

これからの社会に貢献する航空宇宙機システムと基幹技術

軽量展開構造物の宇宙利用

JAXA宇宙科学研究所 宮崎 康行
日本大学理工学部

1. 自己紹介
2. 軽量展開宇宙構造物の例
3. 軽量展開構造物を宇宙利用する際のポイント
(おさらい)

1. 自己紹介

★現在は企業さんと協働で宇宙科学衛星・探査機の研究・開発に従事しています

【現職】

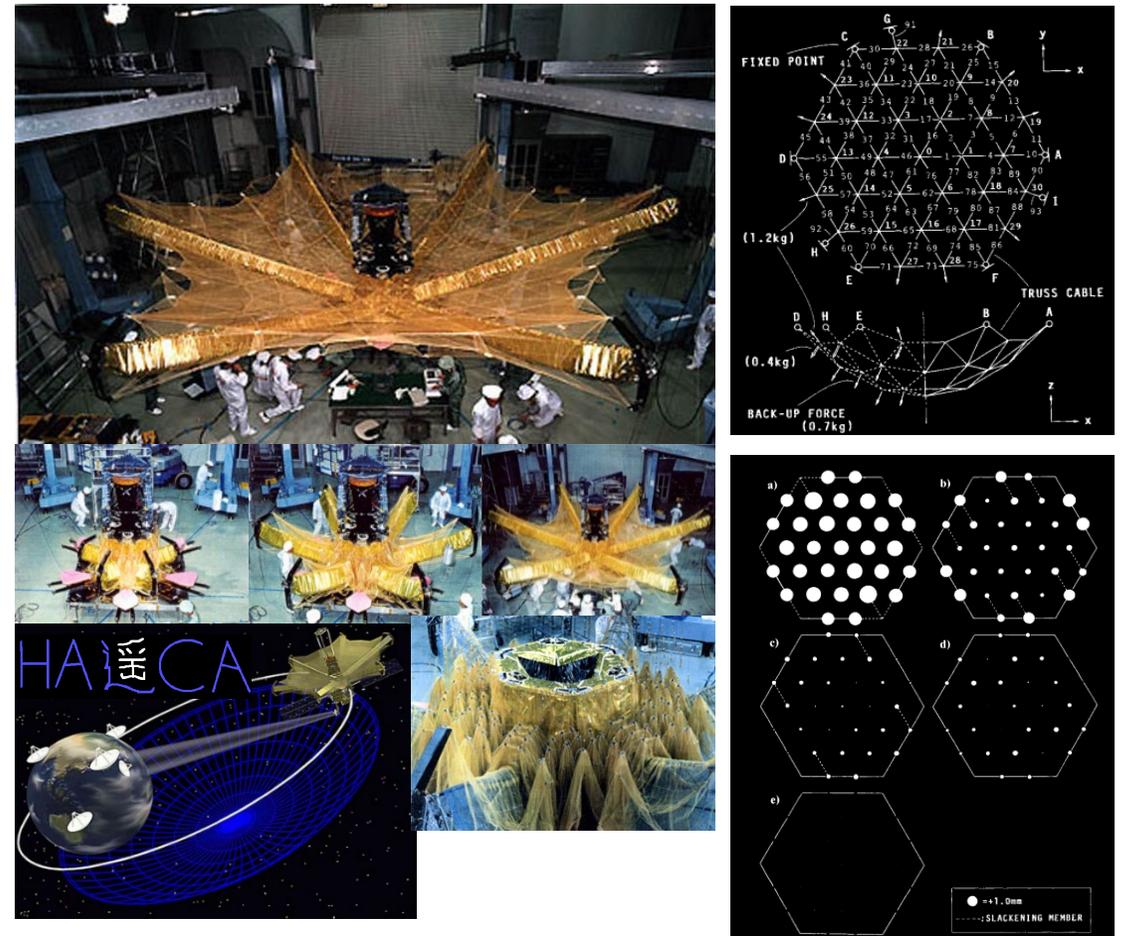
- JAXA宇宙科学研究所 教授(2020年10月~)
 - 総合研究大学院大学 物理科学研究系 教授
 - 日本大学理工学部 特任教授
 - 研究室には総研大生・日大生・神大生・早大生
- <https://stage.tksc.jaxa.jp/taurus>



【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(自分の研究成果が宇宙で使ってもらえるのは楽しい!)

【経歴1】学生時代(~1993)

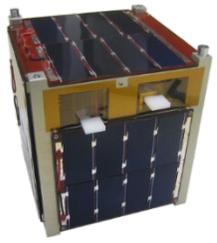


経歴

★現在は企業さんと協働で宇宙科学衛星・探査機の研究・開発に従事しています

【経歴2】日本大学での人材育成(1993~2020)

SEEDS
(2006)



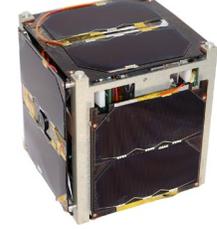
SEEDS-II
(2008)



SPROUT
(2014)

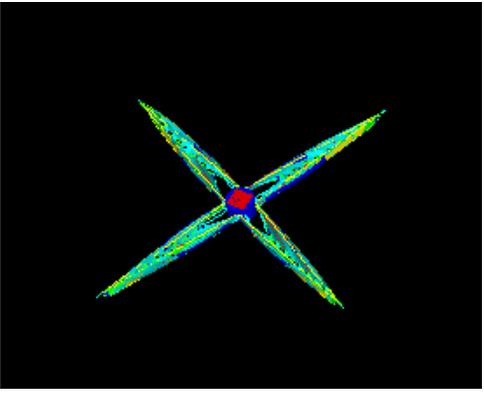
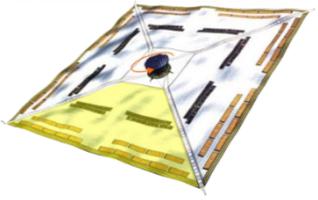
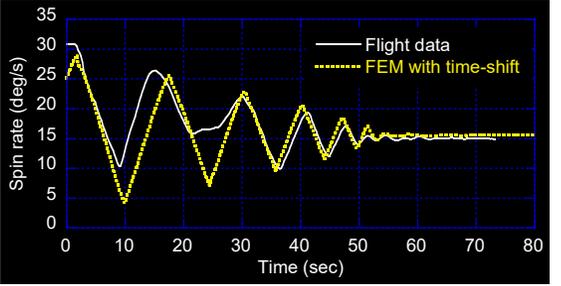
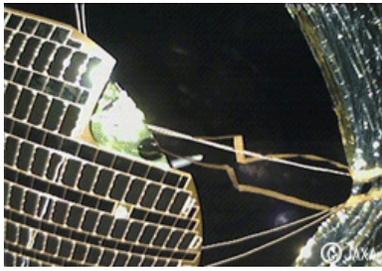
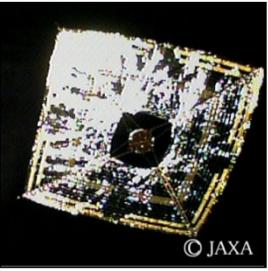
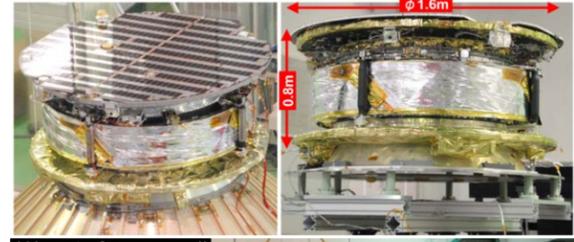


NEXUS
(2019)



【経歴3】JAXAとの共同研究・開発

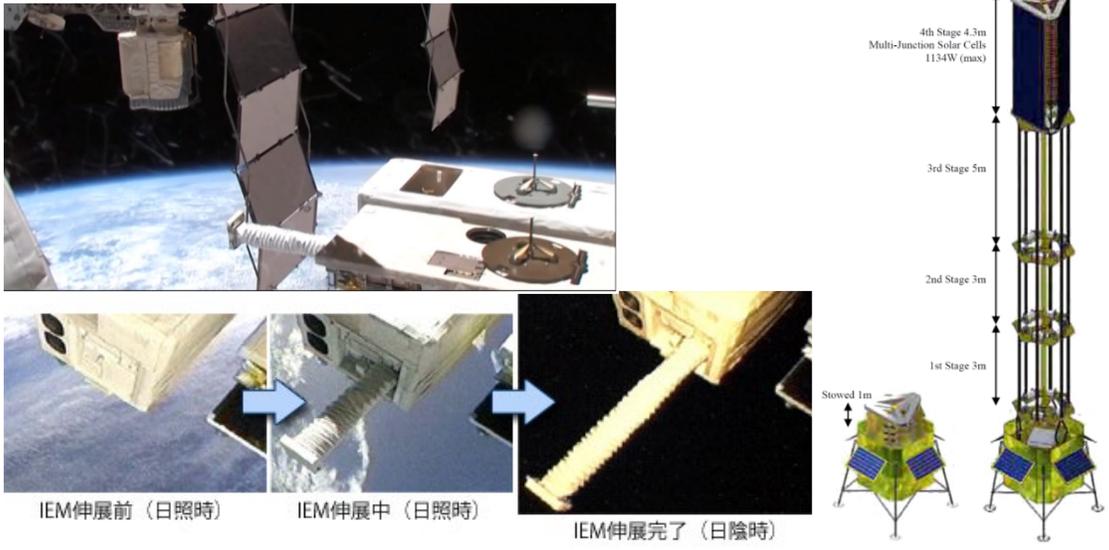
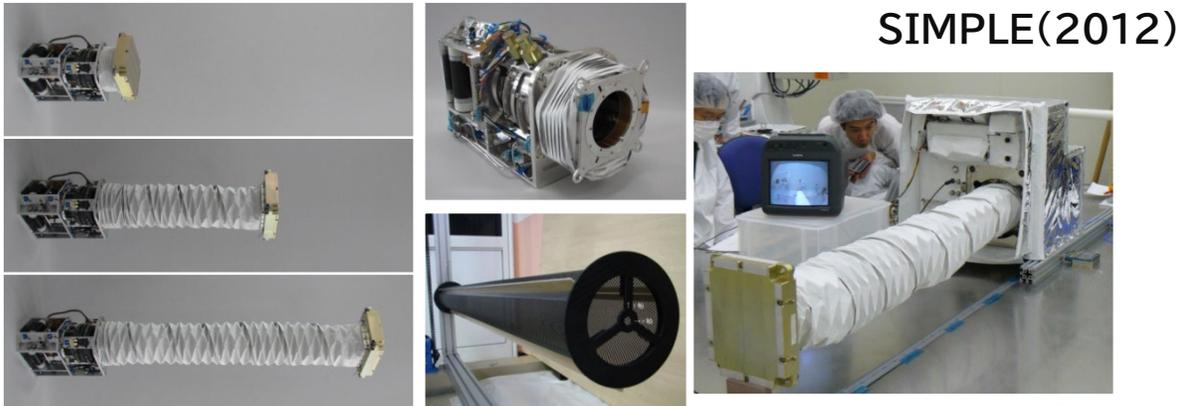
IKAROS(2010)



