

琵琶湖大浦川流域の積雪・融雪・流出解析
Analysis of Snow Accumulation, Melt and Runoff Process
in the Ohura River Basin of Lake Biwa

京都大学防災研究所 正員 池 淵 周 一
建設省琵琶湖工事 宮 井 宏
日本気象協会関西本部 友 村 光 秀

1. はじめに

融雪流出モデルの構成にあつては、降雨・降雪→変換系Ⅰ→積雪→変換系Ⅱ→融雪→変換系Ⅲ→流出、といった一連のプロセスの物理的特徴を可能な限りとりこむ必要があると同時に、利用できるデータに応じてこれらプロセスを実用的な精度にてらして十分表現できるモデル化が必要である¹⁾。本研究では、琵琶湖に流入する融雪流出量を把握・予測する一つのステップとして、大浦川という琵琶湖北部に位置する 13.8km²の河川をとりあげ、そこでの詳細な気象・水文観測を通じて得られるデータをベースに、積雪・融雪・流出モデルを展開せんとするものである。ここでは、主に積雪・融雪モデルおよびその適用結果について述べる。

2. 観測流域の概要

対象とした大浦川流域は、図-1に示すように琵琶湖の北部に位置し、流域面積 13.8km²、標高92～657mの流域である。植生はアカマツ・コシアブラ群集が支配的で、下流河川沿いに水田が発達している。

3. 観測システムの概要

本流域には琵琶湖流入口に近い役場に温度計（自記）と積雪深計（普通）があるのみである。図-1には本調査のために新たに設けた観測機器とその配置も示してある。また基準点では図-2に示すように多くの観測機器を設置している。観測期間は昭和57年12月1日から昭和58年 4月10日までおこなった。観測機器で特徴的なものに積雪深計（自記）がある。光学式自記積雪深計で、積雪・融雪期間を通じて日中での積雪深を自記する（装置が簡単でしかも安価であるが、とくに融雪時に感部の周辺が凹状になることが観測されたので、自記紙の読みとり際に際して、実測値との比較を行ない、誤差が小さくなるよう補正した。読みとりは朝夕の1日2回行なったが、自記記録は光ファイバーで導かれた光線により感光紙を変色させる方式をとっているため、曇天の日や朝夕の弱光時には境界がはっきりせず、読みとり時に主観の入る可能性があることは否定できない。これらの問題点については現在改良中である）。その他、温度計（自記、普通）、放射収支計（自記）、日射計（自記）、雨雪量計（自記）、風向風速計（自記）などに加え、基準点近くの小流域（0.01km²）には90°三角堰、地下水位用井戸を設置している。中流域山門地点（5.7km²）および下流域庄地点（13.8km²）には水位計を設け、水位-流量曲線を作成し、流量に変換している。さらに、図中、はスノーサンプラーによる雪密度観測点である。その他、2月14日および2月28日には飛行機による航空写真も得ている。

