

博士論文

ETFE フィルムを用いた張力膜構造の粘塑性挙動と
延伸成形に関する研究

A Study on Visco-Plastic Behavior and Stretch Fabrication
of Tensile Membrane Structures Using ETFE Film

国立大学法人 横浜国立大学大学院
工学府

丁 乙碩
Eul-Seok Jeong

2013 年 6 月



論文要旨

本論文は、ETFE(エチレン-テトラフルオロエチレン共重合体の略語)フィルムを用いた張力膜構造の粘塑性挙動と延伸成形に関する研究についてまとめたものである。

本研究では、テンション方式フィルム膜構造を対象として、フィルム膜構造の耐力を高める方法として、フィルムを塑性域まで延伸することを提案し、張力膜構造における延伸成形の有効性について実験及び解析的検討を通じて明らかにしている。

本研究論文は、以下のように第1章から第6章までの合計6つの章で構成している。

第1章の「序論」では、本研究を行うに至った背景とその目的を明確にし、さらに本論文の構成についてまとめている。

第2章の「ETFE フィルムの粘塑性構成式」では、フィルムの粘塑性挙動を把握するために、粘塑性構成式を適用し、その妥当性を確認している。まず、フィルムのひずみ速度依存性が再現できるように粘塑性構成式内の材料定数をひずみ速度に応じた近似式で表し、フィルムの1軸及び2軸引張時における解析と実験結果の比較検討を行っている。また、フィルムの第1降伏点を越えた後のひずみ軟化現象を解明するために、アニーリング処理を施したフィルムの1軸引張実験を行い、フィルムの構造挙動について検討している。さらに、粘塑性構成式によるフィルムのカーブフィッティングを行うことで、フィルムへの適用可能性を確認している。

第3章の「ETFE フィルムの延伸効果」では、フィルム膜構造の耐力を高めるための方法として、パネル取付け時にフィルムを塑性域まで延伸することを提案し、その有効性を検討している。まず、延伸成形実験を通じて張力膜構造への適用可能性及びフィルム膜構造の高耐力化が可能なことを確認している。また、実験を模擬した解析的検討を行い、粘性挙動を考慮した弾塑性解析の有効性を検討している。なお、実験施設に対して経年後の張力測定を行い、張力膜構造におけるリラクゼーションによる粘塑性挙動について検討を行っている。

第4章の「ETFE フィルムの応力集中」では、テンション方式フィルム膜構造における外周引込みによるフィルムの応力集中問題について検討している。まず、フィルムを対象として引張実験を行い、切欠き形状による応力集中と亀裂発生との関係を検討している。さらに、実験モデルを対象として1軸引張実験を模擬したFEM解析を行い、クラックやノッチ先端部における応力集中や亀裂発生時の応力分布について把握している。

第5章の「ETFE フィルムを用いた立体形状の延伸成形」では、テンション方式フィルム膜構造の技術的確立を目的として、様々な形状のモデルを対象として延伸成形の適用可能性を確認し、実証実験を通じて実際構造物への実現可能性を把握している。まず、スタディーモデルの試作を通じて、色々な形状のテンション方式に対する延伸成形の適用可能性を確認している。また、実証実験を通じてアーチを用いた延伸成形方法の有効性及び延伸成形後のフィルムの粘性挙動について検討している。さらに、粘性挙動を考慮した弾塑性解析を行い、実験結果との比較検討を通じて解析結果の妥当性を検討するとともに、延伸成形後のフィルムの力学的挙動についても検討を行っている。

第6章の「結論」は、各章で得られた結果と研究成果についてまとめている。

ABSTRACT

A Study on the Visco-Plastic Behavior and Stretch Fabrication of Tensile Membrane Structures Using ETFE Film

Eul-Seok Jeong

This thesis is a summary of study on the visco-plastic behavior and stretch-fabrication of tensile membrane structures using the ETFE(Ethylene/TetraFluoroEthylene) film.

In this study, a method of stretching the ETFE film to its plastic region is proposed in order to increase the yield strength of film membrane structures on tension type. And the effectiveness of stretch-fabrication on such structures is demonstrated by means of experimental and analytical investigations.

This thesis comprises six chapters, as described below.

Chapter 1, "Introduction", describes the background and purpose of this study, and summarizes the structure of the overall thesis.

Chapter 2, "Visco-plastic Constitutive Equation for ETFE Film", describes the use of the visco-plastic constitutive equation to clarify the visco-plastic behavior of the film, and confirms the validity of this approach. First, the material constants are approximated in the visco-plastic constitutive equation based on the strain rate, so that the strain rate dependence of the film could be reproduced. Then, an analysis on uniaxial and biaxial tensile behavior of the film is performed and its results are compared to those of experiments. Also, the uniaxial tensile test on an annealed film is conducted in order to clarify the strain softening phenomenon after the first yield point has been exceeded, and the structural behavior of the film is investigated. Additionally, to verify the possibility of application to the film, the curve fitting of the film is carried out by using the visco-plastic constitutive equation.

Chapter 3, "Stretching Effect of ETFE Film", proposes stretching the film to its plastic region during panel installation as a method of increasing the yield strength of the film membrane structure, and confirms the effectiveness of this approach. First, to investigate the possibility of application on tensile membrane structures, a stretch-fabrication test is carried out, and it is verified that it is possible to increase the yield strength of the film membrane structures. An analytic investigation is also carried out by simulating the experiment, and the effectiveness of the elasto-plastic analysis considering the viscous behavior of the film is investigated. In addition, post-aging tension measurement is conducted at the experimental facilities, and the visco-plastic behavior resulting from relaxation is investigated with respect to tensile membrane structures.

Chapter 4, “Stress Concentration in ETFE Film”, describes the stress concentration of ETFE film caused by stretching the boundary in tensile film membrane structures. First, the uniaxial tensile test is conducted by a shape and a size of notch on the film, and the relationship between the stress concentration and crack propagation is examined by changing a shape of notch. Additionally, FEM analysis on the experimental model is carried out, in order to identify the stress concentration and the stress distribution at cracks and notch tips when crack tip yielding is occurred.

Chapter 5, “Stretch-fabrication of Three-Dimensional Shapes Using ETFE Film”, confirms the possibility of applying stretch-fabrication on models with various shapes to allow technological establishment of such tensile film membrane structures, and shows through validation tests that this approach can be applied to actual structures. First, the applicability of stretch-fabrication is confirmed by introducing tension for study models with various shapes. Also, through validation tests, the effectiveness of the stretch-fabrication method using an arch and the viscous behavior of the film after stretch-fabrication is investigated. Additionally, the elasto-plastic analysis is carried out by considering the viscous behavior of film, and the validity of the analysis results is examined by comparing to experimental results. After stretch-fabrication, the mechanical behavior of the film is also investigated.

Chapter 6, “Conclusion”, summarizes results obtained by experiments and analysis described in each chapter, together with outcomes of this study.

目 次

第 1 章 序論

1. 1 研究背景	2
1. 1. 1 ETFE フィルムの特性	2
1. 1. 2 ETFE フィルムの適用事例及び構造形式	3
1. 1. 3 フィルム膜構造の設計法及び延伸成形	5
1. 1. 4 既往の研究	7
1. 1. 5 本研究の新規性	8
1. 2 研究目的	11
1. 3 本論文の構成	12

第 2 章 ETFE フィルムの粘塑性構成式

2. 1 はじめに	16
2. 2 粘塑性構成式	17
2. 2. 1 1 軸引張状態に対する展開	18
2. 2. 2 2 軸引張状態に対する展開	19
2. 3 アニーリング処理無の場合における検討	20
2. 3. 1 粘塑性定数の決定	20
2. 3. 2 1 軸引張の検討	26
2. 3. 3 2 軸引張の検討	31
2. 4 アニーリング処理有の場合における検討	33
2. 4. 1 アニーリング処理の概要	33
2. 4. 2 アニーリング処理による応力-ひずみ関係	35
2. 4. 3 粘塑性定数の決定	42
2. 4. 4 1 軸引張の検討	45
2. 4. 5 2 軸引張の検討	49
2. 5 まとめ	50

第 3 章 ETFE フィルムの延伸効果

3. 1 はじめに	52
3. 2 延伸効果の実験的検討	53
3. 2. 1 実験概要	53
3. 2. 2 実験結果	57

3.3	延伸成形実験の解析的検討	61
3.3.1	解析概要	61
3.3.2	解析結果	62
3.4	テンション方式フィルム膜構造の張力変化	68
3.4.1	モックアップ実験の概要	68
3.4.2	時間経過による張力変化	69
3.4.3	実験施設の概要	70
3.4.4	時間経過による張力変化	71
3.5	まとめ	73
第4章 ETFE フィルムの応力集中		
4.1	はじめに	76
4.2	切欠き形状と応力集中に関する実験的検討	78
4.2.1	実験概要	78
4.2.2	実験結果及び比較検討	79
4.2.3	亀裂発生時のひずみと真応力の検討	83
4.3	切欠き形状による応力集中の解析的検討	85
4.3.1	解析概要	85
4.3.2	解析結果	86
4.3.3	切欠き形状と応力集中係数	89
4.3.4	亀裂発生時の応力分布	89
4.4	まとめ	93
第5章 ETFE フィルムを用いた立体形状の延伸成形		
5.1	はじめに	96
5.2	ケーススタディー	97
5.2.1	スタディーモデル及び概要	97
5.2.2	スタディーモデルの形状探索及び裁断図	100
5.2.3	スタディーモデルの試作と考察	103
5.3	実証実験	107
5.3.1	実験概要	107
5.3.2	解析的検討	107
5.3.3	実験的検討	116
5.3.4	解析と実験の比較	121

5.4 実大規模パネルの適用性検討	128
5.5 まとめ	135
第6章 結論	
6.1 結論	138
6.2 テンション方式フィルム膜構造の設計への適用	140
参考文献	144
発表関係論文	150
謝辞	151

第 1 章

序論

第1章 序論

1.1 研究背景

1.1.1 ETFE フィルムの特性

膜構造は膜のような引張強度が高い材料を用い、膜面の釣合関係から屋根や外壁が効率的に実現できる張力構造システムの1つであり、中・小規模のスポーツ、レジャー施設を始め、スタジアムのような大空間構造物に至るまで幅広い用途に採用されている構造である。膜構造に対する研究は十数年から始まって、特に PTFE(PTFE と呼ばれるフッ素樹脂をコーティングした織布の略語)膜材料に対する研究は多くの研究者らによるさまざまな研究報告が存在し、実際構造物としても多く建設されてきた。最近では ETFE(エチレン-テトラフルオロエチレン共重合体の略語)という新しい膜材料が建築分野で注目され、大スパン建築の屋根や外壁に ETFE フィルムを用いた事例が増えている。

ETFE フィルムは、耐候性に優れるフッ素樹脂のなかでも引張や引裂き、衝撃などの諸外力に対して強度と靱性のバランスの取れた材料である。フィルムの強度は表 1.1 のように織布で補強された膜材料に及ぶべくもないが、空気圧を用いてクッション状にすれば発生応力を抑えつつ塑性領域の延性も活用できるため、エデン・プロジェクトや北京五輪の国家水泳中心のような大型パネル化が可能である。また透明から遮蔽まで光線透過率を幅広く調整可能で、紫外線や熱線など特定波長域の光線を選択的に遮蔽することやフィルム表面への印刷等の機能性付与にも優れている。その他、複層化による断熱性確保の容易さ、マテリアルリサイクル性など多くの長を有しており^{1,1)}、今後も普及が期待される膜材料である。

表 1.1 膜材料の例^{1,2)}

	PTFE 膜	PVC 膜	ETFE フィルム
基布(織布補強)	ガラス繊維	ポリエステル樹脂	なし
コーティング材	PTFE(フッ素樹脂)	PVC(塩化ビニル樹脂)	ETFE(フッ素樹脂)
等方性/異方性	強い異方性	ほぼ等方性	ほぼ等方性
特長	高強度、不燃性 耐候性、防汚性	高強度、防炎性 柔軟性、経済性	透明性、防炎性、展延性 耐候性、防汚性
厚さ	0.6 ～ 1.0mm	0.6 ～ 1.0mm	0.05 ～ 0.25mm
引張強さ	100 ～ 150 kN/m	20 ～ 130 kN/m	3.5 ～ 20 kN/m (70 ～ 80 MPa)
引張剛性	1000 ～ 2000 kN/m	200 ～ 1000 kN/m	10 ～ 200 kN/m (初期 800、割線 200MPa)

1.1.2 ETFE フィルムの適用事例及び構造形式

ヨーロッパでは1980年代からETFEフィルムの研究が始まって今まで多くの構造物に適用され、イギリスのEden Projectを始め、ドイツのAWD Arena、Center for Gerontology、Allianz Arenaなどの多様な用途の建築物に使用されている[図1.1]。



(a) Eden Project(クッション方式、イギリス、2001)

(b) AWD Arena(テンション方式、ドイツ、2005)



(c) Center for Gerontology(テンション方式、ドイツ、2003)

(d) Allianz Arena(クッション方式、ドイツ、2006)

図 1.1 フィルムの適用事例(海外)^{1.3-1.5)}

一方、日本国内では1970年万国博覧会のお祭り広場の屋根に初めて透明フィルム(PETフィルム)が紹介されたが、ETFEフィルムを用いた最初の事例としてはネットワークリゾートなんせいセンターハウスが存在している[図1.2(a)]。その後、建築物への適用事例は海外に比べ少なく、2000年以後、本格的に研究が進行されている状況である。



(a) なんせいセンターハウス(クッション方式、三重県、1994)



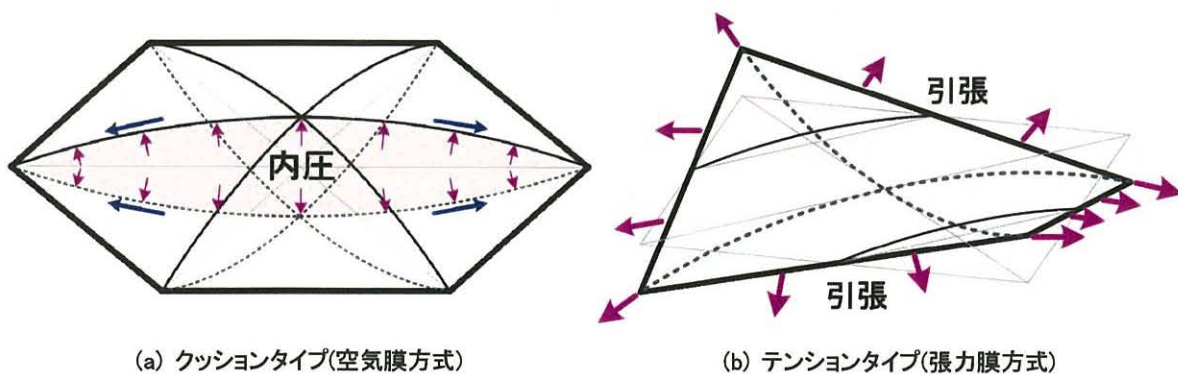
(b) 建築学棟屋上シェルター(テンション方式、横国大、2009)



(c) ユニクロ心齋橋店(クッション方式、大阪市、2010)

図 1.2 フィルムの適用事例(日本国内)^{1,4)}

ETFE フィルムを用いた構造形式には、前節の適用事例のようにクッションタイプ(空気膜方式)とテンションタイプ(張力膜方式)の2種類が最も効率的な方法として知られている。クッションタイプは複層化したフィルムを内圧でレンズ状に膨らませるもので[図 1.3(a)]、テンションタイプは境界部から引張って膜張力を導入するものである[図 1.3(b)]。



(a) クッションタイプ(空気膜方式)

(b) テンションタイプ(張力膜方式)

図 1.3 フィルムを用いた構造形式

図 1.4 には 1980 年代から 2011 年までの ETFE フィルムを用いた適用事例を構造形式を基準に表したものであるが、今までの施工された事例を見ると、クッションタイプの事例がほとん

どである。その理由として、膜面の曲率を大きくしやすいクッションタイプの方が、風や雪などの付加荷重時の応力を低く抑えることができ、ライズ増加でクリープひずみを吸収しやすいことが挙げられる。

一方、テンション方式は内圧の維持装置の不要と力の流れにより形成される自然な曲面といった長所を持っている方式として、最近その事例が増え続けているのが現状である。

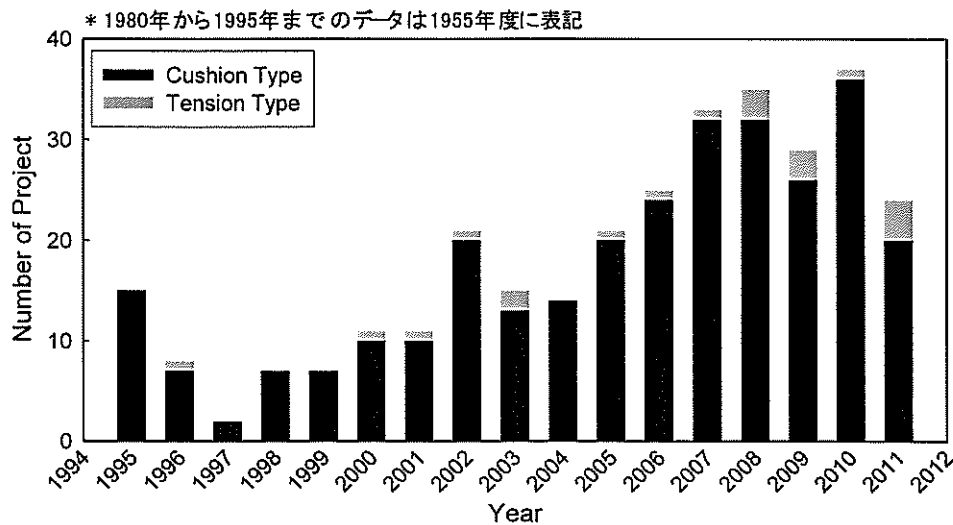


図 1.4 フィルムを用いた事例件数^{1.3-1.5)}

1.1.3 フィルム膜構造の設計法及び延伸成形

フィルムの1軸及び2軸引張時における応力-ひずみ関係を図1.5に示す。フィルム膜構造の設計法には、図の中で許容応力を第1降伏点までとする弾性設計と、フィルムの延性を考慮した塑性設計の2通りが考えられる。小規模なパネルを想定した「ETFEフィルムパネル設計・施工指針案^{1.6)}」は前者の考え方を採用したもので、第1降伏点を許容応力としている。一方、ドーム・スタジアム等に使用される大型フィルムクッションは実質的に後者の考え方によるものもあり、第2降伏点の16%ひずみに対応する荷重を許容耐力としていると言われていたが、先行事例の多い海外でも明確な設計手法が示されていないため、塑性範囲における許容可能な応力レベルや変形状態の明確化が望まれる。

また、フィルムは弾性範囲での許容耐力が低いという問題を持っているが、既存の膜材料に比べ、顕著な伸び能力を持っているため、その長所を活かして塑性域まで延伸することも考えられる。フィルムの延伸によって、二つの効果が期待される。まず、巨視的な観点から見ると、延伸により弾性的な安定した応力-ひずみ関係の範囲を拡張することができる。すなわち、塑性域でのひずみ硬化により降伏点が高くなり、耐力を高めることが可能になる。次に、微視的な観点から考えると、延伸により、フィルムの結晶化が進行し、材料性質が変化する。この結晶化はクリープコンプライアンス、クリープ速度及び応力緩和速度を低め、応力緩和弾性率を

高くする効果があるため、フィルムのクリープまたは応力緩和を抑制することができる^{1.7)}。

また、フィルムの延伸による高耐力化(加工硬化)は他の製造分野では一般的に行われており、包装用ラップやPETフィルムはその代表例である。図1.6は1軸引張時のETFEフィルムの工学ひずみと耐力比(A)、厚さ比(B)、およびこれらの積(C)を示している。耐力比は加工硬化後の応力を第1降伏点の応力で除したものである。厚さ比は体積一定(ポアソン比0.5)と仮定して求めた1軸引張時の厚さを初期厚さで除したものである。ひずみ300~400%の範囲は耐力が大きく上昇するため延伸効果が高いが、厚さ減少や引裂強度、耐衝撃性、耐磨耗性の低下を伴うため建築用途には適用しにくい。以上を考慮すると、1軸延伸では単位幅あたりの耐力(C)が極値となる10~20%が効率的といえる。

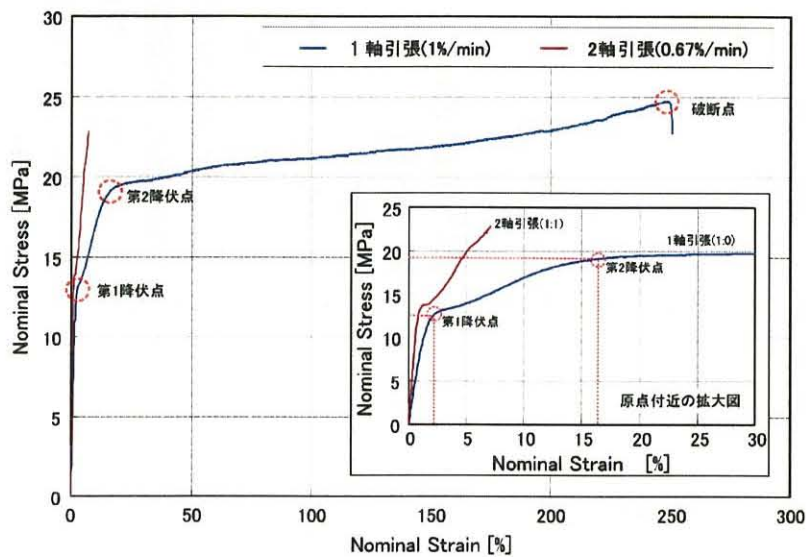


図 1.5 フィルムの1軸及び2軸引張時の応力-ひずみ関係

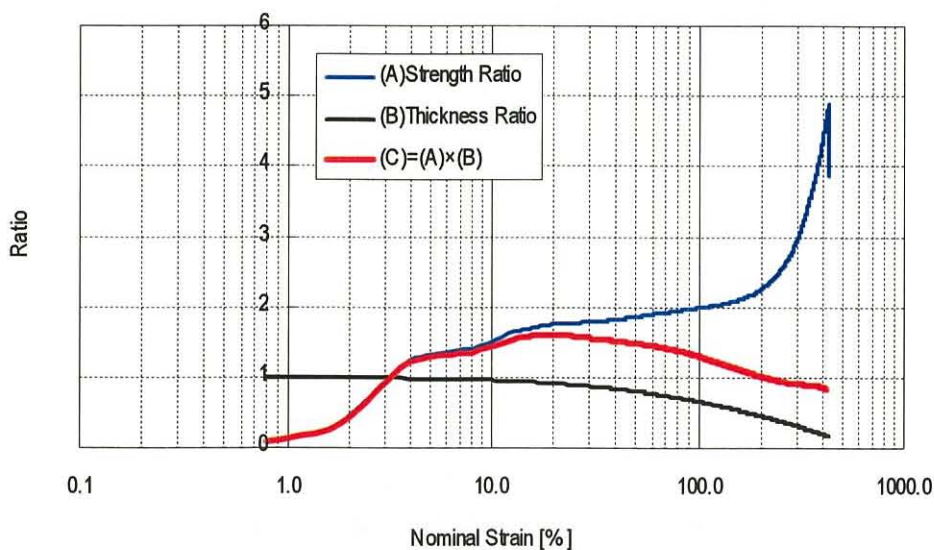


図 1.6 1軸延伸時のひずみと耐力比、厚さの関係

また、フィルムの延伸はパネル取付け時に行うことも可能であると考えられる。特に単純形状のパネルであれば、平面裁断でも取付け時の延伸やクッションの加圧延伸による曲面成形が可能で、低ライズで高耐力のパネルや、高ライズでも溶着線が少なく滑らかな曲面を製作することも可能である。

しかし、このような取付け時の延伸成形の実例はほとんどないのが現状である。その理由として、エアクッションは取付け時の初期張力導入を必要としないこと、延伸による局部的な変形と残留ひずみの懸念があること、2%以上のひずみ領域では複雑な粘塑性挙動を示し、精度良く評価する解析手法が未確立であることが挙げられる。

1.1.4 既往の研究

フィルムを用いた膜構造は1980年代から研究が始まって多様な建築物への適用事例が報告されており、現在、実験及び解析的検討を通じた様々な研究が進行されている状況である。従って、本節では、ETFEフィルム膜構造における既往の研究を概観して、これまでの研究報告を整理するとともにフィルム膜構造に関する研究動向を把握し、未解決または未検討となっている課題の調査を行う。

フィルム膜構造に関する最初の研究報告としては、1994年にSchwitter^{1.8)}が国際シンポジウムで始めてフィルムに関する発表を行い、弾性定数や降伏応力などの基本物性を考慮した空気膜方式の設計法について紹介した研究例が存在しており、日本国内では榎原ら^{1.9)}がETFEフィルムを使用した空気膜方式の屋根の設計及び施工について報告した研究例が存在している。その後、フィルムの材料的特性やフィルム膜構造の構造的挙動に対する様々な研究が進行され、斉藤ら^{1.10-1.13)}は空気膜方式の定圧型及び密閉型の構造特性や適用性に関する基礎的研究を行っており、中井ら^{1.14-1.15)}は密閉型の解析手法を検討し、密閉することの有用性を示すと同時に、そのユニットが連結したときの振動特性について検討を行っている。また、森山ら^{1.16)}は、フィルムの降伏挙動にミーゼスの降伏条件が適用可能なことを示しており、吉野ら^{1.17)}は加工硬化を考慮した弾塑性解析によりフィルムの1軸・2軸引張特性を表し、フィルムの加圧実験によりその有効性を検証した。また、河端ら^{1.18)}はフィルムの粘性が材料の伸長特性に及ぼす影響に関する実験を行い、降伏応力および降伏後の挙動にひずみ速度依存性があることを示すかつ、フィルムの弾塑性解析では、ひずみ速度に応じた材料パラメータの変更が必要になることを明らかにした。また、森山ら^{1.19)}はクリープ実験により、フィルムの粘性挙動に応力依存性があることを明らかにし、一般化Maxwellモデルを用いた非線形粘弾性解析法^{1.20)}を提案した。これにより降伏応力のひずみ速度依存性およびクリープの応力依存性の考慮が可能となったが、大ひずみ領域への適用性に課題を残していた。

次に、フィルムを用いたテンション方式に関する既往の研究として、中島ら^{1.21), 1.22)}はETFEフィルムのクリープ、リラクゼーションのような粘性挙動を考慮した応力弛緩に関する実験を行い、その実験結果より安定ひずみを評価した。そして、安定ひずみを考慮した解析的検討を行い、その有効性について確認している。ただし、実験及び解析の検討範囲は第1降伏点を超

えない弾性範囲としている。

また、フィルムの延伸成形に関する既往の研究として、森山ら^{1.23), 1.24)}はクッション方式フィルム膜構造を対象として加熱加圧延伸による立体成形実験を行い、その有効性について検討した。なお、加圧による2軸延伸を容易に行うことが可能であり、クッション方式においての有効性について検討を行ったが、テンション方式に対する延伸成形の有効性検討が課題として残されている。

最後に、フィルムの延伸による塑性域での材料挙動を精度よく表現するには、フィルムの粘性挙動が記述可能な粘塑性モデルによる非弾性構成則が必要になるが、これに関する既往の研究として、佐野村ら^{1.25), 1.26)}は高分子材料の非弾性モデルを提案し、エポキシやポリエステル樹脂に適用した研究例が存在している。しかし、ETFE フィルムを対象とした粘塑性モデルの有効性検討に関する研究例は未だに報告されてない。

1.1.5 本研究の新規性

以上の内容を踏まえて、本節ではテンション方式フィルム膜構造を対象として延伸成形を提案するにあたって、従来の設計・施工方式と課題、そして本研究での方式と特徴を比較することで、本研究の新規性及び要求される研究内容について述べる。

まず、図 1.7 のような同一サイズのフレームに対してテンション方式の適用を考えると、従来の設計方式では、工場にてフィルムの立体裁断を施し、各裁断パツを結合する溶着加工を行う。そして現場施工時に張力導入しながらフレームに取付け作業を行っている。しかし、取付時に大きな延伸をかけるのは困難であるため、フィルムの低耐力や粘性挙動による張力低下及びシワなどの課題が残される。

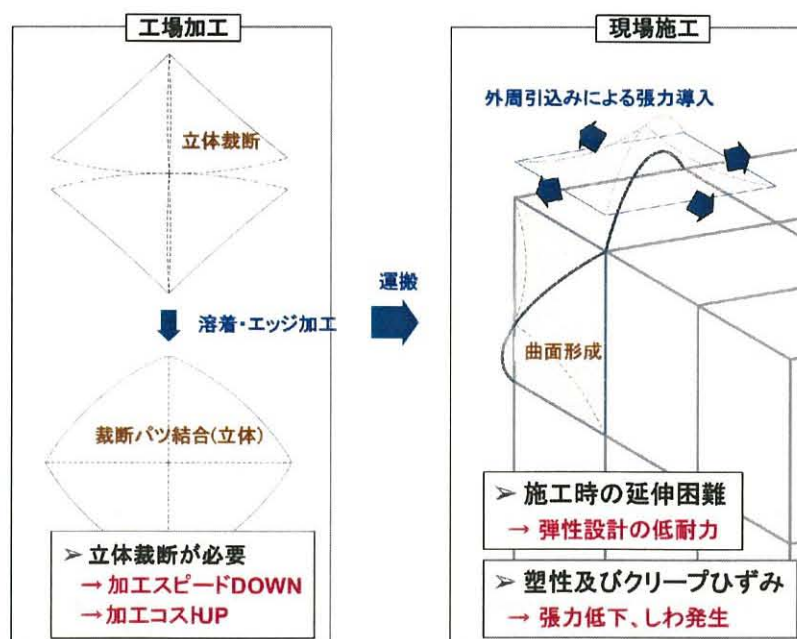


図 1.7 テンション方式における従来の設計方式と課題

一方、本研究では、フィルムの延伸成形を行うことで、加工時には、立体裁断を行わずに、平面フィルムを延伸させて曲面形成ができ、延伸されたフィルムをフレームから取り外し、各パネルのフィルムを重ねて容易に運搬できると考えられる。また、現場施工時には、既に延伸されたフィルムに対しわずかの延伸をかけることで、簡単にフレームに取付けることも可能であると考えられる。また、延伸成形により、フィルムの高耐力化が可能になり、それによりフィルムの力学的挙動も安定されると期待できる。延伸成形による本研究の方式と特徴の概要を図1.8に示す。

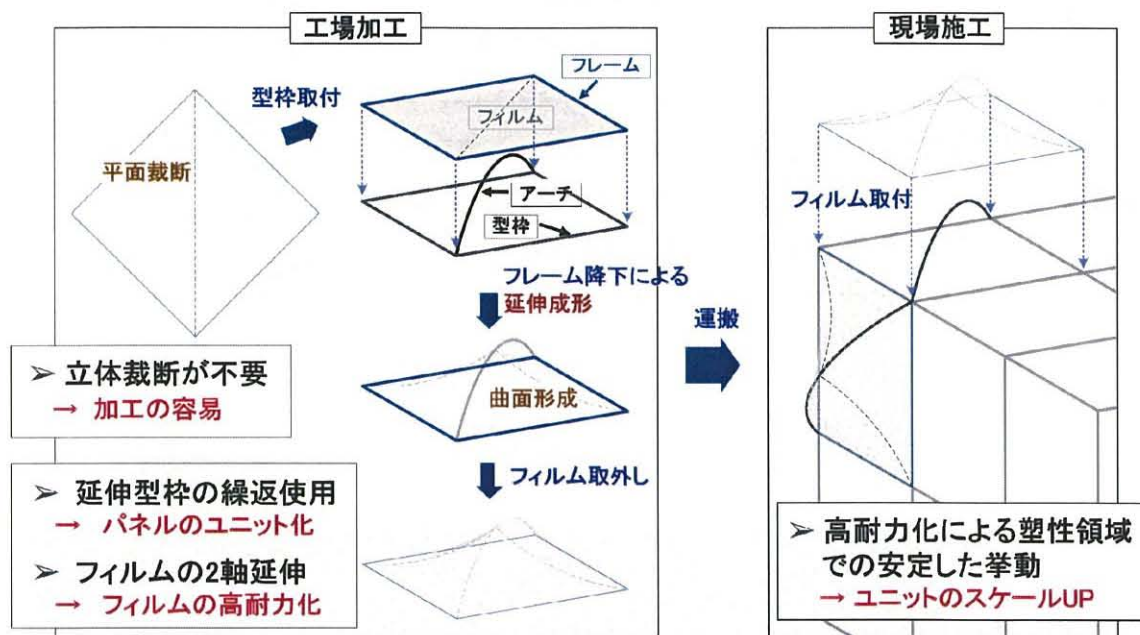


図 1.8 テンション方式における本研究の設計方式と特徴

以上の内容より、テンション方式フィルム膜構造における従来の方式と本研究方式の比較内容を表1.2に纏めると、フィルムの延伸成形を行い、それによりフィルムを高耐力化させることは既往の研究例がない新しい領域であると考えられる。

また、テンション方式に延伸成形を適用する上で、要求される具体的な検討事項としては、まず、延伸成形方法及び延伸効果の検討が必要であり、延伸による塑性域でのフィルムの応力-ひずみ関係やフィルムのひずみ速度依存性、クリープ、リラクセーションなどのような粘性挙動を考慮した粘塑性モデルの適用可能性及び力学的挙動の解明が必要になると考えられる。さらに、既往の研究報告のうち、代表される研究例を構造形式、材料的特性、そして曲面形成方法に基づいて分類し、本研究の内容と比較整理すると、図1.9のように示すことができる。

表 1.2 本研究の新規性及び検討事項

項目	既往の研究	本研究の新規性	重要検討事項
加工(溶着)	<ul style="list-style-type: none"> ・ 立体裁断(曲線) →加工スピード DOWN →加工コスト UP 	<ul style="list-style-type: none"> ・ 平面裁断(直線) → 加工容易 →加工スピード UP →加工コスト DOWN 	
延伸成形	<ul style="list-style-type: none"> ・ 既往例なし 	<ul style="list-style-type: none"> ・ 2軸延伸成形 →フィルムの耐力 UP 	<ul style="list-style-type: none"> ・ 延伸成形方法の検討 ・ 延伸効果の検証
力学特性	<ul style="list-style-type: none"> ・ テンション方式→低耐力 ・ 塑性及びクリープひずみ →張力低下やシワの懸念 	<ul style="list-style-type: none"> ・ テンション方式 → 高耐力化 ・ 塑性領域で安定した挙動 →パネルのスケール UP 	<ul style="list-style-type: none"> ・ 粘塑性モデルの適用可能性の検討 ・ 粘性を考慮した力学的挙動の解明



図 1.9 既往の研究における本研究の位置づけ

1.2 研究目的

以上の研究背景より、ETFE フィルムは弾性範囲での許容耐力が低いため、フィルムを張力膜構造に用いる場合、許容耐力を高める方法として取付時に延伸成形が考えられるが、張力膜構造を対象とした延伸成形に関する研究例は未だに報告されていない。また、フィルム膜構造の構造挙動に関する研究はほとんどクッション方式であり、張力膜構造の構造挙動に対する研究例はあまり報告されていないのが現状である。

本研究では、フィルム膜構造の耐力を高める方法として、取付時にフィルムを塑性域まで延伸することを提案し、フィルムを用いた張力膜構造における延伸成形の有効性を検討することを目的とする。研究目的及び流れを図 1.10 に示す。

まず、フィルムを対象として延伸成形を行う場合、塑性域での材料挙動を表現することが重要である。さらに、ETFE フィルムはクリープ、リラクセーション、ひずみ速度依存性などのような粘性の性質を有しているため、精度良い粘塑性解析が必要となる。したがって、ETFE フィルムの粘塑性挙動を把握するために、移動硬化クリープ理論と非線形移動硬化理論を組合わせた粘塑性構成式を適用し、実験結果と解析結果の比較を通じてその妥当性を検討する。

次に、フィルムを用いた張力膜方式を対象として、実験及び解析的検討を行い、延伸による耐力上昇や残留変形抑制の効果を確認し、延伸成形の有効性を検討する。また、外周引込みによるフィルムの応力集中問題を把握するために、フィルムの引張実験を行い、切欠き形状による応力集中と亀裂発生との関係を検討し、実験モデルを対象として 1 軸引張実験を模擬した FEM 解析を行い、切欠き先端部における応力集中や亀裂発生時の応力分布について把握する。

最後に、テンション方式フィルム膜構造を対象として、様々な形状のモデルに対して延伸成形の適用可能性を確認し、実証実験を通じて実際構造物への実現可能性を把握する。

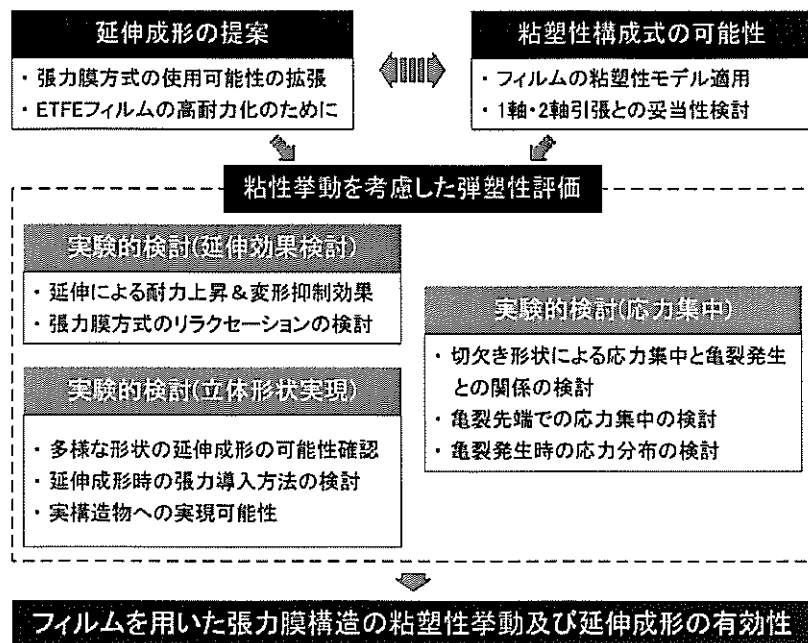


図 1.10 研究目的及び流れ

1.3 本論文の構成

本論文は、第1章から第6章までの合計6つの章で構成している。以下に、その構成と概要を示す。

第1章の「序論」では、本研究を行うに至った背景とその目的を明確にし、さらに本論文の構成についてまとめている。

第2章の「ETFE フィルムの粘塑性構成式」では、フィルムのひずみ速度依存性のような粘性挙動と応力 - ひずみ関係のような材料固有の挙動を把握するために、移動硬化クリープ理論と非線形移動硬化理論を組合わせた粘塑性構成式を適用し、その妥当性を検討している。まず、フィルムのひずみ速度依存性が再現できるように粘塑性構成式内の材料定数をひずみ速度に応じた近似式で表し、フィルムの1軸及び2軸引張時における解析と実験結果の比較検討を行っている。また、フィルムの第1降伏点を越えた後のひずみ軟化現象を解明するために、アニーリング処理を施したフィルムの1軸引張実験を行い、フィルムの構造挙動について検討している。さらに、粘塑性構成式によるフィルムのカーブフィッティングを行うことで、フィルムへの適用可能性を確認している。

第3章の「ETFE フィルムの延伸効果」では、フィルム膜構造の耐力を高めるための方法として、パネル取付け時にフィルムを塑性域まで延伸することを提案し、その有効性を検討している。まず、延伸成形実験を通じて張力膜構造への適用可能性を確認し、付加荷重を想定した加圧実験を通じて延伸によるフィルム膜構造の高耐力化が可能であることを検討している。さらに、実験を模擬した解析的検討を行い、粘性挙動を考慮した弾塑性解析の有効性を検討している。なお、実験施設に対して経年後の張力測定を行い、張力膜構造におけるリラクゼーションによる粘塑性挙動について検討を行っている。

第4章の「ETFE フィルムの応力集中」では、テンション方式フィルム膜構造における外周引込みによるフィルムの応力集中問題について検討している。まず、フィルムを対象として引張実験を行い、切欠き形状による応力集中と亀裂発生との関係を検討している。さらに、実験モデルを対象として1軸引張実験を模擬したFEM解析を行い、クラックやノッチ先端部における応力集中や亀裂発生時の応力分布について把握している。

第5章の「ETFE フィルムを用いた立体形状の延伸成形」では、テンション方式フィルム膜構造の技術的確立を目的として、様々な形状のモデルを対象として延伸成形の適用可能性を確認し、実証実験を通じて実際構造物への実現可能性を把握している。まず、スタディーモデルの試作を通じて、色々な形状のテンション方式に対する延伸成形の適用可能性を確認している。また、実証実験を通じてアーチを用いた延伸成形方法の有効性及び延伸成形後のフィルムの粘性挙動について検討している。さらに、粘性挙動を考慮した弾塑性解析を行い、実験結果との比較検討を通じて解析結果の妥当性を検討するとともに、延伸成形後のフィルムの力学的挙動についても検討を行っている。

第6章の「結論」は、各章で得られた結果及び研究成果についてまとめている。

以上の内容をまとめて本論文の構成を図1.11に示す。

フィルムを用いた張力膜構造の粘塑性挙動と延伸成形に関する研究

1. 序論

- * 研究背景
- * 研究目的
- * 本論文の構成



2. ETFEフィルムの粘塑性構成式

- * 移動硬化クリープ理論と非線形硬化理論を組合わせた粘塑性構成式の適用
- * 1軸及び2軸引張時における応力-ひずみ関係の検討を通じた妥当性の確認
- * 応力-ひずみ関係における第1降伏点を越えた後のひずみ軟化現象の解明



3. ETFEフィルムの延伸効果

- * 平面フィルムを対象とし、延伸実験を通じた耐力上昇及び変形抑制効果の確認
- * 外部荷重を想定した負荷・除荷時におけるフィルムの粘塑性挙動の解析的検討
- * 実証実験を通じた経年後のフィルムのリラクセーション挙動の検討



4. ETFEフィルムの応力集中

- * フィルムの延伸による応力集中(局部的変形)に対する実験的検討
- * 切欠き形状による1軸引張実験を模擬した解析的検討



5. ETFEフィルムを用いた立体形状の延伸成形

- * スタディーモデルの試作を通じて延伸成形による多様な曲面形成の可能性確認
- * スタディーモデルを通じた延伸時の張力導入方法及び裁断図の検討
- * 延伸時にアーチを用いた張力導入方法の適用と実証実験を通じた実現可能性確認
- * 実験時にフィルムの変形及び粘性挙動(リラクセーション)の検討
- * フィルムの粘性挙動(ひずみ速度依存性、リラクセーションなど)を考慮した解析的検討を行い、実験との比較を通じて弾塑性解析の妥当性検討
- * 解析的検討を通じてフィルムを用いたテンション方式の適用規模の検討



6. 結論

- * 結論
- * テンション方式フィルム膜構造の設計への適用

図 1.11 論文の構成

第2章

ETFE フィルムの粘塑性構成式

第2章 ETFE フィルムの粘塑性構成式

2.1 はじめに

ETFE フィルムは粘性挙動、すなわち、クリープ、リラクセーション、ひずみ速度依存性などのような性質を有しているため、弾塑性解析を行う場合、この条件に応じて材料定数を変えなければならない問題を持っている。また、本研究では、フィルムの耐力を高める方法として、施工時にフィルムを延伸する方法を提案し、クッションタイプのみではなく、テンションタイプでもその有効性を確認した^{2.1)}。このような延伸は高分子材料を対象とした場合、塑性域での材料挙動を表現することが重要であり、粘弾性挙動よりも大きいひずみ領域まで考慮しなければならないため、精度良い粘塑性解析が必要となる。しかし、高分子材料の粘塑性挙動に関しては、ポリエチレン樹脂に対して背応力を用いた粘塑性構成式の妥当性の検討研究^{2.2), 2.3)}等が報告されているが、ETFE フィルムに対する粘塑性挙動の把握に関する研究は報告されていない。

一方、一般に高分子材料の場合、製造時に残留ひずみ及び残留応力が存在することが知られている。そこで、残留ひずみの影響を除去するために、材料を高温下で一定時間保持した後に除冷するアニーリング(焼きなまし)処理が行われる。建築物では、ETFE フィルムは通常アニーリング処理を行わないで使用されるが、クリープ、リラクセーションのような粘性挙動と応力-ひずみ関係のような材料固有の挙動を精度よく把握するためには、アニーリング処理を施した場合における応力-ひずみ関係も明らかにしておく必要があると考えられる。また、ひずみ速度は風のような動的荷重時と内圧や雪のような静的荷重時で大きく異なり、それを想定すると、ひずみ速度の極低速時に対しても検討する必要があると考えられる。このようなひずみ速度依存性を把握するために、ひずみ速度 1%/min 以下の極低速時からひずみ速度 100%/min までにおける応力-ひずみ関係に対する検討を行う。

さらに、フィルムを用いた構造形式を考慮すると、平面形状や曲面形状となり、常に2軸応力状態に使われると考えられ、それに対しても検討する必要があると考えられる。

したがって、本章では、ETFE フィルムの粘塑性挙動を把握するために、移動硬化クリープ理論と非線形移動硬化理論を組合わせた粘塑性構成式を適用し、実験結果と解析結果の比較を通じてその妥当性を確認することを目的とする。

具体的には、まず、アニーリング処理を施さないフィルムに対し、1軸引張及び2軸引張時における応力-ひずみ関係を検討することで、粘塑性構成式の妥当性を検討する。また、アニーリング処理を施さない場合における第1降伏点を越えた後の応力-ひずみ関係を明らかにするために、アニーリング処理を施した材料の1軸引張試験データを採取し、粘塑性構成則によるカーブフィッティングを行う。そのうえで、アニーリング処理によるフィルムの構造挙動に及ぼす影響について検討する。

2.2 粘塑性構成式

簡単のために微小変形を仮定する。まず、全ひずみ速度 $\dot{\varepsilon}_{ij}$ は、弾性ひずみ速度 $\dot{\varepsilon}_{ij}^e$ と粘塑性ひずみ速度 $\dot{\varepsilon}_{ij}^v$ の和として次のように表す。そして、数式の中で、 i, j は座標系を表すインデックスとして総和規約に従うものとする。

$$\dot{\varepsilon}_{ij} = \dot{\varepsilon}_{ij}^e + \dot{\varepsilon}_{ij}^v \quad (2.1)$$

ここで、材料の弾性変形はフックの法則に従うとすれば、次のように書ける。

$$\dot{\varepsilon}_{ij}^e = \frac{1+\nu}{E} \dot{\sigma}_{ij} - \frac{\nu}{E} \dot{\sigma}_{kk} \delta_{ij} \quad (2.2)$$

ただし、 E は縦弾性係数、 ν はポアソン比を表す。

次に、Malinin - Khadjinsky の移動硬化クリープ理論^{2,4)}を粘塑性変形に適用し、粘塑性ポテンシャル g を次のように与える。

$$g = \frac{1}{2} \xi_{ij} \xi_{ij} \quad (2.3)$$

ここで、 ξ_{ij} は有効応力と呼ばれ、偏差応力 s_{ij} 、そして、降伏曲面の中心の移動量である背応力 α_{ij} の偏差量 a_{ij} を用いて次のように定義される。

$$\xi_{ij} = s_{ij} - a_{ij} \quad (2.4)$$

したがって、 a_{ij} は偏差応力空間における粘塑性ポテンシャル面の中心の移動量を表す。次に、この粘塑性ポテンシャル g を用いて、粘塑性ひずみ速度 $\dot{\varepsilon}_{ij}^v$ は次式で与えられる。

$$\dot{\varepsilon}_{ij}^v = \Lambda \frac{\partial g}{\partial \sigma_{ij}} = \Lambda \xi_{ij} \quad (2.5)$$

ここで、 Λ は応力 σ_{ij} と負荷履歴に依存する正值のスカラー係数である。

相当有効応力 $\bar{\xi}$ と相当粘塑性ひずみ速度 $\bar{\varepsilon}^v$ を式(2.6)のように定義すれば、式(2.5)の粘塑性ひずみ速度 $\dot{\varepsilon}_{ij}^v$ は式(2.7)のように導かれる。

$$\bar{\xi} = \left(\frac{3}{2} \xi_{ij} \xi_{ij} \right)^{1/2}, \quad \bar{\varepsilon}^v = \left(\frac{2}{3} \dot{\varepsilon}_{ij}^v \dot{\varepsilon}_{ij}^v \right)^{1/2} \quad (2.6)$$

$$\dot{\varepsilon}_y^v = \frac{3}{2} \frac{\bar{\varepsilon}^v}{\bar{\xi}} \xi_y \quad (2.7)$$

そして、相当有効応力 $\bar{\xi}$ と相当粘塑性ひずみ速度 $\bar{\varepsilon}^v$ の関係は次のような Soderberg の関係式^{2.5)}に従うと仮定する。

$$\bar{\varepsilon}^v = n \left\{ \exp \left(\frac{\bar{\xi}}{K} \right) - 1 \right\} \quad (2.8)$$

ここで、 n と K は材料定数である。

最後に、背応力の発展式を次のように、線形項 $\alpha_y^{(1)}$ と非線形項 $\alpha_y^{(2)}$ の和で表し、線形項に対しては、Prager 則、非線形項に対しては、Armstrong-Frederick 則^{2.6)}を足し合わせた移動硬化則を用いる。

$$\dot{\alpha}_y = \dot{\alpha}_y^{(1)} + \dot{\alpha}_y^{(2)} \quad (2.9)$$

ただし、 $\dot{\alpha}_y^{(1)} = A \dot{\varepsilon}_y^v$ 、 $\dot{\alpha}_y^{(2)} = b(C \dot{\varepsilon}_y^v - \alpha_y^{(2)} \bar{\varepsilon}^v)$ 、ここで、 A 、 b 、 C は材料定数である。

2.2.1 1軸引張状態に対する展開

1軸引張における相当有効応力 $\bar{\xi}$ 及び背応力 α_y について展開する。ただし、比較対象がフィルムであることを考慮して平面応力の状態と取り扱う。まず、1軸引張時における応力 σ と粘塑性ひずみ ε^v は次のように仮定する。

$$\sigma_{11} = \sigma, \quad \varepsilon_{11}^v = \varepsilon^v, \quad \varepsilon_{22}^v = \varepsilon_{33}^v = -\frac{1}{2} \varepsilon^v \quad (2.10)$$

次に、偏差応力 S_y と背応力 α_y の関係を考慮すると、有効応力 ξ_y は式(2.13)のように示すことができる。

$$S_{11} = \frac{2}{3} \sigma, \quad S_{22} = S_{33} = -\frac{1}{3} \sigma \quad (2.11)$$

$$a_{11} = \frac{2}{3} (\alpha_{11} - \alpha_{22}), \quad a_{22} = a_{33} = -\frac{1}{3} (\alpha_{11} - \alpha_{22}) \quad (2.12)$$

$$\xi_{11} = \frac{2}{3}(\sigma - \alpha_{11} + \alpha_{22}), \quad \xi_{22} = \xi_{33} = -\frac{1}{3}(\sigma - \alpha_{11} + \alpha_{22}) \quad (2.13)$$

次に、相当有効応力 $\bar{\xi}$ は式(2.14)のようになり、式(8)より求めた相当粘塑性ひずみ速度 $\bar{\varepsilon}^v$ を用いると、背応力の発展式は式(2.15)のように表現できる。

$$\bar{\xi} = (\sigma - \alpha_{11} + \alpha_{22}) \quad (2.14)$$

$$\begin{aligned} \dot{\alpha}_{11} &= A \cdot \dot{\varepsilon}_{11}^v + b(C \cdot \dot{\varepsilon}_{11}^v - \alpha_{11}^{(2)} \bar{\varepsilon}^v) \\ \dot{\alpha}_{22} = \dot{\alpha}_{33} &= -\frac{1}{2} A \cdot \dot{\varepsilon}_{11}^v + b\left(-\frac{1}{2} C \cdot \dot{\varepsilon}_{11}^v - \alpha_{22}^{(2)} \bar{\varepsilon}^v\right) \end{aligned} \quad (2.15)$$

2. 2. 2 2軸引張状態に対する展開

1軸引張時と同様に2軸引張時における相当有効応力 $\bar{\xi}$ 及び背応力 α_y について展開する。まず、2軸引張時における応力 σ と粘塑性ひずみ ε^v は応力比が等張力であると仮定して次のよう示す。

$$\sigma_{11} = \sigma_{22} = \sigma, \quad \varepsilon_{11}^v = \varepsilon_{22}^v = \varepsilon^v, \quad \varepsilon_{33}^v = -2\varepsilon^v \quad (2.16)$$

次に、偏差応力 S_y と背応力 α_y の関係を考慮すると、有効応力 ξ_y は式(2.19)のように表すことができる。

$$S_{11} = S_{22} = \frac{1}{3}\sigma, \quad S_{33} = -\frac{2}{3}\sigma \quad (2.17)$$

$$\alpha_{11} = \alpha_{22} = \frac{1}{3}(\alpha_{11} - \alpha_{33}), \quad \alpha_{33} = -\frac{2}{3}(\alpha_{11} - \alpha_{33}) \quad (2.18)$$

$$\xi_{11} = \xi_{22} = \frac{1}{3}(\sigma - \alpha_{11} + \alpha_{33}), \quad \xi_{33} = -\frac{2}{3}(\sigma - \alpha_{11} + \alpha_{33}) \quad (2.19)$$

背応力の発展式は相当有効応力 $\bar{\xi}$ と相当粘塑性ひずみ速度 $\bar{\varepsilon}^v$ の関係を用いると、式(2.21)のように表現できる。

$$\bar{\xi} = (\sigma - \alpha_{11} + \alpha_{33}) \quad (2.20)$$

$$\begin{aligned} \dot{\alpha}_{11} = \dot{\alpha}_{22} &= A \cdot \dot{\varepsilon}_{11}^v + b(C \cdot \dot{\varepsilon}_{11}^v - \alpha_{11}^{(2)} \bar{\varepsilon}^v) \\ \dot{\alpha}_{33} &= -2A \cdot \dot{\varepsilon}_{11}^v + b(-2C \cdot \dot{\varepsilon}_{11}^v - \alpha_{33}^{(2)} \bar{\varepsilon}^v) \end{aligned} \quad (2.21)$$

2.3 アニーリング処理無の場合における検討

2.3.1 粘塑性定数の決定

前節の構成式で用いられる材料定数を ETFE フィルムに対して調べてみる。まず、高密度ポリエチレン^{2.2), 2.3)}で提案された材料定数に基づいて、次のような定数を用い、各定数の変化による結果を比較する。この時、加力条件は1軸引張応力下におけるひずみ速度 5%/min で解析を行う。各材料定数 A、b、C、K の変化による応力 - ひずみ関係を図 2.1 から図 2.4 に示す。図から分かるように定数 A は塑性域で背応力の線形項の発展を、K は降伏応力を、b と C は背応力の非線形項の発展と関係があることがわかる。そして、種々のケースを検討した結果、A と b は式(2.22)の値に近い結果となった。

$$\left. \begin{aligned} & \{ E = 952 \text{Mpa}, A = 17.0, b = 50.0 \\ & \{ C = 7.0 \text{Mpa}, K = 1.8 \text{Mpa}, n = 2.0 \times 10^{-6} \text{sec}^{-1} \} \end{aligned} \right\} \quad (2.22)$$

次に、式(2.22)の定数を用いて、ひずみ速度依存性に対して調べてみる。まず、C と K の値はひずみ速度 5%/min における応力 - ひずみ関係を記述できるように、図 2.3 及び図 2.4 よりそれぞれ一つの値を選び、3つの異なるひずみ速度に対して解析を行う。解析結果と実験結果は図 2.5 のようになり、図の中で解析結果を記号で、実験結果を実線で示した。実験結果と比較した結果、解析上ではひずみ速度による応力レベルの変化を表現できるが、ETFE フィルムの1軸引張試験におけるの応力レベルとは差異があることが分かる。したがって、ひずみ速度依存性を精度よく表現するためには、定数 C と K の値を修正していく必要があると考えられる。

