

Progress Report of Atmospheric Transmittance Estimation of LSSPS Laser by Applying Meteorological Model¹

Naoya OGAWA (Gifu Univ.), Susumu SHIMADA (AIST), Tomonao KOBAYASHI,
Jun YOSHINO (Gifu Univ.) Hiroyuki YOSHIDA and Katsuto KISARA (JAXA)

The Laser-type Space Solar Power System, LSSPS, uses a laser beam to transfer the solar power from a power satellite to receivers on ground. The Laser beam attenuates due to atmospheric gases and clouds through the atmospheres. Atmospheric transmittance of the laser beam is one of the factors related to the efficiency of the LSSPS. The weather conditions are estimated with a meteorological model, and the distribution of the transmittance on the Japan Islands is evaluated with them. The results will be used for both the estimation of the LSSPS efficiency and the selection of the suitable locations of ground receivers.

The weather conditions on and around Japan Islands are evaluated with the mesoscale meteorological model, WRF (Weather Research and Forecasting Model), that is developed by the National Center for Atmospheric Research (NCAR), and the National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA), for the year in 2011. The total water in the atmosphere is computed with WRF, and applied to evaluate the optical thickness of the atmosphere. The thickness is used to estimate the atmospheric transmittance for the LSSPS laser with the Lamber-Beer law. In this study, the effect of the aerosol to the transmittance is also taken into account.

The atmospheric transmittance is also observed in the field at the Gifu University with a skyradiometer, and applied for the verification of the computed results. The observed transmittance varies in time significantly. The computed results traces well the observed time-series, and it indicates the validity of the computed results.

The atmospheric transmittance on and around Japan Islands are computed every hour including night time, but only the averaged transmittance in a year is printed in this paper. The transmittance at the basin near the central Japan is higher than the other place in Japan in its distribution map. It's also higher along the Pacific coast than the Japan Sea. The map will be used for selecting the appropriate arrangement of the ground receivers, and its time series data will also used for managing them.

¹ Presented at the Sixteenth SPS Symposium, 3-4 October, 2013

気象モデルを用いた LSSPS レーザの大気透過率の推定検討と進捗報告

小川直也 (岐阜大学), 嶋田 進 (産業技術総合研究所), 小林智尚, 吉野 純 (岐阜大学)

吉田裕之, 木皿且人 (宇宙航空研究開発機構)

1. はじめに

現在, 宇宙空間に太陽光パネルを設置して発電する宇宙太陽光発電 (Space Solar Power Systems; SSPS) の実現に向けた研究開発が宇宙航空研究開発機構を中心に進められている. このうち, 宇宙空間から地上へのエネルギー伝送にレーザーを用いる LSSPS (Laser-type Space Solar Power Systems) では, 地上のレーザー受信局をコンパクトに抑えることができる反面, レーザが雲やエアロゾルによって減衰してしまう. そのため, レーザの地表への到達率 (大気透過率) がシステム稼働率を決定付ける要素の一つとなり, 厳格な費用対効果分析やレーザー受信局の設置点検討のためには, 日本全域における大気透過率分布を定量的に把握する必要がある.

エネルギー伝送用レーザーには, 空気分子や大気ガス (水蒸気や二酸化炭素など) による減衰が少ない近赤外波長 (1,064-1,075 nm) が使用されるものの, 空気分子と比べて粒径が大きい雲とエアロゾルによる影響を避けることはできない. そこで著者らは, 雲とエアロゾルによるレーザーの減衰に着目し, 日本列島全域における大気透過率の推定手法を現在開発している. 本稿では, 数値気象モデル WRF と衛星センサ MODIS を利用した LSSPS レーザ大気透過率の推定手法を提案し, その手法に基づき推定した日本列島周辺における大気透過率分布及びその推定精度について紹介する.

2. メソ気象モデル WRF

任意の地点および時間帯における大気透過率を推定するために, 本研究ではメソ気象モデル WRF (Weather Research and Forecasting) による高解像度気象シミュレーションを実施した. WRF とは, 米国大気科学研究センターと米国国立環境予測センターを中心に開発が進められている非静力学・完全圧縮の数値気象モデルであり, 高解像度で現実的な気象場を再現することができることから, 日々の天気予報のみでなく, 再生可能エネルギーの分野等で幅広く使用されている. WRF の計算領域を図 1 に示す. 日本列島全域を含む領域を, 水平解像度 5 km×5 km, 鉛直層数 40 層と設定した. 計算期間については 2011 年 1 月から 2011 年 12 月までの 1 年間とした. 物理オプションを含む詳細な計算条件については表 1 に示す通りである.

