

密閉型レンズ状二重空気膜構造の構造特性の把握と  
内圧設定手法の提案

令和2年6月

與那嶺 仁志



# 密閉型レンズ状二重空気膜構造の構造特性の把握と内圧設定手法の提案

## 目次

論文要旨	1
第1章 序論	9
1.1 研究の背景	10
1.1.1 空気膜構造の沿革	10
1.1.2 空気膜構造の分類とレンズ状二重空気膜構造の位置づけ	17
1.1.3 ETFE フィルムの材料特性とパネルタイプ	19
1.1.4 レンズ状二重空気膜構造の内圧制御方式	23
1.2 研究の目的	25
1.3 本論文の構成	28
1.4 用語の定義	31
第2章 ETFE フィルム材料およびレンズ型二重空気膜構造の概説と 既往の研究	33
2.1 はじめに	34
2.2 ETFE フィルムの材料特性と既往の研究	35
2.2.1 ETFE フィルム材料の特徴	35
2.2.2 ETFE フィルムの材料強度と許容応力度	47
2.3 レンズ状二重空気膜構造の内圧制御方式の現状	49
2.4 レンズ状二重空気膜構造の設計および構造解析の現状	52
2.5 構造問題の整理と研究の位置付け	56
第3章 密閉型レンズ状二重空気膜構造の基本構造特性の把握	59
3.1 はじめに	60
3.2 密閉型を考慮した数値解析モデル	61
3.3 内部体積の影響度の検証	64
3.3.1 検討概要	64
3.3.2 数値解析概要	64
3.3.3 数値解析結果	66
3.4 密閉型と定圧型の比較	67
3.4.1 検討概要	67
3.4.2 全面正圧載荷	67

3.4.3	全面負圧載荷	70
3.4.4	半面正圧載荷	72
3.5	初期内圧およびライズ・スパン比と膜応力の関係	74
3.6	まとめ	75
第4章	積雪荷重時における挙動と進行性ポンドイングの検討 . . . .	79
4.1	はじめに	80
4.2	積雪荷重時の問題点と進行性ポンドイング現象	80
4.2.1	積雪荷重時の問題点	80
4.2.2	進行性ポンドイング現象	81
4.3	正圧載荷実験	84
4.3.1	実験目的	84
4.3.2	実験概要	84
4.3.3	実験結果	89
4.3.4	数値解析結果と実験との比較検証	93
4.4	載荷範囲の違いに関する検討	99
4.4.1	数値解析概要	99
4.4.2	載荷範囲の違いによる数値解析結果	101
4.5	進行性ポンドイングを考慮した検討	105
4.5.1	数値解析概要	105
4.5.2	進行性ポンドイングの数値解析フロー	106
4.5.3	単調載荷と進行性ポンドイング考慮時の比較	108
4.6	内圧の違いによる検討	111
4.6.1	数値解析概要	111
4.6.2	内圧を考慮した検討結果	113
4.7	まとめ	119
第5章	過大な負圧荷重および繰り返し荷重時における挙動の把握 . .	123
5.1	はじめに	124
5.2	風荷重時の問題点	124
5.3	負圧載荷実験	126
5.3.1	実験目的	126
5.3.2	実験概要	126
5.3.3	実験結果	129
5.3.4	数値解析結果と実験との比較検証	137
5.4	初期内圧・アスペクト比・規模および膜厚の違いに関する検討	144

5.4.1	数値解析概要	144
5.4.2	初期内圧による比較	145
5.4.3	アスペクト比による比較	148
5.4.4	パネル規模および膜厚による比較	150
5.5	まとめ	154
第6章	構造設計フローおよび内圧設定手法の提案	157
6.1	はじめに	158
6.2	密閉型の構造設計フローの提案	159
6.2.1	密閉型の構造設計フロー	159
6.2.2	ライズ・スパン比、初期内圧および膜厚の仮定	160
6.2.3	長期に対する検討	161
6.2.4	短期に対する検討	162
6.2.5	負圧載荷時における内圧消失現象	163
6.2.6	偏荷重時の局所変形と進行性ポンドイング現象	164
6.3	内圧設定手法の提案	165
6.3.1	検討条件	165
6.3.2	検討結果	167
6.4	まとめ	168
第7章	統括	171
付録		179
【1】	必要初期内圧の検討結果	180
参考文献		201
研究業績		207



# 論文要旨

# 密閉型レンズ状二重空気膜構造の構造特性の把握と内圧設定手法の提案

## 論文要旨

レンズ状二重空気膜構造は2枚の膜材を周囲のフレームにより支持し、密閉された空間(2枚の膜材の内部)の圧力を外部の圧力より高くすることにより膜面に張力を与え、剛性を付加することで付加荷重に抵抗する構造システムである。ここで、外部圧力に対する内部圧力の差圧を「内圧」と称す。

一般に、空気膜構造は、東京ドームに代表される一重空気膜構造の「空気支持式」と、ビーム式に代表される「空気膨張式」に大別される。この分類は荷重抵抗形式に基づいたもので、これにより二つの構造形式には構造設計思想や設定される内圧に大きな差異が存在する。前者の「空気支持式」は内圧により荷重を支持する荷重抵抗形式を有し、必要内圧は比較的小さく抑えることが可能となる。例えば東京ドームの常時内圧は1気圧の0.3%程度である。一方、「空気膨張式」の付加荷重時の荷重抵抗形式は、片方の膜面が圧縮力を、もう片方の膜面が引張力をそれぞれ負担することで、曲げ抵抗を示す。この時、圧縮力を負担する膜面にしわ(wrinkling)を発生させない設計思想から、必要とする内圧はほぼ1気圧程度の高い数値となる。本論文で対象とする「レンズ状二重空気膜構造」は、「空気膨張式」のように曲げ抵抗のような性状を有しながらも、「空気支持式」のように内圧により荷重を支持させようという構造であり、両者の性状を併せ持つ構造形式である。本構造における内圧は空気支持式と同程度の低い値に抑えることが通常であるが、これは膜面のしわの発生を許容していることと同意である。

一重空気膜構造の設計においては、付加荷重を受けた際にも内圧が常に設定値に維持される(これを「定圧型」と称す)と仮定することが一般的である。これは、内圧制御の時間的な遅れが無視できるほど小さいとの前提に立脚したものである。



これを踏まえ、従来のレンズ状二重空気膜構造においても、定圧型の仮定を用いて検討が行われることが一般的である。しかし、密閉度の高いレンズ状二重空気膜構造では、一重空気膜構造に比べて内部の空気量が少ないため、状況によっては定圧型の仮定を満足できず、内部体積変化に伴う内圧変動により膜応力の急変も危惧されるが、その性状は不明確であり、これまで十分な検討がなされていない。よって、レンズ状二重空気膜構造においては、内部空気が密閉された状態(これを「密閉型」と称す)の挙動も無視することはできないと考えられる。例えば、強風時のように急激な内圧変動が予想される場合には、内圧制御により内圧一定を保持する仮定は現実的ではない。また、大型パネルへの空気供給やパネルを直列に連結した際の内圧制御は、加圧装置の能力に依存するため、積雪時においても内圧を常に一定と仮定することも事実上困難である。そのうえ近年では、薄くて軽く、透光性、耐候性に優れるETFE(エチレン・テトラフルオロエチレン共重合樹脂)フィルムを用いたレンズ状二重空気膜構造が、海外ではスタジアムなどの大規模施設から、建物に付属する小規模キャノピーなどの外装材として多くの事例に採用されているが、設計は基本的に定圧型を前提としており、密閉型を考慮した設計・解析手法は筆者の知る限り確立されていない。

上述のような背景を踏まえ、レンズ状二重空気膜構造における「密閉型」の構造特性を把握すると共に、本構造の安全性と安定性を確保するためには、積雪荷重や風荷重に対する挙動を予測できる構造解析手法をまず確立する必要がある。さらに、積雪等の偏荷重に伴う載荷部の局所的な変位の増大や、雨水等の滞水による進行性ポンドリングの発生、暴風時の過大な負圧荷重時に想定される内圧の減少・消失の際の不安定現象の発現等が懸念されるため、それらを多角的に考慮した構造設計フローと適切な内圧設定手法を確立する必要がある。

本論文では、以上の点を踏まえて、密閉型レンズ状二重空気膜構造に関する

以下の2つのテーマを設定し論じた。

(1)密閉型のレンズ状二重空気膜構造の挙動に対する評価技術の確立

(2)密閉型の特性に留意した構造設計フローの確立と内圧設定手法の提案

なお、本論文においては、平成29年6月の法改正により国内でも使用することが可能となったETFEフィルムを用いて、密閉型レンズ状二重空気膜構造に対する数値解析および実験を行い、上記テーマについて検証を行った。

本論文は7章より構成されている。

第1章「序論」では、我が国における空気膜構造の建設までの背景や分類、レンズ状二重空気膜構造の現状を概観し、さらに内圧制御方式を分析し、研究目的を明らかにすると共に、論文の全体構成および本論で使用する用語の定義を示した。

第2章「ETFEフィルムおよびレンズ状二重空気膜構造の概説と既往の研究」では、まずETFEフィルムの材料特性に関する既往の研究を調査、高分子材料であるETFEフィルムに起因する留意点を分析し、現状の法規、ETFEフィルムの材料強度および許容応力度等を整理した。次に内圧制御法とレンズ状二重空気膜構造の設計法、構造解析手法に関わる既往の研究等に対して、調査、整理を行った。最後に、上記に関わる構造問題および課題を整理することにより、本研究の位置付けを明確にした。

第3章「密閉型レンズ状空気膜構造の基本構造特性の把握」では、数値解析を用いて、密閉型レンズ状二重空気膜構造の内部体積量を変化させながら内部体積量と内圧変動の関係性を検証し、密閉型と定圧型それぞれの特徴や力学性状について確認した。さらに、全面正圧載荷、全面負圧載荷および半面正圧載荷における挙動について比較検証を行った。本章では「密閉型」の特性について次のような知見を得た。

- (1) 密閉型の内部体積を大幅に増大させると定圧型と同等の性状となる。この点から大規模な空気膜構造の設計を定圧型で仮定していることの妥当性が得られた。一方、規模を考慮しないで定圧型で設計することは、危険側の評価につながる可能性がある。
- (2) 密閉型は、片側の膜面のみで抵抗する定圧型と比べて剛性も高く、膜応力も小さくできる。

第4章「積雪荷重時における挙動と進行性ポンディングの検討」では、ETFEフィルムを用いた密閉型レンズ状二重空気膜構造の積雪荷重時の挙動の把握を目的として、実験および数値解析による比較検証を行った。次に数値解析により、アスペクト比(四角形パネルの辺長比)および载荷範囲をパラメータとして、偏荷重が膜面変位に与える影響の検討、さらに雨水等の滞水による進行性ポンディング現象の挙動について検証した。本章で得られた知見を以下に示す。

- (1) 実験と解析結果が概ね一致することを確認し、密閉型の数値解析手法の妥当性を実証した。
- (2) 偏荷重時、アスペクト比が大きいほど内圧増加の少ない「伸びなし変形」に近い性状を示すことを確認した。
- (3) 進行性ポンディング現象が生じる危険がある場合には貯水を考慮した検討が必要であるが、本検討の範囲内ではオーバーフローし、架構の崩壊には至らないことを把握した。

第5章「過大な負圧荷重および繰り返し荷重時における挙動の把握」では、風荷重を想定した全面負圧载荷を単調载荷した際の挙動、内圧が0となり片側の膜面張力が消失した際の挙動、および膜応力が第1降伏点を超える範囲で繰り返し载荷を行い、残留歪が発生した際の挙動等の把握を目的として、実験および数値解析により比較検証を行った。次に数値解析により、初期内圧、アスペクト比、規模お

よび膜厚の違いが及ぼす影響について検討を行った。本章で得られた知見を以下に示す。

- (1) 実験と解析結果が概ね一致することを確認し、密閉型の数値解析手法の妥当性を実証した。
- (2) 過大な負圧荷重時は、内圧が初期内圧から徐々に下がり、0Pa状態の維持後、負圧に移行する性状を把握した。
- (3) 非載荷側の膜面張力が抜けても、載荷側の膜面張力は抜けずに曲率を維持し、架構として不安定とならないことを確認した。

第6章「構造設計フローおよび内圧設定手法の提案」では、第3章～第5章で検証した内容を踏まえ、ETFEフィルムを用いた密閉型レンズ状二重空気膜構造の実用化を目的として、密閉型特有の留意点を考慮した多角的な視点での構造設計フローおよび適切な内圧の設定手法の提案を行った。設計フローでは、まず長期許容応力度、積雪・風荷重に対する短期許容応力度の検討を行い、加えて密閉型特有の挙動を考慮し、負圧荷重時における内圧消失の回避、および積雪偏荷重時の載荷側膜面の反転を許容しないことで、進行性ポンディングの回避等を基本方針とした。この設計フローに則り、6種類のパネルサイズ、4種類のフィルム厚、一般的な都市における荷重である積雪荷重600Paおよび±1000Pa～3000Paの風荷重に対して、密閉型レンズ状二重空気膜構造の適切な初期内圧量を表を用いて簡単に選定する手法を提案した。

最後に、第7章において総括を行った。本検討により、内部圧力の変動が評価できる数値解析手法から密閉型の留意点を考慮した設計手法を確立することを目的として、「密閉型レンズ状二重空気膜構造の評価方法」および、これに基づいた「構造設計フローと内圧設定手法」に関して提案し、その有効性を実証した。また、密閉型は最適な初期内圧を与えれば、その後は常時、非常時荷重に対して機械

的に圧力をコントロールする必要はない合理的でパッシブな構造システムであることを確認した。



# 第 1 章

## 序 論

## 第1章 序論

### 1.1 研究の背景

#### 1.1.1 空気膜構造の沿革

空気膜構造の起源は、200年以上前の熱気球の開発からはじまり、飛行船といった航空学に繋がっていく。飛行船に軽量の膜材が使われるようになり、その設計に使用された技術を用いて空気膜構造が大きく発展を遂げた。その後、航空学における成果を基盤として建築分野での空気膜構造の利用が進み、それ以外でもポートやマットなど様々な分野で空気膜構造は幅広く活用されている。

気球の原理を地上の構造物に適用させることを試みた最初の人物は、イギリスの技術者のFrederick William Lanchesterである。彼は1917年に、夜戦病棟の建物に空気により建物を支持する基本原理を用いた構造を考案し、特許を申請している。その後、直径330mのドームを内圧値の水圧差が25mmAq～75mmAq (250Pa～750Pa)程度の空気で支持可能な空気膜構造を考案したが、実現には至らなかった。

空気膜構造を実際に建設し、今日の空気膜構造の発展の礎を築いた人物が、アメリカのコネル大学航空宇宙研究所のWalter Birdである。彼は、1946年にアメリカ空軍のレーダー用アンテナシェルターとして、高ライズの球状空気膜構造のレーダードームを考案し建設した。膜材には、ガラス繊維にネオプレンゴムを塗装した気密性の高い膜を採用し、立体裁断して接着した15mほどの球形ドームを加圧装置によって膨らませている<sup>1.1), 1.2)</sup>。その後、1958年のベルギーのブリュッセル万国博覧会におけるパナアメリカン航空パビリオンを経て、1964年のニューヨーク万国博覧会で「空気の花」と名付けられた膜のシンボルタワーが建設され、世の中に空気膜構造の存在を大きく知らしめた。



日本で空気膜構造が登場し始めたのは、1970年の大阪で開催された万国博覧会である。表1. 1. 1に、万国博覧会「EXPO' 70」における空気膜構造の実例を示す。既に建設された海外の膜構造の経験を踏まえ、万国博覧会では積極的に様々なシステムの膜構造が生み出され、デザインの的にも技術的にも大きな発展を遂げた。フィルムによる二重空気膜構造を用いた「お祭り広場」、一重空気膜構造の「アメリカ館」、開閉式の休憩場屋根として空気膜構造が適用された「マッシュバルーン」、エアビーム構造の「富士グループパビリオン」、エアビームを梁として利用し外膜と内膜の間を負圧によって安定させた「電力館別館(水劇場)」といったパビリオンが建設された。その中でも「アメリカ館」は、D.GigerとH.Beregerによって膜材の強度により規模に制約のあった空気膜構造を、ケーブルで補強することで大規模ドームの実現を可能とした。<sup>1.3)、1.4)</sup>

1960年代、膜構造は日本において「非建築物」として扱われていた。しかし、1970年には6ヶ月以内という期限付きで「仮設建築物」としての使用が認められ、これにより、万国博覧会のような短期間であれば膜構造の建設が可能となった。設計においても、期限付き建築物による設計荷重の低減や、防火、構造の法律上の問題が一部免除されることで、設計法が確立していった。一方、海外において膜構造は「恒久建築物」として既に扱われていたが、日本においては膜材料に対する建築材料としての不燃性、耐久性および安全性への確証が進んでおらず、膜構造の恒久化の実現は難しい状況であった。

その後、新たな膜材のコーティング技術が開発され、ガラス繊維を織り込んだ新たな膜材が登場したことで、耐久性や防火性の問題を解決し、1980年代半ばに「恒久建築物」として扱われるようになった。膜構造の中でも空気膜構造を恒久化するためには、材料の問題に加え加圧装置の信頼性やエアリークといった問題も生じたが、建設技術や維持管理技術の発展によって、空気膜構造の恒久化を可能とした。

表1. 1. 1 万国博覧会「EXPO' 70」における空気膜構造の実例

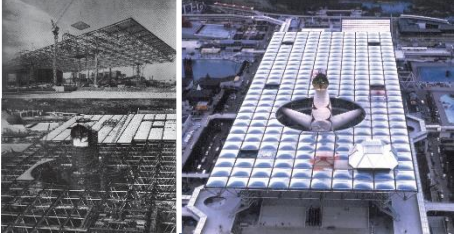


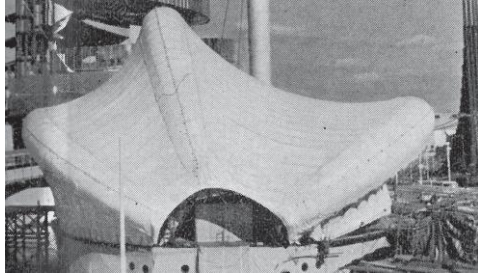

お祭り広場大屋根	
	<p>構造形式：レンズ状二重空気膜構造          膜材料：ポリエチレンテレフタレートフィルム（ルミラー）2軸延伸 厚さ 200<math>\mu</math>m          規模：全体 幅 108m、長さ 291.6m、せい7.637m（スペースフレーム部分）、パネルサイズ10.8m角</p>
富士グループパビリオン	
	<p>構造形式：ビーム式空気膜構造          膜材料：クロロスルホン化ポリエチレン樹脂コーティング・ビニロン繊維布          規模：外径 50m、最高高さ 31m、ビーム直径 4m、全長 72m（一定）、計 16 本</p>
アメリカ館	
	<p>構造形式：低ライズ一重空気膜構造          膜材料：塩化ビニル樹脂コーティング・ガラス繊維布          設定内圧：常時内圧 270Pa、非常時内圧 630Pa          規模：9,500 m<sup>2</sup>、長辺直径 142m、短辺直径 83.5m、高さ 6.1m</p>
電力館別館（水上劇場）	
	<p>構造形式：ビーム式空気膜構造＋二重空気膜構造          膜材料：外膜 テトロン布地塩ビ加工、内膜 ナイロン布地塩ビ加工          設定圧力：エアビーム 常時内圧 15,000Pa、非常時内圧 30,000Pa、二重膜内圧 -100Pa( 負圧 )</p>
マッシュユバルーン	
	<p>構造形式：二重空気膜構造          膜材料：塩化ビニル樹脂コーティング・ポリエステル繊維布          規模：最大直径 30m          丸い空気マットを 45 本のワイヤーで吊り支持。中央ウインチの巻取りにより開閉可能。</p>

表1. 1. 2に、日本における大規模恒久空気膜構造の実例を示す。1988年には日本で最初の大規模屋根付きスタジアムとして「東京ドーム」が完成し、大規模恒久膜構造が実現した<sup>1.5)</sup>。しかし、1997年に二重空気膜構造である「パークドーム熊本」の完成以降、大規模な膜構造は、骨組膜構造やサスペンション膜構造が主流となっていた。空気膜構造は、大規模な無柱空間を構造合理性や施工性の高さに基づきローコストで構築できる一方で、常に加圧装置によって内圧の維持管理が必要のため、他の膜構造に比べてランニングコストが高く、現在では新規に大規模空気支持構造の計画や建設は、国内外共に行われていない。

表1. 1. 2 日本における大規模恒久空気膜構造の実例

<p>東京ドーム (1988)</p> 	<p>構造形式：一重空気膜構造          膜材料：PTFE コーティング・ガラス繊維布          設定内圧：常時内圧 300Pa                            非常時内圧 900Pa</p>
<p>パークドーム熊本 (1997)</p> 	<p>構造形式：二重空気膜構造+骨組膜構造          膜材料：PTFE コーティング・ガラス繊維布          設定内圧：常時内圧 300Pa</p>

現在でもスタジアム建築等において採用される膜構造は、骨組膜構造やサスペンション膜構造が大半であるが、近年になって空気膜構造は大きな転換期を迎えている。その背景には、ETFE（エチレン・テトラフルオロエチレン共重合樹脂）フィルムの出現がある。ETFEフィルムの材料特性を生かした空気膜構造、その中でも特に海外でレンズ状二重空気膜構造を用いた建築外装材としての利用が進み、ETFEフィルムの出現に伴って空気膜構造も再び注目されることとなった。

ETFEフィルムは、透明性、耐候性および引き裂き伝搬強度に優れた材料であり、ガラスに変わる材料として近年注目を集めている。透光率は90%～97%とガラスと比べても高く、約30年の経年劣化試験においても、新品とほぼ同等の強度を保つ性能を有する。このような特徴から、膜構造のスポーツ施設、温室、アトリウム等を中心に世界中で多く採用されている。

表1. 1. 3に、海外におけるETFEフィルムを用いたレンズ状二重空気膜構造の実例を示す。海外では、1980年代頃から建築物の屋根への使用がはじまり、2001年に完成した温室のエデンプロジェクト、2006年サッカーワールドカップのスタジアムとして使用されたアリアンツ・アリーナ、2008年の北京オリンピックのスタジアムや水泳場などの大規模施設から、建物に付属する小規模キャノピーなど、外装材として数多くの実績がある<sup>1.6)</sup>。フィルム自体は織布等で補強された膜材料に比べて伸びやすく、温度依存性と材料非線形性を有する材料であるが、レンズ状二重空気膜構造を採用しパネルシステムとして剛性を高めることで、パネルの大型化を可能としている。



近年では、日本においてもETFEフィルムの利点を活用しようとする動きが高まり、構造材料としての利用を目的とした材料的性質や、その特徴を活かした構造システムの研究が進んでいる。平成18年には日本膜構造協会より、ETFEフィルムの建築膜材料としての利用に関する指針案「ETFEフィルムパネル設計・施工指針(案)」が提案された<sup>1.7)</sup>。

表1. 1. 3 海外におけるETFEフィルムを用いた二重空気膜構造の実例

エデンプロジェクト (2001)	
	<p>構造形式：レンズ状二重空気膜構造</p> <p>膜材料：ETFEフィルム 200 <math>\mu</math>m、最大スパン約11m</p> <p>所在地：イギリス、コーンウォール</p> <p>設定内圧：常時内圧 200Pa 非常時内圧 600Pa</p>
アリアンツ・アリーナ (2005)	
	<p>構造形式：レンズ状二重空気膜構造</p> <p>膜材料：ETFEフィルム 200 <math>\mu</math>m、パネルサイズ約4.5m x 16.5m</p> <p>所在地：ドイツ、ミュンヘン</p> <p>設定内圧：常時内圧 350Pa</p>
北京オリンピック水泳場 (2008)	
	<p>構造形式：レンズ状二重空気膜構造</p> <p>膜材料：ETFEフィルム 200 <math>\mu</math>m、最大スパン約9m</p> <p>所在地：中国、北京</p> <p>設定内圧：常時内圧 200Pa</p>

平成26年10月に、平成12年建設省告示第1446号の改正により、「膜構造用フィルム」として建築基準法上の指定建築材料に加わり、防火上も平成27年に平成12年建設省告示1443号の改正、平成28年に国土交通省告示693号の施行などによりETFEフィルムの使用できる範囲が拡大された。そして、平成29年6月の改正にて材料強度と設計法が位置づけられ、確認申請で扱える材料となった<sup>1.8)~1.12)</sup>。表1. 1. 4に、日本におけるETFEフィルムを用いた二重空気膜構造の実例を示す。2016年に新豊洲Briria ランニングスタジアムが完成し、日本国内においてもETFEフィルムの建築への利用が積極的に進んでいる。

表1. 1. 4 日本におけるETFEフィルムを用いた二重空気膜構造の実例

新豊洲Briria ランニングスタジアム (2016)	
	<p>構造形式：レンズ状二重空気膜構造            膜材料：ETFEフィルム 250 <math>\mu</math> m、スパン2m            所在地：東京都            設定内圧：常時内圧 300Pa                              非常時内圧 850Pa</p>
	

## 1. 1. 2 空気膜構造の分類とレンズ状二重空気膜構造の位置づけ

空気膜構造は、膜材料を用いて形成された内部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、膜材料を張力状態とし、付加荷重に対して抵抗する構造形式である。空気膜構造の分類を、図1. 1. 1に示す。

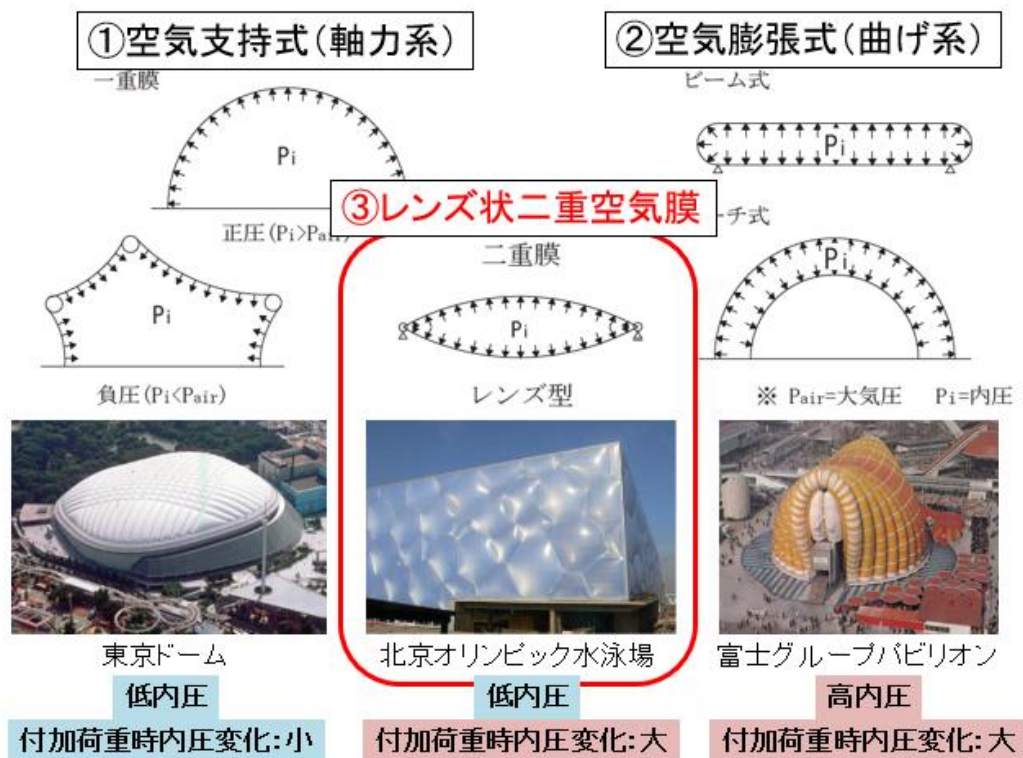


図1. 1. 1 空気膜構造の分類

一般に、空気膜構造は、東京ドームに代表される一重空気膜構造の「空気支持式」と、富士グループパビリオンのようなビーム式に代表される「空気膨張式」に大別される。この分類は荷重抵抗形式に基づいたものであり、これにより二つの構造形式には、構造設計思想や設定される内圧に大きな差異が存在する。

「空気支持式」は、内圧により荷重を支持する荷重抵抗形式であり、膜材と躯体・地盤等により構成された空間に外気よりもわずかに高い圧力を与えることにより

安定性を得る構造である。空気支持式は、規模が大きくなった場合においても必要な圧力に大きな変化はなく、必要内圧は比較的小さく抑えることが可能となる。例えば、東京ドームの常時内圧は1気圧の0.3%程度である。

「空気膨張式」は、チューブ状の膜材に空気を内包させ、膜内部の空気圧を高めて剛性を与えることで、チューブ全体を一体として付加荷重に抵抗する構造である。付加荷重時に片方の膜面が圧縮力を、もう片方の膜面が引張力をそれぞれ負担することで、曲げ抵抗を示す。この時、圧縮力を負担する膜面にしわ(wrinkling)を発生させない設計思想から、必要とする内圧はほぼ1気圧程度の高い数値となる。

本論文で対象とする「レンズ状二重空気膜構造」は、「空気膨張式」のように曲げ抵抗のような性状を有しながらも、「空気支持式」のように内圧により膜自重と付加荷重を支持する構造であり、両者の性状を併せ持つ比較的新しいコンセプトの構造形式である。



### 1. 1. 3 ETFEフィルムの特長とパネルタイプ

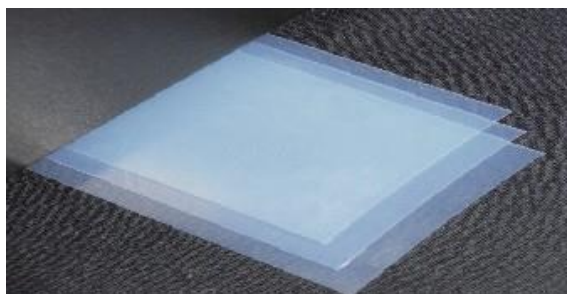


写真 1. 1. 1 ETFE フィルム

レンズ状二重空気膜構造には、様々な膜材を用いることが可能であるが、世界中で汎用性の高いETFEフィルムが多く用いられている。ETFEフィルムは、エチレンとテトラフルオロエチレンを95%以上含む共重合樹脂からなる熱可塑性の高分子材料(写真1. 1. 1)であり、その特徴から「材料非線形性」をもつ材料である<sup>1.7)、1.13)</sup>。

図1. 1. 2に、ETFE フィルムの応力とひずみの関係を示す。

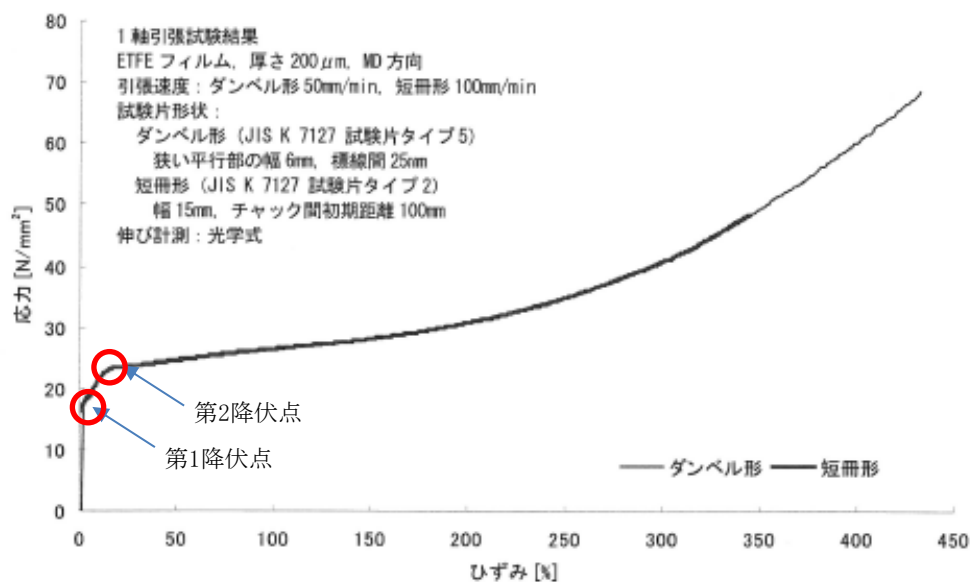


図 1. 1. 2 ETFE フィルムの応力とひずみの関係  
(ETFE フィルムパネル設計・施工指針(案)<sup>1.7)</sup>より)

材料非線形性については、約2%のひずみにおいて降伏(第1降伏)が発生し、その後12%付近で再び降伏(第2降伏)、その後、最大で350~450%程度の大きなひずみを生じながら最終的に破断に至る。実際に設計で用いられる範囲は約10%のひずみまでとし、第1勾配と第2勾配をもつバイリニア材料として扱われている。また、一般的な織布繊維膜(A種膜)の設計用弾性係数は、縦方向1,200kN/m、横方向960kN/mであるのに対し、ETFEフィルムは織布繊維膜の1/8程度であり、ETFEフィルムは膜材料の中でも比較的low剛性な材料である。

図1. 1. 3にフィルムパネルタイプの概念図を示す。ETFEフィルムを用いたパネルタイプは、①のテンションタイプと②のクッションタイプ(レンズ状二重空気膜)に大別される。

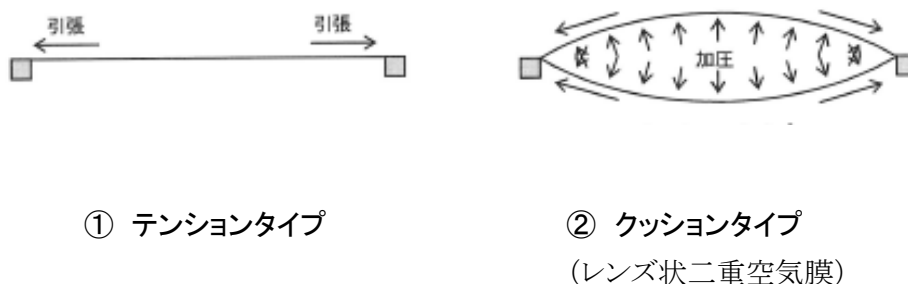
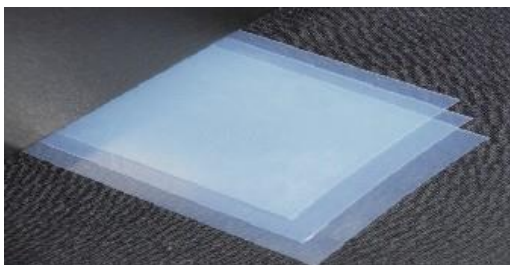


図1. 1. 3 フィルムパネルタイプの概念図  
(ETFE フィルムパネル設計・施工指針(案)<sup>1.7)</sup>より)

テンションタイプは、フィルムに外周から引張力を与える形式であり、膜張力を維持するためには適切な初期張力を与える必要がある。一方、クッションタイプ(レンズ状二重空気膜)は、2枚の膜材を周囲のフレームで支持し、密閉された2枚の膜内の圧力を外部の圧力より高くすることにより、膜面に張力を与えパネルの剛性を高めることで、付加荷重に抵抗する構造システムである。よってテンションタイプに比べて剛性が高く付加荷重に対する変形が小さくなり、パネル規模を大きくすることが可能である。

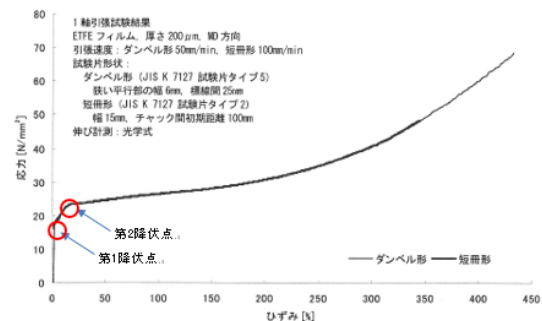
図1. 1. 4に、ETFEフィルムの材料特性とパネルタイプの関係を示す。テンションタイプは、材料の塑性化を許容してしまうと残留変位が残り、膜張力が消失してしまう。よって一般的に、弾性範囲での設計が行われている。またレンズ状二重空気膜構造を採用した場合は一般的に、ETFEフィルムは第1降伏点を超え、約10%のひずみまで許容した設計が行われている。弾性範囲を超えるような大きな荷重によって生じた残留歪によるフィルムの伸びは、内部に空気を追加することで内圧の保持が可能のため、レンズ状二重空気膜が少し膨らむことで許容されていると考えられる。

## ETFEフィルムの材料特性



エチレンとテトラフルオロエチレンを95%以上含む共重合樹脂からなる熱可塑性の高分子材料

## ETFE フィルムの応力 - ひずみ関係



約2%のひずみにおいて降伏(第1降伏)が発生し、その後12%付近で再び降伏(第2降伏)設計で用いられる範囲は約10%のひずみまでとし、第1勾配と第2勾配をもつバイリニア材料として扱う

塑性化を許容しない

塑性化を許容

### 【テンションタイプ】



材料の塑性化を許容してしまうと残留変位が残り、膜張力が消失してしまうため、弾性範囲での設計が一般的に行われている

### 【クッションタイプ (レンズ状二重空気膜)】



弾性範囲を超えるような大きな荷重によって生じた残留歪によるフィルムの伸びは、内部に空気を追加することで内圧の保持が可能のため、レンズ状二重空気膜が少し膨らむことで許容する

図1. 1. 4 ETFEフィルムの材料特性とパネルタイプの関係

### 1. 1. 4 レンズ状二重空気膜構造の内圧制御方式

図1. 1. 5に内圧制御方式の種類とその特徴および問題点を示す。空気膜構造の内圧制御方式に関しては、1980年代を中心に東京ドームを代表とする一重空気膜構造に関する研究が進み、多くの知見が得られている。

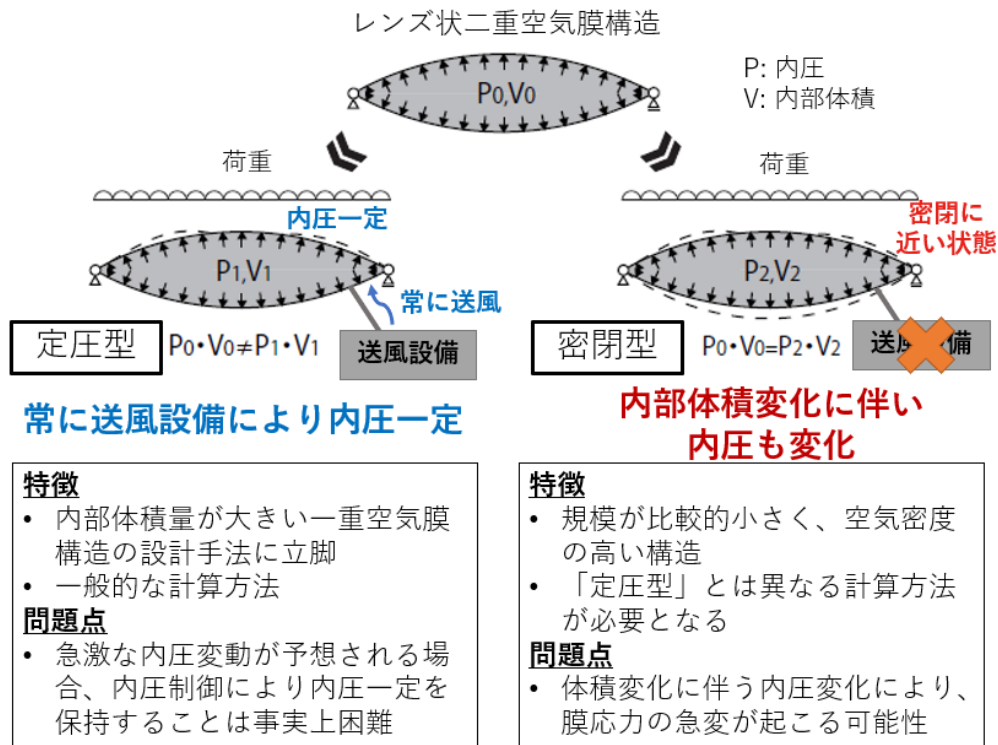


図1. 1. 5 内圧制御方式の種類とその特徴および問題点

一重空気膜構造の設計においては、付加荷重が働いた際にも内圧が常に設定値に維持される(これを「定圧型」と称す)と仮定することが一般的である。これは、比較的規模が大きいこともあり、付加荷重により変形が生じて内部体積変化に伴う内圧の変化はそれほど大きくなく、また加圧装置による内圧制御の時間的な遅れが無視できるほど小さいという前提に立脚したものである。これを踏まえ、従来のレンズ状二重空気膜構造においても、定圧型の仮定を用いて検討が行われることが一般的である<sup>1.14)</sup>。

しかし、レンズ状二重空気膜構造のように規模が比較的小さく、特に空気密度

の高い構造では、一重空気膜構造に比べて内部の空気量が少ないため、状況により内圧一定の仮定を満足できず、体積変化に伴う内圧変化により膜応力の急変が危惧される。よって、空気支持式と空気膨張式の両者の性状を併せ持つレンズ状二重空気膜構造においては、内部空気が密閉された状態(これを「密閉型」と称す)の挙動も無視することはできないと考えられる。

その際にはボイル・シャルルの法則が関係する(式1. 1. 1)。

$$PV = nRT \quad (1. 1. 1)$$

圧力:  $P$  [ Pa ]

体積:  $V$  [ L ]

物質質量(気体):  $n$  [ mol ] (密閉の場合は一定)

気体定数:  $R$  (一定)

絶対温度:  $T$  [ K ]

気温と気体の物質質量が一定と仮定した場合、図1. 1. 5に示す常時 $P_0 \cdot V_0$ の関係が、付加荷重時における $P_2 \cdot V_2$ と釣り合う。例えば付加荷重時に内部体積が減少した際には、内圧が上昇する関係である。

加えて、強風時に動的に変動する風荷重により急激な内圧変動が予想される場合には、内圧制御により内圧一定を保持する仮定は現実的ではない。また大型パネルへの空気供給やパネルを直列に連結した際の内圧制御は、加圧装置の性能に依存するため、強風時だけでなく積雪時においても内圧を常に一定と仮定することは事実上困難である。よって内圧一定の仮定は、条件によっては危険側の評価につながる可能性もある。

## 1.2 研究の目的

ETFEフィルムを用いたレンズ状二重空気膜構造は、既に世界中で多くの建物に採用されている。しかし、材料に対する許容応力度のガイドラインはあるものの、様々な荷重条件に対する適切な設計クライテリアや数値解析手法は、現状では確立されていない。

特に内圧制御の仮定は、内部体積量が大きい一重空気膜構造に用いられる定圧型が一般的であるが、レンズ状二重空気膜構造のように規模が比較的小さく、空気密度の高い構造では、内圧一定の仮定を満足できない場合もある。よって密閉の影響による急激な内圧変動等に対する評価が重要となるが、これまで充分に行われていない。

加えて、レンズ状二重空気膜構造を採用する際に、第1降伏点を超え約10%のひずみまで許容した設計が一般的に行われているが、ETFE フィルムが降伏した後のレンズ状二重空気膜構造の性状は不明確であり、詳細な検討は充分になされていない。

このような状況の中で、ETFE フィルムの材料非線形性を考慮した定圧型と密閉型の性状の違いを把握し、積雪荷重や風荷重に対する挙動を予測する数値解析手法を確立する必要がある。

また上記に加え、積雪時の偏分布の影響や貯水による進行性ポンディング、暴風時のような過大な負圧荷重の際に生じる内圧減少・消失時の挙動等、密閉型特有の留意点を多角的に考慮した構造設計フローと適切な内圧設定手法を確立する必要があると考える。

前述の研究の背景を踏まえて、密閉型レンズ状二重空気膜構造に関する以下の2つのテーマが重要と考え、本論文の目的とする。

(1) 密閉型のレンズ状二重空気膜構造の挙動に対する評価技術の確立

(2) 密閉型の特性に留意した構造設計フローの確立と内圧設定手法の提案

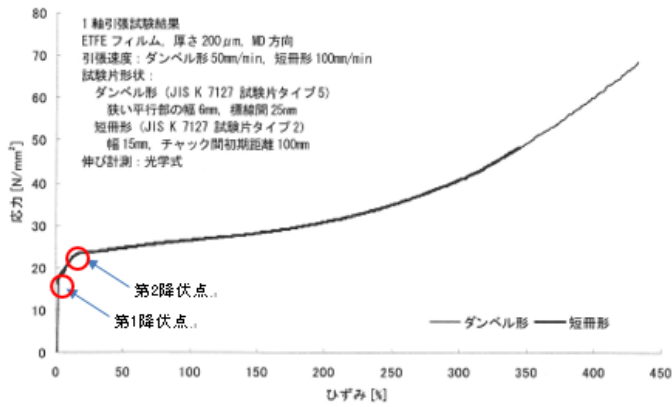
なお、本論文においては、平成29年6月の法改正により国内でも使用することが可能となったETFEフィルムを用いて、密閉型レンズ状二重空気膜構造に対する数値解析および実験を行い、上記のテーマについて検証する。

図1. 2. 1に ETFEフィルムを用いたレンズ状二重空気膜構造の現状と研究目的を示す。

なお、本研究で対象とする密閉型のレンズ状二重空気膜構造は、最適な初期内圧を与えれば、その後は付加荷重に対して加圧装置により内圧をコントロールする必要はないため、合理的でパッシブであり、かつメンテナンスが容易なコスト低減できる汎用性の高い構造システムとなる可能性がある。



### ETFEフィルムの材料特性(材料非線形性)



### <現 状>

- ・海外ではETFEフィルムの許容応力度を示すガイドラインは存在
- ・国内では、塑性化を許容した告示を平成29年6月に施行
- ・構造設計における内圧制御の考え方は定圧型が一般的であり、密閉型の挙動の考えは考慮されていない
- ・ETFEフィルムの材料非線形性を考慮したレンズ状二重空気膜構造の挙動が明確に検証されていない。

### <本研究のテーマ>

密閉型レンズ状二重空気膜構造の構造特性の把握と内圧設定手法の提案

### <本研究の目的>

- (1) 密閉型のレンズ状二重空気膜構造の挙動に対する評価技術の確立
- (2) 密閉型の特性に留意した構造設計フローの確立と内圧設定手法の提案

### 内圧制御方式

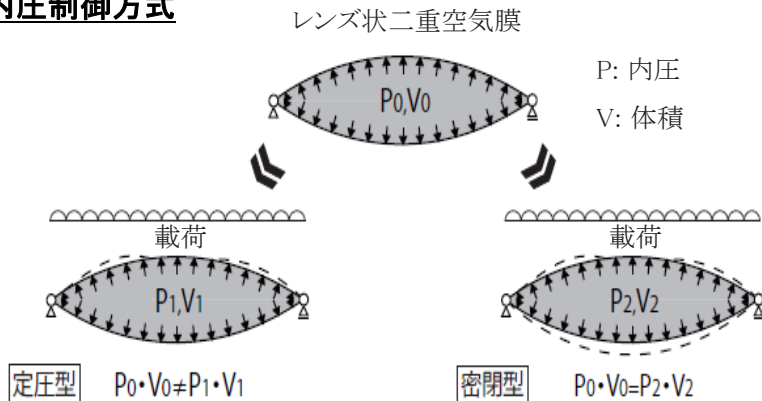


図1. 2. 1 ETFEフィルムを用いたレンズ状二重空気膜構造の現状と研究目的

### 1.3 本論文の構成

本論文は7章より構成される。図1.3.1に本論文の構成を示す。

第1章「序論」では、我が国における空気膜構造の建設までの背景や分類、レンズ状二重空気膜構造の現状を概観し、さらに内圧制御方式の影響を考慮した密閉型のレンズ状二重空気膜構造の設計上の課題を分析する。これらを背景として研究目的を明らかにすると共に、論文の全体構成および用語の定義を示す。

第2章「ETFEフィルムおよびレンズ状二重空気膜構造の概説と既往の研究」では、まずETFEフィルムの材料特性に関する既往の研究を調査、高分子材料であるETFEフィルムに起因する留意点を分析し、現状の法規、ETFEフィルムの材料強度および許容応力度等を整理する。次に内圧制御法とレンズ状二重空気膜構造の設計法、構造解析手法に関わる既往の研究等に対して、調査、整理を行う。最後に、上記に関わる構造問題および課題を整理することにより、本研究の位置付けを明確にする。

第3章「密閉型レンズ状空気膜構造の基本構造特性の把握」では、数値解析を用いて、密閉型レンズ状二重空気膜構造の内部体積量を変化させながら内部体積量と内圧変動の関係性を検証し、密閉型と定圧型それぞれの特徴や力学性状について確認する。さらに、全面正圧載荷、全面負圧載荷および半面正圧載荷における挙動について比較検証を行う。

第4章「積雪荷重時における挙動と進行性ポンディングの検討」では、ETFEフィルムを用いた密閉型レンズ状二重空気膜構造の積雪荷重時の挙動の把握を目的として、実験および数値解析による比較検証を行う。次に数値解析により、アスペクト比(四角形パネルの辺長比)および載荷範囲をパラメータとして、偏荷重が膜面変位に与える影響の検討、さらに雨水等の滞水による進行性ポンディング現象の挙動について検証する。

第5章「過大な負圧荷重および繰り返し荷重時における挙動の把握」では、風荷重を想定した全面負圧荷重を単調荷重した際の挙動、内圧が0となり片側の膜面張力が消失した際の挙動、および膜応力が第1降伏点を超える範囲で繰り返し荷重を行い残留歪が発生した際の挙動等の把握を目的として、実験および数値解析により比較検証を行う。次に数値解析により、初期内圧、アスペクト比、規模および膜厚の違いが及ぼす影響について検討を行う。

第6章「構造設計フローおよび内圧設定手法の提案」では、第3章～第5章で検証した内容を踏まえ、ETFEフィルムを用いた密閉型レンズ状二重空気膜構造の実用化を目的として、密閉型特有の留意点を考慮した多角的な視点での構造設計フロー、および様々な規模、実際に使われるフィルム厚、日本の地域性の荷重条件を考慮した適切な内圧の設定手法の提案を行う。

最後に第7章「総括」において研究の成果をまとめると共に、密閉型レンズ状二重空気膜構造の今後の課題について述べる。

密閉型レンズ状二重空気膜構造の構造特性の把握と  
内圧設定手法の提案

1. 序論

- ・ 研究の背景
- ・ 研究の目的
- ・ 本論文の構成および用語の定義

2. ETFE フィルムおよびレンズ状二重空気膜構造の概説と  
既往の研究

- ・ ETFE フィルムの特性と既往の研究
- ・ 内圧制御法(定圧型、密閉型)の現状
- ・ レンズ状二重空気膜構造の設計、構造解析の現状

構造問題の発生

- ・ 定圧での設計が主流であるが、状況によっては密閉状態に近い挙動となり、内部空気の体積変化に伴う内圧変化により膜応力の急変が予想される
- ・ ETFEフィルムを降伏させ10%程度のひずみまで許容する設計を通常行っているが、材料非線形性を考慮した二重空気膜構造の挙動が明確に検証されていない

研究テーマの発生

本研究の目的

- (1) 密閉型のレンズ状二重空気膜構造の挙動に対する評価技術の確立
- (2) 密閉型の特性に留意した構造設計フローの確立と内圧設定手法の提案

3. 密閉型レンズ状二重空気膜構造の基本構造特性の把握

- ・ 二重空気膜構造の内部空気量(体積)が剛性や挙動に与える影響の把握
- ・ 数値解析による密閉型と定圧型の力学性状の把握

4. 積雪荷重時における挙動と進行性ボンディングの検討

- ・ 全面載荷、半面載荷時の実験および数値解析の比較
- ・ 荷重の載荷範囲の違いに関する検討
- ・ 初期内圧の違いによる検討
- ・ 進行性ボンディングを考慮した検討

5. 過大な負圧荷重および繰り返し荷重時における挙動の把握

- ・ 全面載荷時の実験および数値解析の比較
- ・ 初期内圧の違いに関する検討
- ・ アスペクト比、規模および膜厚の違いに関する検討

6. 構造設計フローおよび内圧設定手法の提案

- ・ 実用化を目的とした密閉型レンズ状二重空気膜構造の構造設計フローの提案
- ・ 様々な規模、フィルム厚、荷重条件を考慮した内圧設定手法の提案

7. 統括

- ・ 研究結果
- ・ 今後の展望、課題

図1.3.1 本論文の構成

## 1.4 用語の定義

本論文では、レンズ状二重空気膜構造の特有の用語を下記のように定義している。

空気膜構造<sup>1,15)</sup>: 膜材料を用いて形成された屋根および外壁の屋内側の空間に空気を送り込むことによって、内部の空気圧を高め、膜材料を張力状態とし、付加荷重に対して抵抗する構造方法。

空気支持式: 一重空気膜構造に代表される構造形式であり、膜材と躯体、地盤等で構成された空間に、外気よりもわずかに高い圧力を与えることにより安定性を得る構造である。空気支持式は、規模が大きくなった場合においても必要な圧力に大きな変化はなく、比較的低下内圧の構造である。

空気膨張式: ビーム式、アーチ式空気膜構造に代表される構造形式であり、チューブ状の膜材に空気を内包させ、膜内部の空気圧を高めて剛性を与えることで、チューブ全体を一体として付加荷重に抵抗する構造である。空気膨張式は圧縮側の膜面が張力を失ってしわ(wrinkling)を発生させないために、小さな体積の空気に対し高い圧力を必要とする。空気支持式と異なり規模に応じて必要な圧力量は変化する。

内圧: レンズ状二重空気膜構造は、密閉された空間(内部)の圧力を外部の圧力より高くすることにより、膜面に張力を与え、剛性を付加することで付加荷重に抵抗する構造システムである。ここで外部圧力に対する内部圧力の差圧を内圧と称す。

内圧制御: レンズ状二重空気膜構造は、密閉された空間(内部)に加圧装置からダクトを介し、さらに細いチューブを通じて空気を供給し外部の圧力より内部を高め、風船のように膨らませている。  
長期時(常時)は一度膨らめば基本的に内部圧力は一定であるが、施工・製作性の問題で少なからず空気漏れが起こるた

め、センサーで管理して常に内圧が一定になるよう制御(内圧制御)を行っている。

暴風時、積雪時は、設計方針によるが通常、常時の設定内圧よりも高い内圧を設定することで、構造体の剛性の増加を期待する場合がある。これは内圧を上げることにより直接膜にかかる抵抗力を高めるだけでなく、膜面曲率の増加による剛性の増加も期待している。このように付加荷重時においても、内圧が一定となるよう制御(内圧制御)することで構造性能を高めることも可能となるが、運用管理や特別なセンサーの設置などが必要となる。

定圧型: 上記の内圧制御を行うことで、常時荷重、付加荷重時において、加圧装置によりレンズ状二重空気膜構造の密閉された内部圧力を常に一定にする型式。

密閉型: 常時内圧を一定に保つために、常時は空気漏れに対して加圧装置により内圧制御を行うが、暴風時、積雪時は送風を行わずレンズ状二重空気膜構造の内部空気が密閉された型式。体積×内圧が常に一定との仮定の下、ボイル・シャルルの法則が成り立つ型式であり、付加荷重時には内圧変動が生じる。

ETFEフィルムの塑性: ETFEフィルムは、材料非線形性を有する材料であり、約2%のひずみにおいて降伏(第1降伏)する。その後、12%付近で再び降伏(第2降伏)する。荷重を取り除いた後にもとの状態に戻らない性質を本論文では塑性と称す。

進行性ポンドイング現象: 膜・フィルム面が積雪、融雪水および雨水等の荷重によって変形して滞留を生じ、さらなる変形と滞留水等の増加が継続的に進行する現象。

なお、本論文では下記の用語を省略して用いている。

ETFE: エチレン・テトラフルオロエチレンフィルム共重合体

## 第 2 章

ETFEフィルムおよびレンズ状二重空気膜構造の概説と  
既往の研究

## 第2章 ETFEフィルムおよびレンズ状二重空気膜構造の概説と既往の研究

### 2.1 はじめに

一般に膜構造に使用される膜材料は、たて糸、よこ糸とを織った繊維織物に樹脂のコーティングを施したものであるが、ETFEフィルムは、四フッ化エチレンとエチレンの共重合体を基本組成とする熱可塑性の高分子材料である。そのためETFEフィルム特有の材料非線形性、速度・温度依存性などは、この材料特性に起因して生じるものと考えられる。一方、張力の存在によって安定性を図る張力膜構造にとって、材料の塑性化や高温時による過大な材料の伸びは張力を消失する要因となり、極めて本質的な問題である。

本章では、ETFEフィルムの材料特性、レンズ状二重空気膜構造に採用する設計手法、内圧制御方法の考え方等に関して既往文献を対象に調査し、本研究の位置付けを明らかにするものである。

具体的には、まず高分子材料であるETFEフィルムの詳細な材料特性について調査し、次に内圧制御方式の詳細、構造設計手法および数値解析手法に関する現状を分析し、整理する。



## 2.2 ETFEフィルムの特徴と既往の研究

### 2.2.1 ETFEフィルム材料の特徴

ETFEフィルムは、四フッ化エチレンとテトラフルオロエチレンを95%以上含む共重合樹脂からなる高分子材料で、一般的な製造方法は、フッ素樹脂原料を融点以上の温度で溶融させ、押し出し成形により製膜する方法やインフレーション法などがある。表2.2.1に、ETFEフィルムと他の透明な建材の材料特性を示す。

表2.2.1 ETFEフィルムと他の透明な建材の材料特性

(ETFEフィルムパネル設計・施工指針(案)<sup>2,1)</sup>より)

	ETFEフィルム材	ポリカーボネート板	塩化ビニルフィルム	普通板ガラス
耐候性	良好	表面耐候処理が必要	良くない	極めて良好
光線透過率	95%	89%	95%	80%
熱膨張率	$6 \times 10^{-5}$	$7.0 \times 10^{-5}$	$5 \sim 10 \times 10^{-5}$	$8.5 \times 10^{-6}$
引張破断強度 ( $N/mm^2$ )	40~60	56~70	45~63	30~90
伸び%	400	105	200	—
比重	1.75	1.2	1.4	2.5
厚み	50~250 $\mu m$	2~15mm 但し 防火上は8mm以下	50~200 $\mu m$	3~19mm
変形追従性	極めて良い	比較的良 サッシ呑み込み代 が必要	良い	良くない サッシ・ファス ナーに工夫が必要
耐衝撃性	良好	極めて良好	良好	割れる
自己浄化性	良好	比較的汚れやすい	汚れやすい	比較的汚れやすい
耐熱性 (融点)	260-270℃	220-230℃	180℃	720-730℃ (軟化点)
防火性	防炎	防炎	防炎	不燃
リユース	可能	不可	不可	可能

