

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 正 員 〇 田 中 康 一
正 員 大 西 亮 一

1. 序 論

近年、合理的な計画に基づく水資源の有効利用の必要性が叫ばれているなかで、農業水利計画においても効率的な水系管理手法の開発が急がれている。

筆者らは、長期降雨流出の検討と広域水収支の検討、特に、農業用水の還元水量（回復利用水量）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かったため、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、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の検討を行った。

積雪・融雪を伴う降雨流出の解析方法には、菅原がタンクモデルを用いた方法を提案している。また、小島、小林、藤野らは融雪現象を熱収支の問題として、詳細な調査を行い検討しているが、広域水収支の解析に用いるには調査項目が多いので、資料収集が困難である。

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、降水量及び積雪量のデータを用いて、積雪・融雪の解析を行い、融雪を降雨と同じように扱い降雨流出の解析を行い報告してきた。

本論文では、これまでの報告結果をもとに、更に標高による気温変化と降雨の融雪への影響を検討した。解析には、岩木川水系早瀬野地点及び北上川水系湯田ダム地点でのデータを用いた。データの収集に当たっては、東北農政局平川農業水利事業所及び北上地域総合開発調査事務所の協力を得た。ここに、感謝の意を表します。

2. 解析地区の概要

解析地区はFig.1に示すように、青森県下・岩木川水系平川の支流・早瀬野川流域と岩手県下・北上川水系和賀川流域である。早瀬野川流域は面積31 km²、観測地点標高は約130 m、流域内最高標高は約750 mであり、一方和賀川流域は面積583 km²、観測地点標高は約250 m、流域内最高標高は約1400 mとなっている。

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、これまでに報告しているので、ここでは基礎式のみを示す。

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

ここに、Y(t)：推定流量、a₀：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

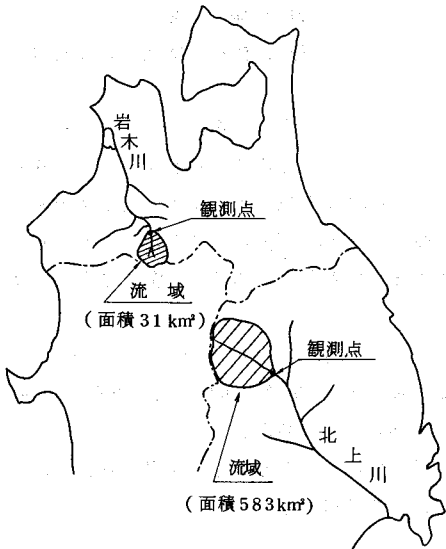


Fig.1 解析地区の位置図

わす), X_i : 降雨と融雪量の和 $[=\{R(t-(i-1) \cdot \Delta t) + S(t-(i-1) \cdot \Delta t)\} \cdot A]$, $R(t)$: 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。

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

ここに, 線形流出率は W_i は次のようになる。

$$W_i = \sum_{i=1}^P a_i \quad \dots\dots\dots (3)$$

4. 積雪・融雪の解析方法

降水は気温が 0°C 未満の場合には雪となり, 0°C 以上の場合には雨となるといわれているので, 積雪・融雪期間の積雪深 H_s は次式で表わされる。

$$H_s(t) = \sum_{i=1}^n \frac{1}{r_s} R(t) \left| \theta < 0 - \sum_{i=1}^n \frac{1}{r_s} S(t) \right| \theta \geq 0 \quad \dots\dots\dots (4)$$

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, $S(t)$: 融雪量である。融雪量 $S(t)$ は気温, 風速, 日射量, 積雪量, 地熱, 降雨量など数多くの要因が影響するといわれているが, ここでは, 気温, 積雪深及び降雨量を取り上げ, 融雪量算定を(5), (6)式を用いて検討する。

$$S_1(t) = \frac{\theta(t)}{2N} \{ M_1 + M_2 \cdot H_s(t) \} \quad \dots\dots\dots (5)$$

$$S_2(t) = \frac{\theta(t)}{2N} \{ M_1 + M_2 \cdot H_s(t) \} + \frac{1}{80} \theta(t) \cdot R(t) \quad \dots\dots\dots (6)$$

