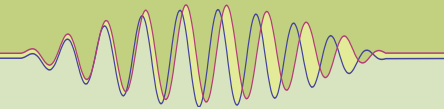


Xバンドマルチパラメータ (MP)レーダー

前坂 剛

(国立研究開発法人 防災科学技術研究所)



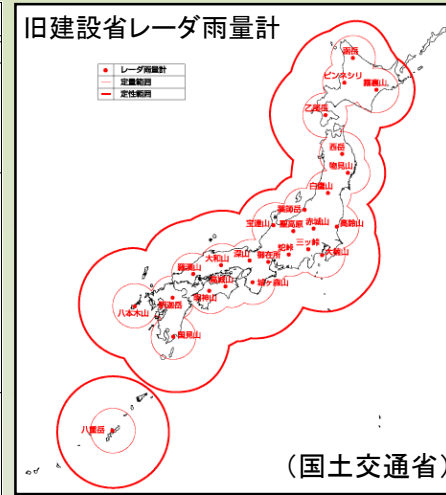
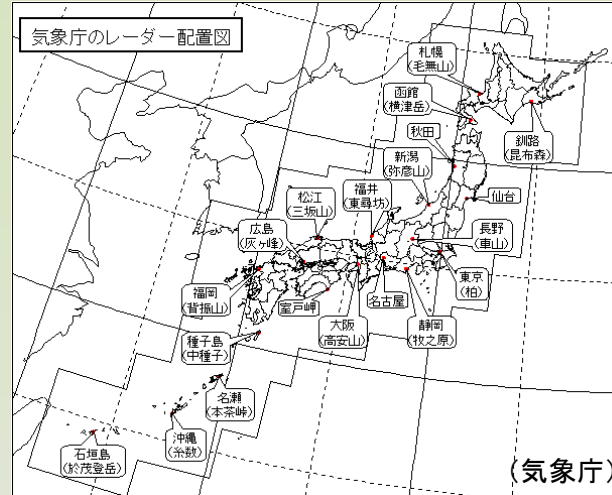
日本における気象レーダーの歴史

■ 現業用レーダー

いくつかの例外を除き、Cバンドの気象レーダーが展開され、主に雨量の観測が行われてきた。

例外：富士山レーダー・初代室戸レーダー（Sバンド）、自治体の気象レーダー（Xバンド）など...

気象庁レーダーは2005年より順次ドップラーレーダー化。



■ 研究用レーダー

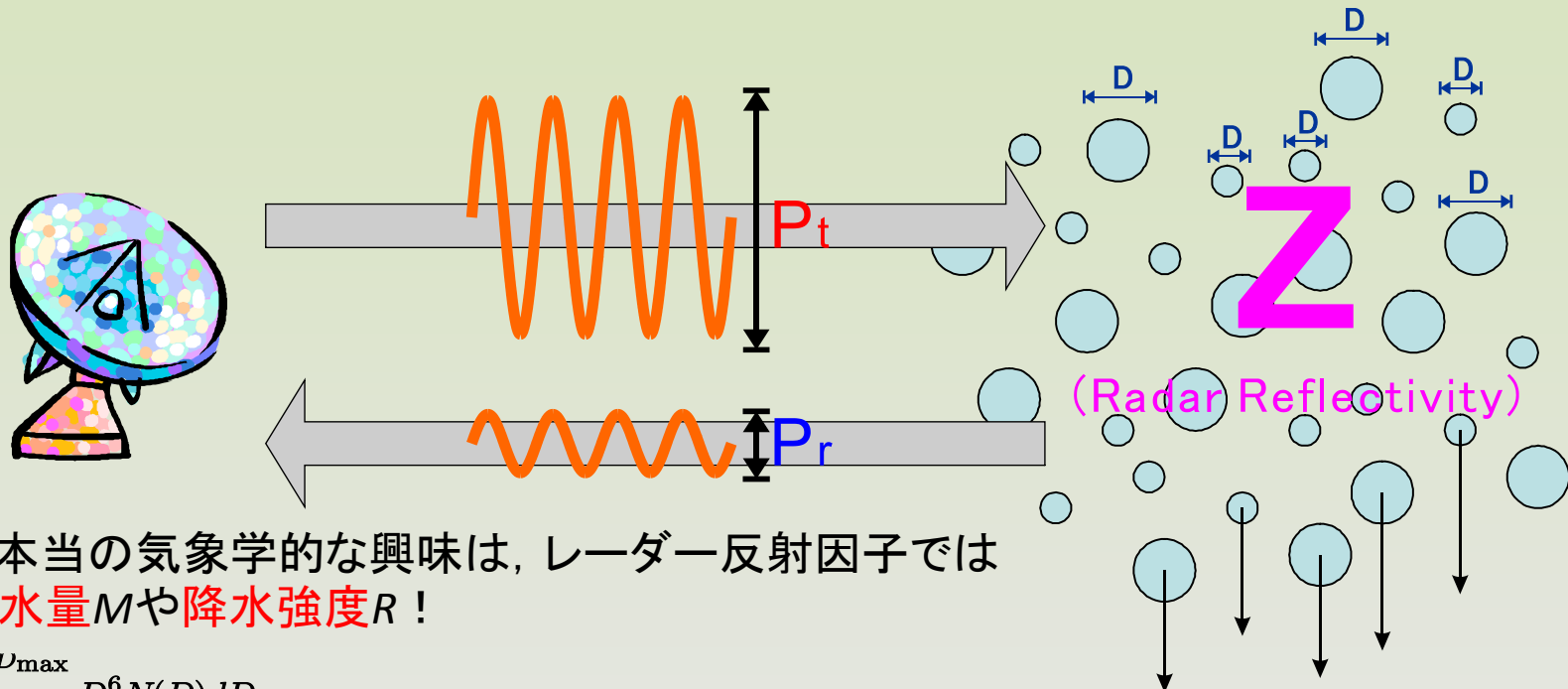
いくつかの例外を除き、大学や試験研究機関ではXバンドの気象レーダーが用いられてきた。

- CバンドやSバンドに比べ小型であるため、持ち運びが容易。
- Xバンド以外の免許を研究用途で取得することが難しかった。

Xバンドは減衰が大きいので、雨の観測には適さないというのが、当時の世界的な認識。だけど、日本では研究用レーダーのほとんどがXバンドだった。



レーダー方程式に基づき、レーダー反射因子を観測するレーダー。



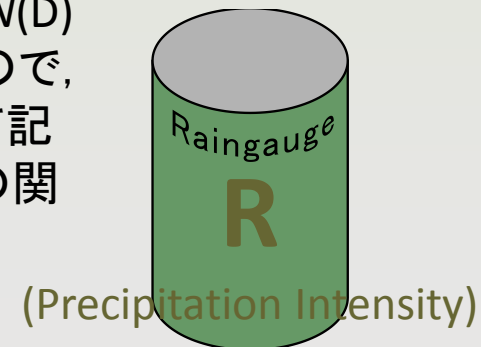
でも、本当の気象学的な興味は、レーダー反射因子ではなく**雨水量** M や**降水強度** R ！

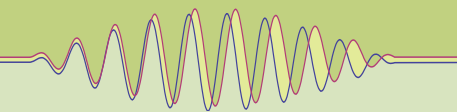
$$Z = \int_{D_{\min}}^{D_{\max}} D^6 N(D) dD$$

$$M = \int_{D_{\min}}^{D_{\max}} \frac{4}{3} \pi \left(\frac{D}{2} \right)^3 \cdot \rho \cdot N(D) dD$$

$$R = \int_{D_{\min}}^{D_{\max}} \frac{4}{3} \pi \left(\frac{D}{2} \right)^3 \cdot \rho \cdot V_{\text{fall}}(D) \cdot N(D) dD$$

しかし、レーダー観測のみでは $N(D)$ や $V_{\text{fall}}(D)$ を知ることができないので、一般的に M や R は Z の関数として記述することはできない。(NやVの関数形によっては可能)





Z-R関係式

- 降水強度 R はレーダー反射因子 Z の関数として解析的に記述できないので、経験的な関係(Z - R 関係)を求めて、その関係により降水強度 R を推定する
- レーダー反射因子は粒径分布(数濃度)に大きく依存する。
- **Z - R 関係式は雨のタイプ(粒径分布)によって大きく変動する(誤差要因)**

$$Z = BR^\beta$$

Empirical relationship
(Z-R Relationship)

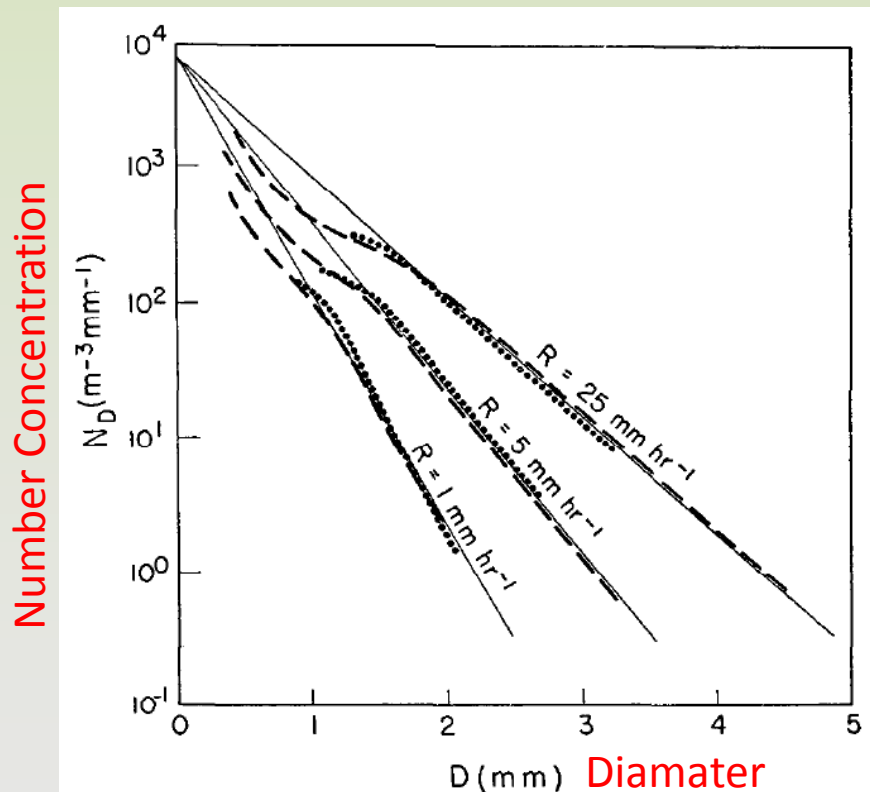


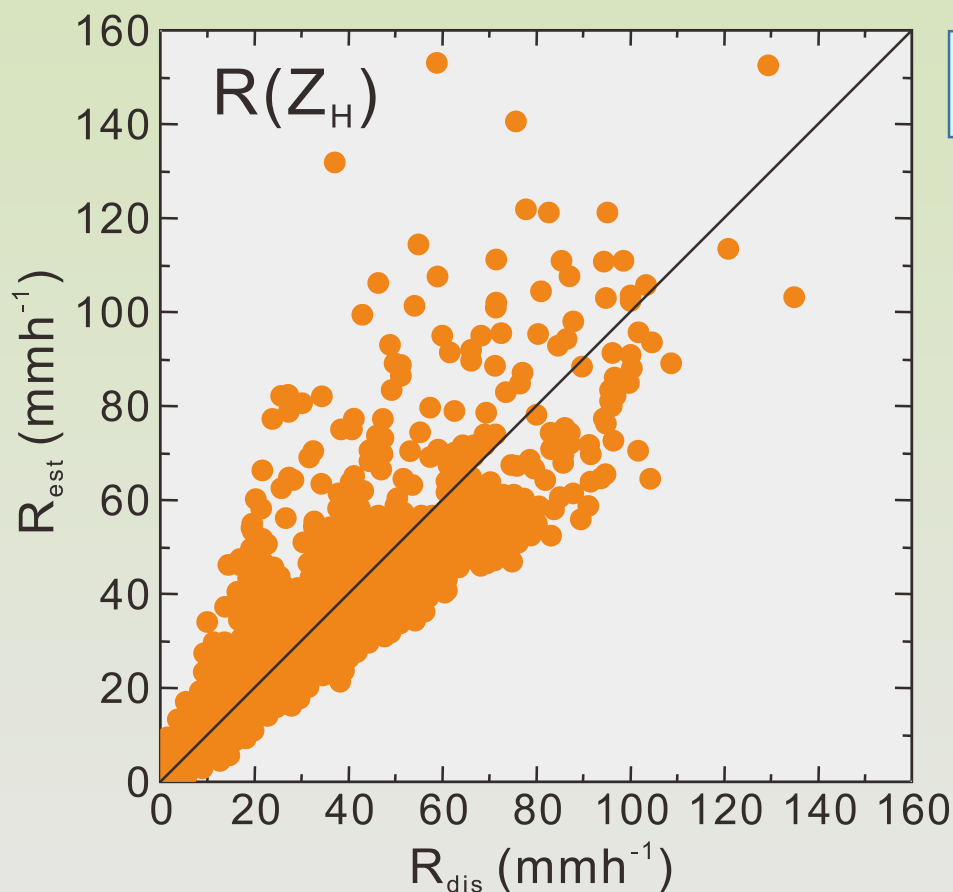
FIG. 2. Distribution function (solid straight lines) compared with results of Laws and Parsons (broken lines) and Ottawa observations (dotted lines).