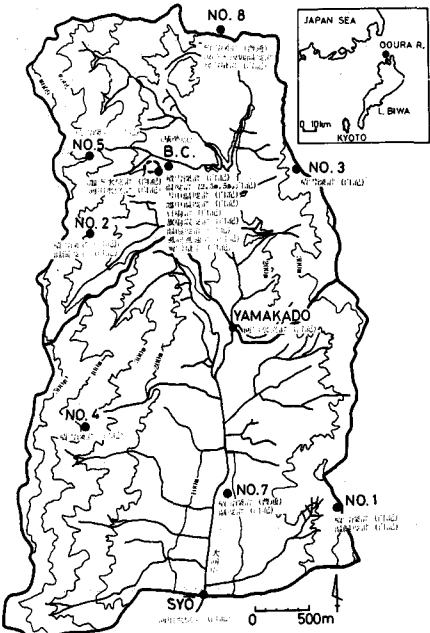


図-1 調査対象流域と観測システム

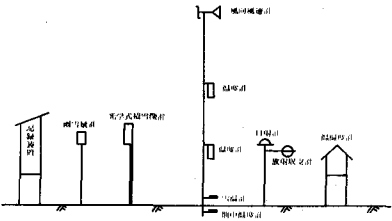


図-2 基準点における観測システム

4. 観測項目の時系列変化

以上の自記・普通観測で得たデータは表-1のような形で整理した。図-3は基準点において積雪深の補正值と観測値を比較したのもである。よい対応を示しているの、他の地点についても同様の補正を行なった。図-4, 5は多くの観測項目の一部を時系列データとして図示したものである。他の観測結果とも合わせてデータにみる時系列特性を概観すると以下のようである。1) 積雪深は標高とともに増加の傾向にあり、最大積雪深で比較すると、基準点(240m)で68cm, No.1(259m); 72cm, No.2(403m); 110cm, No.3(350m); 87cm, No.4(392m); 101cm, No.5(482m); 130cm, であった。また最大積雪深の生じ日も基準点, No.1で1月下旬、他の地点で2月中旬と、融雪の生じ方にも標高の差が現われている。2) 流出量、地下水位であるが、基準点では積雪のない1月前半、3月中・下旬に降雨による増水がみられる。1月下旬、2月上旬、3月上旬の大きな増水は積雪の上に降雨があった場合で、融雪量に加わり、長期間増水が続いている。融雪のみによる

表-1 観測データの整理概要

項目	観測地点	観み取り間隔	単位
感向	基準点	30分	16方位
感速	基準点	30分	m/s
日射	基準点	1時間	ly/hr
放射収支	基準点	1時間	ly/hr
気温	基準点1, 2, NO. 1, NO. 2, NO. 7, 中河内, 吉備, 市島	30分	℃
融雪最低気温	基準点1, 2, NO. 1, NO. 2, NO. 7, NO. 8, 中河内, 吉備, 市島	1日	℃
地温	基準点	30分	℃
雪温	基準点	30分	℃
湿度	基準点, NO. 1, NO. 2, 中河内, 吉備, 市島	30分	%
降水量	基準点, NO. 8	1時間	mm
河川水位	市島, 市島, 小滝城	1時間	cm (水位)
流量			mm (流量)
地下水位	小滝城	1時間	cm
積雪深A	基準点, NO. 1, NO. 2, NO. 3, NO. 1, NO. 5	朝・夕	cm
積雪深B	NO. 7, NO. 8	1日	cm

