3.1 気温ガイダンスの改良¹

3.1.1 はじめに

気温ガイダンスは、一般予報および飛行場予報支援 を目的としてアメダス地点、航空官署を対象に作成さ れている。表 3.1.1 に要素毎の予報対象時刻および作成 しているモデルを示す。気温ガイダンスでは、予測式 の係数の逐次学習にカルマンフィルターを利用し、モ デルの地上気温と観測値の差を目的変数として予測値 を算出している。気温ガイダンスの詳細については小 泉 (2007)を、カルマンフィルターについては瀬上ほか (1995)を参照していただきたい。

従来の気温ガイダンスには、後述の利用する観測値 の差により、最高気温ガイダンスと最低気温ガイダン スに系統的な誤差が生じるという問題があった。また、 降水時に正バイアスを持つこと、予測が大きく外れた 場合に係数が不適切に変動することによる精度悪化な どの問題があった。

本節では、上記の問題を解消するために、2014年3 月に数値予報システムに導入した気温ガイダンスの改 良について述べる。まず改良内容を第3.1.2項で項目 別に分けて解説する。続いて第3.1.3項と第3.1.4項で 統計検証と事例検証を通じて精度や予測特性を確認す る。最後に第3.1.5項で本節のまとめと利用上の注意 点について述べる。

なお、本節では、改良後のガイダンスに「新」、改良 前のガイダンスに「旧」と冠し記述するほか、気温ガ イダンスの要素を限定し、「新最高気温ガイダンス」の ように表記する場合もある。本節は一般予報用の気温 ガイダンスの改良について述べてはいるが、飛行場予 報支援として作成されている航空気温ガイダンスにつ いても同様の改良²を行い、検証の結果、一般予報用 の MSM ガイダンスと同様であることを確認している。

3.1.2 変更内容

ここでは旧ガイダンスでの問題を解消するために行っ た変更内容とその意図について項目別に示す。

(1) 逐次学習に利用する観測値の変更について

旧ガイダンスでは、逐次学習に利用する最高気温お よび最低気温をアメダスの10分毎の気温(以下、10分 値)から算出していた。例えば10分値から算出する場 合、最高気温は0910JSTから1800JSTの10分値の最 高値となる。一方、気象庁HPに公開され、予報の検 証に用いられる最高気温および最低気温は、アメダス の1分毎の気温(以下、1分値)から算出される。1分 値と10分値それぞれから算出される最高気温および最

表 3.1.1 気温ガイダンスの要素と予報対象時刻

要素	予報対象時刻	モデル		
時系列気温	毎正時	GSM, MSM		
最高気温	00–09UTC	GSM, MSM		
最低気温	$15-24 \mathrm{UTC}$	GSM, MSM		
明後日気温	00–24UTC	GSM		
格子形式気温3	毎正時	GSM, MSM		



図 3.1.1 GSM 最高気温ガイダンスの ME 分布図。Cntl(左) Test(右)それぞれ1分値を観測値として検証を行った。 検証期間は2011年7月から9月。00UTC 初期値の翌日 の最高気温ガイダンスを検証対象とした。

低気温は、時間分解能が異なる影響により、1分値か ら算出される最高(最低)気温の方が高く(低く)な る。それゆえ、逐次学習に10分値を利用する旧ガイダ ンスを1分値を用いて検証すると、系統的な誤差が現 れる。この系統的な誤差を解消するために、新ガイダ ンスでは、逐次学習に利用する最高気温および最低気 温を1分値から算出するよう変更した。

図 3.1.1 に旧ガイダンスを Cntl、旧ガイダンスから 逐次学習に利用する最高気温および最低気温を 1 分値 から算出したものに変更したガイダンスを Test とした 平均誤差 (ME)の分布を示す。Cntl は全国的に負バイ アスを持っており、ME の全国平均値は -0.165 であっ た。一方 Test は、全国的に負バイアスが解消され、全 国平均値は 0.074 であった。Cntl を 10 分値で検証し た場合の ME の全国平均値は 0.082 であり、誤差分布 も Test と同様であった(図略)ことから観測値を原因 とする系統的な誤差は解消したと考えられる。

(2) 説明変数の追加と取扱いの変更について

旧ガイダンスでは、説明変数としてモデルの地上気 温、地上風速とその各方位成分、中下層雲量を利用し ていた。新ガイダンスでは、これら既存の説明変数の

¹ 後藤 尚親

² 航空気温ガイダンスは観測値として METAR を利用して いるため、第 3.1.2 項 (1) は該当しない。

³ 格子形式気温は最大降雪量ガイダンスに利用するのみで直 接的には予報作業で利用されていない。

取扱いを変更し、さらに気温減率、降水量、前日との 気温差を追加した。図 3.1.2 に新旧ガイダンスの説明 変数を示す。

まず既存の説明変数の取扱いを変更した目的と狙い について述べる。

- 地上気温 地上気温はその符号が正負に反転するが、説 明変数の正負の反転は寄与量⁴が正負に反転する ことを意味し、精度悪化の一因となることがある。 地上気温は40°Cを加算することで、非常にまれ な場合を除いて正となるため、符号の反転が起き ず精度の悪化を防ぐことができる。
- 風速 モデルのランダム誤差や最近接格子との地勢の差 を平均的に軽減することを目的として、参照する 格子を予測対象地点に最も近い最近接格子から近 接4格子を利用した線形内挿へ変更した。
- 中下層雲量 日中に雲が広がって気温の上昇が抑制され る状況において、旧ガイダンスは気温の上昇を抑 制する効果が不十分となることがあった。この対 策として対象地点の近接4格子の最大値を利用す るよう変更した。

次に新たに追加した説明変数について導入の目的と 狙いについて述べる。

- 気温減率 モデルの標高と現実の標高には差があるが、 この標高の補正は気温の精度に大きく影響する。 新ガイダンスでは、予測対象地点への標高補正を より適切にする目的で、日々の成層状態から気温 減率を算出し、説明変数に導入した。
- 降水量 降水時において、気温の低下はモデルの地上気 温の低下でのみ表現されていたが、これが不十分 であったため、旧ガイダンスは正バイアスを持っ ていた(図略)。この降水時の正バイアスへの対 策として、新ガイダンスでは降水量を説明変数に 導入した。なお、モデルの予測する降水のタイミ



図 3.1.2 新旧ガイダンスの説明変数の仕様。

⁴ 寄与量とは係数と説明変数を乗算することで求まり、各説 明変数の目的変数への寄与分を表す。 ングの誤差を考慮して前3時間降水量とした。

前日との気温差 モデルの地上気温の誤差特性は降水の 有無など天気状況で異なり、これは前日、つまり 24時間前との気温差として評価できる。旧ガイダ ンスはこの誤差特性の変化を定数項が変動するこ とで吸収していたが、本来定数項はモデルと現実 の地勢の差の評価や季節変動など長い期間での変 動が期待されるため、日々大きく変動することは 精度上好ましくない。また、モデルが実況をよく 表現している場合は雲量や降水量が天気状況によ る誤差特性を補正し得るが、予測が外れた場合に も天気状況による誤差特性の変動を前日との気温 差の係数が吸収することで、定数項が安定し、精 度が向上する。これらの理由から前日との気温差 を説明変数に導入した。

説明変数の変更による効果については第 3.1.4 項で 事例を挙げながら述べる。

(3) 予測が大きく外れた場合の逐次学習の抑制

カルマンフィルターには、誤差をどの程度重要視し て係数の逐次学習を行うかを管理する観測誤差分散が ある。詳細については省くが、この観測誤差分散が大 きいほど係数の変動は小さくなる。

旧ガイダンスでは前線の位置ずれや冬季の放射冷却



旭川 GSM00UTC 翌日の最低気温

図 3.1.3 予測が大きく外れた際に観測誤差分散を一時的に 大きくする実験の結果。期間は 2011 年 12 月 1 日から 7 日、00UTC 初期値の旭川における GSM 翌日の最低気温 ガイダンス。図中黒線が観測値、緑線がモデル地上気温、 青実線が Cntl、赤実線が Test(左軸)、青と赤の破線がそ れぞれの予測式の定数項(右軸)である。 による低温など、モデルの予測が大きく外れた事例に おいても通常通り逐次学習を行うため、係数が不適切 に大きく変動し、その後数日間精度が悪化することが あった。これは観測誤差分散が常に一定値であったた め、予測誤差の大きさに比例して係数が変動したこと が要因である。

新ガイダンスでは予測が大きく外れた場合、一時的 に観測誤差分散を大きくする⁵ように変更した。本変 更の意図は、予測が大きく外れた際に通常より係数の 変動を小さくし、精度の悪化を抑制することである。

本変更による効果の例として、旧ガイダンスを Cntl、 旧ガイダンスに本変更を加えたガイダンスを Test とし た結果を図 3.1.3 に示す。図 3.1.3 から、Cntl, Test と もに 12月3日に予測が大きく外れたことが分かる(青 矢印)。Cntl ではこの翌日の逐次学習で、前日の大き な誤差により係数が大きく変動し(緑矢印)、その後数 日間が負バイアスとなっていた(赤矢印)。Test では 同様の誤差でも係数の変動が抑制され、その後数日間 の負バイアスも縮小する結果となった。

(4) 暖候期と寒候期の係数層別化

暖候期と寒候期では、モデルの予測誤差の特性は異 なる。図 3.1.4 にモデルの誤差特性の例として、GSM の地上気温の誤差分布を暖候期と寒候期に分けて描画 した図を示す。誤差分布図より、暖候期と寒候期で分 布や分散など予測誤差の特性が異なることが分かる。



◆暖候期(4月~9月) ●寒候期(10月~3月)

このような誤差特性の違いに着目し、新ガイダンス ではカルマンフィルターの係数や、学習の程度を調整 する観測誤差分散などを暖候期と寒候期で層別化し、 季節別の誤差特性に適合した学習を行うよう変更した。 なお、暖候期は4月から9月、寒候期は10月から翌年 3月とし、切替日の1か月前から事前学習を行うこと により、切替日の予測値の急変、精度の悪化を抑制す るよう設定している。

3.1.3 統計検証

ここでは新旧気温ガイダンスについて統計検証を行っ た結果を示す。まず(1)で時系列気温ガイダンスの通 年検証を通じて説明変数や逐次学習の変更の効果によ る精度改善を確認する。次に(2)で最高気温ガイダン ス、最低気温ガイダンスの季節別検証を通じて季節別 の予測特性を確認する。最後に(3)で地点別の検証結 果を示す。

(1) 通年検証

全国のアメダス地点を対象に通年検証を行った。GSM 時系列気温ガイダンスの検証結果を図 3.1.5 に、MSM 時系列気温ガイダンスについて図 3.1.6 に示す。検証期 間は2012年9月から2013年8月までの1年間で、GSM は00,06,12,18UTC、MSM は03,09,15,21UTC を 初期時刻とするガイダンスを利用して予報時間(FT) ごとの検証を行った。

GSM ガイダンスの検証結果 (図 3.1.5)から、予報時 間を問わず平方根平均二乗誤差 (RMSE) が減少してお り、約5%の予測精度の改善が確認できる。新ガイダン スはやや正バイアスが拡大しているが、これは第 3.1.2 項(3)により、旧ガイダンスにあった冬季の大きな負 バイアスが新ガイダンスで縮小したことが要因として 考えられる。

MSM ガイダンスの検証結果(図 3.1.6)でも同様の 傾向であり、RMSE は約 3%減少している。新ガイダ ンスはわずかに正バイアスが拡大しているが、前述の



図 3.1.5 GSM 時系列気温ガイダンスの検証結果。検証期間 は 2012 年 9 月から 2013 年 8 月。暖色系が新ガイダンス、 寒色系が旧ガイダンスのスコアである。

図 3.1.4 00UTC 初期値の GSM による地上気温を地点に 内挿した値の誤差分布図。対象は翌日の最高気温。期間は 2012 年 4 月から 2013 年 3 月で、予測地点は福岡。暖候 期が赤四角、寒候期が青丸である。

⁵ 4°C 以上外した場合、次の学習時のみ観測誤差分散を 3 倍 とする。



図 3.1.6 図 3.1.5 と同じ。ただし MSM 時系列気温ガイダン スの検証結果。

GSM ガイダンスと同様の理由である。

新ガイダンスで予測が改善している事例を確認する と、降水量や前日との気温差による補正が効いている 事例が多く、第 3.1.2 項 (2) による精度向上が確認で きた。

