

全日本の積雪水量, 積雪深, 全層積雪密度分布推定

ESTIMATING THE DISTRIBUTION OF SNOW WATER EQUIVALENT,
SNOW DEPTH AND SNOW DENSITY IN JAPAN

泉 宏和¹・風間 聡²・戸塚 岳大³・沢本 正樹⁴

Hirokazu IZUMI, So KAZAMA, Takehiro TOTSUKA, Masaki SAWAMOTO

¹ 学生員 東北大学大学院 工学研究科 土木工学専攻 (〒980-8579 仙台市青葉区荒巻字青葉 6-6-06)

² 正会員 工博 東北大学大学院 環境科学研究科 (〒980-8579 仙台市青葉区荒巻字青葉 6-6-20)

³ 学生員 東北大学大学院 工学研究科 土木工学専攻 (〒980-8579 仙台市青葉区荒巻字青葉 6-6-06)

⁴ フェロー 工博 東北大学大学院 工学研究科 (〒980-8579 仙台市青葉区荒巻字青葉 6-6-06)

Daily snow water equivalent, snow depth and snow density distribution were estimated from SWE model with the meteorological data, satellite data and DEM. The SWE model was composed of snowfall model and the snowmelt model. The daily snowfall was estimated using weighted average distance method from AMeDAS data. The daily snowmelt was estimated using the degree-day method in the snowmelt model. Comparing snow distribution from the SWE model, the snowmelt rate factor was not much different in east and west Japan. As a result, the snowmelt rate factor was about 4 to 5 millimeter per day per degree in one snow season. The process of snowfall-accumulated was also evaluated in the different regions.

Key words: AMeDAS 積雪水量分布 積雪深分布 全層積雪密度分布 Degree-day 法 JAIDAS

1. はじめに

日本は雨の多いアジアモンスーン地帯に属し, 年平均降水量は 1800mm 程度であり, 世界年平均降水量(973mm)のおよそ 2 倍である。しかし, 1 人あたりの年間降水総量は 5500m³ で, 世界平均 26,870 m³ の 5 分の 1 程度であり, 必ずしも水資源に恵まれた国とはいえない。また, 降水は梅雨と秋の台風の時期に集中する傾向が強く, 河川の勾配が急で流量の変化が激しく, 年間を通しての水供給が十分ではない。その中で, 冬の間に貯留された積雪は水供給を補う重要な水資源となり得る。一方, 近年の地球規模での温暖化による冬の積雪および春の融雪の変化に伴う水文・水資源への影響が懸念される。積雪として貯留され, 融雪水とともに徐々に流出していた水が温暖化により雪から雨に変化し, 冬にそのまま流出することが予想され, それに伴い冬の河川流量が増加すると同時に, 融雪期後期の河川流量の減少が懸念される。

水利用の面では, 貴重な積雪水資源を農業用水, 工業用水, 生活用水, 都市活動用水として多目的かつ有効に活用している地域もある。その積雪を水資源として高度利用するとともに, 雪崩や吹雪などの雪氷災害を最小限にとどめるためには, 日本全体という広域スケールにお

いて積雪・融雪情報の整備が必要である。

広域積雪観測に関する研究においてリモートセンシング技術はきわめて有効であることから, 多くの研究で利用されている。例えば, 小池ら¹⁾は融雪期を対象として, LANDSAT 等から積雪面積情報を作成し, それを利用して, 積雪水量と流域面積の高度分布特性を考慮した流域積雪水量推定モデルを提案し, 5 つの流域に適用してモデルの適用性が高いことを示している。同様に, 陸ら²⁾は LANDSAT データによる積雪面積情報を気象データに組み込んだ積雪モデルを構築し, 積雪分布をシミュレーションしている。しかし, これらの研究は全て単一の地域・流域を対象としており, 広域での地域特性を抽出するに至っていない。さらに, 東日本では多くの雪に関する研究がなされてきたが, 西日本では積雪地域が広域に渡っていないためあまり研究されていない。しかしながら, 西日本には過去に積雪深 250cm 以上を記録した広島県の高野や福井県の大野, 120cm 以上を記録した鳥取県の智頭といった豪雪地帯が存在する。この数字は降雪が平年並時の東日本でもあまり記録しない。また, これらの地域は世界でも稀にみる低緯度かつ低標高での積雪が観測されている地域である。