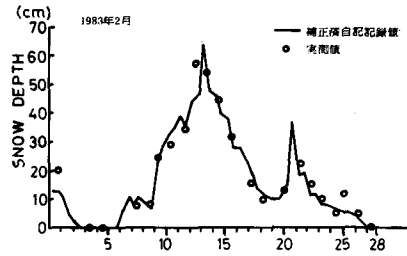


図-3 積雪深の実測値と補正済自記録値の比較

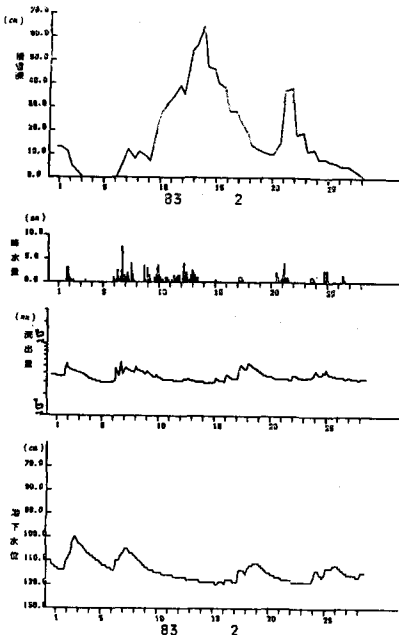


図-4 基準点の積雪深、降水量、流出量、および地下水位

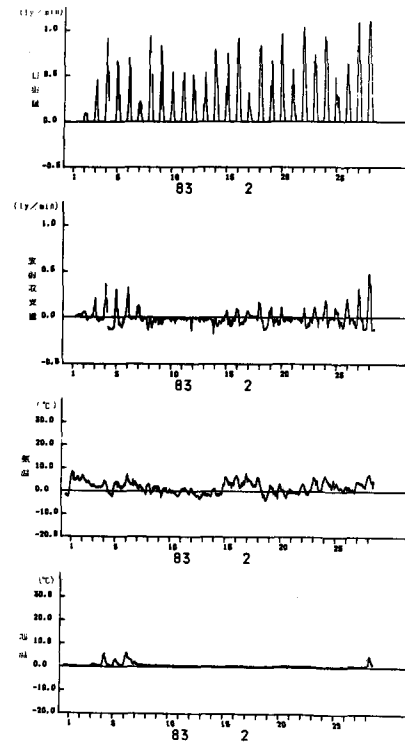


図-5 基準点の日射量、放射収支量、気温および地温

増水は1月下旬、2月中旬にみられ、日変化を繰り返しながら、徐々に増水する融雪特有の変化が見られる。増水のピークは13時ごろが多く、気温のピークと一致している。降水があるのに流出量が低減あるいは横ばいであるのは1月中旬、2月中旬の積雪深増加時に顕著で、これらの期間には融雪がほとんど生じなかったことが推測される。庄、山門流域でも基準点と同様の変化がみられるが、流域上部に雪が残っている3月中旬まで融雪による日変化が見られる。またピークは18時ごろが多く、気温のピークから3時間程度遅れる傾向がある。地下水位については、流出量に比べて緩慢な変化を示し、降雨のみによる水位の増加は小さい。顕著なピークはいずれも融雪あるいは融雪に降雨が加わった時期であり、融雪が地下水かん養に大きく影響している。また、流出のピークに比べて地下水のピークは遅れる傾向にあり、融雪水のなかでも早く流出する成分があることが推測される。3)基準点の気象要素について、積雪期の特徴を示すものを列挙すると、まず放射収支量については無雪期には昼間プラス(下向き)、夜間マイナス(上向き)の変化を示すが、少しでも積雪があると、昼夜を通してマイナスの値となる。これは積雪のアルベドが大きいために、昼間の日射が雪面で反射して、上向きの入力となるためであろう。アルベドの値が小さくなる融雪末期には若干のプラス値が見られるようである。地中10cmの地温については、無雪期には気温とほぼ同様の変化をするが、積雪があると1℃前後からわずかながら降下する変化を示す。しかし、0℃以下にはならず、2月下旬の消雪前で0.3℃ぐらいである。したがって、この地域では地面凍結はおこらず、ほぼ一定量の地面融雪が生じていよう。また、融雪がさかんになる日中には、地表に到達する融雪水のために、地温は0.1℃～0.2℃程度下がるという日変化もみられる。

5. 積雪・融雪モデル

以上の観測時系列の特性をできるだけ忠実に表現できるモデルの展開が必要である。従来、この分野でのモデル展開は気温に融雪係数を乗じて融雪量を算出するという過程のみで構成されているものが多い。しかもデータがほとんどないこともあって、最初から時間的にも空間的にもかなり大きな単位でランプして扱う場合が多い。ここでは多くの気象・水文観測が連続的に4ヶ月あまり実施されたので、これらデータを時にはモデルパラメータの設定に、時にはモデルの検証に最大限活用するような形でモデル展開をはかることを試みる。また、時間ステップとしては1時間、空間的には小流域(0.01km²)、中流域(5.7km²)、全流域(13.8km²)をとりあげ、それらの結果をベースに種々のランピングをはかるという立場をとろうとしている。

モデルの基本はM.I.T.で開発されたTemperature Index 法²⁾に依拠しているが、わが国の、それも大瀬川流域への適用に際して、いくつか修正ならびに改良をはかっている。このモデルの特徴としては、1)積雪・融雪期を通して連続的に計算ができる、2)積雪の冷却・凍結過程がモデルに組み込める、3)積雪内貯留過程がモデルに組み込める、4)計算過程のなかで、積雪水量、積雪深、積雪密度、雪温、含水量などの積雪の状況を表わす諸要素が算出される、といった点を挙げることができる。したがって、従来、流域規模での融雪量の算定は、それを検証することなく直接、流出モデルへ入力してきているが、本モデルではその出力として積雪水量、積雪深、積雪密度、雪温があるものは連続して、あるものはいくつかの時点で観測されているので、これらの計算値と観測値の比較を通して、モデルそのものの検証をはかりながらモデルを評価し、この検証をうけたモデルの一つのアウトプットとして融雪量を把握・予測することになり、これも本モデルの特徴といえよう。