(2) 季節別検証

次に翌日の最高気温ガイダンス、翌日の最低気温ガ イダンスを季節別に検証した結果を示す。検証期間は (1)と同様だが、17時予報での利用を想定してGSMは 00UTC、MSMは03UTC初期値のガイダンスに対し て検証を行った。表3.1.2と図3.1.7にGSM最高気温 ガイダンスについて、表3.1.3と図3.1.8にGSM最低 気温ガイダンスについての検証結果を示す。なお、最 高気温、最低気温それぞれについて通年と季節別に検 証を行った。季節の区分は3月から5月を春、6月か ら8月を夏、9月から11月を秋、12月から2月を冬と した。さらに、観測値が高温、低温となる事例につい て検証を行うために、最高気温について観測値が30°C 以上の事例、最低気温について観測値が0°C以下の事 例を抽出した検証結果も示した。

GSM 最高気温ガイダンスの検証結果から、通年、季 節を問わず RMSE が減少していることが分かる。ま た、旧ガイダンスが持っていた負バイアスが縮小して おり、第3.1.2項(1)の観測値を10分値から1分値に 変更したことによる改善が確認できるほか、秋を除き 誤差が3°C以上の事例数も減少している。さらに季節 別の検証結果から、春、夏に比べて秋、冬の方が精度 が良いことが分かる。この理由として、モデルの地上 気温は実況で高温となる事例ほど、負バイアスが顕著 になることが考えられる (図略)。モデルの地上気温 の負バイアスは、カルマンフィルターによって縮小で きるが、事例に応じてモデルの地上気温のバイアス傾 向が異なる場合、その補正が不十分となることがある。 新ガイダンスは観測値が 30°C 以上の事例においても 旧ガイダンスより改善しているが、依然負バイアスで あることが確認できる。

次に GSM 最低気温ガイダンスについて確認する。 こちらも最高気温ガイダンスと同様に通年、季節を問 わず RMSE が減少し、ME の絶対値もやや減少してい る。また誤差 3°C以上の事例数は大きく減少しており、 予測精度の改善が確認できる。季節別の検証結果から、 夏、秋に比べ冬、春の方が RMSE が大きく、特に冬の RMSE は大きいことが分かる。この理由として、モデ ルの地上気温は低温の事例ほど、顕著な正バイアスと なることが考えられる(図略)。新ガイダンスは観測値 が 0°C 以下の事例でも旧ガイダンスから改善している が、依然正バイアスで、RMSE も大きい結果となった。

MSM ガイダンスの検証結果を最高気温ガイダンス について表 3.1.4 と図 3.1.10 に、最低気温ガイダンス について表 3.1.5 と図 3.1.11 に示す。MSM ガイダンス においても GSM ガイダンスと同様に改善が確認でき、 季節別の予測特性も概ね一致している。

(3) 地点別検証

地域毎の予測特性を確認するため、アメダス地点別 の検証結果を示す。検証期間や初期時刻、要素について は(2)と同様で地点別に通年での検証を行った。GSM、 MSM ガイダンスの検証結果を各々図 3.1.9、図 3.1.12 に示す。それぞれ上段(図(a),(b),(c))が翌日の最高 気温の検証結果、下段(図(d),(e),(f))が翌日の最低 気温の検証結果であり、左列(図(a),(d))が旧ガイダ ンス、中列(図(b),(e))が新ガイダンスの各RMSE、 右列(図(c),(f))が新ガイダンスの RMSE の改善率⁶ である。

GSM 最高気温ガイダンス(図 3.1.9(a), (b))では、 新旧ガイダンスで RMSE の分布は大きく変わらず、太 平洋側で RMSE が大きい。RMSE の改善率では太平 洋側で新ガイダンスの改善が確認できる。

GSM 最低気温ガイダンス(図 3.1.9(d), (e))では、 RMSE の分布に南北で差が見られ、特に北海道におい て RMSE が大きい。北海道で予測精度が悪いのは、放 射冷却時のモデルの気温低下が不十分であるために予 測誤差が大きいこと、また予測誤差の日々変動が大き くガイダンスによる統計的修正も後手になりやすいこ となどが要因として考えられる。RMSE の改善率では 北海道を含む全国的な改善が確認できるが、北海道は 新ガイダンスにおいても他の地域より予測精度が悪い 結果となった。

MSM ガイダンスの検証結果(図 3.1.12)でも GSM ガイダンスと同様の改善や予測特性が確認できた。ま た GSM 気温ガイダンスと MSM 気温ガイダンスを比 較すると MSM 気温ガイダンスの方が予測精度が良い (松澤 2008) という特性は新ガイダンスにおいても変化 はなかった。

⁶ 第 C.2.1 項を参照。図中で赤いほど改善、青いほど改悪と なる。

検証対象(事例数)		ME[°C]	RMSE[°C]	誤差3℃以上の 事例数
全事例	新	+0.09	1.596	23,659
(338,190)	旧	-0.18	1.652	25,650
観測≧30℃の事例	新	-0.50	1.355	1,541
(40,896)	旧	-0.90	1.571	2,433
春の全事例	新	+0.01	1.742	7,554
(85,262)	旧	-0.35	1.822	8,657
夏の全事例	新	+0.14	1.791	8,388
(85,219)	旧	-0.20	1.820	8,547
秋の全事例	新	+0.20	1.432	4,442
(84,308)	旧	+0.03	1.442	4,307
冬の全事例	新	-0.00	1.332	3,275
(83 401)		-0.19	1 4 3 4	4 1 3 9





図 3.1.7 GSM 翌日の最高気温ガイダンスの季節別検証図。

表 3.1.3 GSM 翌日の最低気温ガイダンスの季節別検証ス コア。

検証対象 (事例数)		ME[°C]	RMSE[°C]	誤差3℃以上の 事例数
全事例	新	-0.04	1.569	22,517
(338,125)	旧	+0.05	1.694	29,110
観測≦0°Cの事例	新	+0.20	2.147	9,888
(72.866)	旧	+0.34	2.267	11,950
春の全事例	新	-0.20	1.691	7,211
(85,245)	旧	-0.16	1.838	9,586
夏の全事例	新	-0.03	1.156	1,670
(85,184)	旧	-0.01	1.243	2,301
秋の全事例	新	+0.08	1.446	4,183
(84,304)	旧	+0.30	1.569	5,713
冬の全事例	新	-0.02	1.828	9,453
(83,392)	18	+0.07	1.970	11.510



図 3.1.8 GSM 翌日の最低気温ガイダンスの季節別検証図。



図 3.1.9 00UTC 初期値の GSM 翌日の最高気温ガイダンス、翌日の最低気温ガイダンスを地点別に検証したスコア分布図。検 証期間は 2012 年 9 月から 2013 年 8 月。上段が翌日の最高気温、下段が翌日の最低気温を対象とし、左列が旧ガイダンス、 中列が新ガイダンスの各 RMSE、右列が新ガイダンスの RMSE の改善率である。

検証対象(事例数)		ME[°C]	RMSE[°C]	誤差3℃以上の 事例数
全事例	新	+0.07	1.537	20,979
(338,190)	旧	-0.18	1.585	22,410
観測≧30℃の事例	新	-0.38	1.371	1,689
(40.896)	旧	-0.73	1.535	2,357
春の全事例	新	-0.05	1.687	6,830
(85,262)	旧	-0.38	1.747	7,430
夏の全事例	新	+0.11	1.761	8,177
(85,219)	旧	-0.20	1.799	8,519
秋の全事例	新	+0.24	1.332	3,321
(84,308)	旧	+0.10	1.325	3,177
冬の全事例	新	-0.02	1.271	2,651
(83,401)	旧	-0.23	1.375	3,284

表 3.1.4 MSM 翌日の最高気温ガイダンスの季節別検証ス コア。

表 3.1.5 MSM 翌日の最低気温ガイダンスの季節別検証ス コア。

検証対象(事例数)		ME[°C]	RMSE[°C]	誤差3℃以上の 事例数
全事例	新	-0.05	1.529	20,834
(338,125)	旧	+0.05	1.592	23,566
観測≦0°Cの事例	新	+0.13	2.159	10,149
(72.866)	旧	+0.24	2.258	11,516
春の全事例	新	-0.16	1.624	6,321
(85,245)	旧	-0.06	1.681	7,186
夏の全事例	新	-0.02	1.093	1,286
(85,184)	旧	+0.02	1.149	1,593
秋の全事例	新	+0.07	1.417	3,928
(84.304)	旧	+0.23	1.448	4,314
冬の全事例	新	-0.08	1.831	9,299
(83,392)	IB	+0.02	1.933	10.473



図 3.1.10 MSM 翌日の最高気温ガイダンスの季節別検証図。



図 3.1.11 MSM 翌日の最低気温ガイダンスの季節別検証図。



図 3.1.12 図 3.1.9 と同じ。ただし 03UTC 初期値の MSM ガイダンスの結果。

3.1.4 事例検証

新ガイダンスによる改善事例として、夏の不安定性 降水による気温低下の例と最大降雪量ガイダンスへの 影響の例を紹介する。

(1) 夏季不安定性降水に伴う気温低下の例

ここでは午後に関東地方で不安定性降水が発生した 2013年7月23日の予測を例に、予測地点を東京とし た新旧ガイダンスの比較を行う。

図 3.1.13 は 23 日 18 時までの MSM (23 日 03UTC 初期値の6時間予測値)と解析雨量の3時間積算降水 量である。MSM の降水予測は、解析雨量に比べて、不 安定性降水の分布の広がりがやや過小、かつ降水量の 極大域がやや西であった。降水分布がやや異なる影響 で、東京に強い降水がかかるのは観測に比べて2時間 ほど遅かった。

23日 03UTC 初期値の東京の MSM 時系列気温ガイ ダンスを図 3.1.14 に示す。観測値は降水が始まった 17 時から急激に下がっているが、MSM はその急激な気温 低下を予想できていない。また、旧ガイダンスは MSM で夏の地上気温予測において統計的に見られる負バイ アスを補正するために、地上気温を上昇させており、結 果として MSM の地上気温よりも誤差を拡大させてい る。これに対し新ガイダンスでは、説明変数に追加し た降水量の寄与により、MSM では十分に表現されて いない気温低下を補うことで、旧ガイダンスより観測 値に近づいた。

本事例のように降水の分布や強度が観測とやや異なっ たとしても、モデルによる降水予測が概ね適切である 場合には、新ガイダンスは気温低下をより適切に補正 しうることが確認できた。ただし現段階ではモデルに よる不安定性降水の正確な予測は難しく、位置や強度 が初期時刻によって変動する場合があるため、新ガイダ ンスでも必ずしも適切に補正できるとは限らない。さ らに、モデルの降水表現が変化すると、説明変数の絶 対値が変わることに加え、補正量を足し合わせるベー スであるモデルの地上気温も変わるため、ガイダンス の予測値が変動しやすいことに注意していただきたい。

上記の通り、不安定性降水はモデルの予測の不確実 性が大きいことに注意が必要だが、統計的には、説明 変数に追加した降水量は気温ガイダンスの予測精度の 改善に寄与する。利用の際にはモデルの気象表現、特 に降水表現を考慮して利用していただきたい。

(2) 最大降雪量ガイダンスへの影響

ここでは気温ガイダンスの変更による最大降雪量ガ イダンスへの影響について示す。まず気温ガイダンス と最大降雪量ガイダンスの関係について述べる。最大 降雪量ガイダンスは格子形式気温ガイダンスを入力と して雪水比を算出し、降雪量予測を行っているが、こ の格子形式気温ガイダンスは、地点気温ガイダンスで 求めた各アメダス地点のモデルの補正量を周辺格子へ



図 3.1.13 MSM(左)と解析雨量(右)の 2013 年 7 月 23 日 18 時までの 3 時間積算降水量。



図 3.1.14 2013 年 7 月 23 日 03UTC 初期値の東京の MSM 時系列気温ガイダンス。黒線が観測値、青線が旧ガイダン ス、赤線が新ガイダンス、緑破線が MSM 地上気温(左 軸)。紫線が新ガイダンスにおける降水量の寄与量(右軸)。

線形内挿することで作成している。最大降雪量ガイダンスや格子形式気温ガイダンスの詳細については古市 (2010)を参照していただきたい。

図 3.1.15 は 2011 年 12 月 2 日の 00UTC 初期値の GSM 最大降雪量ガイダンスで、3 日 21 時までの 12 時 間降雪量の予測値と対応する観測値である。赤破線で 囲んだ十勝地方の 20 cm/12h 前後の降雪について、旧 気温ガイダンスを入力とした予測値は、新気温ガイダ ンスを入力としたものに比べ、降雪分布がやや狭いこ とが分かる。新気温ガイダンスを入力とした降雪量は やや過大な地点もあるが、帯広以南の 20 cm/12h 前後 の降雪分布や広尾周辺の海岸沿いまでの降雪の広がり が実況と近くなっている。

