

第8章 気象学的ターゲット

嵐やその他の気象現象を検出することは、レーダの最も価値のある用途の一つだろう。激しい嵐や竜巻の警告、ハリケーンの観測、洪水の警告、インドシアの警告は全てレーダに基づいており、毎年多くの人命と財産を救っている。この章では、レーダがさまざまな気象事象を検出する方法と、その制約や制限について説明する。気象学的に検出可能なほとんどのエコーの源となる降水粒子から始め、気象情報を提供する他のエコー源についても検討する。

hydrometeor：降水粒子。雲、雨、雪など大気中の水の振る舞い。

目次

1. 雲の観測
2. 雨の観測
3. **DVIP (Digital Video Integrator Processor)**
4. 雪の観測
5. ブライトバンド
6. 雹（ひょう）の観測
7. 減衰
8. 減衰補正
9. 減衰検知
10. その他

1. 雲の観測

雲について

- ほとんどのレーダは雲を検出できない。
- 雲は全て氷、または氷と過冷却の水滴（ $-40\sim 0^{\circ}\text{C}$ ）の組み合わせ。
- 非降水雲
 - 雲粒子が小さすぎて下に落ちない
 - 雲がまだ新しく、降水に至る大きさの雲粒子が作られていない
 - 雲粒子を一定の高度で浮遊させる上昇気流がある
- 雲の粒径分布
 - $5\sim 100\ \mu\text{m}$ 以上
 - 雲底から離れるほど、雲粒子は大きくなる。
 - 雲が成長すると、雲粒子は大きくなる。
 - 海洋雲は大陸雲よりも単位体積あたりの雲粒子が少ない。

1. 雲の観測

雲の粒径分布

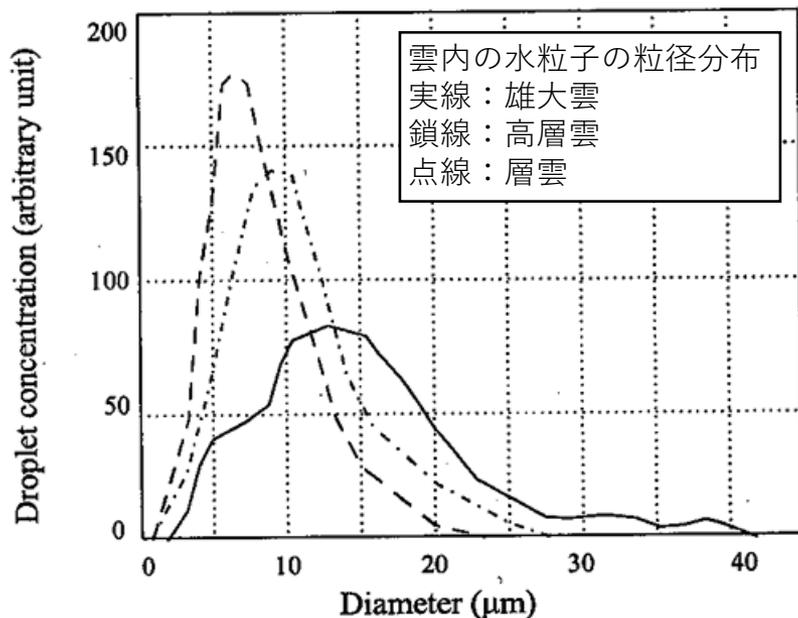


Figure 8.1 The mean droplet size distributions for various cloud types. Cumulus congestus (solid); altostratus (dash, dot, dash); stratus (dash). Based on Fletcher, 1966.

