

「宇宙太陽光発電システム(SSPS)のシステム検討例」

～テザー方式SSPSの構造、姿勢、電力管理、熱制御の検討～

1. システムの特性
2. 構造と構築方法
3. 軌道と姿勢
4. 電力管理と熱制御
5. 技術的課題

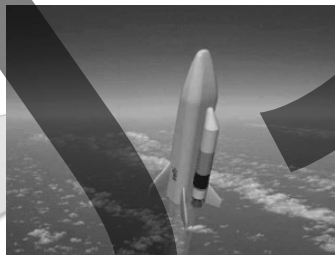
日本太陽エネルギー学会主催 SSPS講演会
2015年11月3日

宇宙航空研究開発機構・東京都市大学
佐々木進

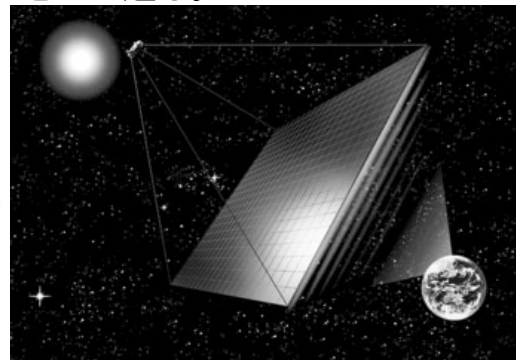


宇宙太陽光発電システム(SSPS)の基本概念

部分に分けて宇宙に運ぶ。



宇宙で組立。発生した電気は電波
で地上に送る。



地上の太陽光発電所

宇宙での太陽光からのエネルギー取得の効率¹は地上太陽光利用の場合の5～10倍。一方電波に夜無線送受電の効率は50%が期待できる。

発電に天候の影響を受けない(不確定さがない)

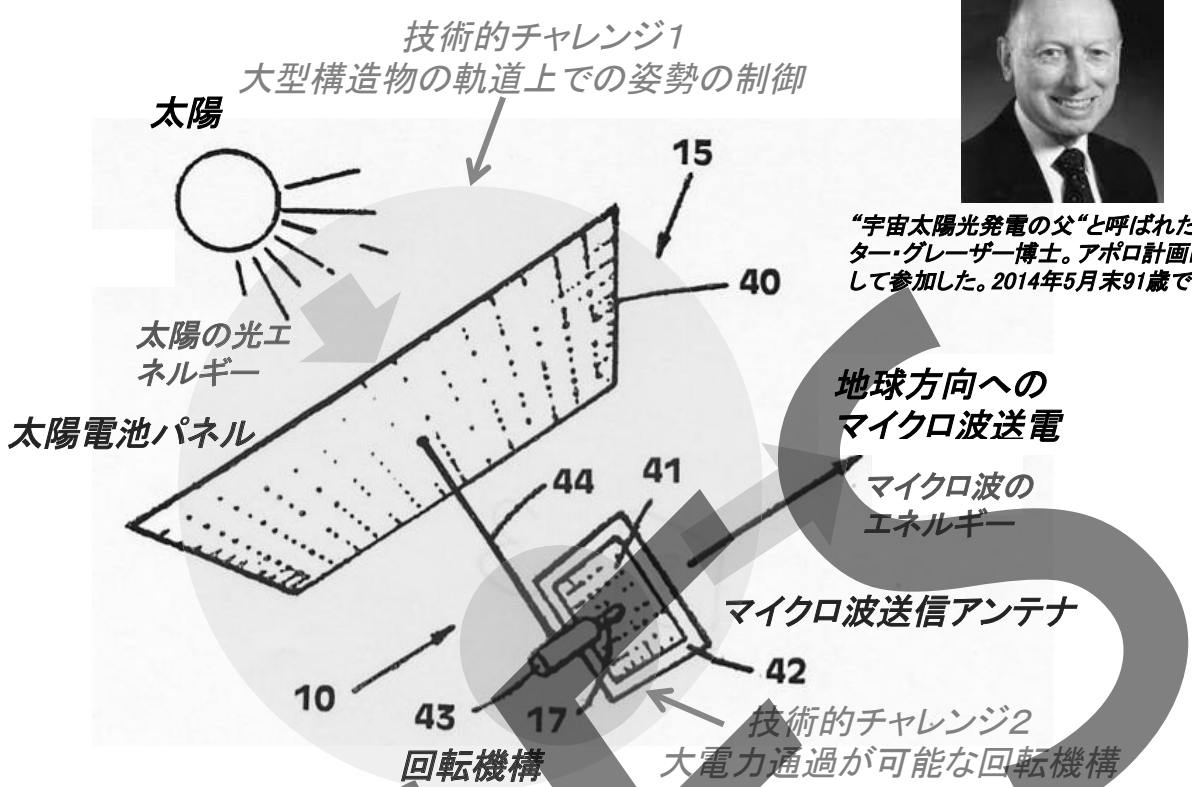
クリーンで大規模なエネルギーシステムの可能性

- ・EPT(Energy Payback Time): 数年以下(試算)
- ・コスト: 10～30円/kWh(試算)
- ・CO₂負荷: 化石燃料火力発電の数十分の一以下(試算)
- ・取得可能エネルギー: 実質的に無制約

SSPSが発案された当時のコンセプトと技術的チャレンジ



“宇宙太陽光発電の父”と呼ばれた発案者ピーター・グレーザー博士。アポロ計画にも科学者として参加した。2014年5月末91歳で亡くなった。



発案者ピーター・グレーザーの特許公告(1973年)

これまでの代表的な宇宙太陽光発電システム(SSPS)の設計例



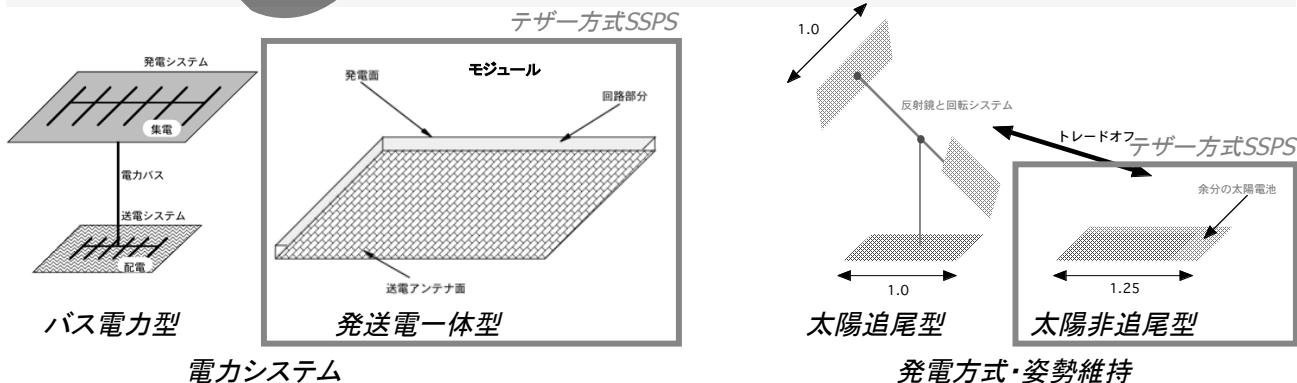
1. テザー方式SSPSのシステムの特徴

テザー方式SSPSのシステム設計の考え方

宇宙太陽光発電システム(SSPS)のシステム設計の選択肢

事項	方式	長所	短所
送電媒体	マイクロ波送電	高い大気圏透過率、天候の影響小	送受電システムの大きさ大
	レーザー送電	送受電システムの大きさ小	低い大気圏透過率、天候の影響大
電力システム	バス電力型(発電部・送電部分離)	統合的な電力管理が容易	大電力配線・接続が必要
	送発電一体型(サンドイッチパネル)	大電力配線・接続が不要	熱的條件が厳しい
発電方式	太陽電池パネル駆動による太陽追尾型	太陽指向可能	ロータリジョイントの技術的困難さ
	ミラーによる太陽追尾型	太陽指向可能	軽量ミラーの技術的困難さ
	太陽非追尾(地球指向)	システムが簡素	電力収集効率小、発電の時間的変化
姿勢維持	能動制御	太陽指向可能	燃料が必要、制御方法が課題
	重力安定(テザー地球指向)	燃料不要、制御システム不要	太陽指向に不適

