

福井県降雪予測システムの開発

奥田 広行^{*1}

1. はじめに

当該システムは平成23年2月の大雪（短期集中降雪）による福井県嶺南地方での農業ハウス倒壊等の雪害を受け、平成25年度から研究開発に着手、4年を経て完成に至ったものである。開発において課せられた目標は、雪が「いつ、どこに、どれだけ降るか」をこれまでにないきめ細かさで明らかにすること、であり、具体的には1kmメッシュサイズでの降雪予測システムを開発すること、であった。

ところで1kmメッシュサイズでの気象予測は、既に特定向け予報（「特定向け予報」とは、企業や個人と契約し、その契約者のためだけに提供する予報のこと）において実用化されている。また最近の気象予報番組は、何cm降るかという数値は示さないものの、降水（降雪を含む降水）の予想されるメッシュを雨雪さらにその強弱で色分けし、動画にして流すことで降雪予測を示すようになっている。

しかしこれらの予報は、実は、5kmメッシュサイズでの数値予報を距離重みによる内挿で“画像処理”して1kmメッシュサイズに変えているだけのもので、本質的には5kmメッシュの数値予報と変わらない。

一方5kmメッシュよりもきめ細かい数値予報としては、気象庁の局地モデルLFMがあるが、9時間先までの予報資料であり、夕刻時点で翌日早朝までの予測が知りたいハウス農家や除雪関係者のニーズを満足しない。またそのメッシュサイズは2kmである。

以上の状況から、本研究開発では“数値予報と統計的手法の組み合わせ方式”を採用することとした。

これは気象予報団体から過去の数値予報データ（本研究開発では日本気象協会の気象予測モデルSYNFOS-5を採用）を入手し、県内で観測された実測データとの相関を調べることによって、予測の補正を定式化（以下「予測補正式」という。）する。そしてその予測補正式をシステムに実装することにより、定時に配信される数値予報データからより精度の高い降雪予測量を自動的に計算、予測結果をWEBサイト上に表示できるようになる、というものである。

ここで、予測補正の元となる数値予報SYNFOS-5のデータは5kmメッシュサイズのものであり、これをどう1kmメッシュサイズの予測につなげられるのか、という課題がある。

また、統計的手法で相関を調べると言っても、どの気象データをどう組み合わせれば予測精度が上がるのかは全く

不明であり、試行錯誤の繰り返しとなった。

以上の困難にもかかわらず、最終的に1kmメッシュサイズでの降雪予測を最大24時間先まで行う「福井県降雪予測システム」が完成、平成29年度から正式運用（ただし一般公開は行われない）の運びとなったので、報告する。

2. システム開発の概要

研究者は平成25年度が山崎三知朗、26年度から28年度が筆者である。研究では表1および表2に記すデータを収集し解析を行っている。

システム開発（データ解析業務含む）は業務委託にて行い、（一財）日本気象協会が受注・履行した。

構築したシステムは同協会のデータセンタ内で稼働するクラウド化方式であり、予測に必要な気象データ（SYNFOS-5の予測データおよび輪島上空高層観測データ）の入力、演算から予測結果の出力は全て同センタの電算機内で自動的に行われ、予測結果は一般には非公開のWEBサイトにて表示される。

予測内容はメッシュ予測（図1参照、福井県とその近辺を1kmメッシュサイズに区分けし、最大で24時間先までの降雪量を地図上に表示）とポイント予測（図2-1および図2-2参照。図2-1に示す地点での降雪量等を最大で48時間先まで予測）の2本立てである。いずれの予測も1日3回、16時、23時、9時に更新する。