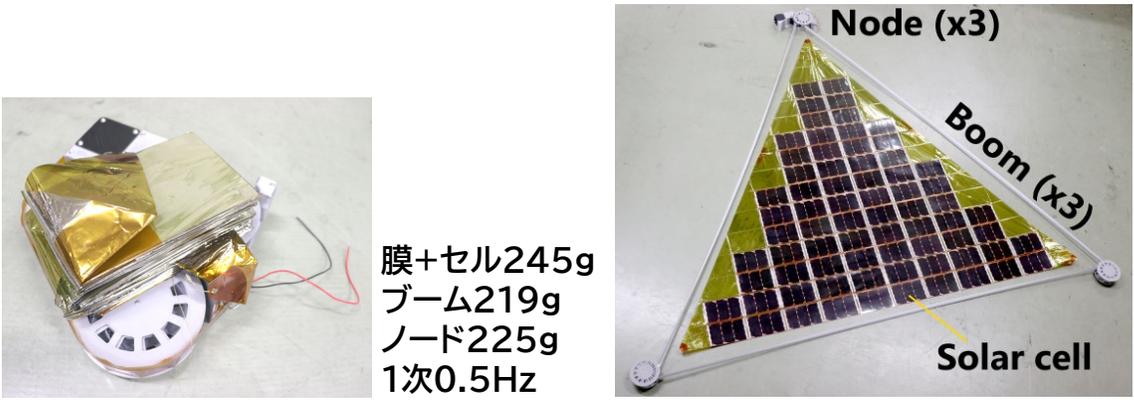
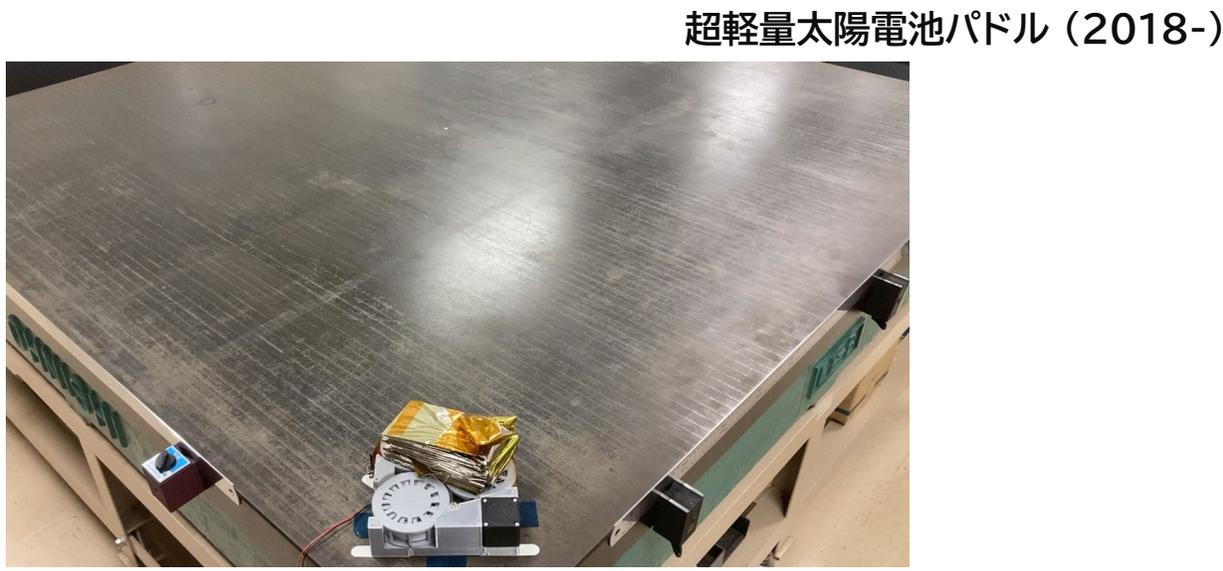
経歴

★現在は企業さんと協働で宇宙科学衛星・探査機の研究・開発に従事しています

【経歴3】大学・企業・JAXAとの共同研究・開発



【経歴3】大学・企業・JAXAとの共同研究・開発



現在の研究・開発活動

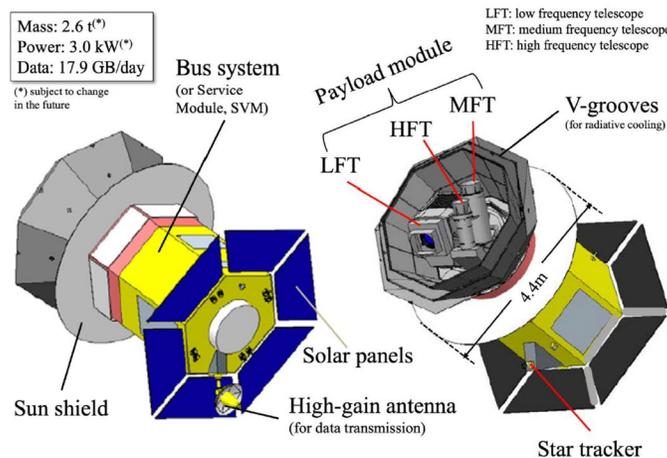
★ JAXAの宇宙科学衛星／探査機の枠組みの中での研究・開発

これから開発しようとしているものの設計・試作を企業さんと一緒にやっています

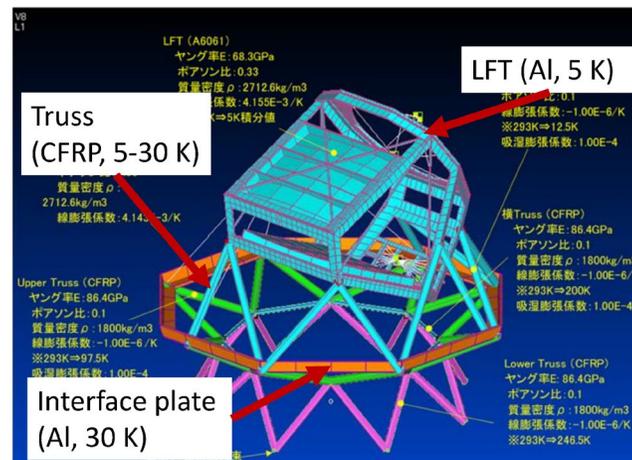
戦略的中型衛星／探査機(総額300~400億円以下)

公募型小型衛星／探査機(総額150~180億円以下)

その他(超小型衛星／探査機／月面の科学)



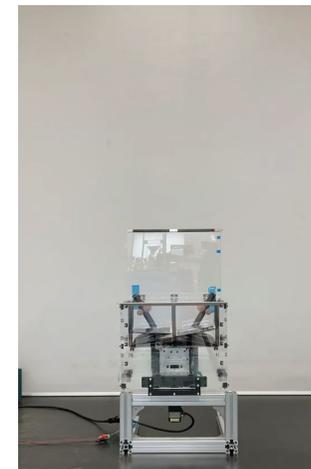
LiteBIRD(戦略的中型)



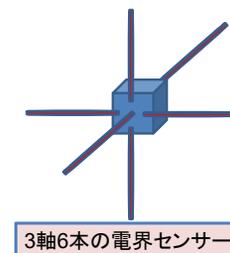
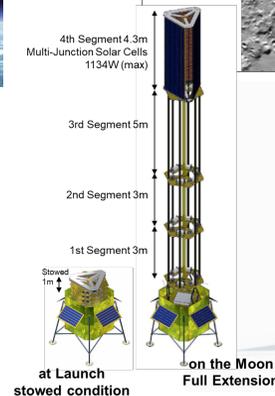
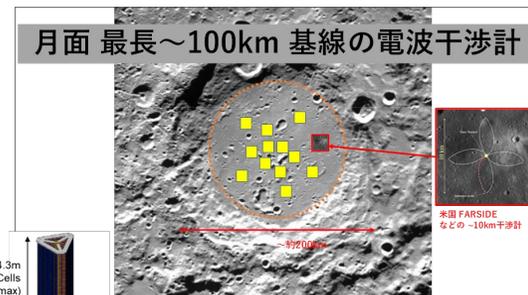
企業さんと宇宙研のメンバーとで設計している望遠鏡のお手伝い



<https://themachinemarket.com/ja/thales-alenia-space-selected-by-esa-to-build-comet-chaser-spacecraft/>



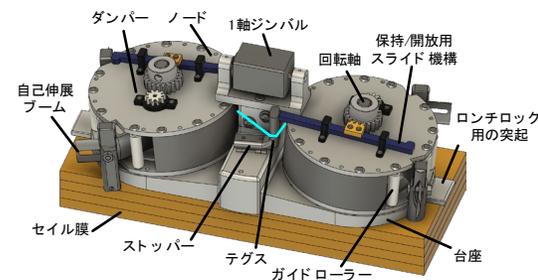
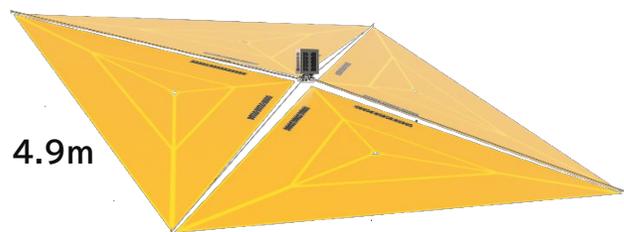
企業さんと一緒に要素開発(解析)



現在の研究・開発活動

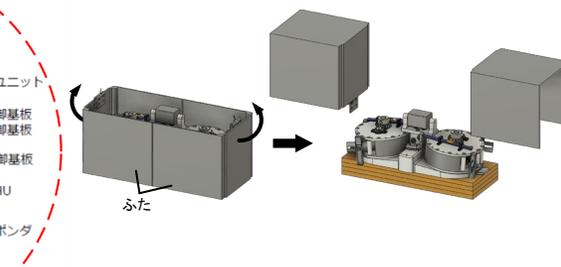
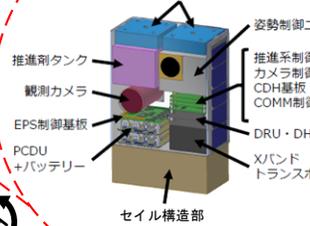
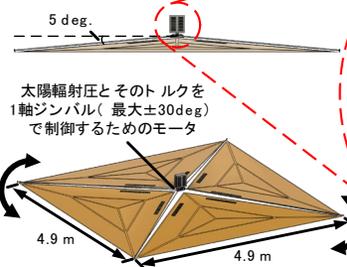
★ 学術研究・開発

超小型ソーラー電力セイル(東工大・JAXA)

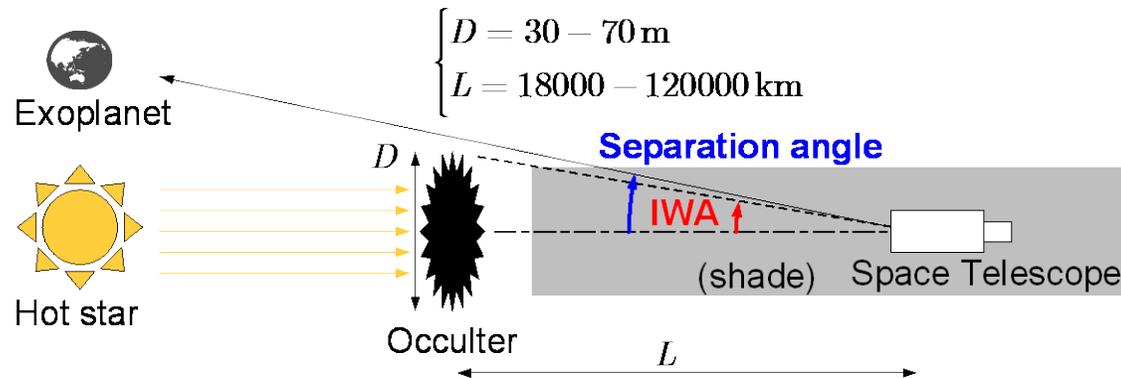


全体外観

構体内部イメージ



系外惑星観測用オカルタ(膜面展開トラス)



Euryops : Exozodiacal Disk Survey using Occulter composed of SDMT
2機の超小型衛星がフォーメーションフライトを行いながら、天文観測を行うミッション

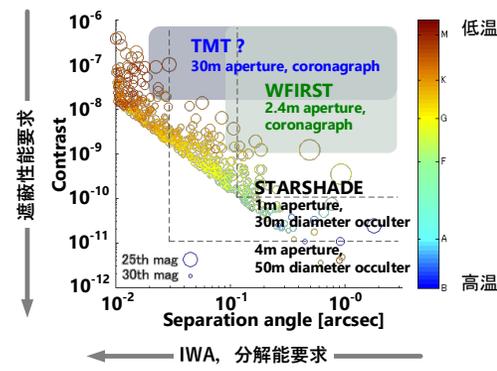
ミッション内容
系外惑星を直接撮像する方法の一つとして提案されている、スターシェードの技術実証を行う

望遠鏡衛星
50 kg, 50x50x50 cm, 19cm Aperture

衛星分離距離 ≈ 1500 km

観測対象
エリダヌス座ε星 デブリ円盤

オカルタ衛星
85 kg, 80x80x65 cm (収納時), オカルタ直径 10 m (展開時)