テザー方式SSPSの設計思想: 実用化の初段階のシステムとして、エネルギー取得効率は相対的に低くても、技術的バリアーの低い(現状技術の延長線上にある)システム構成を選択したタイプ。



テザー方式SSPSの形態とシステムの特徴



- 能動的な姿勢制御機能は持たない、可動機構は持たない
- 姿勢制御は軌道上の”自然の力”である重力傾斜安定を利用
 - ➔単純でロバスト性の高い構造と機構
- 電力的に独立な発電送電一体型モジュール(電力は大規模に集電せず、分散したままマイクロ波に変換)
 - ➔高度なモジュール構成
- 情報は無線LANによる集中制御
 - ➔高度な情報処理と管理

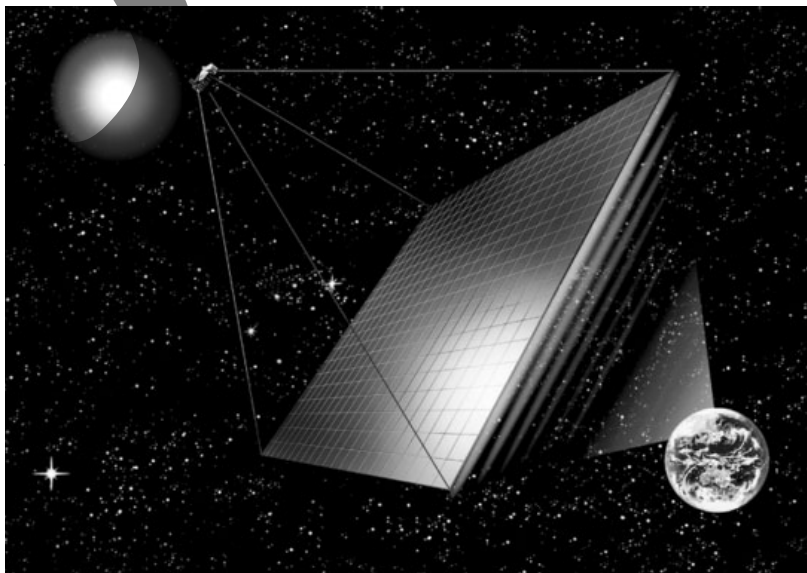
設計された100万kWテザー方式SSPSの例

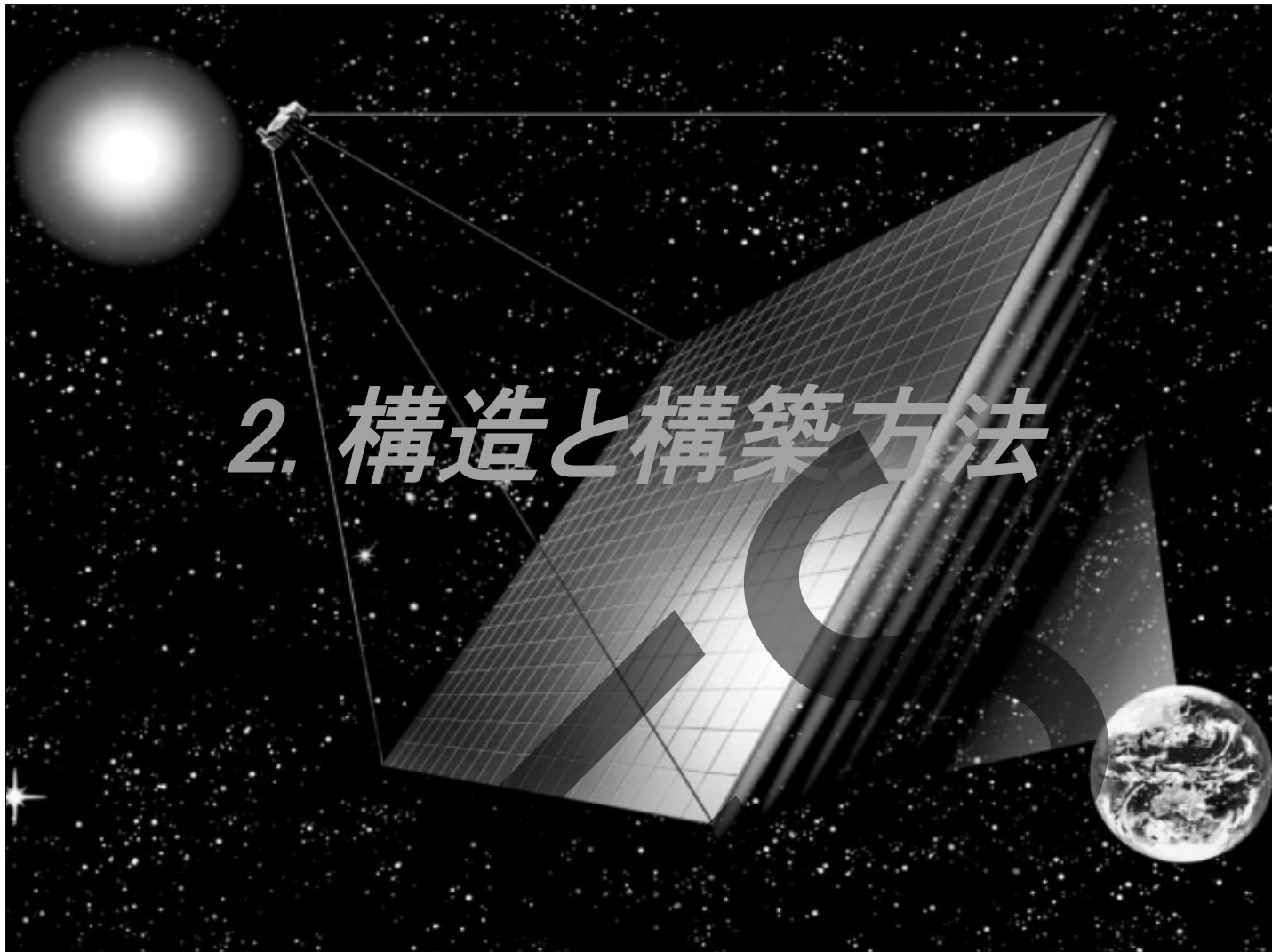
発電送電パネルのサイズ: 2.5 km x 2.4 km

重力安定化用のテザーの長さ: 5-10 km

総重量: 20,000-27,000 トン

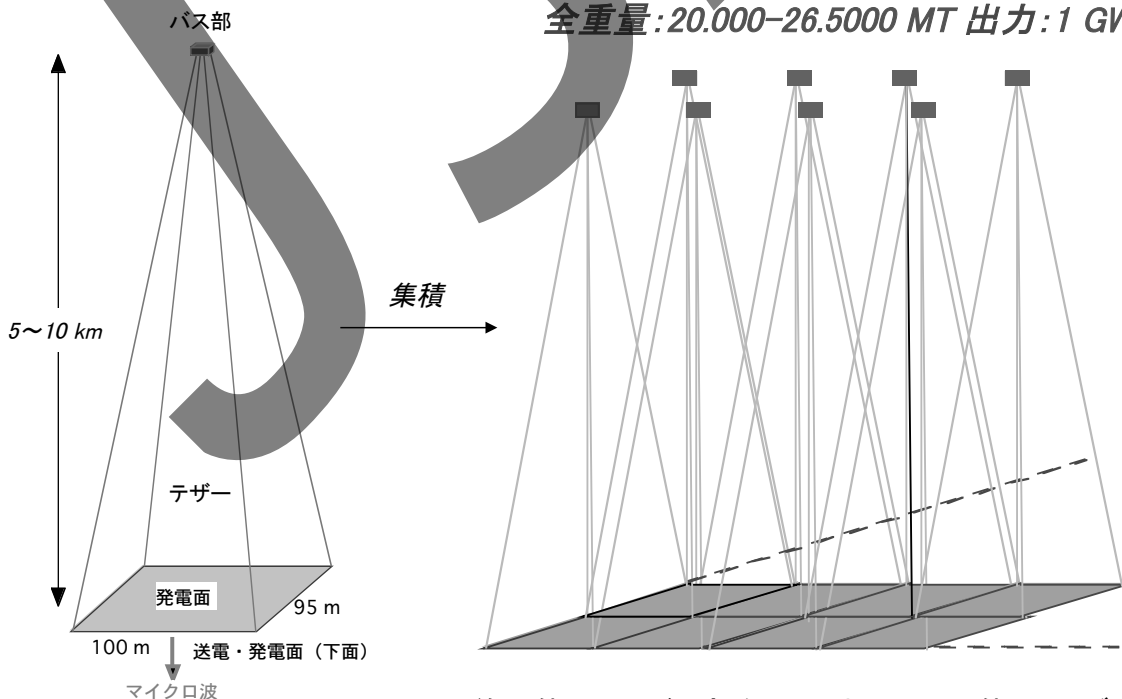
