相関性を確認する。

表6-2-3は曝露試験体の強度試験結果を示した。図6-2-2には過去の曝露試験、及び前節で述べた今回の本体膜の試験結果の引張強さについての結果を合わせて示した。この結果より以下の知見が得られた。

- ①曝露試験体の引張強さ強度保持率の平均値は、タテ 68%（67～69%）、ヨコ 67%（64～70%）であった。この結果から、15年目の結果（タテ 76%、ヨコ 73%）、22年目の結果（タテ 72%、ヨコ 75%）と比較して、緩やかに強度の低下が進んでいることが確認できる。
- ②曝露試験体の引張強さの強度保持率の平均値は、前頁の表6-2-1 本体膜一般部の試験結果（タテ 62%、ヨコ 71%）に比べるとタテで6%高く、ヨコで4%低いという僅かな差はあるものの、かなり良い対応を示している。
- ③曝露期間29年間での上記の強度保持率は、他の文献¹⁾との比較においてもほぼ妥当な数値であり、供用期間と膜材の強度保持率の一つの目安になると思われる。
- ④一般に曝露試験体には常時の膜張力に相当する一定かつ一方方向の張力しか作用しておらず、様々な外力負荷に曝される本体膜と比較すると劣化状況に差が出ることも考えられる。しかし、今回の結果では上述のように曝露試験体と本体膜は一定のパラツキの範囲で同等の保持率（低下率）であることが確認された。
- ⑤これは隣接設置する曝露試験体で、一定の信頼性で本体膜の健全性を十分にモニタリング出来る事を示唆している。
- ⑥また、膜材の経年の強度低下は、荷重や応力履歴よりは紫外線などのウエザリング要因の方がより影響が大きいとも推察される。

引用文献1) 阿部和広 他：PTFEコーテッドガラス繊維織物の屋外曝露試験30年の耐久性評価、日本建築学会大会学術講演梗概集（近畿） 2014年9月、P.935

表 6-2-3 曝露試験台 試験結果一覧表

試験項目	方向	A-1, A-2	B-1, B-2	平均
膜材料の質量 (g/m ²)		1252	1247	1250
厚さ (mm)		0.77	0.77	0.77
織糸密度 (本/25.4mm)	タテ	26.2	25.8	26.0
	ヨコ	18.6	18.6	18.6
引張強さ (N/3cm)	タテ	3400 69%	3290 67%	3345 68%
	ヨコ	2280 64%	2520 70%	2400 67%
破断伸び率 (%)	タテ	6.0	6.2	6.1
	ヨコ	11.6	12.2	11.9
引裂強さ (N)	タテ	156.9 40%	148.8 38%	152.9 39%
	ヨコ	124.7 33%	134.6 35%	129.7 34%
接合部引張強さ (N/3cm)	ヨコ	2300 64%	2270 63%	2285 64%
接合部剥離強さ (N/2cm)	タテ	92.6 136%	67.0 99%	79.8 118%

下段の数値は、建設時工場受入検査に対する強度保率：%

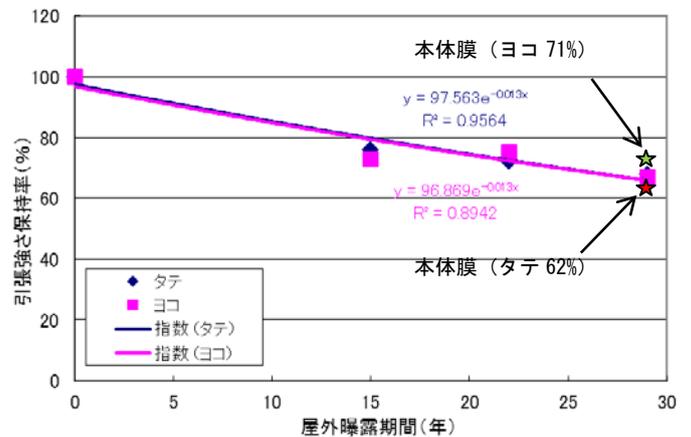


図 6-2-2 曝露試験台の経年劣化曲線と本体膜強度保持率

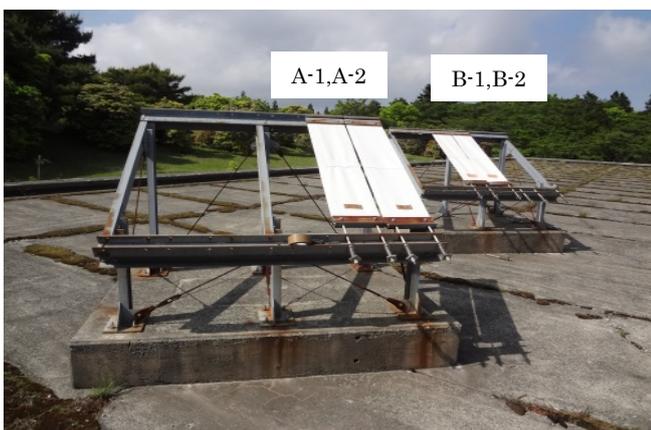


写真 6-2-6 曝露試験台の設置状況

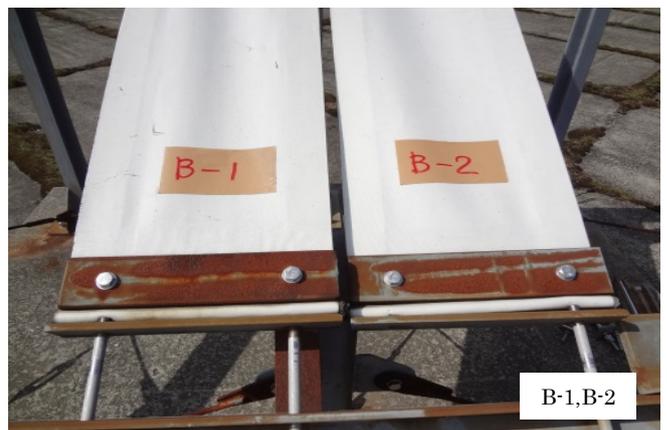


写真 6-2-7 採取した曝露試験体

6.3 内膜材の汚れに対する検討

内膜材は通気性を有し吸音特性を持つ材料である。解体時の外観は写真 6-3-1 のとおりであり、部分的に集中した黒色の汚れが見られた。この汚れの発生源を特定するために実施した分析結果を以下に示す。



