全国のAMeDAS観測点における Degree-Day法および融雪係数の検証

VERIFICATION OF DEGREE-DAY METHOD AND SNOWMELT RATE FACTER IN AMeDAS POINTS OVER JAPAN

宮田 俊介¹・朝岡 良浩²・風間 聡²
Syunsuke MIYATA, Yoshihiro ASAOKA and So KAZAMA

¹学生員 東北大学大学院工学研究科(〒980-8579 宮城県仙台市青葉区荒巻字青葉6-6-06)

²正会員 東北大学大学院工学研究科(〒980-8579 宮城県仙台市青葉区荒巻字青葉6-6-06)

This paper verified Degree-Day method, one of the temperature-based snowmelt methods, over Japan with AMeDAS data. Snowmelt rate factor, which is parameter of the Degree-Day method, is optimized comparing observed snowdepth at AMeDAS point with estimated snow depth with SWE model and snow density estimation model. As a result, the optimized Degree-Day factor is able to estimate snowdepth with high accuracy at more than around 86% AMeDAS points. But snowmodel estimates snowdepth with less than 80% correlation factor at less than 1m maximum snowdepth and high temperature point. Moreover, we confirmed that maximum snowdepth and temperature have effect on snowmelt rate factor. Sensibility of correlation factor against temperature and precipitation showed same results.

Key Words : AMeDAS, Degree-Day method, snowmelt rate factor, SWE model

1. はじめに

日本において、積雪は重要な水資源であるが、地球温暖化をはじめとする気候変動は、降雪や積雪、融雪といった雪現象に大きな影響を及ぼす。過去の長期的な積雪量の再現は、気候変動あるいは気候変動が積雪水資源に与える影響の評価に対して有効なデータといえる。AMeDAS（地域気象観測システム, Automated Meteorological Data Acquisition System）は約30年間の観測データを保有し、空間解像度はおよそ17km四方である。このためAMeDASデータを積雪モデルにインプットすることにより、過去の長期にわたる積雪量のデータが作成された¹⁾。

積雪モデルは融雪量を推定する融雪モデルを組み込む必要があるが、融雪モデルは熱収支法とDegree-Day法の二つに分類することができる。熱収支法は融雪に寄与するエネルギーを成分ごとに求め、積雪層と大気との熱交換をモデル化した手法である。エネルギー交換の原理に基づいて融雪量を推定できるが、多種多様な気象観測データを空間的に高密度で必要とするため、広域に適用することは難しい。これに対し、Degree-Day法は積雪期間の

日融雪量が日平均気温と線形関係にあると仮定する手法である。気温のみで融雪量を推定するシンプルな方法であり、AMeDASデータを用いた広域にわたる積雪量の推定に適している。Degree-Day法のパラメータである融雪係数は気象や地域に応じて設定する必要がある。

日本ではDegree-Day法を適用して広域の積雪量・融雪量分布を推定した事例が多い^{2), 3)}。しかしDegree-Day法は物理的根拠に乏しい簡易モデルであり、信頼性や適用性に問題がある。山崎⁴⁾は融雪係数の熱収支的な解釈を試み、限られた試験地において融雪係数の検証を行った。しかし日本は南北に延び、かつ脊梁山脈によって気象が異なるので、様々な地点においてDegree-Day法の妥当性について検証する必要がある。

そこで本研究はDegree-Day法を組み込んだ積雪モデルを広域に適用した際の精度や適用性を明らかにすることを目的とした。この目的のため、AMeDAS観測点約300か所における過去30年の融雪係数を推定し、積雪深の推定値と実測値を比較する。これにより日本全域のAMeDAS観測点において積雪モデルの精度を調べ、その精度の気象依存性を定量的に抽出した。また、積雪モデルの融雪係数と気象観測データを解析し、融雪係数の地域性に対する物理的な考察を行った。ただし、融雪係数

図-1 対象となる AMeDAS 観測点の分布図

の年変動については議論していない。さらに、Degree-Day法の精度を示す相関係数について感度分析を行い、Degree-Day法の精度に影響を与える気象要素を定量的に評価した。これらはDegree-Day法やDegree-Day法を用いた積雪モデルの汎用性を高めるための重要なプロセスであると考えられる。

