

分岐解析による張力構造物の動的応答の解構造探索 Research on Solution Structure of Dynamic Response of Tensile Structure

指導教授 宮崎康行

M1009 屋宮拓海

1. はじめに

1.1. 背景

人工衛星・探査機の開発において、高速通信や深宇宙探査などに有用である大型アンテナやソーラーセイルなどの大型宇宙構造物の研究・開発が盛んに行われている。このような大型宇宙構造物を実現するため、薄膜やインフレータブル構造物などの柔軟構造物が注目されている。

ソーラーセイルのアイデアは 100 年程前から存在していたが、宇宙空間の過酷な環境で長期間使用できるセイル膜材が存在しなかったため開発がなされてこなかった。しかし、近年になり、ポリイミド膜が開発されたことによりソーラーセイルの開発が始まった。2010 年に JAXA が小型ソーラー電力セイル実証機 IKAROS(Fig.1)を打ち上げた。IKAROS は世界で初めてソーラーセイルによる惑星間飛行を実現させた。

今後は直径 50[m]級の膜面を有する次期ソーラーセイル(Fig.2)の木星およびトロヤ群小惑星の探査が計画されている。



Fig. 1 IKAROS



Fig. 2 次期ソーラーセイル

IKAROS ではポリイミド膜材の機械的評価が十分でなく、ヤング率などが明らかではなかったため、予想される値に幅を持たせることにより、設計マージンを大きく持たせた設計・開発が行えた。しかし、次期ソーラーセイルではセイルの直径が大型なため、膜面にかかる荷重の増加や衛星全体の質量の増加が予想され、物理的な実現可能性の面でもリソースの面でも IKAROS の時のような大きな設計マージンを持たせた設計を行うことができない。よって、次期ソーラーセイルを開発する際には膜材の十分な機械的性質の評価が必要となる。また、膜面は小さな圧縮応力でしわが発生してしまう。ソーラーセイルの膜面にしわができると挙動や性能に影響が出る。そこでしわの形状予測も重要となる^{[1][2][3]}。

50[m]級の膜面の地上での展開試験は、空気抵抗や重力の影響を受けてしまうため不可能である。そこで宇宙空間での展開挙動などを予測するには数値計算が不可欠となる。IKAROS は設計マージンを考慮し設計されているが、分岐解が設計マージンの中に入っているかは検証されてこなかった。動解析では、収束条件・数値積分法・分岐の影響により複数の解が発生する可能性がある。どの原因であろうとも複数の解が存在することは問題となる。膜の場合は特に圧縮と引張で応力歪関係が滑らかではないので複数の解が出てくる可能性が高い。そこで、分岐解析によりどのくらい解がばらつく

のかを調べることができれば、設計マージンを適切に考慮した設計が可能になる。

1.2. 目的

前節より本研究では

- ①構造解析に必要なヤング率と真応力-塑性歪関係を求めるための手法を提案する。
 - ②張力構造物の分岐解析を用いた解析を行い分岐経路が発生する可能性があるのかを調べる。
- の2つを目的とする。

2. 膜材の構造解析に必要な値の導出

この章では、構造解析に必要なヤング率と真応力-塑性歪関係を求めるための手法を提案する。

まず、膜材の引張試験を行いヤング率と公称応力-歪関係を調べた。次に、得られたヤング率と公称応力-歪関係を構造解析に広く用いられている汎用非線形有限要素解析プログラム ABAQUS での解析に用いるため、真応力-歪関係を求めた。

2.1. 試験装置および手順

試験のモデルには Fig. 3 に示した JIS_K7127 試験片タイプ 5 のダンベル型、試験片の全長 115[mm]、平衡部の長さ 33[mm]、平行部の幅 6[mm]、標点間距離 25[mm]、厚み 12.5 [μm]のポリイミド膜を使用した。引張試験機は INSTRON 5582 を使い引張速度 50[mm/min]で試験を行った、データログ・マシン制御ソフトは Blue Hill3 を使用した。試料の平行部に 2 点の標点を打ち、ビデオ伸び計で歪を計測した。