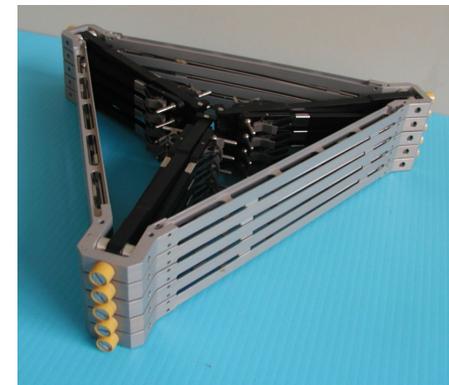
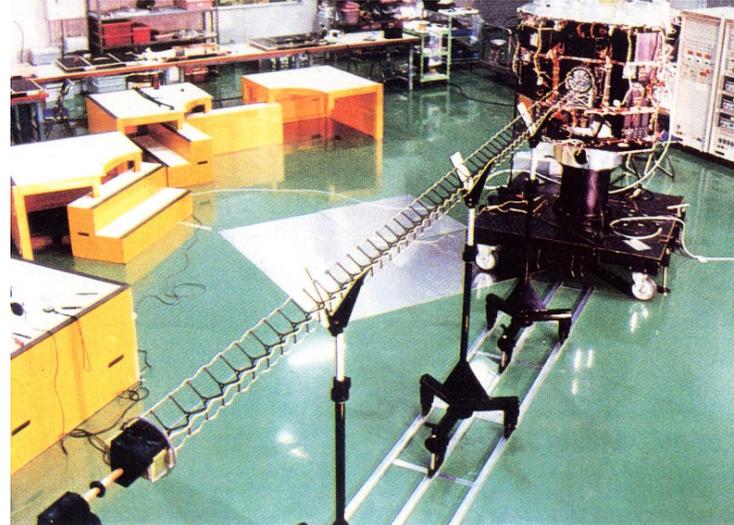
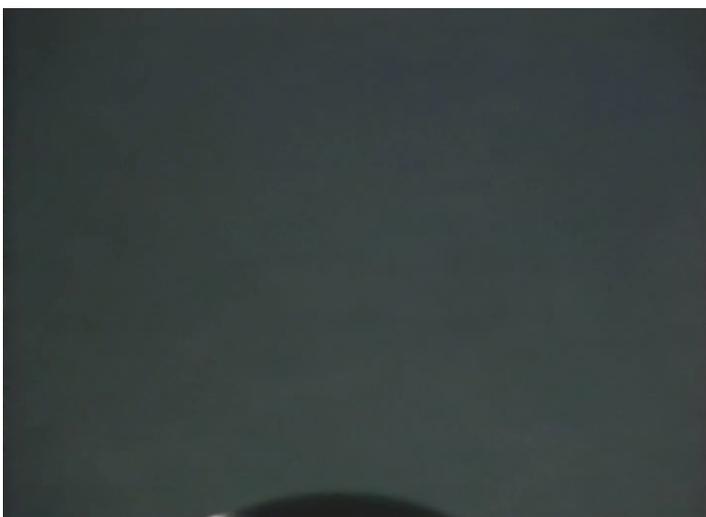
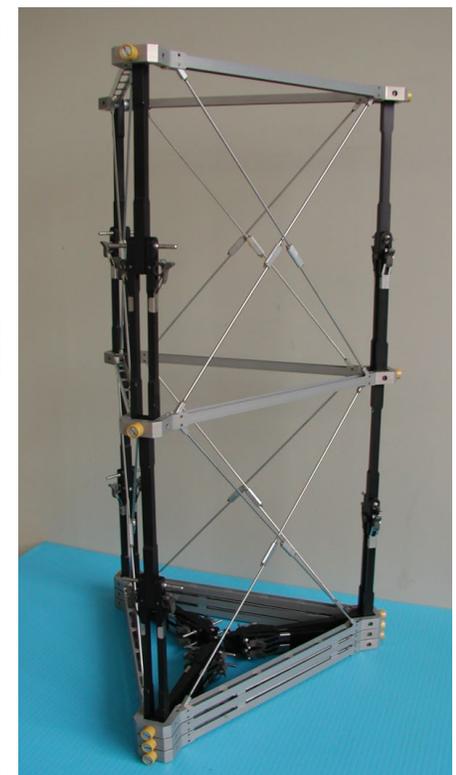
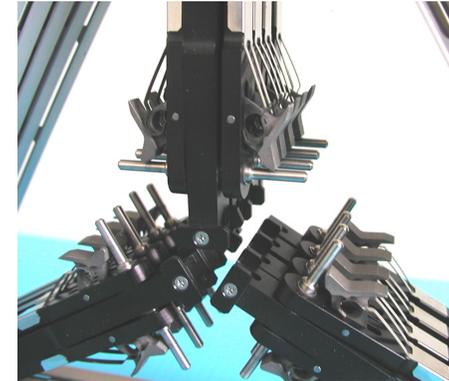
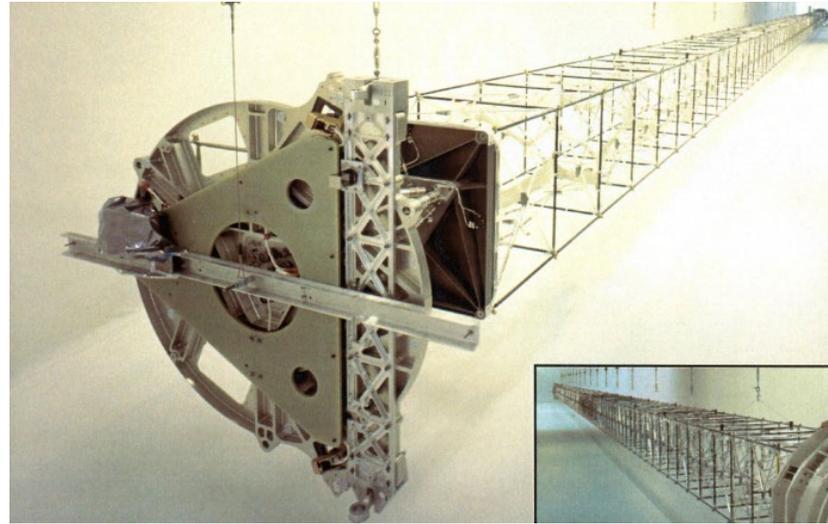
2. 軽量展開宇宙構造物の例

宇宙で軽量な展開構造物といえは

1. 伸展マスト
 2. アンテナリフレクター(パラボラ)、平面アンテナ
 3. 合成開口レーダー(パラボラタイプ、平面タイプ)
 4. 太陽電池アレイ(SAP)
 5. サンシールド
 6. ソーラーセイル
- ⋮

宇宙で軽量な展開構造物といえは

【伸展マスト】



宇宙で軽量な展開構造物といえは

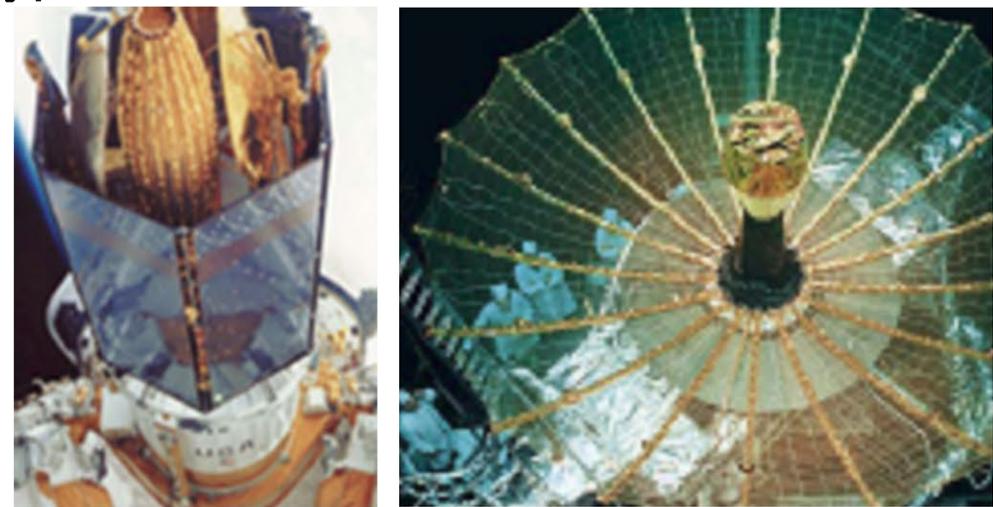
【展開アンテナ】

Petal type reflector



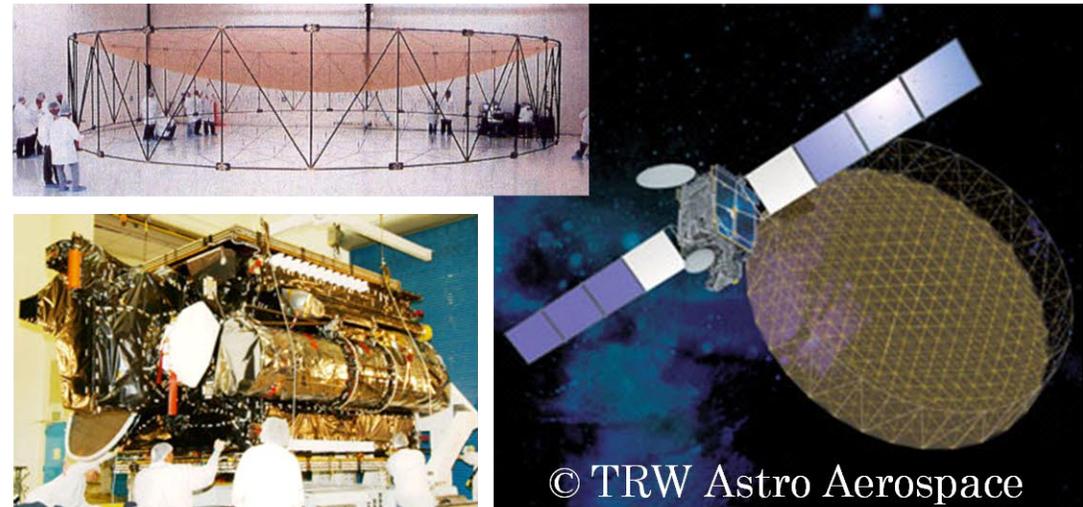
© NASDA/Toshiba

Rib-type mesh antenna



© Harris

Hoop-type mesh antenna



© TRW Astro Aerospace

宇宙で軽量な展開構造物といえは

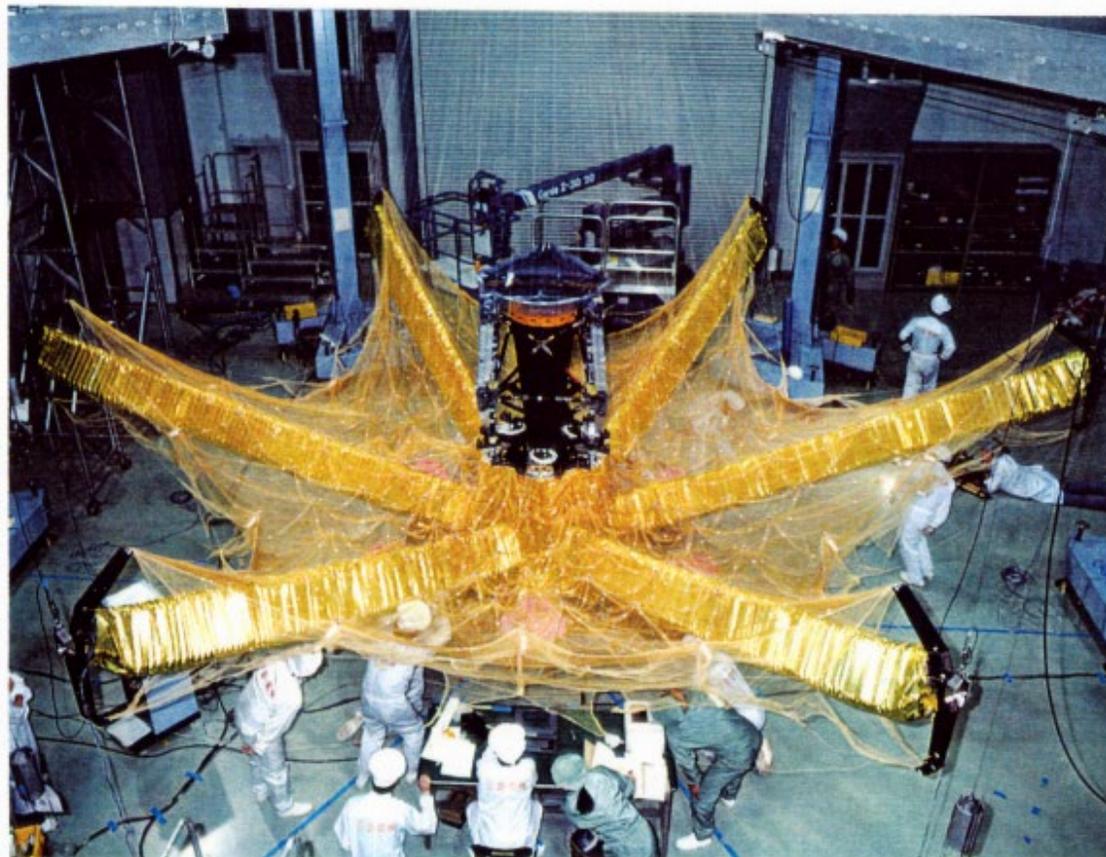
【展開アンテナ】



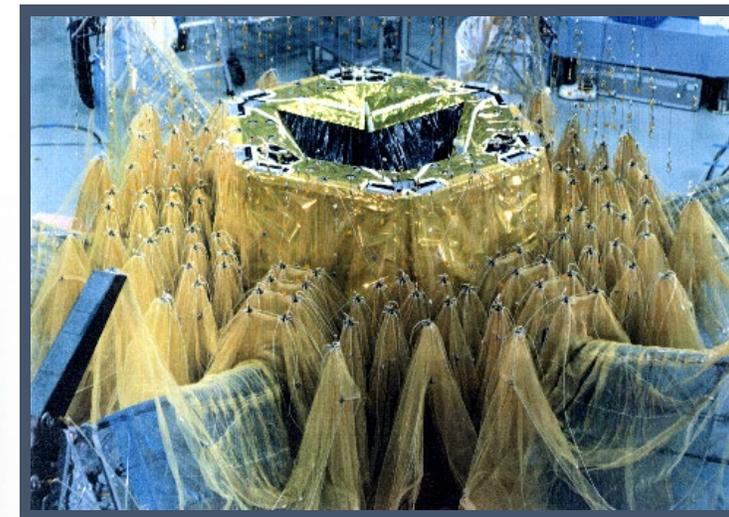
(a)



