

レーザー宇宙太陽光発電システム

金 邊 忠

Laser Space Solar Power System

Tadashi KANABE

The solar pumped solid state laser is the system which changes sunlight-energy into laser-energy. We are developing a solar pumped solid state laser for Space Solar Power Systems (SSPS) that require over 20% efficiency and a high-power. Laser-SSPS (L-SSPS) supplies solar power in space to the earth by the laser beams at the Giga-Watt level in total. We designed a solar pumped laser system with over 20% laser efficiency in 2007. In this paper, we introduce concept and reference system of L-SSPS, direct pumping solid state laser, laser transmission and photovoltaic conversion as current status and the plan of L-SSPS ground demonstration.

Key words: space solar power system, solar pumped solid state laser, laser space solar power system, high power laser, Cr/Nd : YAG ceramics

エネルギー・環境問題を解決する手段のひとつとして、宇宙太陽光発電システム (SSPS: space solar power systems) が提案されている¹⁻⁷⁾。SSPS とは、宇宙空間で得られる太陽光エネルギーをマイクロ波やレーザーに変換し、地上に伝送して、地上で電力や水素などに変換して利用する電力供給システムである。宇宙空間で太陽光をエネルギー源とし、地上に伝送することにより、クリーンなエネルギーを24時間供給することができる。また、宇宙空間で得られる太陽光エネルギーは、地上の場合と比較すると、季節・昼夜・天候に影響されない。このため、太陽光エネルギーの利用率を比較すると宇宙のほうが約10倍程度有利であり、地上での利用システムに比べて高い効率の発電システムの実現が期待できる。そのため SSPS は、大規模かつ安定供給が可能な電力供給システムとして期待されている。

SSPS は、わが国の政策として2008年5月に制定された宇宙基本法に伴い JAXA (Japan Aerospace Exploration Agency, 独立行政法人宇宙航空開発研究機構) が進める宇宙基本計画 (宇宙開発戦略本部) の9つの重点研究のひとつとして挙げられている。

近年、エネルギー変換システムから地上までの約36,000 km のエネルギー伝送には、太陽光を直接レーザーに変換

できる太陽光励起固体レーザーの利用が期待されている。レーザー SSPS の概念図を図1に示す。宇宙太陽光発電用レーザーの出力の目標値は1基あたり10 MW、100基での出力は1 GW である。伝搬時のレーザー口径は1 m 程度で、地上では100 m 程度の規模でレーザーを受けることを想定している。Laser-SSPS (L-SSPS: レーザー宇宙太陽光発電システム) は太陽光を直接レーザーに変換する方式を想定しているため、集光鏡で太陽光パワーを集光し、レーザー媒質に照射、蓄積した太陽光パワーでレーザーを増幅するシステムである。Microwave-SSPS (M-SSPS) は、電力利用には太陽光-マイクロ波変換効率20%以上が必要であると検討されている⁸⁾。L-SSPS も太陽光-レーザー変換効率 (以下、レーザー効率) 20%以上を目指して開発を行っている。

福井大学は、JAXA との共同研究で、太陽光励起レーザーを用いた宇宙太陽光発電の研究開発を行っている。福井大学では2004年からレーザーを利用した宇宙太陽光発電システムの概念設計を開始し、レーザー効率は21.0%を見込み、システムの実現の可能性を示している⁹⁻¹¹⁾。

本論文は、レーザー宇宙太陽光発電システムを概説して、その要素である太陽光励起固体レーザーと、宇宙か

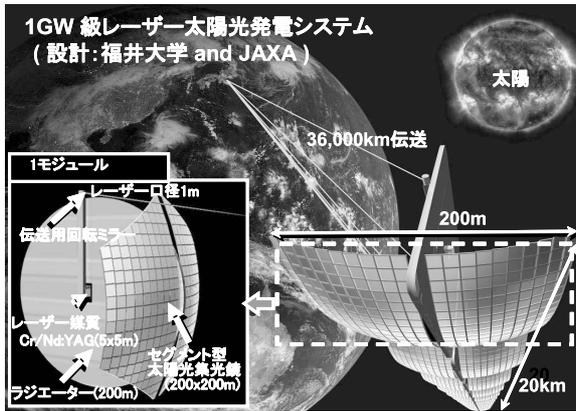


図1 1ギガワット級レーザー宇宙太陽光発電システムの概念図。

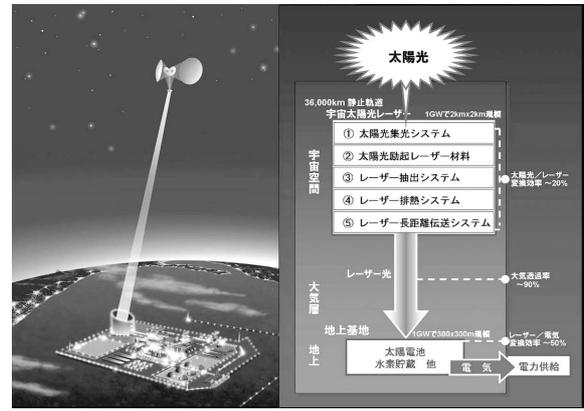


図2 レーザー宇宙太陽光発電システムの構成。

らのエネルギー伝送，レーザー電気変換について開発や動向を報告する。

1. 宇宙太陽光発電システム SSPS

1.1 宇宙太陽光発電構想

宇宙太陽光発電構想は1968年に米国のピーター・グレーザ (Peter Grazer) 博士により提案された。その後、1970年代の約10年間、米国エネルギー省 (DOE: United States Department of Energy) と米国航空宇宙局 (NASA: National Aeronautics and Space Administration) は、宇宙太陽光発電衛星 (SPS: solar power satellite) の本格的な研究開発を実施した。この間に発表された代表的なシステムが1979年型NASA&DOEリファレンスシステムであり、静止軌道に5 km×10 kmの巨大な太陽電池パネルを展開し、発電した電力をマイクロ波に変換して地上に送電する構想で、SSPS 1基につき5 GWの電力を供給できるものである。このリファレンスシステムは、現在最大の宇宙構築物である国際宇宙ステーション (ISS, 約100 mの大きさ) と比較してもはるかに大きい。この構築のために輸送用超大型ロケットも、新規に開発することが考えられた。リファレンスシステムはあまりにも巨大なシステムを検討の対象としたため、効率面から発電コストが見合わず、技術的、社会的な飛躍が大きく、まだその時機ではないと判断され、検討ならびに計画は中止された。

