

論文 / 著書情報
Article / Book Information

題目(和文)	曲率を有する膜面デバイスを貼付した宇宙構造物用薄膜の形状評価
Title(English)	
著者(和文)	松下将典
Author(English)	Masanori Matsushita
出典(和文)	学位:博士(工学), 学位授与機関:東京工業大学, 報告番号:甲第10912号, 授与年月日:2018年6月30日, 学位の種別:課程博士, 審査員:松永 三郎,轟 章,古谷 寛,野田 篤司,中西 洋喜,坂本 啓
Citation(English)	Degree:Doctor (Engineering), Conferring organization: Tokyo Institute of Technology, Report number:甲第10912号, Conferred date:2018/6/30, Degree Type:Course doctor, Examiner:,,,,,
学位種別(和文)	博士論文
Type(English)	Doctoral Thesis

平成 30 年度 博士論文

曲率を有する膜面デバイスを貼付 した宇宙構造物用薄膜の形状評価

指導教員 松永 三郎 教授
野田 篤司 特定准教授

東京工業大学 大学院理工学研究科
機械宇宙システム専攻

松下 将典

目次

第 1 章	序論	1
1.1	研究背景	1
1.1.1	宇宙構造物としての膜要素	1
1.1.2	ソーラーセイル研究の歴史的背景	1
1.1.3	ソーラー電力セイル実証機 IKAROS	2
1.1.3.1	概要	2
1.1.3.2	運用で確認された膜構造の課題	5
1.1.4	ソーラー電力セイル探査機 OKEANOS	7
1.1.5	膜面デバイスのような付属物を有する膜に関する既往研究	9
1.1.5.1	面外変形に関する既往研究	9
1.1.5.2	振動特性に関する既往研究	9
1.1.5.3	膜形状を考慮した姿勢力学に関する既往研究	10
1.1.5.4	既往研究まとめ	10
1.2	研究目的	10
1.3	論文構成	11
第 2 章	地上実験用部分膜モデルを用いた曲率を有する膜面デバイス付き矩形膜の変形特性	13
2.1	緒言	13
2.2	曲率を有する膜面デバイスを貼付した矩形膜の地上実験用部分膜モデル	14
2.2.1	膜面デバイスに曲率が生じる原因	15
2.2.1.1	曲率を有する膜面デバイスのモデリング	15
2.3	有限要素解析の方法	16
2.3.1	有限要素モデル	16
2.4	形状測定実験方法	19
2.4.1	実験モデル	20

	2.4.2 膜引張治具と膜固定方法	20
	2.4.3 3D スキャナ	21
2.5	解析結果・実験結果の比較	21
2.6	解析結果・実験結果の線形理論解との比較	28
2.7	結言	29
第 3 章	地上実験用部分膜モデルを用いた曲率を有する膜面デバイス付き矩形膜の振動特性	31
3.1	緒言	31
3.2	有限要素解析方法	31
	3.2.1 概要	31
	3.2.2 有限要素モデル	32
3.3	振動実験方法	33
	3.3.1 概要	33
	3.3.2 実験モデル	35
	3.3.3 加振方法	35
	3.3.4 測定方法	36
3.4	解析結果	36
	3.4.1 静解析による膜形状	36
	3.4.2 固有値解析による固有特性	37
3.5	実験結果	39
	3.5.1 加振振動数と変位の関係および共振振動数と固有振動数の対応	39
	3.5.2 張力と共振振動数の関係	41
3.6	結言	43
第 4 章	軌道上膜モデルを用いた曲率を有する膜面デバイス付き膜の変形特性	45
4.1	緒言	45
4.2	膜面デバイス単体の変形特性に与える影響	45
	4.2.1 曲率を有する膜面デバイス付き円形膜の変形	46
	4.2.2 曲率を有する膜面デバイス付き正方形膜の変形	48
	4.2.2.1 膜面デバイスの向きのパラメータ解析	50
	4.2.2.2 膜面デバイスの位置のパラメータ解析	51
	4.2.2.3 膜面デバイスのアスペクト比のパラメータ解析	53
	4.2.3 曲率を有する膜面デバイス付き正五角形膜と正六角形膜の変形	54
	4.2.4 曲率を有する膜面デバイス付き正三角形膜の変形	57

	4.2.4.1	膜面デバイスの向きのパラメータ解析	58
	4.2.5	曲率を有する膜面デバイス付き台形膜の変形	59
	4.2.5.1	膜面デバイスの向きのパラメータ解析	60
	4.2.5.2	膜面デバイスの位置のパラメータ解析	61
4.3		膜面デバイス 2 枚が変形特性に与える影響	62
	4.3.1	概要	62
	4.3.2	曲率を有する膜面デバイス 2 枚の位置が正方形膜の変形特性に与える 影響	63
4.4		結言	70
第 5 章		軌道上膜モデルを複数結合した曲率を有する膜面デバイス付きソーラーセ イル膜全体の変形特性	73
	5.1	諸言	73
	5.2	セイル全体の解析モデル	73
	5.3	変形形状の評価指標	75
	5.3.1	面外剛性	75
	5.3.2	太陽輻射圧トルク	75
	5.3.2.1	幾何学的遮蔽効果と多重反射の無視	76
	5.3.2.2	表面の三角形分割による平面近似	77
	5.3.2.3	太陽輻射圧モデル	77
	5.3.2.4	太陽入射光の単位方向ベクトル	78
	5.3.2.5	光学特性値	78
	5.4	セイル全体の変形メカニズム	79
	5.5	膜面デバイスの向きのパラメータ解析	81
	5.6	膜面デバイスの位置のパラメータ解析	87
	5.7	膜面デバイス (大) の向きのパラメータ解析	94
	5.8	膜面デバイス (大) の位置のパラメータ解析	102
	5.8.1	膜面デバイスの曲率で周方向にたわむ場合 ($\theta = 0^\circ$)	102
	5.8.2	膜面デバイスの曲率で半径方向にたわむ場合 ($\theta = 90^\circ$)	110
	5.9	ソーラーセイル膜全体の固有値解析	118
	5.10	ソーラーセイルにおける膜面デバイス配置設計への有効な方針	119
	5.11	結言	120
第 6 章		結論	121
	6.1	結論	121

6.2	今後の課題	122
付録 A	実験の成否まとめ	129
	研究業績	133
	謝辞	139

目次

1.1	軌道上の IKAROS	2
1.2	IKAROS 膜の構成	4
1.3	IKAROS の膜展開シーケンス	5
1.4	軌道上画像からの IKAROS 膜形状推定結果	6
1.5	IKAROS の膜形状 (1.0, 0.055 rpm). 左:打上げ前の数値解析, 右:軌道上画像	7
1.6	ソーラー電力セイル探査機 OKEANOS	8
1.7	OKEANOS 膜の構成案	8
2.1	曲率を有する膜面デバイス付き矩形膜の地上実験用部分膜モデル	14
2.2	温度変化により曲率が生じるバイメタル	15
2.3	曲率を有する膜面デバイス付き膜の有限要素モデル	19
2.4	形状測定実験装置の構成	19
2.5	形状測定実験装置の外観. 手前左は CCD カメラ, 手前右はプロジェクタ. . .	20
2.6	張力 9.8 mN での面外形状コンター図. (c) 欠損部分は太陽電池での鏡面反射 が原因. 膜中央横線はデータ処理による上半分と下半分の不連続境界. . . .	22
2.7	張力 98 mN での面外形状コンター図. (c) 欠損部分は太陽電池での鏡面反射 が原因.	22
2.8	張力 980 mN での面外形状コンター図. (c) 膜中央横線はデータ処理による上 半分と下半分の不連続境界.	23
2.9	張力 9800 mN での面外形状コンター図. (c) 膜中央横線はデータ処理による 上半分と下半分の不連続境界.	23
2.10	反りのない膜面デバイス付き膜の実験セットアップ. 治具に膜を取り付けて 張力を加え, 膜形状をプロジェクタ・カメラで構成される 3D スキャナーで測 定する.	24
2.11	張力 9800 mN を付加した反りのない膜面デバイス付き膜の形状測定結果. ポ リイミド膜 (100 × 300 mm, t10 μm) 中心に PET(30 × 30 mm, t0.5 mm) を貼付.	24

2.12	張力 9.8 mN での中央横断面. 実験の欠損部は鏡面反射が原因.	25
2.13	張力 98 mN での中央横断面. 実験の欠損部は鏡面反射が原因.	26
2.14	張力 980 mN での中央横断面. 実験の欠損部は鏡面反射が原因.	27
2.15	張力 9800 mN での中央横断面. 実験の欠損部は鏡面反射が原因. 解析の-15 mm < x < 15 mm 付近は膜面デバイスと膜の中立面が現れているため 2 重に見える.	28
2.16	張力 9800 mN での面外形状コンター図. (a), (b) は再掲.	29
2.17	張力と面外変形量のピーク・ピーク値の関係.	29
3.1	曲率を有する膜面デバイス付き膜の有限要素モデル	32
3.2	振動実験装置の構成	34
3.3	真空槽内の実験装置の外観	35
3.4	静解析結果：膜 3 種の張力毎の形状. z は面外方向の位置.	37
3.5	固有値解析結果：膜 3 種の張力毎の有効質量比（面外方向）最大のモード形状. コンターは最大変位を 1 として規準化.	38
3.6	固有値解析結果：膜 3 種の張力と有効質量比（面外方向）最大の固有振動数の関係	39
3.7	実験結果：正弦波対数掃引（1 → 150 Hz, 1.5 oct/min）による張力 255 mN の曲率を有する膜面デバイス付き膜の試料 #1 の加振振動数と変位の関係. 範囲外の 1~20, 60~150 Hz に共振が無いことは確認.	40
3.8	固有値解析結果：曲率を有する膜面デバイス付き膜の張力 255mN での振動モード. 青字は図 3.7 の共振振動数に近い固有振動数. 2 次, 9 次モードは有効質量比がそれぞれ 1, 2 番目に大きい. コンターは最大変位を 1 として規準化.	41
3.9	実験・解析結果：曲率を有する膜面デバイス付き膜・平膜の張力と共振振動数の関係. # 1, 2, 3 は曲率を有する膜面デバイス付き膜の 3 試料. # 4, 5, 6 は平膜の 3 試料.	42
4.1	曲率を有する膜面デバイス付き円形膜 (自由端) の解析モデル	47
4.2	曲率を有する膜面デバイス付き円形膜 (自由端) の解析結果	48
4.3	曲率を有する膜面デバイス付き正方形膜 (自由端) の解析モデル	49
4.4	曲率を有する膜面デバイス付き正方形膜 (自由端) の解析結果	50
4.5	正方形膜 (自由端) 上の曲率を有する膜面デバイスを回転させた解析結果	51
4.6	曲率を有する膜面デバイス単体が貼付された正方形膜 (自由端) の解析モデル	52

4.7	曲率を有する膜面デバイス単体付き正方形膜 (自由端) の膜面デバイスの配置を変えた解析結果による形状. (x, y) は移動させた膜面デバイスの中心位置 (単位 : mm).	53
4.8	正方形膜 (自由端) 上の曲率を有する膜面デバイスのアスペクト比を変化させた解析結果	54
4.9	曲率を有する膜面デバイス付き正五角形膜 (自由端) の解析モデル	55
4.10	曲率を有する膜面デバイス付き正六角形膜 (自由端) の解析モデル	55
4.11	曲率を有する膜面デバイス付き正五角形膜 (自由端) の解析結果	56
4.12	曲率を有する膜面デバイス付き正六角形膜 (自由端) の解析結果	57
4.13	曲率を有する膜面デバイス付き正三角形膜 (自由端) の解析モデル	58
4.14	正三角形膜 (自由端) 上の曲率を有する膜面デバイスを回転させた解析結果	59
4.15	曲率を有する膜面デバイス付き台形膜 (自由端) の解析モデル	59
4.16	台形膜 (自由端) 上の曲率を有する膜面デバイスを回転させた解析結果	60
4.17	直角二等辺三角形膜 (自由端) 上の曲率を有する膜面デバイスを回転させた解析結果	61
4.18	曲率を有する膜面デバイス単体付き台形膜の解析での座標系と膜面デバイス位置の定義	61
4.19	曲率を有する膜面デバイス単体付き台形膜の膜面デバイス位置のパラメータ解析結果による形状. (x, y) は移動させた膜面デバイスの中心位置 (単位 : mm).	62
4.20	曲率を有する膜面デバイス 2 枚が貼付された正方形膜の解析モデル	63
4.21	曲率を有する膜面デバイス 2 枚付き正方形膜の 1 つの膜面デバイス配置を変えた解析結果による形状. 正方形膜中心に膜面デバイス単体が固定されており, もう 1 つの膜面デバイスの位置を変化させた. (x, y) は移動させた膜面デバイスの中心位置 (単位 : mm). $(x, y)=(0,0)$ は膜面デバイス同士が干渉するので空白とした.	64
4.22	中心に膜面デバイスが貼付された正方形膜と (x, y) の位置に膜面デバイスが貼付された正方形膜の形状の重ね合わせ. $(x, y)=(0,0)$ は空白.	65
4.23	決定係数 R^2 と膜面デバイス配置の関係. R^2 の計算は, 膜面デバイス 2 枚が膜中心および (x, y) 位置に貼付された正方形膜の面外位置 z を被説明変数とし, 同じ位置に対応するよう膜面デバイス単体が貼付された正方形膜それぞれ 2 枚の z の重ね合わせを説明変数とした. $(x, y)=(0,0)$ での R^2 は膜面デバイス同士が干渉するので計算できないが, 便宜的に $R^2 = 1$ としてプロットした.	67

4.24	膜面デバイスが貼付された正方形膜の面外変形と最大主応力 (面内) 分布 (x, y)= $(0, 0), (200, 200)$ (mm)	68
4.25	膜面デバイスが貼付された正方形膜の面外変形と最大主応力 (面内) 分布 (x, y)= $(0, 0), (200, 0)$ (mm)	69
4.26	膜面デバイスが貼付された正方形膜の面外変形と最大主応力 (面内) 分布 (x, y)= $(0, 0), (0, 200)$ (mm)	69
5.1	1 ペタルに 1 つの膜面デバイスが貼付されたソーラーセイル膜全体の解析モデル	74
5.2	微小平面に加わる太陽輻射圧トルク	76
5.3	四角形要素の重心を 1 頂点とした微小な三角形平面への分割	77
5.4	光学特性モデル	77
5.5	太陽入射光と理想平面の幾何関係	78
5.6	周方向へのシワ・たわみから生じるセイル全体の変形	80
5.7	半径方向へのシワ・たわみから生じるセイル全体の変形	80
5.8	膜面デバイスの向きを考慮した, 1 ペタルに 1 つの膜面デバイスが貼付されたソーラーセイル膜全体の解析モデル. θ は共通の値をとる.	81
5.9	膜面デバイスの向きを変えたソーラーセイル膜全体の解析結果 (太陽輻射圧無し). 角度は θ の値.	82
5.10	解析結果におけるセイル中心部のペタル同士の重なり	83
5.11	膜面デバイスの向きを変えたソーラーセイル膜全体の解析結果 (太陽輻射圧有り). 角度は θ の値.	83
5.12	ソーラーセイル膜全体の太陽輻射圧による面外変位 (RMS) と膜面デバイスの向き θ の関係. 図 5.9 から図 5.11 への面外変位をみている.	84
5.13	ソーラーセイル膜全体の面外剛性と膜面デバイスの向き θ の関係.	85
5.14	太陽輻射圧による変形前のソーラーセイル膜全体に生じる太陽輻射圧トルクと膜面デバイスの向き θ の関係.	86
5.15	太陽輻射圧による変形後のソーラーセイル膜全体に生じる太陽輻射圧トルクと膜面デバイスの向き θ の関係.	87
5.16	膜面デバイスの位置を考慮した, 1 ペタルに 1 つの膜面デバイスが貼付されたソーラーセイル膜全体の解析モデル. 各ペタルの座標系を基準として, 各膜面デバイスの位置 (x, y) は共通の値をとる.	88
5.17	膜面デバイスの位置 (x, y) (mm) を変えたソーラーセイル膜全体の解析結果 (太陽輻射圧無し)	89

5.18	膜面デバイスの位置 (x, y) (mm) を変えたソーラーセイル膜全体の解析結果 (太陽輻射圧有り)	90
5.19	ソーラーセイル膜全体の太陽輻射圧による面外変位 (RMS) と膜面デバイスの位置 (x, y) の関係. 図 5.17 から図 5.18 への面外変位をみている.	91
5.20	ソーラーセイル膜全体の面外剛性と膜面デバイスの位置 (x, y) の関係.	92
5.21	太陽輻射圧による変形前のソーラーセイル膜全体に生じる太陽輻射圧トルクと膜面デバイスの位置 (x, y) の関係.	93
5.22	太陽輻射圧による変形後のソーラーセイル膜全体に生じる太陽輻射圧トルクと膜面デバイスの位置 (x, y) の関係.	94
5.23	膜面デバイスの向きを考慮した, 1 ペタルに 1 つの膜面デバイス (大) が貼付されたソーラーセイル膜全体の解析モデル. θ は共通の値をとる.	95
5.24	膜面デバイス (大) の向きを変えたソーラーセイル膜全体の解析結果 (太陽輻射圧無し). 角度は θ の値. (d) は時間幅 1 の終了時に対向ペタル同士で干渉するほど変形したため, 便宜的に時間幅 0.75 での途中結果を示した.	96
5.25	膜面デバイス (大) の向きを変えたソーラーセイル膜全体の解析結果 (太陽輻射圧有り). 角度は θ の値. (d) はペタル同士が太陽輻射圧を付加する前にすでに干渉したので, 便宜的にモーメントを 65% に下げ, 時間幅 0.15 での途中結果を示す. (e) は時間幅 0.35 での途中結果だが, 最終的に (f) のように変形すると推測される.	97
5.26	ソーラーセイル膜全体の太陽輻射圧による面外変位 (RMS) と膜面デバイス (大) の向き θ の関係. 図 5.24 から図 5.25 への面外変位をみている.	98
5.27	ソーラーセイル膜全体の面外剛性と膜面デバイス (大) の向き θ の関係	99
5.28	太陽輻射圧による変形前のソーラーセイル膜全体に生じる太陽輻射圧トルクと膜面デバイス (大) の向き θ の関係.	100
5.29	太陽輻射圧による変形後のソーラーセイル膜全体に生じる太陽輻射圧トルクと膜面デバイス (大) の向き θ の関係.	101
5.30	膜面デバイス (大) の向きを変えたソーラーセイル膜全体の解析のひずみエネルギー履歴. 0~1 s : モーメント付加のステップ, 1~2 s : 太陽輻射圧付加のステップ.	102
5.31	膜面デバイスの位置を考慮した, 1 ペタルに 1 つの膜面デバイス (大) が貼付されたソーラーセイル膜全体の解析モデル ($\theta = 0^\circ$). 各ペタルの座標系を基準として, 各膜面デバイスの位置 (x, y) は共通の値をとる.	103
5.32	膜面デバイス (大) の位置 (x, y) (mm) を変えたソーラーセイル膜全体の解析結果 ($\theta = 0^\circ$, 太陽輻射圧無し). (a) は時間幅 1 の終了時に対向ペタル同士で干渉するほど変形したため, 便宜的に時間幅 0.75 での途中結果を示した.	104

5.33	膜面デバイス (大) の位置 (x, y) (mm) を変えたソーラーセイル膜全体の解析結果 ($\theta = 0^\circ$, 太陽輻射圧有り). (a) は太陽輻射圧印加前に干渉したので, 便宜的に印加前に干渉しないようにモーメントを低減させ, 印加した後の途中結果であり, 太陽輻射圧でペタルはより傾く傾向にあることを示している. (f) は時間幅 1 の終了時にペタル同士で干渉するほど変形したため, 便宜的に時間幅 0.55 での途中結果を示した.	105
5.34	ソーラーセイル膜全体の太陽輻射圧による面外変位 (RMS) と膜面デバイス (大) の位置 (x, y) の関係 ($\theta = 0^\circ$). 図 5.32 から図 5.33 への面外変位をみている.	106
5.35	ソーラーセイル膜全体の面外剛性と膜面デバイス (大) の位置 (x, y) の関係 ($\theta = 0^\circ$)	107
5.36	太陽輻射圧による変形前のソーラーセイル膜全体に生じる太陽輻射圧トルクと膜面デバイス (大) の位置 (x, y) の関係 ($\theta = 0^\circ$)	108
5.37	太陽輻射圧による変形後のソーラーセイル膜全体に生じる太陽輻射圧トルクと膜面デバイス (大) の位置 (x, y) の関係 ($\theta = 0^\circ$)	109
5.38	膜面デバイス (大) の位置を変えたソーラーセイル膜全体の解析のひずみエネルギー履歴 ($\theta = 0^\circ$). 0~1 s : モーメント付加のステップ, 1~2 s : 太陽輻射圧付加のステップ.	110
5.39	膜面デバイスの位置を考慮した, 1 ペタルに 1 つの膜面デバイス (大) が貼付されたソーラーセイル膜全体の解析モデル ($\theta = 90^\circ$). 各ペタルの座標系を基準として, 各膜面デバイスの位置 (x, y) は共通の値をとる.	111
5.40	膜面デバイス (大) の位置 (x, y) (mm) を変えたソーラーセイル膜全体の解析結果 ($\theta = 90^\circ$, 太陽輻射圧無し)	112
5.41	膜面デバイス (大) の位置 (x, y) (mm) を変えたソーラーセイル膜全体の解析結果 ($\theta = 90^\circ$, 太陽輻射圧有り)	113
5.42	ソーラーセイル膜全体の太陽輻射圧による面外変位 (RMS) と膜面デバイス (大) の位置 (x, y) の関係 ($\theta = 90^\circ$). 図 5.40 から図 5.41 への面外変位をみている.	114
5.43	ソーラーセイル膜全体の面外剛性と膜面デバイス (大) の位置 (x, y) の関係 ($\theta = 90^\circ$)	115
5.44	太陽輻射圧による変形前のソーラーセイル膜全体に生じる太陽輻射圧トルクと膜面デバイス (大) の位置 (x, y) の関係 ($\theta = 90^\circ$)	116
5.45	太陽輻射圧による変形後のソーラーセイル膜全体に生じる太陽輻射圧トルクと膜面デバイス (大) の位置 (x, y) の関係 ($\theta = 90^\circ$)	117

5.46	膜面デバイス (大) の位置を変えたソーラーセイル膜全体の解析のひずみエネルギー履歴 ($\theta = 90^\circ$). 0~1 s : モーメント付加のステップ, 1~2 s : 太陽輻射圧付加のステップ.	118
5.47	モード次数と有効質量比 (面外) の関係 ($\vec{S} = [0, 0, -1]^T$)	119
5.48	モード次数と有効質量比 (面外) の関係 ($\vec{S} = [1, 0, -1]^T$)	119

表目次

1.1	IKAROS 主要諸元	3
2.1	膜 (PET, Lumirror X42G) の材料特性・寸法	17
2.2	膜面デバイス (a-Si 太陽電池) の材料特性・寸法	17
3.1	解析条件	32
3.2	振動実験条件	33
3.3	実験・解析結果：反った膜面デバイス付き膜の張力と共振振動数の関係. SD は標準偏差. 解析は有効質量比 (面外方向) 最大の固有振動数.	42
3.4	実験・解析結果：平膜の張力と共振振動数の関係. SD は標準偏差. 解析は有 効質量比 (面外方向) 最大の固有振動数.	43
4.1	決定係数 R^2 と膜面デバイス配置の関係	67
5.1	太陽輻射圧の単位方向ベクトル \vec{S} と有効質量比 (面外) 最大の固有振動数の関係	119
A.1	実施した実験の成否まとめ	129
A.2	予備実験における張力 9.8, 98 mN での反った膜面デバイス付き膜と平膜の共 振振動数と固有値解析による有効質量比 (面外) 最大の固有振動数. 実験 1 の 反った膜面デバイス付き膜の張力 9.8 mN の共振振動数 13 Hz は加振器の共 振振動数が卓越した可能性が高い.	131

第 1 章

序論

1.1 研究背景

1.1.1 宇宙構造物としての膜要素

宇宙開発が発展するにつれ、軽量・高収納な大型宇宙構造物への需要が高まっている。膜・ケーブルを構成要素に用いるゴッサマー構造物 (Gossamer Structure)[1] によって、そのような宇宙構造物は実現可能となり、1957 年の世界初の人工衛星スプートニク 1 号の打上げに時をおかず、1960 年の気球型人工衛星 Echo 1 打上げ [2] から軌道上実証されてきた。宇宙用膜は高強度かつ宇宙環境に耐える材料によって製作可能となり、厚さ μm オーダーと非常に薄く、折りたためるので収納性に優れる。その一方で、曲げ剛性が小さくて柔軟なため、形状・振動の制御が困難になる。このような膜構造の主な用途としては、ソーラーセイル・宇宙太陽光発電システム・薄膜太陽電池アレイ・サンシールド・膜面アンテナ・望遠鏡の鏡面が挙げられる。本論文では、ソーラーセイルの膜構造を主な研究対象とする。

1.1.2 ソーラーセイル研究の歴史的背景

ソーラーセイルとは、太陽輻射圧を膜に受けて推進力に変換する推進システムである。太陽輻射圧が推進力を生むという物理現象の科学研究は 17 世紀に始まる。その工学的応用であるソーラーセイルの概念は、1921 年に Tsiolkovsky が発表している [3]。1924 年には Tsander が理論的に発展させた論文を発表した [4]。その後、30 年以上に渡って、ソーラーセイルの研究は停滞したが、1958 年に Garwin は太陽系内での宇宙機推進におけるソーラーセイルの優位性と商用膜材をセイルに利用し得ることを発表 [5] し、これがソーラーセイル研究の後押しとなった。そして 20 世紀後半以降、ソーラーセイル宇宙機のミッションや技術要求、動力学・構造力学等に関する理論と実験で多くの研究がなされている。

1.1.3 ソーラー電力セイル実証機 IKAROS

本項では、ソーラー電力セイル実証機 IKAROS の概要を説明し、本論文が取り組む課題に関連する IKAROS の運用で確認された膜構造の想定外の性質を述べる。

1.1.3.1 概要

2010 年、宇宙航空研究開発機構 (JAXA) のソーラー電力セイル実証機 IKAROS[6] (図 1.1[7]) が打上げられた。ソーラー電力セイルという名称は、セイル膜に薄膜太陽電池セルを貼付して電力供給する特徴に由来する。表 1.1 に主要諸元 [8] を示す。IKAROS はソーラーセイルを初めて実証した宇宙機であり、具体的には下記の技術を主として軌道上実証した [9]。

- 遠心力方式による膜展開・展張
- 膜に貼付した薄膜太陽電池セルによる発電
- 太陽輻射圧による加速・航行

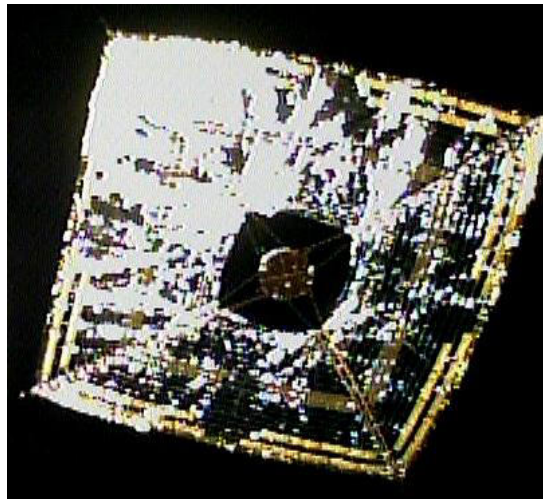


図 1.1: 軌道上の IKAROS

表 1.1: IKAROS 主要諸元

打上げ日	2010 年 5 月 21 日
形状	本体： $\phi 1.6 \text{ m} \times 0.8 \text{ m}$ 膜面： $14 \text{ m} \times 14 \text{ m}$
重量	ウェット (総重量)：310 kg ドライ：290 kg 膜：13 kg 先端マス (全 4 個)：2 kg
軌道	金星遷移軌道
姿勢制御方式	スピン制御

IKAROS の膜構成を図 1.2[10] に示す。軽量で大きな推進力を得るため、厚さ $7.5 \mu\text{m}$ 、面積 $14 \text{ m} \times 14 \text{ m}$ の正方形である。その正方形膜は台形ペタル 4 枚からなる。隣接するペタルは斜辺のブリッジと呼ばれる部分で接続される。その接続においては、周方向に張力を発生させないよう、間隔をあけて正方形膜の周長に余裕をもたせている。これは、正方形膜の 4 隅につながる先端マスに加わる遠心力を主要因とする半径方向の張力で展張することを意図している。先端マスは 1 個 0.5 kg の重りであり、膜に通された 16 本のテザーを介して宇宙機本体までつながる。膜には膜面デバイスと総称される薄膜太陽電池・姿勢制御用液晶デバイス・ダストカウンタが貼付される。薄膜太陽電池 (約 $300 \text{ mm} \times 250 \text{ mm}$) は 1 ペタルで 36 枚、膜全体で 144 枚が正方形に搭載される。液晶デバイスは 1 ペタルで 18 枚、膜全体で 72 枚が外周部に配置される。ダストカウンタは各ペタルで 1 箇所に配置される。その他に電力ケーブル・亀裂進展防止テープが貼付されている。

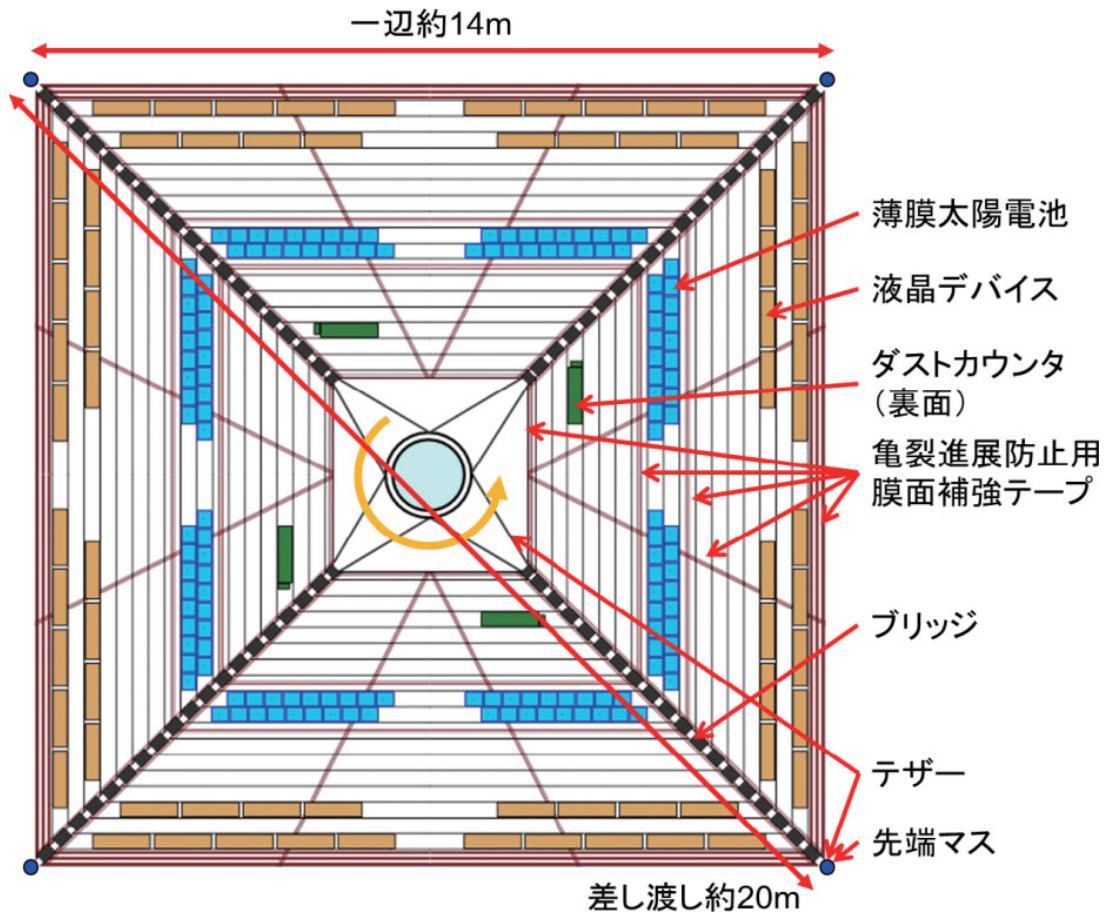


図 1.2: IKAROS 膜の構成

ソーラーセイルの膜展開・展張方式は主に2種類あり、宇宙機のスピンによる遠心力方式およびブーム（支柱）伸展方式がある。IKAROS が採用した遠心力方式の利点は、ブーム伸展方式と比較して、軽量かつブーム座屈の制約を受けないため、膜の大型化に適用しやすいことである。その一方で、欠点はスピンレートに依存する面外剛性が比較的低く、太陽光圧による面外変形やスラスト噴射などの姿勢変更で生じる振動が大きくなることである。

IKAROS の膜展開シーケンスを図 1.3[9] に示す。シーケンスは先端マス分離、1次展開、2次展開の順に進行する。その詳細は下記の通りである [9]。

先端マス分離 ロケット分離後、先端マス分離機構を動作させてロンチロック（固定具）を外し、先端マス4個を同時に分離する。

1次展開 相対回転機構で膜を保持する回転ガイドを動かして、遠心力によって膜を徐々に伸展させる。1次展開完了後、膜は十字形状になる。

2次展開 4本の回転ガイドを同時に展開し、膜の拘束を解く。膜が一挙に展開し、減衰振動しながら展張状態となる。



図 1.3: IKAROS の膜展開シーケンス

1.1.3.2 運用で確認された膜構造の課題

IKAROS の運用において、展張状態の膜は、想定外の形状・太陽輻射圧トルク・太陽輻射圧に対する面外剛性を示した。これらは、今後のソーラー電力セイルの膜構造設計における課題である。

図 1.4 に分離カメラ画像からの Shape-from-Shading による膜形状推定結果 [11] を示す。膜は 2 次展開から 10 日後であり、1.0 rpm で回転していた。推定結果より、膜は波打っており、かつ、太陽輻射圧に抗して太陽側に最大 60 cm 程度たわんだ逆ピラミッド形状であることが判明した。この太陽側にたわんだ形状は姿勢変動データからも示唆されている。具体的には、面外変形によりスピン軸が太陽輻射圧のつり合い方向まわりに円運動しながら近づく渦巻き運動が確認され、その測定からたわみを推定した [12, 13]。また、膜のねじれにより、スピンドアウンを変化させる面外方向のトルク(風車トルク)が意図せず発生した。この風車トルクは、スピンドアウン制御のスラスタ燃料を浪費させ、燃料浪費は宇宙機寿命の短縮につながるため、運用で大きな問題となった。風車トルクを低減または積極的に利用することが考えられるが、少なくともトルクの量を見積もり、正負どちらの方向に作用するかを意図通りに設計することは重要である。

図 1.5 にスピンドアウン 1.0 rpm, 0.055 rpm それぞれでの膜形状の打ち上げ前解析 [14] に基づくコンピュータグラフィック画像と IKAROS 本体搭載カメラ画像での比較を示す [15, 16]。

打ち上げ前の多粒子法による解析では、1.0 rpm だと膜は平坦だが、極めて小さいスピンドルの 0.055 rpm だと太陽輻射圧により膜は反太陽側の下方にたわむ。一方、軌道上運用では、1.0 rpm, 0.055 rpm とともに膜は波打っており、0.055 rpm では下方へのたわみはわずかで形状を維持している。加えて、軌道上画像から、展張状態を意図したテザーにゆるみを確認できる。以上の結果は、何らかの原因で膜が面外変形し、面外変形がテザーをゆるませ、なおかつ、膜の面外剛性を想定以上に高くしたことを示唆する。この高い面外剛性が運用で問題を生じた訳ではなく、むしろ積極的に利用できる可能性があるが、面外剛性や膜とテザーの張力状態を予測できなかったことは今後のソーラー電力セイルの膜構造設計における課題となった。

展張後の膜形状は、膜面デバイス、遠心力、テザー、ハーネス、折り目、しわ、寸法、材料物性等に依存する。後述の既往研究の有限要素解析により、IKAROS では、曲率を有する膜面デバイスが変形および面外剛性の増大を支配的に引き起こしたことが示唆されている。したがって、上述の課題に対しては、曲率を有する膜面デバイスに着目することが重要である。

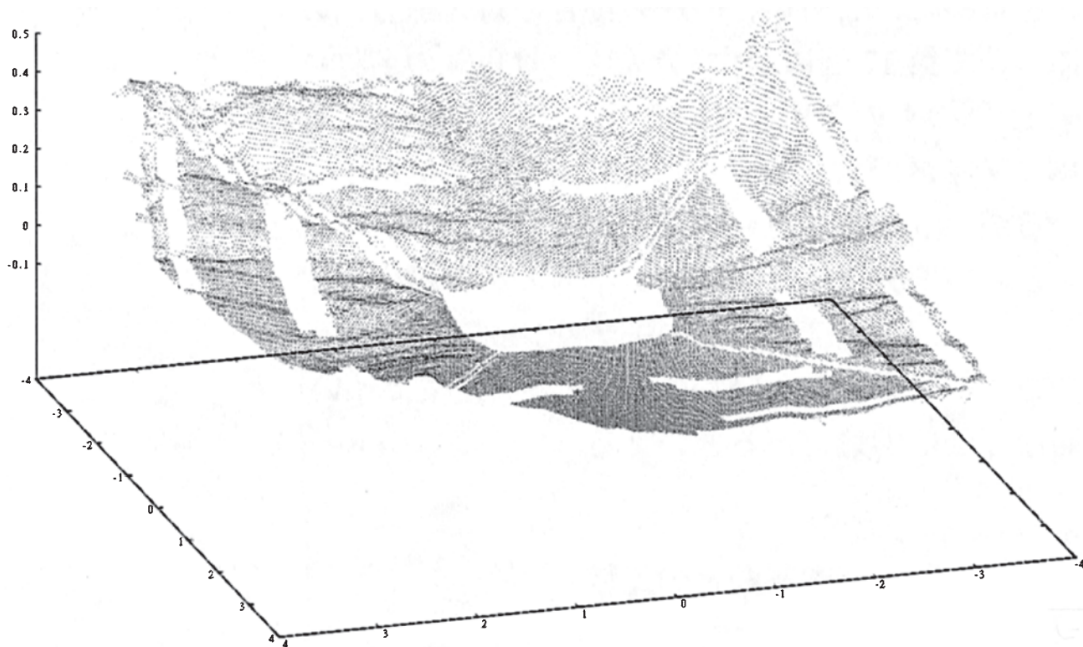


図 1.4: 軌道上画像からの IKAROS 膜形状推定結果

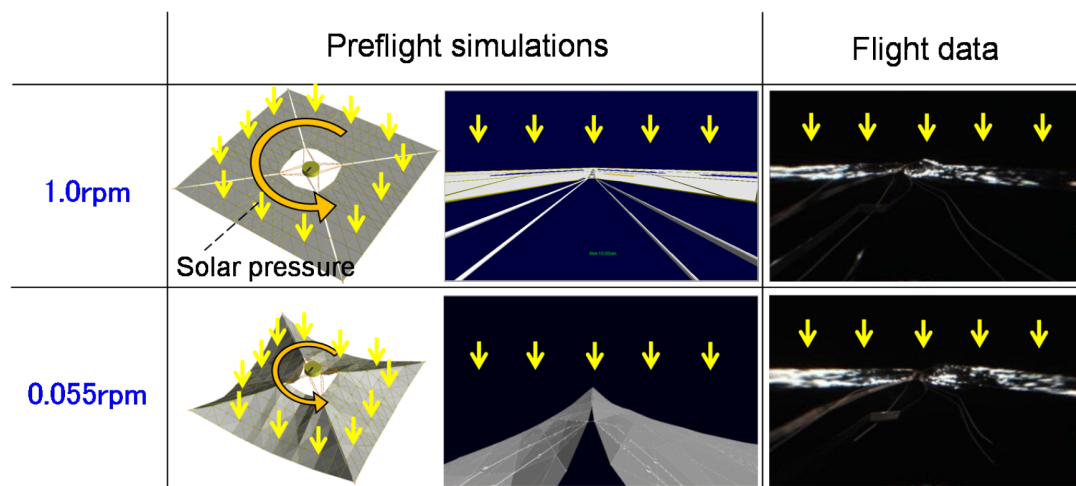


図 1.5: IKAROS の膜形状 (1.0, 0.055 rpm).

左:打上げ前の数値解析, 右:軌道上画像

1.1.4 ソーラー電力セイル探査機 OKEANOS

IKAROS の次世代機として、木星トロヤ群小惑星探査計画に向けたソーラー電力セイル探査機 OKEANOS(図 1.6) が検討されている [17, 18]. 推進にはイオンエンジンを主に使用し、木星近傍で大電力 (5 kW@5.2 AU) が要求されるため、IKAROS の設計を踏襲しつつも、膜は約 50 m × 50 m に大型化し、薄膜太陽電池をほぼ全面に貼付する (図 1.7[19]). したがって、曲率を有する膜面デバイスが膜の形状・太陽輻射圧トルク・面外剛性に与える影響は IKAROS よりも大きく、膜構造設計が宇宙機システム全体での重要な課題となる。薄膜太陽電池の配置には設計自由度が残っているが、IKAROS で確認された課題を解消するための設計指針は明らかではない。なお、膜外周には液晶デバイス、各ペタル中央部には座屈防止フィルム、ペタルの宇宙機本体側付近にはダストカウンタ ALDN-2 が搭載され、ペタル中央部に電気的な膜面デバイスが貼付されていないのは、膜収納時にそこで折り返されるからである。

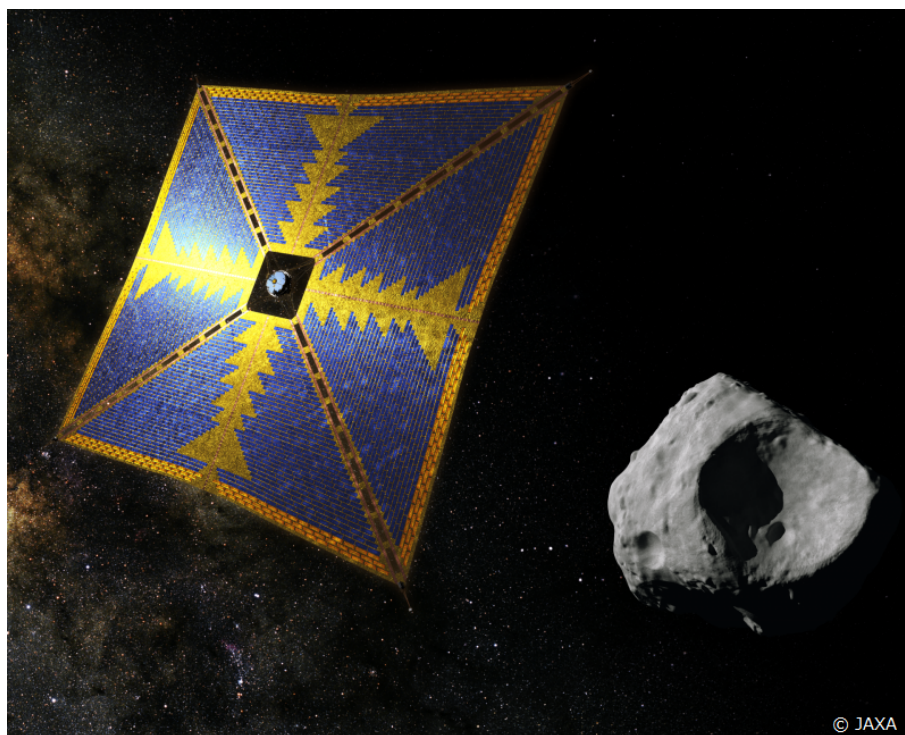


図 1.6: ソーラー電力セイル探査機 OKEANOS

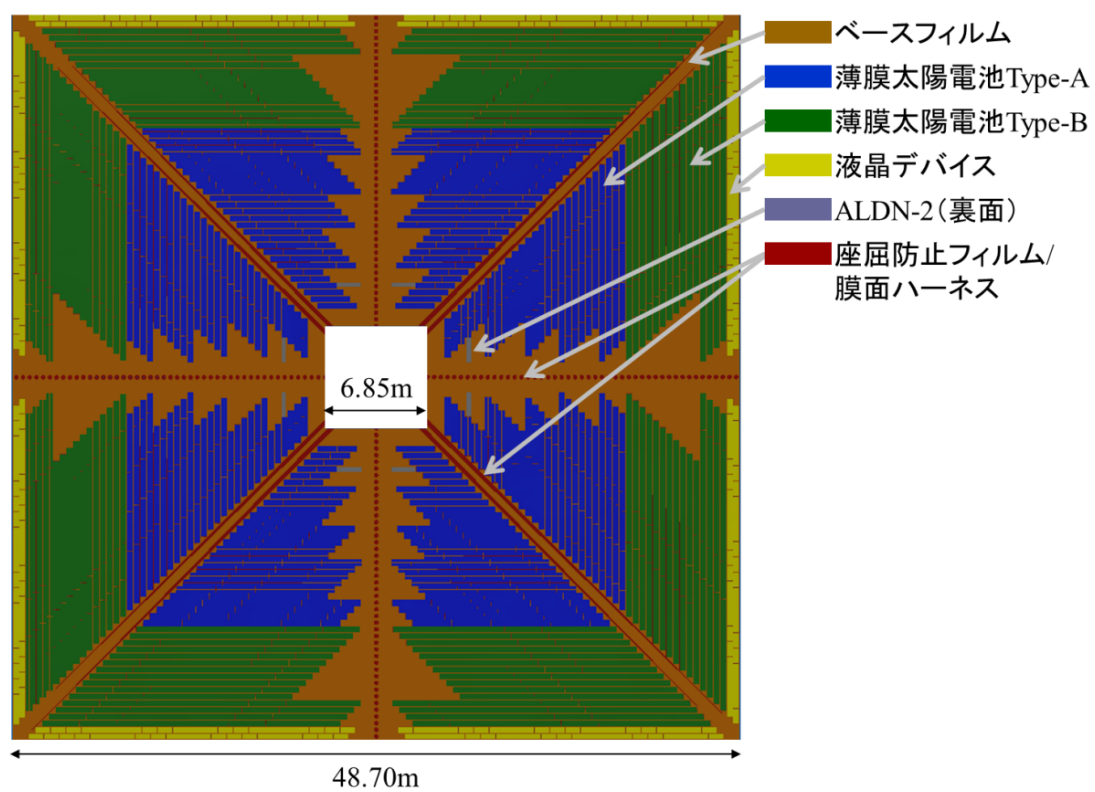


図 1.7: OKEANOS 膜の構成案

1.1.5 膜面デバイスのような付属物を有する膜に関する既往研究

1.1.3 項では、曲率を有する膜面デバイスが膜変形、風車トルク、面外剛性に影響するという課題を示した。本項では、上記の課題に関係する既往研究として、面外変形に関する既往研究、膜形状を考慮した姿勢動力学に関する既往研究、振動特性に関する既往研究を紹介する。膜形状を考慮した姿勢動力学の既往研究は風車トルクに直接的に関係し、振動特性の既往研究は面外剛性に間接的に関係する。一般的に、平面状の薄膜に関する研究は盛んであるが、膜面デバイスのような付属物が貼付された膜に関する研究は少数で、特に曲率を有する膜面デバイスを貼付した膜は十分な検討がなされていない。

1.1.5.1 面外変形に関する既往研究

宇宙構造物に向けた、面外変形に関する研究は、Wong & Pellegrino[20–22] に代表されるように張力が付与された平膜を対象としたものが多く、現在も研究されているが、付属物を有する膜を対象とした研究は少数である。

1.1.3 節で述べた IKAROS の想定外の面外変形の原因解明のため、これまでに有限要素解析で IKAROS モデルに面外変形を再現させることが試みられてきた。陰解法を用いた幾何学的非線形静解析により、薄膜太陽電池セルの曲率が曲げ剛性の増大および変形モードの変化を生じさせた結果、面外剛性が増大し、太陽輻射圧による面外変形が減少したことが示唆された [16]。また、陽解法を用いた準静的な幾何学的非線形動解析により、薄膜太陽電池セルと液晶デバイスの曲率が、逆ピラミッド形状および高い面外剛性をもたらしたことが示唆された [7]。これらの解析では、膜面デバイスの曲率は曲げモーメントを対辺に付加して模擬しており、線形近似が含まれるが、その妥当性は実験的に検証されていない。また、膜面デバイス配置のパラメトリックな解析は詳細になされていないため、配置がセル全体の膜変形に与える影響の検討は不十分である。大型膜での解析のため、膜面デバイス近傍の局所的な膜変形は十分検討されていない。

その他、膜に貼付された薄膜アクチュエータによって形状を制御する研究がある。古谷らは一次元展開膜面の折り目近傍に貼り付けた分散配置圧電フィルムによる静的形状制御実験をした [23]。仙場らは熱可塑性形状記憶ポリマによる正方形膜の形状制御実験をした [24]。

1.1.5.2 振動特性に関する既往研究

振動特性の研究についても、平膜は解析および実験的に盛んに対象とされている [25–27] 一方、付属物のある膜を対象とした研究は少ない。橋本らは低音域での遮音性能に優れる地上用建材として、複数の錘を離散的に付加した膜を開発し、その遮音特性を数値解析・実験で明らかにした [28]。他方で、折り目の付いた宇宙用膜の振動特性については研究されている。西澤

らは IKAROS 膜を対象に折り目が膜の固有振動数に与える影響を有限要素解析で定量的に示し、遠心力が小さい場合、特定のモードで折り目が固有振動数の著しい増大に寄与することを明らかにした [29]. 奥泉は放射状にジグザグな折り目がついた回転円形膜を対象にスピンレートと固有振動数の関係を数値解析・地上実験で定量的に示した [30]. 岩佐と田中はシワ・折り目を含む膜の振動応答の空間分布特性を実験で明らかにした [31].

1.1.5.3 膜形状を考慮した姿勢力学に関する既往研究

ソーラーセイルの姿勢力学の研究は膜形状を理想的な平面として扱うこと [32] が多く、膜形状を考慮した研究では、形状は構造力学に基づくのではなく、単純にパラメータとして姿勢力学に取り込まれている [33]. 津田らは膜要素のねじれ角・たわみ角による太陽輻射圧トルクを考慮したソーラーセイルのシンプルな姿勢力学モデルを提案し、IKAROS の姿勢データに適用した [12]. このモデルは膜形状を構造力学的に考慮しておらず、ねじれ角・たわみ角のパラメータを姿勢データから推定する必要がある。したがって、反った膜面デバイスによる膜変形を構造力学的に考慮すれば、形状パラメータの初期推定値の精度が向上する可能性がある。

1.1.5.4 既往研究まとめ

有限要素解析によって IKAROS の膜変形の主原因は曲率を有する膜面デバイスと示唆されたことが現状であり、曲率を有する膜面デバイスによる膜変形、その変形が太陽輻射圧トルクや面外剛性に及ぼす影響は明らかではなく、曲率を有する膜面デバイスを貼付した膜の検討は不十分である。

1.2 研究目的

1.1.3 項, 1.1.5 項から導かれた膜構造の課題は以下のようにまとめられる。

1. 曲率を有する膜面デバイスによって膜が変形するが、どのような変形となるかは明らかではない。
2. 曲率を有する膜面デバイスによる膜変形が面外剛性に及ぼす影響は十分に検討されていない。
3. 曲率を有する膜面デバイスによる膜変形が太陽輻射圧トルクに及ぼす影響は十分に検討されていない。
4. ソーラーセイルにおける膜面デバイス配置の設計指針が明らかではない。

したがって、これらの課題解決に向けて、本研究の目的は以下のものである。

1. 曲率を有する膜面デバイスが膜変形に及ぼす影響を明らかにすること
2. 曲率を有する膜面デバイスによる膜変形が面外剛性に及ぼす影響を明らかにすること
3. 曲率を有する膜面デバイスによる膜変形が太陽輻射圧トルクに及ぼす影響を明らかにすること
4. ソーラーセイルにおける膜面デバイス配置の設計指針の確立に向けて有効な方針を示すこと

本研究の目的に対応する研究課題を以下に示す。

1. 曲率を有する膜面デバイス付き膜に対する有限要素解析手法を形状測定実験によって検証する (第 2 章).
2. 有限要素解析・形状測定実験によって、膜面デバイス近傍の局所的な膜の変形特性を明らかにする (第 2 章).
3. 有限要素解析手法のさらなる検証のため、変形後の解析結果を継承して固有値解析を行い、固有特性 (固有モード・固有振動数) を振動実験で検証する (第 3 章).
4. 固有値解析・振動実験によって、曲率を有する膜面デバイス付き膜の固有特性を明らかにする (第 3 章).
5. 有限要素解析を用いて、膜形状、膜面デバイスの配置等を変化させて、曲率を有する膜面デバイスによる膜の変形特性を明らかにする (第 4 章).
6. 有限要素解析を用いて、膜面デバイスの配置等を変化させて、曲率を有する膜面デバイスによるソーラーセイル全体の変形特性を明らかにし、変形と太陽輻射圧に対する面外剛性・太陽輻射圧トルクとの関係を明らかにする (第 5 章).
7. 以上の曲率を有する膜面デバイスによる膜の変形特性を考慮し、ソーラーセイルにおける膜面デバイス配置の設計指針の確立に向けて有効な方針を示す (第 5 章).

