

ジーワンタワー

# 日立G1TOWERでの 上下方向レーザー伝送実験の 実施結果について

2016年10月11日

(改訂 2023年7月31日)

国立研究開発法人

宇宙航空研究開発機構

研究開発部門

宇宙太陽光発電システム(SSPS)研究チーム



# 目次

1. 実験の位置付け
2. 実験の実施期間、実施場所
3. 実験実施体制
- 
4. 実験の目的
5. レーザー無線電力伝送の国内外実験事例
6. 実験の成果
- 
7. SSPSとビーム方向制御
8. ビーム方向制御の方法
9. 実験システムの概要
10. 実験作業の流れ/スケジュール
11. 安全上の配慮点
- 
12. 実験結果
13. デモの結果
- 
14. 新たに得られた知見
15. レーザードローンへの発展

# 1. 実験の位置付け(1/2)

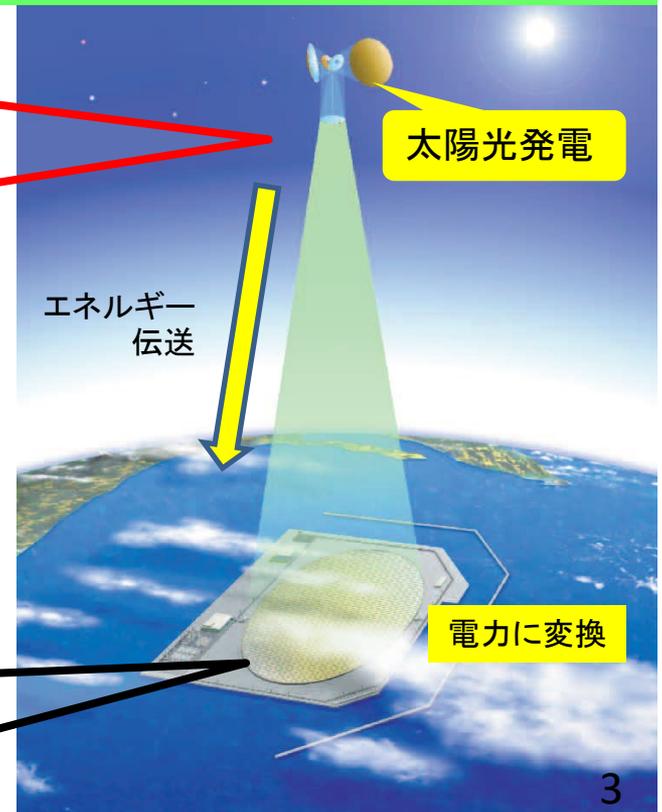
## 宇宙太陽光発電システムとは

宇宙に浮かぶ発電所

Space Solar Power Systems: **SSPS**

太陽光エネルギーを  
マイクロ波や  
レーザー  
により地球に伝送

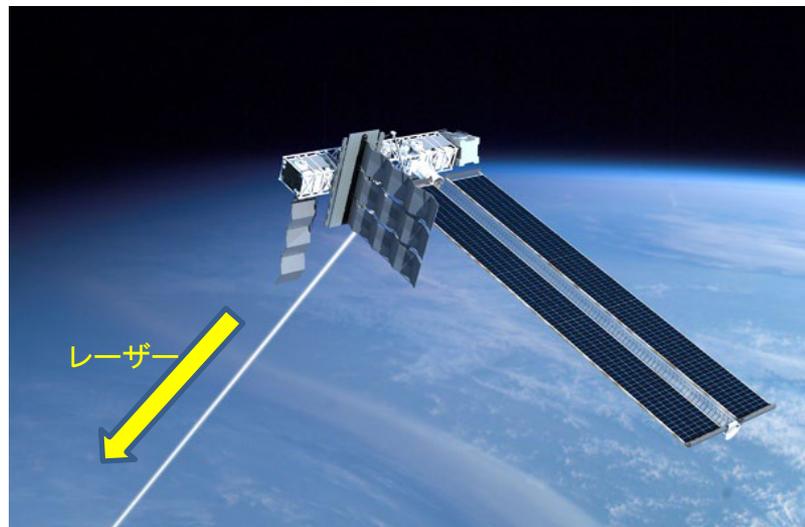
地上で電力に変換し  
変電・送電して利用



# 1. 実験の位置付け(2/2)

## レーザーによる電力伝送

- マイクロ波と比較して波長が短い  
⇒ 比較的小規模なシステムで成立
- 小規模な宇宙システムの集合体を  
順次構築していく方法も採り得る。
- 天候の影響を受けやすい。  
これを避けるために、受光設備を  
複数箇所に設ける必要がある。
- 送光・受光素子のエネルギー効率がマイクロ波より低い。
- ビーム方向制御を機械的に行う必要があり、また大気による  
「ゆらぎ」を補正する技術が必要。
- 安全性(アイセーフティ)に十分な配慮が必要。



⇒ レーザーの方向制御技術

⇒ レーザーによる電力伝送技術

の確立を行う

## 2. 実験の実施期間、実施場所

- 実験の実施期間

予備実験 2016年3月8日～3月31日

方向制御実験(高出力レーザーは使用しない)

本実験 2016年5月10日～6月16日

方向制御実験・電力伝送実験

- 実験の実施場所

日立製作所 水戸事業所 G1TOWER

(ジーワントワー)

(茨城県ひたちなか市)

---

- 日立製作所との関係

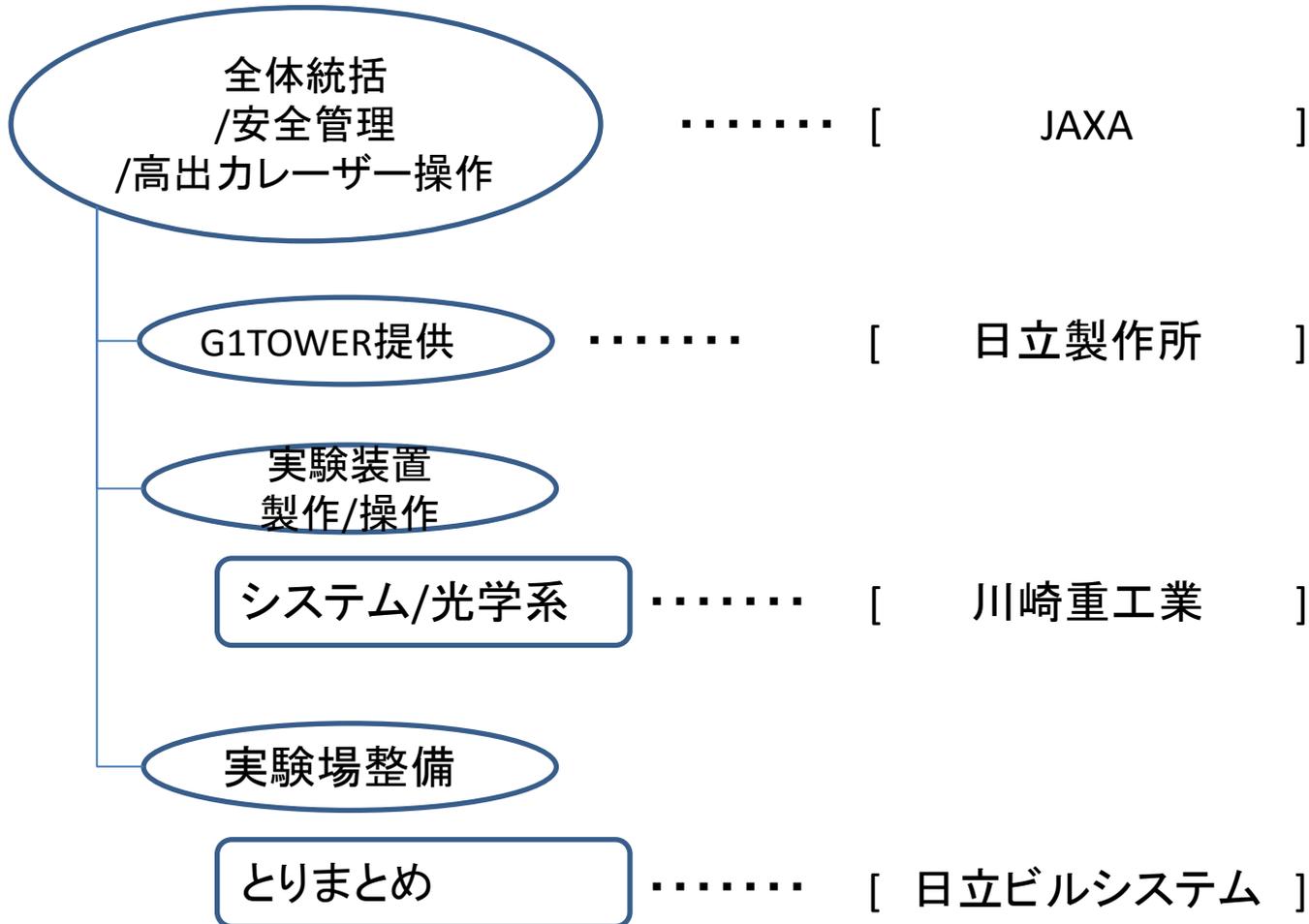
G1TOWERの屋上と地上作業場所を日立製作所から賃貸借

- G1TOWER

高さ213mのエレベーター研究塔



# 3. 実験実施体制



4. 実験の目的
5. レーザー無線電力伝送  
の国内外実験事例
6. 実験の成果

# 4. 実験の目的(1/4)

## 大目的

宇宙から地上までのレーザー発射を模擬し  
電力伝送を行う

- 接地境界層<sub>(p10参照)</sub>内(地上→地上)でのレーザー伝送実験では、伝送路上の大気の乱れが過大
- 宇宙からの伝送を模擬するには、接地境界層より高く大気の乱れが小さいところから、地上までの伝送実験が必要