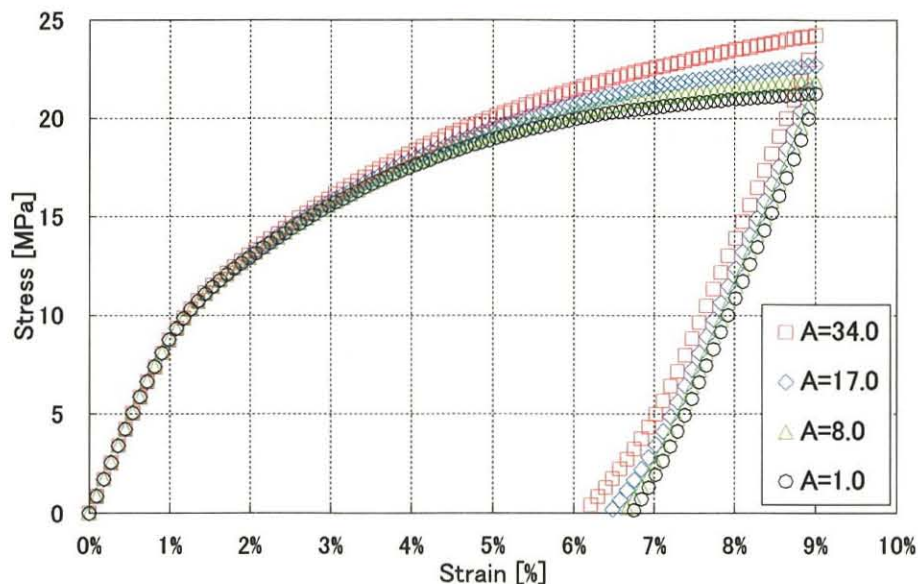


図 2.1 定数 A の変化による応力-ひずみ関係

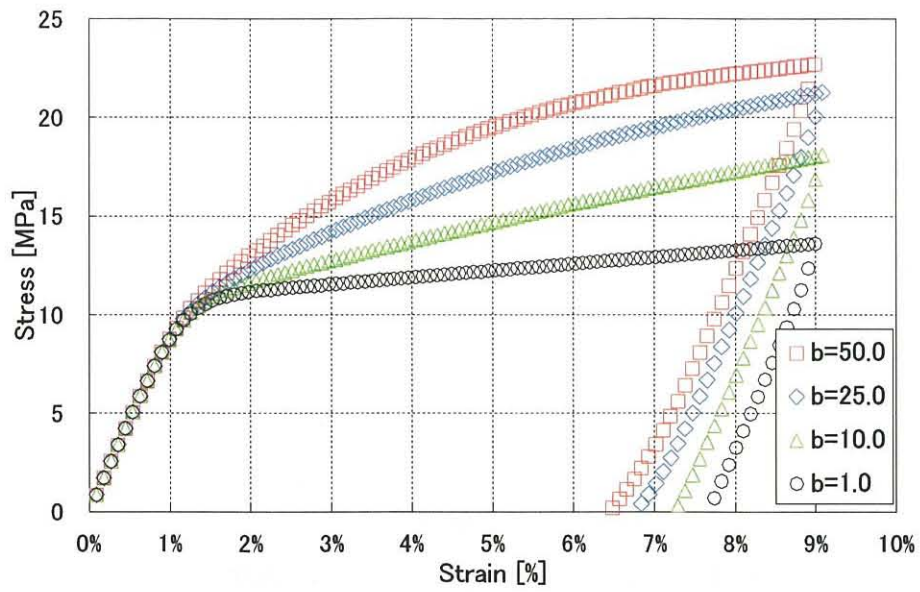


図 2.2 定数 b の変化による応力-ひずみ関係

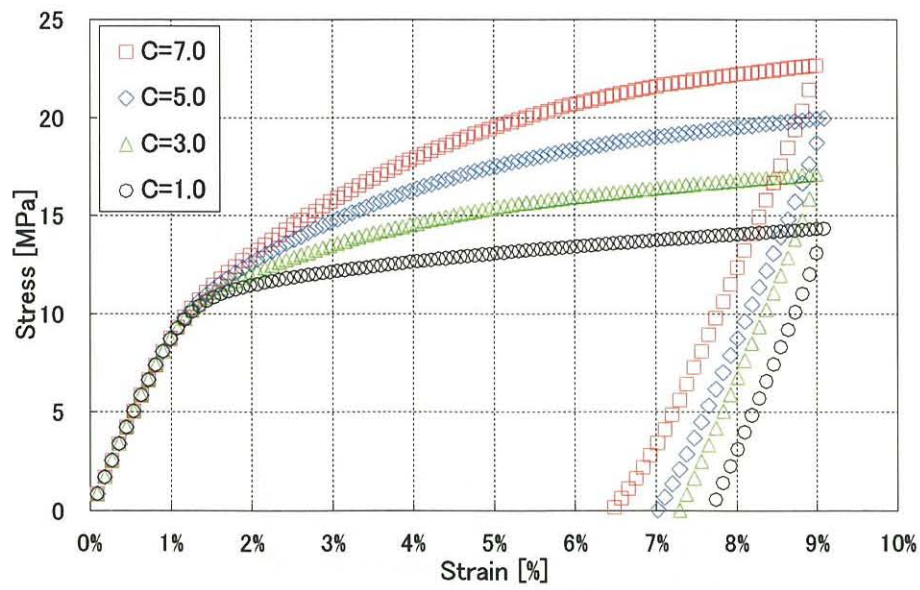


図 2.3 定数 C の変化による応力-ひずみ関係

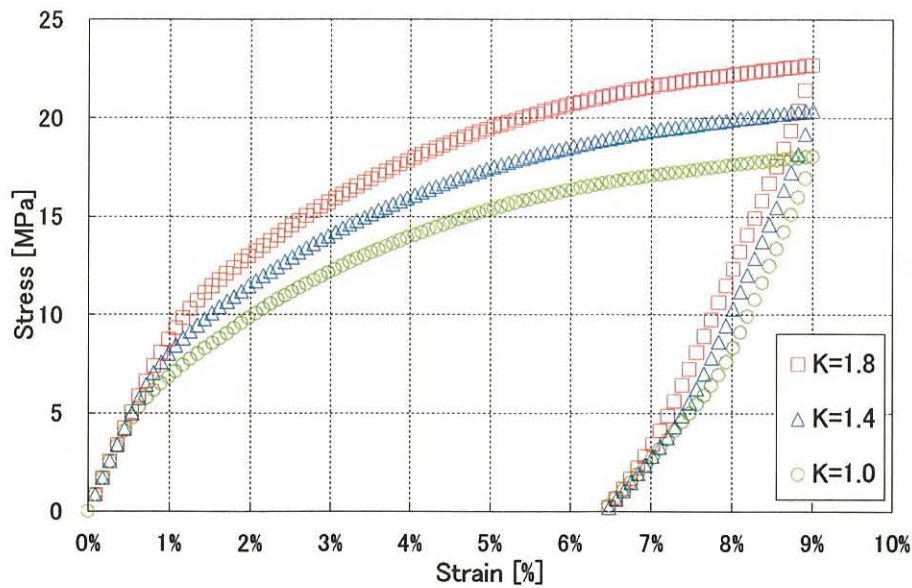


図 2.4 定数 K の変化による応力-ひずみ関係

次に、式(2.22)の定数を用いて、ひずみ速度依存性に対して調べてみる。まず、C と K の値はひずみ速度 5%/min における応力 - ひずみ関係を記述できるように、図 2.3 及び図 2.4 よりそれぞれ一つの値を選び、3 つの異なるひずみ速度に対して解析を行う。解析結果と実験結果は図 2.5 のようになり、図の中で解析結果を記号で、実験結果を実線で示した。実験結果と比較した結果、解析上ではひずみ速度による応力レベルの変化を表現できるが、ETFE フィルムの 1 軸引張試験におけるの応力レベルとは差異があることが分かる。したがって、ひずみ速度依存性を精度よく表現するためには、定数 C と K の値を修正していく必要があると考えられる。

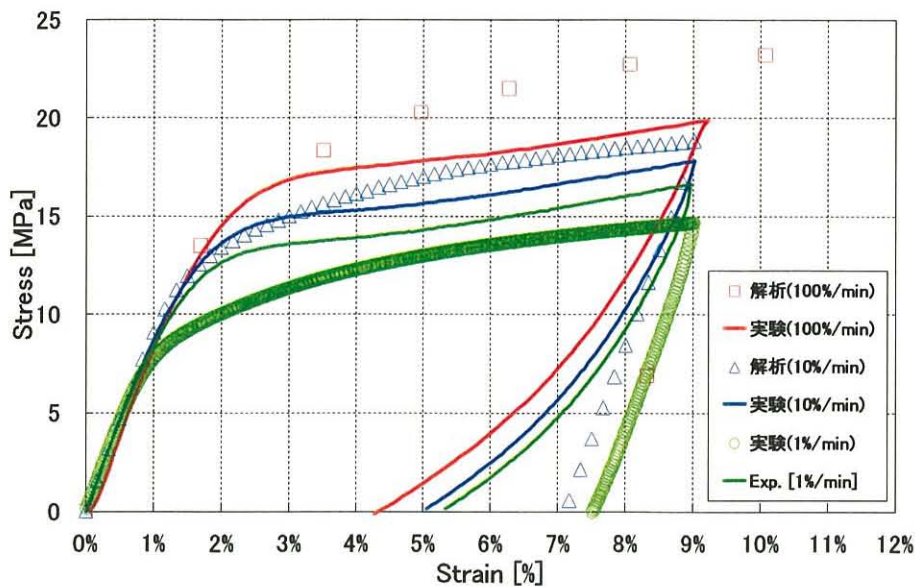
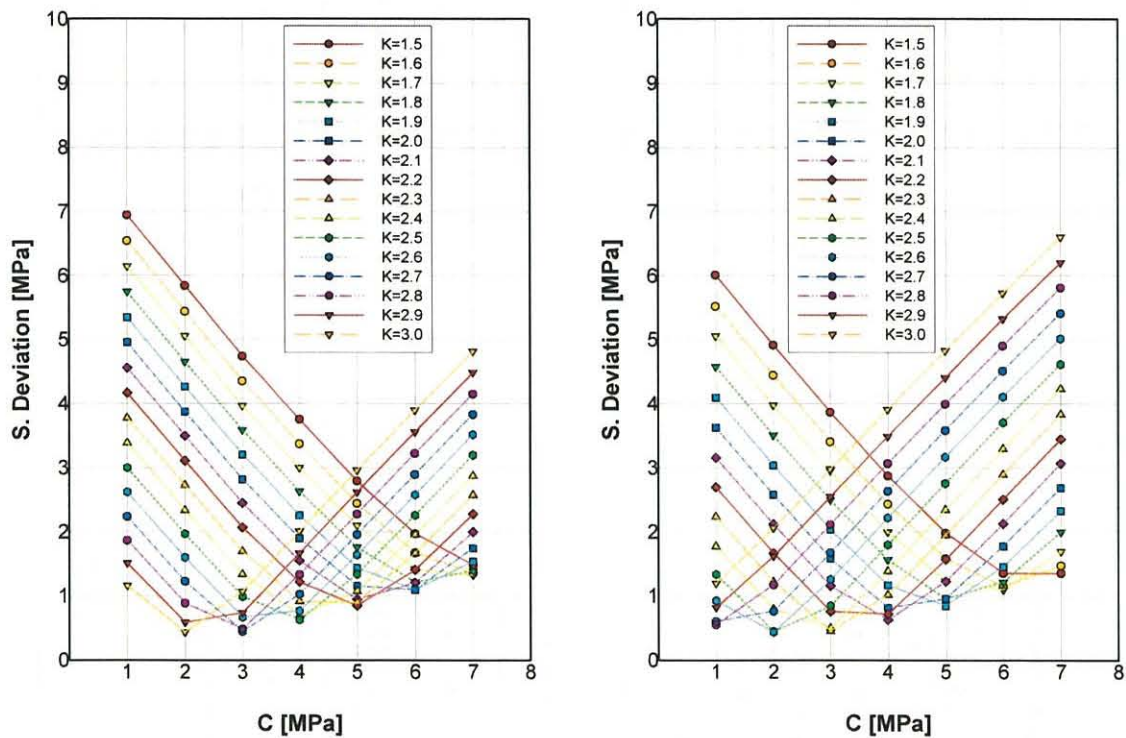


図 2.5 ひずみ速度の変化による応力-ひずみ関係

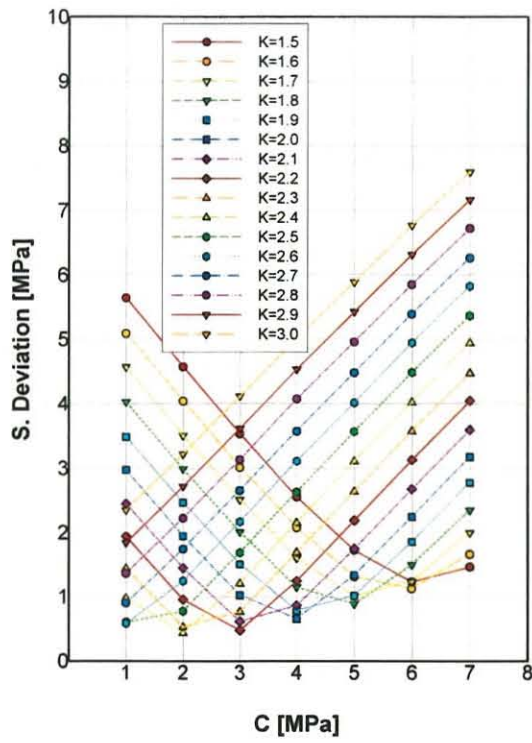
次に、適切な定数 C と K の値を求めるために、ひずみ速度 1%、2.5%、5%、10%、20%、100%/min での C と K 値の変化による応力レベルとの誤差を把握し、実験との誤差が最小となる値を求める。この時、誤差は最小自乗法を用いて求め、 C と K 値の範囲は実験結果に基づいて決定された。図 2.6 は C と K 値の変化による誤差について実験結果を基準とした標準偏差値を示す。各ひずみ速度に対して検討した結果、 $C=2\text{MPa}$ と設定した場合における標準偏差が最も小さくなり、解析結果値の分布が実験結果値のまわりに密集していることがわかる。しかし、この時、 K 値はひずみ速度によって変化しているため、異なるひずみ速度で誤差を最小にする C 及び K の値は同一にならないと考えられる。したがって、Soderberg の関係式に従うと仮定した K 値をひずみ速度に依存した変数として扱う必要があることが明らかとなった。



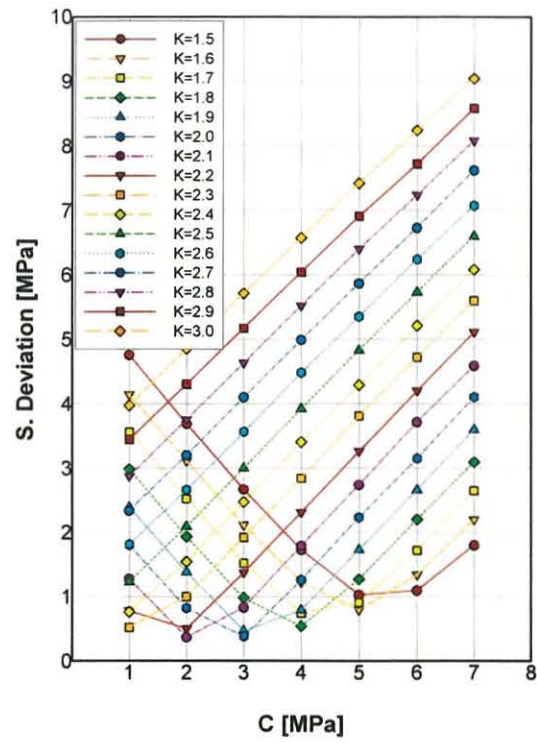
(a) ひずみ速度 : 1%/min

(b) ひずみ速度 : 2.5%/min

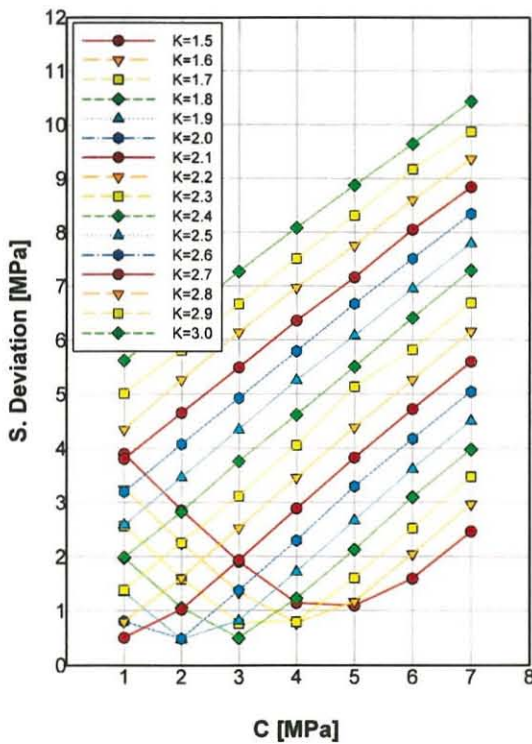
図 2.6 定数 C と K の変化による相関関係



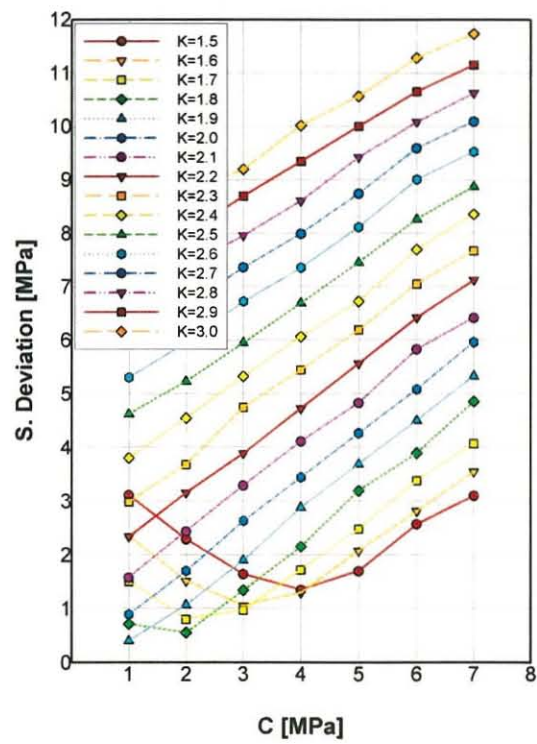
(c) ひずみ速度 : 5%/min



(d) ひずみ速度 : 10%/min



(e) ひずみ速度 : 20%/min



(f) ひずみ速度 : 100%/min

図 2.6 定数 C と K の変化による相関関係

次に、アニーリング処理を施さないフィルムを対象とし、ひずみ速度 0.05%、0.1%、0.5%/min のように低速時に対して解析及び実験結果との比較検討を行う。

定数 K を求めるために、ひずみ速度 0.05%、0.1%、0.05%/min での K 値の変化による応力レベルとの誤差を把握し、実験結果との誤差が最小となる値を求める。図 2.7 は K 値の変化による誤差に対して実験結果を基準とした標準偏差値を示す。

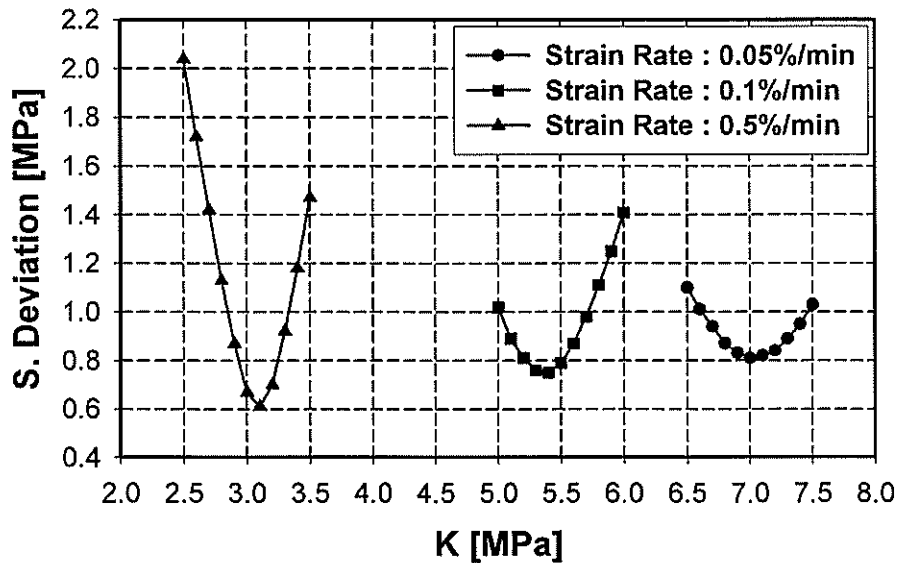


図 2.7 K の変化による標準偏差

以上の考察に基づいて、 $C=2\text{MPa}$ の場合、各ひずみ速度における標準偏差値が最小となる K 値を決定すると、K 値とひずみ速度 0.05~100%/min の範囲までの関係は図 2.8 で表される。これは降伏応力とひずみ速度の関係[3]と同様に、定数 K はひずみ速度に依存した近似式で表すことができ、ひずみ速度の対数に比例することが分かる。

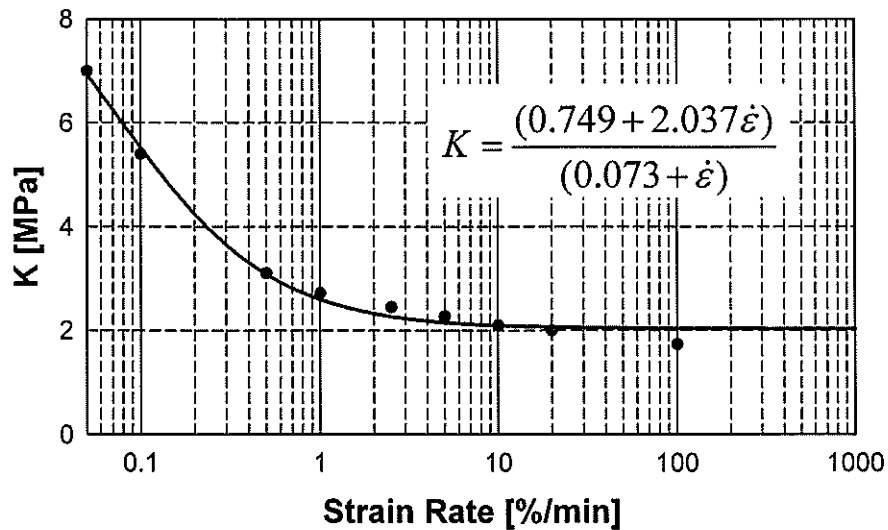


図 2.8 定数 K とひずみ速度の関係

2.3.2 1軸引張の検討

解析結果との比較のために、ETFE フィルムを対象として、1回の負荷 - 除荷の1軸引張の実験を行った。試験体については、幅15mm、チャック間長さ100mm、厚さ200 μ mの短冊形の試験体を使用した。この試験体はフィルムのMD(Machine Direction)方向から採取したものであり、試験体の数は各ひずみ速度において3本ずつ行った。なお、雰囲気温度は $22\pm 2^{\circ}\text{C}$ の範囲とした。試験条件としては、ひずみ速度1%、2.5%、5%、10%、20%、100%/minの6通りとし、荷重はひずみ9%まで負荷した後にただちに除荷する。実験時の様子を図2.9に示す。

次に、解析については、2.3.1節で求められた表1の材料定数を用いて解析を行った。粘塑性構成式のうち、K値は図2.8に示したひずみ速度に応じた値を使用した。

図2.10から図2.15にETFEフィルムの1軸引張試験結果と解析結果を示す。試験結果については、試験体3本の結果に対して平均値で表す。図の中で、記号と実線は、それぞれ実験結果と解析結果を示している。比較検討の結果、図2.10～図2.14より分かるように、粘塑性構成式を用いた解析結果はETFEフィルムの粘塑性挙動を精度よく表現していることがわかる。ただし、図2.15はひずみ速度100%/minにおける結果を比較しているが、変化の様子をみると、解析結果は実験結果と少し差異が見られる。これは、応力及びひずみ増分値をひずみ速度に比例して設定しており、ひずみ速度が速くなるほど解析の増分値が大きいことによる。



図 2.9 1軸引張実験の様子(ひずみ速度1～100%/min時)

表 2.1 アニーリング処理無における材料定数^{2.5)}

E (MPa)	A (MPa)	C (MPa)	b (-)	n (sec ⁻¹)
952	17.0	2.0	50.0	2.0×10^{-6}

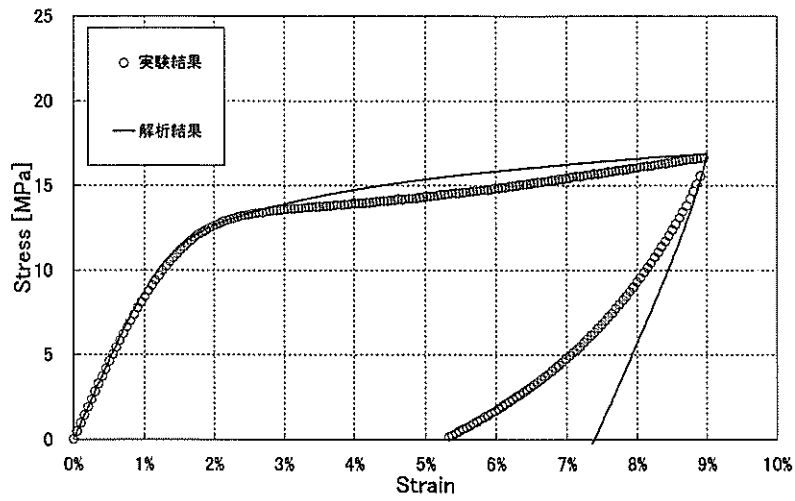


図 2.10 応力-ひずみ関係(ひずみ速度 1%/min)

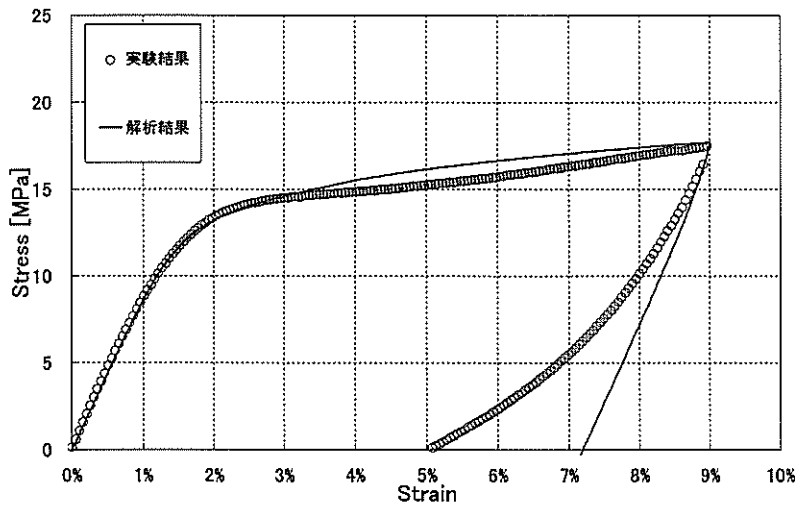


図 2.11 応力-ひずみ関係(ひずみ速度 2.5%/min)

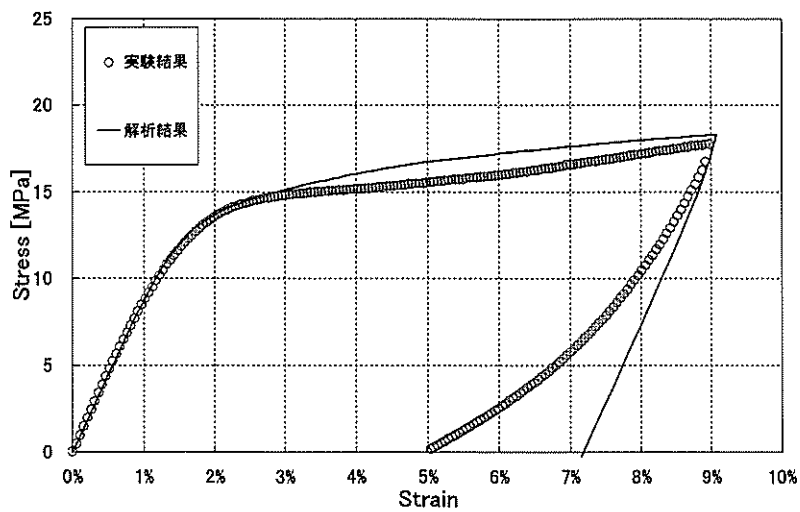


図 2.12 応力-ひずみ関係(ひずみ速度 5%/min)

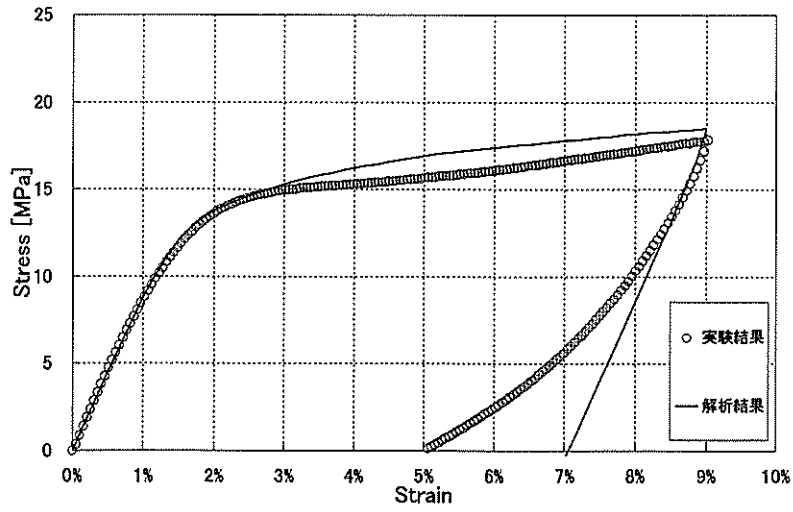


図 2.13 応力-ひずみ関係(ひずみ速度 10%/min)

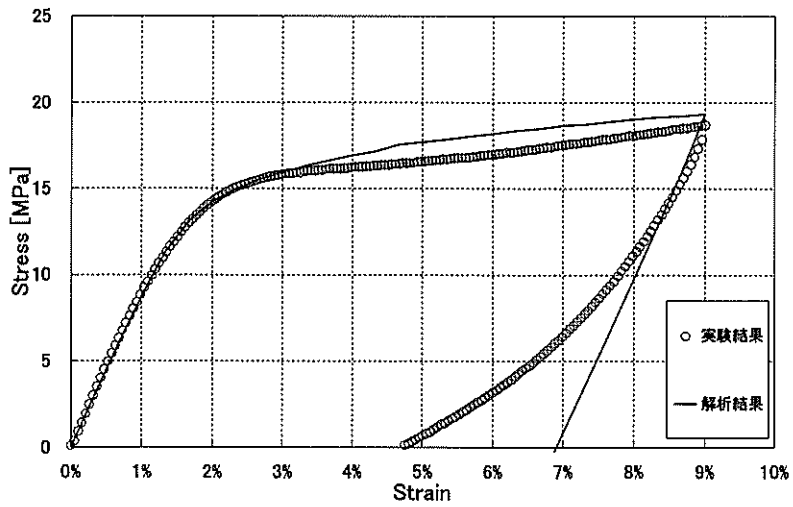


図 2.14 応力-ひずみ関係(ひずみ速度 20%/min)

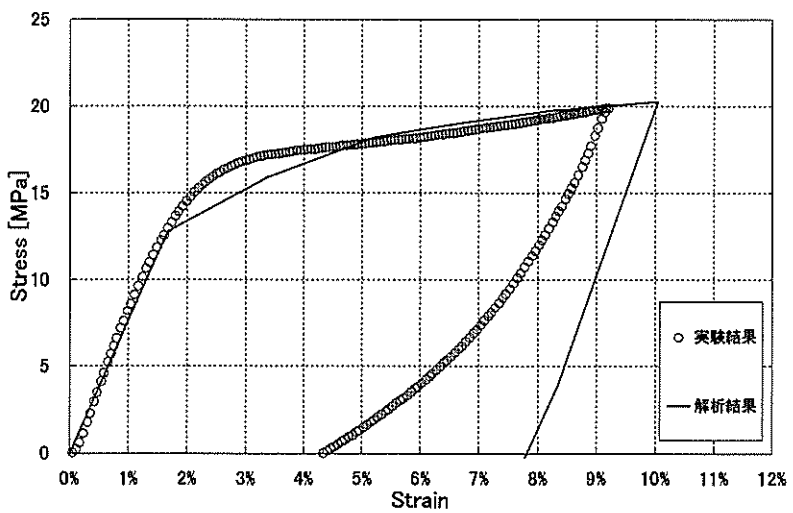


図 2.15 応力-ひずみ関係(ひずみ速度 100%/min)

次に、ETFE フィルムを対象として、ひずみ速度の低速時における解析結果との比較のために、1軸引張の実験を行った。試験体については、幅30mm、チャック間長さ200mm、厚さ200 μ mの短冊形の試験体を使用した。この試験体はフィルムのMD(Machine Direction)方向から採取したものであり、試験体の数は各ひずみ速度において3本ずつ行った。なお、雰囲気温度については $22\pm 2^{\circ}\text{C}$ の範囲とし、ひずみ速度が遅いため、長時間に渡って一定温度を維持できるように図2.16のような断熱材を用いたケース内で実験を行った。また、試験条件としては、ひずみ速度0.05%、0.1%、0.5%/minの3通りとし、荷重はひずみ10%まで負荷する。なお、解析については、ひずみ速度0.05~100%/min時と同様な材料定数を用いて粘塑性解析を行った。ただし、定数K値はひずみ速度に応じた値を使用した。

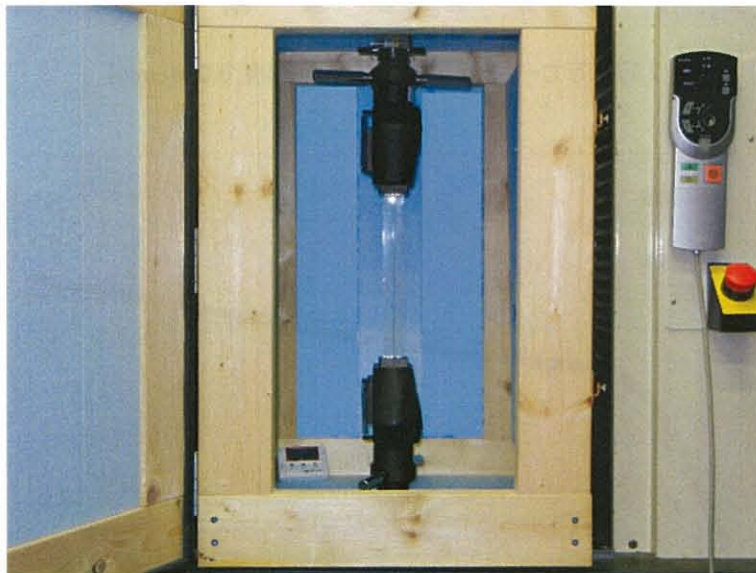


図 2.16 1軸引張実験の様子

図2.17から図2.19にETFEフィルムの1軸引張試験結果と解析結果を示す。試験結果については、試験体3本の結果に対して平均値で表し、図の中で、記号と実線は、それぞれ実験結果と解析結果を示している。比較検討の結果、ひずみ速度0.05%/min、0.1%/minの場合、ひずみ0%~2%の間で少し差異が見られるが、これは実験結果における比例限度内でのばらつきによる結果であると思われ、フィルムの引張弾性率^{2.9)}が800~1000MPaの範囲であることを考慮すると許容できる誤差であると考えられる。

また、既報3)では、ひずみ速度1%/min以上の結果における降伏応力とひずみ速度との関係を示している。それにひずみ速度0.05%、0.1%、0.5%/minの結果を加えて拡張した関係を図2.20に示す。なお、ひずみ速度と降伏応力の関係は同図中の近似式で表すことができる。

その結果、ひずみ速度1%/min以上では、降伏応力はひずみ速度の対数に比例していくのに対し、ひずみ速度1%/min以下では、ほぼ一定値になっている。

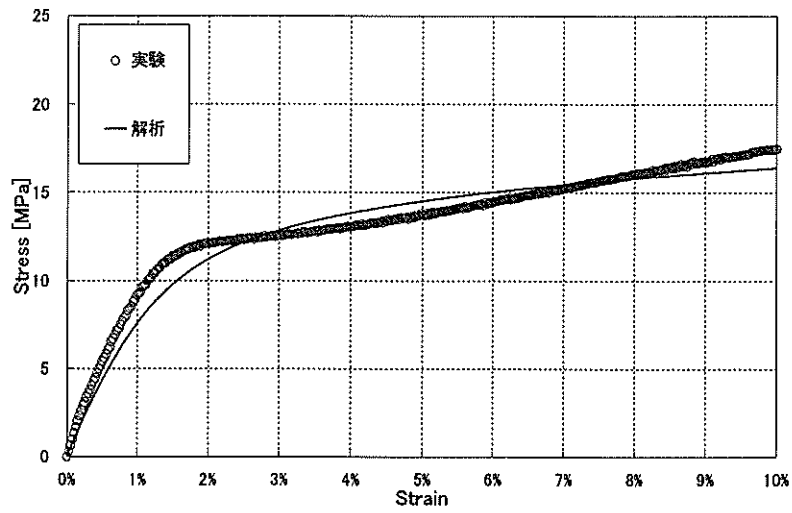


図 2.17 応力-ひずみ関係(ひずみ速度 0.05%/min)

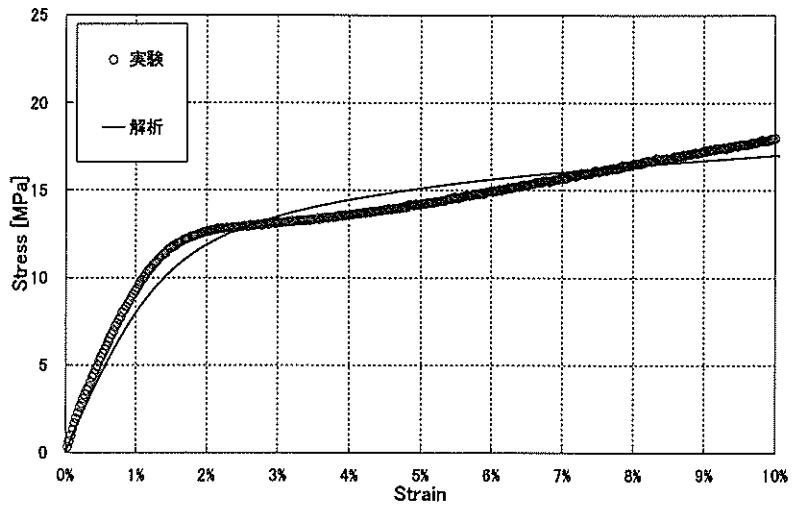


図 2.18 応力-ひずみ関係(ひずみ速度 0.1%/min)

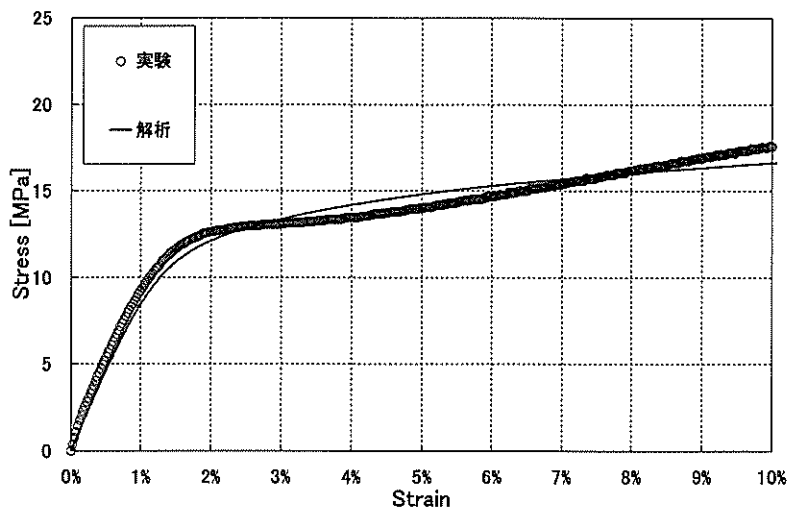


図 2.19 応力-ひずみ関係(ひずみ速度 0.5%/min)

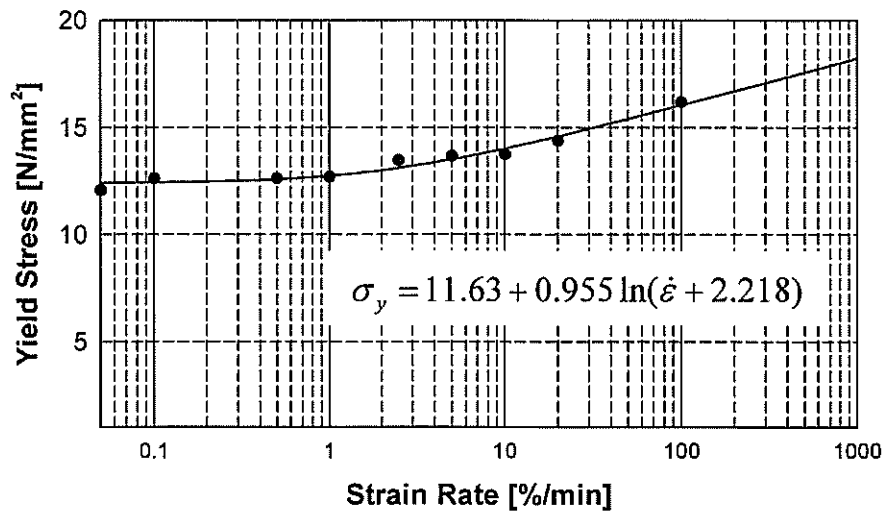


図 2.20 ひずみ速度と降伏応力の関係

2.3.3 2軸引張の検討

粘塑性構成式の妥当性を検討するために、2.3.2節ではアニーリング処理を施さないフィルムを対象として1軸引張時に対して検討を行ったが、本節では粘塑性構成式を2軸引張時に拡張し、解析結果との比較のために、2軸引張実験を行った。

試験体については、図 2.21 のような幅 400mm、チャック間長さ 400mm、厚さ 200 μm の試験体を使用した。この試験体はフィルムの MD(Machine Direction)方向と TD(Transverse Direction)方向を基準に採取したものである。なお、雰囲気温度については 23±1℃の範囲とした。また、試験条件としては、ひずみ速度 0.67%/min とし、荷重はひずみ 20%まで負荷する。2軸引張実験時の様子を図 2.22 に示す。なお、解析については、1軸引張時と同様に表 1 の材料定数を用いて粘塑性解析を行った。ただし、定数 K 値はひずみ速度との関係式から求めた値を使用した。

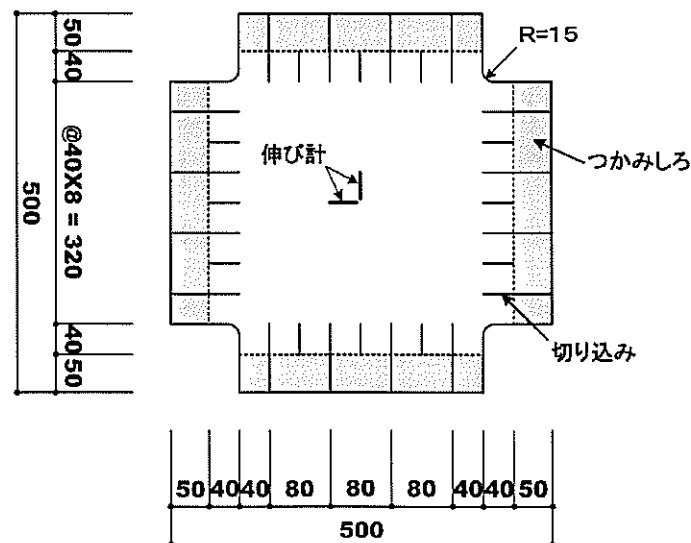


図 2.21 試験片寸法(単位:mm)

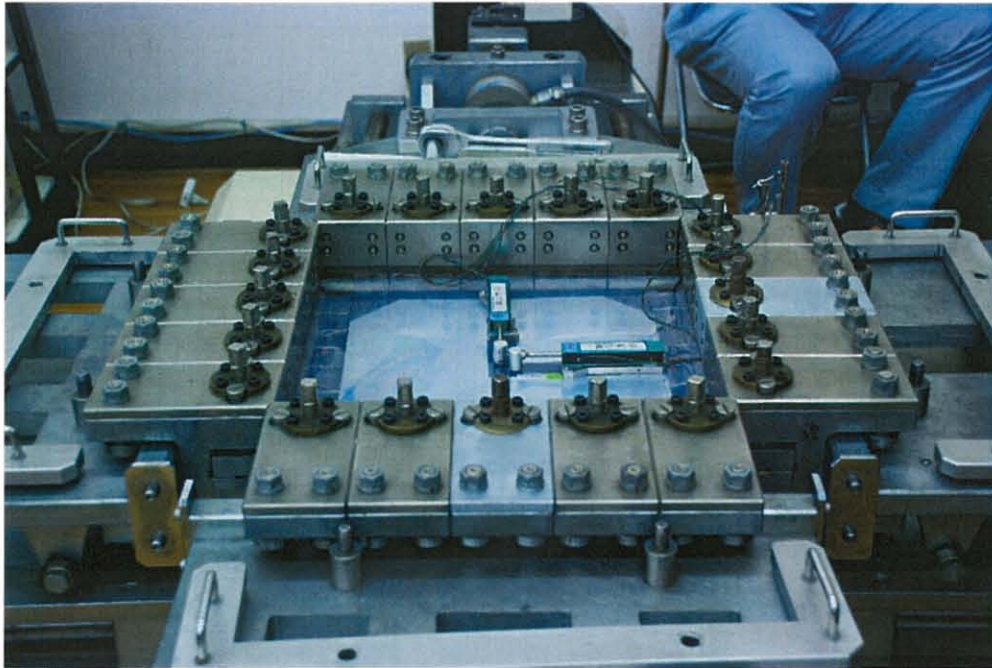


図 2.22 2軸引張実験の様子

解析結果と実験結果を図 2.23 に示しており、1 軸引張結果と同様に 2 軸引張状態へ拡張した場合に対しても精度よく応力 - ひずみ関係が表現できることが分かる。ただし、フィルムが降伏した後、ひずみ 1%~5% 範囲では実験結果と解析結果との差異が見られるが、これは 1 軸引張時と同様にフィルムに残されている残留応力の影響とひずみ軟化現象によるものと考えられる。

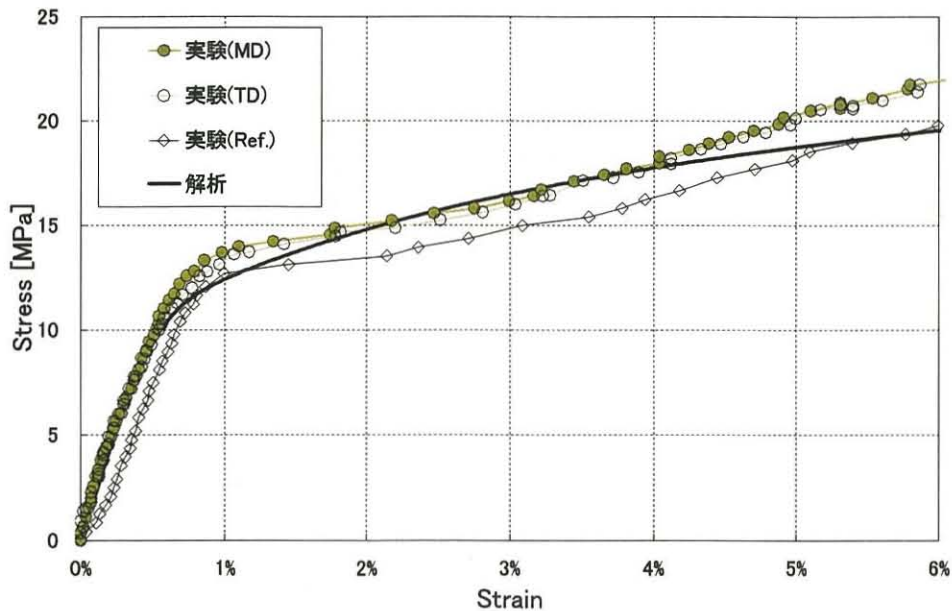


図 2.23 応力-ひずみ関係(ひずみ速度 0.67%/min)

2.4 アニーリング処理有の場合における検討

2.4.1 アニーリング処理の概要

高分子材料の製造工程を図 2.24 に示す。製造工程でキャスト処理後、巻き取るロール状に起こりやすい巻ズレやフレアと呼ばれる現象を防ぐために延伸処理(巻取張力の導入)が行われており、その影響により残留ひずみ及び残留応力が生じると知られている。そして、高分子材料を用いた2次加工時、その残留ひずみ及び残留応力を取り除くために、アニーリング処理が一般に行われる。その効果としては、成形品の寸法安定性及び引張強度のような機械的性質が向上されると知られている。しかし、アニーリング処理については材料の種類によってそれぞれの温度や時間が異なるため、標準化された基準がなく、材料の技術資料などを参考に使用目的に応じたデータの取得が一般に行われている。すなわち、種々の温度条件下で、サンプルリングを通じて適切な基準温度を決定する必要がある。

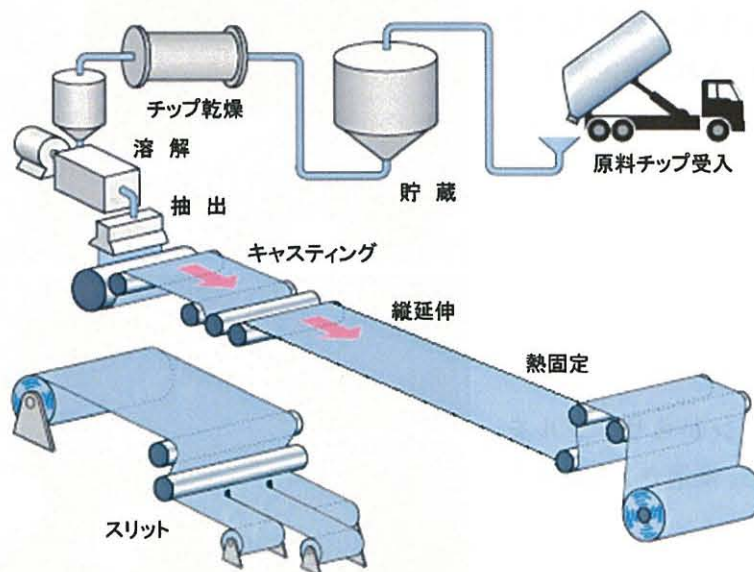
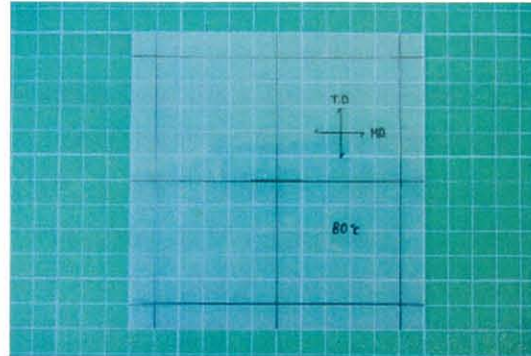


図 2.24 高分子材料の製造工程^{2.7)}

本研究において、アニーリング処理を施すうえで、アニーリング温度設定の流れを図 2.25 に示す。なお、サンプリングの時、オープンの温度設定については 60、70、80、90、100℃の 5通りとし、冷却温度は 24℃とした。図 2.26 にアニーリング処理後の収縮率と温度の関係を表す。その結果、設定温度の 60~80℃の場合、MD 方向の収縮率が TD 方向より大きい結果となっており、90℃と 100℃の場合、TD 方向の収縮率が MD 方向より大きい結果となった。フィルムの製造時、ロールを巻き取る方向が MD 方向となっていることとフィルムの熱変形温度^{注1)}がおよそ 104℃程度であることを考慮すると、90℃と 100℃の場合、熱変形の懸念があると判断され、試験体の製作には適切ではないと考えられる。以上の結果より、設定温度の 70℃と 80℃時の結果が安定していると判断し、本実験では、80℃温度の条件下でアニーリング処理を

行う。さらに、試験体の均一な状態を維持するために、1軸引張実験用の試験体についてはオーブンの中に放置する時間を2時間にする。

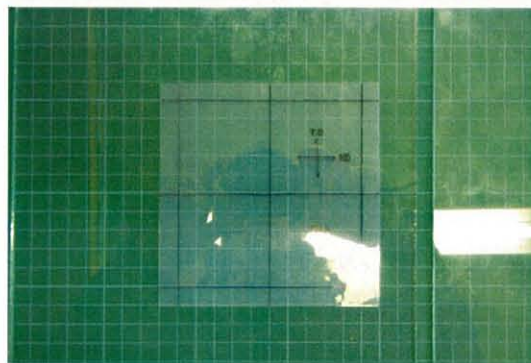
- (a) フィルムを 12 cm × 12 cm サイズの正方形で切り取り(中に 10 cm × 10 cmの正方形を描く)



- (b) ガラスで挟んだ状態でオーブンに入れ、設定温度下で1時間放置



- (c) オーブンからサンプルを取り出し、常温で1時間放置



- (d) サンプルの 10 cm × 10 cm の正方形の変形率を測定、測定データよりアニーリング温度決定

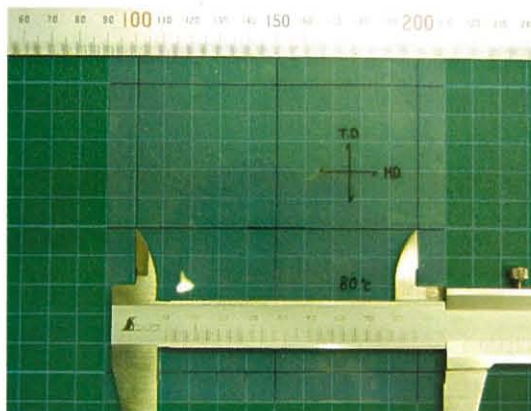


図 2.25 アニーリング温度の設定

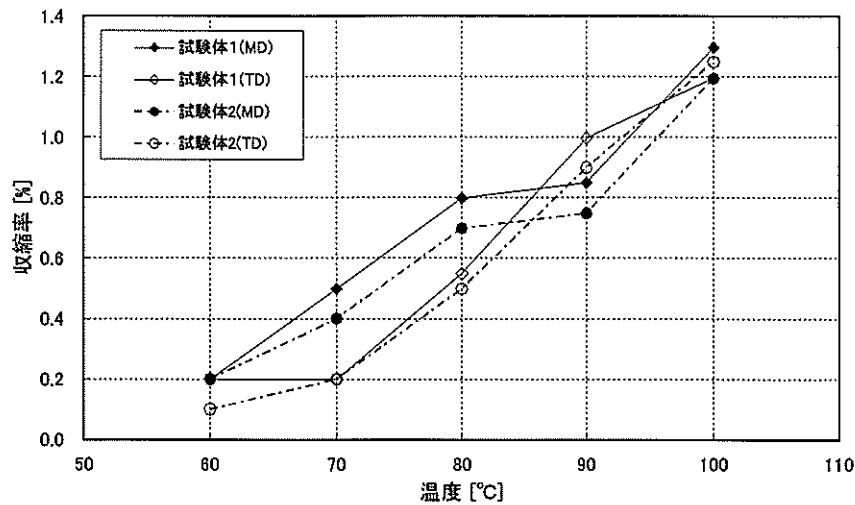


図 2.26 収縮率と設定温度の関係

2.4.2 アニーリング処理による応力-ひずみ関係

1) フィルムの1軸引張時の比較

アニーリング処理を施した試験体を対象として1軸引張実験を行い、アニーリング処理を施さない試験体の実験結果と比較検討する。9通りのひずみ速度条件下で1軸引張実験を行い、その結果を図2.27から図2.35に示す。図から分かるように、アニーリング処理を施すことで、降伏応力のレベルは下がり、降伏した後の応力-ひずみ曲線における曲率の反転、つまり、ひずみ軟化現象がなくなることがわかる。一般に高分子材料の分野では、材料が引張られて降伏点を超えると、局所的なせん断帯が形成され、それにより無結晶分子は再配向される。そして、その影響でネッキング現象が起きると知られている²⁸⁾。しかし、本実験の結果においてはネッキングは発生したものの、ひずみ軟化現象は見られなかった。これは、製作時に生じた残留ひずみ及び残留応力を除去するためのアニーリング処理により、無結晶分子の再配向による結果であると考えられる。なお、応力-ひずみ関係をみると、ひずみ0%からおよそ6%~8%付近までは一致せず、異なるカーブを示しているが、ひずみ8%以後のカーブは一致していく傾向が見られた。

一般に、建築材料として使われる場合、アニーリング処理を施さないため、アニーリング処理を施したものよりも降伏応力の高いものを用いることになる。

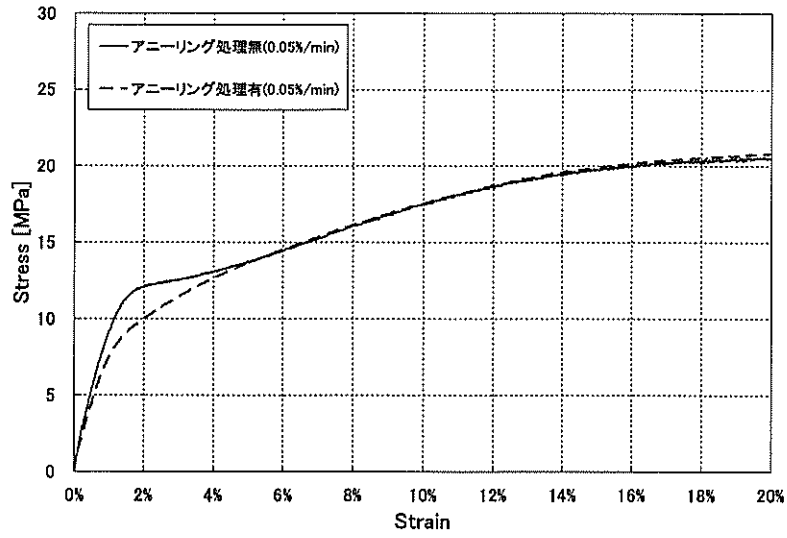


図 2.27 応力-ひずみ関係(ひずみ速度 0.05%/min)

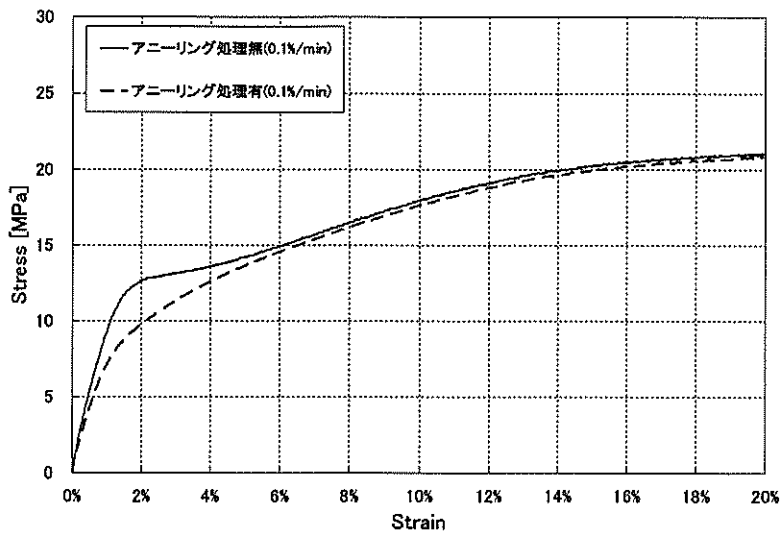


図 2.28 応力-ひずみ関係(ひずみ速度 0.1%/min)

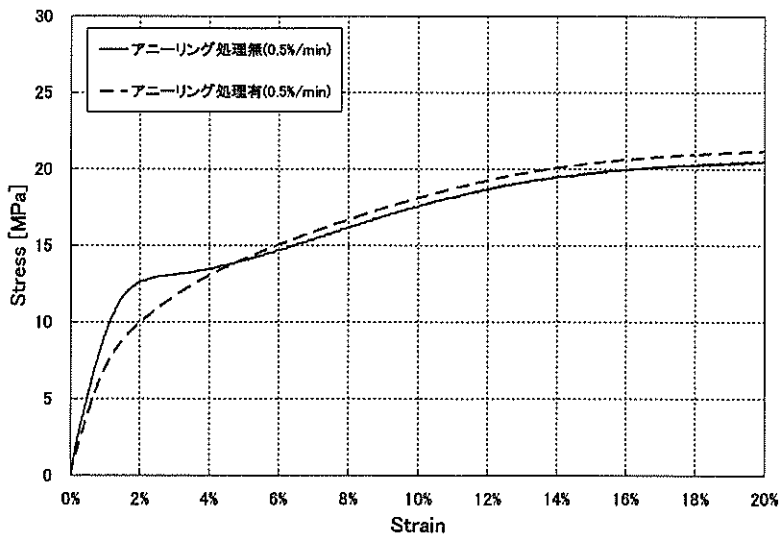


図 2.29 応力-ひずみ関係(ひずみ速度 0.5%/min)

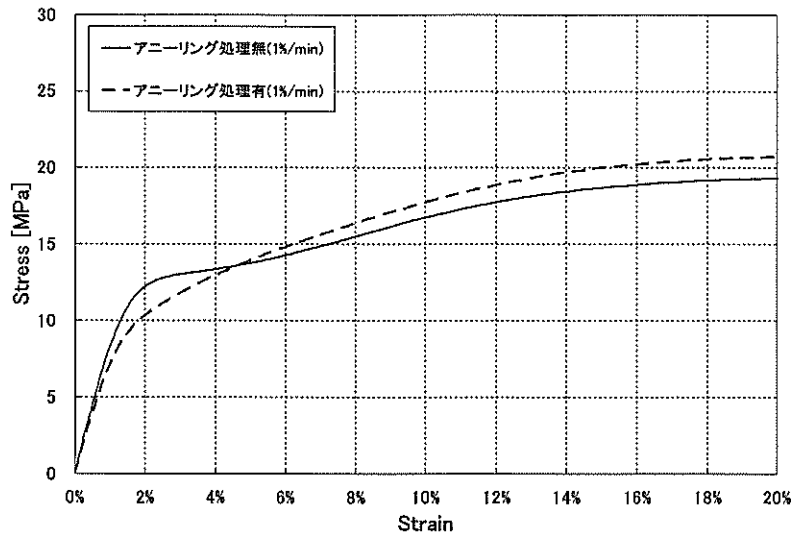


図 2.30 応力-ひずみ関係(ひずみ速度 1%/min)

