



# 衛星シミュレータ Joint Simulator を用いた 数値モデルの検証手法

令和元年9月10日

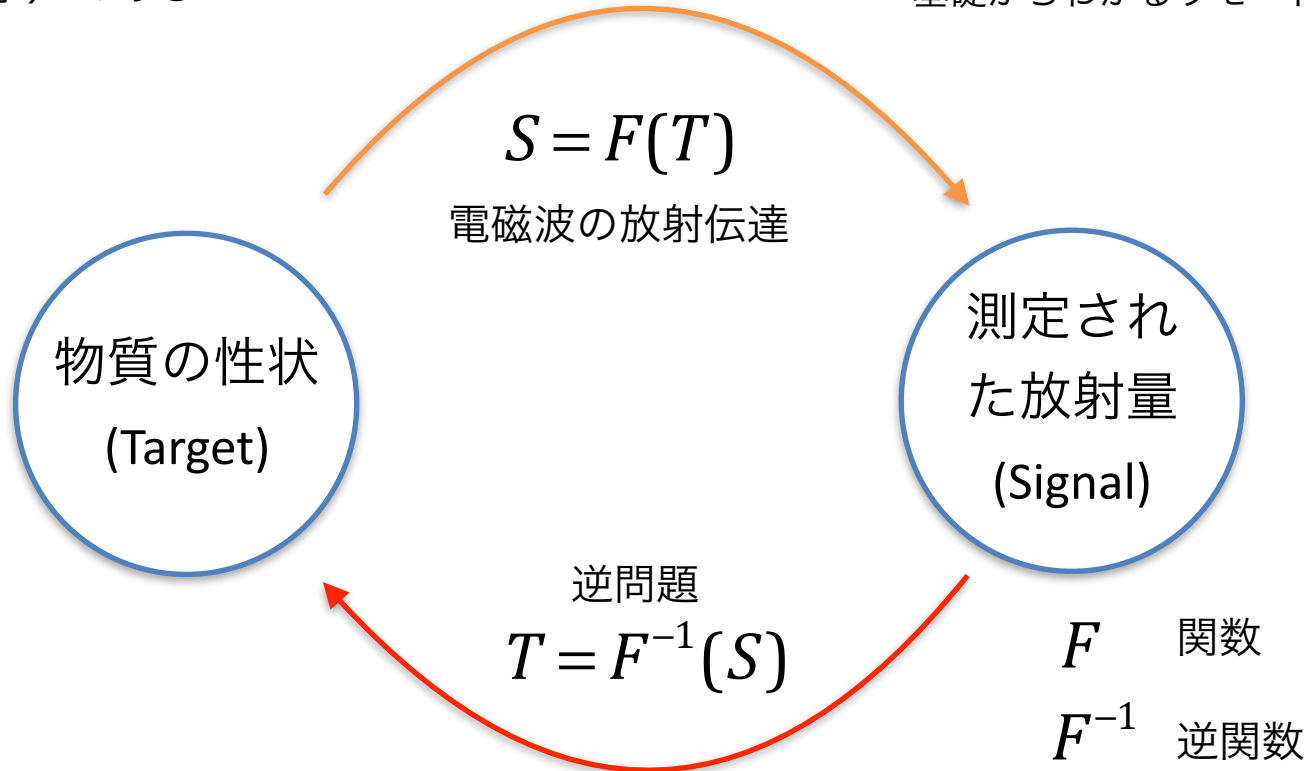
端野 典平

高知工科大学

# リモートセンシングと前方計算

リモートセンシングとは、主として地球表面の対象物からの電磁波を人工衛星などのプラットフォームに搭載されたセンサで観測し、対象物に関する情報を得て、様々な分野に利用する技術（あるいは科学）である

「基礎からわかるリモートセンシング」



リモートセンシング（逆問題）における、解のユニーク性の問題

放射量は、問題としている物質の性状のみで決まるわけではない。他の多くのパラメータに依存し、それらの間の組み合わせによっても同じ放射量が生じる。

# 電磁波・放射源、大気の透明度

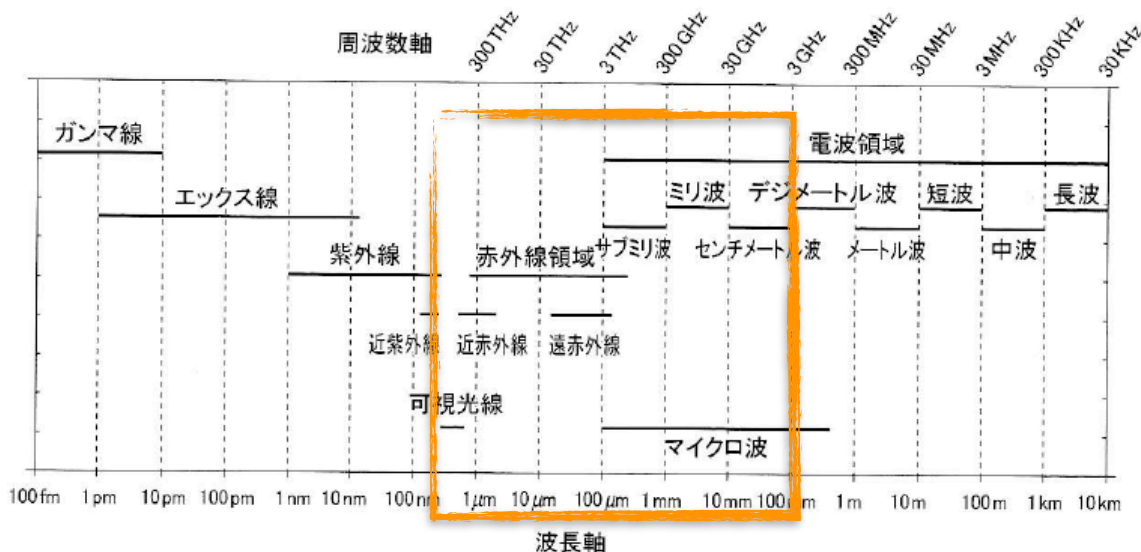


図 1.1 電磁波の波長と呼称

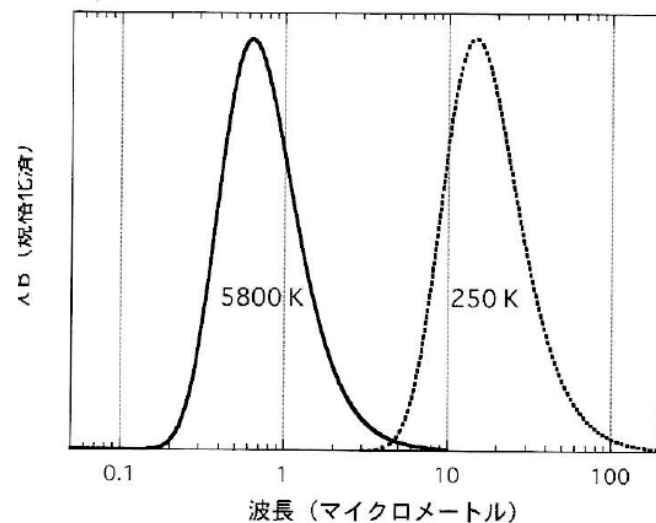
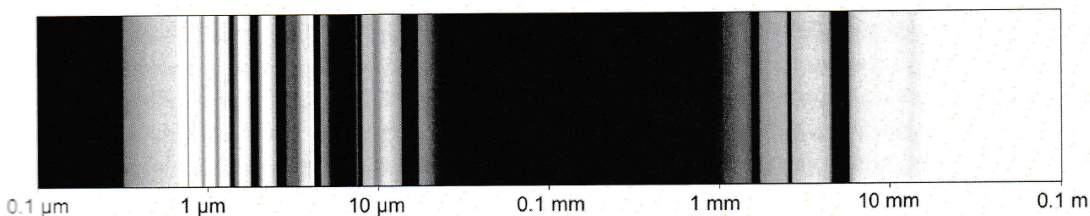


図 1.2 プランク関数

「大気と雨の衛星観測」より

波長の関数としての地球大気の透明度

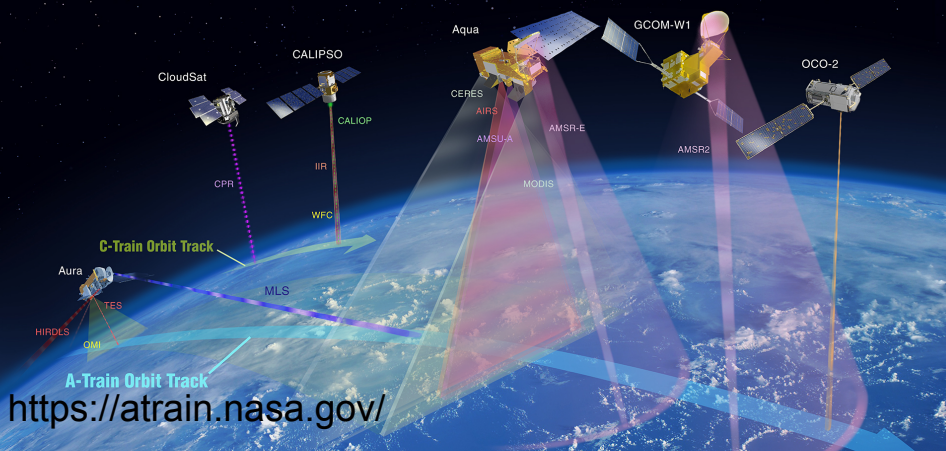


光源：太陽と地球

観測方式：受動型と能動型

# 雲降水を観測する人工衛星

## *The Afternoon Constellation*



## Global Precipitation Measurement (GPM) Mission



<http://gpm.gsfc.nasa.gov/features/whatisgpmcomposedof.html>

## EarthCARE (Earth Clouds, Aerosols and Radiation Explorer)

EarthCARE is a joint European-Japanese mission addressing the need for a better understanding of the interactions between cloud, radiative and aerosol processes that play a role in climate regulation.

衛星観測によって、雲や降水、そして放射の地球規模の分布に対する知見が得られてきた。

# 衛星データシミュレータとは？

衛星センサの種類が増えることにより、衛星観測データを応用可能性が広がった。特に、異なるセンサを組み合わせることにより単体のセンサができる範囲を超えて、その情報を活用することができる。

Masunaga et al. (2010), BAMS

気象学的な応用を対象とした、一貫性のある多センサ衛星シミュレータが必要である。

## 衛星データシミュレータの出現

SDSU family, COSP, CRTM, RTTOV

### エアロゾル・雲モデルの評価

雲解像モデル  
気候モデル

### アルゴリズム開発

リトリバーバル手法、データ同化、  
OSSE (Observing System  
Simulation Experiment)

# 再現されたエアロゾルと雲降水を評価する 2つのアプローチ

比較する衛星観測に内在する不確実性の由来

- 水粒子の相
- 粒径分布
- 氷の形（晶癖）
- 氷の散乱モデル

衛星観測量の不確定性は、  
前方計算により、**みずから**  
把握できる。

リトリブしたプロダクトには、不確定性（もしくはエラーバー）は提供されているが、雲モデルの仮定と異なるものを使っていることが多い。定量的な調査にはプロダクトの開発者の協力が必要。