(b)



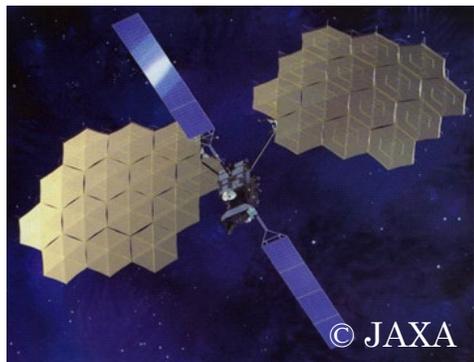
(c)



宇宙で軽量な展開構造物といえは

【展開アンテナ】

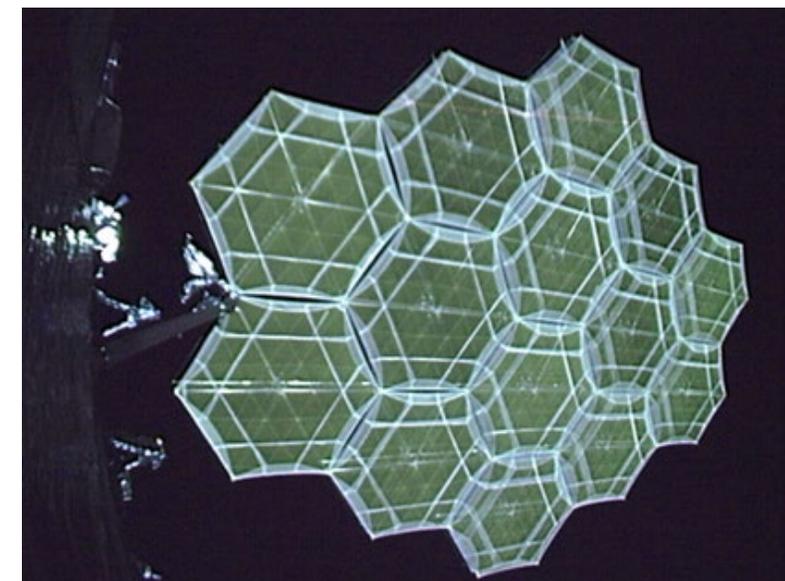
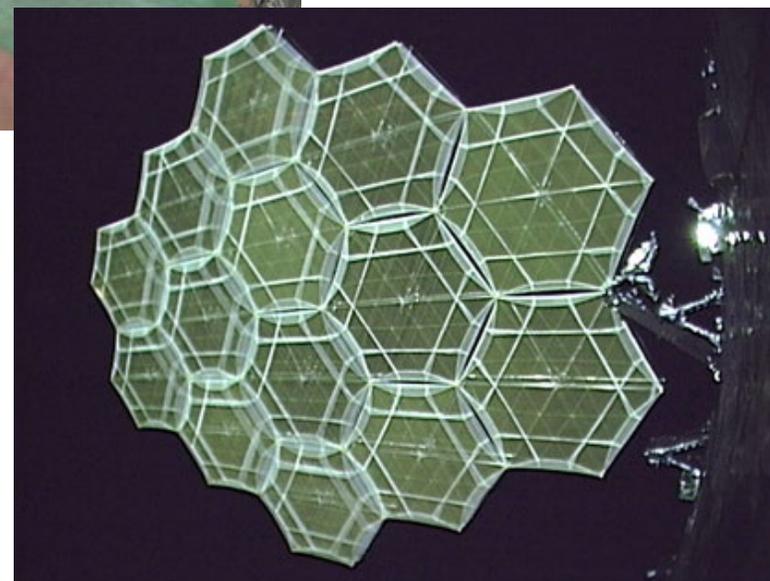
Modular rib-type mesh antenna



LDREX2
deployed in Oct. 2006



deployed in Dec. 2006

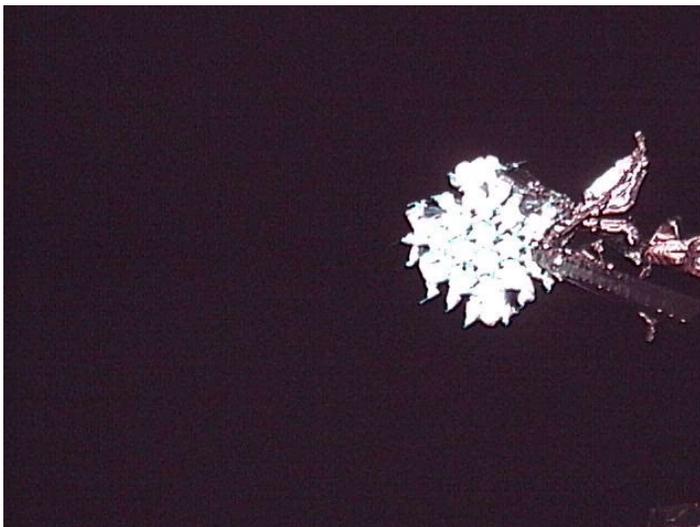
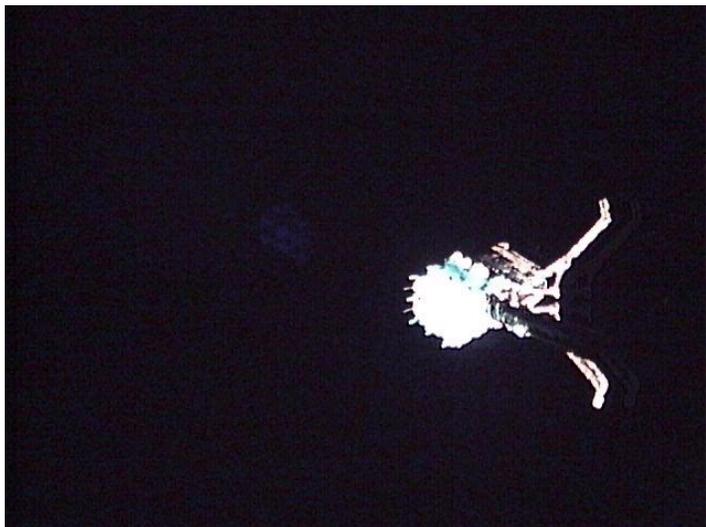
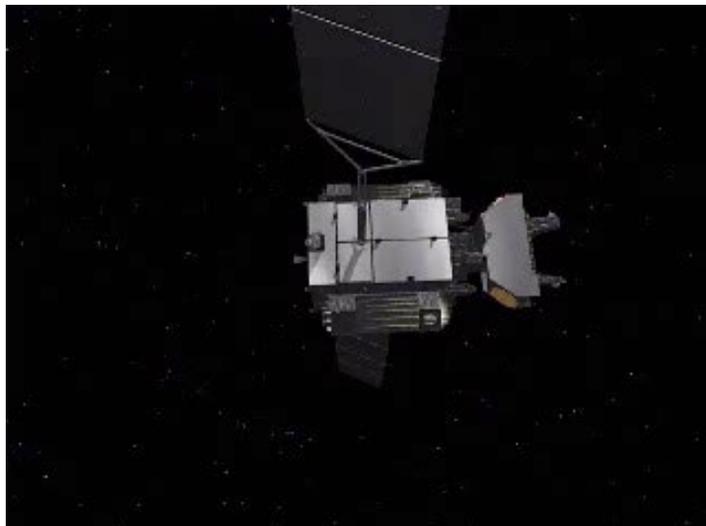


ETS-VIII
launched in Dec. 2006

メッシュの隙間が波長の1/10~1/20以下ならOK

宇宙で軽量な展開構造物といえは

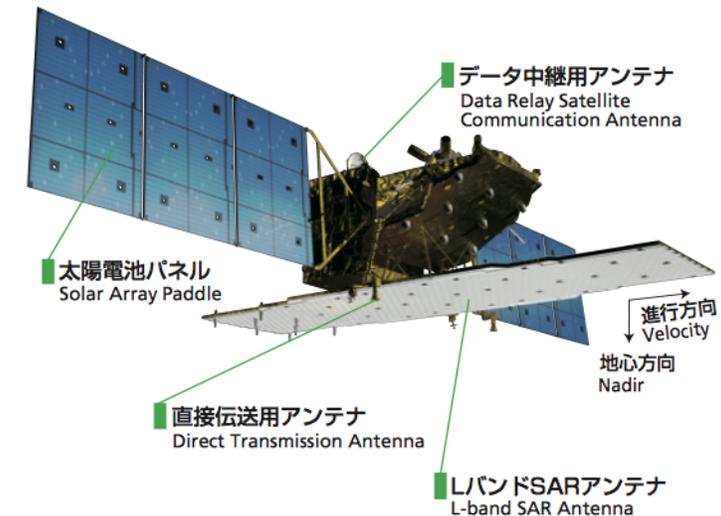
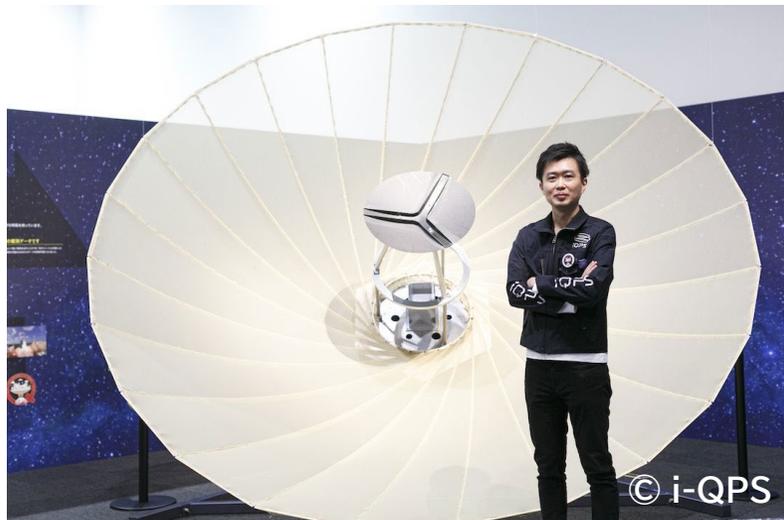
【展開アンテナ】



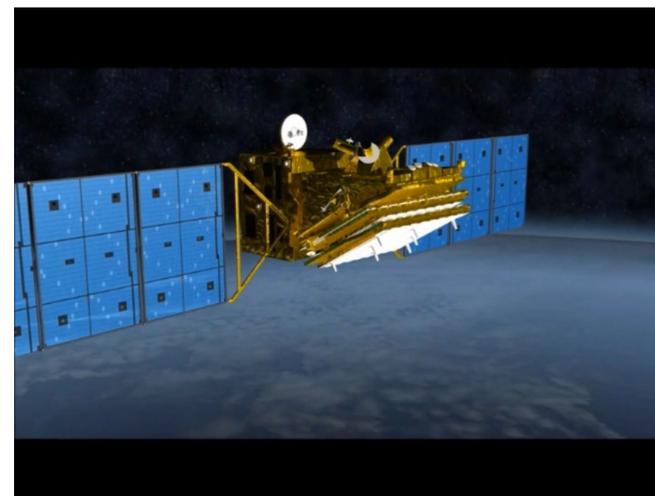
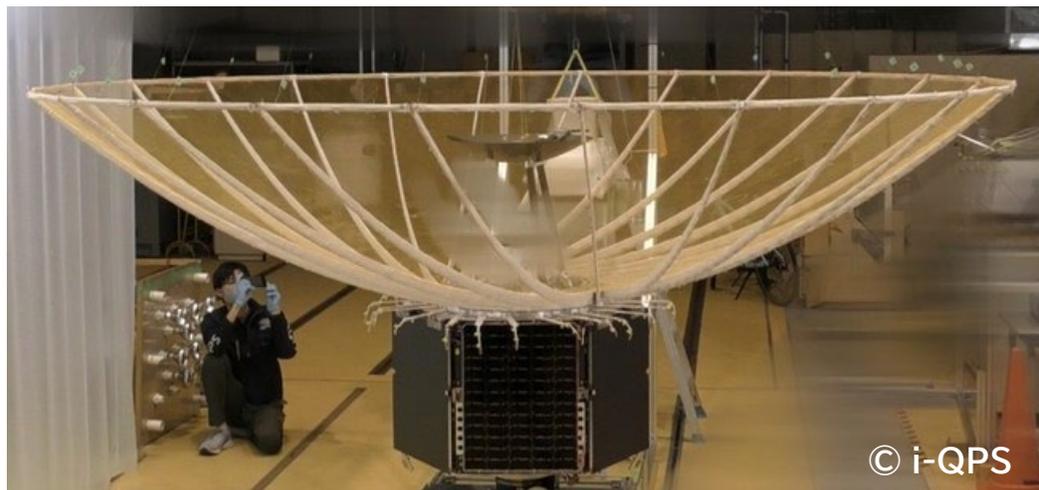
12-METER
REFLECTOR
DEPLOYMENT

