

第1章 ガイドンスの概要

1.1 序論¹

ガイドンスは、数値予報の地上気温や降水量などの予測値を補正してその誤差を軽減したり、数値予報が出力していない天気や発雷確率などを作成することによって、予報作業を支援するものである。ガイドンスの歴史は古く、1970年頃より米国気象局で運用が開始され、その後多くの国の気象機関でも運用が開始され、数値予報の応用プロダクトとして予報業務に利用されてきた。気象庁でも1970年代から開発を始め、1977年にガイドンスの配信を開始した。その後改良や新たなガイドンスの開発を継続的に行い、2018年現在まで約40年間の歴史を持つ。

本報告では、このガイドンスの基礎技術、実際の開発・運用・仕様等について総合的な解説を行う。この40年間でガイドンスの総合的な解説として、「短期間予報用ガイドンスの解説」(気象庁予報部1986)と「天気予報ガイドンスの解説」(気象庁予報部1991)が発刊されている。これ以降は、数値予報研修テキスト及び予報技術研修テキスト²において、ガイドンスの開発・改良について随時解説を行ってきたが、まとまった解説書は発行されなかった。本報告は27年ぶりの総合的な解説書となる。

この27年の間には、ガイドンスの作成方法に大きな変化があった。27年前は全てのガイドンスが線形重回帰(第2.4節)で作成されて予測式は固定されていたが、1996年からはカルマンフィルタ(第2.7節)及びニューラルネットワーク(第2.6節)といった逐次学習型のガイドンスが使われるようになり、予測式が日々変化するようになった。また、確率型ガイドンスに適したロジスティック回帰(第2.5節)も使われるようになった。さらに、数値予報モデルの高性能化に伴い、視程分布予想のように、数値予報モデルの予測値をベースとした簡易な予測手法である診断手法(第2.8節)も使われるようになった。

予報業務の高度化に伴い、ガイドンスの仕様も変化してきた。例えば、予報作業支援システムを使った市町村を対象とする警報・注意報(予報部予報課2011)の作成を支援するために、5kmや20km格子の格子形式のガイドンスが作成され、最大降水量や最大降雪量など防災気象情報の作成を支援する新たなガイドンスが運用されている。また、27年前には航空気象予報用のガイドンスはなかったが、2018年現在は飛行場予報及び空域予報の高度化(予報部予報課航空予報室2006)を支援するために、風、視程、雲のガイドンスや乱気流指数などのガイドンスが運用されている。

このような予報業務の高度化とそれを支援するガイドンスの高度化と多様化により、予報作業も変化してきている。予報作業支援システム(予報部予報課2005)の運用を開始した2004年以降、予報作業は、多くのガイドンスや数値予報資料をベースにし、予報作業支援システム上で多種多様な予報を短時間で作成・発表するといった作業形態となっている。このシステムにおいて、ガイドンスは発表予報のベースとなる重要な資料となっている。詳細な降水量、降雪量、最大風速、最高・最低気温等の量的予報の作成にはガイドンスは必要不可欠であり、今後もその重要性はますます高まるであろう。

近年の変化として、ガイドンスは発表予報と並行して配信され、インターネット等を通じて社会に提供されるようになってきた。これは日本に限らず海外でも同様である。ガイドンスは、時間的・空間的に細かい予測を迅速に提供できるため、今後も予報官の修正を経ることなく社会に直接提供される気象予測資料としての利用が増えてゆくと考えられる。

また、気象庁内外を問わず数値予報を使った応用処理が行われることが多くなってきており、各ガイドンスの内容について詳細な解説を求められることも多くなってきている。それ以外にも、長年にわたって開発・運用してきたガイドンスの取組みについて、そのノウハウ、経緯及び課題等を総括的に解説しておくことは、数値予報の応用処理及び今後のガイドンス開発者にとっても有用と考えられる。

このような状況を鑑み、本報告は、ガイドンスの作成技術、ガイドンスの開発と運用、各ガイドンスの具体的な作成方法を重点的に解説する。前述した過去2度の総合的な解説では、気象庁の予報作業上でのガイドンスの具体的な利用方法について多くのページを割いて解説されていたが、本書ではその点には触れず、各ガイドンスの利用上の留意点のみを記述している。過去の解説はガイドンスが予報作業のベースになりつつある時代のものであり、予報作業でどうガイドンスを利用してゆくかが重要であったと考えられる。しかし、ガイドンスの運用が開始されてから約40年経ち、ガイドンスは既に予報作業に浸透していることから、今回の解説では、数値予報の応用技術としての解説に多くのページを割いた。

まず第1章では、ガイドンスの作成概念や役割、一般的な利用上の留意点を示し、ガイドンスの基本的な事項を解説する。その後に気象庁のガイドンスの歴史と海外気象機関で運用されているガイドンスについて解説する。前述したようにガイドンスは海外気象機関でも作成されているが、統計手法や作成要素などが各国で異なっている。気象庁のガイドンスと海外気象機関のそれとの違いを確認しておくことは、今後のガイ

¹ 高田 伸一

² 平成20年度までは量的予報研修テキスト

ダンスの方向性を考えるためにも重要である。

第2章では、ガイダンスに用いられている各種統計手法について、その基礎的な理論と手法を使用する際の留意事項を解説する。前述したように、数値予報を用いた応用処理を行うことが多くなってきており、数値予報データを扱う観点から見た統計及び機械学習の基礎知識を提供する。

第3章では、ガイダンスを開発・運用する際に重要な3つの点として、ガイダンスの設計、モデル更新への対応及び観測所の移動の影響と対応を解説する。ガイダンスを開発・運用してきた経験に基いた実用的な事項を記述する。

第4章では、2018年現在運用しているガイダンスの一覧を示した上で、各ガイダンスの詳細な解説を行う。前述したように数値予報研修テキスト等において、ガイダンスの開発・改良について随時解説を行ってきたが、紙面の制限により主に変更した部分についての解説となっており、変更と関係のない部分については、過去の数値予報研修テキスト等や過去の文献が引用されていた。このため、個々のガイダンスが複数年度のテキストにわたって解説されているといった問題があり、ガイダンスの利用者にはわかりづらい状況であった。よって、ここでは、個々のガイダンスの仕様、具体的な作成方法、統計検証及び事例検証を通じたガイダンスの利用上の留意点を全て述べ、なるべく他の資料を参照する必要のないようにした。

最後の第5章では、今後の展望として、2018年現在計画されているガイダンスの開発・改良に加え、ガイダンスの将来的な方向性を示す。また、最近話題のディープニューラルネットワークについて、海外での気象分野における取り組みを紹介する。そして最後に、平成29年度から始まった、気象庁技術開発推進本部の実況監視・予測技術開発部会の「ガイダンスグループ」の活動も合わせて紹介する。

なお、本報告は天気予報・防災気象情報用、航空気象予報用のガイダンスに限って解説する。これらのガイダンス以外にも週間予報用、季節予報用のガイダンスが気象庁で運用されているが、本報告では紙面の関係もあり、上記の2つのガイダンスに限っている。

参考文献

- 気象庁予報部, 1986: 短期間予報用ガイダンスの解説. 予報技術資料第35号.
- 気象庁予報部, 1991: 天気予報ガイダンスの解説. 予報技術資料第41号.
- 予報部予報課, 2005: 予報作業支援システムと新しい予報作業形態について. 測候時報, 72, 53-63.
- 予報部予報課航空予報室, 2006: 新しい航空気象予報業務について. 測候時報, 73, 23-49.
- 予報部予報課, 2011: 市町村を対象とした警報・注意報発表のための新しい予報作業支援システムの整備に

ついて. 測候時報, 78, 1-18.

