太陽励起レーザーの開発と宇宙空間における レーザーエネルギー伝送への応用

湯上 浩雄*・内藤 均*・嵐 治夫*

(1996年9月2日 受理)

Development of Solar-Pumped Lasers and its Application to Laser Power Beaming in Space

Hiroo YUGAMI*, Hitoshi NAITO* and Haruo Arashi*

(Received September 2, 1996)

Power transmission by high power lasers is one of the most attractive methods for energy supply system in space. This paper describes the results of solar-pumped solid state lasers developed by the author's group, and some concepts of laser power beaming proposed in USA and Japan. Finally, we introduce the proposal on the space experiment of laser power beaming at Japanese Experiment Module (JEM) on the space station.

Key Words: Solar-pumped laser, Laser power beaming, Solar energy conversion, Laser propulsion, Space, Energy transmission

1. はじめに

21世紀においては、宇宙環境を利用した宇宙産業の発展や月面ステーションなどの建設が期待される。1994年の宇宙開発委員会長期ビジョン懇談会では、宇宙インフラストラクチャーの展開として、燃料ステーションと次世代宇宙ステーションを中心に低中高度軌道(Low Earth Orbit: LEO)や静止軌道(Geostationary Earth Orbit: GEO)上にある人工衛星などを支援するシステムを想定している¹⁾。

このような、高度な宇宙活動を可能にするためには、高効率なエネルギー生産と供給を行うシステムが不可欠である。このためのシステムとして、幾つかのパワーステーションで、太陽光からレーザー光への変換を行い、個々のユーザへレーザーでエネルギーを伝送することが考えられている。このシステムの利点としては、個々のユーザが巨大な太陽電池を装備する必要が無く、システムの単純化と軽量化が可能となり、宇宙への輸送コストや保守の簡素化が可能となることが挙げられる。

* 東北大学工学部機械知能工学科 (〒980-77 仙台市青葉区荒巻字青葉)

* Faculty of Engineering, Tohoku University (Aramaki, Aoba-ku, Sendai 980-77)

したがって、軽量、高効率で、安定的に太陽エネルギーをレーザー光へ変換し、長距離の伝送が可能なシステムの開発が、本格的宇宙利用において重要と考えられている。

また、このような宇宙ステーション-人工衛星などのSpace-to-Space以外にも、地上でのエネルギー消費量の増大や地球環境保全に対応するために、宇宙や月面でのエネルギー生産と地上へのエネルギー伝送が考えられる。

我々は、太陽エネルギー利用の高度化に関する研究の一環として、太陽光励起レーザーの研究を行っている。本文では、太陽光直接励起固体レーザーの研究状況について述べた後、宇宙でのレーザーエネルギー伝送構想を幾つか紹介し、最後に、国際宇宙ステーションでのレーザーエネルギー伝送実験について述べる。

2. 太陽光直接励起固体レーザーの研究

宇宙でのエネルギー伝送を目的に、太陽を1次エネルギーとした種々のレーザーに関する多くの研究が報告されている²⁻⁶⁾。それぞれのレーザーで長所、短所が有るが、太陽光からレーザー光への変換効率では、太陽電池により発電した電力を用いた太陽光間接励起型レーザーである半導体レーザー(Laser Diode: LD)アレイやLD励起固体レーザーが最も高い。これに対して、大型の太陽集光器を用いた太陽光直接励起固体レーザーは、軌道上でのシステムの重量が最も軽くできる特長が有る。このことから、太陽集光器を用いた太陽光励起レーザーの研究

Fig. 1 A large solar concentrator and a heliostat.

Fig. 2 Experimental setup of a solar-pumped Nd:YAG laser.

Fig. 3 Output of solar-pumped Nd:YAG vs. concentration ratio of solar radiation.