宇宙で軽量な展開構造物といえは

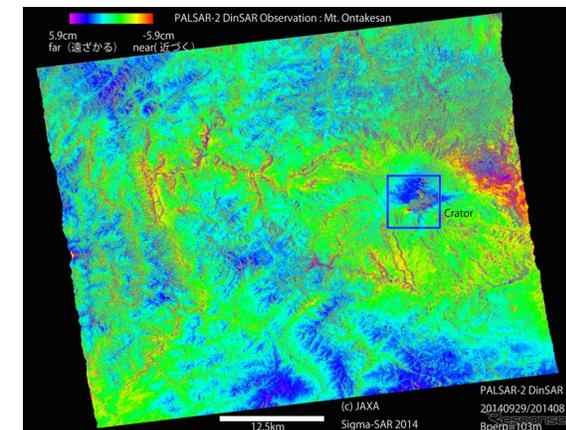
【合成開口レーダー(SAR)】



<https://www.restec.or.jp/solution/product/product-alos-2/alos-2-about.html>



<https://www.youtube.com/watch?v=EQqUdXU05VY>



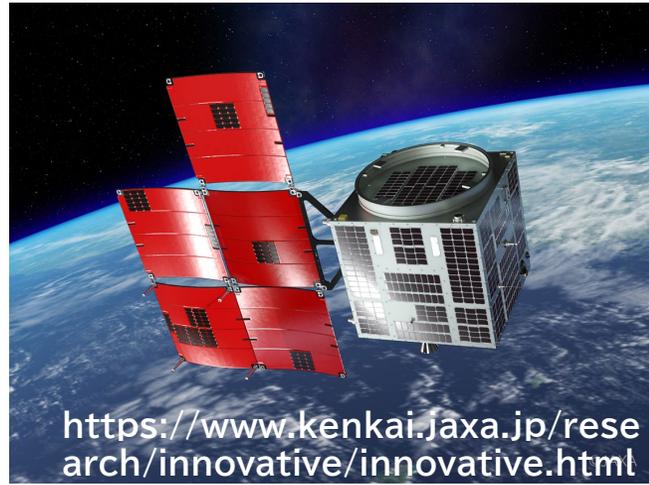
<https://response.jp/article/2014/10/06/234212.html>

宇宙で軽量な展開構造物といえは

【太陽電池アレイ(SAP)】



<https://www.satnavi.jaxa.jp/ja/project/qzss/>

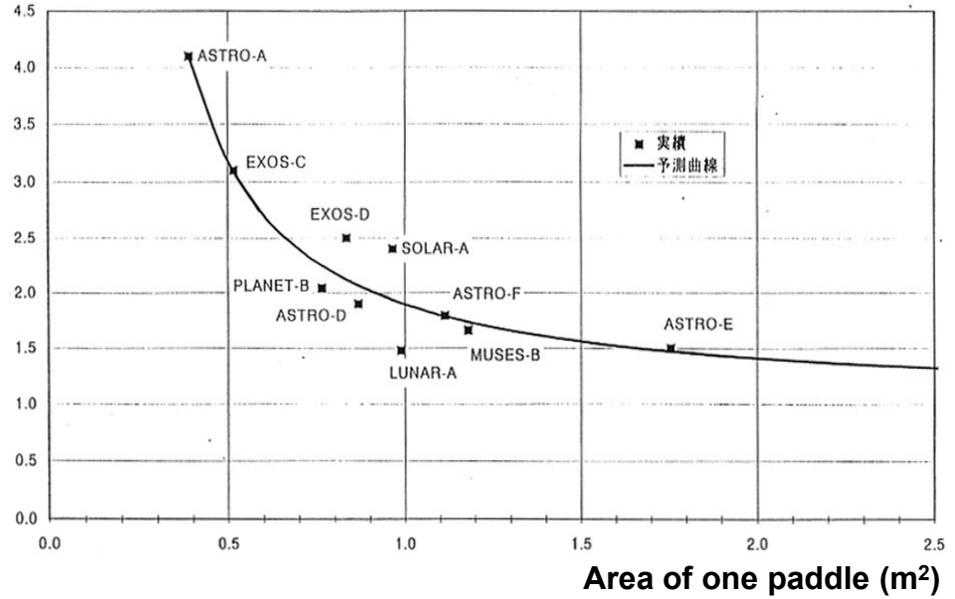


<https://www.kenkai.jaxa.jp/research/innovative/innovative.html>



<https://destiny.isas.jaxa.jp/>

Specific weight (kg/m²)



約150W/kg



<https://www.youtube.com/watch?v=Q8puKlFfUmk&t=3s>

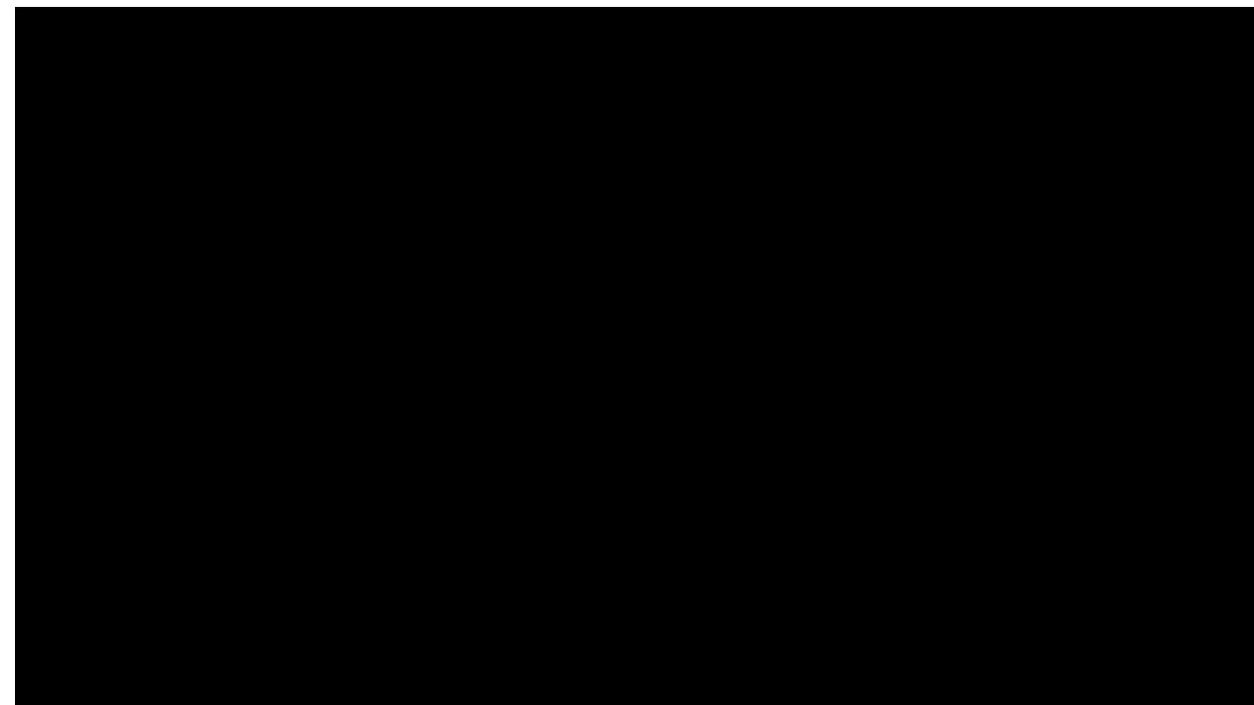
宇宙で軽量な展開構造物といえは

【サンシールド】

21m x 14m, 50 μ m



<https://www.nasa.gov/feature/goddard/2019/nasa-s-james-webb-space-telescope-clears-critical-sunshield-deployment-testing>

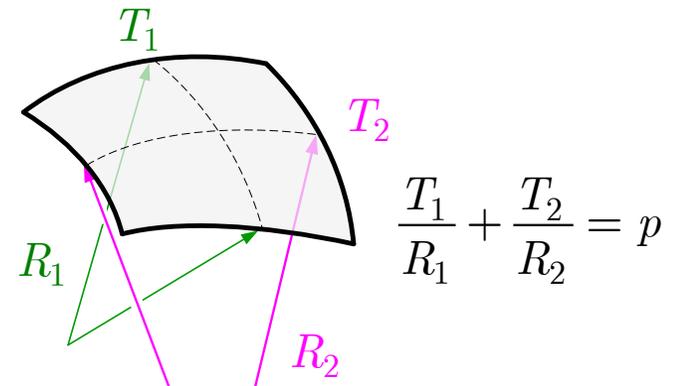


<https://www.youtube.com/watch?v=PVAe9Ovca5Q>

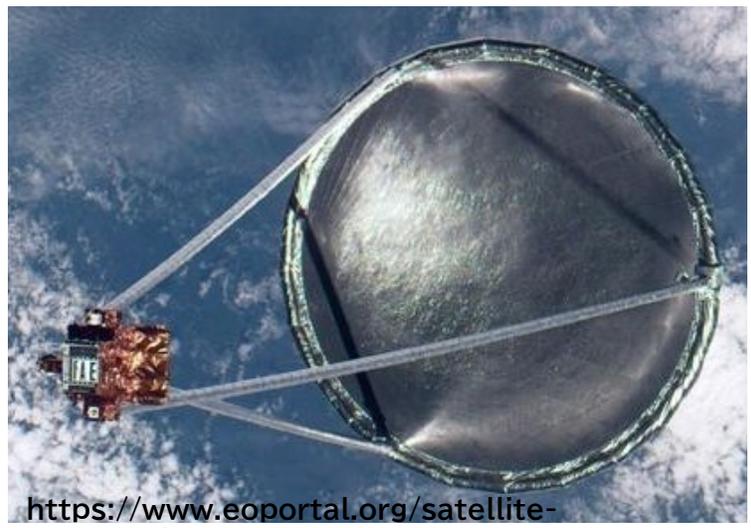
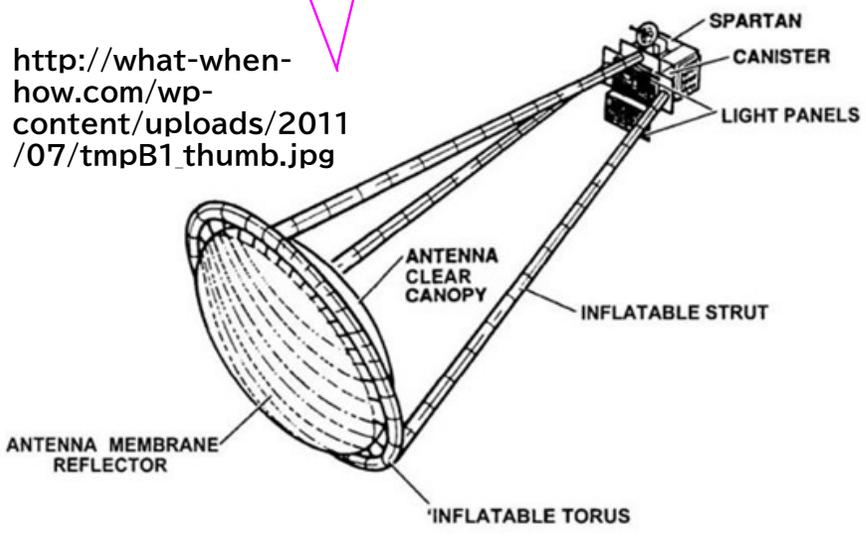
宇宙で軽量な展開構造物といえは

【インフレータブル構造物】

凸型にしたければインフレータブル



http://what-when-how.com/wp-content/uploads/2011/07/tmpB1_thumb.jpg



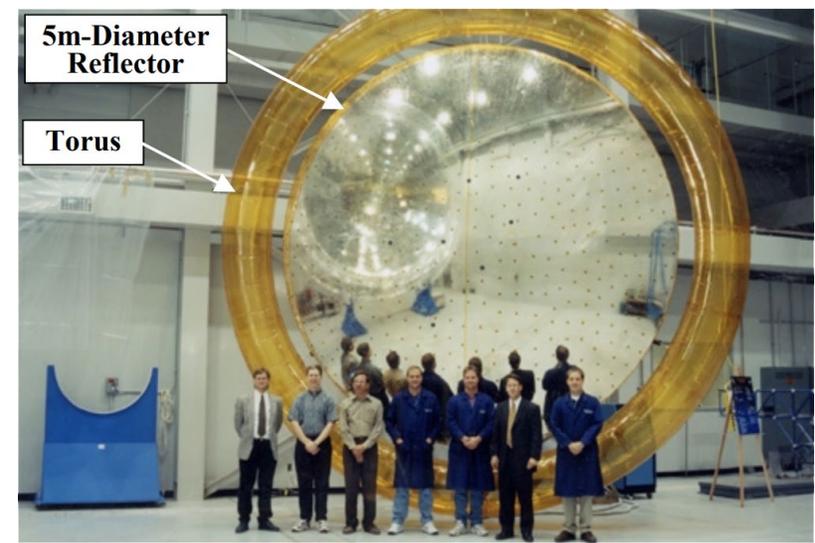
<https://www.eoportal.org/satellite-missions/iae#iae-experiment>



