

A1 ソーラーセイル膜における面外変形の剛性への影響評価

西澤 匡士 (東京工業大学), 坂本 啓 (東京工業大学), 大熊 政明 (東京工業大学),
奥泉 信克 (JAXA), 白澤 洋次 (JAXA), 森 治 (JAXA),
古谷 寛 (東京工業大学), 佐藤 泰貴 (東京工業大学)

Tadashi Nishizawa (Tokyo Institute of Technology), Hiraku Sakamoto (Tokyo Institute of Technology),
Masaaki Okuma (Tokyo Institute of Technology),
Nobukatsu Okuizumi (JAXA), Yoji Shirasawa (JAXA), Osamu Mori (JAXA),
Hiroshi Furuya (Tokyo Institute of Technology), Yasutaka Sato (Tokyo Institute of Technology)

1. 序論

1.1. 研究背景

2010年に打ち上げられた小型ソーラー電力セイル実証機 IKAROS は軌道上での大型膜の展開や太陽輻射圧による加速度実証に成功した[1].

IKAROS のミッションはすべて成功したが、打ち上げ前に想定していなかった現象がいくつか観測された。その一つに膜面剛性の予測があげられる。IKAROS はスピンにより展張時の形状を維持しているため、多粒子法を用いた事前の数値解析では低スピンレート時に、太陽輻射圧の影響が支配的になり膜面が大きくたわむと予測されていた。しかし宇宙機に搭載されたカメラにより撮影された軌道上での膜面の画像からは、低スピンレート時に太陽輻射圧に対するたわみはほぼ観測されなかった。さらに、セイルの面外には局所的な変形が多く見られ、膜面が完全な平面とはならなかった。これらの事実、膜の面外剛性が予想より大きいことを示唆している。

次期ソーラーセイルにおいては姿勢制御の観点から事前に膜面の形状および剛性を予測する必要がある。さらに、宇宙膜面構造物は、大面積、軽量で高収納性から注目を集めており、膜構造物をアンテナ、太陽電池アレイなどに用いる際には膜面の平面度は非常に重要な設計指標

になると考えられる。したがって将来の宇宙膜構造設計においても膜の形状および面外剛性の予測は重要である。

1.2. 既往の研究

白澤ら[2]は、IKAROS の展張後の形状について、軌道上で撮影された膜面画像が、多粒子法による打ち上げ前の予測と違い、太陽方向に向いていること、膜面に局所的な変形が生じていることを指摘した。そしてこれらの原因が、膜面貼付物の変形による曲げ剛性の増加である可能性を指摘し、多粒子法に回転ばねによって曲げ剛性を組み込んだ解析と膜面貼付デバイスの熱環境試験によって実証した。しかし面外剛性の増加を解析で再現することはできなかった。

Papa ら[3]は0.5 m × 0.5 m のミウラ折りで折られた小型の薄膜について、シェル要素を用いた展張解析を行い面内への荷重と変位の関係を明らかにした。また、提案した2次元モデルでの荷重と初期状態からの変位との関係が有限要素解析の結果とよく一致することを示した。

西澤ら[4]は、ソーラーセイル膜の折りぐせの面外剛性への影響を評価するために IKAROS の有限要素モデルにおいて、折りぐせの形状を梁要素と平面膜でモデル化し、固有振動数によって定量化した。その結果、折りぐせは膜面に負

荷されている張力が低い時、剛性に大きく影響していることを定量的に示した。

1.3. 研究目的

既往の研究では、ソーラーセイルのような大型膜において膜の面外変形が剛性へ及ぼす影響、および幾何剛性との関係は定量的に評価されていない。また、打ち上げ前の事前予測で用いられた多粒子法[2]では膜の曲げ剛性を考慮していなかったため実際のセイル形状と予測とに差が生じたと考えられる。したがって本研究では Papa ら[3]のように有限要素解析でシェル要素を用いることで膜の曲げ剛性を考慮し、ソーラーセイルのような大型膜面構造を対象とした膜面の剛性評価を行う。

膜は圧縮剛性が著しく小さいため、膜の曲げ剛性を薄膜の膜面形状を詳細に解析する場合は詳細なメッシュに分割し、非線形性を考慮しなければならない。しかし、ソーラーセイルのような薄膜の場合では極めて計算負荷が大きくなる。そこで面外変形の様々な影響を評価する段階では、非線形性を考慮した詳細な解析を行うのではなく、より簡易な解析によってオーダー評価を行うことが有益である。

