

積雪・融雪を伴う長期降雨流出のシステム解析法

System Analysis of Runoff due to Melting of Snow

農林水産省農業土木試験場

白石英彦

正員 大西亮一

正員 〇田中康一

1. 序 論

近年、水資源の合理的な利用計画の必要性がさげばれ、農業水利計画においても広域利水計画および、効率的な水系管理手法の開発が性急な課題となり、筆者らも、長期降雨流出の検討と広域水収支の検討、とくに、農業用水の還元水量（反復利用水量）の把握を統計的流出予測法の重回帰モデルで行ってきた。しかしながら、これまで積雪・融雪を伴う降雨流出の解析方法が含まれていないので、冬期から春にかけての流出予測に問題が残されていた。そこで、本論文では、重回帰モデルによる降雨流出の解析方法の延長として積雪・融雪を伴う降雨流出の解析方法を検討してきたので報告する。

積雪・融雪を伴う降雨流出の解析方法として、菅原がタンクモデルを用いた解析方法を提案して、多くの人々に利用されている。

一方、小島、小林、藤野らは融雪現象を熱収支の問題として、詳細な調査と風洞実験によって検討した。これらの研究によって、融雪現象を理解することができたが、広域水収支の解析に用いるのには調査する項目が多いので、資料収集が困難という問題がある。

これに対して、一般には日平均気温を用いた気温日数法が多く用いられている。

筆者らは、菅原と同じように、日平均気温を用いて融雪量を算定し、降雨流出モデルで流出量を推定する方法を用いた。解析方法は、まず日平均気温と降水量および積雪量のデータを用いて、積雪・融雪の解析を行ない、融雪を降雨と同じように降雨流出の解析に用いる方法で積雪・融雪を伴う降雨流出の解析を行った。

本報告は岩木川水系早瀬野地点のデータを用いて解析した結果を中心にまとめ、考察には北上川水系等での解析結果も用いた。

2. 解析地区の概要

積雪・融雪を伴う降雨流出の解析は、Fig.1に示すように、青森県下・岩木川水系平川の支流・早瀬野川の観測データを用いる。観測は、河川流量、降水量と気温および積雪深がほぼ同じ場所で行なわれており、観測場所の標高は約130mである。流域面積は約31km²で最高標高は約570mとなっている。このため融雪に最も関係が深いと考えられる気温は、観測地点と最高標高の差は約440mとなる。

3. 降雨流出の解析方法

重回帰モデルを用いた降雨流出の解析方法は、これまで報告しているので、ここでは基礎式のみを示す。

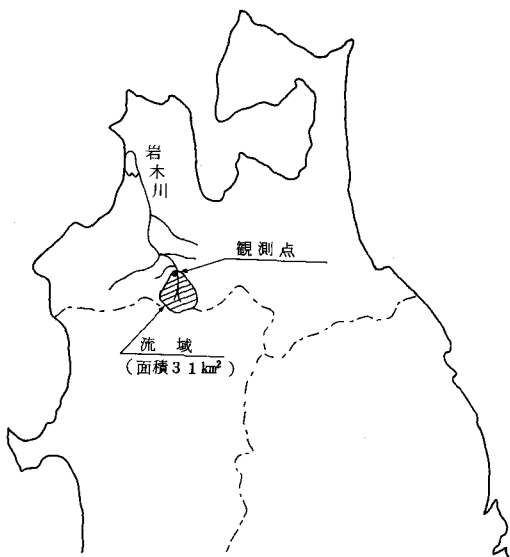


Fig.1 解析地区の位置図

$$Y(t) = a_0 + \sum_{i=1}^{P_1} a_i \cdot x_i + \sum_{i=1}^{P_2} \sum_{j=1}^{P_2} b_{ij} \cdot x_i \cdot x_j \quad \dots\dots\dots (1)$$

ここに、 $Y(t)$ ：推定流量、 a_0 ：定数（基底流量を表わす）、 a_i ：線形偏回帰係数（線形単位図を表わす）、 b_{ij} ：2次の偏回帰係数（2次の流出核を表わす）、 x_i ：降雨と融雪量の和〔 $= \{ R_r(t - (i-1) \cdot \Delta t) + S(t - (i-1) \cdot \Delta t) \} \cdot A$ 〕、 $R_r(t)$ ：降雨量、 $S(t)$ ：融雪量、 A ：流域面積である。