(Marshall and Palmer, 1948)

Variety of Z-R Relationships

- $Z=200R^{1.6}$ Marshall and Palmer, 1955, Stratiform rain
- $Z=150R^{1.5}$ Kodaira, 1972, Summer, Maebashi
- $Z=205R^{1.48}$ Fujiwara, 1965, Continuous rain, Miami
- $Z=300R^{1.35}$ Sekhon and Srivastava, 1971, Thunderstorm, by vertical Doppler radar
- $Z=300R^{1.37}$ Fujiwara, 1965, rainshowers, Miami
- $Z=300R^{1.5}$ Joss and Waldvogel, 1970, 47 days in 1947
- $Z=310R^{1.56}$ Gunn and East, 1954, for $\lambda=3.21$ cm
- $Z=400R^{1.4}$ Laws and Parsons
- $Z=450R^{1.46}$ Fujiwara, 1965, thunderstorms, Miami

Z-R関係式の推定精度



ディストロメータで雨滴の粒径分布を観測

粒径分布から
レーダー反射因子
を計算

レーダー反射因子
からZ-R関係で
降雨強度を計算

粒径分布から
降雨強度
を計算

横軸

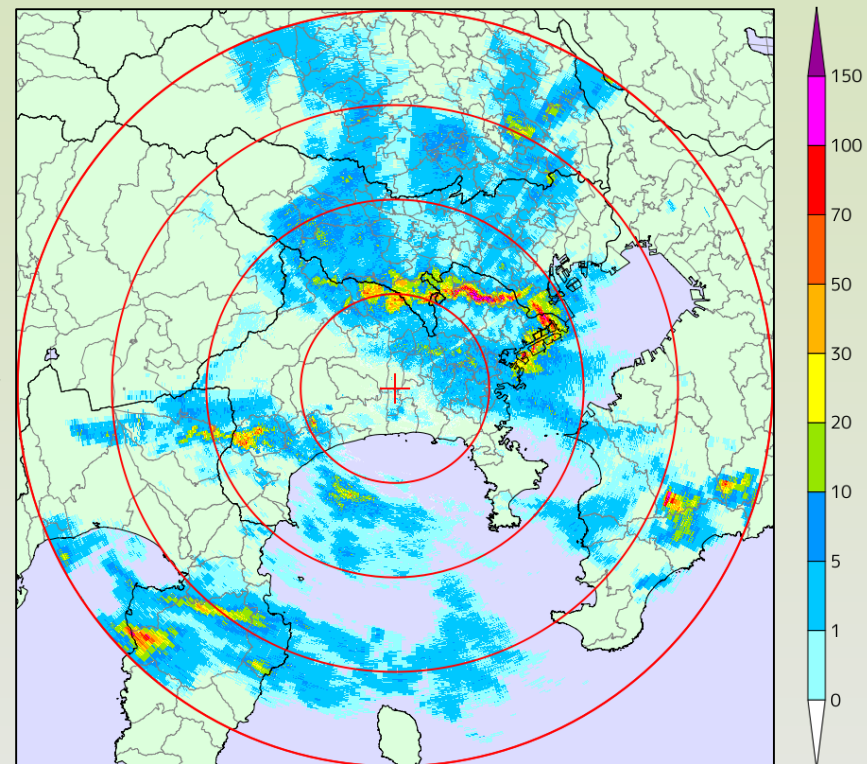
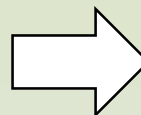
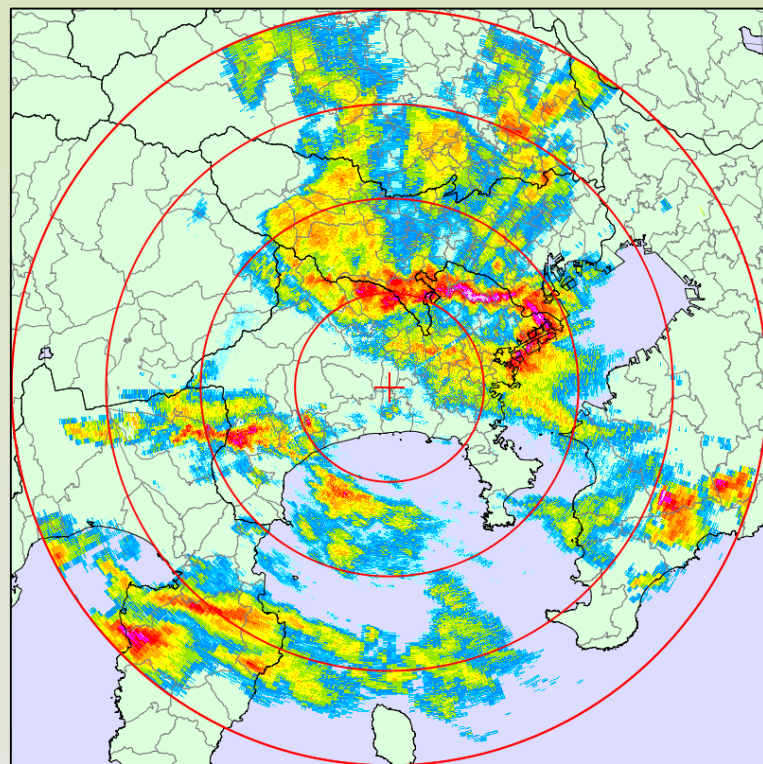
縦軸

Z-R関係は強い雨ほどばらつきが大きくなり、誤差が100 %程度になる場合もある。

Z-R関係式による降水強度推定

1401 JST 10 May 2012, EL=1.7 deg.

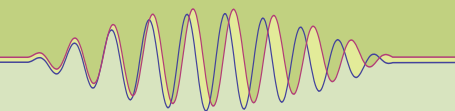
レーダー反射因子 (Reflectivity) dBZ

降雨強度 (Rainfall Intensity) mm hour⁻¹


mm ⁶ m ⁻³	dBZ	R[mm hour ⁻¹]
0.1	-10	0.009
1	0	0.036
10	10	0.15
100	20	0.65
1000	30	2.73
10000	40	11.53
100000	50	48.62

- Z-R関係により降雨強度を算出.
- その時, その場所のZ-R関係を知ることは難しいので, 通常, 予め決めておいたZ-R関係を使用する(誤差要因).
- 波長の短いレーダー(CバンドやXバンド)では**降雨減衰**も誤差要因の一つ.

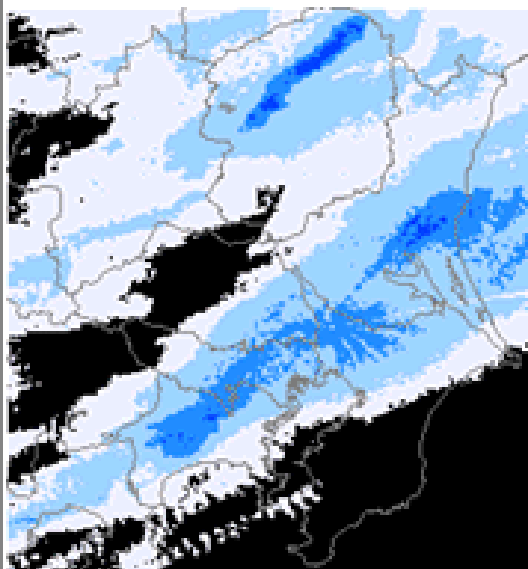
$$Z=200R^{1.6}$$



雨量計による降水強度の補正

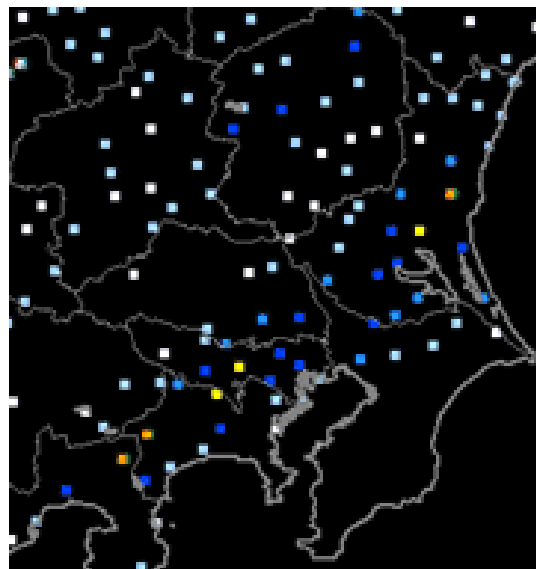
- Z-R関係により推定された降水強度を，地上雨量計の観測結果を用いて補正することにより高精度化を図る。（気象庁で現在行われている方式）
- 雨量計による降水強度の観測には時間がかかるため，リアルタイム補正は難しい。
- 雨量計ネットワークに引っかからない局所的な降水は補正できない。