Fig. 3 試験モデル

2.2. 試験結果

測定によって得られた応力-歪線図を Fig. 4 に、破断後の試験片の外観を Fig. 5 に示す。

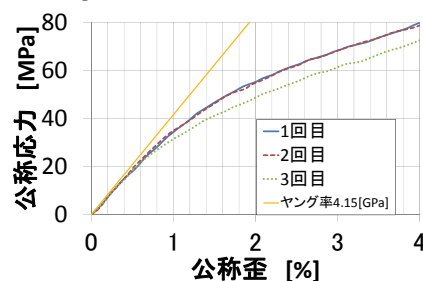


Fig. 4 応力-歪線図 (常温)



Fig. 5 破断後の試験片の外観

Table. 1 に材料試験用ソフト Blue Hill3 によって計算された各サンプルにおけるヤング率を示す。

Table. 1 各サンプルにおけるヤング率

温度[°C]	サンプル番号	ヤング率[GPa]
80	1	3.15
	2	3.38
	3	3.65
常温	1	4.06
	2	4.44
	3	3.94
-80	1	4.19
	2	4.10
	3	4.00

Table.1 より、温度が高くなるほど柔らかく伸びやすい傾向が見られ、一般に予想される通り、温度が低くなるほど伸びにくいという性質を確認した。また、Fig.3 と Fig.5 を比較するとポアソン効果が見られることがわかる。破断時の幅は平均して 3.8[mm]、収縮率は 36%であった。

2.3. 真応力-塑性歪の算出

引張試験によって得られた公称応力-歪関係を ABAQUS に反映させて解析を行うためには、真応力-塑性歪関係を求める必要がある。ここでは常温で平均的な値であった 2 回目の試験結果から計算した真応力-塑性歪関係を求めた。ポアソン効果が見られたことから体積一定で変化しようとする性質があると考えたため、真応力の導出には以下の式を用いた。

$$\sigma_{true} = \sigma_{normal} (1 + \epsilon_{normal}) \quad (1)$$

ここで σ_{true} は真応力、 σ_{normal} は公称応力、 ϵ_{normal} は公称歪である。また、塑性歪を導出する。真全歪は公称歪を以下のように表すことで求めることができる。

$$\epsilon_{normal} = \frac{l - l_0}{l_0} = \frac{l}{l_0} - 1 \quad (2)$$

式(2)の両辺に 1 を加え、両辺の自然対数をとることにより、真歪と公称歪の関係が得られる。

$$\epsilon^t = \ln(1 + \epsilon_{normal}) \quad (3)$$

塑性歪は、全歪の値から弾性歪を引くことで求められる。なお、弾性歪は、真応力をヤング率で割ることで求められる。

$$\epsilon^{pl} = \epsilon^t - \epsilon^{el} = \epsilon^t - \sigma_{normal} / E \quad (4)$$

以上、式(2)~(4)より塑性歪が求められた。ここで、 ϵ^{pl} は真塑性歪、 ϵ^{el} は真弾性歪、 ϵ^t は真全歪、 E はヤング率である。

2.4. 矩形膜のせん断実験

矩形膜のせん断実験は、長方形型の膜面の上下辺を固定端とし、上側の固定端を強制せん断変位を与えて膜面にしわを発生させ、その形状を計測する実験である。今回の実験では XY ステージを 0.5[mm]ずつ δu 方向に変位させていった。Fig. 6 にモデル詳細を示す。実験および解析の妥当性を評価するために既に Pellegrino らにより実験・解析^[4]が行われているものと同様のモデルを採用した。Fig. 7 には実験装置の外観、Fig. 8 には実験結果概観を示す。また、Table. 2 にモデルパラメータを示す。膜面に生じたしわは、電動スライドルールに搭載されている CCD レーザ変位計により 3 次元形状を計測される。CCD レーザ変位計は、0.1[μm]の分解能で計測可能である。

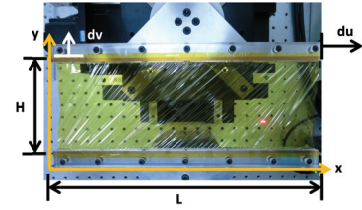


Fig. 6 矩形せん断モデル

Table. 2 矩形せん断モデルパラメータ

膜幅 L	300[mm]	変位量(せん断) δu	3[mm]
膜高さ H	100[mm]	変位量(圧縮) δv	-0.1[mm]
膜厚 t	12.5[μm]	ポアソン比 ν	0.3



