

# Forecasting of Atmospheric Transmittance Estimation of LSSPS Laser by Applying Meteorological Model<sup>1</sup>

Naoya OGAWA (Idea Inc.), 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 transmittance is forecasted with a meteorological model and satellite data, and verified with the observation on the ground. The ensemble forecasting is also employed in this work, and forecasts not only the atmospheric transmittance of the laser beam but also its confidence index.

The weather conditions around the target point, Gifu University are evaluated with the mesoscale meteorological model, WRF (Weather Research and Forecasting Model), which is developed by the National Center for Atmospheric Research (NCAR), and the National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA), from July to November, 2011. The total cloud 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 Lambert-Beer law. In this study, the effect of the aerosol to the transmittance is also taken into account.

The 72-hour-ahead forecasting of the atmospheric transmittance is performed every day. The accuracy of the intra-day forecasting is about 0.7 in the correlation between the forecasting and the observation. The accuracy becomes worse as the forecasting period becomes longer. The ensemble forecasting is also employed in this work. In the ensemble forecasting, several computations of the transmittance forecasting run, and evaluate the forecasted value as their mean value, and the spread as their standard deviation. It seems in the computation results that the spread tends to large when the difference between forecasting and observation is large. Therefore we introduce the spread as confidence index of the forecasting. By the computation of the forecasting and the spread with the ensemble forecasting, not only the atmospheric transmittance of the laser beam but also its confidence index can be forecasted in this work.

---

<sup>1</sup> Presented at the Seventeenth SPS Symposium, 21-22 October, 2014

# 気象モデルを用いた LSSPS レーザ大気透過率の予報<sup>†</sup>

小川直也 (いであ), 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) が天候の変化に従い時々刻々変化してしまう. この受光電力の時間変動は電力システムにとっては電力供給の不安定要因となるため, この変動を除去あるいは事前に予測する必要がある.

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, 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開発している (嶋田ら, 2012; 小川ら, 2013). そこで本研究では大気透過率の事前予報技術を開発する. さらに実際の運用で有益となりうる付加情報として, その予報の信頼度についても事前予測する.

## 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 (Domain1) から対象となる岐阜大学を中心とする小領域 (Domain3) までネスティングしている. 計算期間については 2013 年 7 月から 2013 年 11 月までの 5 年閏ヶ月とし, 1 日に 1 回, 72 時間先までの予報を行った. 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.

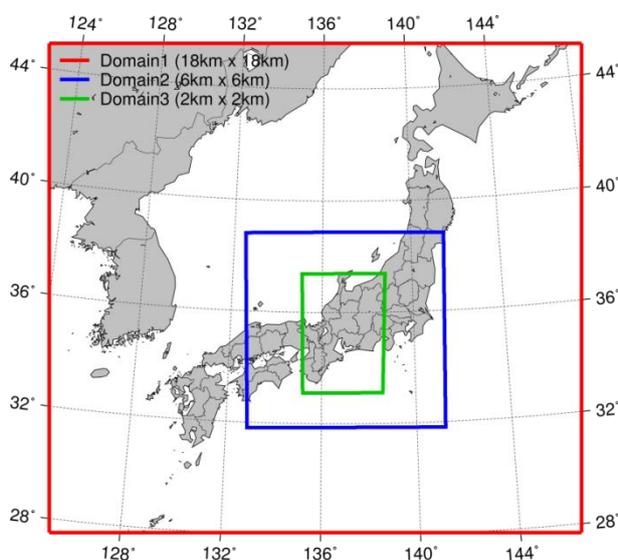


図 1 WRF の計算領域

表 1 WRF の計算条件

計算期間	2013-07-01_00:00UTC ~ 2013-12-01_00:00UTC, 72 時間予測
入力データ	気象庁 GSM (3-hourly, 20 km 格子) 英国気象局 OSTIA (3-hourly, 0.05°格子) NCEP GFS (daily, 1°格子)
ドメイン	Domain 1 : 18 km × 18 km 格子 (119 × 119 grids) Domain 2 : 6 km × 6 km 格子 (129 × 129 grids) Domain 3 : 2 km × 2 km 格子 (159 × 159 grids)
鉛直層数	50 層 (地表面~100 hPa 面)

### 3. 大気透過率の定義とその推定手法

波長  $\lambda$  (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.

式(3)中の大気全体の光学的厚さ  $\tau(\lambda)$  を構成する雲の光学的厚さ  $\tau_c(\lambda)$  とエアロゾルの光学的厚さ  $\tau_a(\lambda)$  にはそれぞれ気象モデル WRF による予報値および, 人工衛星センサーMODIS から算出された観測値を用いた. これらの光学的厚さの算出方法は小川ら (2013) を参照されたい. このうち, エアロゾルの光学的厚さの算出に用いる MODIS の観測値は予報値を得ることができないため, ここではその観測地の平年値 (月平均値) を用いた. 大気透過率の計算条件を表 2 にまとめる.

