

宇宙機開発応用 B

第1講 大規模軽量膜面構造とは？

宮崎 康行

miyazaki.yasuyuki@jaxa.jp



第1講の全体構成

確認事項, 自己紹介

第1章 第1講～第4講までの講義の概要

第2章 本講義が対象とする「大規模軽量膜面構造」

課題



★シラバス

毎年、選定される宇宙工学・開発に関わる現場側の重要課題、例えば、新型ロケット、最先端宇宙探査機、宇宙通信技術、衛星開発技術、宇宙環境適応技術などについての、背景、目的、方法、結果、今後の展開、などについて、実践的立場で解説する。

今年度は、構造・機構工学に焦点を当て、衛星・探査機への適用と将来展望について、JAXA宇宙研にて、最前線で活躍している講師陣が解説する。

1. 宮崎 康行(JAXA 宇宙科学研究所・教授) 11月17日(水)5・6限, 7・8限. 11月24日(水) 5・6限, 7・8限

「大規模軽量膜面構造とその設計・開発」

ソーラーセイルのように大規模な膜面を用いたミッションでは、膜面の適切な折りたたみ方や打ち上げ時の保持が求められ、併せて、軽量の展開機構や支持構造を設計する必要がある。また、実機サイズの地上試験が困難であることから、数値シミュレーションや小規模な地上実験を組み合わせるなど、開発には工夫を要する。本講義では、そういった大規模膜面と機構からなる軽量構造システムの解析・設計・開発手法について概説する。

2. 佐藤 泰貴(JAXA 宇宙科学研究所・准教授) 12月1日(水)5・6限, 7・8限. 12月8日(水) 5・6限

「サンプルリターンに求められる構造と機構」

はやぶさシリーズや火星衛星探査計画MMXなどのサンプルリターンでは、目標天体への到達、着陸、サンプル採取、サンプル格納、カプセルによる再突入を実現するための複雑な構造機構システムが必要である。本講義では、サンプルリターンに必要な大面積太陽電池アレイ、着陸システム、サンプリングシステム、再突入カプセルなどを実際の開発事例を通して構造機構の視点から概説する。

以上の講義から、宇宙開発分野で必要となる宇宙構造・機構工学の基礎と応用を獲得する。



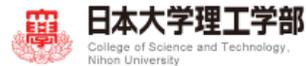
自己紹介

【経歴】

- 1993年に学位取得後, 日本大学理工学部航空宇宙工学科に就職. 構造工学を担当
- 2001年からCubeSat等の超小型衛星の研究・開発やISSでの実験等を実施
- 2020年10月にJAXA宇宙科学研究所に転職

【所属等】

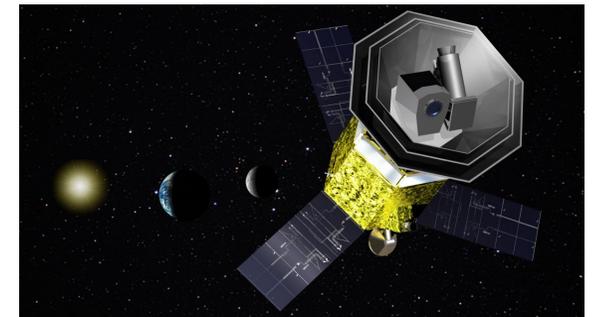
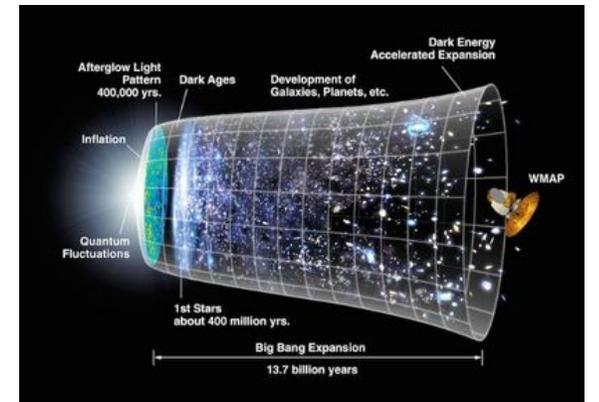
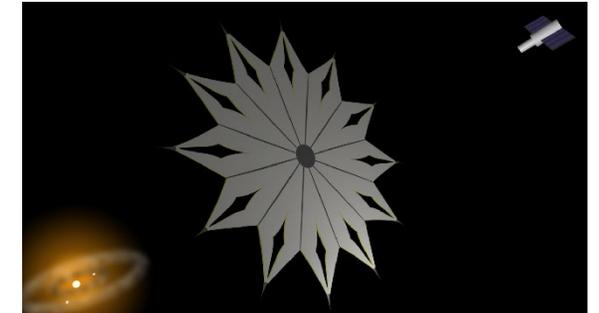
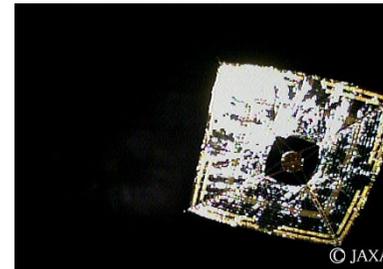
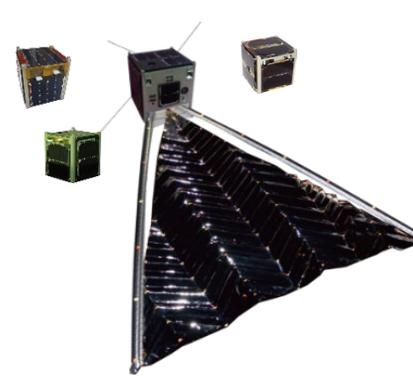
- JAXA宇宙科学研究所 宇宙飛行工学研究系
- 総合研究大学院大学
- 日本大学理工学部(特任教授)



<https://stage.tksc.jaxa.jp/taurus>

【専門】

- 宇宙構造物工学(特に, 超軽量展開宇宙構造物)
- 柔軟マルチボディダイナミクス, 幾何力学
- 宇宙構造物を利用した宇宙科学・探査



宇宙機開発応用B

第1講 大規模軽量膜面構造とは？

第1章 第1講～第4講までの講義の概要



1. 本講義の目標

★ 膜構造を宇宙で利用するためにやるべきことについて理解する

1. 膜面とは？
2. 膜面を宇宙で利用すると何がよいのか？
3. 膜面の宇宙利用にはどのような課題があるのか？
4. 膜面構造を宇宙で利用する場合, 設計・解析, 試験段階では何をする必要があるのであるのか？
5. 膜面構造の解析のポイントは？
6. 膜面構造の設計のポイントは？
7. 膜面構造の地上試験のポイントは？
8. 膜面構造の運用のポイントは？



2. 本講義の構成

11月17日(水)



第1講(14:20 - 16:00)
大規模軽量膜面構造とは？

- － 膜面構造の特徴
- － 膜面宇宙建造物の例
- － 膜面の宇宙利用の課題



第2講(16:15 - 17:55)
膜面建造物の解析法の概要

- － 非線形有限要素法の考え方
- － 平面応力場の運動方程式
- － 膜面の解析法

11月24日(水)



第3講(14:20 - 16:00)
膜面建造物の開発・運用

- － 試験項目と注意点・課題
- － 運用上の注意



第4講(16:15 - 17:55)
まとめ

- － これまでの研究例
- － 今後の大規模軽量膜面建造物



宇宙機開発応用B

第1講 大規模軽量膜面構造とは？

第2章 本講義が対象とする「大規模軽量膜面構造」

図や動画をざっと見ていって、イメージをつかんでもらえればと思います。



1. 膜面宇宙構造物の例

★ アンテナ

- メッシュアンテナ(ケーブルネットワーク+アンテナ鏡面用メッシュ+伸展マスト)
- メッシュアンテナ(ケーブルネットワーク+アンテナ鏡面用メッシュ+展開トラス)
- ラップリブ(wrap-lib)アンテナ(曲線梁+アンテナ鏡面用メッシュ)
- インフレータブルアンテナ(インフレータブル鏡面+支持マスト)

★ 太陽電池パドル(SAP)

- 蛇腹式(伸展マスト+蛇腹式太陽電池アレイ, ロールアップ・ブーム+蛇腹式太陽電池アレイ)
- ロールアップ式(ロールアップ・ブーム+ロールアップ・フレキシブル太陽電池)

★ 薄膜SAP

- 伸展マスト型(フレキシブル太陽電池+膜/メッシュ+伸展マスト)
- 展開トラス型(フレキシブル太陽電池+膜/メッシュ+展開トラス)

★ ソーラー(電力)セイル

- スピン展開型(セイル膜+スピン機構)
- マスト伸展型(セイル膜+伸展マスト)

★ サンシールド

- マスト伸展型(シールド膜+伸展マスト)

★ スターシェード

- 展開トラス型



1. 膜面宇宙構造物の例

1. 材料としての膜とは？
2. 構造部材としての膜とは？
3. 宇宙で膜構造(膜面構造)を使う場合の特徴は、「軽量で大面積で、かつ、折り畳みが容易」
4. その意味で、「収納」、「展開」、「展張」がポイント



1.1 展開アンテナ

1. 材料としての膜とは？
2. 構造部材としての膜とは？
3. 宇宙で膜構造(膜面構造)を使う場合の特徴は、「軽量で大面積で、かつ、折り畳みが容易」
4. その意味で、「収納」、「展開」、「展張」がポイント

★文献を参照

例えば,

T.H. Murphey, "Historical Perspectives on the Development of Deployable Reflectors," AIAA-2009-2605, <https://arc.aiaa.org/doi/pdf/10.2514/6.2009-2605>

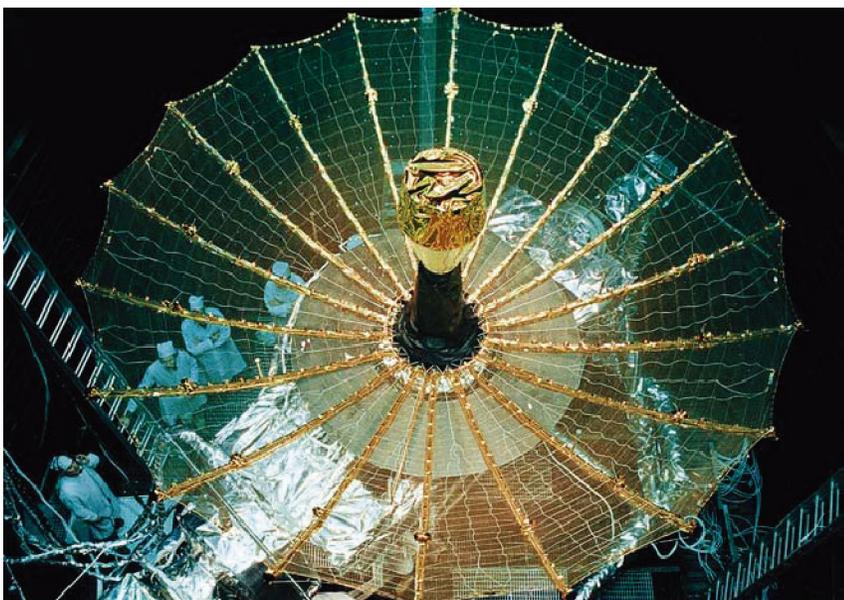


FIG. 1

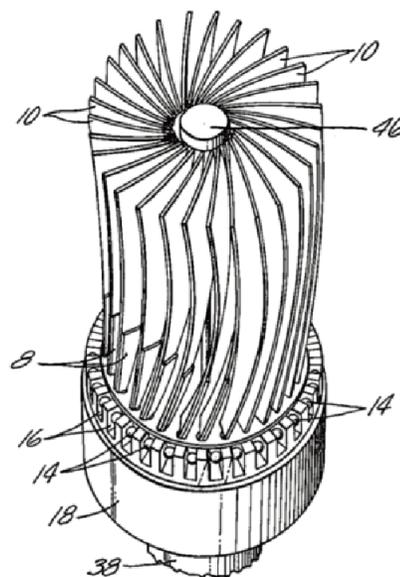
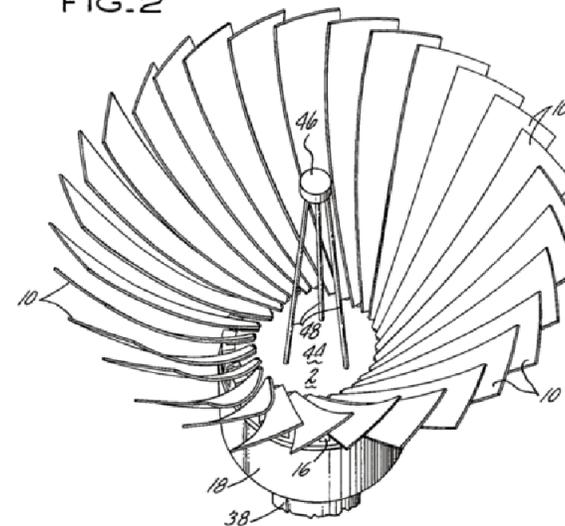


FIG. 2



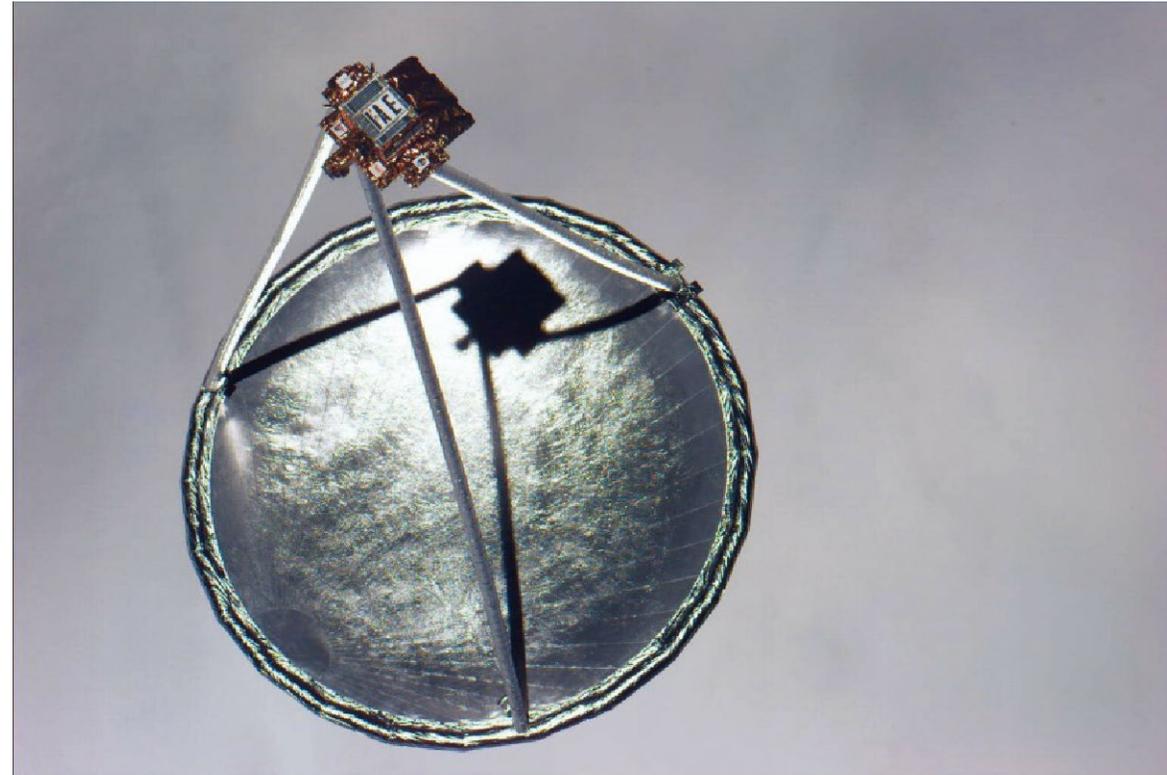
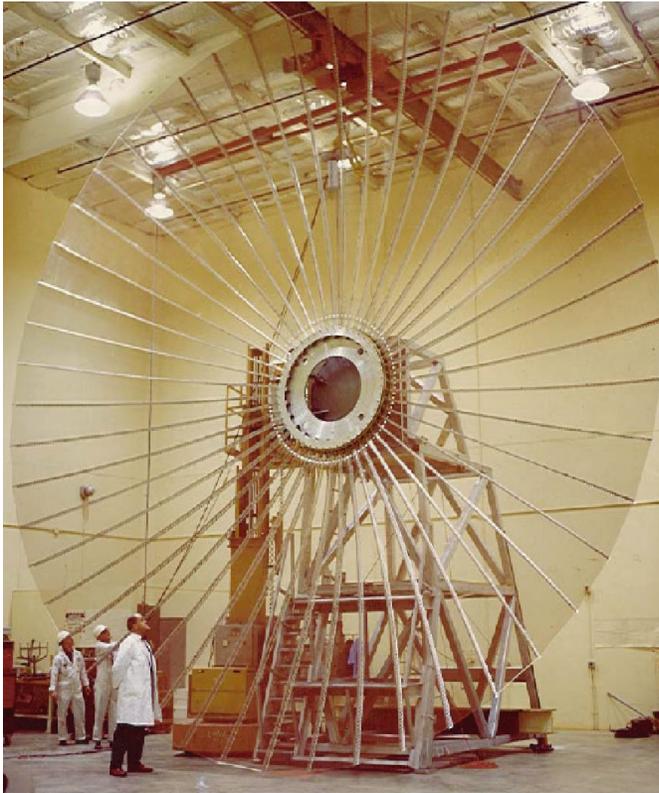
1.1 展開アンテナ

1. 材料としての膜とは？
2. 構造部材としての膜とは？
3. 宇宙で膜構造(膜面構造)を使う場合の特徴は、「軽量で大面積で、かつ、折り畳みが容易」
4. その意味で、「収納」、「展開」、「展張」がポイント

★文献を参照

例えば,

T.H. Murphey, "Historical Perspectives on the Development of Deployable Reflectors," AIAA-2009-2605, <https://arc.aiaa.org/doi/pdf/10.2514/6.2009-2605>



S77E5034 1996:05:20 08:15:14



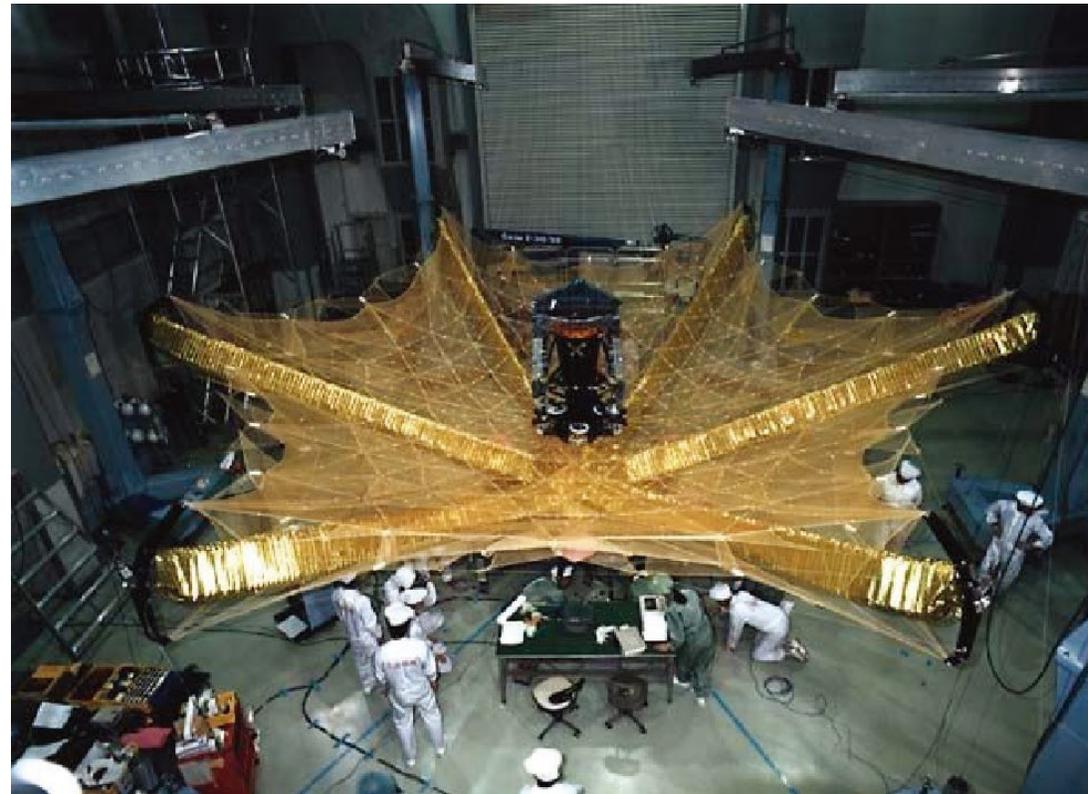
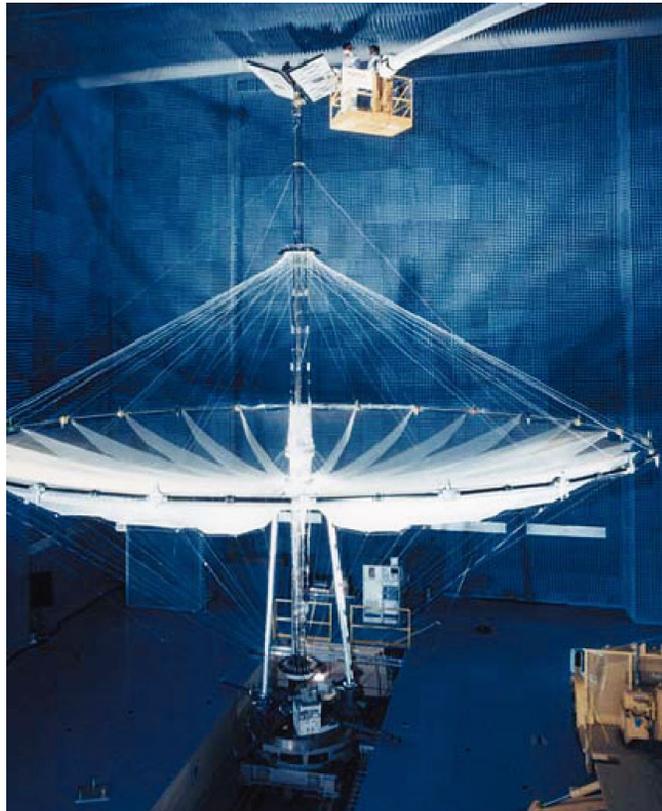
1.1 展開アンテナ

1. 材料としての膜とは？
2. 構造部材としての膜とは？
3. 宇宙で膜構造(膜面構造)を使う場合の特徴は、「軽量で大面積で、かつ、折り畳みが容易」
4. その意味で、「収納」、「展開」、「展張」がポイント

★文献を参照

例えば,

T.H. Murphey, "Historical Perspectives on the Development of Deployable Reflectors," AIAA-2009-2605, <https://arc.aiaa.org/doi/pdf/10.2514/6.2009-2605>



12



1.1 展開アンテナ

1. 材料としての膜とは？
2. 構造部材としての膜とは？
3. 宇宙で膜構造(膜面構造)を使う場合の特徴は、「軽量で大面積で、かつ、折り畳みが容易」
4. その意味で、「収納」、「展開」、「展張」がポイント

★文献を参照

例えば,

T.H. Murphey, "Historical Perspectives on the Development of Deployable Reflectors," AIAA-2009-2605, <https://arc.aiaa.org/doi/pdf/10.2514/6.2009-2605>

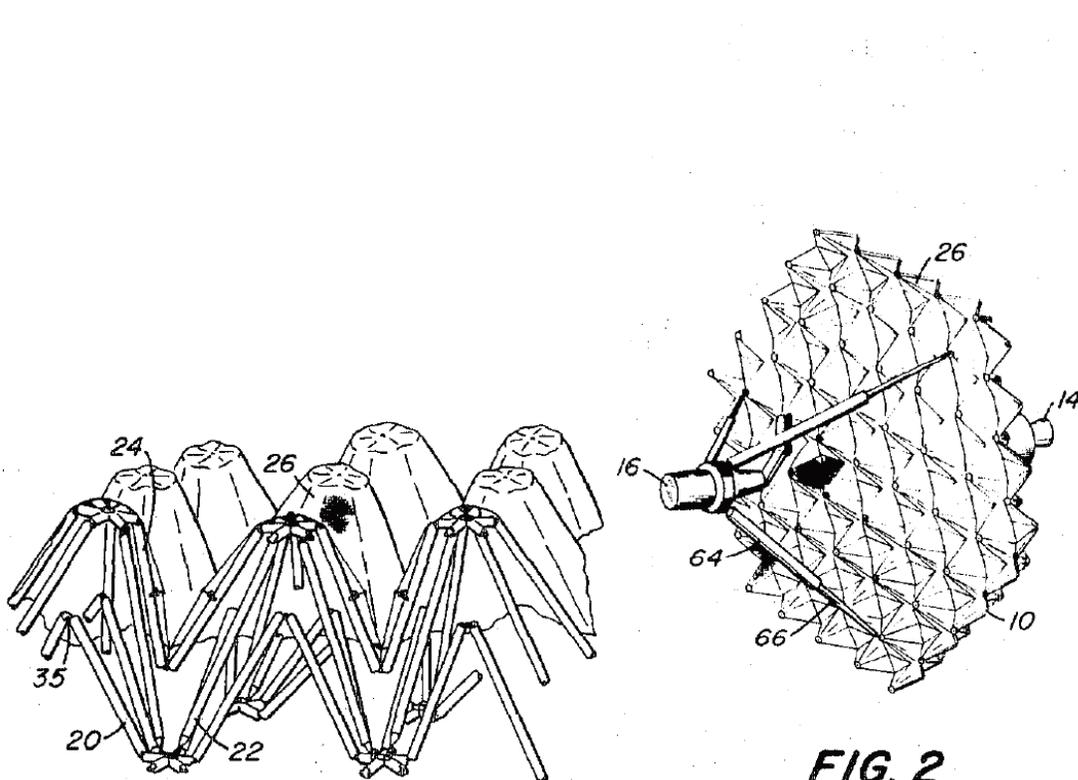


FIG. 2

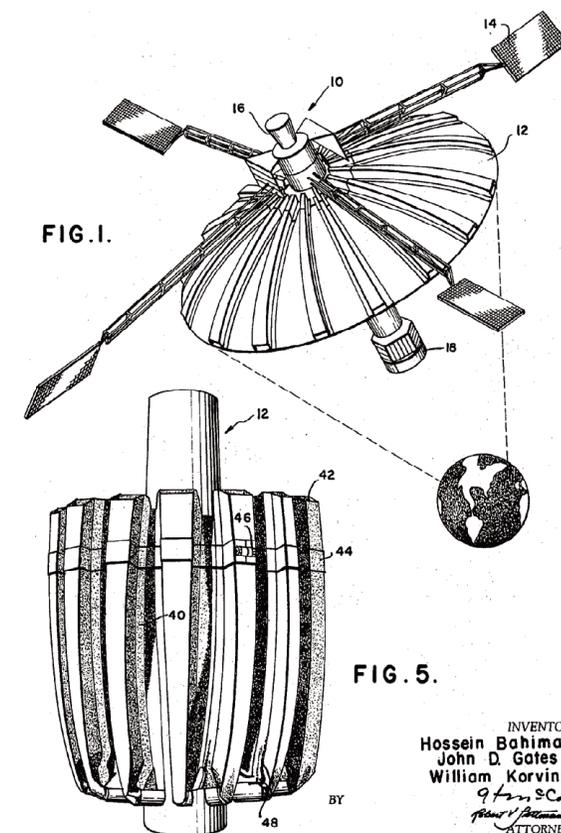
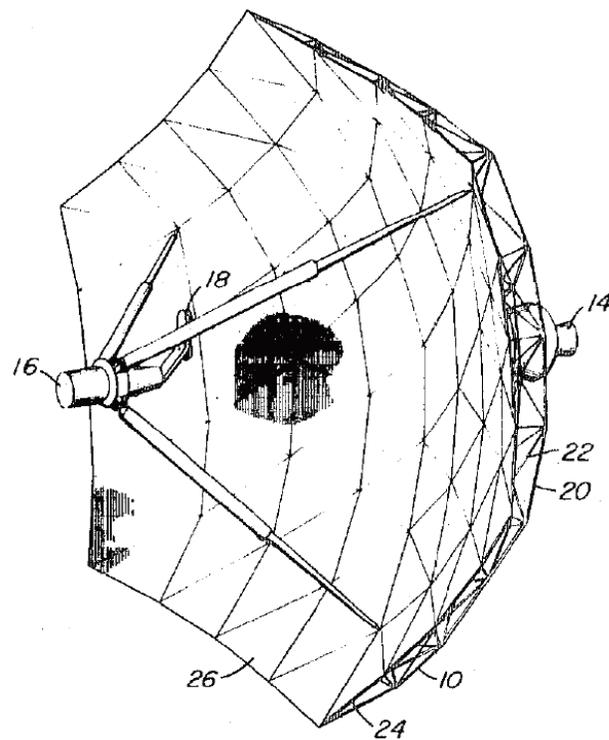


FIG. 5.

INVENTORS
Hossein Bahman
John D. Gates &
William Korvin
BY
Hossein Bahman
ATTORNEYS

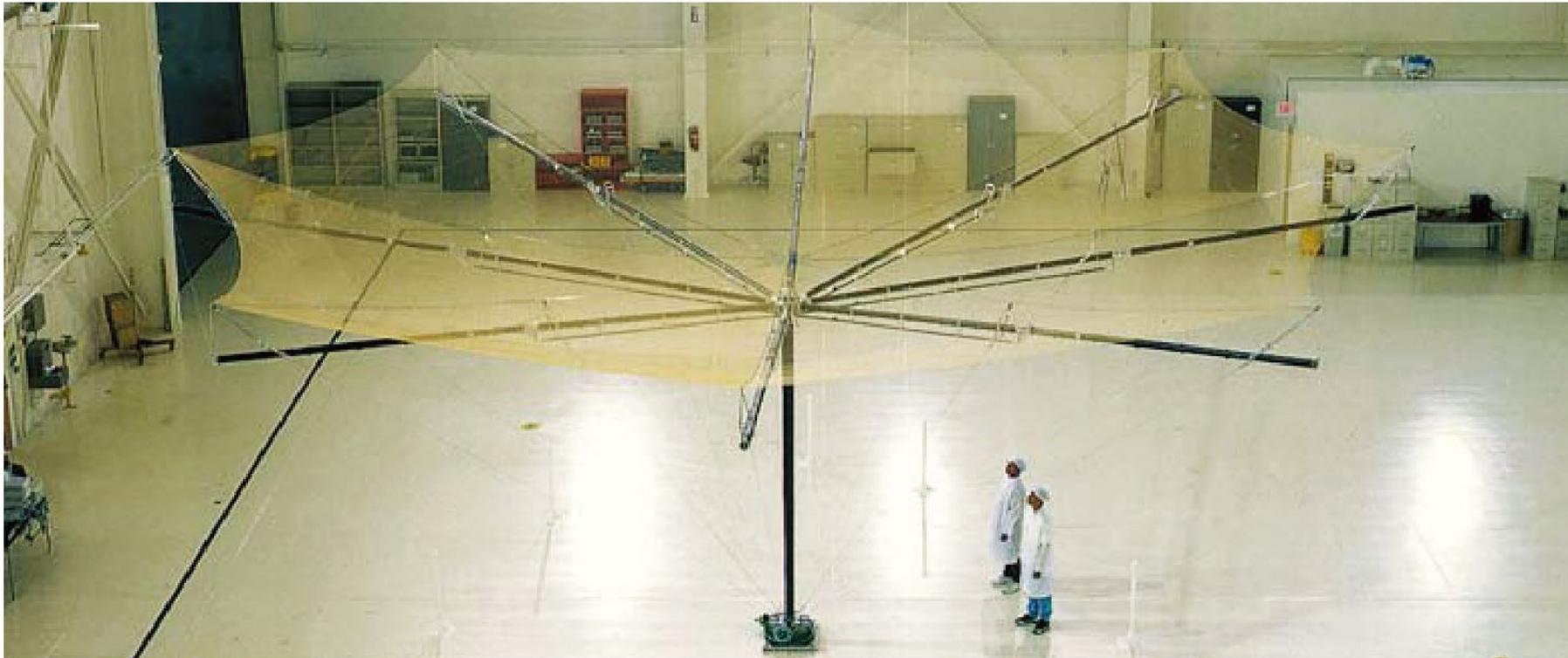
1.1 展開アンテナ

1. 材料としての膜とは？
2. 構造部材としての膜とは？
3. 宇宙で膜構造(膜面構造)を使う場合の特徴は、「軽量で大面積で、かつ、折り畳みが容易」
4. その意味で、「収納」、「展開」、「展張」がポイント

★文献を参照

例えば,

T.H. Murphey, "Historical Perspectives on the Development of Deployable Reflectors," AIAA-2009-2605, <https://arc.aiaa.org/doi/pdf/10.2514/6.2009-2605>



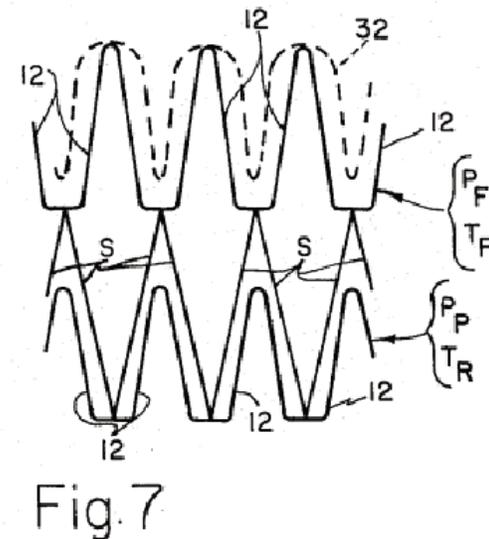
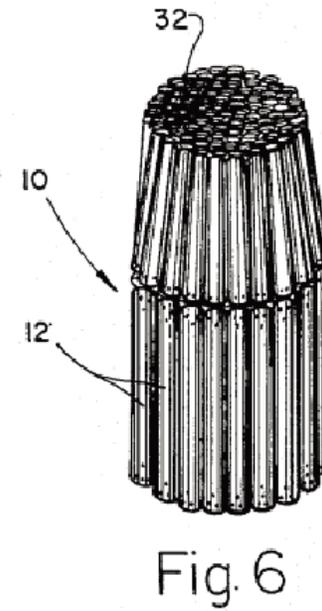
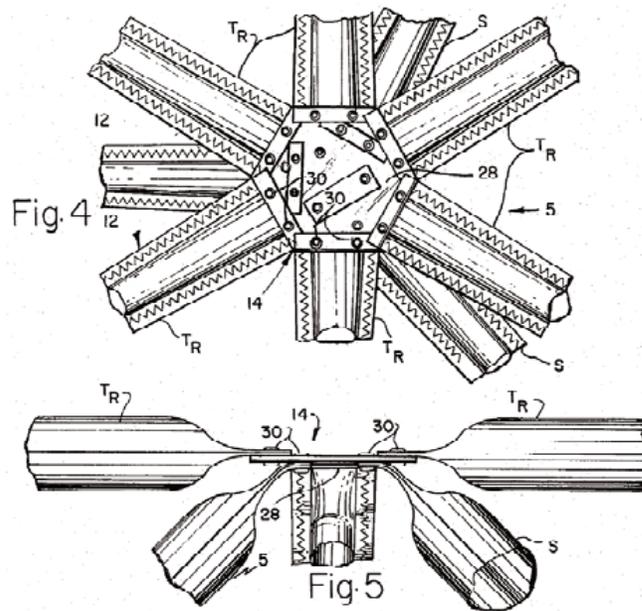
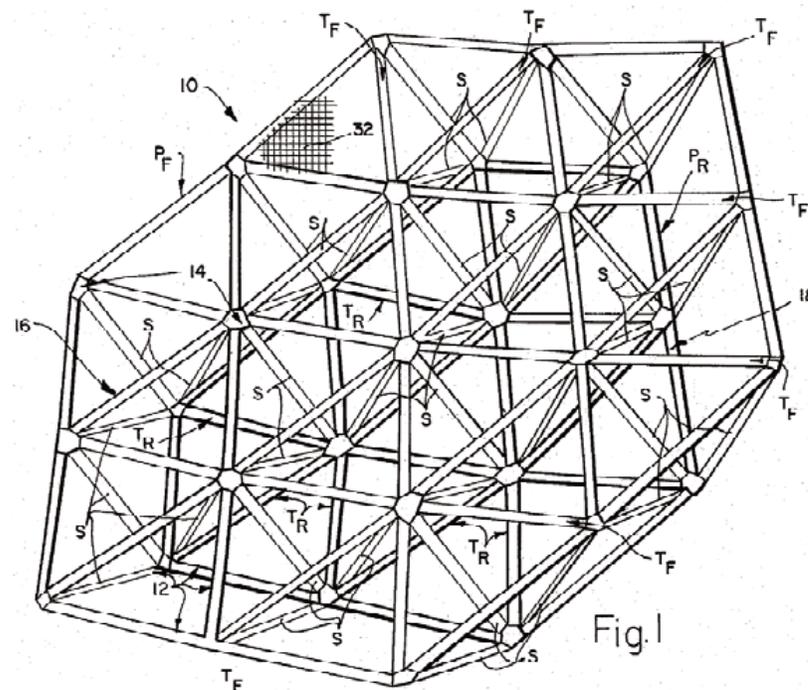
1.1 展開アンテナ

1. 材料としての膜とは？
2. 構造部材としての膜とは？
3. 宇宙で膜構造(膜面構造)を使う場合の特徴は、「軽量で大面積で、かつ、折り畳みが容易」
4. その意味で、「収納」、「展開」、「展張」がポイント

★文献を参照

例えば,

T.H. Murphey, "Historical Perspectives on the Development of Deployable Reflectors," AIAA-2009-2605, <https://arc.aiaa.org/doi/pdf/10.2514/6.2009-2605>



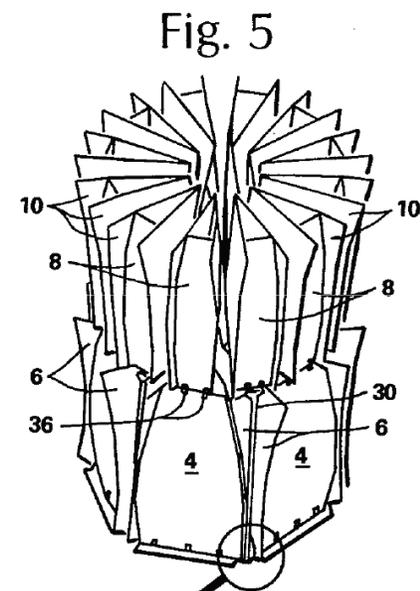
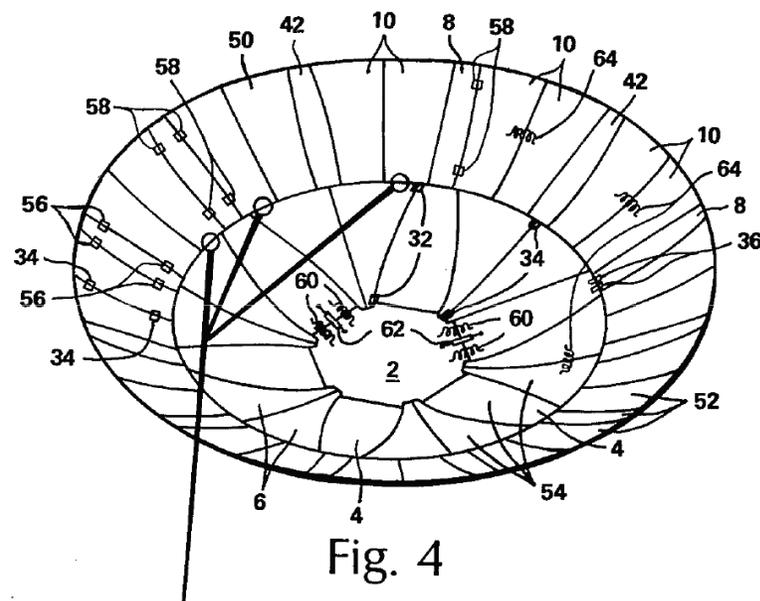
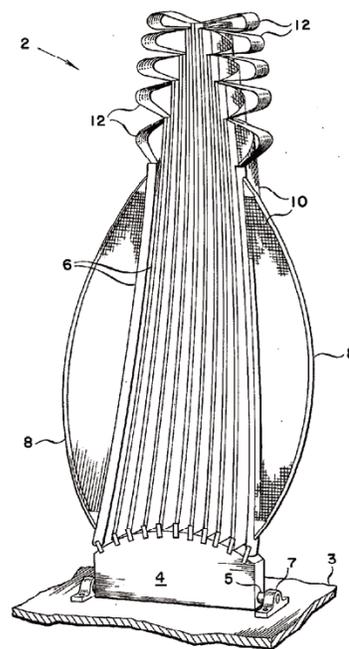
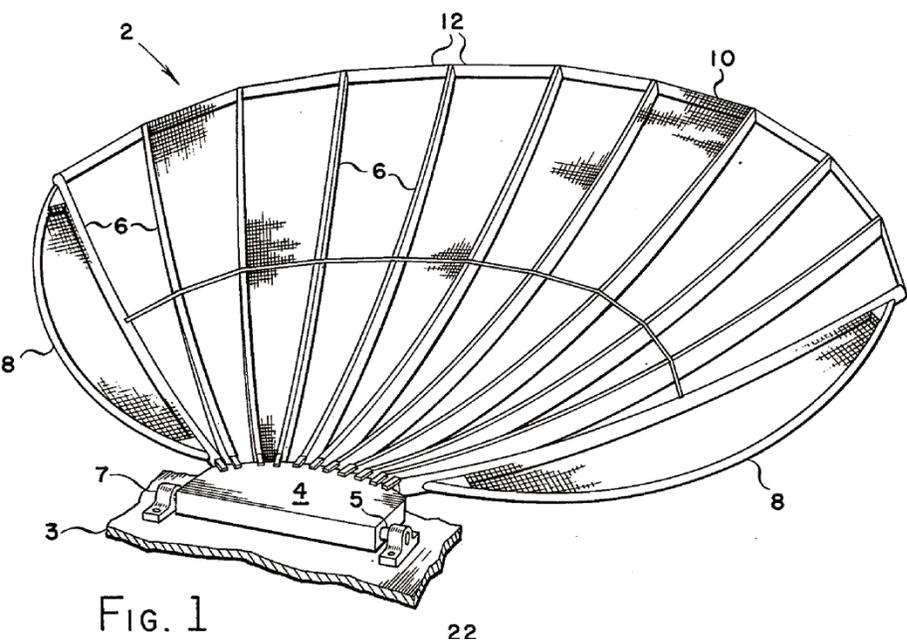
1.1 展開アンテナ

1. 材料としての膜とは？
2. 構造部材としての膜とは？
3. 宇宙で膜構造(膜面構造)を使う場合の特徴は、「軽量で大面積で、かつ、折り畳みが容易」
4. その意味で、「収納」、「展開」、「展張」がポイント

★文献を参照

例えば,

T.H. Murphey, "Historical Perspectives on the Development of Deployable Reflectors," AIAA-2009-2605, <https://arc.aiaa.org/doi/pdf/10.2514/6.2009-2605>



1.1 展開アンテナ

1. 材料としての膜とは？
2. 構造部材としての膜とは？
3. 宇宙で膜構造(膜面構造)を使う場合の特徴は、「軽量で大面積で、かつ、折り畳みが容易」
4. その意味で、「収納」、「展開」、「展張」がポイント

★文献を参照

例えば,

T.H. Murphey, "Historical Perspectives on the Development of Deployable Reflectors," AIAA-2009-2605, <https://arc.aiaa.org/doi/pdf/10.2514/6.2009-2605>

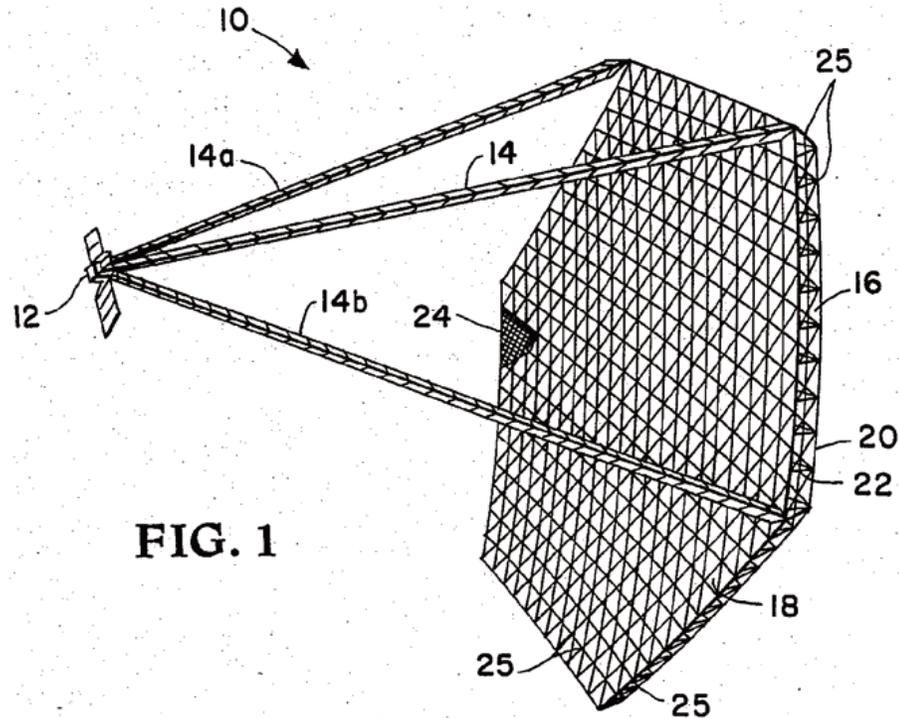


FIG. 1

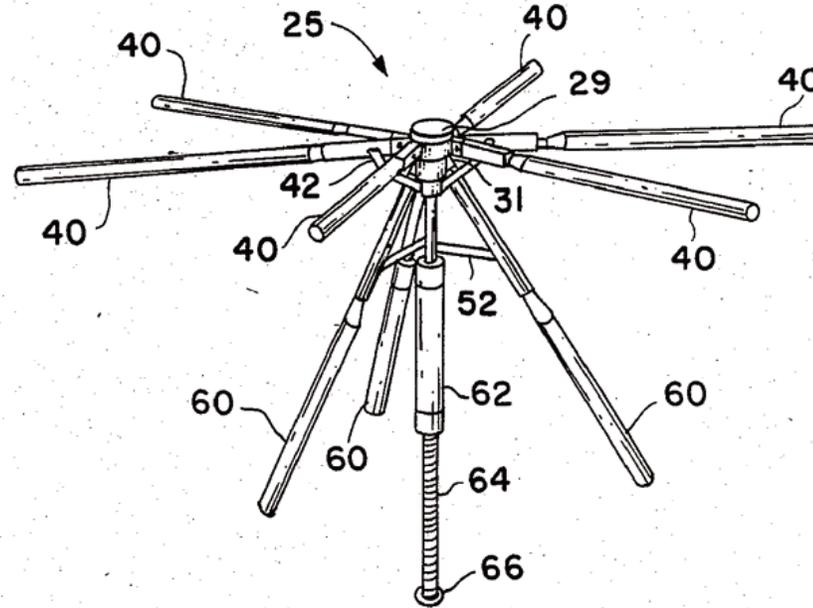
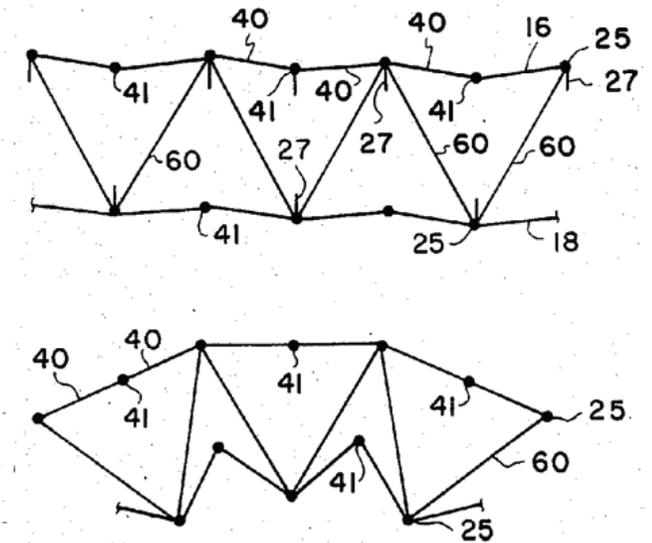


FIG. 2



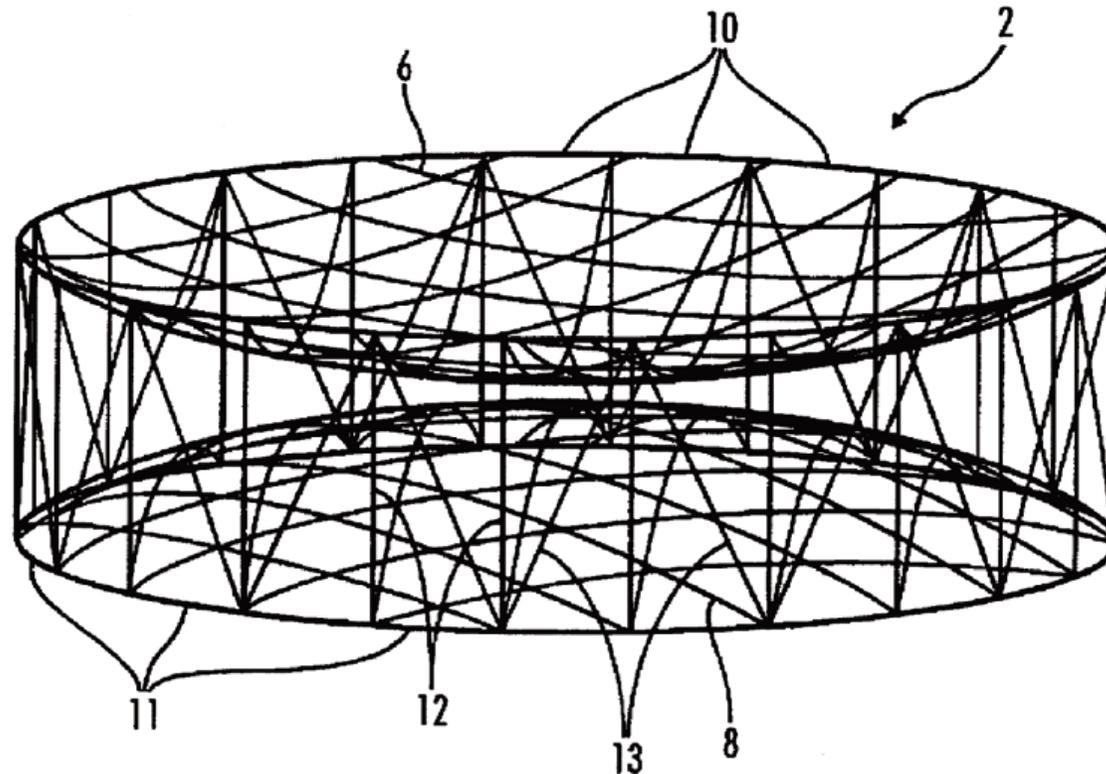
1.1 展開アンテナ

1. 材料としての膜とは？
2. 構造部材としての膜とは？
3. 宇宙で膜構造(膜面構造)を使う場合の特徴は、「軽量で大面積で、かつ、折り畳みが容易」
4. その意味で、「収納」、「展開」、「展張」がポイント

★文献を参照

例えば,

T.H. Murphey, "Historical Perspectives on the Development of Deployable Reflectors," AIAA-2009-2605, <https://arc.aiaa.org/doi/pdf/10.2514/6.2009-2605>



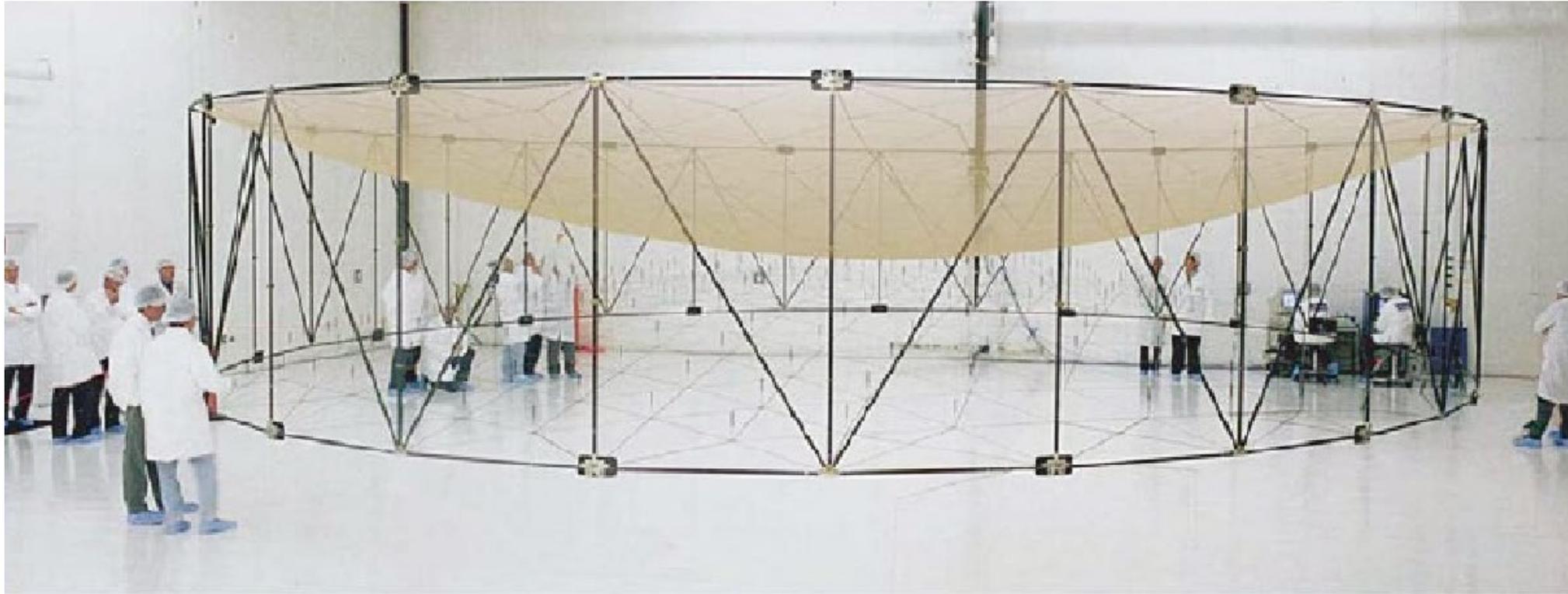
1.1 展開アンテナ

1. 材料としての膜とは？
2. 構造部材としての膜とは？
3. 宇宙で膜構造(膜面構造)を使う場合の特徴は、「軽量で大面積で、かつ、折り畳みが容易」
4. その意味で、「収納」、「展開」、「展張」がポイント

★文献を参照

例えば,

T.H. Murphey, "Historical Perspectives on the Development of Deployable Reflectors," AIAA-2009-2605, <https://arc.aiaa.org/doi/pdf/10.2514/6.2009-2605>



1.1 展開アンテナ

1. 材料としての膜とは？
2. 構造部材としての膜とは？
3. 宇宙で膜構造(膜面構造)を使う場合の特徴は、「軽量で大面積で、かつ、折り畳みが容易」
4. その意味で、「収納」、「展開」、「展張」がポイント

★文献を参照

例えば,

T.H. Murphey, “Historical Perspectives on the Development of Deployable Reflectors,” AIAA-2009-2605, <https://arc.aiaa.org/doi/pdf/10.2514/6.2009-2605>



12



1.1.1 メッシュアンテナ

1. 材料としての膜とは？
2. 構造部材としての膜とは？
3. 宇宙で膜構造(膜面構造)を使う場合の特徴は、「軽量で大面積で、かつ、折り畳みが容易」
4. その意味で、「収納」、「展開」、「展張」がポイント

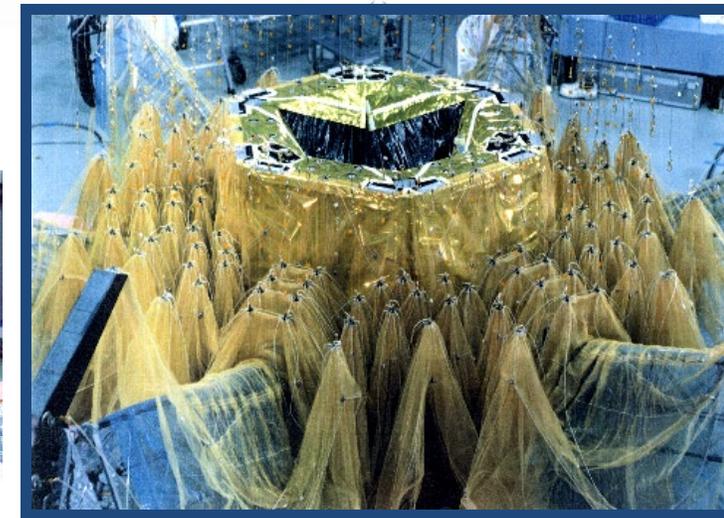
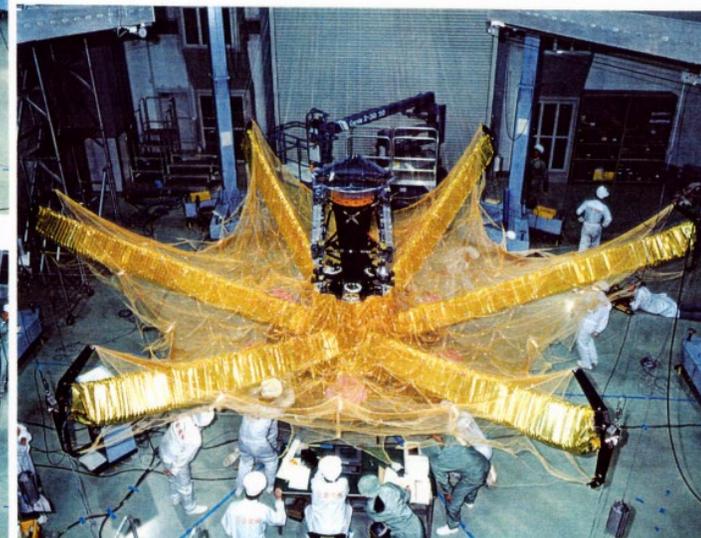
★ HALCA (1996)



(a)



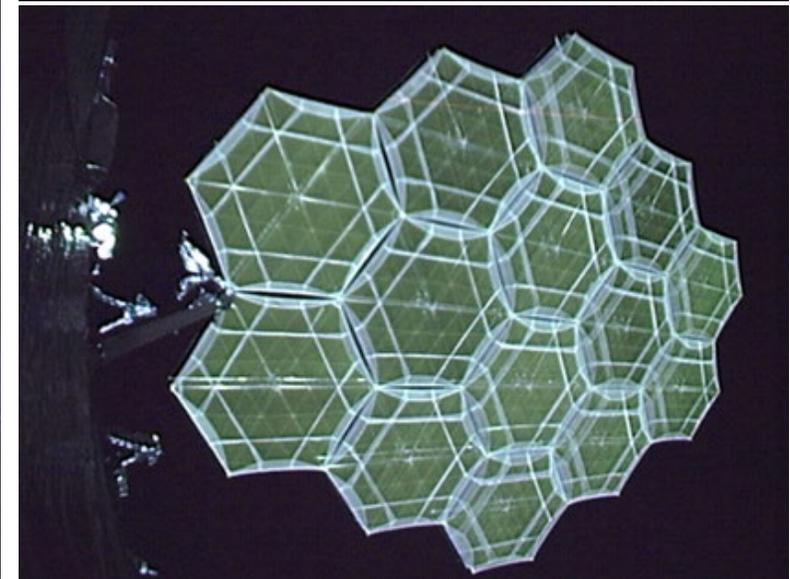
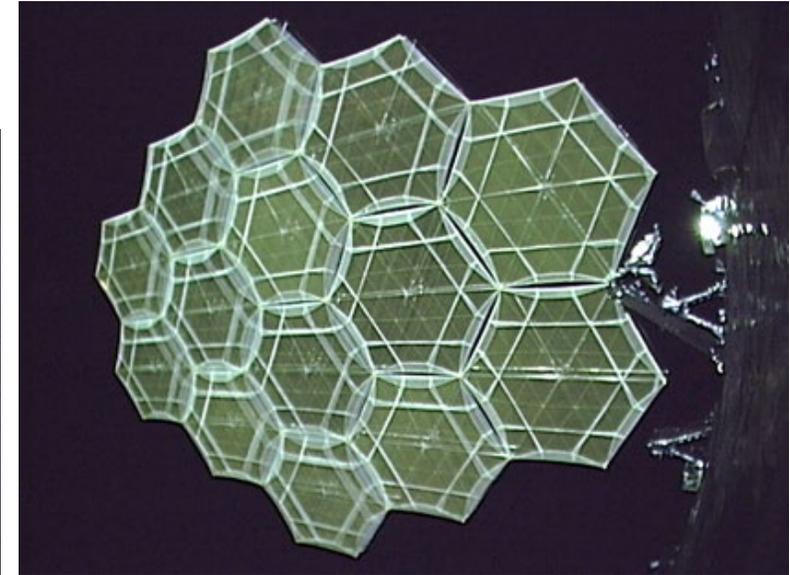
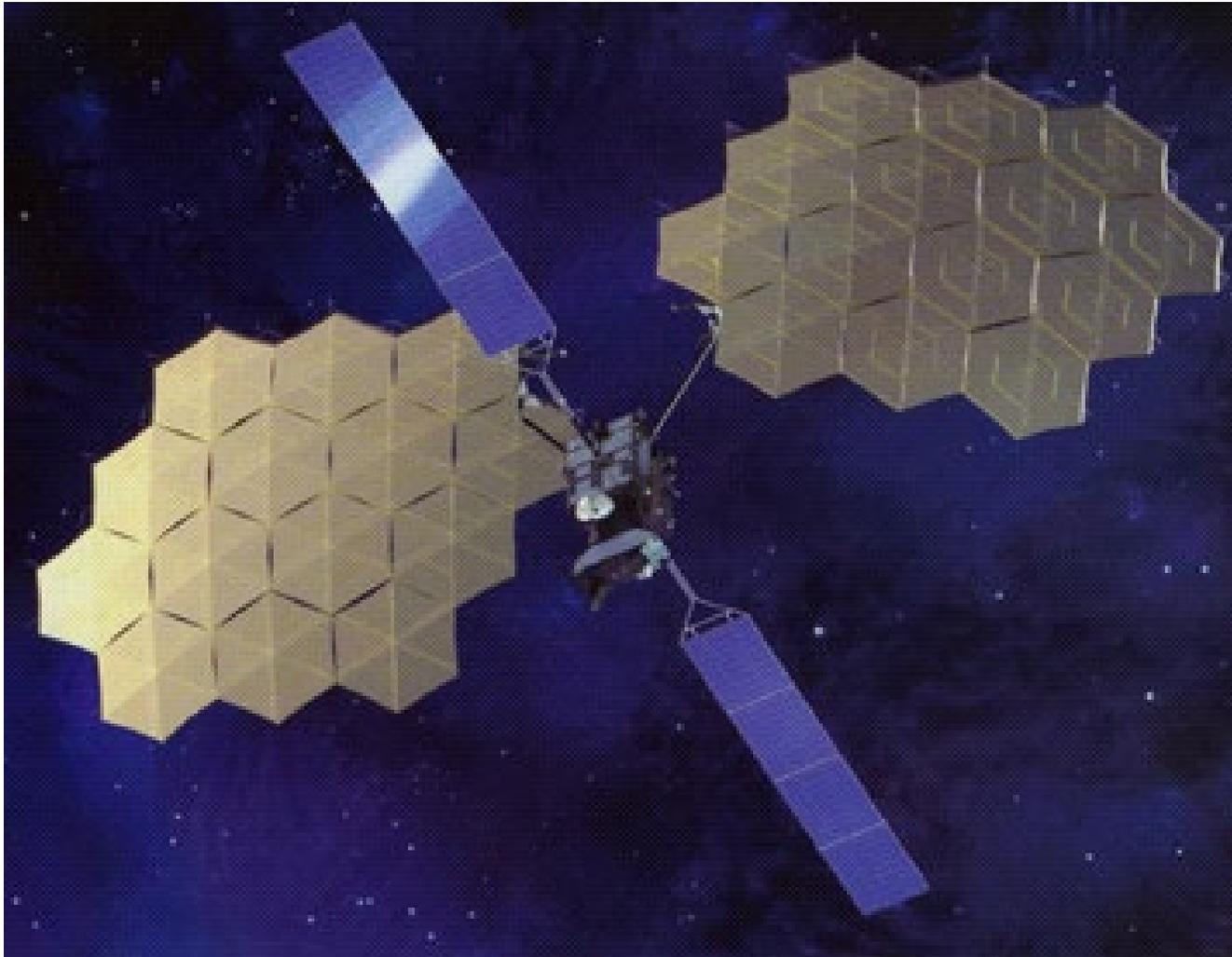
(b)