米国での研究が中断した1980年代には、わが国でSSPSの構想に注目した研究者らの観測ロケットによる無線送電技術の宇宙実験¹²⁾や、早期の実現をめざした実証システムの設計研究¹³⁾が行われた。1980年代の終わりごろからは、人類社会の重要な課題である地球環境問題が全世界的に認識されるようになり、これを解決するための有力な選択肢として、SSPSを現実のエネルギーシステムとして見直そうという機運が高まってきた。1990年以降、米国、

日本、欧州でさまざまなタイプのSSPSが設計研究されている。

1.2 レーザー方式による宇宙太陽光発電システム (レーザー宇宙太陽光発電システム)

地上へのエネルギー供給を想定したL-SSPSの機能は、静止軌道上 (高度3,600 km) で太陽光を集めて連続波のレーザー光に変換して地上へ向けて送り出し、受光基地にて電力供給を行うことである。受光基地では、光電変換により得た電力をそのまま系統電力網に接続するか、電気分解による水素貯蔵を行うことが考えられている。レーザー宇宙太陽光発電システムの構成を図2に示す。

太陽光をレーザーに変換する方法は、太陽光を太陽光発電により一度電力に変換した後、LD (laser diode) 励起によりレーザーに変換する間接方式と、太陽光を励起光源として直接レーザー変換する直接方式とがある。直接方式は間接方式と比較して、電気に変換する過程を省くことができ、衛星システムの軽量化・簡素化が期待できることから、L-SSPSのレーザーモジュールは、直接方式である太陽光励起固体レーザーを第一候補として選択している。

レーザー媒質材料は太陽光に対して広い吸収帯域を有し、大気透過率の高い1.06 μmの波長で発振するNd/Cr:YAG (Nd³⁺, Cr³⁺を共添加したYAG) を第一候補として選択している。また、レーザー媒質は単結晶材料が一般的だが、Nd/Cr:YAGは太陽光からレーザーへの変換効率を高くするためにCrを高濃度で添加する必要があり、高濃度化が可能なセラミック材料を採用している。

JAXAを中心とする検討により、L-SSPSのリファレンスモデルや福井大の設計が提案されている。福井大で検討し設計したL-SSPSの概念図を図1に示した。全体で1GWのエネルギー伝送を行うべく、出力10 MWの単機L-SSPSモジュールを100機並べる全体構成である。L-SSPSの1モジュールには、太陽光を集める太陽光集光系、太陽光を

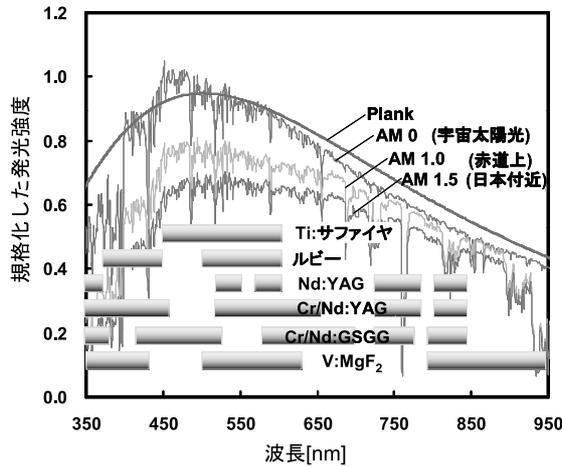


図3 宇宙と地上での太陽光の波長に対する発光強度とレーザー媒質の吸収領域。

レーザー光に変換する太陽光励起レーザーモジュール，地上まで高精度・高効率送光を行う伝送光学系，システム内で発生する熱を宇宙空間に排出するラジエーターにより構成される．1モジュールの大きさは200 m×200 m程度である．それぞれ複数直列連結した構造となっている．なお，基本構成は，レーザー波長1.06 μm，レーザー出力1 GW (10 MW (基本モジュール)×100機)，総重量5,000トン (50トン (基本モジュール)×100機)を想定している．地上へのレーザー伝送は，大気透過の気象条件の影響を考慮して，晴天な複数地上サイトへのマルチ伝送を想定している．

1.3 太陽光の発光，レーザーの吸収・遷移効率とレーザー総合効率

レーザー媒質はYAG，ルビー，サファイア，アレキサンドライト等の固体，テルリウム等のガス，ヨウ素等の液体が提案されている．宇宙と地上での太陽光の波長に対する発光強度とレーザー媒質の吸収領域を図3に示す^{14,15)}．ここで，AMはAir massの略号であり，数値は太陽光に対する観測点の光入射角もしくは大気を実効的に通過した長さに依存したパラメータを示す．AM0は，静止軌道上の太陽光のエネルギー密度スペクトルである．AM1.0は，地上に対して垂直に入射した場合の値で，赤道上を示す．AM1.5は，地上に対して42度で入射した場合の値で，米国全土に対する太陽光の平均入射角度である．AM0に対してAM1.5は大気吸収によって7割程度に減衰している．

レーザーの活性イオンは，Nd³⁺，Cr³⁺，Cr⁴⁺，Yb³⁺，Ti³⁺，Er³⁺，Co³⁺，Tm³⁺，V³⁺等があり，ホスト材料は結晶とガラス等がある．適切な活性イオンを選定することで，多波長な太陽光を効率よく吸収，遷移し，大気吸収の少ない波長で発振することができる．図4に発振波長に対

