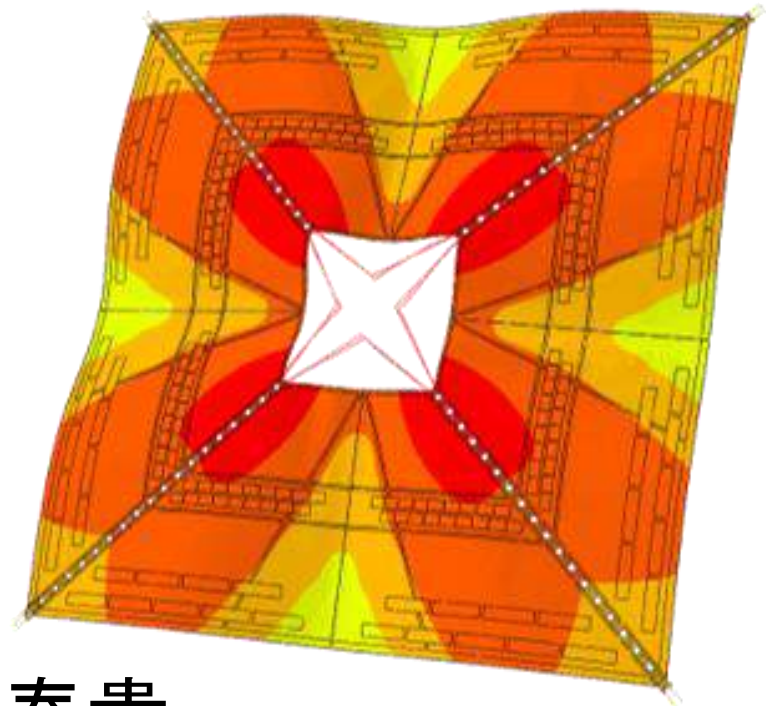
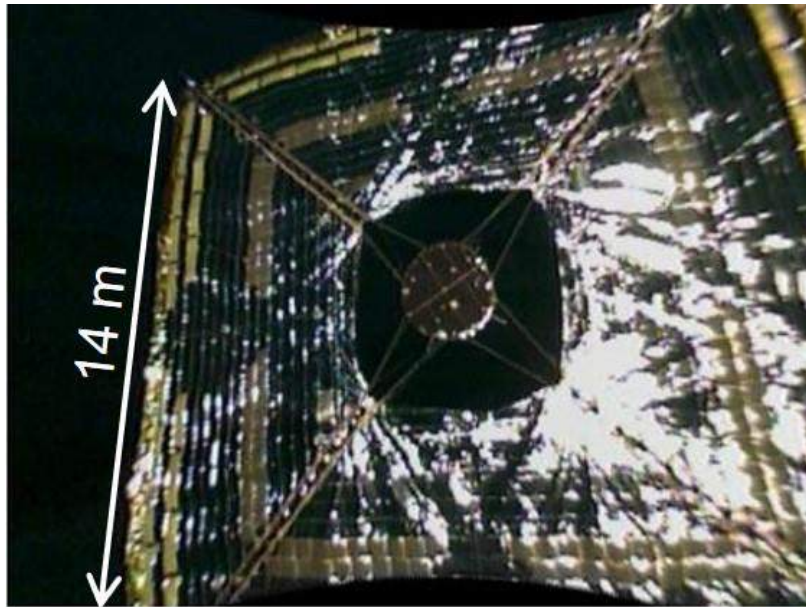
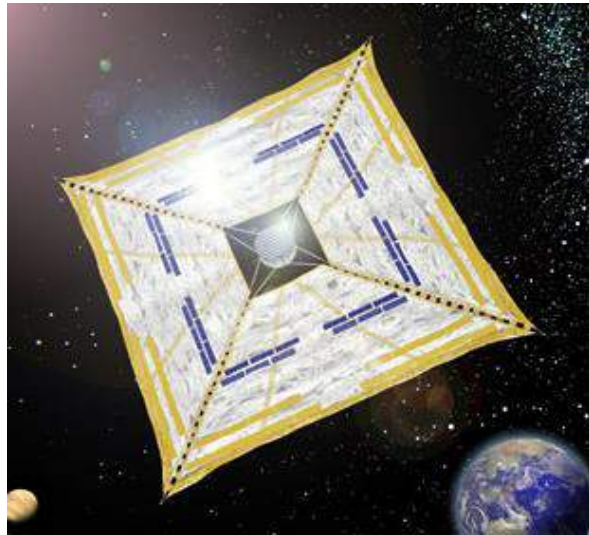


宇宙用大型膜の微細な変形特性を考慮した 収納・展張に関する研究

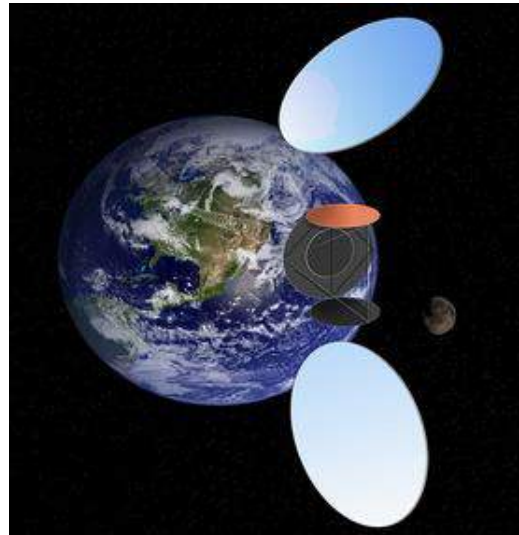


佐藤泰貴
(JAXA/ISAS)

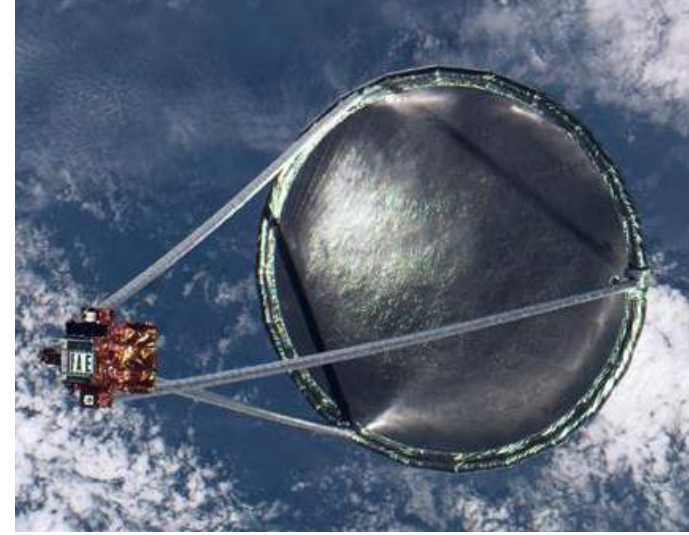
研究のきっかけ1/2: 大型膜構造物



ソーラー電力セイル実証機,
IKAROS (JAXA)



宇宙太陽光発電システム
(JAXA)



膜面アンテナ
(NASA and L'Garde)