同一形状のサブパネル(約100m四方) 25x25枚で構成





レーザー方式SSPSの構成

全重量: 20,000-26,500 MT 出力: 1 GW

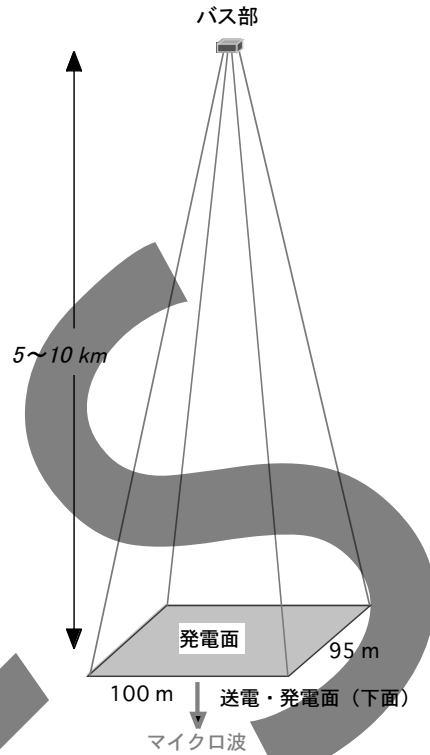


構造の単位(ユニットパネル)

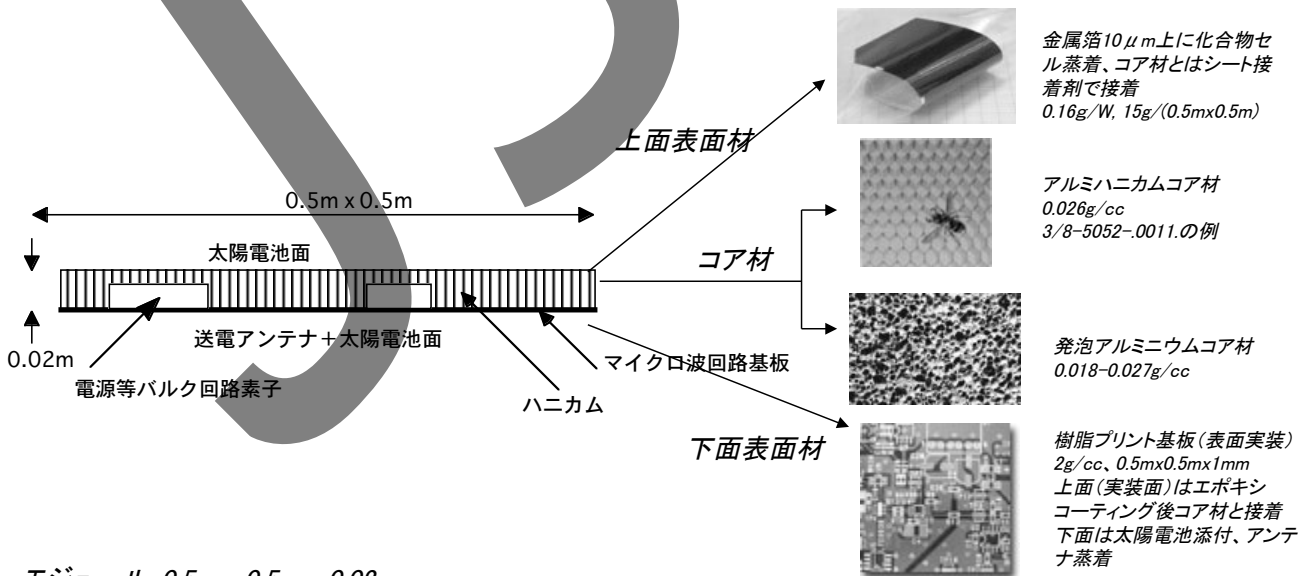
- 最終形態としてバス部を1ヶにまとめた形態: シングルバス方式
 ➔ 安定性に富む
- 最終形態としてバス部を複数とした形態: マルチバス方式
 ➔ ユニット性が高く着脱運用が容易

テザー方式SSPSの基本単位(ユニットパネル)

全重量: 42.5 MT
パネル重量: 40 MT
バスシステム重量 2MT
マイクロ波出力: 2.2 MW
テザー長: 5-10 km
重力傾斜力: 0.337 N



ユニットパネルを構成するモジュールの構造の設計例

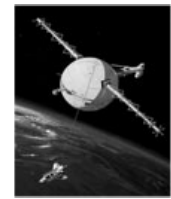
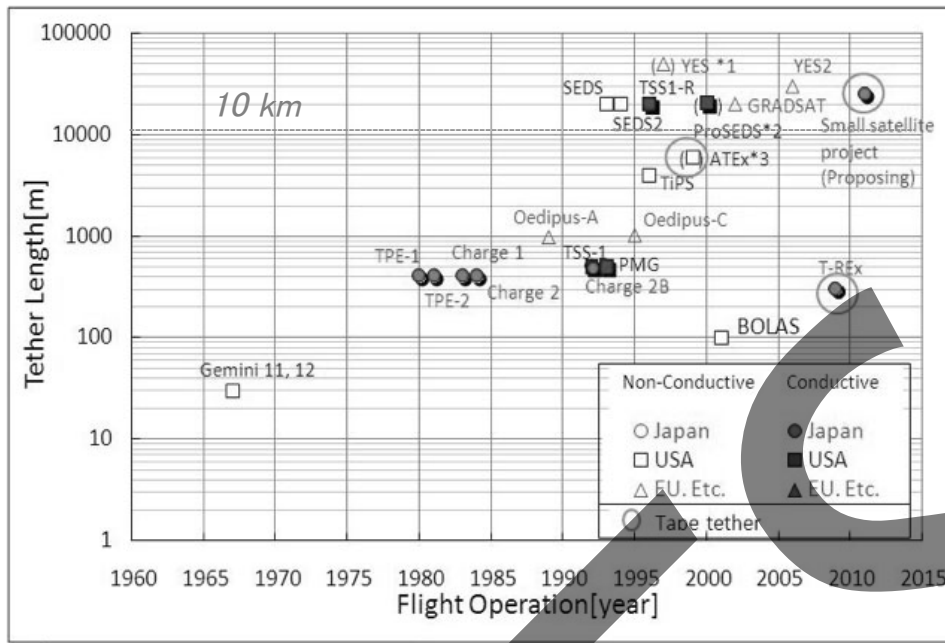


