

南極点におけるサスツルギ及び積雪粒径の抽出アルゴリズム

Ver. 1.0 (October 31, 2011)

朽木勝幸 ・ 青木輝夫 （気象研究所）

1. アルゴリズムの概要

本アルゴリズムは、南極点における Terra/MODIS 反射率の日変化から、サスツルギの縦横比(振幅)と方位角、及び積雪粒径を抽出するためのものである。反射率の日変化は、日毎に太陽方位角の関数として余弦関数で近似して反射率の日平均、振幅、及び位相を求めることによって定量的に表現されている。チャンネルは Band 2 ($\lambda = 0.86 \mu\text{m}$)と Band 6 ($\lambda = 1.64 \mu\text{m}$)に対応している。詳細については Kuchiki et al. (2011) ¹⁾を参照。

2. ディレクトリ構造

SastrugiSP/

```
bat/sas.modsp.bat      ----- バッチファイル
fitting/MODcosfitSP0304wXXX.csv  --- 反射率の日変化を余弦関数近似したデータ
input/MODRefSouthPole0304.csv  ----- 入力ファイル(南極点における MODIS 反射率)
lut/LUTcosfitSPwXXX.csv  ----- ルックアップテーブル
output/SasSouthPole0304wXXX.csv  --- 出力ファイル(サスツルギと粒径の抽出結果)
program/cosfitSPwXXX.v1.0.f90 -- 反射率の日変化を余弦関数近似するためのプログラム
      /sas.modsp.v1.0.f90  ----- サスツルギと積雪粒径を抽出するためのプログラム
```

“wXXX”は MODIS のチャンネルを表し、“w086”が Band 2 ($\lambda = 0.86 \mu\text{m}$)、“w164”が Band 6 ($\lambda = 1.64 \mu\text{m}$)に対応する。

3. プログラムのコンパイル

全てのプログラムファイルは fortran90 に準拠して作成されている。Intel Fortran, gfortran, Fujitsu fortran で動作が確認されている。Intel Fortran によるコンパイル方法は下記の通り:

```
-----
ifort cosfitSPw086.v1.0.f90 -o cosfitSPw086.v1.0.exe
ifort cosfitSPw164.v1.0.f90 -o cosfitSPw164.v1.0.exe
ifort sas.modsp.v1.0.f90 -o sas.modsp.v1.0.exe
-----
```

4. 処理の流れと実行

図 1 に示す一連の処理はバッチプログラムによって実行される。サンプル入力データとして、2003/10/20～2004/02/21 の MODIS 反射率が入っている (input/MODRefSouthPole0304.csv)。

```
bat/sas.modsp.bat
```

```
-----
ln -s ../input/MODRefSouthPole0304.csv ../input/MODref.csv
../program/cosfitSPwXXX.v1.0.exe
cp ../fitting/MODcosfitSP.csv ../fitting/MODcosfitSP0304wXXX.csv
ln -s ../lut/LUTcosfitSPwXXX.csv ../lut/LUTcosfitSP.csv
../program/sas.modsp.v1.0.exe
mv ../output/SasSouthPole.csv ../output/SasSouthPole0304wXXX.csv
rm ../input/MODref.csv
rm ../fitting/MODcosfitSP.csv
rm ../lut/LUTcosfitSP.csv
-----
```