そこで, 本研究では積雪水量の推定を行うことで貯留量の把握をし, 流出量予測の指標として役立たせる。さ

らに、積雪深、積雪密度の推定を行うことで、雪崩、吹雪等の雪氷災害や交通情報としての指標を、入手し易いデータを用いて、簡便な推定手法により作成する。つまり、本研究ではAMeDAS データ、国土数値情報、JAIDAS データを用いて、全日本での積雪水量分布、積雪深分布、全層積雪密度分布を日単位で推定する手法の確立を目的とする。

2. 研究対象地域・期間およびデータセット

研究対象地域は日本全域であり、研究対象期間は1998年11月～1999年4月である。衛星データとしてNOAAのデータベースの一つであるJAIDASの東日本および西日本の画像を用いた。標高データは国土地理院が作成した数値地図情報の解像度250m×250mをJAIDASの解像度1100m×1100mに平均化して用いた。気象データは気象庁より提供されているAMeDASデータから日平均気温(°C)、日降水量(mm)および日最深積雪(cm)を用いた。

3. 解析方法

(1) 積雪水量の推定

積雪水量の推定は戸塚ら³⁾にならいSWEモデルを用いる。SWEモデルは降雪モデルと融雪モデルから構成され式(1)のように示す。

$$d/dt(SWE) = SF - SM \quad (1)$$

ここで、SWEは積雪水量(mm)、SFは降雪量(mm/day)、SMは融雪量(mm/day)。東日本の積雪水量分布は戸塚ら¹⁾が作成したものを用いた。本研究では同手法で西日本の積雪水量分布を作成する。

(2) 降雪モデル

日降雪量の推定に降雪モデルを用いる。各メッシュの気温はAMeDASデータの日平均気温を重み付距離平均法により補間して求め、標高データを用いて気温減率、0.6°C/100mにより補正することによって気温分布(図-1)を作成した。各メッシュの降雪量は降水形態の判別気温2°C⁴⁾を用い、気温2°C以上を降雨、2°C以下を降雪として、AMeDASの降水量データを重み付距離平均法により補間して求めた。その際に近藤ら⁵⁾にならい式(2)を用いて標高補正して降雪量分布(図-2)を作成した。

$$SF = SF' \times \{1 + 0.001 \times (E_m - E_p)\} \quad (2)$$

ここで、SFは標高補正をした降雪量(mm)、SF'はAMeDAS観測点の降水量データ(mm)、Emはメッシュの標高(m)、Epは観測点の標高(m)。0.001は補正係数であり、気温2°C以下を降雪としている条件下において、暖地・寒

地ともに適用できる⁹⁾。

(3) 融雪モデル

各メッシュの日融雪量SM(mm)は式(3)に示すようにdegree-day法により計算した。

$$SM = K \times T \quad (3)$$

ここで、Kは融雪係数(mm/day/°C)であり、Tは0°C以上の日平均気温(°C)である。

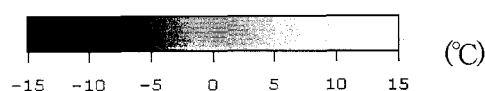
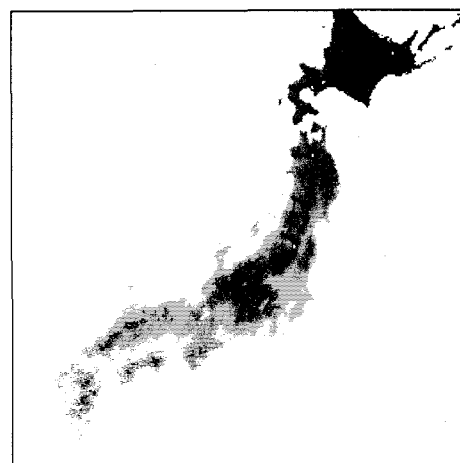


