

博士課程 安形康

電力を水力発電に依存してきた我が国においては、山地における河川の流出についての研究が工学系研究者の手により古くから行われている。たとえば、土木学会誌第1巻において、すでに流域水収支についての詳細な解説が発表されている(金森, 1915)。

金森(1915)には、流域降水量の求め方・河川流量測定法・水年と暦年・流域水収支の基本的考え方・流域損失量および流出係数(流出率)の算定とその季節変化・年流出量と年降水量の関係が、一部を除きほぼ現在の水文学の教科書と同じレベルで記述されている。現在までの水文学は、金森(1915)に比べてどのような新たな知見を加えてきたと言えるのだろうか。この点を以下に概観し、さらに今後解決が望まれる問題を紹介する。そして、その中の一つについて検討した結果を発表する。

1. 水収支項の定量

金森(1915)に比べて現在の水文学が確実に進歩している点のひとつは、水収支を構成する各項についての定量化が進んだことである。とりわけ大きな進歩があったのは Thornthwaite(1948)や Penman(1948)を嚆矢とする気候学的蒸発量算定法の開発である。

広域の蒸発散量が正しく計算されれば、以下の検討が可能になる。つまり、ある地域をとったときの水収支式は

$$P+G_{in}=E+R+G_{out}+\Delta S$$

ここに P :降水量, G_{in}, G_{out} :それぞれ地下

水の流入および流出量, E :蒸発散量, R :地表流出量, ΔS :当該地域内の貯留量の変化量である。 P, R は実測でき、さらに長年平均なら ΔS は他の項に比べて十分小さくなるから、 E が求めれば、 $G_{in}-G_{out}$ の値が算定できる。つまり、その地域が外部と地下水をどのようにやり取りしているか求めることができる。そこで、地形的分水界を境界とする流域を対象にしたとき、 $G_{in}-G_{out}$ の値はどの程度の大きさになるか、言い換えれば、**地形的分水界は水文学的分水界と同じであるとみなしていいか**検討できることになる。

ここで、Thornthwaite 法にせよ他の方法にせよ、我が国の山地のような大起伏の地域である程度広域の蒸発散量を推定するのは非常に計算量が多くなるのであるが、国土数値情報の整備により、これらの計算が容易に行えるようになった。その最初となったのは野上(1990)で、気候値メッシュデータを用いて3次メッシュ各点の年蒸発散量を Thornthwaite 法で算定し、これを水収支的に求められた水損失量と比較した(図1)。その結果、日本を大きく積雪地域と非積雪地域に分けると、非積雪地域全体の平均としては、Thornthwaite 法で求められた蒸発散量 PE と水収支的に求められた蒸発散量 E の差はほぼ誤差範囲にあることがわかった。すなわち、非積雪地域全体の長年平均としては、 $P=R+E$ である($G_{in}-G_{out} \approx 0$ である)と計算された。

さて、蒸発散量は林学の分野でも重要な数値であり、これまでに種々の蒸発散量推定法について日本の森林における実測値とのキャリブレーションが行われている(鈴木, 1991)。それらによると、Thornthwaite

法は季節によっては実測と大きく異なる値を与えることがあり、水収支を検討するには適当でない場合がありうる。現在、森林における観測と最もよい対応を示すことが明らかになっているのは熱収支法(近藤, 1992)と補完法(Morton, 1983; 大槻ほか, 1984)である。そこで演者は西日本の地域において補完法を用いた水収支計算を行い、野上(1990)と同様に誤差範囲内で $P=R+E$ と表せることを見出した。ここまでが確実にわかっていることである。

さて、ここでは日本の少積雪地域全体の平均値による議論であったが、個々の流域についてはどうであろうか。これについては「経験上」流域の $G_{in}-G_{out}$ は 0 とみなせるとしてよいとする文献(たとえば、東浦, 1975)とそうでない文献の双方があるが、具体的な検討はごく限られた地域(流域)で行われているに過ぎない。これは、水文データに全幅の信頼を置けないこと(榎根・竹内, 1971)・そして土地利用条件によっては蒸発散量に従来考えられてきたより大きい地域差がある場合があることがわかってきたこと(榎根, 1989)から、正確な水収支項の算定が先決となったためであろう。