1.2 ガイダンス概論¹

本節では、ガイダンス全般に関する基礎的な事項について解説する。まず、ガイダンスの概念とガイダンスの必要性を述べ、その作成方法の概要を解説する。その後、ガイダンスによる数値予報の誤差の軽減について解説し、軽減できない誤差を含めてガイダンスの限界や課題をまとめる。なお、2018年現在運用しているガイダンスの一覧や手法などについては、第4.1節に示しており、適宜そちらを参照して頂きたい。

1.2.1 ガイダンスの概念

ガイダンスは、数値予報の応用プロダクトの1つである。図1.2.1に数値予報の後処理としてのガイダンスの概念図を示した。数値予報は格子点の予測値を提供しているが、これらは単に膨大な数字が入ったデータである。例えば2018年時点での気象庁の全球モデル(GSM)、局地モデル(LFM)では一億以上の格子点がある。その格子点で風、気温、湿度など多くの予測要素があって、かつ予報時間の数だけこれらのデータが存在している。これらの膨大な予測値のうち予報に大きな影響のある要素を可視化した図を予報官が閲覧し、今後の気象状況の推移が検討される。しかし、気温、降水量などの発表すべき多くの予報を迅速に行うためには、図だけでなく、これらの量的な予測値を直接示す客観的な予測資料が必要であり、そのためにガイダンスが作成・配信されている。

ガイダンスは、米国で1970年頃から数値予報を用いた客観的な予測資料として運用され始めた(Glahn and Lowry 1972)。「ガイダンス」という名称が使われ始めたのがいつ頃かは不明だが、1970年代の米国の論文にはこの客観的な予測資料について“provided as guidance to forecasters at NWC” (Klein and Glahn 1974)、“used as guidance by forecasters at NWS” (Zurndorfer et al. 1979)と記述されている。つまり、予報官をガイド(手引き)する資料であることから「ガイダンス」という名称が使われたと考えられ、2018年現在も“guidance”という名称が使われている(例えばHamill et al. (2017))。日本でも1970年代後半からガイダンスの運用が開始され、保科ほか(1982)では「ガイダンス」という名称が使われており、2018年現在まで継続して使用されている。

一方、ガイダンスの解説(気象庁予報部1986)では、ガイダンスを「数値予報を用いた客観的・統計的翻訳」とも記述している。また、米国では“MOS (Model Output Statistics)”または“MOS guidance”と統計手法を使ったことを明記した呼び方が一般的に使われている²。最

¹ 高田 伸一

² 米国では、2018年現在、モデルを統計処理していない資料をモデルガイダンスとし、MOSガイダンスと使い分けている。

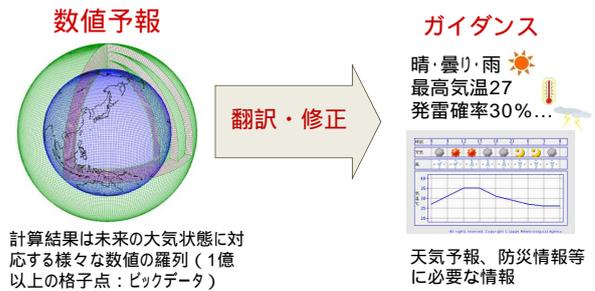


図 1.2.1 ガイダンスの概念図

近では国際的には主に statistical post-processing または単に post-processing と呼ばれることが多く、数値予報の統計的な後処理であることがわかる名称となっている。これらはガイダンスの本質を表した名称と言える。いずれにしても、ここで解説するガイダンスは、数値予報を統計的に処理した客観的な予測資料であり³、予報の作成をガイドするために作成されている資料である。

1.2.2 数値予報の後処理としてのガイダンスの必要性

前項では、ガイダンスは数値予報の統計的な後処理をした資料であることを述べた。ここでは、その数値予報に後処理を加える必要性を2点述べる。

1つ目の必要性は、発雷確率、乱気流及び視程など、数値予報が直接予測していないが、天気予報、警報・注意報、飛行場予報などの発表に必要な気象要素を作成することである。これらの予測を行うため、数値予報データからそれぞれの要素に関係の深いものを取り出し、加工し、予測を行う。この例として、次項で発雷確率の作成方法を示す。

2つ目の必要性は、気温や降水量など数値予報でも予測しているが、その予測値を補正し、より精度を向上させることである。この例として、次項で気温の作成方法を示す。数値予報の予測値には、場所、時刻、予報時間、季節及び気象場に応じて、それぞれ異なる誤差を持っている。この誤差を統計的に補正することで、予測精度を向上させることができる。この誤差の補正については、第1.2.4項で詳しく解説する。

1.2.3 ガイダンスの作成方法(概論)

図1.2.2にガイダンスの作成方法の概念図を示した。ガイダンスは数値予報データと予測対象である実況の観測データを用い、統計手法によって予測式を作る。そのために、まず過去の数値予報データと観測データを用意する。用意した数値予報データから観測と因果関係が深い要素を抽出して作成したものを説明変数、観

³ MOS方式でなく数値予報を統計処理しないPPM(Perfect Prognosis Method)方式のガイダンスもあるが、ほとんどのガイダンスはMOS方式なので、ここではMOS方式を基本として解説する。PPMについては第2.2節を参照。

測データを目的変数として、予測式を作成する。説明変数は気象及び統計の知識を基に作成するが、どのような説明変数を用いるかがガイダンスの予測精度に大きく影響する。図では、発雷確率ガイダンスの例を示しており、過去の数値予報からCAPE（対流有効位置エネルギー）、SSI（ショワルター安定指数）など発雷に関係する変数を作成し、それと発雷の有無の観測を元にロジスティック回帰（第2.5節参照）で予測式を作成する。そして、その予測式に最新初期時刻の数値予報データを入力することによって、発雷確率ガイダンスを算出する。過去データは多いほど良いが、通常同じ予測特性を持った数値予報データを用意できる期間は限られており、実際に運用している発雷確率ガイダンスでも2~3年分の数値予報データを用意して予測式を作成している。米国気象局においても、ガイダンスの開発には通常2年間以上の数値予報データが必要とされている（Carter 1986）。

