富山空港における冬季視程予測の研究

A Study on Nowcast of Visibility at Toyama Airport in Winter

高木次夫^{*1}・寺谷拓治^{*1}
Tsugio Takagi Takuji Teratani

土合雅博^{*2}
Masahiro Doai

はじめに

富山県では克雪・利雪に関する調査研究を推進しており、平成9年度から平成11年度の3カ年で科学技術庁の科学技術振興調整費による地域先導研究「富山県域の雪の特性解明と利雪に関する高度利用研究」を実施している。この研究の一環としてドップラーレーダによる雪雲の観測、高層気象観測などを行い、富山県域の雪雲の特性解明を行ったところである。

また、富山県ではこの地域先導研究の成果を活用しながら、冬季降雪時の視界不良による航空機の欠航便数を減らすことを目的に、富山空港における冬季視程予測の研究を並行して進めてきており、ここでは富山空港の視程を予測する手法ならびにその成果について報告する。

1. 富山空港の特徴と気象的欠航原因

1.1 富山空港の特徴

富山空港は滑走路が河川敷に位置するなどの地理的制約から、一部の着陸装置が設置できず、そのため東京便などに使用されている重量B6クラスの航空機の場合、着陸のための視程は1400m以上必要となっており、隣の小松空港の800mに比べ条件が厳しくなっている。また、気象庁の広域レーダ（福井、新潟、名古屋）では富山県域の高度の低い雪雲が捉えにくく、雪雲の動きや強さを正確に把握する

のが難しい。このため専用レーダを利用しての実況把握と目先1時間程度の予測を行うことが、当空港の降雪による視界不良対策に有効と考えられる。

1.2 視程悪化の原因

表1に、1984～1992年における富山空港の気象的原因による欠航事例の割合を示す。視程悪化原因のほとんどは降雪となっている。年間を通じても降雪による視程悪化のための欠航が多数を占める。

表1 富山空港の気象的要因による欠航事例割合
(期間：1984～1992年 444事例) (単位%)

	春	夏	秋	冬	計
降雪による悪視程	2.3			63.5	65.8
濃霧による悪視程	0.9				0.9
下層雲の低高度	14.0	8.1	5.4	4.5	32.0
雷・乱気流				1.4	1.4
合 計	17.1	8.1	5.4	69.4	100.0

2. ドップラーレーダと視程計による観測

2.1 設置場所と観測概要

ここではXバンド（波長3cm）のドップラーレーダを使用しており、上空の降雪の強さは観測できるが、視程そのものは測定できない。そこで空港ならびに空港から7km北の2ヶ所に視程計を設置して、地上の視程を同時観測することにした。

*1 財団法人日本気象協会

*2 富山県水雪土地対策課

(1) ドップラーレーダの仕様と観測概要

- ・周波数 9375MHz (X バンド)
- ・観測要素 反射強度 (dBm), ドップラー変位, 速度分散
- ・観測範囲 半径 64km (ドップラーモード時)
- ・アンテナ周回速度 4rpm
- ・分解能 125m
- ・設置位置 空港より東南東 5.1km 地点
- ・観測周期 5分毎, 5 仰角 (1, 2, 3, 5, 20°)

※) ドップラーレーダは動いている粒子に電波をあてるとその動きによって周波数が変わる, いわゆるドップラー効果を利用し, 降水の強さ, 位置と移動速度を同時に測定するレーダ。

(2) 視程計 (現在天気計) の仕様と観測概要

- ・方式 赤外線前方散乱光式
- ・観測要素 視程 (10m~50km), 降水粒子形状 (雨, 雪等) 降水強度 (mm/h)
- ・観測周期 1分毎
- ・設置位置 空港, 及び北 7km 地点

2.2 視程の変動状況

航空機が最終進入点付近で待機して, そこから着陸に要する時間は約10~15分である。また, 滑走路の除雪が必要とされる場合, 除雪に40分ほど要することもあり, 降雪の止み間 (視程 1400m 以上の小康状態を含む) が20~60分ないで着陸する機会がない。従って, 降雪 (視程) の変動状況を把握する必要がある。

