

# A8 膜面リンクル制御におけるパッチ状 SMP アクチュエータの設置位置の影響

岡本卓篤 (都市大院・工), 荻芳郎 (東京大), 仙場淳彦 (名古屋大)

小木曾望 (阪府大), 川口健一 (東京大), 渡邊力夫 (都市大)

Takuma Okamoto(Tokyo City University), Yoshiro Ogi (The University of Tokyo), Atsuhiko Senba (Nagoya University), Nozomu Kogiso (Osaka Prefecture University), Ken'ichi Kawaguchi (The University of Tokyo), Rikio Watanabe (Tokyo City University)

## 1. はじめに

宇宙用膜構造の運用時の形状・応力制御技術として、短冊形状の熱可塑性形状記憶ポリマー (以後、SMP (shape memory polymer) パッチと称す) をアクチュエータとして利用する方法が検討されている[1]. 本方法では、ガラス転移温度  $T_g$  以上でのゴム状態で与えた変形形状が  $T_g$  以下でのガラス状態で保たれる SMP の形状固定性と、ゴム状態での弾性体としての形状復元性を利用する. あらかじめ地上で予びずみを与えたガラス状態の SMP パッチを複数、膜面に貼り付けたまま打ち上げ、軌道上で何らかの方法で加熱し形状回復力を膜面に作用させることにより、膜面のしわ (リンクル) やたるみ (スラック) を制御する (図 1). 小型軽量で適度に曲げることができる SMP パッチは、軽量柔軟な膜構造の特性を極力妨げない有望なアクチュエータということができる.

これまで、仙場らの地上実験により、本方法による膜のリンクル・スラック制御効果が確認されている[2]. しかし今後、本方法を実際の大型膜構造物へ適用するためには、数学モデルによる検証を行いながら SMP パッチの必要個数や設置位置の影響について見積もる必要がある. そこで本研究では、4つの頂点に引張荷重を与えて意図的にリンクルを発生させた正方形膜に、単一の SMP パッチを貼り付けてリンクルを制御する実験を行ったので、その結果を考察する.

## 2. SMP パッチによる膜構造制御の原理

図 2 に示す一次元モデルを用いて SMP パッチによる膜構造の形状・応力制御の原理を述べる. 短冊形状の SMP パッチは、あらかじめ加熱冷却過程で自然長から引き伸ばされており、 $T_g$  以下の温度で両端が膜面上に固定されている. もし、膜の支持間距離が小さくなると、膜の張力は失われ、全体的なスラックが発生する. ここで、SMP パッチを  $T_g$  以上に加熱すると、SMP パッチは自然長に向かって縮み始め、力が釣り合う平衡状態に達する. この時、膜のスラックは SMP パッチにより局所化される. これが本制御の原理である. なお図 2 では、膜の支持間距離の変化による全体スラックの発生とその局在化制御を模擬したが、実際の宇宙空間においては、運用初期の形状不良やクリープ変形・デブリ衝突等の経年変化に応じた、膜の部分領域制御も考えられる. 膜構造の形状・応力状態の要求はミッションごとに異なるため、本研究ではリンクル低減が主要目的ではないことを明記しておく.

