

薄膜構造物における折り目の力学モデルに関する研究 Study on Mechanical Model of Crease for Thin Membrane Structures

指導教授 宮崎康行

M9019 早瀬亮

1. はじめに

1.1 薄膜構造物

近年、ソーラーセイルや大型太陽光発電パドル・大型アンテナ等の大型構造物に対する需要が高まり、これらに関する諸研究が盛んになされている。大型構造物は搬送コストの観点から高収納性・可展開・超軽量であることが望ましく、結果として薄膜構造物やインフレーション構造物、テザー等の利用が注目されている。

2010年5月、宇宙航空研究開発機構(JAXA)が打上げを行った小型ソーラー電力セイル実証機「IKAROS」は世界に先駆けてソーラーセイルの実現性を示すものであった。今後は、これらの基礎技術を利用して2010年代後半には直径50m級膜面を有する中型ソーラー電力セイルの打上げを行い、木星およびトロヤ群小惑星の探査が計画されている。

これまで、膜面を用いた宇宙構造物(ゴサマー構造物)の設計・開発が活発に議論されてきているが、膜面上の皺による局所的な面外変形、膜面間の接着方法、膜面に生じた亀裂の進展、折り目の影響による構造物の形状変化等、薄膜構造が故の未解決な問題を多く抱えているのが現状である。

IKAROSでも、折り目が推進性能に与える影響は問題視されており、ランデブを行う次期木星探査ミッションの達成の為に折り目の影響を考慮した設計が必要である。

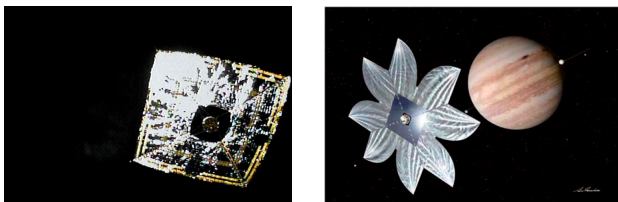


Fig.1 小型ソーラー電力セイル実証機「IKAROS」と中型ソーラー電力セイルによる木星探査計画[1]

1.2 本研究の目的

折り目部断面の応力分布図や、折り目部の有効弾性率について Woo.K らが発表したのを含め[2]、薄膜面構造物の膜面展開時における折り目の振る舞い方について考慮した研究はこれまでも多く行われてきたが、その折り目がいかんして形成されたか、折るという動作のモデルの決定法等、その断面の塑性履歴について言及した研究は少ない。

本研究では、薄膜の折り目断面に生じる応力分布やその後の復元力を、人が「折る」という動作を平板の密着曲げ加工、ヘミング加工(Fig.2)に置き換えることで、折癖による無負荷状態での変形状や、折り目の剛性を求めることを目的とする。将来的には、それを実機レベルの解析モデルに反映させ、解析精度を向上させることを狙う。

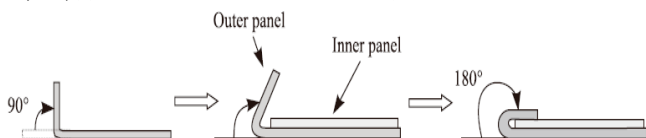


Fig.2 ヘミング加工模式図[3]

2. 従来の折り目の取り扱い

IKAROSの展開シミュレーションでは、折り目部の復元力を実験から得られた回転ばねに近似して取り扱っている。詳細は文献[4]に譲るが、次の手順で折り目の回転ばね剛性と初期角度を求めている。すなわち、(1) 実機と同等の折り方をした厚さ $h = 7.5\mu\text{m}$ 、長さ $L = 300\text{mm}$ 、幅 $D = 200\text{mm}$ の矩形膜を、Fig.3(a)のように垂れ下げたときの角度 θ_1^a 、 θ_2^a を計測する(Ex-1)。(2) 折り目の上の部分を一端単純支持、他端固定(終端条件: $\theta = \theta_1^a$) の条件で、折り目の下の部分を一端固定(初期条件: $\theta = \theta_2^a$)、他端自由のエラスティカ問題として解き、折り目部分の曲げモーメントを計算する。(3) 同様に、先端におもり $2g$ を取り付けた場合にも角度 θ_1^b と θ_2^b を計測し、エラスティカ問題を解く(Ex-2)。(4) Ex-1 および Ex-2 で作用する折り目部分に作用する曲げモーメント M_a および M_b と、折り目角度 $\theta_a = \theta_1^a + \theta_2^a$ 、 $\theta_b = \theta_1^b + \theta_2^b$ から、