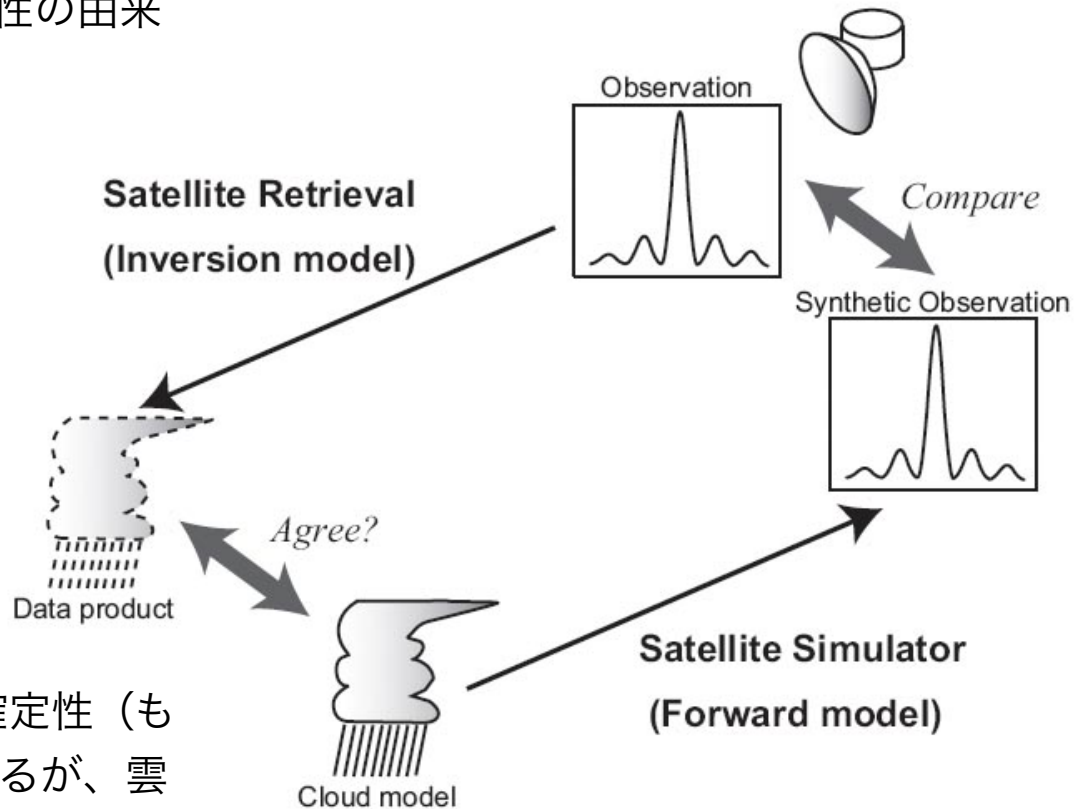
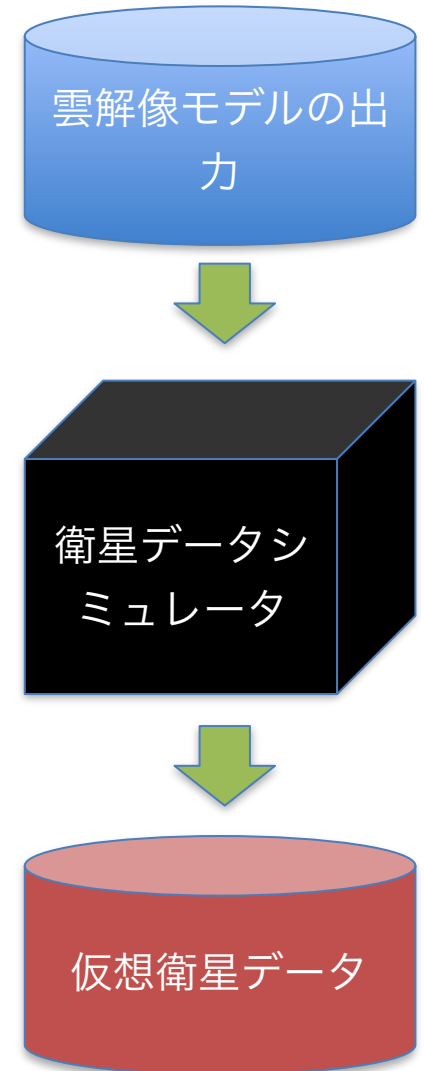
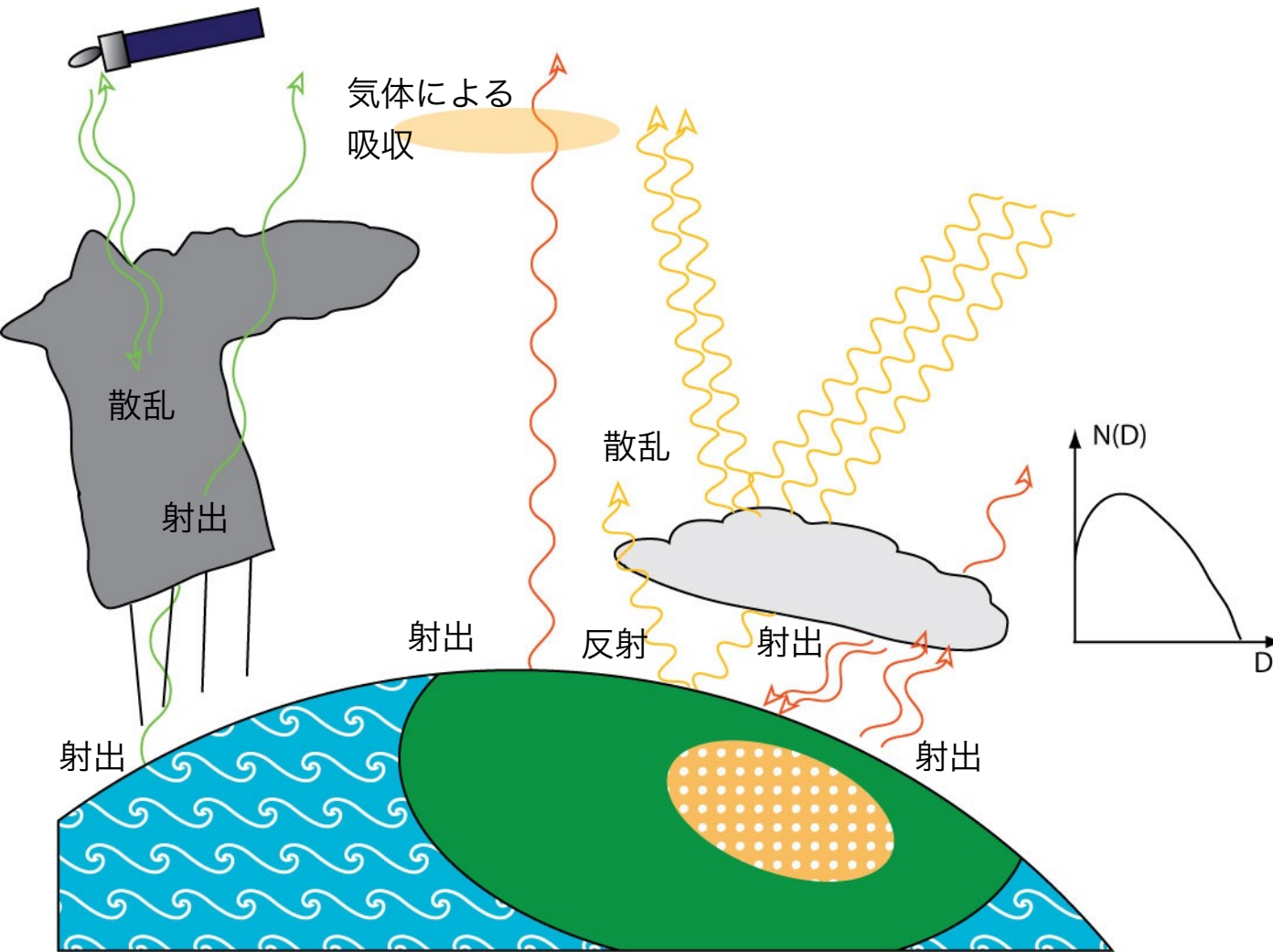


Fig4. Masunaga et al. (2010)

# Joint-Simulatorとは？

- 雲解像モデルの出力について、一次元放射伝達問題を解くもので、センサシミュレータ間および入力モデルの仮定と一貫性を重んじる。



# Joint-Simulatorの特徴

## モデルインターフェ이스の柔軟性

- ✓ 粒径分布関数、質量と直径の関係、落下速度と直径の関係等、namelistで設定。

## 大気モデル

- ✓ 雲解像モデル：NICAM, JMA-NHM, WRF
- ✓ 全球モデル：MIROC, JMA-GSM

## 雲微物理モデル

- ✓ NICAM: NSW6, NDW6
- ✓ WRF: Lin

## エアロゾルモデル

- ✓ SPRINTARS

## 並列計算

放射伝達モデルはリトリバーバル開発で使われる1次元平行平面大気近似のモデル



# センサー シミュレータ

as of Sep 2019

## SDSU family

**Blue:** SDSU modules (<http://precip.hyarc.nagoya-u.ac.jp/sdsu/index.html>)

**Green:** NASA Goddard

SDSU extension

(<http://opensource.gsfc.nasa.gov/projects/G-SDSU/index.php>)

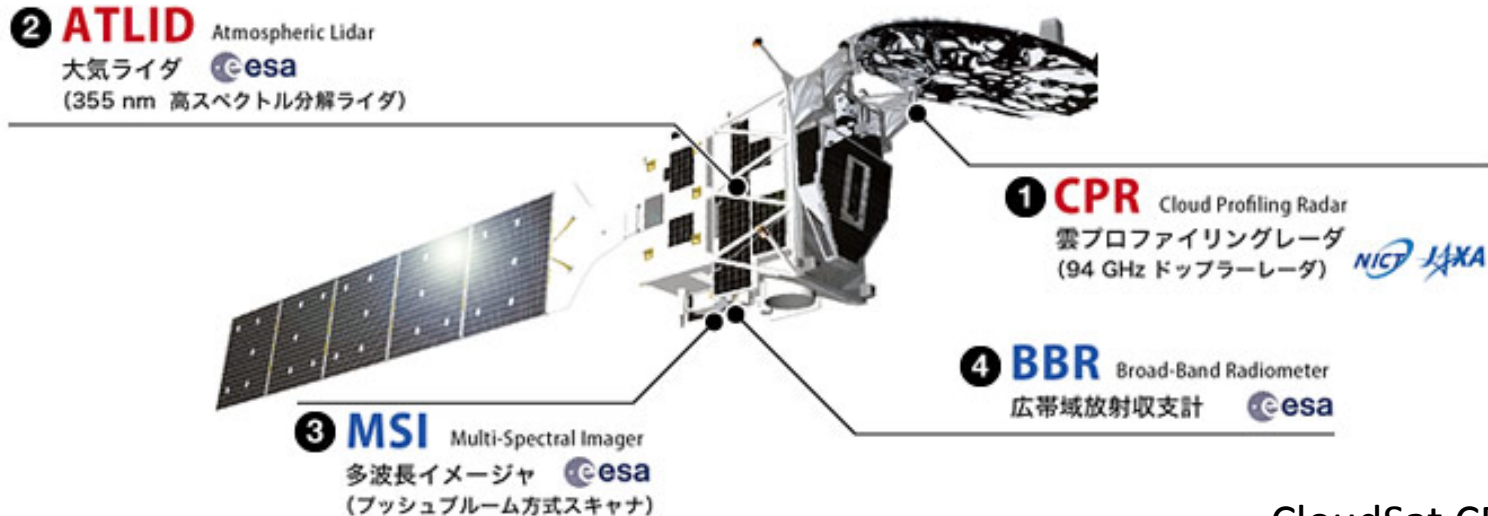
**Orange:** Joint-Simulator extension

(<https://sites.google.com/site/jointsimulator/home>)

- Visible and infrared imager
  - RSTAR7 (Nakajima & Tanaka 1986, 1988)
    - Discrete-ordinate method/adding method
    - K-distribution table with HITRAN2004
- Microwave radiometer and sounder
  - Kummerow (1993)
  - Liu (1998)
- Radar
  - Masunaga & Kummerow (2005)
  - EASE (Okamoto et al. 2007, 2008; Nishizawa et al. 2008)
- Lidar
  - Matsui et al. (2009)
  - EASE
- Broadband radiometer
  - CLIRAD (Chou and Suarez 1994, 1999; Chou et al. 2001)
    - delta-Eddington approximation/adding method (two stream)
    - K-distribution method with HITRAN1996
    - 21 bands
  - MSTRN-X (Sekiguchi and Nakajima 2008)
    - Discrete-ordinate method/adding method (two stream)
    - Correlated-k distribution method with HITRAN2004
    - 18, 29, or 37 bands.
  - RRTMG (Iacono et al. 2008)
    - Two-stream approximation and correlated-k approach.
    - 16 bands for longwave, 14 bands for shortwave.

# 適用可能なセンサー例

EarthCARE



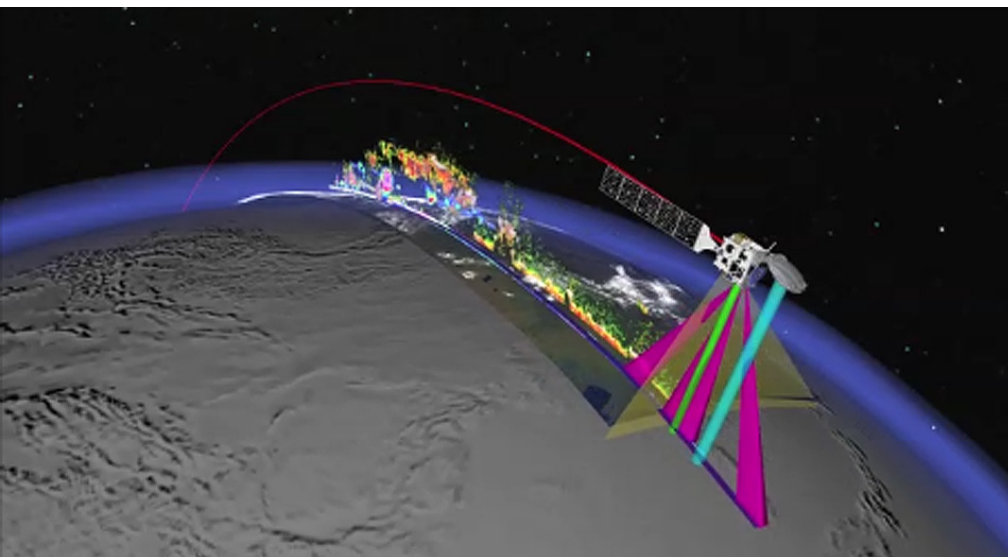
CloudSat CPR &  
CALIPSO CALIOP  
の構成と類似



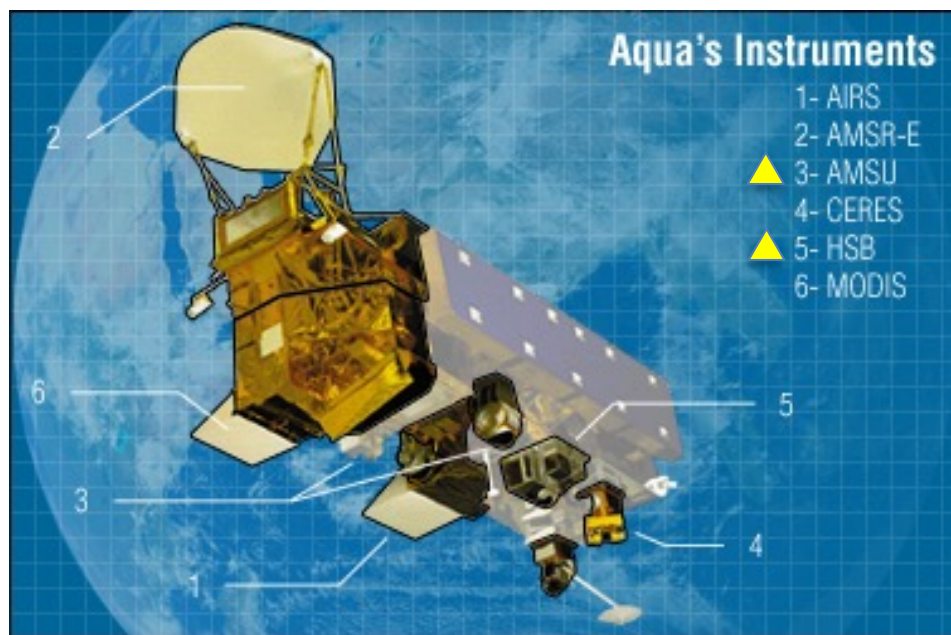
- ease -> CPR and ATLID
- visir -> MSI
- broad -> BBR