図1は大雪となった1999年1月8日の悪視程継続時間の頻度分布を示している。視程 1400m を基準にそれ以下, 以上の時間が何分続くかを示している。

この日は1日の降雪深の合計が50cm を記録し, 大雪となったが, それでも30分以上の良視程 (1400m 以上) の時間が8回以上ある。また, これより降雪の少ない日は悪視程 (1400m 以下) の継続時間はずっと少なくなることから, まれな大雪時は別として, 降雪 (視程) 予測によって航空機の着陸機会を捉えることは有効であると思われる。

2.3 レーダの反射強度と視程との相関

図2は1999年1月8日における, 視程とレーダの反射強度を5分毎にプロットしたものである。反射

図1 悪視程継続時間の出現頻度

図2 視程とレーダ反射強度との比較

強度は3~5メッシュ (1メッシュは125m) を平均している。これによると, 視程が悪化する時間帯と反射強度が大きくなる時間帯がほぼ一致し, 降雪が強くなるほど視程が悪くなることを示している。なお, 富山の雪は湿雪が主で地吹雪となることはほとんどない。

このように視程とレーダ反射強度との間には相関関係があるので, 視程 1400m に対するしきい値を設定することを検討する。図3は1998年12月~1999

降水形態が雪またはみぞれの場合

図3 反射強度に対する悪視程の出現割合

年2月における全降雪日を対象として、各反射強度値に対する視程が1400mを下回る割合を示したものである。反射強度が大きくなるほど悪視程の割合が大きくなることを示している。このことから、どの反射強度をしきい値とするかにより、欠航回避率が異なってくるので、実証実験等を通して検討する必要がある。

3. レーダによる超短時間予測手法

富山県域では降雪域の進行方向は主に西から東である。従って過去から現在に至るレーダエコーの推移を捉え、航空機の着陸判断のため、進行域を10分先、20分先、と10分ピッチで1時間先まで予測を行う。ここでは予測先時間が1時間とごく短いので超短時間予測と呼ぶこととする。

予測は運動学的手法を用いて行った。予測手順の概要を図4に示す。

図4 降水超短時間予測の実施手順

運動学的手法は、レーダによって観測された降水域が上空の風向や風速等の影響によりどのような方向に移動し、さらにその降水域が今後発達するか、衰弱するかを考慮して予測を行う手法である。冬季の雪雲の移動速度はかなり速く、観測周期が10分では降水状況の変化が大きすぎる可能性がある。従ってここでは5分毎に観測し、かつ1時間先までの予測を行い、結果を伝送することを前提に予測モデルを開発した。

(1) ドップラーレーダ観測値

予測の初期値として使用する観測値は、半径64kmで観測された5仰角PPI観測データである。

※) PPI: 仰角を固定してアンテナを水平回転させてデータを取得する方法

(2) 水平断面処理

雪雲は概ね水平に移動するが、PPI観測データは遠くへ行くと高度が高くなっていて都合が悪い。そこで複数のPPIから一定高度のデータを抽出する水平断面処理を行う。地上の降雪との対応を良くするため、高度を出来るだけ低く1000mとした。

(3) 移動性降水成分計算

気象庁配信のRSMモデルの850hPa面（高度約1500m）における風速を用い、以下の式により雪雲の移動量を算出し、移動位置における降水量を計算する。

$$\Delta x = \sum \alpha u_{850} \Delta t$$

$$\Delta y = \sum \alpha v_{850} \Delta t$$

ただし、

$\Delta x, \Delta y$: 雪雲移動量のx, y成分

u_{850}, v_{850} : 850hPa面の風速のx, y成分

α : 係数

Δt : 1分

※) RSM: 気象庁より1日2回配信される日本域数値予報モデル。51時間先までの気象要素の予測値が約20kmの格子点値(GPV)として配信される。

(4) 地形性降水成分計算

地形による雪雲の発達、消散は気象庁の「立平モデル」により計算した。

a. 計算領域の標高データを「国土数値情報」から500mメッシュで作成した。

b. 上空各層の気温、比湿、風速から水蒸気量を求めた。気流は斜面勾配に沿って上昇すると仮定し、凝結量を計算する。

(5) 各成分の合成

(3)及び(4)で計算した予測成分を合成し、また発達、衰弱の時間変化量を加味し、t分後の予測降水量とする。

これらの計算にはパソコン（CPU：Pentium III 700MHz）を用いたが、予測計算に要する時間は1回につき数10秒であり、レーダの観測時間やデータの伝送時間を含み、5分毎にデータを更新するシステムの構築が可能である。