+勝地方の格子形式気温ガイダンスへ影響を与えた アメダス地点の例として、帯広の時系列気温を図 3.1.16 に示す。赤破線で囲んだところは観測で降水があった 時間帯である。また水色の矢印の期間が図 3.1.15 の 12 時間降雪量の積算期間である。新気温ガイダンスは旧 気温ガイダンスに比べて 2°C ほど低く予想できており、 実況に近づいている。説明変数の寄与量(図略)を確 認すると、降水量や前日との気温差が気温を下げてお り、説明変数追加の効果が表れている。雪水比は 2°C





から 0°C 付近の地上気温で変動が大きい (松下 2012) ため、本事例のように 2°C 程度の改善でも降雪量予測 に大きく影響を与える。

なお、最大降雪量ガイダンスの統計的なスコアはほ ぼ同等であり、その予測傾向も大きく変わらないこと を確認している。(1)と同様に、モデルの予測している 気象場と併せて利用していただきたい。

3.1.5 まとめと利用上の注意点

今回の改良により、最高気温ガイダンスと最低気温 ガイダンスでは、係数の逐次学習に利用する観測値の 持つ系統的な差に起因する予測誤差を解消した。また モデルと現実の標高の差をより適切に補正するために 気温減率を、天気状況等に起因する誤差の評価をする ために降水量と前日との気温差を説明変数に加えた。 さらに係数についても見直しを行い、予想が大きく外 れた場合の逐次学習の抑制や、暖候期と寒候期の層別 化によって、より適切な逐次学習を行うことができる 設定に変更した。

また統計検証や事例検証から新ガイダンスの精度向 上を、季節別の検証から季節や要素毎の予測特性を示 した。



図 3.1.16 2011 年 12 月 2 日 00UTC 初期値の帯広における GSM 時系列気温ガイダンス。黒線が観測値、青線が旧ガ イダンス、赤線が新ガイダンス。

今回の変更を行った上で今後検討すべき事項が2つ ある。1つ目は第3.1.2項(3)の逐次学習の設定につい て、観測誤差分散を予測誤差に応じて連続的に変える、 または逐次学習を行う閾値を設けるなど、逐次学習の 設定についてさらに検討することである。2つ目は第 3.1.2項(4)の係数層別化について、新ガイダンスでは 地点や要素を問わず一律に4月、10月で層別化してい るが、地点毎の予測誤差を層別の指標として用いるな ど、別の設定を検討することである。これらの設定内 容の検討については、今後調査を進めどのような実装 が最適なのかを考えていきたい。

最後に新ガイダンスの利用上の注意点として、モデ ルの気象表現による影響を従来より受けやすくなった ことが挙げられる。これは地上気温の補正量を算出す る際に、従来に加えモデルの降水量などを利用するよ うに変更したためである。また、モデルの気象表現に タイミングのズレなどがある場合、そのランダムな誤 差を修正することができないのはこれまでと変わらな い。これらの点に注意しモデルが予測している気象表 現の妥当性も検討し、利用していただきたい。

参考文献

- 小泉友延,2007: 気温ガイダンス. 平成 19 年度数値予 報研修テキスト,気象庁予報部,60-66.
- 瀬上哲秀,大林正典,國次雅司,藤田司,1995:カルマン フィルター.平成7年度数値予報研修テキスト,気象 庁予報部,66-78.
- 古市豊,2010: 降雪ガイダンスの改良と利用. 平成22 年度数値予報研修テキスト,気象庁予報部,78-81.
- 松澤直也, 2008: 気温ガイダンス. 平成 20 年度数値予 報研修テキスト, 気象庁予報部, 67-69.
- 松下泰広, 2012: アプリケーション. 平成 24 年度数値 予報研修テキスト, 気象庁予報部, 42-53.

3.2 降雪量地点ガイダンスの改良¹

3.2.1 はじめに

降雪量地点ガイダンスは、2013年11月にその作成 手法の改良が行われた。このガイダンスは、ニューラ ルネットワーク(松下 2012)を用いて、GSMの予測値 からアメダス地点の12時間降雪量を予測する逐次学 習型のガイダンスで、冬期間を中心に11月から翌年5 月まで運用している²。

本改良では、(1) 予測対象地点の追加、(2) 予報時間 の延長、(3) 予測精度の改善を狙って予測係数の繰り返 し学習を行った。本節ではこれらの改良の詳細とその 検証結果を解説する。まず第 3.2.2 項でガイダンスの 変更点を述べる。次に第 3.2.3 項と第 3.2.4 項で精度検 証の結果と検証期間に発生した大雪事例について述べ る。また、同じく GSM から作成される GSM 最大降 雪量ガイダンスとの予測特性の違いについても述べる。 最後に第 3.2.5 項で改良のまとめと利用上の留意点を 述べる。なお、以降では改良後のガイダンスを「新ガ イダンス」、改良前のガイダンスを「旧ガイダンス」と 記述する。

3.2.2 変更点について

表 3.2.1 に改良前後におけるガイダンスの仕様を示 す。太字で示した箇所は本項の(1) と(2) で示す変更 点であり、これら以外は旧ガイダンスと同じ仕様であ る。表 3.2.1 に掲載していないガイダンスの詳細につ いては古市(2008)を参照していただきたい。

(1) 予測対象地点の追加

旧ガイダンスの予測対象地点は236地点であった。 新ガイダンスでは、新たに 66 地点を加えた計 302 地 点とした。図 3.2.1 に予測対象地点の分布を示す。水色 が従来の予測対象地点、黄色が新規に追加した地点で ある。新ガイダンスでは、主に関東地方の平野部や東 海・近畿地方、また中国地方山間部の気象官署や特別 地域気象観測所、アメダス地点を追加した。北海道や 東北地方についても、これまでは予測対象でなかった 積雪深計の設置されているアメダス地点を追加してい る。濃青色の地点は、開発時点で積雪深計が設置され 観測が行われているが今回は追加しなかった地点であ る。これらの地点は、積雪深計の設置から日が浅いた めに、本項(3)で述べる繰り返し学習を行うための観 測データが十分に存在しなかったり、降雪頻度が少な いために繰り返し学習で良い結果が得られなかったり したため予測対象地点に追加しなかった。これらの地 点を予測対象地点に追加することは、今後の検討課題 としたい。

今回、追加した地点の予測例として熊谷(埼玉県熊谷

市)の降雪量予測を図 3.2.2 に示す。この図は、2013年 1月1日から2月28日までの00UTC初期値のFT=36 の24時間降雪量の予測を時系列で示している。折れ線 グラフは、赤実線が新ガイダンス³、青破線がGSM 最大降雪量ガイダンス、棒グラフが実況の24時間降雪 量を示している。熊谷ではこの期間、1月14日と2月 6日に南岸低気圧によって降雪が観測されているが、新 ガイダンスはそのどちらも適切に予測しており、有効 な予測資料となることが期待される。



図 3.2.1 予測対象地点の分布図。水色は従来からの予測対 象地点、黄色は新規に追加した地点、濃青色は本改良で追 加を見送った地点。



図 3.2.2 新規追加地点の予測例(熊谷)。2013年1月1日か ら2月28日の00UTC初期値、FT=36の24時間降雪量 の予測と実況の時系列図。予測の24時間降雪量は、連続 する2つの12時間降雪量を足し合わせて作成した。赤実 線が新ガイダンス、青破線がGSM最大降雪量ガイダンス、 灰色の棒グラフが対応する実況の24時間降雪量を表す。

¹ 白山 洋平

² 同じく降雪量を予測する最大降雪量ガイダンス (古市 2011) は年間を通してガイダンスを作成している。

³ この予測結果は第 3.2.2 項 (3) で示す繰り返し学習を行った後の独立な検証期間に対する予測である。

	れ 3.2.1 阵当里地点ガイノノスの山脉。太子は以及則後の支丈点を衣字。							
	旧ガイダンス	新ガイダンス						
予測要素	前12時間降雪量	変更なし						
作成対象	主に積雪深計設置のアメダス 236 地点	主に積雪深計設置のアメダス 302 地点						
作成方法	3 層、階層型ニューラルネットワーク	変更なし						
予報時間	FT=24, 36, 48, 60, 72	FT=24, 36, 48, 60, 72, 84						
逐次学習	あり(11 月 9 日 00UTC ~ 翌年 3 月 3 日 00UTC まで。00, 12UTC 初期値のみ)	変更なし						
層別化	予測対象地点、予報時間 (FT=24, 36, 48 と FT=60, 72 の 2 通り)	予測対象地点、予報時間(FT=24,36,48 とFT=60,72,84の2通り)						
運用期間	11月1日00UTC~翌年5月10日00UTC	変更なし						

表 3.2.1 降雪量地点ガイダンスの仕様。太字は改良前後の変更点を表す。

(2) 予報時間の延長

旧ガイダンスは、FT=24 から 12 時間毎に FT=72 までの 12 時間降雪量を予測していた。新ガイダンスで は新たに FT=84 を追加し、ガイダンスの予報時間を GSM と同じにした。旧ガイダンスでは予報時間を前半 と後半に分け、FT=24, 36, 48 と FT=60, 72 の 2 つに 層別化を行っていたことから、これを踏襲して FT=84 の予測に用いる予測係数は FT=60, 72 と同じ予測係数 を用いることにした。

(3) 繰り返し学習による予測精度の改善

学習型のガイダンスに予測対象地点を新たに追加す る場合、通常は追加する地点から水平距離の近い既存 の予測対象地点の係数を利用することが多い。しかし、 この係数は元の地点について最適な予測となるよう学 習が行われた値であり、そのまま追加地点の予測に用 いても、すぐに十分な予測精度を得ることは難しいと いう問題がある。

そこで、(1)の予測対象地点追加の際には、上記の方 法で用意した係数を初期係数として⁴、その係数が追 加地点の予測に対してより適切な状態となるように事 前に繰り返し学習を行った。また、この繰り返し学習 は、新規に追加する 66 地点だけでなく全予測対象地 点について行い、従来の予測対象地点についても同時 に予測係数の最適化を図った。ここでは、学習期間を 2010年11月から 2011年3月までと 2011年11月か ら 2012年3月までの2冬期⁵、検証期間を 2012年11 月から 2013年3月までに設定し、繰り返し回数と検証 期間における予測精度の変化を確認しながら実験を繰 り返した。学習期間への係数の過学習を避けつつ、可

⁵数値予報ルーチンと同じ仕様で繰り返し学習を行ったので、 実際に係数更新が行われるのは11月9日~翌年3月3日の 期間である。 能な限り予測精度を改善させるため、検証期間の予測 精度に改善が見られなくなる少し手前で繰り返し学習 を打ち切った。なお、この繰り返し学習を開始する初 期係数として、2012年3月末の係数を用いることで、 検証期間に対しては未学習な独立検証となるようにし ている。

図 3.2.3 は追加した 66 地点について、事前の繰り返 し学習を十分に行った場合(赤線)と、繰り返し学習を 10 回行った場合(青線)、繰り返し学習を行わず係数 をコピーしたそのままの状態で検証期間の予測を行っ た場合(緑線)の12時間降雪量の検証結果である。十 分な繰り返し学習を行うことで、予測頻度(バイアス スコア、BI)が実況に近づき、予測精度(エクイタブ ルスレットスコア、ETS)も 30 cm/12h 以下の範囲で 大きく改善していることが分かる。

図 3.2.4 に、従来の予測対象 236 地点について、繰 り返し学習を行った場合(新ガイダンス)と繰り返し 学習を行わなかった場合(旧ガイダンス)また比較と して検証条件を揃えた GSM 最大降雪量ガイダンスの 検証結果を示す。従来の予測対象地点は、60 cm/24h 以下の範囲では繰り返し学習なしの旧ガイダンスでも、 GSM 最大降雪量ガイダンスを大きく上回る予測精度 であるが、繰り返し学習を行うことでこれをさらに改 善した。これは旧ガイダンスが、これまで行われてき た GSM の更新や改良による予測特性の大きな変化に 対して、数値予報ルーチン上で行われる逐次学習のみ では追随しきれていなかった可能性や、そもそも地点 によっては学習回数が不足していた可能性があると考 えられる。

