



レーザーによる無線電力伝送

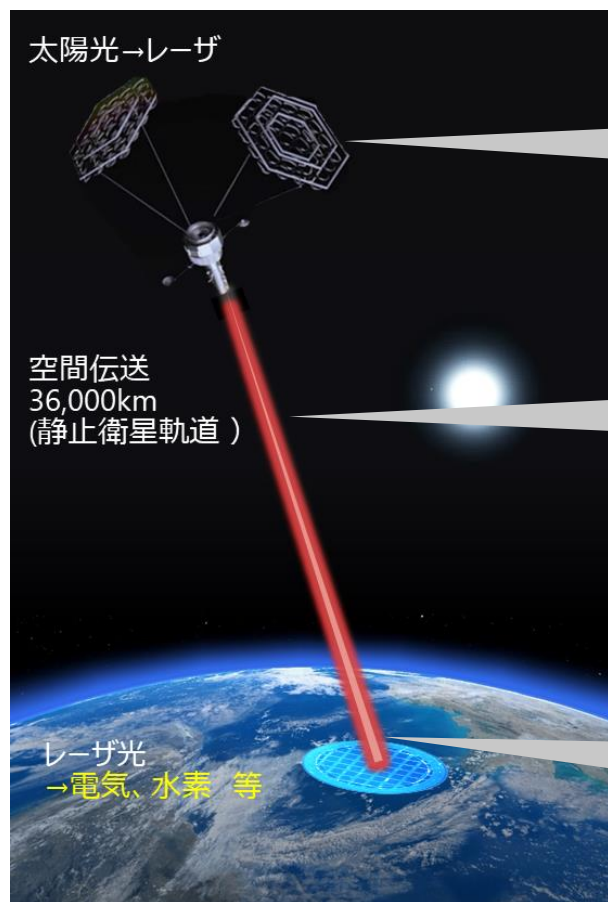
NTT宇宙環境エネルギー研究所
落合夏葉

- 研究背景：宇宙太陽光発電
- レーザ無線電力伝送の課題
- 高効率化に向けた検討
 - › ビーム整形
 - › セル接続最適化
 - › ビーム走査
- 宇宙太陽光発電実現に向けたその他取り組み
- まとめ

- 研究背景：宇宙太陽光発電
- レーザ無線電力伝送の課題
- 高効率化に向けた検討
 - › ビーム整形
 - › セル接続最適化
 - › ビーム走査
- 宇宙太陽光発電実現に向けたその他取り組み
- まとめ

研究背景：宇宙太陽光発電

- 宇宙空間で太陽光エネルギーをマイクロ波やレーザに変換し地上に伝送
- 大きく3つのステップによって実現される



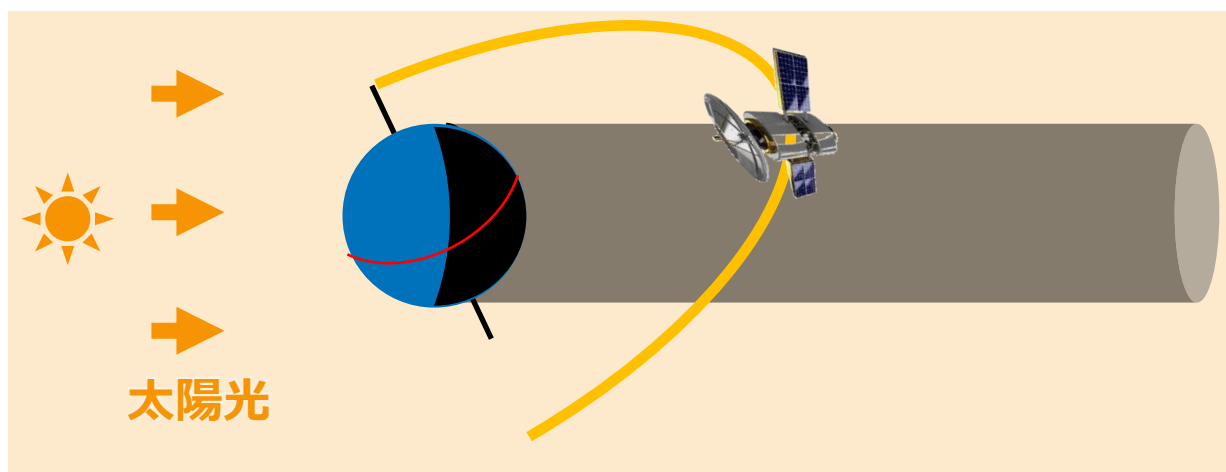
1. 宇宙空間において太陽光をマイクロ波やレーザに変換する

2. マイクロ波やレーザを地上へ36000kmの距離伝送させる

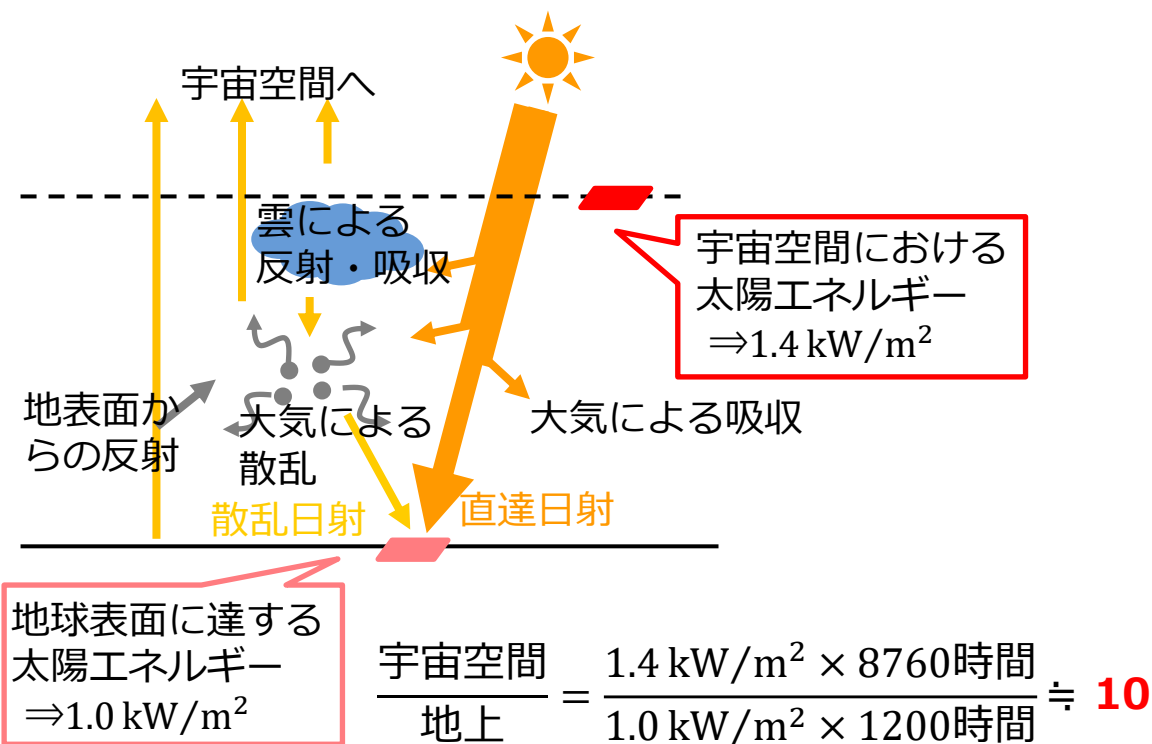
3. 地上においてマイクロ波やレーザを電力等に変換する

宇宙太陽光発電のメリット

- 静止衛星は非常に高い高度に位置しているため、地球の影に入ることほとんどない
- 昼夜問わず安定的に大規模なエネルギーが得られる



静止衛星の高度は地上約36,000 kmと非常に高いため、
静止衛星が地球の影に入らない
→**昼夜問わず発電が可能**



宇宙空間では、年間で**地上の約10倍**
の太陽エネルギーを得ることが可能

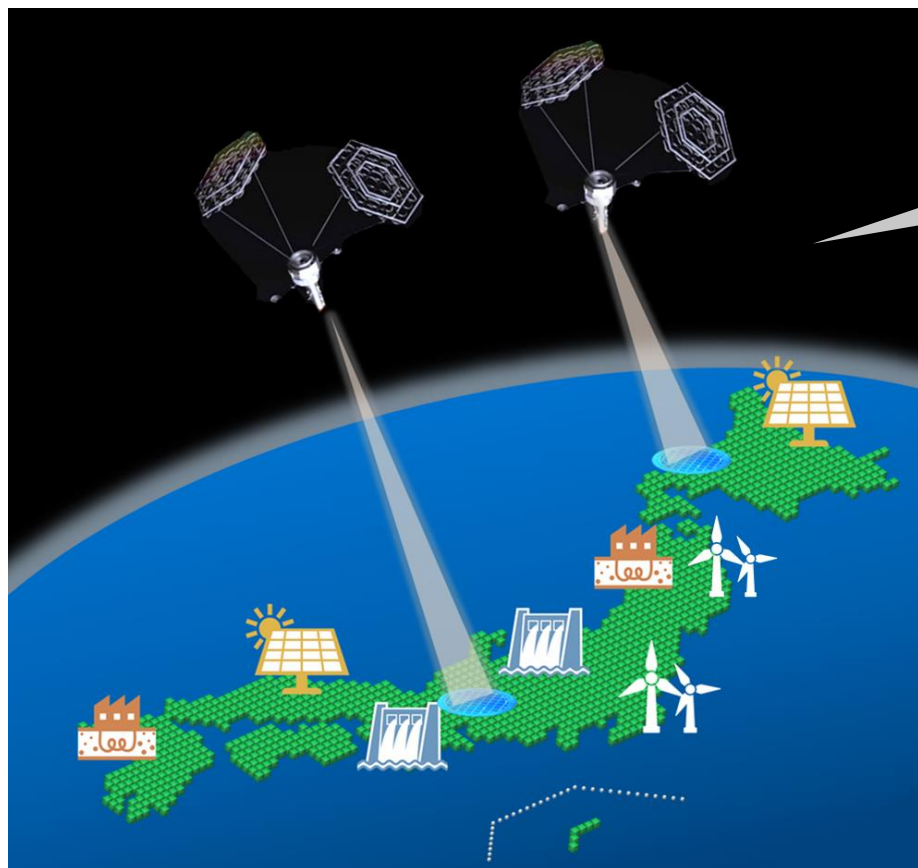
エネルギー伝送方式

- 宇宙空間から地上へエネルギーを伝送する媒体として、マイクロ波とレーザーがある
- 本研究ではシステムの小型化に期待できるレーザー方式に着目

	マイクロ波	レーザー
長所	<ul style="list-style-type: none">・ 雲や雨の影響を受けづらい・ 安全性を確保しやすい	<ul style="list-style-type: none">・ 指向性が高く、装置やシステムの小型化が可能・ 既存の太陽光発電設備を活用可能
短所	<ul style="list-style-type: none">・ ビームの拡がりが大きく、装置やシステムが大規模・ 通信等の電子機器に影響を及ぼす可能性	<ul style="list-style-type: none">・ 雲や雨、大気の影響を受けやすい・ (特に目に対する)安全対策が必要