以上の背景のもと、本研究では、ソーラーセイル膜の面外の変形が面外剛性へ及ぼす影響を簡易かつ定量的に評価し、膜面剛性に寄与する面外変形の影響のオーダー評価を行う方法を提案し、さらにオーダー評価の結果から、将来のセイル設計への指針を得ることを目的とする。

1.4. 研究手法

上記の目的を達成するため、本研究では有限要素解析を用いて IKAROS のモデルを対象に研究を実施する。まず、IKAROS の数値モデルを作成し、軌道上の状態を想定した解析を行い、セイル膜の面外剛性の評価する（第2章）。また、膜が面外に変形する要因を3種類に分類し

その影響をモデルに組み込む（第3章）。そして得られた結果を評価すると共に、結果から膜の面外変形が剛性に与える影響についての知識化する（第4章）。

2. 剛性の評価方法

2.1. IKAROS のミッション概要

IKAROS の初期運用・定常運用では、以下の4つのミッションすべてに成功した[2][5]。

1. 大型膜面の展開・展張
2. 薄膜太陽電池による発電
3. ソーラーセイルによる加速
4. ソーラーセイルによる航行技術の獲得

これらの成功の後、IKAROS は後期運用として、以下に述べる①低スピンレートミッションおよび、②逆スピンミッションを行った。

① 低スピンミッション

IKAROS は膜面を展開後、太陽輻射圧下で膜面を展張するためにスピンレートを 1rpm 以上としていた。しかし、低スピンミッションでは遠心力を低下させた状態で太陽輻射圧を受けることで膜面の剛性を確認するミッションを行い、スピンレートを 0.055rpm まで低下させた。ミッションの結果、事前の数値シミュレーションでは 0.055rpm 時には遠心力が減少するため、太陽輻射圧によって膜面が大きくたわむと考えられていたが、宇宙機本体に取り付けられていた膜面画像では 2.5rpm 時とほぼ同一の形状であった。これらの結果から膜面全体の曲げ剛性が予想より大きいとわかる。

② 逆スピンミッション

低スピン運用の後、剛性が予測以上に高いことから逆スピン運用が可能と判断した。結果として逆スピンへ移行でき、膜面が高い面外剛性を持つことを再び証明した。

2.2. 解析モデル

本研究では、膜面の面外変形を考慮した場合の

剛性の評価を行うために、有限要素法を用いた変形解析を行う。解析には汎用有限要素法ソフトである ABAQUS/Standard を用いた。図 2.1 に解析モデルを示す。解析には IKAROS と同寸法の 1/4 モデルを用いる。モデルのベース膜、薄膜太陽電池セル、液晶デバイス、端面処理テープ、PVDF（ダストカウンター）には 4 節点 4 辺形応力/変位シェル要素 (S4R) を用い、テザーおよび先端テザーには線形空間はり要素 (B31) を用いる。各々の材料特性は表 2.1 の通りである。

図 2.2 に境界条件を示す。中心ハブとテザーの結合部はピン固定とし、台形斜辺は膜の面内の並進方向のみを拘束する。作成した数値モデルは IKAROS の 1/4 部分であり、対称性を考慮した境界条件にするのがより適切であると考えられるが、対称境界条件にした場合、台形膜の斜辺の回転成分を拘束することとなり、境界条件が膜の曲げ剛性に顕著に影響するため、より曲げ剛性に対して影響が少ない境界条件とした。

2.3. 解析方法

図 2.3. に解析過程を示す。解析過程は大きく 2

表 2.1 FE モデルの材料特性

	厚さ[m]/断面	密度[kg/m ³]	ヤング率[Pa]	ポワソン比
ベース膜	7.5×10^{-6}	1420	3.0×10^9	0.3
薄膜太陽電池セル	2.0×10^{-4}	1420	3.0×10^9	0.3
液晶デバイス	5.0×10^{-5}	1777	3.0×10^9	0.3
端面処理テープ	7.0×10^{-5}	1420	3.0×10^9	0.3
PVDF	2.0×10^{-5}	3412	3.0×10^9	0.3
テザーユニット	1.25×10^{-4}	3412	3.0×10^9	0.3
先端テザー, テザー	円形断面 φ: 1.46mm	1420	1.02×10^{11}	0.3