1.3 論文構成

本論文は、以下の 6 章から構成される。

第 1 章「序論」では、宇宙構造物としての膜要素を応用したソーラーセイルに着目し、ソーラー電力セイル IKAROS の軌道上実証実験で確認された大型薄膜構造の予想外の面外変形、面外剛性、太陽輻射圧トルクを取り上げた。それら力学的現象は曲率を有する膜面デバイスが大きく影響したと推測されているものの検討は不十分であることを指摘した上で、研究目的として曲率を有する膜面デバイスによる薄膜の面外変形、面外剛性、太陽輻射圧トルクへの影響を解明し、ソーラーセイルにおける膜面デバイス配置の設計指針の確立に向けた有効な方針を示すことを掲げた。

第2章「地上実験用部分膜モデルを用いた曲率を有する膜面デバイス付き矩形膜の変形特性」では、まず、地上実験用部分膜モデルとして、地上実験が容易にできるよう2辺を固定して、1軸張力で遠心力を模擬し、力のモーメントで膜面デバイスの曲率を模擬したスピン型ソーラーセイル膜の一部を切り出した矩形膜を示す。次に、静解析および準静的な動解析の2通りの幾何学的非線形有限要素解析を行い、3次元形状測定器を用いて部分膜モデルの供試体の形状測定実験を実施する。これにより、解析モデルの妥当性を示し、張力下での膜面デバイス近傍の膜変形特性を明らかにする。

第3章「地上実験用部分膜モデルを用いた曲率を有する膜面デバイス付き矩形膜の振動特性」では、前章の部分膜モデルを対象として、曲率を有する膜面デバイスが面外方向の固有モードの固有振動数に与える影響をみるため、曲率のない膜面デバイス付き膜や膜面デバイスの付いていない平膜と比較しながら、1軸張力下での面外変形後の固有値解析および真空槽内での振動実験を実施する。その結果として、解析モデルが妥当なことを確認するとともに、部分膜モデルに関する1軸張力と固有振動数の関係を明らかにする。

第4章「軌道上膜モデルを用いた曲率を有する膜面デバイス付き膜の変形特性」では、第2,3章で用いた解析モデルを拡張して複雑化させた軌道上膜モデルとして、ソーラーセイル膜を構成するペタル膜単体に相当する膜面デバイスの付いた自由境界膜を外力無しで扱い、曲率を有する膜面デバイスによる軌道上膜の変形特性を解明する。そのため、膜形状をソーラーセイルの代表的なものを主として幅広く正三角形、正方形、円形、台形等とし、膜面デバイスの枚数、位置、向きを変化させることで、それらによって生成される薄膜上のシワの生成形状パターンを整理する。また、膜面デバイス単体が貼付された場合の正方形膜の変形を比較して、膜面デバイス2枚が貼付された膜の変形形状を重ね合わせにより表せる膜面デバイス配置を特定する。

第5章「軌道上膜モデルを複数結合した曲率を有する膜面デバイス付きソーラーセイル膜全体の変形特性」では、前章の軌道上台形ペタル膜モデルを用いて、IKAROS および計画中の次期ソーラー電力セイル OKEANOS 同様に複数のペタル膜をブリッジで結合した構成を持つセイル膜全体に解析モデルを複雑化して、曲率を有する膜面デバイスによる膜変形への影響を解析する。膜面デバイスのサイズ、向き、位置をパラメータとし、太陽輻射圧が外力として作用するときの膜の面外変位および膜に生じる太陽輻射圧トルクの特に膜面法線方向成分を求めることで、全体形状を評価する。以上の解析結果から、ソーラーセイルにおける膜面デバイス配置の設計指針の確立に向けた有効な方針を示す。

第6章「結論」では、本論文の結論および今後の課題を示す。

第 2 章

地上実験用部分膜モデルを用いた曲率を有する膜面デバイス付き矩形膜の変形特性

2.1 緒言

本章では、曲率を有する膜面デバイス付き膜の変形特性を求めるため、まず、スピン型ソーラーセイルの一部分を切り出した膜を扱い、地上実験が容易にできるよう 2 辺を固定して、1 軸張力で遠心力を模擬し、力のモーメントで膜面デバイスの曲率を模擬した矩形の地上実験用部分膜モデルを示す。第 4,5 章では、部分膜モデルを複雑化させて、曲率を有する膜面デバイスを貼付した膜の形状を解析的に評価する。モーメントでの曲率の模擬には線形（微小変位）という近似が入るが、精度良く膜形状を計算できるかは先行研究でも実験的に未検証であり、地上実験と一致すれば軌道上の固定のない状態での膜形状解析にも一定の信頼性があると考えられる。次に、静解析および準静的な動解析の 2 通りの幾何学的非線形有限要素解析を行う。ここでは、静解析のモデルの妥当性検証のために動解析（準静的）と比較し、次章からは静解析のみ用いるが、展張後のソーラーセイルの形状解析において、静解析が未収束または膨大な時間がかかる場合、動解析は用いられるので、この比較は今後の動解析の利用に有益である。最後に、解析結果を部分膜モデルの供試体の 3 次元形状測定器を用いた形状測定実験と比較することで、解析モデルを検証するとともに、セイル全体の観点からは局所的といえる張力下の曲率を有する膜面デバイス近傍の膜形状を明らかにする。

2.2 曲率を有する膜面デバイスを貼付した矩形膜の地上実験用部分膜モデル

図 2.1 に曲率を有する膜面デバイス付き矩形膜の地上実験用部分膜モデルを示す。スピン型ソーラーセイルの一部分を切り出した膜を単純化して模擬している。このモデルをもとに、解析と実験それぞれのモデルを作成する。1.1.3 項で前述したように、曲率を有する膜面デバイスが形状に与える影響が支配的であると示唆されており、その影響を明らかにするため、その他の付属物は無視している。膜の中心に曲率を有する膜面デバイスが1枚貼付される。膜は遠心力またはブーム等の張力により、1軸張力状態にあると仮定し、膜上下辺に1軸張力を等分布で付加して単純化した。特に、IKAROS、OKEANOS のスピン型ソーラーセイルの膜面では、ブリッジで周長余裕をもって隣接するペタルが接続されるので、周方向応力が緩和される。したがって、遠心力による半径方向の張力が支配的になり、1軸張力状態にあるという仮定は妥当といえる。後章で示すように、膜面デバイスの反りの向きによっても形状は変化し、特に張力方向との関係は重要であるが、この地上実験用部分膜モデルでは張力方向に直交する向き(膜の左右辺に沿う方向)とした。

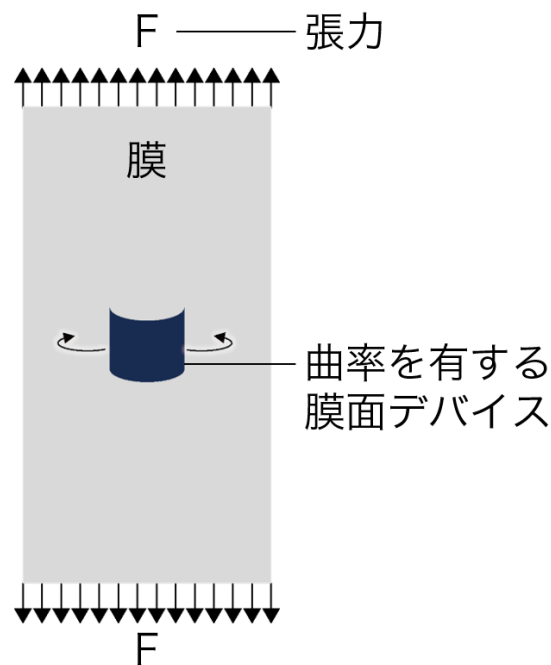


図 2.1: 曲率を有する膜面デバイス付き矩形膜の地上実験用部分膜モデル

2.2.1 膜面デバイスに曲率が生じる原因

製造時の熱応力などの内部応力により、膜面デバイスは一般に曲率を有する。膜面デバイスは熱膨張率の異なる多層膜で構成されており、隣り合う層同士が接合されている。温度変化すると、各層で伸縮が異なるため、各層の断面に垂直力が生じる。各層の力の作用線は同一直線上になく層厚によるオフセットをもつため、曲げモーメントが生じ、曲率が発生する。これは2種類以上の金属層で構成されるバイメタルが温度変化により反る現象と同じ原理である(図2.2)。その他、製造時の残留応力によっても膜面デバイスは曲率を有する。

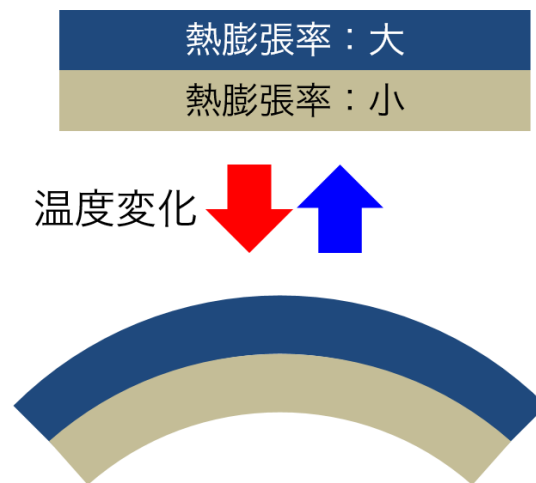


図 2.2: 温度変化により曲率が生じるバイメタル

2.2.1.1 曲率を有する膜面デバイスのモデリング

膜面デバイスのモデル化には、1) 2層のバイメタルとして扱う、2) 実物の3次元形状を測定する、3) 見かけ上1層として扱い曲げモーメントを付与することが考えられる。1)の場合、形状は3)の曲げモーメント付与と大差ないが、3)よりもパラメータが多い。2)の場合、測定やモデル化のコストが大きい。また、層構成や材料特性が不明なことがある。以上より、簡易な3)を採用した。

3)のモデリング方法を説明する。曲率のない膜面デバイスに曲げモーメントを付与することで、曲率を発生させられ、測定した実物の曲率に一致させれば、反った形状をモデリングできる。ここで、曲げモーメント付与前の膜面デバイス断面が一様と仮定する。この場合、曲げモーメント付与後、曲率は一様となり、膜面デバイスは円弧状になる。実際、代表的な膜面デバイスである IKAROS 搭載の薄膜太陽電池セルは、目視のかぎりでは円弧状である。以上のようにして、本モデルでは、予め測定しておいて既知量とした曲率をもとに曲げモーメントを

付与することで、曲率を有する膜面デバイス形状をモデル化した。

2.3 有限要素解析の方法

有限要素解析ソフト Abaqus を用いて、幾何学的非線形有限要素解析により、陽解法による動解析・陰解法による静解析をそれぞれ実施した。

2.3.1 有限要素モデル

図 2.3 に曲率を有する膜面デバイス付き膜の有限要素モデルを示す。詳細を下記に述べる。

座標系 座標系は、x 方向を膜短辺方向、y 方向を張力方向 (膜長辺方向)、z 方向を面外方向とした直交座標系であり、原点は変形前の膜の中立面上の中心の慣性空間に固定した。つまり、膜に固定していないので変形で移動しない。

膜・膜面デバイスの材料特性・寸法 膜・膜面デバイスの材料特性・寸法をそれぞれ表 2.1, 2.2 に示す。これらの値は解析・実験モデルで共通である。膜の材料は、ソーラーセルにも使用されるポリエチレンテレフタレート (PET) 材の中でも、光学式形状測定が容易な低光沢・不透明である練り込みマットタイプの Lumirror X42G の最薄モデルを使用した。平膜のアスペクト比が大きくなると張力によるシワは発生しやすくなる [34]。張力の影響も評価するため、便宜的に膜のアスペクト比を 2:5 とした。膜面デバイスの材料は、IAKROS 搭載品と同型の PowerFilm 社製アモルファスシリコン (a-Si) 薄膜太陽電池セルを使用した。薄膜太陽電池セルのヤング率は中村らの簡易実験による測定値 [35] を参考にした。なお、他の膜材料として、ソーラーセルに使用されるポリイミド材も検討したが、下記の理由で不採用とした。ポリイミドは透過性が高く、金属蒸着した場合は不透明だが高光沢により鏡面反射が著しく、いずれも後述の実験で実施する光学式形状測定が困難である。そのため、膜材につや消しコート剤をスプレーなどで塗布して測定可能にすること [36, 37] もあるが、膜厚が $50\ \mu\text{m}$ だとコート剤の層が面外変形に影響し、なおかつ、均一な層厚の作成が困難で、コート剤の材料特性が不明なこともあり、ポリイミド材は用いなかった。

表 2.1: 膜 (PET, Lumirror X42G) の材料特性・寸法

Properties	Values
Density (g/cm ³)	1.4 (Supplier' s data)
Young's modulus (GPa)	4 (Supplier' s data)
Poisson's ratio	0.3 (Assumed value)
Size (mm)	100 × 250 (Measured value)
Thickness (μm)	5.0 × 10 ¹ (Measured value)

表 2.2: 膜面デバイス (a-Si 太陽電池) の材料特性・寸法

Properties	Values
Density (g/cm ³)	1.4 (Measured value)
Young's modulus (GPa)	2 × 10 ¹ (Measured value)
Poisson's ratio	0.3 (Assumed value)
Size (mm)	30 × 30 (Measured value)
Thickness (μm)	5.8 × 10 ¹ (Measured value)
Radius of curvature (mm)	1.5 × 10 ¹ (Measured value)

要素・メッシュサイズ 剛性を考慮するため、4 節点 4 辺形シェル要素 (S4R) を用い、そのメッシュサイズは 1 mm × 1 mm とした。なお、事前解析で 0.5 mm × 0.5 mm, 2 mm × 2 mm, 4 mm × 4 mm を試し、有限要素モデルの変形形状が定量的に一致したことから、1 mm × 1 mm で十分な細かさであると判断した。この理由は、シワ 1 波長に対して約 6 要素あれば精密な結果を得るのに十分であり [22]、この条件をいずれのメッシュサイズでも十分な余裕をもって満足したことである。

境界条件・拘束条件 膜の境界条件は下記の通りである。上辺は一樣な張力方向の y 方向にのみ 1 自由度を持ち、同一の y 座標値に拘束されている。下辺は完全固定、左右辺は自由端である。その他の拘束条件として、膜面デバイス裏面は膜表面に拘束されている。

荷重条件 膜上辺には張力 F が一樣に付与されている。張力の影響をみるため、 F をパラメータとして、9.8, 98, 980, 9800 mN (応力は 1.96, 19.6, 196, 1960 KPa) でそれぞれ解析を実施する。単純な比較はできないが、参考までに、IKAROS のスピンレートの基準は定常運用で 1 rpm 以上とされ、このとき、先端マスに加わる遠心力は 55 mN 以上になる。実際の定常運用では 2.5 rpm (約 340 mN) に維持されていた。また、膜面デバイスの反りを模擬するため、膜面デバイスの左右辺にはモーメント M が一樣に付与されている。 M の値は、表 2.2 の特性値および、平面保持の仮定 (Bernoulli-Navier の仮定) と法線保

持の仮定に基づいた次式のモーメントと曲率半径の関係を用いて、0.61 mN·m とした。

$$M = \frac{EI}{\rho} \quad (2.1)$$

ここで、 E はヤング率、 I は断面二次モーメント、 ρ は曲率半径である。 M もパラメータとすることが望ましいが、実験での適切な調整方法や材料が見つからず、一定とした。その他、重力は考慮していない。

解析ステップ 解析は下記の2ステップで順に進行する。

1. F をランプ (比例) 入力。動解析の時間幅：3000 秒。
2. M をランプ入力。動解析の時間幅：10000 秒。

なお、静解析と動解析それぞれでステップ1,2を逆順にしても形状が定量的に一致したため、载荷経路の影響は無視できると考える。動解析は準静的にするため、時間幅を大きくした。なお、静解析では時間幅は結果に影響しない。時間増分に関しては、静解析では自動を設定し、動解析ではモデル全体に対してマススケーリングを用い、目標時間増分 5 ms に設定した。

初期不整 初期不整は導入していない。理想的な平膜では初期不整が無いと面外変形しないが、このモデルでは初期不整は無くとも反りによって面外変形するためである。

動解析でのレイリー減衰 動解析では、解析の収束性を向上させるためレイリー減衰を導入した。これは静解析には無関係である。レイリー減衰を用いると、減衰行列 \mathbf{C} は次式で表される。

$$\mathbf{C} = \alpha\mathbf{M} + \beta\mathbf{K} \quad (2.2)$$

ここで、 \mathbf{M} は質量行列、 \mathbf{K} は剛性行列、 α は質量比例減衰係数、 β は剛性比例減衰係数である。 α は大きな値は望ましくなく、 β も減衰がない状態での初期安定時間増分以下にすべきである [38]。上記を満たすべく、 α は 10^{-3} s^{-1} 、 β は 10^{-8} s とした。

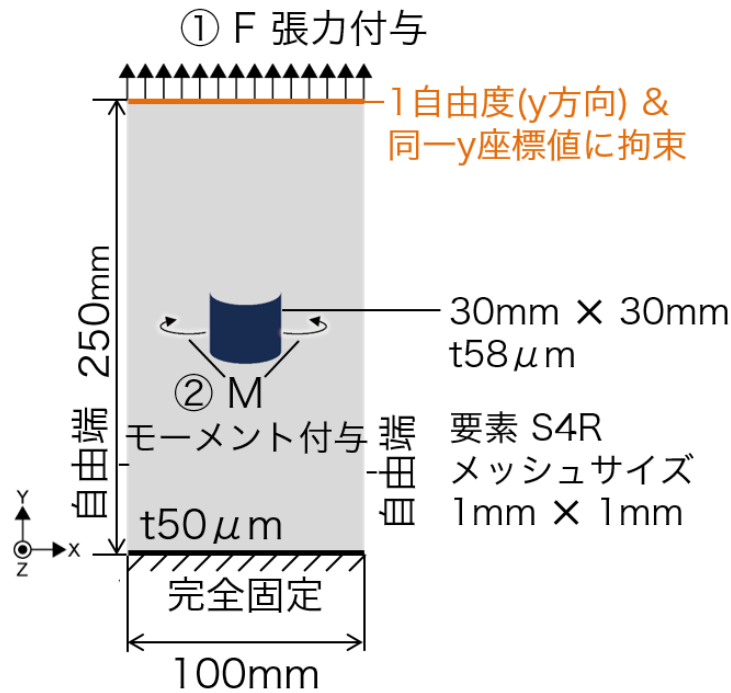


図 2.3: 曲率を有する膜面デバイス付き膜の有限要素モデル

2.4 形状測定実験方法

実験モデルの供試体を作成し、解析同様に張力パラメータを変更して、形状を測定する。図 3.2a に形状測定実験装置の構成を示し、図 2.5 に実験装置の外観を示す。実験装置は、供試体の膜面デバイス付き膜・膜引張治具・3次元(3D)スキャナの3つの構成要素からなる。供試体は膜引張治具に取り付けられ、重りで張力を付与され、3Dスキャナで形状を測定される。環境温度は20度である。以下、構成要素ごとに説明する。

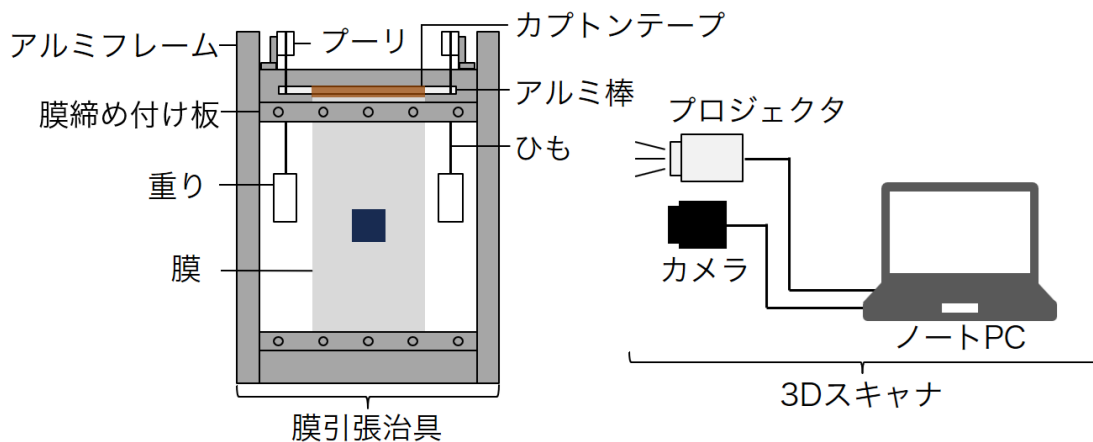


図 2.4: 形状測定実験装置の構成

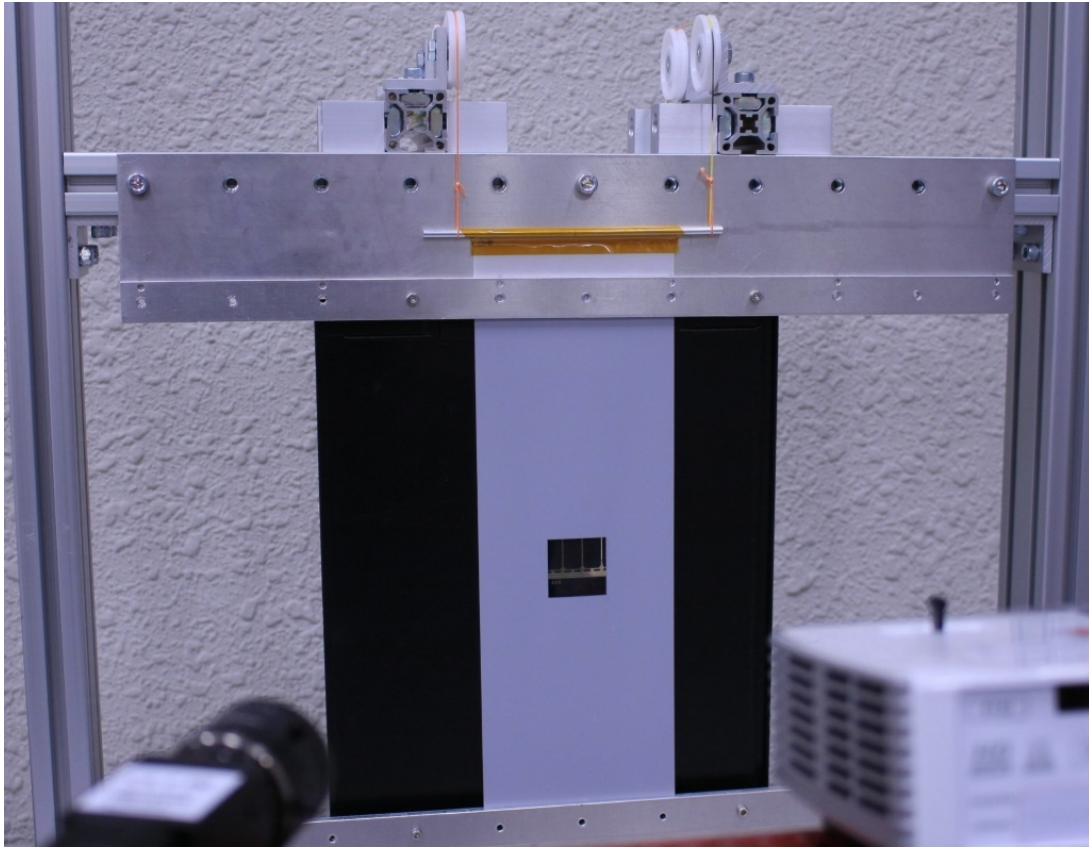


図 2.5: 形状測定実験装置の外観. 手前左は CCD カメラ, 手前右はプロジェクタ.

2.4.1 実験モデル

表 2.1, 2.2 の材料および寸法を用いて, 図 2.5 にあるように実験モデルを作成した. 膜に膜面デバイスを貼るための接着剤には, IKAROS で使用した常温硬化型シリコンゴム (SILASCON) を用いた.

2.4.2 膜引張治具と膜固定方法

膜引張治具は, 一軸張力を加えた状態で供試体の膜を固定する. 面外方向への重力の影響を抑えるため, 膜を縦置きにした. 膜の固定方法を下記に示す.

1. 膜下辺を膜締め付け板 (A6063, t 2 mm) で挟み込みネジ止めする.
2. 膜の上端にアルミ棒 (A6063, ϕ 5 mm) をカプトンテープで巻き込むように接着する.
3. アルミ棒にひも (超高分子量ポリエチレン) の輪を通し, ひもからプーリを介して, 重りで膜に張力を付与する.
4. 膜上部に膜締め付け板をおさえて, ネジ止めする.

貼付け時に生じるシワ低減および固定力強化のため、膜裏面とアルミ板の間には両面テープを貼った。実験前後で、張力によって膜と両面テープの位置関係がずれないことは確認した。張力は測定しておらず、重りの重量が張力として膜上辺に等分布に付与されると仮定した。

2.4.3 3D スキャナ

3次元形状計測器として、商用のストラクチャ・ライト方式の3D スキャナ (SLS-3) を用いた。この3D スキャナは、電荷結合素子 (CCD) カメラ・プロジェクタ・ノート PC・3D スキャナソフト (DAVID 5) から構成される。3D スキャナは物体の位置を測定できるが、変位は測定できない。3D スキャナにより、1回のスキャンで広範囲の領域を短時間に同時測定できる。高精度な測定にするため、CCD カメラと膜の距離はなるべく短くして 43 cm とした。その距離では膜全体を1回で測定できなかったため、膜上半分と下半分で2回に分けて測定し、単純に重ね合わせることで膜全体形状データとした。また、その距離での精度は ± 0.1 mmであった。1回のスキャンあたりの供試体の3次元点群の総数は約 150 万個である。データ処理に時間がかかるため、150 万個の点群のうち 18 万個のみを利用した結果、点群間の3次元空間での距離は約 0.4 mm となった。測定データの座標系は解析の座標系に極力一致させるため、変形が微小な膜上下辺の境界近傍の膜測定データ点群の z 成分の平均を z 方向基準面 ($z=0$) とし、膜の中心を原点とした。

2.5 解析結果・実験結果の比較

本節では、静解析・動解析・実験の結果を比較し、有限要素モデルの検証および変形特性の考察をする。図 2.6~2.9 に静解析・動解析・実験モデルの面外形状コンター図を張力毎に示す。静・動解析は実験と定性的な形状が一致しており、有限要素モデルは定性的に妥当といえる。一方で定量的には差があり、解析よりも実験のほうが面外方向の変形量は大きい。その主な理由は、実験では解析と異なり、膜上下辺の固定が完全固定ではないことであると推測する。また、実験では、全体的に非対称なゆがみ、膜下辺付近に局所的なシワが生じている。その原因は膜面デバイスの接着や膜上下辺を膜引張治具に固定したときに生じた初期不整であると推測する。このような変形は 9800 mN では小さく、張力の付与で減少させられることが分かる。

変形特性に関しては、膜面デバイスの曲率と張力に起因して、膜面デバイスを中心とした X 状のシワが発生することが分かる。曲率のない膜面デバイス付き膜に 1 軸張力を付加した実験では、膜面デバイスを中心として X 状ではなく平行なシワが 2 本生じた [39] ので、膜面デバイスの曲率によってシワが湾曲したといえる。曲率のない膜面デバイス付き膜の実験の詳細を下記に示す。反りのない PET 材 (厚さ 0.5 mm, 30 mm \times 30 mm) が付いたポリイミド膜 (膜厚 10 μ m, 100 mm \times 300 mm) に張力 9800 mN を付加した。本実験とは、膜厚、膜サイズ、材

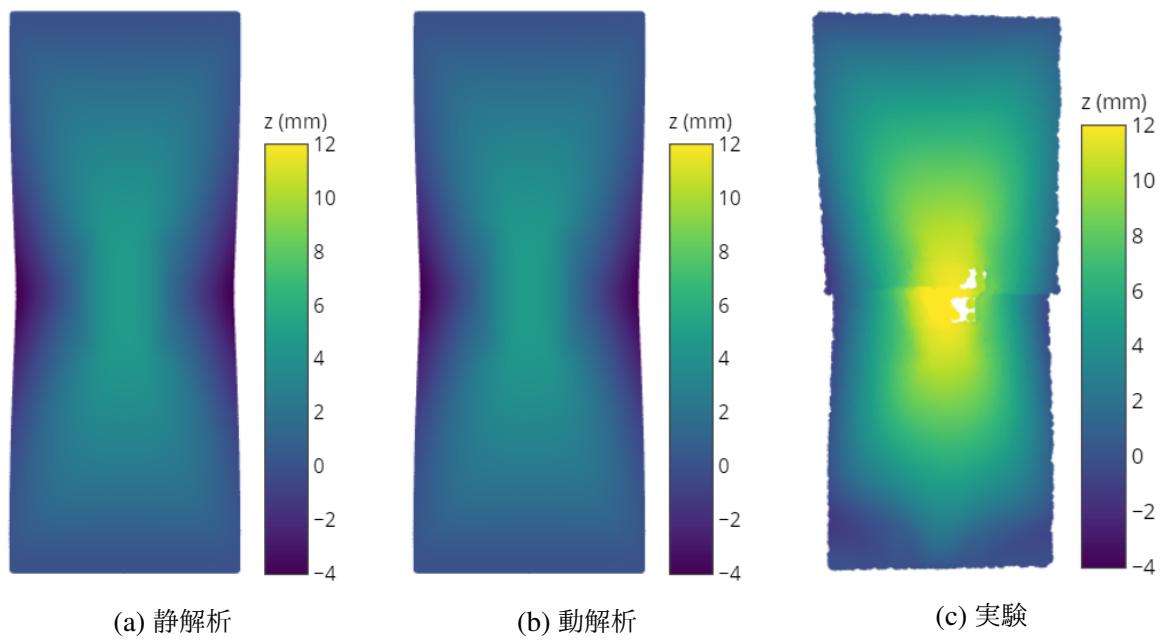


図 2.6: 張力 9.8 mN での面外形状コンター図. (c) 欠損部分は太陽電池での鏡面反射が原因. 膜中央横線はデータ処理による上半分と下半分の不連続境界.

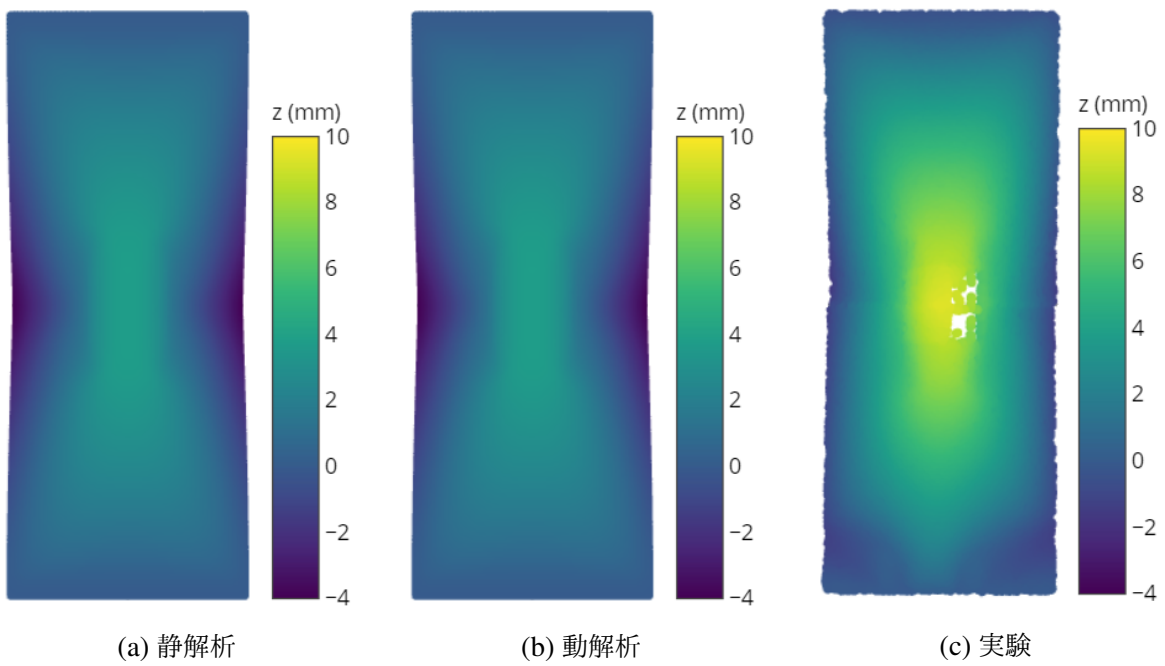


図 2.7: 張力 98 mN での面外形状コンター図. (c) 欠損部分は太陽電池での鏡面反射が原因.

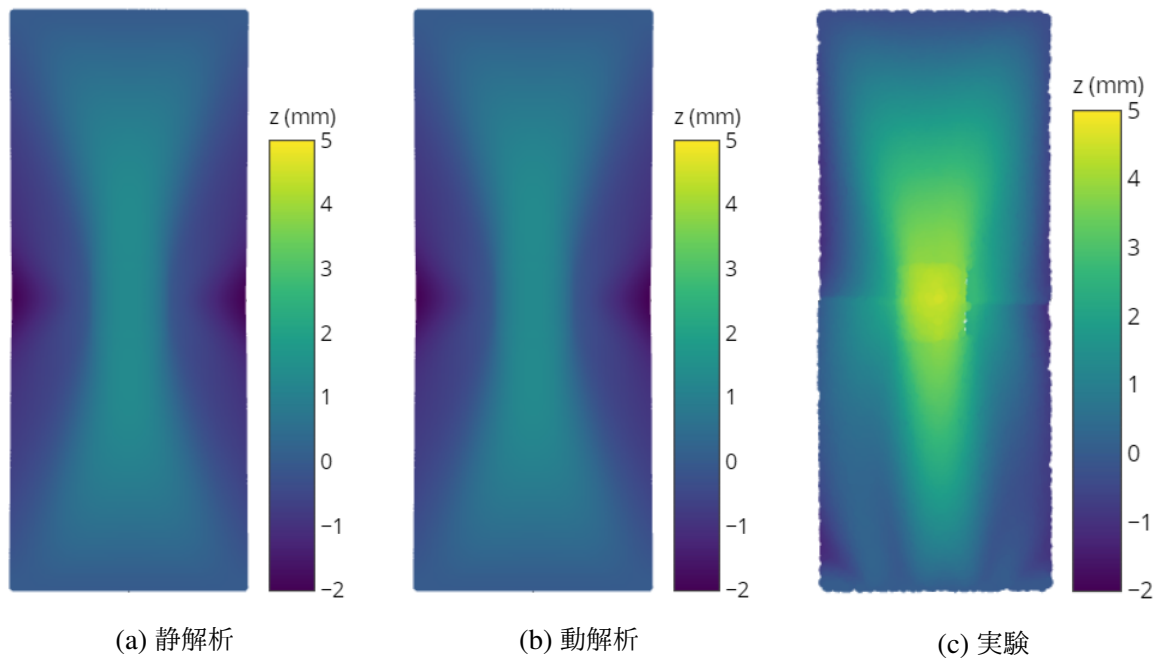


図 2.8: 張力 980 mN での面外形状コンター図. (c) 膜中央横線はデータ処理による上半分と下半分の不連続境界.

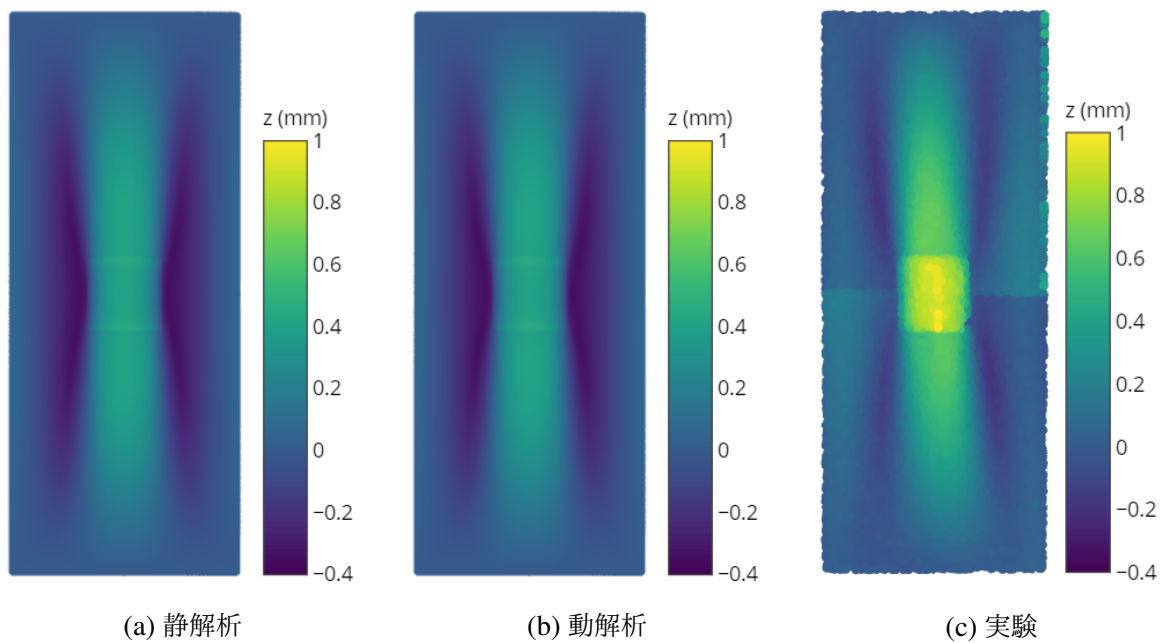


図 2.9: 張力 9800 mN での面外形状コンター図. (c) 膜中央横線はデータ処理による上半分と下半分の不連続境界.

料が異なることに留意する。実験方法は、本実験同様、膜を治具に取り付け、3D スキャナーで形状を測定した (図 2.10)。実験結果の測定形状 (図 2.11) より、膜面デバイス両脇に平行なシワが2本生じていることが分かる。

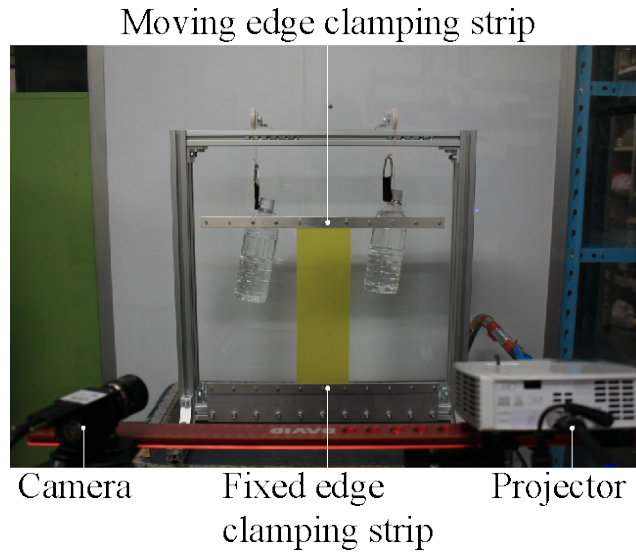


図 2.10: 反りのない膜面デバイス付き膜の実験セットアップ。治具に膜を取り付けて張力を加え、膜形状をプロジェクタ・カメラで構成される 3D スキャナーで測定する。

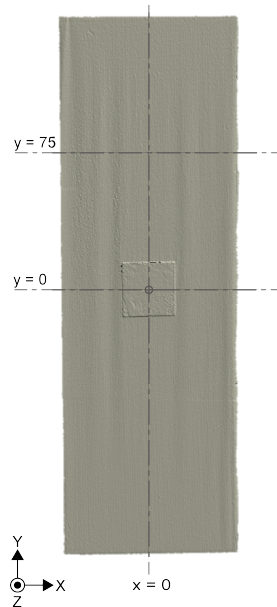


図 2.11: 張力 9800 mN を付加した反りのない膜面デバイス付き膜の形状測定結果。ポリイミド膜 (100 × 300 mm, t10 μm) 中心に PET(30 × 30 mm, t0.5 mm) を貼付。

9800 mN での面外変形パターンが他の張力でのパターンとは異なっており、980 mN と 9800

mN の間でパターンの変化が生じたと考えられる。980 mN 以下では、面外変形は主に膜面デバイスの曲率に起因していたが、9800 mN では、面外変形は主に張力に起因していると考えられる。

図 2.12~2.15 にモデル中央部を x 方向に切断した断面 (中央横断面) を張力毎に示す。静解析と動解析の比較をすると、図 2.9 の張力 9800 mN の断面で $x = 0$ mm 付近では約 $50 \mu\text{m}$ の差があるが、全体としては定量的にほぼ一致している。したがって、静解析・動解析いずれを使用しても同様の精度で解析できると判断する。実験の膜断面が解析よりも +z 方向に剛体移動し、微小な回転もしている。座標系を一致させたにも関わらず、+z 方向へ剛体移動した原因は不明だが、膜上部の固定時に膜中央部を +z 方向にたわませた可能性がある。回転の原因は、膜面デバイスの貼付け位置のずれなどの非対称な初期不整であると推測する。

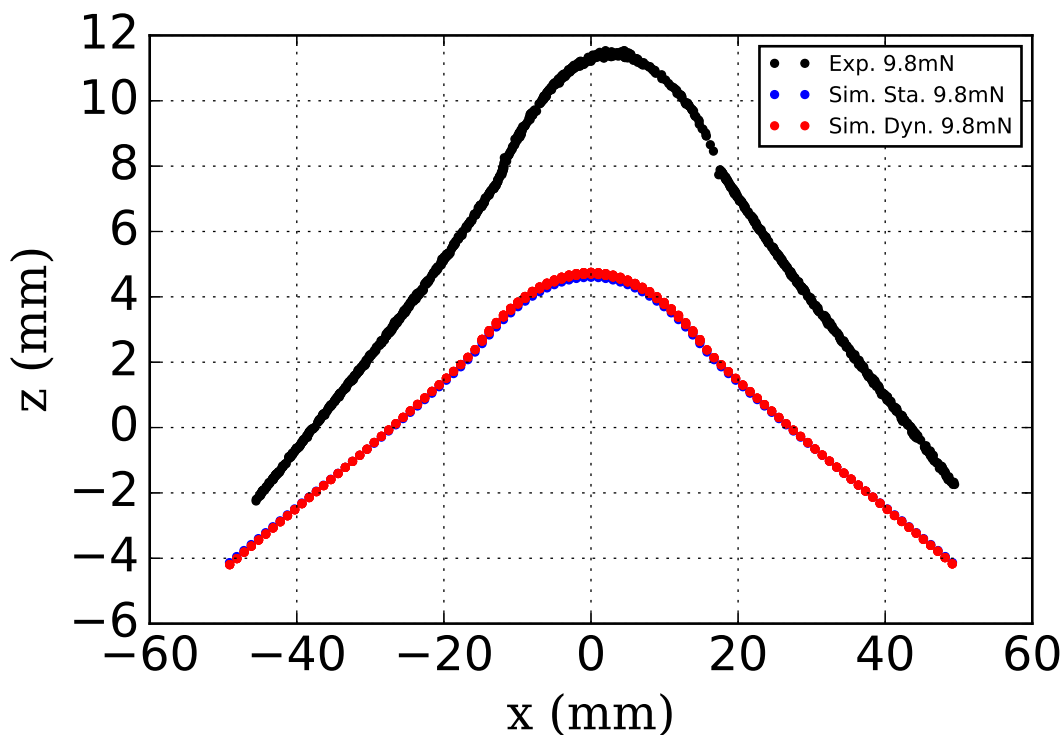


図 2.12: 張力 9.8 mN での中央横断面。実験の欠損部は鏡面反射が原因。

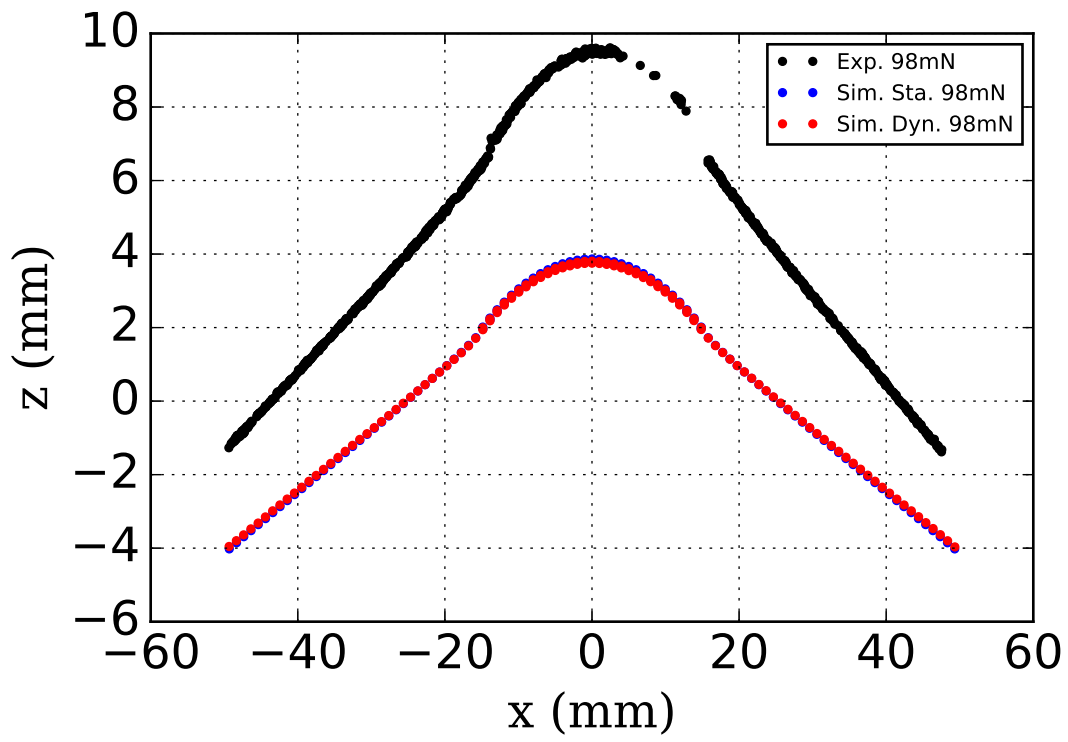


図 2.13: 張力 98 mN での中央横断面. 実験の欠損部は鏡面反射が原因.

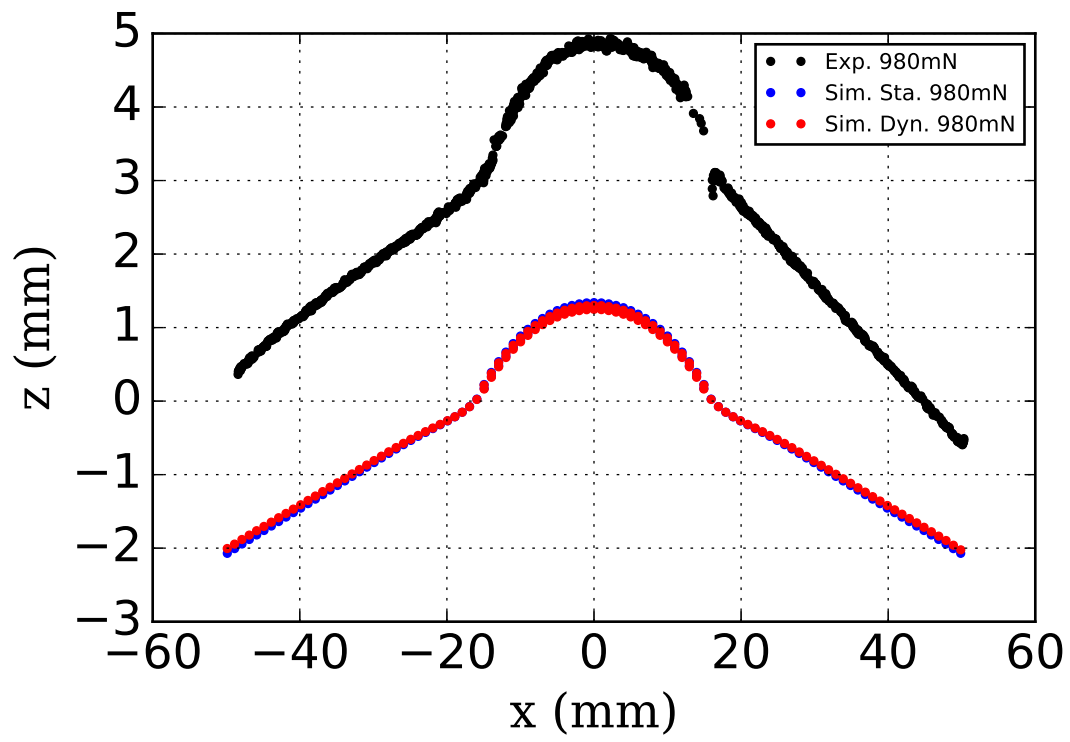


図 2.14: 張力 980 mN での中央横断面. 実験の欠損部は鏡面反射が原因.

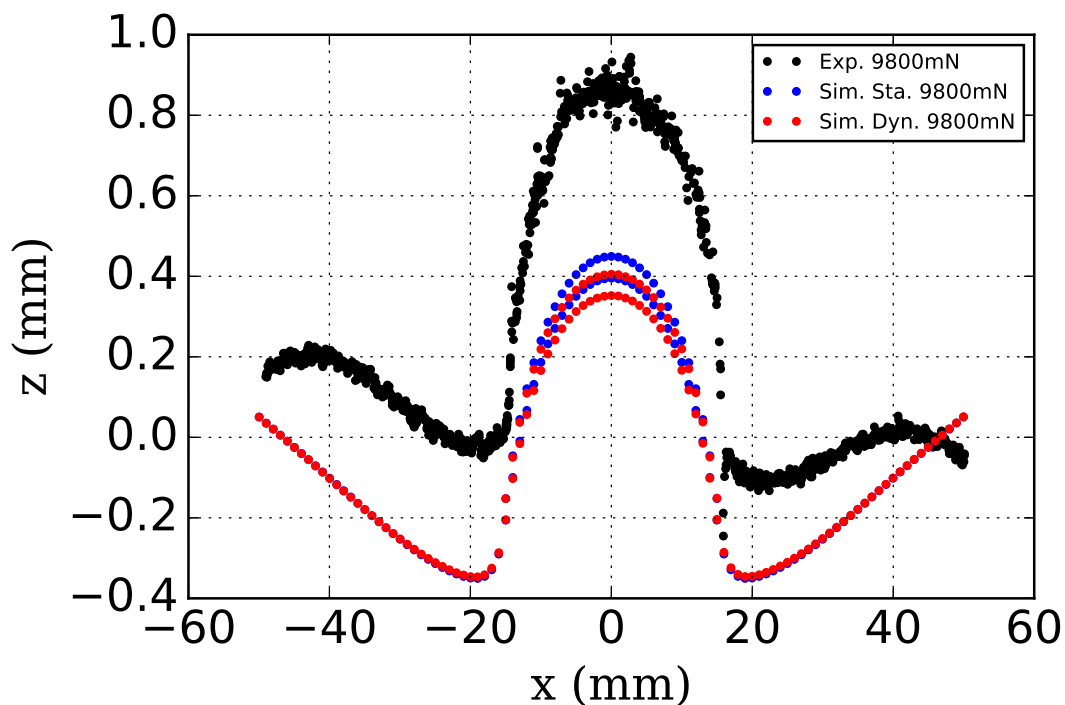


図 2.15: 張力 9800 mN での中央横断面。実験の欠損部は鏡面反射が原因。解析の $-15 \text{ mm} < x < 15 \text{ mm}$ 付近は膜面デバイスと膜の中立面が現れているため 2 重にみえる。

2.6 解析結果・実験結果の線形理論解との比較

竹内 [40] は、はりの弾性理論を 2 次元に拡張した線形微分方程式 (Germain-Lagrange 方程式) を用いて線形理論解を導出し、本実験および本解析の結果と比較した。その結果、理論解による形状は定性的におおむね一致した (図 2.16[40]) もの、面外変形量は実験・数値解析よりも約 10 倍大きくなった (図 2.17[40])。その原因としては、Germain-Lagrange 方程式の仮定のうち、下記が成立していないためと考えられる。

- せん断力が非常に小さい (ベルヌーイ・オイラーの仮定が成立)
- 変形後も断面形状が不変
- 変位が微小

線形理論解の導出および実験・数値解析との比較の詳細は、参考文献 [40] の 3 章を参照されたい。以上より、非線形性の考慮は、特に面外変形量の精度向上において不可欠といえる。

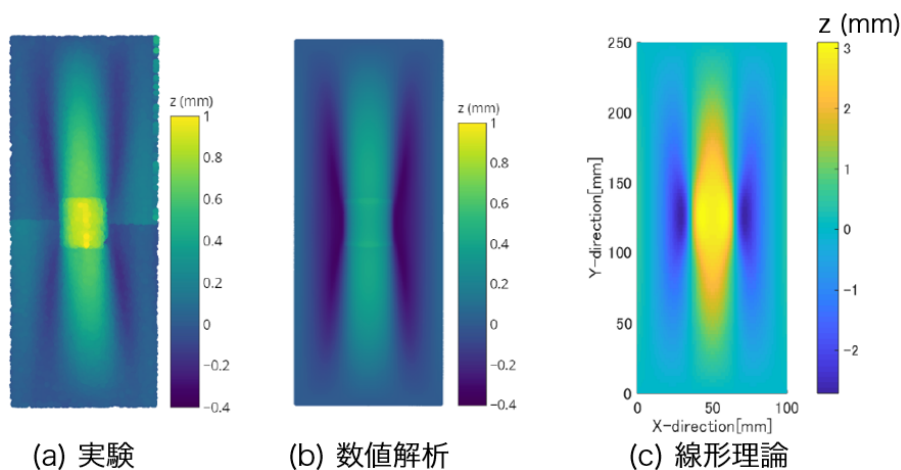


図 2.16: 張力 9800 mN での面外形状コンター図. (a), (b) は再掲.

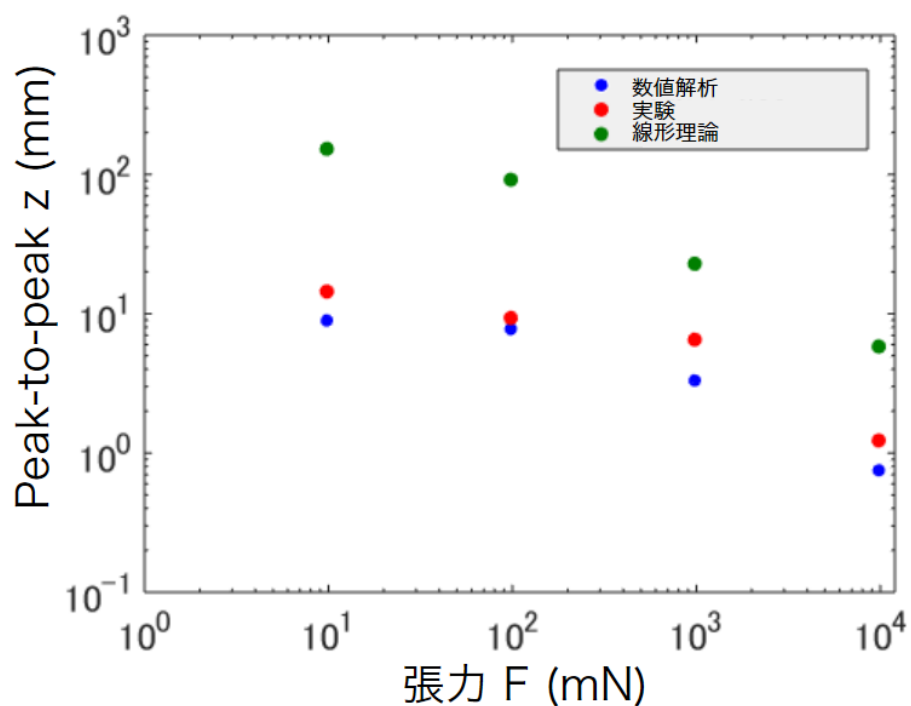


図 2.17: 張力と面外変形量のピーク・ピーク値の関係.

2.7 結言

地上実験用部分膜モデルを用いた曲率を有する膜面デバイス付き矩形膜を対象に、膜面デバイスの曲率を対辺にモーメントを付与することで模擬した有限要素解析を実施し、形状測定実験と比較検証した結果、および、1軸張力をパラメータとして変化させることで得られた曲率

を有する膜面デバイス近傍の膜の変形特性の知見をまとめる.

- 解析結果は実験結果と定性的に一致した. したがって, 本解析モデルは定性的な変形形状を求める目的では妥当といえる.
- 張力方向に沿うように膜面デバイス脇に生じるシワは, 膜面デバイスの曲率により, く字状に曲がり, 両シワで X 状になる.
- 面外変形のパターンは, 張力に応じて変化し, 張力と膜面デバイスの曲率どちらが支配的に面外変形を発生させているかによる.

