

衛星画像と積雪モデルを用いた山地積雪水量の推定

宇治橋康行*

Estimation of snow water using satellite images and a snow model

Ujihashi Yasuyuki

Abstract : Snow water accumulated during winter in high mountain area is important water resources in Japan. However, the time and space variation of snow water is not observed exactly because of the poor measurement system of winter precipitation in the area. The author estimated the snow water using the degree-day factor based snow model and a simple spatial distribution model of precipitation. Both calculated snow covered area and snow water were verified to compare with the observed area using MODIS/ Terra Snow Index images (Snow Map) and the Kumokawa dam inflow. The obtained results showed good agreement with the observed of them.

Keywords : MODIS/Terra image, snow ratio, snow map, degree-day factor

1. はじめに

我が国は、最北端の気象官署稚内（緯度 $45^{\circ} 25' N$ ）でもフランスのパリ（ $48^{\circ} 58' N$ ）より緯度が3度以上低い中低緯度地帯に属しながら世界的に見ても降積雪が非常に多い。国土の約52%は「豪雪地域対策特別措置法」で指定された豪雪地帯（累年平均積雪積算値 $5,000\text{cm}\cdot\text{day}$ 以上の地域とこれに関連が深い地域）である。

これら地域では「38豪雪」、「56豪雪」、「平成18年豪雪」のように時として雪害に悩まされるが、その一方、山地に大量に蓄積された積雪とその融雪水は極めて貴重な水資源となっている。したがって、水資源の管理・開発、今後の温暖化の水循環への影響評価のためにも広域の山地の積雪水量を正確に把握することは極めて重要である。

気象庁のAMeDASは全国的に約1300ヶ所設置され、約 30km^2 に一か所で降水量の観測が行われているが、観測所のほとんどが標高500m前後までの低い所に設置され、1000mを超える山岳部の観測所は34ヶ所しかない。国土交通省の観測所も同様であり、冬季には観測を停止しているところも多い。また、レーダー雨量計によっても降雪量の観測は難しい。このため、標高の高い山間部の降水量、特に冬季の降雪量は十分観測されておらず、冬季に水資源として蓄積される積雪水量は正確に把握されていない。本研究で解析の対象とした福井県においても、気象庁の最も標高の高い九頭竜観測所の標高は430m、国土交通省九頭竜ダムサイトでも577mである。

降水積雪水量を測る最も直接的な方法としてスノーサーベイがあるが、費用と時間がかかり、さらに危険も伴うこと、また、限られた地点での測定しか実施できない欠点がある。また、衛星

* 土木環境工学科

リモートセンシング技術を用いれば積雪域の抽出は可能であるが、限られた条件を除いて積雪水量を直接計測することは現状では困難である。したがって、広域の積雪水量を把握するには基準観測所のデータをもとに降水の空間分布を仮定し、この仮定に基づいて得られた積雪水量の空間分布を衛星リモートセンシング画像の積雪域および積雪モデルから推定される積雪域および積雪水量との比較・検証により推定することが現時点で最も有効な方法である。

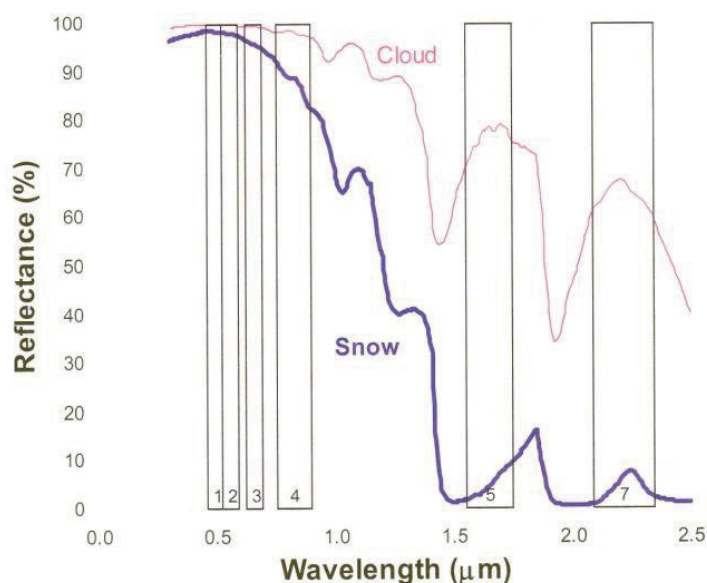
本研究では福井工業大学芦原学舎に設置された衛星受信装置で受信されている MODIS/Terra 画像を用い、Snow Index による積雪域判定・抽出結果と気温因子のみを用いた単純な積雪－融雪モデルにより算定される積雪域を比較・検証することにより山地の冬季降水量と積雪水量の推定を試みた。積雪域の抽出・検証対象地域は福井県大野市・勝山市域とし、積雪水量は大野市真名川上流雲川ダム流入量との比較により検証した。その結果、標高の関数として求めた降水割増率を用いた降水の空間分布と衛星画像から判定される積雪域と積雪モデルの計算積雪域がほぼ一致するようにモデルを構築することにより山地の降水量と積雪水量を実用上十分な精度で推定できることが示された。

