

融雪比情報を用いた融雪出水量の事前把握と 陸面過程モデルにおける水文諸量の特徴

山田 朋人¹・和智 光貴²・中山 裕太²
Tomohito J. YAMADA, Kouki WACHI, and Yuta NAKAYAMA

¹ 北海道大学大学院工学研究院 准教授

² 北海道大学大学院工学院 修士課程

要 旨

北海道をはじめとする豪雪地域において、春の融雪出水に伴う河川流量を予測することは洪水災害を未然に防ぐ治水目的だけでなく水資源量の事前把握といった利水目的にも極めて重要である。1971年から現在まで、天塩川上流に位置する岩尾内ダム流域では融雪直前に行う積雪量調査による積雪深ならびに積雪密度による融雪比を用いた融雪出水予測が行われてきており、これまで比較的良好な予測精度を維持してきた。しかし、2008年、2009年において融雪比がこれまでにない過小評価となった。その原因を明らかにするため、上記の両年を含む過去30年間の融雪比と水文気象データを分析したところ、温暖な年ほど融雪比の推定精度は低いという特徴が判明した。その要因を調査したところ、積雪面からの蒸発量が融雪比に与える影響を考慮すると融雪比は1割程度改善するという結果が得られた。一方、これまで全球スケールの水文・気象予測や再現に用いられてきた複雑な物理過程を有する陸面過程モデルを北海道に適用し、陸面モデルを利用した融雪出水量予測手法の可能性を検討するため、過去30年間の再現実験ならびに融雪期間中における積雪量、凍結土壌水分量さらには土壌水分量の特徴について議論を行った。

《キーワード：融雪出水；積雪量；土壌水分；凍結土壌水分；陸面モデル》

1. はじめに

豪雪地域において春の融雪出水量の予測精度を向上させることは1年を通じた水資源量の安定供給ならびに管理を行う上で極めて重要である。とりわけ、梅雨前線や台風による夏から秋にかけて十分な降雨量が期待できない北海道においては、冬季の間に水資源として蓄えられる積雪量の把握と、その融雪時期の事前把握の精度向上が不可欠である。一方、IPCC 第4次報告書において述べられているとおり、気候変動に伴う積雪量の減少ならびに融雪時期の早期化が懸念されている⁽¹⁾。

本研究の目的は以下の2つである。

(i) 天塩川上流に位置する岩尾内ダム流域における過去30年間の積雪深と積雪密度の観測結果を用いた融雪出水量予測結果の検証と近年の融雪予測精度の特徴を明らかにすること

(ii) これまで全球スケールの気候変動予測や水文・気象予測研究のために開発されてきた複雑な物理過程を有する陸面モデルを北海道に適用した融雪量をはじめとする陸面諸量の再現実験、ならびに融雪直前の積雪量・凍結土壌水分・土壌水分の年々変動の大きさに関する検討

2章, 3章において(i), (ii)それぞれについて解析結果を示し、まとめを4章に記す。

2. 岩尾内ダム流域における積雪調査と融雪出水予測

(1) 岩尾内ダム流域の概要

北海道開発局旭川開発建設部では岩尾内ダム流域において1971年から積雪調査を実施している。積雪調査は25箇所で行っており、北海道内のダムのなかでは観測数が多く、その精度も比較的良好である。しかし2008年以降は積雪調査結果と融雪期のダムへの流入量の相関が悪い。また、近年は気温上昇の早期化により融雪開始時期が早まっており、今後のダム管理に支障をきたす恐れがあるため融雪出水予測の精度向上が重要である。