モジュール: 0.5m x 0.5m x 0.02 m
重量: 1.060 kg

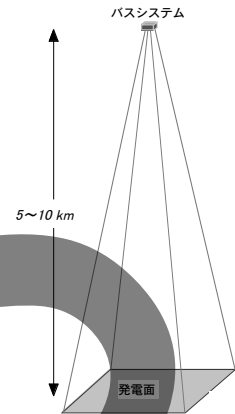
マイクロ波回路(制御、電源、アンテナ部を含む、55.5 W):	277.5 g(5 g/W)
太陽電池(太陽電池、電源部への計装を含む、118.1 W):	120 g(1.016 g/W)
蓄電部(362.5 Wh):	517.9g(700Wh/kg)
構造部材(ハニカム、機構部、他)	144.6 (0.029 g/cc)

構造の基本単位は、0/5 m x 5 m(10モジュール)

宇宙に大型の構造物を構築する技術（テザーの展開）

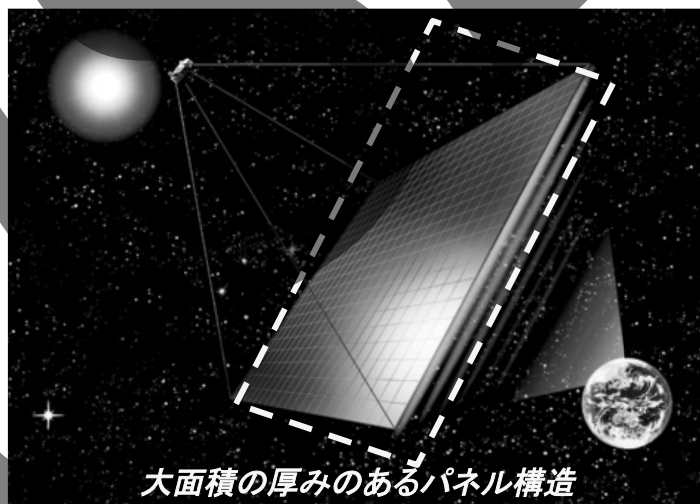


スペースシャトルからの
20kmのテザーワイヤー



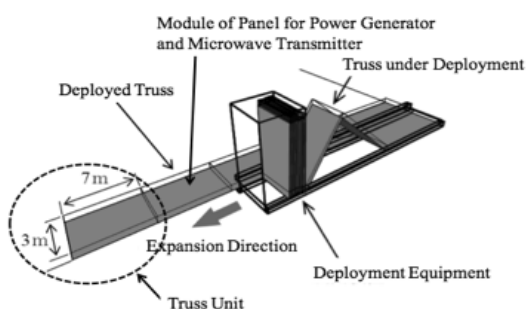
これれまで行われた宇宙テザー実験(計画のみのものも含む)。
10km以上の長さのテザーはこれまで複数回実証され、10kmテザーシステムは既存
技術であると言える。

宇宙に大型の構造物を構築する技術（パネルの展開）

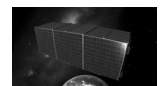
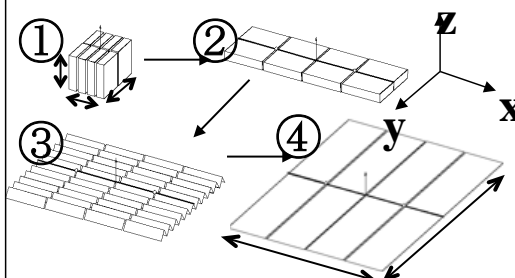