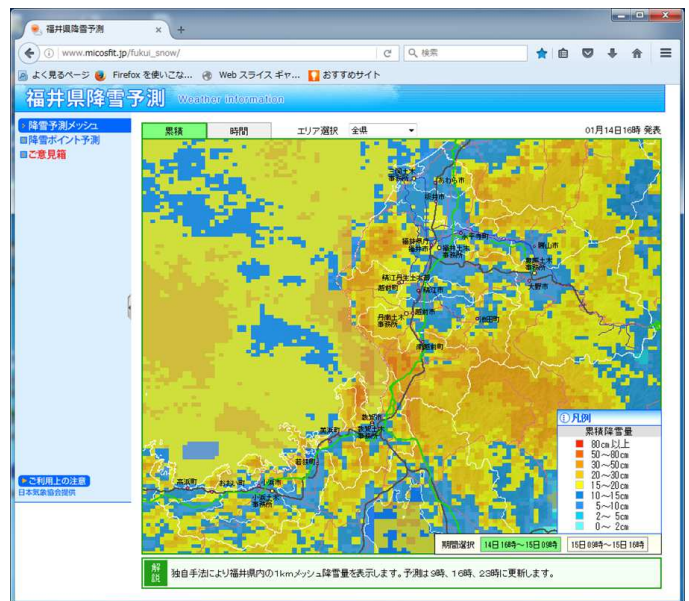


図1 福井県降雪予測システム：メッシュ予測画面

*1 福井県工業技術センター

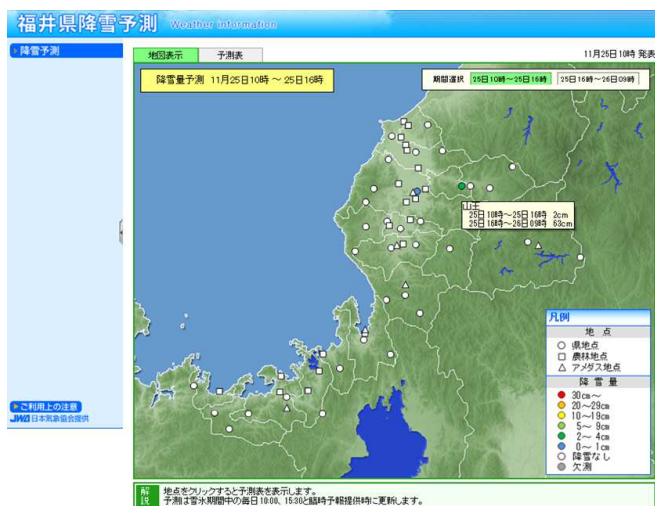


図2-1 ポイント予測画面（地図表示）

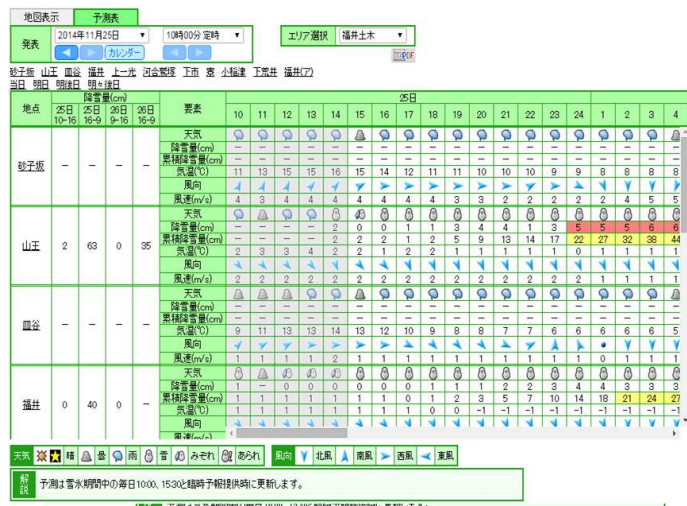


図2-2 ポイント予測画面（予測表）

表 1 収集・使用データ一覧（実測値）

所 管	観測要素	地点数	測定間隔	収集期間	備考
福井県	積雪深	36	1 時間	H21 年度～H28 年度, 8 冬期※	福井県土木部設置の観測所 図 2-1 の○の地点
		20	1 日 1 回	H24 年度～H26 年度, 3 冬期分	図 2-1 の□の地点
	地上気温	36	1 時間	H21 年度～H27 年度, 7 冬期分	図 2-1 の○の地点
気象庁	積雪深	7	1 時間	H21 年度～H28 年度, 8 冬期分	アメダス観測所 7 箇所※※ 図 2-1 の△の地点
	地上気温※※	19	1 時間	H21 年度～H27 年度, 7 冬期分	アメダス観測所 19 箇所※※※
	相対湿度	2	1 時間	H21 年度～H27 年度, 7 冬期分	アメダス観測所、福井、敦賀
	高層気象観測 ・等圧面高度 ・気温 ・相対湿度 ・風速、風向	2	1 日 2 回 (9 時, 21 時)	H21 年度～H27 年度, 7 冬期分	輪島、松江(H26 年度まで)
国交省	解析雨量	13,452	1 時間	H21 年度～H27 年度, 7 冬期分	東西 114×南北 118 メッシュ