2. MODIS/Terra と Snow Index

衛星リモートセンシングデータを用いて積雪域を抽出する最も有力なものはいくつかのバンドのデータを組合せてつくられるフォールスカラー画像を用いるものであるが、この画像では雲と雪の判別が難しい。本研究では以下に示す雲と雪に対する分光反射スペクトル特性を用いた指標 (Snow Index) を用いた積雪域の判別法を用いた。

2.1 MODIS/Terra

本研究で用いた MODIS (Moderate-resolution Imaging Spectroradiometer : 中分解能撮像分光放射計) は NASA の地球観測衛星 Terra, Aqua に搭載されている光学センサであり、福井工業大学芦原学舎に設置されている地球観測衛星 Terra, Aqua 受信システムで受信されている。MODIS は波長 0.4~14 μ m の範囲に 36Band を有している。雲、放射エネルギー束、エアロゾル、土地被覆、土地利用変化、植生、地表温度、火災、噴火、海面温度、海色、積雪、気温、湿度、海水等の観測を行うことができる。解像度は、Band 1, 2, Band 3-7, Band 8-36 でそれぞれ 250m, 500m, 1000m である。両衛星とも軌道周期は約 99 分であ



図－1 雪と雲の反射スペクトルの比較¹⁾
(雪の半径 200 μ m, 雲は半径 5 μ mの水滴としたモデル)

り、1日に2回日本上空を通過し、データの取得頻度が高い。本研究では Terra 衛星のデータのみを用いた。

2.2 Snow Index

衛星データを用いた積雪域の判定には True color 画像, False color 画像あるいは輝度温度を用いる方法があるが、いずれの方法でも雲と積雪域の判別が難しい。Snow Index は図-1に示されるような波長帯による雲と雪に対する反射率の違いを利用して雪と雲を区別し、積雪域を判定する指標の一つである。図-1の長方形で囲まれた波長域とその下の数字は LANDSAT TM の波長帯を示したものであり、MODIS では波長 0.545~0.565 μm の Band 4(緑)と、波長1.628~1.652 μm の Band 6(中間赤外)の波長帯を用いて Snow Index (SI) は次式で定義される。

$$SI = \frac{(\text{Band 4} - \text{Band 6})}{(\text{Band 4} + \text{Band 6})} \quad (1)$$

積雪域は、求められた SI に適当な閾値を設定して判定する。SI を-1~1に正規化した場合ではおよそ 0.3 以上、0~255で表示する場合にはおよそ 160 以上が一般に用いられる。判定された積雪域を表示した画像が Snow Map と呼ばれるものである。

3 積雪-融雪モデル

積雪-融雪モデルには、熱収支に基づき積雪の変態を考慮した精緻なモデル^{2), 3)}が考案されているが、ここでは利用できる気象データが気温、降水量のみであることおよび水資源としての積雪水量の推定とこれに必要な降水の空間分布の推定を目的としていることを考慮して気温データのみを使用する単純なモデルを用いた。

3.1 雨雪の限界気温および融雪量

モデルを用いて積雪水量を推定する場合、降水の雨雪の判別は重要である。ここでは降水の雨雪の判定に雨雪の限界気温 T_c を用いて、次のように雨雪を区別する。

$$\begin{aligned} T_a &\geq T_c && \text{ならば降水はすべて降雨} \\ T_a &< T_c && \text{ならば降水はすべて降雪} \end{aligned} \quad (2)$$