<https://youtu.be/NrAKFiBiZ4>



<https://thespaceoption.com/chemically-rigidized-expandable-structures/>



<https://www.cs.odu.edu/~mln/ltrs-pdfs/NASA-2001-tm210857.pdf>

なぜ軽量な伸展／展開構造？

1. 打上げ機からのペイロード重量、サイズに対する制約

- 重量の制約の中でやりたいことを実現したい
- 大面積のものや長いものを使って宇宙で何かをしたい場合、打ち上げ時には小さく収納しておくしかない

2. 衛星から離れたたい

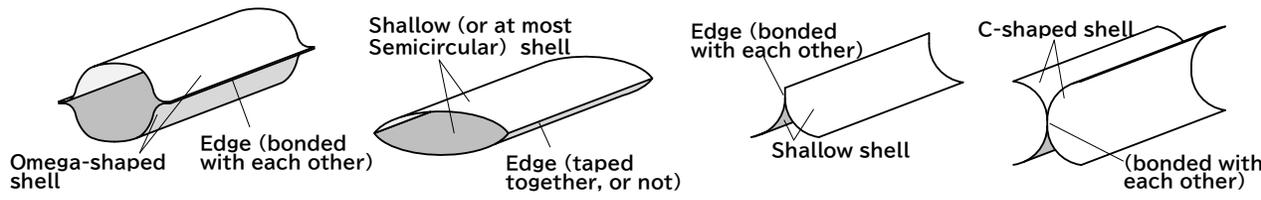
- 磁場や電場など、何かをその場計測する際、衛星が発する電磁場が邪魔(特に、送信機の影響は大)

3. 物理的に大きいものがほしい

- 望遠鏡の口径(小型でも高性能な画期的な方法も研究はされているが)
- SAP(太陽電池セル自体の高効率化の研究はされているが、太陽光のエネルギーは地球周辺で $1370\text{W}/\text{mm}^2$ 程度と上限があるし、例えば木星付近となると、 $1/25$)
- 合成開口レーダー, 平面アンテナ(電波を“しぼる”ためには面積が必要)
- 太陽光圧推進(ソーラーセイル)(SAPと同様で、推進力を得るには面積が必要)
- 日陰をつくりたい(サンシールド)

伸展ブーム(凸型断面ブーム)

- モーター伸展(双安定ブーム)&自己伸展
- 様々な断面形状



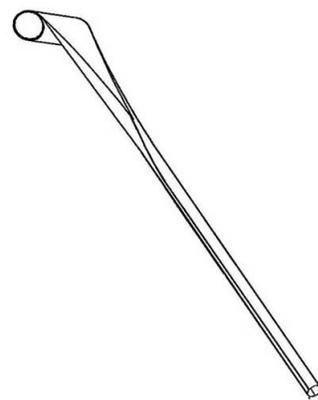
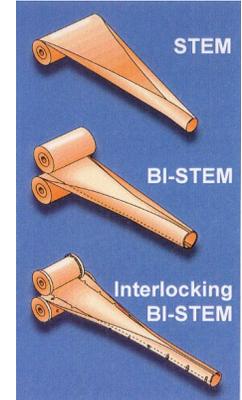
Hingeless Mast
(日本飛行機)



HIMAT
(日本飛行機)



SPINAR
(ISAS/Well/(Astro Aerospace) Sakase)



Elastic Memory Composite
(CTD)



www.niko-spring.com/take.html



タケノコバネ
(東海バネ工業)



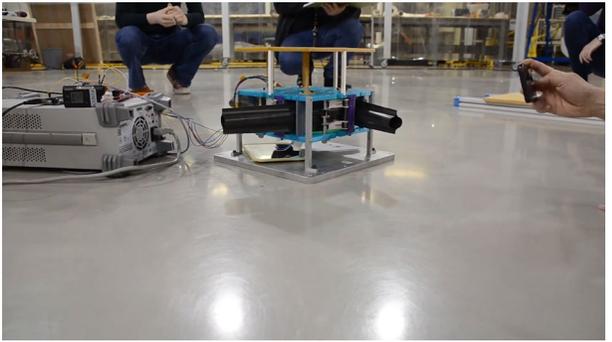
2m CubeSat Boom (OSS)
youtu.be/ORc6DqYUytg



ROSA (NASA, 2017)
youtu.be/1Pm4MbIwRDw



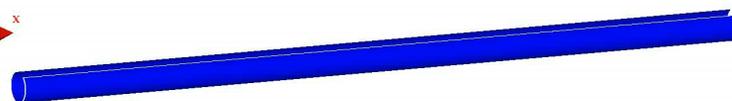
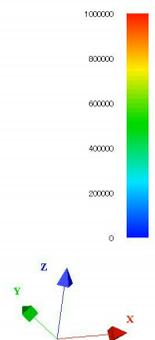
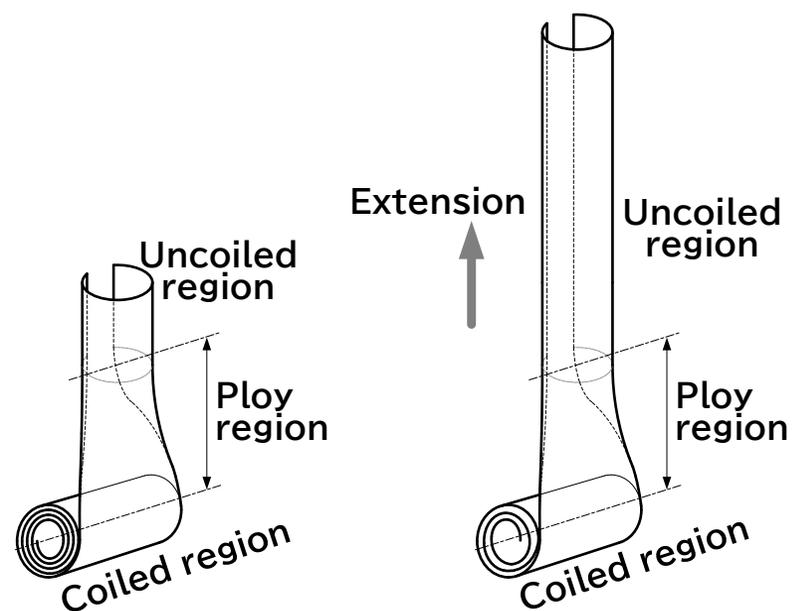
NEA Scout (NASA, 2022?)
youtu.be/U6aE_LV47NQ



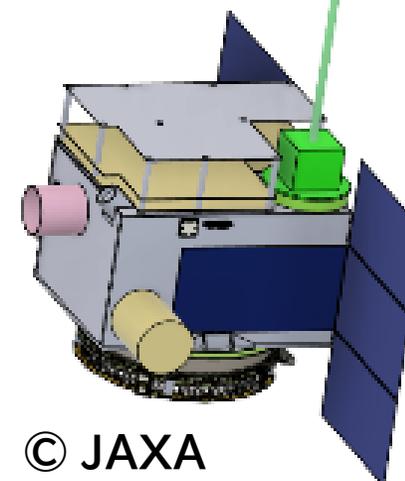
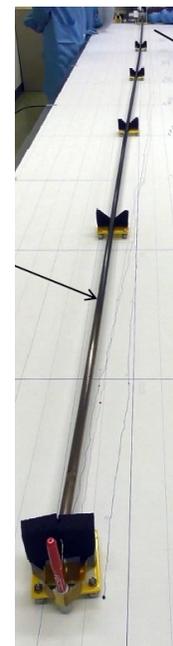
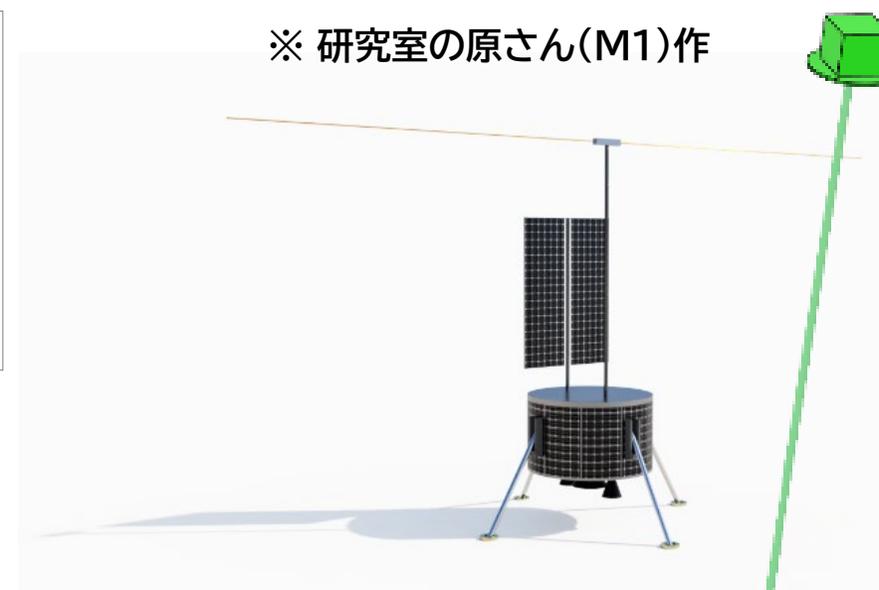
ACS-3 (NASA, 2022?)
youtu.be/wsXNgRI_RMs

伸展ブーム(凸型断面ブーム)

- ローンチロック
- 根元の形状(ploy region)
- 伸展後のラッチ
- 精度要求, 剛性要求, 強度要求, 導電性要求, ...
- 結局は, 「質」の問題(いまは, 「質」が問われる時代)



※ 研究室の原さん(M1)作

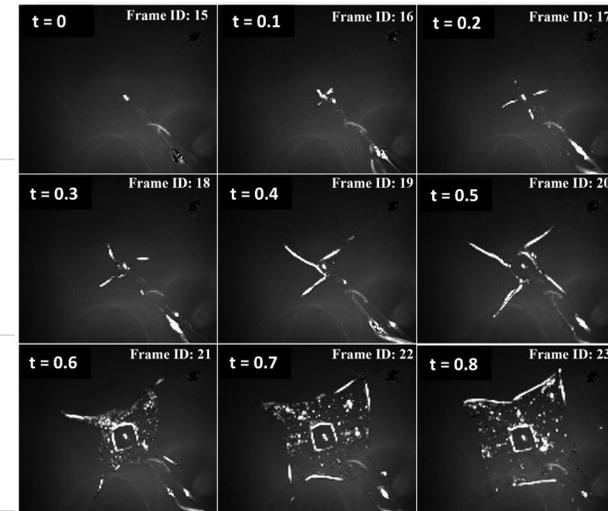
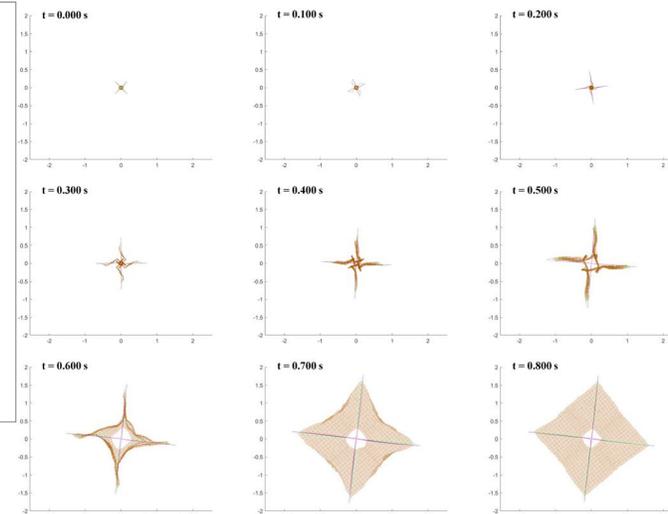


