

II-3 レーダ定数の理論的考察

建設省土木研究所 正員 水野雅光  
 建設省土木研究所 正員 吉野文雄  
 建設省土木研究所 正員 兪 朝夫

1. はじめに レーダによる降雨量観測の観測精度は、降雨換算定数B、 $\beta$ 及び降雨減衰定数の係数k、 $\alpha$ の推定精度に非常に影響を受ける。そこで本研究は、降雨原因別に提案されている雨滴の粒径分布モデルを用い、温度による影響も考慮し、Cバンドレーダ(5.7cm波)のB、 $\beta$ 及びk、 $\alpha$ の厳密な理論値を求めた。

2. 後方散乱断面積と全吸収断面積 後方散乱断面積は、5.7cm波レーダの場合、粒径が波長に比べて十分に小さいとしてRayleigh近似を用いているが、図-1のように粒径が3mm以上になると厳密解であるMieの理論値との差が大きくなる。そこで、本研究では後方散乱断面積 $\sigma$ と全吸収断面積QtはMieの理論値である次式を用いた。

$$\sigma = \frac{\pi D^2}{4 \alpha^2} \left| \sum_{n=1}^{\infty} (-1)^n (2n+1) (a_n - b_n) \right|^2 \quad \text{----- ①}$$

$$Qt = \frac{-\lambda^2}{2\pi} \operatorname{Re} \sum_{n=1}^{\infty} (2n+1) (a_n + b_n) \quad \text{----- ②}$$

ここで、Dは粒径(cm)、 $\lambda$ は波長(cm)、 $\alpha = \pi D/2$ 、Reは実数部を表す。また、 $a_n, b_n$ は変数が $\alpha, m$ である球ベッセル関数である。mは複素屈折率で温度の関数であり、本研究では、降雨時を対象としているので0°C~30°Cで、 $\sigma$ 及びQtの計算を行った。複素屈折率の値を表-1に示す。

3. 雨滴の粒径分布モデルと落下速度式 気象レーダの場合、電波の散乱、吸収はビーム体積中の雨滴群によるものである。したがって、反射因子Z及び降雨減衰定数 $K_R$ を計算するには、雨滴の粒径分布N(D)に関する情報が必要である。雨滴の粒径分布は、一般に $N(D) = N_0 \cdot \exp(-\Lambda D)$ で表され、定数 $N_0, \Lambda$ は降雨状態によって異なる。ここで、Dは粒径(mm)である。本研究では、降雨原因別にB、 $\beta$ 及びk、 $\alpha$ を検討するため、表-2の4種類の分布形を用いた。

また、降雨強度Rは粒径分布と落下速度V(D)の積である。したがって、Z~R及び $K_R$ ~R関係を求めるには、雨滴の落下速度の情報が必要である。雨滴の落下速度はGunn-Kinzerの観測値が一般的に用いられている。本研究はGunn-Kinzerの観測値とよく一致するBestの式を用いた。

$$V(D) = 9.58 (1.0 - \exp\{- (D/1.77)^{1.147}\}) \quad \text{----- ③}$$

D: 粒径(mm)

4. 降雨換算定数B、 $\beta$  B、 $\beta$ は、レーダ反射因子Zを降雨強度Rに換算するときを求める定数で、ZとRの関係は $Z = B R^\beta$ と表される。レーダ反射因子Zと降雨強度Rは次式で定義される。

$$Z = 10^{-6} \frac{\lambda^4}{\pi^5} \left| \frac{m^2 + 2}{m^2 - 1} \right|^2 \int_0^{D_{MAX}} \sigma \cdot N(D) dD \quad \text{----- ④}$$

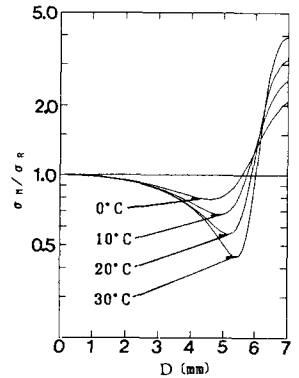


図-1  $\sigma_M / \sigma_R$ の値

表-1 複素屈折率

温度(°C)	複素屈折率
0	8.443-2.157i
10	8.637-1.651i
20	8.657-1.250i
30	8.580-0.951i

表-2 雨滴の粒径分布

提案者	降雨原因	$N_0$	$\Lambda$
Marshall-Palmer	地雨	8000	4.1R <sup>-0.21</sup>
Joss	霽雨	30000	5.7R <sup>-0.21</sup>
Joss	雷雨	1400	3.0R <sup>-0.21</sup>
Best	雷雨	160R <sup>0.324</sup> D <sup>-1.75</sup>	0.55R <sup>-0.52</sup> D <sup>1.25</sup>

R: 降水強度 [mm/h] D: 粒径 [mm]

表-3 降雨換算定数B、 $\beta$

分布形	温度(°C)	B	$\beta$
M-P	0	101	1.52
	10	97	1.52
	20	95	1.52
	30	93	1.52
Joss (霽雨)	0	62	1.47
	10	62	1.46
	20	62	1.45
	30	62	1.44
Joss (雷雨)	0	247	1.52
	10	230	1.54
	20	216	1.56
	30	206	1.57
Best	0	125	1.63
	10	115	1.64
	20	107	1.66
	30	102	1.67

$$R = 3.6 \times 10^{-3} \frac{4}{3} \pi \int_0^{D_{MAX}} \left(\frac{D}{2}\right)^3 \cdot N(D) \cdot V(D) dD \quad \text{----- ⑤}$$