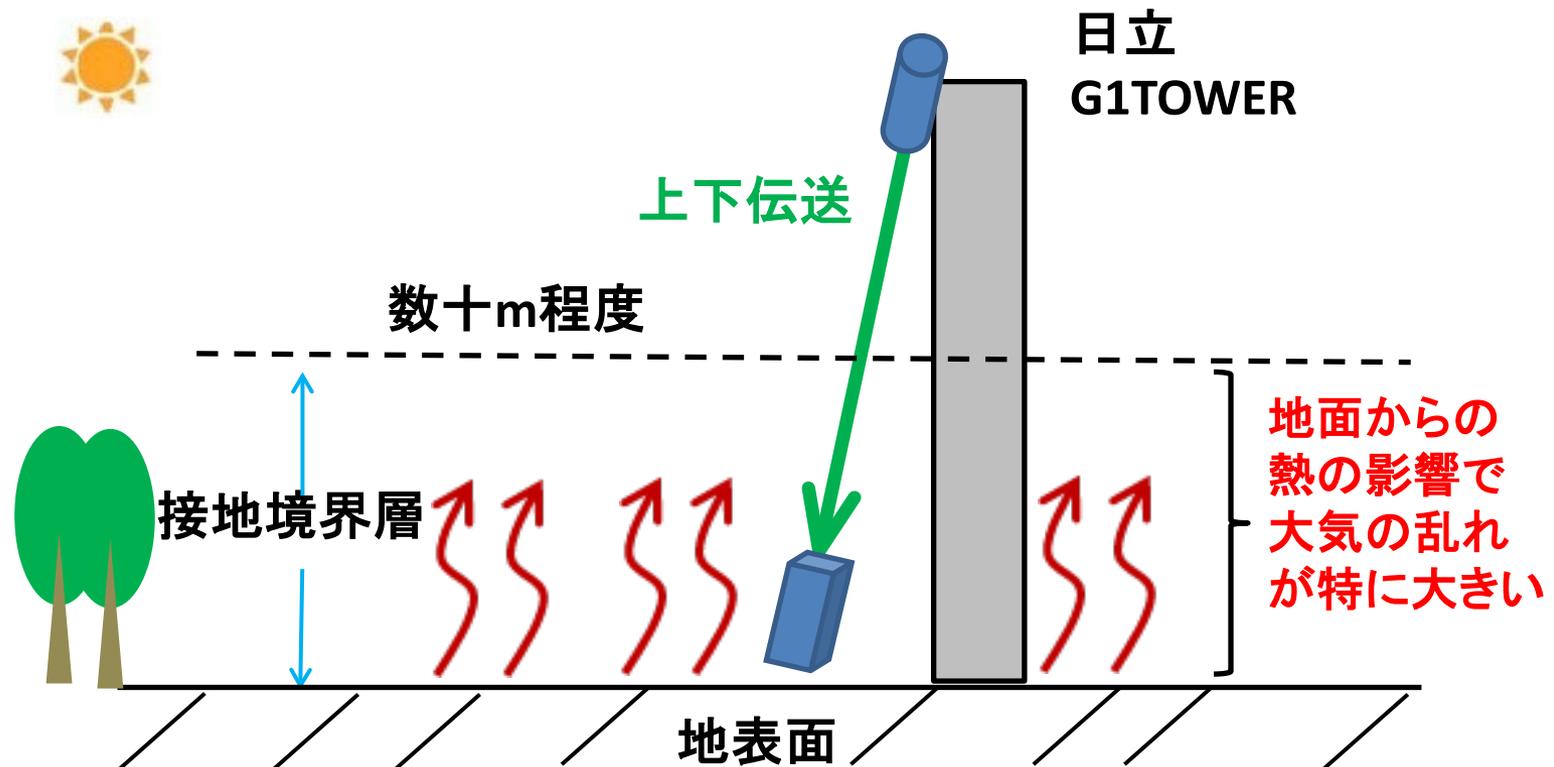
## 4. 実験の目的(2/4)

- 衛星を使うと巨額の費用と時間がかかる
- 航空機は、搭載に向けた安全上の許認可の問題があり、また費用がかかる
- 大気球は実験機会が限られ、飛行経路も不確定  
⇒ タワーでやると、早く、安く、効率的!

### 小目的その1

タワーの屋上から地上への  
上下方向伝送実験を行なう

# 4.実験の目的(補足説明)



## 4. 実験の目的(3/4)

- 宇宙から地上までレーザーを送ることを想定して、レーザーの方向制御の精度を確認する
- 本実験では、大気の乱れが特に大きい接地境界層を貫いて、タワーの上から地上までレーザーを送る

### 小目的その2

- レーザーの方向を制御し、十分な精度を実現できるか確認する  
大気の乱れの大きさが特徴的な、早朝、日中、日没後、夜間でレーザーの方向制御精度を取得
- 方向制御方式の性能と妥当性を確認する

## 4. 実験の目的(4/4)

- レーザーによる電力伝送を実証
- 安全確保のため、まず小出力のレーザーで方向制御を確定させてから高出力レーザーを発射
- 高出力レーザーを光電変換して電力を得る

### 小目的その3

- 方向制御された小出力レーザーに高出力レーザーを重ね合わせて<sup>(p28)</sup>、高精度に方向制御できることを確認する
- 空間を長距離伝搬して、ビームが乱れた状態での光電変換の効率を確認する

## 5. レーザ無線電力伝送の国内外実験事例 (1/2)

No.	実施年	機関	実験内容
1	2003	近畿大学 (日本)	<p>&lt;月面ローバ(模擬機)へのレーザー無線電力伝送実験&gt;</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• レーザ出力(最大): 30 W (発振器:半導体レーザー、波長:808 nm)</li> <li>• レーザ伝送距離: 1,200 m (伝送方向:水平方向)</li> <li>• ビーム方向制御精度: 記載なし</li> <li>• ビーム方向制御方式: 記載なし</li> <li>• 受電電力: 2.7 W (受電素子:GaAs)</li> </ul>
2	2006	近畿大学 (日本)	<p>&lt;小型飛翔体へのレーザー無線電力伝送実験&gt;</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• レーザ出力(最大): 300W (発振器:半導体レーザー、波長:808 nm)</li> <li>• レーザ伝送距離: 50 m (伝送方向:上下方向)</li> <li>• ビーム方向制御精度: 200<math>\mu</math>rad (50 m先で1 cm以下)</li> <li>• ビーム方向制御方式: CCR反射光をセンサにより解析し制御</li> <li>• 受電電力: 45 W (受電素子:GaAs)</li> </ul>
3	2009	LaserMotive社 (アメリカ)	<p>&lt;クライマーへのレーザー無線電力伝送&gt;</p> <p>※NASA-sponsored Power Beaming Centennial Challenge</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• レーザ出力(最大): 4,500 W (発振器:半導体レーザー、波長:810 nm)</li> <li>• レーザ伝送距: 最大1,000 m (上下方向)</li> <li>• ビーム方向制御精度: 記載なし</li> <li>• ビーム方向制御方式: 記載なし</li> <li>• 受電電力: 400 W (受電素子:GaAs)</li> </ul>
4	2010	LaserMotive社 (アメリカ)	<p>&lt;小型飛翔体へのレーザー無線電力伝送実験&gt;</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• レーザ出力(最大): 1,000 W (発振器:半導体レーザー、波長:810 nm)</li> <li>• レーザ伝送距離: 15 m (伝送方向:上下方向)</li> <li>• ビーム方向制御精度: 数10 <math>\mu</math>rad (15 m先で1 mmオーダ)</li> <li>• ビーム方向制御方式: カメラにより解析し制御</li> <li>• 受電電力: 170 W (受電素子:GaAs)</li> </ul>

## 5. レーザ無線電力伝送の国内外実験事例 (2/2)

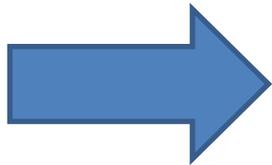
No.	実施年	機関	実験内容
5	2012 (学会 発表)	Air Force Research Laboratory, Boeing, Auburn University (アメリカ)	<p>&lt;水平方向レーザー電力伝送実験&gt;</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• レーザ出力(最大): 285 W (発振器:半導体レーザー、波長:810 nm)</li> <li>• レーザ伝送距離: 100 m (伝送方向:水平方向)</li> <li>• ビーム方向制御精度: 記載なし</li> <li>• ビーム方向制御方式: 記載なし</li> <li>• 受電電力: 25 W (受電素子:GaAs)</li> </ul>
6	2013 (学会 発表)	University of Surrey(イギリス), EADS ASTRIUM(ドイツ、 現在 AIRBUS)	<p>&lt;レーザー電力伝送実験&gt;</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• レーザ出力(最大): 50 W (発振器:半導体レーザー、波長:1550 nm)</li> <li>• レーザ伝送距離: 30 m (伝送方向:記載なし)</li> <li>• ビーム方向制御精度: 記載なし</li> <li>• ビーム方向制御方式: 記載なし</li> <li>• 受電電力: 記載なし (受電素子:InGaAsP、セル効率:44.6%)</li> </ul>
7	2016	JAXA (日本)	<p>&lt;上下方向レーザー無線電力伝送実験&gt;</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• レーザ出力(最大): 350 W (発振器:ファイバレーザー、波長:1070 nm)</li> <li>• レーザ伝送距離: 200 m (伝送方向:上下方向)</li> <li>• ビーム方向制御精度: 2.5 <math>\mu</math>rad (200 m先で0.5 mm)</li> <li>• ビーム方向制御方式: パイロットビームをセンサにより解析しFSMにより方向制御</li> <li>• 受電電力: 74.7 W (受電素子:InGaAs)</li> </ul>

### <参考文献>

- No.1: N. Kawashima et al.: 1.2km Laser Energy Transmission for the Development of a Lunar Rover Confirming the Presence of Ice on the Moon, Proceedings of ILC2003/ILEWG5, 108/2003, pp.291-294.  
武田、河島: 無人月氷探査車(ローバー)モデルへの1.2 km レーザーエネルギー伝送実験, 宇宙技術 3, pp.45-48, 2004.
- No.2: 武田、河島: レーザーエネルギー伝送の小型無人飛翔体への応用, 宇宙技術 7, pp.27-32, 2008.
- No.3: <http://lasermotive.com/>
- No.4: <http://lasermotive.com/>
- No.5: M. Smith et al.: Development of a laser power beaming experiment, Photovoltaic Specialists Conference (PVSC), 2012 38th IEEE.
- No.6: J Mukherjee et al.: Efficiency limits of laser power converters for optical power transfer applications, J. Phys. D: Appl. Phys. 46 (2013) 264006 (6pp)

## 6. 実験の成果

宇宙から地上への伝送を模擬した経路において、  
高精度に方向制御されたレーザービームによる  
電力伝送の実現性を確認した



# 世界初の実績

レーザーによるエネルギー伝送は過去に実績はあるが、  
・接地境界層を貫いてレーザーによる電力伝送  
・パイロットレーザー方式による高精度な方向制御  
をともに実現したのは、世界初の試み