$$M_a = k_\theta(\theta_a - \theta_0), \quad M_b = k_\theta(\theta_b - \theta_0)$$

により、初期角度 θ_0 および単位幅当たりの回転ばね定数 k_θ/D を求める(それぞれ、 23.8° および $40.0 \times 10^{-6} \text{N}$)。そして、これを元に、折り幅 280mm の IKAROS の膜が Fig.3(b)のように変形する際に、これを同図(c)のように回転ばね、及び、エラスティカモデルと同等の圧縮剛性を有する、折れ線状の膜要素で近似している。

この方法は、ばらつきの多い実験データに基づいている点や、折り目角度 θ と曲げモーメント M の線形性を仮定し、折り目角度が大きくなると曲げモーメントを過大に評価してしまう点に問題があるが、 θ と M との理論的關係が現時点では明らかになっていないこと、および、このモデルでも、展開性に対する折り目の影響を評価することはある程度可能であることから考え、採用された。しかし、今後は設計段階で θ と M との理論的關係が求まっていることが望ましい。

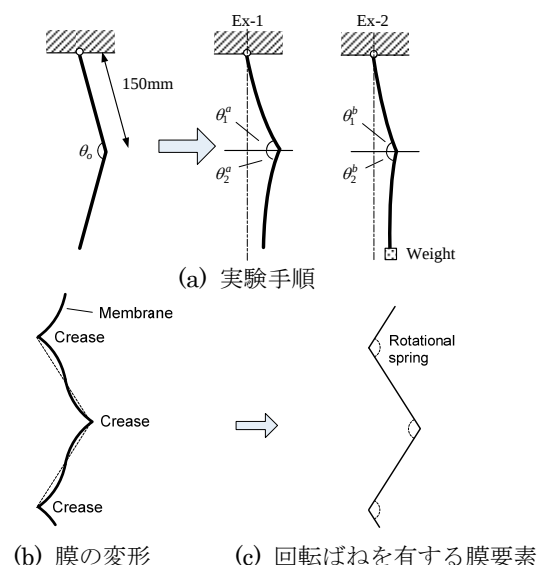


Fig.3 膜面の折り目の回転ばねモデル

3. 平板の曲げ加工・ヘミング加工の薄膜への応用

本研究では、薄膜を人が「折る」という動作を平板の曲げ加工、中でもその曲げ角が180度に近い「ヘミング加工」を利用する。ヘミング加工はフードやドア等の自動車部材において、インナパネルをアウトパネルで覆うように折り曲げ、エッジの平滑化・板材の接合を行う曲げ加工であり、これまでも種々の研究が広くなされている。

平板の密着曲げにはこの他にもその工程の違いから突き曲げを行う2工程ヘミング加工やロールヘミング加工等が存在するが、ガイドに沿って当て板をし、折り曲げ、上から圧をかけて膜に癖をつけるという「人が折る」動作を最も良く表したものとして、さらには折り部の寸法安定性や曲げ部の割れなど、ヘミング加工独自の課題を抱えているものの、既に自動車産業で実用化されており、実験・解析双方からの豊富な比較データが存在するという点からこの3工程ヘミング加工は「折り」動作のモデル化に有効であると考えた。