大面積の厚みのあるパネル構造

パネルを組み立てながら展出する方式

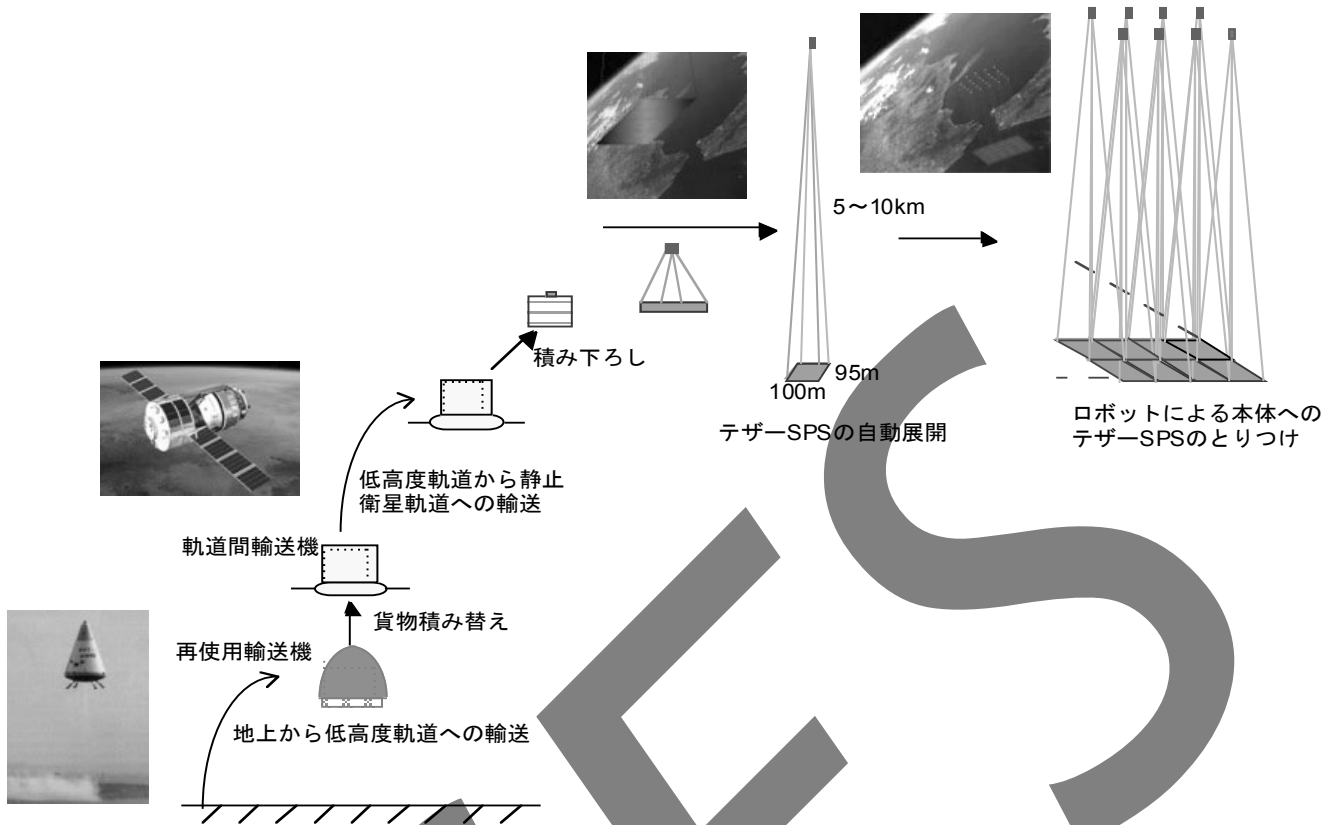


パネルを自動で自己展開する方式

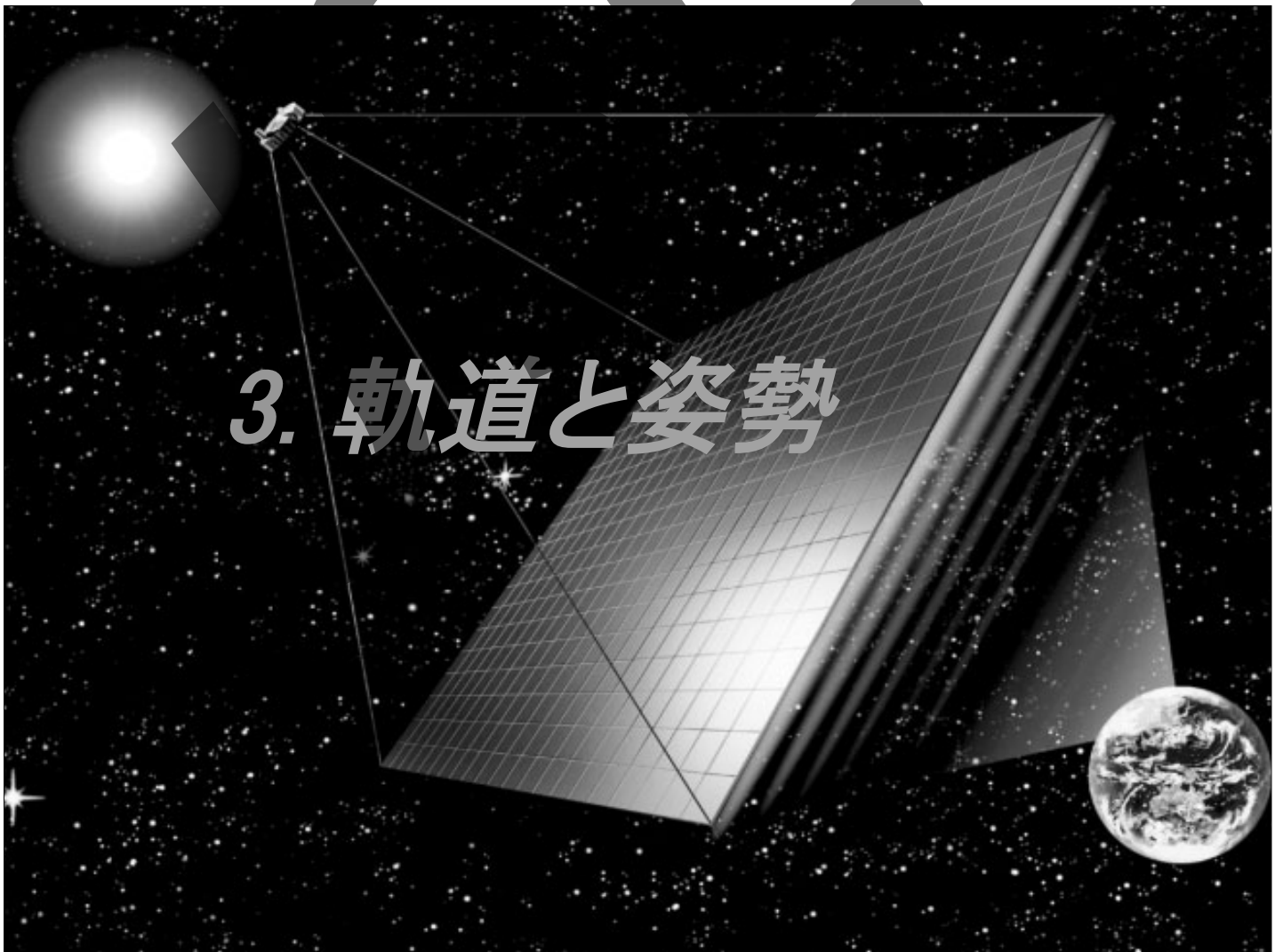


CG©NYAISAS
(宮崎氏製作)

テザー方式太陽発電衛星の建設方法



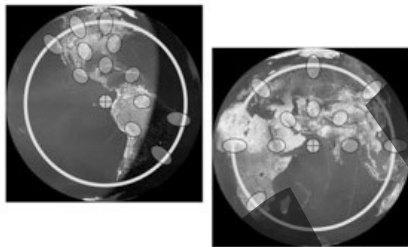
3. 軌道と姿勢



テザー方式SSPSの軌道の選択

選択

軌道	これまで検討された軌道例	軌道の特性	受電頻度	送電アンテナのサイズ	輸送コスト	例
静止衛星軌道	36,000km	常時可視	常時	大(低軌道の数十倍)	高	NASA リファレンスシステム ²⁾ NEDO グランドデザイン ³⁾ NASDA2001年モデル ⁴⁾ NASA ISC ⁵⁾ USEF テザーSPS モデル ⁶⁾
太陽同期軌道	軌道傾斜角 100度程度 LEO	常時日照	1回/1日(軌跡が交差する場合は2回/日)	中	中	サンタワー(太陽同期タイプ) ⁷⁾
位相同期低高度軌道	軌道傾斜角 90度以下 高度 370km	日陰あり	1回/数日	小	低	USEF テザー型 SPS 実証実験モデル ⁸⁾ ISAS 小型衛星実験モデル ⁹⁾
低高度赤道軌道	1,100km	最大日陰率 1/3	約 2 時間の間隔	小	低	SPS 2000 ¹⁰⁾

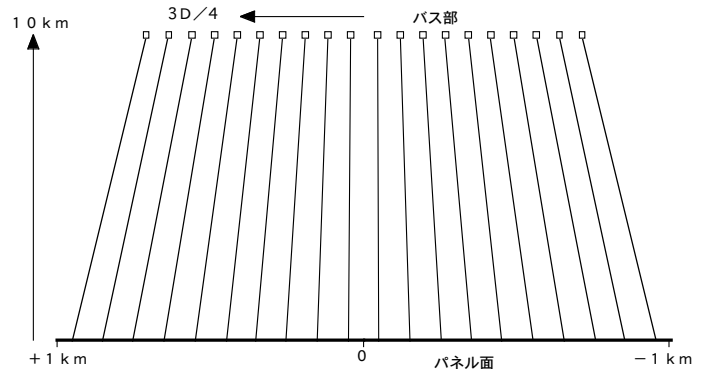
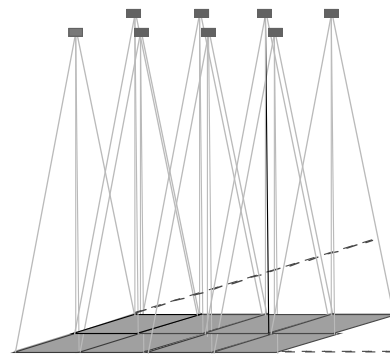
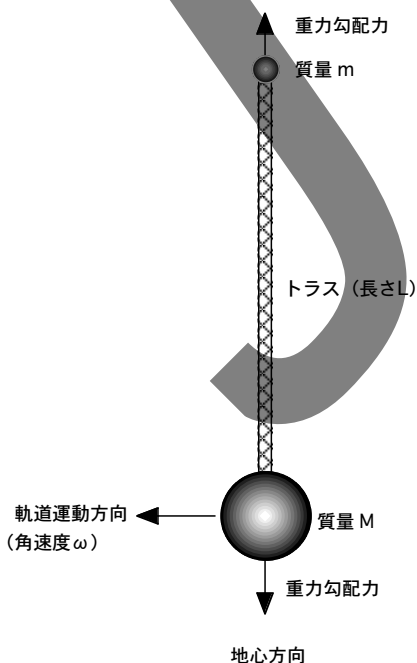


静止衛星軌道上3ヶ所使用すれば、人口の90%の領域をサービスできる。

Perspectives Space Solar Power, J.C.Mankins
2010, IAA Nagoya WS

17

姿勢は重力勾配力を利用した重力安定 (能動的な姿勢制御は不要)