図-1 気温分布 (1999/2/14)

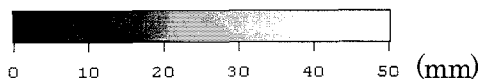
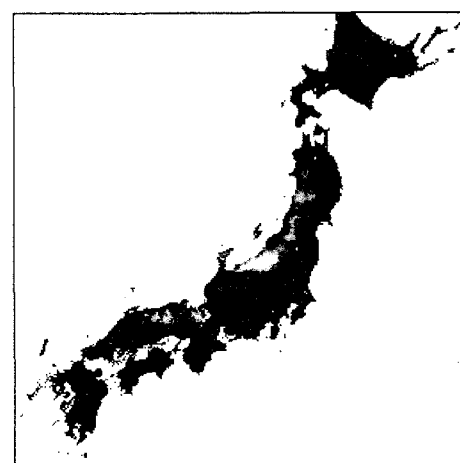


図-2 降雪量分布 (1998/12/31)

(4) 融雪係数の決定

融雪係数を変化させて求まるSWEモデルの積雪域とJAIDAS画像から作成した積雪マップにおける積雪域を比較し、最も相関が高い際に得られたものを融雪係数とした。つまり、様々な融雪係数を式(3)に代入し、最適な融雪係数を求めた。積雪マップとしては朝岡ら⁶⁾がリモートセンシングにより作成した東日本のもの(図-3)と、同手法により作成した西日本のものを用いた。

⑤ 積雪マップの作成

積雪マップは NOAA/AVHRR による東日本および西日本の JAIDAS 画像の ch1,3,4 (可視域(0.58~0.68 μm), 中間赤外域(3.55~3.93 μm), 熱赤外域(10.3~11.3 μm))⁷⁾を用いて、風間ら⁸⁾と同手法により作成した。まず ch1 の可視の波長域で目視により雲または雪の部分进行判定し、次に標高データを用い、気温減率(0.6°C/100m)を用いて ch4 の熱赤外の波長域を用いて輝度温度を 0m のものに補正し、標高による温度变化をなくし、氷で形成されている高層の雲を判定した。そして、ch3 の中間赤外の波長域が大気中の水粒に強く反射する性質から低層の雲を判定した。このようにして、雲域を除去して積雪マップを作成した。

ここでは、例として朝岡ら⁶⁾が上述の手法により作成した東日本の積雪マップ(1999.3.17, 1024×1024 メッシュ)を図-3 に示す。白い部分が積雪域であり、その他は無積雪域である。この積雪マップは、冬期の日本海域と高山域における被雲率が高く、容易に得ることができない。そのため、積雪域判定した図を 2 週間にわたって合成して雲域を取り除き、雲のない積雪分布図(積雪マップ)をおおよそ各月 1 枚作成し、融雪係数の決定に用いた。各月 1 枚の積雪マップを利用するため、積雪が安定している時期の精度は高いが、積雪の有無が日々变化する降雪期や融雪期の精度には多少の問題が残る。しかし、解像度が 1100m×1100m であるため、吹雪等による積雪の再分布の影響は少なく、大きな誤差にはならないと考えられる。



図-3 積雪マップ⁶⁾(1999/3/17)

(6) 積雪深、全層積雪密度の推定

積雪水量は、融雪期における流出量予測に必要不可欠なデータである一方、積雪深、全層積雪密度は冬の降雪期において、災害、交通情報として重要な役割を果たす。ここでの全層積雪密度とは、地面から積雪面までの全ての層での平均密度を表しており、積雪深に占める積雪水量と同じ値である。全層積雪密度を推定することは、雪氷災害時において有効なデータとなる。阿部ら⁹⁾によると、雪の乾湿や密度の大小によって、発生する雪氷災害の種類が全く異なってくると言われている。

そこで、本研究では積雪深、全層積雪密度についても日単位で推定を行う。積雪深は、風間¹⁰⁾にない SWE モデルと雪の圧密過程を考慮し推定する。このモデルは推定した積雪水量分布、気温分布を用いて計算を行い、積雪深、全層積雪密度を推定するものである。

