

レーダによる降雪観測について

OBSERVATION OF SNOWFALL BY RADAR RAINGAUGE

佐々木 憲孝¹・長谷川 俊介²・笹本 誠³・平山 健一⁴・堺 茂樹⁵

Noritaka SASAKI, Shunsuke HASEGAWA, Makoto SASAMOTO, Kenichi HIRAYAMA and Shigeki SAKAI

¹学生員 修士(工学) 岩手大学大学院 工学研究科 生産開発工学専攻 (〒020-8551 岩手県盛岡市上田4-3-5)

²学生員 岩手大学 工学部 建設環境工学科 (同上)

³正会員 岩手大学技官 工学部 建設環境工学科 (同上)

⁴正会員 Ph.D. 岩手大学教授 工学部 建設環境工学科 (同上)

⁵正会員 工博 岩手大学助教授 工学部 建設環境工学科 (同上)

To utilize data of Radar rain gauge in prediction for snowfall distribution a model was proposed. In this model, a calculation of wind field on arbitrary terrain is included. The accuracy of the prediction model are examined by comparisons with field data of hourly measurements of snow fall at seven sites, maximum snow depth distribution in dam depth basin and dam inflow.

Key Words : snowfall, radar data, wind, field observation, potential flow

1. 研究目的

レーダ雨雪量計の設置により上空での降雨雪分布や雨雪域の移動の観測が可能となった。レーダによる定量的な観測には、レーダ定数を同定する必要があり、レーダ定数の同定はレーダ反射因子 Z と地上降水量 R_g との比較により行われる。降雨の場合、雨滴の落下速度は大きいので地上観測地点での値とその直上でのレーダ観測値を比較することが出来る。しかし、雪片は雨滴に比べ落下速度が小さいため、風による移流の影響を受け、地上で観測された量とその直上のレーダ観測値を比較することは必ずしも適当ではない。

そこで本研究では、風の場を三次元ポテンシャル流と仮定し、上空から地表付近までの風の場を計算し、地上に到達したレーダ反射因子 Z と地上観測による R_g とを比較し、降雪観測用のレーダ定数の同定を行った。また、レーダ観測による総降水量と最大積雪深の観測値やダム流入量と比較し、移流計算の有効性について検討した。

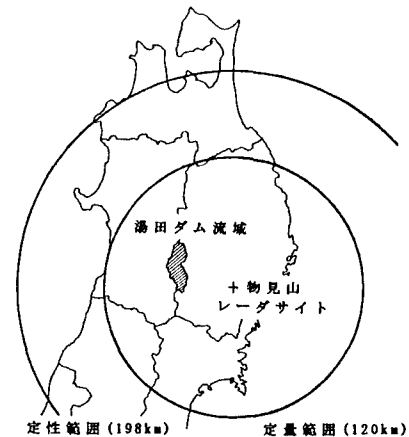


図-1 研究対象地域

2. 対象地域と現地観測

(1) 対象地域

研究対象地域として、岩手県北上川水系和賀川上流の湯田ダム流域を選定した(図-1)。この地域は毎年2m

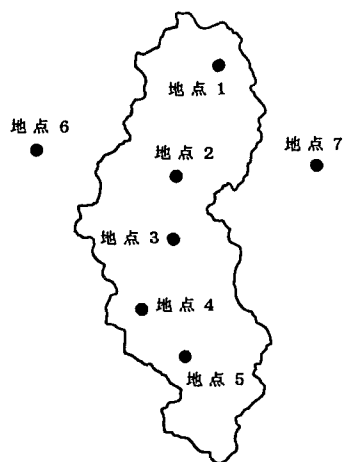


図-2 地上降水量観測点



図-3 最大積雪深計設置場所

を超える積雪があり、北東北有数の豪雪地帯である。湯田ダム流域は西側に南北に延びる奥羽山脈があり、東側中央部には標高945mの黒森山、南側に標高1548mの焼石岳があり、周囲を高い山で覆われた地域である。

(2)現地観測

地上降水量は湯田ダム流域に5地点、その東西に各1地点ずつの計7地点で観測を行った(図-2)。観測方法は溢水式雨雪量計を用い、観測された降水量は1時間毎にデータロガーに記録される。観測点では降水量の他、気温、地温、風向、風速、融雪量の観測も行っている。