※ 「冬期」はその年度の 12 月 1 日から翌年 3 月 31 日までとしている（以下の「冬期」において全て同じ）

※※ 福井、大野、九頭竜、武生、今庄、敦賀、小浜

※※※ 福井、大野、今庄、敦賀、小浜、三国、春江、越廼、勝山、美浜、舞鶴、美山、今津、虎姫、長浜、樽見、長滝、栢野、加賀菅谷

表 2 収集・使用データ一覧（予測値）

気象予測モデル	要素名	メッシュサイズ	初期時刻※	予測時間	収集期間
SYNFOS-5 日本気象協会	降雪量、降水量、気温	5 km	0, 3, 6・・・, 21 (1 日 8 回)	6, 9, 21 時：51 時間先 上記以外：33 時間先	H21 年度～H28 年度, 8 冬期分
SYNFOS-NOWCAST 日本気象協会	降雪量、降水量、気温	2.5 km	0, 1, 2・・・, 23 (1 日 24 回)	6 時間先	H23 年度～H25 年度, 約 2 冬期分

3. 予測更新時刻と予測時間範囲の決定

当該システムでは、予測の更新時刻は16時、23時、9時の1日3回、そして累積降雪量は夜間と日中に分けて集計し表示するもの、となっている。なぜこのような予測更新時刻と予測時間範囲を選んだかについてまず説明したい。

研究当初の段階では、1日何回何時に発表するか（または予測を更新するか）は未定であった。それでも、福井地方気

象台の降雪量予想と同様、予測を時刻に一度出さなくてはならないということは明らかだった。

というのは想定されるユーザのうち除雪関係者に関しては、降雪予測を受けてまず道路管理者が除雪待機の可否を判定、「当」であれば土木職員に除雪待機を命じることになる。この命令は閉庁時刻までに発せられる必要があり、よって予測は16時頃には最新のものに更新されてなければならないから

である。

そしてこの時点で求められるのは、通勤が始まる朝方までの累積の予測降雪量である。除雪車が出動するまでの降雪量の時間的变化即ち毎時の予測降雪量については、除雪待機判断には意味をなさない。

一方ハウス農家に関しては、融雪装置があれば夜間に散水融雪、融雪装置がなければ鉄骨補強という対応になり、前者は朝方まで、後者は2日間分の予測が必要とされている（県農林水産部に確認）。後者はスノータイヤの交換と同じで1回すれば済むことだが、前者は電気代が無駄になりコストにかかってくるため、夜間の降雪に対して特にシビアである。故に、情報としては夜間累積降雪量が最も重要となる。

以上のことから、夕刻の予測更新は16時、夜間降雪に対する予測時間は翌日9時までの17時間、という仕様に決まった（予測は昼間降雪も併せて更新するため、全体としての予測時間は17時間ではなく、メッシュ予測で24時間、ポイント予測で48時間である）。

そしてその補完として、朝方の予測更新は9時に行うこととなった。

最後に23時の予測更新に関しては、以下の3つの事由により定まった。即ち「23時は最新の高層観測データ（高層観測は9時と21時に行われる）を予測補正に利用できる」、「23時であれば、除雪待機の解除を判断できる可能性がある」、「福井地方気象台には困難な真夜中での最新予測提供になる」の3事由である。

なお、「23時の予測による除雪待機解除」という案に関しては、28年度冬季に試験運用を行っているものの十分な経験が得られていないため、現段階では適否を評価できない。

予測更新時刻等の決定理由は以上であるが、ここでもう一つ重要な補足事項がある。それは、ここで決定した夜間降雪と昼間降雪の時間定義は、ユーザの利便性のためだけではなく、実際の降雪予測（SYNFOS-5の予測降雪量の予測補正）にも使われる、ということである。というのは、予測値（0.1cm単位）であれ観測所の実測値（1cm単位）であれ時間降雪量は値が小さく、あっても1cm前後が大半のため回帰分析に適さず、従って必然的に数値の大きい累積時間降雪量の方がより基本的な量として取り扱われることになるからである。

最終的に完成したシステムでは、SYNFOS-5が予測する毎時の予測降雪量を夜間時間帯と昼間時間帯に分けて集計し、その累計値を予測補正式に代入して累積の予測降雪量の補正值を算出、これを元のSYNFOS-5の時間降雪量に対して比例配分してやることにより、毎時の予測降雪量の補正值を算出している。