レーザ宇宙太陽光発電のメリット

- ピンポイント・オンデマンドにMW級のエネルギー伝送が可能
- 電力としてだけでなく、光エネルギーとしての活用も可能



- ・ピンポイント
- ・オンデマンド
なエネルギー伝送が可能

活用シチュエーション

◆ 電力

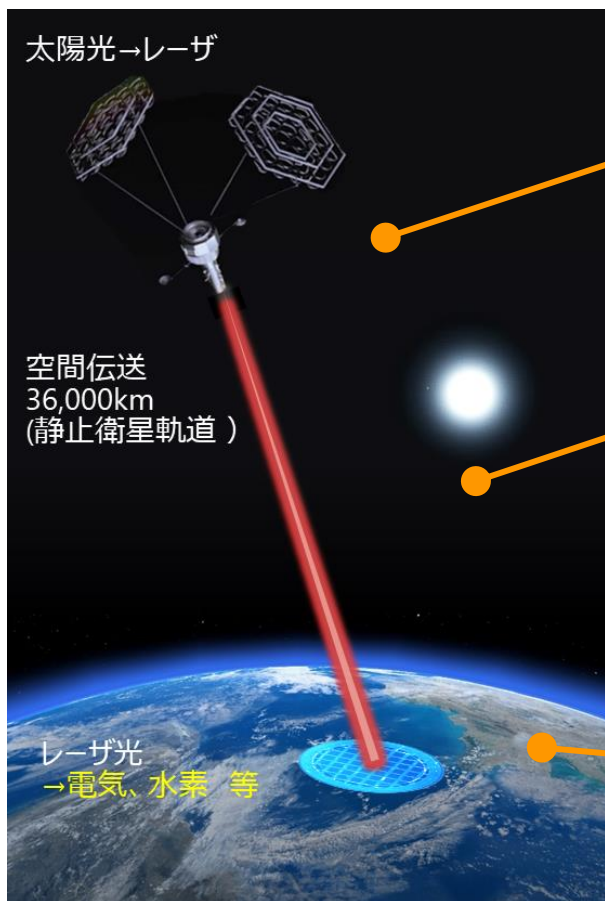
再生可能エネルギーでの電力供給の不安定性をカバーする活用

◆ 光エネルギー

ハイパワーの光エネルギーを用いた水素生成やCO₂還元

レーザ宇宙太陽光発電技術

- NTT宇宙環境エネルギー研究所ではレーザ宇宙太陽光発電の実現に向け、3つの技術に取り組んでいる



【①太陽光励起レーザ技術】

静止衛星上でレーザ結晶に太陽光を集光し、電力を介さずレーザ光に変換する

【②長距離エネルギー伝送技術】

レーザ光を地上に向けて36000km伝送させる

本講演のメインテーマ

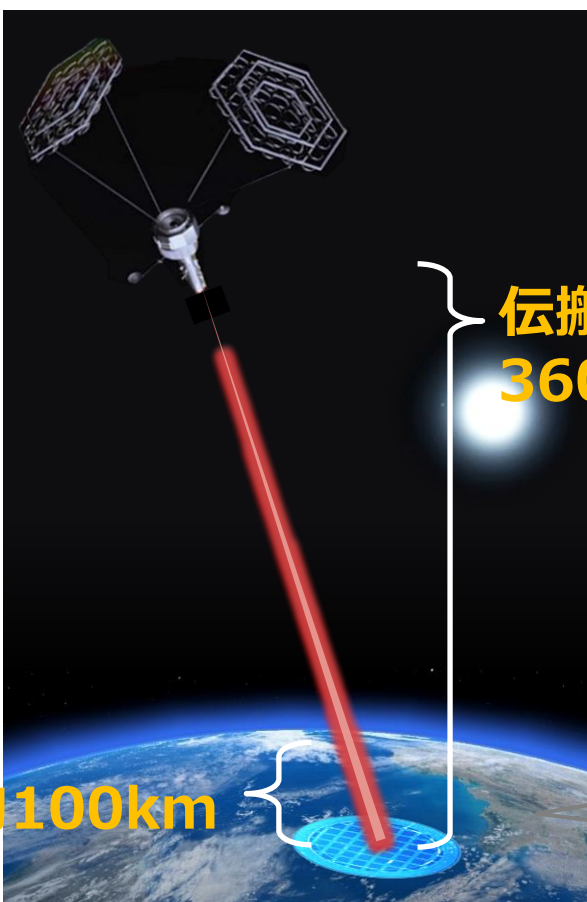
【③高強度レーザエネルギー変換技術】

高変換効率で高強度ビームにも使用可能なエネルギー変換システム

- 研究背景：宇宙太陽光発電
- レーザ無線電力伝送の課題
- 高効率化に向けた検討
 - › ビーム整形
 - › セル接続最適化
 - › ビーム走査
- 宇宙太陽光発電実現に向けたその他取り組み
- まとめ

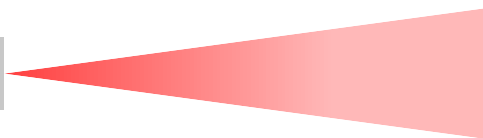
課題：回折・大気擾乱

- 回折によるビーム拡がりや、大気を通過する際に擾乱による強度分布の乱れが生じ、効率が低下
- 回折や大気擾乱に対してロバスト・最適なシステム構築が課題



回折

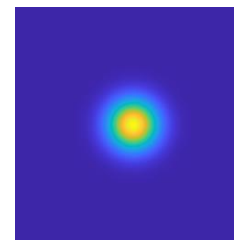
レーザ



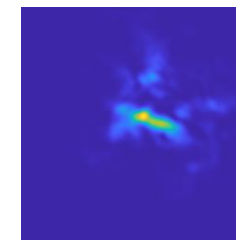
伝搬するにつれビームが拡がる

大気擾乱

伝搬前の
Gaussianビーム



1km大気伝搬後の
Gaussianビーム



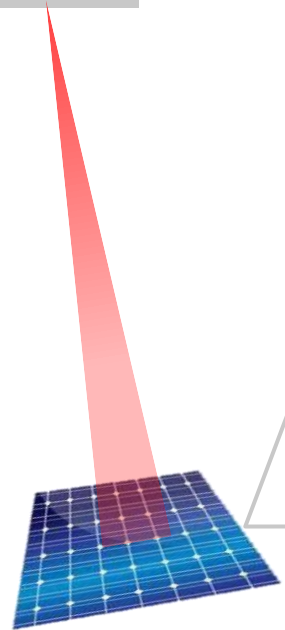
- ・ 位置がずれる
- ・ ビームの強度分布にムラができる

大気圏:
地表から約100km

強度分布と光電変換効率

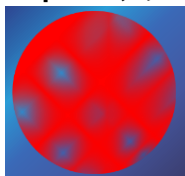
- 高出力の光電変換の際にはセルの直列化が必要であるが、セルごとの光量にばらつきがあると電流制限により光電変換効率が低下
- ビームの乱れ具合を定量的に評価するため、光活用率という指標を導入

レーザ



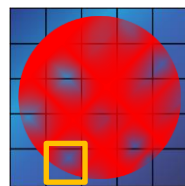
光電変換素子

単セル



ビームがセル内に入っていれば
ビーム形状は不問だが電流値が
大きくなる
→ハイパワーには不向き

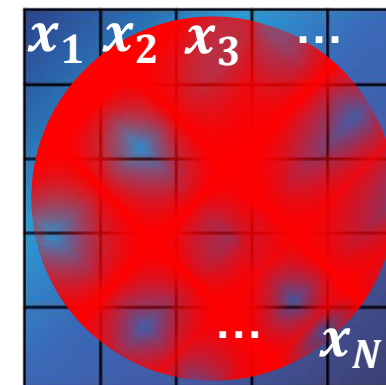
直列セル



ビームが不均一だと、
一番発電量の少ないセルの
電流値で制限される
→ロスが大きい

光活用率：

パネルに照射された光パワーのうち、
光電変換に寄与した光パワーの割合



x_n : n 番目のセルに
照射された光パワー

律速となる光パワー

$$\text{光活用率} = \frac{\min(x_1, x_2, \dots, x_N) \times N}{x_1 + x_2 + x_3 + \dots + x_N}$$

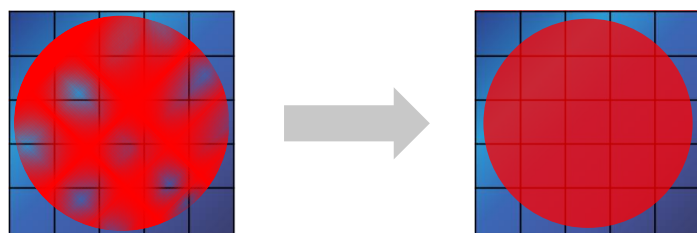
パネルに照射された光パワー

- 研究背景：宇宙太陽光発電
- レーザ無線電力伝送の課題
- 高効率化に向けた検討
 - › ビーム整形
 - › セル接続最適化
 - › ビーム走査
- 宇宙太陽光発電実現に向けたその他取り組み
- まとめ

効率向上に向けて

- 高効率化に向けて様々なアプローチで検討中
- 本講演では3つの方法について紹介する

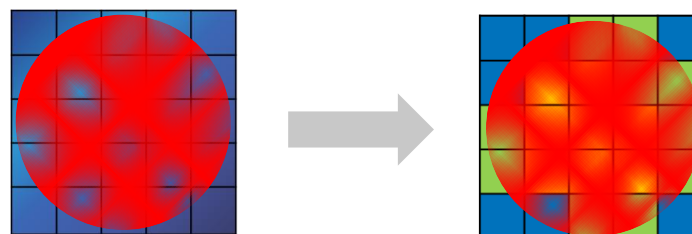
方法1：強度均一ビーム整形



通常のPVパネルにおいても
変換効率が上がるよう、
ビームの強度分布を均一にする

CLEO-PR2024にて発表
We2H-5 "Flat-top Beam Shaping
for Long-distance Optical Wireless
Power Transmission"