7. SSPSとビーム方向制御
8. ビーム方向制御の方法
9. 実験システムの概要
10. 実験作業の流れ/スケジュール
11. 安全上の配慮点

# 7. SSPSとビーム方向制御

実用システムで目指すビーム方向制御精度:

**常時 $0.1 \mu\text{rad}$**  (1rad=約57度。 $0.1 \mu\text{rad}$ =百万分の5.7度)

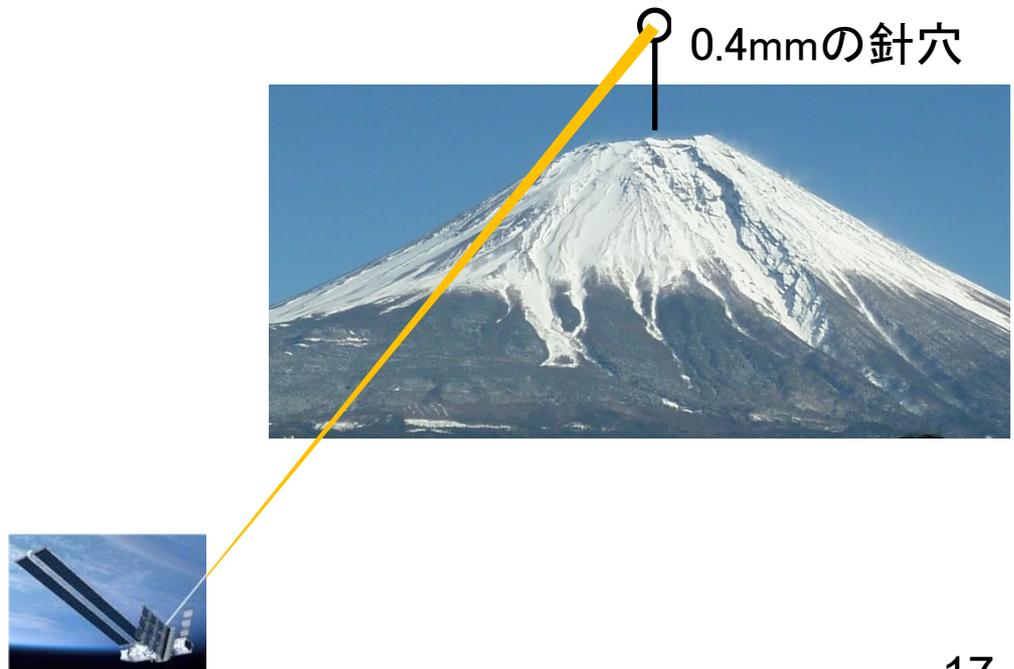
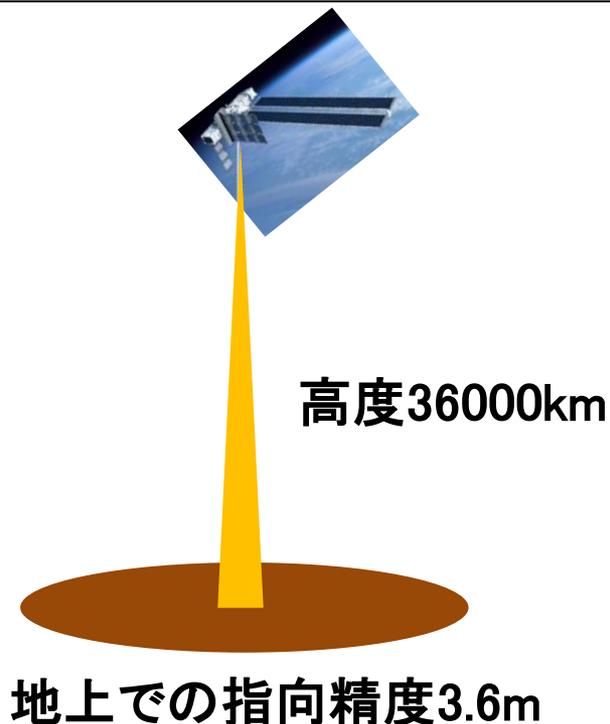
これは、

**4km先の富士山頂の0.4mmの針穴** を裾野から狙う精度。

今回の実験の目標: **$1\mu\text{rad}$**  (=十万分の5.7度)

⇒ **4mmの針穴** (富士山頂)

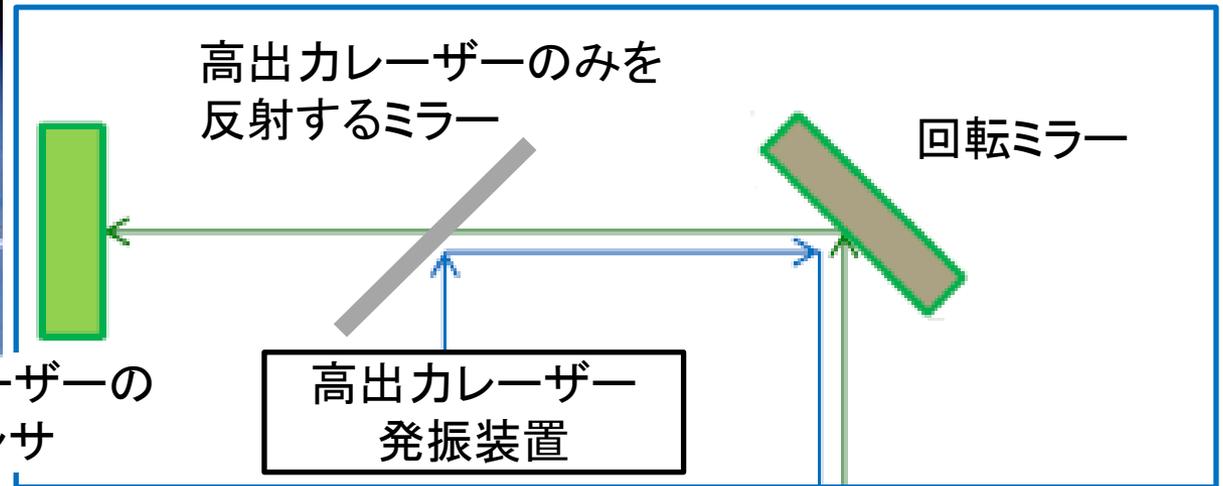
⇒ **0.2mmの針穴** (200mのタワー下)



# 8. ビーム方向制御の方法(1/3)



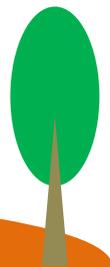
パイロットレーザーの  
受光位置センサ



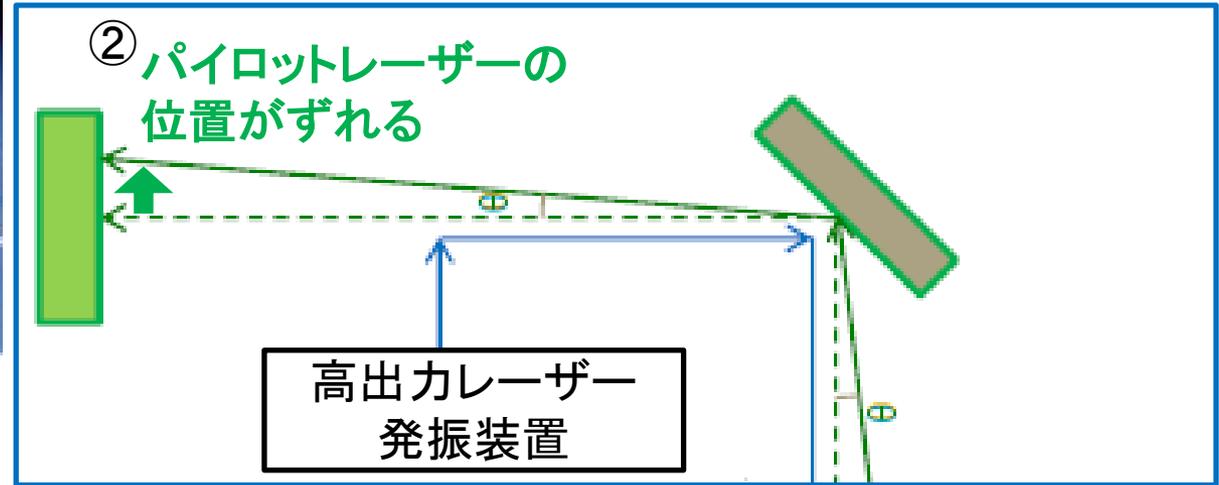
高出力レーザー

地上からの  
パイロットレーザー

高出力レーザーを常時正確に地上設備に照射するためには、地上からSSPSへ誘導用のパイロットレーザーを送り、それが来た方向に正確に高出力レーザーを打ち返す必要がある。