図 2 は全国河川の年流出高と年降水量の関係である(榎根, 1989。ただし原図は Kinoshita *et al.*, 1986)。これを見ると、見かけの損失量(=降水量-流出高)は流域毎に大きな違いがある事がわかる。これがデータの問題によるのか、それとも蒸発散量の地域差によるのか、あるいは $G_{in}-G_{out}$ が流域毎に大きな値をとる(地形的分水界を越えて地下水が流れる)ためなのかは、データソースが明らかでないので今のところ不明である。また、演者の検討においても、個々

の流域については必ずしも $P=R+E$ とならないことが示されている(図 3)。

図 4 は阿蘇山西麓における流域間の水のやり取りを示した図である(下津, 1987)。阿蘇山の西部は火山噴出物中の大規模な地下水流動系が見られることで知られ、その水を水源とする熊本県の手によって詳細な研究が行われている。その結果、図 4 のように、流域間での水の移動量が推定されるに至った。しかし、これは特別によく研究された希有な事例である。

この例は第四紀火山という特殊な

さらに現在水収支項でわかっていないものは、**流域貯留量 S が 1 年でどれほど変動するか**ということである。これについては「短期間では無視できない」等々とあいまいな書き方をした文献が多い。図 5 は阿蘇山西麓白川における流域貯留量の径時変化を示したものである(下津, 1989)。これは地下水位との時差相関が非常に高いので信頼出来る値と考えられる。貯留量の変動(実線)を見ると、多い年と少ない年とで 1000mm もの違いがある。この地域は基盤岩の透水性がきわめて高く、地下水貯留能力が大きいためこのような現象が生じていると考えられているが、それでは他の地域ではどうなっているのか実証的に整理した研究はまだなされていない。

2. 貯留量と流量の関係(流出解析)

金森(1915)に比べて現在の水文学が大きく進化している二つ目は、降雨に対する流出の応答が明らかになってきたことである。これは具体的には流出解析の手法の進歩によるところが大きい。

流出解析には何らかの数値モデルが使わ

れる。これらのモデルは大きく集中系モデル(lumped model)と分布系モデル(distributed model)に分けられ、現在は後者の研究が盛んである。これは斜面水文学において斜面土層特性と流出の関係が明らかにされつつあること、コンピュータの計算能力が上がった事が原因である。しかし後述する比較河川水文学においては、流域の特性を明確に表す手法が必要とされ、そのため集中系モデルもその有用性を失っていない。

集中系モデルのうち、きわめて高い適合性を持ち、かつ構造が簡単で水文過程の物理性にも配慮されている(とされている)モデルがタンクモデル(直列貯留型流出モデル)である。このモデルは非常にパラメータの数が多く、かつては最適化は試行錯誤で行われた時代があったが、角屋・永井(1979)などによって種々の自動最適化(その多くは非線型最適化法を使うもの)が考案されている。

タンクモデルにはきわめて柔軟なシステムで、ほとんどすべての河川のハイドログラフを実用上十分な精度で再現できる。しかしタンクモデルには、河川の特性をモデルで代表させ、比較対象にするという使い方をするうえでは大きな欠点がある。その一つは、パラメータの変化に対する output の感度が弱いこと、もう一つは、違うパラメータや構造を持つモデルが非常によく似た output を生成してしまうことがあることで、これはタンクモデルの考案者自らが認めていることである(菅原, 1979)。