表 2 大気透過率の計算条件

対象波長	1,064 nm
対象地点	岐阜大学 (東経 136.737° , 北緯 35.467° )
計算期間	2013 年 7 月~同年 11 月 (5 ヶ月間)
時間解像度	30 分
雲の光学的厚さ	雲水透過率モデル TMCW を用いて算出
エアロゾルの光学的厚さ	MODIS から算出された平年値 (月平均値)

### 4. 大気透過率の予報と予報精度

図 2 に地上観測値および予測計算から得られた日平均大気透過率の時系列を示す (8 月は地上観測値の欠測期間であるため除外した). 図中の灰線は地上観測値, 赤線は当日予測値, 青線は 1 日先予測値, 緑線は 2 日先予測値である. この図に示す様に計算結果は予報期間に関わらず透過率の大まかな変動傾向を捉えている. しかし, 7 月 13 日・9 月 10 日・11 月 2 日など前日と比べて透過率が急激に低くなる日では, 当日予測で最も的中し, 2 日先予測で外す傾向がみられる.

表 3 に岐阜大学に設置されたスカイラジオメータによる日平均透過率と予測計算による日平均透過率とのスコア値を示す. この表のとおり予報期間による精度に違いがみられ当日予測の RMSE と比べて 2 日先予測の RMSE は 2%程度大きくなっている. また, CORR に関しては 0.08 程度 2 日先予測の方が低くなっている. これらのことから, 予報期間が長くなると共に精度が低下することが分かる. 一方で, BIAS に関しては 2 日先予測で最も小さく, 1 日先予測で最も大きくなっている. つまり, 予報期間が長くなっても BIAS に対してはあまり影響が無いと言える.

表3 日平均透過率の地上観測値と予報値とのスコア値

予報期間	当日予測	1日先予測	2日先予測
BIAS [%]	8.67	9.03	7.25
RMSE [%]	24.19	26.30	26.61
CORR	0.7054	0.6436	0.6216

