

改良型ディグリー・デー法による日融雪量推定の精度検証

河島 克久¹・和泉 薫¹

Validation of the accuracy of daily amount of snowmelt estimated by using advanced degree-day method

by

Katsuhisa KAWASHIMA and Kaoru IZUMI

Abstract

A simple method for estimating daily amount of snowmelt has been proposed by Kawashima *et al.* (2002), with the objective of application to railway disaster prevention during snowmelt season. This method, called the advanced degree-day method in this study, was developed by modifying the existing degree-day method to suit day-to-day estimation of snowmelt. The advanced degree-day method allows an estimate of the first date when continuous snowmelt occurs as well as the daily snowmelt by using air temperature data alone. However, the truth of the matter is that the accuracy validation of the proposed method is not performed still enough. In this study, aiming at the accuracy validation of the method, the comparison was made between the daily amount of snowmelt obtained during two snowmelt seasons in 2007 and 2008 at Shiodani observation site and that estimated by using the advanced degree-day method. Consequently, it was found that the advanced degree-day method was capable of estimating the daily amount of snowmelt with an accuracy of approximately $\pm 10\text{mm}$. In addition, the estimated first date when continuous snowmelt occurs was in good agreement with the observation.

キーワード：日融雪量, 改良型ディグリー・デー法, 推定精度, 中越地震被災地

Keywords: daily amount of snowmelt, advanced degree-day method, estimation accuracy, areas devastated by the Mid Niigata Pref. Earthquake

はじめに

2004年10月に発生した新潟県中越地震は中山間地域の斜面に大きなダメージを与えた。また、中越地震の直後に2冬期連続で豪雪に襲われたため、被災斜面の中には一層荒廃が進んだものもある。中越地震から3年以上経過し、生活圏に位置する比較的規模の大きい被災斜面については復旧がほぼ完了したが、被災地には小規模な崩壊、亀裂、倒木などがまだ残されており、地震の影響で不安定化した斜面全てが解消されたわけではない。実際に、中越地震の影響を受けた長岡市森上（旧栃尾市）の県道脇斜面において、土砂を伴った全層雪崩（表土内部の破壊によって発生した全層雪崩）が2008年1月6日に発生したとの報告がある（鈴木ら, 2008）。この土砂崩壊を伴った全層雪崩は気温上昇による融雪水の地盤浸透が関与していると考えられ、豪雪地域である中越地震被災地の積雪期の防減災を推進するうえで、融雪量の評価とそれに応じた対策が望まれる。融雪量の評価には熱収支法、ディグリー・デー法、ライシメーター法など様々な手法があるが、

それぞれで精度、時間分解能、所要コスト（機器）が異なり、使用目的や場所によって最適な手法を検討する必要がある。

本研究では、著者らが提案した日融雪量の簡易推定方法（改良型ディグリー・デー法、河島ら（2002））の検証を目的として、2006/2007積雪期及び2007/2008積雪期に小千谷市塩谷地区で得られた気象・積雪観測データを解析した。この改良型ディグリー・デー法は、気温データのみを用いて融雪開始日と開始日以降の日融雪量を評価する簡便かつ実用的な手法であるが、これまでその精度的な検証は十分にはなされていなかった。そこで、著者らが中越地震被災地の防災力向上に資するために小千谷市塩谷地区へ設置した気象・積雪観測システム（河島・和泉, 2007）で得られた日融雪量データと、改良型ディグリー・デー法で推定された融雪開始日及び日融雪量との比較検討を試みたわけである。さらに、この改良型ディグリー・デー法を用いて中越地震被災地の複数地点の日融雪量を推定し、日融雪量変化にどのような地域差があるかを調べた。