レーダーの1時間積算値



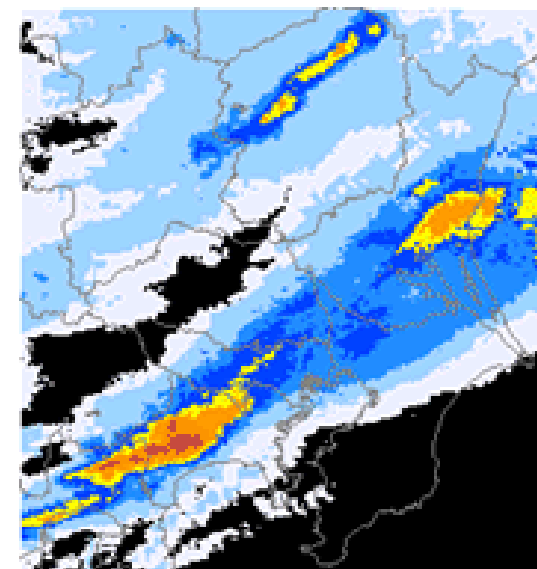
面的に得られる雨量

アメダスの1時間雨量



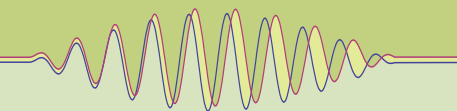
正確な雨量

解析雨量

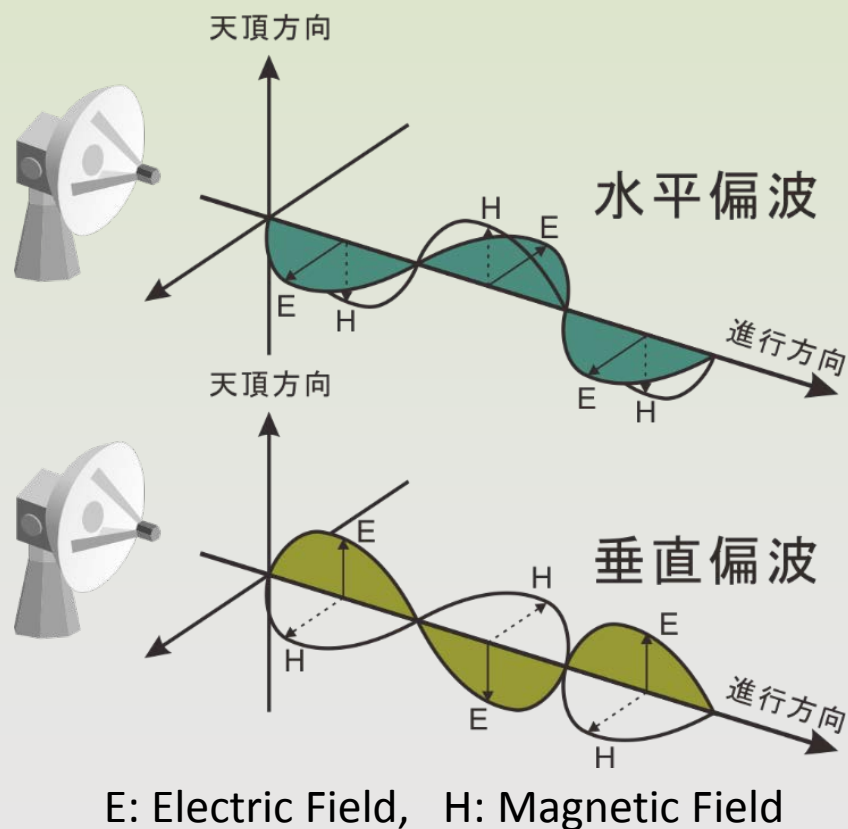


面的で正確な雨量

- レーダー方程式に基づきレーダー反射因子を観測.
- 降水強度の推定にはZ-R関係式を使用.
- Z-R関係式は粒径分布に大きく依存. レーダーだけでは粒径分布を知ることが難しいので, 粒径分布の変動が大きな誤差要因となる.
- 波長の短いレーダー(CバンドやXバンド)では降雨減衰も誤差要因となる.
- 地上雨量計の観測結果を用いてレーダー推定による降水強度を補正する.



- これまでのレーダーは、単一の周波数と単一の偏波(水平偏波)を使用。
- 偏波: 電磁波における電場の振動面
- MPLレーダー: 複数の周波数や複数の偏波を用いて、より多くのパラメータを取得するレーダー。



8. Precipitation Measurements

8.1	Drop Size Distributions	210
8.1.1	Cloud Drop Size Distribution	
8.1.2	Raindrop Size Distribution	
8.1.3	Hailstone Size Distribution	
8.2	Terminal Velocities	216
8.3	Rainfall Rate, Reflectivity, and Liquid Water Content	
8.3.1	Liquid Water Content	
8.3.2	Reflectivity Factor Z	
8.3.3	Rainfall Rate	222
8.4	Single-Parameter Measurement Methods	
8.4.1	Reflectivity Factor Method	
8.4.2	Attenuation Method	
8.4.3	Differential Phase Method	234
8.5	Multiple-Parameter Measurements of Precipitation	235
8.5.1	Dual Wavelength	236
8.5.2	Polarization Diversity	239
8.5.3	Application of Dual Polarization	252
8.5.4	Rain Gauge and Radar	271
8.6	Distribution of Hydrometeors from Doppler Spectra	274
	Problems	278

DOPPLER RADAR AND WEATHER OBSERVATIONS

Second Edition

Richard J. Doviak

Dušan S. Zrnić

National Severe Storms Laboratory
National Oceanic and Atmospheric Administration
Norman, Oklahoma

and
Departments of Electrical Engineering and Meteorology
University of Oklahoma
Norman, Oklahoma



ACADEMIC PRESS, INC.
Harcourt Brace Jovanovich, Publishers
San Diego New York Boston
London Sydney Tokyo Toronto

防災科研MPレーダーシステム

- 防災科研では2000年にXバンド偏波ドップラーレーダー, Kaバンドドップラーレーダー, Wバンド偏波ドップラーレーダーを導入し, マルチパラメータレーダーシステムと呼んだ.
- 2003年にXバンドのレーダーを神奈川県海老名市の某社独身寮の屋上に移設し, 首都圏を中心とした量的降水量推定(QPE)の研究を行ってきた.
- このレーダーを用いたQPEの精度が高いことが明らかになり, マルチパラメータレーダーの名前も広まった.

このような経緯から, 日本では. . .

水平・垂直の二つの偏波を同時送受信し, 偏波間位相差を観測可能なレーダーをマルチパラメータ(MP)レーダーと呼ぶようになった.

マルチパラメータレーダー

- ≡ 偏波レーダー
- ≡ 二重偏波レーダー
- ≡ 偏波ドップラーレーダー
- ≡ 二重偏波ドップラーレーダー



Reprinted from the preprint volume of the 30th International Conference on Radar Meteorology, 19-24 July 2001, Munich, Germany, by the American Meteorological Society, Boston, MA.

P3.6 DEVELOPMENT OF A MULTIPARAMETER RADAR SYSTEM ON MOBILE PLATFORM

Koyuru Iwanami ^{1*}, Ryohel Misumi ¹, Masayuki Maki ¹, Toshio Wakayama ², Kiyoyuki Hata ² and Shinichiro Watanabe ²

1: National Research Institute for Earth Science and Disaster Prevention, Tsukuba, Ibaraki, Japan
2: Mitsubishi Electric Corporation, Amagasaki, Hyogo, Japan

1. INTRODUCTION

It is important to observe cloud and precipitation systems during their whole life cycles from the initiation of cloud through formation and development of precipitation to dissipation of cloud and precipitation in order to study mechanisms and develop forecast methods of heavy rainfall and snowfall that causes disasters.

National Research Institute for Earth Science and Disaster Prevention (NIED) has investigated rainfall and snowfall clouds, especially that caused disasters, using X-band Doppler and polarimetric radars. But we could not observe non-precipitating clouds and measure simultaneously Doppler velocity and polarimetric parameters. So we have developed a multiparameter radar system with three frequencies of 9, 35 and 95 GHz on mobile platforms under contract with Mitsubishi Electric Corporation in order to observe cloud and precipitation systems through their whole life cycles. It will be used for observation measures of not only

auto-driving license in Japan, for field experiments. The antenna is mounted on the rear portion of flatbed and the radar control and data acquisition systems are contained in the container on the front portion of flatbed of each truck. The system can be easily transported to observation sites according to the meteorological situation.



FIG 1. Photograph of developed multiparameter radar system. X-band (right) and Ka/W-band (left) radar subsystems are mounted on 4-ton truck. The antenna on the top of

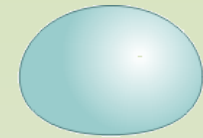
How is the shape of falling rain drops?



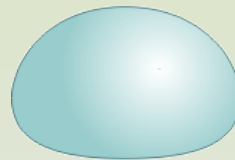
3 mm



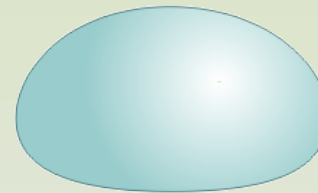
4 mm



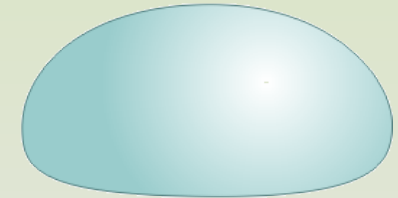
5 mm



6 mm

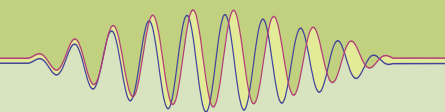


7 mm



8 mm

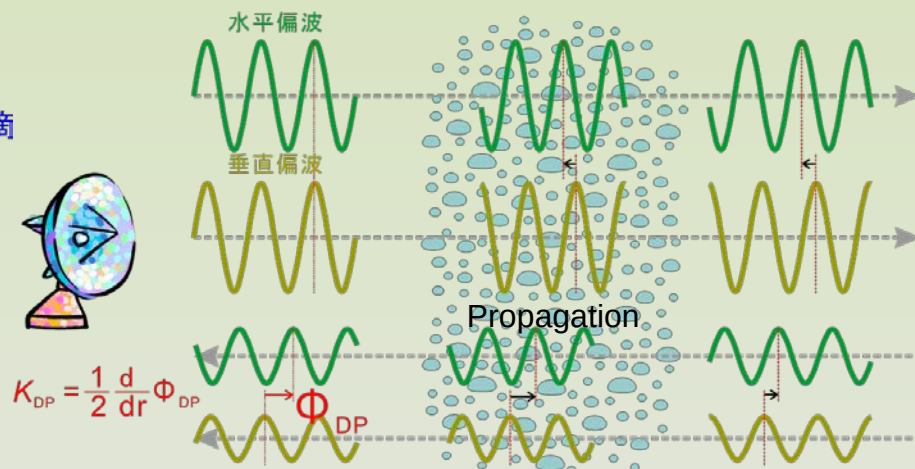
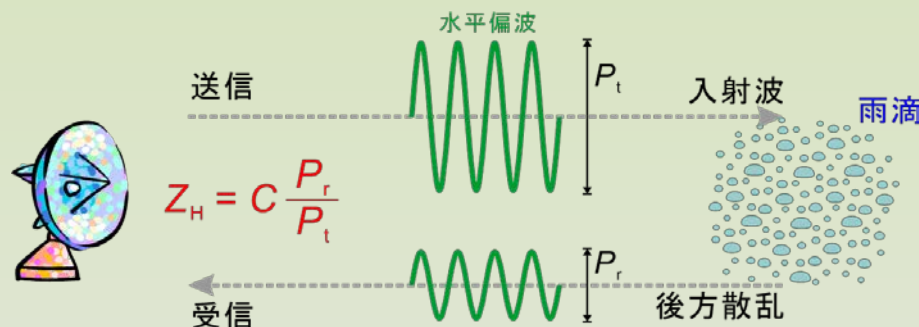
- 落下する雨粒は空気抵抗により扁平につぶれる.
- 粒径が大きいほど, つぶれ具合は大きくなり, アンパンの様な形状になる.
- MPLレーダーは, つぶれた雨粒を水平・垂直の偏波で観測.