ここに, M_1 , M_2 は係数である。

ここで, 気温 $\theta(t)$ は標高の関数となり次のように書ける。

$$\theta(t) = \theta_0(t) + \Gamma \cdot h + \delta_{(\theta)} \quad \dots\dots\dots (7)$$

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

一般に, $\Gamma \cdot h + \delta_{(\theta)}$ は 100 m 当たり 0.6°C の変化となるといわれているので, (7)式は次のように書ける。

$$\theta(t) = \theta_0(t) + \Gamma' \cdot h \quad \dots\dots\dots (8)$$

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

流域を標高により分割し, 気温を補正すると(4)式は次のように書ける。

$$H_s(t) = \frac{1}{A} \sum_{j=1}^m A_j \cdot \left(\sum_{i=1}^n N \cdot R(t) \right) \left| \theta < 0 - \sum_{i=1}^n N \cdot S(t) \right| \theta \geq 0 \quad \dots\dots\dots$$

$$= \frac{1}{A} \sum_{j=1}^m \left(\sum_{i=1}^n N \cdot A_j \cdot R(t) \right) \left| \theta_0 + \Gamma' \cdot h < 0 - \sum_{i=1}^n N \cdot A_j \cdot S(t) \right| \theta_0 + \Gamma' \cdot h \geq 0 \quad \dots\dots\dots (9)$$

ここに, θ : 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。

(9)式に, (5), (6)式を代入して積雪量と融雪量を計算する。

5. 積雪換算係数

積雪換算係数は, 気温が 0°C 未満の場合について, 降水量 1 mm 当たりの積雪深 (cm) を表わし, 係数算出は比較的気温が 0°C 未満の日が続く期間を選定し(10)式にて求める。

$$N = \frac{H_s(n) - H_s(i)}{\sum_{i=1}^n R(t)} \quad \dots\dots\dots (10)$$

(10)式にて求めた結果, 岩木川水系では, $N = 1.3$, 北上川水系では $N = 0.5$ が得られる。

雪の比重は一般に新雪で $0.1\text{ g}/\text{cm}^3$, よく締った雪で $0.3\text{ g}/\text{cm}^3$, さらめ雪で $0.3 \sim 0.5\text{ g}/\text{cm}^3$ といわれているので, 岩木川水系では新雪に近い値を示し, 北上川水系ではやや締った雪の値を示していることになる。

6. 積雪深の時間変化

Fig. 2, 3に(5)式の第1項及び第2項をそれぞれ単独に用いて融雪量を算出し, 積雪深の変化を推定したものを示す。これより, 融雪初期における融雪量を第1項のみを用いて推定を行った場合には, 過少に推定し, 第2項のみを用いた場合には, 過大に推定している。また, 第2項のみを用いた場合には, 積雪の消える時期が実測値の場合より遅れるとともに, 岩木川水系については12月末に, 北上川水系については11月末に一時積雪が消えるのを説明できない。しかし, 第1項及び第2項を加えた(5)式を用いた場合には, これらが改良されることがわかる。

ところで(5)式の係数 M_1 及び M_2 は, 第1項及び第2項を用いて, それぞれ単独に決定する。岩木川水系については, $M_1 = 1.8$, $M_2 = 0.04$ となり, 北上川水系については, $M_1 = 2.0$, $M_2 = 0.02$ となる。

Fig.4,5は(5)式に降雨による融雪量を考慮した(6)式を用いて融雪量を算出したものであるが、Fig.2, 3と比較すると融雪に対する降雨の影響はほとんど見られないことがわかる。