写真 6-3-1 内観

6.3.1 分析用サンプルの採取

写真 6-3-1 の囲み部分付近よりサンプルを採取し(写真 6-3-2)、汚れの少ない部分を A 部、著しい部分を B 部とし、観察等を進めた。

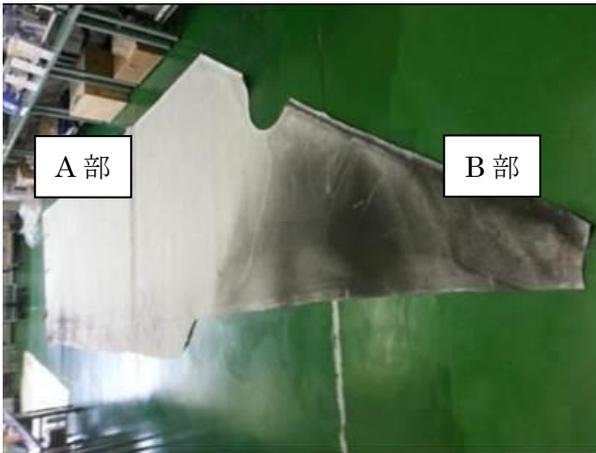


写真 6-3-2 採取サンプル

6.3.2 付着物の外観確認

汚れの少ない A 部はうっすらと黒色物質が見られた(写真 6-3-3)。

汚れの著しい B 部は A 部で見られた黒色物質が大量に堆積した状態である(写真 6-3-4)。

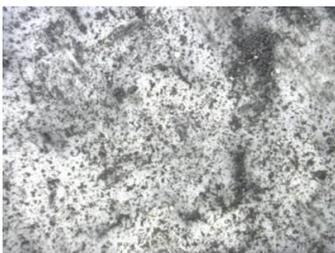


写真 6-3-3 A 部拡大



写真 6-3-4 B 部拡大

この汚れは柔らかい布でふき取ることによって大部分は除去でき、表面に堆積しているだけであった。



写真 6-3-5 汚れ拭き取り後

6.3.3 表面付着物の熱分析

外膜と同様に、採取サンプルの熱分析 (TG、DSC) を実施した。

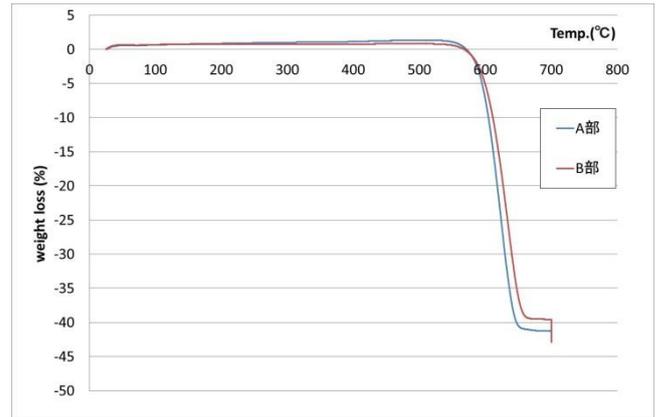


図 6-3-1 TG 測定結果 (膜+汚れ)

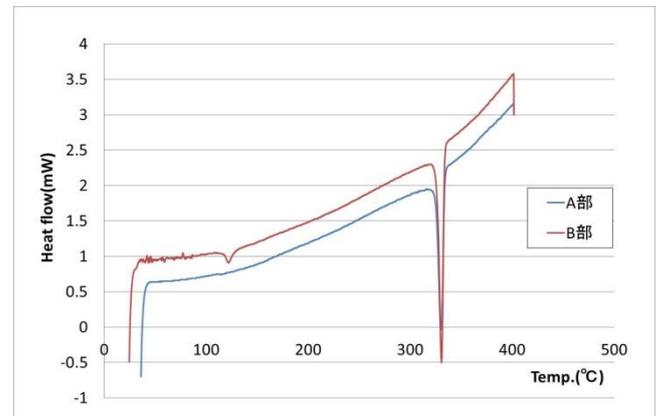


図 6-3-2 DSC 測定結果 (膜+汚れ)

熱減量 (TG : 図 6-3-1) では A、B ともにふっ素樹脂の減量以外の結果は得られなかった。これは汚れの全量が少なく、減量も少ないため測定分解能外であった可能性が高い。しかし最終減量率をみると、汚れの多い B 部は A 部より減量率が小さく残留物が多い、且つ試験後試料が黒色を呈していた (A 部は白色) ため、700°C 以上の融点を持つ黒色残留物の存在が予測できた。

DSC (図 6-3-2) からは B 部 (汚れ多) データで 400°C 以下でもピークがみられ、有機物の汚れの存在も推測された。

さらに、400°C 以下の熱減量測定精度を上げるため、表面汚れを削り取り、TG を追加実施した。

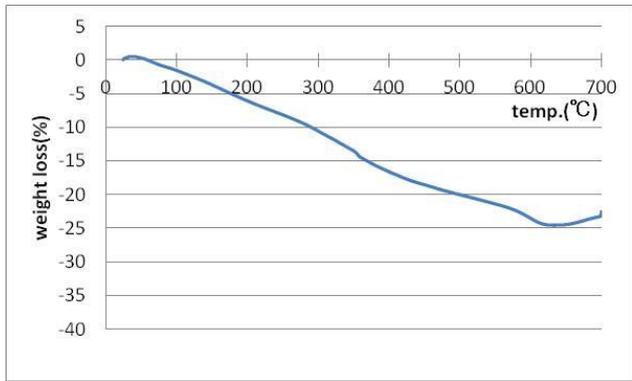


図 6-3-3 TG 測定結果(汚れのみ)