上記の発雷確率ガイダンスのように過去数年分のデータを利用し一括して学習する型のガイダンスは、一括学習型、バッチ学習型もしくは係数固定型と呼ばれる。一方、気温ガイダンスのように逐次的に学習し、係数が変化するガイダンスもある。このようなガイダンスは、逐次学習型、オンライン学習型もしくは係数更新型と呼ばれる。図1.2.3に気温ガイダンスを例として、逐次学習型ガイダンスの概念図を示した。図1.2.2の一括学習型と大きく異なるのは、最新の観測が入ったら、学習用のデータ（最新の観測と対応する数値予報から作成した説明変数）を作成し、予測式を評価して予測式の係数を更新することである。この予測式の更新は、通常、最新初期時刻の数値予報データに基づくガイダンスを作成する直前に行われる。

気象庁では、一括学習型ガイダンスに使われる学習（統計）手法として、ロジスティック回帰及び線形重回帰を、逐次学習型ガイダンスの作成に使われる手法として、カルマンフィルタ及びニューラルネットワーク

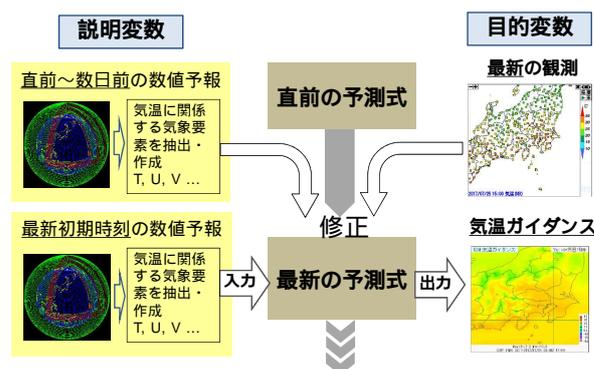


図 1.2.3 ガイダンス（逐次学習型）の作成方法の概念図。気温ガイダンスの例で、予測式の係数がカルマンフィルタで更新される。

を使っている⁴。第3.3節でも解説するが、気象庁では、1996年3月より、モデル更新に柔軟に対応できるように、初めて逐次学習型ガイダンスを気温や降水量などに導入し（田沢1996）、その後視程や最小湿度など徐々に逐次学習型のガイダンスを拡げていった。よって、ガイダンスの多くは逐次学習型となっているが、乱気流、発雷確率など主に発現頻度の低い現象においては、逐次学習型では実況の後追い予測⁵となりやすい等の理由により、一括学習型を利用している。どのガイダンスにどのような手法が用いられているかは第4.1節「ガイダンス一覧」に示しているため、そちらを参照願いたい。

逐次学習型と一括学習型には表1.2.1に示す利点と欠点がある。詳しくは第2.2節で述べるが、逐次学習型は日々学習するため、一括学習型と違い、モデル更新、観測所の移設・新設に自動的に対応できる。また、逐次学習型は日々の学習により、季節変化に対応可能である。ただし、逐次学習型は予測式が変化するため、予測特性が日々変化して予報官が利用しにくいという欠点や、予測式の係数が不適切に変化する場合があり予測の安定性に劣るといった欠点がある。また、逐次学習型には、係数の変化の大きさを調整するパラメータを設定する必要があること、その変化を監視する必要があること、係数のデータファイルが変化するために処理が複雑になること等開発・運用コストが高い。

1.2.4 ガイダンスの数値予報の誤差の補正

ここでは、数値予報の誤差とガイダンスによるその誤差の軽減について解説する。数値予報の予測値は、場所、予報対象時刻、予報時間、季節及び気象場に応じて、それぞれ異なった系統誤差を持っている。ここで言う系統誤差とは、場所毎や対象時刻毎で統計検証

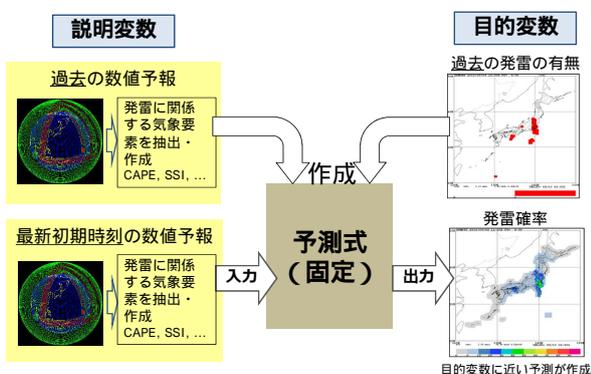


図 1.2.2 ガイダンス（一括学習型）の作成方法の概念図。発雷確率ガイダンスの例で、予測式はロジスティック回帰で作成される。

⁴ 逐次学習型でないニューラルネットワークもあり、1, 3時間最大降水量ガイダンスで使われている。

⁵ 例えば発雷確率では、雷発生後に確率が高くなるといった、実況の後を追うように予測が変化すること。見逃しの後に空振りとなるため、予測精度が低くなる。

表 1.2.1 逐次学習型ガイダンスと一括学習型ガイダンスの利用面・運用面からみた優劣。優劣を不等号で示している。

モデル更新への対応	逐次 > 一括
季節変化への対応	逐次 > 一括
観測所の移設・新設への対応	逐次 > 一括
予測特性の日々の変化	逐次 < 一括
予測の安定性	逐次 < 一括
開発・運用コスト	逐次 < 一括

した際の期間平均の誤差という意味で使う。ガイダンスはこの系統誤差を統計的に補正することで、予測精度を向上させることができる。数値予報の系統誤差の要因として考えられるものとして、

1. 数値予報モデルの地形と実際の地形の違い
2. 数値予報モデルの海陸分布と実際の海陸分布の違い
3. 数値予報モデルの不完全性や空間代表性

がある。ガイダンスは統計処理をすることにより、これらの系統誤差を補正し、予測値の精度を向上させている。以下では3点それぞれについて、例を挙げて説明する。

まず、「数値予報モデルの地形と実際の地形の違い」により発生する系統誤差について、その模式図を図 1.2.4 に示した。実地形に比べて数値予報モデルの地形はかなりなだらかで、この地形の違いにより、例えば図中の A 地点では、数値予報の地形性の降水は実況より弱くなる傾向がある。また、B 地点では、実際の地形では谷となっているが、数値予報モデルでは谷が表現されていないため、逆転層がない限り、数値予報の地上気温は実況より低くなる。