ここで、 T_a : 日平均気温 (°C), T_c : 雨雪の限界気温である。

融雪量の算定モデルは積雪モデルの最も重要な要素モデルである。ここでは気温データのみが利用できることを前提にし、degree-day factor 法を用いた。融雪量は次式で求められる。

$$M = M_f (T_a - T_m) \quad (3)$$

ここで、 M : 融雪量(mm/day), M_f : 融雪係数(mm・°C/day), T_m : 融雪開始気温(°C)である。解析が日単位であることから融雪水の積雪層内での移動過程は無視した。

3.2 降水の割増率および気温減率

積雪水量の空間分布を求めるうえで最も重要な要素の一つが降水の空間分布である。本研究の目的の一つが降水の空間分の推定である。降水量の空間分布は種々の気象因子や地形因子に支配され複雑であり、特に時間単位が短くなるほどその推定は困難である。しかし、年降水量は月降

水量に関しては標高の関数として精度良く表すことができる。したがって、ここでは、月降水量を用いて基準点の降水量に対する各地点の降水量の割増率を標高のみの関数として表し、この割増率を日降水量にも適用することとした。任意標高の降水量及び割増率は式（４），（５）を用いて推定する。

$$Pr(z) = KP_{rb} \quad (4), \quad K = \exp(\alpha z) \quad (5)$$

ここで、 $Pr(z)$: 標高 $z(m)$ での降水量, P_{rh} : 基準点の降水量, K : 降水の割増率, α : 定数である。

気温の空間分布については、いわゆる気温減率を用いて推定した。

4. 対象領域と使用データ

MODIS/Terra データの解析対象

領域は福井県大野市および勝山市域とした。対象領域の標高分布を図－2に、解析に用いた領域内の観測所の概要を表－1に示す。ダム流入量との比較による積雪水量の検証に用

表-1 気象観測所の概要

	大野	勝山	九頭竜	九頭竜ダム
緯度	35°58.3' N	36°2.3' N	35°54.3' N	35°53.2' N
経度	136°29.8' E	136°31.3' E	136°40.2' E	136°41.2' E
標高	182(m)	196(m)	430(m)	577(m)

いた雲川ダム流域（流域面積55.83km²）の概要を図－3に示す。解析対象期間は2008年～2009年冬期とした。この期間でTrue画像表示で雲がなく地表面が明瞭に観測されていると思われる2008年11月26日、12月2日、2009年1月28日、2月7日、28日、3月17日、30日、4月9日、19日及び30日の10日間を選んで画像解析を行った。

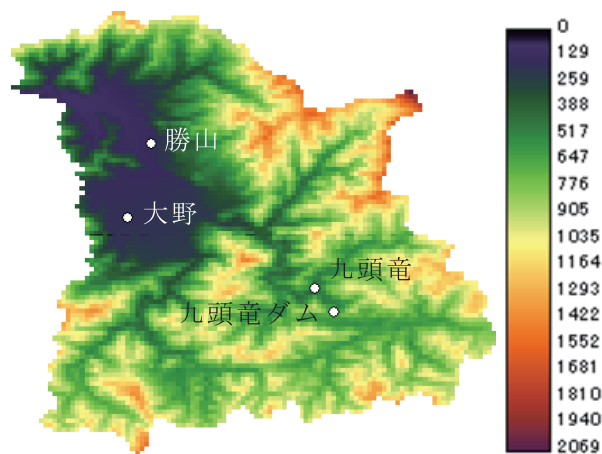


図-2 大野勝山市域標高分布（単位：m）
および雨量観測所（図中○印）位置図

5. 結 果

5. 1 降水の割増率, 気温減率及び限界気温

降水の割増率は、気象庁 AMeDAS 勝山、大野、九頭竜観測所および国土交通省九頭竜ダムサイトでの月降水量データを用い、大野での観測値に対する各観測所の割増率を求め、これに式(5)をあてはめ最少二乗法により定数 α を推定した。得られた α の値は 0.0002 であった。この値を用いて大野を基準観測所として求めた勝山、九頭竜、九頭竜ダムの各観測所の月降水量の計算値と観測値との比較を示したものが図-4である。図を見ると九頭竜ダムの一例(2月)を除いて観測値と計算値はよく一致しており、月降水の割増率は妥当であると考えられる。前述のように、日降水量の空間分布も月降水量と同じであると



図-3 雲川ダム流域図

仮定し、 $\alpha = 0.002$ を用いて推定した。

気温減率については、時間単位の短いデータに対しても気温と標高の相関が降水量より良いので、前述の観測所の日単位データを用いて推定した。その結果、一般に用いられている $0.6^{\circ}\text{C}/100\text{m}$ が得られた。雨雪の限界気温 T_c については、これまでの研究^{4), 5)} を参考にし $T_c = 2.4^{\circ}\text{C}$ を用いた。