4. 1kmメッシュサイズ解析降雪量の算出

統計的手法による1kmメッシュサイズでの降雪予測を実現

しようとした場合、大変だが一番自然な方法は、全てのメッシュで回帰分析を行い、13,452組（東西114×南北118メッシュ）もの予測補正式を作成してやることである。しかしそのためには全てのメッシュにおける実測降雪量が必要である。そしてそのような実測値はもちろん存在しない。

これが降水量となると全く状況が異なる。「気象庁雨雲レーダ」で明らかなようにレーダ観測によって1kmメッシュごとの降水量を直接観測できるからである。ただしレーダ観測による降水量観測は精度が劣るため、アメダス等の地上観測降水量と組み合わせで時間降水量が算出される。これを「解析雨量」という。

そこで今度は、その1kmメッシュサイズの解析雨量を元に、地上気温等と組み合わせることで1kmメッシュサイズの「解析降雪量」を算出することが考えられる。

本研究では、1kmメッシュサイズである国土交通省解析の解析雨量データを用いて、以下の方法により解析降雪量を算出した。

(1) 平成21年度から27年度までの冬季（12月～翌年3月）の国土交通省解析の解析雨量のデータを入手。

(1)-2 (1)の解析雨量を精査した結果、アメダス降水量に対し平均で134%も過大であることが分かったため）入手した解析雨量を0.75倍し、これを1kmメッシュ解析雨量とする。

(2) 以下により1kmメッシュでの地上気温を算出する。

①気温減率の算出：観測時刻毎にアメダス気温を標高別にプロットし、最小二乗法により直線の傾き（＝気温減率）を求める。

②海面気温の算出：気温減率を用いて各アメダス気温を海拔0mに補正する。

③海面気温の内挿：距離の2乗の逆数で重み付け、1kmメッシュに内挿する。

④1kmメッシュ地上気温の算出：気温減率により1kmメッシュ海面気温を各メッシュの標高にあわせて補正。

(3) 以下により1kmメッシュ相対湿度を算出する。

①平均水蒸気圧の算出：水蒸気圧は福井県内ではほぼ一様と考えられるため、水蒸気圧観測のある福井および敦賀のアメダス観測所での水蒸気圧を平均し、福井県内一様にこの値を適用する。

②飽和蒸気圧の算出：(2)の1kmメッシュ地上気温から、テイーテンスの式により1kmメッシュ飽和蒸気圧を算出する。

③1kmメッシュ相対湿度の算出：平均水蒸気圧を1kmメッシュ飽和蒸気圧で除して相対湿度を算出する。

(4) (1)-2の1kmメッシュ解析雨量に対し、(2)(3)の値および雨雪判別図（図3）から雨雪判別する。

(5) (4)で雪と判別された場合、(1)-2の解析雨量に雪水比を乗じることで1km解析降雪量を算出する。

雪水比は降雪量[cm]を降水量[mm]で除した値のことであるが、ここで解析雨量に乗ずる雪水比としては、図4（県内アメダス観測所のデータ解析によって定式化したもの）と地上気温から求まる値を使う。