- 2007年頃(研究室配属): **大型膜構造物**の研究が盛ん
 - 大型構造物をコンパクトに収納し, 宇宙で展開
 - **大型化・高精度化**をキーワードとして世界的に研究が活発化
- 当時, IKAROSの開発が促進
 - ソーラーセイルWG構造部会に参加する中で, 自分も何かできないか

研究のきっかけ2/2: 折り畳みパターンの折り紙

- 大型膜の折り畳みパターンを折り紙で折ってみることに

回転二重折り



部分モデル

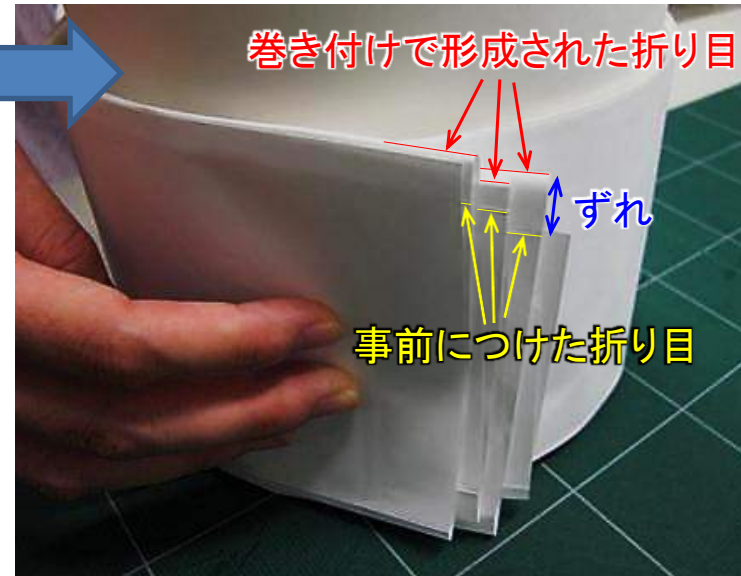
事前につけた折り目



巻き付けで形成された折り目

ずれ

事前につけた折り目



- 紙で遊んでいる中で、様々な現象を発見
 - 周期的に凸凹になる(=局所座屈), 折り目がずれていく
 - 何故このような現象が起こるのか解明したい
- これらの微細な変形: 膜構造物の大型化・高精度化に重要

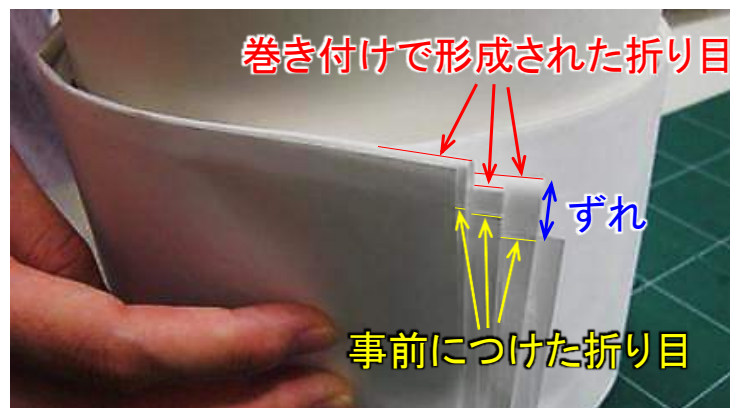
本受賞での成果概要

	業績	着目した微細な変形	微細な変形が影響を与えるもの
1	折り目の変形特性を考慮した巻きつけ折り畳み	収納時の折り目の変形 (局所座屈, 折り目のずれ含む)	収納効率
2	展開時の折り目の残留変形の予測	折り目の非弾性変形	展張形状
3	IKAROS展張形状特性の解明	膜面デバイスの反り, それによって生じるしわ	

本受賞での成果概要

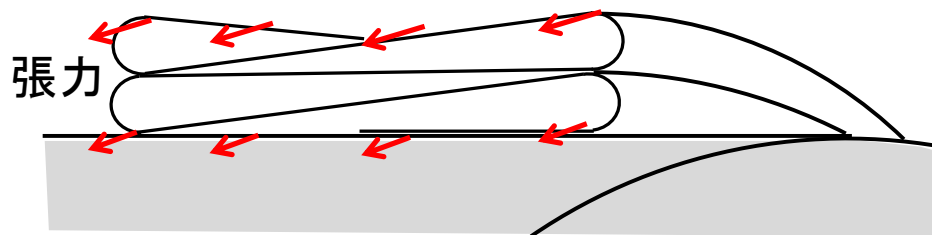
	業績	着目した微細な変形	微細な変形が影響を与えるもの
1	折り目の変形特性を考慮した巻きつけ折り畳み	収納時の折り目の変形 (局所座屈, 折り目のずれ含む)	収納効率
2	展開時の折り目の残留変形の予測	折り目の非弾性変形	展張形状
3	IKAROS展張形状特性の解明	膜面デバイスの反り, それによって生じるしわ	

収納時の折り目の変形

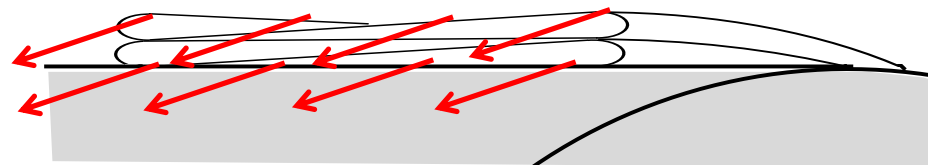


局所座屈や折り目のずれ: 収納効率低下

- 局所座屈や折り目のずれ
 - 折り畳みパターン等の幾何学
 - 折り目の変形等の力学に依存
- 既往研究では、主に幾何学に注目
 - 折り目の変形という力学的な特性に注目し、これらの現象を解明



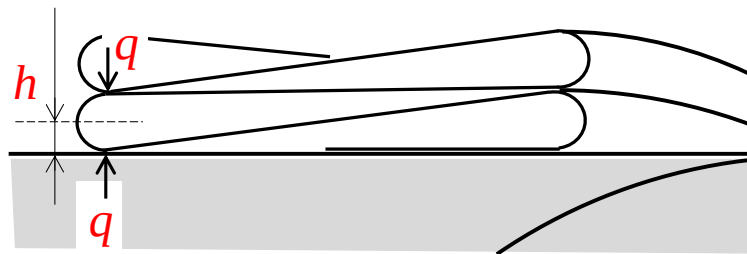
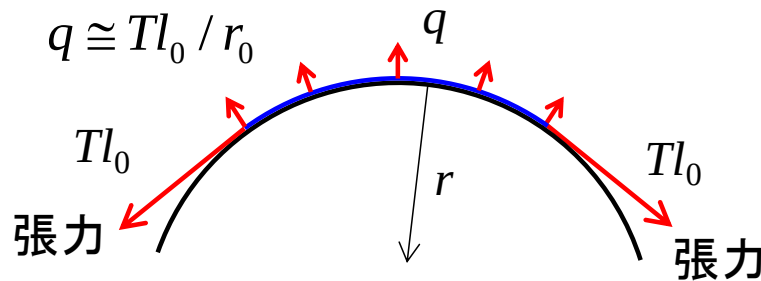
張力小: ずれや局所座屈が生じやすい