第3章

地上実験用部分膜モデルを用いた曲率を有する膜面デバイス付き矩形膜の振動特性

3.1 緒言

前章では、地上実験用部分膜の解析モデルを実験的に検証した。本章では、さらなる検証のため、前章の変形解析後に固有値解析を行い、その固有特性(固有振動数・固有モード)のうち、面外方向の有効質量比が最大となる固有モードの固有振動数を真空槽内の振動実験と比較する。固有値解析で求められる固有振動数は剛性と質量に依存するため、面外剛性を間接的に評価する指標となり得る。加えて、既往研究では検討が不十分であった、曲率を有する膜面デバイスが1軸張力下の膜の固有特性に与える影響を明らかにする。そのため、1) 曲率を有する膜面デバイス付き膜(部分膜モデル)、2) 曲率の無い膜面デバイス付き膜、3) 膜面デバイスの付いていない膜(平膜)の3種類で固有特性を比較する。

3.2 有限要素解析方法

3.2.1 概要

膜面デバイスの曲率が固有特性に与える影響をみるため、1) 曲率を有する膜面デバイス付き膜、2) 曲率のない膜面デバイス付き膜、3) 平膜の解析モデルを作成し、陰解法による幾何学的非線形静解析・Lanczos法による固有値解析を実施する。静解析によって膜の形状を求め、その形状および応力状態から固有値解析を実施する。固有値解析は変形を微小と仮定しており、実験との差になり得ることに留意する。解析には有限要素解析ソフト Abaqus を使用した。表

3.1 に主な解析条件をまとめる．張力パラメータは,2.5 節で示したように張力が小さいと解析モデルと実験モデルの変形量の誤差が大きいことから，実験による検証では 225 mN (23 gf) を下限にした．重力と大気の影響は無視している．

表 3.1: 解析条件

膜	1) 曲率を有する膜面デバイス付き膜 2) 曲率のない膜面デバイス付き膜 3) 平膜
張力 (mN)	225, 980, 9800 (23, 100, 1000 gf)
気圧 (Pa)	0
重力	無し

3.2.2 有限要素モデル

図 3.1 に反った膜面デバイス付き膜の有限要素モデルを示す．2.3.1 節の有限要素モデルに固有値解析のステップを追加している．他の膜モデルは，反りが無いことや膜面デバイスが無いことを除いて，基本的に同様である．以下，2.3.1 節の有限要素モデルとの相違点を説明する．

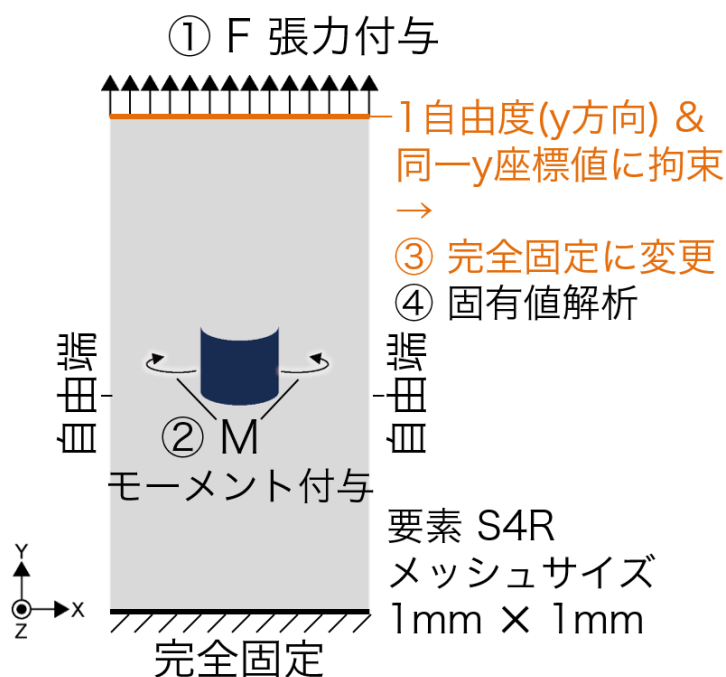


図 3.1: 曲率を有する膜面デバイス付き膜の有限要素モデル

解析ステップ 静解析・固有値解析の順に進行し、下記の4ステップで構成される。

1. 張力 F をランプ入力。
2. モーメント M をランプ入力。但し、2), 3) の膜の場合は省く。
3. 膜上辺の境界条件を1自由度 (y 方向) から2ステップ目完了時の位置で完全固定に変更。
4. 固有値解析

ステップ3で境界条件を変更した理由は、膜上辺の固定により y 方向の振動は抑制されるので、完全固定のほうが実際に近いと判断したことである。

初期不整 平膜にのみ初期不整を導入した。面外方向に $\pm 5 \mu\text{m}$ (膜厚 $\pm 10\%$) の範囲で一様乱数を入れた。この理由は、平膜だけは初期不整を導入しないと面外変形しない形状に必ず収束するためである。

3.3 振動実験方法

3.3.1 概要

固有値解析結果の検証のため、真空槽内で1) 曲率を有する膜面デバイス付き膜、3) 平膜を小型加振器により正弦波対数掃引で加振し、レーザ変位計で変位を測定して共振振動数を求めた。図3.2に実験装置の構成図を示し、図3.3に真空槽内の実験装置の外観写真を示す。上記2種類の膜を3枚ずつ作成し、張力をパラメータとして変え、それぞれ測定した。実験条件を第3表にまとめる。真空槽の使用は、空気の付加質量効果による共振振動数の低下を抑制するためである。なお、2) 曲率のない膜面デバイス付き膜は、適切な材料が入手できず、実験対象としなかった。

表 3.2: 振動実験条件

膜	1) 曲率を有する膜面デバイス付き膜 3) 平膜	供試体 #1, 2, 3 供試体 #4, 5, 6
張力 (mN)	225, 980, 9800 (23, 100, 1000 gf)	
気圧 (Pa)	0	
重力	無し	

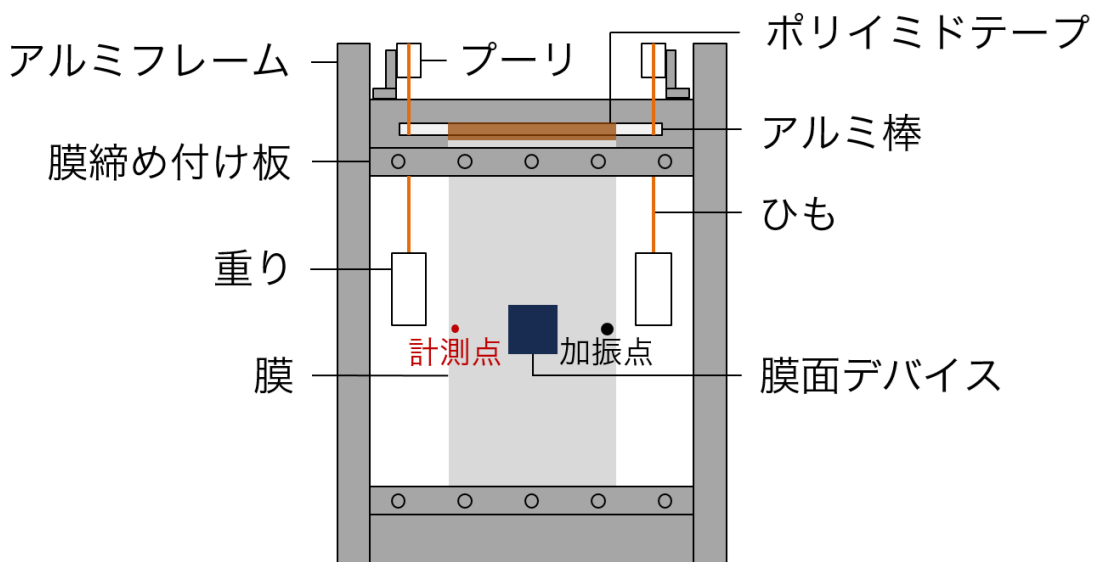
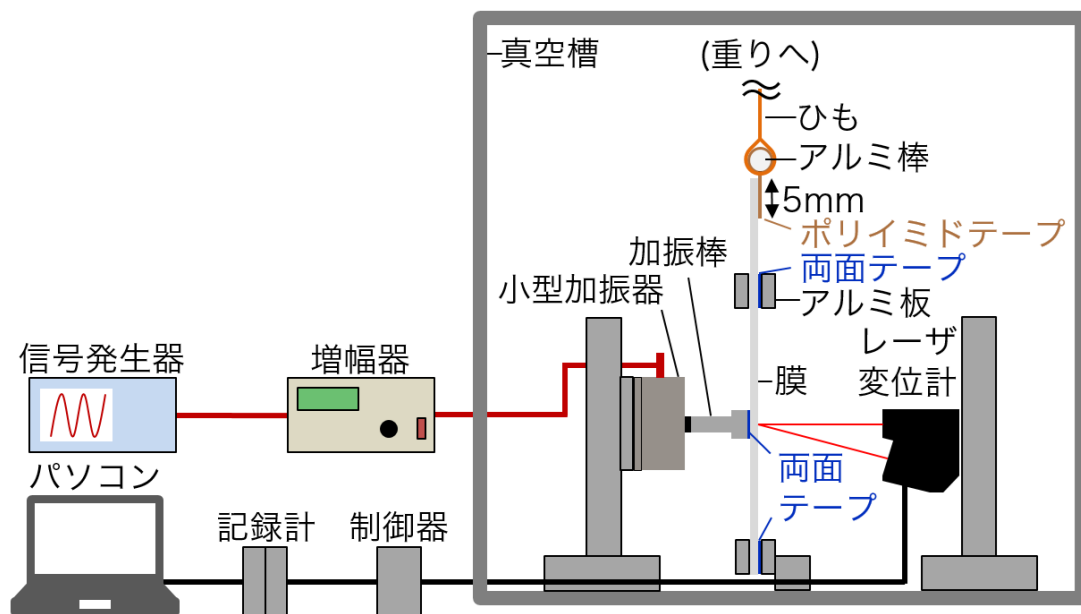
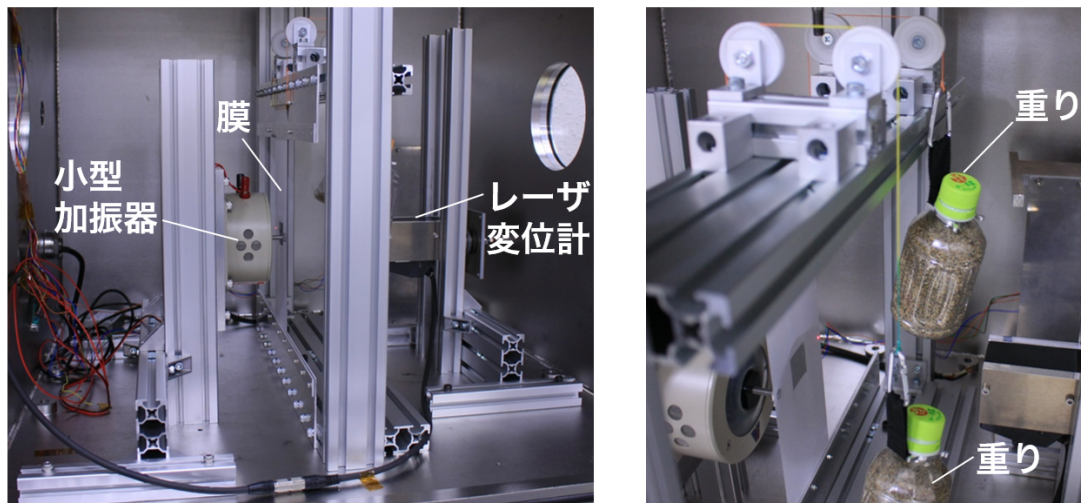
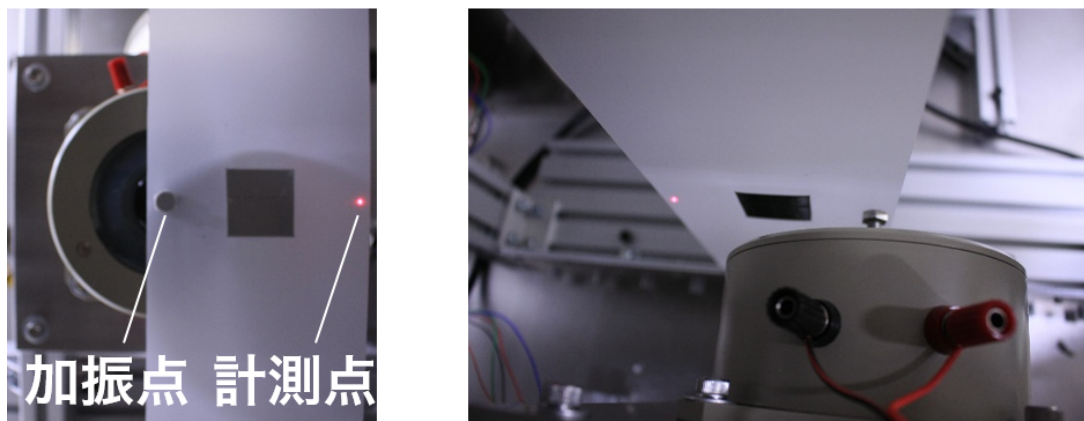


図 3.2: 振動実験装置の構成



(a) 真空槽内全体



(b) 膜の中心部

図 3.3: 真空槽内の実験装置の外観

3.3.2 実験モデル

曲率を有する膜面デバイス付き膜は 2.4.1 節の実験モデル同様である。平膜は、曲率を有する膜面デバイス付き膜に膜面デバイスを貼付していないモデルである。

3.3.3 加振方法

信号発生機 (WF1973) から増幅器 (APD-050FCA) を通して小型加振器 (WaveMaker05) に信号を入力し、膜に両面テープで接着した加振棒 (ステンレス鋼製 M6 ボルト) で加振する。加振信号として、正弦波対数掃引 (1~150 Hz, 1.5 oct/min 以下) を往復で入力した。加振棒の

振幅は、固有値解析と比較するので極力変形を抑え、計測点での共振時の膜の振幅が $100\ \mu\text{m}$ (膜厚 $50\ \mu\text{m}$ の2倍) 以下になるように各実験条件で調整した。なお、加振方法等の実験条件が一部異なるが、共振時の膜の振幅 $400\ \mu\text{m}$ (膜厚 $50\ \mu\text{m}$ の8倍) で実験しても、固有振動数の振幅依存性は確認できなかった。加振点の位置は、解析のモード形状の腹周辺をねらい、膜中央部の右端から $5\ \text{mm}$ 中心に向かう位置にして、各実験条件で固定した。

3.3.4 測定方法

CCD レーザ変位計 (LK-G150) とその制御器 (LK-G3000V) で膜の1箇所の振幅を繰り返し精度 $1\ \mu\text{m}$ で測定し、記録計 (NR-500, NR-HA08) とパーソナルコンピュータで変位計の時系列データを $0.1\ \text{ms}$ 毎に記録する。計測点の位置は、加振点同様、膜中央部の左端から $5\ \text{mm}$ 中心に向かう位置に固定した。以上の測定から、共振を見出し、解析の固有振動数に近い共振の振動数を固有モードに対応する共振振動数とした。また、共振振動数は掃引の往復で平均をとった。

3.4 解析結果

3.4.1 静解析による膜形状

図 3.4 に膜3種の張力毎の形状を示す。反った膜面デバイス付き膜は、反りのため膜面デバイスを中心に X 状に大きく面外変形している。また、張力が大きくなるほど、面外変形が小さくなっており、張力値 $225, 980, 9800\ \text{mN}$ のそれぞれについて面外方向位置のピークピーク値は $6.8, 3.5, 0.85\ \text{mm}$ である。反りのない膜面デバイス付き膜は、ほぼ面外変形していないが、張力が大きくなる程、膜面デバイス周辺に面外変形が生じる。平膜は、初期不整があるものの面外変形は生じず、平坦である。

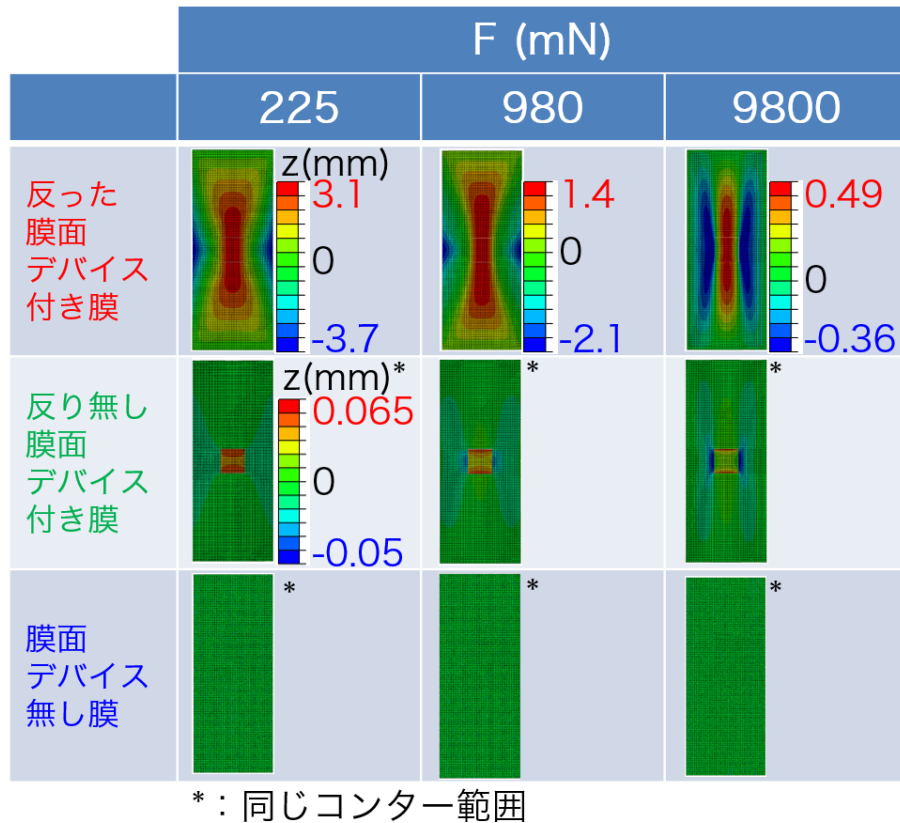


図 3.4: 静解析結果：膜 3 種の張力毎の形状。z は面外方向の位置。

3.4.2 固有値解析による固有特性

図 3.5 に膜 3 種の張力毎の有効質量比（面外方向）最大のモード形状を示す。全条件の傾向として、膜の中央部または中央部の左右端が腹となる。平膜の場合、張力が大きくなるにつれて、腹は中央部から左右端に移動する傾向にある。反りのない膜面デバイス付き膜の場合、膜面デバイスを中心に腹が生じる傾向にある。反った膜面デバイス付き膜の場合、左右端に腹が生じる傾向にある。これらモード形状から、実験での加振点・計測点の位置を決めた。図 3.6 に 3 種類の膜で張力と有効質量比（面外方向）最大のモードの固有振動数の関係を示す。ここでは、張力パラメータをより幅広く、9.8~98000 mN にした。980 mN 以下の場合、反った膜面デバイス付き膜の固有振動数は他の膜と比較して大きい。この差は反りが原因であり、断面二次モーメント増大による面外剛性向上が寄与したと考えられる。9.8 mN で差が著しい原因は、反った膜面デバイス付き膜の有効質量比が最大となるモードがより高次になったためである。9800 mN 以上では、反った膜面デバイス付き膜・反りのない膜面デバイス付き膜の固有振動数はほぼ等しく、平膜の固有振動数よりも僅かに小さくなる。この原因は、張力が大きいと、反りによる面外変形が減少して面外剛性の増大が抑制され、一方で膜面デバイス貼付によ

る質量増大の影響が顕著になり，膜面デバイス付き膜では固有振動数が減少したためと考えられる．なお，平膜の固有振動数は概ね張力の平方根に比例する．張力下の弦の固有振動数の理論解は張力の平方根に比例する [41] ため，これは妥当といえる．

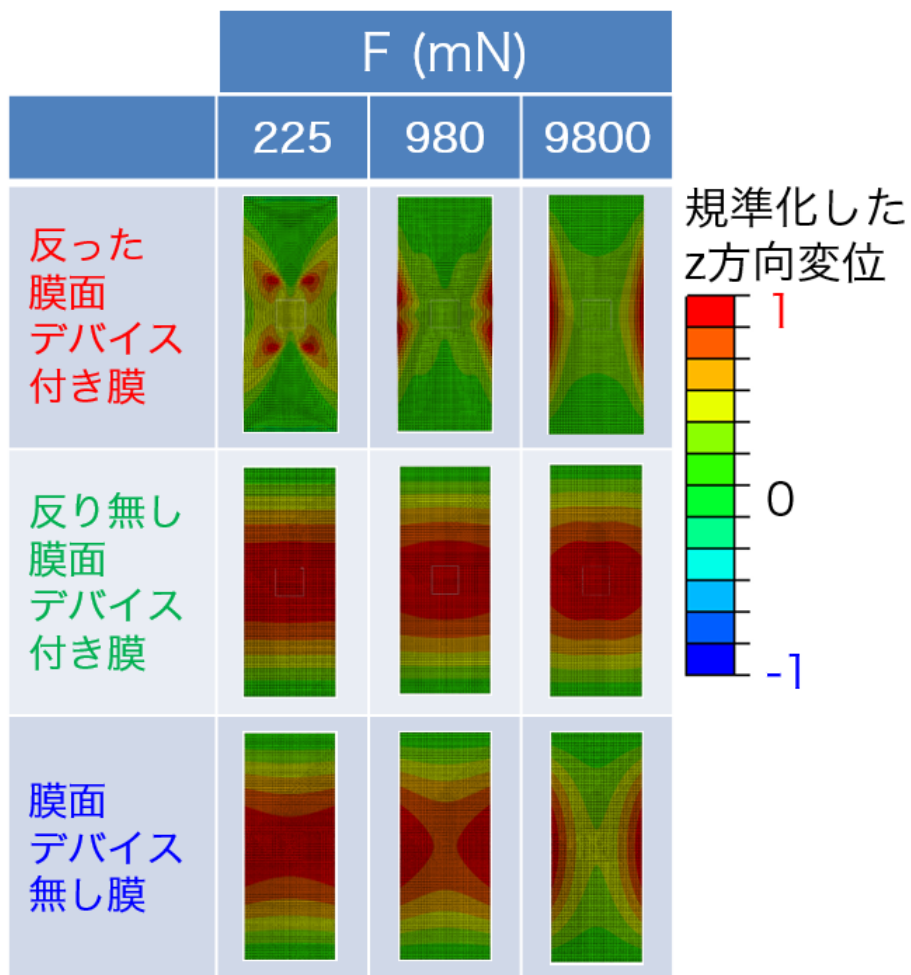


図 3.5: 固有値解析結果：膜 3 種の張力毎の有効質量比（面外方向）最大のモード形状．コンターは最大変位を 1 として規準化．

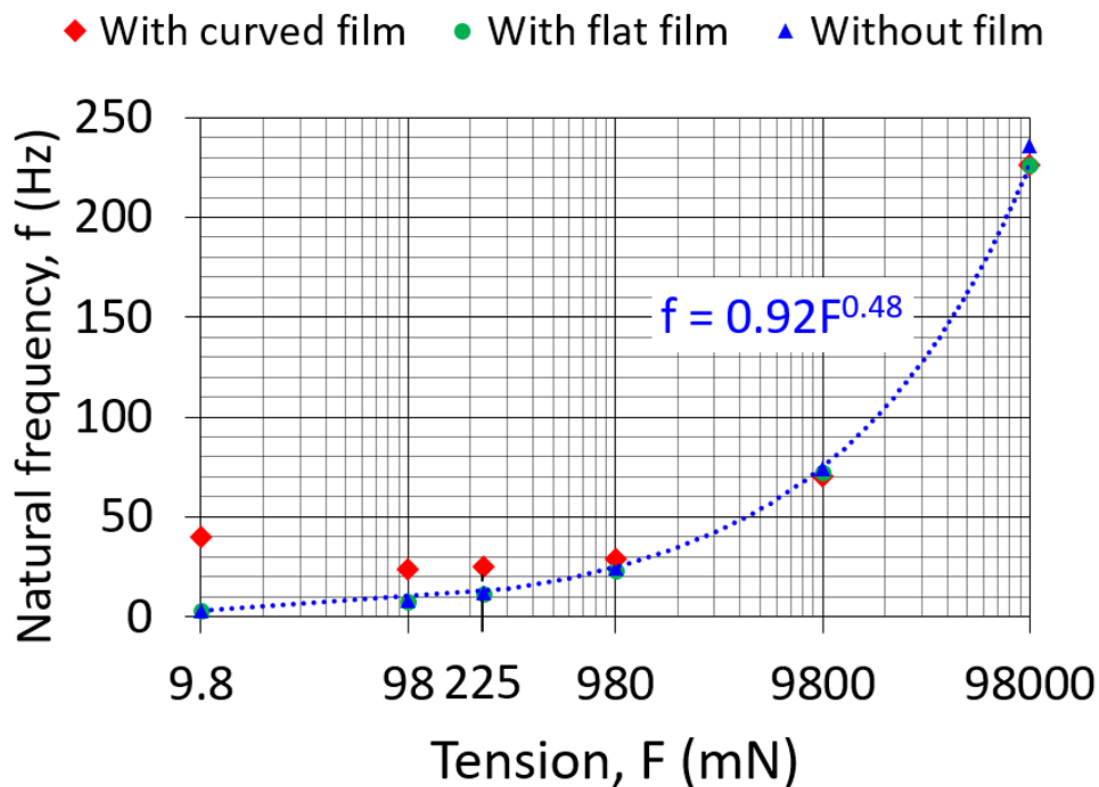


図 3.6: 固有値解析結果：膜 3 種の張力と有効質量比（面外方向）最大の固有振動数の関係

3.5 実験結果

3.5.1 加振振動数と変位の関係および共振振動数と固有振動数の対応

測定した変位データの一例として、図 3.7 に正弦波対数掃引（1 → 150Hz, 1.5 oct/min）による張力 255 mN の反った膜面デバイス付き膜の試料#1 の加振振動数と変位の関係を示す。また、図 3.8 に同条件での固有値解析による複数の振動モードを示す。変位は共振時でも約 50 μm と膜厚程度である。加振振動数 21.6 Hz の小さな共振は 1 次モードの固有振動数 21.0 Hz に対応し、加振振動数 24.6 Hz の共振は、有効質量比最大で 2 次モードの固有振動数 24.9 Hz に対応するとした。また、55.5 Hz でも共振しているが、有効質量比が 2 番目に大きい固有振動数 57.4 Hz の 9 次モードに対応する可能性がある。2 つの大きな共振峰の間に小さな共振峰があるが、これらと解析の固有振動数の対応は取れなかった。このようにして、膜 1 箇所での測定ではあるが、複数の共振振動数と解析の固有振動数の対応をみながら、有効質量比最大の固有振動数に対応する共振振動数を求めた。

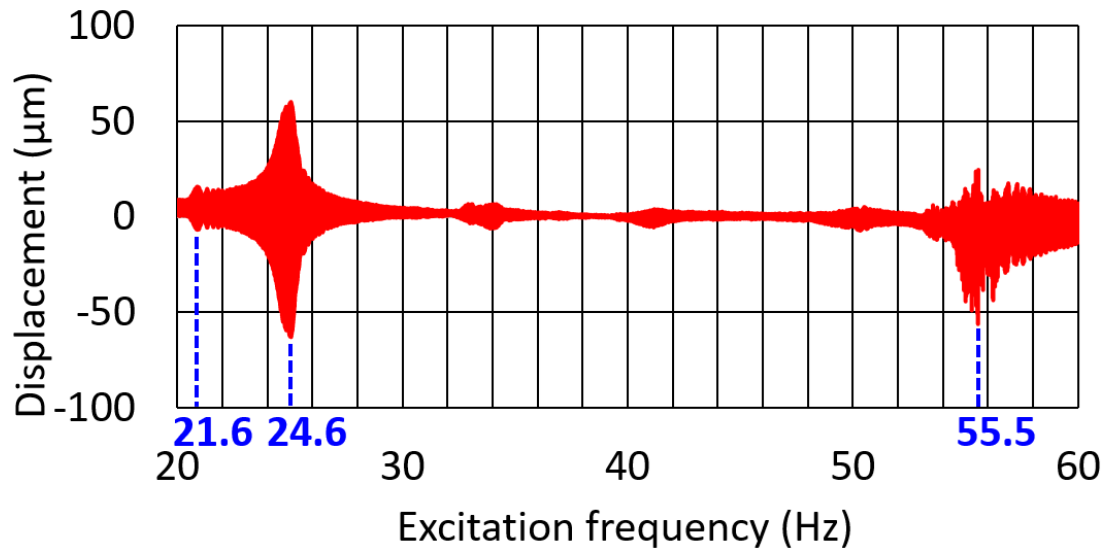


図 3.7: 実験結果：正弦波対数掃引（1 → 150 Hz, 1.5 oct/min）による張力 255 mN の曲率を有する膜面デバイス付き膜の試料 #1 の加振振動数と変位の関係．範囲外の 1～20, 60～150 Hz に共振が無いことは確認．

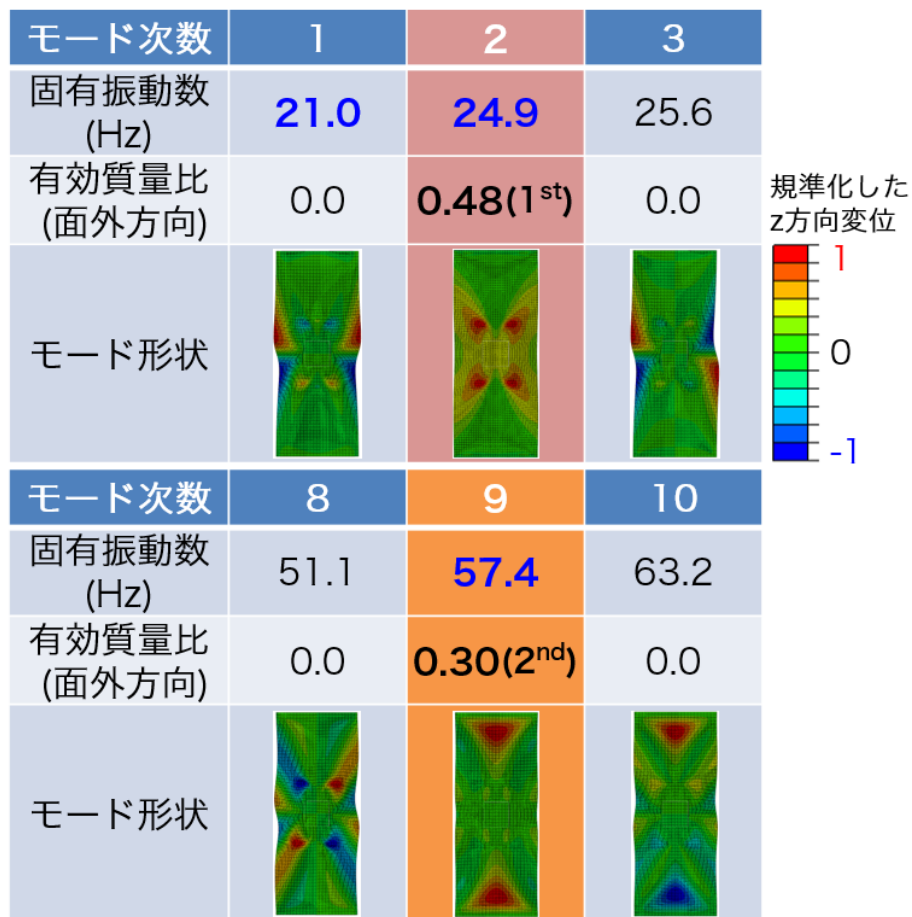


図 3.8: 固有値解析結果：曲率を有する膜面デバイス付き膜の張力 255mN での振動モード。青字は図 3.7 の共振振動数に近い固有振動数。2 次, 9 次モードは有効質量比がそれぞれ 1, 2 番目に大きい。コンターは最大変位を 1 として規準化。

3.5.2 張力と共振振動数の関係

反った膜面デバイス付き膜・平膜の張力と共振振動数の関係の実験結果を固有値解析結果 (図 3.6) の一部とあわせて図 3.9, 表 3.3, 3.4 に示す。実験と解析で差 (平均して実験値は解析値より 10% 小さい) はあるが, 実験における反った膜面デバイスの有り・無しでの固有振動数の大小関係は解析と同じである。したがって, 反った膜面デバイスを貼付すると, 低張力では固有振動数が増大し, 高張力では固有振動数が減少するという解析結果の定性的な傾向が実験でも確認された。なお, 張力 9800 mN のとき, 膜 2 種ともに実験値は解析値より約 15% 小さく, 各種 3 試料での標準偏差が約 3, 4 Hz と他の張力での約 2 倍に増大している。この原因は, 実験装置の問題であり, 重りから実際に膜にかかる張力が膜上辺の膜締め付け板による固定などで減衰したこと, 9800 mN ではポリイミドテープがアルミ棒から若干はがれ, その

度合いにばらつきが生じたこと等であると推測する。

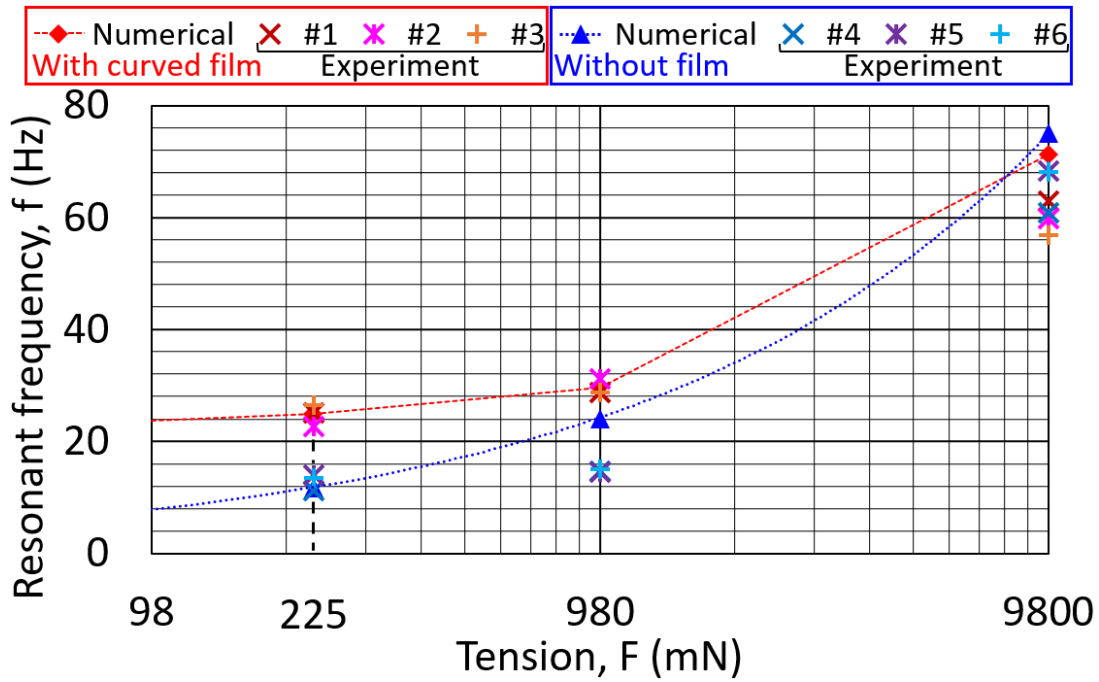


図 3.9: 実験・解析結果：曲率を有する膜面デバイス付き膜・平膜の張力と共振振動数の関係。
1, 2, 3 は曲率を有する膜面デバイス付き膜の 3 試料。# 4, 5, 6 は平膜の 3 試料。

表 3.3: 実験・解析結果：反った膜面デバイス付き膜の張力と共振振動数の関係。SD は標準偏差。解析は有効質量比（面外方向）最大の固有振動数。

張力 (mN)	実験 (Hz)					解析 (Hz)
	#1	#2	#3	SD	平均	
9800	63.0	59.8	56.9	3.1	59.9	71.2
980	28.7	31.2	28.7	1.4	29.5	29.6
255	25.2	22.7	26.5	2.0	24.8	24.9

表 3.4: 実験・解析結果：平膜の張力と共振振動数の関係。SD は標準偏差。解析は有効質量比（面外方向）最大の固有振動数。

張力 (mN)	実験 (Hz)					解析 (Hz)
	#4	#5	#6	SD	平均	
9800	60.9	68.4	68.1	4.2	65.8	75.1
980	14.6	14.5	15.1	0.31	14.7	24.1
255	11.3	13.9	13.4	1.4	12.9	11.8

3.6 結言

有限要素解析手法の検証のため、および、膜面デバイスの曲率が面外方向の有効質量比最大の固有モードの固有振動数に与える影響をみるため、曲率を有する膜面デバイス付き矩形膜（地上実験用部分膜モデル）を対象に、曲率のない膜面デバイス付き膜・膜面デバイスの付いていない平膜と比較しながら固有値解析・振動実験を実施した。その結果、解析の固有振動数と実験で測定した共振振動数の傾向が一致し、変形解析および固有値解析が妥当なことを確認した。加えて、曲率を有する膜面デバイス付き膜における、張力と固有振動数の関係を明らかにし、以下の知見を得た。

- 低張力の場合、曲率によって固有振動数が顕著に増大する傾向が明らかとなった。この原因は、曲率による面外変形で断面二次モーメントが増大し、曲げ剛性が増大したと考えられる。
- 高張力の場合、曲率に関わらず膜面デバイス付き膜は固有振動数が僅かに減少する傾向が明らかとなった。この原因は、曲率による面外変形が減少することで、膜面デバイス貼付による質量増大の影響が顕著になり、固有振動数が低下したと考えられる。

第 4 章

軌道上膜モデルを用いた曲率を有する膜面デバイス付き膜の変形特性

4.1 緒言

本章では、第 2, 3 章で検証した地上実験用部分膜モデルを拡張して複雑化し、曲率を有する膜面デバイスが軌道上の膜の変形に与える影響を静解析によって明らかにする。ここでは、ソーラーセイルのペタル膜に相当する自由境界の膜で外力が無いものを対象とし、膜形状や膜面デバイスの向き・位置と変形の関係性を明らかにする。まず、膜面デバイス単体が貼付された膜を扱い、膜形状と膜面デバイスの向き、膜形状によっては膜面デバイスの位置も変化させ、それらが変形へ及ぼす影響を明らかにする。次に、膜面デバイス 2 枚が貼付された膜を扱い、膜面デバイスの配置を変化させ、膜面デバイスが変形に及ぼす作用が、膜面デバイス単体の作用の重ね合わせでどの程度成立するか、ならびに、成立しやすい配置は存在するのかを明らかにする。これにより、膜面デバイス 1 枚および 2 枚が変形に与える影響を考察する。

4.2 膜面デバイス単体の変形特性に与える影響

第 2 章では、解析結果が実験結果と定性的に一致することを確認したが、地上実験と比較する上での制約が変形特性に大きく影響した可能性がある。例えば、膜サイズが小さくて膜面デバイスと膜辺が近いこと、膜形状、一部の膜辺を固定したこと等は変形に影響し得る。本節では、膜形状等の条件を変更した静解析を実施し、曲率を有する膜面デバイス単体が膜変形に与える影響について考察する。解析の実行時間との兼ね合いになるが、広範囲での影響をみるため、膜サイズは膜面デバイスのサイズに対して極力広くする。膜形状の影響をみるため、ソーラーセイルとして検討されている円形膜・正方形膜・正三角形膜・台形膜に加えて、正五角形膜・正六角形膜をそれぞれ解析する。円形膜は外周に対して等方的であり、他の形状と比

較しやすく、一般的な変形形状になると考えられる。台形膜は IKAROS と次期ソーラー電力セイルの膜 1 ペタルに相当する。正方形膜・正三角形膜・台形膜では、膜面デバイスの向きを回転した解析も行う。また、正方形膜・台形膜では、膜面デバイスの位置を変えた解析も行う。軌道上の宇宙構造物は宇宙空間に浮いているため、宇宙構造物全体としての境界条件は free-free であり、全境界が自由端となる。現状のソーラーセイルの場合、スピン型・ブーム型ともに、膜辺は構造物で固定されず、自由端に近いと考えられる。例えば、スピン型の IKAROS・OKEANOS では、ペタルの斜辺はブリッジで接続されるが、正方形膜としての外周は、4 隅が先端マスにつながるのみで、自由端に近い。また、ブーム型では、膜辺をブームに固定せず、ブーム先端とその近傍の膜頂点部およびブーム根元側の宇宙機本体とその近傍の膜頂点部を固定する設計が多く、自由端に近い。そこで、解析では、膜頂点を固定することも考えられるが、今回は膜頂点を含めて全膜辺を自由端とする。また、膜に張力を付加するほうが実際の運用での条件に近いが、解析の実行時間が増大したため、本章の解析は張力無しの条件とした。なお、以下の全ての解析モデルのメッシュサイズは、シワ 1 波長に対して約 6 要素あれば精密な結果を得るのに十分 [22] という条件を満足している。

4.2.1 曲率を有する膜面デバイス付き円形膜の変形

図 4.1 に曲率を有する膜面デバイス付き円形膜 (自由端) の解析モデルを示す。膜と膜面デバイスの材料特性は表 2.1~2.2 と同じである。膜面デバイスは構造特性も同じであるが、膜の構造特性は半径 400 mm の円に変更している。膜のメッシュはアドバンシングフロント法で作成し、円周を 471 分割して円周上の要素の長さを 5.3 mm とした。膜面デバイスのメッシュサイズは 1 mm × 1 mm とした。膜面デバイスとその下の膜の節点の x,y 位置がずれると変形形状に影響するため、x,y 位置を一致させた。

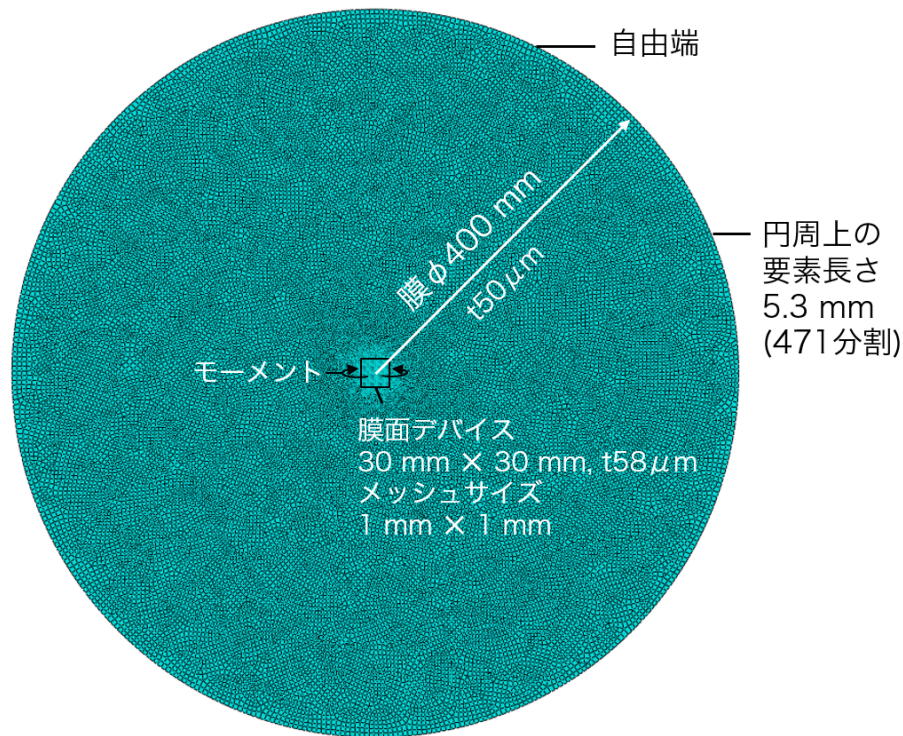


図 4.1: 曲率を有する膜面デバイス付き円形膜 (自由端) の解析モデル

図 4.2 に比較的一般的な変形形状と考えられる円形膜での解析結果を示す。2.5 節の解析・実験結果同様に、曲率を有する膜面デバイスを中心とした X 状のシワが生じている。2.5 節の解析・実験結果では、矩形膜の上下端を完全固定としていたが、この円形膜は全周が自由端なので、上下方向 (y 方向) の端部も面外変形しており、左右端は、2.5 節の矩形膜とこの円形膜ともに自由端のため、膜面デバイス水平方向に位置する端部の辺が最もたわんでいる。

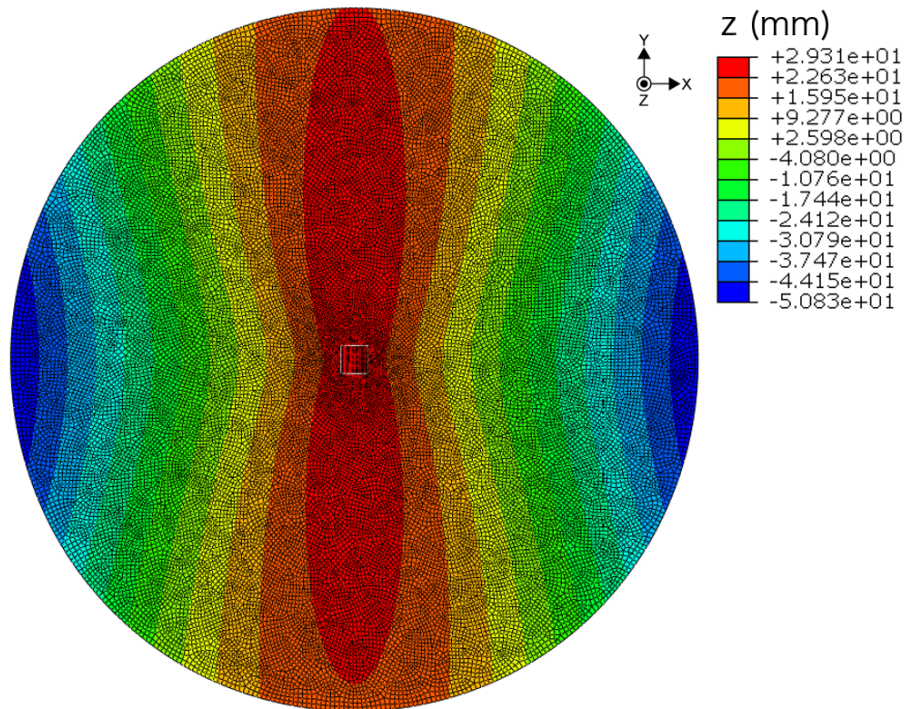


図 4.2: 曲率を有する膜面デバイス付き円形膜 (自由端) の解析結果

4.2.2 曲率を有する膜面デバイス付き正方形膜の変形

図 4.3 に曲率を有する膜面デバイス付き正方形膜 (自由端) の解析モデルを示す。膜は $800\text{ mm} \times 800\text{ mm}$ である。膜中心に曲率を有する膜面デバイス ($30\text{ mm} \times 30\text{ mm}$) が貼付されている。メッシュサイズを細かくしつつも計算コストを抑えるため、領域によってメッシュサイズを変えた。黄色の点線で囲まれた 4 領域のメッシュサイズは $3.85\text{ mm} \times 3.85\text{ mm}$ ，マゼンタの点線で囲まれた 4 領域のメッシュサイズは $3.85\text{ mm} \times 1\text{ mm}$ ，膜面デバイスおよびその下の膜の領域のメッシュサイズは $1\text{ mm} \times 1\text{ mm}$ である。

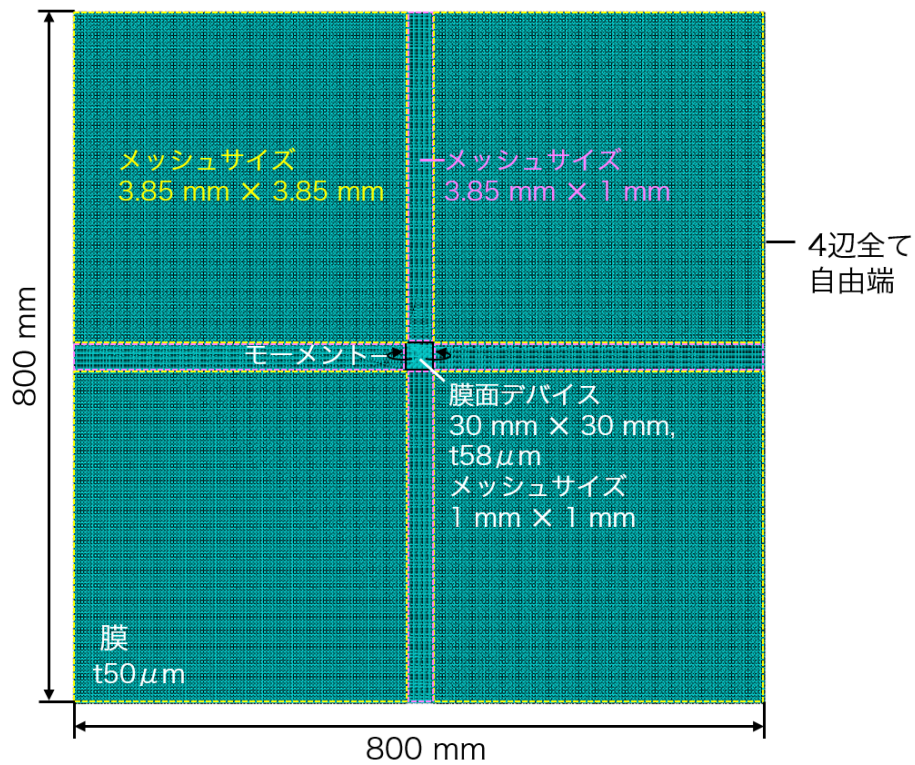


図 4.3: 曲率を有する膜面デバイス付き正方形膜 (自由端) の解析モデル

図 4.4 に解析結果を示す．図 4.2 の円形膜同様の形状になっており，変形後の円形膜を正方形に切り抜いたら，正方形膜の変形形状に近いと考えられる．

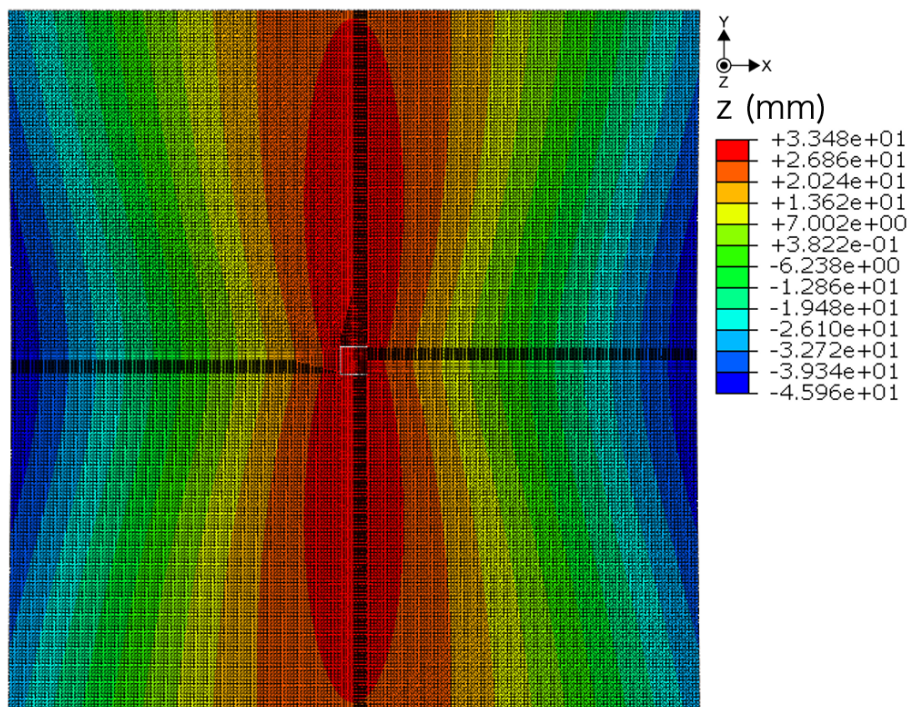


図 4.4: 曲率を有する膜面デバイス付き正方形膜 (自由端) の解析結果

4.2.2.1 膜面デバイスの向きのパラメータ解析

解析モデルは図 4.3 のモデルをもとにしているが、膜のメッシュはアドバンシングフロント法で作成するように変更した。膜面デバイスを z 軸正方向 (反時計) 周りに回転させた結果を図 4.5 に示す。回転角の範囲は対称性を考慮し、10, 20, 30, 45 度と全範囲を網羅した。

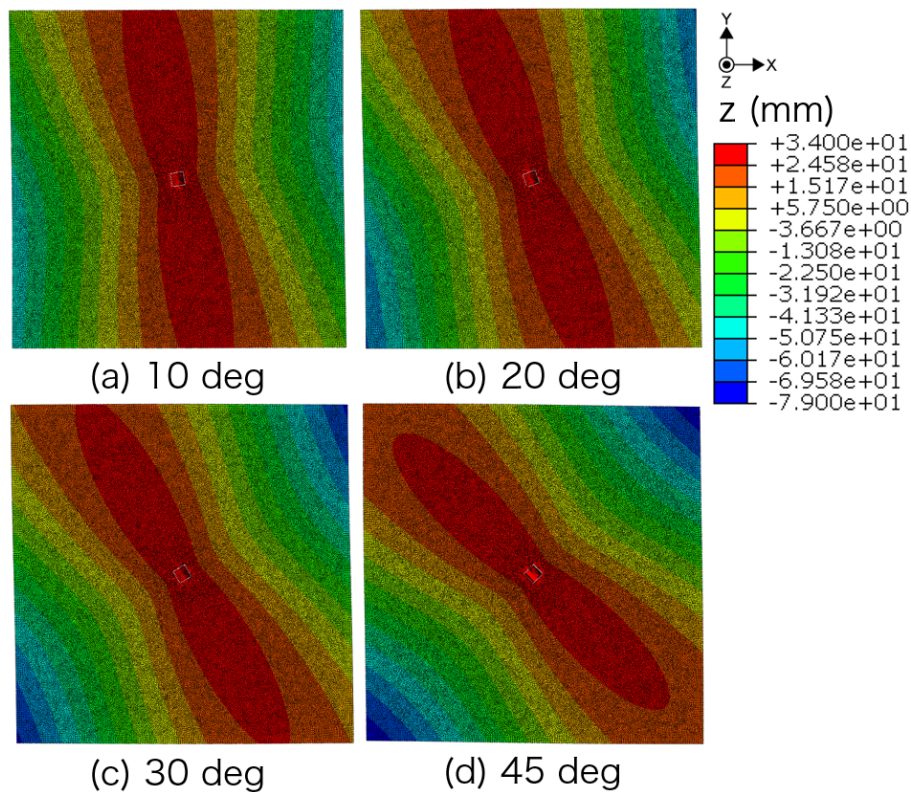


図 4.5: 正方形膜 (自由端) 上の曲率を有する膜面デバイスを回転させた解析結果

解析結果より、膜面デバイスの回転によって変形形状のパターンが大きく様変わりすることはなく、膜面デバイスの回転に伴いパターンも回転していることがわかる。ただし、膜面デバイスの左右の膜辺に生じる $-z$ 方向へ面外変形する領域 (青色) は、右上・左下の頂点へ片寄るようにねじれている。なお、回転角が45度するとき、 $-z$ 方向への変形量が最大となっているが、膜面デバイスの左右辺から頂点までの距離が最大となるためと考えられる。

4.2.2.2 膜面デバイスの位置のパラメータ解析

図 4.6 に曲率を有する膜面デバイス単体が貼付された正方形膜 (自由端) の解析モデルを示す。基準となる慣性座標系は膜面中立面上の中心に原点 O をとる直交座標系である。正方形膜 ($800 \text{ mm} \times 800 \text{ mm}$, $t50 \text{ }\mu\text{m}$) に膜面デバイス ($30 \text{ mm} \times 30 \text{ mm}$, $t58 \text{ }\mu\text{m}$) が1つ貼付されている。膜面デバイスの位置は、その中心の座標を (x, y) で表し、対称性を考慮して第一象限において、 $0, 30, 200, 300 \text{ mm}$ の組み合わせで格子状に変化させた。膜面デバイスの曲率はモーメント付加により与えた。境界条件は膜4辺全てが自由端で6自由度をもつ。張力は無い。メッシュサイズは膜・膜面デバイスともに $5 \text{ mm} \times 5 \text{ mm}$ とした。要素は S4R である。

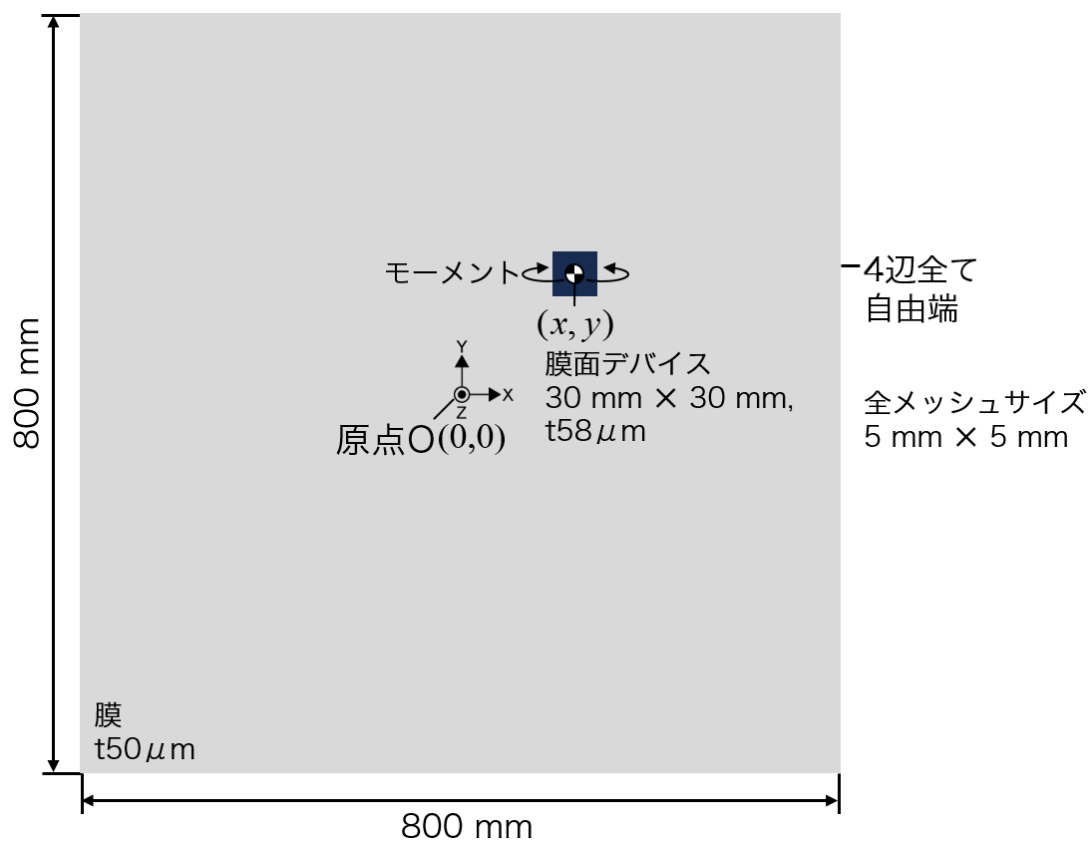


図 4.6: 曲率を有する膜面デバイス単体が貼付された正方形膜 (自由端) の解析モデル

図 4.7 に曲率を有する膜面デバイス単体付き正方形膜 (自由端) の膜面デバイスの配置を変えた解析結果による形状を示す. (x, y) の値が大きくなるほど境界に近づくため, 変形パターンが大きく変化している. y 方向への移動は, 変形パターンが y 方向へ移動して, 境界で途切れるようになる傾向がある. x 方向への移動は, 変形パターンが x 方向へ移動して, 境界で途切れずに境界上の変形パターンがおおむね維持され, 膜面デバイス中心から半分の $-x$ 側の変形パターンが引き伸ばされるように拡大し, $+x$ 側は縮小するようになる傾向がある. また, その面外変形量は, 膜面デバイスが境界に近づくほど, 全体的に減少する.