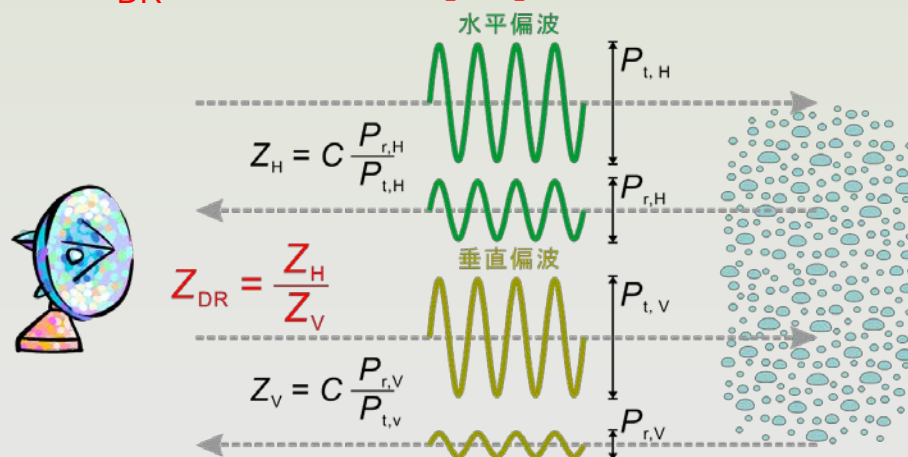
偏波パラメータの例

● Z_H : レーダー反射因子(水平偏波)[dBZ]

● Φ_{DP} : 偏波間位相差 [°]



● Z_{DR} : 反射因子差 [dB]



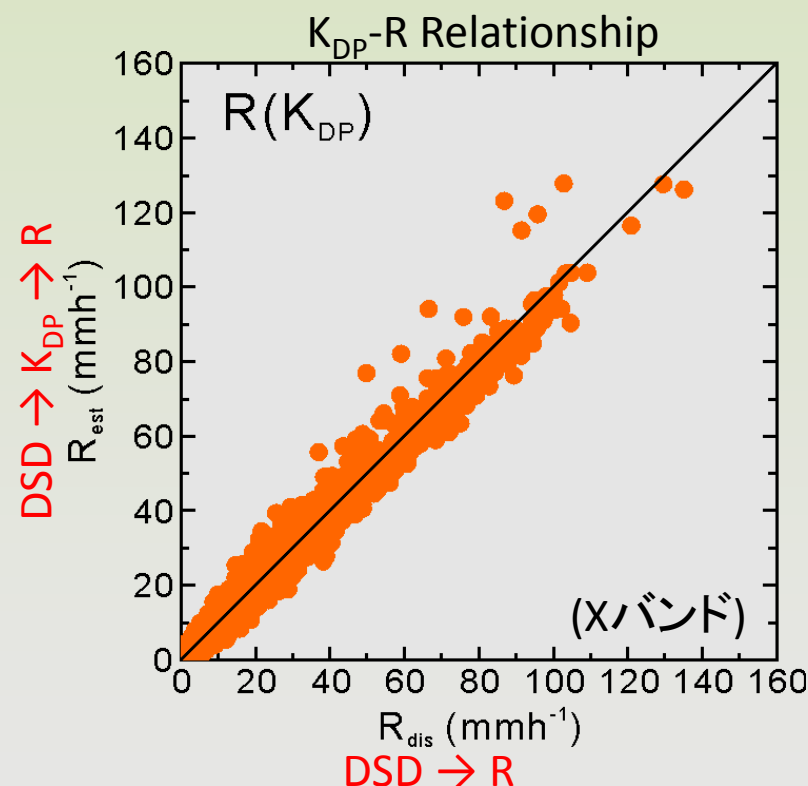
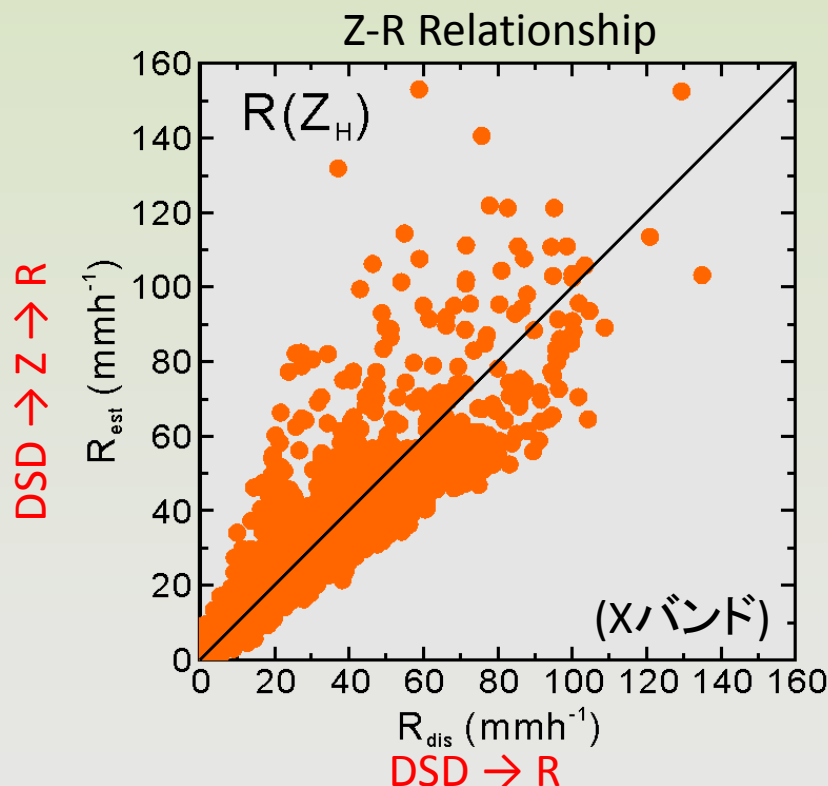
● K_{DP} : 単位距離あたりの Φ_{DP} [°/km]

Φ_{DP} の距離微分から求める.

● ρ_{HV} : 偏波間相関係数

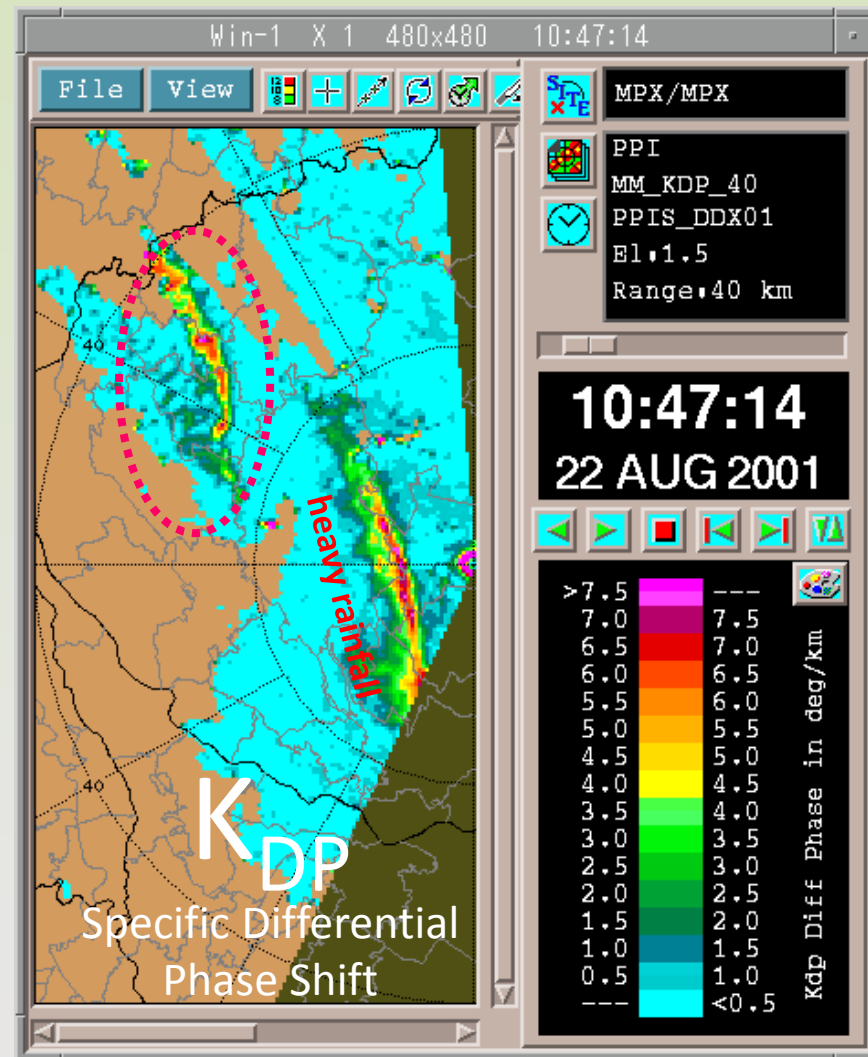
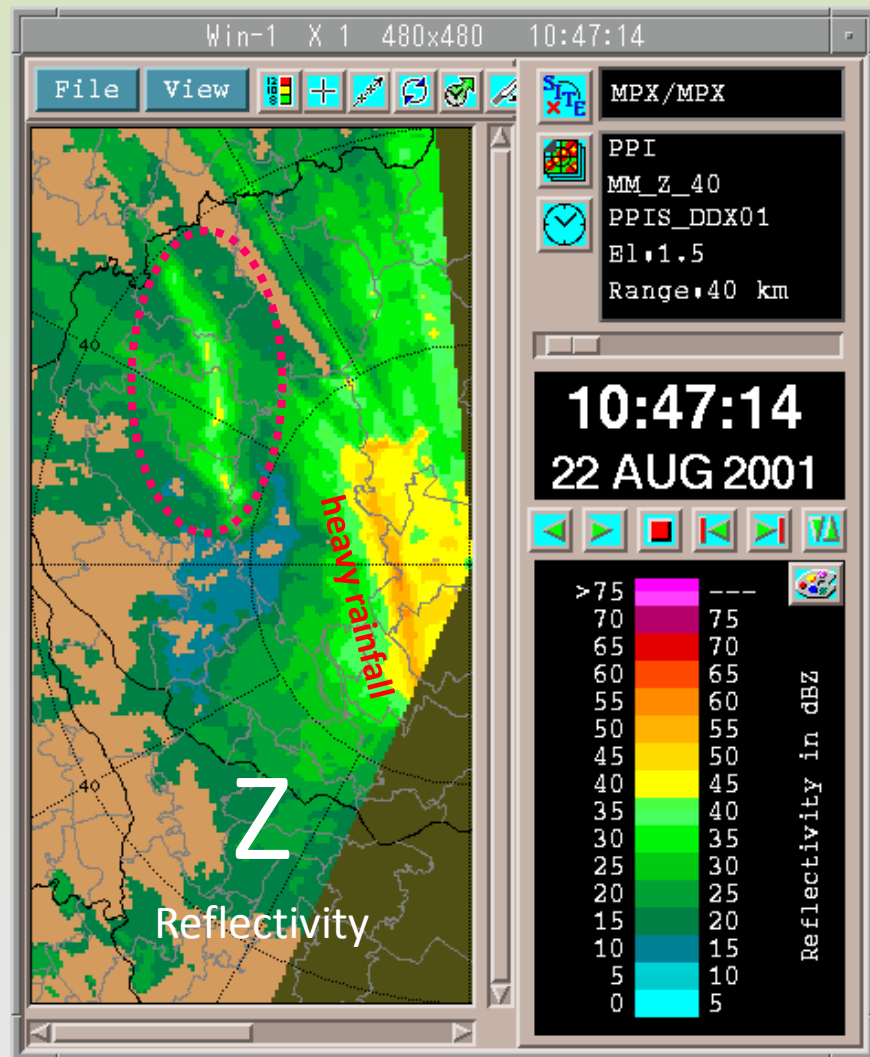
K_{DP} -R関係式による降雨強度推定

- Z-R関係式を用いた降雨強度推定は、粒径分布のばらつきや降雨減衰の影響を受け、それらが精度低下の原因となっていた。
- K_{DP} -R関係式は、粒径分布のばらつきによる影響が小さい、Z-R関係式よりも高精度に降雨強度推定が可能。

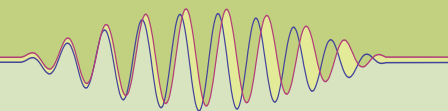


- K_{DP} は波長が短いほど観測しやすい。(弱い雨でも K_{DP} が求められる)
- Sバンドでは30 mm hour⁻¹から、Xバンドでは数mm hour⁻¹から算出可能。

