

## ミリ波 雲レーダ と衛星 および地上観測による雲物理量解析と 広域および局所雲水量評価

鷹野敏明・永瀬雄斗・宇野賢吾・中田裕之・  
 高村民雄 <千葉大>

第16回環境リモートセンシングシンポジウム  
 2014年2月21日

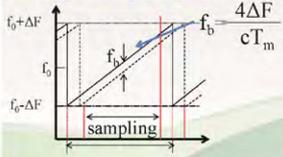
雲レーダ FALCON-I とマイクロ波放射計による  
 雲水量評価

### FALCON-I の概要

W-band 95GHz ミリ波  
 高分解能・高感度・ドップラ  
 ↓  
 雲の内部構造・運動



### FM-CW方式



FALCON-I 基本諸元	
中心周波数	94.79 [GHz]
掃引周波数幅	±10 [MHz]
変調周期	1[msec]

淡い雲まで観測できる

P-01

### 研究目的、内容

#### 目的

FALCON-I のデータから、鉛直雲水積算値 LWP を求め、FALCON-I の性能を評価する。

#### 内容

FALCON-I で得られたレーダ反射因子 Z から LWP を算出し、マイクロ波放射計で観測された LWP と比較した。

P-02

### レーダ反射因子

FALCON-I によるレーダ反射因子の算出

受信値  $P$

↓ 受信機特性による補正

受信電力  $P_r$

↓ 「レーダー方程式」の適用

レーダー反射因子  $Z$

#### レーダー方程式

$$P_r = P_t \frac{\pi^3 \theta^2 G^2 |K|^2 \Delta h}{512 (\ln 2)^2 \epsilon^2 h^2} Z \cdot 10^{-18} [W]$$

$N$ : 雲の粒子密度  
 $r$ : 粒子の半径  
 $n(r)$ : 規格化された粒径分布  
 $P_t$ : 送信電力  
 $\theta$ : ビーム幅  
 $G$ : アンテナ利得  
 $\Delta h$ : 距離分解幅  
 $\epsilon$ : 送信電波の波長  
 $h$ : アンテナからの距離  
 $|K|^2$ : 比誘電率で決まる定数

レーダー反射因子と粒径の関係(レイリー)

$$Z = 2^6 N \int_0^\infty r^6 n(r) dr$$

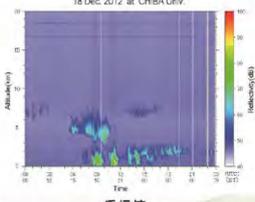
P-03

### レーダ反射因子 Z

#### dBZ

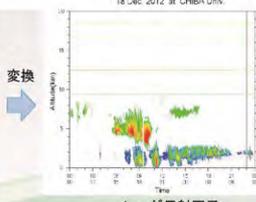
$Z=1 [mm^6 / m^3]$  を基準としたデシベル値

$dBZ = 10 \log Z$



受信値

→



レーダ反射因子

2012年12月18日千葉大学構内

P-04

### LWC, LWP

くもみず  
雲水量 (Liquid Water Content)

- 単位体積当たりの雲粒の総量

$$LWC_i = \frac{4}{3} \pi \rho_w N_i \int_0^\infty r^3 n(r) dr = \frac{4}{3} \pi \rho_w N_i \langle r^3 \rangle [g/m^3]$$

$\rho_w = 1.0 \times 10^3 [g/m^3]$ : 水の密度  
 $N = 288 \times 10^6 [m^{-3}]$ : 雲の粒子密度  
 $M = 2184$ : レンジ数  
 $\Delta z = 9.15 [m]$ : レンジゲート

#### 鉛直雲水積算値(Liquid Water Path)

- 雲水量を鉛直方向に積算した値

$$LWP = \sum_{i=1}^M LWC_i \Delta z [mm]$$

P-05

### LWP算出1

二つの仮定 Frisch et al.(1998)

**仮定 I**

雲の粒径分布の3次モーメントの2乗と6次モーメントが比例する。

$$\langle r^6 \rangle = k^2 \langle r^3 \rangle^2$$

(k: 定数)

3次モーメントと6次モーメントの関係(播磨屋, 他 2004)

**仮定 II**

雲の粒子密度 (Number density) が高度方向によらず一定である。

航空機による観測から層雲では成り立つことが確認されている Nicholls(1982)