また、タンクモデルは流出の物理特性を考慮しているとされているが、近年明らかになってきた斜面水文学的知見とタンクモデルの構造は必ずしも一致するものではな

い。なぜタンクモデルで流出がうまく再現できるのかは現在に至るまで未解決である。これに限らず、斜面水文学的知見をスケールアップして流域全体の水循環過程を描くこと、あるいは斜面水文学からの帰納により流域の流出特性を記述することは現在の水文学の大きな課題となっている。

3. 流出特性の地域性

河川の流出特性を比較し、その地域性を明らかにする研究は種々行われているが、個々の研究の持つ意義については十分検討されているわけではない。つまり、「流出特性」には非常に多数の特性が含まれるのだが、どのような流出特性を河川間で比較すればどのような事が明らかになるかはまだまとめられていない。

日本島の河川の流出特性がどのような地域性を示すかということは、まず流出量および流出率(篠原,1965,図7)で検討され、次に月ごとの流出量のパターンの地域性が示された(たとえば Tada and Oya,1971, 図8)。ただし、これらは流域の input となる降水の季節分布に規定され、むしろ気候分類に近いものである。

河川の流出特性そのものの地域性を検討したのは、湧水流量(虫明,1978)、ハイドログラフの逓減特性(安藤ほか,1983)があり、これらが特に流域地質と大きな関係があることが示されている。同様に植原・佐藤(1981,1983)は全国の河川の「保水力」が流域地質と関係があることを示している。

これらの研究は、入力ノイズを捨象するために降雨がないときの流域の反応を検討したものあるいは月単位のデータを用いた

ものである。

しかし、流出においては降雨時にどのような反応が流域に起こるかという点も重要である。吉野ほか(1983)は全国山地河川の洪水流出率の資料を整理し、流域の地形構造との対応を得ている。これは重要な業績であるが、洪水流出の形態は、流域の湿潤条件によって大きく異なるのが普通であるので、これでは十分といえない。この湿潤条件と洪水流出の対応については、日野・長谷部(1983)が3つの河川で指摘しているのみで、全国的な検討はまだ行われていない。とくにある程度以上湿潤になると大きな洪水が発生しやすくなるしきい値については、流域の流出特性を表す基本的な数値であるので、この値の検討は重要である。

ここで、タンクモデルを用いれば、側孔の高さがこのしきい値を流域貯留量の形で表すと考えられるから、河川間の比較が容易であると思われるが、しかし実際にはタンクモデルには前述したような難点があり、この場合だとタンク側孔の高さがしきい値を正しく示していない(それでもハイドログラフは実測によく合う)可能性がある。そこで、タンクモデルを用いないで(曖昧さを極力少なくして)しきい値を求める方法が必要とされる。そこで流域貯留量を直接算定し、洪水流出量との関係を検討する。

図11は北海道宗谷丘陵稚内層流域における逡減時ハイドログラフを2成分に分け回帰したものである。二つの成分のうち、早い減衰をするものは指数関数、遅い減衰をするものは2次の分母関数で表される。これらは成分毎に解析的に流量-流域貯留量との関係を求めることが出来る。すなわち、

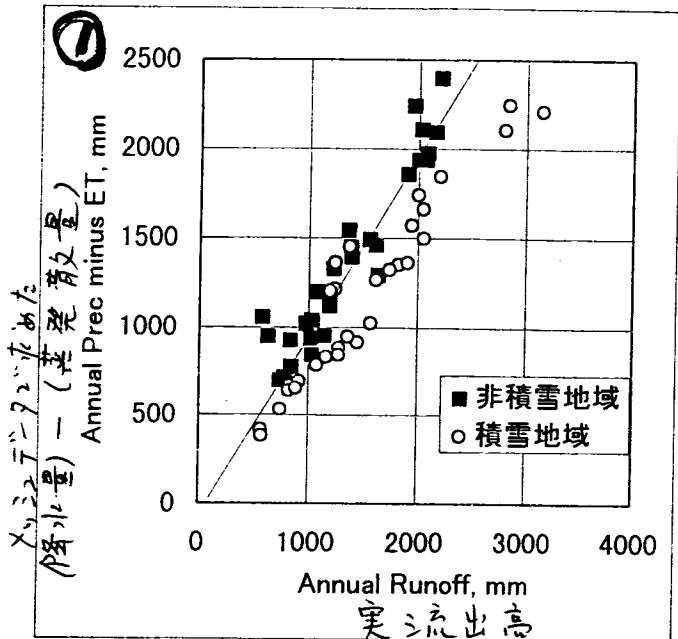
時間を t 、時刻 t における流量を $q(t)$ 、貯留量を $S(t)$ としたとき、 $dS/dt = -q$ を解いて、