Fig. 7 実験装置概略図

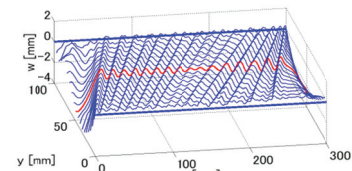


Fig. 8 実験結果概観 (赤線は中央断面) ^[6]

2.5. 矩形膜のせん断の解析

弾性変形内の膜面のせん断変位の実験の解析を ABAQUS で行った。要素は 4 節点 5 自由度 DKF シェル要素 S4R5 を用い、要素数 7500、節点数 7701 とした。解析は、最初に δv 方向に -0.1[mm] たるませてから、上方の固定端を δu 方向に 1.0[mm] せん断変位させた。重力の影響を考慮し解析を行った。ヤング率は、4.15[GPa] とした。

2.6. 計測結果と解析結果の比較

Fig.9 にせん断実験の計測結果、Fig.10 に ABAQUS でのしわの解析結果、Fig.11 に中央断面のしわの波形を示す。

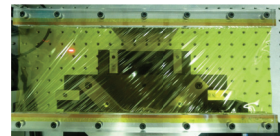


Fig. 9 実験の変形形状 Fig. 10 ABAQUS の解析結果

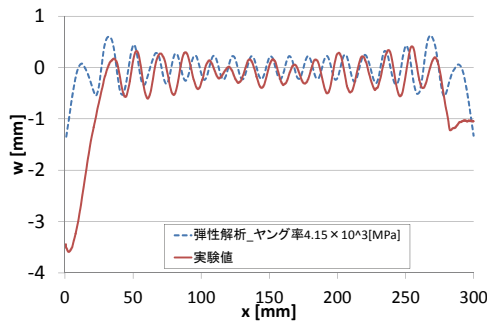


Fig. 11 中央断面のしわ波形(せん断変位 1.0[mm])

Fig.10 の青色の部分 Z 軸の負の方向の変位であり、赤色の部分が Z 軸の正の方向の変位である。Fig.9,10 により左上と右下の自由端部のたるみが模擬できていることがわかる。また、自由端に近づくにつれ、しわの高さが大きくなる傾向が解析できていることがわかる。

2.7. まとめ

せん断実験と ABAQUS での解析がほぼ一致していることにより、膜材の構造解析に必要なヤング率と真応力-塑性歪関係を求める手法を提案することができた。

3. 分岐解析による解の探索

分岐とは解くべき運動方程式の解が一意に定まらずに、複数の解が同時に発生することである。例えば、長柱の長手方向にゆっくりと荷重をかけ、ある荷重に達すると、そのまま長手方向に圧縮する解と、短手方向に曲がってしまう解の両方が存在することが知られている[6]。上記は静解析の例であるが、動解析においては、収束条件・数値積分・分岐の影響により複数の解が発生すると考えられる。この章では、ソーラーセイルのような張力構造物の分岐解析を用いた解析を行い、分岐経路が発生する可能性があるのか調べる。

3.1. 解析モデル

分岐解析を行うにあたり、Fig.12 のようなケーブル要素で構成された簡単な膜面モデルを用いて解析を行った。一辺が 0.6[m] の正方形で、Y 軸上の要素は固定し自由度を 0 とした。要素数 68、節点数 25、自由度数 40 である。数値積分法にはエネルギー・モーメント法[7]、収束計算にはニュートン法を用いた。

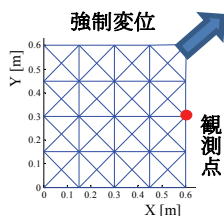


Fig. 12 解析モデル

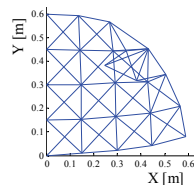


Fig. 13 解析モデル (変形後)

Fig.12 の右上の節点に X 軸方向に 3[mm]、Y 軸方向に 3[mm]の引張り変位を与え、Fig.13 のように圧縮されていくような運動を解析する。

3.2. 分岐の可能性

解析するモデルにて分岐が発生する可能性があるか調べるために、まず接線剛性マトリクスの固有値を調べた。動解析は慣性項の影響により安定であるが、静的には接線剛性マトリクスの固有値が 1 つでも負になったとき系が不安定になる。座屈分岐により解が複数発生する可能性がある。固有値は自由度数分存在しているが、すべての固有値の変化を表示すると正負の変化がわかりにくくなるため、ここではある 1 つの固有値の時間変化を表したグラフを示す。