JAXAホームページより

<http://www.satnavi.jaxa.jp/project/earthcare/>



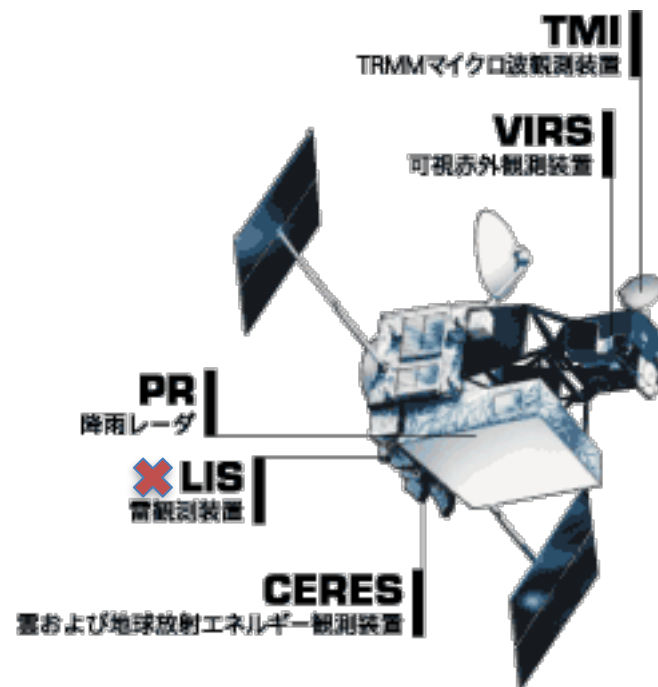
# 適用可能なセンサー一例



<http://aqua.nasa.gov/about/instruments.php>

- micro -> AMSR-E
- visir -> MODIS
- broad -> CERES

- micro -> TMI
- visir -> VIRS
- broad -> CERES
- radar -> PR



[http://www.eorc.jaxa.jp/TRMM/about/mechanism/main\\_j.htm](http://www.eorc.jaxa.jp/TRMM/about/mechanism/main_j.htm)

# 適用可能なセンサー例

ひまわり8号



- visir -> AHI

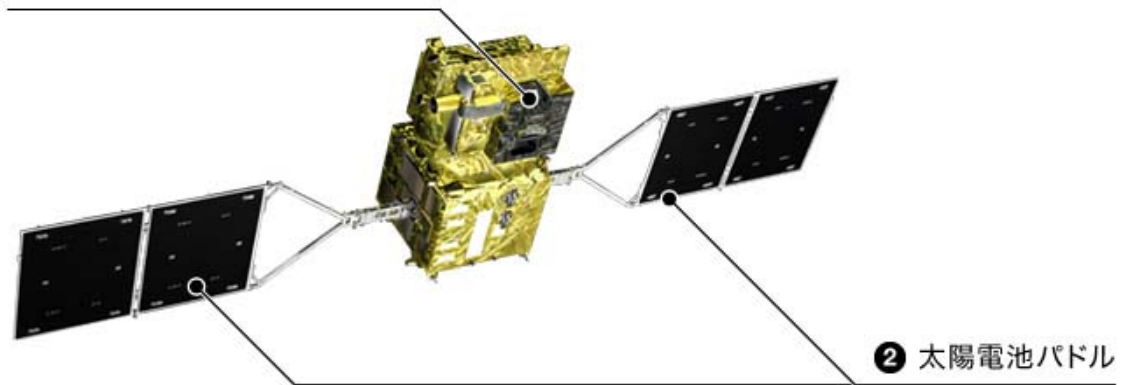
気象庁ホームページより

<https://www.jma-net.go.jp/sat/himawari/himawari89.html>

GCOM-C (しきさい)

- visir -> SGLI

① 多波長光学放射計 (SGLI)



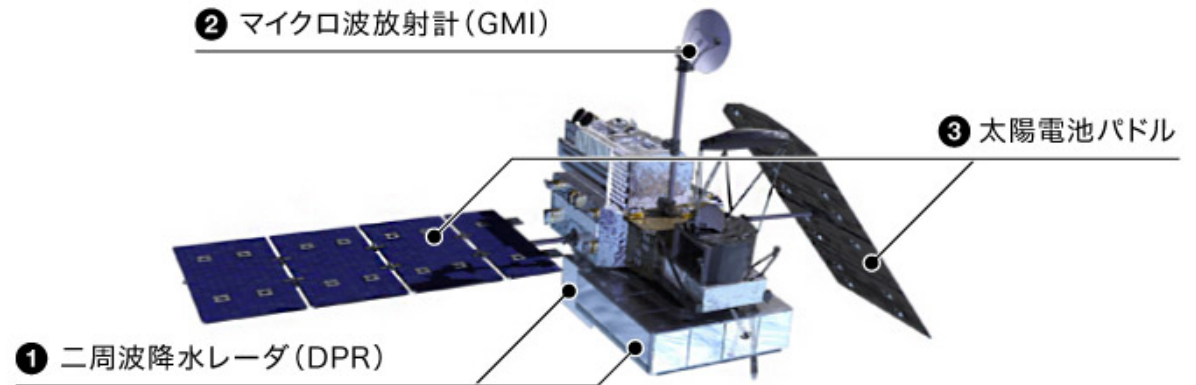
JAXAホームページより

[http://www.satnavi.jaxa.jp/project/gcom\\_c1/index.html](http://www.satnavi.jaxa.jp/project/gcom_c1/index.html)

# 適用可能なセンサー例

## GPM主衛星

- micro -> GMI
- radar -> DPR

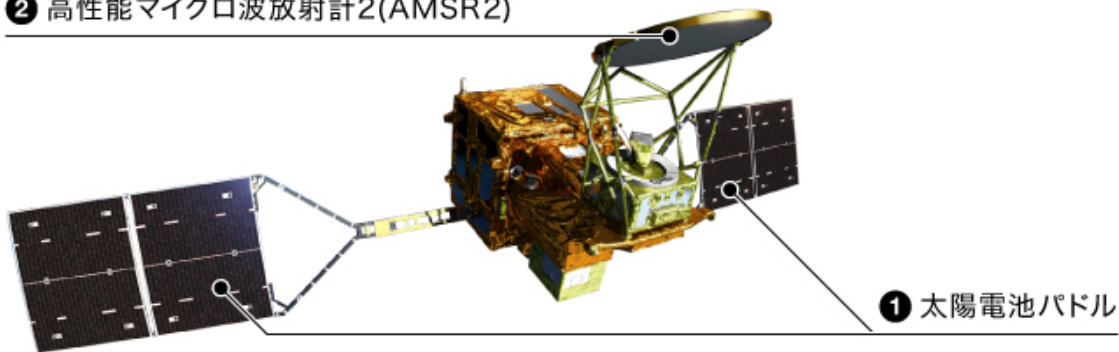


JAXAホームページより

<http://www.satnavi.jaxa.jp/project/gpm/index.html>

## GCOM-W (しずく)

### ② 高性能マイクロ波放射計2(AMSR2)



- micro -> AMSR2

JAXAホームページより

[http://www.satnavi.jaxa.jp/project/gcom\\_w1/](http://www.satnavi.jaxa.jp/project/gcom_w1/)

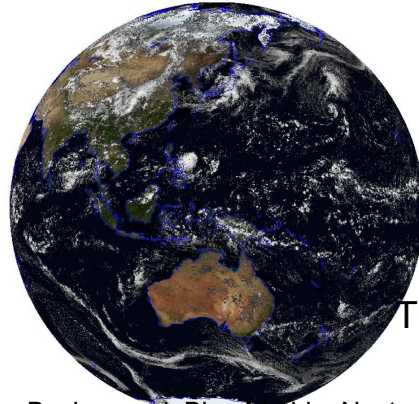
# Example of simulated signals

## NICAM (GCRM) + Joint-simulator

MSI ← RSTAR6b

Nakajima & Tanaka (1986,1988)

VIS 0.62  $\mu\text{m}$

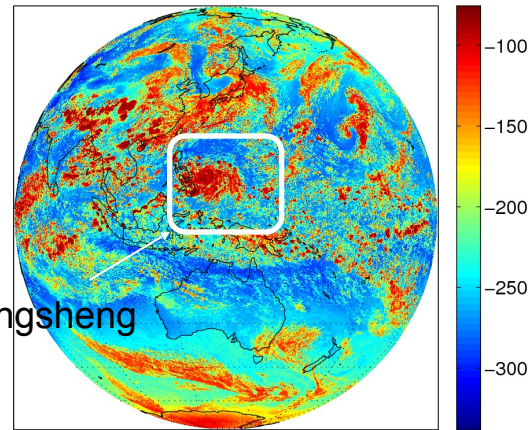


Background: Blue-Marble: Next Generation, NASA

BBR ← MSTRN-X

Sekiguchi & Nakajima (2008)

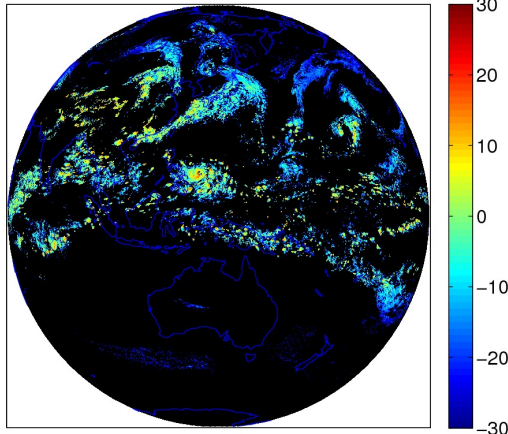
TOA LW upwelling flux [ $\text{W m}^{-2}$ ]



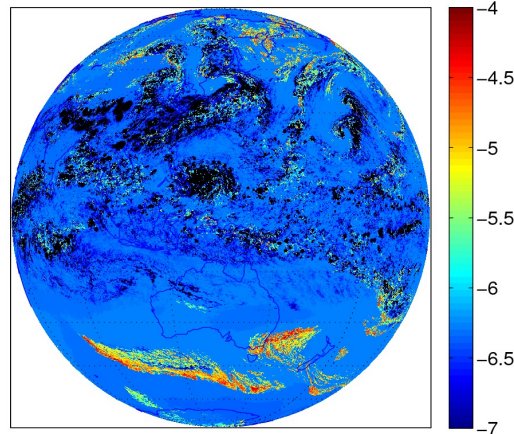
TC Fengsheng

## CPR & ATLID ← EarthCARE Active Sensor simulator (EASE)

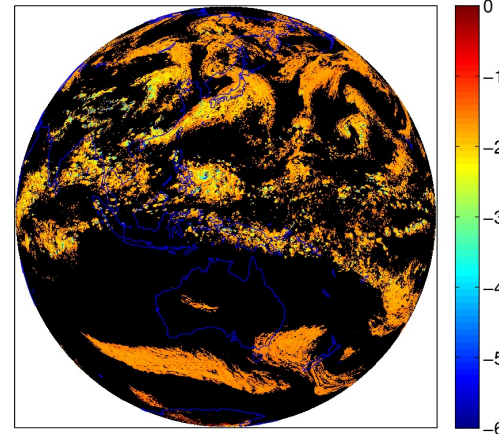
94GHz Radar reflectivity [dBZe]



532nm backscattering coef [ $\log_{10} \text{m}^{-1} \text{str}^{-1}$ ]



Dopplar velocity [ $\text{m s}^{-1}$ ]



Okamoto et al.,  
(2007, 2008);  
Nishizawa et al.,  
(2008)

Signals at 10km

# 数値モデルの評価

# データセット

観測：CloudSAT-CALIPSO merged data set (Hagihara et al. 2010)

4つの雲マスク

Radar mask (C1); cloud & precipitating particles.

Lidar mask (C2); cloud particles.

Radar and Lidar mask (C3); cloud particles

Radar or Lidar mask (C4); all particles

CloudSATとCALIPSOのdataを同じ空間解像度を持つグリッドに内挿・平均  
(鉛直240m、水平1.1km).