3.2.3 統計検証

ここでは、改良後の降雪量地点ガイダンスの精度検 証の結果を示す。旧ガイダンスやGSM最大降雪量ガ イダンスについても同様の検証を行い比較する。検証 期間は、2012年12月から2013年2月までの3か月間 で、00,06,12,18UTCの全初期値を用いた。降雪量 地点ガイダンスは12時間降雪量を予測するガイダンス

⁴ 一部の地点では地勢などから別の地点をコピー元とした場 合もある。例えば、大間(青森県大間町)は最短の水平距離 では津軽海峡を挟んだ反対側の函館空港(北海道函館市)が 選ばれるが、地勢などから同じ青森県の津軽半島に位置する 今別(青森県今別町)を初期係数のコピー元に設定するなど、 実験を重ねた上で決定している。



図 3.2.3 新ガイダンスで追加した 66 地点の閾値別の検証結果。FT=36,48 の 12 時間降雪量の (a) エクイタブルスレットスコア (ETS) と (b) バイアススコア (BI)。赤線が繰り返し学習を十分に行った場合(新ガイダンス) 青線は繰り返し学習を 10 回行った場合、緑線は繰り返し学習を行わない場合で、縦軸はスコア、横軸は降雪量の閾値、エラーバーは 95%信頼区間を 表す。



図 3.2.4 従来の予測対象 236 地点の閾値別の検証結果。FT=36,48 の 24 時間降雪量の (a) エクイタブルスレットスコア (ETS) と (b) バイアススコア (BI)。赤線が繰り返し学習を十分に行った場合 (新ガイダンス)、青線が繰り返し学習を行わない場合、緑線が GSM 最大降雪量ガイダンスである。降雪量地点ガイダンスの 24 時間降雪量は連続する 2 つの 12 時間降雪量を 足し合わせることで作成している。その他の図の見方は図 3.2.3 と同じ。



図 3.2.5 新ガイダンスで追加した 66 地点の閾値別の検証結果。FT=36,48 の 12 時間降雪量の (a) エクイタブルスレットスコア (ETS) と (b) バイアススコア (BI)。赤線が新ガイダンス、青線が検証条件を揃えた GSM 最大降雪量ガイダンス。その他の図の見方は図 3.2.3 と同じ。



図 3.2.6 新ガイダンスの予報時間別、閾値別の 12 時間降雪 量のエクイタブルスレットスコア (ETS)。縦軸はスコア、 横軸は降雪量の閾値を表し、色は各予報時間を表す。

であるが、連続する 2 つの 12 時間降雪量を足し合わせ て 24 時間降雪量を作成し、これも同様に検証した。

追加地点の検証

新ガイダンスで追加した 66 地点の 12 時間降雪量の 検証結果を図 3.2.5 に示す。比較のために、検証対象地 点などを揃えた GSM 最大降雪量ガイダンスの検証結 果も示す。新ガイダンスは、GSM 最大降雪量ガイダン スの予測精度を概ね上回っている。ただし、40 cm/12h を超える大雪に対しては GSM 最大降雪量ガイダンス に劣っている。これは、ニューラルネットワークが統 計的手法であるため、発生頻度の多い現象に関係式が 適応しやすく、相対的に頻度の少ない現象の予測への 精度が十分でないことが原因である。古市 (2010) は、 この「40 cm/12h 以上の降雪を予測することはほと んどない」という特性を指摘しているが、新ガイダン スにおいても、この特性に大きな変化はない。これは 従来の予測対象地点についても同様である。発生頻度 の少ない大雪に対しては、雪水変換法で予測する最大 降雪量ガイダンスの方が優勢である点に留意が必要で ある。

(2) 予報時間毎の検証

図 3.2.6 に全予測対象地点での新ガイダンスの 12 時 間降雪量を、予報時間別に検証した結果を示す。本改 良で新たに追加した FT=84 は、FT=60 や FT=72 の 予測精度に比べて妥当な精度となっており、予報時間 に応じた自然な変化となっていることが確認できる。 3.2.4 事例検討

検証期間に発生した大雪事例を取り上げ、ガイダン スの予測特性について解説する。

(1) 南岸低気圧(2013年1月14日)

2013年1月14日に南岸低気圧の通過により関東地 方南部を中心に大雪となった事例を示す。本州の南岸 を急速に発達しながら進む低気圧の影響で、関東地方 は14日の日中に大雪に見舞われ、14日21時までの12 時間に東京(東京都千代田区)で8 cm/12h、横浜(神 奈川県横浜市)で13 cm/12hの降雪量を記録した(原 ほか 2013)。

この 14 日の降雪を予測した前日 13 日 00UTC 初期 値の新・旧ガイダンスおよび GSM 最大降雪量ガイダ ンスの予測を図 3.2.7 に示す。

GSM 最大降雪量ガイダンスは、GSM が降雪時の関 東地方平野部の地上気温の低下を予測できなかったた め、降雪を予測できなかった(原ほか 2013)。旧ガイダ ンスは、関東地方の平野部には予測対象地点がなく、地 点の予測資料を得る術がない。それに比べて、新ガイ ダンスは、本改良で新たに予測対象となった熊谷(埼 玉県熊谷市)や宇都宮(栃木県宇都宮市)など平野部 北側の予測対象地点で実況に近い降雪を予測すること ができた。

一方で、新ガイダンスは東京や横浜といった平野部 南側の降雪を予測できなかった。これは降雪頻度が少 ないために統計的手法による予測が難しいという理由 のほかに、降雪量地点ガイダンスの予測値は、ニュー ラルネットワークによる予測を、モデルの地上気温や 降水量などで補正⁶した値であるためである。実際、 補正処理を施す前のニューラルネットワークによる直 接の降雪量予測を見ると、東京や横浜など平野部南側 の予測対象地点でも数 cm の降雪量を予測していた。 この事例では GSM の地上気温の予測が高かったため、 残念ながらこれらの地点の降雪量予測は0 cm に補正 されたが、ニューラルネットワークは降雪の可能性を 予想しており、新ガイダンスが関東地方の降雪に対し て有効な予測資料となる可能性があることを示してい ると考える。

(2) 冬型の事例(2013年1月26日)

2013年1月25日から26日にかけて冬型の気圧配置 により北陸地方で大雪となった事例について、新ガイ ダンスとGSM最大降雪量ガイダンスの予測特性の違 いを示す。

図 3.2.8 に、北陸地方における 26 日 12UTC を予報

⁶ 地上気温の予測が2°C以上の場合にガイダンスの予測降 雪量を0 cm にする補正や、モデルの予測降水量を雪水変換 法で降雪量に変換した値との整合処理などが施されている。 前者はニューラルネットワークによる弱い降雪の予測頻度が 過剰になることを抑える効果を、後者はモデルの降水量予測 と一定の整合を取るために必要な処理であり、平均的にはこ れらの補正処理を施した方が予測精度は高くなっている。



図 3.2.7 2013 年 1 月 14 日の南岸低気圧の事例。(a) から(e) は 1 月 14 日 12UTC を対象とする 13 日 00UTC 初期値の 12 時 間降雪量の予測または実況の降雪量。(a) 旧ガイダンス、(b) 新ガイダンス、(c) GSM 最大降雪量ガイダンス、(d) 新ガイダ ンス、ただしモデル地上気温や降水量による補正前、(e) 実況の 12 時間降雪量(毎正時の前 1 時間積雪深差が正の場合を積 算)(f) 1 月 14 日 12UTC の地上天気図。(b), (d), (e) の赤破線より南側は新ガイダンスで追加した関東地方および山梨県 の予測対象地点の範囲を、(e) の× 印は期間中の積雪深に欠測を含むことを表す。

対象時刻とする新ガイダンスと GSM 最大降雪量ガイ ダンスの予測と実況の 24 時間降雪量、26 日 12UTC の 地上天気図を示す。低気圧が北海道付近にあり、東日 本から西日本は冬型の気圧配置となっており、北陸地 方では広範囲のアメダス観測点で 40 cm/24h に近い 大雪となった。

この 26 日 12UTC を予報対象時刻とする予測を見る と、GSM 最大降雪量ガイダンスは新潟県と福島県の県 境付近に 80~100 cm/24h の予測をしている。これは 実況の 24 時間降雪量が最も多かった地域と分布は一致 するが、量的にはおよそ 2 倍であり過剰な予測であっ た。また、予報時間が FT=84, FT=60(図略), FT=36 と短くなるにつれて少しずつ実況の降雪量には近づい ているものの、FT=36 でも 80 cm/24h を超えるなど 降雪量予測が過剰な傾向は変わらず一貫していた。こ れに対して新ガイダンスは、FT=84 ではやや予測の降 雪量が少ない地域も見られるが、FT=84, FT=60(図 略), FT=36 と予報時間によらず安定して 50 cm/24h 前後の実況の降雪量に近い予測ができていた。 図 3.2.9 に 24 時間降雪量についての新ガイダンスと GSM 最大降雪量ガイダンスの閾値別のバイアススコ アを示す。新ガイダンスの予測頻度は適正からやや過 少な傾向が、最大降雪量ガイダンスの予測頻度には一 貫した過大傾向があり、新ガイダンスと GSM 最大降 雪量ガイダンスでは予測頻度の特性が大きく異なるこ とが分かる。本事例は、この予測頻度の特徴が現れて いる事例と考えられ、新ガイダンスを参考に最大降雪 量ガイダンスの面的な予測を修正できる場合があるこ とを示している。

3.2.5 まとめと利用上の留意点

本改良では降雪量地点ガイダンスについて、予測対 象地点の追加、予報時間の延長、また、ニューラルネッ トワークの係数を繰り返し学習を十分に行ったものに 置き換えることで予測精度の改善を得た。この新ガイ ダンスを検証することにより以下の特性が確認された。

1. ニューラルネットワークの繰り返し学習を事前に行うことで、新規に追加した地点のガイダンスの予



図 3.2.8 2013 年 1 月 25 日から 26 日にかけての冬型の事例。(a) から (e) は 26 日 12UTC を対象とする 24 時間降雪量の予測 または実況の降雪量。(a), (b) 新ガイダンス(FT=84 および FT=36)、(c) 実況の 24 時間降雪量(毎正時の前 1 時間積雪深 差が正の場合を積算)、(d), (e) GSM 最大降雪量ガイダンス(FT=84 および FT=36)、(f) 1 月 26 日 12UTC の地上天気 図。(c) の × 印は期間中の積雪深に欠測を含むことを表す。



図 3.2.9 新ガイダンス(実線)とGSM 最大降雪量ガイダ ンス(破線)の予報時間別、閾値別の24時間降雪量のバ イアススコア(BI)。縦軸はスコア、横軸は降雪量の閾値を 表す。

測精度が、単純に近接地点の係数をコピーした場 合よりも高まること。また、その予測精度はGSM 最大降雪量ガイダンスを上回ること。

- 2. 従来の予測対象地点についても繰り返し学習を行うことで、その予測精度が改善すること。
- 3. これまで予測を行っていなかった FT=84 を予報 時間に追加し、その予測精度が予報時間に応じた ものであること。

本改良で予測対象地点に追加しなかった地点につい ては、今後の観測データの蓄積を待って予測対象地点へ の追加を検討したいと考えている。この際には、2012 ~13、2013~14年の大雪事例を繰り返し学習に取り込 むことで、既存の予測地点についてもさらなる予測精 度の改善を図りたい。

このような改善の一方で、ニューラルネットワークと いう統計的手法を用いるため、現象の発生頻度の少ない 大雪の予測精度が不十分であるという点については旧 ガイダンスと変わらない結果であった。このため旧ガイ ダンスと同じく新ガイダンスについても、40 cm/12h 以上といった大雪の予測になることはほとんどなく、こ の点は利用に際して引き続き留意する必要がある(古 市 2008)。 また、第 3.2.4 項 (2) では、GSM 最大降雪量ガイダ ンスとは、同じ降雪量を予測するガイダンスではある ものの、その予測頻度の特性には大きな違いがあるこ とを示した。第 3.2.2 項 (3) や第 3.2.3 項 (1) では、統 計的な予測精度は、降雪量地点ガイダンスの方が概ね 優勢であることも示した。これらのことから、本ガイ ダンスの予測特性や精度を考慮しつつ、YSS(予報作 業支援システム)での予報作業において、最大降雪量 ガイダンスを修正する参考として本ガイダンスを利用 することを推奨したい。

参考文献

- 原旅人,白山洋平,氏家将志,2013:2013 年1月14日 の関東大雪.平成25年度数値予報研修テキスト,気 象庁予報部,71-89.
- 古市豊,2008: 降雪量ガイダンス. 平成20年度数値予 報研修テキスト,気象庁予報部,73-76.
- 古市豊,2010: 降雪ガイダンスの改良と利用. 平成22 年度数値予報研修テキスト,気象庁予報部,78-81.
- 古市豊,2011:最大降雪量ガイダンス.平成21年度数 値予報研修テキスト,気象庁予報部,27-36.
- 松下泰広,2012: ガイダンス作成に用いる予測手法.平成 24年度数値予報研修テキスト、気象庁予報部、44-48.