ヘミング加工は Flanging, Pre-Hemming, Final-Hemming という3つの工程に細分化することができる。以下に、一般的に用いられているヘミング加工各工程の概要と、模式図を示す (Fig.4)

a) 第1工程 (Flanging)

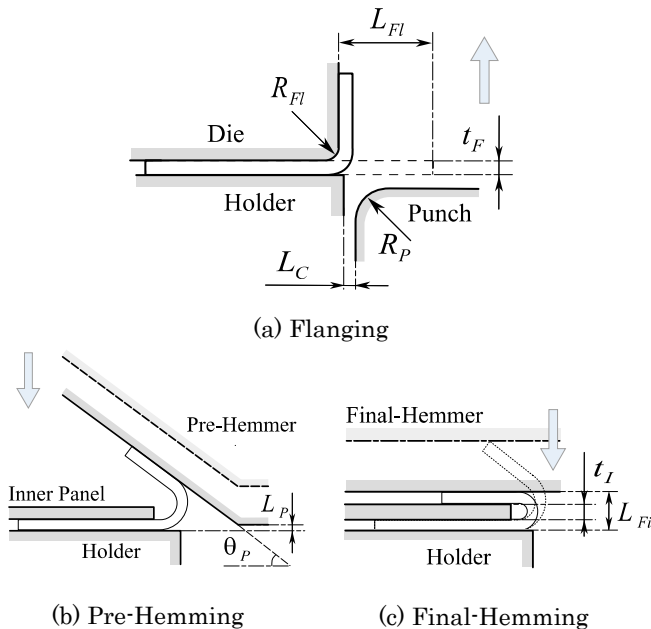
Holder と Die で挟みこんだ板材の Flange 部を下から Punch で90度になるまで押し上げる。

b) 第2工程 (Pre-Hemming)

ある傾き θ_p を持った Pre-Hemmer を所定の位置 L_p まで押し下げる。

c) 第3工程 (Final-Hemming)

Final-Hemmer を曲げ部材が InnerPanel に完全に密着する位置 L_{Fi} まで押し下げる。



R_{Fi} : Flange Die Corner Radius L_{Fi} : Final-Hem Ending Position
 R_P : Punch Corner Radius t_F : Film Thickness
 L_{Fi} : Flange Length t_I : Inner Panel Thickness
 L_P : Pre-Hem Ending Position θ_P : Pre-Hem Angle
 L_C : Flanging Clearance

Fig.4 変形工程

4. 解析

前述の工程を模擬した解析を有限要素法解析ソフト ABAQUS / Standard を用いて各工程での変形形状について解析を行った。尚、解析の際は曲げ変形を平面ひずみのもとと仮定して評価した (ABAQUS 要素タイプ: CPE4R)。

解析に用いた材料・幾何学パラメータを Table1 に、応力-歪曲線を Fig.5 に示す。

Table1 に示すように、今回の解析では膜厚 $25\mu\text{m}$ のカプトンフィルム1種類(Kapton-type HN)に対して R_{Fi} , L_P , L_{Fi} , t_I の値を変化させて解析を行った。これら文字が示すところは Fig.4 に示す通りである。

Table1 解析に用いた材料・幾何学パラメータ

Material Parameter : Kapton-type HN Film	
t_F : Film Thickness [μm]	25
E : Elastic Modulus [GPa]	2.5
ν : Poisson's Ratio [-]	0.34
σ_Y : Yield Strength [MPa]	69
Geometry Control Parameter	
R_{Fi} : Flange Die Corner Radius [μm]	125, 100, 75, 50, 25
R_P : Punch Corner Radius [μm]	25
L_{Fi} : Flange Length [mm]	1.275
L_C : Clearance [μm]	25
L_P : Pre-Hem Ending Position [μm]	150, 125, 100, 75, 50
L_{Fi} : Final-Hem Ending Position [μm]	150, 125, 100, 75, 50
t_I : InnerPanel Thickness [μm]	250, 200, 150, 100, 50
θ_P : Pre-Hem Angle [deg]	45

