

(II-2) 永久凍土帯における熱・水フローを考慮した水文モデルの適用

長岡技術科学大学大学院 石平 博
長岡技術科学大学 小池俊雄
長岡技術科学大学 陸 旻皎

1. はじめに

チベット高原やシベリアに広がる凍土は、土壤水分の季節的なコントロールや年々変動を駆動するメモリーとしての機能の面から、モンスーン変動へ与える影響の重要性が指摘されている。また、このような気候との関わりだけでなく、季節的な活動層（凍土が融解した層）の発達により流出特性が大きく変化することも知られている。本検討ではこのような永久凍土帯における水やエネルギーの輸送を表現可能な一次元凍土モデルの開発する。また、一次元モデルの分布型流出モデルへの導入ならびにこれを用いた凍土帯での流出解析についても検討する。

2. 一次元凍土モデルの概要

土層中での熱伝導については、熱伝導方程式

$$\frac{\partial(CT)}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial z} \right) \quad (1)$$

を差分化（鉛直格子点間隔 10cm）し、上端：地表面温度、下端：年間恒温深さの温度を境界条件として解くことにより、地温の鉛直プロファイルを計算する。なお、地表面温度については気象要素から熱収支要素を推定して地表面熱収支が成り立つように決定し、年間恒温深さは 6m とした。ここで、熱伝導率 λ は、体積含水率 θ の関数として与え（福田ほか(1982)）、熱容量 C は凍土（未凍土）を構成する土、氷（水）の熱容量と体積比より計算する。また、凍土融解面では潜熱の効果を含んだ見掛けの熱容量を使用する（福田ほか(1980)）。一方、土層中の水の移動については、全層（0~6 m）を 5 つの層（第 1 層：0~0.1m、第 2 層：0.1~0.4m、第 3 層：0.4~1.0m、第 4 層：1.0~2.0 m、第 5 層：2.0~6.0m）に分割し計算を行う。なお、各層の水収支は以下のように表される。

$$\Delta S_i = I_{i-1} - I_i - Q_i + M_i \quad (2)$$

$$I_i = \bar{K} \left[2 \frac{\psi_i - \psi_{i+1}}{d_i + d_{i+1}} + 1 \right] \Delta t \quad (3)$$

$$\bar{K} = \min(K_i, K_{i+1}) \quad (4)$$

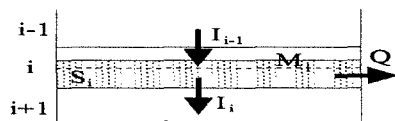


Fig. 1: 土層の水収支

$$Q_i = (A_u S_i)^2 \quad (5)$$

ΔS : 貯留量 S の変化, I : 浸透量, Q : 地下水流出量, M : 水の相変化量, K : 不飽和透水係数, ψ : 吸引力ポテンシャル d : 層厚, Δt : time step, A_u : 不圧減水定数であり、添字 i は層の位置 (i 番目) を表す。また、 K, ψ は体積含水率 θ の関数として以下のように与える (Clapp and Hornberger (1978))。

$$K = K_s (\theta/\theta_s)^{2B+3} \quad \psi = \psi_s (\theta/\theta_s)^{-B} \quad (6)$$

以上のようにモデル化した熱と水の輸送過程を Fig.2 のように組み合わせることにより、土層中における熱・水輸送を計算する。

3. 一次元モデルの検証

長江最源流部のチベット高原タングラ・ヤンシービン流域において 1991~93 年に行われた CREQ project 期間に設置された気象観測地点である D105, WL に対してモデルを適用し、その検証を行った。なお、対象期間は 1993 5/21~7/31 の約 2 ヶ月間である。Fig.3 上は、D105 地点における深さ 10, 40, 80cm の地温について計算値と実測値とを比較したものである。計算後期に深い部分（深さ 80cm）で温度が系統的に低く計算されているなどの問題点もあるが、全体的には良く温度状態を再現できていると言える。また、Fig.3 下は D105 地点におけるモデル第 1, 2 層の土壤含水率の計算値と実測値の比較であり、含水率についてもほぼ妥当な値を示している。以上の結果より、本モデルは凍土中における熱・水移動を比較的良く再現できているこ