地形に沿って吹く風も、モデルの地形と実際の地形によって差が出る。図 1.2.5 に冬型の気圧配置の事例におけるアメダス地点での GSM の風の予測、風ガイダンスの予測、アメダスの実況の風を示した。図に示したように、GSM の地形は 20 km 解像度のため滑らかであり、それを反映した風となっているが、実況では実地形を反映した風となっている。風ガイダンスはこの系統誤差を補正し、実際の風向に近づけているこ

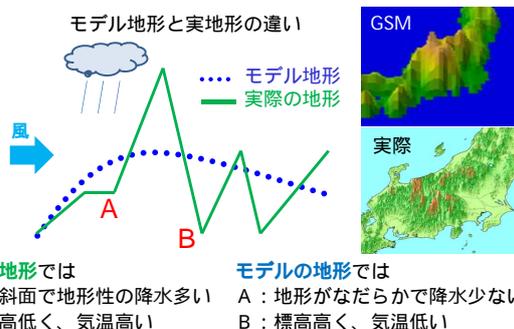


図 1.2.4 数値予報モデル地形と実地形の違いで生じる、系統誤差の概念図。実際の地形の図は GTOPO30 (米国地質研究所作成の 1 km 格子の地形データ) から作成している。

とがわかる。例えば富山県の東部 (図中 A) では、冬型の気圧配置に地形の影響で南風になることが多いが、GSM では滑らかな地形のために西～北西風を予測する系統誤差がある。風ガイダンスでは、GSM の風を適切に補正して、南風を予測している。

次に「数値予報モデルの海陸分布と実際の海陸分布の違い」により発生する系統誤差について説明する。海上では陸上に比べて、通常、風が強く、湿度が高く、気温の日変化が小さい、という特性を持つ。数値予報でもこれに対応して海格子と陸格子で大きく特性が変化する。数値予報モデルと実際の海陸分布が一致していればそれほど大きな問題はないが、沿岸では両者が一致しないことが多く、これによって系統誤差が発生する。図 1.2.5 (右上) の「GSM の地形」からは新潟県粟島 (図中 B) は島ではなく単に海となっていることがわかる。また、図は省略するが、メソモデル (MSM) でも粟島は海上となっている。ただし、実際にはアメダスは陸上にあり、気温の日変化が大きい。図 1.2.6 に粟島における気温ガイダンスの実例を示した。赤線で示した実況は日変化が大きい、青・緑の細実線で示した GSM 及び MSM の気温は日変化が小さい。青・緑の太実線で示した GSM 及び MSM 気温ガイダンスはこの日変化を大きくし、実況に近い気温を予測していることがわかる。

最後に「数値予報モデルの不完全性や空間代表性」による系統誤差について説明する。数値予報モデルは、複雑な大気の状態を様々な仮定のもとでシミュレートしており、このため様々な原因により系統誤差が発生する。また、モデル解像度等により、格子平均である降水量などは実況と同じにならないものもある。図 1.2.7 に GSM 及び MSM の降水量と両平均降水量ガイダンスのバイアスコアを示した。図からわかるように GSM の降水量予測は 10 mm/3h 以上ではバイアスコアは 1 より低く、並～大雨の予測頻度が過小であることがわかる。また MSM の降水量予測は 3 mm/3h 以上でバイアスコアが 1 以上となっており、並～大雨の予測頻度が過剰となっている。実線の降水量ガイダンスはモデルの降水量予測の頻度の偏りをなるべく実況に近づけるよう (バイアスコアが 1 になるよう) に補正していることがわかる。

これまでガイダンスが補正できるモデルの系統誤差を説明してきたが、次にガイダンスが補正できない誤差について解説する。なお、ここではモデルの誤差から系統誤差を引いたものを「ランダム誤差」として説明を行う。この使い方は正確ではなく、後述するように系統誤差とここでいうランダム誤差の違いは明確でないが、説明のためにこの用語を用いる。

はじめに、気温ガイダンスにおける、系統誤差補正の実例を示す。図 1.2.8 は、長野県軽井沢の最高気温ガイダンスの予測例を 2 年間で時系列表示したものである。気温ガイダンスはモデルの気温の誤差を目的変

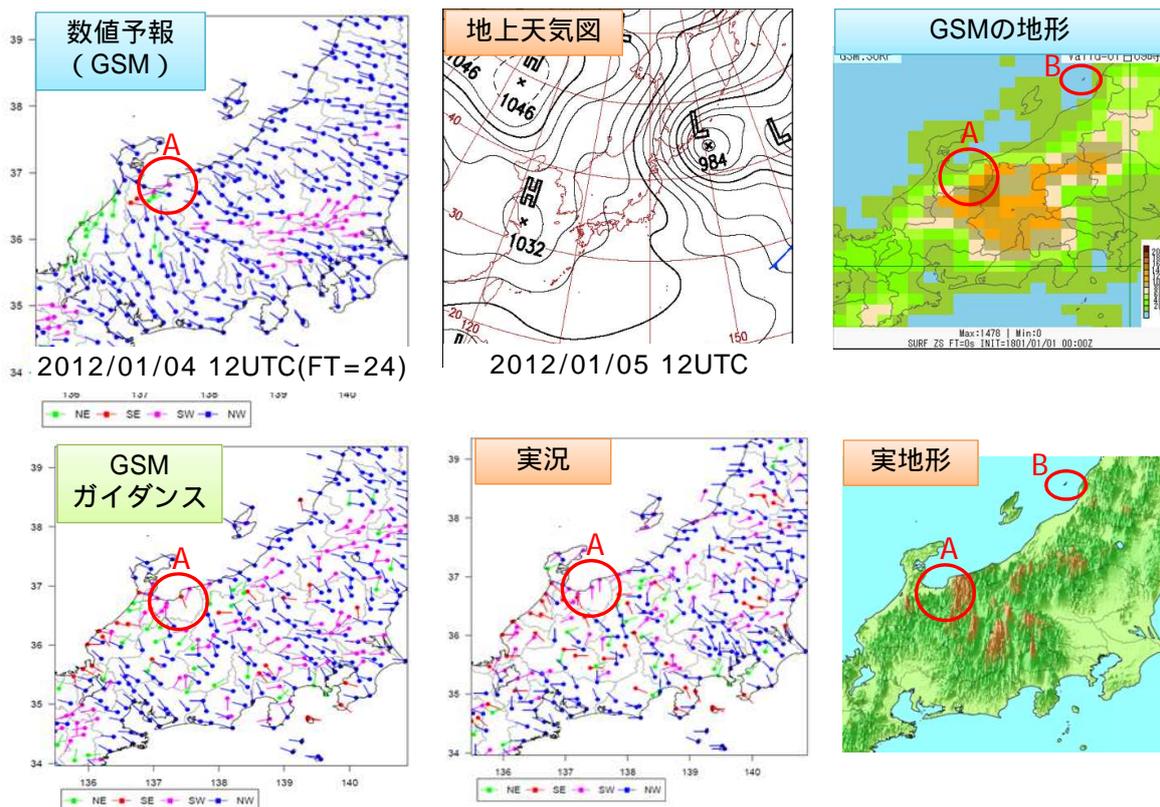


図 1.2.5 2012年1月4日12UTCのFT=24のGSMの風(左上)とGSM風ガイダンス(左下)、対象時刻の日本域地上天気図(中上)とアメダスの風の実況(中下)、GSMの地形(右上)と実地形(右下)。