は、1966年にC. G. Young⁷⁾が初めて発振に成功して以来、幾つかの研究グループにより精力的に行われてきた⁸⁻¹²⁾。

我々は、ヘリオスタット方式の大型太陽集光器(Fig. 1)を用いてNd:YAGレーザーを用いた太陽光励起レーザーの研究を行っている¹³⁾。放物面鏡は口径10m、焦点距離3.2mで181枚のモザイク鏡からなっている。この集光器の太陽集中度(地上での直達太陽日射パワー密度に対する集光器焦点位置でのパワー密度の比)は平面試料で 5.1×10^4 である。

Fig. 2に太陽光励起Nd:YAGレーザーの実験装置を示す。本装置ではレーザー結晶の周囲から

均等に高密度太陽光が入射するように、レーザーロッドの軸を太陽集光器の光軸に平行にしてある。レーザーロッドは、直径10mm、長さ100mm、Nd³⁺濃度が0.9%のものを用いた。太陽集光器に入射する太陽光量を、絞りをを用いて変化させながら、レーザー出力を測定した結果をFig. 3に示す。しきい値以上では、入射光量に比例してレーザー出力が増大していることがわかる。この実験では、マルチモードで40Wのレーザー出力が得られた。この時の、太陽エネルギーのレーザー光への変換効率率は約1.6%であった。

この太陽集光器により作られる焦平面での太陽像は直径約30mmの円形であり、レーザーロッドとの形状の一致が悪く、太陽光の利用効率の低下の問題が生じる。この問題点を低減すると同時に、太陽集中度を上げるために、2次集光器として非結像光学の理論に基づいて作製したCPC (Compound Parabolic Concentrator) と呼ばれる集光器を用いてレーザーロッドの励起を行った¹⁴⁾。

Fig. 4は作製したCPCの断面図とロッド(4mm ϕ)との位置関係を示している。CPCの紙面垂直方向の長さは6cmである。材質は真鍮性で、表面は金コーティングされている。

CPCでは、許容角 θ_a より小さな角度で入射した光は、すべてロッドに到達し、ロッドを均一に励起することができる。本実験では、 θ_a は太陽集光器のリム角53°と一致するように設計されている。

円筒形状のターゲットに対するCPCの入射口の最大幅は、 $2\pi a/\sin\theta_a$ で与えられる(a はロッドの半径)。従って本実験では、入射口の最大幅は

Fig. 4 Cross-sectional view of the Compound Parabolic Concentrator (CPC) used in the experiment.

15.7mmとなり、レーザーロッドの有効吸収面積が、CPCを用いることにより、4mm $\times$ 6cmから、16mm $\times$ 6cmに増加する。実際に太陽光を用いて発振実験を行ったところ、同じ太陽光強度のときに、5倍の出力を得た。太陽光の有効吸収面積比以上の出力差があるのは、CPCにより均一光励起されたことにより熱レンズ効果などが低下したことによると考えられる。

CPCを2次集光器として用いることにより、1次集光器で円形に結像した太陽イメージをより効率的にレーザーロッドに集光で、集中太陽光の利用効率を向上することが出来た。しかしながら、レーザーロッドに入射した太陽光強度から計算した変換効率率は1.6%であり、今後の課題として太陽光ーレーザー光変換の高効率化を行うことが不可欠である。

太陽光スペクトルを分割して利用することによる太陽光直接励起型レーザーの高効率化がイスラエルのグループ¹²⁾により提案されている。彼らの計画では、太陽光を4つの領域に分割し、可視光をアレキサンドライトレーザーに、近赤外光をNd:YAGレーザーの励起にそれぞれ用い、他の領域の光を太陽電池や熱デバイスによる発電用として用いる。

ドイツ航空宇宙研究所では、Fig. 5に示すような太陽光励起レーザーとソーラーダイナミックシステムを組み合わせ軌道上システムを提案している¹⁵⁾。このシステムでは、全太陽光スペクトルの38%(400-700nm)を用いて全太陽光スペクトルに対する変換効率8%で太陽光ーレーザー光変換が可能であるとしている。さらに、残りの62%の太陽スペクトルをソーラーダイナミック

Fig. 5 Space-based solar laser system.

システムにより効率30%で電力に変換できることから、全太陽光スペクトルに対するソーラードイナミックシステムの効率は19%となる。従って、入射太陽エネルギーに対するレーザー光および電力への変換効率はシステム全体で27%に達するとしている。ただし、8%の太陽光-レーザー光変換を達成するためには、レーザー媒質の冷却を効率良く行い、熱負荷を低減する必要がある。また、このシステムでは発生した電力は主に軌道上システムの維持に使われるが、余剰電力を用いてLD励起固体レーザーを発振させることにより、太陽光-レーザー光変換効率を上げることが可能である。