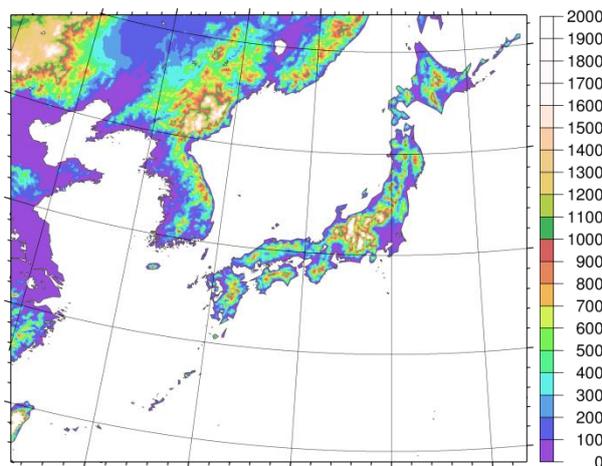


図 1 WRF の計算領域とモデル内標高

表 1 WRF の計算条件

Period	Start: 2010-12-31_00:00UTC End: 2011-12-31-18:00UTC
Input data	JMA GANAL (6 hourly, 20 km grid) NCEP FNL (6 hourly, 1° grid) OSTIA (daily, 0.05° grid)
Domain	5 km grid, 559×539 grids
Vertical layer	40 levels (surface to 50 hPa)
Physics option	Dudhia short wave radiation RRTM long wave radiation WSM 6-class graupel scheme Kain-Fritsch cumulus parameterization Noah land surface model MYJ PBL parameterization
FDDA option	Off

3. 大気透過率の定義とその推定手法

波長 λ (nm) におけるレーザ大気透過率 $TR(\lambda)$ (無次元) は, 地上に到達するレーザ強度 $I(\lambda)$ ($W/m^2/nm$) を大気上端でのレーザ強度 $I_0(\lambda)$ ($W/m^2/nm$) で除した次式で定義する.

$$TR(\lambda) \equiv \frac{I(\lambda)}{I_0(\lambda)} \quad (1)$$

大気中を透過する光の減衰については, 次式に示す Lambert Beer の式によって表現できる.

$$I(\lambda) = I_0(\lambda) \cdot \exp(-AM \cdot \tau(\lambda)) \quad (2)$$

ここで, AM は鉛直方向から入射した光が海表面まで達する大気経路長を 1 とした相対的な光の大気経路長である相対エアマス (無次元), $\tau(\lambda)$ は大気全体の光学的厚さ (無次元) である. これらの式より, 式 (1) で示した大気透過率の定義は

$$TR(\lambda) \equiv \frac{I(\lambda)}{I_0(\lambda)} = \exp(-AM \cdot \tau(\lambda)) \quad (3)$$

となり, 相対エアマスおよび大気全体の光学的厚さからレーザ大気透過率を推定することができる.

次に大気全体の光学的厚さ $\tau(\lambda)$ は, レイリー散乱の光学的厚さ $\tau_R(\lambda)$, ガス (水蒸気や CO_2 など) の光学的厚さ $\tau_G(\lambda)$, 雲の光学的厚さ $\tau_C(\lambda)$, エアロゾルの光学的厚さ $\tau_A(\lambda)$ の合計値として表すことができる.

$$\tau(\lambda) = \tau_R(\lambda) + \tau_G(\lambda) + \tau_C(\lambda) + \tau_A(\lambda) \quad (4)$$

ここで, LSSPS レーザ波長 1,064 nm は, 空気分子やガスによる吸収・散乱が少ない波長帯であるため,

$$\tau(\lambda) \approx \tau_C(\lambda) + \tau_A(\lambda) \quad (5)$$

と近似できる. つまり, 相対エアマス及び雲・エアロゾルの光学的厚さをそれぞれ推定できれば, そこから大気透過率へと換算することができる.