ETFEフィルムは、ポリカーボネート板や普通板ガラスに比べて、軽量で極めて薄く、また透明性が高く紫外線を透過する材料である。また、塩化ビニルフィルムに比べても強度に比例して伸びが大きいいため、変形追従性が非常に高く、耐衝撃性にも優れ、加えて自己浄化性を有している。

ETFEフィルムの材料特性に関しては、海外では特にヨーロッパで多くの実験が

行われ、DESIGN RECOMMENDATIONS FOR ETFE FOIL STRUCTURES (TensiNet ETFE Working Group, 2013)<sup>2.2)</sup>にて多くの実験結果がまとめられている。また国内では、斎藤ら<sup>2.3)</sup>、岡田ら<sup>2.4)~2.8)</sup>、河端ら<sup>2.9)~2.14)</sup>、吉野ら<sup>2.15)~1.17)</sup>によりETFEフィルム自体の機械的特性、弾塑性挙動、粘弾性挙動、クリープ特性および進行性ポンドイングに関する多くの実験が行われている。平成26年10月の告示1446号の改正によりETFEフィルムが追加され、平成29年6月の改正<sup>2.18)</sup>にて基準強度と設計法が位置づけられ、確認申請で扱える材料となった。

以下に、ETFEフィルムの特徴的な材料特性を示す<sup>2.1), 2.19)</sup>。

- (1) 非抗圧性
- (2) 等方性
- (3) 材料非線形性
- (4) ひずみ速度依存性
- (5) 引張クリープ性(温度依存性)
- (6) 履歴依存性

高分子材料であるETFEフィルムは、多数の鎖状高分子が集まった物質である。図2. 2. 1に高分子材料の特徴を示す。赤い規則的なパターンを持つ結晶相(原子間の化学的結合により強い結合を持つ弾性的な挙動)と、ランダムな鎖状の非結晶相(物理的拘束による弱い結合)からなり、結晶化度の低い半結晶性の高分子材料である<sup>2.20)</sup>(ETFEは33%程度が結晶相である)。この半結晶性の高分子材料は、温度上昇時に各鎖状高分子の分子活動が活発になり結束が弱まることで、(4) ひずみ速度依存性や(5) 引張クリープ性(温度依存性)を持つ。しかし材料がクリープし、ある一定以上伸びた場合、結晶相は荷重方向にそれ自体を整列させる特性があり、弾性的な挙動となる(6) 履歴依存性も併せて持つ<sup>2.21)</sup>。

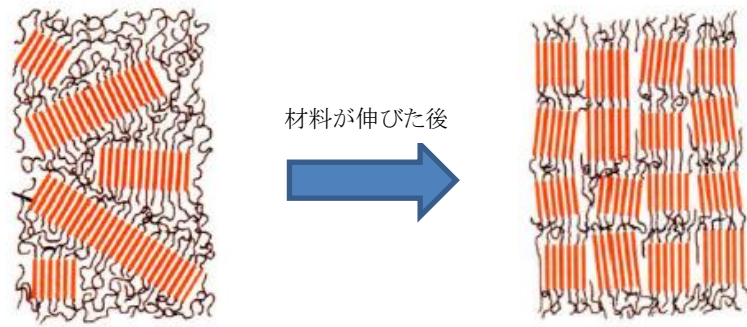


図2. 2. 1 高分子材料の特徴

(Visualization of a semi-crystalline microstructure (Winkler, 2009)より<sup>2.21)</sup>)

(1) 非抗压性については、ケーブル材料にも見られる特性であり、薄いフィルムであるため圧縮力に抵抗できない。この材料特性は、応力・変形解析を行う前の釣り合い形状を求める形状解析や、膜材力独特のしわ(wrinkling)解析などの膜構造特有の構造解析手法により反映される。

(2) 等方性は、従来の建築の材料として使用されてきた織布繊維膜(二方向のガラス繊維にテフロンコーティングされている膜材料)のような異方性とは異なり、若干のフィルムのロール方向による差はあるものの、単一素材の等方性の膜材料と仮定できる。

(3) 材料非線形性については、図2. 2. 2に代表的なETFEフィルムの応力-ひずみ曲線(1軸引張)を示す。1軸引張に対する破断までの応力-ひずみ曲線で、2つの降伏点がある。第1降伏点(ひずみで2.5%付近)を越えた後に第2降伏点(ひずみで12%付近)に達し、大きなひずみを生じながら緩やかに応力が上昇していき、最終的に破断に至る。第1降伏点と第2降伏点の間は、ひずみが増加する際に安定して応力も増加する傾向が見られ、ETFEフィルムは材料の塑性化を考慮した設計も選択できるように、告示にて第一基準強度F1と第二基準強度F2の2つを定めている。それぞれ2.5%ひずみ時および10%ひずみ時の引張応力を降伏点の指標と

し、基準強度はこれらに材料のばらつきを考慮している。また、2軸引張の試験も同様に多く行われており、2軸引張時の伸びは、1軸の概ね1/2程度になる傾向がある一方、第1降伏点の応力度はほぼ1軸引張のものと同様の結果となった<sup>2.19)</sup>。

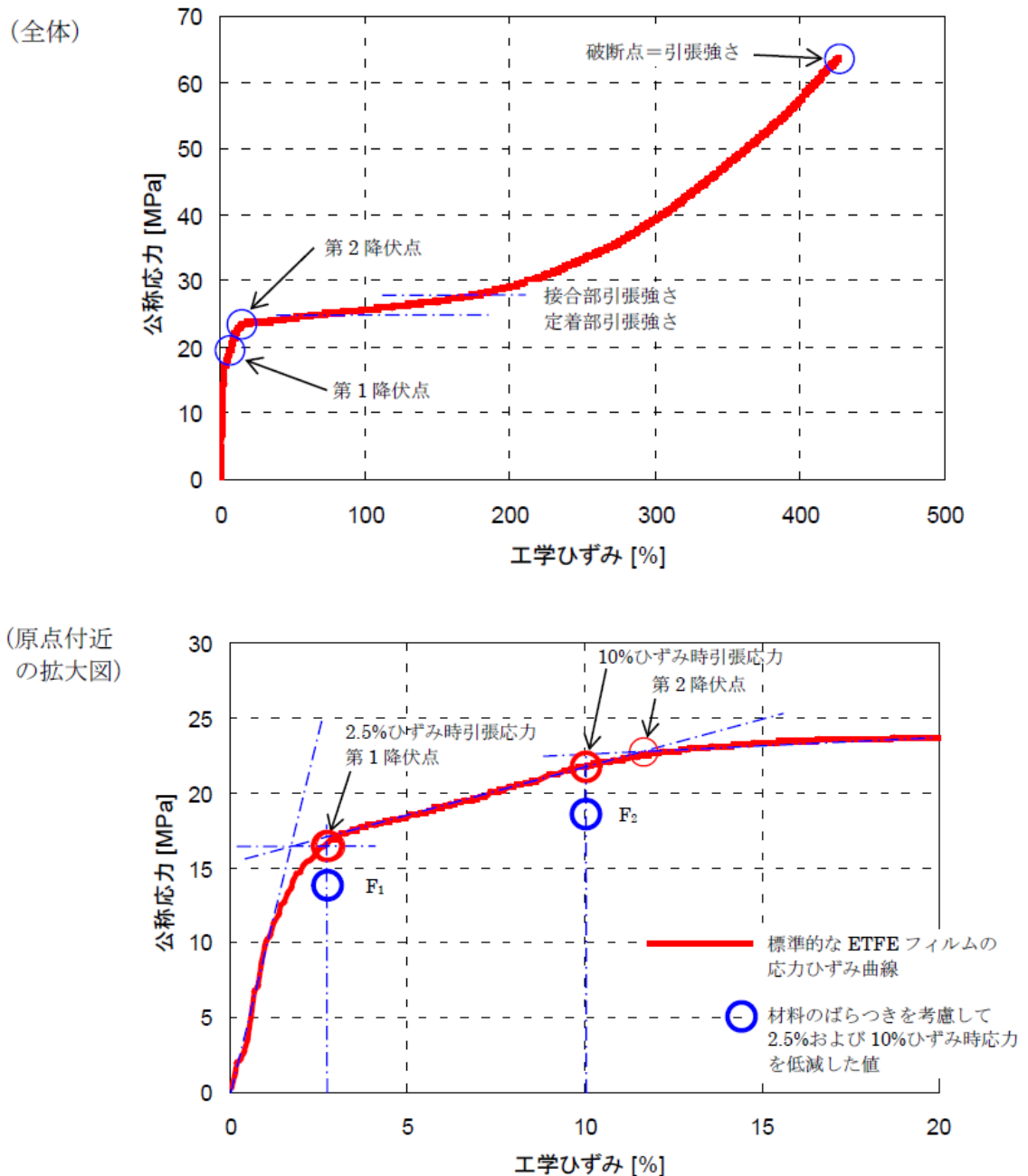


図2. 2. 2 代表的なETFEフィルムの応力-ひずみ曲線(1軸引張)  
 (膜構造用フィルム・ETFEに係る改正告示の説明会資料、日本膜構造協会、2017より<sup>2-19)</sup>)

(4) ひずみ速度依存性について、図2. 2. 3にETFEフィルムの第1降伏応力-ひずみ速度を示す。

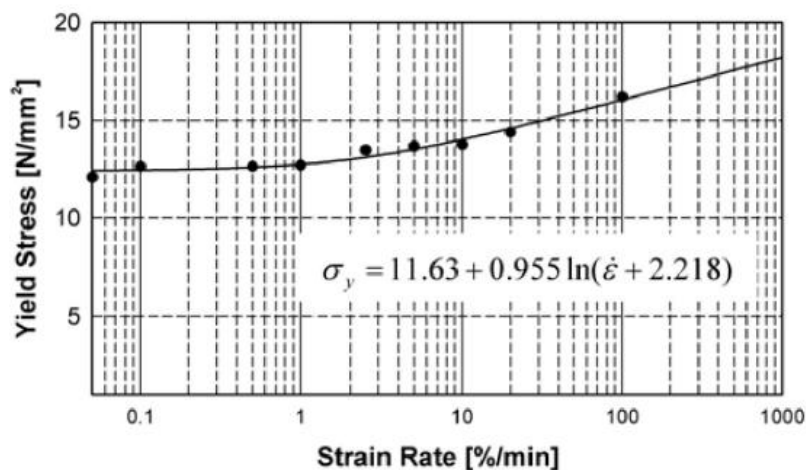


図2. 2. 3 ETFEフィルムの第1降伏応力-ひずみ速度

(膜構造用フィルム・ETFEに係る改正告示の説明会資料、日本膜構造協会、2017より<sup>2.19)</sup>)

この結果より、ひずみ速度が上がると降伏応力が高くなるのがわかる。これは高分子材料であるETFEフィルムの粘性の影響によるものであり、通常、フィルムの引張試験は引張速度100%/minで行っている。

(5) 引張クリープ性(温度依存性)について、図2. 2. 4にETFEフィルムのクリープ伸びの温度および荷重依存性を示す。

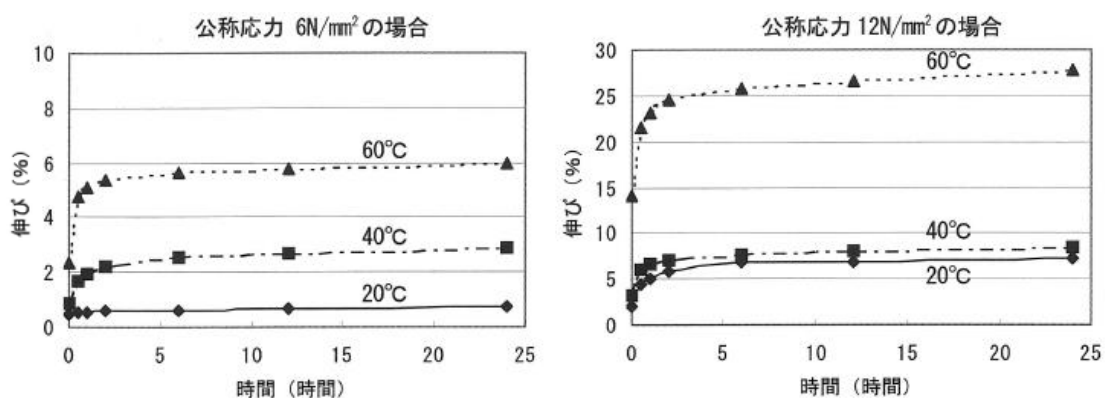


図2. 2. 4 ETFEフィルムのクリープ伸びの温度および荷重依存性

(ETFE フィルムパネル設計・施工指針(案)より<sup>2.1)</sup>)

24時間における結果を示しており、荷重により(上図では公称応力6MPaと公称

応力12MPaの比較)、伸びが大きく変わるものの、その後のクリープ速度は小さな値である。しかし、常温低応力下でのクリープ伸びは非常に小さいものの、高温高応力下ではクリープ伸びが大きくなるため注意が必要である。

図2. 2. 5に、1,000時間のクリープ試験結果を示す。温度20°Cにおいて1,000時間(約42日)のクリープ試験を行い、フィルム応力度4MPaではクリープ歪で0.3%となり、その結果から25年に換算すると、クリープは0.6%程度と予測されている。フィルム応力度8MPaに対しては、1,000時間のクリープ歪で1.0%であり、同様に25年に換算するとクリープは1.9%程度、フィルム応力度14MPaに対しては7.4%程度と予測される<sup>2.22)</sup>。レンズ状二重空気膜構造において長期間応力が発生し続ける常時では、クリープの影響を受けづらくするため、低い応力度に保つことが重要となる。

図2. 2. 6に、1軸引張と2軸引張(応力比1:1)によるひずみとクリープの関係を示す。温度23°Cにおける結果を示しており、1軸応力ではクリープひずみの増加が長時間に及ぶのに対して、2軸応力では数時間でひずみが飽和していることがわかる。クリープの影響は常時だけでなく、数日間継続して荷重を受ける積雪荷重時においても配慮が必要となる。2軸引張試験、72時間(3日間)程度、14MPa(第1降伏点近辺)において、ひずみは約4.5%であり、その後巨大な伸びは見られない。弾性範囲内であることも考慮すると、積雪荷重のような中長期的な荷重であれば、ある程度高い応力度でも許容できると考えられる<sup>2.19)</sup>。

図2. 2. 7に、様々な温度におけるETFEフィルムの応力-ひずみ曲線(1軸引張)を示す。温度が上昇すると、弾性率や第1降伏点の応力度が低下することがわかる。設計時には、20°C~25°C程度の材料特性で計算し応力度を算出するため、夏季・冬季の条件を配慮しながら設計を行う必要がある。0°C(冬季)は、2.5%ひずみ時および10%ひずみ時の応力度は20°Cよりも高く、弾性率も高い。逆に40°C(夏季)は弾性率が下がるため、材料の伸びには注意が必要である<sup>2.19)</sup>。

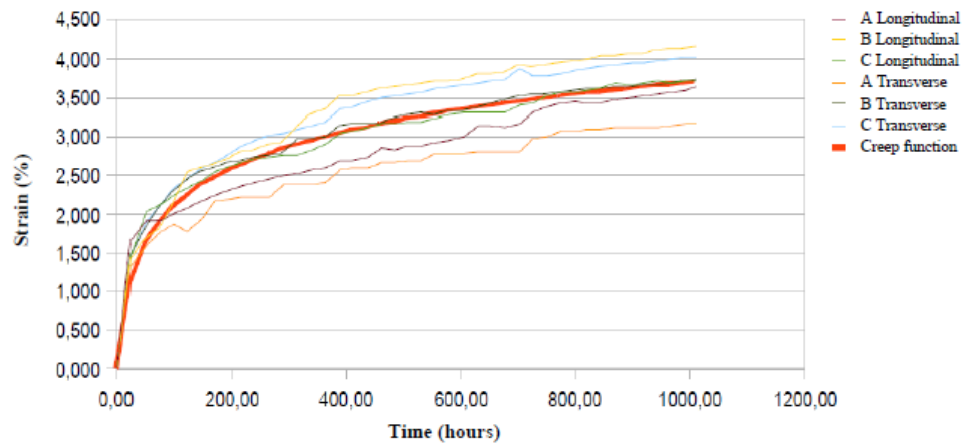
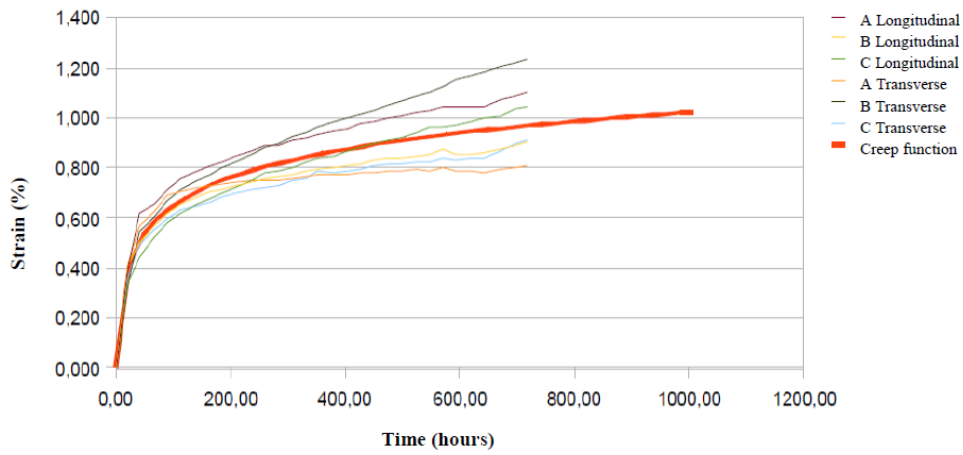
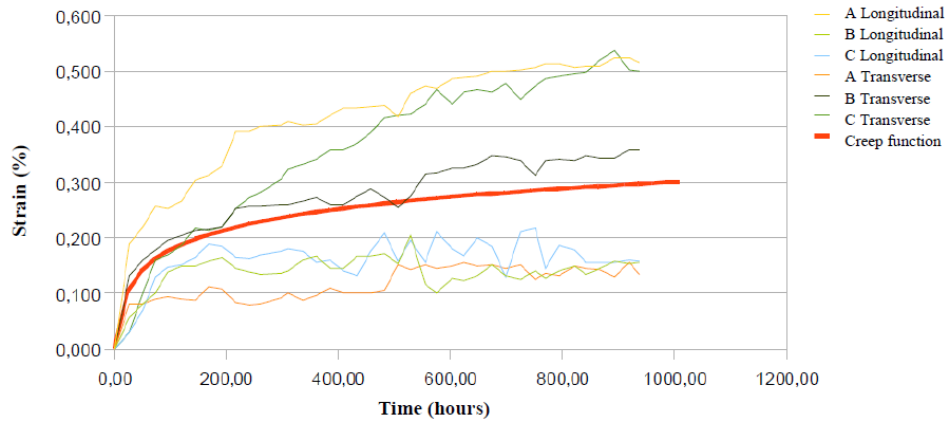


図2. 2. 5 1,000時間のクリープ試験結果

(Jan Winkler: Creep Behavior of ETFE Foils in Structural Engineering, 2009より<sup>2,22)</sup>)

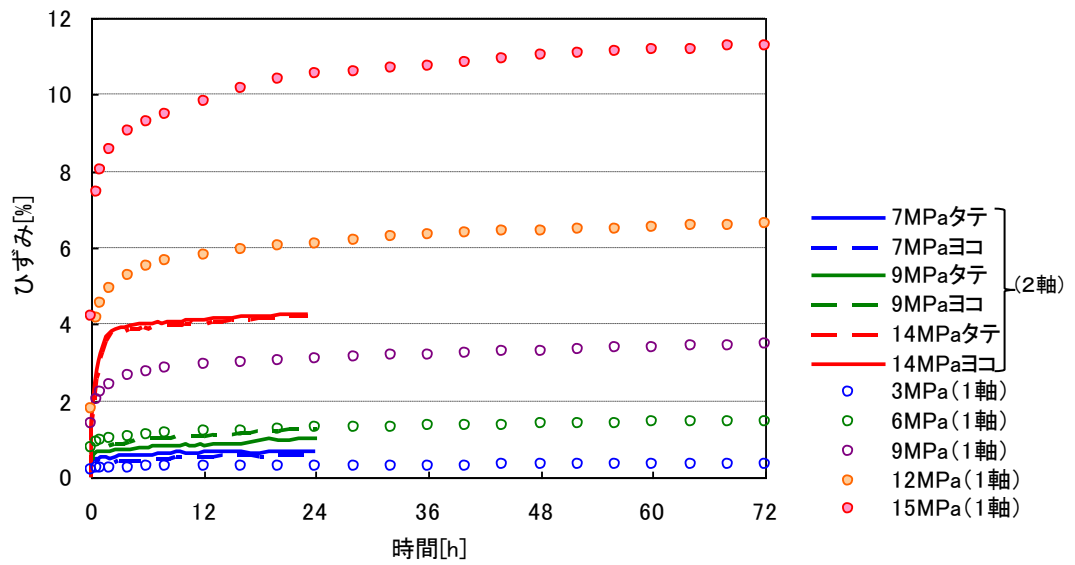


図2. 2. 6 1軸引張と2軸引張(応力比1:1)によるひずみとクリープの関係  
(膜構造用フィルム・ETFEに係る改正告示の説明会資料、日本膜構造協会、2017より<sup>2,19)</sup>)

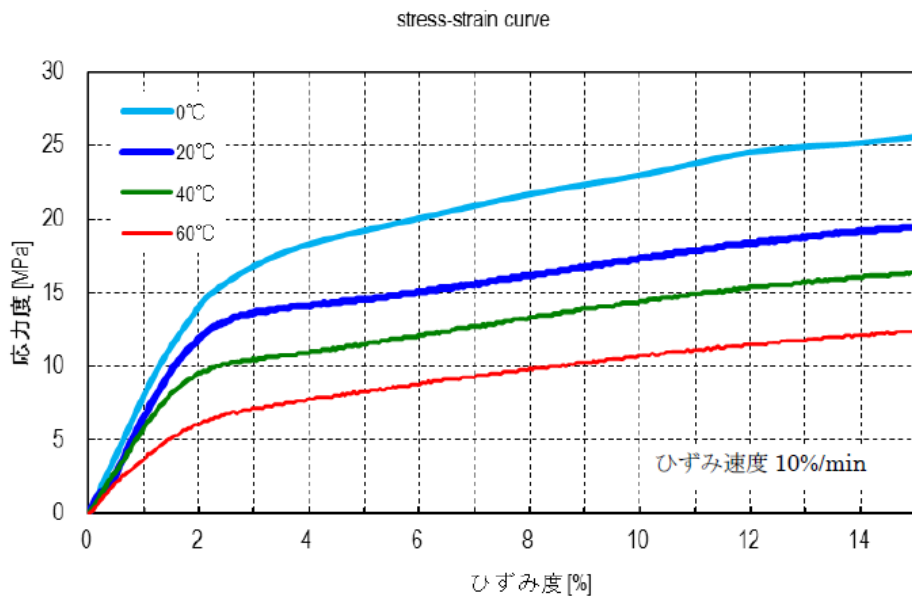


図2. 2. 7 様々な温度におけるETFEフィルムの応力-ひずみ曲線(1軸引張)

(膜構造用フィルム・ETFEに係る改正告示の説明会資料、日本膜構造協会、2017より<sup>2,19)</sup>)



(6)履歴依存性について、図2. 2. 8に繰り返し引張によるひずみの変化(1軸引張)を示す。繰り返し载荷後の残留ひずみ(100回繰り返し载荷、繰り返し応力0~16.5N/mm<sup>2</sup>)結果である。

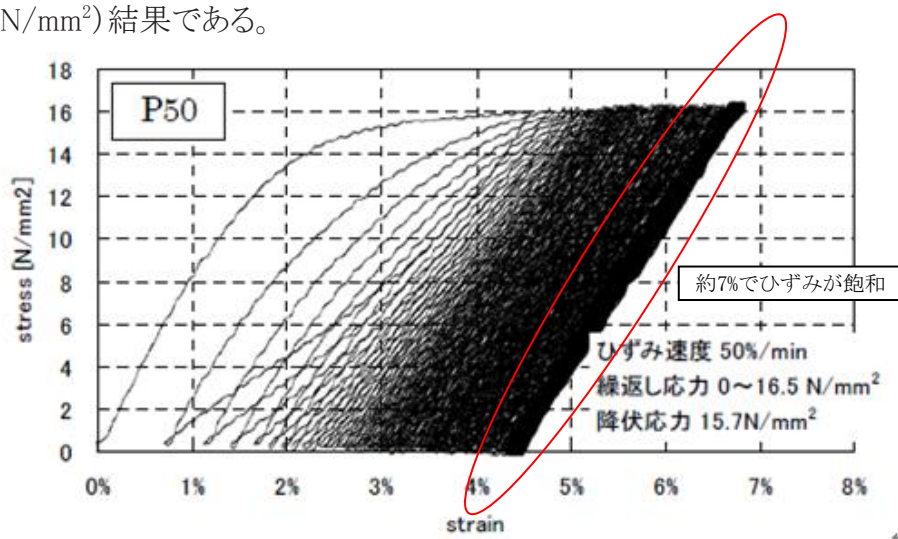


図2. 2. 8 繰り返し引張によるひずみの変化(1軸引張)

(膜構造用フィルム・ETFEに係る改正告示の説明会資料、日本膜構造協会、2017より<sup>2,19)</sup>)

初期の繰り返しサイクルでは非線形な履歴特性があり、これは高分子材料による化学的性質によるものである。第1降伏点を越える応力では徐々にひずみが増加していくが、ある程度の材料の伸びが発生すると、ひずみが7%程度で飽和し、材料特性が弾性挙動に変わっていく<sup>2,19)</sup>。

図2. 2. 9に、30万回繰り返し引張に対するひずみを示す。繰り返し応力2~16N/mm<sup>2</sup>における繰り返し試験結果を示しており、図2. 2. 8と同様に7%程度で飽和していることがわかる。また飽和後も、初期の弾性率と繰り返し後の弾性率では、ほとんど同じ勾配であることから、繰り返し引張りによる材料疲労の影響はないと考えられる<sup>2,19)</sup>。

図2. 2. 10に、様々な応力度レベルでの繰り返し試験を示す。試験条件はひずみ速度3mm/min、気温24℃である。弾性範囲である6MPaや12MPaでの繰り返し試験では残留歪は生じないが、第1降伏点を超える17MPaや20MPaでは若干残留歪は残る。また弾性率は、繰り返し後も概ね同じであることが結果から読み取れる。

さらに、どの応力度レベルで繰り返し挙動が起きたとしても、塑性した場合は残留歪が残る違いはあるが、応力-ひずみ曲線の傾向は変わらないことがわかる<sup>2,20)</sup>。

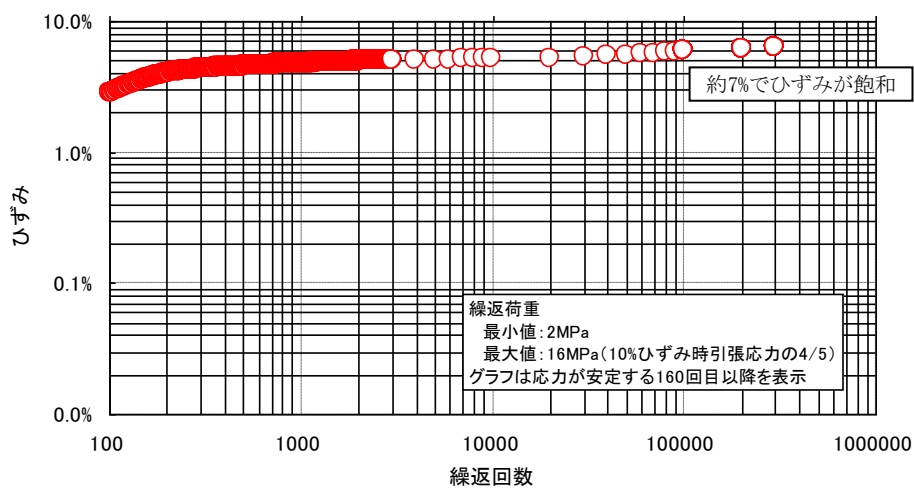


図2. 2. 9 30万回繰り返し引張に対するひずみ

(膜構造用フィルム・ETFEに係る改正告示の説明会資料、日本膜構造協会、2017より<sup>2,19)</sup>)

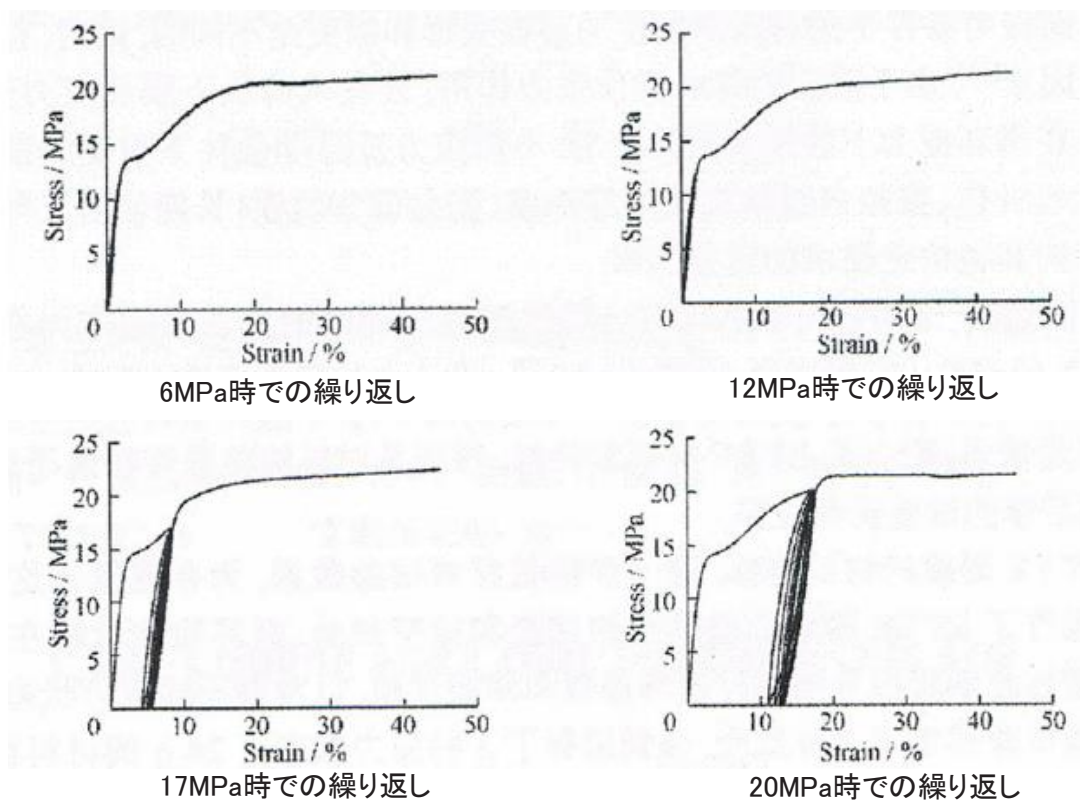


図2. 2. 10 様々な応力度レベルでの繰り返し試験

(Liu, Mu, & Wu, Cycle Loading and Creep Tests of ETFE Foil, 2008より<sup>2,20)</sup>)

以上の結果より、レンズ状二重空気膜構造の実際の設計においては、第1降伏点を越え塑性化を許容した場合、繰り返し荷重下においても材料に歪が生じるが、常に空気が送風され二重膜が膨らみ、膜の張力が保たれることで不安定現象とはならない。また試験結果から、ある一定の歪(7%程度)に達した時点で弾性挙動に変わり安定することから、大きな問題はないと判断できる。

加えて、膜応力は、「膜応力 = 膜面にかかる荷重×膜面円弧の半径」の関係で算出できる。膜面が伸びた際には二重空気膜の円弧の半径が小さくなるため、荷重が同じであれば、歪後の膜面応力は小さくなり安全側となる。ただし材料の伸びを許容しているため、外観の変化(初期よりも膨らみが大きい)に問題がある場合には注意が必要である。

その他に、恒久建築物に使用するにあたり対候性が重要となる。ETFEフィルムは、温室等の仮設建築物は多く使われてきたが、恒久建築物に実際使われるようになったのは1982年のBurger's Zoo(オランダ)のMangrove Hallからである。よって現状、実績としては38年が最長である。

図2. 2. 11に、ETFEフィルムの対候性試験結果を示す。試験はメーカーにより実施されており、約15年間の屋外暴露試験のデータである。

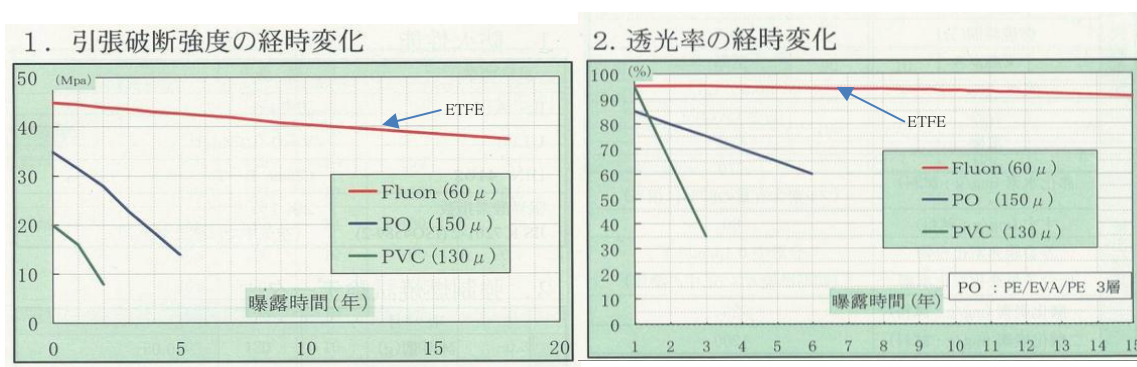


図2. 2. 11 ETFEフィルムの対候性試験結果 (AGCカタログより<sup>2,23)</sup>)

引張破断強度については、経年変化はあるものの、他の一般的な膜材料よりもかなり変化の少ない結果となっている。透光率の経年変化についても、大きな変化は見られない。さらに、実際に国内でフィルムを屋外に22年暴露された試験結果においても、破断強度、破断伸度、10%伸び応力などはほとんど変化していないことが確認されている<sup>2,24)</sup>。

図2. 2. 12、にDSET Laboratoriesで行われたETFEフィルムの暴露試験結果の一例を示す。0.2mm厚のETFEフィルムを10年間アメリカ、アリゾナで屋外暴露した結果である。この結果を見ても、材料特性にほとんど変化がないことがわかる<sup>2,20)</sup>。

よってETFEフィルムは、従来建築の材料として使用されてきた織布繊維膜(二方向のガラス繊維にテフロンコーティングされている膜材料)と同等かそれ以上の対候性が期待できると思われる。

Property	Units	Years of Exposure						
		Original	1	2	3	5	7	10
Longitudinal (L) Direction Tensile Strength	MPa	46.7	45.6	46.2	44.9	46.0	48.4	52.4
Transverse (T) Direction Tensile Strength	MPa	42.3	43.8	45.5	42.6	44.8	42.4	44.6
Stress at 10% Strain (L)	MPa	22.6	22.5	25.0	22.3	23.2	22.8	22.5
Stress at 10% Strain (T)	MPa	21.8	21.4	22.0	-	22.3	21.0	21.5
Break Strain (L)	%	330	340	310	345	315	325	340
Break Strain (T)	%	390	405	390	390	420	390	405
Tear Strength (L)	N/mm	420	430	415	445	440	525	-
Tear Strength (T)	N/mm	435	425	420	480	430	530	-
Light Transmission (Total)	%	95	96	94	95	96	96	96
Light Transmission (Scattered)	%	8	8	11	9	11	11	8
Light Transmission (Direct)	%	87	88	83	86	85	85	88

図2. 2. 12 ETFEフィルムの暴露試験結果の一例  
(DSET Laboratories, 1979-1989より<sup>2,20)</sup>)

## 2.2.2 ETFEフィルムの材料強度と許容応力度

海外では既にETFEフィルムを用いた多くの建物が完成しており、多くの研究機関、エンジニアリング事務所、専門業者により、ETFEフィルムの設計クライテリアが提案されている<sup>2,2)</sup>。様々な手法が提案されているが、共通して言えることは、荷重のかかる時間と気温を考慮した許容応力度を提案していることである。常時(23℃)における許容応力度は9～13MPa程度と幅が広いが、非常時(23℃)では約20MPaと共通である。

国内では、平成26年10月の告示1446号の改正によりETFEフィルムが建築基準法に追加され、平成29年6月の改正<sup>2,18)</sup>にて基準強度と設計法が位置づけられたことで、確認申請で扱える材料となった。表2.2.2に膜構造用フィルムの許容応力度と材料強度(折りたたみがない場合)を示す。

表2.2.2 膜構造用フィルムの許容応力度と材料強度(折りたたみがない場合)  
(膜構造用フィルム・ETFEに係る改正告示の説明会資料、日本膜構造協会、2017より<sup>2,19)</sup>)

	状態	応力範囲	応力度(MPa)	各許容値の根拠
① 長期許容応力度	長期	弾性	7	$F_1 \times 0.5$ 長期間継続する荷重に対してクリープの影響を受けにくい応力レベル
② 積雪に対する長期許容応力度	中長期	弾性	9.8	$F_1 \times 0.7$ 数ヶ月間継続する荷重に対してクリープの影響を受けにくい応力レベル
③ 積雪に対する短期許容応力度	中短期	弾性	12.6	$F_1 \times 0.9$ 数日間継続する荷重に対してクリープの影響を受けにくい応力レベル
④ ③、⑤以外の短期許容応力度	短期	弾性	14	$F_1 \cdots$ 第1基準強度 第1降伏点に対応する応力レベル
⑤ <u>クッション方式の風</u> に対する短期許容応力度	短期	7%程度ひずみ内	16.8	$F_1 \times 1.2 \cdots$ ④の1.2倍 繰返引張に対してひずみが飽和した後に弾性的挙動を示す応力レベル(クッション方式の風に対する変形が許容範囲内である)。
⑥ 積雪に対する材料強度	中短期	弾性(0℃)		$F_1 \times 1.2 \cdots$ ④の1.2倍 数日間継続する荷重に対して部分的にもメカニズム状態に至らない応力レベル。
⑦ ⑥以外の材料強度	短期	10%ひずみ内	19	$F_2 \cdots$ 第2基準強度 第2降伏点を超えない応力レベル(風圧力の継続時間内に進行性的変形を生じない範囲である)

F1は第1基準強度として伸び率2.5%時の応力 $-3\sigma$  ( $\sigma$ :標準偏差)とし、短期許容応力度として表2. 2. 2の④の14MPaとしている。F2は第2基準強度として伸び率10%時の応力 $-3\sigma$ とし、⑦の19MPaとなる。長期はクリープの影響を受けづらい応力レベルを考慮し、F1の50%である①の7MPaとなる。また、積雪荷重や風荷重等の中長期・短期、フィルム材の弾性域・塑性域、温度の影響およびパネル形式(テンション方式とクッション方式)を考慮し、細分化した許容応力度の設定を行っている。他にも、折りたたみがある場合、フィルム定着部の許容応力度も別途設定されている。

なお、ETFEフィルムは、一般に膜構造で使用される膜材料のように、たて糸、よこ糸を織った繊維織物ではないため、設計においては各糸方向の発生応力に対する検証ではなく、引張応力やせん断応力が複合した場合の降伏を判定するための相当応力であるミーゼスの降伏条件式にて検討を行う。

## 2.3 レンズ状二重空気膜構造の内圧制御方式の現状

図2.3.1に、内圧制御方式と体積・内圧変動の関係を示す。空気膜構造では、加圧装置による内圧の制御が構造上不可欠な要素であるため、設計における内圧制御の仮定はとても重要である。一般に、先に発展した構造形式である一重空気膜構造においては、常に内圧が設定値に維持されている状態(定圧型)を仮定している。これは、東京ドームのような一重空気膜構造は内部体積量が大いいため、加圧装置の稼働・停止や調圧ダンパーの開閉などの圧力制御に伴う内圧制御の時間的な遅れが無視できるほど小さいという判断に基づいたものである<sup>2,25)</sup>。しかし実際には、完全に空気が密閉された空間(密閉型)では、付加荷重時に内部空間の内圧 $P$ ・体積 $V$ が一定となるボイル・シャルルの法則が当てはまり、内圧変動が生じる。

レンズ状二重空気膜構造は、2枚の膜の間の空気量が他の空気膜構造と比べ小さいという特徴を持つことから、定圧型の設計だけでは問題があると考えられる。そのため1.1.4でも前述したとおり、密閉型による急激な内圧変動に対する評価が必要となる。

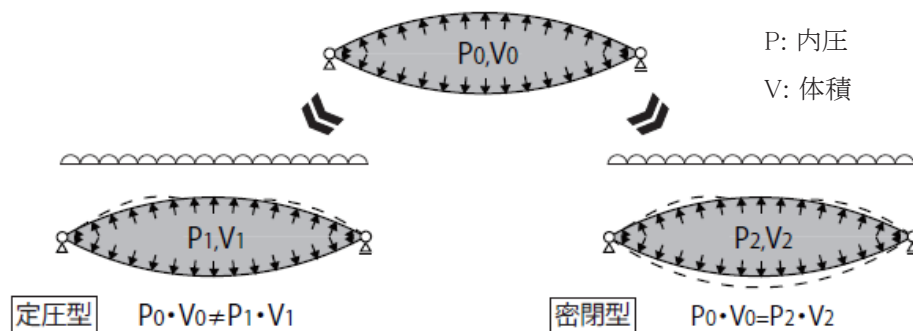


図2.3.1 内圧制御方式と体積・内圧の変動の関係

さらに、外乱中において常に動的に変動する荷重・内圧に対して、圧力制御を行うことは現実的ではない。また、パネルサイズに比べて空気供給用のダクトは細く、パネルを直列に連結して内圧制御を行う場合もあることから、内圧を常に一定と仮定するこ

とは事実上困難である(写真2. 3. 1)。一時的な圧力指示値に対する制御措置は、内圧の過多や過小を引き起こし、構造性能の低下に繋がる可能性も考えられる。よって、レンズ状二重空気膜構造の強風時における設定内圧増加は、密閉の影響により過大な加圧を生じさせる恐れがあり、膜材に対する負担の増大に繋がる可能性も考えられる。



写真2. 3. 1 大型パネルへの細いチューブによる空気供給

密閉型の観点からは、岡田ら<sup>2.26), 2.27)</sup>により、強風時におけるレンズ状二重空気膜構造の応答性状の把握と内圧設定手法に関する研究が行われ、密閉型でのレンズ状二重空気膜構造の強風時における挙動を、実験および数値解析を用いて検証している。また中井ら<sup>2.28)</sup>も、ETFEフィルムを用いた密閉型小規模空気膜に関する研究を行い、実験および数値解析により検証をしているが、基本的に等分布荷重を想定したもので、偏分布荷重に対する検証、進行性ポンディング現象、過大な負圧荷重のような終局時に対する検証およびETFEフィルムの材料非線形性を考慮した密閉型の研究は、筆者の知る限り報告されていない。

図2. 3. 2に、レンズ状二重空気膜構造の荷重時の状態と内圧制御(定圧型)を示す。暴風時、積雪時は、常時設定内圧よりも高い内圧を設定することで、構造体の剛性の増加を期待している。これは、内圧を上げることで直接的に荷重に対する抵抗圧が上がるだけでなく、膜面曲率の増加により剛性が高くなることが要因である。

その他にも、野鳥などによる膜面の局所的な破損等も起こりうるため、デフレート状態のような非常時を考慮した配慮が必要となる。



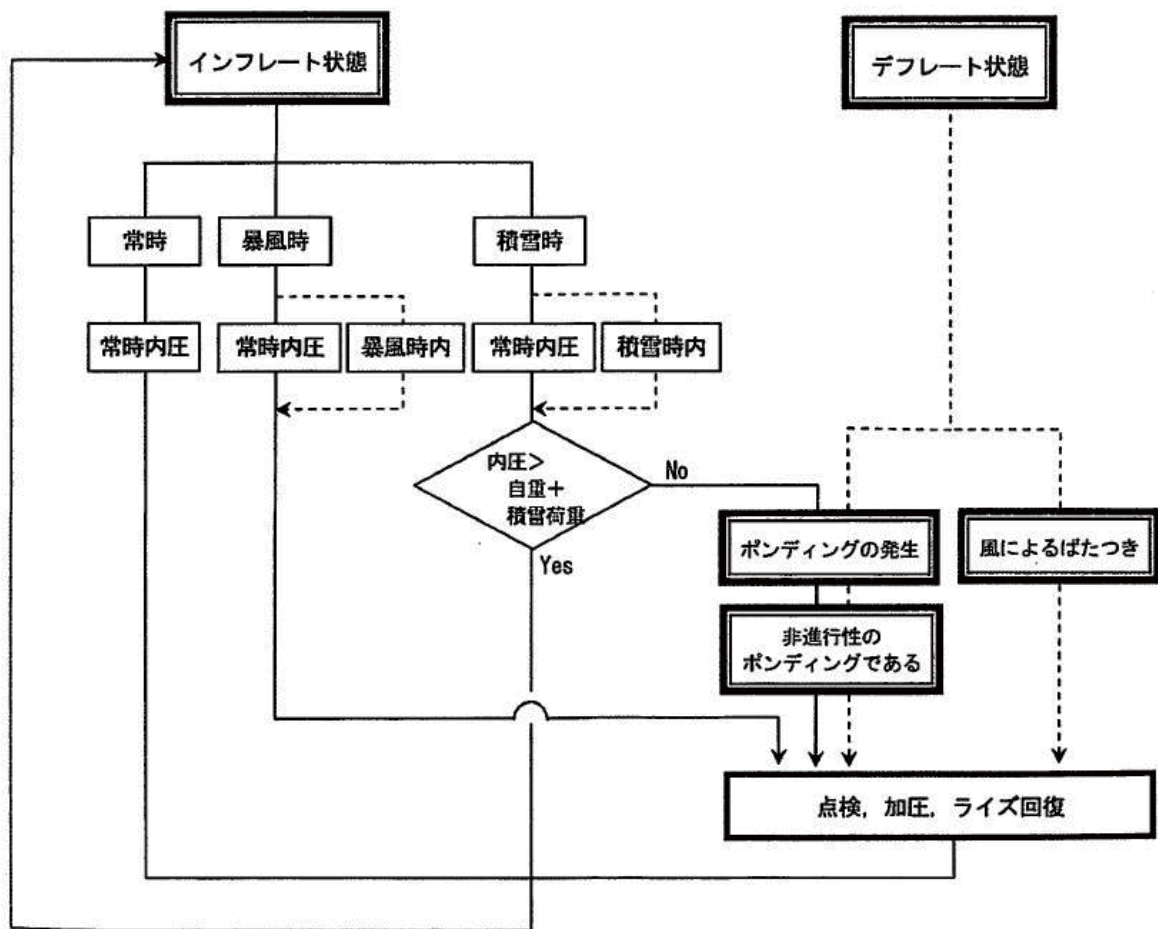


図2. 3. 2 レンズ状二重空気膜構造の荷重時の状態と内圧制御(定圧型)  
 (ETFE フィルムパネル設計・施工指針(案)より<sup>2.1)</sup>)

## 2.4 レンズ状二重空気膜構造の設計および構造解析の現状

空気膜構造は、空気支持式と空気膨張式に大別される。これは、付加荷重に対する抵抗機構の違いに基づいている。空気支持式は軸力系の抵抗機構であるのに対し、空気膨張式は曲げ系の抵抗機構である。また、レンズ状二重空気膜構造は両者の特徴を併せ持つ構造として位置付けられている。

下記および図2.4.1に、荷重に対する抵抗メカニズムを示す。

### (1) 空気支持式

膜面には内圧によって張力 $T$ が働いている。ここに荷重 $P$ が付加されると、膜面は湾曲して変形する。その際、両端の張力の鉛直成分の合力 $T_1$ が荷重に抵抗して均衡を保つ。このメカニズムでは、内圧によって生じる初期張力が大きいほど抵抗も大きく、また変形が大きくなれば幾何剛性によって抵抗性能が向上する。

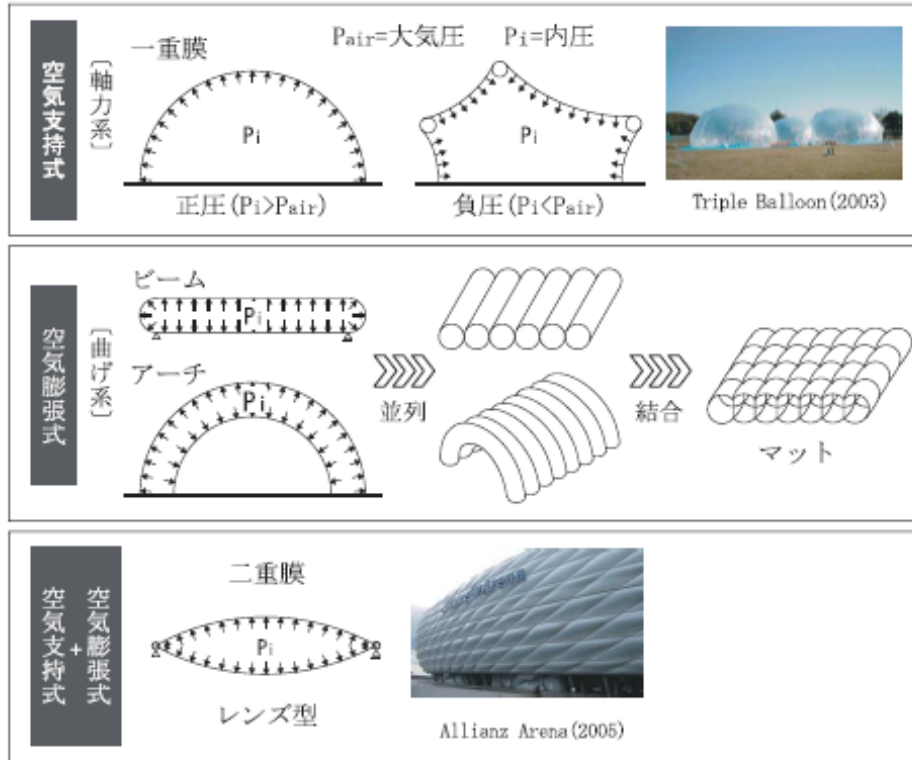
### (2) 空気膨張式

膜面には内圧によって張力 $T$ 、内部空気には圧縮力 $N$ が働いている。まず軸力に対する抵抗は、張力 $T$ が軸力 $P$ に対し抵抗するが、軸力が圧縮力の場合は $P \geq T$ となると膜面の張力は失われてしまう(しわ(wrinkling)の発生)。

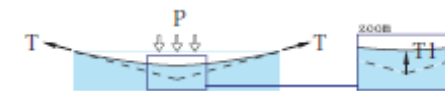
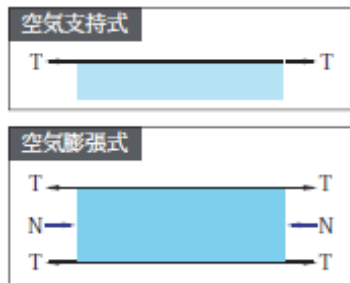
せん断力に対する抵抗は、膜面の張力 $T$ の鉛直成分の合力を生じるのに対して、空気の圧縮力 $N$ は左右で打ち消し合うため、張力の合力がせん断力 $Q$ に対して抵抗する。膜材にせん断剛性が無いとすれば、内圧の大きさによってせん断抵抗性能は左右される。

一方、曲げに対する抵抗は、内部空気も膜面と共に変形し、空気の圧縮力 $N$ が張力 $T$ の鉛直成分の合力 $T_1$ とは逆向きの合力 $N_1$ を生じさせる。ここで $T_1$ の合計と $N_1$ は釣り合い、抵抗力は相殺されてしまう。よって曲げ $M$ に対しては内圧による張

力の大きさに関係なく、膜剛性や断面形状によって抵抗性能が決まるといえる。



空気膜構造の分類



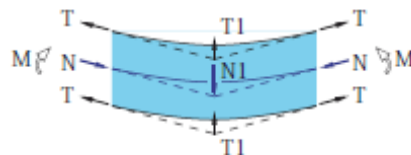
軸力に対する抵抗



せん断力に対する抵抗



曲げに対する抵抗



外力に対する抵抗メカニズム

図2. 4. 1 荷重に対する抵抗メカニズム

図2. 4. 2に、鉛直に作用する荷重に対する膜応力を示す。レンズ状二重空気膜構造には、正方形や長方形パネルのような単純な形状が多く使われることもあり、初期設計時には曲率を持つ片側の膜面を想定して、ETFEフィルムの応力、必要厚さを略算するが多い。

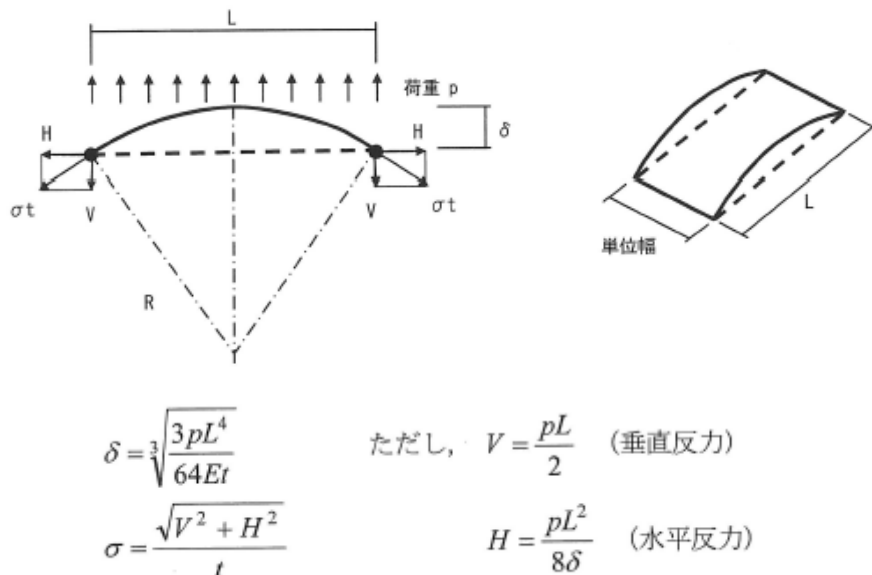


図2. 4. 2 鉛直に作用する荷重に対する膜応力  
(ETFE フィルムパネル設計・施工指針(案)より<sup>21)</sup>)

しかし、略算ではパネル内の正確な応力度分布や変位量が把握できない。加えて、様々な形状や等分布荷重以外の検討の必要性も考慮し、FEMによるモデルを作成しコンピューターを用いて挙動を検討することが一般的である。図2. 4. 3に、FEMによるモデルの検討の一例を示す。

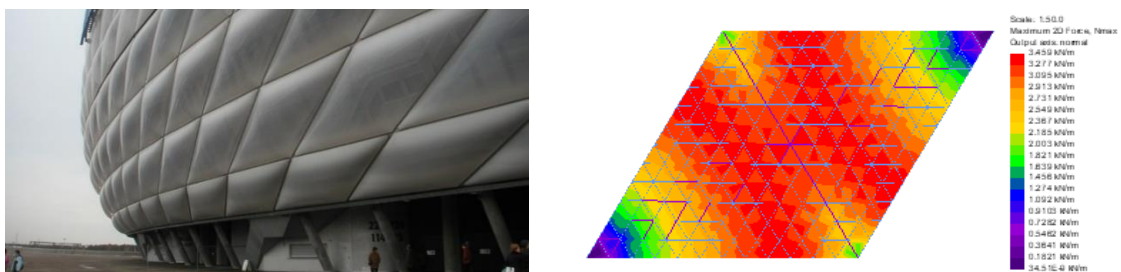


図2. 4. 3 FEMによるモデルの検討の一例

数値解析に用いるETFEフィルムの材料特性は、圧縮・曲げに抵抗できない非抗圧材料、またフックの法則が成り立つ等方材料とし、第一降伏点を考慮したバイリニアの非線形材料とすることが多い。海外では、DESIGN RECOMMENDATIONS FOR ETFE FOIL STRUCTURES (TensiNet ETFE Working Group, 2013<sup>2,2)</sup>)などで、レンズ状二重空気膜構造のモデル化と数値解析手法が紹介されているが、基本的に定圧型の仮定に基づくものであり、密閉型に対する検討方法は示されていない。

密閉型に対する検討手法の一例として、Koch, Klaus-Michael, Membrane Structures, 2004<sup>2,29)</sup>において下記のとおり提案している。

- (1) FEMを用いて、望ましい膜応力にするため初期内圧を決定
- (2) 密閉空間の体積を(1)の条件を踏まえて計算
- (3) 付加荷重載荷後の変化した内圧を予測
- (4) 上記の内圧に収束するまで解析を行い、その際に変化した体積を算出
- (5) ボイル・シャルルの法則の仮定を満足するように内圧を調整
- (6) 変化後の内圧を用いて膜応力を算出

これは当時、密閉性を考慮した内部空気のモデル化を適切にモデル化できなかったため、ステップ毎に挙動を算出しながら計算を行ったと考えられるが、近年では、コンピューターの発達により内部空気もモデル化し、一体での解析が可能となってきた。また国内では、喜多村<sup>2,30)</sup>が事例をもとに、設計法を紹介している。

本論文では、レンズ状二重空気膜構造の内部空気を流体要素(完全流体)としてモデル化し、ポテンシャル理論に基づいた流体解析(有限要素解析)により行う。解析モデルは膜面相互の接触を考慮し、2枚の膜要素の間に設置した空気要素に初期内圧を与えた後、内部空気量を一定とすることで、密閉型をモデル化している。解析手法の詳細は第3章に示す。