3.3 乱気流指数の改良¹

3.3.1 はじめに

乱気流指数 (TBindex) は、ケルビン・ヘルムホルツ (KH) 波や対流雲など、様々な要因で発生する乱気流を 総合的に予測する指数である。乱気流の要因別に算出 した複数の指数をロジスティック回帰で組み合わせる ことで、様々な要因による乱気流を1つの指標で予測 することが可能になるとともに、単独の指数での予測 と比べて予測精度が大幅に向上している。また、ロジ スティック回帰で求めた確率値を調整することで、高 度によらず1つの閾値で最適な予測を行うことが可能 となっている。MSM の予測値から算出する国内航空 悪天 GPV の TBindex は、2010 年 2 月に数値予報ルー チンでの作成が開始され、2010年6月には係数の変更 による改良を行い(工藤 2010)、2011年3月からは空 域予報現業での利用が開始されている。LFM の予測値 に基づく LFM 航空悪天 GPV の TBindex は、国内航 空悪天 GPV の TBindex と同じ手法、同じ係数で 2012 年6月から作成を開始しており、2014年3月からは下 層悪天予想図と狭域悪天予想図での乱気流域の予測に 用いられている。2013年には GSM 版の TBindex の 開発も行われた (三輪 2013)。

国内航空悪天 GPV の TBindex は、従来から乱気流 の予測に用いられてきた鉛直ウィンドシアー (VWS) を 有意に上回る精度を持つ予測指数であるものの、以下 のような問題があった。

- 2008年から2009年の2年間のデータで学習を行っているため、その後に行われたモデルの改良により、回帰係数や調整パラメータが最適ではない可能性があった
- TBindex を構成する説明変数の1つであるトラン スバースバンド指数 (TRAV)の予測精度が不十分 であった (工藤 2010)
- 3. 対流雲の雲頂付近で発生する乱気流の予測が不十 分であった

今回これらの問題を解消するための変更を行い、さら に後述するいくつかの変更を行った結果、乱気流の予 測精度の改善が確認できた。国内航空悪天 GPV では 改良版の TBindex の運用を 2014 年 8 月に開始した。

本節では主に、国内航空悪天 GPV の TBindex の変 更内容と検証結果を述べる。以下では従来の TBindex を旧 TBindex、改良版の TBindex を新 TBindex と呼 ぶ。まず第 3.3.2 項で旧 TBindex からの変更点を述べ る。変更によって説明変数間の相関と各層での典型的 な寄与量が変化する。これについては第 3.3.3 項で述べ る。第 3.3.4 項では確率値の調整方法の変更について述 べる。続いて第 3.3.5 項と第 3.3.6 項では検証結果と予 測事例を述べる。検証結果では、今回の変更を LFM 航 空悪天 GPV の TBindex に適用した場合の検証結果も 併せて述べる。新 TBindex の利用上の注意点とまとめ を第 3.3.7 項と第 3.3.8 項で述べる。なお、ここでは旧 TBindex からの変更点を中心に述べるため、TBindex の基本的な算出手順や変更のない説明変数の算出方法 などについては工藤 (2010) を参照していただきたい。

3.3.2 変更点

(1) 学習期間の変更

旧 TBindex は 2008 年から 2009 年の 2 年間のデー タで学習を行っているため、それ以降に行われたモデ ルの改良により、回帰係数や調整パラメータが最適で はない可能性があった。そこで新 TBindex では、2011 年から 2012 年のデータを用いて係数を学習し、2013 年のデータで検証することとした。なお、学習期間の 違いによる影響を比べるため、このほかにも 2010 年か ら 2012 年の 3 年間で学習した場合と、2010 年、2011 年、2012年の各1年間で学習した場合を検証したが、 予測精度への影響は小さかった(図略)。ただし、学習 期間を短くするとサンプル数が少なくなるため、頻度 の少ない要因による乱気流に対する評価が不十分とな り、回帰式に反映されない可能性が生じる。一方、学 習期間を長くすると、データの蓄積に必要なディスク 容量が増加するという問題が生じる。これらのことを 考慮し、新 TBindex の学習期間は旧 TBindex と同じ 2年間とした。

(2) トランスバースバンド指数 (TRAV) の変更

ジェット気流に伴う雲バンドの中で発生するトラン スバースバンドは、乱気流発生の重要な指標の1つで ある(気象衛星センター 2003)。大野・三浦(1982)は、 トランスバースバンドは圏界面下で励起された KH 波 であり、発生条件は、「圏界面直下の低安定度層厚が 1 km を超え、その中で最小リチャードソン数がおよ そ0.25 より小さく、最大風速が 50 m/s を超える」と 述べている。ただしこれは1次元方程式の数値解であ り、3次元の現象であるトランスバースバンドの発生条 件と一致しているとは限らない。そこで現状の TRAV は、トランスバースバンドに伴う乱気流発生時の経験 的な特徴を表現した指数となっている。旧 TBindex に おける TRAV(以下、旧 TRAV)は次のように算出し ていた。

- まず、風速 100 ノット(kt: 100 kt ≃ 50 m/s)以 上で相当温位の鉛直変化率が 2.0 K/km 以下の層 を、下層から上方に向かって探す
- 次に、その層から上方の4000 ft 以内² の層に、風速 が100 kt 以上で相当温位の鉛直変化率が2.0 K/km 以上の層があった場合、その層における VWS の 値(単位は kt/1000 ft)をTRAV とする

 $^{^2}$ 1 ft $\simeq 0.3048$ m。本節では ft で表される高度は全て標準 大気の気圧高度である。



図 3.3.1 トランスバースバンド指数 (TRAV) の予測例。2013 年 1 月 12 日 21UTC 初期値の FT=13, FL350 の予測。FL は フライトレベルで、標準大気における気圧高度 (ft) を 100 で割った値。(a) VWS(単位は kt/1000 ft), (b) 旧 TRAV、(c) 新 TRAV。



図 3.3.2 新 TRAV に用いているシグモイド関数。

3. この条件を満たさない場所では TRAV=0 とする この算出方法では、風速 100 kt を閾値として TRAV が値を持つか否かを決定しているため、100 kt を境に 不連続に値が変わっていた。また、相当温位の鉛直変 化率が 2.0 K/km 以上の領域と VWS が大きい領域が 鉛直方向にやや離れている場合があり、結果として指 数としての表現が不十分になることもあった。実際の 予測事例を図 3.3.1 に示す。旧 TRAV は VWS の一部 を切り取った形の予測となっており、九州の西~南海 上や、北陸の沿岸部で不連続な変化をしている。トラ ンスバースバンドは主に対流圏上層付近で発生する現 象であるが、上記のような理由により、旧 TRAV では TBindex への寄与量は小さく、上層でも説明変数とし て採用されない場合があった(工藤 2010)。このような 問題を解消するために、TRAVの算出方法を次のよう に変更した。

 相当温位の鉛直変化率が 2.0 K/km 以下の層が 4000 ft 以上続いている場合、その領域の上端高度 の鉛直層の番号を k₁ とする k₁番目の層から上に相当温位の鉛直変化率が 2.0 K/km よりも大きい層が続いている場合、その中のある高度(層番号 k₂)におけるトランスバース バンド指数を次のように定義する

$$\operatorname{TRAV}(k_2) = \operatorname{VWS}(k_2) \cdot \operatorname{F}(k_1, k_2) \cdot \operatorname{S}(k_2)$$

$$F(k_1, k_2) = 2^{[1.5 - \{FL(k_2) - FL(k_1)\}/20]}$$
(3.3.2)

$$S(k_2) = \frac{1}{1 + \exp\left[-20\left\{V(k_2) - 90\right\}/90\right]} \quad (3.3.3)$$

ここで FL はフライトレベルで、標準大気における気 圧高度(ft)を100で割った値、Vは風速(kt)である。 F(*k*₁,*k*₂)は、*k*₂が弱安定層の上端高度である*k*₁に近 いほど大きくなる関数で、k1から1000ft離れる毎に、 $2,\sqrt{2},1$ というように、 $1/\sqrt{2}$ 倍になっていく。これは 弱安定層の上端高度がトランスバースバンドの雲頂に 相当し、その雲頂に近いほど乱気流が発生しやすいと 考えたためである。このようにすることで、弱安定層 の上端高度とその上にある VWS が大きい領域の高度 差が大きい場合でも、ある程度の値を持つようになる。 $S(k_2)$ は風速に応じて $0 \sim 1$ に変化するシグモイド関数 で、風速が90 ktのときに0.5 となる(図 3.3.2)。従 来は風速 100 kt を境に値を持つか持たないかを決めて いたが、経験的には100 kt よりも風速が弱くてもトラ ンスバースバンドが発生することから、風速の閾値を 下げるとともに、100 kt を境とした不連続を解消する ことを目的としている。

変更後の TRAV (以下、新 TRAV)の予測例(図 3.3.1c)を見ると、旧 TRAV で見られた不連続な変化 が解消されている。また、旧 TRAV は VWS の一部 を切り取った形の予測であったのに対し、新 TRAV は VWS との相関が低くなっている。旧 TRAV で北陸の 沿岸部や九州の西海上で強い値が予測されていたが、 新 TRAV では予測されなくなっている。これは変更後



図 3.3.3 対流雲中乱気流指数 (CONV) の予測例。2013 年 12 月 17 日 21UTC 初期値の FT=5, FL230 の予測。(a)前1 時間 降水量(1 mm/h 以上から表示)、(b) 旧 CONV、(c) 新 CONV。

の算出方法の1で弱安定層が4000 ft 以上続いていると いう条件を付加したためである。変更の結果、第3.3.3 項で示す通り、新TRAV は上層の全ての高度で説明変 数として採用されるようになった。

(3) 対流雲中乱気流指数 (CONV) の変更

対流雲の雲中では強い上昇・下降流によって鉛直方 向の突風が発生することにより乱気流が発生する。ま た対流雲中や雲頂に VWS の大きな層がある場合には、 上昇流によって VWS が強化されて KH 波が発生し、 乱気流が発生する (Lane and Sharman 2008)。対流雲 中乱気流指数 (CONV) はこのような乱気流を予測する ことを目的としている。

従来の対流雲中乱気流指数(以下、旧CONV)は次の式で算出していた。

$$CONV(k_1) = W_{mean}(k_1) \times VWS(k_1)$$
(3.3.4)

ここで k_1 は鉛直層の番号、 W_{mean} は水平 80 km で平均した鉛直流で、 $W_{mean} \le 0$ の場合(平均的に下降流の場合)は CONV=0 とする。VWS の単位は kt/1000 ft である。山岳波などの対流雲以外での強い上昇流の影響を除去するために、対象とする地点での前1時間降水量が1 mm/h未満である場合も CONV=0 とする。

対流雲に関連した乱気流についての事例解析を行っ たところ、旧CONVは対流雲の雲中での乱気流に対し ては期待した効果が得られていたが、雲頂付近での乱 気流に対しては予測が不十分であった。その理由とし ては、対流雲に伴う強い上昇流域と、対流雲頂付近に ある VWS が大きい領域の重なりがモデルの中では不 十分な場合があり、その結果として指数の値が十分に 大きくならないことがあったためと考えられる。

この問題を解消するために CONV を次のように変更した。

$$CONV(k_1) = W_{mean}(k_1) \times VWS(k_2) \qquad (3.3.5)$$

ここで W_{mean} は(3.3.4)式と同じ定義で、 $W_{mean} \leq 0$

の場合は CONV=0 とする。 k_1 は $W_{mean} > 0$ の格子 点の鉛直層の番号、 k_2 は k_1 から上方に 4000 ft 以内で $W_{mean} > 0$ の領域が継続している層の中で、VWS が 最大となる鉛直層の番号を示す。これにより、強い上 昇流域と VWS が大きい領域が多少離れていても指数 としてある程度大きな値が算出されるようになる。ま た、旧 CONV では前 1 時間降水量が 1 mm/h 未満で ある場合に CONV=0 としていたが、変更後の CONV (以下、新 CONV)ではこの閾値を 0.1 mm/h に変更 する。これは、上・中層雲主体の対流の場合には地上 に達する降水が少ない場合もあるため、条件を緩和し て予測領域を広げることを意図している。これらの変 更は主に上・中層での予測精度を向上させることを目 的としている。