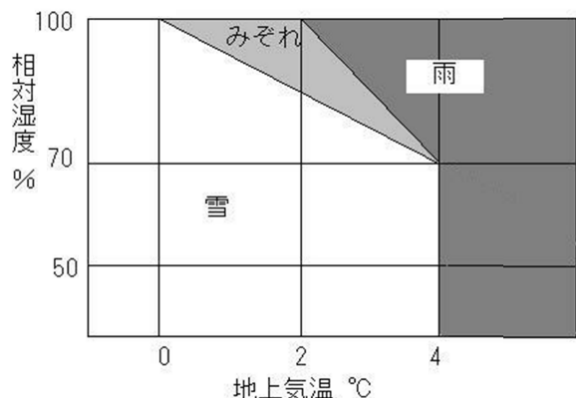


図3 雨雪判別図

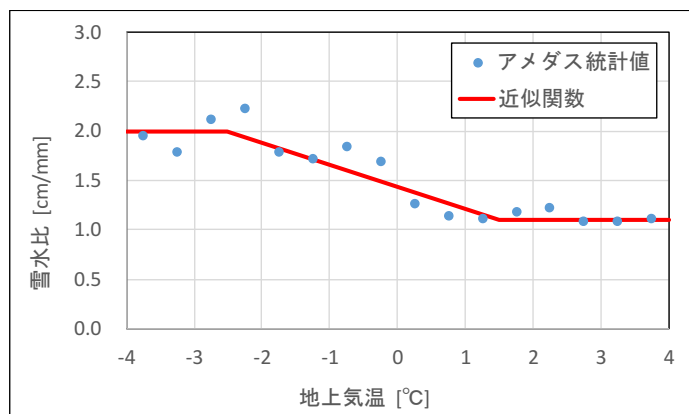


図4 アメダス観測値から求めた雪水比

以上の方法により、福井近辺含む13,452個のメッシュに対し、過去7年間分の冬期（延べ840日）の解析夜間降雪量と解析日中降雪量を算出した。

次に、県内の観測所（アメダス7箇所、県土木部観測所36箇所）で観測された実測値と照合し、解析降雪量の精度検証を行った。その結果は表3のとおりである。なおここで回帰係数とは、実測降雪量をx、解析降雪量をyとして $y=ax$ の線形近似したときのaの値である。回帰係数は1を大きく超え、精度が良いとは言えない。解析降雪量が大きければそれを反映する降雪予測補正式も過大な予測をすることとなる。

表3 観測所が存在する1kmメッシュにおける、解析降雪量の精度検証結果

検証箇所		有効データ数	相関係数	回帰係数
アメダス7箇所平均	夜間降雪	840	0.86	1.52
	日中降雪	839	0.78	1.59
県観測36箇所平均	夜間降雪	812	0.76	1.48
	日中降雪	813	0.66	1.43

5. 重回帰分析による予測補正式の作成

冒頭で明らかにした通り、本研究で開発する降雪予測手法とは、ゼロから予測降雪量を算出するのではなく、既に出されている予測降雪量を補正してより精度の高いものにする、ということである。従って予測精度が向上しなければ、この研究は無意味なものになってしまう。

今ベースとなる予測降雪量は、日本気象協会の気象予測モデルSYNFOS-5のそれである（表2参照）。

SYNFOS-5に何を組み合わせれば予測精度が向上するか。表1および表2の各種気象データを試行錯誤で調べていった結果、有効性が示されたのは、輪島上空500hPa等圧面高度での観測データのうちの高度と気温であった。このことは、ポイント予測に関する相関関係調査でまず明らかとなった。

次に、この気象2要素およびSYNFOS-5予測降雪量について線形回帰を仮定すると、以下のような式となる。

（実測降雪量）

$$= \text{係数1} \times (\text{SYNFOS-5予測降雪量 [cm]}) + \text{係数2} \times (\text{輪島500hPa等圧面高度 [m]}) + \text{係数3} \times (\text{輪島500hPa気温 [°C]}) + \text{定数項}$$

ただし、メッシュ予測の場合は上式の実測降雪量を解析降雪量と読み替えることとなる（以下同様）。

上式に対し、過去の時点でのデータを入れて重回帰分析すれば、上式の全ての係数と定数項が全箇所について求まる。

メッシュ予測では平成21年度から27年度までの冬期、ポイント予測では平成21年度から26年度までの冬期について重回帰分析を行い、全係数と定数項を算定した。なおポイント予測の集計年数が短いのは、その開発が1年早く終了したためである。

次に、求めるべき予測補正式は次式となる。これは上記の重回帰分析式に対して、「実測降雪量」を「予測補正降雪量」に読み替えたものに他ならない。

（予測補正降雪量）

$$= \text{係数1} \times (\text{SYNFOS-5予測降雪量 [cm]}) + \text{係数2} \times (\text{輪島500hPa等圧面高度 [m]}) + \text{係数3} \times (\text{輪島500hPa気温 [°C]}) + \text{定数項}$$

最後に、重回帰分析式および予測補正式で用いる「SYNFOS-5予測降雪量」に関して、補足事項が2つある。

まずポイント予測に関して。ポイント予測ではその観測所の属する5kmメッシュでのSYNFOS-5の予測降雪量ではなく、観測所の直近格子の±20kmの範囲で観測所の実測値と最も相関が良くなるメッシュにおけるSYNFOS-5の予測降雪量を採用することとした。これは、そうすることで若干ではあるが予測精度をさらに改善できることが分かったためである。