## 2.5 構造問題の整理と研究の位置付け

現状のETFEフィルムの材料特性、内圧制御方式、レンズ状二重空気膜構造の設計、構造解析の現状および既往文献などを調査した結果、ETFEフィルムの材料非線形性、密閉型のレンズ状二重空気膜構造の様々な荷重ケースにおける挙動、それに対する適切な内圧設定手法に関する扱いなどの諸問題を、下記のように整理することができる。

- (1) ETFEフィルムは、四フッ化エチレンとエチレンの共重合体を基本組成とする熱可塑性の高分子材料であることに起因した、非抗压性・等方性・材料非線形性・ひずみ速度依存性・引張クリープ性(温度依存性)・履歴依存性などの材料特性を有している。
- (2) パネルタイプは、大きく分けてテンションタイプとクッションタイプ(レンズ状二重空気膜構造)の2種類があり、前者は弾性範囲内での設計が行われているが、後者は空気を追加しながら内圧の保持が可能なため、フィルムの塑性化を許容している。
- (3) 内圧制御方式については、一般に付加荷重が働いた際にも内圧が常に設定値に維持される定圧型が採用されてきたが、レンズ状二重空気膜構造のように規模が比較的小さく、特に空気密度の高い構造では、状況により内圧一定の仮定を満足できず、体積変化に伴う内圧変化により膜応力の急変が予想される。
- (4) ETFEフィルム材料の非線形性に関する研究は多数あるものの、レンズ状二重空気膜構造のパネルシステムとしての材料非線形性を考慮した研究は少ない。特に密閉型の研究については、小規模空気膜に関する実験および数値解析検証の研究が行なわれているものの、基本的に等分布荷

重のみを想定したものである。しかし、偏分布荷重に対する検証、進行性ポンドイング現象や過大な負圧荷重のような終局時に対する検証に加え、ETFEフィルムの材料非線形性を考慮した密閉型の多角的な研究は、筆者の知る限り報告されていない。

- (5) 内部空気を適切にモデル化した密閉型のレンズ状二重空気膜構造のモデル化や数値解析手法に関する研究は少なく、また様々な荷重条件に対する実験と数値解析による比較検証は報告されていない。
- (6) 密閉型の特性に留意したレンズ状二重空気膜構造の構造設計フローおよび内圧設定手法は確立されていない。

以上のように、本章では、構造問題を整理すると共に、材料やシステムの特性を考慮した数値解析手法および構造設計に対する研究課題を明確にした。

以上の背景を踏まえて、本研究では

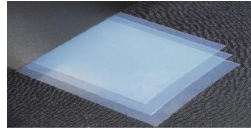
- (1) 密閉型のレンズ状二重空気膜構造の挙動に対する評価技術の確立
  - ・ 内部圧力の変動が評価できる数値解析手法の確立
  - ・ 数値解析と実験の比較検証による解析手法の妥当性の確認
- (2) 密閉型の特性に留意した構造設計フローの確立と内圧設定手法の提案
  - ・ 規模、フィルム厚、設計荷重をパラメーターとした際の最適な内圧設定手法の提案
  - ・ 密閉型の特性を考慮した設計クライテリアの提案

を具体的課題として検討する。

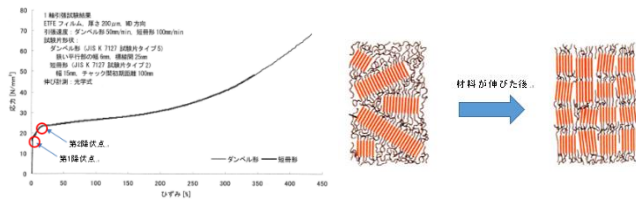
最後に図2. 5. 1に、ETFEフィルムを用いた密閉型レンズ状二重空気膜構造の構造解析および設計手法に着目した研究テーマの位置付けに関してまとめる。

### ETFEフィルムの材料特性

- (1) 非抗圧性
- (2) 等方性
- (3) 材料非線形性
- (4) ひずみ速度依存性
- (5) 引張クリープ性(温度依存性)
- (6) 履歴依存性

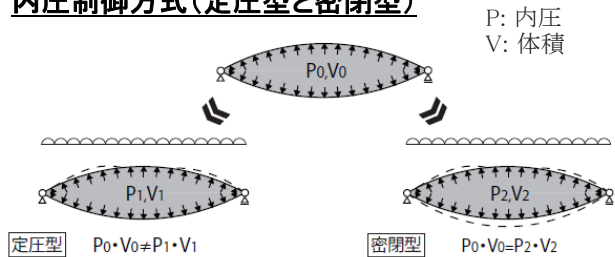


#### <ETFE フィルムの応力 - ひずみ関係>



約2%のひずみにおいて降伏(第1降伏)が発生し、その後12%付近で再び降伏(第2降伏)半結晶性の高分子材料の結束力に依存する温度・速度・履歴依存性

### 内圧制御方式(定圧型と密閉型)

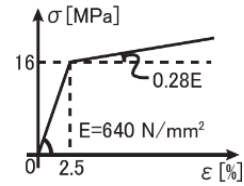


レンズ状二重空気膜構造のように規模が比較的小さく、特に空気密度の高い構造では、状況により内圧一定の仮定を満足できず、体積変化に伴う内圧変化により膜応力の急変が予想される

### 構造解析

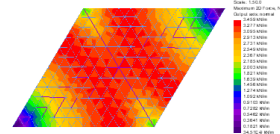
#### <応力変形解析>

フィルム材料の非抗圧性、等方性、材料非線形性を考慮したモデル化



バイリニア型の材料特性

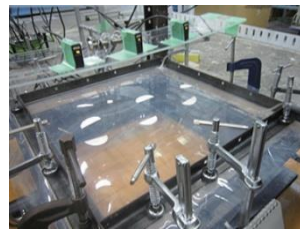
「定圧型」を想定し片側の膜面を取り出してFEMにより応力解析



菱形形状のFEモデルによる解析例

#### <モデル化に関する検討課題>

- ・ ボイル・シャルルの法則を考慮した「密閉型」のレンズ状二重空気膜構造のモデル化
- ・ 塑性を許容した密閉型レンズ状二重空気膜構造の数値解析の妥当性の確認(実験との比較)



密閉型による実験風景

### 設計

#### <定圧型と密閉型の選択>

現状では、荷重条件・実状に合わせた内圧制御方式の選択はない(設計者判断)

#### <密閉型の応力算出>

材料非線形性を考慮し、内部空気を適切にモデル化した密閉型のレンズ状二重空気膜構造の研究は少ない

#### <設計フロー>

長期、風、雪荷重時だけでなく、偏分布荷重や進行性ボンディング現象への配慮等、様々な荷重ケースを考慮した設計フローが未確定

#### <断面算定>

等方硬化則、von Mises の降伏条件により応力を算出し、告示の許容応力度を用いて精査

定圧型の内圧制御による構造解析・設計に立脚



塑性化を許容した「密閉型」レンズ状二重空気構造の

挙動把握が不十分

### 具体的な課題

- (1) 密閉型のレンズ状二重空気膜構造の挙動を評価できる予測技術の確立
  - ・ 内部圧力の変動が評価できる数値解析手法の確立
  - ・ 数値解析と実験の比較検証による解析手法の妥当性の確認
- (2) 密閉型の特性に留意した構造設計フローの確立と内圧設定手法の提案
  - ・ 規模、フィルム厚、設計荷重をパラメーターとした際の最適な内圧設定手法の提案
  - ・ 密閉型の特性を考慮した設計クライテリアの提案

図2. 5. 1 ETFEフィルムを用いた密閉型レンズ状二重空気膜構造の構造解析および設計手法に着目した研究テーマの位置付け



## 第 3 章

密閉型レンズ状二重空気膜構造の基本構造特性の把握

## 第3章 密閉型レンズ状二重空気膜構造の基本構造特性の把握

### 3.1 はじめに

レンズ状二重空気膜構造の内圧制御は、「密閉型」と「定圧型」の2種類の型式に大別できる。「密閉型」は、体積×内圧が常に一定との仮定の下、ボイル・シャルルの法則が成り立つ型式であり、付加荷重時には内圧変動が生じる。一方、「定圧型」は荷重に関わらず、加圧装置を用いて、常に内圧を一定値(あるいは設定値)に維持し、短期荷重に対しては必要に応じて意図的に内圧を上げることで抵抗する型式である。

現状、レンズ状二重空気膜構造は、定圧型の仮定に基づく設計が一般的である<sup>3.1), 3.2)</sup>。しかし、一般に風荷重など動的で瞬間的な荷重が付加する場合、内圧制御機器の時間的遅れが生じ、その際には密閉型に近い挙動を示すと考えられる。このため、レンズ状二重空気膜構造の性状を理解するには、これまで詳細に検証が行われていない密閉型の挙動の把握も必要不可欠と考える。

本章では、ETFEフィルムを用いたレンズ状二重空気膜構造の密閉型と定圧型それぞれの特徴や力学性状の把握を目的とし、数値解析を用いて比較検証を行う。具体的には、一般的に用いられるスケールのレンズ状二重空気膜構造パネル(規模2m x 2m、フィルム厚さ250  $\mu$  m、ライズ・スパン比0.1)を定圧型と密閉型の2種類モデル化し、密閉型の内部体積量を変化させながら、定圧型とみなすことができる内部体積量と内圧変動の関係性を確認する。その後、密閉型と定圧型それぞれに対して、全面正圧载荷、全面負圧载荷および半面正圧载荷における挙動を数値解析により確認し比較検証を行う。加えて、密閉型における初期内圧およびライズ・スパン比が膜応力に与える影響についても検証する。

### 3.2 密閉型を考慮した数値解析モデル

レンズ状二重空気膜構造は、付加荷重に対して大変形を伴うため、幾何学的非線形解析を行える汎用数値解析ソフト「ADINA」を用いて検討を行う。

本解析モデルは、積雪荷重時や強風時の内圧変動および膜応力を把握することを目的としているため、内部空気を流体要素としてモデル化している。膜面は、面外方向への変形に対し曲率で抵抗が可能な2D-Solid要素、内部の空気要素は3D-Fluid要素としている。膜要素はETFEフィルム、内部空気の流体はポテンシャルベースド流体によるモデル化を行う<sup>3.3)</sup>。

一般にポテンシャルベースド流体は、以下の仮定に基づいている。

- ・ 熱伝導のない、非粘性・回転のない媒質
- ・ 圧縮性の媒質、あるいはほとんど非圧縮の媒質
- ・ 流体境界が相似的に小さい変位であること
- ・ 音速よりも低い速度(亜音速の定式)の現実の流体流れ、あるいは非現実の流体流れ(線形-無限小速度の定式)

本解析モデルは、流体部(内部空気)とそれに張り付く膜面の双方をモデル化し、流体要素と膜面を結合させている。そのため、膜要素の動きは構造境界の法線方向に圧力を受ける。流体要素は構造要素の変位に伴い、その変位により圧力をもたらされる。

また、ポテンシャルベースド流体は、流体要素を定常流で完全流体としている。定常流は、流れが時間的に変化しないものであり、完全流体とは流体の要素同士の間働く力が純粋な圧力のみ仮定となっている。現実の流体では、超流動状態を除いて圧力以外に空気の粘性力が働くが、流体の運動が大きくない場合は流体の粘性を通常無視することができるため、非粘性流体としている。

なお、本論文で検討対象とした荷重条件では、特に積雪時や進行性ポンディング現象時において上膜と下膜が接触するため、2枚の膜面の接触を考慮できるモデルとする。なお2枚の膜面同士の接触において摩擦係数は0とし、摩擦力は生じない仮定とする。

レンズ状二重空気膜構造の初期形状の形成方法としては、立体裁断を用いる場合(立体裁断あり)と用いない場合(立体裁断なし)の2種類がある。立体裁断ありのモデルでは、完成形状にあわせて膜面を製作するため、低い内圧でレンズ状二重空気膜構造が形成でき、フィルムの応力度も低くなる特徴がある。一方、立体裁断なしのモデルは、2枚の平らに張られた膜面の間に空気を送風し、強制的に膜面を膨らませることにより形成する方法である。よって、立体裁断を用いるモデルよりも高い内圧が必要となりフィルムの応力も高くなるが、膜面の製作が容易となる。図3. 2. 1に、立体裁断なしの数値解析モデル概要を示す。

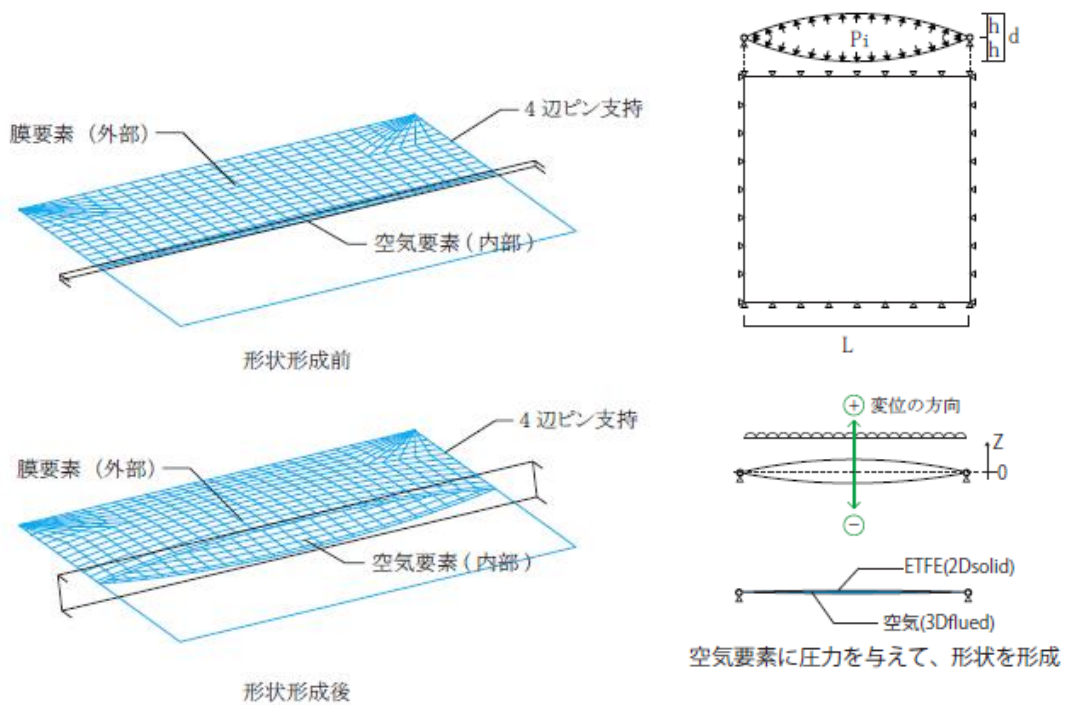


図3. 2. 1 立体裁断なしの数値解析モデル概要

表3. 2. 1に、数値解析材料諸元を示す。

表3. 2. 1 数値解析材料諸元

＜材料種別＞	
[膜材料]: 膜 (2D-Solid) 要素 ETFE フィルム	
膜剛性 $E_t$	640 [N/mm <sup>2</sup> ]
ポアソン比 $\nu$	0.43
密度	1750 [kg/m <sup>3</sup> ]
[空気]: 流体 (3D-Fluid) 要素 ポテンシャルベースド流体	
体積弾性率	0.142 [N/mm <sup>2</sup> ]
空気密度	1.3 [kg/m <sup>3</sup> ]

ETFEフィルムの材料特性は、第1降伏点(16MPa) を考慮したバイリニア型により検討を行い、またETFE フィルムの自重は荷重の大きさに比べて極めて小さいことから、本検討では考慮しない。

図3. 2. 2に、解析に用いるバイリニア型のETFEフィルムの材料特性を示す。

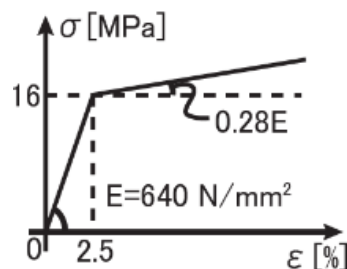


図3. 2. 2 解析に用いるバイリニア型のETFEフィルムの材料特性

解析モデルは、2枚の膜要素の間に設置した空気要素に初期内圧を与えた後、内部空気量を一定とすることで、密閉型をモデル化する。また、本モデルは等方硬化則を用い、引張応力やせん断応力が複合した場合の降伏を判定するための相当応力であるミーゼスの降伏条件式にて検討を行う<sup>3,4)</sup>。

### 3.3 内部体積の影響度の検証

#### 3.3.1 検討概要

一重空気膜構造は、一般に内部体積が大きいこともあり、付加荷重が加わった際の内圧変動を無視できる場合が多い。しかし、本論文で対象とするレンズ状二重空気膜構造は内部体積が比較的小さいため、付加荷重が加わった際の内圧変動が大きく、その影響を無視することは危険である。そのため、従来の空気膜構造の定圧型の設計法をレンズ状空気膜に適用するのは、危険側の評価につながる可能性がある。

ここでは、密閉型の二重空気膜構造の内部体積の大きさをパラメータとして変化させることで、密閉型を定圧型とみなすことができる内部空気量(体積)や剛性に与える影響を検証し、密閉型と定圧型の挙動を比較する。

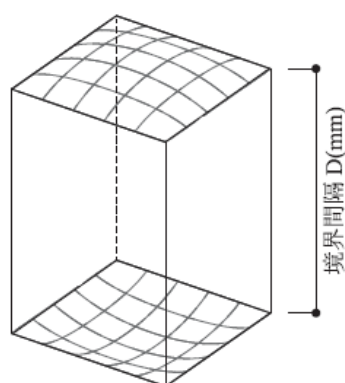
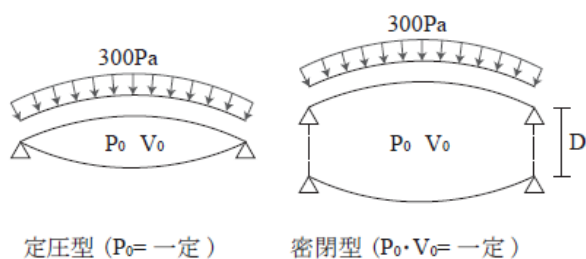
#### 3.3.2 数値解析概要

図3.3.1に、数値解析概要を示す。解析モデルは、一辺が2,000mm、アスペクト比1の矩形平面を有するレンズ状の二重空気膜とし、密閉型と定圧型の2ケースを対象とする。数値解析材料諸元は3.2の内容とし、初期形状は立体裁断ありのモデルにより形成する。初期内圧は300Paとし、初期形状のライズ・スパン比は0.1とする。その際、膜面の応力度は長期許容応力度以下の1.93MPaである。

密閉型は、空気要素に初期内圧を与えた後に、内部空気量を一定としてモデル化する。また、定圧型は空気要素を設けず、上膜面と下膜面それぞれに初期内圧を模擬した300Paの分布荷重を与えることでモデル化し、両モデル共に上下の膜面同士の接触を考慮する。定圧型は、付加荷重が初期内圧よりも大きくなると載荷側の膜面の反転が生じるため、付加荷重は300Paまでの全面正圧載荷とする。膜

面の変位は境界高さを0とした座標値(上膜側を正)で表し、圧力は膜面を押す側を正とする。上膜、下膜それぞれの境界の間隔Dをパラメータとし、Dを増加させることで内部体積を増加させる。

アスペクト比	1
規模	2,000mm × 2,000mm
初期内圧	300 Pa
境界条件	剛境界
ライズ・スパン比	0.1



境界間隔 D (mm)	増加分の内部体積 (m³)
0	0
100	0.4
1000	4
5000	20
10000	40
15000	60
20000	80
30000	120
40000	160
50000	200
60000	240
70000	280
80000	320
90000	360
100000	400

図3. 3. 1 数値解析概要

### 3. 3. 3 数値解析結果

図3. 3. 2に、境界間隔Dと上膜変位量 $\delta$ および内圧P'の関係を示す。

定圧型は、内部体積量が増えようが減ろうとも常に内圧300Paがかかっている状態のため、Dが増加しても上膜面の変位に変化はなく、内圧も一定である。しかし、密閉型はボイル・シャルルの法則が成り立つため、境界間隔Dが小さいうちは300Pa載荷された際に内部体積が減少することで、内圧はその分増加する傾向が見られた。また、境界間隔の増加に伴い、300Pa載荷時の上膜変位量が徐々に増加し、D=90m(内部体積:約360 $\text{m}^3$ )付近で定圧型と同じ変位量になることを確認した。内圧に関しては、境界間隔の増加に伴い、密閉型の内圧は減少し、D=60m(内部体積:約240 $\text{m}^3$ )以降はほぼ一定の値に収束し、定圧型に近づくことが確認された。

よって、このパネルサイズとライズ・スパン比のパネルに関しては、D=0時の内部体積が約1 $\text{m}^3$ であるため、正圧に対する鉛直剛性は内部体積が約360倍増えた場合、内圧は約240倍に増えた場合に密閉型を定圧型とみなせる性状が確認された。これより、極端に内部体積量が増えないかぎり、密閉型を定圧型とみなすことができず、本構造において定圧型と密閉型の力学性状が異なることが把握された。

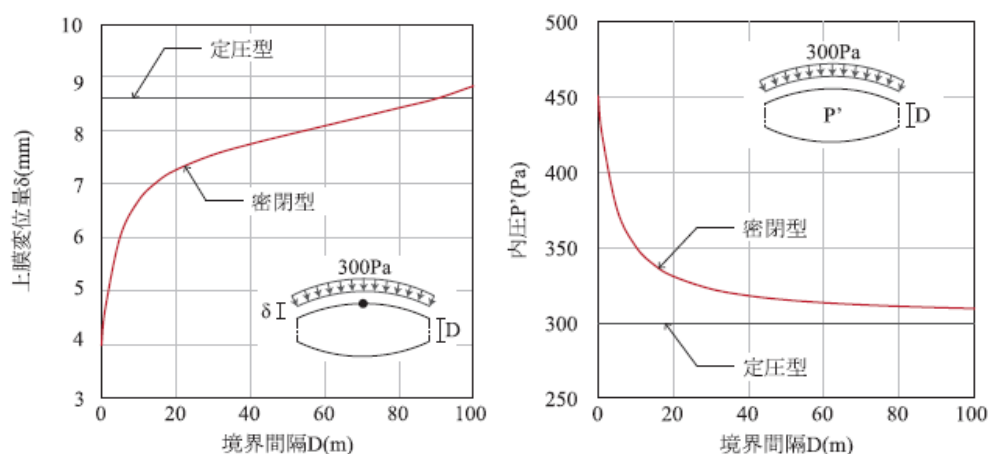


図3. 3. 2 境界間隔Dと上膜変位量 $\delta$ および内圧P'の関係



### 3. 4 密閉型と定圧型の比較

#### 3. 4. 1 検討概要

3. 3で用いた解析モデルの境界間隔 $D$ を0としたモデル(初期内圧300Pa)に対して、全面正圧载荷(2,000Pa)、全面負圧载荷(-2,000Pa)および半面正圧载荷(2,000Pa)の3つの荷重ケースに対して検討を行い、密閉型と定圧型の力学性状を比較する。図3. 4. 1に、検討荷重ケースを示す。

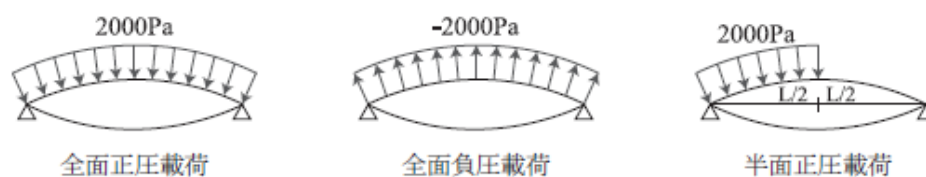


図3. 4. 1 検討荷重ケース

#### 3. 4. 2 全面正圧载荷

図3. 4. 2に、全面正圧载荷の結果を示す。荷重－上膜・下膜変位関係、荷重－膜応力関係、荷重－内圧関係、および荷重2,000Pa時のパネルの中央線の断面図をそれぞれ示す。

密閉型は、荷重が0～650Paの範囲では荷重<内圧の関係であるが、荷重650Pa以降は荷重=内圧となり、荷重の増加に伴い内圧も同様に増加する傾向を示した。荷重<内圧の範囲では、上膜面の応力が減少するが消失までには至らず、荷重に対して上下膜で抵抗することを確認した。荷重=内圧(650Pa)時に、上膜の張力消失に伴い下膜の応力が増加し、下膜のみで荷重に負担する性状を示した。荷重650Pa以降で荷重と内圧が概ね同様の値となるのは、上膜面の張力が消失したことにより、荷重と内圧が釣り合うためと考えられる。また、荷重の増加に伴い内圧が増加し、変位も大きくなることを確認した。この荷重の範囲内では、最大膜応力

が16MPaより小さいため、フィルムは弾性範囲内であることを確認した。

定圧型は、荷重<内圧(300Pa)の範囲では、上膜面は線形的に変位が進行するが下膜面には影響がなく、荷重>内圧(300Pa)となった際に、上膜面の反転が確認された。また、上膜面は反転後に再び応力が発生し、荷重に抵抗している。その後、荷重が約650Paで下膜に変位が発生し、かつ上膜の変位勾配が緩やかになったことから、上膜面と下膜面の接触が起きたと考えられる。下膜面は上膜面との接触前は変位、応力共に一定の値を示した。つまり、下膜面は上膜面との接触後に抵抗要素となることが把握された。接触後は、ETFEフィルム2枚が重なった張力膜構造と同様の挙動となり、応力が2枚の膜面に分散されるため、密閉型より小さい応力となった。図3.4.2-e)に、荷重2,000Pa時の断面形状を示す。定圧型は荷重が300Paを超えると上膜面全体が反転するが、密閉型は荷重が2,000Pa時においても端部が局所的に反転するだけで、パネル全体としては十分な剛性を有していることを確認した。

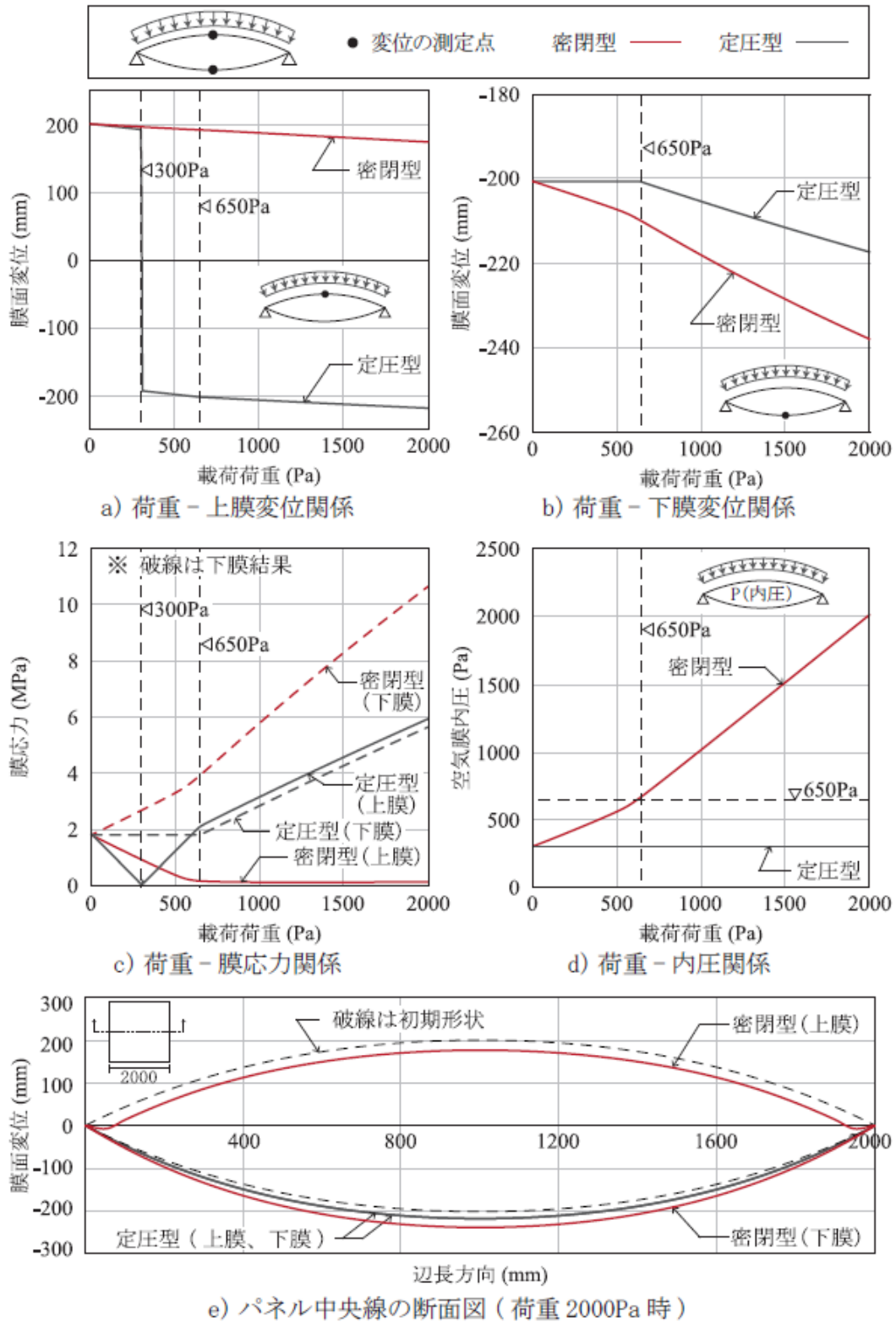


図3. 4. 2 全面正圧载荷の結果

### 3. 4. 3 全面負圧載荷

図3. 4. 3に、全面負圧載荷の結果を示す。荷重－上膜・下膜変位関係、荷重－膜応力関係、荷重－内圧関係、および荷重2,000Pa時のパネルの中央線の断面図をそれぞれ示す。

密閉型は、低荷重域において下膜面の応力が減少するが、張力消失には至らず、上下膜面で抵抗することが確認された。荷重の増加に伴い内圧が減少し、荷重が-690Pa時に内圧が0となって下膜面の張力が消失し、その後は上膜面のみで抵抗する性状を示した。また張力消失後には荷重の増加に伴い、下膜面も上向きに変位する性状を示した。これは、内部空間が密閉され内部空気量が一定であることに起因する密閉型特有の性状である。また、張力消失後の下膜は内圧および荷重が作用しないため、不安定な挙動を示すことが確認された。加えて、この荷重の範囲内では、最大膜応力が16MPaより小さいため、フィルムは弾性範囲内であることを確認した。

定圧型は、下膜面の変位および応力が一定であることから、下膜面は全く抵抗要素とならないものと考えられる。そのため、荷重の大小に関わらず、上膜面のみで抵抗するシステムであると考えられる。また、上膜面の応力に関して、密閉型は-690Pa時まで上下膜面で抵抗するが、定圧型は上膜面のみの抵抗となるため、定圧型の方が大きな値を示した。図3. 4. 3-e)に、荷重-2,000Pa時の断面形状を示す。定圧型の下膜面は常に一定で変位しないが、密閉型は内圧が消失し不安定となる性状を示した。しかし、密閉であるため張力消失後も内部空気量を維持するために機能し、間接的に上膜の抵抗性能を向上させていると考えられる。

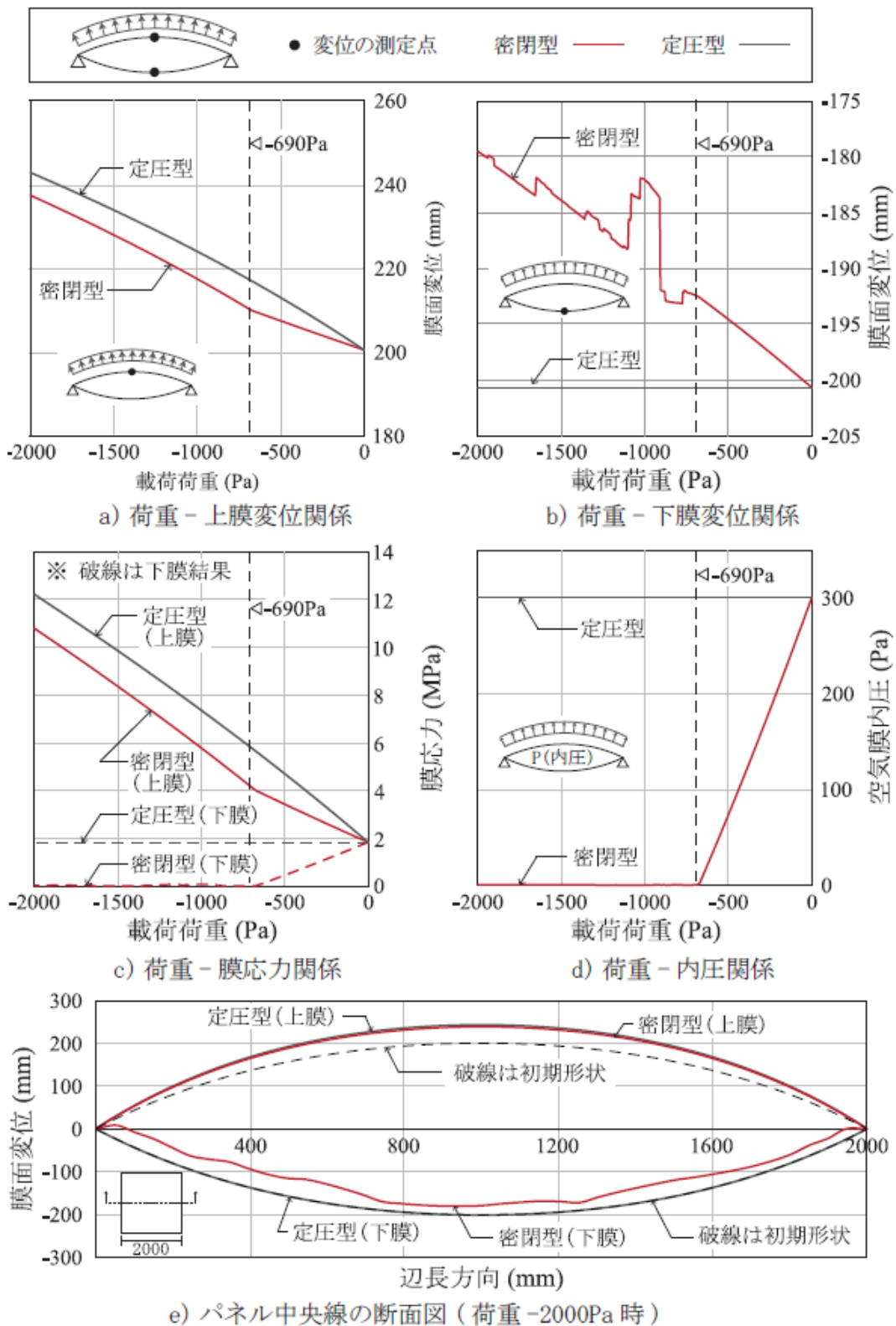


図3. 4. 3 全面負圧载荷の結果

### 3. 4. 4 半面正圧載荷

図3. 4. 4に、半面正圧載荷の結果を示す。荷重－上膜・下膜変位関係、荷重－膜応力関係、荷重－内圧関係、および荷重2,000Pa時のパネルの中央線の断面図をそれぞれ示す。

密閉型は、図3. 4. 4-a) と e)より、荷重が下向きに載荷された際に、測定点上膜1および2は載荷方向と同じ下向きに変位するが、非載荷面である上膜3は逆方向の上向きに変位し、非載荷面が膨らむ性状を示したことから、内部空気が移動しているものと考えられる。また、図3. 4. 4-b) と e)より測定点下膜1および3の挙動が一致していることから、下膜の挙動は載荷範囲に関係なく、内圧の増加によることが示唆された。これは、荷重が内部空気を介して下膜に作用するためと考えられる。一方、内圧の増加量は全面正圧載荷と比べてやや小さくなった。また、この荷重の範囲内では、最大膜応力が16MPaより小さいため、材料は弾性範囲内であることを確認した。

定圧型は、荷重<内圧(300Pa)の範囲では、上膜は線形的に変位が進行するが下膜面には影響がなく、荷重>内圧(300Pa)となった際に、載荷側の上膜面の反転が確認された。また荷重が増加すると、徐々に端から中央に向かって反転する性状を示した。全面載荷と同様に、半面載荷においても上膜面が下膜面に接触し、ETFEフィルム2枚が重なった張力膜構造と同様の挙動を示すため、密閉型よりも小さな応力となった。図3. 4. 4-e) に、荷重2,000Pa時の断面形状を示す。定圧型は内圧<荷重となった際に載荷された側の上膜面が反転し下膜面に接触するが、密閉型は載荷側の端部が一部反転するものの剛性が高く、システム全体で抵抗していることが把握された。

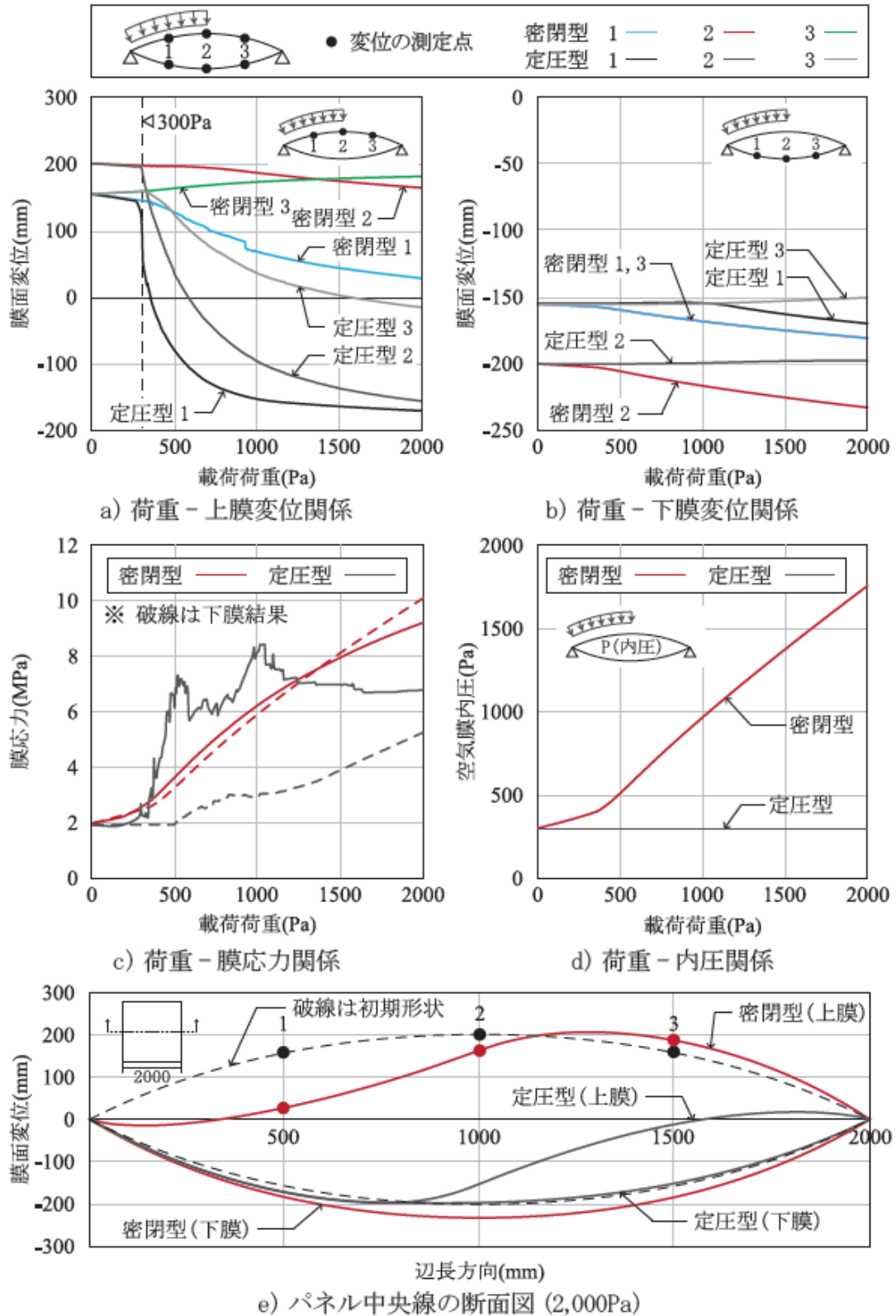


図3. 4. 4 半面正圧载荷の結果

### 3.5 初期内圧およびライズ・スパン比と膜応力の関係

初期内圧およびライズ・スパン比が、膜応力に与える影響について検討を行う。検討モデルは、3.4の密閉型のモデルを用いる。図3.5.1に載荷荷重－膜応力関係を示す。

図3.5.1-a)に、初期内圧をパラメータとした際の荷重－膜応力関係を示す。初期内圧を変更した場合、正圧載荷では上膜の張力消失までの荷重域において差が見られるが、張力消失以降の荷重域は概ね同様の膜応力となった。また負圧載荷においても、下膜の張力消失までの荷重域において差が見られるが、その後は同様の結果が見られた。よって、膜張力の消失を許容しない設計方針においては、初期内圧を上げることで抵抗力を上げることができるが、膜張力消失後は初期内圧の効果はほとんど影響しないことが把握された。図3.5.1-b)に、ライズ・スパン比をパラメータとした際の荷重－膜応力関係を示す。ライズ・スパン比が大きいほど膜応力が小さくなる傾向を示した。これはライズ・スパン比が大きくなると、膜面の曲率半径が小さくなり、膜応力が小さくなるものと考えられる。

以上より、初期内圧の影響は低荷重域に大きく、ライズ・スパン比の影響は全荷重域に亘ることが把握された。

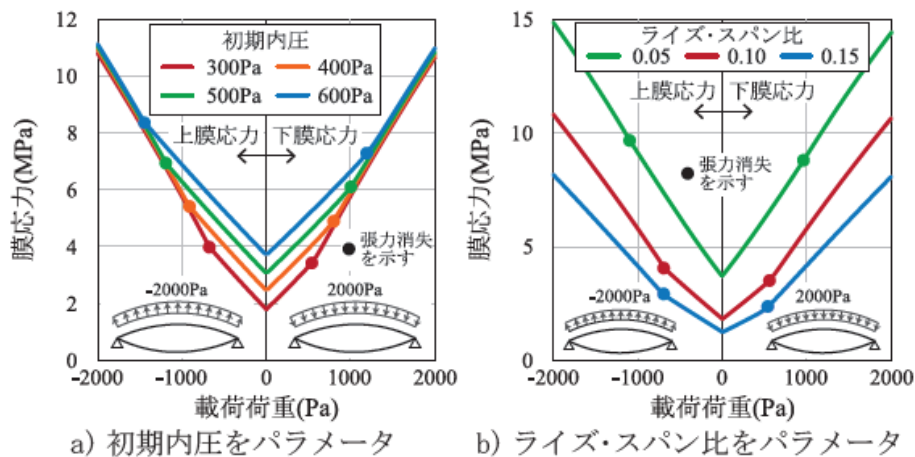


図3.5.1 荷重－膜応力関係



### 3.6 まとめ

本章では、ETFEフィルムを用いたレンズ状空気膜の密閉型と定圧型それぞれの特徴や力学性状の把握を目的とし、数値解析を用いて内部体積量を変化させながら、内部体積量と内圧変動の関係性を確認した。さらに、密閉型と定圧型それぞれに対して、全面正圧载荷、全面負圧载荷および半面正圧载荷における挙動について比較検証を行った。加えて、密閉型における初期内圧およびライズ・スパン比が膜応力に与える影響についても検証を行った。得られた知見を以下に示す。

#### (1) 内部体積の影響について

- ① 今回の検討範囲では、密閉型の内部体積を大幅に増大させない限り、密閉型を定圧型と同等の性状が得ることができないことが把握された。
- ② 従来の定圧型による空気膜構造の設計法を密閉型に適用することは、危険側の評価につながることを示唆された。

#### (2) 全面正圧载荷時の密閉型の挙動について

- ① 荷重<内圧の範囲では、荷重の増加に伴い内圧が増加する傾向を示すが、载荷側の膜面の応力が減少するものの張力消失までは至らず、荷重に対して上下膜面で抵抗する性状を示した。
- ② 荷重=内圧時に、载荷側の膜面の張力消失に伴い下膜面の応力が増加し、下膜面のみで荷重に抵抗し始める性状を示した。
- ③ 荷重>内圧の範囲になると、上膜面の張力消失により荷重と内圧が釣り合う性状となり、荷重の増加に伴い内圧も比例して増加し変位も大きくなる性状を示した。

#### (3) 全面負圧载荷時の密閉型の挙動について

- ① 低荷重域においては、非载荷側の膜面応力が減少するが、張力消失

までには至らず、上下膜面で抵抗する性状を示した。

- ② 荷重の増加に伴い内圧が減少し、内圧が0になるまで上下膜面で荷重に抵抗するが、非載荷側の膜面張力消失後は、載荷側の膜面のみで抵抗する性状を示した。
- ③ 非載荷側の膜面張力消失後には荷重の増加に伴い、非載荷側の膜が上向きに変位する性状を示した。これは、二重空気膜構造の内部空間が密閉され内部空気量が一定であることに起因する密閉型特有の性状であることが把握された。
- ④ 張力消失後の非載荷側の膜面は内圧および荷重が作用しないため、不安定な挙動を示す性状を示した。

#### (4) 半面正圧載荷時の密閉型の挙動について

- ① 載荷側の膜面において、直接荷重が載荷される範囲は載荷方向に変位し、非載荷側の膜面は逆方向に膨らむ性状を示したことから、内部空気が移動していることが把握された。
- ② 非載荷側の膜面変位は、全面正圧載荷と同様に、荷重が内部空気を介して非載荷側の膜面に作用するため、均等に変位する性状を示した。
- ③ 内圧の増加量は、全面正圧載荷と比べてやや小さくなる性状を示した。

#### (5) 密閉型の初期内圧、ライズ・スパン比の影響について

- ① 初期内圧を変更した場合、正圧載荷では上膜面の張力消失までの荷重域において差が見られるが、張力消失以降の荷重域は概ね同様の膜面応力となった。負圧載荷においても下膜面の張力消失までの荷重域において差が見られるが、それ以降は同様の結果が見られた。
- ② 膜面張力消失を許容しない設計方針においては、初期内圧を上げるこ

とで抵抗力を上げることができるが、膜面張力消失後は初期内圧の効果はほとんどないことが把握された。

③ ライズ・スパン比が大きいほど膜応力が小さくなる傾向を示した。

以上から、密閉型は正圧・負圧荷重共に膜面張力が消失しない限り上下膜面一体で抵抗するため、片側の膜面のみで抵抗する定圧型と比べて剛性も高く、膜面応力も小さくなる傾向があることが把握された。膜面張力消失後は、定圧型は正圧荷重時には荷重が内圧より大きくなるとすぐに反転してしまい、積雪時の進行性ポンドイング現象を生むリスクが高まるため、通常は加圧装置を用いて内圧を上げて抵抗力を高めている。一方、密閉型は加圧装置によるコントロールを行わなくても十分な剛性を有しているため、そのリスクが軽減され冗長性も高いことが確認された。



## 第 4 章

### 積雪荷重時における挙動と進行性ポンドイングの検討

## 第4章 積雪荷重時における挙動と進行性ポンドイングの検討

### 4.1 はじめに

本章では、積雪荷重におけるETFEフィルムの材料非線形性を考慮した密閉型レンズ状二重空気膜構造の挙動の把握を目的として、実験および数値解析による比較検証を行う。検討では、まず全面正圧載荷および半面正圧載荷を行い、材料非線形性を考慮したレンズ状二重空気膜構造の挙動と内圧との関係を確認する。次に、アスペクト比(四角形パネルの辺長比)および載荷範囲をパラメータとして、偏荷重が膜面変位に与える影響について検討を行う。上記を踏まえ、偏荷重に伴う載荷部の局所変位が生じた際の、雨水等の滞水による進行性ポンドイング現象の挙動について検討を行う。さらに、立体裁断ありのモデルを用いて、進行性ポンドイングへの初期内圧が及ぼす影響、および載荷によるETFEフィルムへの塑性化の影響を検討する。

### 4.2 積雪荷重時の問題点と進行性ポンドイング現象

#### 4.2.1 積雪荷重時の問題点

レンズ状二重空気膜構造を屋根面へ適用をする場合、正方形や長方形のパネル形状を、水平方向に連続配置して屋根面とする場合が多い。積雪時における屋根面への荷重は、全面に等しく積もるのであれば等分布荷重として作用するが、風や日照の影響により、同一パネル内で積雪深のバラ付きが生じることが予想される。また、レンズ状二重空気膜構造を連続配置する際はパネル間が谷部となり、雪が溜まりやすくなる。よってETFEフィルム材料の特性から、積雪荷重が作用する期間に生じるクリープの影響を考慮した検討が必要であると考えられる。

さらに、積雪荷重により、パネルの周辺境界部よりも上膜の膜面が下向きに反転

することで、そこに雨水の滞水が生じる進行性ポンドイングによる崩壊の懸念もある。

近年、レンズ状二重空気膜構造が多く採用され、また、規模拡大の需要が高まることで、上述のような偏った荷重分布が生じるリスクが多くある。岡田らはホルン型張力膜構造の進行性ポンドイング現象に関する基礎的研究<sup>4.1)</sup>、河端らは四角形パネルの進行性ポンドイングの研究<sup>4.2)</sup>を行っているが、密閉型のレンズ状二重空気膜構造については、このような現象に対する検討はあまりなされていないのが現状である。

よって本章では、ETFEフィルムの材料非線形性を考慮しながら、全面正圧載荷だけでなく半面正圧載荷について、実験および数値解析による比較検証を行う。また数値解析により、荷重の載荷範囲の違いに関する検討を行い、載荷範囲と膜面変位の関係の把握を目的として検討を行う。

#### 4. 2. 2 進行性ポンドイング現象

進行性ポンドイング現象の定義は、下記の2つがある。

- (1) 空気膜面への付加荷重により、荷重の増加がないまま膜面が変位し、座屈するような性状で変位が急速に進行する現象(主に高ライズの空気膜)  
(Finite Deformation and stability behaviour of spherical inflatables subjected to axi-symmetric hydrostatic loading, W.Szyszkowski and P.G.Glockner<sup>4.3)</sup>)
- (2) フィルム面が積雪、融雪水および雨水等の荷重によって変形して滞留を生じ、さらなる変形と滞留水等の増加が継続的に進行する現象(図4. 2. 1)

海外において当初(1)の現象を膜面のポンドイング現象と呼んでいたが、日本にポンドイングの概念が入り、(2)の内容においてもポンドイングという言葉が使われるようになった。2つの現象を区別する上で、(2)の現象を「進行性ポンドイング現象」と呼んでいる。

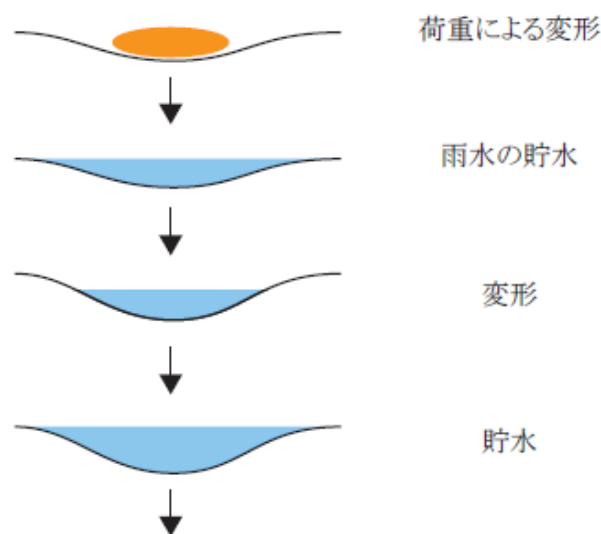


図4. 2. 1 進行性ポンドイング現象

また張力膜構造は、常時状態で発生するリラクゼーション(応力緩和)と、付加荷重によるクリープ伸びとが混在し、応力が減少する。これは、フィルム材料である高分子材料特有の現象であり、ETFEフィルムにおいては顕著に見られる。

一般的な構造材料に比べ、ETFEフィルムは伸び剛性が小さく、経年時の応力弛緩の影響が大きい材料である。そのため、積雪荷重時に局所的な変形が生じやすい。一般に進行性ポンドイング現象は、パネル面を有効な水勾配とパネル境界部に、水はけの機能が確保されていれば問題ないとされているが、レンズ状二重空気膜構造では、荷重により周辺境界部以下に膜面の変位が進行することも懸念されるため、進行性ポンドイング現象の発生が懸念される。図4. 2. 2は、進行性ポンドイングによるレンズ状二重空気膜の大変形を示す。

進行性ポンドイングは貯水と変形が繰り返し生じることで、大きな荷重に成長する可能性があるため、膜構造の設計では留意しなければならない事項の1つである。1999年には、建築会館中庭で建設された仮設建築物「Oval Dome」において、進行性ポンドイングによる構造体の崩壊事故も発生している(写真4. 2. 1)。集中豪雨(当日最高降水量46mm/h)により、構造体全体を覆っていたフィルム膜に生じた大



きな貯水の発生を基点として、主構造である張弦梁のストリング端部の破断を招いたことによる。

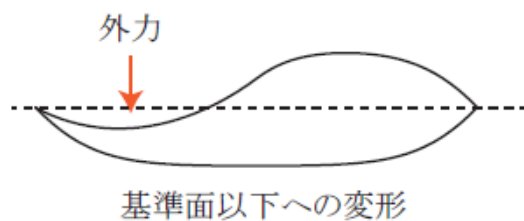


図4. 2. 2 進行性ポンディングによるレンズ状二重空気膜の大変形



写真4. 2. 1 仮設建築物の崩壊

## 4.3 正圧載荷実験

### 4.3.1 実験目的

ETFEを用いたレンズ状二重空気膜構造の正圧荷重に対する力学性状の把握を目的として、矩形平面のレンズ状空気膜の模型を用いた正圧載荷実験を行う。レンズ状空気膜の下部にチャンバーを設置し、チャンバー内圧を制御することにより空気圧で載荷を行い、設定した荷重ケースに対しての上下膜面の挙動の把握を行う。レンズ状二重空気膜構造を屋根面に設置する事を想定し、積雪荷重を想定した全面正圧載荷、半面正圧載荷を行う。

### 4.3.2 実験概要

実験概要を、図4.3.1～図4.3.6に示す。実験では平面状のETFEフィルム2枚を重ねてシワのないように四周を固定し、密閉された2枚のフィルムの間へパネル隅角部から空気を送風することで、初期形状を形成する。また一般に、空気膜構造では内圧を高く設定した場合、膜材への負荷が大きくなりクリープが問題となるため、常時は低内圧となるように配慮することが望ましい。しかし、積雪時には進行性ポンドリング現象の発現などが危惧されることから、積雪荷重には内圧を上げて剛性を高める手法が取られている<sup>4.4)</sup>。以上から、本実験の初期内圧の設定値は、事前の数値解析結果に基づき、最大膜面応力が告示<sup>4.5), 4.6)</sup>で示す長期許容応力度7MPaとなるように設定する。試験体は、短辺(Lx) 500mm×長辺(Ly) 500mmのアスペクト比(長辺/短辺)1、および短辺500mm×長辺1,000mmのアスペクト比2の矩形平面とし、膜材はETFEフィルム100 $\mu$ mを用いる。

載荷方法は、全面正圧載荷はチャンバー内へ空気を送風することにより加圧を行い、また半面正圧載荷はチャンバー内に設置したエアーバックに空気を送風することで行う。なお、正圧載荷は積雪荷重を想定しているが、ETFEフィルムの自重

が十分に小さいことを考慮し、また実験治具の都合から下膜への上向きへの荷重により実験を行う。内圧は、圧力計に接続したチューブを試験体隅角部より挿入し、測定を行う。なお、本実験は6月に日本大学理工学部駿河台校舎実験室にて、空調による室温管理(摂氏22~25度)のもと、風、日射の当たらない環境で実施した。また、数値解析に用いた材料特性は、同様の室温環境で得られたものを用いる。

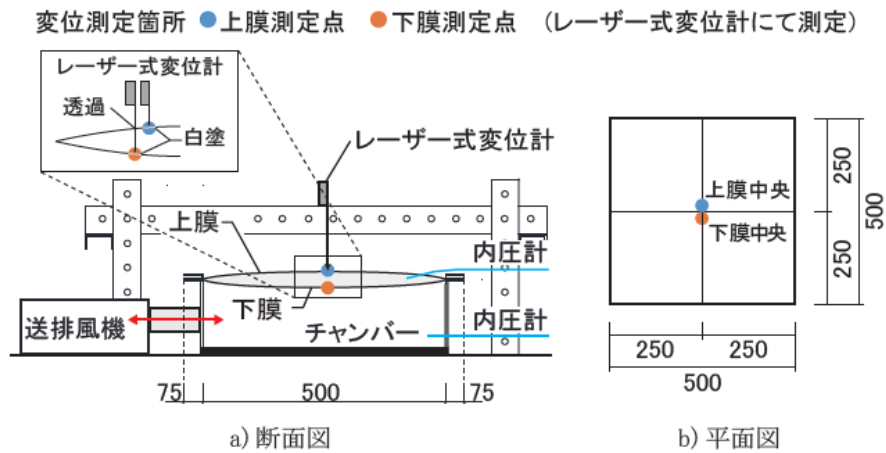


図4. 3. 1 アスペクト比1治具図

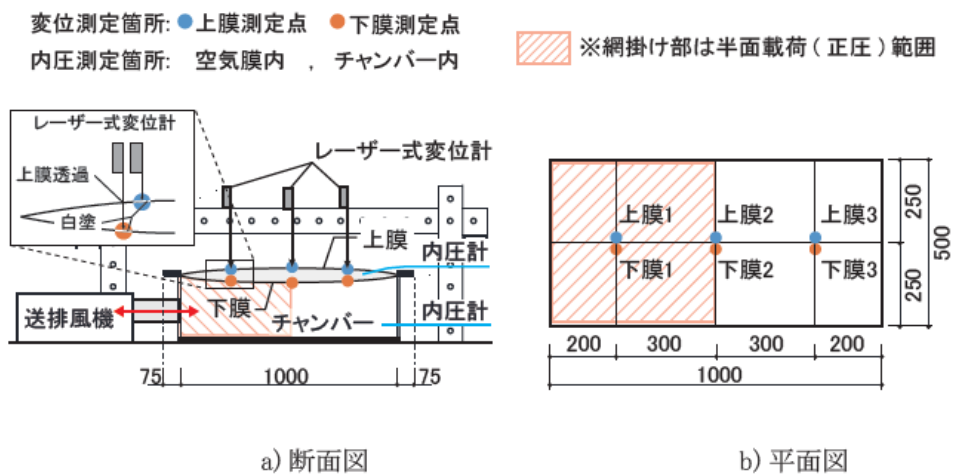
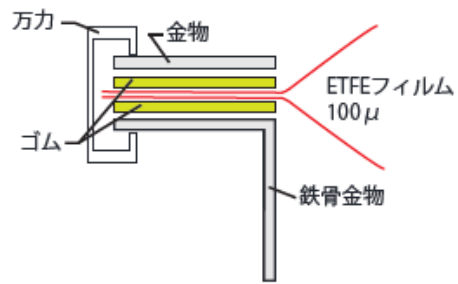