数としているため、MSMの予測誤差(黒線)とガイダンスによるMSMの予測誤差の見積もり(MSMの予測値の補正量; 赤線)を示している。両者の線が一致していれば、ガイダンスがモデルの誤差を正確に予測したことを示す。図からわかるようにMSMの誤差は日々変動し、また緩やかな周期で季節変動している。ガイダンスの予測をみると、季節変化しているMSMの平均的な誤差(系統誤差)を補正し、MSMの誤差を減じていることがわかる。一方、系統誤差を補正して残っている誤差(ランダム誤差; 黒線と赤線の差)は日々変動している。

このようなランダム誤差の要因は様々であるが、例えば、数値予報の前線や低気圧等の擾乱の位置ずれ、擾乱の発生・発達の外れによる誤差がある。これらは頻繁に起こるが、様々な誤差を生じるため、ガイダンスにとってはランダムに変化する誤差となり、基本的にはガイダンスで修正できない。擾乱の位置ずれによるランダム誤差はガイダンス全般に言えることだが、ほかにも、要素によってランダム誤差となる要因がある。例えば、気温の場合には、天気の外れ(日照や降水予測の外れ)、海陸風の入るタイミングの違い、放射冷却が起こるか否か、積雪面解析の誤りなどが考えられる。これらの誤差も、様々な要因で様々な誤差が生じ、ガイダンスにとってはランダムに変化する誤差となり、基本的にはガイダンスで修正できない。

前述したように、ここで使った系統誤差とは、場所毎などで統計検証した際の期間平均の誤差のことである。このため、期間平均の仕方により、系統誤差は変わり、その結果残差であるランダム誤差は変わる。通常は地点(格子)毎に期間平均を取るが、ほかにも対象時刻毎、予報時間毎、季節毎、風向毎、気圧配置毎など平均の仕方を変えると、系統誤差は変わり、ランダム誤差として見えている誤差も変化する。つまりガイダンスにおいて、補正できる誤差とできない誤差(系統誤差とランダム誤差)というのは、明確に分離できているわけではない。

気温ガイダンスでは、地点毎、初期時刻毎、予報時間毎、季節毎に分けて予測式を作成している(第4.4節)。また、説明変数に西風成分等を取り入れて風向ごとの系統誤差を軽減している。しかし、それでも補正できていない誤差はある。例えば、気圧配置等のパターンで見られる誤差(例えば放射冷却が起こるパターンでの平均的な誤差)は、現状では補正できてはいないが、気圧配置等で層別化できれば誤差を軽減できるであろう。つまり、今までランダム誤差として扱っていた誤差を系統誤差として補正できることになる。ガイダンスは数値予報が持つ様々な要因による誤差を、学習のサンプル数を保ちながら系統付けてその誤差を見積り、補正している。それを適切に行えばガイダンスの精度向上に結びつく。

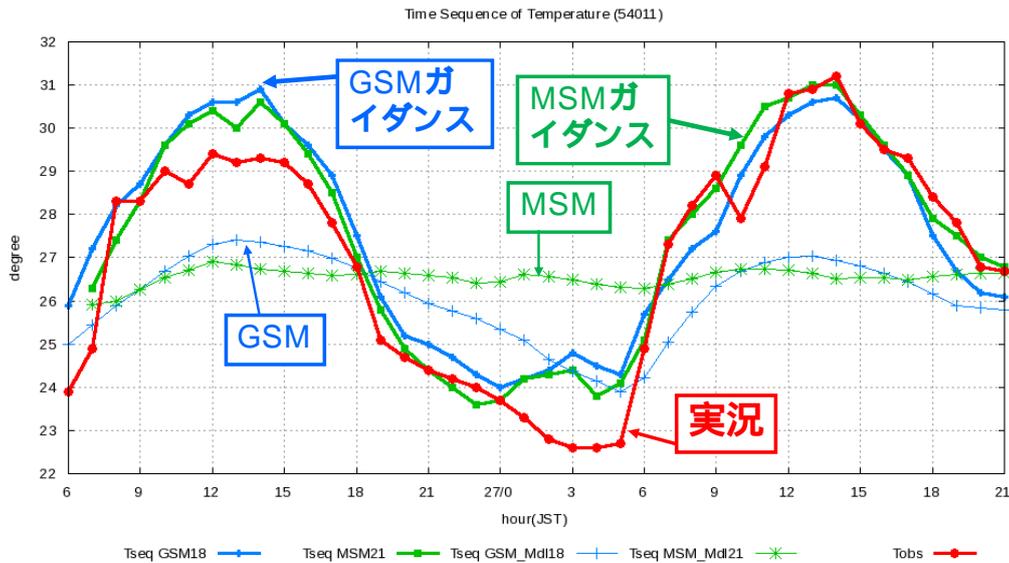


図 1.2.6 新潟県粟島の 2015 年 7 月 26 ~ 27 日にかけての気温の実況と GSM 及び MSM の地上気温予測、対応する GSM 及び MSM 気温ガイダンス。GSM は 7 月 25 日 18UTC、MSM は 7 月 25 日 21UTC 初期値の予測。

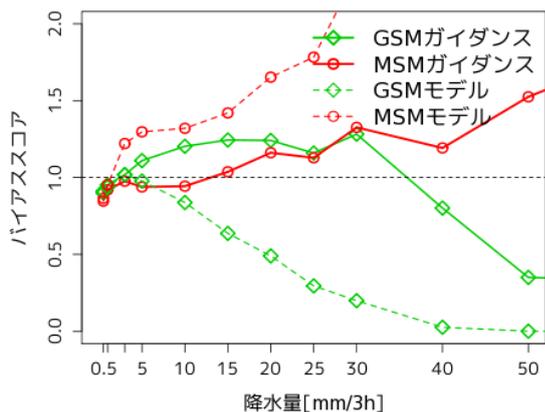


図 1.2.7 2016 年 6 月 ~ 8 月における GSM と MSM のモデル降水量のバイアスコア、及び GSM と MSM 平均降水量ガイダンスのバイアスコア。検証に利用した実況は 20km 格子平均の解析雨量。MSM 及び MSM ガイダンスは 20 km 格子に変換して検証している。緑破線は GSM の降水量、赤破線は MSM の降水量、緑実線は GSM 平均降水量ガイダンス、赤実線は MSM 平均降水量ガイダンスを表す。