汚れは 700°C で約 25% 減量し、有機物 25%、無機物 75% の比率と推定できる。

膜材を含んだ試験では測定質量のうち 99% 以上を膜で占めており、この減量が検出できなかったと推定できる。

6.3.4 FT-IR、EDX による物質同定

前項で測定された成分をさらに詳しく同定するため、FT-IR、EDX での分析を行った。

FT-IR (フーリエ変換赤外分光法)：分子の振動による赤外線吸収を測定することで分子構造の情報を得る手法。

EDX (エネルギー分散型 X 線分光法)：電子線照射により発生する特性 X 線を検出し、エネルギーで分光することにより元素分析や組成分析を行う手法。

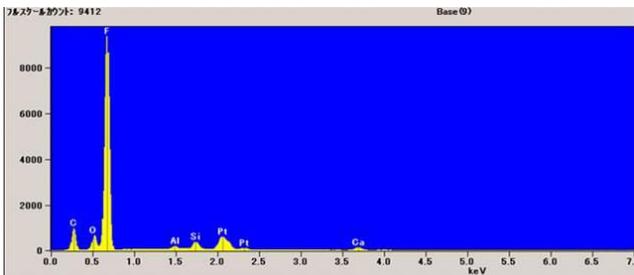


図 6-3-4 EDX 測定結果 (A 部)

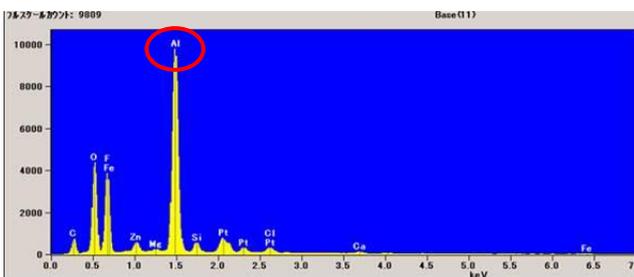


図 6-3-5 EDX 測定結果 (B 部)

両試験とも付着が多い B 部からは付着の少ない A 部では微量にしか検出されないアルミ元素が多く検出された(図 6-3-4、6-3-5 参照)。

有機物は使用環境から発生しうる埃などと予測されるが、その詳細までは同定できなかった。

今回検出されたアルミ元素は膜取付け金物として使われているアルミ部材に由来すると考えられ、これが酸化することで黒色を呈したものと推測される。

7. 膜屋根材損傷時の応急処置に関する実験

実際の空気膜構造の建築物を利用して、屋根膜材の損傷時にどのような補修や応急処置が可能であるかを見極めるための以下の 2 つの実験を行なった。

- ① 200 mm 程度の L 字型損傷に対する膜補修実験
- ② 3m にも及ぶ大規模な損傷時を想定した応急処置実験

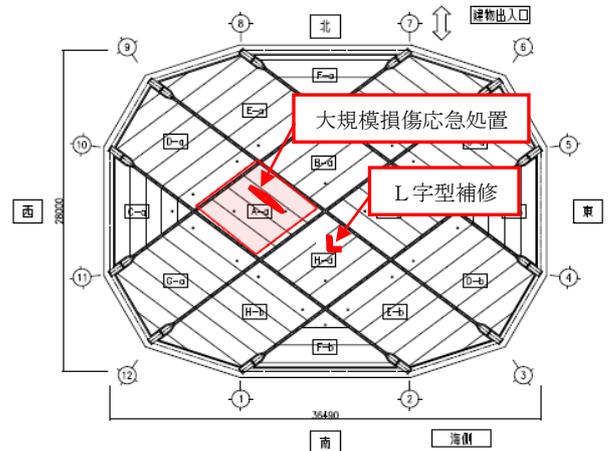


図 7-1-1 L 字型補修実験と大規模損傷応急処置実験

7.1 L 字型補修実験

暴風時の飛来物などによる膜面損傷を考えた場合、損傷の初期には直線的な傷が生じ、後に傷の両端に応力が集中して延長上に引裂けていくか、直交の繊維方向に引裂けていくかのどちらかである。膜面の補修としては、L 字型に裂けた傷のほうが内圧による空気流出や補修膜の溶着時の不安定さなどの理由で処置が難しいために、補修実験として L 字型を採用した。

7.1.1 L 字型補修実験の手順

L 字型補修実験は、図 7-1-1 に示す屋根中央南側パネルの膜面に両辺 200mm の L 字型をけがき(写真 7-1-1)、カッターにて切込みを入れた(写真 7-1-2)。この時の内圧は、30mmAq としたが、傷口が引裂き伝播していくことはなかった。

膜面の補修は現場溶着機で上面から四周を順次溶着する方法で行った。最初の溶着時には、損傷部と補強膜材の隙間から常時空気が流出しており、非常に作業性が悪いが、2 周目からは安定した作業となった。最終的に 5 周(各周のオーバーラップ 10mm)の溶着で完了とした。一般に溶着幅は 75mm であるが、本試験では 2 倍の溶着幅を確保することとした。