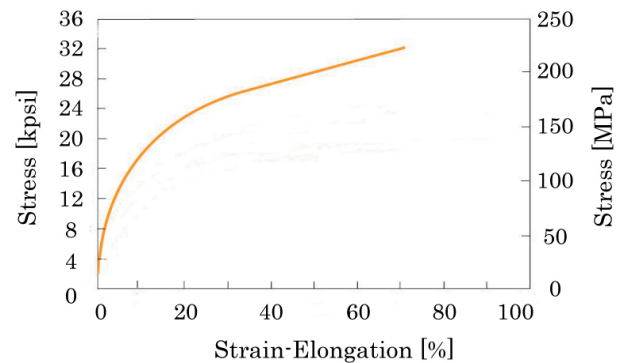


Fig.5 Kapton-type HN, $25\mu\text{m}$ 応力-歪線図[5]

ヘミング加工を模擬した剛表面や膜面部材の2次元配置、また膜面の節点位置等は Fig.6 に示す通りであり、水平方向に999分割、垂直方向に20分割、曲げの厳しい折り目近傍ではさらにメッシュを細かく設定した。

今回の解析では Final-Hemming 工程で膜面が完全に InnerPanel に密着するまでの解析を行い、その時に生じる折り目近傍での応力分布を求め、さらに強制変位除荷時に生じる復元力、すなわち、SpringBack 量を算出し各パラメータの影響について調べることにする。

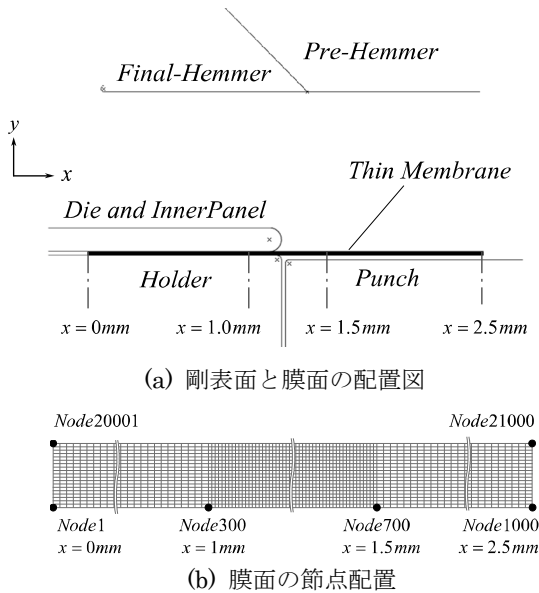


Fig.6 有限要素法解析モデル

5. 計算結果

5.1 膜断面の応力分布

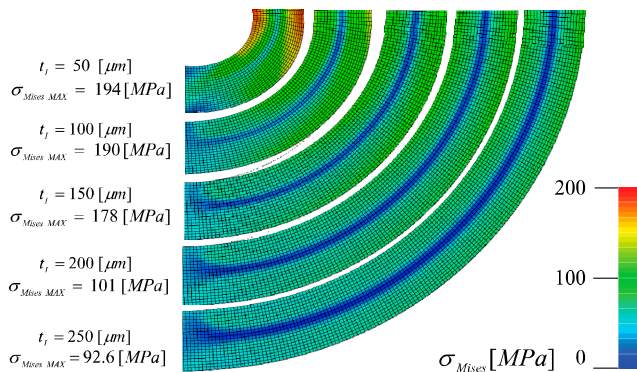


Fig.7 膜断面の相当応力分布図(Final-Hemmer)