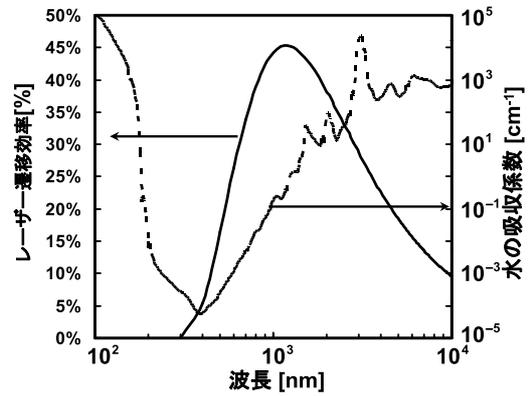


図4 発振波長に対するレーザー遷移効率と水の吸収係数。

する遷移効率と水の吸収係数を示す¹⁶⁾．レーザー媒質内の量子的な遷移効率は式(1)で求められる．レーザー媒質への照射スペクトルの有効波長範囲は，レーザー媒質のソラリゼーション防止の観点から，短波長領域は発振波長350 nmからレーザーとしている．

$$\eta_{\text{trans}} = \frac{\int_{350}^{\lambda_L} \frac{\lambda}{\lambda_L} \cdot I_{\text{sun}}(\lambda) d\lambda}{\int_0^{\infty} I_{\text{sun}}(\lambda) d\lambda} \quad (1)$$

ここで， λ_L はレーザー発振波長， λ は励起波長， I_{sun} は太陽光強度である．レーザー媒質は励起光のうち発振波長より短い波長のみ吸収するため，遷移効率は1.15 μmでピークを迎え，水の吸収も $10^{-2} \sim 10^{-1} \text{ cm}^{-1}$ と低い．水の吸収は1.15 μmより短波長側で低い値をとるが，遷移効率が低くなるため，1.15 μmより高い効率は見えない．大気吸収では，支配的となる水のみを考慮したが，より精度の高い設計では窒素や酸素の吸収も考慮する必要がある．

最もエネルギー変換効率が高くなる発振波長は1.2 μmであり，レーザーの遷移効率は45%が望める．これは，発振波長が1.2 μm以下だと太陽光のエネルギーの利用率が悪くなり，1.2 μm以上だと発振波長と励起波長の差による量子欠損が増加するためである．1.15 μmに近い発振波長をもつものはNd³⁺，Yb³⁺，V²⁺がある．Yb³⁺は準三準位系であるため，レーザー動作させるには零度以下への冷却が必要であり，高温動作を想定するL-SSPSには適さない．以上の検討より，活性イオンはNd³⁺，V²⁺が優位性を示した．現在，最も高い効率が期待できるレーザー媒質として，可視光の吸収が大きいCrを共ドープしたCr/Nd:YAGがある．Cr/Nd:YAGは吸収バンドが350~900 nmにあるため，吸収遷移効率は最大36.2%を見込めた．

レーザー総合効率は式(2)で表される．

$$\eta_{\text{laser}} = \eta_{\text{collect}} \cdot \eta_{\text{abs}} \cdot \eta_{\text{trans}} \cdot \eta_{\text{q}} \cdot \eta_{\text{ext}} \quad (2)$$

表1 レーザー宇宙太陽光発電システムの概念設計で得られたレーザー効率.

集光効率	η_{collect}	92.3%
吸収効率	η_{abs}	88.7%
遷移効率	η_{trans}	36.2%
量子損失	η_q	88.8%
抽出効率	η_{ext}	80.0%
レーザー効率	η_{laser}	21.0%

ここで、 η_{collect} は集光効率、 η_{abs} は吸収効率、 η_{trans} は遷移効率、 η_{ext} はレーザー抽出効率、 η_q は量子欠損以外のレーザー媒質の損失である。

表1に、レーザー宇宙太陽光発電システムの概念設計で得られたレーザー効率を示す。集光効率は、セグメント型平面集光鏡の構成で92.3%が得られることが計算されている。吸収効率は88.7%、遷移効率は36.2%、増幅器は高温動作条件下で抽出効率は80%以上が期待でき、以上の検討より、概念設計でのレーザー総合効率は21.0%を達成できた。Cr/Nd:YAGをベースとした概念設計で、SSPSに必要なレーザー効率20%を上回る設計ができた。福井大の太陽光励起固体レーザーの設計によって、L-SSPSの可能性を示した⁹⁻¹¹⁾。

2. 太陽光励起レーザー

宇宙でのエネルギー変換を掌る太陽光励起レーザーのエネルギー利用の検討は、当初1960年代から米国ではNASA^{1,4,5)}からはじまり、国立再生可能エネルギー研究所(NREL)¹⁷⁾、アラバマ大⁷⁾で検討が行われ、ヨーロッパでは欧州宇宙機関(ESA)¹⁸⁾、日本では、JAXA^{3,19)}で行われている。

2.1 太陽光励起レーザーの海外の開発状況

世界初の太陽光励起レーザー発振は、1965年、米国のC. G. Youngによって行われた²⁾。レーザー材料はNd:Glassロッドで、レーザー出力は1.0Wであった。このシステムは61cmのパラボラ鏡で軸方向励起している。同年にCr/Nd:YAG結晶が開発され、太陽光の発光スペクトルとCr³⁺の吸収波長のマッチングがよいため期待された。しかし1 μ m帯に吸収をもつCr⁴⁺が混入してしまい、Nd³⁺の放射光を吸収してしまうため有効に動作しなかった²⁰⁾。その後、Cr/Nd:YAGに関する数々の報告があったが、有効に動作することはなかった²¹⁻²³⁾。NASAでは1987年に宇宙太陽光励起レーザーでの利用を目的とした太陽光模擬ランプ励起の発振実験がNd:YAG, Nd:YLF, Cr/Nd:GSGGを用いて行われた²⁴⁾。3つの媒質での最大レーザー出力はCr/Nd:GSGGで1.5Wであった。

1988年、イスラエルのM. Wekslerらが3.5mのパラボ

ラ鏡で軸方向励起Nd:YAGを用い、60Wのレーザー発振に成功している²⁵⁾。1993年にはV. Krupkinらによって、現在でも世界最高のレーザー出力500Wを、非結像の集光系照射のNd:YAGロッドを用いて達成した²⁶⁾。この装置でのレーザー効率は1%に満たなかった。近年では2003年、M. LandoらによりNd:YAGでレーザー出力45W、レーザー効率1.79%のシステムが開発された²⁷⁾。2008年にはウズベキスタンで30メートル級の集光鏡が開発され、1メガワット級の太陽光励起レーザーを目指して開発を始めている^{28,29)}。