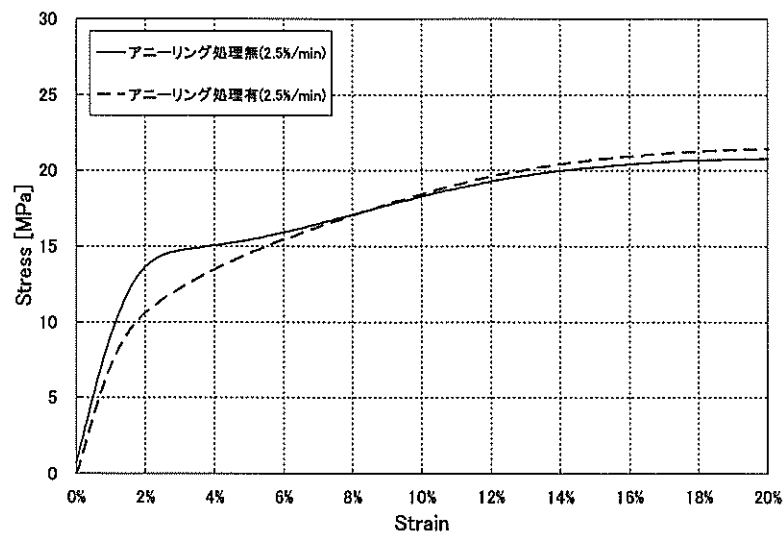


図 2.31 応力-ひずみ関係(ひずみ速度 2.5%/min)

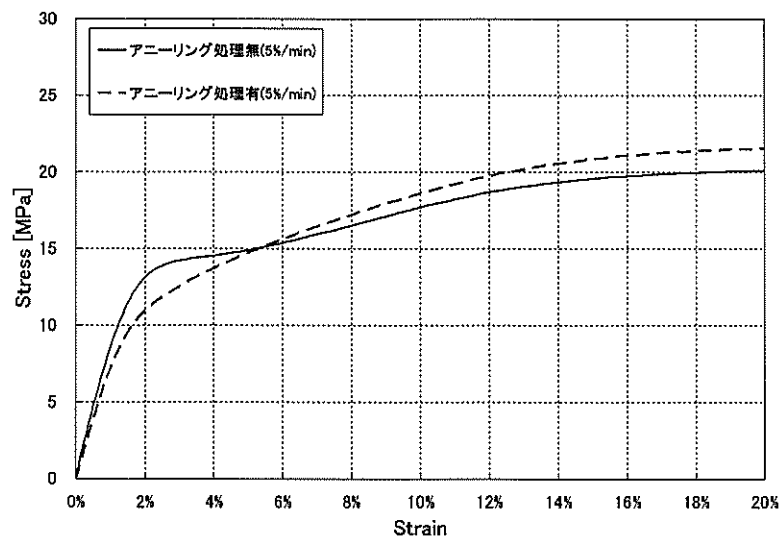


図 2.32 応力-ひずみ関係(ひずみ速度 5%/min)

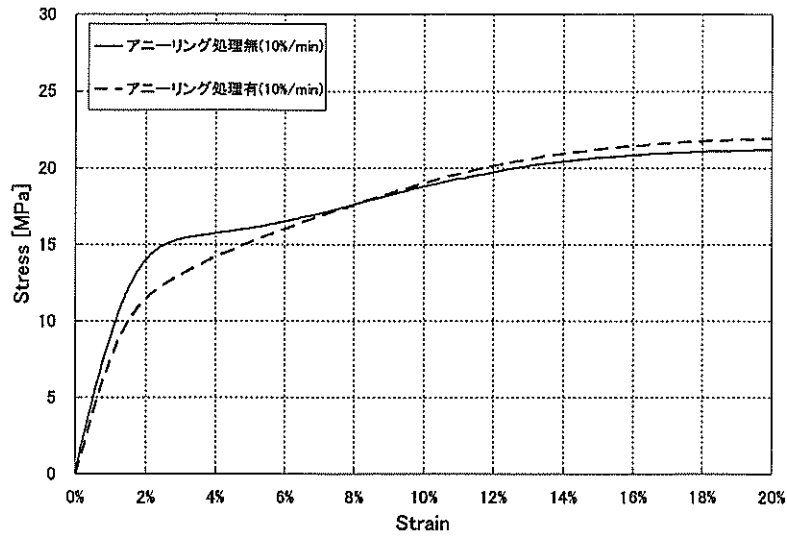


図 2.33 応力-ひずみ関係(ひずみ速度 10%/min)

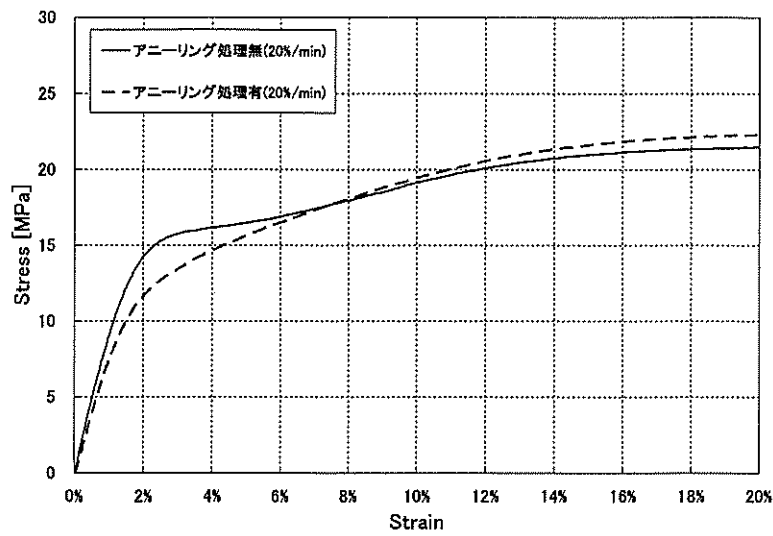


図 2.34 応力-ひずみ関係(ひずみ速度 20%/min)

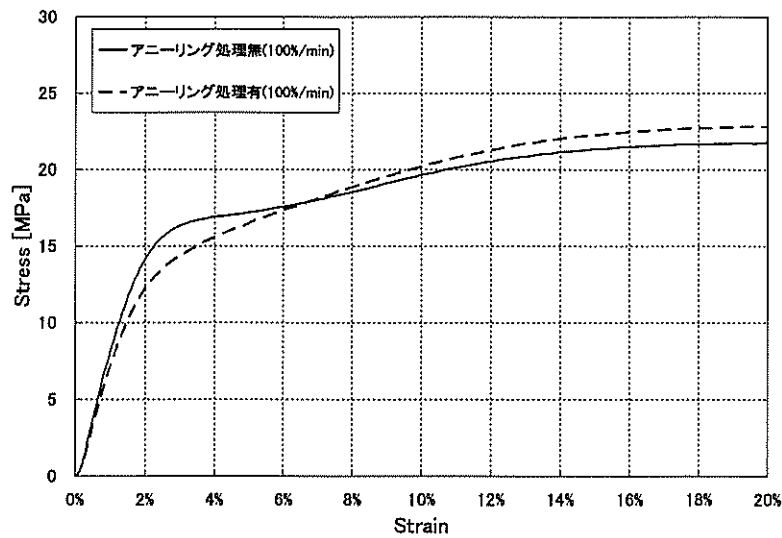


図 2.35 応力-ひずみ関係(ひずみ速度 100%/min)

2) フィルムとプレートの1軸引張時の比較

前節のフィルムの1軸引張時の比較検討より、降伏後、応力レベルの低下現象が見られており、このような現象がETFEフィルムの特有の性質であるかについて把握するために、ETFEフィルムとプレートに対する1軸引張試験を通じて検討する。まず、ETFEフィルムの単調増加試験について記述する。試験体については、幅15mm、チャック間長さ100mm、厚さ200 μm の短冊形の試験体を使用した。次に、ETFEプレートの1軸引張試験については、ETFE樹脂(旭硝子(株)、C-55A)プレスシートを使用し、最大ひずみ20%までの単調加力試験を行った。試験体については、幅10mm、チャック間長さ66.7mm、厚さ0.95、1.80、2.65mmの短冊形の試験体を使用した。そして、2つの実験の共通条件としては、試験体の数は各ひずみ速度に対して3本ずつ行い、雰囲気温度は $22\pm 2^{\circ}\text{C}$ の範囲とした。なお、ひずみ速度1%、2.5%、5%、10%、20%、100%/minの6通りとした。

図2.36から図2.41にETFEフィルムとプレートの1軸引張実験結果を表す。同一ひずみ速度でのプレートの厚さによる結果を各々表す。この図より、ETFEフィルムを対象とした実験結果では、第1降伏点を超えて第2降伏点に至る前まで応力の低下現象が顕著に見られるのに対して、ETFEプレートの実験結果では、降伏点を超えてひずみ20%の塑性域まで負荷しても応力の低下現象は生じていないのが確認できる。なお、ETFEプレートの厚さによる応力-ひずみ関係においても同一の結果となることが分かる。

したがって、ETFEフィルムでのみ、この現象が見られる原因としては、まず、プレートの製造時には、フィルムの製造工程時とは違い、巻き取るロール状にするための延伸処理(巻取張力の導入)が行われてないため、延伸処理による残留ひずみ及び残留応力が生じてないと考えられる。もう一つは、ETFEプレートに比べ、フィルムの厚さが薄いため、厚さ方向より幅方向への応力集中が生じやすく、応力集中によるくびれ発生とひずみ軟化の進行による影響と考えられる。

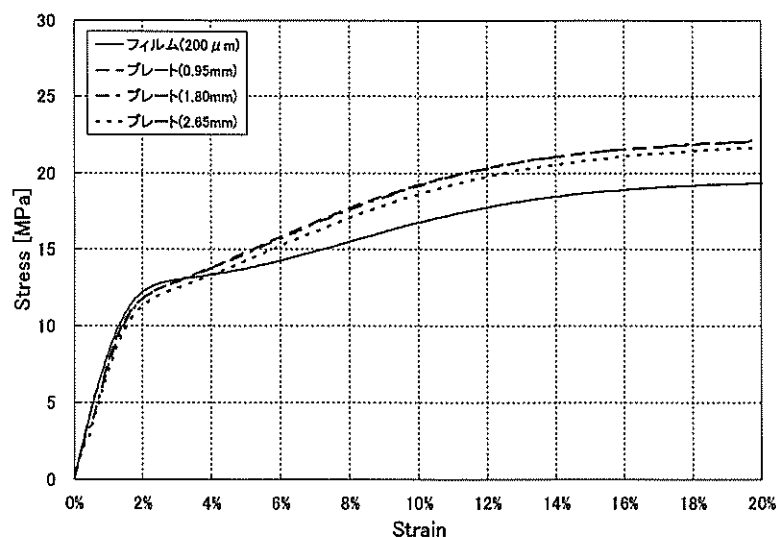


図 2.36 応力-ひずみ関係(ひずみ速度 1%/min)

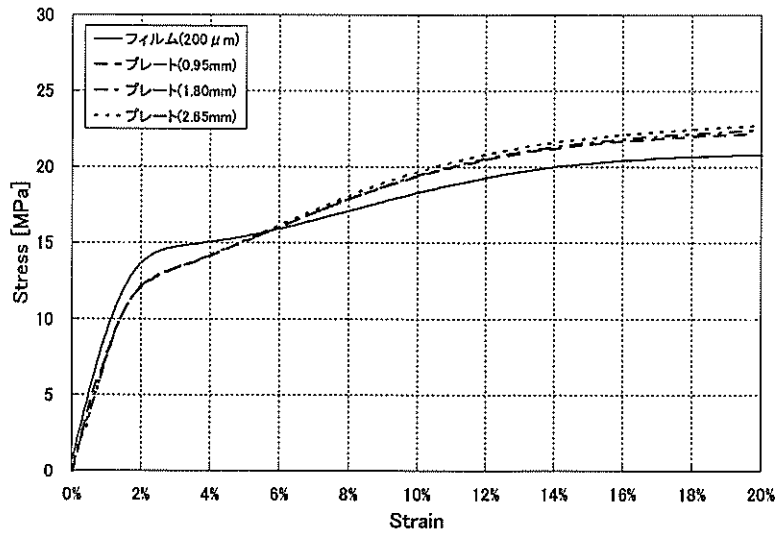


図 2.37 応力-ひずみ関係(ひずみ速度 2.5%/min)

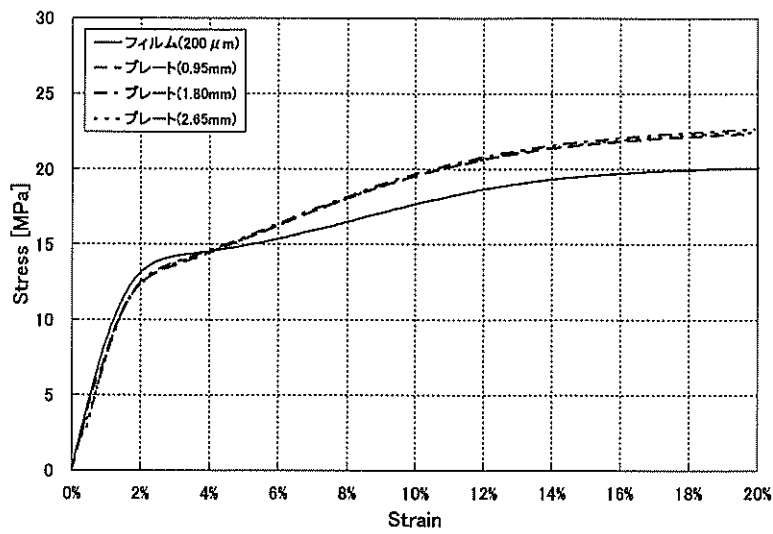


図 2.38 応力-ひずみ関係(ひずみ速度 5%/min)

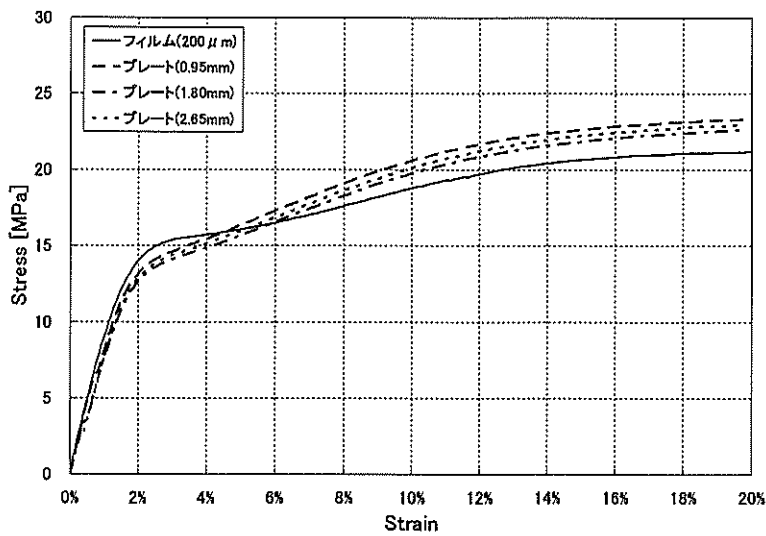


図 2.39 応力-ひずみ関係(ひずみ速度 10%/min)

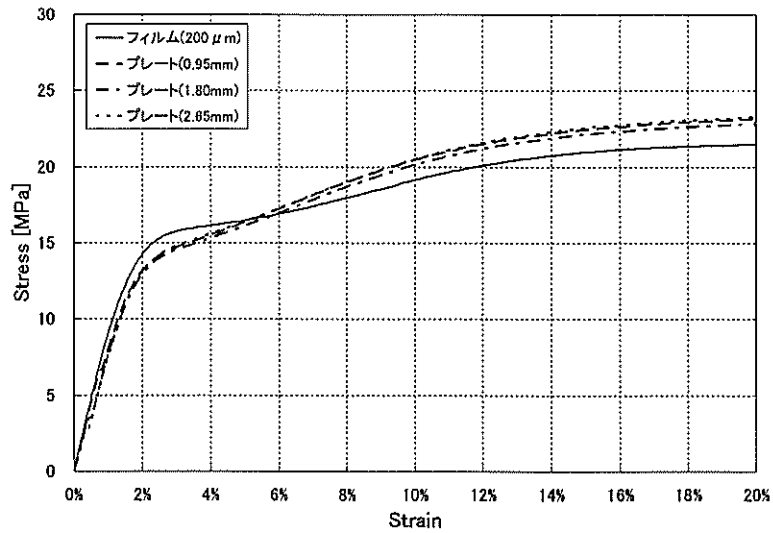


図 2.40 応力-ひずみ関係(ひずみ速度 20%/min)

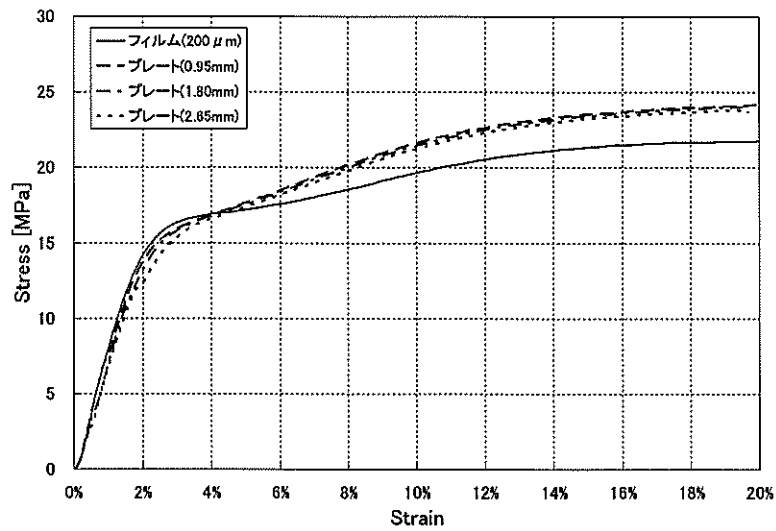


図 2.41 応力-ひずみ関係(ひずみ速度 100%/min)

3) 2軸引張時の検討

アニーリング処理を施した試験体を対象として2軸引張実験を行い、アニーリング処理を施さない試験体の実験結果と比較検討する。実験は 2.3.3 節と同様な条件下で行い、MD 方向及び TD 方向の比較結果をそれぞれ図 2.42、図 2.43 に示す。

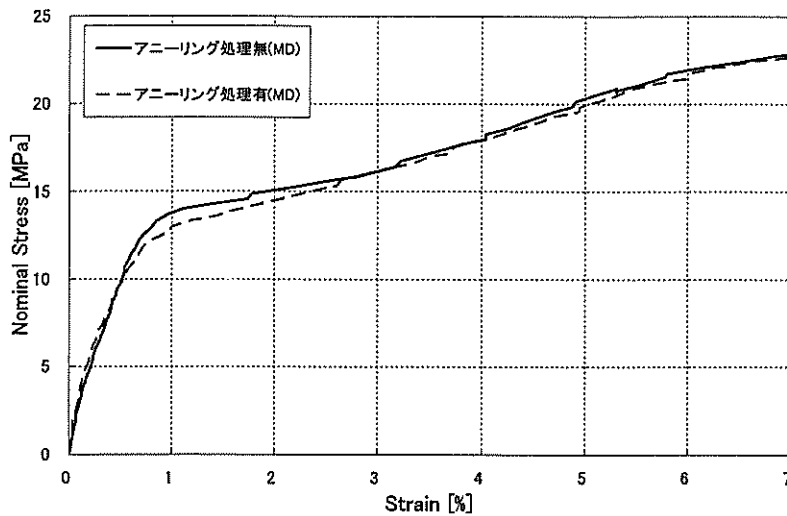


図 2.42 応力-ひずみ関係(MD 方向)

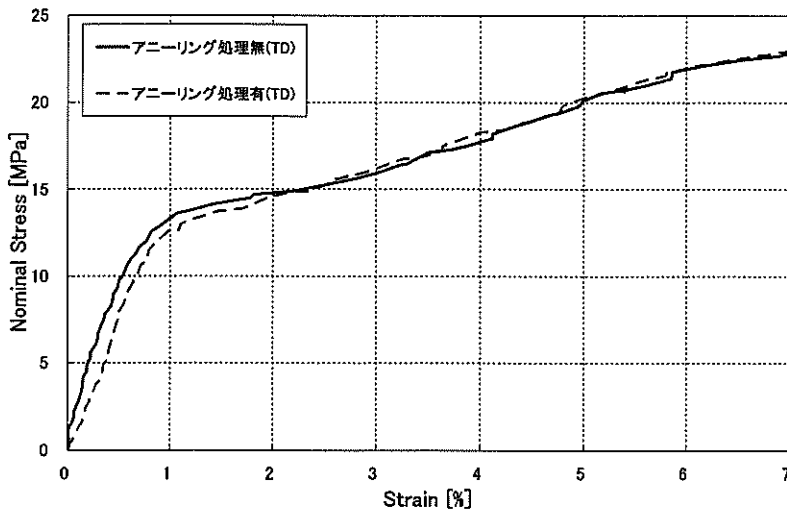


図 2.43 応力-ひずみ関係(TD 方向)

2.4.3 粘塑性定数の決定

アニーリング処理を施したフィルムの応力-ひずみ曲線に対して、粘塑性構成則によるカーブフィッティングを行い、本手法の適用性を検討する。既報^{2.5)}では、表1の材料定数に基づいて、各材料定数 A 、 b 、 C 、 K の変化による応力-ひずみ関係を比較しており、その結果より定数 A は塑性域で背応力の線形項の発展を、 K は降伏応力を、 b と C は背応力の非線形項の発展と関係があることがわかる。なお、フィルムの塑性域での応力-ひずみ関係を見ると、その勾配はひずみ速度によらずほぼ一定であるという共通点が見られるため、ひずみ速度依存性の表現に係わる K 値を除いた各定数はすべてのひずみ速度に対しても同じ値が使えると考えられる。材料定数を求めるうえで、実験及び解析条件は1軸引張応力下におけるひずみ速度 $5\%/min$ にした。まず、実験結果に基づいて、降伏応力を記述できる K 値を設定し、種々のケ

ースを検討した。その結果、弾性係数 E は ETFE フィルムパネル設計・施工指針(案)^{2.9)}に提案されている範囲内の 800MPa と、定数 A は b と C に比べると影響が小さいため、表 2.1 と同一の値を用いる。次に、定数 b と C の値を求めるために、実験との誤差が最小となるように最小自乗法を用いて求めた。図 2.44 に b と C 値の変化による標準偏差を示す。以上の検討より、求めた材料定数を表 2.2 に表す。

次に、パラメータ K による標準偏差の違いを図 2.45 に示す。これより、誤差が最小となる K 値を各ひずみ速度ごとに求めたものが図 2.46 である。K 値はひずみ速度によって異なる値を持つため、これを $\dot{\epsilon}$ の近似式で表すと同図中の式のようにになる。

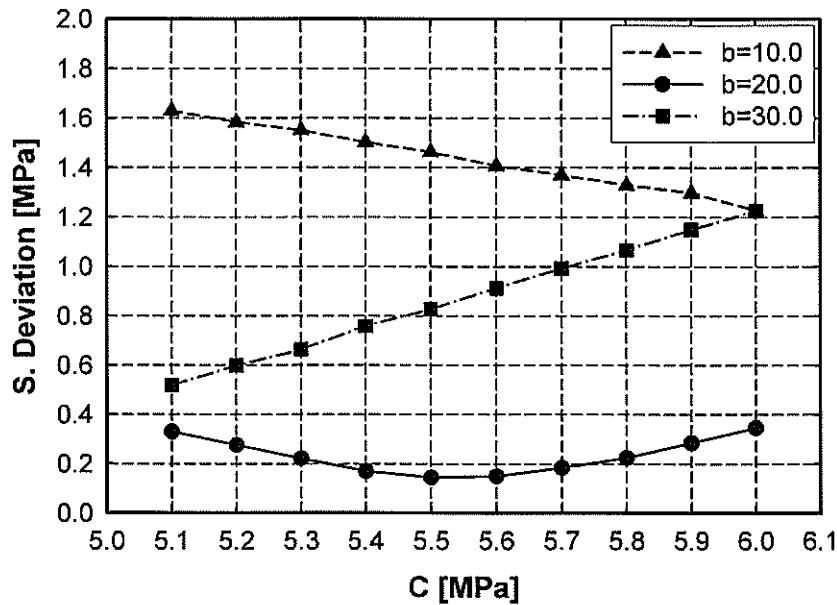
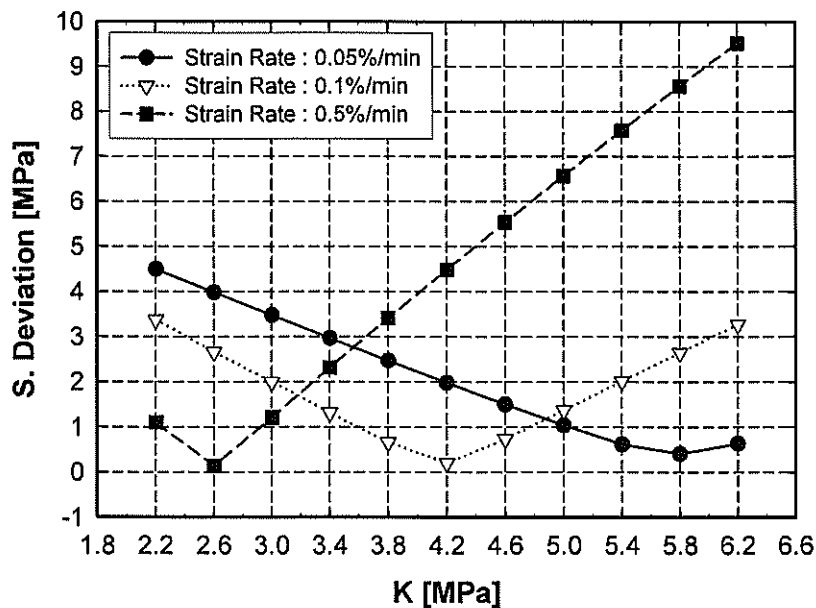
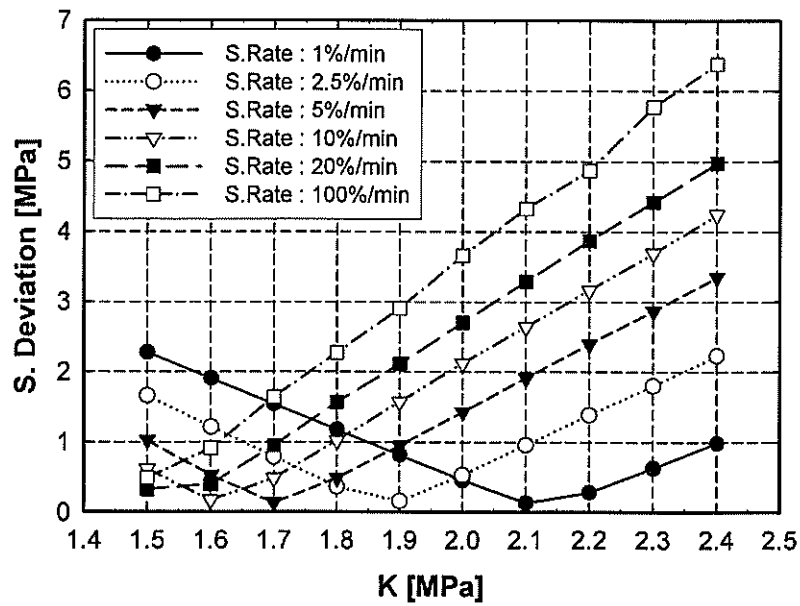


図 2.44 定数 b と C の相関関係



(a) ひずみ速度(0.05~0.5%/min)



(b) ひずみ速度(1~100%/min)

図 2.45 ひずみ速度によるKの変化

表 2.2 アニーリング処理有における材料定数

E (MPa)	A (MPa)	C (MPa)	b (-)	n (sec ⁻¹)
800	17.0	5.5	20.0	2.0×10 ⁻⁶

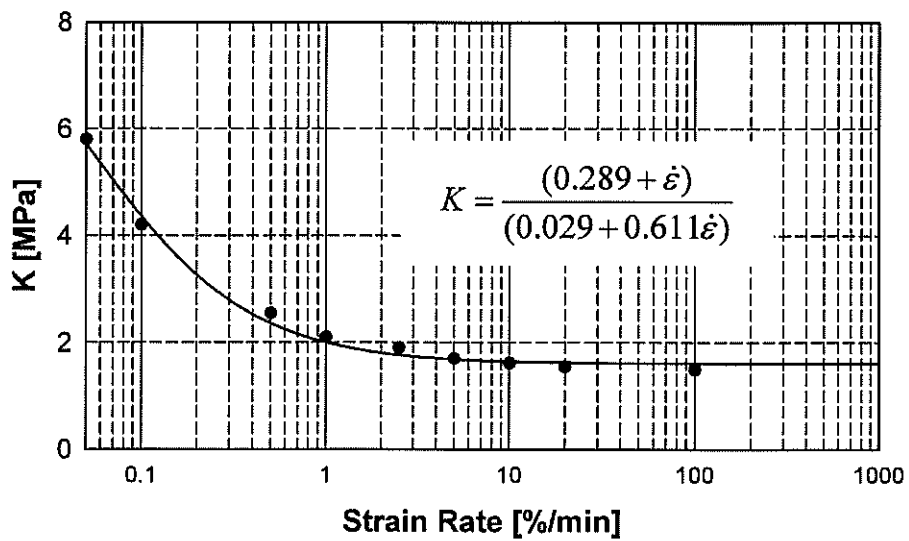


図 2.46 定数Kとひずみ速度の関係

2.4.4 1軸引張の検討

解析結果との比較のために、2.3.2節と同様な条件で1軸引張実験を行った。ただし、ひずみ速度は0.05%/minから100%/minまでの9通りとした。その結果を図2.47から図2.55に示す。比較検討の結果、粘塑性構成式を用いた解析結果はひずみ速度0.05%/minから20%/minまでの実験結果に対して、フィルムの応力-ひずみ曲線を精度よく表現していることがわかる。ただし、図2.47のひずみ速度0.05%/minの結果においては、実験結果の比例限度内でのばらつきにより解析結果との誤差が見られる。また、図2.55はひずみ速度100%/minにおける結果を比較しているが、変化の様子をみると、解析結果は実験結果と少し差異が見られる。これは、応力及びひずみ増分値をひずみ速度に比例して設定しており、ひずみ速度が速くなるほど解析の増分値が大きいことによる。また、図2.56は降伏応力とひずみ速度の関係で、ひずみ速度1%/min以上では、降伏応力がひずみ速度の対数に比例していくのに対し、ひずみ速度1%/min以下では、ほぼ一定値であると言える。

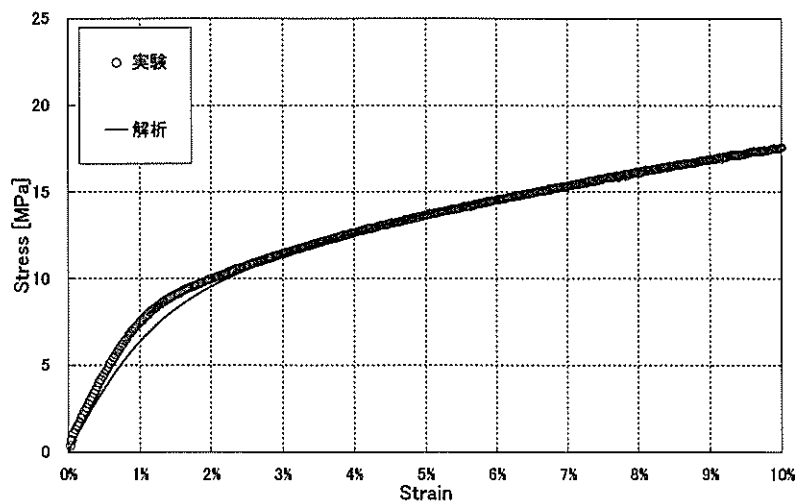


図 2.47 応力-ひずみ関係(ひずみ速度 0.05%/min)

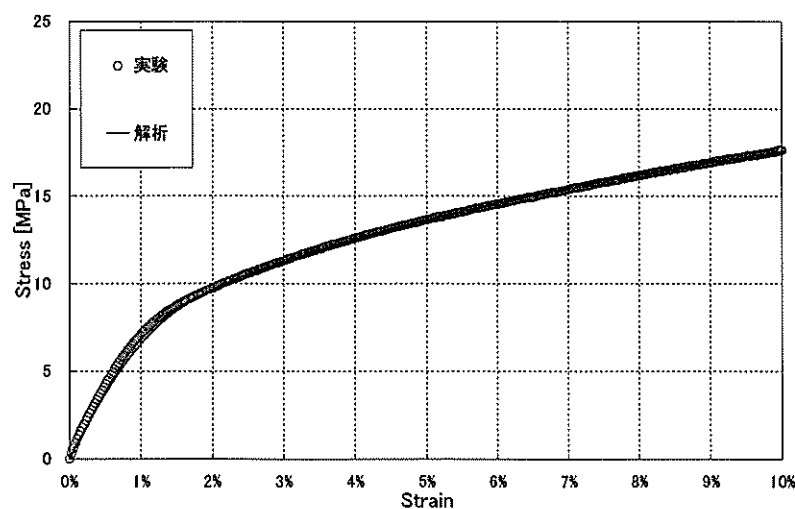


図 2.48 応力-ひずみ関係(ひずみ速度 0.1%/min)

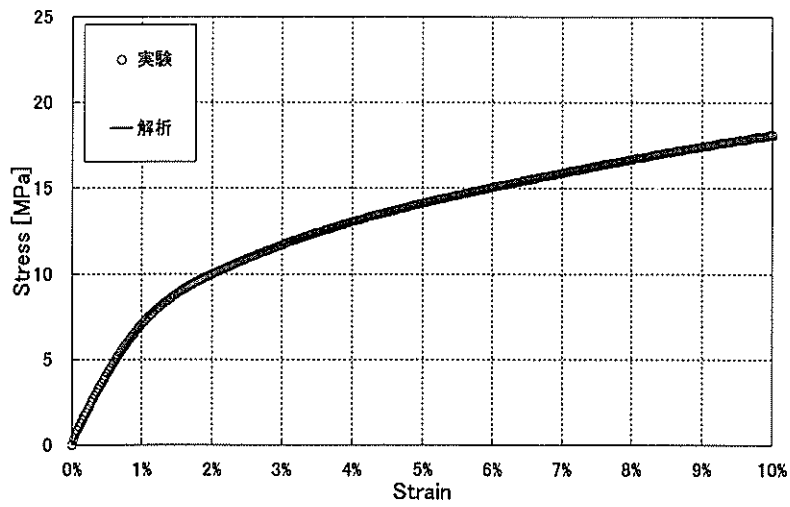


図 2.49 応力-ひずみ関係(ひずみ速度 0.5%/min)

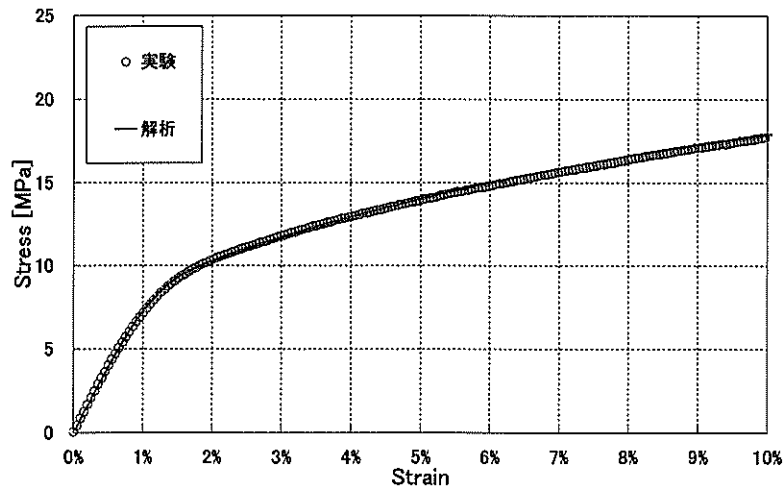


図 2.50 応力-ひずみ関係(ひずみ速度 1%/min)

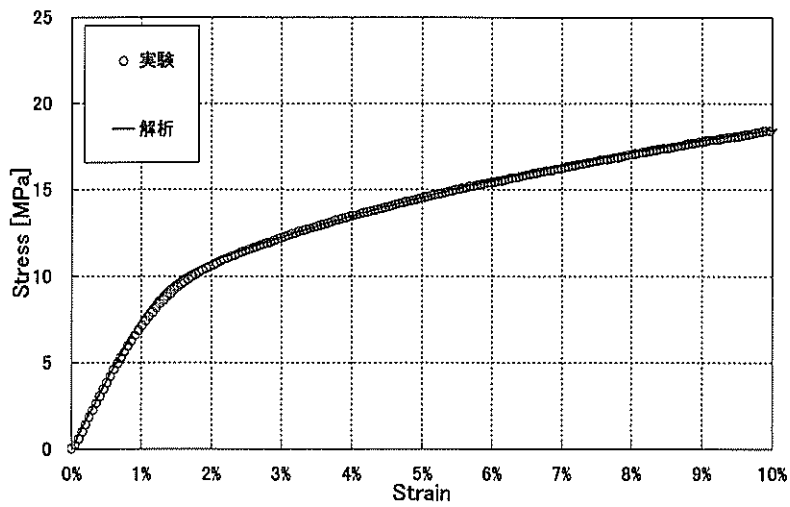


図 2.51 応力-ひずみ関係(ひずみ速度 2.5%/min)

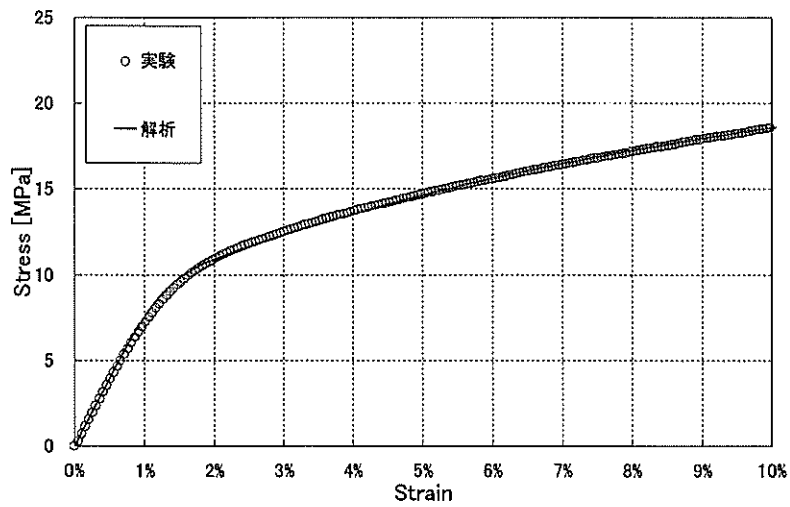


図 2.52 応力-ひずみ関係(ひずみ速度 5%/min)

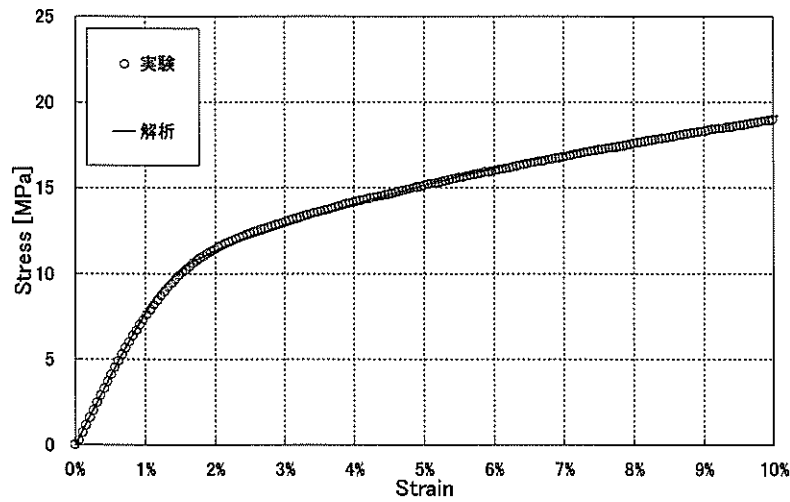


図 2.53 応力-ひずみ関係(ひずみ速度 10%/min)

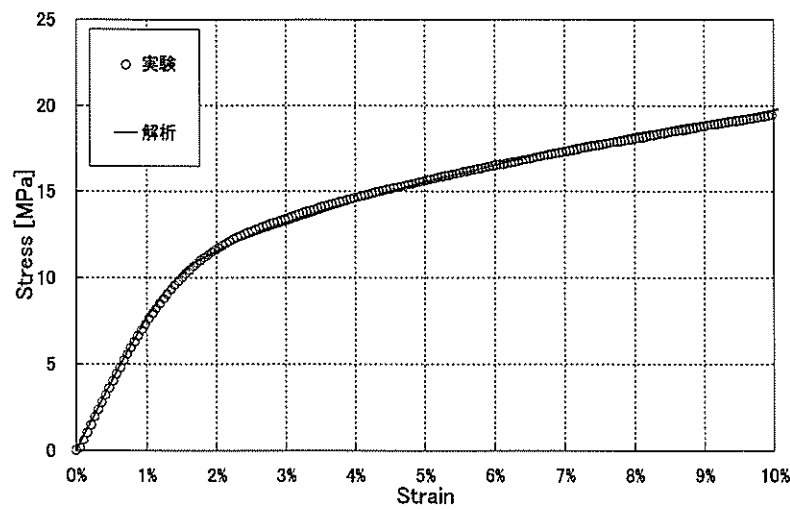


図 2.54 応力-ひずみ関係(ひずみ速度 20%/min)

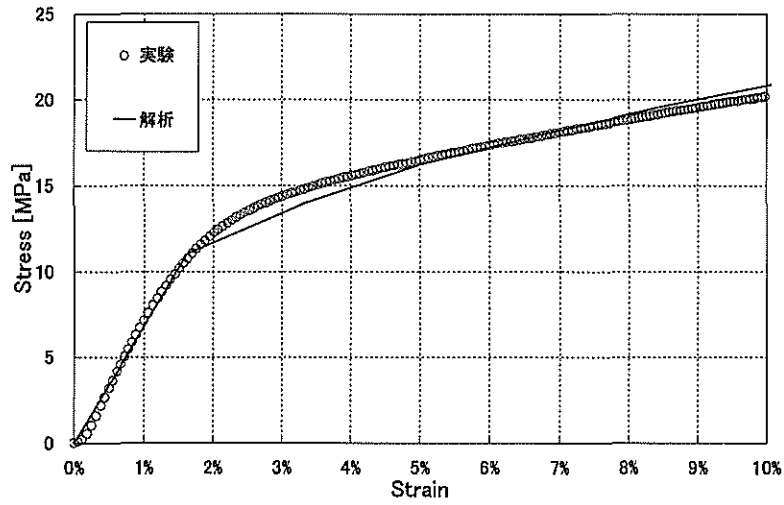


図 2.55 応力-ひずみ関係(ひずみ速度 100%/min)

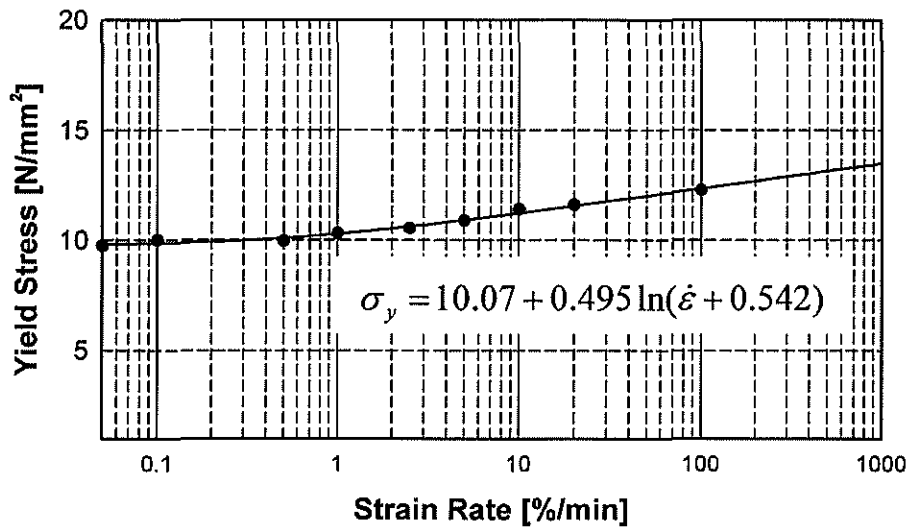


図 2.56 ひずみ速度と降伏応力の関係

2.4.5 2軸引張の検討

解析結果との比較のために、2.3.3 節と同様な条件で2軸引張実験を行った。MD 方向及び TD 方向に対する比較結果をそれぞれ図 2.57、図 2.58 に示す。比較検討の結果、粘塑性構成式を用いた解析結果は2軸応力状態においてもフィルムの応力-ひずみ曲線を精度よく表現していることがわかる。

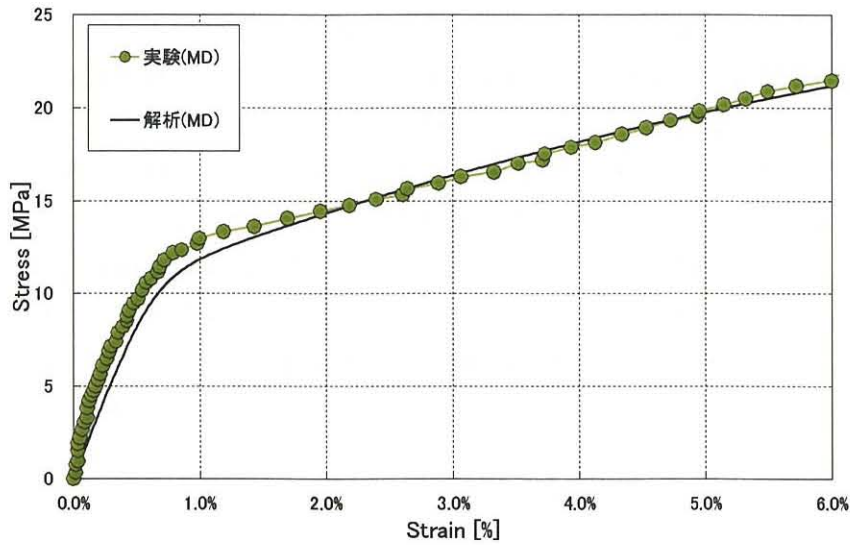


図 2.57 応力-ひずみ関係(MD 方向)

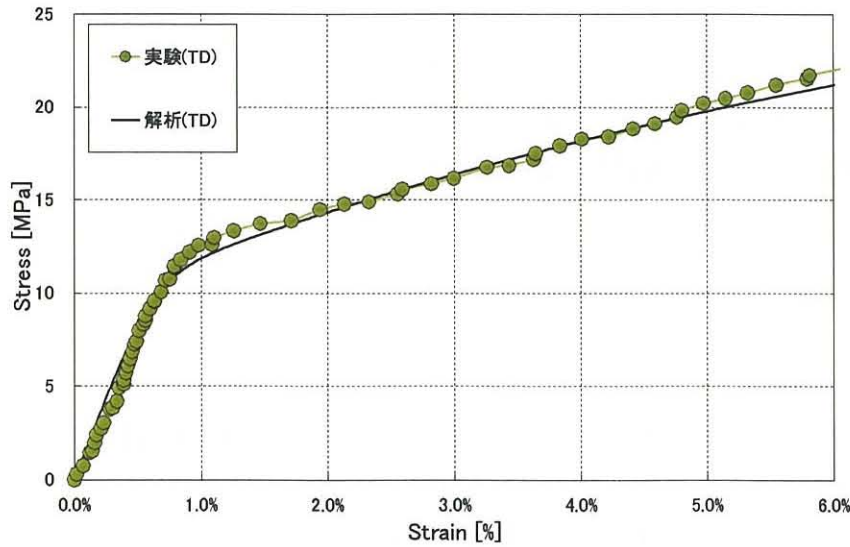


図 2.58 応力-ひずみ関係(MD 方向)

2.5 まとめ

本章では、ETFE フィルムの粘塑性挙動を把握するために、移動硬化クリープ理論と非線形移動硬化理論を組合わせた粘塑性構成式を適用し、解析結果と実験結果の比較を通じてその妥当性を検討した。本章で得られた知見を以下にまとめる。

- 1) Soderberg の関係式の K 値はひずみ速度に依存した変数として扱うことによって、フィルムの応力 - ひずみ曲線を適切に表現でき、1 軸引張時における材料定数をそのまま用いて 2 軸引張時へ拡張できることが分かった。また、アニーリング処理を施したフィルムに対する 1 軸及び 2 軸引張時においても同様に粘塑性構成式を適用できることが確認された。
- 2) ETFE フィルムは降伏点を超えていくと、くびれの発生とひずみ軟化の進行による応力レベルの低下現象が顕著に見られることが確認された。その原因としては、アニーリング処理の有無による影響を検討した結果、製作過程において主に MD 方向の巻取によってフィルムが延伸され、残留ひずみ及び残留応力が生じていると考えられる。これにより降伏応力が増加し、降伏以後の応力 - ひずみ関係にも影響を及ぼしていることが確認された。
- 3) アニーリング処理を施さなかった場合の降伏応力とひずみ速度の関係については、ひずみ速度 $0.05\sim 0.5\%/min$ の試験データを追加して、修正した近似式で表現することができた。なお、ひずみ速度 $1\%/min$ 以上では降伏応力とひずみ速度の関係は比例していくのに対し、ひずみ速度 $1\%/min$ 以下ではほぼ一定値となることが確認された。
- 4) 粘塑性解析の結果、粘塑性構成式はアニーリング処理を施さなかった場合よりもアニーリング処理を施した場合の実験結果に対してより精度良く表現できることが分かった。

今回、粘塑性構成式を用いた解析結果では、ETFE フィルムの負荷履歴については精度よい結果が得られたが、除荷に対しては表現できなかったため、今後は除荷時のひずみ回復が表現できる粘塑性挙動についても検討が必要であると考えられる。

[注]

主 1) 熱変形温度(HDT)：樹脂の試験片に 4.6 または 18.6kgf/cm^2 の荷重をかけ、 $2^\circ\text{C}/\text{分}$ で加熱して行く時、試験片が一定量変形する温度を測定する。ETFE フィルムの場合、 4.6kgf/cm^2 の荷重については 104°C 、 18.6kgf/cm^2 の荷重については 74°C と報告されている。なお、高分子材料では熱変形温度より 10°C 低い温度を短期使用の上限温度とするのが一般的であると知られている。

第3章

ETFE フィルムの延伸効果

第3章 ETFE フィルムの延伸効果

3.1 はじめに

フィルム膜構造の設計法には、許容応力を第1降伏点までとする弾性設計と、フィルムの延性を考慮した塑性設計の2通りが考えられる。小規模なパネルを想定した「ETFE フィルムパネル設計・施工指針案^{3.1)}」は前者の考え方を採用したもので、第1降伏点を許容応力としている。一方、ドーム・スタジアム等に使用される大型フィルムクッションは実質的に後者の考え方によるものもあり、第2降伏点の15%ひずみに対応する荷重を許容耐力としていると言われていたが、先行事例の多い海外でも明確な設計手法が示されていないため、塑性範囲における許容可能な応力レベルや変形状態の明確化が望まれる。また、フィルムの延伸による高耐力化(加工硬化)は他の製造分野では一般的に行われており、包装用ラップやPETフィルムはその代表例である。図3.1は1軸引張時のETFEフィルムの工学ひずみと耐力比(A)、厚さ比(B)、およびこれらの積(C)を示している。耐力比は加工硬化後の応力を第1降伏点の応力で除したものである。厚さ比は体積一定(ポアソン比0.5)と仮定して求めた1軸引張時の厚さを初期厚さで除したものである。ひずみ300~400%の範囲は耐力が大きく上昇するため延伸効果が高いが、厚さ減少や引裂強度、耐衝撃性、耐磨耗性の低下を伴うため建築用途には適用しにくい。以上を考慮すると、1軸延伸では単位幅あたりの耐力(C)が極値となる10~20%が効率的といえる。

延伸成形に関しては、既報^{3.2), 3.3)}で加熱加圧によるフィルムクッションの立体成形実験を行い、その有効性について検討した研究例が報告されている。なお、加圧による2軸延伸を容易に行うことが可能であり、クッションタイプには有効な方法であると論じている。

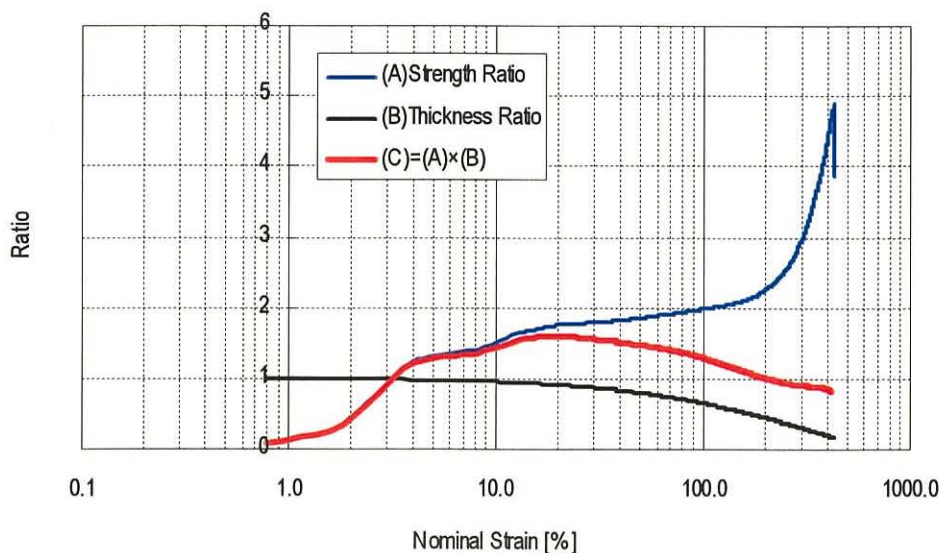


図 3.1 1軸延伸時のひずみと耐力比、厚さの関係

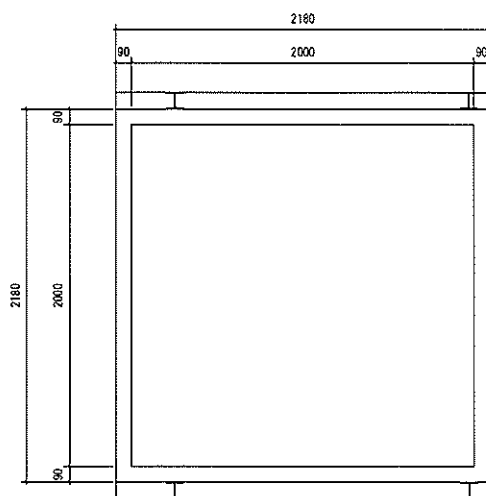
一方、延伸はパネル取付け時に行うことも可能であると考えられる。特に単純形状のパネルであれば、平面裁断でも取付け時の延伸やクッションの加圧延伸による曲面成形が可能で、低ライズで高耐力のパネルや、高ライズでも溶着線が少なく滑らかな曲面を製作することも可能である。しかし、このような取付け時の延伸成形の実例はほとんどない。その理由として、エアクッションは取付け時の初期張力導入を必要としないこと、延伸による局所的な変形と残留ひずみの懸念があること、2%以上のひずみ領域では複雑な粘塑性挙動を示し、精度良く評価する解析手法が未確立であることが挙げられる。

そこで、本章では、フィルム膜構造の耐力を高めるための方法として、パネル取付け時にフィルムを塑性域まで延伸することを提案し、延伸によるフィルムの耐力上昇効果を確認する。また、実験施設に対して経年後の張力変化を把握することで、延伸成形の有効性検討を行う。

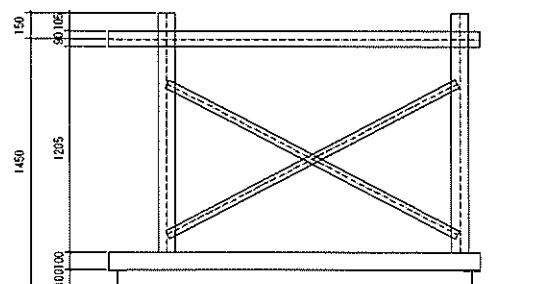
3.2 延伸効果の実験的検討

3.2.1 実験概要

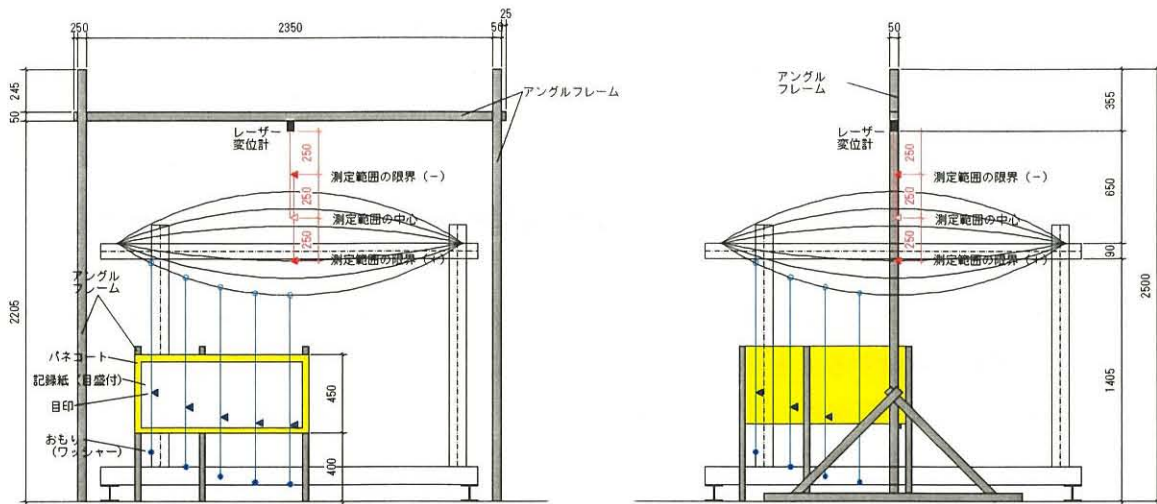
試験体の概要を図3.2に示す。試験体は2m×2mの正方形フレーム、厚さ200 μm のフィルム2枚を重ねて平面フィルムを製作し、縮小率、エッジロープの有無、载荷パターンをパラメータとして表3.1のように8種類とした。延伸による変形を抑える効果を確認するために、取付け後の2枚のフィルムの上にコンプレッサーの空気を送り込み、圧力と変形を計測した。その時、中央部の鉛直変位はレーザー変位計を設置し、加圧によるライズ変化を測定した。また、加圧時にフィルムの変形形状は2枚のフィルムのうち、下面のフィルムに重り(ワッシャー)を貼付け、载荷中の変形形状を記録した。なお、フィルムにはあらかじめ格子線を描き、フィルムの取付け直後とフレームから取り外した後の変形及び残留ひずみを計測した。実験の様子を図3.3に示す。実験はフィルムをフレームに平張った後、風荷重を想定して図3.4のように内圧による载荷実験を行った。延伸率0%と延伸率5%における繰返漸増加圧実験の風景を図3.4に示す。



(a) 平面図(フレーム)

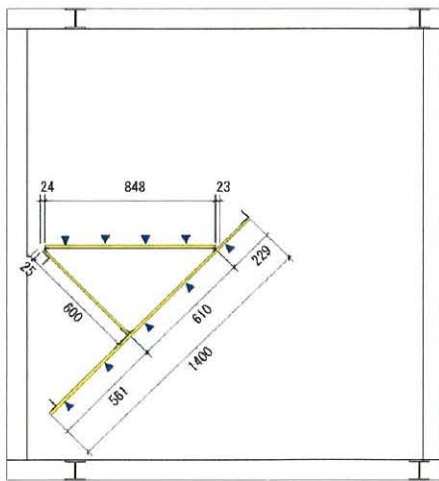


(b) 立面図(フレーム)