また、最大積雪深計を用いて湯田ダム流域内の最大積雪深分布の観測を行った。最大積雪深計は、木製の支柱にアルミ棒を突き通し両側に10cmずつ張り出させたものである。アルミ棒は非常に曲がりやすいので、一度でも雪の下に没すると積雪の沈降力により変形する。そこで、変形したアルミ棒のうちの一番高い位置より、最大積雪深が推定できる。図-3は湯田ダム流域内の約100地点の最大積雪深観測地点を示している。

3. 研究方法

(1)移流モデルの概要

本研究の移流モデルでは、風の場合を三次元ポテンシャル流と仮定し、地形の影響を受けない高度(境界高度)の風向・風速及び対象地域の標高を境界条件として与えることにより、地形の影響を受けた風の場合を三次元的に計算できる。なお、境界高度の風向・風速は秋田気象台の高層気象データを使用し、対象地域の標高は国土数値情報の標高データを使用した。まず、対象地域の標高データを二次元フーリエ変換し、さらに境界高度における風向・風速から速度ポテンシャルのフーリエ係数を計算し、逆フーリエ変換により風速ベクトルを計算する。この風速分布と雪片の落下速度を用い、対象地域のレーダービーム中心高度1200mにある雪を地表付近まで追跡計算

する。

境界高度としては、風に対する地形の影響が無視できる高度であり、かつレーダービームの中心高度(本研究では1200m)以上であれば、どのような値を設定してもよい。しかし、3000m以上の上空では、しばしばジェット気流が存在し、境界高度を高く設定した場合には過大評価することがある。従って、ジェット気流の影響を除くためには、境界高度は低い方が望ましい。そこで、境界高度を順次低くし、風の場合に大きな違いが見られない範囲を検討した結果、2000m程度で十分であることが明らかとなった。そこで、本研究では境界高度を2000mとして、それより下方の風の場合を計算し、1200mに位置する雪片の軌跡を計算している。

図-4(a)及び(b)は、落下速度が降雪分布に及ぼす影響について示した図である。これらの図は上空に一樣に置いた仮想の雪域分布を落下速度のみ変化させ、他の条件は同一として移流計算を行った例である。これらの図から、落下速度が小さい場合雪片は風の影響を大きく受け、雪片の落下速度は移流計算結果に大きな影響を与えることがわかる。しかし、雪片の落下速度は、雪片の結晶形や大きさにより変わり、気象条件によっても左右されるため、その値を特定するのは難しい。また、結晶形や大きさに対応した落下速度を設定できるとしても、通常のレーダー観測では結晶形や大きさに関する情報は得られない。降雪の中にはいくつもの種類の結晶や大きさの異なるものが含まれると考えられるが、本研究では平均的な落下速度を設定することとする。孫野¹⁾によれば最大直径2mmの小雪片では約0.8~2.0m/s、最大直径が15mmのぬれ雪では1.5~2.5m/s程度である。本計算では気温が零度以上の時は平均的な値として2.0m/s、零度以下の時は1.0m/sとした。

また、ポテンシャル流では地表面付近の摩擦の影響や地表面の起伏によって発生する乱流渦などの現象は表現できない。そこで本研究では地表面より100m上空で計算を打ち切った。100m上空までとした理由は以下のとおりである。平均的な風速15m/s、落下速度1.0m/sの場合

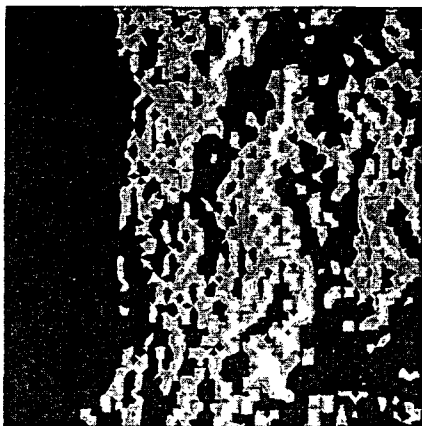


図-4(a) 落下速度(1m/s)と降雪分布

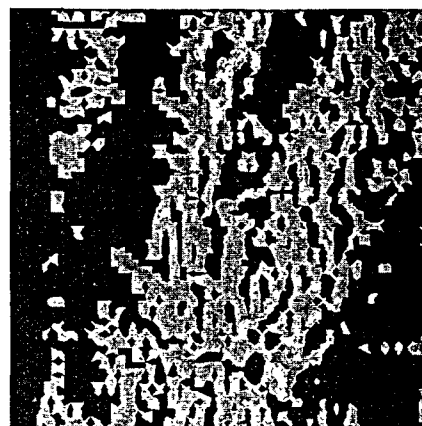


図-4(b) 落下速度(2.5m/s)と降雪分布

表-1 総降水量比(移流あり)