2. データセット

風速と降水量、気温、日照時間、積雪深を観測する約300か所のAMeDAS観測点（図-1）を対象として積雪モデルを適用した。解析の対象期間は観測開始から2004年4月までとし、11月から翌年4月までを積雪期間として一定の融雪係数を求めた。ただし積雪期間中の積雪日数が15日以上の場合のみを解析の対象とした。これは積雪日数が極端に短い場合には、データ数の少なさのため後述する相関係数が過大評価されることを考慮したためである。

各地点における気象データ（降水量と気温、風速、日照時間、積雪深）はアメダス統計値から取得した。AMeDAS統計値とは全国各地のAMeDAS観測点で得られた観測データを、1976年から2004年までの29年間収録したものである。本論文は日単位の観測データのみを用いており、以降本論文において、特に断りの無い限り観測データは日単位のデータを指すものとする。

3. Degree-Day法を用いた積雪モデル

(1) Degree-Day法について

Degree-Day法とは融雪の原因となる諸因子を気温で代表させる方法である。融雪量は次式で示される。

$$SM = T \cdot K \quad (1)$$

ここで、 SM は日融雪量(mm/day)、 T は日平均気温(°C)、 K は融雪係数(mm/day・°C)である。融雪係数はDegree-Day法において融雪量を決定する重要なパラメータであり、日本では0.7から8.0 mm/°C・day程度の値をとることが報告されている⁵⁾。本研究では各AMeDAS観測点の各積雪期間における融雪係数を推定する。

(2) 融雪係数の最適化と積雪モデルの検証

融雪係数は各アメダス観測点における日最大積雪深の観測値と、積雪モデルによる日最大積雪深（以降日最大積雪深を積雪深と記述する）の推定値を同定することにより求める。融雪係数を0.1から20.0まで0.1刻みに変化させ、積雪深の観測値と任意の融雪係数に対応した積雪深の推定値の相関係数を求め、相関係数が最大となる融雪係数を採用する。相関係数により、最適化された融雪係数によるDegree-Day法を用いた積雪モデルが、積雪深をどの程度再現可能か定量的に評価できる。また相関係数と気象データの解析により、気象要素が積雪モデルの精度に与える影響について調べる。

(3) 積雪モデル

積雪モデルは、積雪水量モデルと全層積雪密度モデルにより構成され、気温と降水量の気象データを入力データとして用いる。まず、積雪水量モデルについて説明する。積雪水量モデルを用いて積雪水量を推定する式を以下に示す。

$$SWE = SWE' + SF - SM \quad (2)$$

ここで SWE は積雪水量(mm/day)、 SWE' は前日の積雪水量(mm/day)、 SF は降雪水量(mm/day)であり、表面で発生した融雪水は即座に積雪層から底面へ流出すると仮定して、積雪底面流出量を融雪量とみなしている。また底面融雪量および降雨による融雪量は考慮していない。ここで降水形態を判別する必要がある。広域における判別に関してKazama *et al.*²⁾や泉ら⁶⁾は判別気温を用いている。本研究もこれらに倣い、日平均気温が2°C以上の降水形態を降雨とし、2°C以下の降水形態を降雪とした。

次に積雪水量から積雪深を推定するために、風間⁷⁾の全層積雪密度推定モデルを用いた。このモデルは広域に適用可能で一定の精度が得られ、これまでに様々な観測地点においてその妥当性が確認されてきた⁶⁾⁷⁾。全層積雪密度は以下の式により示される。

$$\rho_d = \frac{SWE}{SD} + \beta(0.55 - \rho_d') \quad (3)$$

ここで ρ_d は全層積雪密度(g/cm³)、 SD は積雪深(mm)、 β は圧密速度、 ρ_d' は前日の全層積雪密度(g/cm³)である。

図-2 積雪深の推定値と実測値の比較（2000年冬季）

図-3 最大積雪深と相関係数の散布図

圧密速度は気温により以下のように与えた。

$$\beta = \begin{cases} 0.002 & T < 1.0 \\ 0.002T & T \geq 1.0 \end{cases} \quad (4)$$

また積雪深は以下のように求められる。

$$SD = SD' - \frac{0.284R}{\rho d'} \left(\frac{SD'}{10} \right)^{10} + \frac{R}{\rho s} \quad (5)$$

ここで SD' は前日の積雪深(mm), R は降雪量(mm), ρs は降雪密度(g/cm^2)である。降雪密度は気温を用いて以下のように与えた。

$$\rho s = \begin{cases} 0.04 & T < -2 \\ 0.0667 + 0.0133T & -2 \leq T < 1 \\ 0.08 & T \geq 1 \end{cases} \quad (6)$$

