分散型タンクモデルを用いた空知川流域における 流域水収支モデル

沼尻 治樹^{*1}

A water balance model for Sorachi river basin using distributed tank models

Haruki NUMAJIRI ^{*1}

Abstract

The purpose of this study is to construct a monthly water balance model using a tank distributed to each grid in a drainage basin. The study area is the Sorachi river basin (2531 km²) in Hokkaido. The grid size is 1km × 1km, which is common to the monthly climate grid data (Japan Meteorological Agency). The grid tank model is composed of a main model and a sub model for snow accumulation and snowmelt. The sub model is used for two purposes to separate snowfall from total precipitation in the original data and to surmise snowmelt, as the input to the main model. The monthly temperature was used for these purposes. Total runoff from the main tank is the sum of three components (surface, interflow and baseflow runoff) from separated three outlets, which are defined by four parameters; heights of two outlets from the tank bottom, and two runoff ratios to water storage depth to the outlet and the bottom. The optimized values of the parameters were obtained by minimizing difference between the monthly model output and observed monthly river discharge (Ministry of Land, Infrastructure and Transport). The data term; 1971 to 2000 is common for both the climate and the discharge used in this study. Using this model with optimized parameters we were able to simulate the intra - annual variation of water discharge from the drainage basin with sufficient accuracy. In conclusion this type of the distributed grid model is efficient and useful to simulate the seasonal changes of basin water balance.

Key words: climate mesh data, distributed tank model, monthly water balance, parameter optimization, Sorachi river basin

キーワード：気候値メッシュデータ, 分散型タンクモデル, 月間水収支, パラメータ最適化, 空知川流域

I. はじめに

水収支解析は水文学の主要な分野の一つであり(市川 1978), これまでに多くの流出モデル, 水収支モデルが考案され解析が行われてきた。流域を

扱った多くの水収支解析の手法は, 流域にひとつのモデルを適用するものや, いくつかの標高帯にモデルを設置するものが多数であった(近藤ほか, 1995)。広域スケールで流域水収支を扱った研究としては, 関口・吉野 (1953) と野上 (1990) があ

* 1 日本大学大学院理工学研究科地理学専攻
現在：社団法人日本測量協会測量技術センター GIS 研究所

る。関口・吉野（1953）は、測候所などの雨量観測値から 450 万分の 1 の地図に毎月の等雨線図を書き、その図に 13.5km メッシュをかけ、メッシュの交点の値から流域平均の値を求め、全国の流域を対象に過剰水分量を計算している。積雪からの融雪の割合を適当に調節して積雪地域の融雪量を決定していることから、気温等を用いて融雪を発生させることが今後の課題であると述べている。野上（1990）は、気候値メッシュデータ（気象庁）と流量年表による河川流量を用いて全国の流域を対象に、1km 解像度で年間の水収支解析を行っている。その結果、多くの流域で気候値メッシュデータから求めた流出量と観測値である河川流量とが近い値を示すことを報告している。そして、積雪地域の流域では河川流量の方が気候値メッシュデータから求めた流出量より多い傾向にあることから、降雪としての降水量の捕捉率が不十分であることなどを指摘している。この野上（1990）の研究は、年値で水収支を扱っており、月値レベルでは検討されていない。

そこで本研究は、野上（1990）が用いた旧版の気候値メッシュデータに代わり最新版である気候値メッシュデータ 2000 を用い、同期間の流量データを用いて水収支の季節変化を検討することができる流域水収支モデルを構築することを目的とした。また、月ごとの変化を追うためにタンクモデルを採用した。対象としたのは、北海道の空知川流域である。

タンクモデルは菅原（1972, 1985）によって、洪水予測などを目的に考案された流域流出解析の手法である。菅原（1972）では、当時のコンピュータの性能では、ループ計算に時間がかかり過ぎることを理由の一つに挙げ、タンクモデルのパラメータの自動最適化をあきらめている。しかし今日、パーソナルコンピュータにおいても十分な演算速度とメモリを確保することが可能になった。そこで流域内の各メッシュにタンクを置き、さらにタンクのパラメータを自動最適化するプログラムを C 言語で自作し用いることにした。