大陸雲における雲粒子の粒径分布

Diameter (mm)	Number/cm ³	$N D^6$ (mm ⁶ /m ³)
5	100	$1.56 \cdot 10^{-6}$
10	100	$1.00 \cdot 10^{-4}$
15	50	$5.69 \cdot 10^{-4}$
20	25	$1.60 \cdot 10^{-3}$
25	10	$2.44 \cdot 10^{-3}$
30	5	$9.19 \cdot 10^{-3}$
35	1	$4.01 \cdot 10^{-3}$
		<hr/>
		Total = $1.80 \cdot 10^{-2}$
		=> -17.4 dBZ

- -17.4 dBZは非常に小さく、ほとんどのレーダは観測できない。
- 粒子の数 N_i よりも粒径 D_i が支配的。

$$Z = \sum N_i D_i^6$$

2. 雨の観測 雨粒の粒径分布

- レーダは様々な雨を観測できる。
- マーシャル・パルマー分布

降雨強度に応じた粒径分布。つまり、ある雨量強度の下で任意の粒径について、単位体積、単位粒径区間あたりの水滴数を計算できる。

$$N_d = N_0 e^{-\lambda D}$$
$$\lambda = 4.1 R^{-0.21}$$

$$N_0 = 8000 \text{ (m}^{-3}\text{mm}^{-1}\text{)}$$

Dは雨粒の直径(mm)

Rは降雨強度(mm/h)

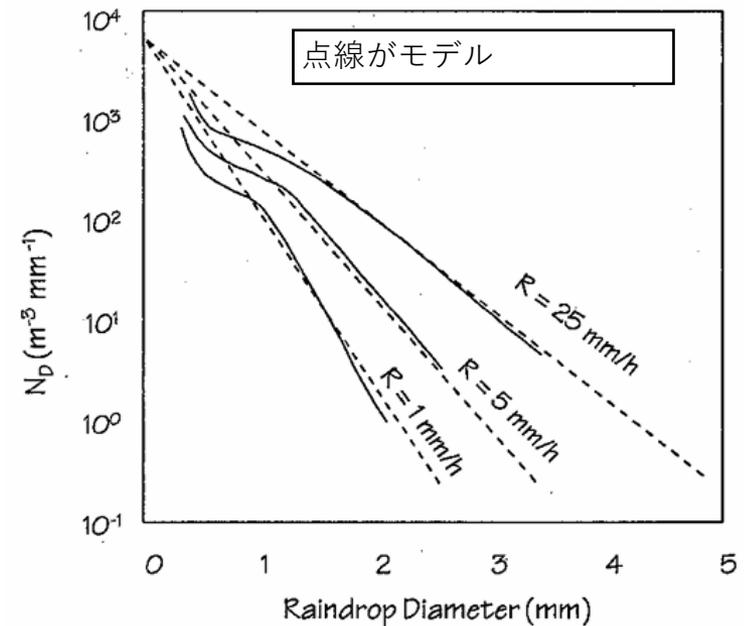


Figure 8.2 Marshall and Palmer drop-size distribution functions compared with the results of Laws and Parsons. Based on Marshall and Palmer, 1948.

2. 雨の観測 Z-R関係

- Z-R関係

雨量強度 R とレーダ反射因子 Z の関係。

$$Z = A R^b$$

A 、 b は経験定数。

最も一般的なZ-R関係はマーシャルとパルマーによるもので、

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

- 降雨の観測によって様々なZ-R関係が導かれているが、どれも大きくは変わらない。

3. DVIP (Digital Video Integrator Processor)

- 雨による反射因子は20dBZ～50dBZ以上まで様々。
- レーダ信号処理は80～90dBの範囲を256段階で表現。

初期の頃は強度レベルがほんの一握りしかないものもあった

- アメリカ国立気象局（NWS：National Weather Service）は嵐の強度を6段階に分割して利用 → **DVIP**
 - ✓ in/h の降雨強度で分割。
 - ✓ 航空機では1,2,3,5の4段階。
- 安全のため反射率は上限で評価。