7. 降水量の補正

冬期に降水量は山地に多く、平地に少ないといわれている。そこで、降水量と河川流量の累計の比を2地区についてFig.6,7に示す。これらより両地区とも1～2月は降水量に比べて河川流量が少なくなっているが、5月時点では、岩木川水系は1.5倍となっており、一方、北上川水系は1.4倍となっている。また、2か年の差がほとんど見られないことより、これら2地区では、降雨量が観測地点より大きいことがわかる。

つきに、降水量の補正值は、岩木川水系については3.0、北上川水系については1.4を用いる。

8. 降雨流出特性

岩木川水系及び北上川水系について降雨流出特性を求めるために積雪・融雪の影響のない期間の降雨と河川流量のデータを用いて流出特性を求めるとTable.1となる。各F.M.Dによる線形偏回帰係数の変化をFig.8,9に示す。

次に、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求めるとFig.10, 11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.12, 13に示すように積雪・融雪の影響がある1月～5月を除いた他の時期は河川流量を良く説明していることがわかる。

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、(9)式を用いて積雪深と(5)式を用いて融雪量を計算し河川流量の推定を行ったのがFig.12, 13である。

観測点と流域の標高差による気温補正は標高差100mにつき0.6℃の値を用いる。

流域を分割せず、気温補正值を全流域一様に考え、岩木川水系では-1.8℃、北上川水系では-3.5℃として河川流量の推定を行った場合には、岩木川水

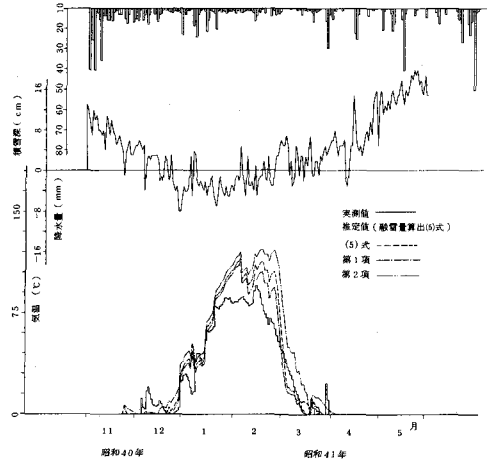


Fig.2 積雪深の時間変化(岩木川水系)

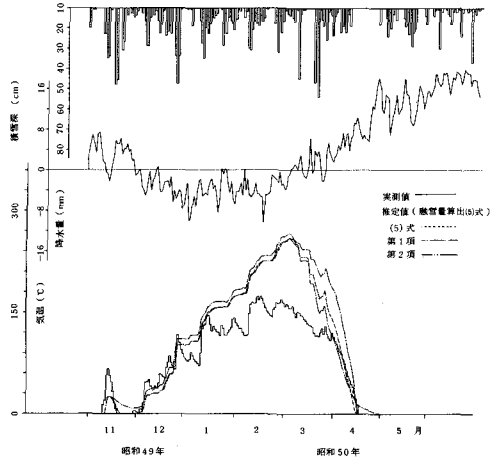


Fig.3 積雪深の時間変化(北上川水系)

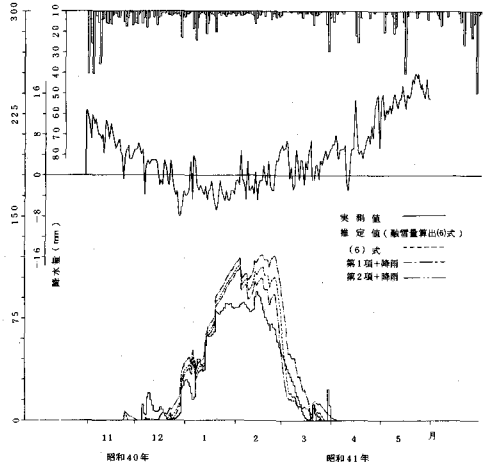


Fig.4 積雪深の時間変化(岩木川水系)

系については、4月末から5月にかけての融雪による河川流量の増加をあまり良く説明しておらず、北上川水系については、3月中旬から4月上旬にかけての融雪水量を説明していないとともに、融雪による河川流量の最大値が実測値をかなり上回った結果となっている。