このように、太陽光直接励起レーザーは本質的には高効率を得られる可能性があるが、レーザー媒質の熱負荷を低減することが大きな課題となっている。我々は、熱負荷の低減を目的として最近、太陽電池を用いた太陽光間接励起LDレーザーの開発を始めており、太陽光直接励起レーザーと組み合わせることにより、より高効率なシステムの構築を目指している¹⁶⁾。

3. 宇宙でのレーザーエネルギー伝送構想

3.1 軌道上へのエネルギー伝送

人工衛星を用いた通信や観測へのニーズは今後益々増大すると考えられる。したがって、人工衛星の打ち上げや維持コストの削減と寿命の延長が要求されている。このため、レーザーによる電力供給やレーザー推進に関する構想がある。このような概念にもとづくレーザーエネルギー伝送は、大気による影響が有る高度300km以下のLEOにある人工衛星に対して、太陽電池より経済的であると試算されている¹⁷⁾。

米国NASAのYoungら¹⁸⁾は、Fig. 6に示すような軌道上6400Kmにある太陽光励起レーザー・パワーステーションからのエネルギー伝送により、LEOにある人工衛星へのエネルギー供給を提案している。彼らは、148000m²の太陽集光器を用いて沃素レーザーにより1MWの出力を出す太陽光励起レーザーを構築し、11,000km先で1mに集光できる伝送光学系を考えている。このシステムでは、レーザー媒質($t\text{-C}_4\text{F}_9\text{I}$)を補給する

Fig. 6 Schematic diagram for solar-pumped laser system. The molecules of the gaseous laserant ($t\text{-C}_4\text{F}_9\text{I}$) is supplied by laser Orbit Transfer Vehicle (OTV).

必要があり、シャトルによりLEOまで運ばれたロケットを、レーザー推進によりパワーステーションまで運搬するためのエネルギー供給を行うシステムを提案している。

これは、軌道上にあるパワーステーションから人工衛星へのレーザーエネルギー伝送を提案したものであるのに対し、地上設置のレーザーサイトから人工衛星にエネルギーを送るSELENE計画がアメリカで提案されている¹⁹⁾。この計画では、地上設置の自由電子レーザー光を補償光学系によりLEOにある人工衛星に照射し、太陽電池へのエネルギー供給や、食の間のエネルギー供給を目指している。また、軌道上にあるOrbit Transfer Vehicle (OTV)に電力を供給し、電気推進によりLEOに打ち上げられた人工衛星をOTVでGEOまで引き上げる構想を持っている。彼らは、これらのシステムは近い将来、採算性が有るとしている。

3.2 地上へのレーザーエネルギー伝送

今後、飛躍的に増大する地球上のエネルギー需要と、環境負荷の軽減に対応するために宇宙発電衛星 (Space Power Satellite: SPS) や月面基地で発電した電力を地上に伝送し利用するLunar Energy Park (LEP)計画²⁰⁾ (Fig. 7)が考えられている。Glaser²¹⁾により1968年にSPSからのマイクロ波電力伝送システムが提案されて以来、マイク

Fig. 7 Laser power transmission from moon to earth for Lunar Energy Park (LEP).

口波によるエネルギー伝送に関する研究が世界で数多くなされ、システム研究はレーザー伝送と比較すると非常に進んでいる。マイクロ波の特長は高変換効率と大気透過性が高いことである。これに対しレーザー伝送では回折広がり小さく送受信光学系を小さくできる特長がある。波長 λ 、口径 D のレーザー光が距離 d 伝搬した後のAiryディスクの口径 D_m は、 $D_m = 2.44d\lambda/D$ で与えられ、マイクロ波に比べて2桁以上送受信施設を小さくできることが分かる。

レーザー光は大気層での吸収による減衰があるが、 CO_2 レーザーの $10\mu\text{m}$ 帯を用いれば70-80%の透過率が期待できる。また、生体への影響を考慮した最大許容露光量が CO_2 レーザーを用いた場合マイクロ波のそれより20倍高くできる。以上のことから、特に、月面ステーションからのエネルギー伝送を考えたときは、レーザー伝送が優位と考えられている²²⁾。

日本で発案されたLEP計画では、フェーズAとして500kWeの太陽集熱発電システムを月面上に設置し、レーザーエネルギー伝送の実証試験を行い、フェーズB,Cには原子力発電所を建設し、それぞれ40MWe,100GWeの電力を地上に伝送する構想である²³⁾。