NICAMによる3.5km解像度全球実験

2008 TC Fengshen (Nasuno et al. 2009)



EASEによる前方計算

再現された観測量：CloudSAT & CALIPSO merged data set

期間

観測：2008年6月

再現：2008年6月17日00Zから25日00Z



# 赤外 (10.8 $\mu\text{m}$ ) 輝度温度

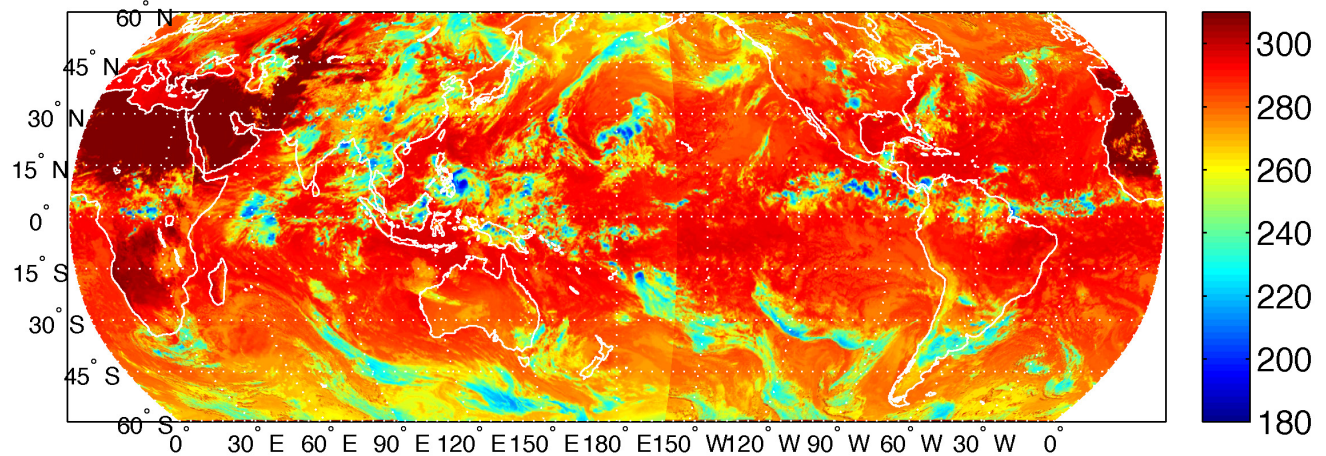
(a) Global IR (K) : 20080619.12

(a) MTSAT (MRI, Japan;  
Chiba University, CEReS)+  
globally-merged IR (CPC,  
NOAA)

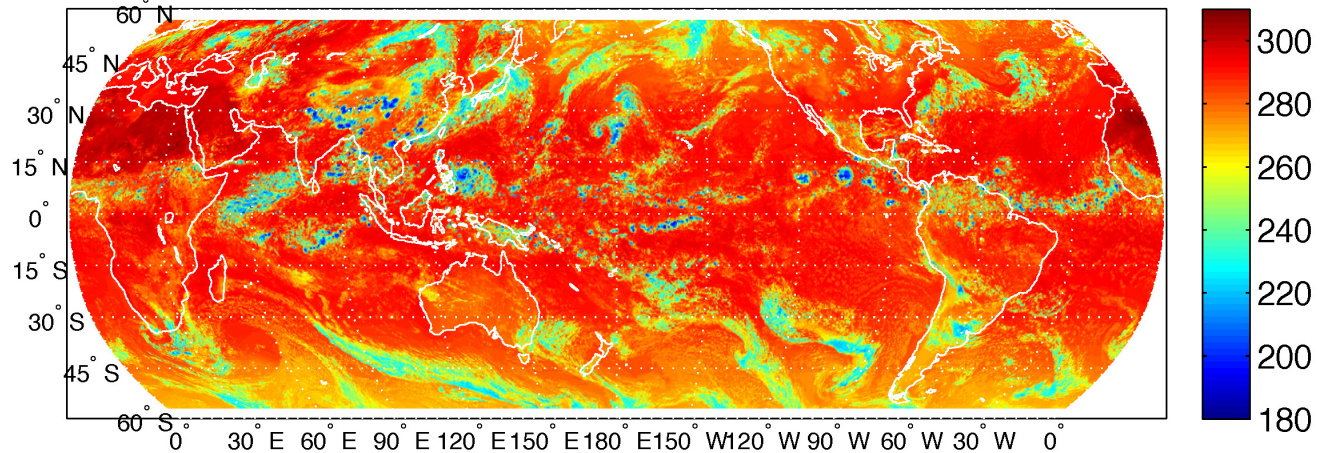
(b) RSTAR  
[Nakajima and Tanaka 1988]  
[Sekiguchi and Nakajima 2008]

雲降水の検証では、赤外  
輝度温度を見て、大気モデ  
ル・スキームの特性を大ま  
かに把握できる。

- 中緯度の総観規模擾乱に  
伴う雲の水平分布は現実的  
に再現できている。
- 熱帯では高い雲頂の雲に  
付随する層状雲の広がり  
が少ない。



(b) NICAM IR (K) : 20080619.12

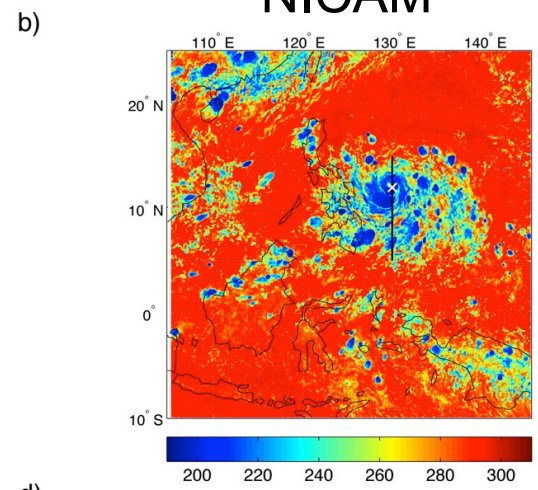
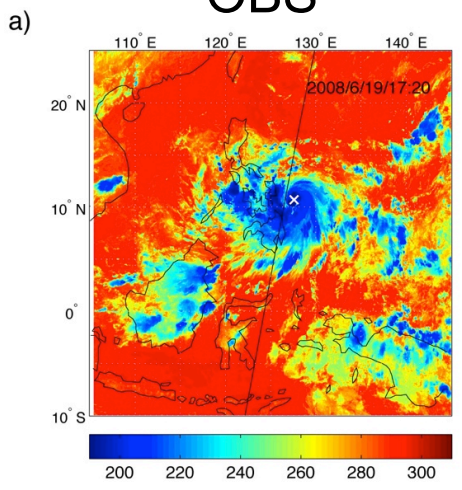


# 台風の場合

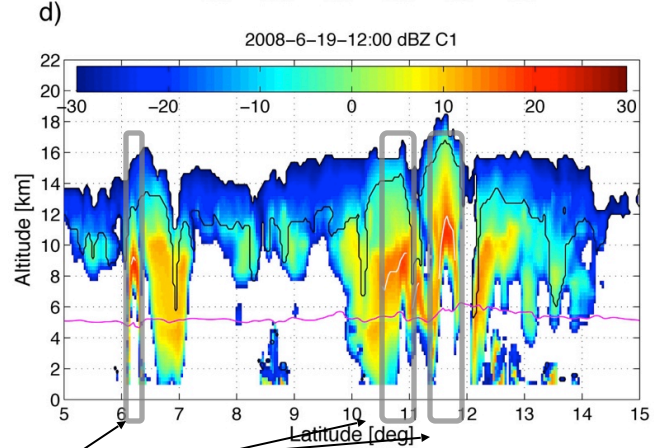
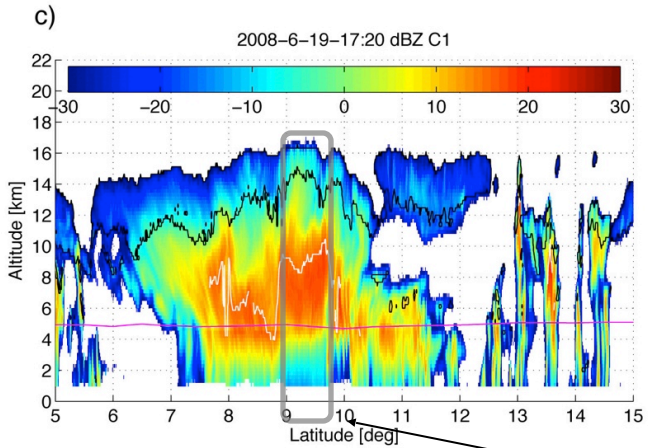
IR T<sub>b</sub>

OBS

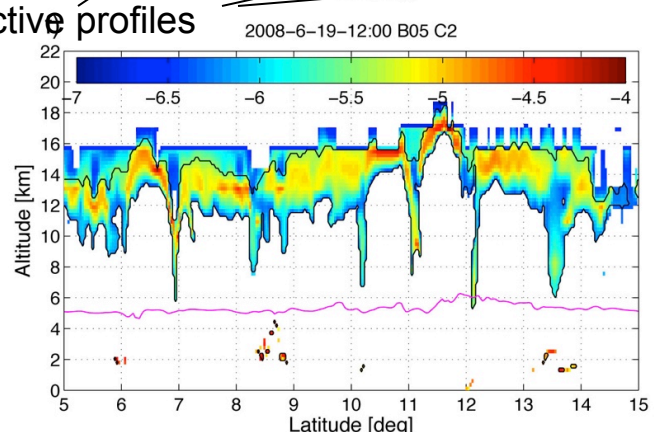
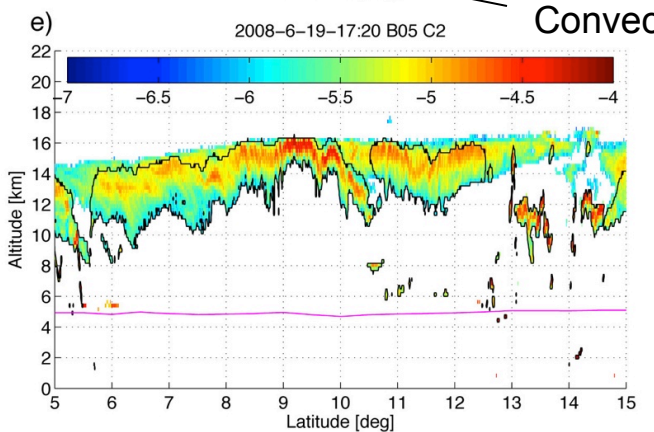
NICAM



CloudSat 95 GHz

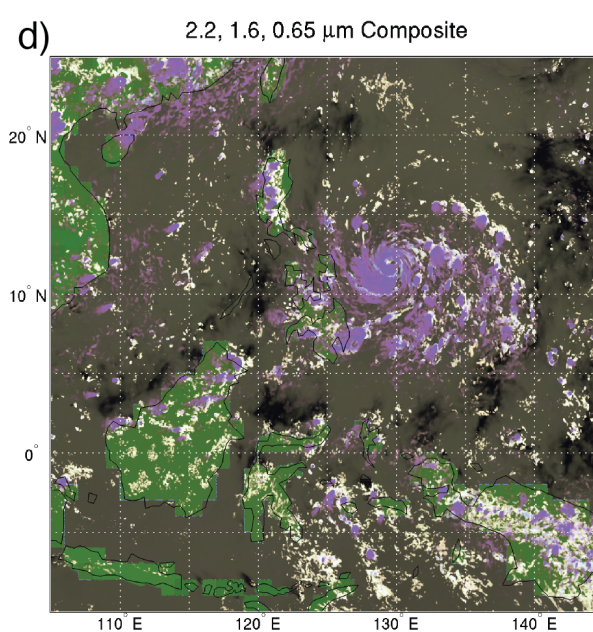
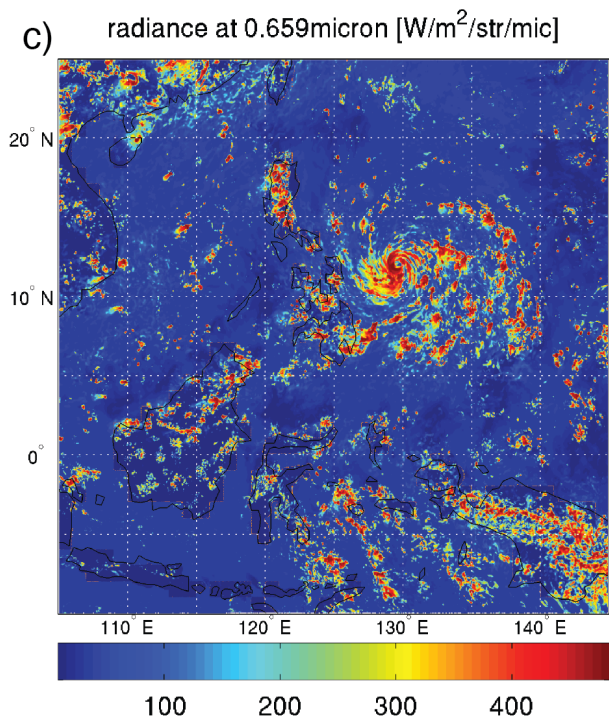
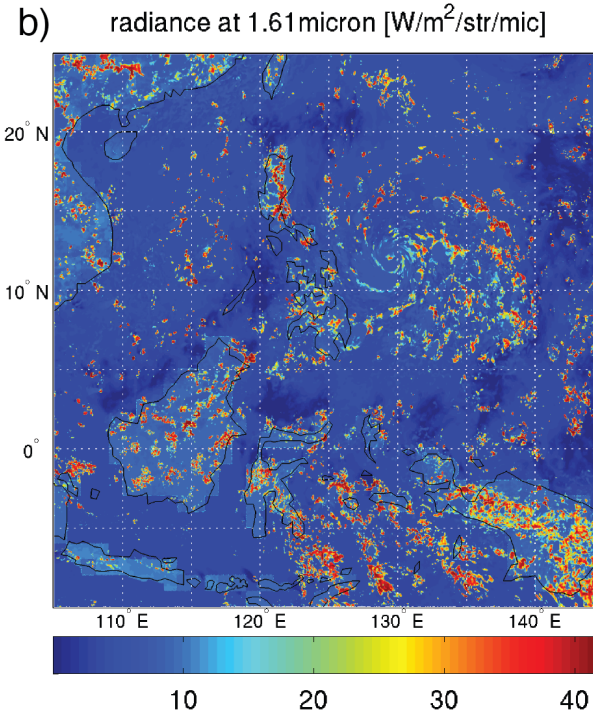
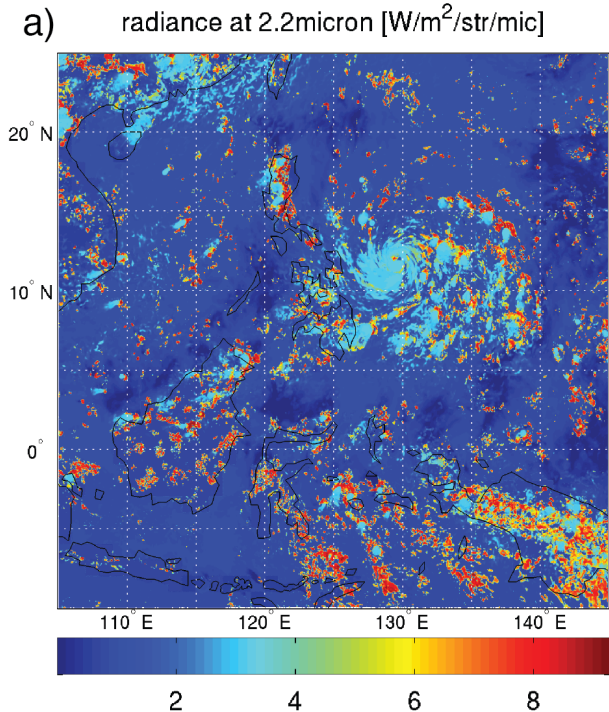