$$q(t) = ae^{-at} \text{ のとき } S(t) = q(t)/c$$

$$q(t) = \frac{1}{(1 + b\sqrt{Q(0)t})^2} \text{ のとき、}$$

$$S(t) = \frac{\sqrt{Q(t)}}{b}$$

これより t を媒介変数として S と q の関係が求められる(図12)。これを用いて、この流域における洪水イベント開始時の流域貯留量 S_0 を直接算定できる。実際には、降雨時において、もともと貯留されていた水 S_0 と降雨でもたらされた水 P が一時的に流域内に貯留されるのだから、洪水時の流域の貯留量は $S_0 + P$ となる。そこで、この値と洪水流出量との関係を示すと図13aのようになる。また、宗谷丘陵の別の流域(声問層流域)について同様に示したのが、図13bである。これらの流域では、洪水流出量は降雨量ではなく貯留量によって決まる事が明瞭に現れている。さらに洪水流出の様相がかわる貯留量のしきい値(限界貯留量)が明瞭に存在し、それは稚内層の場合 30mm、声問層の場合 50mm である。図13a,bより、この流域では洪水流出量は降雨量でなく貯留量で決まることがわかる。一方、図9に示された流域では洪水流出量はもっぱら降雨量で決まるという特性がある。しかし、図13に比べると回帰線の周りの点のばらつきが大きい。これもまた流域の乾湿状態に左右されているものと思われる。以上の手法により限界貯留量をタンクモデルより曖昧さなしに決定することができる。これは比較河川水文学に大きな貢献をするものである。



