レーザー方式宇宙太陽光発電の開発現状と展望

鈴木 拓明

宇宙航空研究開発機構 研究開発本部 未踏技術研究センター
高度ミッション研究グループ (〒305-8505 茨城県つくば市千現2-1-1)

Current Status and Future Scope of Laser Based Space Solar Power System

Hiroaki SUZUKI

Advanced Mission Research Group, Innovative Technology Research Center, Aerospace Research and Development Directorate,
Japan Aerospace Exploration Agency, 2-1-1 Sengen, Tsukuba, Ibaraki 305-8505

(Received October 14, 2010)

Japan Aerospace Exploration Agency (JAXA) has studied Space Solar Power Systems (SSPS) to solve energy and environmental problems for years since 1998. In research and development of laser based SSPS (L-SSPS) from FY2008 to 2012, our target is establishment of basic techniques such as laser oscillation, laser transmission and power conversion from laser respectively in the beginning, and next is construction of basic system that consists of those basic techniques by the ground demonstration experiment. 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: Laser based space solar power system, Solar concentrator, Direct solar pumping solid-state laser, Laser transmission, Laser photovoltaic conversion

1. はじめに

近年、化石燃料の枯渇、温室効果ガス増加による地球温暖化などのエネルギー・環境問題が深刻化しており、太陽光発電、燃料電池などに代表される二酸化炭素(CO₂)などの温室効果ガスを排出しない再生可能エネルギー

ギーを利用した発電システムの研究開発、実用化が進められている。しかし、2008年の国内一次エネルギー供給構成は、化石エネルギーが約83%、非化石エネルギーが約17%であり、再生可能エネルギーの割合は全供給量の約3%にとどまっている(Fig. 1)¹⁾。政府の方針では、原子力を維持・増強しながら新エネルギーの可能な限り

Fig. 1 Change of primary energy supply in Japan.

導入する施策が示されており、導入目標として、2030年には国内一次エネルギーの約11%を再生可能エネルギーにし、内40%を太陽光発電としている²⁾。

宇宙航空研究開発機構(JAXA)では、エネルギー・環境問題を解決する手段の一つとして、宇宙太陽光利用システム(SSPS: Space Solar Power Systems)の研究開発を進めている³⁻⁷⁾。SSPSとは、宇宙空間で得られる太陽光エネルギーをレーザーやマイクロ波に変換後、地上に無線伝送し、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ため、単位面積当たりの年間利用可能エネルギー量は5~10倍になる。そこで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。

本稿ではレーザー方式SSPSの研究開発におけるJAXAの取り組み、L-SSPSの概念・衛星基準モデル、開発現状として太陽光励起固体レーザー、レーザー伝送、レーザー光電変換技術を中心に紹介する。

2. 宇宙太陽光発電

2.1 宇宙太陽光発電構想

宇宙太陽光発電構想は、1968年にアメリカのピーター・グレーザー(Peter. E. Glaser)博士により提案された⁸⁾。その後、1970年代の約10年間、アメリカエネルギー省(DOE: United States Department of Energy)とアメリカ航空宇宙局(NASA: National Aeronautics and Space Administration)は、宇宙太陽発電衛星(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年型リファレンスシステム(Fig. 2)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、SPS 1基につき5 GWの電力を供給できるものであった⁹⁾。このリファレンスシ

Fig. 2 NASA/DOE reference system (1979).

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(約100 mの大きさ)と比較してもはるかに大きい。この構築のための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余りにも巨大なシステムを検討の対象としたため、技術的・社会的な飛躍が大きく未だその時機ではないと判断され、実現のための一歩を踏出すことなく米国の検討は終了した。

アメリカでの研究が中断した1980年代には、我が国でSSPSの構想に注目した研究者たちにより観測ロケットによる無線送電技術の宇宙実験¹⁰⁾や、早期の実現をめざした実証システムの設計研究¹¹⁾が行われた。1980年代の終わり頃からは、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、アメリカ、日本、ヨーロッパで様々なタイプのSSPSが設計研究されている。

2.2 JAXAの取り組み

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の研究開発として、地上実証試験によるレーザーエネルギー送受電技術の確立を当面の開発ターゲットとして、要素技術研究による太陽光集光、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、地上実証試験によりレーザー発振・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。

Fig. 3 Concept design of L-SSPS.