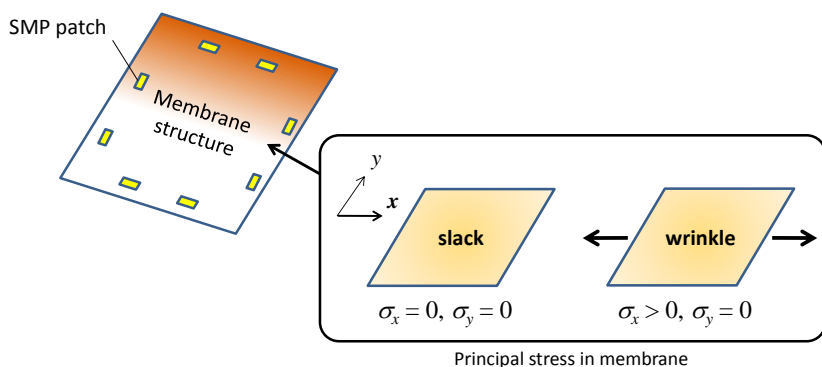


図 1 膜のリンクル・スラックと SMP パッチ

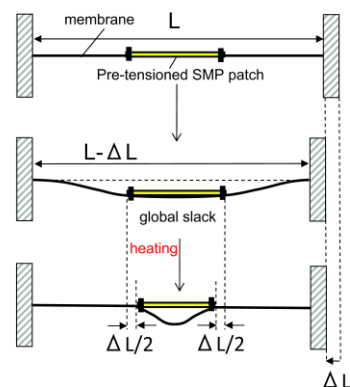


図 2 SMP パッチによる膜構造制御の原理

### 3. 実験方法

図3に実験装置の構成を示す。制御対象とする膜材は、一辺400 mmの正方形に切り出した厚さ12.5  $\mu\text{m}$ のポリイミドフィルム（東レ・デュポン社製カプトン 50H）である。引張荷重を与える膜の4つの頂点は幅30 mmのポリイミドテープで補強している。膜面のリンクル形状に及ぼす重力の影響を小さくするために、膜面を地面に対して垂直に支持し、ケーブルを介した重りで頂点に引張荷重を与える。膜の面外形状は、直交2軸スライダに固定したレーザー変位計（キーエンス社製LK-G80）で計測する。

SMPパッチの予ひずみ付与時および形状回復時の加熱はハロゲンヒータ（フィンテック社製HSH-35）を用いて非接触で行う（図4）。加熱温度の調整は、サーモカメラで温度分布をモニタリングしながら、ハロゲンヒータの照射距離や直流印加電圧を操作し行った。

予ひずみを付与したSMPパッチの製作は、まず、厚さ100  $\mu\text{m}$ のフィルム（SMPテクノロジー社製MM-6520,  $T_g = 65^\circ\text{C}$ ）から幅5 mm、長さ20 mmの長方形を切り出す。長手方向両端5 mmずつの部分は両面テープで膜材に貼り付ける接着面であり、形状回復力の発生に寄与する有効領域の自然長は10 mmである。これを別途用意した一軸ステージに固定し、ハロゲンヒータで非接触加熱して4 mm（自然長に対し40%）伸長させ、冷却する。予ひずみ付与前後のSMPパッチの例を図5に示す。

実験では同一仕様の膜材、SMPパッチをそれぞれ複数用意し、1枚の膜に1枚のSMPパッチをそれぞれ異なる位置に貼り付ける。後述する水平対角線付近に生じる振幅の大きなリンクル（図8）への制御効果を検証するため、便宜上SMPパッチの基準点を図6で定義し、膜面における基準点の座標で設置位置を表現する。図6および図7に、膜面の座標系の定義、膜の頂点の荷重条件、およびSMPパッチの設置位置を示す。また、形状回復力に寄与するSMPパッチ有効領域の、予ひずみ付与前の自然長、予ひずみ付与後（実験前）の長さ、膜に貼り付け加熱した後（実験後）の長さを表1に示す。

