

石狩川全流域を対象とした水循環の定量化

Quantitative analysis of hydrologic process for the entire Ishikari river catchment area

(財) 日本気象協会 北海道支社 ○正会員 臼谷 友秀 (Tomohide Usutani)
 (独) 北海道開発土木研究所 環境研究室 正会員 中津川 誠 (Makoto Nakatsugawa)
 (株) ドーコン 河川部 正会員 工藤 啓介 (Keisuke Kudo)

1. はじめに

地球温暖化、集中豪雨の頻発など、今後、さらに気象条件が厳しくなることが予想されている。このような中で、流域の水管理や水環境計画を考えるには、水文諸量を定量的に把握した上で、気象条件等の変化に伴う水循環の動特性を評価することが必要である。また、積雪寒冷地の水循環は雪の影響を受けることから、水文諸量を定量化する手法は、雪氷現象を踏まえたものであることが必要となる。

これまで、融雪モデルの開発や検証が報告されているが(陸ら¹⁾、中山²⁾)、長期的に水循環を考える場合には、水収支の面からの検証が重要と考えられる。

そこで本研究では、石狩川(流域面積 14,327km²)を対象に、蒸発散量・積雪量などの水文諸量を、雪氷現象を踏まえ、広域的に推定した。さらに、推定値と実測値の比較に加え、水収支の検証を行い、推定した値が妥当であることを確認した。

2. 対象流域、及び基礎資料

解析対象は、図-1に示す石狩川流域である。石狩川は、大雪山系石狩岳(標高 1,967m)に源を発し、雨竜川、空知川などの主要支川を含む大小約 70 の河川と合流しながら石狩平野を流下し日本海に注ぐ。流路長 268km(全国第3位)、流域面積 14,327km²(全国第2位)で、全国有数の規模を誇る河川である。

解析には、表-1に示す資料を用いる。気象データは、気象官署及びアメダスを基本とし、1998年～2001年の日単位のデータを収集した。地形に関する資料は、主に石狩川流域ランドスケープ情報³⁾を用いた。

3. 水文諸量の定量化手法

大規模流域を対象として水文諸量を定量化する場合、

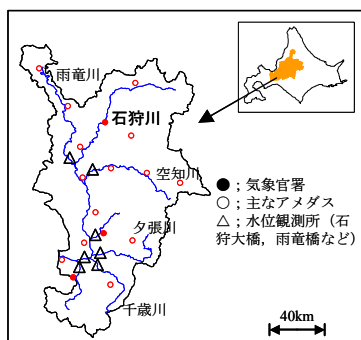


図-1 解析対象流域(石狩川)

空間分布は無視できない。そこで、水文諸量をメッシュ毎に推定し、その積み上げによって流域全体を把握する。また、水文諸量の1つである蒸発散量の推定には、メッシュの地被情報を計算に取り入れ、地被を反映させる。具体的な定量化の手順は、次のとおりである。

- 1) 点在する気象データから約 1km×1km のメッシュデータを作成する。
- 2) 1) で作成したメッシュデータを基に、2層モデルを用いて、各メッシュの蒸発散量、積雪量などを推定する。推定した蒸発散量・積雪量は実測値などと比較する。
- 3) 2) で推定した値を流出モデルの入力として使い、流量を計算する。再現した流量と実績流量を比較する。なお、3) で行う流量の再現は、2) で推定した値が妥当であるかを検証する目的である。

3.1. 気象データのメッシュ化

(1) 気温、日射量、日照時間

気温・日射量・日照時間は、観測値の相関構造をバリオグラムで推定し、Kriging法でメッシュ化する。解析の結果、バリオグラムと距離には直線の関係が見られたことから、表-2に示す線形回帰式をバリオグラムとして採用する。なお、この直線関係は表-2の適用範囲内に限ら