CALIPSO 532 nm



Convective profiles

- 南北の非対称性がNICAMで再現されている
- C3マスクが4 kmほどの深さまで到達することがわかる。
- 多重散乱の効果がシミュレータに入っていないため、反射因子がない。
- ダークバンドが観測にも再現にも見られる。

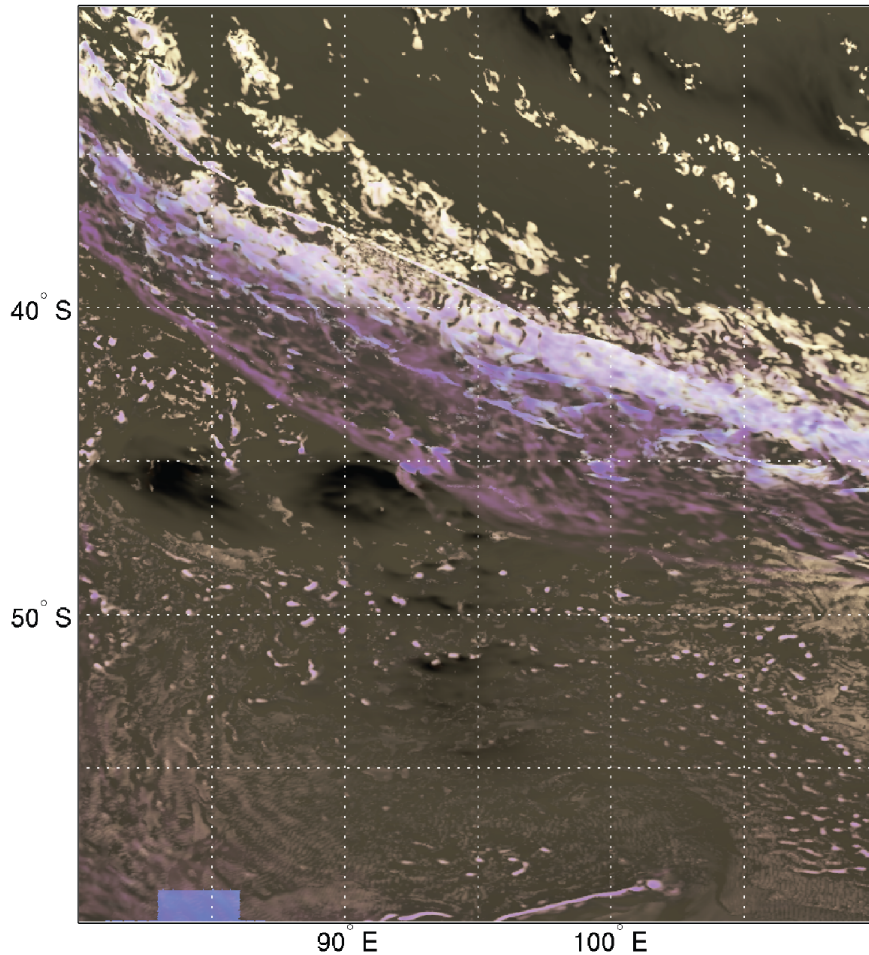


## 2.2, 1.61, 0.659 $\mu m$ 放射 輝度とそのRGB合成の 例 1

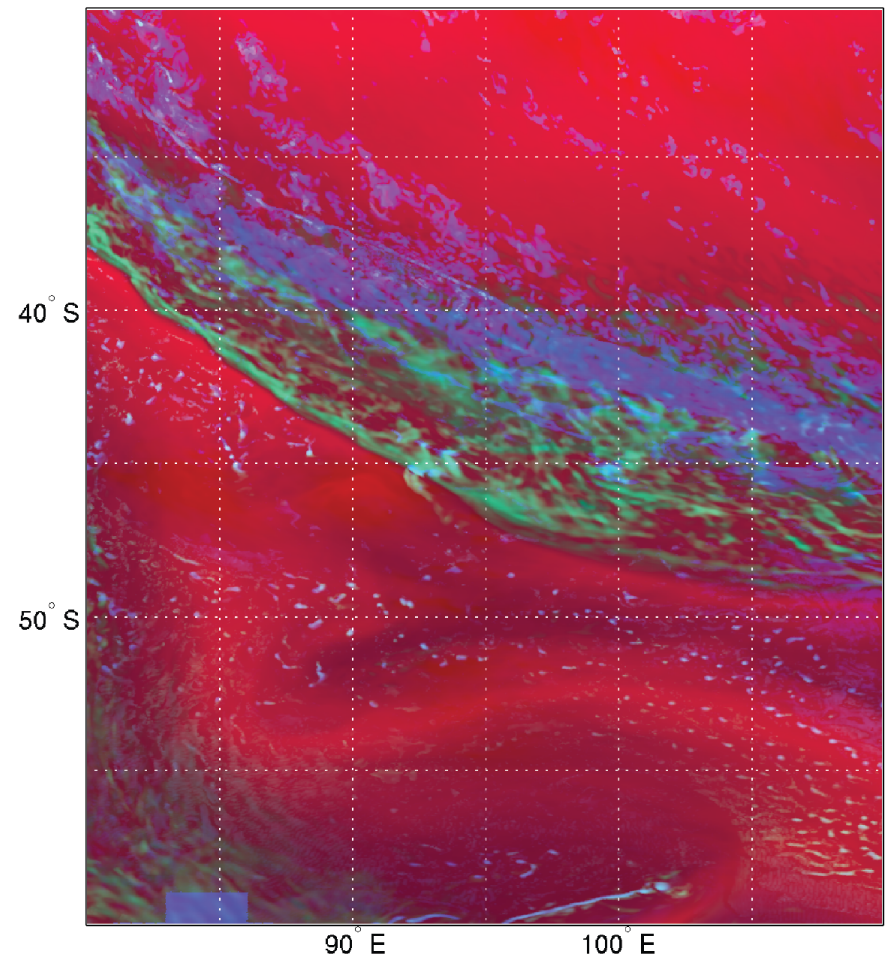
- 1.61 $\mu m$ は水よりも氷に吸収されるので、氷雲は紫色に見える。
- 水雲は灰色から白に見える。
- 陸地は0.659と2.2 $\mu m$ でアルベドが小さいため、緑色に。
- 海面はアルベドが小さいため黒く見える。

# RGB合成の例 2

a) 2.2, 1.6, 0.65  $\mu\text{m}$  Composite



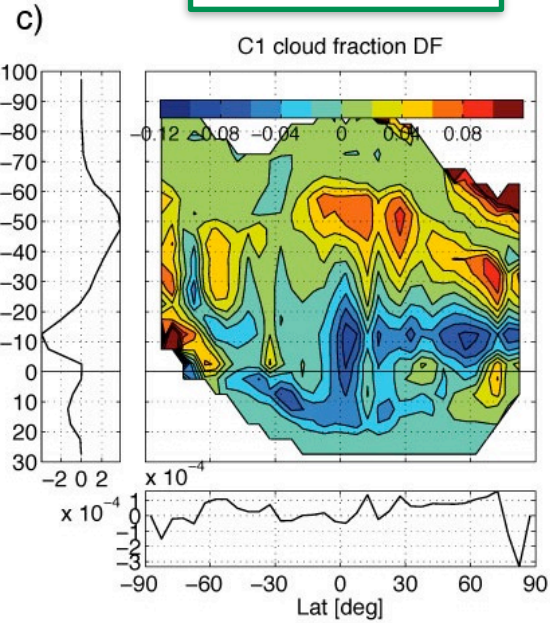
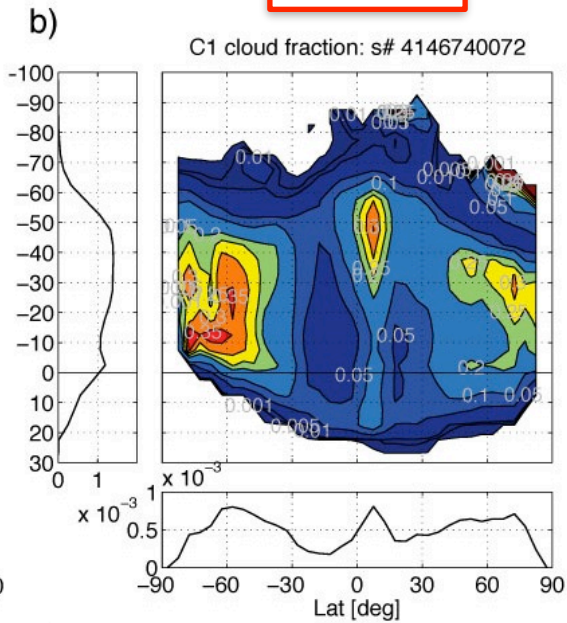
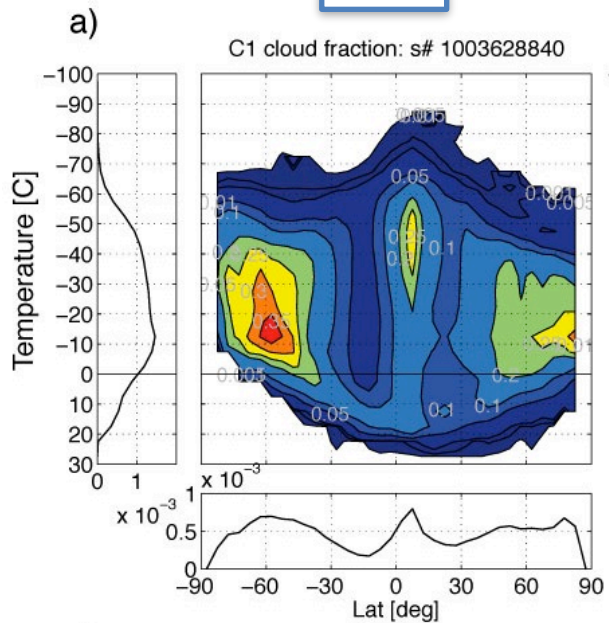
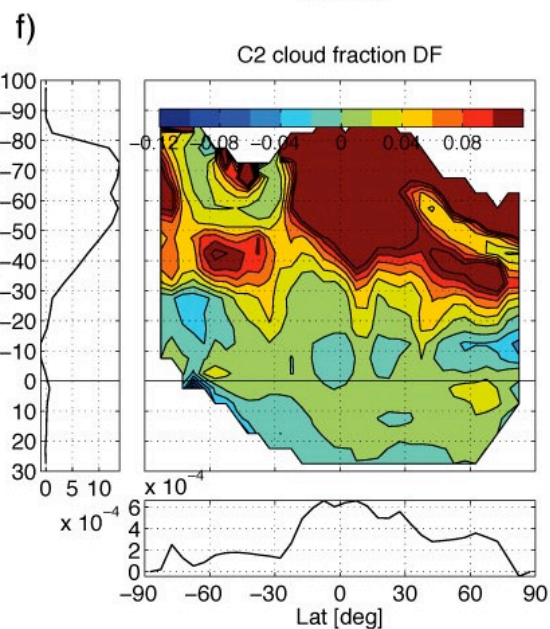
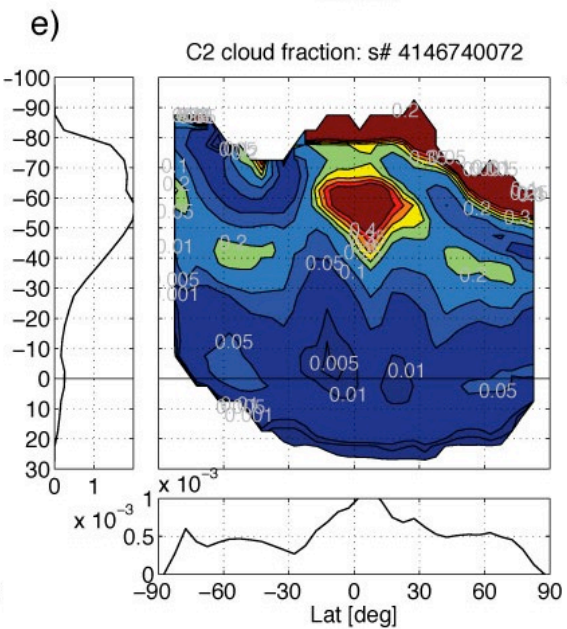
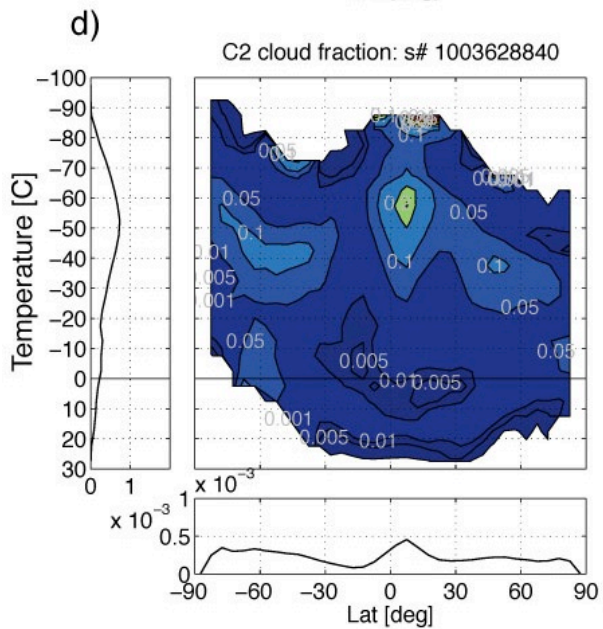
b) 6.7, 1.38, 0.865  $\mu\text{m}$  Composite