本研究の手法を用いた積雪深の再現性の例として、2000年冬季の6観測点において最適化した融雪係数を用いて推定した積雪深と実測値の比較を図-2に示した。

4. Degree-Day法および融雪係数の検証結果と考察

(1) Degree-Day法の検証

対象とした2545のケースについて融雪係数を最適化した結果、約86%に相当する2186のケースにおいて、積雪深の推定値と実測値は0.8以上の高い相関係数を示した。これにより、適切な融雪係数を設定すれば多くの地域においてDegree-Day法による融雪量の推定が有効であるといえる。

(2) 相関係数と気象データの解析

融雪係数の最適化より求めた相関係数と気象データを解析した結果、最大積雪深と相関係数に相関性がみられた。全てのケースにおける最大積雪深と相関係数の散布図を図-3に示す。最大積雪深の増加に伴い、相関係数は増加する傾向にあり、積雪量の多い地域においてDegree-Day法は融雪量の推定に適していると考えられる。

この結果について考察を行う。融雪に寄与するエネルギー成分は日射・大気放射・顕熱伝達・水蒸気輸送に伴う潜熱・雨による伝達熱・地中伝導熱が考えられる⁸⁾。

図-4 相関係数 0.8 以上のケースにおける融雪係数の度数分布

表-1 最大積雪深1000mm以下、相関係数が0.8未満と0.8以上の対象地点の気象条件

	相関係数 0.8未満	相関係数 0.8以上
期間平均気温(°C)	4.5	1.3
積雪日数(日)	54.4	100.1
最大積雪深(mm)	304.7	648.3

表-2 融雪係数が5.0以上のグループと5.0未満のグループの気象条件

	融雪係数 5.0 以上	融雪係数 5.0 未満
融雪係数 (mm/°C・day)	8.0	1.7
最大積雪深 (mm)	325	474
積雪期間の 日平均気温(°C)	-0.3	0.9
融雪期間の 日平均気温(°C)	1.6	2.6

表-3 地域別のケース数に対する融雪係数が5.0以上の地域別ケース数の割合

地域区分	割合 (%)
北海道北西部	5.6
北海道南東部	16.7
東北	3.4
北陸	12.4
その他	4.5

これらのエネルギー成分のうち卓越するものは日射・顕熱伝達であるが、気温が高い場合には日射・顕熱伝達に

よる熱は気温と相関関係を持つため⁹⁾、気温が高い状態において気温と融雪量の一次近似は成立しやすい¹⁰⁾。さらに積雪量の多い地域では気温が高く一次近似できる状態が全体の融雪期間に対して占める割合が大きい。以上より積雪量の多い地域においてDegree-Day法の精度がよいと考えられる。

また最大積雪深が小さくなるに従い、相関係数は減少する傾向にある。図-3に示すように、相関係数が0.8未満である359のケースは全て最大積雪深が1000mm以下であった。そこで最大積雪深が1000mm以下のケースを相関係数が0.8未満のグループと0.8以上のグループに分類し、気象データの平均値を比較した。その結果、表-1に示されるように最大積雪深が1000mm以下であり相関係数が小さいケースは気温が高く積雪日数が少ない。また最大積雪深が1000mm以下であるものの相関係数が大きいケースは気温が低く積雪日数が多い。以上より、最大積雪深が小さくかつ気温が高く積雪日数が少ない地域において、Degree-Day法による融雪量の推定は不適切であることが示唆された。

この結果について考察する。表面融雪が発生すると水みちが形成され、くぼみが生じることがある¹¹⁾。積雪深の小さな観測点では積雪が不均一に存在するため、均一な積雪面の熱収支を仮定することが難しく、また裸地における地表面の熱収支の影響を受けやすくなる。また、積雪深が小さい場合には、AMeDASの積雪深観測の誤差が積雪深に占める割合が大きくなる。以上より気温が高く最大積雪深が小さい場合にはDegree-Day法の適用性に問題があると考えられる。