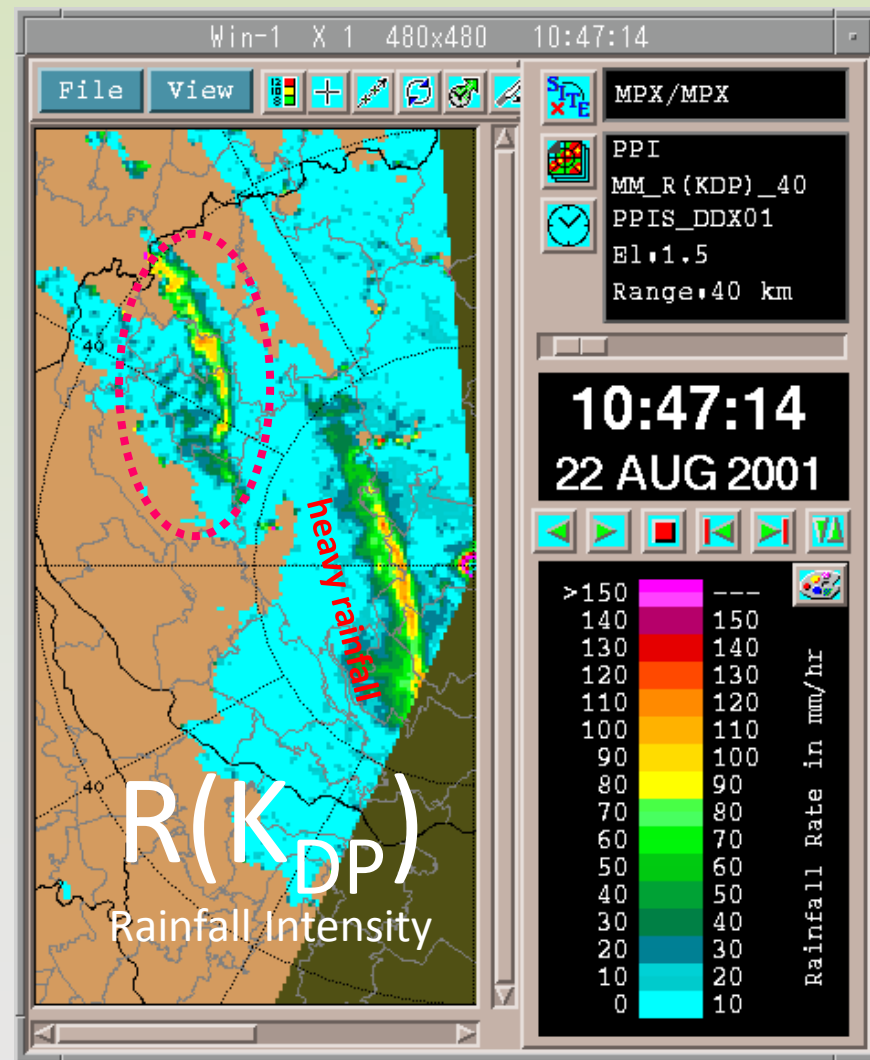
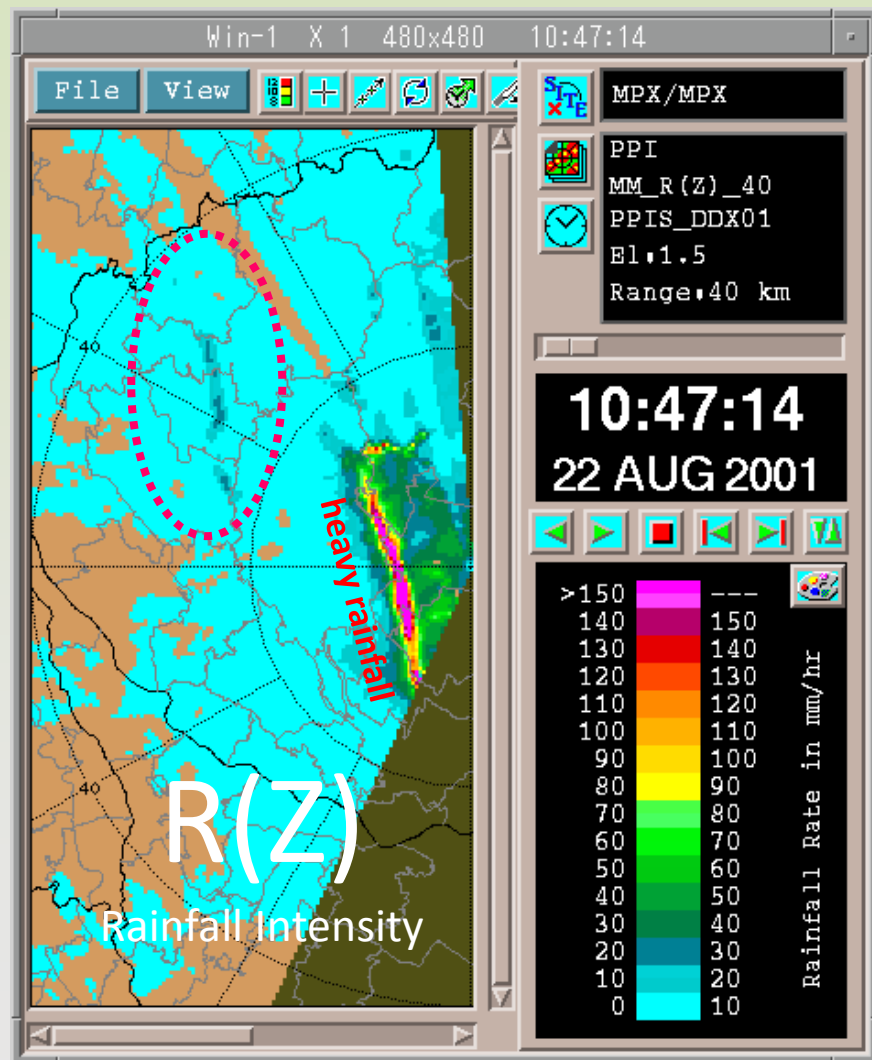
Reflectivity is attenuated, while phase information is not!

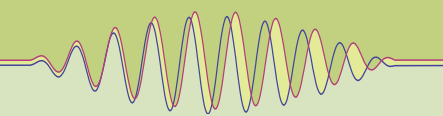


降雨減衰の影響 ($R(Z)$ と $R(K_{DP})$)



Reflectivity is attenuated, while phase information is not!

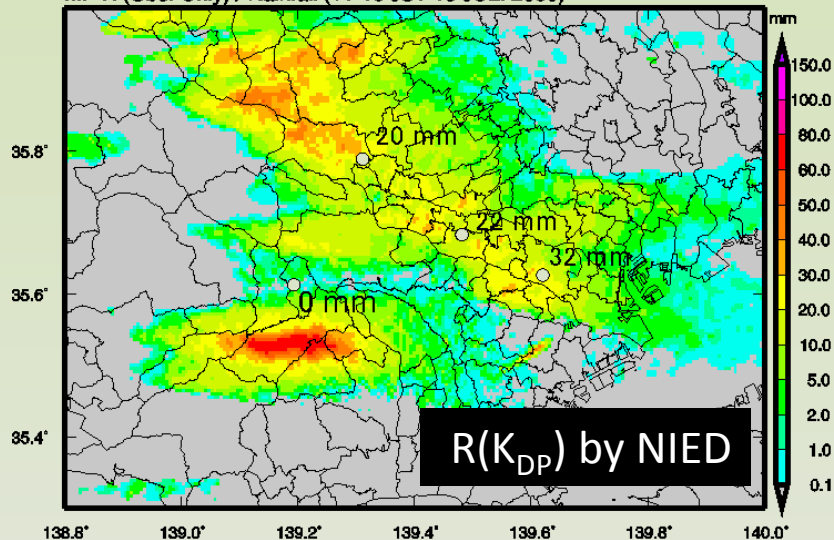




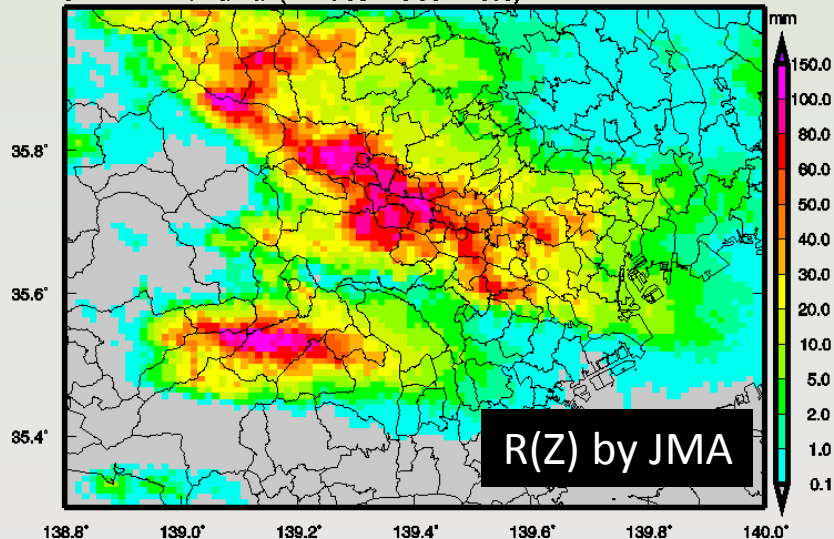
降雨量推定の比較 (K_{DP} -RとZ-R)

- 東京都付近で降雹が発生した事例 (5時間積算雨量で比較).
- Z-R関係に基づく気象庁の推定 (左下) では, 雨量計による補正を行った解析雨量 (右下) に比べて過大評価. (レーダー反射因子は粒径の6乗に比例)
- $R-K_{DP}$ による推定は解析雨量に近い.

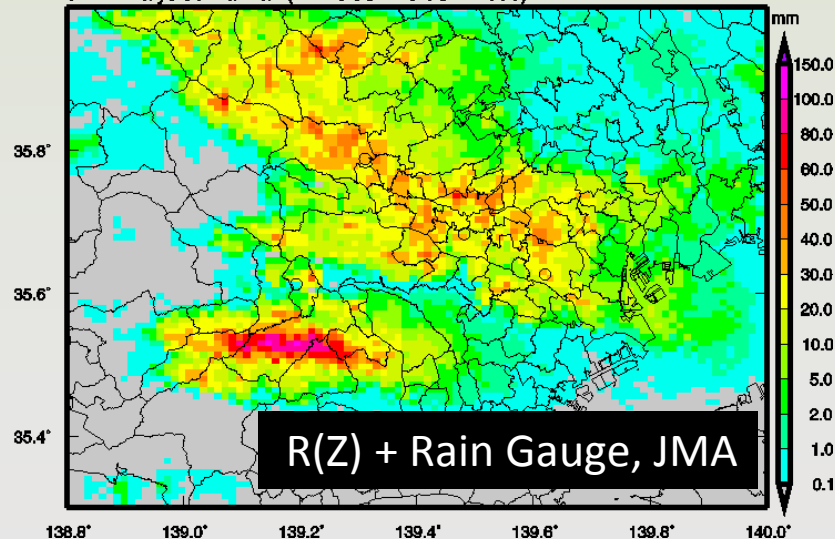
MP-X (Obs. Only) / Rainfall (11-16 JST 15 JUL. 2006)

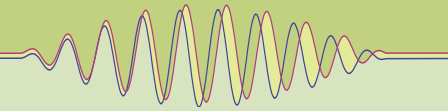


JMA RADAR / Rainfall (11-16 JST 15 JUL. 2006)



JMA Analysis / Rainfall (11-16 JST 15 JUL. 2006)