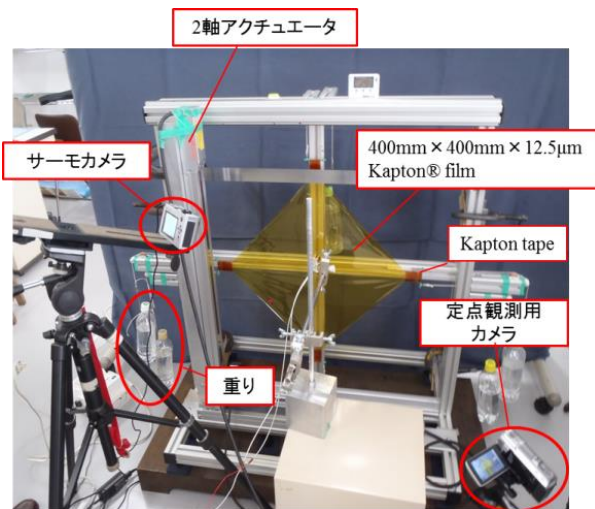


図3 実験装置

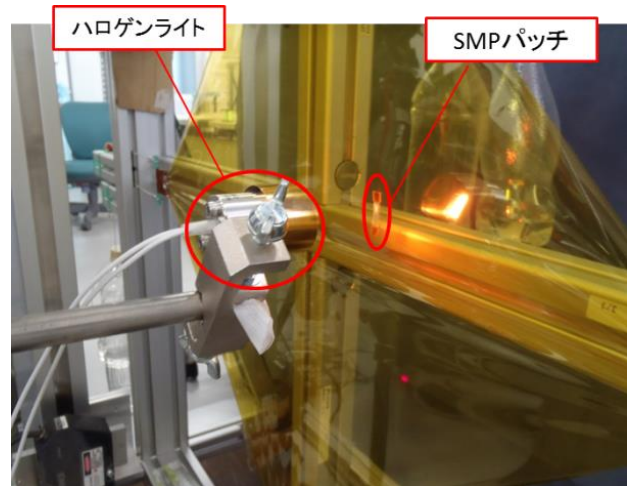


図4 SMPパッチの加熱方法

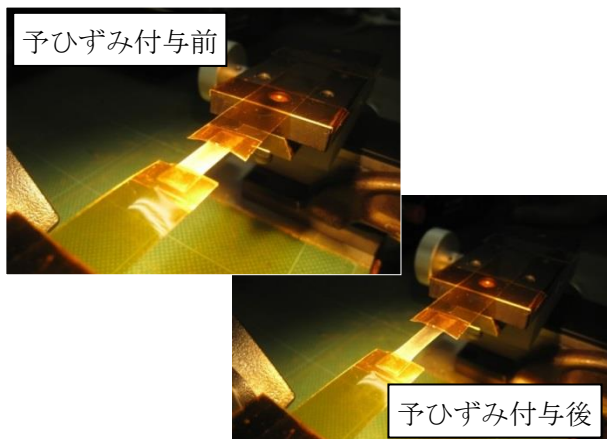


図5 予ひずみ付与前後のSMPパッチ

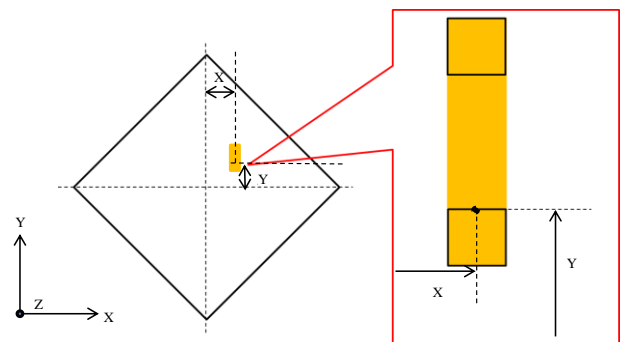


図6 SMPパッチ設置位置の定義

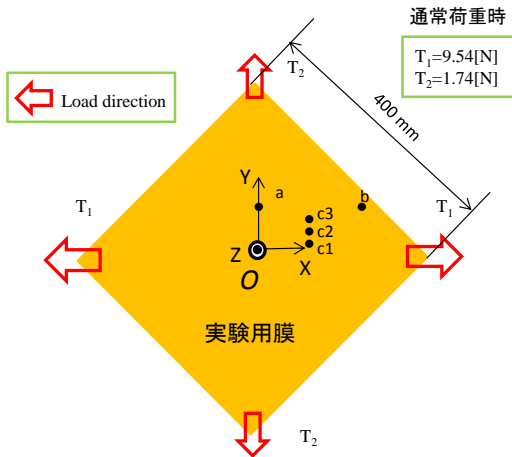


図7 膜の頂点荷重と SMP パッチ設置位置

表1 SMP パッチ設置位置と形状回復力に寄与する有効長

| Case | Attachment location [mm] | Effective length of recovery force [mm] |                   |                  |
|------|--------------------------|---|-------------------|------------------|
|      |                          | Natural length                          | Before experiment | After experiment |
| a    | (0, 50)                  | 10.2                                    | 13.8              | 13.9             |
| b    | (200,50)                 | 10.5                                    | 14.2              | 12.7             |
| c1   | (100,15)                 | 10.0                                    | 14.2              | 13.1             |
| c2   | (100,25)                 | 10.2                                    | 14.1              | 13.4             |
| c3   | (100,35)                 | 10.0                                    | 13.8              | 13.4             |

#### 4. 実験結果と考察

##### 4.1 リンクル形状の再現性

膜面に生じるリンクル形状の再現性を確認するため、SMP パッチを貼り付けていない単体の膜に対し、水平方向荷重  $T_1$  を 9.54 N に維持したまま、鉛直方向荷重  $T_2$  を 1.74 N (初期通常荷重)、9.54 N (等荷重)、1.74 N (2 回目通常荷重) と順次変更したときの膜面形状計測結果を図 8 に示す。本図では形状の面外方向成分 (Z 方向成分) をコンター図で表している。なお、計測時間が限られていたため、X 方向の計測間隔は図 8(a)~(c) ごとに異なっている。通常荷重時 ( $T_1 > T_2$ ) に観察されるリンクルは、水平方向に貫通する振幅の大きなものと、頂点付近の振幅の小さな短いものがあり、同様の傾向は文献[3]でも確認することができる。