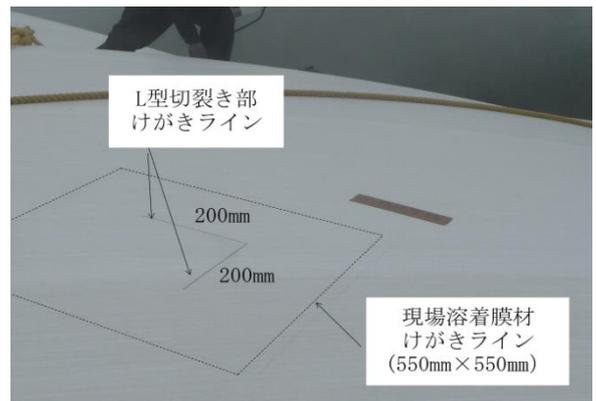


写真 7-1-1 損傷のけがきライン

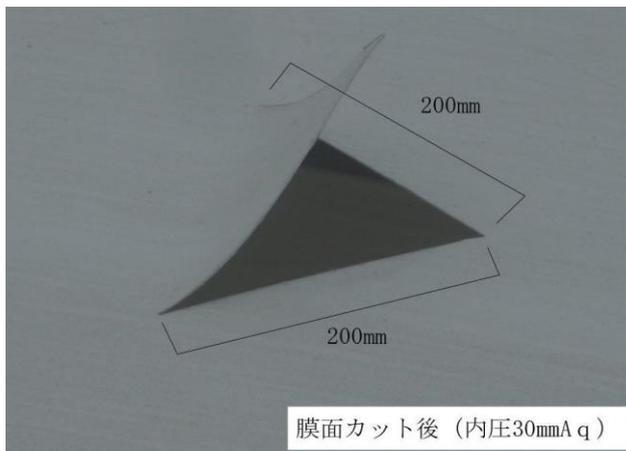


写真 7-1-2 切込み部

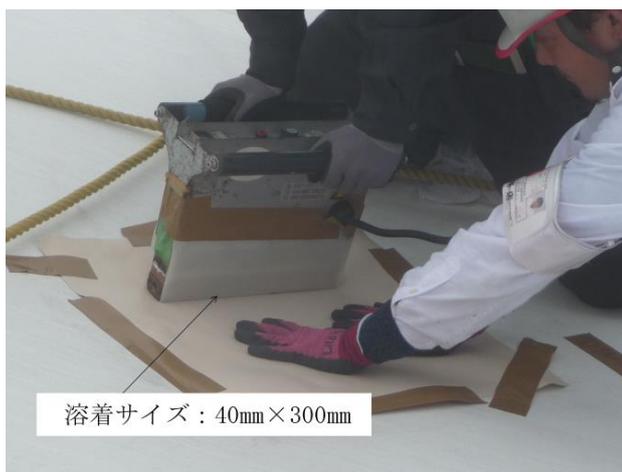


写真 7-1-3 溶着の状況①



写真 7-1-4 溶着の状況②

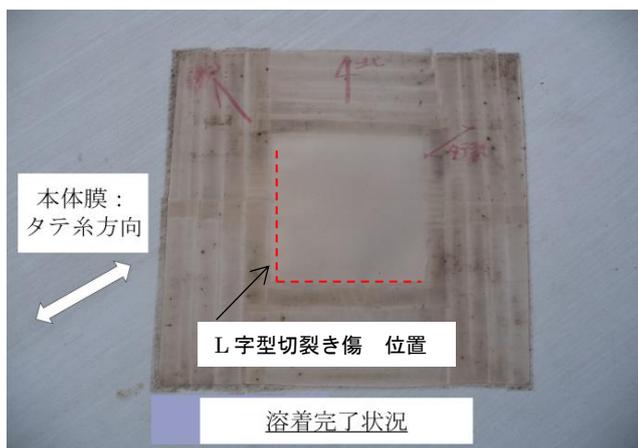


写真 7-1-5 溶着完了の状況

7.1.2 補修溶着部の溶着性能（剥離）試験

現場溶着部分の信頼性を確認するため、すべての実験や検証終了後に補修部分をサンプリングして剥離試験を実施した。切り出したサンプルは、剥離試験用の卦書き（幅 30mm）を入れ、溶着部分の全面で行なった（写真 7-1-6）。

剥離試験は、（一社）日本膜構造協会の「膜材料の品質及び性能試験方法」にもとづき、剥離角度を 180° にして引張り、剥離した時の引張荷重を読み取った。剥離強さの基準は、引張強さの 1% 以上かつ 10N/cm 以上であり、タテ 45N/3cm、ヨコ 36N/3cm となる。

剥離試験の結果は、十分に溶着されている部分（強い部位）の剥離強さは 70N/3cm 程度であるが、溶着が不十分な部分（弱い部位）は 40N/3cm 程度であり、溶着機の幅の縞模様がみられた（写真 7-1-7）。ただし、一部の弱い部位は縞模様毎に 36N/3cm を下回る数値もみられ、良好な作業環境で行われる場合の剥離強度に達していない部分も確認された。

膜面を押せば変形してしまう空気膜構造で、膜面上部から裏当て板なしで現場溶着を行うだけでは、一様にムラのない溶着を施すことが困難であることが改めて確認された。

この様な補修方法においては、あらかじめ溶着の不確定さを補うために、通常の 75mm の溶着幅を増やす等の配慮が必要と思われる、今回は前述したように 2 倍の余裕をもって 150mm の溶着幅の試験としている。

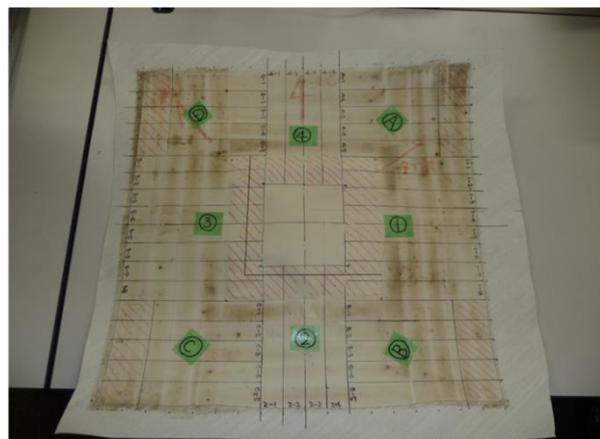


写真 7-1-6 剥離試験用サンプル試験体



写真 7-1-7 試験後の剥離面の状況

7.2 膜面の大規模損傷を想定した応急処置実験

この実験では、膜面に大規模な損傷が生じた場合に、その後の引裂き伝播の状況や応急処置のための作業手順と安全計画、および応急処置にかかる作業時間などを検証することを目的とした。