段階に分けて行う。まず、スピンに相当する張力を負荷した状態での膜面の釣り合い形状を求めするために、Step 1 では幾何学的非線形性を考慮した解析を行う。スピンに相当する張力には ABAQUS の回転物体力を用いる。原点は衛星の中心部とし、スピンレートが 0, 0.055, 0.2, 1 rpm に相当する $x-y$ 平面方向の張力を付加する。

Step 2 では、太陽輻射圧に相当する面外荷重を付加する。面外荷重の大きさは 1AU に相当する 9.0×10^{-6} Pa とする。また、Step2 では幾何学的非線形は考慮せずに線形解析を行う。解析は Step 1 終了時の形状および応力状態を引き継ぐ。

薄膜の面外変形を伴う非線形解析は非線形性強いため、解析負荷が大きい。そこで、Step 2 にあたる面外変形を伴う解析を線形解析で行う。この簡略化により、解の厳密性は失われるが、解析負荷を小さくすることができ、多くのパラメータでの解析が可能となる。また Step 1 の幾何剛性を Step 2 に引き継ぐことでスピンによる張力の影響も考慮することができる[6]。

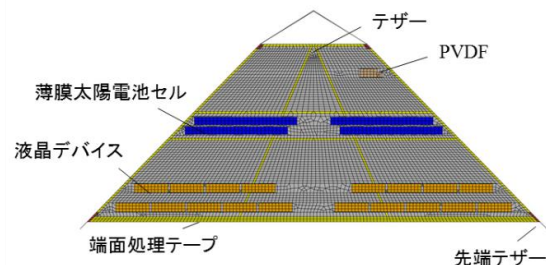


図 2.1 IKAROS 1/4 モデル (6812 要素)

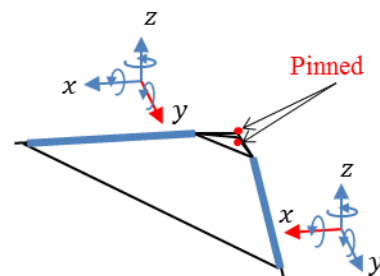


図 2.2 IKAROS 1/4 モデル拘束条件
(台形膜の各斜辺は座標軸の赤色成分を拘束)

ABAQUS 解析プロシージャは Step 1 では一般解析ステップである **Static, General** を用いる。このとき、幾何学的非線形性を考慮するための **NLgeom** オプションを使用する。また、Step 2 では、線形摂動ステップである **Static, Linear perturbation** を用いる。

2.4. 剛性の評価方法

膜の面外剛性は以下に示す方法で評価する。まず、台形膜の下底上の節点に対して節点集合を作成する。そして、解析で得られた面外平均について、作成した集合接点の平均をとる。その算出した面外平均の逆数を剛性として評価を行う。

3. 面外変形のモデル化

3.1. 面外変形の要因

軌道上で撮影された IKAROS の膜面画像（図 3.1）より IKAROS の膜面が折りぐせ、しわ等で面外に変形していることが確認できる。軌道上で膜面が面外変形する要因は多々考えられるが、本研究ではそれらを折りぐせ、端面処理テープの湾曲、膜のうねりの 3 種類に分類した。各々の要因をモデル化して数値モデルに組み込むことで剛性への影響を評価する。

3.2. 面外変形のモデル化

A) 折りぐせ

折りぐせとは、セイル製作時、膜を収納する際に生じた折り目が、軌道上で展開した後も残存し

ていることによる面外変形をさす。折りぐせによる面外変形は西澤ら[2]の梁要素を用いたモデル化手法を用いる。

B) 端面処理テープの湾曲

端面処理テープの湾曲とは、セイル製作時、テープを貼付する際に、張力が加わることでテープが反ることをテープ部分の剛性が増加する効果をさす。モデル化するために、まず地上にて実機のセイルと同等の膜に貼付されているテープのそりの曲率を測定し、その曲率と等価な曲げ剛性を持つ矩形断面のテープとしてモデル化を行う。測定の結果、端面処理テープの曲率は 21.6[1/m]であった。IKAROS には 2 種類の端面処理テープが用いられているので、それぞれが湾曲した際の断面二次モーメントが等価となるように膜厚をそれぞれ 0.116 mm, 0.526 mm とした。