図4. 3. 2 アスペクト比2治具図



四周の計 12 箇所を万力により固定

図4. 3. 3 ETFEフィルム端部取付け詳細図

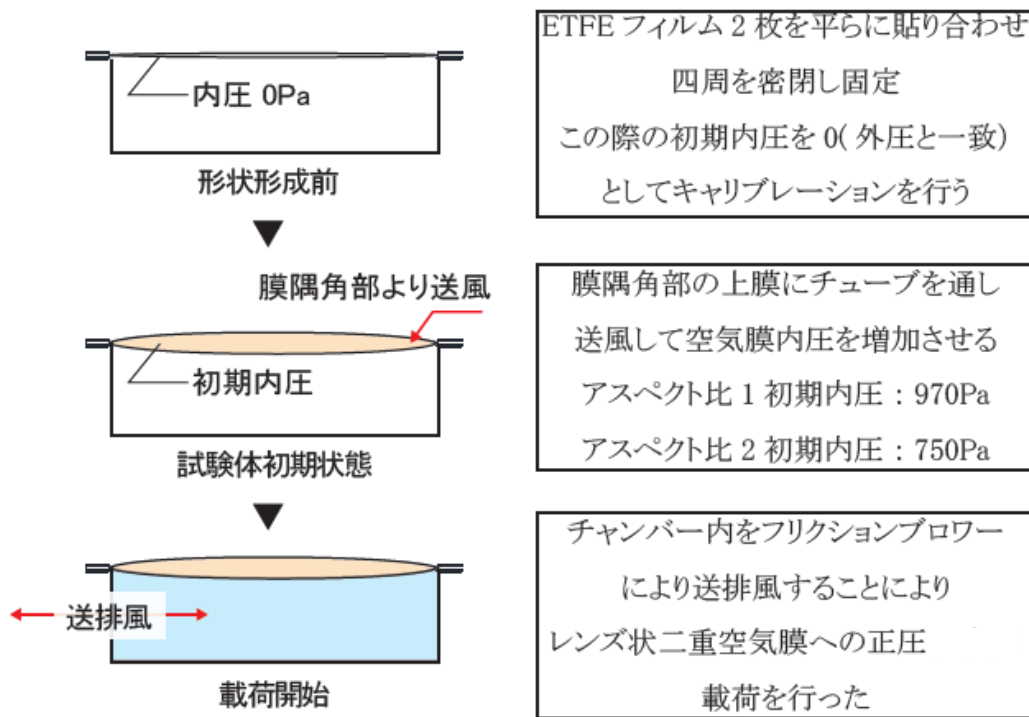
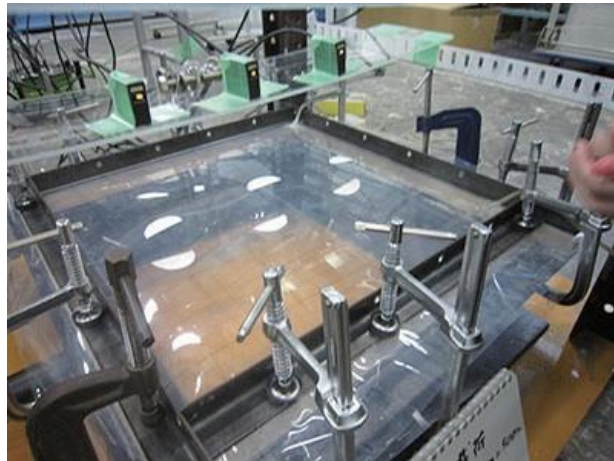
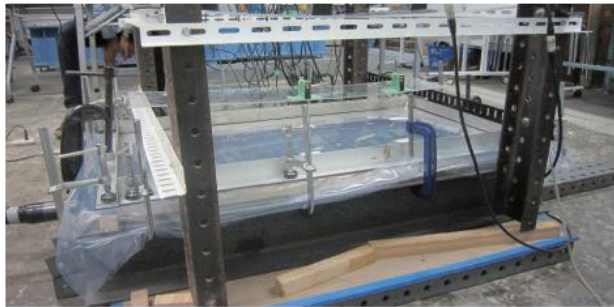


図4. 3. 4 実験手順



a) アスペクト比 1 治具写真



b) アスペクト比 2 治具写真



c) アスペクト比 2 エアバッグ (半面載荷用)

図4. 3. 5 実験治具写真



a) アスペクト比 1 実験風景



b) アスペクト比 1 試験体



c) アスペクト比 1 測定器設置写真

図4. 3. 6 実験風景写真

### 4. 3. 3 実験結果

図4. 3. 7に、アスペクト比1における全面正圧載荷の結果を示す。図4. 3. 8および図4. 3. 9に、それぞれアスペクト比2における全面正圧載荷と半面正圧載荷の結果を示す。実験結果の考察に関しては、4. 4の数値解析結果で併せて記述する。

全試験は、それぞれ3回ずつ計測を行った。試験体を設定内圧へ内圧を増加させた後に載荷を行ったが、試験体毎に若干の初期内圧や初期形状の誤差が生じる結果となった。しかし結果の平均化等の処理は行わず、本章では各試験結果を個別に掲載する。

【アスペクト比1】全面正圧载荷(初期内圧970Pa)

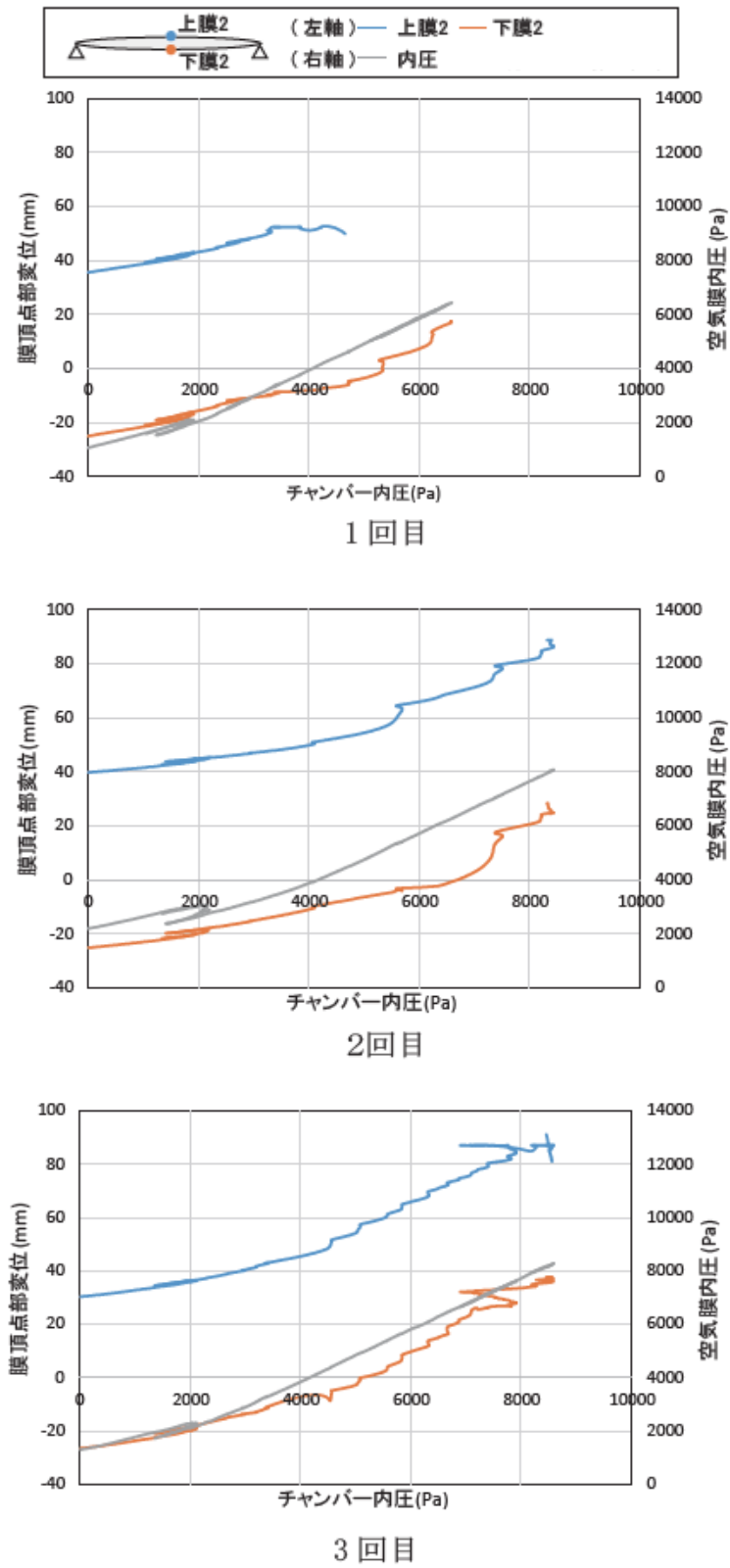


図4. 3. 7 アスペクト比1における全面正圧载荷



【アスペクト比2】全面正圧载荷(初期内圧750Pa)

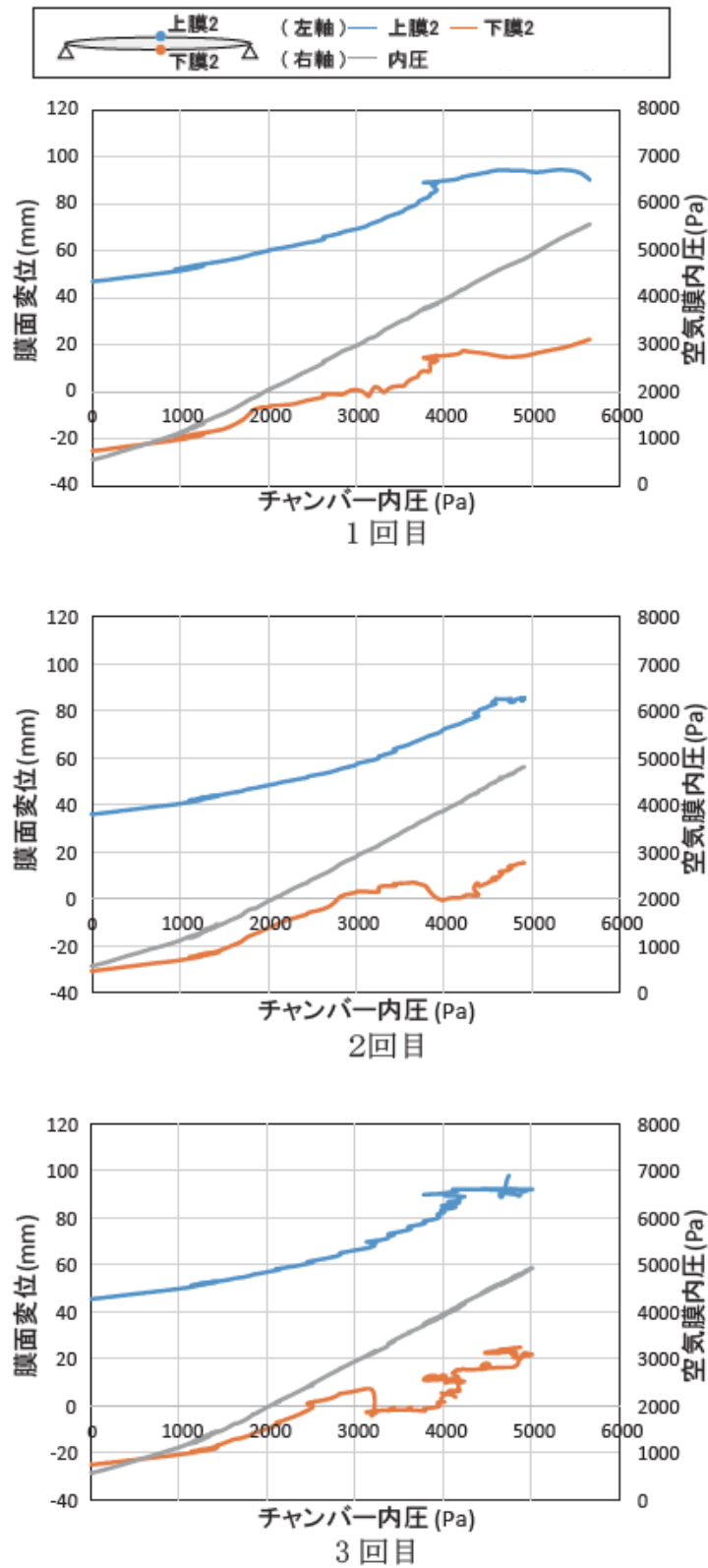


図4. 3. 8 アスペクト比2における全面正圧载荷

【アスペクト比2】半面正圧载荷(初期内圧750Pa)

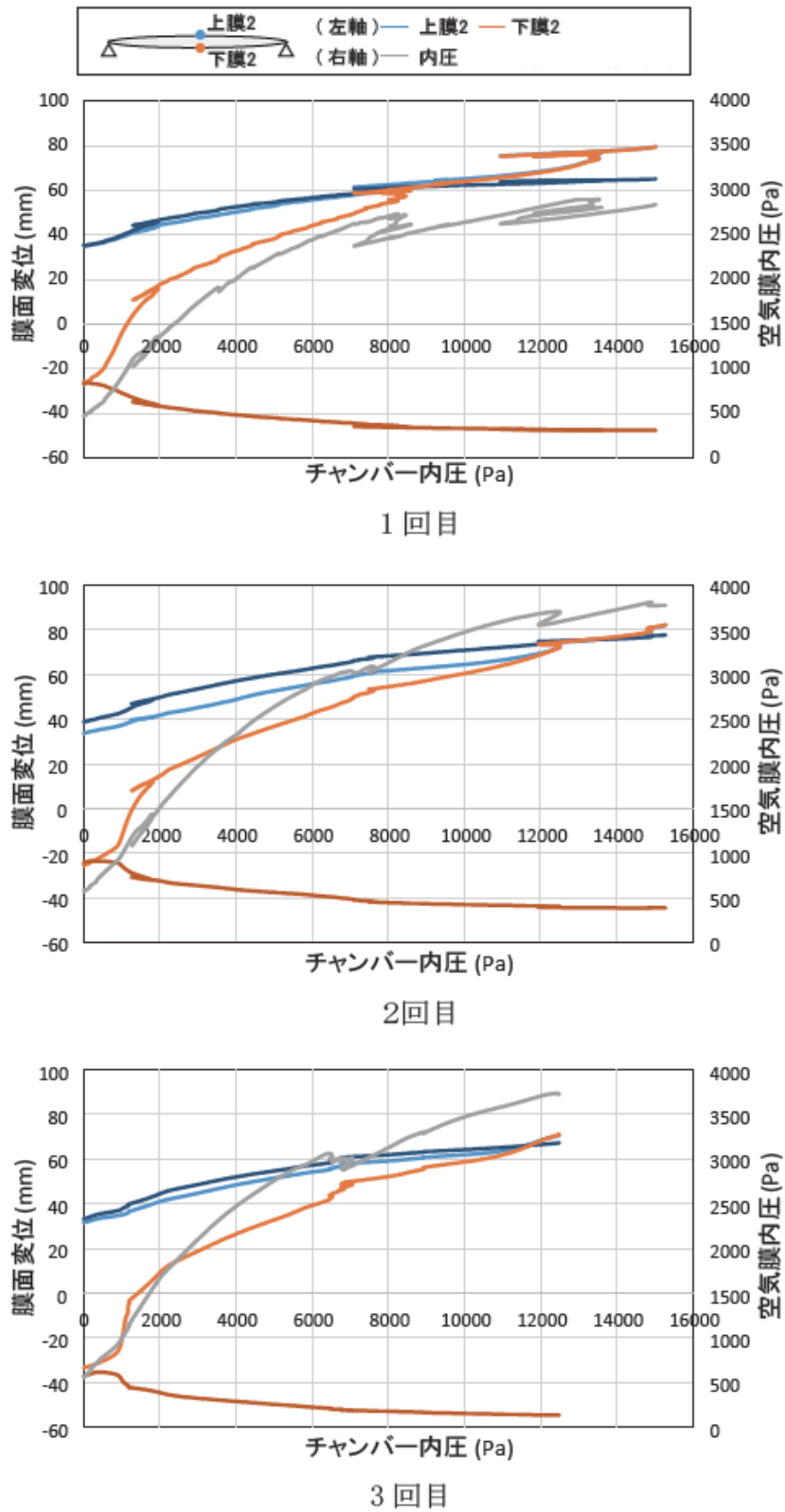


図4. 3. 9 アスペクト比2における半面正圧载荷

#### 4. 3. 4 数値解析結果と実験との比較検証

実験時に採用する初期形状(初期内圧)を最大膜応力7MPa時の形状とするために、事前に2枚の膜を平らに重ねた状態から膨らませる数値解析検討を行う。実験と数値解析との比較を行い、数値解析における初期内圧を与える際の変位の比較も行う。その後、数値解析において最大膜応力が7MPaとなる際の初期内圧を決定し、実験時の初期内圧を設定する。なお数値解析のモデル化・諸元は、3. 2と同じとする。パネルサイズ、フィルム厚は実験と同じものを用いる。

図4. 3. 10に、アスペクト比1(短辺500mm)空気膜内圧 - 鉛直変位関係を示す。内圧とETFEフィルムの鉛直変位関係は、実験と数値解析で結果が概ね一致した。内圧を漸増させていくと、鉛直変位はフラットな状態(変位0)から急激に変位が進行するが、その後剛性の増大が確認され、膜面の曲率による幾何剛性を考慮できているモデルであることが把握できた。本モデルにおいては内圧3,000Pa以降剛性が低下する傾向を示したが、これはETFEフィルムが降伏していることが原因と考えられる。ETFEフィルムの降伏は、辺の境界付近から生じたが、レンズ状二重空気膜構造のシステム全体としては、急激な剛性低下には至らないことが確認された。

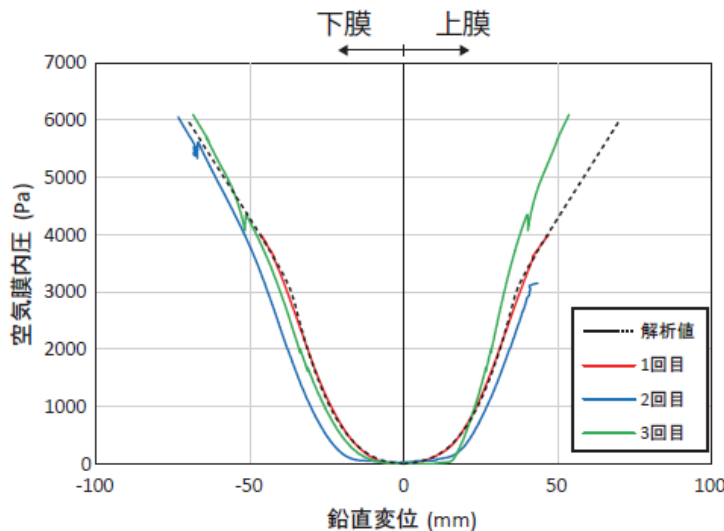


図4. 3. 10 アスペクト比1(短辺500mm)空気膜内圧 - 鉛直変位関係

これより、本検討におけるレンズ状二重空気膜の初期内圧は、アスペクト比1が初期内圧970Pa、アスペクト比2以上は750Paと設定した。

#### (1) アスペクト比1 全面正圧載荷

図4. 3. 11に、アスペクト比1(短辺500mm)全面正圧載荷を示す。荷重－膜面変位および内圧関係の結果を示し、変位は周辺境界位置の水平面を基準とした値とし、正圧載荷は荷重を正の値とする。上膜変位、下膜変位、空気膜内圧とも全面正圧載荷において実験値と解析値が概ね一致することが把握された。実験および数値解析共に、荷重の増加に伴い、載荷面である下膜と非載荷面となる上膜が共に上方向へ変位し、内圧が増加する性状が見られた。上膜と下膜は初期形状のデプスをほぼ保ちながら変形する性状が把握された。

数値解析において、荷重約3,000Paで第一降伏応力の16MPa程度となって上膜面に降伏が生じ、その後、剛性が少し低下する傾向を示したが実験および数値解析共に変形性状に大きな変化はなく、膜面降伏後も安定して荷重に抵抗できることが確認された。実験では荷重が約5,000Paで下膜面の反転を生じ、その際の内圧が約5,000Paであることから、荷重と内圧がバランスし、そのまま荷重が上膜面に伝わっていると考えられる。よって下膜面は、ほぼ無張力状態と考えられる。上膜面の変位と同様に下膜面も変位していくものの、約7,000Paまで変位がばらつく性状がみられた。

その後、荷重増加に伴い膜面の剛性は低下した後に、もう一度剛性が増加していることが確認された。これは、付加荷重により膜面が変位し、上下膜の曲率変化による抵抗性状(幾何剛性)によるものと、下膜が反転したことで付加荷重に対して上下2枚の膜で抵抗したものと考えられる。

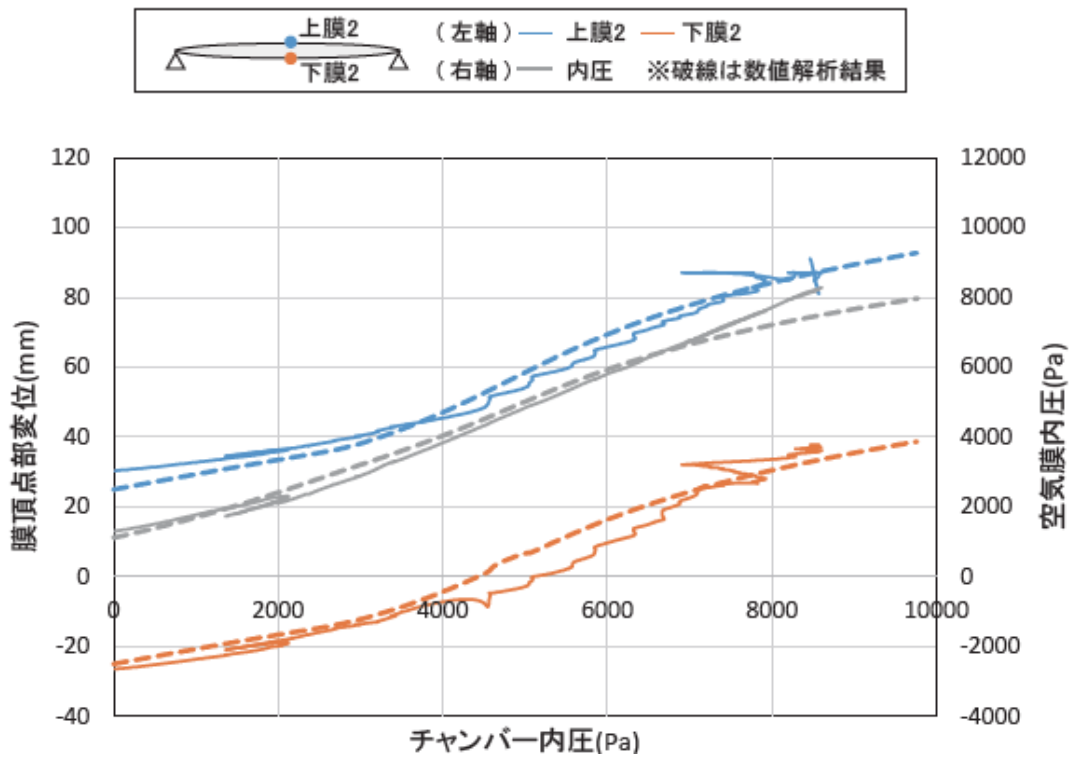


図4. 3. 11 アスペクト比1(短辺500mm)全面正圧載荷

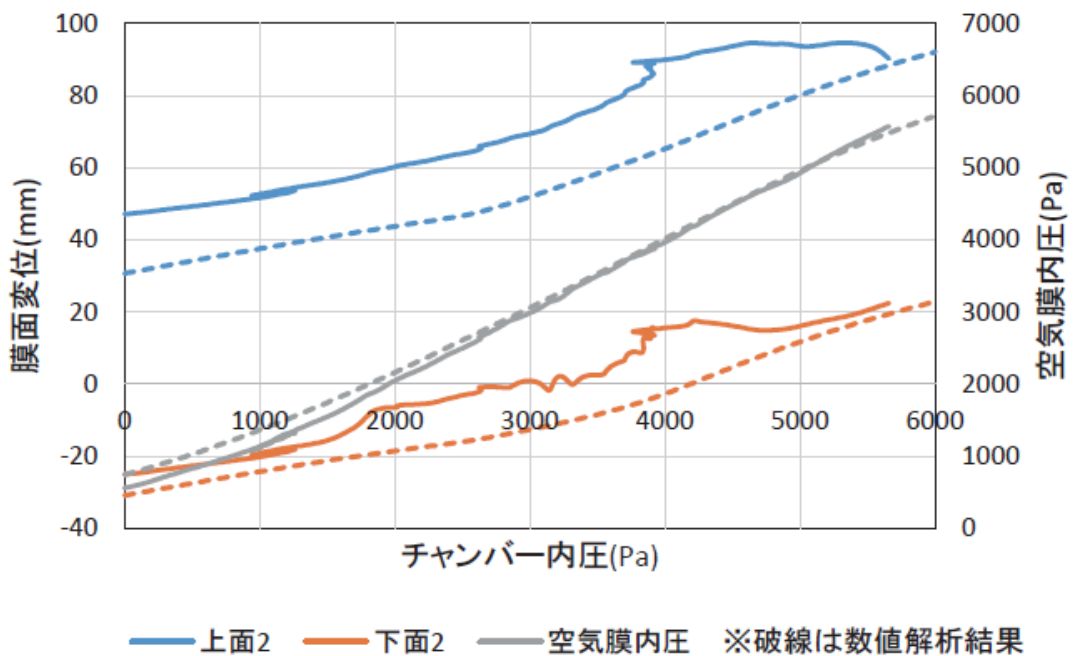


図4. 3. 12 アスペクト比2(短辺500mm)全面正圧載荷

## (2) アスペクト比2 全面正圧載荷

図4. 3. 12に、アスペクト比2 (短辺500mm) 全面正圧載荷を示す。荷重－膜面変位および内圧関係の結果を示し、アスペクト比1同様に、実験および数値解析共に荷重の増加に伴い、載荷面である下膜と非載荷面となる上膜が共に上方向へ変位し、内圧が増加する性状が把握された。

アスペクト比1同様に、初期形状のデプスをほぼ保ちながら変位する性状が把握されたが、第一降伏応力の16MPaとなる荷重は、数値解析において約2,000Paであり、アスペクト比1よりも小さい荷重となった。これはアスペクト比1のパネルが2方向で均等に抵抗しているのに対し、アスペクト比2は短辺のほぼ1方向で抵抗したため、降伏時の荷重が下がったと考えられるが、実験および数値解析共に変形状に大きな変化はなく、膜面降伏後も安定して荷重に抵抗できることが確認された。さらに、実験では荷重が3,000Pa以上になると下膜面の反転が生じ、その際の内圧が約3,000Paであることからアスペクト比1同様に、荷重と内圧がバランスし、そのまま荷重が上膜面に伝わっていると考えられる。よって下膜面はほぼ張力がない状態となり、上膜面の変位と同様にそれ以降も変位していくものの、約5,000Paまでばらつく性状がみられた。その後、荷重増加に伴い、アスペクト比1と同様にもう一度剛性が増加していることが把握された。内圧値は、荷重の増大に従い比例的に増加する傾向があり、実験と数値解析で良好に一致した。一部、上膜面の初期値に実験値と解析値で差異が見られた。これは実験において、上膜面側に空気送風用および内圧測定用のチューブを取り付けたことによる試験体製作上の誤差だと考えられる。しかし、実験値と解析値での変位の挙動はほぼ一致することが確認された。

### (3) アスペクト比2 半面正圧載荷

図4. 3. 13に、アスペクト比2(短辺500mm)半面正圧載荷を示す。実験および数値解析共に荷重の増加に伴い、非載荷面となる上膜は上方向へ変位し内圧が増加する性状が把握されたが、下膜は載荷面である測定点下膜1は上方向へ変位するものの非載荷面の下膜3は逆に下方向に変位し、空気の移動を伴うことが確認された。半面正圧載荷においては、載荷面の変位が顕著に進行し、測定点下膜1と上膜1が接触する現象が見られた。その後、上下膜の膜面が同じ変位になり、間に空気がない状態で変位することが確認された。

半面載荷において実験では、反転が生じた後も全面載荷とは異なり、概ね下膜面の変位挙動は良好に一致した。これは、全面載荷では、膜面のほぼ全体が一斉に張力消失を生じる状況になるが、偏荷重載荷においては、反転による張力消失エリアがごく狭い領域におけるものであったからだと考えられる。また、全面正圧載荷時と同様に、荷重の増加に伴い内圧は増加する傾向を示したが、荷重が約2,000Pa以上になると、内圧の増加の割合が緩やかになる傾向が見られた。これは半面載荷において、荷重2,000Pa以降で内部空気の移動が顕著に生じたためと考えられる。

図4. 3. 14に、アスペクト比2(短辺500mm)荷重一下膜1変位関係を示す。半面正圧載荷と全面正圧載荷の載荷面側の変位と荷重の関係結果を示し、半面正圧載荷は、載荷面側の変位が全面載荷に比べ大きくなることが把握された。特に全面載荷では荷重が約4,000Pa時に膜面変位が0となり、膜面が反転するのに対して、半面載荷では約1,500Paと小さい荷重で膜面が反転することが把握された。

以上のことから、全面載荷では上膜と下膜の初期形状のデプスをほぼ保ちながら変形する性状を把握し、膜面降伏後も安定して荷重に抵抗できることを確認した。半面載荷では載荷した側の変位が顕著に進行し、載荷していない側は膨らむ

性状を示し、全面載荷と異なる性状を示すことが把握された。

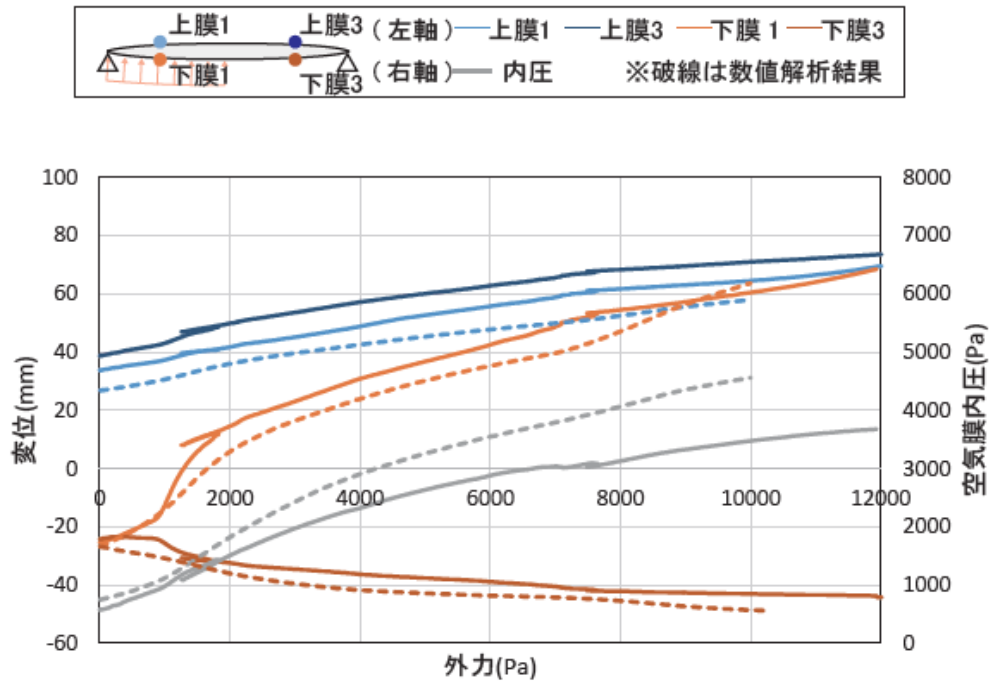


図4. 3. 13 アスペクト比 2(短辺500mm)半面正圧載荷

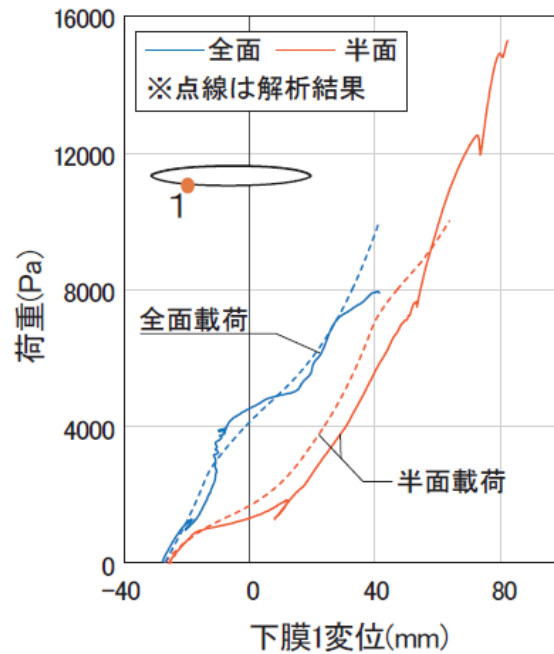


図4. 3. 14 アスペクト比 2(短辺500mm)荷重一下膜1変位関係



## 4. 4 載荷範囲の違いに関する検討

### 4. 4. 1 数値解析概要

矩形平面のレンズ状二重空気膜構造の載荷範囲の違いにより、膜面の変形性が異なることが4. 3より確認された。また、パネルのアスペクト比を大きくした場合、体積が大きくなることで、膜面の変位が生じやすくなると考えられる。よって、載荷範囲と膜面変位の関係の把握を目的として、矩形平面に載荷範囲を変更した検討を行う。図4. 4. 1に載荷範囲の違いによる数値解析概要を示す。また、数値解析には4. 3. 4と同様の解析モデルを用いる。

アスペクト比2~8 (短辺500mm)および、アスペクト比が十分大きいモデルとしてアスペクト比20を対象として、正圧の載荷範囲を変えた数値解析を行う。なお、偏荷重時の影響はアスペクト比が大きくなるほど顕著になることが考えられ、本検討ではアスペクト比2以上を対象としている。積雪荷重は、上膜面への載荷として検討を行う。「載荷範囲」はモデルの長辺 $L_y$ に対し、載荷する範囲の割合とし、検討では載荷範囲側の試験体端部から50mm間隔で範囲を増加させて行った。ここで、膜面の四周の境界面から載荷面(上膜)側の膜端部の膜面角度を $\theta$ とし、膜面が境界面と平行となるときを $\theta = 0$ とする。変位が進行し $\theta = 0$ となる荷重を、膜面の反転が生じ始める荷重という意味から「反転荷重」と定義する。一例として、図4. 4. 2に載荷範囲50%時の変形図(アスペクト比2)を示す。荷重の増加に伴い $\theta$ が小さくなり、1,430Paで $\theta = 0$ となった。このときの荷重1,430Paが反転荷重となる。また、反転荷重以上の荷重(例:3,000Pa時)を加えた場合、膜面は境界面より下がる性状を示す。ここでは反転荷重の算出を目的とし検討を行う。

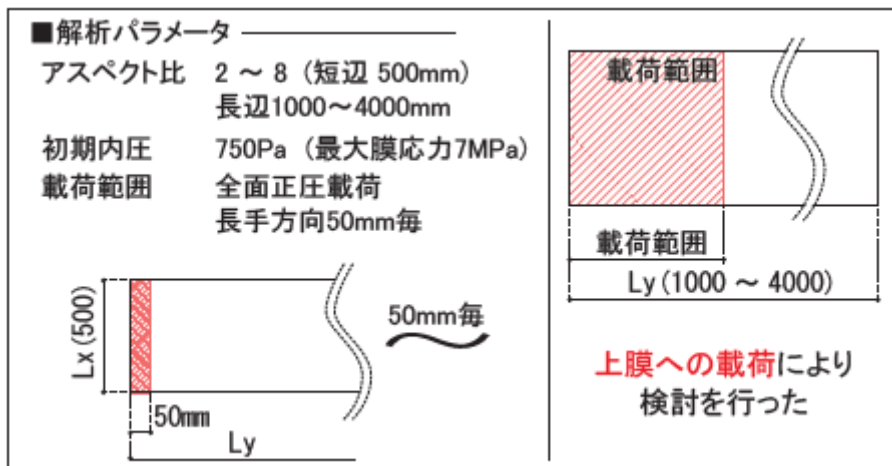


図4. 4. 1 載荷範囲の違いによる数値解析概要

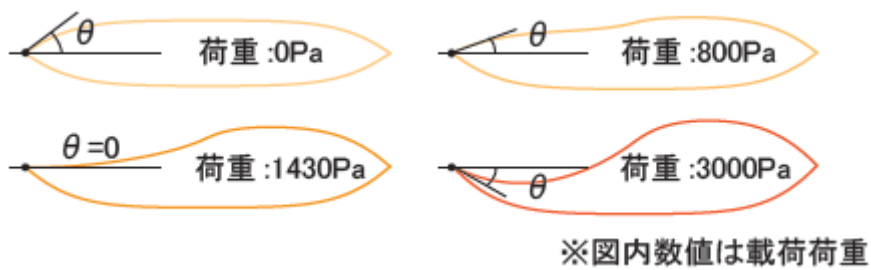


図4. 4. 2 載荷範囲50% 時の変形図 (アスペクト比2)

#### 4. 4. 2 載荷範囲の違いによる数値解析結果

図4. 4. 3に、アスペクト比毎の反転荷重－載荷範囲関係を示す。アスペクト比2では、載荷範囲30%で反転荷重が最も小さく(「最小反転荷重」と称す)、容易に変形することが把握された。また、アスペクト比が大きくなるほど反転荷重は小さくなると共に、反転が生じる載荷範囲も、小さくなる傾向が確認された。この理由として、アスペクト比が大きくなると初期形状の内部空気量が大きくなり、内部空気の移動を生じやすくなることが考えられる。また、最小反転荷重が存在することから、ある設計積雪荷重に対して、反転を生じさせないために必要な初期内圧が、アスペクト比毎に存在する可能性が示唆された。加えて、載荷荷重が初期内圧以下では膜面の反転は生じないことも把握された。

本検討により、設計を行う上でレンズ状二重空気膜構造に反転を生じさせないための必要初期内圧が存在することが示された。例えば、アスペクト比2では積雪荷重が1,200Paであった場合、初期内圧が750Paあれば、どのような範囲に積雪が生じたとしても反転が生じないことになる。アスペクト比20においては、最小反転荷重がほぼ初期内圧と同様であるため、設計積雪荷重とほぼ同等の初期内圧が必要であることが確認された。

図4. 4. 4に、アスペクト比毎の反転時内圧－載荷範囲関係を示す。アスペクト比が大きくなるほど、最小反転荷重時の初期内圧からの内圧増加は小さくなることが把握された。これは、アスペクト比が大きいほど内部体積が大きくなり、内部空気の移動が容易なため、体積変化(内圧変化)をほとんど伴わない変形、すなわち伸び無し変形に近い性状が顕著に現れることが原因と考えられる。

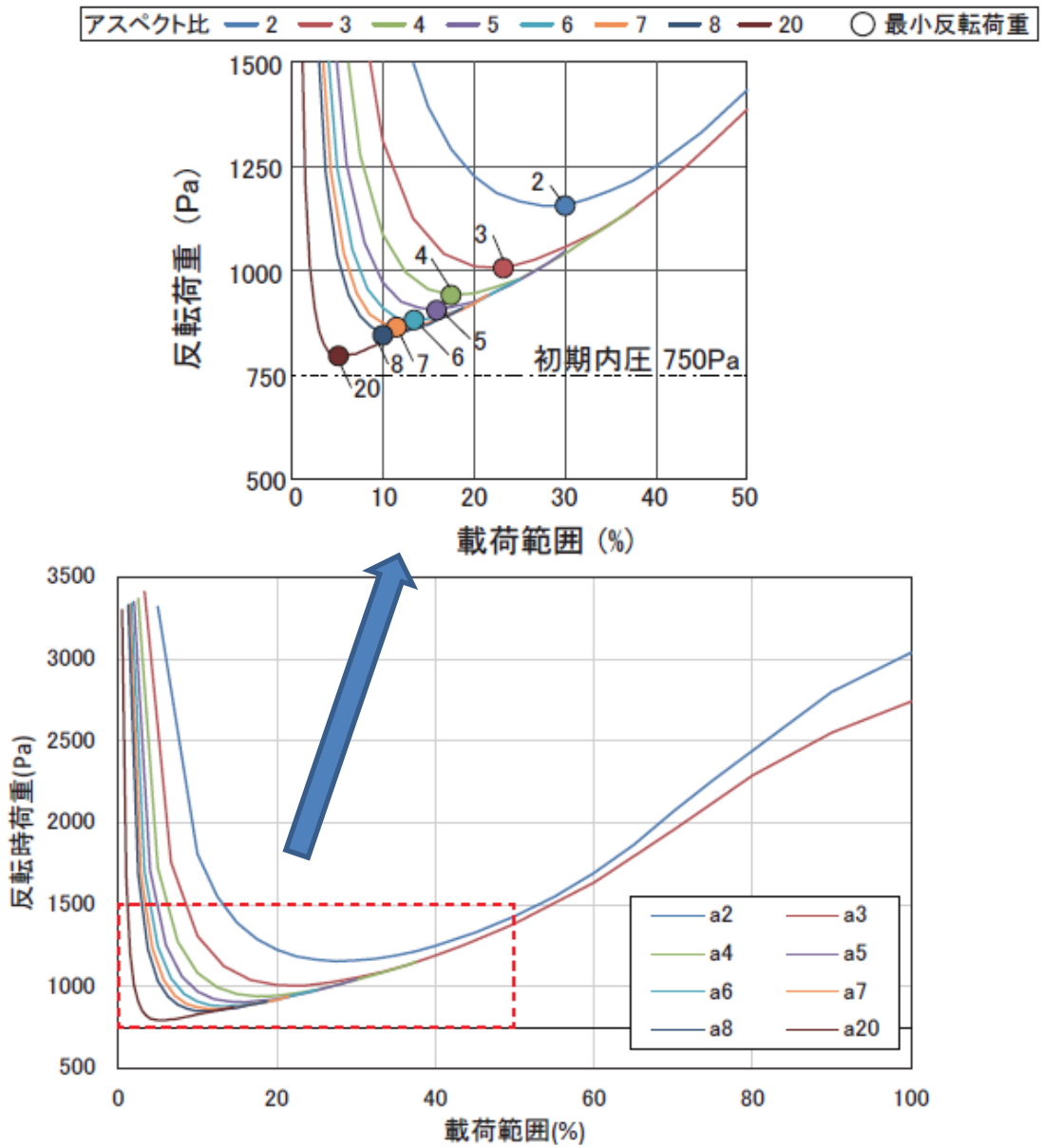


図4. 4. 3 アスペクト比毎の反転荷重－載荷範囲関係

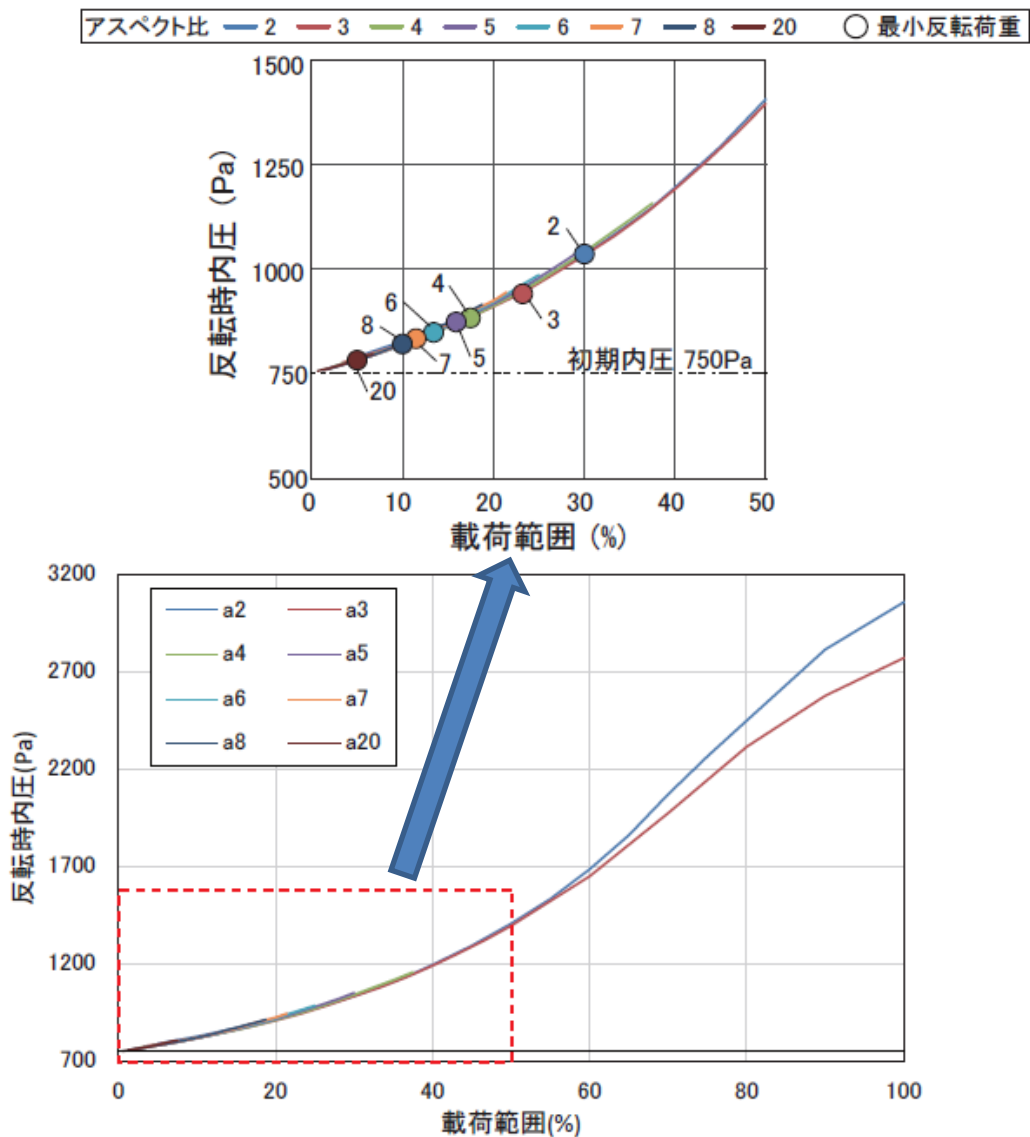


図4. 4. 4 アスペクト比毎の反転時内圧－载荷範囲関係

図4. 4. 5に、反転荷重が最小となる载荷範囲を示す。各アスペクト比で反転荷重が最小となる载荷範囲をプロットした図であり、反転が最も生じやすい载荷範囲は、アスペクト比が大きくなるほど全体に対する割合は減少する傾向を有していて、アスペクト比に対して反比例の減少傾向を示した。アスペクト比が大きくなるほど、内部空気量が多くなることから、アスペクト比が大きくなるにつれて内部空気が移動しやすくなることが要因として考えられる。

図4. 4. 6に、反転荷重が最小となる载荷範囲時の反転時内圧を示す。最小反転荷重時の内圧はアスペクト比が大きくなるに従い減少していき、初期内圧(750Pa)に漸近していく傾向が見られた。

以上のことから、レンズ状二重空気膜構造の反転を生じさせないためには、アスペクト比が大きいほど付加荷重時の内圧増加が期待できないため、大きな初期内圧が必要であることが把握された。

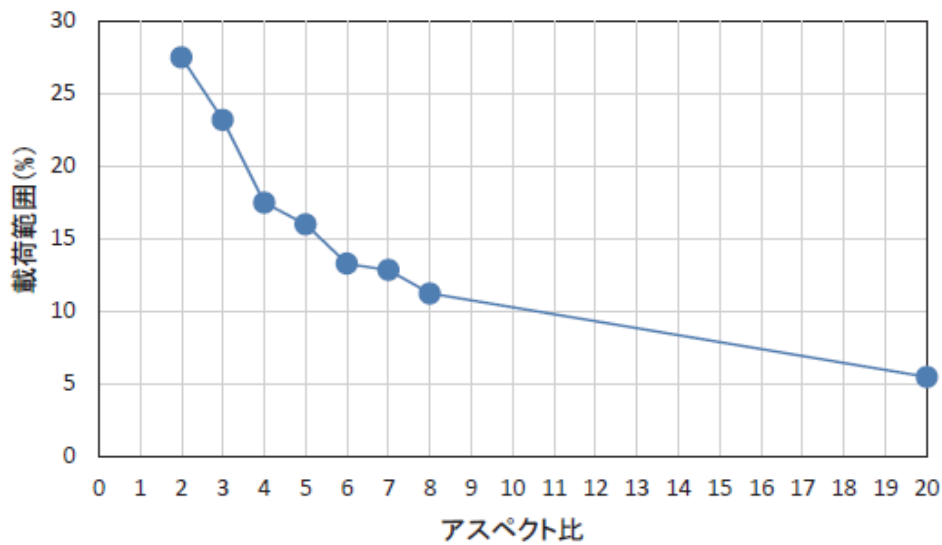


図4. 4. 5 反転荷重が最小となる载荷範囲

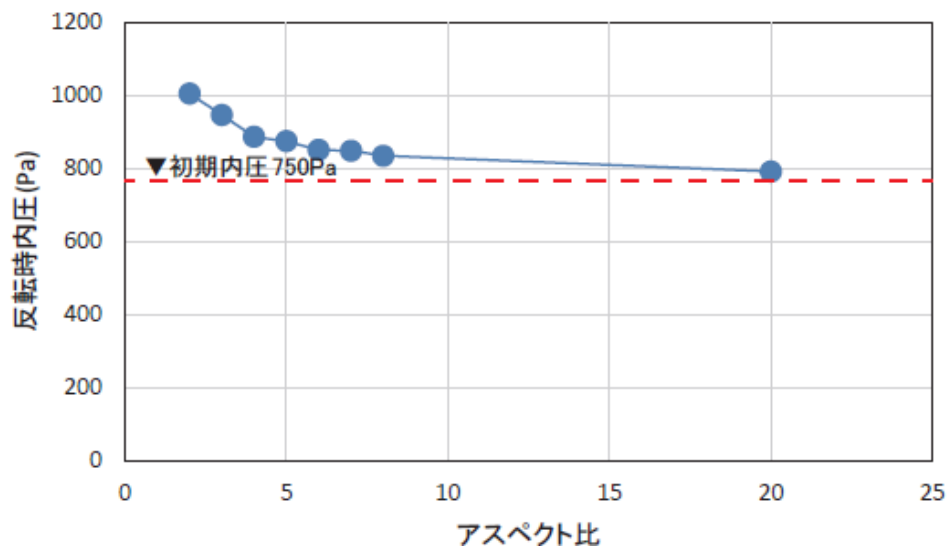


図4. 4. 6 反転荷重が最小となる载荷範囲時の反転時内圧

## 4.5 進行性ポンディングを考慮した検討

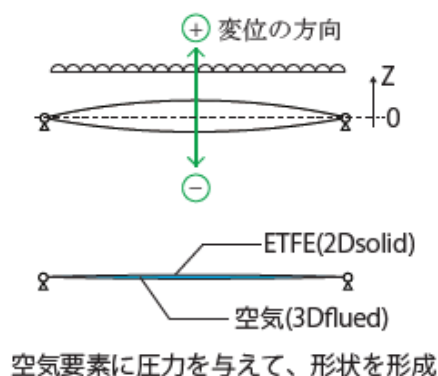
### 4.5.1 数値解析概要

4.4より、レンズ状二重空気膜構造の反転を生じさせないための必要初期内圧が存在することが示された。ここでは、想定以上の積雪荷重の際や、設定内圧を大きく出来ない状況では、膜面の反転が生じる事が危惧されることから、進行性ポンディング現象が生じた場合の検討を行う。

境界部が水平に設置されたレンズ状空気膜は、付加荷重により上膜面がパネル面以下に変形した際、その箇所に溜まった水等の排水が困難であることから、進行性ポンディング現象による崩壊の発生が危惧される。レンズ状二重空気膜構造は、雨水などはパネル境界部に雨水を排水するように計画することで屋根上に滞らせないように設計されるが、積雪荷重後の変形時に雪の融雪水や雨水により、積雪荷重以上の追加荷重が生じる恐れがある。4.4より、偏荷重による変位進行の増加が把握されたことから、偏荷重時の変形から貯水が生じたときの挙動の把握を目的とした検討を数値解析により行う。

進行性ポンディングは、貯水による変位進行を考慮して検討を行うため、実際の規模を想定し、水平面に設置された矩形平面パネル(短辺長さ2,000mm)を対象として検討を行う。図4.5.1に、数値解析概要および諸元を示す。数値解析手法は、前章までと同様である。膜材はETFE フィルム200 $\mu$ m厚とし、初期内圧は最大膜応力が長期許容応力度(7MPa)となる365Paとした。検討するアスペクト比は2、3、4および8とし、載荷する積雪荷重は20N/m<sup>2</sup>/cm、積雪深は30cm～100cmを想定した600Pa～2,000Paとする。アスペクト比が2を超えると、等分布荷重に対する応力はほぼ短手方向の1方向に流れることから、全てのアスペクト比で初期内圧を365Paと設定する。アスペクト比により、生じる最大膜応力に若干の誤差が生じたが、アス

ペクト比2と8での差が0.1MPa程度であったことから、無視できるものとして検討を行った。また解析では、載荷範囲の形状が結果に与える影響が大きいことから、載荷する範囲は要素分割数を細かくして検討する。



#### ■実規模モデル

<材料種別>

[膜材料]: 膜 (2D-Solid) 要素 ETFE フィルム 200 $\mu\text{m}$	
膜剛性 $E_t$	640 [N/mm <sup>2</sup> ]
ポアソン比 $\nu$	0.34
密度	1750 [kg/m <sup>3</sup> ]

※空気要素は実験・実規模モデルで同様とした。

[雨水荷重]: 水密度 1tonf/m<sup>3</sup>

図4. 5. 1 数値解析概要および諸元

#### 4. 5. 2 進行性ボンディングの数値解析フロー

図4. 5. 2に、進行性ボンディングの数値解析フローを示す。まず初期形状を形成後、積雪荷重を載荷する(Step1)。なお、載荷範囲は図4. 4. 3に示した各アスペクト比における最小反転荷重時の載荷範囲とする。積雪荷重載荷後の形状に対してパネル境界の水平面(基準面)を下回る箇所に、各節点の変位から算出した「貯水荷重」を載荷した(Step2)。この時、Step1で載荷された積雪荷重は載荷状態を保



持したままとする。積雪荷重によって生じたくぼみに雨水や雪解け水が流れ込むことを想定し、貯水可能範囲の体積分の貯水荷重を載荷している。Step2により生じる変位から前Stepとの差分の「貯水荷重」を各節点に載荷する(Step3)。以後、変位に応じて貯水の増加を繰り返し、貯水荷重による変形後に対する変形前の貯水量の割合が99%に達した時点で、滞水した水が外に溢れ出る「オーバーフロー」が生じたとみなし、検討を終了する。99%以下の場合は変形による差分の貯水量を繰り返し載荷し、貯水量が変形後の載荷面以下の総体積の99%となるまで繰り返す。99%に到達する前に変位進行のほうが大きくなり、貯水による変形が大きくなる場合は、進行性ポンディング減少による崩壊が生じたとみなす。

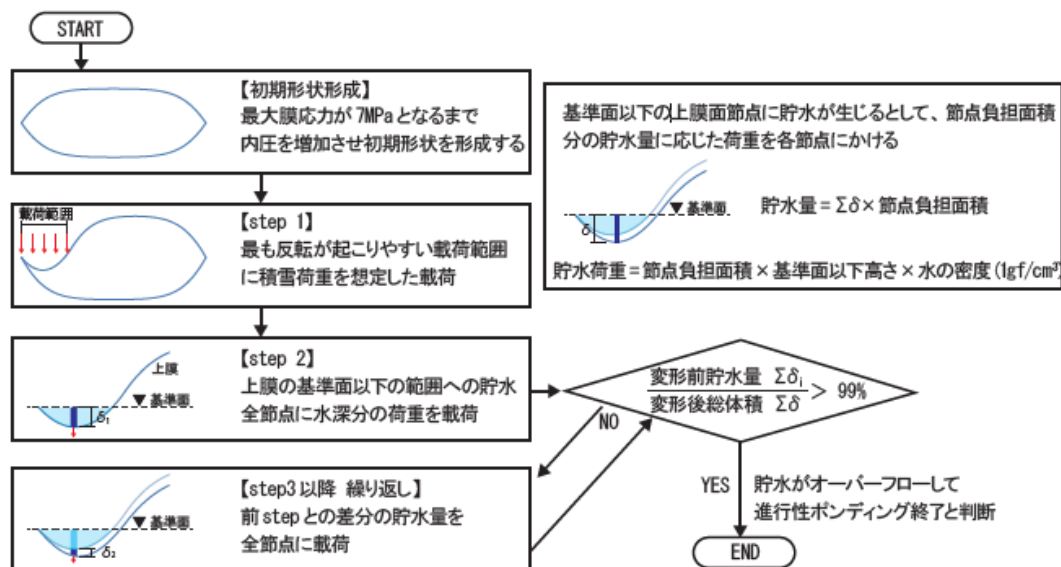


図4. 5. 2 進行性ポンディングの数値解析フロー

### 4. 5. 3 単調載荷と進行性ボンディング考慮時の比較

図4. 5. 3に、単調載荷時と進行性ボンディング考慮時の最大膜応力と内圧を示す。各アスペクト比の載荷範囲へ積雪荷重の載荷のみを行った場合と、積雪荷重を載荷後、積雪によって生じたくぼみへの貯水を考慮した場合の最大膜応力と空気膜内圧を併せて示す。