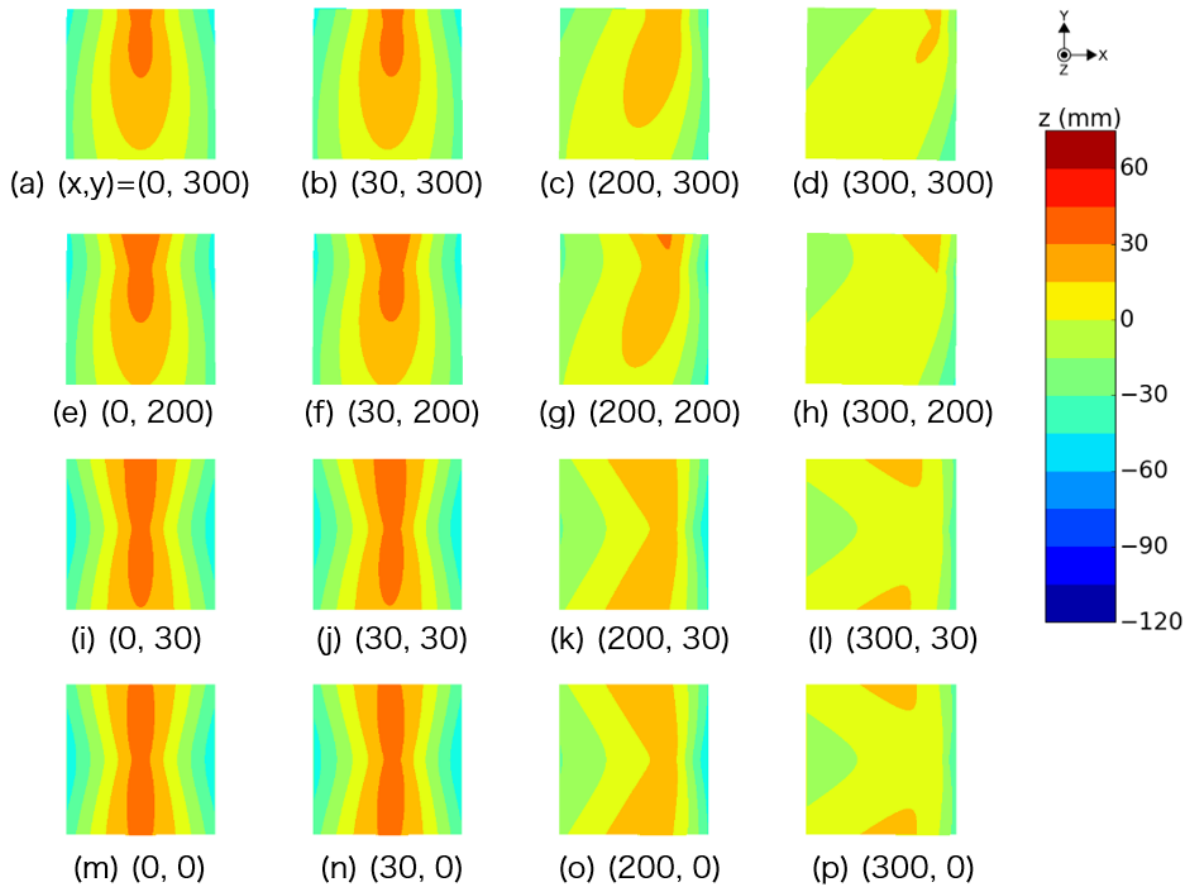


図 4.7: 曲率を有する膜面デバイス単体付き正方形膜 (自由端) の膜面デバイスの配置を変えた解析結果による形状. (x,y) は移動させた膜面デバイスの中心位置 (単位 : mm).

4.2.2.3 膜面デバイスのアスペクト比のパラメータ解析

ここまでの解析で、膜面デバイスをアスペクト比 1:1 の正方形としたが、アスペクト比は様々な値をとり得る。例えば、IKAROS の薄膜太陽電池 1 枚はおよそ 20 cm × 30 cm でアスペクト比 2:3 である。そのため、アスペクト比のパラメータ解析を実施した。

図 4.3 のモデルをもとにして、膜面デバイスのモーメントを加えていない横辺の長さを変更し、膜面デバイスのサイズを 10 mm × 30 mm, 60 mm × 30 mm, つまり、アスペクト比 1:3, 2:1 に変化させた結果を示す (図 4.8)。

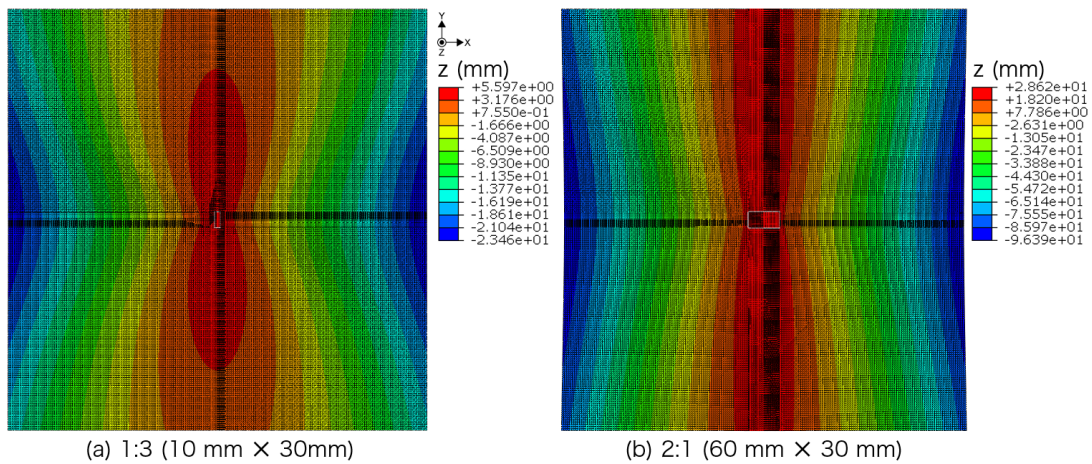


図 4.8: 正方形膜 (自由端) 上の曲率を有する膜面デバイスのアスペクト比を変化させた解析結果

結果より、アスペクト比が変化しても、面外変形のパターンは大きく変化しないことが分かる。このことは、膜形状が正方形ではなくても成り立つと予想する。

4.2.3 曲率を有する膜面デバイス付き正五角形膜と正六角形膜の変形

膜形状が変形におよぼす影響を考察するため、ソーラーセイルの膜形状として広く用いられていないが、正五角形膜と正六角形膜で解析を行う。

図 4.9 に曲率を有する膜面デバイス付き正五角形膜 (自由端) の解析モデル、図 4.10 に曲率を有する膜面デバイス付き正六角形膜 (自由端) の解析モデルを示す。中心に膜面デバイスが貼付されており、基本的に前述の円形膜・正方形膜と同様である。

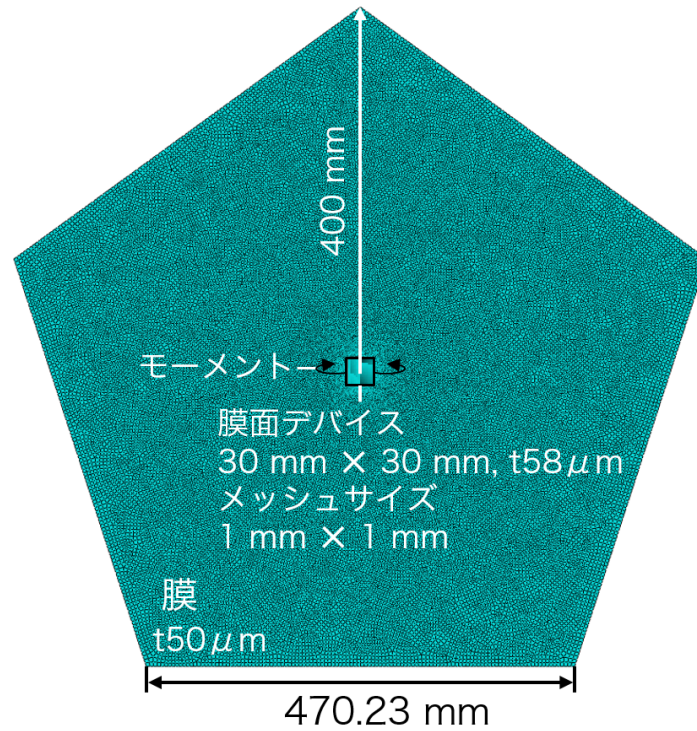


図 4.9: 曲率を有する膜面デバイス付き正五角形膜 (自由端) の解析モデル

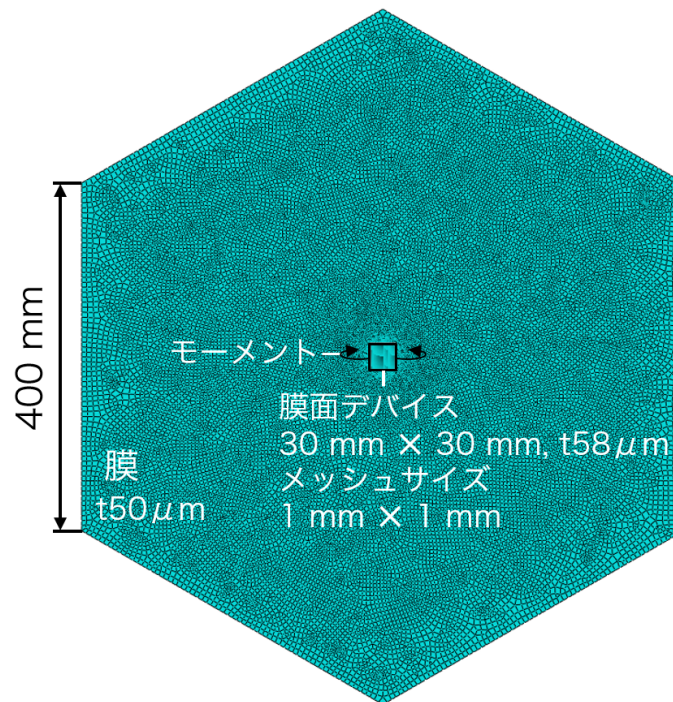


図 4.10: 曲率を有する膜面デバイス付き正六角形膜 (自由端) の解析モデル

図 4.11, 図 4.12 に正五角形膜と正六角形膜それぞれの解析結果を示す. 円形膜・正方形膜

での変形とおおむね同様の形状になっている。それらとの相違点としては、正五角形膜と正六角形膜では左右の頂点部の面外変位が大きくなっていることであるが、正方形膜同様、変形後の円形膜を正五角形・正六角形に切り抜いたら、これらの変形形状に近いと考えられる。つまり、この解析モデルだと、正方形・正五角形・正六角形では、曲率を有する膜面デバイスによる変形は、円形膜での変形を考えた後に、その円形膜を元の膜形状に切り抜いたような変形形状に近いと考えられる。このことは、自然数 $N > 3$ での正 N 角形で成立すると推測する。

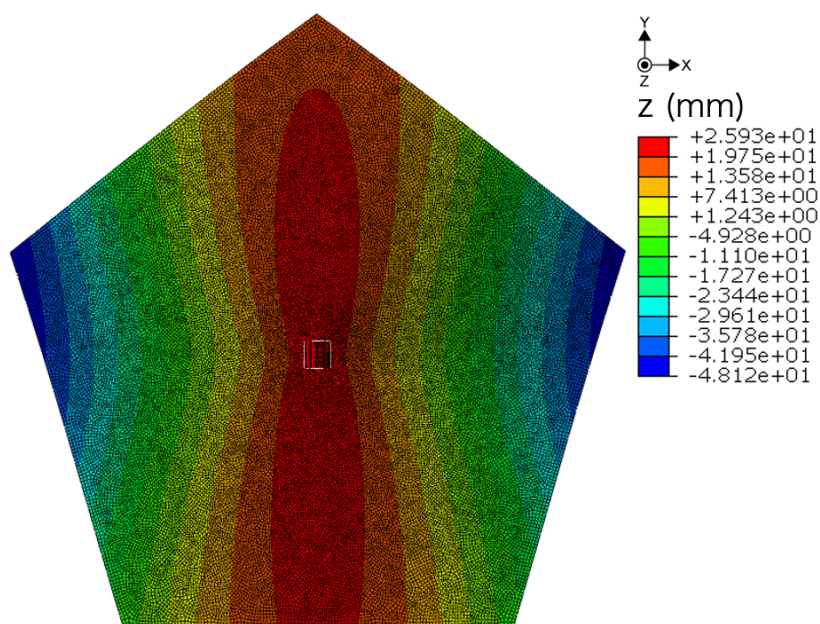


図 4.11: 曲率を有する膜面デバイス付き正五角形膜 (自由端) の解析結果

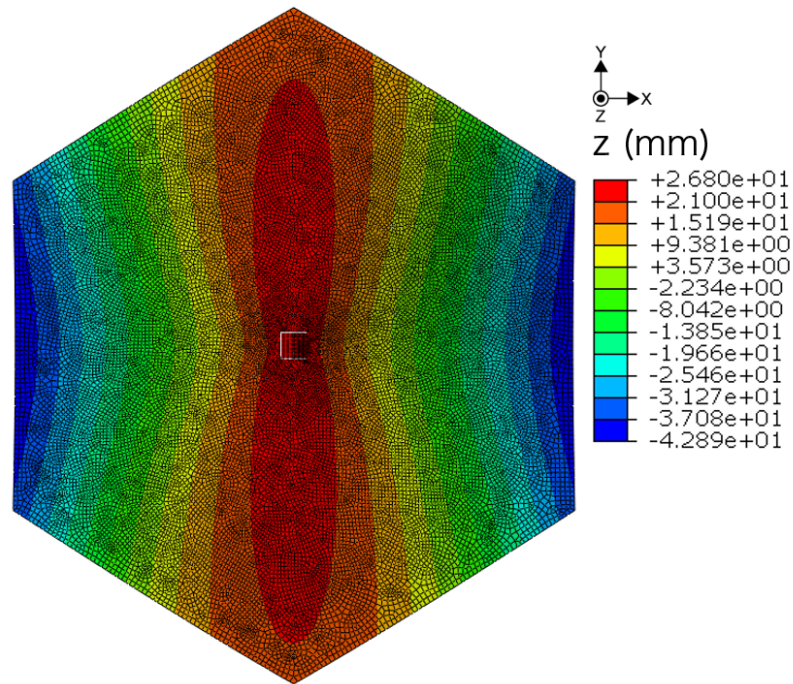


図 4.12: 曲率を有する膜面デバイス付き正六角形膜 (自由端) の解析結果

4.2.4 曲率を有する膜面デバイス付き正三角形膜の変形

図 4.15 に曲率を有する膜面デバイス付き正三角形膜 (自由端) の解析モデルを示す。膜面デバイスは正三角形の中心に貼付している。辺長は、IKAROS ペタルの 1/10 サイズとした台形膜 (4.2.5 節) の下底の長さに一致させた。

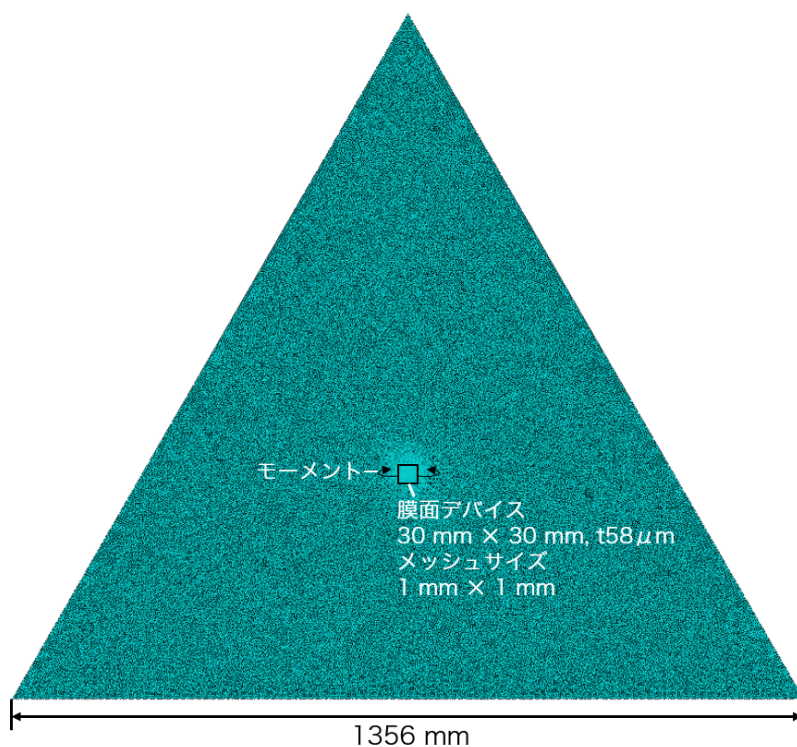


図 4.13: 曲率を有する膜面デバイス付き正三角形膜 (自由端) の解析モデル

4.2.4.1 膜面デバイスの向きのパラメータ解析

図 4.14 に正三角形膜 (自由端) 上の曲率を有する膜面デバイスを回転させた解析結果を示す。対称性を考慮して、30 度までの回転とした。解析結果より、正三角形膜では、変形後の円形膜から正三角形膜を切り抜いたときの変形形状とはなっていない。また、回転によって面外変形のパターンが変化している。図 4.14(a) では三角形形状に面外変形が生じており、三角形膜の上方の頂点の面外変形が小さい。(b) と (c) では回転に応じて (a) の面外変形パターンが歪んでいる。(d) では膜面デバイスのモーメントを付加した辺が正三角形膜の右辺と平行になっており、その面外変形パターンは円形膜・正方形膜でのパターンが歪んだ様であり、正三角形膜左下の頂点から右辺に引いた 2 等分線を軸とした対称形状である。(a)~(d) より、膜面デバイスの反りによって面外変形が反りで生じる面外変形方向に沿う様に生じるが、その先に頂点があって先細りになっていて、他方は辺があって裾広がりになっていると、裾広がりな側の変形量が大きくなる傾向があることが示唆される。裾広がりな側の変形量が大きくなる理由としては、定性的な考察にとどまるが、その 2 頂点が $-z$ 方向に大きく変形する位置にあるので、その間を結ぶ辺はたわんで $+z$ 方向への変形が大きくなると考えられる。

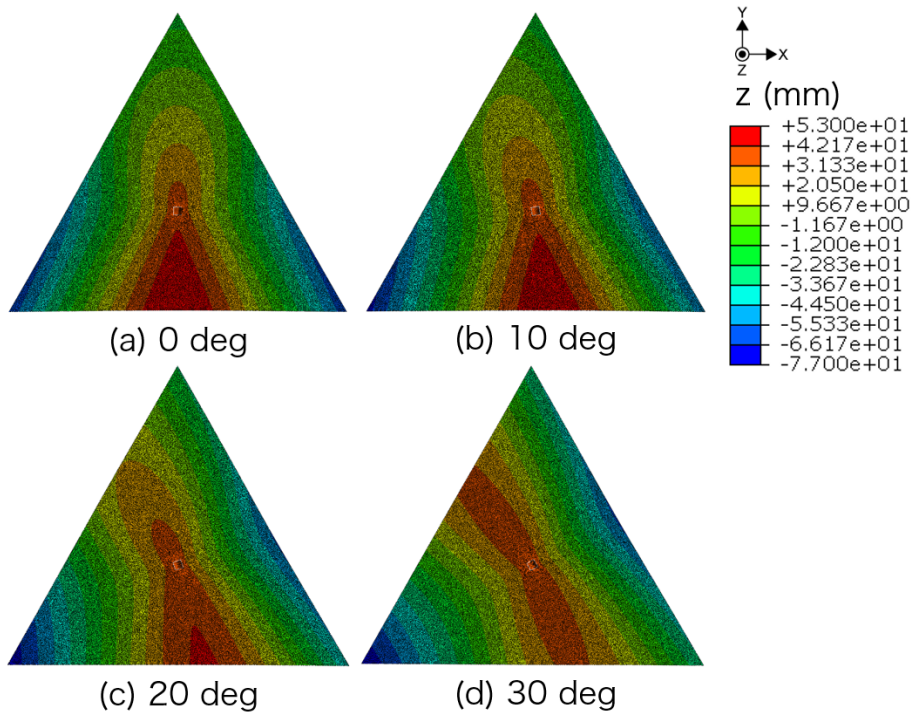


図 4.14: 正三角形膜 (自由端) 上の曲率を有する膜面デバイスを回転させた解析結果

4.2.5 曲率を有する膜面デバイス付き台形膜の変形

図 4.15 に曲率を有する膜面デバイス付き台形膜 (自由端) の解析モデルを示す。台形の辺長は IKAROS のペタルの 1/10 サイズとしており、直角二等辺三角形の直角部分を切り取った様な台形である。

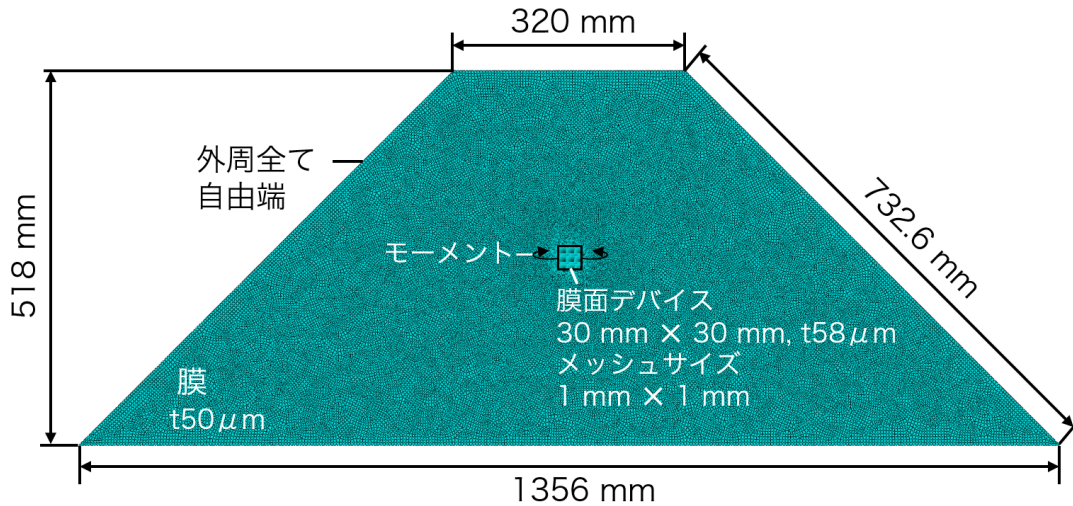


図 4.15: 曲率を有する膜面デバイス付き台形膜 (自由端) の解析モデル

4.2.5.1 膜面デバイスの向きのパラメータ解析

図 4.16 に台形膜 (自由端) 上の曲率を有する膜面デバイスを回転させた解析結果を示す。解析結果より、正三角形膜に類似した変形パターンとなっている。また、この台形膜の一部を拡張して直角二等辺三角形膜にしたときの変形パターン (図 4.17) と同様である。以上から、三角形膜の一部を切り取って台形膜とした場合、互いに同様の変形パターンになる傾向が示唆される。

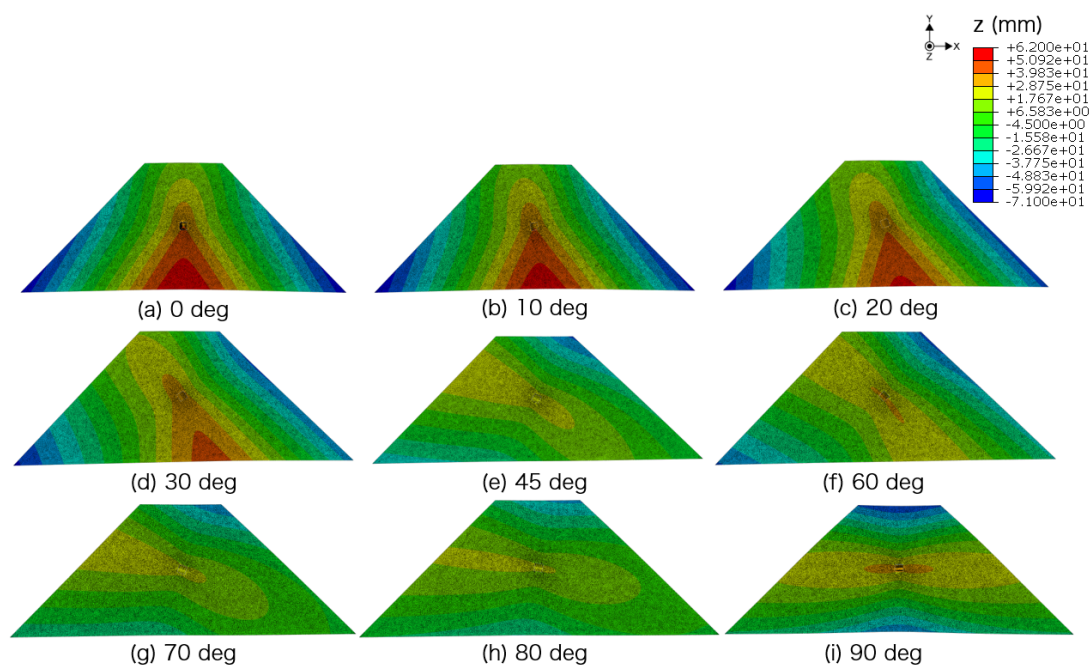


図 4.16: 台形膜 (自由端) 上の曲率を有する膜面デバイスを回転させた解析結果

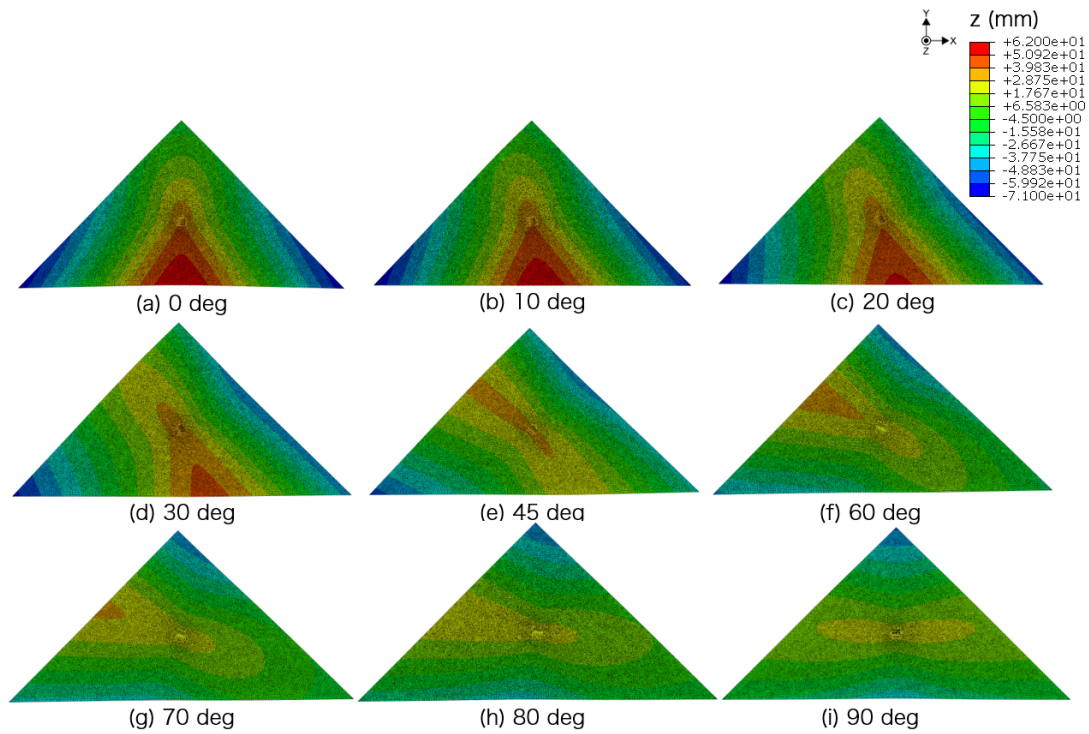


図 4.17: 直角二等辺三角形膜 (自由端) 上の曲率を有する膜面デバイスを回転させた解析結果

4.2.5.2 膜面デバイスの位置のパラメータ解析

図 4.15 の解析モデルを元にして、その膜面デバイスの位置を変える。基準となる慣性座標系は膜面中立面上の中心に原点 O をとる直交座標系であり、膜面デバイスの位置は、その中心の座標 (x, y) で表す (図 4.18)。対称性を考慮し、 $(x, y) = (0, 120), (120, 120), (0, 0), (120, 0), (240, 0), (0, -120), (120, -120), (240, -120), (360, -120)$ (単位: mm) で格子状に移動させた。

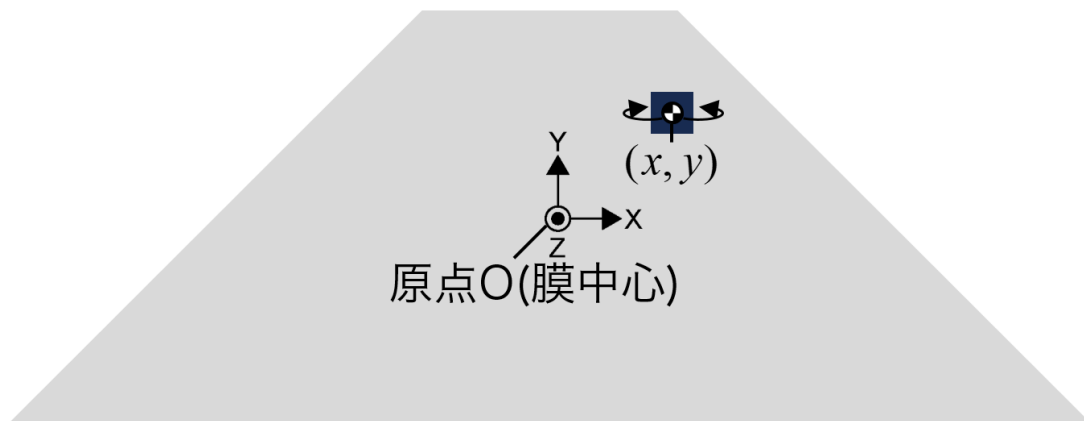


図 4.18: 曲率を有する膜面デバイス単体付き台形膜の解析での座標系と膜面デバイス位置の定義

解析結果を図 4.19 に示す。正方形膜での位置のパラメータ解析 (図 4.7) とは、 y 方向の傾向が異なる。 $+y$ 方向への移動は、変形パターンが $+y$ 方向へ移動して、境界で途切れずに境界上の変形パターンがおおむね維持され、膜面デバイス中心から半分の $-y$ 側の変形パターンが引き伸ばされるように拡大し、 $+y$ 側は縮小された様になる。 $+x$ 方向への移動も、変形パターンが $+x$ 方向へ移動して、境界で途切れずに境界上の変形パターンがおおむね維持され、膜面デバイス中心から半分の $-x$ 側の変形パターンが引き伸ばされるように拡大し、 $+x$ 側は縮小するようになる傾向がある。また、その面外変形量は、膜面デバイスが (f)、つまり、 y 方向中心軸上かつ下底に近い位置から離れるほど、全体的に減少する。

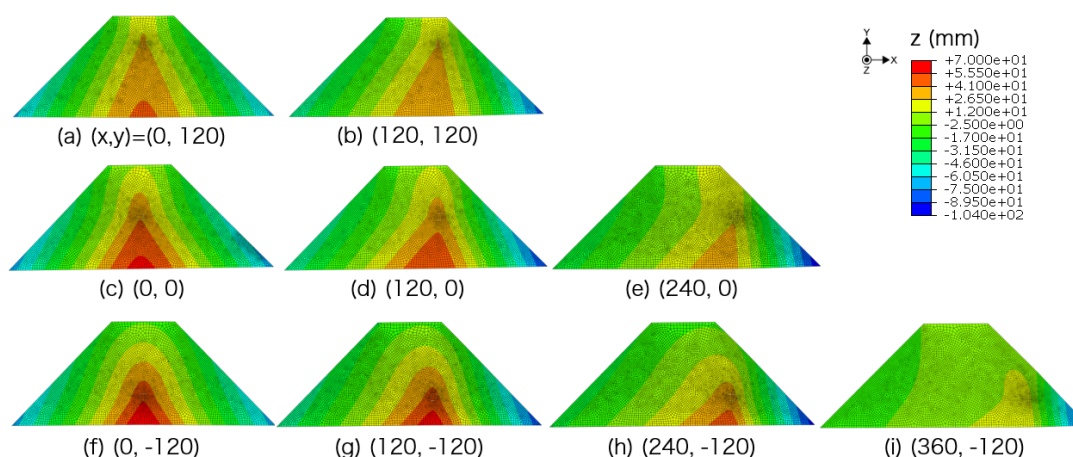


図 4.19: 曲率を有する膜面デバイス単体付き台形膜の膜面デバイス位置のパラメータ解析結果による形状。 (x, y) は移動させた膜面デバイスの中心位置 (単位 : mm)。

4.3 膜面デバイス 2 枚が変形特性に与える影響

4.3.1 概要

これまで、曲率を有する膜面デバイス単体が膜変形に与える影響をみてきた。しかし、実際には複数の膜面デバイスが貼付されることが多い。また、膜面デバイスの数が増大すると膜変形は多様になるが、膜面デバイス単体が及ぼす変形の重ね合わせで形状を線形近似できるかは、計算コストの低減、つまり、設計時間の短縮につながるため、簡易な予備設計において有用であり、その点において重要な問題といえる。そこで、本節では、位置が異なる膜面デバイス単体それぞれによる変形の重ね合わせで、膜変形が表せるかをみるため、膜面デバイス 2 枚が貼付された正方形膜の変形とそれら膜面デバイスと同じ配置で膜面デバイス単体が貼付された正方形膜 2 枚の変形を重ね合わせた形状を有限要素解析により比較する。正方形膜にした理由は、台形膜・三角形膜と比較して分かりやすい傾向がでると予想したためである。まず、正

方形膜に貼付された曲率を有する膜面デバイス 2 枚の相対位置を変化させた解析を行う。次に、前節で示した膜面デバイス単体が貼付された正方形膜での膜面デバイスの位置を変化させた解析 (図 4.7) をもとにして、膜面デバイス単体が貼付された正方形膜 2 枚の変形の重ね合わせの解析を行い、膜面デバイス 2 枚の相対位置を変化させた解析と比較する。比較点として、変形パターン・変形量に着目する。変形量については、適合度の指標として決定係数 R^2 を用いる。

4.3.2 曲率を有する膜面デバイス 2 枚の位置が正方形膜の変形特性に与える影響

図 4.20 に曲率を有する膜面デバイス 2 枚が貼付された正方形膜 (自由端) の解析モデルを示す。このモデルは、図 4.6 のモデルの膜中心に膜面デバイスを追加したものである。他の解析条件は同じであり、膜中心の膜面デバイスの位置は固定して、もう 1 つの膜面デバイスの位置を変化させて解析する。

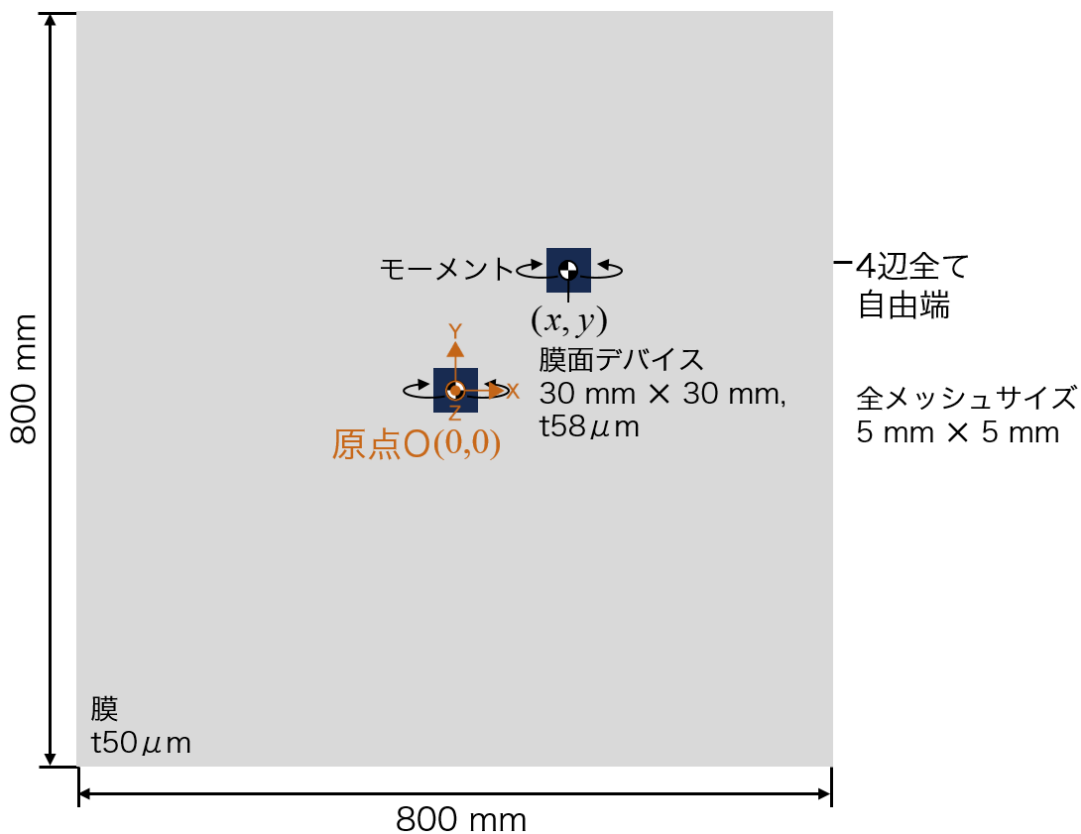


図 4.20: 曲率を有する膜面デバイス 2 枚が貼付された正方形膜の解析モデル

図 4.21 に曲率を有する膜面デバイス 2 枚付き正方形膜の 1 つの膜面デバイス配置を変えた解析結果による形状を示す。図 4.7 の膜面デバイス 1 つの場合と比較して、変形パターンが複

雑化し，面外変形量が増大する傾向にある．以下，この結果が，図4.7にあるような，中心に膜面デバイスが貼付された正方形膜と (x,y) の位置に膜面デバイスが貼付された正方形膜の形状の重ね合わせで表現できるかをみる．

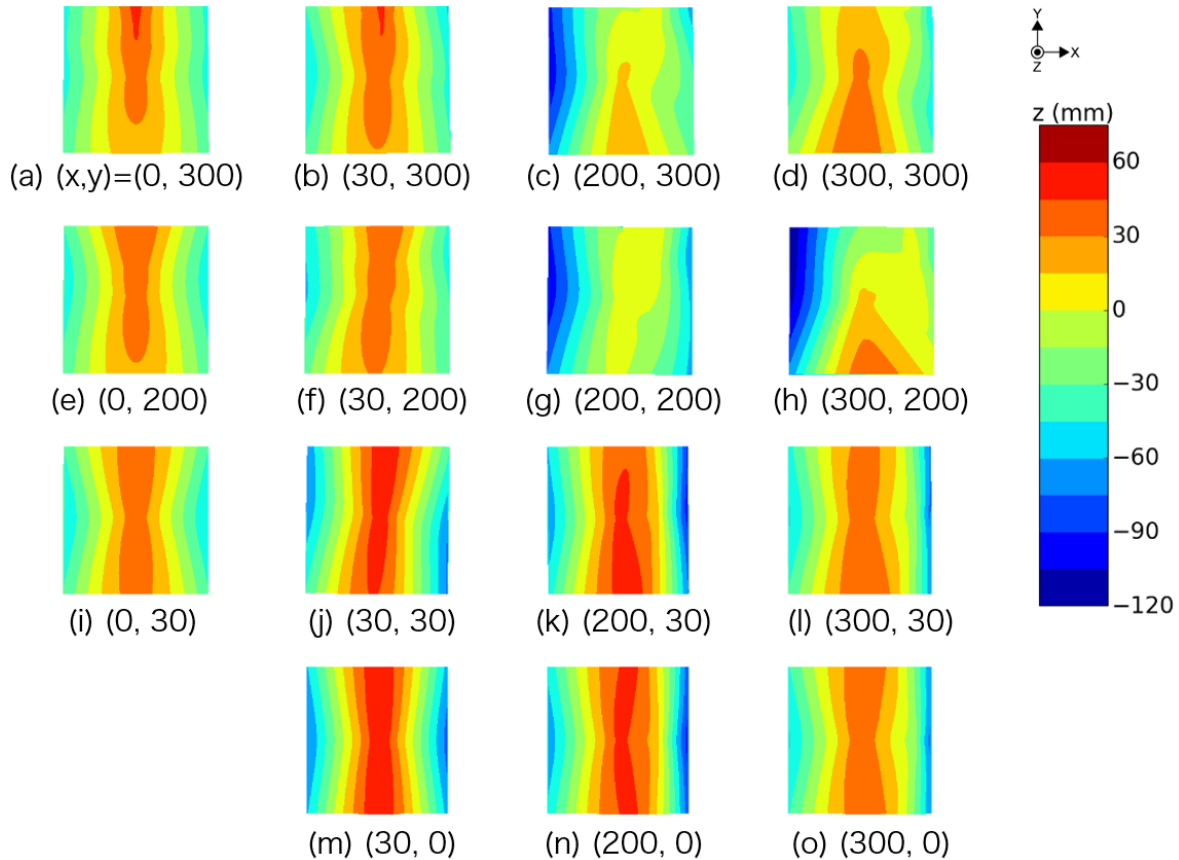


図4.21: 曲率を有する膜面デバイス2枚付き正方形膜の1つの膜面デバイス配置を変えた解析結果による形状．正方形膜中心に膜面デバイス単体が固定されており，もう1つの膜面デバイスの位置を変化させた． (x,y) は移動させた膜面デバイスの中心位置 (単位: mm)． $(x,y)=(0,0)$ は膜面デバイス同士が干渉するので空白とした．

重ね合わせの方法を説明する．膜のある節点 i の座標を (x_{1i}, y_{1i}, z_{1i}) とする．節点が位置的に対応するもう1つの膜において，節点 i の座標を (x_{2i}, y_{2i}, z_{2i}) とする．重ね合わせ後の節点 i の座標 (x'_i, y'_i, z'_i) を次式で表す．

$$\begin{aligned} x'_i &= \frac{x_{1i} + x_{2i}}{2} \\ y'_i &= \frac{y_{1i} + y_{2i}}{2} \\ z'_i &= z_{1i} + z_{2i} \end{aligned} \quad (4.1)$$

つまり， x,y については，和をとって重ね合わせると膜の長さが大きくなってしまうので，膜の

個数で割って平均をとり、 z については重ね合わせた。

図 4.22 に中心に膜面デバイスが貼付された正方形膜と (x, y) の位置に膜面デバイスが貼付された正方形膜の形状の重ね合わせを示す。図 4.21 と比較して、 x 方向に膜面デバイスを大きく移動させた (k),(l),(n),(o) は変形パターンと面外変形量がほぼ等しい。また、 y 方向に膜面デバイスを大きく移動させた (a),(b),(e),(f) と中心の膜面デバイスに隣接させた (i),(j),(m) は、(j)を除いて変形パターンはよく一致しているが、面外変形量は 2 倍ほど異なる。 x, y 方向に膜面デバイスを大きく移動させた (c),(g),(h) は変形パターンに相違がある。

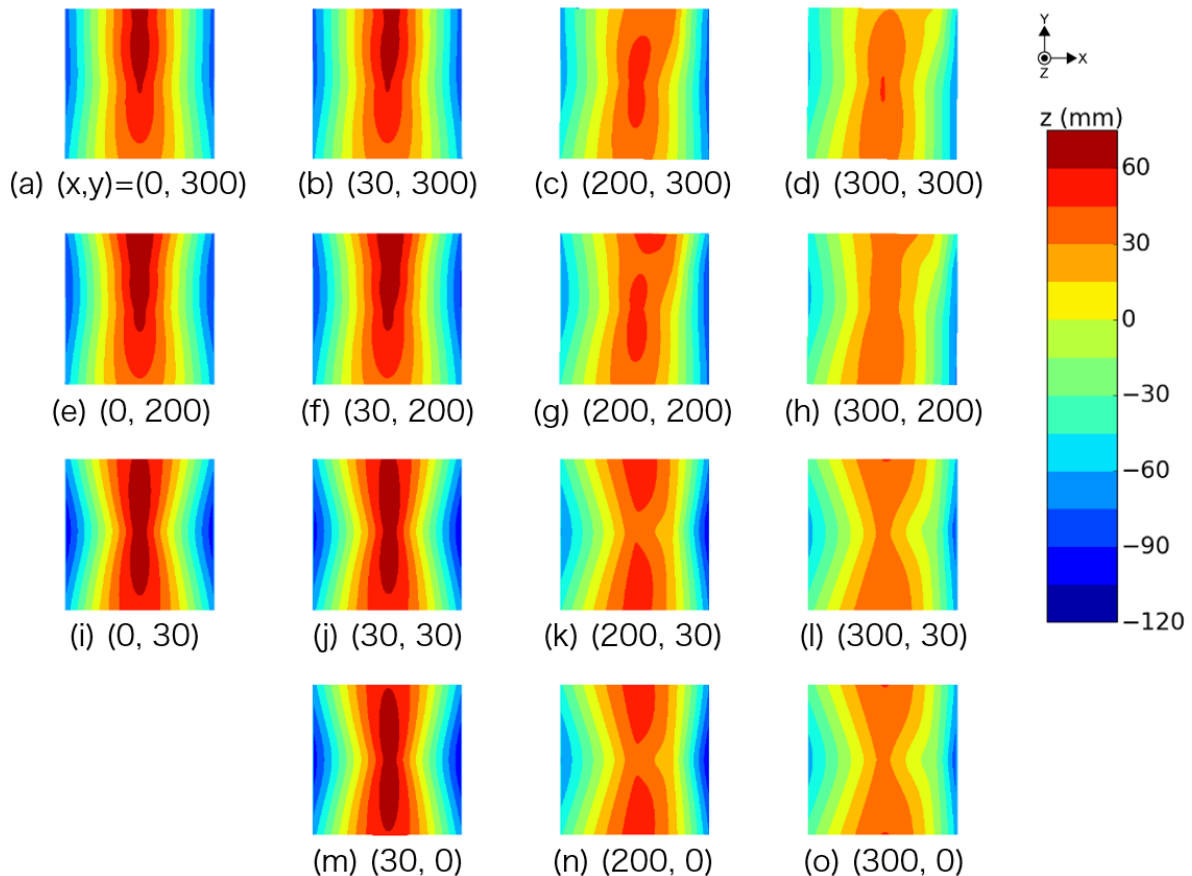


図 4.22: 中心に膜面デバイスが貼付された正方形膜と (x, y) の位置に膜面デバイスが貼付された正方形膜の形状の重ね合わせ。 $(x, y)=(0,0)$ は空白。

以上は定性的な考察であったが、重ね合わせの適合度を定量的に評価する指標として、残差二乗和を用い、0 に近いほど適合していると判断することが基本的である。しかし、この指標では、最大値が 1 に統一されておらず、モデルが違くと値の大きさが変化する。そのため、比較が煩雑になり、参考にしづらい。そこで、決定係数 R^2 を用いる。 R^2 は、被説明変数 (標本値) が説明変数 (推定値) から決定される度合いを表す指標となり、次式で表される。

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=0}^n (z_i - \hat{z}_i)^2}{\sum_{i=0}^n (z_i - \bar{z})^2} \quad (4.2)$$

ここで、 \hat{z}_i は推定値とし、 \bar{z} は標本値の平均とした。式 (4.2) の右辺第 2 項は残差二乗和 (分子) と全変動 (分母) の比率であり、この第 2 項が 0 に近い、つまり R^2 が 1 に近いほど推定値のあてはまりが良いことになる。ここでは、 z_i は膜面デバイス 2 枚が貼付された正方形膜の節点 i の z 座標とする。また、 \hat{z}_i は回帰方程式から求めることが通常であるが、重ね合わせ後の節点 i の z 座標とおき、 $\hat{z}_i = z'_i$ とする。

R^2 と膜面デバイス配置の関係を図 4.23, 表 4.1 に示す。これらの傾向は、当然、上述した定性的な傾向と矛盾しない。x 方向に膜面デバイスを大きく移動させると、変形パターンと面外変形量がほぼ等しく、 $R^2 \cong 1$ となる。また、y 方向に膜面デバイスを大きく移動させると、変形パターンはよく一致しているが、面外変形量は 2 倍ほど異なり、 $R^2 \cong 0.4$ となる。x,y 方向に膜面デバイスを大きく移動させると、変形パターンの相違が著しく、 R^2 は 0 以下となり、全く適合していない。ただし、 $(x,y)=(300,300)$ では $R^2 = 0.84$ となっているので、斜め方向に対しては形状が不安定であると示唆される。

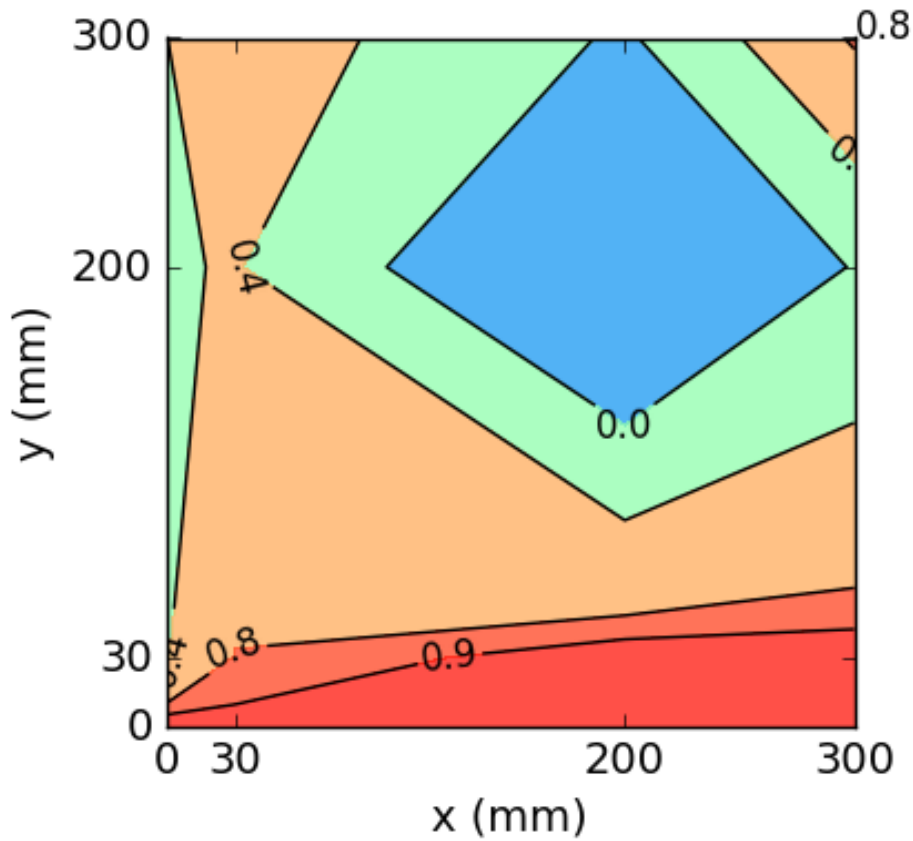


図 4.23: 決定係数 R^2 と膜面デバイス配置の関係. R^2 の計算は, 膜面デバイス 2 枚が膜中心および (x, y) 位置に貼付された正方形膜の面外位置 z を被説明変数とし, 同じ位置に対応するよう膜面デバイス単体が貼付された正方形膜それぞれ 2 枚の z の重ね合わせを説明変数とした. $(x, y)=(0, 0)$ での R^2 は膜面デバイス同士が干渉するので計算できないが, 便宜的に $R^2 = 1$ としてプロットした.