固体レーザー以外のレーザー方式では、1980年代に太陽光励起の半導体レーザーも検討されたが、熱の問題が解決できず、開発は行われていない。2001年にはテルリウムガスを用いた太陽光励起のレーザー増幅器の開発が行われ、1.42倍のゲインを確認している³⁰⁾。また、太陽光励起ヨウ素レーザーの開発も進められている³¹⁾。

海外での太陽光励起レーザーの開発は数百Wの高いレーザー出力は得られているが、レーザー効率は数%程度で、宇宙太陽光発電システムの開発に繋がるものではなかった。

2.2 太陽光励起レーザーの国内の開発状況

国内の太陽光励起レーザーの開発は、1984年、東北大の実験が初であり、Nd:YAGでレーザー出力18Wを達成している³²⁾。このシステムは10mのパラボラ鏡で側面励起している。1993年には60Wのレーザー出力を達成した³³⁾。しかし60W発振するために100メートル級の太陽光集光鏡が必要であった。1995年にワールドラボ、2002年に神島化学がCr/Nd:YAGのセラミック化に成功した^{34,35)}。われわれの研究室の測定では2006年まではCrのハイドープ時にCr⁴⁺の混入が認められたが、2008年以降に製造されたロットからのCr⁴⁺の混入は検出限界以下に低減した。近年ではCr³⁺からNd³⁺へのエネルギーの遷移構造の解析が複数報告されている^{36,11)}。Cr/Nd:YAGセラミックスの開発と同時期に東工大、阪大、レーザー総研で太陽光励起レーザーの開発がはじまった。

東工大はマグネシウム還元を目的として太陽光励起レーザーの開発をはじめた³⁷⁾。Cr/Nd:YAGロッドを用いてレーザー出力78W、レーザー効率は3~4%であり、スロープ効率は14.0%を得ている。集光にはフレネルレンズを用い、集光効率は64%である。

3. 宇宙静止軌道からのレーザーのエネルギー伝送³⁸⁻⁴⁰⁾

3.1 宇宙からのレーザーのエネルギー伝送システム

静止軌道から発生したハイパワーのレーザーを、約

36,000 km 離れた地上の受光設備に、高効率で安全に安定したエネルギーとして伝送しなければならない。レーザーエネルギー伝送部は、追尾方向制御と拡大望遠伝送鏡部からなる。システムは送信ビームが1 m 程度、指向精度は1 μ rad 以下、ビーム品質 $M^2=2$ 、大気擾乱による広がりの影響、散乱の広がり影響は小さく無視できるとし、この条件での単一ビームによる地上でのビーム直径は300 m 程度を想定している。また、大気擾乱による波面歪みを補正するために伝送光学系に補償光学システムの採用も考えている。宇宙から地上へのエネルギー伝送の研究課題は、伝送効率と安全性の確保である。その課題の項目として、(1) 地球の大気と気象の影響によるレーザーの伝送効率、(2) 大気の大気擾乱によるレーザー強度変調と散乱、(3) ポインティング精度 (指向・方向性の制御)、(4) レーザーエネルギーの受光と地上でのエネルギー変換 (変換効率) などが挙げられる。

3.2 地球の大気と気象の影響によるレーザーの伝送効率

L-SSPS におけるレーザー伝送の課題として、宇宙から地上に伝送する場合、レーザーの大気の透過率があり、この大気透過率の高低がL-SSPSのシステム効率を考える上で重要となっている。L-SSPSの伝送に利用するレーザーの波長は、大気による吸収がほとんどない1 μ mの波長が想定されているが、レーザーも光であることから、雲による遮へいや、散乱エアロゾルによる散乱・吸収の効果は避けられない。それらの透過率や地域分布、季節変動、日変動などはL-SSPSの稼働率、すなわちコストに直結する課題である。

気象データに基づき、日本近辺におけるレーザー光の波長帯域の大気透過率についての調査検討も行われている。調査は、(1) 地上における直達日射量から大気透過量を推定する手法、(2) 日照時間から推定する手法、(3) ひまわり画像による被雲率から推定する手法、(4) スカイラジオメーターによる4つの手法について実施し、静止軌道からの波長1 μ mのレーザー光の透過率は、30~40%であると予測される結果が得られている⁴¹⁾。また、福井大の、スカイラジオメーターと被雲率の相関をとり透過率を算出する手法では、50%の高い値が得られている⁴²⁾。受電基地が1か所の場合は年間運用率が30~40%となるが、年間運用率を上げるため、受電基地を複数設置することが考えられる。気象条件の異なる地理的に離れた候補地を選定し年間運用率についてシミュレーションした結果、候補地が2か所の場合、運用率は70%、5か所では98%を超える運用率が期待できる。宇宙-地上間の光空間通信の研究分野や太陽光発電における分光日射の調査における研究動向も含め

て、調査研究が進められているところである。

3.3 大気の大気擾乱によるレーザー強度変調と散乱

地上へ向けて発射されたレーザービームは、36,000 km 近く進んだ後、最後の10 km ほどは濃い大気層 (対流圏) を通過する。このときレーザービームは、大気のゆらぎによる影響で、強度変調を受けたり、ビーム広がりが増大する。これは高温・低温状態の空気が入り混じった乱流状態にある領域を光が通過すると、空気の屈折率をもつ温度依存性のために起こる屈折効果が原因で、シンチレーションとよばれる強度変調である。H-Vモデル⁴³⁾によると、宇宙から地上へレーザー伝送した場合は大気擾乱によるレーザー伝送効率への影響は小さいと考えられている。ビーム広がりについてもH-Vモデルを用いた解析により大気擾乱の影響がほとんどない計算結果も得られている。Andrews等により実測された屈折率構造係数の高度依存性では、地上数メートル近傍において大気のゆらぎが激しく、高度が増すにつれて大気のゆらぎが弱くなることが示されている。

しかしながら、安全性の観点⁴⁴⁾から大気擾乱による微小エネルギーの散乱、特に受光基地付近における照射強度の信頼性のある定量化が必須であり、現在検討が進められている。

3.4 ポインティング精度 (指向・方向性の制御)