進行性ボンディングを考慮した場合には、積雪荷重のみと比べて最大膜応力が大きくなる傾向が把握された。この傾向はアスペクト比が大きくなるほど顕著である。これは、アスペクト比が大きくなるほど載荷時の変形が増加し、貯水量が多くなることが原因である。また、アスペクト比が大きいアスペクト比8では、内部空気が移動しやすいため、局部変形が大きくなり膜応力も大きくなる。その際、体積変化が大きくないため、内圧の増加量はそれほど大きくはない。一方、アスペクト比2においては、積雪荷重のみと進行性ボンディング考慮時の最大膜応力はあまり差がないことから、アスペクト比が小さい範囲では偏分布荷重の貯水による影響が少ないと考えられる。アスペクト比が大きいレンズ状空気膜構造を用いる場合は、偏荷重に対する注意が必要であると考えられる。国土交通省の告示<sup>4.5), 4.6)</sup>ではフィルムクリープ特性を考慮し、積雪時(一般地域の中短期)の荷重状態を考慮して、許容応力度が12.6MPaと定められているが、今回の検討範囲では、それを満足する結果となった。オーバーフロー時は許容応力度を満足していないが、最大応力度は約20MPaで第2降伏点近辺であることから、ひずみが10%程度になるものの、フィルムの破断には至らないことが確認された。

図4. 5. 4に、長手方向断面形状(2,000Pa)を示す。積雪荷重時では、載荷範囲において局所的に変形しており、載荷範囲以外では内部空気の移動に伴い、膨らむ性状が把握された。同様にオーバーフロー時の形状は、貯水範囲において局所的に変形しており、積雪荷重時の形状と類似することが把握された。また、アスペク

ト比が大きくなるに従い、載荷範囲における変位量は増加する傾向を示した。アスペクト比が小さい2~3の範囲では、上膜面が一部下膜面に接触しているのに対して、アスペクト比が大きい4以降では上膜面が下膜面に大きく接触し、下膜面でも局所的な変形が生じることで、一体となって貯水荷重に抵抗していることがわかる。このことから、アスペクト比が大きくなるほど内部空気の移動が容易なため、積雪荷重時とオーバーフロー時の変形形状の差が大きくなると共に、上膜面と下膜面の接触状態も変化することを確認したが、最終的には全てのアスペクト比においてオーバーフローする結果が得られた。

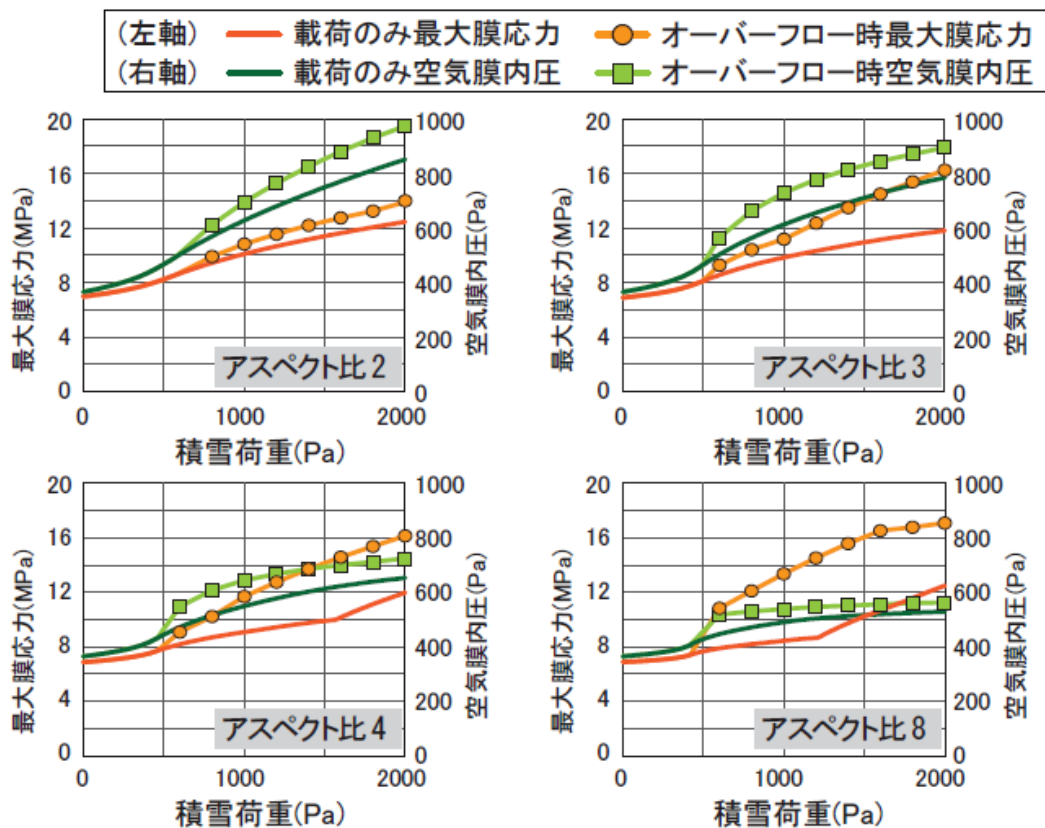
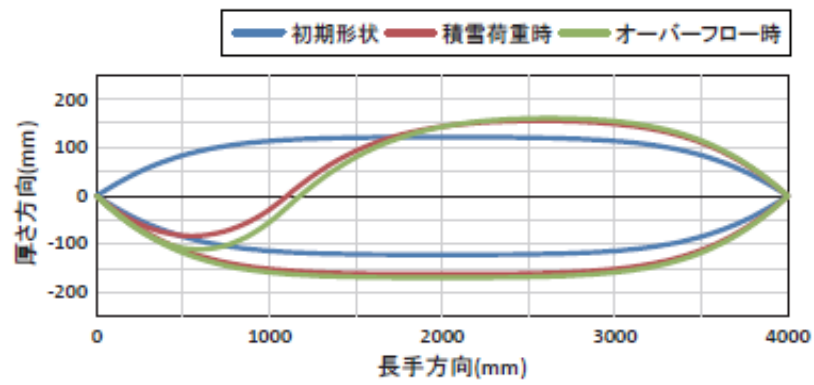
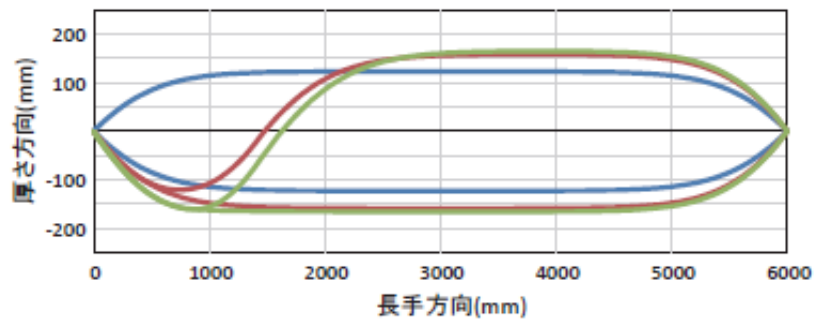


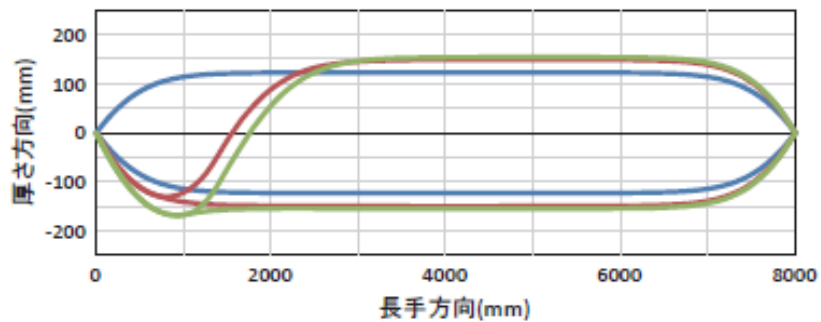
図4. 5. 3 単調載荷時と進行性ポンドリング考慮時の最大膜応力と内圧



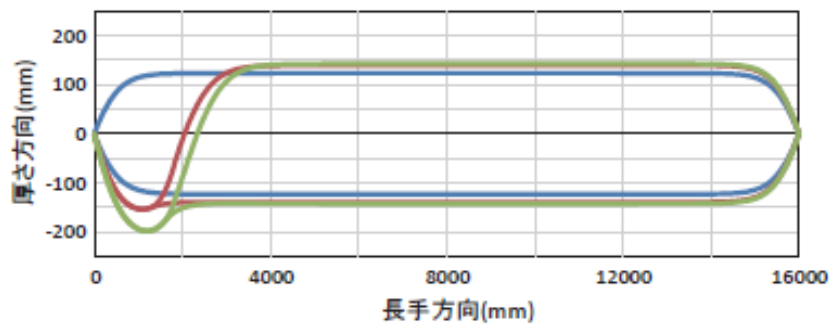
アスペクト比 2 載荷荷重 2000Pa



アスペクト比 3 載荷荷重 2000Pa



アスペクト比 4 載荷荷重 2000Pa



アスペクト比 8 載荷荷重 2000Pa

図4. 5. 4 長手方向断面形状(2,000Pa)

## 4.6 内圧の違いによる検討

### 4.6.1 数値解析概要

レンズ状二重空気膜構造の進行性ポンディングに及ぼす初期内圧の影響と、  
載荷によるETFEフィルム<sup>1</sup>の塑性化の影響の把握を目的とした検討を行う。また、一  
般に空気膜構造では初期形状を形成する際に立体裁断を行うことが多いことから、  
本検討では下記の手法を用いて、立体裁断を模擬したモデルを採用する。

立体裁断ありモデルとして、4.5で得られた初期状態(フラットな状態から最大  
膜応力が7MPaとなるまで膨らませた形状)を初期形状(応力度0)とし、そのモデル  
に対して所定の初期内圧を与える。立体裁断モデルは等張力曲面により構成され  
ることが理想とされるが、本検討では上記の通り、擬似的な立体裁断モデルを用い  
ている。図4.6.1に、立体裁断形状(アスペクト比2)を示す。

パラメータはアスペクト比2, 3, 4および8とし、初期内圧は10 Pa、50 Pa、100  
Pa、150 Pa、300 Paおよび600Paとした。初期内圧に差があるため、初期形状、初期  
応力状態に差が生じる(初期内圧150Paで約20mm、初期内圧600Paで約50mmの  
初期形状とのデプス差が生じている)。立体裁断を行ったレンズ状二重空気膜構造  
は、実際の運用でも、積雪荷重時や強風時に内圧を上げ剛性を高めることが多い  
ことから、このデプス差を有したまま検討を行うものとする。一例として、図4.6.2に  
立体裁断の有無による応力分布(アスペクト比2、内圧100Pa 時)を示す。立体裁断  
ありモデルでは、立体裁断なしモデルに比べ、ほぼ等張力に近い状態が得られて  
いることが確認された。

載荷範囲は4.5と同様とし、積雪荷重は2,000Paに設定する。積雪荷重は4.5  
の貯水による進行性ポンディングを考慮した検討において、2,000Paにおいても全  
てのアスペクト比において崩壊には至らなかったことから、初期内圧による偏荷重

およびその後の貯水による影響を把握するため2,000Paにて行う。図4. 5. 2に示す進行性ポンディングの数値解析フローにより検討を行う。

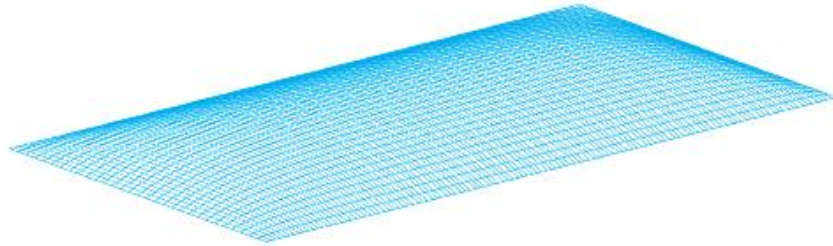


図4. 6. 1 立体裁断形状(アスペクト比2)

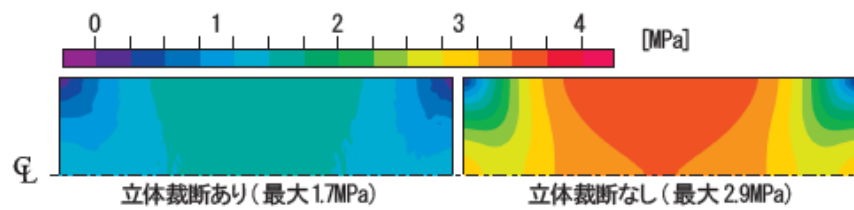


図4. 6. 2 立体裁断の有無による応力分布(アスペクト比2, 内圧100Pa 時)

#### 4. 6. 2 内圧を考慮した検討結果

図4. 6. 3に、各荷重時における内圧値を示す。比較する荷重状態は、初期形状形成時、積雪荷重時(2,000Pa載荷時)および進行性ボンディング考慮時である。結果、全てのパラメータでオーバーフローの発生が確認された。立体裁断ありモデルの内圧値は、積雪荷重時においては、初期内圧によらずほぼ同様の内圧増加量となり、内圧が増加することで付加荷重に抵抗することが確認された。例えばアスペクト比2では、増加量にして約550Pa～650Paであった。この傾向はアスペクト比によらず、ほぼ一定であることが把握された。また、アスペクト比が大きくなるほど内圧の増加量は小さい傾向を有する。これは、アスペクト比が大きいほど内部体積量が大きいためである。立体裁断の有無により比較すると、立体裁断なしモデル(初期内圧365Pa)は、立体裁断ありモデルの初期内圧300Paモデルと、内圧の増加傾向はあまり変わらないことが把握された。立体裁断の有無によらず、積雪荷重時の内圧増加傾向は同様であることが示唆された。進行性ボンディング考慮時は、初期内圧を増加させることで内圧の増加量が小さくなる傾向を示した。これは、初期内圧を大きくすることで積雪荷重時の変位が小さくなり、貯水量が少なくなったためと考

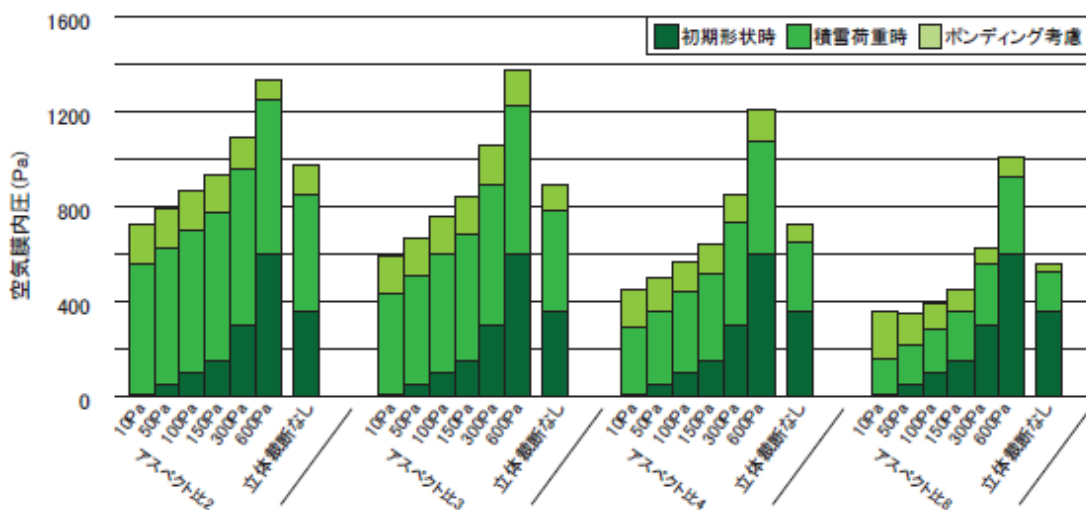


図4. 6. 3 各荷重時における内圧値

えられる。図4. 6. 4に、各荷重時の最大膜応力の結果を示す。立体裁断ありモデルは積雪荷重載荷後、初期内圧によらず、上膜最大応力がほぼ一定の値となることが把握された。これは、初期内圧の増加により初期膜面応力が増大する一方で、剛性が大きくなることで膜面応力の増加量が減少したことが要因と考えられる。しかし、オーバーフロー時の最大膜応力は初期内圧の増加により小さくなる傾向が確認された。これは図4. 6. 3と同様に、初期内圧の増加により積雪荷重時の変位が小さくなり、貯水量が少なくなるためだと考えられる。アスペクト比2~4においては初期内圧を600Paとすることで、オーバーフロー時の膜応力はフィルムの第一降伏応力の16MPa以下となり、ETFEフィルムが降伏をしない状態となる。また、立体裁断なしモデルは、上膜面、下膜面の最大膜応力に差をほとんど生じないが、立体裁断ありでは、上膜の最大膜応力が下膜に比べ大きくなる事が確認された。これは、立体裁断を行った場合、上膜の載荷箇所の変形と共に、上膜の載荷を行わない範囲が大きく膨らむ性状を示し、載荷領域の端部において膜面の引張応力が増加することで、上膜の最大膜応力が大きくなったためと考えられる。一方で、アスペクト比8、初期内圧10Paのモデルでは、下膜面においても応力が増大することが確認された。これはアスペクト比が大きく初期内圧が小さい場合には、上膜面が下膜面に接触することで、下膜面の応力が大きくなったためと考えられる。しかし、同様のアスペクト比で初期内圧を600Paとしたモデルでは、下膜面の応力増加が減少している。このことから初期内圧を大きくすることで、下膜の接触による応力増加は回避可能であることが示唆された。

また、進行性ポンディングの影響は、変形が生じやすく貯水量の多くなるモデルにおいて最も影響が大きいと考えられるが、本検討範囲におけるアスペクト比8、初期内圧10Paのモデルにおいても、オーバーフローが確認された。これは、アスペクト比が大きく、初期内圧が小さい場合においても、貯水考慮時に上膜面が下膜面



に接触し、下膜面も荷重に抵抗するため、崩壊に至らなかったと考えられる。以上のことから、本検討で対象としたレンズ状二重空気膜構造では、ETFEフィルムの第1降伏点を超える場合においても、進行性ボンディングによる膜の破断等の崩壊が起こらないことが把握された。

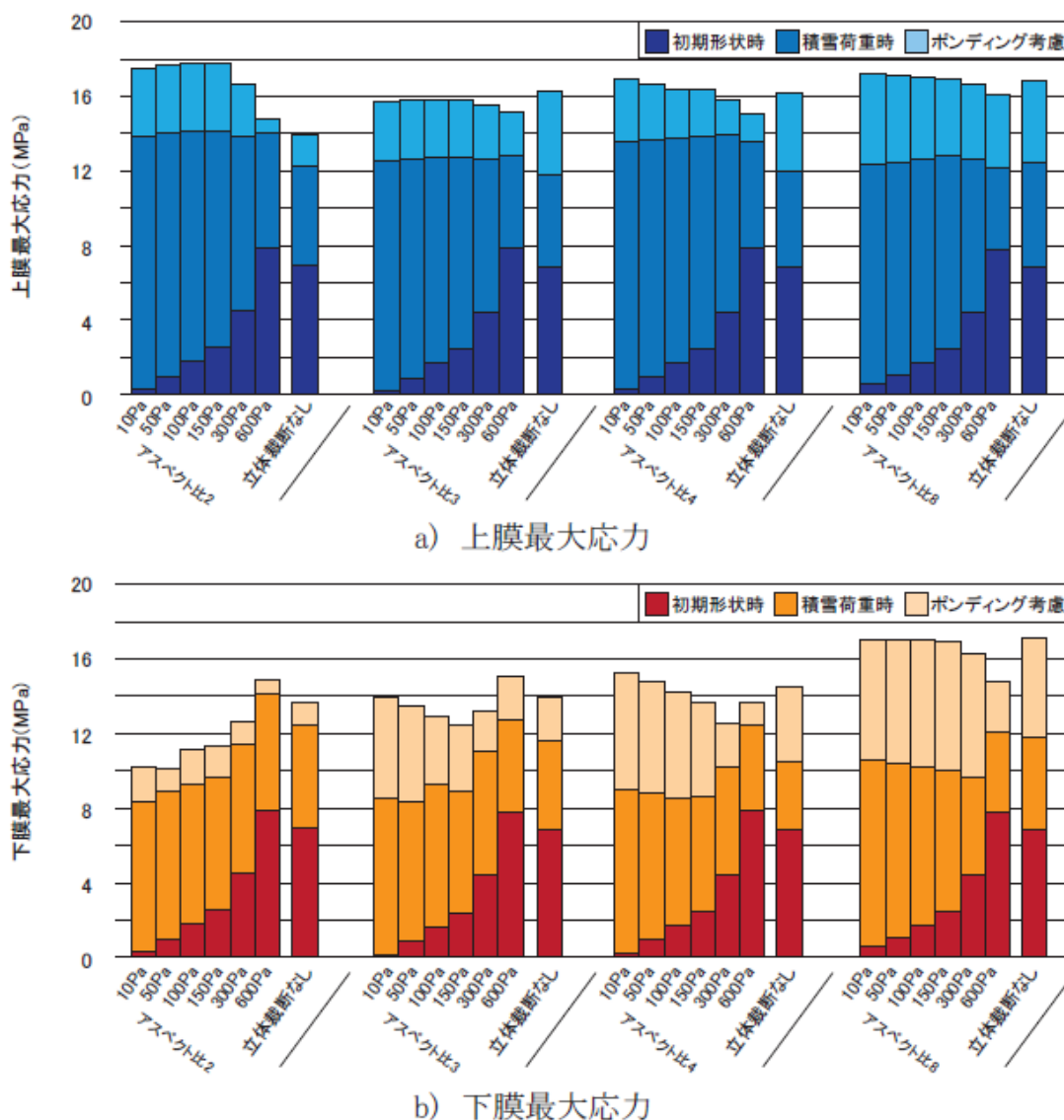
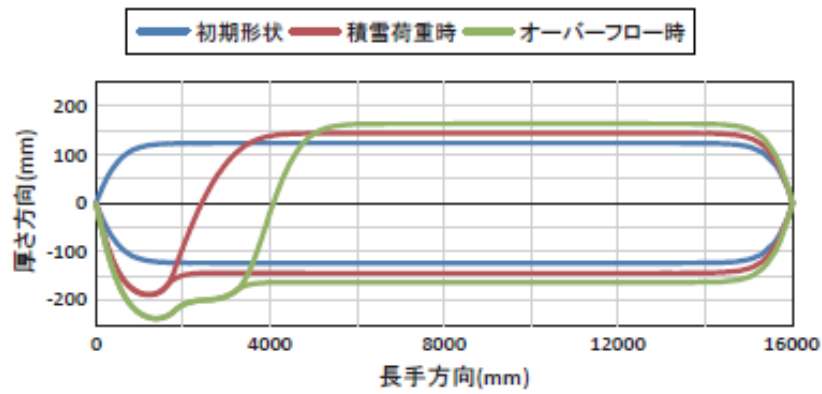


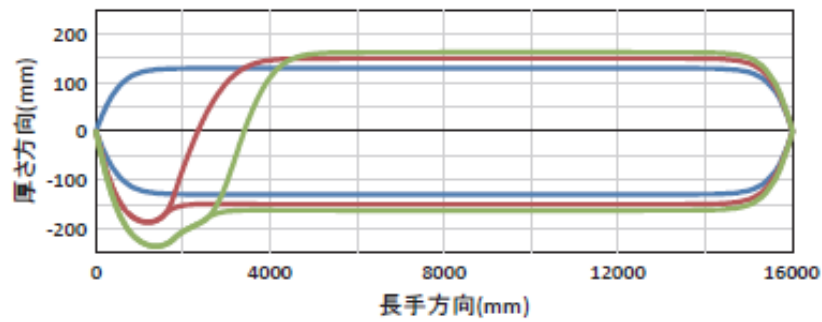
図4. 6. 4 各荷重時の最大膜応力

図4. 6. 5および図4. 6. 6に、アスペクト比8の長手方向断面形状を示す。載荷荷重は2,000Paとし、図4. 6. 5では立体裁断ありモデルを用い、内圧を10 Pa、50 Pa、100 Paおよび150Paとした際の変形図、図4. 6. 6では立体裁断ありモデルの内圧300 Paと600Pa、および立体裁断なしモデルの内圧365Paの結果を示す。

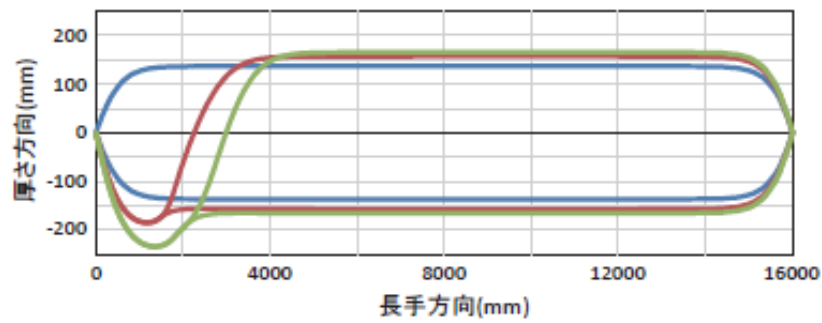
貯水量の多くなる初期内圧10Paでは、積雪荷重を載荷後の貯水による変位が大きくなっている。一方で初期内圧600Paでは積雪荷重を載荷後に若干の変形でオーバーフローすることが確認された。このことから初期内圧が小さいほど貯水を考慮した際の膜面変位の進行が大きくなることが示された。また、積雪荷重載荷時に注目したとき、初期内圧10Paでは上膜面が下膜面に大きく接触しているのに対して、初期内圧600Paではわずかに接触するのみであった。以上より、変形結果から、初期内圧を増加させることで、上膜面と下膜面の接触を回避できることが把握された。



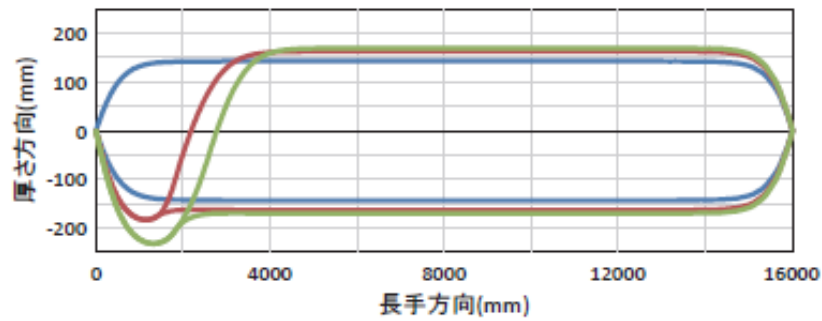
アスペクト比 8 載荷荷重 2000Pa 初期内圧 10Pa



アスペクト比 8 載荷荷重 2000Pa 初期内圧 50Pa

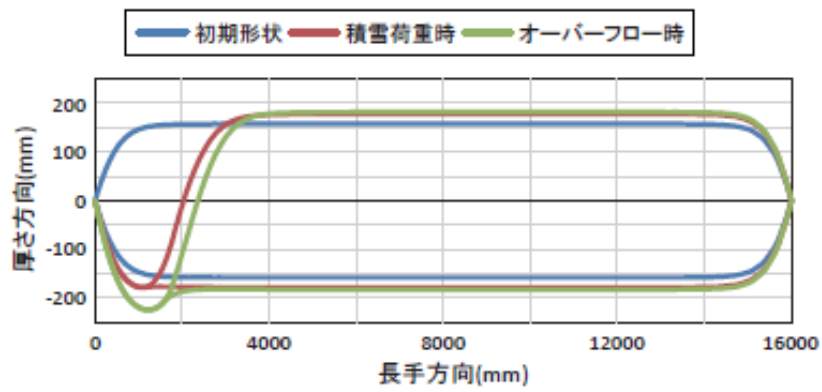


アスペクト比 8 載荷荷重 2000Pa 初期内圧 100Pa

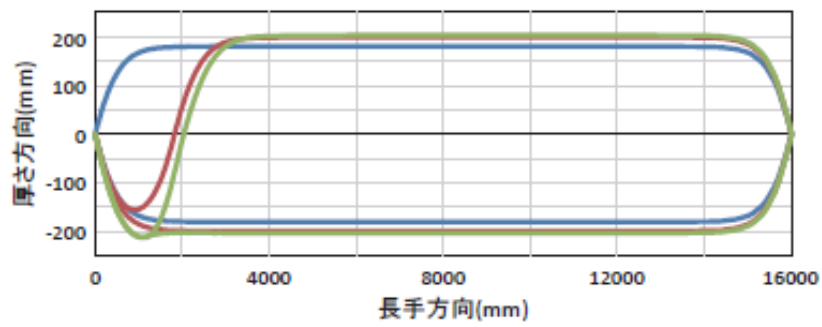


アスペクト比 8 載荷荷重 2000Pa 初期内圧 150Pa

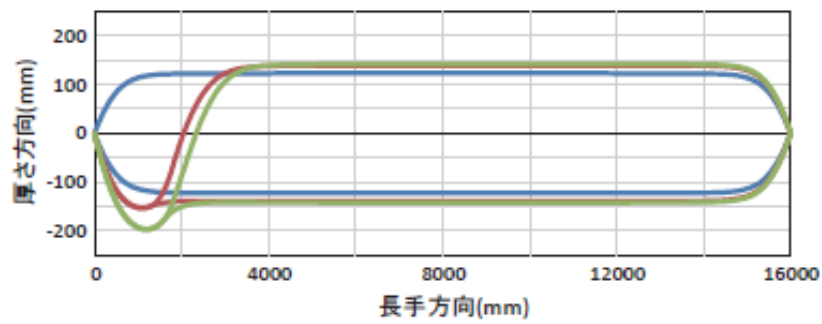
図4. 6. 5 アスペクト比8 長手方向断面形状(1)



アスペクト比 8 載荷荷重 2000Pa 初期内圧 300Pa



アスペクト比 8 載荷荷重 2000Pa 初期内圧 600Pa



立体裁断なしモデル アスペクト比 8 載荷荷重 2000Pa 初期内圧 365Pa

図4. 6. 6 アスペクト比8 長手方向断面形状(2)

## 4.7 まとめ

本章では、密閉型のレンズ状二重空気膜構造の挙動とETFEフィルムの材料非線形性に着目し、積雪荷重時(全面正圧載荷および半面正圧載荷)における密閉型レンズ状二重空気膜構造の挙動の把握を目的として、実験および数値解析による比較検証を行った。さらに、偏荷重に伴う載荷部の局所的変位の増大、雨水等の滞水による進行性ポンディング発生の可能性について、パネル形状および載荷範囲をパラメータとして検討を行った。得られた知見を以下に示す。

### (1) 立体裁断なしモデルによるレンズ状二重空気膜構造について

実験と数値解析の比較から次のことが言える。

- ① 全面正圧載荷時においては、ほぼデプスが一定に維持されながら変形する性状を把握した。
- ② 全面正圧載荷時に、載荷側の膜面が反転することで剛性が一度低下するが、その後は2枚の膜で抵抗し、剛性が再び向上することが確認された。
- ③ 半面正圧載荷時は、全面正圧載荷時に比べ載荷膜面側の変位進行が大きくなる傾向があることを把握し、内部空気の移動を伴い容易に膜面が変形することが確認された。

数値解析結果から次のことが言える。

- ① 全面正圧載荷に比べて偏荷重時は、載荷膜面の変位の進行が大きくなり、特にアスペクト比が大きいほど内圧の増加の少ない「伸び無し変形」に近い性状を示すことが把握された。
- ② 載荷範囲の違いにより膜面の挙動に影響があることから、アスペクト比と長手方向に対する載荷範囲をパラメータとして検討を行い、膜面の反転は端部から生じ各アスペクト比において最も反転が生じやすい載荷範囲(反転最

小荷重)が存在することを把握した。最小反転荷重がある載荷範囲が存在することから、アスペクト比毎に必要な初期内圧が積雪荷重に対して存在する可能性が示唆された。

- ③ 進行性ポンディング現象を考慮した場合、積雪荷重時に比べ膜面応力は増加する傾向を示したが、本検討の範囲内においては崩壊が生じないことを確認し、初期内圧が小さい場合でも上膜面と下膜面が一体となって抵抗する性状を把握した。

## (2) 立体裁断ありモデルを採用したレンズ状二重空気膜構造について

数値解析結果から次のことが言える。

- ① 初期内圧の大きさに関わらず上膜面の応力は、積雪荷重時では一定となる傾向があり、貯水を考慮した場合においては、初期内圧を大きくしたほうが、最大膜応力が小さくなる傾向が把握された。
- ② アスペクト比が大きいほど、また初期内圧が小さいほど変形が大きく生じ、載荷側の上膜面が下膜面に接触した。下膜面への接触を回避するためには、初期内圧を大きくすることが有効であることが把握された。
- ③ 上膜面と下膜面が接触することで、2枚で付加荷重への抵抗要素として働くことから、剛性の向上が期待されることが把握された。
- ④ 本検討の範囲内において、アスペクト比2～4の立体裁断ありモデルでは、初期内圧を高くすることで膜面の降伏を回避できることが示唆された。また、全てのアスペクト比においてオーバーフローが生じ、進行性ポンディングによる崩壊に至らないことを把握した。

以上のように、密閉型レンズ状二重空気膜構造の設計においては、アスペクト

比や設計積雪荷重の設定から、膜面の反転を生じさせない必要初期内圧が存在することが把握された。設計積雪荷重以上の雪荷重の発生や、初期内圧を大きく出来ない場合は、進行性ボンディング現象が生じる危険があることから、貯水を考慮した検討が必要となる。しかし、本検討の範囲内では、ETFEフィルムの降伏は生じるがパネルの崩壊には至らないことが把握された。これは、内圧の増加と上下の膜面の接触により、付加荷重への抵抗力が大きくなったことが要因のひとつとして考えられる。





## 第 5 章

過大な負圧荷重および繰り返し荷重時における挙動の把握

## 第5章 過大な負圧荷重および繰り返し荷重時における挙動の把握

### 5.1 はじめに

本章では、風荷重を想定した負圧載荷時を対象に、第1降伏点を許容する材料非線形を考慮した密閉型ETFEレンズ状二重空気膜構造の挙動の把握を目的として、実験および数値解析により比較検証を行う。まず、全面負圧載荷の単調載荷時の検討を行い、次にレンズ状二重空気膜構造の内圧が0となり、片側の膜張力が消失した際の挙動の確認を行う。さらに、載荷側の膜応力が第1降伏点を超える範囲で繰り返し載荷を行い、残留歪が発生した際の挙動について検討を行う。また、数値解析により、初期内圧、アスペクト比、規模および膜厚の違いが及ぼす影響、および載荷によるETFE フィルムの塑性化の影響を検討する。

### 5.2 風荷重時の問題点

空気膜構造は、一般的な構造システムと比べて非常に柔らかい構造であり、膜構造特有の問題も有する。特に風荷重が支配荷重となる場合が多く、強風に対する安全性が空気膜構造の重要な課題の1つである。

一般にライズの大きなドームでは、風荷重時に風上側で正圧が生じるが、低ライズの場合には屋根面全体がほぼ負圧領域になる。空気膜構造で正圧場が発生する場合には、膜反転が生じないように内圧を上げることが基本となるが、強風時に内圧を上げるとは、加圧装置による負荷の増加、膜張力の増加、建築各部の機能にも制約をもたらす。そのため、空気膜構造の設計においては屋根面に正圧が発生しないよう、可能な限り低ライズにすることが望ましいとされている。一重空気膜構造においては、多くの研究がなされ、上記の知見も一重空気膜構造による実験や解析による研究成果によるところが大きい<sup>5.1)</sup>。これを踏まえ、従来のレンズ状二重空

気膜構造においても、定圧型の仮定を用いて検討が行われることが一般的である。

しかし、密閉度の高いレンズ状二重空気膜構造(密閉型)では、一重空気膜構造に比べて内部の空気量が少ないため、状況によっては定圧型の仮定を満足できず、内部体積変化に伴う内圧変動により膜応力の急変も危惧されるが、その性状は不明確であり、これまで十分な検討がなされていない。特に、強風時のように急激な内圧変動が予想される場合には、内圧制御により内圧一定を保持する仮定は現実的ではない。

またETFEフィルムを用いたレンズ状二重空気膜構造を採用する際に、第1降伏点を超え約10%のひずみまで許容した設計を告示<sup>5.2), 5.3)</sup>でも許容しているが、ETFEフィルムが降伏した後のレンズ状二重空気膜構造の性状は不明確であり、暴風時のように過大な負圧荷重を上膜が受けた際に、内圧が減少・消失し、非載荷側の膜面の張力消失に伴う不安定現象の発現も懸念される。

以上の観点から、本章では、負圧荷重時に内圧が0となり膜張力が消失した際の挙動と、第一降伏点を超える範囲での繰り返し荷重による挙動の把握を目的として、ETFEパネルを用いた密閉型レンズ状二重空気膜構造の検討を、実験および数値解析により行う。

## 5.3 負圧載荷実験

### 5.3.1 実験目的

ETFEを用いたレンズ状二重空気膜構造の負圧荷重に対する力学性状の把握を目的として、矩形平面のレンズ状空気膜の模型を用いた負圧載荷実験を行う。レンズ状二重空気膜構造の下部にチャンバーを設置し、チャンバー内圧を制御することにより空気圧で載荷を行い、設定した荷重ケースに対して上下膜面の挙動の把握を行う。レンズ状二重空気膜構造を屋根面に設置する事を想定し、風荷重を想定した全面負圧載荷を行う。また、非載荷側の膜面張力が消失する際の挙動の把握を目的に、繰り返し載荷による検討も行う。

### 5.3.2 実験概要

実験概要を、図5.3.1～図5.3.5に示す。実験では平面上のETFEフィルム2枚を重ねてシワのないように外周を固定し、密閉されたフィルムの間へパネル隅角部から空気を送風することで初期形状を形成する。また、初期内圧は常時に比較的低内圧となるように配慮し、事前の数値解析結果に基づき、最大膜応力が3MPa(長期許容応力度の約1/2)となる内圧値として、280Paと設定する。試験体は一辺が500mmでアスペクト比1の矩形平面、膜材はETFEフィルム100 $\mu$ mを用いて製作し、載荷はチャンバー内の空気を吸引することによる全面負圧載荷とする。なお、負圧載荷は風荷重を想定しているが、ETFEフィルムの自重が十分に小さいことを考慮し、実験治具の都合から下膜への下向きの載荷により実験を行う。内圧は圧力計に接続したチューブを試験体隅角部より挿入し、測定を行う。

図5.3.6に、荷重ケースを示す。荷重ケースは3ケースとし、「ケースA」は-10,000Paまで単調載荷を行う。「ケースB」は、内圧が0となり膜張力が消失した際の挙動の把握を目的として、載荷により内圧が0となった時点で載荷を止めて除荷

し、これを3回繰り返した後、 $-10,000\text{Pa}$  まで载荷を行う。「ケースC」は、第1降伏点を超える範囲での繰り返し载荷時の挙動の把握を目的として、 $-1,000\text{Pa}$  以降に除荷を挟んで $-1,000\text{Pa}$  刻みで荷重を $-10,000\text{Pa}$  まで増加させる。なお、本実験は6月に日本大学理工学部駿河台校舎実験室にて、空調により室温管理(摂氏 $22\sim 25$ 度)のもと、風、日射の当たらない環境で実施した。また、数値解析に用いた材料特性は、同様の室温環境で得られたものを用いる。

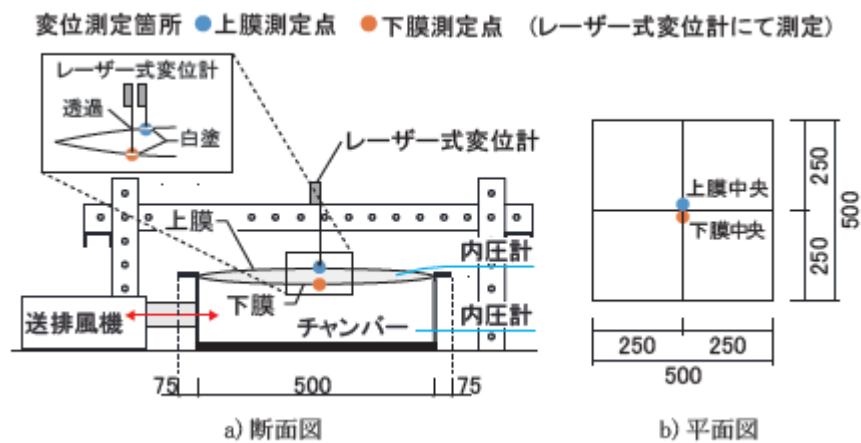
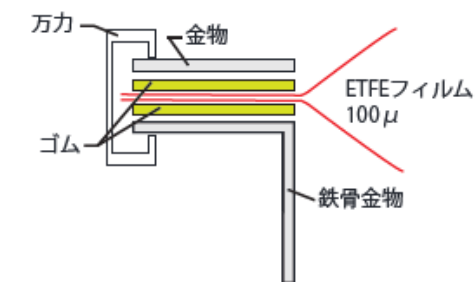


図5. 3. 1 治具図



四周の計 12 箇所を万力により固定

図5. 3. 2 ETFEフィルム端部取付け詳細図

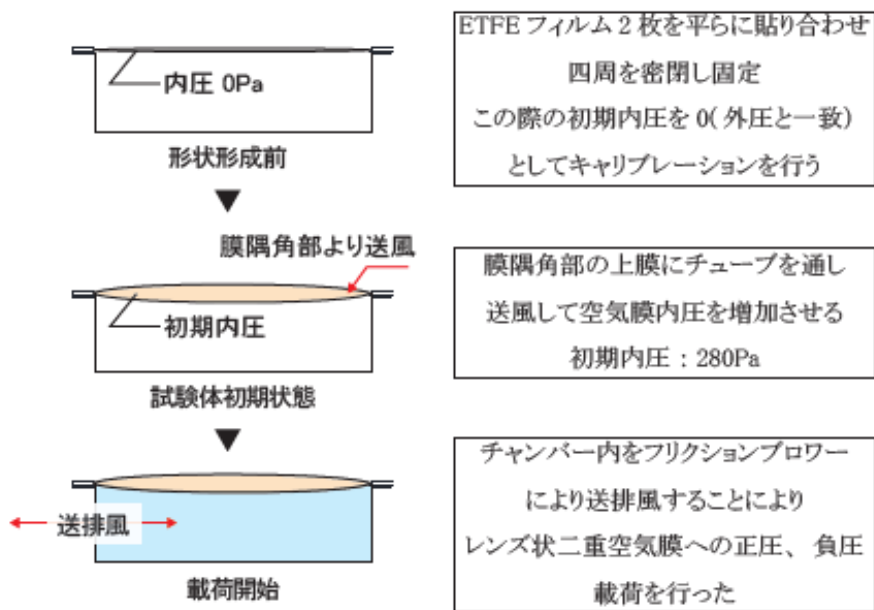


図5. 3. 3 実験手順



図5. 3. 4 実験治具写真

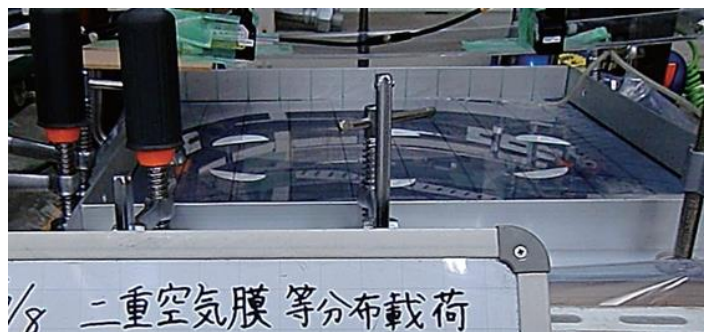


図5. 3. 5 実験風景写真

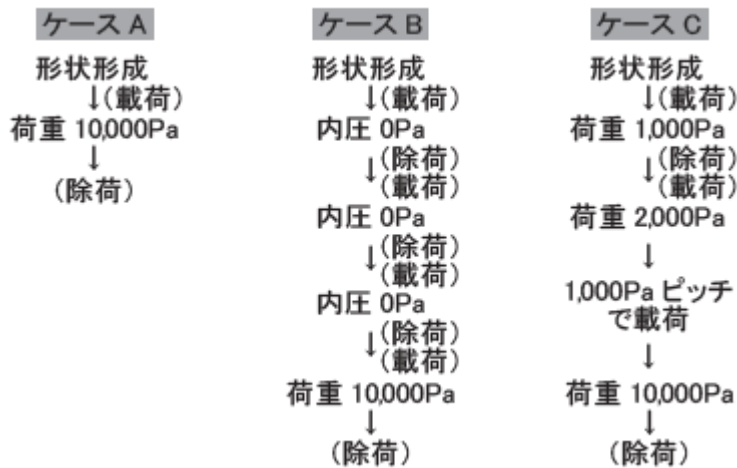


図5. 3. 6 荷重ケース

### 5. 3. 3 実験結果

図5. 3. 7に、全面負圧載荷ケースAを示す。図5. 3. 8～図5. 3. 10に、繰り返し負圧載荷ケースBを示し、それぞれ1回目、2回目および3回目の結果を示す。図5. 3. 11～図5. 3. 13に、繰り返し負圧載荷ケースCを示し、同様にそれぞれ1回目、2回目および3回目の結果を示す。考察に関しては5. 4の数値解析結果で併せて記述する。

実験において、試験体毎に若干の初期内圧や初期形状の誤差が生じる結果となったが、平均化等の処理は行わず、本章では各試験結果を個別に掲載する。

【全面負圧载荷ケースA】

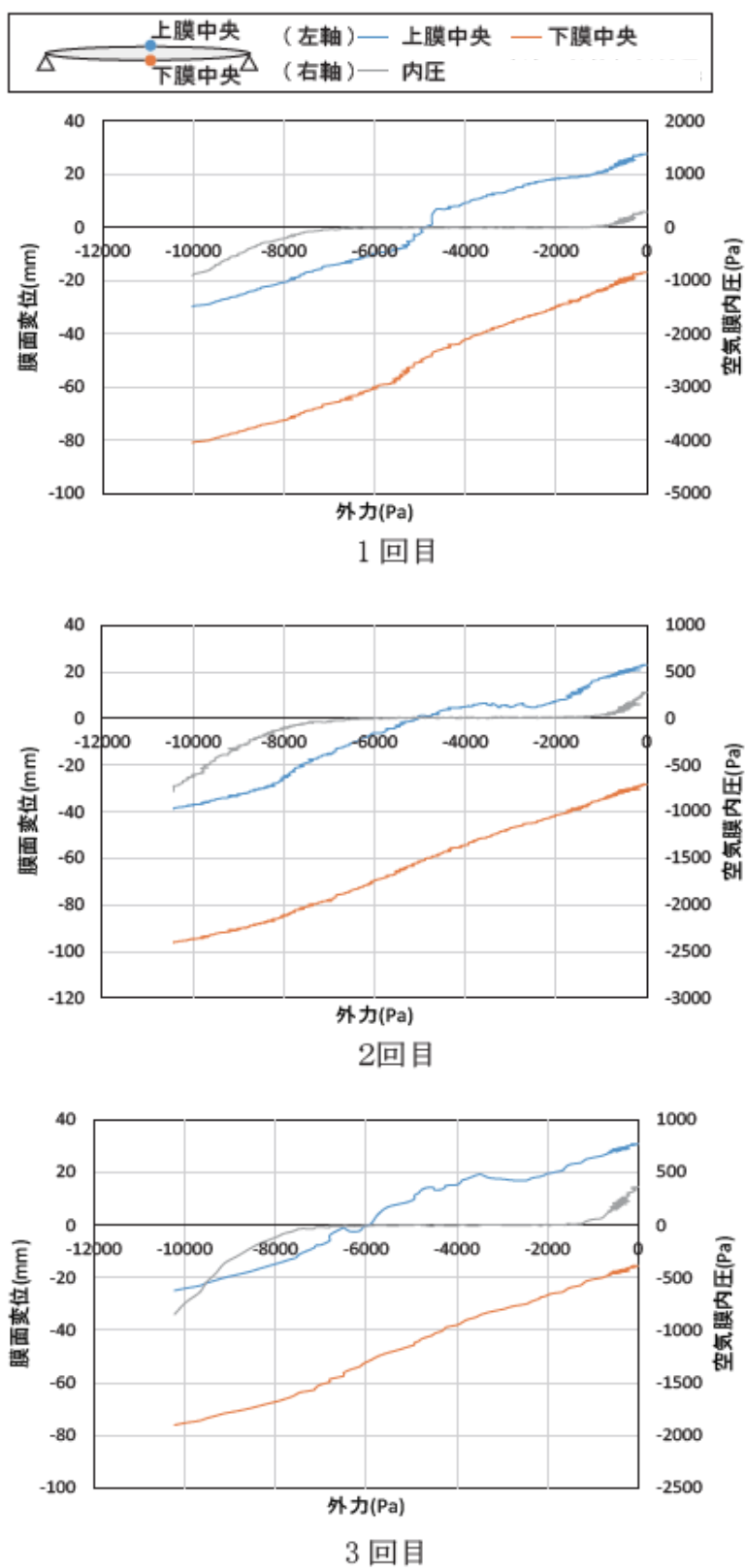


図5. 3. 7 全面負圧载荷ケースA



【繰り返し負圧载荷ケースB】(1回目)

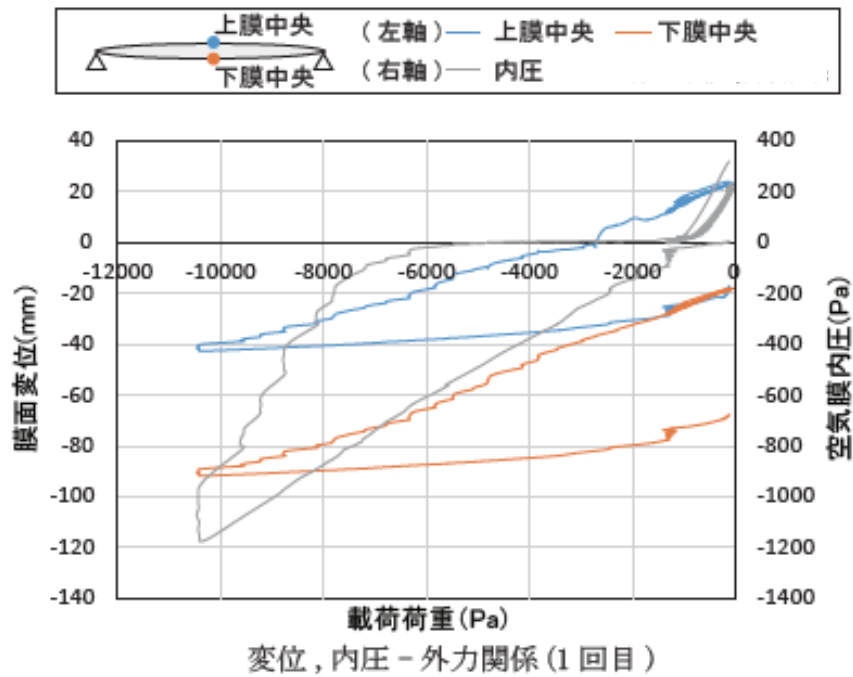
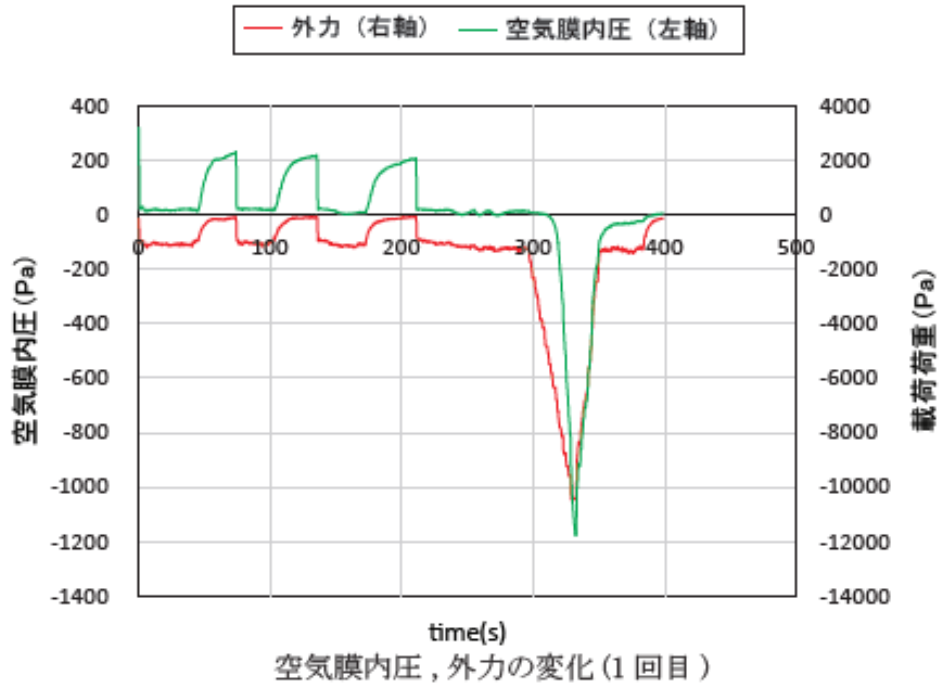
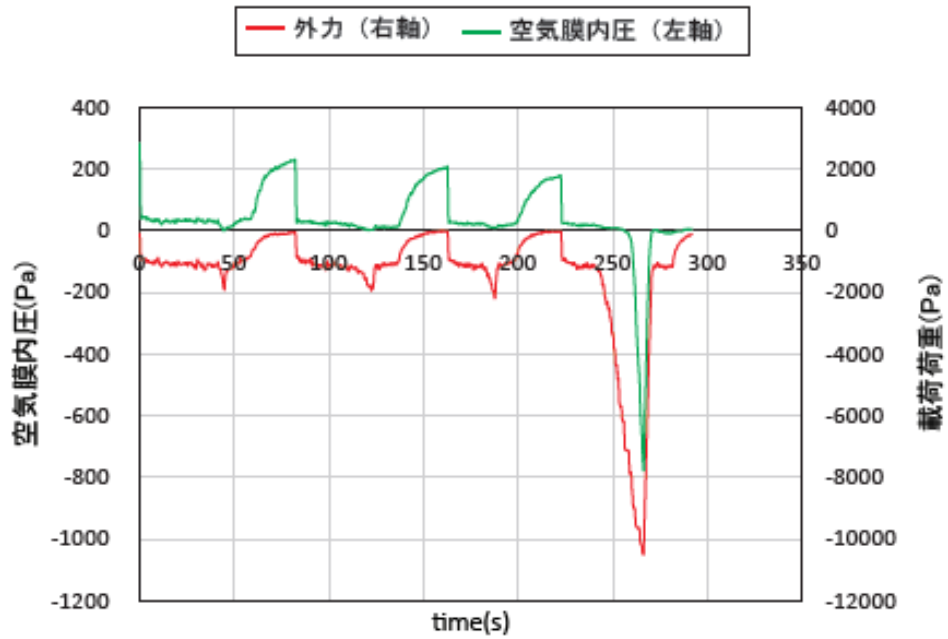
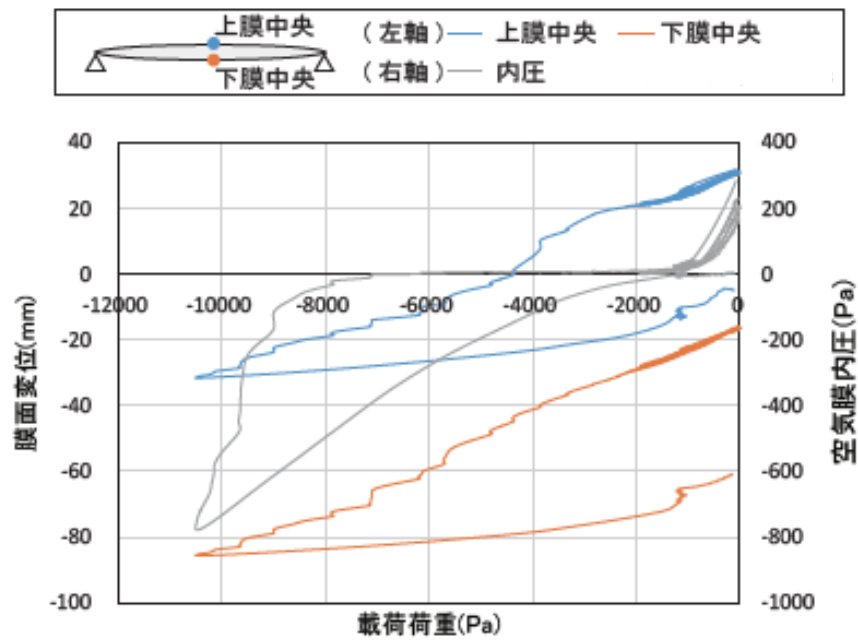


図5. 3. 8 繰り返し負圧载荷ケースB(1回目)

【繰り返し負圧载荷ケースB】(2回目)



空気膜内圧, 外力の変化 (2回目)



変位, 内圧 - 外力関係 (2回目)

図5. 3. 9 繰り返し負圧载荷ケースB(2回目)

【繰り返し負圧载荷ケースB】(3回目)