- 6.7  $\mu\text{m}$ は水蒸気に吸収され、200から500hPaに感度がある。
- 1.38  $\mu\text{m}$ は氷の反射率が水より若干大きい。0.865  $\mu\text{m}$ はその逆。
- 前線の北側は亜熱帯の大気があり湿っていることがわかる。

# 評価手法の方針

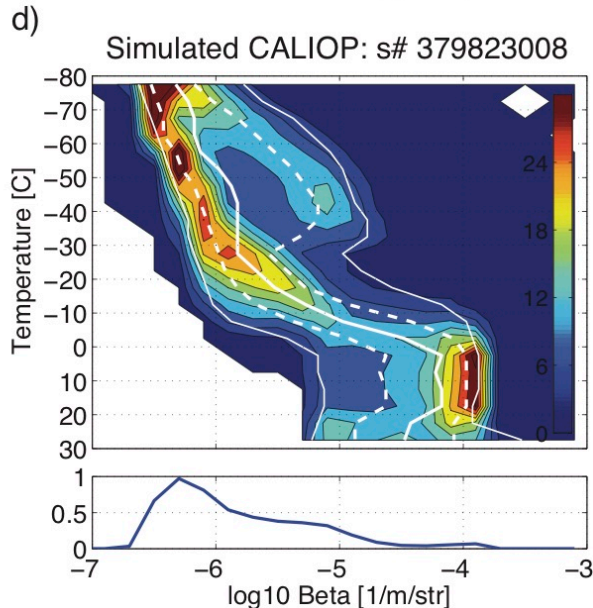
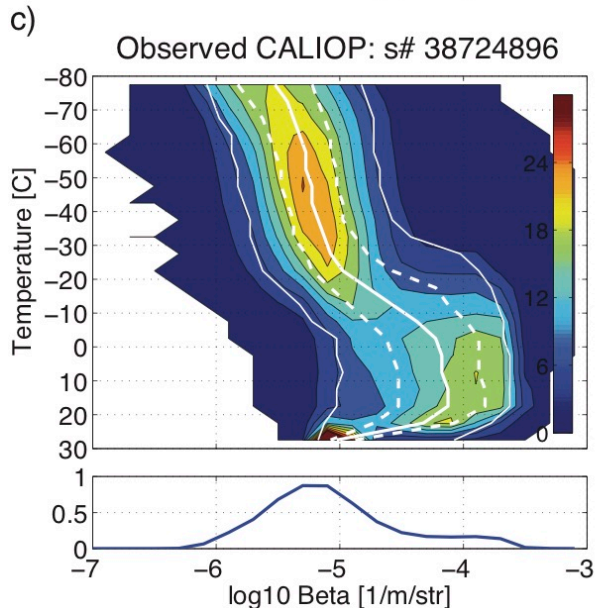
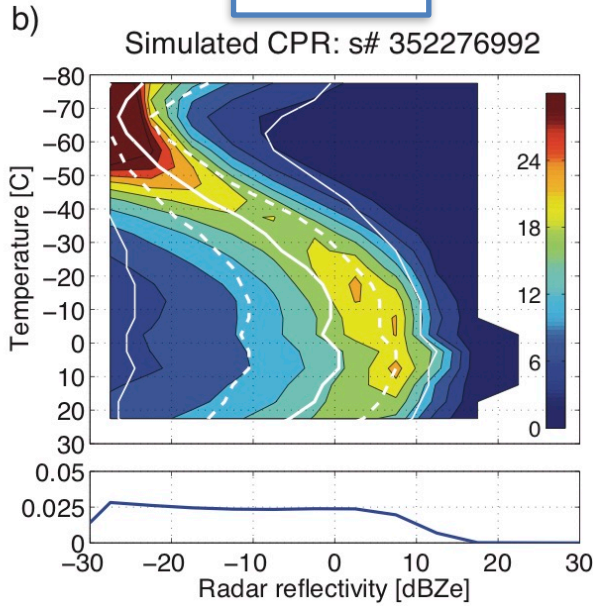
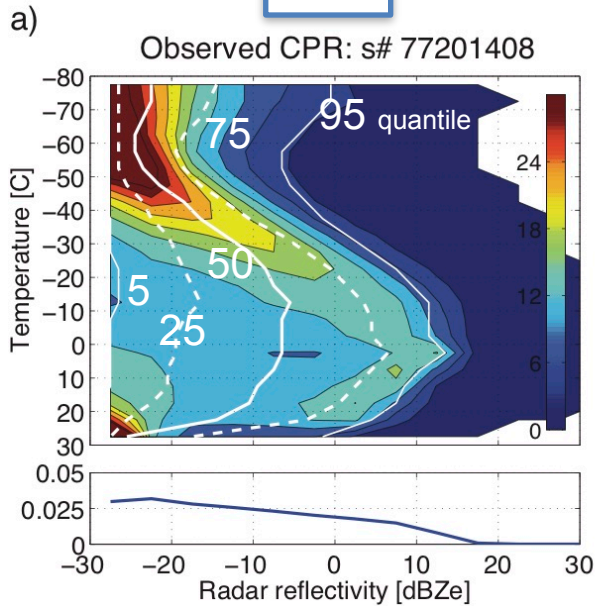
- 期間と場所を固定して、標本を取る
- センサーの効果的な組み合わせを考える
- 統計に現れるパターンと物理過程を結びつける
- 一致しない統計と物理スキームの関係を明らかにする

**OBS****NICAM****NICAM-OBS****C1 Mask****C2 Mask**

# Global Contoured Frequency by tEmperature Diagram (CFED)

OBS

NICAM



鉛直軸として、気温を用いる。  
色は、気温を指定したときの確率密度x100。

観測

- $-10^{\circ}\text{C}$ 以下では気温の値ごとに、モードが一つある。
- $T > 0^{\circ}\text{C}$ で、非降水粒子のモードと降水粒子のモード

NICAM

- 分布が狭く、 $0 < Z < 10$  dBZ付近に集中。
- $T > -20^{\circ}\text{C}$ で、quantilesを過大評価
- $T > 0^{\circ}\text{C}$ で、降水粒子のモードが卓越。

- $\log_{10}(\beta_{532})$ :  $T < -40^{\circ}\text{C}$ で2つのモードが存在。
- 過小評価気味

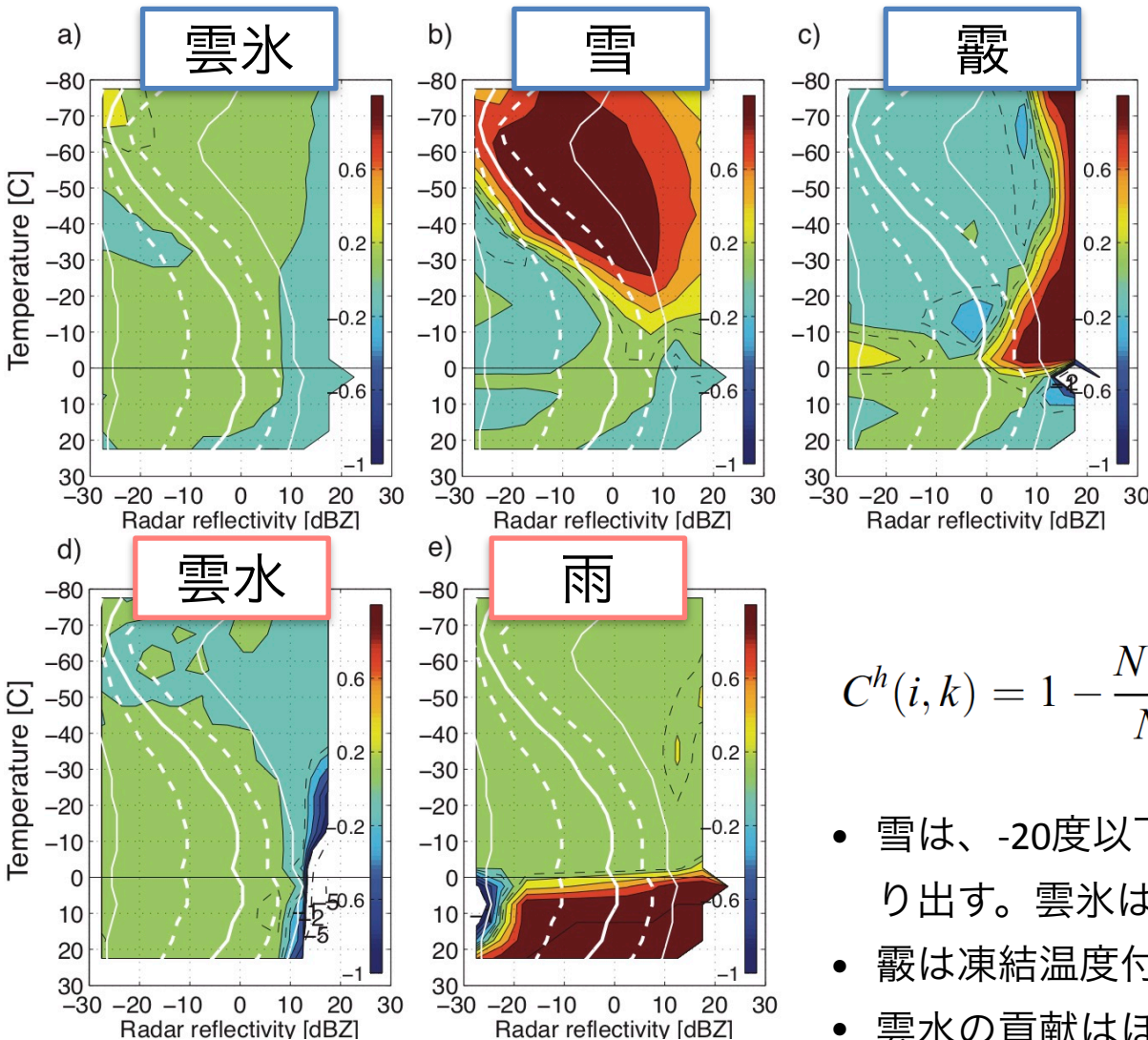
# 水粒子の貢献度: レーダ反射因子

NICAMの雲微物理スキーム  
NSW6は、水蒸気と5つの水粒子カテゴリから成る

- 雲水(cloud)
- 雨(rain)
- 雲氷(cloud ice)
- 雪(snow)
- 霰(graupel)

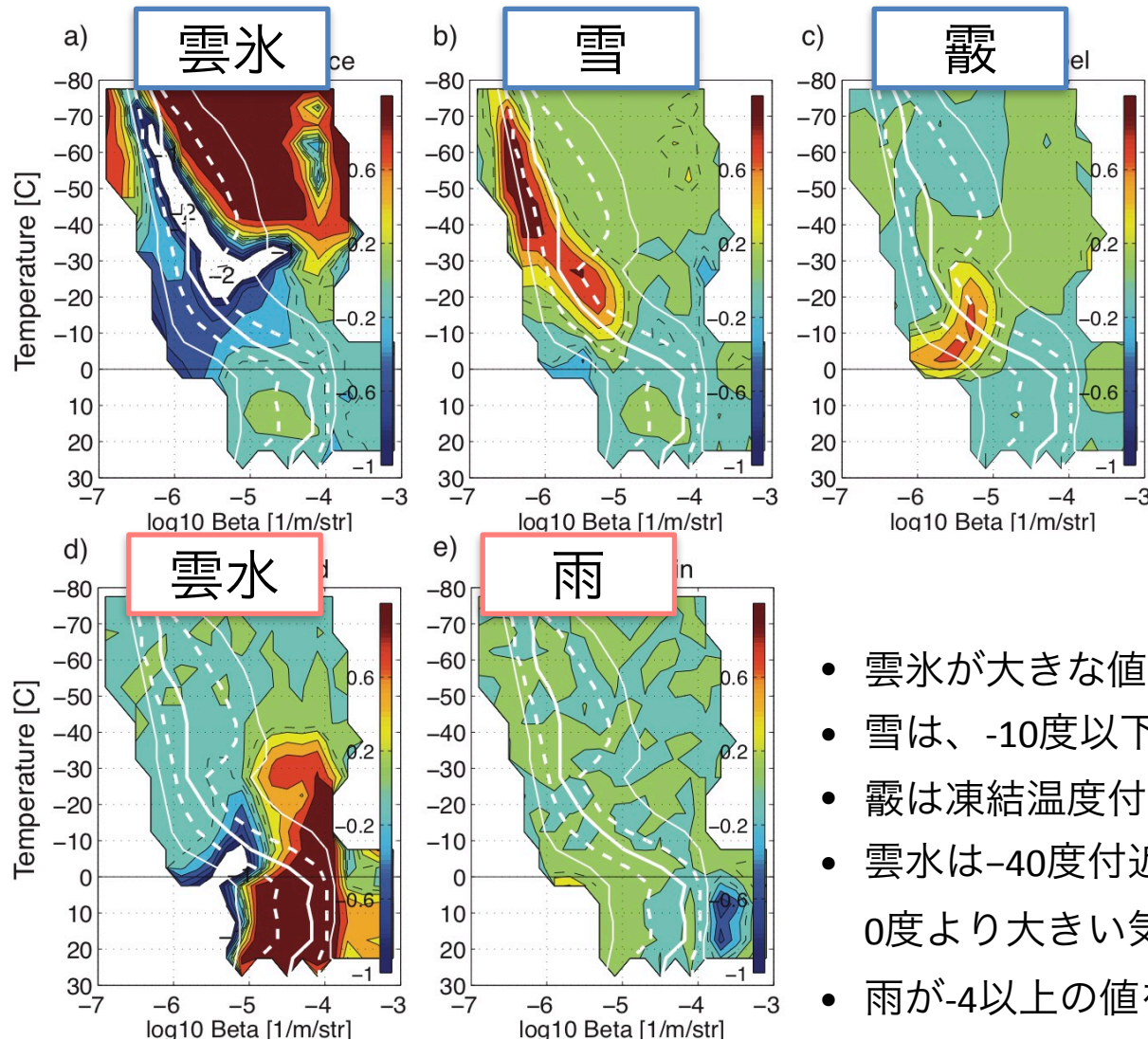
$$C^h(i, k) = 1 - \frac{N^{T-h}(i, k)}{N^T(i, k)}$$