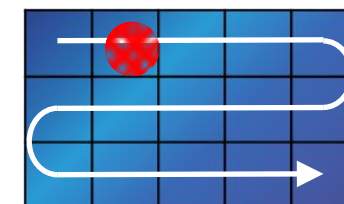
方法2：PVパネルのセル接続最適化



不均一なビームパターンであっても
変換効率が上がるよう
セルの接続方法を最適化する

OWPT2024にて発表
OWPT3-02 "Design of the cell
connection configuration of
photovoltaic panel using an
optimization algorithm"

方法3：ビーム走査



不均一なビームパターンかつ
どのような形のPVパネルであっても
変換効率が上がるよう
PVパネル上をビーム走査する

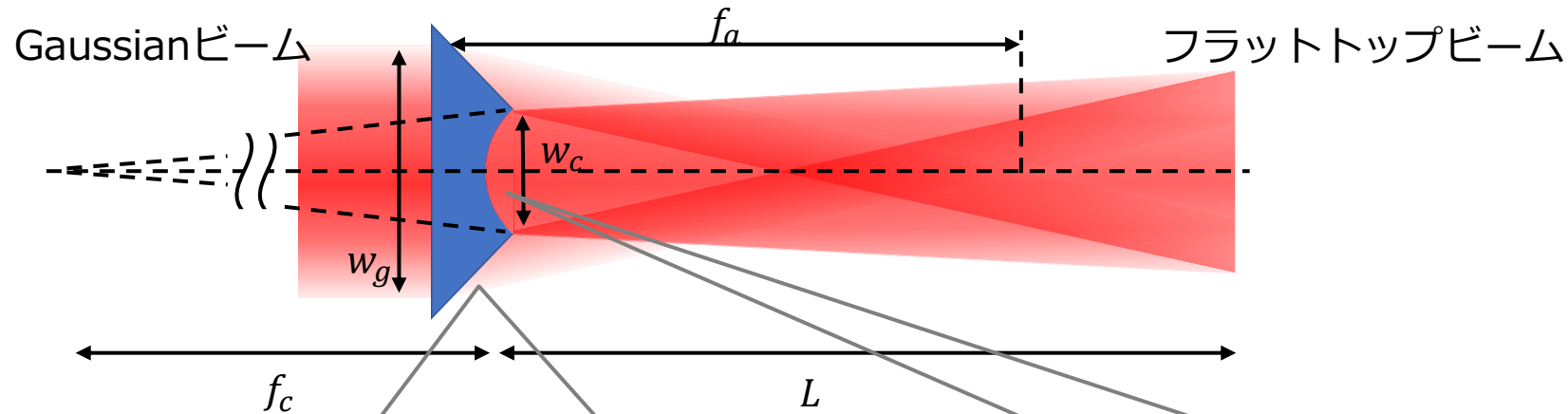
2024年度秋季応用物理学会にて発表
19a-A35-10「光無線給電における
PVパネルのビーム走査による発電量
の向上」

- 研究背景：宇宙太陽光発電
- レーザ無線電力伝送の課題
- 高効率化に向けた検討
 - › ビーム整形
 - › セル接続最適化
 - › ビーム走査
- 宇宙太陽光発電実現に向けたその他取り組み
- まとめ

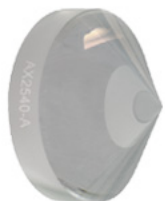
フラットトップビーム整形

パラメータをうまく調整することで リングビームと中心のビームが重なり、
フラットトップビームを整形

提案手法: アキシコンレンズと凹レンズの組み合わせ

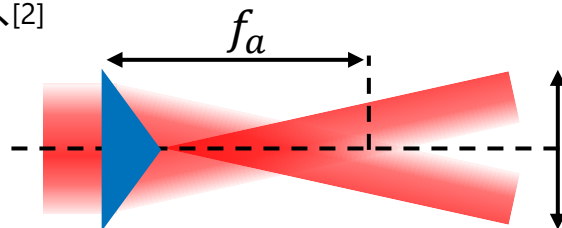


アキシコンレンズ^[2]



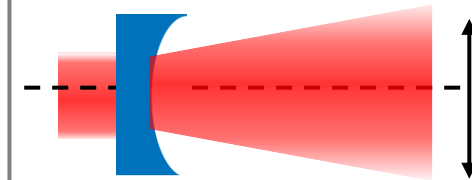
AX2540

アキシコンレンズ



焦点距離 f_a で調整

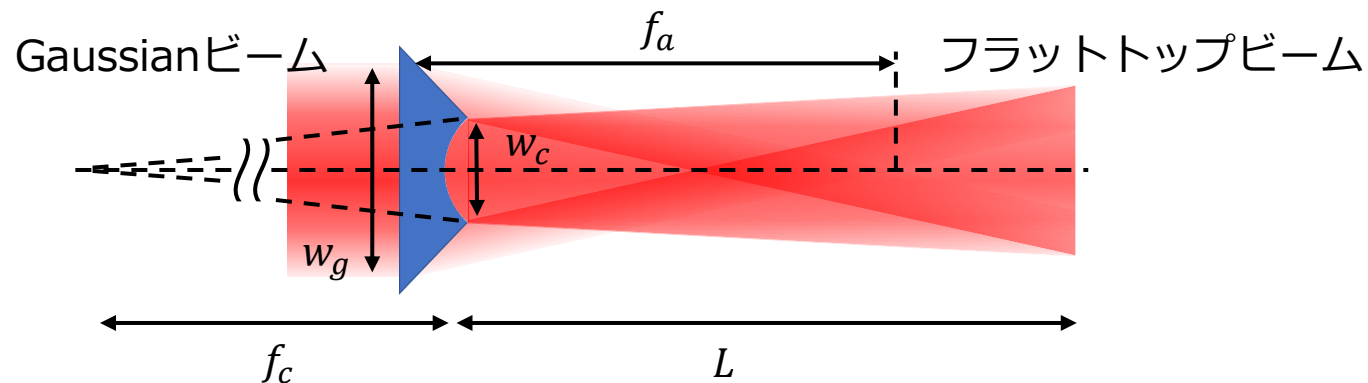
[2] https://www.thorlabs.co.jp/newgrouppage9.cfm?objectgroup_id=4277



凹レンズ

焦点距離 f_c で調整

ビームパターン設計



パラメータ

λ : 1064 nm

w_g : 9.4 mm (full width of $1/e^2$ maximum)

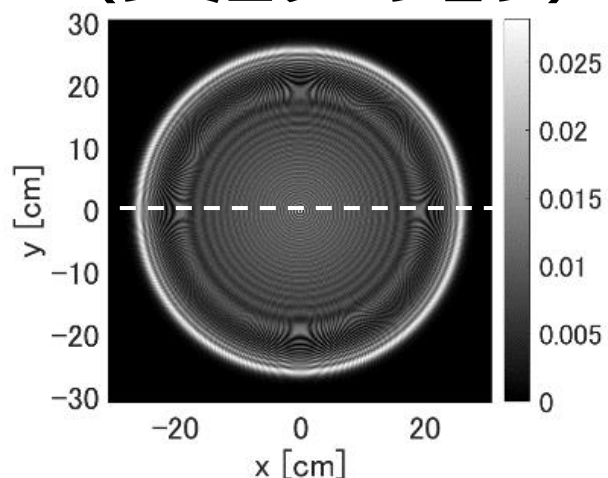
w_c : 5 mm

f_a : 10 m

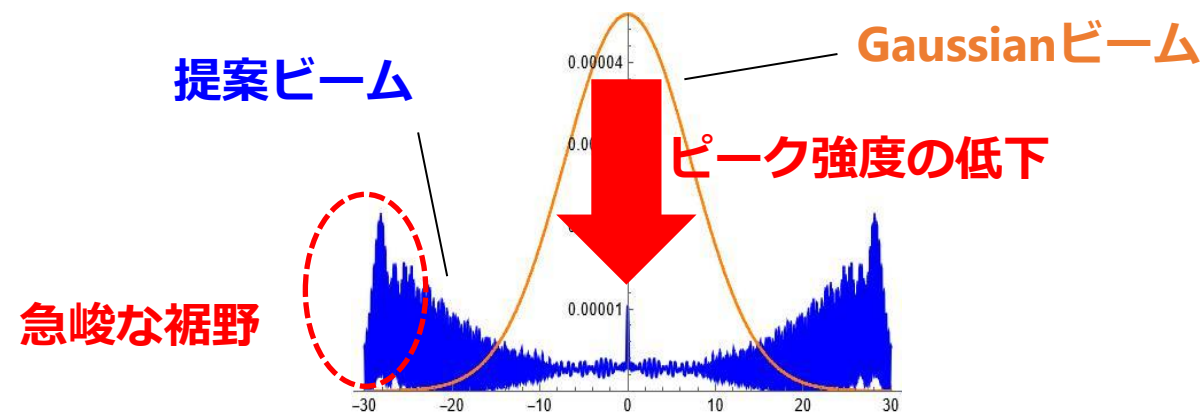
f_b : 8.3 m

L : 100 m

100m伝搬後のビームパターン
(シミュレーション)



クロスセクション
(シミュレーション)



ピークが低く、裾野が急峻なフラットトップビームが得られる

エネルギー伝送実験方法

PVパネル

100 m伝搬

ヒータ

送光系

方向制御ミラー

IRカメラ

PVパネルにビームを照射し
発電を行う
ビームパターンの撮影には
IRカメラを用いる

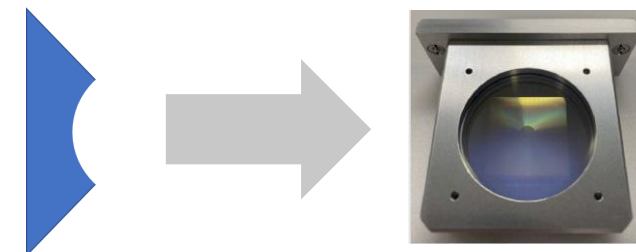
DOE
エキスパンダ
(8倍)
レーザ
波長: 1064 nm
ビーム径: 9.4 mm