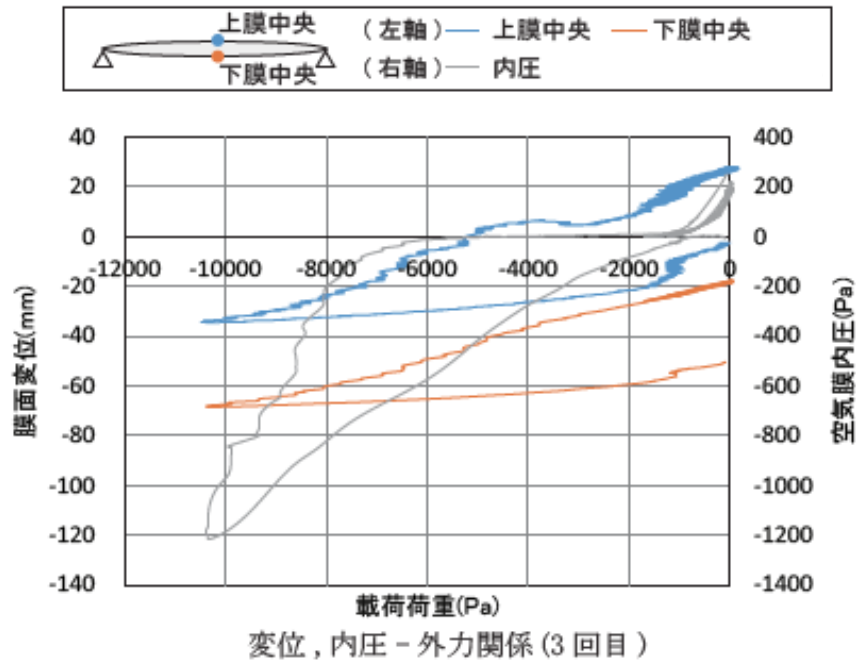
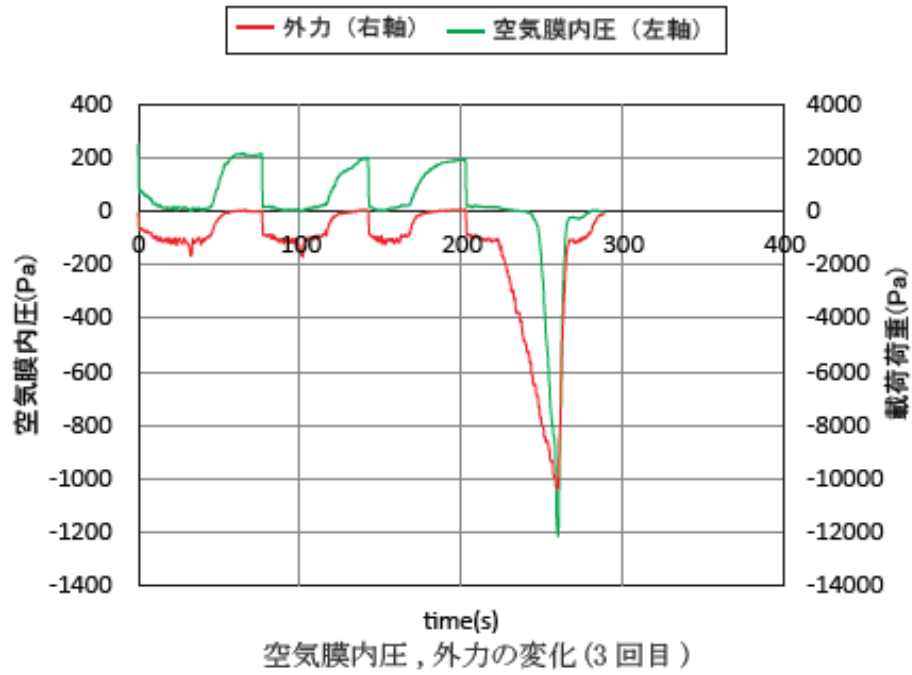


図5. 3. 10 繰り返し負圧载荷ケースB(3回目)

【繰り返し負圧载荷ケースC】(1回目)

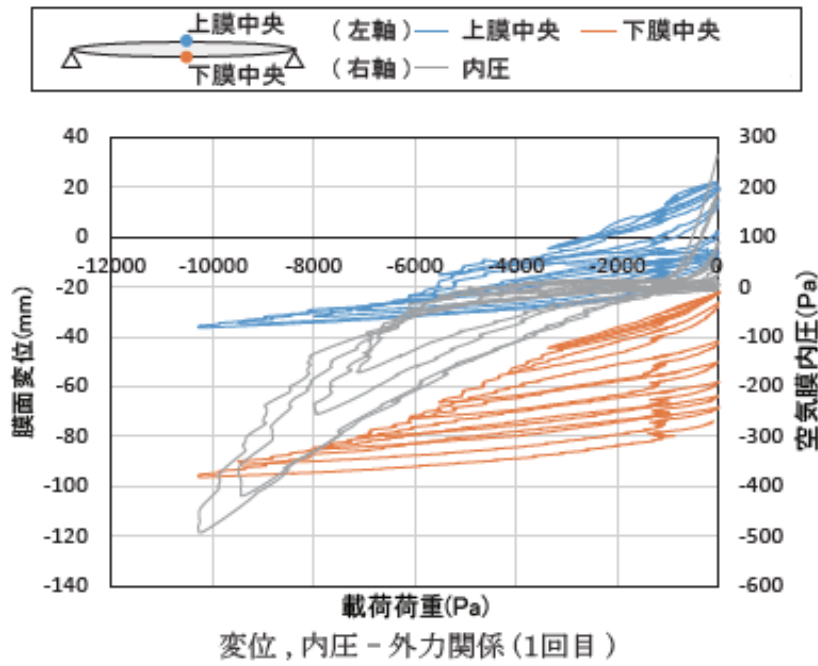
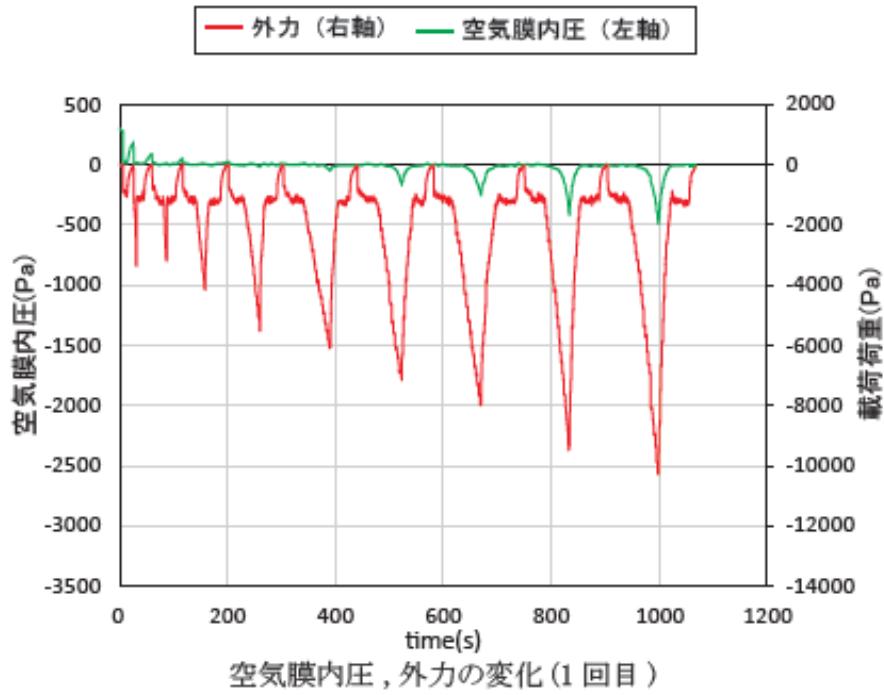


図5. 3. 11 繰り返し負圧载荷ケースC(1回目)

【繰り返し負圧载荷ケースC】(2回目)

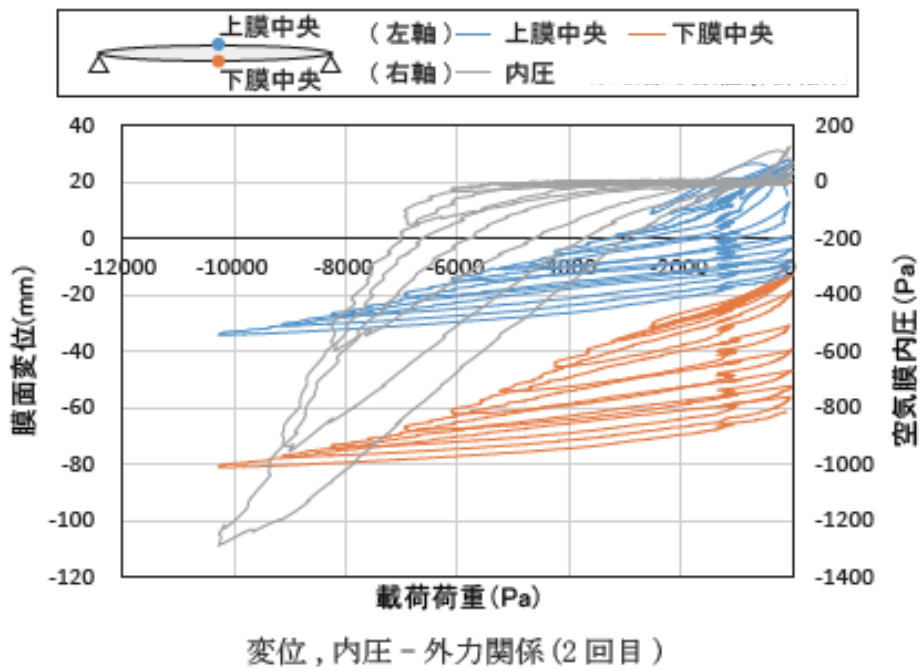
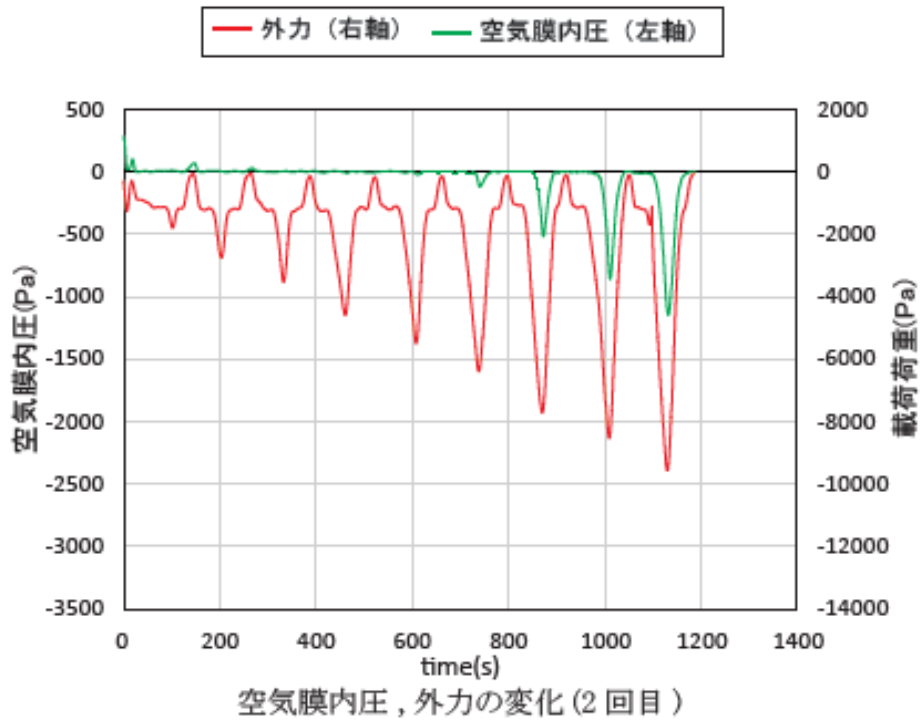


図5. 3. 12 繰り返し負圧载荷ケースC(2回目)

【繰り返し負圧荷重ケースC】(3回目)

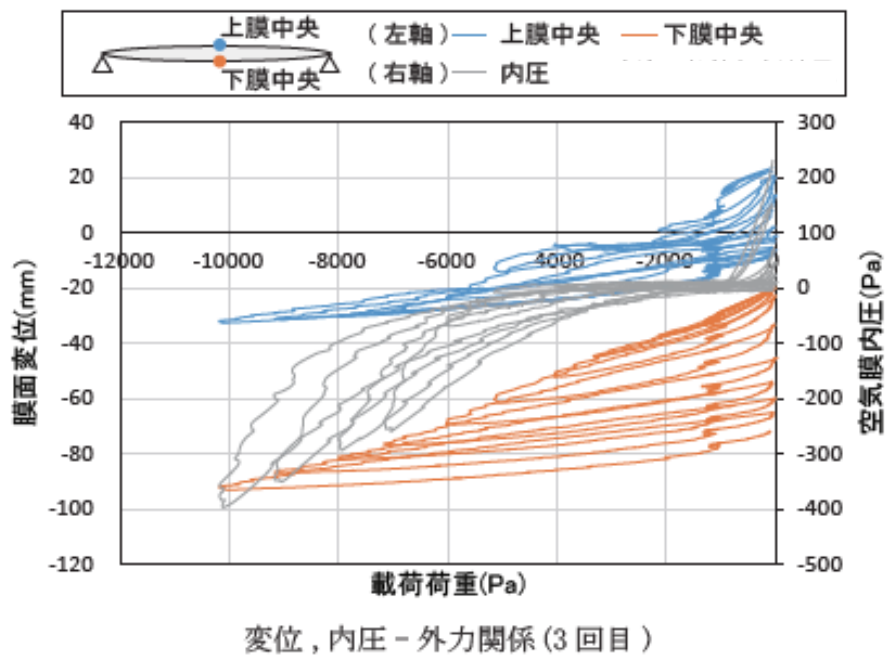
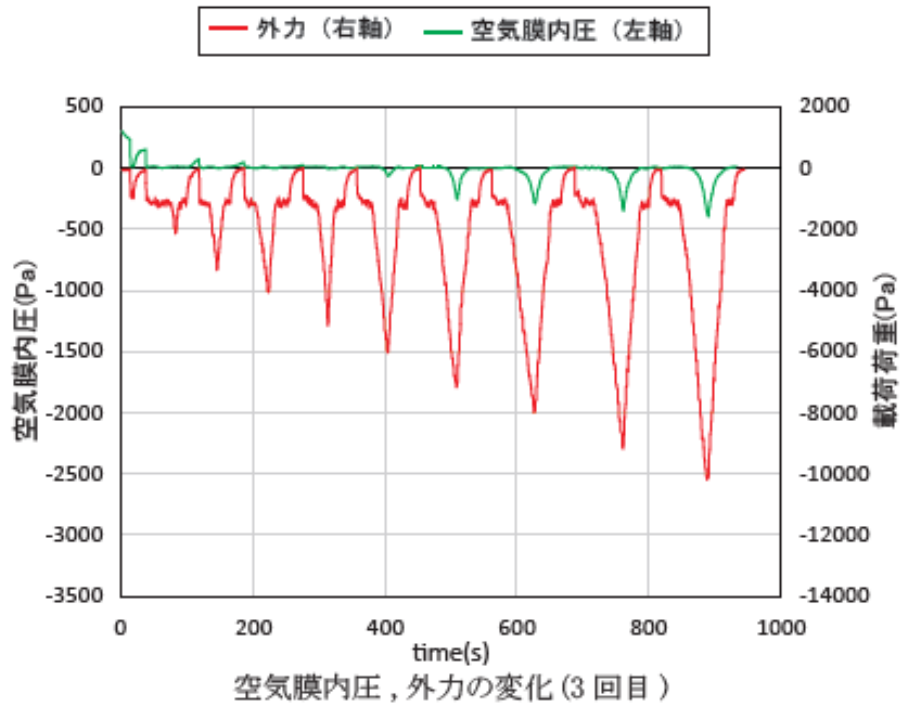


図5. 3. 13 繰り返し負圧荷重ケースC(3回目)

#### 5. 3. 4 数値解析結果と実験との比較検証

実験時に採用する初期形状(初期内圧)を最大膜応力3MPa時の形状とするために、事前に2枚の膜を平らに重ねた状態から膨らませる数値解析検討を行う。実験と数値解析との比較を行い、数値解析における初期内圧を与える際の変位の比較も行う。その後、数値解析において最大膜応力が3MPaとなる際の初期内圧を決定し、実験時の初期内圧を設定する。なお数値解析のモデル化・諸元は、3. 2と同じとする。パネルサイズ、フィルム厚は実験と同じものを用いる。

##### (1) 全面負圧载荷ケースA (単調载荷)

図5. 3. 14に荷重－膜面変位および内圧関係(ケースA)、図5. 3. 15に荷重－最大膜応力関係(ケースA)および図5. 3. 16に荷重－上膜最大膜応力関係(ケースA)を示す。変位は、周辺境界位置の水平面を基準とした値である。最大膜応力は下膜中央部のミーゼス応力とする。また、本実験では等分布による载荷により最大変位が中央で発生するため、変位は中央変位のみを抽出して考察する。図5. 3. 14における実験値と解析値の差異は、実験において上膜面側に空気送風用および内圧測定用のチューブを埋め込んだことで、当該部分に局所的に上方向の膨らみが生じ、上膜面の表面積と内部体積が大きくなったことが原因と考えられる。ケースAでは全面負圧载荷において、荷重の増加に伴い载荷面である下膜と非载荷面となる上膜が、共に下方向へ変位する性状が把握された。ただし、上膜の初期値に実験値と解析値で差異が見られるものの、実験値と解析値での変位の挙動は、ほぼ一致している。数値解析では、上下膜のデプス(上下膜の中央の鉛直方向距離)は、初期形状時は約45mmであったが、 $-10,000\text{Pa}$  载荷時でも約50mmであった。このことから、上膜面と下膜面は初期形状のデプスをほぼ保ちながら変形する性状が把握された。内圧は徐々に減少し、実験では荷重約 $-1,500\text{Pa}$ ～ $-6,000\text{Pa}$ の間で $0\text{Pa}$ の状態を保った後に、負圧へ移行する性状を示した。ま

た、内圧が負圧へ移行するタイミングが、実験と数値解析結果で差異が見られた。これも実験において、内圧測定用のチューブを取り付けたことが原因で生じた試験体の誤差と考えられる。しかし、実験値と解析値での変位の挙動は、ほぼ一致することが確認された。数値解析では、荷重約 $-1,500\text{Pa}$ において内圧が $0\text{Pa}$ となり、非載荷面である上膜は周辺境界と同じ高さとなり平坦となるが、下膜面は曲面形状を保っているため架構として不安定とはならず、荷重に抵抗できることが確認された。実験でもほぼ同じ挙動を確認した。

以上より、下膜面に下向きの分布荷重が加わる場合、荷重の増加に伴い、以下のように性状が変化するものと推定できる。付加荷重が小さい範囲では、膜内部の空気の体積が増加して内圧が減少し、これに伴い上膜面張力の減少と下膜面張力の増加が生じる。さらに荷重が増加すると、内部体積はさらに増加し、内圧が $0$ 状態に達する。この時、下膜面張力は増加する一方で、上膜面は初期の取付時の状態になる。本実験の場合には、上膜面張力は消失することになる。その後、荷重が増加すると内圧は負圧へ移行し、上膜面は反転すると共に張力が発生する。結果として上膜面、下膜面共に引張力が生じ、釣合状態(安定状態)が形成される。

図5. 3. 15の荷重－最大膜応力関係(ケースA)では、最大膜面応力が第1降伏点の $16\text{MPa}$ となる荷重 $-3,220\text{Pa}$ 時に膜材が降伏し、図5. 3. 14の変位の結果と照らし合わせても挙動に変化が生じていることが把握された。また、膜材の降伏は上下膜の変位の進行にほとんど影響を及ぼさず、デプスに相当する一定の距離をほぼ保ちながら変形する性状が確認された。解析結果では、最大膜応力が約 $20\text{MPa}$ 程度であるが、ETFE フィルムの第2降伏点(約 $22\text{MPa}$ )を大きく超える場合には、トリリニア型での検討が必要となる。図5. 3. 16の荷重－上膜最大膜応力関係(ケースA)から、非載荷側の上膜も初期には荷重に抵抗しながら応力が減少し、その後反転し、再び応力が増加する傾向がみられた。



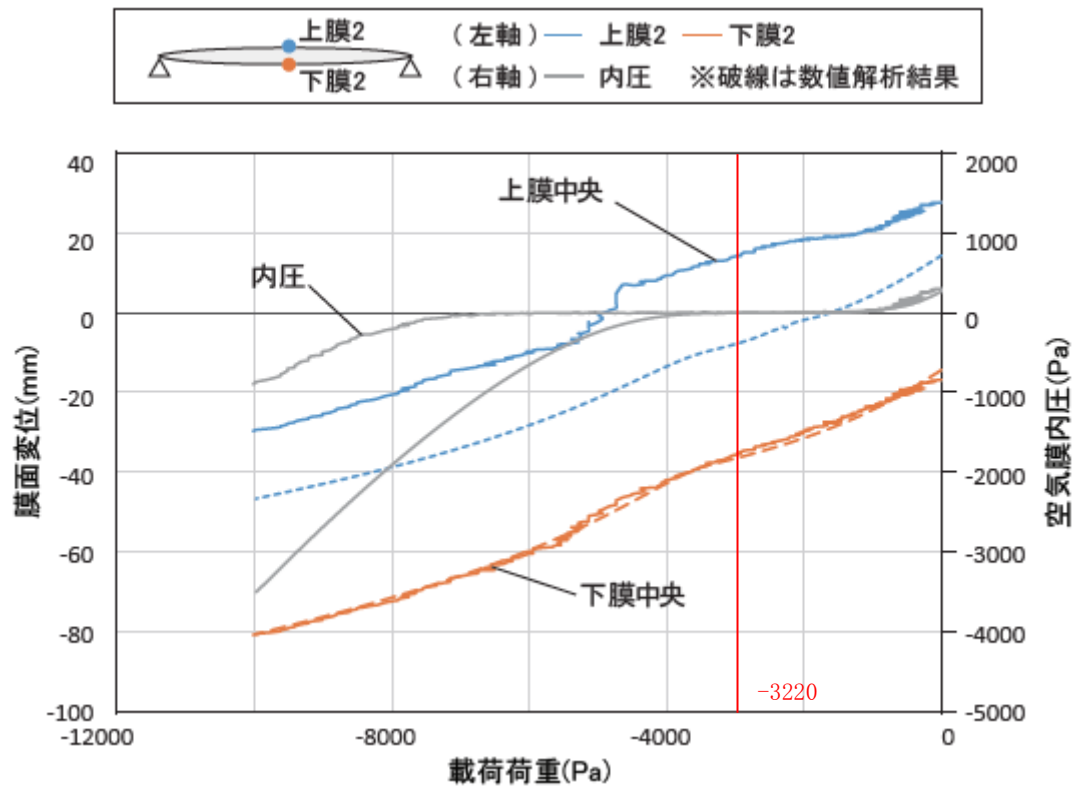


図5. 3. 14 荷重—膜面変位および内圧関係(ケースA)

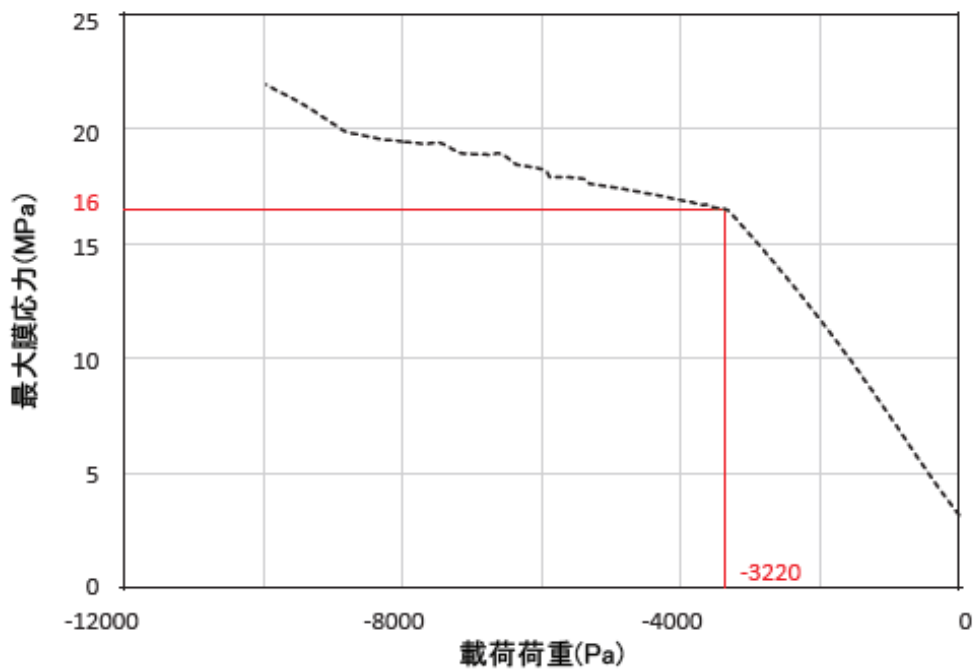


図5. 3. 15 荷重—最大膜応力関係(ケースA)

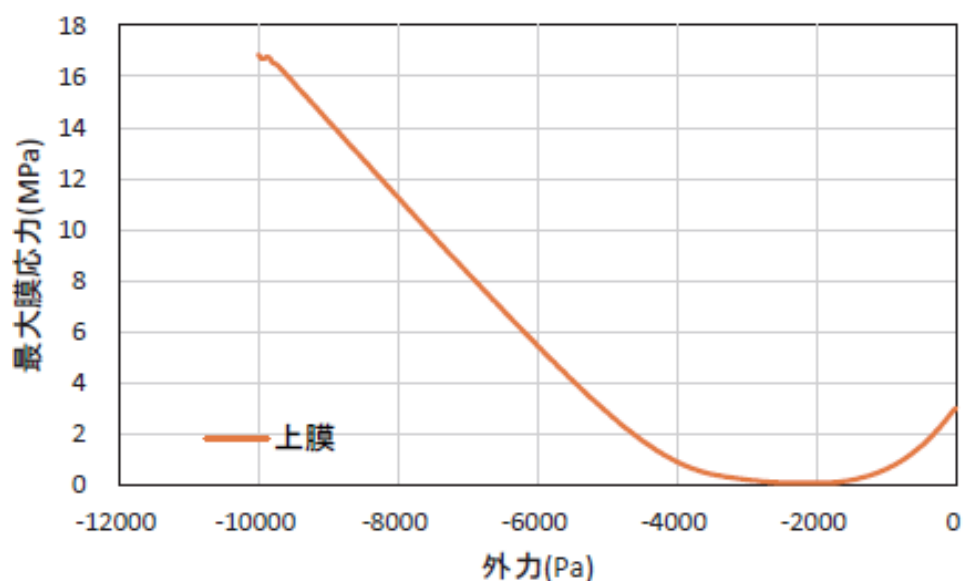


図5. 3. 16 荷重－上膜最大膜応力関係(ケースA)

(2) 繰り返し負圧载荷ケースB(張力消失時の挙動の把握)

図5. 3. 17に荷重－膜面変位および内圧関係(ケースB)、図5. 3. 18 に内圧と付加荷重の相間関係(ケースB)を示す。図5. 3. 17 に示すように、変位・内圧共に包絡線は図5. 3. 14 のケースA と概ね同様の挙動を示す事が確認された。実験および解析共に、内圧が0Pa となる荷重約-1,500Pa を3 回繰り返した時点ではフィルムは弾性域内であるため、膜面は初期状態まで戻り、それと共に内圧も図5. 3. 18 のように0Pa から初期内圧280Pa 近くまで戻る性状を示した。実験では载荷毎に若干の内圧の低下が確認されたが、これは試験体の若干の空気漏れが要因と考えられる。ケースAと同様に、内圧0Pa 時において、载荷面(下膜面)の反対側の膜面(上膜面)は曲面形状が保たれず、膜面がフラットとなる挙動が見られたが、载荷面(下膜面)は曲面形状を保っているため架構として不安定とはならず、荷重に抵抗できることが確認された。また上膜面と下膜面は、初期形状のデプスをほぼ保ちながら変形する性状も把握された。

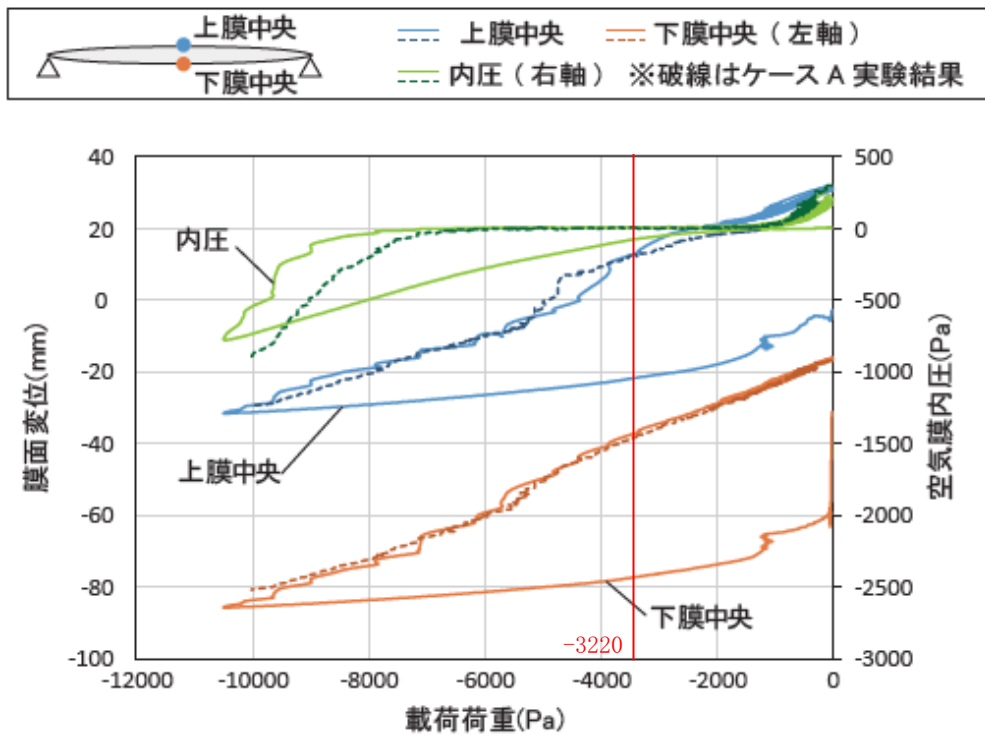


図5. 3. 17 荷重—膜面変位および内圧関係(ケースB)

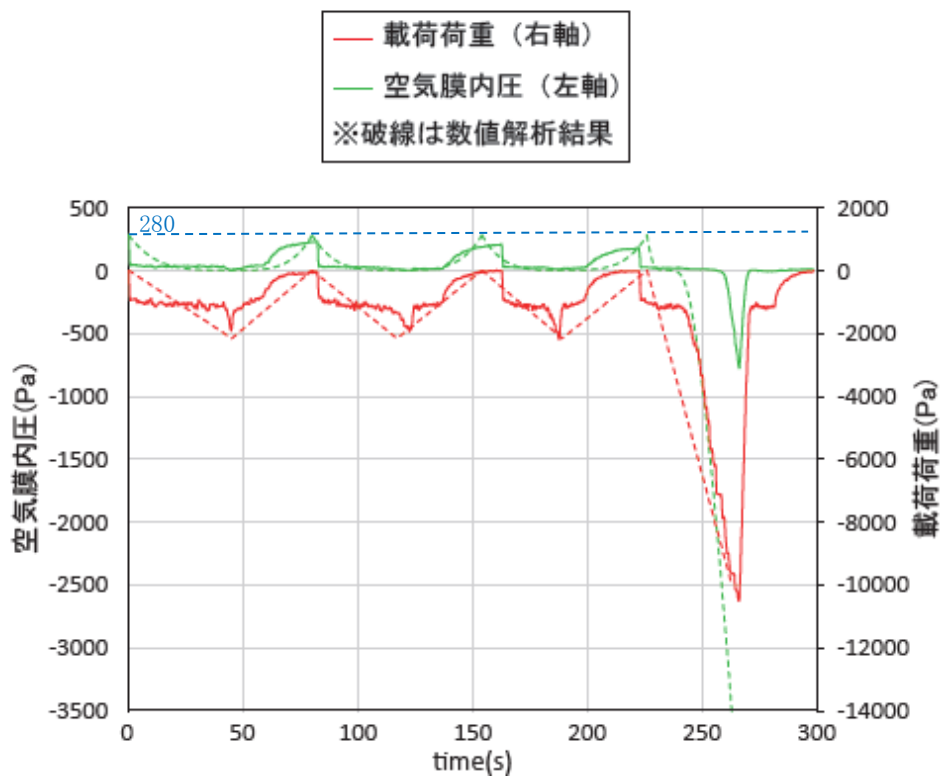


図5. 3. 18 内圧と付加荷重の相間関係(ケースB)

(3) 繰り返し負圧载荷ケースC(第1降伏点を超える範囲での繰り返し载荷)

図5. 3. 19に荷重－膜面変位および内圧関係(ケースC)、図5. 3. 20に内圧と付加荷重の相間関係(ケースC)を示す。ケースCの実験では、 $-1,000\text{Pa}$ 以降に除荷を挟んで $-1,000\text{Pa}$ 刻みで荷重を $-10,000\text{Pa}$ まで繰り返し増加させた。結果は、図5. 3. 19のとおり载荷により徐々に変位が進行するが、それに伴い内圧が減少する傾向となり、変位・内圧共に包絡線は概ね図5. 3. 14のケースAと同様の挙動を示す事が確認された。

図5. 3. 20の実験結果において、荷重が $0 \sim$ 約 $-3,000\text{Pa}$ の範囲では、载荷時は内部体積が増加することで内圧が減少していくが、除荷後はほぼ初期状態に戻る性状を示した。これは膜面応力が弾性範囲内であったためと考えられる。また、荷重が約 $-3,000 \sim -6,000\text{Pa}$ の範囲では、膜材料が降伏し、除荷後の内圧が初期内圧よりも減少する傾向が見られ、最終的には除荷後の内圧が $0\text{Pa}$ となった。荷重が $-6,000\text{Pa}$ 以降は、内圧値が $0\text{Pa}$ を保つ性状を示した後、载荷に伴い内圧が負圧へ増加する傾向が認められた。

本検討の範囲内においては、内圧 $0\text{Pa}$ 時は架構が不安定とならないことが確認され、また内圧値が負となる範囲においても、膜面変位は安定的に推移することが把握された。このため、内圧 $0\text{Pa}$ 以下の状況で第1降伏点を超える範囲での繰り返し载荷においても、架構が不安定とはならない設計が可能であることが示唆された。また、最終的に $-10,000\text{Pa}$ まで载荷し除荷した後には、残留歪は残るものの、今回の検討範囲内では崩壊には至らないことが確認された。

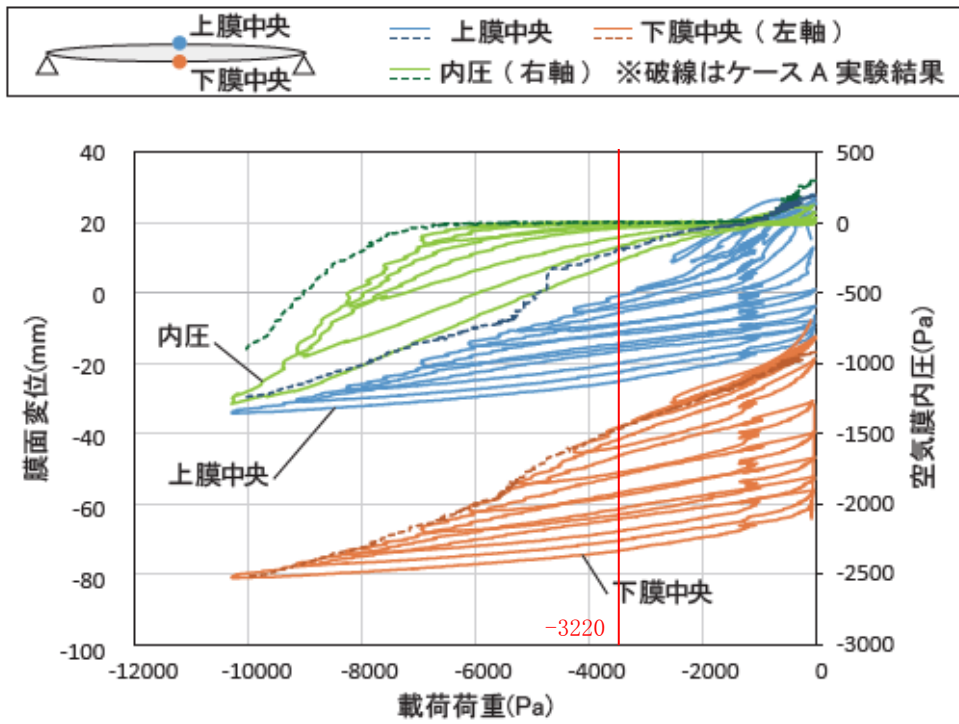


図5. 3. 19 荷重—膜面変位および内圧関係(ケースC)

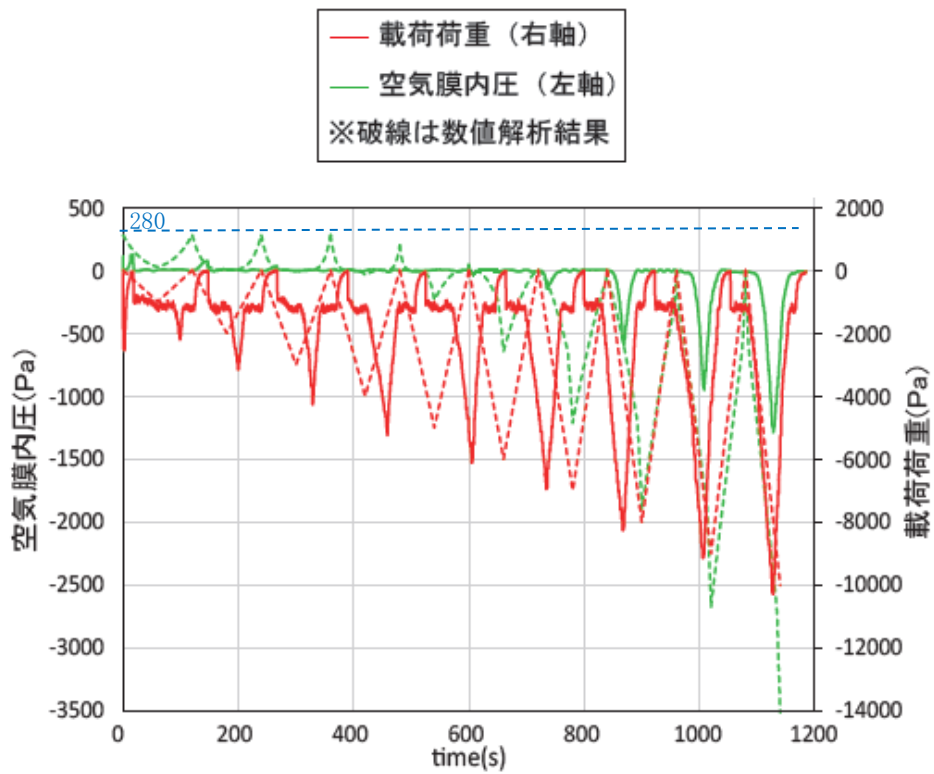


図5. 3. 20 内圧と付加荷重の相間関係(ケースC)

## 5. 4 初期内圧・アスペクト比・規模および膜厚の違いに関する検討

### 5. 4. 1 数値解析概要

実際に用いられるレンズ状二重空気膜構造においては、アスペクト比(長辺と短辺の比) や初期内圧、パネル規模等が異なることが想定される。そのため、5. 3. 4 のアスペクト比1、初期内圧280Pa 時を対象とした検討に加え、初期内圧、アスペクト比、パネル規模および膜厚の諸元が及ぼす影響の把握を目的として、数値解析による比較を行った。表5. 4. 1に数値解析による検討ケースを示す。数値解析は5. 3. 4と同様の解析モデルを用いて、平面状の2枚の膜面要素の間に設置した空気要素に初期内圧を与えた後、内部空気量を一定とすることで密閉型をモデル化した。次項以降に、初期内圧、アスペクト比、パネル規模および膜厚をパラメータとした検討結果を示す。荷重は、図5. 3. 6のケースAの単調載荷とする。

表5. 4. 1 数値解析による検討ケース

パラメータ	初期内圧 (Pa)	アスペクト比	パネルサイズ (mm)	膜厚(μm)
初期内圧	60	1	500×500	100
	150			
	280			
	420			
	580			
	760			
	960			
アスペクト比 (長辺/短辺)	デプス/スパン比が 0.1となる内圧	1	500×500	100
		1.1	500×550	
		1.2	500×600	
		1.5	500×750	
		2	500×1,000	
		3	500×1,500	
		4	500×2,000	
パネルサイズ・ 膜厚	最大膜応力が3MPa 時の内圧	1	1,000×1,000	100
				200
				250
				300
		1	1,500×1,500	100
				200
				250
				300
		1	2,000×2,000	100
				200
				250
				300

#### 5. 4. 2 初期内圧による比較

図5. 4. 1～図5. 4. 3 に、それぞれ初期内圧変更による荷重－空気膜内圧関係、初期内圧変更による荷重－膜面変位関係および初期内圧変更による荷重－最大膜応力関係を示す。初期内圧は事前の数値解析結果に基づき、最大膜応力が1MPa となる60Pa から長期許容応力度である7MPa となる960Pa まで、応力度が1MPa 刻みで変化するように増加させて比較を行った。図5. 4. 1の荷重－内圧関係から、いずれの初期内圧においても内圧が初期内圧から徐々に下がり、0Pa を保った後に負圧へ移行する性状を示し、5. 3 の荷重ケースA における単調载荷の結果と同様の性状を示すことが確認された。

図5. 4. 2および図5. 4. 3の荷重－膜面変位・最大膜応力関係より、荷重が約-3,200Pa で最大膜応力は、第1降伏点である16MPa 程度となり、载荷面の下膜の変位は概ね38mm 程度となることが把握された。この傾向は初期内圧によらず、ほぼ一定である。また、どの内圧においても、下膜面に载荷されることで下膜面が最初に弾性に伸び、レンズ状二重空気膜の内部空気が膨張して内圧が低下する傾向が見られた。一方、上膜面は载荷されていないため、変位は下膜面とは異なる挙動を示した。すなわち初期内圧を上昇させると、上膜面の張力が消失する荷重および上膜面の形状がフラットになる荷重を、増大させるために有効であることが確認された。第1降伏点を超える荷重以降は変位が増大し、剛性が弾性範囲時よりも小さくなる性状を示したが、下膜面、上膜面共にそれぞれ変形が進行した。これはレンズ状二重空気膜が密閉されることで、内圧が正圧から負圧に移行してもレンズ状二重空気膜は一体として挙動し、下膜面の変位に上膜面が追従していると考えられる。また、-8,000Pa 载荷した際の内圧は、初期内圧60Pa で-2,767Pa、初期内圧960Pa で-936Pa となり、それぞれ初期内圧から2,827Pa、1,896Pa 減少しており、初期内圧の増加により内圧の減少量が小さくなることが把握された。

なお、今回のように2枚のETFEを平らに重ねた状態から膨らませる方法でレンズ状二重空気膜を形成する場合、膜応力が第1降伏点の約半分である7MPaを長期応力として設定すると、スパン500mmに対しライズ・スパン比が約0.05までが形成可能な限界となる。これ以上のライズでの検討が必要な場合は、立体裁断ありモデルでの検討が必要となる。



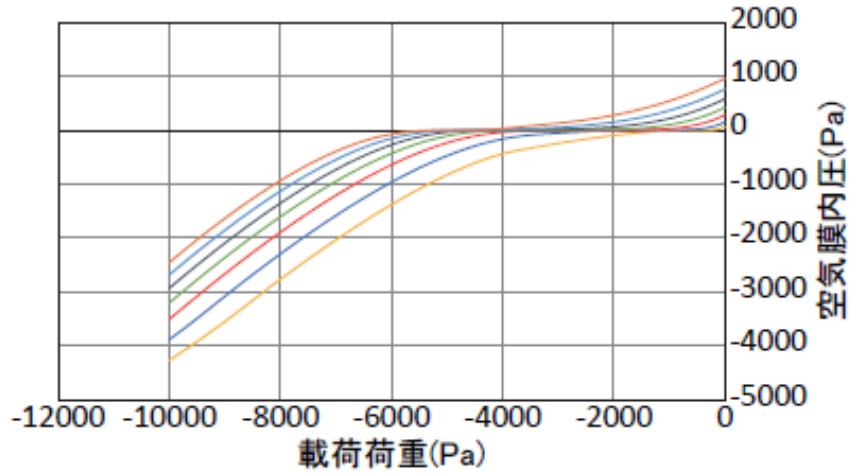
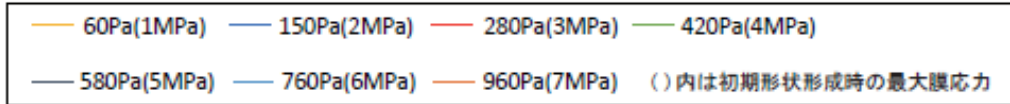


図5. 4. 1 初期内圧変更による荷重－空気膜内圧関係

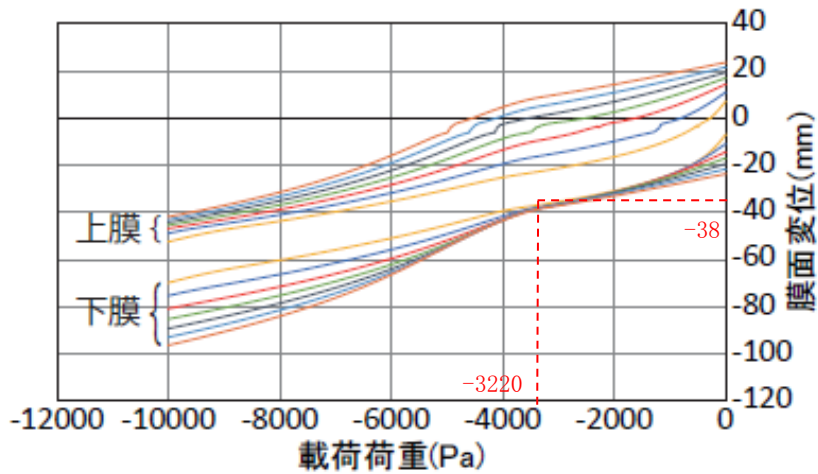
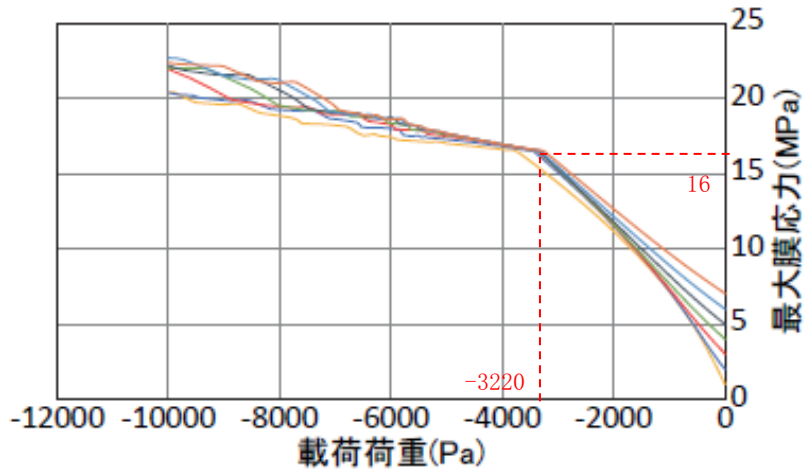


図5. 4. 2 初期内圧変更による荷重－膜面変位関係



c) 荷重－最大膜応力関係

図5. 4. 3 初期内圧変更による荷重－最大膜応力関係

### 5. 4. 3 アスペクト比による比較

図5. 4. 4～図5. 4. 6 に、それぞれアスペクト比変更による荷重－空気膜内圧関係、アスペクト比変更による荷重－膜面変位関係およびアスペクト比変更による荷重－最大膜応力関係を示す。アスペクト比は、1、1.1、1.2、1.5、2、3、4および8（長辺 $L=500$  mm、550 mm、600 mm、750 mm、1,000 mm、1,500 mm、2,000 mmおよび4,000mm）の計8種類を対象とする。短辺方向（ $L=500$ mm）を基準にデプス $D$ を一定とし、全てのアスペクト比で初期内圧時にデプス・スパン比（ $D/L$ ）が0.1となるように初期形状を形成する。

図5. 4. 4および図5. 4. 6より、アスペクト比が1の場合のみ初期形状時の内圧と応力度が高いことが確認された。また、アスペクト比が1.1以上の場合、アスペクト比1に比べて初期内圧を低く抑えられるものの、荷重が付加された際に早い段階で内圧が0Paとなり、小さい荷重で第一降伏点に達することが把握された。これはアスペクト比1では、2方向に均等な膜面剛性を持つため、載荷後の膜応力が2方向に分散され、膜応力の増大が他のアスペクト比に比べて小さくなったことが要因と考えられる。また図5. 4. 5より、アスペクト比が大きくなるほど変位は大きくなり、今回の検討範囲内ではアスペクト比1.5以上の場合、空気膜内圧、膜面変位および最大膜応力は、概ね同等の値を示すことが把握された。

アスペクト比      1      1.1      1.2      1.5      2      3      4      8

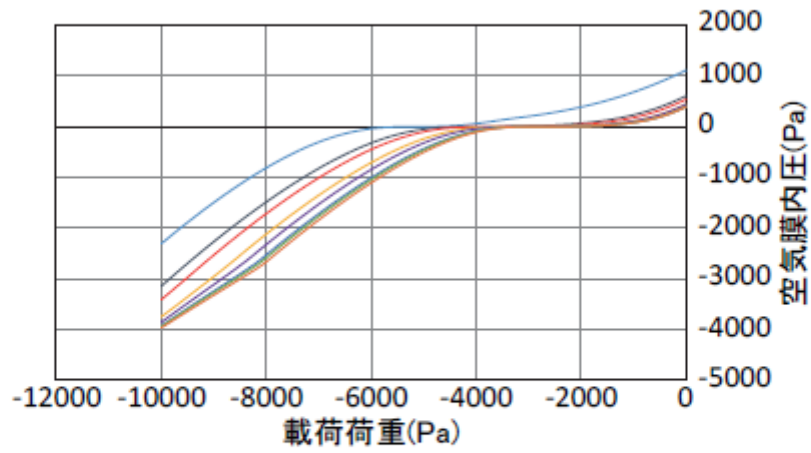


図5. 4. 4 アスペクト比変更による荷重- 空気膜内圧関係

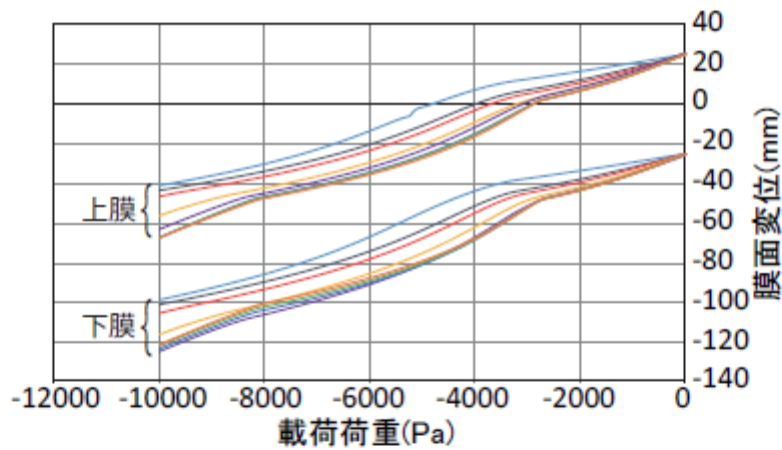


図5. 4. 5 アスペクト比変更による荷重- 膜面変位関係

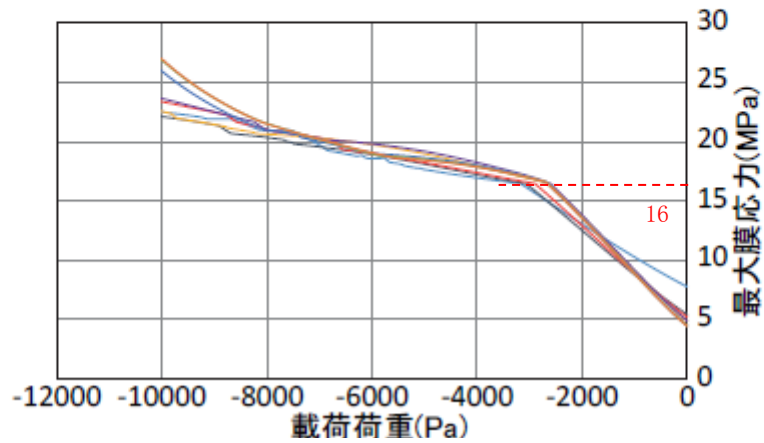


図5. 4. 6 アスペクト比変更による荷重- 最大膜応力関係

#### 5. 4. 4 パネル規模および膜厚による比較

図5. 4. 7～図5. 4. 9にパネル規模1,000mm×1,000mmに対して、それぞれパネル規模・膜厚変更による荷重－空気膜内圧関係、パネル規模・膜厚変更による荷重－膜面変位関係およびパネル規模・膜厚変更による荷重－最大膜応力関係を示す。同様に、図5. 4. 10～図5. 4. 12にパネル規模2,000mm×2,000mmの結果を示す。載荷時の最大膜応力が22MPa となるまでの結果を示す。なお、事前の数値解析結果に基づき、形状形成時の最大膜応力が3MPa となる内圧値を初期内圧として、初期形状を形成した。膜厚は、一般的に用いられる100  $\mu$  m、200  $\mu$  m、250  $\mu$  mおよび300  $\mu$  m の計4種類とした。

図5. 4. 7および図5. 4. 9より、膜厚が増加することで内圧減少量が小さくなり、最大膜応力も抑えられることが確認された。また、最大膜応力は膜厚100  $\mu$  m で荷重約-1,700Pa 時に第1 降伏点の16MPa となり、膜厚200  $\mu$  mでは約-3,400Pa、膜厚300  $\mu$  mで約-5,000Pa と、厚みと降伏荷重がほぼ比例関係にあることが把握された。一方、図5. 4. 8より、膜厚の増加により膜面変位量も小さくなり剛性が大きくなっている。これも膜厚自体の剛性の違いによるものと考えられるが、内圧もそれぞれ異なるため、初期形状の差による剛性の違いの影響も考えられる。

パネル規模2,000mm×2,000mm では、例えば膜厚300  $\mu$  mでは、1,000mm × 1,000mmで荷重約-5,000Pa 時に第1降伏点に達するが、同状態に達する荷重は半分の約-2,500Pa であった。また、図5. 4. 12 より、第1降伏点の16MPa に至る荷重は膜厚100  $\mu$  m で約-800Pa、膜厚200  $\mu$  m で約-1,600Pa、膜厚300  $\mu$  m で約-2,500Pa となり、パネル規模を大きくした場合においても、厚みと第1降伏点に至る荷重は比例関係となることが把握された。

図5. 4. 8および図5. 4. 11 より、パネル規模が大きくなることで変位が増加

し、第1降伏点に達する荷重に違いが見られたものの、挙動の傾向は規模が異なってもほぼ同じであった。また、図5.4.7 および図5.4.10 より、内圧もパネル規模の増加に伴い、早期に減少し負圧に移行する傾向が見られたが、挙動は同じような傾向であった。