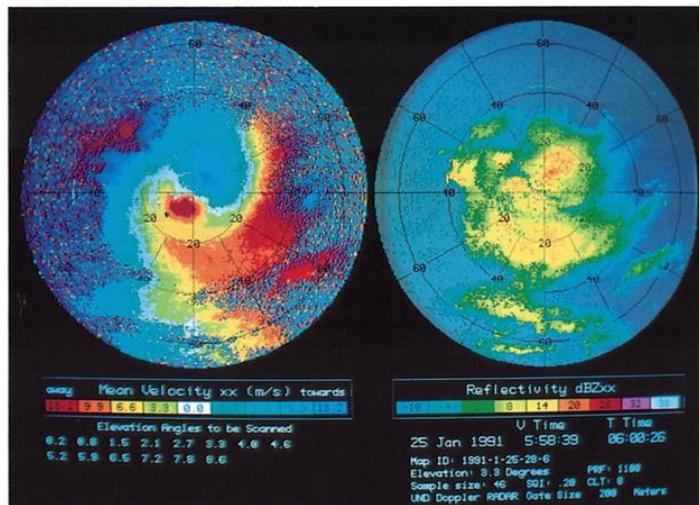
Table 8.1 DVIP intensity levels based on rainrates and the corresponding radar reflectivity factors. Reflectivities are based on $z = 200 R^{1.6}$.

	<u>DVIP level</u>	<u>Rainrate (in/h)</u>	<u>Reflectivity (dBZ)</u>
	1	0.1	29.5
	2	0.25	35.9
	3	0.5	40.7
	4	1.25	47.0
	5	2.5	51.9
	6	4.0	55.1

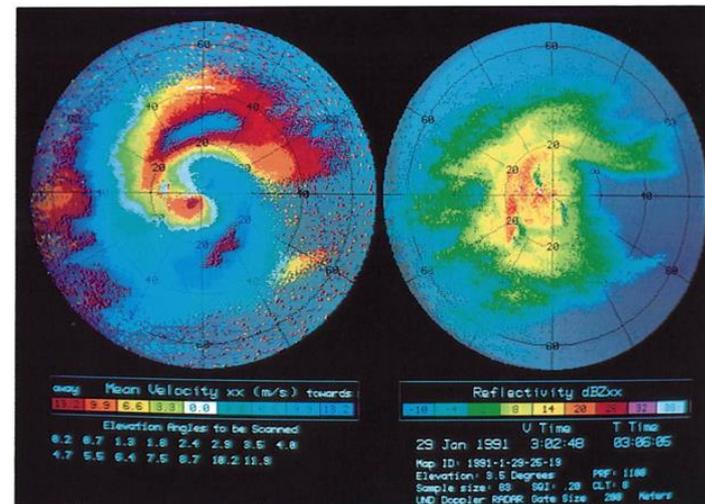
航空機用 →

4. 雪の観測 雪について

- レーダは雪を検出できる。
- 雪と雨の違い
 - 雪は雨より降水量（雪を水に換算したもの）がはるかに少ない
33～36°F（0.56～2.2°C）で最大
 - 雪の誘電率 $|K|^2$ は雨よりも小さい
水：0.93、氷：0.197 → 受信電力の差は約 7 dB
- コロラド州デンバー近郊の2つの雪の状況（カラー図13、14）