表-1 解析資料

項 目	種別
気象	気温
	気象官署3箇所、アメダス25箇所
	湿度
	気象官署3箇所、ダム管理所6箇所
	日射量
	気象官署3箇所、アメダス25箇所(日照時間からの推定箇所)
	日照時間
地形	気象官署3箇所、アメダス25箇所
	降水量
	気象官署3箇所、アメダス44箇所
	降雪深(積雪深)
	気象官署3箇所、アメダス16箇所
気象	風速
	気象庁RSM、気象官署3箇所、アメダス25箇所
	標高
	地 被
地形	石狩川ランドスケープ情報(1kmメッシュ)
	メッシュ間の流入・流出関係
地形	傾斜
	国土数値情報(250mメッシュ)

表-2 バリオグラムの回帰式

要素	バリオグラムの回帰式	適用範囲
気温	$\gamma(d) = 0.0228d + 0.4045$	$d \leq 100\text{km}$
日射量	$\gamma(d) = 6.3049d + 157.52$	$d \leq 70\text{km}$
日照時間	$\gamma(d) = 0.0289d + 0.8621$	$d \leq 70\text{km}$

※ $\gamma(d)$; バリオグラム, d ; 距離 (km)

れている。すなわち、気温は2地点間の距離が100kmまで、日射量・日照時間は70kmまでである。そこで、メッシュ化に際しては、適用範囲内にある観測所のデータのみを用いる。なお、気温は、観測値を気温減率（0.51℃/100m）で標高0mの値に補正した後Kriging法で補間し、再度標高に応じた値に戻す。気温減率は、標高と気温の回帰分析により求めた。

(2) 降水量、降雪深

Kriging法を用いて降水量・降雪深をメッシュ化すると、標高が高い領域の値が過少評価されることが分かった。そこで、降水量と降雪深については、次の手順で処理し、標高の影響を考慮した。

- 1) 各観測所の降水量（または降雪深）を目的変数、緯度・経度・標高を説明変数として回帰式を作る。
- 2) 各観測所の降水量を、1)で作成した回帰式で計算し、計算値と実測値の差を求める。この差を、次式で距離を重みとしてメッシュ化する（残差メッシュ値）。

$$z(X_0) = \left\{ \sum_{i=1}^N z(X_i)/d_i \right\} / \left\{ \sum_{i=1}^N 1/d_i \right\} \quad (1)$$

ここで、 $z(X_0)$ は推定するメッシュの値、 $z(X_i)$ は、地点 X_i の観測値、 d_i は地点とメッシュ間の距離を表す。

- 3) 1)で作成した回帰式を用いて、各メッシュの緯度・経度・標高から降水量を推定する（回帰メッシュ値）。
- 4) 2)で求めた残差メッシュ値と、3)で求めた回帰メッシュ値を加え、その値を当該メッシュの値とする。
- 5) これらの処理を対象となる期間だけ繰り返す。

(3) 湿度、風速

湿度は、距離とバリオグラムに明瞭な関係が見られなかったことから、距離を重みとする式(1)でメッシュ化した。また、風速は、Kriging法でメッシュ化した場合、分布が過剰に平滑化され、現実的ではないと考えられた。そこで風速は、気象庁RSMとアメダスを基に、マスコン法⁴⁾で作成した1kmメッシュの値を用いる。

3.2. 水文諸量の推定方法⁵⁾

より高い精度で熱フラックスを推定するため、土壌もしくは積雪面（以下、地表面と呼ぶ）の熱収支、及び植被層の熱収支を近藤ら⁶⁾によって提案された2層モデルに基づき、次式のように定式化した。

$$f_v R \downarrow + (1 - f_v) \sigma T_v^4 - Q_G + Q_R = \varepsilon \sigma T_g^4 + H_g + I E_g \quad (2)$$

$$(1 - f_v) (R \downarrow + \varepsilon \sigma T_g^4) = 2(1 - f_v) \sigma T_v^4 + H_v + I(E_v + I) \quad (3)$$