張力大: ずれや局所座屈が生じにくい

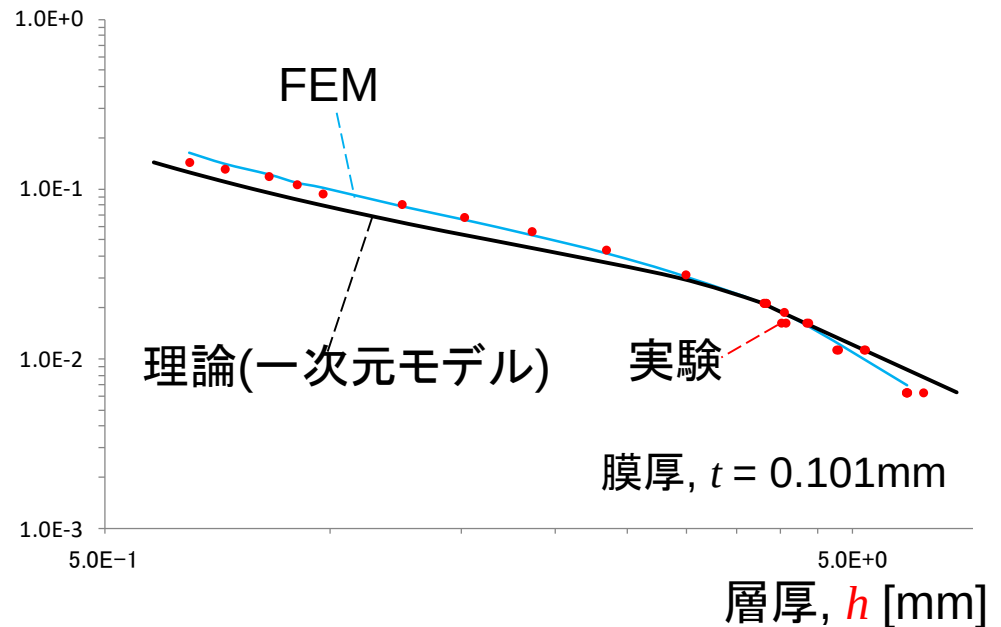
折り目の変形と張力の関係

- 張力によって膜同士の間接触力が発生
- 接触力＝折り目をつける力 q に相当するため、それと層厚 h との関係を幾何学非線形および材料非線形を考慮して導出



膜断面形状

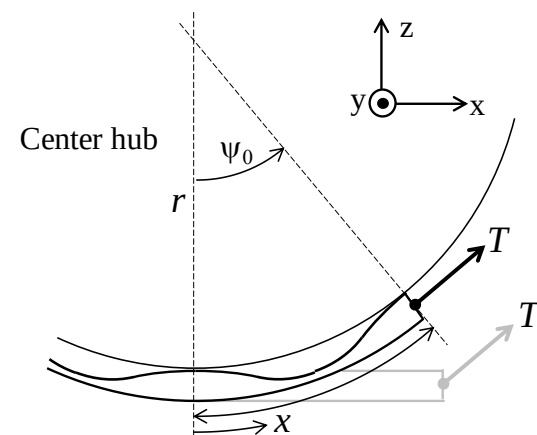
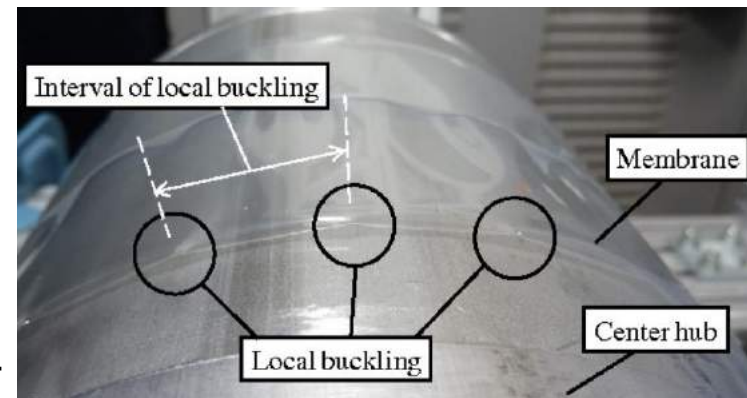
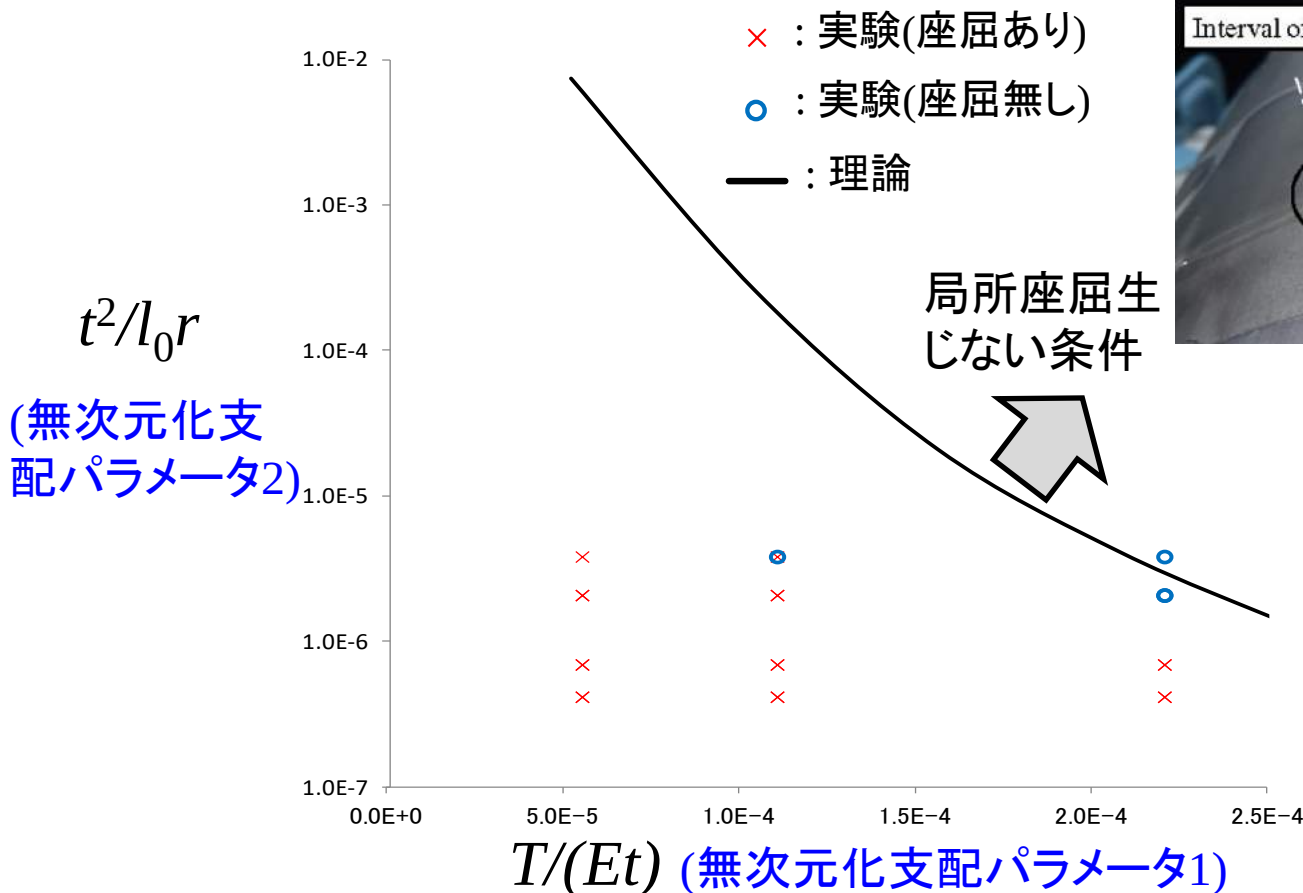
折り目をつける力, q [N/mm]