レーザーモジュールの一端に設置された伝送装置は、36,000 kmの遠方から数百メートル規模の受光エリアに数十メートル範囲の指向誤差で伝送する必要があり、指向精度は1 μ rad レベルとなり、高精度のポインティング (指向) 精度が静止軌道上で必要となる。これまでの宇宙における光学的な指向精度の実績としては、2005年に打ち上げられた光衛星間通信実験衛星「きらり」(OICETS)⁴⁵⁾によって、数万 km 隔てた衛星間のレーザー光による通信実験が実施され、波長847 nm、出力100 mW、口径26 cmの伝送系実験で、指向精度1 μ rad が達成されている。また、レーザー発振や、レーザー伝送ではないが大型光学系として口径2.4 m ハッブル宇宙望遠鏡の姿勢精度0.03 μ rad 以下の安定運用⁴⁶⁾などがある。L-SSPSに必要な指向精度は、実験レベルで高精度な衛星姿勢を制御することで基盤技術は検証されている。これらの成功例は、光学系とその支持機構の熱歪みや衛星内の各種駆動機構等に起因する振動を丁寧に取り除いた上に成り立っている。L-SSPSは大規模なレーザーシステムであることから、規模の大きな熱発生や振動源を有し、こうした基盤技術の延長上で、捕捉、追尾、指向技術を実証し、静止軌道上から地上設備に向けてハイパワーのエネルギー伝送を行う必要がある。



図5 L-SSPSの洋上受光基地の構想図。1GWのパワーで受光エリアは300m程度。

3.5 レーザーエネルギーの受光と地上でのエネルギー変換

L-SSPSシステム成立の別の重要なキー技術のひとつは、地上受電系におけるエネルギー変換技術である。地上まで届いたレーザーエネルギーは、受光基地にて電力（光電変換）や水素（水の電気分解）に変換される。どこまで低い強度領域の散乱光までをエネルギー利用するか、安全のための管理区域の設定範囲と採算性を考慮した検討が必要となる。現時点における受光基地の規模は、1ギガワット級のパワーで受光範囲の直径を300～500m程度と想定している。図5に洋上を想定したL-SSPSの受光基地の構想図を示す。波長が長いマイクロ波による同様のエネルギー伝送では数km規模と想定されており、この差は短波長レーザーの利用による物理的優位性を示している。

この受光サイズはおもに伝送ビーム内のパワー密度設定、散乱などによるビーム広がり、およびビームの指向精度（ぶれ）によって決まる。パワー密度設定は、ラマン散乱などの非線形現象による伝送効率低下の回避や安全性を考慮して決定される。現状では地上における太陽光パワー密度（ $\sim \text{kW/m}^2$ ）の5～10倍程度を目処に検討が進められている。各種ビーム広がりや指向精度（これも指向誤差として広がりの一部とみなせる）の評価もあわせて作業が進められている。

届いたレーザー光の電気への変換手段は光電変換の利用を第一候補として想定しており、波長 $1.06\ \mu\text{m}$ に対する光電変換効率が高い素子を必要としている。近年、高効率太陽光発電技術の進歩はめざましいものがある。エネルギー変換に用いる太陽電池は、現時点で未定であるが、用いるレーザー光の波長に特化した高効率変換が可能なデバイス開発が必要となる。レーザー対応光電変換素子において、レーザーを効率よく電気エネルギーに変換するためには、電子の遷移に必要な波長の光を入射させ、熱エネルギー損失を減らす必要がある。レーザー光から電気を作るとい

単色の光電変換はニーズがなく、その研究報告例はほとんどない。太陽電池にみられるような半導体をベースにした素子を中心に検討が始められている。L-SSPSのレーザー波長は $1.06\ \mu\text{m}$ であるため、 $1.16\ \text{eV}$ よりバンドギャップが小さい材料を選択しなければならない。Siの太陽電池の場合はバンドギャップが $1.12\ \text{eV}$ であるため、 $1.11\ \mu\text{m}$ より短波長の光を吸収して比較的高い光電変換することが可能である。現在は太陽電池の半導体材料の候補であるSi、 $\text{CuIn}_{1-x}\text{Ga}_x\text{S}$ （銅、インジウム、セレンの化合物）、 InGaAs （P）などの光電変換特性を検討している。また、間接遷移型の太陽電池に比べ、バンドギャップ制御が容易にでき、急峻な光の吸収端を有し、光吸収係数が大きい直接遷移型の材料系として $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ ($E_g=0.35\sim 1.42\ \text{eV}$)、 $\text{CuIn}_{1-x}\text{Ga}_x\text{Se}_2$ ($E_g=1.00\sim 1.68\ \text{eV}$) に着目して調査研究が進められている。最終的には半導体材料や構造の最適な選択を行い、単色のレーザー光からの電気変換効率が65～85%程度の変換を目指した調査・研究開発がなされている。

また、直接発電ではない手法として、レーザー光を利用した水素生成技術の応用についても研究が進められている^{47,48)}。水素をベースとしたエネルギーインフラの研究も進められ、波長が $1.06\ \mu\text{m}$ であるレーザーの熱源としての活用も検討されている。

4. L-SSPSの開発の現状と取り組み

レーザー方式のSSPSは、従来型のレーザー技術では開発されていない、①太陽光を効率よく集光する光学システム技術、②太陽光を有効に利用できるレーザー材料技術、③太陽光からのレーザー遷移パワーを有効にレーザーにするシステム技術、④太陽光からレーザーに変換されない熱成分の効率のよい排熱システム技術、⑤宇宙から地上基地へのエネルギー効率のよいレーザー長距離伝送技術、を研究開発していく必要がある。

上記技術の構築によって、概念設計からの試算で、宇宙から地上基地伝送までのシステム総合効率20%以上が見込める。

JAXAでは、1998年度にマイクロ波方式SSPS（M-SSPS）、2002年度にレーザー方式SSPS（L-SSPS）のシステム総合研究を開始し、システムコンセプト、技術実証シナリオ、安全性、経済性などの検討を実施している。また、近年はL-SSPSの研究要素開発として、地上実証実験による太陽光集光、太陽光励起固体レーザー、レーザー伝送、レーザー光電変換の基本技術の確立を目指して、レーザー発振・伝送・受光の基本方式を構築し、軌道上実証および商用システムの実現のための課題の明確化を中心に研究開発