1.1.1 メッシュアンテナ

1. 材料としての膜とは？
2. 構造部材としての膜とは？
3. 宇宙で膜構造(膜面構造)を使う場合の特徴は、「軽量で大面積で、かつ、折り畳みが容易」
4. その意味で、「収納」、「展開」、「展張」がポイント

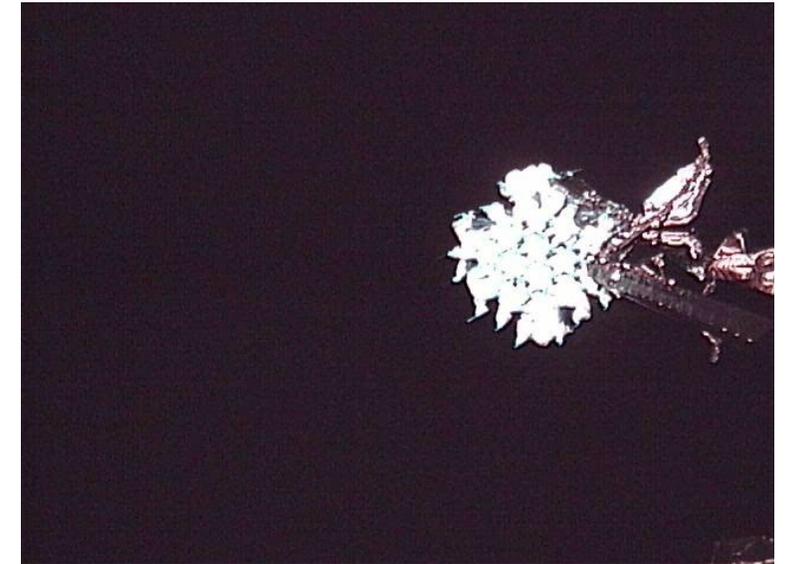
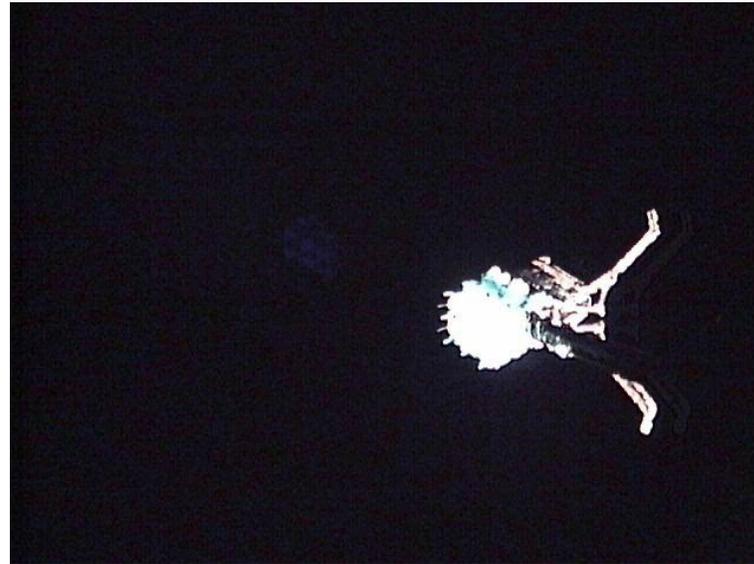
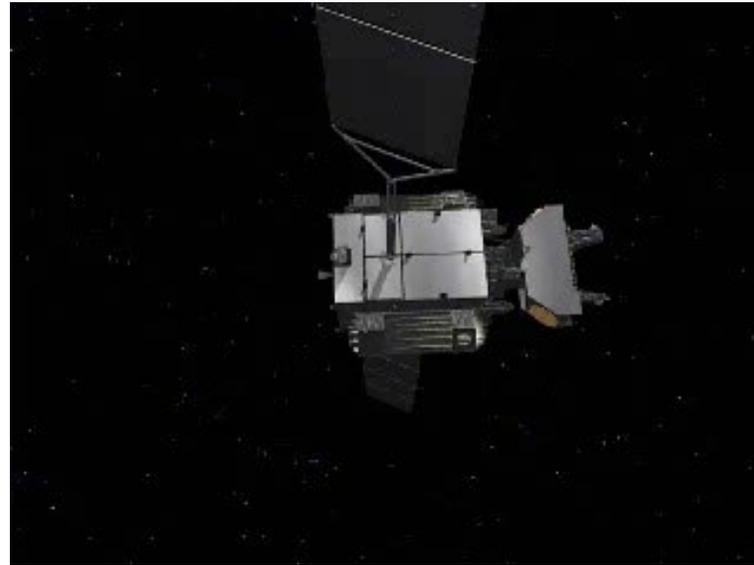
★ ETS-VIII (2006)



1.1.1 メッシュアンテナ

1. 材料としての膜とは？
2. 構造部材としての膜とは？
3. 宇宙で膜構造(膜面構造)を使う場合の特徴は、「軽量で大面積で、かつ、折り畳みが容易」
4. その意味で、「収納」、「展開」、「展張」がポイント

★ ETS-VIII (2006)



1.1.1 メッシュアンテナ

1. 材料としての膜とは？
2. 構造部材としての膜とは？
3. 宇宙で膜構造(膜面構造)を使う場合の特徴は、「軽量で大面積で、かつ、折り畳みが容易」
4. その意味で、「収納」、「展開」、「展張」がポイント

★ Astro-mesh

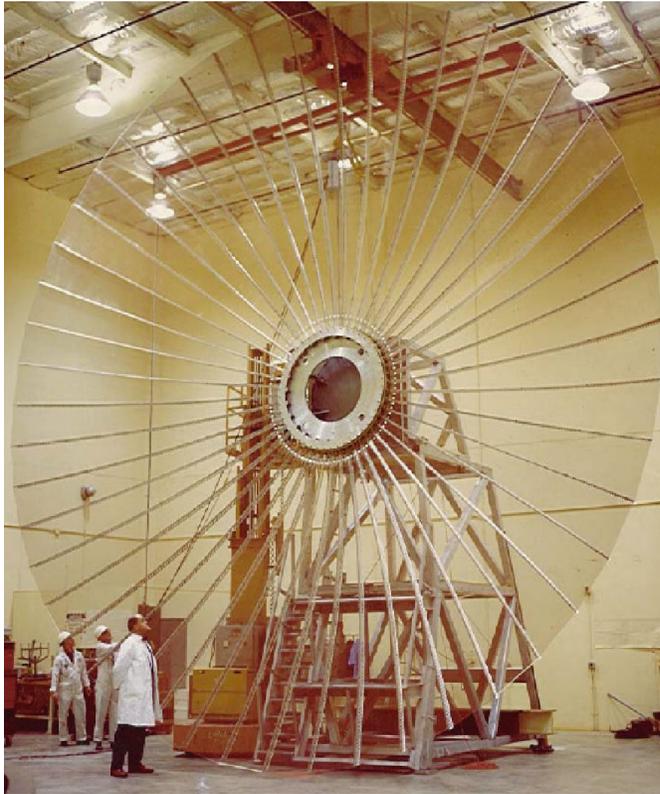
12-METER
REFLECTOR
DEPLOYMENT



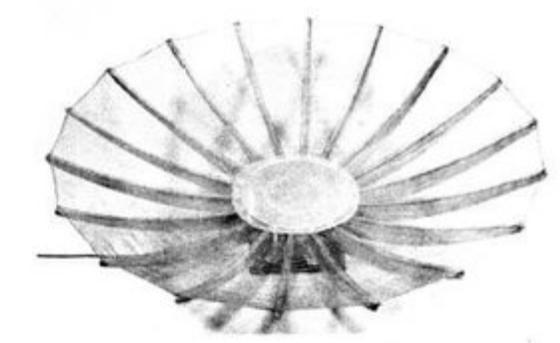
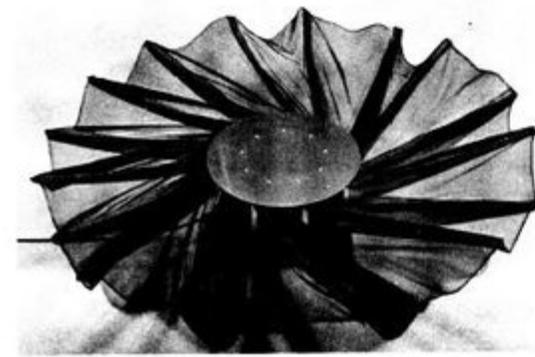
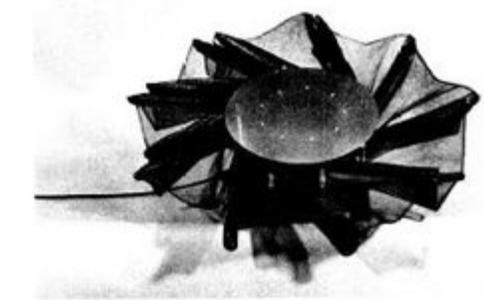
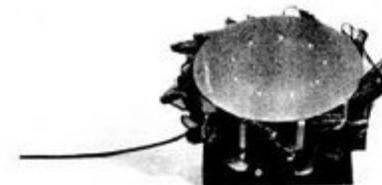
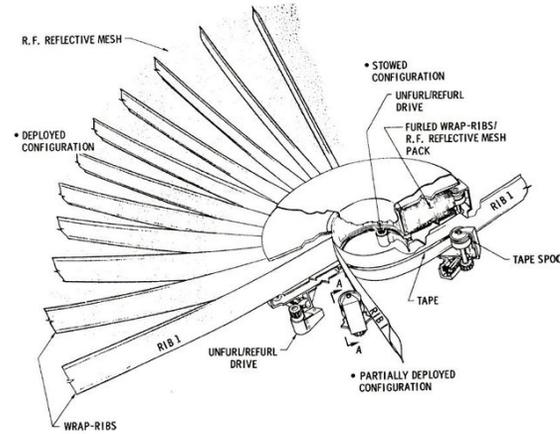
1.1.2 Wrap-ribアンテナ

1. 材料としての膜とは？
2. 構造部材としての膜とは？
3. 宇宙で膜構造(膜面構造)を使う場合の特徴は、「軽量で大面積で、かつ、折り畳みが容易」
4. その意味で、「収納」、「展開」、「展張」がポイント

★ATS-6(1974)



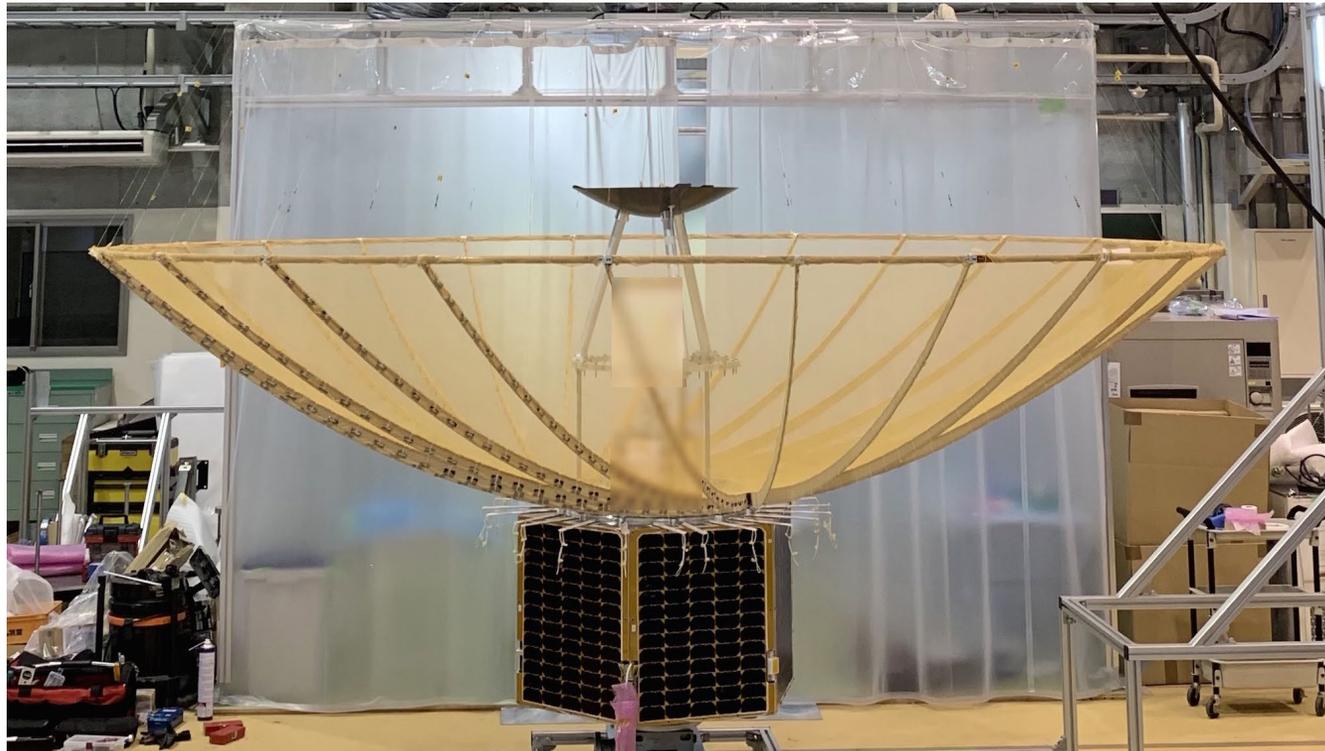
https://www.researchgate.net/publication/1733172_The_Experimental_Probe_of_Inflationary_Cosmology_EPIC_A_Mission_Concept_Study_for_NASA%27s_Einstein_Inflation_Probe/figures?lo=1



1.1.2 Wrap-ribアンテナ

1. 材料としての膜とは？
2. 構造部材としての膜とは？
3. 宇宙で膜構造(膜面構造)を使う場合の特徴は、「軽量で大面積で、かつ、折り畳みが容易」
4. その意味で、「収納」、「展開」、「展張」がポイント

★いざなぎ (2019)



<https://i-qps.net/news/176>



<https://www.facebook.com/qpslaboratory/>



1.1.3 インフレータブルアンテナ

1. 材料としての膜とは？
2. 構造部材としての膜とは？
3. 宇宙で膜構造(膜面構造)を使う場合の特徴は、「軽量で大面積で、かつ、折り畳みが容易」
4. その意味で、「収納」、「展開」、「展張」がポイント

★ Inflatable Antenna Experiment (1996)



1.1.3 インフレータブルアンテナ

1. 材料としての膜とは？
2. 構造部材としての膜とは？
3. 宇宙で膜構造(膜面構造)を使う場合の特徴は、「軽量で大面積で、かつ、折り畳みが容易」
4. その意味で、「収納」、「展開」、「展張」がポイント

★ Inflatible Antenna Experiment (1996)



1.1.3 インフレータブルアンテナ

1. 材料としての膜とは？
2. 構造部材としての膜とは？
3. 宇宙で膜構造(膜面構造)を使う場合の特徴は、「軽量で大面積で、かつ、折り畳みが容易」
4. その意味で、「収納」、「展開」、「展張」がポイント

★ Inflatable Antenna Experiment (1996)



1.2 太陽電池パドル(SAP)

1. 材料としての膜とは？
2. 構造部材としての膜とは？
3. 宇宙で膜構造(膜面構造)を使う場合の特徴は、「軽量で大面積で、かつ、折り畳みが容易」
4. その意味で、「収納」、「展開」、「展張」がポイント

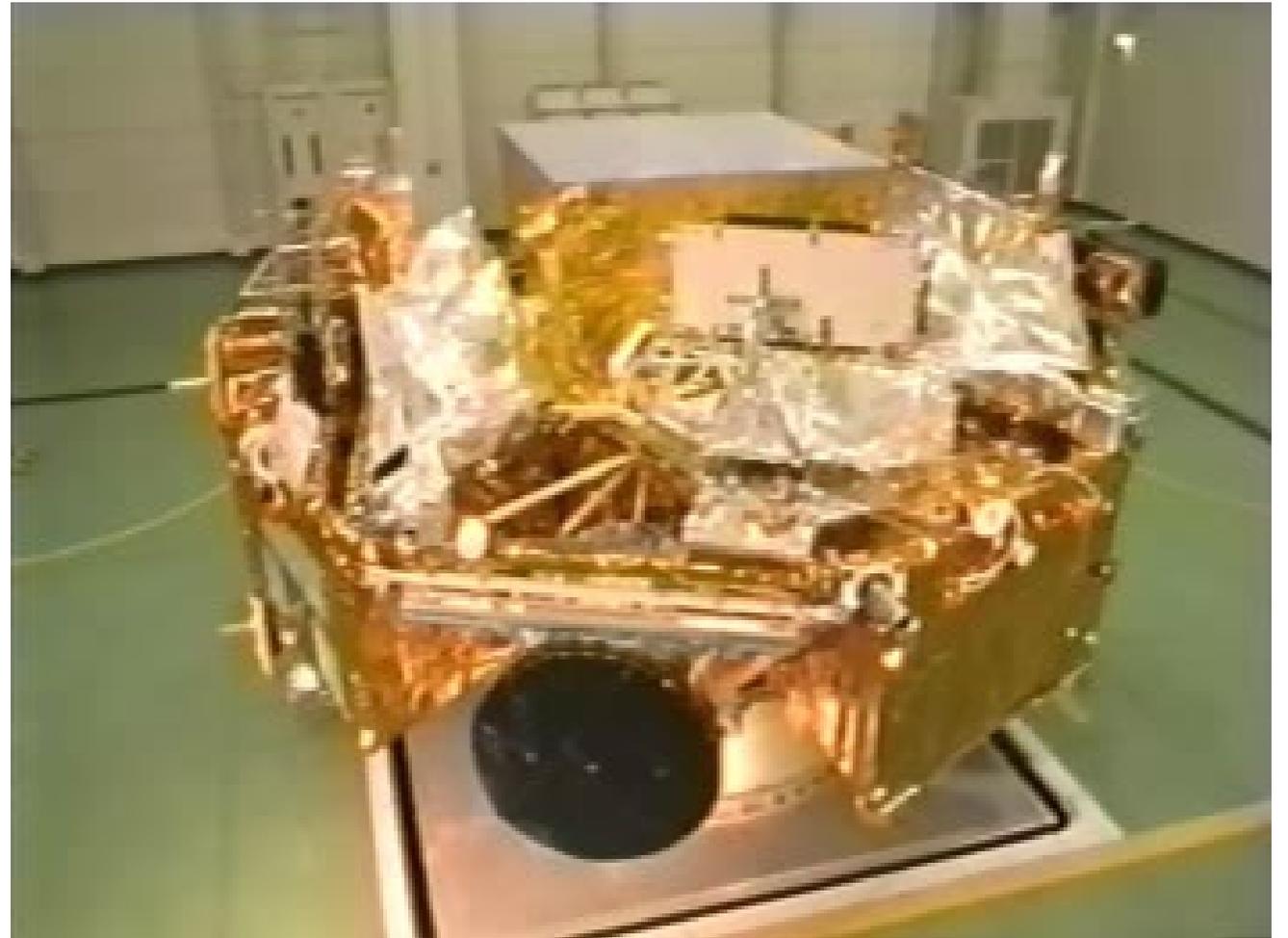
★ISS Solar Array



1.2 太陽電池パドル(SAP)

1. 材料としての膜とは？
2. 構造部材としての膜とは？
3. 宇宙で膜構造(膜面構造)を使う場合の特徴は、「軽量で大面積で、かつ、折り畳みが容易」
4. その意味で、「収納」、「展開」、「展張」がポイント

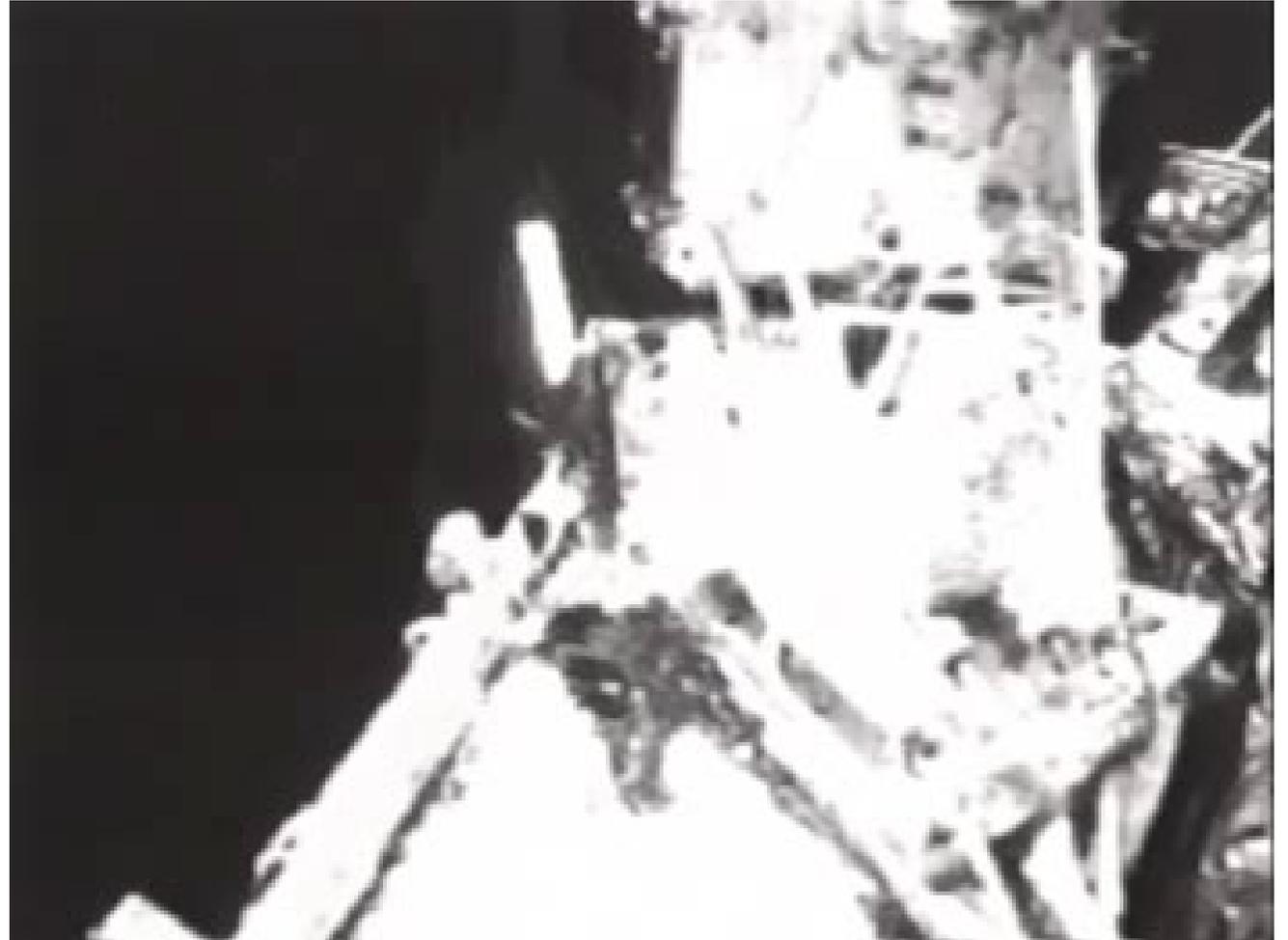
★SFU (Space Flyers Unit, 1996)



1.2 太陽電池パドル(SAP)

1. 材料としての膜とは？
2. 構造部材としての膜とは？
3. 宇宙で膜構造(膜面構造)を使う場合の特徴は、「軽量で大面積で、かつ、折り畳みが容易」
4. その意味で、「収納」、「展開」、「展張」がポイント

★SFU (Space Flyers Unit, 1996)



1.2 太陽電池パドル(SAP)

1. 材料としての膜とは？
2. 構造部材としての膜とは？
3. 宇宙で膜構造(膜面構造)を使う場合の特徴は、「軽量で大面積で、かつ、折り畳みが容易」
4. その意味で、「収納」、「展開」、「展張」がポイント

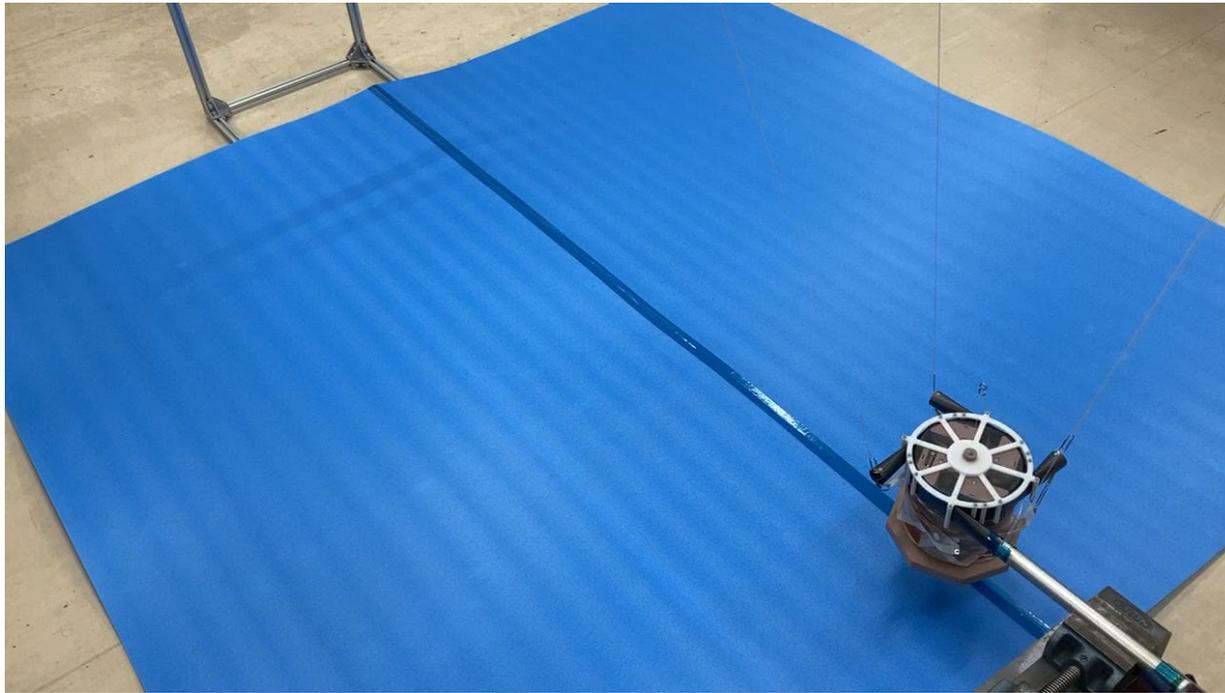
★ ROSA (Roll-OUT Solar Array, 2017)



1.3 薄膜SAP

1. 材料としての膜とは？
2. 構造部材としての膜とは？
3. 宇宙で膜構造(膜面構造)を使う場合の特徴は、「軽量で大面積で、かつ、折り畳みが容易」
4. その意味で、「収納」、「展開」、「展張」がポイント

★ 十字型



※ 革新的衛星技術実証3号機に「HELIOS」が搭載される予定



1.3 薄膜SAP

1. 材料としての膜とは？
2. 構造部材としての膜とは？
3. 宇宙で膜構造(膜面構造)を使う場合の特徴は、「軽量で大面積で、かつ、折り畳みが容易」
4. その意味で、「収納」、「展開」、「展張」がポイント

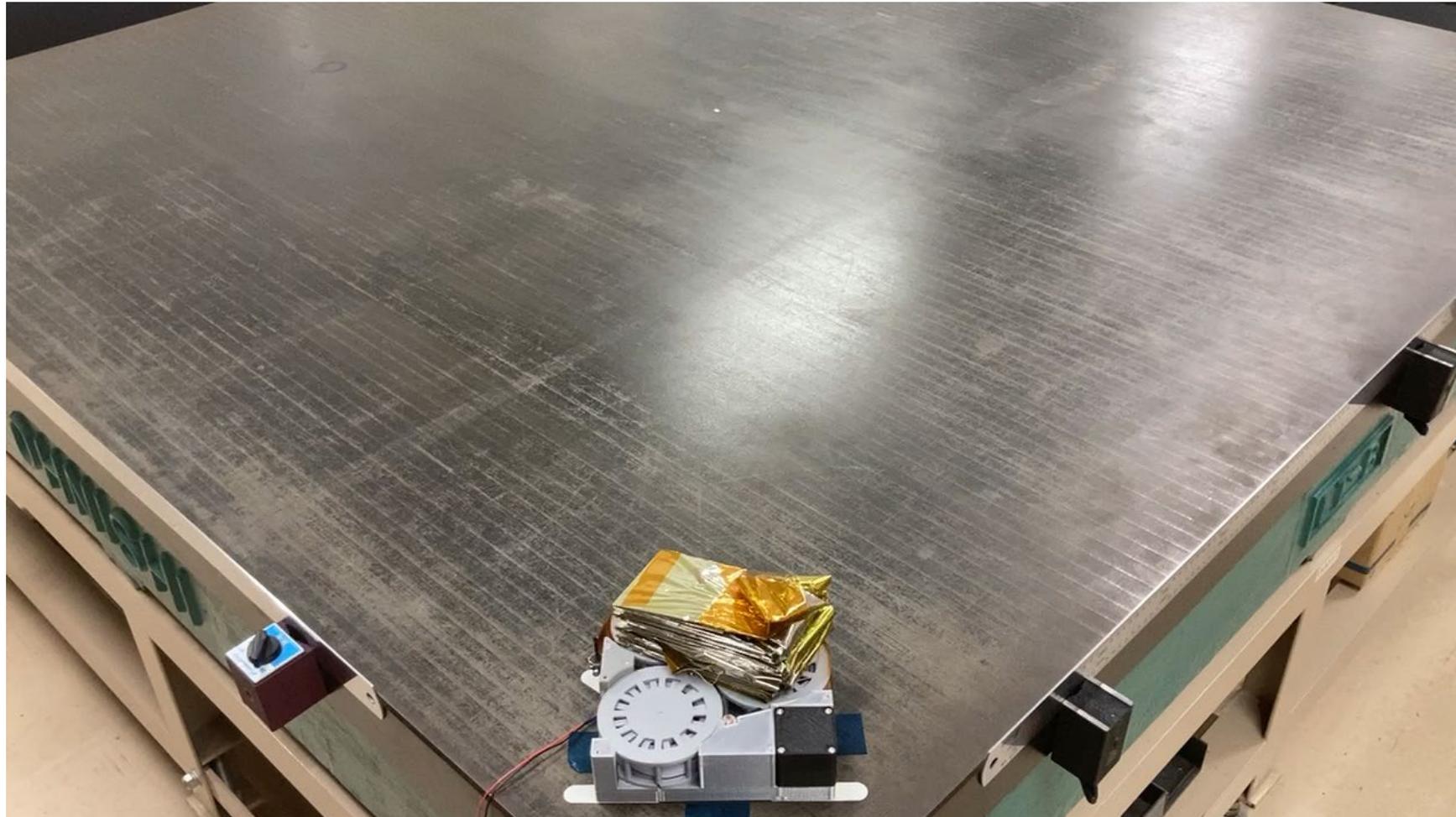
★十字型



1.3 薄膜SAP

1. 材料としての膜とは？
2. 構造部材としての膜とは？
3. 宇宙で膜構造(膜面構造)を使う場合の特徴は、「軽量で大面積で、かつ、折り畳みが容易」
4. その意味で、「収納」、「展開」、「展張」がポイント

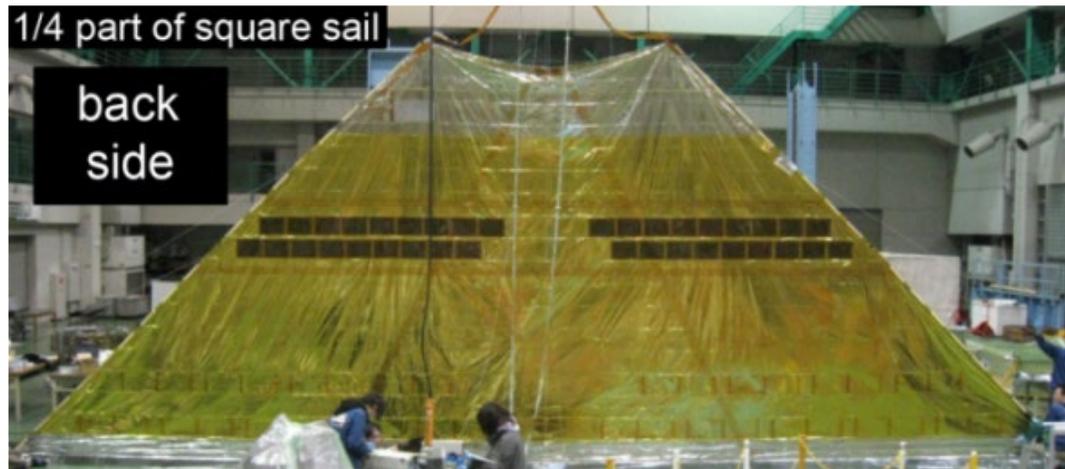
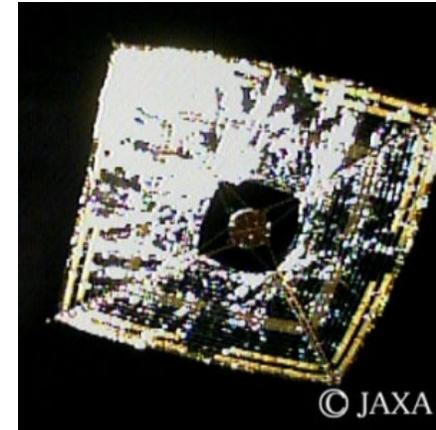
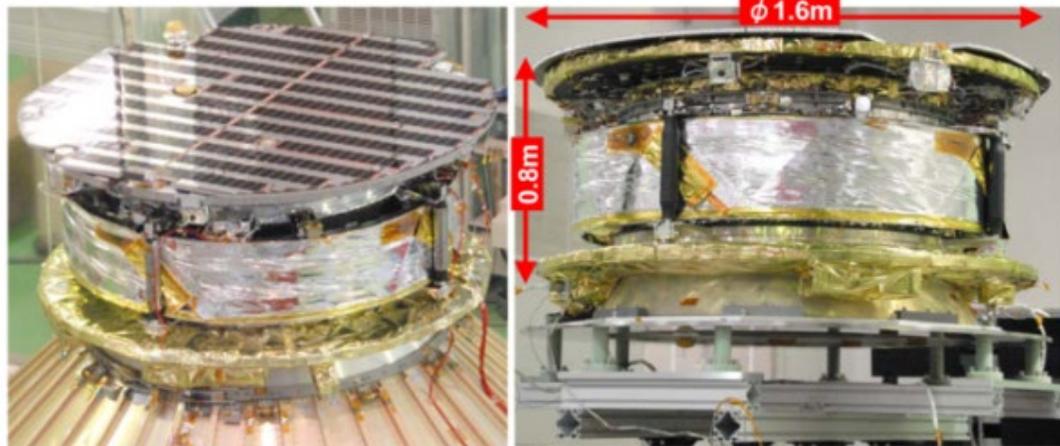
★ 三角形トラス型



1.4 ソーラーセイル

1. 材料としての膜とは？
2. 構造部材としての膜とは？
3. 宇宙で膜構造(膜面構造)を使う場合の特徴は、「軽量で大面積で、かつ、折り畳みが容易」
4. その意味で、「収納」、「展開」、「展張」がポイント

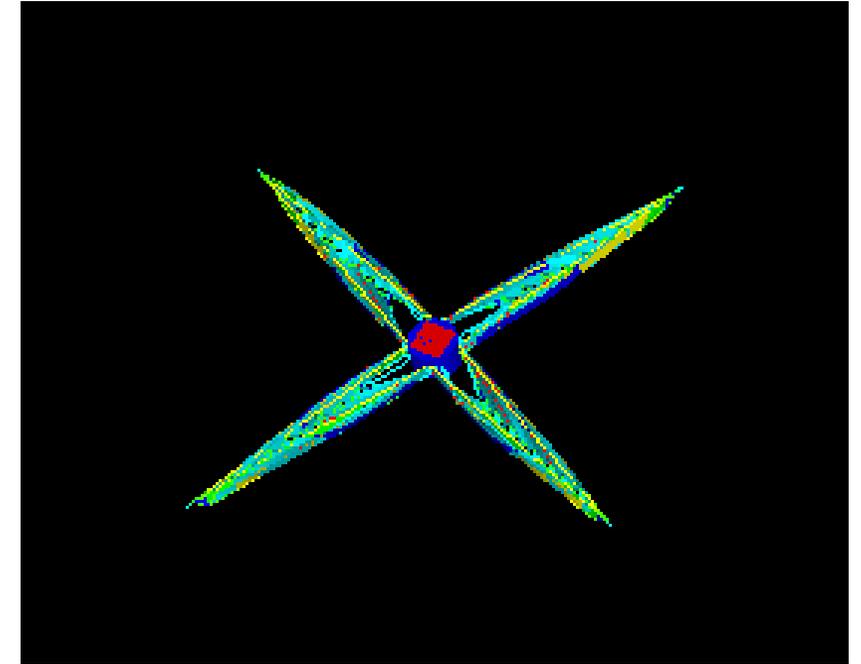
★ IKAROS (2010)



1.4 ソーラーセイル

1. 材料としての膜とは？
2. 構造部材としての膜とは？
3. 宇宙で膜構造(膜面構造)を使う場合の特徴は、「軽量で大面積で、かつ、折り畳みが容易」
4. その意味で、「収納」、「展開」、「展張」がポイント

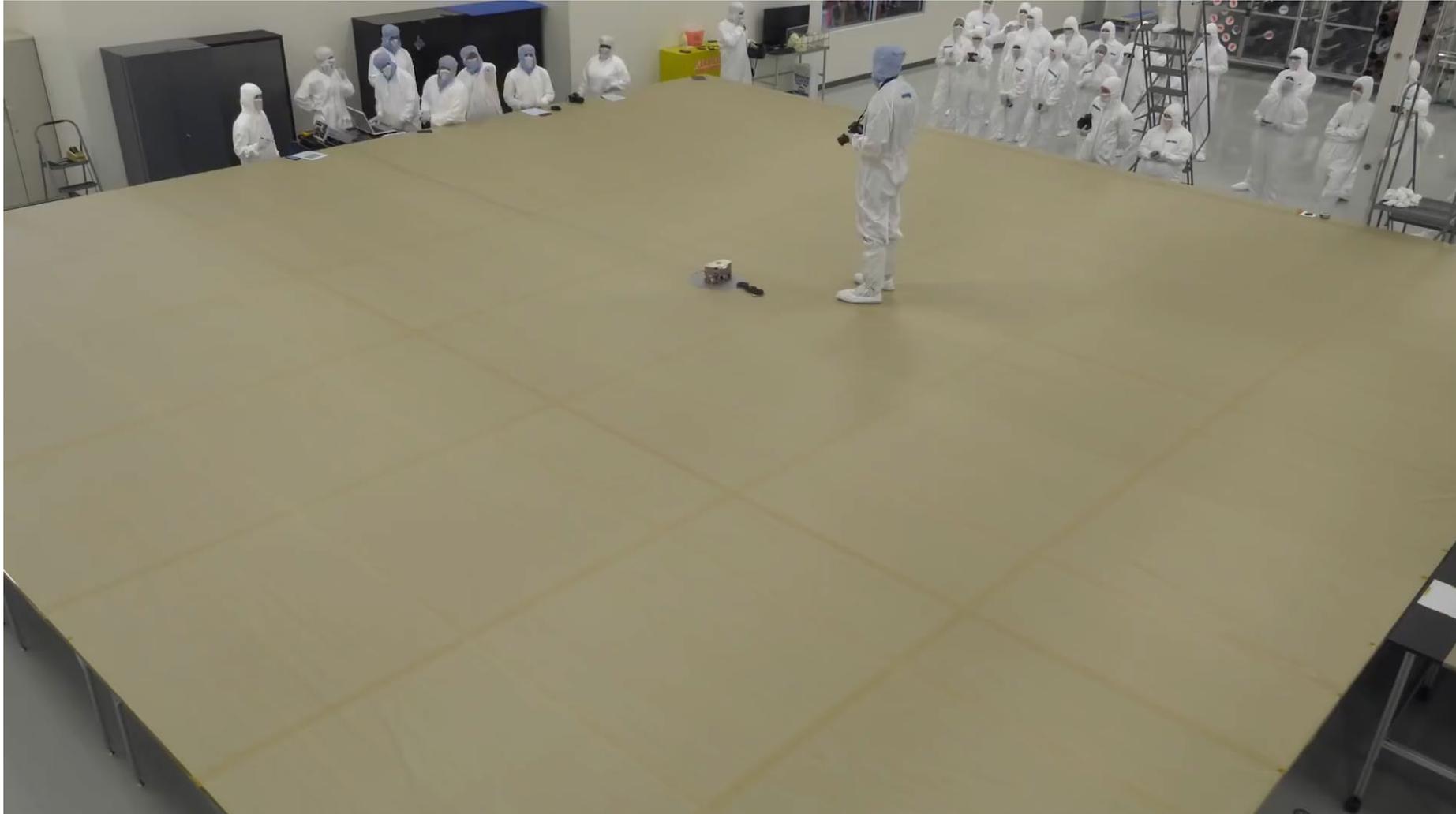
★ IKAROS (2010)



1.4 ソーラーセイル

1. 材料としての膜とは？
2. 構造部材としての膜とは？
3. 宇宙で膜構造(膜面構造)を使う場合の特徴は、「軽量で大面積で、かつ、折り畳みが容易」
4. その意味で、「収納」、「展開」、「展張」がポイント

★ NEA Scout



1.5 Sunshield

1. 材料としての膜とは？
2. 構造部材としての膜とは？
3. 宇宙で膜構造(膜面構造)を使う場合の特徴は、「軽量で大面積で、かつ、折り畳みが容易」
4. その意味で、「収納」、「展開」、「展張」がポイント

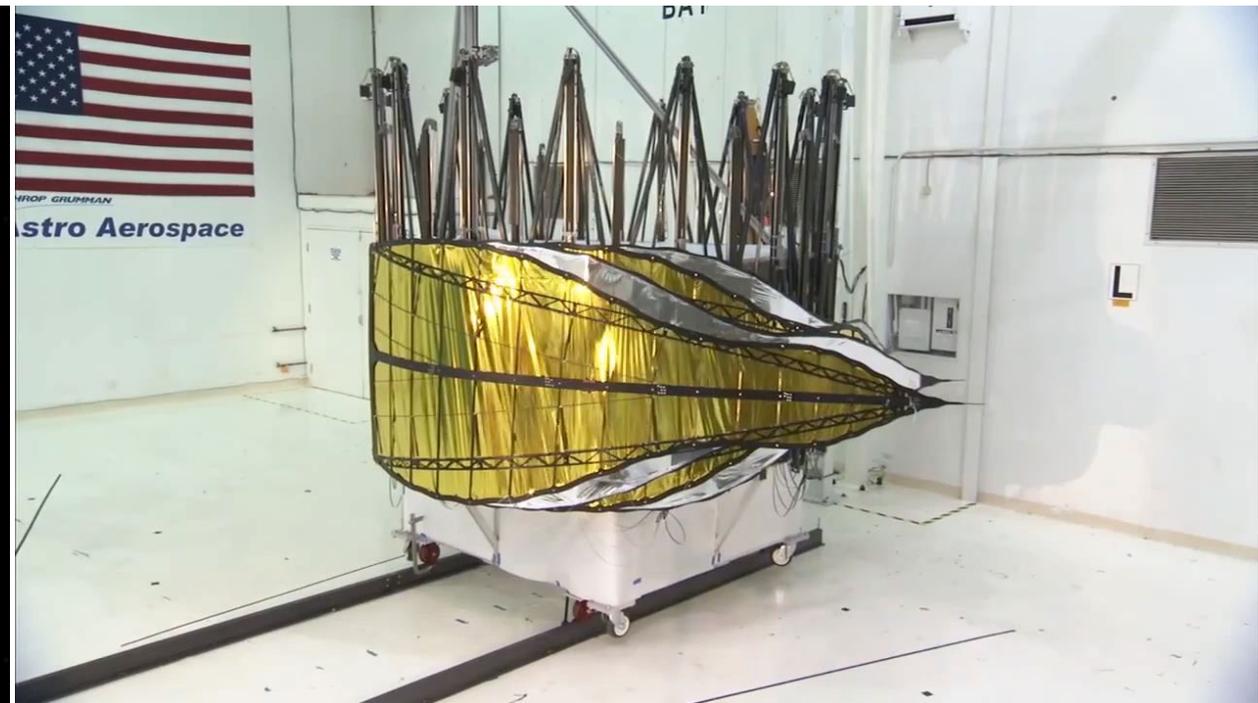
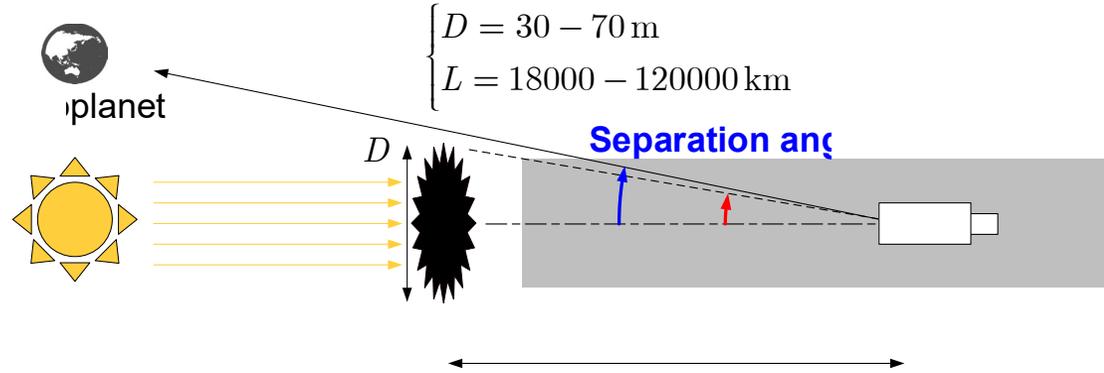
★ JWST



1.6 StarShade

1. 材料としての膜とは？
2. 構造部材としての膜とは？
3. 宇宙で膜構造(膜面構造)を使う場合の特徴は、「軽量で大面積で、かつ、折り畳みが容易」
4. その意味で、「収納」、「展開」、「展張」がポイント

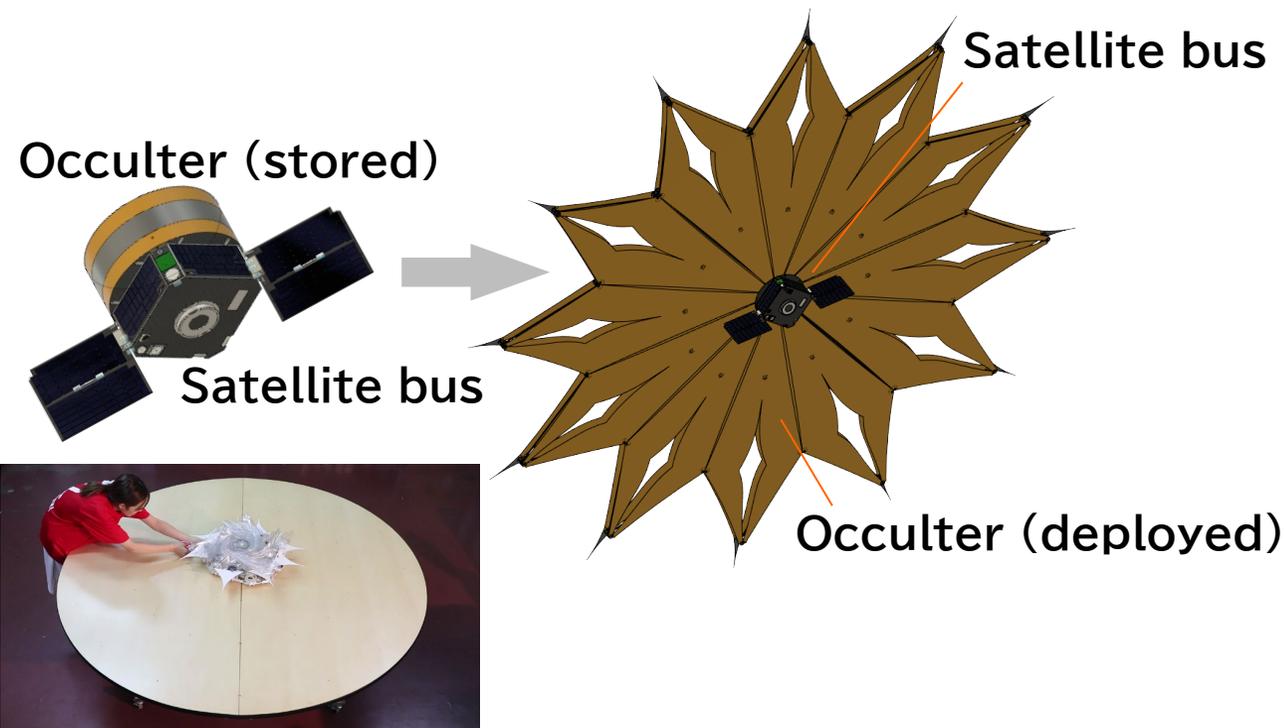
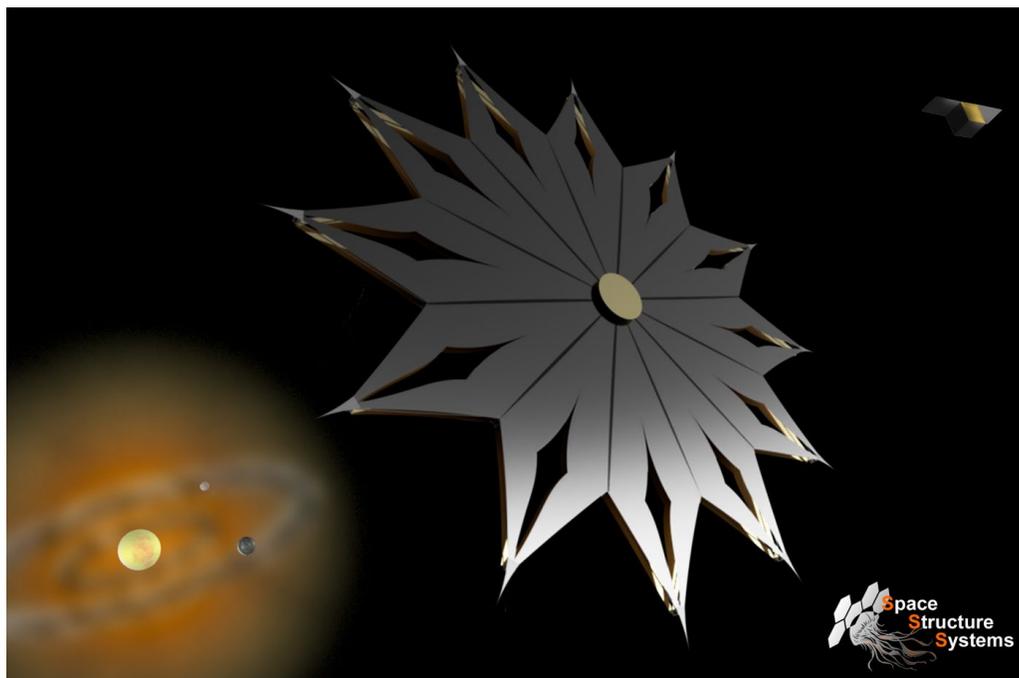
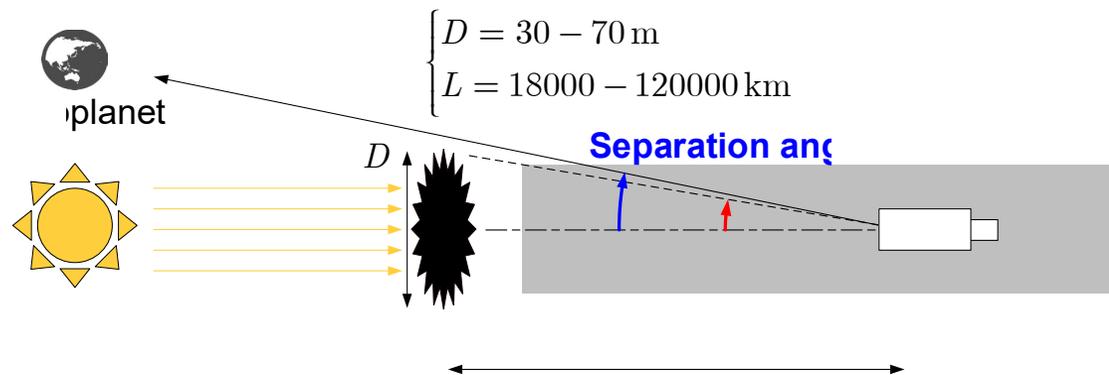
★ NASA



1.6 StarShade

1. 材料としての膜とは？
2. 構造部材としての膜とは？
3. 宇宙で膜構造(膜面構造)を使う場合の特徴は、「軽量で大面積で、かつ、折り畳みが容易」
4. その意味で、「収納」、「展開」、「展張」がポイント

★ 宮崎研



1. 膜面宇宙構造物の例

★ アンテナ

- メッシュアンテナ(ケーブルネットワーク+アンテナ鏡面用メッシュ+伸展マスト)
- メッシュアンテナ(ケーブルネットワーク+アンテナ鏡面用メッシュ+展開トラス)
- ラップリブ(wrap-lib)アンテナ(曲線梁+アンテナ鏡面用メッシュ)
- インフレータブルアンテナ(インフレータブル鏡面+支持マスト)

★ 太陽電池パドル(SAP)

- 蛇腹式(伸展マスト+蛇腹式太陽電池アレイ, ロールアップ・ブーム+蛇腹式太陽電池アレイ)
- ロールアップ式(ロールアップ・ブーム+ロールアップ・フレキシブル太陽電池)

★ 薄膜SAP

- 伸展マスト型(フレキシブル太陽電池+膜/メッシュ+伸展マスト)
- 展開トラス型(フレキシブル太陽電池+膜/メッシュ+展開トラス)

★ ソーラー(電力)セイル

- スピン展開型(セイル膜+スピン機構)
- マスト伸展型(セイル膜+伸展マスト)

★ サンシールド

- マスト伸展型(シールド膜+伸展マスト)

★ スターシェード

- 展開トラス型



2. 膜とは？

★材料としての膜とは？

極めて薄く、単体での座屈荷重が低い板状のもの

- 圧縮のみで脆性座屈は起こすが、塑性座屈には至らないのが「膜」
- ポリイミド等の高分子膜だけでなく、CFRPであろうがアルミであろうが、薄くすれば「膜」のはず
- 高分子材料系であれば、厚さはせいぜい50ミクロン程度以下？(特に定義はない)
- 例えばアルミの場合、アルミホイルで12ミクロン程度であるが、クシャクシャにすると塑性変形を起こすので、「膜」というイメージはないかもしれない。
- 一方、メッシュは「膜」とみなせる。

★構造部材としての膜とは？

面内応力のみで荷重を支える面状の構造部材

- 少々厚めの板であっても、曲げモーメント(およびせん断力)を負担しない「面状」の部材は「膜」と同等。
- 「板」と「膜」の違いは、曲げを負担するか否か。
- 実際、CFRPやアルミのシート状のものも、使われ方によっては「膜」とみなせる。
- 東京ドームですら、「膜」構造。
- とはいえ、荷重が想定から少しずれると曲げやせん断を支持してしまうものは「膜」という感じではない。
- その意味では、薄いポリイミドの膜であっても、宇宙では「板」の効果が大きくなる場合もある。



3. 宇宙で膜構造(膜面構造)を使う場合の特徴は？

★ 軽量で大面積で、かつ、折り畳みが容易

- そもそも、「軽量」, 「**大面積**」が膜構造の“売り”. これがないければ, 膜構造を宇宙で使う意味はほぼないでしょう.
- そうなると, 打ち上げの制約から, 「収納」は必須.
- 「収納」には「折り畳み」か「ロールアップ」がよく用いられる. ただし, ロールアップは, 収納効率がよくない.
- 「折り畳み」は, 「折り目を付ける」(= 塑性変形)か, 「ヒンジで結合する」のどちらかにするのが一般的.
- メッシュの場合, 面内変形(せん断)が容易であるので, 折り目とつけなくても小さく収納できるのが大きなメリット(その代わりに, “穴”があるので, ミッションによっては使えない場合もある).
- 収納するということは, 「展開」も必須.

★ 収納・展開・展張がポイント

- 収納時に応力が生じているか否かで展開特性が変わる場合がある(応力緩和, クリープ). 場合によっては展開しないかもしれない.
- 打上げ振動で破損しないかが心配(解析で予測できると楽).
- 破損しなかったとしても, 折りたたみ状態が変化していると, 展開特性が変わる可能性がある.
- 展開を準静的に行うのか, 動的に行うかで, 展開信頼性(信用度?)が異なる(現時点では, 準静的展開の方が安心感がある).
- 展開後, 膜面に張力を付加する(ピンと張る)必要があるか, たるんでいてもミッション遂行上, 問題がないかによって, 技術的困難さが異なる.
- 特に, 形状精度(面精度)が要求される場合, 要求精度に応じて技術的困難さが急激に高まる.



宇宙機開発応用B

第1講 大規模軽量膜面構造とは？

課題



- 課題** : 膜面宇宙構造物を1つ取り上げ, 次の点について考察しなさい。
ただし, 膜面宇宙構造物としては, 過去に実現しているもの, 打ち上げが予定されているもの, 研究中もののいずれでも構いません。
1. 膜面構造に課せられる要求事項(システム要求)
 2. 設計・開発したものがその要求事項を満足していることを確認するために必要な検証作業をまとめなさい。ただし, 設計段階(製造前)と, 試験段階(製造後)のそれぞれについてまとめなさい。
 3. 上記2で示した検証作業のそれぞれについて, 技術的に困難な点についてまとめなさい。

提出期限 : 2021年12月15日(水)

提出先 : miyazaki.yasuyuki@jaxa.jp



宇宙機開発応用B

第1講 大規模軽量膜面構造とは？

おわり



宇宙機開発応用 B

第2講 膜面構造物の解析法の概要

宮崎 康行

miyazaki.yasuyuki@jaxa.jp



第2講の全体構成

第1章 非線形有限要素法の考え方

第2章 平面応力場の運動方程式

第3章 膜面の解析法



宇宙機開発応用B

第2講 膜面構造物の解析法の概要

第1章 非線形有限要素法の考え方

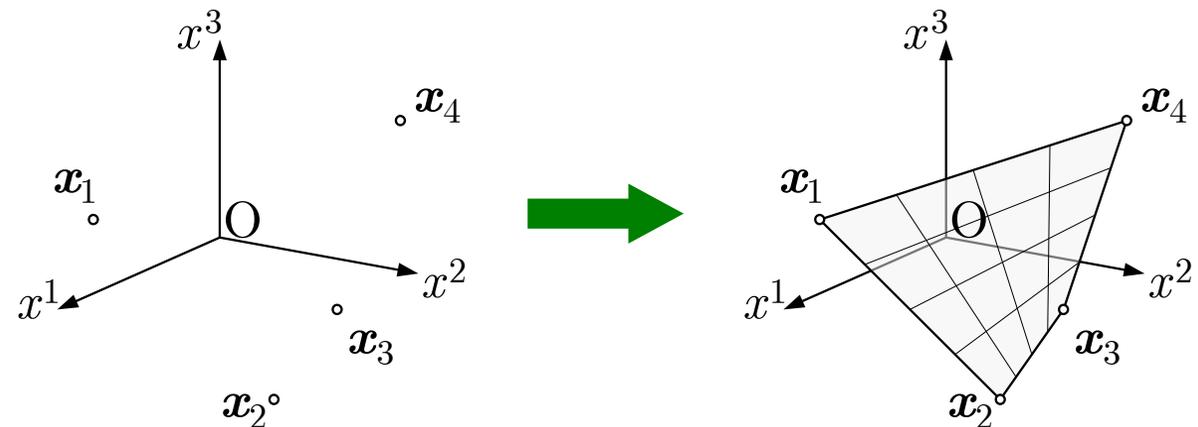
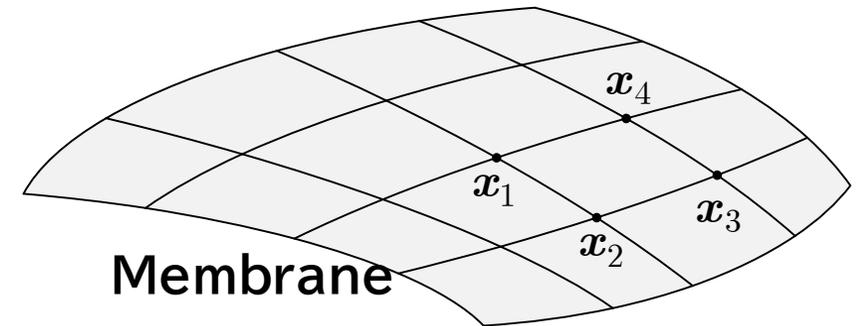


1. 有限要素法とは？

★有限要素法(変位法)のポイントは「補間」

- 連続体の自由度は無限大であり、運動方程式は偏微分方程式になるが、任意の境界条件を満たすように変形運動を解くことは困難.
- したがって、未知数を有限個にしたい.
- 何らかのモデル化(近似)により未知数を有限個に減らすことになるが、その方法の一つが有限要素法.
- 有限要素法にもいろいろあるが、基本的には、物体を有限個の「要素」に分割し、分割点(節点)での状態を未知数とする.
- 膜面の変形運動であれば、節点位置(座標)を未知数とするのが一般的.
- そして、要素内の任意の点の位置は、節点の位置の関数として「補間」する.
- したがって、節点位置が求めれば、物体内の任意の点の位置が求まることになる.