野上(1990)の図

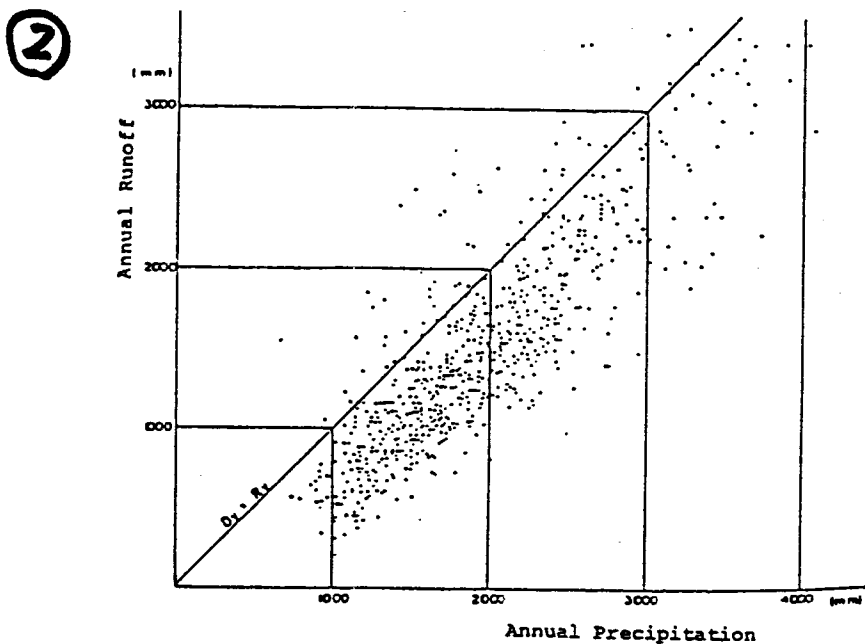
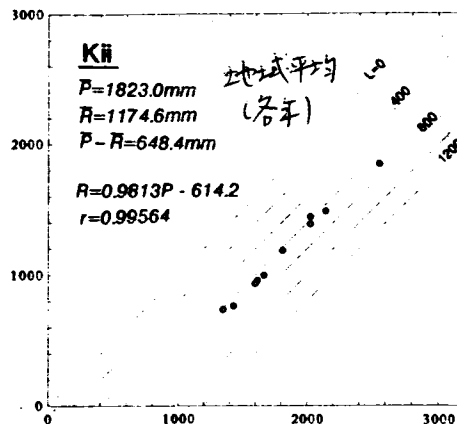
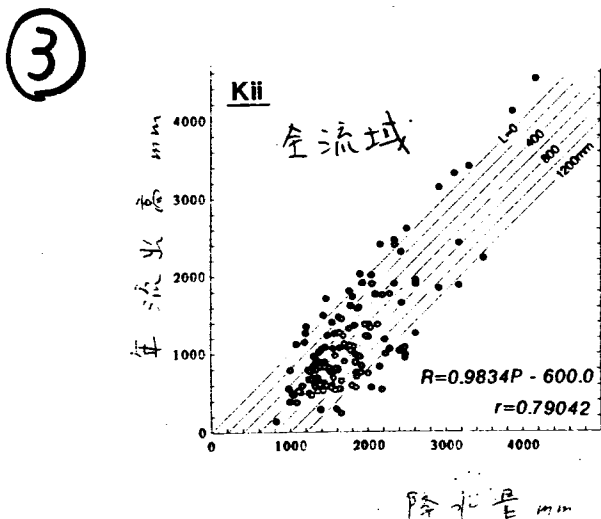
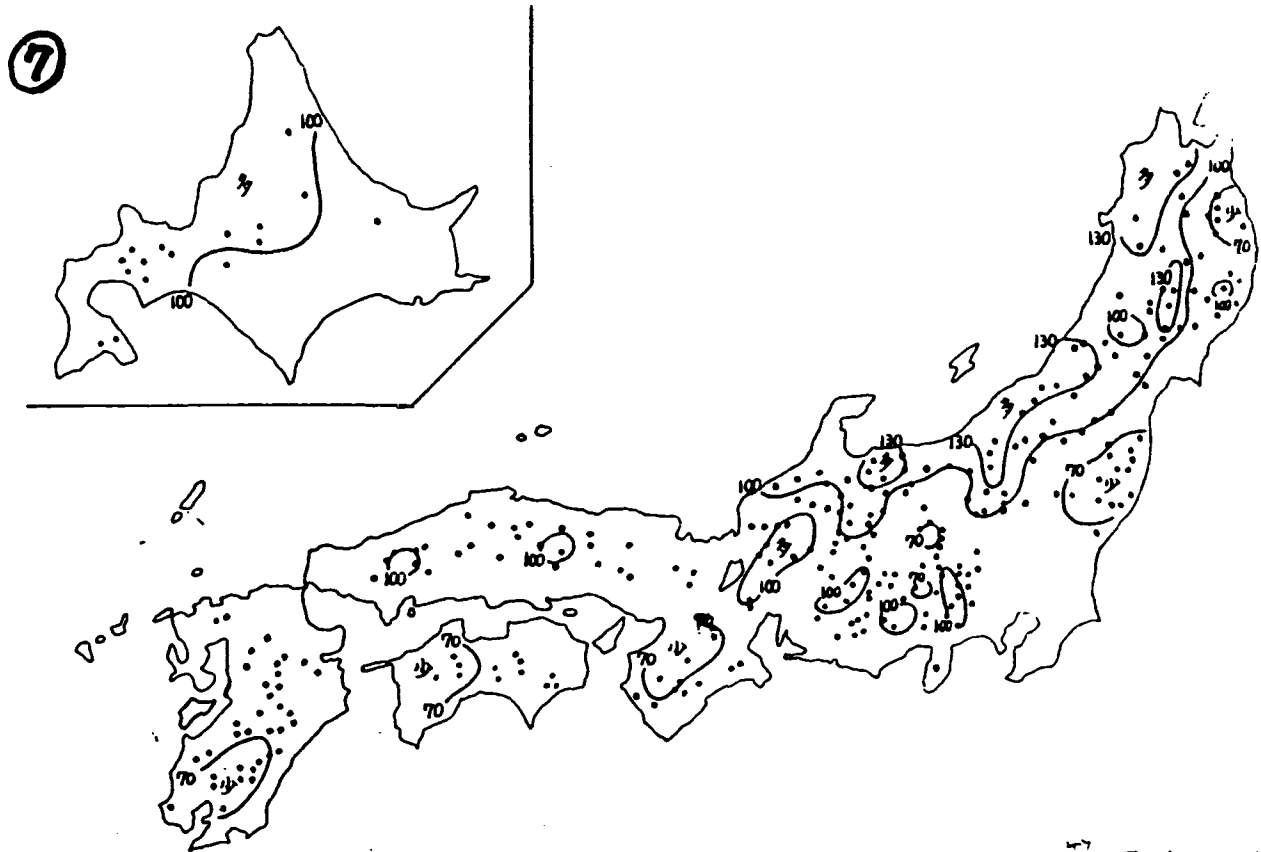