を進めている。

4.1 L-SSPSの地上実証実験の取り組み

現在 JAXA では、本中期計画中（2008～2012 年）に L-SSPS の地上実証実験を実施し、レーザー発振・伝送・受光の基本方式を構築することを目標としている。地上実証実験は、目標を3段階に設定し進めている。

第1段階は発振部・受光部の地上実証実験である。ここで発振部の目標はレーザー出力100ワット級の太陽光励起固体レーザーの開発、受光部の目標はビーム均質化機構と光電変換素子を組み合わせた受光システムの開発である。

第2段階は発振部、伝送部、受光部の地上実証実験である。ここで発振部の目標はレーザー出力1キロワット級の太陽光励起固体レーザーの開発、伝送部の目標はレーザー出力1kW、伝送距離500m、ビーム方向制御±数 μrad の伝送システムの開発、受光部の目標は波長 $1\mu\text{m}$ 用光電変換素子、受電能力300Wの受光システムの開発である。

第3段階は発振部、伝送部、受光部の地上実証システムを組み合わせた総合システム試験である。

4.2 JAXAと福井大学の地上実証用太陽光励起固体レーザーの開発

レーザー発振部の研究開発としては、現在、高濃度Cr添加Nd/Cr:YAGセラミックレーザー媒質の高品質化の開発研究、レーザー発振における最適組成の選定、太陽光励起固体レーザーの地上実証実験（レーザー出力100ワット級）を中心に開発研究を行っている。

L-SSPSの地上実証実験のレーザー発振部の主目的は、実太陽光励起によるレーザー発振、熱的影響（複屈折、発熱率）の確認である。現状はパルスレーザー励起による発振実験（熱的影響を考慮しない発振実験）、実太陽光励起による発振実験（熱的影響を考慮した発振実験）を実施中である。装置構成は、太陽光は主鏡により集光されレーザーヘッド内にあるレーザー媒質材料に照射される。そして集光太陽光を励起光として、共振器はジグザグスラブ方式によりレーザー発振を行う構造である。現在は集光特性の確認実験、発振実験を実施中である。

JAXAと福井大の共同研究開発チームによって、宇宙太陽光利用システムに必要なとされる太陽光エネルギーからの変換効率20%以上で出力1kWの地上実証用レーザーの開発を5か年計画で進めている。

現在はその前段階として100ワット級のレーザーシステムを開発して、2011年度から1kWシステムの開発を行う予定である。

4.3 100ワット級レーザーシステムの開発状況

100ワット級太陽光励起レーザーシステムを図6に示

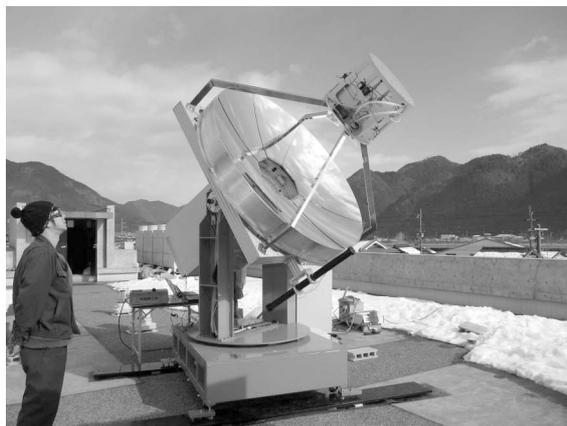


図6 開発中の100ワット級太陽光励起固体レーザー。反射鏡口径は1.8m、レーザー媒質の大きさは長さ80mm、幅10mm、厚み5mmである。

す。集光鏡の大きさはパラボラ鏡1.8mで、前頭部のレーザーヘッドへ光を導く方式である。1kWシステムで必要になる5mの巨大な集光鏡への対応のため、セグメント型リブ構造の集光鏡である。レーザー媒質は80mm×10mm×5mmでジグザグスラブ構造である。測定系はパワー、FFP (far field pattern), NFP (near field pattern), パワーのゆらぎ、冷却水の温度上昇が同時測定できる構造をもたせた。また、レーザーヘッド外部にフィゾー干渉計を構成しリアルタイムに波面歪みが測定できる。

レーザーシステムは3段階で実験を行う予定である。最初に532nmのレーザー励起で熱を伴わない単波長励起の発振を行う。目的はNd³⁺吸収が支配的な状態でのゲイン測定と、各要素、光学系の最適化による抽出効率の高効率化である。次に白色ランプでの励起で熱を伴った多波長の励起を行う。目的は、熱が加わった状態、かつCr³⁺吸収が支配的な状態でのレーザー発振とゲイン測定である。ストレートパスとジグザグ光路での波面歪みを比較し、ジグザグ光路による熱緩和を実証する。また、冷却水の上昇を測定し、発熱効率を測定する。最後に実太陽光でレーザー発振を行う。最終的なレーザー出力は240W、レーザー効率は13.5%を見込んでいる。2009年12月には実太陽光で予備的なレーザー発振実験を行い、19.1Wのレーザー発振に成功している。今後は熱解析を含めた実験を行い、さらなる高出力、高効率化を目指す予定で実験進行中である。

レーザー宇宙太陽光発電システムL-SSPSの開発状況・現状についてレビューを行った。また、JAXA・福井大のSSPS宇宙太陽光励起レーザーの開発状況について報告した。

宇宙太陽光発電のアイディアは1968年に発案され、

NASA を中心に研究が進められた。日本でも早い段階から SSPS の研究が進められ、現在も多くは大学や JAXA で研究が行われている。2009 年策定された宇宙開発基本計画でも SSPS 実現に向けて記され、エネルギー資源の乏しい日本が、直接エネルギーを確保する手段として、早期の開発運用が期待されている。

福井大では、太陽光エネルギーを直接レーザー光に変換する方式の L-SSPS の概念設計を行い、レーザー材料、太陽光集光システム、レーザー増幅システムを新たに検討・構築し、レーザー効率約 20% の見込みを立て、SSPS の新たな可能性を示した。実現に向けては、段階的な地上実証実験を踏まえ、着実な技術構築が必要である。想定シナリオは、2020 年ごろに宇宙実証装置の開発を終え、2030 年ごろの商用化運転開始を目指している。