相対エアマス AM に関しては, レーザ入射角に依存する平均的なエアマス m_0 に標高や気圧の高低に伴う大気層の厚さを考慮するため, WRF の気象計算より出力される地表面気圧 P_{sfc} (hPa) と標準大気圧 P_0 (=1,013 hPa) の比を掛け合わせることで推定した.

$$AM = m_0 \cdot \frac{P_{sfc}}{P_0} \quad (6)$$

次に, 雲の光学的厚さ $\tau_C(\lambda)$ に関しては, WRF による気象計算結果から得られる全水量の鉛直積算値に Stephens の式 (1978) を適用することで算出することができる. WRF では, 雲水, 雲氷, 雨水, 雪, 霰に区分された混合比を予報している. これらのパラメータについて状態方程式を介して一旦密度に換算し, その密度の合計値に大気層の厚さを乗じたものを全水量の鉛直積算値 CWP (g/m^2) と定義する. Stephens (1978) によれば, 波長 750 nm~4,000 nm における雲の光学的厚さは, CWP の関数として式(8)のように表現できる.

$$\log_{10} \tau_C = 0.3492 + 1.6518 \cdot \ln(\log_{10} CWP) \quad (7)$$

エアロゾルの光学的厚さについては, 米国航空宇宙局から配信されている地球観測衛星 TERRA・AQUA の搭載センサ MODIS による観測データを使用する. MODIS では陸域・海域におけるエアロゾルの光学的厚さを観測しているものの, 収録データは 550 nm 帯に対応した値 $\tau_A(550 \text{ nm})$ であるため, 式(8)によって, LSSPS のレーザ波長である 1,064 nm に対応する値 $\tau_A(1,064 \text{ nm})$ に換算する必要がある.

$$\tau_A(\lambda) = \tau_A(550 \text{ nm}) \cdot \left(\frac{\lambda}{550}\right)^{-\alpha}, \lambda = 1,064 \text{ nm} \quad (8)$$

ここで, α はエアロゾルの粒径の大小を示す指標であるオングストローム指数 (無次元) で, エアロゾルの光学的厚さと同様 MODIS 観測データセットに収録されている. しかし, MODIS では雲域でのデータが欠落しており, また極軌道衛星に搭載されていることから, 周期および領域は観測時間や天候条件により変化する. そのため, 式(9)の換算を行う前に, 観測データセットを日単位に整理し, WRF の水平解像度と合わせるために 0.05° 格子にデータを内挿した後, スプライン補間によって欠落部分への外挿処理を施した (図 2 参照).

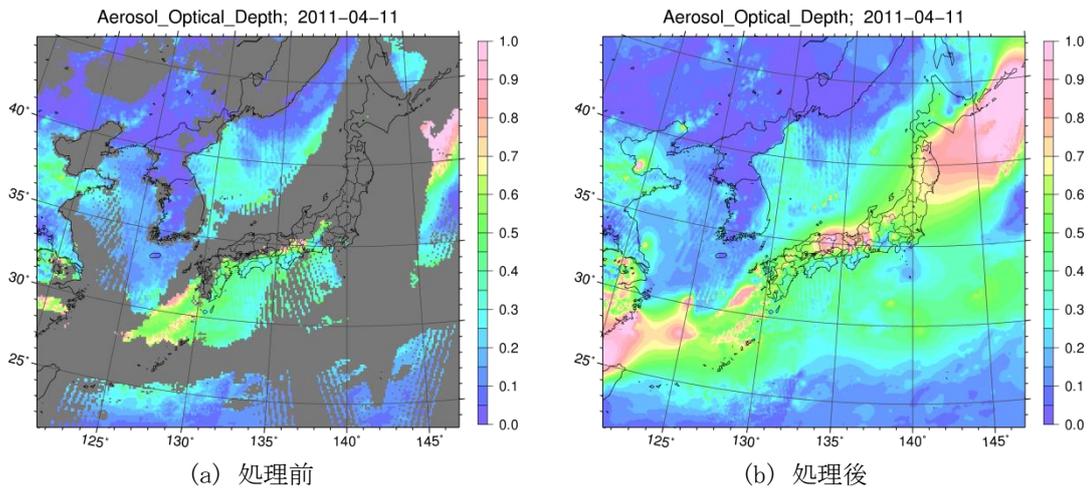


図2 MODIS/NASAによるエアロゾルの光学的厚さ (a) 処理前, (b) 処理後 (1,064 nm, 2011年4月10日)