大陸性雲の平均値  
 $N = 288 \times 10^3 [\text{m}^{-3}]$

Miles et al. (2000)

### LWP算出2

$LWC_i = \frac{4}{3} \pi \rho_w N_i \int_0^\infty r^3 n(r) dr = \frac{4}{3} \pi \rho_w N_i \langle r^3 \rangle$  — 雲水量(3次モーメント)  
 $Z = 2^\theta N \int_0^\infty r^6 n(r) dr = 2^\theta N_i \langle r^6 \rangle$  — レーダ反射因子(6次モーメント)

対数正規分布

$$n(r) = \frac{1}{\sigma_r \sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{(\ln r - \ln r_0)^2}{2\sigma_r^2}\right)$$

$$k = \exp\left(\frac{9}{2}\sigma_r^2\right) \quad \langle r^6 \rangle = \int_0^\infty r^6 n(r) dr$$

各パラメータ

- $\rho_w = 1.0 \times 10^3 [\text{g}\cdot\text{m}^{-3}]$ : 水の密度
- $N = 288 \times 10^3 [\text{m}^{-3}]$ : 雲の粒子密度
- $\sigma_r = 0.28$ : 分布幅
- $M = 2184$ : レンジ数
- $\Delta z = 9.15[\text{m}]$ : レンジゲート

全高度を積算

$$LWP = \frac{1}{6} \pi \rho_w N^{\frac{1}{2}} \exp\left(-\frac{9}{2}\sigma_r^2\right) \sum_{i=1}^M Z_i^{\frac{1}{2}} \Delta z$$

FALCON-I での観測結果

### 観測

**観測期間**  
2012年8月27日から9月7日

**観測場所**  
千葉県君津市(ロマンの森)

**観測高度**  
高度約 110m ~ 4000 m

**条件**  
雨が降ってなく、雲の多く発生している日時

**時間分解能**  
マイクロ波放射計: 1分間に2回, FALCON-I: 1分間に6回

**比較対象となったマイクロ波放射計**  
(千葉大学環境リモートセンシング研究センター)

- ・受動観測
- ・マイクロ波領域の電磁放射を計測している
- ・水蒸気と雲による水量を測定している。

マイクロ波放射計と FALCON-I の LWP の相関について調べた

### 観測結果

31 Aug. 2012 at Kimitsu.

相関が良い 2012年8月31日(12-14)

03 Sep. 2012 at Kimitsu.

相関が悪い 2012年9月1日(11-13) P-09

### 考察1

**仮定**

- I. 3次モーメントの2乗と6次モーメントが比例 ( $r_{\text{max}} < 25 \mu\text{m}$ )
- II. Nを一定としている(層雲)

今回採用した LWP 算出のアルゴリズムには適用限界が存在するはずである。

レーダ反射因子の受信強度が -15dBZ を境に粒径分布の最大値が  $r_{\text{max}} < 25 \mu\text{m}$   $r_{\text{max}} \geq 25 \mu\text{m}$  とで存在確率が逆転している。

各観測タイミングごとにレーダ反射因子が -15dBZ を超えたチャンネル(レンジ)を検出

### 考察2

**相関が良いデータ**

- 15dBZを超えるチャンネルは一つも検出されなかった

**相関が悪いデータ**

- 15dBZを超えるチャンネルが多数検出された

レーダ反射因子が -15dBZ を超えている範囲では相関がとれてなく、FALCON-I での LWP が大きくなっている。

**相関悪いデータ**

理由  
粒径が大きくなると、二つの仮定や対数正規分布が成り立たなくなると考えられる。

## まとめおよび今後の課題

### まとめ

FALCON-Iのレーダ反射因子Zにより算出されるLWP  
受信強度が-15dBZ以下の範囲においては、  
マイクロ波放射計のデータと良い相関  
→ -15dBZ以下ならば、FALCON-IでLWPは観測可能

### 今後の課題

- ・サンプル日数を増やす。  
-観測条件を満たす日数が少なく、十分な検証が行えなかった。
- ・レーダ反射因子の受信強度が-15dBZを超える範囲においてLWPを算出できるアルゴリズムの検討。
- ・雲水量だけでなく、雲水量も求められるようになる。

P.13