2.3 レーザー方式宇宙太陽光発電

L-SSPSの概念(Fig. 3)は、静止軌道上(高度36,000 km)で一次集光鏡により太陽光を集光し、二次集光鏡により波長分離(レーザー増幅に必要な波長域と不必要な波長域に分離する。不必要な波長域は増幅器の熱負荷低減のため、宇宙空間に放射される。)集光太陽光の均質化を行う。次にレーザーモジュールで太陽光励起によりレーザー光を増幅し(太陽光励起固体レーザー)、地上にエネルギー伝送する。地上では伝送されたレーザーエネルギーを電力(光電変換)や水素(水の電気分解)に変換する。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。

L-SSPSの衛星基準モデルは、Fig. 4に示すように太陽光を集光し、レーザー増幅器に照射する太陽光集光ミラー、太陽光を励起光としてレーザーを増幅・発振し、伝送するレーザーモジュール、レーザーの増幅・発振時に発生する熱を排熱するラジエーターからなる基本ユニットを複数直列連結した構造となっている(Fig. 5)。なお基本仕様はレーザー波長 $1.06\mu\text{m}$ 、レーザー出力1 GW(：10 MW(基本ユニット)×100基)、総重量5,000 ton(：50 ton(基本ユニット)×100基)を想定している。

Fig. 4 JAXA reference system of L-SSPS unit system.

3. JAXAの開発現状

3.1 レーザー電力伝送地上実験

現在JAXAでは、本中期計画(2008-2012年)にレーザー電力伝送地上実験を実証し、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。レーザー電力伝送地上実験は目標を3段階に設定し進めている。Fig. 6にレーザー電力伝送地上実験の概念図を示す。

第1段階は発振部、受光部の機能確認試験である。ここで発振部の目標はレーザー出力100 W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、受光部の地上実証試験である。ここで発振部の目標はレーザー出力1 kW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1 kW、伝送距離500 m、ビーム方向制御 $\pm$ 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300 Wの受光システムの開発であ

Fig. 5 JAXA reference system of L-SSPS overall system.

Fig. 6 Schematic diagram of ground demonstration equipment.

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。

3.2 太陽光励起固体レーザー技術

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1.064 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る。高濃度化が可能なセラミック材料を採用している。

太陽光励起固体レーザー発振器の開発は、東北大による実験が初であり、Nd:YAG結晶を用いてレーザー出力60 Wを達成している。しかし60 W発振するために10 m級の太陽光集光鏡が必要であった¹²⁾。近年では東工大がエネルギーリサイクル、マグネシウム還元を目的として、Nd/Cr:YAGセラミックを用いて研究開発を進めている。太陽光集光はフレネルレンズを用い、スロープ効率約14 %、レーザー出力78 Wを達成している¹³⁾。レーザー総研・阪大のグループはL-SSPSを想定して、Nd/Cr:YAGセラミックを用いたアクティブミラー型増幅器の研究開発を進めており、太陽光を限定的に模擬したアークメタルハライドランプによる励起によって光-光変換効率38 %で178 Wのレーザー出力を実現している¹⁴⁾。

L-SSPS発振部における研究開発としては、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機能確認試験(レーザー出力100 W級)を中心に研究開発を行っている¹⁵⁻¹⁷⁾。Nd/Cr:YAGセラミックの高品質化研究では、粉末合成条件、焼結条件

を最適化することにより、高濃度Cr添加Nd/Cr:YAGセラミックにおいても、内部散乱係数を低減でき、Cr⁴⁺の生成を抑制できており高品質なレーザー媒質作製に成功している⁷⁾。また小片試料の光学物性(吸収遷移効率、量子効率、抽出効率(推定値))計測よりNd/Cr:YAGセラミックの最適組成を推定した¹⁸⁾。Table 1に光学物性及びレーザー総合効率のCr濃度依存性を示す。吸収遷移効率はCr濃度約0.5 at%までは急激に増加し、約0.5 at%以上では緩やかに増加する傾向を示し、量子効率はCr濃度約0.2 at%までは急激に減少し、約0.2 at%以上では緩やかに減少する傾向を示した。吸収遷移効率の増加はCr濃度増加による可視域の吸収係数の増大、量子効率の減少はCr濃度増加による濃度消光に起因すると考えられる。レーザー総合効率はCr濃度1.5~3.0 at%においてはほぼ一定となり、約21.1 %と見積もられた。レーザー発振試験における最適組成は、大型媒質(機能確認試験用媒質)での製造技術を考慮して、Cr濃度1.5~2.0 at%、Nd濃度1.0 at%と選定した。機能確認試験の主目的は、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。Fig. 7に機能確認システムの外観図(全体、レーザーヘッド)を示す。装置構成はまず太陽光は主鏡、副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・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。

3.3 レーザー伝送技術

宇宙空間から地上へのレーザーエネルギー伝送において、宇宙空間での伝送効率は散乱、吸収因子がほとんどないためほぼ100 %である。しかし大気層ではレーザー波長ごとに様々な散乱、吸収因子がある。そこでそれらの因子の影響を受けにくいレーザー波長を選択する必要がある。更にそのレーザー波長の地上での利用形態も考慮する必要がある。遠赤外領域は大気透過率が高いが、地上での利用形態は熱エネルギーから電気エネルギーへ

Table 1 Cr concentration dependence of optical properties and laser efficiency.