流出率 w は次のようになる。

$$w = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{\int_0^T Y(t) \cdot dt}{\int_0^T A \cdot R(t) \cdot dt} \quad \dots\dots\dots (2)$$

ここで、線形流出率 w_1 は次のようになる。

$$w_1 = \sum_{i=1}^{P_1} a_i \quad \dots\dots\dots (3)$$

4. 積雪・融雪の解析方法

積雪と融雪は気温 0°C を境にして決まるといわれている。そこで、積雪深 H_s は次のようになる。

$$H_s(t) = \sum_{t=1}^n \frac{1}{r_s} R(t) \Big|_{\theta < 0} - \sum_{t=1}^n \frac{1}{r_s} S(t) \Big|_{\theta \geq 0}$$

ここに、 θ ：気温、 $R(t)$ ：降水量、 r_s ：雪の比重（ $= \frac{1}{N}$ ）、 N ：積雪換算係数である。降水量 $R(t)$ は $\theta \geq 0$ で降雨量 $R_r(t)$ となる。融雪量 $S(t)$ は積雪がある場合に、気温、風速、日射量、地熱、降雨量などに関係すると考えられているので、次のようになる。

$$S(t) = f(H_s, \theta, R_r, W, Q_s, \dots\dots) \quad \dots\dots (5)$$

ここでは、気温のみを考えた場合 $S_1(t)$ と、気温と積雪深を考えた場合 $S_2(t)$ について検討するので次のようになる。

$$S_1(t) = \frac{M_1}{N} \cdot \theta(t) \quad \dots\dots\dots (6)$$

$$S_2(t) = \frac{M_2}{N} \cdot \theta(t) \cdot H_s(t) \quad \dots\dots\dots (7)$$

ここに、 M_1, M_2 ：係数である。

ここで、気温 $\theta(t)$ は標高の関数となり、次のようにかける。

$$\theta(t) = \theta_0(t) + \Gamma \cdot h + \delta(\theta)$$

ここに、 Γ ：大気の乾燥断熱減率（ $= -0.01^\circ\text{C}/m$ ）、 $\delta(\theta)$ ：水蒸気の凝結による補正量である。

一般に、 $\Gamma \cdot h + \delta(\theta)$ で 100 m 当り 0.6°C の変化となるといわれているので、一般に(8)式は次のようにかける。

$$\theta(t) = \theta_0(t) + \Gamma' \cdot h \quad \dots\dots\dots (9)$$

ここに、 $-0.005^\circ\text{C}/m \leq \Gamma' \leq -0.01^\circ\text{C}/m$ （ $\neq -0.006^\circ\text{C}/m$ ）である。

このように、標高ごとに気温が変化するので気温変化を標高で補正すると(4)式は次のようにかける。

$$\begin{aligned} \overline{H_s(t)} = & \frac{1}{A} \sum_{j=1}^m A_j \cdot \left\{ \sum_{t=1}^n N \cdot R(t) \right\} \Big|_{\theta < 0} \\ & - \sum_{t=1}^n N \cdot S(t) \Big|_{\theta \geq 0} \Big\} = \frac{1}{A} \sum_{j=1}^m \left\{ \sum_{t=1}^n N \cdot A_j \cdot \right. \\ & \left. R(t) \right\} \Big|_{\theta_0 + \Gamma' \cdot h < 0} - \sum_{t=1}^n N \cdot A_j \cdot S(t) \Big|_{\theta_0 + \Gamma' \cdot h \geq 0} \Big\} \quad \dots\dots\dots (10) \end{aligned}$$

ここに、 θ_0 ：気温観測点の気温、 h ：気温観測点と積雪のある標高までの標高差、 A_j ： h における流域面積である。

(10)式に、(6)、(7)式を代入して積雪深と融雪量を計算する。

5. 積雪換算係数

積雪換算係数は積雪深と降水量の関係を考える上で重要となる。そこで気温が 0°C 未満の場合のみについて降水量と積雪深の変化を日ごとに整理すると Fig.2 となる。この結果はほとんど相関が見られないので、(4)式を用いて計算した積雪深で表示すると Fig.3 となる。この結果から $N = 1.3$ が積雪深の増加量を説明していることがわかる。この値は新雪の比重 $r_s \approx 0.1$ 程度といわれるのにほぼ一致することがわかる。また他の地区では、 $5 \sim 10$ 程度となっているので、この地区は少し大きいといえる。