4. 富山空港における実証実験

4.1 実験概要

平成11年度に実験用の冬季視程予測システムを構築し富山空港の関係諸機関の協力を得て試験的に配信を行い、予測情報の効果の検討を行った。

富山空港における航空機の離着陸には、航空機の運航主体である航空会社のみではなく、滑走路の管理や気象情報の提供等のために複数の機関が関与している。

図5に平成11年度冬季に実施した視程予測システ

ムの実証実験における情報の流れを示した。

- (1) 観測：ドップラーレーダーによって雪雲の挙動を観測する。また、視程計を用いて視程の現況を観測する。
- (2) 集信：観測データを日本気象協会富山事務所に集信する。
- (3) 予測：日本気象協会富山事務所において、観測データに基づいて超短時間予測を行う。
- (4) 配信：視程の予測結果をオンラインで富山空港の運航支援者に配信する。
- (5) 伝達：機長に視程の予測情報を伝達する。
- (6) 判断：視程の超短時間予測をもとに着陸の可否を判断する。

4.2 実施要領

- (1) 実験期間：平成11年12月20日～平成12年3月10日
- (2) 参加機関：
 - ・全日空富山空港所
 - ・運輸省大阪航空局富山空港出張所
 - ・富山地方気象台富山空港出張所
 - ・富山県土木部空港管理事務所
 - ・財団法人日本気象協会北陸センター
- (3) 実験内容：上記期間の降雪日にドップラーレーダ観測を実施し、その他の実況値と併せて視程予測

図5 実証実験における情報の流れ

図6 実験用システムによる予測例

値を参加機関に配信する。予測計算や情報配信に要する時間が十分に実用的であるかを検証すると同時に配信情報の有用性を検討する。また、今後に向けてシステムの改良課題（予測精度改善等）を把握する。

4.3 実証実験結果（事例と効果）

(1) 予測事例

実証実験期間中である平成12年1月21日午前10時20分を初期値（実況値）とする予測事例を図6に示した。実証実験では10分間隔で50分先までの5連続時刻の予測値を配信したが、ここでは20分間隔で2連続時刻の予測事例を示した。

図6に示したとおり、本システムでは視程はランク分けし色分け表示される。富山空港における視程に関するWM（Weather Minimum：飛行場最低気象条件）は1400mであるため、富山空港の位置がオレンジ色（800m～1399m）或いは赤色（800m未満）で表示されていれば航空機は着陸できないことになる。

【10時20分（実況）】

この時刻には富山空港上空には雪雲は無く、視程は5000m以上と良好であった。しかし富山空港の北西方向にまとまった量の雪雲があり、空港に接近しつつあることがわかっていった。

【10時40分（20分後の予測）】

この時刻はANA883便の着陸予定時刻であった。図6に示したとおり富山空港にはまとまった量の雪

雲がかかり視程は1400mを下回るという予測であった。実際この時刻には富山空港の視程は急激に悪化し、ANA883便は着陸する事が出来ず、上空で着陸機会をうかがって待機していた。

【11時00分（40分後の予測）】

この時刻には富山空港上空の雪雲は南東方向に移動し、視程は5000m以上に回復するという予測であった。実際、10時55分頃から視程は急速に回復し、ANA883便は10時56分に、定刻より約20分遅れて着陸した。