(2) 融雪比情報の評価手法

岩尾内ダムでは積雪水量と融雪量の比較を行うために融雪比⁽²⁾という値を用いている。融雪比は次式で算出される。

$$[\text{融雪比}] = [\text{融雪量}] \div [\text{積雪水量}] \quad (1)$$

$$[\text{融雪量}] = [\text{総流入量}] - [\text{降雨総量}] \quad (2)$$

また、2式より

$$[\text{総流入量}] = [\text{降雨総量}] + [\text{融雪比}] \times [\text{積雪水量}] \quad (3)$$

と表す。

以上の式から算出された1976年から2008年の融雪比を図-1に示す。1976~2009年の35年間の融雪比の平均値は0.99、標準偏差は0.11である。融雪比が1.0となれば積雪水量と融雪量は等しく、つまり融雪に伴うダム湖への流入量予測精度は高い。一方、1.0より低ければ調査により得られる積雪水量より実際の流入量は小さい。2007年までは精度が極端に悪い年でも融雪比の低い年では2002年の0.80、最も高い年で融雪比の算定が可能になった1976年の1.18であった。特に1994年から2006年はほとんどの年で0.94~1.05の範囲に納まっており精度はある基準内に収まっている。しかし、近年(2008年、2009年)の融雪比はそれぞれ0.66、0.74と非常に精度が悪く、積雪水量から予測される融雪出水量は実際の流入量よりも過小評価された。

| | |
|---------|--------------------------|
| 着手年、竣工年 | 1963年、1970年 |
| 水系・河川 | 天塩川水系・天塩川 |
| ダム形式 | 重力式コンクリートダム |
| 管理 | 北海道開発局 |
| 用途 | 洪水調整、灌漑用水、上水道用水、工業用用水、発電 |
| ダム流域面積 | 331.4km ³ |
| 有効貯水容量 | 96.3 百万 m ³ |

表-1: 岩尾内ダムの概要

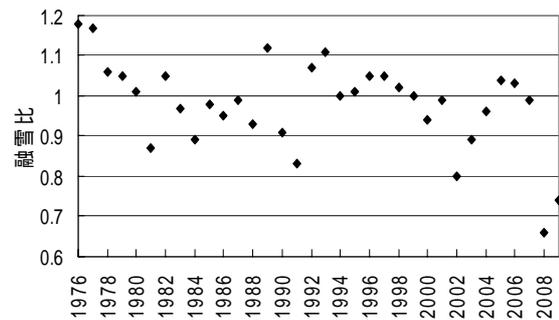


図-1: 岩尾内ダム流域における 1976 年から 2009 年の融雪比

| | 融雪比 | 総流入量(百万 m ³) |
|----|-------|--------------------------|
| 予測 | 1.0 | 235.5 |
| 実際 | 0.66 | 174.7 |
| 誤差 | -0.34 | -60.8 |

表-2: 2008 年の融雪比情報による予測の総流入量と実際の総流入量

| | 融雪比 | 総流入量(百万 m ³) |
|----|-------|--------------------------|
| 予測 | 1.0 | 334.2 |
| 実際 | 0.74 | 267.0 |
| 誤差 | -0.26 | -67.2 |

表-3: 2009 年の融雪比情報による予測の総流入量と実際の総流入量

| 年 | 1981 | 1984 | 1991 | 2002 | 2003 | 2008 | 2009 |
|-----|------|------|------|------|------|------|------|
| 融雪比 | 0.87 | 0.89 | 0.83 | 0.80 | 0.89 | 0.66 | 0.74 |

表-4: 融雪比が 0.9 以下の年と、各年の融雪比

(3) 融雪期間の判断方法

岩尾内ダムにおいては、融雪期間の開始および終了時期の判断を次のように行っている。

(i) 開始時期の判断

1. ダム流入量が日平均で 3m³/s 以上
2. 似峽観測所が日平均で 2.7m³/s 以上
3. 茂志利観測所が日平均で 1.7m³/s 以上
4. 日平均気温が 0 以上

以上 4 項目のうち 2 項目以上が達した場合、融雪出水が開始したと判断する。

(ii) 終了時期の判断

ダム流入量が 6m³/s 以下に減少したときに融雪出水が終了したと判断する。この判断方法が通年で最も精度が良くなる方法であったが、それでも 2008 年、2009 年の両年は融雪比が極端に低い。