¹ 新潟大学災害復興科学センター

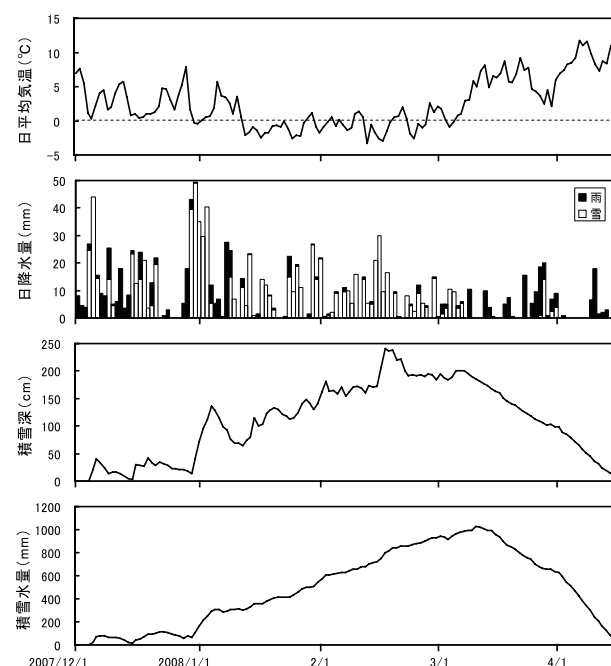
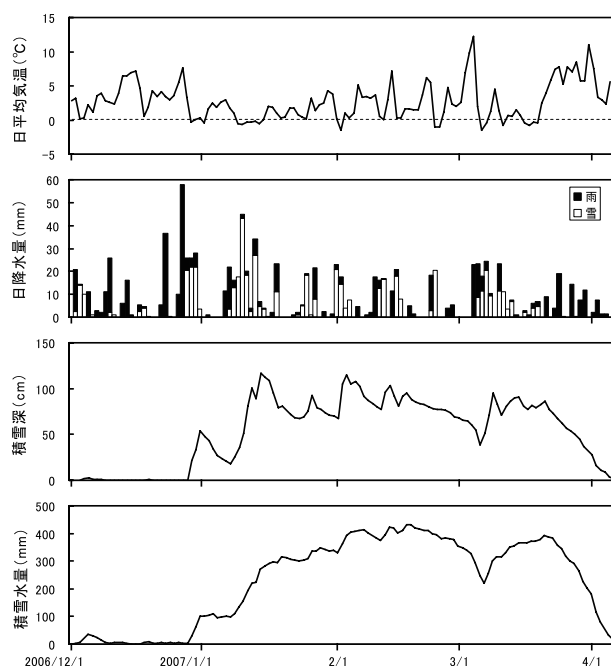
小千谷市塩谷地区の気象・積雪観測システムの概要

小千谷市塩谷地区（塩谷小学校跡地、標高約300m）に2006年12月に設置された気象・積雪観測システムは、気温・湿度・降水量・降雪強度・雨雪判別・風向風速・日射量・積雪深・積雪重量・融雪量を計測する各種センサ、データロガ・工業用パソコン・電源コントローラ・無停電電源装置・耐雷トランス・通信装置などの機器、及びWebカメラから構成されている（図－1）。各種データ（10分間隔）は、ISDN回線を介して送信され、インターネット環境の整ったパソコンから所定のサイトにアクセスすることによってリアルタイムでの閲覧（表形式及びグラフ形式）が可能である。

本システムによる取得データのうち、2006/2007年積雪期及び2007/2008年積雪期の日平均気温、日降水量（雨雪別）、積雪深、積雪水量を図－2に示す。2006/2007年積雪期の新潟地域は記録的な暖冬少雪であった（冬季平均気温（12月～2月）2.2℃）。一方、2007/2008年積雪期は平年並みの積雪量であり、冬季平均気温は0.9℃であった。