- 補間方法としては、最もシンプルなのは「4節点四角形要素」や「3節点三角形要素」



1. 有限要素法とは？

★有限要素法(変位法)のポイントは「補間」

4節点四角形要素の場合,

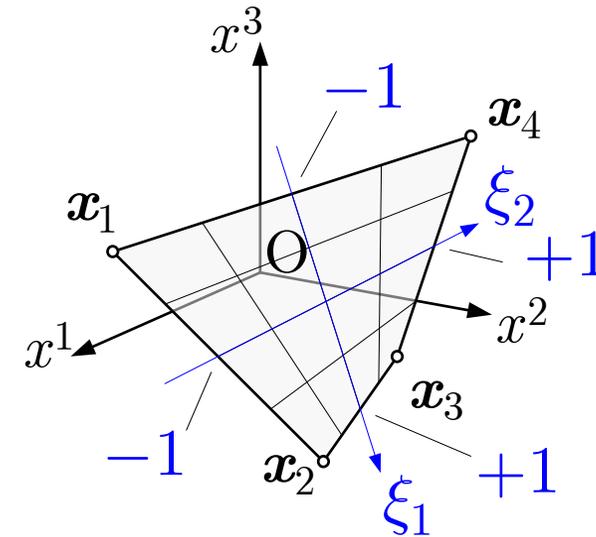
$$\boldsymbol{x}(\xi_1, \xi_2) = \boldsymbol{a} + \xi_1 \boldsymbol{b} + \xi_2 \boldsymbol{c} + \xi_1 \xi_2 \boldsymbol{d} \quad (2.1.1)$$

ただし,

$$\begin{cases} \boldsymbol{x}(-1, -1) = \boldsymbol{x}_1, & \boldsymbol{x}(+1, -1) = \boldsymbol{x}_2 \\ \boldsymbol{x}(+1, +1) = \boldsymbol{x}_3, & \boldsymbol{x}(-1, +1) = \boldsymbol{x}_4 \end{cases} \quad (2.1.2)$$

したがって,

$$\begin{aligned} \boldsymbol{x} &= \frac{(1 - \xi_1)(1 - \xi_2)}{4} \boldsymbol{x}_1 + \frac{(1 + \xi_1)(1 - \xi_2)}{4} \boldsymbol{x}_2 \\ &\quad + \frac{(1 + \xi_1)(1 + \xi_2)}{4} \boldsymbol{x}_3 + \frac{(1 - \xi_1)(1 + \xi_2)}{4} \boldsymbol{x}_4 \\ &= \frac{(1 + \xi_1^n \xi_1)(1 + \xi_2^n \xi_2)}{4} \boldsymbol{x}_n \equiv N_n \boldsymbol{x}_n \end{aligned} \quad (2.1.3)$$



1. 有限要素法とは？

★有限要素法(変位法)のポイントは「補間」

物体内の任意の点 x における平衡方程式を

$$f(x) = 0 \quad (2.1.4)$$

とすれば,

$$\iiint_{B_0} f(x) \cdot \delta x dV = 0 \quad (2.1.5)$$

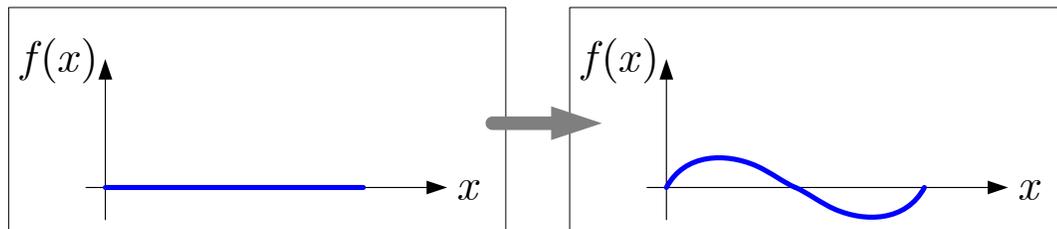
厳密には δx は任意の値を取れなければならないが、有限要素法では

$$\delta x = N_i \delta x_i \quad (2.1.6)$$

としているので,

$$\iiint_{B_0} N_i f(x) dV = 0 \quad (2.1.7)$$

つまり、任意の点で 0 にはならないが、平均的には 0 になる、というものが有限要素法。



2. 非線形有限要素解析の基本的な流れ

★ エネルギーさえ定式化できれば、あとはLagrange方程式に持ち込むだけ

- ① **未知数**と、エネルギーの算出に必要なとなる、任意の点の位置ベクトルを出す式（**補間式**）を決定
 - 膜の場合は 節点の絶対座標を未知数とするのが一般的
 - 膜の場合は、補間は双一次補間、板厚方向は変形後も断面に垂直であると仮定
 - ポアソン比の影響による板厚方向の伸縮は無視
- ② 任意の点の**速度ベクトル**を定式化
- ③ **運動エネルギー**の定式化
 - 膜の場合、いわゆる回転慣性は無視するのが一般的
- ④ **ポテンシャルエネルギー**（歪エネルギー）を定式化
 - 1) 歪を定式化
 - 膜の場合はGreen-Lagrange歪を使うのが一般的
 - 2) 応力 – 歪関係を仮定

3) 応力を定式化し、歪エネルギーを定式化。ただし、曲げエネルギーを無視するのが一般的

⑤ **運動方程式**を定式化

– あとはLagrange方程式に持ち込むだけ（私は、数値安定性を考慮し、構造保存型解法の一つである、エネルギー・モーメント法（EM法）により離散運動方程式を定式化しています）

⑥ **運動方程式の解法**の決定 & そのための定式化

– 非線形方程式になる

– 一般的にはNewton法で解いており、接線行列を導出



宇宙機開発応用B

第2講 膜面構造物の解析法の概要

第2章 平面応力場の運動方程式

数式がずらずらと出てきますが, ここは, 「流れ」だけをおさえてもらえればと思います.



1. 運動エネルギー

★位置ベクトル

法線方向の変形は無視するのが膜要素。

位置ベクトルは

$$\tilde{\mathbf{X}} = \mathbf{X} + \frac{h}{2}\xi^3\mathbf{N}, \quad \tilde{\mathbf{x}} = \mathbf{x} + \frac{h}{2}\xi^3\mathbf{n} \quad (2.2.1)$$

ただし,

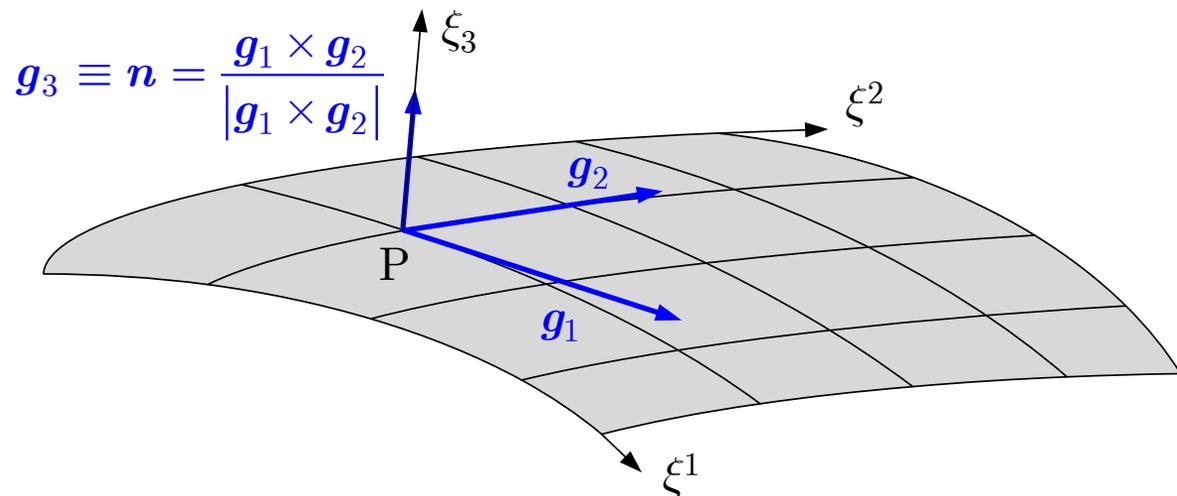
$$\begin{cases} \mathbf{X} = N_m \mathbf{X}_m, & \mathbf{x} = N_m \mathbf{x}_m \\ \mathbf{G}_\alpha = \frac{\partial N_m}{\partial \xi^\alpha} \mathbf{X}_m, & \mathbf{N} = \frac{\mathbf{G}_1 \times \mathbf{G}_2}{|\mathbf{G}_1 \times \mathbf{G}_2|} \\ \mathbf{g}_\alpha = \frac{\partial N_m}{\partial \xi^\alpha} \mathbf{x}_m, & \mathbf{n} = \frac{\mathbf{g}_1 \times \mathbf{g}_2}{|\mathbf{g}_1 \times \mathbf{g}_2|} \end{cases} \quad (2.2.2)$$

共変基底は

$$\begin{cases} \tilde{\mathbf{G}}_\alpha = \mathbf{G}_\alpha + \frac{h}{2}\xi^3 \frac{\partial \mathbf{N}}{\partial \xi^\alpha} = \mathbf{G}_\alpha \\ \tilde{\mathbf{G}}_3 = \mathbf{G}_3 = \frac{h}{2}\mathbf{N} \\ \tilde{\mathbf{g}}_\alpha = \mathbf{g}_\alpha + \frac{h}{2}\xi^3 \frac{\partial \mathbf{n}}{\partial \xi^\alpha} \approx \mathbf{g}_\alpha, & \tilde{\mathbf{g}}_3 = \mathbf{g}_3 = \frac{h}{2}\mathbf{n} \end{cases} \quad (2.2.3)$$

微小体積は

$$\begin{aligned} dV &= [(\tilde{\mathbf{G}}_1 \times \tilde{\mathbf{G}}_2) \cdot \tilde{\mathbf{G}}_3] d\xi^1 d\xi^2 d\xi^3 \\ &\approx [(\mathbf{G}_1 \times \mathbf{G}_2) \cdot \mathbf{G}_3] d\xi^1 d\xi^2 d\xi^3 \\ &= \frac{h}{2} |\mathbf{G}_1 \times \mathbf{G}_2| d\xi^1 d\xi^2 d\xi^3 \end{aligned} \quad (2.2.4)$$



1. 運動エネルギー

★ 運動エネルギー

運動エネルギーは

$$\begin{aligned} T &= \int_{-1}^1 \left[\int_{-1}^1 \left(\int_{-1}^1 \frac{1}{2} \rho \dot{\mathbf{x}}^2 \frac{h}{2} |\mathbf{G}_1 \times \mathbf{G}_2| d\xi^3 \right) d\xi^1 \right] d\xi^2 \\ &\approx \int_{-1}^1 \left[\int_{-1}^1 \left(\int_{-1}^1 \frac{1}{2} \rho \dot{\mathbf{x}}^2 \frac{h}{2} |\mathbf{G}_1 \times \mathbf{G}_2| d\xi^3 \right) d\xi^1 \right] d\xi^2 \\ &= h \int_{-1}^1 \left[\int_{-1}^1 \frac{1}{2} \rho \dot{\mathbf{x}}^2 |\mathbf{G}_1 \times \mathbf{G}_2| d\xi^1 \right] d\xi^2 \\ &= \frac{1}{2} M_{\alpha\beta} \dot{\mathbf{x}}_\alpha \cdot \dot{\mathbf{x}}_\beta \end{aligned} \quad (2.2.5)$$

ただし,

$$M_{\alpha\beta} = h \int_{-1}^1 \left[\int_{-1}^1 \rho N_m N_n |\mathbf{G}_1 \times \mathbf{G}_2| d\xi^1 \right] d\xi^2 \quad (2.2.6)$$

密度が一定であれば,

$$M_{\alpha\beta} = \frac{M}{6} \begin{bmatrix} 2 & 1 \\ 1 & 2 \end{bmatrix} \quad (2.2.7)$$



2. 平面応力場における仮想仕事の原理と歪エネルギー

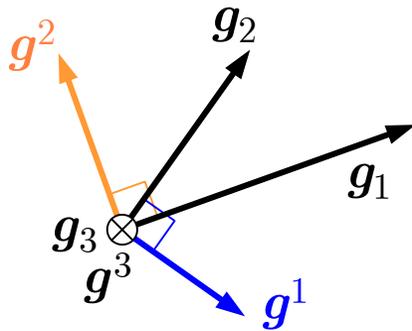
★ 共変基底と反変基底

共変基底ベクトル (g_i, G_i) は、位置ベクトル局所座標 ξ^i で微分したもの。反変基底ベクトルは

$$G^i \cdot G_j = \delta_{ij} \quad (2.2.8)$$

具体的には、

$$\begin{cases} G^1 = \frac{G_2 \times G_3}{G_1 \cdot (G_2 \times G_3)} = \frac{G_2 \times (G_1 \times G_2)}{|G_1 \times G_2|^2} \\ G^2 = \frac{G_3 \times G_1}{G_2 \cdot (G_3 \times G_1)} = -\frac{G_1 \times (G_1 \times G_2)}{|G_1 \times G_2|^2} \end{cases} \quad (2.2.9)$$

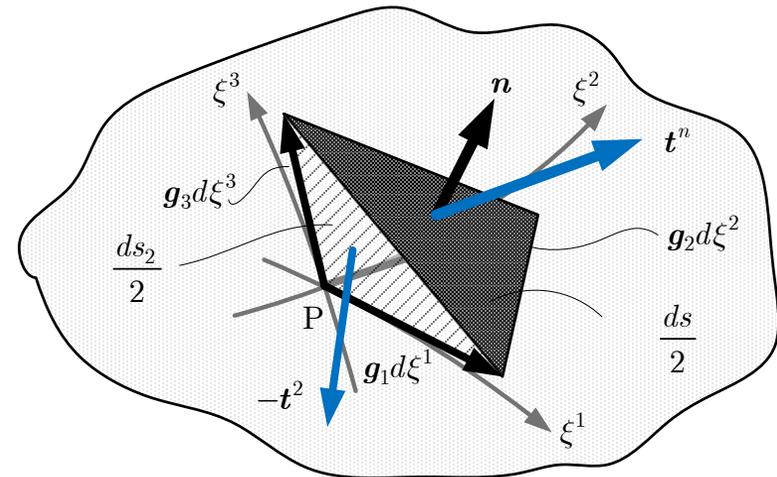


★ Cauchy応力テンソル

一般に、弾性体内の微小部分の力のつり合いを考えると、変形後の弾性体内の任意の点Pにおいて、その点を通る微小断面に作用する応力ベクトル t^n 、すなわち、微小断面に作用する力ベクトルをその微小面積で割ったベクトル) は次式で書けることがわかる。

$$t^n = T^T n \quad (2.2.10)$$

ただし、 T は点Pで定義されたCauchy応力テンソルであり、 n は微小断面の単位法線ベクトルである。



2. 平面応力場における仮想仕事の原理と歪エネルギー

★ 変形後の微小平行六面体のつり合い

モーメントのつり合いより,

$$\mathbf{T}^T = \mathbf{T} \quad (2.2.11)$$

そして, 力のつり合いより,

$$\frac{\partial \mathbf{T}}{\partial \xi^i} g^i dv + f dv = 0 \quad (2.2.12)$$

拘束力 dF_c がある場合には,

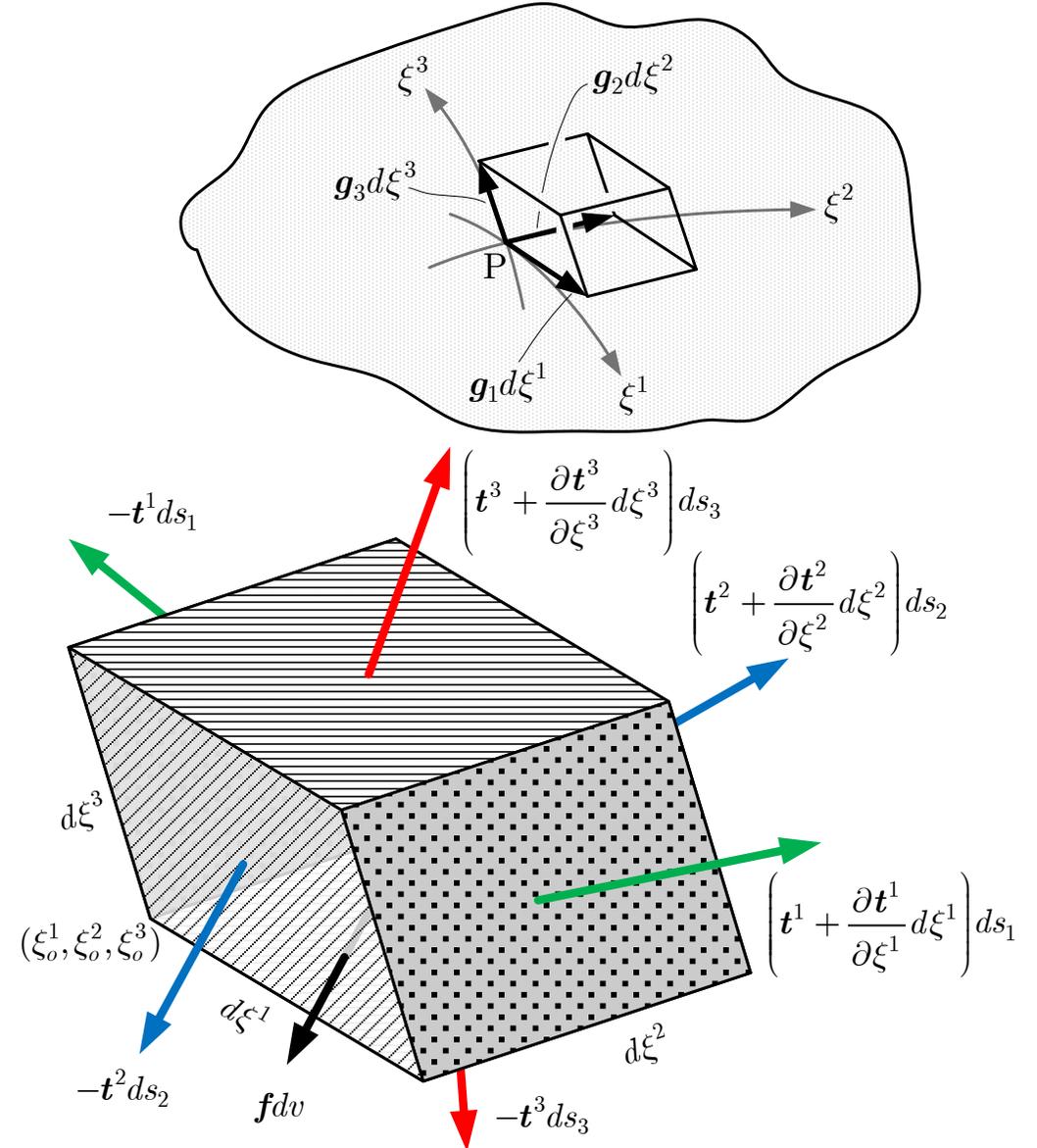
$$\frac{\partial \mathbf{T}}{\partial \xi^i} g^i dv + f dv + dF_c = 0 \quad (2.2.13)$$

d'Alembertの原理 (拘束力は仕事をしない) より,

$$-\int_B (\nabla \cdot \mathbf{T} + \mathbf{f}) dv \cdot \delta \mathbf{x} = 0 \quad (2.2.14)$$

★ 境界条件

$$\begin{cases} \mathbf{x} \in \partial B^\sigma : \mathbf{T} \mathbf{n} = \tilde{\mathbf{t}}^n \\ \mathbf{x} \in \partial B^u : \mathbf{x} = \tilde{\mathbf{x}} \end{cases} \quad (2.2.15)$$



2. 平面応力場における仮想仕事の原理と歪エネルギー

★ 仮想仕事の原理

式(2.2.14)を部分積分して,(2.2.15)を用いると,

$$\int_B T^{ij} \delta E_{ij} dv = \int_{\partial B^\sigma} \tilde{t}^n \cdot \delta x ds + \int_B f \cdot \delta x dv \quad (2.2.16)$$

ただし, T^{ij} は T の成分

$$T = T^{ij} g_i \otimes g_j = T^{ij} g_i g_j^T \quad (2.2.17)$$

であり,

$$E_{ij} \equiv \frac{1}{2} (g_i \cdot g_j - G_i \cdot G_j) \quad (2.2.18)$$

E_{ij} は Green-Lagrange歪と呼ばれる。なお, T^{11} が第1軸方向の垂直応力 (σ^{xx}), T^{12} は第1軸に垂直な面に作用する第2軸方向のせん断応力 (σ^{xy}), E_{11} が第1軸方向の垂直歪 (ε_{xx}), E_{12} は第1軸に垂直な面に生じる第2軸方向のせん断歪 (γ_{xy}) の半分。

式(2.2.16)の左辺の積分を変形前の座標系に変換できれば計算が楽になる・・・

★ 変形前の座標系での仮想仕事の原理

体積膨張率は

$$dv = \frac{g_1 \cdot (g_2 \times g_3)}{G_1 \cdot (G_2 \times G_3)} = \frac{|g_1 \times g_2|}{|G_1 \times G_2|} dV \quad (2.2.19)$$

したがって, 式(2.2.16)より,

$$\int_{B_0} S^{ij} \delta E_{ij} dV = \int_{\partial B_0^\sigma} \tilde{t}^n \cdot \delta x ds + \int_B f \cdot \delta x dv \quad (2.2.20)$$

ただし,

$$S^{ij} \equiv \frac{|g_1 \times g_2|}{|G_1 \times G_2|} T^{ij} \quad (2.2.21)$$

は第二Piola-Kirchhoff応力と呼ばれ,

$$S \equiv S^{ij} G_i \otimes G_j \quad (2.2.22)$$

は第二Piola-Kirchhoff応力テンソルと呼ばれる。

ちなみに,

$$E \equiv E_{ij} G^i \otimes G^j \quad (2.2.23)$$

はGreen-Lagrange歪テンソルと呼ばれる。

では, 膜の場合は?



2. 平面応力場における仮想仕事の原理と歪エネルギー

★ 膜の場合の仮想仕事の原理

膜の場合，平面応力を仮定するので，第3軸方向の応力は0.

$$\int_{B_0} S^{\alpha\beta} \delta E_{\alpha\beta} dV = \int_{\partial B^0} \underline{t}^n \cdot \delta \underline{x} ds + \int_B \underline{f} \cdot \delta \underline{x} dv \quad (2.2.24)$$

左辺は内力による仮想仕事，右辺第1項は圧力などの表面力による仮想仕事． 右辺第2項は重力など体積力による仮想仕事．

★ 正規直交系での弾性マトリクス

$$\begin{bmatrix} S_o^{11} \\ S_o^{22} \\ S_o^{12} \end{bmatrix} = \frac{E}{1-\nu^2} \begin{bmatrix} 1 & \nu & 0 \\ \nu & 1 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1-\nu}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_{11}^o \\ E_{22}^o \\ 2E_{12}^o \end{bmatrix} \quad (2.2.25)$$

であり，

$$\tilde{S}_o \equiv \begin{bmatrix} S_o^{11} \\ S_o^{22} \\ S_o^{12} \end{bmatrix}, \quad \tilde{E}_o \equiv \begin{bmatrix} E_{11}^o \\ E_{22}^o \\ 2E_{12}^o \end{bmatrix} \quad (2.2.26)$$

$$\tilde{C}_o \equiv \frac{E}{1-\nu^2} \begin{bmatrix} 1 & \nu & 0 \\ \nu & 1 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1-\nu}{2} \end{bmatrix} \quad (2.2.27)$$

では，任意の座標系での弾性マトリクスは？



2. 平面応力場における仮想仕事の原理と歪エネルギー

★ 弾性マトリクスの座標変換

正規直交系での応力テンソル成分が S_o^{ij} , 歪テンソル成分が $E_{k\ell}^o$, 弾性テンソル成分が C_o^{ijkl} であるとき,

$$\begin{cases} \mathbf{S} = S^{ij} \mathbf{G}_i \otimes \mathbf{G}_j = S_o^{i'j'} \mathbf{E}_{i'} \otimes \mathbf{E}_{j'} \\ \mathbf{E} = E_{k\ell} \mathbf{G}^k \otimes \mathbf{G}^\ell = E_{k'\ell'}^o \mathbf{E}^{k'} \otimes \mathbf{E}^{\ell'} \\ S_o^{i'j'} = C_o^{i'j'k'\ell'} E_{k'\ell'}^o \end{cases} \quad (2.2.28)$$

であることから,

$$C^{ijkl} = C_o^{i'j'k'\ell'} (\mathbf{E}_{k'} \cdot \mathbf{G}^k) (\mathbf{E}_{\ell'} \cdot \mathbf{G}^\ell) (\mathbf{E}_{j'} \cdot \mathbf{G}^j) (\mathbf{E}_{i'} \cdot \mathbf{G}^i) \quad (2.2.29)$$

★ 平面応力場の弾性マトリクス

$$\begin{cases} \tilde{\mathbf{S}} = \begin{bmatrix} \tilde{S}^1 \\ \tilde{S}^2 \\ \tilde{S}^3 \end{bmatrix} \equiv \begin{bmatrix} S^{11} \\ S^{22} \\ S^{12} \end{bmatrix}, \quad \tilde{\mathbf{E}} = \begin{bmatrix} \tilde{E}_1 \\ \tilde{E}_2 \\ \tilde{E}_3 \end{bmatrix} \equiv \begin{bmatrix} E_{11} \\ E_{22} \\ 2E_{12} \end{bmatrix}, \quad \tilde{\mathbf{S}} = \tilde{\mathbf{C}} \tilde{\mathbf{E}} \\ \tilde{\mathbf{C}} = \begin{bmatrix} \tilde{C}^{11} & \tilde{C}^{12} & \tilde{C}^{13} \\ \tilde{C}^{21} & \tilde{C}^{22} & \tilde{C}^{23} \\ \tilde{C}^{31} & \tilde{C}^{32} & \tilde{C}^{33} \end{bmatrix} \equiv \begin{bmatrix} C^{1111} & C^{1122} & C^{1112} \\ C^{2211} & C^{2222} & C^{2212} \\ C^{1211} & C^{1222} & C^{1221} \end{bmatrix} \end{cases} \quad (2.2.30)$$

$$\tilde{\mathbf{C}} = \frac{E}{(1-\nu^2) |\mathbf{G}_1 \times \mathbf{G}_2|^4} \times \begin{bmatrix} (G_{22})^2 & \begin{cases} (1-\nu)(G_{12})^2 \\ +\nu G_{11} G_{22} \end{cases} & -G_{22} G_{12} \\ & (G_{11})^2 & -G_{11} G_{12} \\ sym. & & \begin{cases} \frac{1-\nu}{2} G_{11} G_{22} \\ + \frac{1+\nu}{2} (G_{12})^2 \end{cases} \end{bmatrix} \quad (2.2.31)$$



2. 平面応力場における仮想仕事の原理と歪エネルギー

★歪エネルギーの定義

仮想仕事の原理

$$\int_{B_0} S^{\alpha\beta} \delta E_{\alpha\beta} dV = \int_{\partial B^0} \underline{t}^n \cdot \delta \underline{x} ds + \int_B \underline{f} \cdot \delta \underline{x} dv \quad (2.2.24)$$

において,

$$\delta U \equiv \int_{B_0} S^{\alpha\beta} \delta E_{\alpha\beta} dV \quad (2.2.25)$$

を満たす U が存在したとしたら, U を歪エネルギーと呼ぶ。いま,

$$S^{\alpha\beta} \delta E_{\alpha\beta} = \tilde{S}^i \delta E_i = \tilde{C}^{ij} E_j \delta E_i \quad (2.2.26)$$

であるので,

$$\begin{aligned} \int_{B_0} S^{\alpha\beta} \delta E_{\alpha\beta} dV &= \int_{B_0} \tilde{C}^{ij} E_j \delta E_i dV \\ &= \delta \left[\frac{1}{2} \int_{B_0} \tilde{C}^{ij} E_i E_j dV \right] \end{aligned} \quad (2.2.27)$$

したがって,

$$U \equiv \frac{1}{2} \int_{B_0} \tilde{C}^{ij} E_i E_j dV \quad (2.2.28)$$



3. 運動方程式

★ Lagrange方程式

Lagrangianを L とすれば,

$$L = T - U = \frac{1}{2} M_{\alpha\beta} \dot{\mathbf{x}}_{\alpha} \cdot \dot{\mathbf{x}}_{\beta} - \frac{1}{2} \int_{B_0} \tilde{C}^{ij} E_i E_j dV \quad (2.2.29)$$

であり, 最小作用の原理から

$$\int_{t_0}^t \delta L dt + \int_{t_0}^t \left[\int_{\partial B^{\sigma}} \tilde{\mathbf{t}}^n \cdot \delta \mathbf{x} ds + \int_B \mathbf{f} \cdot \delta \mathbf{x} dv \right] dt = 0 \quad (2.2.30)$$

であるので, 未知数ベクトル (配位変数, 一般化座標) を \mathbf{z} とすれば, 結局,

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{\mathbf{z}}} \right)^T - \left(\frac{\partial L}{\partial \mathbf{z}} \right)^T \\ = \int_{\partial B^{\sigma}} \tilde{\mathbf{t}}^n \cdot \frac{\partial \mathbf{x}}{\partial \mathbf{z}} ds + \int_B \mathbf{f} \cdot \frac{\partial \mathbf{x}}{\partial \mathbf{z}} dv \end{aligned} \quad (2.2.31)$$

★ 平面応力場の特徴

歪の厚さ方向の変化を無視しているため, 曲げやねじりを模擬できない。

これにより, 要素は局所的な曲げ・ねじりのみならず, 面外方向の力(せん断力)を支えることができなくなる。このため, **平面応力要素では座屈後の面外変形を模擬できない。**

それだけでなく, **座屈後の面内力の減少も模擬できない。**



宇宙機開発応用B

第2講 膜面構造物の解析法の概要

第3章 膜面の解析法



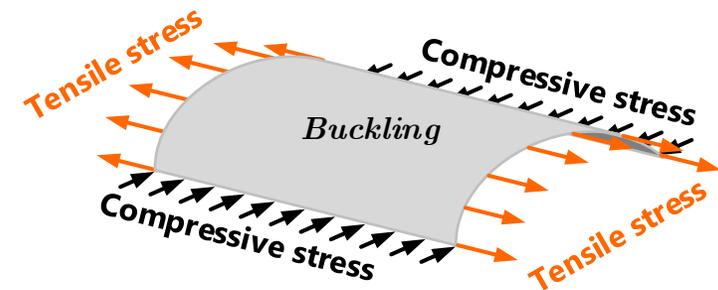
1. 膜要素

★ 膜要素の特徴

- 一般的な膜要素では、圧縮荷重が作用すると、だちに座屈をすると仮定する。すなわち、座屈応力を -0 とする。
- 座屈判定をする際は、平面応力問題における主応力を算出する必要がある。
- つまり、平面応力問題を解く過程において、2つの主応力を計算したところ、一方の値が負になっていた場合、本来ならば面外変形を起こすはずであるが、膜要素では面外変形を無視し、面内変形のみが起こるものとする(というか、面内変形しか起きない)。
- この場合、座屈後の圧縮応力を 0 とするのが一般的な膜要素であるが、ここでは、圧縮剛性が一定で、かつ、引張剛性に比べて非常に小さいものと仮定する。

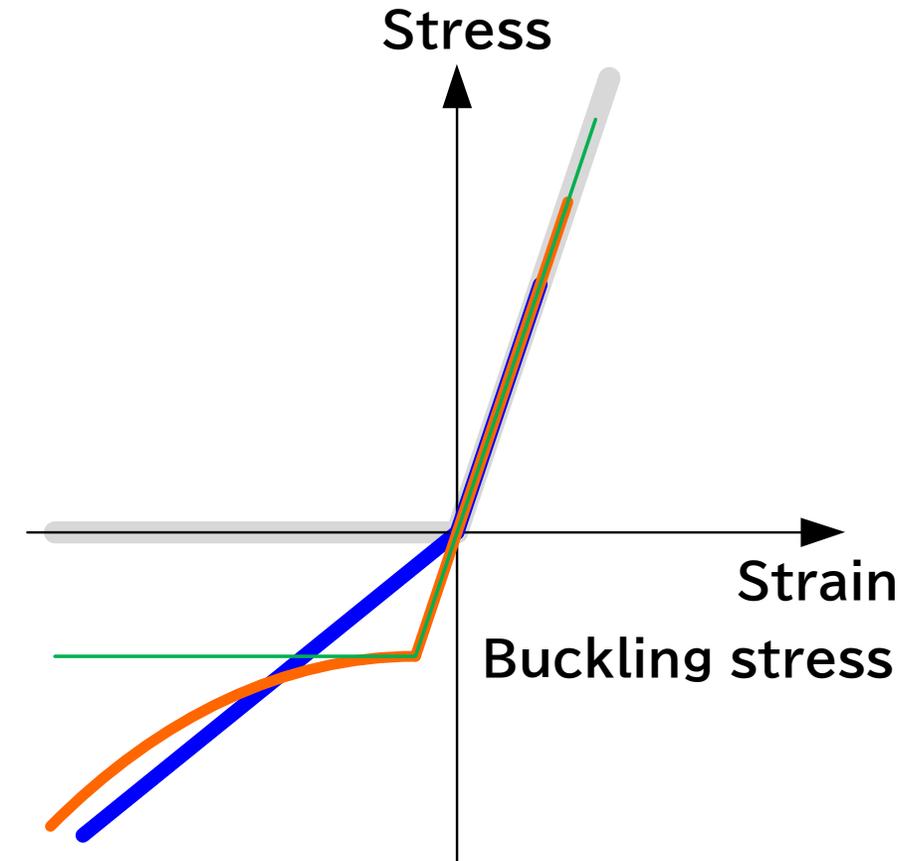
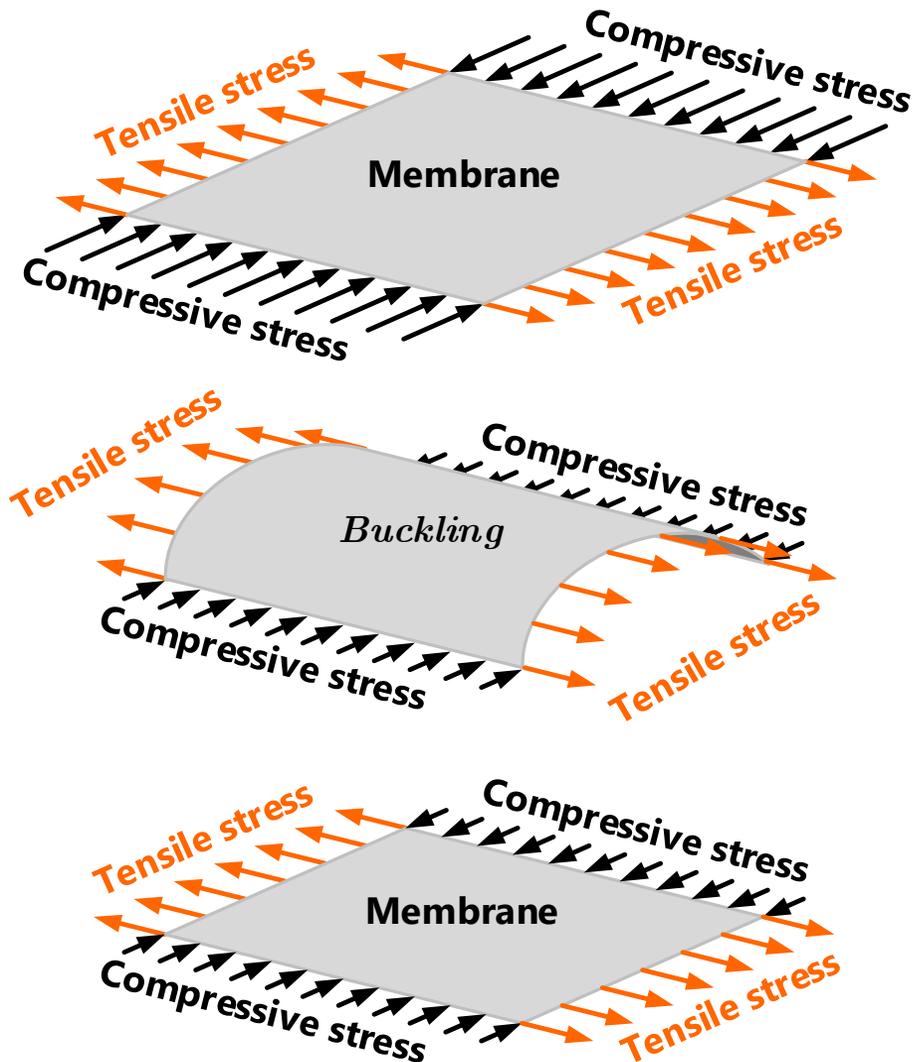
- つまり、本来は、圧縮応力は圧縮歪の非線形な関数になるはずであるが、ここでは線形であると仮定する。
- なお、座屈荷重を -0 とせず、座屈後の圧縮応力を圧縮歪の非線形関数にする場合や、圧縮応力を一定と仮定する場合については、以下の論文を参照。

Shoko Arita, Takumi Okumiya, and Yasuyuki Miyazaki, "Numerical model for prediction of wrinkling behavior on a thin-membrane structure", Mechanical Engineering Journal, Vo.1, No.4, Paper No.13-00086, pp.1-16, 2014, DOI: 10.1299/mej.2014se0041.



1. 膜要素

★ 膜要素の特徴

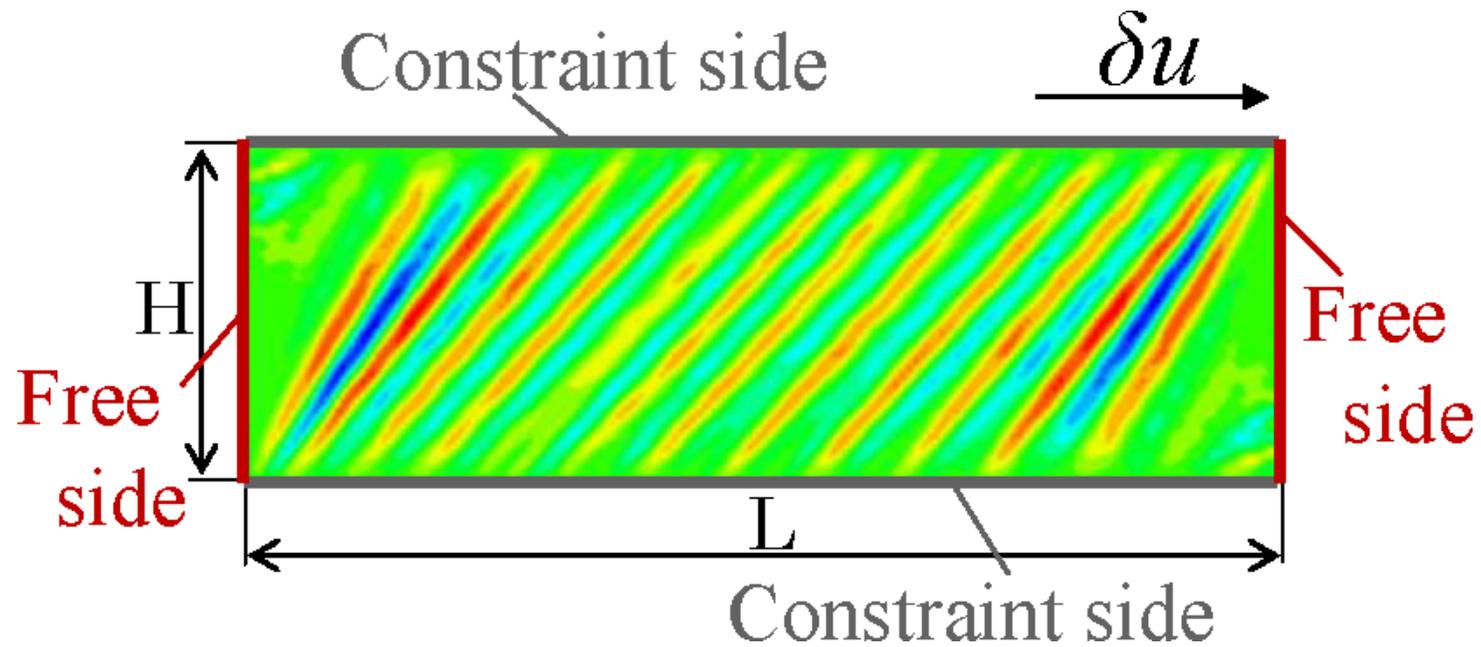


Conventional Membrane Model
Maximum Compressive Stress Model
Stiffness Reduction Model
Modified Stiffness Reduction Model



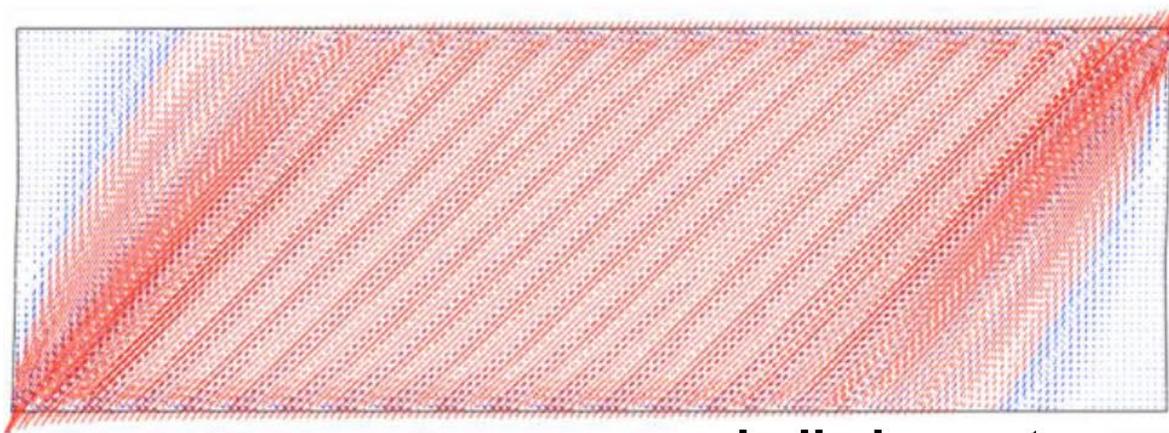
1. 膜要素

★ 膜要素の特徴

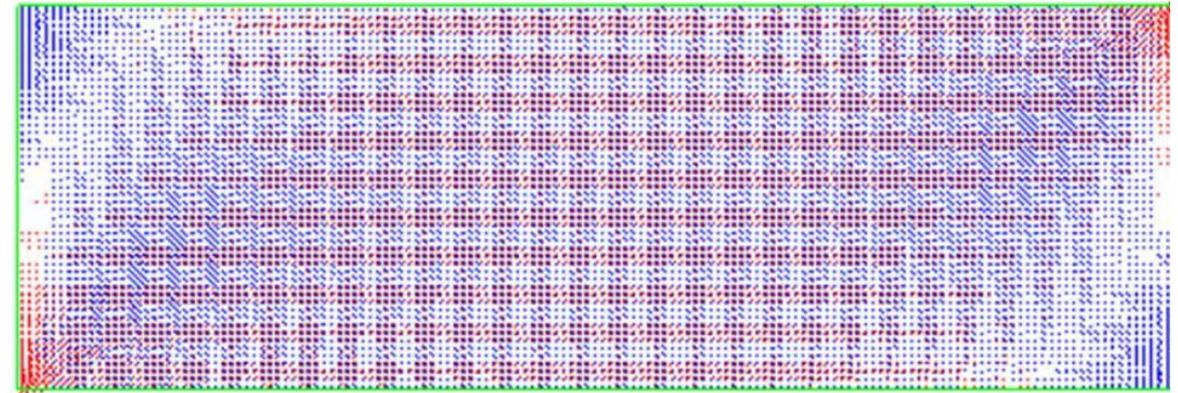


1. 膜要素

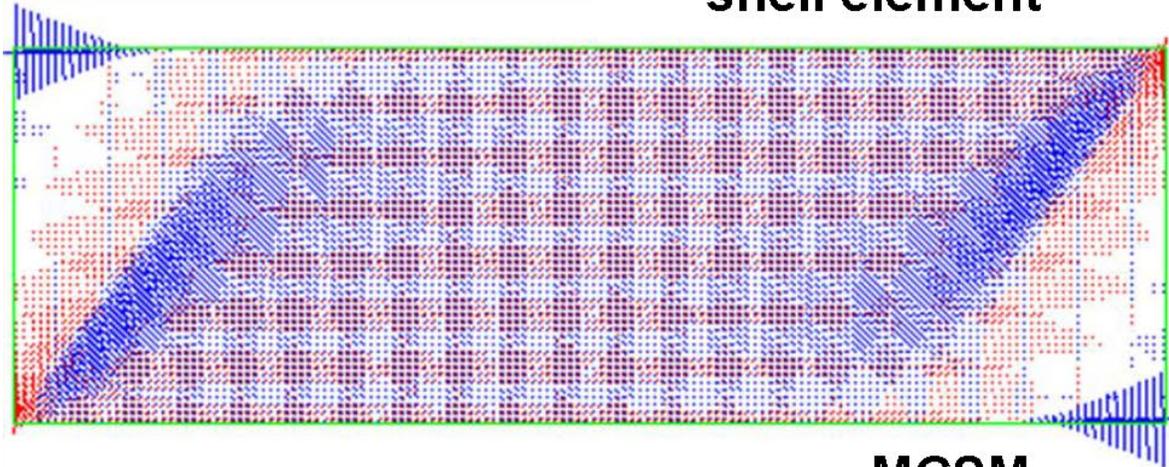
★ 膜要素の特徴



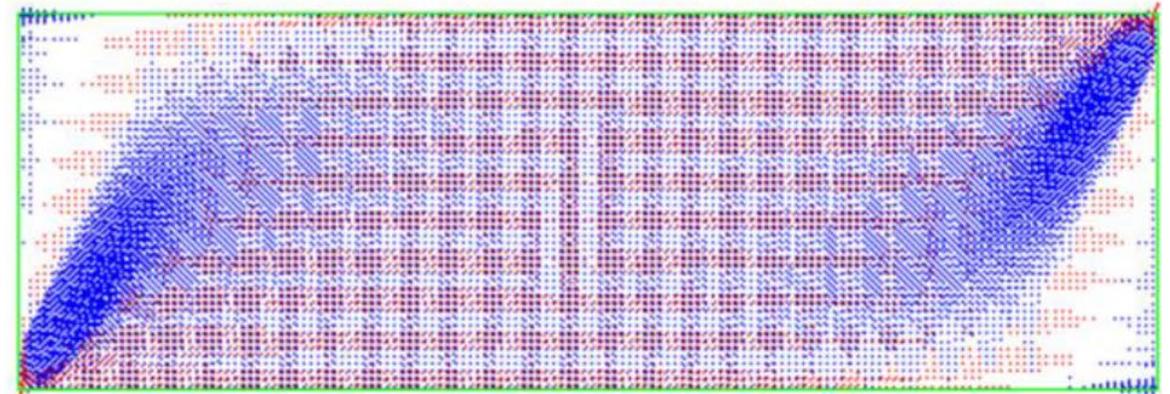
shell element



SRM



MCSM



Mod-SRM

2. 構成則

★ wrinkle判定と構成則

等方性の場合, 主応力方向と主歪方向が一致し, 主応力 τ_α と主歪 γ_α との関係は, 二軸引張の場合であれば,

$$\begin{bmatrix} \tau_1 \\ \tau_2 \end{bmatrix} = \frac{E}{1-\nu^2} \begin{bmatrix} 1 & \nu \\ \nu & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \gamma_1 \\ \gamma_2 \end{bmatrix} \quad (2.3.1)$$

したがって, 主歪を計算すれば, 座屈判定等ができる.

※ 異方性の場合については, 以下の論文を参照.

Yasuyuki Miyazaki, "Wrinkle/Slack Model and Finite Element Dynamics of Membrane", International Journal for Numerical Methods in Engineering, Vol.66, No.7, pp.1179-1209, May, 2006, DOI: 10.1002/nme.1588

★ 主歪の計算

Green-Lagrange歪テンソルの固有値が主歪

$$(E_{ij}G^i \otimes G^j)e = \gamma e \quad (2.3.2)$$

実際に計算すると,

$$\gamma_1 = \frac{A-B}{2}, \quad \gamma_2 = \frac{A+B}{2} \quad (2.3.3)$$

ただし,

$$\begin{cases} G^1 \equiv \mathbf{G}^1 \cdot \mathbf{G}^1, & G^2 \equiv \mathbf{G}^2 \cdot \mathbf{G}^2 \\ G^3 = G^1 \cdot G^2 \\ A \equiv \tilde{E}_1 G^1 + \tilde{E}_2 G^2 + \tilde{E}_3 G^3 \\ C \equiv \tilde{E}_3^2 - 4\tilde{E}_1 \tilde{E}_2, & B \equiv \sqrt{A^2 + DC} \\ \tilde{E}_1 = E_{11}, & \tilde{E}_2 = E_{22}, & \tilde{E}_3 = 2E_{12} \end{cases} \quad (2.3.4)$$



2. 構成則

★ wrinkle判定と構成則

$$\begin{bmatrix} \tau_1 \\ \tau_2 \end{bmatrix} = \frac{E}{1-\nu^2} \begin{bmatrix} 1 & \nu \\ \nu & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \gamma_1 \\ \gamma_2 \end{bmatrix} \quad (2.3.1)$$

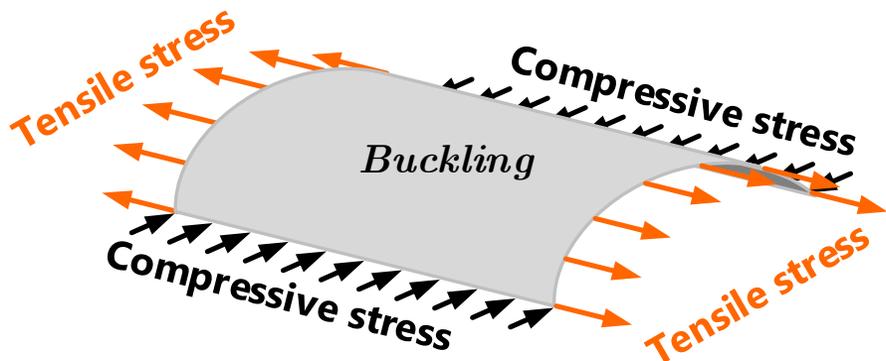
より,

1) $\gamma_1 + \nu\gamma_2 > 0$

2) $\gamma_1 + \nu\gamma_2 \leq 0$

$$\Rightarrow \begin{cases} 2.1) \alpha_1\nu\gamma_1 + \gamma_2 > 0 & \text{:wrinkle} \\ 2.2) \alpha_1\nu\gamma_1 + \gamma_2 \leq 0 & \text{:slack} \end{cases}$$

:taut



taut, wrinkle, slackに応じて, 主応力と主歪とを関係づける弾性マトリクス Γ を次のように切り替える.

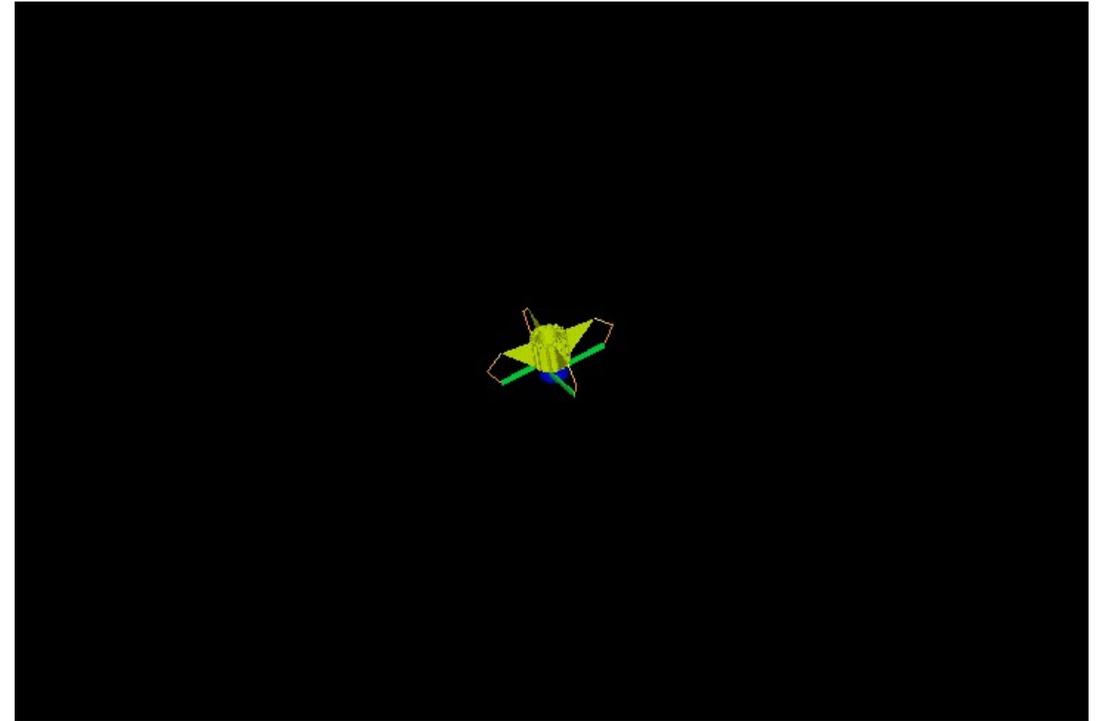
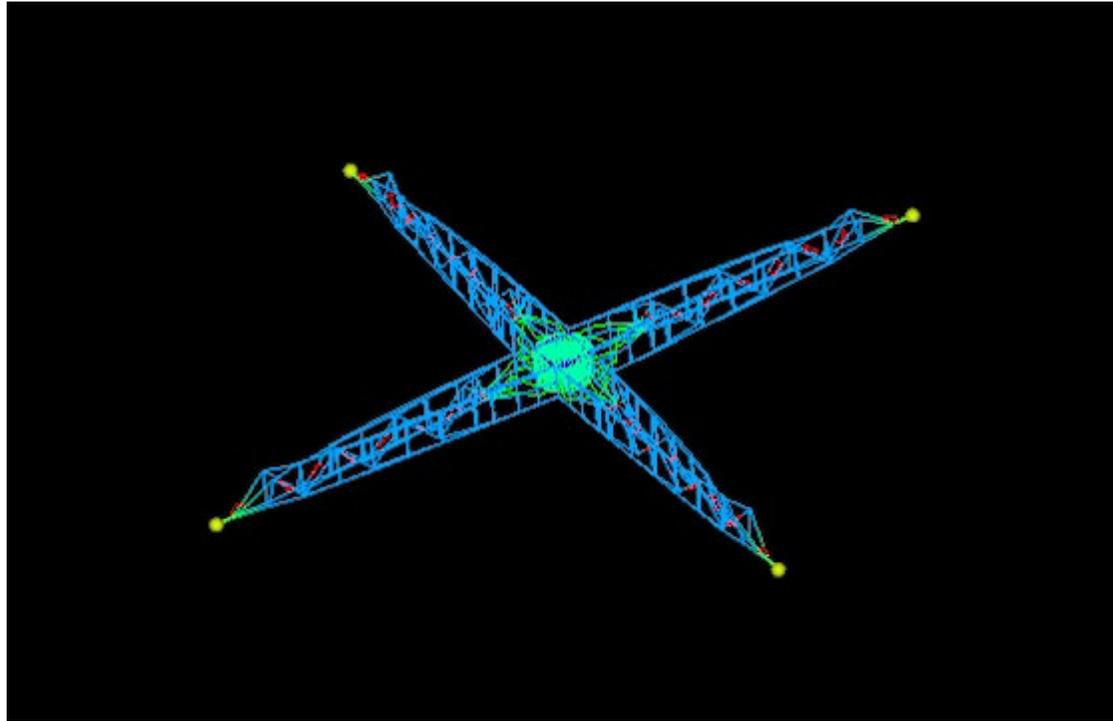
$$\tau = \Gamma\gamma, \quad \tau \equiv \begin{bmatrix} \tau_1 \\ \tau_2 \end{bmatrix}, \quad \gamma \equiv \begin{bmatrix} \gamma_1 \\ \gamma_2 \end{bmatrix} \quad (2.3.2)$$

$$\Gamma = \begin{cases} \Gamma_t = \frac{E}{1-\nu^2} \begin{bmatrix} 1 & \nu \\ \nu & 1 \end{bmatrix} \\ \Gamma_w = \frac{E}{1-\alpha_1\nu^2} \begin{bmatrix} \alpha_1 & \alpha_1\nu \\ \alpha_1\nu & 1 \end{bmatrix} \\ \Gamma_s = \frac{E}{1-\alpha_1\alpha_2\nu^2} \begin{bmatrix} \alpha_1 & \alpha_1\alpha_2\nu \\ \alpha_1\alpha_2\nu & \alpha_2 \end{bmatrix} \end{cases} \quad (2.3.3)$$

物理現象としては, α_1 は小さい値にし, α_2 はそれに比べると大きい値にしたいところであるが, γ_1 と γ_2 の値がほぼ同じ値の場合, Newton反復の収束性が悪くなる可能性があるので, $\alpha_1 = \alpha_2$ としてしまう方が無難.



3. 計算例



宇宙機開発応用B

第2講 膜面構造物の解析法の概要

おわり



宇宙機開発応用 B

第3講 膜面構造物の開発・運用

宮崎 康行

miyazaki.yasuyuki@jaxa.jp



第3講の全体構成

第1章 設計・解析段階でやるべきこと

第2章 地上試験項目と注意点・課題

第3章 運用上の注意点

第4講が長くなりそうな気がしますので、第3講は一瞬で終わって、第4講に進もうかと思えます。



宇宙機開発応用B

第3講 膜面構造物の開発・運用

第1章 設計・解析段階でやるべきこと



1. 打ち上げ前にやっておくべきであろうこと

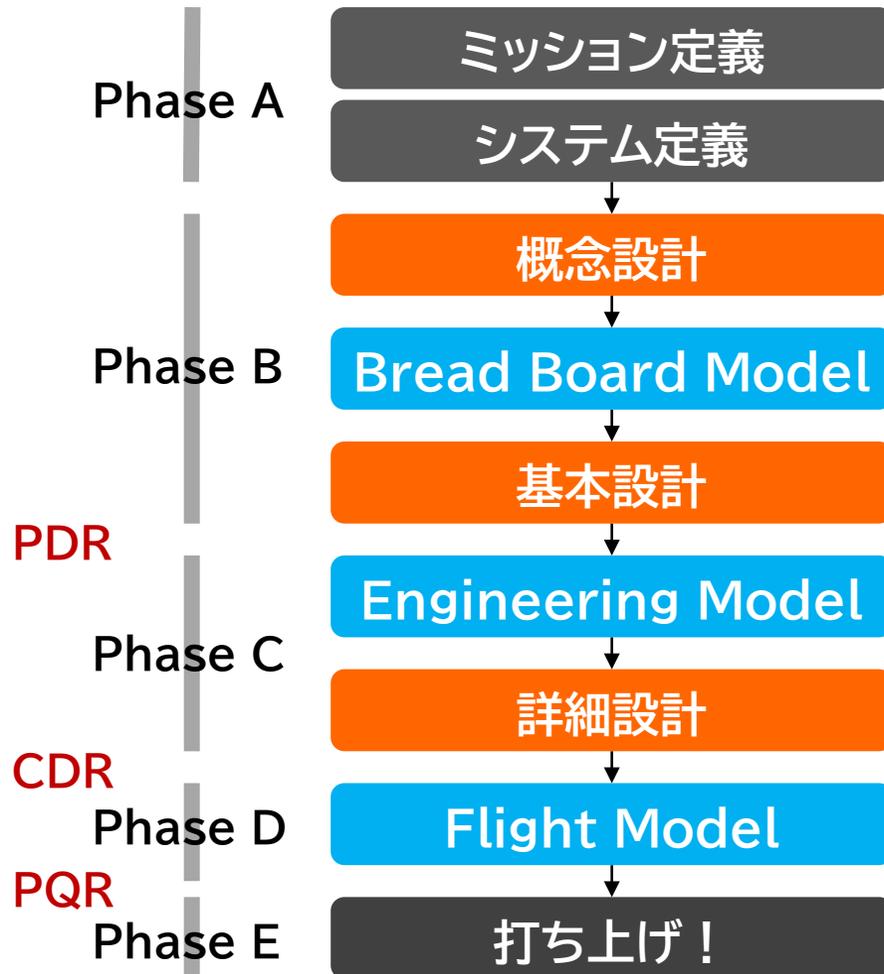
★ 目的は“ミッション”を成功させること

- 衛星／探査機全体のミッションの成功のために、膜面構造物に課せられた要求(膜面構造物にとっての“ミッション”)を満足させる必要がある
- 膜面構造物としての“ミッション”は,
 - 収納できること
 - 打ち上げ時に壊れないこと
 - 軌道上で展開すること
 - 展開後, 所望の形状を維持すること
- (その他, 衛星／探査機全体のミッションに関わる要求を満たすこと)



2. 宇宙機の一般的な開発の流れ

★ 段階的な開発

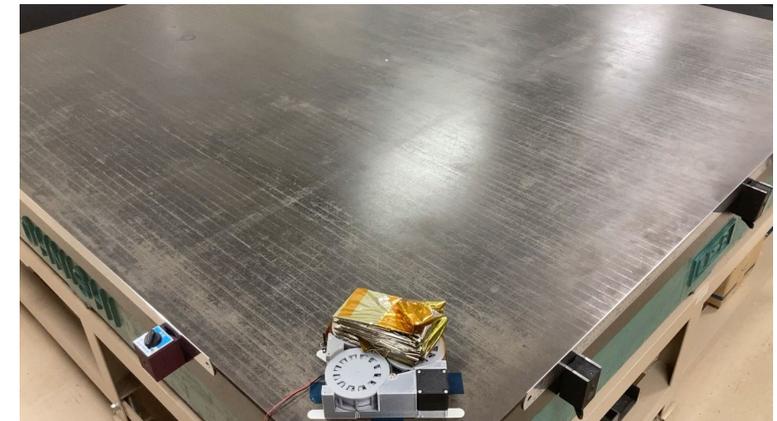


★ BBM開発

- 狙い: 概念設計の妥当性の確認(システムの確認)
- 搭載予定部品・機器の単体での動作試験(温度試験, 真空試験), 個々のサブシステムの電子回路の確認
- 全体を統合しての動作試験
- コンフィグレーションは, 実際の衛星とは違う場合もある (“テーブルサット”)

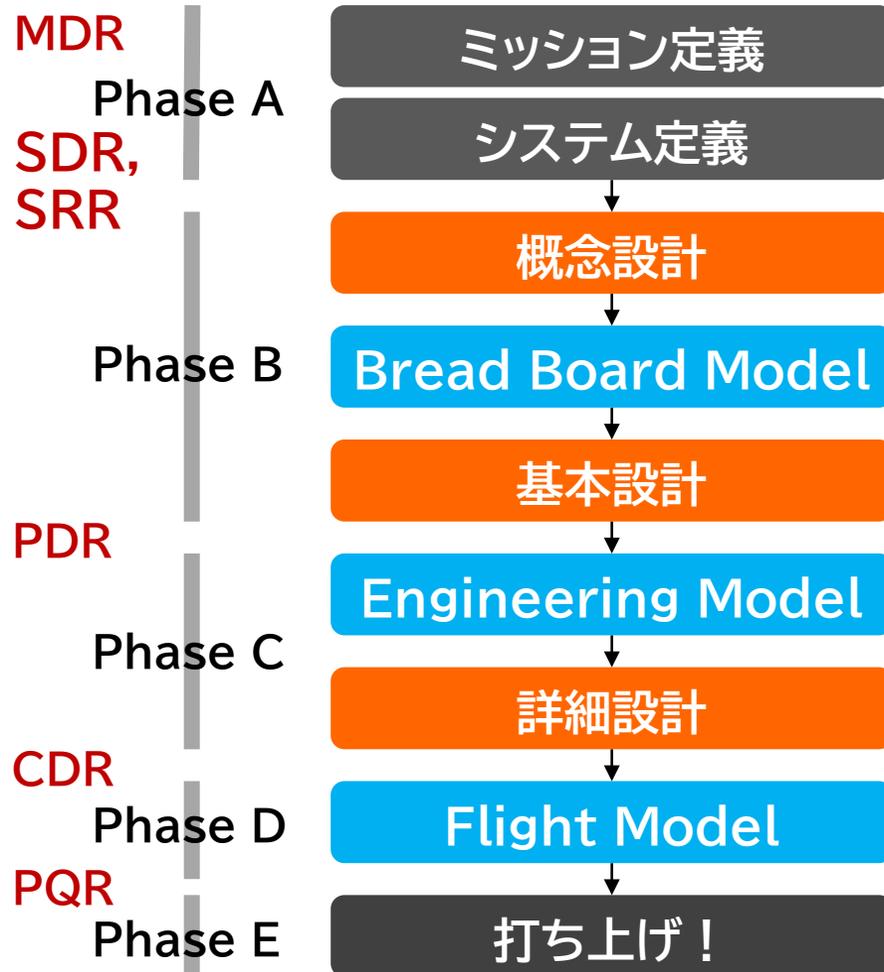
【膜面展開宇宙構造物の場合】

- 狙い: 収納/展開/展張方式のコンセプト(概念設計)の確認(「多分, これでいけるだろう」)



2. 宇宙機の一般的な開発の流れ

★ 段階的な開発



★ 基本設計～EM開発

- 狙い: 基本設計の妥当性確認(部品レベルから電子基板や配線, そして, 衛星全体に至る全て)
- 機能試験, 環境試験(実際より厳しめに)
- End-to-End試験(実際の運用を模擬した試験)
- ここで徹底的にダメだしをする(ダメだしができないと, FM開発でトラブルが多発する, あるいは, 本番で失敗する可能性が高い)

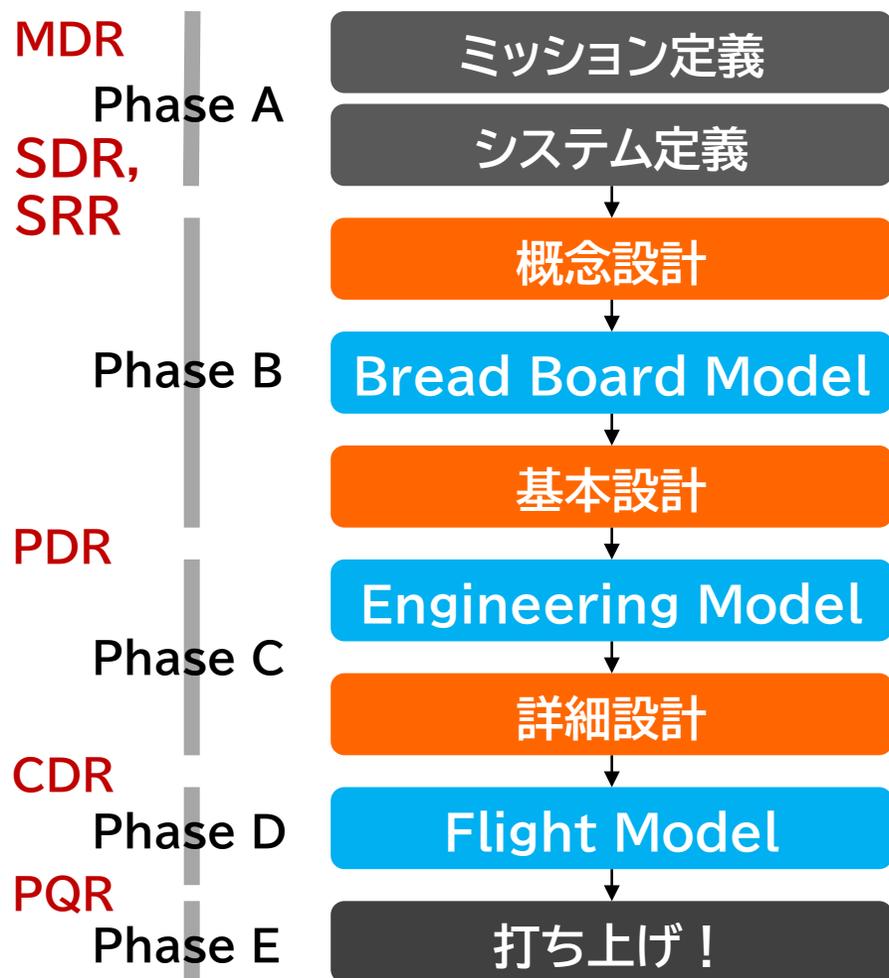
【膜面展開宇宙構造物の場合】

- 衛星システム側が現実よりも厳しい環境条件を提示する可能性もあり, それにさらに安全率を掛けるので, かなり厳しい条件になりがち...
- 収納・環境耐性・展開・展開後性能の確認
- できれば, 真空・無重力下で実施したいが...