$\frac{B}{\beta}$	100	110	120	130	140	150	160	170	180	190	200
1.5	1.500	1.408	1.329	1.260	1.199	1.145	1.097	1.054	1.014	0.978	0.945
1.6	1.433	1.350	1.279	1.216	1.161	1.112	1.068	1.029	0.992	0.959	0.929
1.7	1.377	1.302	1.237	1.180	1.130	1.085	1.044	1.008	0.975	0.944	0.916
1.8	1.336	1.267	1.207	1.155	1.108	1.066	1.029	0.995	0.964	0.935	0.909
1.9	1.302	1.238	1.183	1.134	1.091	1.052	1.017	0.985	0.956	0.929	0.904
2.0	1.278	1.218	1.166	1.121	1.080	1.043	1.010	0.980	0.952	0.927	0.904
2.1	1.255	1.200	1.151	1.108	1.070	1.035	1.004	0.975	0.949	0.925	0.902
2.2	1.236	1.184	1.138	1.097	1.061	1.028	0.998	0.971	0.946	0.923	0.902
2.3	1.220	1.171	1.127	1.089	1.054	1.023	0.995	0.969	0.945	0.923	0.903
2.4	1.206	1.159	1.118	1.081	1.048	1.019	0.922	0.967	0.944	0.923	0.904
2.5	1.192	1.147	1.108	1.073	1.042	1.013	0.987	0.964	0.942	0.922	0.903

表-2 総降水量比(移流なし)

$\frac{B}{\beta}$	250	260	270	280	290	300	310	320	330	340	350
1.5	1.050	1.023	0.997	0.973	0.951	0.930	0.909	0.890	0.872	0.855	0.839
1.6	1.047	1.022	0.998	0.976	0.955	0.935	0.916	0.898	0.880	0.864	0.849
1.7	1.048	1.024	1.002	0.980	0.960	0.941	0.924	0.906	0.890	0.875	0.860
1.8	1.051	1.028	1.007	0.987	0.968	0.950	0.933	0.916	0.901	0.886	0.872
1.9	1.055	1.034	1.013	0.994	0.976	0.959	0.942	0.927	0.912	0.898	0.884
2.0	1.060	1.040	1.020	1.002	0.985	0.968	0.952	0.937	0.923	0.909	0.896
2.1	1.066	1.047	1.028	1.010	0.994	0.978	0.963	0.948	0.934	0.921	0.908
2.2	1.073	1.054	1.036	1.019	1.003	0.987	0.973	0.959	0.945	0.933	0.920
2.3	1.079	1.061	1.044	1.027	1.012	0.997	0.983	0.969	0.956	0.944	0.932
2.4	1.086	1.068	1.051	1.036	1.020	1.006	0.993	0.979	0.967	0.955	0.944
2.5	1.092	1.075	1.059	1.044	1.029	1.015	1.002	0.989	0.977	0.966	0.955

で100m上空から地表面に達する間の雪片の水平方向の移動距離は 1.5kmであり、レーダ雨雪量計の観測メッシュが約3km×3kmであることから、平均的な誤差はレーダメッシュ1つ以下である。

(2)解析方法

レーダデータは建設省物見山レーダ雨雪量計のデータを用い、1994年度～1996年度の3冬季間のものを使用した。レーダ観測による降水量の予測はレーダ反射因子Z

より、レーダ方程式 $Z = BR^\beta$ を用いて求めることが出来るが、そのためにはレーダ定数B、 β を同定する必要がある。そこで、B、 β を同定するためにBが100～400、 β が1.5～2.5の範囲で、刻み幅をBが10、 β が0.1として各組み合わせでのレーダ降水量 R_r を求め、これと地上降水量 R_g を比較し、3冬季間の総降水量の誤差が1%以内になるB、 β を求めた²⁾。また、このB、 β を用いて湯田ダム流域内の冬季間の総降水量を求め、最大積雪深の観測結果と比較検討した。