5. 2 融雪開始気温及び融雪係数

融雪開始気温については一般に 0°C が用いられ、本研究でも $T_m = 0^{\circ}\text{C}$ とした⁶⁾。また、融雪係数については計算および衛星画像から判定される積雪域がよく一致するように試行錯誤により決定した結果、 $M_f = 5\text{mm} \cdot ^{\circ}\text{C}/\text{day}$ となった。

5. 3 Snow Map と積雪モデルによる積雪域

図-5 (a) ~ (d) に 2008~2009 年冬期の 4 日間を選び Snow Index 画像、Snow Map 画像および積雪モデルにより計算された積雪域の比較を示す。Snow Index 画像では白く表示されている領域が Snow Index の値が大きく雪と判別される領域であり、Snow Map 画像および積雪モデルにより計算された積雪域は見やすくするために黒で表示している。図に示されるように Snow Map と積雪モデルにより計算された積雪域は全体的によく一致している。しかし、標高の高い地域の河道周辺では両者はあまり一致していない。これは、今回の対象領域のみならず、日本の山岳地域は複雑な地形をしているため、分解能 500m の画像では積雪域の判定の限界があることを示している。今後、分解能のより高い衛星データとの比較検証により判定精度を高める必要がある。積雪域判別の閾値は図中に示すように 2009 年 3 月 30 日を除いて 130 であり、当初予想した値 160 前後より低い値でよい結果が得られた。

5. 4 積雪水量の計算結果

図-6 は雲川ダム流域の積雪域の変化を Snow Map とモデルによる計算値を示したものである。この場合も図-5 の大野勝山市街域の場合と同様、全体的にはよく一致しているが、河道周辺の精度が悪い。図-7 は雲川ダム流入量の実測値から得られた積雪水量とモデルにより得られた積雪水量の記事変化を