Color Figure 13



Color Figure 14

4. 雪の観測 雪の可観測性

- レーダ反射因子の式

$$Z = C_3 + P_r + 20 \log_{10}(r)$$

距離 r について、

$$r = 10^{(Z - P_r - C_3)/20}$$

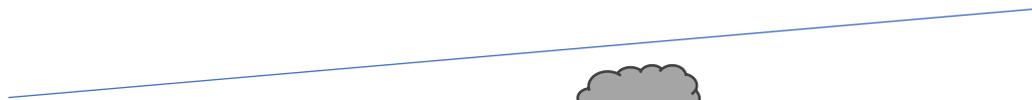
レーダ定数： $C_3 = 64.9$ dB

検出可能な最小信号電力： $P_r = -113$ dBm

雪の反射因子： $Z = 20$ dBZ

→ $r = 2541$ km

- 雪雲は雷雲と比べて高度が低いため、遠方では検出されにくい。



5. ブライトバンド

- 雪と雨のもう一つの違い
 - 雪の方が終端速度が遅い
滑らかなもの、密度の高いもの、低い大気密度で速く落下する。
- 雪が降り、溶けて雨になるとどうなるだろうか？
 - ① 融解レベルより上では、雪は比較的遅い終端速度で降る。
 - ② 溶けるレベルに達すると水でコーティングされてくる。→ **7 dB**増加
 - ③ 溶け続けると小さくなり、終端速度が増加する。→ 数密度が下がる

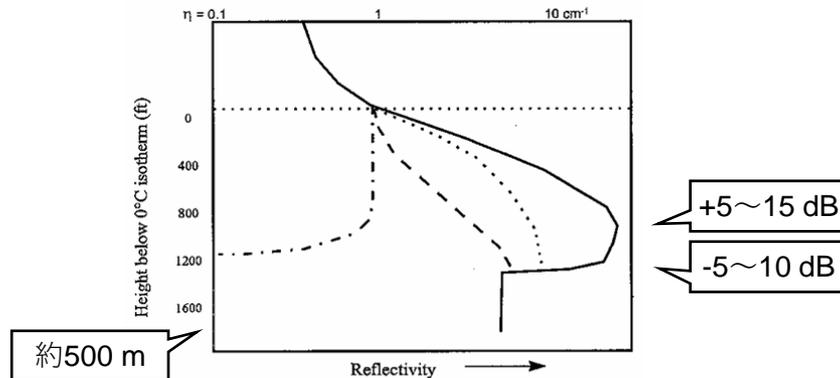


Figure 8.3 Schematic drawing showing the effects of particle coalescence (dotted), melting (dash), and changes in the terminal velocity (dot-dash-dot) on radar reflectivity through the bright band. From Austin and Bemis, 1950. Zero height is the freezing level. Radar reflectivity η is given along the top of the figure.

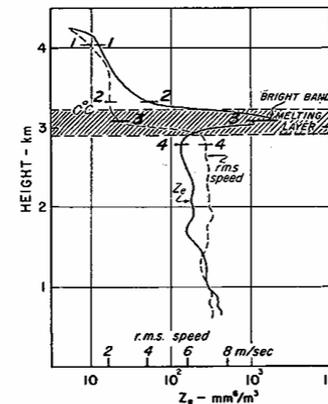


Figure 8.4 Simultaneous profiles of reflectivity factor Z and root-mean-square particle fall speeds in light (1 mm/h), steady precipitation with a bright band. Based on Lhermitte and Atlas, 1963.