レーザビーム



光軸の下にヒータを
配置し、温めることで
人工的に大気擾乱を
再現する

提案したビーム整形は
回折光学素子(DOE)を用いて実装する



実験結果：ビームパターン

提案手法によりフラットなビームが形成され、
Gaussianビームと比較して大気擾乱下でのビーム強度の不均一性を29%改善

100m伝搬後の
ビームパターン

擾乱なし

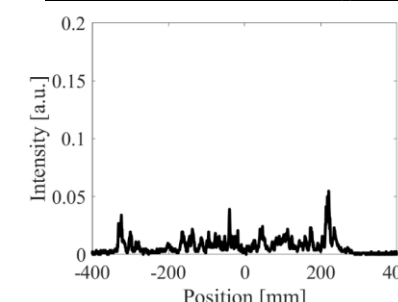
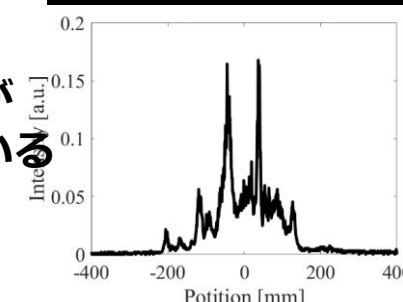
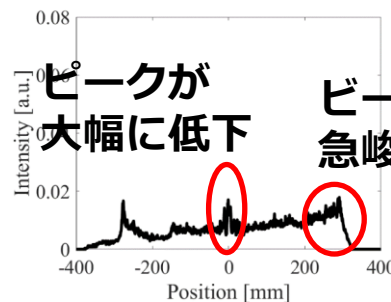
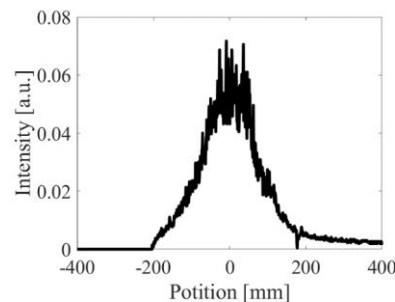
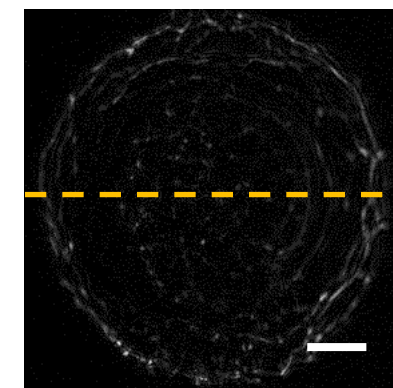
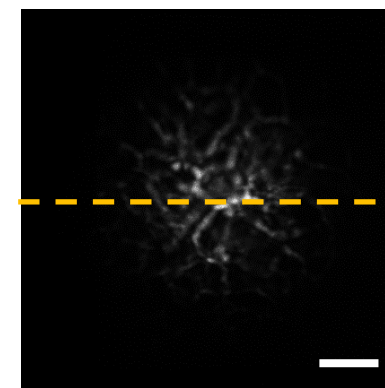
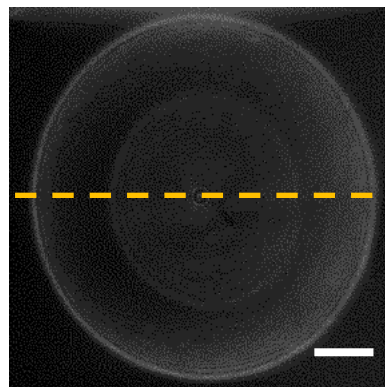
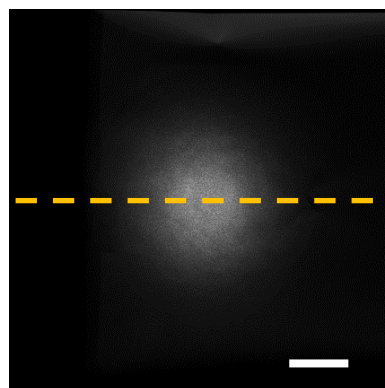
擾乱あり

Gaussianビーム

提案ビーム

Gaussianビーム

提案ビーム



クロスセクション

不均一性：

$$\text{RMS} = \frac{\sqrt{\frac{1}{n} \sum_i^n (I(i) - \bar{I})^2}}{\bar{I}}$$

1.24

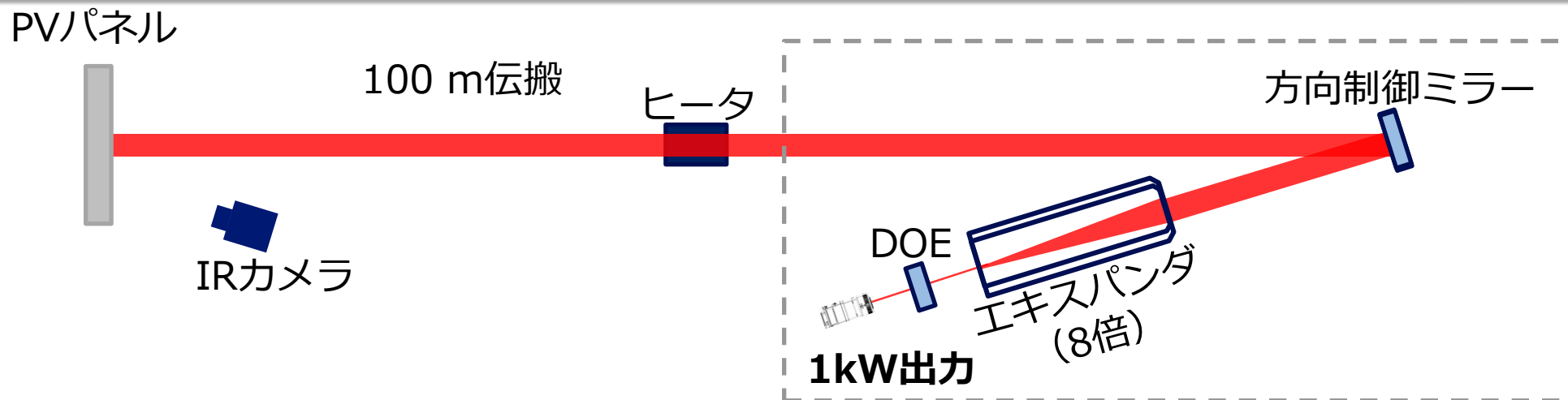
0.475

1.15

0.816

実験結果：発電量

- ビームの強度分布が均一となったことで、発電量が1.5倍に向上
- 擾乱による効率低下分も小さい



1kW送光時の発電量

	擾乱なし時の 発電量[W]	擾乱あり時の 発電量[W]	擾乱による低下
Gaussianビーム	74.8	61.6	28%
提案ビーム	99.3	89.6	10%

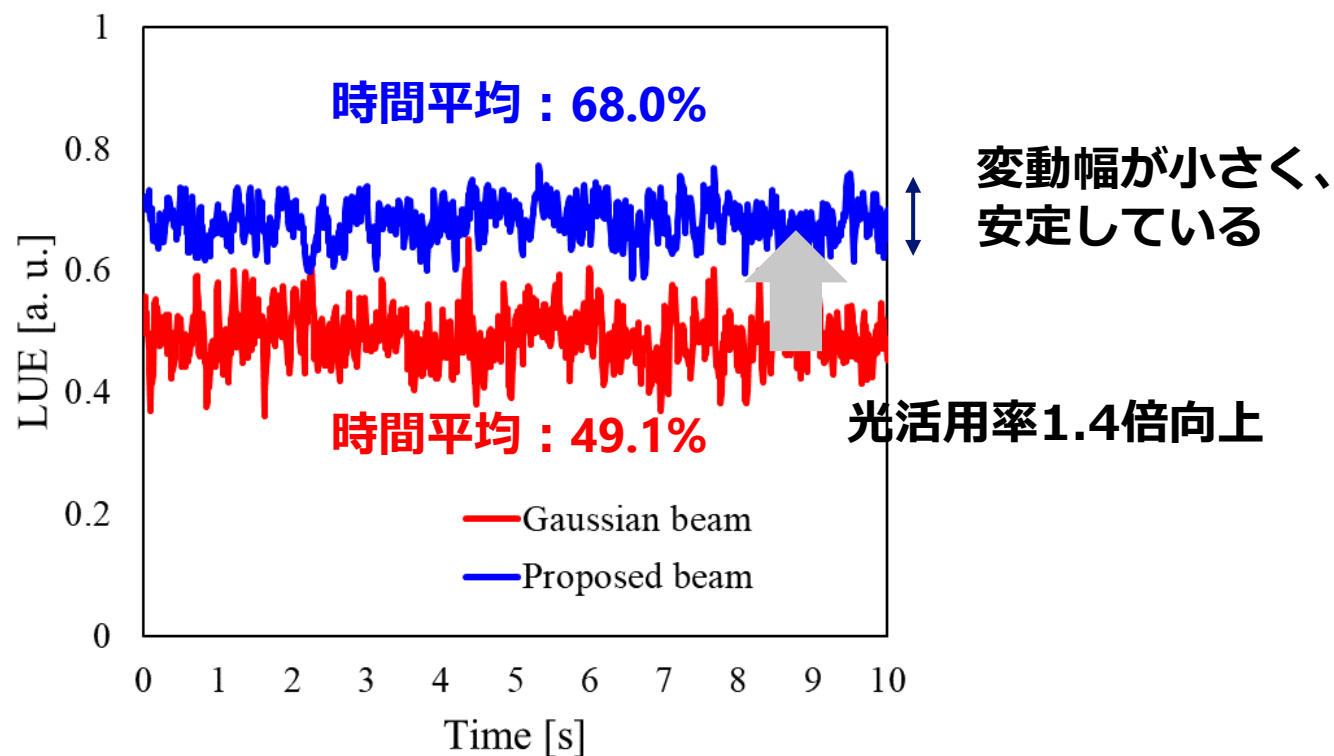
1.5倍

擾乱の影響が小さい

ビームの不均一性の向上

- ビームの均一性を向上し発熱の影響を抑えたことで変換効率が向上
- 本手法の有効性を実証

光活用率の時間変化（擾乱あり）



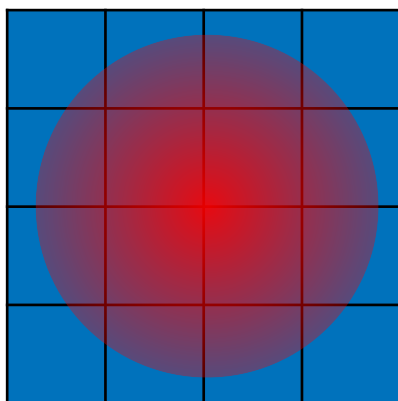
均一化による光活用率の向上に加え、発熱の影響を抑えPVセルの光電変換効率が向上

- 研究背景：宇宙太陽光発電
- レーザ無線電力伝送の課題
- 高効率化に向けた検討
 - › ビーム整形
 - › セル接続最適化
 - › ビーム走査
- 宇宙太陽光発電実現に向けたその他取り組み
- まとめ