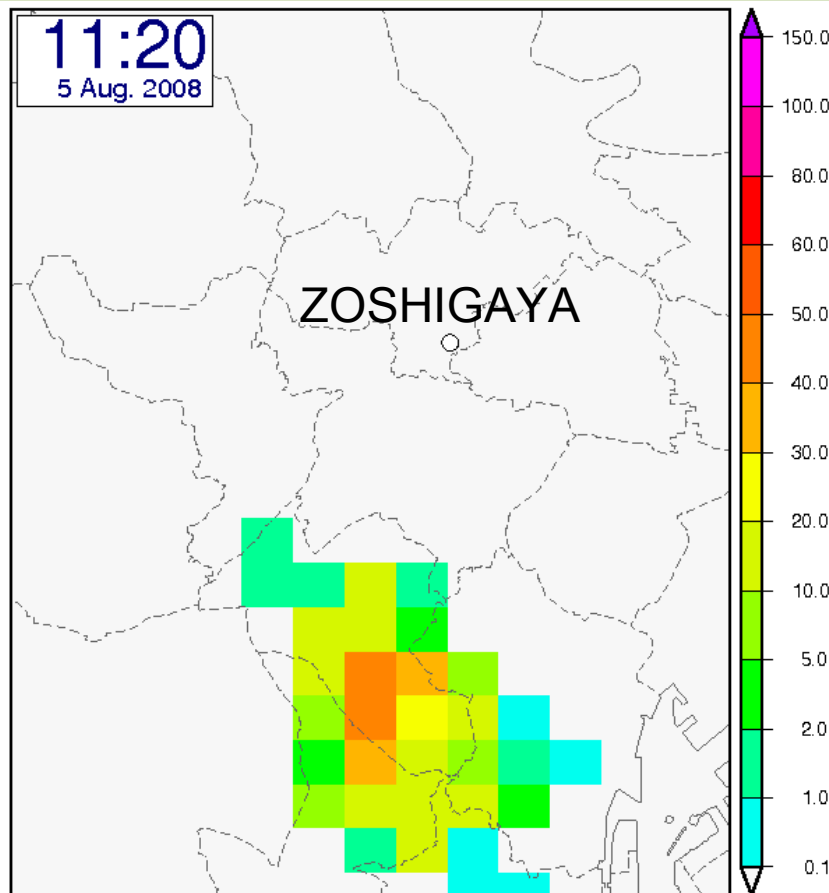


- 2008年8月5日正午頃に、東京都豊島区雑司が谷で下水道の改修工事を行っていた作業員6名が急激な出水により流され、5名が死亡した。
- 当時、活発な積乱雲が急激に発達し、雑司が谷付近で100 mmを越える降雨をもたらした。

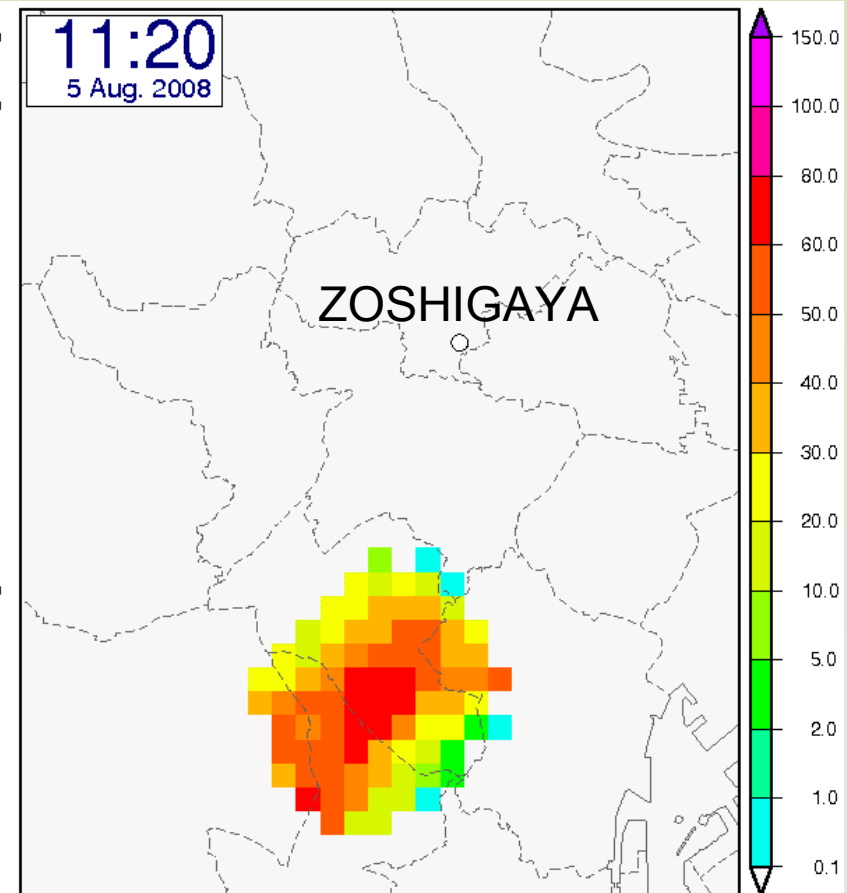
Rainfall Intensity

C-band Conventional Radar
with Rain Gauge Calibration

NIED X-band Dual-Pol. Radar Only



Horizontal resolution: 1 km
Updated every 10 min.



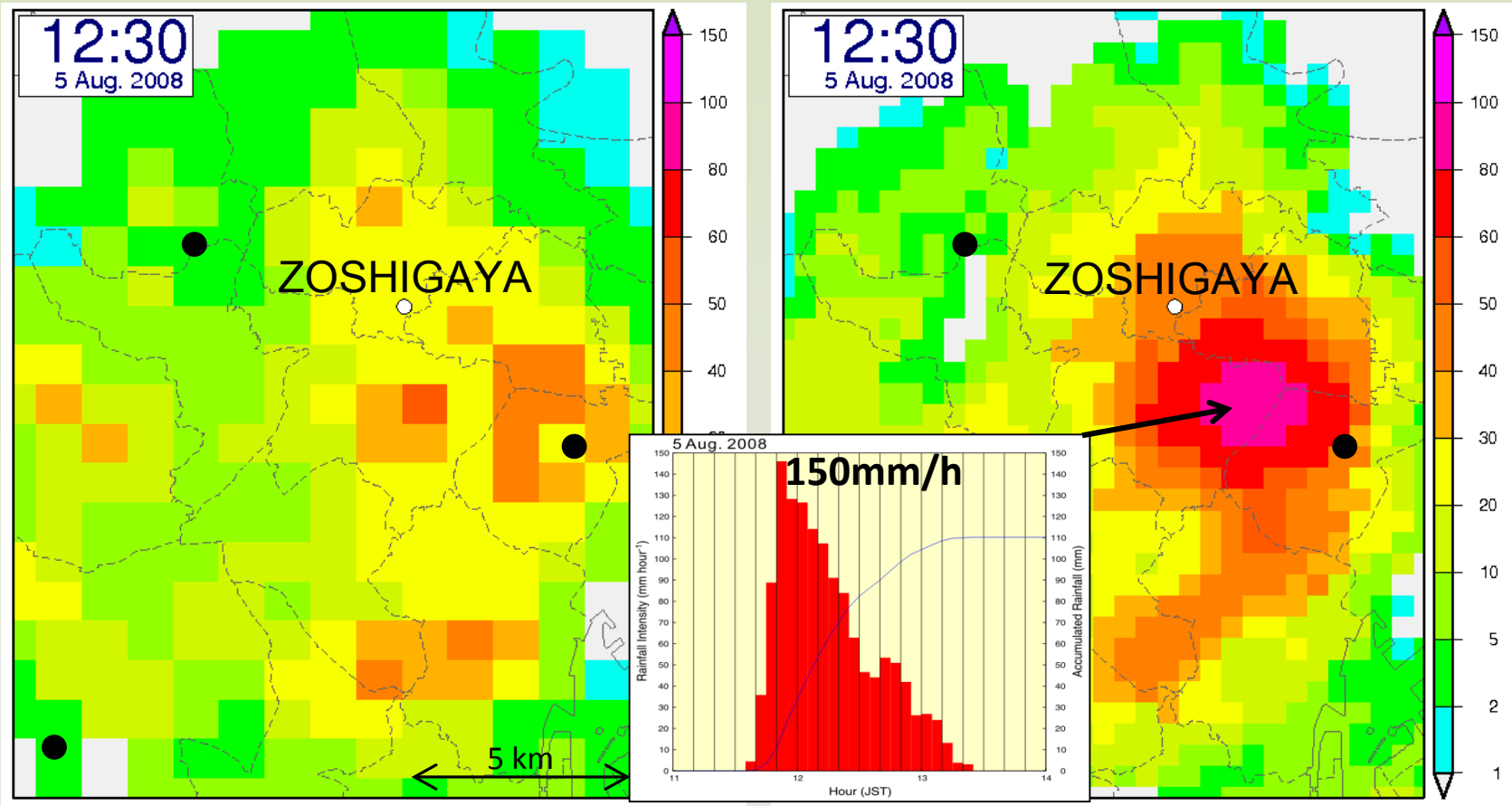
Horizontal resolution: 500 m
Updated every 5 min.

1時間積算雨量(2008年8月5日雑司が谷)