図 3.3.3 に新旧 CONV の予測例を示す。旧 CONV では、前1時間降水量が1 mm/h 以上の領域で切り取 られた形の予測をしているが、新 CONV では降水量の 閾値を下げたことにより、旧 CONV よりも広い領域で 予測されている。また前1時間降水量が1 mm/h 以上 の領域では、新 CONV は旧 CONV 以上の強さで予測 されている。これは 4000 ft 以内で最大の VWS を利用 するように変更した効果である。

(4) VHS の導入

旧 TBindex では説明変数に TPI (Turbulence Potential Index; 宮腰 2003)を用いていたが、これに代わる 指数として VHS (Vws-Hws-Speed)を導入する。TPI は、深いトラフや大きな曲率を持ったリッジの周辺で発 生する乱気流を対象とした指数で、次の式で表される。

$$TPI = \left| \boldsymbol{v} \times \frac{\mathrm{d}\boldsymbol{v}}{\mathrm{ds}} \right| \times VWS \tag{3.3.6}$$

ここで v は風ベクトル、ds は流れに沿った方向の微小 距離で、VWS の単位は s⁻¹ である。TPI は風ベクトル と流れに沿った方向の風の水平シアーベクトルとの外 積に比例するため、流れに沿って風向が変化する(流

番号	名称	略号	意味
1	斜方ウィンドシアー	SWS	斜め方向に算出した風のシアー
2	対流雲中乱気流指数	CONV	対流雲の雲中および雲頂での強い上昇流や VWS の強化によ り発生する乱気流を予測する指数
3	風下山岳波指数	MTW1	風下山岳波に伴い山頂付近の安定層下で発生する乱気流を予 測する指数
4	鉛直伝搬山岳波指数	MTW2	鉛直上方に伝搬した山岳波の砕波による乱気流を予測する指数
5	中層雲底乱気流指数	BASETB	中層雲底下での対流による乱気流を予測する指数
6	トランスバースバンド指数	TRAV	トランスバースバンドに伴う乱気流を予測する指数
7	水平ウィンドシアー	HWS	水平方向の風のシアー
8	VHS	VHS	VWS × (流れに沿った方向の風の水平シアー)× (風速)
9	リチャードソン数	RI	KH 不安定の発生を予測する指数
10	気温の水平傾度	GRADT	等フライトレベル面で算出した気温の水平傾度の大きさ

表 3.3.1 新 TBindex に用いられている説明変数の略号と意味。



図 3.3.4 寄与最大説明変数の表示例。2013 年 3 月 1 日 09UTC 初期値の FT=6, FL150。(a) TBindex、(b) 寄与最大説明変 数。(b) で色が付いていない(白い)領域は 1 番目の説明変数である SWS の寄与量が最も大きい場所であることを示してい る点に注意。

れが曲率を持つ)場合に値を持ち、風速のみ変化する 場合には値が0になる。しかしながら、ジェット気流 の加速場や減速場では乱気流が発生しやすいことを考 慮し、VHSとして次の指数を導入する。

$$VHS = |\boldsymbol{v}| \times \left| \frac{\mathrm{d}\boldsymbol{v}}{\mathrm{ds}} \right| \times VWS \times 10^5$$
(3.3.7)

VHS は、風ベクトルの大きさと、流れに沿った方向の 風の水平シアーの大きさに、VWS(単位は s^{-1})を掛 けた指数である。 10^5 はVHSのオーダーを1程度にす るための係数である。外積ではなく大きさの掛け算に することで、流れが曲率を持つ場合だけではなく、流 れに沿って風速が変化する場合も値を持つようになる。

(5) 説明変数の組み換え

TBindex では、複数の説明変数の候補の中から、統 計モデルの良さを評価する指標である赤池情報量基準 (AIC)に基づいて説明変数を選択している。旧TBindex では TSI (Turbulence Stability Index; 宮腰 2003)を 説明変数に用いていたが、上記(1)~(3)の変更を行ったところ有効な説明変数としてほとんど選択されなくなったため、TSIを説明変数の候補から除外し、代わりに水平ウィンドシアー(HWS)を候補に追加する。またTPIの代わりにVHSを導入する。説明変数の候補の数は旧TBindexと同じ10個である。新TBindexに用いる説明変数を表 3.3.1 に示す。

(6) 寄与最大説明変数の追加

乱気流は様々な要因で発生するが、予測や実況監視 において着目すべきポイントは発生要因によって異な る。このため空域予報作業では、単に乱気流が発生す るか否か(TBindex が大きいか小さいか)だけではな く、その発生要因(どの説明変数の寄与が大きいか) を知ることが重要となる。これまでは、予報担当者が 各説明変数の値を見て乱気流の発生要因を判断してい たが、係数の値は高度によって変化するため、説明変 数を見ただけでは判断が難しい場合もあった。そこで

表 3.3.2 説明変数間の相関係数。回帰式を層別化した 2000 ft 毎に求めた相関係数を全高度で平均した値。相関係数の絶対値 が 0.6 以上を赤、0.4 以上 0.6 未満を黄、0.4 未満を青で示している。

	SWS	HWS	VHS	CONV	MTW1	MTW2	BASETB	TRAV	RI	GRADT
SWS	1.000	0.617	0.655	0.396	0.052	0.085	0.069	0.194	-0.506	0.503
HWS	0.617	1.000	0.478	0.348	0.054	0.079	0.060	0.045	-0.156	0.303
VHS	0.655	0.478	1.000	0.410	0.031	-0.054	0.042	0.237	-0.322	0.438
CONV	0.396	0.348	0.410	1.000	0.005	0.042	0.048	0.137	-0.205	0.268
MTW1	0.052	0.054	0.031	0.005	1.000	-0.061	-0.306	0.004	-0.015	0.060
MTW2	0.085	0.079	-0.054	0.042	-0.061	1.000	-0.053	-0.102	-0.091	0.102
BASETB	0.069	0.060	0.042	0.048	-0.306	-0.053	1.000	-0.024	-0.064	0.068
TRAV	0.194	0.045	0.237	0.137	0.004	-0.102	-0.024	1.000	-0.112	0.070
RI	-0.506	-0.156	-0.322	-0.205	-0.015	-0.091	-0.064	-0.112	1.000	-0.229
GRADT	0.503	0.303	0.438	0.268	0.060	0.102	0.068	0.070	-0.229	1.000

TBindex への寄与が最も大きい説明変数を示す要素として寄与最大説明変数を算出する。具体的には、各説明変数に表 3.3.1 で示した番号を割り振っておき、各格子点で寄与量(係数×説明変数値)が最大となった説明変数の番号を寄与最大説明変数として出力する。寄与最大説明変数を利用することでTBindex が大きくなった理由を直接的に知ることができる。

寄与最大説明変数の表示例を図 3.3.4 に示す。 TBindex では 3.0 を超える並以上の乱気流の領域が いくつか予測されているが、北海道周辺と三陸沖で は CONV が、沿海州と朝鮮半島北部では鉛直伝搬山 岳波指数 (MTW2) が、華中では中層雲底乱気流指数 (BASETB) が、その他の領域では斜方ウィンドシアー (SWS) が TBindex に最も寄与していることが分かる。

3.3.3 相関と寄与量

TBindex では複数の説明変数の候補の中から独立な (相関が弱い)変数だけを選択して使用している。こ れにより、どの説明変数がTBindex に寄与しているの か、利用者が理解しやすくなる。ここでは説明変数の 独立性を確認するために、各説明変数間の相関を示す。 また、各説明変数のTBindex への寄与を見るために、 各高度における代表的な寄与量を示す。

表 3.3.2 に 2 つの説明変数間の相関係数を示す。こ こで示した相関係数は、回帰式の層別化と同じ 2000 ft 毎に相関係数を求め、その値を全層で平均した値であ る。相関係数を算出する際、例えば CONV や TRAV 等はある条件を満たす場合のみ値を持ち、そうでない 場合には値が0 になる説明変数であるが、この場合の 相関係数は、2 つの説明変数の値がいずれも0 ではない 場合のデータのみを利用して算出している。表では相 関が強いもの(相関係数の絶対値が0.6 以上)を赤で、 中程度のもの(同0.4 以上0.6 未満)を黄で、弱いもの (同0.4 未満)を青で背景を塗りつぶしている。CONV, MTW1, MTW2, BASETB, TRAV はほぼ全ての説明 変数に対して相関が弱い(独立性が高い)と言える。リ チャードソン数 (RI) と気温の水平傾度 (GRADT) は SWS と中程度の相関を持つ。HWS と VHS は SWS と 強い相関があり、HWS と VHS も中程度の相関を持つ が、これらも用いた方が若干の精度向上が見られたた め、今回は説明変数の候補として採用することとした。

表 3.3.3 に各高度における説明変数の代表的な寄与 量³を示す。表では切片項に対して 10%以上の寄与量 を持つ説明変数の背景を青で塗りつぶしている。空欄 は、AICに基づく判定でその高度では説明変数として 採用されなかったことを示している。SWS と CONV は全ての高度で採用され、上層の一部を除いては寄与 が大きくなっている。MTW1, MTW2, BASETB はそ れぞれ、下層、中・上層、中層を中心に説明変数とし て採用されており、採用されている高度では寄与量が 大きい。TRAV は FL210 以上の全ての高度で説明変 数として採用されており、上層でも採用されない高度 があった旧 TRAV と比べると今回の変更の効果が見ら れるが、寄与が大きいのは一部の高度のみであった。 HWS と VHS は多くの高度で採用されているが、一部 の高度を除いて寄与量は小さい。RIと GRADT は全 般に寄与が小さい。

3.3.4 確率値の調整

TBindex では、ロジスティック回帰で求めた確率値 を調整することで、並 (MOD) 以上の強度の乱気流に 対して全ての高度で同じ閾値 (TBindex=3.0)を用いて 最適な予測が行えるようにしている。各格子点におけ る TBindex は、次の式で求められる。

$$\Gamma \text{Bindex} = \frac{\ln P(i, j, k) - \mu(k)}{\sigma(k)} + 3.0 \qquad (3.3.8)$$

ここで *i*, *j*, *k* は格子点の座標、P はロジスティック回帰 で求めた 0~1 の確率値に 100 を掛けて%表示した確率

³ 寄与量は説明変数の値に回帰係数を掛けて求められる値で ある。ここでは各高度・説明変数に対する代表的な寄与量と して、スキルスコアが最大または極大となる説明変数の値を 用いて寄与量を算出した。

高度	切片	SWS	CONV	MTW1	MTW2	BASETB	TRAV	RI	GRADT	HWS	VHS
FL410	-7.58	0.70	0.33				0.14	-0.02		1.18	0.29
FL390	-7.11	0.86	0.42		0.95		0.24	-0.02		0.81	0.37
FL370	-6.80	0.77	0.45		1.86		0.33	-0.02		0.66	0.46
FL350	-6.74	1.27	0.39		1.82		0.41	-0.01		0.51	0.44
FL330	-6.67	2.06	0.61		1.06		0.30			0.29	0.44
FL310	-6.47	2.46	0.87		0.80		0.33				0.52
FL290	-6.51	2.74	0.88		0.97		0.56	0.00			0.46
FL270	-6.39	2.93	0.92		0.86		0.70	-0.01			0.27
FL250	-6.17	2.72	1.07		0.79	0.79	0.69	-0.01	-0.18	0.25	0.19
FL230	-6.27	2.55	1.06		0.58	1.01	0.29			0.21	0.23
FL210	-6.22	2.47	1.28		0.68	1.70	0.19	0.00	0.16	0.24	0.25
FL190	-5.84	2.23	1.20	1.15	0.62	1.96				0.32	0.23
FL170	-5.68	2.35	1.20	0.51	0.98	1.99				0.34	
FL150	-5.26	2.37	1.09	1.65	0.76	1.68			0.27	0.37	-0.11
FL130	-4.54	1.85	0.83	1.60	0.32	1.01			0.22	0.48	
FL110	-4.40	1.55	0.70	1.19	0.36	0.71		-0.01	0.25	0.53	0.08
FL090	-4.40	1.40	0.63	0.62				-0.01	0.26	0.46	0.19
FL070	-4.35	1.22	1.00	0.97				-0.01	0.13	0.36	0.22
FL050	-4.33	1.23	1.30	1.24				-0.01		0.38	0.17
FL030	-4.23	1.54	1.05	1.02				-0.02			0.21