C) 膜のうねり

膜のうねりとは、セイル製作時、または軌道上の熱環境化において膜面貼付物が湾曲し、そのことに起因して膜面全体が波打つことをさす。膜のうねりのモデル化は膜の面外方向に初期変位を入れることでモデル化を行った。初期変位は、津田ら[7][8]と同様に、次式を仮定した。

$$Z_{nm}(r, \theta) = h_{nm} R_n(r) \Theta_m(\theta) \quad (3.1)$$

ここで、 $Z_{nm}(r, \theta)$ は面外変位の大きさ、 $R_n(r)$ は周期が n のときの半径方向の面外変位を表す関数、 $\Theta_m(\theta)$ は周期が m のときの周方向の面外変位を表す関数、 h_{nm} は面外変位の周期が (n, m) のときの

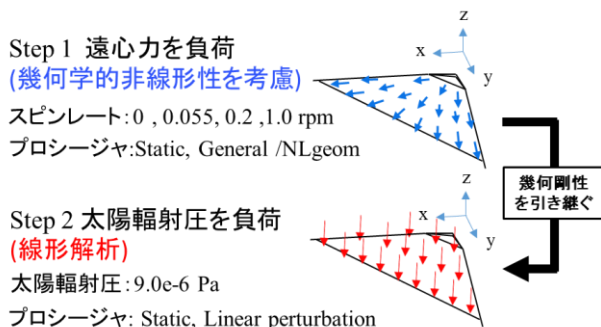


図 2.3 解析過程

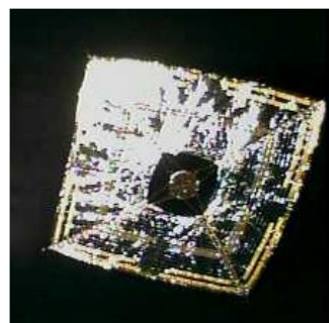


図 3.1. 軌道上での IKAROS の膜面画像

振幅を表す。

セイル膜の座標の取り方を図 3.2.に示す。セイル膜の半径方向の変位 $R_n(r)$ は次の漸化式で表される第一種の Chebyshev 多項式を用いた。

$$\begin{aligned} R_{n+1}(r) &= 2r \cdot R_n(r) - R_{n-1}(r) \\ R_0(r) &= 1 \\ R_1(r) &= r \end{aligned} \quad (3.2)$$

ここで、 $0 \leq r \leq 1$ である。また、セイル膜の周方向の変位 $\Theta_m(\theta)$ には正弦関数

$$\Theta_m(\theta) = \sin(m\theta + \alpha) \quad (3.3)$$

を仮定した。図 3.2 に示す通り $-45^\circ \leq \theta \leq 45^\circ$ 、また $\alpha = 90^\circ$ 、 m は偶数とすることで台形の斜辺部の面外変位が0となるようにして境界での影響が少なくなるように考慮した。今回は周期的な面外変形を仮定するために (n, m) は、 $(0, 0)$, $(10, 10)$, $(20, 20)$, $(30, 30)$ とした。膜のうねりを考慮した数値モデルを図 3.3 に示す。また、振幅は初期変位を入れたことによる膜の面積増加が各々のモデルで等しくなるように平面の台形膜の面積に対してそれぞれ 2.5%, 5%, 10%となる値とした。振幅値 h_{nm} の値を表 3.1 に示す。

表 3.1 「C) 膜のうねり」の振幅 h_{mn}

h_{nm} 振幅 (m)			
面積増加	$(n, m) = (10, 10)$	$(n, m) = (20, 20)$	$(n, m) = (30, 30)$
2.5%	0.081	0.040	0.027
5%	0.118	0.059	0.040
10%	0.170	0.086	0.059