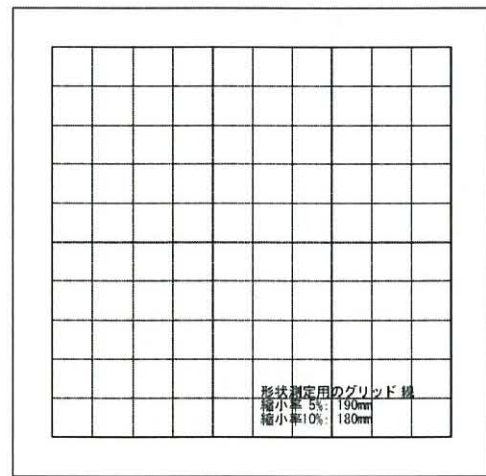


(c) 立面図(変位計測位置)

(d) 立面図(変位計測位置)



(e) 平面図(変位測定用パネル)



(f) 平面図(試験体のひずみ計測用)

図 3.2 試験体の概要

表 3.1 試験体の種類

順番	名称	エッジロープ	縮小率	载荷パターン
1	T-00	×	0%	単調増加加圧
2	T-00	×	0%	繰返漸増加加圧
3	T-05	×	5%	単調増加加圧
4	T-05	×	5%	繰返漸増加加圧
5	T-10	×	10%	単調増加加圧
6	T-10	×	10%	繰返漸増加加圧
7	TE-05	○	5%	単調増加加圧
8	TE-10	○	10%	繰返漸増加加圧



図 3.3 実験の様子



① フィルムの取付



① 延伸による初期張力導入



② 加圧(ライズ 300mm)

(a) 延伸率 0%時

② 加圧(ライズ 149mm)

(b) 延伸率 5%時

図 3.4 実験の風景

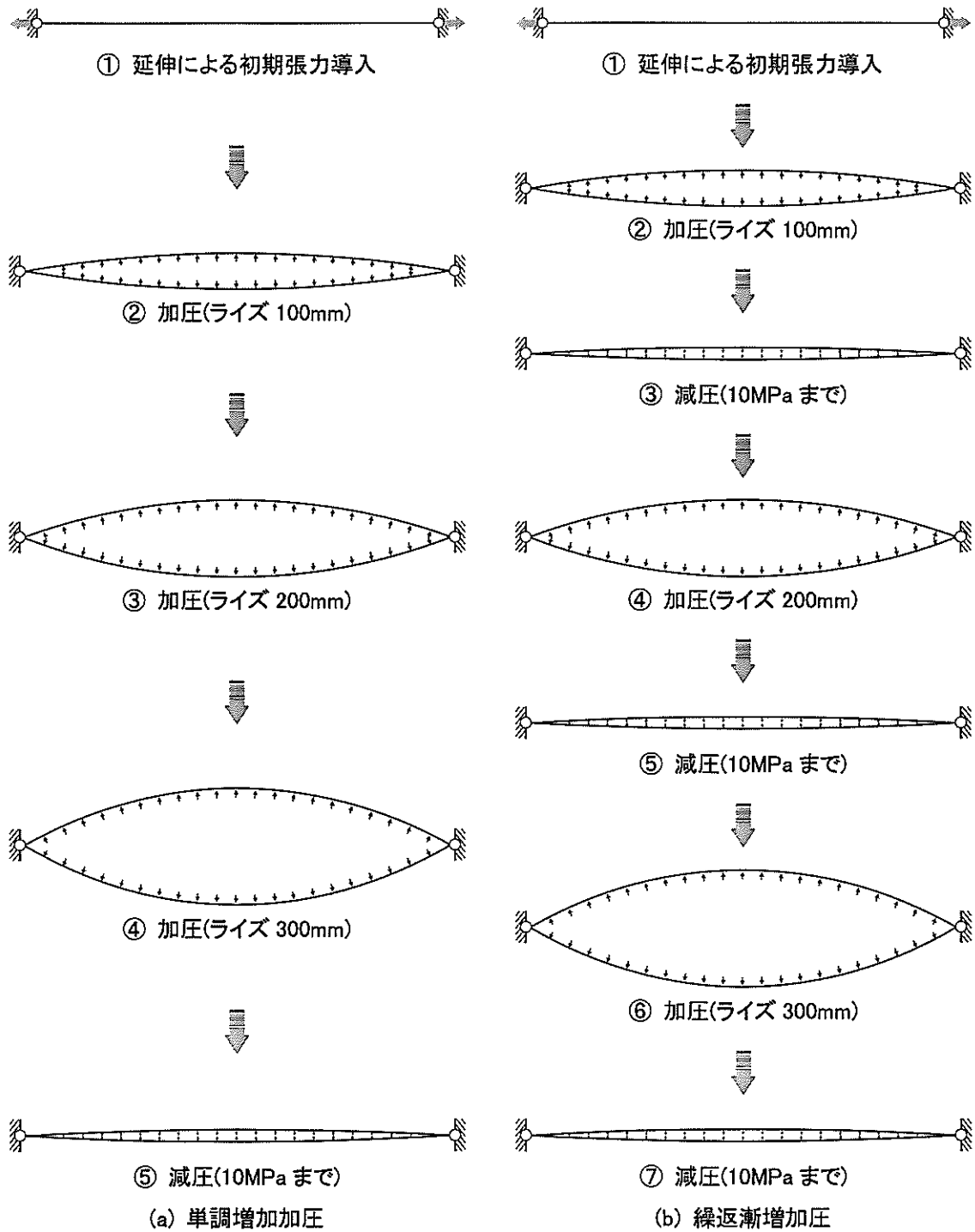


図 3.5 載荷実験の流れ

3.2.2 実験結果

実験結果では、加圧方法とケーブル有無に対しては差異が見られなかったため、表 3.1 の 8 つの試験体のうち、延伸率 0%と 5%時における繰返漸増加圧実験の結果に対して検討を行う。また、実験では、フィルムの応力を直接測定できなかったため、フィルムの応力は図 3.6 のように変形状が円弧となることを仮定し、試験体の中央部の鉛直変位から式(3.2)を用いて求めた平均応力とした。なお、フィルムのひずみは式(3.3)を用いて、試験体の中央部の鉛直変位から同様の関係により求めた。

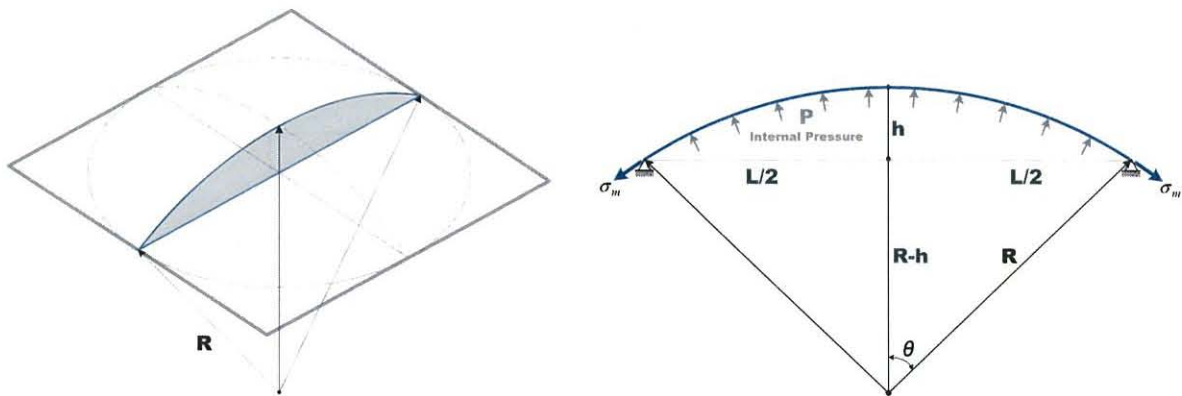


図 3.6 平均応力の算出

$$R = \frac{L^2 + 4h^2}{8h} \tag{3.1}$$

$$\sigma_m = \frac{PR}{2t} \tag{3.2}$$

$$\varepsilon_m = \frac{2R\theta - L}{L} \tag{3.3}$$

延伸率 0%の場合、繰返漸増加圧における圧力とライズ比の関係を図 3.7 に、応力とライズ比の関係を図 3.8 に、応力とひずみの関係を図 3.9 に示す。図 3.7 では圧力 1kPa 時のライズ比 7%、圧力 2kPa 時のライズ比 11%、圧力 3kPa 時のライズ比 14%となった。また、延伸率 0%の場合は初期剛性が極めて小さいため変形が大きく、ライズ 7.5%、圧力 1.2kPa 付近でフィルムが降伏応力に達し、剛性が低下している。また、図 3.9 の応力-ひずみ関係より、除荷後の残留変形を見ると、弾性範囲では除荷した後、ほとんど残留変形が残らずに元に戻るが、塑性域を超えてからは除荷時点から弾性域とほぼ同じ勾配で除荷され、加圧レベルが上がるにつれて残留変形も大きく生じる結果となった。

次に、延伸率 5%の場合、繰返漸増加圧における圧力とライズ比の関係を図 3.12 に、応力と

ライズ比の関係を図 3.13 に、応力とひずみの関係を図 3.14 に示す。図 3.12 では圧力 1kPa の時のライズ比 4.5%、圧力 2kPa の時のライズ比 7.5%、圧力 3kPa の時のライズ比 10%となっており、延伸率 0%時と比べ、延伸による外圧に対する変形量が小さく抑えられることが確認できた。また、除荷後の残留変形をみると、図 3.12 のようにライズ比 5%、7.5%、10%の変形後も除荷した後はほぼライズ比 0%に戻り、残留変形を生じてないことが確認できた。

また、図 3.7 と図 3.12 では、加圧レベルを上げるにつれて剛性が増やしているのに対して、図 3.9、図 3.14 では降伏応力を超えて「塑性域」に達した後も応力の極大点と極小点を結ぶ直線の勾配は、弾性範囲の勾配とほぼ同じになっている。つまり、材料の応力 - ひずみ関係には加工硬化と同様の現象が見られるが、載荷除荷に引張弾性率は弾性時とほぼ同じであり、フィルムの面外変形に対する剛性(幾何剛性)の上昇が見られる。

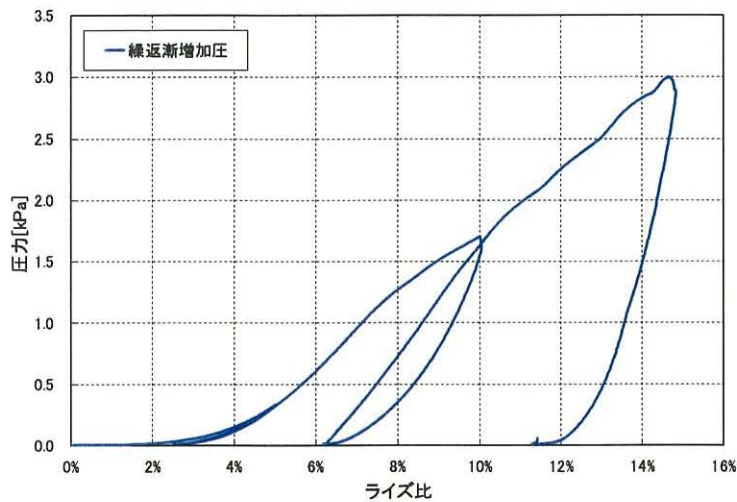


図 3.7 圧力とライズ比の関係(延伸率 0%時)

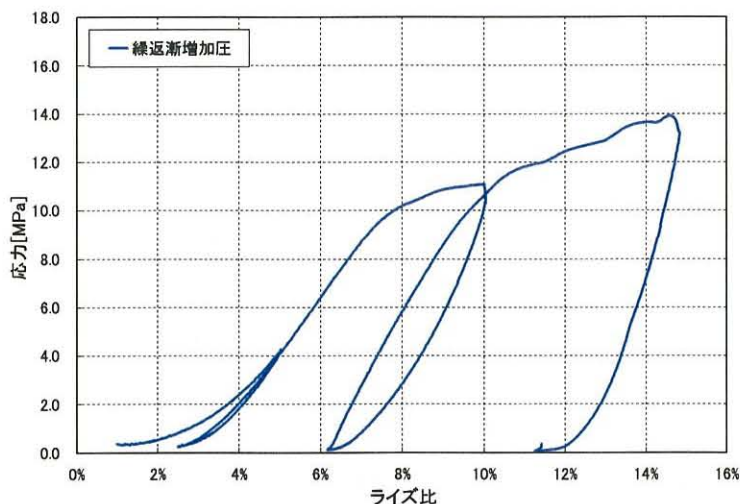


図 3.8 応力とライズ比の関係(延伸率 0%時)

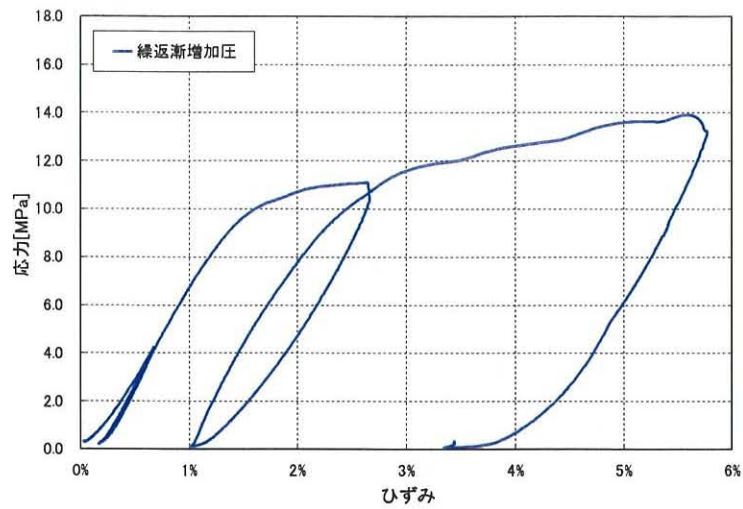


図 3.9 応力とひずみの関係(延伸率 0%時)

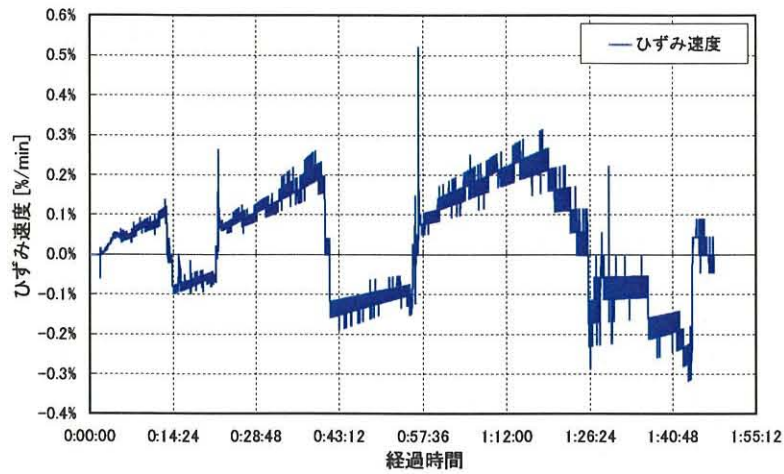


図 3.10 ひずみ速度の変化(延伸率 0%時)

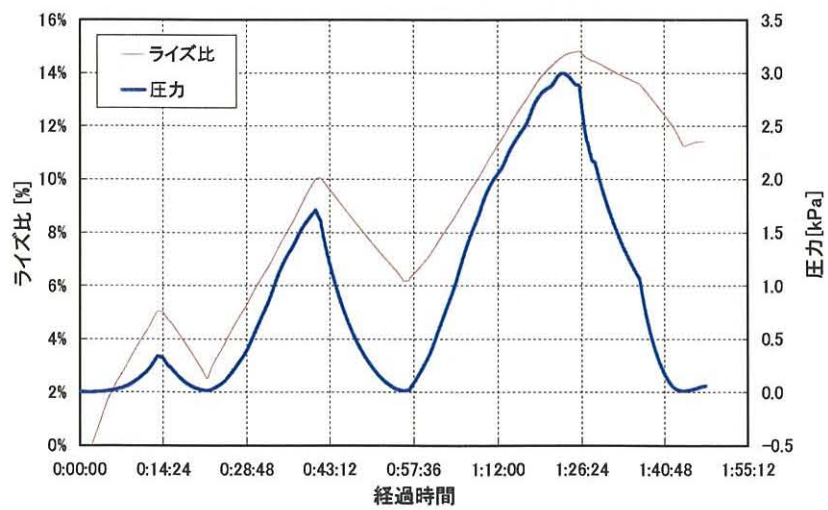


図 3.11 圧力とライズ比の変化(延伸率 0%時)

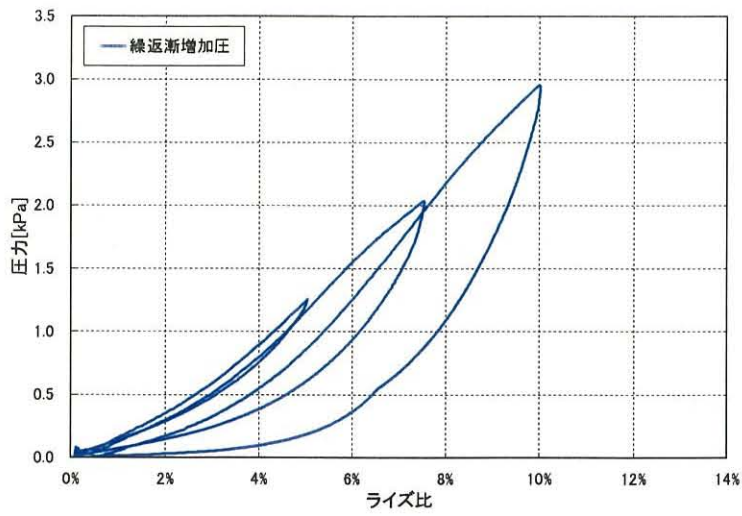


図 3.12 圧力とライズ比の関係(延伸率 5%時)

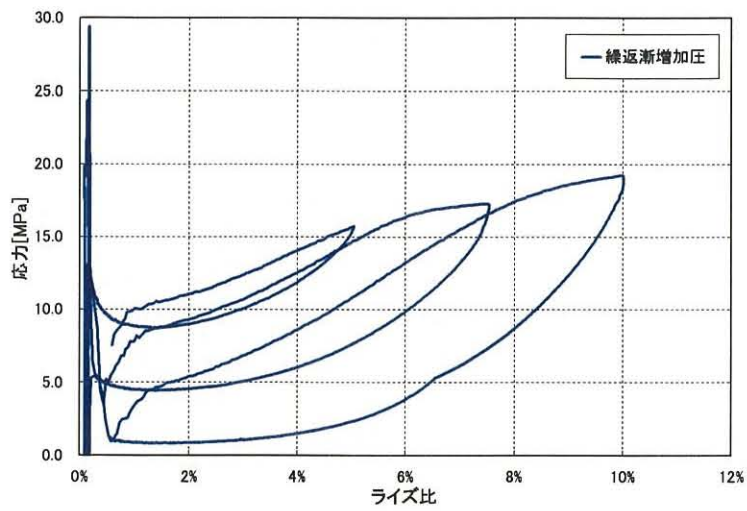


図 3.13 応力とライズ比の関係(延伸率 5%時)

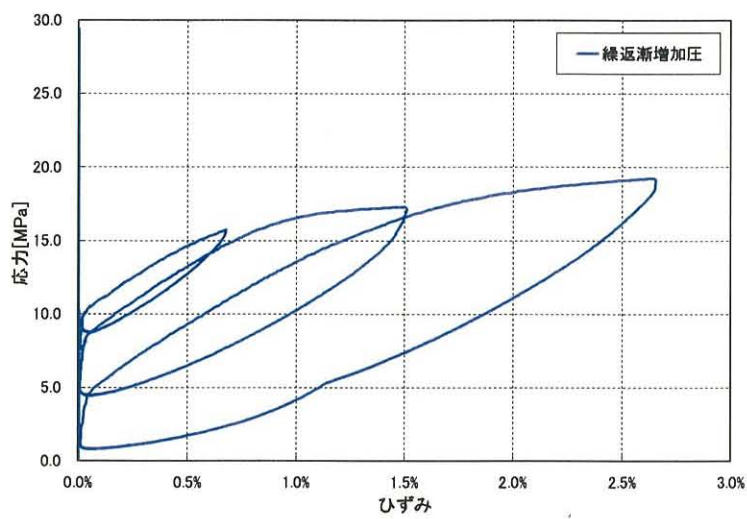


図 3.14 応力とひずみの関係(延伸率 5%時)

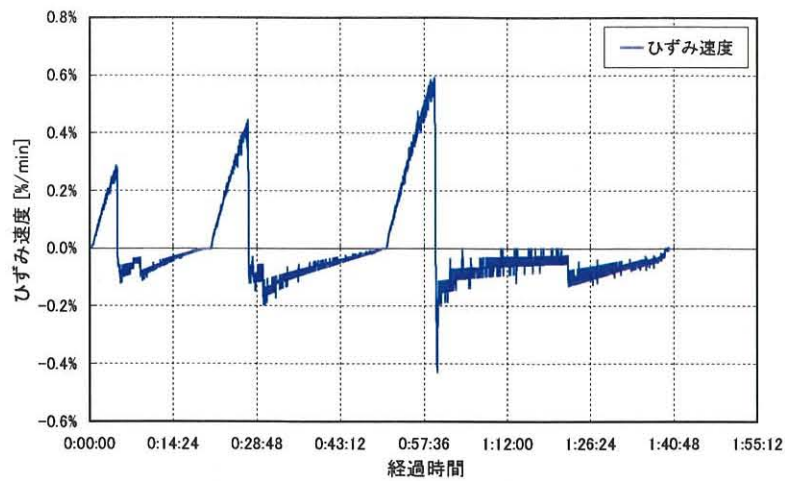


図 3.15 ひずみ速度の変化(延伸率 5%時)

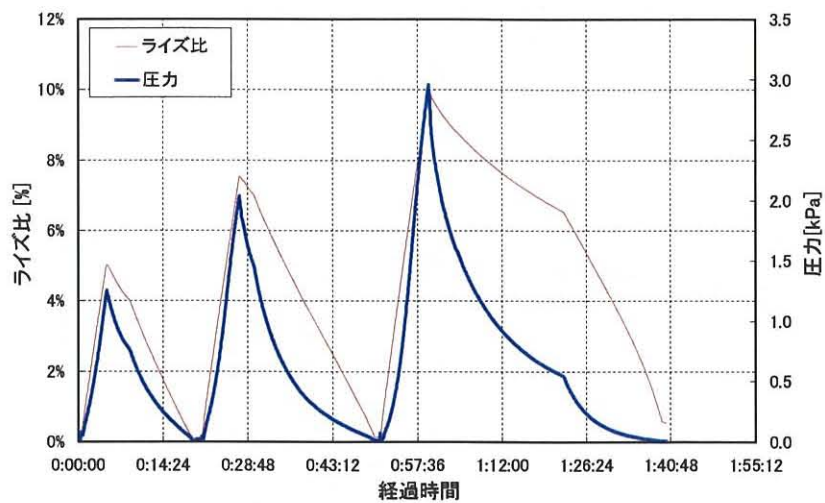


図 3.16 圧力とライズ比の変化(延伸率 5%時)

3.3 延伸成形実験の解析的検討

3.3.1 解析概要

延伸によるフィルムの応力分布や内圧による構造挙動を検討するために、実験を模擬した解析を行った。フィルムの応力解析には汎用プログラム ANSYS を用いた。解析モデルを図 3.17 に示す。材料モデルは、フィルムの弾塑性挙動を現すために、Von-Mises 降伏条件を用いたマルチリニア弾塑性モデルを採用し、フィルムの材料定数を図 3.18 に示す。解析条件は、延伸を想定して外周部に強制変位を与えた後、実験時の加圧条件に合わせて内圧条件を設定した。ただし、実験時は負荷と除荷の始点をライズ比を基準としているのに対し、解析時は内圧(1kPa → 10Pa → 2kPa → 10Pa → 3kPa → 10Pa)を基準とした。

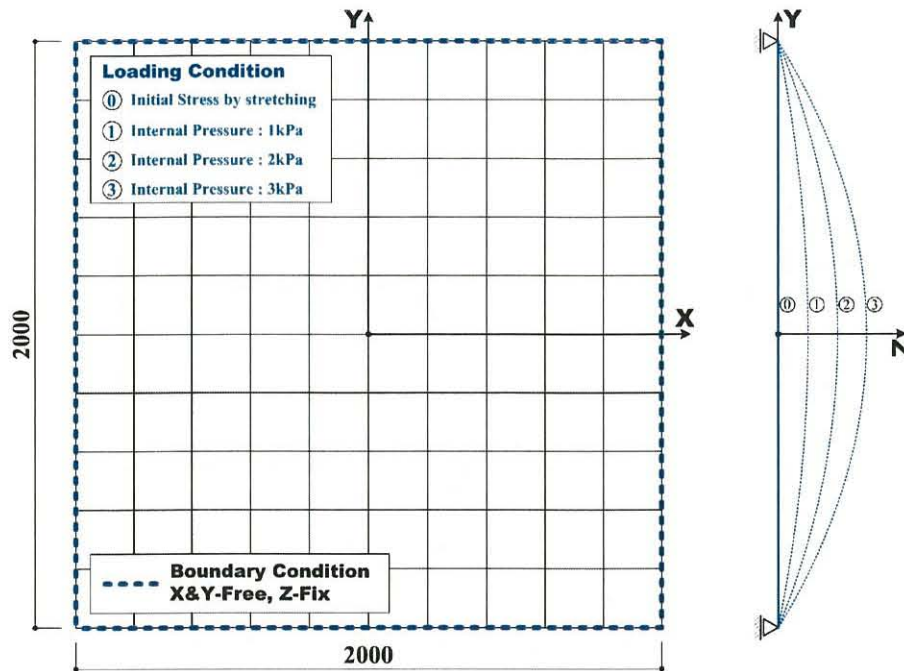


図 3.17 解析モデル

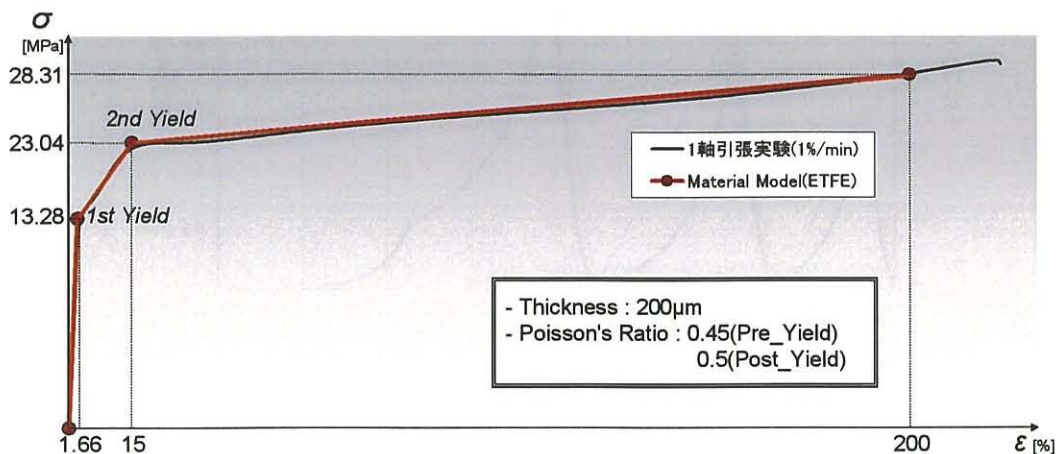


図 3.18 フィルムの材料モデル

3.3.2 解析結果

外周延伸及び内圧に対する延伸率 0%時の相当応力分布を図 3.19 に、延伸率 5%の相当応力分布を図 3.20 に示す。延伸率 0%の場合、加圧時の相当応力分布は正方形試験体の中央部で円弧方向に沿って最大応力が分布し、内圧 1kPa の負荷時は第 1 降伏点(13MPa)を超えずに弾性範囲内での応力分布を示している。内圧 2kPa と 3kPa の負荷時は第 1 降伏点(13MPa)を超えて塑性域へ入っているが、第 2 降伏点(23MPa)には至ってない。一方、延伸率 5%の場合は、延伸率 0%時より塑性域が大きく広がり、内圧 1kPa の負荷時の最大応力は第 1 降伏点を超えている。また、内圧 2kPa と 3kPa の負荷時の最大応力は第 2 降伏点(23MPa)に達している。

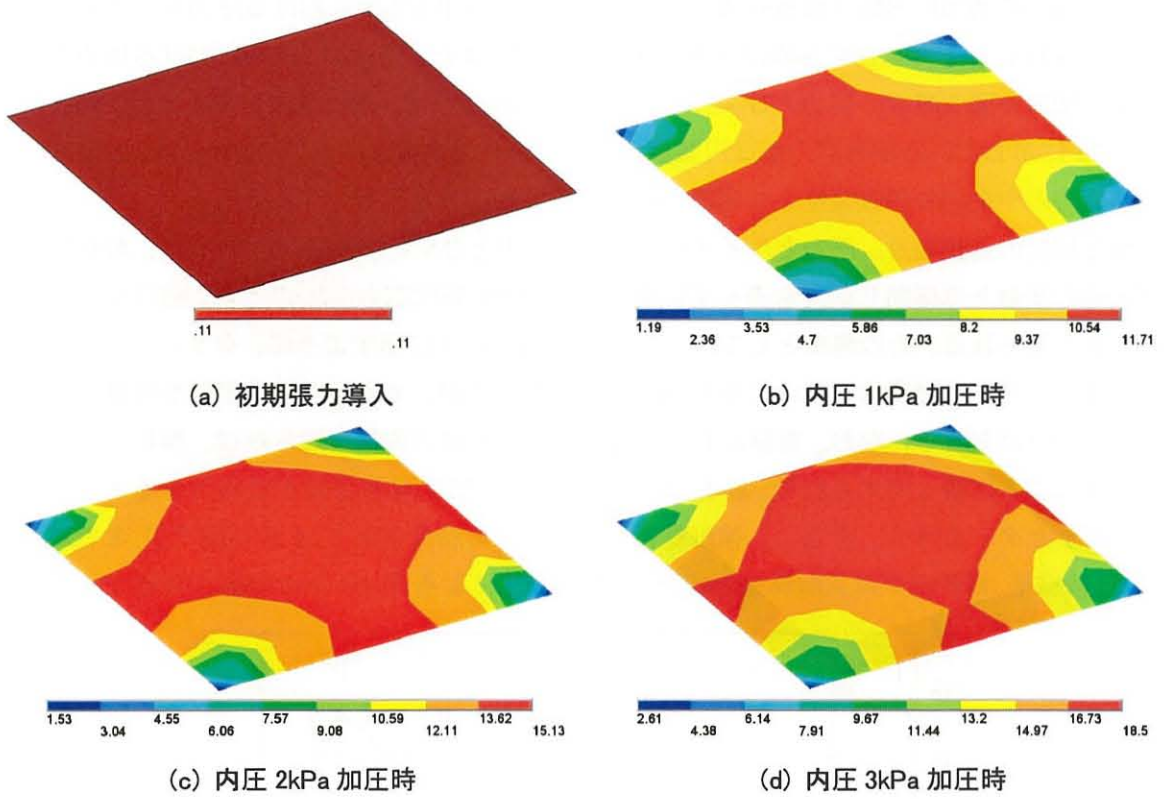


図 3.19 応力分布(延伸率 0%時)

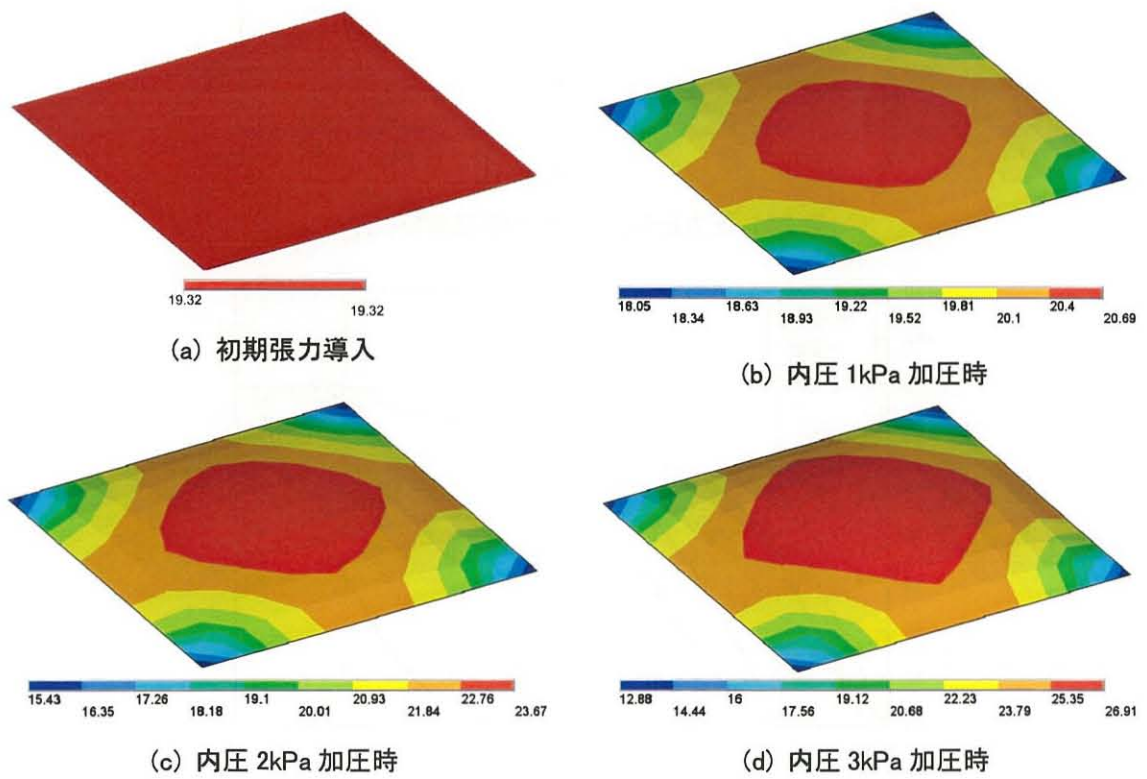


図 3.20 応力分布(延伸率 5%時)

次に、繰返漸増加圧実験と解析結果の比較を行う。延伸率 0%時における圧力とライズ比の関係を図 3.21 に、応力とひずみの関係を図 3.22 に示す。また、延伸率 5%時における圧力とライズ比の関係を図 3.23 に、応力とひずみの関係を図 3.24 に示す。解析結果に関しては、図 3.19 と図 3.20 に示している相当応力値は円弧仮定より求めた実験値とは異なるため、3.2.2 節と同様に解析時の中央部の鉛直変位との関係から求めた平均応力と平均ひずみとした。

実験と解析の比較結果、圧力とライズ比の関係、応力とひずみの関係については、解析結果が実験時の挙動とほぼ同じ傾向を表しているが、負荷時の降伏応力や除荷時の残留ひずみには少し差異が見られる。その理由としては、フィルムは図 3.25 に示すように、クリープ、リラクセーション、ひずみ速度依存性のような粘性を持っているが、本解析では、粘性を考慮していないことが挙げられる。なお、実験における繰返漸増加力時の曲線の膨らみは、解析との比較より粘性による影響と考えられる。以上を踏まえて、図 3.25 に粘性挙動が表現できるように調整したファクターを示す。さらに、検証解析を行い、その結果を図 3.26 から図 3.31 までに示した。比較結果、解析結果は実験結果とほぼ一致し、加圧によるフィルムの挙動が再現できた。

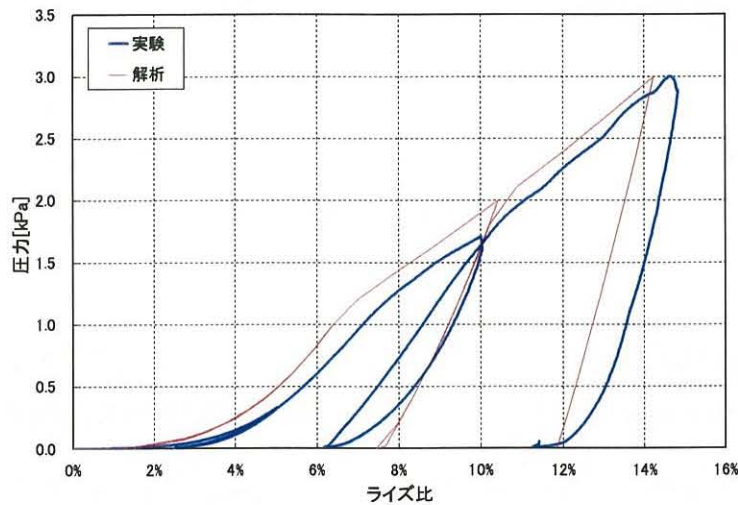


図 3.21 圧力とライズ比の関係(延伸率 0%)

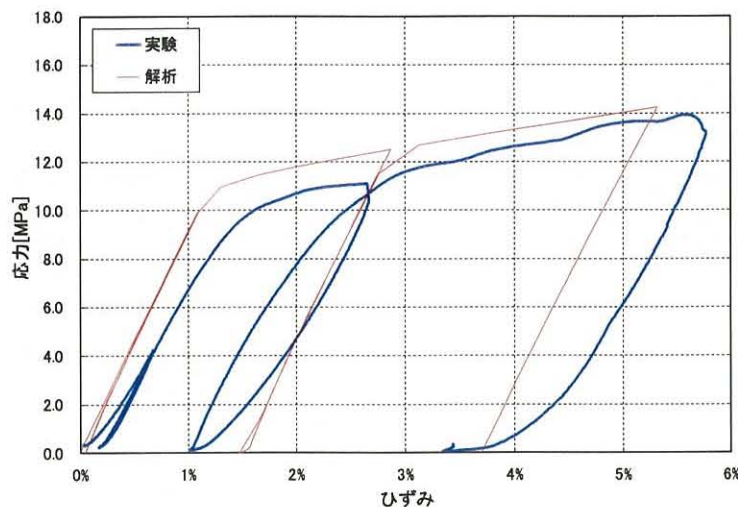


図 3.22 応力とひずみの関係(延伸率 0%)

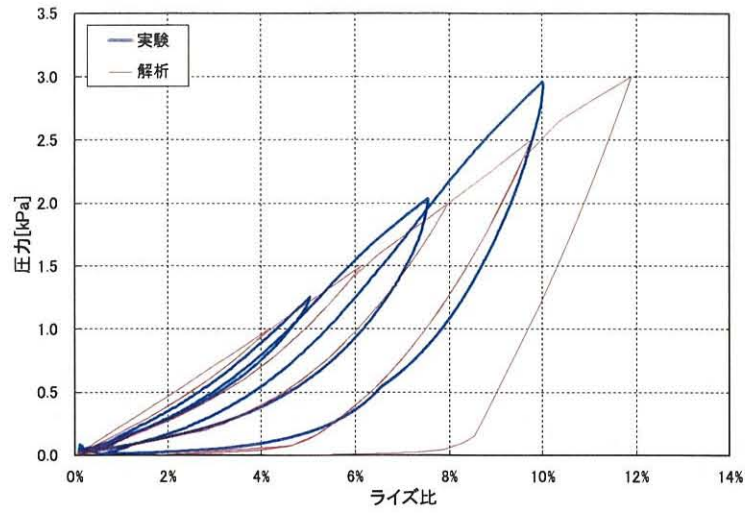


図 3.23 圧力とライズ比の関係(延伸率 5%)

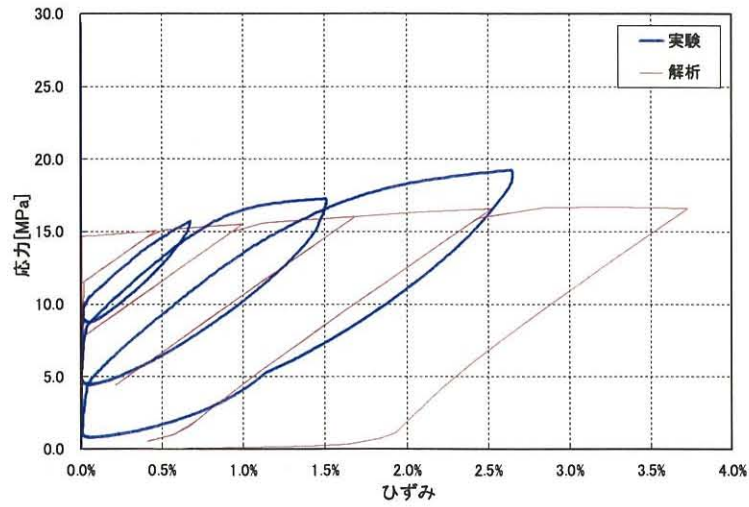


図 3.24 応力とひずみの関係(延伸率 5%)

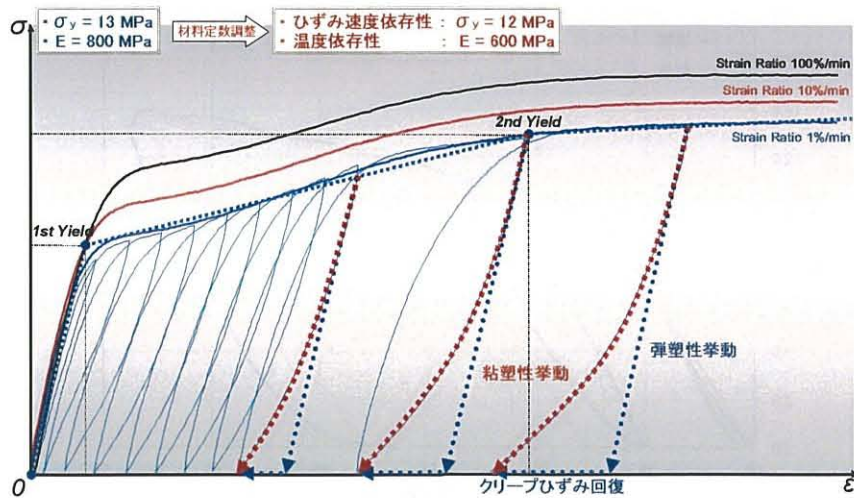


図 3.25 フィルムの粘性挙動と材料定数の調整

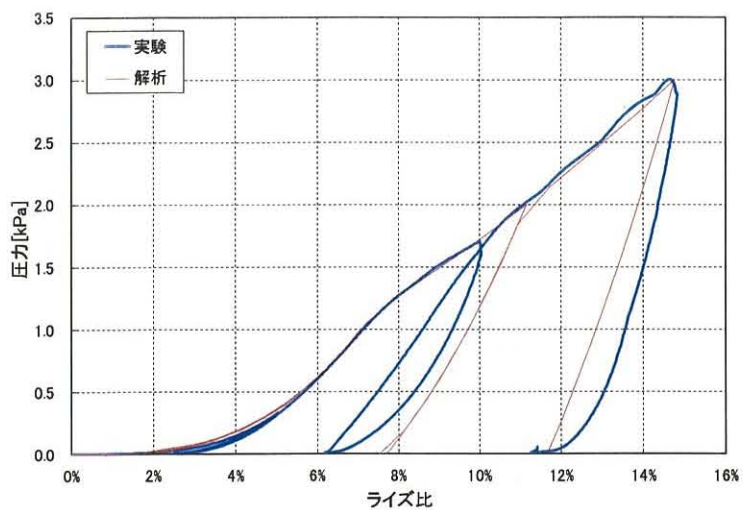


図 3.26 圧力とライズ比の関係(延伸率 0%)

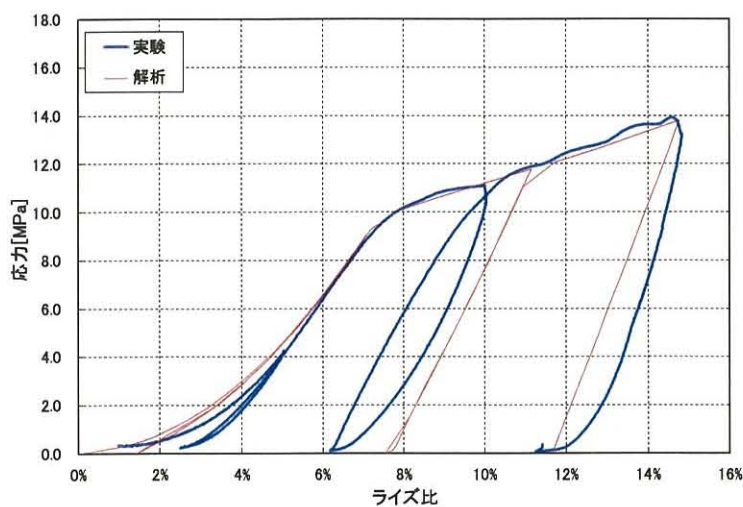


図 3.27 応力とライズ比の関係(延伸率 0%)

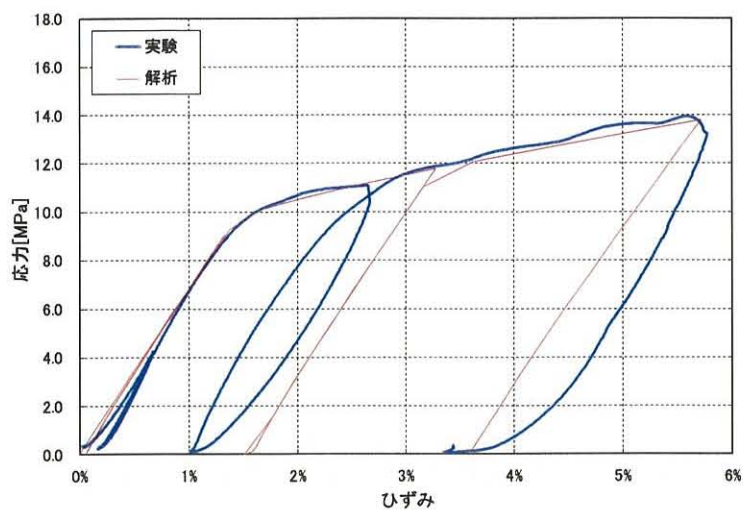


図 3.28 応力とひずみの関係(延伸率 0%)

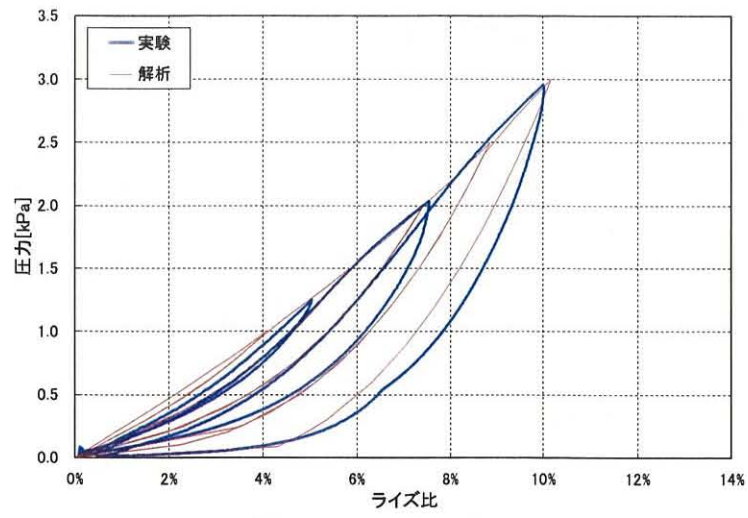


図 3.29 圧力とライズ比の関係(延伸率 5%)

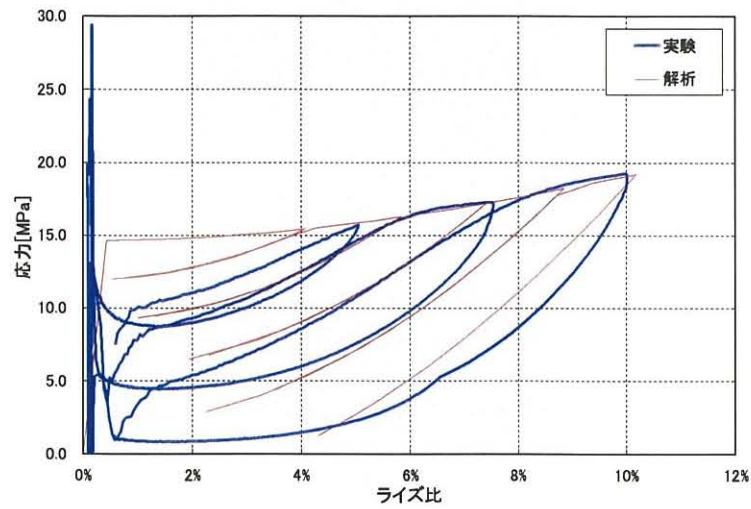


図 3.30 応力とライズ比の関係(延伸率 5%)

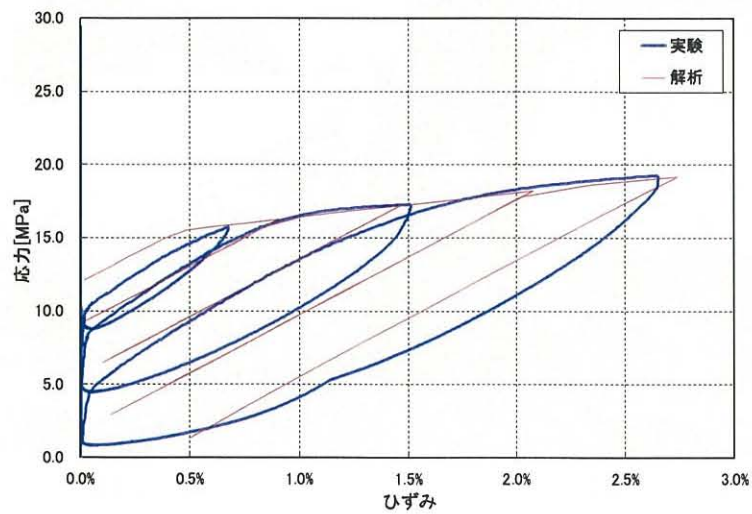


図 3.31 応力とひずみの関係(延伸率 5%)

3.4 テンション方式のフィルム膜構造の張力変化

3.4.1 モックアップ実験の概要

施工手順及び縮小率の確認のため、モックアップ実験を行った。試験体の概要を図 3.32 に示す。試験体は 3.2 節と同様に 2m×2m の正方形フレームを用い、短辺方向の中央部に中間固定及びエッジケーブルが設置できるように部材を補強した。フィルムは厚さ 200 μm を 2 枚重ね、縮小率は短辺方向 2%、長辺方向 1% として製作した。施工時は、はじめにフィルムを短辺方向に引張り、アルミクランプを用いてフレームに固定した。次に長辺方向の両端に配置したエッジケーブルを末端のナット締め込みにより緊張して、フィルムの長辺方向に張力を導入した。実験の様子を図 3.33 に示す。

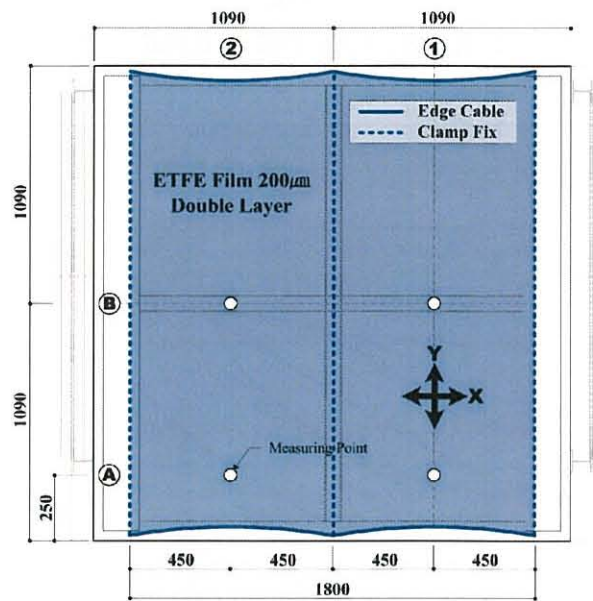


図 3.32 モックアップ試験体の概要



(a) 延伸による初期張力導入

(b) 延伸成形完了

図 3.33 モックアップ実験の様子

3.4.2 時間経過による張力変化

延伸により、フィルムはいったん塑性領域に入るが、同時に応力緩和により徐々に張力は低下していく。そこで、経年後の張力変化について把握するために、短辺および長辺の2方向で張力測定を行い、その結果を図3.34に示す。計測時期は初回が施工後126日、2回目は初回から205日、3回目はさらに372日経過後となっており、X、Yはそれぞれ短辺、長辺方向に対応する。施工後1年間は応力緩和が顕著であるが、その後は安定的に推移している。張力比は経年後も縮小率とほぼ同じ2:1の比率を維持している。図3.35は初回計測値に対する張力保持率を示す。約2年経過後の張力保持率は60~70%程度となった。フィルムは降伏応力を超える延伸に対して、時間経過によりリラクセーションが進むものの、張力保持率は一定値に停留することが確認できた。

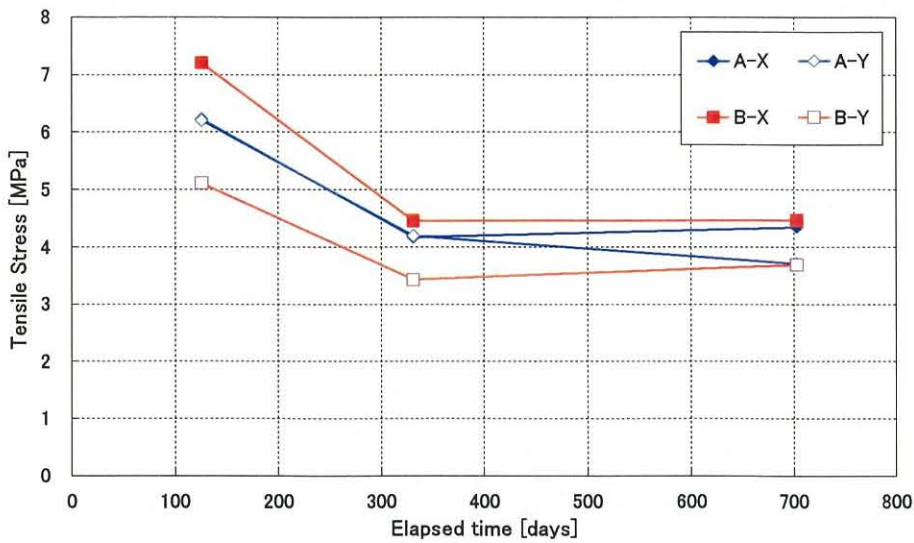


図 3.34 張力推移(モックアップ)

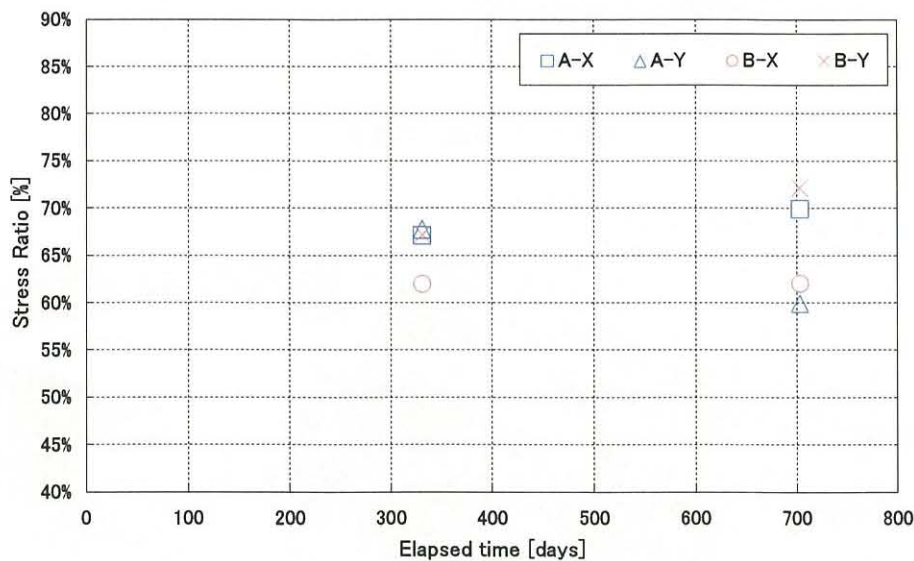


図 3.35 張力保持率(モックアップ)

3.4.3 実験施設の概要

テンション方式によるフィルム膜構造の実験施設の概要を図 3.36 に示す。A の字型の 3 列の柱で支持されたキャンチレバーの梁の下側に ETFE フィルムを取り付けている。フィルムは白色と UVC (紫外線カット) の 2 種類を使用し、それぞれ厚さ $200\mu\text{m}$ を 2 枚重ね、縮小率は短辺方向 2%、長辺方向 1% として製作している。施工時は、はじめにフィルムを短辺方向に引張り、アルミクランプを用いて鉄骨梁に固定し、次に長辺方向の両端に配置したエッジケーブルを末端のナット締め込みにより緊張して、フィルムの長辺方向に張力を導入している。この施工時の延伸により、フィルムはいったん塑性領域に入るが、同時に応力緩和により徐々に張力は低下していく。そこで、図 3.36 の白丸で表す 12 箇所について、経年後の張力を短辺および長辺の 2 方向で測定した。各パネルは展張された日が異なるため、計測時期は初回が白色は施工後 53 日、UVC は 27 日、2 回目は初回から 205 日、3 回目はさらに 372 日経過後となっている。