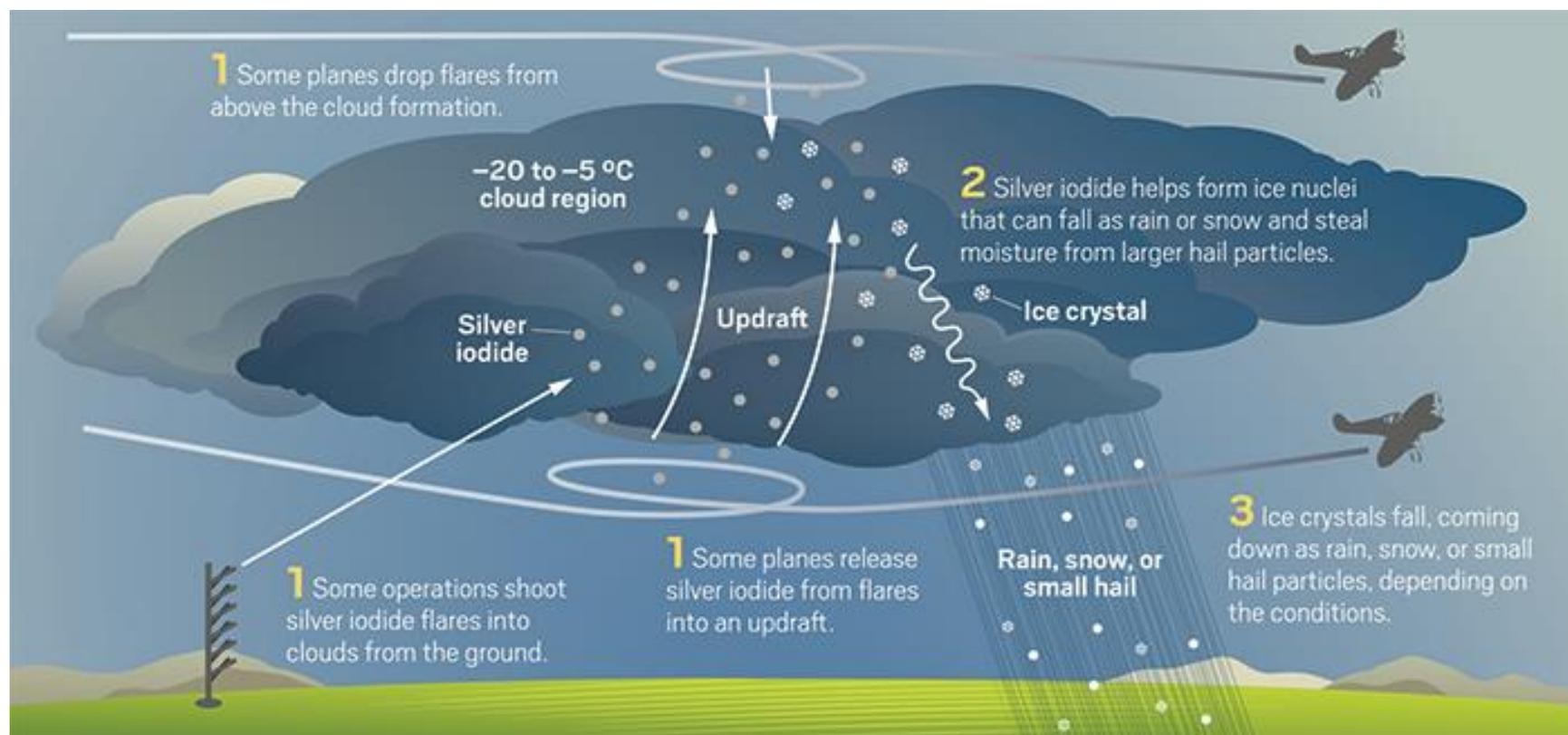
5. ブライトバンド 参考：PPIで見たブライトバンド



5. ブライトバンド

参考：cloud-seedingプロジェクト

- 雷雨の減衰部分では、ブライトバンドが検出されることがある
- 雹対策のcloud-seedingプロジェクト



6. 雹（ひょう）の観測

- 雹：直径5 mm以上の氷の粒が降ること
 - 反射因子は表面が濡れているか乾いているかによって異なる
 - 約**55 dBZ**を超える大きな値になることがある。
 - 雹の終端速度

$$V_t = A D^{0.5}$$

Dは雹の直径（通常はcm）

V_tは終端速度（m/s）

Aは経験定数（11.45（Matson and Huggins, 1979））

- レイリー散乱条件が適用されないほど大きい
 - 波長3 cmおよび5 cmのレーダでは、ほとんどの雹がミ一領域
 - 波長10cmのレーダでは、小さな雹まではレイリー領域
 - 2波長レーダを用いた雹の検出については第10章
 - 雹が溶けて小さくなるにつれて、雹の後方散乱断面積が増加する可能性がある（が、このような個々の粒子の効果はレーダでは検出できないかも）

6. 雹（ひょう）の観測 参考：巨大な雹

- 1972年9月14日にカンザス州コーヒービル近郊に降った世界記録の雹は、最長の寸法で14cm
- 2020年リビアで降った雹は最大20cm以上と言われている（写真）。