1.2.5 ガイダンスの限界と課題

最後にこれまでの解説をもとにガイダンス全般の限界と課題を示す。これらの限界と課題はガイダンスを利用する際の留意点にもなる。なお、個別のガイダンスの課題は第 4 章をご覧ください。

第 1.2.3 項では、ガイダンスは通常 2~3 年分のデータを使って作成していることを述べた。しかし、この 2~3 年で発生していない顕著現象に対しては、ガイダンスの予測式が適合していない可能性が高い。例えば、今まで起こったことのないような記録的な大雨においては、それより少ない降水事例で学習した予測式を外

挿しているだけであり、その量的予測は適切かどうかはわからない。また、学習したデータでも、事例数が少ない場合は、その予測式が適切でない可能性もある。学習していない事例、学習のサンプル数が足りない事例に対する予測は、信頼性が低く、誤差が大きくなる傾向がある。

逐次学習型ガイダンスの欠点として、不適切な係数の変化が起きる可能性があるとして述べた。実際、降水量ガイダンスにおいて、予測に比べて実況の降水量が非常に大きかった際に係数が大きく変化し、その後の予測精度が劣化した例がある。係数が大きく動かないようにカルマンフィルタ等のパラメタの設定を工夫するなどの対策は行っているが、完全に排除することはできない。

ガイダンスはモデルの擾乱の位置ずれ、擾乱の発生や強度の外れなどの誤差を修正することができない。これらの誤差については、擾乱について実況とモデル

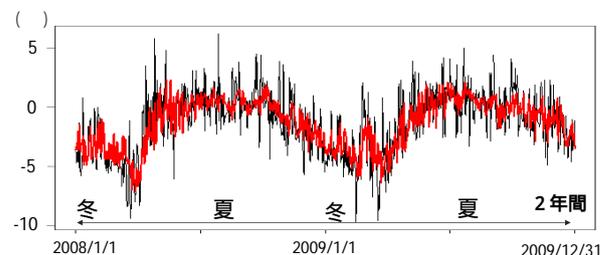


図 1.2.8 長野県軽井沢における MSM の最高気温の誤差 (黒線) と MSM 最高気温ガイダンスによる MSM の補正量 (赤線)。赤線と黒線が一致した所が MSM ガイダンスが MSM の誤差を適切に補正し、ガイダンスの予測の誤差がゼロになったことを示す。MSM の最高気温は 30 分ごとの地上気温予測値から日中の最高値として算出している。期間は 2008~2009 年の 2 年間。

の予測を比較して補正を行う必要がある。ただし、このタイプのランダム誤差を軽減する方法として、他のモデルのガイダンスとの平均、または適切と考えたモデルのガイダンスを用いるといった方法がある。他のモデルのガイダンスと平均することによってランダム誤差が軽減できることは、第 5.1 節でもう少し詳しく説明する。

ガイダンスは、地点や予報対象時間などで予測式を層別化し、また風などを説明変数として取り入れることによってモデルの誤差を軽減しており、さらに適切な層別化や説明変数によってガイダンスの予測精度を向上できることを述べた。現在、ガイダンスは気圧配置や暖湿流などのパターンで生じる誤差を補正できていないが、予報現場では予報官のパターン認識を含んだワークシートを作成し、ガイダンスを補正している例がある。第 5.1 節でも述べるが、画像認識で有効性が確認されているディープニューラルネットワークを使うことにより、将来はガイダンスでこういったパターンを平面的・立体的に認識して誤差を軽減できる可能性がある。

参考文献

- Carter, G. M., 1986: Moving towards a more responsive statistical guidance system. *Preprints, 11th Conf. on Weather Forecasting and Analysis, Kansas City, Amer. Meteor. Soc.*, 39–45.
- Glahn, H. R. and D. A. Lowry, 1972: The Use of Model Output Statistics (MOS) in Objective Weather Forecasting. *J. Appl. Meteor.*, **11**, 1203–1211.
- Hamill, T. M., E. Engle, D. Myrick, M. Peroutka, C. Finan, and M. Scheuerer, 2017: The U.S. National Blend of Models for Statistical Postprocessing of Probability of Precipitation and Deterministic Precipitation Amount. *Mon. Wea. Rev.*, **145**, 3441–3463.
- 気象庁予報部, 1986: 短期間予報用ガイダンスの解説. 予報技術資料第 35 号.
- Klein, W. H. and H. R. Glahn, 1974: Forecasting Local Weather by Means of Model Output Statistics. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, **55**, 1217–1227.
- 田沢秀隆, 1996: 予報支援資料. 平成 7 年度量的予報研修テキスト、気象庁予報部, 43.
- Zurndorfer, E. A., J. R. Bocchieri, G. M. Carter, J. P. Dallavalle, D. B. Gilhousen, K. F. Hebenstreit, and D. J. Vercelli, 1979: Trends in Comparative Verification Scores for Guidance and Local Aviation/Public Weather forecasts. *Mon. Wea. Rev.*, **107**, 799–811.
- 保科正男, 安富裕二, 此田進, 1982: 短期間予報用最終製品型予測資料 (ガイダンス) の作成手法. 気象庁

1.3 気象庁のガイダンスの変遷¹

気象庁は 1970 年代からガイダンスの開発を進め、1977 年にガイダンスの配信を開始した。2018 年現在までの主なガイダンスの変遷を、利用する数値予報モデルと合わせて図 1.3.1 に示した。図には主に新たなガイダンスの配信開始、モデル更新への対応を記述しており、ガイダンスの改良は省略している。

本節では、気象庁におけるガイダンスについて、線形重回帰 (MLR) による一括学習型ガイダンスのみを使っていた時代である 1996 年 3 月以前と、カルマンフィルタ (KF) やニューラルネットワーク (NN) といった逐次学習型ガイダンスが登場した 1996 年 3 月以降の 2 期間に分けてそれぞれ解説する。前者については、主に気象庁予報部 (1986) 及び気象庁予報部 (1991) に基づいて記述しているので、詳細はこれらを参照願いたい。なお、2018 年現在運用しているガイダンスについては第 4.1 節を参照願いたい。また、第 4 章で各ガイダンスの変遷について記述されているので、こちらも参照願いたい。