セル接続構成の最適化

- 1つの直列で構成されたパネルだと電流制限が大きくなり光活用率が低下する
- 光活用率を高めるよう、セル接続構成を最適化する

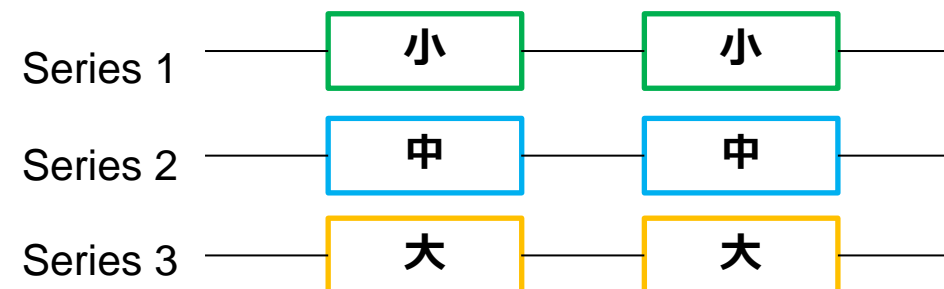
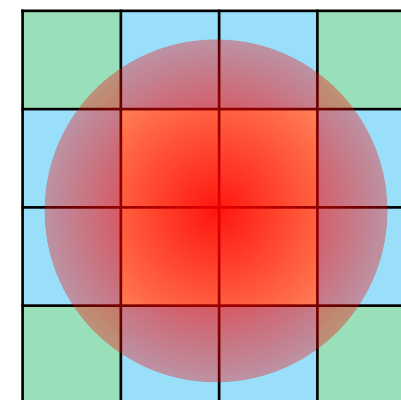
PVパネル



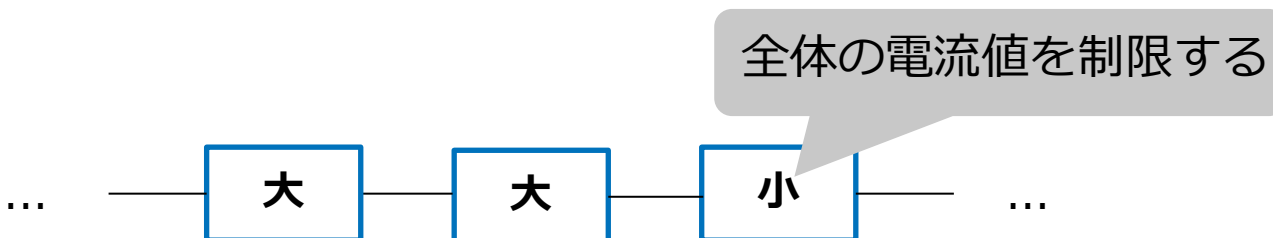
光活用率を高めるため
セル接続構成を最適化する



PVパネル



複数の直列にセルを分ける
→電流制限によるロスを減らせる

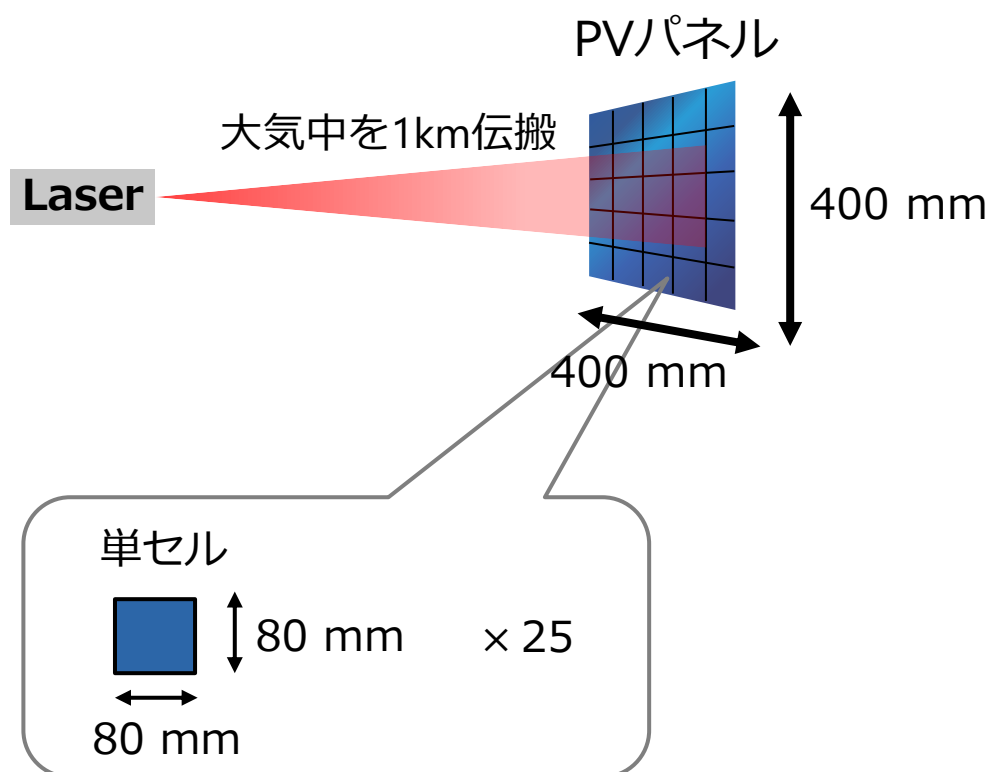


全てのセルが1つの直列に接続されている
→電流制限による損失が大きくなる

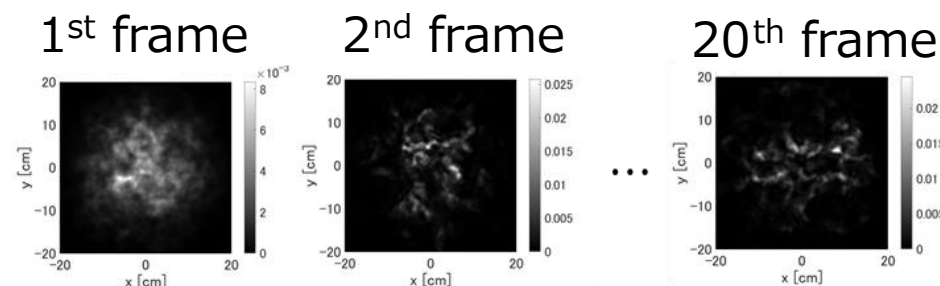
最適化問題設定

- 最適化の効果を検証するため、地上・水平方向1kmの光無線給電を想定する
- 大気中を1km伝搬したビームに対して光活用率を高めるよう最適化問題を解く

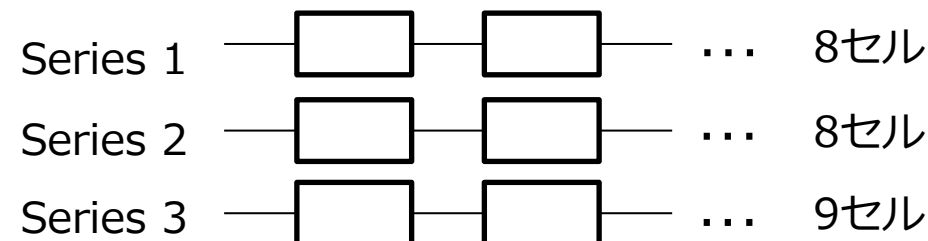
想定シチュエーション：
地上・水平方向1kmの光無線給電



PVに照射するビームパターン
(シミュレーション結果)



20枚のビームパターンに対して光活用率が高くなるよう
25セルを3つの直列に分ける
→組み合わせ最適化問題



定式化を簡単にするため、各直列内の光強度のばらつきを小さくするという問題を解く

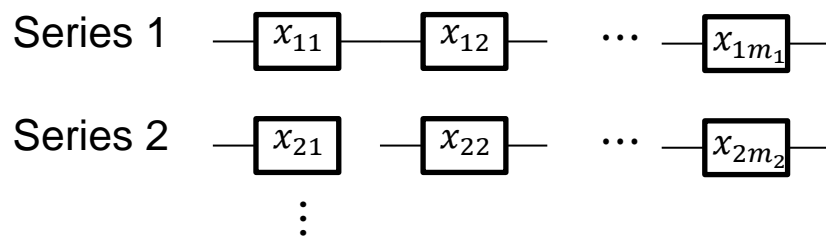
目的関数: セル数で重み付けした各直列内の光強度のばらつきの和の最小化

Series1の光強度のばらつき

$$\min \left(\boxed{m_1} \times \frac{1}{m_1} \sum_{k=1}^{m_1} (x_{1k} - x_{mean1})^2 + m_2 \times \frac{1}{m_2} \sum_{k=1}^{m_2} (x_{2k} - x_{mean2})^2 + \dots \right)$$

Series1内のセル数で重み付け

制約条件: $m_1 + m_2 + \dots \leq n$



n : パネル内の総セル数
 m : 各直列内のセル数
 x : 各セルの光強度
 x_{mean} : 各直列の光強度の平均

光活用率の最大化が最適化の目的であるが、
定式化が難しい

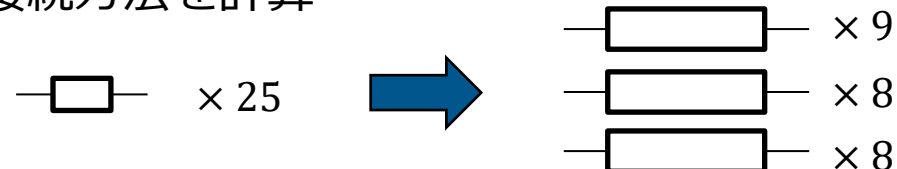
→各直列内の**光強度のばらつきを小さくすること**で
光活用率の向上を狙う

セル接続構成の比較

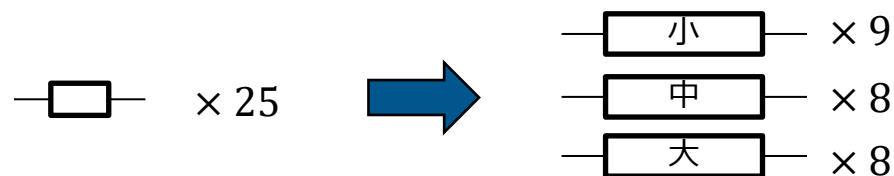
最適化の検証のため、最適化の他に2つのセル接続構成を検討し光活用率を比較する

(1) **最適化**: 最適化アルゴリズムを使用した設計 (提案手法)

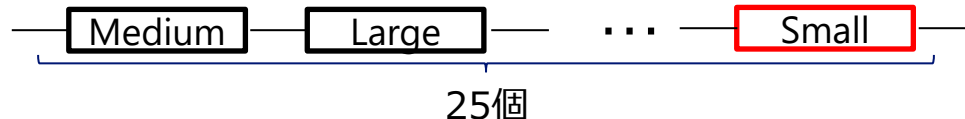
20枚のビームパターン (シミュレーション) に対して光活用率が最大になるようなセル接続方法を計算



