

陸面モデルを用いた積雪量、土壌水分、凍結土壌水分の再現性

Reproducibility of snow, soil moisture and frozen soil moisture in a Land Surface Model

北海道大学 工学部環境社会工学科シビルエンジニアリングコース ○ 学生員 中山裕太 (Yuta NAKAYAMA)

北海道大学 工学研究科環境フィールド工学専攻 准教授 正会員 山田朋人 (Tomohito YAMADA)

1. はじめに

春季の融雪出水量を予測することは、利水と治水の両面において重要であり、この予測精度が上がれば、確保できる飲料水、灌漑用水の量、水力発電で得られるエネルギー量等を正確に把握ができるようになる。また合理的な貯水池管理や、洪水の制御を行うことが可能となる。

現在我が国では AMEDAS 観測データ、国土交通省の水文水質データベース等、水文・気象観測データが充実してきている。そのため、以前より高い時間分解能・空間分解能を持つデータが入手可能となっている、また入手可能なデータの種類も増加している。これらを用いて土層、雪層での熱・水収支の詳細を調査すれば、融雪出水予測の精度向上に繋げることができるのではないだろうか。

本研究では、これらの増加したデータを予測に役立てるため土層、雪層でのより詳細な熱・水収支の過程を取り入れた陸面過程モデル Minimal Advanced Treatments of Surface Interaction and RunOff(以降 MATSIRO Development of the minimal advance treatments of surface interaction and runoff (Kumiko Takata, et al. 2003))を用いた融雪出水予測実験を行う。元来 MATSIRO は気候予測に用いる大気大循環モデル(GCM)で大気との相互作用を再現するための陸の受け皿の役割を担うものである。

MATSIRO の広域スケールが日本の流域スケールの現象をどの程度再現できるかは未知であるが、このモデルを用いて水文予報に役立つ成果を挙げることを本研究の目的とする。

1988 年の北米大干ばつ予報に土壌水分を初期情報として用いることで予報スキルが向上されることが実証されている。(Yamada, submitted to JSCE(accepted))。これを受けて、本研究では融雪出水予報に土壌水分を初期情報として用いることで、予報の精度を向上に繋がるかどうかを検証する。また、本研究の対象地域である北海道のほぼ全域で、非積雪状態の冬期に地盤の凍結が観測されている。(Seiiti KINOSITA et al.(1978)。木下らは凍結深観測器を北海道全域に多数設置し、積雪のない条件での地盤凍結深分布図を作製している。この観測結果を図1に示す。しかし、積雪状態の観測をから作製された最大積雪深分布図 (Ishikawa, M Suzuki, T 1964)) では、北海道の一部でのみ地盤の凍結は観測されている。観測結果を図2に示す。図2の分布図によると、自然積雪状態において、天塩川・石狩川流域では土壌の凍結は存在しないことが示されている。つまり、天塩川・石狩川流域で

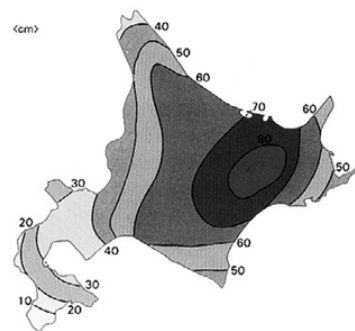


図1 1974-1975 冬期非積雪状態における地盤凍結最大深の分布 (cm) (木下ら 1978)



図2 1964-1965 冬期自然積雪下における地盤最大凍結深分布 (cm) (石川ら 1964)

は積雪時期には凍結土壌水分は存在しないため、融雪流出予測に凍結土壌水分量は考慮する必要はないということになる。非積雪時の分布 (図1) に示した凍結土壌は、融雪時期までに全て融解してしまっているのだろうか。それを確かめるため、本実験ではモデルにより凍結土壌水分量を計算し、天塩川・石狩川流域において凍結土壌水分を考慮する必要があるのかどうかを明らかにしたい。また図2から北海道東部では土壌水分に加えて凍結土壌水分も考慮する必要があると考えられるため、本実験では土壌水分量に加え凍結土壌水分量も考慮する。当然、積雪量も考慮する。土壌水分量、凍結土壌水分量、積雪量の大小により、融雪水の流出過程に変化が生じ、融雪出水のピーク量、ピーク時期、ピークの立ち上がりと低減に影響を与えられられるため、これらの量を流出の初期情報として用いることで、融雪出水予報の精度向上に役立つのではないだろうか。その可否を明らかにす