【パネル規模 1000 × 1000】

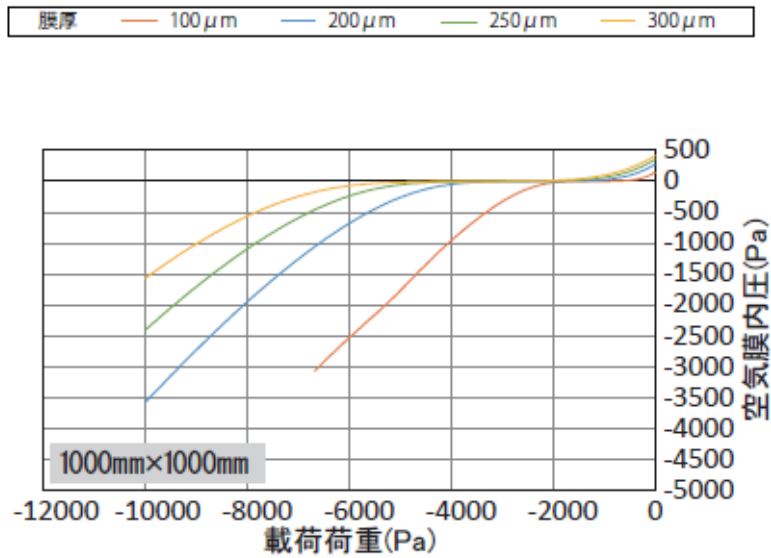


図5. 4. 7 パネル規模・膜厚変更による荷重- 空気膜内圧関係

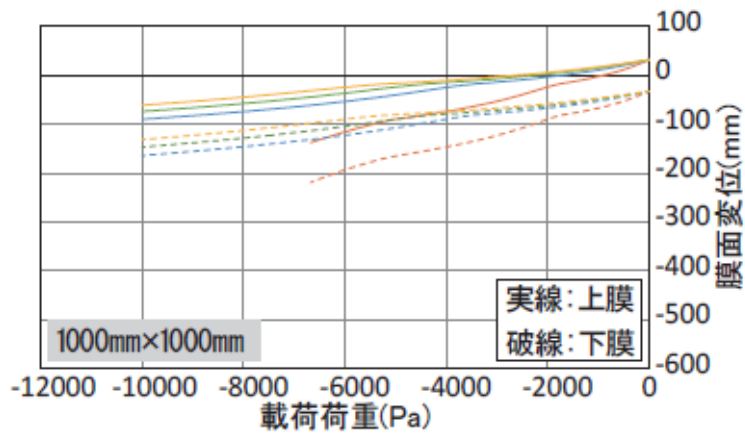


図5. 4. 8 パネル規模・膜厚変更による荷重- 膜面変位関係

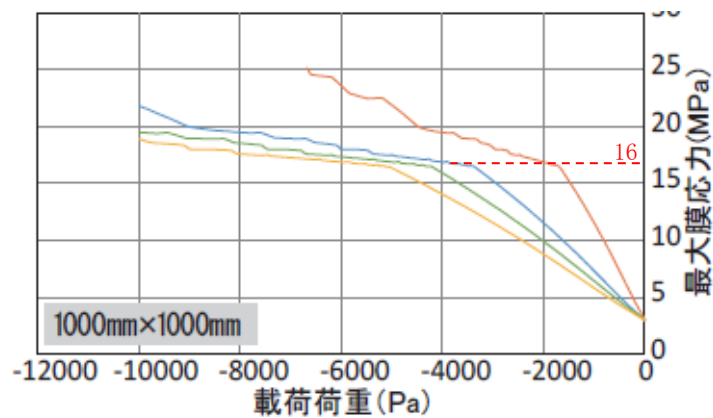


図5. 4. 9 パネル規模・膜厚変更による荷重- 最大膜応力関係

【パネル規模 2000 × 2000】

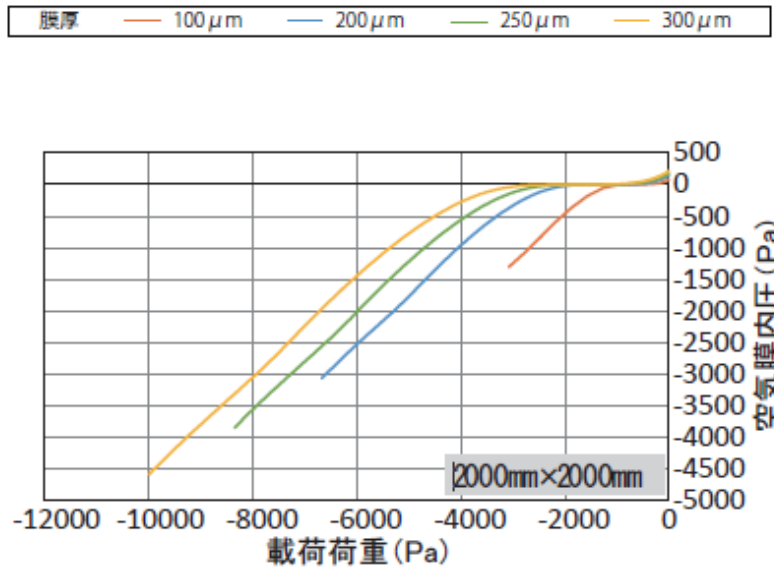


図5. 4. 10 パネル規模・膜厚変更による荷重- 空気膜内圧関係

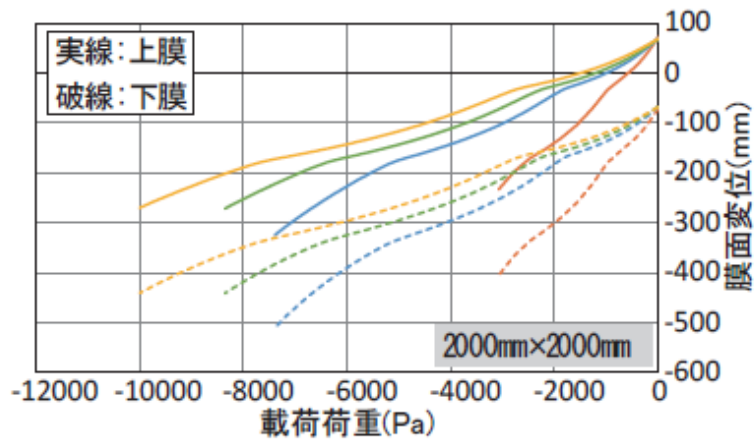


図5. 4. 11 パネル規模・膜厚変更による荷重- 膜面変位関係

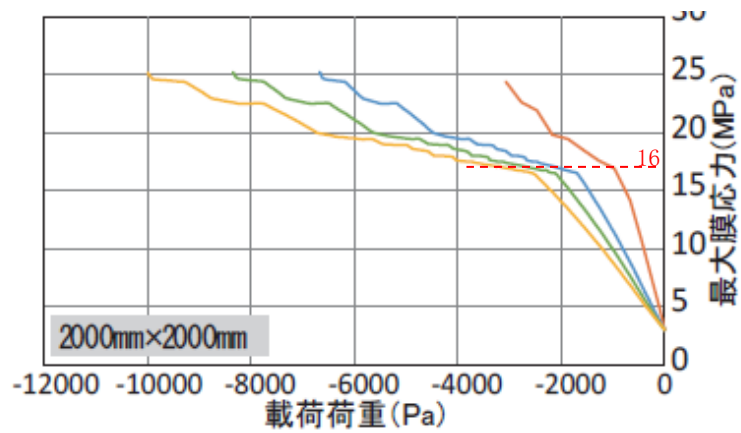


図5. 4. 12 パネル規模・膜厚変更による荷重- 最大膜応力関係

## 5.5 まとめ

本章では、密閉型のレンズ状二重空気膜構造の挙動とETFE フィルムの材料特性に着目し、風荷重を想定した負圧载荷時を対象に、第1降伏点を許容する材料非線形を考慮した密閉型ETFEレンズ状二重空気膜構造の挙動の把握を目的として、実験および数値解析により比較検証を行った。さらに初期内圧、アスペクト比、パネル規模および膜厚の違いが及ぼす影響を、数値解析により検討を行った。得られた知見を以下に示す。なお、膜面の形状はすべての検討において、立体裁断なしモデルを用いた。

(1) 実験と数値解析の比較から次のことが言える。

- ① 全面負圧単調载荷においては、デプスをほぼ一定に保ちながら変位が進行する性状を確認した。
- ② 負圧载荷時は、内圧が初期内圧から徐々に低下し、0Pa 状態を一定期間維持した後、負圧に移行する性状を把握した。
- ③ 非载荷面側の膜面張力が消失し形状がフラットな状態となっても、载荷面側は張力を維持した状態で曲率を保ち、システムとして不安定とらないことが把握された。
- ④ 繰り返し载荷により、残留歪の発生と共に除荷後に初期内圧が低下するという密閉型特有の性状が見られたが、本検討の範囲内では、不安定挙動は認められなかった。

(2) 数値解析結果から次のことが言える。

- ① 初期内圧を上昇させることにより、非载荷側の上膜面の張力が消失する荷重および上膜面の形状がフラットになる荷重が、増大する傾向が確認された。しかし、初期内圧の大きさに関わらず、下膜面が第1降伏点に達する荷



重は一定であり、これに伴う下膜面の変位もほぼ一定となった。

- ② アスペクト比1.5以降は空気膜内圧、膜面変位および最大膜応力は概ね同等の値を示すことから、2方向から1方向への荷重抵抗の変化が示された。
- ③ パネル規模が異なっても、膜厚を厚くすることで内圧減少量が小さくなり、剛性が大きくなることが示された。弾性範囲においては、概ね膜厚と第1降伏点に至る荷重が比例関係にあることが把握された。

以上のように、過大な負圧荷重時には、内圧が初期内圧から徐々に下がり、0Pa状態の維持後、負圧に移行する性状を把握した。非載荷側の膜面の張力が抜けてフラットな状態となっても、載荷面側は張力が抜けずに曲率を保ち、架構として不安定とならないことが示唆された。繰り返し載荷では、残留歪の発生と共に初期内圧が低下するという密閉型特有の性状が見られたが、本検討の範囲内では不安定挙動は認められなかった。また、アスペクト比1.5以降は空気膜内圧、膜面変位および最大膜応力は概ね同等の値を示すことが示唆された。



## 第 6 章

### 構造設計フローおよび内圧設定手法の提案

## 第6章 構造設計フローおよび内圧設定手法の提案

### 6.1 はじめに

第3章では、ETFEフィルムを用いたレンズ状空気膜の密閉型および定圧型の特徴や力学性状の把握を目的とし、数値解析を用いて内部体積量の違いが与える影響を確認し、全面正圧载荷、全面負圧载荷および半面正圧载荷における挙動について比較検証を行った。また第4章、第5章では、実験と数値解析を用いて、積雪荷重時における挙動、進行性ポンディングの検討および過大な負圧荷重時と繰り返し荷重時における挙動について検討を行い、詳細な密閉型レンズ状二重空気膜構造の特性を把握した。

以上の検証から、密閉型レンズ状二重空気膜構造は、定圧型に比べ剛性が高く、力学的にも優れており、また定圧型のように常に加圧装置により圧力をコントロールする必要はない合理的でパッシブな構造システムであることを確認した。また、ETFEフィルムの降伏を考慮しても、パネルシステム全体で不安定現象を起こさないことが把握された。

しかし、定圧型の仮定に基づいたレンズ状二重空気膜構造の構造設計フローは存在するものの、密閉型特有の留意点(負圧風荷重時の内圧消失、積雪偏荷重時の局所変形および進行性ポンディング現象の影響)を多角的に考慮した構造設計フローおよび適切な内圧の設定手法が確立されていない。

以上を踏まえ本章では、密閉型の実用化を目的とし、ETFEフィルムを用いたレンズ状二重空気膜構造の構造設計フローの提案を行う。加えて、様々なパネル規模、実際に使われるフィルム厚および日本の地域性の荷重条件を考慮した内圧設定手法の提案も行う。

## 6.2 密閉型の構造設計フローの提案

### 6.2.1 密閉型の構造設計フロー

図6.2.1に、密閉型の構造設計フローを示す。ETFEフィルムを用いた密閉型レンズ状二重空気膜構造に対して、まずライズ・スパン比、初期内圧および膜厚を仮定し、長期許容応力度の検討で初期内圧に対するETFEフィルムの検定を行う。次に短期許容応力度の検討として、風荷重および積雪荷重に対する検定を行う。最後に、密閉型特有の留意点である負圧風荷重時における内圧消失、積雪偏荷重時に生じる局所変形および進行性ボンディング現象に対する検討を行い、フィルム応力だけでなくパネルの変位量についても確認する。

密閉型レンズ状空気膜構造は初期内圧を与えた後に、常時における内圧の微調整以外、基本的に加圧操作は行わない。よって、初期内圧の設定、想定荷重に対する膜応力の評価および局所変形の確認が重要となる。次項以降にそれぞれの検討項目の留意点を示す。

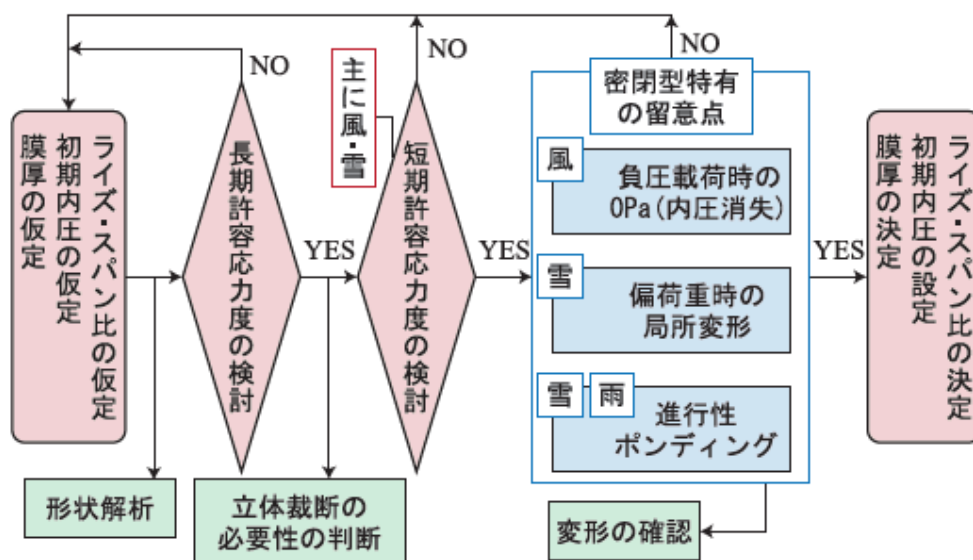


図6.2.1 密閉型の構造設計フロー

## 6. 2. 2 ライズ・スパン比、初期内圧および膜厚の仮定

レンズ状二重空気膜構造の最大パネルサイズ(スパン)は、主にETFEフィルムの厚さと設計荷重に依存する。市場で一般に使用されているフィルム厚は、100  $\mu$  m、150  $\mu$  m、200  $\mu$  m、250  $\mu$  mおよび300  $\mu$  mである。近年500  $\mu$  mも開発されている<sup>6.1)</sup>が、メーカーが限定されコストも高くなりやすいことから、あまり普及していない。

第5章の結果からもわかるように、パネル形状が正方形に近い(アスペクト比が1.5程度を超えない)場合は、2方向で膜面が抵抗し応力分散を可能とするが、長方形になると1方向での抵抗となるため、膜厚を決定する際には重要となる。ライズ・スパン比は、一般的に最低限の曲率として0.1程度を採用することが多いが、積雪の影響等で荷重が大きい場合には、ライズを大きくする場合もある。

初期内圧に関して、これまでは定圧型が一般的で付加荷重時に内圧を増加する方針となる場合が多いことから、常時は低内圧に保ち200Pa～300Paとなることが多い。今回密閉型では、第3章、第4章の検討より、低内圧においても十分に正圧荷重に対して剛性が確保できたため、同様に200Pa～300Paを目安とする。

以上の内容を踏まえ、ライズ・スパン比、初期内圧および膜厚の仮定をする際のポイントを以下に示す。

- ① フィルム厚: 100  $\mu$  m、150  $\mu$  m、200  $\mu$  m、250  $\mu$  mおよび300  $\mu$  mから選択
- ② パネルのアスペクト比: アスペクト比が1.5程度を超えると2方向の抵抗から  
1方向による抵抗に変化
- ③ ライズ・スパン比: 0.1程度を目安とし、荷重条件によりライズを増加
- ④ 初期内圧: 低内圧である200Pa～300Paを目安

### 6.2.3 長期に対する検討

ETFEフィルムはクリープの影響が大きいいため、常時の膜応力を可能な限り小さくする配慮が必要である。告示<sup>6.2), 6.3)</sup>による長期許容応力度は7MPaであるが、第2章で示したようにクリープを考慮した場合には約1/2の3～4MPa以下とすることが望ましい。

また、初期形状を形成する際には、立体裁断なしと立体裁断ありの2種類が考えられる。前者は製作が容易であり、内圧をそのまま初期内圧として設定することが可能であるが、発生膜面応力を長期許容値以下にする必要があるため、得られる初期形状のライズ・スパン比には限界がある。後者の立体裁断ありでは、一般的な膜構造に用いられるように等張力に近い曲面を製作することで、内圧を与えた際の応力を低減できるメリットがあるが、製作に手間がかかるデメリットもある。立体裁断なしで初期形状を得る場合には、初期形状時の膜応力の許容値で初期内圧の上限値が定まる傾向であり、また隅角部等におけるシワの発生が立体裁断ありに比べ顕著となる。よって、初期形状時の膜応力の検定を行いながら、あわせてバランスのよい初期内圧を決定する必要がある。

以上の内容を踏まえ、長期に対する検討を行う際のポイントを以下に示す。

- ① 長期許容応力度は7MPaであるが、クリープを考慮した場合には約1/2の3MPa～4MPa以下とすることが望ましい。
- ② 初期形状を形成する際には、立体裁断なしと立体裁断ありの2種類があり、状況に合わせて使い分ける。

## 6. 2. 4 短期に対する検討

ここでは、主に風荷重と積雪荷重を対象に検討を行う。

風荷重は、地域毎に異なる基準風速 $V_0$ 、地表面粗度区分および建物高さ $H$ や建物形状に依存する風力係数 $C_f$ により算出されるが、岬など極端に風速が大きい地域を除き、高さ10m～30m程度の建物規模であれば、国内における風荷重(再現期間50年)は概ね1,000Pa～3,000Pa程度である<sup>6.4), 6.5)</sup>。また積雪荷重は一般地域と多雪地域に分かれ、雪国での使用を想定しなければ、都市部での積雪荷重は概ね600Paである。一方、1m深の多雪地域であれば3,000Paとなり、短期でなく中長期、中短期扱いとなる<sup>6.4)～6.6)</sup>。なお、地震荷重については、自重が軽く影響を受けづらいことから、パネルの検討では無視しても問題はない。

短期荷重時の密閉型レンズ状二重空気膜構造の抵抗形式は、内圧消失前は上下膜面共に抵抗するが、消失後は主に正圧載荷では下膜(非載荷面)、負圧載荷では上膜(載荷面)により抵抗し、最大膜応力が発生する。よって、正圧と負圧の荷重の大きさからどちらの膜に最大応力が発生するか判断でき、膜応力の検討を行うことであわせて初期内圧の上限値が定まる。

以上の内容を踏まえ、短期に対する検討を行う際のポイントを以下に示す。

- ① 想定される風荷重: 概ね1,000Pa～3,000Pa程度
- ② 想定される積雪荷重: 一般地域で600Pa程度、多雪地域で3,000Pa以上
- ③ 内圧消失前は上下膜面共に抵抗するが、消失後は正圧載荷では下膜(非載荷面)、負圧載荷では上膜(載荷面)で主に抵抗し、最大膜応力が発生する。



## 6. 2. 5 負圧載荷時における内圧消失現象

密閉型特有の留意点として、負圧載荷時における内圧消失現象が挙げられる。第3章および第5章より、密閉型では、全面等分布に近い負圧荷重時に内部体積が増加して内圧が減少し、その後0Paとなり下膜の張力が消失する。その結果、非載荷面は曲面形状が保たれない挙動を示したが、載荷面は曲面形状を保持しており、架構としては不安定とはならなかった。

しかし、実際の状況を考慮した場合、内圧が0Paとなって非載荷面の膜張力が消失し、常にその膜面に風荷重によるバタつきが発生することは、望ましくないと考える。また定圧型においても、瞬間的な荷重が付加する場合、内圧制御機器の時間的遅れが生じると考えられ、密閉型と同様にバタつきが発生する可能性が高い。

よって、バタつきの影響を極力避けるために、台風時以外で常時起こりうる風速(基準風速 $V_0=20\text{m/s}$ 程度<sup>6,7)</sup>)以下の風荷重においては、内圧が0Paにはならないことをクライテリアとし、初期内圧の設定を行うことを推奨する。これにより、初期内圧の下限值が定まる。

以上の内容を踏まえ、負圧載荷時における内圧消失現象のポイントを以下に示す。

- ① 負圧荷重時には、内部体積が増加して内圧が減少し、その後0Paとなり下膜の張力が消失する。
- ② 台風時以外で常時起こりうる風速(基準風速 $V_0=20\text{m/s}$ 程度)以下の風荷重においては、内圧が0Paにはならないよう初期内圧の設定を推奨する。

## 6. 2. 6 偏荷重時の局所変形と進行性ポンディング現象

密閉型特有の留意点として、偏荷重時の局所変形と進行性ポンディング現象が挙げられる。第4章より、レンズ状二重空気膜の規模や形状によっては、偏分布の積雪荷重を検討する必要があることが把握された。その際、内圧の増加は小さいものの、伸び無し変形のような局所的な変形が生じる可能性がある。この変形が凹状になると、さらなる滞雪と貯水が生じ、進行性ポンディング現象が生じることにつながる。よって、実際の設計においては、初期内圧を上げることで剛性を高め、凹状の変形を未然に防ぐことが望ましい。これにより、初期内圧の下限值が定まる。

また第4章では、初期内圧を増加することにより、オーバーフロー時の最大膜応力が小さくなる傾向を示し、貯水を考慮した際の膜面変位の進行が小さくなることを確認した。初期内圧を上げることで、凹状の変形が生じた場合でも、オーバーフローによりポンディング状態を留まらせることが可能となり、崩壊に至らないことを確認した。

以上の内容を踏まえ、偏荷重時の局所変形と進行性ポンディング現象のポイントを以下に示す。

- ① 局所変形が凹状になると、さらなる滞雪と貯水が生じ、進行性ポンディング現象が生じる可能性がある。
- ② 初期内圧を上げて剛性を高め、凹状の変形を未然に防ぐことを推奨する。
- ③ 最悪、局所変形の凹状の変形が生じた場合でも、オーバーフローによりポンディング状態を留まらせることが可能となり、崩壊までには至らない。

## 6.3 内圧設定手法の提案

### 6.3.1 検討条件

6.2に示すフローに則り、第3章の数値解析モデルを用いて、下記の規模、膜厚および荷重をパラメータとした際の最適な初期内圧設定手法の提案を行う。

#### (1) 規模

① パネルサイズは、下記の正方形、長方形パネルとする。

- ・ 正方形パネル：1m×1m、2m×2mおよび3m×3mの3種類

(アスペクト比1)

- ・ 長方形パネル：1m×2m、2m×4mおよび3m×6mの3種類

(アスペクト比2)

② 膜厚は、100  $\mu$ m、200  $\mu$ m、250  $\mu$ mおよび300  $\mu$ mの4種類とする。

③ ライズ・スパン比は、0.1で固定とする。

#### (2) 荷重

① 長期は、自重が付加荷重に比べて極めて小さいため省略し、膜応力は内圧により発生した応力のみとする。

② 風荷重は、 $\pm 1,000$ Pa、 $\pm 2,000$ Paおよび $\pm 3,000$ Paの6種類とする。

③ 積雪荷重は、一般地域である600Paとする。

④ 積雪時の局所変形は、「半面」載荷時の載荷面変位の最小値(最大変位量)とする。(今回は最小反転荷重時の載荷範囲は用いない。)

#### (3) ETFEフィルムの許容応力度<sup>6.2), 6.3)</sup>

① 長期許容応力度 7MPa

② 短期(中短期)許容応力度(積雪) 12.6MPa

③ 短期許容応力度(風) 16.8MPa




(4) 初期内圧: 100Pa~1,000Paの範囲(100Pa刻み)

(5) 設計クライテリア

表6.3.1に、設計クライテリアを示す。初期内圧を設定する際のクライテリアとして下記について考慮する。

- ・ 長期は、許容応力度を超える検定比の1以上を危険、クリープの影響を考慮し、検定値の1/2以下を安全、1より小さい検定値を許容内とする。
- ・ 短期は、風、積雪荷重共に、許容応力度を超える検定比の1以上を危険、30%以上の安全率を確保した検定値0.7以下を安全と呼び、1より小さい検定値を許容内とする。
- ・ 積雪偏荷重を載荷した際の局所変形については、反転しないことを安全とし、凹状の変形を許容しないものとする。その結果、進行性ポンドイングも発生しない。
- ・ 内圧消失荷重については、載荷荷重に対して内圧が消失しないものを安全とする。また、張力消失に伴う膜面のバタつきを考慮し、台風時以外で常時起こりうる風速(20m/s程度)の風荷重(概ね載荷荷重の30%)以下の荷重において張力が消失してしまう状況を危険とする。張力が消失しない状況を許容内とする。

表6.3.1 設計クライテリア

安全	危険	判断基準
		長期：検定比 0.5 以下を安全、1.0 以上を危険
		短期：検定比 0.7 以下を安全、1.0 以上を危険
		積雪時の局所変形：想定荷重で反転しないことを安全
		内圧消失荷重：想定荷重の 30% 以下を危険、100% 以上を安全

### 6.3.2 検討結果

図6.3.1に、検討例を示す。正方形パネルの3m×3m、膜厚は250μmに対して、一般的な都市における風荷重±2,000Pa、積雪荷重600Paの結果を示す。

#### ■ 風荷重±2,000Pa、積雪荷重600Pa (負圧風荷重30%:-600Pa)

初期内圧(Pa)		100	200	300	400	500	600	700	800	900	1000
長期に対する検定比		0.14	0.28	0.42	0.56	0.70	0.84	0.98	1.13	1.27	1.41
短期(風)の検定比	正圧	0.95	0.96	0.97	0.98	0.98	0.99	0.99	1.00	1.01	1.02
	負圧	0.95	0.96	0.97	0.98	0.98	0.98	0.99	0.99	1.00	1.01
短期(雪)の検定比		0.44	0.45	0.46	0.53	0.61	0.68	0.76	0.83	0.91	0.99
上膜の反転の有無		反転する			反転しない						
内圧消失荷重(Pa)		-220	-450	-700	-960	-1240	-1530	-1850	-2090	-2180	-2260

暴風時の風荷重-2,000Pa

常時起こりうる基準風速 $V_0=20\text{m/s}$ の風荷重 = 約30% x -2,000Pa = 約-600Pa

図6.3.1 検討例

- ・ 長期、短期に対しては検定値が1より小さければ許容内である。
- ・ 積雪偏荷重時には、局所変形により進行性ポンドイングが起きないように上膜を反転させない。
- ・ 内圧消失荷重については、まず台風時-2000Paに対して内圧が全く消失しないものを安全とする。また暴風時の30%である-600Paの風荷重までは、内圧を保持し張力が抜けないようにするクライテリアとし、内圧300Paまでは許容内である。

このように、内圧が赤字の400Pa～700Paが採用できる初期内圧となる。実際には、初期内圧を抑えたほうが検定比も小さくなり、長期時のクリープ等の影響を低減できるため、ここでは「400Paの初期内圧」が最適となる。このように、表からシンプルに密閉型の最適内圧を決定することが可能となった。

付録1に必要初期内圧の検討結果を示す。各パネルサイズおよび様々な荷重に対する必要初期内圧の検討結果を示す。

## 6.4 まとめ

第3章～第5章の検証から、密閉型のレンズ状二重空気膜構造は、定圧型に比べ剛性が高く力学的にも優れており、また定圧時のように常に加圧装置により圧力をコントロールする必要はない合理的でパッシブな構造システムであることを確認した。また、ETFEフィルムの材料非線形性を考慮しても、パネルシステム全体で不安定現象を起こさないことが把握された。しかし、様々な荷重条件や密閉型特有の留意点を考慮した多角的な視点での構造設計フローおよび適切な内圧の設定手法が確立されていない。

よって本章では、密閉型の実用化を目的としてETFEフィルムを用いた密閉型レンズ状二重空気膜構造の構造設計フローの提案を行った。加えて、様々な規模、実際に使用されるフィルム厚および日本の地域性の荷重条件を考慮した内圧設定手法の提案も行った。得られた知見を以下に示す。

### (1) 密閉型の構造設計フローの提案

検討項目と得られたポイントを以下に示す。

#### ① ライズ・スパン比、初期内圧および膜厚を仮定

- ・ フィルム厚は、 $100\ \mu\text{m}$ 、 $200\ \mu\text{m}$ 、 $250\ \mu\text{m}$ および $300\ \mu\text{m}$ を必要規模に合わせて使用する。
- ・ パネルのアスペクト比は、アスペクト比が1.5程度を超えると1方向による抵抗形式となり、それ以下であれば2方向に力が分散される。
- ・ ライズ・スパン比は、0.1程度を目安とし、荷重条件により剛性が必要な場合や応力度を低減させたい場合はライズを増加させる。
- ・ 初期内圧は、低内圧である $200\text{Pa}$ ～ $300\text{Pa}$ を目安とする

## ② 長期に対する検討

- ・ 長期許容応力度は7MPaであるが、クリープを考慮した場合には約1/2の3MPa～4MPa以下とすることが望ましい。
- ・ 初期形状を形成する際には、立体裁断なしと立体裁断ありの2種類があり、状況に合わせて使い分ける。

## ③ 短期に対する検討

- ・ 想定される風荷重は、概ね±1,000Pa～3,000Pa程度となる。
- ・ 想定される積雪荷重は、一般地域で600Pa、多雪地域で3,000Pa以上となる。
- ・ 内圧消失前は上下膜共に抵抗するが、消失後は正圧荷重では下膜(非荷重面)、負圧荷重では上膜(荷重面)で主に抵抗し、最大膜応力が発生する。

## ④ 負圧荷重時における内圧消失現象

- ・ 負圧荷重時には、内部体積が増加して内圧が減少し、その後0Paとなり下膜の張力が消失する。
- ・ 台風時以外で常時起こりうる風速(基準風速 $V_0=20\text{m/s}$ 程度)以下の風荷重においては、内圧0Paにはならないよう初期内圧の設定を推奨する。

## ⑤ 偏荷重時の局所変形と進行性ポンドリング現象

- ・ 局所変形が凹状になると、さらなる滞雪と貯水が生じ、進行性ポンドリング現象が生じる可能性がある。
- ・ 実際の設計においては、初期内圧を上げることで剛性を高め、凹状の変形を未然に防ぐことを推奨する。
- ・ 最悪、局所変形の凹状の変形が生じた場合でも、オーバーフローにより進行性ポンドリング状態を留まらせることが可能となり崩壊までには至らない。

## (2) 内圧設定手法の提案

上記の構造設計フローに則り、第3章の数値解析モデルを用いて、下記をパラメータとした条件での最適な初期内圧設定手法の提案を行った。

- ① 規模(パネルサイズ、膜厚、ライズ・スパン比)
- ② 荷重(長期、風荷重時、積雪荷重時(全面、半面))
- ③ ETFEフィルムの許容応力度
- ④ 初期内圧(100Pa~1,000Paの範囲、100Pa刻みで表示)⇒適切な内圧を選択
- ⑤ 密閉型の留意点を考慮した設計クライテリア

以上の検証により、ライズ・スパン比は0.1で固定、積雪荷重は600Paとした日本国内のほとんどを占める一般地域(多雪地域を除く)において、下記の6種類のパネルサイズ、±1,000Pa~3,000Paの荷重に対して、構造設計フローに則った密閉型レンズ状二重空気膜構造の必要膜厚(4種類から選択)および適切な初期内圧量を、表を用いて簡単に選定する手法を提案した。

- ・ 正方形パネル： 1m×1m、2m×2および 3m×3mの3種類(アスペクト比1)
- ・ 長方形パネル： 1m×2m、2m×4mおよび3m×6mの3種類(アスペクト比2)
- ・ 膜厚： 100 μ m、200 μ m、250 μ mおよび300 μ mの4種類
- ・ 風荷重： ±1,000Pa、±2,000Paおよび±3,000Paの6種類

なお、本章で設定した設計クライテリアは一案を示すものであり、建物形状の特殊性や要求性能に応じて設計者の判断が必要となる場合があるが、設計初期時にパネル規模、必要内圧および加圧装置の仕様を決定する上では有効な手法と考える。今後は、多雪地域における検討など荷重条件の違いや、屋根勾配の影響など広範囲に展開していきたいと考えている。



## 第 7 章

### 総 括

## 第7章 総括

空気膜構造は、東京ドームに代表される一重空気膜構造の「空気支持式」と、ビーム式に代表される「空気膨張式」に大別される。本論文で対象とする「レンズ状二重空気膜構造」は、両者の性状を併せ持つ構造システムと位置付けられる。

一重空気膜構造の設計においては、付加荷重を受けた際にも内圧が常に設定値に維持される(これを「定圧型」と称す)と仮定することが一般的である。これは、内圧制御の時間的な遅れが無視できるほど小さいとの前提に立脚したものである。これを踏まえ、従来のレンズ状二重空気膜構造においても、定圧型の仮定を用いて検討が行われることが一般的である。しかし、密閉度の高いレンズ状二重空気膜構造では、一重空気膜構造に比べて内部の空気量が少ないため、状況によっては定圧型の仮定を満足できず、内部体積変化に伴う内圧変動により膜応力の急変も危惧されるが、その性状は不明確であり、これまで十分な検討がなされていない。よって、レンズ状二重空気膜構造においては、内部空気が密閉された状態(これを「密閉型」と称す)の挙動も無視することはできないと考えられる。例えば、強風時のように急激な内圧変動が予想される場合には、内圧制御により内圧一定を保持する仮定は現実的ではない。また、大型パネルへの空気供給やパネルを直列に連結した際の内圧制御は、加圧装置の能力に依存するため、積雪時においても内圧を常に一定と仮定することも事実上困難である。そのうえ近年では、薄くて軽く、透光性、耐候性に優れるETFE(エチレン・テトラフルオロエチレン共重合樹脂)フィルムを用いたレンズ状二重空気膜構造が、海外ではスタジアムなどの大規模施設から、建物に付属する小規模キャノピーなどの外装材まで多くの事例に採用されているが、設計は基本的に定圧型を前提としており、密閉型を考慮した設計・解析手法は筆者の知る限り確立されていない。

上述のような背景を踏まえ、レンズ状二重空気膜構造における「密閉型」の構造特性を把握すると共に、本構造の安全性と安定性を確保するためには、積雪荷重や風荷重に対する挙動を予測できる構造解析手法をまず確立する必要がある。さらに、積雪等の偏荷重に伴う載荷部の局所的な変位の増大や、雨水等の滞水による進行性ポンドリングの発生、暴風時の過大な負圧荷重時に想定される内圧の減少・消失の際の不安定現象の発現等が懸念されるため、それらを多角的に考慮した構造設計フローと適切な内圧設定手法を確立する必要がある。

本論文では、以上の点を踏まえて、密閉型レンズ状二重空気膜構造に関する以下の2つのテーマを設定し論じた。

- (1) 密閉型のレンズ状二重空気膜構造の挙動に対する評価技術の確立
- (2) 密閉型の特性に留意した構造設計フローの確立と内圧設定手法の提案

なお、本論文においては、平成29年6月の法改正により国内でも使用することが可能となったETFEフィルムを用いて、密閉型レンズ状二重空気膜構造に対する数値解析および実験を行い、上記テーマについて検証を行った。

本研究の主な研究成果を章毎に列挙する。

第3章「密閉型レンズ状空気膜構造の基本構造特性の把握」では、数値解析(立体裁断ありモデル)を用いて、密閉型レンズ状二重空気膜構造の内部体積量を変化させながら内部体積量と内圧変動の関係性を検証し、密閉型と定圧型それぞれの特徴や力学性状について確認した。さらに、全面正圧載荷、全面負圧載荷、半面正圧載荷における挙動について比較検証を行った。本章では「密閉型」の特性について次のような知見を得た。

- (1) 密閉型の内部体積を大幅に増大させると定圧型と同等の性状となる。この

点から大規模な空気膜構造の設計を定圧型で仮定していることの妥当性が得られた。一方、規模を考慮しないで定圧型で設計することは、危険側の評価につながる可能性がある。

- (2) 密閉型は、正圧、負圧荷重共に張力消失までは上下膜で抵抗するため、片側の膜のみで抵抗する定圧型と比べて剛性も高く、膜応力も小さくできる。張力消失後は、定圧型は正圧载荷が内圧より大きくなるとすぐに反転し、積雪時の進行性ポンディング現象を生むリスクが高まるため、通常内圧を加圧装置により上げて抵抗力を高めているが、密閉型はシステムとして定圧型よりも剛性が高く加圧装置により内圧を高める必要がないため、そのリスクが軽減され冗長性が高い。

第4章「積雪荷重時における挙動と進行性ポンディングの検討」では、ETFEフィルムを用いた密閉型レンズ状二重空気膜構造の積雪荷重時の挙動の把握を目的として、実験および数値解析による比較検証を行った。次に数値解析により、アスペクト比(四角形パネルの辺長比)および载荷範囲をパラメータとして、偏荷重が膜面変位に与える影響の検討、さらに雨水等の滞水による進行性ポンディング現象の挙動について検証した。本章で得られた知見を以下に示す。

- (1) 実験と解析結果が概ね一致することを確認し、密閉型の数値解析手法の妥当性を実証した。
- (2) 偏荷重時、アスペクト比が大きいほど内圧増加の少ない「伸びなし変形」に近い性状を示すことを確認した。
- (3) 進行性ポンディング現象が生じる危険がある場合には貯水を考慮した検討が必要であるが、本検討の範囲内ではオーバーフローし、架構の崩壊には至らないことを把握した。

第5章「過大な負圧荷重および繰り返し荷重時における挙動の把握」では、風荷

重を想定した全面負圧載荷を単調載荷した際の挙動、内圧が0となり片側の膜面張力が消失した際の挙動、および膜応力が第1降伏点を超える範囲で繰り返し載荷を行い、残留歪が発生した際の挙動等の把握を目的として、実験および数値解析により比較検証を行った。次に数値解析により、初期内圧、アスペクト比、規模および膜厚の違いが及ぼす影響について検討を行った。本章で得られた知見を以下に示す。

- (1) 実験と解析結果が概ね一致することを確認し、密閉型の数値解析手法の妥当性を実証した。
- (2) 過大な負圧荷重時は、内圧が初期内圧から徐々に下がり、0Pa状態の維持後、負圧に移行する性状を把握した。
- (3) 非載荷側の膜面張力が抜けても、載荷側の膜面張力は抜けずに曲率を維持し、架構として不安定にならないことを確認した。
- (4) アスペクト比1.5以降は、空気膜内圧、膜面変位および最大膜応力は、概ね同等の値を示すことが示唆された。

第6章「構造設計フローおよび内圧設定手法の提案」では、第3章～第5章で検証した内容を踏まえ、ETFEフィルムを用いた密閉型レンズ状二重空気膜構造の実用化を目的として、密閉型特有の留意点を考慮した多角的な視点での構造設計フローおよび適切な内圧の設定手法の提案を行った。設計フローでは、まず長期許容応力度、積雪・風荷重に対する短期許容応力度の検討を行い、加えて密閉型特有の挙動を考慮し、負圧荷重時における内圧消失の回避、および積雪偏荷重時の載荷側膜面の反転を許容しないことで、進行性ポンディングの回避等を基本方針とした。この設計フローに則り、6種類のパネルサイズ、4種類のフィルム厚、一般的な都市における荷重である積雪荷重600Paおよび±1000Pa～3000Paの風荷重に対して、密閉型レンズ状二重空気膜構造の適切な初期内圧量を表を用いて簡

単に選定する手法を提案した。

上記の検討を通じて、密閉型レンズ状二重空気膜構造に対して以下の知見が得られた。

- (1) 従来の定圧型によるレンズ状二重空気膜構造の設計手法を適用することは、状況により危険側の評価につながる可能性があるため、内圧変動を考慮した密閉型による設計が必要となる。
- (2) 密閉型は、1つのパネルシステムとして上下膜が一体で働く特徴があり、定圧型に比べて剛性が高い。
- (3) 正圧载荷時においては、定圧型では「内圧<荷重」の条件となると、膜面が一瞬で反転し進行性ボンディングのリスクが高まるが、密閉型では局部変位が発生するものの反転せず構造システムとして冗長性が高い。
- (4) 負圧载荷時においては、上下膜が一体で抵抗するため定圧型に比べ膜応力を低くすることができるが、内圧消失後は非载荷面の膜張力も消失する。最終的には、密閉効果により内圧が負圧に移行し、膜面が反転して抵抗することで不安定とはならない。
- (5) 密閉型は、定圧型のように加圧装置を用いて内圧を制御する必要のないパッシブな構造システムであり、構造性能面においても定圧型よりも優れる。また、設備的にも施工時と空気漏れに対応する最小限の加圧装置のみで運用が可能で、かつメンテナンスが容易なため、コストダウンも可能な有効なシステムである。

本研究では、内部圧力の変動が評価できる数値解析手法から密閉型の留意点を考慮した設計手法を確立することを目的として、密閉型レンズ状二重空気膜構造の評価方法および、これに基づいた構造設計フローと内圧設定手法に関して提案

し、その有効性を実証した。また、密閉型は最適な初期内圧を与えれば、その後は常時、非常時荷重に対して機械的に圧力をコントロールする必要のない合理的でパッシブな構造システムであることを確認した。

なお今後、崩壊系を確認するために、ETFE フィルムの第2降伏点(約22MPa)を考慮したトリニニア型での数値解析を用いた検討を行い、さらなる精度の向上を図ると共に、強風下での膜面と内圧変動、および負圧荷重による非載荷側の膜面反転(張力消失)時の動的挙動の検討も必要と思われる。また、内圧設定手法に関しても、多雪地域における検討など荷重条件の違いや、屋根勾配の影響など広範囲な条件が存在し、加えて設計クライテリアに関しても建物形状の特殊性や要求性能に対して設計者の判断が必要となる。その特殊性の影響を考慮することも今後の課題である。

図7.1に、主な研究成果を示す。

最後に、本研究で示した成果がETFEフィルムを用いた密閉型レンズ状二重空気膜構造の設計に展開および適用されると、さらに下記のような研究に展開していくことを期待している。

- (1) ETFEフィルムを用いた密閉型レンズ状二重空気膜構造の動的挙動の構造安定性に対する評価、特に負圧荷重による非載荷側の膜面反転(張力消失)時の動的な挙動の検証
- (2) 密閉型のシステムをローコストで実現するディテールの検証と実大試験を用いた静的・動的性能の検証

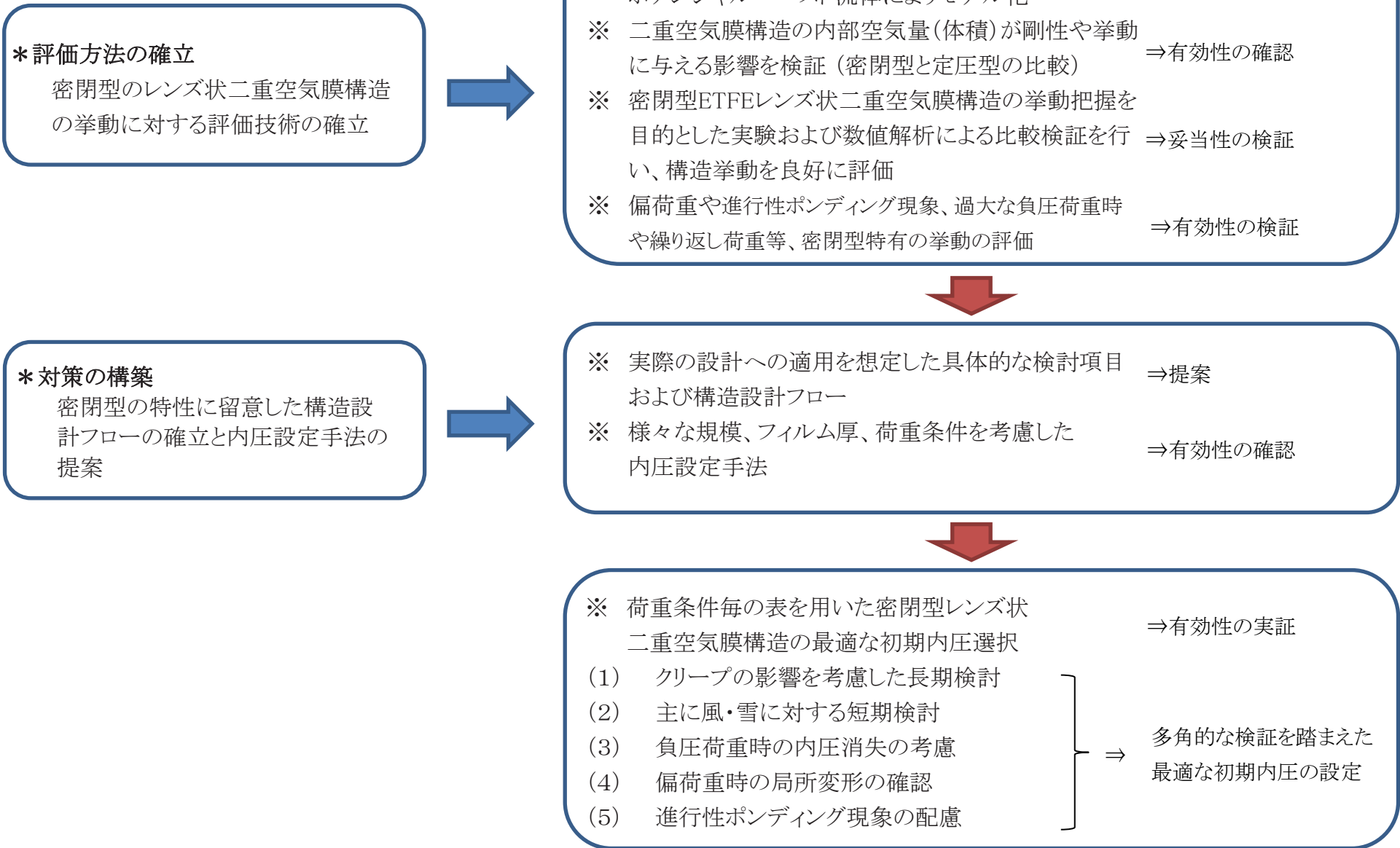


図7.1 主な研究成果



# 付 録

## 【付録1】 必要初期内圧の検討結果

第6章で提案した内圧設定手法を用いて、下記の規模、膜厚および荷重をパラメータとしたレンズ状二重空気膜構造の最適な初期内圧の検討結果を示す。

### (1) 規模

#### ① パネルサイズ：下記の正方形および長方形パネル

- ・ 正方形パネル：1m×1m、2m×2mおよび3m×3mの3種類

(アスペクト比1)

- ・ 長方形パネル：1m×2m、2m×4mおよび3m×6mの3種類

(アスペクト比2)

#### ② 膜厚：100 μm、200 μm、250 μmおよび300 μmの4種類

#### ③ ライズ・スパン比：0.1で固定

### (2) 荷重

#### ① 風荷重：±1,000Pa、±2,000Paおよび±3,000Paの3種類

#### ② 積雪荷重：一般地域である600Pa

#### ③ 積雪時の局所荷重：半面正圧載荷時

### (3) 初期内圧：100Pa～1,000Paの範囲(100Pa刻み)

### (4) 設計クライテリア

付表1. 1に、設計クライテリアを示す。初期内圧を決定する際の設計クライテリアを以下に示す。

#### ① 長期：許容応力度を超える検定比の1以上を危険、クリープの影響を考

慮し検定値の1/2以下を安全、1より小さい検定値を許容内




② 短期： 風、積雪荷重共に、許容応力度を超える検定比の1以上を危険、30%以上の安全率を確保した検定値0.7以下を安全、1より小さい検定値を許容内

③ 上膜反転の有無： 積雪偏荷重を載荷した際の局所変形については、反転しないことを安全とし、凹状の変形を許容しない

④ 内圧消失荷重： 載荷荷重に対して内圧が消失しないものを安全、台風時以外で常時起こりうる風速(20m/s程度)の風荷重以下の荷重において張力が消失してしまう状況を危険、張力が消失しない状況を許容内

付表1. 2～付表1. 19に、各パネルサイズおよび荷重に対する必要初期内圧の検討結果を示す。

付表 1. 1 設計クライテリア

安全	危険	判断基準
		
長期：検定比 0.5 以下を安全、1.0 以上を危険		
短期：検定比 0.7 以下を安全、1.0 以上を危険		
積雪時の局所変形：想定荷重で反転しないことを安全		
内圧消失荷重：想定荷重の 30% 以下を危険、100% 以上を安全		

付表1.2 規模 1m×1m、フィルム厚100μmの必要内圧

■規模:1m×1m(ライズ・スパン比0.1)、フィルム厚100μm

\*初期内圧欄の赤字が初期内圧の許容範囲を示す

(1)風荷重±1,000Pa、積雪荷重600Pa ⇒ 最適初期内圧400Pa

初期内圧(Pa)	100	200	300	400	500	600	700	800	900	1000	
長期に対する検定比	0.12	0.23	0.35	0.47	0.58	0.70	0.82	0.94	1.05	1.17	
短期(風)の検定比	正圧	0.44	0.45	0.45	0.46	0.48	0.52	0.57	0.61	0.66	0.71
	負圧	0.44	0.44	0.45	0.45	0.49	0.53	0.58	0.62	0.67	0.71
短期(雪)の検定比	0.37	0.38	0.39	0.45	0.51	0.57	0.63	0.70	0.76	0.82	
上膜の反転の有無	有	有	有	無	無	無	無	無	無	無	
内圧消失荷重(Pa)	-230	-460	-690	-940	-1220	-1500	-1800	-2140	-2420	-2560	

(2)風荷重±2,000Pa、積雪荷重600Pa ⇒ 最適初期内圧400Pa

初期内圧(Pa)	100	200	300	400	500	600	700	800	900	1000	
長期に対する検定比	0.12	0.23	0.35	0.47	0.58	0.70	0.82	0.94	1.05	1.17	
短期(風)の検定比	正圧	0.81	0.82	0.83	0.84	0.84	0.85	0.87	0.88	0.91	0.95
	負圧	0.81	0.82	0.82	0.83	0.84	0.85	0.86	0.87	0.91	0.96
短期(雪)の検定比	0.37	0.38	0.39	0.45	0.51	0.57	0.63	0.70	0.76	0.82	
上膜の反転の有無	有	有	有	無	無	無	無	無	無	無	
内圧消失荷重(Pa)	-230	-460	-690	-940	-1220	-1500	-1800	-2140	-2420	-2560	

(3)風荷重±3,000Pa、積雪荷重600Pa ⇒ 許容外

初期内圧(Pa)	100	200	300	400	500	600	700	800	900	1000	
長期に対する検定比	0.12	0.23	0.35	0.47	0.58	0.70	0.82	0.94	1.05	1.17	
短期(風)の検定比	正圧	1.04	1.05	1.05	1.05	1.06	1.06	1.06	1.07	1.07	1.07
	負圧	1.03	1.03	1.03	1.04	1.04	1.04	1.04	1.04	1.05	1.05
短期(雪)の検定比	0.37	0.38	0.39	0.45	0.51	0.57	0.63	0.70	0.76	0.82	
上膜の反転の有無	有	有	有	無	無	無	無	無	無	無	
内圧消失荷重(Pa)	-230	-460	-690	-940	-1220	-1500	-1800	-2140	-2420	-2560	

付表1.3 規模 1m×1m、フィルム厚200 $\mu$ mの必要内圧

■規模:1m×1m(ライズ・スパン比0.1)、フィルム厚200 $\mu$ m

\*初期内圧欄の赤字が初期内圧の許容範囲を示す

(1)風荷重±1,000Pa、積雪荷重600Pa ⇒ 最適初期内圧300Pa

初期内圧(Pa)	100	200	300	400	500	600	700	800	900	1000	
長期に対する検定比	0.06	0.12	0.17	0.23	0.29	0.35	0.41	0.47	0.53	0.58	
短期(風)の検定比	正圧	0.23	0.23	0.23	0.24	0.24	0.26	0.28	0.31	0.33	0.35
	負圧	0.23	0.23	0.23	0.23	0.25	0.27	0.30	0.32	0.34	0.37
短期(雪)の検定比	0.19	0.19	0.20	0.22	0.25	0.28	0.32	0.35	0.38	0.41	
上膜の反転の有無	有	有	無	無	無	無	無	無	無	無	
内圧消失荷重(Pa)	-260	-610	-720	-990	-1210	-1470	-1880	-2040	-2280	-2570	

(2)風荷重±2,000Pa、積雪荷重600Pa ⇒ 最適初期内圧300Pa

初期内圧(Pa)	100	200	300	400	500	600	700	800	900	1000	
長期に対する検定比	0.06	0.12	0.17	0.23	0.29	0.35	0.41	0.47	0.53	0.58	
短期(風)の検定比	正圧	0.44	0.44	0.44	0.44	0.45	0.45	0.46	0.46	0.47	0.48
	負圧	0.44	0.44	0.44	0.44	0.45	0.45	0.45	0.45	0.47	0.49
短期(雪)の検定比	0.19	0.19	0.20	0.22	0.25	0.28	0.32	0.35	0.38	0.41	
上膜の反転の有無	有	有	無	無	無	無	無	無	無	無	
内圧消失荷重(Pa)	-260	-610	-720	-990	-1210	-1470	-1730	-2040	-2280	-2570	

(3)風荷重±3,000Pa、積雪荷重600Pa ⇒ 最適初期内圧400Pa

初期内圧(Pa)	100	200	300	400	500	600	700	800	900	1000	
長期に対する検定比	0.06	0.12	0.17	0.23	0.29	0.35	0.41	0.47	0.53	0.58	
短期(風)の検定比	正圧	0.63	0.63	0.63	0.63	0.64	0.65	0.65	0.65	0.66	0.66
	負圧	0.63	0.63	0.63	0.63	0.64	0.64	0.65	0.65	0.65	0.66
短期(雪)の検定比	0.19	0.19	0.20	0.22	0.25	0.28	0.32	0.35	0.38	0.41	
上膜の反転の有無	有	有	無	無	無	無	無	無	無	無	
内圧消失荷重(Pa)	-260	-610	-720	-990	-1210	-1470	-1880	-2040	-2280	-2570	

付表1.4 規模 1m×1m、フィルム厚250 $\mu$ mの必要内圧

■規模: 1m×1m(ライズ・スパン比0.1)、フィルム厚250 $\mu$ m

\*初期内圧欄の赤文字が初期内圧の許容範囲を示す

(1) 風荷重 $\pm 1,000$ Pa、積雪荷重600Pa  $\Rightarrow$  最適初期内圧200Pa

初期内圧(Pa)	100	200	300	400	500	600	700	800	900	1000	
長期に対する検定比	0.05	0.09	0.14	0.19	0.23	0.28	0.33	0.37	0.42	0.47	
短期(風)の検定比	正圧	0.19	0.19	0.19	0.19	0.20	0.21	0.23	0.24	0.26	0.28
	負圧	0.19	0.19	0.19	0.19	0.20	0.22	0.24	0.26	0.28	0.30
短期(雪)の検定比	0.15	0.16	0.16	0.18	0.20	0.23	0.25	0.28	0.30	0.33	
上膜の反転の有無	有	無	無	無	無	無	無	無	無	無	
内圧消失荷重(Pa)	-230	-500	-730	-970	-1220	-1470	-1770	-2010	-2270	-2550	

(2) 風荷重 $\pm 2,000$ Pa、積雪荷重600Pa  $\Rightarrow$  最適初期内圧300Pa

初期内圧(Pa)	100	200	300	400	500	600	700	800	900	1000	
長期に対する検定比	0.05	0.09	0.14	0.19	0.23	0.28	0.33	0.37	0.42	0.47	
短期(風)の検定比	正圧	0.36	0.36	0.36	0.36	0.36	0.37	0.37	0.37	0.38	0.38
	負圧	0.36	0.36	0.36	0.36	0.36	0.36	0.37	0.37	0.38	0.40
短期(雪)の検定比	0.15	0.16	0.16	0.18	0.20	0.23	0.25	0.28	0.30	0.33	
上膜の反転の有無	有	無	無	無	無	無	無	無	無	無	
内圧消失荷重(Pa)	-230	-500	-730	-970	-1220	-1470	-1770	-2010	-2270	-2550	

(3) 風荷重 $\pm 3,000$ Pa、積雪荷重600Pa  $\Rightarrow$  最適初期内圧400Pa

初期内圧(Pa)	100	200	300	400	500	600	700	800	900	1000	
長期に対する検定比	0.05	0.09	0.14	0.19	0.23	0.28	0.33	0.37	0.42	0.47	
短期(風)の検定比	正圧	0.52	0.52	0.52	0.52	0.52	0.53	0.53	0.53	0.54	0.54
	負圧	0.51	0.52	0.52	0.52	0.52	0.52	0.53	0.53	0.53	0.53
短期(雪)の検定比	0.15	0.16	0.16	0.18	0.20	0.23	0.25	0.28	0.30	0.33	
上膜の反転の有無	有	無	無	無	無	無	無	無	無	無	
内圧消失荷重(Pa)	-230	-500	-730	-970	-1220	-1470	-1770	-2010	-2270	-2550	

付表1.5 規模 2m×2m、フィルム厚200μmの必要内圧

■規模:2m×2m(ライズ・スパン比0.1)、フィルム厚200μm

\*初期内圧欄の赤文字が初期内圧の許容範囲を示す

(1)風荷重±1,000Pa、積雪荷重600Pa ⇒ 最適初期内圧400Pa

初期内圧(Pa)	100	200	300	400	500	600	700	800	900	1000	
長期に対する検定比	0.12	0.23	0.35	0.47	0.58	0.70	0.82	0.94	1.06	1.18	
短期(風)の検定比	正圧	0.44	0.45	0.45	0.46	0.48	0.52	0.57	0.62	0.66	0.71
	負圧	0.44	0.44	0.45	0.45	0.49	0.53	0.58	0.62	0.67	0.72
短期(雪)の検定比	0.37	0.38	0.39	0.45	0.51	0.57	0.63	0.70	0.76	0.82	
上膜の反転の有無	有	有	有	無	無	無	無	無	無	無	
内圧消失荷重(Pa)	-240	-460	-720	-970	-1240	-1520	-1830	-2150	-2500	-2580	

(2)風荷重±2,000Pa、積雪荷重600Pa ⇒ 最適初期内圧400Pa

初期内圧(Pa)	100	200	300	400	500	600	700	800	900	1000	
長期に対する検定比	0.12	0.23	0.35	0.47	0.58	0.70	0.82	0.94	1.06	1.18	
短期(風)の検定比	正圧	0.81	0.82	0.83	0.84	0.84	0.85	0.86	0.88	0.91	0.95
	負圧	0.81	0.82	0.82	0.83	0.84	0.85	0.85	0.88	0.91	0.96
短期(雪)の検定比	0.37	0.38	0.39	0.45	0.51	0.57	0.63	0.70	0.76	0.82	
上膜の反転の有無	有	有	有	無	無	無	無	無	無	無	
内圧消失荷重(Pa)	-240	-460	-720	-970	-1240	-1520	-1830	-2150	-2500	-2580	

(3)風荷重±3,000Pa、積雪荷重600Pa ⇒ 許容外

初期内圧(Pa)	100	200	300	400	500	600	700	800	900	1000	
長期に対する検定比	0.12	0.23	0.35	0.47	0.58	0.70	0.82	0.94	1.06	1.18	
短期(風)の検定比	正圧	1.04	1.05	1.05	1.05	1.06	1.06	1.06	1.07	1.07	1.07
	負圧	1.03	1.03	1.03	1.04	1.04	1.04	1.04	1.04	1.05	1.05
短期(雪)の検定比	0.37	0.38	0.39	0.45	0.51	0.57	0.63	0.70	0.76	0.82	
上膜の反転の有無	有	有	有	無	無	無	無	無	無	無	
内圧消失荷重(Pa)	-240	-460	-720	-970	-1240	-1520	-1830	-2150	-2500	-2580	

付表1. 6 規模 2m×2m、フィルム厚250 μ mの必要内圧

■規模:2m×2m(ライズ・スパン比0.1)、フィルム厚250 μ m

\* 初期内圧欄の赤文字が初期内圧の許容範囲を示す

(1) 風荷重±1,000Pa、積雪荷重600Pa ⇒ 最適初期内圧400Pa

初期内圧(Pa)	100	200	300	400	500	600	700	800	900	1000	
長期に対する検定比	0.09	0.19	0.28	0.37	0.47	0.56	0.65	0.75	0.84	0.94	
短期(風)の検定比	正圧	0.36	0.36	0.37	0.37	0.39	0.42	0.46	0.49	0.53	0.57
	負圧	0.36	0.36	0.36	0.37	0.39	0.43	0.47	0.50	0.54	0.58
短期(雪)の検定比	0.30	0.30	0.31	0.36	0.41	0.46	0.51	0.56	0.61	0.66	
上膜の反転の有無	有	有	有	無	無	無	無	無	無	無	
内圧消失荷重(Pa)	-230	-500	-650	-940	-1200	-1470	-1750	-2050	-2350	-2680	