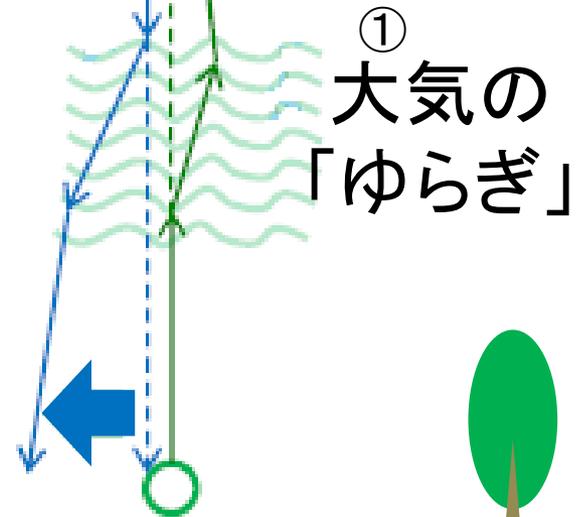


# 8. ビーム方向制御の方法(2/3)



大気の「ゆらぎ」により  
レーザーの位置がずれるため、  
それを常に正確に補正して、  
「ずれ」を元に戻す必要がある。

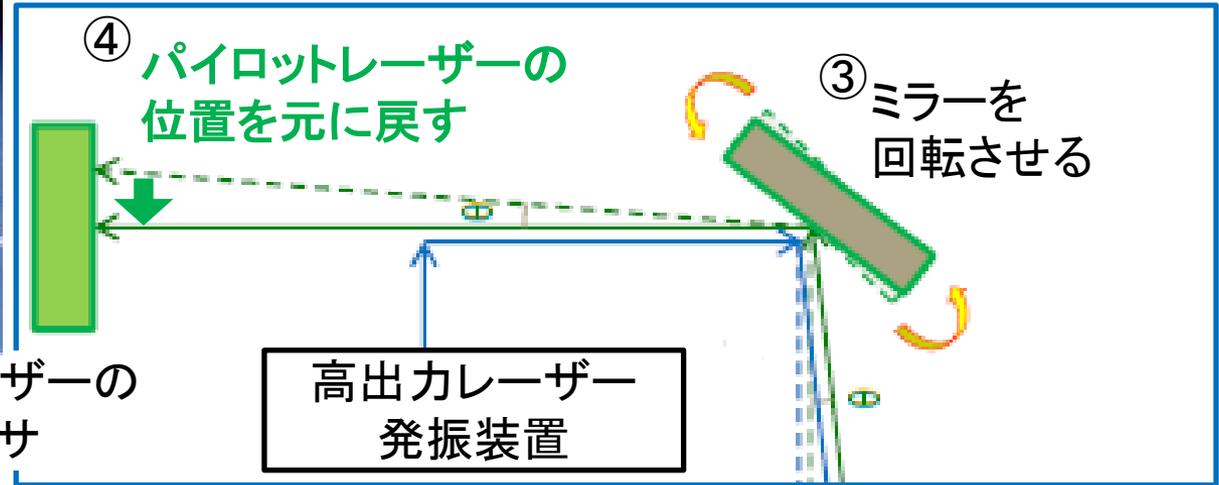
② 高出力レーザーの位置がずれる



# 8. ビーム方向制御の方法(3/3)



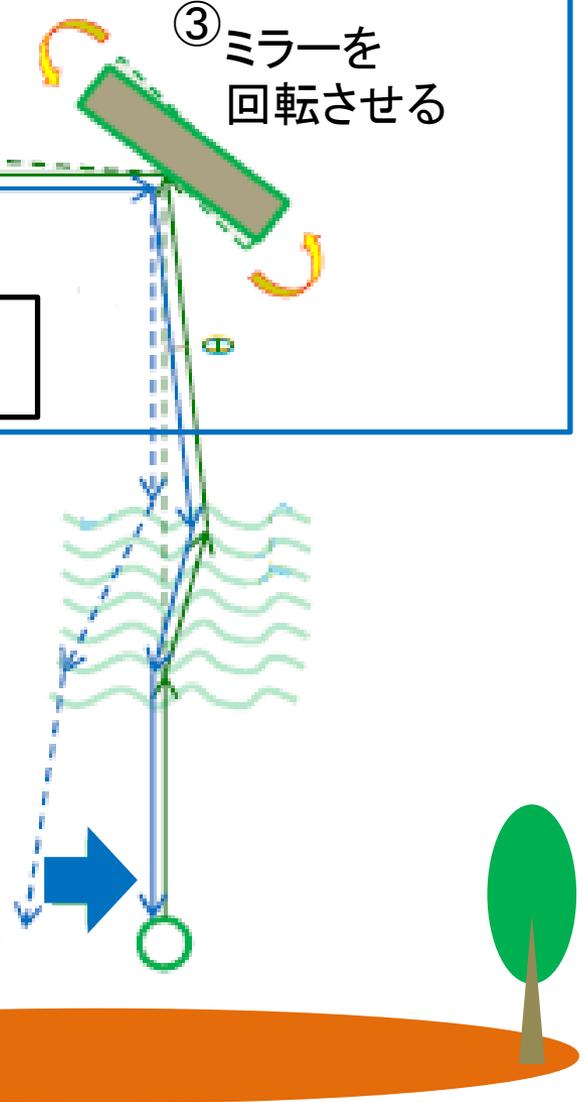
パイロットレーザーの  
受光位置センサ



受光位置センサ上でのパイロットレーザー  
の位置が元に戻るようにミラーを回転させる

地上での高出カレーザーの位置が  
元に戻る。

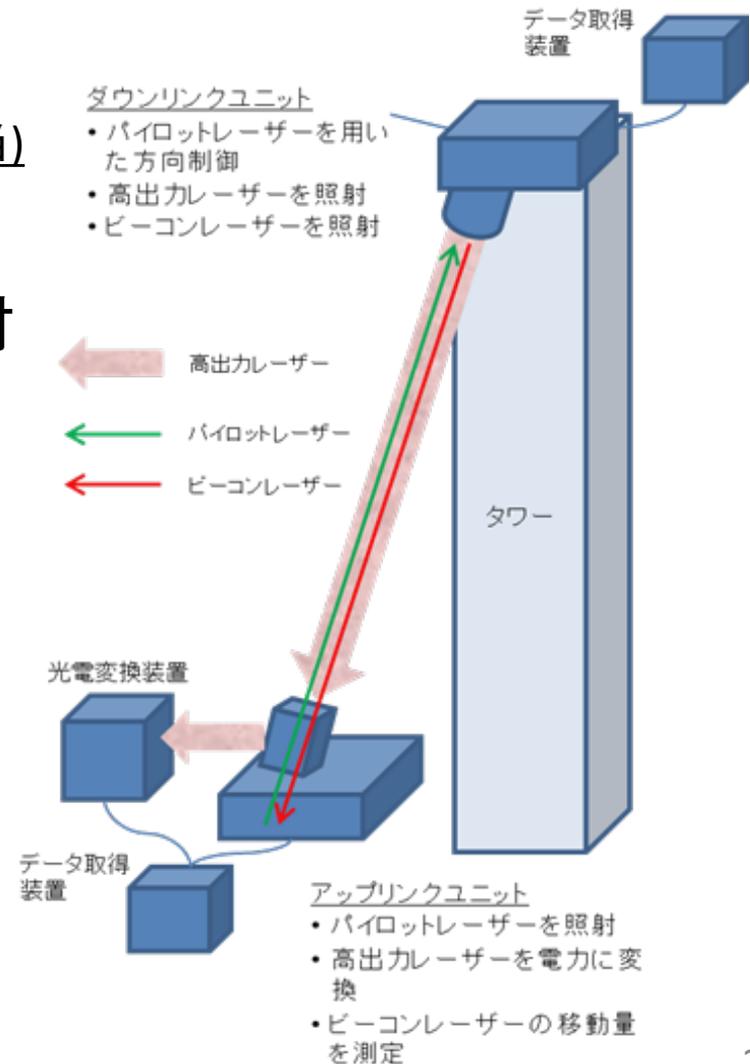
⑤ 高出カレーザーの位置が戻る



# 9. 実験システムの概要(1/8)

- **G1TOWER屋上**
  - ダウンリンクユニット(衛星に相当)
    - レーザーの方向制御
    - ビーコンレーザー
    - 高出力レーザーを発射

- **地上**
  - アップリンクユニット
    - 方向制御精度の計測
    - パイロットレーザーを発射
  - 光電変換装置
    - 受光したレーザーを電力に変換

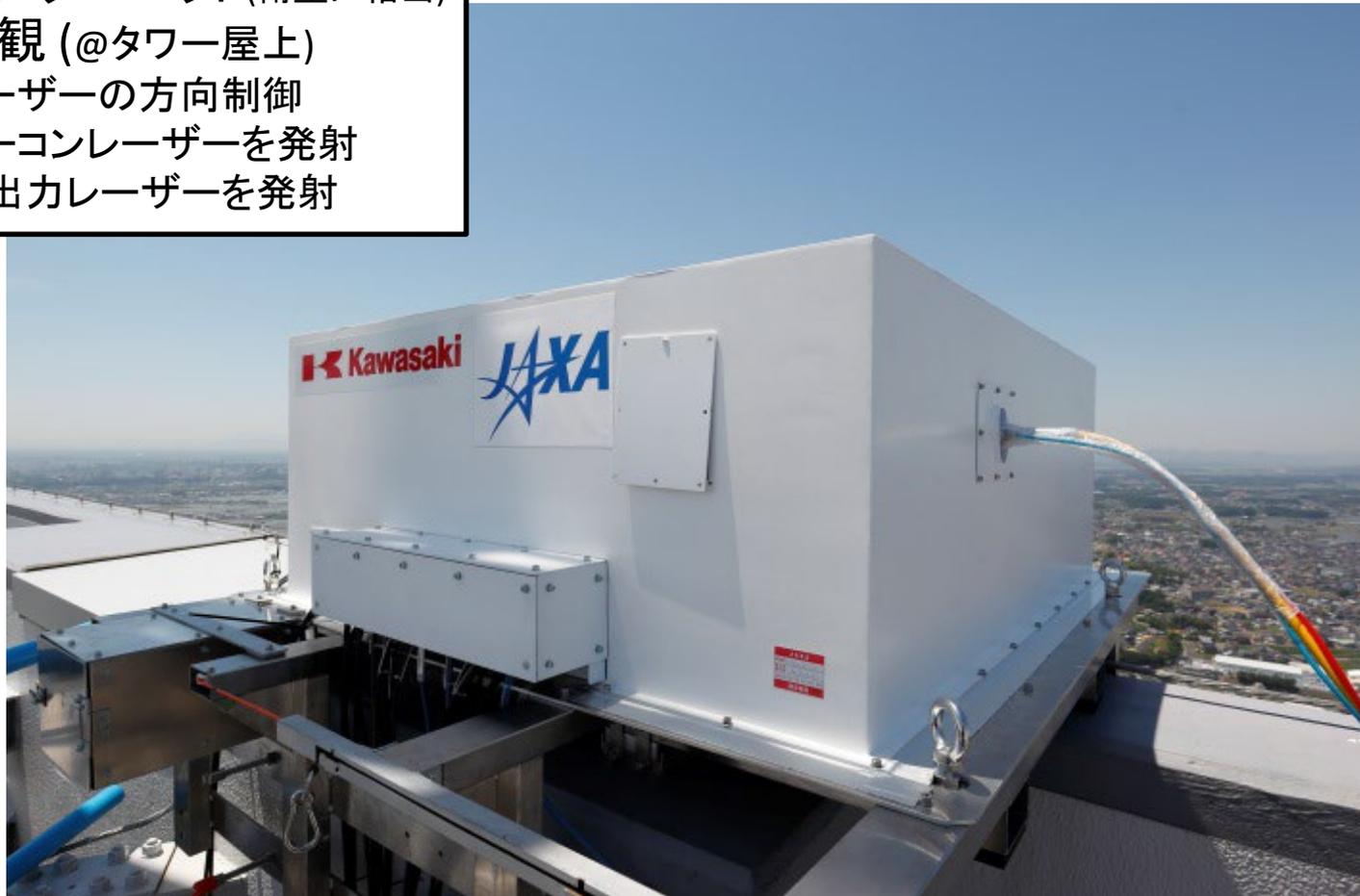


# 9. 実験システムの概要(2/8)

ダウンリンクユニット(衛星に相当)