➤ 張力と折り目の変形状の関係が得られた

局所座屈の発生条件

張力と折り目の変形状の関係を使用し、**局所座屈が生じない条件**を求めるためのモデル化/定式化

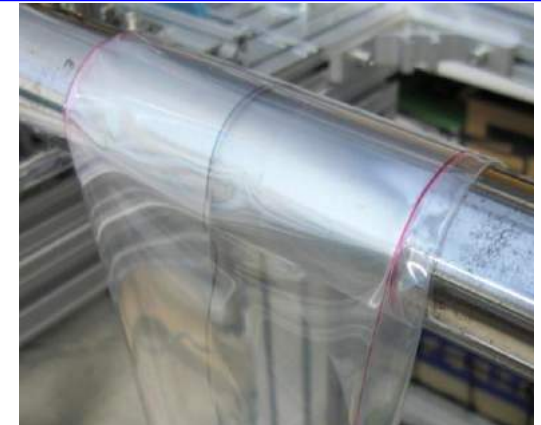
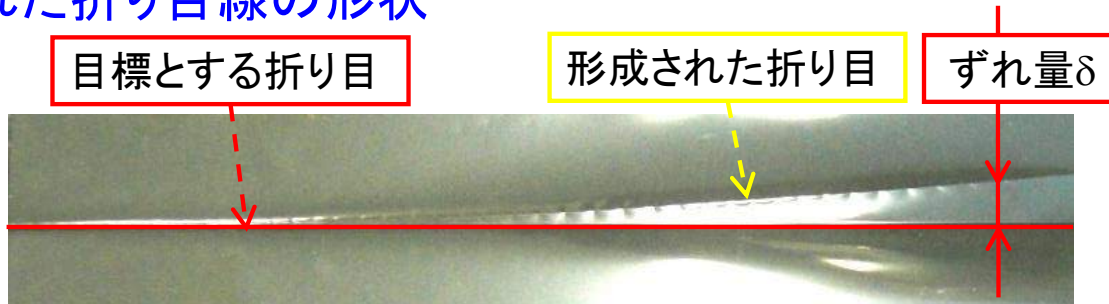


座屈解析のモデル

- 理論解析結果と実験がほぼ一致
- 本条件を用いれば、局所座屈が生じることなく収納できる

折り目線のずれの予測

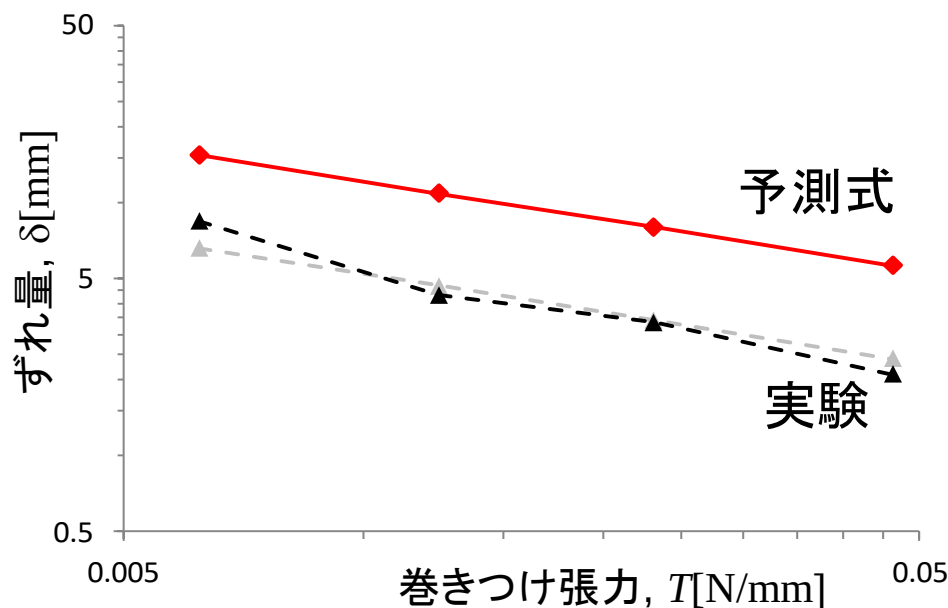
ずれた折り目線の形状



ずれ量の予測

- らせん折り(幾何学的な考察に基づくずれが生じない折り畳みパターン)*の応用と, 前出した折り目の力学特性を組み合わせ, 予測法を提案

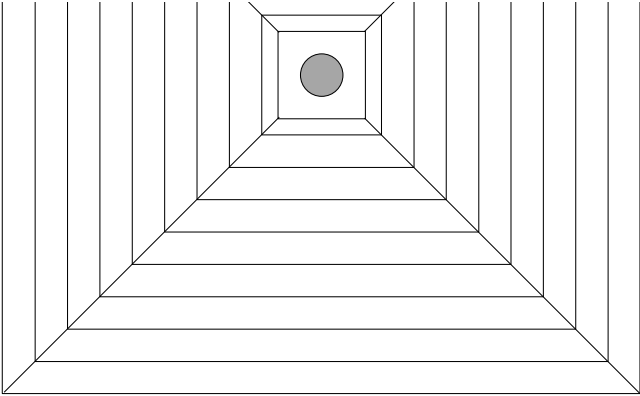
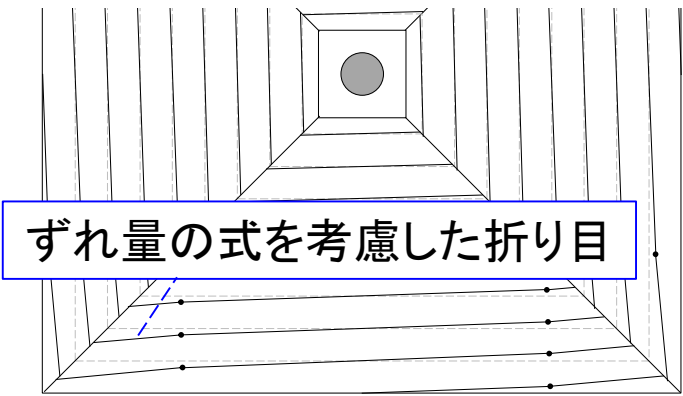
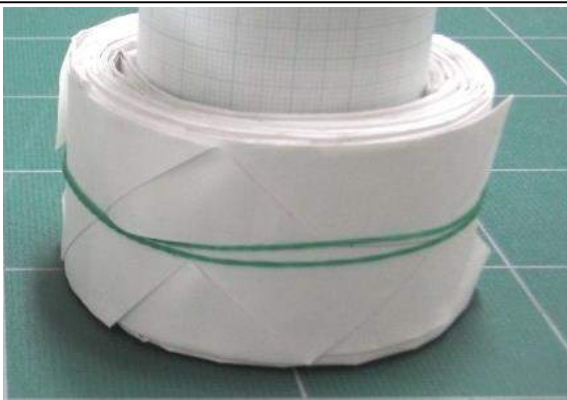
*渡辺, 名取, 宇科連, 2004