もう一つはメッシュ予測に関して。メッシュ予測に関して

は特別な前処理をする考えは無く、説明した方法のままでシステムを構築した。ところがいざシステムを稼働させてみると、地図上の降雪域が非常に不自然で、5km角にまとまったままで見えてしまう傾向にあることが分かった。そこで、SYNFOS-5の予測降雪量を直接ここに代入するのではなくて、距離重みによる内挿処理で1kmメッシュ化した予測降雪量をまず求め、その上でそれを予測補正式に代入する、という仕組みに改めた。予測補正式を使用するより先にSYNFOS-5の1kmメッシュ化を済ましておくようにしたのであり、この前処理によって”不自然な降雪分布”は避けられるようになった。

6. 回帰係数による予測の再補正

前章の予測補正式の予測精度を改めて回帰分析し精度を検証した際、以下のことが明らかになった。

ここで再度の回帰分析とは、実測降雪量（メッシュ予測の場合は解析降雪量）をx、予測補正式により算出される予測補正降雪量をyとし、 $y=ax$ の線形回帰を仮定して行うものである。

その結果明らかになったこととは、ほとんどのケースで回帰係数aが1を下回るものだった、ということである（メッシュ予測では9割、ポイント予測では観測所のある43箇所全てに

おいて）。

aが1を下回るとは過小予測になっていることを意味する。そこで

$(\text{予測再補正降雪量}) = (\text{予測補正降雪量}) \div \text{回帰係数}a$ の再補正を行うこととしたものである。

この再補正を行うと、補正予測が当たっていたケースは過大予測に、補正予測が過大だったケースはさらに過大予測になる。また、予測全体的中率も下がることになる。しかし実は、的中率の低下は数%程度である。そうであれば、過小予測の低減による安全性の向上の方が大きなメリットとなるので、上記の再補正を採用した次第である。

7. 予測精度の検証

福井県降雪予測システムの予測補正は、6章の予測再補正をもって完了である。ここからは当該システムの予測精度の検証結果について報告する。

使用する実測値、予測値としては、5章の重回帰分析の時と同じものを使う。ただしメッシュ予測に関しては、解析降雪量を使わず、検証を観測所のある場所に限ることとして、実測降雪量によって精度検証することとする。従ってポイント予測と同じく、観測所のある43箇所での検証となる。

表 4-1 観測所が存在する 1 kmメッシュにおける福井県降雪予測システム予測降雪量の予測精度（16 時予測更新時）

検証箇所		有効データ数	相関係数	回帰係数	的中率 [%]	見逃率 [%]
アメダス 7 箇所平均	夜間降雪	842	0.61	1.33	49.7	25.8
	日中降雪	840	0.52	1.36	67.4	19.0
県観測所 36 箇所平均	夜間降雪	814	0.56	1.51	55.2	22.4
	日中降雪	814	0.40	1.46	71.6	17.4

表 4-2 観測所が存在する 5 kmメッシュにおける SYNFOS-5 予測降雪量の予測精度（16 時予測更新時）

検証箇所		有効データ数	相関係数	回帰係数	的中率 [%]	見逃率 [%]
アメダス 7 箇所平均	夜間降雪	842	0.60	1.00	52.2	34.2
	日中降雪	840	0.53	0.87	68.0	25.4
県観測所 36 箇所平均	夜間降雪	814	0.55	1.10	56.4	31.2
	日中降雪	814	0.40	1.05	71.4	21.7

表 5-1 観測所における福井県降雪予測システムポイント予測降雪量の予測精度（16 時予測更新時）

検証箇所		有効データ数	相関係数	回帰係数	的中率 [%]	見逃率 [%]
アメダス 7 箇所平均	夜間降雪	721	0.67	1.00	61.3	18.1
	日中降雪	719	0.60	1.00	73.6	17.0
県観測所 36 箇所平均	夜間降雪	695	0.63	1.00	65.7	18.6
	日中降雪	695	0.51	1.00	76.7	16.2

表 5-2 観測所が存在する 5 kmメッシュにおける SYNFOS-5 予測降雪量の予測精度（16 時予測更新時）

検証箇所		有効データ数	相関係数	回帰係数	的中率 [%]	見逃率 [%]
アメダス 7 箇所平均	夜間降雪	721	0.58	1.01	51.9	34.5
	日中降雪	719	0.55	0.83	68.5	25.1
県観測所 36 箇所平均	夜間降雪	695	0.54	1.12	56.0	31.3
	日中降雪	695	0.42	1.04	71.3	21.7