Ⅱ. 使用データと研究対象流域

1. 使用データ

使用したデータは、空間解像度 1km の気候値メッシュデータ 2000（気象庁）の月平均気温、月降水量と 250m-DEM から作成した 1km-DDM（落水線方向マトリックス）である。気候値メッシュデータ 2000 は、河川・湖沼などの陸水域について調和計算を行って補間したものを使用した（野上道男作成、未公表）。また、気候値メッシュデータ 2000 には、1971 ～ 2000 年までの平均値が用いられているので、同期間の毎年の流量年表（国土交通省）から 30 年間の平均月流量を計算して使用した。すなわち、気候値メッシュデータ 2000 と河川流量データの期間を合致させた。

2. 対象流域

対象流域は、北海道空知川赤平流量観測所流域（以下空知川流域）とした（Fig. 1）。対象流域の流域面積は 2,531 km² で、1km 解像度の DEM による地形計測では、流域内の最高点は 1,786m、最低点は 73m である。流域東部に石狩山地十勝岳があり、西部には夕張山地がある。

Ⅲ. 流域水収支モデル

本研究で構築した流域水収支モデルは、グリッドごとに単純なモデルを設置し流域出口で集計する分散型モデルである。グリッドに配置されるタンクモデル（以下タンクモデルあるいは単にタンクと呼ぶ）は、流出に関わるモデルと、そのサブモデルの積雪・融雪モデルから構成される（Fig. 2）。これらのモデルの計算フローチャートを Fig. 3 に示す。グリッドごとに計算される流出量を対象流域内で集計し月流出量とした。本研究で用いた流域水収支モデルは、ラスタ型データ（気候値メッシュデータ）を利用しているので、水収支に関わる成分ごとにラスタ型データを作成することができ、視覚的にもその分布を捉えることができるという利点がある。

Fig. 1 Location of the Sorachi river basin in Hokkaido and sites in the river basin.

Fig. 2 Tank model given to each grid.

Fig. 3 Flow chart of calculation in the tank model and snow accumulation and snowmelt sub model.

1. 積雪・融雪モデル

グリッドごとに配置された積雪・融雪モデルで
使用されるデータは、気候値メッシュデータ 2000
の月平均気温と月降水量である。モデルのパラ
メータは、降水形態の判別に用いる降雨・降雪判
別気温（月値）と融雪係数（ km ）の二つである。
小川・野上（1994）は日平均気温で雨が雪かを判
定し、その判別気温の月平均値を報告している。
本研究では、その月平均気温を用いる。融雪は、
気温に比例（融雪係数）するという degree-day
法に準拠した方法を採用した。これまでの研究に
おいて、気温が広域にわたる熱特性を反映してい
ることから、融雪過程の気温の有効性が報告され
ている（Ohmura, 2001）。なお、小島ら（1983）は
日平均気温から日融雪量を求める場合、日平均気
温 0°C 以下でも放射融雪による融雪が発生する場
合があると述べているが、本研究では月値を用い
ていることでもあり、月平均気温 0°C 以下の場
合、融雪は発生しないとした。また、積雪からの
昇華と積雪底面における融雪は無視した。

自作プログラムでは、以下のような場合に分け
計算を行った。降水量の判別に際して、1) 月平均
気温（ T_m ）が 0°C 以下の場合、2) 月平均気温が
 0°C 以上で降雨・降雪判別気温（後述）以下の場
合、3) 月平均気温（ T_m ）が降雨・降雪判別気温
以上の場合とに分けた。さらに、2), 3) の場合に
ついて、a) 当月積雪量（ S_m ）が月融雪量より多い
場合、b) 当月積雪量が月融雪量より少ない場合
に分けた。

1) 月平均気温（ T_m ）が 0°C 以下の場合は、月降
水量（ P_m ）は全て月降雪量（ Sf_m ）とする。この
とき、月融雪は発生しないのでメインモデルで
あるタンクへの入力量（ IN_m ）は 0 である（ m は
月を表す）。

$$Sf_m = P_m \quad (1)$$

$$S_{m+1} = S_{m-1} + Sf_m \quad (2)$$

$$IN_m = 0 \quad (3)$$

2) 月平均気温（ T_m ）が 0°C 以上で降雨・降雪判
別気温以下の場合は、月降水量（ P_m ）は全て月
降雪量（ Sf_m ）とするが、月融雪は発生する。こ