(2) **昇順**: 20枚のビームパターンの光強度の平均が小さい順に3つの直列に分ける (直観的に光活用率を最大化できる接続方法)



(3) **全直列**: 25個のセルをすべて直列に接続する

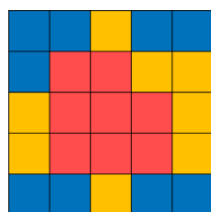


結果：光活用率の向上

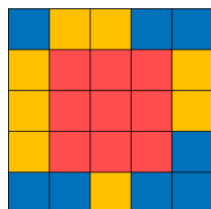
- 提案手法により光活用率が向上。さらに光活用率を高めるため、目的関数を工夫する
- セル数や直列数が増加すると最適化による設計がより効果的になる

セル接続構成

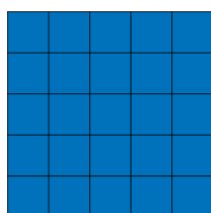
(1) 最適化



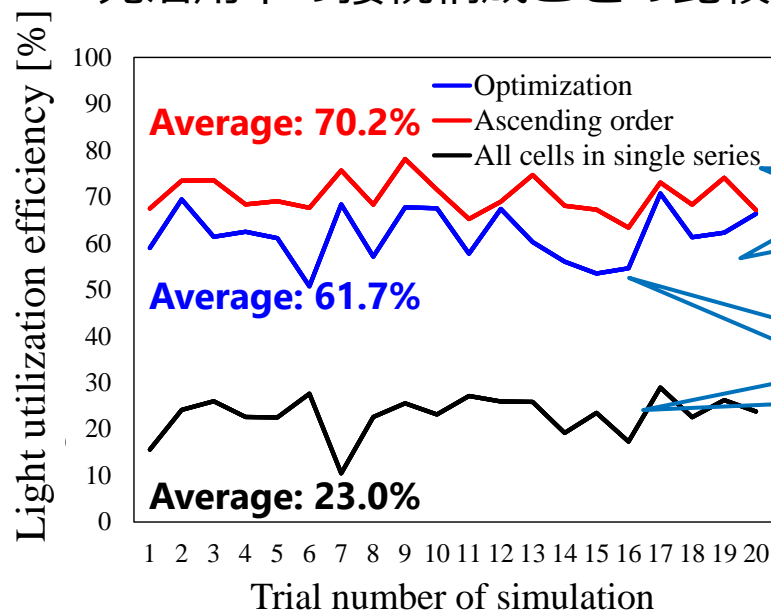
(2) 昇順



(3) 全直列



光活用率の接続構成ごとの比較



昇順による接続方法と最適化による結果はほとんど一致
→最適化はうまく機能している

最適化をしたPVパネルでは光活用率が2.7倍に向上

- ・ 直列内の光強度ばらつきを小さくするような最適化を解いているため、光活用率が完全には最適化されていない
→目的関数を工夫することで光活用率をさらに高めることが可能
- ・ 今後、セル数や直列数が増えてくると直感的にセル接続を設計することが難しくなる
→最適化アルゴリズムによる設計が効果的になる

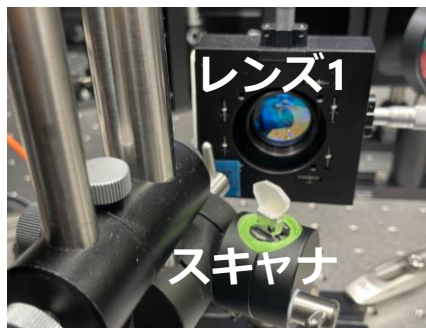
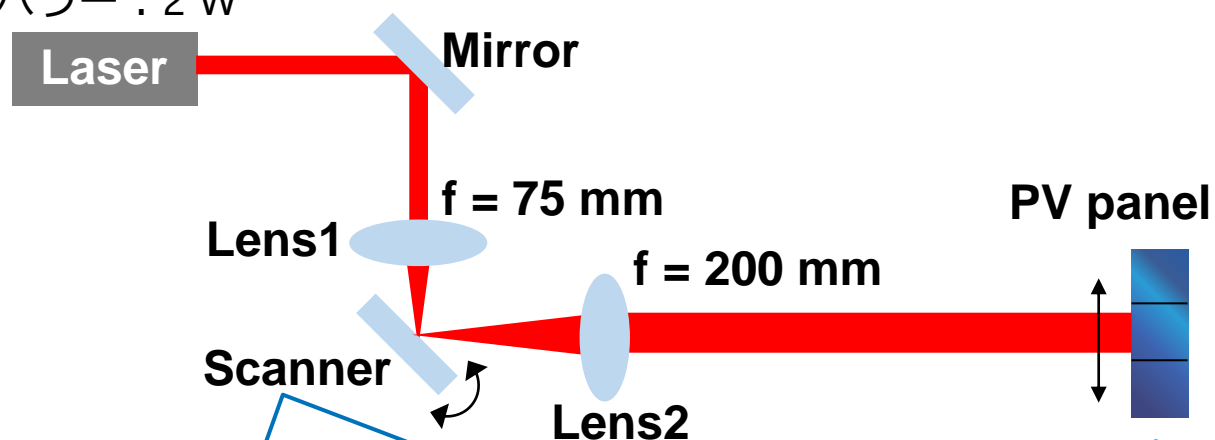
- 研究背景：宇宙太陽光発電
- レーザ無線電力伝送の課題
- 高効率化に向けた検討
 - › ビーム整形
 - › セル接続最適化
 - › ビーム走査
- 宇宙太陽光発電実現に向けたその他取り組み
- まとめ

ビーム走査実験系

- 3つのセルを直列化したPVパネル上をビーム走査する
- 各セルにコンデンサを並列に接続することで、電流制限を受けずに発電を行うことが可能

波長 : 1064 nm
パワー : 2 W

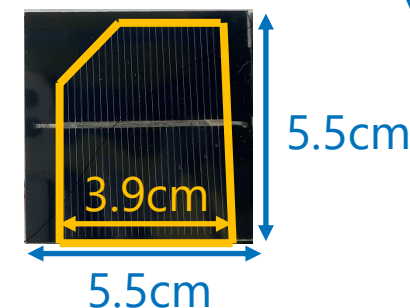
実験系



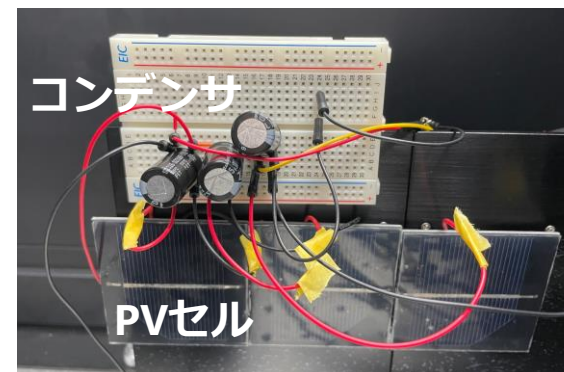
走査条件 :
走査角 : 6度
走査周波数 : 300Hz

- ・ 3枚のセルを直列に接続しパネル化
- ・ 各セルに1m Fのコンデンサを並列に接続
- ・ パネル後段には電子負荷を接続し、各電圧における電流値を測定して発電特性を取得