るのが本実験の主な目的である。

2. モデルの概要

MATSIRO が表現する過程を次に列挙する

- ・気孔の開閉による蒸散の制御
 - ・植生群落内の放射過程と大気の大運動による熱・水輸送
 - ・植生による降水の遮断とその蒸発
 - ・植生上・地面上の積雪と融雪、特に積雪内の熱伝導と融雪水の再凍結、雪の変質による日射反射率の変化
 - ・斜面の勾配を考慮した地表流出と地中流出
 - ・土壌中の熱・水輸送、土壌水分の相変化（凍土過程）
- 以上、MATSIRO が表現する内容である。概念図を図3に示す。図3について、使用している変数と共に示す。右半分が積雪地帯、左半分が非積雪地帯を表す。林冠は一層で表現し、葉の垂直分布は均質とする。葉から矢印

が二つ出ているが、 W_c から出ているのが蒸発、でありもう一方は蒸散を示している。雪の層数は1~3の値を取る変数でその層数は雪の水当量によって決定される。この際、雪の密度はある一定値を仮定する。土の層は上から順に5cm、20cm、70cm、100cm、200cmと区切っている。流出は全ての層から起こるが、主なものは最下層から流れ出るものと表面流出になるため、この図では簡単のためその二つのみ記している。 T_c とは林冠の温度のことで上付きで sn となっている方は積雪状態での林冠の温度を表す。 W_c は林冠の水分量、 T_s は地表面の温度を表し、上付きで sn となっている方は林冠と同様に積雪状態での地表面の温度を示す。 T_{sn} は雪層の温度を表し、その横の数字が第何層目のものかを示している。 T_g は土壌の温度、 θ は土壌水分量、 θ_i は凍結土壌水分量を表し、横の数字は第何層目のものかを示している。

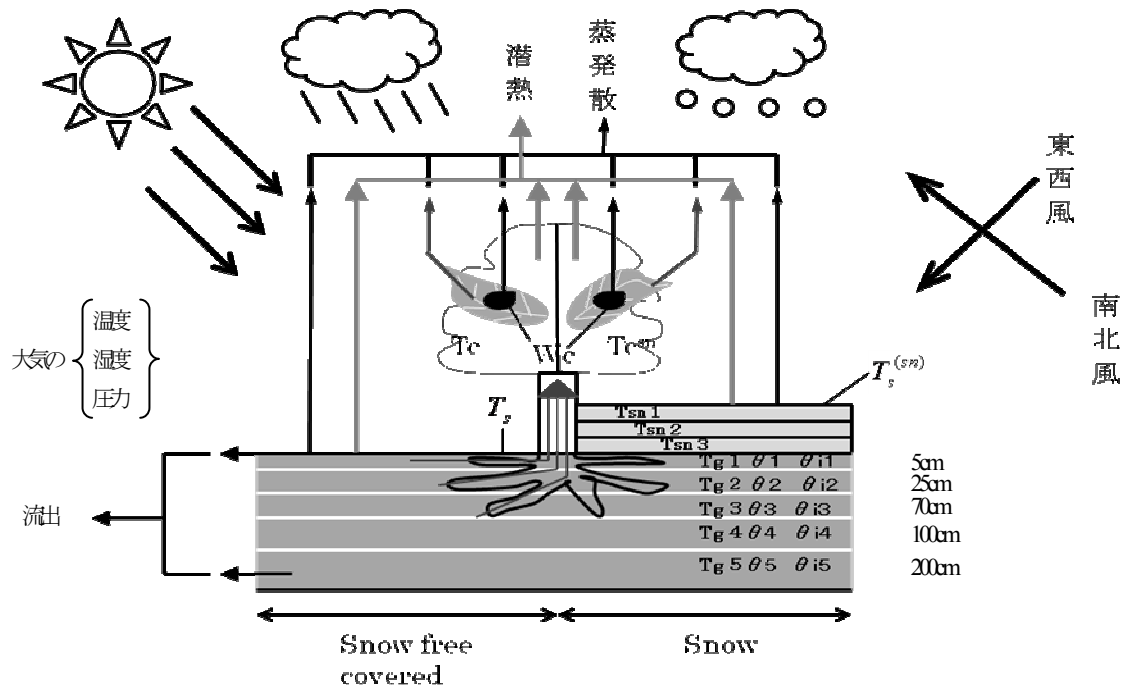


図3 MATSIROの概念図

大気温度・湿度・圧力、日射、雨、雪、東西風速、南北風速はインプットデータである。これをモデルに与えると、地形の地図情報に基づいて、地表面、林冠での熱のフラックス、地表面の温度、林冠の温度、林冠の水分量蒸発散、地表面からの蒸発、潜熱、雪層の温度、雪のアルベド、雪の水当量、土層の温度、土壌水分、凍結土壌水分、地中流出量、地表流出量等が算出される。