図-6は本モデルのブロックダイアグラムであり、以下の各式は各部分システムでの基本式である。

1)降水の有無と降水の形態; 降水量データにより降水の有無を判断し、降水がなければ6.へ進み、積雪がなければ流出モデルへの入力を0として次ステップへ進む。積雪がある場合は8.の融雪量計算へ進む。降水がある場合、図-7に示すように基準点においてえた気温と雨、雪の比率の関係から、その比率50%に相当する2.1℃を降水形態の判断気温とし、地上気温が2.1℃以下であれば雪、2.1℃より高ければ雨とした。2)新雪密度、積雪量の増加、積雪密度計算; 新雪密度 $DNS(g/cm^3)$, 新雪深 $DPNS(mm)$, 新雪による積雪の圧縮深 $REDUCT(mm)$ をそれぞれ次式であたえる。

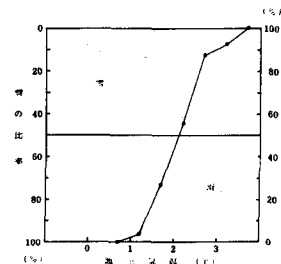


図-7 降水の形態と地上気温

$$DNS = 0.03 + \{(1.8T + 32)/100\} ** 2 \quad \dots\dots\dots(1)$$

$$DPNS = P / DNS \quad \dots\dots\dots(2)$$

$$REDUCT = P * DP' / WEQ' * (DP' / 10) * 0.35 * 0.3244 \quad \dots\dots\dots(3)$$

ここに、T；気温（℃），P；降雪量（mm），DP'；新雪が積もる前の積雪深（mm），WEQ'；新雪が積もる前の積雪水量（mm）。したがって、新雪が積もった後の諸量は、

$$DP = DP' - REDUCT + DPNS \quad \dots\dots\dots(4)$$

$$WEQ = WEQ' + P \quad \dots\dots\dots(5)$$

$$DN = WEQ / DP \quad \dots\dots\dots(6)$$

ここに、DN；積雪密度（g/cm³）。3）融雪量の計算；融雪量は気温と日射量を用いて、(7),(8) で計算される。

$$ALB = 0.85 * 0.82 * (NTX * 0.48) \quad \dots\dots\dots(7)$$

$$HTI = BDHF * RAD / 359 * (1 - ALB) * T \quad \dots\dots\dots(8)$$

ここに、ALB；アルベド，NTX；新雪が降った日からの日数，HTI；融雪量（mm），RAD；日射量（ly/day），BDHF；融雪定数（mm/℃・hr），359；彥根の4月の平均日射量。降雨による融雪量HR（mm）（= P * T / 80）および地面融雪量HG（mm）（= 0.02）を加えると、総融雪量HT（mm）は、HT = HTI + HR + HG ……(9) となる。4）融雪の有無、積雪の冷却、再凍結；総融雪量HTがマイナスの時は融雪が生じず、積雪内の水分がある場合（雪温 ≥ 0）は凍結、ない場合（雪温 < 0）は積雪の冷却が生じる。本モデルでは、積雪の冷たさを示す指標として、Cold Content³⁾ という値を用いており、(10)式で示される。CC = -0.5/80 * DP * DN * TP ……(10)。ここに、CC；Cold Content（mm），TP；雪温（℃），0.5；雪の比熱，80；氷の融解潜熱（cal/g）。5）積雪水量の減少、積雪内貯留、流出；総融雪量がプラスの時、Cold Contentが正（雪温 < 0）の場合、HTの一部または全部が Cold Contentを0にするまで費やされる。Cold Contentが0（雪温 = 0）になってはじめて実際の融雪が生じ、積雪水量が減少する。なお、本モデルではHTを融雪量に変換するとき、積雪量の含水量により積雪の比熱と氷の比熱の比を考え、Thermal quality⁴⁾ QT（%）を持ち込んでいる。QT = 1 + 0.5/80 * (-TP)，TP < 0 ……(11)，QT = 1 - WC/WEQ，TP = 0 ……(12)。ここに、WC；積雪内含水量（mm）。積雪内を融雪水が重力水として降下する限界値を積雪の可能保水率 WHCとして次式で与えている。⁵⁾ WHC = 0.025 * DN + 0.03，DN ≤ 0.4 ……(13)，WHC = 0.111 * DN + 0.131，0.4 < DN ≤ 0.55 ……(14)，WHC = 0.2 * DN - 0.04，0.55 < DN ……(15)。したがって、融雪水のうち可能保水率を超過した分が重力水として流下可能な水量となる。さらに、時間ステップでの融雪重力水の地面到達率、いわば流出率PCは次式で与える。PC = 21 / (21 + DP) ……(16)。(16)式で表わされた流出率で積雪中の重力水は地表に到達し、残りは積雪内含水量に置きかえられて、次の時間ステップへ進む。6）積雪パラメータの再計算；以上の計算を終了したのち、次ステップでの初期値として、積雪パラメータの再計算をする。DN ((6) 式により)，TP = -CC * 80 / (0.5 * DN * DP) ……(17)，TS = (T + TP) / 2 ……(18)，WHC ((13),(14),(15)式により)，QT ((11),(12) 式により)。ここに、TS；雪面温度（℃）。なお、本モデル(8) 式は天候、季節等により変化することを表現したものであるが、式中の定数BDHFについては積雪の減少、消雪日に着目して、積雪深の計算を行ない、1.0mm/℃・hrという値を得た。図-8は Degree hour法という融雪係数に相当する BDHF * RAD /