次に、流域を標高により2分割し、気温補正値を岩木川水系については-0.6℃、-2.4℃、北上川水系については-0.9℃、-2.7℃とした場合には流域を分割しなかった場合に生じた上記の現象を改善しているといえる。

更に流域を標高により5分割し、気温補正値を岩木川水系については-0.0℃、-1.5℃、-3.7℃、-4.9℃、-6.7℃とし北上川水系については-1.3℃、-1.9℃、-2.5℃、-3.1℃、-4.1℃として河川流量の推定を行った場合には、積雪・融雪による流出遅れの現象及び流出量をよく推定していることがわかる。

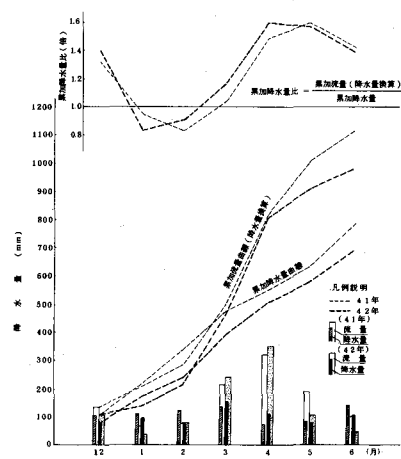


Fig.6 降水量と河川流量の関係(岩木川水系)

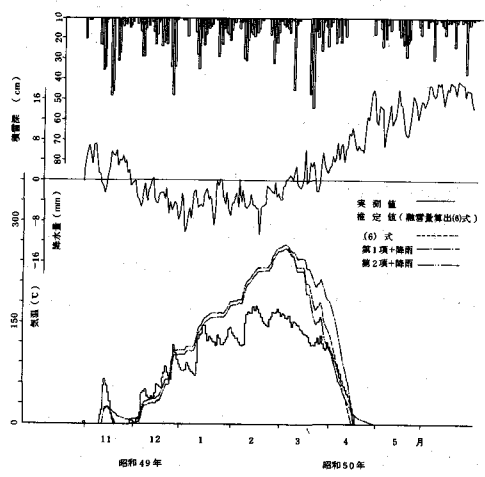


Fig.5 積雪深の時間変化(北上川水系)

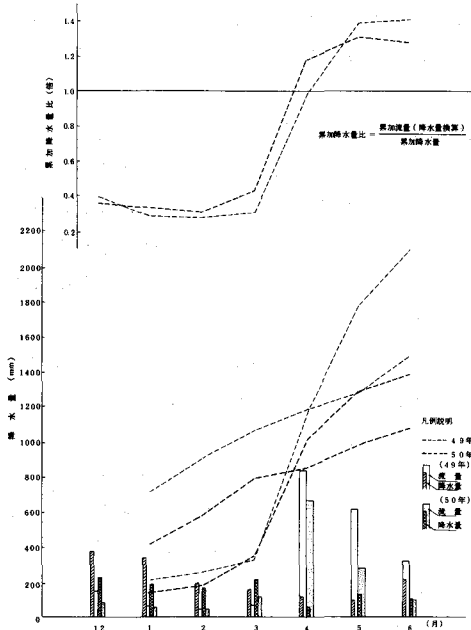


Fig.7 降水量と河川流量の関係(北上川水系)

Table.1 諸流出特性値

地区	岩木川水系	北上川水系
流出特性値	早瀬野流域	和賀川流域
解析期間	9月～11月	6月～10月
F・M・D	3.3 m ³ /sec	40.5 m ³ /sec
遅れ日数	25 日	38 日
流出率	52.1 %	44.1 %
基底流量	0.307 m ³ /sec	5.552 m ³ /sec