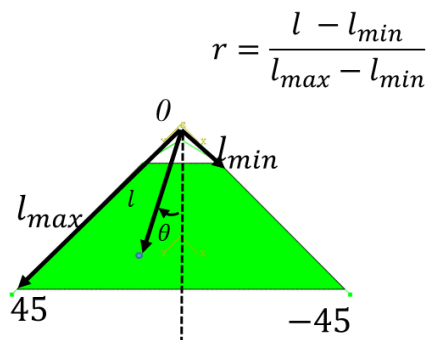


図 3.2 台形膜上の座標軸

4. 結果

4.1.面外変形の効果

図 4.1 は剛性とスピンによる張力の関係を図に表したものである。横軸はモデルに付加した遠心力のスピンレート[rpm]、縦軸は 2.3.で示した方法で評価した剛性 [1/m]で対数軸である。実線は面外変形を考慮しない場合の剛性の値であり、スピンの値が 0 rpm、つまり Step 1 の張力を負荷しない場合、剛性は著しく小さいが、スピンレートの値が大きくなるにつれて剛性の値も増加している。

Step 1 のスピンによる張力を考慮しない場合、面外変形を考慮したモデルは、変形を仮定しないモデルに比べて A)折りぐせによる効果が 1.3 倍、B)端面処理テープの変形の効果が 40.7 倍、C)膜のうねりの効果 $((n, m) = (20, 20)$ 、振幅 h_{nm} :面外変形を加えたことによる面積増加 5%)は 1100 倍となり、膜に張力を負荷しない場合でも面外変形の影響を考慮することで剛性が著しく増加していることが分かる。また、変形の影響は C)膜のうねり、B)端面処理テープの変形、A)折りぐせの順に大きいことが分かった。

4.2.幾何剛性と曲げ剛性

図 4.2 は図 4.1 に面外変形を考慮したモデルに

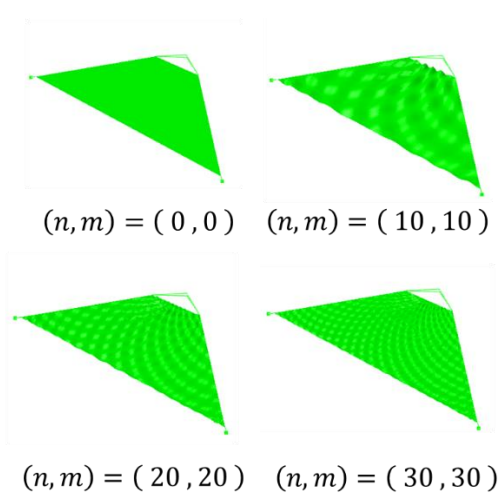


図 3.3 「C) 膜のうねり」を考慮した解析モデル

Step1 の張力の影響を加味したものを加えた図である。横軸・縦軸は図 4.1 と同様にスピレート [rpm]、2.3.で示した方法で評価した剛性 [1/m] である。4.1.で述べたようにスピレートが低いとき、面外変形を考慮したモデルは変形を考慮しないモデルより剛性の値は大きい。しかし、Step1 で与える遠心力のスピレートが大きくなるにつれて面外変形を考慮したモデルの剛性は変形を仮定しないモデルの値に漸近していく。このことから、面外変形の膜面剛性への影響は膜面に加わる張力の値が小さいときに大きく影響し、膜面に加わる張力が大きい場合は幾何剛性が支配的になることが分かった。

しかしながら図 4.1 において例えばスピレートが 1 rpm のとき、面外変形を考慮したモデルの剛性は、面外変形を考慮しないモデルに比べて、A)折りぐせによる効果が 0.91 倍、B)端面処理テープの変形の効果が 0.69 倍、C)膜のうねりの効果 $(n, m) = (20, 20)$, h_{nm} :面積増加 5%)が 0.73 倍と、面外変形を仮定しないモデルに比べて剛性の値が小さくなっている。面外変形の効果に幾何剛性が加わった場合、膜面の剛性はさらに大きくなる

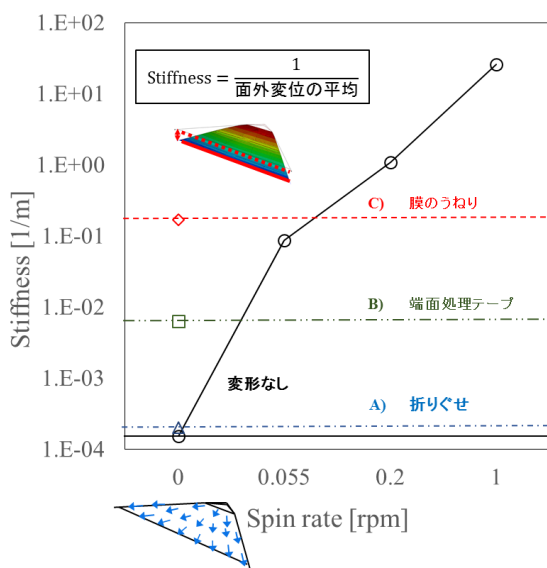


図 4.1 張力と剛性の関係
(膜の面外変形の影響)

