

## [招待論文]宇宙太陽光発電とレーザーエネルギーネットワーク

○木皿且人<sup>†</sup>、新野正之<sup>‡</sup>

<sup>†</sup> 宇宙航空研究開発機構 〒981-1525 宮城県角田市君萱字小金沢 1

<sup>‡</sup> (財)航空宇宙技術振興財団 〒981-1525 宮城県角田市君萱字小金沢 1

E-mail: <sup>†</sup> kisara.katsuto@jaxa.jp, <sup>‡</sup> niino.masayuki@jaxa.jp

### あらまし

レーザー方式による宇宙太陽光発電のベースであるレーザーエネルギーネットワークについて述べ、同ネットワークの静止軌道/地上間の伝送に関する特性を把握する目的で実施された角田宇宙センターに置くレーザー地上伝送試験の空間伝送特性について報告する。報告の主要な部分は2007年の宇宙科学技術連合講演会にて述べた資料をベースとしている。

**キーワード** L-SSPS、レーザー伝送

SSPS (Space Solar Power System) and Laser Energy NetWark

Katsuto KISARA<sup>†</sup> and Masayuki NIINO<sup>‡</sup>

<sup>†</sup> JAXA 1 Koganezawa, Kimigaya, Kakuda-city Miyagi-Pref. 981-1525 Japan

<sup>‡</sup> JAST 1 Koganezawa, Kimigaya, Kakuda-city Miyagi-Pref. 981-1525 Japan

E-mail: <sup>†</sup> kisara.katsuto@jaxa.jp, <sup>‡</sup> niino.masayuki@jaxa.jp

## 1. 概要

レーザー方式による宇宙太陽光発電 (L-SSPS: Space Solar Power System using Laser) 研究のベースは1995年に当時の科学技術庁航空宇宙技術研究所の研究者が提唱した月面エネルギー基地構想である。その構想に基づく宇宙でのエネルギー利用の方式としてレーザーによるエネルギーネットワーク構想が導き出され、静止軌道上から地上へのエネルギー伝送の部分がクローズアップされたのがレーザー方式による宇宙太陽光発電と言える。概念を図1に示す。

本構想においては宇宙におけるレーザー伝送の一つとして宇宙から地上へのエネルギー伝送の部分があり、地球近傍の大気圏内の伝送は気象や大気の影響が影響するため、200年代の前半にJAXA 角田宇宙センター敷地内で地上における伝送試験を実施した。本報告ではレーザーエネルギーネットワークについて概略するとともに、レーザービームの空間伝送特性試験の結果についても触れる。

## 2. 目的および背景

レーザーを用いた宇宙エネルギー利用システムの研究がJAXAを中心に進められている。太陽光を指向性のあるレーザー光に変換して長距離伝送を行うL-SSPSは、地上向けや月面活動な

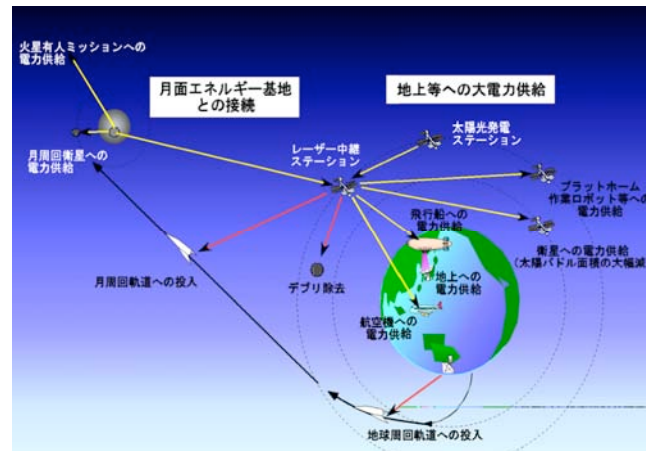


図1 LE-NET 構想

どの宇宙空間における遠隔地向けにエネルギー供給を行うものである。地上伝送の場合、宇宙から伝送されるレーザービームが大気中を通過することから、大気中のレーザー伝送特性は気象条件に依存しシステム稼働率に大きく影響を与えるためその把握は重要である。また、大気中のレーザー伝送特性の把握は、エネルギー供給が絶たれた災害現場や危険地域での一時的な利用等に対してもその利用可能性を検討する上で重要である。