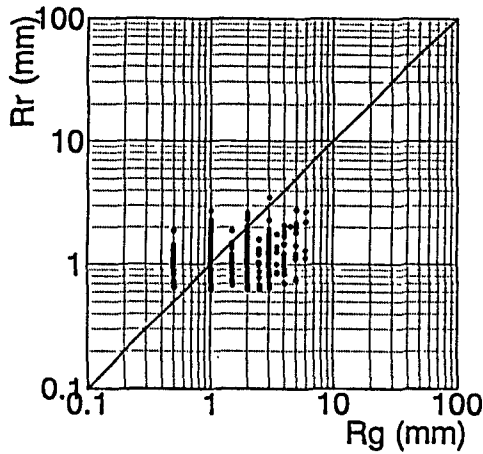


図-5(a) 移流を考慮した R_r-R_g 関係 (1時間)

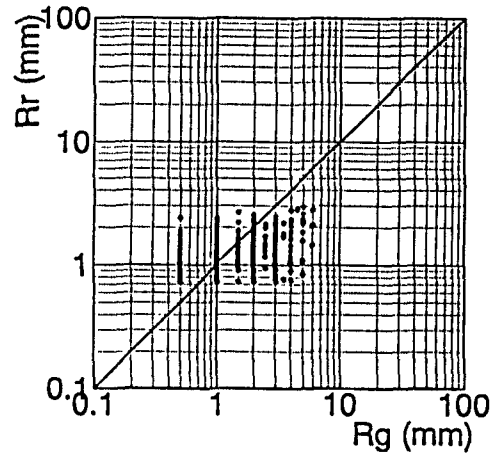


図-5(b) 移流を考慮しない R_r-R_g 関係 (1時間)

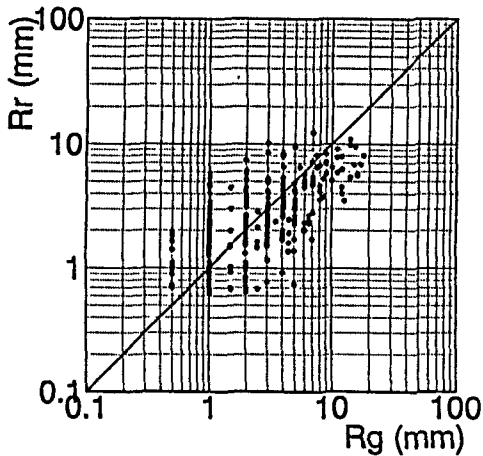


図-6(a) 移流を考慮した R_r-R_g 関係 (6時間積算)

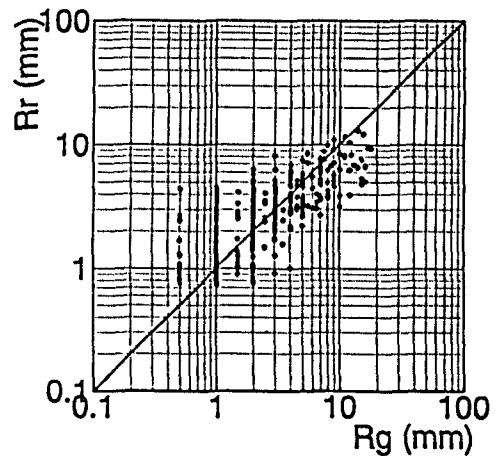


図-6(b) 移流を考慮しない R_r-R_g 関係 (6時間積算)

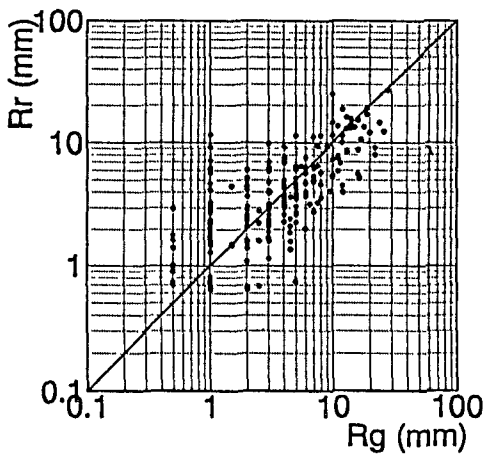


図-7(a) 移流を考慮した R_r-R_g 関係 (24時間積算)