積雪深 D は、前日の積雪深 D' と降雪深 D_n から式(4)のように求められる。

$$D = D' - dD + D_n \quad D_n = SF \frac{\rho_w}{\rho_s} \quad (4)$$

ここで、 ρ_s は降雪の新雪密度であり、式(5)のように与えた

$$\begin{cases} \rho_s = 0.04 & (T < -2.0) \\ \rho_s = 0.0667 + 0.0133T & (-2.0 \leq T < 1.0) \\ \rho_s = 0.08 & (T \geq 1.0) \end{cases} \quad (5)$$

降雪後は、雪自身の重さで圧密が起こる。この時の圧縮高さ dD は降雪量 SF と降雪前の積雪密度 ρ_D 、積雪深 D から式(6)のように示す。

$$dD = \beta_N SF \left(\frac{D}{10} \right)^{0.43} \frac{\rho_w}{\rho_D} \quad (6)$$

ここで、新雪圧縮係数 $\beta_N = 0.024$ 、 ρ_w は水の密度である。 ρ_D は前日の積雪密度 ρ_D' で与えられ、積雪前の積雪水量 SWE と積雪深 D から式(7)のように示す。

$$\rho_D = \rho_w \frac{SWE}{D} + \beta(\rho_{\max} - \rho_D') \quad (7)$$

終局密度 $\rho_{\max} = 0.55(\text{g/cm}^3)$ 、 β は圧密速度であり気温 T によって式(8)のように与えた。

$$\begin{cases} \beta = 0.012 & (T < 1.0) \\ \beta = 0.012T & (T \geq 1.0) \end{cases} \quad (8)$$

(4)~(8)式に示した係数および数値は、風間¹⁰⁾による時間単位での推定に用いたものを AMeDAS 観測所で観測されている日最深積雪を用いて比較・検討を行い、日単位での推定に適用できるようにしたものである。

4. 結果と考察

(1) 積雪水量分布

融雪量の推定に大きく影響する融雪係数は積雪マップ全域に対する相関が最も高くなるように決定した。1998-99 年の東日本と西日本の融雪係数を図-4 に示す。西日本の毎月の融雪係数は 4~6(mm/day/°C)の範囲に含まれており、戸塚ら³⁾による東日本の融雪係数の 3~5(mm/day/°C)より大きいことが確認できる。また、西日本の融雪係数の極大は 2~3 月、東日本の融雪係数の極大は 3~4 月にかけて現れていることが読み取れる。融雪係数

の極大は融雪量が大きくなっている時期を示している。そして、両者の融雪係数の範囲に多少の誤差はあるが、1998-99年という1シーズンで見れば、東日本における融雪係数の範囲は、同時期の西日本における融雪係数の範囲に含まれている。つまり、98-99年において東日本と西日本の融雪係数は概ね同一値であることが分かる。そして、図-4に示される融雪係数をそれぞれの地域に用いて日単位で推定した積雪水量分布(1999/3/1)を図-5に示す。

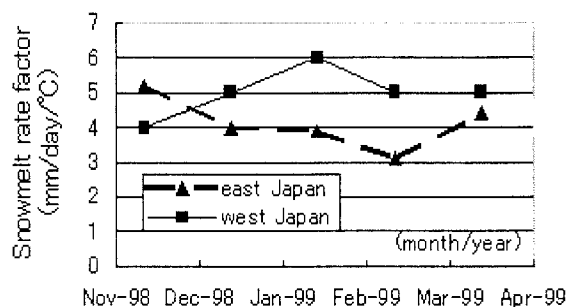


図-4 東西の融雪係数 (1998-99)

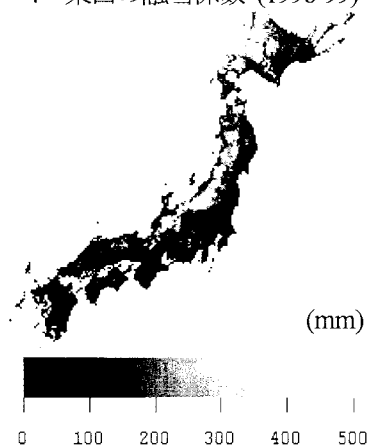


図-5 積雪水量分布 (1999/3/1)