以上のデータに基づく解析結果は表4-1、表5-1のとおりである。ただし表4-1はメッシュ予測に関する解析で集計期間は平成21年度から27年度までの冬期（7年集計値）、表5-1はポイント予測に関する解析で集計期間は平成21年度から26年度までの冬期（6年集計値）であり、システム開発の時期の違いのため集計期間が異なっている。

参考のため、同時期におけるSYNFOS-5の予測精度も表4-2および表5-2に示す。

ここで表中の「回帰係数」は、最終的な予測に対しての回帰分析（ x ：実測降雪量、 y ：予測降雪量）を行って算出する回帰係数であり、6章の回帰係数 a とは異なる。またメッシュ予測に関しては、 x を解析降雪量から実測降雪量に変更しているため、回帰係数 a で割った予測値であるにもかかわらず、回帰係数が1とは異なる値となる（表4-1）。

次に「的中率」および「見逃率」について。これらは、実測値が予測の許容幅内にあれば「的中」、予測の許容幅を超えていれば「見逃し」とし、それらを有効データ数で割った値のことである（ちなみに予測の許容幅を下回っていれば「空振り」という）。予測の許容幅に関しては定義されたものはないが、ここでは予測値の $\pm 20\%$ $\pm 2\text{cm}$ の範囲とした。また、あえて評価を厳しくするため、実測値で累積降雪量が0cmの日（無降雪日）は集計から除外している。

表から分かる通り、あらゆる点で予測精度が良いのはポイント予測であり、夜間降雪量予測ではSYNFOS-5の的中率を10%近くも改善、見逃率はそれ以上の低減となっている。一方メッシュ予測は、SYNFOS-5に対して若干予測精度の下がった項目もあるが、見逃率は10%近く下がっており、安全サイドの予測となっている。

8. システムの試験運用

以上の過程を経て完成した福井県降雪予測システムに対し、平成28年12月1日から29年3月31日にかけて試験運用を行っている。

試験運用については土木部と農林水産部の全職員に通知し、意見を求めたものであるが、概ね好評であった（ただし、予測は外れる可能性があり情報を過信しないこと、気象予報士の介在しない自動予測であり安全サイドに予測する福井地方気象台の降雪量予想とは状況が異なること、を事前に周知しているため、批判的意見が少なかった可能性もある）。

9. 課題と考察

難航した福井県降雪予測システムの開発は、最終的には何とか完成を見ることができた。しかしそれは必ずしも

満足できる内容ではなかった。以下の課題が残されている。

- ①一般公開の予定がないため、ハウス農家への情報提供という本来の研究目的が実現しない。
- ②全体としての予測精度を高めることには成功したものの、降雪予測は大雪時ほど外れ易い、という宿命的な問題を克服できていない。
- ③土木部で整備した観測所は道路監視を目的とするため、人口密度の多寡に関係なく整備され、峠など地形として特殊な場所も多く、地域的代表性に乏しい。従って今回整備したポイント予測は土木部においては有意義でも、地域住民には誤解を招く要素があり、一般公開には適さない面もある。
- ④③の難点にもかかわらず、決まった地点における予測を数値で時系列にて捉えられるポイント予測は見方が安定しており、除雪待機のような仕事での利用に向いているように思われる。それに対してメッシュ予測は、注意力を働かさなければ感覚的な動画の確認に終わってしまう可能性がある。
- ⑤高層観測データ（等圧面高度および気温）による予測補正がなぜ有効なのか、原因が解明できていない。

ここで②について補足する。

大雪の発生自体は予測できたのに、大雪となる場所を誤った、というケースが多くみられる。これは、風向の予測に失敗しているからである。大雪には必ず強風が伴うことから、大雪であればあるほど、風向の予測が外れた時の影響は大きく、大外れに至る可能性が高まると考えなければならない。その外れの大きさは、5kmメッシュの範囲を超えるものとなる（たとえば冒頭の23年2月の大雪時に福井地方気象台は嶺南での大雪を予想していたが実際は今庄の大雪だった）。従って、降雪予測システムの大元である数値予報の段階で既に外れてしまっている以上、いくら統計的手法による予測補正をかけてもリカバリーのしようのないことである。

このような課題は研究した「統計的手法」の範囲を明らかに超えており、数値予報の改良かあるいは観測手段の改良・増設を待つしかないと思われる。それはそれでよいのだろうが、研究の費用対効果という点で問題が無かったか、自省する必要があると思われる。

参考文献

福気象庁予報部；数値予報の基礎知識と最新の数値予報システム、2012