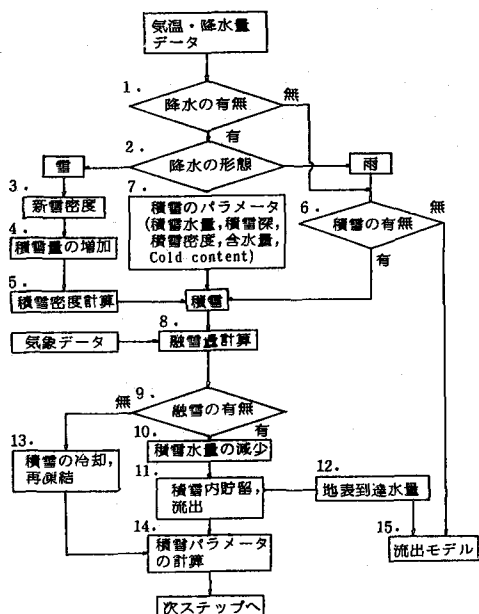


図-6 積雪・融雪・流出のブロックダイアグラム

359 * (1 - ALB) の変化を示したものである。天候、季節によって変化しており、平均的には春先にむかうにともない大きい融雪係数をとっている。さらに、大浦川流域の任意地点への適用をはかるため、7) 標高にともなう降水量の割増率；

$$Ph = Po \{ 1 + \alpha (h - h_o) \} \dots (19)$$

積雪のはじまった 1 月 9 日から 2 月 26 日までの No.8 地点 ($h_o = 245\text{m}$) の積算降水量 $\Sigma Po = 338\text{mm}$ および 2 月 26 日までの積雪量調査による $h = 471\text{m}$ 地点の積雪水量 403.5mm を ΣPh に代入し、 $\alpha = 0.0009$ を得た。8) 標高にともなう気温減率；

$$Th = To - \beta * (h - h_o/100) \dots (20)$$

自記気温データのある 4 地点において、一般に用いられている $\beta = 0.6$ をあてはめると、基準点、No.1、No.2 の間ではよい一致をみる。No.7 においては気温を幾分高く評価することになる。No.7 が盆地型気候に支配されているとも考えられるが、現時点では $\beta = 0.6$ に固定した。

6. 適用結果と考察

本モデルにおいては、日単位の日射量と時間単位の気温、降水量データを用い、時間単位で種々のアウトプットを算定した。まず、8 地点における積雪深の日変化について計算値と観測値を比較した。図-9、10、11 にその比較例を示す。両者はよく一致しているといえようが、欲をいえば、1 月 15~20 日ごろおよび 1 月下旬の一致度を高める必要がある。図-12 は基準点および No.2 地点での積雪水量の比較図であり、図-13 は積雪水量の高度分布の比較例である。さらに、図-14 は雪密度についての比較図である。いずれも時と場所によっては計算値と観測値の不一致をみることもあるが、全体的にはよい一致をみているといえよう。このように、本モデルのアウトプットである積雪深、積雪水量、雪密度などが観測値とよい一致をみることから、現時点では本モデルおよび同定パラメータを用いて、積雪・融雪モデルの最終アウトプットである融雪量が評価できると判断した。しかも本モデルにおいて標高による気温減率を一つのパラメータとして導入することにより、任意地点での融雪量が評価できるので、雪線高度や融雪量分布の算定も可能となる。そこで、小流域、中流域および全流域での面積融雪量、もちろん地面到達水量であるが、これを算定し、各流域からの流出ハイドログラフと比較した一例が図-15 である。両者の対応をみると、流出モデルとしてはかなり単純なもので十分であるようであり、現在、タンク