の月融雪量はタンクへの入力量（ IN_m ）となる。

a) 当月積雪量が月融雪量より多い場合。

$$Sf_m = P_m \quad (4)$$

$$S_{m+1} = S_{m-1} + Sf_m - k_m \cdot T_m \quad (5)$$

$$IN_m = k_m \cdot T_m \quad (6)$$

b) 当月積雪量が月融雪量より少ない場合。

$$Sf_m = P_m \quad (7)$$

$$S_{m+1} = 0 \quad (8)$$

$$IN_m = S_{m-1} + Sf_m \quad (9)$$

3) 月平均気温（ T_m ）が降雨・降雪判別気温以上
の場合は、月降水量（ P_m ）は全て月降雨量（ Sf_m ）
とする。当月積雪量（ S_m ）があれば、月融雪は
発生する。ここで計算される月融雪量と月降水
量の和がタンクへの入力量（ IN_m ）となる。

a) 当月積雪量が月融雪量より多い場合。

$$Rf_m = P_m \quad (10)$$

$$S_{m+1} = S_{m-1} - k_m \cdot T_m \quad (11)$$

$$IN_m = k_m \cdot T_m + Rf_m \quad (12)$$

b) 当月積雪量が月融雪量より少ない場合。

$$Rf_m = P_m \quad (13)$$

$$S_{m+1} = 0 \quad (14)$$

$$IN_m = S_{m-1} + Rf_m \quad (15)$$

2. グリッドタンクモデル

本研究で用いたタンク（Fig. 2）は、表面流出
口、中間流出口、基底流出口の 3 つの流出口を備
えたものである。タンクの上縁から底までを第 1
容量（ $Stg1$ ）、中間流出口より底までを第 2 容量
（ $Stg2$ ）とした。このうち、中間流出口、基底流
出口にはそれぞれ流出率（中間流出率と基底流出率）
を設け、出口までの貯留高に比例した流出がある
とした。結局、このタンクのパラメータは中間流
出率（ if ）、基底流出率（ bf ）、第 1 容量（ $Stg1$ ）、
第 2 容量（ $Stg2$ ）の 4 つである。タンクを流域内
のすべてのグリッドに配置するが、これらのパラ
メータは同一流域内のグリッドで共通値とした。

このタンクモデルの計算も積雪・融雪モデルと
同じように場合分け計算を自作プログラムで行っ
た。このモデルの計算手順を Fig. 3 に従って述べる。
前月繰越貯留量（ St_{m-1} ）に、タンクへの入力

量 (IN_m) である降雨+融雪量を加えたものを当月貯留量 (St_m) とし、それが第1容量 ($Stg1$) よりも多い場合はその差が表面流出 (sR_m) となる。この場合は、以下のように表される。

$$sR_m = (St_{m-1} + IN_m) - Stg1 \quad (16)$$

$$St_m = Stg1 \quad (17)$$

入力量 (IN_m) が第1容量 ($Stg1$) よりも少ない場合、表面流出 (sR_m) は発生しない。

$$sR_m = 0 \quad (18)$$

$$St_m = St_{m-1} + IN_m \quad (19)$$

月平均気温と 0°C 以上の月平均気温の積算値を用いて Thornthwaite 法の可能蒸発散量 (pE_m) の近似値を推定する手法 (沼尻, 2006) によって可能蒸発散量 (pE_m) を求めた。そして, Bras (1990) の記述を参考にして, 次式のように第1容量 ($Stg1$) に対する当月貯留量 (St_m) の比を乗じた値が実蒸発散量 (aE_m) と仮定した。

$$aE_m = \frac{St_m}{Stg1} \cdot pE_m \quad (20)$$

(20)式からも明らかなように, 当月貯留量 (St_m) が第1容量 ($Stg1$) より少ない場合, 実蒸発散量 (aE_m) もそれに比例して少なくなる。ただし, 蒸発散量の大きい夏季に十分な降水のある日本では夏季に自然植生に対する水不足が生じていないことから, $St_m \approx Stg1$, すなわち $aE_m \approx pE_m$ (Thornthwaite 法) であろうとの推定がなされている (野上, 1990)。

次に, 中間流出量 (iR_m) と基底流出量 (bR_m) を発生させる。実蒸発散量 (aE_m) を減じた当月貯留量 ($St_m - aE_m$) が第2容量 ($Stg2$) よりも多い場合のみ, 中間流出が発生する。なお, 基底流出は常に発生しているとした。