$$\frac{dS_n}{dt} = P_{sn}^* - E_s^{(sn)} - M_{sn} + F_R \quad (1)$$

$$c_i \frac{dT_{sn}}{dt} = \frac{\partial}{\partial z} k_{sn} \frac{\partial T_{sn}}{\partial z} \quad (2)$$

$$C_g \frac{\partial T_g}{\partial t} = \frac{\partial F_g}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial z} k_g \frac{\partial T_g}{\partial z} \quad (3)$$

$$\frac{\partial \theta_w}{\partial t} = \frac{\partial F_w}{\partial z} + S_w \quad (4)$$

$$\Delta \theta_i = C_g (T_{mli} - T_g) / \rho_w l_{mli} \quad (5)$$

MATSIRO における、雪と土の物理過程に関して簡単に示す。

雪の水当量はバランス式（式1）から求める。 P_{sn}^* は林冠の遮蔽と林冠からの落下を考慮した降雪、 M_{sn} は融雪量、 F_R は融雪水の再凍結量と雨の凍結量である。

雪の温度 T_{sn} は熱伝導方程式（式2）から求める。 c_i は雪の熱容量、 k_{sn} は雪の熱伝導率である。

土壌の温度 T_g は熱伝導方程式（式3）によって計算される。 F_g は地中伝導熱量、 C_g は土壌の熱容量、 k_g は土壌の熱伝導率である。

土壌水分 θ_w の支配方程式は以下のリチャード方程式

(式4)である。 F_w は土壌水分フラックス、 S_w は根の吸い上げと流出のソース項である。

土壌の凍結は式は熱伝導方程式より求めた土壌の温度が氷点より低く、土壌水分が0より大きいときに計算される、融解の場合は土壌の温度が氷点より高く、凍結土壌水分が0より大きいときに計算される。凍結融解の総量 $\Delta\theta_i$ は熱力学的に(式5)で計算される。 ρ_w は水の密度、 L_{ml} は融解潜熱である。

MATSIRO計算の流れのフローチャートを図4に示す。まず外部のパラメータを決定する、これは植生の量や、地形凹凸の情報などの地図情報である。次に、インプットデータとして風速(=10m)、日射、温度(=2℃)、湿度、大気圧を与える。これらの情報から、地表面と林冠表面での熱の表面フラックス、地表面と、林冠表面の温度が求まる。求めた熱のフラックスと温度に、インプットデータとして雨と雪を与えると、林冠の水量、雪の水当量、雪の温度、雪のアルベド、流出量、土壌からの上向き放射、土壌水分、凍結土壌水分、土壌の温度が求まる。これがMATSIROの大まかな計算の流れである。

3. 実験設定

3. 1 インンブットデータ

インプットデータはAMEDASの観測値を10km²に加重平均したものを用いた。

3. 2 対象期間と地域

MATSIROで計算した結果、土壌水分、凍結土壌水分、積雪量がどのような値を取るのかを調べるため1978年～2004年までを日本全国に渡って計算する、融雪出水の時期を含むよう、計算の対象を2月～6月とした。この計算結果から主に天塩川流域での土壌水分、凍結土壌水分、積雪量の年々変動を調査する。

4. 結果と考察

天塩川の水源地(東経142.5度、北緯44度)では3月から5月の土壌水分は、27年間を通して大きな変化はなく、融雪出水のピーク時には飽和に近い値となっていた。土壌は毎年凍結していたが、その凍結量は年による変動が大きかった。また積雪量も年による変動が大きかったことがわかった。図5～10に積雪量(kg/m²)、土壌水分量(m/m)、凍結土壌水分量(m/m)(土壌水分量、凍結土壌水分量は地表面から5～30cmの層の値である。これらは無次元化されており、最大値は共に0.5である。)の計算結果を1978年～2002年の、3/15～3/25の平均値とその標準偏差、同様に4/20～4/30の平均値と標準偏差を示す。北海道の山間部河川流域において3/15～3/25は融雪の直前期、4/20～4/30は融雪期間中に当たるためこの期間に注目した。土壌水分に着目すると、両期間とも全地域においてほぼ様な値となっており、その標準偏差は最大でも0.022である。図9の方が標準偏差にばらつきが見られる、また一部の地域で土壌水分が現象している。しかし、標準偏差に関しては最大値に対して約4%以内の変化である。土壌水分の値は約0.45～0.5なので、モデルの振る舞いが正しいとすれば、年々変動はほぼ無いと考えてよいだろう。凍結土壌水分は3/15～3/25の北海道