2. 宇宙機の一般的な開発の流れ

★ 段階的な開発



★ 詳細設計～FM開発

- 狙い:安全かつ壊れずに宇宙に到達し,宇宙で機能するであろうことを確認(納得)すること
- 機能試験,環境試験
- End-to-End試験(実際の運用を模擬した試験)を徹底的に行う
- 温度の影響(電源系から電流・電圧が適切に供給されているかなど)を確認することが結構,重要だったりする
- ここで問題が発生すると,リカバーが大変

【膜面展開宇宙構造物の場合】

- 収納・環境耐性・展開・展開後性能の最終確認だけのはずだが...
- 一番怖いのは,試験中に膜が破損すること...



3. 結局, 数値解析と試験の組み合わせ

★BBM

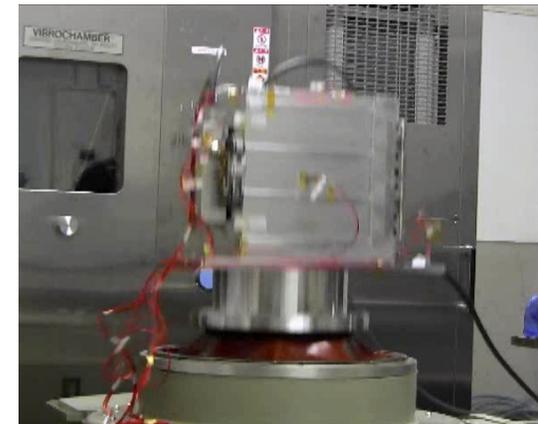
- 多分, 小型モデルの実験と, 実機モデルの数値シミュレーション?
- まだ膜構造物の諸元も固まっていないと思われるので, 仮決めした値で計算や実験を行うことになるかも.

★基本設計～EM

- 基本的には, 実機と同等のものをつくって, 収納・環境耐性・展開・展開後性能を試験で確認
- 実機サイズで試験が困難な場合は数値シミュレーション
- 予算等の都合で実機と同等のものを作れない場合も同様(本当に作って確認しなくてもいいのかは事前によく吟味)
- いずれにしても, 地上試験で軌道上環境を模擬するのはほぼ不可能であるので, 数値シミュレーションは必須でしょう.
- 収納時に構造物がさらされる環境については模擬できるはずなので, 試験を実施(振動試験, 温度試験, 熱真空試験等)

★詳細設計～FM

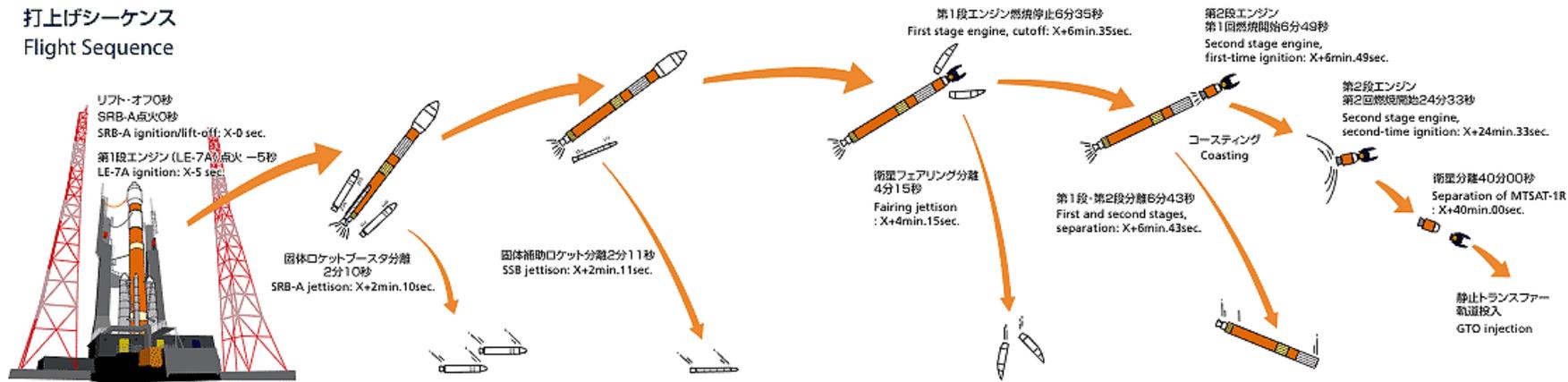
- この頃には軌道上でのシーケンスもかなり固まっているはずなので, それに即したend-to-end試験を行うのが望ましい.
- ただし, やはり, 軌道上環境を模擬するのは困難であるので, 展開時以降のシーケンスについては, 数値シミュレーション
- したがって, 例えば, 設計パラメータ・運用パラメータ等の値を振って, シミュレーションを行い, ノミナルの運用パラメータおよびパラメータの許容値を設定(例えば, 展開開始時の衛星の姿勢や角速度など)



イメージ



ちなみに、打上げ時の機械環境は？



飛行計画
(1) Major Flight Plan

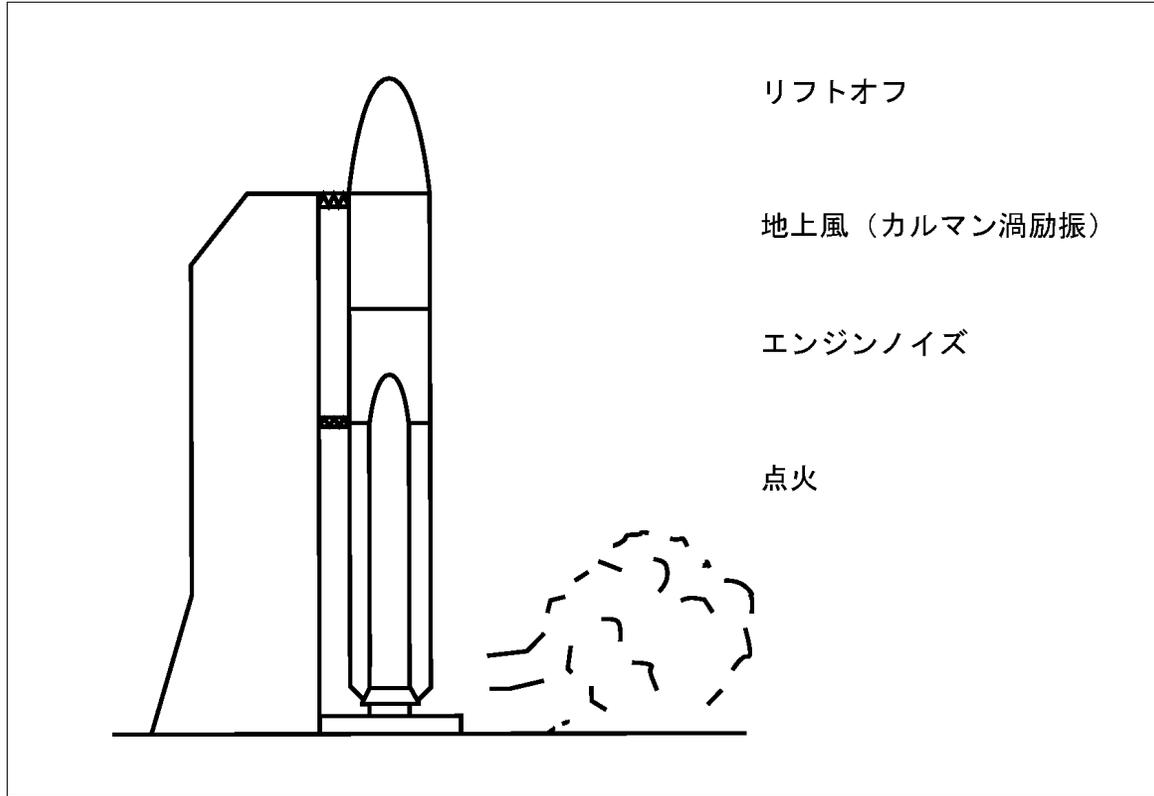
事象 Event	打上げ後経過時間 Mission elapsed time	高度 Altitude	慣性速度 Inertial velocity
	時 分 秒 hr. min. sec.	km	km/s
1 リフトオフ Lift off	0 0 0	0	0.4
2 固体補助ロケット点火 SSB ignition	0 46	6	0.6
3 固体補助ロケット燃焼終了 SSB, burnout	1 45	38	1.6
4 固体ロケットブースタ燃焼終了 SRB-A, burnout	2 8	57	1.7
5 固体ロケットブースタ分離 SRB-A jettison	2 10	59	1.7
6 固体補助ロケット分離 SSB jettison	2 11	60	1.7
7 衛星フェアリング分離 Fairing jettison	4 15	138	2.7
8 第1段主エンジン燃焼停止 First stage engine, cutoff (MECO)	6 35	216	5.2
9 第1段・第2段分離 First and second stages, separation	6 43	222	5.2
10 第2段エンジン第1回燃焼開始 Second stage engine, first-time ignition (SEIG 1)	6 49	226	5.2
11 第2段エンジン第1回燃焼停止 Second stage engine, first-time cutoff (SECO 1)	12 30	314	7.7
12 第2段エンジン第2回燃焼開始 Second stage engine, second-time ignition (SEIG 2)	24 33	258	7.7
13 第2段エンジン第2回燃焼停止 Second stage engine, second-time cutoff (SECO 2)	27 26	255	10.2
14 MTSAT-1R分離 Separation of MTSAT-1R	40 0	1979	8.9

静止軌道ミッション飛行経路
(2) Flight Trajectory



<https://www.jaxa.jp/projects/rockets/h2a/f7/sequence.html>

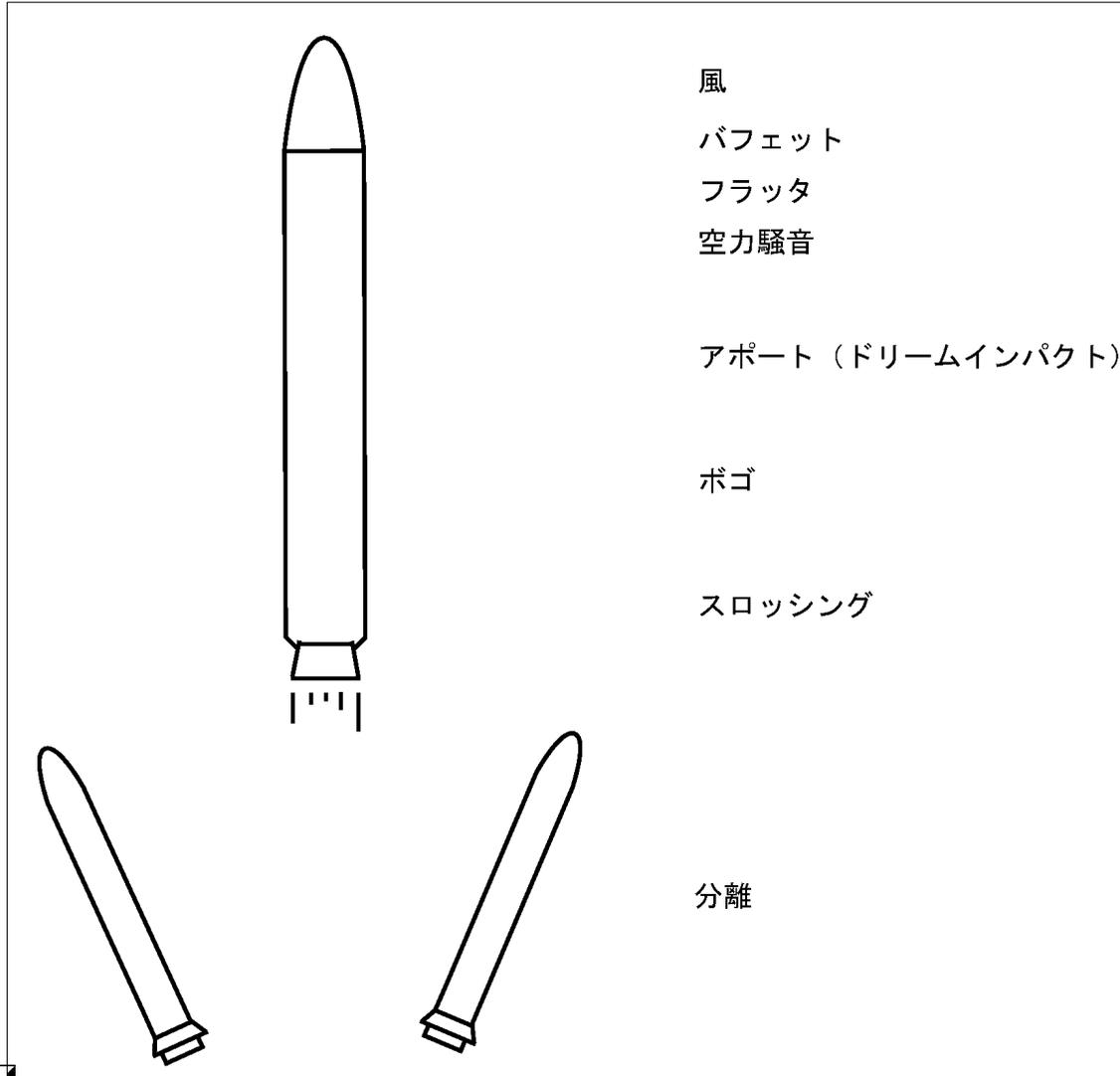
ちなみに、打上げ時の機械環境は？



<https://www.youtube.com/watch?v=athE2loTY1o>

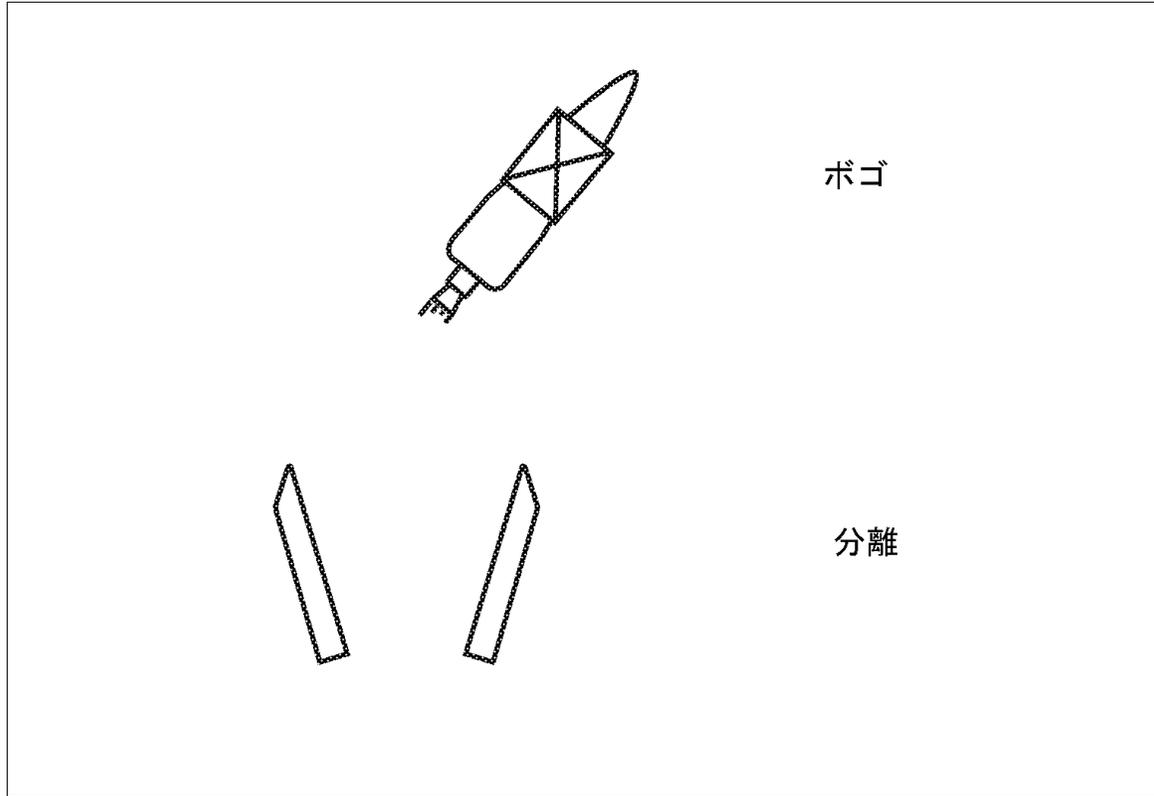


ちなみに、打上げ時の機械環境は？



<https://www.youtube.com/watch?v=athE2loTY1o>

ちなみに、打上げ時の機械環境は？



<https://www.youtube.com/watch?v=athE2loTY1o>



ちなみに、打上げ時の機械環境は？

★ 打上げ時の振動

$$\left\{ \begin{array}{l} x = r \sin \omega t \Rightarrow \ddot{x} = -r\omega^2 \sin \omega t \Rightarrow |\ddot{x}|_{\max} = r\omega^2 \\ \text{応力} = \frac{\text{荷重}}{\text{面積}} = \frac{\text{質量} \times \text{加速度}}{\text{面積}} = \frac{\text{質量} \times \text{振幅} \times (\text{角振動数})^2}{\text{面積}} \end{array} \right.$$



<http://jda.jaxa.jp/result.php?lang=j&id=af7664b58f8a5e3b9e0fc347797b60e5>

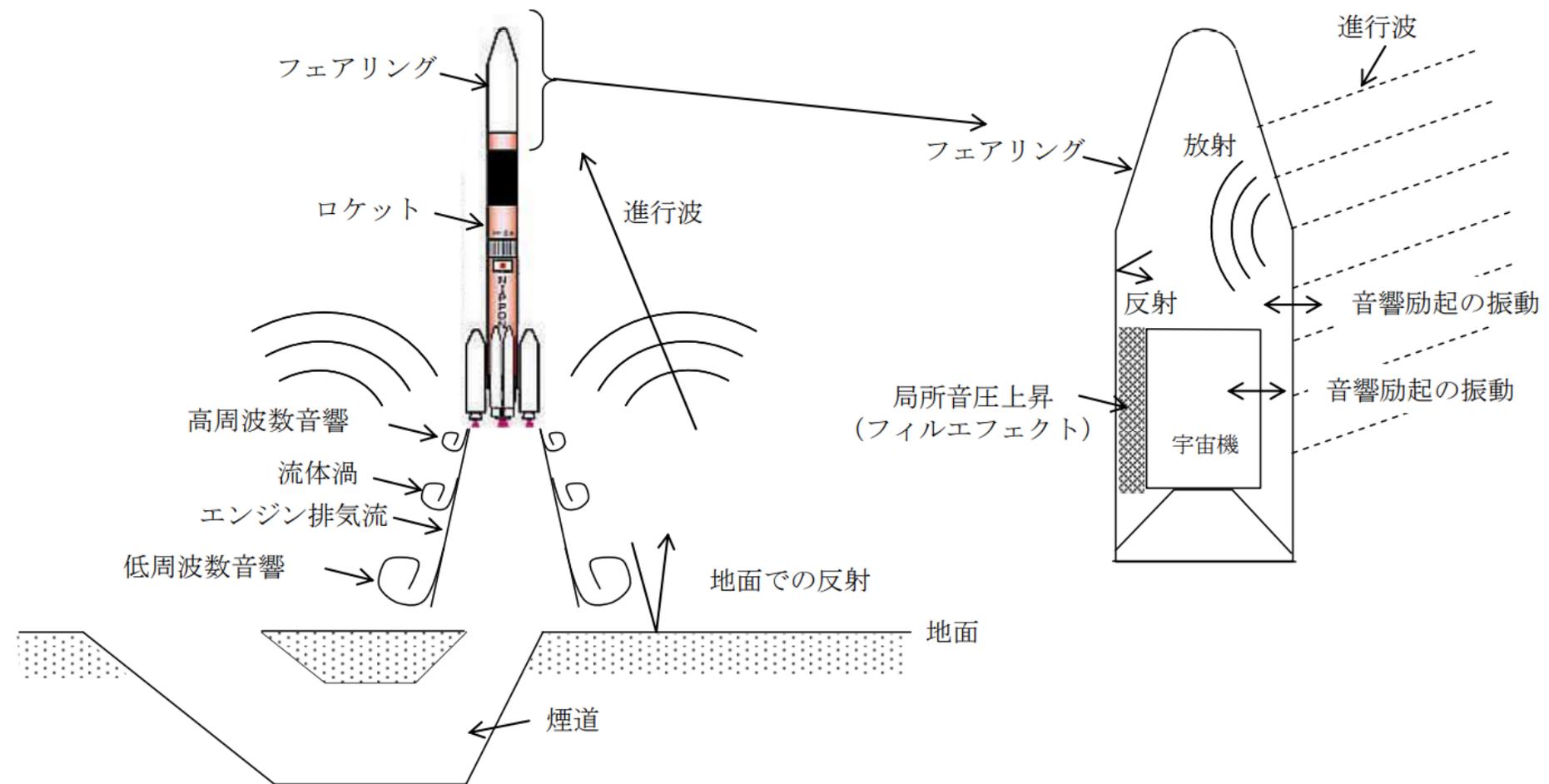
周波数	振動源
0～5Hz程度	上昇時の軸方向準静的加速度, その他, 低振動数成分
低周波振動 5～100Hz程度	ロケットの振動 1. Lift off時 2. 空気力の変動 3. 2段分離時 4. POGO(正弦波振動)
音響・ランダム振動 数十Hz以上	Lift off時のエンジン燃焼の振動音響(ロケットから直接,あるいは,外からフェアリングを通して)
衝撃 100～ 10,000Hz	フェアリング開頭, 衛星分離

準静的加速度や衝撃の他に, ランダム振動と正弦波振動を考慮する必要がある。



ちなみに、打上げ時の機械環境は？

★音響振動

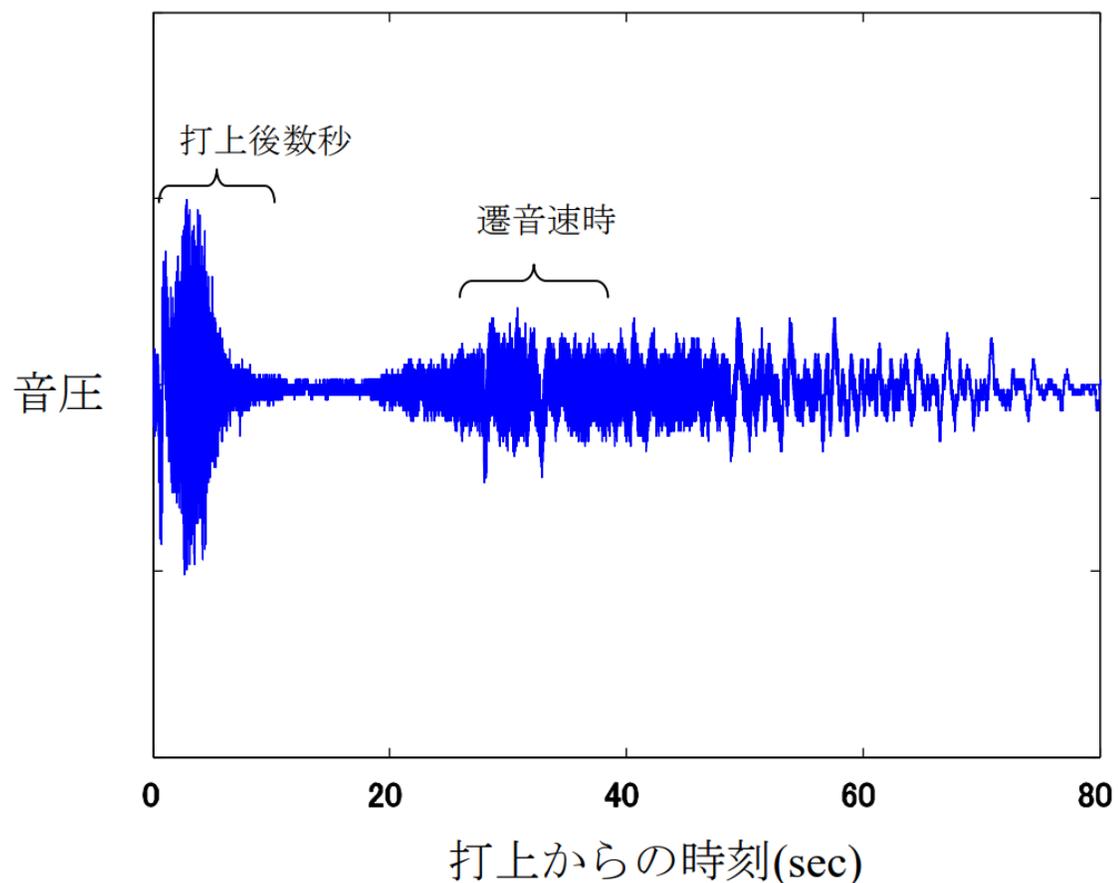


JAXA 音響試験ハンドブック <https://sma.jaxa.jp/TechDoc/Docs/JAXA-JERG-2-130-HB002B.pdf>



ちなみに、打上げ時の機械環境は？

★音響振動



$$\text{SPL} = 10 \log_{10} \left(\frac{p}{p_0} \right)^2, \quad p_0 = 20 \times 10^{-6} [\text{Pa}]$$

表1 H-IIA 202 型 最大予測音響環境

1/1 オクターブ中心周波数 [Hz]	音圧レベル [dB]
31.5	125
63	126.5
125	131
250	133
500	128.5
1000	125
2000	120
4000	115
8000	113
オーバーオール[dB]	137.5

The reference point 0 [dB] = 20×10^{-6} [Pa]

JAXA 音響試験ハンドブック
<https://sma.jaxa.jp/TechDoc/Docs/JAXA-JERG-2-130->

施, 赤城, ロケット打上げ時の音響加振に対する宇宙機設計解析・試験方法,
ながれ33(2014)445-452.

ちなみに、打上げ時の機械環境は？

★音響振動

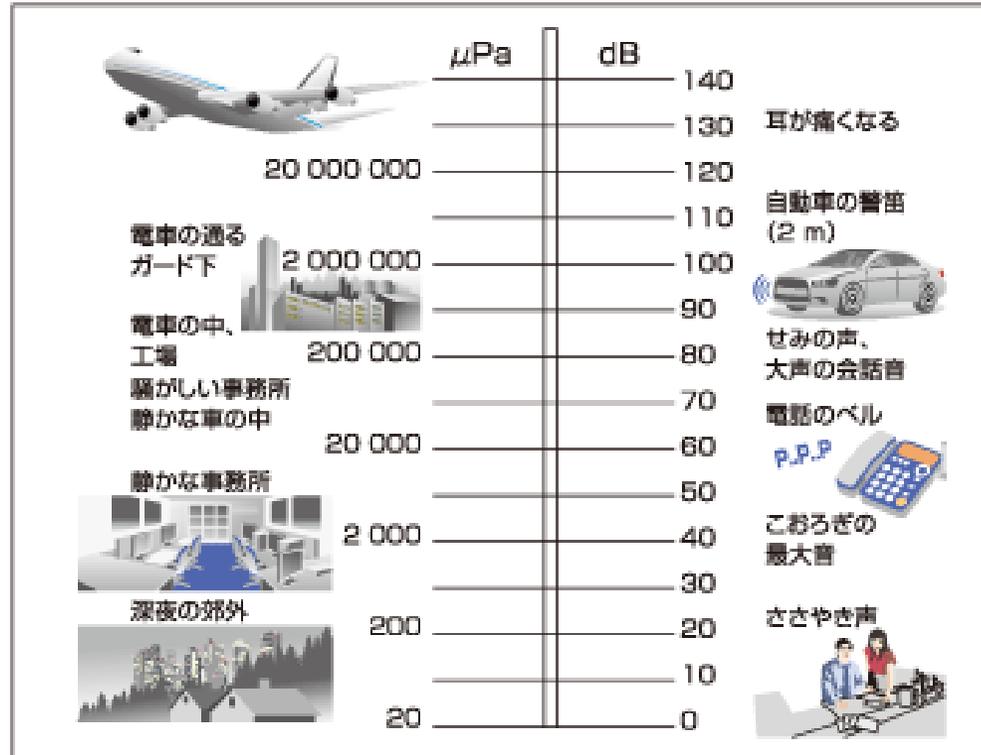


図1 音圧と音圧レベル

$$\text{SPL} = 10 \log_{10} \left(\frac{p}{p_0} \right)^2, \quad p_0 = 20 \times 10^{-6} [\text{Pa}]$$

表1 H-IIA 202 型 最大予測音響環境

1/1 オクターブ中心周波数 [Hz]	音圧レベル [dB]
31.5	125
63	126.5
125	131
250	133
500	128.5
1000	125
2000	120
4000	115
8000	113
オーバーオール[dB]	137.5

The reference point 0 [dB] = 20×10⁻⁶ [Pa]

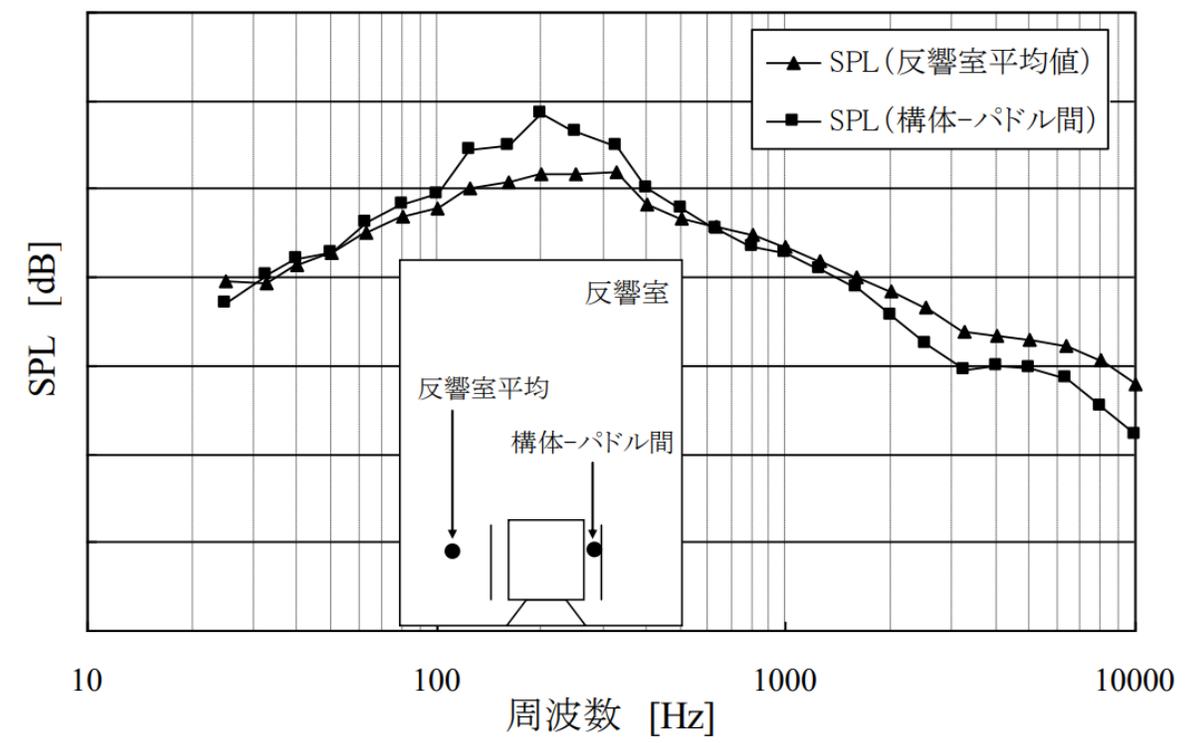
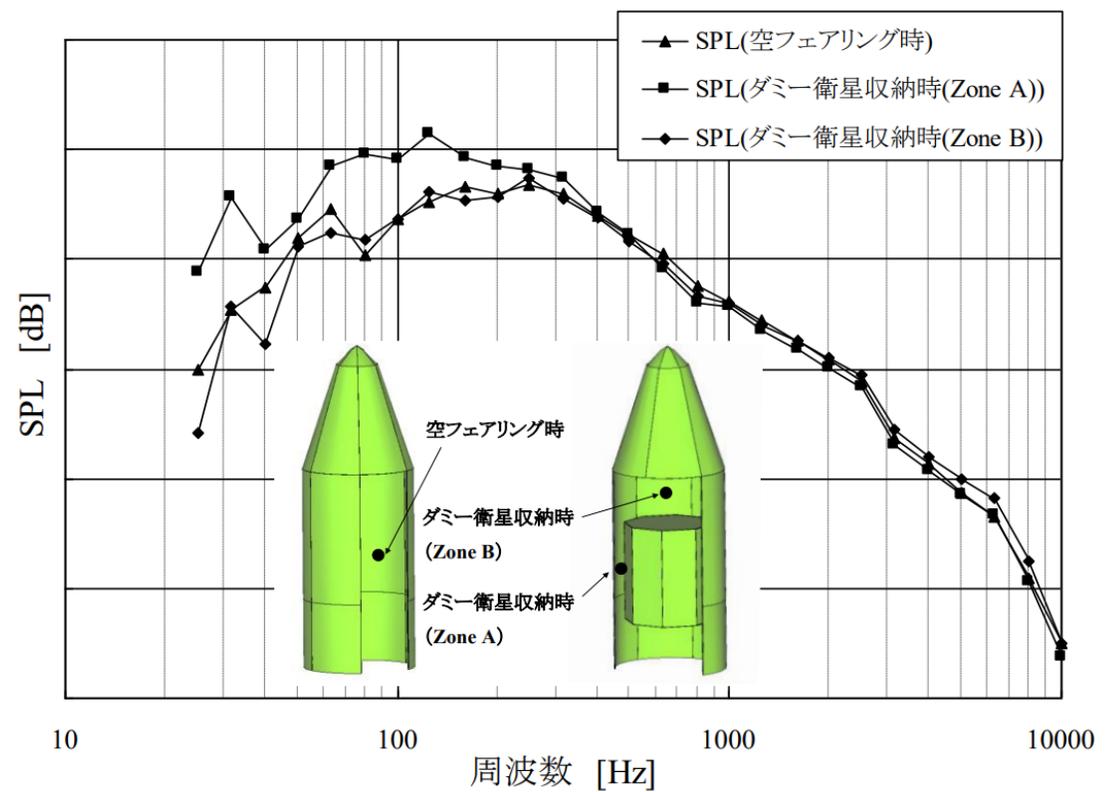
https://rion-sv.com/support/st_sound.aspx

施, 赤城, ロケット打上げ時の音響加振に対する宇宙機設計解析・試験方法, ながれ33(2014)445-452.

ちなみに、打上げ時の機械環境は？

★音響振動

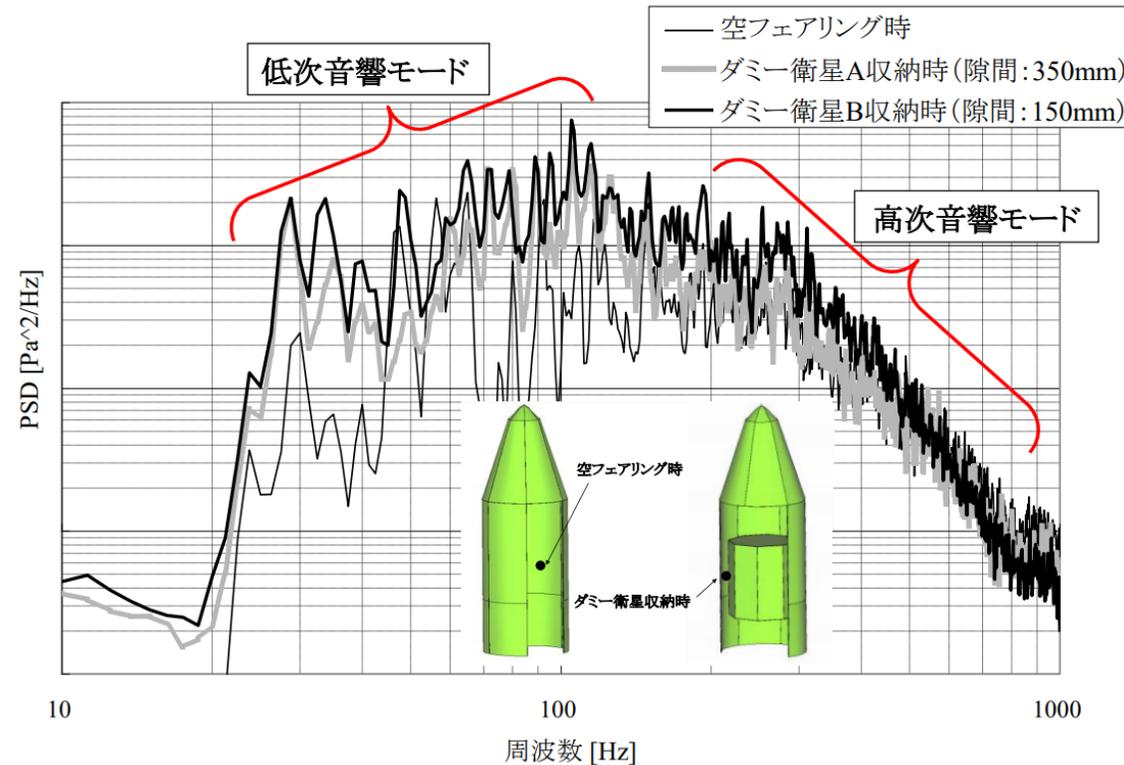
$$m\ddot{x} + c\dot{x} + kx = pA \Rightarrow \ddot{x} + 2\zeta\omega_o\dot{x} + \omega_o^2x = \frac{pA}{m} \Rightarrow \text{面積が大きいものほど影響を受ける}$$



ちなみに、打上げ時の機械環境は？

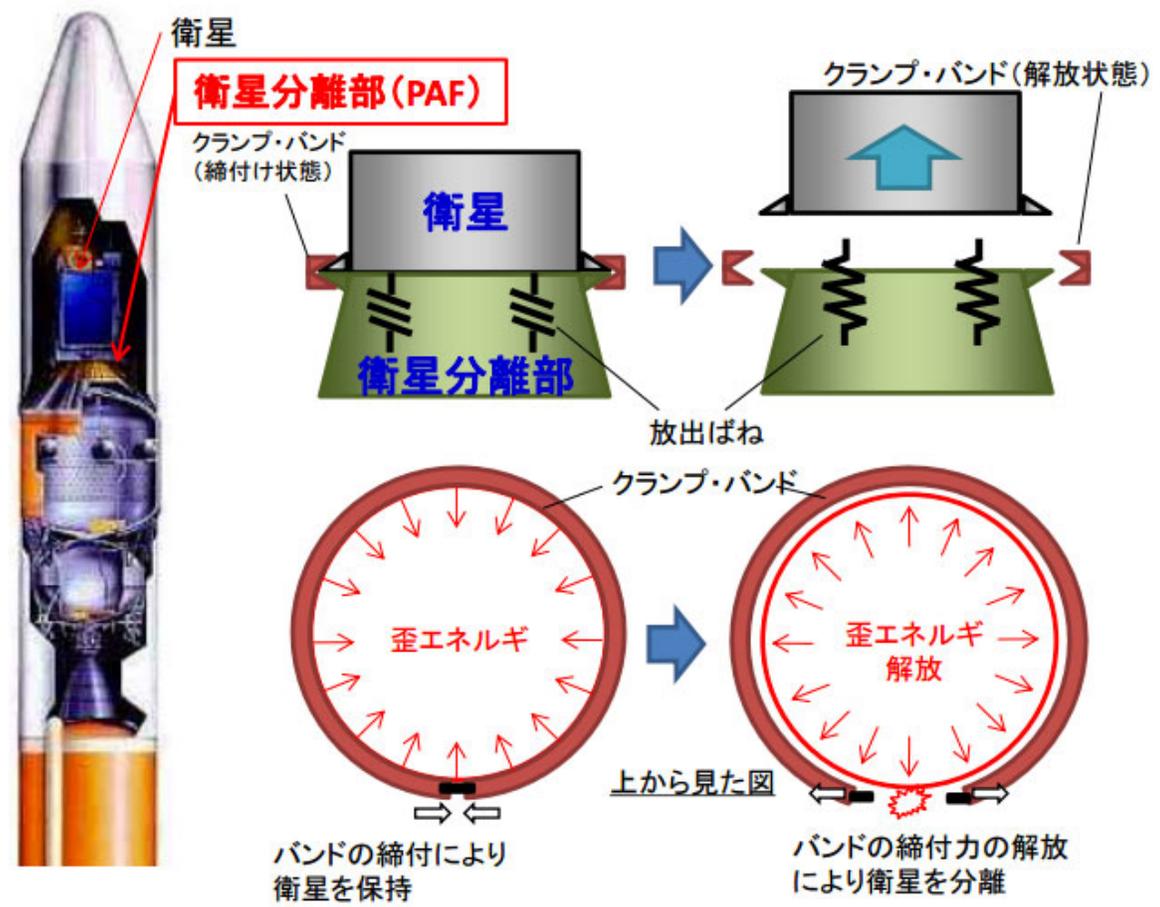
★音響振動

$$m\ddot{x} + c\dot{x} + kx = pA \Rightarrow \ddot{x} + 2\zeta\omega_o\dot{x} + \omega_o^2x = \frac{pA}{m} \Rightarrow \text{面積が大きいものほど影響を受ける}$$



ちなみに、打上げ時の機械環境は？

★音響振動



https://fanfun.jaxa.jp/countdown/astro_h/f30.html



<http://jda.jaxa.jp/result.php?lang=j&id=7f29bdca95cc035b5701fd9d69224641#>



宇宙機開発応用B

第3講 膜面構造物の開発・運用

第2章 地上試験項目と注意点・課題



1. どうすれば軌道上で機能することを「納得」できるか

★ TLYF(Test Like You Fly)は難しい・・・

－ 収納試験

- － 収納できるか(製造誤差等により収納不可となる可能性もある)
- － 収納時に破損しないか？

－ 展開試験

- － 展開できるか(重力下では展開しないことがわかっている場合には, 重力補償をして実施. 収納時に何かがどこかにひっかかったりして, 展開できない可能性もある)
- － 展開時に破損しないか？
- － できれば, 真空下・無重力下で.
- － 問題は, 本当に意味のある展開試験ができるかどうか・・・

- － 例えば, 以下のような環境試験を実施するとともに, その前後に収納・展開試験を実施.

- － 振動試験, 衝撃試験(打ち上げ時の環境に耐えられるか?)
- － 収納状態での温度試験(温度によって何か状態が変化することはないか?). 可能であれば, 展開状態でも(多分, 難しい?)
- － 収納状態での熱真空試験(打ち上げ環境を想定). 可能であれば, 展開状態でも(多分, 難しい?)
- － 収納状態での急減圧試験(打ち上げ環境を想定)
- － その他(例えば, ミッションによっては, 何等かの性能試験をやったり, EMCの試験, 通信関連の試験など, 他の系に関連した試験をやったりするでしょう)



2. 展開試験

★例えば、機構の動作検証



ETS-VIIIの19m×17mのアンテナの試験

重力(および空気力)の存在する地上で展開試験することの意義は？(電気系の動作確認の他は？)

宇宙機開発応用B

第3講 膜面構造物の開発・運用

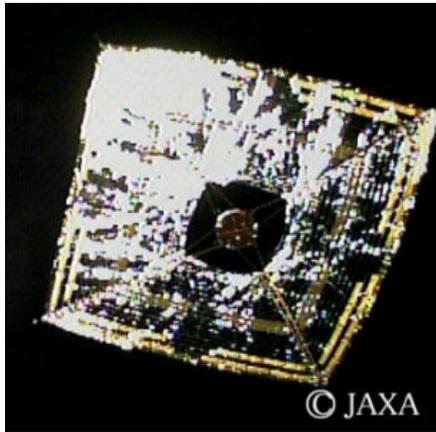
第3章 運用上の注意点



他の搭載機器(宇宙機)と違う点があるとすれば・・・

★“動き”を予測しにくい

- 膜の運動の許容範囲が大きいと、無重力下での膜の挙動は予測しにくい。よって、できるだけ膜の運動は抑えたい
- その意味で、準静的な展開が望まれる(IKAROSの二次展開のようなやり方はまれ)



- 通常は、軌道上での機器の状態をテレメトリで確認しながら機器を動作させていくが、展開時・展開後の状態の路湯法とも、なかなか推定しにくい(IKAROSの分離カメラは画期的だった。ただし、常時、自撮りできるのがベスト)。

- したがって、状態をこと細かに確認しなくても大丈夫な構造にしたい
- その意味で、例えば、展開トラスで支持するような構造が望ましい
- ただし、その分、重くなって、膜面を使う利点が薄まる
- ちなみに、予測しにくいからこそ、推定技術を高めようという研究意欲が出てくるかも？



宇宙機開発応用B

第3講 膜面構造物の開発・運用

おわり



宇宙機開発応用 B

第4講 まとめ

宮崎 康行

miyazaki.yasuyuki@jaxa.jp



第4講の全体構成

第1章 これまでの研究例

第2章 今後の大規模軽量膜面宇宙構造物

課題の再確認



宇宙機開発応用B

第4講 まとめ

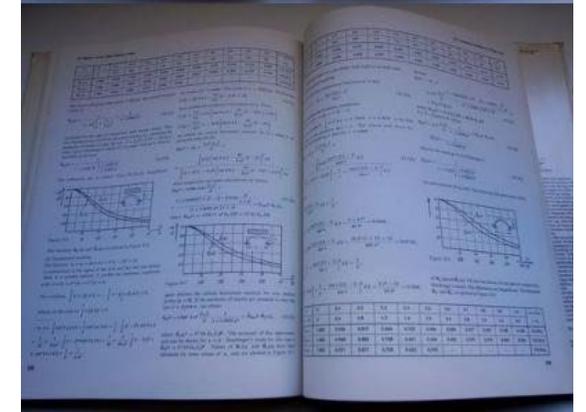
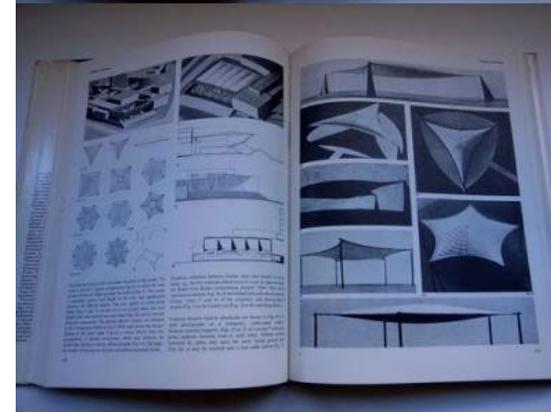
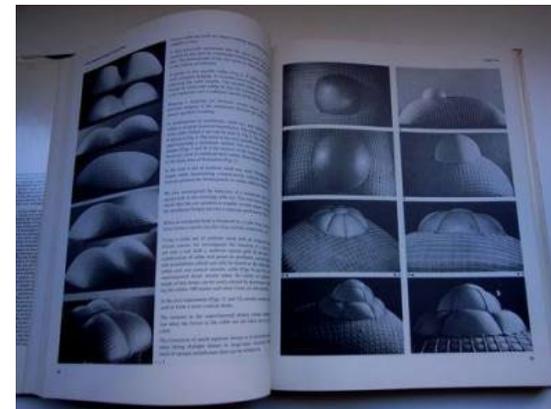
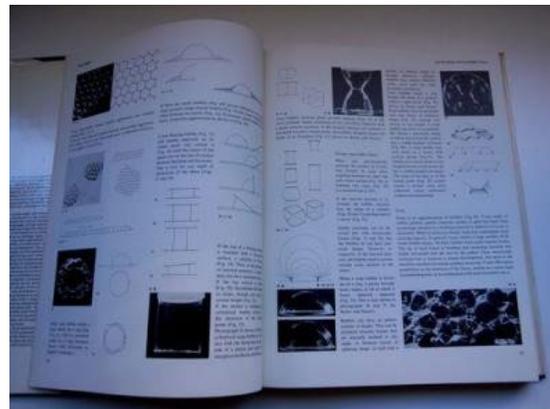
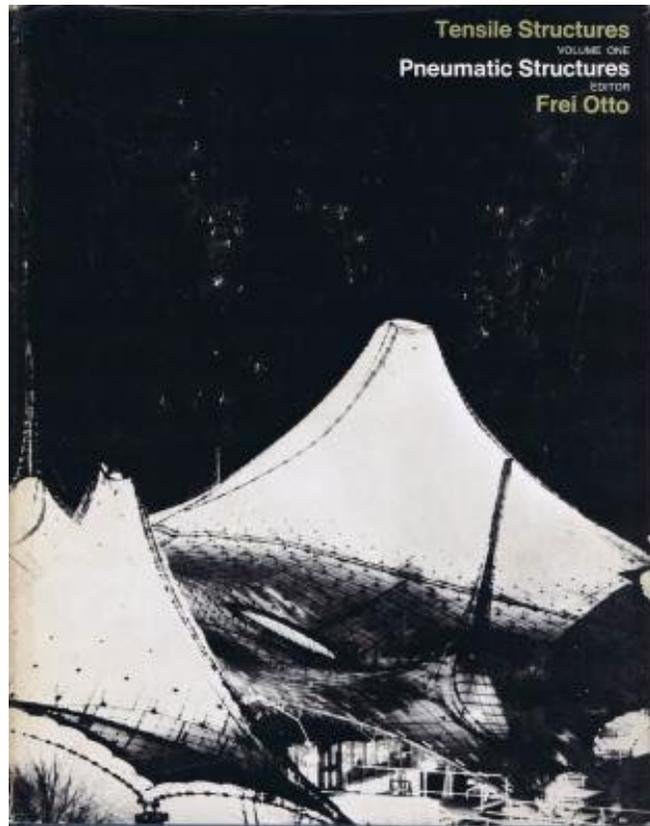
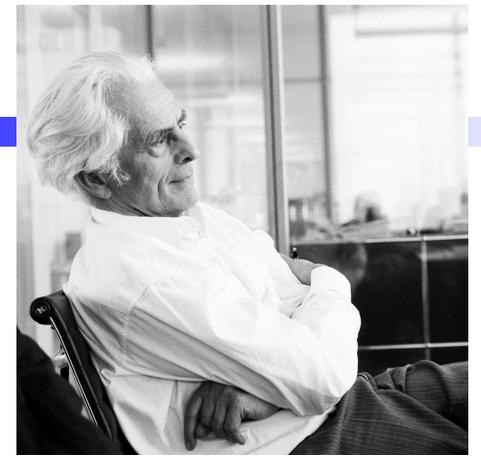
第1章 これまでの研究例

本来は、膜面宇宙構造物に関する研究のサーベイをすべきかと思いますが、今回は、私が関係している研究の一部だけを紹介させていただきます。



1. お勧めの文献

★ Frei Otto, "Tensile Structures," MIT Press, 1970.

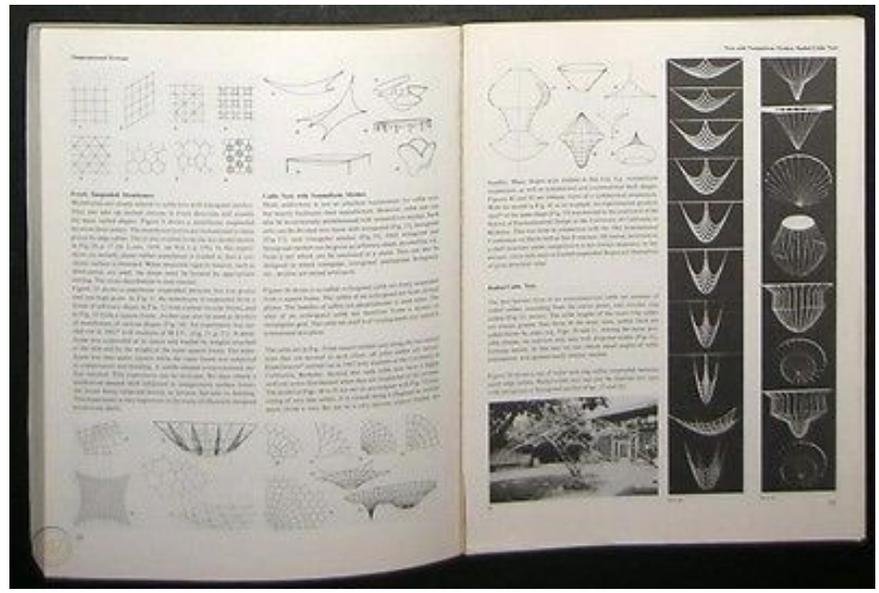
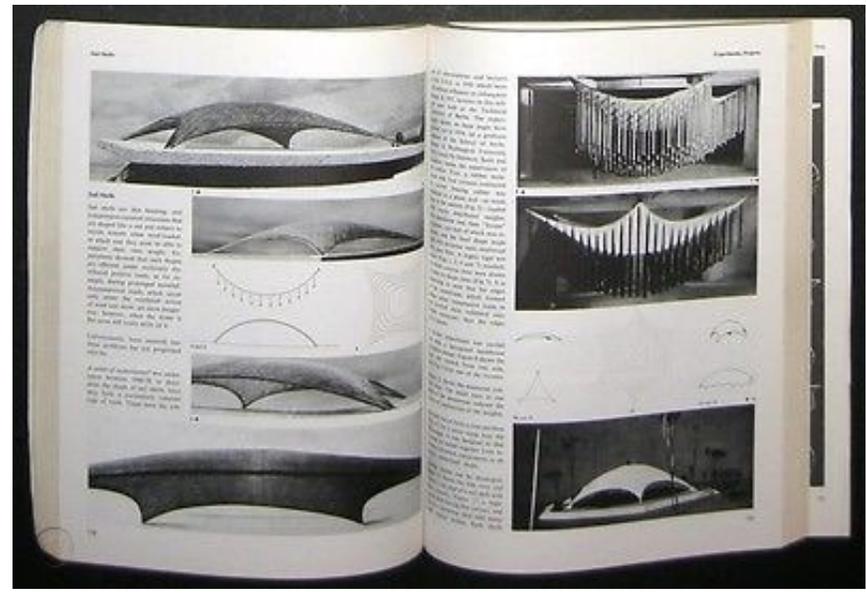
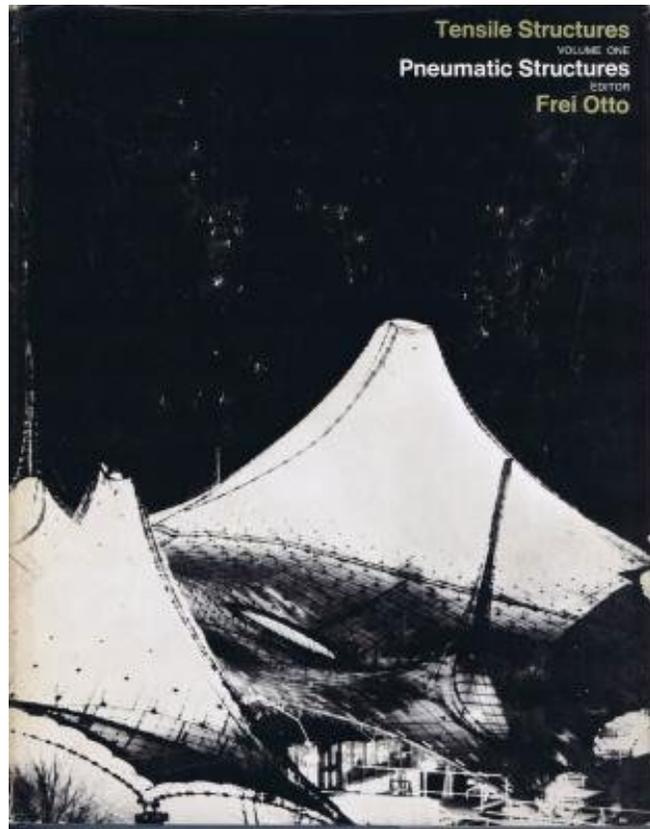


<https://www.yama-semi.com/?pid=17656410>



1. お勧めの文献

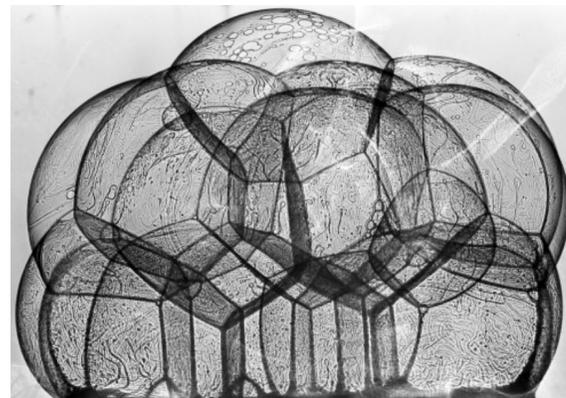
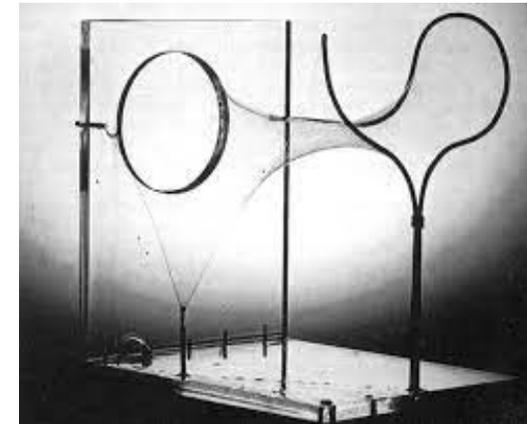
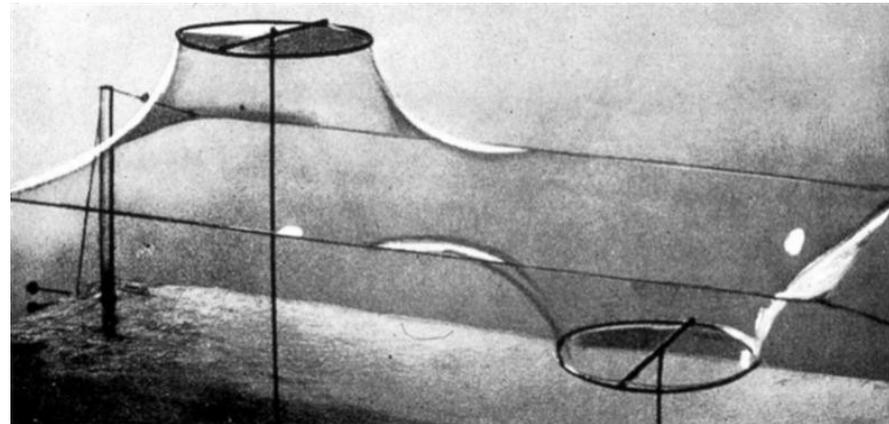
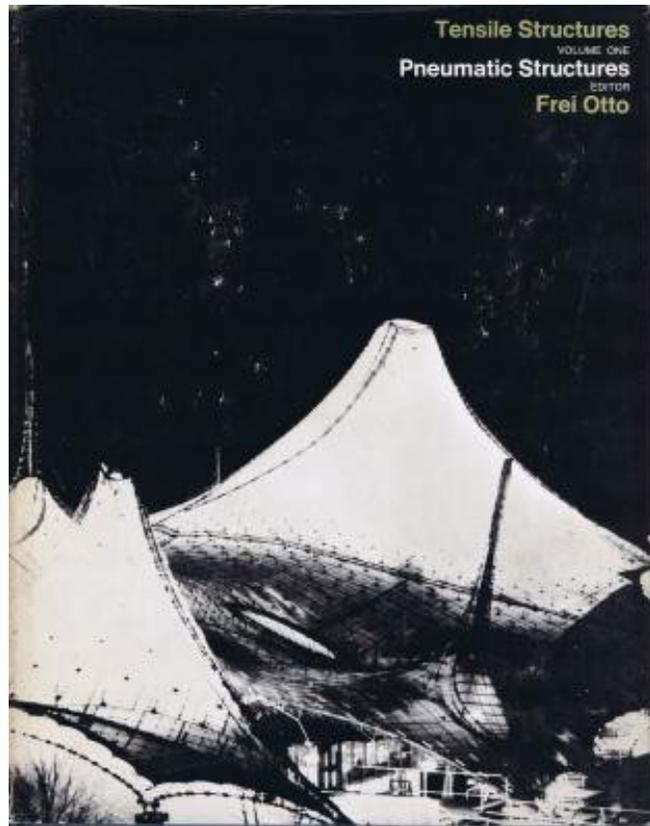
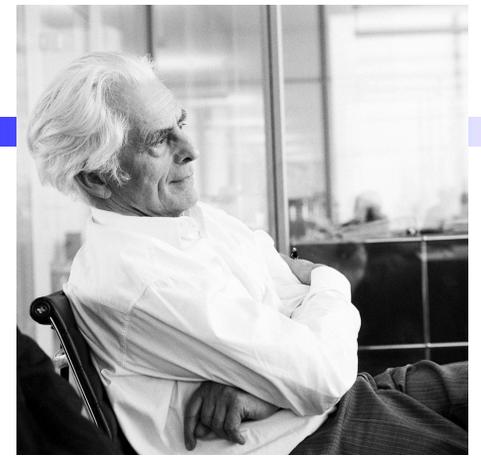
★ Frei Otto, "Tensile Structures," MIT Press, 1970.