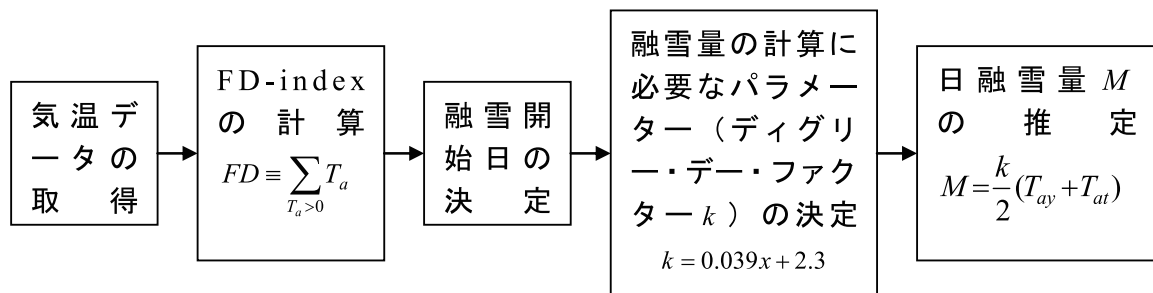
図－1 小千谷市塩谷地区の気象・積雪観測システム。



図－2 塩谷における日平均気温、日降水量（雨雪別）、積雪深、積雪水量の変化（上：2006/2007年積雪期，下：2007/2008年積雪期）。

改良型ディグリー・デー法

河島ら（2002）は、鉄道沿線における融雪期の斜面災害に対し列車運行の安全性を確保することを目的として、ディグリー・デー法を用いて日融雪量を推定する場合の精度向上の方法について検討した。その結果、図－3のフロー図に示す手順によって日融雪量を推定する方法を提案した。この概要をフロー図に沿って説明すると以下の通りである。なお、ここで用いる日融雪量とは、雪面融雪量ではなく、斜面災害への適用の観点から融雪水の積雪底面流出量を意味している。



図－3 改良型ディグリー・デー法における日融雪量推定のフロー。

気温データの取得

融雪量を推定したい箇所の日平均気温を取得する。気温データは現地で測定されたものを用いるのが最善であるが、データがない場合には、アメダスデータのような気象データを高度補正して使用することもできる。

FD-indexの計算

取得された気温データから、次式のように、日平均気温 T_a を積算した形態で表現される指標であるFD-index (First Discharge Index, 以後FDと表す) を計算する。

$$FD = \sum T_a \quad (1)$$

ただし、その算出においては、①日平均気温がマイナスの場合は $T_a = 0$ として扱う、②3日間連続して日平均気温がマイナスの場合はFDを0に戻す、という条件を設けておく。

融雪開始日の決定

あらかじめFDにしきい値を設定しておき、FDがしきい値を超えた日を融雪開始日（融雪水の積雪底面流出が連続的かつ顕著に起こり始める日）とみなす。最適なしきい値は場所によって多少異なるが、多くの場合、 10°C day 程度に設定しておけば、融雪開始日を精度良く決定できる。

ディグリー・デー・ファクターの決定

融雪量の計算に必要なパラメーターであるディグリー・デー・ファクター k ($\text{mm}/^\circ\text{C}/\text{day}$) を次式から求める。

$$k = 0.039x + 2.3 \quad (2)$$

ここで x は、融雪開始日をユリウス日数（1月1日を1として日数を順次積算したもの）の形態で表したものである。

日融雪量の推定

日融雪量を推定する日の前日の日平均気温 T_{ay} 、日融雪量を推定する当日の日平均気温 T_{at} 及びディグリー・デー・ファクター k を用いて、日融雪量 M (mm) を次式により推定することができる。

$$M = \frac{k}{2} (T_{ay} + T_{at}) \quad (3)$$

日融雪量の観測値の導出

改良型ディグリー・デー法による日融雪量推定の精度を検

証するため、小千谷市塩谷地区の気象・積雪観測システムの観測データから日融雪量を導出した。本システムには融雪量計（積雪ライシメータ）が含まれており、その観測結果から直接的に日融雪量を求めることが可能であるが、現状ではその計測データに若干の不安定性があるため、本研究では、河島ら（2002）と同様に積雪重量計から得られた積雪水量データ等を用いて次式により日融雪量を算出した。

$$M = Hw_b - (Hw_t - S) \quad (4)$$

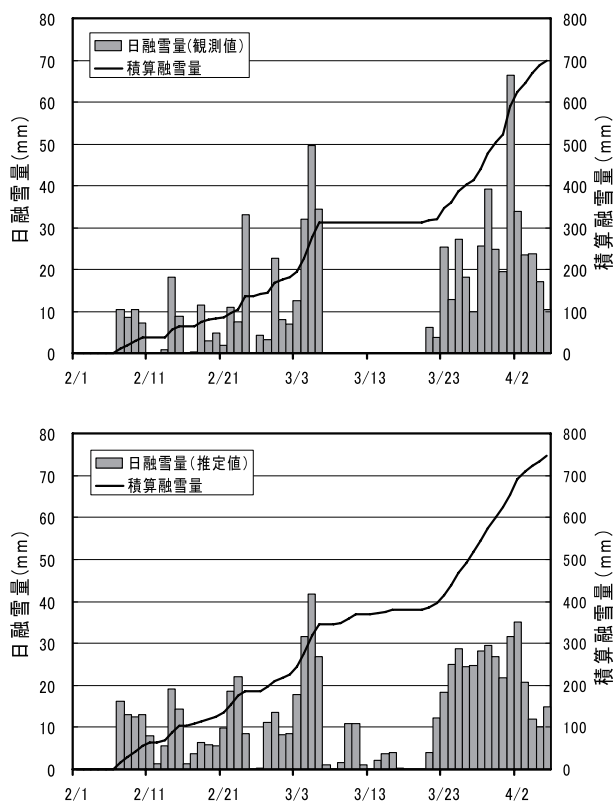
ここで、 M は日融雪量 (mm)、 Hw_b は日融雪量を評価する日の前日24時の積雪水量 (mm)、 Hw_t は日融雪量を評価する当日24時の積雪水量 (mm)、 S は日融雪量を評価する当日の日降雪水量 (mm) である。積雪水量はメタルウエファース式の積雪重量計によって得られるものであり、式(4)から求まる日融雪量は、雪面融雪量ではなく、前述のとおり融雪水の積雪底面流出量を意味する。日降雪水量 S は、降水量を雨雪判別計（雪温式）のデータで雨量と降雪量に分け、このうち降雪量のみを日積算して求めたものである。この際、降水量の補足率の補正は行っていない。