(2) 予測システムの効果の検討

平成11年度に導入した実験用冬季視程予測システムが富山空港における航空機の就航にどの程度有用であったかを、平成10年度の運航状況と比較することにより把握した。

表2に平成10年度、及び平成11年度の降雪状況、欠航便数等を示した。

平成11年度における欠航便数（東京発富山着便）は410便中21便で欠航率は5.1%，平成10年度は405便中24便で欠航率は5.9%で、欠航率としては0.8%の改善がみられた。欠航便数を降雪日数で割った「欠航便割合」で比較すると平成11年度は0.488便/日、平成10年度は0.615便/日となっており降雪日1日あたりの欠航便数も改善されている。仮に平成10年度における欠航便割合を本年度に適用すると

$$43日 \times 0.615 \text{ 便/日} = 26.4 \text{ 便}$$

表2 平成10年度と平成11年度の比較

	平成11年度	平成10年度
検討期間	12/20～3/10	12/20～3/10
降雪日数	43日間	39日間
降雪量の累計	319cm	274cm
欠航便数 (羽田発富山着)	21便 (対象：410便)	24便 (対象：405便)
欠航率	5.1%	5.9%
欠航便割合*	0.488便/日	0.615便/日

*欠航便割合の欄には「欠航便数÷降雪日数」の値を示した。表中の「欠航」にはダイバージョンも含む。
(ダイバージョン：小松空港等に着陸したケース)

となり、26.4便の欠航便が発生していたことになるが実際の欠航便数は21便であり、着陸便に関して5.4便の欠航が回避されたことになる。また、同時に同数の折り返しの富山空港発東京便の欠航が回避されたことになる。このことから、当システムが富山空港の冬期就航率の向上に役立ったのではないかと考察される。

4.4 実験の結果判明したシステムの問題点

構築した予測システムには、いくつかの改良すべき事項も判明した。

(1) レーダ視程と地上視程の相関が良くない事例

ドップラーレーダ観測結果（反射強度；dBZ）を視程に換算した視程実況値と、富山空港に設置した視程計で観測された地上視程実況値の相関が思わしくない事例がみられた。このことは反射強度（dBZ）を視程（m）に変換する際に用いた変換式に問題のあることを示唆している。

さらに上空（1000m）の降雪域の動向と地上の視程変化に有意な時間差のあることもわかった。

(2) もやが発生する場合の予測精度が低い事例

降雪と同時にもやが発生した場合、実際には悪視程であるにも拘わらず、良視程と予測してしまうことが判明した。すなわち、Xバンド（波長3cm）ドップラーレーダでは、もやを構成する微水滴粒子を観測できないため、もやによる視程の悪化が表現されないことがわかった。

(3) 上空の風予測精度が良くない事例

気象庁から配信されるRSMの風向・風速予測値が時間の経過で実際の風向風速とかなり異なる事例が確認された。このような場合、上空の降水域の動向も実際とは異なった予測となるため、視程予測精度も悪化する。

4.5 システムの改良

以下の点について予測システムの改良を検討した。

(1) もやと降雪が混在する場合の予測式

平成11年度の観測結果から富山空港周辺において降雪と同時にもやが発生した場合の降水強度と視程のデータを用いて視程予測式を作成した。

$$Y = 1422 * X^{-0.362537} \quad (R = 0.80)$$

X：降水強度（mm/h）

Y：視程（m）

(2) 上空の風予測精度

気象庁から配信されるGPVではなく、ドップラーレーダの観測により得られる実況風を用い、それが60分先まで継続すると仮定した予測を行い、予測精度を検討する。図7に改善効果が高かった1月25日7時25分を初期値とする予測結果を示した。

図7から読みとれるとおり、ドップラーレーダの実況風を用いた場合の方が、かなり予測精度が改善されることがわかる。

図7 平成12年1月25日の予測結果

5. 今後の予定

平成11年度の実証実験により、

- (1) 最適なレーダ観測高度（上空と地上の時間差）
- (2) 改良を加えた視程予測式の組み込み（もや発生時等）
- (3) レーダにより観測された風を用いた予測の3点が冬季視程予測システムの重要な課題であることが判明したため、今後も精度向上のための研究を継続する予定である。

6. 謝辞

本研究を実施するにあたり検討委員会を組織し、
財高度情報科学技術研究機構の山岸米二郎博士、北海道大学の上田博助教授、防災科学技術研究所新庄雪氷防災実験研究所の佐藤威博士及び気象庁富山地方气象台、全日空空港本部、富山県航空対策室から
助言・ご指導を頂きました。

ここに記して感謝の意を表します。