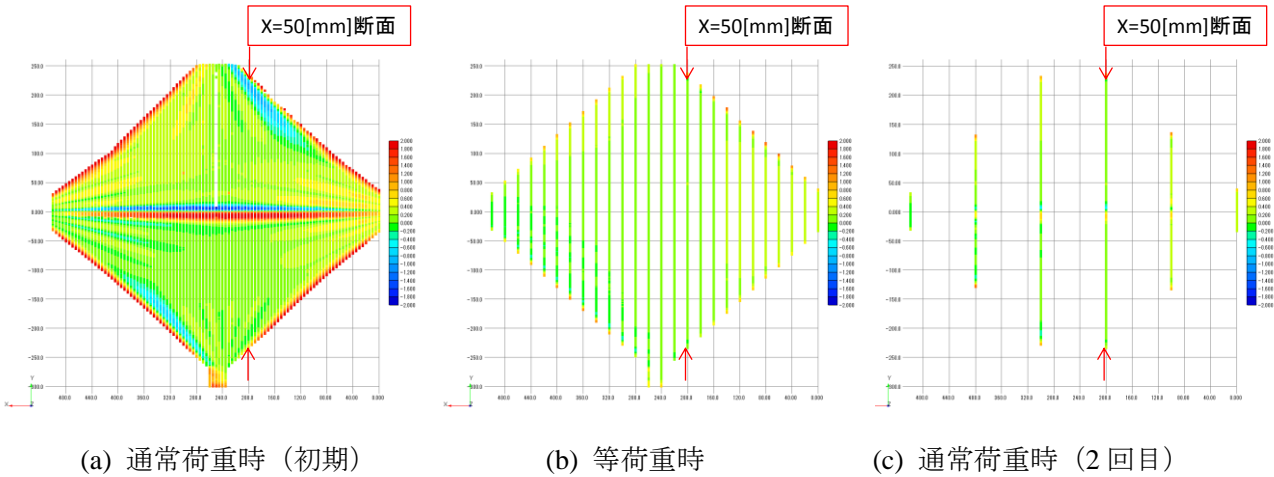


図8 膜単体の形状の面外方向成分 (Z 方向成分)

図 9 に  $X = 50 \text{ mm}$  における断面形状を示す。初期および 2 回目の通常荷重時の形状を比較すると、両者とも水平対角線付近の振幅の大きなリンクルを観察することができるが、その大きさは異なっている。これは、治具の摩擦により 2 回目通常荷重時の頂点荷重が意図した値でなかったことが理由として考えられる。しかし、後述するように、SMP パッチを貼り付けた膜の初期通常荷重時の  $X = 50 \text{ mm}$  断面における水平対角線付近のリンクルの振幅は 1.5~2.5 mm の範囲にあり (図 10)、図 9 の初期通常荷重時の振幅もこの範囲にあることから、初期通常荷重時であれば本研究における形状再現性は十分あると考えられる。

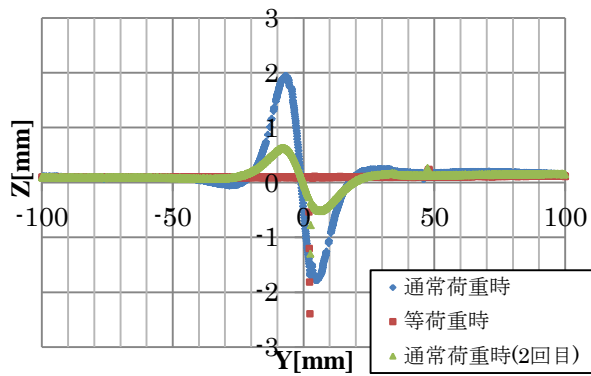


図9 荷重変更時膜面形状比較(X=10mm)

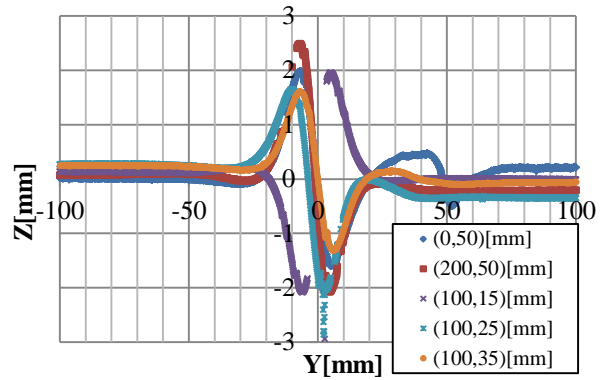


図10 初期荷重時膜面形状比較(X=10mm)