(4) 流入量と気温

以上の背景をふまえ、本研究ではダムの流入量や、気温、風速などの気象データ⁽³⁾などから融雪比の精度が悪い年(0.9 以下)の傾向ならびに原因を探り、融雪期間中の水資源量を正確に把握することを目的とする。表-2、-3 は 2008 年、2009 年の積雪水量を用いたダム湖への総流入量の予測と実際の総流入量の誤差を示す。予測の段階では積雪水量はすべて融雪出水量としてダム湖に流入すると考えるため、予測の融雪比は 1.0 とする。2008 年において融雪比は 0.66 となり過去 33 年で最も精度が悪い。これは実際の総流入量が予測値よりも 60.8 百万 m³ 少なくなっており、実際の総流入量が 26% 程度予測値よりも少ないことを意味する。2009 年の実際の融雪比は 0.74 であり、過去 2 番目に精度が悪い年である。2009 年においては約 20% 予測値よりも実際の総流入量が少ない。上記の原因を明らかにするため、これまで岩尾内ダム管理支所で観測されてきた使用可能なデータを用いた検討を以下に行う。

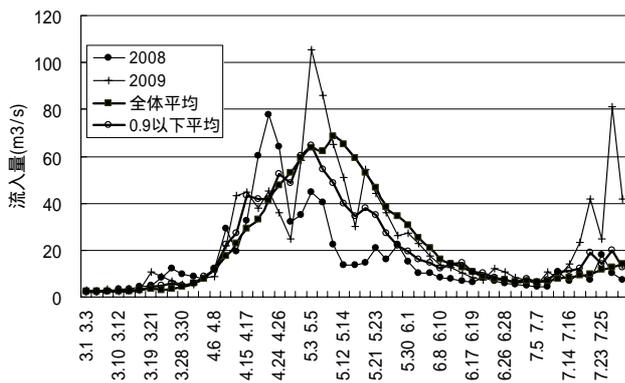


図-2: 岩尾内ダム湖への流入量の3日平均値

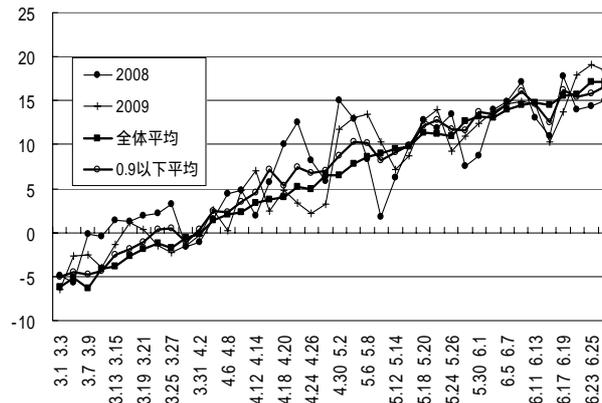


図-3: 3月1日から7月31日までの気温の3日平均値

(5) 各データの検証

(i) 流入量

図-2は岩尾内ダム湖への流入量を年ごとに示す。対象とする期間は3月1日から7月31日までとし、流入量の3日ずつの平均値をプロットした。図中の全体平均は1971年から2009年までの全期間の平均値、0.9以下平均は表-4に示す過小融雪比年7年間の平均値である。図より融雪比が0.9以下の年(0.9以下平均)は全体平均よりも流入量の立ち上がり早い。また、流入量が最大になった日(以下、ピーク日と記す)を見ると、全体平均が5月9日～5月11日であるのに対して0.9以下平均は5月3日～5月5日と一週間程早いことがわかる。同様に流量の逡減時期も0.9以下平均は全体平均よりも早い。2008年、2009年について更に詳細に述べると、2008年は特にこの傾向が顕著であった、ピーク日は4月21日～23日であり、全体平均よりも2週間以上もピークを早く迎える、またピーク後はすぐに逡減が始まる。一方、2009年はピーク日が5月3日～5月5日であり、つまり過去39年間の平均と比較すると一週間程ピークを早く迎える事になる。流量の立ち上がりも早く、2008年と同様にピーク後すぐに流入量は逡減する。

(ii) 気温

気温についても流入量と同様に3日ずつの平均値を図-3に示す。気温の観測データは1986年から存在するため、全体平均は1986年～2009年の平均、0.9以下平均は表-4の1991年以降の平均となる。この気温データは岩尾内ダム管理支所で計測されたものである。