(2) 風荷重±2,000Pa、積雪荷重600Pa ⇒ 最適初期内圧400Pa

初期内圧(Pa)	100	200	300	400	500	600	700	800	900	1000	
長期に対する検定比	0.09	0.19	0.28	0.37	0.47	0.56	0.65	0.75	0.84	0.94	
短期(風)の検定比	正圧	0.67	0.67	0.68	0.68	0.69	0.70	0.71	0.72	0.73	0.76
	負圧	0.66	0.67	0.67	0.68	0.69	0.69	0.70	0.71	0.74	0.77
短期(雪)の検定比	0.30	0.30	0.31	0.36	0.41	0.46	0.51	0.56	0.61	0.66	
上膜の反転の有無	有	有	有	無	無	無	無	無	無	無	
内圧消失荷重(Pa)	-230	-500	-650	-940	-1200	-1470	-1750	-2050	-2350	-2680	

(3) 風荷重±3,000Pa、積雪荷重600Pa ⇒ 最適初期内圧400Pa

初期内圧(Pa)	100	200	300	400	500	600	700	800	900	1000
長期に対する検定比	0.09	0.19	0.28	0.37	0.47	0.56	0.65	0.75	0.84	0.94
短期(風)の検定比	正圧	0.95	0.96	0.96	0.97	0.98	0.98	0.98	0.99	0.99
	負圧	0.95	0.95	0.96	0.96	0.97	0.98	0.98	0.98	0.99
短期(雪)の検定比	0.30	0.30	0.31	0.36	0.41	0.46	0.51	0.56	0.61	0.66
上膜の反転の有無	有	有	有	無	無	無	無	無	無	無
内圧消失荷重(Pa)	-230	-500	-650	-940	-1200	-1470	-1750	-2050	-2350	-2680



付表1. 7 規模 2m×2m、フィルム厚300 $\mu$ mの必要内圧

■規模:2m×2m(ライズ・スパン比0.1)、フィルム厚300 $\mu$ m

\*初期内圧欄の赤字が初期内圧の許容範囲を示す

(1)風荷重±1,000Pa、積雪荷重600Pa ⇒ 最適初期内圧300Pa

初期内圧(Pa)	100	200	300	400	500	600	700	800	900	1000	
長期に対する検定比	0.08	0.15	0.23	0.31	0.39	0.47	0.55	0.62	0.70	0.78	
短期(風)の検定比	正圧	0.30	0.31	0.31	0.31	0.32	0.35	0.38	0.41	0.44	0.47
	負圧	0.30	0.30	0.31	0.31	0.33	0.36	0.39	0.42	0.45	0.48
短期(雪)の検定比	0.25	0.26	0.26	0.30	0.34	0.38	0.42	0.46	0.51	0.55	
上膜の反転の有無	有	有	無	無	無	無	無	無	無	無	
内圧消失荷重(Pa)	-280	-530	-730	-970	-1230	-1470	-1750	-2030	-2330	-2630	

(2)風荷重±2,000Pa、積雪荷重600Pa ⇒ 最適初期内圧300Pa

初期内圧(Pa)	100	200	300	400	500	600	700	800	900	1000
長期に対する検定比	0.08	0.15	0.23	0.31	0.39	0.47	0.55	0.62	0.70	0.78
短期(風)の検定比	正圧	0.57	0.57	0.58	0.58	0.58	0.59	0.60	0.61	0.63
	負圧	0.57	0.57	0.57	0.58	0.58	0.58	0.59	0.59	0.62
短期(雪)の検定比	0.25	0.26	0.26	0.30	0.34	0.38	0.42	0.46	0.51	0.55
上膜の反転の有無	有	有	無	無	無	無	無	無	無	無
内圧消失荷重(Pa)	-280	-530	-730	-970	-1230	-1470	-1750	-2030	-2330	-2630

(3)風荷重±3,000Pa、積雪荷重600Pa ⇒ 最適初期内圧400Pa

初期内圧(Pa)	100	200	300	400	500	600	700	800	900	1000	
長期に対する検定比	0.08	0.15	0.23	0.31	0.39	0.47	0.55	0.62	0.70	0.78	
短期(風)の検定比	正圧	0.81	0.82	0.82	0.82	0.83	0.84	0.84	0.85	0.85	0.86
	負圧	0.81	0.81	0.82	0.82	0.83	0.83	0.84	0.84	0.85	0.85
短期(雪)の検定比	0.25	0.26	0.26	0.30	0.34	0.38	0.42	0.46	0.51	0.55	
上膜の反転の有無	有	有	無	無	無	無	無	無	無	無	
内圧消失荷重(Pa)	-280	-530	-730	-970	-1230	-1470	-1750	-2030	-2330	-2630	

付表1. 8 規模 3m×3m、フィルム厚200 μ mの必要内圧

■規模: 3m×3m(ライズ・スパン比0.1)、フィルム厚200 μ m

\* 初期内圧欄の赤文字が初期内圧の許容範囲を示す

(1) 風荷重±1,000Pa、積雪荷重600Pa ⇒ 最適初期内圧400Pa

初期内圧(Pa)	100	200	300	400	500	600	700	800	900	1000
長期に対する検定比	0.17	0.35	0.52	0.70	0.88	1.05	1.23	1.41	1.59	1.77
短期(風)の検定比	正圧	0.64	0.65	0.66	0.67	0.72	0.78	0.85	0.92	0.98
	負圧	0.63	0.64	0.65	0.66	0.72	0.79	0.85	0.92	0.98
短期(雪)の検定比	0.54	0.55	0.58	0.67	0.76	0.85	0.95	1.04	1.14	1.24
上膜の反転の有無	有	有	有	無	無	無	無	無	無	無
内圧消失荷重(Pa)	-230	-470	-740	-1020	-1300	-1620	-1730	-1810	-1880	-1940

(2) 風荷重±2,000Pa、積雪荷重600Pa ⇒ 許容外

初期内圧(Pa)	100	200	300	400	500	600	700	800	900	1000
長期に対する検定比	0.17	0.35	0.52	0.70	0.88	1.05	1.23	1.41	1.59	1.77
短期(風)の検定比	正圧	1.04	1.05	1.05	1.06	1.06	1.07	1.08	1.08	1.09
	負圧	1.03	1.03	1.04	1.04	1.04	1.05	1.05	1.05	1.05
短期(雪)の検定比	0.54	0.55	0.58	0.67	0.76	0.85	0.95	1.04	1.14	1.24
上膜の反転の有無	有	有	有	無	無	無	無	無	無	無
内圧消失荷重(Pa)	-230	-470	-740	-1020	-1300	-1620	-1730	-1810	-1880	-1940

(3) 風荷重±3,000Pa、積雪荷重600Pa ⇒ 許容外

初期内圧(Pa)	100	200	300	400	500	600	700	800	900	1000
長期に対する検定比	0.17	0.35	0.52	0.70	0.88	1.05	1.23	1.41	1.59	1.77
短期(風)の検定比	正圧	1.33	1.34	1.34	1.35	1.36	1.37	1.38	1.39	1.40
	負圧	1.41	1.42	1.43	1.44	1.46	1.47	1.49	1.50	1.52
短期(雪)の検定比	0.54	0.55	0.58	0.67	0.76	0.85	0.95	1.04	1.14	1.24
上膜の反転の有無	有	有	有	無	無	無	無	無	無	無
内圧消失荷重(Pa)	-230	-470	-740	-1020	-1300	-1620	-1730	-1810	-1880	-1940

付表1. 9 規模 3m×3m、フィルム厚250 μ mの必要内圧

■規模: 3m×3m(ライズ・スパン比0.1)、フィルム厚250 μ m

\* 初期内圧欄の赤文字が初期内圧の許容範囲を示す

(1) 風荷重±1,000Pa、積雪荷重600Pa ⇒ 最適初期内圧400Pa

初期内圧(Pa)	100	200	300	400	500	600	700	800	900	1000	
長期に対する検定比	0.14	0.28	0.42	0.56	0.70	0.84	0.98	1.13	1.27	1.41	
短期(風)の検定比	正圧	0.52	0.53	0.54	0.55	0.58	0.63	0.68	0.74	0.79	0.85
	負圧	0.52	0.52	0.53	0.54	0.58	0.64	0.69	0.74	0.80	0.85
短期(雪)の検定比	0.44	0.45	0.47	0.53	0.61	0.68	0.76	0.83	0.91	0.99	
上膜の反転の有無	有	有	有	無	無	無	無	無	無	無	
内圧消失荷重(Pa)	-220	-450	-700	-960	-1240	-1530	-1850	-2090	-2180	-2260	

(2) 風荷重±2,000Pa、積雪荷重600Pa ⇒ 最適初期内圧400Pa

初期内圧(Pa)	100	200	300	400	500	600	700	800	900	1000	
長期に対する検定比	0.14	0.28	0.42	0.56	0.70	0.84	0.98	1.13	1.27	1.41	
短期(風)の検定比	正圧	0.95	0.96	0.97	0.98	0.98	0.99	0.99	1.00	1.01	1.02
	負圧	0.95	0.96	0.97	0.98	0.98	0.98	0.99	0.99	1.00	1.01
短期(雪)の検定比	0.44	0.45	0.47	0.53	0.61	0.68	0.76	0.83	0.91	0.99	
上膜の反転の有無	有	有	有	無	無	無	無	無	無	無	
内圧消失荷重(Pa)	-220	-450	-700	-960	-1240	-1530	-1850	-2090	-2180	-2260	

(3) 風荷重±3,000Pa、積雪荷重600Pa ⇒ 許容外

初期内圧(Pa)	100	200	300	400	500	600	700	800	900	1000	
長期に対する検定比	0.14	0.28	0.42	0.56	0.70	0.84	0.98	1.13	1.27	1.41	
短期(風)の検定比	正圧	1.13	1.14	1.14	1.15	1.15	1.15	1.16	1.16	1.17	1.17
	負圧	1.09	1.09	1.09	1.09	1.10	1.10	1.10	1.10	1.11	1.11
短期(雪)の検定比	0.44	0.45	0.47	0.53	0.61	0.68	0.76	0.83	0.91	0.99	
上膜の反転の有無	有	有	有	無	無	無	無	無	無	無	
内圧消失荷重(Pa)	-220	-450	-700	-960	-1240	-1530	-1850	-2090	-2180	-2260	

付表1. 10 規模 3m×3m、フィルム厚300μmの必要内圧

■規模:3m×3m(ライズ・スパン比0.1)、フィルム厚300μm

\*初期内圧欄の赤文字が初期内圧の許容範囲を示す

(1)風荷重±1,000Pa、積雪荷重600Pa ⇒ 最適初期内圧400Pa

初期内圧(Pa)	100	200	300	400	500	600	700	800	900	1000	
長期に対する検定比	0.12	0.23	0.35	0.47	0.58	0.70	0.82	0.94	1.06	1.17	
短期(風)の検定比	正圧	0.44	0.45	0.45	0.46	0.48	0.52	0.48	0.61	0.66	0.71
	負圧	0.44	0.44	0.45	0.45	0.49	0.53	0.58	0.62	0.67	0.71
短期(雪)の検定比	0.37	0.38	0.39	0.45	0.51	0.57	0.51	0.70	0.76	0.82	
上膜の反転の有無	有	有	有	無	無	無	無	無	無	無	
内圧消失荷重(Pa)	-230	-460	-730	-970	-1240	-1560	-1820	-2140	-2430	-2580	

(2)風荷重±2,000Pa、積雪荷重600Pa ⇒ 最適初期内圧400Pa

初期内圧(Pa)	100	200	300	400	500	600	700	800	900	1000	
長期に対する検定比	0.12	0.23	0.35	0.47	0.58	0.70	0.82	0.94	1.06	1.17	
短期(風)の検定比	正圧	0.81	0.82	0.83	0.84	0.84	0.85	0.84	0.88	0.91	0.95
	負圧	0.81	0.82	0.82	0.83	0.84	0.85	0.86	0.87	0.91	0.96
短期(雪)の検定比	0.37	0.38	0.39	0.45	0.51	0.57	0.51	0.70	0.76	0.82	
上膜の反転の有無	有	有	有	無	無	無	無	無	無	無	
内圧消失荷重(Pa)	-230	-460	-730	-970	-1240	-1560	-1820	-2140	-2430	-2580	

(3)風荷重±3,000Pa、積雪荷重600Pa ⇒ 許容外

初期内圧(Pa)	100	200	300	400	500	600	700	800	900	1000	
長期に対する検定比	0.12	0.23	0.35	0.47	0.58	0.70	0.82	0.94	1.06	1.17	
短期(風)の検定比	正圧	1.04	1.05	1.05	1.05	1.06	1.06	1.06	1.07	1.07	1.07
	負圧	1.03	1.03	1.03	1.04	1.04	1.04	1.04	1.04	1.05	1.05
短期(雪)の検定比	0.37	0.38	0.39	0.45	0.51	0.57	0.51	0.70	0.76	0.82	
上膜の反転の有無	有	有	有	無	無	無	無	無	無	無	
内圧消失荷重(Pa)	-230	-460	-730	-970	-1240	-1560	-1820	-2140	-2430	-2580	

付表1. 11 規模 1m×2m、フィルム厚100μmの必要内圧

■規模:1m×2m(ライズ・スパン比0.1)、フィルム厚100μm

\*初期内圧欄の赤文字が初期内圧の許容範囲を示す

(1)風荷重±1,000Pa、積雪荷重600Pa ⇒ 最適初期内圧500Pa

初期内圧(Pa)	100	200	300	400	500	600	700	800	900	1000	
長期に対する検定比	0.17	0.34	0.51	0.68	0.84	1.02	1.19	1.36	1.52	1.69	
短期(風)の検定比	正圧	0.60	0.61	0.62	0.64	0.69	0.75	0.81	0.87	0.94	0.99
	負圧	0.59	0.60	0.61	0.63	0.69	0.75	0.81	0.87	0.93	0.99
短期(雪)の検定比	0.51	0.52	0.56	0.64	0.73	0.82	0.91	0.99	1.08	1.17	
上膜の反転の有無	有	有	有	有	無	無	無	無	無	無	
内圧消失荷重(Pa)	-350	-610	-1170	-1420	-1920	-1940	-1980	-2020	-2130	-2290	

(2)風荷重±2,000Pa、積雪荷重600Pa ⇒ 許容外

初期内圧(Pa)	100	200	300	400	500	600	700	800	900	1000	
長期に対する検定比	0.17	0.34	0.51	0.68	0.84	1.02	1.19	1.36	1.52	1.69	
短期(風)の検定比	正圧	1.04	1.04	1.05	1.06	1.07	1.07	1.08	1.10	1.11	1.13
	負圧	1.02	1.02	1.03	1.03	1.04	1.04	1.04	1.05	1.06	1.07
短期(雪)の検定比	0.51	0.52	0.56	0.64	0.73	0.82	0.91	0.99	1.08	1.17	
上膜の反転の有無	有	有	有	有	無	無	無	無	無	無	
内圧消失荷重(Pa)	-350	-610	-1170	-1420	-1920	-1940	-1980	-2020	-2130	-2290	

(3)風荷重±3,000Pa、積雪荷重600Pa ⇒ 許容外

初期内圧(Pa)	100	200	300	400	500	600	700	800	900	1000	
長期に対する検定比	0.17	0.34	0.51	0.68	0.84	1.02	1.19	1.36	1.52	1.69	
短期(風)の検定比	正圧	1.35	1.36	1.37	1.38	1.40	1.41	1.42	1.43	1.45	1.46
	負圧	1.20	1.20	1.21	1.21	1.21	1.22	1.22	1.23	1.23	1.24
短期(雪)の検定比	0.51	0.52	0.56	0.64	0.73	0.82	0.91	0.99	1.08	1.17	
上膜の反転の有無	有	有	有	有	無	無	無	無	無	無	
内圧消失荷重(Pa)	-350	-610	-1170	-1420	-1920	-1940	-1980	-2020	-2130	-2290	

付表1. 12 規模 1m×2m、フィルム厚200 $\mu$ mの必要内圧

■規模:1m×2m(ライズ・スパン比0.1)、フィルム厚200 $\mu$ m

\*初期内圧欄の赤文字が初期内圧の許容範囲を示す

(1)風荷重 $\pm 1,000$ Pa、積雪荷重600Pa  $\Rightarrow$  最適初期内圧500Pa

初期内圧(Pa)	100	200	300	400	500	600	700	800	900	1000	
長期に対する検定比	0.08	0.17	0.25	0.34	0.42	0.51	0.59	0.68	0.76	0.84	
短期(風)の検定比	正圧	0.32	0.32	0.33	0.34	0.35	0.38	0.41	0.44	0.48	0.51
	負圧	0.32	0.32	0.32	0.33	0.35	0.39	0.42	0.45	0.48	0.52
短期(雪)の検定比	0.27	0.27	0.28	0.32	0.37	0.41	0.46	0.50	0.55	0.59	
上膜の反転の有無	有	有	有	有	無	無	無	無	無	無	
内圧消失荷重(Pa)	-320	-570	-810	-1110	-1390	-1720	-1980	-2310	-2650	-3020	

(2)風荷重 $\pm 2,000$ Pa、積雪荷重600Pa  $\Rightarrow$  最適初期内圧500Pa

初期内圧(Pa)	100	200	300	400	500	600	700	800	900	1000	
長期に対する検定比	0.08	0.17	0.25	0.34	0.42	0.51	0.59	0.68	0.76	0.84	
短期(風)の検定比	正圧	0.59	0.60	0.60	0.61	0.61	0.62	0.63	0.64	0.66	0.68
	負圧	0.58	0.59	0.60	0.60	0.61	0.61	0.62	0.63	0.66	0.69
短期(雪)の検定比	0.27	0.27	0.28	0.32	0.37	0.41	0.46	0.50	0.55	0.59	
上膜の反転の有無	有	有	有	有	無	無	無	無	無	無	
内圧消失荷重(Pa)	-320	-570	-810	-1110	-1390	-1720	-1980	-2310	-2650	-3020	

(3)風荷重 $\pm 3,000$ Pa、積雪荷重600Pa  $\Rightarrow$  最適初期内圧500Pa

初期内圧(Pa)	100	200	300	400	500	600	700	800	900	1000	
長期に対する検定比	0.08	0.17	0.25	0.34	0.42	0.51	0.59	0.68	0.76	0.84	
短期(風)の検定比	正圧	0.83	0.84	0.85	0.86	0.86	0.87	0.88	0.88	0.89	0.90
	負圧	0.83	0.83	0.84	0.85	0.85	0.86	0.87	0.87	0.88	0.89
短期(雪)の検定比	0.27	0.27	0.28	0.32	0.37	0.41	0.46	0.50	0.55	0.59	
上膜の反転の有無	有	有	有	有	無	無	無	無	無	無	
内圧消失荷重(Pa)	-320	-570	-810	-1110	-1390	-1720	-1980	-2310	-2650	-3020	

付表1. 13 規模 1m×2m、フィルム厚250 $\mu$ mの必要内圧

■規模:1m×2m(ライズ・スパン比0.1)、フィルム厚250 $\mu$ m

\*初期内圧欄の赤文字が初期内圧の許容範囲を示す

(1)風荷重±1,000Pa、積雪荷重600Pa ⇒ 最適初期内圧500Pa

初期内圧(Pa)	100	200	300	400	500	600	700	800	900	1000	
長期に対する検定比	0.07	0.13	0.20	0.27	0.34	0.41	0.47	0.54	0.61	0.68	
短期(風)の検定比	正圧	0.26	0.26	0.27	0.27	0.28	0.30	0.33	0.36	0.38	0.41
	負圧	0.26	0.26	0.26	0.27	0.29	0.31	0.34	0.36	0.39	0.42
短期(雪)の検定比	0.22	0.22	0.23	0.26	0.29	0.33	0.37	0.40	0.44	0.48	
上膜の反転の有無	有	有	有	有	無	無	無	無	無	無	
内圧消失荷重(Pa)	-270	-590	-840	-1090	-1360	-1660	-2050	-2250	-2590	-2910	

(2)風荷重±2,000Pa、積雪荷重600Pa ⇒ 最適初期内圧500Pa

初期内圧(Pa)	100	200	300	400	500	600	700	800	900	1000
長期に対する検定比	0.07	0.13	0.20	0.27	0.34	0.41	0.47	0.54	0.61	0.68
短期(風)の検定比	正圧	0.48	0.49	0.49	0.50	0.51	0.51	0.52	0.53	0.55
	負圧	0.48	0.48	0.49	0.49	0.50	0.50	0.51	0.54	0.56
短期(雪)の検定比	0.22	0.22	0.23	0.26	0.29	0.33	0.37	0.40	0.44	0.48
上膜の反転の有無	有	有	有	有	無	無	無	無	無	無
内圧消失荷重(Pa)	-270	-590	-840	-1090	-1360	-1660	-2050	-2250	-2590	-2910

(3)風荷重±3,000Pa、積雪荷重600Pa ⇒ 最適初期内圧500Pa

初期内圧(Pa)	100	200	300	400	500	600	700	800	900	1000
長期に対する検定比	0.07	0.13	0.20	0.27	0.34	0.41	0.47	0.54	0.61	0.68
短期(風)の検定比	正圧	0.69	0.69	0.70	0.70	0.71	0.71	0.72	0.72	0.74
	負圧	0.68	0.69	0.69	0.70	0.70	0.71	0.71	0.72	0.73
短期(雪)の検定比	0.22	0.22	0.23	0.26	0.29	0.33	0.37	0.40	0.44	0.48
上膜の反転の有無	有	有	有	有	無	無	無	無	無	無
内圧消失荷重(Pa)	-270	-590	-840	-1090	-1360	-1660	-2050	-2250	-2590	-2910

付表1. 14 規模 2m×4m、フィルム厚200 $\mu$ mの必要内圧

■規模:2m×4m(ライズ・スパン比0.1)、フィルム厚200 $\mu$ m

\*初期内圧欄の赤文字が初期内圧の許容範囲を示す

(1)風荷重 $\pm 1,000$ Pa、積雪荷重600Pa  $\Rightarrow$  最適初期内圧500Pa

初期内圧(Pa)	100	200	300	400	500	600	700	800	900	1000	
長期に対する検定比	0.17	0.34	0.51	0.68	0.85	1.02	1.19	1.36	1.53	1.70	
短期(風)の検定比	正圧	0.60	0.61	0.62	0.64	0.69	0.75	0.81	0.87	0.94	0.99
	負圧	0.59	0.60	0.61	0.63	0.69	0.75	0.81	0.87	0.94	0.99
短期(雪)の検定比	0.51	0.52	0.56	0.64	0.73	0.82	0.91	0.99	1.09	1.18	
上膜の反転の有無	有	有	有	有	無	無	無	無	無	無	
内圧消失荷重(Pa)	-290	-630	-820	-1130	-1710	-1760	-1920	-2030	-2120	-2230	

(2)風荷重 $\pm 2,000$ Pa、積雪荷重600Pa  $\Rightarrow$  許容外

初期内圧(Pa)	100	200	300	400	500	600	700	800	900	1000	
長期に対する検定比	0.17	0.34	0.51	0.68	0.85	1.02	1.19	1.36	1.53	1.70	
短期(風)の検定比	正圧	1.04	1.04	1.05	1.06	1.07	1.07	1.08	1.10	1.11	1.13
	負圧	1.02	1.02	1.03	1.03	1.04	1.04	1.04	1.05	1.06	1.07
短期(雪)の検定比	0.51	0.52	0.56	0.64	0.73	0.82	0.91	0.99	1.09	1.18	
上膜の反転の有無	有	有	有	有	無	無	無	無	無	無	
内圧消失荷重(Pa)	-290	-630	-820	-1130	-1710	-1760	-1920	-2030	-2120	-2230	

(3)風荷重 $\pm 3,000$ Pa、積雪荷重600Pa  $\Rightarrow$  許容外

初期内圧(Pa)	100	200	300	400	500	600	700	800	900	1000	
長期に対する検定比	0.17	0.34	0.51	0.68	0.85	1.02	1.19	1.36	1.53	1.70	
短期(風)の検定比	正圧	1.35	1.36	1.37	1.38	1.40	1.41	1.42	1.43	1.45	1.46
	負圧	1.20	1.20	1.21	1.21	1.22	1.22	1.22	1.23	1.23	1.24
短期(雪)の検定比	0.51	0.52	0.56	0.64	0.73	0.82	0.91	0.99	1.09	1.18	
上膜の反転の有無	有	有	有	有	無	無	無	無	無	無	
内圧消失荷重(Pa)	-290	-630	-820	-1130	-1710	-1760	-1920	-2030	-2120	-2230	



付表1. 15 規模 2m×4m、フィルム厚250 $\mu$ mの必要内圧

■規模:2m×4m(ライズ・スパン比0.1)、フィルム厚250 $\mu$ m

\*初期内圧欄の赤文字が初期内圧の許容範囲を示す

(1)風荷重±1,000Pa、積雪荷重600Pa ⇒ 最適初期内圧500Pa

初期内圧(Pa)	100	200	300	400	500	600	700	800	900	1000	
長期に対する検定比	0.13	0.27	0.41	0.54	0.68	0.81	0.95	1.08	1.22	1.36	
短期(風)の検定比	正圧	0.49	0.50	0.51	0.52	0.55	0.60	0.65	0.70	0.76	0.81
	負圧	0.48	0.49	0.50	0.51	0.56	0.61	0.66	0.71	0.76	0.81
短期(雪)の検定比	0.41	0.42	0.45	0.52	0.59	0.66	0.73	0.80	0.87	0.94	
上膜の反転の有無	有	有	有	有	無	無	無	無	無	無	
内圧消失荷重(Pa)	-290	-480	-780	-1110	-1540	-1800	-2220	-2320	-2440	-2540	

(2)風荷重±2,000Pa、積雪荷重600Pa ⇒ 最適初期内圧500Pa

初期内圧(Pa)	100	200	300	400	500	600	700	800	900	1000	
長期に対する検定比	0.13	0.27	0.41	0.54	0.68	0.81	0.95	1.08	1.22	1.36	
短期(風)の検定比	正圧	0.89	0.90	0.91	0.92	0.93	0.94	0.96	0.99	1.01	1.03
	負圧	0.88	0.89	0.90	0.91	0.92	0.93	0.94	0.98	1.00	1.02
短期(雪)の検定比	0.41	0.42	0.45	0.52	0.59	0.66	0.73	0.80	0.87	0.94	
上膜の反転の有無	有	有	有	有	無	無	無	無	無	無	
内圧消失荷重(Pa)	-290	-480	-780	-1110	-1540	-1800	-2220	-2320	-2440	-2540	

(3)風荷重±3,000Pa、積雪荷重600Pa ⇒ 許容外

初期内圧(Pa)	100	200	300	400	500	600	700	800	900	1000	
長期に対する検定比	0.13	0.27	0.41	0.54	0.68	0.81	0.95	1.08	1.22	1.36	
短期(風)の検定比	正圧	1.08	1.08	1.08	1.09	1.09	1.09	1.10	1.10	1.10	1.10
	負圧	1.14	1.14	1.15	1.16	1.16	1.17	1.18	1.18	1.19	1.20
短期(雪)の検定比	0.41	0.42	0.45	0.52	0.59	0.66	0.73	0.80	0.87	0.94	
上膜の反転の有無	有	有	有	有	無	無	無	無	無	無	
内圧消失荷重(Pa)	-290	-480	-780	-1110	-1540	-1800	-2220	-2320	-2440	-2540	

付表1. 16 規模 2m×4m、フィルム厚300 $\mu$ mの必要内圧

■規模:2m×4m(ライズ・スパン比0.1)、フィルム厚300 $\mu$ m

\*初期内圧欄の赤文字が初期内圧の許容範囲を示す

(1)風荷重 $\pm 1,000$ Pa、積雪荷重600Pa  $\Rightarrow$  最適初期内圧500Pa

初期内圧(Pa)	100	200	300	400	500	600	700	800	900	1000	
長期に対する検定比	0.11	0.22	0.34	0.45	0.56	0.68	0.79	0.90	1.01	1.13	
短期(風)の検定比	正圧	0.41	0.42	0.43	0.44	0.46	0.50	0.55	0.59	0.63	0.68
	負圧	0.41	0.42	0.42	0.43	0.47	0.51	0.55	0.59	0.64	0.68
短期(雪)の検定比	0.35	0.36	0.38	0.43	0.49	0.55	0.61	0.67	0.73	0.79	
上膜の反転の有無	有	有	有	有	無	無	無	無	無	無	
内圧消失荷重(Pa)	-300	-590	-820	-1160	-1400	-1730	-2060	-2530	-2690	-2830	

(2)風荷重 $\pm 2,000$ Pa、積雪荷重600Pa  $\Rightarrow$  最適初期内圧500Pa

初期内圧(Pa)	100	200	300	400	500	600	700	800	900	1000	
長期に対する検定比	0.11	0.22	0.34	0.45	0.56	0.68	0.79	0.90	1.01	1.13	
短期(風)の検定比	正圧	0.76	0.77	0.77	0.78	0.79	0.80	0.82	0.84	0.87	0.90
	負圧	0.75	0.76	0.77	0.78	0.78	0.79	0.80	0.83	0.87	0.91
短期(雪)の検定比	0.35	0.36	0.38	0.43	0.49	0.55	0.61	0.67	0.73	0.79	
上膜の反転の有無	有	有	有	有	無	無	無	無	無	無	
内圧消失荷重(Pa)	-300	-590	-820	-1160	-1400	-1730	-2060	-2530	-2690	-2830	

(3)風荷重 $\pm 3,000$ Pa、積雪荷重600Pa  $\Rightarrow$  許容外

初期内圧(Pa)	100	200	300	400	500	600	700	800	900	1000	
長期に対する検定比	0.11	0.22	0.34	0.45	0.56	0.68	0.79	0.90	1.01	1.13	
短期(風)の検定比	正圧	1.03	1.04	1.04	1.05	1.05	1.06	1.06	1.07	1.07	1.08
	負圧	1.02	1.02	1.02	1.03	1.03	1.03	1.03	1.04	1.04	1.04
短期(雪)の検定比	0.35	0.36	0.38	0.43	0.49	0.55	0.61	0.67	0.73	0.79	
上膜の反転の有無	有	有	有	有	無	無	無	無	無	無	
内圧消失荷重(Pa)	-300	-590	-820	-1160	-1400	-1730	-2060	-2530	-2690	-2830	

付表1. 17 規模 3m×6m、フィルム厚200 $\mu$ mの必要内圧

■規模:3m×6m(ライズ・スパン比0.1)、フィルム厚200 $\mu$ m

\*初期内圧欄の赤字が初期内圧の許容範囲を示す

(1)風荷重 $\pm 1,000$ Pa、積雪荷重600Pa  $\Rightarrow$  許容外

初期内圧(Pa)	100	200	300	400	500	600	700	800	900	1000	
長期に対する検定比	0.25	0.51	0.76	1.01	1.27	1.52	1.78	2.04	2.29	2.50	
短期(風)の検定比	正圧	0.85	0.87	0.89	0.93	1.00	1.04	1.07	1.10	1.13	1.20
	負圧	0.84	0.86	0.88	0.92	0.99	1.02	1.04	1.06	1.08	1.08
短期(雪)の検定比	0.73	0.76	0.83	0.95	1.08	1.21	1.32	1.38	1.42	1.50	
上膜の反転の有無	有	有	有	有	無	無	無	無	無	無	
内圧消失荷重(Pa)	-250	-510	-980	-1170	-1310	-1400	-1490	-1570	-1700	-2030	

(2)風荷重 $\pm 2,000$ Pa、積雪荷重600Pa  $\Rightarrow$  許容外

初期内圧(Pa)	100	200	300	400	500	600	700	800	900	1000	
長期に対する検定比	0.25	0.51	0.76	1.01	1.27	1.52	1.78	2.04	2.29	2.50	
短期(風)の検定比	正圧	1.35	1.37	1.39	1.41	1.43	1.45	1.47	1.50	1.53	1.63
	負圧	1.20	1.21	1.21	1.22	1.23	1.23	1.24	1.25	1.26	1.26
短期(雪)の検定比	0.73	0.76	0.83	0.95	1.08	1.21	1.32	1.38	1.42	1.50	
上膜の反転の有無	有	有	有	有	無	無	無	無	無	無	
内圧消失荷重(Pa)	-250	-510	-980	-1170	-1310	-1400	-1490	-1570	-1700	-2030	

(3)風荷重 $\pm 3,000$ Pa、積雪荷重600Pa  $\Rightarrow$  許容外

初期内圧(Pa)	100	200	300	400	500	600	700	800	900	1000	
長期に対する検定比	0.25	0.51	0.76	1.01	1.27	1.52	1.78	2.04	2.29	2.50	
短期(風)の検定比	正圧	3.06	3.21	3.37	3.56	3.76	4.00	4.26	4.59	5.08	5.60
	負圧	1.71	1.72	1.74	1.76	1.76	1.77	1.79	1.79	1.80	1.80
短期(雪)の検定比	0.73	0.76	0.83	0.95	1.08	1.21	1.32	1.38	1.42	1.50	
上膜の反転の有無	有	有	有	有	無	無	無	無	無	無	
内圧消失荷重(Pa)	-250	-510	-980	-1170	-1310	-1400	-1490	-1570	-1700	-2030	

付表1. 18 規模 3m×6m、フィルム厚250 $\mu$ mの必要内圧

■規模:3m×6m(ライズ・スパン比0.1)、フィルム厚250 $\mu$ m

\*初期内圧欄の赤字が初期内圧の許容範囲を示す

(1)風荷重 $\pm 1,000$ Pa、積雪荷重600Pa  $\Rightarrow$  許容外

初期内圧(Pa)	100	200	300	400	500	600	700	800	900	1000	
長期に対する検定比	0.20	0.41	0.61	0.81	1.02	1.22	1.42	1.63	1.83	21.60	
短期(風)の検定比	正圧	0.70	0.71	0.73	0.76	0.82	0.89	0.97	1.01	1.04	1.07
	負圧	0.69	0.71	0.72	0.75	0.82	0.89	0.96	1.00	1.03	1.04
短期(雪)の検定比	0.60	0.62	0.67	0.77	0.87	0.98	1.08	1.19	1.30	1.35	
上膜の反転の有無	有	有	有	有	無	無	無	無	無	無	
内圧消失荷重(Pa)	-270	-510	-840	-1240	-1490	-1590	-1720	-1800	-1900	-2070	

(2)風荷重 $\pm 2,000$ Pa、積雪荷重600Pa  $\Rightarrow$  許容外

初期内圧(Pa)	100	200	300	400	500	600	700	800	900	1000	
長期に対する検定比	0.20	0.41	0.61	0.81	1.02	1.22	1.42	1.63	1.83	21.60	
短期(風)の検定比	正圧	1.14	1.15	1.16	1.17	1.18	1.19	1.20	1.22	1.23	1.25
	負圧	1.08	1.08	1.09	1.09	1.10	1.10	1.11	1.11	1.12	1.12
短期(雪)の検定比	0.60	0.62	0.67	0.77	0.87	0.98	1.08	1.19	1.30	1.35	
上膜の反転の有無	有	有	有	有	無	無	無	無	無	無	
内圧消失荷重(Pa)	-270	-510	-840	-1240	-1490	-1590	-1720	-1800	-1900	-2070	

(3)風荷重 $\pm 3,000$ Pa、積雪荷重600Pa  $\Rightarrow$  許容外

初期内圧(Pa)	100	200	300	400	500	600	700	800	900	1000	
長期に対する検定比	0.20	0.41	0.61	0.81	1.02	1.22	1.42	1.63	1.83	21.60	
短期(風)の検定比	正圧	1.74	1.76	1.78	1.80	1.83	1.85	1.88	1.91	1.94	1.98
	負圧	1.41	1.42	1.42	1.43	1.44	1.44	1.45	1.46	1.46	1.47
短期(雪)の検定比	0.60	0.62	0.67	0.77	0.87	0.98	1.08	1.19	1.30	1.35	
上膜の反転の有無	有	有	有	有	無	無	無	無	無	無	
内圧消失荷重(Pa)	-270	-510	-840	-1240	-1490	-1590	-1720	-1800	-1900	-2070	

付表1. 19 規模 3m×6m、フィルム厚300 $\mu$ mの必要内圧

■規模:3m×6m(ライズ・スパン比0.1)、フィルム厚300 $\mu$ m

\*初期内圧欄の赤文字が初期内圧の許容範囲を示す

(1)風荷重 $\pm 1,000$ Pa、積雪荷重600Pa  $\Rightarrow$  最適初期内圧500Pa

初期内圧(Pa)	100	200	300	400	500	600	700	800	900	1000	
長期に対する検定比	0.17	0.34	0.51	0.68	0.84	1.02	1.19	1.36	1.53	1.70	
短期(風)の検定比	正圧	0.60	0.61	0.62	0.64	0.69	0.75	0.81	0.87	0.94	0.99
	負圧	0.59	0.60	0.61	0.63	0.69	0.75	0.81	0.87	0.94	0.99
短期(雪)の検定比	0.51	0.52	0.56	0.64	0.73	0.82	0.91	0.99	1.09	1.18	
上膜の反転の有無	有	有	有	有	無	無	無	無	無	無	
内圧消失荷重(Pa)	-270	-500	-800	-1130	-1480	-1890	-1980	-2040	-2120	-2200	

(2)風荷重 $\pm 2,000$ Pa、積雪荷重600Pa  $\Rightarrow$  許容外

初期内圧(Pa)	100	200	300	400	500	600	700	800	900	1000	
長期に対する検定比	0.17	0.34	0.51	0.68	0.84	1.02	1.19	1.36	1.53	1.70	
短期(風)の検定比	正圧	1.04	1.04	1.05	1.06	1.07	1.07	1.08	1.10	1.11	1.13
	負圧	1.02	1.02	1.03	1.03	1.04	1.04	1.04	1.05	1.06	1.07
短期(雪)の検定比	0.51	0.52	0.56	0.64	0.73	0.82	0.91	0.99	1.09	1.18	
上膜の反転の有無	有	有	有	有	無	無	無	無	無	無	
内圧消失荷重(Pa)	-270	-500	-800	-1130	-1480	-1890	-1980	-2040	-2120	-2200	

(3)風荷重 $\pm 3,000$ Pa、積雪荷重600Pa  $\Rightarrow$  許容外

初期内圧(Pa)	100	200	300	400	500	600	700	800	900	1000	
長期に対する検定比	0.17	0.34	0.51	0.68	0.84	1.02	1.19	1.36	1.53	1.70	
短期(風)の検定比	正圧	1.35	1.36	1.37	1.38	1.40	1.41	1.42	1.43	1.45	1.46
	負圧	1.20	1.20	1.21	1.21	1.22	1.22	1.22	1.23	1.23	1.24
短期(雪)の検定比	0.51	0.52	0.56	0.64	0.73	0.82	0.91	0.99	1.09	1.18	
上膜の反転の有無	有	有	有	有	無	無	無	無	無	無	
内圧消失荷重(Pa)	-270	-500	-800	-1130	-1480	-1890	-1980	-2040	-2120	-2200	



## 参考文献

## 参考文献

### 【第1章】

- 1.1) R・N・デント著、佐々木幹夫、佐々木隆夫訳：空気膜構造の建築、鹿島出版会、1975.1
- 1.2) 石井一夫：空気膜構造－設計と応力、工業調査会、1977.7
- 1.3) 斎藤公男：空間・構造・物語－ストラクチャル・デザインのゆくえ－、彰国社、2003.10
- 1.4) 石井一夫編：日本の膜構造・作品集、SPS出版、1993.2.15
- 1.5) 石井一夫編：世界の膜構造デザイン、新建築社、1999.3.31
- 1.6) Annette W.Lecuyer,Ian Liddell：ETFE: Technology and Design、Birkhauser Boston、2008.9.3
- 1.7) 日本膜構造協会：ETFEフィルムパネル設計・施工指針(案)、2006.3
- 1.8) 建設省告示第1446号、2017.6.5
- 1.9) 建設省告示第1443号、2015.5.29
- 1.10) 国土交通省告示第 666号、2017.6.5
- 1.11) 国土交通省告示第 667号、2017.6.5
- 1.12) 国土交通省国土技術制作総合研究所、国立研究開発法人建築研究所：膜構造建築物・膜材料等の技術基準及び同解説2020年版、2020.1.31
- 1.13) 日本膜構造協会：膜構造用フィルム・ETFEに係る改正告示の説明会資料、2017.8.28
- 1.14) 丹野吉雄、岡田章、深尾康三、林田英俊、岩佐義輝、木原碩美: 大規模 空気膜構造の内圧制御下における実挙動に関する研究(その1) 東京ドームの内圧実験及び強風時の挙動について、日本建築学会大会学術講演梗概集、B分冊、構造I、pp.1203-1204、1989.7
- 1.15) 日本膜構造協会：膜構造形式「空気膜構造」  
<http://www.makukouzou.or.jp/introduction/introduction002/>、(参照 2020-04-02)

### 【第2章】

- 2.1) 日本膜構造協会：ETFEフィルムパネル設計・施工指針(案)、2006.3
- 2.2) TensiNet ETFE Working Group, DESIGN RECOMMENDATIONS FOR ETFE FOIL STRUCTURES、2013
- 2.3) 斎藤 公男、岡田 章、宮里 直也、水野 公義、赤岩 英和、川又 哲也：ETFEフィルムの張力膜構造への適用性に関する基礎的研究：ばねストラット式張力膜構造の有効性について、日本建築学会関東支部研究報告集、第78号、pp.317-320、2008.2
- 2.4) 赤岩 英和、岡田 章、宮里 直也、永井 佑季、梅原 智洋、福田 隆徳、斎藤 公男：ETFEフィルムを用いたホルン型張力膜構造のポンディング現象に関する基礎的研究：実験および数値解析モデルによる検討、日本建築学会関東支部研究報告集、第79号、pp.201-204、2009.3



- 2.5) 水野 公義、岡田 章、宮里 直也、中島 肇、永井 佑季、斎藤 公男：ETFEフィルムの張力膜構造への適用性に関する基礎的研究：ばねストラット式張力膜構造の有効性について、日本建築学会構造系論文集、第55B号、pp.79-84、2009.3
- 2.6) 川又 哲也、岡田 章、宮里 直也、永井 佑季、中島 肇、斎藤 公男：ETFEフィルムを用いたばねストラット式張力膜構造の応力弛緩に関する研究：安定ひずみの評価と応力-ひずみモデルの提案、日本建築学会構造系論文集、第56B号、pp.527-532、2010.3
- 2.7) 梅原 智洋、岡田 章、宮里 直也、永井 佑季、中島 肇、斎藤 公男：ETFEフィルムを用いたばねストラット式張力膜構造の構造挙動に関する研究：二軸の材料特性と応力弛緩を考慮した数値解析手法の提案と妥当性の検証、日本建築学会構造系論文集、第57B号、pp.177-183、2011.3
- 2.8) 吉橋 隼太、岡田 章、宮里 直也、廣石 秀造、宮内 隼、宮内 隼：ETFEフィルムのクリープ・リカバリー性状に関する基礎的研究、日本建築学会大会学術講演梗概集(中国)、構造 I、pp.743-744、2017.7
- 2.9) 正木佳代子、河端昌也、森山史朗：ETFE フィルムの機械的特性と構造挙動に関する基礎的研究、日本建築学会大会学術講演梗概集、B 分冊、構造 I、pp.941-942、2003.7
- 2.10) 河端昌也、森山史朗、薛学禎：ETFE フィルムを用いた四角形パネルの進行性ポンドイング、膜構造研究論文集、17号、pp.27-33、2003
- 2.11) 森山史朗、河端昌也、正木佳代子：ETFE フィルムの弾塑性挙動について、膜構造研究論文集 2003、No.17、pp.21-26、2004
- 2.12) 河端昌也、森山史朗：ETFE フィルムのひずみ速度依存性と構造的挙動について、膜構造研究論文集 2004、No.18、pp.41-46、2005
- 2.13) 河端昌也、森山史朗、會田裕昌：ETFE フィルムの粘弾性挙動について、膜構造研究論文集 2005、No.19、pp.1-8、2006
- 2.14) 丁乙碩、河端昌也：ETFE フィルムの粘塑性構成式—粘塑性定数の決定と1 軸引張の負荷過程に関する検討—、膜構造研究論文集 2009、No.23、pp.9-14、2010
- 2.15) 瀬川 信哉、吉野 達矢、小田 憲史：ETFEフィルムの弾塑性特性：その1:2軸引張特性、日本建築学会大会学術講演梗概集(近畿)、構造 I、pp.933-934、2005.07
- 2.16) 吉野 達矢、瀬川 信哉、小田 憲史：ETFEフィルムの弾塑性特性：その2:矩形平面フィルムの加圧試験とその数値シミュレーション、日本建築学会大会学術講演梗概集(近畿)、構造 I、pp.935-936、2005.07
- 2.17) 吉野達矢、加藤史郎：ETFE フィルムの粘性特性—2 軸張力場における非線形粘弾性構成方程式—、膜構造研究論文集 2015、No. 29、pp.13-20、2016
- 2.18) 建設省告示第1446号、2017.6.5
- 2.19) 日本膜構造協会：膜構造用フィルム・ETFEに係る改正告示の説明会資料、2017.8.28
- 2.20) Liu, Mu, & Wu：Cycle Loading and Creep Tests of ETFE Foil, 2008
- 2.21) Jan Winkler：Visualization of a semi-crystalline microstructure, 2009
- 2.22) Jan Winkler：Creep Behavior of ETFE Foils in Structural Engineering, 2009
- 2.23) AGC：アフレックス 高機能フッ素樹脂フィルム Fluon ETFE FILM カタログ

- 2.24) 有賀広志：膜構造用ETFEフィルムの展開、旭硝子研究報告 65, 2015
- 2.25) 丹野吉雄，岡田章，深尾康三，林田英俊，岩佐義輝，木原碩美: 大規模 空気膜構造の内圧制御下における実挙動に関する研究 (その1) 東京ドームの内圧実験及び強風時の挙動について，日本建築学会大会学術講演梗概集，B 分冊，構造 I，pp.1203-1204, 1989.7
- 2.26) 小野晋，永井佑季，神崎聡美，宮里直也，岡田章，斎藤公男: レンズ型二重空気膜構造の強風時の構造挙動について -動的応答解析手法の提案と風応答に基づく強風時の内圧設定-, 構造工学論文集, Vol.56B, pp.521-526, 2010.3
- 2.27) 榎紀佳，岡田章，宮里直也，城一祐樹，廣石秀造，斎藤公男: レンズ型空気膜構造の内圧制御手法に関する基礎的研究 (その2) 強風時の動的挙動に基づく最適内圧設定手法，日本建築学会大会学術講演梗概集，構造 I，pp.1061-1062, 2013.7
- 2.28) 中井政義，藤井英二，鈴木庸介 :ETFE フィルムを用いた密閉型小規模空気膜に関する研究，膜構造研究論文集, 2006
- 2.29) Koch, Klaus-Michael ; Membrane Structures, 2004
- 2.30) 喜多村 淳 : ETFEフィルム膜構造の設計法に関する考察 テンションタイプとクッションタイプ、日本建築学会大会学術講演梗概集，構造 I，pp.735-736, 2017.7

### 【第3章】

- 3.1) 日本膜構造協会：ETFEフィルムパネル設計・施工指針(案)、2006.3
- 3.2) TensiNet ETFE Working Group, DESIGN RECOMMENDATIONS FOR ETFE FOIL STRUCTURES, 2013
- 3.3) 吉野 誠一、与那嶺 仁志、岡田 章、宮里 直也、廣石 秀造、篠塚 皓太、宮内 隼: レンズ型二重空気膜構造の強風時の応答性状の把握と内圧設定手法の提案、日本建築学会構造系論文集、第742号、pp.1905-1913、2017.12
- 3.4) 日本膜構造協会：膜構造用フィルム・ETFEに係る改正告示の説明会資料、2017.8.28

### 【第4章】

- 4.1) 赤岩 英和、岡田 章、宮里 直也、永井 佑季、梅原 智洋、福田 隆徳、斎藤 公男：ETFEフィルムを用いたホルン型張力膜構造のポンディング現象に関する基礎的研究：実験および数値解析モデルによる検討、日本建築学会関東支部研究報告集、第79号、pp.201-204、2009.3
- 4.2) 河端昌也，森山史朗，薛学禎: ETEF フィルムを用いた四角形パネルの進行性ポンディング，膜構造研究論文集 ,17号, pp.27-33, 2003
- 4.3) W.Szyszkowski, P.G.Glockner : Finite Deformation and stability behavior of spherical inflatables subjected to axi-symmetric hydrostatic loading, International Journal of Solids and Structures, Volume 20, pp1021-1036, 1984
- 4.4) 日本膜構造協会：ETFEフィルムパネル設計・施工指針(案)、2006.3

4.5) 国土交通省告示第 666号, 2017.6.5

4.6) 国土交通省国土技術制作総合研究所、国立研究開発法人建築研究所：膜構造建築物・膜材料等の技術基準及び同解説2020年版、2020.1.31

### 【第5章】

5.1) 丹野吉雄，岡田章，深尾康三，林田英俊，岩佐義輝，木原碩美: 大規模 空気膜構造の内圧制御下における実挙動に関する研究（その1）東京ドームの内圧実験及び強風時の挙動について，日本建築学会大会学術講演梗概集，B 分冊，構造 I，pp.1203-1204，1989.7

5.2) 国土交通省告示第 666号, 2017.6.5

5.3) 国土交通省国土技術制作総合研究所、国立研究開発法人建築研究所：膜構造建築物・膜材料等の技術基準及び同解説2020年版、2020.1.31

### 【第6章】

6.1) AGC：アフレックス 高機能フッ素樹脂フィルム Fluon ETFE FILM カタログ

6.2) 国土交通省告示第 666号, 2017.6.5

6.3) 国土交通省国土技術制作総合研究所、国立研究開発法人建築研究所：膜構造建築物・膜材料等の技術基準及び同解説2020年版、2020.1.31

6.4) 日本建築センター：2015年版 建築物の構造関係技術基準解説書、2015

6.5) 日本建築学会: 建築物荷重指針・同解説, 2015

6.6) 日本建築学会: 雪と建築, 2010

6.7) 日本建築学会: 期限付き建築物設計指針, 2013



## 研究業績

- |           |        |
|-----------|--------|
| 1. 審査付き論文 | 計 6 篇  |
| 2. 口答論文   | 計 15 篇 |
| 3. 著書     | 計 3 篇  |
|           | 計 24 篇 |

## 【1. 審査付論文】 計 6 篇

- (1) Yonamine H :  
HOTO FUDO – HOLISTIC DESIGN OF A SANDWICH RC SHELL STRUCTURE –  
Structural Engineers World Congress 2011.4 (Italy)
- (2) Yonamine H, Okada A, Miyasato N, Hiroishi S, Goto K, Miyauchi J :  
Study on Basic Mechanical Properties of ETFE Sealed Air Cushion – Study of the Behavior  
under Partial Distributed Snow Load and Progressive Ponding–  
International Association for Shell and Spatial Structures (IASS) 2017.9 (Germany)
- (3) 吉野 誠一、与那嶺 仁志、岡田 章、宮里 直也、廣石 秀造、篠塚 皓太、宮内 隼：  
レンズ型二重空気膜構造の強風時の応答性状の把握と内圧設定手法の提案  
日本建築学会構造系論文集、第 742 号、pp.1905-1913、2017.12
- (4) Yonamine H, Okada A, Miyasato N, Hiroishi S, Nakamura S :  
Study on Basic Mechanical Properties of ETFE Sealed Air Cushion – Understand of Behavior  
under Excessive Negative Pressure and Cyclic Loading –  
International Association for Shell and Spatial Structures (IASS) 2018.7 (USA)
- (5) 与那嶺 仁志、岡田 章、宮里 直也、廣石 秀造、宮内 隼：  
材料非線形性を考慮した積雪偏荷重時における挙動と進行性ボンディングに関する検討 –  
ETFE フィルムを用いた密閉型レンズ状二重空気膜構造の基本的力学性状に関する研究 –  
日本建築学会構造系論文集、第 756 号、pp.217-225、2019.2
- (6) 与那嶺 仁志、岡田 章、宮里 直也、廣石 秀造、中村 咲瑛子：  
材料非線形性を考慮した過大な負圧荷重時と繰り返し荷重時の挙動の把握 –ETFE フィル  
ムを用いた密閉型レンズ状二重空気膜構造の基本的力学性状に関する研究 –  
日本建築学会構造系論文集、第 766 号、pp.1557-1565、2019.12

## 【2. 口頭発表論文】 計 15 篇

- (1) 与那嶺 仁志、後藤 一真、松本 仁、保坂 猛  
ほうとう不動（構造・構法(3),建築デザイン）  
日本建築学会大会建築デザイン発表梗概集(北陸)、G-1、pp.312-313、2010.7
- (2) 宮内 隼、岡田 章、宮里 直也、廣石 秀造、与那嶺 仁志、内田啓太、中村 咲瑛子  
レンズ型二重空気膜構造の偏分布荷重時の基本的力学性状に関する研究  
日本大学理工学部 学術講演会論文集、構造・強度、2016.12
- (3) 内田啓太、岡田 章、宮里 直也、廣石 秀造、与那嶺 仁志、宮内 隼  
ETFE フィルムのクリープ・リカバリー性状に関する基礎的研究  
日本大学理工学部 学術講演会論文集、構造・強度、2016.12
- (4) 中村 咲瑛子、岡田 章、宮里 直也、廣石 秀造、与那嶺 仁志、宮内 隼  
ETFEを使用したレンズ型二重空気膜構造の基本的力学性状に関する研究－負圧荷重下における膜張力消失時と繰り返し荷重時の挙動の把握－  
日本大学理工学部 学術講演会論文集、構造・強度、2016.12
- (5) 宮内 隼、岡田 章、宮里 直也、廣石 秀造、与那嶺 仁志  
ETFE フィルムを用いたレンズ状密閉型二重空気膜構造の基本的力学性状に関する研究－積雪偏荷重時における挙動と進行性ボンディングに関する検討－  
日本建築学会関東支部研究報告集、第 87 号、pp.517-520、2017.2
- (6) 瀧澤 峰義、岡田 章、宮里 直也、廣石 秀造、与那嶺 仁志、宮内 隼  
ETFE フィルムを用いた密閉型レンズ状二重空気膜構造の基本的力学性状に関する研究  
(その 1) 全面載荷時及び半面載荷時の挙動の把握  
日本建築学会大会学術講演梗概集(中国)、構造 I、pp.723-724、2017.7
- (7) 中村 咲瑛子、岡田 章、宮里 直也、廣石 秀造、与那嶺 仁志、宮内 隼  
ETFE フィルムを用いたレンズ状密閉型二重空気膜構造の基本的力学性状に関する研究  
(その 2) 負圧荷重下における膜張力消失時と繰り返し荷重時の挙動の把握  
日本建築学会大会学術講演梗概集(中国)、構造 I、pp.725-726、2017.7
- (8) 鴛海 昂、岡田 章、宮里 直也、廣石 秀造、与那嶺 仁志、宮内 隼  
ETFE フィルムを用いた密閉型レンズ状二重空気膜構造の基本的力学性状に関する研究  
(その 3)アスペクト比及び載荷範囲の違いに関する検討  
日本建築学会大会学術講演梗概集(中国)、構造 I、pp.727-728、2017.7
- (9) 宮内 隼、岡田 章、宮里 直也、廣石 秀造、与那嶺 仁志  
ETFE フィルムを用いたレンズ状密閉型二重空気膜構造の基本的力学性状に関する研究  
(その 4) 積雪偏荷重時における挙動と進行性ボンディングに関する検討  
日本建築学会大会学術講演梗概集(中国)、構造 I、pp.729-730、2017.7
- (10) 中村 咲瑛子、岡田 章、宮里 直也、廣石 秀造、与那嶺 仁志

ETFE フィルムを用いた密閉型レンズ状二重空気膜構造の基本的力学性状に関する研究 - 過大な負圧荷重時と繰り返し荷重時の挙動の把握 -

日本大学理工学部 学術講演会論文集、構造・強度、2017.12

- (11) 中村 咲瑛子、岡田 章、宮里 直也、廣石 秀造、与那嶺 仁志

ETFE フィルムを用いた密閉型レンズ状二重空気膜構造の基本的力学性状に関する研究 - 過大な負圧荷重時と繰り返し荷重時の挙動の把握 -

日本建築学会関東支部研究報告集、第 88 号、pp.505-508、2018.3

- (12) 瀧澤 峰義、岡田 章、宮里 直也、廣石 秀造、与那嶺 仁志、中村 咲瑛子

ETFE フィルムを用いたレンズ状密閉型二重空気膜構造の基本的力学性状に関する研究 (その 1)負圧載荷時の挙動の把握及び内圧 0Pa 時における膜のばたつきに関する検討

日本建築学会大会学術講演梗概集(東北)、構造 I、pp.1099-1100、2018.7

- (13) 進藤 隆太、岡田 章、宮里 直也、廣石 秀造、与那嶺 仁志、中村 咲瑛子

ETFE フィルムを用いたレンズ状密閉型二重空気膜構造の基本的力学性状に関する研究 (その 2)張力消失時及び繰り返し荷重時の挙動の把握

日本建築学会大会学術講演梗概集(東北)、構造 I、pp.1101-1102、2018.7

- (14) 中村 咲瑛子、岡田 章、宮里 直也、廣石 秀造、与那嶺 仁志

ETFE フィルムを用いた密閉型レンズ状二重空気膜構造の基本的力学性状に関する研究 (その 3)初期内圧、アスペクト比、パネル規模及び膜厚が及ぼす影響に関する検討

日本建築学会大会学術講演梗概集(東北)、構造 I、pp.1103-1104、2018.7

- (15) 進藤隆太、岡田 章、宮里 直也、廣石 秀造、与那嶺 仁志

ETFE フィルムを用いたレンズ状二重空気膜構造の基本的力学性状に関する研究 -密閉型と定圧型の比較-

日本大学理工学部 学術講演会論文集、構造・強度、2019.12



### 【3. 著書】 計3篇

- (1) 棚橋修、与那嶺仁志 他 21 名:

Arup Japan 建築のトータル・ソリューションをめざして  
誠文堂新光社、2009.4

- (2) 金田勝徳、与那嶺仁志 他 8 名:

構造デザインの歩み -構造設計者が目指す建築の未来-  
建築技術、2010.9

- (3) 新宮清志、与那嶺仁志 他 30 名:

建築形態と力学的特性  
日本建築学会、2014.3