#### 4.2 リンクル形状に対するSMPパッチ貼り付けの影響

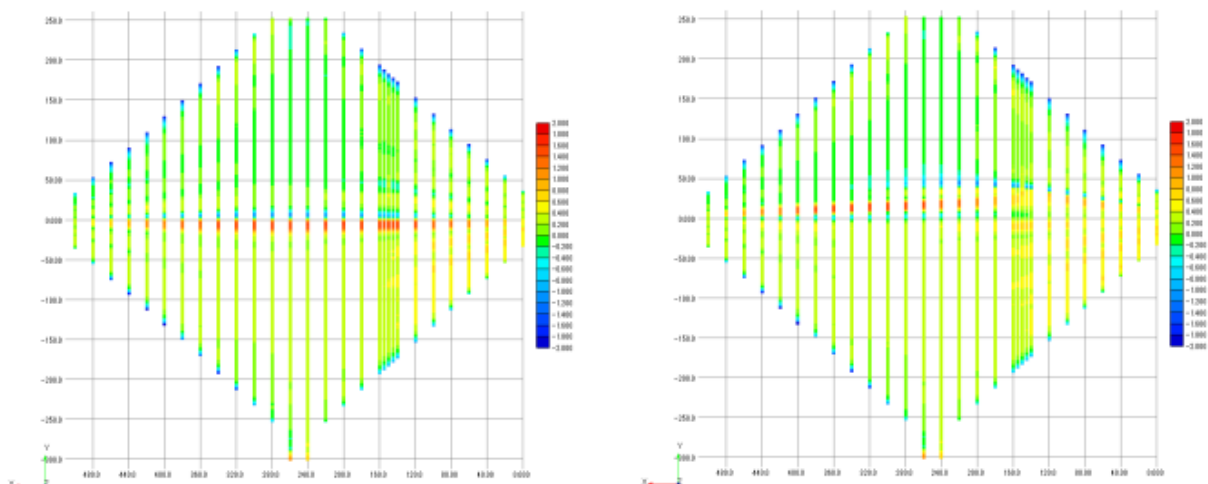
SMPパッチの加熱以前において、貼り付けそのものがリンクル形状に与える影響を考察する。図10にSMPパッチ加熱前の $X = 10 \text{ mm}$ での断面形状を示す。SMPパッチ設置位置(100, 15) [mm]において、リンクル形状の反転が観察されるが、これは安定な釣り合い形状が2つ存在するからであると考えられる。SMPパッチ設置位置に関わらず水平対角線付近のリンクルの振幅は1.5~2.5 mmの範囲にあるため、本研究で考察対象とするリンクルへのSMPパッチ貼り付けの影響はほとんどないことが分かる。

#### 4.3 SMPパッチ加熱によるリンクル制御効果

SMPパッチ加熱前後の形状計測結果を比較することによりリンクル制御効果を考察する。図11に設置位置(100, 35) [mm]の時の面外方向成分(Z方向成分)を、図12~16に設置位置(0, 50), (200, 50), (100, 15), (100, 25), (100, 35) [mm]の時の断面形状を示す。

設置位置(0, 50) [mm]の時、少なからずリンクル制御効果があると予想していたが、図12に示されているように、いずれの断面形状においても加熱前後の違いは観察されなかった。実際に働いていたSMPパッチの回復力および膜面の応力状態について考察する必要があると考えられる。

設置位置(200, 50) [mm]の時(図13)、膜の右上の辺付近の面外変形が大きい反面、水平対角線上のリンクル形状はほとんど変化していない。これは、SMPパッチ上端が貼り付いている膜の近傍領域がもともスラック領域であり、SMPパッチ下端を土台としてスラックを増大させたためと考えられる。



(a) SMPパッチ加熱前

(b) SMPパッチ加熱後

図11 SMPパッチ設置位置(100, 35) [mm]の時の膜形状の面外方向成分

設置位置(100, 15), (100, 25), (100, 35) [mm]の時, SMP パッチの加熱により水平対角線付近のリンクル形状に顕著な影響を与えていることが分かる. これらの様相は貼り付け位置ごとに異なるが, いずれの設置位置においても,  $X = 100$  mm 付近の断面では, 加熱前に最大振幅であった水平対角線付近の変形が低減され, SMP パッチ付近に局在化されている (図 14~図 16 において,  $X = 100$  mm では SMP パッチ直上を計測するため, 局在化された膜の形状は表れない). この局在化は  $X$  軸の正負の方向に伝播するが, その際, 膜の左右の頂点に集まるように  $Y$  方向を移動する.

図 17 に, 設置位置(100, 15), (100, 25), (100, 35) [mm]の時の, SMP パッチ加熱による膜形状面外方向成分の最大・最小点の位置の変化を示す. いずれの設置位置においても, 最大・最小の値に大きな変化はないが, 膜面上の位置が変化していることが分かる.