図12.2 日本の年降水量と年流出量との関係 (木下ら, 1986)。

(権根, 1989 より引用)



安形



図一 流出率の分布図；単位は%，○は測水所の位置。

菅原 (1965)

⑧

FIG. 1 A REGIONAL DIFFERENCES OF DISCHARGE-TYPE.

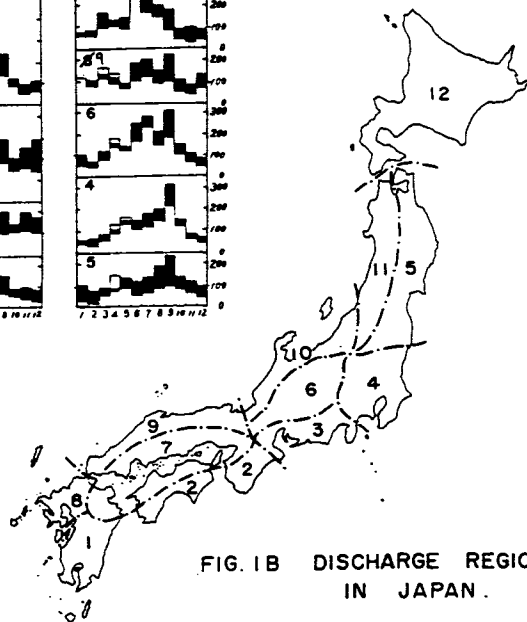
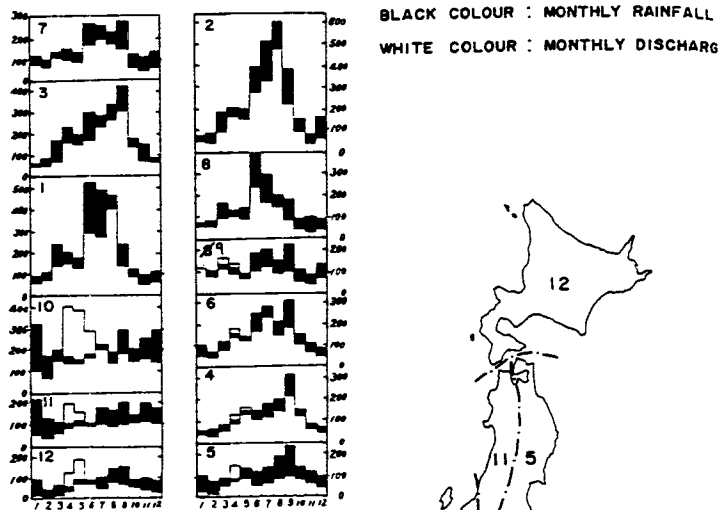