7.2.1 膜面の切裂き状況

膜面を 300mm、500mm、1000mm、2000mm、3000mm とカッターで順次切裂き、その状況を観察した(写真 7-2-1～7-2-3)。

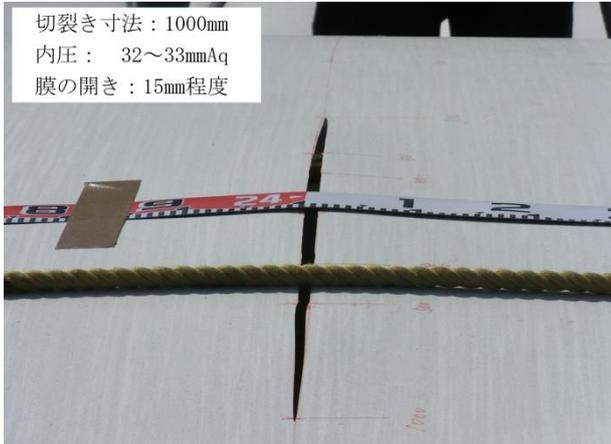


写真 7-2-1 切裂き 1000mm (開き 15mm 程度)

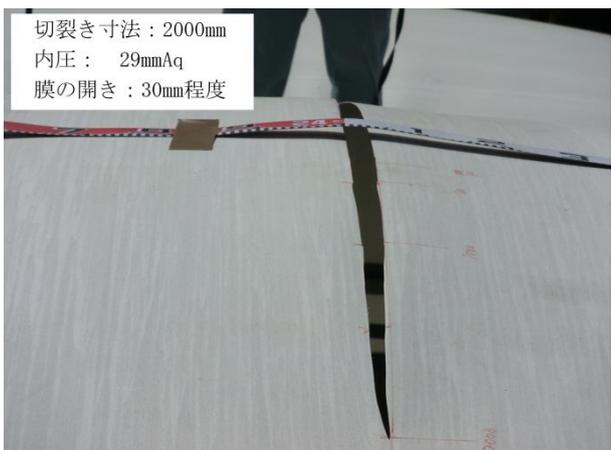


写真 7-2-2 切裂き 2000mm (開き 30mm 程度)

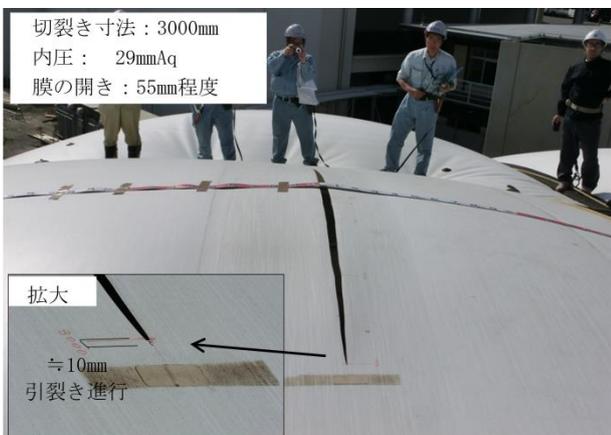


写真 7-2-3 切裂き 3000mm (開き 55mm 程度)

内圧 30mmAq 時の 3000mm の破損では、口の開きが 55mm 程度であり、損傷の両端は引裂き伝播することは無かったが、内圧を 40mmAq に上昇させると 10mm 程度裂けが進行した。

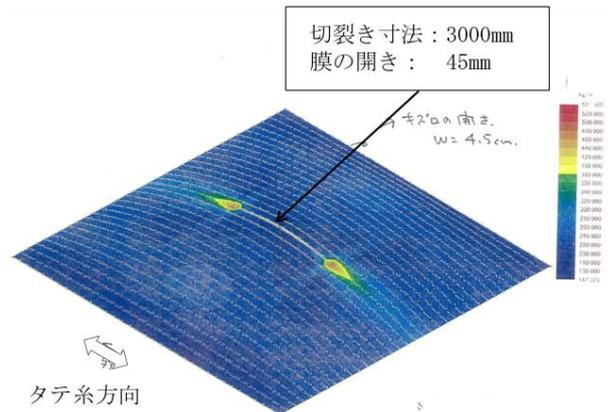


図 7-2-1 解析による状況の確認

この状態の解析を試みたが、解析上は口の開きが 45mm であり、ほぼ破損の状況が再現できた。また、前述の 40mmAq 昇圧時に引裂きが進行したことから、同一条件の解析結果と対応させることにより、引裂き進展発生の有無を解析的に推定する際の、参考指標を得ることができた。

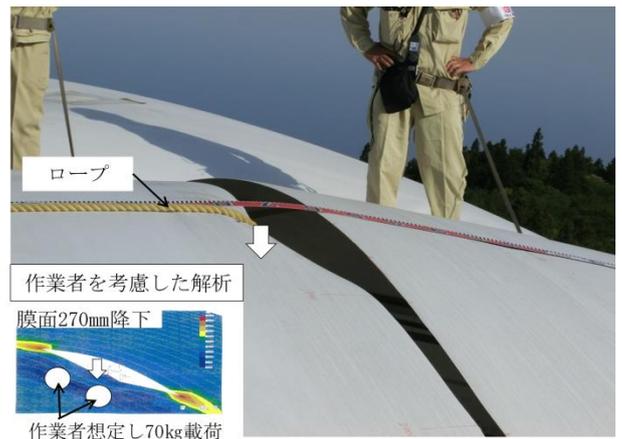


写真 7-2-4 作業者の安全性検証

引き続き、緊急時に損傷の生じた近傍で作業を実施する場合の安全性の検証を行った。事前に行った解析によれば、作業員 1 人の自重により生じる開口部の変形は、作業員がドーム内部に滑落することが懸念されるオーダーであった。

そのため、開口から下部空間へ垂らしたロープに体重相当の 70kg の荷重を作用させ、開口周りの変形の状況を観察した。解析結果では約 270mm の膜面鉛直変位の想定であったが、実験では 300mm 程度の膜面鉛直変位を観察した。