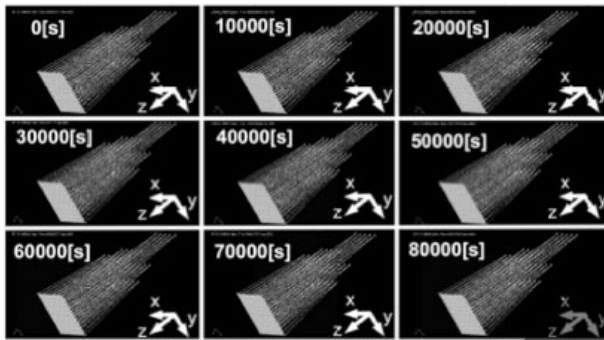
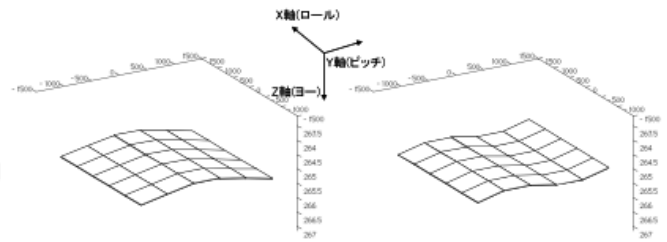
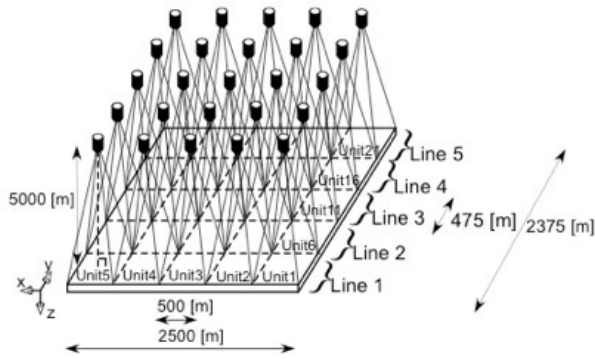


起き上がり小法師と同じ原理



各パネルの大きさを100mとすればバスの間隔は75m

システムの安定性



バスの位置をLine毎に変化させてパネルが屈曲しない条件が見いだされている(泉田)。鉛直方向のバス部の高さをLine1、Line5で3735m(系の重心からの高さ)、Line2、Line4で4735m、Line3で6735mとすれば安定。

(a) 1次モード(固有角振動数比 1.3)

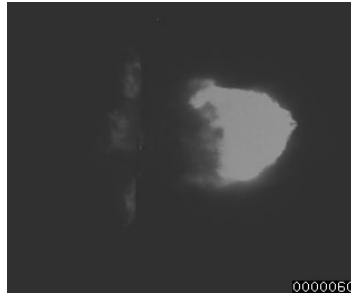
(b) 2次モード(固有角振動数比 1.7)

固有値解析によれば、パネルの振動周期は軌道運動の1.3-2倍程度となる(石村)。1次モードの振幅は約0.4mである。

太陽輻射圧による軌道擾乱

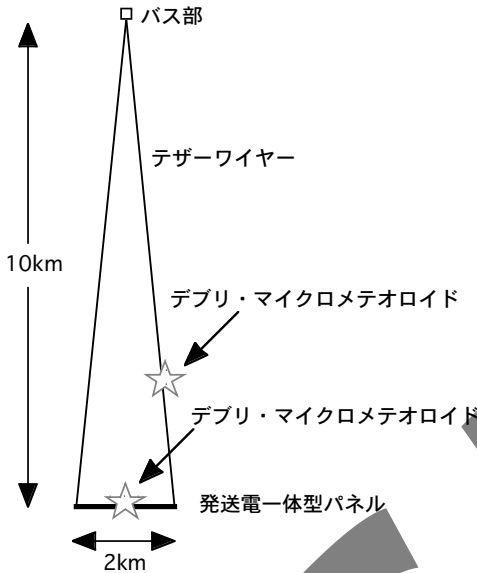
太陽輻射圧:	$4.6 \times 10^{-6} \text{ N/m}^2$
発電電一体型パネル反射率:	0.5
働く力(最大値):	26 N
短周期擾動(1日以下):	1000 m
長周期擾動(東西、1年):	0.74°
軌道維持用燃料(電気推進):	17トン(年間)

テザー方式SSPSへのデブリ・マイクロメテオロイド衝突対策



パネルへの衝突頻度
 10cm以上 200年間に全パネル1回
 1cm以上 1年に全パネル1回
 1mm以上 30年間で100m²に1回

テザーへの衝突頻度
 1mmのワイヤ 3年で全て切断
 10mm幅テープ 30年で1%の本数が切断



パネルでの対策

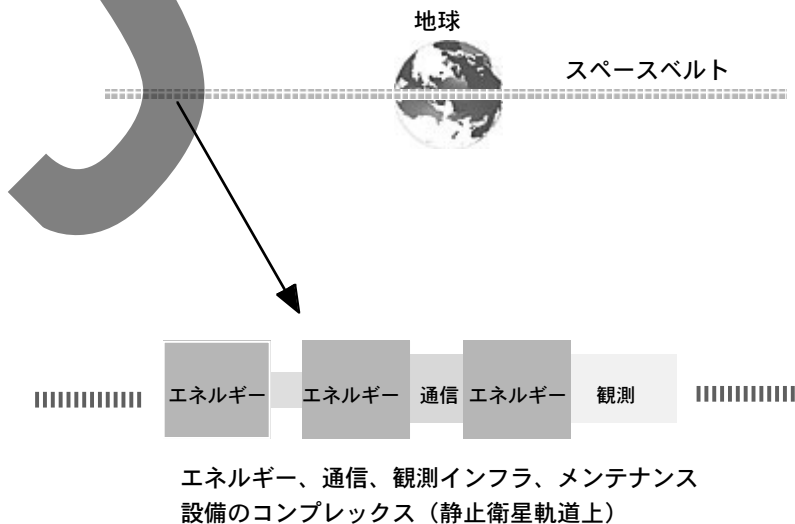
・高速浮遊物の衝突の影響は浮遊物のサイズの10倍程度に及ぶことを想定してモジュール設計(モジュール外には故障が伝搬しない設計)。この観点から、モジュールサイズは0.5m×0.5mとしている。

テザーでの対策

・1%程度の本数のワイヤーの切断は許容するよう冗長設計。

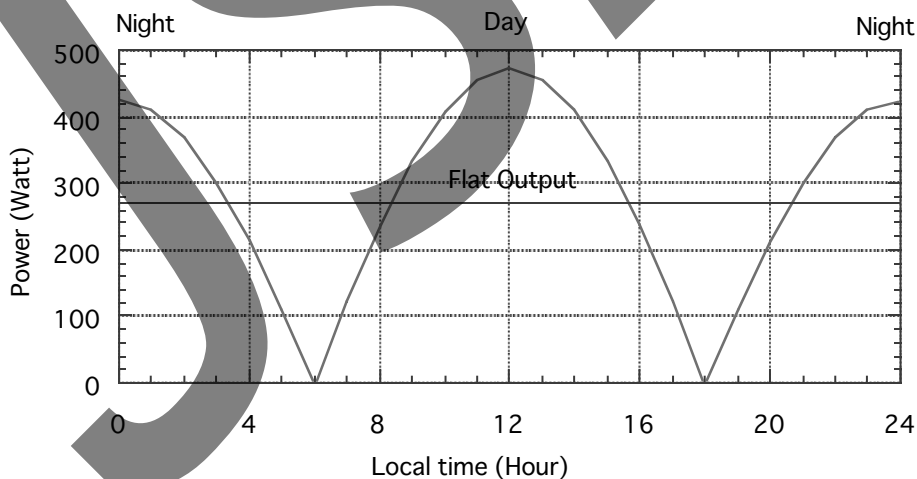
静止衛星軌道は既に沢山の衛星で混雑、対策は？

巨大なパネル構造を持つテザー型SSPSに、他の通信インフラや地球観測インフラを取り込むことが可能(軌道上複合インフラ)。あるいは、異なる機能の衛星を接続することにより、静止衛星軌道を有効に利用することが可能(スペースベルト)。