4. 結果と考察

4.1. 岐阜大学における大気透過率の推定精度

図3は、スカイラジオメータによる地上観測および開発した推定モデルに基づく岐阜大学における日平均大気透過率の時系列である。図中、青線で示される観測値では、春季・夏季(4月～8月)と比べて秋季・冬季(2月～3月, 9月～12月)での大気透過率が相対的に高く、逆に黄砂の飛来する5月と梅雨時期である6・7月では透過率が低くなっている。一方、図中、赤線で示される推定値を観測値と比較してみると、大気透過率が春季・夏季で低く、秋季・冬季で高くなりやすいこの地域の季節的特徴を捉えられていることが分かる。さらに、天候の変化に伴う日々の細かな変動についても概ね再現できている。

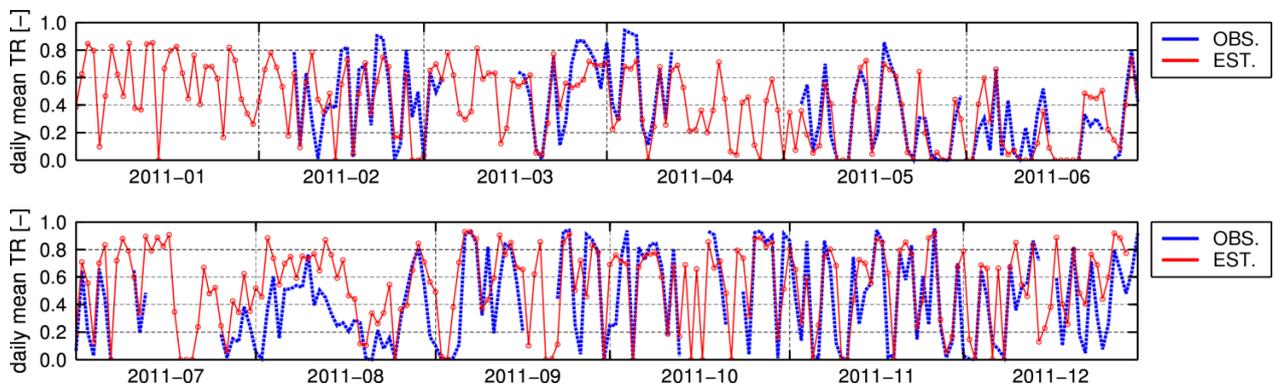


図3 観測およびWRF計算値に基づき推定した日平均大気透過率の時系列

(1,064 nm, 2011年, 岐阜大学, 青線: 観測値, 赤線: 推定値)

4.2. 日本周辺における年平均大気透過率分布

図4は、日本列島全域における年平均大気透過率分布である。まず全体的に見てみると、日本列島における大気透過率はほとんどの地域で0.2～0.5の間に分布しており、脊梁山脈を境に日本海側と比べて太平洋側で相対的に大気透過率が高くなっている。日本海側では、秋の終わりから春先まで西高東低の気圧配置が卓越し、長期間曇天日が継続する。この冬場に日本海を覆う厚い雲が日本海側の年平均透過率を低くしていると推察される。次に、大気透過率の高低からレーザ受信局の候補地を検討してみると、群馬・山梨・長野各県の一部で大気透過率が0.50～0.55の間で分布しており、日本国内において最も高い大気透過率が期待できる地域となっている。これらの地域は中央高地式気候に属しており、年間を通して降水量が少なく天候が安定している。従って自然地理的要因のみを考慮した場合には、群馬・山梨・長野周辺がレーザ受信局の有力な候補地の一つとして挙げる事ができる。