## 5. まとめ

本研究では, SMP パッチの設置位置による膜面リンクル制御効果の違いを検証するため, 4 つの頂点に引張荷重を与えて意図的にリンクルを発生させた正方形膜を用いて, 単一の SMP パッチを貼り付けてリンクルを制御する実験を行った. その結果, SMP パッチ設置位置の変化によるリンクル形状の局在化ならびにその位置の変化が顕著であることが示された.

今後の課題として, 非線形有限要素法を用いた数値解析を行い, 本実験結果の考察を行う.

## 謝辞

本研究は, JAXA 戦略的開発研究費「高精度大型宇宙構造システムの開発研究」の支援を受けて行われたものである. ここに記して感謝の意を表す.

## 参考文献

- [1] 仙場淳彦, 荻芳郎, “形状記憶ポリマを用いた軽量構造用アクチュエータの基礎検討”, 日本機械学会 2010 年度年次大会講演論文集(5), 2010, pp. 389-390.
- [2] 仙場淳彦, 荻芳郎, 小木曾望, “形状記憶ポリマフィルムによる正方形膜のリンクル/スラック制御実験”, 第 56 回宇宙科学技術連合講演会, 2012, 1O16.
- [3] 小木曾望, 伊藤亜矢, 岩佐貴史, “引張荷重を受ける正方形膜に生じるリンクルの計測と解析”, 膜構造研究論文集 2011, No. 25, 2011, pp. 41-48.