6. 積雪深の時間変化

積雪深の時間変化を考える場合に融雪量の推定が必要である。そこで(6)、(7)式で推定する。まず、(6)式を用いて気温との関係をみるために、融雪期のデータを用いて積雪深の変化量と気温の関係を Fig.4 に示す。この結果から、少し相関が見られるがあまり良い相関とはいえない。そこで、(6)式を(4)式に代入して積雪深の時間変化で見ると Fig.5 となる。この結果から融雪が始まる。2月中旬付近では少し問

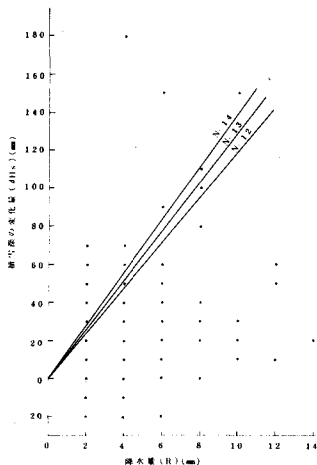


Fig.2 降水量と積雪深の変化量の関係

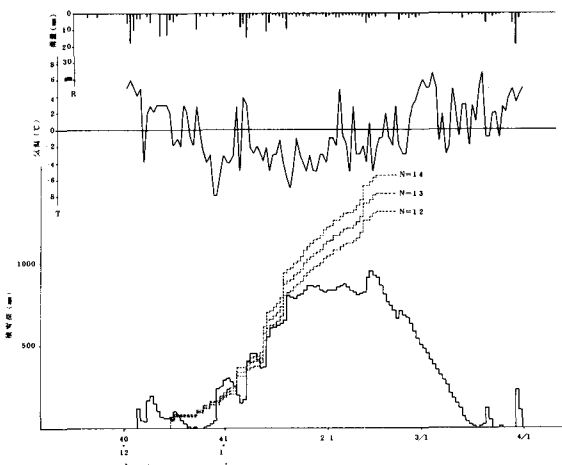


Fig.3 降水量と積雪深の時間変化

題があるが、 $M_1 = 1.8$ とすると融雪を良く説明することがわかる。しかし、Fig.4 のデータから求めた $M_1 = 1.2$ では問題があるといわなければならない。

つぎに、2月中旬付近の改良を考えて(7)式で考えると積雪深の変化量はFig.6に示すようにかなりのバラツキとなる。しかし、積雪深の時間変化でみるとFig.7に示すように良くなってくる。とくに、 $M_2 = 0.04$ の場合に、2月中旬の積雪深を良く説明する。しかし、3月1日以降については3月1日付近の変化量が大きいので、いまだし問題があるといわなければならない。

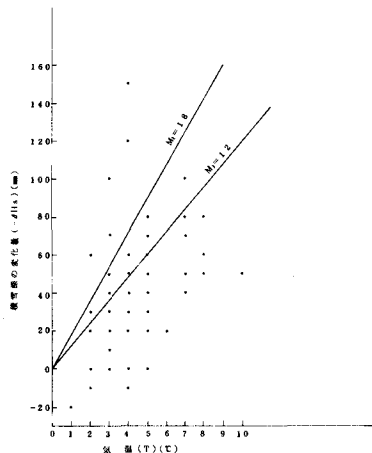


Fig.4 気温と積雪の変化量の関係

7. 降水量の補正

冬期に降水量は山地に多く、平地に少いといわれている。そこで、降水量と河川流量の累計の比をFig.8に示す。この結果から1月～2月は降水量に比べて河川流量が少くなっているが、5月には、1.6倍になっていることがわかる。また、昭和41年と42年の差がほとんどみられないから、ここでは、降水量の観測地点よりも山地に降水量が大きいといえる。