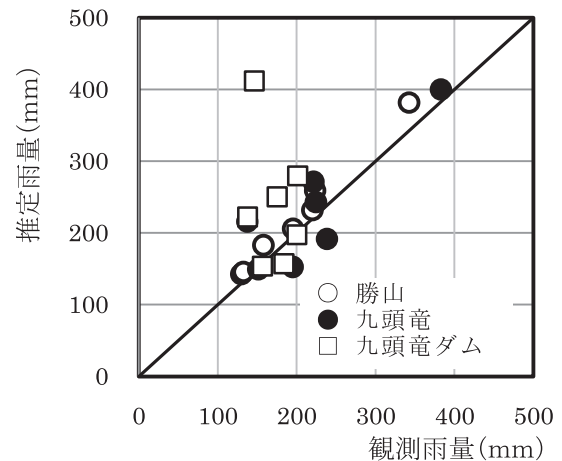


図-4 月降水量の観測値と割増率による推定値の比較

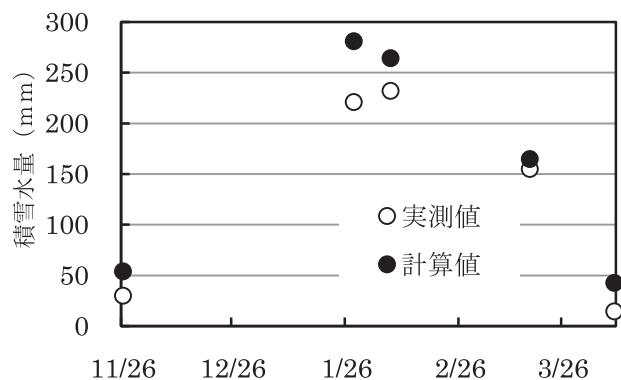
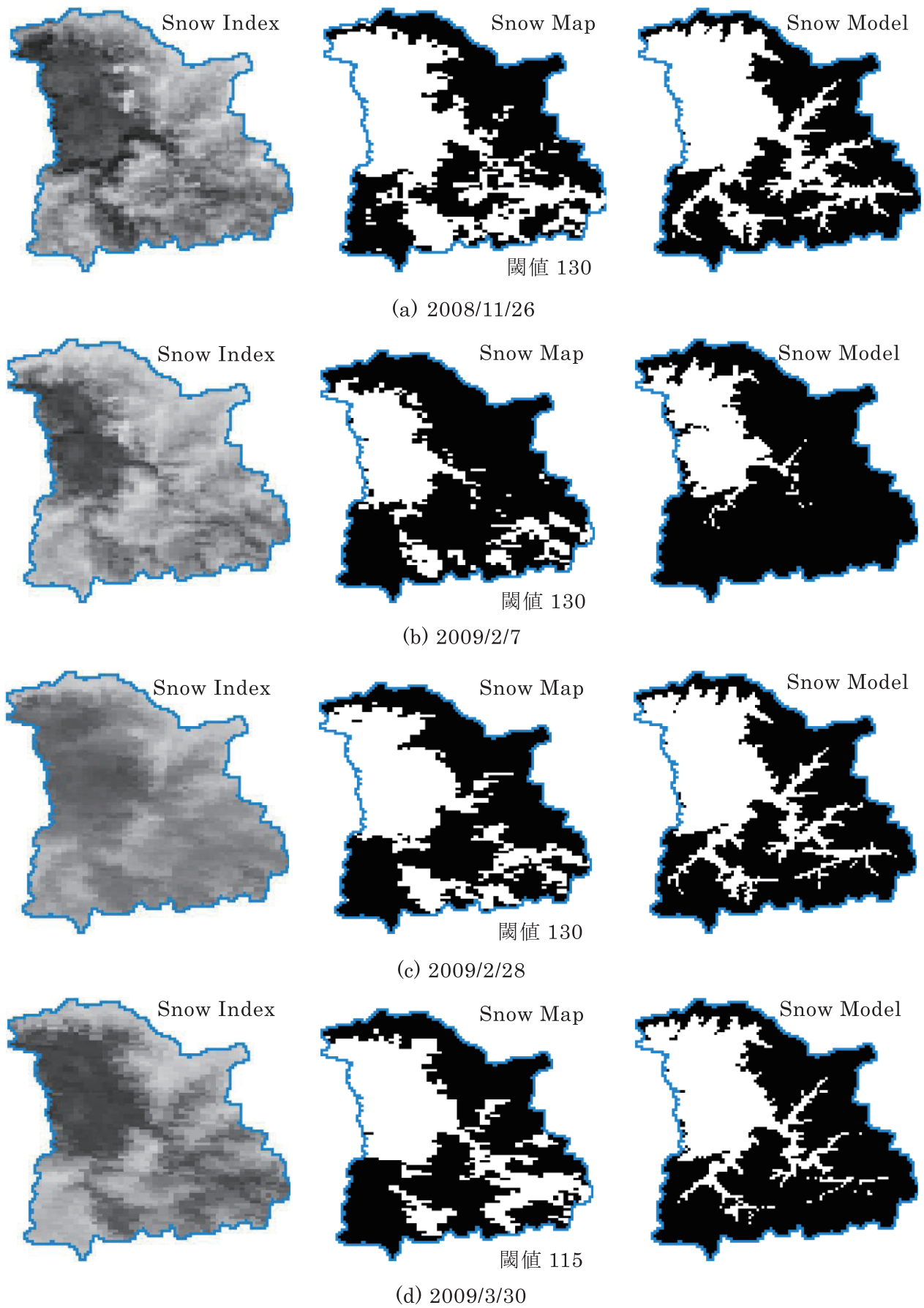
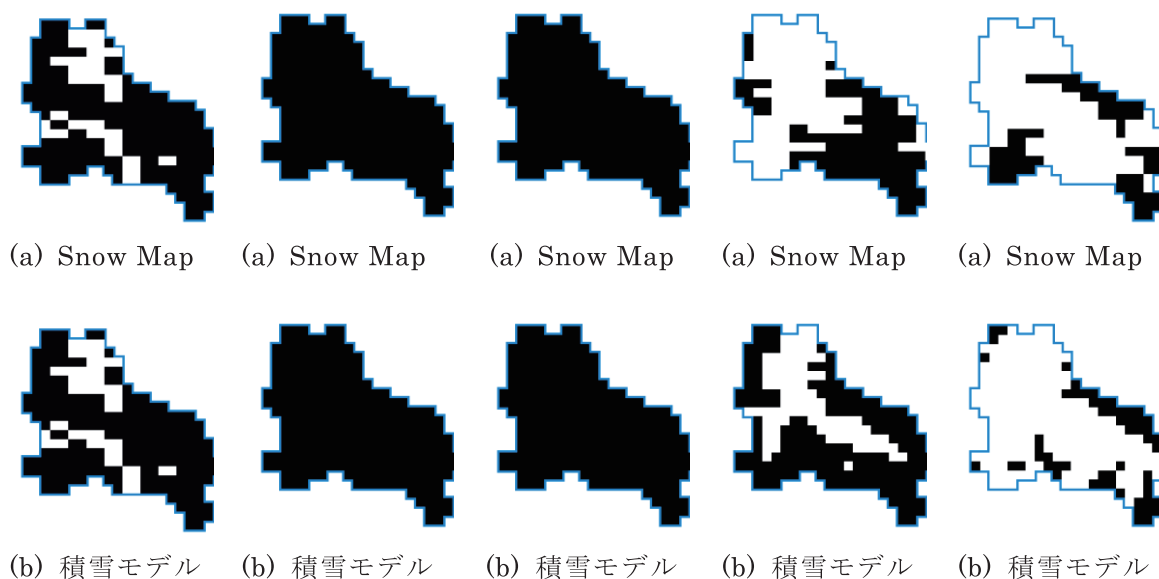