7. 減衰

大気による減衰

- レーダの波長（約10 GHz未満）ではそれほど問題にならない。無視することが多い。
- 水蒸気量が多いと減衰が大きくなる。
- 補正量は距離と仰角の関数として求められる。

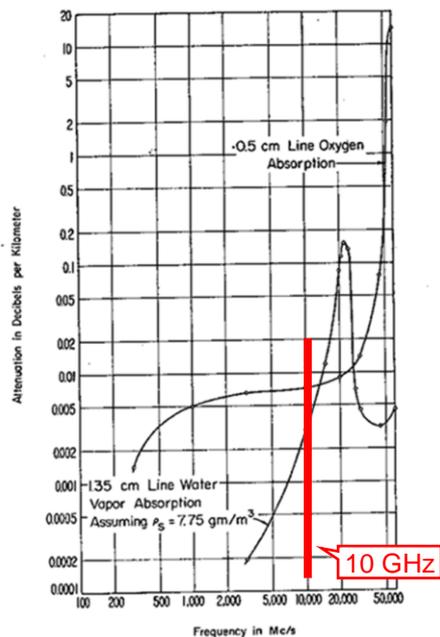


Figure 8.5 Atmospheric attenuation from water vapor (dashed curve) and oxygen (solid curve) at standard pressure (1013.25 mb) as a function of frequency. The water vapor curve assumes an absolute humidity of 7.5 g/m³. From Bean and Dutton (1968)

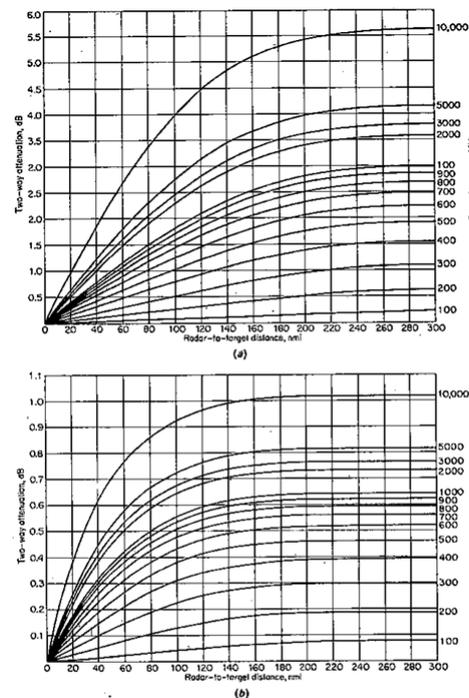


Figure 8.6 Attenuation for two-way radar propagation as a function of range and frequency for elevation angles of 0° (a) and 5° (b). From Skolnik, 1980, Introduction to Radar Systems, with permission of McGraw-Hill, Inc.

7. 減衰 雲による減衰

- 氷の粒でできている雲は減衰が小さい。

0.0006~0.009 (dB/km)/(g/m³)

- 水滴が含まれると減衰を無視できない。

波長3.2cmのレーダを使用

液体の含水量が4g/m³

温度が20°C

片道の経路長が25kmの雲の合計減衰

→ 0.0483 × 4 × 25 × 2 = 9.66 dB

Table 8.2. One-way attenuation coefficient K_1 in clouds in (dB/km)/(g/m³). From Gunn and East, 1954.

	Temp. (°C)	Wavelength (cm)			
		0.9	1.24	1.8	3.2
Water	20	0.647	0.311	0.128	0.0483
	10	0.681	0.406	0.179	0.0630
	0	0.99	0.532	0.267	0.0858
	-8	1.25	0.684	0.34*	0.122*
Ice	0	0.00874	0.00635	0.00436	0.00246
	-10	0.00291	0.00211	0.00146	0.00081
	-20	0.00200	0.00145	0.00100	0.00056

* extrapolated

7. 減衰 雨による減衰

- 雨による減衰は雲よりもずっと大きい。

例1) 3.21 cmの波長でのMuller-Jones関係で降水量が100 mm/hの雷雨を10 km通過する場合、

$$0.0058 \times 100 \times 10 \times 2 = 11.6$$

(dB/km)/(mm/h) mm/h km dB

Table 8.3 One-way rain attenuation K' in (dB/km)/(mm/h). From Wexler and Atlas, 1963.