図より全体平均よりも0.9以下平均の方が3月中旬から5月下旬にかけて気温が高いことがわかる。過去24年間の平均値(全体平均)では、融雪が始まるであろう0以上の日は4月3日～4月5日に対して、融雪比が0.9以下の年(0.9以下平均)では3月22日～3月24日であった。2008年、2009年について詳細に述べると、2008年は3月13日～3月15日で既に0を超え、一度も氷点下を下回らずに0を超える日が3月25日～3月27日まで2週間ほど続く。その後1週間ほど気温が氷点下に落ち込むが、それからは全体平均を上回る日が続く、特に4月中旬や5月上旬は全体平均を5近く上回る日がある。2009年についても3月中旬で0を超える日が一週間ほど続く。2008年と同様に一旦氷点下に落ち込むが、その後は全体平均を上回る日が続く。また、1986年～2009年までの融雪期間を平均化し(以後、平均融雪期間と記す)、その中の気温の平均値を図-4に示す。融雪比の精度が比較的良好な年も含まれるが(1990年:融雪比0.91、1995年:1.01、1998年:1.02、2004年:0.96など)、概ね0.9以下の年において気温が高い傾向にあることが明らかとなった。他のダム流域における融雪比についても岩尾内ダム流域と同様の結果が得られるとすれば、今後懸念される気温の上昇は融雪比を用いた融雪出水量の予測精度に大きな影響を与える可能性を示唆するものである。

(5) 蒸発量の影響

高温年ほど融雪比が過小評価される前節における結果より、融雪比に与える蒸発量の影響について検討する。蒸発散の推定方法は近藤ら⁽⁴⁾によって提案されているモデルを積雪面について使用した。式の詳細は紙面の制約上割愛する。

本研究では蒸発量を考慮した融雪比を新たに仮融雪比として定義する(式-4)。

$$[\text{仮融雪比}] = \{[\text{融雪量}] + [\text{総蒸発量}]\} / [\text{積雪水量}] \quad (4)$$

ここでは各年の融雪期間中の蒸発量を以下により求める。本研究では蒸発量のオーダーの推定を目的としているため、蒸発量推定に必要なパラメータは先行研究の値を使用した。表-5に示す通り、融雪比が過小評価された2008年、2009年において仮融雪比も求めるとそれぞれ1割程度融雪比の改善が期待されることがわかった。その結果、融雪比が過小評価された温暖年において積雪面からの蒸発量の影響を考慮したところ、融雪比は10%程度の改善がみられた。その他、温暖年においては融雪期間中の降雨による融雪効果等の影響も考えられる。以上より、地球温暖化に伴う豪雪地域の水資源量の安定的な事前把握には、積雪情報の調査のさらなる充実化に加え、雪の蒸発や降雨による融解過程も考慮する新しい融雪比の推定方法の必要性が示唆される。

| | 2008年 | 2009年 |
|------|-------|-------|
| 融雪比 | 0.66 | 0.74 |
| 仮融雪比 | 0.77 | 0.86 |