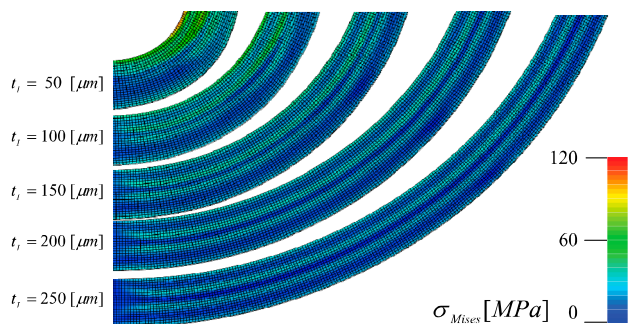


Fig.8 強制変位除荷時の膜断面の相当応力分布図

各パラメータにおける Final-Hemmer 工程終了後時の応力分布図を Fig.7 に示す. また, 図は InnerPanel の曲率中心点から下部半分を抽出したものであり, 同図には, 膜断面に生じる最大相当応力の値も示している.

InnerPanel 厚 t_i の減少に伴って, 膜面に生じる最大相当応力及び折り目部近傍での応力分布は次第に増加し, $t_i = 50 \mu\text{m}$ では折り目部のほぼ全域に渡り, 150MPa 程度の高い応力を示していることが分かる. これは膜材全体に渡っ

て材料が降伏していることを意味している.

また, Final-Hemmer 工程終了後, 膜面の強制変位・負荷を解放してやると, 膜断面の応力は減少し, その際の応力分布図は Fig.8 のようになる. t_i の薄いものは特に, 強制変位除荷後も膜面の最内縁部には依然として強い残留応力が発生していることが窺える. また, この時に膜の最内縁に生じる応力は逆転, すなわち, 膜の内側には強い引張応力が作用している.

5.2 膜の復元量 (SpringBack 量) の比較

Fig.9 に各パラメータにおける SpringBack 後の膜面形状及び, 復元量 θ_0 を示す. 薄板ばねや回転ばねの通例に倣い, この θ_0 を SpringBack 量と呼ぶ. InnerPanel 厚 t_i が最も小さい $t_i = 50 \mu\text{m}$ では特に θ_0 が小さく, その大きさは 20.1° となった. t_i の増加にほぼ比例して θ_0 の値も大きくなり, $t_i = 250 \mu\text{m}$ での θ_0 は 93.3° と Flanging 工程終了の変形状よりも外側まで復元を起こした.

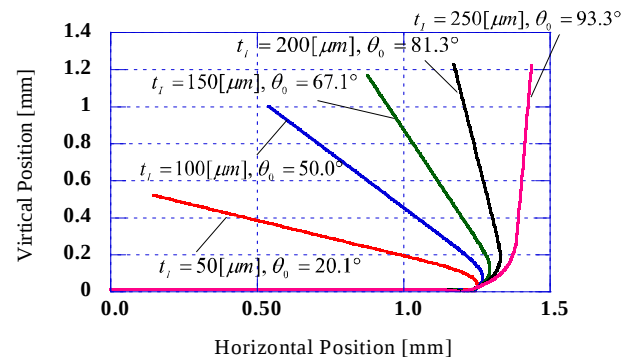


Fig.9 SpringBack 後の膜面形状

5.3 膜の折り目部の荷重-変位曲線

次に, Final-Hemmer 工程終了後, SpringBack した後の無負荷状態での膜面の一端に荷重 F を x 軸に平行にかけ, その際の膜面の形状変化を調べた. Fig.11(a)の破線で示す曲線は膜面の初期形状であり, 無負荷状態での膜面の代表パラメータとして, InnerPanel 厚 $t_i = 150 \mu\text{m}$ を採用した.