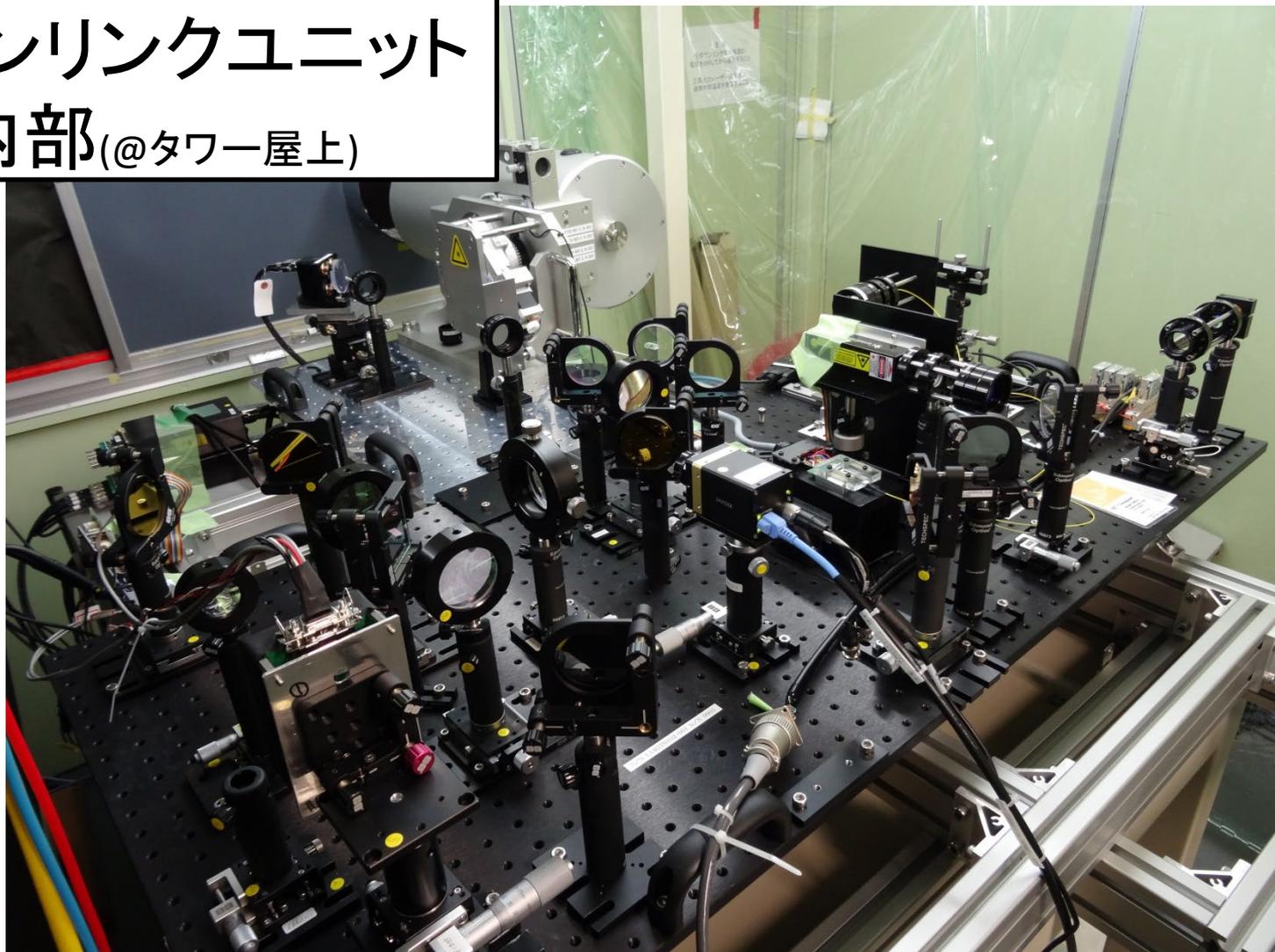
外観 (@タワー屋上)

- ・レーザーの方向制御
- ・ビコンレーザーを発射
- ・高出力レーザーを発射



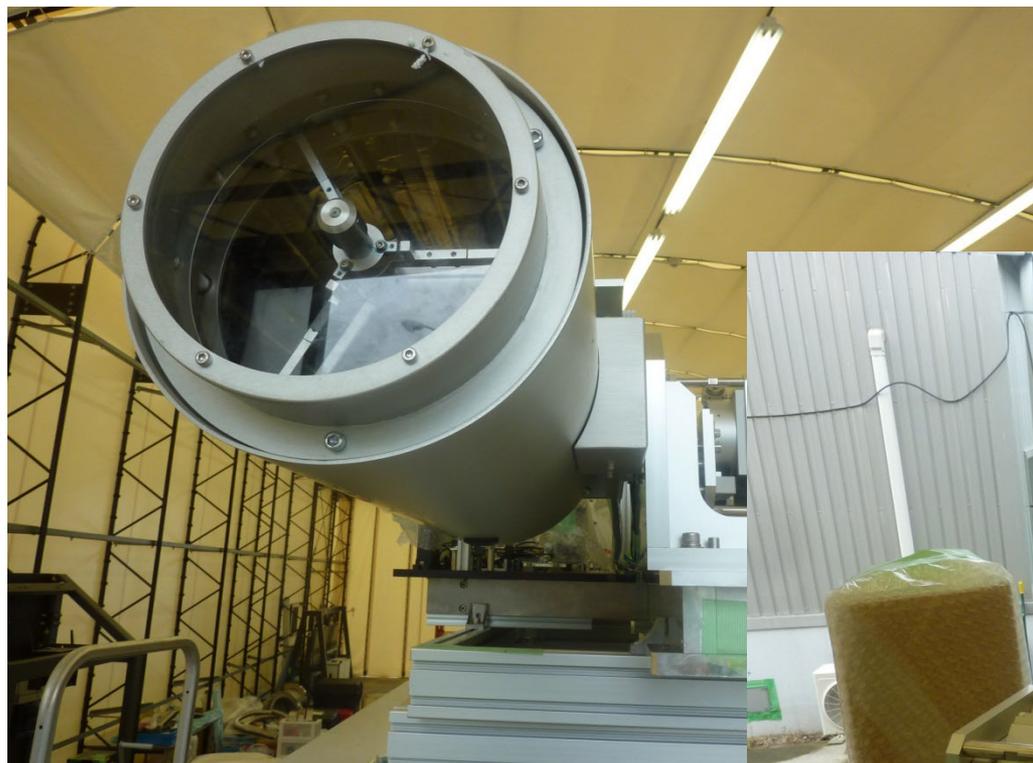
## 9. 実験システムの概要(3/8)

### ダウンリンクユニット 内部(@タワー屋上)



(実験装置を開発時の写真)

## 9. 実験システムの概要(4/8)



ダウンリンクユニット  
の望遠鏡(@タワー屋上)

- レーザーを直径12cmのビームとして発射する発射口



(実験装置開発時の写真)

## 9. 実験システムの概要(5/8)



# 高出力レーザー 発振装置

(@タワー屋上)

- ・工場等でのレーザー加工用
- ・今回の実験で望遠鏡から発射したレーザーは最大350W

## 9. 実験システムの概要(6/8)

# アップリンク ユニット

(@地上)