(2) 全層積雪密度分布

図-6に日単位での全層積雪密度分布(1999/3/1)を示す。全層積雪密度が高い地域は雪の圧密が進行しており、水分が多いので融雪が始まっているといえる。また、西日本では雪が圧密することなく融雪してしまう地域が多く存在しており、降雪密度に近い地域が多いため、全層積雪密度の値は降雪の新雪密度 ρ_s の影響で低い値を示していることが分かる。また、全層積雪密度を広域に渡って推定することで、積雪による家屋倒壊などの情報をおおまかに把握することができると言える。

(3) 積雪深分布

図-7に日単位での積雪深分布(1999/3/1)を示す。積雪水量分布と同様な傾向が見られる。

冬期において、積雪は交通に多大な影響を与えるため、正確に積雪深を推定することができれば、日本海域や高山域を中心とする多雪地域において、交通情報として良い指標となる。そして、特に危険な地域において、実測値等とのキャリブレーションを行うことで、ダウンスケ

ールし、より詳細な情報を得ることも可能となる。そこで、本研究で推定した積雪深を実際に観測されているデータを用いて検証を試みる。

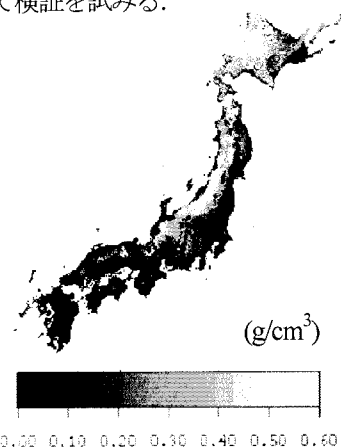


図-6 全層積雪密度分布 (1999/3/1)

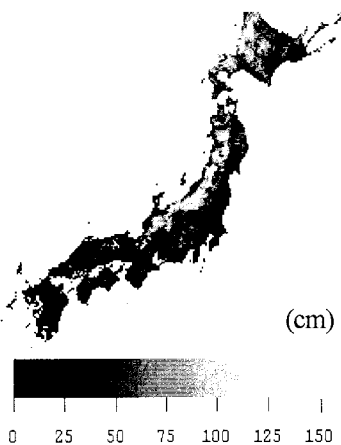


図-7 積雪深分布 (1999/3/1)

(4) 積雪深の検証

3章の解析方法で示した手法によって推定した積雪深分布(図-7)を AMeDAS 観測所で観測されている日最深積雪と比較することによって検証を行った。朝岡ら¹¹⁾によると、本研究で解析した1998-99年は多雪でも小雪でもなく、標準的な積雪年であり、積雪水量は2~3月にピークとなる地域が多かったと言われている。また、高山域、中腹部等で積雪の経時変化パターンが違うことを考慮して検証対象地域を選定した。それは、北から札幌(北海道)、横手(秋田)、湯田(岩手)、湯沢(新潟)、飯山(長野)、大山(鳥取)の6地点において、推定した積雪深と AMeDAS 観測所で計測された日最深積雪の推移を図-8~図-13に示す。

これら6つの図から分かるように、いずれの地点でも積雪深の変化の傾向は似ているものの、積雪深が極大となる挙動を正確に推定できておらず、積雪深が過小評価されていた。さらには融雪が終了する時期が10日程度遅れていた。これらの誤差の要因として考えられることをいくつか挙げる。まず、降雪における新雪密度を日平均気温による違いのみで与えたため、降雪直後の低密度の