前記2, 3の数値モデルを用いて上記2式からB, βを推定した。推定結果を表-3、図-2に示す。これから次のことが言える。

- ① B, βは、温度によってほとんど変わらない。
- ② βは降雨原因にかかわらず1.4~1.6になる。
- ③ Bは降雨原因によって大きく異なる。また、同じ降雨原因でも分布形によって大きく異なる。

以上のことより、地上観測値とレーダ観測値とを対比して降雨換算定数B, βを推定する場合は、βを1.4~1.6の間の値に固定し、Bのみを正確に推定すればよいと言える。

5. 降雨減衰定数の係数k, α 降雨減衰定数K<sub>R</sub>は次式で定義される。

$$K_R = 0.4343 \int_0^{D_{max}} N(D) \cdot Q_t dD \quad \text{----- ⑥}$$

K<sub>R</sub>と降水強度Rとの間には一般にK<sub>R</sub> = k R<sup>α</sup>関係がある。前記2, 3の数値モデルを用いて、K<sub>R</sub>とRの関係性を求めた。図-3, 4が、K<sub>R</sub>とRの関係である。また、表-4がk, αの値である。これから、次のことが言える。

- ① K<sub>R</sub>とRの関係は、10mm/h付近で変化する。
- ② 降雨減衰量は、温度が低い程大きくなる。これは、水の吸収係数である複素屈折率の虚数部の値が、温度が低くなるにつれて大きくなるためと考えられる。
- ③ 降雨強度が10mm/h以下だと、降雨減衰定数は20°Cで今井式に近い値になるが、降雨強度が30mm/hを超えると、雷雨のように粒径の大きな雨滴が多い場合は、Gunn-East式より降雨減衰定数は大きくなる。
- ④ 降雨減衰量は、粒径分布及び気温によって大きく異なるので降雨毎に適正な降雨減衰定数を設定する必要がある。

最後に、ミー散乱のプログラムを提供していただいた郵政省電波研究所小口和宏室長に感謝いたします。

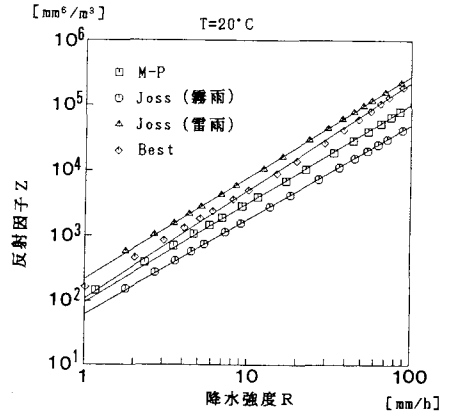


図-2 Z ~ R の関係

表-4 降雨減衰定数

分布形	温度(°C)	R ≤ 10mm/h		R ≥ 10mm/h	
		k	α	k	α
M-P	0	0.0025	1.008	0.0013	1.278
	10	0.0019	1.021	0.0008	1.347
	20	0.0015	1.026	0.0005	1.406
	30	0.0011	1.026	0.0004	1.445
Joss (霧雨)	0	0.0029	0.915	0.0018	1.118
	10	0.0022	0.921	0.0012	1.150
	20	0.0017	0.922	0.0009	1.170
	30	0.0014	0.920	0.0007	1.180
Joss (雷雨)	0	0.0024	1.188	0.0017	1.352
	10	0.0018	1.236	0.0013	1.424
	20	0.0014	1.272	0.0009	1.494
	30	0.0011	1.298	0.0007	1.559
Best	0	0.0023	1.092	0.0010	1.454
	10	0.0018	1.113	0.0006	1.562
	20	0.0014	1.119	0.0004	1.665
	30	0.0011	1.117	0.0002	1.760
小平の式		K <sub>R</sub> = 0.0013 R ~ 0.0015 R <sup>1.3</sup>			
今井の式		K <sub>R</sub> = 0.0013 R <sup>1.1</sup>			
Gunn-East		K <sub>R</sub> = 0.0022 R <sup>1.17</sup>			

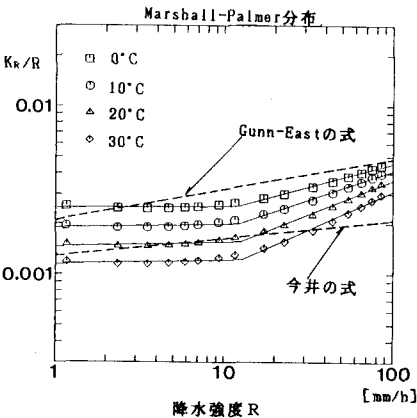


図-3 温度別雨量と減衰定数の関係

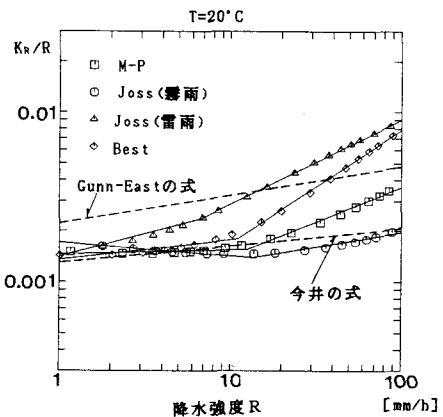


図-4 粒径分布別雨量と減衰定数の関係