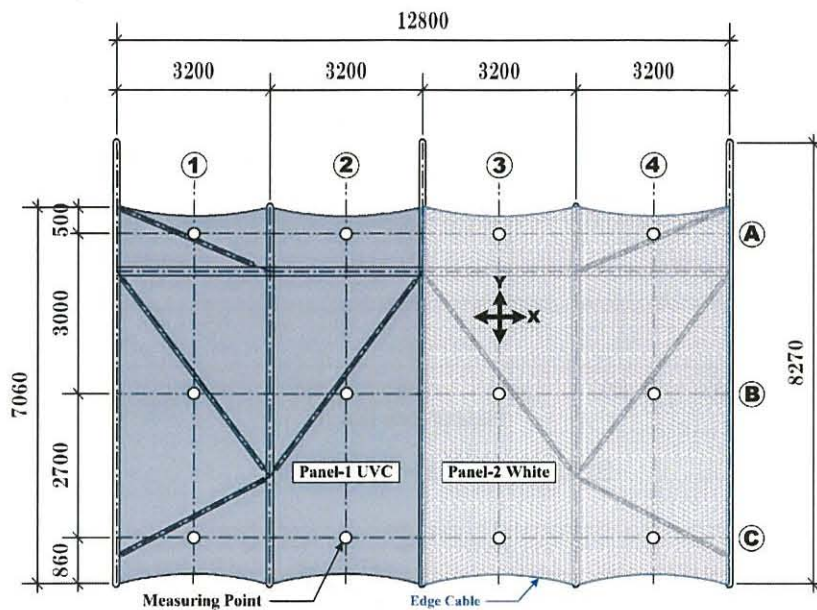


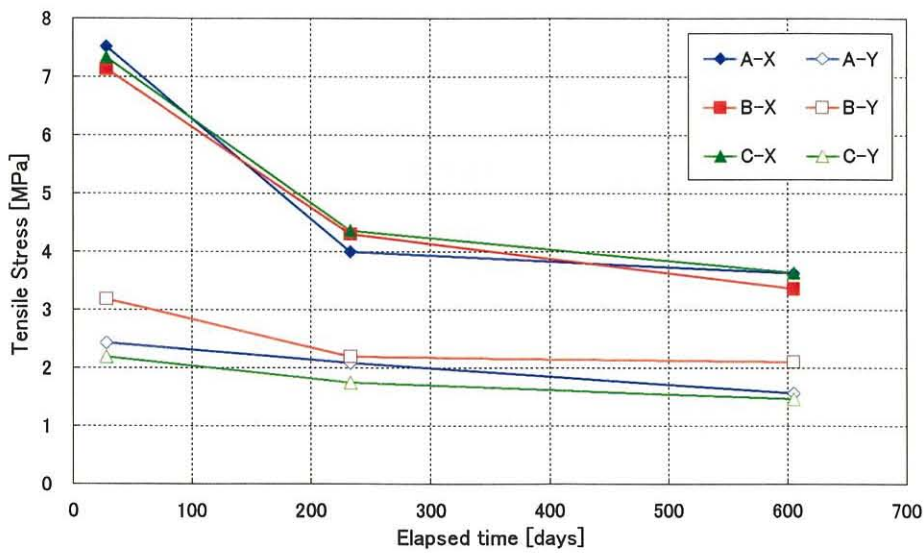
図 3.36 実験施設の概要



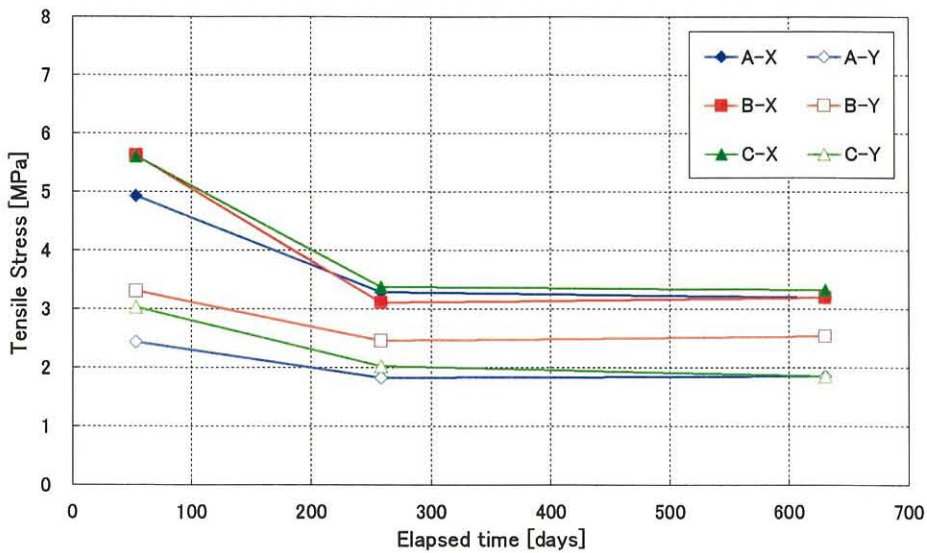
図 3.37 実験施設の様子

3.4.4 時間経過による張力変化

図 3.38 は各フィルムの張力測定結果を示す。X、Y はそれぞれ短辺、長辺方向に対応する。施工後 1 年間は応力緩和が顕著であるが、その後は安定的に推移している。張力比は経年後も縮小率とほぼ同じ 2 : 1 の比率を維持している。図 3.39 は初回計測値に対する張力保持率を示す。白色と UVC では少し異なる傾向を示しており、白色の方が張力保持率は高めで安定する傾向にある。パネルによる差がやや大きいものの、約 2 年経過後の張力保持率は白色で 55~75%、UVC で 45~65% 程度となっている。フィルムは降伏応力を超える延伸に対して、時間経過によりリラクセーションが進むものの、張力保持率は一定値に停留する傾向があると言える。



(a) UV カット



(b) ホワイト

図 3.38 張力推移(建築学棟屋上シェルター)

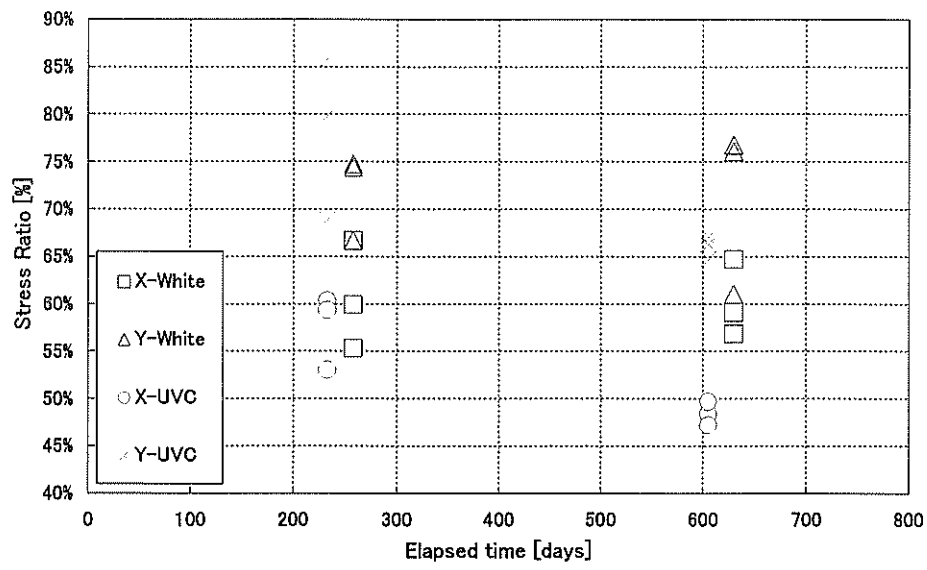


図 3.39 張力保持率(建築学棟屋上シェルター)

3.5 まとめ

ETFE フィルムの施工時延伸により、降伏応力の上昇効果の確認と、テンション方式のフィルム構造への適用性を検討することを目的として、モックアップ実験を実施した結果、得られた知見を以下に示す。

- 1) フィルムの施工時延伸により、降伏応力が上がって耐力の上昇効果が得られ、外力による変形後にも緩みを生じにくくなることが確認された。
- 2) フィルムの延伸範囲については、1軸延伸では10～20%の延伸が効率的であることが確認されたが、実験時の2軸延伸では、延伸率5%及び10%の場合には試験体のコーナー部分引裂きを生じることが確認されたため、施工時にあまり高い延伸率を設定することは困難であると考えられる。
- 3) 実験棟の施工では、モックアップの結果をふまえて、縮小率(短辺方向:長辺方向 = 2% : 1%)の設定、コーナー部分の引裂き対策を行った結果、空気の送風を必要としないテンション方式のフィルム構造が実現できた。
- 4) 経年後の張力変化については、フィルムの張力は初期の張力比(短辺方向:長辺方向 = 2 : 1)を保ちつつ応力緩和により低下し、施工後1年間は応力緩和が顕著であるが、その後は安定する傾向が確認された。なお、フィルムの張力保持率は施工後約2年経過後にも初期張力値に対して約50%以上の張力を維持することが分かった。

第4章

ETFE フィルムの応力集中

第4章 ETFE フィルムの応力集中

4.1 はじめに

ETFE フィルムは、耐候性に優れるフッ素樹脂のなかでも引張や引裂き、衝撃などの諸外力に対して強度と靱性のバランスの取れた材料である。強度は織布で補強された膜材料に及ぶべくもないが、空気圧を用いてクッション状にすれば発生応力を抑えつつ塑性領域の延性も活用できるため、エデン・プロジェクトや北京五輪の国家水泳中心のような大型パネル化が可能である。また透明から遮蔽まで光線透過率を幅広く調整可能で、紫外線や熱線など特定波長域の光線を選択的に遮蔽することやフィルム表面への印刷等の機能性付与にも優れている。その他、複層化による断熱性確保の容易さ、マテリアルリサイクル性など多くの特長を有する。

これまでのフィルムを用いた適用事例では、クッションタイプが多いが、これは雪や風のような外部荷重及びクリープ、リラクセーションのようなフィルムの粘性挙動に対して有利なためである。ただし、維持管理の設備や形状に限られるといった問題点も持っている。著者らはこれまでにフィルムの耐力を高める方法として、施工時にフィルムを延伸する方法を提案し、テンションタイプへの有効性を確認してきた^{4.1), 4.2)}[図 4.1]。



図 4.1 延伸成形によるテンションタイプの適用事例

実際に延伸成形方法を適用するためには、施工時に外周から引き込む方法が一般に行われるが、その時、孔や切欠きなどで力の流れが周囲に比べて急激に変わる部分^{4.3)}、特に、コーナー部においては応力集中が生じやすくなり、引裂きに至る事も考えられる。その対策としては、コーナー部に円形の切欠きを施すことにより応力集中が回避できることを確認した[図 4.2]。し

かし、応力集中を回避するための切欠き形状やサイズについては、鋼材のような線形弾性的な材料に関する研究は多く報告されているが、フィルムのような塑性領域が広い非弾性材料に関する研究例はほとんど報告されていないのが現状である。そこで、本報では、外周引込みによるテンション方式フィルム膜構造の技術的確立を目的として、フィルムを対象として引張実験を行い、切欠き形状による応力集中と亀裂発生との関係を検討する。さらに、実験モデルを対象として1軸引張実験を模擬したFEM解析を行い、クラックやノッチ先端部における応力集中や亀裂発生時の応力分布について把握する。



図 4.2 応力集中部のコーナー処理

4.2 切欠き形状と応力集中に関する実験的検討

4.2.1 実験概要

切欠き形状による応力集中及び亀裂発生時の特性を把握するために1軸引張試験を行った。試験片は、図4.3のような幅30mm、長さ60mm(チャック間30mm)、厚さ200 μ mのドットプリントされたフィルムを使用した。なお、切欠き形状や寸法による各モデルの分類を図4.4に示す。試験片の採取はMD方向とし、試験片の数は各モデルにおいて2本ずつ行った。また、試験条件は、ひずみ速度10%/minとし、雰囲気温度は22 $^{\circ}$ Cとした。なお、切欠きのない試験片(モデル[0])に対しても1軸引張試験を行い、比較検討した。

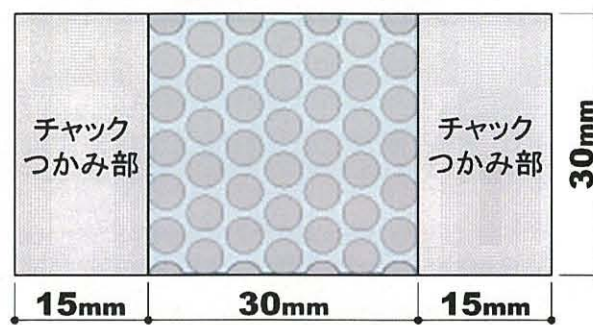


図 4.3 試験片の寸法(モデル[0])

<p>[1]両端線切欠き</p> <p>$d=1, 3, 5, 7\text{mm}$</p>	<p>[2]中央線切欠き</p> <p>$d=1, 3, 5\text{mm}$</p>	<p>[3]両端半円切欠き</p> <p>$R=1, 2.5, 5\text{mm}$</p>	<p>[4]中央円切欠き</p> <p>$R=1, 2.5, 5\text{mm}$</p>
<p>[5]両端浅角切欠き</p> <p>$\theta=30, 45, 90, 120^{\circ}$</p>	<p>[6]両端深角切欠き</p> <p>$\theta=30, 45, 90^{\circ}$</p>	<p>[7]両端四角切欠き</p> <p>$d=3, 5\text{mm}$</p>	<p>[8]中央四角切欠き</p> <p>$d=3, 5\text{mm}$</p>

図 4.4 試験片の分類

4.2.2 実験結果及び比較検討

各切欠き形状における1軸引張実験結果を示す。まず、両端線状([1])及び両端円形切欠き([3])における公称応力-ひずみ関係を図4.5に、中央線状([2])及び中央円形切欠き([4])における公称応力-ひずみ関係を図4.6に、三角切欠き([5]、[6])の公称応力-ひずみ関係を図4.7、8に、そして、四角切欠きの公称応力-ひずみ関係を図4.9に示す。ここで、公称応力は荷重を変形前の断面積で除したものである。

線状及び三角切欠きでは、フィルムの第二降伏点付近(ひずみ度15~20%)周辺で荷重ピークを迎えたのに対し、円形切欠きモデルでは、応力集中が緩やかで、ひずみ100%近くまで伸びて、図4.10-(a)のような亀裂を生じて最大荷重に達する結果となった。なお、半径5mm両端部円形切欠きモデル([3]-5)では、このような亀裂を生じることなく、切欠きなしの結果と同様な性状を示した。また、三角切欠き([5]、[6])では、切欠き深さが同じである場合、線状切欠きの結果と同様な傾向があったが、切欠き角度の変化による違いはほとんど見られなかった。

また、四角切欠きモデル([7]、[8])では、図4.10-(c)のように四隅から亀裂進展するのではなく、二か所から亀裂が発生し、斜めに变形しながら破断するなど、亀裂発生及び進展においては、線状切欠きの結果と同様な傾向を示した。

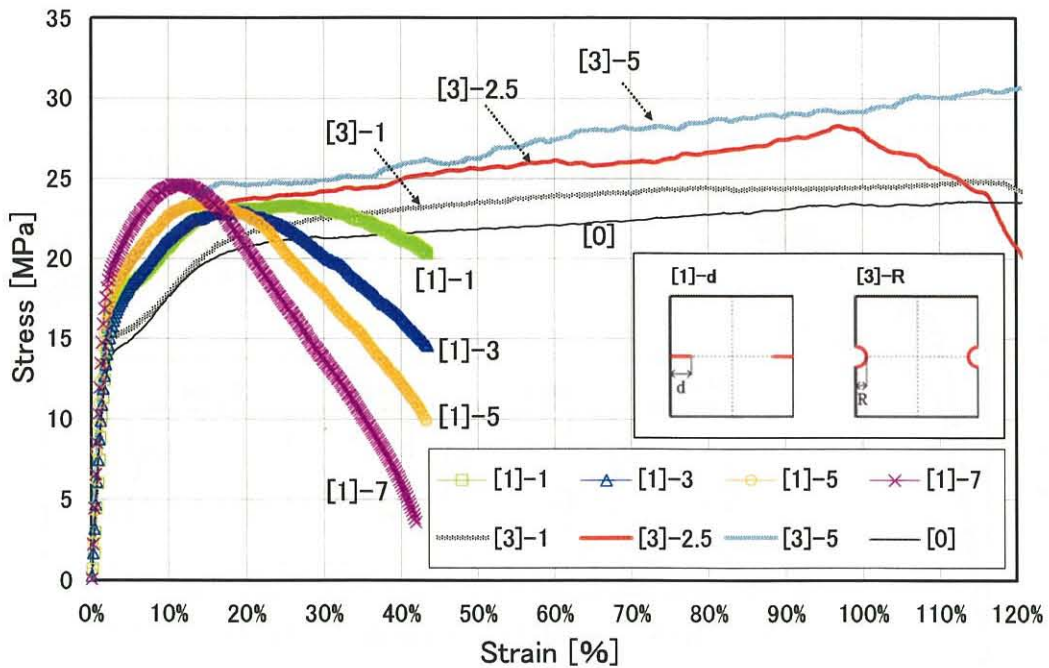


図 4.5 両端線及び両端円形切欠きの応力-ひずみ関係

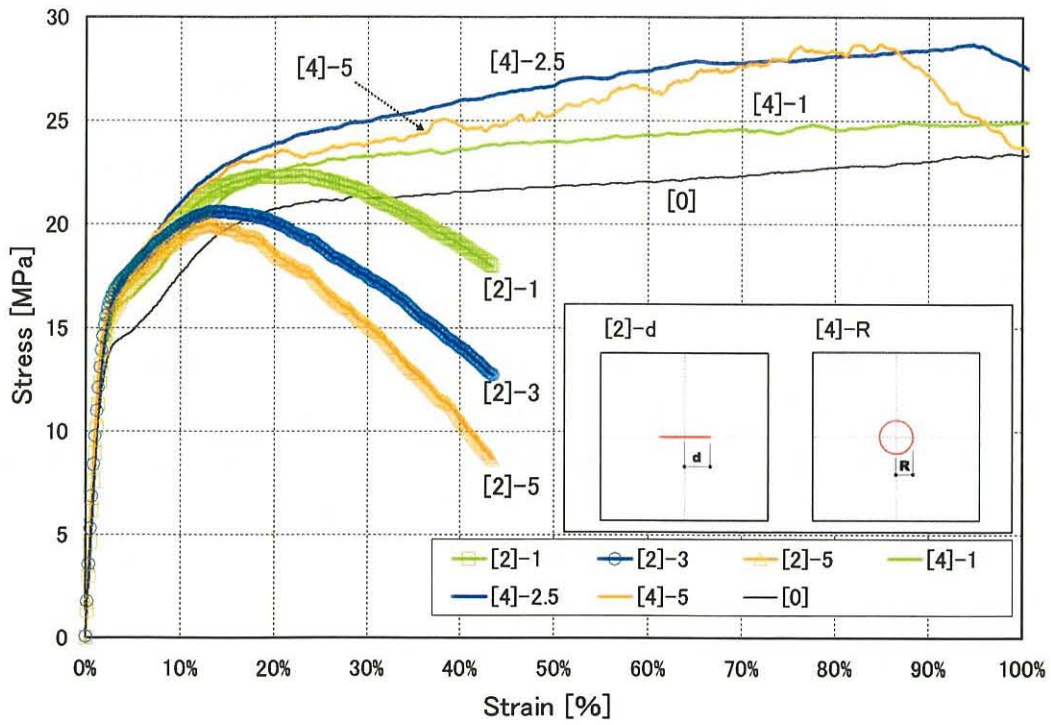


図 4.6 中央線及び中央円形切欠きの応力-ひずみ関係

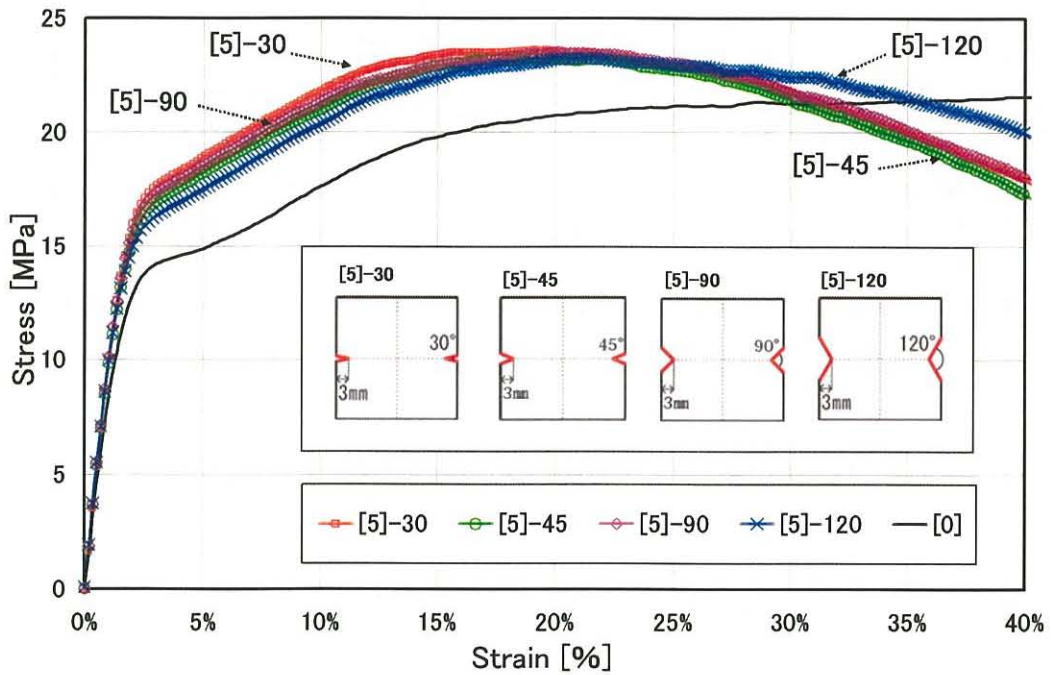


図 4.7 両端浅角の切欠き角度による応力-ひずみ関係

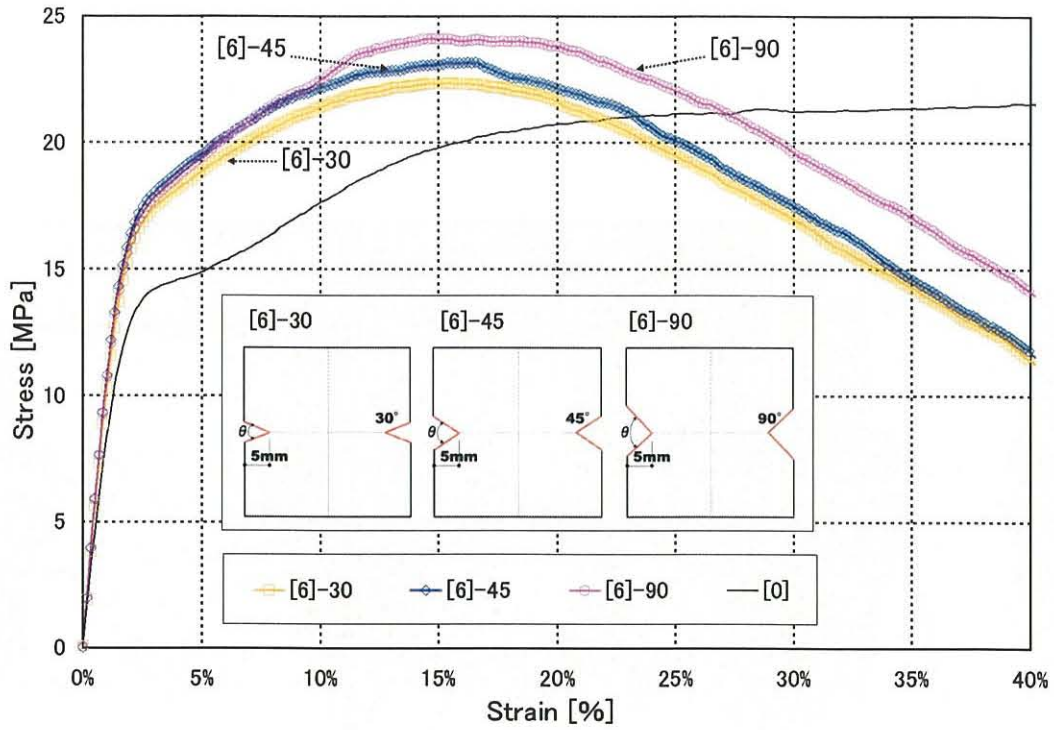


図 4.8 両端深角の切欠き角度による応力-ひずみ関係

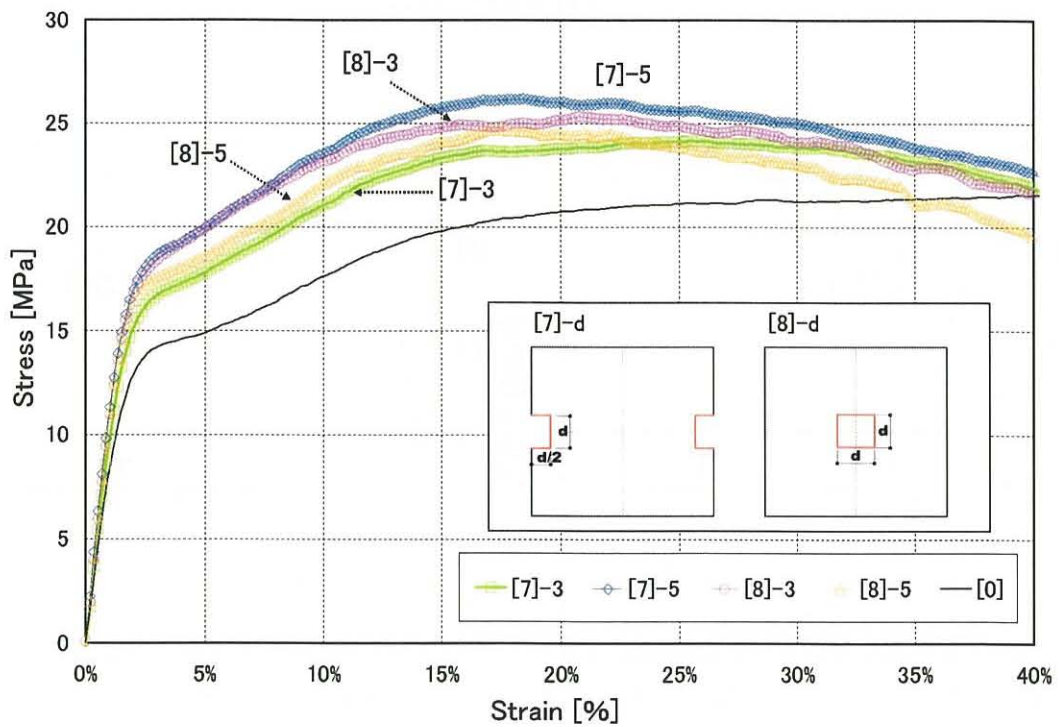


図 4.9 四角切欠きの応力-ひずみ関係

次に、線状切欠き([1]、[2])における公称応力-ひずみ関係を図 4.11 に示す。切欠き位置によって、中央部に切欠きのある試験片([2]、[4]、[8])では引張の際、切欠き周辺にしわ波状の座屈が生じ、面外方向にも変形した。特に、中央線切欠き([2])では、図 4.10-(b)のように大きく面外変形する結果となった。その結果、中央線切欠き([2])では切欠き幅に依存して公称応力のピークが変化するかつ、両端線切欠き([1])と比べて公称応力が低くなる結果となった。

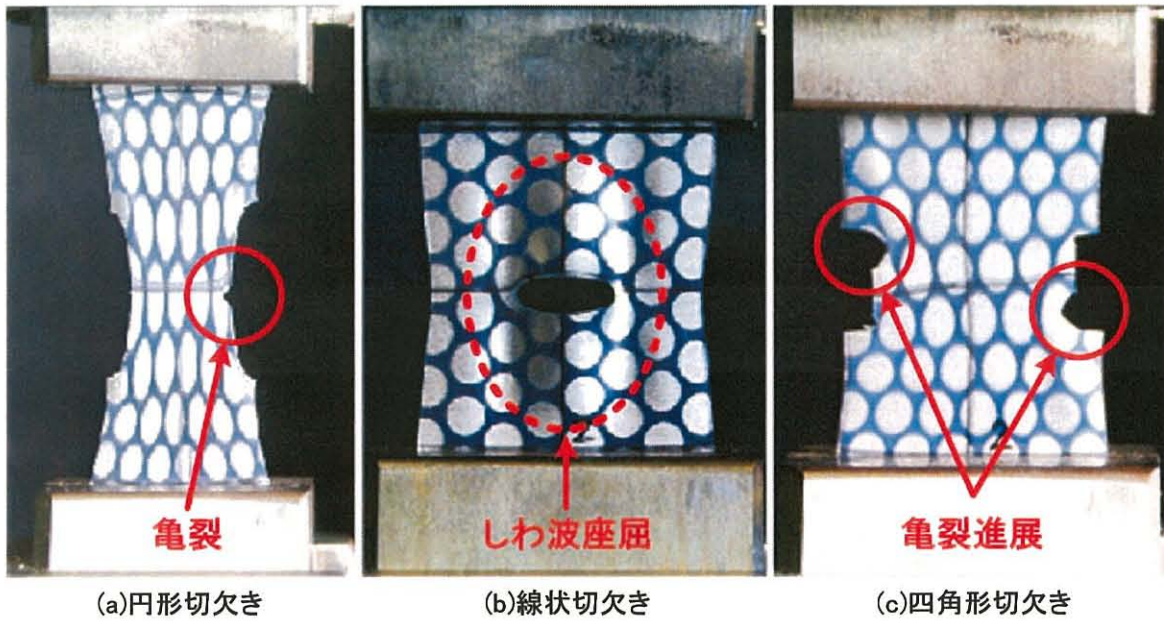


図 4.10 亀裂発生時の様子

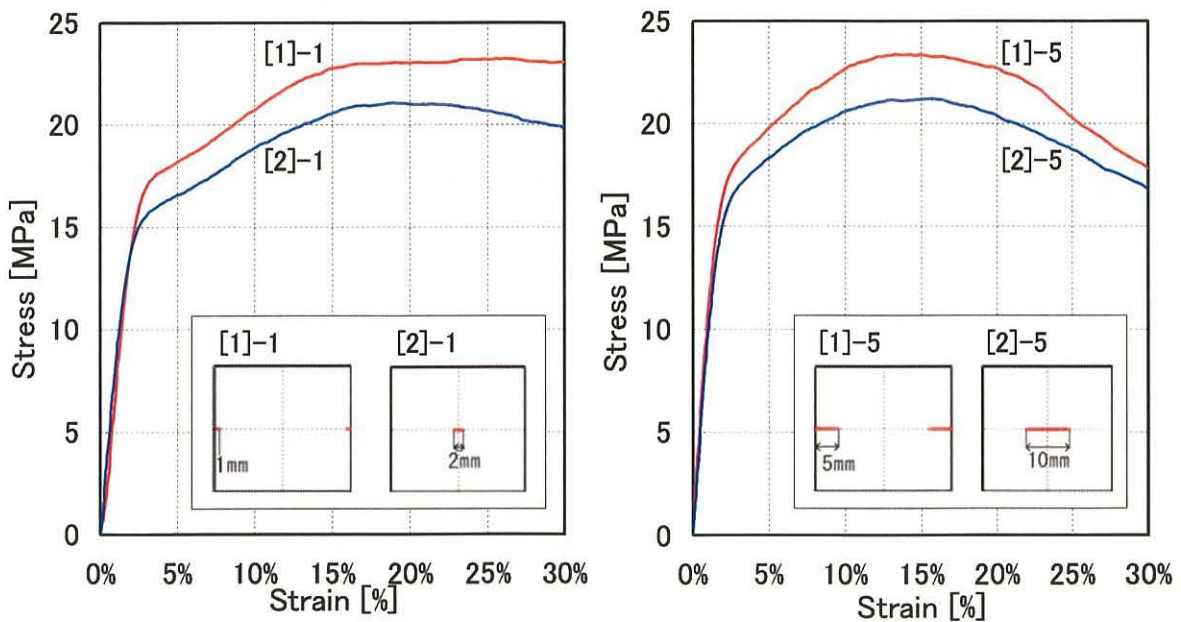


図 4.11 線状切欠きにおける比較

4.2.3 亀裂発生時のひずみと真応力の検討

切欠き先端において亀裂発生時の応力状態を把握するために、画像データを用いて真応力を求めて、比較検討した。真応力については、図 4.12 に示すように変形後の試験片幅を計測し、その断面積で応力値を求めた。ただし、厚さは初期値のままとした。なお、ひずみ 3.3%毎に計測を行い、亀裂発生始点や公称応力との関係からフィルムの破断が亀裂発生によるものかどうか検証した。

円形切欠きにおける試験片幅変化率－ひずみ関係を図 4.13 に示す。切欠きなし([0])との比較結果、ひずみ 100%付近で幅変化が大きくなり、亀裂が発生することが分かった。なお、その他の線状、三角切欠き([1]、[2]、[5]、[6])においてはひずみ 6～10%の間で亀裂が発生することが確認できた。また、真応力と公称応力の結果を図 4.14 に示す。荷重ピーク値より前に公称応力と真応力の差が大きくなることから、亀裂発生と同時にフィルムの荷重ピークになるのではなく、亀裂が生じ、進展が進み暫くした後公称応力が下降することが確認できた。以上の結果より、各モデルの亀裂発生始点を図 4.15 に示す。

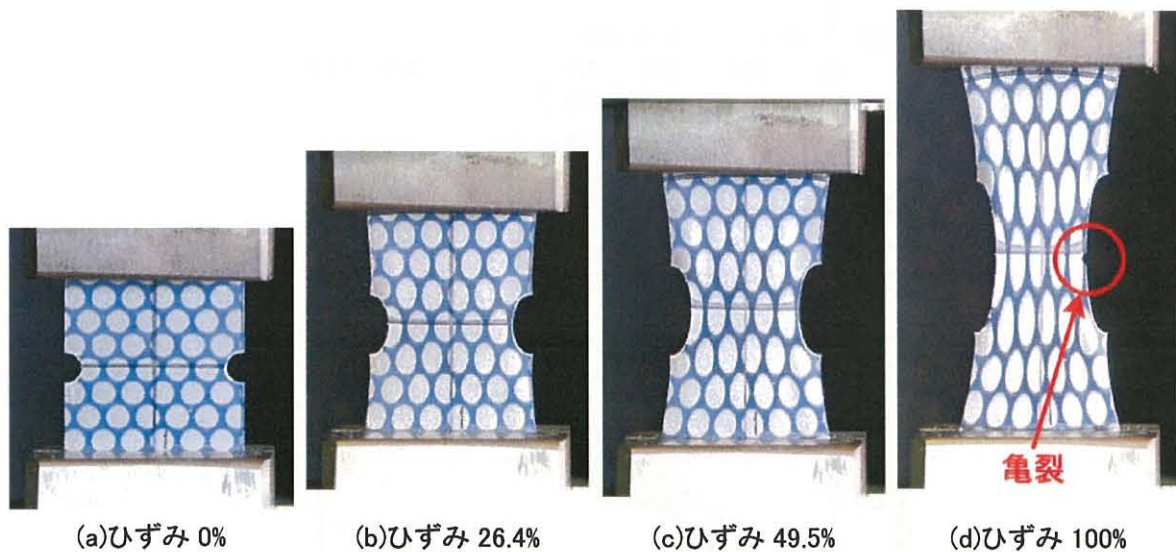


図 4.12 画像解析(試験片中央部幅の測定([3]-2.5))

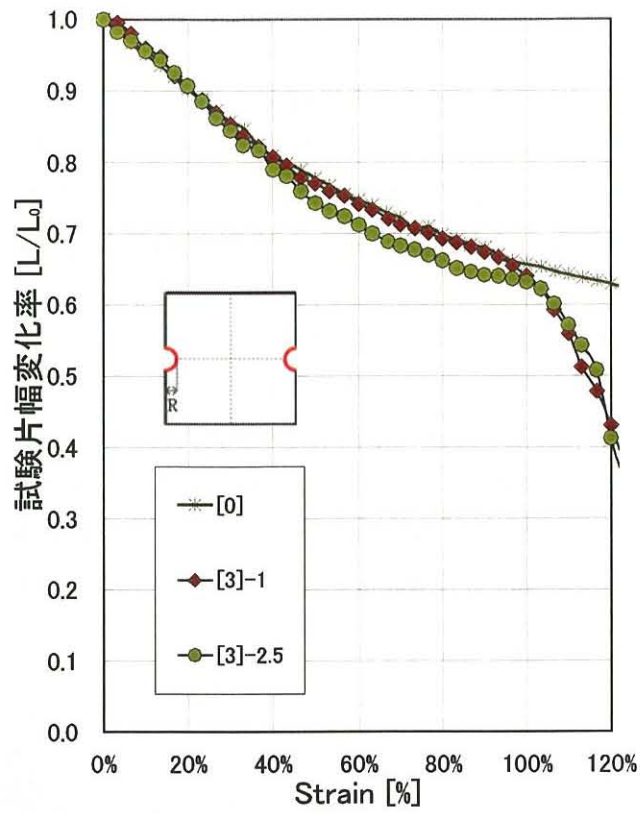


図 4.13 幅変化率

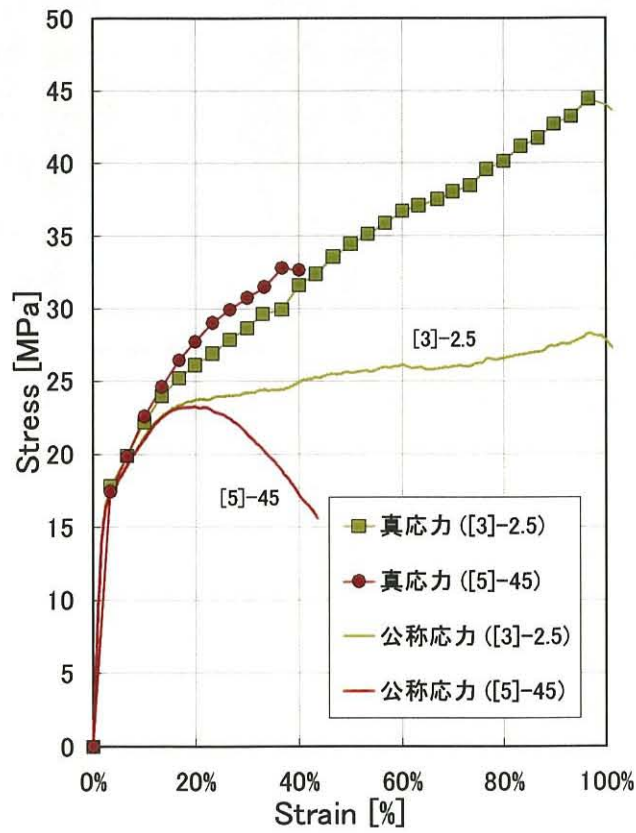


図 4.14 真応力と公称応力の比較

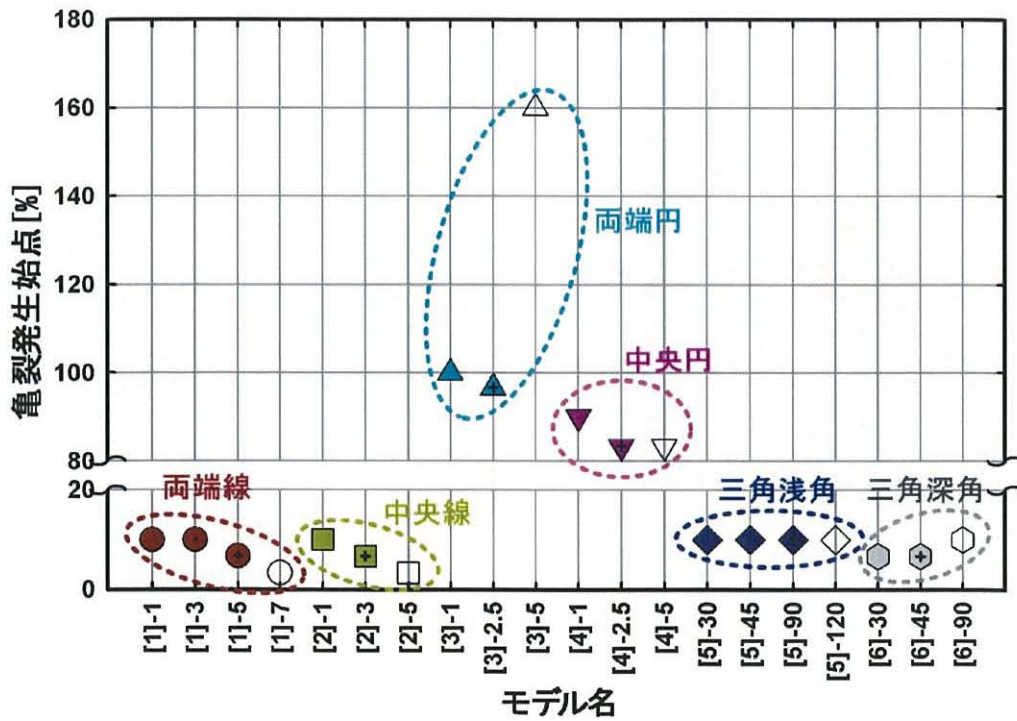


図 4.15 切欠き形状による亀裂発生始点

4.3 切欠き形状による応力集中の解析的検討

4.3.1 解析概要

切欠き先端部における応力集中及び亀裂発生時の応力分布について把握するために、1軸引張実験を模擬した解析を行った。解析には汎用プログラム MidasNFX を用いた。解析対象は図 4.4 の試験片のうち、[1]から[6]までとした。解析モデルの1例を図 4.16 に示す。解析領域は、対称性を考慮して全体の 1/4 とする。フィルムの弾塑性挙動のモデル化には Von-Mises 降伏条件を採用した。材料定数を図 4.17 に示す。

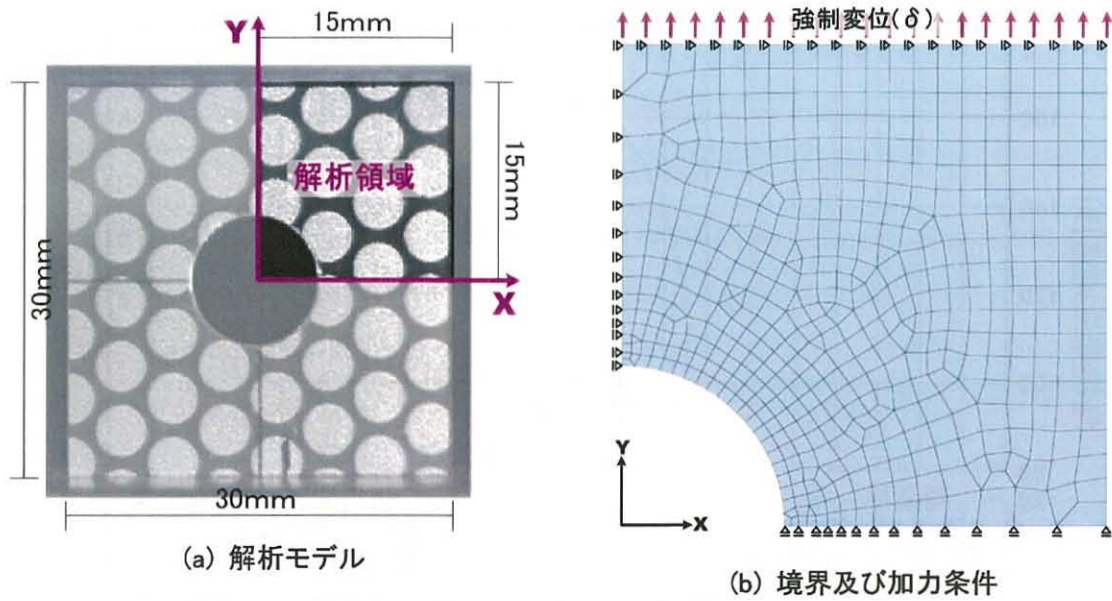


図 4.16 解析モデル及び解析条件

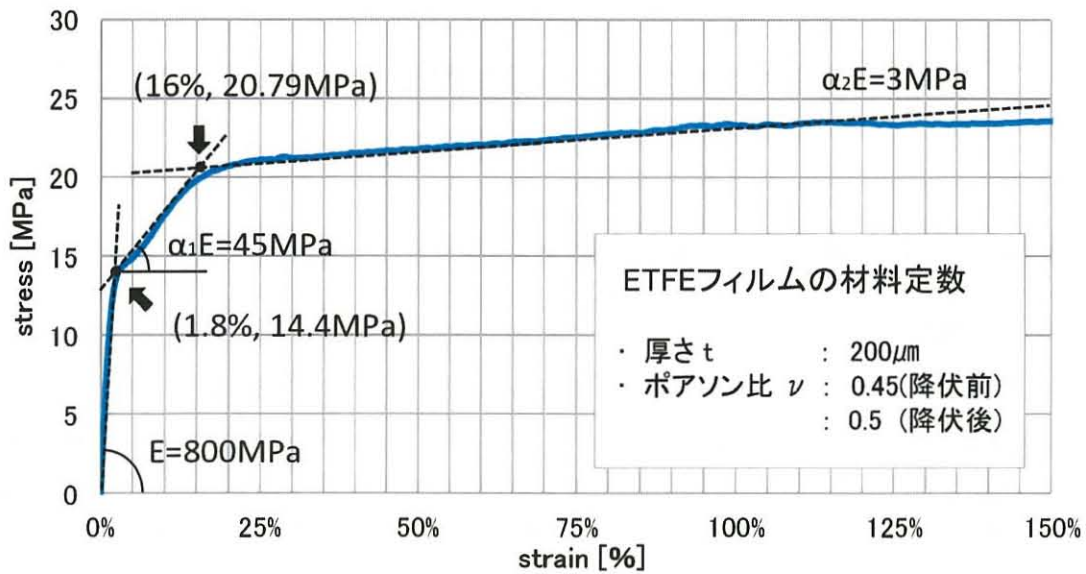
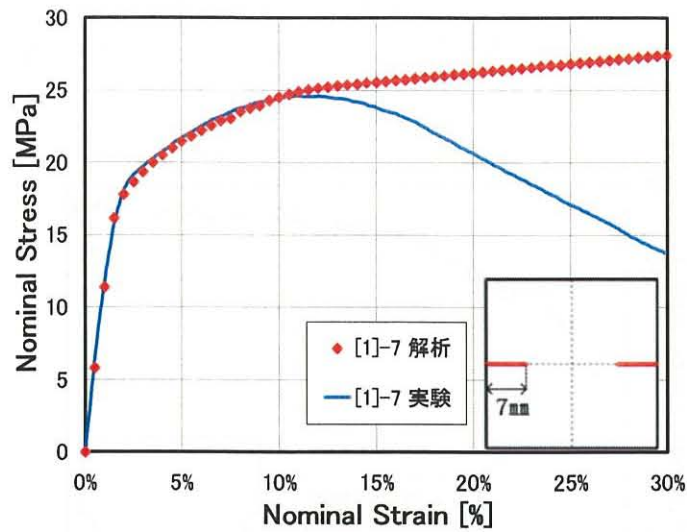


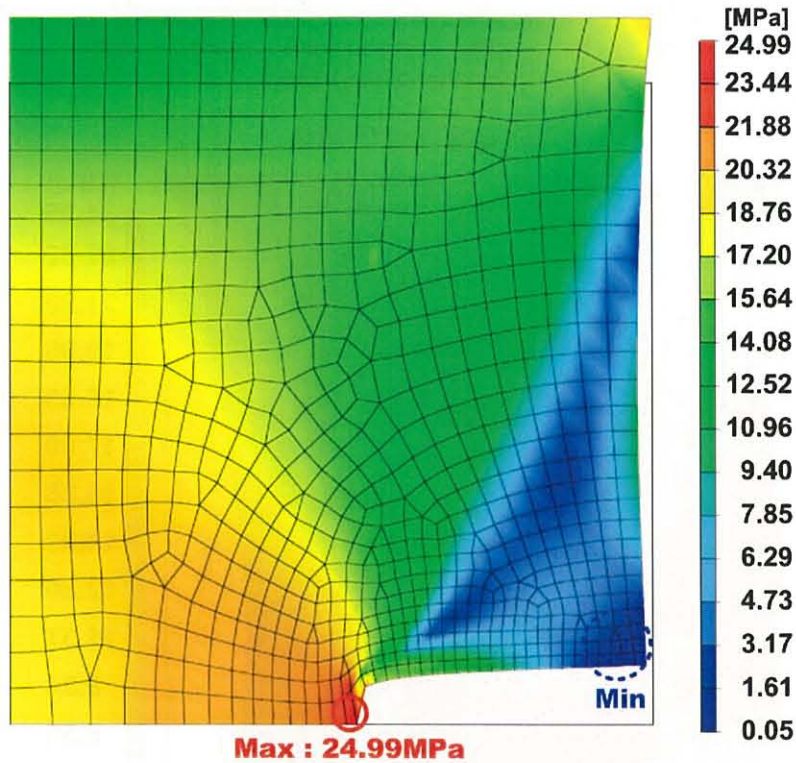
図 4.17 フィルムの応力-ひずみ関係(ひずみ速度 10%/min)

4.3.2 解析結果

モデル[1]-7の解析結果を図4.18に示す。図4.18-(a)の線状切欠きの公称応力-ひずみ関係ではひずみ10%まで応力値は一致しているが、その後は異なる結果となった。その原因として、実験では亀裂進展により有効幅が減少するのに対して、解析では亀裂を考慮していないためである。図4.18-(b)にひずみ10%時の相当応力分布を示す。線状切欠きでは、切欠き先端で最大応力値が現れるかつ、先端部周辺で高い応力が分布する結果となった。



(a) 応力-ひずみ関係

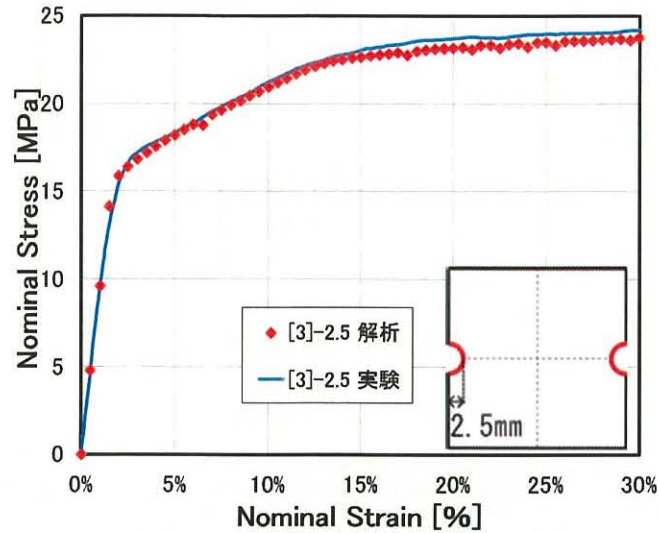


(b) 相当応力分布図 4.(ひずみ 10%時)

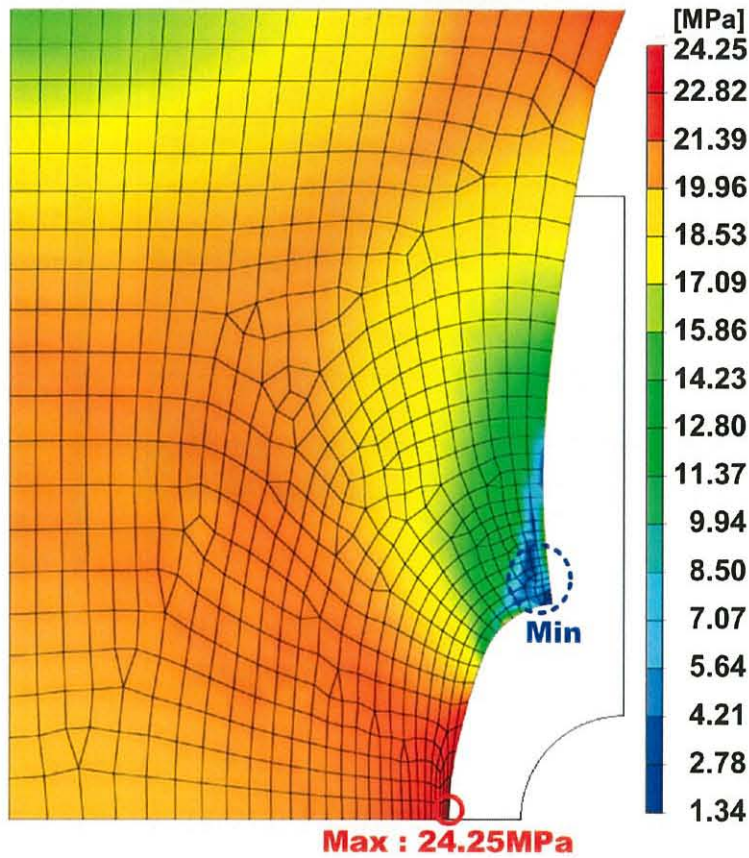
図 4.18 モデル[1]-7の解析結果

次に、円形切欠きモデル[3]-2.5の解析結果を図 4.19 に示す。円形切欠きの場合、図 4.19-(a)の公称応力 - ひずみ関係はひずみ 30%まで実験結果とほぼ同じカーブになることが確認できた。なお、図 4.19-(b)にひずみ 30%時の相当応力分布を示す。円形切欠きの場合、線状切欠きと比べて局所的な応力集中は見られずに、全体的に応力レベルが上がる結果となった。また、モデル[3]と[4]のような円形切欠きの場合、30%以上の大ひずみ領域では切欠き先端部が内側に

反転し、有意な解が得られなかった。以上の結果より、本研究では、応力集中の検討にあたり、解析の適用範囲としては、線状や三角切欠きの場合、ひずみ 10~15%以内に、円形切欠きの場合、ひずみ 30%以内と判断する。



(a) 応力-ひずみ関係



(b) 相当応力分布図 4.(ひずみ 30%時)

図 4.19 モデル[3]-2.5 の解析結果

4.3.3 切欠き形状と応力集中係数

各切欠き形状による応力集中部の検討を行う。各増分段階ごとに切欠き先端部の要素応力と公称応力との関係より応力集中係数($\alpha = \text{亀裂先端部応力}(\sigma_{\max}) / \text{公称応力}(\sigma_n)$)を求め^{4.3)}、各切欠き形状による増分解析時の応力集中係数の変化を図4.20に示す。

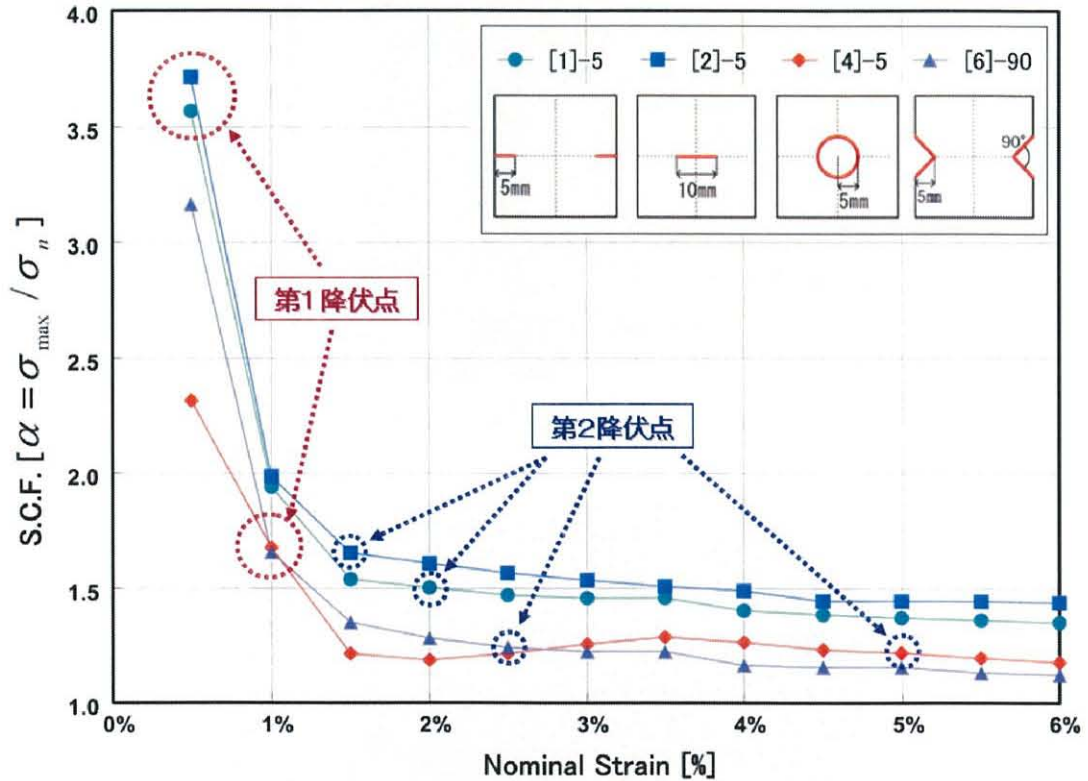
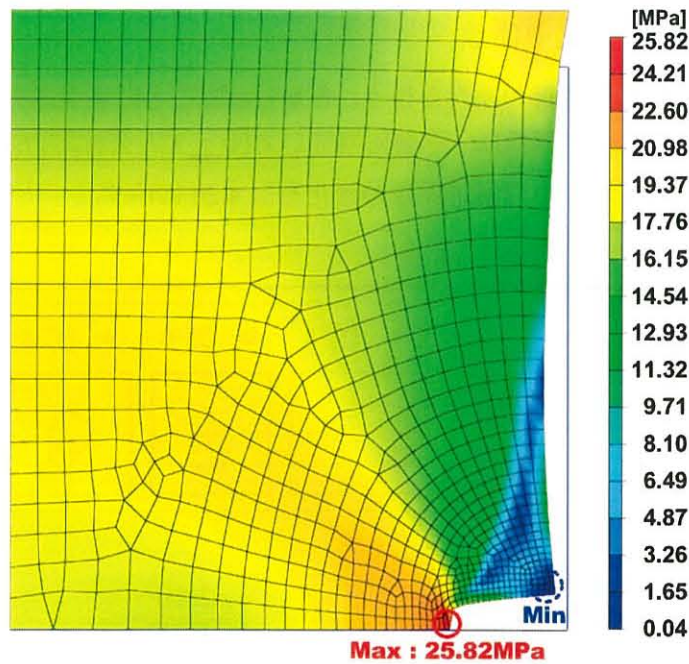


図 4.20 応力集中係数

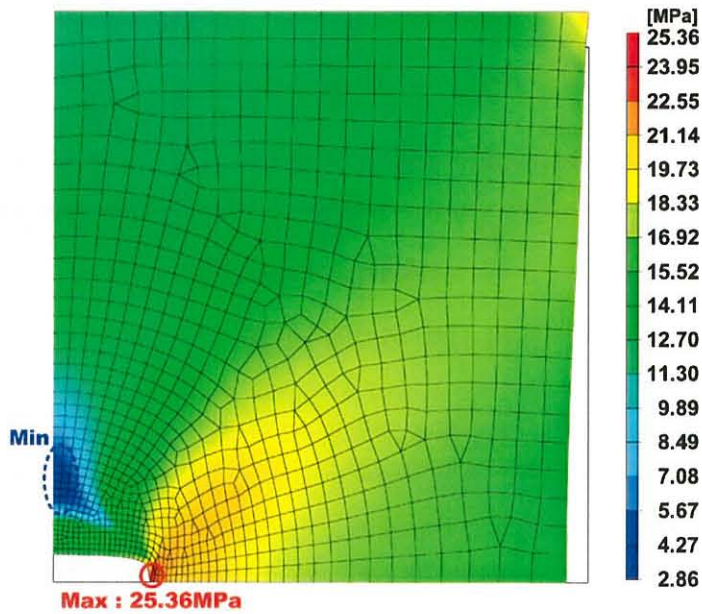
その結果、弾性範囲における応力集中係数は線状及び三角切欠きの場合は3以上であるのに対し、円形の場合は3以下となっているが、塑性範囲に入ると全てのケースで応力集中係数は下がり、ほぼ一定値となる傾向がみられた。また、三角及び円形切欠きの場合、応力集中係数は線状切欠きケースより小さくなる傾向が見られ、線状切欠きに比べて亀裂先端部で応力集中しにくい形状であると考えられる。なお、三角切欠きの場合、切欠き角度による差異はあまり見られなかった。

4.3.4 亀裂発生時の応力分布

画像解析結果に基づいて各切欠きケース別に亀裂発生始点を検討対象とし、その時の亀裂先端部の応力値を比較する。検討モデルのうち、モデル[1]-3 とモデル[2]-3 の相当応力分布を図4.21に、モデル[5]-45 とモデル[6]-45 の相当応力分布を図4.22に示す。



(a) [1]-3 モデル(ひずみ 10.0%時)

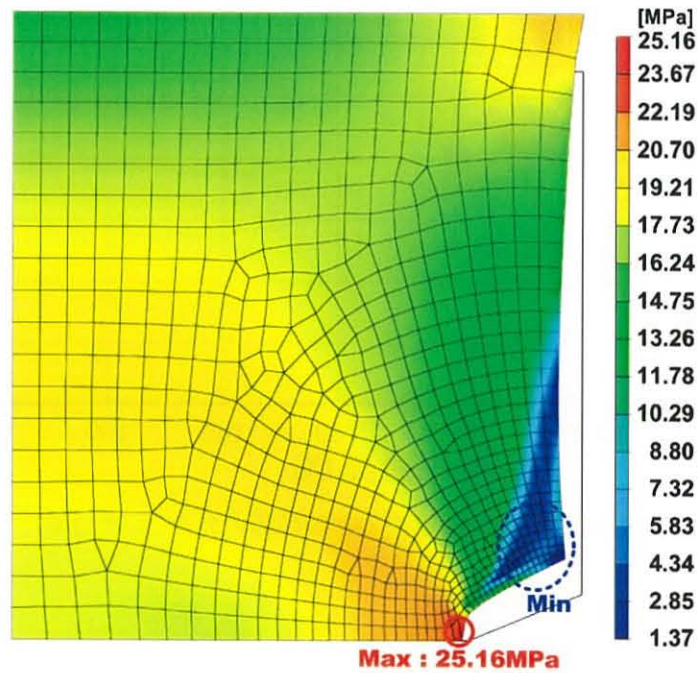


(b) [2]-3 モデル(ひずみ 6.7%時)