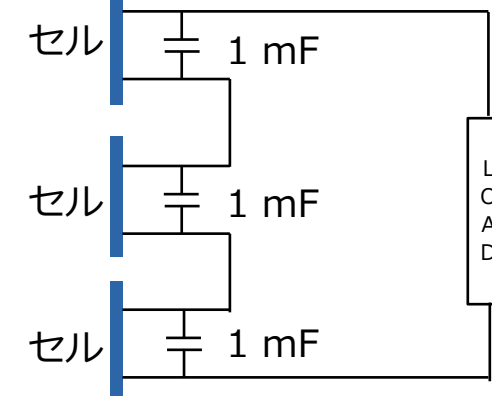
セル



PVパネル

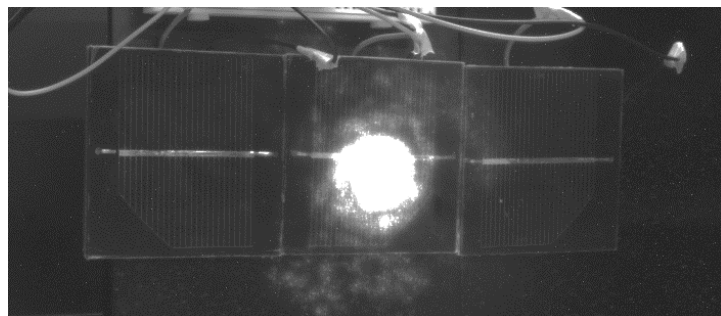


回路図



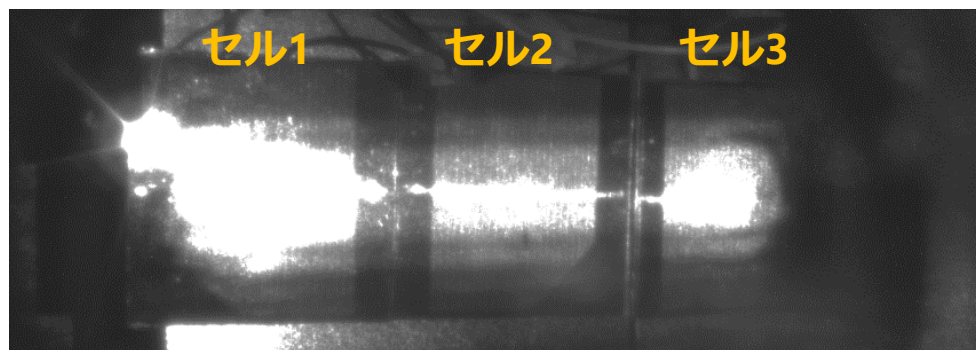
ビーム走査幅や走査周波数を調整

ビーム走査なしの時



PVセルに収まるようビーム径を調整

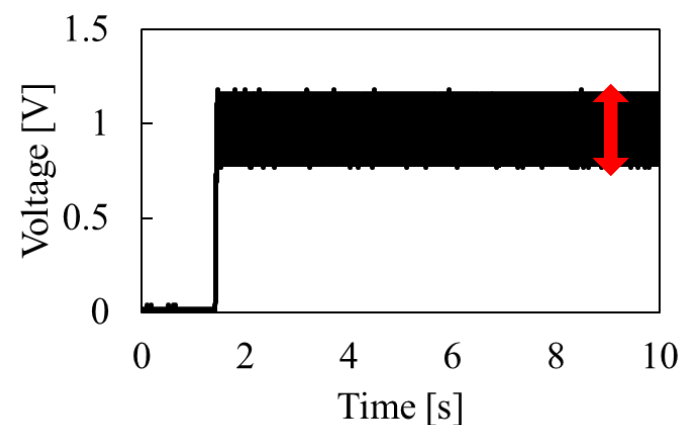
ビーム走査時



ビームの中心が両端のセルの中心に到達するよう
ビーム走査幅を調整

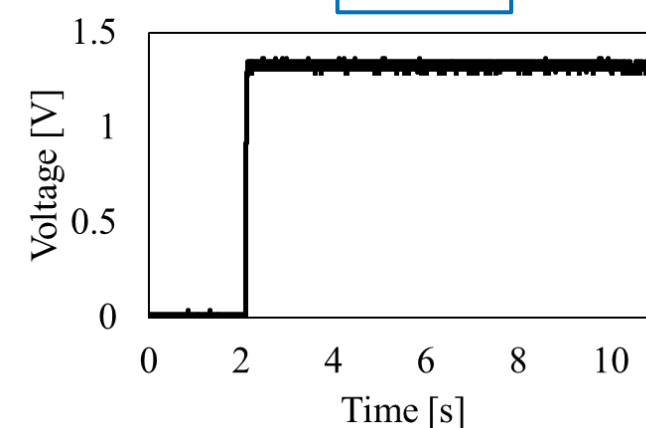
走査周波数とパネル電圧

30Hz



コンデンサ容量が小さく、
スキャン速度が足りていない

300Hz



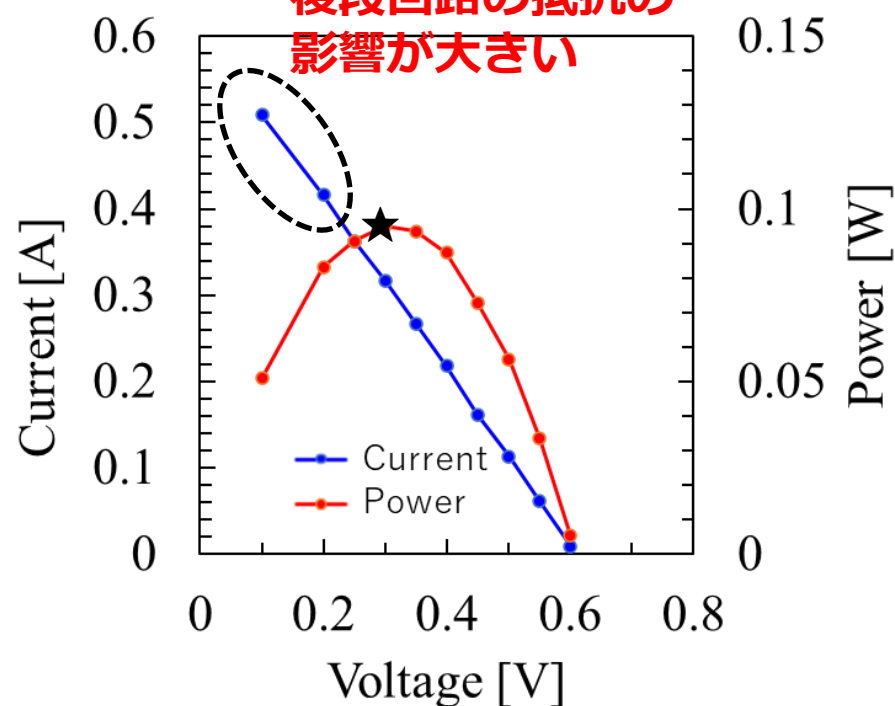
スキャン速度を上げ、
電流制限を受けずに
発電ができている

実験結果：発電量

- PVパネルに2Wを照射し、パネルに電子負荷を接続し、IVカーブを取得する
- 単セル時に比べ、電圧値を増やして電流値を抑えることで発電量を1.5倍に向上した

単セル照射時

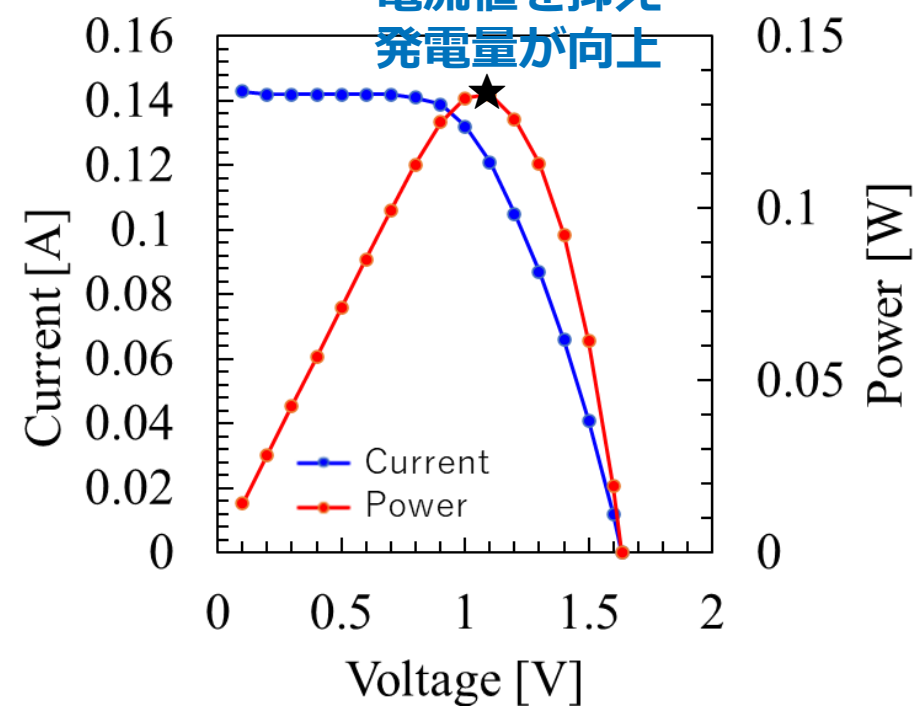
電流値が大きく、
後段回路の抵抗の
影響が大きい



最大電力95.1mW@0.3V

ビーム走査時

電圧を大きくし
電流値を抑え
発電量が向上

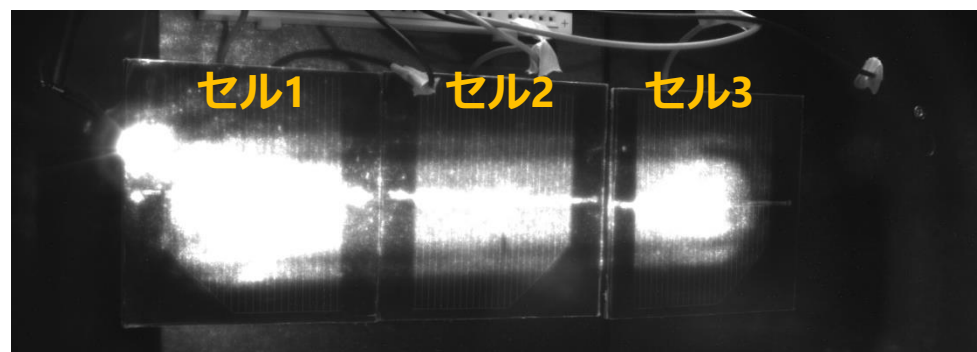


最大電力133.1mW@1.1V

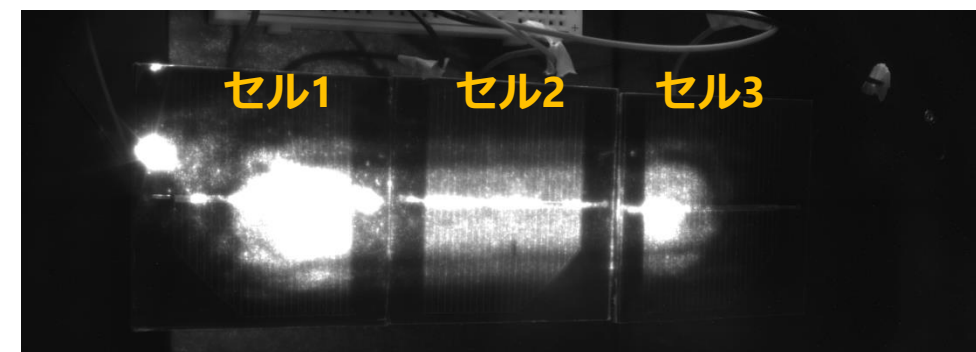
条件

- ビーム走査幅によって、各セルに照射される光量のバランスが変化する
- ビーム走査幅を調整することでさらなる効率向上が見込まれる

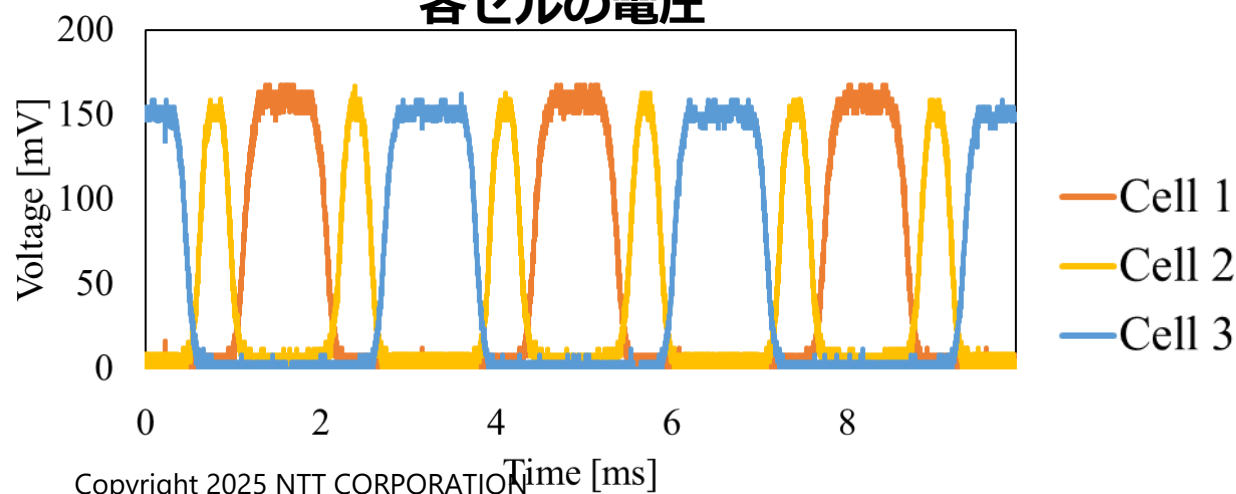
ビーム走査角：6度



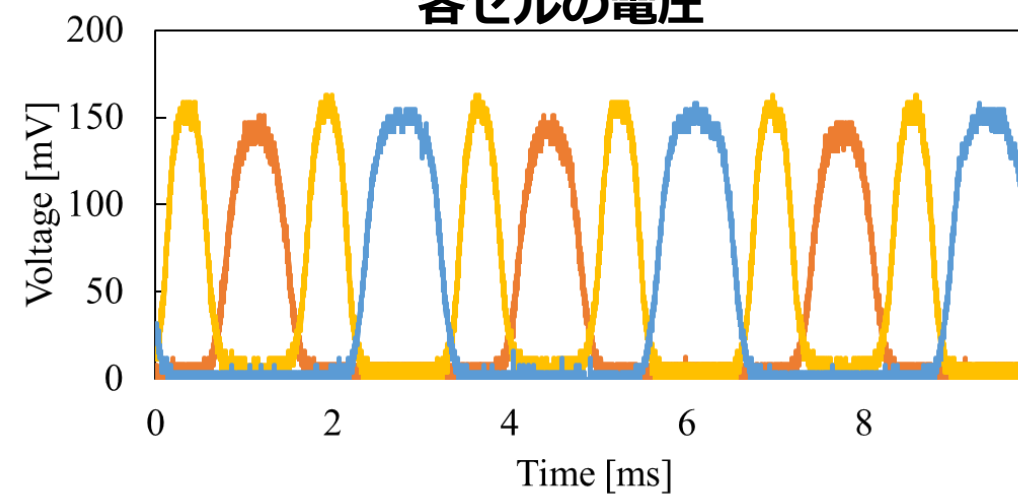
ビーム走査角：5度



各セルの電圧



各セルの電圧



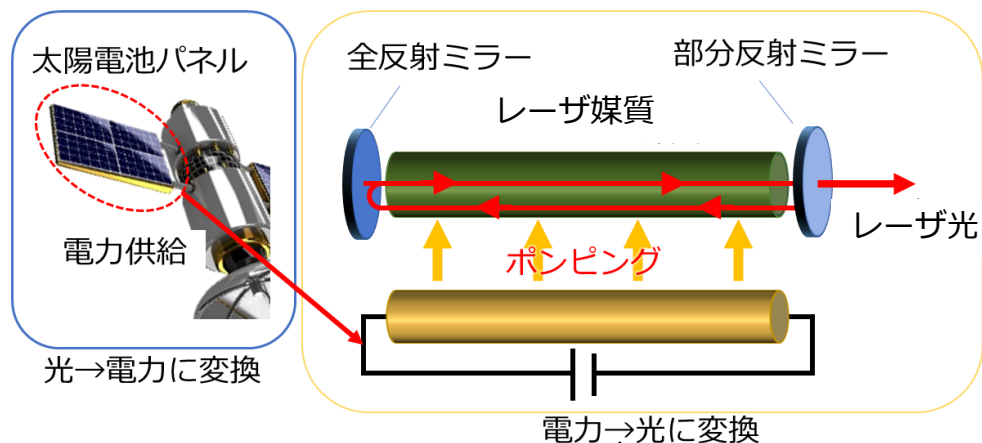
- 研究背景：宇宙太陽光発電
- レーザ無線電力伝送の課題
- 高効率化に向けた検討
 - › ビーム整形
 - › セル接続最適化
 - › ビーム走査
- 宇宙太陽光発電実現に向けたその他取り組み