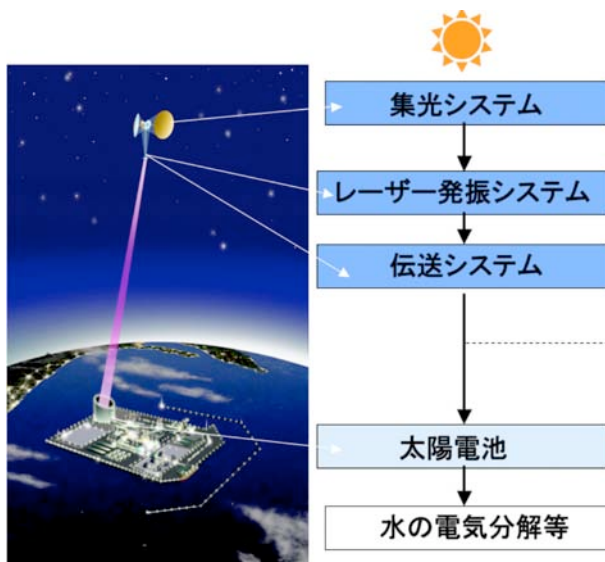


図2 レーザーによるエネルギー伝送の概念

地上での受光レーザー光の利用に際しては、大気中伝搬によりビーム内の強度分布が変化して強度の局在化が発生し、例えば光電変換素子への照射時にその強度によっては損傷等の不具合を引き起こす可能性があり注意が必要となる。従ってどの程度の強度の局在化が起こり、それが気象条件にどのように依存するかを把握することが重要となる。

ビーム進行垂直方向に媒質の温度分布が想定されるような場合（おそらく地面などの熱源の近く）、温度分布は屈折率分布を与え、伝搬によりビームの進路が変化して到達位置に変動を生じる可能性がある。これを補償するトラッキング技術やより大きなレーザー受光面が要求されるため、位置変動の規模とその気象条件依存性を把握しておくことが必要となる。

## 2. 実験

### 2-1 レーザー伝送試験設備

実験は宇宙航空研究開発機構の角田宇宙センター内、レーザー伝送試験設備で実施した（写真1）。図2に設備構成の概略を示す。図中左端の送光小屋からレーザー光を発射し、500m離れた受光小屋で伝送されたレーザー光を受ける構

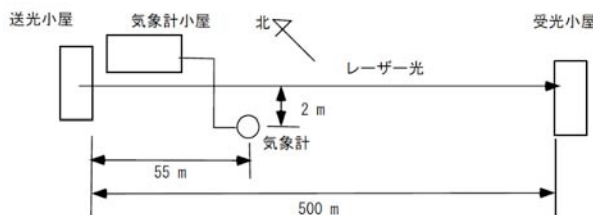


図3 設備構成



写真1 走行小屋より望む 500m 伝送路



写真2 地上でのレーザー実験（受光側より）

成である。付随して各種気象条件を計測・記録する施設も併設されている。送光小屋には最大出力10W、波長1.064  $\mu\text{m}$  のNd:YVO4 (CW) レーザーが設置され、光学系を調整することにより5cm程度までのビーム径にて伝送ビームを受光小屋に向けて送り出すことができる。伝送路は舗装されていない土（道路）・草地の上で、高1.3~2.1mの範囲でほぼ水平方向に設定されている。伝送距離は500m。受光小屋には直径25cmの放物面鏡によりビームを収束させてパワー測定等ができる。光学系が設置されている。これらの基本構成に加えて種々の機器を持ち込むことが可能な設備となっている。