- 予測式と実験式は定性的にほぼ一致
- 折り目線がずれないようにするには？
- 「ずれる形状＝折るべき折り目線」とすれば, ずれることなく収納可能であると考えた

折り目線のずれおよび局所座屈が生じない折り畳み

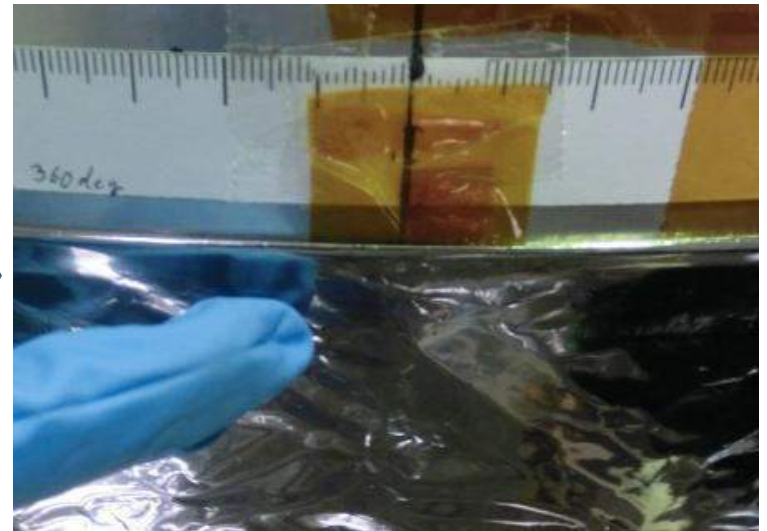
- 局所座屈および折り目線のずれが少ない収納方法を提案した

	従来の折り畳み(四角形折り)	提案した折り畳み
折り畳みパターン		
折り畳み条件	局所座屈発生条件	局所座屈が生じない条件
収納状態		

提案した折り畳み方法の実証



- ソーラー電力セイルを想定し、ダミー太陽電池セルを貼り付けた状態での収納試験を実施
- 想定通り、ずれることなく収納できたことを確認

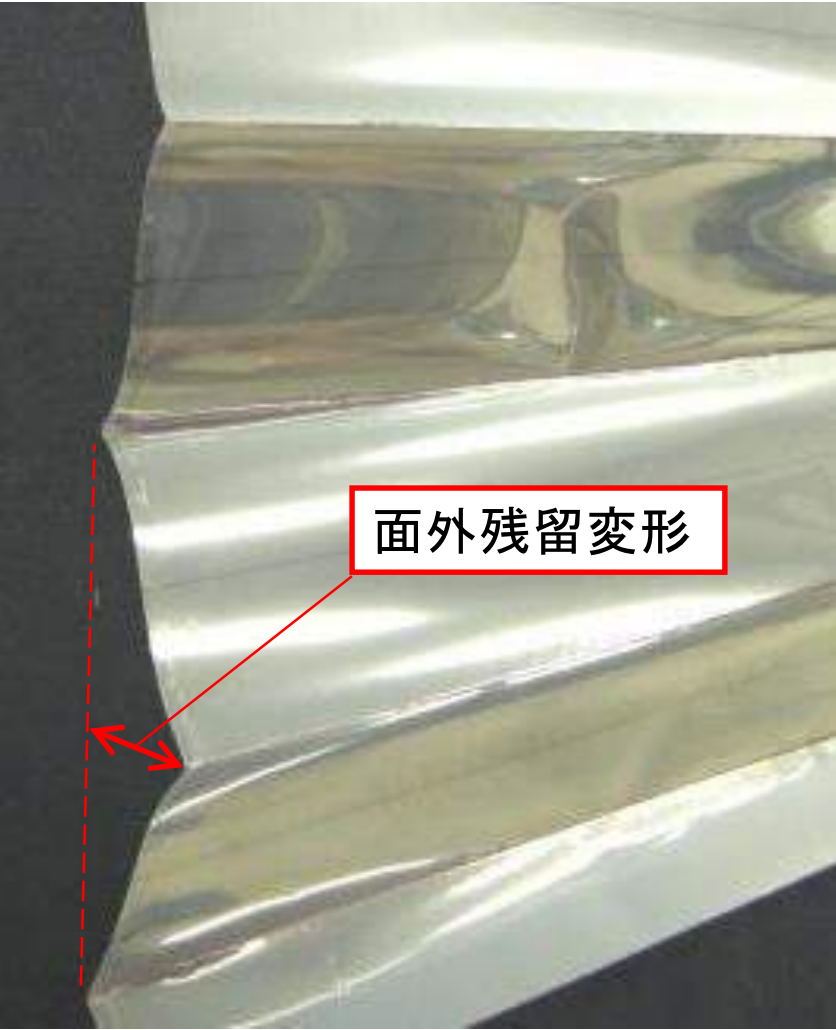


本受賞での成果概要

	業績	着目した微細な変形	微細な変形が影響を与えるもの
1	折り目の変形特性を考慮した巻きつけ折り畳み	収納時の折り目の変形 (局所座屈, 折り目のずれ含む)	収納効率
2	展開時の折り目の残留変形の予測	折り目の非弾性変形	展張形状
3	IKAROS展張形状特性の解明	膜面デバイスの反り, それによって生じるしわ	