現在、地上実証用キロワット級太陽光レーザー要素開発研究として JAXA 主催の SSPS 開発ワーキンググループ「kW 級太陽光励起レーザー設計検討委員会」(委員長: 佐々木進先生) のメンバーとともに、100 ワット級レーザー装置の開発を進めている。今年度中に 100 ワット級のレーザー出力を達成し、来年度の 1 キロワット級レーザーシステムの開発に必要なデータを得る予定である。来年度からは、1 kW システムの開発に着手する予定である。

宇宙太陽光発電の実現に向けては、段階的な地上実証実験を踏まえ、着実な技術構築が必要である。当面の課題は、技術実証とコストの 2 点である。まず、太陽光エネルギーから、効率よくレーザー光に変換できるかどうかの検証が必要である。この 2 年でその検証実験を行い、その後、従来の原子力発電や火力発電なみの電力コストが実現できるのか、JAXA のロケット技術の開発を踏まえ着実な開発を進めていく段取りである。

宇宙太陽光発電は、これまでの地上での太陽光発電や風力発電とは違った、新しい電力供給技術開発へ向けての新しい研究である。この装置によって、エネルギー資源の少ない日本国が、エネルギーを輸入する国から輸出する国へと生まれ変わる時代が来るかもしれません。昨今、エネルギーの問題は資源の乏しい日本国民はもとより、全世界の人びとにとって身近なもので、重要な関心事である。CO₂ 排出問題や、環境にやさしいエネルギーの問題に、少しでもこの宇宙太陽光発電の研究が役にたつ日が来ることを祈ります。また、この原稿が、宇宙太陽光発電への皆様のご理解やご支援のきっかけになれば幸いです。

文 献

1) P. E. Glaser: "Power from the sun: Its future," *Science*, **162**

- (1968) 857-861.
- 2) C. G. Young: "A sun-pumped cw one-watt laser," *Appl. Opt.*, **5** (1966) 993-997.
- 3) 斉藤由佳, 藤田辰人, 吉田裕之, 森 雅裕: "SSPS (宇宙太陽光利用システム) 実現性検討の現状", 傾斜機能材料論文集, **20** (2006) 158-161.
- 4) R. J. De Young, G. H. Walker and M. D. Williams, G. L. Schuster, E. J. Conway: "Preliminary design and cost of a 1-megawatt solar-pumped iodide laser," *Space-to Space Transmission Station* (National Aeronautics and Space Administration Scientific and Technical Information Office, 1987) pp. 13-34.
- 5) *Laying the Foundation for Space Solar Power: An Assessment of NASA's Space Solar Power Investment Strategy* (National Research Council National Academy press, Washington D.C., 2001.)
- 6) L. Summerer and O. Purcell: "Concepts for wireless energy transmission via laser," *RPR-NRG-2009-SPS-ICSOS* (ESA, 2009)
- 7) R. L. Fork: "High energy lasers may put power in space," *Laser Focus World*, **33** (2001) 113-114.
- 8) "宇宙発電衛星 SPS2000", 宇宙科学研究所報告書 43, 佐々木進編 (2001) 1-194.
- 9) 金邊 忠, 浦野渡瑠: "太陽光励起レーザーの開発", *レーザー研究*, **38** (2010) 169-175.
- 10) 金邊 忠, 浦野渡瑠, 荻野純平: "宇宙太陽光励起レーザーの概念設計", *レーザー研究*, **38** (2010) 187-194.
- 11) 金邊 忠, 荻野純平, 白濱卓馬, 浦野渡瑠, 鈴木拓明, 吉田裕之, 木皿且人, 福室康行, 佐々木進: "Cr/Nd: YAG セラミックの発光特性評価及び光遷移過程解析", *レーザー研究*, **38** (2010) 195-201.
- 12) R. Akiba, K. Miura, M. Hinada, H. Matsumoto and N. Kaya: "ISY-METS rocket experiment," *The Institute of Space and Astronautical Science Report*, No. 652 (1993) 1-13.
- 13) M. Nagatomo and K. Itoh: "An evolutionary satellite power system for international demonstration in developing nations," *Space Power*, **12** (1993) 23-36.
- 14) M. Taylor: "IKONOS planetary reflectance and mean solar exoatmospheric irradiance," *ASTM Standard Extraterrestrial Spectrum Reference*, E-490-00 (2000).
- 15) B. Schmid, P. Spyak, S. Biggar, C. Wehrli, J. Sekler, T. Ingold, C. Mätzler and N. Kämpfer: "Evaluation of the applicability of solar and lamp radiometric calibrations of a precision sun photometer operating between 300 and 1025 nm," *Appl. Opt.*, **37** (1998) 3923-3941.
- 16) H. Buiteveld, J. H. M. Hakvoort and M. Donze: "The optical properties of pure water," *Proc. SPIE*, **2258** (1994) 174-183.
- 17) D. C. Lorents, S. Narang, D. C. Huestis, J. L. Mooney, T. Mill and H. K. Song: "Solar-pumped laser," *High-Flux Solar Photon Process NREL/TP-253-4471 DE92 001247* (The Solar Energy Research Institute, 1992) pp. 3-15.
- 18) I. Gokalp, M. Calabro and H. Hollanders: "Space solar energy: A challenge for the European and international community," *IAC-02-R.1.03*, ESA2002 (2002) 1-10.
- 19) 斉藤由佳, 藤田辰人, 森 雅裕, 長山博之: "JAXA SSPS コストモデルに関する検討", 電子情報通信学会技術研究報告, SPS2006-09 (2009) 47-51.
- 20) Z. J. Kiss and R. C. Duncan: "Properties of neodymium laser materials," *Appl. Phys. Lett.*, **5** (1966) 993-995.
- 21) D. S. Sumida, D. A. Rockwell and M. S. Mangir: "Energy storage and heating measurements in flashlamp-pumped Cr:Nd:GSGG and Nd:YAG," *IEEE J. Quantum Electron.*, **24** (1988) 985-994.
- 22) G. Armagan and B. D. Bartolo: "Rare-earth scandium chromium garnets as active media for solid-state lasers," *IEEE J. Quantum Electron.*, **24** (1988) 974-985.
- 23) E. Luria, S. R. Rotman, J. A. Mares, G. Boulon, A. Brenier and