Nd and Cr concentration	1.0at%Nd	1.0at%Nd 0.2at%Cr	1.0at%Nd 1.5at%Cr	1.0at%Nd 2.0at%Cr	1.0at%Nd 3.0at%Cr	2.0at%Nd 1.0at%Cr
Abs.-Trans. efficiency, $\eta_{\text{abs-trans}}$ (%) (Air Mass: 1.5, Pump length: 2cm)	15.8	25.2	30.1	30.5	30.8	29.1
Quantum efficiency, η_Q (%)	88.8	83.0	82.5	81.5	80.3	60.0
Extraction efficiency, η_{ext} (%) (Estimated value)	85.0	85.0	85.0	85.0	85.0	85.0
Laser efficiency, η_L (%) $\eta_L = \eta_{\text{abs-trans}} \times \eta_Q \times \eta_{\text{ext}}$ (Air Mass: 1.5, Pump length: 2cm)	11.9	17.8	21.1	21.1	21.0	14.8

Fig. 7 Photograph of functional test equipment. (a) Overall system, (b) Laser head.

の変換に限られる。また可視光領域は地上での利用形態が多数期待できるが、長波長域と比べ透過率が低いという問題がある。それに対して近赤外領域は大気透過率も高く、多様な地上利用が可能である。しかし極端に大気透過率が低い波長域も存在する。

そこで我々は総合的に判断して、波長 $1.064\ \mu\text{m}$ を中心に大気透過特性、ビーム形状に対する気象条件の影響を調査している¹⁹⁾。Fig. 8に500 mレーザーエネルギー伝送試験施設(JAXA角田宇宙センター)での各天候時の伝送効率の視程依存性を示す。試験条件はレーザー出力10 W、波長 $1.064\ \mu\text{m}$ (Nd:YVO₄(CW))、ビーム径が約 $\phi 50\ \text{mm}$ 、ビームが通過する位置が地上から1.3~2.1 m、伝送距離が500 mである。パワー計測により伝送効率を取得し、気象条件として天候(晴れ、霧、雪)、視程(水平における見通し距離)、気温、湿度、気圧、風向、風速、日射、大気の揺らぎの強さを同時に観測した。快晴時(視程20,000 m以上)では95 %程度の伝送効率となるが、霧などにより視程が10,000 m以下になると伝送効率は顕著に減少し、400 m以下ではほぼゼロとなった。以上より伝送効率には天候依存性(散乱、吸収因子の影響)があることがわかる。また快晴時であっても80 %程度

Fig. 8 Weather conditions dependence of laser transmission in atmosphere.

まで伝送効率が減少することがあり、大きい変動が見られる。これは同時に計測した大気の揺らぎの指数(屈折率構造定数)が大きいときに見られる現象であり、ビームが通過する位置が地上から1~2 m程度と低いことから、日射に起因した大気の揺らぎの増大がレーザービーム内での散乱を増大させ、受光光学系の視野外にビームが散乱して伝送効率が低下したと予測される。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m近傍において大気の揺らぎが激しく、高度が増すにつれて大気の揺らぎが弱くなることが示されている²⁰⁾。以上より大気の揺らぎによる伝送効率への影響は、宇宙から地上へレーザー伝送が行われる場合には緩和される可能性がある。

そこで最近ではレーザーエネルギー伝送試験の結果を踏まえ、鉛直方向における波長 $1.064\ \mu\text{m}$ 近傍の大気透過特性の解析として、雲、エアロゾル、その他の減衰因子を考慮した数値解析モデルを構築中である。また数値解析モデルの検証として、太陽光の近赤外領域分光観測を進めている。更にレーザーエネルギー伝送技術の開発として、高出力レーザー条件下(レーザー通信より約3桁高い出力)及び大気擾乱の影響等を考慮したクローズドループ制御方式によるビーム方向制御技術を開発中である。前述のビーム方向制御技術は機能確認試験を行い、レーザー電力伝送地上実験に反映させる計画である。

3.4 レーザー光電変換技術

レーザー対応光電変換素子において、レーザーを効率良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。Fig. 9に半導体材料のバンドギャップと格子定数の関係を示す。Siの場合はバンドギャップが1.12 eVであるため $1.11\ \mu\text{m}$ より短波長の光を吸収して光

Fig. 9 Relation between band gap and lattice constant for semiconductor materials.