$$iR_m = (St_m - aE_m - stg2) \cdot if \quad (21)$$

$$bR_m = (St_m - aE_m - iR_m) \cdot bf \quad (22)$$

ただし, if は中間流出率, bf は基底流出率とした。この算出した各流出量と実蒸発散量から翌月への繰越貯留量 (St_{m+1}) を求める。

$$St_{m+1} = (St_{m-1} + IN_m) - (sR_m + aE_m + iR_m + bR_m) \quad (23)$$

結局, 本研究で用いたタンクモデルの水収支式は次式で表される。

$$St_{m-1} + IN_m = sR_m + aE_m + iR_m + bR_m + St_{m+1} \quad (24)$$

3. 最適パラメータ探索法

積雪・融雪モデルのパラメータである降雨・降雪判別気温は, 小川・野上 (1994) を参考に設定した。小川・野上 (1994) は, 気候値メッシュデータ作成時に設定された計算領域ごとに, 冬季の各月について降水形態判別日平均気温を求めている。本研究では, その値を月平均気温に適用するため, 月ごとに求められた降水形態判別気温の平均値を使用した。

積雪・融雪モデルの融雪係数 (k_m) とタンクの4つのパラメータの最適値は, 逐次法を使った自作プログラムで探索した。この自作プログラムは, パラメータを値の範囲内でループ計算することで評価値を求め, パラメータを最適化するものである。北海道では, 冬季に流域への降雨の供給がほとんどなく, 河川の流量は地下水からの流出が主であると考えられる。そこで本研究では, 1月, 2月の河川流量はすべて基底流出によるものと仮定した。そして, 1月, 2月のモデル流出量と河川流量の差の2乗の合計が最小になるように, タンクモデルの基底流出に関わるパラメータである基底流出率 (bf) を調節した。次に, 各月のモデル流出量と河川流量の差の2乗の年合計を評価値として, それが最小になるよう最適化し, 融雪係数 (k_m), 第1容量 ($Stg1$), 第2容量 ($Stg2$), 中間流出率 (if) を決定した。

IV. 流域水収支モデル実行結果

上記の方法に従って流域水収支モデルの探索プログラムを実行した。その結果, パラメータの最適値は Table 1 のようになった。このパラメータを用いた流域水収支モデルによる各月の流出量を Fig. 4 に示す。流出量の季節変化をシミュレート

Table 1 Optimized parameters, applied to the grid tank model.

Threshold temperature (°C)	Degree month factor for snowmelt (mm/°C・month)	Depth of tank for surface runoff (mm)	Height of interflow outlet (mm)	Runoff ratio of interflow	Runoff ratio of baseflow
1.5	190	513	219	0.78	0.43

Fig. 4 Comparison between simulation and observation.

することができたといえるが、細かくみると実測河川流量との差も生じている。その差は、年間を通して実測の河川流量の方が多いという傾向である。樫根・竹内（1971）は、山地の降水量観測の不十分さを指摘している。観測値として捕捉されなかった分は、流域水収支でしか検討できない。野上（1990）は、積雪地域で気候値メッシュデータによる計算値よりも実測の河川流量が多くなる傾向について、気象庁の観測システムでは降雪としての降水量の捕捉率が低いためではないかと予想している。本研究ではさらに、年実測河川流量と年モデル流出量の差のほとんどが、融雪期（3～6月）の河川流量とモデル流出量の差であることから、積雪（降雪）の捕捉率が低いことを追証できた。流出成分の季節変化については、4月、5

月に融雪による表面流出と中間流出がみられ、その他の月の主な流出は基底流出であった。対象流域内の降水形態の季節変化を Fig. 5 に示す。降雪期間は10月から4月までであり、その内流域内で降雨と降雪の両方がみられるのは、3月、4月、11月である。8月には降雨量が最も多くなるが、表面流出は僅かで、供給された降水量が蒸発散量として消費されている（Table 2）。

次に、対象流域内の貯留量と積雪量を Fig. 6 に示す。11月に積雪がみられ、積雪がみられなくなるのは5月である。貯留量は、融雪期に増加し、7月には減少するが10月までに再び増加する。これは、実蒸発散量の減少によって貯留量の消費が抑えられるためと考えられる。

この流域水収支モデルは実蒸発散量や表面流出

Table 2 Monthly water balance of the Sorachi river basin.

	Runoff (mm)				Storage to the next month (mm)	Actual evapotranspiration (mm)	Rainfall + snowmelt (mm)
	Total	Surface	Interflow	Baseflow			
Jan	24	0	0	24	33	0	0
Feb	14	0	0	14	19	0	0
Mar	8	0	0	8	11	0	0
Apr	212	6	107	99	133	11	344
May	156	23	41	92	123	31	177
Jun	70	1	1	68	91	32	69
Jul	64	0	0	64	86	43	103
Aug	89	0	6	83	111	59	174
Sep	98	0	9	89	119	43	148
Oct	113	0	20	93	124	20	138
Nov	79	0	5	73	98	1	22
Dec	42	0	0	42	57	0	0

Fig. 5 Intra – annual variation of snowfall and rainfall in the Sorachi river basin.