図-7 雲川ダム流域の積雪水量の実測値計算値の比較

比較したものである。図から分かるように実測値と計算値がよく一致しており、本研究で用いた降水の空間分布モデルおよび積雪モデルとそのパラメータの妥当性が示されたといえる。



図－5 Snow Index 画像，Snow Map，積雪モデルによる積雪域の比較



2008年11月26日 2009年1月28日 2009年2月7日 2009年3月17日 2009年4月9日

図－6 雲川ダム流域の Snow Map と積雪モデルによる積雪域の比較

6. 結 語

本研究では、降水量が十分に観測されていないために正確な値が把握されていない冬期の山地積雪水量の推定を福井県奥越地方大野・勝山市域を対象として行った。降水の空間分布モデルは標高のみを変数とする単純な指数関数で表わし、積雪モデルには気温、降水量データのみを用いたモデルを用い、MODIS/Terra 画像を積雪域の検証データとして積雪モデルのパラメータを同定した。その結果、以下のことが分かった。

- 1) 積雪モデルによる計算結果は、雲川ダム流入量から求めた積雪水量とよく一致、降水の空間分布およびモデルパラメータの妥当性が確かめられた。
- 2) 積雪モデルにより得られた積雪域と MODIS/Terra データを用いて定義した Snow Index から得られた Snow Map は河道周辺を除きよく一致し、Snow Index は積雪域判定の良好な指標であることが確認された。
- 3) 以上の結果は、大野・勝山市域という特定の地域で得られたものであるが、衛星データを検証データとして積雪モデルのパラメータおよび降水の空間分布モデルの構造とそのパラメータを同定すれば、基準観測点のデータから山地の冬期降水量、積雪水量が推定できる可能性が示されたといえる。

今後は、さらに熱収支に基づく積雪モデルを用い、空間分解能の高い衛星データによる積雪域の判定精度を向上させ、わが国のすべての地域の冬期降水量および積雪水量算定モデルを構築していく必要がある。

最後に、本研究で用いたダム流入量および降水量資料は国土交通省近畿地方整備局九頭竜川ダム統合管理事務所より提供して頂いた。記して謝意を表します。

参考文献

- 1) Timothy A. Warner, A. J. Campagna : Remote Sensing with IDRIS Taiga, Geocarto International Centre, pp.119-137, 2009.
- 2) 近藤純正, 山崎剛 : 熱収支法による融雪量の予測, 雪氷, 49 巻 4 号, pp.181-191, 1987.
- 3) Wigmosta, M. S., L. W. Vail and D.P.Lettenmair : A distributed hydromorology-vegetation model for complex terrain, Water Resources Research, Vol.30, No.6, pp.1665-1679, 1994.
- 4) Ujihashi Y. and Takase N. : Simulation of time variation in seasonal snow cover based on routinely available data, journal of Natural Disaster Science, Vol.13, No.2, pp.57-68, 1991.
- 5) 近藤純正編著 : 水環境の気象学, 朝倉書店, 1994.
- 6) D. M. Gray and T. D. Prowse : Snow and Floating Ice, Chapter 7, Handbook of Hydrology, edited D. R. Maidment, McGRAW-HILL, 1992.

(平成 23 年 3 月 31 日受理)