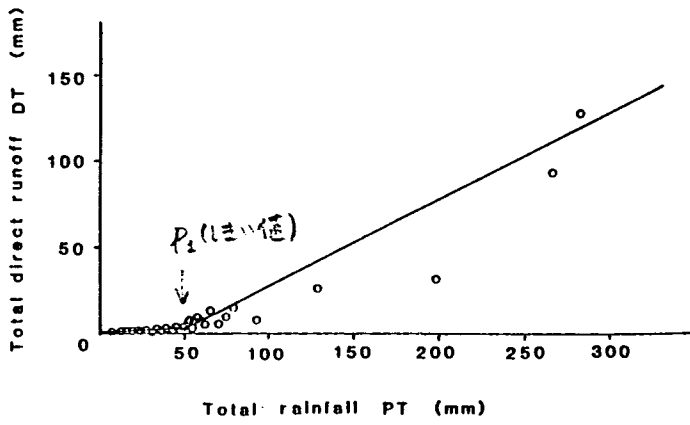
FIG. 1 B DISCHARGE REGION IN JAPAN.

- | | | |
|--------------|--------------|--------------|
| 1. S. KYUSHU | 5. TŌHOKU | 9. SANIN |
| 2. NANKAI | 6. TŌSAN | 10. HOKURIKU |
| 3. TŌKAI | 7. NAIKAI | 11. ŌU |
| 4. KWANTO | 8. N. KYUSHU | 12. HOKKAIDO |