ここで、式(2)は地表面、式(3)は植被層の熱収支式である。また、 f_v は放射に対する植被層の透過率、 $R \downarrow$ は下向きの正味放射量（W/m²）、 Q_G は地表面に供給される熱フラックス（W/m²）、 Q_R は降雨によって供給される熱フラックス（W/m²）、 H_g および H_v は地表面および植被層からの顕熱フラックス（W/m²）、 $I E_g$ および $I E_v$ は地表面および植被層からの潜熱フラックス（W/m²）、 I は植被層からの遮断蒸発に伴う潜熱フラックス（W/m²）、 T_g お

表-3 用いるバルク係数、及び蒸発効率

地被	植被層		地表面	
	バルク係数	蒸発効率	バルク係数	蒸発効率
森林	0.005	0.10	0.001 (0.002)	0.10 (1.00)
畑・牧草地・水田	0.001	0.20		
水面	0.0001	0.001	0.0013 (0.002)	1.00 (1.00)
市街地・裸地	0.0001	0.001	0.0015 (0.002)	0.10 (1.00)

※ ()内は、積雪時の設定値

よび T_v は地表面および植被層の代表温度（K）、 ε は射出率（土壌面=1.00、積雪面=0.97）、 σ はStefan-Boltzmann定数（ $=5.67 \times 10^{-8} \text{W/m}^2/\text{K}^4$ ）である。

以上により、各層の代表温度 T_g および T_v を求め、顕熱フラックスは次に示す式(4)、潜熱フラックスは式(5)で求める。

$$\begin{aligned} H_g &= C_p \rho C_{Hg} U (T_g - T) \\ H_v &= C_p \rho C_{Hv} U (T_v - T) \end{aligned} \quad (4)$$

$$\begin{aligned} I E_g &= l \rho \beta_g C_{Hg} U \left\{ e_{SAT}(T_g) - e \right\} \frac{0.622}{p} \\ I E_v &= l \rho \beta_v C_{Hv} U \left\{ e_{SAT}(T_v) - e \right\} \frac{0.622}{p} \end{aligned} \quad (5)$$

ここで、 U は代表高度での風速（m/s）、 T は代表高度での気温（℃）、 C_p は空気定圧比熱（ $=1,004 \text{J/Kg/K}$ ）、 ρ は空気密度（Kg/m³）、 C_{Hg} 、 C_{Hv} は地表面～大気間および植被層～大気間のバルク輸送係数、 l は蒸発潜熱（ $=2.50 \times 10^6 \text{J/Kg}$ ）、 ρ は空気密度（Kg/m³）、 β_g と β_v は地表面および植被層の蒸発効率、 e と e_{SAT} は代表高度での水蒸気圧（hPa）および飽和水蒸気圧（hPa）、 p は大気圧（hPa）を表す。

バルク輸送係数と蒸発効率は、収集したランドスケープ情報の地被に基づき、メッシュ毎に値を設定する。これにより、地被に応じた蒸発散量が推定できる。各地被のバルク輸送係数と蒸発効率は、文献値^{6), 7)}を参考にしつつ、流域全体の水収支が合うように試行錯誤を行い、表-3のように決めた。

積雪深・融雪量の算定は以下の方で行った⁵⁾。融雪量の算定は、式(2)、(3)より得られた T_g を積雪温度（仮値） T_s とする。 $T_s \leq 0^\circ\text{C}$ のときは積雪表面融雪が起きないとし積雪温度 $T_s = T_g$ とする。このとき底面融雪量1mm/dを別途与える。 $T_s > 0$ のとき $T_g = T_s = 0^\circ\text{C}$ とする。このときの植被層温度は式(3)で与える。式(2)より積雪供給熱量 Q_G を求め、それに相当する融雪量を算出する。この際、底面融雪量1mm/dに相当する融解潜熱3.86W/m²を別途与える。積雪水量にあたっては時刻 t の積雪水量を次のように定式化する。