表 3.3.3 各高度の説明変数の寄与量。ここでは回帰係数に各高度における説明変数の代表値を掛けた値を示す。切片に対して 10%以上の値を青で表示している。空欄は係数が0であることを示す。



図 3.3.5 (a) スキルスコアが最大となる lnP の閾値、(b) lnP のスキルスコアの標準偏差。移動平均と 3 次関数を当てはめた結 果を併せて示す。学習期間(2011 年~2012 年)のデータを用いて求めている。

である。また $\mu(k) \ge \sigma(k)$ は、 ln P の値を変えながら 高度別にスキルスコアを求めた際に、スキルスコアが 最大になるときの ln P の値と、スキルスコアの分布の 標準偏差である。右辺第一項は ln P に対するスキルス コアの分布を正規分布とみなした場合に、平均 0、標準 偏差 1 の正規分布になるように標準化する操作である。 これに 3.0 を加えることで、多くの格子点で TBindex が正の値を持つようになる。また TBindex=3.0 を閾値 とすることで、高度によらずスキルスコアが最大とな る予測を行うことが可能になると期待される。 μ と σ は学習期間のデータから得られる値であるが、 そのまま用いると学習データにオーバーフィッティン グしてしまい、予測には適さない可能性がある。これ を避けるために旧 TBindex では学習データから得られ た μ と σ のそれぞれを高度の 3 次関数で近似した値を 利用していたが、新 TBindex では層別化した上下 3 層 での移動平均値を用いることとした。図 3.3.5 は、学習 期間 (2011 年から 2012 年)のデータを用いて高度別 に求めた μ, σ と、これに移動平均および 3 次関数を当 てはめた結果である。 μ, σ とも、3 次関数を当てはめる



図 3.3.6 2013 年 1 月から 12 月の MOD 以上の乱気流に対する TBindex の閾値別の捕捉率 (Hit Rate) と体積率 (Volume Rate)。(a) FL000~FL150, (b) FL150~FL300, (c) FL300~FL450。RTN は旧 TBindex、TEST は新 TBindex の検証結 果を示す。TBindex は 0 から 0.2 毎に、VWS は 0 から 1 kt/1000 ft 毎に検証した結果を示している。図中の数値はそれぞ れの点に対応する TBindex の値。新 TBindex のみに 95%信頼区間を示すエラーバーを付加している。



図 3.3.7 2013 年 1 月から 12 月の MOD 以上の乱気流に対する TBindex の閾値別のスキルスコア。横軸は TBindex または VWS の値 (VWS の単位は kt/1000 ft)。(a) FL000 ~ FL150, (b) FL150 ~ FL300, (c) FL300 ~ FL450。凡例とエラーバー の意味は図 3.3.6 と同じ。

と実データからの乖離がやや大きいため、新 TBindex では移動平均を用いることにした。

3.3.5 検証

ここでは統計検証の結果を示す。検証に用いる実況 データは、学習データと同様に C-PIREP⁴(大林 2001) のみを使用する。また、天候状態(晴天、雲中等)に よる区別はしない。時刻については、予報時間の前後 30 分以内を観測時刻とした実況と比較を行う。乱気流 の観測場所については「地点Aで揺れた」と通報され る場合と、「地点Aから地点Bまで揺れた」と通報さ れる場合の2つのパターンがある。後者の場合は2地 点間の中点を実況があった場所とするが、2地点間の 距離が水平240km以上または鉛直6000ft以上離れて いた場合は中点に代表性がないと判断し、検証には使 用しない。以下、(1)~(3)では国内航空悪天 GPVの TBindexに対する検証結果を、(4)ではLFM航空悪天 GPVのTBindexに対する検証結果を示す。検証対象 領域は各 GPVの全領域とする。

(1) 高度別検証

ここでは高度別 (FL000 ~ FL150, FL150 ~ FL300, FL300 ~ FL450)の検証結果を示す。検証期間は学習期 間と独立な 2013 年 1 月から 12 月の 1 年間である。予 報時間は FT=4 ~ 15 を対象とし、分割表値を全て足し

⁴ 機上観測報告 (PIREP) の 1 つ。Common-PIREP の略。 飛行中の乱気流や着氷、雲の状態等が通報される。従来は各航 空会社内でのみ利用されていた PIREP (カンパニー PIREP) を、国土交通省航空局のシステムで集約して形式を統一した PIREP で、C-PIREP に参加する航空会社と気象庁に配信 される。従来の PIREP の多くが並以上の強度の乱気流や着 氷に対する通報であったのに対し、C-PIREP では乱気流が ないという情報も数多く通報される。

合わせてスコアを算出する。比較のために VWS によ る検証結果も示す。

図 3.3.6 に、TBindex の閾値別に MOD 以上の乱気流 を予測した場合の捕捉率 (Hit Rate) と体積率 (Volume Rate) の関係を示す。横軸は体積率で、全ての通報に 対する、閾値以上の領域から報じられた通報の割合を 示す。縦軸は捕捉率で、全ての実況ありの通報に対す る、閾値以上の領域から報じられた実況ありの通報の 割合を示す。体積率と捕捉率を付録 C.3.1 の分割表を 用いて書くと次のようになる。

Volume Rate =
$$\frac{FO + FX}{FO + FX + XO + XX}$$

Hit Rate = $\frac{FO}{FO + XO}$ (3.3.9)

体積率が等しい予測を比べた場合には捕捉率が大きいほ ど乱気流を多く捕らえた良い予測であり、捕捉率が等し い予測を比べた場合には体積率が小さいほど予測領域を 限定した良い予測と言えるため、図では線が左上にある ほど予測精度が高いと言える。TBindex で MOD 以上 の乱気流を予測する目安となる閾値 3.0 に着目すると、 新 TBindex は旧 TBindex と比べて、FL000~FL150 では同等、FL150~FL300では有意に改善、FL300~ FL450 ではやや改善している。また FL000~FL150 で は、新 TBindex は旧 TBindex よりも体積率が大きい。 これは新 TBindex で MOD 以上の乱気流が予測される 領域が広がっていることを示している。この理由は次 の図 3.3.7 の説明で述べる。FL150~FL300 と FL300 ~FL450 では、新 TBindex は旧 TBindex よりも体積 率は小さく、捕捉率は大きくなっている。すなわち、新 TBindex では予測領域が狭くなるにもかかわらず、よ り多くの乱気流を捕捉できていることを意味している。 また、いずれの高度でも新 TBindex は VWS を有意に 上回っている。

図 3.3.7 に TBindex の閾値別に MOD 以上の乱気流 を予測した場合のスキルスコアを高度別に示す。FL000 ~ FL150 では、新 TBindex は閾値 3.0 でスコアが最大 となっており、指数の調整によって期待される効果が得 られている。一方、旧 TBindex では閾値 2.8 付近にピー クがあり、スコアの分布としても全般に閾値が低い方に シフトしている(図 3.3.7a)。これは旧 TBindex で 3.0 を閾値として予測した場合には、最適値よりもやや狭 く予測を行っていたことを意味する。旧 TBindex は新 TBindex と比べて TBindex=3.0 での体積率が小さい が(図3.3.6a)、これは最適な閾値からのずれが生じて いたためである。FL150~FL300では、新旧 TBindex とも閾値 3.2 付近に最大値があり、最適値よりもやや 広く予測していた。FL300~FL450 では、新 TBindex では閾値 3.0 でスコアが最大となっており、指数の調 整によって期待される効果が得られている。スキルス コアの最大値を比べると、新 TBindex は旧 TBindex と比べて、FL000~FL150 では同等、FL150~FL300 では有意に改善、FL300~FL450 ではやや改善してい る。また VWS と比べると、いずれの高度でも有意に 上回っている。

検証の結果、FL150以上の高度で予測精度の改善が 見られたが、今回行った変更の中でどの変更が予測精 度に影響していたか調べたところ⁵、CONVと学習期 間の変更の効果が最も大きく、続いてTRAVの変更が 寄与していた(図略)。CONVとTRAVの変更は主に 中・上層での予測精度の向上を目的としており、期待 していた効果が得られていると言える。その他の変更 に関しても、予測精度の改善は見られるが、改善幅と しては小さかった。

高度別にスキルスコアの最大値を比べると、上層ほど 値が小さくなっているが、これは上層ほど C-PIREP で MOD 以上の乱気流が通報される割合が低くなることの 影響が大きい。検証期間中に通報された MOD 以上の 乱気流の割合は、FL000 ~ FL150 では 3.9% であったの に対し、FL150 ~ FL300 では 0.86%、FL300 ~ FL450 では 0.29% と、上層ほど低くなっている。現象の頻度 が低くなるほど位置ずれの影響を受けやすくなるため、 予測がランダム予測に近づき、スキルスコアは小さく なる。

高度別の検証結果をまとめると、FL000~FL150で は新旧 TBindex は同等、FL150以上では新 TBindex が旧 TBindex を上回る結果となった。またいずれの高 度でも、新 TBindex は VWS を有意に上回っていた。 スキルスコアで比べると、新 TBindex は旧 TBindex よりも 3.0 に近い閾値でスコアが最大になっており、指 数調整の効果が得られていると言える。

(2) 予報時間別検証

図 3.3.8 に、新 TBindex で MOD 以上の乱気流を 予測した場合のスキルスコアを予報時間別 (FT=4~7, FT=8~11, FT=12~15) に示す。検証期間は学習期間 と独立な 2013 年 1 月から 12 月の 1 年間である。高度 については FL000~FL450 の全高度での分割表値を足 し合わせてスコアを算出している。スキルスコアの最 大値は予報時間によってやや差があるものの、いずれ の予報時間でも閾値 3.0 付近に最大があり、予報時間 によらず TBindex=3.0 で最適な予測を行っていたと言 える。

(3) 並以外の乱気流に対する閾値の確認

ここでは TBindex を図に表示させる際の塗りわけの 閾値を決める参考とするため、乱気流の強度別に検証 を行った結果を示す。予測精度を比較することが目的 ではないため、検証期間は学習期間を含む 2011 年か ら 2013 年の 3 年間とする。予報時間は FT=4~15 を 対象とし、高度については各高度での分割表値を全て 足し合わせて算出したスコアを示す。

⁵ それぞれの変更を行わなかった場合の予測精度を調べることで、各変更の予測精度への影響を調べた。



図 3.3.8 新 TBindex の MOD 以上の乱気流に対する予報時 間別のスキルスコア。横軸は TBindex の値。高度について は FL000 から FL450 までの分割表値を足し合わせてスコ アを算出している。

図 3.3.9 に乱気流の強度別のスキルスコアを示す。ス キルスコアが最大となる TBindex の閾値は、LGTM (弱-)については0.9程度、LGT(弱)については1.3 程度、LGTP(弱+)については1.9程度、SEV(強)に ついては4.9程度となった。これは旧 TBindex におけ る閾値(LGTM: 0.9, LGT: 1.3, LGTP: 2.0, SEV: 5.0) とほぼ一致しており、MOD 以外の乱気流に対しても 従来と同じ閾値を用いても大きな問題はない。SEV の 乱気流に対するスキルスコアは、他の強度の乱気流と 比べて極端に低くなっているが、これは SEV の頻度が 極めて低く、平均的な頻度としては全通報の 0.01%程 度しかないこと(工藤 2012)が影響している。

(4) LFM 版 TBindex の高度別検証

ここでは LFM 航空悪天 GPV の TBindex に国内航 空悪天 GPV と同じ変更を行った場合の検証結果を示 す。検証期間は2013年6月から2014年5月までの1 年間で、03,09,15,21UTC 初期値のデータのみを使用 する。予報時間はFT=4~9を対象とし、高度について は FL000 ~ FL150, FL150 ~ FL300, FL300 ~ FL450 の 3つの高度で検証した結果を示す。検証スコアは各予報 時間と高度の分割表値を全て足し合わせて算出してい る。比較のために VWS による検証結果も示す。なお、 説明変数や回帰係数は国内航空悪天 GPV の TBindex と同じものを使用するが、事前検証の結果、スキルス コアが最大となる TBindex の閾値が 3.0 からややずれ ることが分かったため、指数の調整については検証期 間と同じ 2013 年 6 月から 2014 年 5 月のデータを用い て行った。指数の調整は最適な閾値を3.0に揃えるため の操作であり、予測精度そのものには影響を与えない。