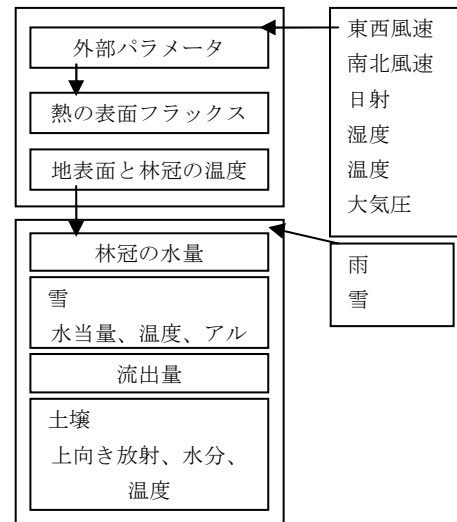


図4 陸面モデル(MATSIRO)における計算の流れ

において、ほぼ全域に存在している(図7)。4/20～4/30(図10)では凍結量は減少するが、やはり北海道ではほぼ全域に凍結土壌水分が存在している。これは図2に示した石川らの結果に反している。また、図1に示した木下らの分布図と図7の凍結のトレンドは一致している。しかし、図10の方は異なる傾向を示している。恐らく山間部等で気温が低くなっている影響ではないかと考えられる。年による変動は土壌水分に比べると両期間共に一桁大きい。最大標準偏差は0.18であり、これは最大値の36%である。つまり、凍結土壌水分には大きな年々変動があるといえる。また、図7では北海道の西部の方が年々変動が激しくなるという傾向が表れている。この変動が融雪出水の立ち上がり、ピーク、低減にどのような影響を与えるのかが大変興味深い。

5. 結果の検証

モデルの計算結果と実現象との整合性確認のために、岩尾内ダムでの積雪量調査で得られた観測値と、本実験で計算した値の東経142.5北緯44度の位置の積雪量の散布図をに示す。積雪のトレンドは一致しているが、計算値が観測値よりも低くなっている。これを改善するため、モデルの改良が必要である。これはインプット比較したデータは山間部の観測ポイントで観測したもの

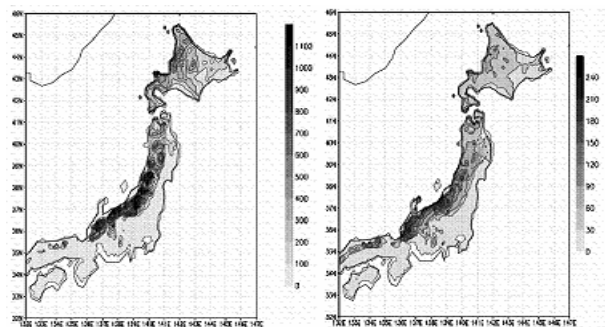


図5 1978年～2002年の3月15日から3月25日平均積雪量(左)とその標準偏差(右)(kg/m²)
0～1100 100間隔 0～240 30間隔

であるため、AMEDAS の観測データとの間にズレがあったのではないだろうか。データの値が地域を代表する値ではないことが原因ではないかと考えられる。

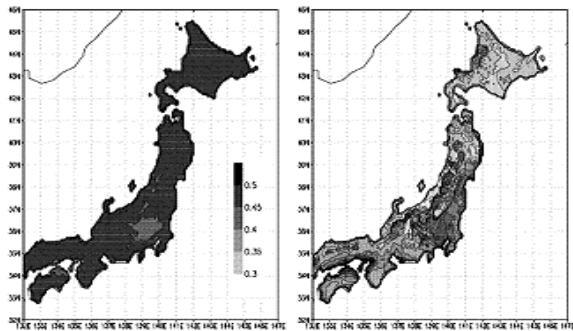


図6 1978年~2002年の3月15日から3月25日
平均土壌水分量(左)とその標準偏差(右) (m/m)
0.3~0.5を0.05間隔 0~0.022を0.002間隔

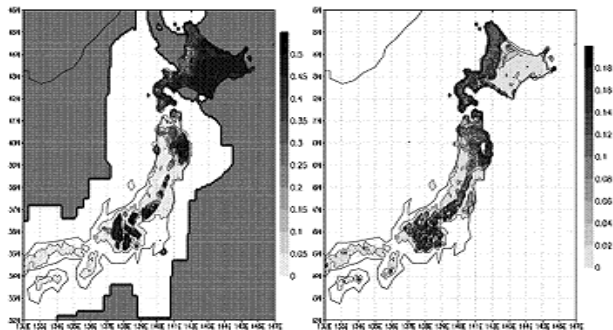


図7 1978年~2002年の3月15日から3月25日
平均凍結土壌水分量(左)とその標準偏差(右) (m/m)
0~0.5 0.05間隔 0~0.18 0.02間隔