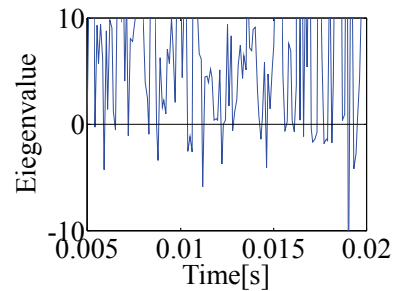


Fig. 14 固有値の変化

Fig. 14 より、固有値が正から負に変化する箇所があることが分かった。すなわち、固有値がゼロになり、慣性項の影響が小さくなる刻み幅を細かく設定した解析の場合や、実際の構造のように製造誤差が存在する場合には、解が複数発生する可能性があることが分かった。そこで、分岐解を求めるために、解の誘導を行った。次節にその手法を示す。

3.3. 解析手法

分岐解への誘導手法を以下に示す。固有値が負になると静的に系が不安定となると考えられ、その場合、最小固有値に対する固有ベクトルが分岐方向を表すと考えられる。よって、固有値が負になった時点での最小固有値に対する固有ベクトルを初期値として解析を行うことにより分岐解へと解を誘導する。

3.4. 解析結果

時間刻み幅 $\Delta t = 1.0 \times 10^{-4}$ 、収束条件 $\delta = 1.0 \times 10^{-12}$ のときの観測点の座標変化と全体形状の変化を以下に示す。

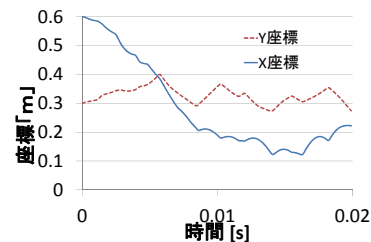


Fig. 15 観測点の座標変化

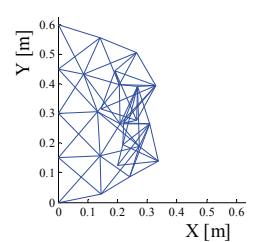


Fig. 16 全体形状の変化

次に、時間刻み幅 Δt と収束条件 δ は変えずに分岐解析を行った結果を以下に示す。

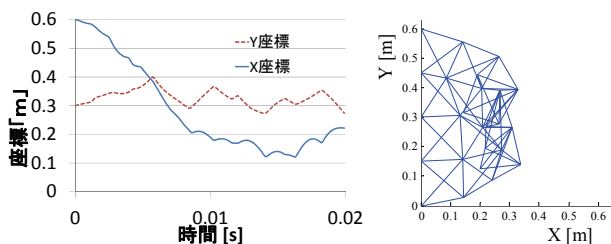


Fig. 17 観測点の座標変化 Fig. 18 全体形状の変化

Fig.15~18 を比較すると、わずかな変化しか見られなかったため、分岐解析を行った場合と行わなかった場合の X,Y 座標の差を取ったものを以下のグラフに示した。

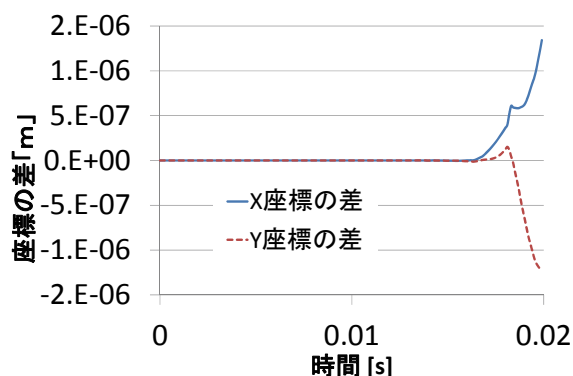


Fig. 19 座標の差

Fig. 19 より、分岐により今回の解析モデルでは 0.02[s]間の解析で 10^{-6} [m] オーダーのわずかな差が発生した。このわずかな差が解析時間を長くすると大きな差となってしまう問題となる。よって、解析時間が長くなると最初わずかであった差がどの程度影響してくるのか調べるために 0.2[s]間の解析も行った。以下に分岐解析を行った時と行わなかったときの座標の差を示す。