- ・方向制御精度の計測
- ・パイロットレーザーを発射

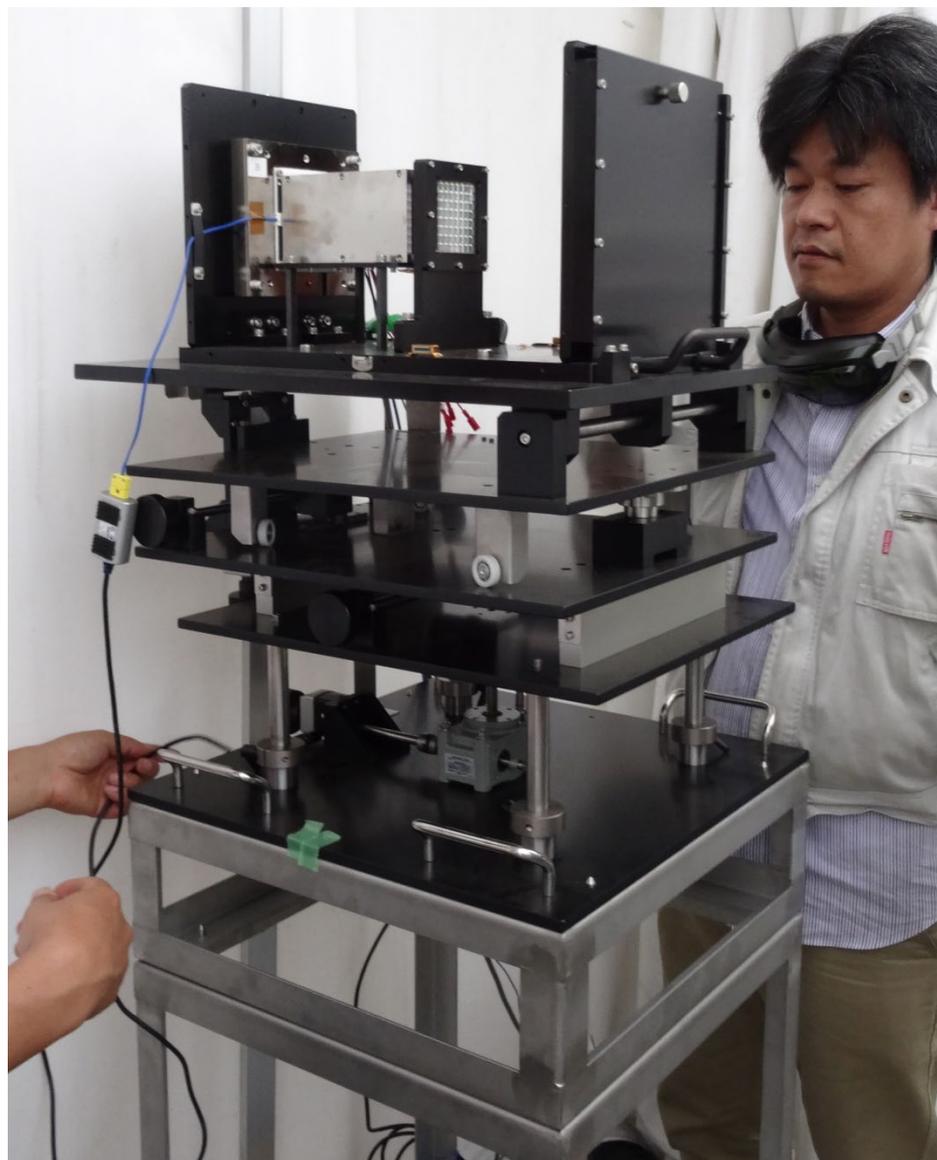


## 9. 実験システムの概要(7/8)

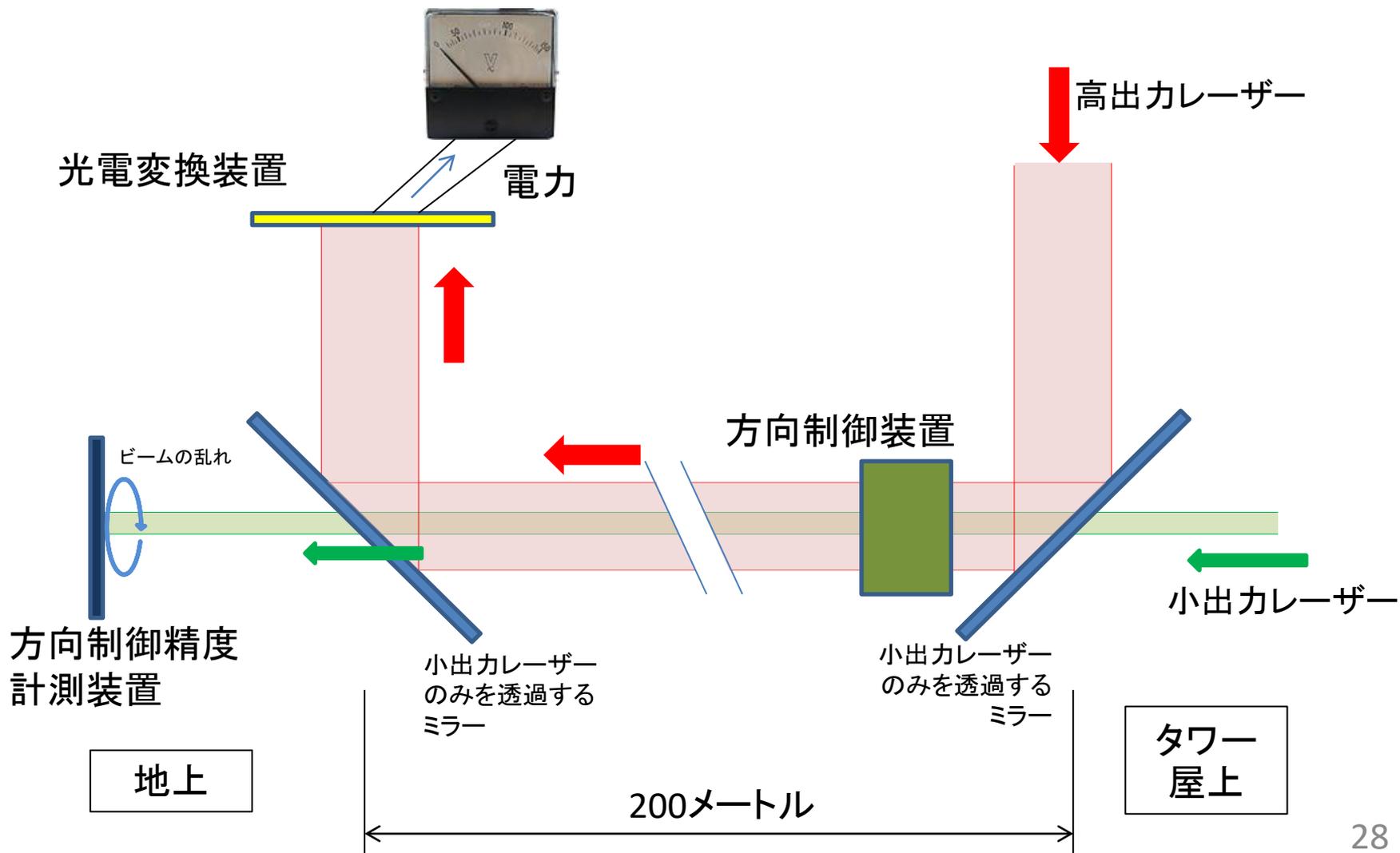
### 光電変換装置

(@地上)

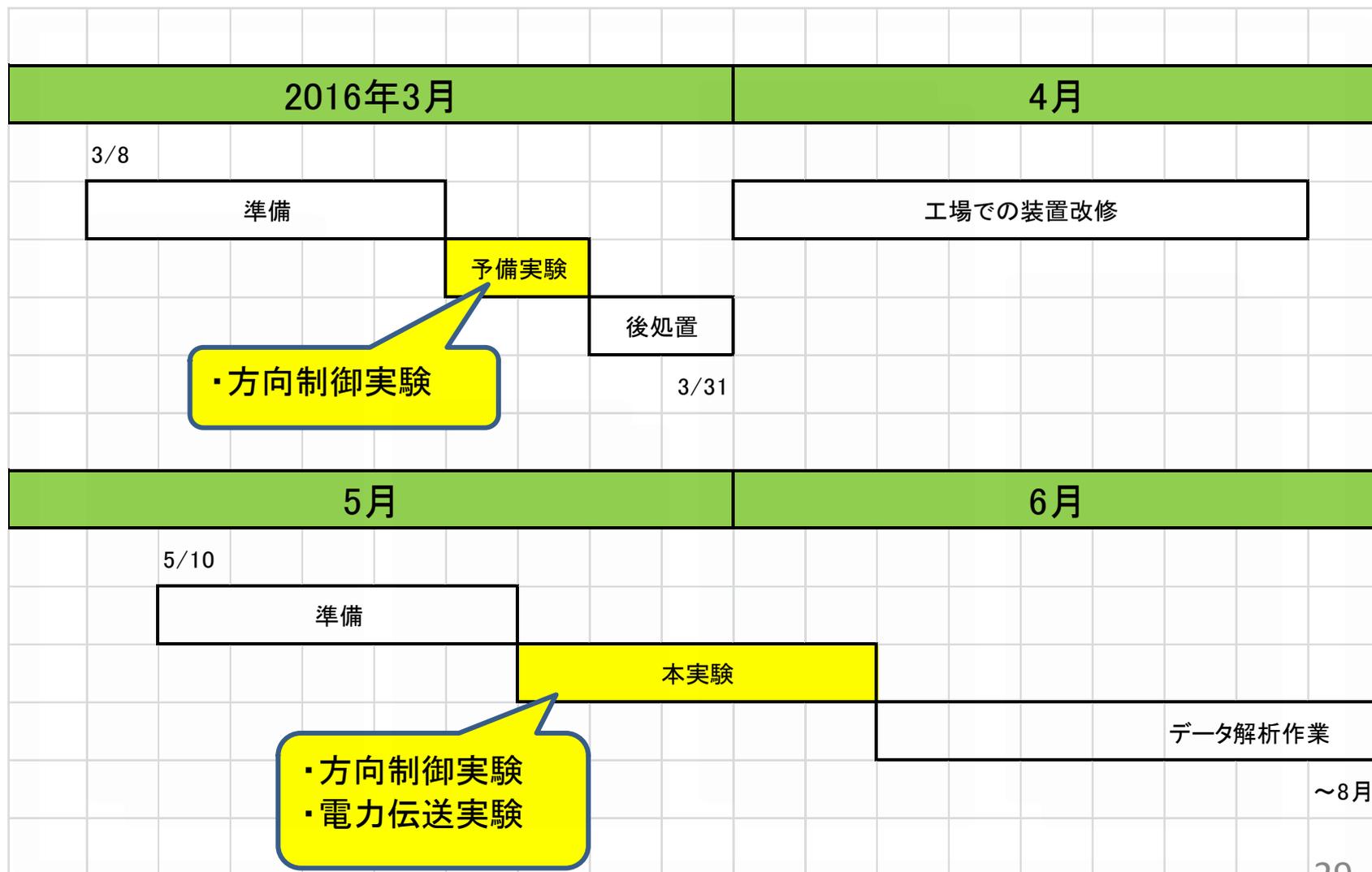
- ・受光したレーザーを  
電力に変換する



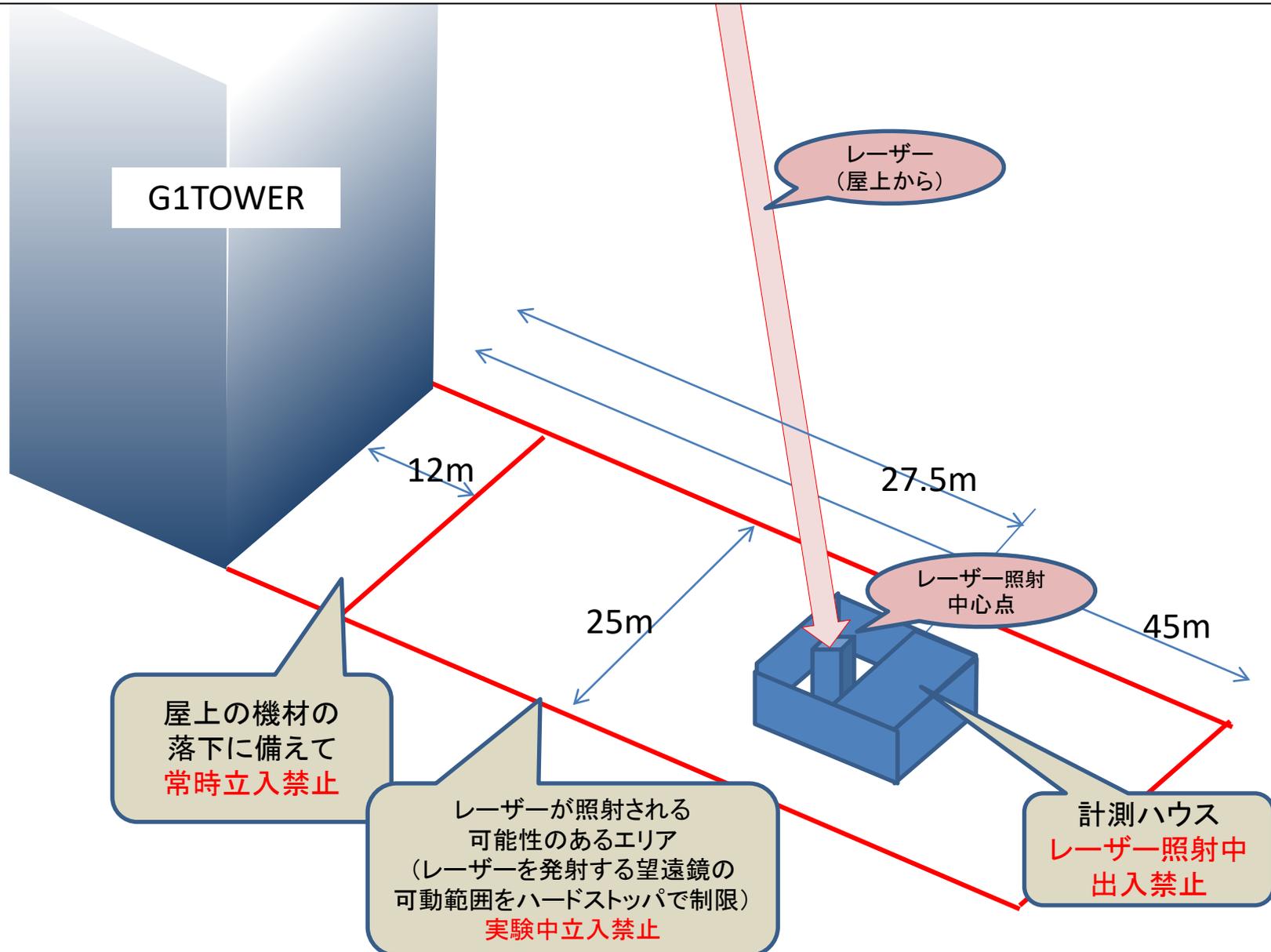
# 9. 実験システムの概要(8/8)