つぎに、降水量の補正量は流出率を約50%と考えて、冬期間は3倍として、計算を試みた。

8. 降雨流出特性

この地区の降雨流出特性を求めるために積雪・融雪の影響がない9月～11月の降雨と河川流量を用

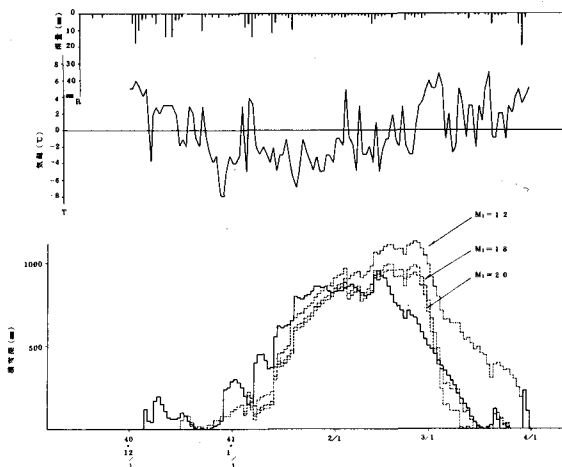


Fig.5 積雪深の時間変化

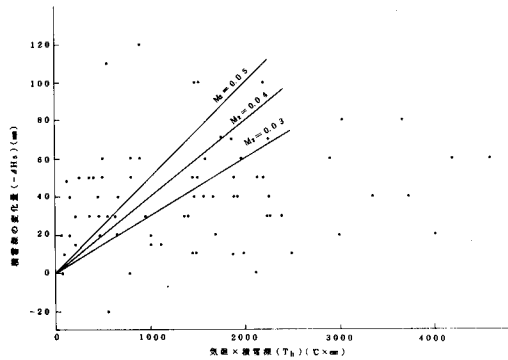


Fig.6 (気温×積雪深)と積雪深の変化量の関係

いて流出特性を求めると Table.1 となる。この結果、F.M.D が $3.7 \text{ m}^3/\text{sec}$ 場合が基底流量 $a_0 = 0.306 \text{ m}^3/\text{sec}$ ，線形流出率 53.0% となり，重相関係数 R1 とデータの対数をとった重相関係数 R2 が最も大きくなるのがわかる。このため線形単位図は F.M.D = $3.7 \text{ m}^3/\text{sec}$ に対する値を用いる。この単位図は Fig.9 となる。

つぎに，降雨の多い時期の流出を良く推定するために非線形の流出特性を 7 月～11 月のデータを用いて求めると Fig.10 に示す 2 次の流出核が求まる。これらを用いて河川流量を推定すると Fig.11, Fig.12 に示すように積雪・融雪の影響がある 1 月～5 月の河川流量の推定には問題があるが，他の時期の河川流量をよく説明することがわかる。