4. 国際宇宙ステーションでのレーザーエネルギー伝送実験

現在、国際共同で宇宙ステーションの建設が計画されており、我が国では、宇宙開発事業団(National Space Development Agency of Japan: NASDA)が日本実験モジュール(Japanese Experi-

Fig. 8 Schematic diagram for the experiment of laser power transmission to H2 Transfer Vehicle (HTV) from Japanese Experiment Module (JEM) on the space station.

ment Module: JEM)の建設を行っている。JEMには、予圧部と宇宙空間に露出した曝露部がある。東北大学と科学技術庁航空宇宙技術研究所(National Aerospace Laboratory: NAL)とが中心となり、このJEM曝露部の1ポートを用いてFig. 8に示すようなレーザーによるエネルギー伝送の実証実験を提案している。

JEM曝露部のペイロードには大きさと重量の制限があることから、大型の太陽集光器を用いた実験は困難であることと、熱負荷の観点から、本計画ではステーションからの電力を用いてレーザーを発振させるシステムを考えている。レーザーとしては重量とシステムの安定性から、全固体レーザーであるLD励起固体レーザー(Diode Pumped Solid State Laser: DPSSL)を用いる。LDレーザー自身を用いるほうが効率は高いが指向性で問題があり、現時点では、宇宙での超長距離伝送にはDPSSLまたはDPSSLのSHGを用いるのが最適であると考えられる。しかし、LDアレイの位相整合技術が発展すれば、将来的にはLDによるエネルギー伝送が実用化されることが考えられる。

レーザー出力に関しては、使用できる電源容量や排熱量に制限があるが、エネルギー伝送の実証として意味のあるレーザー出力で実験を行う必要が有る。今後のレーザー技術の進展によるが、現段階では、DPSSLの2倍波で平均出力100W(1kHz)を目標としている。

受光ターゲットとしては、テスト用の人工衛

星または、JEMから切り離された後のH2Transfer Vehicle (HTV)を想定しており、伝送距離は50-100kmを目標としている。受光側口径はできる限り小さくする必要がある、指向精度としては6-7 μ rad程度が必要である。

また、曝露部でのレーザーシステムでは、固体レーザーとLDの非液体冷却方式を開発する必要がある。宇宙空間では放射により排熱を行うが、LDは低温度で大量の熱を放出するため、ラジエーターやヒートパイプなどの開発が必要である。このほかにも、光学素子の安定化や無重力・真空中でのオートアライメント機構の開発などが必要であると考えられる。

受光器としては、光電セルによる光電変換を想定している。単色光に対するセルの変換効率は太陽光に対するものより高く、理論的にはYAGの基本波に対して60%、SHGに対して80%程度の変換効率が期待できる²⁴⁾。しかしながら、現状の太陽電池では0.5 μ mの光に対して約30%(GaAs)、および約20%(Si)の変換効率である。更に、パルス光に対しては更に効率が低下することが知られており²⁵⁾、レーザーエネルギー伝送の効率を改善するためには光電セルの開発が必要不可欠である。NASA, Lewis研究所ではSiやGaAsセルのパルス光照射時の特性についての実験やシミュレーションが行なわれている²⁶⁾。

宇宙ステーションのJEMの運用開始は2002年が予定されている。従って、この計画が採択された場合、今後8-10年以内にミッションが開始される可能性が高い。

現在、NALの角田宇宙推進技術研究センター(宮城県)においてNALと東北大学を中心に、住友重機械工業(株)の協力を得て、レーザーエネルギー伝送の地上実験が開始されている。今後、より長距離間の伝送や航空機を用いた実験を行い、各要素技術の開発指針や技術課題の抽出を精力的に行う必要がある。

5. まとめ

宇宙空間でのレーザーエネルギー伝送に関連して太陽光励起レーザーの研究の現状や、レー

ザーエネルギー伝送構想について述べた。宇宙での高出力レーザーの研究は軍事技術と密接に連携して開発が進んできたが、冷戦終結後、アメリカやロシアで蓄積されたこの分野での技術が、民生用として転用されてきおり、今後21世紀初頭には、レーザーエネルギー伝送が実用化される可能性があると考えられる。日本では、レーザーエネルギー伝送に関して関心がある研究者は多くないように感じられる。しかし、ここで紹介した国際宇宙ステーションでの実験などは、少数の研究者のみで実現することは当然不可能であり、レーザー光源開発はもとより、太陽エネルギー変換、受光素子、宇宙構造物、システム設計などの分野の研究者からなる研究組織を形成する必要がある、多くの研究者がレーザーエネルギー伝送に興味を持っていただけることを期待する。

