無人月氷探査車（ローバー）モデルへの 1.2 km レーザーエネルギー伝送実験^{*1} 1.2 km Laser Energy Transmission for the Lunar Rover Model to Explore the Ice on the Moon

武田 和也^{*2}・河島 信樹^{*3}
Kazuya TAKEDA and Nobuki KAWASHIMA

Key Words: Diode Laser, Energy Transmission, Lunar, Ice, Rover

Abstract: We have developed a model of a lunar rover and 1 km laser energy transmission system using a laser diode as the light source. The laser-electric conversion efficiency of a solar panel loaded on the lunar rover model is measured as more than 20% at the indoor experimental level. 1.2 km laser energy transmission experiment has successfully be done. The rover model was controlled with PC through the wireless LAN system.

1. はじめに

我々は月にあると考えられている氷を探査するため、探査車（ローバー）を用いた直接確認探査計画を進めてきた。月に大量の氷が存在することは、21世紀の宇宙開発の最大の目標である火星有人探査を照準に置いた将来の人類の宇宙活動の拠点として大きくクローズアップされることになる。この氷の存在は1998年アメリカの探査機ルナ・プロスペクターによって月の極地域で存在を示すデータが得られていたが¹⁾、これは間接的に得られた氷存在の証拠（水素の発見）である。確実に氷を確認するには直接探査を行わなければならないが、問題となってくるのが氷の存在する環境である。1年中太陽光が当たらない永久影領域なので太陽電池でエネルギーを得ることはできない。我々は以前より半導体レーザーを光源として利用し、ローバーにエネルギーを伝送することを提案して^{2,3)}、この方法は宇宙のみならず地上での応用、例えば火山の噴火口調査、災害地調査救助ロボット、原子炉事故用ロボット、地雷除去ロボットなどにも使用することが可能である。

今回は実際のスケールに近い1.2 km エネルギー伝送実験とハワイでレーザー長距離伝搬実験を行ったので報告するものである。

2. 長距離エネルギー伝送用実験装置の作製

我々はこれまでに高出力半導体レーザー（出力:32 W/cw, 波長:812.3 nm, 発散角:12 mrad × 12 mrad）を光源として使用し、近畿大学構内に半導体レーザーから100 m離れた

場所に実物大ローバー（全長1 m, 太陽電池パネルサイズ70 cm × 1 m）を配置して、レーザーのエネルギーのみで駆動させる実験に成功している^{4,5)}。

今回は新しく作製したローバーの実機大モデル（第1図）を使用し、光源の大出力ファイバーカップリング半導体レーザーと光学系を使用して1.2 kmでのエネルギー伝送実験を行った。これほど長距離で大出力半導体レーザーと太陽電池を使用したエネルギー伝送実験はこれまで行われたことがない。

第1図 1.2 km用実物大ローバーモデル

2.1 1.2 km用実物大ローバーモデル 今回の実験用に第1図のような実物大ローバーモデルを作製した（第1表）。

第1表 実物大ローバーモデル仕様

重量：	9kg（太陽電池パネル含む）
車体サイズ：	650mm × 480mm × 300mm
駆動電圧電流：	1.5V, 1.8A(最小値)
運動制御：	ラジコン

車体を樹脂主体にしたので前回の100 m用ローバーと比べ

^{*1}©2004 日本航空宇宙学会
平成15年11月20日, ILC 2003 にて一部発表
平成16年1月19日原稿受理

^{*2}大阪 TLO 近畿大学事業部

^{*3}近畿大学理工学部

ると7 kgの軽量化に成功した。前輪後輪ともに固定し、前後運動のみ運動が可能となっている。使用しているモーターはギアボックスが取り付けられており、速度は約15cm/sとなる。ローバーの制御方法はラジオコントロールで行うようになっている。太陽電池パネルとモーター間に制御回路を設置し、モーターのon/off・正転逆転制御が行えるようにした。実際の実験では1.2 km先から無線LANを経由してラジコン制御するようにした。

2.2 太陽電池パネル 太陽電池パネル(第2表)はSingle-Junction GaAs 太陽電池を使用して作製した。

第2表 太陽電池パネル仕様

太陽電池パネル:	674 mm × 686 mm(セル116枚)
太陽電池セル:	Single-Junction GaAs (40 mm × 70 mm)
太陽電池セル特性:	(太陽光 135.3 mW/cm ²)
	短絡電流 30.5 mA/cm ²
	開放電圧 1.025 V
	最適電流 28.6 mA/cm ²
	最適電圧 0.9 V(太陽光)
	変換効率 19.0%(太陽光)

(808 nm レーザーに対する変換効率は27~28%)

パネル上で4枚を直列にしたものを29並列にして取り付けられている。当初1kmのエネルギー伝送を想定していたので、1kmの地点でのレーザー光スポット径を考慮してパネルの大きさは決められている。パネルはローバー車体に固定されている。レーザー光スポット径を1kmと同じ約67cmにしたとき、入射レーザー光量に対する太陽電池パネルの出力はおおよそ20%の変換効率が得られた(第2図)。