© JAXA



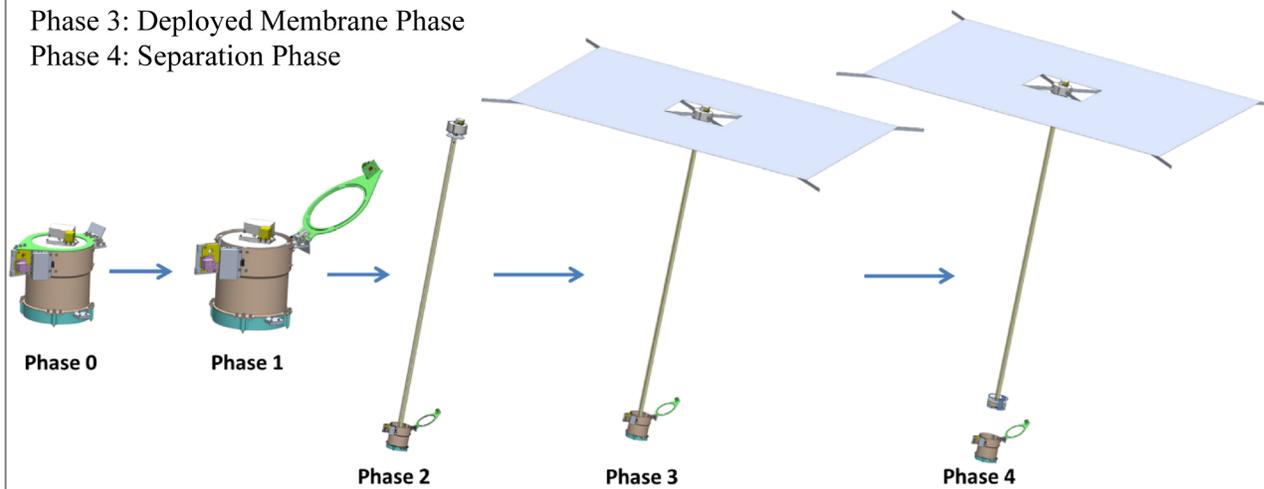
デオービット機構DOM

- 2009年打上げ(ALE-1)
- 軽量マストの設計
- 自己伸展ブームや巻き付け形状・半径などの設計
- 自己伸展のダイナミクス(伸展制御とは異なる難しさ), 膜のダイナミクス, 接触問題
- 展開運動(パラメータ同定)



※ 東北大・PALA, Alperen Ahmedさん(ポスドク)作

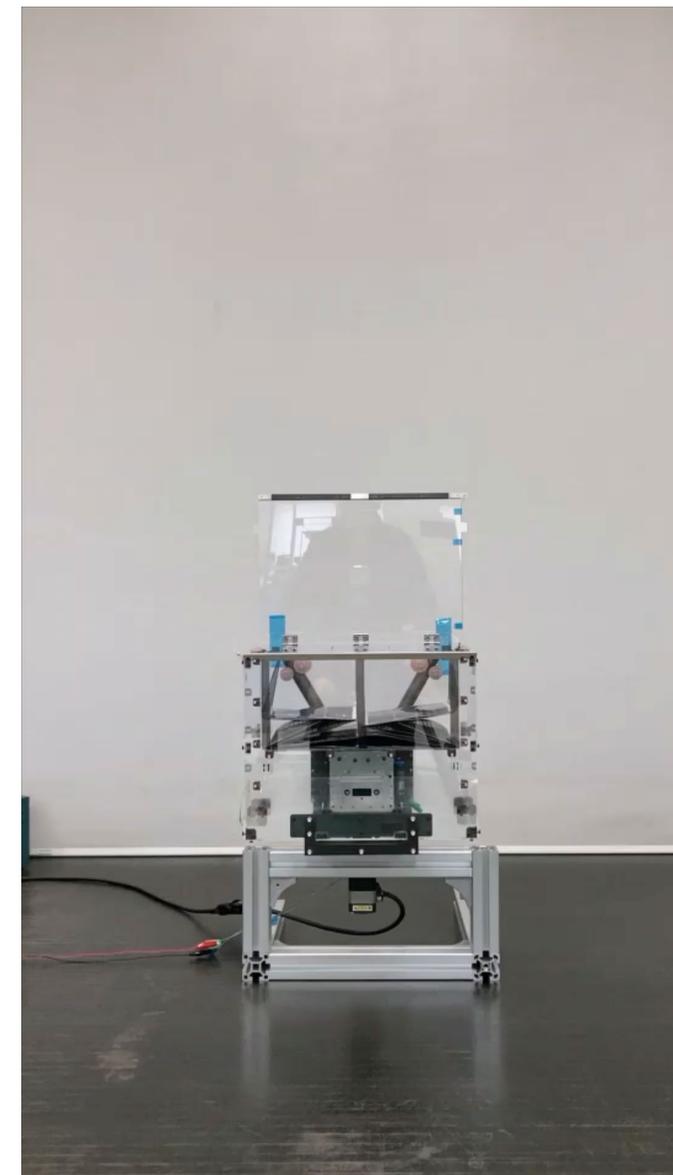
- Phase 0: Storage Phase
- Phase 1: Open Lid Phase
- Phase 2: Extended Mast Phase
- Phase 3: Deployed Membrane Phase
- Phase 4: Separation Phase



太陽電池アレイ

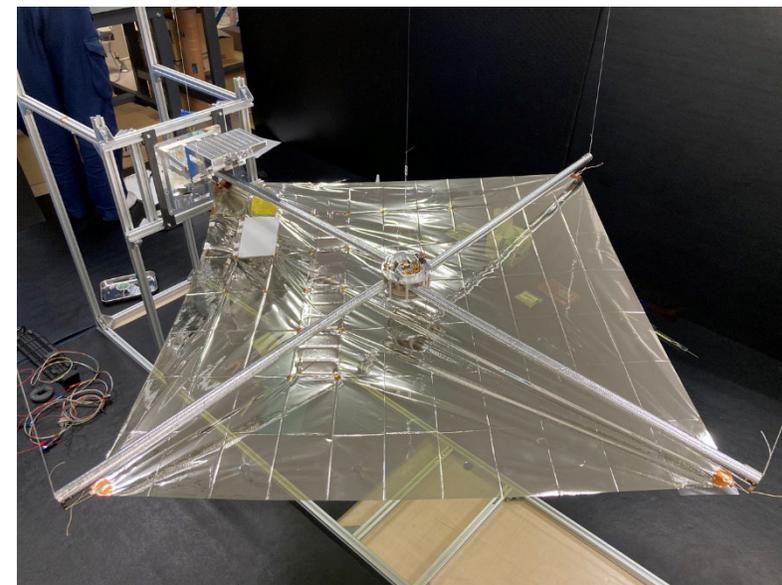
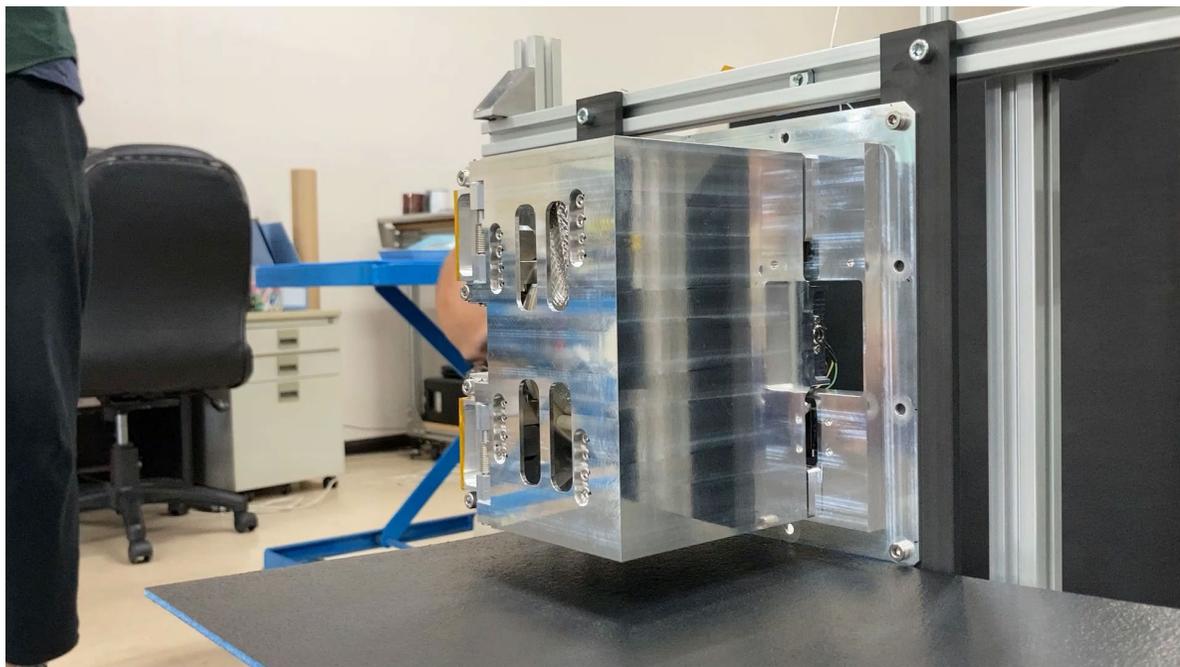
- 深宇宙探査用の軽量SAP(Solar Array Panel)
- とにかく、軽量で大面積であること
- 展開後の剛性の確保
- その他、HELIOSと同様の課題

© JAXA/Sakase



超軽量展開膜構造の技術実証HELIOS

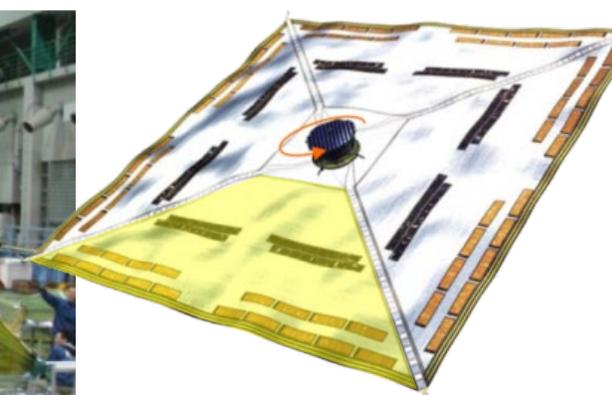
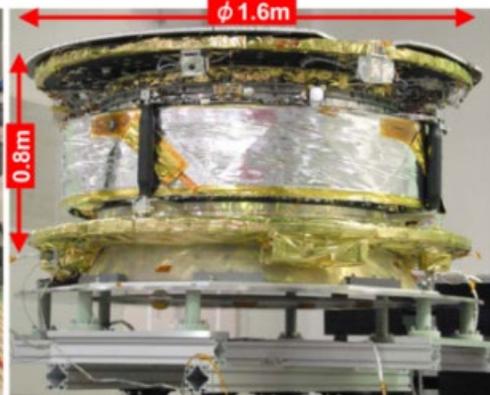
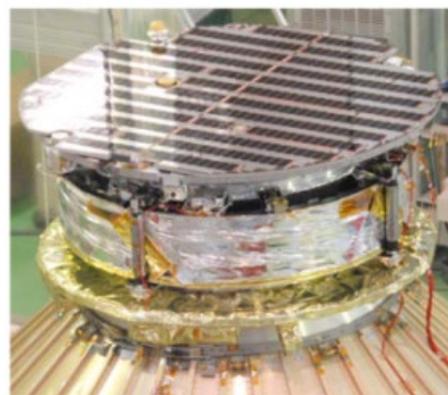
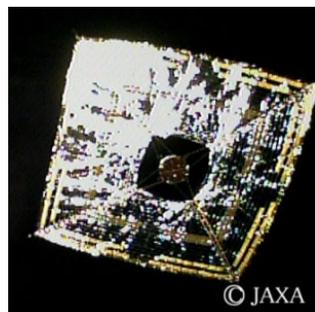
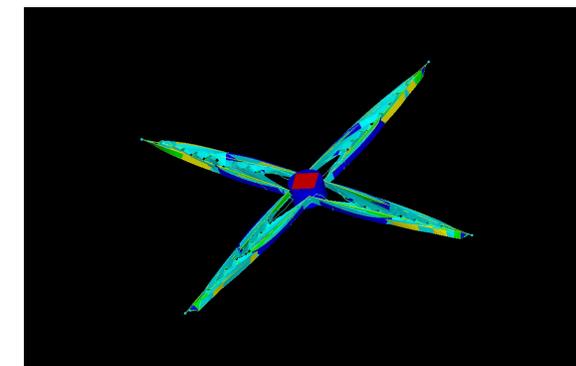
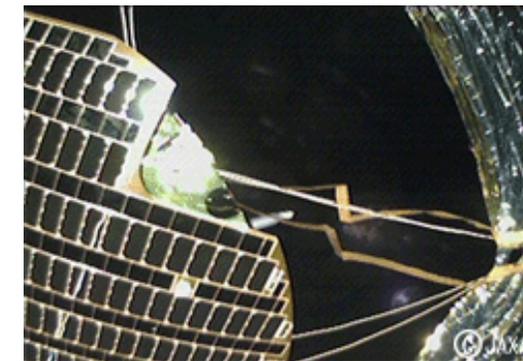
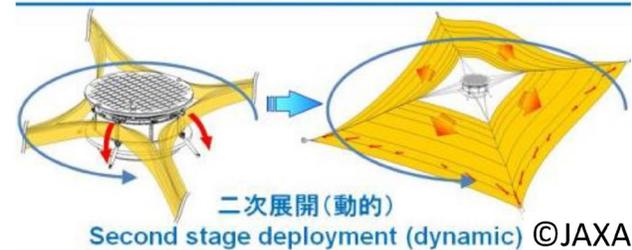
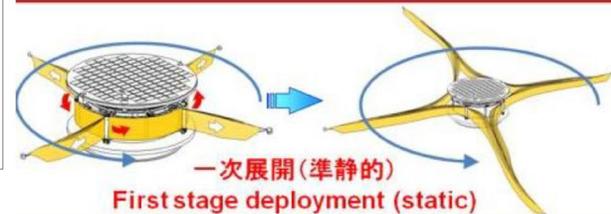
- ー 革新3号機で打上げ・・・
- ー 収納時の膜の保持(収納ボックスの問題)
- ー ブームのモーター伸展の問題(ひっかかり, 完了時のブームの局所変形)
- ー 膜の展張の問題(バネの調整)
- ー 地上試験の難しさ
- ー 衛星本体との姿勢運動の連成