参考文献

- 1) 宇宙開発委員会長期ビジョン懇談会(1994年7月).
- 2) E. W. Walbridge: Space Solar Power Rev. 3 (1982) 45.
- 3) R. J. De Young, J. H. Lee, M. D. Williams and G. Schuster, E. J. Conway: NASA TM-4045 (1988).
- 4) K. Maeno, H. Aoyama, Y. Hanaoka and H. Arashi: 7th Int. Symp. on Gas Flow & Chemical Lasers (GCL) 22 (1988).
- 5) M. Weksler and J. Schwartz: IEEE J. Quantum Electron. QE-24 (1988) 1222.
- 6) U. Brauch, H. Opower, W. Wittwer and J. Muckenschnabel: Proc. SPS'91 (1991) 320.
- 7) C. G. Young: Appl. Opt. 5 (1966) 993.
- 8) H. Arashi and M. Ishigame: J. Space Tech. and Sci. 1 (1986) 23.
- 9) R. Winston: Science, March (1991) 52.
- 10) K. H. Kim, D. D. Venable, L. A. Brown and H. Lee: J. Appl. Phys. 69 (1991) 2841.
- 11) U. Brauch, J. Muckenschnabel, G. A. Thompson, H. Bernstein, A. Yogeve, A. Reich and M. Oron: Opt. Eng. 31 (1992) 1072.
- 12) V. Krupkin, Y. Kagan and A. Yogeve: Proc. SPIE

- 38th Int. Symp. on Optical Applied Science and Eng. (1993).
- 13) H. Arashi, H. Yugami and H. Naito: WPT-95 (Kobe, Japan Oct. 16-19, 1995).
- 14) H. Arashi, D. Cooke and H. Naito: Jpn. J. Appl. Phys. **34** (1995) 4795.
- 15) U. Brauch, W. Schall, G. Spindler, W. Wittwer and E. Zeyfang: ESA-TT-**1246** (1991).
- 16) 湯上浩雄, 内藤 均, 嵐 治夫: 第15回宇宙エネルギーシンポジウム (1996).
- 17) R. J. De Young, J. Stripling, T. M. Enderson, D. H. Humes, W. T. Davis and E. J. Conway: *Proc. Intersoc. Energy Convers. Eng. Conf.*, Aug. 1984. p. 339.
- 18) R. J. De Young, G. H. Walker, M. D. Williams, G. L. Schuster and E. J. Conway: NASA TM-**4002** (1987).
- 19) G. A. LANDIS, L. H. WESTERLUND, NASA-CR-**190793** (1992).
- 20) M. Niino, K. Kisara and L. Chen: Space Power **12** (1993) 123.
- 21) P. E. Glaser: Science **162** (1968) 857.
- 22) 材料科学技術振興財団, 「月面エネルギー基地構想の概念検討」平成6年度成果報告書 (1995年).
- 23) K. Eguchi, M. Niino, H. Arashi, Y. Takeda and T. Kobayashi: WPT-95 (Kobe, Japan Oct. 16-19, 1995).
- 24) H. W. Friedman: Proc. SPIE **2121** (1994) 232.
- 25) R. A. Lowe, G. A. Landis and P. Jenkins: IEEE Trans. Electron Devices, **42** (1995) 744.
- 26) R. K. Jain and G. A. Landis: Proc. SPIE **2121** (1994) 264.

レーザーワード

レーザー高度計 (laser altimeter)

パルスレーザー光を上空から発射し, 地表面からの反射光を検出し, レーザーパルスの往復時間から高度を求める装置をいう。レーザーレーダーの一つの形体で, レーザー測距の特殊な応用技術である。従来の航空機搭載のものから最近ではスペースシャトル等の宇宙飛翔体搭載のものも開発され, 米国NASAで実現されている。最近ではLD励起のNd:YAGレーザー(波長1.06 μm)でパルス幅5-10nsものが一般に用いられている。地表や海面の形状をグローバルに観測するトポグラフィーのための最も有効な手段である。発射ビーム数を複数にして精度を上げたり, 反射パルスのエコーのパターンから地表の形状をより精密に測定し, 樹木の高度分布等も求められる技術も開発されてきている。

(有賀 規)