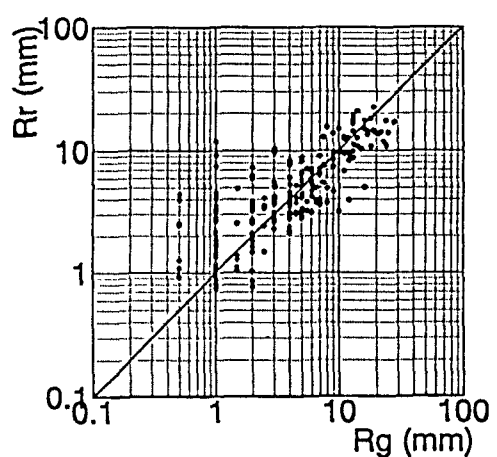


図-7(b) 移流を考慮しない R_r-R_g 関係 (24時間積算)

4. 研究結果と考察

(1) レーダ定数の同定

移流を考慮した場合のレーダ定数は、レーダ降水量

R_r と地上降水量 R_g の3冬季間における総降水量の誤差が1%以内となる B と β の組み合わせの中で、各年度毎の誤差が最小となる値を求めると、 $B=160$ 、 $\beta=2.0$ となった。なお、この組み合わせでの誤差は1994年度が10%、1995年度が3%、1996年度が5%となる。また同様に移

流を考慮しない場合のレーダ定数を同定した結果、 $B=280$ 、 $\beta=2.0$ となった。この場合の各年度毎における総降水量の誤差は1994年度が9%、1995年度が2%、1996年度が7%となる。なお、それぞれの総降水量の誤差（総降水量比 $\Sigma R_r / \Sigma R_g$ ）を表-1、表-2に示す。

(2)レーダ降水量と地上降水量の比較

同定したレーダ定数を用いて、レーダ方程式より求めたレーダ降水量 R_r と地上降水量 R_g とを比較する。図-5、図-6、図-7はそれぞれ1時間、6時間積算、24時間積算の $R_r - R_g$ の関係であり、(a)が移流を考慮した場合、(b)が移流を考慮しない場合である。これらの図から、1時間のような短い時間では誤差が大きい、積算時間が長くなるに伴い R_r は R_g に近い値となり、積算時間が長いほど観測精度が良くなっている。移流を考慮した場合としない場合の $R_r - R_g$ の関係には大きな差が見られないため、移流の効果がないように見える。しかし、各々の場合で誤差が最小となるようなレーダ定数を求め、この値を同定に用いたデータに適用して R_r と R_g の比較を行っているために、2つの場合で精度が同程度になっているもので、移流の効果がないことを意味するものではない。

(3)レーダ降水量と最大積雪深の比較

移流の効果を明らかにするためには、同定に用いたデータとは異なるデータを用いる必要がある。しかし、本研究で対象としている流域では、著者らが実施している観測の結果以外にはない。そこで地上での降水量の代わりに最大積雪深との比較を行った。図-8は最大積雪深と標高の関係を示しており、最大積雪深が標高に依存しているのがわかる。本来、積雪は圧縮、融雪、蒸発散の影響を受けるため、総降雪量と最大積雪深は同じものではないが、降雪量が多い場合、最大積雪深も深くなると考えられるため、両者を比較した。また、図中の R_o 、 D_o は、それぞれ標高300~400mにおけるレーダ降水量と最大積雪深の平均値である。

図-9は、移流計算を行わずにレーダで観測された上空の雪域分布をそのまま地上降雪分布とした場合の冬季間の総降水量と標高の関係であるが、回帰直線の傾きは負となり、最大積雪深観測の結果と異なる。一方、移流計算を行って求めた冬季間のレーダ降水量と標高との関係を示したのが、図-10である。最大積雪深の結果と同様、標高に依存しているのがわかる。移流を考慮しない場合におけるレーダ降水量の回帰直線の傾きが負であるのに対し、移流を考慮したレーダ降水量は最大積雪深の観測結果を良く再現している。