Fig. 6 Intra – annual variation of snow accumulation and water storage in the Sorachi river basin.

量など各水収支成分の分布を出力することができるが、本研究では流出量と積雪量の分布を図化した。まず、流出量については、11月以降は流域内の低地である谷沿いで主な流出が起こっている。また、融雪流出量については、4月では山地の標高の高い地域では融雪が発生していないため流出量がほとんど0に近い値になっていることがわかる。5月、6月になると融雪流出量の多い地域は、標高の高い地域へと移動するのが確認される (Fig. 7)。次に、積雪量については、11月より、標高の高い地域より積雪が始まり、12月には流域内全域で積雪がみられるようになる。4月には標高の低い地域では積雪は消えるが、標高の高い山地で積雪は増加していることが明らかになった (Fig. 8)。

V. まとめ

本研究では、流域内のグリッドにタンクを分散配置させるモデルを用いて、流域水収支を再現した。また、パラメータは自動化した自作プログラムで河川流量との検証によって最適化した。その結果、河川流量の季節変化をシミュレートすることができた。すなわち、グリッドごとにタンクモデルを設置する分散型モデルの構築は成功したといえる。また、パラメータは、河川流量によって最適化されたものであるが、地形・気候条件が大きく異なる限り、実測河川流量データのない他の流域にも適応できるであろう。

モデル流出量よりも河川流量の方が多い傾向にあり、特に融雪期（3～6月）の河川流量とモデ

Fig. 7 Monthly runoff (mm) in the Sorachi river basin.

Fig. 7 (continued)

Fig. 8 Monthly snow accumulation (mm) in the Sorachi river basin.

Fig. 8 (continued)

ル流出量の差が大きいことから積雪（降雪）の捕捉率が低いと推測される。

また、水収支成分毎のラスタ型データを作成した。その結果、流域内の流出と積雪の分布について季節変化を視覚的にとらえることができた。

謝 辞

ご指導いただいている日本大学大学院理工学研究科の野上道男先生に心より感謝いたします。また、同大学院理工学研究科の先生方から有益なご助言を頂きました。この場を借りて厚く御礼申し上げます。

なお本稿は2006年7月3～7日に開催された国際地理学会議（ブリスベン地域大会）にて発表した一部を修正・加筆したものである。

文 献

- 市川正巳（1978）：『日本の水収支』、古今書院、1-7。
- 小川真由美・野上道男（1994）：冬季の降水形態の判別と降水量の分離。水文・水資源学会誌, **7**(1), 421-427.
- 榎根 勇・竹内 浩（1971）：本邦における河川の年流出率について。地理学評論, **45**(5), 347-355.
- 小島賢治・山本秀明・山田芳則（1983）：気温等単純な気象要素による融雪予測について。低温科学物理篇, **42**, 101-110.
- 近藤純正・本谷 研・松島 大（1995）：新バケツ

モデルを用いた流域の土壤水分量、流出量、積雪水当量、及び河川水温の研究。天気, **42**(12), 11-21.

菅原正巳（1972）：『流出解析法』。共立出版、257.

菅原正巳（1985）：タンク・モデルー河川の流量を雨量から算出する一つのモデルについて。地学雑誌, **94**(4), 209-221.

沼尻治樹（2006）：月平均気温を用いた可能蒸発散量の推定法。日本水文科学会誌, **36**(2), 71-79.

野上道男（1990）：暖かさの指数と流域蒸発散量－気候値メッシュデータによる解析－。地学雑誌, **99**(6), 682-694.

Ohmura, A. (2001) : Physical Basis for the Temperature-Based Melt-Index Method. Journal of Applied Meteorology, **40**(4), 753-761.

Bras, R. L. (1990) : Hydrology An introduction to Hydrologic science. Addison-Wesley, 228-229.

資 料

建設省河川局 編（1971-1998）：流量年表。昭和46年－平成10年版（28冊）。

国土交通省河川局 編（1999-2000）：流量年表。平成11年－平成12年版（2冊）。

（受付：2007年2月8日）

（受理：2007年6月26日）

この論文に対する「討論」を2008年8月31日まで受け付けます。