雪が十分に再現できなかったことが考えられる。しかし、1 シーズンを通して平均的に捉えればまずまずの推定結果であった。また、降雪量を各メッシュで平均化された値を使用しているため、局所的な降雪を再現できなかったためとも考えられる。AMeDAS の観測所は街中に存在しており、小さい都市であると市街地以外を多く含んでしまう。そのため、それらの地域を推定した解像度 1100m × 1100m のものと、街中にある観測点でのデータという面と点との比較をし、検証を行ったために生じた誤差が考えられる。広域をとらえた衛星画像から推定した融雪の終了する日が遅くなったと説明できる。つまり、AMeDAS 観測所では雪が融けきったが、周辺域では積雪がまだ存在していた可能性がある。それ以外にも、積雪マップの作成には 2 週間～1 ヶ月の衛星画像を合成しているため、積雪域の変動が大きい融雪期には誤差が生じてしまう。以上のような要因から誤差が生じてしまったと考えられる。

図-8～図-13 には、融雪期である 3,4 月の融雪係数を

K=20 として解析を行ったものも載せた。その結果は融雪期の挙動をかなり精度良く推定することができていた。同様な研究を行っている N.P.Molotch ら¹²⁾によると、融雪係数の推定値は、観測値から同定する場合と衛星データから同定する場合にしばしば大きな差が生じることが述べられている。本研究でも先に述べたような理由から同様の結果となった。

次に、今回得た推定結果がおおよそ利用できるものとし、検証を行った 6 地点の積雪水資源について考察する。札幌は降雪が始まるのが早いが平野部にあるため、北海道内の他の地域と比較して降雪量は少なめであり、最大積雪深は 100cm 以内である。東北地方を二分する奥羽山脈を挟んで横手は日本海側に存在し、湯田は太平洋側に位置する。横手は市街地付近に盆地が存在し、逆に、湯田は高山地域である。そのため、両者の積雪深は 3 月上旬に 100cm と 225cm 程度と最大で 2 倍ほどの差が見られる。また、図-6～図-8 に示した各分布図から奥羽山脈沿いに積雪が出現し、その後日本海側が遅れて積雪する

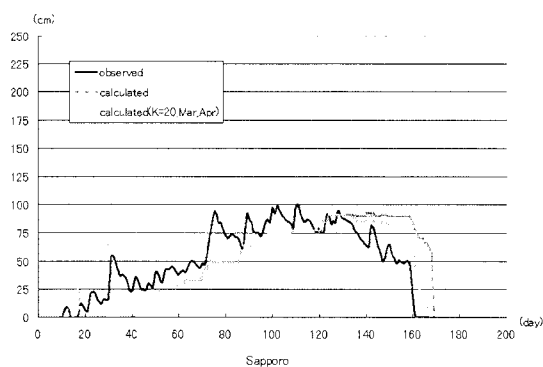


図-8 積雪深の検証(札幌)

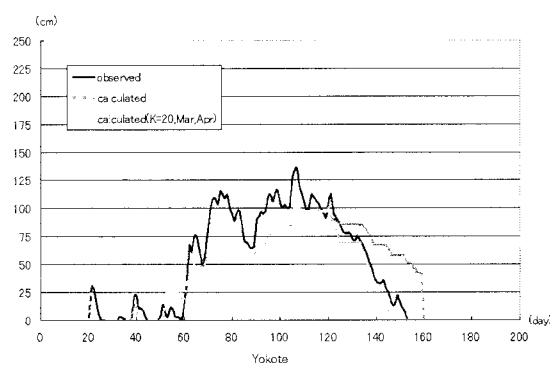


図-9 積雪深の検証(横手)

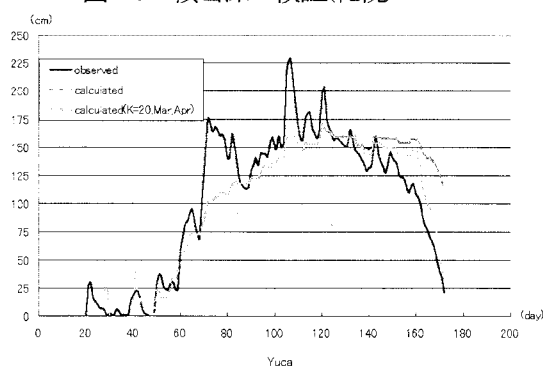


図-10 積雪深の検証(湯田)