次に、移流を考慮したレーダ降水量が地形特性による降雪分布の違いを再現しているかを検討する。湯田ダム流域を東側と西側に分けたのが、図-11(a)及び図-11(b)である。図-11(a)は最大積雪深と標高の関

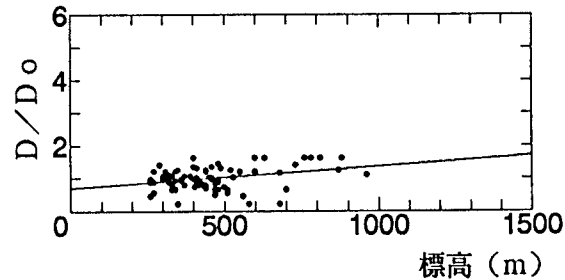


図-8 最大積雪深と標高の関係

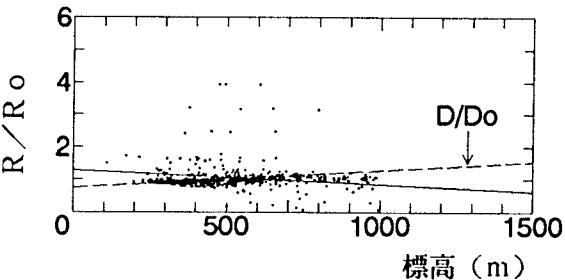


図-9 移流を考慮しないレーダ降水量と標高の関係

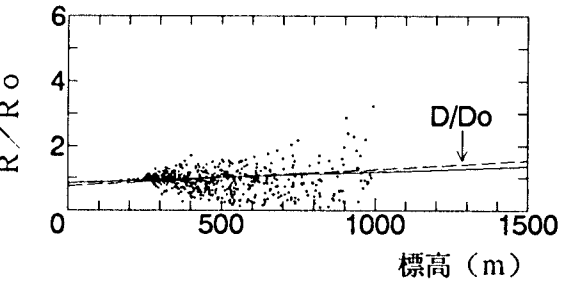


図-10 移流を考慮したレーダ降水量と標高の関係

係であるが、西側の方が東側よりわずかではあるが回帰直線の傾きが大きい。図-11(b)は移流を考慮したレーダ降水量と標高の関係であるが、最大積雪深の結果と同様に西側の方が東側よりわずかではあるが回帰直線の傾きが大きい。

さらに細かく地形特性による違いを検討するため谷と尾根に分類したのが、図-12(a)及び図-12(b)である。図-12(a)は最大積雪深と標高の関係であり、尾根よりも谷の降雪量が多い。図-12(b)は移流を考慮したレーダ降水量と標高の関係であるが、尾根よりも谷の降雪量が多く、最大積雪深の結果と定性的に一致している。なお、湯田ダム流域は標高が1500mに達するが、最大積雪深計の設置場所が1000m以下であるため、レーダ降水量と標高の関係に示した回帰直線は全て標高1000m以下のものを使用した。