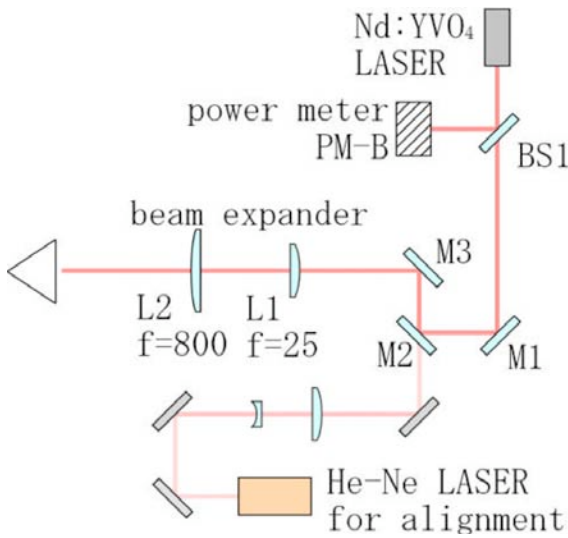
### 2-2 実験内容

前項のレーザー伝送試験設備を利用しいくつかの追加装置と合わせ実験を行った。

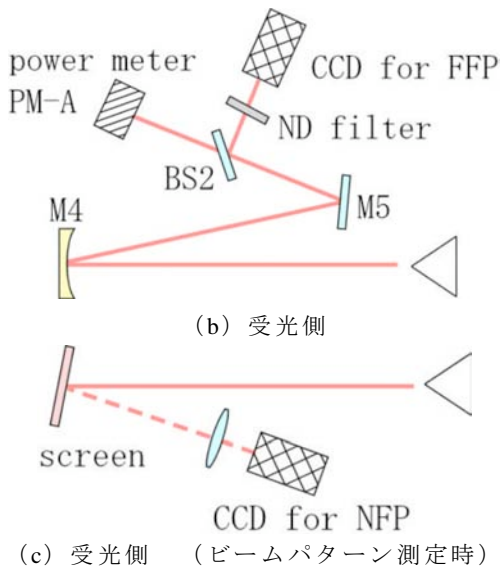
図4に送光光学系の配置図を示す。図中右上のレーザー装置本体から出た直径0.87mmのレーザービームは分岐比が約6:4（反射:透過）の誘電体多層膜コート付のビームスプリッターで分岐され、反射成分はパワーメータ）PM-Bにより送光側のパワーモニターとして測定された。

透過成分は、いくつかのミラーを経て倍率32倍のケプラー式望遠鏡を基本とした拡大光学系によりビーム径を拡大して500m伝送路へ（図中三角印）と送り出される。この拡大光学系の倍率設定は、伝送後のビーム強度分布を近視野像として解析することを目的に決められた。

図4(b)に受光小屋内に設置した受光光学系の配置を示す。BS2 透過成分をパワーメータPM-Aにて受光パワーとして測定した。



(a) 送光側



(b) 受光側

(c) 受光側 (ビームパターン測定時)

図4 送受光光学系

図4(c)は伝送されたビームの形状観測を行う光学系の配置図である。

以上のセットアップにより、各種天候などの気象条件に対する依存性について伝送実験を行い、パワー計測にて伝送効率を、パターンの高速測定にてビーム径と位置変動の高速変化についてのデータをそれぞれ取得した。気象条件として、天候(晴れ、雪、霧)、視程、気温、湿度、気圧、風向、風速、日射、大気ゆらぎ(陽炎に相当)の強さを示す屈折率構造定数(Cn2)を同時観測した。