展開後の折り目の残留変形

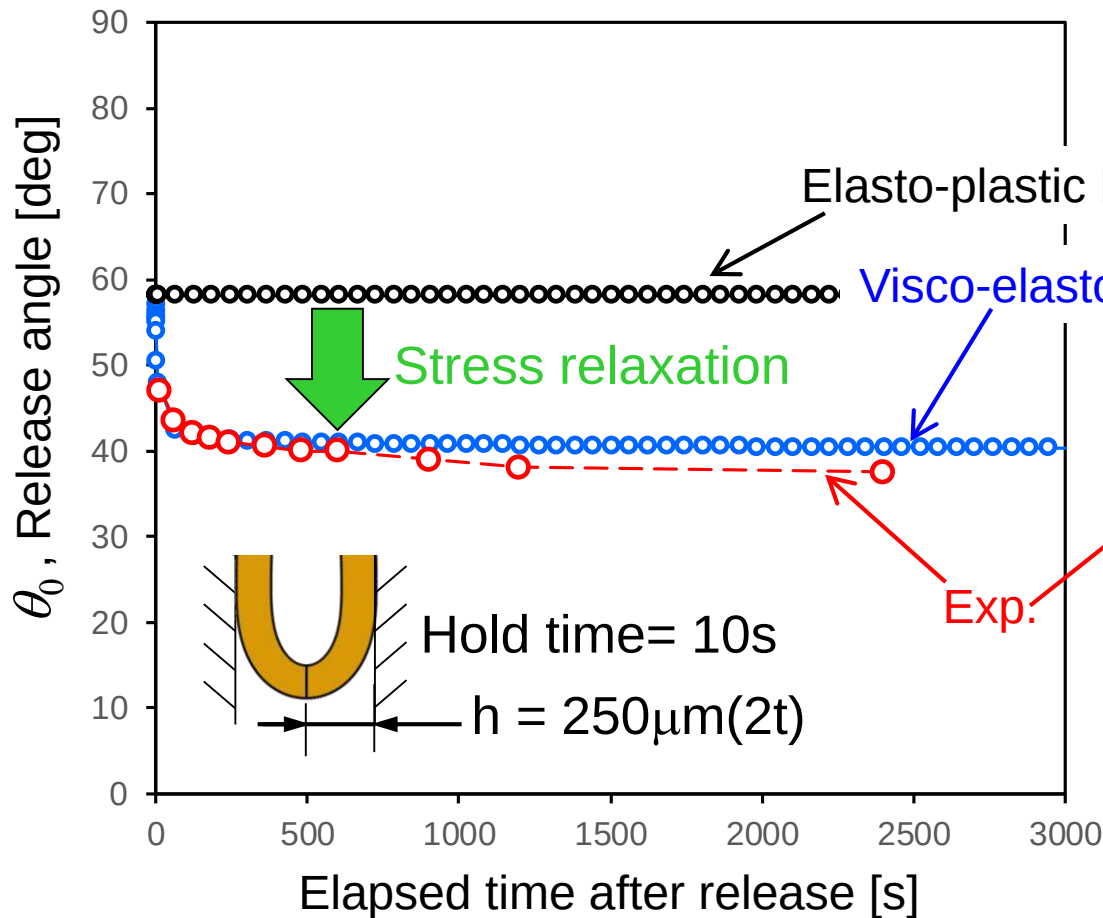
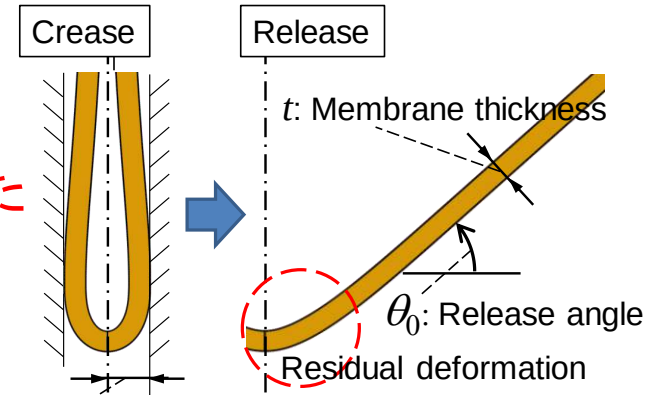
- 折り目形成時の非弾性ひずみによって、面外残留変形が発生
- 高精度な膜面構造物の実現のためには、この残留変形を予測する必要



面外残留変形

粘弾性を考慮した残留変形量の推定

- 折り目形成→リリースしたときの角度を推定したい
- 応力緩和によって次第に折り目が開いてくる
- 粘弾性解析によって精度よく推定できることを示した

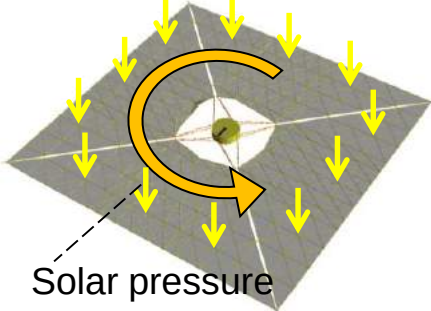
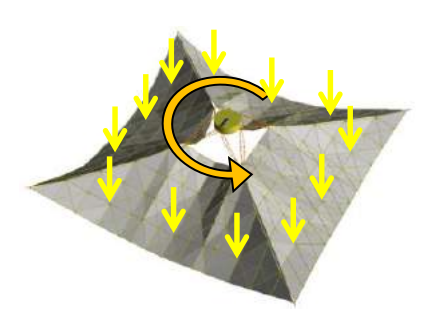
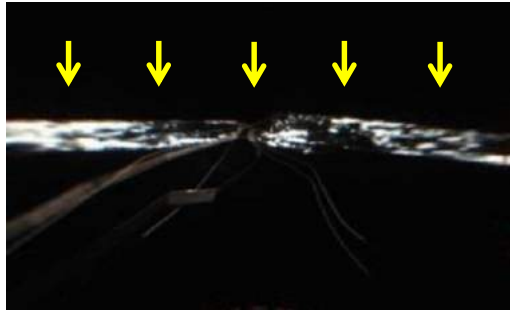


Released configuration (t: 2400s)

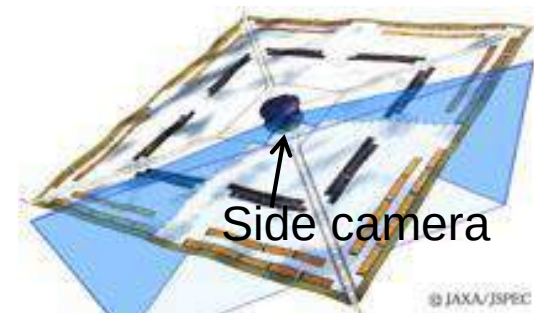
本受賞での成果概要

	業績	着目した微細な変形	微細な変形が影響を与えるもの
1	折り目の変形特性を考慮した巻きつけ折り畳み	収納時の折り目の変形 (局所座屈, 折り目のずれ含む)	収納効率
2	展開時の折り目の残留変形の予測	折り目の非弾性変形	展張形状
3	IKAROS展張形状特性の解明	膜面デバイスの反り, それによって生じるしわ	

ソーラー電力セイルIKAROSでの想定外事象

	Preflight simulations by MPM (Shirasawa, et. al, ISTS 2011)	Flight data
1.0rpm (定常運用)	 Solar pressure	
0.055rpm (低スピン運用)		