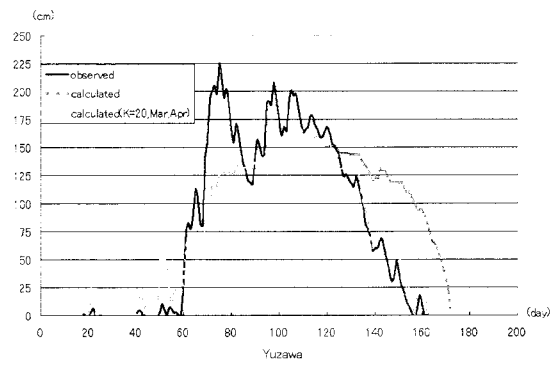


図-11 積雪深の検証(湯沢)

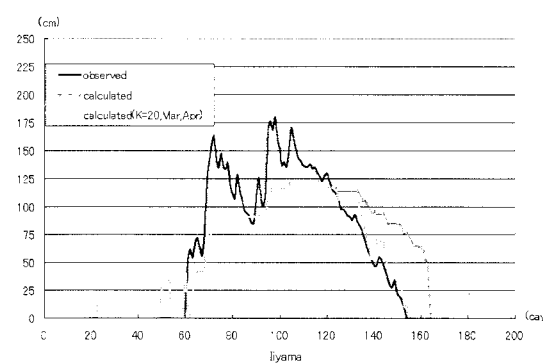


図-12 積雪深の検証(飯山)

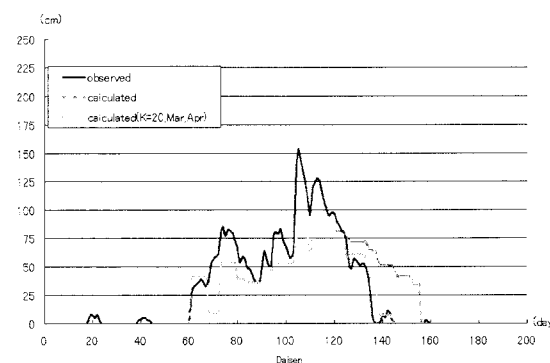


図-13 積雪深の検証(大山)

※図-8～図-13 の横軸(day)は 1998.11.1～1999.4.20 である。

ことが読み取れる。積雪密度は、積雪が安定し始めた 1 月は $0.20\sim0.30\text{g/cm}^3$ の範囲にあった。そして、3 月の積雪密度は横手周辺の盆地を中心として $0.40\sim0.50\text{g/cm}^3$ 、湯田周辺では $0.20\sim0.50\text{g/cm}^3$ であり、横手では融雪がかなり進行しており、湯田周辺でも融雪が進行しているものの、まだ積雪が安定している地域が存在していることが分かる。湯沢は 1000m を越える高山地域であり、積雪深は湯田（岩手）と同程度であるが、融雪時期はやや早く、密度変化も 0.50g/cm^3 以上になる時期が早いことが読み取れる。飯山は 2000m 級の志賀高原が近くに存在するが標高は低めであり、街の規模は小さい。積雪深は横手よりやや大きく、積雪密度の変化は横手とほぼ同程度の傾向を示した。大山は低緯度にもかかわらず標高が 1800m 程度あるため、100cm を越える積雪深が見られるが、降雪－積雪－融雪の過程が他の 5 地点よりも短期間で進んでいる。大山周辺の積雪密度は融雪が進行している 2,3 月でも $0.10\sim0.50\text{g/cm}^3$ という広範囲の値を示した。これは、積雪が徐々に圧密して大きくなった地域と、新たに降雪し、小さい値を示す新雪密度が分布している地域が存在していたためにこのような結果となった。

本研究では標準的な積雪年について解析を行ったが、今後は地球温暖化などの気候変動の影響も考慮して、小雪年についても解析を行う必要がある。小雪年は降雪期の終わりが早まり、それに伴い融雪期も早まる。この過程も本研究で用いたモデルで再現できるかを検討する必要がある。最後に、本研究で得た結果は、冬期の日本海城や高山域において積雪深データは交通情報や災害予測情報として有意義なものになるであろう。