<https://www.yama-semi.com/?pid=17656410>

1. お勧めの文献

★ Frei Otto, “Tensile Structures,” MIT Press, 1970.



<https://www.yama-semi.com/?pid=17656410>

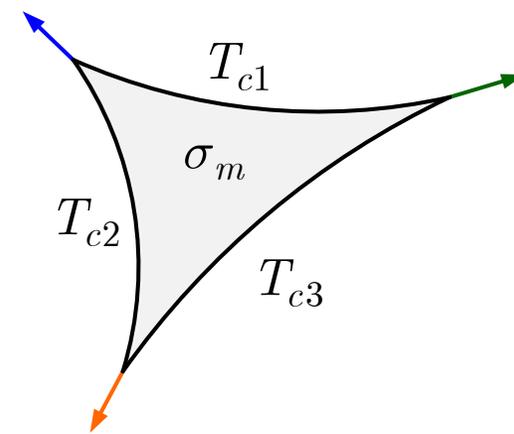
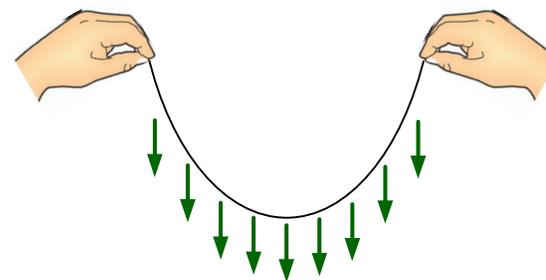
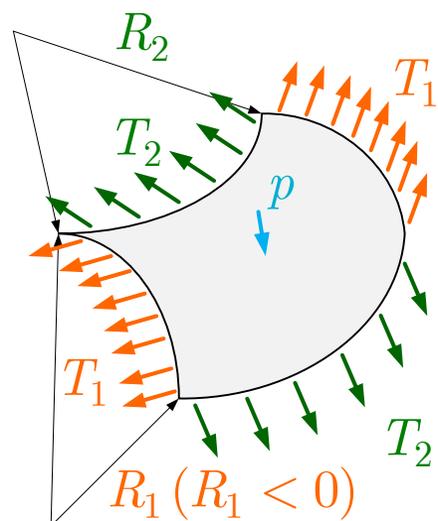
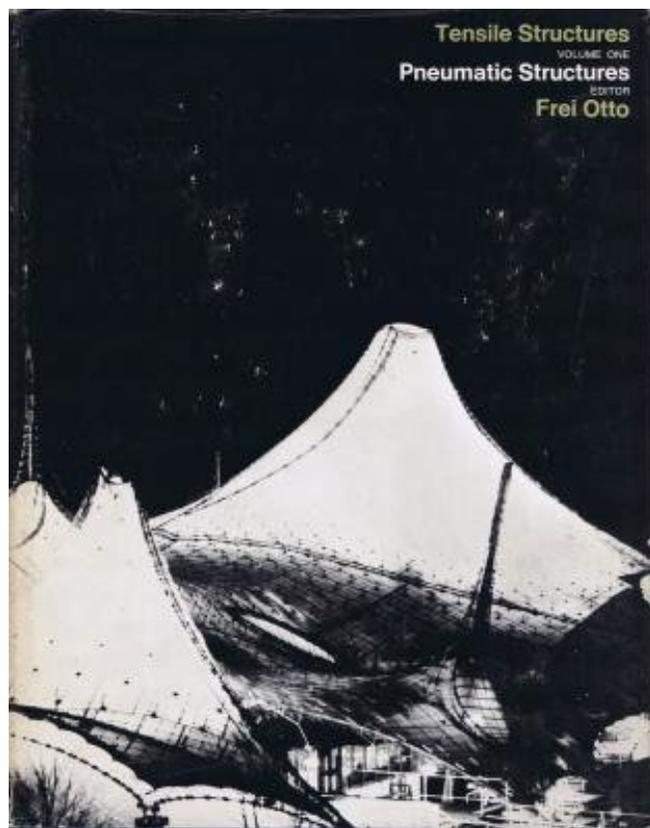


1. お勧めの文献

★ Frei Otto, "Tensile Structures," MIT Press, 1970.



- 膜面の力のつり合い, 境界条件の取り扱い, 計算例, 実験例
- ケーブルネットワークの力のつり合い, 膜面とケーブルネットワークを組み合わせた構造の力のつり合い, 計算例, 実験例



$$\frac{T_1}{R_1} + \frac{T_2}{R_2} = p$$

$$y = \frac{\ell}{2\beta} \cosh\left(\frac{2\beta}{\ell} x\right)$$

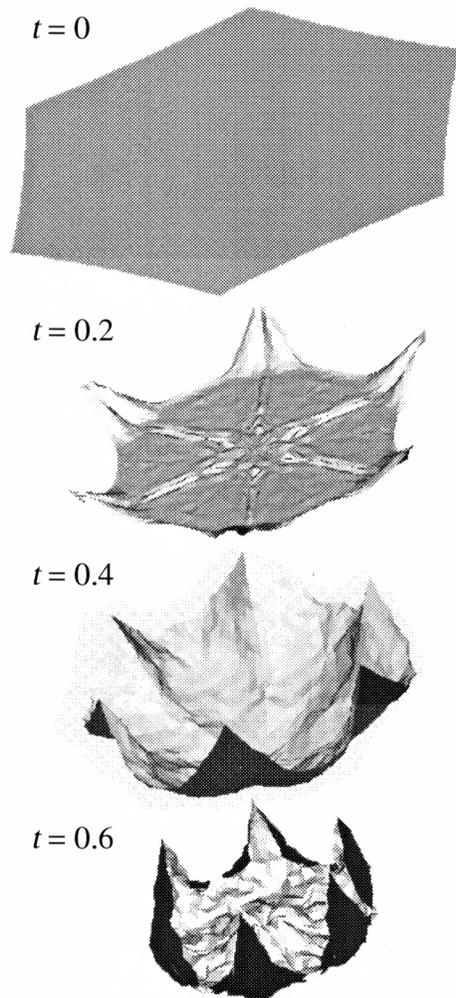
$$\begin{cases} T_{c1} = \sigma_m t R_1 \\ T_{c2} = \sigma_m t R_2 \\ T_{c3} = \sigma_m t R_3 \end{cases}$$

<https://www.yama-semi.com/?pid=17656410>

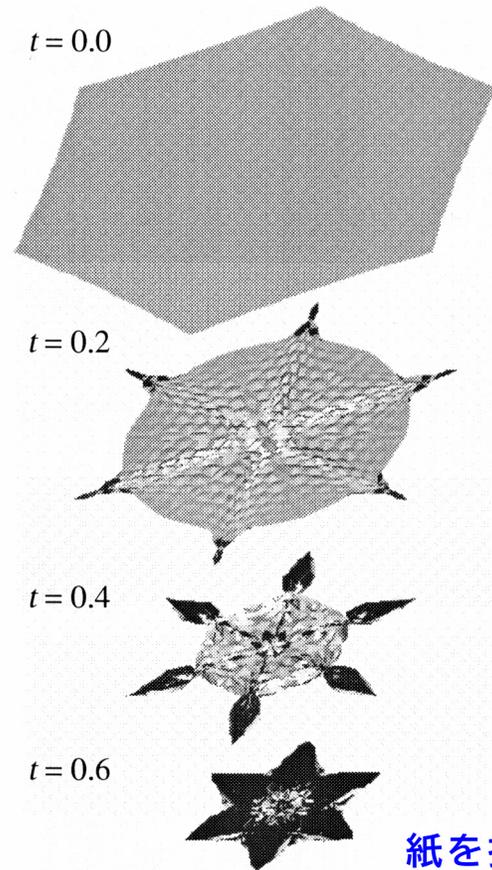
2.1 膜の収納・展開解析(1998)

★ 解析結果から折り方を考えてみたり・・・

Yasuyuki Miyazaki and Yoshitaka Nakamura, "Dynamic Analysis of Deployable Cable-Membrane Structures with Slackening Members," Proceedings of 21st International Symposium on Space Technology and Science, ISTS98-b-13, pp.1-6, May 1998.

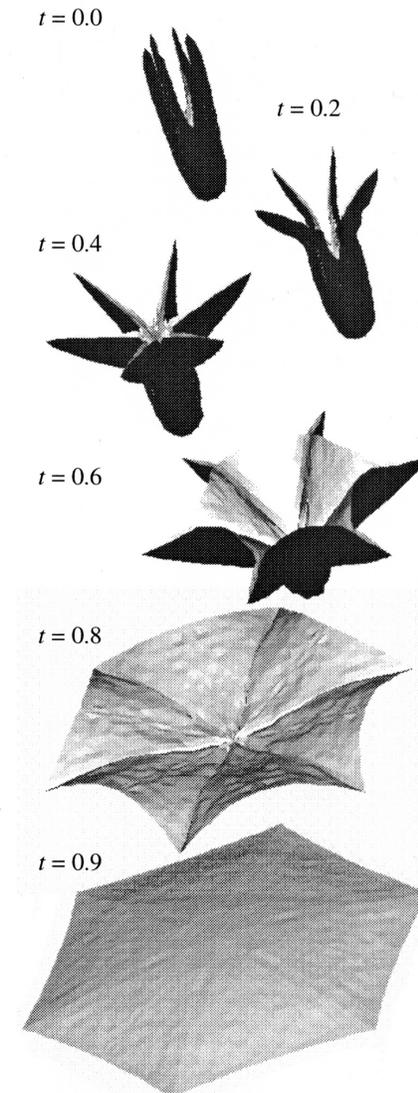


重力下



無重力下

紙を折ったよ
うな形に収納
されている



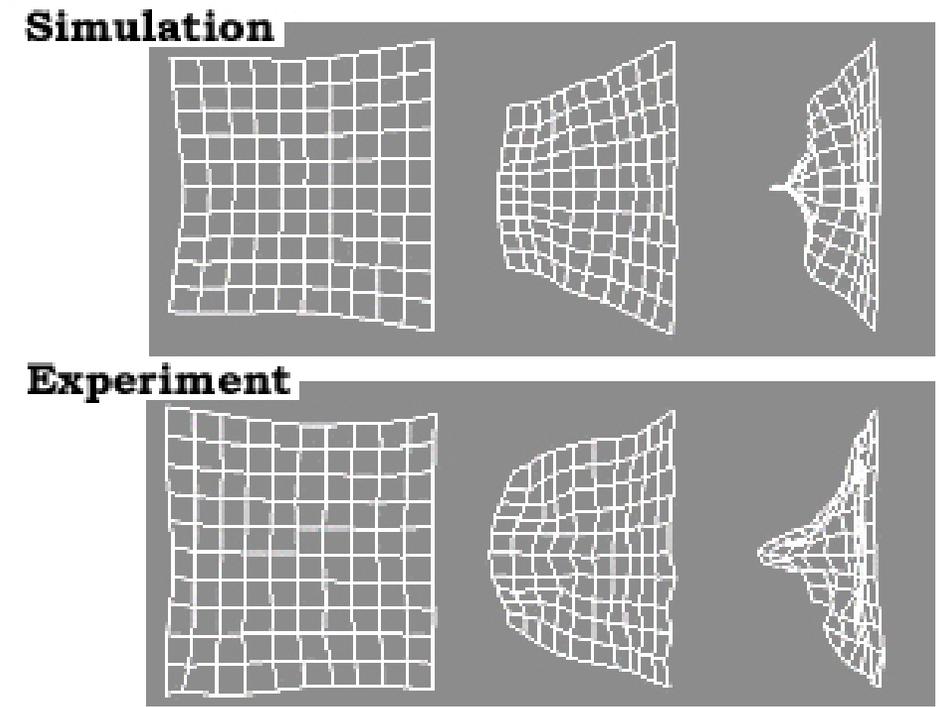
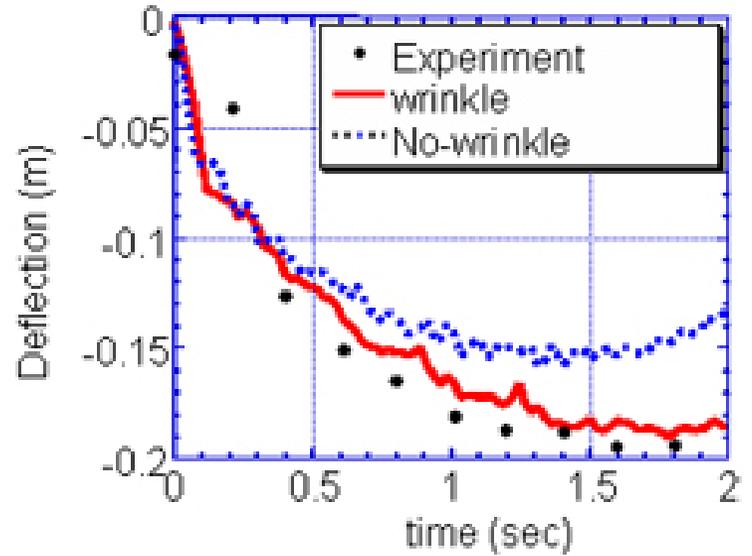
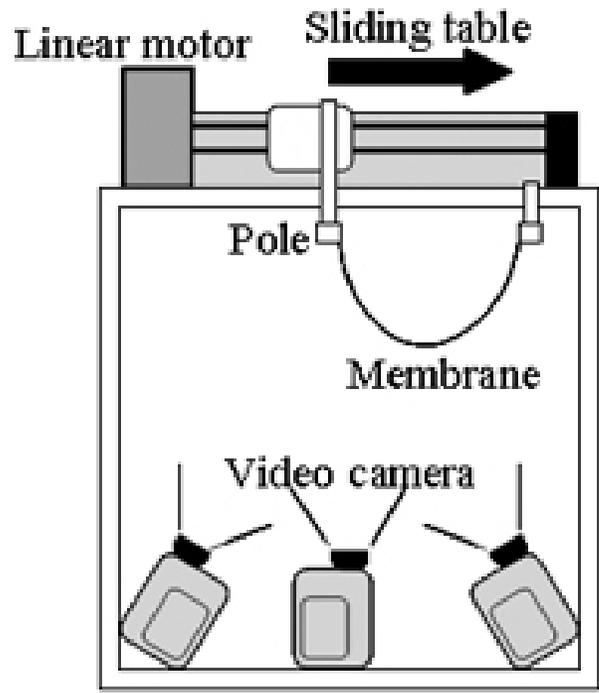
紙をはがすよ
うな開き方を
している



2.2重力下での膜の収納の実験と数値解析(1999)

Masaki Namaizawa, Yoshitaka Nakamura, and Yasuyuki Miyazaki, "Dynamic Analysis of Membrane Structures with Wrinkling Members", Proceedings of Asia-Pacific Vibration Conference, Vol.2, pp.782-787, December 1999.

★しわによる圧縮応力低減の効果



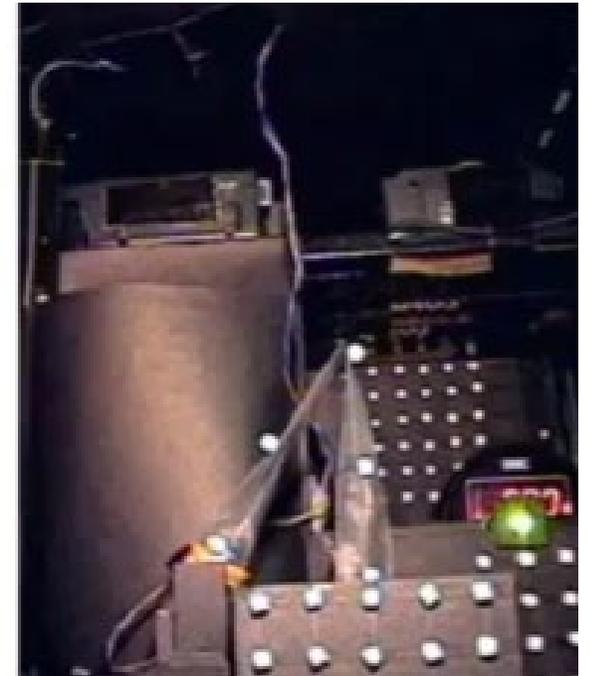
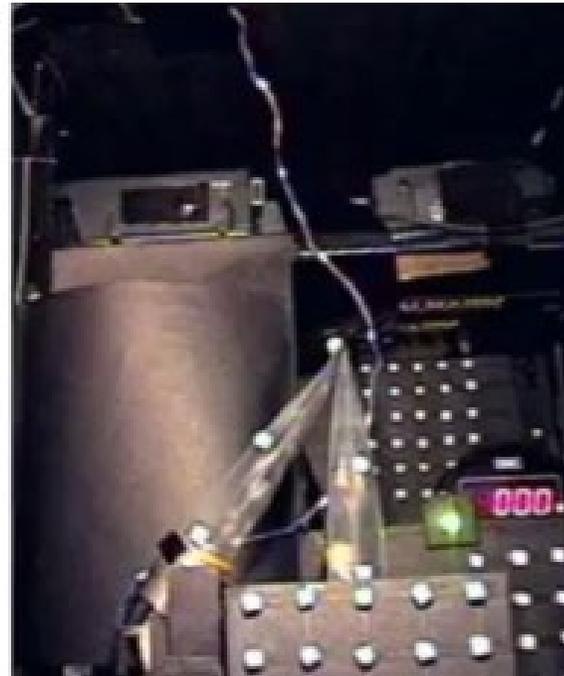
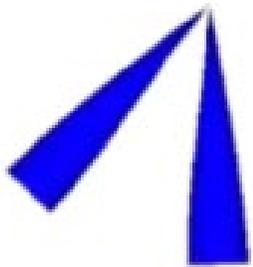
ふつうの平面応力要素では実験と合わないが、膜要素ならそこそこ合う



2.3 無重力下でのインフレータブルチューブの展開(2000)

★ 膜とガスとの相互作用・膜同士の接触

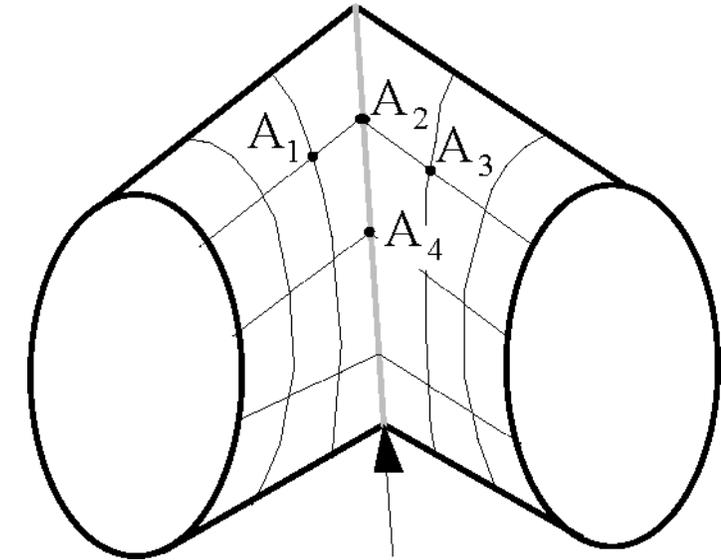
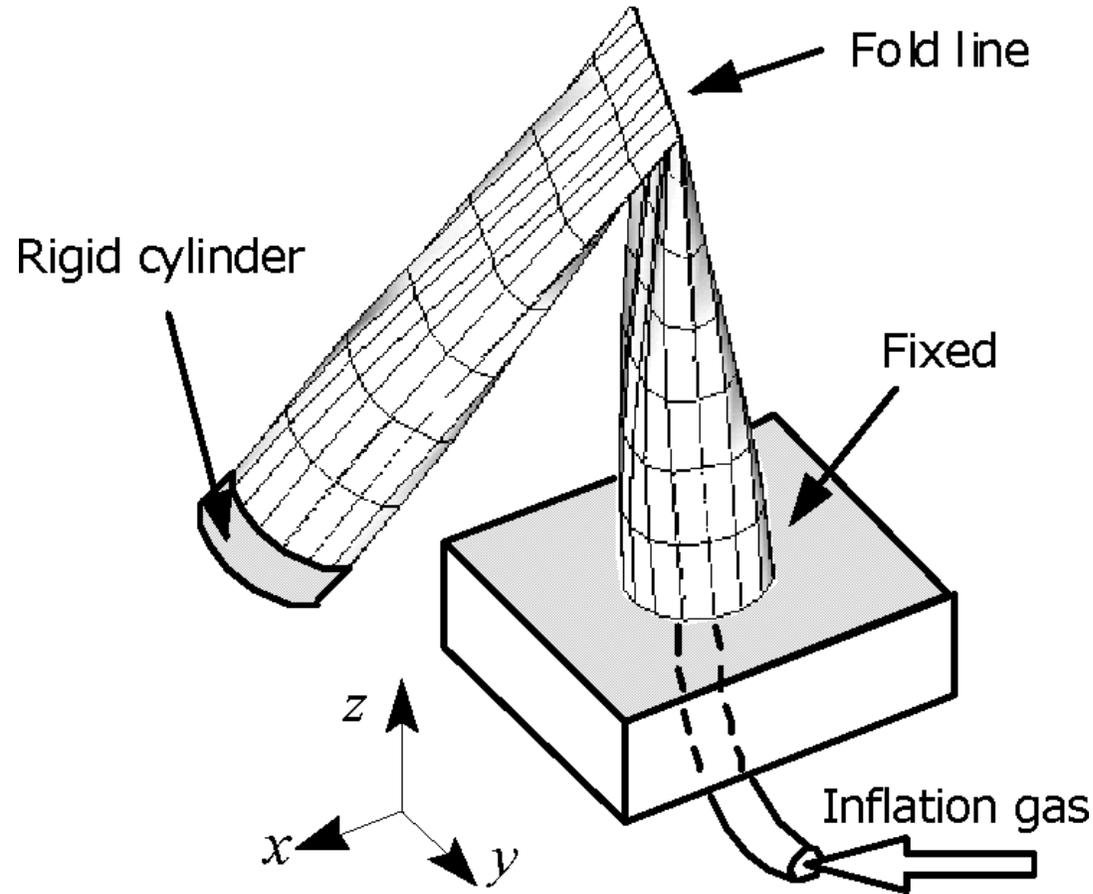
Yasuyuki Miyazaki and Michiharu Uchiki, Deployment dynamics of Inflatable Tube, AIAA Paper 2002-1254, pp.1-10, April 2002. (CD-ROM Proceedings of 43rd AIAA/ASME/ASCE/ AHS/ASC Structures, Structural Dynamics, and Materials Conference), doi: 10.2514/6.2002-1254.



2.3 無重力下でのインフレータブルチューブの展開(2000)

★ 膜とガスとの相互作用・膜同士の接触

Yasuyuki Miyazaki and Michiharu Uchiki, Deployment dynamics of Inflatable Tube, AIAA Paper 2002-1254, pp.1-10, April 2002. (CD-ROM Proceedings of 43rd AIAA/ASME/ASCE/ AHS/ASC Structures, Structural Dynamics, and Materials Conference), doi: 10.2514/6.2002-1254.



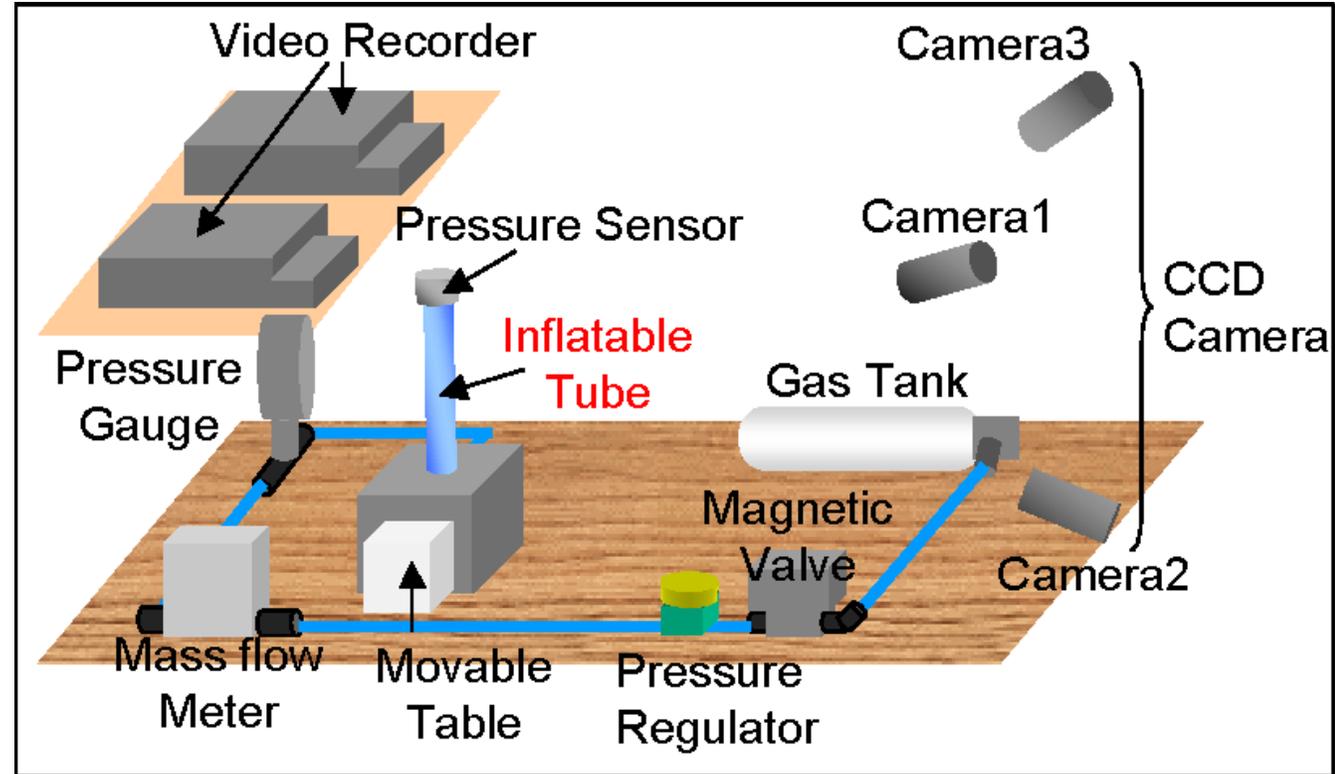
4点で構成される三角錐の体積が負になった場合にペナルティをかける。



2.3 無重力下でのインフレーターチューブの展開(2000)

★ 膜とガスとの相互作用・膜同士の接触

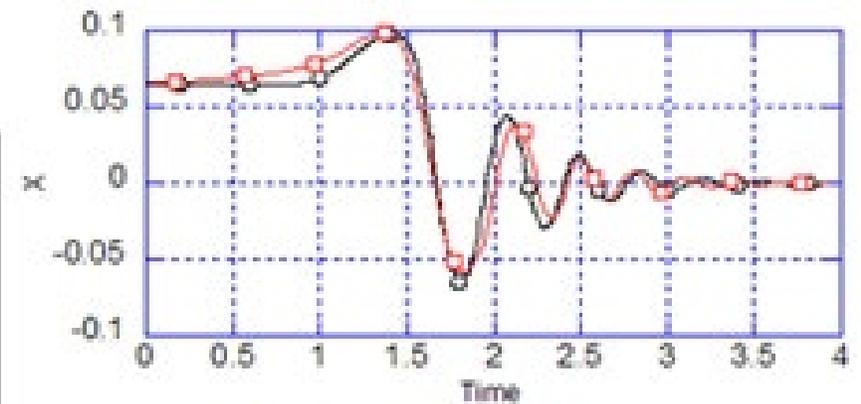
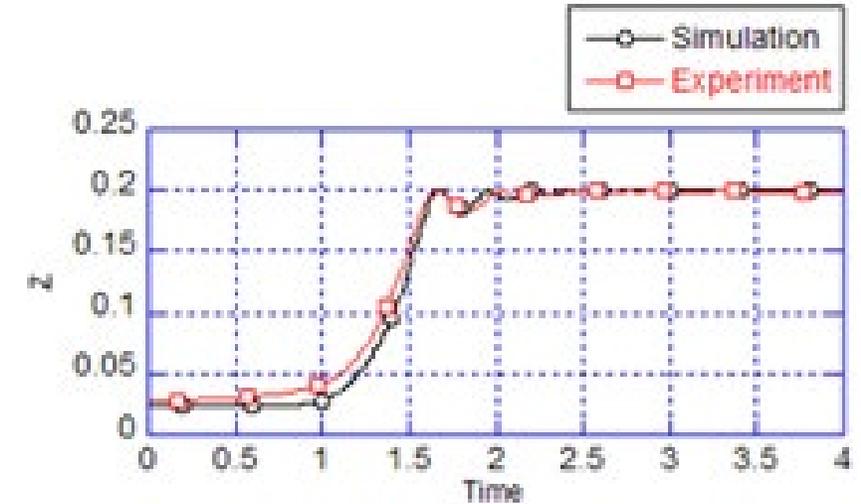
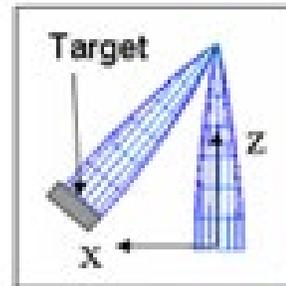
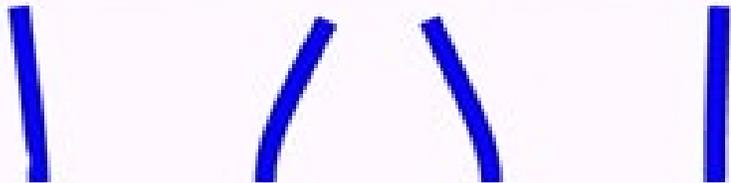
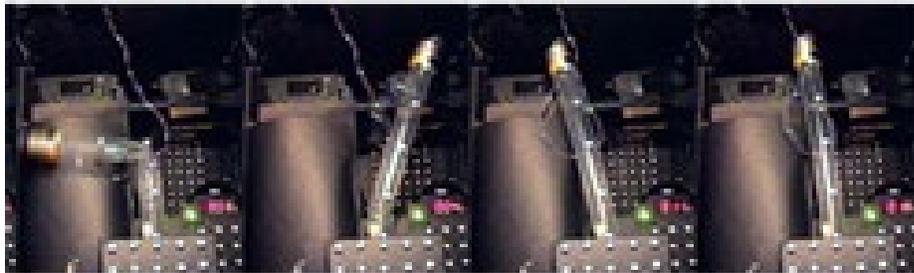
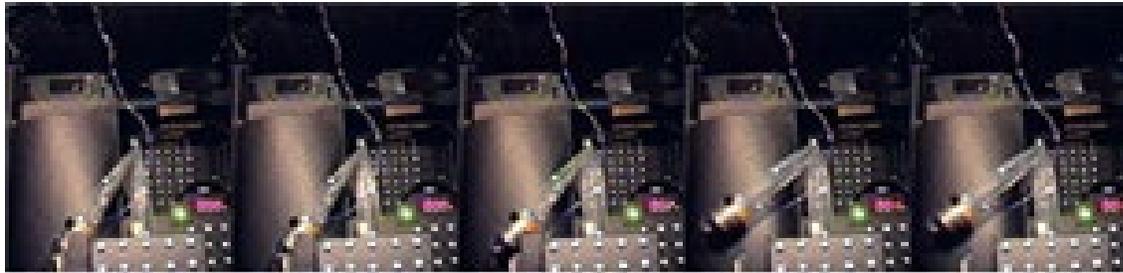
Yasuyuki Miyazaki and Michiharu Uchiki, Deployment dynamics of Inflatable Tube, AIAA Paper 2002-1254, pp.1-10, April 2002. (CD-ROM Proceedings of 43rd AIAA/ASME/ASCE/ AHS/ASC Structures, Structural Dynamics, and Materials Conference), doi: 10.2514/6.2002-1254.



2.3 無重力下でのインフレータブルチューブの展開(2000)

★ 膜とガスとの相互作用・膜同士の接触

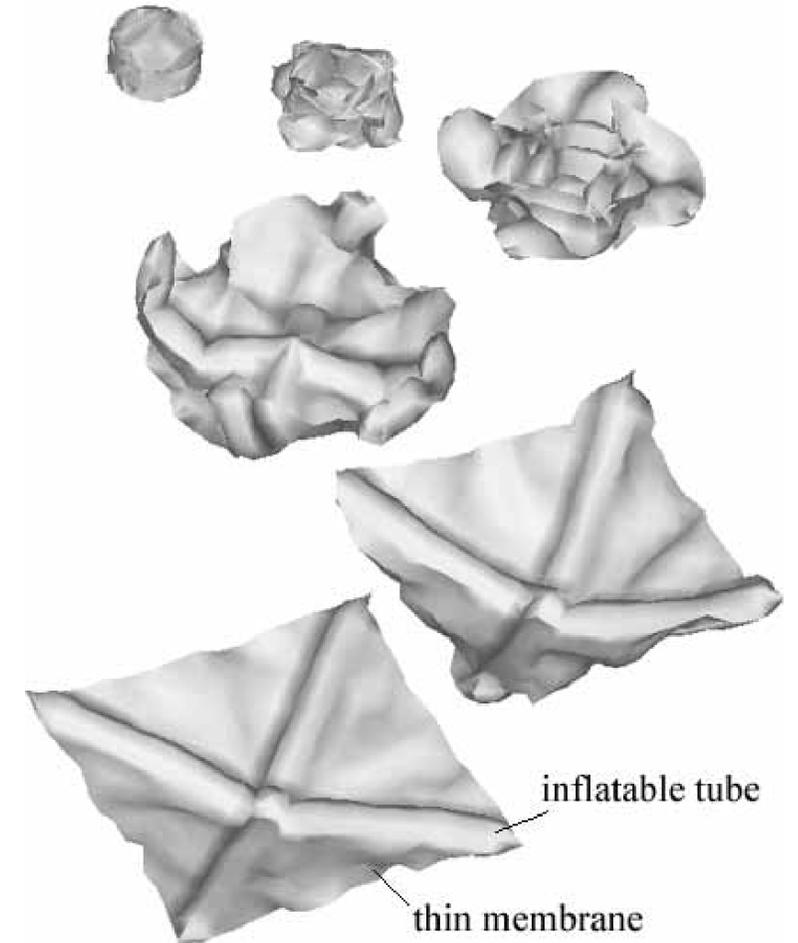
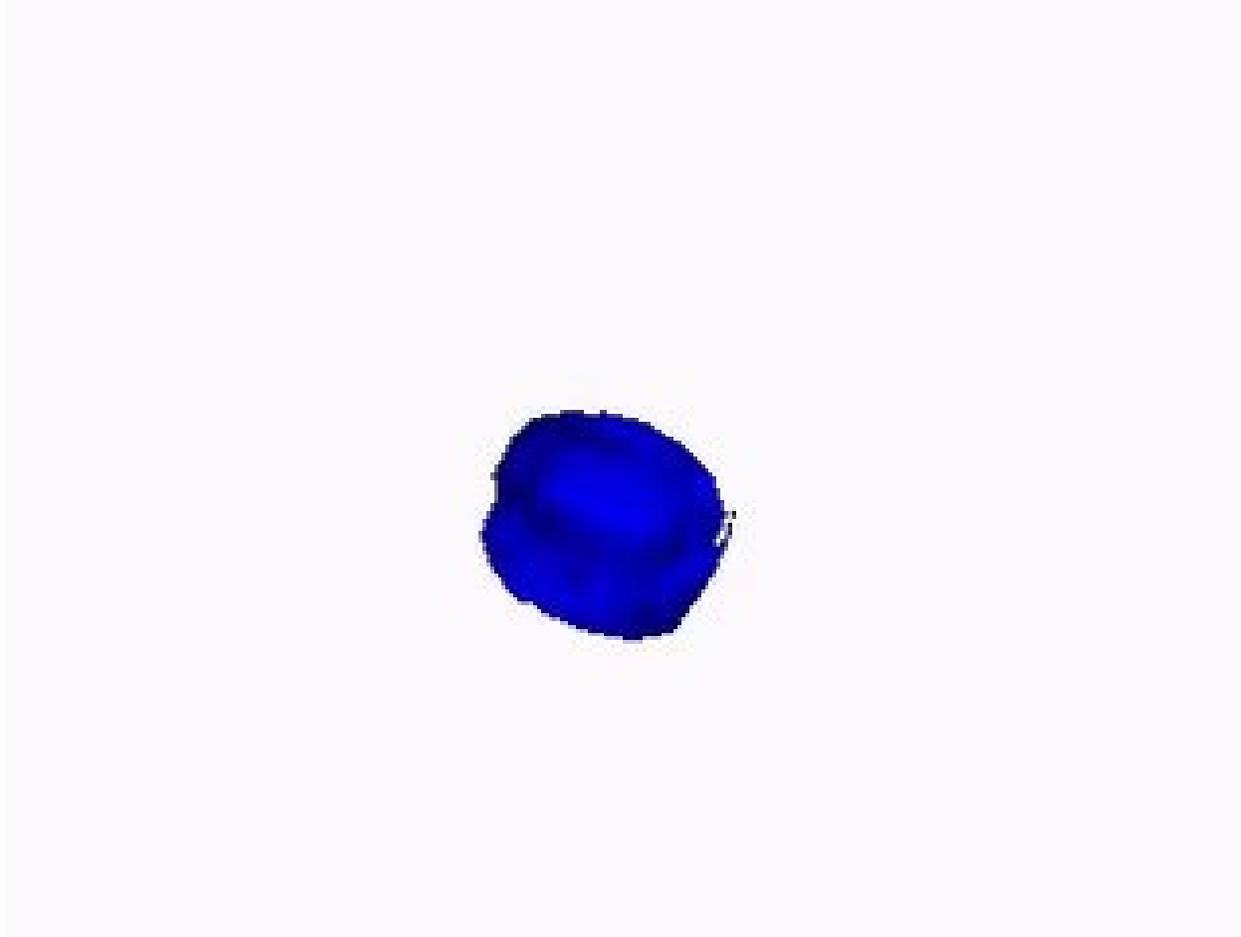
Yasuyuki Miyazaki and Michiharu Uchiki, Deployment dynamics of Inflatable Tube, AIAA Paper 2002-1254, pp.1-10, April 2002. (CD-ROM Proceedings of 43rd AIAA/ASME/ASCE/ AHS/ASC Structures, Structural Dynamics, and Materials Conference), doi: 10.2514/6.2002-1254.



2.4 インフレーターブルチューブによる膜展開(2002)

★ 膜とガスとの相互作用・膜同士の接触

Yasuyuki Miyazaki and Michiharu Uchiki, Deployment dynamics of Inflatable Tube, AIAA Paper 2002-1254, pp.1-10, April 2002. (CD-ROM Proceedings of 43rd AIAA/ASME/ASCE/ AHS/ASC Structures, Structural Dynamics, and Materials Conference), doi: 10.2514/6.2002-1254.



展開しても平面にならずに別の安定点に陥ることも



2.4 インフレーターブルチューブによる膜展開(2002)

★ 膜とガスとの相互作用・膜同士の接触

Yasuyuki Miyazaki and Michiharu Uchiki, Deployment dynamics of Inflatable Tube, AIAA Paper 2002-1254, pp.1-10, April 2002. (CD-ROM Proceedings of 43rd AIAA/ASME/ASCE/ AHS/ASC Structures, Structural Dynamics, and Materials Conference), doi: 10.2514/6.2002-1254.



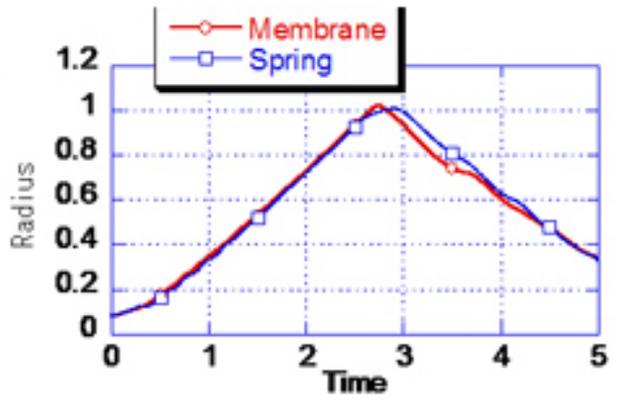
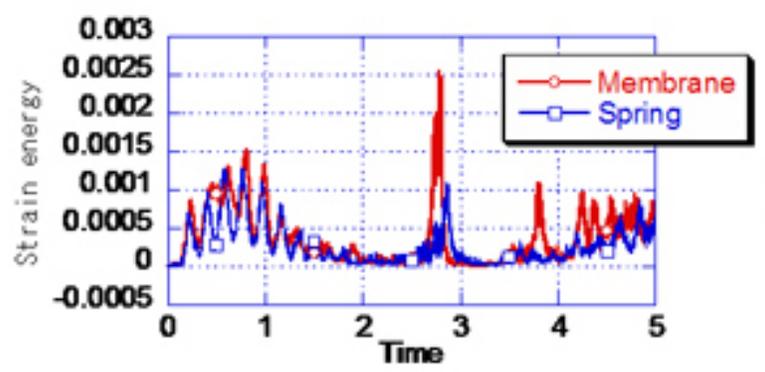
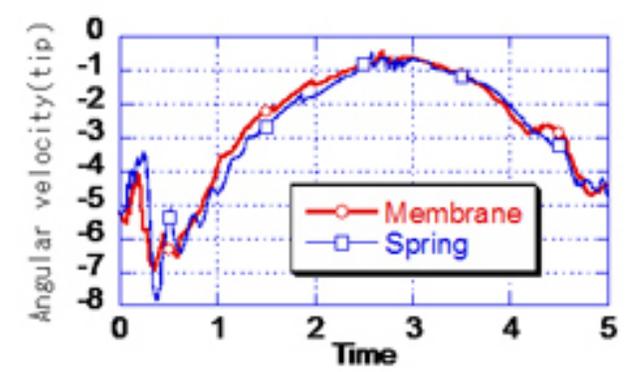
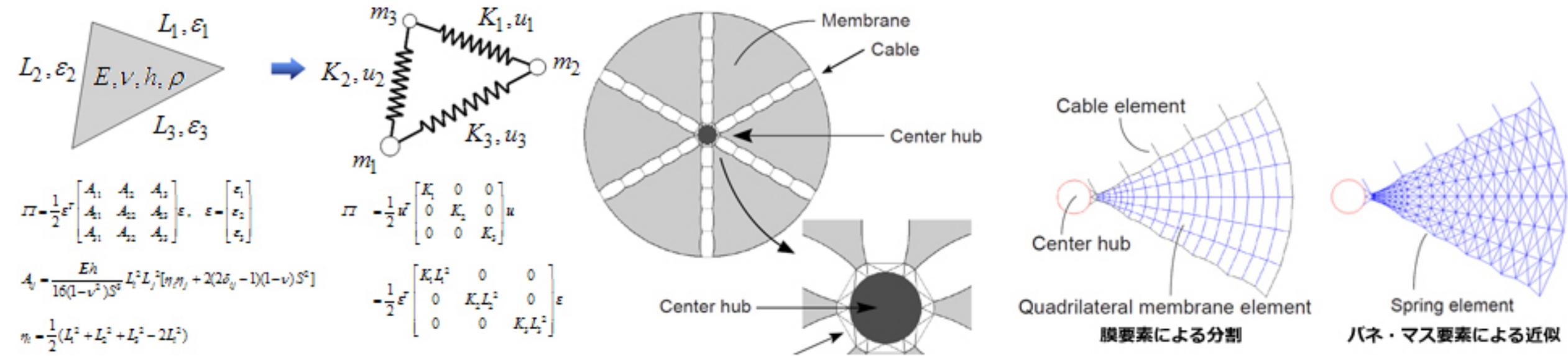
展開しても平面にならずに別の安定点に陥ることも



2.5 ケーブルネットでの膜の模擬(2005)

宮崎康行, 岩井優佳, 「遠心力展開膜面のダイナミクスについて」, 第13回スペース・エンジニアリング・コンファレンス講演論文集, pp.59-64, 2005年1月, 東京

★ ケーブルの等価剛性の算出



張力が小さいときにはそこそよく合う



2.5 ケーブルネットでの膜の模擬(2005)

宮崎康行, 岩井優佳, 「遠心力展開膜面のダイナミクスについて」, 第13回スペース・エンジニアリング・コンファレンス講演論文集, pp.59-64, 2005年1月, 東京

★ ケーブルの等価剛性の算出



2.6 ソーラー電力セル(ISAS/JAXA)(2002-)

Solution Using Particle System Approximation / Simulator Using FEM

2010/6/9 Ikaros

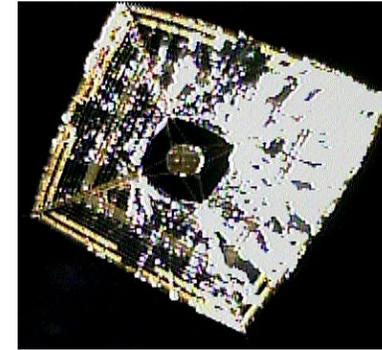
Analytical Approach (Sail Configuration, Response of an Actual Large Scale Membrane)

Experimental Approach (Manufacturing Method, Response of Small Scaled Membranes)

Manufacturing Method, Deployment Hardware, Surface Control Method

2010.5.21 Flight to Jupiter and beyond

Piggy Bag "Ikaros" (20m : length of a diagonal line)



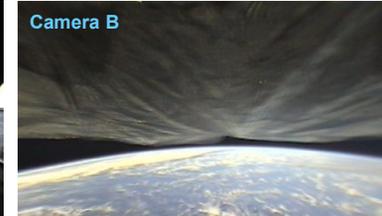
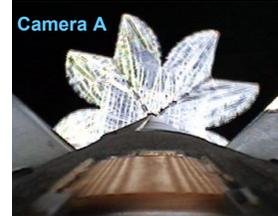
Sawada, IAC-10.C2.2-10

Nishimura, IAC-04-A.5.10; Kawaguchi, IAC-09.D1.1.3

- 世界初のソーラーセイルによる惑星間航行を目指して
- 将来の大型化をにらんだ「スピン展開型」
- 膜面に薄膜太陽電池セルを貼付したソーラー電力セル
- ISAS独自の「光子推進と電気推進のハイブリッド推進」



S310 Exp. Φ10m



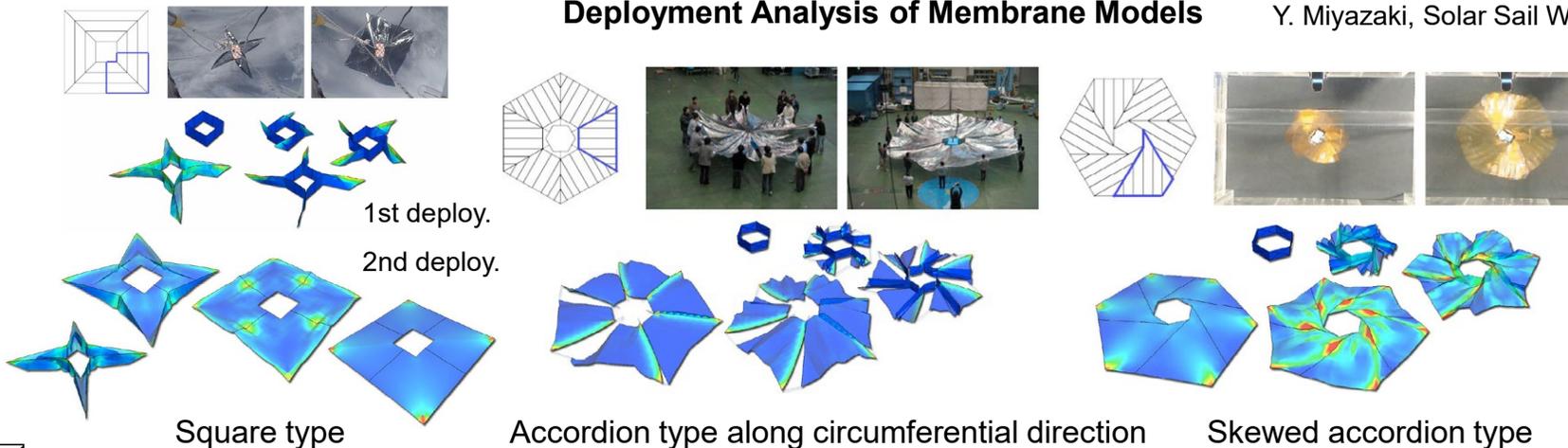
Drop Test in a Vacuum Chamber Φ1.5m

Balloon Test Φ4m

Spin Table Test Φ2.5m

Deployment Analysis of Membrane Models

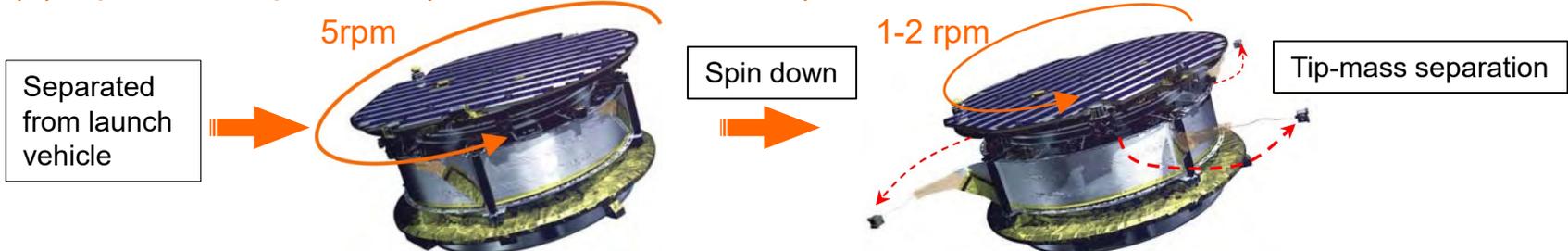
Y. Miyazaki, Solar Sail WG



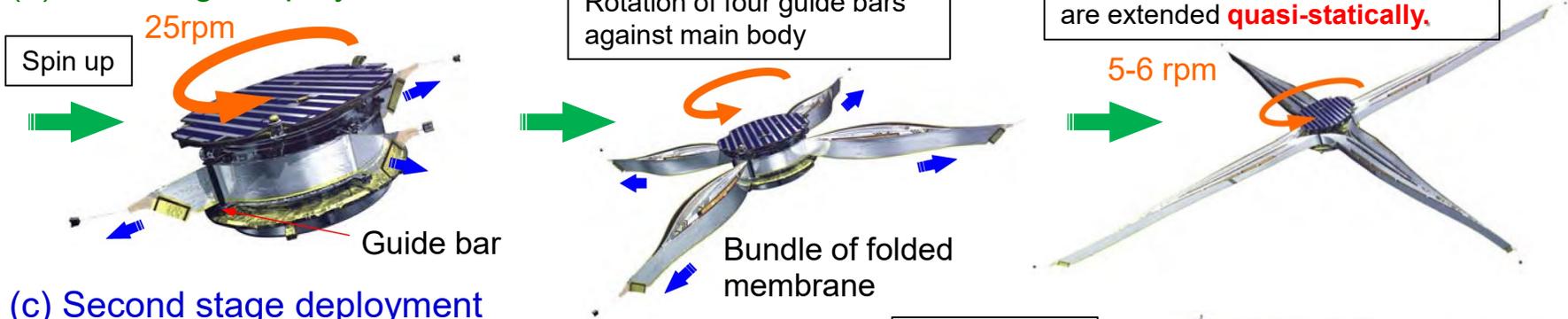
名取通弘先生からいただいた資料より

2.7 IKAROS (2010)

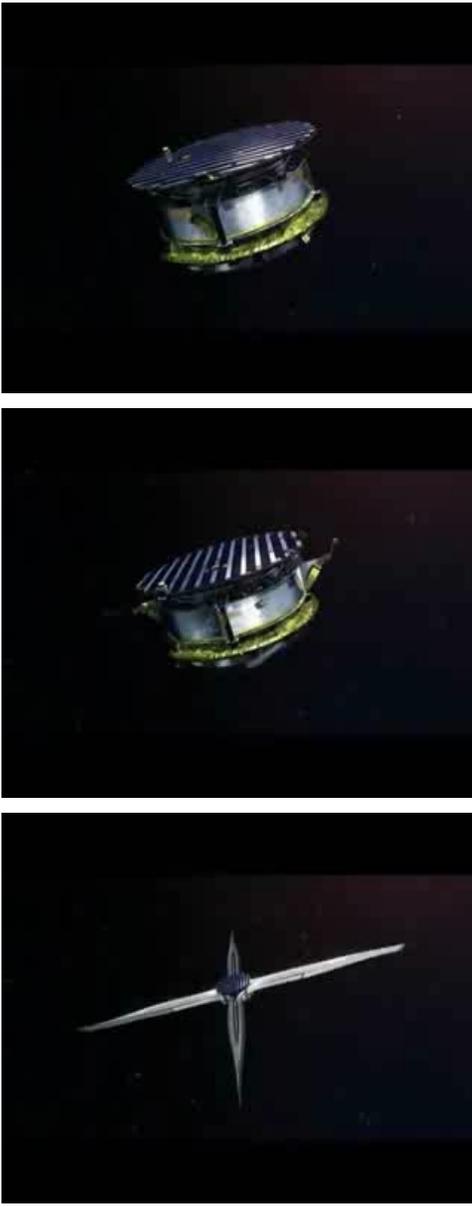
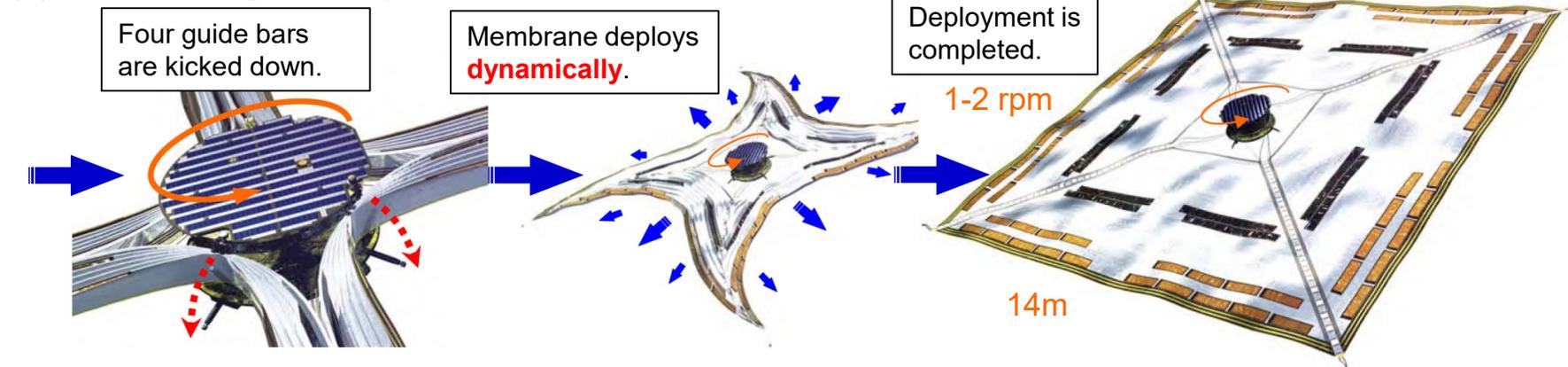
(a) Tip-mass separation (release of launch lock)



(b) First stage deployment



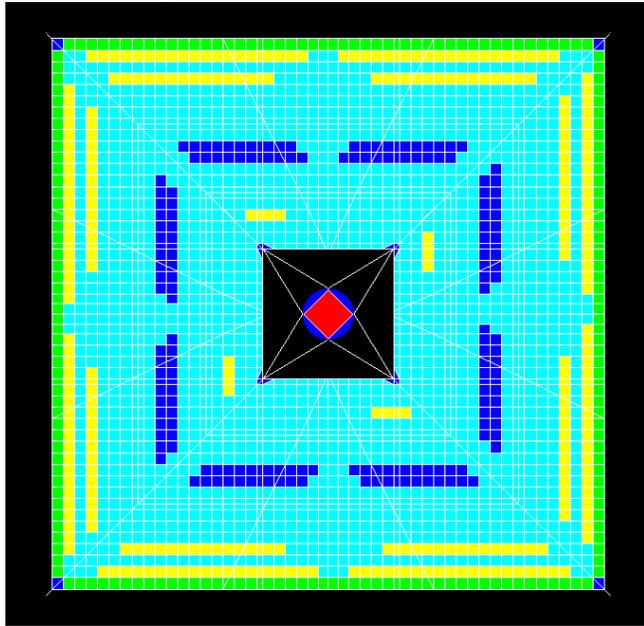
(c) Second stage deployment



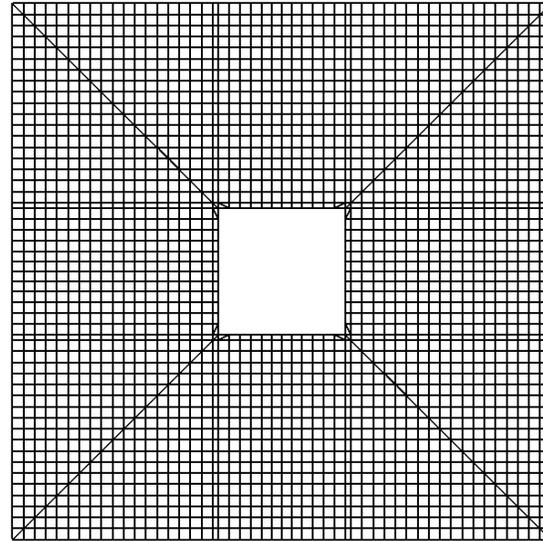
2.7 IKAROS (2010)

★ Finite element mesh

Spacecraft model



Petal

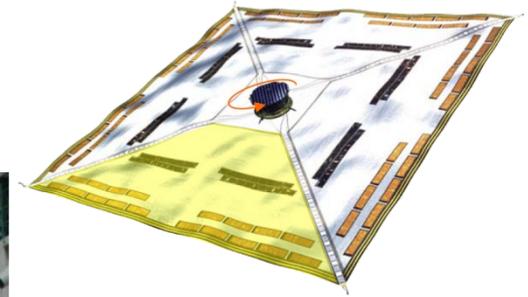
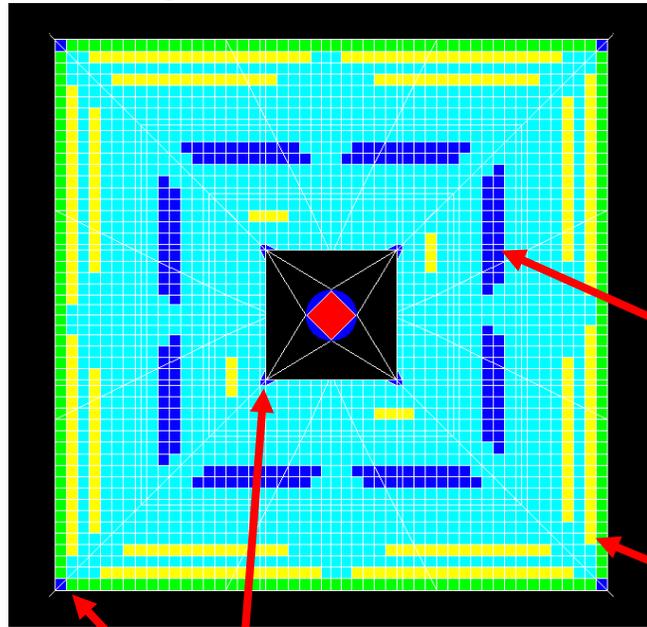


結構, 粗い(11,000自由度程度)

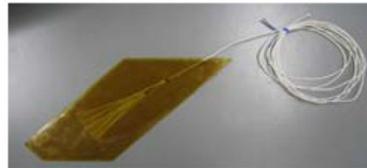
2.7 IKAROS (2010)

★ Attached devices

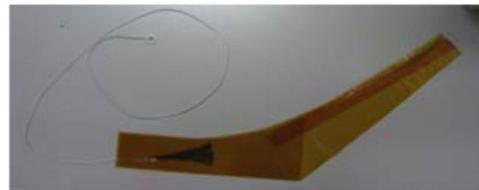
Spacecraft model



Flexible solar cell



Liquid crystal switching film



Tether unit

いろいろなデバイスが付いている



2.7 IKAROS (2010)

★ Reinforcing tape, tether unit, bridge

Cable/bar elements are superposed on membrane elements

❖ Constraint condition

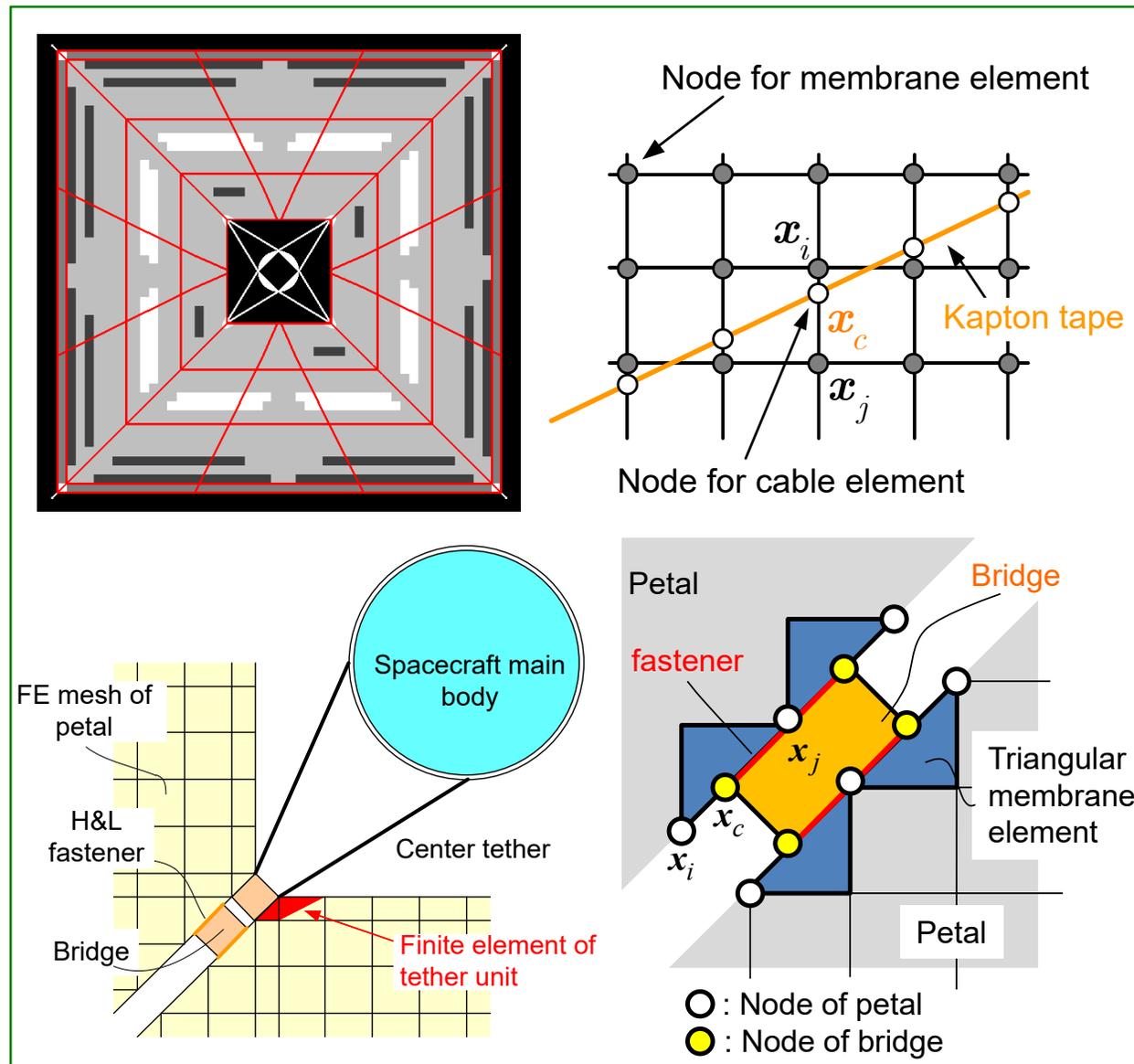
$$\mathbf{x}_c = \alpha_c^i \mathbf{x}_i + \alpha_c^j \mathbf{x}_j$$

❖ Nodal force vector

$$\tilde{\mathbf{f}}_i \leftarrow \tilde{\mathbf{f}}_i + \alpha_c^i \tilde{\mathbf{f}}_c$$

$$\tilde{\mathbf{f}}_j \leftarrow \tilde{\mathbf{f}}_j + \alpha_c^j \tilde{\mathbf{f}}_c$$

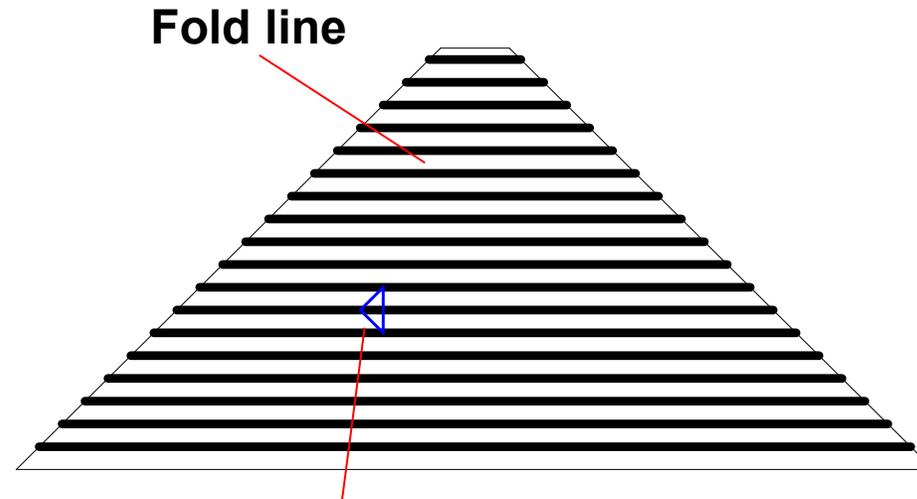
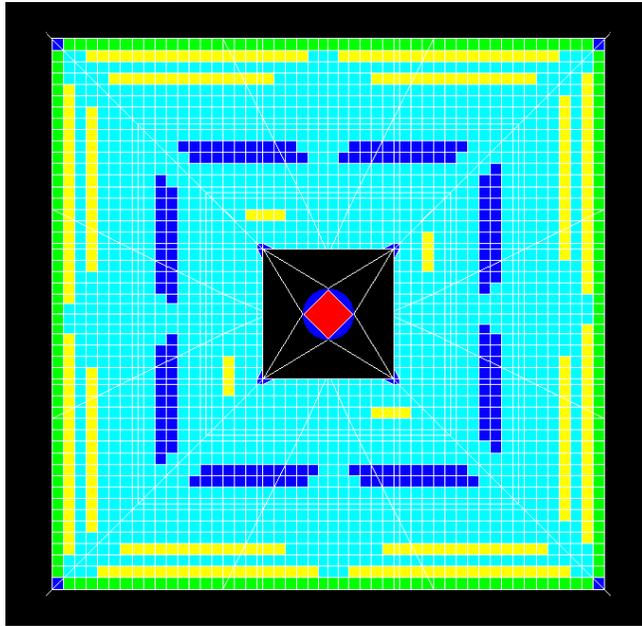
膜面のメッシュが複雑になるのを避けたかった



2.7 IKAROS (2010)

★ Self-contact of membrane

Spacecraft model



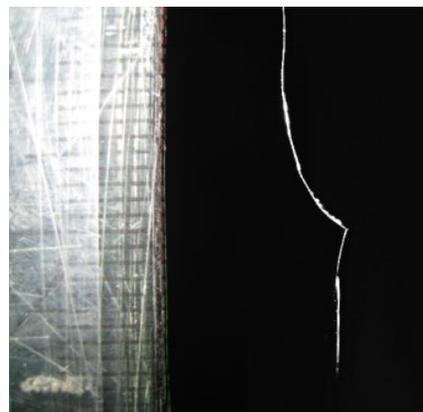
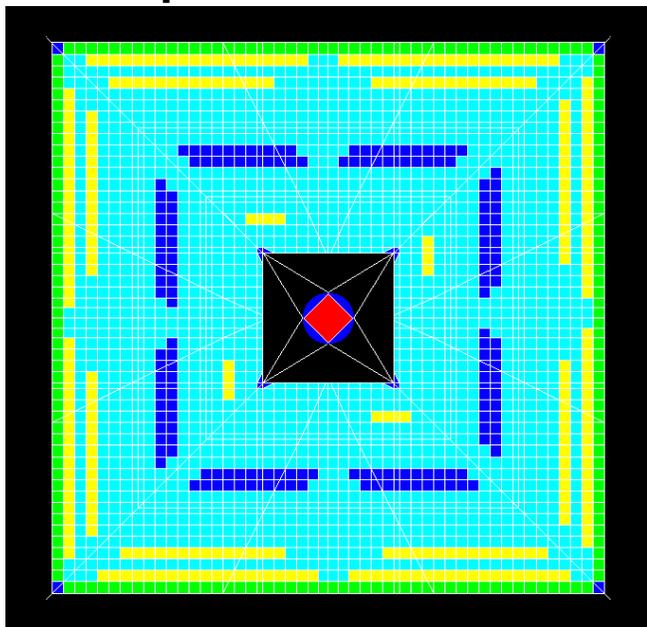
隣り合う要素の接触だけを考慮

Contact of two triangular elements are considered by using penalty method.