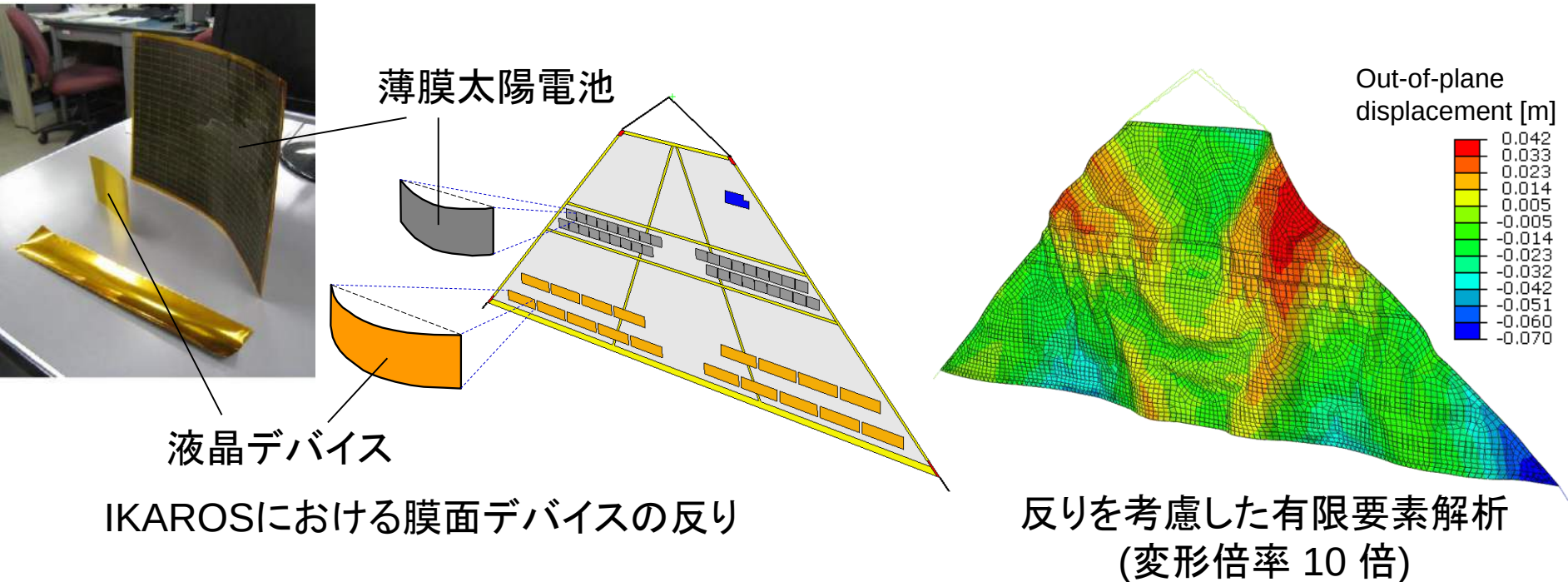
- 事前シミュレーションに反し、低スピン運用(0.055rpm)でも膜がほとんどたわまない
- 何らかの原因で面外剛性が高くなっている



Side camera field-of-view

膜面デバイスの反り

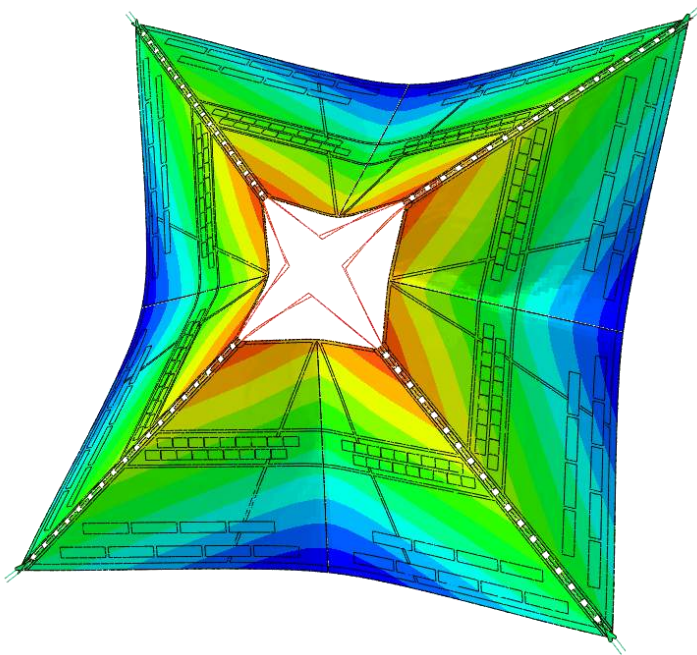
- 薄膜太陽電池セル, 液晶デバイスは, 熱変形等の理由により, 初期形状が反っていた



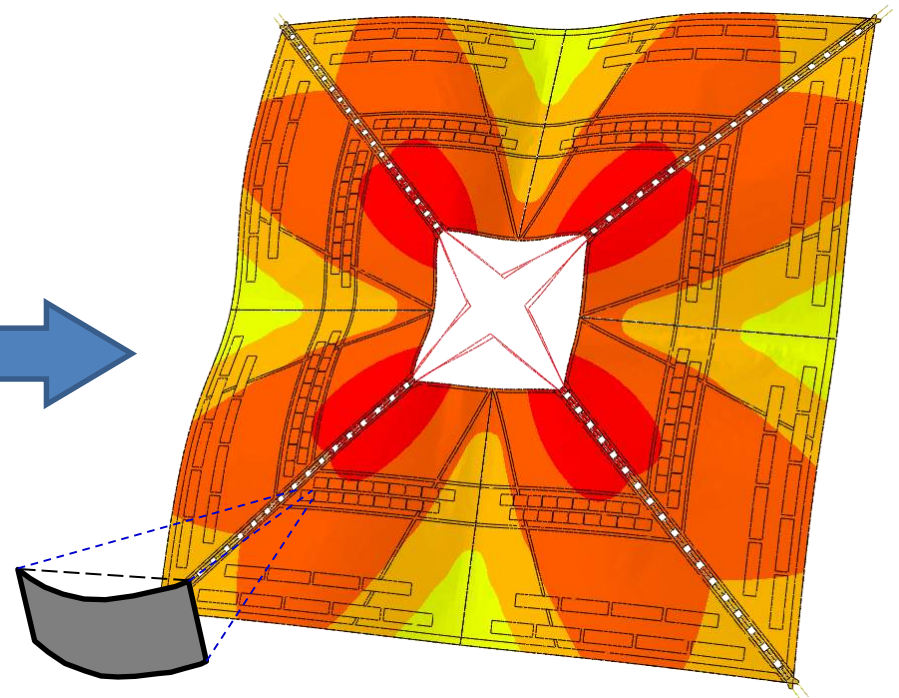
- 反りを考慮した有限要素解析を実施すると, 反りによって周囲にしわが成長した

低スピン運用条件での形状解析

- 低スピン運用条件(0.055rpm)での形状解析を実施すると、反りを考慮した場合は、考慮しない場合に比べて十分小さいたわみ量となった。
- デバイスの反りによって面外剛性が向上したことが一要因であることが示された