- L. Lou: "Energy transfer between Cr^{3+} and Nd^{3+} in Cr, Nd: YAP," *J. Lumin.*, **72** (1997) 951-953.
- 24) A. G. Avanesov, Y. K. Voron'kov, B. I. Denker, G. V. Maksimova, V. V. Osiko, A. M. Prohorov and I. A. Scherbakov: "Nonradiative energy transfer from Cr^{3+} to Nd^{3+} ions in glasses with high neodymium concentrations," *Sov. J. Quantum Electron.*, **9** (1979) 935-946.
- 25) W. Koechner: *Solid-State Laser Engineering*, 4th ed. (Springer-Verlag, Berlin, 1995) p.57.
- 26) M. Lando, J. Kagan, B. Linyekin and V. Dobrusin: "A solar-pumped Nd: YAG laser in the high collection efficiency regime," *Opt. Commun.*, **222** (2003) 371-381.
- 27) Y. A. Abdel-Hadi: *Development of Optical Concentrator Systems for Directly Solar Pumped Laser Systems* (Mathematik und Naturwissenschaften der Technischen Universität Berlin Genehmigte dissertation, 2005) pp. 69-78.
- 28) V. M. Batenin: "Feasibility of a solar-radiation-pumped color-center crystal laser," *Sov. J. Quantum Electron.*, **11** (1981) 382-394.
- 29) D. Liang and R. Pereira: "Maximizing TEM00 solar laser power by a light guide assembly-elliptical cavity," *Opt. Laser Technol.*, **41** (2009) 687-692.
- 30) I. Peer, I. Vishnevitsky, N. Naftali and A. Yogev: "Broadband laser amplifier based on gas-phase dimer molecules pumped by the sun," *Opt. Lett.*, **26** (2001) 1332-1334.
- 31) H. S. Kwang: "Direct solar-pumped iodine laser amplifier," *Laser Amplifier Progress Report*, ed. H. Hwang, K. H. Kim and L. V. Stock (National Aeronautics and Space Administration Langley Research Center, Virginia, 1988) pp. 52-54.
- 32) H. Arashi, Y. Oka, N. Sasahara, A. Kaimai and M. Ishigame: "A solar-pumped cw 18W Nd: YAG laser," *Jpn. J. Appl. Phys.*, **23** (1984) 1051-1053.
- 33) H. Arashi and Y. Kaneda: "Solar-pumped laser and its second harmonic generation," *Sol. Energy*, **50** (1993) 447-451.
- 34) "光学セラミックスの現状と宇宙太陽光発電におけるセラミック技術適用の可能性", 池末明生傾斜機能材料論文集, **21** (2007) 250-262. http://www.microwave.densi.kansai-u.ac.jp/solarlaser/history_ceramic.htm.
- 35) H. Yagi, T. Yanagitani, H. Yoshida, M. Nakatsuka and K. Ueda: "Highly efficient flashlamp-pumped Cr^{3+} and Nd^{3+} codoped $\text{Y}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$ ceramic laser," *J. J. Appl. Phys.*, **45** (2006) 133-135.
- 36) 椿本孝治, 吉田英次: "レーザ発振器の基礎と最近の固体レーザの進展", *レーザー研究*, **9** (2009) 698-706.
- 37) T. Ohkubo, T. Yabe, K. Yoshida, S. Uchida, T. Funatsu, B. Bagheri, T. Oishi, K. Daito, M. Ishioka, Y. Nakayama, N. Yasunaga, K. Kido, Y. Sato, C. Baasandash, K. Kato, T. Yanagitani and Y. Okamoto: "Solar-pumped 80 W laser irradiated by a Fresnel lens," *Opt. Lett.*, **34** (2009) 175-177.
- 38) 鈴木拓明: "レーザー方式宇宙太陽光発電の開発現状と展望", *レーザー研究*, **39** (2011) 24-29.
- 39) 木皿且人: "宇宙太陽光発電エネルギーのレーザー伝送", *電気学会誌*, **131** (2011) 18-20.
- 40) 藤田和久: "太陽光励起レーザーのエネルギー伝送技術の現状と展望", *レーザー研究*, **38** (2010) 180-186.
- 41) 吉田裕之, 鈴木拓明, 森谷信一, 石川東一郎, 木皿且人, 藤田和久, 吉野純, 小林智尚: "LSSPにおけるレーザー大気透過率と運用検討", 第54回宇宙科学技術連合講演会講演集, IS03 (2010) JSASS-2010-4003.
- 42) 片山祐太郎: "宇宙太陽光エネルギーのレーザー伝送効率の評価に関する研究", 福井大学大学院工学研究科原子力・エネルギー安全工学専攻修士論文 (2011).
- 43) L. C. Andrews, R. L. Phinips and P. T. Yu: "Optical scintillations and fade statistics for a satellite-communication system," *Appl. Opt.*, **34** (1995) 7742-7751.
- 44) 長山博幸, 吉田裕之, 斉藤由佳, 森 雅裕: "SSPSの環境・安全性評価", 電子情報通信学会技術研究報告, SPS2006-08 (2006) 43-46.
- 45) 山脇敏彦, 荒井功恵, 間瀬一郎, 佐藤尚樹, 池辺憲一: "光衛星間通信実験衛星(OICETS)「きらり」の開発", 特集光衛星間通信実験衛星(OICETS)「きらり」の開発と軌道上実験, 日本航空宇宙学会誌, **55** (2007) 9-15.
- 46) G. S. Nurre, J. P. Sharkey and B. J. D. Nelson: "Preserving mission, on-orbit modifications to Hubble space telescope pointing control system," *J. Guid. Control. Dynam.*, **18** (1995) 222-229.
- 47) 田路和幸: "レーザー SSPS利用を目指した光触媒による硫化水素からの水素製造", 傾斜機能材料論文集, **20** (2006) 162-163.
- 48) 矢部 孝: "太陽光レーザーが拓くマグネシウム社会", *日経サイエンス*, **11** (2007) 25-31.

(2011年3月15日受理)