Todo & Oya, 1971

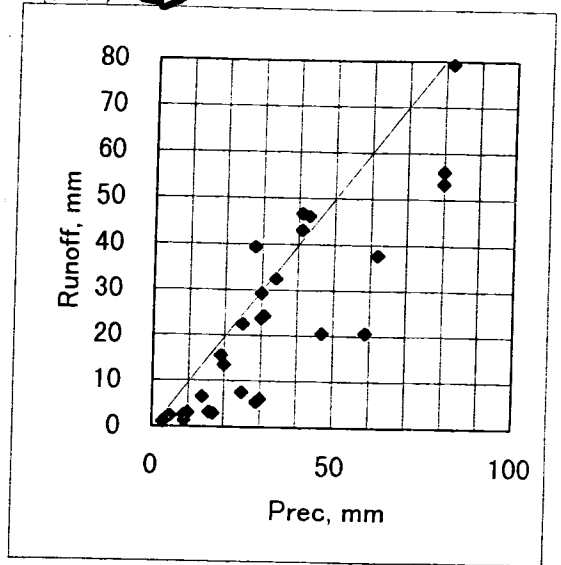
9

第12図 塩沢流域における一雨雨量 PT と直接流出量 DT の相関図



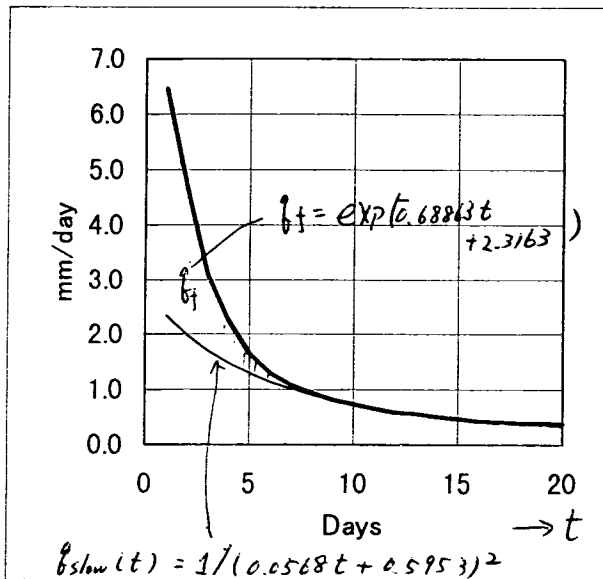
安藤(1983)、神流川「塩沢」流域の
洪水水収支

箱内E, 10



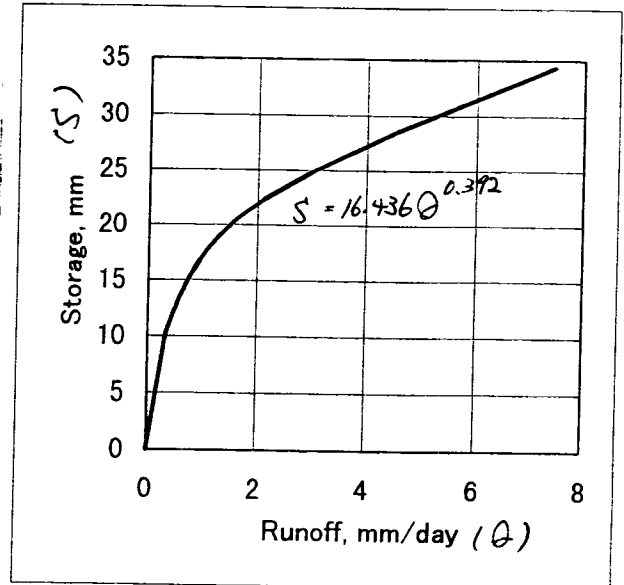
宗谷丘陵「Wk」流域の洪水水収支

11



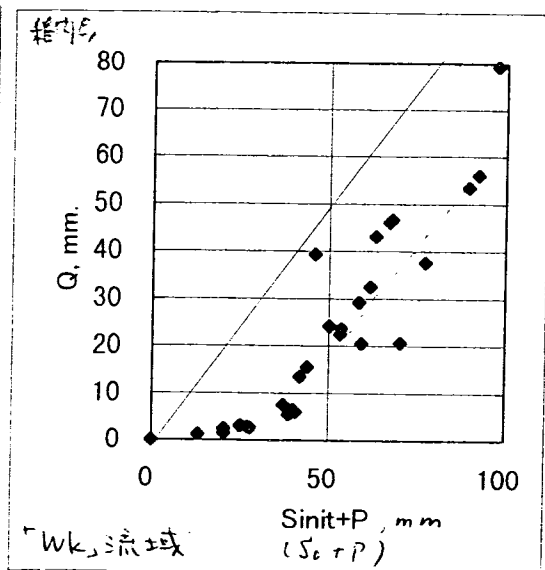
「Wk」流域のハイドログラフ分離

12

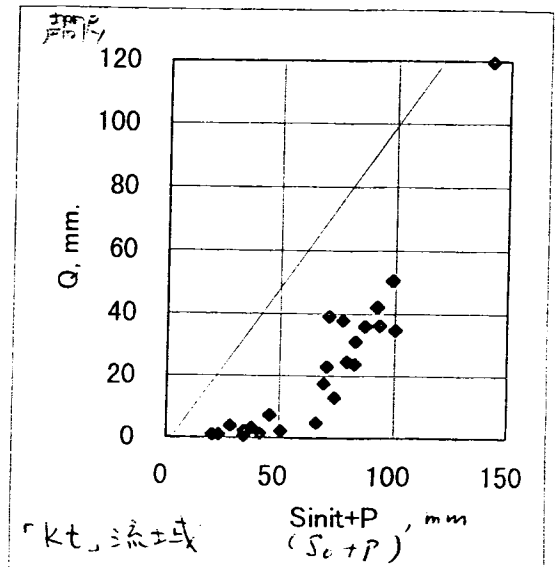


「Wk」流域の流量 - 貯留量関係

13



「Wk」流域



「kt」流域

洪水時貯留量と洪水流出量の関係 (宗谷丘陵)