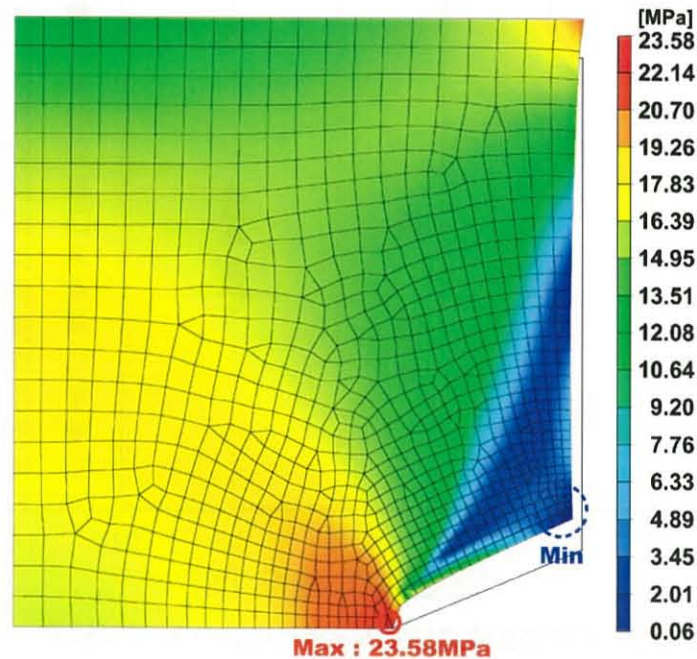
図 4.21 亀裂発生時の相当応力分布(線状切欠き)

各モデルにおける試験結果より得られた公称ひずみと公称応力の関係を図 4.23 に、亀裂発生開始時の公称ひずみと相当応力(公称)の関係を図 4.24 に示す。線状及び三角切欠き(モデル[1]、[2]、[5]、[6])の場合、公称応力は約 20~30MPa となっており、切欠き長さが長いほど亀裂発生始点は早く、応力値は小さくなる傾向が見られた。また、中央線切欠きより両端線切欠きの方が高い応力値を示しており、三角切欠きにおいては切欠き角度が大きいほど応力値は下がる結

果となった。一方、円形切欠きモデル([3]、[4])の場合、フィルムの破断までを模擬した解析結果は得られなかったが、実験結果から公称応力 - ひずみ関係や画像解析結果を見ると、図 4.23 より公称応力は凡そ 24~33MPa 程度となることが確認されており、それに応力集中係数を考慮すると亀裂先端部は引張強さとほぼ同じ応力に達して破断に至ると考えられる。



(a) [5]-45 モデル(ひずみ 10.0%時)



(b) [6]-45 モデル(ひずみ 6.7%時)

図 4.22 亀裂発生時の相当応力分布(三角切欠き)

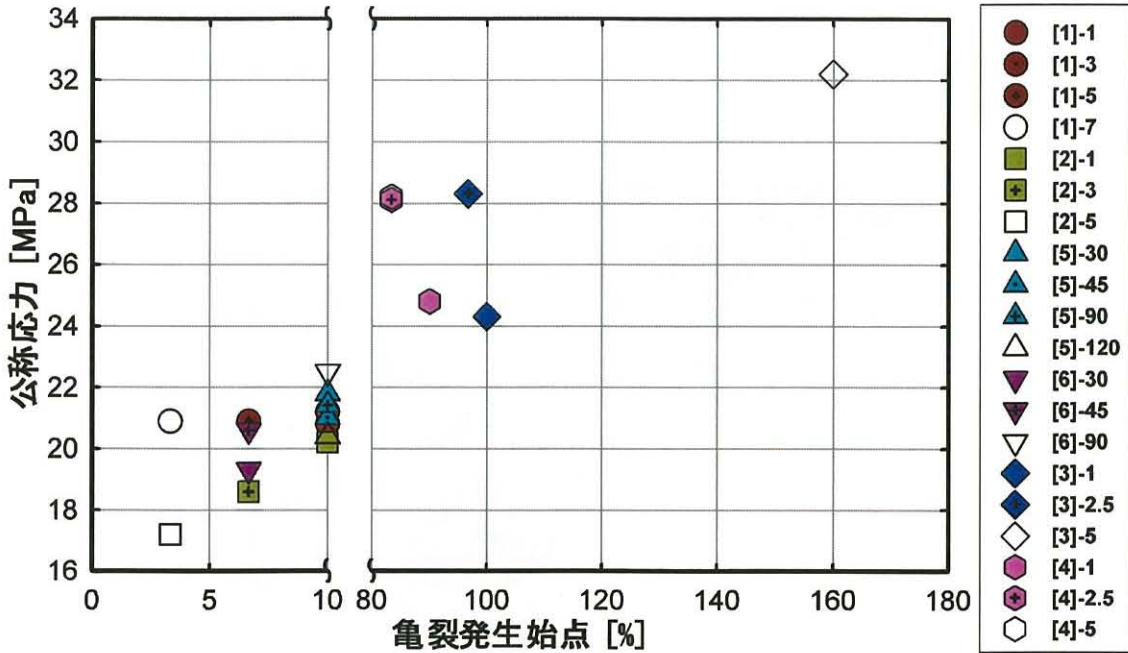


図 4.23 亀裂発生時のひずみと公称応力分布(実験結果)

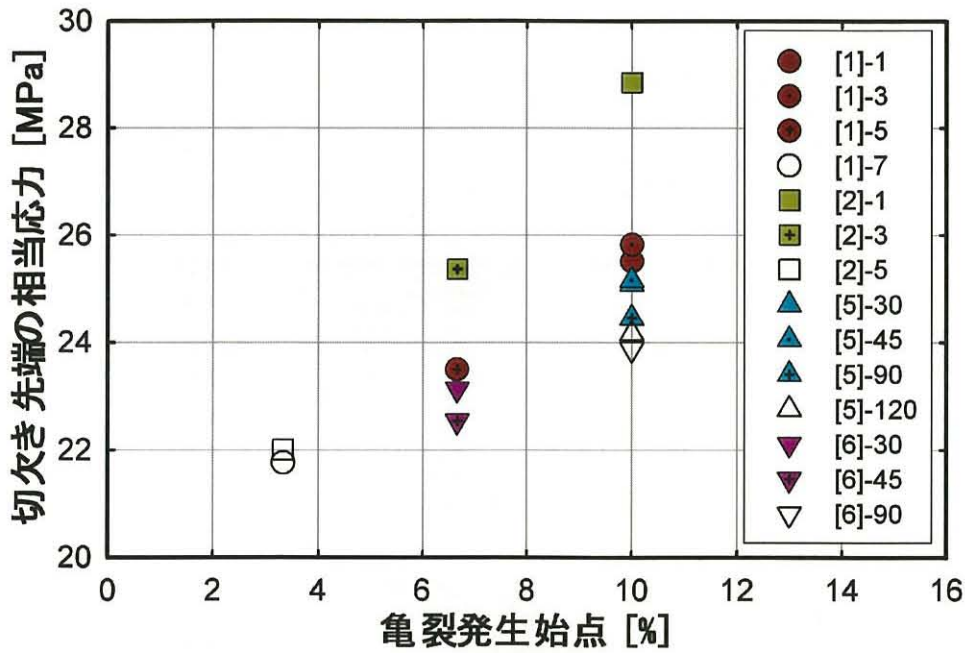


図 4.24 亀裂発生時のひずみと相当応力分布(解析結果)

4.4 まとめ

本報では、ETFE フィルムを対象として、切欠き形状の異なる試験片の1軸引張実験及びそれを模擬した解析的検討を行い、亀裂先端部の応力集中や亀裂発生時の応力分布について比較検討した結果、以下の知見を得た。

- 1) 1軸引張実験の結果、亀裂発生と同時に公称応力が下降するのではなく、亀裂進展した後に下降することが確認できた。なお、円形切欠きでは、応力集中による亀裂は生じにくく、約80%以上の伸び能力を保持することが確認された。三角形切欠きでは、切欠き先端角度による違いはわずかであった。
- 2) 円形切欠きの応力集中係数が他の切欠き形状に比べて小さく、亀裂発生時のひずみは90～100%と顕著な延性を示すことが明らかとなった。
- 3) 解析結果より、切欠き形状による亀裂先端での最大応力はそれぞれ差があるが、応力分布を見ると、線状、三角形そして四角形切欠きでは、亀裂先端で応力分布が集中しているのに対し、円形切欠きでは局所的な応力集中は見られずに、全体的に応力レベルが上がることが分かった。
- 4) 亀裂先端角度の小さい切欠きでは、小さなひずみで亀裂を生じることに注意する必要がある。

第 5 章

ETFE フィルムを用いた立体形状の延伸成形

第5章 ETFE フィルムを用いた立体形状の延伸成形

5.1 はじめに

近年、大スパン建築の屋根や外壁に ETFE フィルムを用いた事例が増えており、その構造形式にはクッション方式とテンション方式が効率的な方法として用いられているが、フィルムのクリープ、リラクセーションのような粘性挙動の懸念から、内圧により発生応力を抑えられるクッション方式の施工例が多く報告されている。一方、テンション方式は内圧の維持装置の不要と力の流れにより形成される自然な曲面といった長所を持っている方式として、最近その事例[図 5.1]が増え続けているが、粘性挙動に対する問題点を解決しなければならない課題も持っている。

著者らは、これまでにフィルムの耐力を高める方法として、施工時にフィルムを延伸する方法を提案し、テンション方式におけるその有効性を確認した^{5.1)}。また、延伸成形による実験的検証を行い、長時間に渡って張力測定を行った結果、リラクセーション現象は起きるものの、張力保持率はほぼ 50%以上を維持しながら安定していく傾向が確認されたことより、延伸成形の適用可能性を確認した^{5.2)} [図 5.2]。

一方、テンション方式に延伸成形を適用するうえで、考えられる課題としては、張力導入方法や裁断方法などが挙げられる。まず、フィルムの延伸成形時における張力導入方法としては、現在、外周から引き込む方法が一般に行われているが、フィルムの場合、応力集中による引裂きの問題^{5.3), 5.4)}が生じることやフィルムの高耐力化のための張力導入装置が必要となることを考えると、他の張力導入方法も考慮する必要がある。次に、フィルムの裁断方法を考えると、膜構造においては初期張力により形成される曲面を等張力曲面と仮定し、施工時に等張力曲面を形成するために、形状解析からの 3 次元要素データを平面に展開し、裁断パーツを決定、そして分割されたパーツを結合するという立体裁断が行われている。また、フィルムの場合、既存の膜材料に比べ、顕著な伸び能力を持っているため、その長所を活かせば、立体裁断や溶着作業などを減らしたシンプルな曲面形成も可能であると考えられる。また、テンション方式の様々な形状を実現するためにも色々な張力導入方法を考慮する必要があると考えられるが、ETFE フィルムを用いたテンション方式の延伸成形に関する研究例はほとんどない。

そこで、本報では、テンション方式フィルム膜構造の技術的確立を目的として、様々な形状のモデルを対象として延伸成形の適用可能性を確認し、実証実験を通じて実際構造物への実現可能性を把握する。



(a) Training Center for Mt. Rescue (2008)

(b) Queens Wharf Cloud(2011)

図 5.1 ETFE フィルムを用いたテンション方式の事例

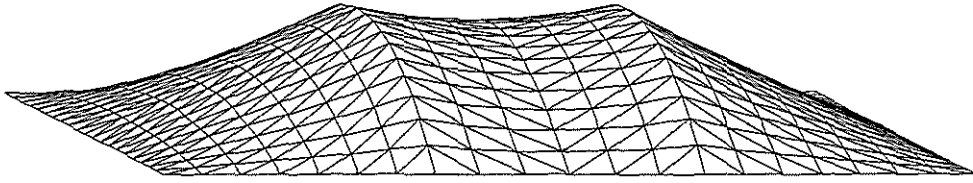


図 5.2 延伸成形によるテンション方式の実証実験

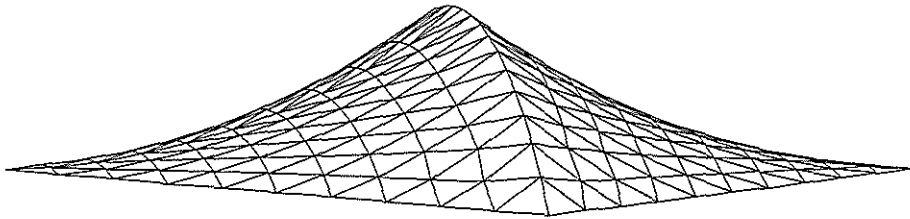
5.2 ケーススタディー

5.2.1 スタディーモデル及び概要

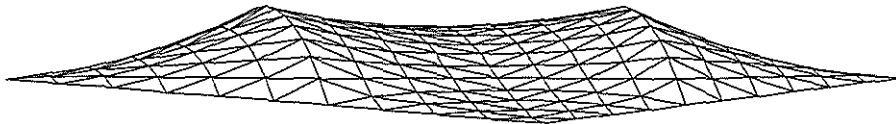
延伸成形による様々な形状への適用可能性を確認するためにスタディーモデルを作成して比較検討を行う。スタディーモデルは、図 5.3 のような四角形パネルタイプにおけるアーチの本数及び位置によって形成される 5 つのモデルとする。



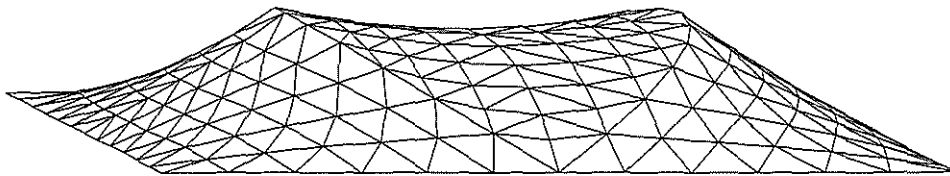
(a) 並行アーチ



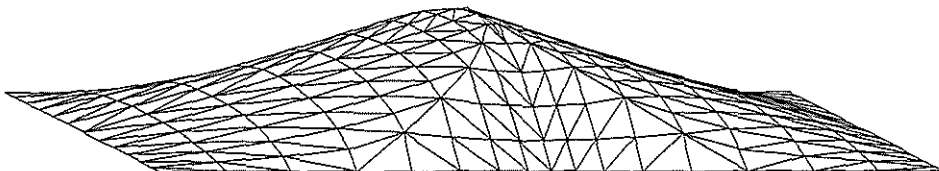
(b) 対角アーチ



(c) 対角並行アーチ



(d) 傾斜アーチ



(e) クロスアーチ

図 5.3 スタディーモデルの分類

モデルの試験体は実大スケールに対して部材検討を行い、1/5の縮尺とする。実大パネルの規模は、フレームを3,000mm角の正方形、アーチの高さはスパンの15%、ETFEフィルムの厚さは250 μm と想定する。荷重条件はフィルムに対して長期及び短期荷重(積雪、風)を考慮し、図5.4のように設定した。また、フィルムの解析結果を用いて外周フレーム及びアーチに対する部材検討を行った。その結果のうち、並行アーチモデルの結果を図5.5に示す。部材検討結果より、外周フレームには[-150 \times 75 \times 9 \times 12.5の溝形鋼が、アーチには ϕ -60.5 \times 3.2の鋼管が必要という結果が得られた。

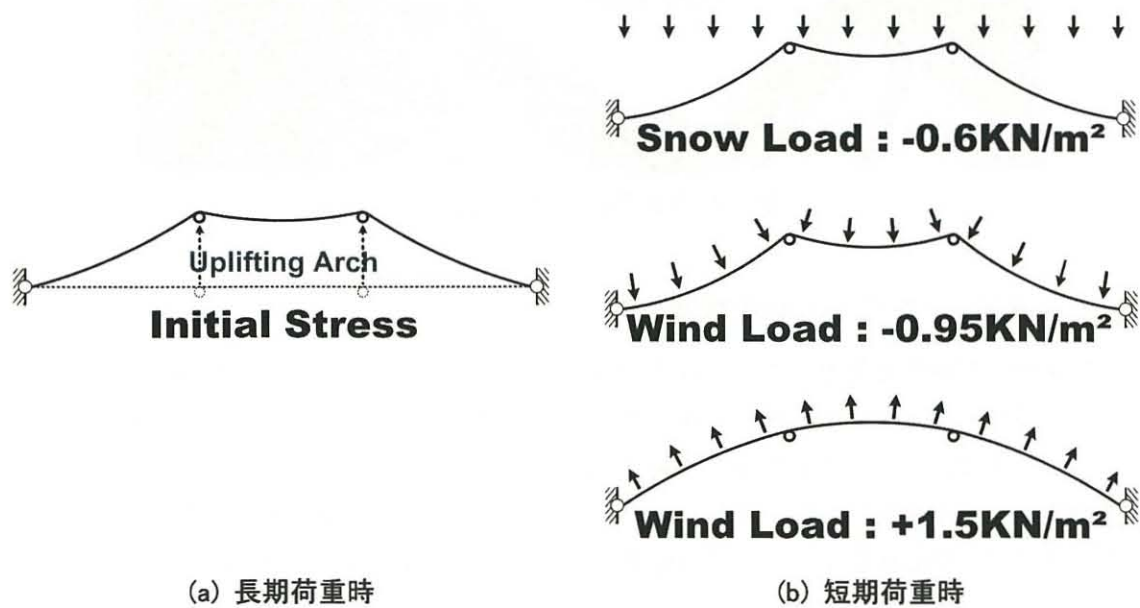


図 5.4 付加荷重条件

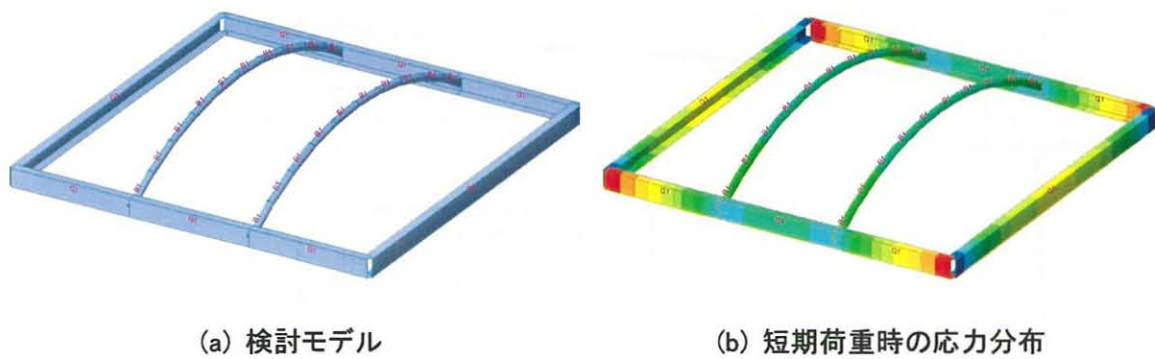


図 5.5 並行アーチモデルの部材検討

以上の結果をふまえて、スタディーモデルの試作は600mm角の正方形に対してETFEフィルムの厚さを50 μm 、外周フレームをアングル材(L-30 \times 30 \times 2 \times 600)、アーチをアルミパイプ(ϕ -13 \times 1)とした。並行アーチモデルの試験体の様子を図5.6に示す。

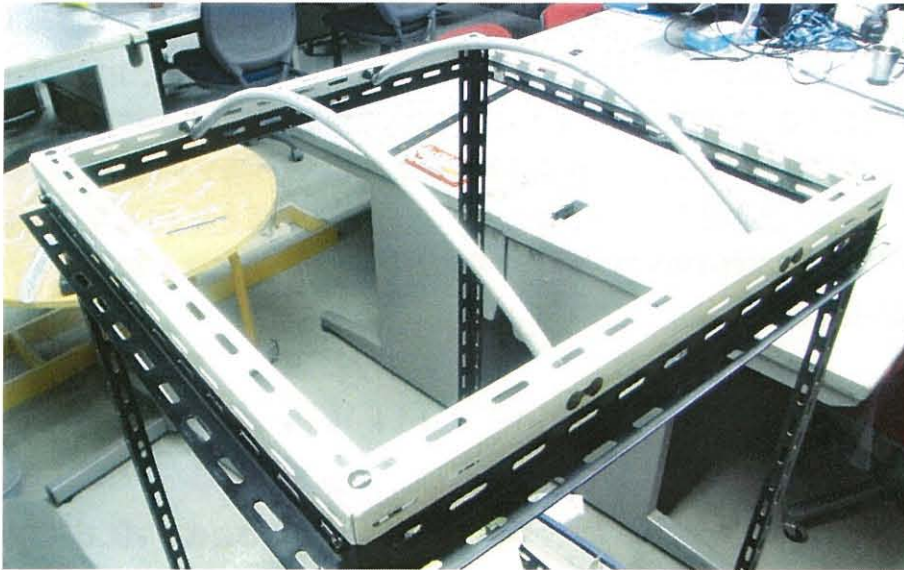


図 5.6 スタディーモデルの様子

5.2.2 スタディーモデルの形状探索及び裁断図

スタディーモデルを対象として延伸成形を適用するために、各モデルの形状探索を行い、その結果より各モデルに対する裁断図を検討する。形状探索には汎用プログラム ANSYS を用いた。材料モデルは、フィルムの弾塑性挙動を現すために、Von-Mises 降伏条件を用いたマルチリニア弾塑性モデルを採用した。フィルムの材料定数を図 5.7 に示す。解析条件は、初期張力を想定して初期の平面状態からアーチの位置で Z 方向に強制変位を与えた。なお、解析領域は、モデルの対称性を考慮して全体の 1/4 とした。

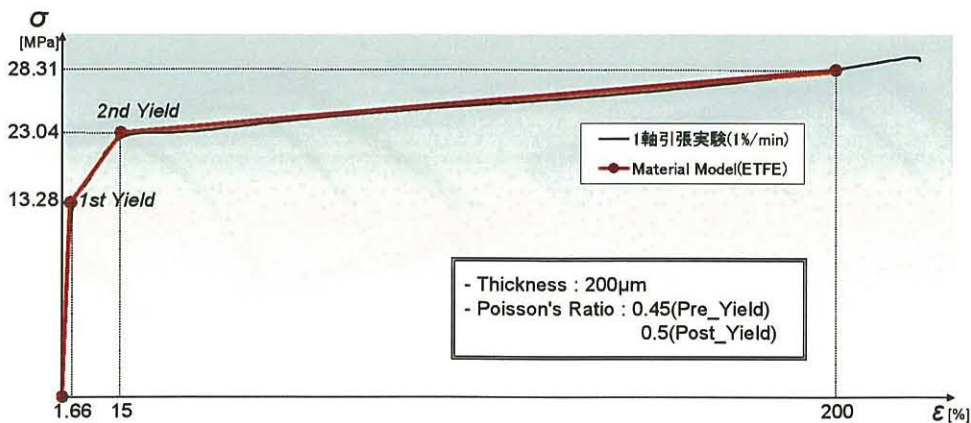


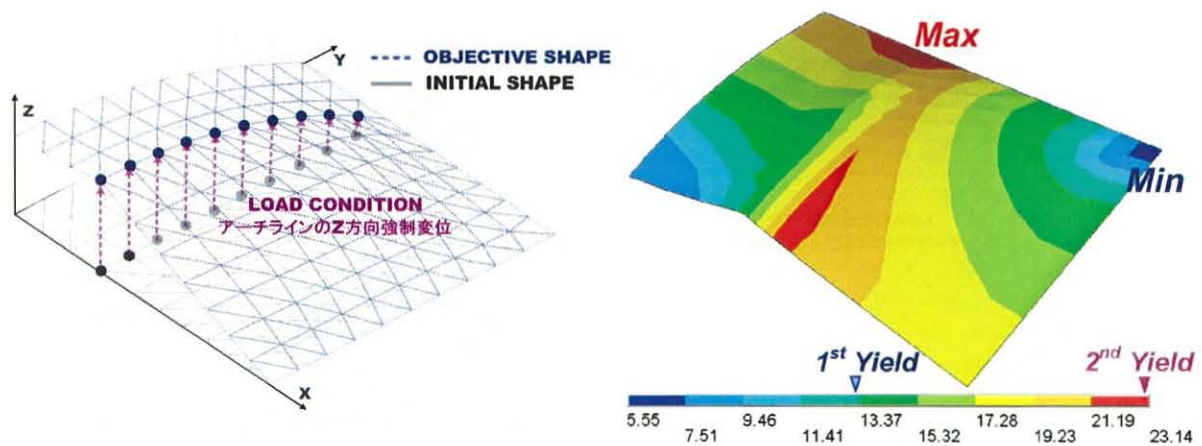
図 5.7 フィルムの材料モデル

延伸によるフィルムの釣合形状と膜面の応力分布を図 5.8 に示す。解析の結果、延伸による各モデルの形状は等張力曲面とほぼ同じ結果となったが、応力分布は強制変位を与えたアーチ及びアーチ端部付近に高い応力が生じる結果となった。

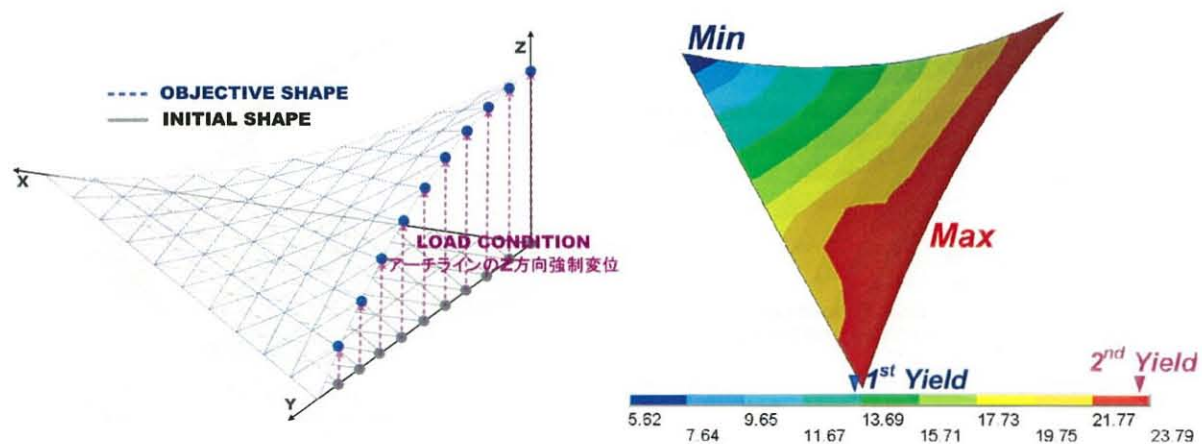
次に、形状探索の結果を用いて、各モデルの裁断図について検討を行う。本節では、立体的な形状を平面から延伸することによって曲面を形成することを試みる。まず、解析結果より、600mm 角の正方形パタンを用いる場合、応力分布は第2降伏点を超えるため、外周引き込みによる延伸成形は相当大変な作業になると考えられる。

従って、スタディーモデルを対象として延伸成形を行うために、2つの方針に基づいて裁断図を検討する。1つは張力導入時に同じ辺を同時に引き込めるように直線で結ぶことで、外周が四角形になるようにする。もう1つは形状探索結果より求めた3次元曲面の面積を裁断図の面積とほぼ同じにすることで、外周の長さを決定する。

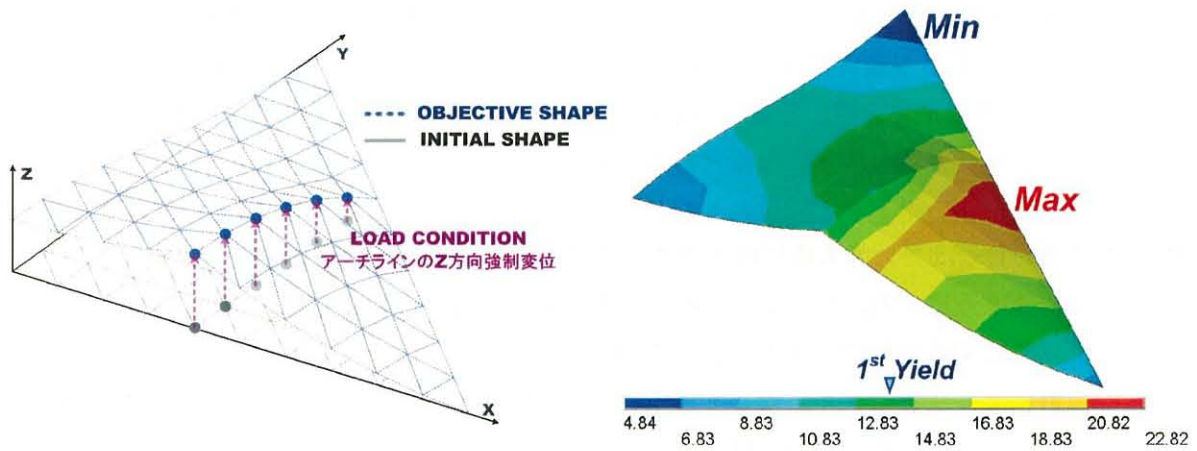
以上の方針により、各モデルに対して設定した裁断図を図 5.9 に示す。図の中で、左側は曲面を平面展開した図で、右側は裁断図である。



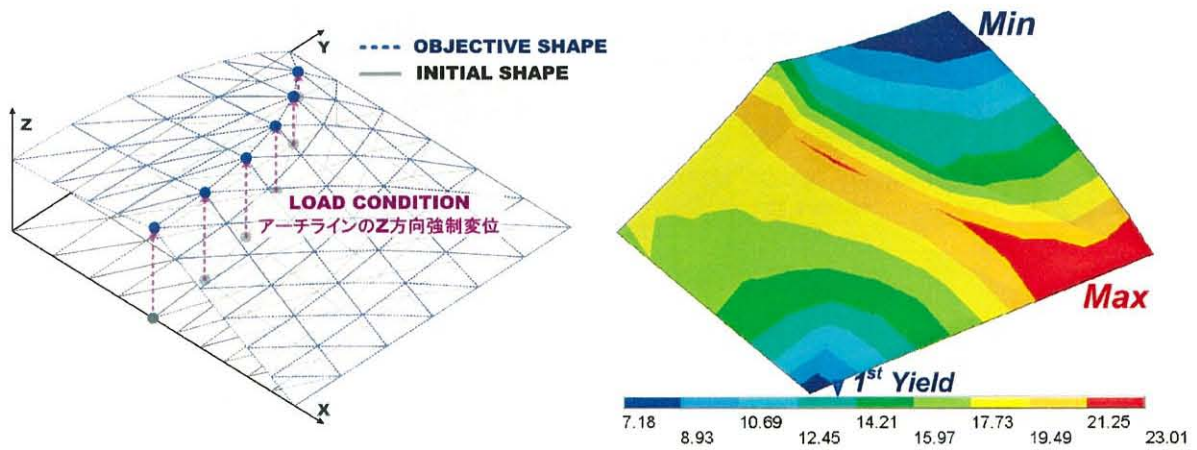
(a) 並行アーチ



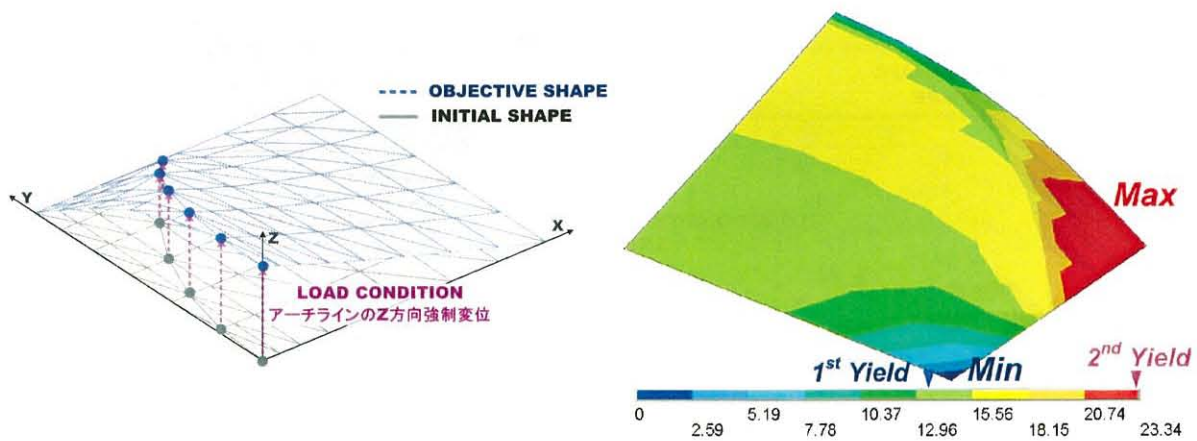
(b) 対角アーチ



(c) 対角並行アーチ

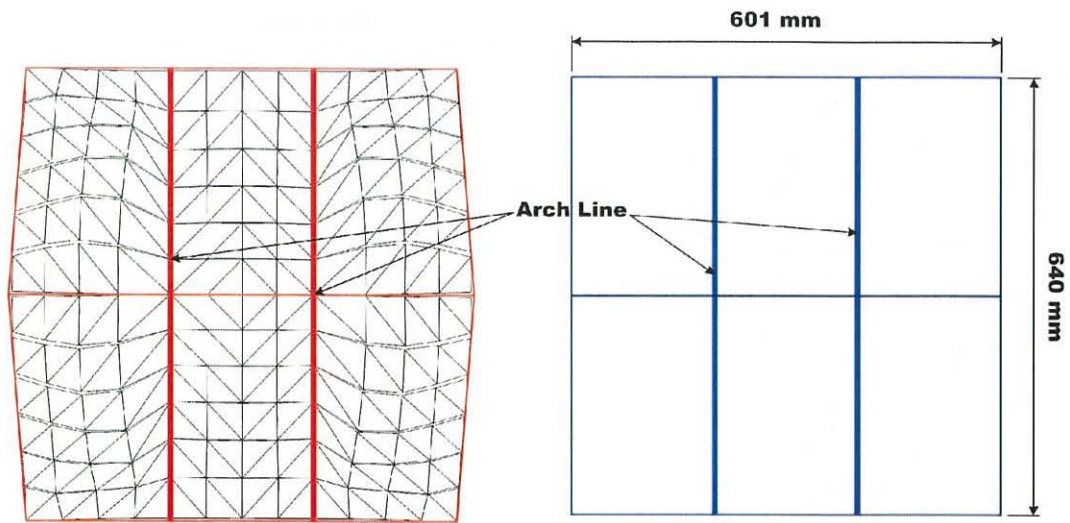


(d) 傾斜アーチ

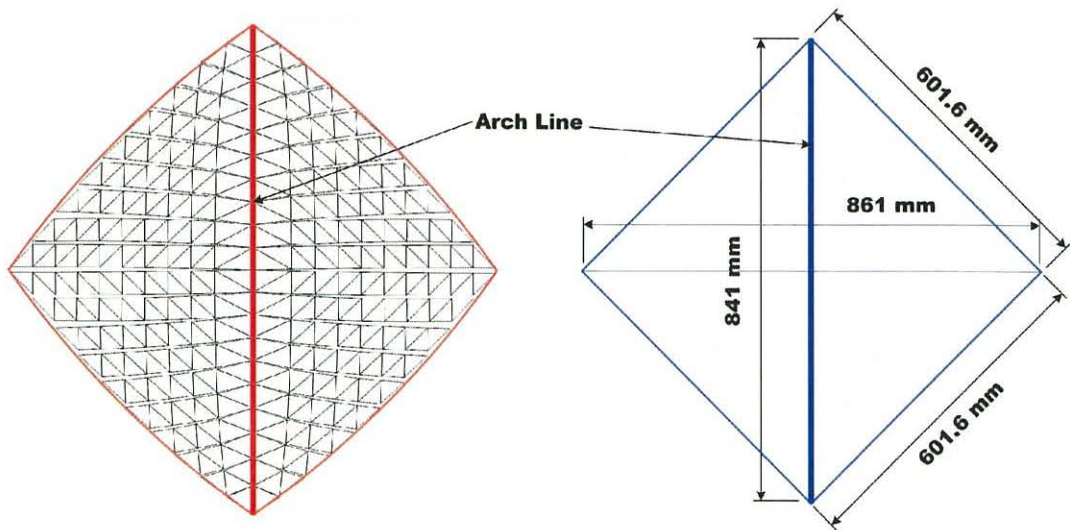


(e) クロスアーチ

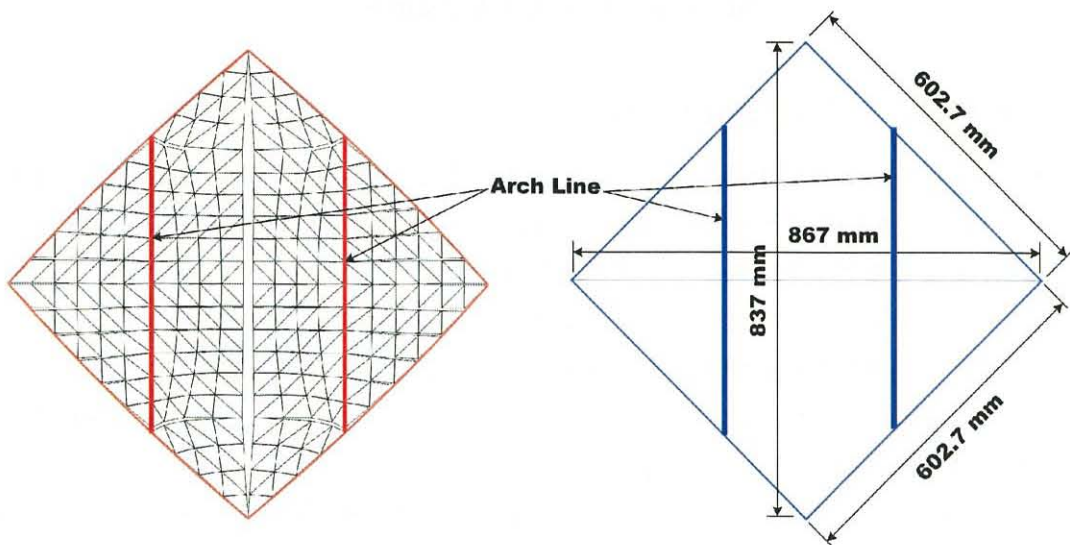
図 5.8 延伸による初期形状及び応力分布図



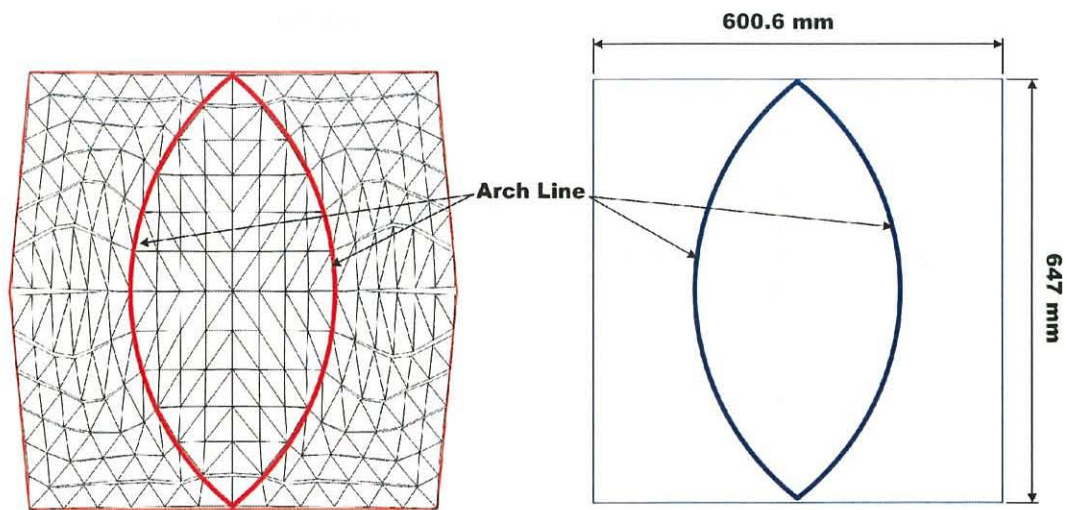
(a) 並行アーチ



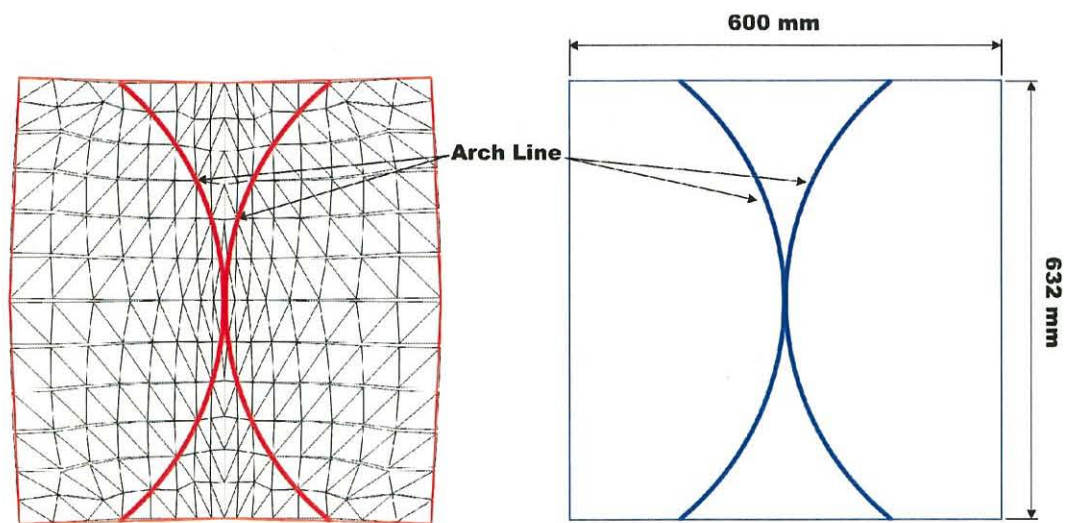
(b) 対角アーチ



(c) 対角並行アーチ



(d) 傾斜アーチ



(e) クロスアーチ

図 5.9 スタディーモデルの裁断図

5.2.3 スタディーモデルの試作と考察

前節の手法で求めた裁断図を各モデルの試作に用いることで、延伸成形の適用可能性を検討する。試作の流れを図 5.10 に示す。延伸成形は外周引き込みにより行い、引き込みの目標値は、予め裁断図の上に各モデル別に縮小率を考慮した基準線までとした。なお、引き込み完了時はフィルムの上にプラットバーを付け、ボルト締めにより固定した。

5つのスタディーモデルを対象とした延伸成形による試作結果を図 5.11 に示す。試作結果より、延伸により様々なテンション方式の形状形成が可能で、形状に合わせた裁断図を使うことで、効果的に延伸成形を行えることが分かった。

次に、各モデルのライズ比と面積の比較結果を表 1 に表す。初期の要素面積と裁断図の面積を比較すると、並行・対角並行・傾斜・クロスアーチではほぼ同じ面積比にすることが可能で

ある。対角アーチでは、面積比の誤差が大きかったため、試作時にその誤差分の縮小率を考慮した結果となった。また、初期の要素面積と試験体の平面面積を比較すると、対角アーチで約15%と最も大きく、他では約5%前・後の面積比となっており、裁断図を考慮する場合には、面積比の目標値を5%前・後にした方が望ましいと考えられる。

また、実構造物の場合、フィルムの厚さが厚くなるため、試作時より張力導入が困難になることが予想された。そこで、実証実験では、アーチを利用した張力導入を行うこととした。



(a) モデルのフレーム製作



(b) 外部引き込みによる延伸成形



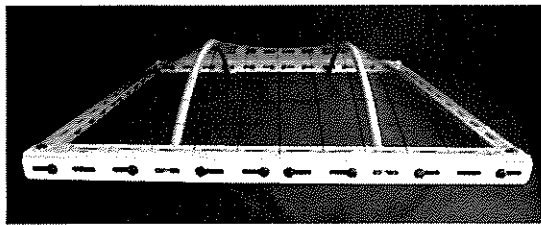
(c) プラットバーによる固定

図 5.10 延伸成形の流れ

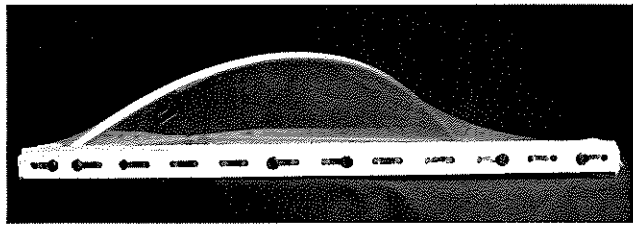
表1 スタディーモデルのライズ比と面積比

モデル名	試作時の ライズ比	②初期の 要素面積	③裁断図の 面積	面積比 (②と③)	面積比 (①と②)
(a) 並行アーチ	15.0%	3,837 cm ²	3,837 cm ²	0%	6.59%
(b) 対角アーチ	17.6%	4,131 cm ²	3,618 cm ²	12.4%	14.74%
(c) 対角並行アーチ	11.5%	3,754 cm ²	3,630 cm ²	3.3%	4.28%
(d) 傾斜アーチ	14.2%	3,888 cm ²	3,888 cm ²	0%	8.01%
(e) クロスアーチ	15.8%	3,791 cm ²	3,791 cm ²	0%	5.32%

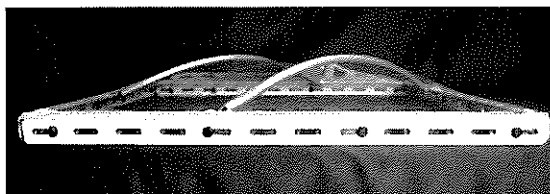
※ ① : 試験体の平面面積(3,600 cm²)を指す。



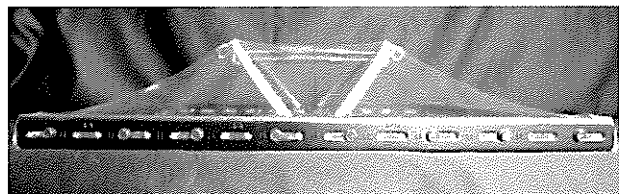
(a) 並行アーチ(縮小率 2%)



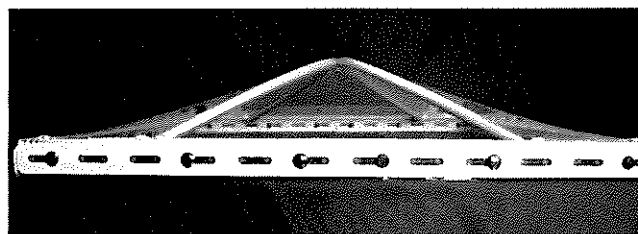
(b) 対角アーチ(縮小率 6%)



(c) 対角並行アーチ(縮小率 3%)



(d) 傾斜アーチ(縮小率 3%)



(e) クロスアーチ(縮小率 2%)

図 5.11 試作後の様子

5.3 延伸成形の実証実験

5.3.1 実験概要

延伸成形の実構造物への適用性の確認を目的として、スタディーモデルのうち、対角アーチモデルの実証実験を行う。特に、スタディーモデルの試作では明確でなかった曲面形成時のフィルムの応力分布や延伸成形後の時間経過によるフィルムの力学的挙動についても検討を行う。本実験で、対角アーチモデルを選んだ理由としては、フィルムの応力分布及びリラクゼーションのような粘性挙動を比較検討しやすいこと、デザインがシンプルなこと、対称形のための施工性が良いこと等が挙げられる。

試験体の規模は ETFE フィルムは厚さ 200 μm 、フレームは 1,500mm 角の正方形、アーチの高さはスパンに対するライズ比 10%と 15%の 2 通りとした。

5.3.2 解析的検討

まず、試験体の部材選定のため、解析的検討を行った。フィルムの形状解析や応力-変形解析には汎用プログラム ANSYS を、フレームの応力解析には MidasGEN を用いた。まず、フィルムを対象として長期(初期張力)及び短期荷重(積雪・風荷重)に対する解析を行う。さらに、実証モデルにおける張力保持率を把握するために、付加荷重の除荷後を想定した解析を行う。これらの解析の流れを図 5.12 に示す。なお、解析条件及びフィルムの材料モデルは、5.2.2 節と同様とした。

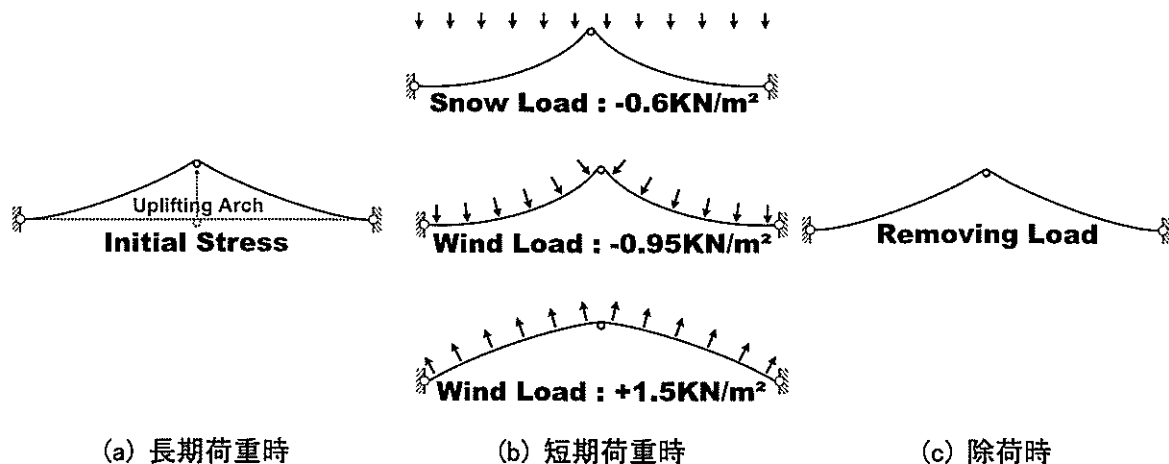
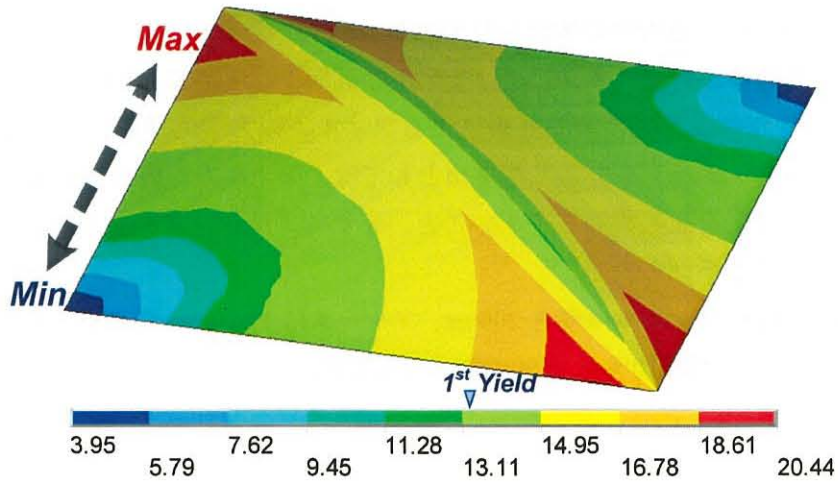


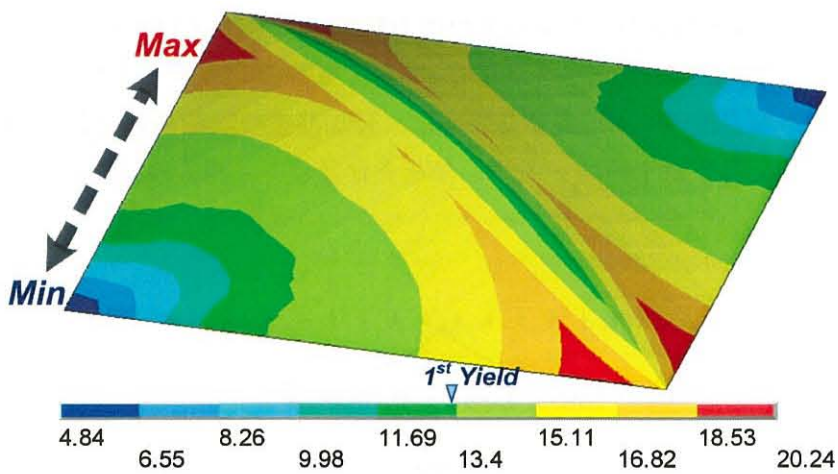
図 5.12 解析の流れ

長期及び短期荷重に対するライズ比 10%の結果を図 5.13 に、ライズ比 15%の結果を図 5.15 に示す。フィルムの最大応力はライズ比 10%の場合、アーチを中心に広い範囲で第 1 降伏点 (13MPa)を超えて塑性域へ入っているが、第 2 降伏点(23MPa)には至ってない。一方、ライズ比 15%の場合は、ライズ比 10%時より塑性域が大きく広がり、アーチ周辺部の応力は張力導入時

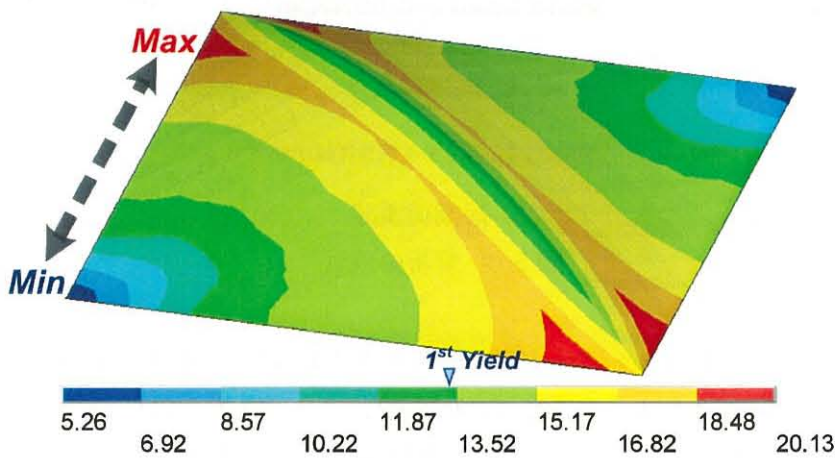
及び風荷重(負圧)時に第2降伏点に達している。一方、アーチの直交方向のコーナー部は応力が低くなる結果となった。



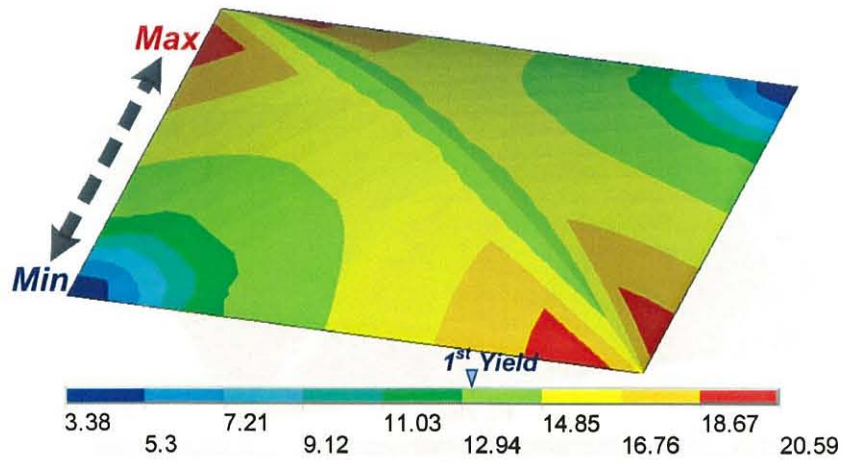
(a) 初期張力時



(b) 雪荷重時

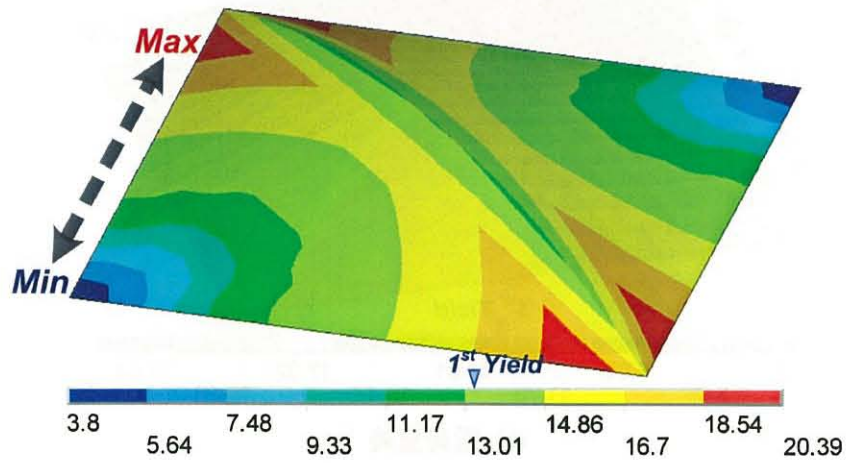


(c) 風荷重(正圧)時

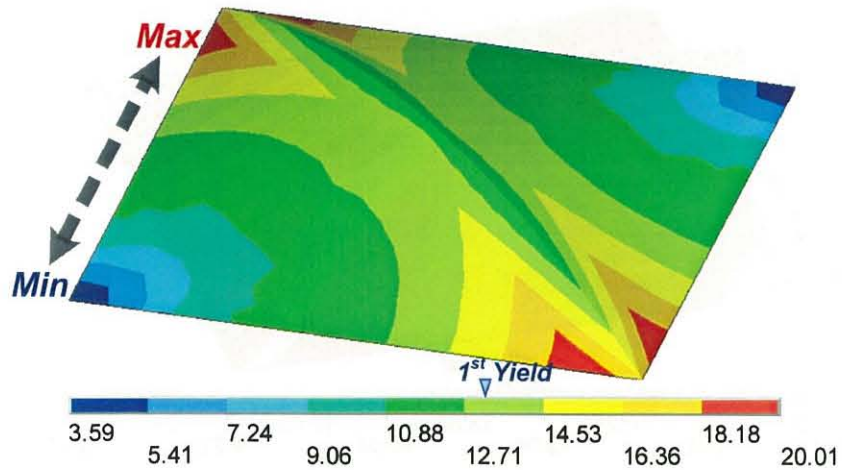


(d) 風荷重(負圧)時

図 5.13 初期張力及び短期荷重時の応力分布(ライズ比 10%時)