と考えられるが、これは剛性を先端で評価しているため、面外変形を加えること外力に対する膜の変形状も変化していることが大きく影響していると考えられる。

4.3.膜のうねりの振幅・周期の影響

膜のうねりについて振幅・周期の変化させた結果を示す。図 4.3.は膜のうねりの周期 $(n, m) = (30, 30)$ のときの振幅 h_{nm} が面外変位を与えたことによる面積増加が 2.5%, 5%, 10% となるように変化させものである。周期を一定としたとき、張力の大きさに関係なく、面外変形の振幅が大きいものほど剛性の値も大きくなっている。

図 4.4.は膜の振幅 h_{nm} が面外変位を与えたことによる面積増加が 5% のときにうねりの周期 (n, m) を $(10, 10)$, $(20, 20)$, $(30, 30)$ と変化させた場合の結果である。面積増加を一定にしてうねりの周期を変化させると、負荷された張力が小さいときは周波数が大きいものほど剛性は大きい、負荷された張力が大きい場合には周波数が大きいほど剛性が小さくなる傾向が見られた。

膜の面積増加が大きいほど膜の面外剛性が大

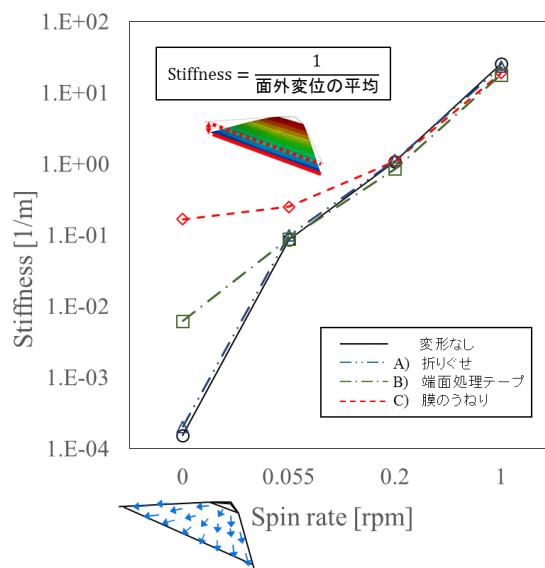


図 4.2 張力と剛性の関係
(面外変形の影響と幾何剛性の比較)

きいのは、振幅が大きくなったことによる膜の断面二次モーメント増加が影響していると考えられる。しかし、膜の周期の違いによる剛性の変化では、遠心力によって付加された張力が大きいときと小さいときで剛性への影響の大きさが逆になっている。これは、膜のうねりが膜面に蓄えられる歪エネルギーの大きさに影響を与えているためだと考えられ、今後更なる検討を行う。

4.4. 考察

上記の解析によって、ソーラーセイルのような大規模な膜面構造物において、膜の面外変形は膜に付加された張力が小さいときに面外剛性に顕著に影響が出ることが分かった。また、折りぐせや端面処理テープの湾曲の影響のような、膜の一部が変形することにより、その部分の剛性が増加する効果より、膜全体がうねることで膜面の剛性が大きく増加することが分かった。膜面全体のうねりの影響が大きいということは、将来の大型膜面展開構造物において膜面の面外変形量を設計することで膜面剛性を設計できる可能性がある。

本研究では、計算負荷小さくし、膜面変形に関

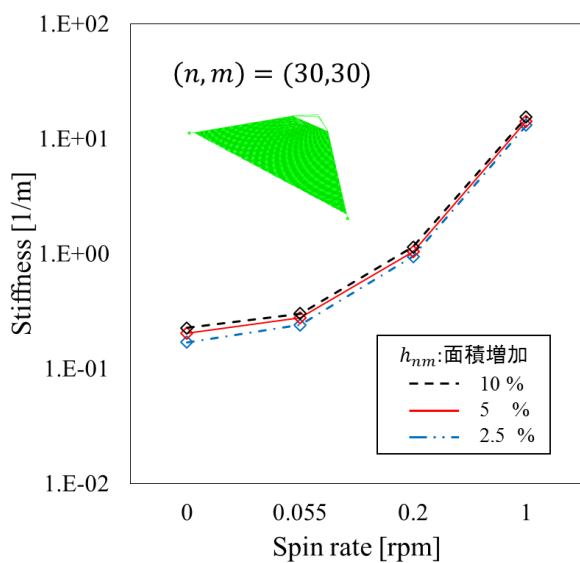


図 4.3 張力と剛性の関係
(膜のうねりの振幅の影響)