大きな変形を伴う不安定な状況に対しても、解析は良い対応を示しており、非常時の備えとしての事前計画立案に対しても、解析的な状況予測が有効であることを確認した。

7.2.2 膜面の大きな損傷に対する応急処置の検証実験

空気膜構造における膜面の大きな損傷に対しては、損傷箇所からの漏気を最小限に抑え、極力インフレート状態を

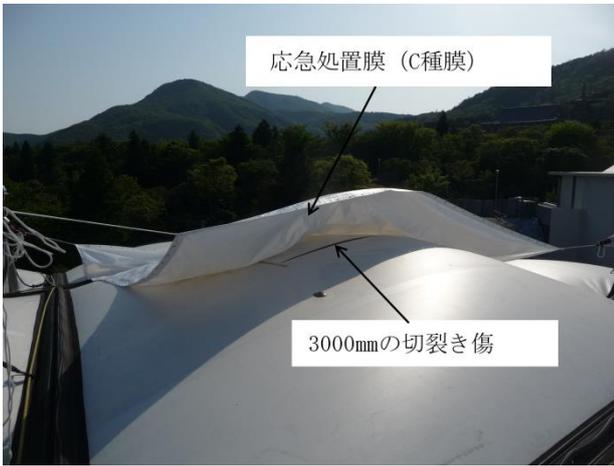


写真 7-2-5 応急処置膜の設置

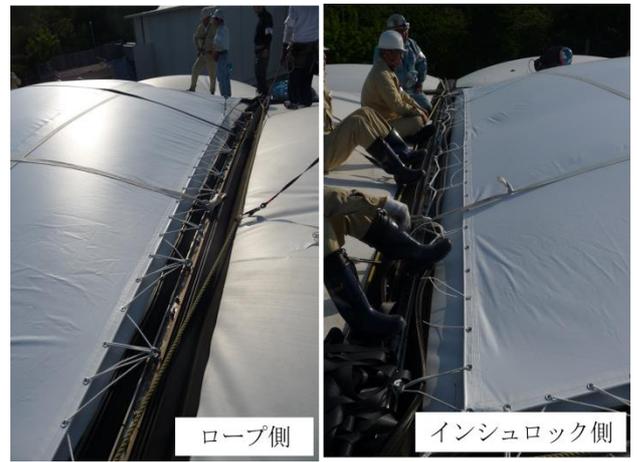


写真 7-2-8 膜定着方法の比較

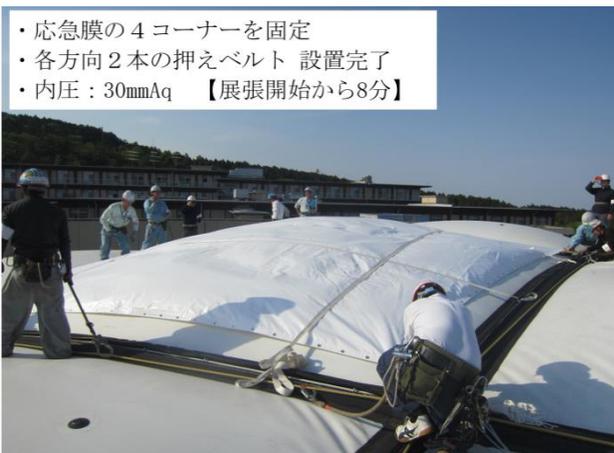


写真 7-2-6 応急処置膜コーナー支持と押えベルトの設置

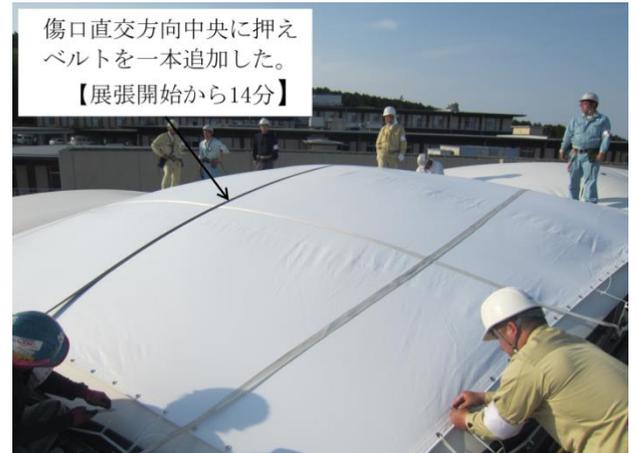


写真 7-2-9 押えベルトの増設



写真 7-2-7 膜定着作業（ロープと樹脂製結束バンド比較）



写真 7-2-10 応急処置膜の設置完了

維持することが初期対応の基本である。

本実験では、予め準備したC種膜材（PVCコーティングポリエステル繊維布）製の応急処置膜を、人力で損傷パネル上に展張し、その外周4辺を仮想的に固定する方法について、その作業可能性及び漏気防止の有効性などを確認した。この応急処置膜は、どの膜パネルが損傷を受けても対応できるように最小パネルのサイズに合わせ、外周部分はラッキングなどのロープ調整で形状に対応することとした。実験では、一般的なロープと樹脂製結束バンド（インシュロック）による方法の作業性も比較した（写真7-2-7）。

膜定着の作業時間は、2つの方法にほとんど差が見られなかったが、樹脂製結束バンドの長さや強度に配慮すれば、ロープより作業性が向上することも確認できた。

一連の作業は、膜材を展張し始めてから25分程度で完了した（写真7-2-10）。作業途中には、押えベルトを増設することでの作業性の改善が図れることも判り、緊急時の漏気防止を目的とした本工法の有効性を確認できた。

但し、今回の実験は平穏な気象環境下での作業であり、一般にこのような対応が求められる場合の外部気象はより厳しい環境が想定されることへの留意も必要であろう。

8. デフレート及びインフレート過程の検証

8.1 デフレート及びインフレート過程の全体的な形状

本建物は建設後約 29 年を経て、その間数回のデフレートを経験している。今回観察したインフレート状態とデフレート状態の両モード間の全体的な移行過程は、建設当時とほぼ同様な形状を経て推移していたと判断された（写真 8-1、8-2）。