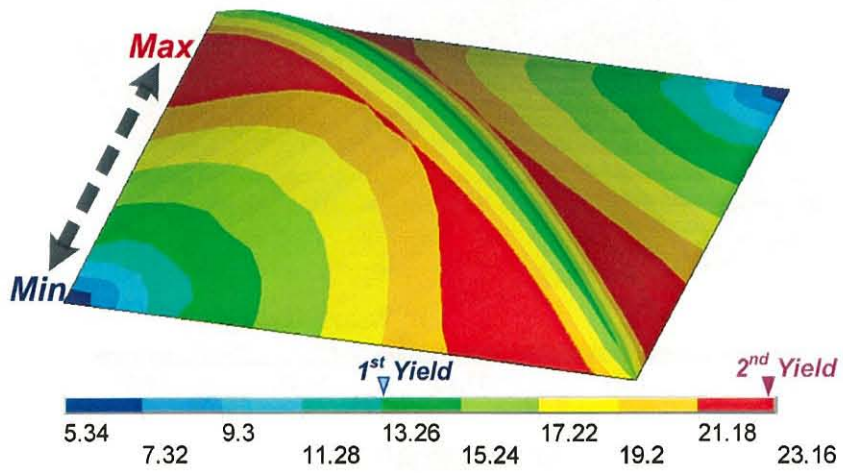


(a) 雪荷重の除荷時

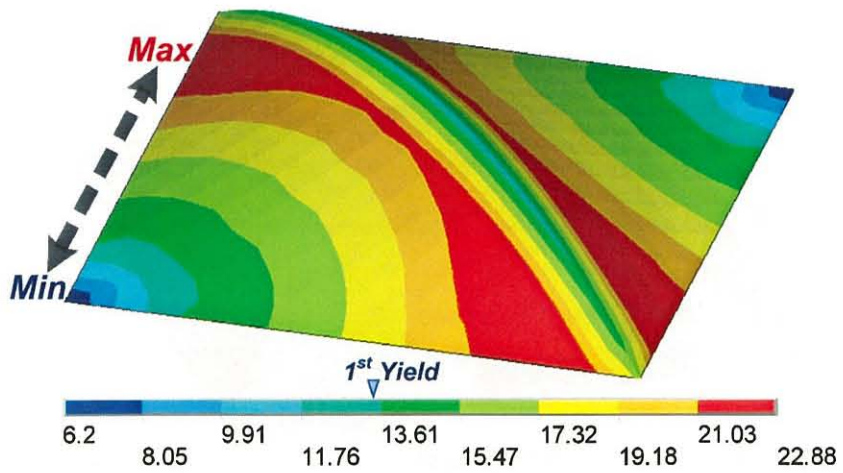


(b) 風荷重(負圧)の除荷時

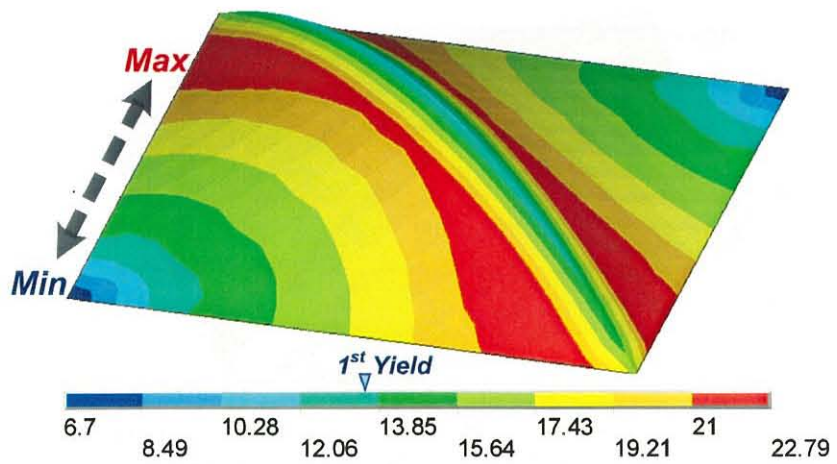
図 5.14 付加荷重の除荷後の応力分布(ライズ比 10%時)



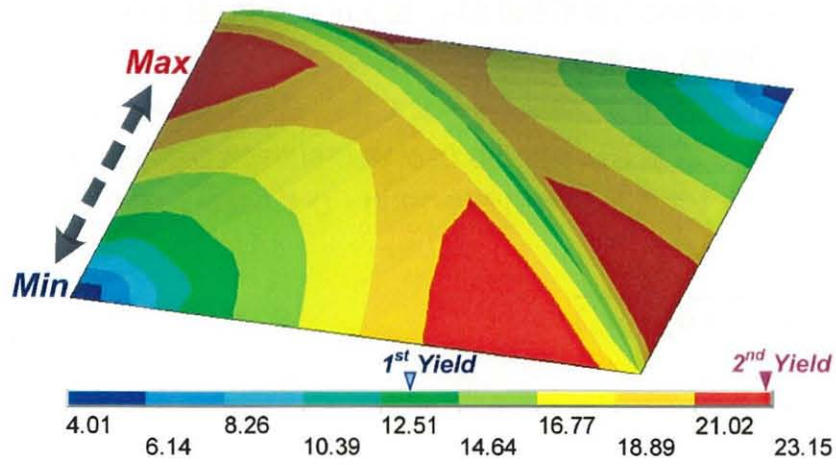
(a) 初期張力時



(b) 雪荷重時

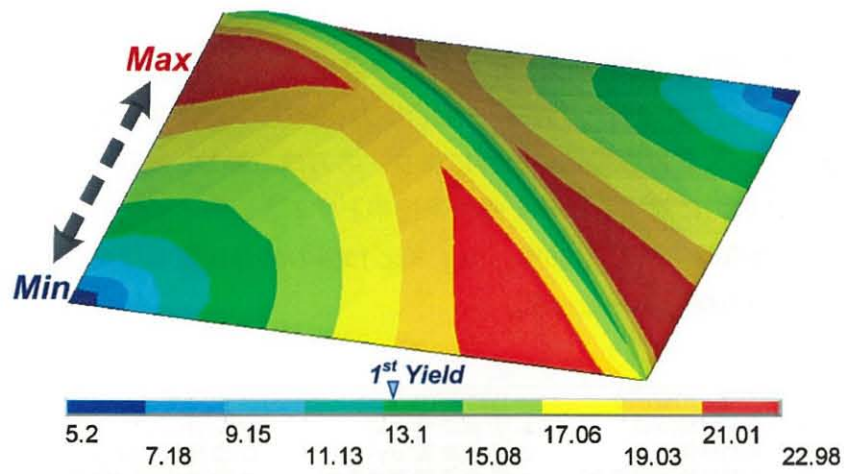


(c) 風荷重(正圧)時

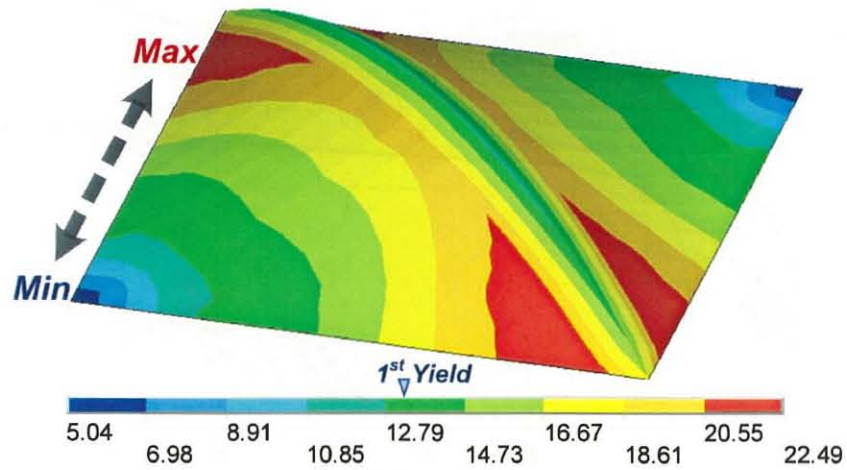


(d) 風荷重(負圧)時

図 5.15 初期張力及び短期荷重時の応力分布(ライズ比 15%時)



(a) 雪荷重の除荷時



(b) 風荷重(負圧)の除荷時

図 5.16 付加荷重の除荷後の応力分布(ライズ比 15%時)

次に、外部荷重の除荷時の応力分布を図 5.14、図 5.16 に示す。図 5.17 にはライズ比 10% に対して、張力導入(延伸成形) → 荷重の負荷 → 除荷時における応力-ひずみの関係をフィルムの 1 軸及び 2 軸(応力比 1:1)引張時の曲線と合わせて示す。張力導入後のフィルムは各位置で応力が異なる。そこで、次式で表される相当応力($\bar{\sigma}$)及び相当塑性ひずみ($\bar{\varepsilon}^p$)の関係を考える。これらを図 5.17 にプロットすると、1 軸引張時の応力 - ひずみ関係とほぼ一致する結果となった。

$$\bar{\sigma} = \sqrt{(\sigma_x^2 - \sigma_x \sigma_y + \sigma_y^2 + 3\tau_{xy}^2)} \tag{5.1}$$

$$\bar{\varepsilon}^p = \int d\bar{\varepsilon}^p \tag{5.2}$$

$$d\bar{\varepsilon}^p = \sqrt{\frac{4}{3} [(d\varepsilon_x^p)^2 + d\varepsilon_x^p d\varepsilon_y^p + (d\varepsilon_y^p)^2 + (\frac{d\gamma_{xy}^p}{4})^2]} \tag{5.3}$$

$$\varepsilon = \varepsilon^e + \bar{\varepsilon}^p \tag{5.4}$$

ただし、 ε^e は弾性ひずみ、 $\bar{\varepsilon}^p$ は相当塑性ひずみを表す。

これらを用いて、ライズ比 10% と 15% 時の相当応力-相当ひずみの関係を図 5.18、図 5.19 に示す。張力導入後、積雪または風荷重の負荷により、応力は上昇し、除荷により応力は低下する。除荷後応力の初期応力に対する比率を張力保持率とすると、ライズ比 10% の場合は積雪荷重に対して 94%、風荷重時に対して 86%、ライズ比 15% の場合は積雪荷重に対して 97%、風荷重に対して 92% の張力保持率となった。

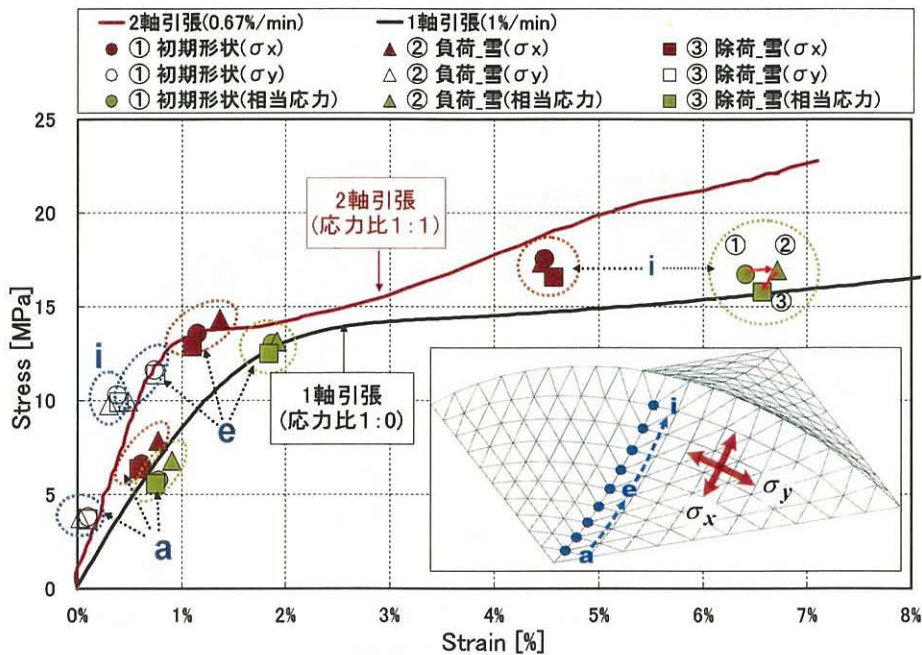
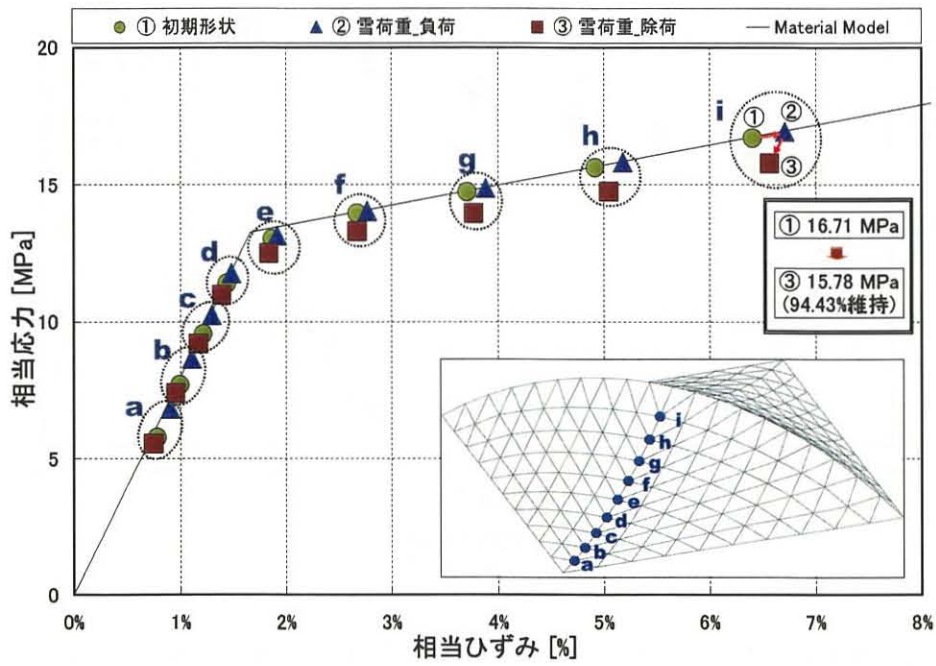
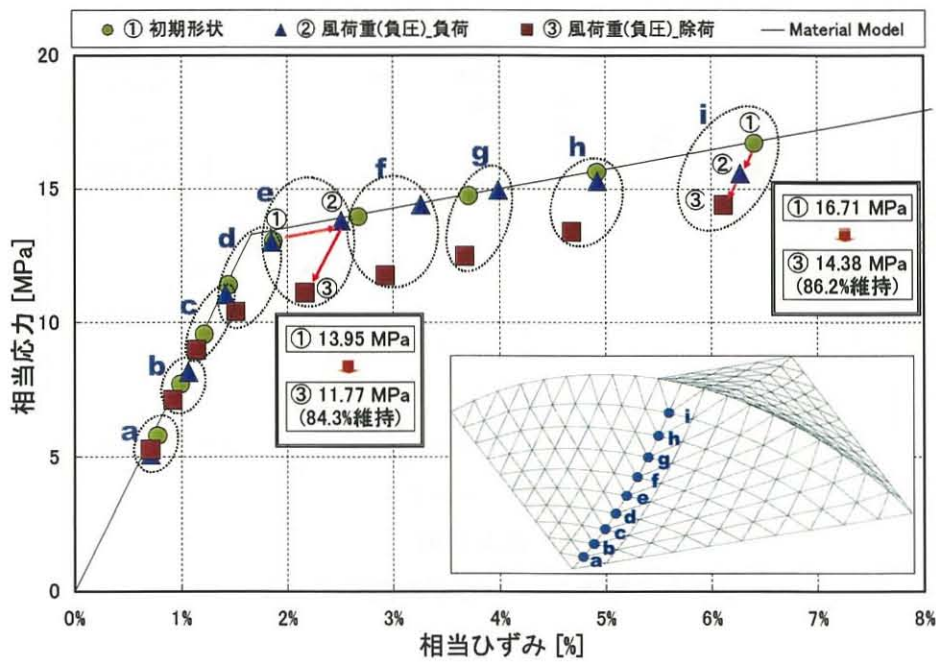


図 5.17 負荷と除荷時の応力-ひずみ関係(ライズ比 10%時)

次に、フィルム境界部の反力値をアーチ及びフレームに荷重値として加えた場合の応力分布を図5.20に示す。結果より、外周フレームには[-100×50×5×7.5の溝形鋼が、アーチにはφ-34×2.3の鋼管が適切であることが確認された。

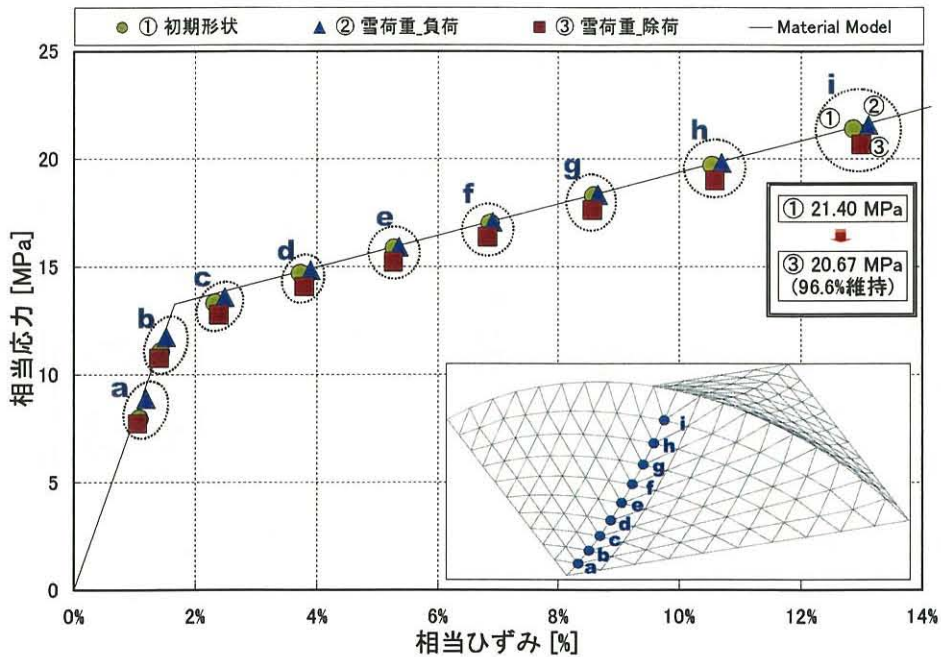


(a) 積雪荷重時

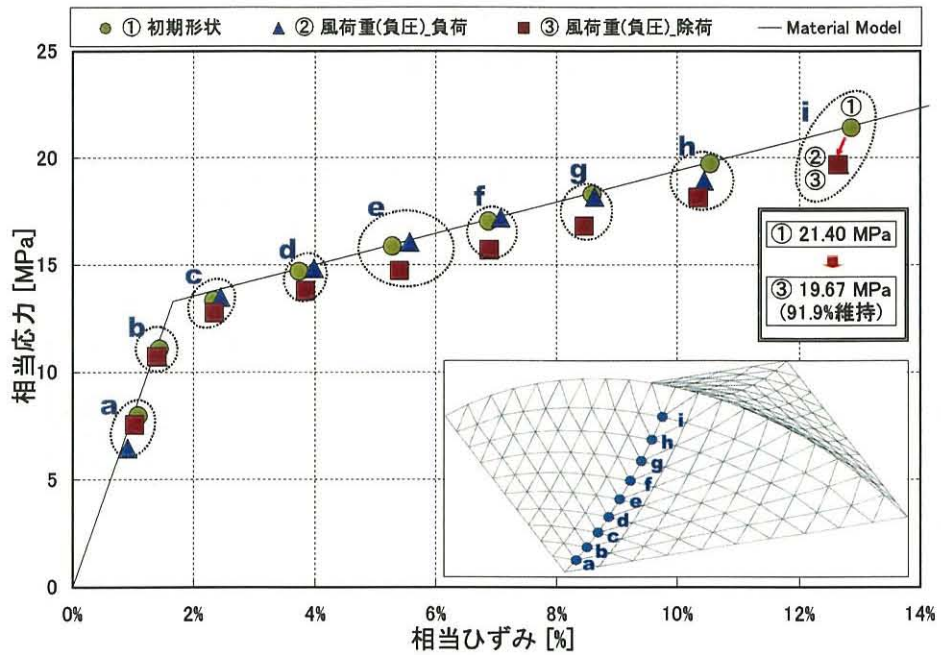


(b) 風荷重時

図 5.18 負荷と除荷時の応力-ひずみ関係(ライズ比 10%時)

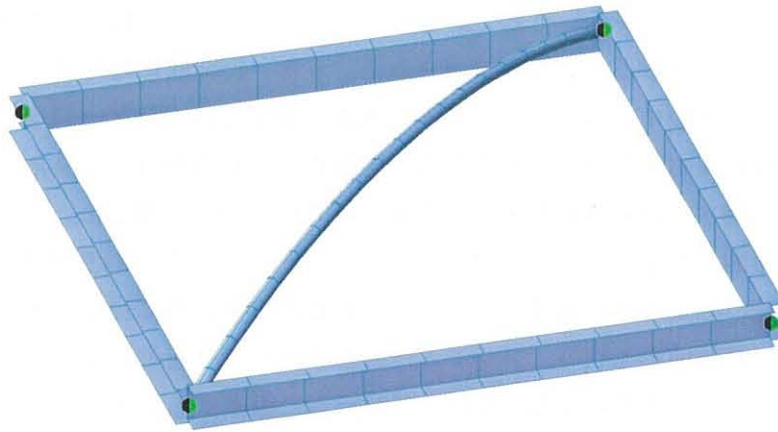


(a) 積雪荷重時

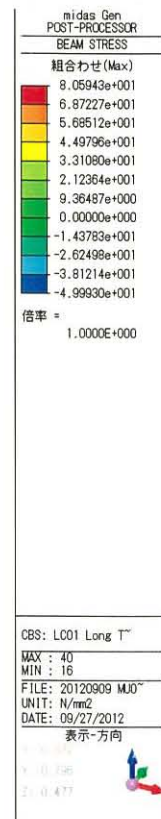
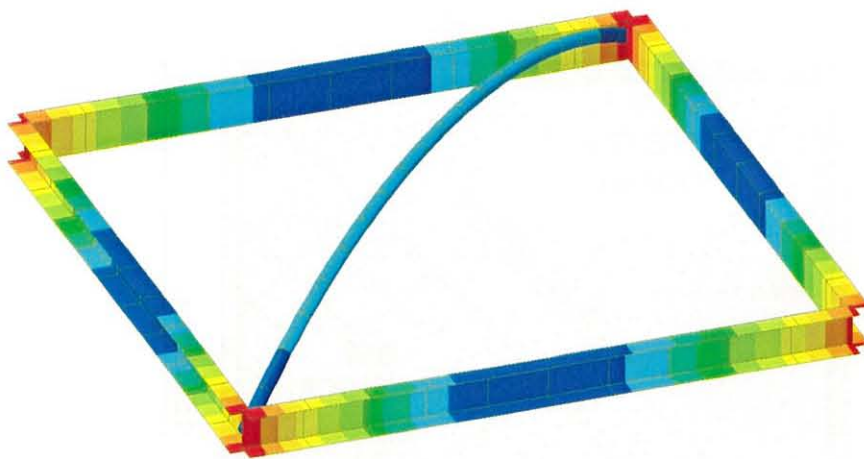


(b) 風荷重時

図 5.19 負荷と除荷時の応力-ひずみ関係(ライズ比 15%時)



(a) 実験モデル



(b) 応力-変形解析(長期荷重)

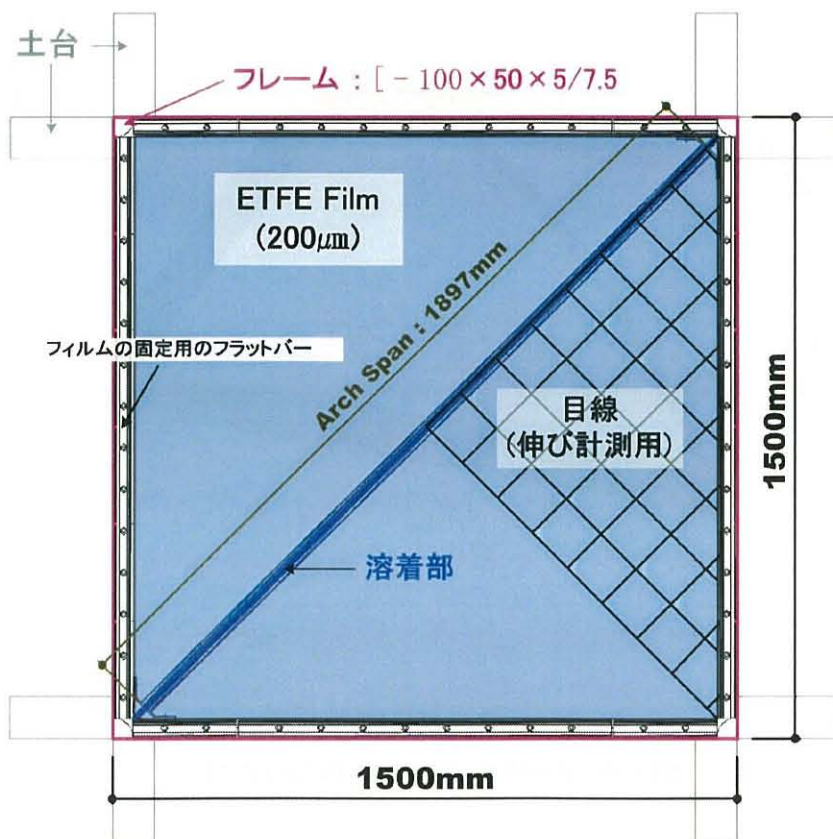
図 5.20 アーチ及びフレームの部材検討

5.3.3 実験的検討

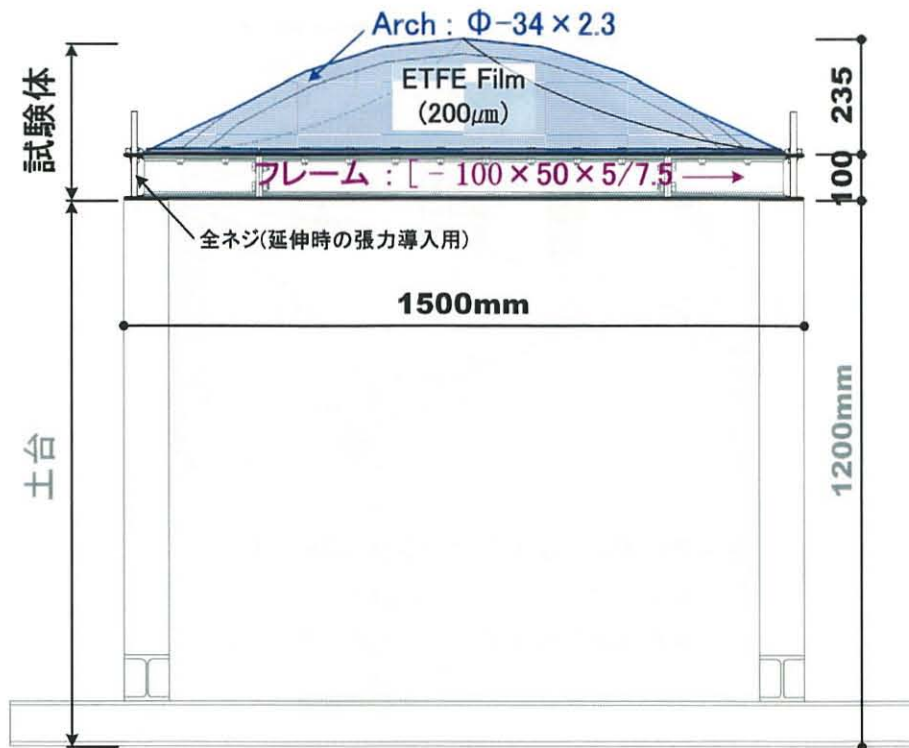
試験体の概要を図 5.21 に示す。試験体は 1.5m×1.5m のフレーム、ライズ比 10%と 15%のアーチ、200 μ m の ETFE フィルム、そして定着用のフラットバーからなるパネル形式の試験体と延伸成形時に反力を受け取る土台から構成される。また、延伸成形時のフィルムの応力状態を把握するために、各柱のネジ棒及びアーチの中央部・端部にひずみゲージを貼付した。これたのひずみより、柱の反力とアーチの軸力を求めて解析との比較を行う。また、フィルムにはあらかじめ格子線を描き、延伸成形前・後の変形及び残留変形を計測した。

延伸成形の手順を図 5.22 に示す。はじめに、フィルムをフレームに取り付ける。次に、延伸のためのアーチを柱に固定する。最後に、フレームを各柱のネジ棒に通し、ネジ締めによりフレームを降下させて延伸成形を行う。フレームは各点のバランスを取るために、インターバルを取りながら 2mm ずつ下げていった。なお、フレームに固定するフィルムの寸法は内法長さで 1.4m の正方形とした。

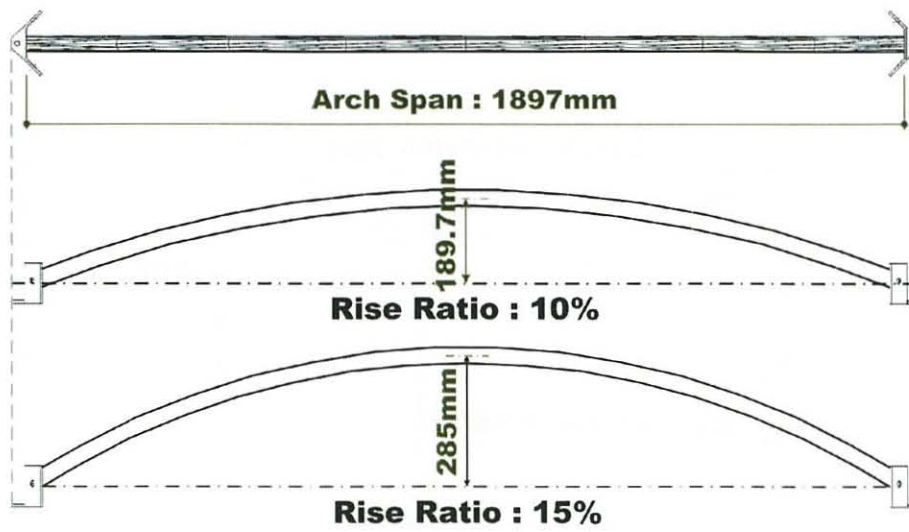
実験時の様子を図 5.23、図 5.24 に示す。アーチの突き上げにより、フィルムの延伸成形が安定的に行えている。また、スタディーモデルでは懸念された応力の通りによる問題は、本方式では特に見られなかった。ただし、実験後、ライズ比 15% の試験体においてはアーチと直交方向のコーナー部でフィルムの張力によるフレームの変形が大きく、柱から取り外すことができなかった。



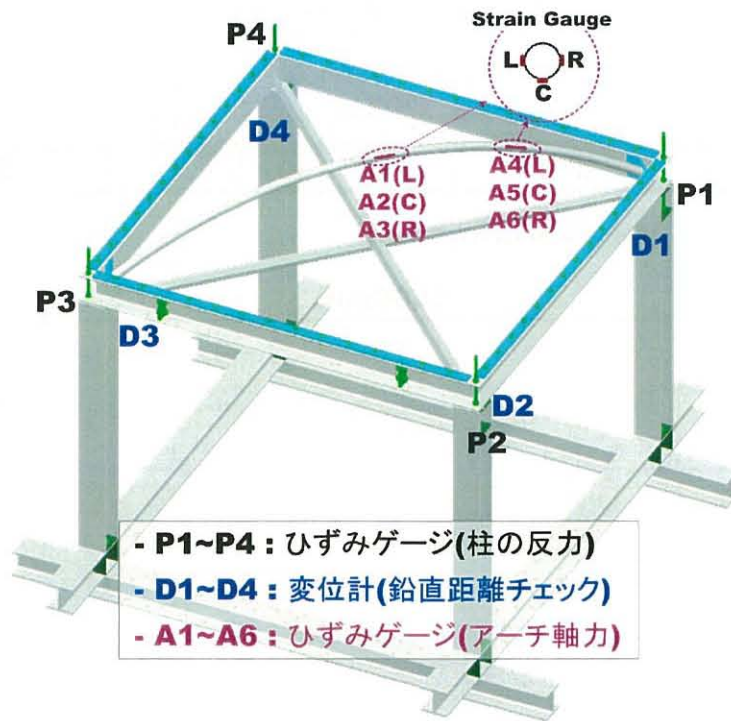
(a) Plan



(b) Section



(c) Arch



(d) 計測位置

図 5.21 試験体の概要図

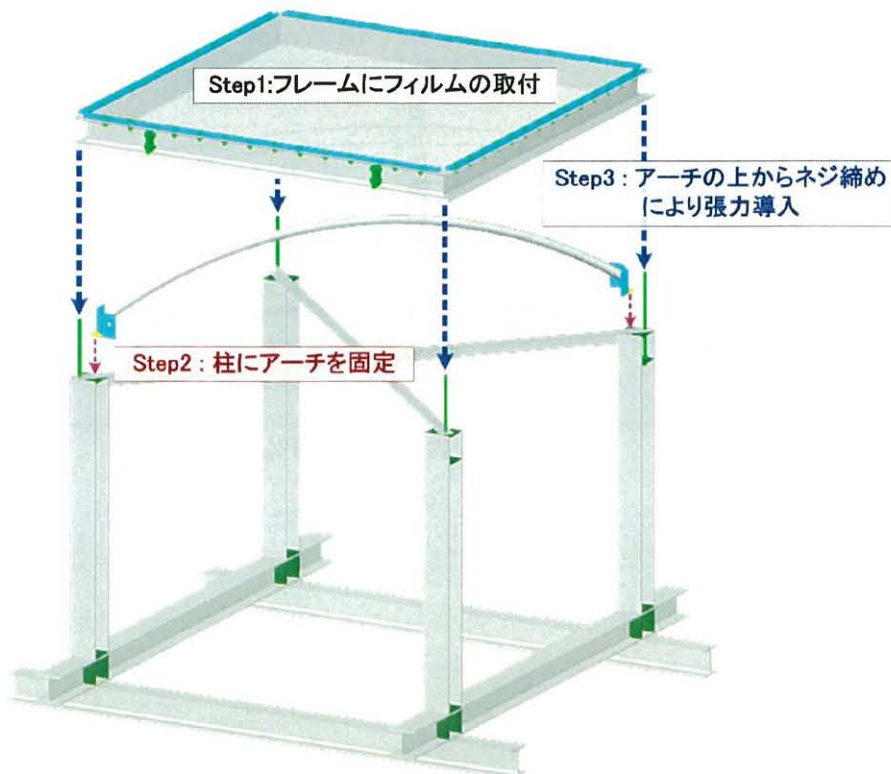
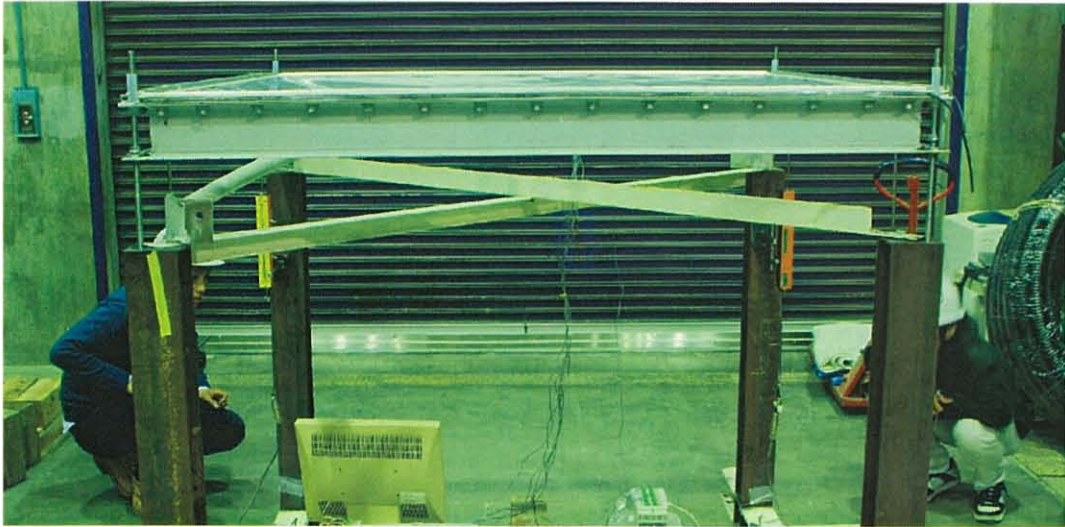
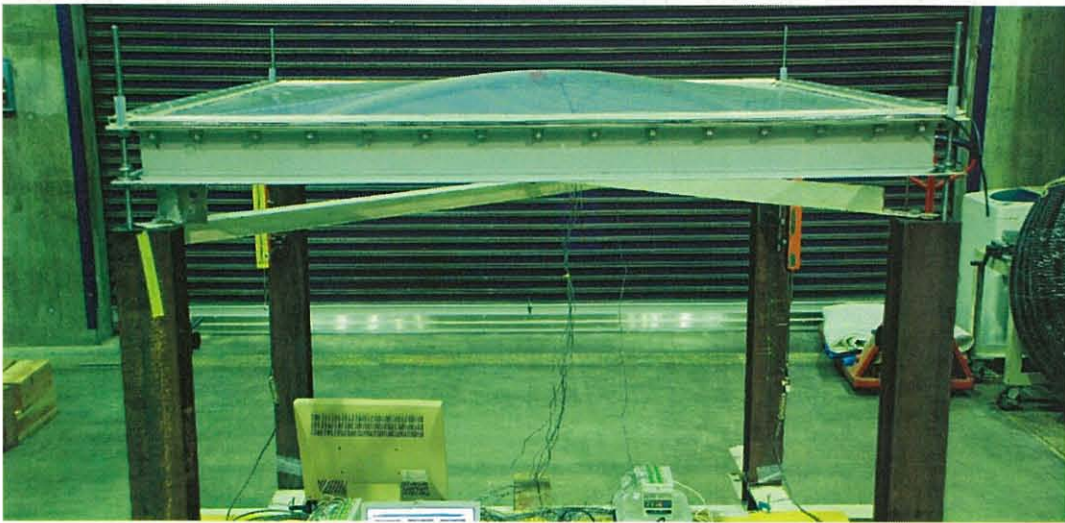


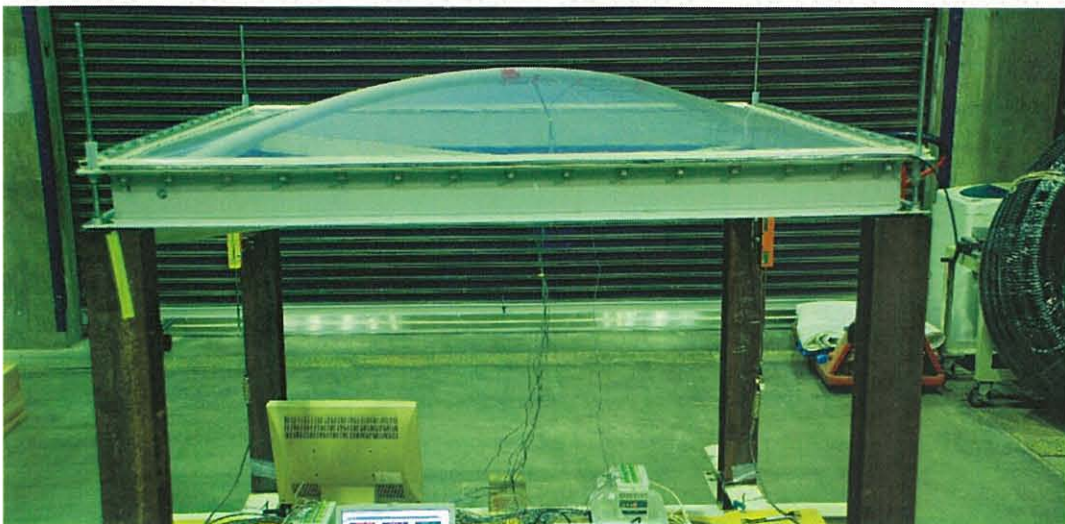
図 5.22 延伸成形の手順



(a) 延伸成形前

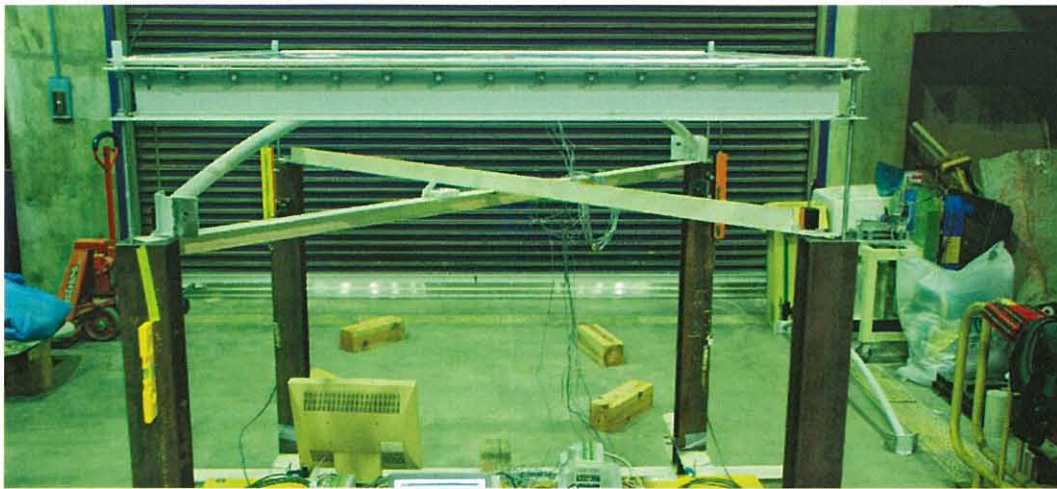


(b) 延伸成形途中

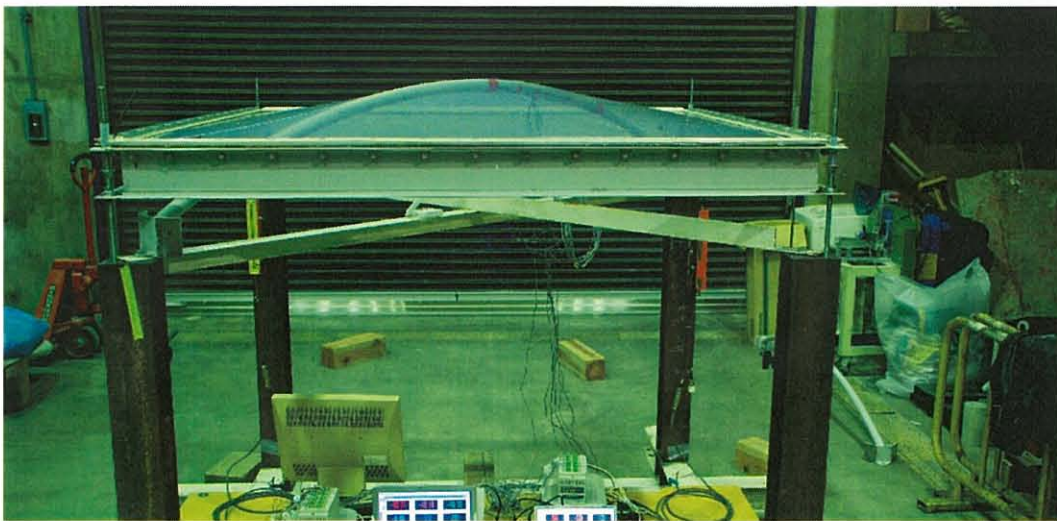


(c) 延伸成形完了

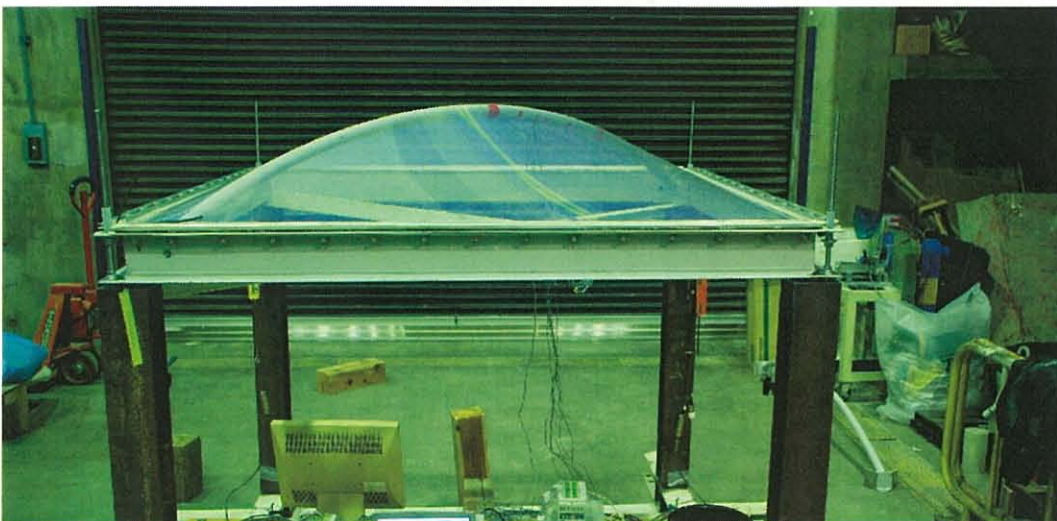
図 5.23 延伸成形の様子(ライズ比 10%時)



(a) 延伸成形前



延伸成形途中



(c) 延伸成形完了

図 5.24 延伸成形の様子(ライズ比 15%時)

5.3.4 解析と実験の比較検討

フレームの鉛直変位とアーチ中央部及び端部軸力の関係を図 5.25、図 5.26 に示す。実験と解析の結果では、軸力に大きな差異が見られた。アーチ及び支柱の寸法誤差のため、取付時にアーチに強制曲げを加える必要があったことが原因と考えられる。

そこで、これらを考慮して再度解析を行ったものが図 5.27、図 5.28 である。その結果、両者はほぼ一致しており、実験時の現象を解析で再現できることが分かった。

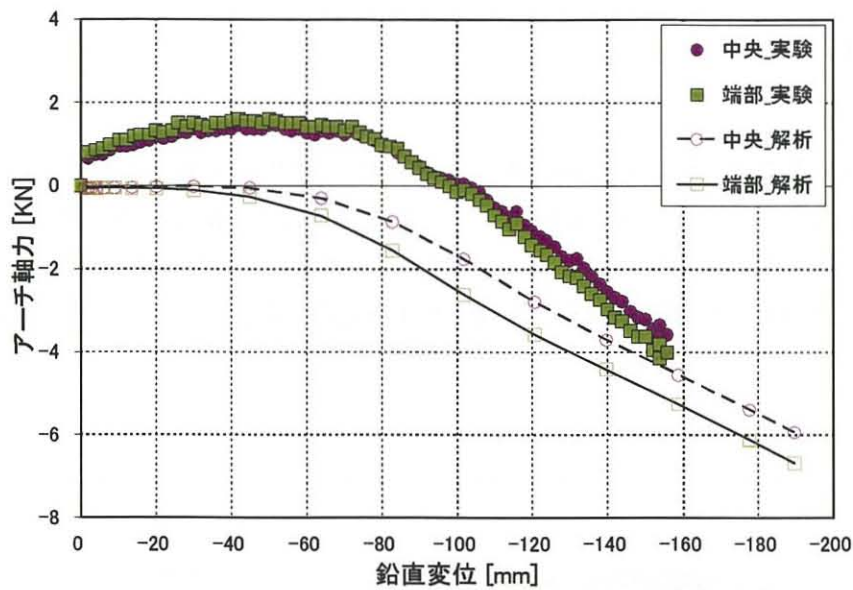


図 5.25 鉛直変位と軸力との関係(ライズ比 10%)

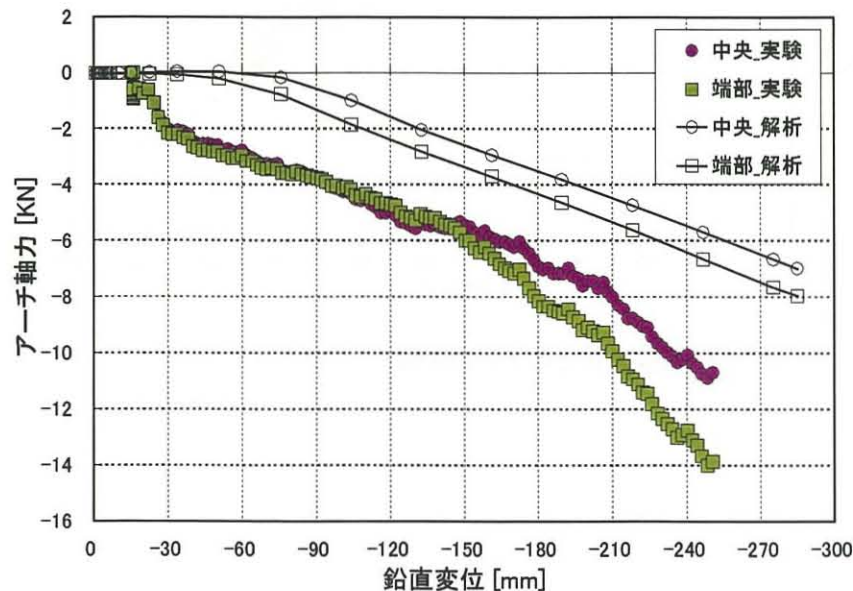


図 5.26 鉛直変位と軸力との関係(ライズ比 15%)

次に、実験の時間経過に対するアーチの軸力および室温の変化を図 5.29、図 5.30 に示す。延伸成形完了直後は、アーチの圧縮力が低下するが、約 20 分後からは反転して、増加する傾向が見られた。その後のアーチ軸力は室温の変化とほぼ同調している。このことから、フィルムのリラクセーションは、延伸直後 20 分程度は生じるが、その後はわずかであると言える。

次に、フィルムの格子点間距離の変化から求めたひずみをそれぞれ図 5.31、図 5.32 に示す。ひずみはアーチ方向 (Y 方向) 及びアーチの直交方向(X 方向)のベクトルの変化から変形勾配テンソル F を求め、式(5.5)で定義されるグリーンひずみテンソルで評価した。

$$E = \frac{1}{2}(F^T F - I) \tag{5.5}$$

延伸成形時の結果では、ライズ比 10%時に最大ひずみ 3.1%、ライズ比 15%時に最大ひずみ 7.8%となっており、いずれもアーチ方向よりアーチ直交方向の変形が大きい結果となった。さらに、計測終了後、試験体から外したフィルムに対して残留変形を計測した結果では、ライズ比 10%時はアーチ周辺で局部的に 0.51~1.52%の残留変形が計測されたが、ライズ比 15%時は残留変形領域の広がりが確認された。

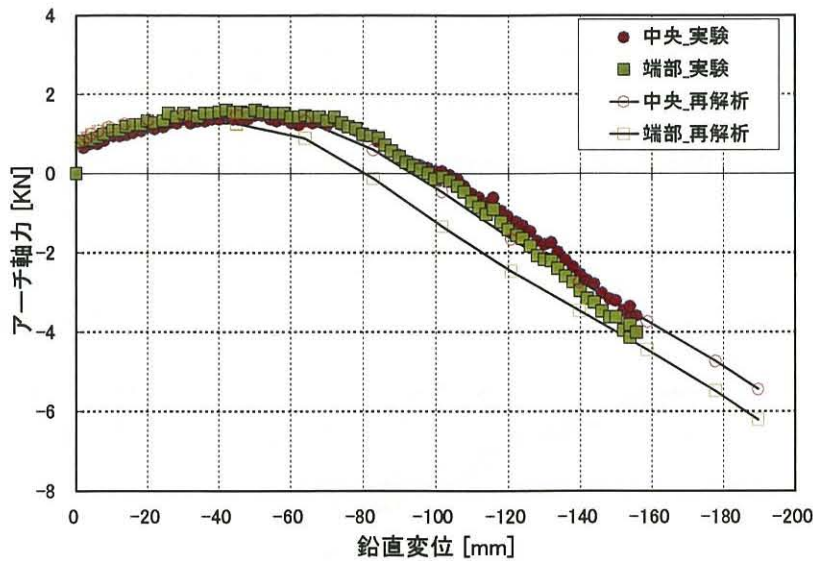


図 5.27 鉛直変位と軸力との関係(ライズ比 10%の再解析)

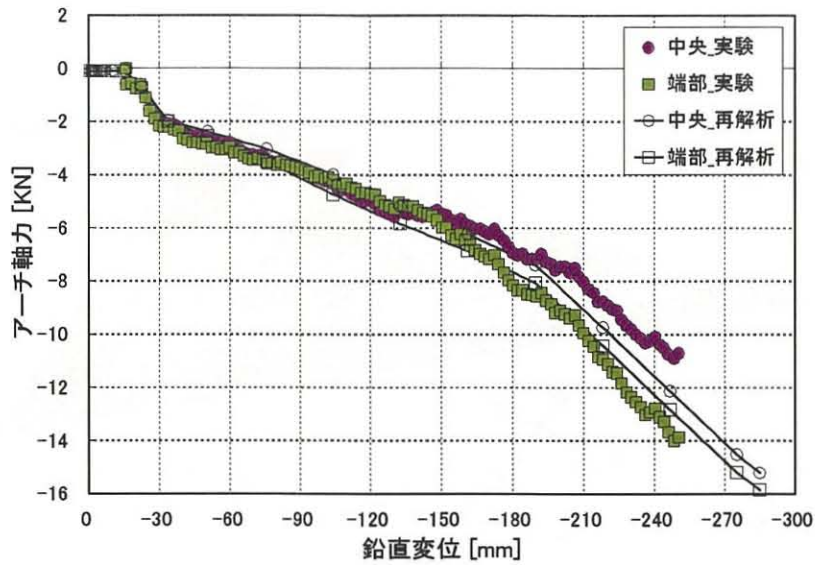


図 5.28 鉛直変位と軸力との関係(ライズ比 15%の再解析)

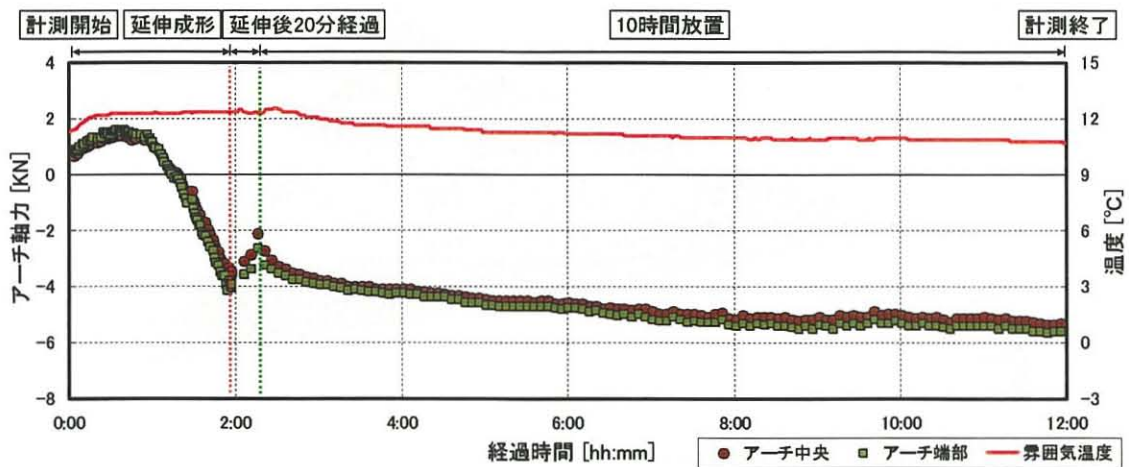


図 5.29 時間経過による軸力と温度の関係(ライズ比 10%)

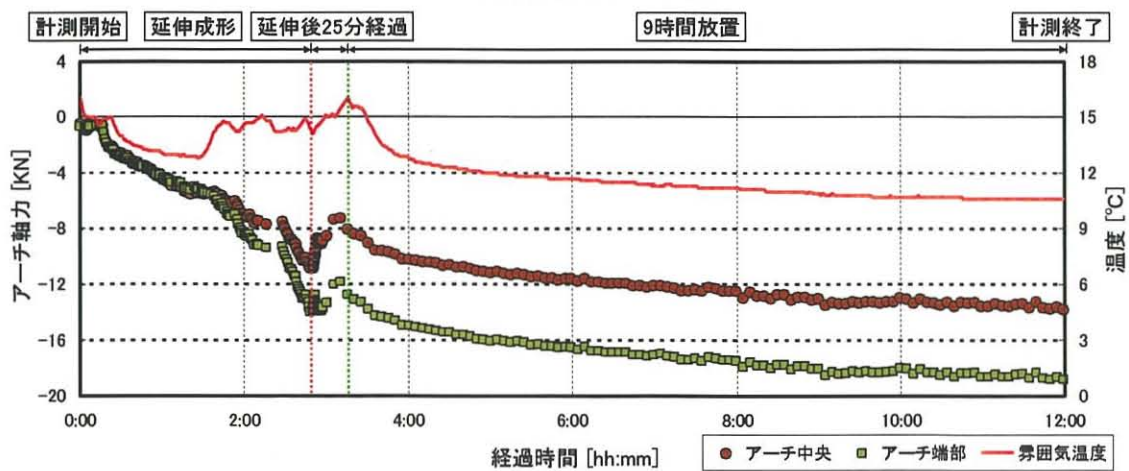
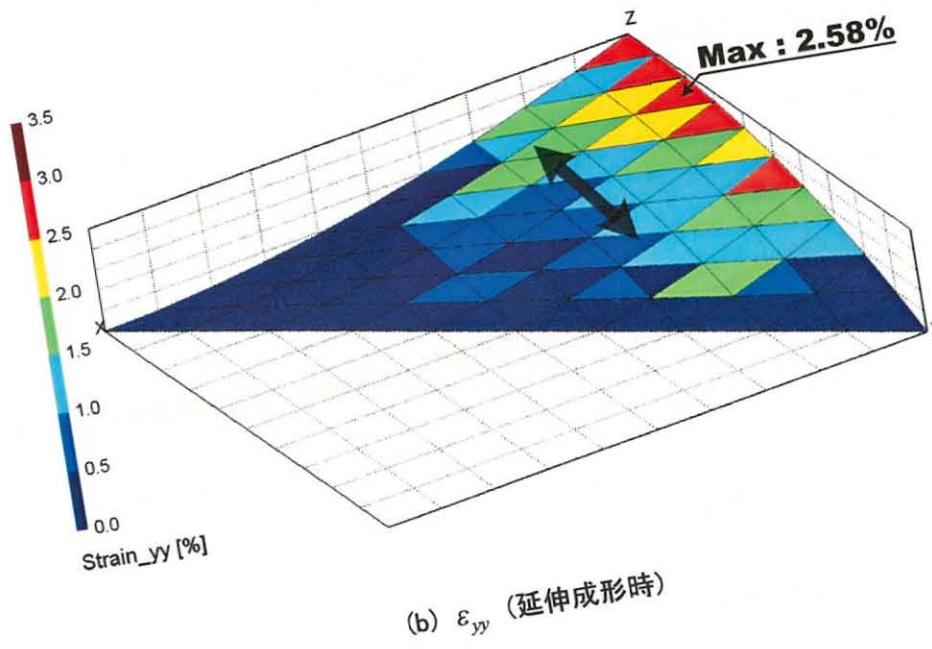
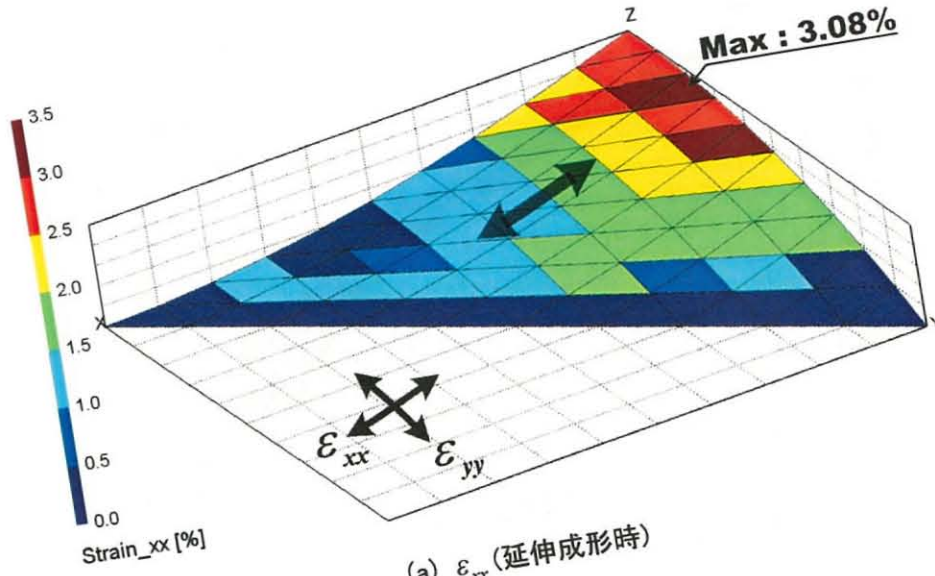
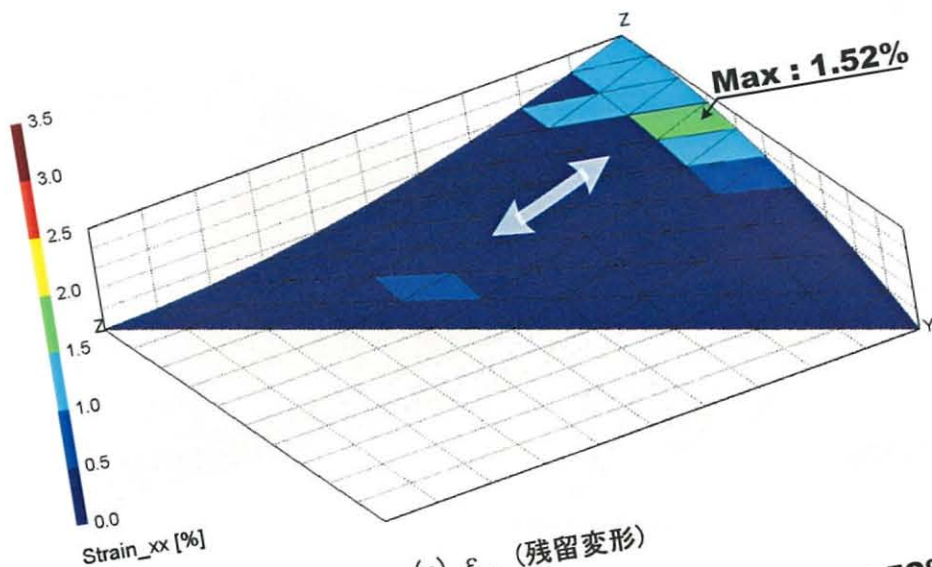
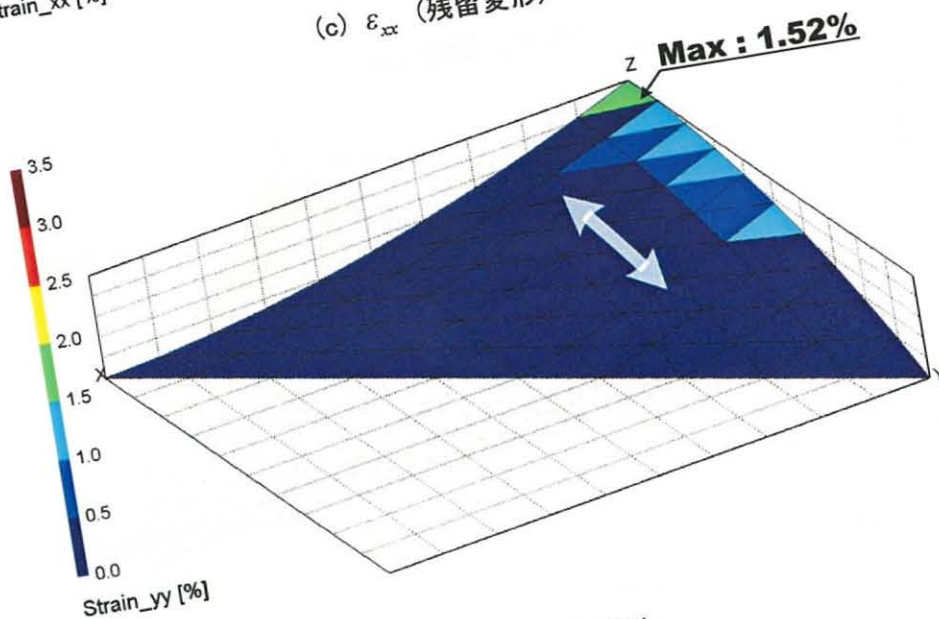