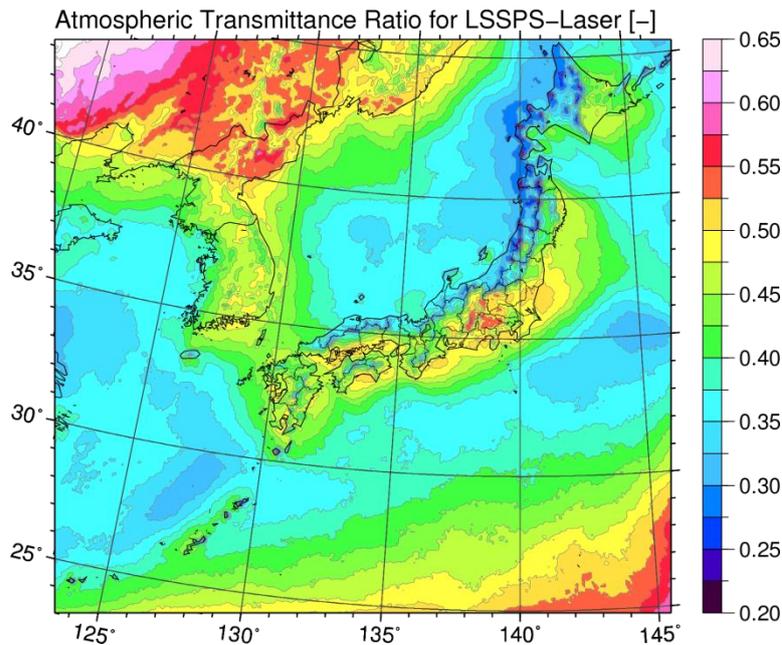


図4 WRF 計算値に基づき推定した LSSPS レーザの年平均大気透過率分布 (0.05° × 0.05° 格子)

5. おわりに

本研究では、メソ気象モデル WRF による計算結果および衛星センサ MODIS によるエアロゾル観測値を用いた LSSPS レーザ大気透過率の推定手法を提案し、その手法に基づき推定した日本列島周辺における大気透過率分布及びその推定精度を示した。本研究で得られた主要な成果は以下のようにまとめられる。

- 1) LSSPS レーザの大気透過率は、相対エアマスと雲・エアロゾルの光学的厚さから定量的に推定できる。
- 2) 相対エアマスは気象モデル WRF から得られる地表面気圧、雲の光学的厚さは WRF から得られる雲混合比から推定し、エアロゾルの光学的厚さに関しては MODIS による衛星観測値を利用する。
- 3) WRF 計算値から推定した LSSPS レーザの年平均大気透過率分布より、日本列島周辺では、日本海側に比べると相対的に太平洋側での透過率が高い。そして、関東から東海までの範囲で透過率の高い地域が帯状に分布し、長野、山梨、群馬の各県の一部が日本国内において年平均大気透過率が最も高い地域である。
- 4) 岐阜大学における大気透過率のスカイラジオメータによる観測値と WRF 計算値に基づく推定値を比較した結果、推定値は大気透過率が春季・夏季で低く、秋季・冬季で高くなりやすいこの地域の季節的特徴を再現できている。また、数日周期で値が大きく上下する日々の変動に関しても概ね追従できている。

参考文献

- 1) Donlon, C. J., M. Martin, J. Stark, J. Roberts-Jones, E. Fiedler, and W. Wimmer: The Operational Sea Surface Temperature and Sea Ice Analysis (OSTIA) system. *Remote Sens Environ*, 116, 140-158, 2012.
- 2) NCAR_FNL data download homepage: rda.ucar.edu/datasets/ds083.2
- 3) MODIS Website: <http://modis.gsfc.nasa.gov/>
- 4) WRF Model Users Page: <http://www.mmm.ucar.edu/wrf/users/>
- 5) Stephens, G. L.: Radiation Profiles in Extended Water Clouds. II: Parameterization Schemes. *J Atmos Sci*, 35, 2123-2132, 1978.
- 6) 笠原三紀夫, 東野達: エアロゾルの大気環境影響, 京都大学学術出版会, pp. 173-206, 2007.
- 7) 熊須啓介, 吉田裕之, 木皿且人, 嶋田進, 吉野純, 小林智尚: LSSPS 地上伝送に関するレーザ大気透過特性の検討, 第 55 回宇宙科学技術連合講演会論文集, 1H08, 2011.
- 8) 嶋田進, 小川直也, 吉野純, 小林智尚, 吉田裕之, 木皿且人: 気象モデルを用いた日本周辺の LSSPS レーザ大気透過率に関する研究, 第 56 回宇宙科学技術連合講演会論文集, 3C05, 2012.