5. まとめ

本研究では衛星データ、AMeDAS データ、数値地図情報から日本における日単位での積雪水量分布、積雪深分布、全層積雪密度分布の推定を速報性に優れた簡便な方法で行い、さらに積雪深の検証を行った。その結果から得られた結論を以下に示す。

- ・日本において、積雪水量分布、積雪深分布、全層積雪密度分布を日単位で推定することによって、広域に渡る積雪特性の把握をすることができた。
 - ・降雪過程および融雪過程の把握に有効である全層積雪密度の変化を推定することができた。
 - ・融雪期における融雪係数の範囲は広く、およそ $5\sim20(\text{mm/day}/^{\circ}\text{C})$ であった。
 - ・平均的な積雪年では融雪期に西日本の方が、融雪係数が大きくなる傾向がある。
 - ・冬期の豪雪地帯において、積雪深情報を整備することによって、雪崩、吹雪といった雪氷災害対策、交通情報として有意義なデータになり得る。
- 今後は、流域ごとに観測されている流量データ等を用

いることによって、積雪水量分布の検証も行っていく必要がある。また、全層積雪密度は実際に計測されているデータが乏しいため、実測をすることによって推定したデータを検証する必要がある。広域によって同定されたモデルを点データによって検証する際の問題点の克服は新たな研究課題である。解像度をさらに細かくし、推定することが可能となれば、検証の議論はより進むと同時に、雪崩等の雪氷災害の危険予測にもつながり得る。

謝辞

本研究を進めるにあたり「(独) 森林総合研究所」から援助を受けました。ここに記して謝意を示します。

参考文献

- 1) 小池俊雄・高橋裕・吉野昭一：積雪面積情報による流域積雪水量の推定 土木学会論文集 Vol.357, pp159-165, 1985.
- 2) 陸星蛟・早川典生・吉岡善浩：衛星積雪面積情報と分布型流出モデルを用いた流域降雪抽出特性の試み 水工学論文集 41, pp239-244, 1997.
- 3) 戸塚岳大・朝岡良浩・風間聡・沢本正樹：積雪モデルと衛星積雪面積情報を用いた東北地方の積雪分布と融雪係数の解析 水文・水資源学会誌 Vol.17, no.5, 2004 (印刷中)
- 4) 塚本良則：森林の水文学 pp195, 文永堂出版, 1992.
- 5) 近藤純正・本谷研・松島大：新バケツモデルを用いた流域の土壤水分量、流出量、積雪水当量、及び河川水温の研究 天気 vol.42, pp821-831, 1995.
- 6) 朝岡良浩・風間聡・沢本正樹：広域積雪水資源量の変動特性とその地理・気候依存性 水文水資源学会誌 vol.15, no.3, pp279-289, 2002.
- 7) 日本リモートセンシング研究会：図解リモートセンシング, pp114-115, 日本測量協会, 2001.
- 8) 風間聡・川村宏・松澤茂・及川一志・沢本正樹：AVHRR/NOAAデータによる積雪域抽出パラメータの経時変化 日本リモートセンシング学会誌 第8巻 第5号, pp477-483, 1995.
- 9) 阿部修・中村秀臣：新雪における新積雪の密度 東北地域災害科学研究 第36巻 pp165-170, 2000.
- 10) 風間聡：広域における積雪全層密度推定に関する研究 水工学論文集 第41巻 pp245-250, 1997.
- 11) 朝岡良浩・風間聡・沢本正樹：多雪年・小雪年の積雪分布について、平成 12 年度土木学会東北支部技術研究発表会講演概要, pp138-139, 2001.
- 12) N. P. Molotch, S. R. Fassnacht, R. C. Bales, S. R. Helfrich : Estimating the distribution of snow water equivalent and snow extent beneath cloud cover in the Salt-Verde River basin, Arizona, *Hydrological Processes*, 18, pp1595-1611, 2004.

(2004. 9. 30 受付)