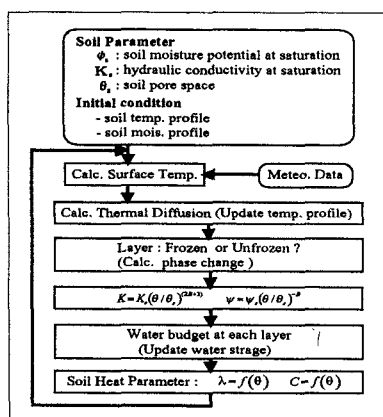


Fig. 2: 計算フロー

とが示された。

4. 一次元モデルの分布型流出モデルへの導入

一次元凍土モデルを陸ら (1989) の分布型流出モデルへ導入し、凍土の効果を考慮した流出モデルの開発ならびに永久凍土帯での流出過程の検討を行う。このモデルでは、まず流域を細かなグリッドセルに分割し各グリッドから発生する流出成分を擬河道と呼ばれる集積経路を介して追跡計算するモデルであり、各メッシュから発生する流出成分の計算に一次元凍土モデルを用いることにより、凍土の影響を考慮した流出過程の検討を行う。対象流域は前述のチベット高原、タングラ・ヤンシーピン流域であり、当該流域の擬河道網は GLOBE(標高データ、30"grid) および DCW の河道データより作成した。この擬河道網を用い、分布型流出モデルにより流量を計算した例を Fig.4 に示す。降水の空間分布考慮していないことやその観測精度、氷河からの流出の効果をとり込んでいないことなどの問題により、計算値と実測値とは必ずしも一致しているとは言えないが、基底流出や減速部などは比較的よく表現されており、流出に与える凍土の影響 (凍土からの地下水流出) を再現できていると考えられる。

5. まとめ

- 1) 永久凍土を対象した一次元の熱・水輸送モデルの開発を行った。
- 2) 開発したモデルをチベット高原上の永久凍土帯に適用し、その有用性の検証を行った。
- 3) 一次元モデルの分布型モデルへの導入およびこれを用いた流出解析について検討を行った。

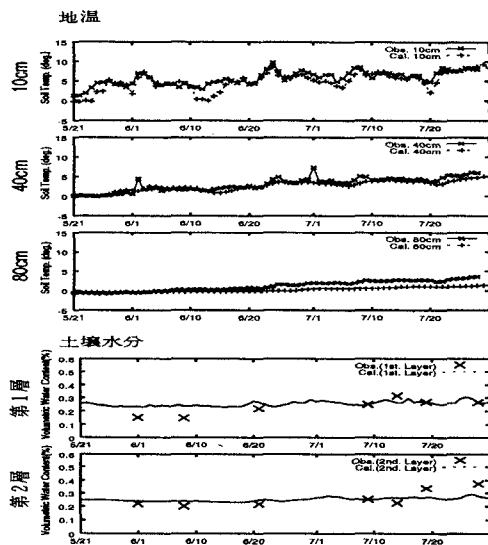


Fig. 3: 地温・含水率の推定結果 (D105 地点)

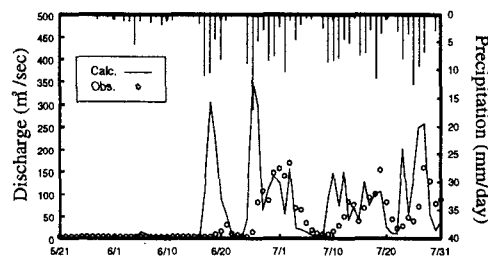


Fig. 4: 流出計算の結果 (日単位流量)

謝辞

本研究は、文部省国際共同研究等経費「チベット高原域のエネルギー・水循環過程の研究」のもとに実施されている。また、本研究の解析に用いたデータの取得は「チベット高原の雪氷圏と水循環」の一環として行われた。記して謝意を表する。

参考文献

- [1] 福田正己, 木下誠一, 中川茂: 熱と水の結合した流れモデルによる野外凍上の予測, 低温科学物理篇, pp.83-97., 1982.
- [2] 福田正己, 石崎武志: 平衡値表面温度による土壤凍結深推定モデル, 雪氷 42 巻 2 号, pp.71-80., 1980.
- [3] Clapp, R.G, G. M, Hornberger., : Empirical Equations for some soil hydraulic properties, Water Resour. Res. 14., pp.601 - 604. 1978.
- [4] 陸旻皎, 小池俊雄, 早川典生: 分布型水文情報に対応する分布型流出モデルの開発, 土木学会論文集, 411/II 12, pp.135-142., 1989.