すなわち、長期間インフレート形状を維持していたことによる、ケーブルや取付け金物の「くせ」の様なもの形状推移過程において、特に大きな影響を与えていないと判断された。また、形状推移の過程において新たな膜材の異常や金物などからの異音の発生なども観察されなかった。

今回の結果からは、インフレートを長期間維持した後の大きな形状の変化に対して、初期インフレート時の状況に関する様々な記録及び観察が、有効に活用できると判断される。

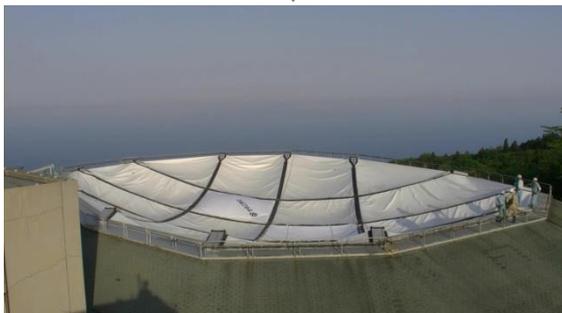


写真 8-1 インフレートからデフレートに至る過程の形状

8.2 内圧の変化と屋根頂部の変位計測

デフレート及びインフレート過程の内圧と屋根頂部の変位の計測結果を、次ページの図 8-1 及び図 8-2 に示す。

デフレート時には、内圧を管理して徐々に低下させているため、屋根頂部の変位と内圧の関係は逆比例的にほぼ線形な関係で推移している。再インフレート時には過去の事例と同様に、