$$S_w(t) = S_w(t-1) - \{m(t) + e(t)\} + (\rho_{sf}/\rho_w) S_f(t) \quad (6)$$

また、積雪深、積雪密度は下式から求める。

$$S_d(t) = \left[S_d(t-1) - \{m(t) + e(t)\} \frac{\rho_w}{\rho_s(t-1)} + S_f(t) \frac{\rho_{sf}}{\rho_s(t-1)} \right] \eta_s \quad (7)$$

$$\rho_s(t) = \{S_w(t)/S_d(t)\} \rho_w \quad (8)$$

ここで、 S_w は積雪水量 (mm)、 S_d は積雪深 (mm)、 S_f は降雪深 (mm)、 m は融雪量 (mm)、 e は蒸発散量 (mm)、 ρ_w は水の密度 (=1,000kg/m³)、 ρ_s は積雪密度 (kg/m³)、 ρ_{sf} は降雪密度 (kg/m³)、 η_s は全層沈下率である。本解析では降雪密度は160kg/m³、全層沈下率は積雪密度に関係すると考え、最小積雪密度309kg/m³で0.999、最大積雪密度700kg/m³で0.985という値を按分し、積雪密度に応じて与えた。

3.3. 流量の再現方法 (流出モデル)

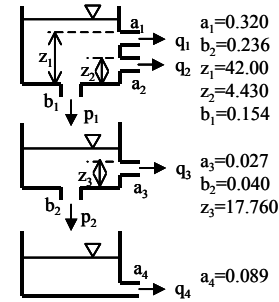


図-2 タンクモデルの構成

流量の再現計算は、入力値となる雨量・融雪量・蒸発散量に対応させ、メッシュ単位で行うこととした。一つのメッシュでは、メッシュ上端の流量を下流端まで河道追跡し、また、メッシュ内で生じる流出量はタンクモデルで計算する。これらの合計を下流側のメッシュに流れている流量とした。なお、再現地点は図-3に示す石狩大橋とする。

タンクモデルのパラメータは、定山溪ダムで同定した値を参考⁵⁾に、石狩大橋の流量が合うように修正したものを用いる。流域内の全てのメッシュとも同じ値とした(図-2)。河道追跡には、kinematic wave式を変形した次の式を用いる⁸⁾。

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{5}{3} \frac{i^{0.3} Q^{0.4}}{n^{0.6} B^{0.4}} \frac{\partial Q}{\partial x} = 0 \quad (9)$$

ここで、 Q は流量 (m³/s)、 i は勾配、 n は粗度係数、 B は川幅 (m)を表す。

勾配 i は、ランドスケープ情報から計算対象メッシュとその流下側メッシュの最低標高を抽出し標高差から決定する。粗度係数 n は0.05とし、川幅 B (m)は、山口ら⁹⁾の報告を参考に、流域面積 A (km²)から次のよう

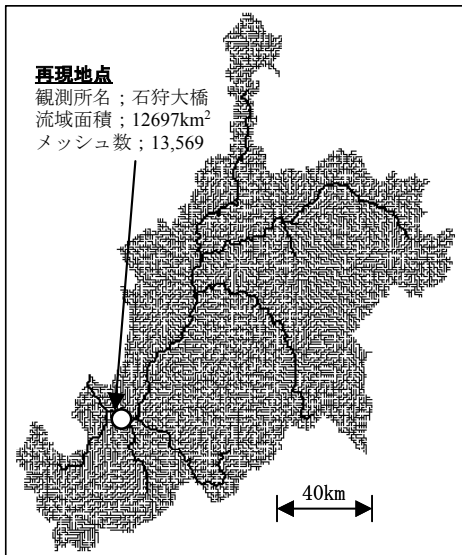


図-3 再現地点と石狩川流域の河道網図

に求める。

$$B = 3.476 A^{0.435} \quad (10)$$

4. 推定結果の検証

4.1. 流域水収支

2層モデルと水収支法で求めた蒸発散量を、流域単位で比較した。表-4は、石狩大橋と、石狩川の主な支川における流域水収支の結果である。値は4ヵ年(1998年～2001年)の平均値である。2層モデルによる蒸発散量は水収支法による値に比べやや多いものの、差は60mm/yr程度であり、良好に推定できることが分かった。