第2図 レーザー光に対する太陽電池パネル変換効率

2.3 レーザーシステム エネルギー伝送用のレーザーにはファイバーカップリングタイプの半導体レーザーを用いた(第3表)。今回の実験は野外で行われるので可搬式のレーザーシステムが必要だった。全体をなるべくコンパクト

第3表 レーザーシステム仕様

半導体レーザー:	ファイバーカップリングタイプ
ファイバー:	コア径=400 μm, NA=0.22
光出力:	60 W/cw
電源:	4 V, 52 A
冷却:	空冷(ペルチェ方式)
温度制御:	レーザー内蔵サーミスタ使用

トにまとめるため、ペルチェ冷却装置を用いて組んだ。レーザーシステムはレーザー本体、レーザー用電源、ペルチェ冷却装置、ペルチェ用電源、温度コントローラーから構成されており、AC100 が供給できればどこでも稼働可能になっている。

半導体レーザーには発熱部分近くにサーミスタが内蔵されている。このサーミスタを利用することで半導体レーザーの温度制御が行える。温度コントローラーにて内部温度25 を中心に±約3 で制御を行う。何らかの原因で内部温度が30 を越えると半導体レーザー用電源の出力が切れ、半導体レーザーを守る保護回路を作製し取り付けした。

第3図 レーザーシステムと光学系

2.4 光学系 1.2 km 先でなるべく小さくレーザー光を集光するためファイバーカップリング半導体レーザーと放物面鏡(有効直径: 270 mm, 焦点距離: 600 mm)を用いた光学系を第3図のように作製した。この光学系を使用し1.2 km 伝送した場合、レーザー光スポット径は約80 cm になる。ファイバーは放物面鏡焦点の位置に固定できるようにし、放物面鏡はミラーホルダーごと前後してピン調整できるようになっている。光学台には微動台(精度 0.5 μm)が取り付けられており、レーザー光の射出方向を約 0.8 μrad の精度で制御が可能である。

2.5 ローバー制御系 ローバーの制御にはパソコンに接続されたラジコンが使用されている。パソコンは無線LAN によって1.2 km 離れたパソコンと接続し使用できるようになっている。また、ローバー横に赤外線カメラを設置し、パソコン-無線LAN にて1.2 km 先でローバーの動きを確認出来るようにした。これにより1.2 km 離れたところで

第4図 制御系とレーザー概略図

画面を見ながらローバーのコントロールをパソコン上で行えるようになった(第4図)．また，パソコン上の画面はレーザー光のスポット位置やピントを確認するときにも利用される．

3. 1.2km エネルギー伝送実験

我々は2003年11月7日，大阪淀川河川敷にあるゴルフ場を貸していただき1.2 km のエネルギー伝送実験を行った．1.2 km もの直線を見渡せる場所で，レーザーの光路上に部外者が入らないような場所を選ばなければならず，夜間は人が入らないゴルフ場を選択した．

レーザー光のみでローバーを駆動する実験は夜間行われた．ローバーの移動方向はレーザー光軸と平行にし，ローバーが移動してもレーザーが太陽電池パネルから外れないように配置した．

第5図 1.2 km エネルギー伝送実験
(画面奥から手前のローバーへレーザー照射)

実験の結果 30 W/cw のレーザー出力で 1.2 km のレーザーエネルギー伝送を行い，ローバーの駆動を確認した(第5図)．1.2 km でのレーザー光スポット径は約 80 cm であった．ローバーは 2.7 W で駆動するのでレーザー出力に対する効率は 9% と低かった．原因としては大気や塵の影響もあるが，一番の影響はレーザー光スポットが太陽電池パネルよりも大きくなってしまったという点である．これは太陽電池パネルを 1 km の地点でのスポット径(67 cm)に合わせて作製したからである．今後ピントの正確さや大気・地面の状態が入射光量やローバー駆動電力にどれくらい影響を与えるのか検討・測定を行っていく．

4. ハワイ・ラナイ島レーザー長距離伝搬実験

ゴルフ場での 1.2 km エネルギー伝送実験の 1 週間後，ハワイのラナイ島にて日米協力に向けたレーザーエネルギー伝送実験が JUSTSAP（日米科学技術宇宙応用国際会議 2003/11/15～19）で行われた．

米国側が当初用意した場所は，装置を運ぶのに厳しい場所で，風速 20 m を越す強風と，溶岩台地特有の細かい砂

嵐のため使用することを断念した．市内から数 km 離れた海に面した道路脇に実験場所を変え，レーザー伝搬実験を行った．実験の目的も当初予定された 1.2 km のレーザーエネルギー伝送でローバーを駆動する実験が，すでに出発前に牧野パーク・ゴルフ場で確認できていることもあり，12 km 離れた岬へ向けたレーザー・ビームの長距離伝搬とその撮影に変更して行った．その結果，レーザー光スポットは撮影出来なかったが，これまで得られていなかったレーザー側からの肉眼では見えないビームの長距離伝播の様子(第6図)と焦点を移動させる様子を動画で撮影した．