日融雪量の観測値と改良型ディグリー・デー法による推定値との比較

小千谷市塩谷地区の気象・積雪観測システムで得られた2006/2007年積雪期及び2007/2008年積雪期について、式(4)によって日融雪量を求め、これと改良型ディグリー・デー法による推定結果とを比較した。なお、この比較は両年ともに2月1日から消雪日の前日までを対象とした。前述したFD-indexは2月1日以降について計算を行い、融雪開始日を決定した（FDのしきい値 10°C day ）。

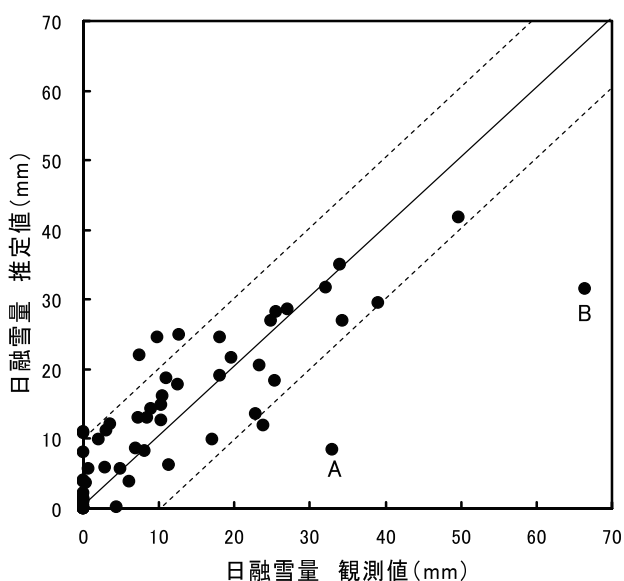
2006/2007年積雪期

2006/2007年積雪期の日融雪量の変化を観測値と推定値を比較して図－4に示す。図には2月1日を起日とした積算融雪量も実線で表している。2006/2007年積雪期は暖冬であったため2月7日から日融雪量が観測されているが、この融雪開始日を推定結果は良好に再現している。また3月7日から3月20日まで続いた寒気侵入と降雪による融雪の中断に関しても、推定値はまずまずの一致をみせている。日融雪量の観測値と推定値の相関図を融雪開始日から消雪日の前日までを対象として図－5に示す。期間内のほとんどの日で推定値は