また、千歳川流域の蒸発散量は、2層モデル、水収支法とも400mm/yr程度となっている。流域に占める森林の割合(表-4)は、各流域とも70～80%であるものの、千歳川流域だけ約50%と少なく、この点が千歳川流域の蒸発散量が少ない一つの理由と考えられる。このように、地被を取り入れて推算した結果、実態に即した推定値を得ることができた。

4.2. 積雪深

推定した積雪深を観測値、及び衛星画像と比較する。

図-4は、岩見沢で観測された積雪深と、観測所を含むメッシュの計算積雪深を時系列で示したものである。積雪の開始・終了時期、また、最深積雪深が出現する時期がよく再現されている。また図-5は、計算で求めた積雪

表-4 流域水収支の検証結果

流域	石狩川	雨竜川	空知川	夕張川	千歳川
基準地点	石狩大橋	雨竜橋	赤平	清幌橋	裏の沢
流域面積[km ²]	12,697	1,661	2,531	1,116	1,142
平均標高[m]	386	276	504	381	185
森林の占める割合[%]	70	75	81	80	56
平均気温[℃]	4.7	4.9	4.9	5.7	6.7
平均風速[m/s]	2.1	2.1	2.0	2.1	2.1
降雨量[mm/yr]	1,012	992	1,031	1,058	1,000
降雪量[mm/yr]	761	917	702	655	597
流出高[mm/yr]	1,289	1,471	1,278	1,219	1,201
水収支法蒸発散量[mm/yr]	484	438	455	494	396
2層モデルによる蒸発散量[mm/yr]	543	501	590	563	392
蒸発散の差[mm/yr]	59	63	135	69	-4

※4ヵ年(1998年～2001年)の平均

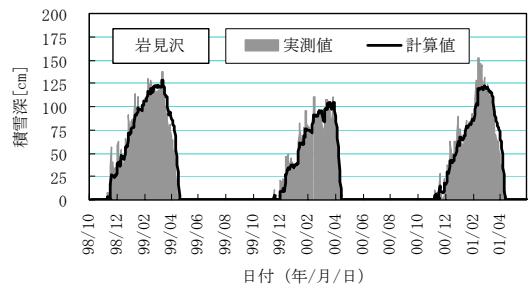


図-4 積雪深の検証結果

深分布と衛星画像（NOAA AVHRR バンド 1）から判断した積雪域を比較したものである。衛星画像の積雪域は白い部分であり、計算値は図中の凡例に従っている。図によれば、計算結果と衛星画像の積雪域が一致しており、また、積雪域の減少パターンもよく再現されている。

4.3. 再現流量

石狩大橋における、再現流量と実績流量との比較図を、図-6 に示す。図によると、4月から6月の融雪に伴う出水、また降雨に伴う流出状況が再現されていることが分かる。前章で示した水文諸量の推定手法が妥当なものであることを裏付けている。しかし、融雪が終了する6月頃の計算流量が実測値に比べやや大きくなる傾向が見られ、今後の検討を要する。

5. まとめ

本研究で得られた結果を以下にまとめる。

- 1) 2 層モデルを用いて、蒸発散量や積雪分布・融雪量をメッシュ単位で推定した。推定値を水収支の面か

ら検証した結果、妥当な値であることが分かった。

- 2) 水文諸量を推定する際に地被を考慮した結果、実態に即した蒸発散量を得ることができた。
- 3) 推算した水文諸量から流量を計算した結果、長期的傾向な流出状況が再現でき、推定手法の妥当性を裏付ける結果が得られた。

これらの結果から、本論文で示した水文諸量の推定方法は、積雪流域の降水・融雪・蒸発散量を定量化する有効な手法と考えられる。今後は、流域全体を対象として、流出量の把握、更には物質循環の定量化を目指す。