図 5.30 時間経過による軸力と温度の関係(ライズ比 15%)



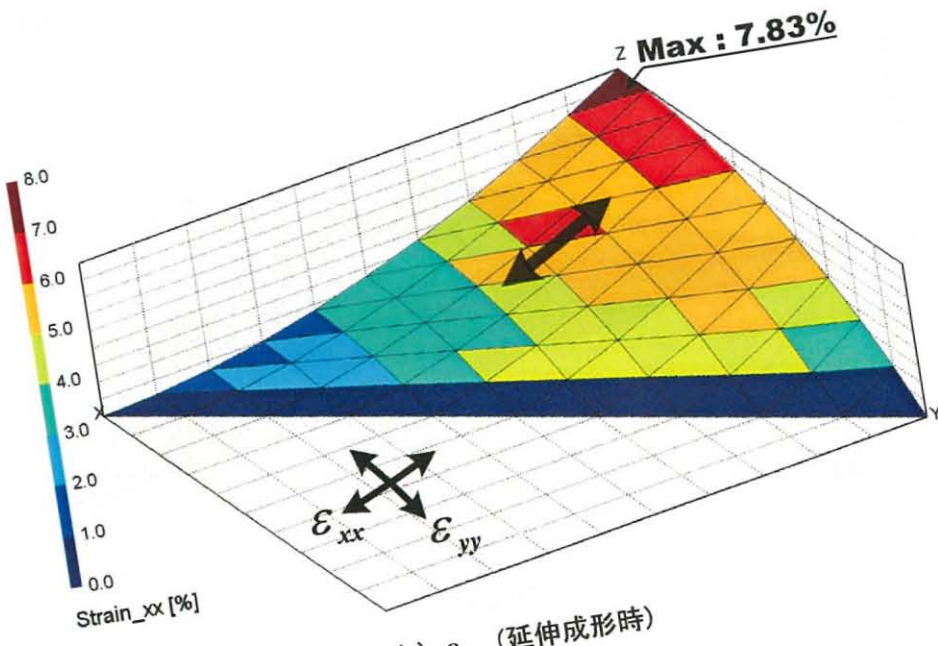


(c) ϵ_{xx} (残留変形)

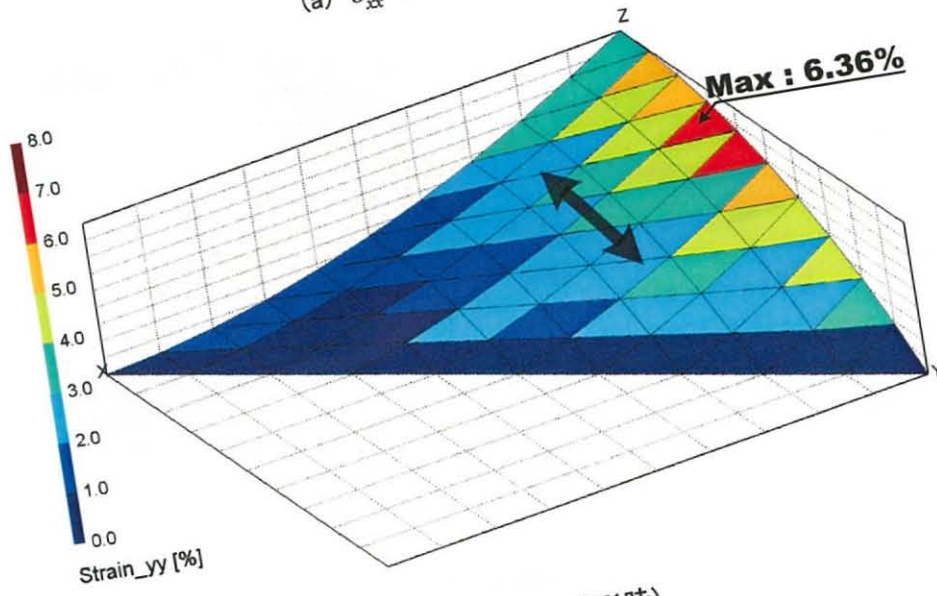


(d) ϵ_{yy} (残留変形)

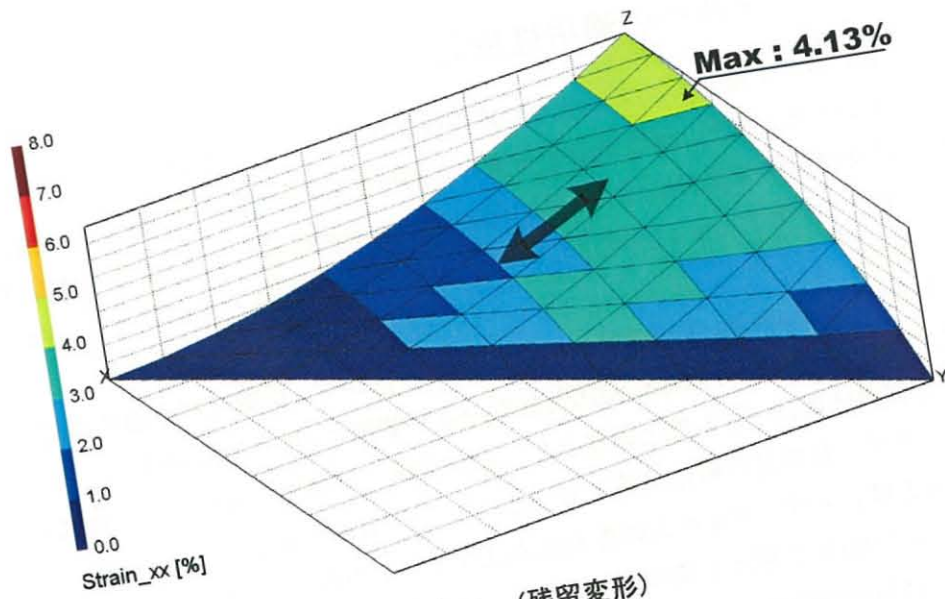
図 5.31 フィルムのひずみ変化(ライズ比 10%)



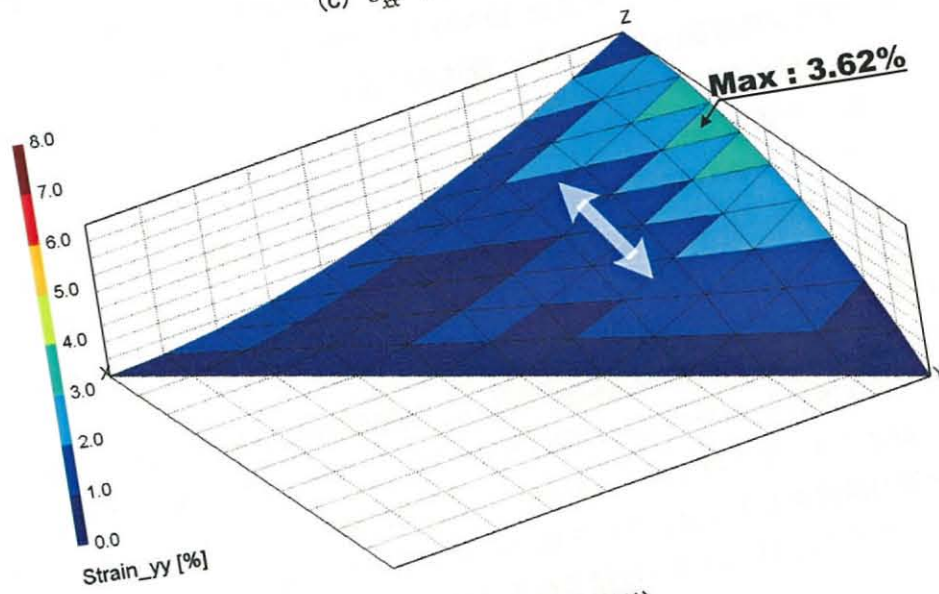
(a) ϵ_{xx} (延伸成形時)



(b) ϵ_{yy} (延伸成形時)



(c) ϵ_{xx} (残留変形)



(d) ϵ_{yy} (残留変形)

図 5.32 フィルムのひずみ変化(ライズ比 15%)

5.4 実大規模パネルへの適用性検討

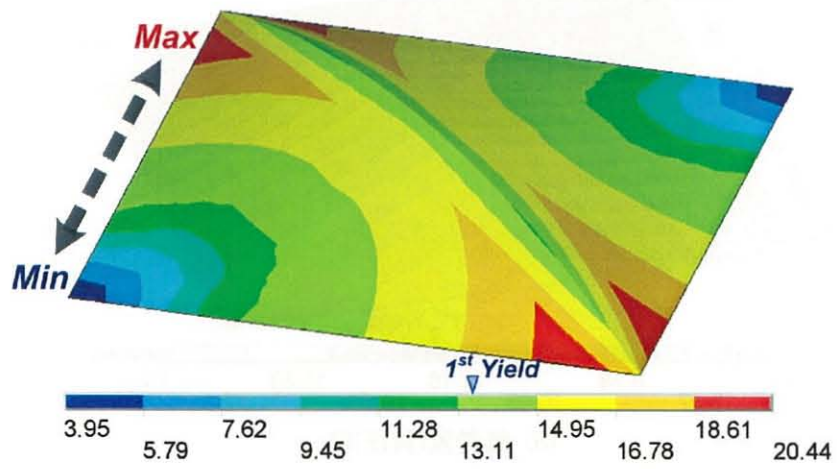
5.3 節では実証実験を通じて、フィルムの延伸成形はテンション方式の立体形状を実現可能であることを確認した。また、粘性挙動を考慮した解析的検討を行い、1.5m×1.5m 規模のパネルにおける長期及び短期荷重時に対する張力保持率の予測を行った。さらに、実験と解析結果の比較検討を通じて、テンション方式においての 1.5m×1.5m 規模パネルの適用性は有効であることが分かった。

そこで、本節では、3m×3m 規模の実大パネルを対象として、長期及び短期荷重時に対する解析的検討を行うことで、延伸成形の適用可能なパネル規模について検討を行う。

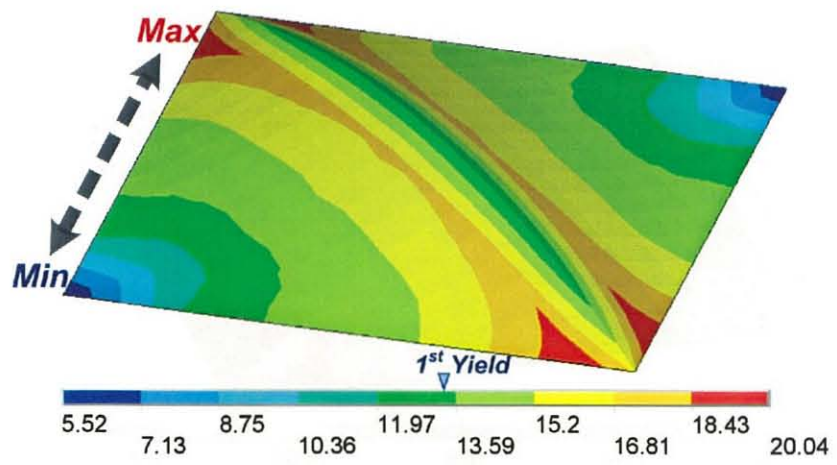
解析条件及び荷重条件は 5.3.2 節と同様とし、付加荷重の除荷後に対する張力保持率の比較検討を行った。まず、長期及び短期荷重に対するライズ比 10%の結果を図 5.33 に、ライズ比 15%の結果を図 5.35 に示す。フィルムの最大応力はライズ比 10%の場合、アーチを中心に広い範囲で第 1 降伏点(13MPa)を超えて塑性域へ入っているが、第 2 降伏点(23MPa)には至っていない。また、ライズ比 15%の場合、ライズ比 10%時より塑性域が大きく広がり、アーチ周辺部の応力は張力導入時及び風荷重(負圧)時に第 2 降伏点に達している。一方、アーチの直交方向のコーナー部は応力が低くなる結果となった。

次に、付加荷重の除荷時に対するライズ比 10%の応力分布を図 5.34、ライズ比 15%の応力分布を図 5.36 に示す。フィルムの応力分布はライズ比 10%の場合、雪荷重の除荷時には目立った変化は見られなかったが、風荷重(負圧)時はアーチを中心にフィルムの応力が大幅に落ちる結果となった。また、ライズ比 15%の場合、ライズ比 10%時に比べて、アーチ周辺部の顕著な応力低下現象は見られなかった。

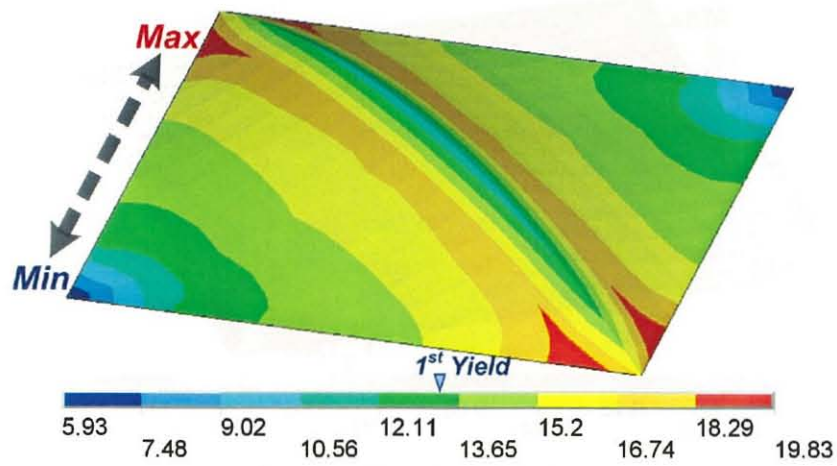
以上の結果より、ライズ比 10%と 15%時に対して、初期張力導入(延伸成形) → 荷重の負荷 → 除荷時における相当応力-相当ひずみの関係を図 5.37、図 5.38 に示す。張力導入後、積雪または風荷重の負荷により、応力は上昇し、除荷により応力は低下する。除荷後応力の初期応力に対する比率を張力保持率とすると、ライズ比 10%の場合は積雪荷重に対して 83%、風荷重時に対して 39%、ライズ比 15%の場合は積雪荷重に対して 90%、風荷重に対して 64%の張力保持率となった。



(a) 初期張力時



(b) 雪荷重時



(c) 風荷重(正圧)時

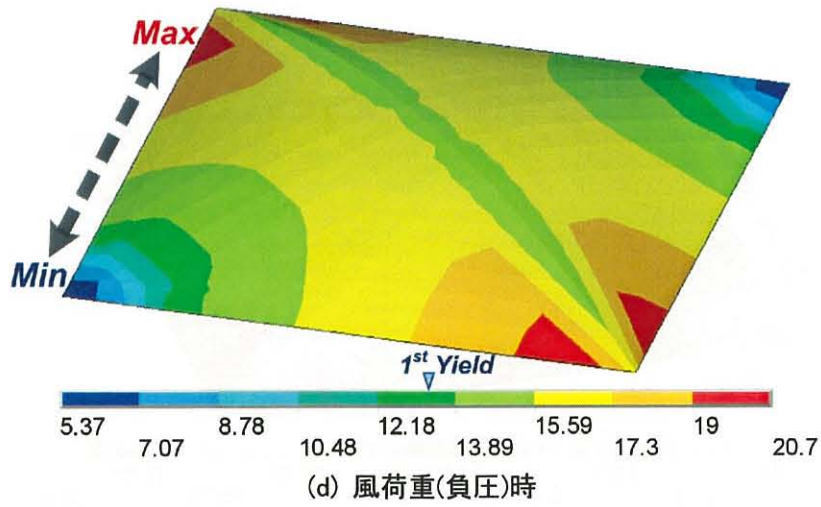


図 5.33 初期張力及び短期荷重時の応力分布(ライズ比 10%時)

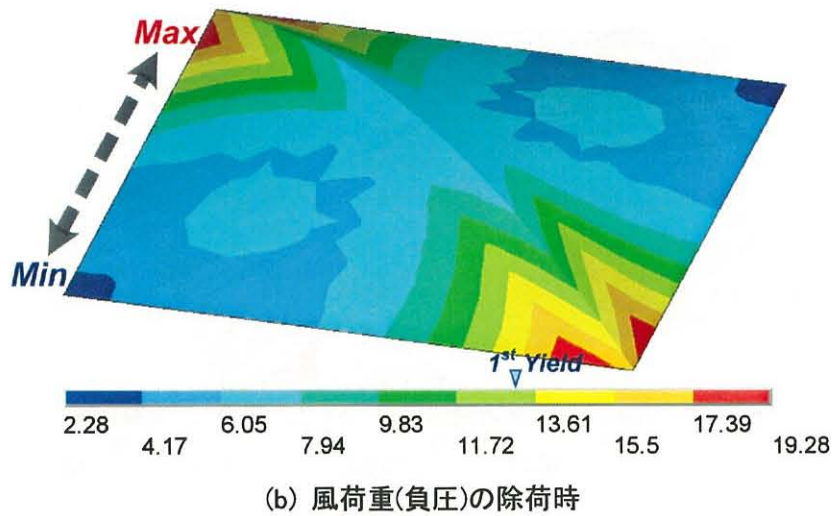
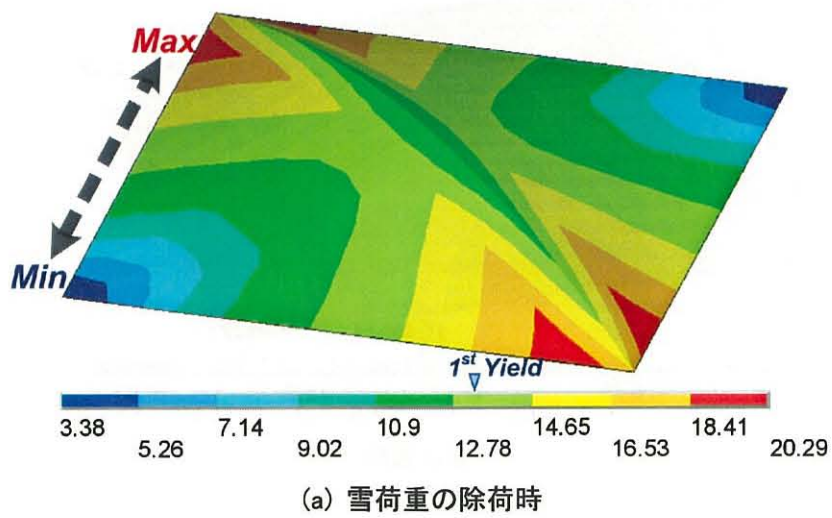
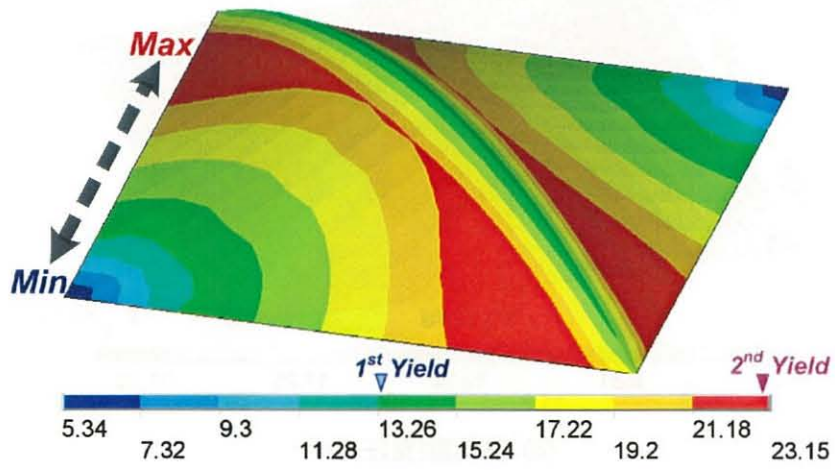
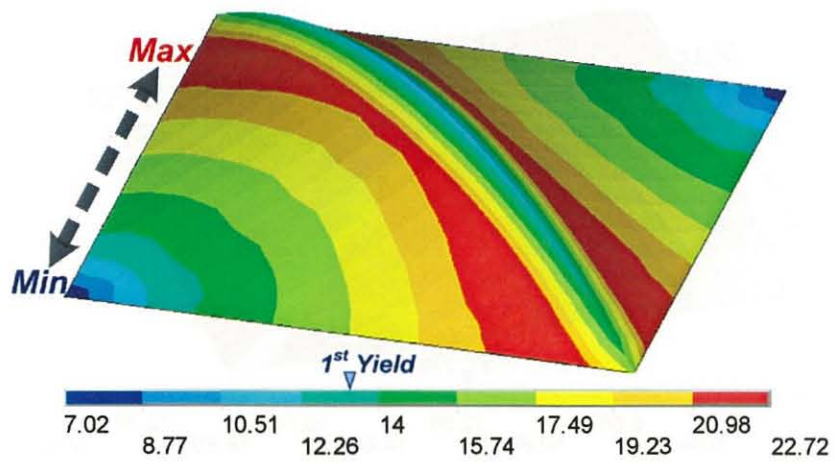


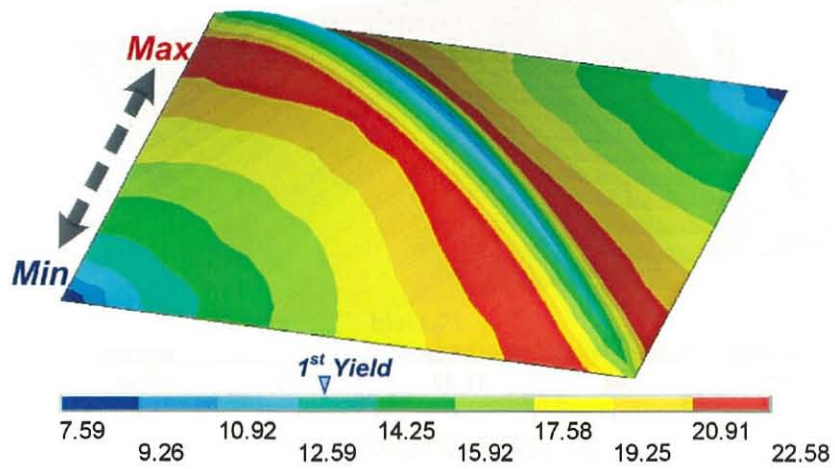
図 5.34 付加荷重の除荷後の応力分布(ライズ比 10%時)



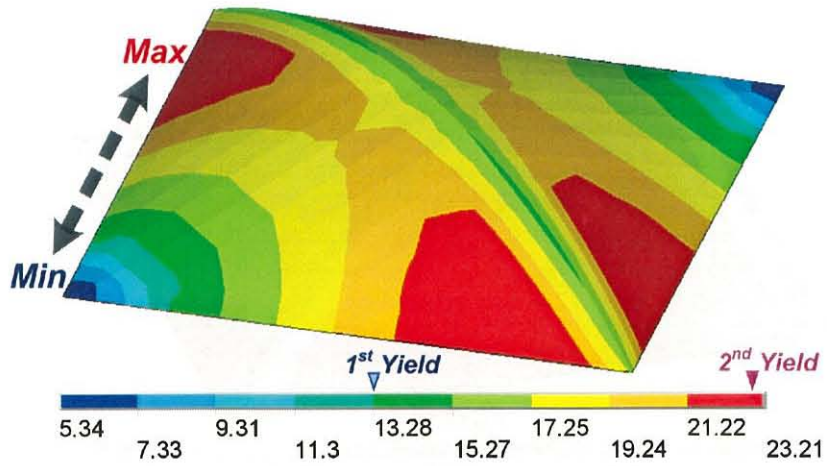
(a) 初期張力時



(b) 雪荷重時

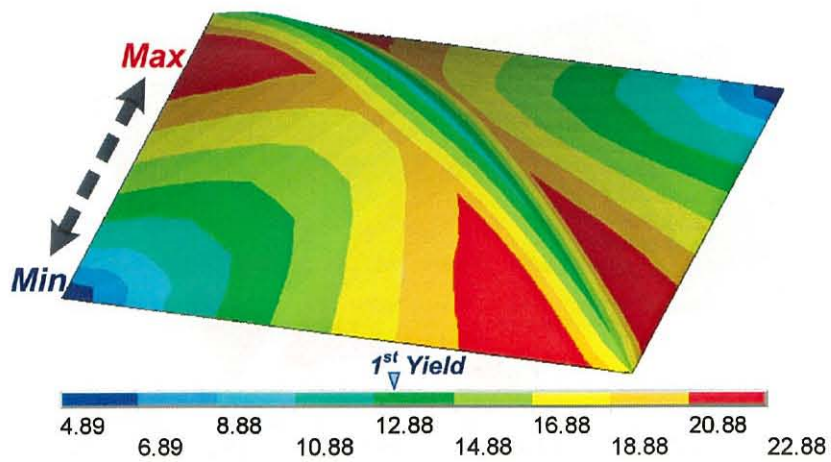


(c) 風荷重(正圧)時

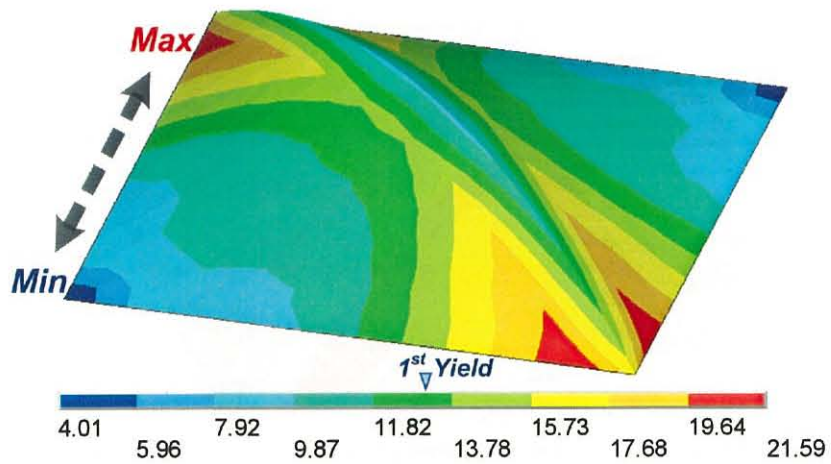


(d) 風荷重(負圧)時

図 5.35 初期張力及び短期荷重時の応力分布(ライズ比 15%時)

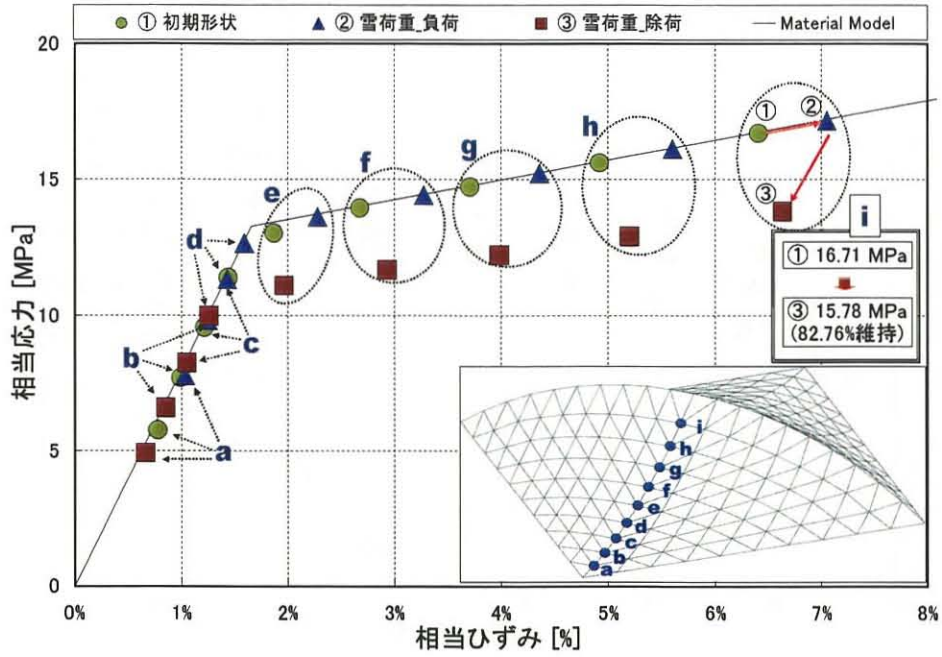


(a) 雪荷重の除荷時

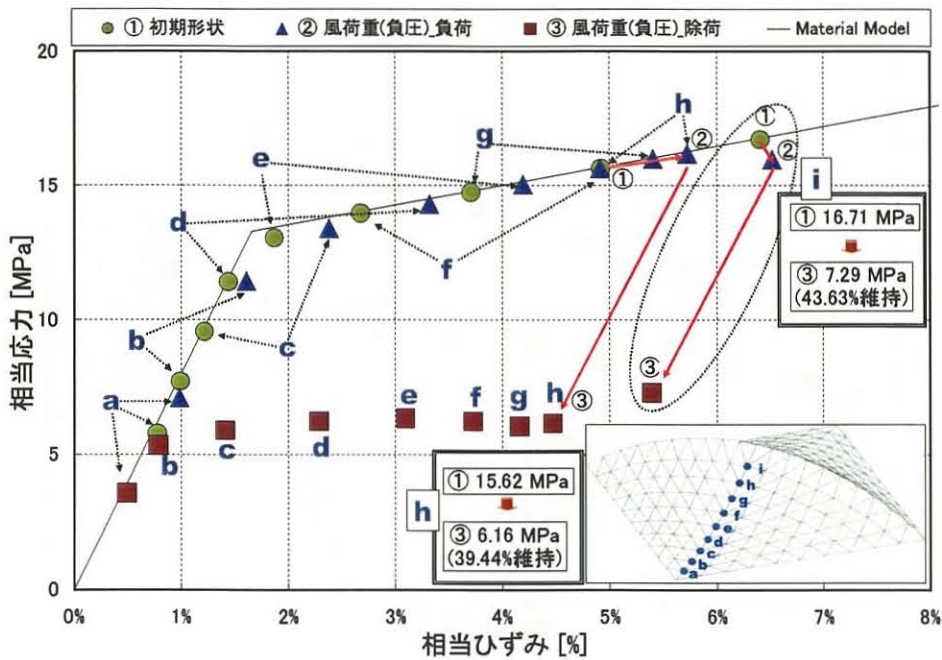


(b) 風荷重(負圧)の除荷時

図 5.36 付加荷重の除荷後の応力分布(ライズ比 15%時)

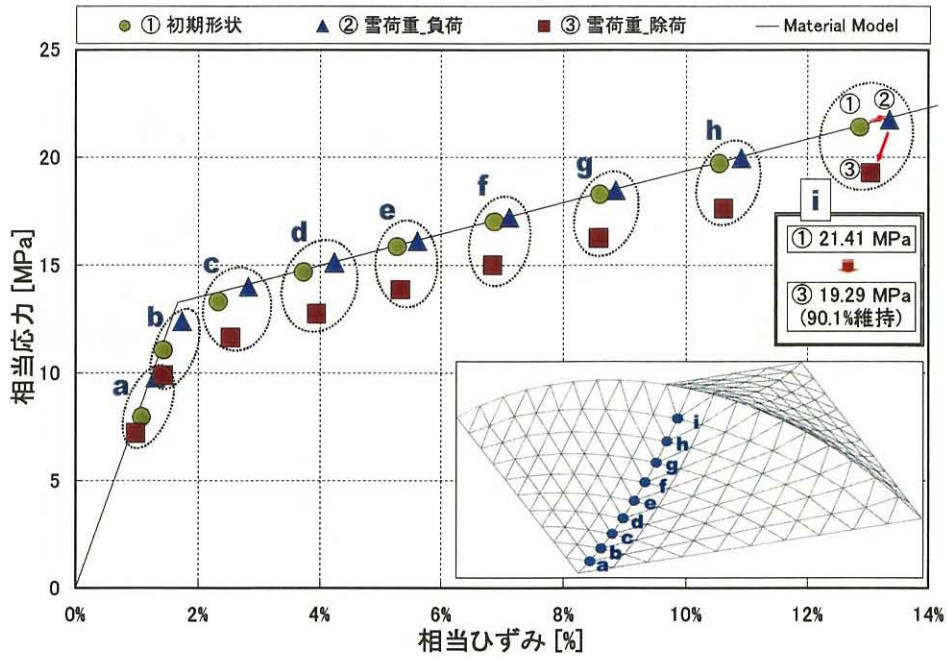


(a) 積雪荷重時

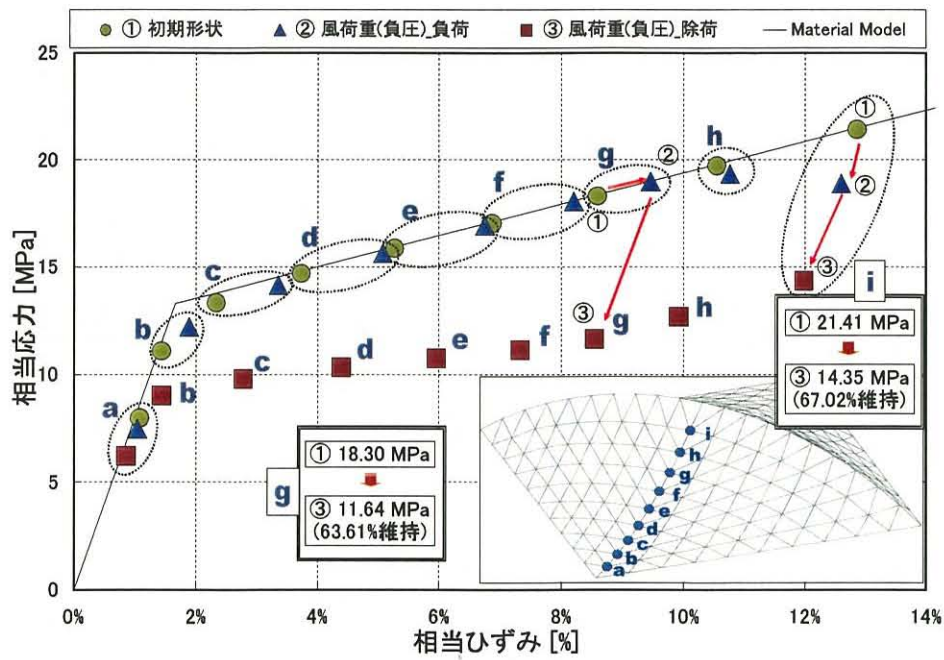


(b) 風荷重時

図 5.37 負荷と除荷時の応力-ひずみ関係(ライズ比 10%時)



(a) 積雪荷重時



(b) 風荷重時

図 5.38 荷重と除荷時の応力-ひずみ関係(ライズ比 15%時)

5.5 まとめ

本章では、ETFE フィルムを用いたテンション方式のスタディーモデル及び実大モデルを対象として、延伸成形の実現可能性を検討し、以下の知見を得た。

- 1) スタディーモデルの試作及び実証実験の結果、フィルムの延伸成形は、色々な形状のテンション方式に適用可能であり、フィルムの高耐力化に有効な手法となり得ることを確認した。また、平面の裁断図を用いることで、より効率的な延伸成形が可能であり、初期形状の要素面積と約5%程度の面積比が有効であると考えられる。
- 2) 張力導入方法については、局所的な応力集中の懸念や均等な引込みの難しさ等を考慮すると、外周引き込みよりもアーチの突き上げによる延伸成形が効率的であることが分かった。
- 3) 実証実験の結果、延伸成形によるアーチの軸力変化は解析結果とほぼ同じ傾向を示しており、粘性挙動を考慮した弾塑性解析は有効であることが分かった。
- 4) 解析的検討を通じた付加荷重の除荷後におけるフィルムの張力保持率は、実証モデル(1.5m×1.5m)の場合、ライズ比10%時には積雪荷重に対して94%、風荷重(負圧)に対して86%、ライズ比15%時には積雪荷重に対して97%、風荷重(負圧)に対して92%の張力を保持しており、実大モデル(3.0m×3.0m)の場合、ライズ比10%時には積雪荷重に対して83%、風荷重(負圧)に対して39%、ライズ比15%時には積雪荷重に対して90%、風荷重(負圧)に対して64%の張力を保持していることが分かった。
- 5) 時間経過によるアーチ軸力の変化では、延伸成形後に引張力が生じた後、圧縮力が大きくなる結果となったが、それはフィルムのリラクセーションによる影響より、温度変化による影響であることがわかった。

第 6 章

結論

第6章 結論

6.1 結論

本研究は、テンション方式フィルム膜構造の耐力を高める方法として、取付時にフィルムを塑性域まで延伸することを提案し、フィルムを用いた張力膜構造における粘塑性構成式の適用可能性と延伸成形の有効性を検討することを目的として、実験的及び解析的検討を行ったものであり、以下に、各章で得られた結果をまとめる。

1. ETFE フィルムの粘塑性構成式について

- 1) フィルムの粘塑性挙動を把握するために、移動硬化クリープ理論と非線形移動硬化理論を組合わせた粘塑性構成式を適用し、解析結果と実験結果の比較を通じてその妥当性を検討した結果、粘塑性構成式のうち、Soderberg の関係式の K 値をひずみ速度に依存した変数として扱うことによって、1 軸及び 2 軸引張時におけるフィルムの応力 - ひずみ関係とひずみ速度依存性が適切に表現できる。また、アニーリング処理を施したフィルムに対する 1 軸及び 2 軸引張時においても同様に粘塑性構成式を適用でき、粘塑性構成式はアニーリング処理を施さなかった場合よりもアニーリング処理を施した場合の実験結果に対してより精度良く表現できる。
- 2) ETFE フィルムは降伏点を超えた後、応力レベルの低下現象が顕著に見られるが、その原因としては、製作過程において主にフィルムの MD 方向の巻取によって生じる残留ひずみ及び残留応力の影響であることが確認された。これにより降伏応力が増加し、降伏以後の応力 - ひずみ関係にも影響を及ぼす。

2. ETFE フィルムの延伸効果について

- 1) パネル取付時にフィルムの延伸により、降伏応力が上がって耐力の上昇効果が得られ、外力による変形後にも緩みを生じにくくなる。
- 2) 実験施設における経年後の張力変化については、フィルムの初期張力比(短辺方向：長辺方向 = 2 : 1)を保ちつつ応力緩和により降下し、施工後 1 年間は応力緩和が顕著であるが、その後は安定する傾向が確認された。なお、フィルムの張力保持率は施工後約 2 年経過後にも初期張力値に対して約 50%以上の張力を維持する。
- 3) フィルムの延伸適用範囲については、1 軸延伸では 10~20%の延伸が効率的であることが確認されたが、2 軸延伸の実験では、延伸率 5%及び 10%の場合には試験体のコーナー部分で引裂きを生じることが確認されたため、施工時にあまり高い延伸率を設定することは望ましくない。

の時の応力レベルを延伸による長期荷重時に対するフィルムの許容応力範囲と見ることが出来る。また、短期荷重時には、初期張力導入後に短期許容荷重を超えない負荷荷重であれば、負荷荷重によりフィルムの応力は上昇するが(①[′] → ②)、除去後は弾性的な挙動に従い、張力導入時の応力レベルに戻ることが予測される(② → ①[′])。

以上の内容より、設計時における長期荷重時の許容応力範囲としては、延伸成形を行った後、フィルムのリラクセーション後の応力値(①[′])が長期許容応力値の以下になるようにする。一方、短期荷重時の許容範囲としては、フィルムのリラクセーション後の長期応力時(①[′])に対して、負荷荷重による応力値が短期荷重時の許容応力を超えない範囲とする。

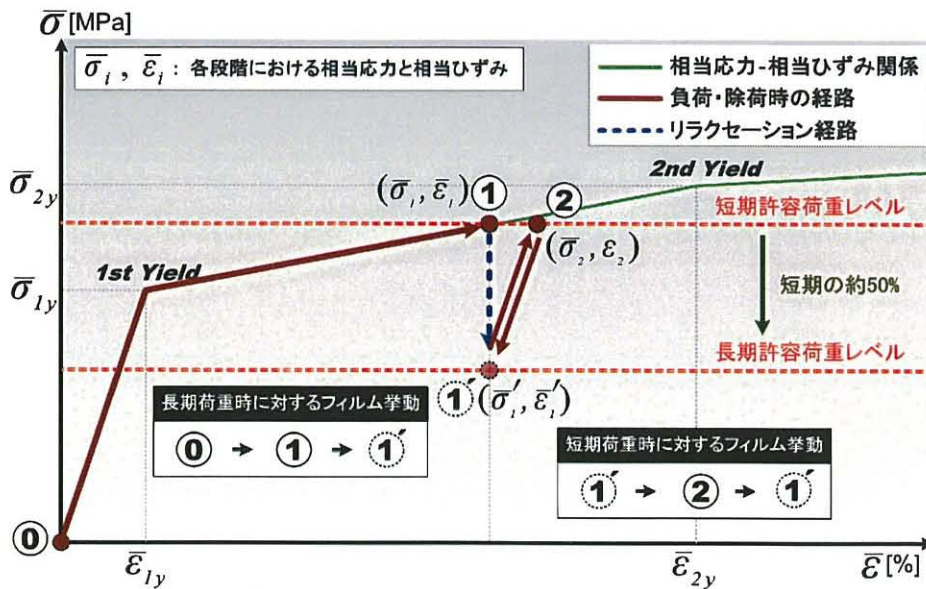


図 6.2 テンション方式フィルム膜構造における構造的挙動の概要

参考文献

参考文献

[第 1 章]

- 1.1) ETFE フィルムパネル設計・施工指針(案)、(社) 日本膜構造協会、2006
- 1.2) 坪井善昭、川口衛、佐々木睦朗、大崎純、植木隆司、竹内徹、河端昌也、川口健一、金箱温春：力学・素材・構造デザイン、建築技術、2012
- 1.3) <http://www.seele.com/cover-en-2.html>
- 1.4) <http://www.hightexworld.com/en/projects/material/etfe-foil>
- 1.5) <http://www.vector-foiltec.com/en/projects/chronological.html>
- 1.6) ETFE フィルムパネル設計・施工指針(案)、(社) 日本膜構造協会、2006
- 1.7) 日本材料学会編、固体力学の基礎、日刊工業新聞社、pp.152, pp.176, 1981
- 1.8) Craig Schwitter: The Use of ETFE Foils in Lightweight Roof Constructions, Proceedings of the IASS-ASCE International Symposium, 94 Atlanta, pp622-631, 1994
- 1.9) 榎原修治、David Walker、David Wakefield、近藤芳広：ETFE フィルムを使用した膜屋根の設計・施工、日本建築学会大会学術講演梗概集、pp907-908、1996
- 1.10) 柳井麻理、斎藤公男、岡田章、宮里直也、左藤裕子：レンズ型二重空気膜構造の基本構造特性(その1) 小規模模型実験による検討、日本建築学会大会学術講演梗概集、pp911-912、2004
- 1.11) 左藤裕子、斎藤公男、岡田章、宮里直也、柳井麻理：レンズ型二重空気膜構造の基本構造特性(その2) 数値解析による適用性の検討、日本建築学会大会学術講演梗概集、pp913-914、2004
- 1.12) 坂本憲太郎、斎藤公男、岡田章、宮里直也、左藤裕子：レンズ型二重空気膜構造の基本構造特性(その3) 簡易モデルの提案、日本建築学会大会学術講演梗概集、pp923-924、2005
- 1.13) 左藤裕子、斎藤公男、岡田章、宮里直也、坂本憲太郎：レンズ型二重空気膜構造の基本構造特性(その4) 簡易モデルの動的な基本特性の把握、日本建築学会大会学術講演梗概集、pp925-926、2005
- 1.14) 中井正義、藤井英二、上林厚志、鈴木庸介：密閉型小規模空気膜に関する研究(その1) 静的挙動に関する数値解析的・実験的研究、日本建築学会大会学術講演梗概集、pp919-920、2005
- 1.15) 鈴木庸介、藤井英二、上林厚志、中井正義：密閉型小規模空気膜に関する研究(その2) 連結状態における振動特性に関する実験的研究、日本建築学会大会学術講演梗概集、pp921-922、2005
- 1.16) 森山史郎、河端昌也、正木佳代子：ETFE フィルムの弾塑性挙動、膜構造研究論文集 2003、No.17、pp21-26、2004
- 1.17) 吉野達矢、瀬川信哉、小田憲史：ETFE フィルムの2軸引張特性と弾塑性応力・変形解析、膜構造研究論文集 2004、No.18、pp31-39、2005

- 1.18) 河端昌也、森山史郎：ETFE フィルムのひずみ速度依存性と構造挙動について、膜構造研究論文集 2004、pp41 - 46、2005
- 1.19) 森山史郎、河端昌也：ETFE フィルムのクリープ特性 - 遅延時間の分布関数による考察、膜構造研究論文集 2004、pp47 - 51、2005
- 1.20) 河端昌也、森山史郎、會田裕昌：ETFE フィルムの粘塑性挙動について、膜構造研究論文集 2005、pp1 - 8、2006
- 1.21) 中島肇、永井佑季、宮里直也、岡田章、川又哲也、梅原智洋：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、膜構造研究論文集 2009、No.23、pp1 - 7、2010
- 1.22) 川又哲也、永井佑季、宮里直也、中島肇、岡田章、梅原智洋：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、日本建築学会構造工学論文集、Vol.56B、pp1 - 6、2010
- 1.23) Setsu Gakutei、河端昌也、西川薫、小竹達矢、山内優、森山史郎：ETFE フィルムパネルの加熱加圧成形に関する研究（その 1）加熱時の挙動と材料定数、日本建築学会大会学術講演梗概集、pp929 - 930、2005
- 1.24) 森山史郎、河端昌也、西川薫、小竹達矢、山内優、Setsu Gakutei：ETFE フィルムパネルの加熱加圧成形に関する研究（その 2）加熱加圧成形における挙動の考察、日本建築学会大会学術講演梗概集、pp931 - 932、2005
- 1.25) 佐野村幸夫、水野衛：高密度ポリエチレンの粘塑性構成式、日本強度学会誌、Vol.38、No.1、pp7 - 13、2004
- 1.26) 水野衛、佐野村幸夫：高分子材料の負荷反転時の非弾性挙動を表す粘塑性構成式、日本強度学会誌、Vol.54、No.4、pp414 - 419、2005

[第 2 章]

- 2.1) 河端昌也、丁乙碩：ETFE フィルムの延伸立体成形に関する研究 - (その 1) 延伸立体成形の概要、日本建築学会大会学術講演梗概集、pp931 - 932、2008
- 2.2) 佐野村幸夫、水野衛：高密度ポリエチレンの粘塑性構成式、日本強度学会誌、Vol.38、No.1、pp7 - 13、2004
- 2.3) 水野衛、佐野村幸夫：高分子材料の負荷反転時の非弾性挙動を表す粘塑性構成式、日本強度学会誌、Vol.54、No.4、pp414 - 419、2005
- 2.4) N. N. Malinin and G. M. Khadjinsky, *Int. J. Mech. Sci.*, 14, 234, 1972
- 2.5) 日本材料学会編、固体力学の基礎、日刊工業新聞社、pp.152, pp.176, 1981
- 2.6) P. J. Armstrong and C. O. Frederick, *CEGB Rep.*, No.RD/B/N731, 1966
- 2.7) PET フィルムの製造工程、<http://www.teijinupontfilms.jp/product/process.html>
- 2.8) J.Roesler, H.Handers and M.Baeker : *Mechanical Behavior of Engineering Materials—Metals, Ceramics, Polymers and Composites*, Springer, 2007

- 2.9) ETFE フィルムパネル設計・施工指針(案)、(社)日本膜構造協会、2006
- 2.10) 森山史郎、河端昌也、正木佳代子:ETFE フィルムの弾塑性挙動、膜構造研究論文集 2003、No.17、pp21 - 26、2003
- 2.11) 吉野達矢、瀬川信哉、小田憲史:ETFE フィルムの 2 軸引張特性と弾塑性応力・変形解析、膜構造研究論文集 2004、No.18、pp31 - 39、2004
- 2.12) 河端昌也、森山史郎:ETFE フィルムのひずみ速度依存性と構造挙動について、膜構造研究論文集 2004、No.18、pp41 - 46、2005
- 2.13) 森山史郎、河端昌也:ETFE フィルムのクリープ特性 - 遅延時間の分布関数による考察、膜構造研究論文集 2004、No.18、pp47 - 51、2005
- 2.14) 河端昌也、森山史郎、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、pp1 - 8、2006
- 2.15) 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、pp9 - 14、2010
- 2.16) テナックの試験方法の概略、旭化成ケミカル&プラスチック情報サイト、http://www.akchem.com/emt/emt_top.html

[第 3 章]

- 3.1) ETFE フィルムパネル設計・施工指針(案)、(社)日本膜構造協会、2006
- 3.2) Setsu Gakutei、河端昌也、西川薫、小竹達矢、山内優、森山史郎:ETFE フィルムパネルの加熱加圧成形に関する研究(その 1) 加熱時の挙動と材料定数、日本建築学会大会学術講演梗概集、pp929-930、2005
- 3.3) 森山史郎、河端昌也、西川薫、小竹達矢、山内優、Setsu Gakutei:ETFE フィルムパネルの加熱加圧成形に関する研究(その 2) 加熱加圧成形における挙動の考察、日本建築学会大会学術講演梗概集、pp931-932、2005
- 3.4) 森山史郎、河端昌也、正木佳代子:ETFE フィルムの弾塑性挙動、膜構造研究論文集 2003、No.17、pp21 - 26、2003
- 3.5) 吉野達矢、瀬川信哉、小田憲史:ETFE フィルムの 2 軸引張特性と弾塑性応力・変形解析、膜構造研究論文集 2004、No.18、pp31 - 39、2004
- 3.6) 河端昌也、森山史郎:ETFE フィルムのひずみ速度依存性と構造挙動について、膜構造研究論文集 2004、pp41 - 46、2005
- 3.7) 森山史郎、河端昌也:ETFE フィルムのクリープ特性 - 遅延時間の分布関数による考察、膜構造研究論文集 2004、pp47 - 51、2005
- 3.8) 河端昌也、森山史郎、會田裕昌:ETFE フィルムの粘塑性挙動について、膜構造研究論文集 2005、pp1 - 8、2006
- 3.9) 河端昌也、丁乙碩:ETFE フィルムの延伸立体成形に関する研究 - (その 1) 延伸立体成形の概要、日本建築学会大会学術講演梗概集、pp931 - 932、2008

発表関係論文

発表関係論文

[査読研究論文]

- 1) 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. 3
- 2) 丁乙碩、河端昌也：ETFE フィルムの粘塑性構成式—アニーリング処理に従う1軸・2軸引張時における応力-ひずみ関係の検討，膜構造研究論文集 2011, No. 25, pp. 55～64, 2012. 3
- 3) 丁乙碩、岡村卯吉、河端昌也：外周引込によるETFE フィルムの応力集中に関する検討，膜構造研究論文集 2012, No. 26, pp. 43～49, 2013. 3
- 4) 丁乙碩、安武信一、河端昌也：ETFE フィルムを用いた張力膜構造の延伸成形に関する研究，膜構造研究論文集 2012, No. 26, pp. 1～12, 2013. 3

[口頭発表論文]

- 1) 河端昌也、丁乙碩：ETFE フィルムの延伸立体成形に関する研究 - (その 1) 延伸立体成形の概要、日本建築学会大会学術講演梗概集、pp931 - 932、2008
- 2) 丁乙碩、河端昌也：ETFE フィルムの延伸立体成形に関する研究 - (その 2) 粘塑性構成式による1軸引張の検討、日本建築学会大会学術講演梗概集、pp917 - 918、2010
- 3) 丁乙碩、河端昌也：ETFE フィルムの延伸立体成形に関する研究 - (その 3) 粘塑性構成式による1軸及び2軸引張の検討、日本建築学会大会学術講演梗概集、pp813 - 814、2011
- 4) EulSeok JEONG, Masaya KAWABATA : Visco-Plastic Constitutive Equation of ETFE Film – Examination on the Stress-Strain Relationships of Uniaxial and Biaxial Tensile Deformation, Proceedings of the IABSE-IASS International Symposium in London, England, pp542, 2011
- 5) 河端昌也、丁乙碩、岡村卯吉：外周引込によるテンション方式フィルム膜構造に関する研究 - (その 1) 施工時延伸と経年後の張力変動、日本建築学会大会学術講演梗概集、pp919 - 920、2012
- 6) 岡村卯吉、丁乙碩、河端昌也：外周引込によるテンション方式フィルム膜構造に関する研究 - (その 2) 切欠き形状による応力集中の実験的検討、日本建築学会大会学術講演梗概集、pp921 - 922、2012
- 7) 丁乙碩、岡村卯吉、河端昌也：外周引込によるテンション方式フィルム膜構造に関する研究 - (その 3) 切欠き形状による応力集中の解析的検討、日本建築学会大会学術講演梗概集、pp923 - 924、2012

謝辞

本論文の作成にあたり、多くの先生方及び研究室の皆様より多大な御協力と御指導を頂きました。ここに厚く御礼申し上げます。

横浜国立大学准教授 河端昌也先生には、著者が研究生の頃から6年間の長きに渡り、始終暖かい御指導と激励を賜りました。河端昌也先生からは、本研究を遂行するにあたって、研究者としての心構えや研究の進め方、実験関連等、数多くの御指導と御支援を頂きました。また、研究以外に日本での留学生活に困ったことや大変なことがあっても、いつも優しい笑顔で相談に乗っていただき、暖かい助言と激励を賜りました。先生には、どんな感謝の言葉も足りないと思われませんが、長い間大変お世話になりました。ここに心より御礼申し上げます。

本論文の審査にあたり、横浜国立大学 田川泰久教授、田才晃教授、楠浩一准教授、松本由香准教授には、暖かい御指導と有益な助言を賜りました。ここに厚く感謝の意を表します。

韓国の世明大学の金勝徳教授には、学部時から留学生活に至るまで、暖かい御指導と有益な助言を賜りました。“人に対しては礼儀を守るかつ、研究に対しては堂々にしろ”という教えの言葉はこれからも忘れずに、自分がいる場所で誠実に生きていくのが先生への恩返しになると考えております。長い間、真に有難うございました。ここに、心より御礼申し上げます。

韓国技術教育大学の孫秀徳博士には、研究や進路等の色々な助言を頂きました。留学生生活を継続していく上で精神的な支えとなり、ここに深く感謝の意を表します。

旭硝子株式会社化学品カンパニー 下井保子氏、有賀広志氏には、フィルムの実験において始終御協力を頂きました。また、太陽工業株式会社技術研究所 吉野達矢氏、空間デザインカンパニー 喜多村淳氏には、フィルムの2軸引張実験や試験体製作など多くの御協力を頂きました。ここに深く感謝の意を表します。

協立工業株式会社 飯塚社長を始め、関係者方々には、アルバイトとして勤めさせて頂きながら、膜構造の設計や施工など様々な助言を賜りました。長い間大変お世話になりました。ここに厚く感謝の意を表します。なお、当研究室のOBである金熙均氏には、研究や留学生活など様々なことでお世話になりました。心から感謝致します。

横浜国立大学建築材料・構法研究室 中尾方人先生、江口亨先生、そして環境工学研究室 田中稲子先生、太田篤史先生、手塚陽子氏には、研究室の生活や活動等で大変お世話になりました。ここに厚く感謝の意を表します。

当研究室の正木佳代子技官には、研究を進めるにあたり、実験の計画から遂行まで多大な御協力を賜りました。ここに、深く感謝の意を表します。また、フィルムに関する研究に共に取り組んできた当研究室の元大学院生であった岡村卯吉氏(現、鹿島建設)、安武信一氏(現、JFE エンジニアリング)には、実験の準備や遂行、計測データの整理作業、解析のお手伝いなど、数多くの御協力を頂き、心より感謝致します。なお、当研究室の大学院生である斉藤舞氏、竹田達氏、野口京平氏、松林圭亮氏、柳田圭裕氏には実験のお手伝いや研究室の活動などの多くの御協力を頂きました。ここに厚く感謝の意を表します。

横浜国立大学の同じ留学生であり、他の分野で研究を進めている博士課程 李皓準氏、李泰雨氏には、励まし合いながら共に研究に努力してきました、研究を継続していく上で様々なことでお世話になりました。心から感謝いたします。

本論文は、その他にも多くの方々の御指導、御支援によってまとめられたものであります。皆様に心より御礼申し上げます。

最後に、今まで長きに渡り、精神的、経済的に支えてくれた母親の李順禮、愛する妻の敏子と娘のハウン、そして遠い母国から暖かく見守ってくれた家族に心から感謝いたします。

平成 25 年 5 月 丁 乙 碩