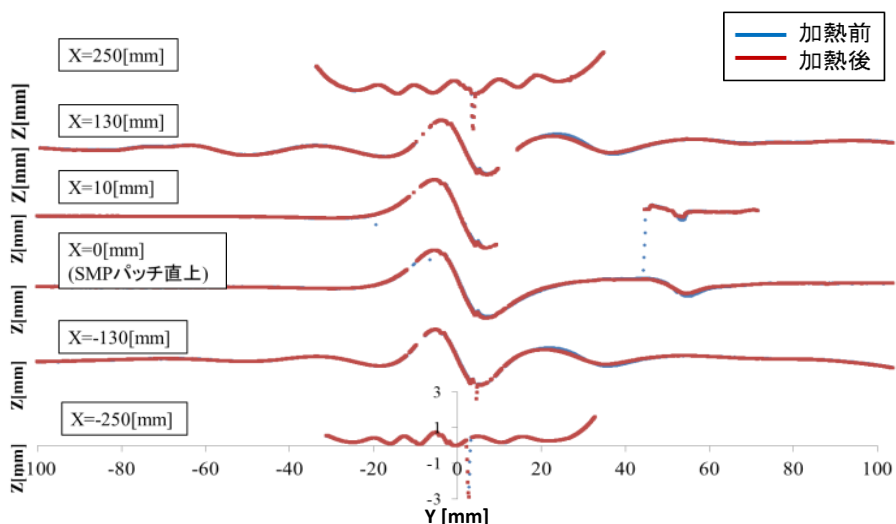


図 12 SMP パッチ貼り付け位置(0, 50) [mm]の時の断面形状

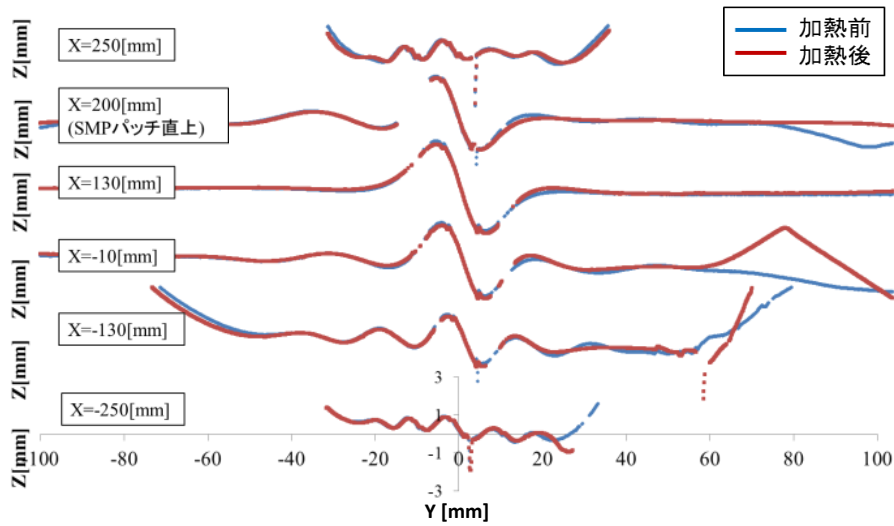


図 13 SMP パッチ貼り付け位置(200, 50) [mm]の時の断面形状

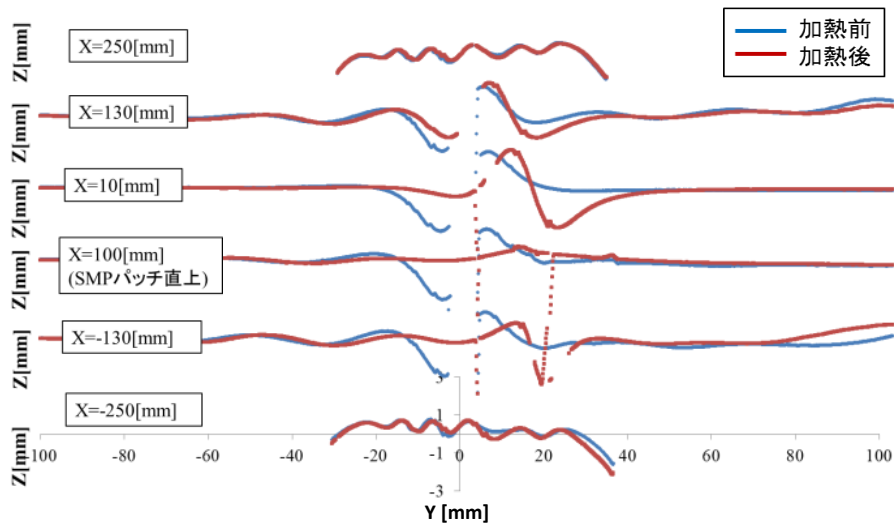


図 14 SMP パッチ貼り付け位置(100, 15) [mm]の時の断面形状