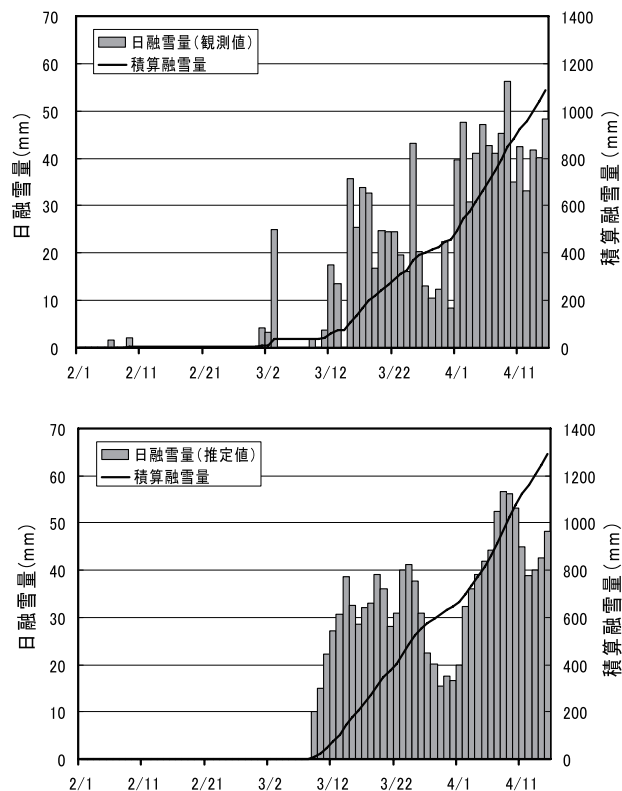


図－４ 塩谷における日融雪量と積算融雪量の観測値（上）と推定値（下）の比較（2006/2007年積雪期）。

観測値の $\pm 10\text{mm}$ 以内に収まっているが、2月24日（図－5のA）と4月1日（図－5のB）の両日は推定値が観測値を大きく下回っている。この両日は、前日にそれぞれ15.5mm、12mmの降雨が観測されており、これが式(4)によって算出される日融雪量に大きく影響した可能性がある（河島ら，2006）。



図－５ 塩谷における日融雪量の観測値と推定値の相関図（2006/2007年積雪期）。実線と破線は、観測値＝推定値、観測値＝推定値 $\pm 10\text{mm}$ をそれぞれ表す。



図－６ 塩谷における日融雪量と積算融雪量の観測値（上）と推定値（下）の比較（2007/2008年積雪期）。

2007/2008年積雪期

2007/2008年積雪期の日融雪量の変化を観測値と推定値を比較して図－6に示す。FD-indexによる2007/2008年積雪期の融雪開始日は3月9日であり、これは観測結果との比較から良好な推定であると言える。また、3月末に融雪がいったん弱まっている点や融雪末期に融雪量が上昇している点などもある程度良好に再現できているものの、図－7の相関図に示すように、推定値が観測値から大きく外れる事例が2006/2007年積雪期よりも多くみられる。

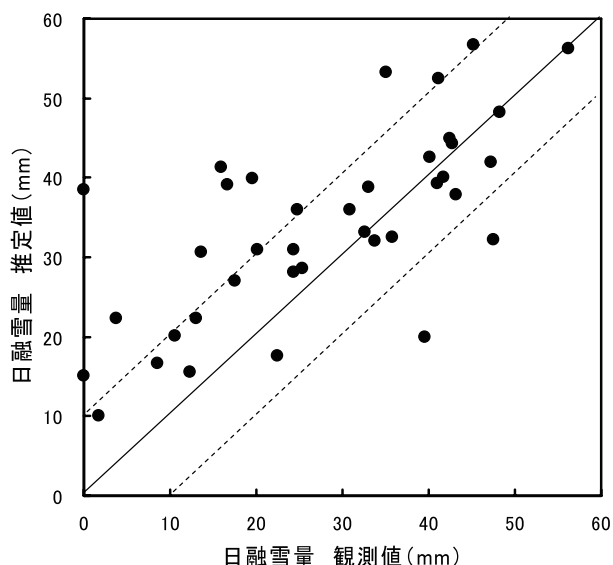
平均誤差と二乗平均平方根誤差

日融雪量の観測値を真値として、推定値の平均誤差 ME と二乗平均平方根誤差 $RMSE$ を次式から求めた。

$$ME = \frac{\sum_{i=1}^n (F_i - A_i)}{n} \quad (5)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (F_i - A_i)^2}{n}} \quad (6)$$

ここで、 F_i は推定値、 A_i は観測値、 n はデータ数を表す。ここでの n は、FD-indexで判断された融雪開始日から消雪日前日までの日数である。計算の結果、平均誤差と二乗平均平方根誤差は、2006/2007年積雪期ではそれぞれ0.8mm、8.1mm、2006/2007年積雪期ではそれぞれ6.3mm、12.6mmとなった。平均誤差は推定値が真値に対して過大傾向であるか、または過小傾向であるかといった意味での偏りを表すものである。2006/2007年積雪期はこれが0に近いことから推定値の偏り