λ (cm)	M-P (at 0°C)	Modified M-P (0°C)	Mueller- Jones (0°C)	Gunn and East (18°C)
0.62	0.50-0.37	0.52	0.66	
0.86	0.27	0.31	0.39	
1.24	0.117R ^{0.10}	0.31R ^{0.07}	0.18	0.12R ^{0.06}
1.8				0.045R ^{0.11}
1.87	0.0045R ^{0.10}	0.050R ^{0.10}	0.065	
3.21	0.005-0.007*	0.0053	0.0058	
4.67	0.011R ^{0.15}	0.013R ^{0.15}	0.018	0.0074R ^{0.31}
5.5	0.003-0.004*	0.0031	0.0033	
5.7				0.0022R ^{0.17}
10	0.0009- 0.0007*	0.00082	0.00092	0.0003

*First value applies at 2 mm/h, second at 50 mm/h, and there is a "smooth transition" between them.

例2) XバンドレーダがDVIPレベル6 (Z=55.1 dBZ) で雷雨を10 km通過する場合、

$$1.18 e^{-4} \times (10^{55.1/10})^{0.67} \times 10 \times 2 = 11.6$$

(dB/km) km dB

Table 8.4 Attenuation by rain expressed in terms of z (mm⁶/m³). Except for those from McCormick, the values are based on the modified MP data in Table 8.3 and a Z-R relationship of z = 300 R^{1.5}.

Frequency (GHz)	Wavelength (cm)	k _p (dB/km)
15.0	2.0	7.15·10 ⁻⁴ z ^{0.725*}
9.3	3.21	1.18·10 ⁻⁴ z ^{0.67}
8.0	3.75	1.16·10 ⁻⁴ z ^{0.806*}
5.5	5.5	6.9·10 ⁻⁵ z ^{0.67}
3.0	10.0	1.83·10 ⁻⁵ z ^{0.67}

* From McCormick, 1970

7. 減衰

雪による減衰、雹による減衰

• 雪による減衰

- 雪は雲よりも減衰が大きいが、その総量は通常無視できる。
- 誘電率が小さく、融解降水強度が小さく、雪雲が低高度にある

例) 10 mm/hの降水量で雪の中を往復50 km通過した場合、

$$\begin{array}{ccc} 0.040 & \times & 50 = 2 \\ \text{dB/km} & & \text{km} \quad \text{dB} \end{array}$$

Table B.5 One-way attenuation coefficients (dB/km) by low-density snow at 0°C calculated from: $k_s = 3.5 \cdot 10^{-2} R^2 / \lambda^4 + 2.2 \cdot 10^{-3} R / \lambda$ (Battan, 1973).

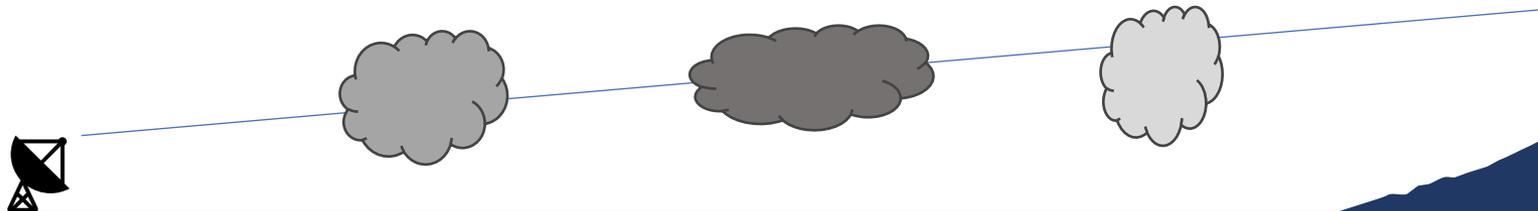
Wavelength (cm)	Precipitation rate R (mm/h)		
	1	10	100
1.8	0.0046	0.344	33.5
3.2	0.0010	0.040	3.41
5.4	0.00045	0.0082	0.45
10.0	0.00022	0.0026	0.057