表 4.1: 決定係数 R^2 と膜面デバイス配置の関係

y (mm)	x (mm)			
	0	30	200	300
300	0.39	0.62	-0.05	0.84
200	0.37	0.42	-0.66	0.02
30	0.38	0.81	0.97	0.97
0	-	0.94	0.98	0.97

重ね合わせが成立または不成立となる原因について, 応力にもとづいて以下に考察する. 位置 $(x, y)=(0, 0), (200, 200)$ にそれぞれ 1 枚または 2 枚の膜面デバイスが貼付された正方形膜

の面外変形と最大主応力 (面内) σ_1 の分布を図 4.24 に示す. 図 4.24(a) の膜面デバイス 1 枚が $(x,y)=(0,0)$ の位置に貼付された正方形膜の σ_1 分布より, 膜面デバイスの x 方向には $\sigma_1 > 0$ Pa, y 方向には $\sigma_1 < 0$ Pa の領域が広がり, 膜面デバイスの対角線方向には $\sigma_1=0$ Pa の境界線がある. これは, x 方向は膜面デバイスの曲率によって張力が働き, y 方向はポアソン比の影響で圧縮力が働いたためである. 膜面デバイス 1 枚の位置を $(x,y)=(200,200)$ とした図 4.24(b) でも, 膜面デバイスを中心として同様の応力分布となっている. 膜面デバイス 2 枚が $(x,y)=(0,0), (200,200)$ の位置に貼付された正方形膜の図 4.24(c) では, 図 4.24(a), (b) の応力分布の重ね合わせが主に膜面デバイス 2 枚の間の領域で成立していない. これは, 応力が 0 Pa に近い領域は形状が不安定になりやすく, 図 4.24(a), (b) の応力分布で互いに $\sigma_1=0$ Pa の境界線付近に膜面デバイスがあり, そこで曲率により面外変形するので, 応力分布および形状の重ね合わせが不成立になるためと考えられる.

x 方向一直線上の位置 $(x, y)=(0, 0), (200, 0)$ に膜面デバイスが貼付された正方形膜の面外変形と最大主応力 (面内) 分布を図 4.25 に示す. また, y 方向一直線上の位置 $(x, y)=(0, 0), (0, 200)$ に膜面デバイスが貼付された正方形膜の面外変形と最大主応力 (面内) 分布を図 4.26 に示す. これらの場合では, 応力分布 (a), (b) で $\sigma_1=0$ Pa の境界線近くに相手の膜面デバイスが位置しないので, 重ね合わせが成立すると考えられる. 以上より, $\sigma_1=0$ Pa の領域付近に曲率を有する膜面デバイスを配置すると, 形状が不安定になり, 重ね合わせが不成立となることが示唆される.

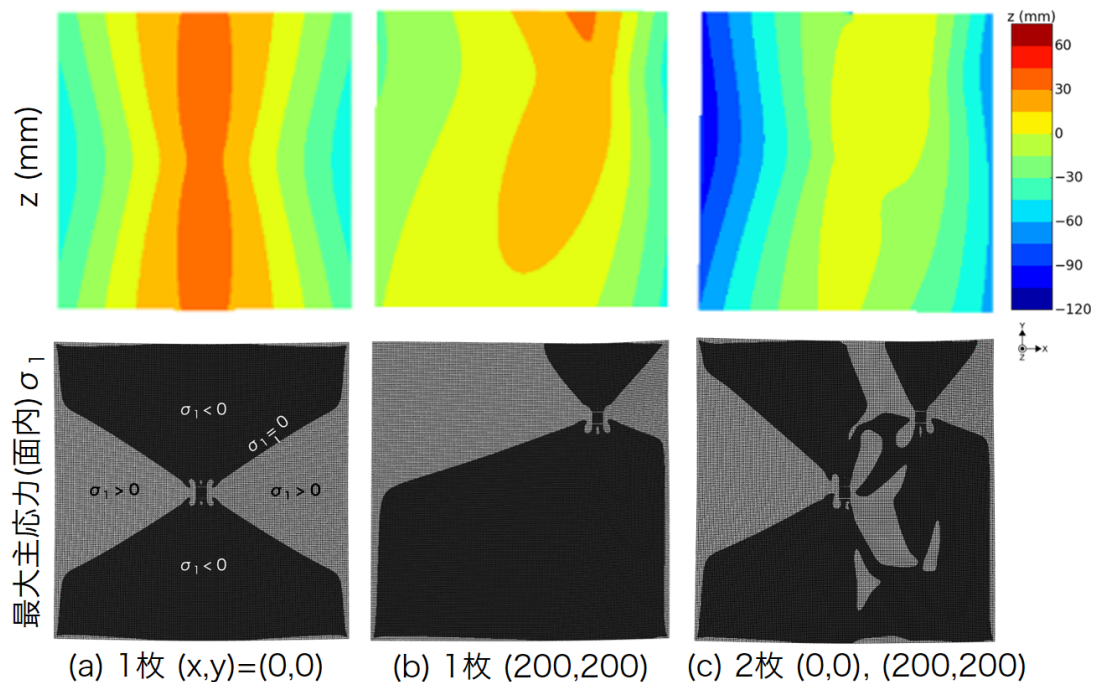


図 4.24: 膜面デバイスが貼付された正方形膜の面外変形と最大主応力 (面内) 分布 $(x, y)=(0, 0), (200, 200)$ (mm)

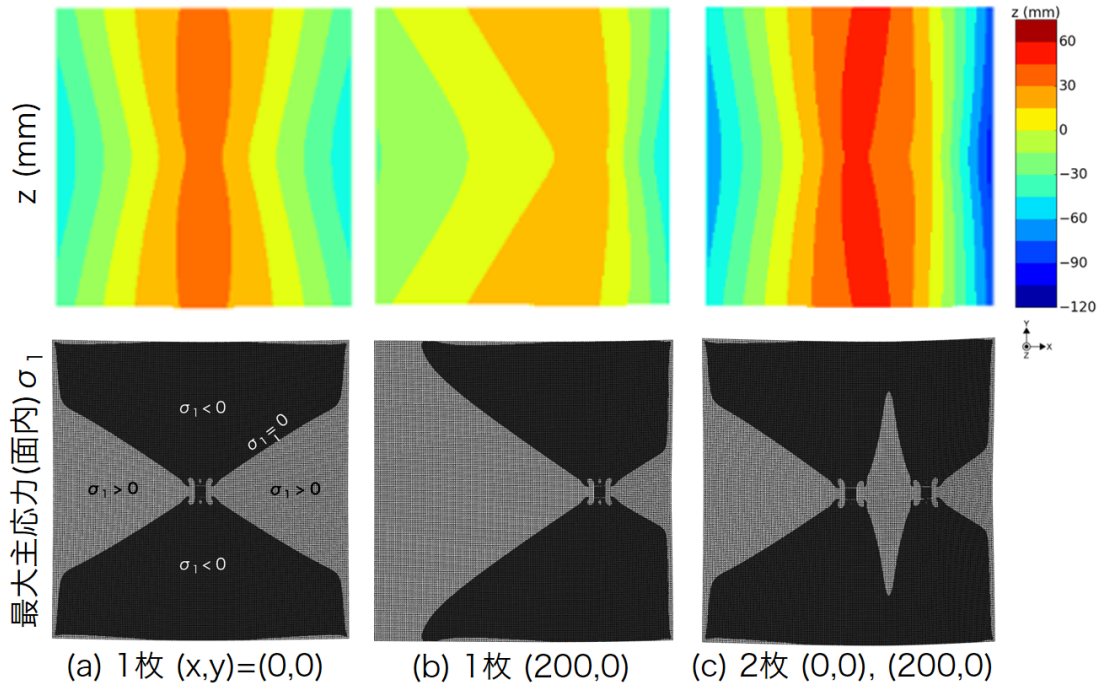


図 4.25: 膜面デバイスが貼付された正方形膜の面外変形と最大主応力 (面内) 分布 $(x, y)=(0, 0)$, $(200, 0)$ (mm)

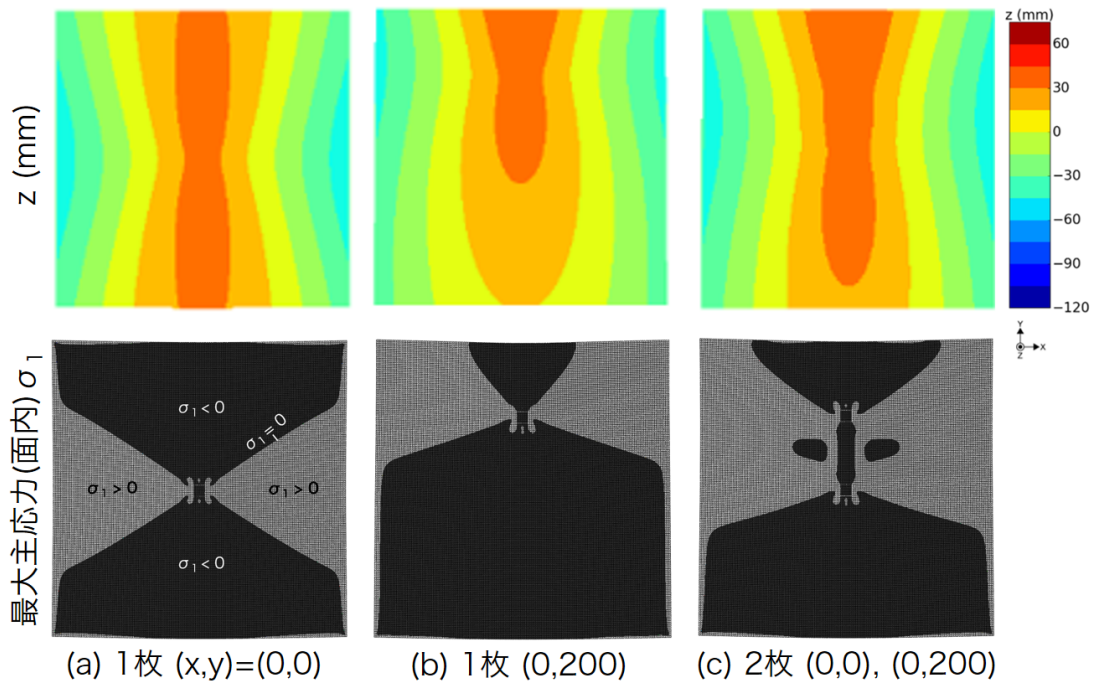


図 4.26: 膜面デバイスが貼付された正方形膜の面外変形と最大主応力 (面内) 分布 $(x, y)=(0, 0)$, $(0, 200)$ (mm)

4.4 結言

本章では、有限要素解析を用いて、膜面デバイス1枚および2枚が膜変形に与える影響を考察した。

まず、膜面デバイス1枚が貼付された膜を対象に、膜形状と膜面デバイスの向き・位置を変化させ、それらが変形へ及ぼす影響を考察した。正方形・正五角形・正六角形では、曲率を有する膜面デバイスによる変形は、円形膜での変形を考えた後に、その円形膜を元の膜形状に切り抜いたような変形形状に近いと考えられる。このことは、自然数 $N > 3$ での正 N 角形で成立すると推測する。一方、正三角形膜では、変形後の円形膜から正三角形膜を切り抜いたときの変形形状とはなっていない。膜面デバイスの反りによって面外変形が y 方向に生じるが、その先に頂点があって先細りになっていて、他方は辺があって裾広がりになっていると、裾広がりな側が変形量が大きくなる傾向がある。正方形膜では、膜面デバイスの回転によって変形形状のパターンが大きく様変わりすることはなく、膜面デバイスの回転に伴いパターンも回転していることが明らかになった。膜面デバイスの位置 (x, y) の値が大きくなるほど境界に近づくため、変形パターンが大きく変化した。膜面デバイスの y 方向への移動は、変形パターンが y 方向へ移動して、境界で途切れるようになる傾向がある。 $+x$ 方向への移動は、変形パターンが $+x$ 方向へ移動して、境界で途切れずに境界上の変形パターンがおおむね維持され、膜面デバイス中心から半分の $-x$ 側の変形パターンが引き伸ばされるように拡大し、 $+x$ 側は縮小するようになる傾向がある。また、その面外変形量は、膜面デバイスが境界に近づくほど、全体的に減少する。正方形膜において、膜面デバイスのアスペクト比が変化しても、面外変形のパターンは大きく変化しないことが明らかになった。このことは、膜形状が正方形ではなくても成り立つと予想する。台形膜では、正方形膜での位置のパラメータ解析とは y 方向の傾向が異なり、膜面デバイスの $+y$ 方向への移動は、変形パターンが $+y$ 方向へ移動して、境界で途切れずに境界上の変形パターンがおおむね維持され、膜面デバイス中心から半分の $-y$ 側の変形パターンが引き伸ばされるように拡大し、 $+y$ 側は縮小された様になる。 $+x$ 方向への移動も、変形パターンが $+x$ 方向へ移動して、境界で途切れずに境界上の変形パターンがおおむね維持され、膜面デバイス中心から半分の $-x$ 側の変形パターンが引き伸ばされるように拡大し、 $+x$ 側は縮小するようになる傾向がある。また、その面外変形量は、膜面デバイスが y 方向中心軸上かつ下底に近い位置から離れるほど、全体的に減少する。三角形膜の頂点付近の一部を切り取って台形膜とした場合、その三角形膜と台形膜は互いに同様の変形パターンとなり、頂点部の有無は全体形状に影響しない。

次に、膜面デバイス2枚が貼付された正方形膜の変形とそれら膜面デバイスと同じ配置で膜面デバイス単体が貼付された正方形膜2枚の変形を重ね合わせた形状を有限要素解析により比較し、膜変形は位置が異なる膜面デバイス単体それぞれによる変形を重ね合わせで表せるかを

考察した。その結果、下記が明らかとなった。

- 面外変形の重ね合わせは、膜面デバイスをシワが沿う方向 (y 方向) に並べると、定量的性質である変形量に関しては、決定係数 R^2 が比較的低く、成立しない。その一方で、定性的性質である変形パターンに関しては、膜面デバイス 2 枚が貼付された正方形膜と膜面デバイス単体が貼付された正方形膜 2 枚の重ね合わせがよく一致している。
- 膜面デバイスを縦方向に直交する x 方向へ並べると、面外変形の重ね合わせは、変形量に関しては、 $R^2 \approx 1$ と高く、おおむね成立している。変形パターンに関しては、y 方向よりは劣るが、一致している。
- 膜面デバイスを斜め方向に並べると、変形の重ね合わせは定量的にも定性的にも成立しない傾向にある。

したがって、膜面デバイス 2 枚を x または y 方向へ一直線に並べることに對しては、変形を重ね合わせでおおむね表せると考えられる。

第 5 章

軌道上膜モデルを複数結合した曲率を有する膜面デバイス付きソーラーセイル膜全体の変形特性

5.1 諸言

本章では、前章の軌道上台形ペタル膜モデルを用いて、IKAROS や OKEANOS 同様の膜構成のセイル全体に対して、曲率を有する膜面デバイスが与える変形への影響を解析的に明らかにする。まず、セイル全体の解析モデルを示す。次に、変形形状の評価指標として、1) 太陽輻射圧による面外変位にもとづいた面外剛性、2) 膜に生じる太陽輻射圧トルクを定義する。続いて、膜面デバイスの大小 2 通りの寸法それぞれに対して、向き・位置を個別に変えて解析を行い、指標を用いて全体形状を評価する。また、得られた解析結果をもとに、ソーラーセイルにおける膜面デバイス配置の設計指針の確立に向けた有効な方針を示す。

5.2 セイル全体の解析モデル

図 5.1 に 1 ペタル (台形膜) に 1 つの膜面デバイスが貼付されたソーラーセイル膜全体の解析モデルを示す。本章では、このモデルを基本とし、パラメータを変更して解析する。このモデルは IKAROS・次期ソーラー電力セイルの膜構造をモデル化している。膜が大型化および薄化すると、剛性が低下して、数値解析のステップ幅が減少し、実行時間が長期化する。そこで、実行時間を短縮するため、サイズは 1 辺 1356 mm と IKAROS の 10 分の 1 とし、膜厚 50 μm で IKAROS の膜厚 7.5 μm の 6.7 倍とした。したがって、相似則は考慮されておらず、剛性は上記の数十 m サイズのセイルに対して非常に大きくなっている。これは、本解析の目的は曲率を有する膜面デバイスによるソーラーセイル膜全体の変形を調査することであり、幾何

学的関係から膜全体の變形形状が決定され、剛性が小さくとも大局的な變形は同様という予想にもとづいている。ただし、低剛性な膜での解析は今後必要である。なお、本章の全ての解析モデルのメッシュサイズは、シワ 1 波長に対して約 6 要素あれば精密な結果を得るのに十分 [22] という条件を満足している。

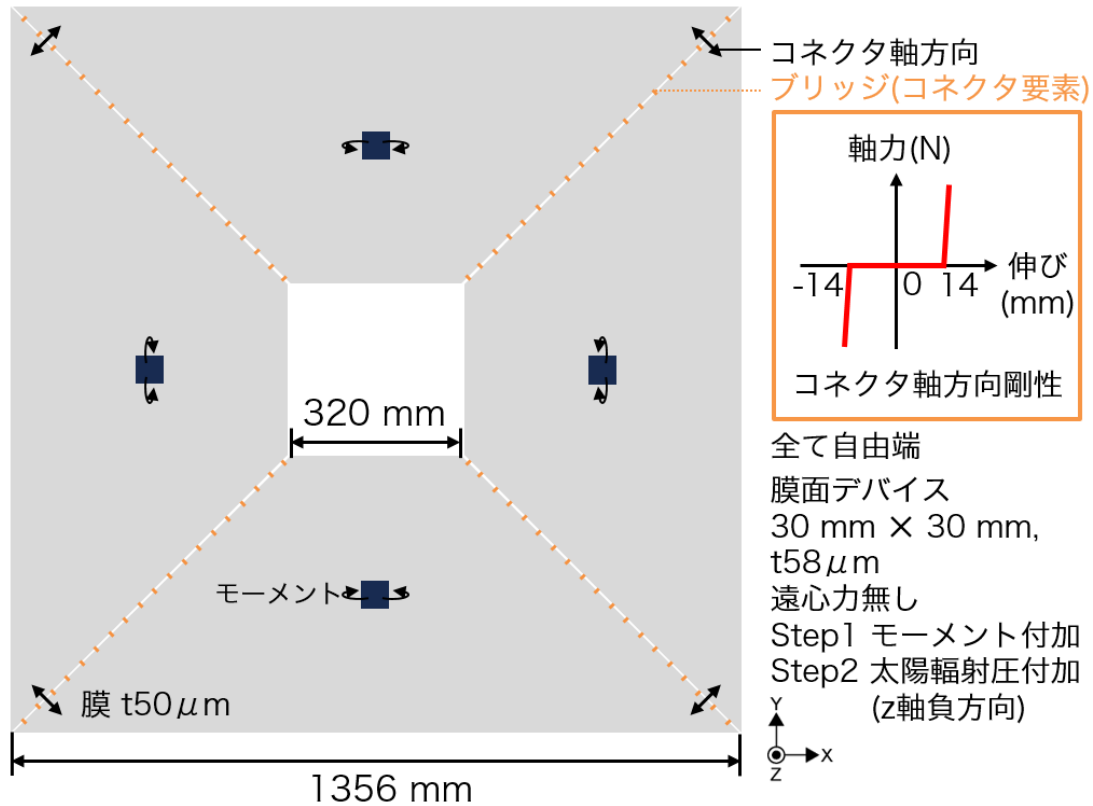


図 5.1: 1 ペタルに 1 つの膜面デバイスが貼付されたソーラーセイル膜全体の解析モデル

セイルは 4 つのペタルで構成される。1 つのペタルは 4.2.5 節で解析した台形膜モデルである。各ペタルの中心の表面上に膜面デバイスが 1 つある。隣接するペタル同士は間隔を空けて、各ブリッジの節点で接続されている。ブリッジ接続のモデリングには、Okuizumi et al. のモデル [7] を参考に、コネクタ要素を使用した。図 5.1 中のコネクタ軸方向に対して、間隔 ± 14 mm の範囲内に隣接する斜辺の相対距離が収まれば、膜同士に力が作用しないが、範囲外になると強い力が作用することで、間隔の空いたブリッジ接続をモデル化した。

軌道上を模擬するため、ペタルの辺は全て自由端である。実際の軌道上運用では、膜展開シーケンスがあるが、解析では、セイルが完全な平膜状態から開始され、膜面デバイスの曲率を模擬するためのモーメントを作用させる。実行時間短縮のため、遠心力等の張力は 0 としたが、太陽輻射圧は加えた。太陽輻射圧は z 軸負方向に太陽から 1 天文単位 (AU) の距離での圧力 (4.563×10^{-6} Pa) とした。簡易的に、鏡面反射のみを近似する太陽輻射圧モデルを採用し、Abaqus の設定にある表面力を使用して、變形で生じる回転に従って各要素面の法線方向

に圧力が加わるようにしたが、面の傾きで生じるコサインロスによる圧力値の減少は模擬できておらず、各面に加わる圧力は一定値をとる。なお、回転に従わない場合は、太陽光の吸収のみを考慮したモデルに相当する。解析ステップは 1) モーメント付加, 2) 太陽輻射圧付加の 2 ステップである。この順に付加した理由は、膜面デバイスの曲率のほうが変形に対して支配的と推測しており、軌道上では収納状態から曲率が形状に作用すること、および、解析で太陽輻射圧による面外変形を評価したいことである。

5.3 変形形状の評価指標

変形形状の評価には、形状自体に加えて、以下に示すように、太陽輻射圧による全節点の面外変位の二乗平均平方根 (RMS) に基づいた面外剛性、および、セイルに作用する太陽輻射圧トルクを指標とする。

5.3.1 面外剛性

一般的に、面外方向に力が作用したときの剛性を面外剛性という。薄い平膜の場合、曲げ剛性が支配的であるが、厳密にはせん断剛性も含まれる。ソーラーセイルのように、複雑な形状で、遠心力やブームで張力が生じており、境界条件が free-free の場合、面外剛性の評価は困難になる。そこで、以下のように簡易化した面外剛性の指標 k_z を用いる。

$$k_z = \frac{F}{z_{RMS}} = \frac{PA}{\sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n z_i^2}} \quad (5.1)$$

ここで、 F は太陽輻射圧によりセイルに作用する力、 z_{RMS} は太陽輻射圧で生じた面外変位の RMS、 P は太陽輻射圧、 A は平面状態でのセイル面積、 i は節点番号、 n は節点数、 z_i は i 番目の節点の太陽輻射圧で生じた面外変位である。つまり、太陽輻射圧と平面状態のセイル面積の積を太陽輻射圧による膜の全節点の面外変位の RMS で割った指標を面外剛性と定義する。RMS なので、面外変位の絶対値のみ抽出し (面外変位の正負方向の情報は失われ)、セイル境界条件は free-free なので、面外変位には剛体移動や剛体回転が含まれることに留意する。また、遠心力やブームによる張力が作用していない、つまり、幾何剛性が無い (面外剛性が低くなる) 条件で評価し、曲率を有する膜面デバイスによって変形したセイル膜を対象とする。

5.3.2 太陽輻射圧トルク

図 5.2 に膜の微小平面に加わる太陽輻射圧トルクを示す。2 章同様、座標系は慣性空間に固定した直角座標系であり、原点は変形前の膜の中立面上の中心である。有限要素解析結果の膜

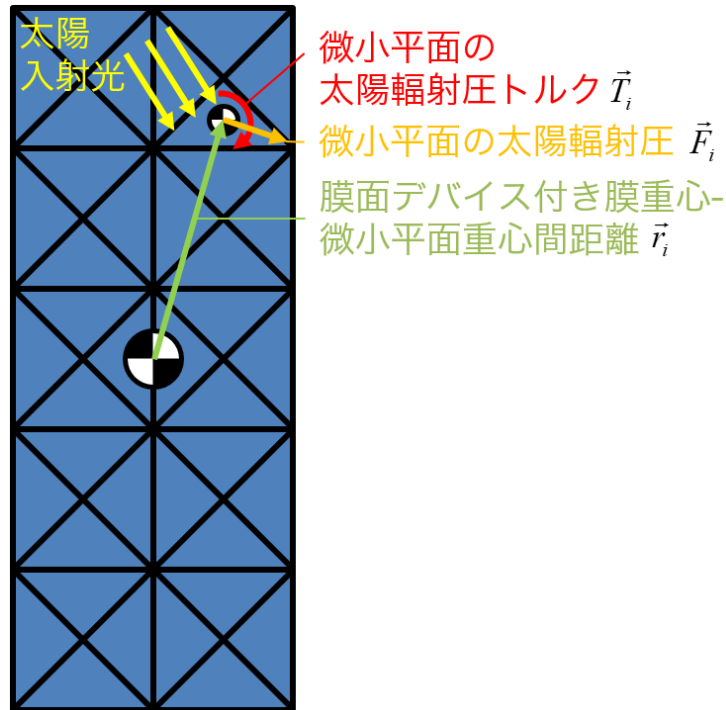


図 5.2: 微小平面に加わる太陽輻射圧トルク

面形状を微小平面群で近似する (5.3.2.2 項). ここで, n 個ある微小平面のうち i 番目のものに注目する. 太陽輻射圧による力 \vec{F}_i は太陽入射光ベクトル・光学特性・微小平面の面積から計算できる (5.3.2.3 項). \vec{F}_i および膜面デバイス付き膜重心から微小平面重心への位置ベクトル \vec{r}_i から, 太陽輻射圧トルク \vec{T}_i は次式のように求まる.

$$\vec{T}_i = \vec{r}_i \times \vec{F}_i \quad (5.2)$$

したがって, 膜全体の太陽輻射圧トルク \vec{T} は, 次式のように各微小平面での \vec{T}_i の総和をとることで求められる.

$$\vec{T} = \sum_{i=1}^n \vec{T}_i \quad (5.3)$$

5.3.2.1 幾何学的遮蔽効果と多重反射の無視

膜面デバイスと膜の重なりを考慮すると太陽輻射圧計算が複雑になる. また, 膜面デバイスは薄いので膜面デバイスで生じる影の影響は小さい. そのため, 有限要素解析結果の膜面デバイスによって変形した膜形状のみを近似的に用い, 膜面デバイス自体は無視する. 加えて, 膜で反射した光がさらに反射することは考慮しない. これは単純化のためで, 膜の局所的な対向を無視しており, 全体的には対向するほど変形しないとの考えにもとづく.

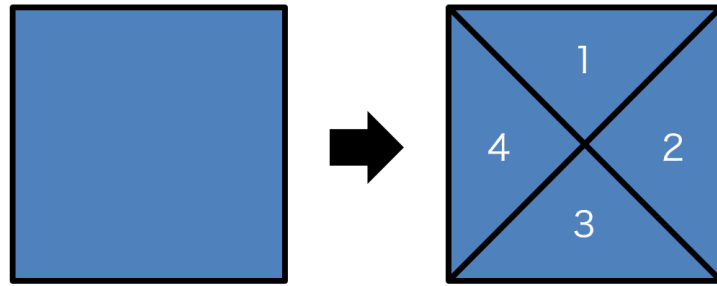


図 5.3: 四角形要素の重心を 1 頂点とした微小な三角形平面への分割

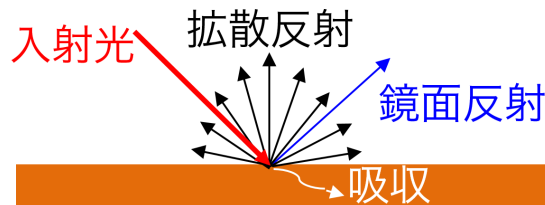


図 5.4: 光学特性モデル

5.3.2.2 表面の三角形分割による平面近似

今回の有限要素モデルは 4 節点要素であり、要素表面が平面ではないことが一般的である。その場合、太陽輻射圧の計算が困難になるので、表面を 4 節点の重心を 1 頂点とした微小な三角形平面 4 つに分割することで、平面近似する (図 5.3)。

5.3.2.3 太陽輻射圧モデル

本項では、参考文献 [42] に基づいて、太陽輻射圧をモデル化する。太陽輻射圧は太陽から放出された光子が物体表面に衝突することに起因する。衝突後、光子は表面で反射・吸収・透過する。透過は太陽輻射圧として影響しないので無視して、吸収・鏡面反射・拡散反射 (Lambert 反射) でモデル化する (図 5.4)。ここで、Lambert 反射とは、入射角のコサインに比例した反射光強度となる反射であり、どの方向から見ても一定の反射光強度となるような理想的な拡散反射面の特性である。表面を理想的な平面と仮定する。図 5.5 のように、平面の単位法線ベクトルを \vec{n} 、平面の単位接線ベクトルを \vec{i} 、太陽入射光の単位方向ベクトルを \vec{S} 、太陽入射光と \vec{n} のなす角 (太陽角) を α とする。

吸収率を ρ_a 、鏡面反射率を ρ_s 、拡散反射率を ρ_d として、透過を無視すれば、次式が成立する。

$$\rho_a + \rho_s + \rho_d = 1 \quad (5.4)$$

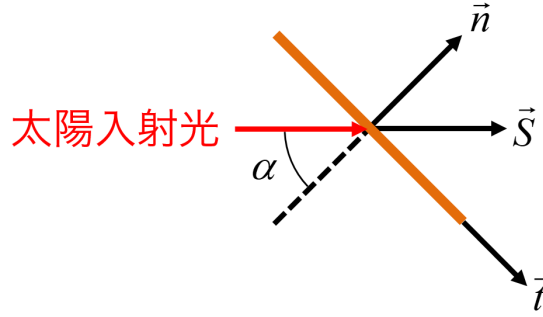


図 5.5: 太陽入射光と理想平面の幾何関係

太陽から 1 AU の距離にある平面に作用する太陽輻射圧の力は次式で表される。

$$\begin{aligned}
 \vec{F} &= PA \left[\rho_a (\vec{S} \cdot \vec{n}) \vec{S} + 2\rho_s (\vec{S} \cdot \vec{n})^2 \vec{n} + \rho_d (\vec{S} \cdot \vec{n}) \left(\vec{S} + \frac{2}{3} \vec{n} \right) \right] \\
 &= PA (\vec{S} \cdot \vec{n}) \left\{ (\rho_a + \rho_d) \vec{S} + \left[2\rho_s (\vec{S} \cdot \vec{n}) + \frac{2}{3} \rho_d \right] \vec{n} \right\} \\
 &= PA (\vec{S} \cdot \vec{n}) \left\{ (1 - \rho_s) \vec{S} + \left[2\rho_s (\vec{S} \cdot \vec{n}) + \frac{2}{3} \rho_d \right] \vec{n} \right\} \quad (5.5)
 \end{aligned}$$

ここで、 $P = 4.563 \mu\text{N}/\text{m}^2$ は太陽から 1 AU の距離での太陽輻射圧定数のノミナル値で、 A は平面の面積である。なお、太陽輻射圧は太陽からの距離の逆 2 乗に比例する。また、図 5.5 より、 $\vec{S} = \cos \alpha \vec{n} + \sin \alpha \vec{t}$ なので、太陽輻射圧の力は \vec{n} , \vec{t} の方向ベクトルでも表現可能であり、 $\vec{S} \cdot \vec{n} = \cos \alpha$ の式変形も用いると次式になる。

$$\begin{aligned}
 \vec{F} &= PA \cos \alpha \left\{ (1 - \rho_s) (\cos \alpha \vec{n} + \sin \alpha \vec{t}) + \left[2\rho_s \cos \alpha + \frac{2}{3} \rho_d \right] \vec{n} \right\} \\
 &= PA \left\{ (1 + \rho_s) \cos^2 \alpha + \frac{2}{3} \rho_d \cos \alpha \right\} \vec{n} + PA (1 - \rho_s) \cos \alpha \sin \alpha \vec{t} \\
 &= F_n \vec{n} + F_t \vec{t} \quad (5.6)
 \end{aligned}$$

5.3.2.4 太陽入射光の単位方向ベクトル

太陽入射光の単位方向ベクトルは變形前の膜の法線 \vec{n} の反対方向、つまり $\vec{S} = [0, 0, -1]^T$ とする。

5.3.2.5 光学特性値

一般的にソーラーセイルでは、推進力を大きくするために鏡面反射する膜を使用する。例えば IKAROS の場合、ポリイミド膜の片面がアルミ蒸着されており、光学特性値は $(\rho_a, \rho_s, \rho_d) = (0.053, 0.882, 0.065)$ と鏡面反射が支配的である。この IKAROS 膜の光学特性値を採用する。

5.4 セイル全体の变形メカニズム

パラメータ解析の前に、セイル全体の基本的な变形メカニズムについて、Okuizumi et al. の既往研究 [7] を参考に説明する。シワ・たわみの方向 (周方向と半径方向) がセイル全体の变形に関係し、図 5.6, 5.7 [7] のように变形する。初期状態のセイルは平坦とする (図 5.6 (a), 図 5.7 (a))。周方向にシワ・たわみが生じる場合、周方向にペタルが縮まり、ペタルの間隔は広がる (図 5.6(b))。ペタル間隔が広がることはブリッジ接続により制限されるので、間隔が広がらないように、セイルは中心に向かって半径方向に縮む。それでも間隔が許容できない場合で、なおかつ、膜の曲げ剛性が相対的に高い場合、全ペタルが同一の面外方向 (正負どちらでもよい) に傾き、傘を閉じるように周方向に収縮してすぼまり、ピラミッド状になる (図 5.6(c))。曲げ剛性が相対的に低い場合は、半径方向にシワ・たわみが生じて、周方向に収縮する (図 5.6(d))。一方、半径方向にシワ・たわみが生じる場合でも、ペタル間隔は広がる。それを解消するため、中心に向かって半径方向にペタルが縮まる (図 5.7(b))。すると、周方向のペタルの長さが余り、ペタルが面内に収まらない。そこで、ペタルの曲げ剛性が相対的に高い場合、各ペタルが面外方向に傾き、全体としてはジグザク状になって、鞍型形状 (双曲放物面のような形状) になる (図 5.7(c))。曲げ剛性が相対的に低い場合は、周方向にシワ・たわみが生じて、周方向に縮む (図 5.7(d))。本解析では、曲げ剛性が高い膜なので、ピラミッド型 (あるいは逆ピラミッド型) と鞍型が生じる。

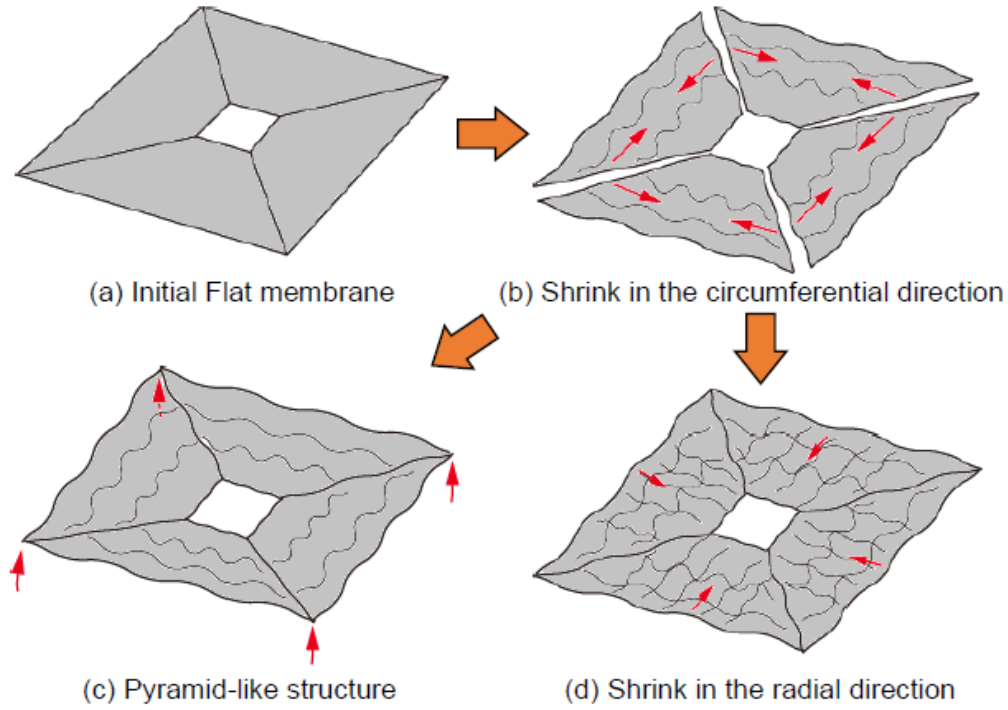


図 5.6: 周方向へのシワ・たわみから生じるセイル全体の変形

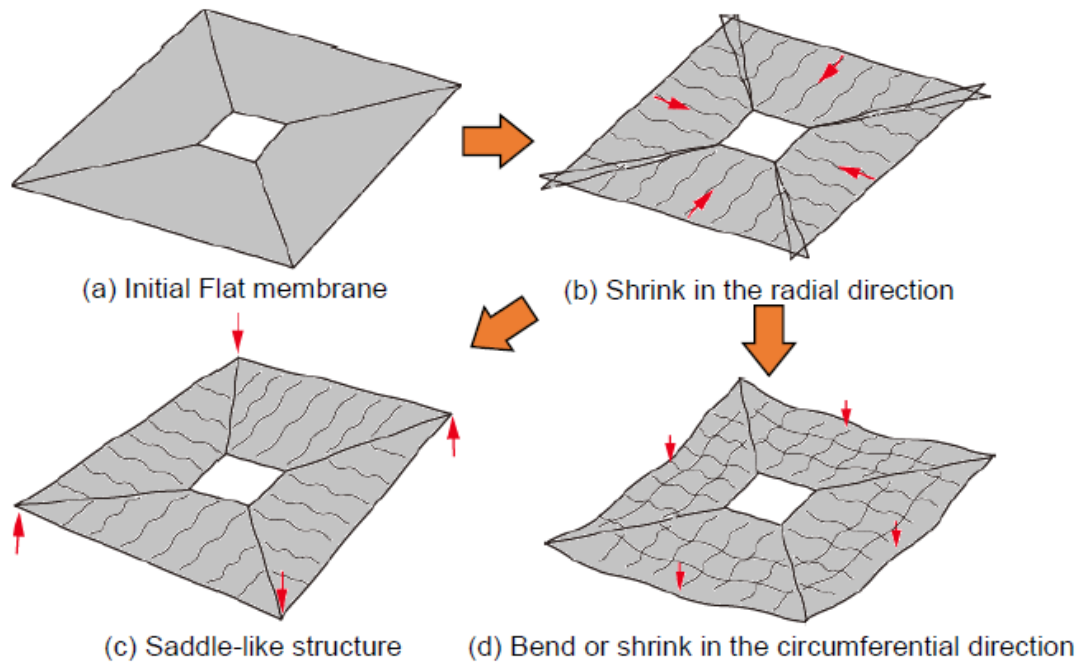


図 5.7: 半径方向へのシワ・たわみから生じるセイル全体の変形

5.5 膜面デバイスの向きのパラメータ解析

図 5.1 のモデルをもとに，膜面デバイスの向きが形状に与える影響のパラメータ解析を行う。そのため，解析モデルに膜面デバイスの向きを表す角度 θ を導入する (図 5.8)。各膜面デバイスは各ペタルの中心を貫く z 方向軸で回転する。各 θ はセイル中心の向きを基準として反時計回りを正とした。 θ の値は共通であり，すなわち，セイル中心を貫く z 方向軸に対して回転対称とした。対称性を考慮して，主に 10° 刻みで $\theta = 0^\circ, 10^\circ, 20^\circ, 30^\circ, 45^\circ, 60^\circ, 70^\circ, 80^\circ, 90^\circ$ として解析する。

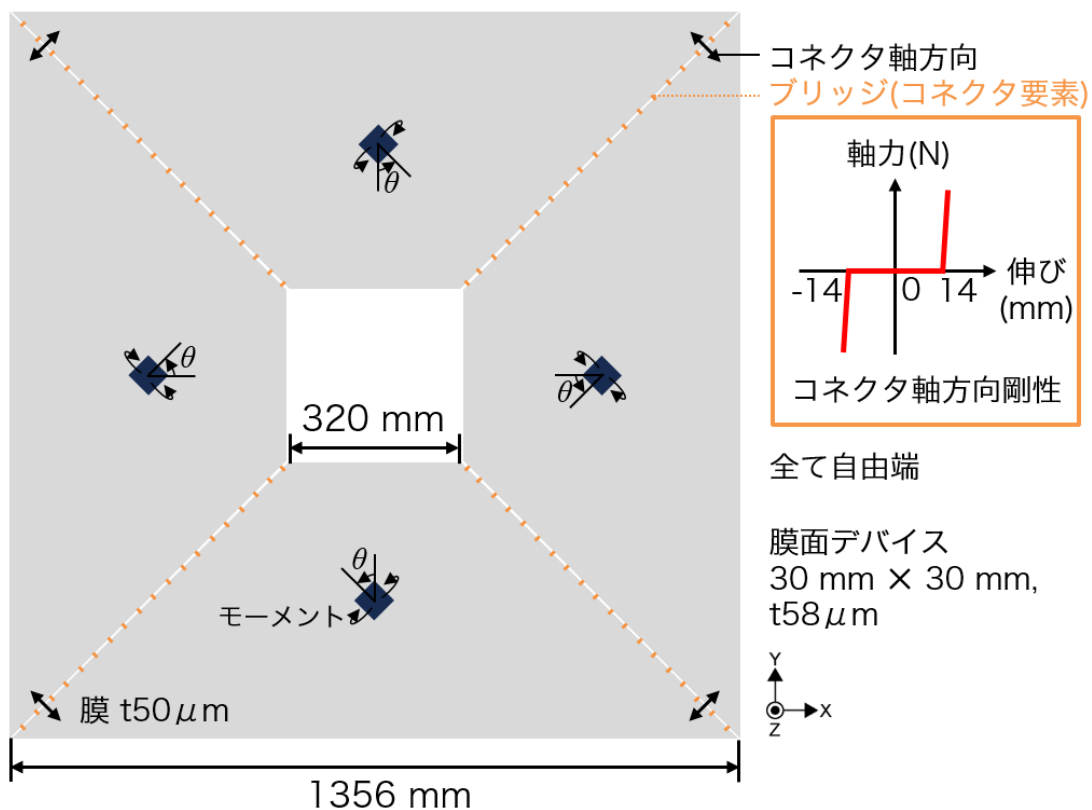


図 5.8: 膜面デバイスの向きを考慮した，1 ペタルに 1 つの膜面デバイスが貼付されたソーラーセイル膜全体の解析モデル。 θ は共通の値をとる。

モーメントを付加する解析ステップ 1 終了時，つまり，太陽輻射圧を付加する前の解析結果を図 5.9 に示す。 θ が 0° から 90° へ増加するにつれ，面外変位量は減少する傾向にある。これは，半径方向よりも周方向にシワやたるみが発生させたほうが高い面外剛性になることを示唆する。セイル中心軸に対して 90° 毎に対称になっている。 0° から 90° までのいずれにおいても，ブリッジの影響で各ペタルがセイル中心方向に移動，つまり，セイル全体が収縮している。その結果，セイル中心部でペタル同士が，互いに寄りかかるような形で円状に重なってお

り，スクリュプロペラの様である．例として， $\theta = 0^\circ$ の場合のセイル中心部での重なりを図 5.10 に示す． 0° から 80° までの場合は，時計回りに倒れ込むように重なり合う． 90° の場合では，反時計回りに重なり合う．

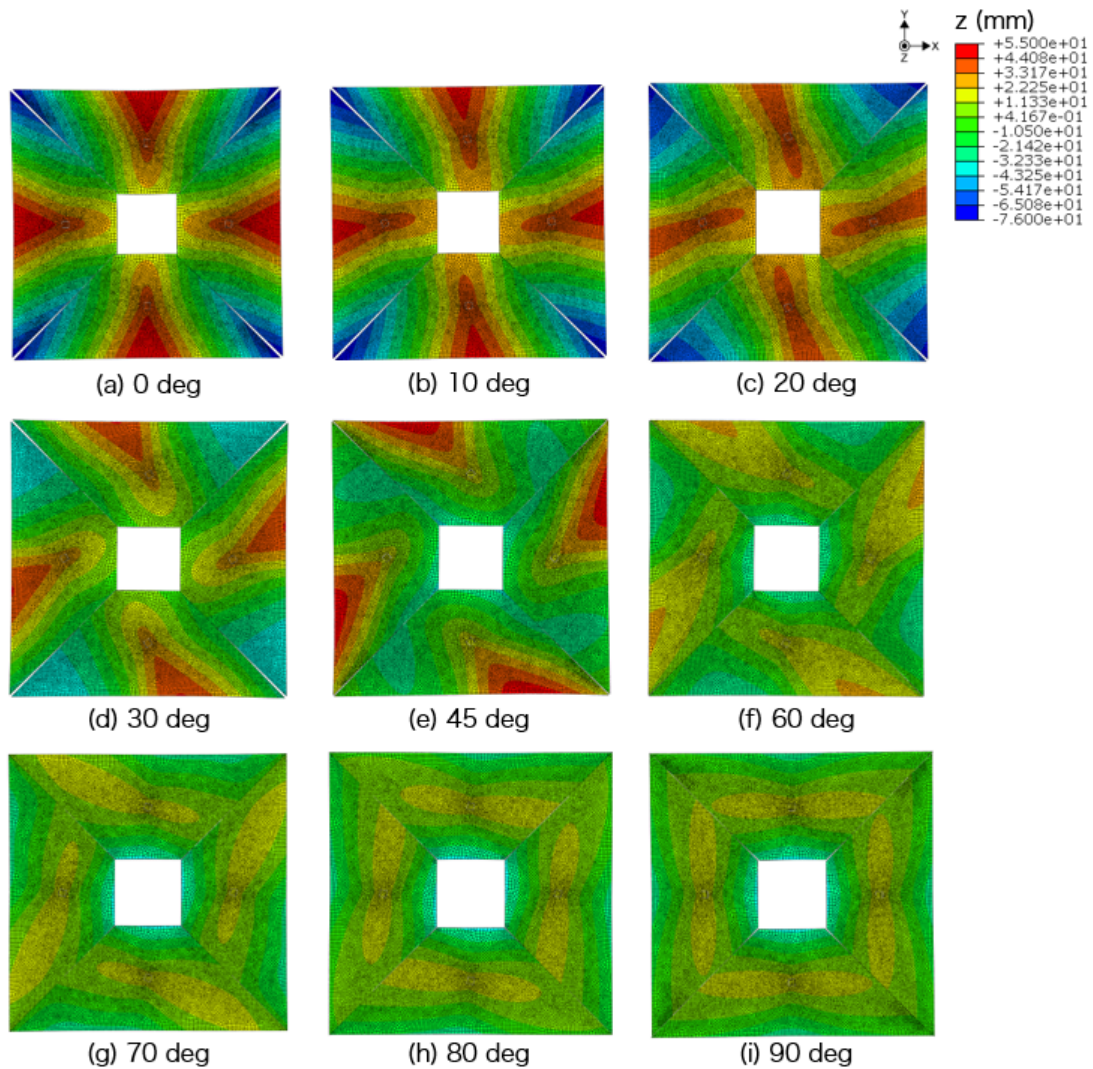


図 5.9: 膜面デバイスの向きを変えたソーラーセイル膜全体の解析結果 (太陽輻射圧無し)．角度は θ の値．

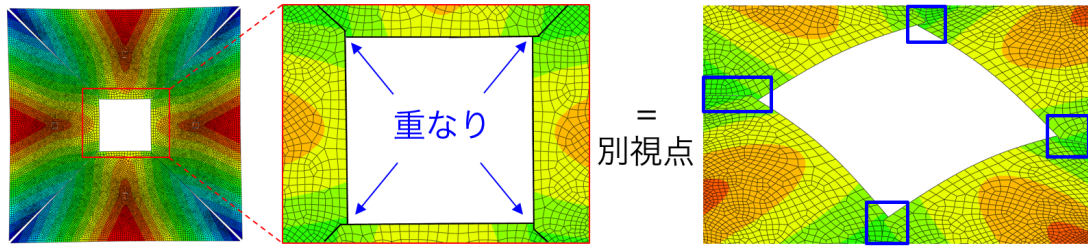


図 5.10: 解析結果におけるセイル中心部のペタル同士の重なり

太陽輻射圧を付加した解析結果を図 5.11 に示す. $10^\circ, 20^\circ, 30^\circ$ はピラミッド型, 45° は逆ピラミッド型に変化している. $0^\circ, 70^\circ, 80^\circ, 90^\circ$ は形状に大きな変化はない.

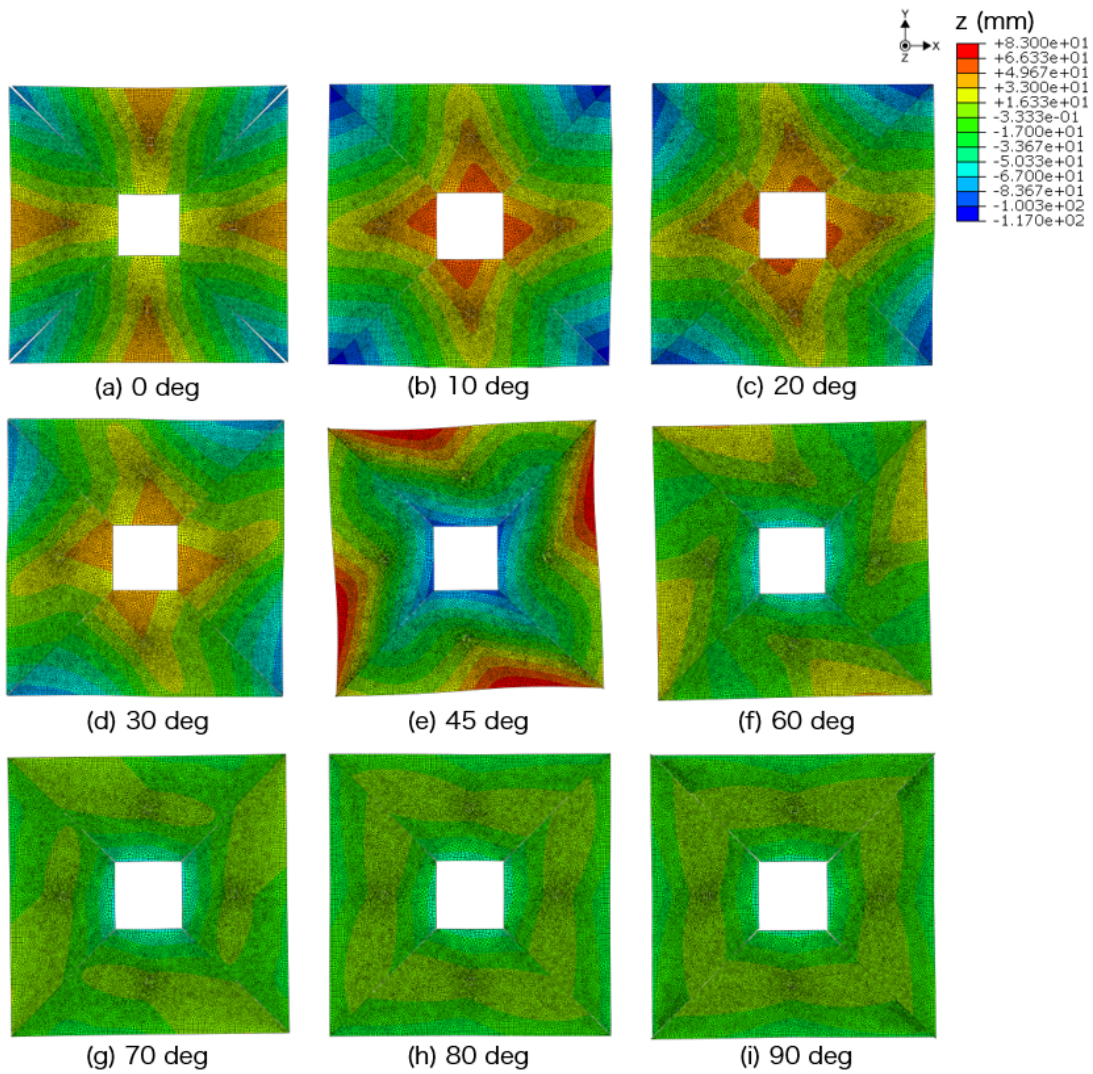


図 5.11: 膜面デバイスの向きを変えたソーラーセイル膜全体の解析結果 (太陽輻射圧有り). 角度は θ の値.