表-5: 2008年、2009年の融雪比と蒸発量を考慮した仮融雪比

3. 陸面モデルを用いた融雪出水量推定に関する検討

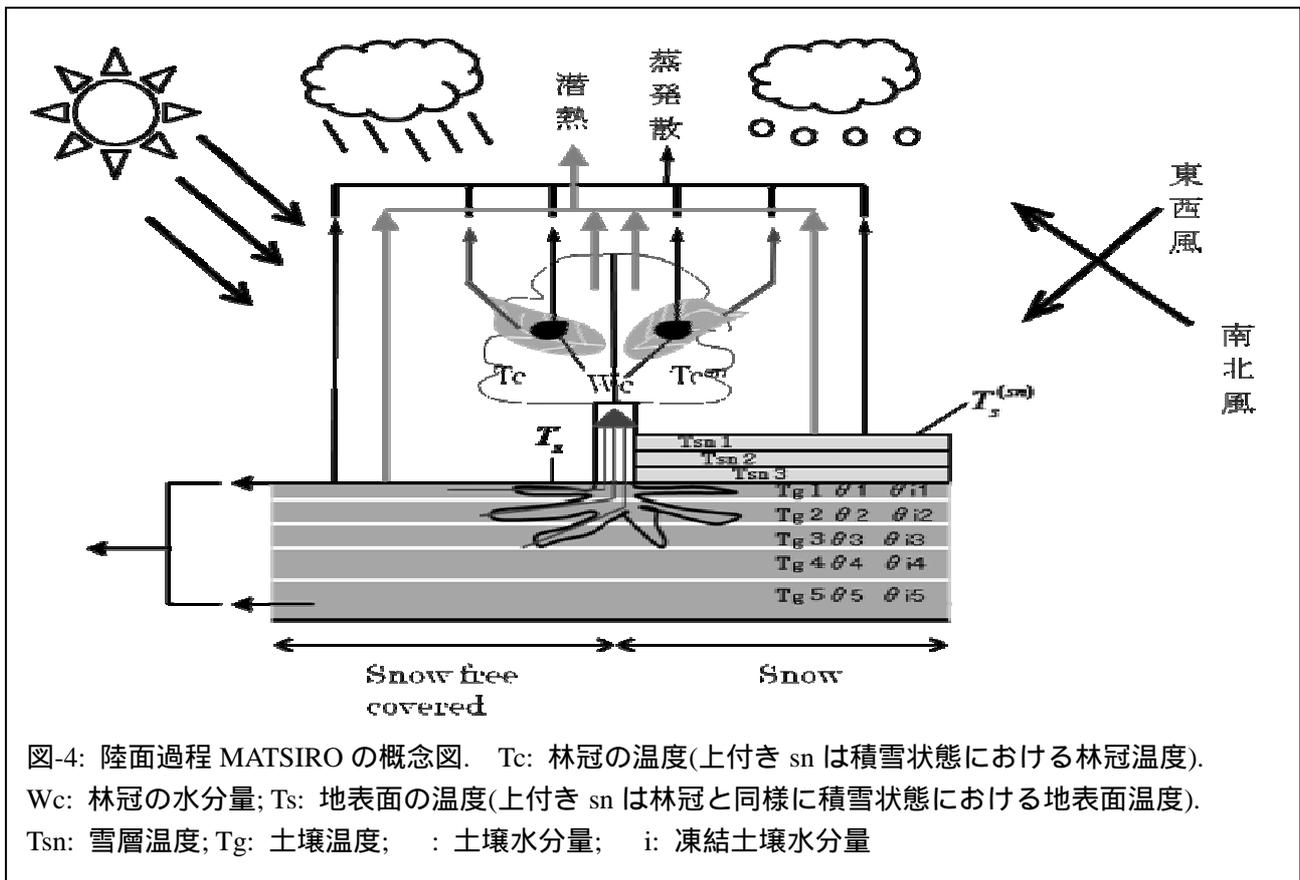
本章では、時空間スケールともに精緻な水文・気象データを春の融雪出水予測に活用するため、土層、雪層における詳細な熱・水収支の過程を取り入れた陸面過程モデル Minimal Advanced Treatments of Surface Interaction and RunOff(以降 MATSIRO Development of the minimal advance treatments of surface interaction and runoff⁽⁵⁾)の再現性に関する検討を行う。元来 MATSIRO は気候予測に用いる大気大循環モデル(GCM)において大気過程との相互作用を再現するための陸面の受け皿の役割を担うものである。前章で議論した通り、融雪期間中の積雪面からの蒸発量の推定など相変化に関する推定を行うには、今後陸面モデルの必要性が期待される。本章は陸面モデルが北海道の流域スケールの現象をどの程度再現できるか明らかにすることを目的とする。

(1) 陸面モデルの概要

陸面モデル MATSIRO が表現する物理過程は以下の通りである。

- ・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渦運動による熱・水輸送、植生による降水の遮断とその蒸発
- ・植生・地面上の積雪と融雪、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)

以上の物理過程の概念図を図-4に示す。図中の右半分が積雪地帯、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、もう一方は蒸散である。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。



(2) 実験設定

MATSIRO に与える大気データには AMEDAS による観測値を 10km^2 に加重平均したものをを用い、1978～2004 年までの再現計算を行った。対象とする領域は日本全域である。

(3) 結果と考察

図 5～10 に積雪量(kg/m^2)、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。これらの値は無次元化されている)の計算結果を 1978 年～2004 年の 3/15～3/25 の平均値とその年々変動の大きさ、同様に 4/20～4/30 における結果を示す。北海道の山間部では 3/15～3/25 は融雪の直前期にあたる。