### 3. 実験結果と検討

#### 3-1 伝送効率

各種気象パラメータの中で、最も依存性が大きかったのが視程であった。図5に晴れ、霧、雪の各

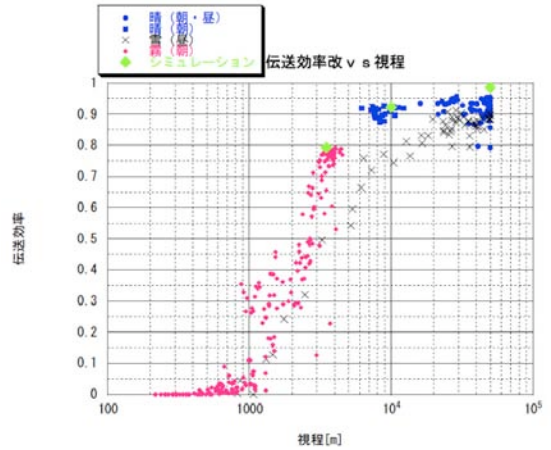


図5 伝送効率の気象条件依存性

天候時の伝送効率の視程依存性を示す。伝送距離500mに対し、視程が10,000m以下になると伝送効率は顕著に低下し、400m以下ではほぼゼロであった。その低下の程度には天候依存性があることもわかる。

快晴時で視程が20,000m以上になると95%程度の伝送効率となるが、80%程度にまで落ち込むときもあり、変動が大きい特徴が見られる。図6に大気揺らぎ依存性を示す。大気揺らぎが大きいときに伝送効率の変動が大きいことがわかる。日射のデータから、晴れていて日射があるときに屈折率構造定数が大きくなることもわかっており、伝送ビーム位置の地上高が1~2m程度と低いことから、日射に起因した大気揺らぎの増大がレーザービーム内での散乱を増大させ、受光光学系視野外にパワーが散逸して伝送効率が低下していることが予想される。図6から、屈折率構造定数がおおむね10<sup>-13</sup>(m<sup>-2/3</sup>)程度以下であれば伝送効率の変動(低下)が見られないことがわかる。

伝送効率の予測について、HITRAN データベースを利用したFascode3PによるPcLnWinソフトウェアを用いて検討した。設定条件は実験条件に合わせ、光路高さ1.5m、地上面の海拔高10m、気圧1006hPa、気温2℃、相対湿度50%、降雨強度0mm/hr、エアロゾルの種類を田園モデルとして、視程3種類に対して計算した結果が図5のグラフ内にプロットされている。いずれもほぼ実験値の上限付近であることがわかる。この計算には、エアロゾルによる散乱効果は考慮されているものの、大気揺らぎによるビーム散逸の効果は考慮されていないので、伝送効率が低下しているデータ点との開きが大気揺らぎ効果であると推察される。



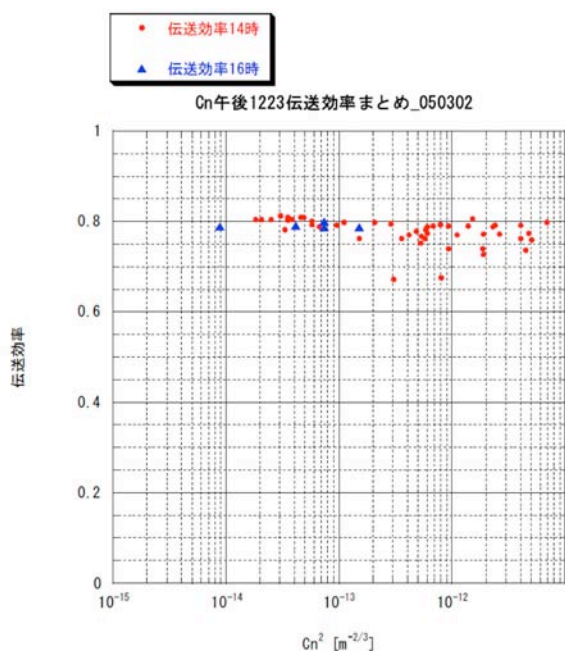


図6 伝送効率の大気揺らぎ依存性

### 3-2 ビーム断面強度分布

高速度カメラで捉えたビームの高速変化の様子からは、ビーム位置の変動（揺らぎ）は夜間では小さく、日射のある昼間では数mm オーダーの大きさであることがわかった。夜間は大気状態が安定していることに起因していると考えられ、大気揺らぎとの相関を見れば明らかになると予想される。