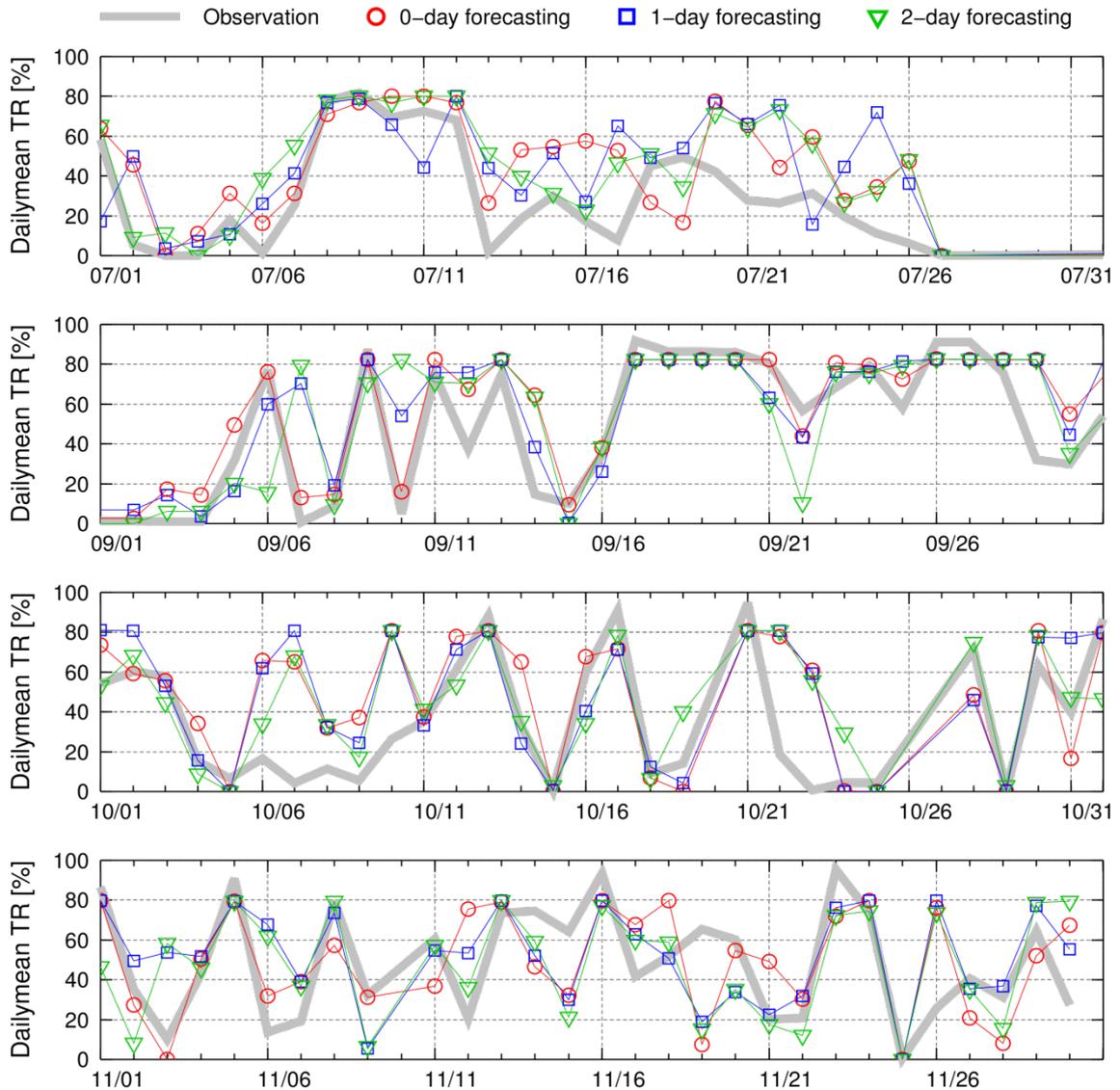


図2 日平均大気透過率の時系列

灰線：地上観測値，赤線：当日予測，青線：1日先予測，赤線：2日先予測  
 (波長 1064nm 帯，2013 年 7 月~同年 12 月，岐阜大学)

## 5. 大気透過率のアンサンブル予報

WRFによる気象予報システムでは、当日予測・1日先予測・2日先予測を実施している。つまり、今日1日の透過率を知りたい場合、2日前に計算された2日先予測・1日前に計算された1日先予測・今日計算された当日予測の3種類の計算結果が存在することになり、明日1日の透過率を知りたい場合は、1日前に計算された2日先予測・今日計算された1日先予測の2種類の計算結果が存在することになる（図3参照）。本節では、大気透過率の各計算結果をメンバーとしたアンサンブル予報を実施する。アンサンブル予報とは異なる条件で予報計算を実施し、それらを統計処理することで全体の傾向をつかむ手法である。アンサンブル予報の種類には初期値に微小のバラつきを与える初期値アンサンブルやモデルの計算スキームを複数用意するモデルアンサンブルなどがある。本研究で行うアンサンブル予報は初期値アンサンブルのタイムラグ法（Lagged Averaged Forecast; LAF法）に相当する。

図4は地上観測値およびアンサンブル予報から得られた日平均透過率の時系列を示す。図中、赤線は透過率のアンサンブル予報値（当日予測・1日先予測・2日先予測の平均値）、エラーバーはアンサンブルメンバーの標準偏差である。この図によれば、9月7日や9月10日のような標準偏差が大きい日では透過率を外していることが多く、逆に標準偏差が小さい日では的中していることが多い。このことから、この標準偏差は予報の信頼度に関係していると考えられ、値が小さいほど予報の信頼性が高いと言える。ただしこの標準偏差は信頼度を示す指標であるため、標準偏差がほとんど0であっても透過率を外す場合がある。

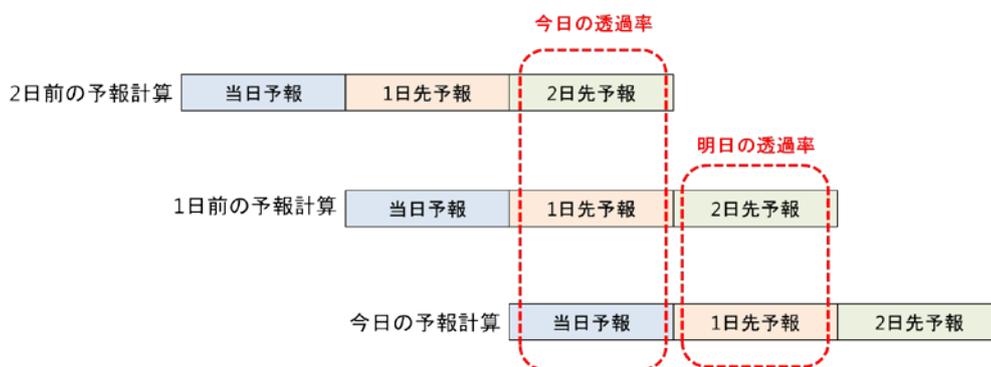


図3 大気透過率アンサンブル予報の概念図

## 6. 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予報を試みた。その結果、予報結果は当日予測について相関値0.7の精度で予報することが可能であった。また大気透過率予報にアンサンブル予報手法を導入した。これにより大気透過率の予報値だけでなく、その予報信頼度を示す指標もあわせて予報することが可能になった。