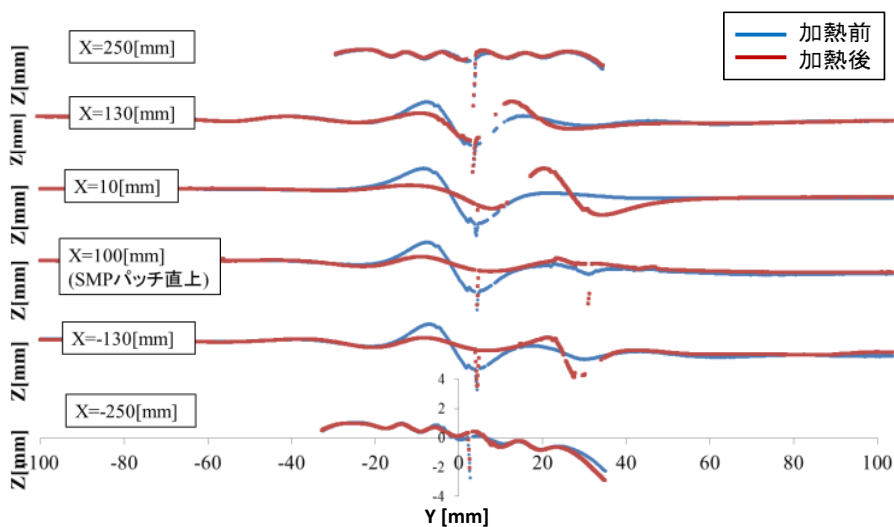


図 15 SMP パッチ貼り付け位置(100, 25) [mm]の時の断面形状

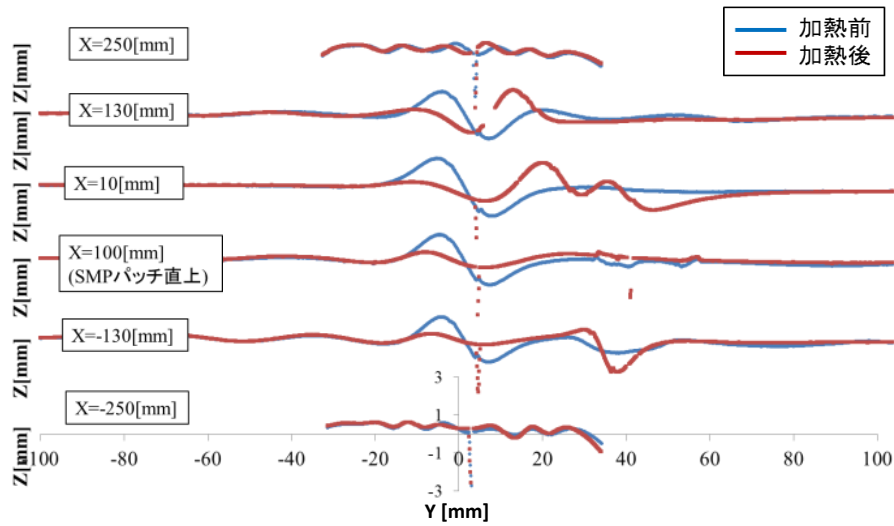


図 16 SMP パッチ貼り付け位置(100, 35) [mm]の時の断面形状

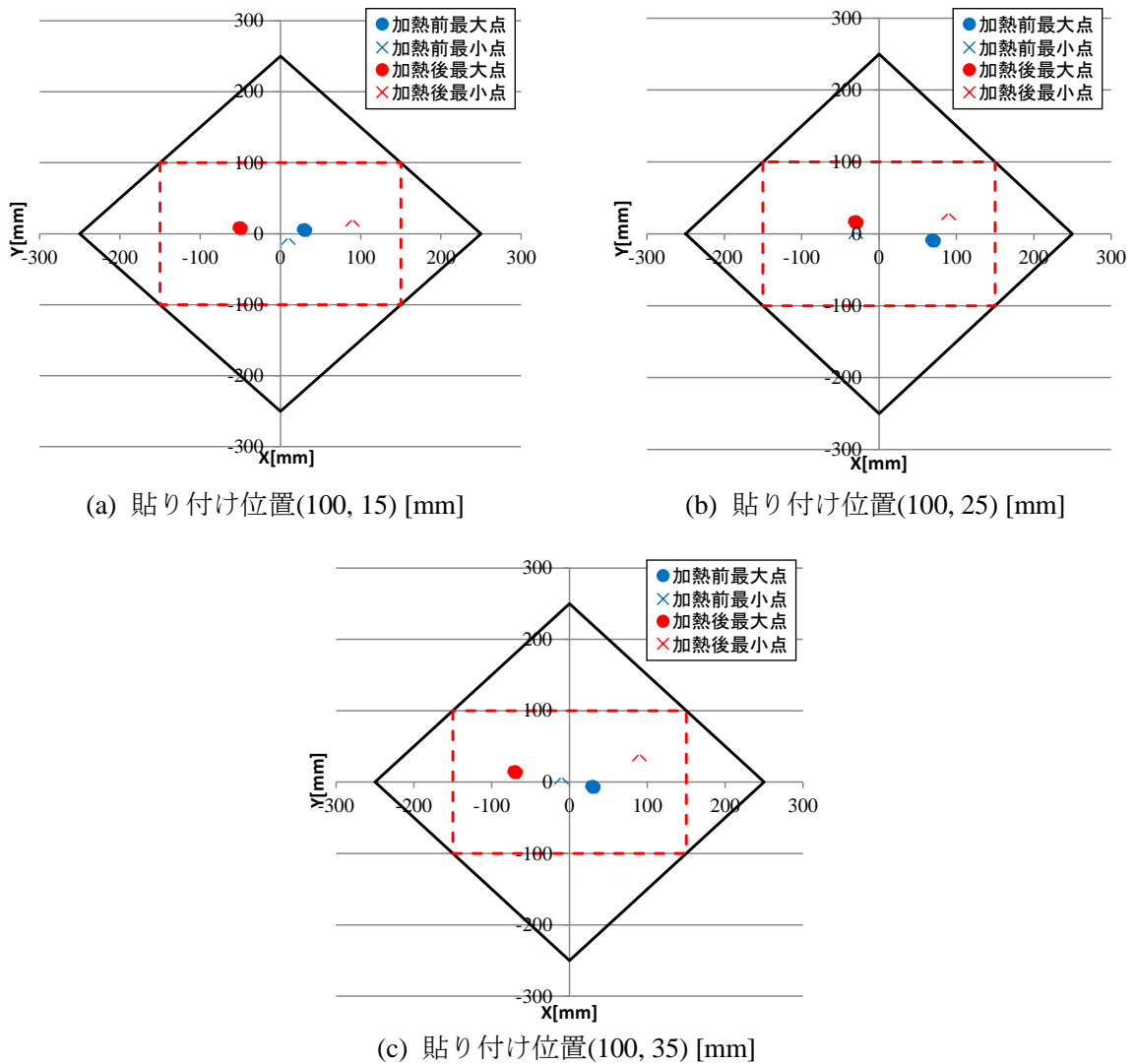


図 17 SMP パッチ加熱による膜形状面外方向成分の最大・最小点の移動