①内圧は初期上昇の後、屋根面の平均重量とバランスする値で一定値を保つ

②送風された空気は屋根上昇に伴う内部空間の増加に費やされる

③屋根がほぼインフレート完了に近づいた時点で、短時間で内圧が上昇する

という安定した推移を経ることが確認された。



写真 8-2 デフレートから再インフレートに至る過程の形状

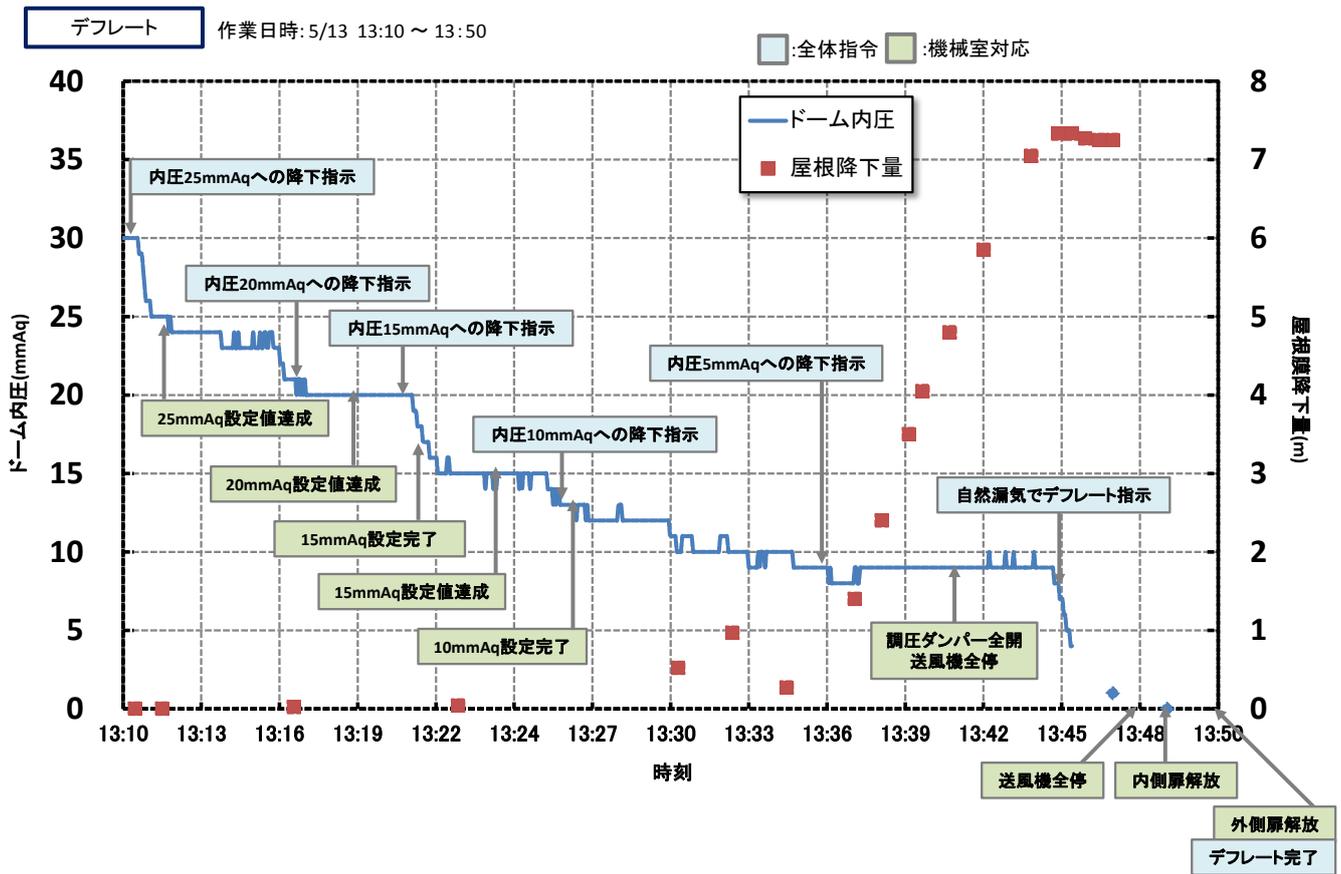


図 8-1 デフレート時の屋根膜降下量と内圧の記録

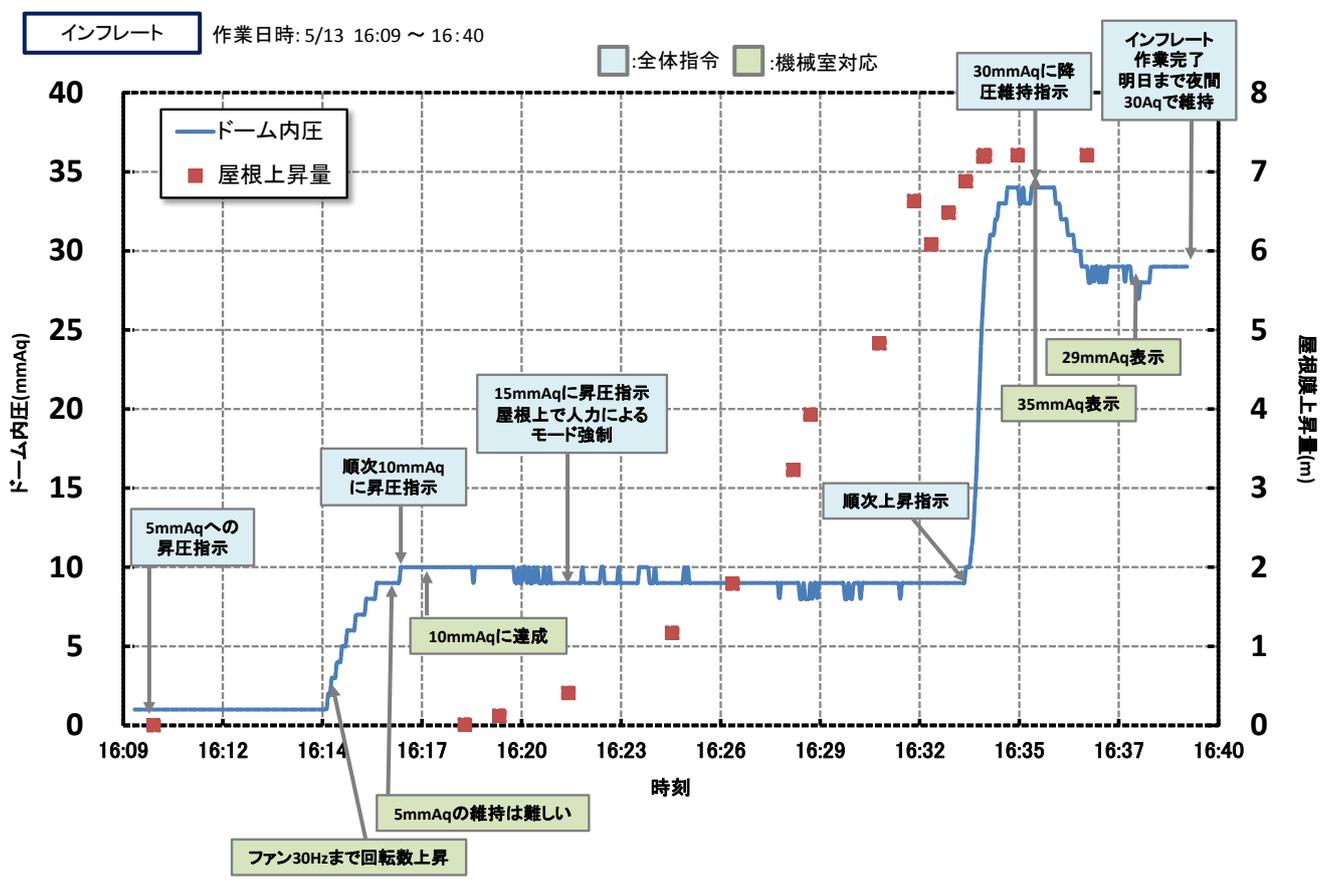


図 8-2 再インフレート時の屋根膜上昇量と内圧の記録

おわりに

本報告は建設後 29 年経過した霊友会弥勒山エアードームの解体に先立ち、2013 年 5 月に実施した空気膜構造を構成する各要素の耐久性や、建設当時立案した膜材の維持補修計画の妥当性確認などを目的とした調査及び検証の結果を纏めたものである。

本調査及び検証に際して、霊友会のご理解とご協力を頂けたことに深謝いたします。また実験や分析調査などにご協力を頂いた太陽工業㈱、中興化成工業㈱、神鋼鋼線工業㈱、㈱タケチの各社関係者の皆様、及び作業所や技術研究所など竹中工務店の関連部署の関係者にも改めて御礼を申し上げます。

なお、7 章に記した一連の実験は、本建物の耐久性の調査以外に、空気膜構造における膜材料の補修および緊急対応（膜部分破損）時の技術（方法や手順）向上を目的として太陽工業㈱より提案され実施した内容であることを付記致します。

本報告が、今後の膜構造の発展の一助になれば幸いである。

【霊友会弥勒山エアードームの関連文献】

- 1) 山口伸夫：初の恒久空気膜構造 霊友会エアードーム、ビルディングジャーナル、1985. 1
- 2) 渡辺博司他：空気膜構造用膜材用の検討（その 1～3）
日本建築学会大会学術講演集（関東）、昭和 59 年 10 月
- 3) 丹野吉雄他：低ライズケーブル補強空気膜構造の実大実験及び内圧制御システム（その 1、2）
日本建築学会大会学術講演集（東海）、昭和 60 年 10 月
- 4) 影山健二他：霊友会弥勒山エアードームの音響について、
日本建築学会環境工学委員会
音環境分科会第 25 回音シンポジウム、1985. 02
- 5) 岡田章他：低ライズケーブル補強空気膜構造の長期観測
日本建築学会大会学術講演集（北海道）、昭和 61 年 8 月
- 6) 岡田章他：霊友会弥勒山エアードームの加圧・空調システム、空気調和・衛生工学 第 60 巻 第 3 号