図-5 は 3/15～3/25 の積雪量の平年値(1978～2004 年の平均値)と年々変動の大きさを図-8 に示す。MATSIRO では北海道の北西部において積雪量が多く、東北から北陸地方においても日本海側において積雪量ならびに年々変動が大きい。これは我が国の積雪観測によって明らかにされてきた積雪量の地域分布と同様の傾向を有しており、MATSIRO の示す積雪量の地域分布はある程度の再現性を有していると言えよう。

図-6 は凍結土壌水分に関する同期間の平年値を示す。北海道の特に南東部において凍結土壌水分が大きいことがわかる。これは石川ら(1964)⁽⁶⁾による観測結果と比較して地域分布が過大評価されている。今後モデルによる計算値と観測値の詳細な比較ならびに検証が必要である。一方、土壌水分は北海道をはじめとする全国で飽和に近い状態である。次に 3/15～3/25 における凍結土壌水分量、土壌水分量の年々変動の大きさに着目すると、北海道の日本海側において年ごとの差が大きいことが確認できる。これらの結果に関しても観測値との比較が必要となるが、積雪量に加え、凍結土壌水分、土壌水分ともに融雪期間中のこれらの値がその年の融雪出水量の立ち上がり、ピーク、遞減時期を予測する上で重要なパラメータとなる可能性を示唆するものである。