次に、面外剛性を評価する。ソーラーセイル膜全体の太陽輻射圧による面外変位 (RMS) と膜面デバイスの向き θ の関係を図 5.12 に示す。大局的にみて、面外変位 (RMS) は、 45° での最大値を中心とした山状になる、つまり、 0° または 90° に近づくにつれて小さくなることが分かる。したがって、逆に面外剛性は 45° での最小値を中心とした谷状になり、 θ は 0° または 90° 近傍のほうが面外剛性は高い (図 5.13)。

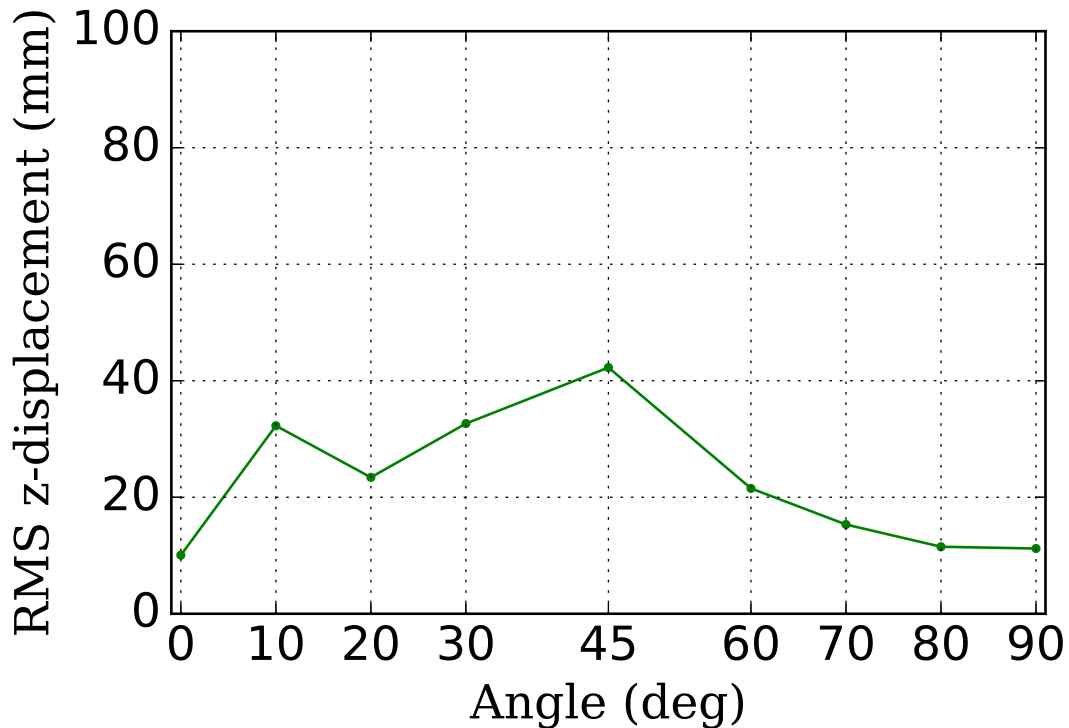


図 5.12: ソーラーセイル膜全体の太陽輻射圧による面外変位 (RMS) と膜面デバイスの向き θ の関係。図 5.9 から図 5.11 への面外変位をみている。

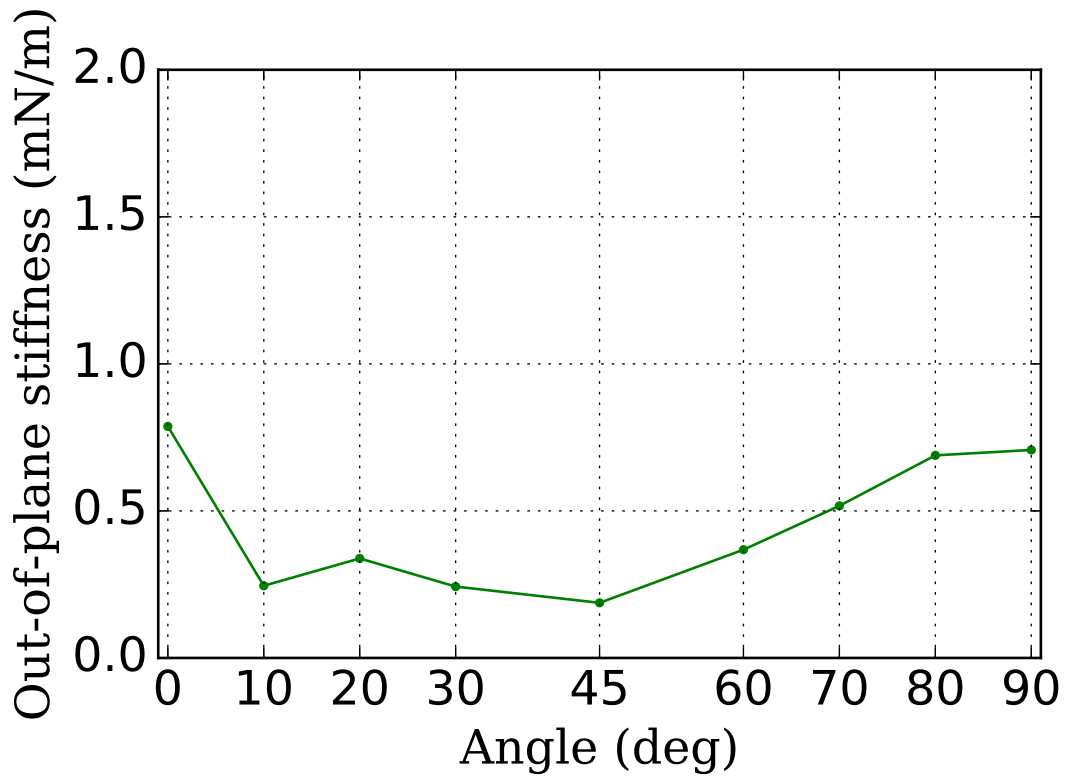


図 5.13: ソーラーセイル膜全体の面外剛性と膜面デバイスの向き θ の関係.

続いて、太陽輻射圧による変形前のソーラーセイル膜全体に生じる太陽輻射圧トルクと膜面デバイスの向き θ の関係を図 5.14, 変形後の関係を図 5.15 に示す. 変形前後ともに, 全ての θ で $-z$ 方向のトルクが支配的であり, x, y 方向のトルクは相対的に微小である. 太陽輻射圧による変形で, 45° でのトルクの値が 0 に近づいている. $0^\circ, 90^\circ$ でのトルク値が 0 に近く, 風車トルクが低減されることが分かる.

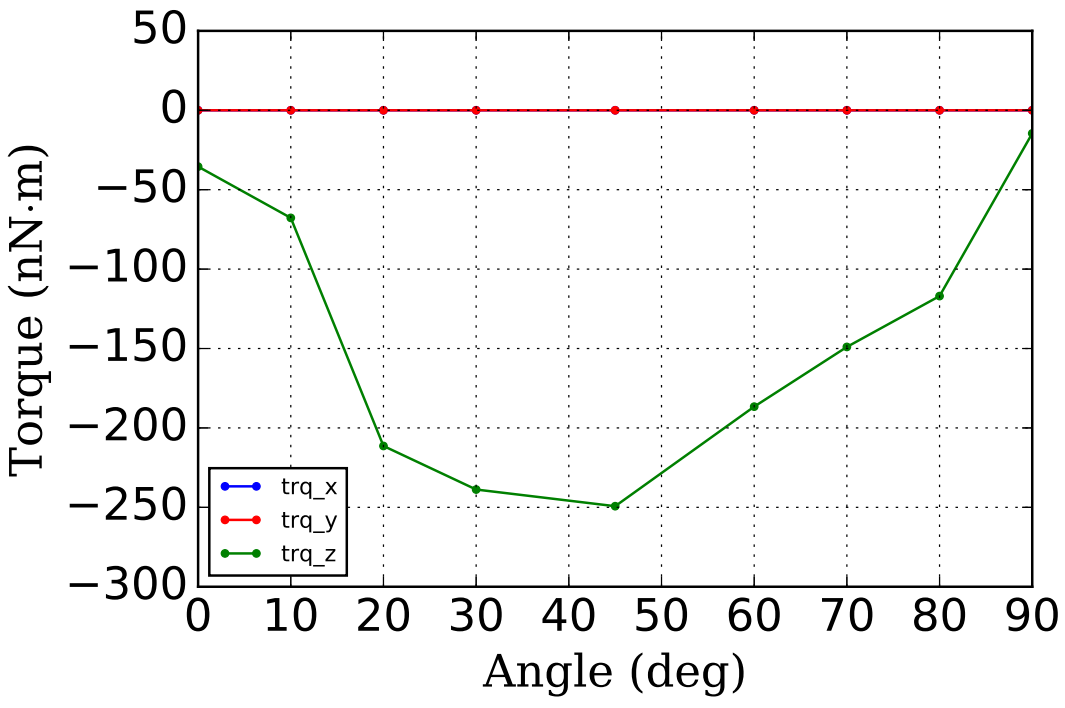


図 5.14: 太陽輻射圧による変形前のソーラーセイル膜全体に生じる太陽輻射圧トルクと膜面デバイスの向き θ の関係.

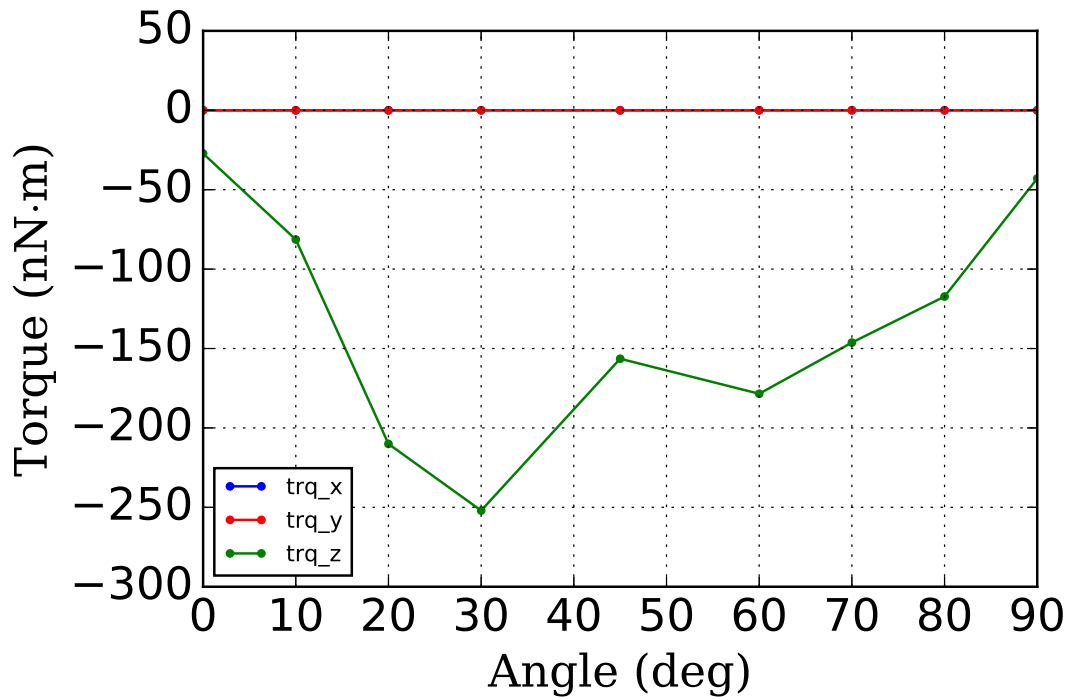


図 5.15: 太陽輻射圧による変形後のソーラーセイル膜全体に生じる太陽輻射圧トルクと膜面デバイスの向き θ の関係。

5.6 膜面デバイスの位置のパラメータ解析

向きのパラメータ解析に続いて、図 5.1 のモデルをもとに、膜面デバイスの位置が形状に与える影響のパラメータ解析を行う。そのため、図 5.16 のように、解析モデルに各ペタル中心を原点とした座標系を導入し、各膜面デバイスの中心位置 (x, y) を各座標系で表現する。 (x, y) の値は共通であり、すなわち、セイル中心を貫く z 方向軸に対して回転対称とした。対称性を考慮して、台形に沿って 120 mm 刻みの格子状に $(x, y) = (0, 120), (120, 120), (0, 0), (120, 0), (240, 0), (0, -120), (120, -120), (240, -120), (360, -120)$ として解析する。

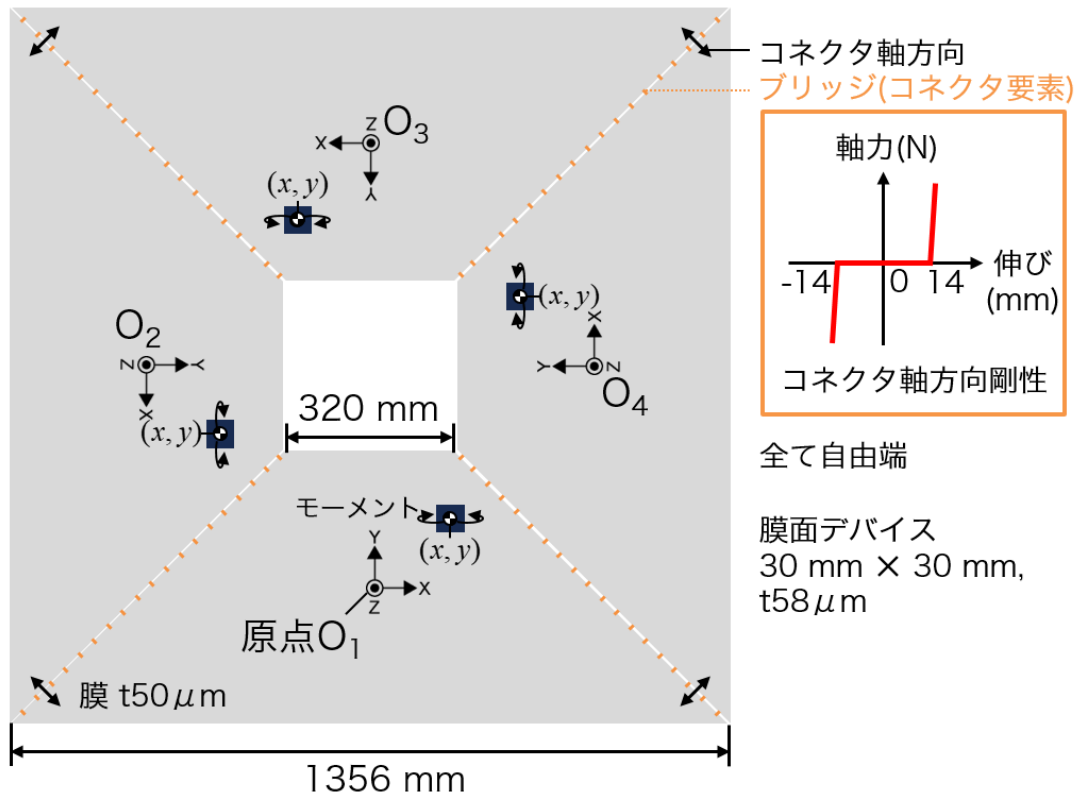


図 5.16: 膜面デバイスの位置を考慮した、1 ペタルに 1 つの膜面デバイスが貼付されたソーラーセイル膜全体の解析モデル。各ペタルの座標系を基準として、各膜面デバイスの位置 (x, y) は共通の値をとる。

太陽輻射圧付加前の解析結果を図 5.17 に示す。x 方向に移動するにつれ、面外変位量が減少する傾向にある。セイル中心軸に対して 90° 毎に対称になっている。いずれにおいても、ブリッジの影響でセイル全体が収縮し、セイル中心部でペタル同士が互いに寄りかかるような形で円状に重なっている。図 5.17 (a),(c),(f) はかすかに時計回りに倒れ込むように重なり合う。一方、(b),(d),(e),(g),(h),(i) は x 方向への偏りによって反時計回りに重なり合う。

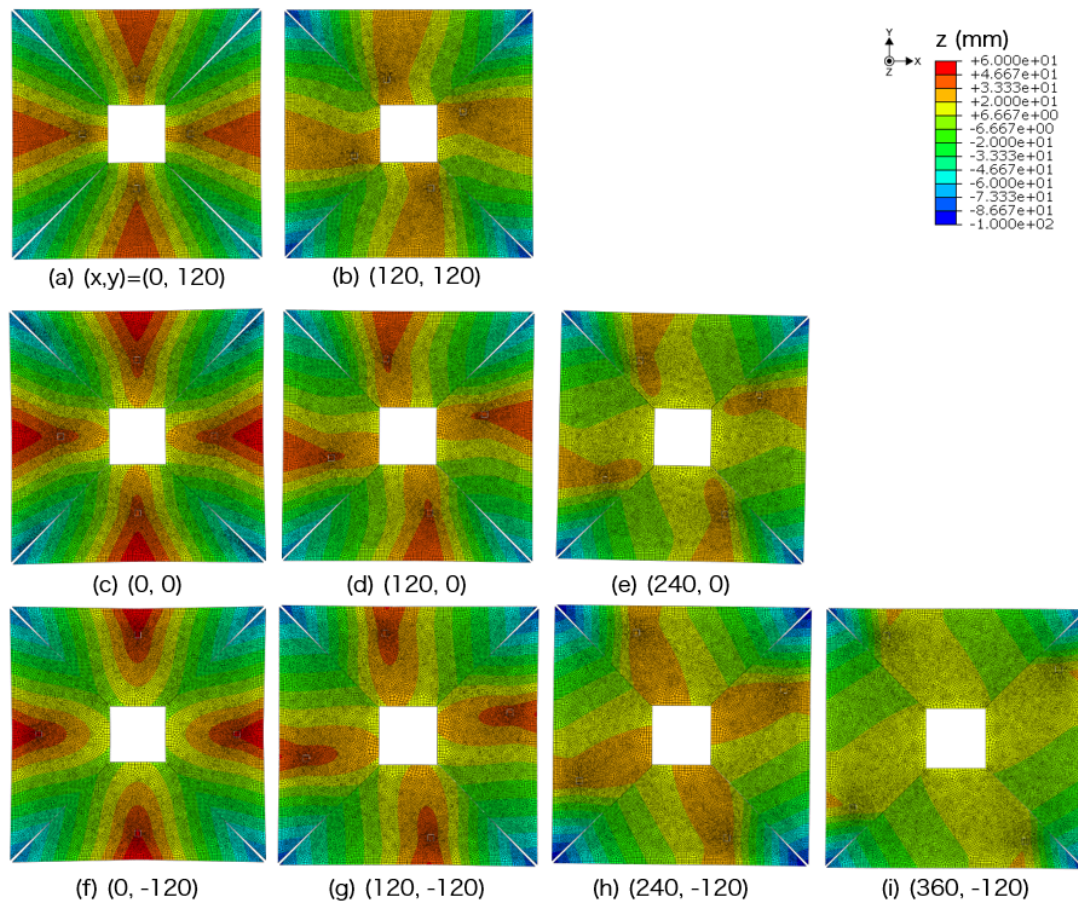


図 5.17: 膜面デバイスの位置 (x, y) (mm) を変えたソーラーセル膜全体の解析結果 (太陽輻射圧無し)

太陽輻射圧付加後の解析結果を図 5.18 に示す。太陽輻射圧により、 $x = 0$ mm の (a), (c), (f) 以外はピラミッド型に変化しているが、重なり合いの方向は反時計回りのままで変化しない。

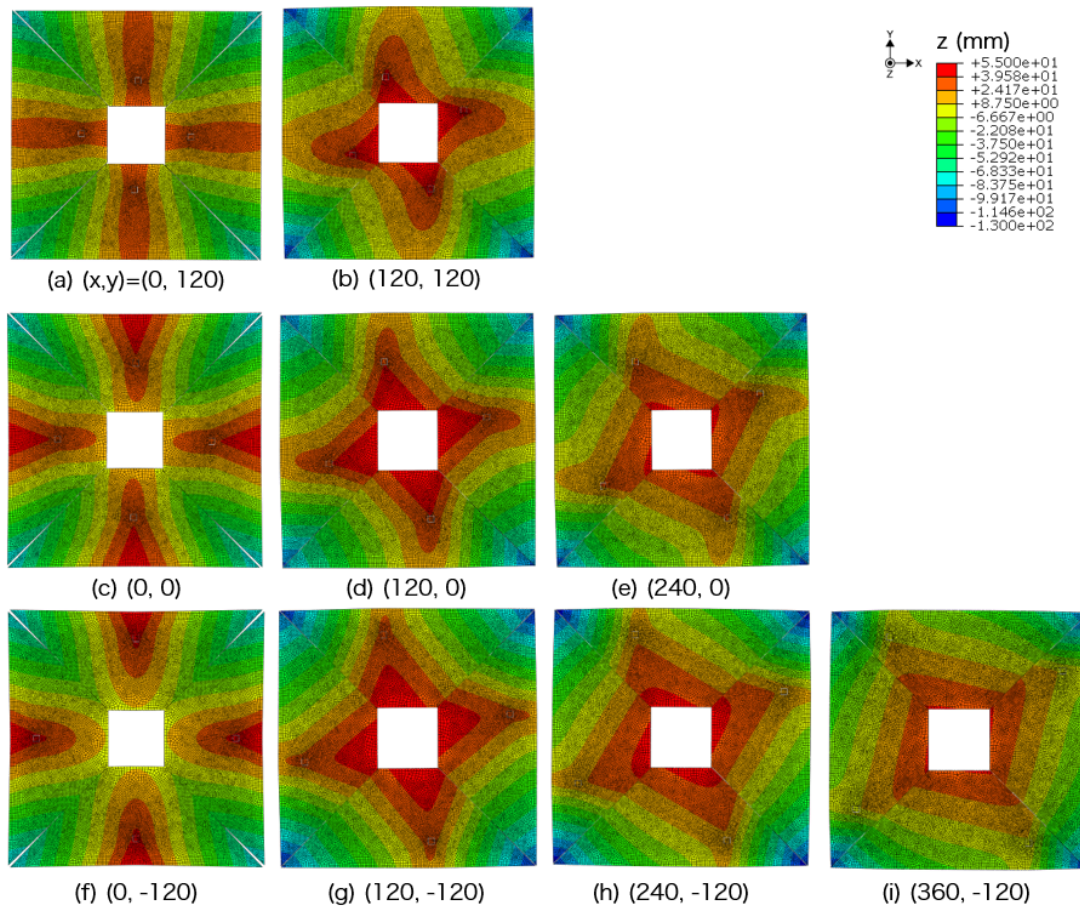


図 5.18: 膜面デバイスの位置 (x, y) (mm) を変えたソーラーセイル膜全体の解析結果 (太陽輻射圧有り)

ソーラーセイル膜全体の太陽輻射圧による面外変位 (RMS) と膜面デバイスの位置 (x, y) の関係を図 5.19 に示す。ピラミッド型に変化していない $x = 0$ mm では面外変位が相対的に小さく、それ以外のピラミッド型に変化した位置では面外変位はおおむね一定である。太陽輻射圧による面外変位 (RMS) に基づいた面外剛性は図 5.20 のようになる。

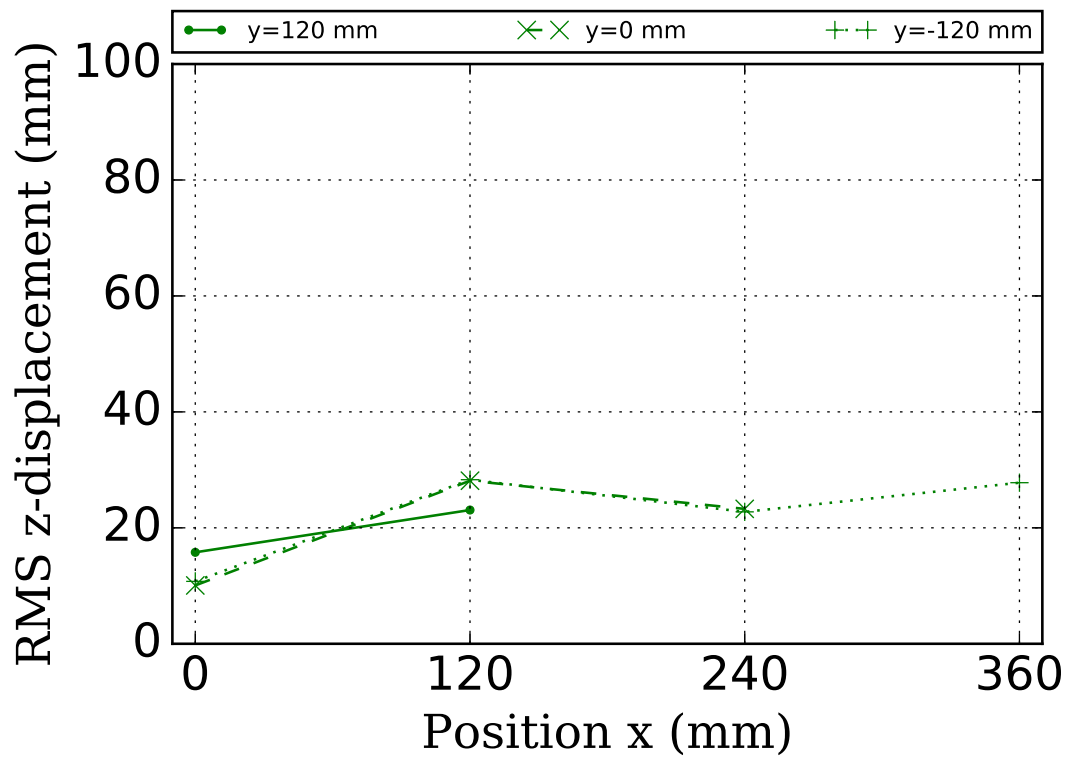


図 5.19: ソーラーセイル膜全体の太陽輻射圧による面外変位 (RMS) と膜面デバイスの位置 (x, y) の関係. 図 5.17 から図 5.18 への面外変位をみている.

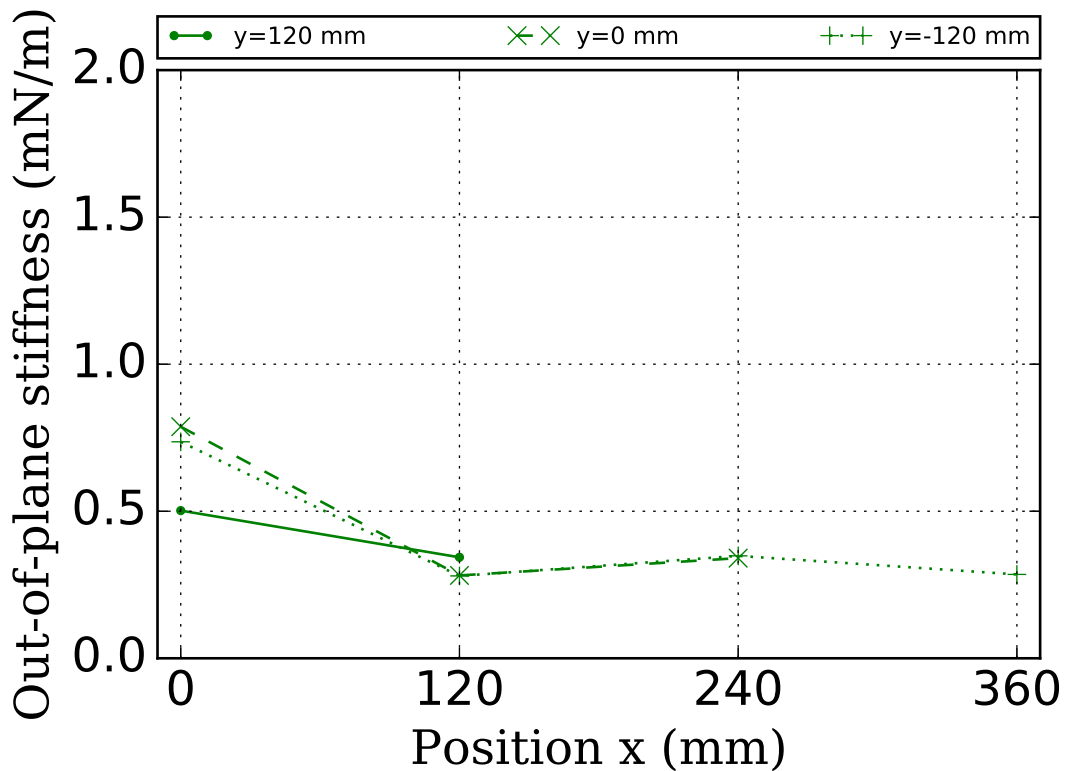


図 5.20: ソーラーセイル膜全体の面外剛性と膜面デバイスの位置 (x, y) の関係.

太陽輻射圧による變形前のソーラーセイル膜全体に生じる太陽輻射圧トルクと膜面デバイスの位置 (x, y) の関係を図 5.21 に、變形後の関係を図 5.22 に示す. 變形前後ともに、全ての (x, y) でトルクの z 成分が支配的であり、トルクの x, y 成分は相対的に微小である. また、 x 方向に偏った膜面デバイス位置になるほど、トルクの z 成分の絶対値が大きくなる傾向にある. $(120, -120)$ を除いた $x \geq 120$ mm では、トルク z 成分の絶対値が大きくなっているが、これは太陽輻射圧でピラミッド型に変化した影響と考えられる. 一方、 $x = 0$ mm の $(0, 120)$ ではトルク z 成分の正負が反転し、 $(0, 0)$ ではトルク z 成分の絶対値が小さくなっている.

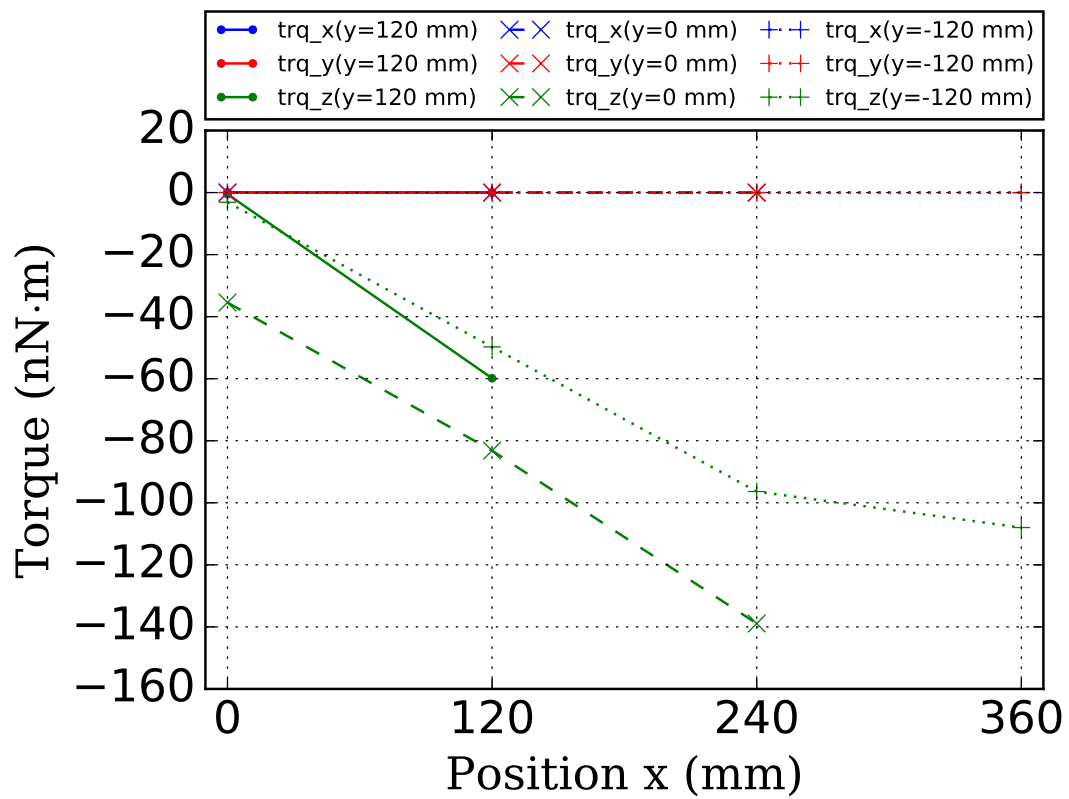


図 5.21: 太陽輻射圧による変形前のソーラーセイル膜全体に生じる太陽輻射圧トルクと膜面デバイスの位置 (x, y) の関係.

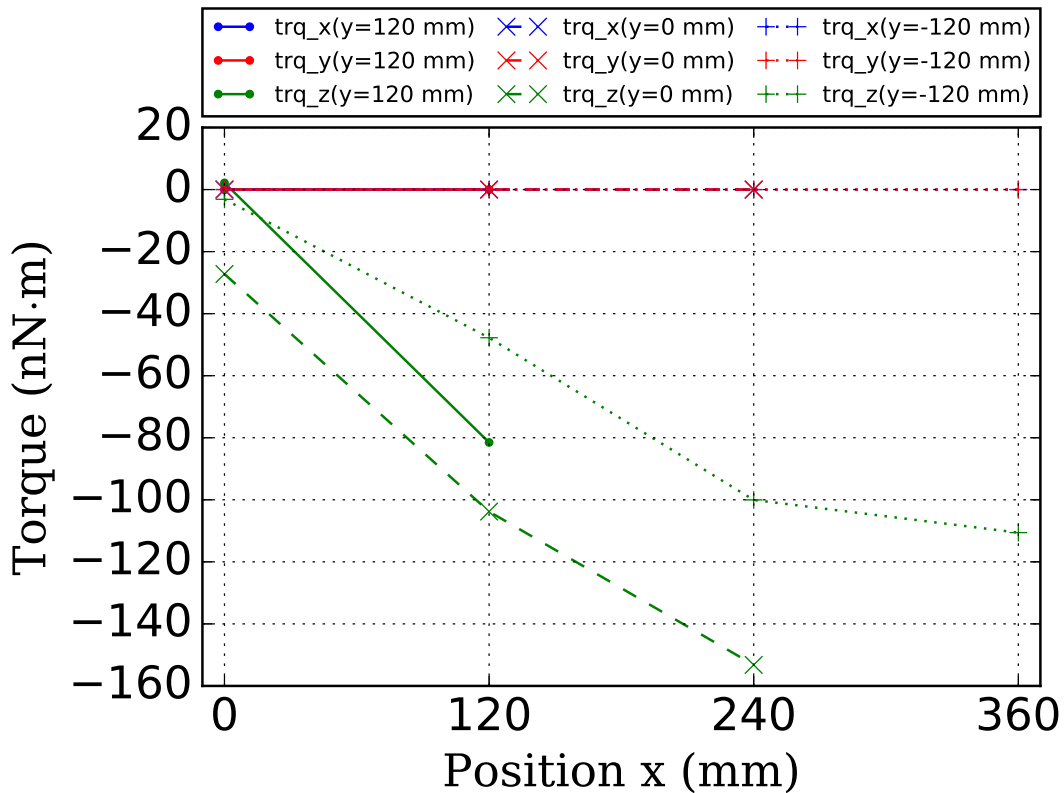


図 5.22: 太陽輻射圧による変形後のソーラーセイル膜全体に生じる太陽輻射圧トルクと膜面デバイスの位置 (x, y) の関係.

5.7 膜面デバイス (大) の向きのパラメータ解析

前節までは、膜面デバイスのサイズを $30\text{ mm} \times 30\text{ mm}$ としてきた。膜面デバイスのサイズ、つまり、膜に曲率を発生させる領域は直接的にセイルの変形に作用するパラメータである。本節からは、セイルの変形を大きくするため、膜面デバイスを $120\text{ mm} \times 120\text{ mm}$ に大型化して、向きと位置のパラメータ解析を前節までと同様に行い、サイズによるセイル全体膜の変形の違いを調査する。

図 5.23 に膜面デバイスの向きを考慮した、1 ペタルに 1 つの膜面デバイス (大) が貼付されたソーラーセイル膜全体の解析モデルを示す。膜面デバイスの大型化および、それに伴うメッシュの変更以外は図 5.8 と同じ解析モデルであり、 θ の値も同様に $\theta = 0^\circ, 10^\circ, 20^\circ, 30^\circ, 45^\circ, 60^\circ, 70^\circ, 80^\circ, 90^\circ$ として解析する。

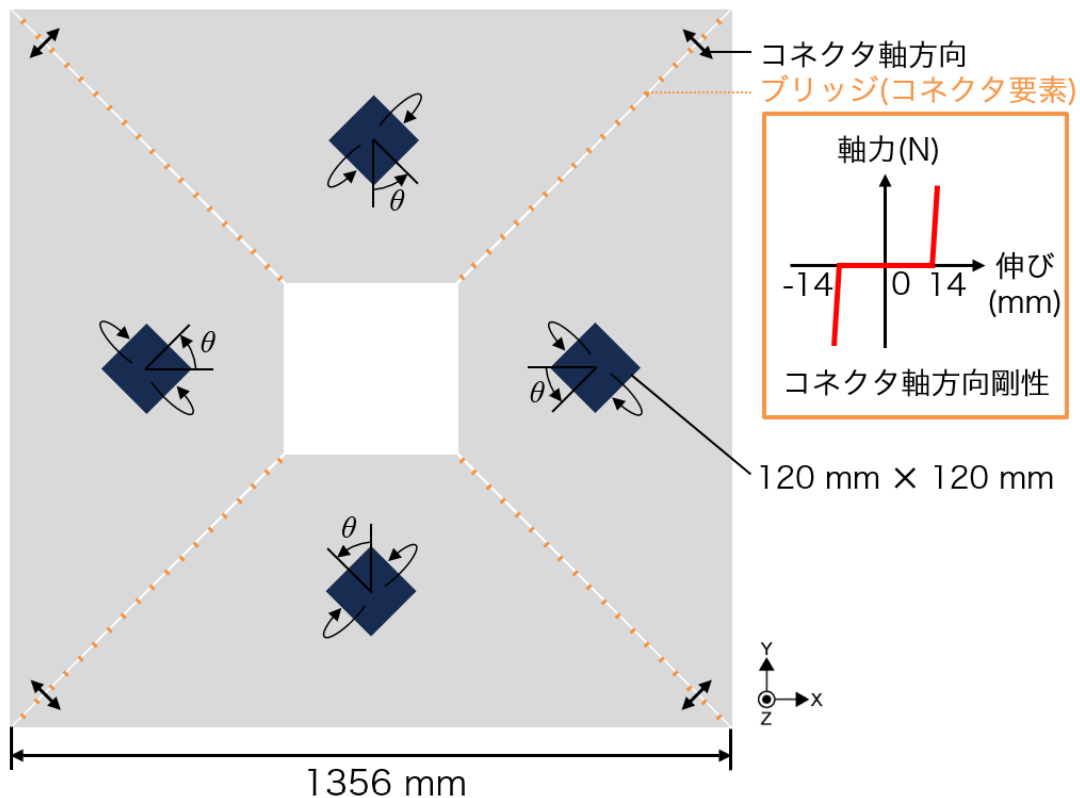


図 5.23: 膜面デバイスの向きを考慮した, 1 ペタルに 1 つの膜面デバイス (大) が貼付されたソーラーセイル膜全体の解析モデル. θ は共通の値をとる.

図 5.24 に太陽輻射圧印加前の膜面デバイス (大) の向きを変えたソーラーセイル膜全体の解析結果を示す. 膜面デバイスが小さい場合と比較して, 面外変位量が 1 桁大きい. 大別して 3 種類の形状がある. $0\sim 20^\circ$ と 70° はピラミッド型で, $-z$ 方向に各ペタルが傾いている. $30\sim 60^\circ$ は逆ピラミッド型で, $+z$ 方向に各ペタルが傾いている. これらは, ピラミッド型と逆ピラミッド型どちらにも安定する構造であり, 今回の解析は平膜から開始する場合で, 全ひずみエネルギーが減少する方向にペタルが傾いて, どちらかの型に安定したと考えられる. ただし, 軌道上では収納状態から開始して展開・展張するので, 実際には収納状態から動力学を考慮し収束形状を予測する必要があることに留意する. $80\sim 90^\circ$ は鞍型で, 双曲放物面シェル構造の様に 2 組の対頂点がそれぞれ $+z$ 方向と $-z$ 方向に移動している.

図 5.25 に太陽輻射圧印加後の膜面デバイス (大) の向きを変えたソーラーセイル膜全体の解析結果を示す. $30\sim 60^\circ$ の逆ピラミッド型は大きく変形している. 30° では, 隣接するペタル同士が接触し, IKAROS の 1 次展開終了後の状態のようにペタルが閉じている. $45^\circ, 60^\circ$ では, 逆ピラミッド型が鞍型に変形し, セイル対角線方向に潰れた格好になる. $0\sim 20^\circ$ と $70\sim 90^\circ$ のピラミッド型・鞍型は型を維持している. ピラミッド型の $0\sim 20^\circ$ と 70° は太陽輻射圧による変形がほぼない. 鞍型の $80^\circ, 90^\circ$ は, 太陽輻射圧により, 2 組の対頂点の高低差が大き

くなっている。

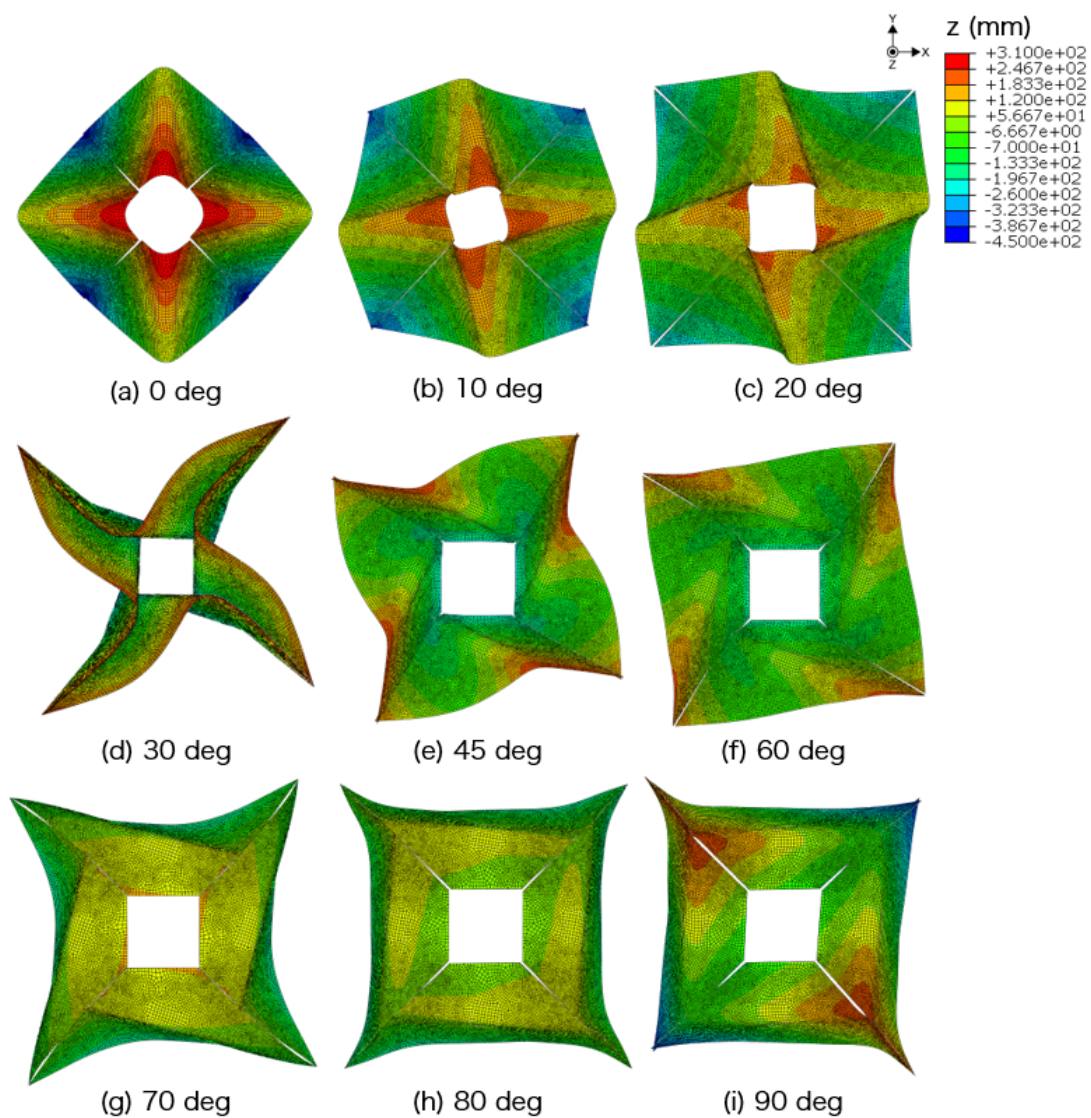


図 5.24: 膜面デバイス (大) の向きを変えたソーラーセイル膜全体の解析結果 (太陽輻射圧無し). 角度は θ の値. (d) は時間幅 1 の終了時に対向ペタル同士で干渉するほど変形したため, 便宜的に時間幅 0.75 での途中結果を示した.

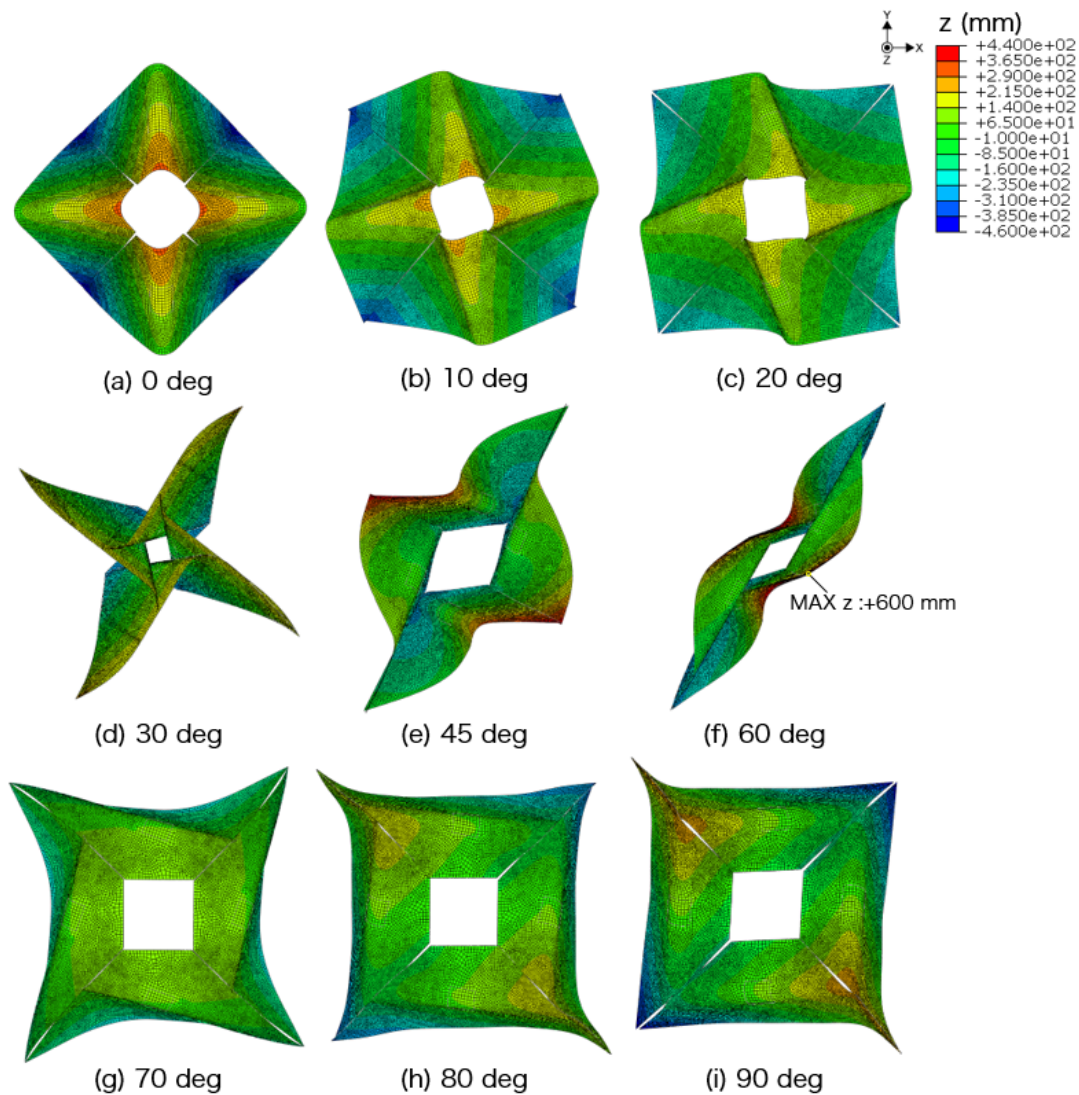


図 5.25: 膜面デバイス (大) の向きを変えたソーラーセイル膜全体の解析結果 (太陽輻射圧有り). 角度は θ の値. (d) はペタル同士が太陽輻射圧を付加する前にすでに干渉したので, 便宜的にモーメントを 65% に下げ, 時間幅 0.15 での途中結果を示す. (e) は時間幅 0.35 での途中結果だが, 最終的に (f) のように変形すると推測される.

図 5.26 にソーラーセイル膜全体の太陽輻射圧による面外変位 (RMS) と膜面デバイス (大) の向き θ の関係を示す. 30° , 45° はペタルが干渉したので, 同一条件の解析結果ではないが, 逆ピラミッド型の $30 \sim 60^\circ$ は大きく面外変位することがわかる. 図 5.27 に太陽輻射圧による面外変位 (RMS) に基づいた面外剛性と膜面デバイス (大) の向き θ の関係を示す. 膜面デバイスが小さい場合の面外剛性 (図 5.13) と比較すると, ピラミッド型と鞍型の $0 \sim 20^\circ$, $70 \sim 90^\circ$ では, 太陽輻射圧に対する面外剛性が増加している. これは, 膜面デバイス (大) の曲率によって大きく面外変形し, ピラミッド型か鞍型になったためである. 一方, 逆ピラミッド型は太陽輻

射圧に対する面外剛性が低下していることがわかる。

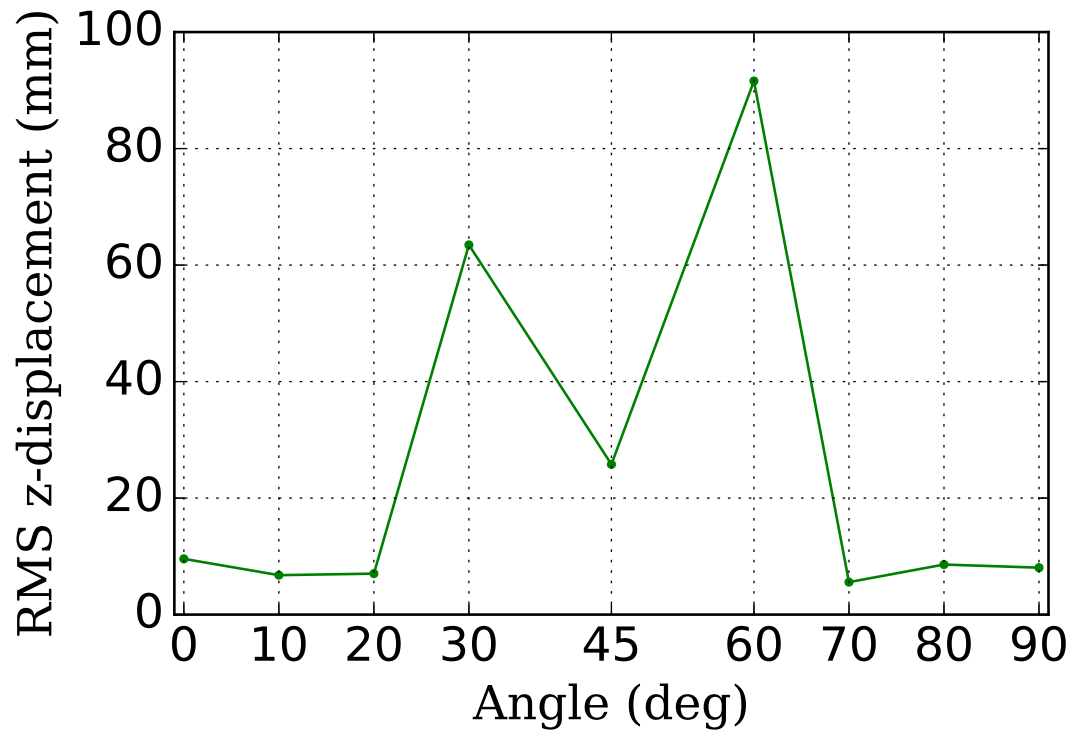


図 5.26: ソーラーセイル膜全体の太陽輻射圧による面外変位 (RMS) と膜面デバイス (大) の向き θ の関係. 図 5.24 から図 5.25 への面外変位をみている.

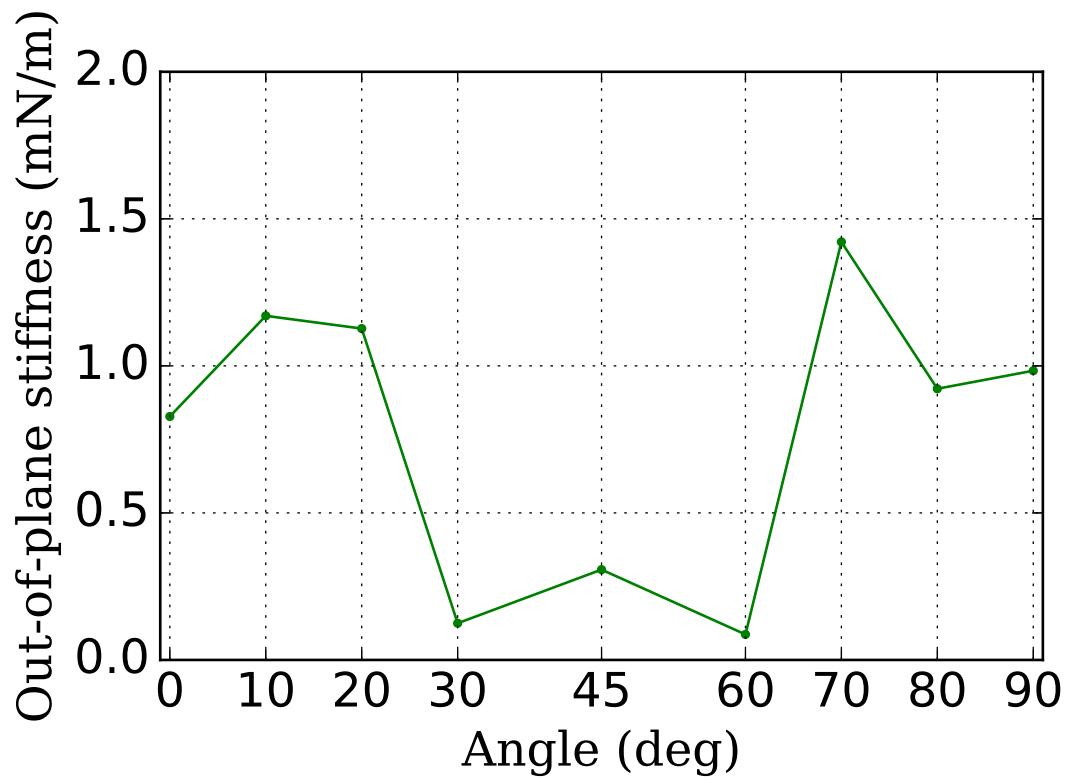


図 5.27: ソーラーセイル膜全体の面外剛性と膜面デバイス (大) の向き θ の関係

太陽輻射圧による変形前のソーラーセイル膜全体に生じる太陽輻射圧トルクと膜面デバイス (大) の向き θ の関係を図 5.28 に, 変形後の関係を図 5.29 に示す. 太陽輻射圧トルクの有無による変化が大きいのは, 逆ピラミッド型から鞍型に変形した $45^\circ, 60^\circ$ である. 60° に至っては, トルク z 成分の正負が反転している. $0^\circ, 90^\circ$ では, トルク z 成分が比較的小さい.

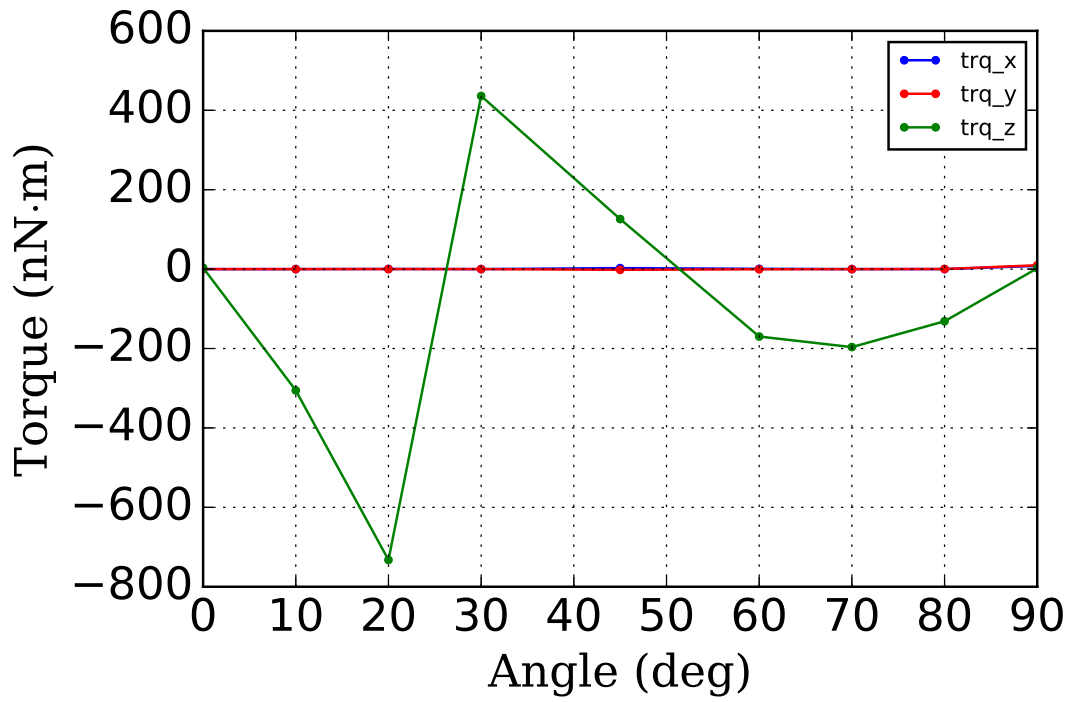


図 5.28: 太陽輻射圧による変形前のソーラーセイル膜全体に生じる太陽輻射圧トルクと膜面デバイス (大) の向き θ の関係.