第6図 12 km 先の岬へ向けたレーザー伝搬実験（背景合成）

5. まとめと今後の課題

1.2 km でのエネルギー伝送は成功した．また，ハワイでの長距離レーザー伝搬実験によりレーザーの伝搬の様子を撮影した．この伝搬実験ではレーザー光スポットが画像から確認できなかったため，帰国後 7 km 離れた山へ同じレーザーを照射した．レーザー光スポットを撮影し，レーザーが 7 km 届くことを確認している．スポット径は今後確認の予定である．次は本物のクレーターと同スケールとなる 7 km エネルギー伝送を目標としている．

7 km エネルギー伝送実験を行うとき考えなければならないのがレーザーと光学系の組み合わせである．今回使用したファイバカップリング半導体レーザー（コア径:400 μm , NA:0.22）をそのまま光源として使用するとき，7 km 先で直径 1 m のスポット径にするためには焦点距離:2800 mm, 直径:1252 mm の放物面鏡が必要になり，かなり大きな光学系となってしまう．市販されている高出力ファイバカップリング半導体レーザーには出力:25 W/cw, コア径:100 μm , NA:0.22 というものが存在する．このレーザーを使用した場合，7 km 先で直径 1 m のスポット径にするには焦点距離:700 mm, 直径:310 mm の放物面鏡で実現可能である．しかし，レーザーのコストの面で問題がある．

ファイバカップリング半導体レーザー以外ではレーザーポインターや CD などに使われている LD 素子を複数個光源として使用することが考えられる．LD 素子は数 mW ～ 数百 mW，中には 1 W 以上の高出力のものが存在す

る .出力も重要だが出力以上に重要なのが発光点面積である .高出力のLDは大きな発光点面積になってしまう . 小さいのものは $1\ \mu\text{m} \times 3\ \mu\text{m}$ 程度のものから存在する .例えば波長 780 nm,出力 100 mW/cw の LD 素子の場合 ,発光点の大きさが $2\ \mu\text{m} \times 4\ \mu\text{m}$ (半値)というものが安価で購入することができる . この場合 , 7 km 先で 1 m の径に集光するとき LD 素子から 28 mm のところに直径約 13 mm のレンズが必要である .今回の実験で使用したファイバーカップリング半導体レーザーと同じ 60 W を出力させるには 600 個必要である . 24 個 $\times$ 25 個で並べるとすると約 312 mm $\times$ 325 mm の大きさとなる .

複数個の LD 素子を使用することは並べる面積が必要だが ,発光点を小さくすることでその面積を小さくすることができ ,また個々の LD とレンズのセットが小さいので厚さを薄くできる .他のレーザーと比べ軽量化に大変有利である .この方法には発熱 ,各素子の方向制御の問題があるが ,集光方法やシステムとしての大きさは最も有望なので ,制御方法 ,放熱方法でさらなる検討が必要である .

この他 7 km へ向けての検討課題としては ,今回の実験では行わなかったローバーの動きに合わせたトラッキング ,太陽電池パネルとレーザーが常に正対する制御があり ,現在研究開発中である .また ,今回の実験では受光素子に Single-Junction の GaAs 太陽電池を使用した が ,レーザーに特化した素子を使用することでより変換効率を上げ

ることが可能か十分な検討が必要である .

最後に今回の実験及び装置作製は近畿大学オープンリサーチセンターの GEMDAT (Global Environment Measurement and Development of Adaptive Technology)のメインプログラムとして ,また NEDO フェローシップのプログラムの一環としてサポートを受けている .

参 考 文 献

- 1)Feldman, W. C., Maurice, S., Binder, A. B., Barraclough, B. L., Elphic, R. C. and Lawrence, D. J.: Fluxes of Fast and Epithermal Neutrons from Lunar Prospector, Evidence for Water Ice at the Lunar Poles, *Science*, **281**(1998), pp.1496-1500.
- 2)Kawashima, N.: The Importance of the Development of a Rover for the Direct Confirmation of the Existence of Ice on the Moon, *Trans. Jpn. Soc. Aeronaut. Space Sci.*, **43**(2000), pp.34-35.
- 3) 河島信樹主査 : 小型ローバーによる月極地方氷探査ミッション検討部会報告書, 月惑星協会, 1997.
- 4)Takeda, K., Tanaka, M., Miura, S., Hashimoto, K. and Kawashima, N.: Laser Power Transmission for the Energy Supply to the Rover Exploring Ice on the Bottom of Craters in the Lunar Polar Region, *Proceedings of SPIE*, **Vol. 4632**, 2002, pp.223-227.
- 5)武田和也, 河島信樹 : 半導体レーザーによる月氷探査ローバーモデルへの 100 m エネルギー伝送実験, 日本航空宇宙学会論文集, **51**(2003), pp.393-396.