電変換することができる。しかしL-SSPSのレーザー波長は1.064 μm であるため、1.16 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ず、更に間接遷移型のエネルギーバンド構造より直接遷移型の方が急峻な光の吸収端を有しており光吸収係数が大きい。そこでバンドギャップ制御が容易にでき、直接遷移型の材料系として $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ ($E_g = 0.35 - 1.42 \text{ eV}$)、 $\text{CuIn}_{1-x}\text{Ga}_x\text{Se}_2$ ($E_g = 1.00 - 1.68 \text{ eV}$)を選択し、研究開発を進めている。現在は候補材料であるSi、 Cl(G)S 、 InGaAs(P) の市販品について、光電変換特性の測定を実施中である。

4. おわりに

本稿では、L-SSPS研究開発におけるJAXAの取り組み、L-SSPSの概念・衛星基準モデル、開発現状として太陽光励起固体レーザー、レーザー伝送、レーザー光電変換技術を述べてきた。JAXAではレーザー電力伝送地上実験を実証し、レーザー発振・伝送・受光の基本方式の構築をL-SSPS実現のための第一歩として、研究開発を進めている。

謝 辞

本研究は、JAXA主催の「kW級太陽光励起レーザー設計検討委員会」、「レーザー伝送・受光系検討委員会」の協力を受け研究開発を進めている。本解説をまとめるにあたり、委員会メンバーである大阪大学の中塚先生、福井大学の金邊先生、レーザー技術総合研究所の本越氏、光産業創成大学院大学の藤田先生、岐阜大学的小林先生、吉野先生、情報通信研究機構の有本氏に感謝致します。

参考文献

- 1) 経済産業省：平成20年度(2008年度)エネルギー需給実績(確報)，平成22年4月15日。URL: <http://www.meti.go.jp/press/20100415002/20100415002.pdf>
- 2) 総合資源エネルギー調査会需給部会：長期エネルギー需給見通し，資源エネルギー庁，平成20年5月21日。URL: <http://www.enecho.meti.go.jp/topics/080523a.pdf>
- 3) M. Mori, H. Kagawa, and Y. Saito: *56th International Astronautical Congress*, IAC-05-C3.1.03 (2005).
- 4) Y. Saito, T. Fujita, and M. Mori: *57th International Astronautical Congress*, IAC-06-C3.1.04 (2006).
- 5) T. Fujita, M. Mori Y. Hisada, and Y. Saito: *57th International Astronautical Congress*, IAC-06-C3.3.08 (2006).
- 6) H. Suzuki, T. Fujita, and M. Mori: *59th International Astronautical Congress*, IAC-08-C3.2.04 (2008).
- 7) H. Suzuki, T. Fujita, K. Kisara, and S. Sasaki: *60th International Astronautical Congress*, IAC-09-C3.4.06 (2009).
- 8) P. E. Glaser: *Science* **162** (1968) 857.
- 9) P. E. Glaser, O. E. Maynard, J. Mackovciak, and E. L. Ralph: NASA CR-2357, NTIS F74-17784 (1974).
- 10) R. Akiba, K. Miura, M. Hinada, H. Matsumoto, and N. Kaya: ISAS Report 652 (1993).
- 11) M. Nagatomo and K. Itoh: *Space Power* **12** (1993) 23.
- 12) H. Arashi and Y. Kaneda: *Sol. Energy* **50** (1993) 447.
- 13) T. Funatsu, T. Yabe, K. Yoshida, S. Uchida, T. Ohkubo, B. Bagheri, T. Oishi, K. Daito, M. Ishioka, N. Yasunaga, Y. Sato, C. Baasanddash, K. Kato, T. Yanagitani, and Y. Okamoto: *J. Opt.* **37** (2009) 139.
- 14) 佐伯 拓，本越 伸二，今崎 一夫，藤岡 加奈，藤田 尚徳，中塚 正大，山中 千代衛：レーザー研究 **37-5** (2009) 374.
- 15) 荻野 純平，浦野 渡瑠，片山 祐太郎，白濱 卓馬，仁木 秀明，金邊 忠，鈴木 拓明，福室 康行，佐々木 進：信学技報，SPS2009-02 (2009) 1.
- 16) 金邊 忠，浦野 渡瑠，荻野 純平：レーザー研究 **38** (2010) 187.
- 17) 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：レーザー研究 **38** (2010) 195.
- 18) 鈴木 拓明，吉田 裕之，森谷 信一，木皿 且人，佐々木 進：第54回宇宙科学技術連合講演会講演集，JSASS-2010-4001 (2010).
- 19) 藤田 和久，内田 成明，橋本 和久，木皿 且人，新野 正之：平成19年度日本太陽エネルギー学会・日本風力エネルギー協会合同研究発表会予稿集 (2007) 35.
- 20) L. C. Andrews, R. L. Phillips, and P. T. Yu: *Appl. Opt.* **34** (1995) 7742.