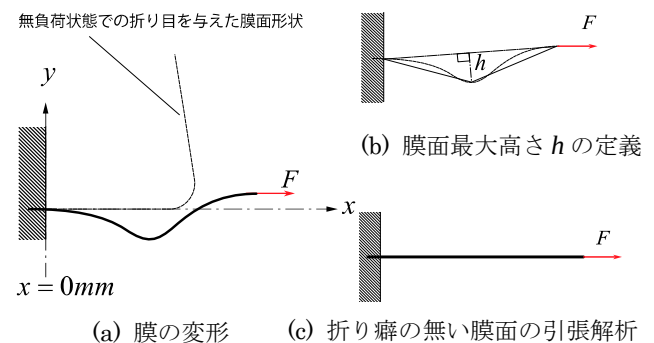


Fig.11 膜面の折り目の引張解析

荷重は $F = 0.5 \text{ N}, 1.0 \text{ N}, 5.0 \text{ N}, 10 \text{ N}, 20 \text{ N}, 30 \text{ N}, 40 \text{ N}$ の 7 種類について行い, また, 評価項目として膜面先端の変位量 ($F = 0$ の膜面先端位置を基準として, 変位量 dx, dy を測定する. 符号は, dx は x 軸正の方向を正, dy は $-y$ 方向を正とする), 膜面最大高さ h を採用した. ここで h は Fig.11(b)に示すように, 膜面端部を結んだ直線から最も離れた距離にあるポイントを結んだ垂線を膜面最大高さ h と

定義している。Fig.12 に引張力に応じた折り目部の形状を表す曲線と、膜面最大高さ h の値を示す($F = 0.5\text{ N} \sim 20\text{ N}$)。尚、Fig.11(c)のように、比較のため、折り癖を与えていない膜面に対しても同様の解析を行った。

引張力が 0.5 N 、 1.0 N と小さい範囲の膜面形状は、その残留応力が生む折り目剛性の影響から、膜面先端は大きく上面に突きだしたままの形状を示している。先端部への引張荷重を 5.0 N 、 10.0 N と大きくしていくと、固定端部と先端部は x 軸上にほぼ直線状に配置し、その後、 h は張力の増加に伴って指数関数的に減少を示すことが Fig.13(a)からも窺える。

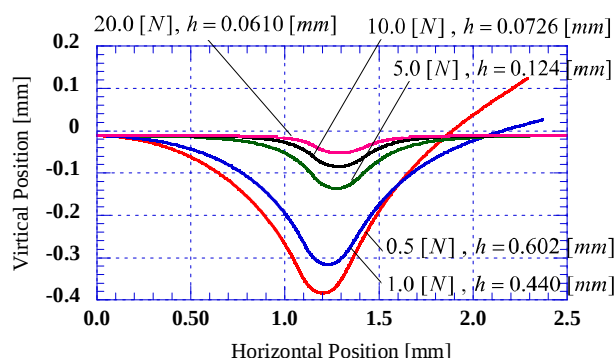
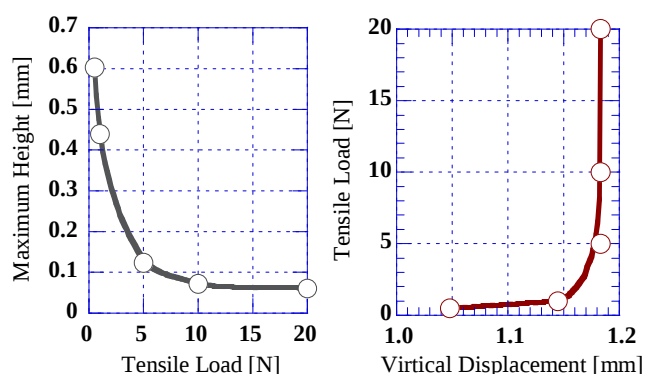
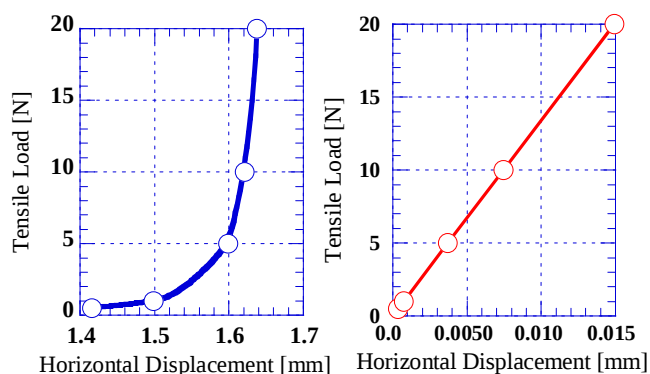