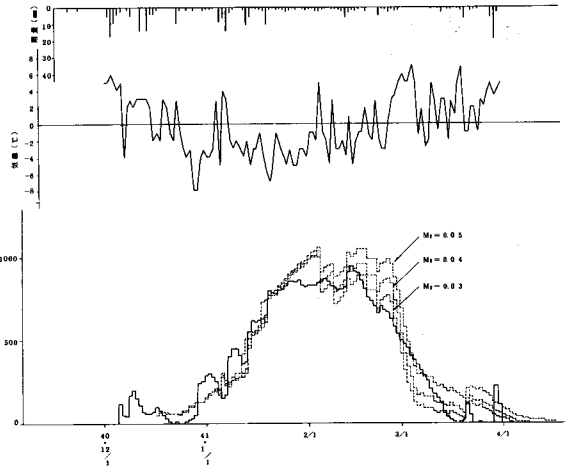


Fig.7 積雪深の時間変化

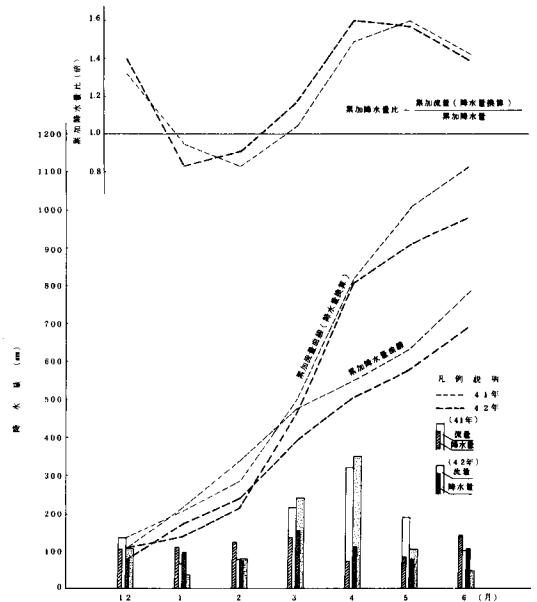


Fig.8 降水量と河川流量の関係

Table.1 F.M.Dによる諸特性

F.M.D	データ数	遅れ日数	重相関係数		分散比	流出率	基底流量
			R1	R2			
m^3/s							
2.0	275	23	0.496	0.451	11.79	0.394	0.318
2.5	302	22	0.519	0.464	14.74	0.457	0.295
3.0	318	20	0.532	0.466	15.64	0.496	0.290
3.5	336	14	0.561	0.488	30.42	0.525	0.311
3.7	337	14	0.562	0.488	30.09	0.530	0.306
4.0	342	23	0.557	0.470	17.98	0.575	0.247
4.5	344	23	0.557	0.469	19.55	0.582	0.239
5.0	348	20	0.564	0.464	24.38	0.613	0.206

9. 積雪・融雪期の河川流量の推定

積雪・融雪の影響がある1月～5月の河川流量の推定を良くするために、(10)式を用いて積雪深と(6)，(7)式を用いて融雪量を計算する。この場合に標高により気温が変化するので，ここでは，流域内の標高差440 mを考慮して100 m当り0.6℃の値を用いて，3℃の補正を行ない全流域で一様と考えた解析を行った。このようにして積雪と融雪を計算し，融雪量に降雨量を加えた値を用いて(1)式で河川流量を推定するとFig.11，Fig.12となる。この結果から積雪・融雪を考えない場合よりも河川流量を良く説明することがわかる。また，(6)式で求めた融雪量では4月～5月の河川流量を良く説明するが，3月始めは，(7)式が良く説明することがわかる。(7)式では河川への流出が(6)式にくらべて早くなることがわかる。

10. 考 察

a. 積雪深の時間変化の推定について，
積雪深の時間変化を見ると，積雪・融雪の現象をよく説明することがわかる。そこでFig.5とFig.7の積雪・融雪深の時間変化を見ると，(6)式の気温のみで融雪量を推定すると2月中旬から3月にかけて問題である。これに対して(7)式では2月～3月はよいが，3月1日附近は急激に融雪が起ることが問題と考えられる。また実測値を見ると，融雪期はほぼ毎日一定量の積雪変化があり，その量は40 mm/day程度になっている。これを水深にすると $40/13 = 3.08 \text{ mm/day}$ となる。そこで，これらの値に対して熱収支から考察を加える。小島によると，融雪は積雪の表面と下面から起り，下面は地温の影響で融雪し，表面は太陽放射と気温の影響と考えられている。これらの関係を次式に示す。

$$Q_R - 4R + Q_A + Q_E + Q_C + Q_T = Q_M \quad \cdots (11)$$

ここに， $Q_R - 4R$ ：放射収支量， Q_A ：大気と雪面の温度差に基づく顕熱交換量， Q_E ：雪の蒸発または大気中の水蒸気の雪面への凝結による潜熱交換量， Q_C ：雪の中の熱流量， Q_T ：雨が雪に与える熱量， Q_M ：融雪熱量である。

これらの項に，これまで求められた係数を用いて，風速，3.0 m/sec，気温5℃とすれば， $Q_M \div 1.4 \times 10^2 \text{ cal} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{day}^{-1}$ となり，1日に1 cm²当り1.8 g/dayの雪が融けることになる。また，実測の