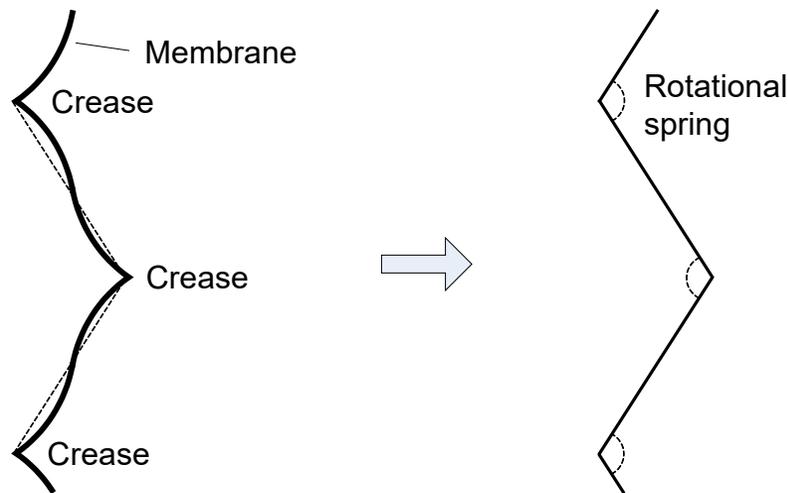
2.7 IKAROS (2010)

★ Bending stiffness of fold line

Spacecraft model



Fold line is assumed to have initial deformation and rotational spring.



このサイズだと、折り目は展開可否に影響を及ぼすほどではなかった(計算時間が無駄に増えただけだったような気がする)。

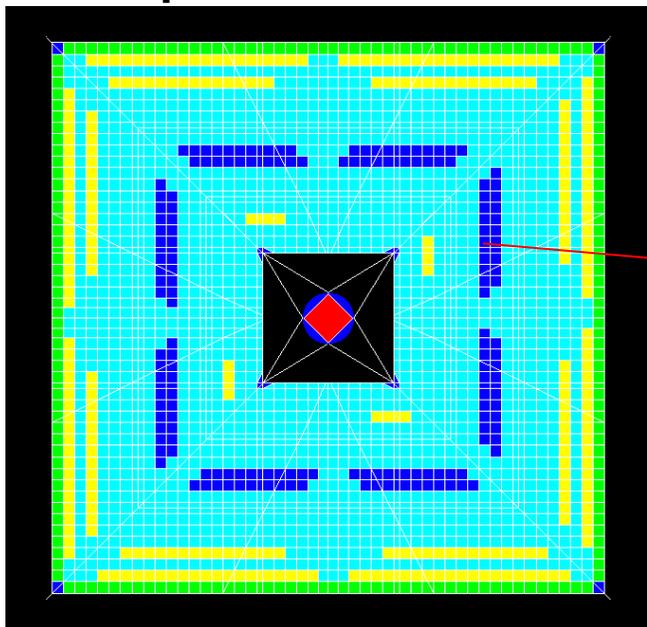
地上だと、スピンドルが小さいと、折り目の影響はそれなりにある。



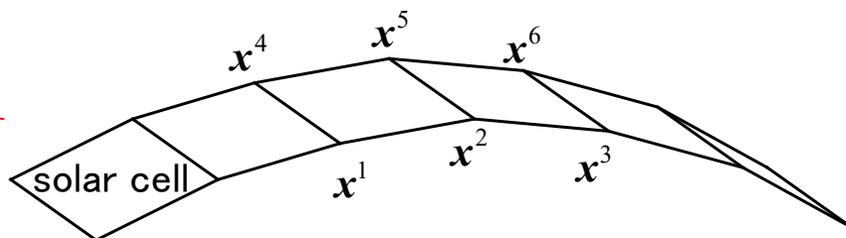
2.7 IKAROS (2010)

★ Bending stiffness of flexible solar cell

Spacecraft model



Bending rigidity of solar cell



$$2 \sin^2 \frac{\theta}{2} = 1 - \left[\frac{x^5 - x^1}{|x^5 - x^1|} \times \frac{x^1 - x^2}{|x^1 - x^2|} \right] \cdot \left[\frac{x^3 - x^2}{|x^3 - x^2|} \times \frac{x^5 - x^1}{|x^5 - x^1|} \right]$$

$$\kappa = \frac{\theta}{L} \approx \frac{2 \sin \frac{\theta}{2}}{L}, \quad L \equiv \frac{|X^1 - X^2| + |X^3 - X^2|}{2}$$

$$U^{in} = \frac{L}{2} EI \kappa^2 \approx \frac{2EI}{L} \sin^2 \frac{\theta}{2}$$

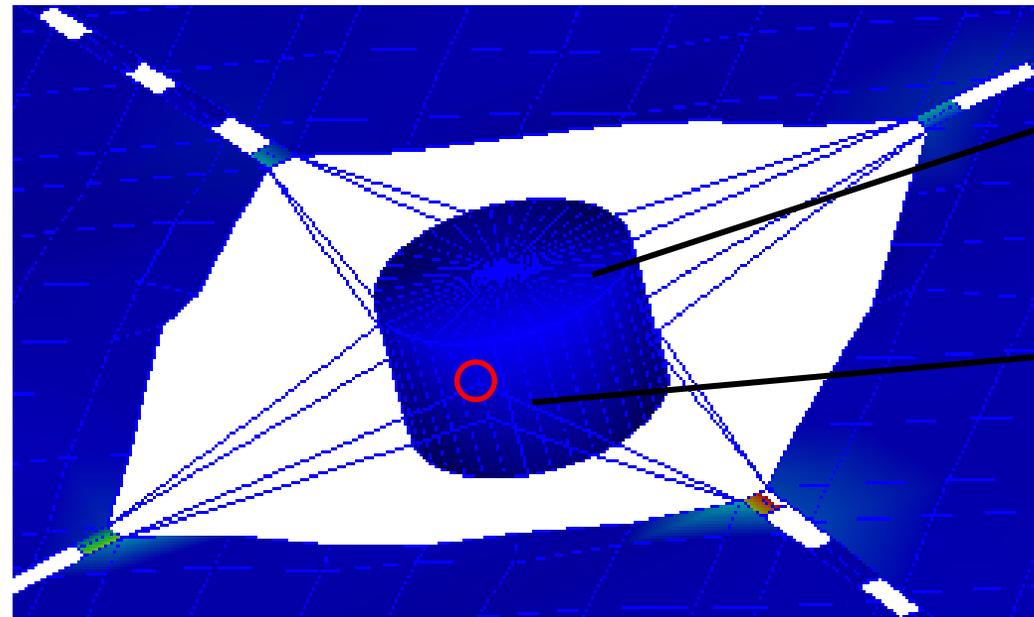
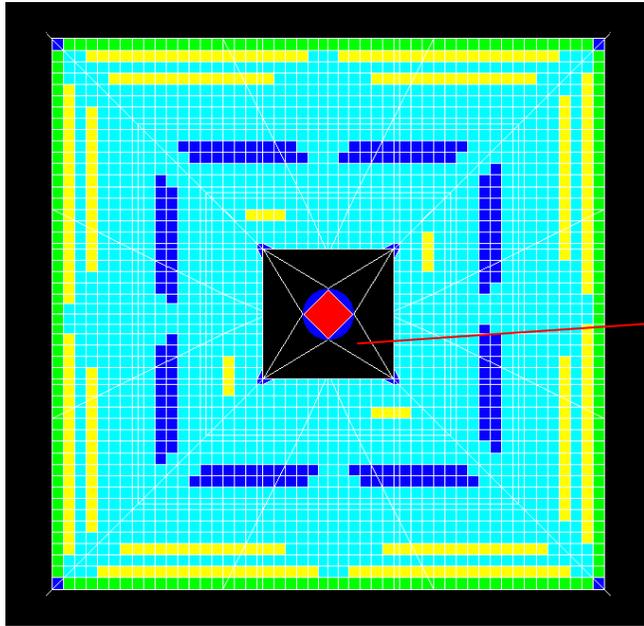
「シェル要素で計算すればいいじゃないか」と思う人も多いでしょうが、節点に回転自由度を追加して計算するのが面倒だったのと、シェル要素だと、メッシュを細かくしないと柔軟性をうまく模擬できないので、手を抜いた。



2.7 IKAROS (2010)

★ Holonomic constraint

Spacecraft model



Main body

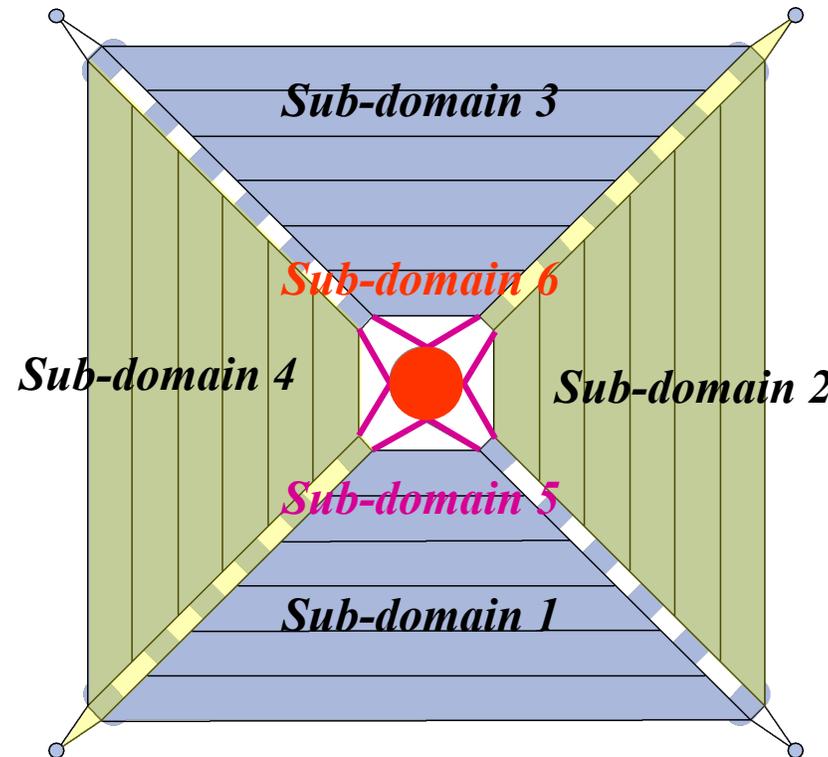
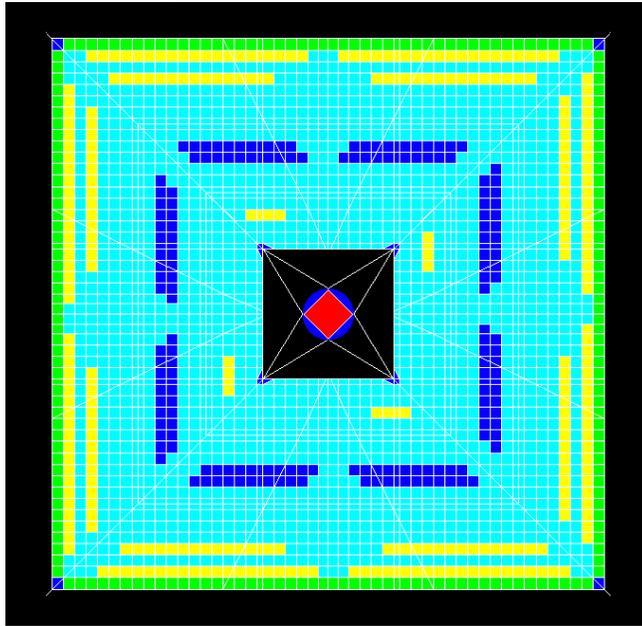
Center tether

探査機本体は剛体として、テザーの節点はHolonomic拘束で結合

2.7 IKAROS (2010)

★ Sub-domain decomposition for parallel computing

Spacecraft model



Computation time is reduced to about 25 % of that by non-parallel computation

当時はMPIで並列コードを自作しましたが、多分、今なら並列化用のソフトを使ってずっと早く計算できるでしょう。

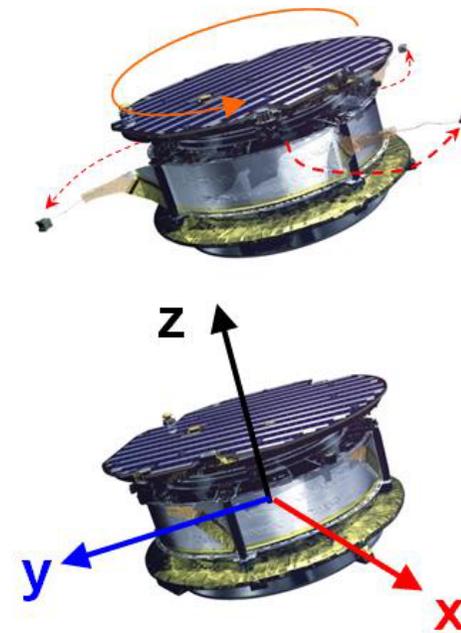
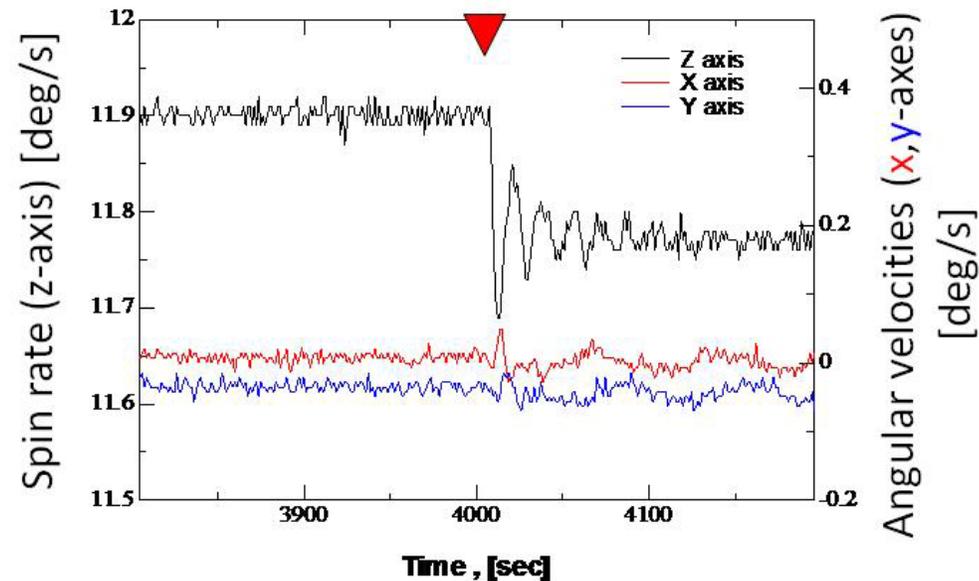


2.7 IKAROS (2010)

★ Tip mass separation

Four tip masses were separated.

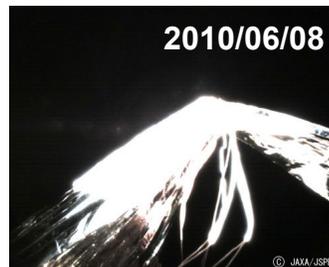
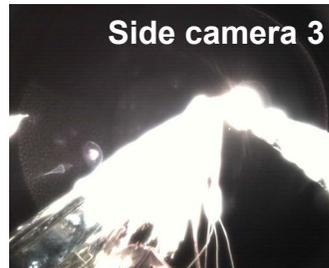
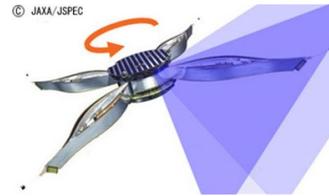
Tip masses were separated from the main body



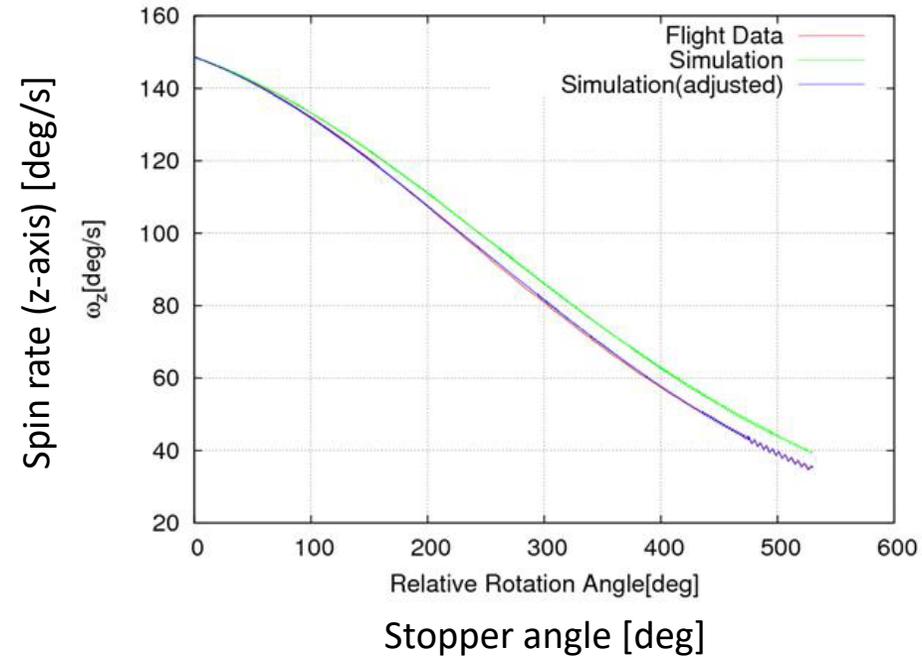
- The spin rate was decreased due to conservation of angular momentum.
 - The angular velocities of x, y-axes were zero before and after this event.
(If one of the tip masses was not separated, nutation motion was occurred.)
- => Four tip masses were separated at the same time.

2.7 IKAROS (2010)

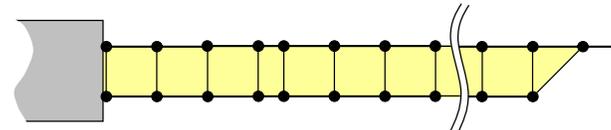
★ First stage deployment



First stage deployment



adjusted by changing the mass distribution,

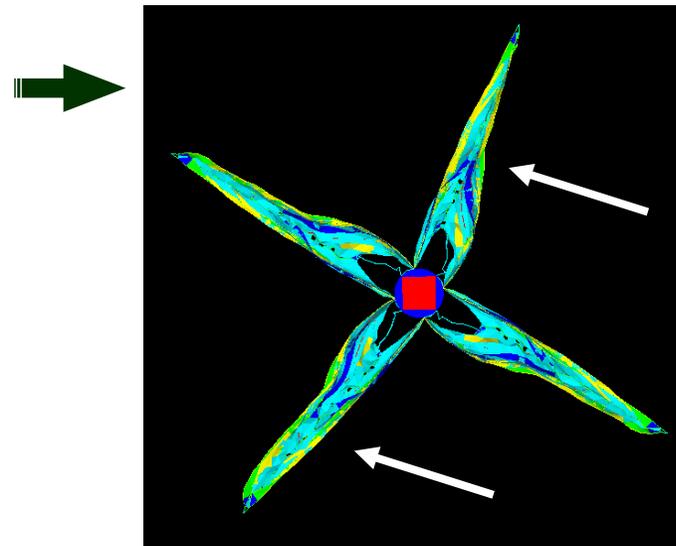
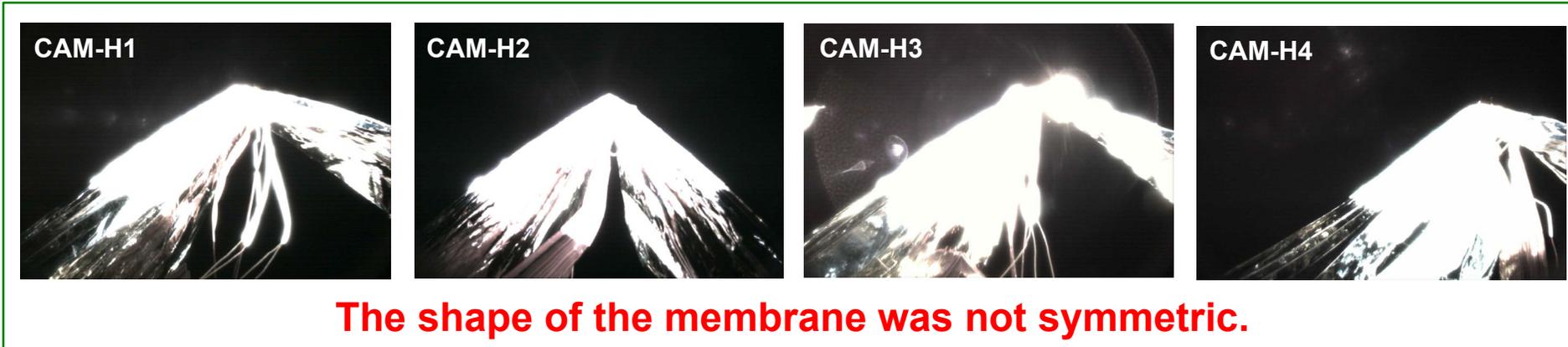
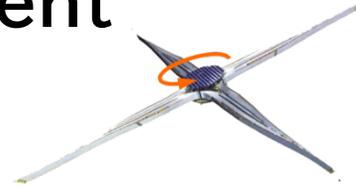


Simulation data (adjusted mode) = Flight data



2.7 IKAROS (2010)

★ Membrane shape at the beginning of 2nd stage deployment

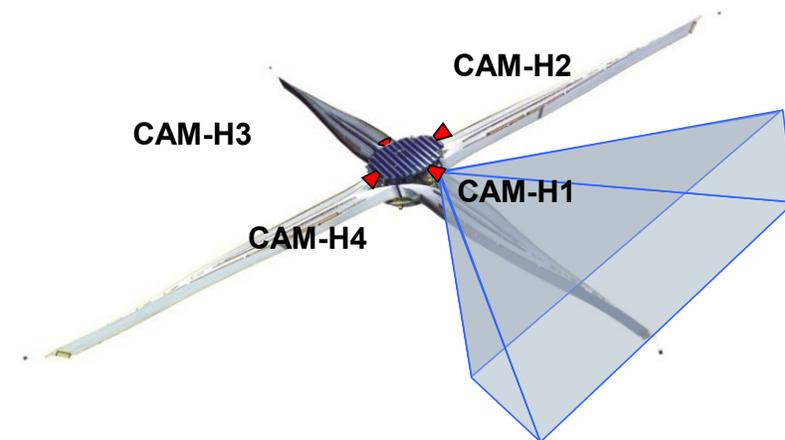
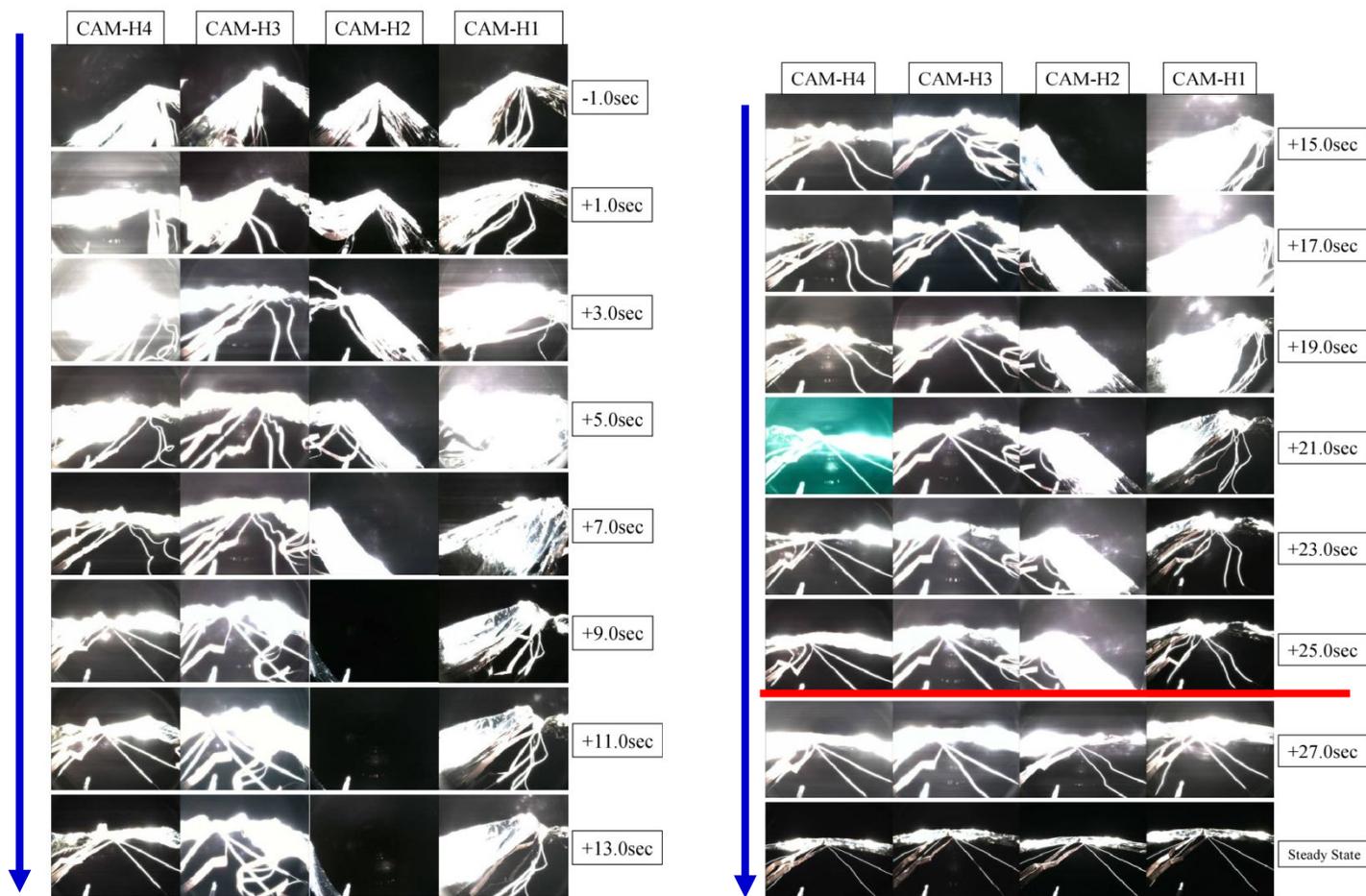


多分、こんな感じの形になっていたのでしょう。



2.7 IKAROS (2010)

★ Membrane shape during 2nd stage deployment

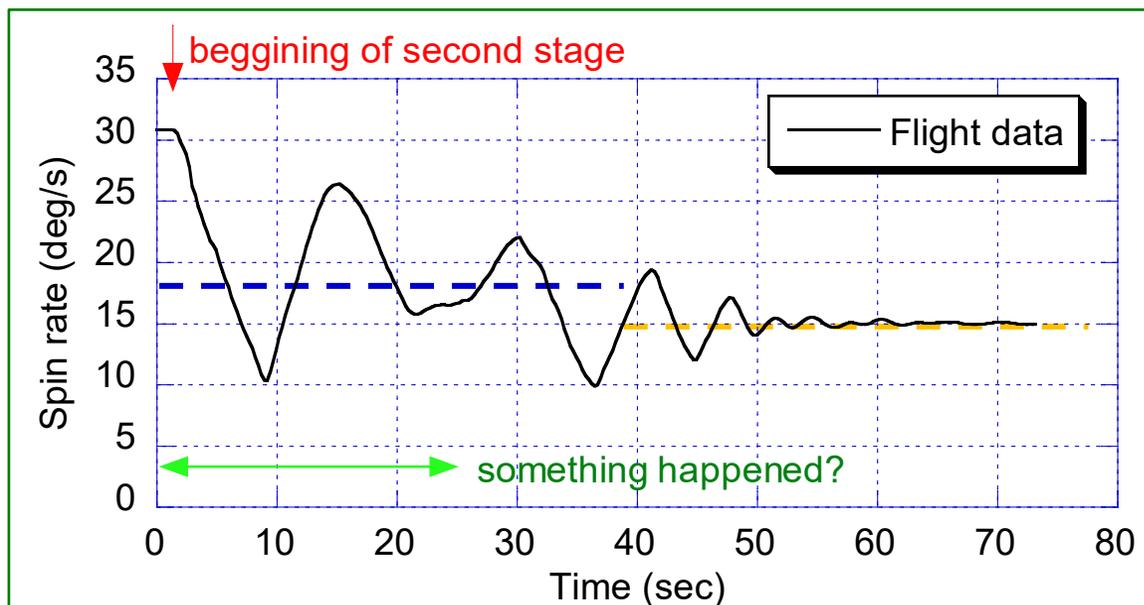


The deployment was not symmetric and was completed after +25.0sec since the 2nd stage started.



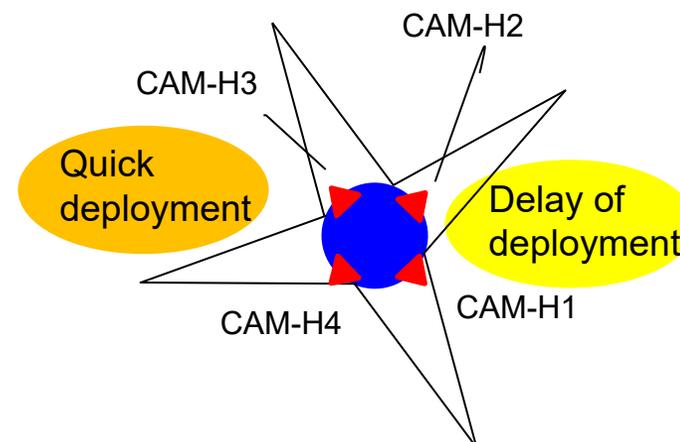
2.7 IKAROS (2010)

★ Membrane shape during 2nd stage deployment



The spin rate would be converging to 18 deg/sec during the first 25 seconds. After that, the spin rate converged to 15 deg/sec.

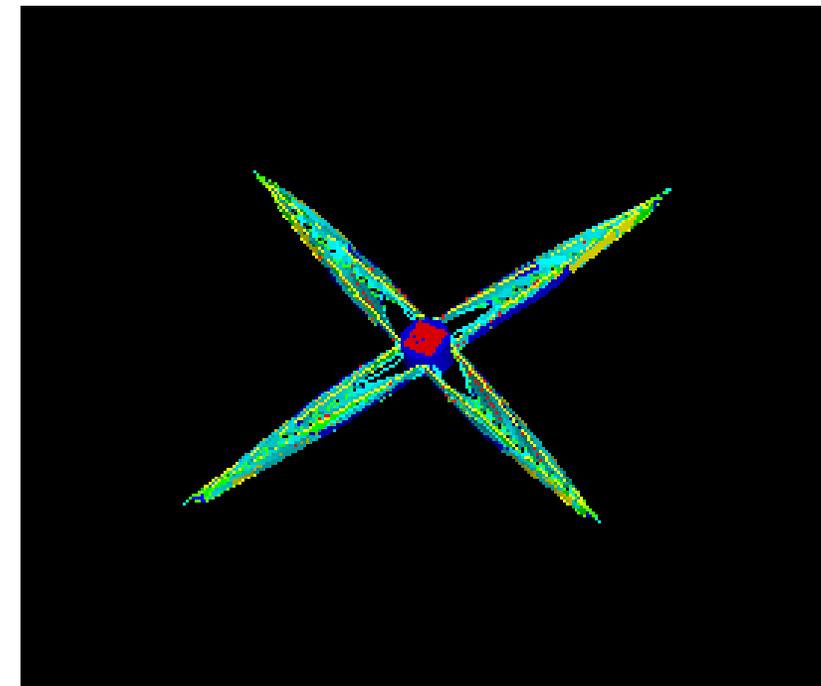
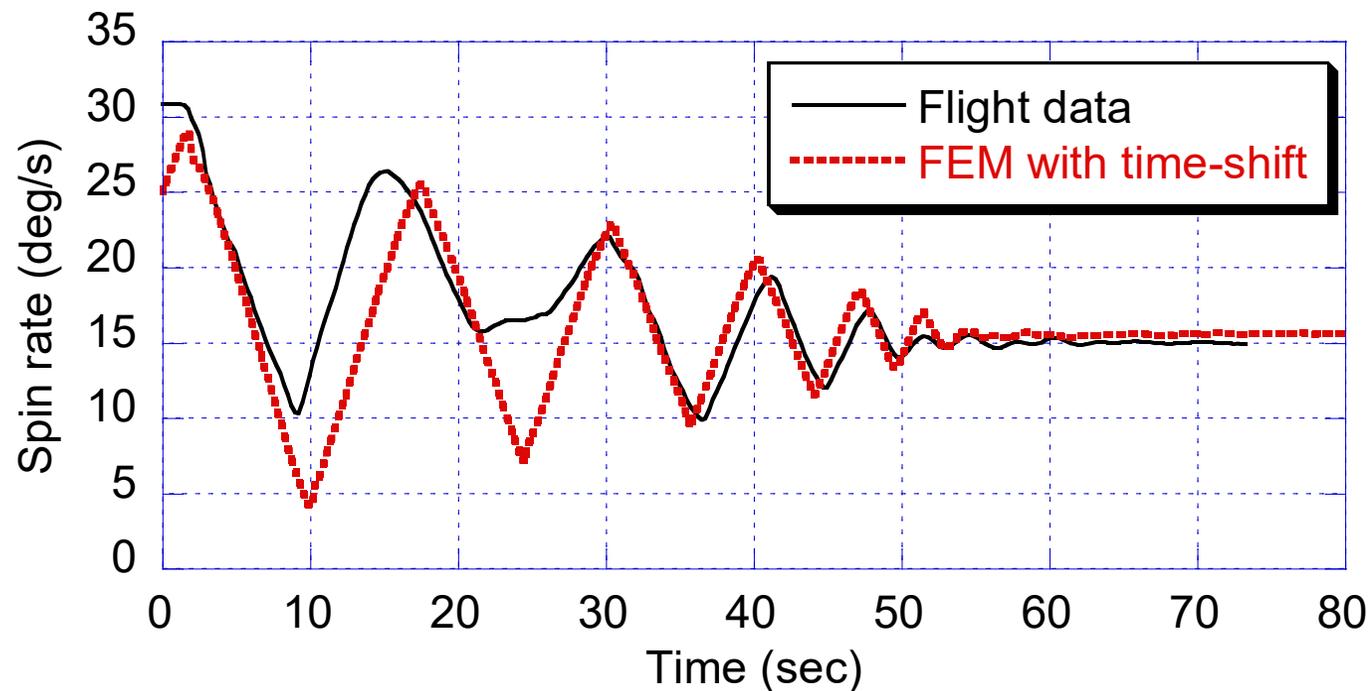
The oscillation damped very quickly.



- ❖ **Such a two-phase process may be caused by the asynchronous deployment of the membrane.**

2.7 IKAROS (2010)

★ Membrane shape during 2nd stage deployment



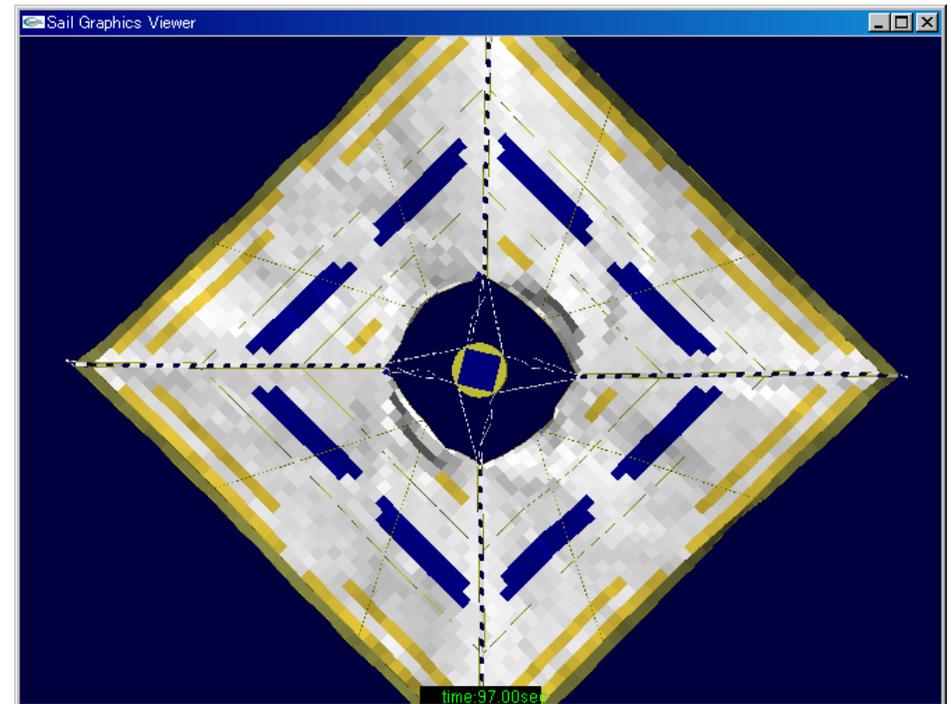
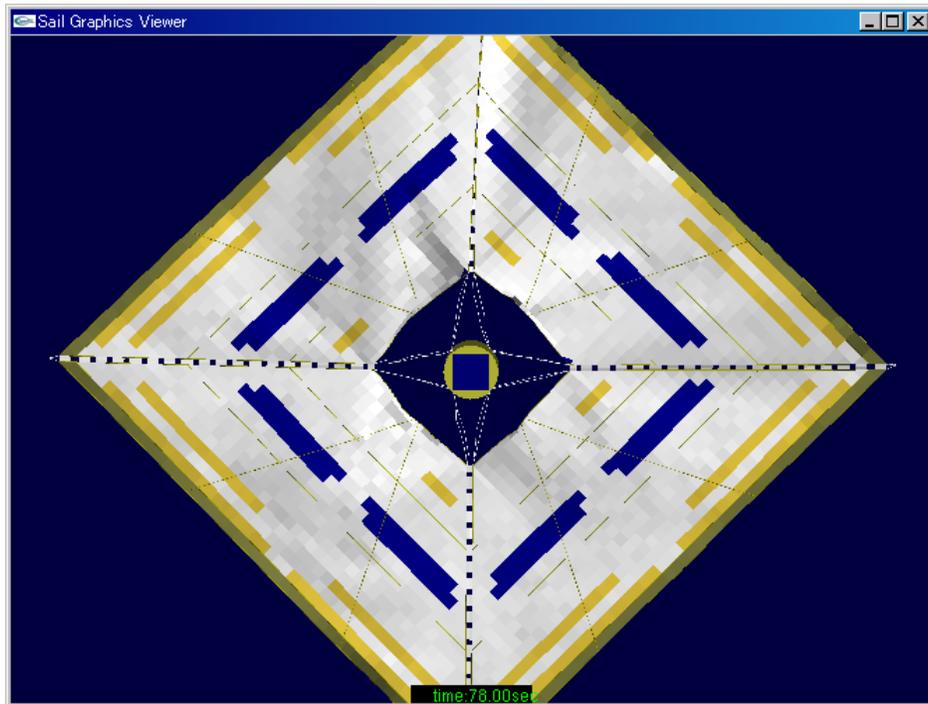
カクカクするのが膜の展開の特徴

膜のひっかかりを考慮して、
ちょっと時間をずらすと、なんと
なくそれっぽくなる



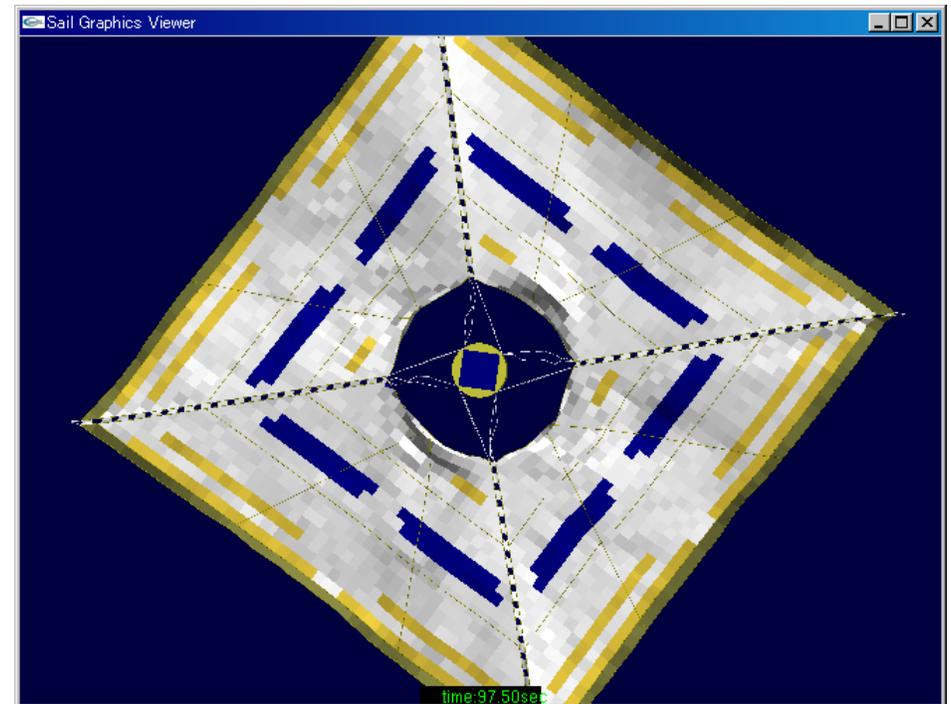
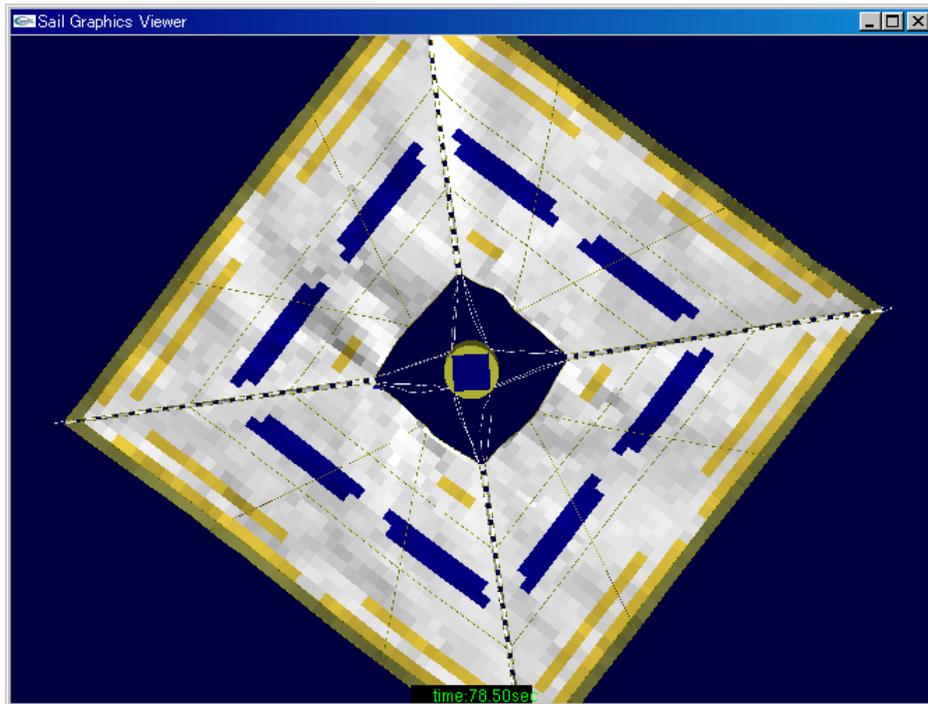
2.7 IKAROS (2010)

★ 膜要素(左)とケーブルネットワーク(右)との違い



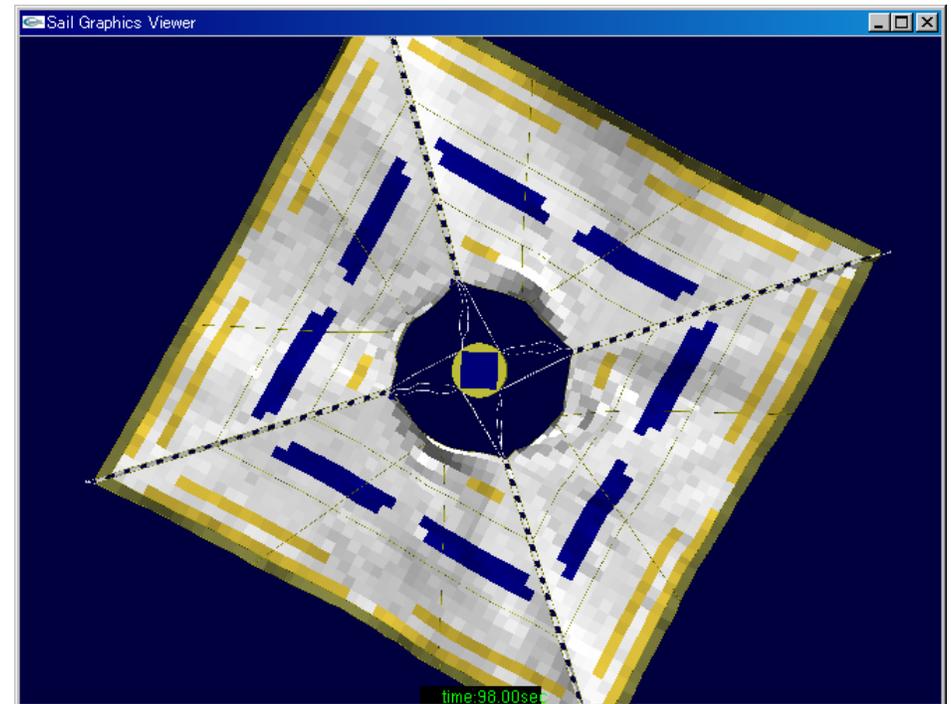
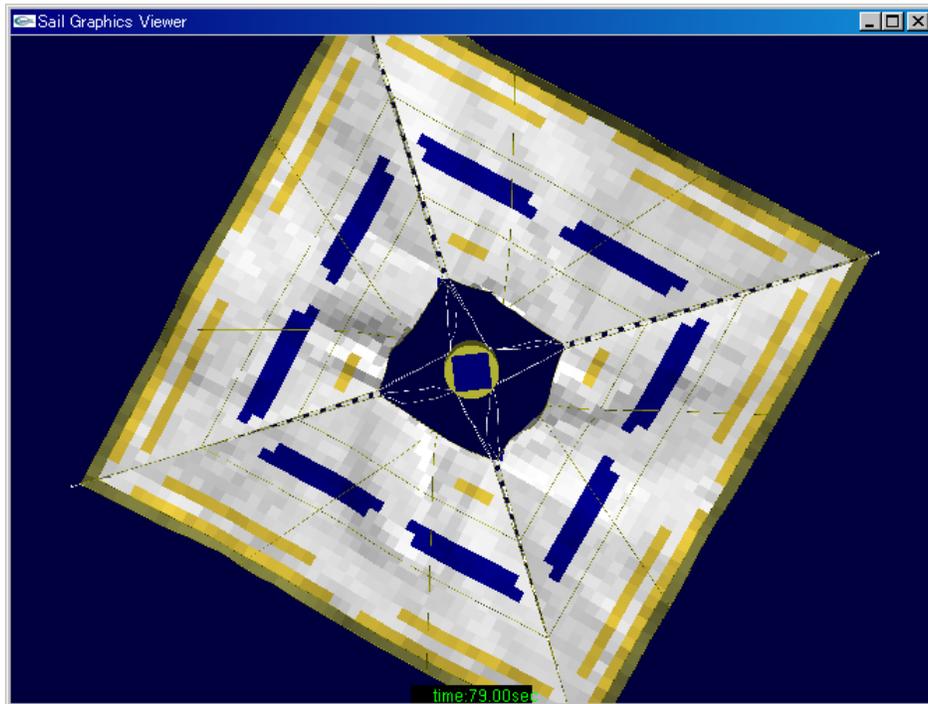
2.7 IKAROS (2010)

★ 膜要素(左)とケーブルネットワーク(右)との違い



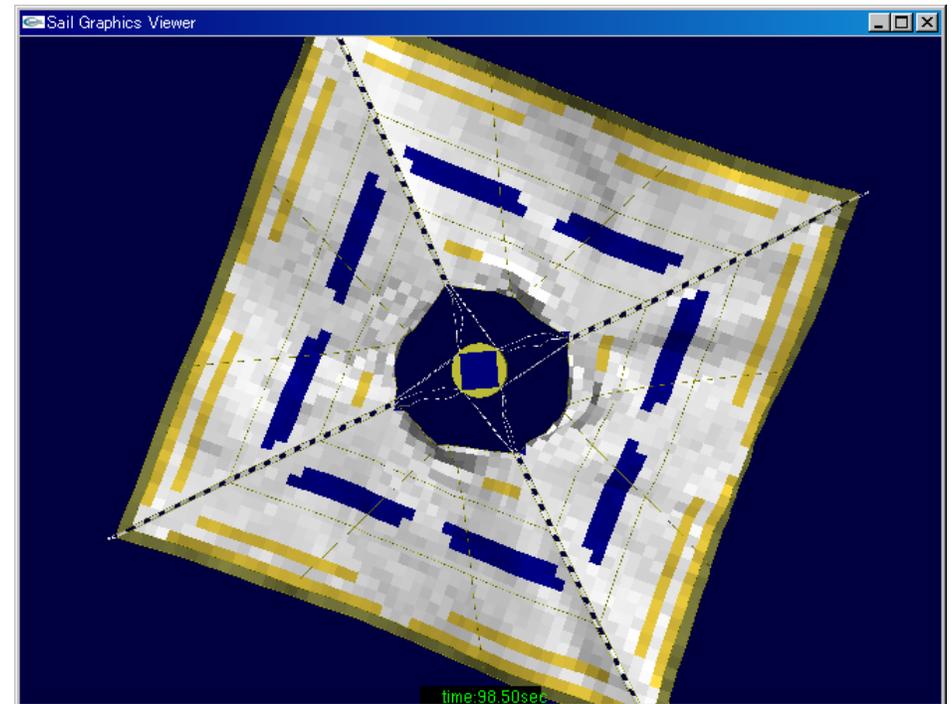
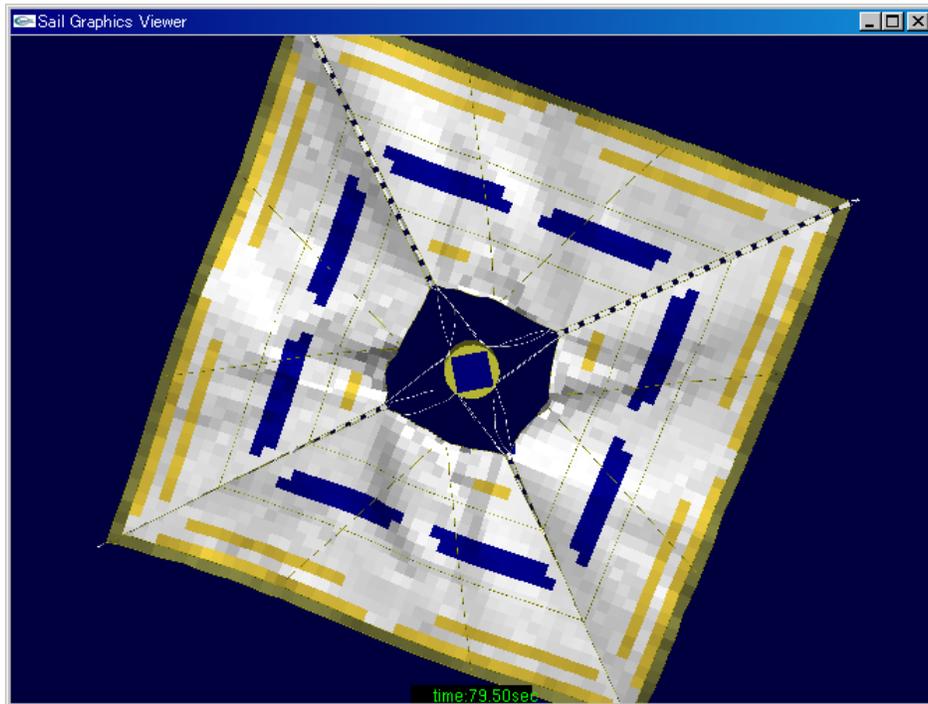
2.7 IKAROS (2010)

★ 膜要素(左)とケーブルネットワーク(右)との違い



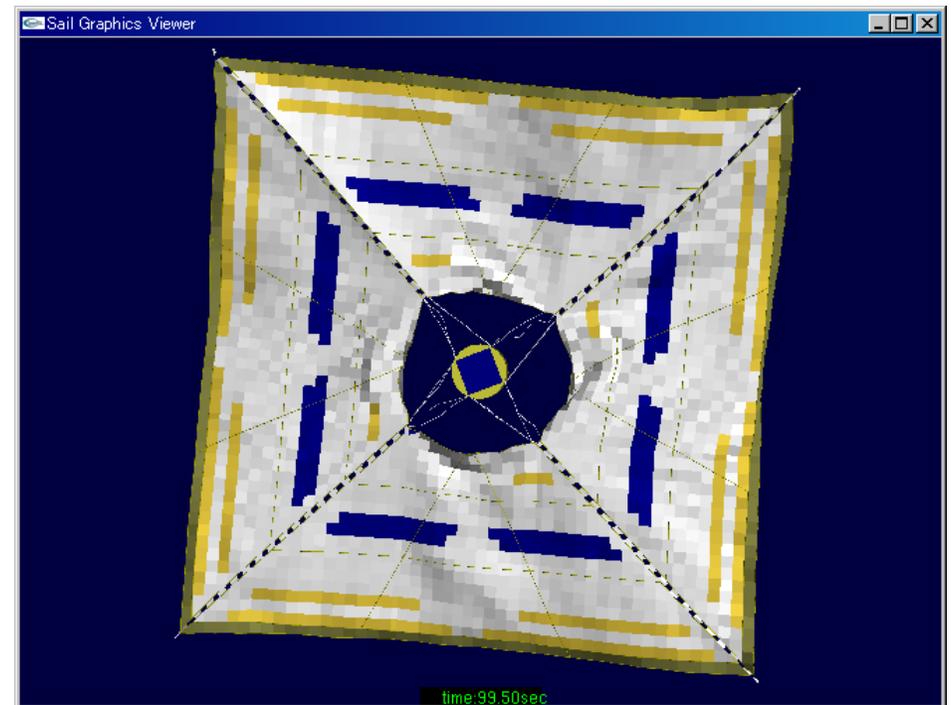
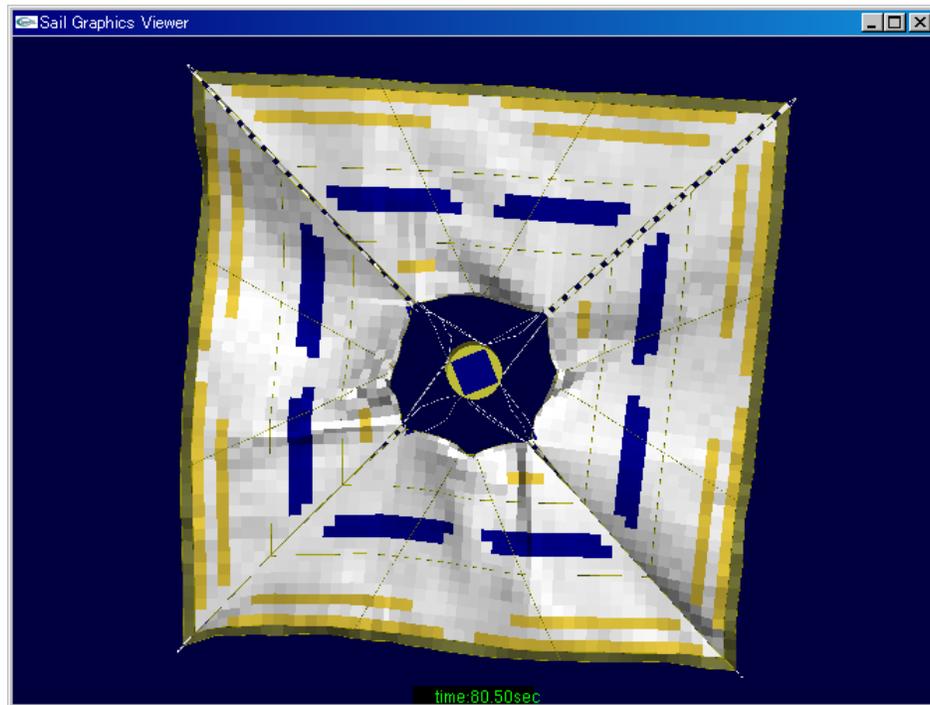
2.7 IKAROS (2010)