する多くのパラメータで計算を行うために膜の面外変形を伴う解析では線形解析を用いた。解析の結果、膜面の変形を考慮した場合には、膜の剛性は著しく増大したので、膜面の変形を考慮した場合、線形解析でも膜面剛性を十分予測可能なことが示唆された。しかし、今後は非線形解析と比較することにより線形解析の精度を検証する必要がある。

また、膜面のうねりの周期の影響については、張力の大きさによって傾向が異なっており、更なる検討。考察が必要である。

5. 結論

IKAROS の膜面剛性の課題に起因して、大型膜面構造物において面外変形が膜の面外剛性へ与える影響を評価するため、シェル要素を用いた有限要素解析を行った。その結果、膜面に付加された張力が小さいとき、膜面全体がうねることによる効果が膜面剛性を著しく増加させていることが分かった。その影響は膜のうねりの周期、振幅に依存しており、将来の大型膜面展開構造物では膜面の面外変形量を適切に設計することの必要性を示した。

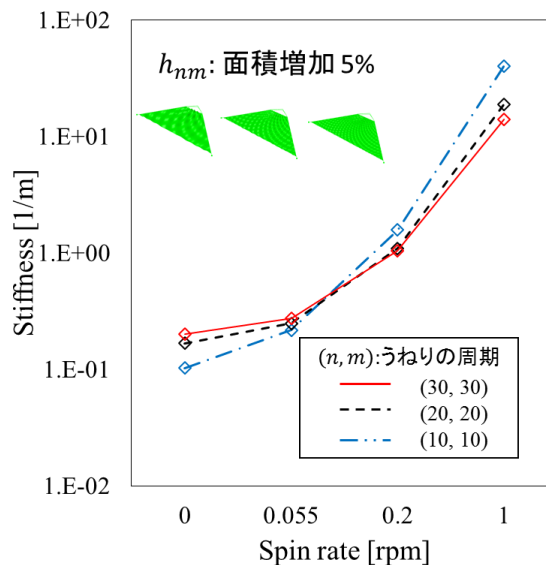


図 4.4 張力と剛性の関係
(膜のうねりの周期の影響)

謝辞

本研究を行うにあたり、JAXA/ISAS ソーラーセイルWGの構造部会の先生方のご支援を賜りました。ここに感謝の意を表します。

参考文献

- 1) Sawada, H., et al., : Mission Report on the Solar Power Sail Deployment Demonstration of IKAROS, AIAA Paper 2011-1887, April 2011.
- 2) Shirasawa, Y., et al., : A Study on Membrane Dynamics and Deformation of Solar Power Sail Demonstrator “IKAROS”, AIAA Paper 2012-1747, April 2012.
- 3) Papa, A., and Pellegrino, S., : Systematically Creased Thin-Film Membrane Structures, Journal of Spacecraft and Rockets, Vol. 45, No. 1, January–February 2008.
- 4) Nishizawa, T., et al., : Evaluation of Crease Effects on Out-of-plane Stiffness of Solar Sails, 2013-c-52, 29th International Symposium on Space Technology and Science June 2013.
- 5) 森治, 白澤洋次, IKAROSの後期運用 : 第57回宇宙科学連合講演会講演集, 2013.
- 6) ABAQUS 6.11 Japanese Documentation, SIMULA Inc., 2011.
- 7) Tsuda, Y., et al., : On-Orbit Sail Quality Evaluation Utilizing Attitude Dynamics of Spinner Solar Sailer IKAROS, AAS 12-211, 22nd AAS/AIAA Space Flight Mechanics Meeting, January-February 2012.
- 8) Tsuda, Y., et al., : Design Criteria of Spinning Solar Sail Surface Based on Attitude Dynamics, AIAA Paper 2012-4662, August 2012.