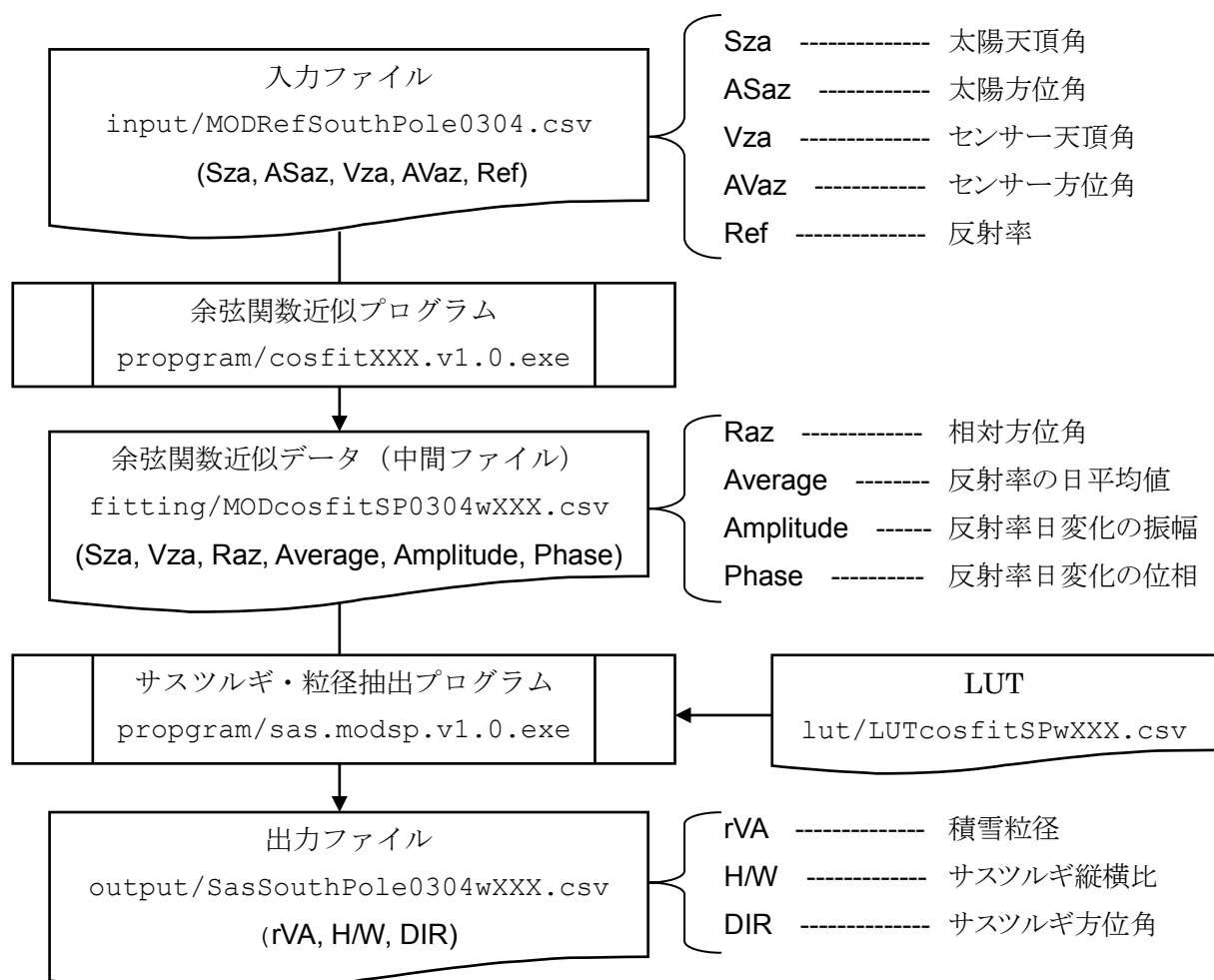


図 1 処理の流れ

5. プログラムの概要

5.1. cosfitSPwXXX.v1.0.f90

南極点におけるMODIS 反射率の時系列データを日毎に太陽方位角の関数として余弦関数で近似し、反射率の日平均、振幅、及び位相を計算するためのプログラムである。Band 2 用 (w086) と、Band 6 用 (w164) がある。

1) 入力パラメータ

input/MODref.csv

```
-----  
DateTime  ---- 日時 yyyy/mm/dd hh:mm  
Sza  ----- 太陽天頂角  
ASaz  ----- 太陽方位角  
Vza  ----- センサー天頂角  
AVaz  ----- センサー方位角  
Ref0.86  ----  Band 2 ( $\lambda = 0.86 \mu\text{m}$ )における大気上端反射率  
Ref1.64  ----  Band 6 ( $\lambda = 1.64 \mu\text{m}$ )における大気上端反射率  
-----
```

2) 出力パラメータ

fitting/MODcosfitSP.csv

```
-----  
Date  ----- 日付 yyyy/mm/dd  
Sza  ----- 太陽天頂角の日平均  
Vza  ----- センサー天頂角の日平均  
Raz  ----- 相対方位角の日平均  
Average  ----  反射率の日平均  
Amplitude  ---  反射率日変化の振幅  
Phase  -----  反射率日変化の位相  
RMSE  -----  回帰分析の 2 乗平均平方根誤差  
R2  -----  回帰分析の決定係数  
Num  -----  1 日のデータ数  
-----
```

3) 近似関数

$$\text{Ref} = a + b * \cos(2.0 * (\text{ASaz} - c))$$

a,b,c は回帰係数であり、それぞれ反射率の Average、Amplitude、Phase に相当する。

4) 計算条件

Num >= 10 (マスクデータ "-999.9")