# 10. 実験作業の流れ/スケジュール



# 11. 安全上の配慮点



- 12. 実験結果
- 13. デモの結果

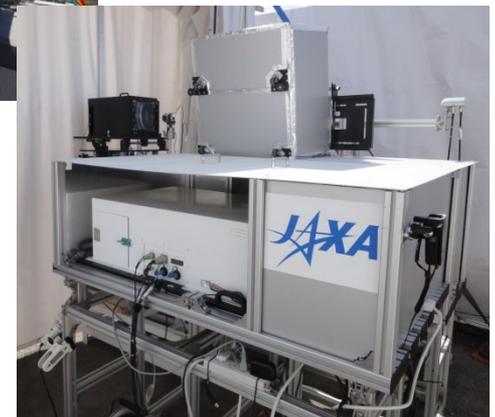
# 12. 実験結果(1/5)

## 小目的その1

- タワーの屋上からの上下伝送を実現する



ダウンリンクユニット  
(外観 @屋上)



アップリンクユニット  
(@地上)

- 小目的その1(上下方向の伝送)

⇒ 目的を達成

# 12. 実験結果(2/5)

## 小目的その2

- レーザーの方向を制御し、十分な精度を実現できるか確認する
- 方向制御方式の性能と妥当性を確認する

## • ビーム方向制御

### – 方向制御精度

約 $2.5[\mu\text{rad}]$  (=1万分の1.4度)

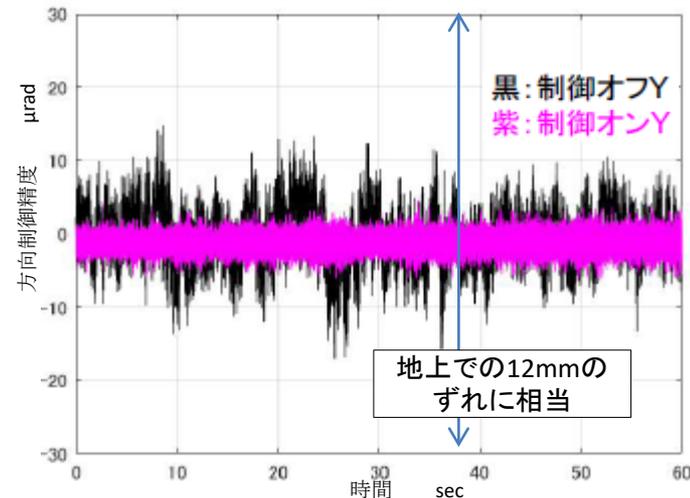
(目標  $1[\mu\text{rad}]$  (=十万分の5.7度))

(200m先のタワーの下で

$2.5[\mu\text{rad}] = 0.5[\text{mm}]$  相当、 $1[\mu\text{rad}] = 0.2[\text{mm}]$  相当)

– 「制御オン」では「制御オフ」に比べてばらつきが小さくなり、制御は良好に作動

– ビーム方向制御方式の妥当性を確認



# 12. 実験結果(3/5)

- ビーム方向制御(続き)

- 高出力のレーザーを方向制御する場合、回転ミラーが大型化し、高速での回転が難しくなり、制御の精度が落ちる
- 今回の実験では、従来の光通信衛星(OICETS)と比較し3桁大きい出力のレーザーを、光通信とほぼ同じ精度に制御できた
- ただし、さらなる性能向上が必要

	方向制御の精度	レーザー出力
今回の実験	2.5 $\mu\text{rad}$ (=1万分の1.4度)	350 W
OICETS (きらり)	1 $\mu\text{rad}$ (=十万分の5.7度)	0.12 W

- 小目的その2(レーザーの方向制御)

⇒ 目的をおおむね達成

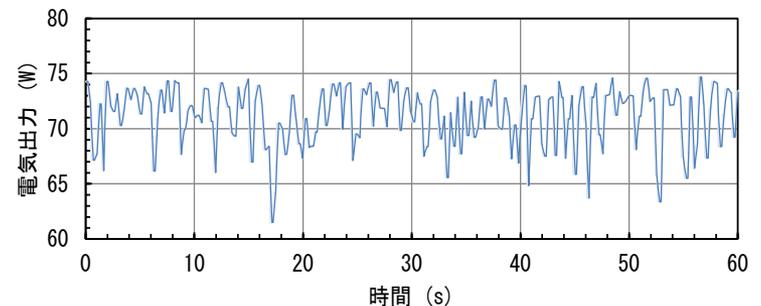
# 12. 実験結果(4/5)

## 小目的その3

- 方向制御された小出力レーザーに高出力レーザーを重ね合わせて、高精度に方向制御できることを確認する
- 空間を長距離伝搬して、ビームが乱れた状態での光電変換の効率を確認する

- 電力伝送

- 電力伝送出力: 最大74.7[W]  
(目標 60[W])
- 目標を達成



レーザーによる電力伝送出力

- 小目的その3(高出力レーザーによる送電)

⇒ 目的を達成

# 12. 実験結果(5/5)

## 大目的

宇宙から地上までのレーザー発射を模擬し  
電力伝送を行う

小目的その1 }  
小目的その2 } を総合して  
小目的その3 }

世界初

高精度に方向制御されたレーザービームによる  
電力伝送の実現性を確認した

• 大目的

⇒ 目的を達成!!

# 13. デモの結果

- レーザーで伝送した電力を利用
  - ▶ ドローンのデモンストレーション飛行(有線給電)
- このデモにより、以下を示した
  - ▶ レーザーにより伝送した電力が、実際に利用可能である
  - ▶ 「踊り場成果」(\*)候補であるドローンへの電力伝送(p42)の実現可能性
  - ▶ 将来的には、月面探査用ローバーへの電力伝送にもつながる



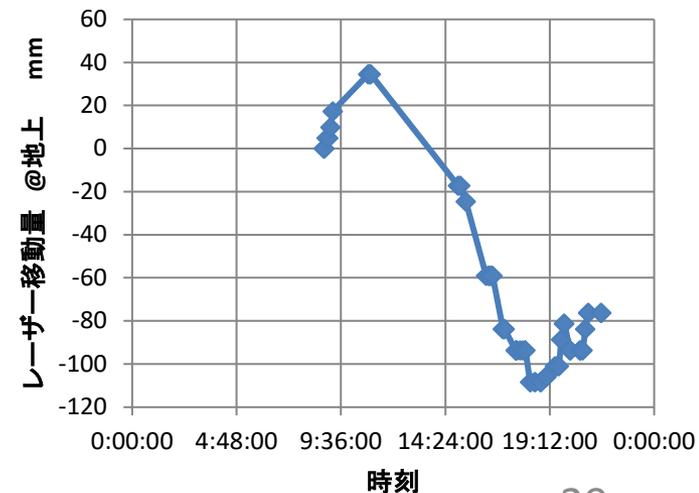
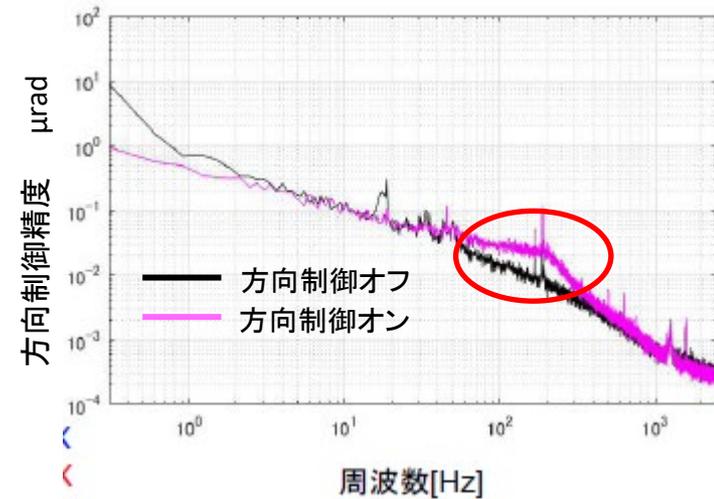
※「踊り場成果」とはSSPSの研究開発を長い階段を登ることにとえて、その途中段階で社会に成果を還元することと、その成果を意味する造語

14. 新たに得られた知見

15. レーザードローンへの発展

# 14. 新たに得られた知見 (1/3)

- 方向制御精度の向上
  - 回転ミラーの制御最適化
    - 制御によりむしろ悪くなった周波数がある
    - 回転ミラーの構造や駆動回路の最適化(高速化を含む)に向けた実績データが取得できた
    - 高出力レーザーを伝送するためのミラーの大型化と駆動速度の高速化は両立しないため、むやみに高速化できない
    - 実際の伝搬経路において、どの程度の高速化が必要かの実績データは貴重
  - 日射による熱歪み
    - 今回の実験装置では、日射によるタワー等の熱歪み自動調整機構は装備していなかった
    - 方向制御精度に影響した可能性が否定できない
    - より高精度なビーム伝送のための今後の熱歪み対策に資する実績データが取得できた