(3) 融雪係数と気象データの解析

相関係数が0.8以上である2186のケースについて、融

図-5 熱収支法を用いた積雪モデルによる積雪深の推定値と実測値の比較

図-6 気温と降水量の変化に対する相関係数の分布

雪係数の頻度分布および累積頻度分布を図-4に示す。図より融雪係数の値は0.1から5.0の範囲に92.8%が分布していることが示された。そこで融雪係数が5.0以上である166ケースのグループと、融雪係数が5.0未満である2020のケースのグループに分類し、解析を行った。

まず、二つのグループについて、気象データの各要素の平均値を求めて比較した(表-2)。その結果、融雪係数が5.0以上であるグループは融雪係数が5.0未満であるグループに比べ、最大積雪深が小さく、積雪期間および融雪期間の日平均気温が低いことが示された。これより、最大積雪深と気温は融雪係数の値に影響を与えると思われる。これは、寡雪寒冷地帯では降雪量や積雪量が少なく、融雪が低温状態のまま進行し、早期に消雪し、融雪熱量に対して放射成分が卓越するため気温のみで融雪現象を表現することに無理があるため融雪係数が高い値になるとした報告¹²⁾と一致している。

次に、地域別のケース数に対する融雪係数が5.0以上の地域別ケース数の割合を表-3に示す。ただし北海道地方については、宗谷・上川・留萌・石狩・空知・渡島・檜山の各振興局の管轄地域を北海道北西部とし、それ以外の地域を北海道南東部として、二つの地域に分けた。これより、北海道地方を対象とした場合には、ケース数

は積雪量の多い北西部よりも積雪量の少ない南東部に多くみられることが確認できる。北海道南東部は北海道北西部と比較して、最大積雪深が少なく、消雪日が早い時期に訪れるとされる¹²⁾。また冷帯に属する北海道南東部は気温が低い地域である。よって北海道南東部は融雪係数が比較的大きくなると考えられ、上述した解析結果との整合性がみられた。また表-3より北陸地方は割合が高いことが分かる。これは北陸地方には最大積雪深が小さく積雪日数が少ないAMeDAS観測点が比較的多く存在するためと考えられる。

5. 熱収支モデルによる感度分析

前章2節において、Degree-Day法の適用性に影響を与える要素として最大積雪深と積雪日数、気温を示したが、その影響を定量的に評価するためにDegree-Day法の感度分析を行った。

(1) 感度分析の方法

Degree-Day法の適用性に影響を与える要素のうち、最大積雪深と積雪日数は降水量と正の相関があると思われる。そこで降水量と気温の二つのパラメータを変動させた際の積雪深を、熱収支法を用いた積雪モデルによって再現する。そして再現した積雪深とDegree-Dayを用いた積雪モデルにより推定した積雪深について融雪係数の最適化を行い、相関係数を求めた。

(2) 熱収支モデル

熱収支法を用いた積雪モデルを構築するために、泉ら¹³⁾から熱収支解析による融雪モデルを得た。この融雪モデルは積雪を一つの層とみなし、積雪面における放射量と潜熱・顕熱交換量より融雪熱量を求め、融雪量を推定する。これより、式(2)に示す積雪水量を推定し、全層積雪密度モデルと組み合わせることにより熱収支法を用いた積雪モデルを構築した。

この積雪モデルのデータセットとして、山形の地上気象観測所における2005年11月から翌年4月までの気象データを気象庁月報より取得した。この期間における、熱収支法を用いた積雪モデルによる積雪深の推定値と実測値の比較を図-5に示す。推定値と実測値の相関係数は約0.89となり、熱収支法を用いた積雪モデルは積雪深を精度よく再現することが示された。

(3) 感度分析の結果と考察

降水量はデータセットの観測値に0.1倍から2.0倍までの降水量の変化率を掛けることにより変動させた。また、気温はデータセットの観測値に-5.0℃から+5.0℃まで

の気温の変化(°C)の値を加えることにより変動させた。

図-6に気温と降水量の変化に対する相関係数の分布を示す。図によると、気温の増加と降水量の減少に伴い相関係数は減少している。これより気温が高く積雪量が少ない気候においてDegree-Day法の精度が低下することが示唆された。これは最大積雪深が小さくかつ気温が高く積雪日数が少ない地域において、Degree-Day法による融雪量の推定は不適切であるとした前章2節の検証結果と一致している。この結果を気温と降水量を用いて定量的に評価すると、相関係数が0.7以下となる条件として式(7)が得られた。

$$Y - 5.8X \geq -2.0 \quad (7)$$

ここで降水量の変化率の値を X 、気温の変化量(°C)の値を Y とした。

また気温を -3.5°C から -5.0°C まで低下させた場合に相関係数の減少がみられ、そのケースにおいて最適化された融雪係数は $20\text{mm/day}\cdot^{\circ}\text{C}$ 近い値であった。これより気温が著しく低い気候では融雪係数が増加することを示唆された。これは冬季の日平均気温が低い地域において、融雪現象を気温のみで表現することに無理があるため融雪係数が増加する前章3節の検証結果と一致している。