(4)レーダ降水量とダム流入量の比較

次に、湯田ダム流域内のレーダ降水量と湯田ダム流入量を比較する。降雪が始まる12月初めから融雪が終了する5月末までのダム流入量と移流を考慮した場合としな

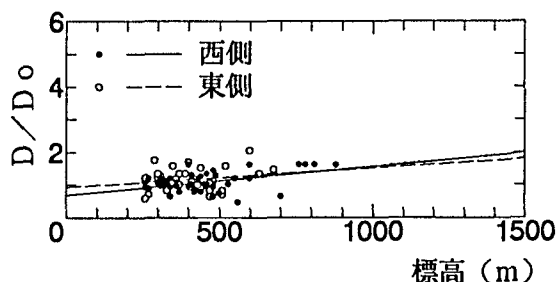


図-11(a) 西側と東側に分けた最大積雪深と標高の関係

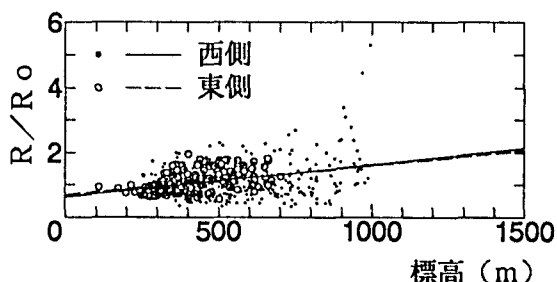


図-11(b) 西側と東側に分けたレーダ降水量と標高の関係

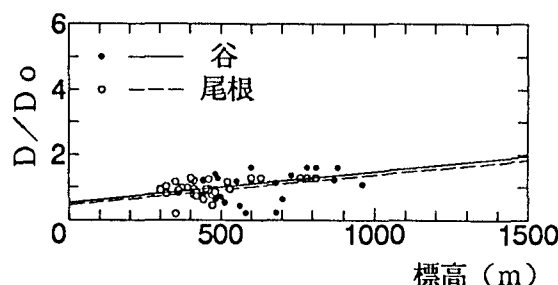


図-12(a) 谷と尾根に分けた最大積雪深と標高の関係

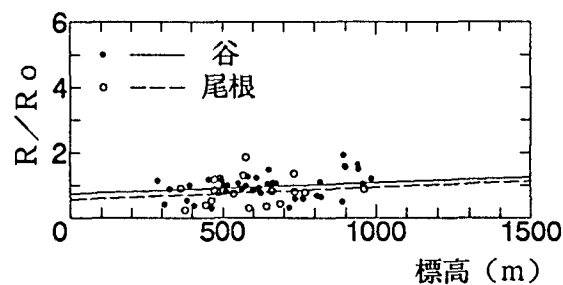


図-12(b) 谷と尾根に分けたレーダ降水量と標高の関係

表-3 ダム流入量とレーダ降水量の比較

	ダム流入量 (m^3)	レーダ降水量(m^3)	
		移流あり	移流なし
'95~'96	885254400	886770867	660191297
'96~'97	735588864	631313461	504381733

表-4 ダム流入量とレーダ降水量の比較

(年度毎にレーダ定数を同定した場合)

	ダム流入量 (m^3)	レーダ降水量(m^3)	
		移流あり	移流なし
'95~'96	885254400	933794448	657601202
'96~'97	735588864	681959077	385628064

い場合のダム流域内におけるレーダ降水量の合計を比較したのが表-3である。移流を考慮した場合のレーダ降水量は、1995年～1996年においてほぼダム流入量に等しく、1996年～1997年において約15%の誤差である。1996年～1997年のレーダ降水量とダム流入量との誤差が1995年～1996年の結果と比べて大きいのは、同定したレーダ定数による年度毎の誤差が1996年度の方が大きいためである。そこで、年度毎にレーダ定数を同定し計算したレーダ降水量とダム流入量とを比較したのが表-4である。誤差は約5～7%となった。一方、移流を考慮しない場合のレーダ降水量はダム流入量と約25～48%であり、移流を考慮した場合と比べて精度が極めて低く、このことから移流計算の必要性が明らかである。雪片の落下速度に対する結晶形や大きさの影響を考慮せず、気温で決定したにもかかわらず、移流を考慮したレーダ降水量がダム流入量とほぼ一致したのは、平均的な落下速度を用いることにより誤差が相殺されたためであると考えられる。

また、降雪量と流出量の比較に際しては、蒸発散量を考慮する必要がある。しかし、冬季間の蒸発散量は夏季に比べると非常に小さく、多田ら³⁾がThornthwaite法により求められた滝ダム流域における蒸発散量は積雪期においてほとんどないことから、表-3、表-4に示すよう

な結果が見られたといえる。

5. まとめ

本研究での成果を取りまとめると、以下のようになる。

1. レーダによる降雪観測用のレーダ定数を同定した
2. レーダ降水量は積算時間が長くなるほど地上観測値に近づく
3. レーダ降水量及び最大積雪深と標高の関係から、移流を考慮したレーダ降水量は降雪分布に対する地形形状の影響を再現している。また、レーダによるダム流域内の全降雪量はダム流入量とほぼ一致している

参考文献

- 1) 孫野長治：「雪片の落下速度」雪氷の研究-I, 1943
- 2) 佐々木憲孝：移流を考慮したレーダ雨雪量計による降雪分布予測に関する研究, 岩手大学大学院修士論文, 1998
- 3) 多田毅, 風間聡, 沢本正樹：NDVIを用いた蒸発散分布推定, 水工学論文集第38巻, p155～160, 1994

(1998. 9. 30受付)