- まとめ

宇宙太陽光発電への太陽光励起レーザーの応用

- 一般的なレーザー技術では、システムが複雑になる
- 太陽光励起レーザーは太陽光を直接レーザー結晶に照射してレーザーを発振
- エネルギー変換時の発熱の低減やシステムの小型・軽量化が期待

・電力励起レーザーシステム(従来技術)

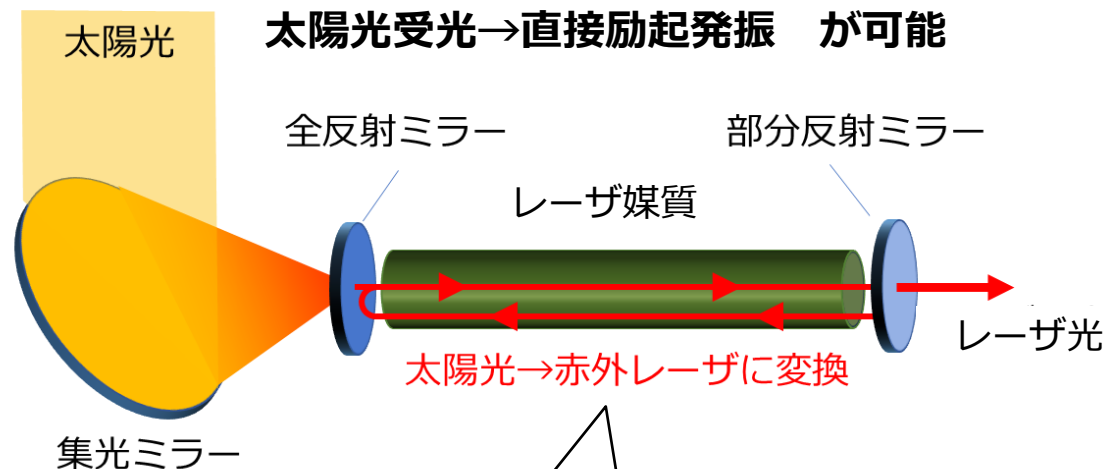
太陽光受光→電力→励起→発振 が必要



システムが大型・複雑

・太陽光励起レーザーシステム

太陽光受光→直接励起発振 が可能



電力変換を介さず、太陽光で直接発振

高強度ビームエネルギー変換技術

- 太陽光励起レーザの効率や大気透過率から1064nmの波長を選択
- 従来のSi系太陽電池ではエネルギー変換効率は約20%
- 波長1064nmのレーザ光を高効率に電力に変換する新たな光電変換素子が必要

地表の放射照度と大気圏上部の放射照度の比[1]

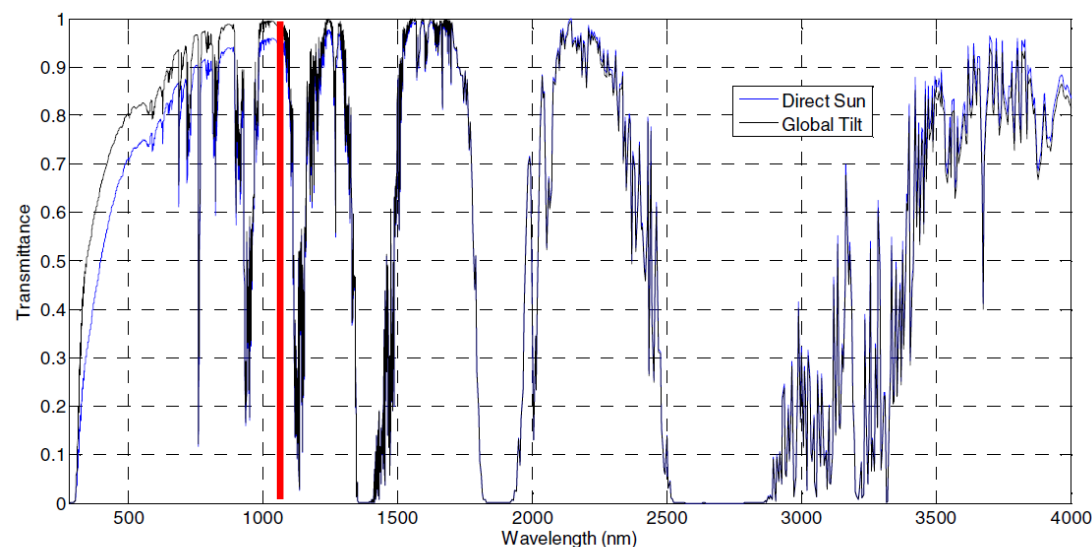
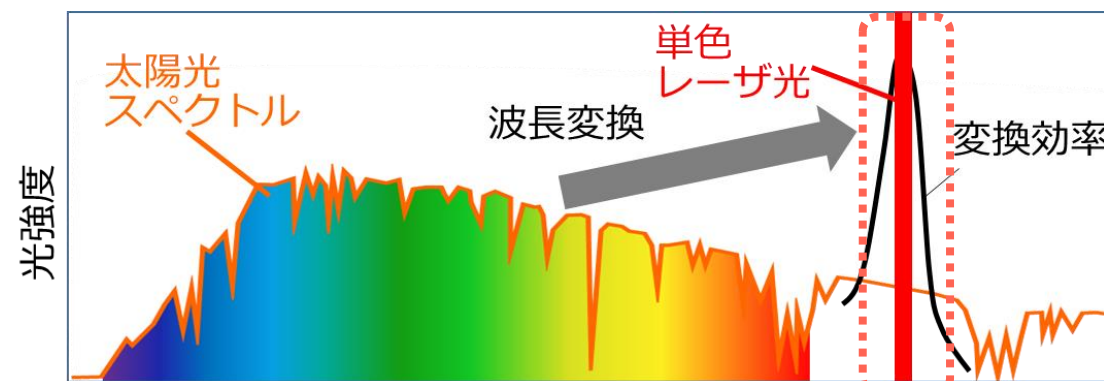


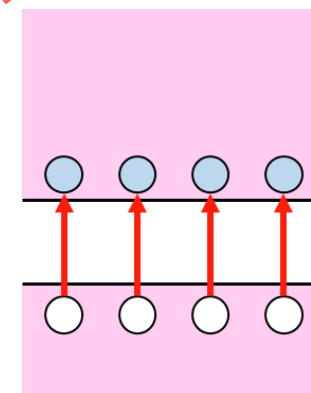
Fig. 3. Normalized atmospheric transmittance for wavelengths from 280 nm to 4000 nm.

1976年米国標準大気

[1]A. Jooshesh, *et. al.*, "Space to ground optical power transmission," IEEE 2012.



波長特化型太陽電池



レーザの単色光に適切な
バンドギャップ材料の選択
により、**エネルギーロス**の
少ない発電が可能

- 研究背景：宇宙太陽光発電
- レーザ無線電力伝送の課題
- 高効率化に向けた検討
 - › ビーム整形
 - › セル接続最適化
 - › ビーム走査
- 宇宙太陽光発電実現に向けたその他取り組み
- まとめ

- ・宇宙太陽光発電などレーザー無線給電の実現に向けて、効率向上が課題。

特にビームの強度分布が光電変換効率を大きく左右し、光活用率を向上させることが重要。

- ・光活用率の向上のため、強度分布を均一化するビーム整形技術やPVパネルのセル接続最適化、PVパネル上のビーム走査について検討。

- ・宇宙太陽光発電実現に向け、太陽光励起レーザーや光電変換素子についても検討を進めている