• 雹による減衰

- 持続時間や範囲、強度が幅広いいため定量的な推定は困難
- 雹がない場合よりは大きい

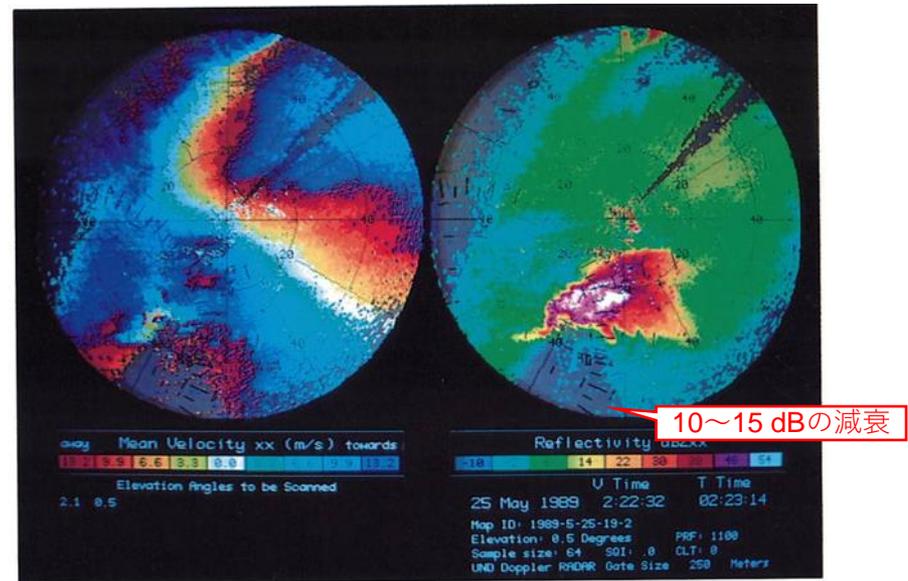
8. 減衰補正

- 大気（ガス）による減衰は容易に推定可能
- 雲や雨の減衰補正は難しい
 - 実際に雲を通過している区間を正確に把握することが難しい
- 減衰が大きいと電波が返ってこなくなる→復元不能
- 複数レーダによる観測が有効



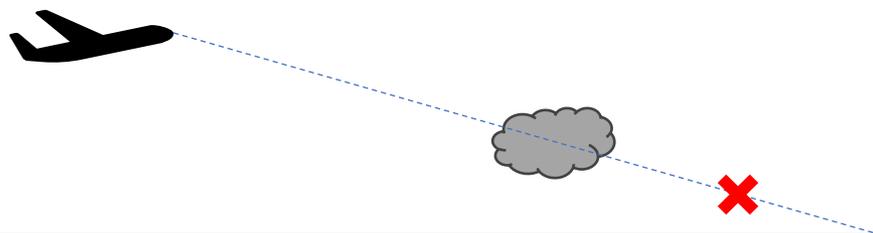
9. 減衰検知

- 受信電力は減衰したか？
 - 減衰なのか
 - 雷雲の形状なのか



Color Figure 11

- Archie Trammell(1989)が提案した方法
レーダの探知距離付近で地上を観測する。
地上エコーが見えなければ減衰が生じていると判断



10. その他 ハリケーン

• ハリケーン

- 陸地から数百～数千キロメートル離れた場所で発生
- 地上レーダの射程は約400km（近づかないと検知できない）
- 航空機搭載レーダを活用