# 14. 新たに得られた知見 (2/3)

## • 方向制御精度の向上(続き)

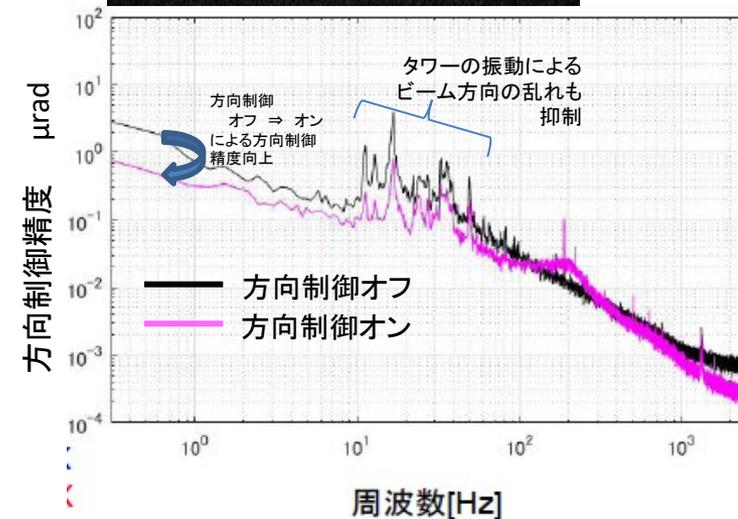
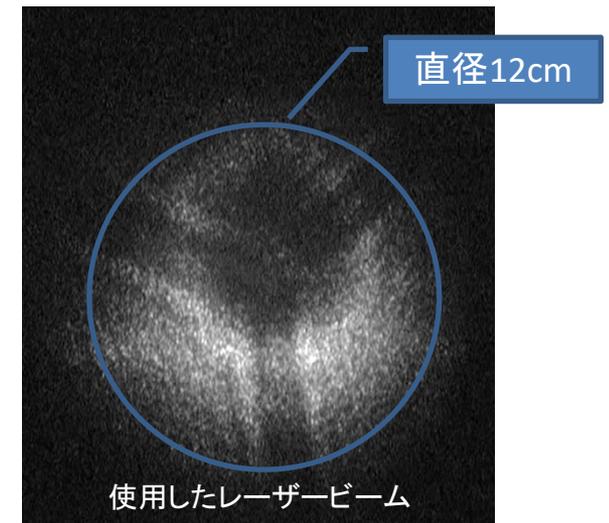
### – レーザービーム波面制御:

- レーザービームが太いため、レーザービーム断面内の波面の乱れが方向制御精度に影響した可能性が否定できない
- 今後のビーム方向制御の高精度化に向け、接地境界層を貫く伝送経路でのビーム断面内の波面状態の貴重なデータが得られた

### – タワー振動の抑制

- G1TOWERではエレベータ試験による振動が発生
- レーザー方向制御への振動の影響も抑制できることを確認

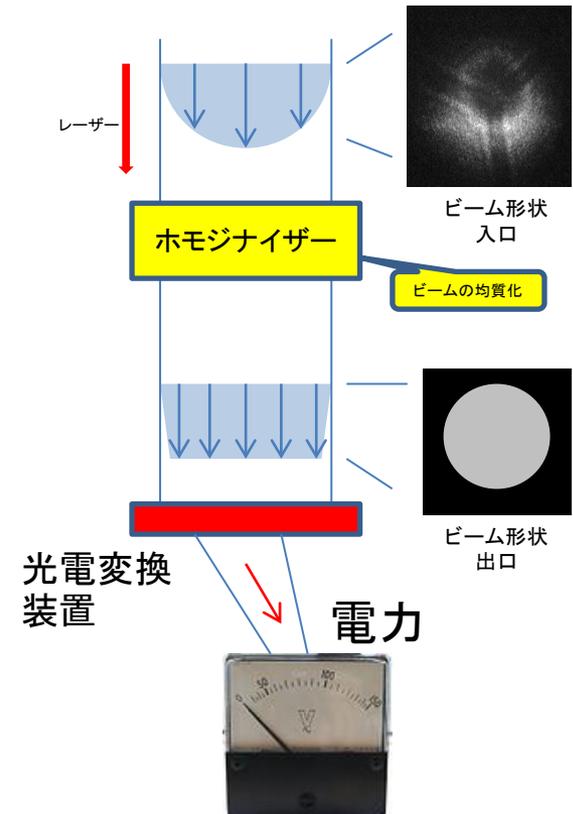
⇒ 将来の移動体等からのレーザー伝送に適用の可能性



# 14. 新たに得られた知見 (3/3)

## • レーザーによる電力伝送

- 光電変換装置の出力と効率、  
60W  $\Rightarrow$  17% (目標)  
74.7W  $\Rightarrow$  21.3% (実験結果)
- 接地境界層を貫く伝送経路の  
伝搬後のビームを、均質化する  
光学装置の有効性が確認できた
- セル単体効率はほぼ上限の値が  
得られている
- 以下のさらなる出力向上策により、  
今後は効率35%を目指す
  - 伝送システム内の光学系損失の低減
  - 受光装置内のホモジナイザーの  
均質化改善



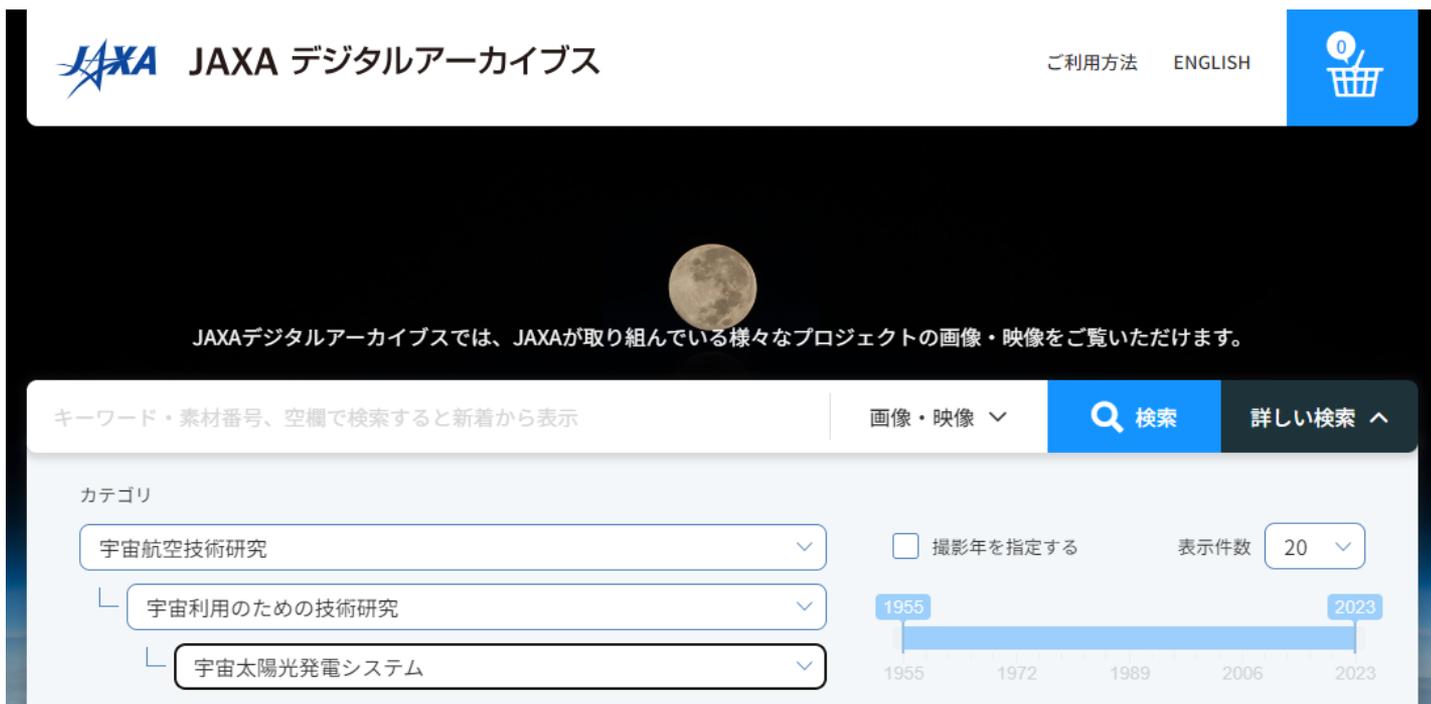
# 15. レーザードローンへの発展

## レーザーによる電力伝送技術の 「踊り場成果」<sub>(p37)</sub>候補

- メリット
  - ドローンの最大の課題であるバッテリー制約による飛行時間の短さを解消
  - これにより、監視など長時間飛行の用途へのドローンの適用が可能となる
- 課題
  - 伝送の高精度化
  - 受光部の小型軽量化
  - 送光部の小型化
  - 放熱の高効率化
  - 安全の確保
  - 価格の低廉化



- 本実験に係る画像・映像はJAXAデジタルアーカイブスに掲載しております。
- 以下カテゴリでご確認いただけます。  
【宇宙航空技術研究】>【宇宙利用のための技術研究】  
>【宇宙太陽光発電システム】



The screenshot shows the JAXA Digital Archive website interface. At the top left is the JAXA logo and the text 'JAXA デジタルアーカイブス'. To the right are links for 'ご利用方法' and 'ENGLISH', and a shopping cart icon with '0' items. Below the header is a dark banner with a moon image and the text: 'JAXAデジタルアーカイブスでは、JAXAが取り組んでいる様々なプロジェクトの画像・映像をご覧いただけます。' Below this is a search bar with the placeholder text 'キーワード・素材番号、空欄で検索すると新着から表示'. To the right of the search bar are filters for '画像・映像', a search button '検索', and a link '詳しい検索 >'. Below the search bar is a 'カテゴリ' section with three dropdown menus: '宇宙航空技術研究', '宇宙利用のための技術研究', and '宇宙太陽光発電システム'. To the right of the categories is a checkbox '撮影年を指定する' and a '表示件数' dropdown set to '20'. Below these is a timeline slider from 1955 to 2023, with a blue bar indicating the selected range from 1955 to 2023.