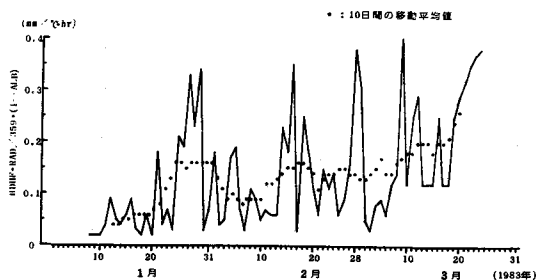


図-8 融雪係数 $BDHF * RAD / 359 * (1 - ALB)$ の変化

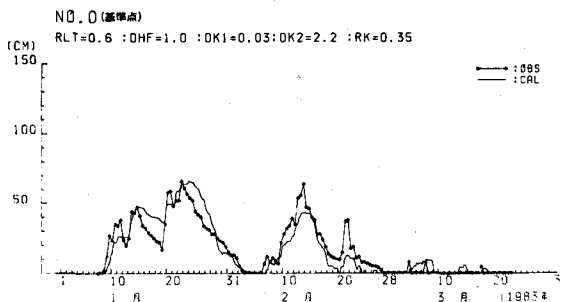


図-9 基準点での積雪深の実測値と計算値の比較

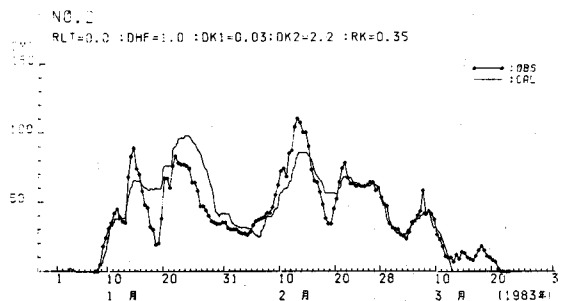


図-10 No.2 地点での積雪深の実測値と計算値の比較

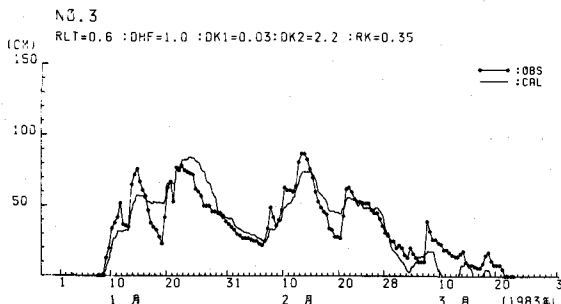


図-11 No.3 地点での積雪深の実測値と計算値の比較

融雪・融雪モデルの最終アウトプットである融雪量が評価できると判断した。しかも本モデルにおいて標高による気温減率を一つのパラメータとして導入することにより、任意地点での融雪量が評価できるので、雪線高度や融雪量分布の算定も可能となる。そこで、小流域、中流域および全流域での面積融雪量、もちろん地面到達水量であるが、これを算定し、各流域からの流出ハイドログラフと比較した一例が図-15 である。両者の対応をみると、流出モデルとしてはかなり単純なもので十分であるようであり、現在、タンク

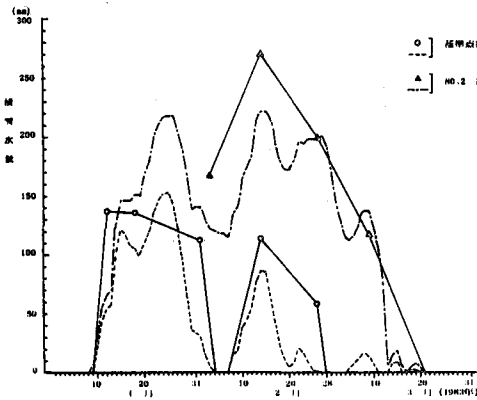


図-12 積雪水量の変化

モデルをベースに検討している。また、図-16は雪線高度の計算値であるが、2月下旬から3月下旬まで約12m/日の割合で上昇している。

7. おわりに

以上、大漕川流域で詳細な気象・水文観測を実施するとともに、それらデータを最大限に活用する積雪・融雪モデルの展開をはかってきた。本報告では、基本となる時間単位で、主に積雪・融雪プロセスに限定して議論しているが、多くの流域では利用できるデータが必ずしも時間単位で存在しているとは限らない。本モデルをベースに、3, 8, 12, 24時間平均としてデータが得られているとした場合のモデルの精度についても考察し、流出モデルとあわせ、積雪・融雪・流出現象の時・空間ランピングスケールについても議論していきたい。