5.2. sas.modsp.v1.0.f90

南極点における MODIS 反射率の日平均と振幅から、look-up table (LUT) 法によってサスツルギの縦横比と積雪粒径を抽出し、さらに位相差からサスツルギの方位角を抽出するためのプログラムである。

1) 入力パラメータ

fitting/MODcosfitSP.csv

5.1 の出力ファイルに同じ

2) ルックアップテーブル

lut/LUTcosfitSPwXXX.csv

- Sza, Vza, Raz, rVA, H/W と Average, Amplitude, Phase との関係を表した数表。
- 様々な Sza, Vza, Raz, rVA, H/W の条件下でサスツルギの存在する雪面における反射率の日変化を計算し、それらを回帰分析することによって Average, Amplitude, Phase を求めた。
- 計算範囲: Sza = 65.0-80.0°, Vza = 57.0°, Raz = 63.5-71.5°, rVA = 10-500 μm , H/W = 0.0-0.2
- LUT を作成するために使用した放射伝達モデルの概要は 6 章を参照。

3) 出力パラメータ

output/SasSouthPole0304wXXX.csv

```
-----  
Date      -----   日付 yyyy/mm/dd  
rVA[um]   -----   積雪粒径  [ $\mu\text{m}$ ]  
H/W       -----   サスツルギの縦横比  
DIR[deg]  -----   サスツルギの方位角  [deg]  
-----
```

4) 計算条件

Sza <= 80.0° and R2 >= 0.8 (マスクデータ "-999.9")

6. 放射伝達モデル

サスツルギの存在する雪面における反射率の計算では、3 次元放射伝達モデルを使用した。

```
-----  
1 次散乱   -----   幾何光学近似(ray-tracing)2,3)  
多重散乱   -----   モンテカルロ法4)  
積雪粒子   -----   円柱粒子、結晶表面ラフネスあり、粒径は比表面積等価球半径(rVA)で定義  
積雪不純物  ---   なし(pure snow)  
雪面形状   -----   鉛直断面が二等辺三角形の小山が平行に連なった構造(図 2)  
                        底辺 W は 2.0 m で固定、高さ H は 0.0-0.4m で変化  
積雪層     -----   鉛直均一、半無限積雪深  
大気モデル  ---   subarctic winter model5) の高度 2800 m 以下をカット  
大気エアロゾル --   antarctic aerosol model6)、 $\tau = 0.02$  at  $\lambda = 0.5 \mu\text{m}$   
-----
```

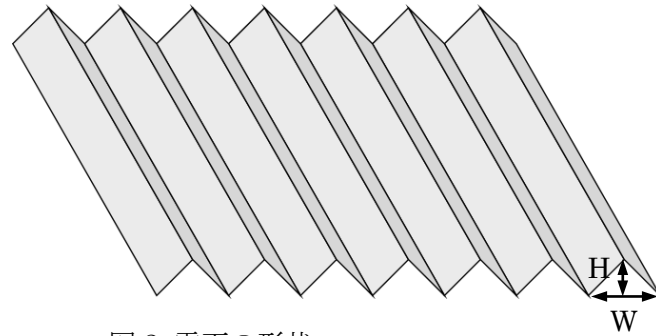


図 2 雪面の形状

7. 参考文献

- 1) Kuchiki, K., T. Aoki, M. Niwano, H. Motoyoshi, and H. Iwabuchi (2011), Effects of sastrugi on snow bidirectional reflectance and its application to MODIS data, *J. Geophys. Res.*, *116*, D18110, doi: 10.1029/2011JD016070)
- 2) Macke, A., and M. I. Mishchenko (1996), Applicability of regular particle shapes in light scattering calculations for atmospheric ice particles, *Appl. Opt.*, *35*, 4291–4296.
- 3) Tanikawa, T., T. Aoki, M. Hori, A. Hachikubo, and M. Aniya (2006), Snow bidirectional reflectance model using non-spherical snow particles and its validation with fields measurements, *EARSeL eProceedings*, *5*, 137–145.
- 4) Iwabuchi, H. (2006), Efficient Monte Carlo method for radiative transfer modeling, *J. Atmos. Sci.*, *63* 2324–2339.
- 5) Anderson, G. P., S. A. Clough, F. X. Kneizys, J. H. Chetwynd, and E. P. Shettle (1986), AFGL atmospheric constituent profiles (0–120 km), *Air Force Geophys. Lab. Tech. Rep.*, *AFGL-TR-86-0110*, Air Force Geophys. Lab., Hanscom, Mass.
- 6) Hess, M., P. Koepke, and I. Schult (1998), Optical properties of aerosols and clouds: the software package OPAC, *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, *79*, 831–844.