© JAXA

ソーラー電力セイル小型実証機IKAROS

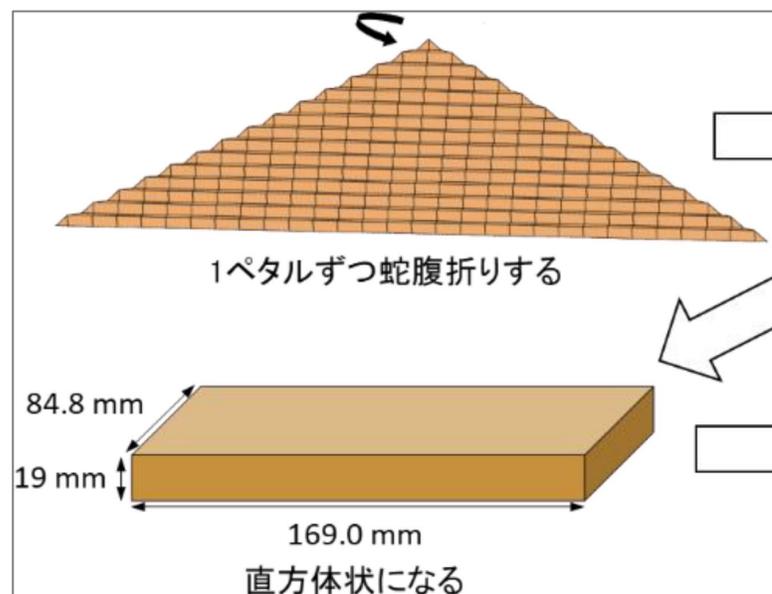
- 2010年5月打上げ, 6月展開
- 収納時の巻き付けの問題
- 打ち上げ時の振動耐性の問題
- 展開ダイナミクス(1次展開中・後)
- 展開ダイナミクス(2次展開)
- 展張後の形状変化



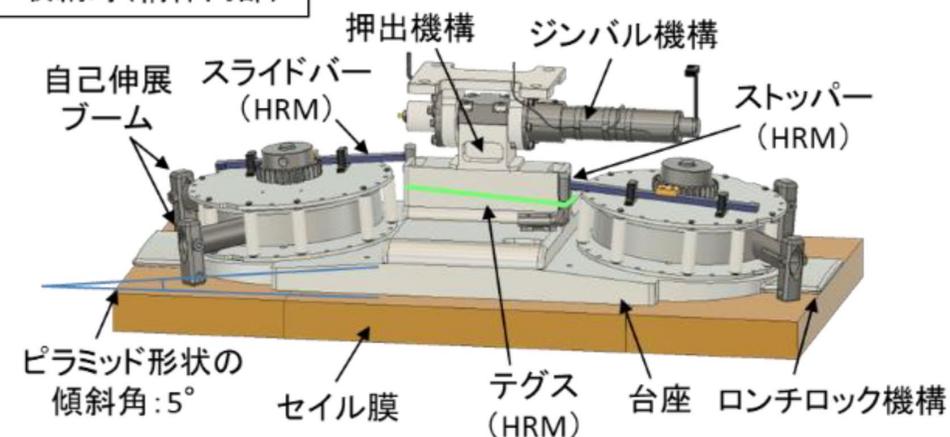
超小型ソーラー電力セイルPIERIS

- ISAS + 東工大で検討中
- 膜の折り畳み収納の問題
- 4本のブームを自己伸展させて三角形膜を展開
- 展張後のセイル構造の形状の問題
- 特に、ねじれの問題
- 初期設計(概念検討)を見誤ると、あとあとまで尾を引く可能性が高い・・・(特に、構造系)

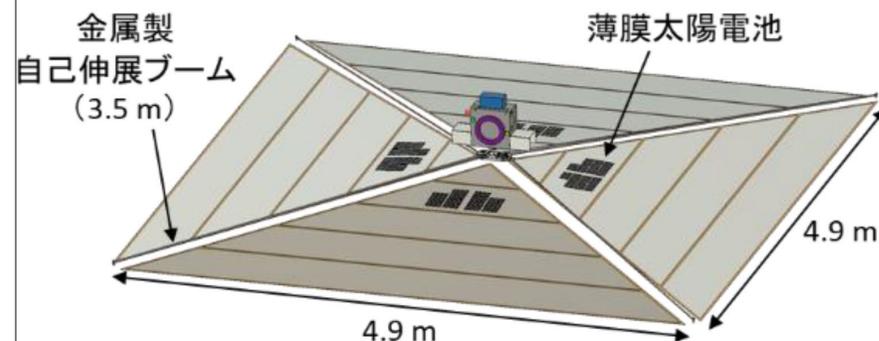
※ 研究室の多々良さん(D2)作



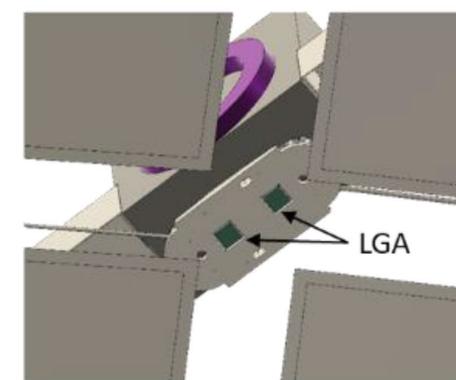
収納時(構体内部)



展開時概観

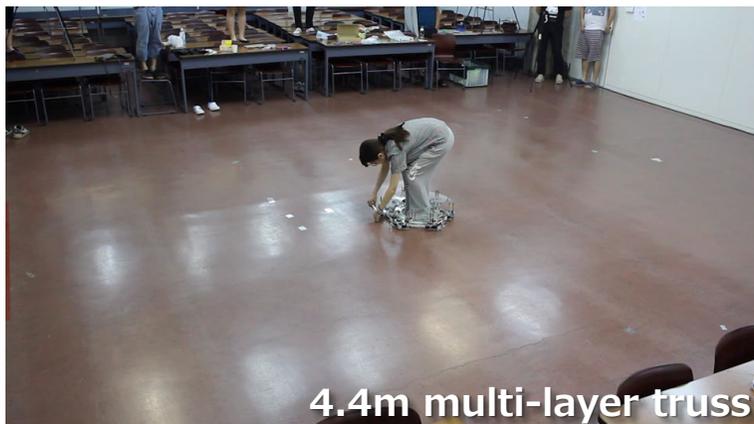


展開時-z面



その他

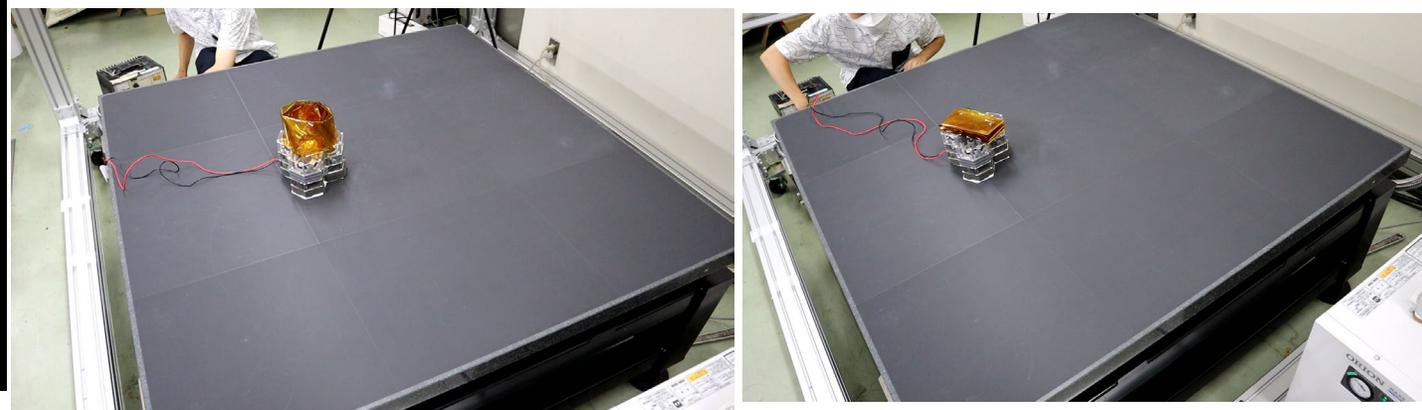
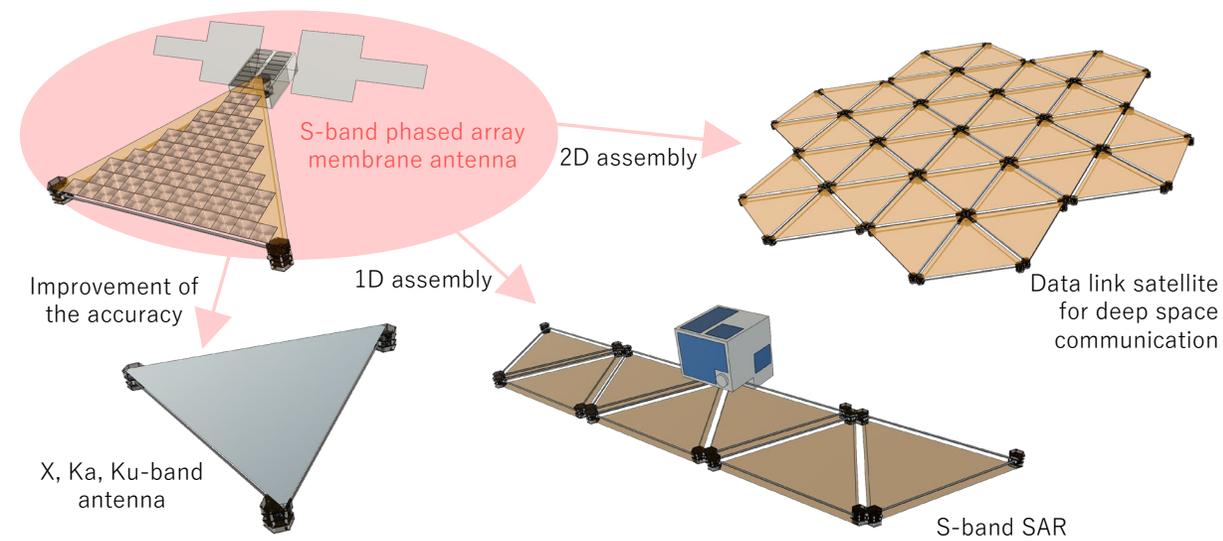
- 軽量でコンパクトに収納できて、確実に開く展開構造物がほしい
- さらに、形状精度も高いものがほしい



その他

- 軽量でコンパクトに収納できて、確実に開く展開構造物がほしい
- さらに、形状精度も高いものがほしい

※ 研究室の中村さん(D2)作



3. 軽量展開構造物を宇宙利用 する際のポイント(おさらい)

利点と課題は表裏一体

1. 「軽量」と引き換えに何を“妥協”するか？

- 剛性？
- 形状精度？

2. 収納できるのか？

- 折り畳めるのか？
- ローンチロックをかけられるのか？

3. 地上試験は可能か？

- 大気の影響は？
- 重力の影響は？

4. 打上げ環境に耐えられるか？

- 膜や膜に貼付したデバイス(太陽電池セル, アンテナ素子等)が振動に耐えられるか？
- 急減圧の影響はないか？

5. 展開できるか？

- ひっかからないか？
- 展開力は十分か？
- 局所平衡点にはまらないか？
- 分岐解に至らないか？
- 展開後にラッチをかけられるか？

6. 軌道上環境に耐えられるか？

- 劣化しないか？
- 放射線に耐えられるか？
- 熱変形は大丈夫か？
- 癖がつかないか？(応力緩和)
- 張力をかけられるのか？
- 張力を維持できるか？(クリープ等が生じないか？)