図 3.3.10 に、TBindex の閾値別に MOD 以上の乱 気流を予測した場合の捕捉率と体積率の関係を高度別



図 3.3.9 各強度の乱気流に対する新 TBindex のスキルス コア。横軸は TBindex の値。高度については FL000 から FL450 までの分割表値を足し合わせてスコアを算出して いる。

に示す。FL000~FL150 では新旧 TBindex の精度は 同等、FL150 以上では新 TBindex が旧 TBindex をや や上回っている。TBindex=3.0 で比べると、FL000~ FL150 では新旧 TBindex の体積率はほぼ等しいのに対 し、FL150 以上では新 TBindex の体積率が小さくなっ ている。これは FL150 以上では MOD 以上の乱気流を 予測する領域が狭くなることを意味している。

図 3.3.11 に、TBindex の閾値別に MOD 以上の乱気 流を予測した場合のスキルスコアを高度別に示す。新 旧 TBindex とも、概ね 3.0 付近でスキルスコアが最大 となっている。スキルスコアの最大値で比べると、い ずれの高度でも新 TBindex は旧 TBindex を上回って おり、VWS に対しては有意に上回っている。

以上のことから、今回の TBindex の変更を LFM 版の TBindex に導入した場合でも予測精度が改善することが確かめられた。

3.3.6 事例

今回の変更に伴う TBindex の違いの具体例として、 検証期間(2013年1月から12月)に発生した3つの 乱気流事例を示す。

(1) トランスバースバンドに伴う乱気流事例

2013 年1月13日にはトランスバースバンドに伴う 乱気流が多数発生した。13日10UTCの衛星赤外画像 (図3.3.12)では、西日本から東日本の南海上の広い範 囲でトランスバースバンド状の雲域が見られる(図の赤 点線で囲った領域)。広域雲解析情報図(TSAS1)によ れば、この雲域の雲頂はFL350付近であった(図略)。

13日 10UTC の前後 3 時間以内に C-PIREP で報じ られた MOD 以上の乱気流の実況(図 3.3.13)による と、九州から四国の南海上にかけて FL350 前後で多 数の乱気流が通報されていた。12日 21UTC 初期値の



図 3.3.10 2013 年 6 月から 2014 年 5 月の MOD 以上の乱気流に対する LFM 版 TBindex の閾値別の捕捉率 (Hit Rate) と 体積率 (Volume Rate)。(a) FL000 ~ FL150, (b) FL150 ~ FL300, (c) FL300 ~ FL450。RTN は旧 TBindex、TEST は新 TBindex の検証結果を示す。TBindex は 0 から 0.2 毎に、VWS は 0 から 1 kt/1000 ft 毎に検証した結果を示している。図 中の数値はそれぞれの点に対応する TBindex の値。新 TBindex のみに 95%信頼区間を示すエラーバーを付加している。



図 3.3.11 2013 年 6 月から 2014 年 5 月の MOD 以上の乱気流に対する LFM 版 TBindex の閾値別のスキルスコア。横軸は TBindex または VWS の値 (VWS の単位は kt/1000 ft)。(a) FL000 ~ FL150, (b) FL150 ~ FL300, (c) FL300 ~ FL450。凡 例とエラーバーの意味は図 3.3.10 と同じ。

FT=13 における FL350 の新旧 TRAV の予測図は図 3.3.1 に示してある。これと同じ時刻・高度における新 旧TBindex の予測図(図3.3.14)を見ると、新TBindex ではトランスバースバンドが発生していた四国の南海 上まで TBindex が 3.0 以上の MOD の乱気流が予測 されている。また、FL350 付近では乱気流が通報され ていない北陸の沿岸部については、新 TBindex は旧 TBindex よりも MOD 以上の予測領域を狭めている。 これは新 TRAV が旧 TRAV と比べて四国の南海上に 大きな値を予測するとともに、北陸の沿岸部には値を 予測しなくなったことが寄与している。

(2) 対流雲頂付近の乱気流事例

2013年12月18日には対流雲の雲頂付近で乱気流が 多数発生した。18日02UTCのレーダーエコー頂高度 (図 3.3.15)を見ると、西日本から東日本の広い範囲で エコーが観測されており、エコー頂高度の最大は $6 \sim 8$ km (FL200 ~ FL260) であった。18 日 02UTC の前後 3 時間以内に C-PIREP で報じられた MOD 以上の乱 気流の実況(図 3.3.16)によると、西日本ではエコー 頂の高度にあたる FL180 ~ FL280 付近で多数の乱気流 が通報されていた。17 日 21UTC 初期値の FT=5 にお ける FL230 の新旧 CONV の予測図は図 3.3.3 に示し てある。これと同じ時刻・高度における新旧 TBindex の予測図(図 3.3.17)を見ると、旧 TBindex では、四 国から近畿周辺などでは LGTP 程度の予測(TBindex ≥ 2.0)であるのに対し、新 TBindex では MOD の予 測(TBindex ≥ 3.0)がされている。これは新 CONV が旧 CONV と比べて四国から近畿周辺に大きな値を 予測したことが寄与している。

本事例ではもう1つ注目したいことがある。それは、



図 3.3.12 2013 年 1 月 13 日 10UTC の衛星赤外画像。トランスバースバンドが見られる雲域を赤点線で示す。



図 3.3.13 2013 年 1 月 13 日 10UTC の前後 3 時間以内に通 報された MOD 以上の C-PIREP。シンボルは乱気流の強 さを、色は高度 (FL) を示す。



図 3.3.14 2013 年 1 月 12 日 21UTC 初期値の FT=13, FL350 の TBindex の予測値。(a) 新 TBindex、(b) 旧 TBindex。

FL230 付近で MOD 以上の乱気流が通報されていない 東北地方では新 TBindex が旧 TBindex よりも予測を 弱めている点である。この領域ではSWS が強く予測さ れていたため(図略)、旧 TBindex では MOD 程度の 乱気流を予測していたが、新 TBindex では SWS の相 対的な寄与量が減ったため予測が弱まった。実況では、 東北地方の FL230 付近では MOD 以上の強度の乱気流 は通報されておらず(図3.3.16) 乱気流強度は最大で LGTP であった (図略)。この例のように新 TBindex では単に SWS が強い領域ではこれまでよりも予測が 弱くなる傾向がある一方、実際に乱気流が通報された 四国から近畿周辺のように、SWS に加えて他の指数も 大きくなっている場合には、従来よりも強い予測がさ **れる傾向がある。**図 3.3.6 で示した通り、新 TBindex では FL150 以上で体積率が減ったにもかかわらず捕捉 率が高くなっていたが、これは本事例で示したような 予測特性の変化によるものである。

(3) 複数の要因による乱気流事例

2013 年 11 月 10 日にはジェット気流の分流場で乱 気流が多数発生した。10日 04UTC の衛星赤外画像 (図 3.3.18)を見ると、ジェットの分流場にあたる東 日本では対流雲が発生し、雲頂はトランスバースバ ンド状になっている。TSAS1によればこの雲の雲頂 は FL350 付近であった (図略)。10 日 04UTC の前後 3時間以内に C-PIREP で報じられた MOD 以上の乱 気流の実況(図 3.3.19)によると、東日本の FL310~ FL370 付近で MOD の乱気流が多数通報されていた。 9日 21UTC 初期値の FT=7 における FL350 の予測図 (図 3.3.20)を見ると、新 TBindex は旧 TBindex より も広い範囲で MOD の乱気流を予測しており、実況に 近い予測をしていたと言える。このときの寄与最大説 明変数(図 3.3.20c)によると、新 TBindex では SWS, VHS, CONV, TRAV の寄与が大きくなっており、複 数の要因での乱気流を予測していた。



図 3.3.15 2013 年 12 月 18 日 02UTC のレーダーエコー頂 高度。



図 3.3.16 2013 年 12 月 18 日 02UTC の前後 3 時間以内に 通報された MOD 以上の C-PIREP。シンボルは乱気流の 強さを、色は高度 (FL) を示す。



図 3.3.17 2013 年 12 月 17 日 21UTC 初期値の FT=5, FL230 の TBindex の予測値。(a) 新 TBindex、(b) 旧 TBindex。

3.3.7 利用上の注意点

今回の変更により、TRAV は上層を中心に広く採用 されるようになったが、寄与量としてはそれほど大き くはならなかった。これは新 TRAV でもトランスバー スバンドの発生領域を的確には抽出できていないこと を示唆している。トランスバースバンドは発生メカニ ズムが十分には分かっていない現象であり、今後の研 究により現象とその予測可能性の理解が深まることが 期待される。

TBindex は様々な要因による乱気流を考慮している が、全ての要因を対象としているわけではない。例え ば、上層雲の雲底付近で発生していると思われる乱気流 (Luce et al. 2010)や、対流雲の雲頂から発生した内部重 力波が砕波することによる乱気流 (Lane and Sharman 2008)は、発生メカニズムや予測手法がまだ確立して いないため TBindex では予測の対象としていない⁶。 また、人工的な乱気流である後方乱気流や衝撃波失速 は、気象要因だけでは予測ができないため TBindex で は考慮していない。これらの乱気流は TBindex では予 測できないと考えてよい。

TBindexは2000 ft 毎の高度別に層別化した回帰式に より算出されている。各説明変数の寄与量は高度によっ て異なり(表3.3.3)説明変数としては大きな値が計算 されていたとしても、係数が0であるためにTBindex への寄与量は0になっている場合もある。TBindexの 利用にあたっては、どの高度で寄与量が大きくなって いるかを考慮して利用していただきたい。寄与最大説 明変数を用いることで、どの説明変数が最も寄与して いるかを知ることができるため、こちらも活用してい ただきたい。

3.3.8 まとめ

国内航空悪天 GPV の乱気流指数 (TBindex) の改良 を行った。主な変更点は、対流雲中乱気流指数 (CONV)

⁶ ただし、経験上これらの要因による乱気流の発生頻度は高くないと思われる。



図 3.3.18 2013 年 11 月 10 日 04UTC の衛星赤外画像。



図 3.3.19 2013 年 11 月 10 日 04UTC の前後 3 時間以内に 通報された MOD 以上の C-PIREP。シンボルは乱気流の 強さを、色は高度 (FL) を示す。



図 3.3.20 2013 年 11 月 9 日 21UTC 初期値の FT=7, FL350 の TBindex の予測値。(a) 新 TBindex、(b) 旧 TBindex、(c) 寄与最大説明変数。

の変更、トランスバースバンド指数 (TRAV) の変更と、 学習期間の見直しである。独立資料による検証の結果、 FL150 以上では予測領域の体積が減少して捕捉率が増 加することで予測精度が向上することが確かめられた。 FL150 未満では従来と同程度の予測精度であったが、 新しい学習期間のデータで指数調整を行ったことによ り、TBindex=3.0 で最適な予測となるように修正され た。また LFM 版の乱気流指数においても、今回と同 様の変更を行うことで予測精度が改善することが確か められた。第 3.3.7 項で述べた利用上の注意点に留意 の上、空域予報に役立てていただきたい。

参考文献

- 大野久雄, 三浦信男, 1982: 圏界面直下におけるケルビ ンヘルムホルツ波の励起. 天気, 29, 1235–1241. 大林正典, 2001: カンパニーパイレップについて. 航空 気象ノート第61号, 気象庁総務部, 1–3. 気象衛星センター, 2003: 気象衛星画像の解析と利用 -
 - 航空気象編 . 223pp.

- 工藤淳, 2010: 乱気流指数の開発. 平成 22 年度数値予 報研修テキスト, 気象庁予報部, 95-108.
- 工藤淳, 2012: C-PIREP 10 年の統計. 航空気象 ノート 第 73 号, 気象庁総務部, 12–19.
- 宮腰紀之,2003:風ベクトルの外積を用いた乱気流予測 の指数.天気,50,327-334.
- 三輪剛史, 2013: GSM 乱気流指数の開発. 平成 25 年度 数値予報研修テキスト, 気象庁予報部, 63-70.
- Lane, T. P. and R. D. Sharman, 2008: Some Influences of Background Flow Conditions on the Generation of Turbulence due to Gravity Wave Breaking above Deep Convection. J. Appl. Meteor. Climat., 47, 2777–2796.
- Luce, H., T. Nakamura, M. K. Yamamoto, M. Yamamoto, and S. Fukao, 2010: MU radar and lidar observations of clear-air turbulence underneath cirrus. *Mon. Wea. Rev.*, **138**, 438–452.