- 雪は、-20度以下の気温で半分以上の反射因子を作り出す。雲氷は貢献がほぼない。
- 霰は凍結温度付近と75 percentile以上の値に貢献。
- 雲水の貢献はほぼない。





# 水粒子の貢献度: ライダー後方散乱係数



$$C^h(i, k) = 1 - \frac{N^{T-h}(i, k)}{N^T(i, k)}$$

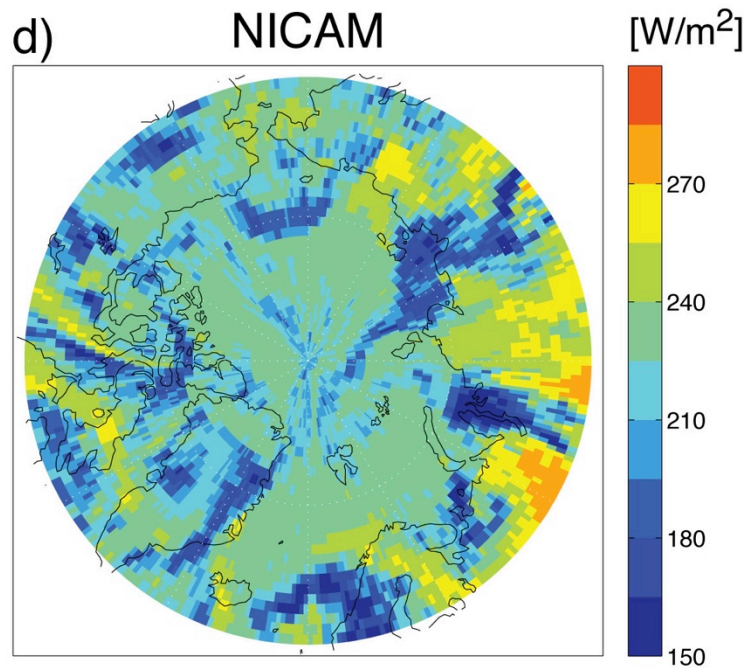
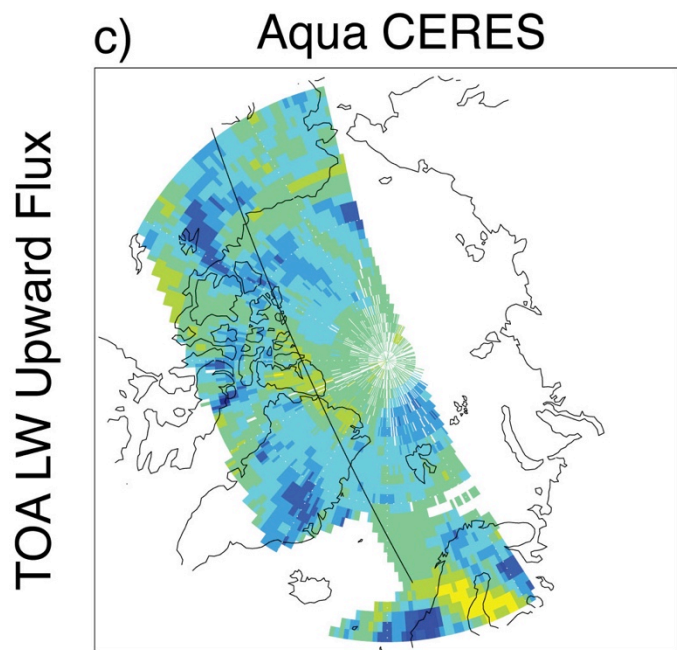
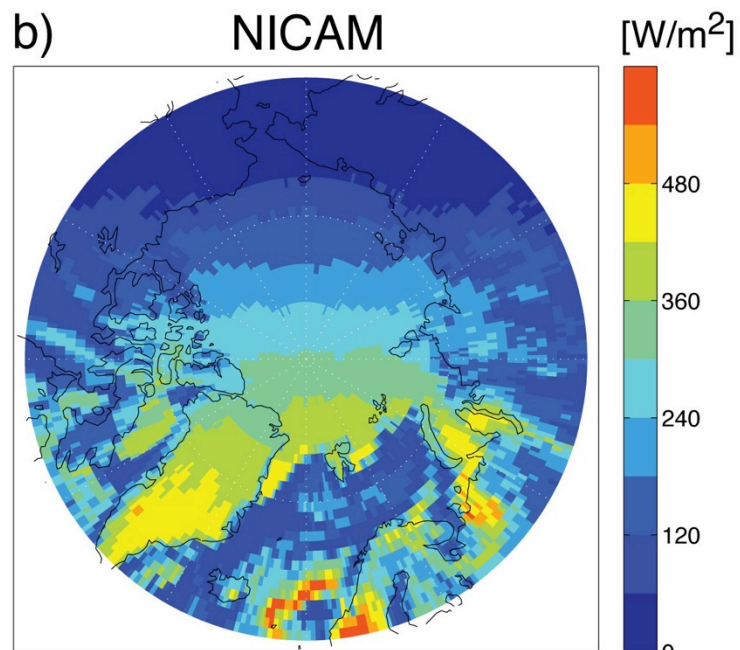
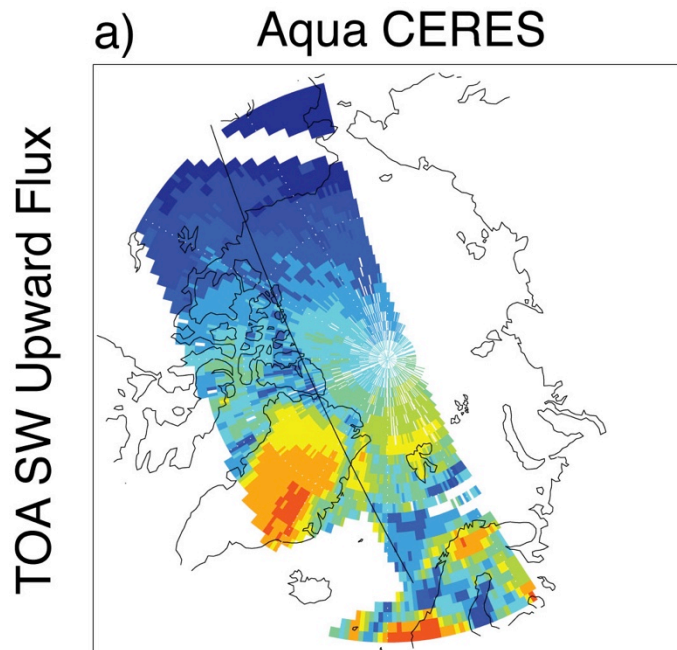
- 雲氷が大きな値のモード。観測と一致。
- 雪は、-10度以下の温度で小さな値のモード。
- 霰は凍結温度付近の値に貢献。
- 雲水は-40度付近まで存在するが極値のみに貢献。0度より大きい気温では卓越。
- 雨が-4以上の値を減らす。

## 目的

- 雲放射効果(Cloud Radiative Effects)の簡単で効果的な評価手法を提案する

## データセット

- CloudSAT & CALIPSO merged data set (Hagihara et al. 2010)にAqua CERES SSF L2 (NASA)を追加



# 領域平均の雲放射効果(CRE)

Arctic (65N-80N)

CRE	TOA UP		SFC DOWN		SFC NET	
	SW	LW	SW	LW	SW	LW
CCCM	-75.5 (95.9)	18.2 (20.2)	-116.1 (129.1)	41.5 (31.1)	-87.7 (112.2)	40.7 (30.6)
NICAM	<b>-57.8</b> (87.8)	22.1 (25.3)	<b>-91.8</b> (128.7)	32.7 (27.9)	<b>-65.8</b> (100.1)	31.3 (26.7)

[W/m<sup>2</sup>]

- 雲アルベド効果と傘効果は過小評価。
- 温室効果は地表で過小評価。
- 地表で短波下向き放射効果は、25W/m<sup>2</sup>、過大評価。

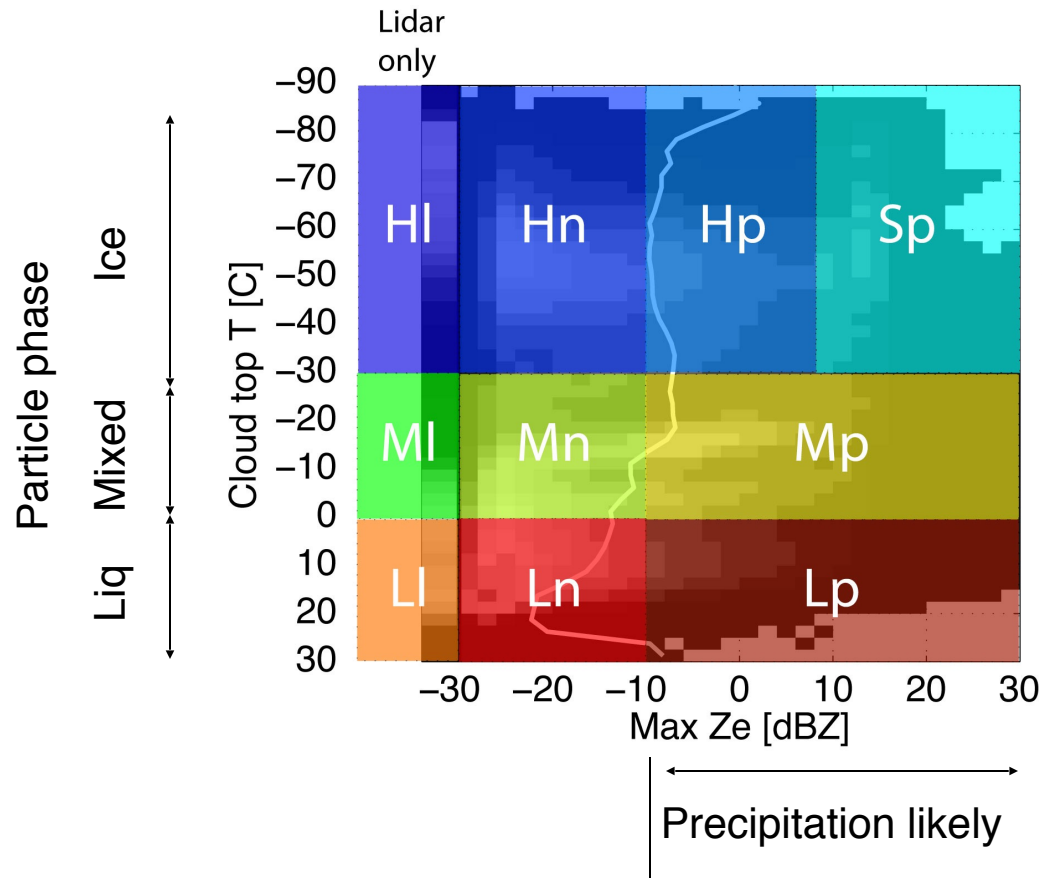
	Cloud fraction
OBS	0.74
NICAM	0.79

雲の種類とその貢献度は？

# 雲タイプ

雲レーダーとライダーの観測と再解析の気温により雲タイプを決める

- 雲頂温度と最大レーダー反射因子の2次元空間を7つに分ける。
- ライダーのみにより観測される雲タイプは3つ。



背景にはC4雲マスク(radar-or-lidar)を使った全球での同時確率密度関数

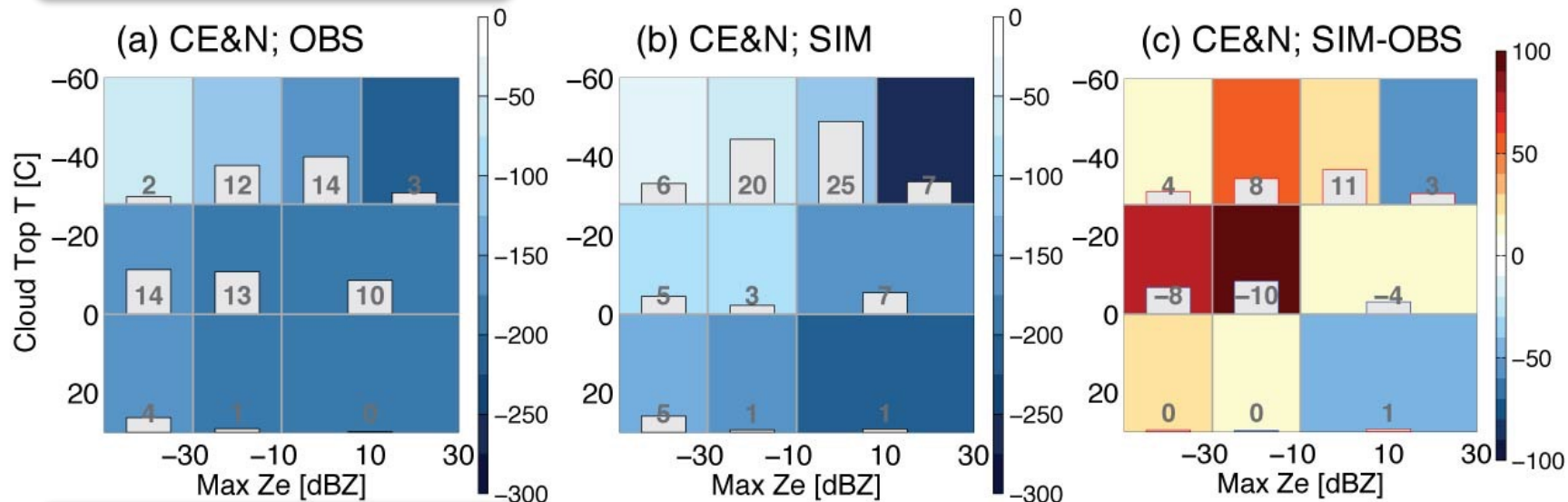
ある鉛直層にそのまま適用するか、単層に分けて適用できる。

# 地表での下向き短波の雲放射効果; Arctic 65-80N

CRE	SFC DOWN
	SW
OBS	-116.1
SIM	-91.8

$$N_i \text{ \& \ } CE_i \quad i = 1, \dots, 10$$

Hashino et al. (2016)



$$CRE_i = N_i \cdot CE_i \quad i = 1, \dots, 10$$

# 雲レーダ(z)とライダー( $\beta$ )を使った雲氷量と粒径の診断

北極圏(65-80°N)