★ 膜要素(左)とケーブルネットワーク(右)との違い



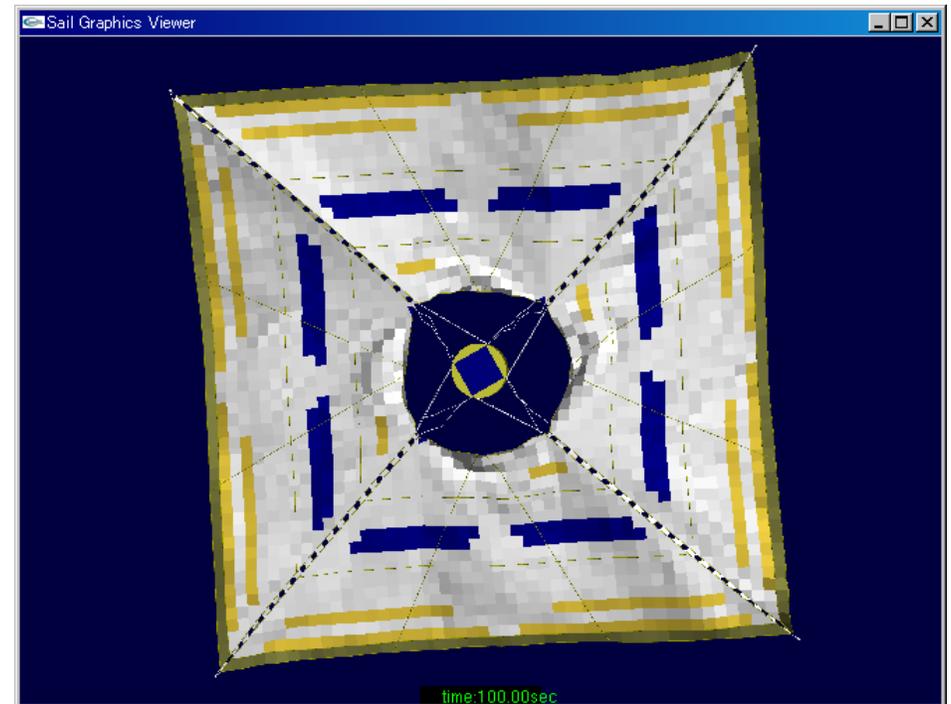
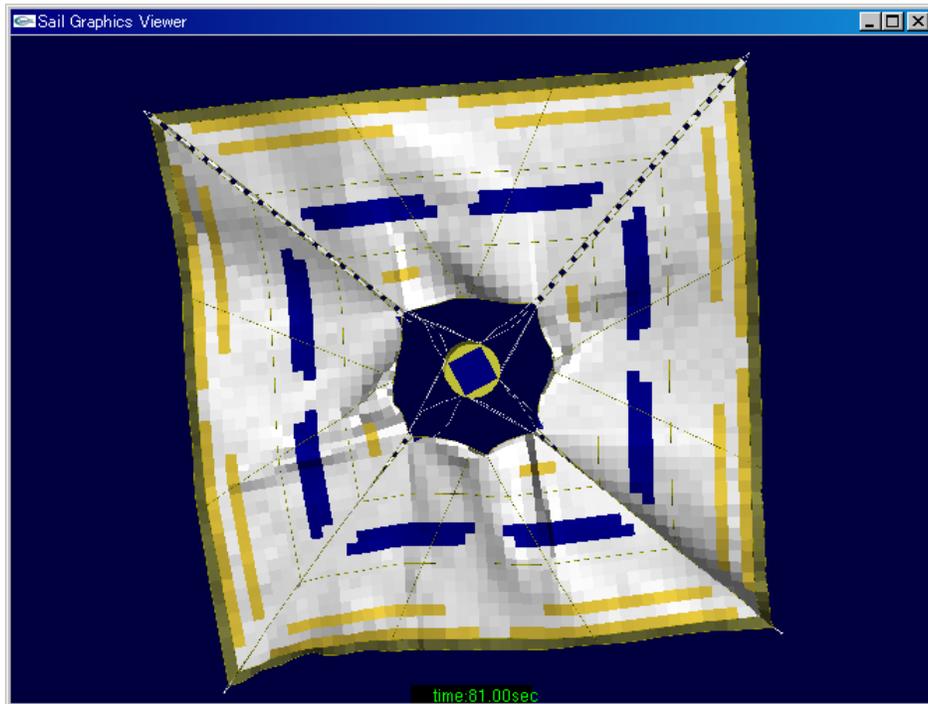
2.7 IKAROS (2010)

★膜要素(左)とケーブルネットワーク(右)との違い



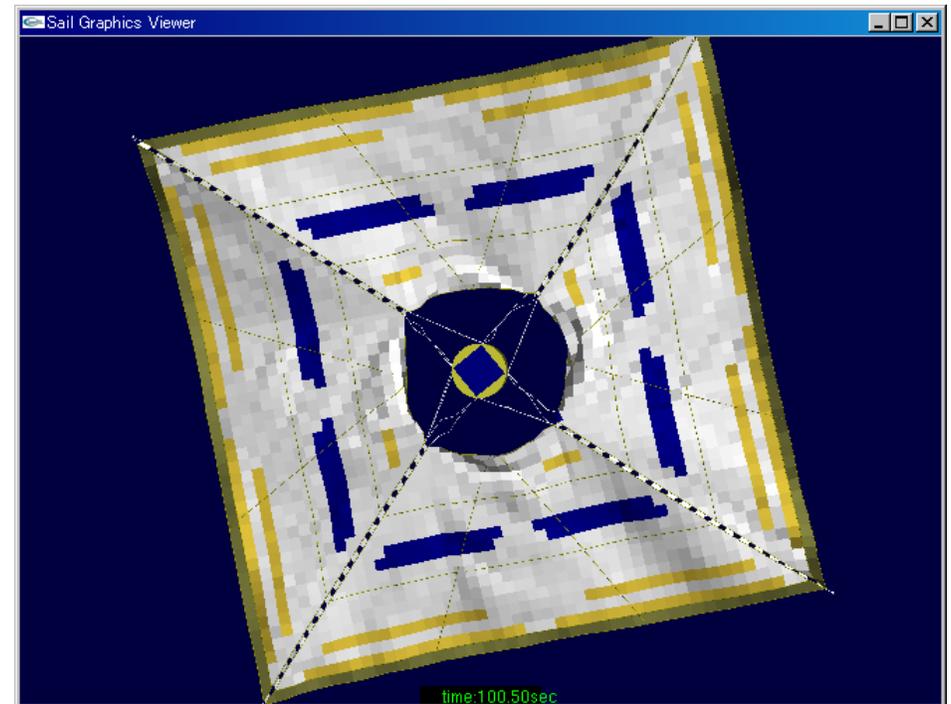
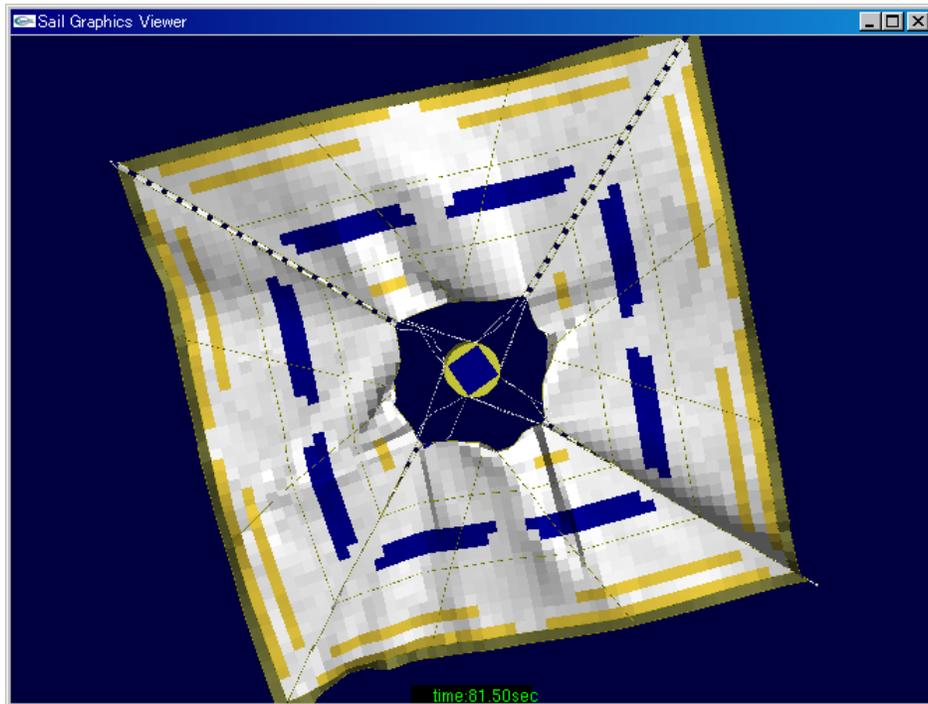
2.7 IKAROS (2010)

★膜要素(左)とケーブルネットワーク(右)との違い



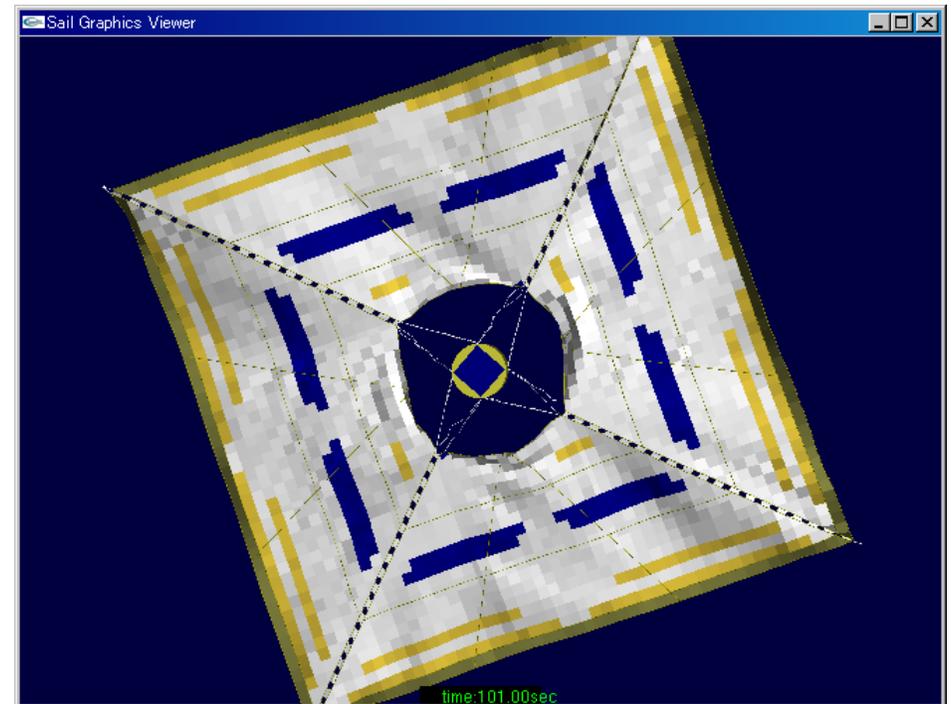
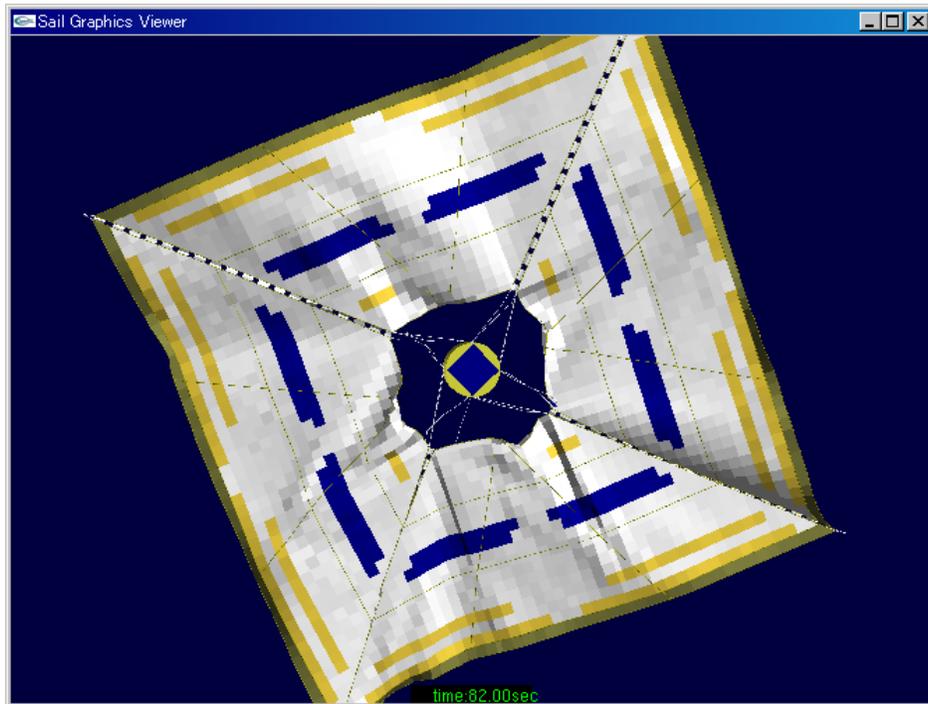
2.7 IKAROS (2010)

★ 膜要素(左)とケーブルネットワーク(右)との違い



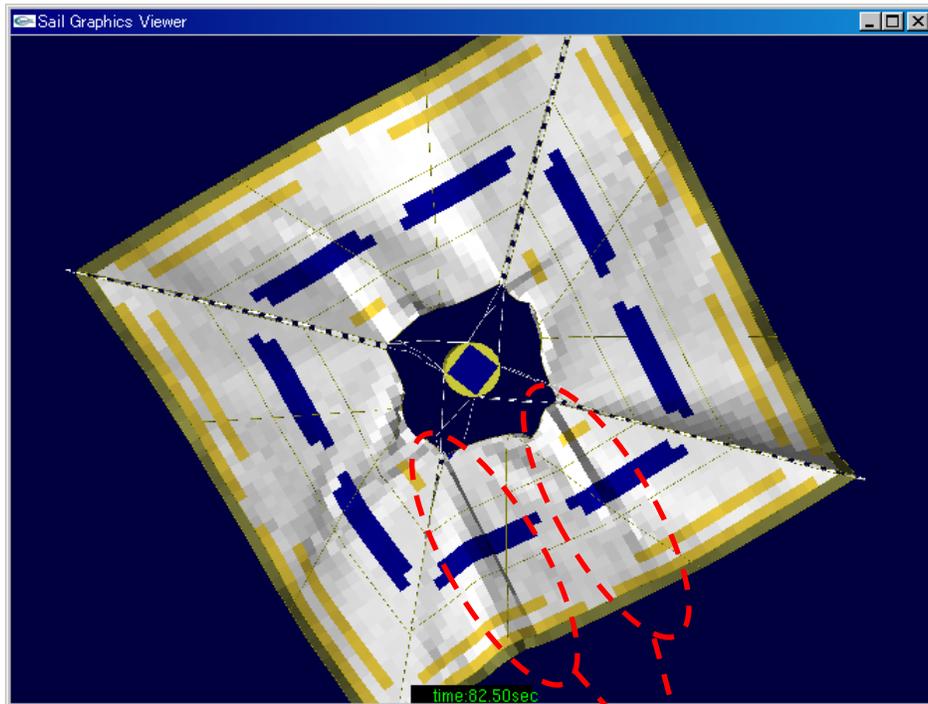
2.7 IKAROS (2010)

★ 膜要素(左)とケーブルネットワーク(右)との違い

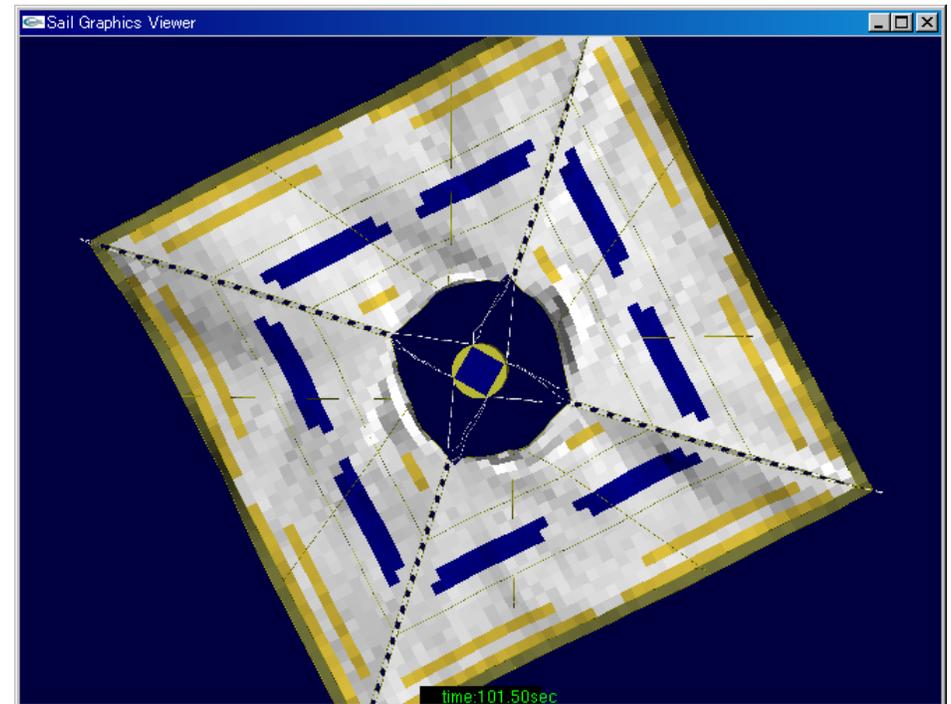


2.7 IKAROS (2010)

★膜要素(左)とケーブルネットワーク(右)との違い



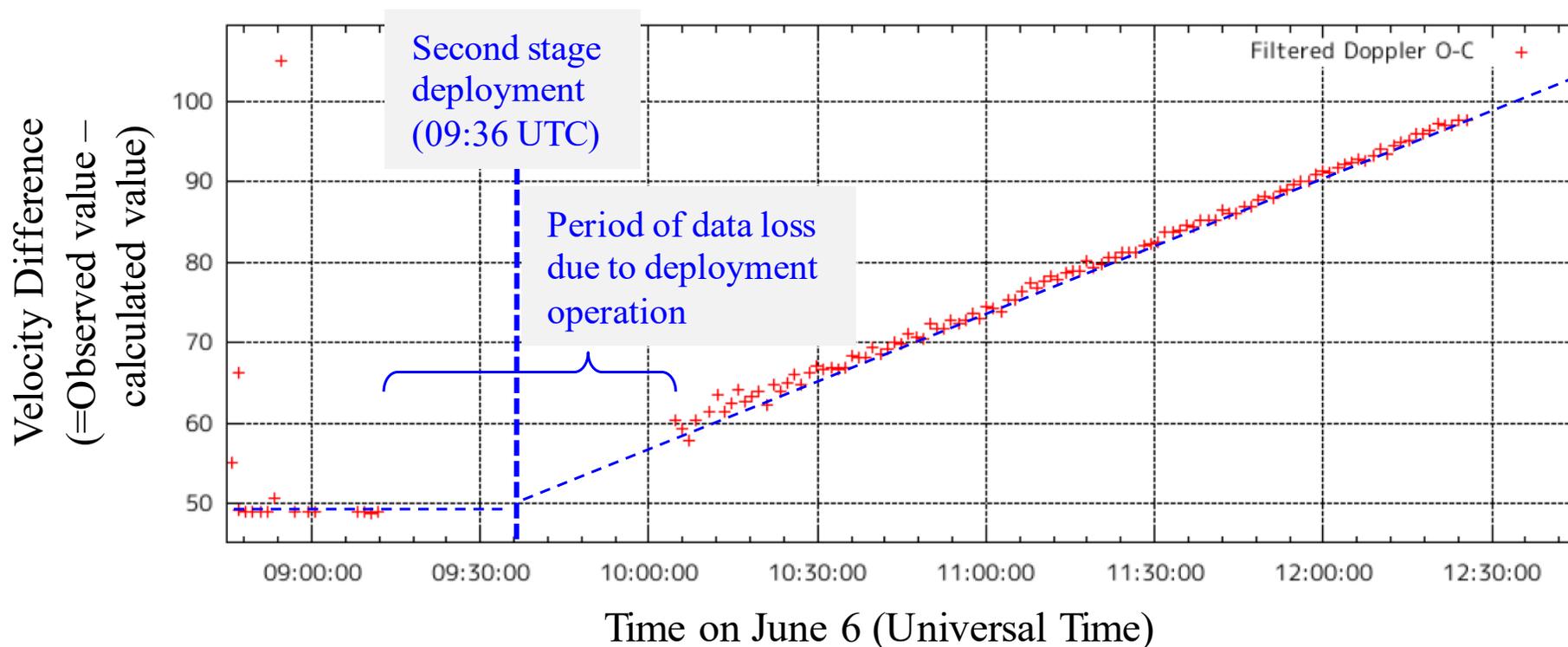
座屈している



2.7 IKAROS (2010)

★ Demonstration of photon propulsion

Doppler measurement data at the second stage deployment



$$\begin{cases} \Phi \approx 1367 \text{ W / m}^2 \\ c \approx 3.0 \times 10^8 \text{ m / s} \\ A = 200 \text{ m}^2 \\ C_R \approx 1.5 \end{cases}$$
$$\Rightarrow p = C_R \frac{\Phi}{c} \approx 6.835 \times 10^{-6} \text{ Pa}$$
$$\Rightarrow F = pA \approx 1.37 \text{ mN}$$

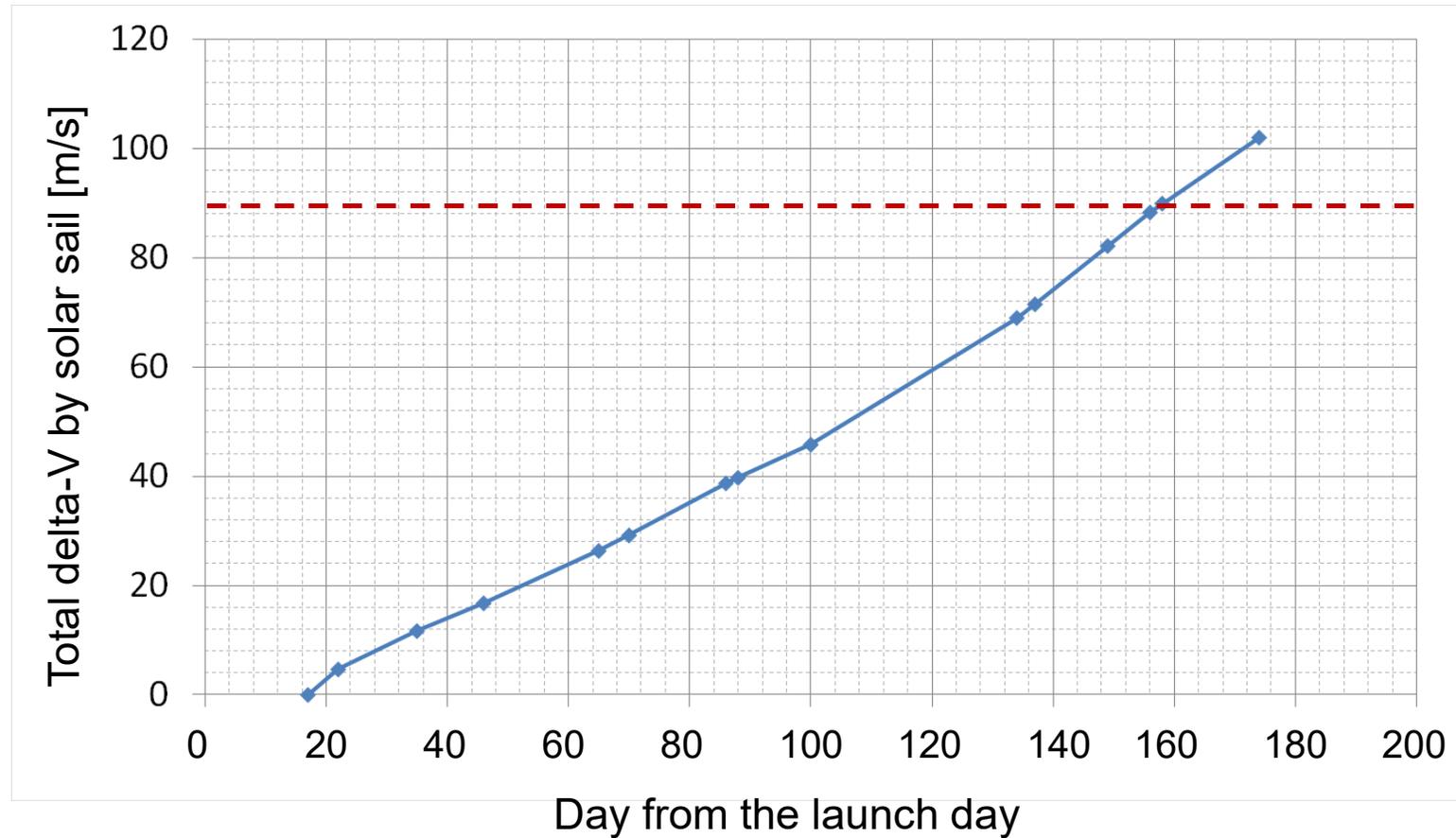
The value of two way doppler was increased gradually, after second stage deployment. The thrust by solar light pressure can be calculated 1.12mN by the inclination. It is nearly equal to the designed value of solar sail.



2.7 IKAROS (2010)

★ Demonstration of photon propulsion

IKAROS continued to be accelerated by solar sail.



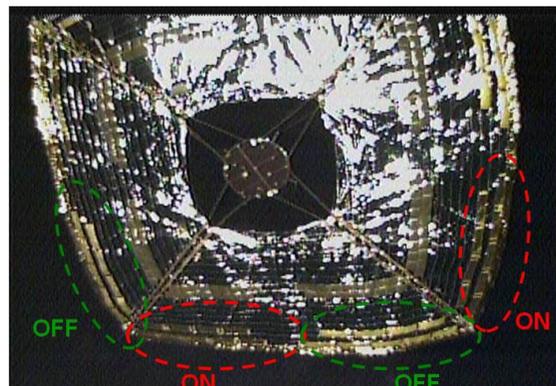
The total delta-V was achieved to **100m/s** within six months



2.7 IKAROS (2010)

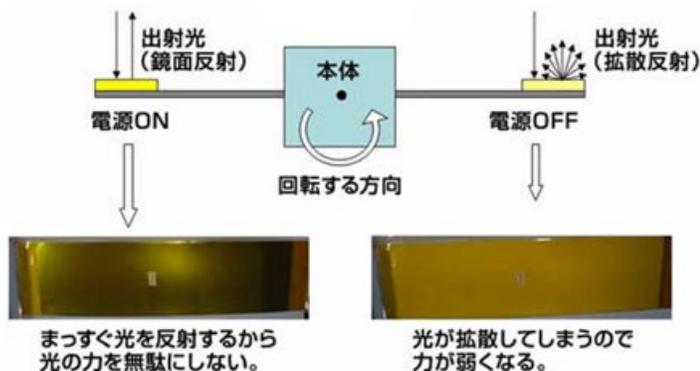
★ Demonstration of steering devices

Reflection Control Test of Steering Devices

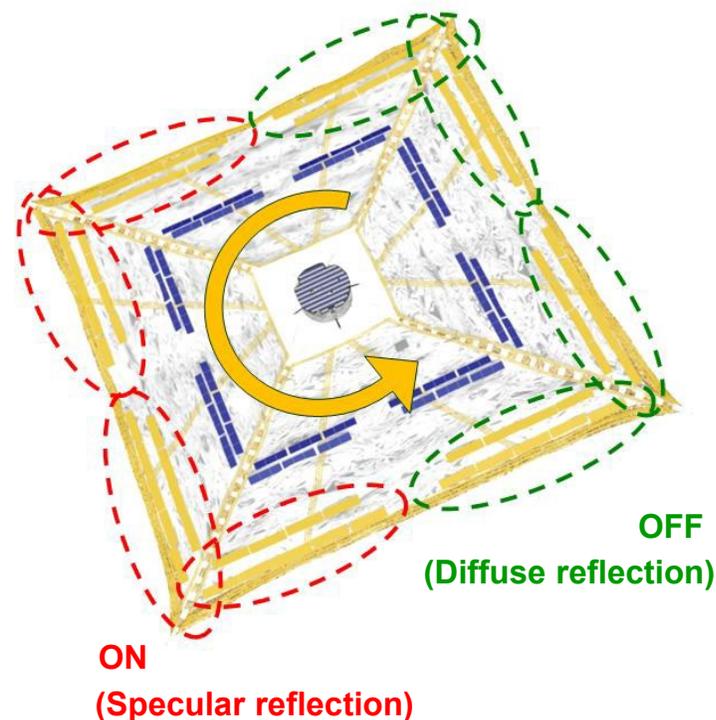


(Specular reflection) (Diffuse reflection)

How ON and OFF reflectivity control devices looks like in orbit was confirmed by the pictures of the second separation cameras.



Attitude Control Method Using Steering Devices

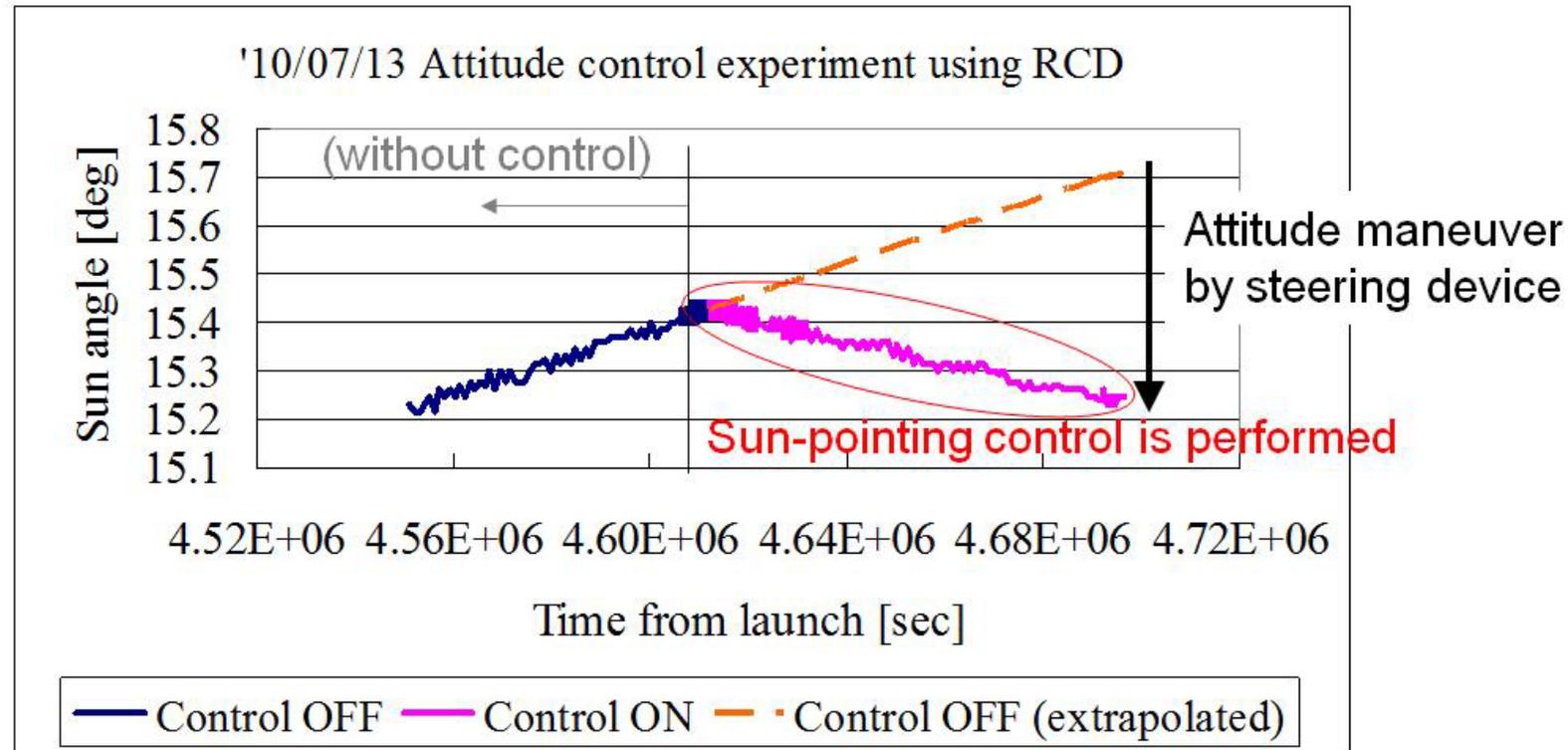


The steering devices need to be switched ON and OFF according to the spin rate for attitude control.



2.7 IKAROS (2010)

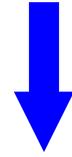
★ Demonstration of steering devices



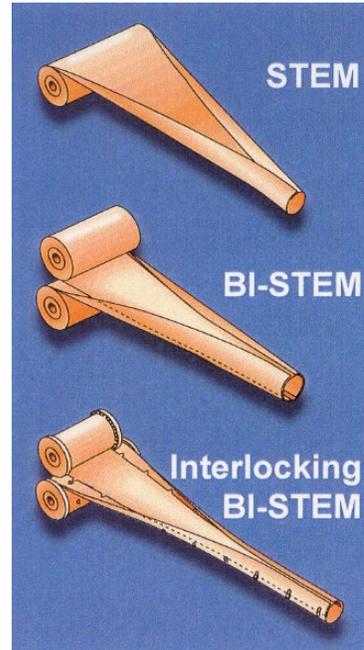
- The sun angle was increased by the orbital motion without steering devices and it was decreased by steering device control.
- 94% of attitude control performance was confirmed compared with the ground-based performance estimation.
- Very smooth attitude maneuver was achieved.



3軸制御ができる(大型)軽量膜構造物は？

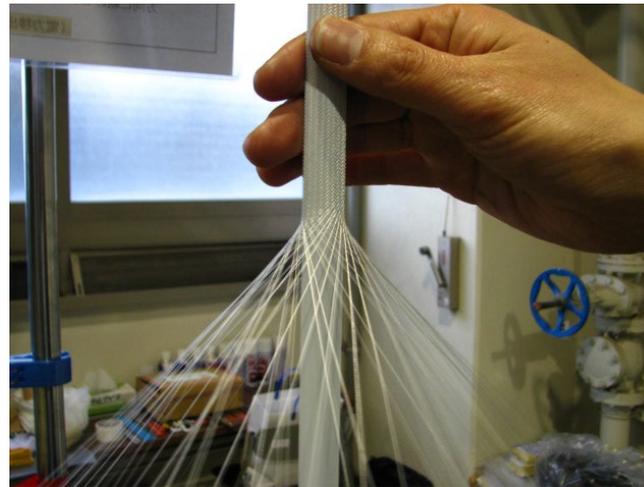
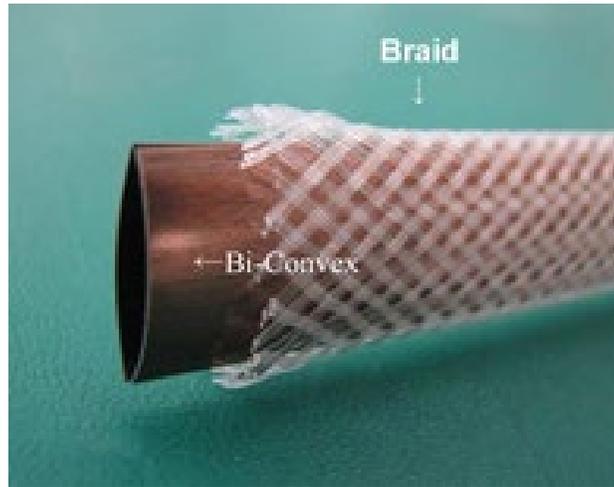


例えば, 伸展ブームや展開トラスなど, 圧縮部材による膜の展張および構造物の形状の維持？

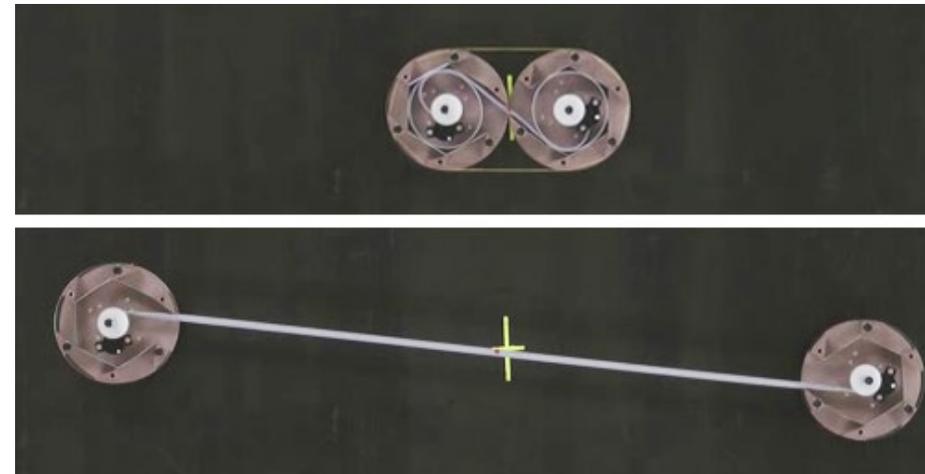


2.8 Convex Boom (2012)

★ BCON boom



Bi-convex tape boom covered by braid (BCON boom)



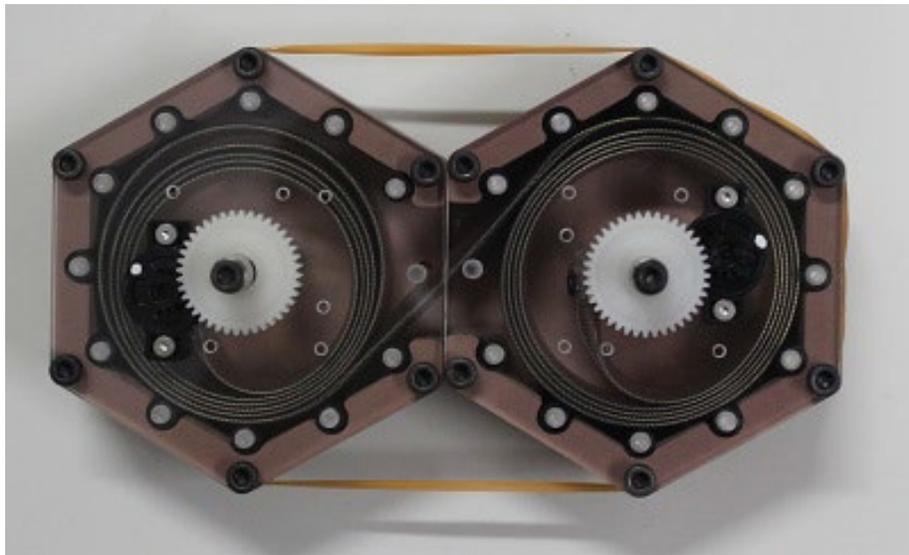
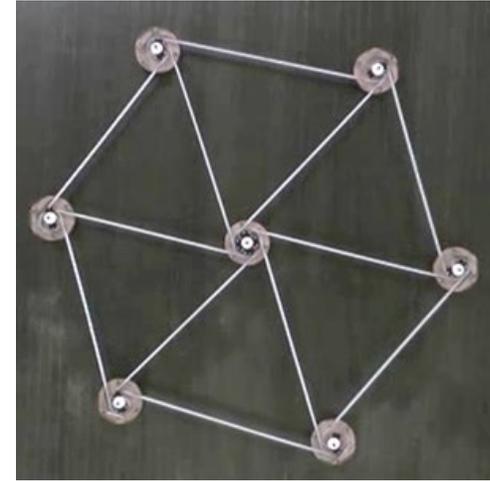
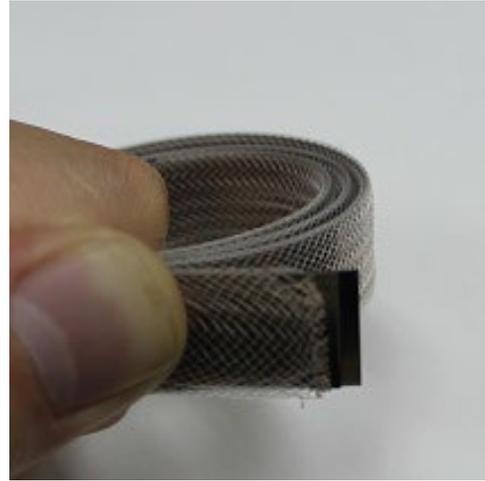
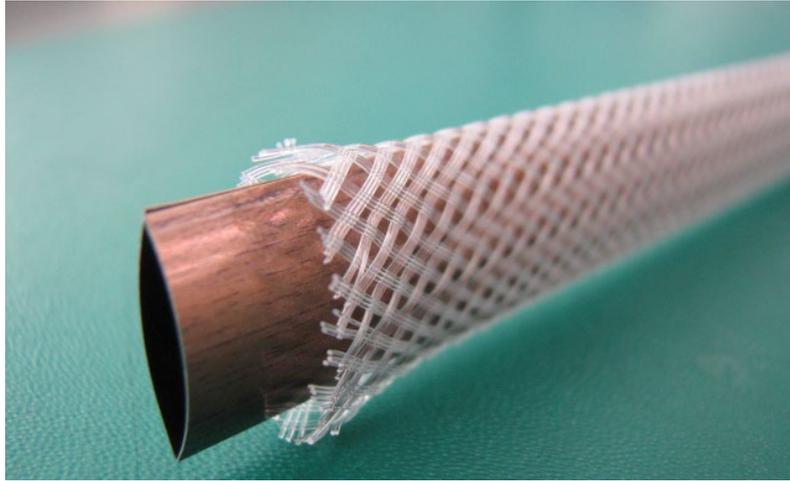
Two node element (2N1B)

Watanabe, A., Ito, H. and Hori, T., "Study of the Extensible Structure Which Coated a Braid," Japanese 56th United Conf. Space Science and Technology (Ukaren), JSASS-2012-4496, Beppu, Japan, Nov. 2012 (in Japanese).



2.8 Convex Boom (2012)

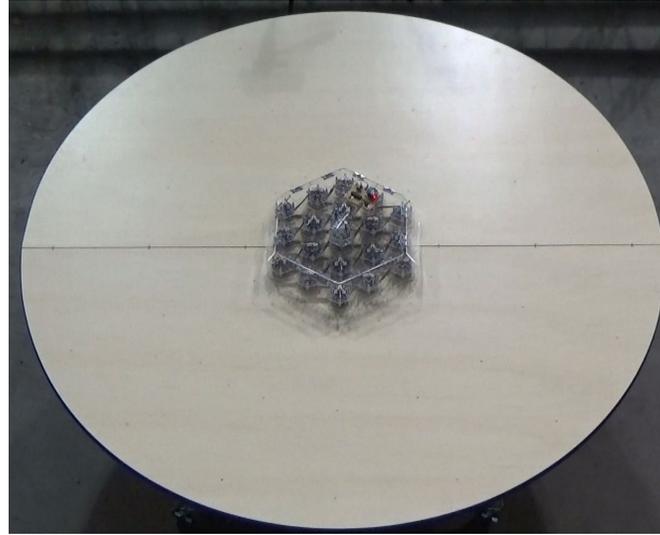
★ BCON boom



© サカセ・アドテック(株)



2.8 Self-Deployable Membrane Truss (2013-)



2.8 Self-Deployable Membrane Truss (2013-)



剛性の高いブームがほしい…

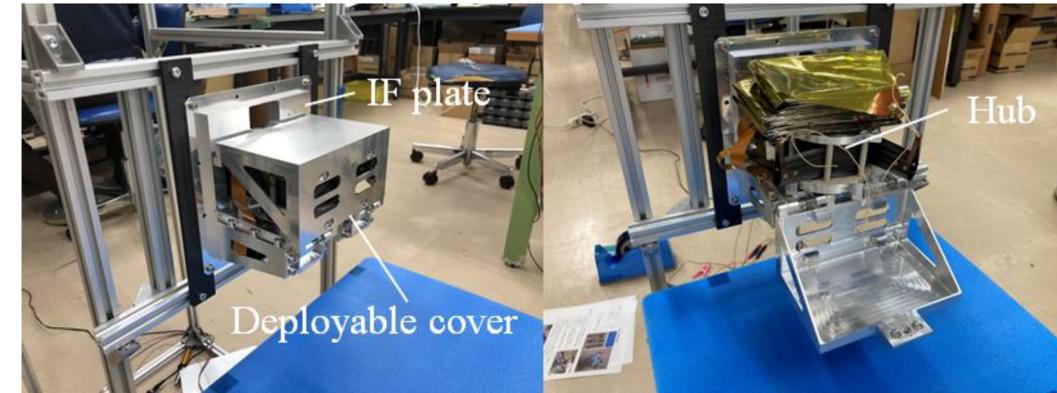


2.9 HELIOS (ISAS & 東工大)(2019-)

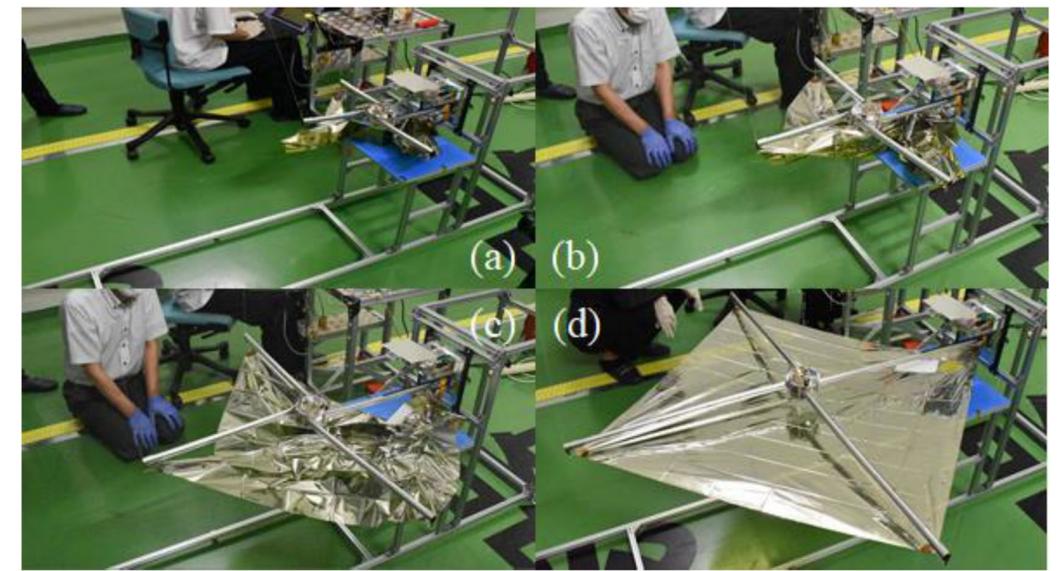
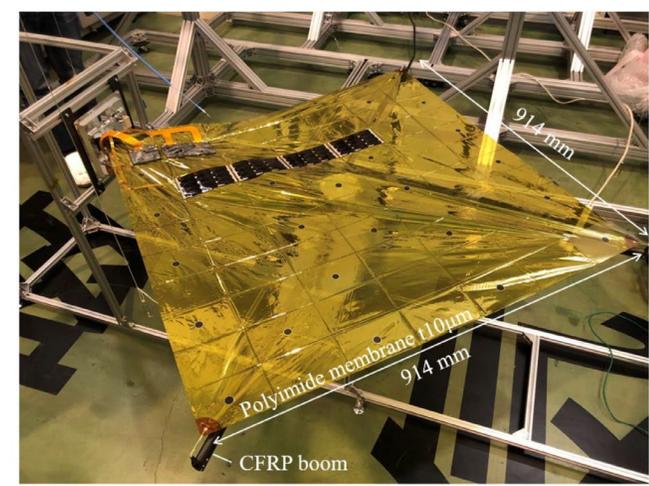


BBM

FM



Step1 カバー展開



Step2 膜展開



宇宙機開発応用B

第4講 まとめ

第2章 今後の大規模軽量膜面宇宙構造物



1. 今後の研究項目(と思われるもの)

★ 構造概念

- 軽量で展開効率の大きいもの(衛星のサイズによらず)
- “確実に”展開するもの(衛星バスとしての利用)
- 剛性が十分にあるもの(せめて、3軸制御ができるレベルのもの)
- 形状精度を予測できるもの(“高精度のもの”とまでは言わないが、“軌道上ではこれくらいの精度を維持できます”と言えるものがあるがたい)
- (超)大型なもの(展開だけでなく、軌道上組み立ても含めて)

★ 構造部材等

- 巻き付け収納など、歪が生じている状態で長期収納しても“へたらない”軽量ブーム(High Strain Composite)
- 軽量で所望の形状に加工できる薄肉部材(軽量金属ブーム)
- 軌道上で寸法精度を予測できる軽量展開構造(コンバックス・ブーム, 展開トラス)
- HRM, および, 展開後ラッチ
- 展開の(受動)制御用小型軽量ダンパ
- 形状制御デバイス, 張力制御デバイス
- “確実に展開する”機構
- 挙動を予測可能な潤滑部品(潤滑剤)



1. 今後の研究項目(と思われるもの)

★解析理論

- High Strain Compositeの経年変化
- 摩擦(潤滑剤)
- 高分子材料(膜材料)の粘弾塑性(膜の折り目)
- “信用される”構造解析(構造動解析)手法(“信用される”ロジック)

★地上試験法

- TLYFではない地上検証
- 例えば, 部分構造モデルの試験+フルモデルの数値解析で軌道上挙動を“検証”できるようにするなど
- 例えば, モジュール構造にして, 1モジュールの試験+結合部の試験+フルモデルの数値解析で軌道上挙動を“検証”できるようにするなど

★その他

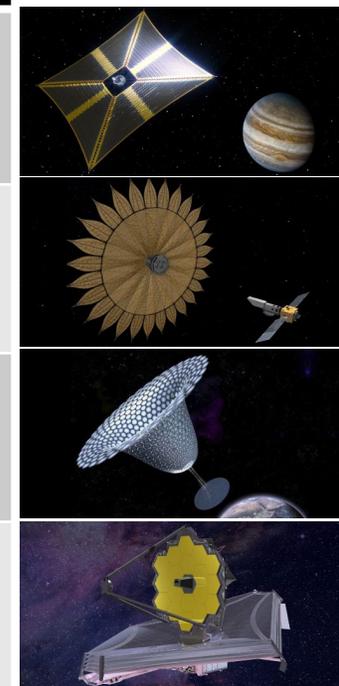
- 膜面の製作法・折り畳み法(膜の接合法・折り目の付け方 or 有限点で連結された膜?)
- 膜・膜面デバイスに優しい折り畳み収納・保持方法
- 軌道上での膜構造の状態推定法
- 膜面の軌道上形状制御法
- 膜構造物の軌道上組み立て方法



2. 大型宇宙構造物

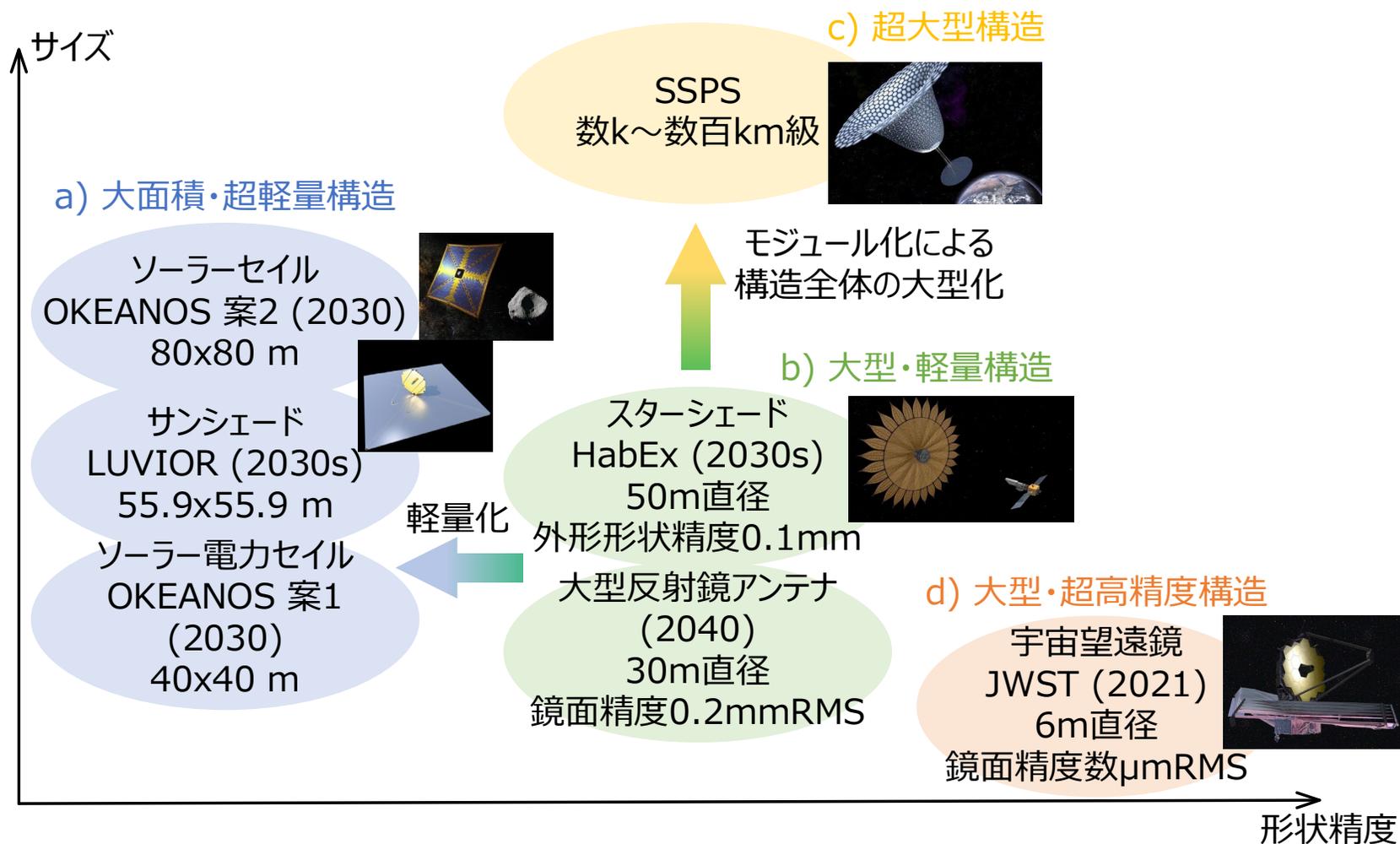
★ 軽量な展開構造に近い将来の大型宇宙構造物のキー技術

構造(サイズ)分類	特徴	アプリケーション例
a) 大面積・超軽量構造 (20 – 100m)	超軽量かつ大面積の展開構造. 形状精度に対する要求は他の構造に比べて低い.	ソーラーセイル, サンシェード
b) 大型・軽量展開構造 (20 – 100m)	軌道上外乱に対して形状を自律的に維持できる構造. ある程度の形状精度が要求される.	スターシェード, 薄膜太陽電池アレイ, 膜面パッチアンテナ
c) 超大型構造 (<1000m)	巨大な構造であり, 形状を自律的に維持できる構造. 要求される形状精度はb)と同程度.	宇宙太陽光発電衛星(SSPS), 軌道エレベータ
d) 大型・高精度構造 (5 – 20m)	高い形状精度および相対位置精度要求を満たす構造. サイズは他の構造に比べて小さい.	望遠鏡鏡面, 望遠鏡支持構造



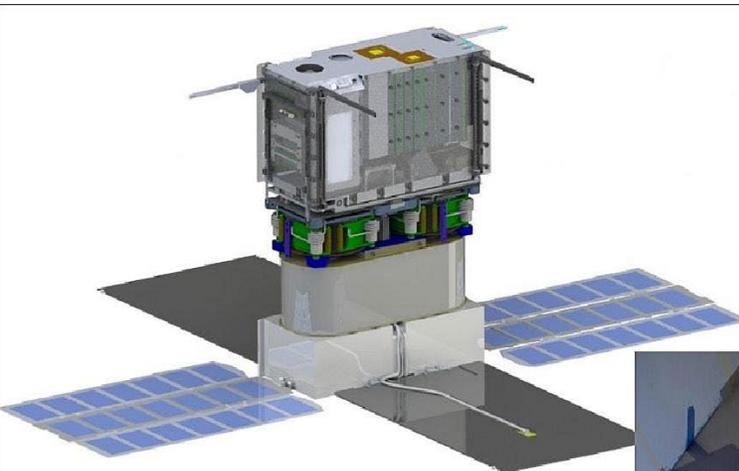
2. 大型宇宙構造物

★ 軽量な展開構造が近い将来の大型宇宙構造物のキー技術



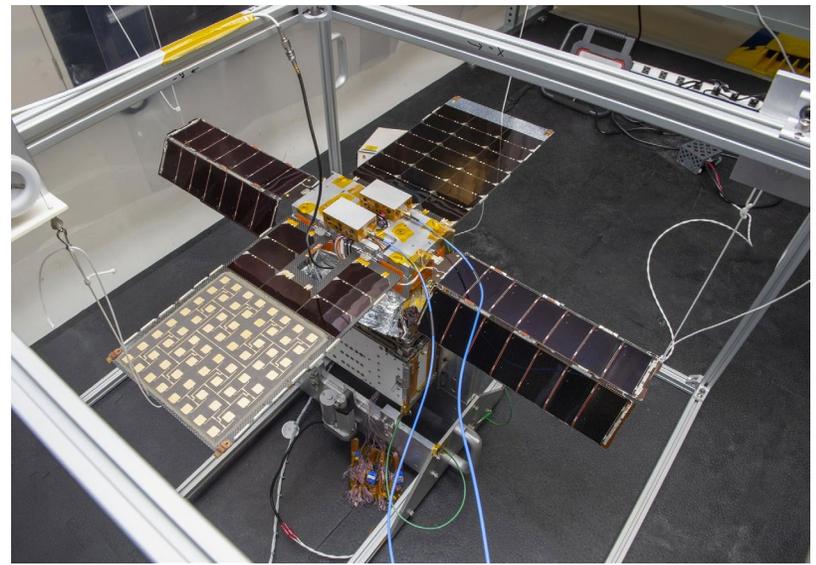
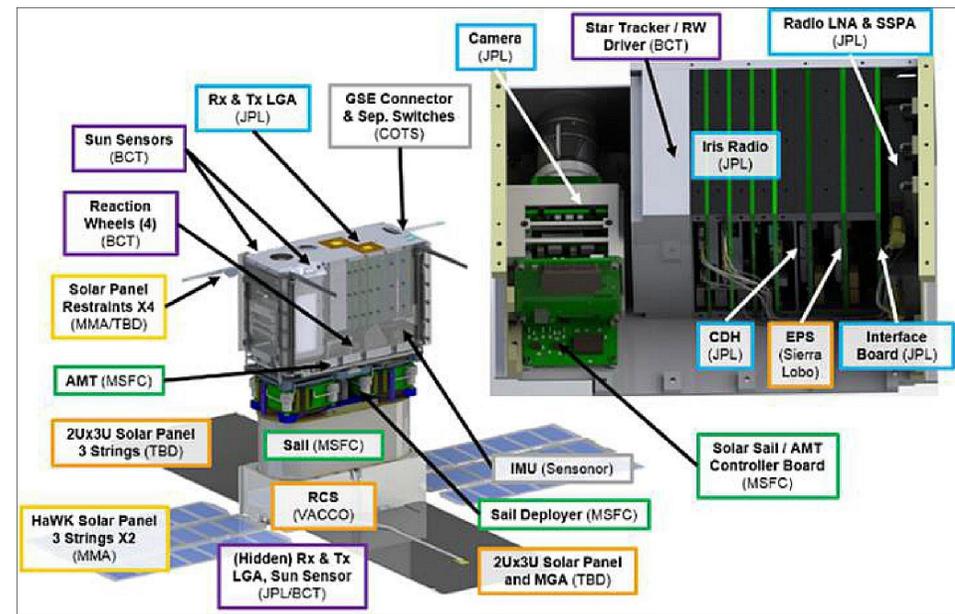
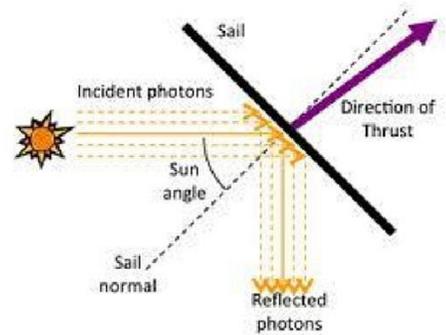
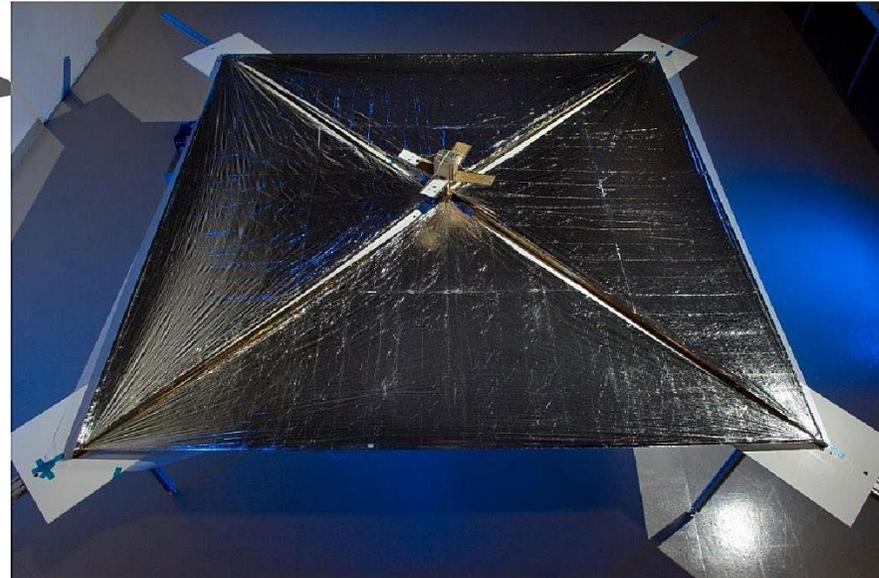
3. 私が好きな今後の大規模軽量膜面宇宙構造物

★超小型ソーラーセイル NEA Scout(2022?)