今後様々な気候の地域で感度分析を行うことにより、Degree-Day法のパラメータ補正法を定式化することが望まれる。ただし熱収支法を用いた積雪モデルには多様な気象データが必要であり、気象観測所の観測精度が分析結果に影響を与えやすいことに留意する必要がある。

6. おわりに

本研究では、日本全域のAMeDAS観測点において融雪係数を求め、Degree-Day法の精度や融雪係数について検証を行った。その結果を以下に示す。

- ・全国の約86%の地点においてDegree-Day法により融雪量を精度よく推定できた。
- ・気温が高い状態で融雪が進むため、積雪量の多い地域においてDegree-Day法は融雪量の推定に適している。
- ・最大積雪深が小さく、かつ気温が高く積雪日数が少ない地域においてDegree-Day法は融雪量の推定に不適切である。
- ・融雪係数が比較的大きくなる事例は北海道南東部にいて多くみられ、融雪係数の増加に影響する気象要因として、最大積雪深と気温を確認することができた。
- ・熱収支法を用いた分析により、気温と降水量がDegree-Day法の適用性に影響を与えることを確認し、その影響を式(7)により定量的に評価した。

これらの知見はDegree-Day法が使用可能な地域の判別方法の確立や、日本全域の積雪量データベースの作成に役立つと思われる。

謝辞：本研究の一部は、JST/JICA地球規模課題対応国際科学技術協力事業(SATREPS)の援助によるGRANDEによって実施されました。

参考文献

- 1) 本谷研：東北地方における積雪水量の27年平均値と豪雪・寡雪、雪氷、70巻3号、pp.561-570,2008.
- 2) So Kazama, Hirokazu Izumi, Priyantha Ranjan Sarukkalige, Takayuki Nasu, Masaki Sawamoto.: Estimating snow distribution over a large area and its application for water resources, Hydrological Processes, 22(13), pp.2315-2324, 2008.
- 3) Kominami, Y., Tanaka, N., Endo, Y. and Niwano, S.: Estimation of snow distribution under global warming using data from remote weather stations (AMeDAS), Journal of Agricultural Meteorology, 60, pp.445-450, 2005.
- 4) 山崎剛：融雪係数の熱収支的検討、雪氷、57巻3号、pp.239-244, 1995.
- 5) 板倉忠興：水理公式集、社団法人土木学会、p.27, 1949.
- 6) 泉宏和、風間聡、戸塚岳大、沢本正樹：全日本の積雪水量、積雪深、全層積雪密度分布推定、水工学論文集、第49巻、pp.301-306, 2005.
- 7) 風間聡：広域における積雪全層密度推定に関する研究、水工論文集、第41巻、pp.245-250, 1997.
- 8) 小野延雄、石川信敬、新井正、若土正徳、青田昌秋：雪氷水文現象、古今書院、pp.18-19, 1994.
- 9) 小島賢治：融雪機構と熱収支、気象研究ノート、第136号、pp.1-38, 1979.
- 10) 熊倉俊郎、山野井克己、早川典生：積雪の多層圧密モデルを用いた北陸地方の降積雪現象の解析、雪氷、66巻1号、pp.35-50, 2008.
- 11) Kathy L.Young, Jane Assini, Anna Abnizova and Nelson De Miranda : Hydrology of Hillslope-Wetland Streams, Polar Bear Pass, Nunavut, Canada, Hydrol. Process. 24, pp.3345-3358, 2010.
- 12) 朝岡良浩、小南裕志、竹内由香里、大丸裕武、田中信行：衛星観測に基づく積雪水量の広域推定と融雪係数の地域性、水文・水資源学会誌、第20巻、第6号、pp.519-529, 2007.
- 13) 泉宏和、風間聡、沢本正樹：積雪水資源量評価における森林の影響について、水工学論文集、第50巻、pp.421-426, 2006.

(2011. 9. 30受付)