図－7 塩谷における日融雪量の観測値と推定値の相関図
(2007/2008年積雪期)。実線と破線は、観測値＝推定値、観測値＝推定値±10mmをそれぞれ表す。

は小さいが、2007/2008年積雪期はこれがプラス側に大きいことから推定値が過大評価傾向にあることがわかる。一方、二乗平均平方根誤差は推定精度を表す指標であり、平均的な日融雪量の推定精度が2006/2007年積雪期は8mm程度であったのに対し、2007/2008年積雪期は前年よりも推定精度が1.5倍程度劣っているといえる。

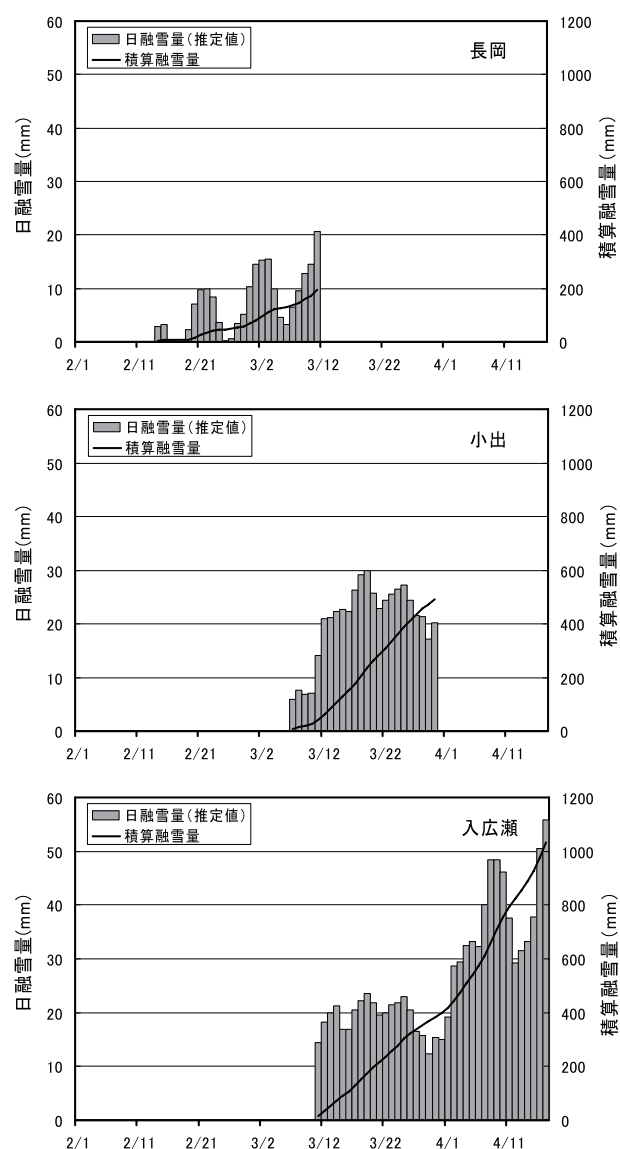
両年で推定精度に違いがみられた原因を特定することは困難であるが、前述したように、2006/2007年積雪期が記録的な暖冬少雪であったのに対し、2007/2008年積雪期は平年並みに近い気温・積雪量であったことが関係しているものと考えられる。すなわち、暖冬少雪の冬は、積雪量が少ないだけでなく、積雪のざらめ化が急速に進み、積雪全体が単純な構造になるため、積雪内の水（融雪水や雨水）の移動も比較的単純かつ規則的である。一方、寒冷多雪の冬ほど融雪期の積雪構造は複雑化し、その結果、積雪内で水の顕著な水平移動が頻繁に生じるため積雪水量自体に場所による大きな違いが出現する傾向にある。積雪重量計が平均的とはいえない積雪水量を捉えた場合、式(4)によって算出される日融雪量にこの影響が現れることとなる（河島ら、2006；竹内ら、2007）。この場合、真値とした日融雪量の観測値自体に大きな誤差が含まれるため、これを用いて評価した推定精度の低下が起こることは避けられないであろう。その意味で、改良型ディグリー・デー法の推定精度としては、2007/2008年積雪期よりも暖冬少雪であった2006/2007年積雪期の結果の方が、信頼性の点からはより高いものと考えられる。

改良型ディグリー・デー法による中越地震被災地の日融雪量変化の推定

上記の改良型ディグリー・デー法の検証結果は、日融雪量に±10mm程度の推定誤差を許容し得るならば、本手法が融雪開始日の推定も含めて十分実用可能であることを示すもの