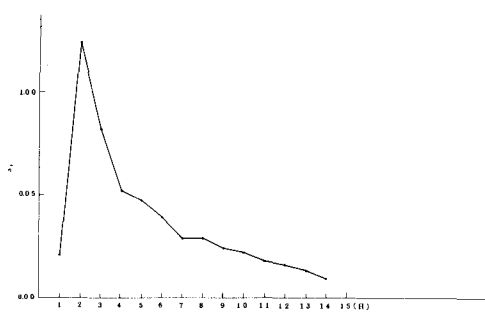


Fig.9 線形偏回帰係数（統計的単位図）

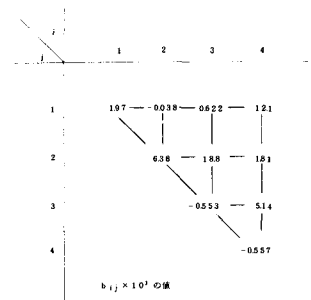


Fig.10 2次の流出特性（2次の流出核）

0.308 g/dayの融雪量では2.5℃の気温と3.0 m/secの風速となる。

b. 河川流量について
積雪・融雪を含む解析によって，これまでの流出予測を改善することができたと考えられる。このため，これからは，流出解析と河川流量の比較によって，解析精度を上げることができると考える。

11. 結 論

これまでのシステム解析に積雪・融雪の解析を組込むことによって，流出予測の精度を上げることができた。また，融雪の推定には気温の関数と考える場合と，気温と積雪深の積の関数と考える場合について検討し，融雪初期は積の形が良く，融雪後期では気温のみを考えた方がよいと考えられる。しかし，実測の積雪量の変化量はほぼ一定であるので，この関係について，今後検討する必要がある。

参 考 文 献

1) 白石・大西・伊藤(1977)：重回帰モデルによる非線形降雨流出の解析，水理講演会論文集，第

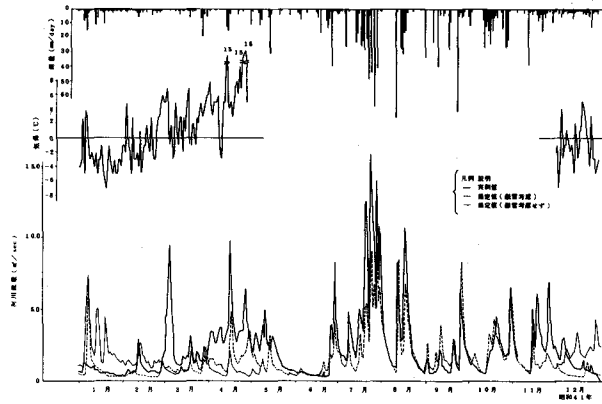


Fig.11 降雨流出の推定値と河川流量の比較

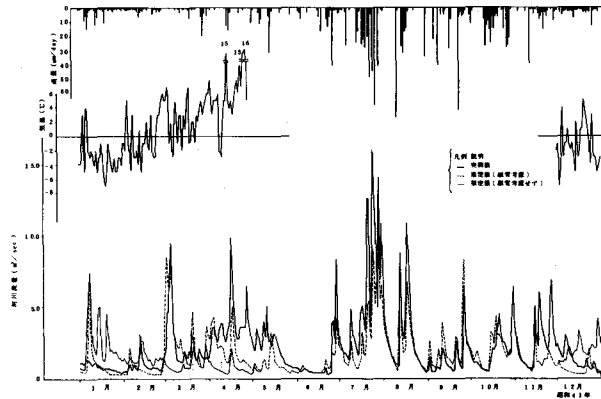


Fig.12 降雨流出の推定値と河川流量の比較

21号.

2) Ito, Y・Shiraishi, H・Oonishi, R(1980)
: A statistical approach to rainfall runoff
process by multiple regression analysis,
The third International Symposium on Sto-
chastic Hydraulics.

3) 農業土木学会編(1969): 農業土木ハンドブ
ック(改訂三版).

4) 土木学会編(1971): 水理公式集(昭和46
年改訂版).

5) 菅原(1973): 流出解析法, 共立出版.

6) 小島(1979): 融雪機構と熱収支, 気象研究
ノート, 第136号.

7) 小林(1979): 融雪水の流出, 気象研究ノ
ート, 第136号.

8) 藤野(1979): 融雪水の積雪内部への浸透,
気象研究ノート, 第136号.