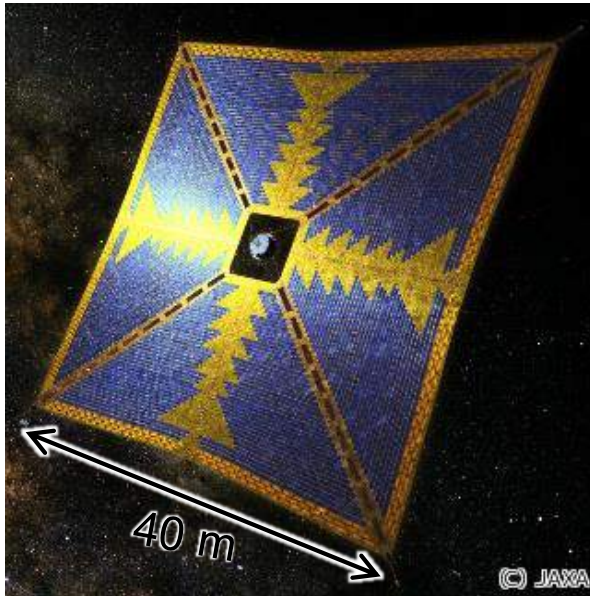


膜面デバイスの反り**未考慮**

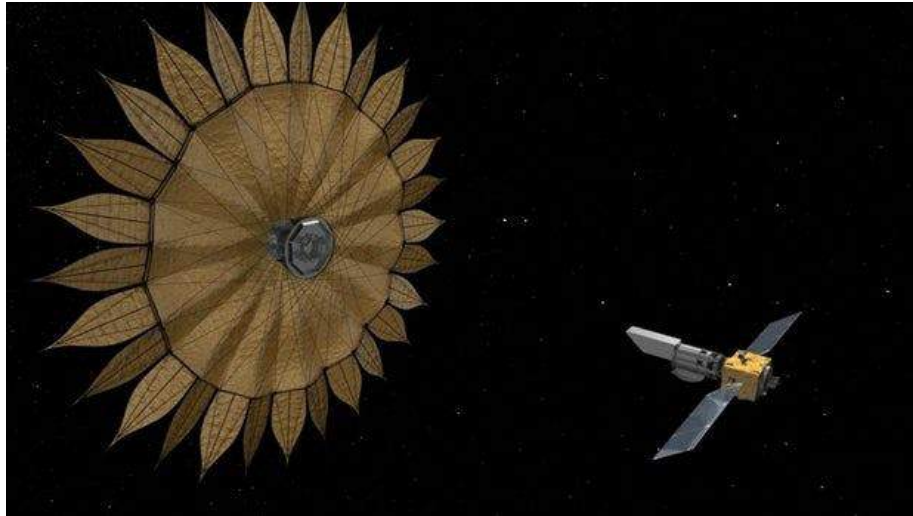


膜面デバイスの反り**考慮**

研究成果の今後の発展



Solar power sail OKEANOS (JAXA)



Star Shade (JPL)

- 次世代の大型膜構造の設計・製造に直接的に反映できる
- 既にOKEANOSでは様々な形で反映されている



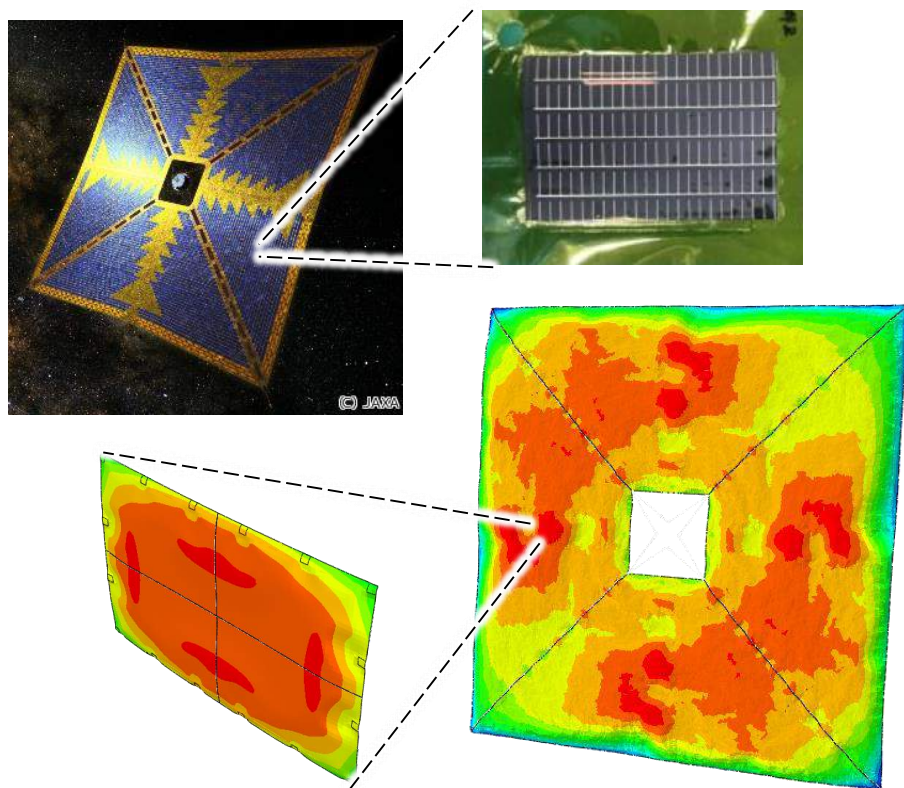
Roll-out solar array (AFRL, NASA, and DSS)

研究成果のOKEANOSでの発展例

40m級大型膜の展張形状解析

- OKEANOSの運用＝低スピン
 - 低張力状態での形状推定

温度変化があっても形状がロバストな接着方法の検討とそれを考慮した形状推定



膜面収納方法への応用

- 新たな収納方法(モコモコ巻き)の定式化として, 局所座屈推定式を応用



定式化に利用



モコモコ巻き

まとめ

宇宙用大型膜の微細な変形を考慮することによって、以下を明らかにした

- 収納時の折り目の変形特性を考慮することで、局所座屈や折り目線のずれが少なく、収納効率の高い折り畳み方法を提案した
- 折り目の非弾性変形を考慮することにより、展開後の折り目の残留変形を予測することができた
- 膜面デバイスの反りを考慮することにより、IKAROSの想定外の事象である、予測より小さいたわみとなった原因の一要因を明らかにすることができた

最後に...

OKEANOSは、日本が今後も膜構造の第一人者として世界をけん引していくうえで重要な成果が得られるような大変面白いミッションであり、大規模膜構造の一員として、是非やっていきたい

謝辞

本研究を進めるうえで、ソーラーセイルWG構造部会の先生方に大変貴重なご意見を賜りました。今回の賞は、その部会でご指導いただいた賜物です。以下に先生方の名前を記載いたします。

奥泉信克先生 (JAXA/ISAS)
坂本 啓 先生 (東工大)
鳥阪綾子先生 (首都大)
名取通弘先生 (JAXA/ISAS)
古谷 寛 先生 (東工大)
松永三郎先生 (東工大)
宮崎康行先生 (日大)
森 治 先生 (JAXA/ISAS)

博士課程指導教員の古谷寛先生、本賞に推薦してくださった名取通弘先生には重ねて感謝申し上げます。

最後に、宇宙科学振興会の皆様、本賞選考委員会の皆様に心から感謝申し上げます。