'Propellantless' primary propulsion method using momentum exchange with incident photons

Leverages MSFC NanoSail-D (2010) and collaborate arrangements with the Planetary Society and University of Surrey

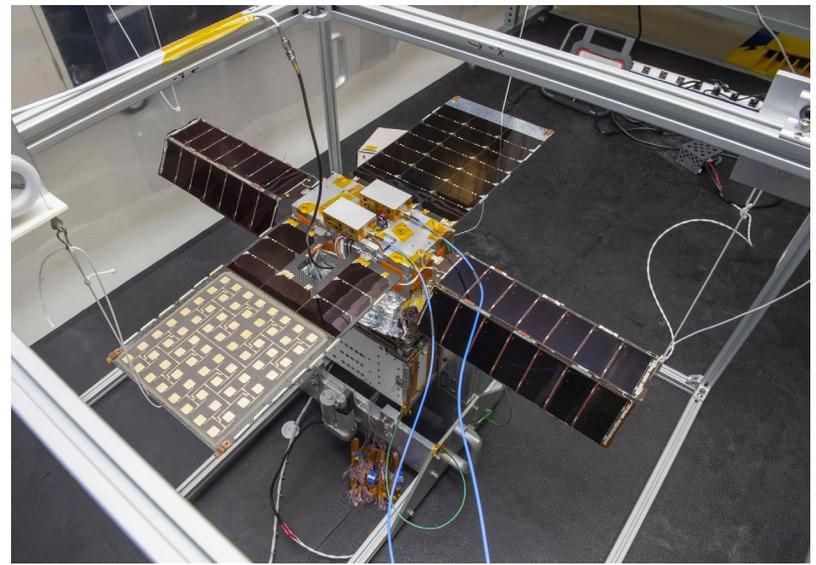
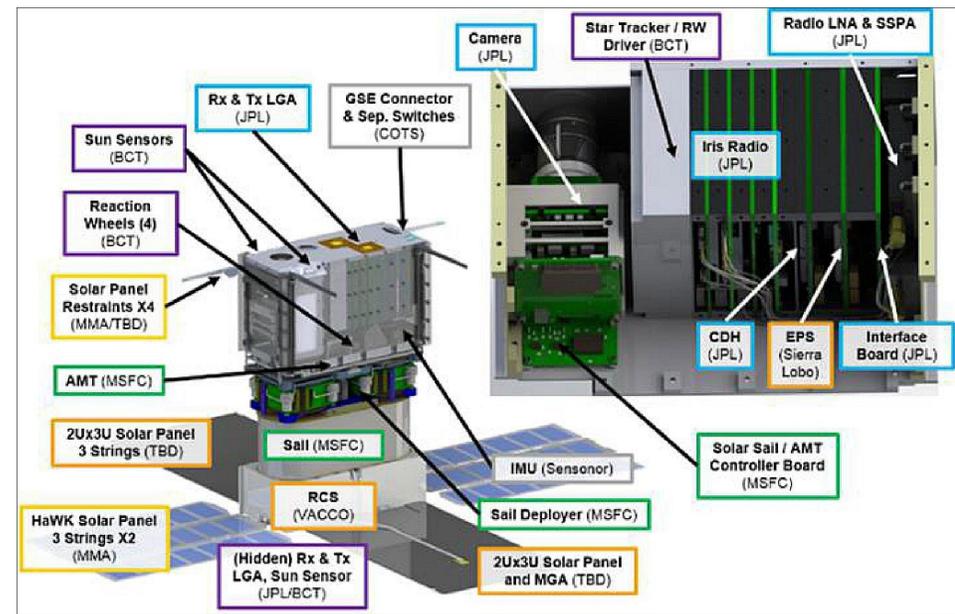


6U. SLSで打ち上げ予定(86m²?)



3. 私が好きな今後の大規模軽量膜面宇宙構造物

★超小型ソーラーセイル NEA Scout(2022?)

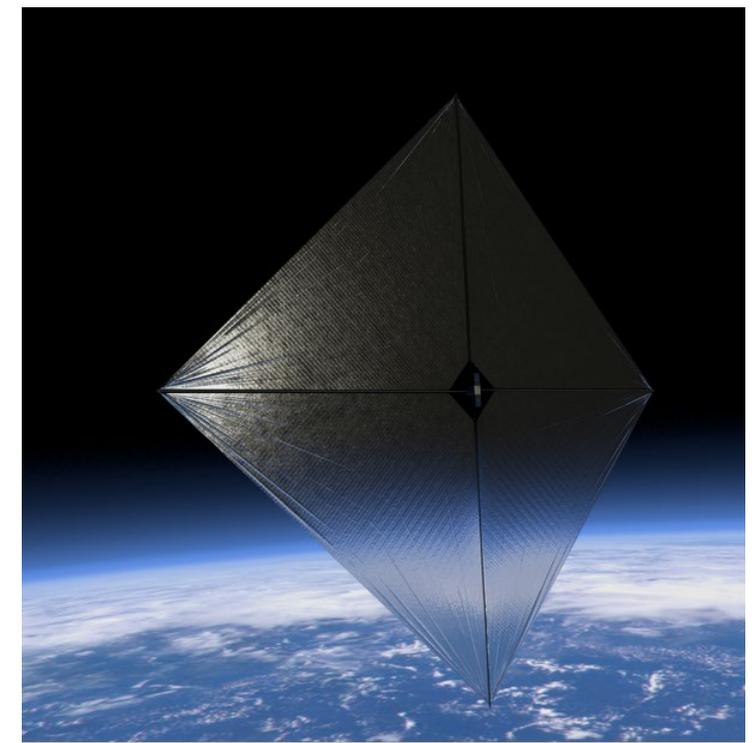
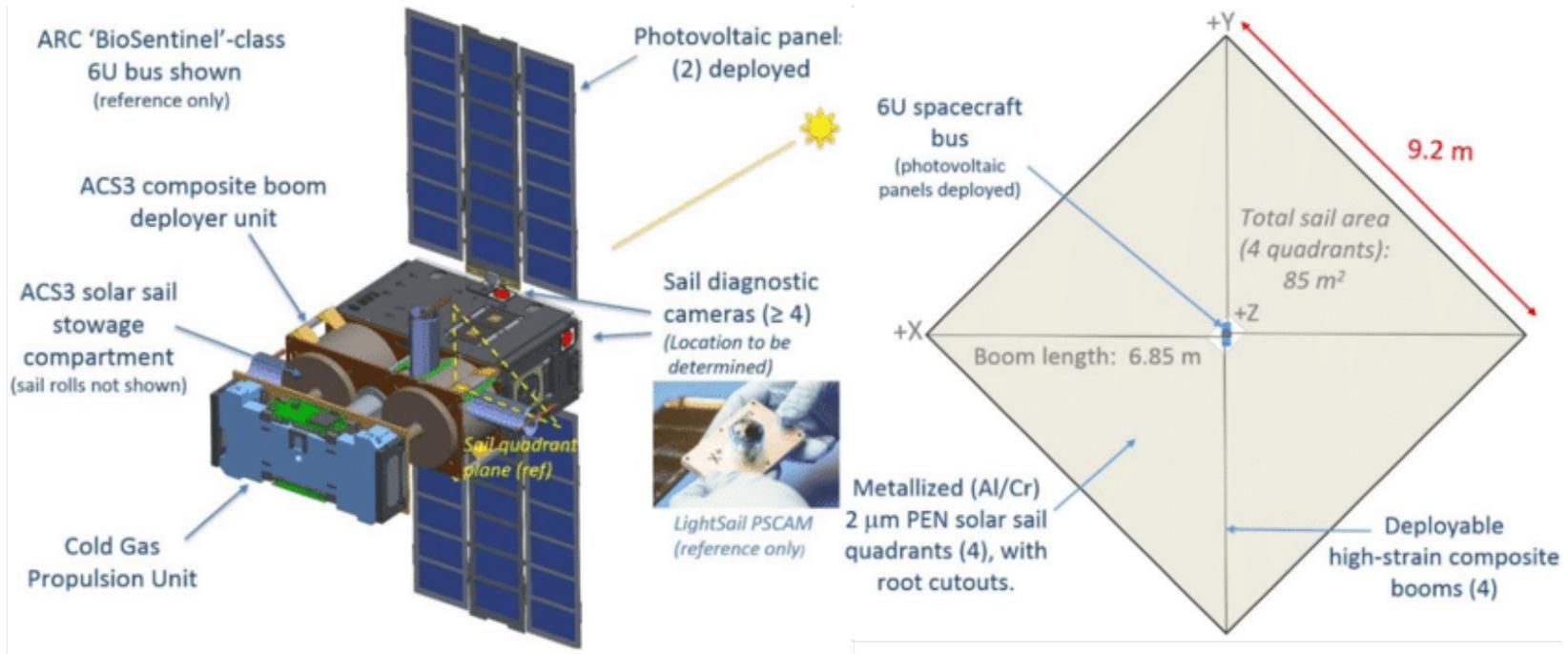


6U. SLSで打ち上げ予定(86m²?)



3. 私が好きな今後の大規模軽量膜面宇宙構造物

★超小型ソーラーセイル ACS-3(2022?)



12U(バスが6U, ミッション部が6U). Rocket LabのElectronで打ち上げ予定

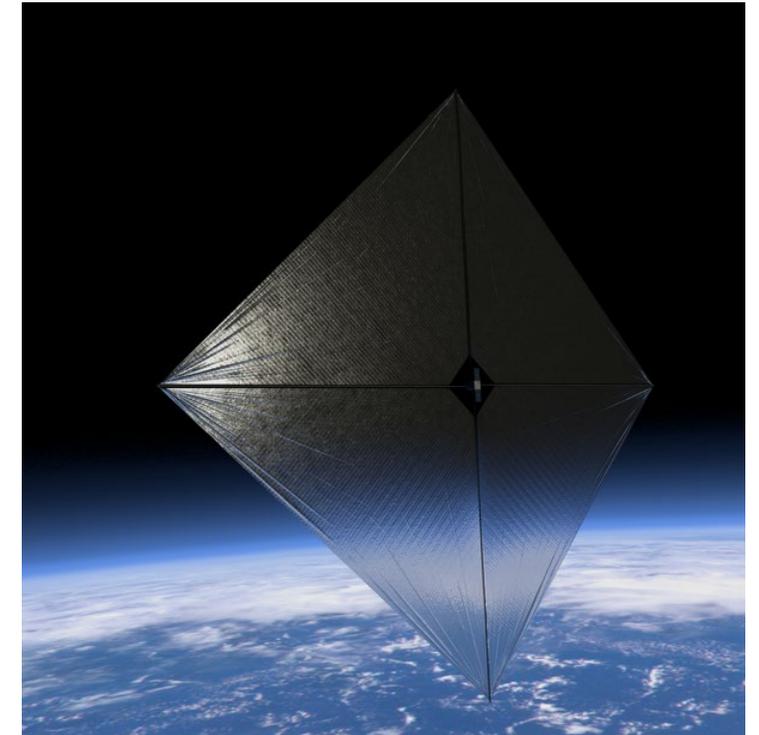


3. 私が好きな今後の大規模軽量膜面宇宙構造物

★超小型ソーラーセイル ACS-3(2022?)

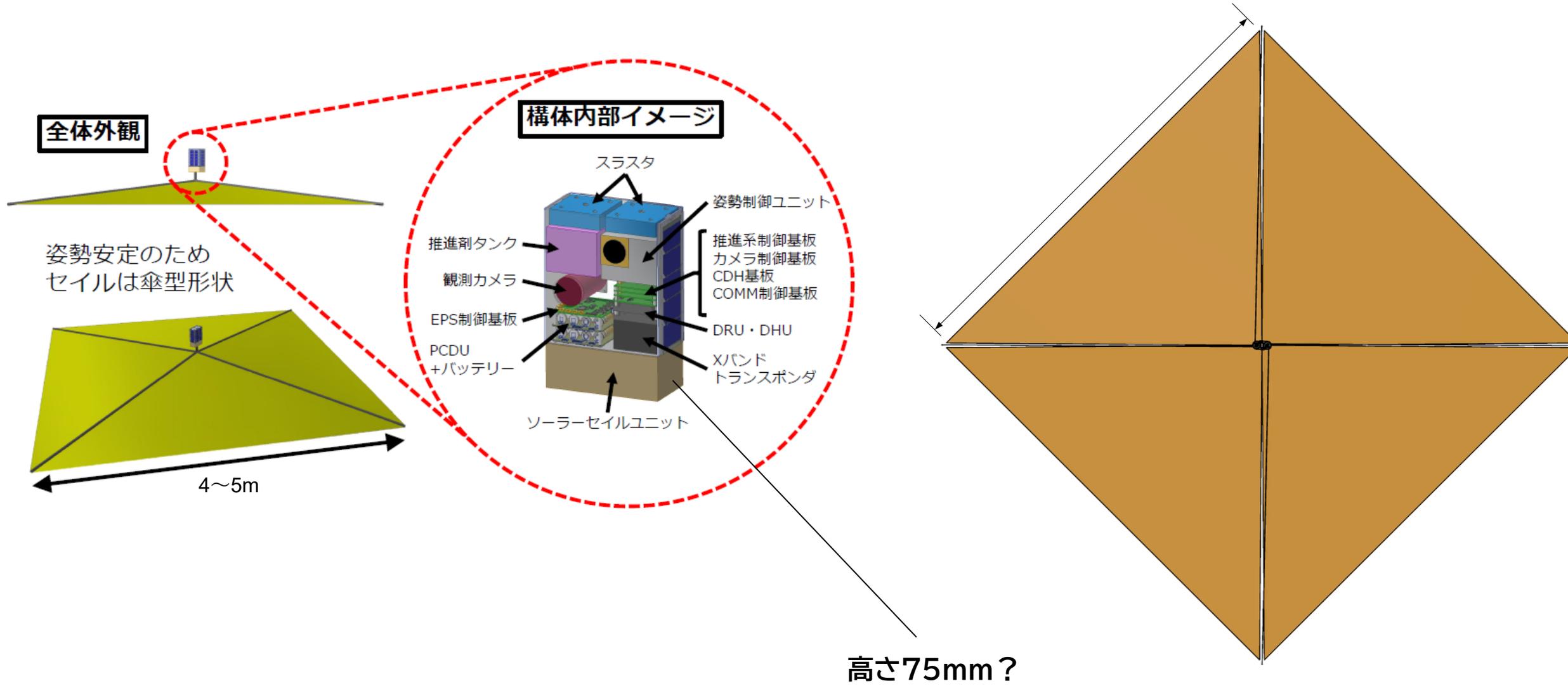


12U(バスが6U, ミッション部が6U). Rocket LabのElectron
で打ち上げ予定



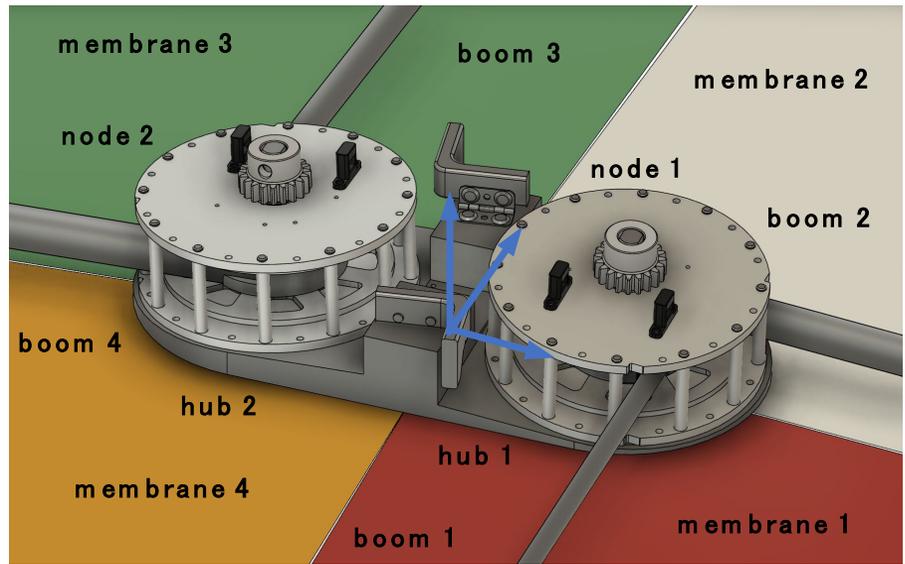
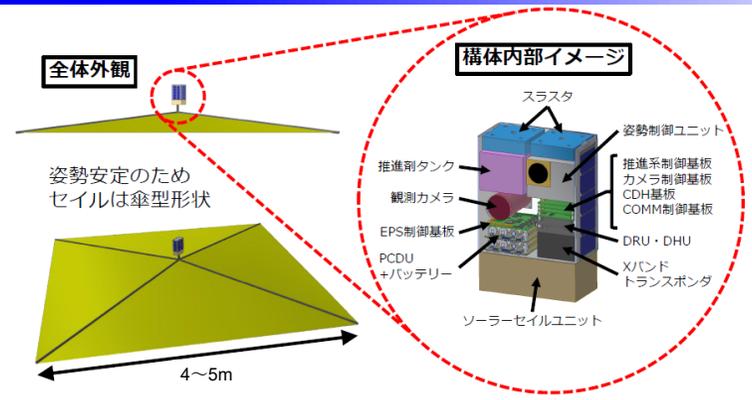
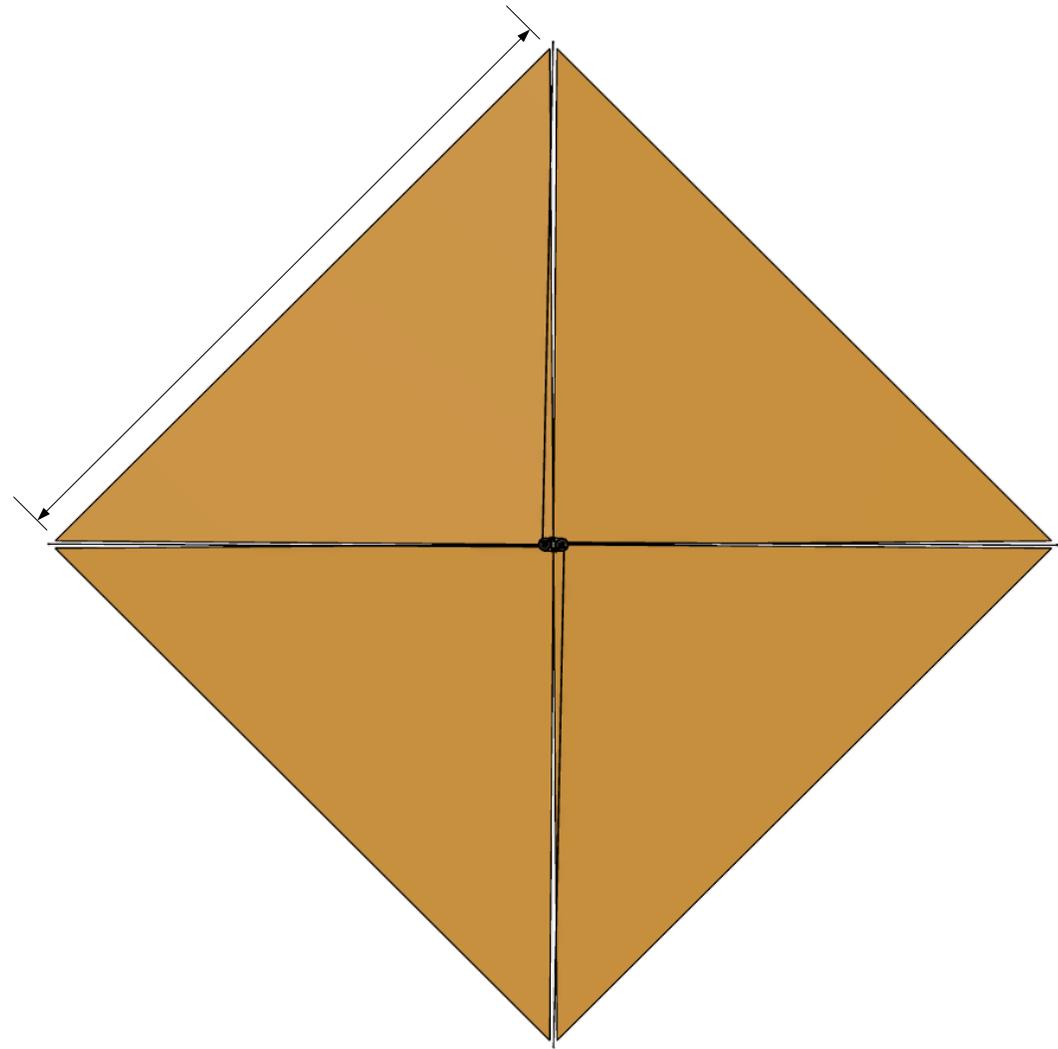
3. 私が好きな今後の大規模軽量膜面宇宙構造物

★超小型ソーラーセイル(中条先生)



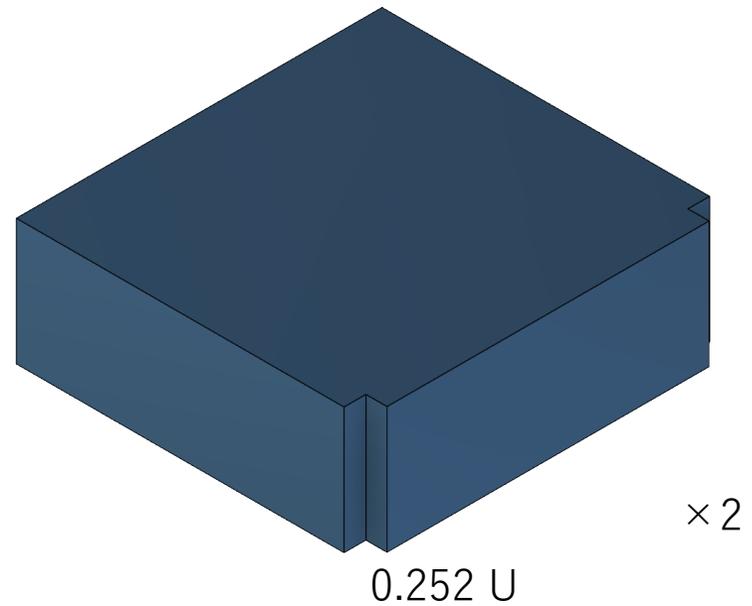
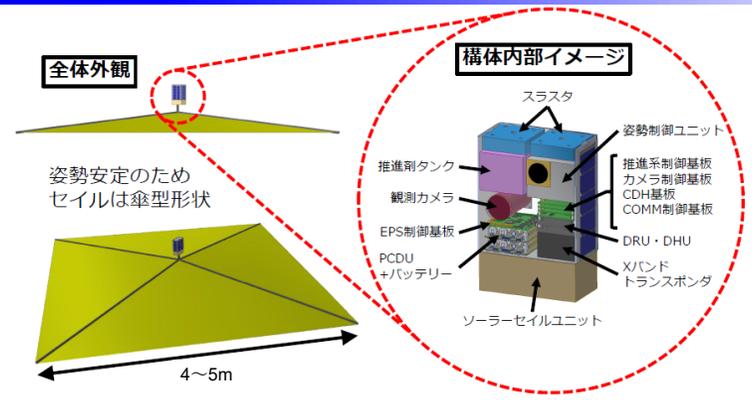
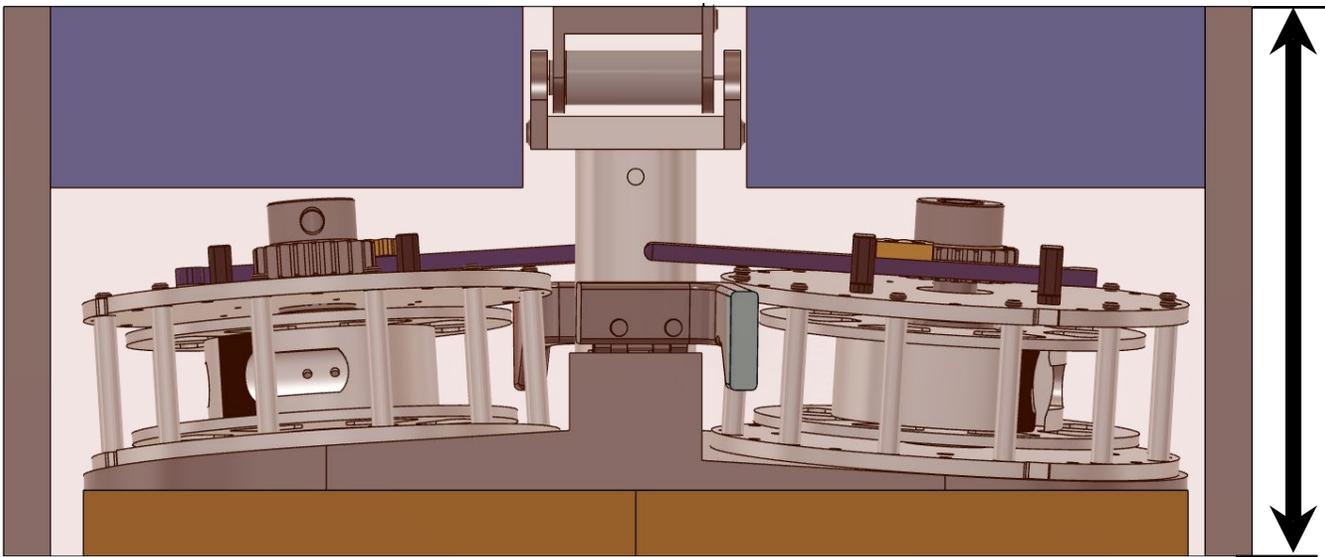
3. 私が好きな今後の大規模軽量膜面宇宙構造物

★超小型ソーラーセイル(中条先生)



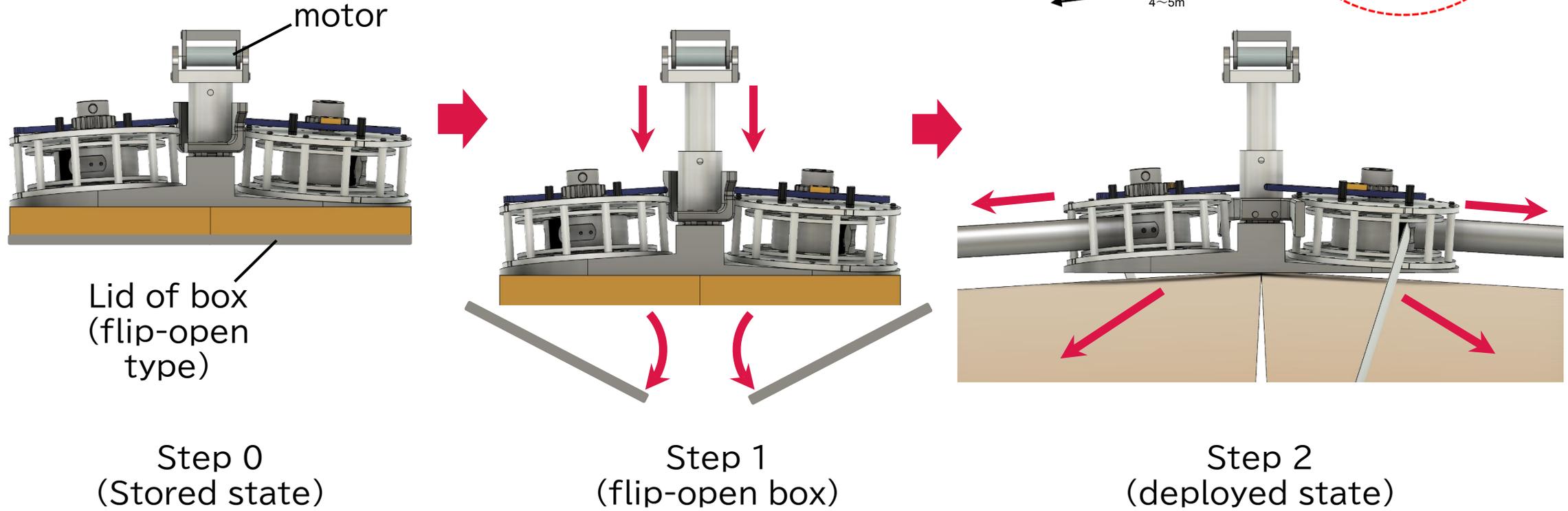
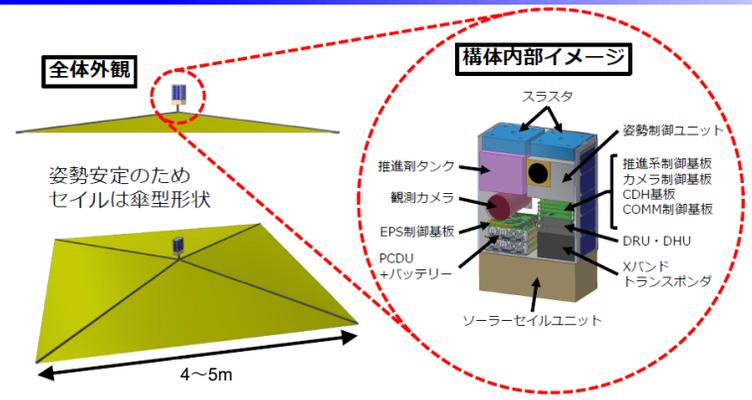
3. 私が好きな今後の大規模軽量膜面宇宙構造物

★超小型ソーラーセイル(中条先生)



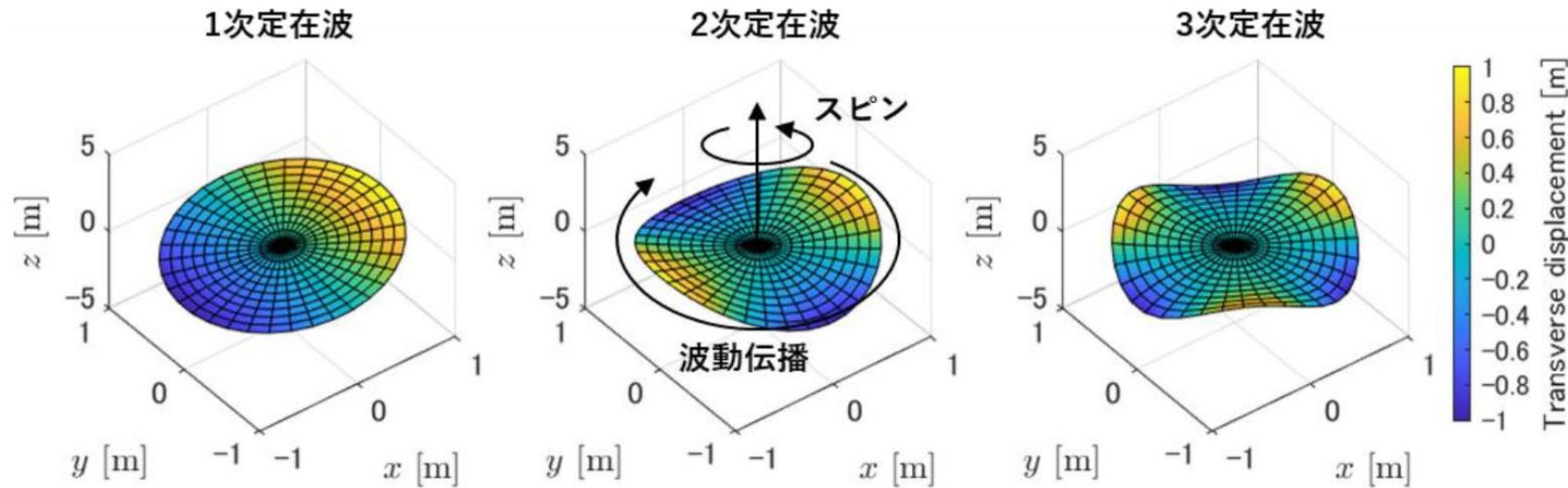
3. 私が好きな今後の大規模軽量膜面宇宙構造物

★超小型ソーラーセイル(中条先生)



3. 私が好きな今後の大規模軽量膜面宇宙構造物

★ スピン型セイルの形状制御(高尾さん@ISAS)



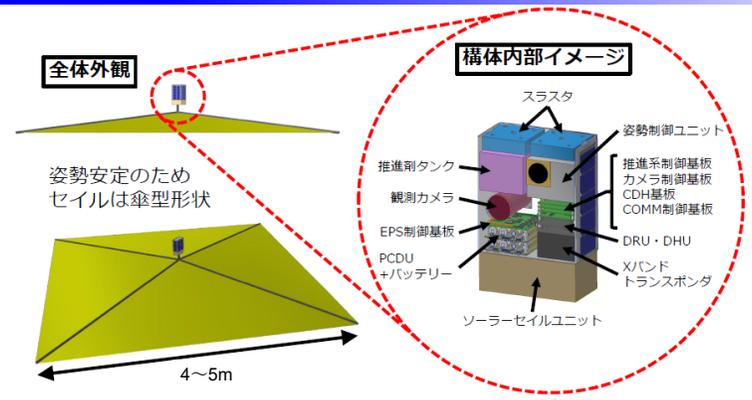
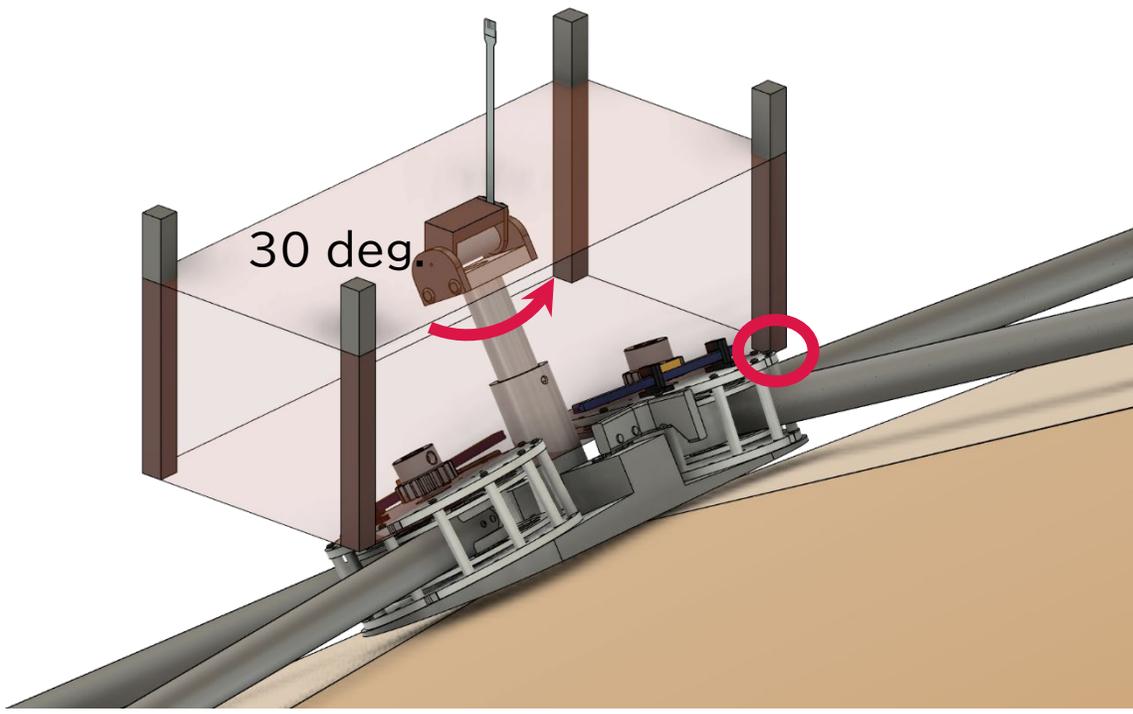
NEA ScoutやACS-3に対抗して、6Uから100m²くらいのスピン型ソーラーセイルを展開して、形状制御の宇宙実証をできないか？

高尾, 遠心力展開される薄膜構造物の立体・可変構造化に向けたアクティブ形状制御システムの実証計画と将来構想, 第65回宇科連, 2J04, 2021.



3. 私が好きな今後の大規模軽量膜面宇宙構造物

★超小型ソーラーセイル(中条先生)



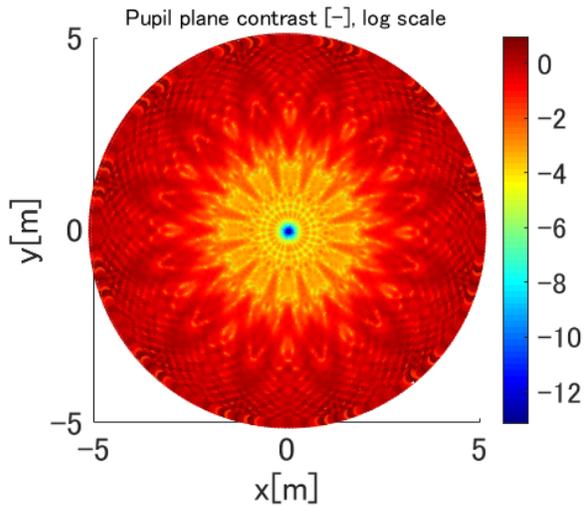
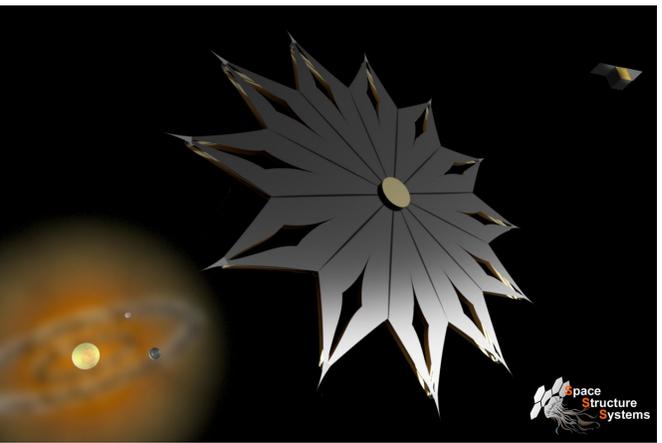
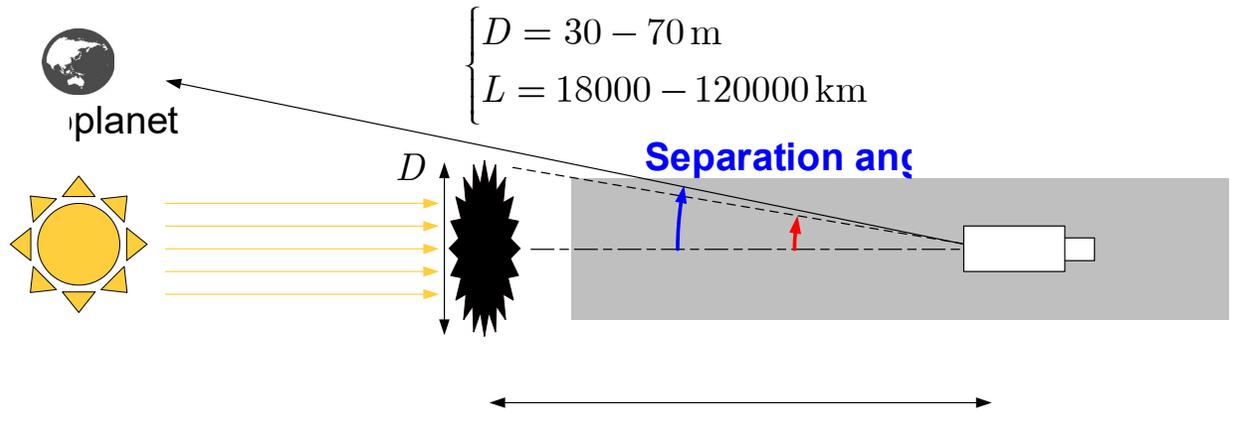
※ ACS-3やNEA Scoutに対抗して、6Uから100m²くらいの
スピン型セイルを展開して形状制御などを行うミッションを



3. 私が好きな今後の大規模軽量膜面宇宙構造物

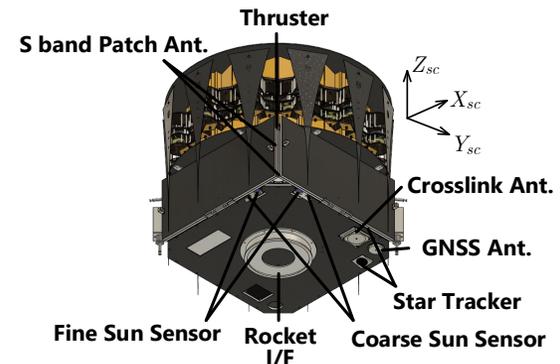
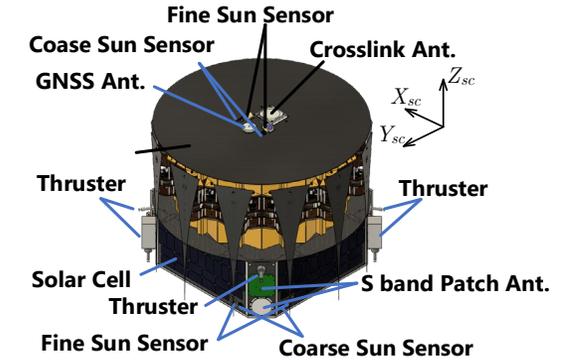
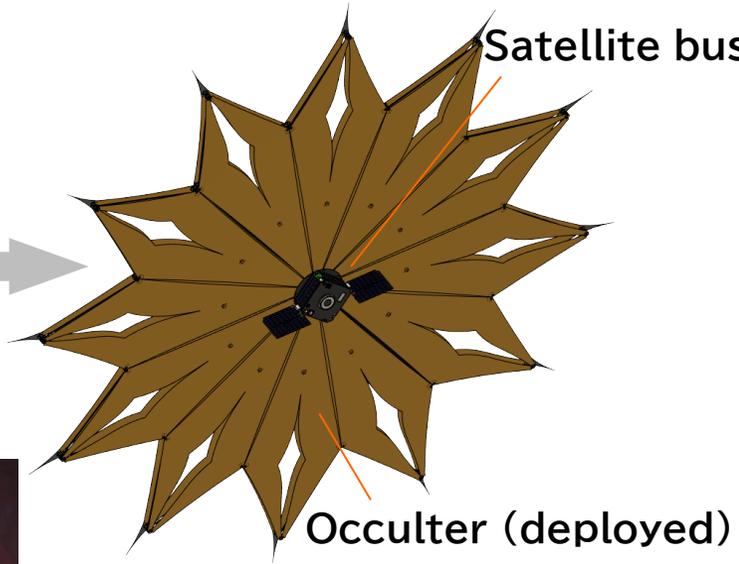
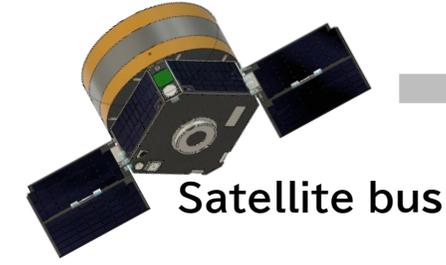
★スターシェード

Direct observation of exoplanets



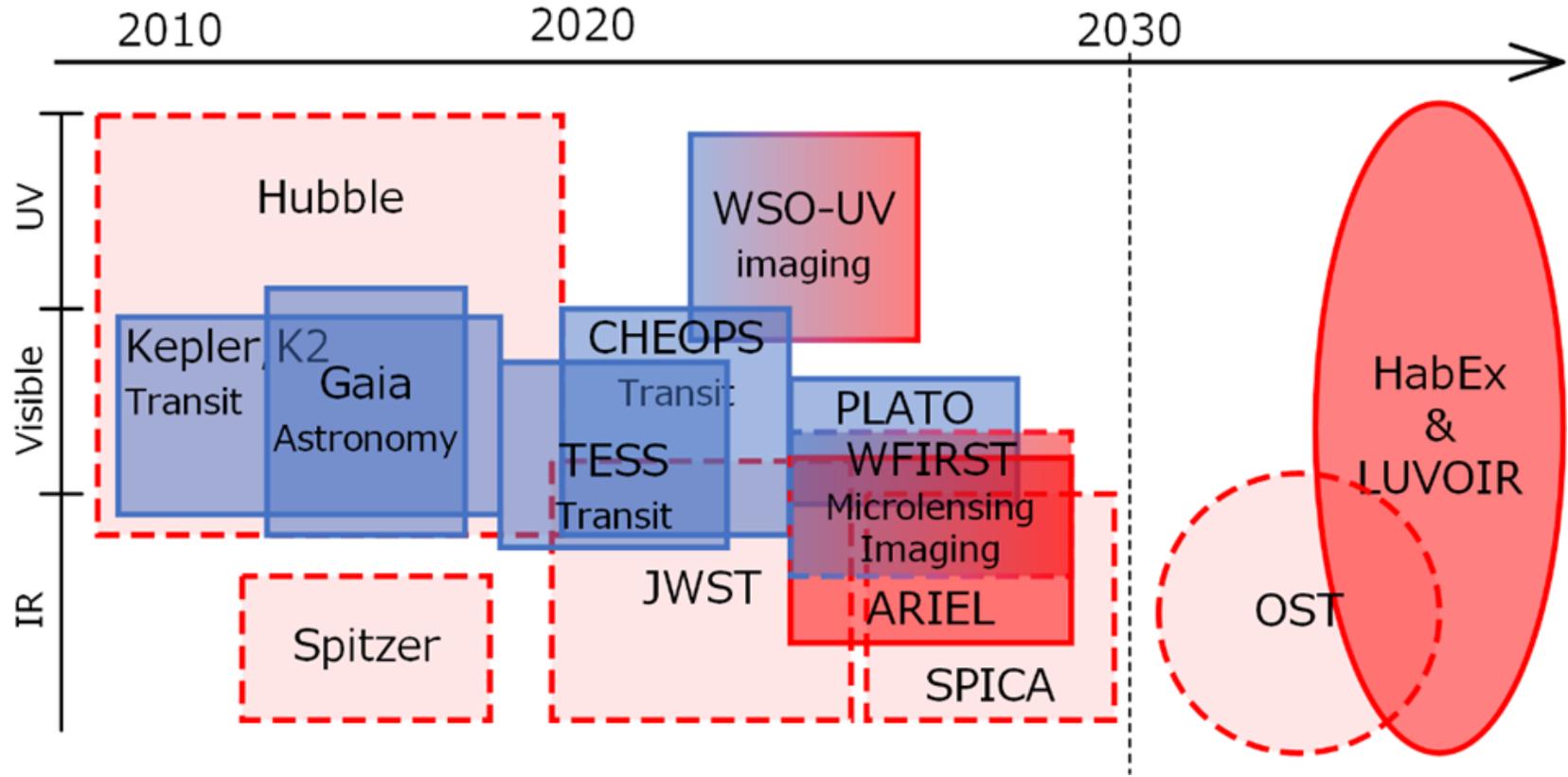
★小型衛星でのスターシェードのデモ

Occulter (stored)



3. 私が好きな今後の大規模軽量膜面宇宙構造物

★スターシェード



- ✓ 今後は特徴づけにシフト
- ✓ 特徴づけには系外惑星表層の観測が重要(特に, ハビタブル惑星の特徴づけには必要)
- ✓ 表層の観測には直接撮像が適している

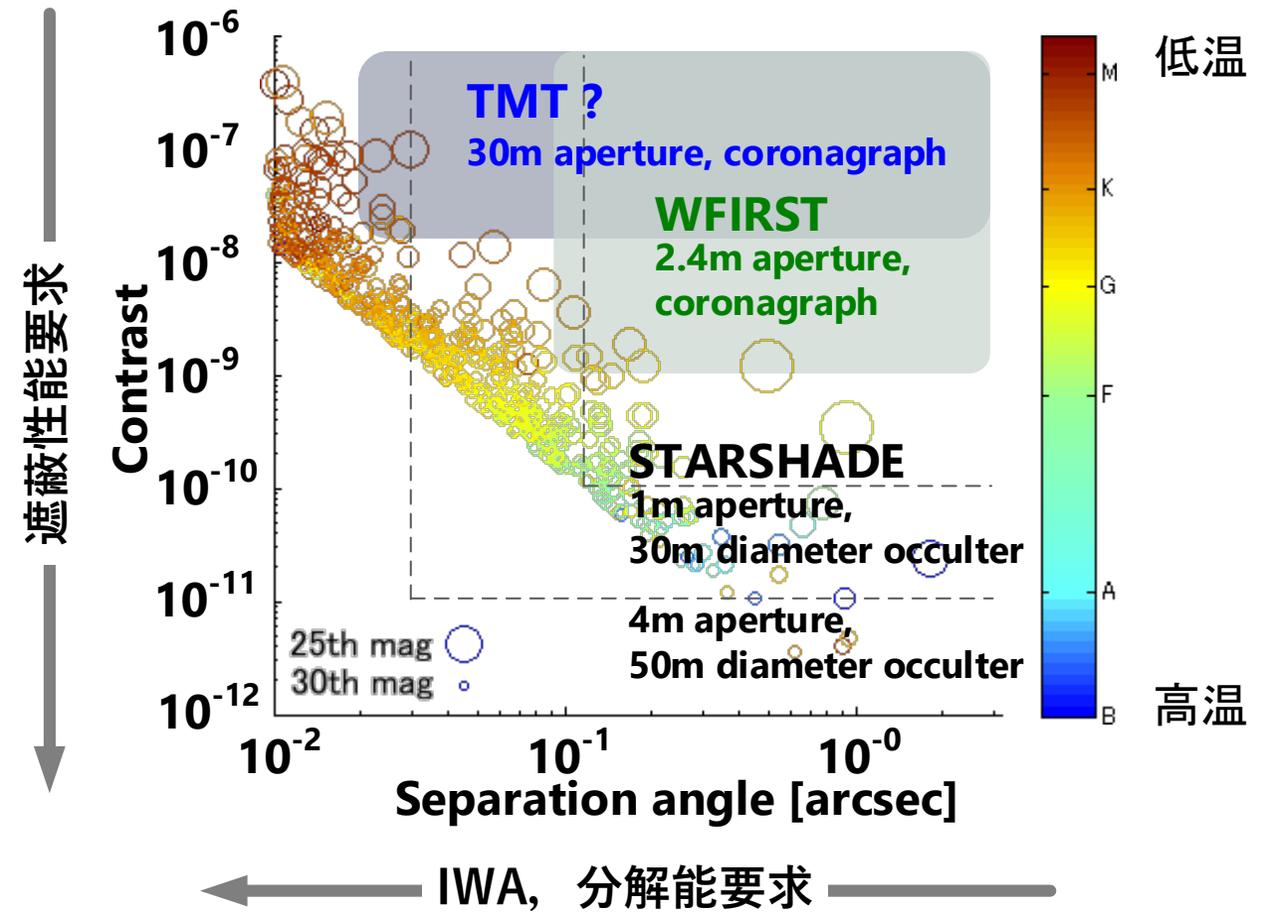
青:検出が目的 / 赤:特徴づけが目的

実線:系外惑星観測のみが目的 / 点線:系外惑星観測以外も行う



3. 私が好きな今後の大規模軽量膜面宇宙構造物

★スターシェード



3. 私が好きな今後の大規模軽量膜面宇宙構造物

★スターシェード

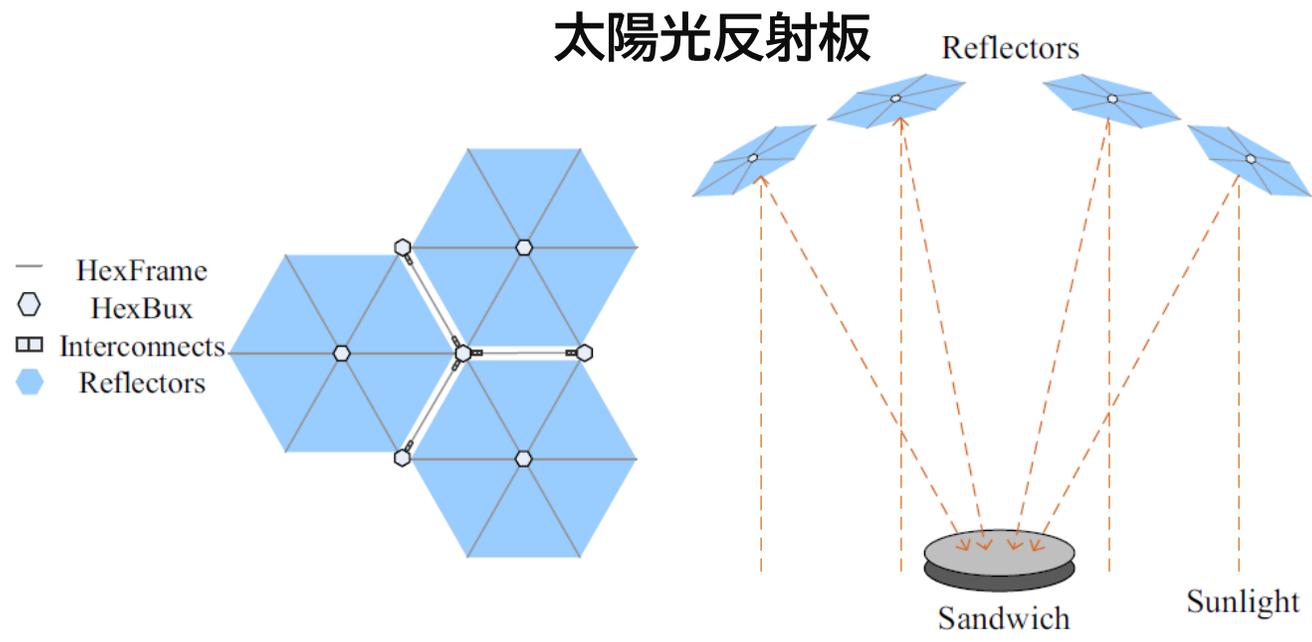
	コロナグラフ	スターシェード
利点	<ul style="list-style-type: none"> 遮光システムが望遠鏡内に搭載されているため、望遠鏡のみで観測が可能 	<ul style="list-style-type: none"> コロナグラフに比べて光学設計が単純 IWAが望遠鏡口径に依存しない → 望遠鏡自体は小さくて済む 既に軌道上にある宇宙望遠鏡に対してオカルタを打ち上げることで、高コントラスト撮像が可能
課題	<ul style="list-style-type: none"> 光学系の複雑化 高価 IWAが望遠鏡の口径に反比例して変化 → ハビタブルゾーンを解像するためには大きな開口径が必要 → 観測できる領域に限界がある 	<ul style="list-style-type: none"> 2機の宇宙機を用いることによるコストの増加(かなり高価) 2機の宇宙機の高精度なフォーメーションフライト オカルタ構造の形状精度・剛性の維持
実績	<ul style="list-style-type: none"> ハッブル宇宙望遠鏡 すばる望遠鏡, HiCIAO 等 	<ul style="list-style-type: none"> なし
将来計画	<ul style="list-style-type: none"> WFIRST-AFTA (スペース, 口径2.4m, 2025年打ち上げ予定) TMT (地上, 口径30m) ACESat (スペース, 30 - 40cm, 実証機) HabEx (オカルタ直径52m, 口径4m) 	<ul style="list-style-type: none"> Starshade Rendezvous Probe (WFIRSTにランデブ, オカルタ直径26m) mDOT (オカルタ直径3m, 口径10cm, 実証機)



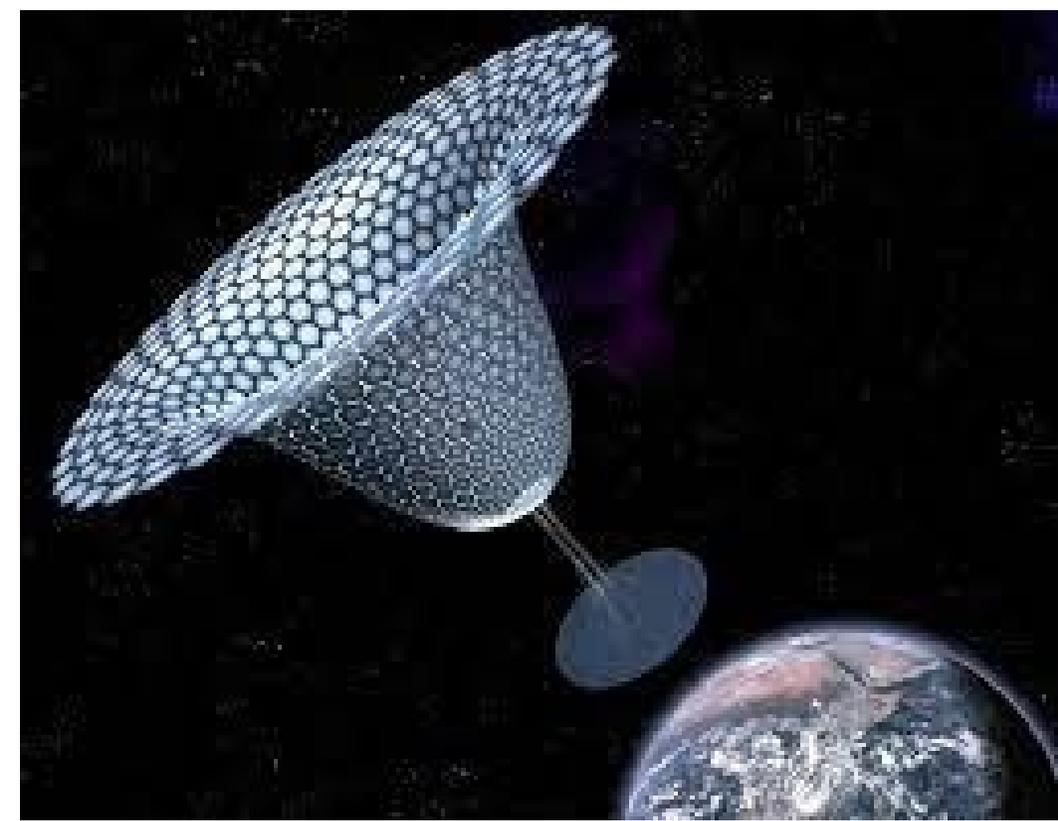
3. 私が好きな今後の大規模軽量膜面宇宙構造物

★SSPS(宇宙太陽光発電システム)

SPS-Alpha



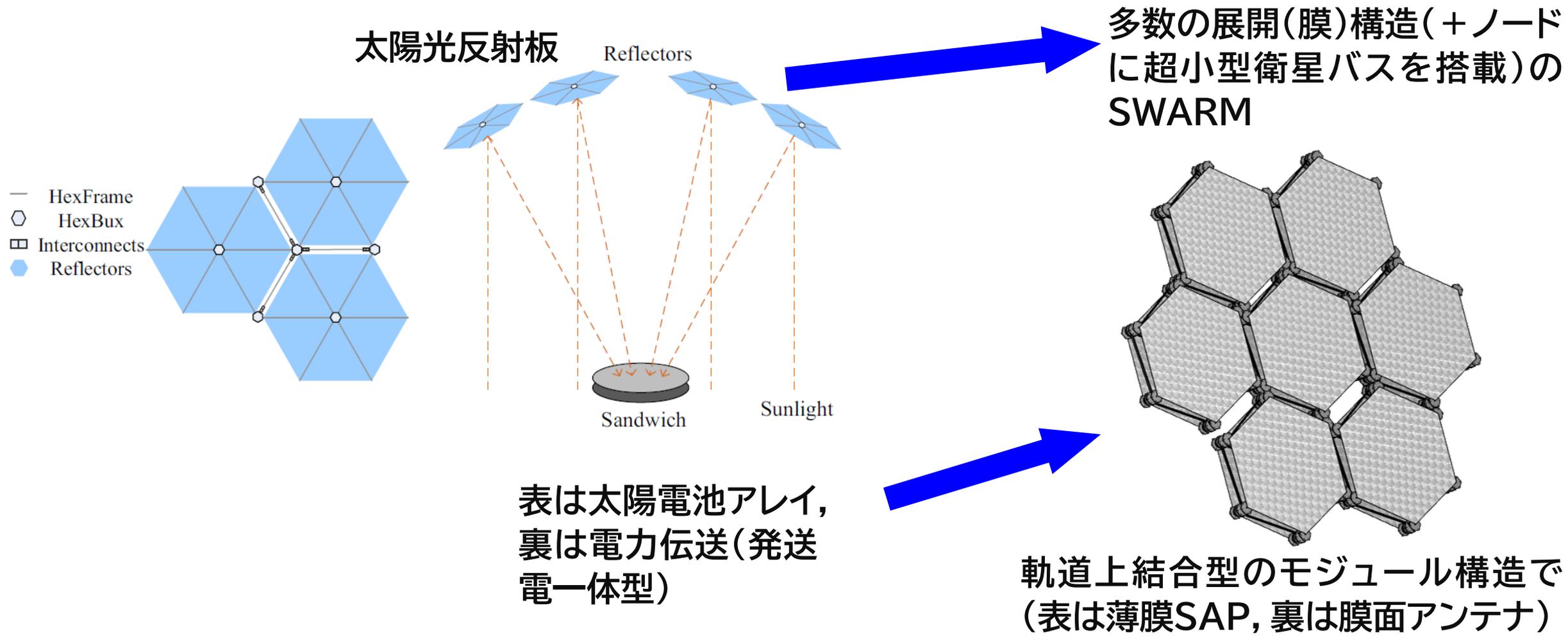
表は太陽電池アレイ,
裏は電力伝送(発送
電一体型)



3. 私が好きな今後の大規模軽量膜面宇宙構造物

★SSPS(宇宙太陽光発電システム)

日本でできないか？



★ 膜面宇宙構造物についてお話ししました

- 膜構造は予測しにくいから面白い(“手中”に収めたい)
- 宇宙にクラゲのようにフワフワしたものが漂っているのは楽しそう
- 他の人がやらなさそうなこと, できなさそうなことをやってみたい
- 超小型衛星の技術を使って超大型の宇宙構造物をつくってみたい
- 見えないものを見てみたい
- ちょっとは社会に貢献してみたい

とあって, 私は膜面宇宙構造物の研究をしています.

皆さんには, 是非, 高いポテンシャルを活かして, おもしろい世の中をつくっていただきたいと勝手ながら思っています.



宇宙機開発応用B

第4講 まとめ

課題



課題 : 膜面宇宙構造物を1つ取り上げ, 次の点について考察しなさい。
ただし, 膜面宇宙構造物としては, 過去に実現しているもの, 打ち上げが予定されているもの, 研究中もののいずれでも構いません。

1. 膜面構造に課せられる要求事項(システム要求)
2. 設計・開発したものがその要求事項を満足していることを確認するために必要な検証作業をまとめなさい。ただし, 設計段階(製造前)と, 試験段階(製造後)のそれぞれについてまとめなさい。
3. 上記2で示した検証作業のそれぞれについて, 技術的に困難な点についてまとめなさい。

提出期限 : 2021年12月15日(水)

提出先 : miyazaki.yasuyuki@jaxa.jp

宇宙機開発応用B

第4講 まとめ

おわり