1.3.1 運用開始から 1996 年 3 月まで

米国気象局 (NWS) では、1972 年に MLR に基づく MOS ガイダンスの運用を開始した。気象庁では、これを参考に、1970 年代から独自のガイダンスの開発を開始した。後述するように NWS との違いもみられるが、

統計手法として MLR を利用、暖候期・寒候期 (または季節) に分けて予測式を作成、MOS 方式 (第 2.2 節) で作成していたこと等、NWS のガイダンスの作成方法と共通する部分が多く、これらの 3 点は 1996 年 3 月まで変更がなかった。なお、NWS では 2018 年現在もこの 3 点が概ね維持されている。

第 1.2 節で述べたように、ガイダンスは数値予報を入力とした統計処理であるため、以下では利用されたモデルに分けてガイダンスの経過を説明する。

(1) FLM-6L (1977 年～1982 年)

ガイダンスが最初に適用されたモデルは、FLM-6L (アジア・プリミティブ・ファインメッシュモデル、格子間隔 150 km、鉛直 6 層) という現在と比べると低解像度の数値予報モデルであった (保科ほか 1982)。まず降水関係のガイダンスが開発され、1977 年よりガイダンスとして配信が開始された。その後、徐々に要素を拡充し、風ガイダンス、雷雨確率 (後に発雷確率) ガイダンス、気温ガイダンス、日照確率 (後に曇天率) ガイダンス、雪関係のガイダンスが 1982 年にかけて運用開始となった。表 1.3.1 に 1982 年時点での要素を示した。

風及び気温ガイダンスは気象官署を対象として作成されていたが、降水ガイダンスなどその他のガイダ

スとは格子形式でモデルと同じ格子間隔であった (一部地域形式)。この点は全てのガイダンスが地点形式であった NWS のガイダンスとは大きく異なる²。多くの種類のガイダンスを格子形式で作成し、日本全体をカバーする予測資料を作成することができたのは、1974 年から始められた全国 900 余のアメダスの運用開始が大きく寄与していると思われる。つまり、モデルの格子間隔である 150 km 格子内に観測点が多く存在し、格子平均値の平均降水量や降水確率などの目的変数が算出できたことによると考えられ、気象庁予報部 (1986) にもその旨が記述されている。

(2) FLM-10L/12L (1982 年～1988 年)

1982 年 3 月に利用するモデルが FLM-6L から FLM-10L (格子間隔 127 km、鉛直 10 層) に更新されたが、FLM-10L の運用開始時は FLM-6L で作成した予測式を継続して利用した。この際に格子間隔の違いを緩和するために旧格子への内挿処理が行われた (保科ほか 1982)。1983 年 3 月には鉛直層が 12 層に増強されたが (FLM-12L)、その際も旧予測式が継続利用された。その後 FLM-10L 及び FLM-12L の予測データが 2 年間分蓄積されたことに伴い、新しいモデルに適合させるために予測式の改訂作業が開始された。要素ごとに改訂時期は異なるが、1985 年 12 月までに全てのガイダンスの予測式が改訂された。この際に格子間隔はモデルの格子間隔に合わせ 150 km から 127 km に変更になった。また、ガイダンスの予測式の更新に合わせ、ガ

表 1.3.1 1982 年時点でのガイダンスの一覧。保科ほか (1982) を基に作成。予測式の作成には全て FLM-6L (初期時刻は 00 と 12 UTC) が利用されており、作成方法は全て線形重回帰。予報時間は概ね 24 時間先まで (1982 年 3 月の FLM-10L への変更の際に 36 時間までに延長)。格子間隔は 150 km。内容に記述してある「地域確率」とは、ある現象が格子・地域内のどこかで発生する確率、単に「確率」とは地点確率の格子・地域平均であることを示す。

要素	作成形式	内容
降水型	格子、地域	予測される降水が層状性か対流性かの判別
降水確率	格子	6, 12 時間に 1 mm 以上の雨の降る確率
平均雨量	格子、地域	6, 12, 24 時間に予測領域内に降る平均降水量
日照確率	格子	日照の確率
雷雨確率	格子	雷の発生する地域確率 (定義は各管区で異なっていた)
雪確率	格子	降水現象があると仮定した場合、それが雪になる確率
最大風速	地点 (15 の気象官署)	日本時間でみた翌日の日最大風速とその風向
最高・最低気温	地点 (152 の気象官署)	世界標準時でみた翌日の日最高気温と最低気温

² 米国では 2006 年より Gridded MOS として格子形式のガイダンスも運用開始している。

¹ 高田 伸一

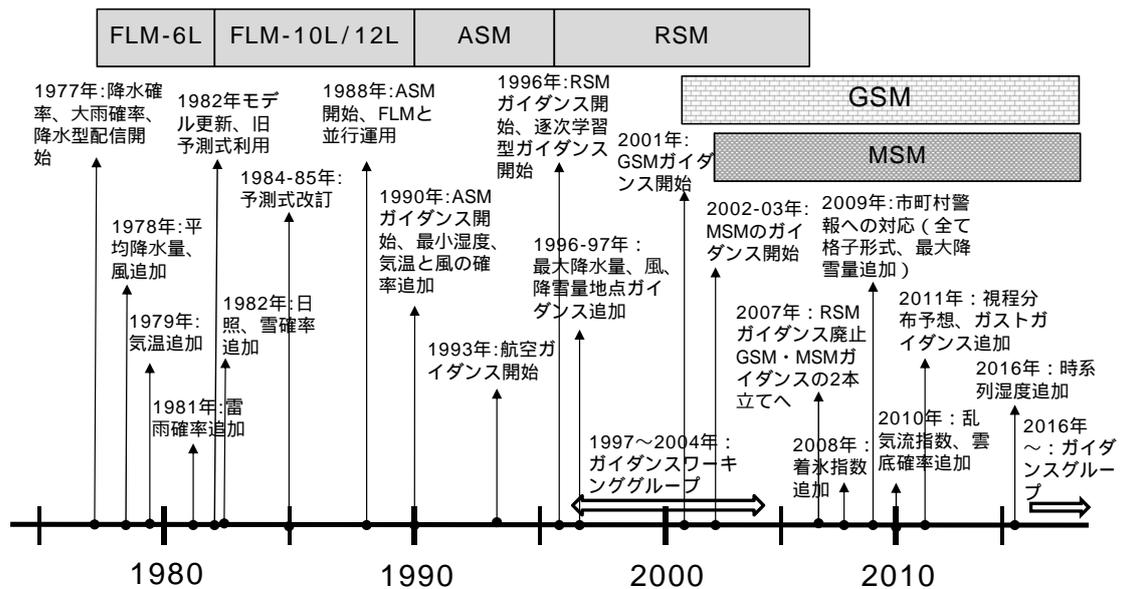


図 1.3.1 気象庁のガイダンスの変遷。上部の四角枠はガイダンスが利用している数値予報モデルを示している。

表 1.3.2 1986 年 2 月時点でのガイダンスの一覧。気象庁予報部 (1986) を基に作成。予測式の作成には全て FLM-10/12L (初期時刻は 00 と 12 UTC) が利用されており、作成方法は全て線形重回帰、予報時間は 36 時間、格子間隔は 127 km。