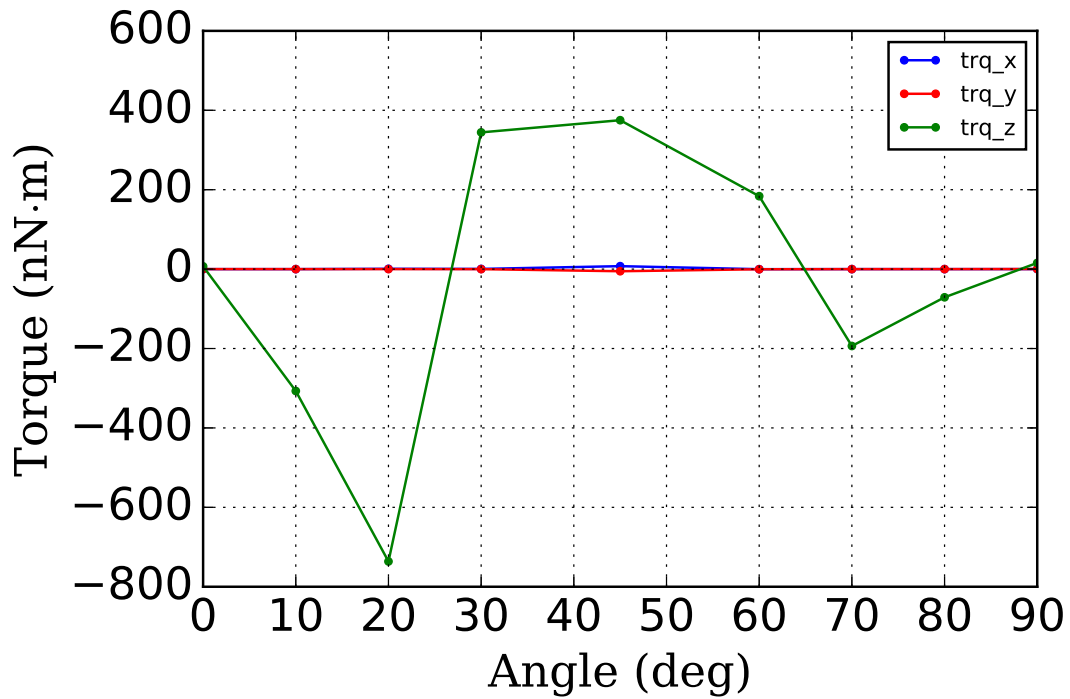


図 5.29: 太陽輻射圧による変形後のソーラーセイル膜全体に生じる太陽輻射圧トルクと膜面デバイス (大) の向き θ の関係。

ひずみエネルギー履歴を図 5.30 に示す。ひずみエネルギーが小さい順に、 $\theta = 70^\circ, 60^\circ, 80^\circ, 90^\circ, 45^\circ, 20^\circ, 10^\circ, 30^\circ, 0^\circ$ となる。つまり、おおむね、鞍型、逆ピラミッド型、ピラミッド型の順にひずみエネルギーが小さく、エネルギー的に安定な傾向にある。

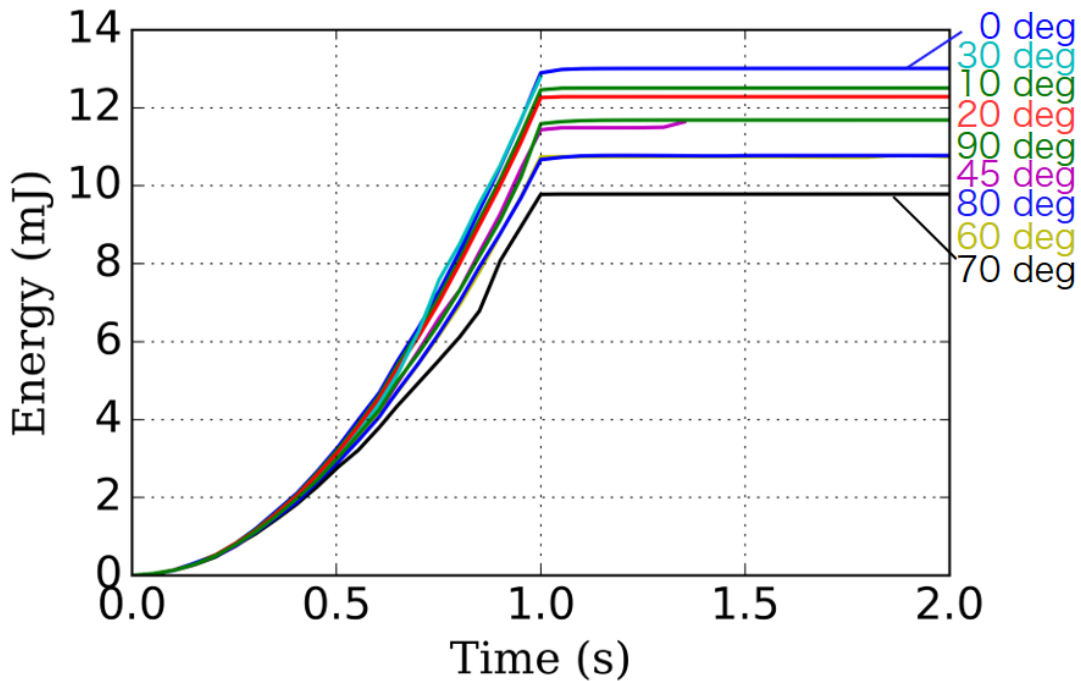


図 5.30: 膜面デバイス (大) の向きを変えたソーラーセイル膜全体の解析のひずみエネルギー履歴。0~1 s : モーメント付加のステップ, 1~2 s : 太陽輻射圧付加のステップ。

5.8 膜面デバイス (大) の位置のパラメータ解析

5.6 節同様に, 膜面デバイス (大) の位置のパラメータ解析を行う。ピラミッド型形状になった $\theta = 0^\circ$ と鞍型形状になった $\theta = 90^\circ$ の 2 通りで実施し, 大きく形状が変化するかを調査する。

5.8.1 膜面デバイスの曲率で周方向にたわむ場合 ($\theta = 0^\circ$)

図 5.31 に膜面デバイスの位置を考慮した, 1 ペタルに 1 つの膜面デバイス (大) が貼付されたソーラーセイル膜全体の解析モデル ($\theta = 0^\circ$) を示す。膜面デバイスの大型化, および, それに伴うメッシュの変更以外は図 5.16 と同じ解析モデルであり, (x, y) の値も同様に变化させて解析する。

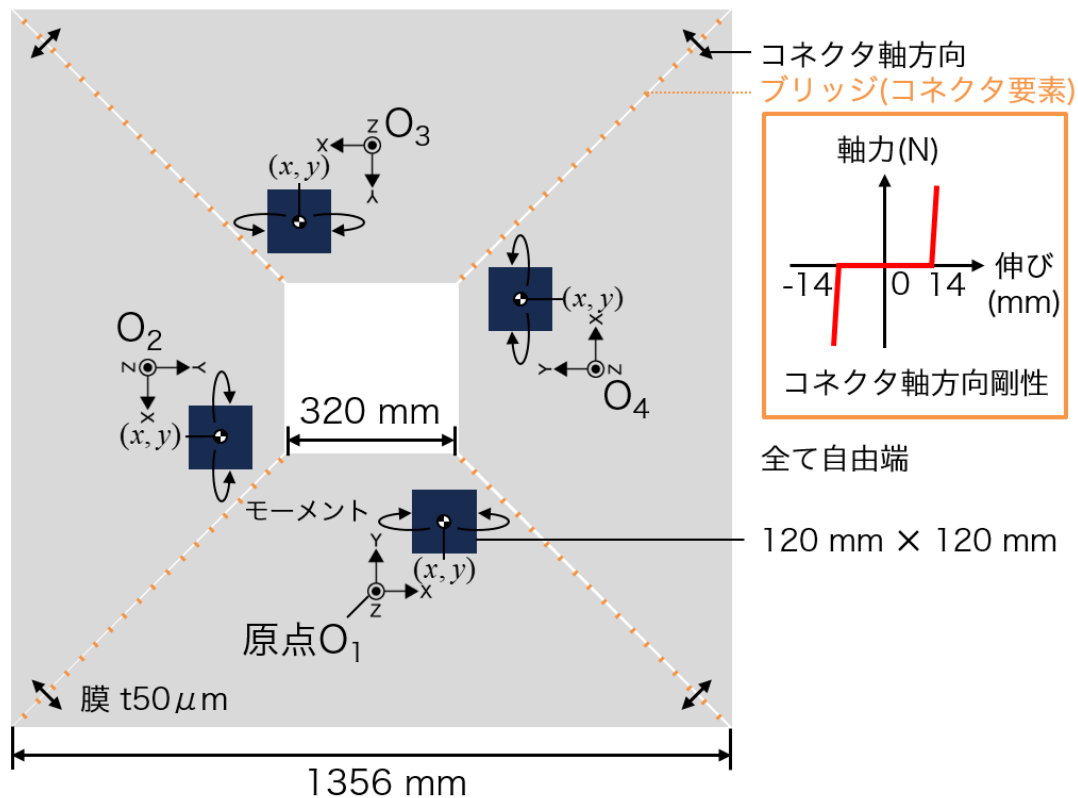


図 5.31: 膜面デバイスの位置を考慮した, 1 ペタルに 1 つの膜面デバイス (大) が貼付されたソーラーセイル膜全体の解析モデル ($\theta = 0^\circ$). 各ペタルの座標系を基準として, 各膜面デバイスの位置 (x, y) は共通の値をとる.

太陽輻射圧印加前の解析結果を図 5.32 に示す. 図 5.32(a) のみ逆ピラミッド型に変化したしたが, 他はピラミッド型のままである. (a),(c),(f) を比較すると, 膜面デバイスの半径方向 (y 方向) への移動は, ペタルの傾きに影響するようである. つまり, $+y$ 方向への移動は $+z$ 方向にペタルが傾き, $-y$ 方向への移動は $-z$ 方向にペタルが傾く傾向がある. また, 5.6 節の膜面デバイスが小さい場合と同様に, 周方向 (x 方向) に膜面デバイスを移動するほど面外変位量が減少する. (b) が逆ピラミッド型に変化しなかったのは, 膜面デバイスの周方向への移動により, ペタルの変形が減少したためと推測する.

太陽輻射圧印加後の解析結果を図 5.33 に示す. (a), (b), (f) が大きく変形したことが一瞥してわかる. (a) は図 5.32 で述べたように太陽輻射圧印加前に干渉したので, 便宜的に印加前に干渉しないようにモーメントを低減させ, 印加した後の途中結果であるが, 太陽輻射圧によってペタルはさらに傾く傾向にあった. (b), (f) は隣接する 2 つのペタルの組それぞれが対向するように潰れている. それら以外では, 太陽輻射圧による大きな変形はない.

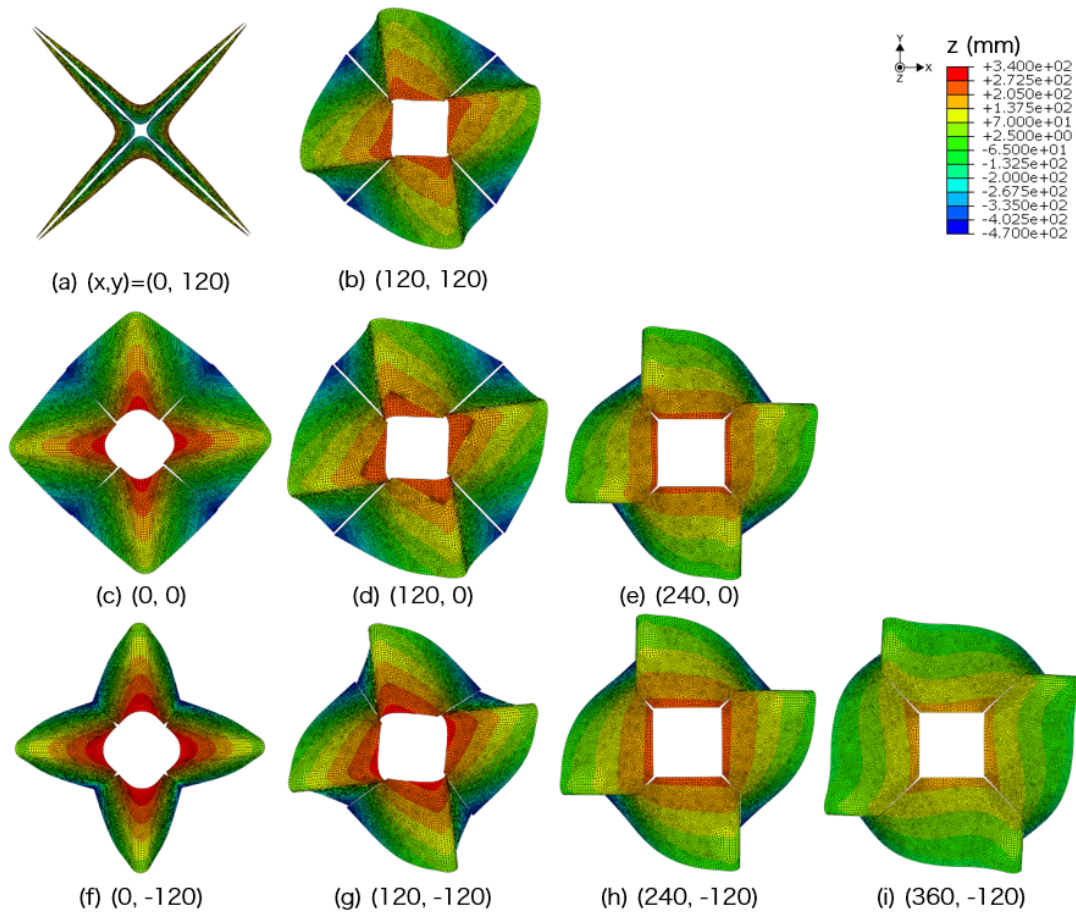


図 5.32: 膜面デバイス (大) の位置 (x, y) (mm) を変えたソーラーセイル膜全体の解析結果 ($\theta = 0^\circ$, 太陽輻射圧無し). (a) は時間幅 1 の終了時に対向ペタル同士で干渉するほど変形したため、便宜的に時間幅 0.75 での途中結果を示した.

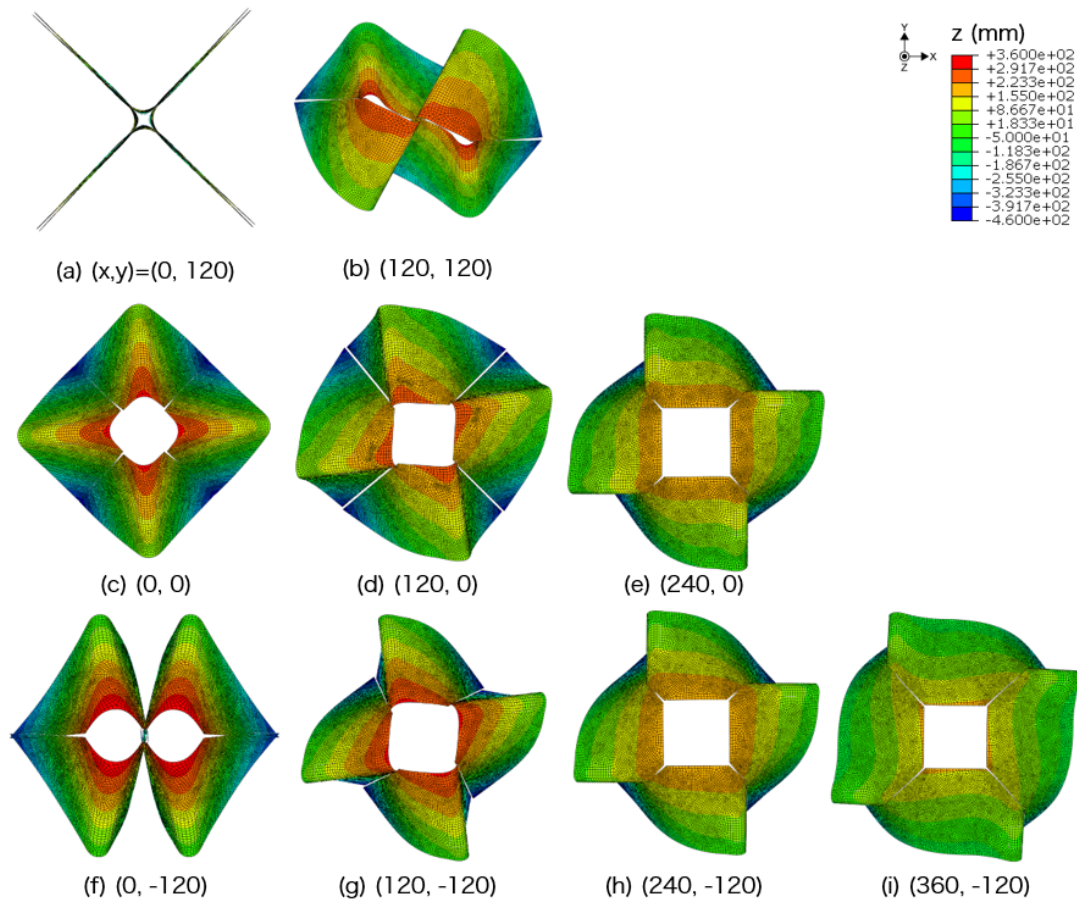


図 5.33: 膜面デバイス (大) の位置 (x, y) (mm) を変えたソーラーセイル膜全体の解析結果 ($\theta = 0^\circ$, 太陽輻射圧有り). (a) は太陽輻射圧印加前に干渉したので, 便宜的に印加前に干渉しないようにモーメントを低減させ, 印加した後の途中結果であり, 太陽輻射圧でペタルはより傾く傾向にあることを示している. (f) は時間幅 1 の終了時にペタル同士で干渉するほど変形したため, 便宜的に時間幅 0.55 での途中結果を示した.

図 5.34 にソーラーセイル膜全体の太陽輻射圧による面外変位 (RMS) と膜面デバイス (大) の位置 (x, y) の関係を示す. $(x, y) = (0, 120), (120, 120), (0, -120)$ で面外変位が大きい. これらはそれぞれ図 5.32(a), (b), (f) の大きく変形した膜面デバイス位置に対応する. その他の膜面デバイス位置では, 面外変位が 10 mm 以下で小さくて大差ない.

図 5.35 にソーラーセイル膜全体の面外剛性と膜面デバイス (大) の位置 (x, y) の関係を示す. 膜面デバイスが小さい場合の面外剛性 (図 5.20) と比較して, $(x, y) = (0, 120), (120, 120), (0, -120)$ 以外では, 曲率を有する膜面デバイスに起因した変形によって面外剛性が向上している.

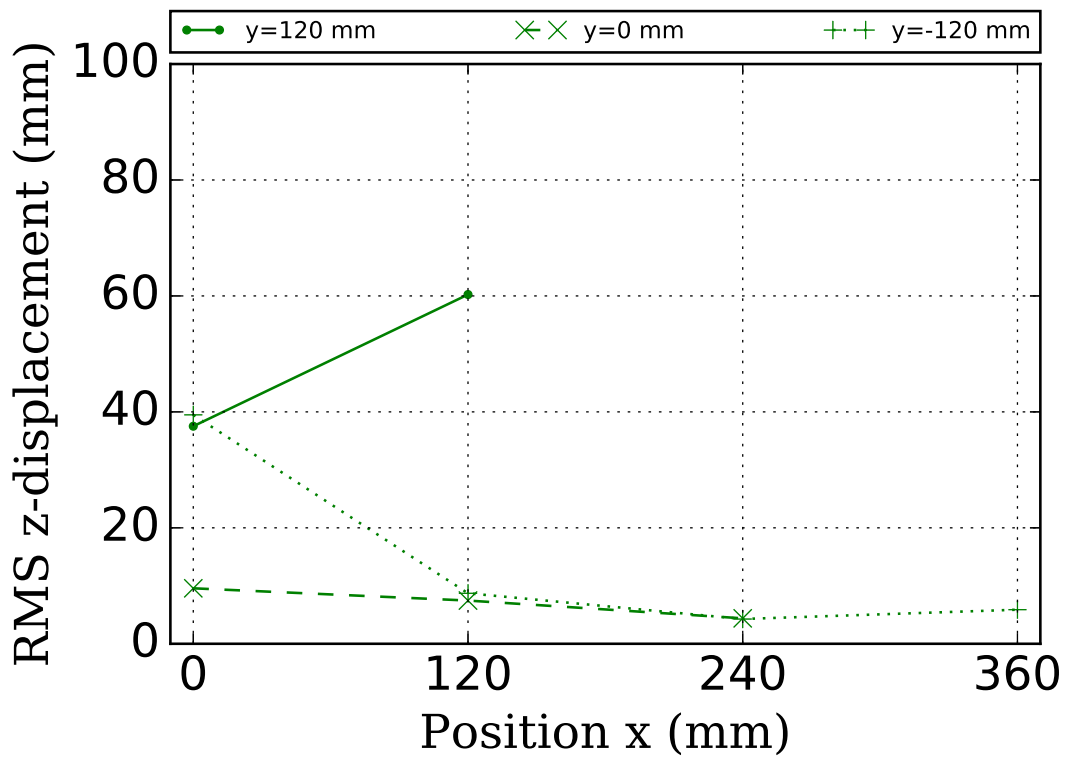


図 5.34: ソーラーセイル膜全体の太陽輻射圧による面外変位 (RMS) と膜面デバイス (大) の位置 (x, y) の関係 ($\theta = 0^\circ$). 図 5.32 から図 5.33 への面外変位をみている.

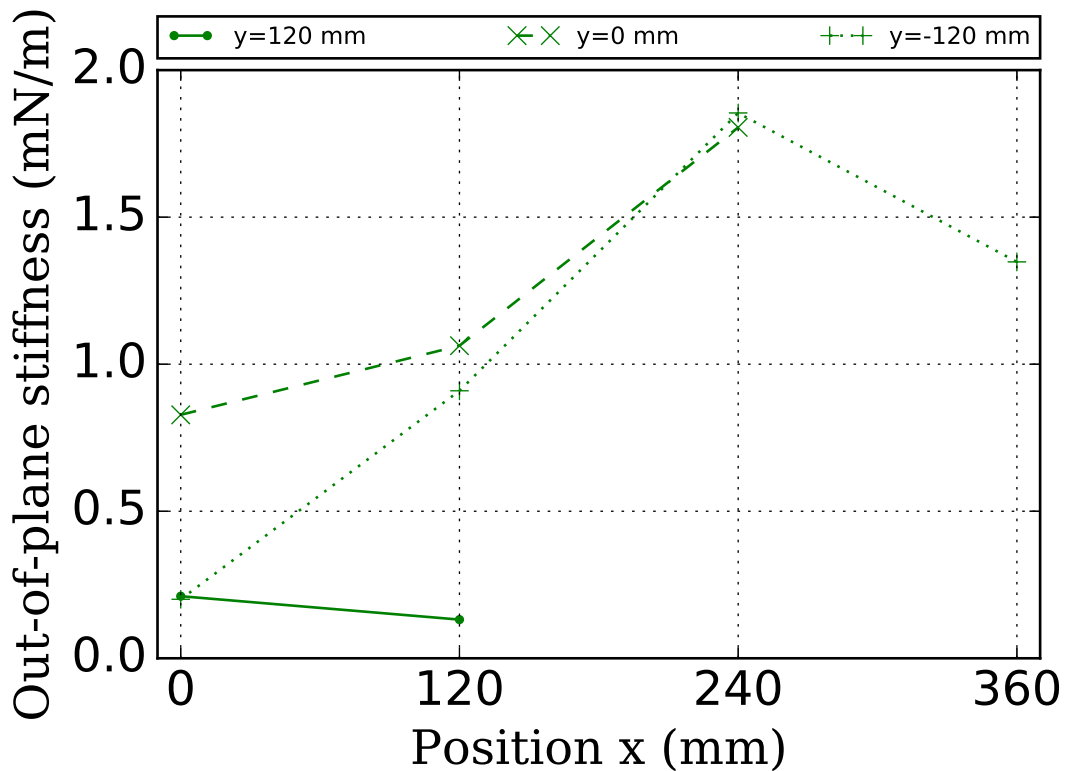


図 5.35: ソーラーセイル膜全体の面外剛性と膜面デバイス (大) の位置 (x, y) の関係 ($\theta = 0^\circ$)

太陽輻射圧による変形前のソーラーセイル膜全体に生じる太陽輻射圧トルクと膜面デバイス (大) の位置 (x, y) の関係 ($\theta = 0^\circ$) を図 5.36 に、変形後の関係を図 5.37 に示す。太陽輻射圧による変形前後を比較すると、 $x = 120$ mm で大きく変化している。 $(120, 120)$ では変形が大きいいため、トルクも大きく変化している。一方、 $(120, 0)$, $(120, -120)$ では変形が小さいにもかかわらず、トルクが大きく変化している。このことは、ピラミッド型においては、膜面デバイスの大きさや位置によって、太陽輻射圧トルクへの感度が高くなる場合があることを示唆する。

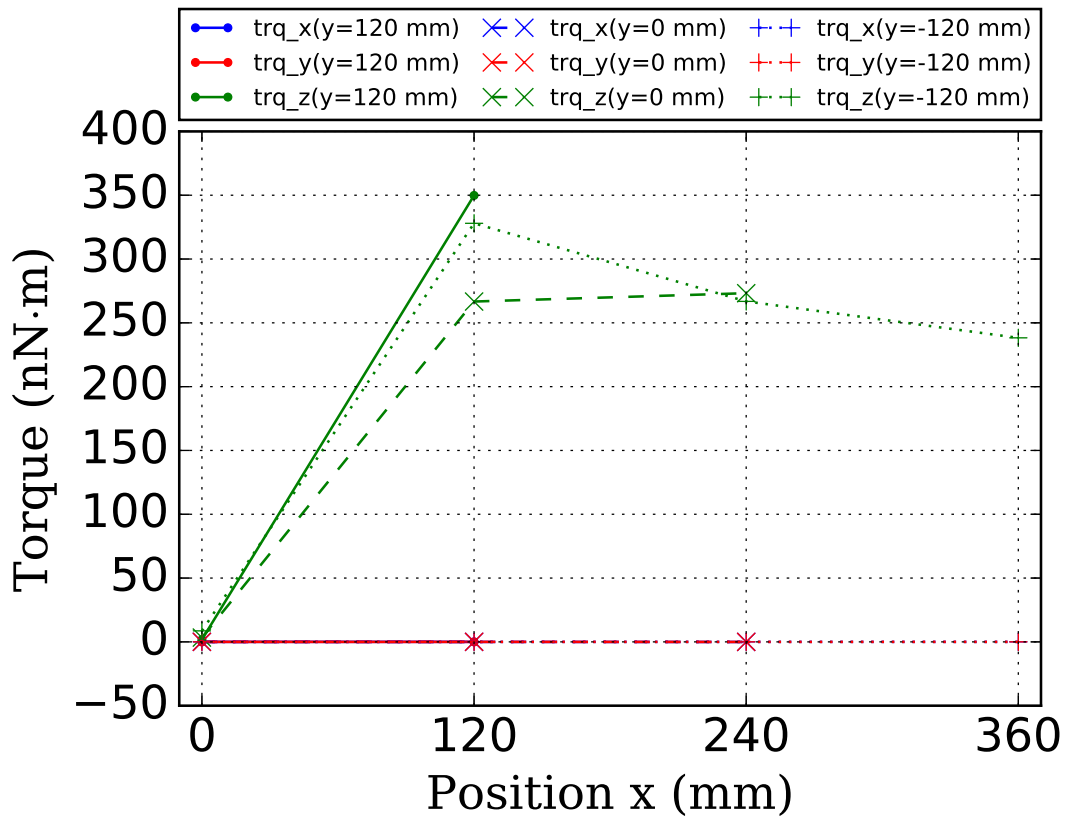


図 5.36: 太陽輻射圧による変形前のソーラーセイル膜全体に生じる太陽輻射圧トルクと膜面デバイス (大) の位置 (x, y) の関係 ($\theta = 0^\circ$)

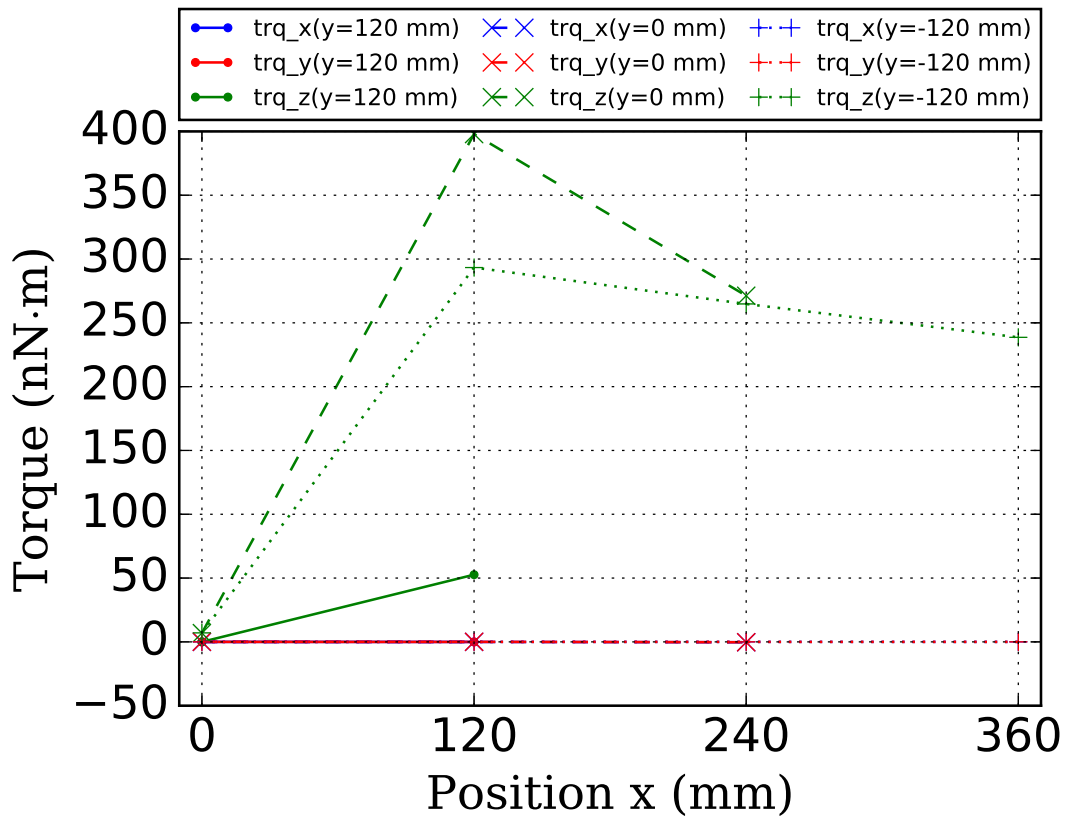


図 5.37: 太陽輻射圧による変形後のソーラーセイル膜全体に生じる太陽輻射圧トルクと膜面デバイス (大) の位置 (x, y) の関係 ($\theta = 0^\circ$)

ひずみエネルギー履歴を図 5.38 に示す. $(x, y) = (120, 0)$ (mm) の位置がひずみエネルギー最小となり, x 方向については $x = 120$ mm で最小, y 方向については $y = 0$ mm で最小となる傾向にある. 次項で $\theta = 90^\circ$ の場合と比較する.

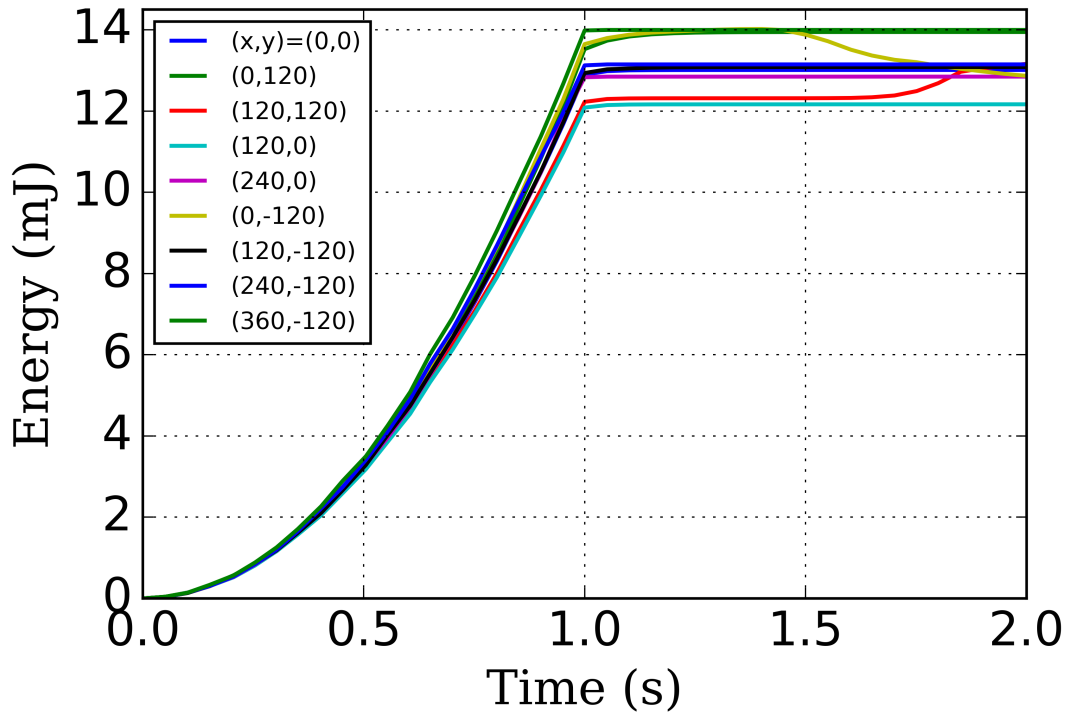


図 5.38: 膜面デバイス (大) の位置を変えたソーラーセイル膜全体の解析のひずみエネルギー履歴 ($\theta = 0^\circ$). 0~1 s : モーメント付加のステップ, 1~2 s : 太陽輻射圧付加のステップ.

5.8.2 膜面デバイスの曲率で半径方向にたわむ場合 ($\theta = 90^\circ$)

図 5.39 に膜面デバイスの位置を考慮した, 1 ペタルに 1 つの膜面デバイス (大) が貼付されたソーラーセイル膜全体の解析モデル ($\theta = 90^\circ$) を示す. $\theta = 90^\circ$ とした以外, 前節と同様の解析を行う.

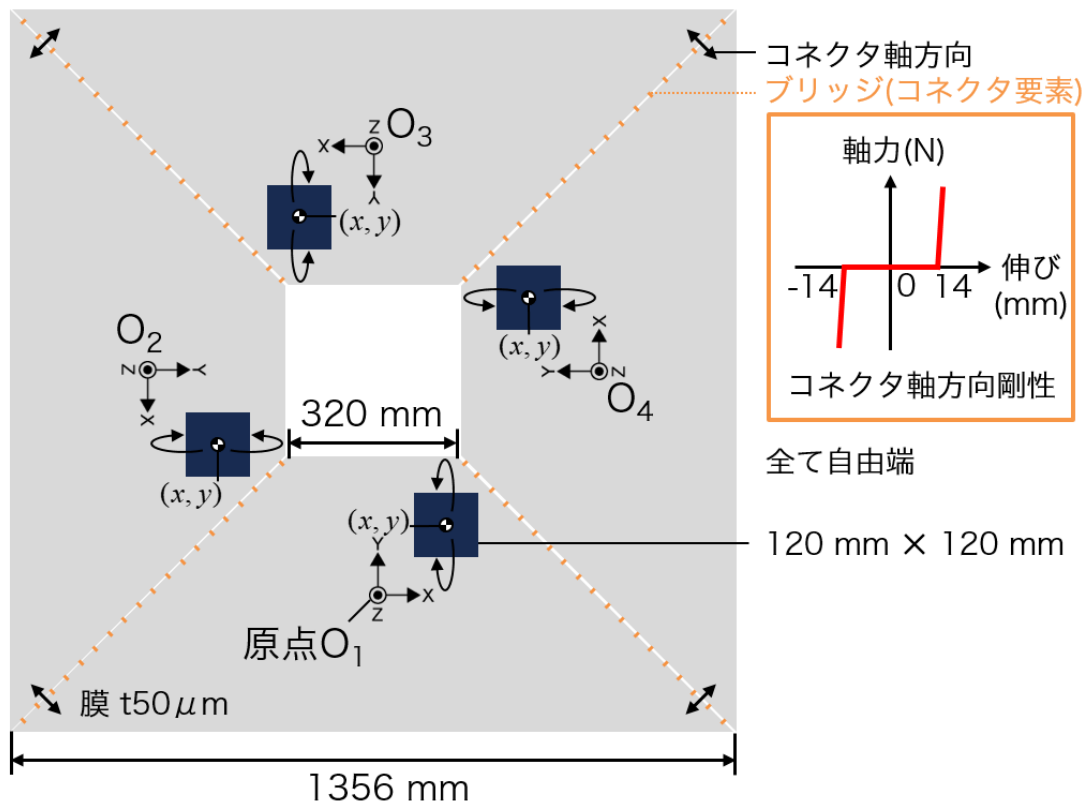


図 5.39: 膜面デバイスの位置を考慮した, 1 ペタルに 1 つの膜面デバイス (大) が貼付されたソーラーセイル膜全体の解析モデル ($\theta = 90^\circ$). 各ペタルの座標系を基準として, 各膜面デバイスの位置 (x, y) は共通の値をとる.

太陽輻射圧印加前の解析結果を図 5.40 に示す. 全ての膜面デバイス位置で鞍型になっているが, 対頂点の変位方向が反対になる 2 通りの鞍型がある. これは, ピラミッド型と逆ピラミッド型の関係と同様, バイステーブル構造になっているためと考えられる. 前節同様, 周方向 (x 方向) に膜面デバイスを移動するほど面外変位量が減少し, $(x, y) = (240, -120), (360, -120)$ では, 対頂点の組の間の z 方向位置の差が小さい. 半径方向 (y 方向) への移動は, セイル中心から離れる ($-y$ 方向へ移動する) につれて, 対頂点の組の間の z 方向距離が増え, 面外変位量が増大する.

ピラミッド型と逆ピラミッド型は, 互いに遷移し得る 2 つの安定形状であるが, 想定しない型形状に遷移すると, 光圧中心が z 方向に変化して, 重心との位置関係が変化し, 光圧に対して姿勢が安定する方向が変化する欠点がある. その一方で, 鞍型の 2 つの安定形状は遷移しても光圧中心は変化しない. さらに, スピン型ソーラーセイルの場合, スピンするので, 回転対称関係にある鞍型 2 通りが生じ得ることの弊害は少ない.

太陽輻射圧印加後の解析結果を図 5.41 に示す. 全ての膜面デバイス位置で鞍型を維持している. このことは, 膜面デバイスの曲率で周方向にたわむ場合 ($\theta = 0^\circ$)(図 5.33) のピラミッド

型よりも、鞍型のほうが太陽輻射圧および膜面デバイス位置に対して安定形状であることを示唆する。(g), (h), (i) の変形が比較的大きく、対頂点 2 組の高低差が顕著になっている。そのため、それらの膜面デバイス位置 ($y = -120 \text{ mm}$ かつ $x \geq 120 \text{ mm}$) では、太陽輻射圧による面外変位 (RMS) が大きく (図 5.42), 面外剛性が小さくなっている (図 5.43)。膜面デバイスの曲率で周方向にたわむ場合 ($\theta = 0^\circ$) での面外剛性 (図 5.35) と比較すると、(g), (h), (i) 以外は、この半径方向にたわむ場合 ($\theta = 90^\circ$) のほうが、面外剛性が高い傾向にある。

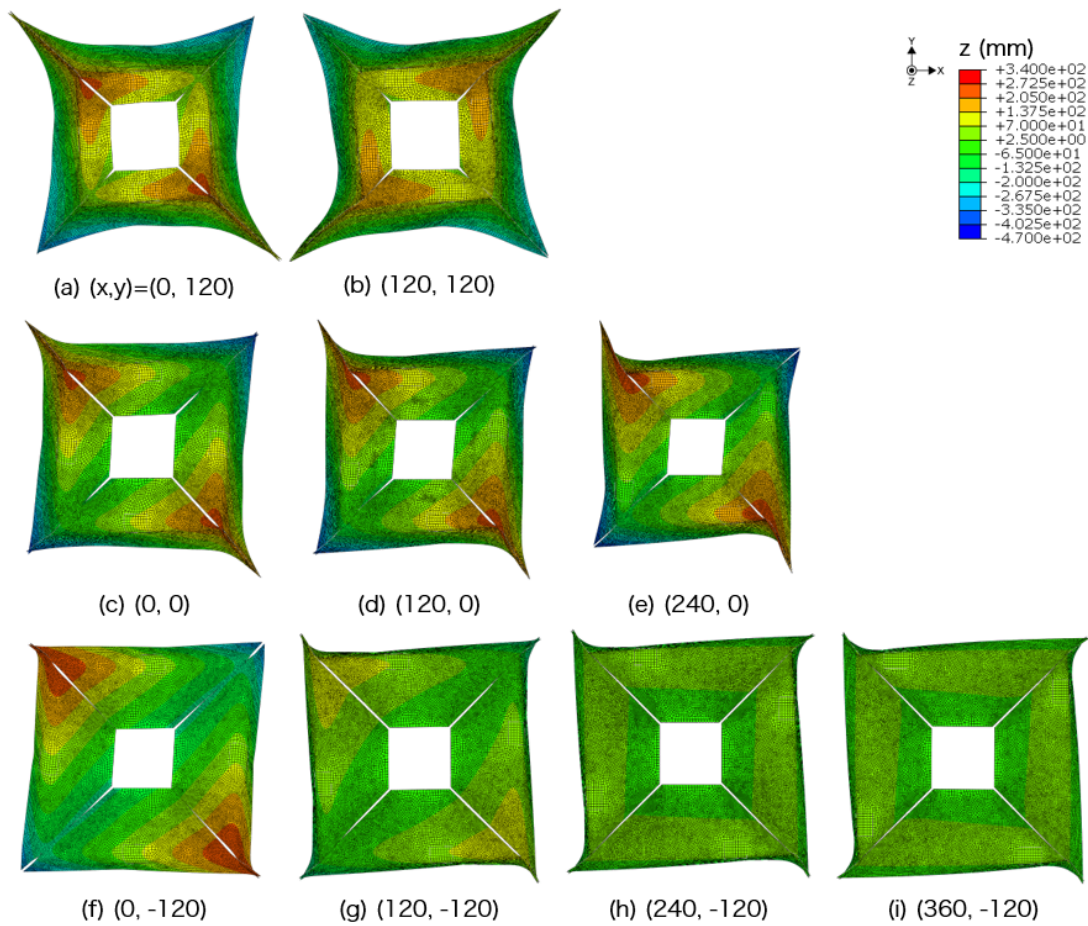


図 5.40: 膜面デバイス (大) の位置 (x, y) (mm) を変えたソーラーセイル膜全体の解析結果 ($\theta = 90^\circ$, 太陽輻射圧無し)

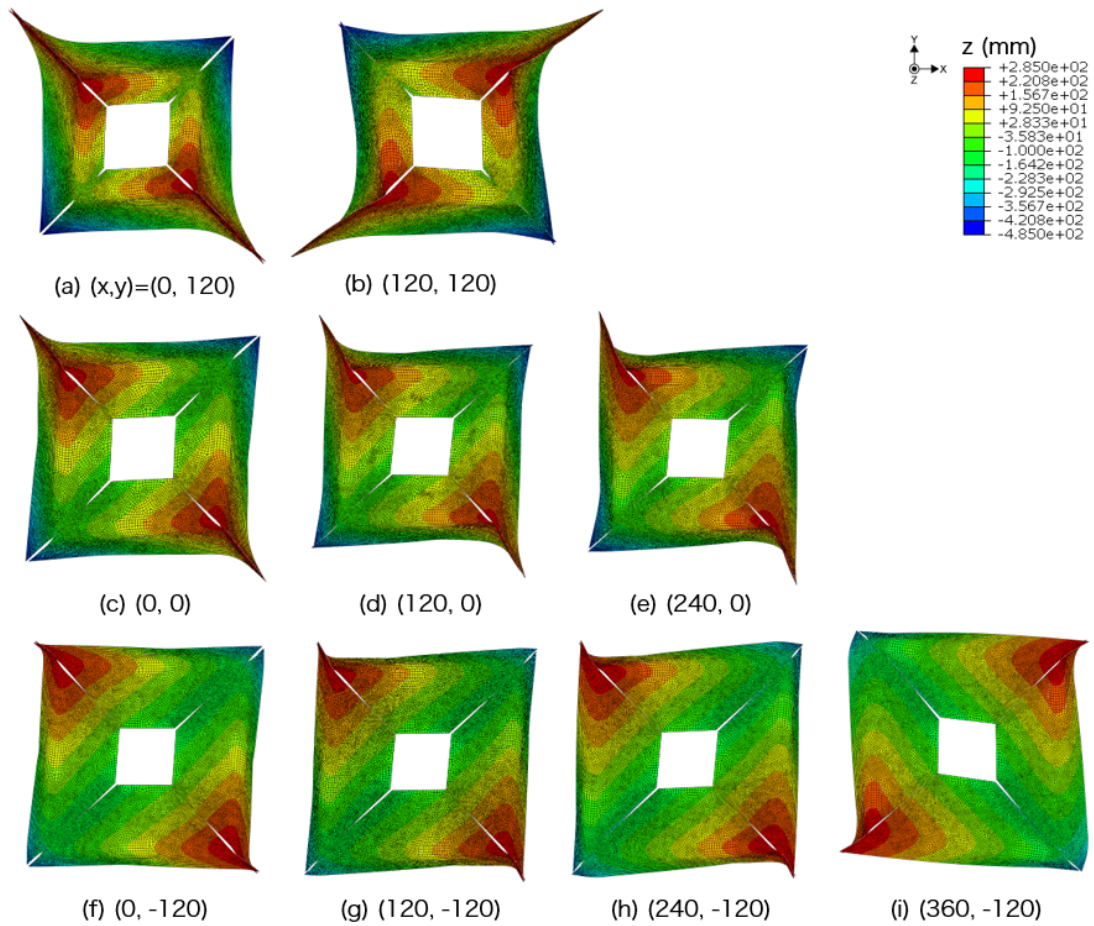


図 5.41: 膜面デバイス (大) の位置 (x, y) (mm) を変えたソーラーセイル膜全体の解析結果 ($\theta = 90^\circ$, 太陽輻射圧有り)

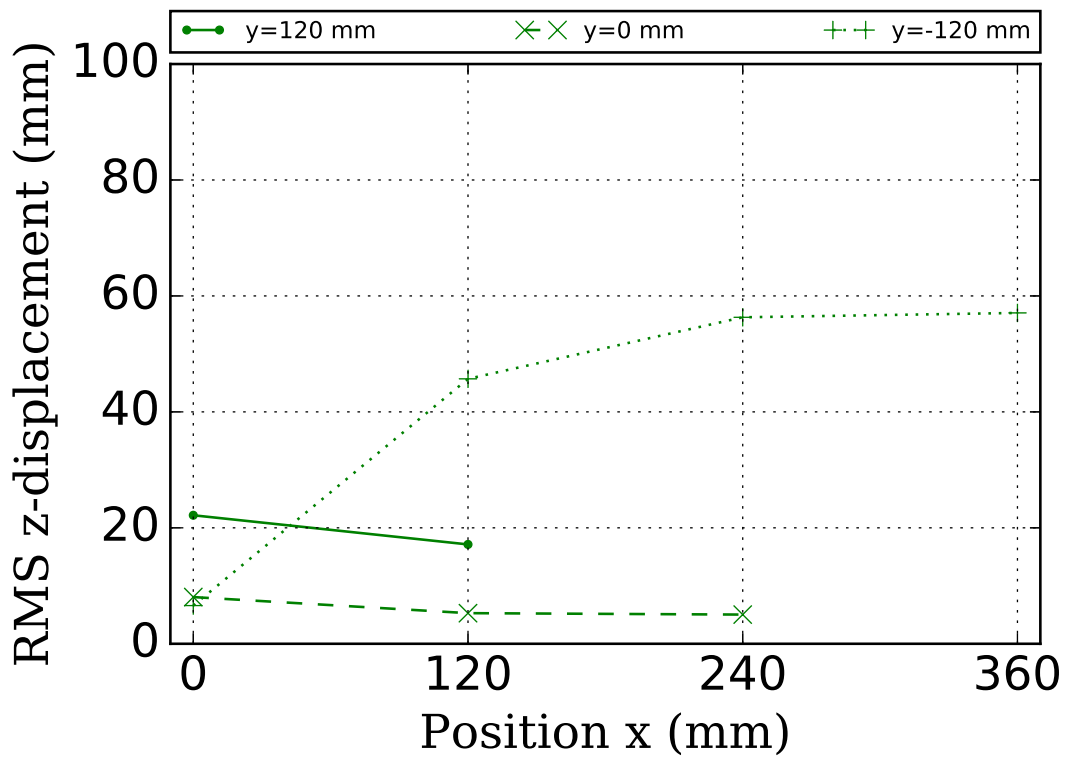


図 5.42: ソーラーセイル膜全体の太陽輻射圧による面外変位 (RMS) と膜面デバイス (大) の位置 (x, y) の関係 ($\theta = 90^\circ$). 図 5.40 から図 5.41 への面外変位をみている.

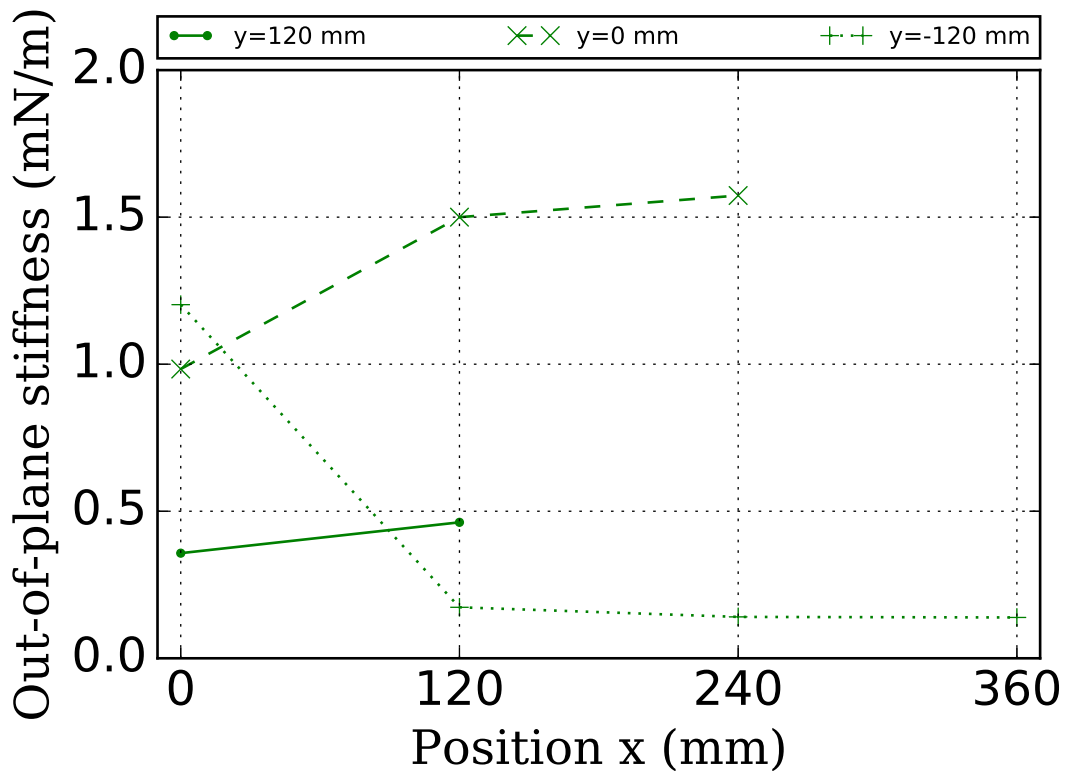


図 5.43: ソーラーセイル膜全体の面外剛性と膜面デバイス (大) の位置 (x, y) の関係 ($\theta = 90^\circ$)

太陽輻射圧による変形前のソーラーセイル膜全体に生じる太陽輻射圧トルクと膜面デバイス (大) の位置 (x, y) の関係 ($\theta = 90^\circ$) を図 5.44 に、変形後の関係を図 5.45 に示す. 全体的に、トルク z 成分が支配的であり、膜面デバイス位置 y 方向の太陽輻射圧トルクに対する感度は低く、膜面デバイス位置 x 方向が増加する (x 方向に偏った配置になる) と、トルク z 成分の絶対値も増加する傾向がある. $\theta = 0^\circ$ の場合 (図 5.36, 5.37) と比較すると、トルク z 成分の絶対値は $\theta = 90^\circ$ のほうが $100 \text{ nN} \cdot \text{m}$ ほど小さい傾向にある.

$(x, y) = (0, 0)$ では、太陽輻射圧による変形前 (図 5.44) は、トルク z 成分の絶対値よりも x, y 成分の絶対値のほうが大きいですが、変形後は他の膜面デバイス位置同様に z 成分のほうが大きい. また、 $(x, y) = (0, 120)$ では、トルク z 成分が変形前後で反転している. したがって、膜面デバイスを $x = 0 \text{ mm}$ の位置、つまり、ペタル中心軸上に置くと、太陽輻射圧トルクは不安定になるので、 x 方向に偏らせた配置としたほうが安定である. 一方で、 x 方向に偏らせた配置とすると、トルク z 成分の絶対値は増大するので、安定性とトルク z 成分の絶対値のトレードオフ関係に留意した配置が望ましいことが分かる.