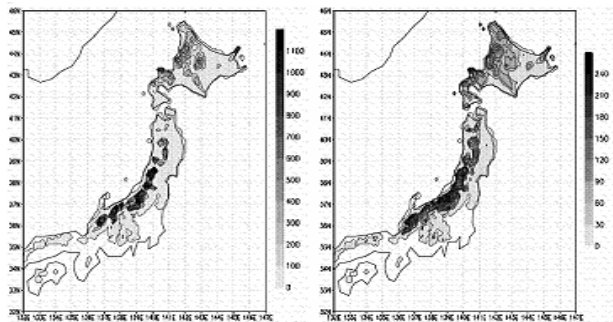


図8 1978年~2002年の4月20日から4月30日
平均積雪量(左)とその標準偏差(右) (kg/m²)

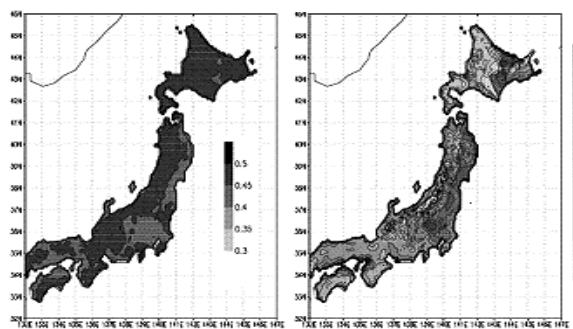


図9 1978年~2002年の4月20日から4月30日
平均土壌水分量(左)とその標準偏差(右) (m/m)

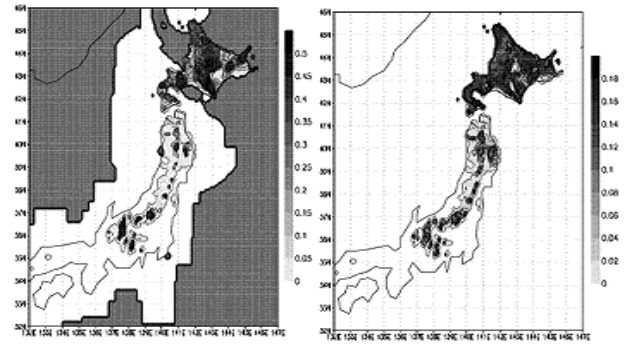


図10 1978年~2002年の4月20日から4月30日
平均凍結土壌水分量(左)とその標準偏差(右) (m/m)

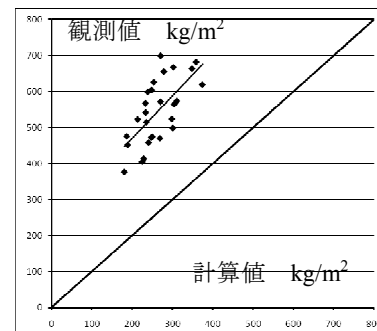


図11 観測値と実測値のプロットによる検証

5. 今後の予定

モデルの精度改善を図るとともに、積雪量、土壌水分量、凍結土壌水分量の変動が融雪出水に与える影響を陸面モデルを用いて解析する。その結果から土壌水分量と凍結土壌水分量を流出予測の初期情報として用いることの有意性を検証する。

参考文献

Development of the minimal advance treatments of surface interaction and runoff (Kumiko Takata ,Seita Emori, Tsutomu Watanabe 27 May 2002)

国立環境研究所 HP

<http://www.nies.go.jp/kanko/news/18/18-3/18-3-05.html>

陸水収支のパケツモデルとタンクモデル

http://flood.dpri.kyoto-u.ac.jp/research/thesis/2003_Nagatani.pdf

分布型融雪流出解析モデルによる融雪出水予測

浮須 修栄、吉永 平 2009

<http://www.yukicenter.or.jp/symposium/071024/ronbun04.pdf>

FROST PENETRATION DEPTH IN HOKKAIDO , JAPAN (Seiiti KINOSITA Masami FUKUDA Hiroshi YAHAGI 1978)

Distribution of maximum freezing depth in the ground in the winter of 1964-1965 in Hokkaido (Ishikawa,M Suzuki,T 1964)

積雪寒冷地の河川における融雪予測の有効性の検討 (旭川開発建設部 治水課 伊藤 貴寛 佐々木 猛 長尾 鉄彦)

謝辞

本研究で使用したアメダスデータは、東京大学生産技術研究所 沖研究室で作製されたものである。