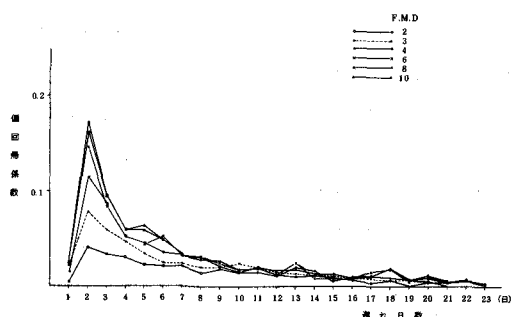


Fig.8 線形偏回帰係数 (岩木川水系)

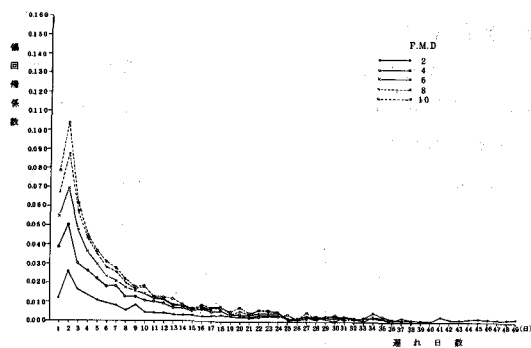


Fig.9 線形偏回帰係数 (北上川水系)

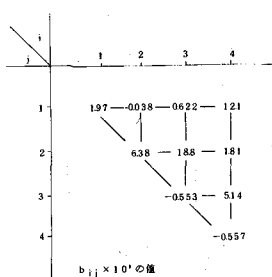


Fig.10 2次の流出特性 (岩木川水系)

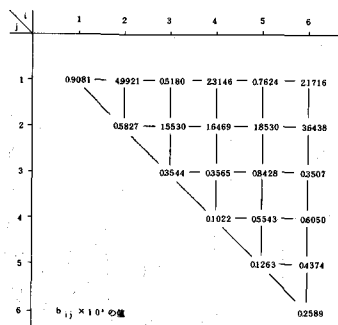


Fig.11 2次の流出特性 (北上川水系)

10. 考察

a. 積雪深の時間変化の推定について

前回は(5)式の第1項及び第2項を単独に用いた場合について融雪量の検討を行った。

今回、気温のみにより融雪量を推定する場合の補正項として気温と積雪深をかけたものを考えることにより、融雪状況をより良く推定することができた。しかし、融雪初期の積雪深を過大に推定するという問題がある。

また、(5)式に雨による融雪の項を加えた(6)式を用いた場合の積雪深の推定値にはほとんど違いが見られない。このため、菅原も述べているように降雨は融雪にあまり影響を与えないと考えられる。

b. 河川流量の推定について

流域を標高により分割すると良い推定結果が得られることがわかり、流域分割による気温補正が融雪による流出現象に大きく影響を与えることがわかる。

このことは、冬に入ると雪は山の頂上から積もり始め、春になると雪は麓から融け始めるという我々が一般によく経験している現象をモデルに組み入れたことになる。

また、流域分割数は菅原が提案しているように4

分割から5分割まで行えばよいことがわかる。

降水量の補正値は岩木川水系ではFig.6の値の約2倍とした場合が融雪期の河川流量をよく説明し、北上川水系ではFig.7の値を用いた場合がよく説明することより、地域的にかなりの違いが見られる。

11. 結論

これまでの降雨流出モデルに積雪・融雪現象を組み込むことにより、積雪・融雪期の流出予測の精度を向上させることができた。

しかし、積雪深の推定においては、積雪ピーク時の推定に問題が残されており、今後検討する必要がある。

今回、融雪量の算定式に気温のみの項に気温と積雪深をかけた項を補正項として加えることにより、積雪深の時間変化の推定を改善することができた。また、積雪・融雪期の河川流量の推定には標高による流域分割が有効であることがわかり、分割数は菅原が述べているように4～5分割でよいことがわかった。また、降雨は融雪にほとんど影響しないことがわかった。