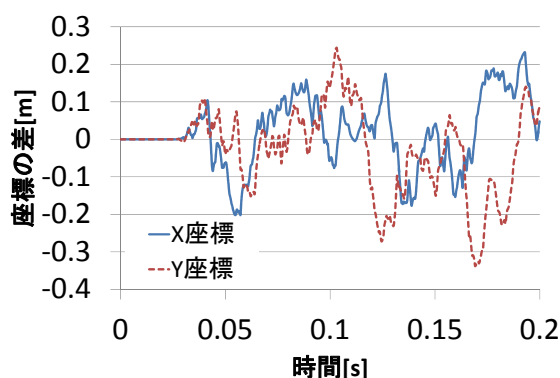


Fig. 20 座標の差 (0.2[s]間)

Fig. 20 より分岐解析の有無で最大で約 0.3[m]もの差が発生していることが分かった。このことにより、分岐を考慮した解析の必要性があることを示すことができた。

また、座標の差が生じ始めたときの座標の差が 10^{-11} のオーダーであったので収束条件の影響により複数の解が発生した可能性もある。そこで収束条件の影響の可能性ではないことを確かめるために収束条件が $\delta=1.0 \times 10^{-14}$ の時の解析を行った。この時の分岐解析をした時としなかった時の座標の差を以下に示す。

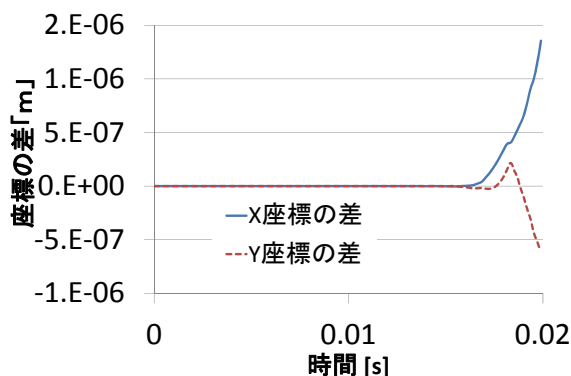


Fig. 21 座標の差

Fig. 21 より収束条件が $\delta=1.0 \times 10^{-14}$ のときも座標の差が発生した。また、定量的にみると差が生じ始めた時の座標の差は 10^{-11} のオーダーのままであった。よって、この2つの解は分岐の影響により発生したものだと考えることができる。

4. おわりに

本研究では第一に、膜材の構造解析に必要なヤング率と真応力-塑性歪関係を求める手法を提案することができた。

第二に、張力構造物の分岐解析を用いた解析を行い、分岐経路が発生する可能性を示すことができた。よって、本研究で示した分岐解の探索手法を用いれば、今後の本格的な展開挙動解析でも分岐解を求めることができると考えられる。

参考文献

- [1] Miyazaki, Y., et. al., "Conserving Finite Element Dynamics of Gossamer Structure and Its Application to Spinning Solar Sail "IKAROS"", 52nd AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics, and Materials Conference, AIAA-2011-2181, 2011, 1-17, Denver, CO.
- [2] Miyazaki, Y., "Wrinkle/slack model and finite element dynamics of membrane", International Journal for Numerical Methods in Engineering, Vol.66, No.7, May 2006, pp.1179-1209.
- [3] Miyazaki, Y. and Arita, K., "Simplified Model of Membrane for Wrinkle Analysis of Gossamer Structure", 49th AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics and Materials Conference, AIAA2008-2134, 7-10 April 2008, Schaumburg, IL.
- [4] Wong, Y.W. and Pellegrino, S., "Wrinkled Membranes Part III: Numerical Simulations", *Journal of Mechanics and Materials and Structures*, January 2006
- [5] 井上祥子, 薄膜構造物におけるしわ分布の予測手法, 平成 22 年度 大学院修士論文
- [6] 池田清宏, 室田一雄, 構造系の座屈と分岐, コロナ社, 2001
- [7] Y. Miyazaki, User's Manual of Nonlinear Elasto-Dynamic Analysis code "NEDA" Ver.1.7, Jan.4, 2008