〔参考文献〕 1) S. Ikebuchi; Runoff System Model in Snow Accumulation and Melting Seasons, Bull. D.P.R.I., Kyoto Univ., vol.32, No.293, 1982.12

2) Laramie, R.L. and J.C. Schaake; Simulation of the Continuous Snowmelt Process, M.I.T. Report No.143, 1972

3), 4) P.S. Eagleson; Dynamic Hydrology, chap.13, McGraw-Hill, 1970

5) Amorocho, J. and B. Espildora; Mathematical Simulation of the Snow Melting Process, Water Science and Engineering, Paper No.3001, Univ. of California, 1966.

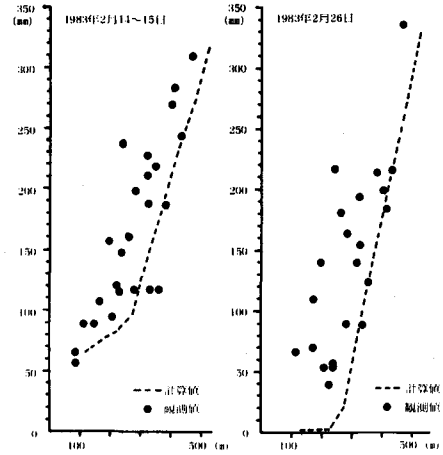


図-13 積雪水量と標高

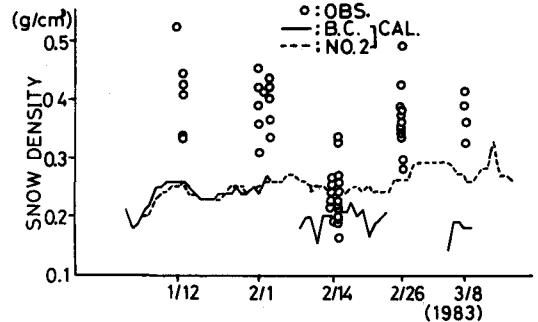


図-14 全層雪密度の実測値と計算値

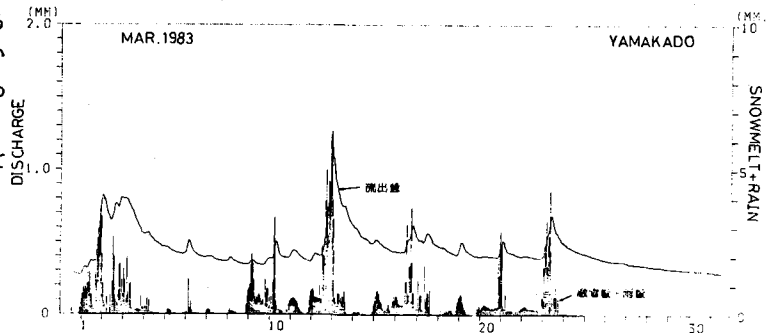


図-15 山門地点での流出ハイドログラフと面積融雪量

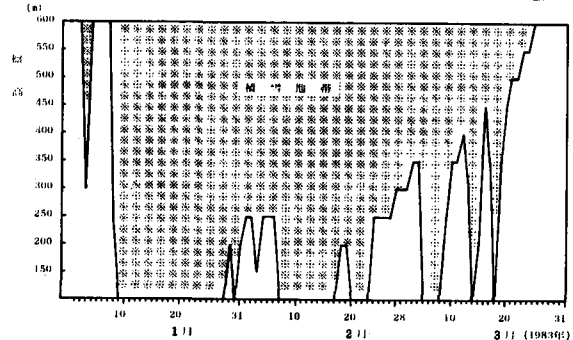


図-16 雪線の高度変化