4. 電力管理と熱制御

太陽電池パネルの発電特性



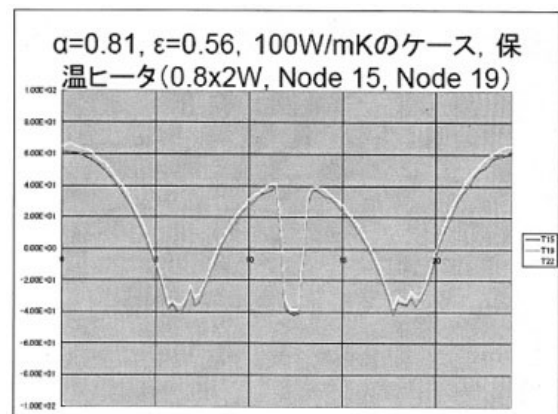
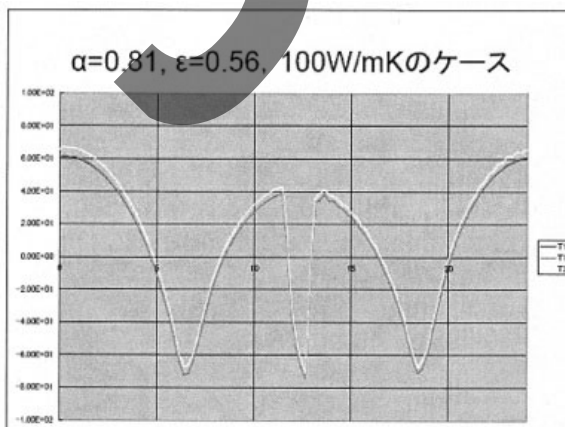
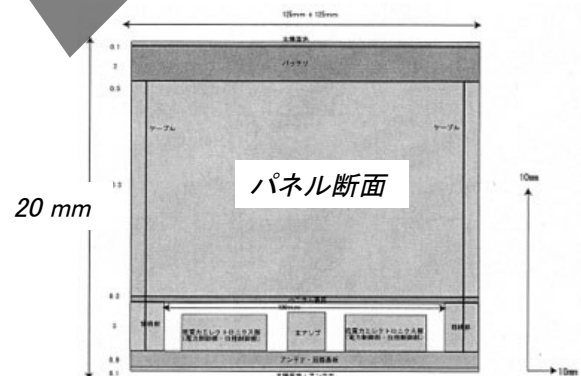
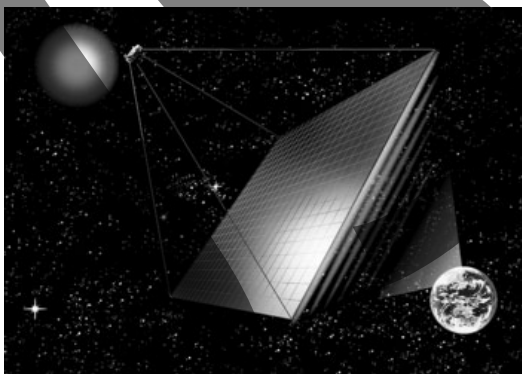
ローカルタイムで発電量が変化する(地球指向のため)。
パネル両面に太陽電池を装着する場合、太陽指向方式に対し平均で64%の電力取得量となる。
天候による影響はないので、変動は規則的で不確定さはない。
単位重量当たりの蓄積エネルギーの高い蓄電装置(500Wh/kg以上程度)が実用化すれば、パネル内で平滑することも考えられるが、実用の初段階では変動電力システムとして導入することが現実的。

テザー方式SSPSのエネルギーフロー(出力一定タイプ)

	電力(/m ²)*	総電力	備考
太陽光強度	1,350 W(max)	8.0 GW	夏・冬はx 0.92(平均は0.97)
発電ピーク	473 W(表) 425 W(裏)	2.8 GW(表) 2.5 GW(裏)	裏側太陽電池面積は表側の90%、太陽電池効率35%
バッテリーへの蓄積	1000 Wh	5.9 GWh	平滑60%、充放電効率90%、ピーク電力の25%以下は充電せず
送電系への電力	270 W	1.6 GW	
送電電力	228 W	1.4 GW	マイクロ波への変換効率85%
レクテナ入力	-	1.2 GW	伝播効率97%、収集効率90%
レクテナ出力	-	1 GW	DC電力への変換効率85%

*:1m²は4モジュール分(1モジュール=0.5 m x 0.5 m)