### 4. まとめ

大気中のレーザービーム伝送における伝送効率とビーム特性の気象条件依存性について述べた。伝送効率に関しては、各種気象パラメータの中で、最も依存性が大きかったのが視程であった。伝送距離500mに対し、視程が10km以下になると伝送効率は顕著に低下するとともに、その低下の程度には天候依存性があることがわかった。大気揺らぎが大きいときには伝送効率の変動が大きくそれは日射依存であることがわかった。

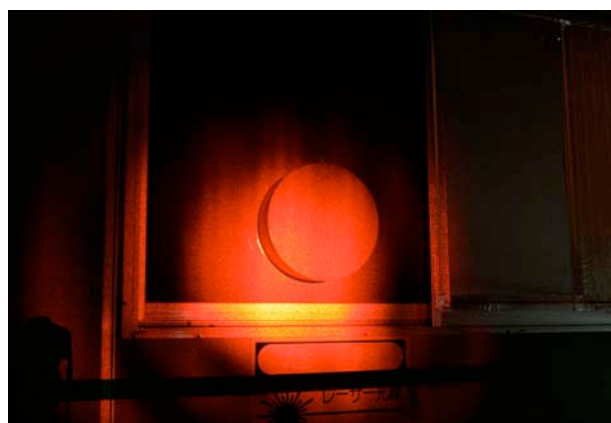
ビーム特性に関しては、ビーム位置とビーム径の変動が、共に大気揺らぎに依存していることがわかった。実験結果から、屈折率構造定数が $3 \times 10^{-14} (m^{-2/3})$ 程度以下であれば、ビーム径7mmに対し、位置ずれがビーム径半分程度、半径はほぼ維持、とすることができ、かつこの領域は $10^{-13} (m^{-2/3})$ 以下であるので伝送効率の大気揺らぎ依存性が小さく、安定したパワー伝送が可能である。このように、本研究では、大気中のレーザー伝送においてビーム経路の大気揺らぎの重要性を明

らかにし、伝送効率やビーム特性に及ぼす定量的影響の評価を可能にした。

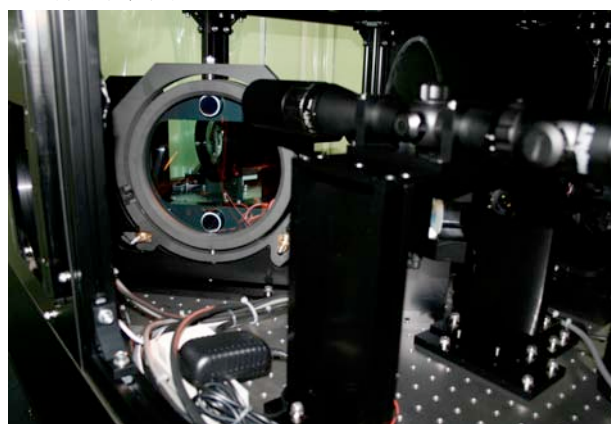
### 5. 付録：高出力レーザー伝送試験設備の整備

本報告で実験を行った JAXA 角田宇宙センターの 500m レーザー実験場に 2007 年 11 月、出力 1kW レベルのレーザー実験が可能な設備を整備し、これまでの実験で用いていた 10W レベルの 100 倍の強度で実験が可能となった。この整備により、大気中の空間伝送特性の把握にレーザー強度をパラメータとしたフィールド試験が可能となった。レーザー伝送に置ける光学装置の熱的特性や光学系の耐久性が長距離伝送に及ぼす効果等についての把握が可能となる。

本装置は現在研究開発中の太陽光励起レーザーとほぼ同じ波長帯の光を出力するファイバーレーザーである。今後送受光系間のビーム制御やトラッキングのためのシステム検証等に利用されるほか、1kW クラスの太陽光励起レーザー実証試験用設備としてもデータを取得する予定である。



付録写真1 受光小屋のレーザー光  
500m 伝送後のレーザー光、ビーム径をの調整中の写真（夜間撮影）



付録写真2 送光光学系の一部