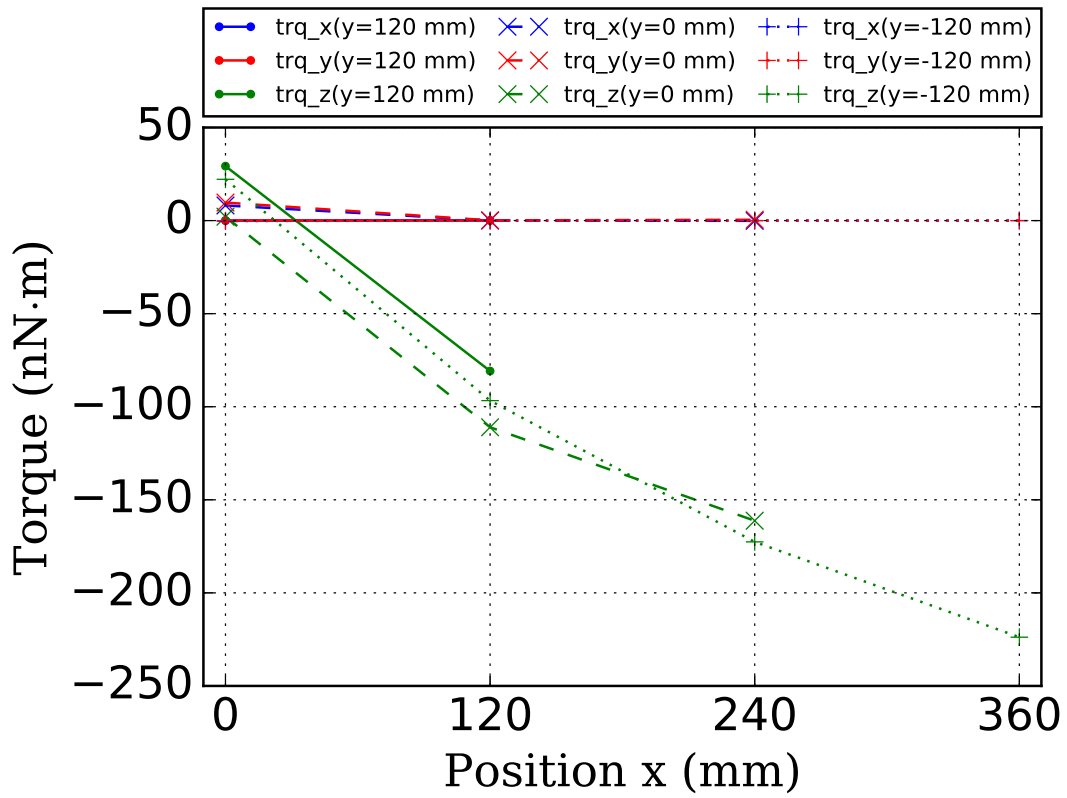


図 5.44: 太陽輻射圧による変形前のソーラーセイル膜全体に生じる太陽輻射圧トルクと膜面デバイス (大) の位置 (x, y) の関係 ($\theta = 90^\circ$)

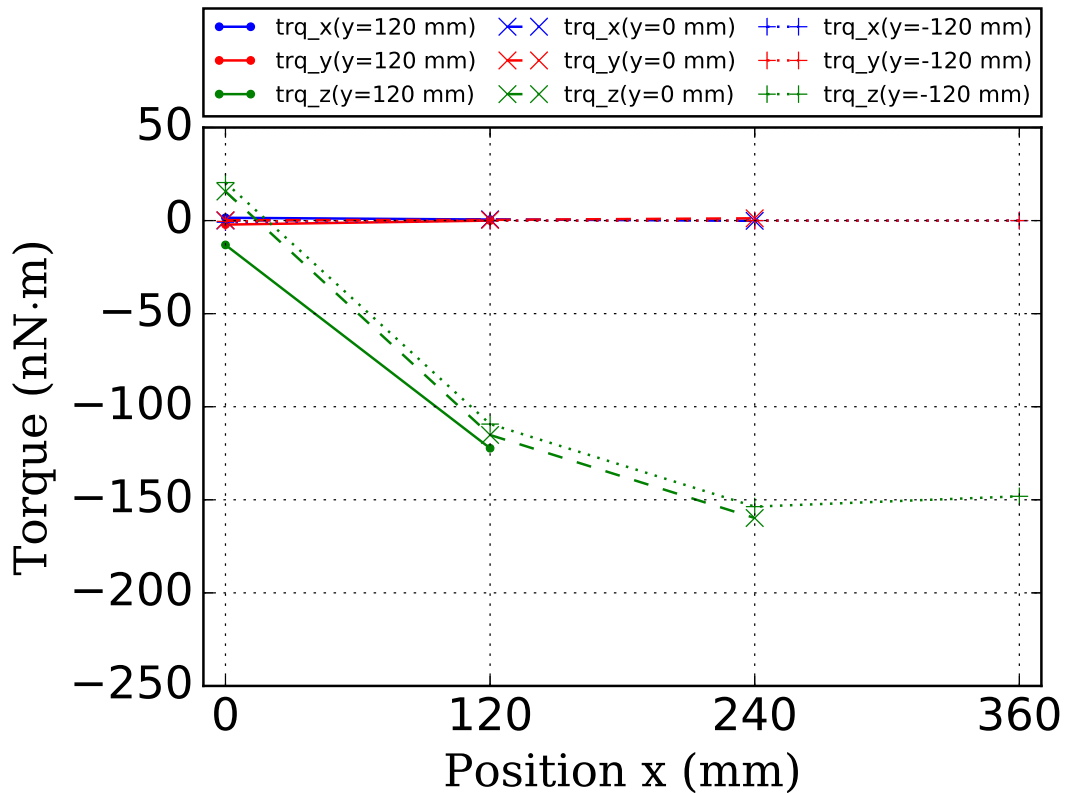


図 5.45: 太陽輻射圧による変形後のソーラーセイル膜全体に生じる太陽輻射圧トルクと膜面デバイス (大) の位置 (x, y) の関係 ($\theta = 90^\circ$)

ひずみエネルギー履歴を図 5.46 に示す。鞍型では、 $(x, y) = (0, -120)$ (mm) の位置がひずみエネルギー最小となり、その位置から膜面デバイスを $+x, +y$ 方向に移動させると、ひずみエネルギーが単調増加する傾向にある。また、鞍型のひずみエネルギーはピラミッド型 (図 5.38) よりも全体的に小さい。したがって、エネルギー的に安定な膜面デバイス配置は、向きは $\theta = 90^\circ$ 付近で鞍型とし、位置はペタル外周側の周方向中心近傍となる。

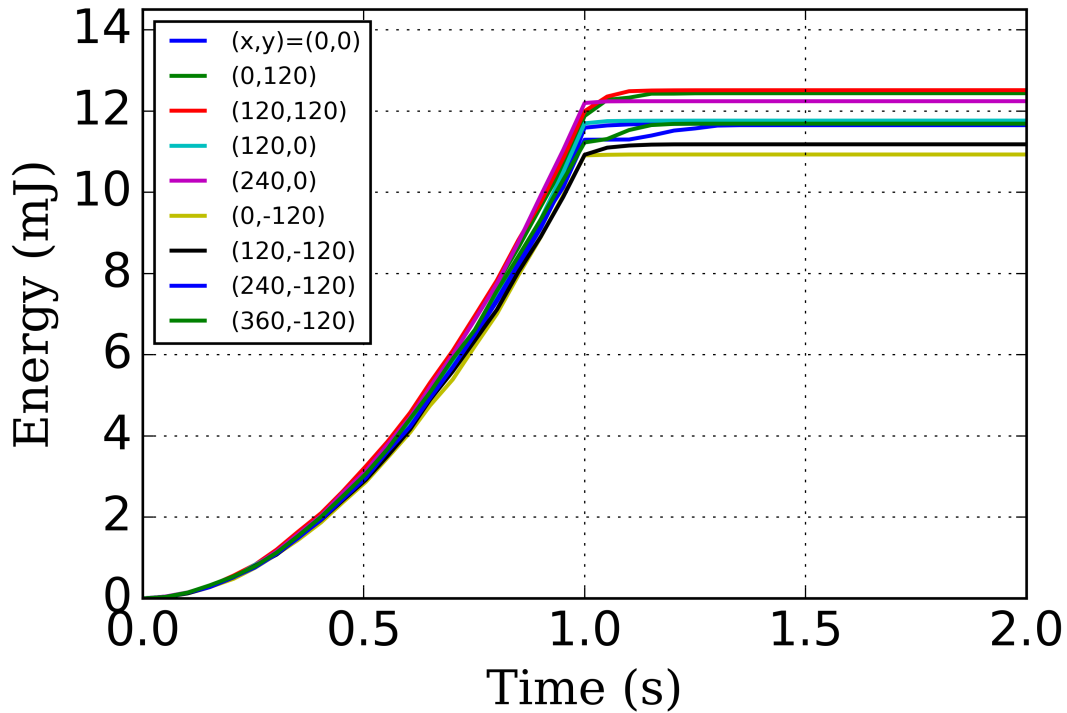


図 5.46: 膜面デバイス (大) の位置を変えたソーラーセイル膜全体の解析のひずみエネルギー履歴 ($\theta = 90^\circ$). 0~1 s : モーメント付加のステップ, 1~2 s : 太陽輻射圧付加のステップ.

5.9 ソーラーセイル膜全体の固有値解析

本章では、太陽輻射圧による面外変位をもとに、面外剛性を評価してきたが、ソーラーセイル全体での固有振動数についても考察する。各ペタルの中心に膜面デバイス (大) を配置したソーラーセイル全体モデル (図 5.23) において、解析ステップの 3 番目に固有値解析を追加し、固有値解析を実施した。膜面デバイスの向き $\theta = 0^\circ$ (ピラミッド型), 90° (鞍型) それぞれで、太陽輻射圧の単位方向ベクトル $\vec{S} = [0, 0, -1]^T$, $\vec{S} = [1, 0, -1]^T$, つまり、変形前の膜の法線方向の反対方向、斜め 45° 方向それぞれに太陽光を入射させて解析した。

解析結果として、図 5.47, 5.48 にモード次数と有効質量比 (面外方向) の関係を示す。モード次数 1~50 の有効質量比の総和 1.0 なので、次数の範囲は十分である。宙に浮いた膜なので、6 自由度それぞれの剛体モードが生じているが、剛体モードおよび固有振動数 0 Hz のモードは除いて考える。すると、有効質量比 (面外方向) 最大のモードの固有振動数は表 5.1 のようになる。 \vec{S} によって、 $\theta = 0^\circ$ と 90° の固有振動数の大小関係が変化し、ピラミッド型は太陽輻射圧の方向で固有振動数が変化する一方で、鞍型は変化しない傾向が示唆される。

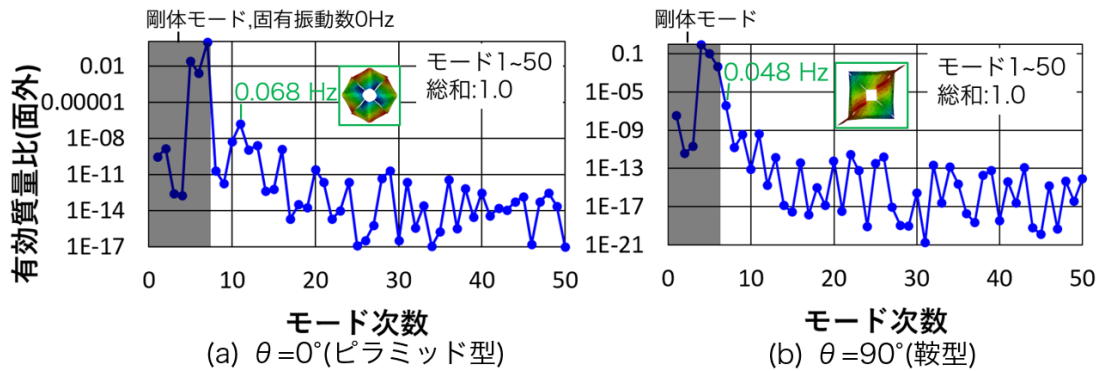


図 5.47: モード次数と有効質量比 (面外) の関係 ($\vec{S} = [0, 0, -1]^T$)

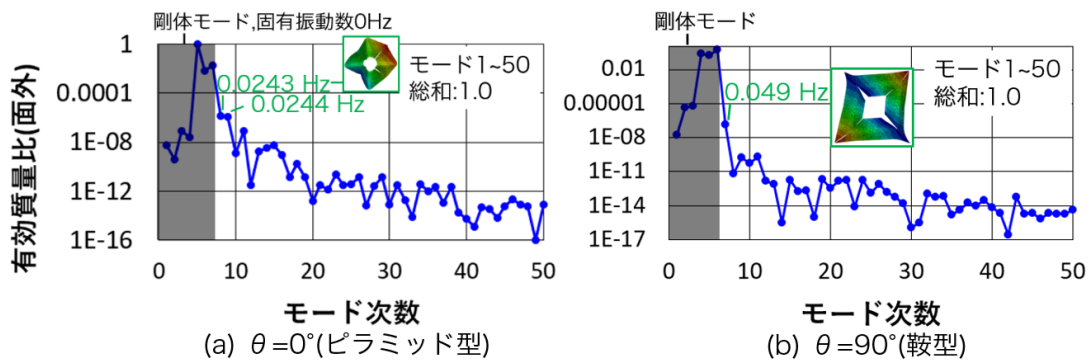


図 5.48: モード次数と有効質量比 (面外) の関係 ($\vec{S} = [1, 0, -1]^T$)

表 5.1: 太陽輻射圧の単位方向ベクトル \vec{S} と有効質量比 (面外) 最大の固有振動数の関係

\vec{S}	有効質量比最大の固有振動数 (Hz)	
	$\theta = 0^\circ$ (ピラミッド型)	90° (鞍型)
$[0, 0, -1]^T$	0.068	0.048
$[1, 0, -1]^T$	0.0243	0.049

5.10 ソーラーセイルにおける膜面デバイス配置設計への有効な方針

前節までの解析結果をもとに、ソーラーセイルにおける膜面デバイス配置の設計指針の確立に向けた有効な方針を示す。曲率を有する膜面デバイスの向きについては、周方向にたわむ $\theta = 0^\circ$ 付近はピラミッド型、半径方向にたわむ $\theta = 90^\circ$ 付近は鞍型、 $\theta = 45^\circ$ 付近では逆ピラ

ミッド型に変形する傾向がある。逆ピラミッド型は太陽輻射圧に対して不安定な形状であり、ソーラーセイルには望ましくない。ピラミッド型・鞍型だと、太陽輻射圧に対する面外剛性が高く、太陽輻射圧トルクは小さい傾向にある。曲率を有する膜面デバイス(大)の位置のパラメータ解析結果から、ピラミッド型よりも鞍型形状のほうが形状安定性の点で望ましい。また、風車トルクの正負方向を意図した方向とするため、 $\theta = 90^\circ$ ではなく、 $80 \sim 90^\circ$ の間で向きを傾ける、あるいは、膜面デバイスの位置を $x = 0 \text{ mm}$ から周方向(x方向)に少し偏らせたほうが望ましいと考えられる。その一方で、x方向に偏らせると、風車トルクの絶対値は増大するので、風車トルクの正負方向の安定性と絶対値のトレードオフ関係に留意する必要がある。どの程度偏らせると良いかの指針は定量的に示せていないが、セイル製作誤差等の不確定要因が風車トルクを生じさせる量にたいして、ある程度の安全率をもった値で偏らせれば良いと考えられる。以上をまとめると、膜面デバイス配置設計への有効な方針は下記になる。

- 鞍型に変形するように、膜面デバイスの曲率で半径方向にペタルがたわむような膜面デバイスの向きとし、形状安定性を高める。
- 膜面デバイスの位置を偏らせて、風車トルクの絶対値とのトレードオフ関係に留意しつつ、風車トルクの正負方向を定める。

本章ではペタル1枚につき膜面デバイス1枚での解析だったが、膜面デバイス複数枚の配置にも上記指針は適用できると予想する。ただし、複数枚の場合、形状が安定して、なおかつ、風車トルクを低減させて、その正負方向が定まる様な複雑な配置があり得るだろう。

5.11 結言

本章では、ソーラーセイル膜全体に対して、曲率を有する膜面デバイスが与える変形への影響を明らかにした。膜面デバイスの大小2通りの寸法それぞれに対して、向き・位置を個別に変えて解析を行い、太陽輻射圧による面外変位にもとづいた面外剛性、および、膜に生じる太陽輻射圧トルクをもとに全体形状を評価した。膜面デバイスの向きに関しては、ペタルが周方向にたわむ向きでは膜全体がピラミッド型に変形し、半径方向にたわむ向きでは鞍型に変形し、その中間の向きでは、逆ピラミッド型に変形する。逆ピラミッド型は不安定な形状であり、ソーラーセイルには望ましくない。ピラミッド型・鞍型ともに面外剛性が高く、風車トルクは小さい傾向があるが、形状の安定性および風車トルクの正負方向の制御の観点から鞍型が望ましい。膜面デバイスの位置は、ペタル中心軸上から周方向に偏らせると、風車トルクの絶対値が増加する傾向にある。最後に、得られた解析結果をもとに、ソーラーセイルにおける膜面デバイス配置の設計指針の確立に向けた有効な方針を示した。

第 6 章

結論

6.1 結論

本論文の結論を以下にまとめる。

第 1 章「序論」では、宇宙構造物としての膜要素を応用したソーラーセイルに着目し、ソーラー電力セイル IKAROS の軌道上実証実験で確認された大型薄膜構造の予想外の面外変形、面外剛性、太陽輻射圧トルクを取り上げた。それら力学的現象は曲率を有する膜面デバイスが大きく影響したと推測されているものの検討は不十分であることを指摘した上で、研究目的として曲率を有する膜面デバイスによる薄膜の面外変形、面外剛性、太陽輻射圧トルクへの影響を解明し、ソーラーセイルにおける膜面デバイス配置の設計指針の確立に向けた有効な方針を示すことを掲げた。

第 2 章「地上実験用部分膜モデルを用いた曲率を有する膜面デバイス付き矩形膜の変形特性」では、まず、地上実験用部分膜モデルとして、地上実験が容易にできるよう 2 辺を固定して、1 軸張力で遠心力を模擬し、力のモーメントで膜面デバイスの曲率を模擬したスピン型ソーラーセイル膜の一部を切り出した矩形膜を示した。次に、静解析および準静的な動解析の 2 通りの幾何学的非線形有限要素解析を行い、3 次元形状測定器を用いて部分膜モデルの供試体の形状測定実験を実施し、解析と実験のシワが生じた薄膜形状が定性的に一致することでモデルの妥当性を示し、張力下の膜面デバイス近傍の膜変形特性として、膜面デバイス脇に生じるシワは曲率によって、くの字状に曲がり、シワのパターンは張力によって変化することを明らかにした。

第 3 章「地上実験用部分膜モデルを用いた曲率を有する膜面デバイス付き矩形膜の振動特性」では、前章の部分膜モデルを対象として、曲率を有する膜面デバイスが面外方向の固有モードの固有振動数に与える影響を見るため、曲率のない膜面デバイス付き膜や膜面デバイスの付いていない平膜と比較しながら、1 軸張力下での面外変形後の固有値解析および真空槽内での振動実験を実施した。その結果、面外方向有効質量比が最大の固有振動数と実験で計測さ

れた共振振動数の傾向が一致して解析モデルが妥当なことを確認するとともに、部分膜モデルに関する1軸張力と固有振動数の関係として、低張力の場合は曲率によって固有振動数が顕著に増大し、高張力の場合は曲率の有無に関わらず膜面デバイスによって固有振動数が僅かに減少する傾向を明らかにした。

第4章「軌道上膜モデルを用いた曲率を有する膜面デバイス付き膜の変形特性」では、第2、3章で用いた解析モデルを拡張して複雑化させた軌道上膜モデルとして、ソーラーセイル膜を構成するペタル膜単体に相当する膜面デバイスの付いた自由境界膜を外力無しで扱い、曲率を有する膜面デバイスによる軌道上膜の変形特性を解明するため、膜形状をソーラーセイルの代表的なものを主として幅広く正三角形、正方形、円形、台形等とし、膜面デバイスの枚数、位置、向きを変化させることで、それらによって生成される薄膜上のシワの生成形状パターンを整理した。また、膜面デバイス単体が貼付された場合の正方形膜の変形を比較して、膜面デバイス2枚が貼付された膜の変形形状を重ね合わせにより表せる膜面デバイス配置はxまたはy方向へ一直線に並べる配置であることを示した。

第5章「軌道上膜モデルを複数結合した曲率を有する膜面デバイス付きソーラーセイル膜全体の変形特性」では、前章の軌道上台形ペタル膜モデルを用いて、IKAROS および計画中の次期ソーラー電力セイル OKEANOS 同様に複数のペタル膜をブリッジで結合した構成を持つセイル膜全体に解析モデルを複雑化して、曲率を有する膜面デバイスによる膜変形への影響を解析した。膜面デバイスのサイズ、向き、位置をパラメータとし、太陽輻射圧が外力として作用するときの膜の面外変位および膜に生じる太陽輻射圧トルクの特に膜面法線方向成分を求めることで、全体形状を評価した。以上の解析結果から、曲率を有する膜面デバイスの向きで変化するペタルのたわみ方向によって、膜全体がピラミッド型、逆ピラミッド型、鞍型と呼ぶ特徴的な形状に変化する傾向があり、逆ピラミッド型は太陽輻射圧に対して不安定、ピラミッド型と鞍型はともに面外剛性が高く、太陽輻射圧トルクが小さくなる傾向を見出し、ソーラーセイルにおける膜面デバイス配置の設計指針の確立に向けた有効な方針として、膜面デバイスの位置および太陽輻射圧に対する形状安定性および太陽輻射圧トルク制御の観点から鞍型になる膜面デバイス配置が望ましいことを示した。

6.2 今後の課題

本論文の今後の課題を以下にまとめる。

膜厚や膜長等で膜変形が変化するので、相似則を考慮して無次元量を求め、より網羅的に解析を行うことで一般的な知見を得ることが必要になる。

第2章の地上実験用部分膜モデルの変形特性では、有限要素解析よりも形状測定実験の面外変形量が大きくなった。面外変形量を解析で求めるためには、膜面デバイスの曲率のモデリング方法などの解析モデルの高精度化、あるいは、面外変形量の実験式を求めることが必要と

なる。

第3章の地上実験用部分膜モデルの振動特性では、膜面デバイスの曲率が固有振動数に与える影響の力学的な理論解析およびセイルの一部を切り取った膜から全体膜の固有振動数を求めるような拡張が課題と考える。

第4章の軌道上膜モデルの変形特性では、膜面デバイス2枚の場合で膜変形が膜面デバイス単体による変形の重ね合わせによって表されるかを考察したが、実際には膜面デバイス3枚以上での考察が望まれる。加えて、第2,3章で地上実験用部分膜モデルの妥当性を確認したが、解析結果の実験による評価も必要と考えられる。

第5章のソーラーセイル膜全体の変形特性では、各ペタルに膜面デバイス単体が付いたセイルで解析したが、各ペタルに膜面デバイス複数枚が付いたセイルでの解析も必要と考えられる。加えて、第4章同様、第2,3章で地上実験用部分膜モデルの妥当性を確認したが、解析結果の実験による評価も必要と考えられる。

参考文献

- [1] C. H. Jenkins, *Progress in astronautics and aeronautics: gossamer spacecraft: membrane and inflatable structures technology for space applications*, Vol. 191: AIAA, 2001.
- [2] I. I. Shapiro and H. M. Jones, “Perturbations of the Orbit of the Echo Balloon,” *Science*, Vol. 132, No. 3438, pp. 1484–1486, 1960.
- [3] C. McInnes and J. Simmons, “Halo orbits for solar sails I—heliocentric case,” *J. Spacecraft Rockets*, Vol. 29, pp. 466–471, 1992.
- [4] K. Tsander, *From a Scientific Heritage, NASA Technical Translation TTF-541, 1967, a translation of Iz Nauchnogo Naslediya*: Nauca Press, Moscow, 1924.
- [5] R. L. Garwin, “Solar sailing—a practical method of propulsion within the solar system,” *Jet Propulsion*, Vol. 28, No. 3, pp. 188–190, 1958.
- [6] O. Mori, Y. Shirasawa, Y. Mimasu, Y. Tsuda, H. Sawada, T. Saiki, T. Yamamoto, K. Yonekura, H. Hoshino, J. Kawaguchi et al., “Overview of IKAROS mission,” in *Advances in solar sailing*: Springer Science & Business Media, pp. 25–43, 2014a.
- [7] N. Okuizumi, Y. Satou, O. Mori, H. Sakamoto, and H. Furuya, “Investigation of the Deformation and Stiffness of Spinning Solar Sail Membrane of IKAROS,” in *4th AIAA Spacecraft Structures Conference*, p. 1113, 2017.
- [8] IKAROS デモンストレーションチーム, “小型ソーラー電力セイル実証機 IKAROS (イカロス) の紹介”, , http://www.jaxa.jp/countdown/f17/pdf/presskit_ikaros.pdf, (accessed 2017-12-30).
- [9] 森治, “小型ソーラー電力セイル実証機 (IKAROS) の定常運用終了報告”, , http://www.jaxa.jp/press/2011/01/20110126_sac_ikaros.pdf, (accessed 2017-12-30).
- [10] 森治, 白澤洋次, 奥泉信克, “IKAROS におけるセイル展開・展張実証と次世代機への反映”, 日本航空宇宙学会誌, Vol. 65, No. 7, pp. 208-215, 2017.
- [11] 知識柔一, 森治, 澤田弘崇, 白澤洋次, “分離カメラ画像の陰影による IKAROS の膜面形状推定”, 日本航空宇宙学会論文集, Vol. 60, No. 4, pp. 167-172, 2012.
- [12] Y. Tsuda, T. Saiki, R. Funase, and Y. Mimasu, “Generalized attitude model for spinning

- solar sail spacecraft,” *Journal of Guidance, Control, and Dynamics*, 2013.
- [13] 森治, “小型ソーラー電力セイル実証機「IKAROS」後期運用報告”, , http://www.jaxa.jp/press/2012/03/20120321_sac_ikaros.pdf, (accessed 2017-12-30).
- [14] Y. Shirasawa, O. Mori, Y. Miyazaki, H. Sakamoto, M. Hasome, N. Okuizumi, H. Sawada, S. Matunaga, H. Furuya, and J. Kawaguchi, “Evaluation of Membrane Dynamics of IKAROS based on Flight Result and Simulation using Multi-Particle Model,” *Transactions of the Japan Society for Aeronautical and Space Sciences, Aerospace Technology Japan*, Vol. 10, No. ists28, pp. Po_4_21-Po_4_26, 2012.
- [15] O. Mori, R. Funase, Y. Shirasawa, Y. Mimasu, Y. Tsuda, T. Saiki, H. Yano, S. Matsuura, D. Yonetoku, and J. Kawaguchi, “IKAROS Extended Operation for Advanced Solar Power Sail Mission,” *Transactions of the Japan Society for Aeronautical and Space Sciences, Aerospace Technology Japan*, Vol. 12, No. ists29, pp. Tk_19-Tk_24, 2014b.
- [16] Y. Satou, O. Mori, N. Okuizumi, Y. Shirasawa, H. Furuya, and H. Sakamoto, “Deformation Properties of Solar Sail IKAROS Membrane with Nonlinear Finite Element Analyses,” in *2nd AIAA Spacecraft Structures Conference*, pp. 2015–0436, 2015.
- [17] O. Mori, T. Saiki, Y. Shirasawa, H. Kato, G. Ono, J. Matsumoto, T. Chujo, S. Kikuchi, Y. Teramoto, Y. Oki, K. Akatsuka, S. Matsuura, H. Yano, R. Nakamura, Y. Kebukawa, J. Aoki, and J. Kawaguchi, “Jovian Trojan Asteroid Exploration by Solar Power Sail-craft,” in *Proc. 30th ISTS*, 2015-k-14, pp. 1-7, Kobe, July, 2015.
- [18] R. Funase, O. Mori, Y. Shirasawa, and H. Yano, “Trajectory Design and System Feasibility Analysis for Jovian Trojan Asteroid Exploration Mission Using Solar Power Sail,” *Transactions of the Japan Society for Aeronautical and Space Sciences, Aerospace Technology Japan*, Vol. 12, No. ists29, pp. Pd_85-Pd_90, 2014.
- [19] 奥泉信克, 森治, 加藤秀樹, 田中孝治, 野々村拓, 豊田裕之, 細田聡史, 松永三郎, 後藤健, 石田雄一他, “ソーラー電力セイル用薄膜太陽電池膜面展開構造の研究開発”, 『第16回宇宙科学シンポジウム講演集』, P-107, 相模原, Nov., 2016.
- [20] W. Wong and S. Pellegrino, “Wrinkled membranes I: experiments,” *Journal of Mechanics of Materials and Structures*, Vol. 1, No. 1, pp. 3–25, 2006a.
- [21] W. Wong and S. Pellegrino, “Wrinkled membranes II: analytical models,” *Journal of Mechanics of Materials and Structures*, Vol. 1, No. 1, pp. 27–61, 2006b.
- [22] W. Wong and S. Pellegrino, “Wrinkled membranes III: numerical simulations,” *Journal of Mechanics of Materials and Structures*, Vol. 1, No. 1, pp. 63–95, 2006c.
- [23] H. Furuya, Y. Miyazaki, and Y. Akutsu, “Experiments on static shape control of one-dimensional creased membrane by piezoelectric films,” in *Collection of Technical Papers-AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics and Materials Conference*,

- Vol. 2, pp. 1338–1341, 2002.
- [24] A. Senba, Y. Ogi, and N. Kogiso, “Wrinkle/Slack Control Using Shape Memory Polymer Films for Large Membrane Structures,” AIAA Paper 2013-1928, 2013.
- [25] C. H. Jenkins, “Nonlinear dynamic response of membranes: state of the art-update,” *Applied Mechanics Reviews*, Vol. 49, pp. S41–S48, 1996.
- [26] C. H. Jenkins and U. A. Korde, “Membrane vibration experiments: an historical review and recent results,” *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 295, No. 3, pp. 602–613, 2006.
- [27] R. Singhal, D. Gorman, J. Crawford, and W. Graham, “Investigation of the free vibration of a rectangular membrane,” *AIAA journal*, Vol. 32, No. 12, pp. 2456–2461, 1994.
- [28] N. Hashimoto, M. Katsura, M. Yasuoka, and H. Fujii, “Sound insulation of a rectangular thin membrane with additional weights,” *Applied Acoustics*, Vol. 33, No. 1, pp. 21–43, 1991.
- [29] T. Nishizawa, H. Sakamoto, M. Okuma, H. Furuya, Y. Sato, N. Okuizumi, Y. Shirasawa, and O. Mori, “Evaluation of Crease Effects on Out-of-plane Stiffness of Solar Sails,” *Transactions of the Japan Society for Aeronautical and Space Sciences, Aerospace Technology Japan*, Vol. 12, No. ists29, pp. Pc_107–Pc_113, 2014.
- [30] N. Okuizumi, “Effect of Creases on the Stiffness of Spinning Circular Membrane,” in *Proc. 31th ISTS*, 2017-c-44, pp. 1-4, Matsuyama, June, 2017.
- [31] 岩佐貴史, 田中博之, “皺・折り目を含む薄膜の衝撃過渡振動応答の空間分布特性”, 実験力学, Vol. 15, No. 4, pp. 270–276, 2016.
- [32] D. A. Lawrence and M. S. Whorton, “Solar sail dynamics and coning control in circular orbits,” *Journal of Guidance, Control, and Dynamics*, Vol. 32, No. 3, pp. 974–985, 2009.
- [33] L. Rios-Reyes and D. Scheeres, “Generalized model for solar sails,” *Journal of Spacecraft and Rockets*, Vol. 42, No. 1, pp. 182–185, 2005.
- [34] 呂品崎, 川口健一, “平面矩形張力膜のしわ発生に関する実験的研究”, 膜構造研究論文集, No. 13, pp. 49–55, 1999.
- [35] 中村琢磨, 坂本啓, 奥泉信克, 佐藤泰貴, 森治, “反りを伴う膜面構造物の形状評価”, 『第 61 回宇宙科学技術連合講演会講演集』, 2F17, 新潟, Oct., 2017.
- [36] 岩佐貴史, 采光啓太, 杉山遼, 岸本直子, 樋口健, 藤垣元治, 塩川貴之, “格子投影法によるポリイミドフィルムの表面形状計測”, 航空宇宙技術, Vol. 11, pp. 69–78, 2012.
- [37] 松田浩, 森下喬, 安東祐樹, 古屋瞬, 山下務, 内野正和, 伊藤幸広, 崎山毅, “デジタル画像相関法を用いた矩形張力膜のリンクル計測”, 応用力学論文集, Vol. 9, pp. 581–590, 2006.
- [38] SIMULIA, “Abaqus Analysis User’s Guide (2016),” <http://50.16.225.63/v2016/books/usb/default.htm>, (accessed 2018-1-8).

- [39] M. Matsushita, O. Mori, N. Okuizumi, Y. Satou, T. Iwasa, and S. Matunaga, “Wrinkles in a Membrane with a Small Thin Film with Different Stiffness under Tension Load: Experiments and Simulations,” in *Proc. 4th International Symposium on Solar Sailing*, 17069, pp. 1-6, Kyoto, Jan., 2017.
- [40] 竹内優一郎, “曲率を有する薄膜デバイスを貼り付けた膜面の変形解析”, 学士論文, 東京工業大学, 2018.
- [41] 西岡隆, 『構造振動解析』, 培風館, 1987.
- [42] B. Wie, *Space Vehicle Guidance, Control and Astrodynamics*: AIAA, 2015.

付録 A

実験の成否まとめ

実施した形状測定実験と振動実験の成否を表 A.1 に示す。形状測定実験は、9.8, 98, 980, 9800 mN で解析と定性的に形状が一致したが、9.8 mN では面外変形量が解析の約 1.6 倍と差が大きかった。振動実験は、98, 225, 980, 9800 mN で解析と定量的に概ね一致したが、9.8 mN では固有振動数が解析の 2 倍大きくて不一致だった。張力 2 kgf では実験治具の膜接着不良により実施できなかった。以下、詳細を説明する。

表 A.1: 実施した実験の成否まとめ

張力 [mN]	張力 [gf]	形状測定実験	振動実験
9.8	1	△	X
98	10	○	解析と定量的に概ね一致
225	23	未実施	
980	100	○	
9800	1000	○	
19600	2000	治具の問題で実施不能	

- ：解析と定性的に一致
- △：解析と定性的に一致するが、面外変形量が比較的大きい
- X：解析と不一致

張力 9.8mN での単純モデルおよび膜面デバイスの貼付されていない平膜の振動実験も試みた

が、最大振幅となった共振振動数が面外方向の有効質量比最大のモードの固有振動数と一致しなかった。その原因として、1) 張力の管理が不十分なこと、2) 張力が微小だと、形状が一意に定まらないことをあげる。

実験では、膜に加わる張力を測定しておらず、張力は重りの質量に等しいと仮定しており、重りから膜までの張力の変化を管理できていない。張力変化の要因として、a) 膜に張力を加えた状態で膜上辺を固定したが、膜上辺の固定をするさいに生じる不整、b) 膜自体が約 2 g、治具のアルミ棒が約 7 g あり、それらの重力補償をして重りを付加したが、その誤差の影響、c) 重りと膜はプラスチック製プーリーを介してヒモで接続したが、プーリーとヒモに摩擦が生じること等が考えられる。ひもにひずみゲージを中継して張力を計測しておけば、張力管理の高精度化は可能と考える。

実験では、重力が面外変位に与える影響を減らすため、膜を地面垂直に立たせたので、膜にかかる重力は圧縮力として作用する。重りによる張力が重力より十分大きい場合、膜はたわんだ初期状態からでも張力で上に引き伸ばされて張り、自然に一意の安定形状になる。張力が重力と均衡する場合、プーリーとヒモの間の静摩擦の影響で力が釣り合ってしまう、膜がたるんだ初期状態でも静止する。その状態の膜を手で触ってたわみを変化させると、そのたわみ形状で静止する。そこで、手で膜を張った状態からそっと手を離して張力を重りに任せたときの形状を用いたが、張力が正しくかかっているのか不明であった。実際、張力 9.8 mN の実験では、定性的な形状は解析と一致したが、面外変形量は解析との誤差が他の張力と比較して大きく、膜がたるんでいた可能性がある。

3章の振動実験の予備実験の結果を示す。反った膜面デバイス付き膜と平膜それぞれの最大振幅となった共振振動数と固有値解析による有効質量比(面外)最大の固有振動数を表 A.2 に示す。平膜の張力 9.8 mN では、実験の共振振動数 6 Hz、解析の固有振動数 3 Hz と差があり、98 mN では共振振動数 8 Hz、固有振動数 7.9 Hz と一致していることから、9.8 mN では張力の管理が適切ではないことが示唆される。予備実験では、3章の振動実験と比較して、小型加振機の固定が弱く、加振振幅を大きくしたため、加振機自体が 13Hz で共振したことが測定データに現れた。そのため、反った膜面デバイス付き膜の 9.8 mN では、実験 1 は小型加振機の共振振動数 13 Hz に埋もれてしまい、膜の共振振動数が不明であった。実験 2 は共振振動数 19 Hz、固有振動数 19.5 Hz と一致しているが、実験 1, 2 で差が大きいため、張力 9.8 mN での実験は再現性を保証できず不適切と判断した。張力 98 mN では、反った膜面デバイス付き膜と平膜ともに実験と解析で一致しているが、目視と手の感覚では 98 mN で形状に再現性を持たせるのは困難に感じられたので、張力 223 mN として、自然に一意の安定形状になるようにした。

表 A.2: 予備実験における張力 9.8, 98 mN での反った膜面デバイス付き膜と平膜の共振振動数と固有値解析による有効質量比 (面外) 最大の固有振動数. 実験 1 の反った膜面デバイス付き膜の張力 9.8 mN の共振振動数 13 Hz は加振器の共振振動数が卓越した可能性が高い.

	張力 [mN]	共振/固有振動数 [Hz]		
		実験1	実験2	解析
反った膜面デバイス付き膜	9.8	13	19	19.5
	98	22	23	23.7
平膜	9.8	6	-	3.0
	98	8	-	7.9

張力 19600 mN(2 kgf) だと, 実験治具のカプトンテープの接着強度の問題で, カプトンテープが剥がれてしまい, 形状計測と振動実験が実施できなかった. 張力の上限を向上させる方法として, より高い接着強度のテープの使用, または, 膜上辺部を挟み込む膜締め付け板に張力を加えた後に膜締め付け板を固定する方法が考えられる.

研究業績

本研究に関係するもの

査読付き学術論文

- [1] Masanori Matsushita, Osamu Mori, Nobukatsu Okuizumi, Yasutaka Satou, Takashi Iwasa, and Saburo Matunaga, “Wrinkling of a Membrane with a Curved Small Thin Film,” The 31st ISTS Special Issue of Transactions of JSASS ATJ, (掲載決定), (2章の一部).
- [2] 松下将典, 奥泉信克, 佐藤泰貴, 森治, 岩佐貴史, 松永三郎, “反った膜面デバイスが矩形膜の固有振動数に与える影響,” 航空宇宙技術, (査読中), (3章の一部).
- [3] 松下将典, 森治, 奥泉信克, 佐藤泰貴, 岩佐貴史, 松永三郎, “反った膜面デバイス1枚付き膜の変形の重ね合わせによる複数枚膜面デバイス付き膜の変形表現,” 日本航空宇宙学会論文集, (投稿準備中), (4章の一部).
- [4] 松下将典, 森治, 奥泉信克, 佐藤泰貴, 岩佐貴史, 松永三郎, “反った膜面デバイスによるソーラーセイル膜面の変形が太陽光圧トルクに与える影響,” 日本航空宇宙学会論文集, (投稿準備中), (5章の一部).

国際会議論文

- [1] ○Masanori Matsushita, Osamu Mori, Nobukatsu Okuizumi, Yasutaka Satou, Takahashi Iwasa, and Saburo Matunaga, “Wrinkles in a Membrane with a Small Thin Film with Different Stiffness under Tension Load: Experiments and Simulations,” 4th International Symposium on Solar Sailing, 17069, Kyoto, Japan, Jan. 17-20, 2017, (2章の一部).
- [2] ○Masanori Matsushita, Osamu Mori, Nobukatsu Okuizumi, Yasutaka Satou, Takashi Iwasa, and Saburo Matunaga, “Wrinkling of a Membrane with a Curved Small Thin Film,” 31th International Symposium on Space Technology and Science, 2017-c-40, Matsuyama, Japan, June 3-9, 2017, (2章の一部).
- [3] ○Masanori Matsushita, Osamu Mori, Nobukatsu Okuizumi, Yasutaka Satou, Takahashi

Iwasa, and Saburo Matunaga, “Deformation of Space Membrane Structures with Curved Thin-film Solar Cell,” 5th UKJEEL Glasgow 2017 Workshop, Glasgow, UK, Sept. 7-8, 2017, (2 章の一部).

国内発表

- [1] 松下将典, 森治, 奥泉信克, 佐藤泰貴, 岩佐貴史, 松永三郎, “曲率を有する膜小片が張力下の矩形膜の面外剛性に与える影響,” 第 27 回アストロダイナミクスシンポジウム, C-15, 神奈川, 2017 年 7 月 24-25 日.
- [2] 松下将典, 森治, 奥泉信克, 佐藤泰貴, 岩佐貴史, 松永三郎, “膜面に貼り付けた曲率を有する膜小片が膜面形状に与える影響”, 第 59 回構造強度に関する講演会, 1A11, 福井, 2017 年 8 月 3-5 日.
- [3] 松下将典, 森治, 奥泉信克, 佐藤泰貴, 岩佐貴史, 松永三郎, “剛性膜小片を貼付した薄膜の 3 次元形状計測と静・動解析の妥当性検討”, 第 61 回宇宙科学技術連合講演会, 2F12, 新潟, 2017 年 10 月 25-27 日.
- [4] 松下将典, 奥泉信克, 佐藤泰貴, 森治, 岩佐貴史, 松永三郎, “曲率を有する膜面デバイスが 1 軸張力下の矩形膜の固有振動数に与える効果”, 第 60 回構造強度に関する講演会, 徳島, 2018 年 8 月 1-3 日, (発表予定).

その他の業績

査読付き学術論文

- [1] Masanori Matsushita, Yoichi Yatsu, Makoto Arimoto, and Saburo Matunaga, “Hardware Development and In-orbit Demonstration of the Electrical Power System for TSUBAME High-powered Micro-satellite,” *Transaction of JSASS*, Vol. 60, No. 2, pp. 109-115, 2017.

国際会議論文

- [1] ○ Takashi Kamiya, Le Xuan Huy, Hao Ting, Shota Kawajiri, Masanori Matsushita, Tomohiro Oya, Yuto Takei, Ken Jingu, Toshiyuki Nishihara, Kazuya Ishizaka, Yuta Komiya, Kunihiro Ogatsu, Kaoru Matsubara, Masato Terakura, Saburo Matunaga “Development and Performance Evaluation of the Attitude Determination and Control System for nano-satellite “TSUBAME”,” The 5th Nano-Satellite Symposium, Tokyo, Japan, Nov. 20-22, 2013.

-
- [2] ○ Yoichi Yatsu., Kei Ito, Shin Kurita, Makoto Arimoto, Nobuyuki Kawai, Masanori Matsushita, Shota Kawajiri, Shogo Kitamura, Saburo Matunaga, Shin'ichi Kimura, Jun Kataoka, Takeshi Nakamori, Sin Kubo, "Pre-flight performance of a micro-satellite TSUBAME for X-ray polarimetry of gamma-ray bursts," Proc. SPIE, Vol. 9144, Space Telescopes and Instrumentation 2014: Ultraviolet to Gamma Ray, 91440L, July 24 2014.
- [3] ○ Shin Kurita, Haruka Ohuchi, Makoto Arimoto, Yoichi Yatsu, Nobuyuki Kawai, Masanori Matsushita, Saburo Matunaga, on the behalf of TSUBAME team, "Development of a micro-satellite TSUBAME for X-ray polarimetry of GRBs", 1.06, Fifth International Fermi Symposium, Nagoya Japan, Oct. 20-24, 2014.
- [4] ○Masanori Matsushita, Shota Kawajiri, Takashi Nagasu, Eugene Kim, Kazuyoshi Miyasato, Souta Suzuki, Kyosuke Tawara, Kei Ohta, Masaya Koga, Hao Ting, Shin Kurita, Makoto Arimoto, Yoichi Yatsu, Nagahisa Moriyama, Shinichi Kimura and Saburo Matunaga, and TSUBAME development team, "Flight Model Development and Integlation Test of the Micro-satellite TSUBAME," 21st Session of the Asia-Pacific Regional Space Agency Forum, Tokyo, Japan, Dec. 2-5, 2014.
- [5] ○ Shota Kawajiri, Hao Ting, Masanori Matsushita, Kyosuke Tawara and Saburo Matunaga, "Pointing accuracy and stability analysis of CMG control for nano-satellite TSUBAME", 10th IAA Symposium on Small Satellites for Earth Observation, IAA-B10-1402, Berlin, Germany, Apr. 20-24, 2015.
- [6] ○Masanori Matsushita, Shota Kawajiri, Takashi Nagasu, EuGene Kim, Kazuyoshi Miyasato, Souta Suzuki, Kyosuke Tawara, Kei Ohta, Masaya Koga, Hao Ting, Shin Kurita, Nagahisa Moriyama, Makoto Arimoto, Yoichi Yatsu, Shinichi Kimura, Saburo Matunaga and TSUBAME development team, "Flight Model Development of the Micro-satellite TSUBAME," 10th IAA Symposium on Small Satellites for Earth Observation, IAA-B10-1008P, Berlin, Germany, Apr. 20-24, 2015.
- [7] ○ Shota Kawajiri, Masanori Matsushita, Kyosuke Tawara, Masaya Koga and Saburo Matunaga, "Attitude Simulation and Result of On-Orbit Initial Operation of Microsatellite TSUBAME", 30th International Symposium on Space Technology and Science, 2015-f-41, Kobe, Japan, July 6-10, 2015, CD-ROM.
- [8] ○Masanori Matsushita, Kazuyoshi Miyasato, Kei Ito, Makoto Arimoto, Yoichi Yatsu and Saburo Matunaga, "Major Upgrade of Electrical Power System for High-powered Micro-satellite", 30th International Symposium on Space Technology and Science, 2015-q-11, Kobe, Japan, July 6-10, 2015, CD-ROM.
- [9] ○ Yuhei Kikuya, Masanori Matsushita, Masaya Koga, Kei Ohta, Yuki Hayashi, Takehiko Koike, Toshiki Ozawa, Yoichi Yatsu, and Saburo Matunaga, "Fault Tolerant Circuit Design

for Low-cost and Multi-Functional Attitude Sensor Using Real-time Image Recognition,” 31th International Symposium on Space Technology and Science, 2017-f-093, Matsuyama, Japan, June 3-9, 2017, CD-ROM.

- [10] ○ Yoichi Yatsu, Nobuyuki Kawai, Shin'ichi kimura, Masanori Matsushita, Shota kawajiri, Kyosuke Tawara, Kei Ohta, Masaya Koga, Saburo Matunaga, “What We Learned from the Tokyo Tech 50 kg-satellite “TSUBAME”,” SSC17-WK-41, 31st Annual AIAA/USU Conference on Small Satellites, Utah, USA, Aug. 5-10, 2017.

国内発表

- [1] 石坂和也, 秋山恭平, 木佐允彦, 小宮悠太, 牟田梓, 森下拓往, 新宅健吾, 西原俊幸, 森井翔太, 神谷崇志, 喜多村章悟, 松下将典, 松永三郎, “地球・天体観測技術実証衛星 TSUBAME のエンジニアリングモデル開発と今後の展望”, 1st UNISEC Space Takumi Conference, UNISEC 2011-2, 北九州, 2011年12月10日.
- [2] 西原俊幸, 松下将典, 新宅健吾, 森井翔太, 神谷崇志, 喜多村章悟, 大谷知弘, 木佐允彦, 古賀茂昭, 松永三郎, “地球・天体観測技術実証衛星 TSUBAME の電源系開発”, 2th UNISEC Space Takumi Conference, UNISEC 2012-006, 東京, 2012年7月23日.
- [3] 神谷崇志, Le Xuan Huy, 大谷知弘, 松下将典, 神宮健, 石坂和也, 小宮悠太, 小勝國弘, 松原薫, 松永三郎, “超小型衛星 TSUBAME における姿勢決定制御系開発”, JSASS-2012-4424, 2I10, 第56回宇宙科学技術連合講演会, 別府, 2012年11月20-22日.
- [4] 神谷崇志, Le Xuan Huy, カクテイ, 河尻翔太, 松下将典, 大谷知弘, 武井悠斗, 神宮健, 西原俊幸, 石坂和也, 小宮悠太, 小勝國弘, 松原薫, 寺倉雅人, 松永三郎, “超小型衛星 TSUBAME の姿勢決定制御系開発とその性能評価について”, 4th UNISEC Space Takumi Conference, UNISEC 2013-004, 東京, 2013年7月29日.
- [5] 松下将典, 松永三郎, “磁気トルカによる超小型衛星の大気抵抗トルクを考慮したスピン姿勢制御に関する研究”, JSASS-2013-4371, 2G09, 第57回宇宙科学技術連合講演会, 米子, 2013年10月9-11日.
- [6] 吉川健人, 稲垣章弥, 唐鎌聡太郎, 河尻翔太, 長洲孝, 松下将典, 田中優一郎, 濱島大輝, 宮里和良, “民生品システムを用いた CANSAT の設計開発と実証実験”, 第22回スペース・エンジニアリング・コンファレンス, P05, 東京, 2013年12月20-21日.
- [7] 松下将典, 宮里和良, 谷津陽一, 有元誠, 伊藤慶, 松永三郎, “超小型衛星 TSUBAME 搭載用電源回路のスパイクノイズ対策”, 日本機械学会 2014年度年次大会, S1920204, 東京, 2014年9月7-10日.
- [8] 栗田真, 伊藤慶, 有元誠, 谷津陽一, 河合誠之, 太田佳, 古賀将哉, 鈴木聡太, 俵京佑,

- 宮里和良, 長洲孝, 河尻翔太, 松下将典, 松永三郎, 木村真一, 久保信, TSUBAME 開発チーム, “超小型衛星 TSUBAME のソフトウェア開発と統合試験”, 日本天文学会 2014 年秋季年会, 山形, 2014 年 9 月 11-13 日.
- [9] 松下将典, 河尻翔太, 松永三郎, “スピンする超小型衛星の大気抵抗トルクを考慮した磁気姿勢制御に関する研究”, 第 58 回宇宙科学技術連合講演会, JSASS-2014-4259, 1M02, 長崎, 2014 年 11 月 12-14 日.
- [10] 松下将典, 宮里和良, 古賀将哉, 伊藤慶, 有元誠, 谷津陽一, 松永三郎, “地球・天体観測技術実証衛星「TSUBAME」の電源系フライトモデル開発”, 第 23 回スペース・エンジニアリング・コンファレンス, D05, 羽咋, 2014 年 12 月 19-20 日.
- [11] 松下将典, 河尻翔太, 長洲孝, 宮里和良, 鈴木聡太, 俵京佑, キムユージン, 太田佳, 古賀将哉, 下中淳史, カクテイ, 栗田真, 森山長久, 有元誠, 谷津陽一, 木村真一, 松永三郎, “超小型衛星 TSUBAME のフライトモデル開発とクリティカルフェーズ運用”, 5th UNISEC Space Takumi Conference, UNISEC 2014-003, 相模原, 2014 年 12 月 26 日.
- [12] 栗田真, 大内遙河, 有元誠, 谷津陽一, 河合誠之, 太田佳, 古賀将哉, Kim EuGene, 鈴木聡太, 俵京佑, 宮里和良, 長洲孝, 河尻翔太, 松下将典, 松永三郎, 森山永久, 木村真一, “TSUBAME 衛星搭載ガンマ線バースト硬 X 線偏光観測システムの開発”, 第 15 回宇宙科学シンポジウム, 相模原, 2015 年 1 月 6-7 日.
- [13] 古賀将哉, 松下将典, 河尻翔太, 長洲孝, 鈴木聡太, 俵京佑, 宮里和良, 太田佳, 下中淳史, Hao Ting, Kim EuGene, 木村真一, 谷津陽一, 松永三郎, “小型衛星開発プログラム活動報告”, 第 15 回宇宙科学シンポジウム, 相模原, 2015 年 1 月 6-7 日.
- [14] 俵京佑, 河尻翔太, 松下将典, 古賀将哉, 松永三郎, “超小型衛星 TSUBAME における姿勢決定制御系の設計と評価”, 第 15 回宇宙科学シンポジウム, P-046, 相模原, 2015 年 1 月 6-7 日.
- [15] 谷津陽一, 栗田真, 大内遙河, 有元誠, 河合誠之, 松下将典, 河尻翔太, 長洲孝, 松永三郎, 森山永久, 木村真一, 片岡淳, 中森健之, 久保信, “硬 X 線偏光観測衛星 TSUBAME の打上げ (II)”, 日本物理学会講演概要集 70.1, pp. 494, 24aDJ-2, 東京, 2015 年 3 月 21-24 日.
- [16] 古賀将哉, 松下将典, 河尻翔太, 長洲孝, 松永三郎, “超小型衛星の軌道・姿勢運動を考慮した電力収支の高精度模擬”, 日本機械学会 2015 年度年次大会, 札幌, 2015 年 9 月 13-16 日.
- [17] 松下将典, 栗田真, 谷津陽一, 松永三郎, “超小型衛星 TSUBAME の電源系の軌道上運用結果”, 第 59 回宇宙科学技術連合講演会, JSASS-2015-4212, 1N01, 鹿児島, 2015 年 10 月 7-9 日.
- [18] 松下将典, 河尻翔太, 鈴木聡太, 俵京佑, 宮里和良, 太田佳, 古賀将哉, 渡邊輔祐太, 栗田真, 有元誠, 谷津陽一, 森山永久, 木村真一, 松永三郎, “50kg 級衛星 TSUBAME プ

プロジェクトの総合報告－開発と軌道上運用からの教訓－”，第 16 回宇宙科学シンポジウム，P-059，相模原，2016 年 1 月 6-7 日。

- [19] 吉井健敏, 太田佳, 松下将典, 菊谷侑平, 林雄希, 小池毅彦, 新谷勇介, 針田聖平, 小澤俊貴, 下川辺隆史, 谷津陽一, 河合誠之, 松永三郎, “深層学習を用いた新しい衛星姿勢決定方法の開発”, 第 17 回宇宙科学シンポジウム, P-161, 相模原, 2017 年 1 月 5-6 日.
- [20] 俵京佑, 針田聖平, 河尻翔太, 松下将典, 吉井健敏, 太田佳, 古賀将哉, 渡邊輔祐太, 菊谷侑平, 林雄希, 小池毅彦, 新谷勇介, 谷津陽一, 河合誠之, 松永三郎, “50kg 級技術実証衛星「ひばり」－形状可変姿勢制御と重力波対応天体観測”, 第 17 回宇宙科学シンポジウム, P-147, 相模原, 2017 年 1 月 5-6 日.

受賞

- [1] 第 22 回衛星設計コンテスト, 日本機械学会 宇宙工学部門一般表彰 スペースフロンティア, 2014 年 11 月.
- [2] 日本機械学会若手優秀講演フェロー賞, 宇宙工学部門, 2015 年 3 月.
- [3] 第 4 回日本プロジェクトマネジメント大賞, 2015 年 6 月.
- [4] 第 24 回衛星設計コンテスト, 設計大賞, 2016 年 11 月.

謝辞

本論文の主査かつ指導教員である松永三郎教授には、ご指導いただき、感謝いたします。副査を務めていただいた轟章教授、古谷寛准教授、野田篤司特定准教授、坂本啓准教授、ならびに中西洋喜准教授には、本論文に対してご助言いただき、感謝いたします。宇宙航空研究開発機構宇宙科学研究所の森治助教、奥泉信克助教、佐藤泰貴助教、鳥取大学の岩佐貴史准教授には、本研究に対して定期的に議論を重ねていただき、感謝いたします。宇宙科学研究所川口研究室の中村拓磨氏には、同研究所での実験等で支援いただき、感謝いたします。東京工業大学中西研究室の多賀啓介氏には、加振器の治具設計等で助言いただき、感謝いたします。松永研究室の竹内優一郎氏には、数値解析・実験を線形理論解と比較していただいたことに加え、解析の妥当性検証作業にも協力していただき、感謝いたします。松永研究室秘書の藤沢まり氏には、事務作業において支援いただき、感謝いたします。両親には、生来、筆者の意志を尊重し、経済的に支援いただき、感謝いたします。