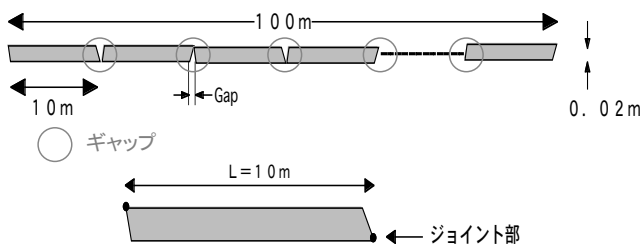
発電電一体型パネルの熱解析例



ヒーターを使用することにより電子回路部を-40°C~+60°Cの範囲に入れることができる

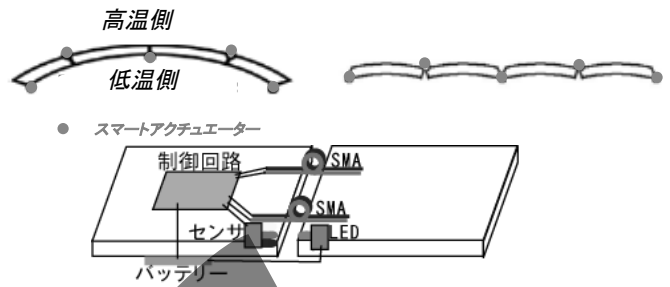
テザー方式SSPSパネルの熱歪み対策の案

受動的的方法



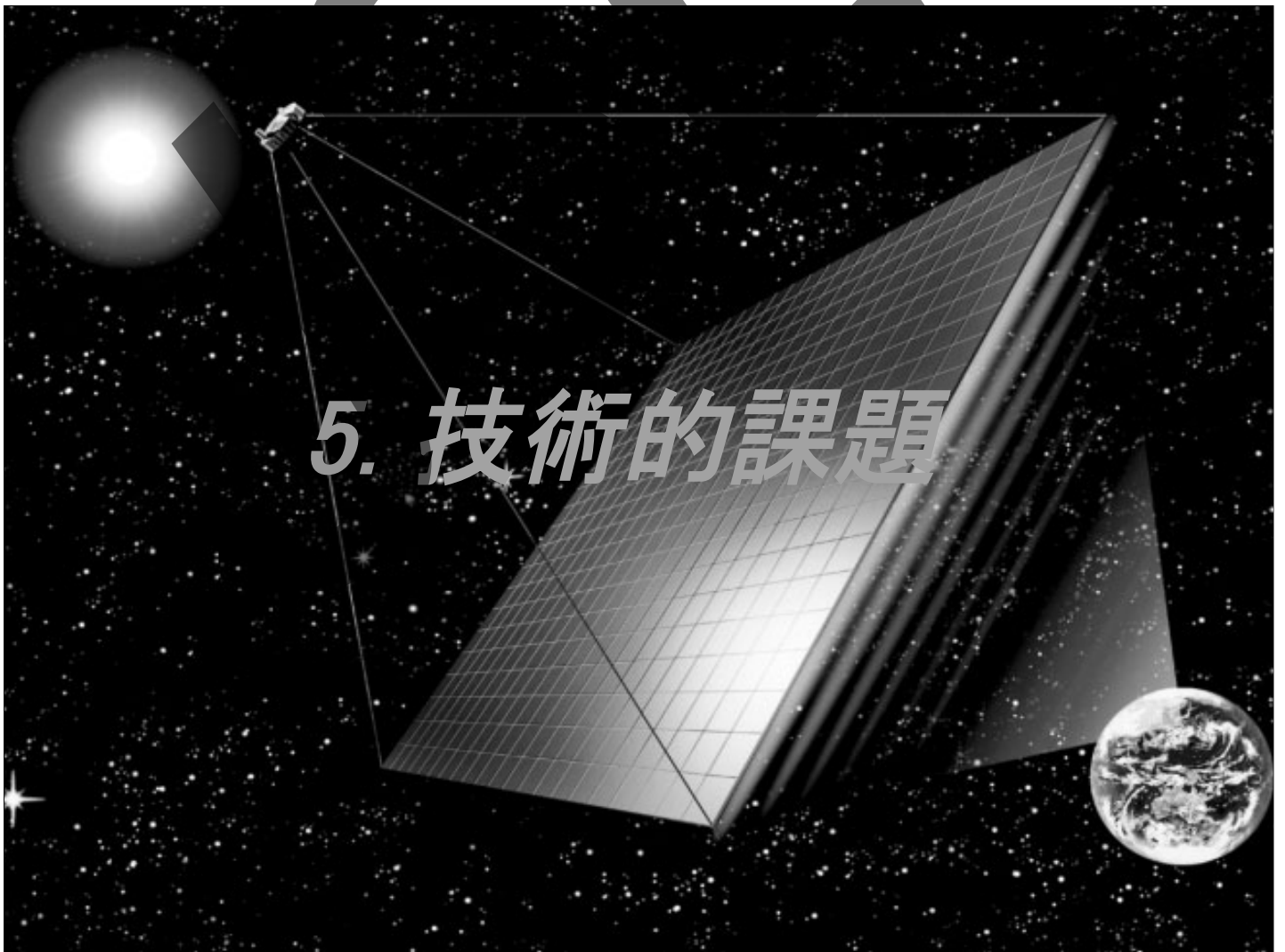
パネル間にギャップを設けることにより、熱変形がパネル間を伝搬し大きくなることを防止する。熱変形を伝搬させないためには、サブパネル間のギャップを0.6mm以上とれば良い。

能動的的方法



パネル間角度検出器と駆動機構の組み合わせ(スマートアクチュエーター)を用いてパネル間の角度を制御する。巨大なパネル全体では、非常に多くの駆動機構が必要である。モーターの代わりに形状記憶素子を用いることにより、モーターよりはるかに軽量の駆動機構を実現できることが、実験室での実験で示されている。

5. 技術的課題



テザー方式SSPSの技術的課題

(構造分野)

1. 95m×100mサブパネルの展開方法
2. サブパネル同士の脱着(ラッチ・アンラッチ)方法
3. 微小テンションテザーの伸展方法とダイナミクスの検討
4. 建設途上での姿勢安定性の確保(サブパネル接続の順序)
5. 軌道維持方法(推進機の取り付け場所と動作時のダイナミクス)

(電力分野)

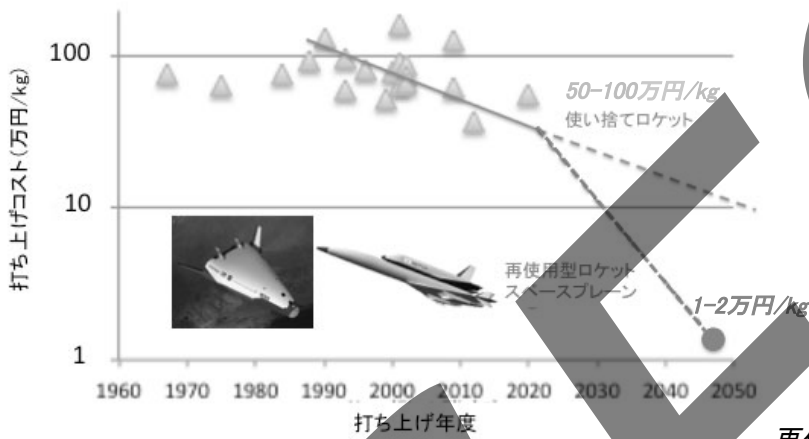
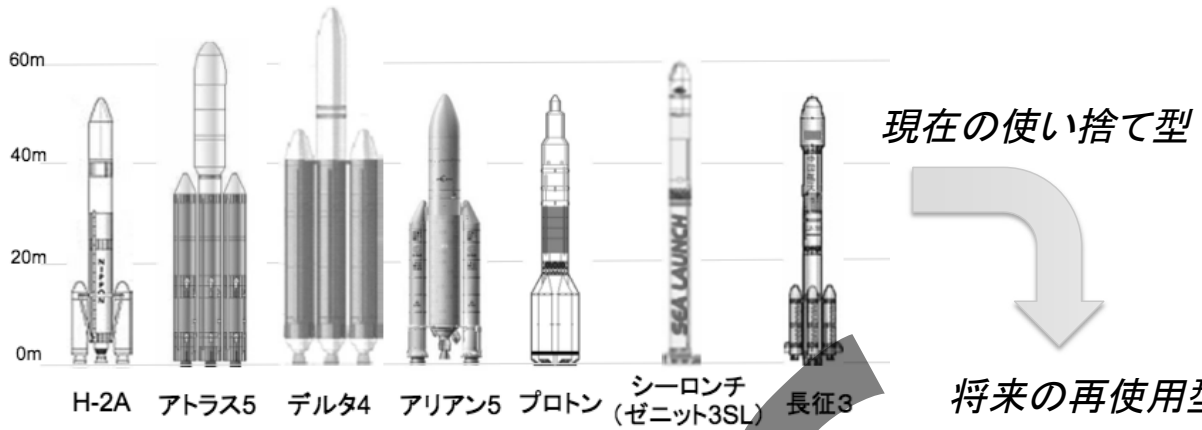
6. 各モジュールのマイクロ波原振の位相同期の方法(バス同士の同期と各バスとパネル上モジュールの同期の階層化)
7. マイクロ波の一様放射の場合の電磁干渉防止(テーパをつけてた場合より漏れ電力(サイドローブ)が大きい)

テザー方式SSPS (出力1GW)が成立するための技術目標

事項	コスト・性能	最終目標	近未来の目標	現状	備考
太陽電池	コスト	50 円/W	100 円/W	数百円/W	at 1 kW/ m ²
	効率	35 %	20~25 %	10~20 %	
	重量比	2 W/g	1.5 W/g	1 W/g	薄膜、ベアであれば既に5W/gのものあり
マイクロ波回路	コスト	100 円/W	500 円/W	1000~10,000 円/W	
	効率	85 %	60 %	40 %	
	重量比	0.1 W/g	0.02 W/g	0.01 W/g	
蓄電	コスト	10 円/Wh	50 円/Wh	100 円/Wh	
	重量比	0.5~1 kWh/kg	0.4 kWh/kg	0.2 kWh/kg	
	充放電効率	90 %	85 %	70~80 %	DOD 50 % 寿命充放電3万回(40年)
輸送コスト	重量比(打ち上げ)	10,000 円/kg	500,000 円/kg	1,000,000 円/kg	
	重量比(軌道間輸送)	5,000 円/kg			打ち上げコストの50 %
レクテナ	コスト	50 円/W			
	効率	85 %	75 %	50~70 %	

技術的なバリエーションが低いモデルとはいえ、目標技術に達するには、本格的で継続的な技術開発の努力が必要

SSPSを建設する為に必要なロケット



再使用ロケット実験機 重量:500kg、全長3.5m

宇宙太陽光発電システムの技術の現状