である。本手法は、気温のみを用いて融雪開始日とその日以降の日融雪量の推定が可能である。また、積雪深データがあれば消雪日が分かるため、日融雪量の推定をいつまで行えばよいかも判断できる。

そこで、改良型ディグリー・デー法の適用例として、気温と積雪深が得られる気象庁の地域気象観測所（アメダス）のデータを用いて、中越地震被災地周辺の2007/2008年積雪期における日融雪量の変化を推定し、その場所による違いを調べた。対象としたアメダス観測点は長岡（長岡市、標高23m）、小出（魚沼市、標高98m）、入広瀬（魚沼市、標高230m）の3地点であり、2007/2008年積雪期の最大積雪深はそれぞれ74cm（2月18日）、192cm（2月17日及び18日）、262cm（2月18日）であった。また、積雪深データからそれぞれの地点の消雪日は3月12日、3月31日、4月18日であり、長岡と入広瀬では1ヶ月以上の開きがあった。



図－8 改良型ディグリー・デー法を用いて推定した中越地震被災地（長岡、小出、入広瀬）における2007/2008年積雪期の日融雪量変化。

図-8に各地点の日融雪量の推定結果を示す。日融雪量の推定期間は、FD-indexによる融雪開始日から消雪日前日までである。まず、融雪開始日に着目すると、長岡は2月14日、小出は3月7日、入広瀬は3月11日であり、融雪水の積雪底面流出が連続的かつ顕著に起こり始める日が、標高の高い内陸の地点ほど遅いことが分かる。2007/2008年積雪期では、長岡と入広瀬では1ヶ月近い差がある。小出と入広瀬では、長岡の融雪が完了する頃になってようやく融雪開始日を迎えるが、日融雪量の値は長岡に比べて大きく、特に消雪日が遅い入広瀬では融雪末期には50mmを超える日も出現している。融雪期間（融雪開始日から消雪日前日までの日数）は長岡27日、小出24日、入広瀬38日であり、小出が最短となっている。これらから明らかなように、同じ中越地震被災地でも、地点（地域）によって融雪開始日、融雪期間、融雪の強さが大きく異なるため、融雪期の災害を防止する上で、できるだけ融雪量を空間的にきめ細かく評価することが重要であるといえる。

おわりに

融雪量の評価には、冒頭に述べたように熱収支法、ライシメーター法、積雪水量差法などの手法があり、これらを用いて精度良く評価することが望ましいのは言うまでもない。しかし、これらの手法は観測機器やその維持管理に多額のコストを要するため、広大な被災地の多地点において、これらの手法に必要とされる観測を行うことは事実上困難である。一

方、提案した改良型ディグリー・デー法で必要とされる気温データや積雪深データは、その取得が比較的容易であり、実際にアメダス観測点以外にも、国土交通省、新潟県、市町村、消防署、鉄道会社、高速道路会社、研究機関などで多数の観測地点を有しており、しかもそれらの一部は新潟県道路情報システムのように、ウェブサイト上でリアルタイム公開されているものもある。このような既存の気象データをうまく活用し、改良型ディグリー・デー法から推定した日融雪量を融雪期の防減災対策に用いることは実用的かつ有意義な方法である。ただし、この場合、本研究から明らかになったように、日融雪量の推定結果に±10mm程度の誤差があり得ることを念頭におかなければならない。

参考文献

- 河島克久・飯倉茂弘・杉山友康・遠藤 徹・藤井俊茂（2002）鉄道防災に適用可能な日融雪量の簡易推定方法。雪氷，64，605-615。
- 河島克久・和泉 薫（2007）災害発生予測システム。新潟大学災害復興科学センター年報，1，54-57。
- 河島克久・外狩麻子・岸 滋・石丸民之永・松田益義・栗原 靖（2006）積雪水量差を用いた日融雪量算出の問題点。寒地技術論文・報告集，22，76-80。
- 鈴木正一・和泉 薫・河島克久・上石 勲（2008）土砂を伴った全層雪崩の発生機構に関する研究（2）。雪氷北信越，28，61。
- 竹内由香里・村上茂樹・庭野昭二（2007）ライシメーターと積雪重量計による融雪流出量の比較。寒地技術論文・報告集，23，156-160。