参考文献

- 1) 白石・大西・田中(1982): 積雪・融雪を伴う長期降雨流出のシステム解析法, 第26回水理講演会論文集
- 2) 農業土木学会編(1969): 農業土木ハン

ドブック(改訂三版)

- 3) 日野・長谷川(1989): 融雪時期の流出解析, 第26回水理講演会論文集
- 4) 菅原(1973): 流出解析法, 共立出版

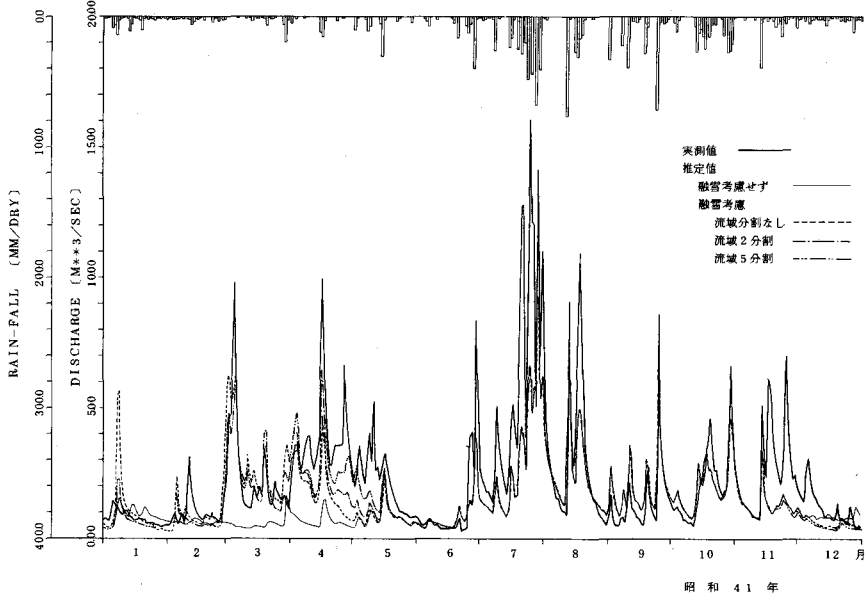


Fig.1 2 降雨流出の推定値と河川流量の比較(岩木川水系)

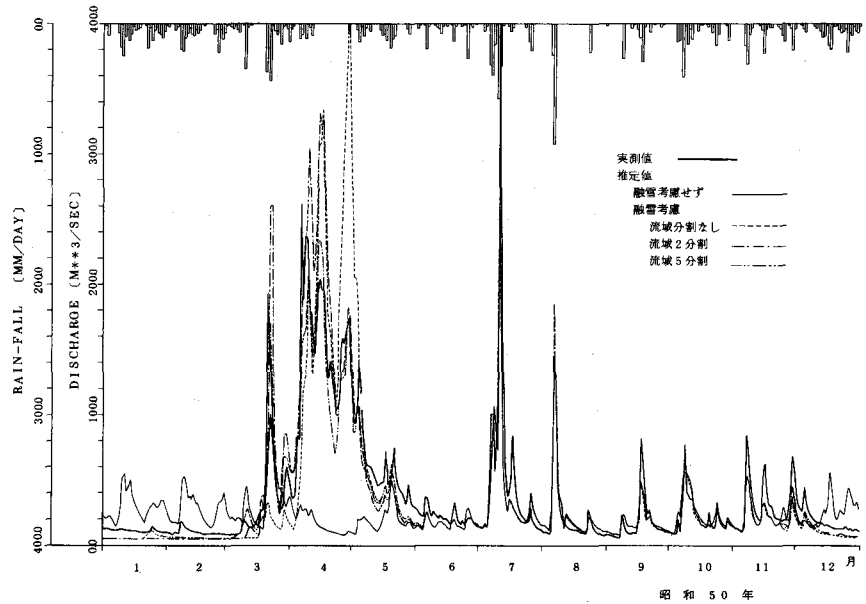


Fig.1 3 降雨流出の推定値と河川流量の比較(北上川水系)