Observation  
Joint PDF

Simulation  
Joint PDF

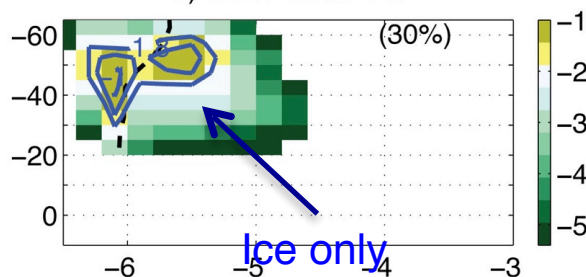
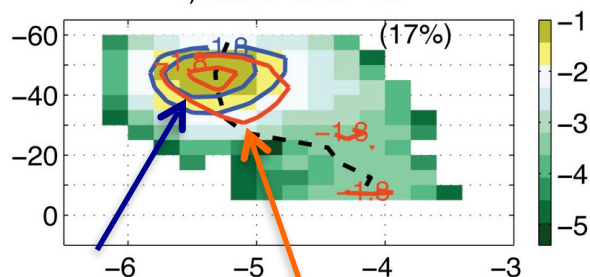
BETTER診断の手順

1. 同じZの値を選ぶ
  2.  $\beta$ を比較する
- もし $\beta$ が大きければ、IWCが大きく、 $R_{\text{eff,m}}$ が小さい。

Hn ~ cirrus (cloud-top T < -28°C)

a) dBZ :-30 to -25

a) dBZ :-30 to -25



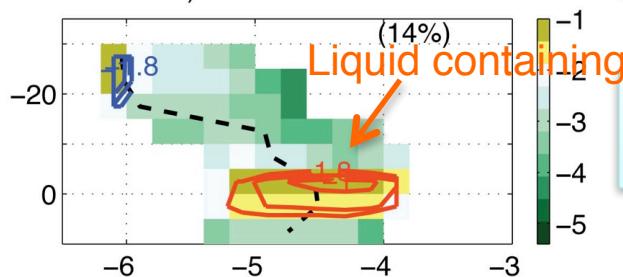
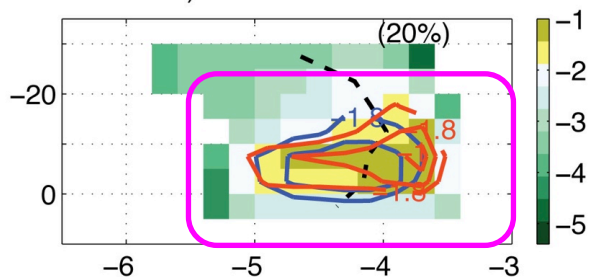
Ice only      Liquid containing

モデルの雲氷と雪：粒径が大き  
く、雲氷量は小さい。

Mn ~ Mixed-phase clouds (cloud-top T 0 ~ -28°C)

a) dBZ :-30 to -25

a) dBZ :-30 to -25



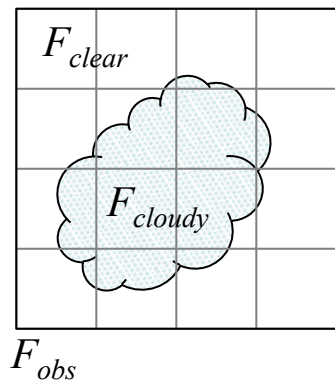
モデル：T < -10°Cにて、過冷却水  
が不足している。

雲水が凍結する過程は再現されて  
いない。

$\beta_{532}$  [log10(1/m/str)]

$\beta_{532}$  [log10(1/m/str)]

# 放射への雲粒子の相の効果



地表での雲放射効果

$$C = N(F_{cloudy} - F_{clear})$$

$N$ : cloud fraction

負の値: 地表面の冷却

正の値: 地表面の加熱

$$F_{cloudy} - F_{clear}$$

下向き短波放射フラックス (W/m <sup>2</sup> )		High clouds (Hn)	Mixed-phase clouds (Mn)
Clouds containing liquid particles	OBS	-74	-146
	NICAM		-116
Ice-only clouds	OBS	-48	-130
	NICAM	-21	-25

下向き長波放射フラックス (W/m <sup>2</sup> )		High clouds (Hn)	Mixed-phase clouds (Mn)
Clouds containing liquid particles	OBS	40	65
	NICAM		47
Ice-only clouds	OBS	20	53
	NICAM	13	16

雲氷量と有効半径の診断は、雲放射効果のモデルバイアスと一致している。

気候モデルの雲や降水の評価は、放射の評価に関係づける必要がある。



# P-S index (Petty 1994a,b)

Attenuation index  $P$  [-]

$$P \equiv \frac{T_V - T_H}{T_{V,O} - T_{H,O}}$$

$T_V, T_H$  vertically and horizontally polarized brightness temperatures [K]

$T_{V,O}, T_{H,O}$  hypothetical Tb without clouds

$$P \approx \exp[-1.69\tau]$$

$\tau$  slant-path microwave optical depth by clouds and precipitation

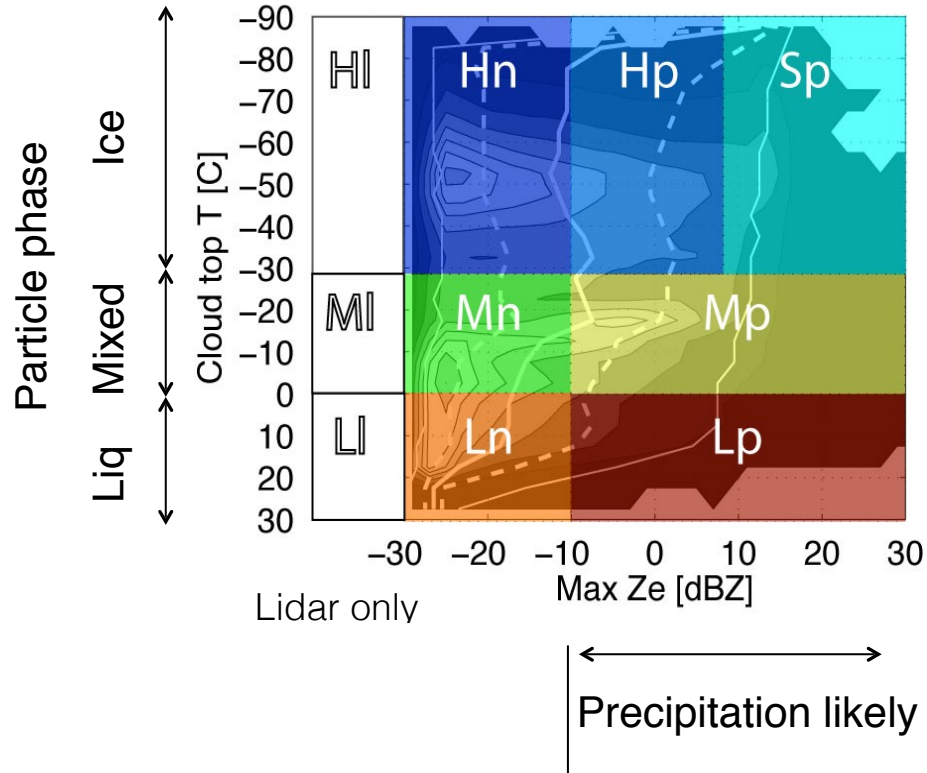
Scattering index  $S$  [K]

$$S = PT_{V,O} + (1 - P)T_c - T_V$$

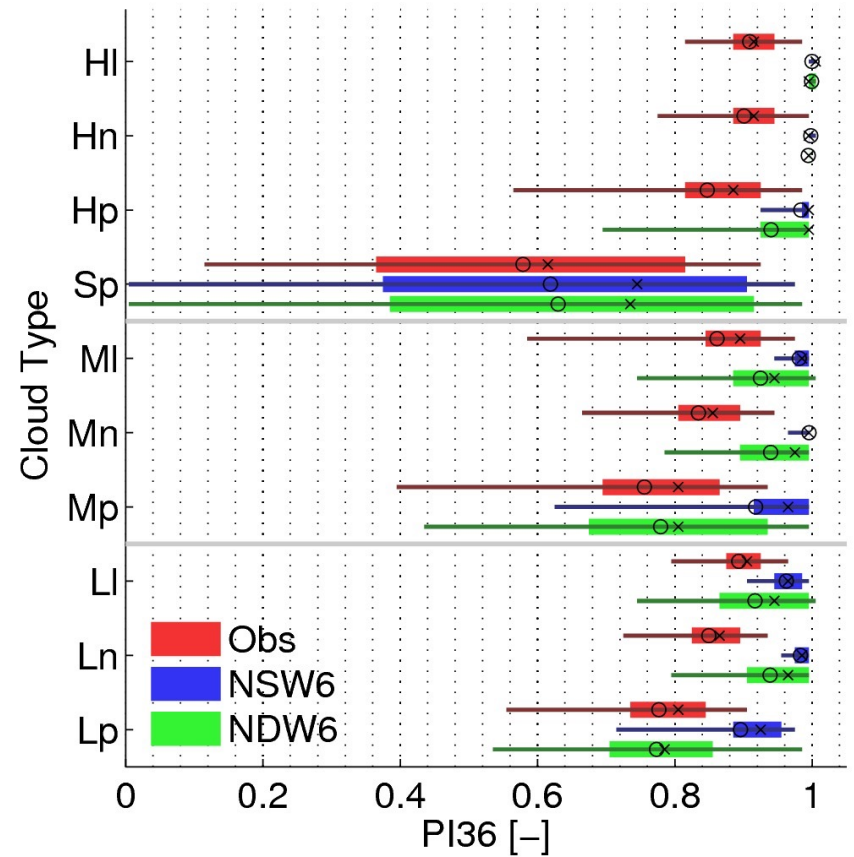
$T_c$  limiting brightness temperature, set to 273 K

# P36 sorted by cloud type

## Cloud Type Diagram



## Single-Layer cloud only



# まとめ

- 衛星データシミュレータは、ユーザーがモデル側の仮定を観測量に反映できるため、一貫した比較が容易である。
- 複数の衛星データを同時利用することで、雲降水粒子の特性と雲放射効果の関係を調査できる。
- 前方計算のアプローチは解釈が難しいことがあるが、感度実験にて理解を深めることができる。
- 今後さらに、物理過程とシグナルの特徴との関係を明らかにしてゆくことが大切だと考える。
- 可視赤外のRGB合成もQuick lookに良いが物理量との具体的な対応の理解が必要である。

## 今後の予定

- ブライトバンドモデル
- GCMサブグリッドジェネレーター
- 地上レーダー対応

# 文献

- Hagihara, Y., H. Okamoto, and R. Yoshida (2010), Development of a combined CloudSat-CALIPSO cloud mask to show global cloud distribution, J. Geophys. Res., 115, D00H33, doi:10.1029/2009JD012344.
- Hashino, T., M. Satoh, Y. Hagihara, T. Kubota, T. Matsui, T. Nasuno, and H. Okamoto (2013), Evaluating cloud microphysics from NICAM against CloudSat and CALIPSO, J. Geophys. Res. Atmos., 118, doi:10.1002/jgrd.50564.
- Hashino, T., and Coauthors, 2016: Evaluating Arctic cloud radiative effects simulated by NICAM with A-train. J. Geophys. Res. Atmos., 121, 7041-7063.
- Satoh, M., W. Roh, and T. Hashino, 2016: Evaluations of clouds and precipitations in NICAM using the joint simulator for satellite sensors, CGER'S SUPERCOMPUTER MONOGRAPH REPORT Vol.22 <http://www.cger.nies.go.jp/publications/report/i127/i127.pdf>
- Roh, W., and M. Satoh, 2014: Evaluation of Precipitating Hydrometeor Parameterizations in a Single-Moment Bulk Microphysics Scheme for Deep Convective Systems over the Tropical Central Pacific, J. Atmos. Sci., 71, 2654-2673.
- Petty, G. W., 1994: physical retrievals of over-ocean rain rate form multichannel microwave imagery. Part I: theoretical characteristics of normalized polarization and scattering indices. Meteorol. Atmos. Phys., 54, 79-99.