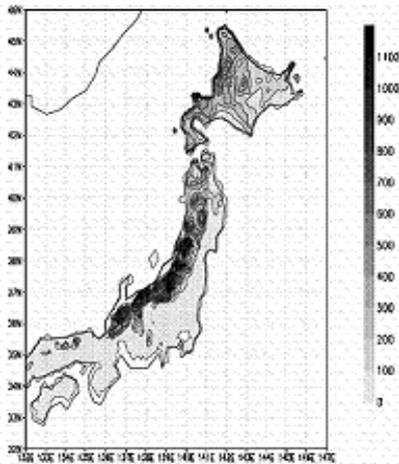


図-5: 陸面モデル MATSIRO によって計算された 1978～2004 年 3 月中旬(3/15～3/25)の積雪量の平年値。単位は kg/m²。

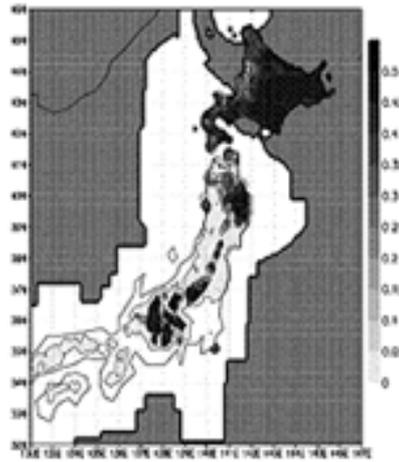


図-6: 陸面モデル MATSIRO によって計算された 1978～2004 年 3 月中旬(3/15～3/25)の凍結土壌水分量の平年値。単位は kg/m²。

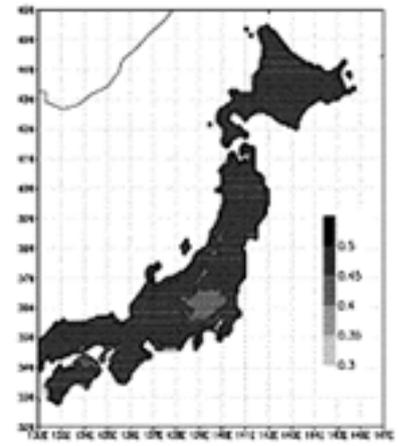


図-7: 陸面モデル MATSIRO によって計算された 1978～2004 年 3 月中旬(3/15～3/25)の土壌水分量の平年値。単位は kg/m²。

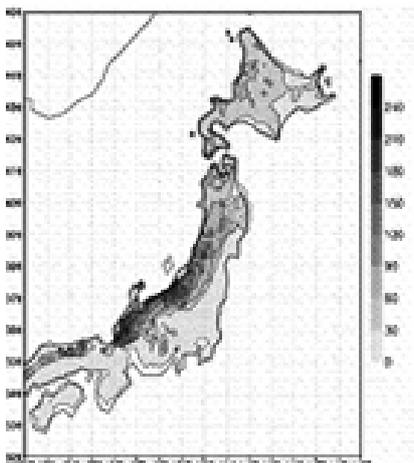


図-8: 1978～2004 年 3 月中旬(3/15～3/25)における積雪量の年々変動の大きさ。単位は kg/m²。

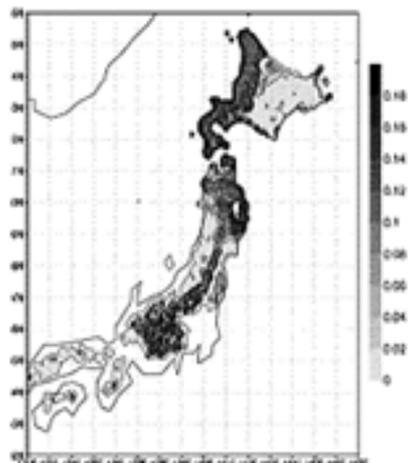


図-9: 1978～2004 年 3 月中旬(3/15～3/25)における凍結土壌水分量の年々変動のお大きさ。単位は kg/m²。

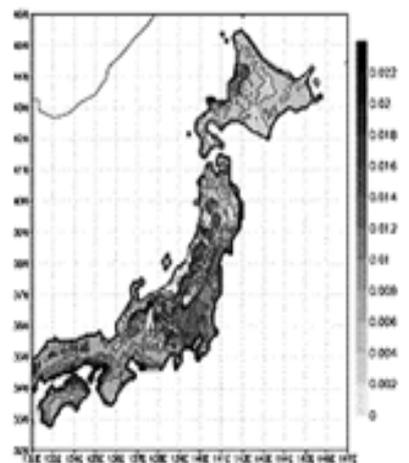


図-10: 1978～2004 年 3 月中旬(3/15～3/25)における土壌水分量の年々変動の大きさ。単位は kg/m²。

4. まとめ

本研究は北海道における融雪出水量予測の高精度化を目的とするものである。本年度は天塩川上流に位置する岩尾内ダム流域において融雪出水量の予測に用いられている融雪比情報の精度に関する検討を行ったところ、温暖年において融雪比は過小評価(積雪量観測によって得られた予測値よりも実際の融雪出水量が小さい)される傾向にあることが判明した。同流域内の水文気象データから融雪期間中の蒸発量による融雪量を算出し、それらを積雪水量に加えることにより、融雪比は 10%程度の改善が示唆された。地球温暖化に伴う融雪期間中の気温上昇が顕著となれば、現在用いられている融雪比では融雪出水量の予測精度に限界が生じる可能性が懸念される。したがって、現在よりも大気-陸面間の物理過程を考慮する新しい融雪比の提案が期待される。具体的には陸面モデルと観測データを効率的に利用することで得られる水文諸量を用いた融雪出水量予測手法の開発の必要性が考えられる。

本報告書の3章では陸面過程モデルMATSIROとAMEDAS等の観測データを用いた冬季の水文諸量の再現を行った。今後はMATSIROによって得られる水文諸量の検証ならびにモデルの改良点を見つけ、現在行われている融雪出水量予測手法と併せた新たな予測手法の開発を進める予定である。

謝辞：本研究を行うにあたり、過去30年以上にわたる貴重なデータを提供して下さった北海道開発局旭川開発建設部名寄河川事務所岩尾内ダム管理支所に感謝の意をここに記します。また、陸面モデルMATSIROに与えるAMEDASデータの一部は東京大学生産技術研究所沖研究室において作成されたものである。

参考文献

- 1) Intergovernmental Panel on Climate Change 第4次報告書
- 2) 北海道開発局旭川開発建設部名寄河川事務所岩尾内ダム管理支所，岩尾内ダム流域における融雪予測の精度向上について
- 3) 北海道開発局旭川開発建設部名寄河川事務所岩尾内ダム管理支所，岩尾内ダム各種データ
- 4) 近藤純正：水環境気象学，朝倉書店，1994
- 5) Development of the minimal advance treatments of surface interaction and runoff (MATSIRO), Takata, K., E. Seita, T. Watanabe, *Global and Planetary Change*, **38**, 209-222, 2003.
- 6) Distribution of maximum freezing depth in the ground in the winter of 1964-1965 in Hokkaido, Ishikawa, M and T. Suzuki, 1964.