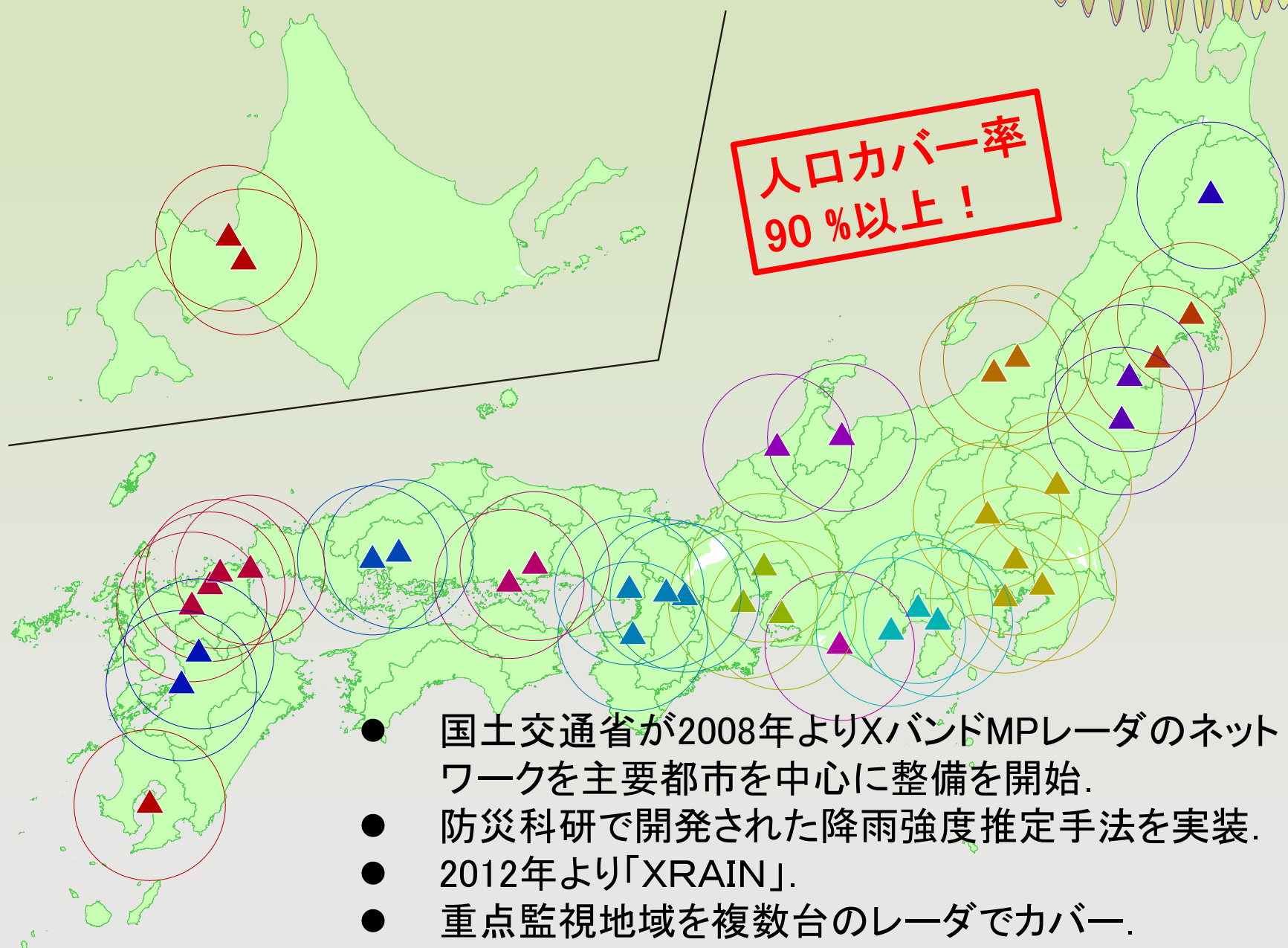
1-hour Accumulated Rainfall Amount

C-band Conventional Radar
with Rain Gauge Calibration

NIED X-band Dual-Pol. Radar Only

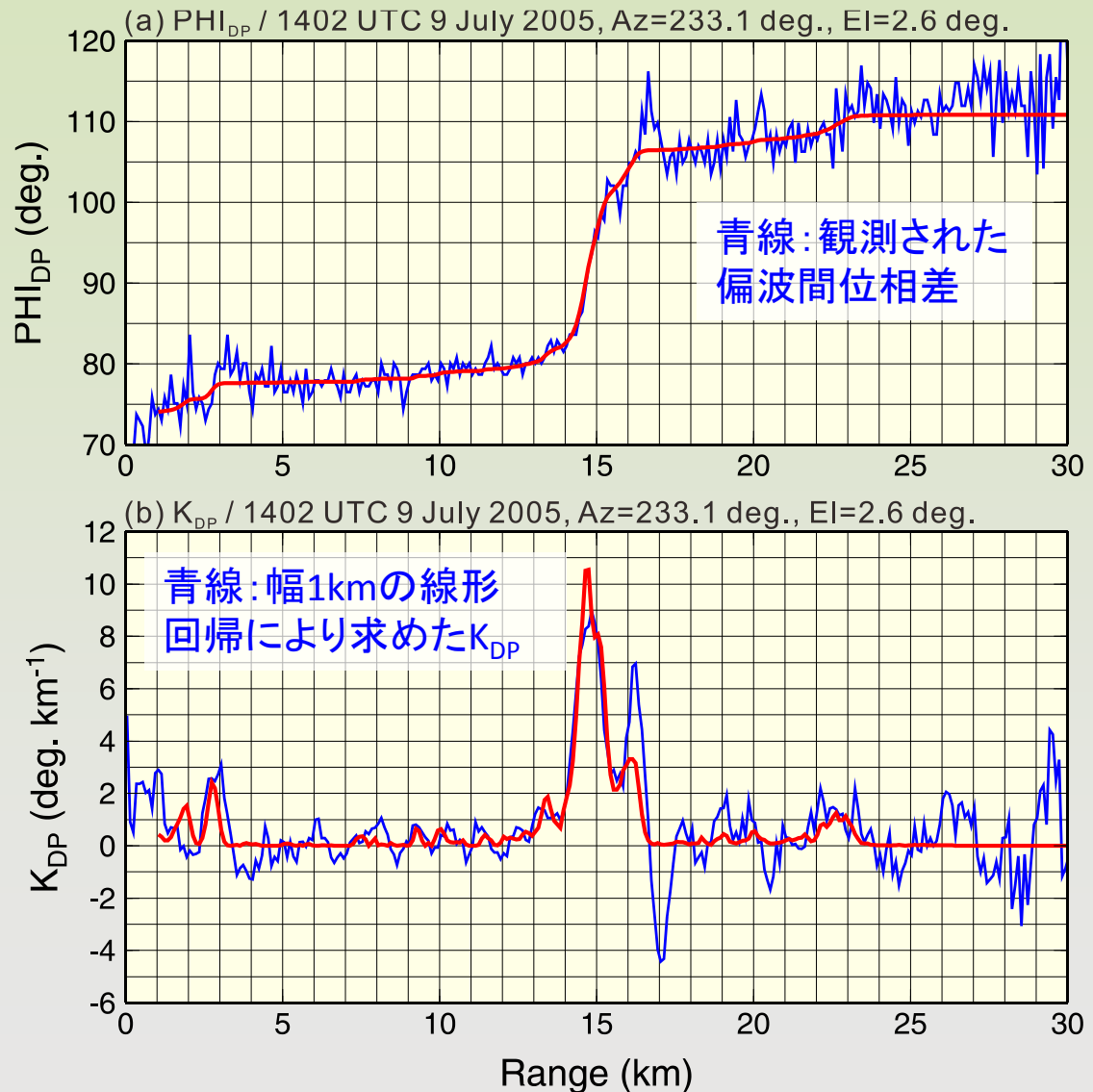


Ministry of Land, Infrastructure, Transportation and Tourism (MLIT) decided to deploy X-band radar network.

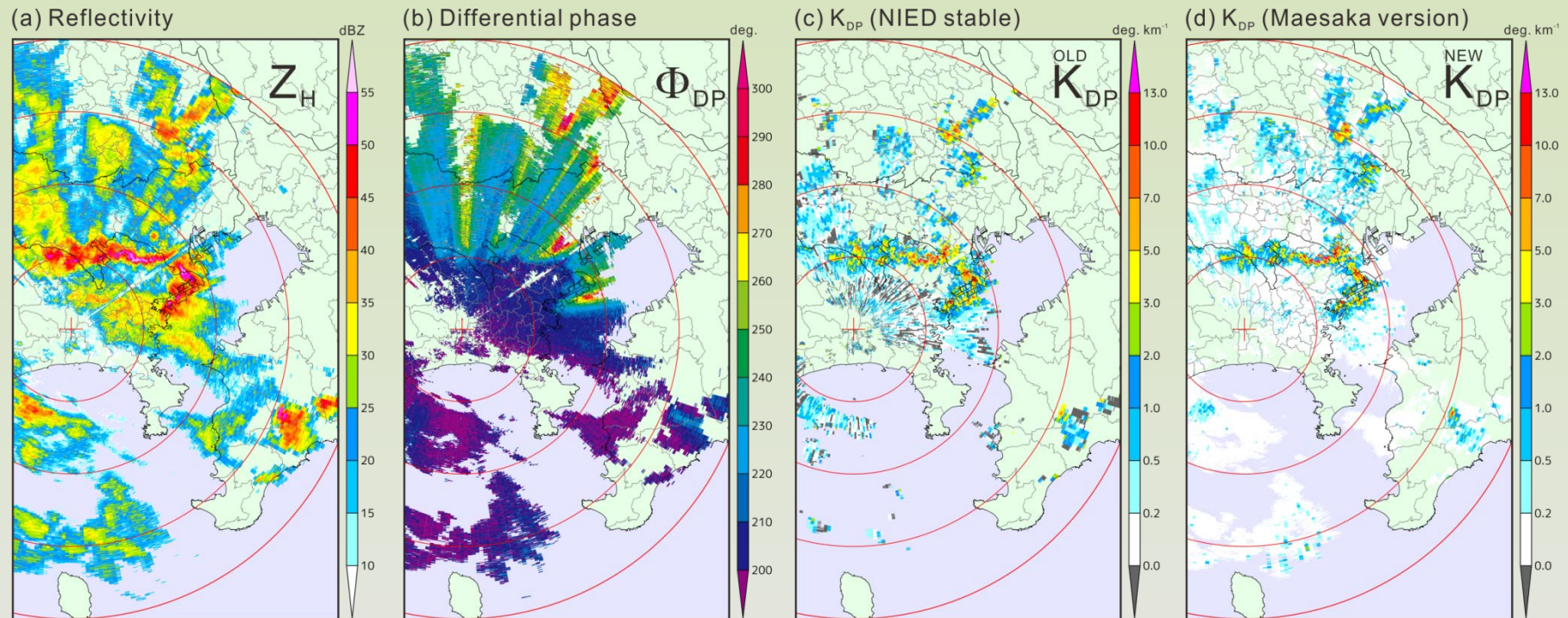


K_{DP} の算出について

- 現在XRAINでは、弱雨域ではZ-R関係式を、強雨域では K_{DP} -R関係を用いて降雨強度推定を行っている。
- Z-R関係式を使う方式では、受信電力のキャリブレーションを常に行う必要があること、手法的には K_{DP} -R関係の方が優れていることから、なるべく弱雨域でも K_{DP} -R関係を使用したい。
- しかし、観測された偏波間位相差にはノイズが含まれ、その距離微分から単位距離あたりの偏波間位相差(K_{DP})を求めると、負の値が算出されてしまう。
- 雨滴は水平軸の方が長いので、 K_{DP} は常に正の値となるはず。
- 弱雨域の方がノイズの影響を受けやすい。



弱雨域での K_{DP}



PPI images of NIED's X-band polarimetric radar at Ebina city at 0500 UTC 10 May 2012. The elevation angle is 1.2. Range circles are drawn at 20 km intervals from the radar. a) Observed reflectivity (no attenuation correction), b) Observed differential phase, c) Specific differential phase estimated by classic method (NIED stable algorithm; the data which S/N ratio less than 10 dB are not used.), d) Specific differential phase estimated by this method ($C_{lpf}=1 \times 10^{10}$), and e) Rainfall rate calculated from K_{DP} shown in (f).

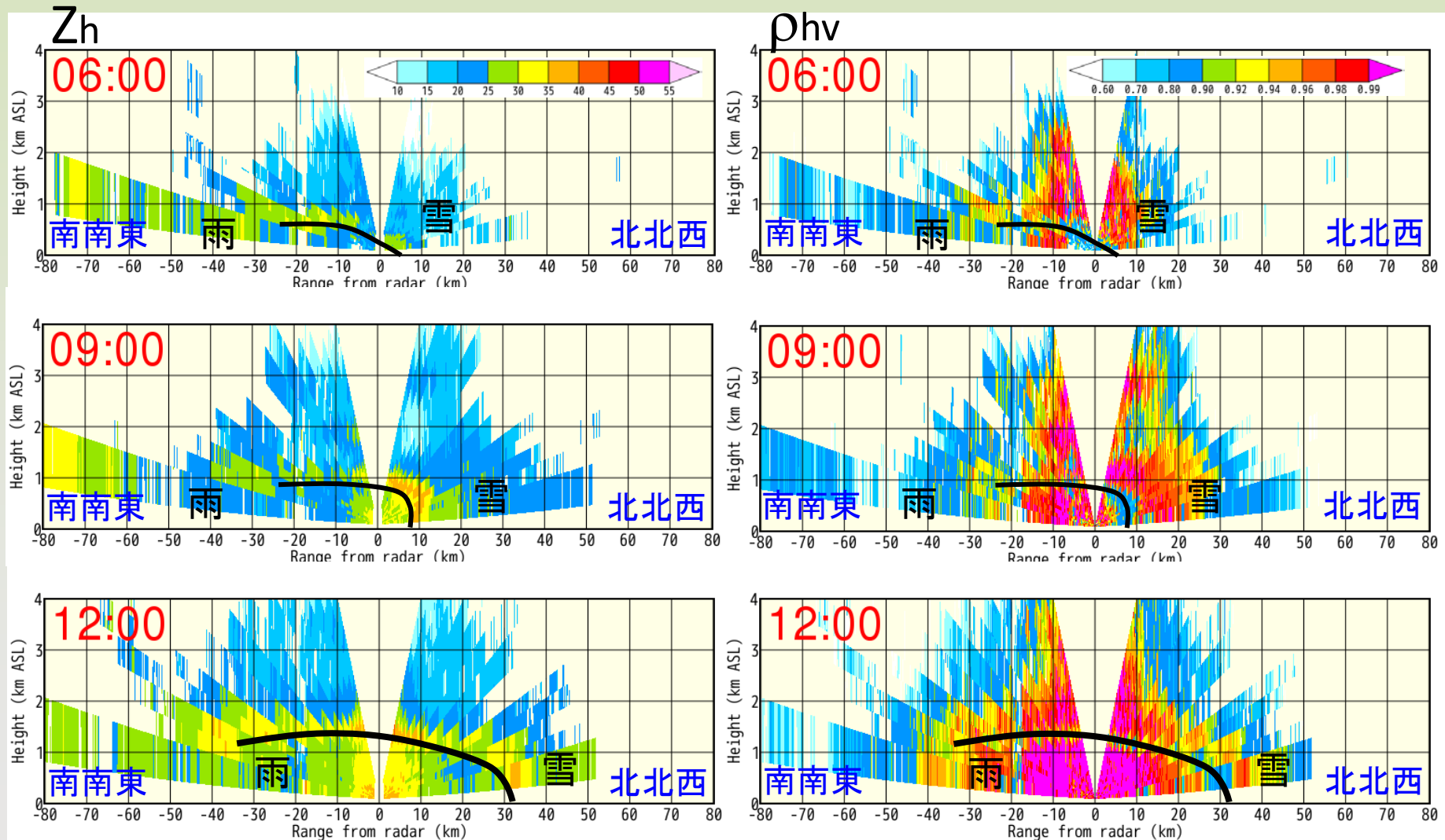
弱雨域でも，負の値の K_{DP} を含まず，解像度のよい K_{DP} を求めることが現在の研究課題。

→手法の高度化.