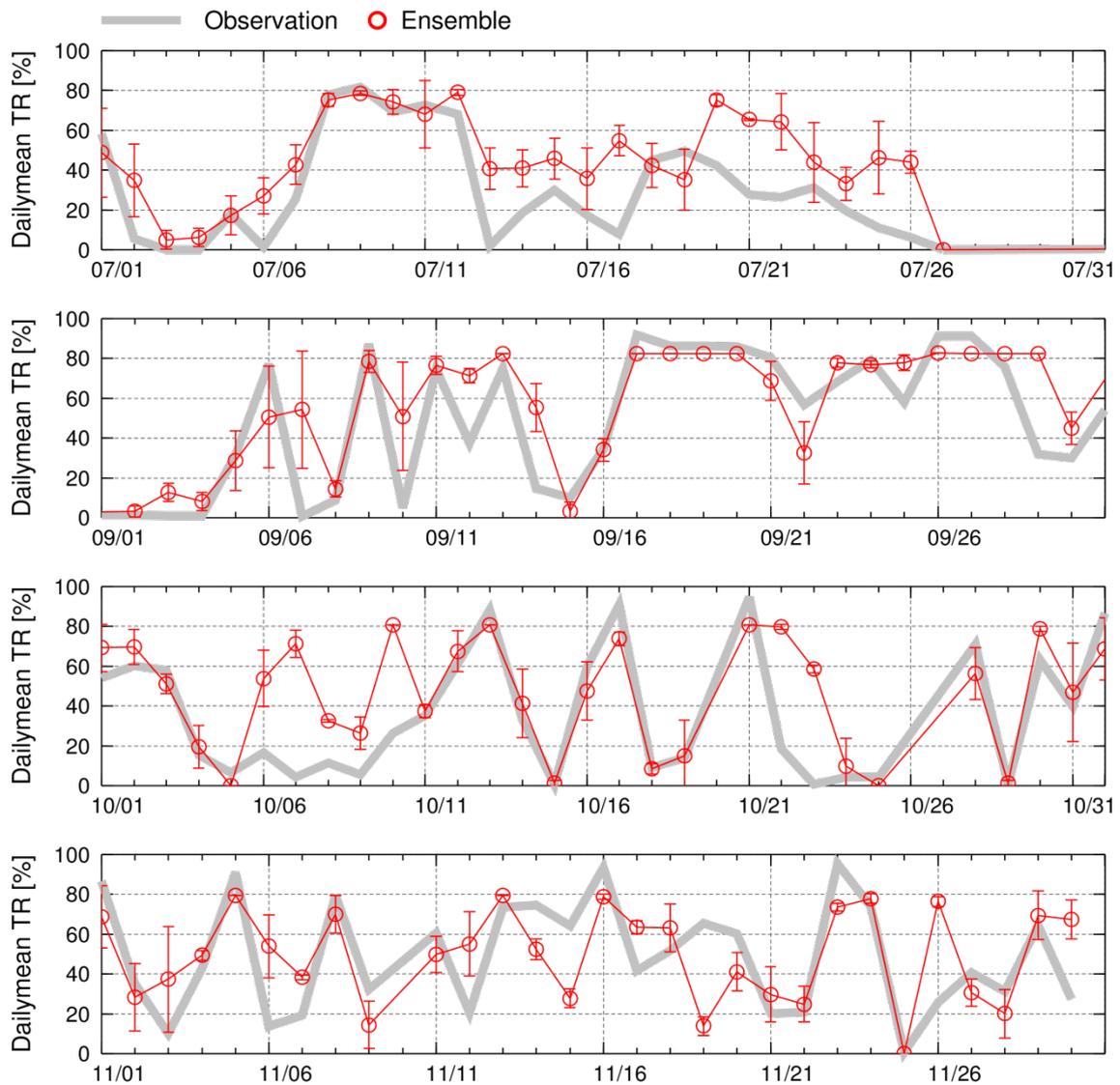


図4 日平均大気透過率のアンサンブル予測結果(当日予測・1日先予測・2日先予測のアンサンブル)  
 灰線：地上観測値，赤線：アンサンブル予報値，エラーバー：標準偏差  
 (波長 1064nm, 2013 年 7 月~同年 11 月, 岐阜大学)

### 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](http://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) 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.
- 6) 小川直也, 嶋田進, 小林智尚, 吉野純, 吉田裕之, 木皿且人: 気象モデルおよび MODIS を用いた LSSPS レーザ大気透過率の推定, 第 57 回宇宙科学技術連合講演会論文集, 3B07, 2013.