謝辞：本研究の一部は、北海道開発局受託研究費によって実施したものである。ここに記して謝意を表す。

参考文献

- 1) 陸旻皎，小池俊雄，早川典生：アメダスデータと数値地理情報を用いた分布型融雪解析システムの開発：水工学論文集 第 42 巻，pp.121-126，1998。
- 2) 中山恵介，伊藤哲，藤田睦博，斎藤大作：融雪を考慮した山地流出モデルに関する研究：土木学会論文集 No.691/II-57,pp25-41，2001。
- 3) 財団法人 北海道河川防災研究センター：石狩川流域ランドスケープ情報，1998。
- 4) 横山長之編：大気環境シミュレーション，白亜書房，1992。
- 5) 中津川誠，濱原能成，星清：積雪変化を考慮した長期流出計算，第 47 回水理講演会論文集，pp.157-162,2003。
- 6) 近藤純正編著：水環境の気象学，朝倉書店，1994。
- 7) 口澤寿，中津川誠：熱・水収支を考慮した流域スケールの積雪と蒸発散の推定，北海道開発土木研究所月報，588，pp.19-38，2002。
- 8) 品川守，山田正，豊田康嗣：洪水ハイドログラフ形成過程と治水対策の効果に関する研究，水文・水資源学会第 5 巻 3 号，1992。
- 9) 山口甲，新庄興，三田村一弘，上野順也：豊平川の生産土砂について：土木学会北海道支部 論文報告集 第 55 号(B)，pp.268-271，1998。

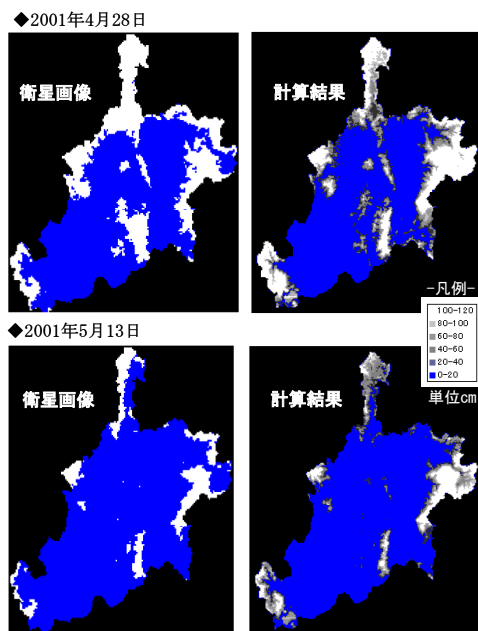


図-5 積雪分布の検証結果

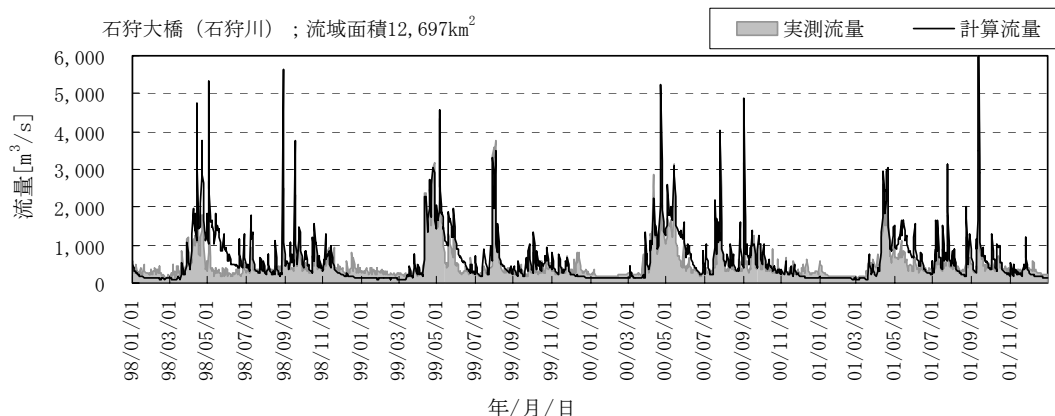


図-6 流出計算の結果