偏波間位相差のノイズを減らす.

ρ_{HV} の応用例(融解層の検出)

ρ_{HV} : 偏波間相関係数. 通常の雨ではほぼ1. パルス毎に縦横比が変動するような粒子(みぞれ, ひょう, 巨大な雨粒など)の場合は小さくなる.



降水粒子判別

MPLレーダーで観測された種々のパラメータや気温などの環境条件から、降水粒子の種類を判別する。

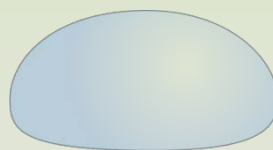
- 判別テーブル
- ファジーロジック
- ニューラルネットワーク



雪片



霰(あられ)



雨粒

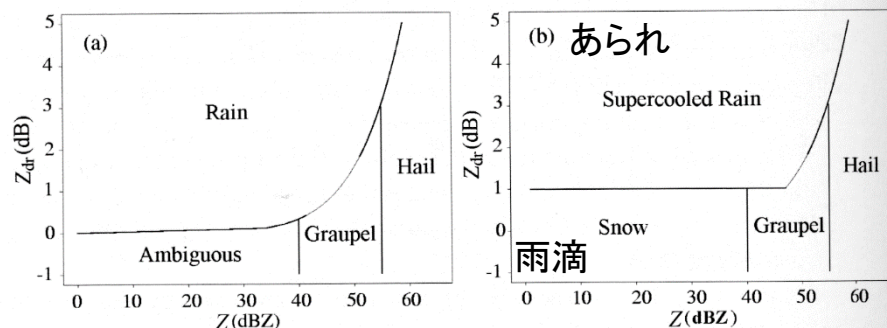


Fig. 7.91. Hydrometeor classification decision boundary in Z_h , Z_{dr} space: (a) below and (b) above the 0° level. The boundaries correspond to the decision scheme used by Zeng et al. (in press), and are valid at S-band.

(Zeng et al. 2000)

判別テーブル

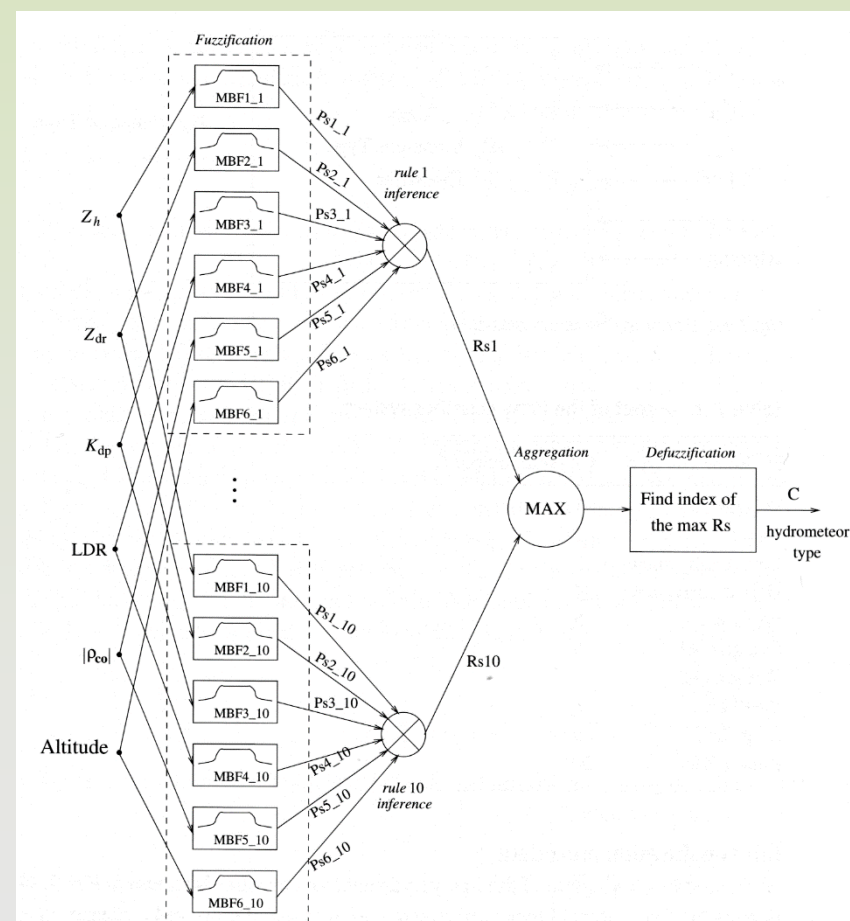
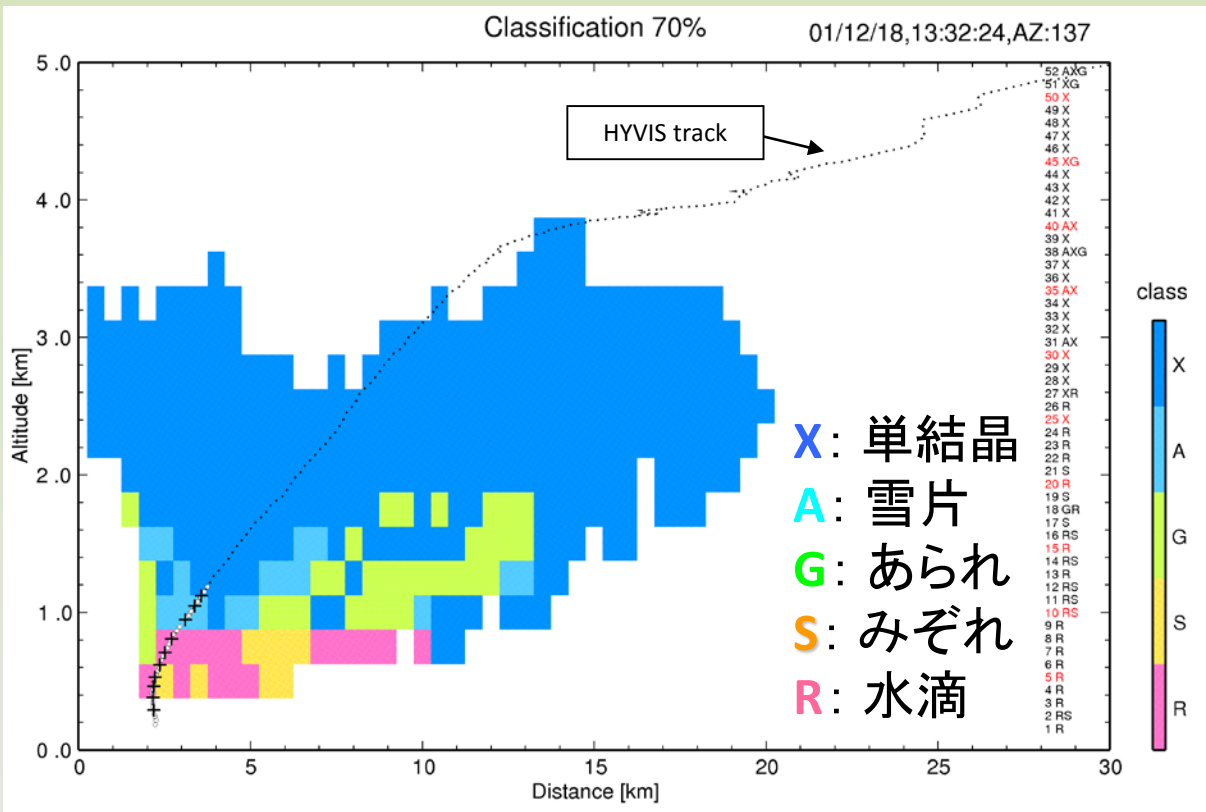
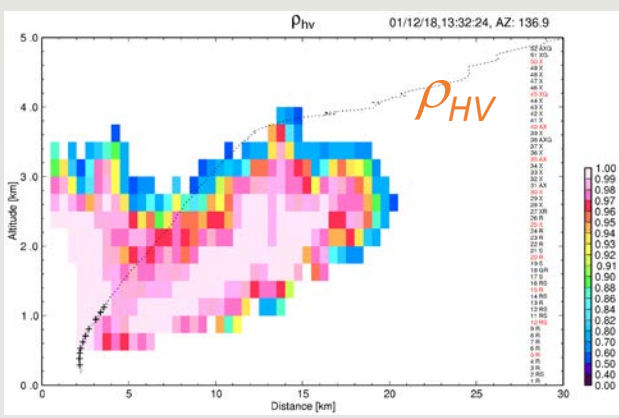
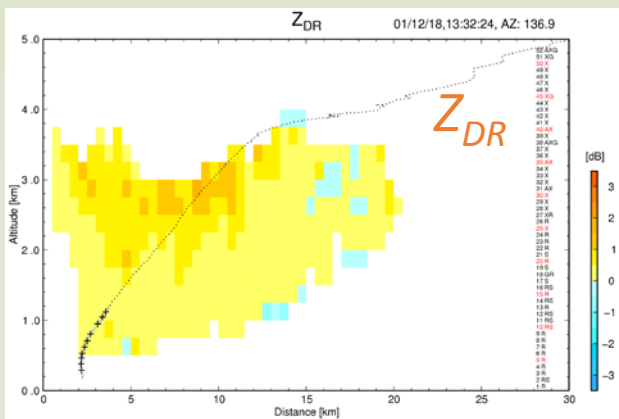
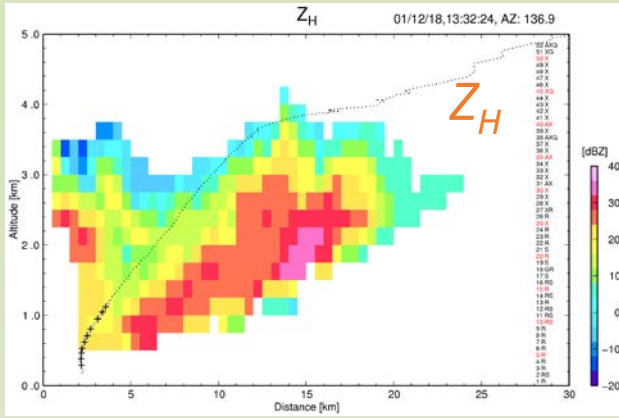


Fig. 7.94. Detailed block diagram of the fuzzy logic system for hydrometeor classification.

ファジーロジック

(Liu & Chandrasekar 2000)

降水粒子判別(判別例)



- 水平・垂直の二つの偏波を送受信することにより、より多くの情報を取得するレーダー。
- K_{DP} -R関係はZ-R関係に比べて粒径分布のばらつきによる影響が小さく、降雨強度推定精度が高い。 K_{DP} は位相情報であるため、降雨減衰の影響を受けない。
- 在来型Xバンド気象レーダにおける降雨強度推定の弱点が解決された。
- 降水粒子判別や融解層判別など、降水粒子の特徴を推定できる。