Fig.12 引張力に応じた折り目部の形状



(a) 引張荷重と膜面最大高さ

(b) y 方向変位量と引張荷重



(c) x 方向変位量と引張荷重 (折り癖あり)

(d) x 方向変位量と引張荷重 (折り癖なし)

Fig.13 膜面の折り目の引張解析における諸結果

また、膜面先端の変位量について見てみると、折り癖を有する膜面は dx 、 dy とともに、はじめは僅かな荷重の増加に対して変位量も大きく増加しているが、途中から傾きが大きく変化し、荷重の増加に対する変位量の反応が鈍くなるポイントが現れる。この傾きの変化はまさに、折り癖を与えた膜面がばねのように振る舞い、初めは柔軟に伸び縮みを行っていたものがついに伸び切り、そこからは初期歪を持った膜面の伸び変形に遷移したことが考えられる(Fig.13 (b),(c))。現に、荷重が大きくなるにつれて傾きはある一定の値に収束しているが、この値は Fig.11(c)のように、折り癖を与えない状態の膜面に対して引張解析を行ったときの変位量の傾き Fig.13 (d)に酷似している。比較の簡単化のために、Fig.13(c)のグラフに Fig.13(d)のグラフを平行移動し、重ねて表示したものを Fig.14 に示す。

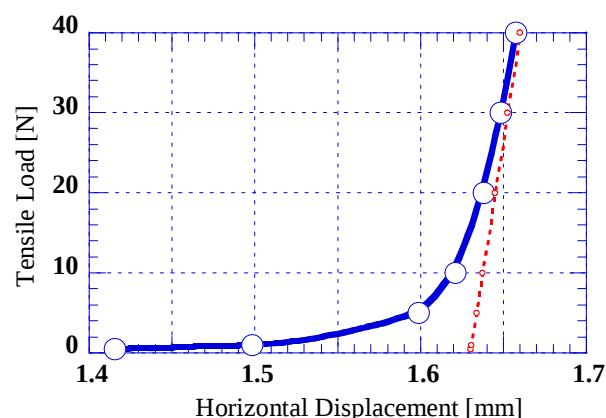


Fig.14 引張解析の直線の傾きの比較

6. まとめ

本研究では人が折るという動作を平板の 180° の曲げ加工、ヘミング加工を適応・モデルとし、同様の手順で計算することで折り部に付与される応力分布、SpringBack 量等を求めた。従来までは実験的に展開シミュレーションに組み込みを行ってきた折り部のばね剛性も、本解析と同様の手法でより有用性の高い値の評価ができることと考える。

今回の解析では幾何学的にインナパネルにアウトパネルが密着するまでの曲げ加工のみを扱ったが、今後は更なる潰しを含めた解析や、種々の膜厚・材料パラメータの解析を行うことで、膜面の初期の形状不良・折り癖への影響因子を調査することができると考える。

7. 参考文献

- [1] <http://www.jspec.jaxa.jp/activity/ikaros.html>
- [2] Kyeongsik Woo, Kuldeep Nandukar and Christopher H.Jenkins, "Effective Modulus of Creased Thin Membranes", Journal of Spacecraft and Rockets, Vol.45, No.1, January-February, 2008, pp.19-26.
- [3] Guohua Zhang, S.Jack Hu, and Xin Wu, "Numerical Analysis and Optimization of Hemming Processes", Journal of Manufacturing Processes Vol.5, No.1, 2003, pp87-96.
- [4] 宮崎, 「小型ソーラー電力セイル実証機IKAROSのセイル膜面の数学モデルについて」, 第25回宇宙構造・材料シンポジウム講演集, pp.72-75, 2009年12月.
- [5] http://www2.dupont.com/Kapton/en_US/products/HN