要素	作成形式	内容
降水型	格子	予測される降水が層状性か対流性かの判別
降水確率	格子	所定期間内に 1 mm 以上の雨の降る確率
大雨確率	格子	3 時間内に格子内で少なくとも 1 地点で 30 mm 以上の大雨の降る確率
平均雨量	格子	所定期間内に予測領域内に降る平均降水量
曇天率	格子	日照率を 100 から引いた値 (地域内の平均値)
雷雨確率	格子	雷の発生する確率 (発雷はエコー頂高度で定義)
地域最大降水量	地域	寒候期における細分地域内の最大降水量
雪確率	地域	降水現象があると仮定した場合、それが雪になる確率
大雪確率	地域	大雪の降る確率 (大雨確率と雪確率の積)
最大風速	地点 (70 の気象官署)	日本時間でみた翌日の日最大風速とその風向
最高・最低気温	地点 (152 の気象官署)	世界標準時でみた翌日の日最高気温と最低気温。晴天時と曇天時の 2 つの予測値を出力。

ガイダンスの要素や予報時間の拡充が行われた。1986 年 2 月時点でのガイダンスの一覧を表 1.3.2 に示す。

(3) ASM (1988 年 ~ 1995 年)

1988 年 3 月に FLM-12L が ASM (アジアモデル、格子間隔 75 km、鉛直 16 層) に更新された。このモデル

更新の対応として、ガイダンスの精度を維持するために特別な対処が行われた。それは、更新前のモデルである FLM-12L をガイダンスのために運用を継続させたことである。ASM の予測資料が蓄積されるまで、新しい ASM と古い FLM-12L の二つのモデルが並行に運用された。これは、ガイダンスが予報作業に必要な不可欠な資料であり、ガイダンスの予測精度を維持する必要があるとの判断によると思われる。しかし、ガイダンスが使うモデルと数値予報 FAX 図等が使っているモデルが異なること、二つのモデルを並行運用するコストが高いことなどの問題もあった。

前回の FLM-10L(12L) への更新と同様に、この時も ASM の予測データの蓄積を待って ASM に適合した予測式に改訂された。新旧モデルの並行運用を早く解消するために、ASM への変更から 2 年経った 1990 年 4 月から暖候期用、1990 年 10 月から寒候期用の予測式が改訂された³。この改訂の際に、モデルの高解像度化に合わせてガイダンスも高解像度化された。ただし、それまではモデル出力とガイダンスの格子間隔は同じだったが、この時からガイダンス独自の格子系である緯度経度 40 分間隔 (50~75 km) に変更になった。これにより、モデルの格子系の変更に合わせてガイダンスの格子系を変える必要がなくなった⁴。また、この予測式の改訂の際には、最小湿度、気温の確率、風確率等の追加があった一方、雪予測資料の地域最大降水量が廃止となった。表 1.3.3 に 1991 年 3 月時点でのガ

³ 新しい予測式への改訂のための開発期間がないと考えるかもしれないが、当時は予測式を暖候期と寒候期に分けて作成していたため、例えば暖候期の 2 年間の数値予報データが蓄積が終わった 1989 年 10 月から運用開始の 1990 年 4 月までに約半年間の開発期間がある。

⁴ これ以降、ガイダンスの格子系は格子間隔の変化はあるものの、独自の格子系を継続している。

表 1.3.3 1991 年 3 月時点でのガイダンスの一覧。気象庁予報部 (1991) を基に作成。予測式の作成には全て ASM (初期時刻は 00 と 12 UTC) が利用されており、作成方法は全て線形重回帰、予報時間は 45 時間、格子間隔は 40 分。

要素	作成形式	内容
降水型	格子	予測される降水が層状性か対流性かの判別
降水確率	格子	6 時間に 1 mm 以上の雨の降る確率
大雨確率	格子	3 時間に 30 mm 以上の大雨の降る確率
平均雨量	格子	所定期間内に予測領域内に降る平均降水量
曇天率	格子	日照率を 100 から引いた値 (地域内の平均値)
雷雨確率	格子	雷の発生する確率 (発雷はエコー頂高度で定義)
気温	アメダス地点	00 時 (日本時) の気温
最高・最低気温	アメダス地点	日中の最高気温と朝の最低気温
気温確率	アメダス地点	最高 (最低) 気温が基準値を上回る (下回る) 確率
風確率	アメダス地点	最大風速が基準値を超える確率
最大風速・風向	アメダス地点	最大風速が基準値を超えると仮定したときの最大風速・風向
最小湿度	気象官署	日中出现すると仮定したときの最小湿度

イダンスの一覧を示した。

なお、この期間には、ASM を利用した航空気象予報ガイダンス (以下、航空ガイダンス) が 1993 年 3 月より運用開始された。航空ガイダンスは一般の天気予報用ガイダンスと同じ MLR を用いて作成された。一般の天気予報用のガイダンスとの大きな違いは目的変数が航空定時・特別観測気象報 (METAR, SPECI) から算出されること、視程や雲などの航空気象予報に特有の要素がある点である。これにより、航空気象予報業務にも初めてガイダンスが導入された。表 1.3.4 に 1993 年 3 月時点での航空ガイダンスの一覧を示した。

1.3.2 1996 年から 2018 年現在 (逐次学習型の登場)

1996 年 3 月にガイダンスの作成方法について、大きな変化があった。前述したように、それまでのガイダンスは MLR を用い、いったん作成された予測式は固定されていた。第 1.2 節で述べたように、この手法の欠点として、モデル更新への対応が難しく、実際にも更新時にガイダンス側で対応に苦慮していた。このため、予報部ではモデル更新に柔軟に対応できる KF や NN という逐次学習型の手法の開発を進め、1996 年 3 月よりこれらの手法を使ったガイダンスの運用を開始した (田沢 1996)。ただし、この際に全てのガイダンスが逐次学習型に移行できたわけではなく、発雷確率ガイ

表 1.3.4 1993 年 3 月時点での航空ガイダンスの一覧。田崎・此田 (1994) を基に作成。対象空港は 68 空港、作成方法は全て線形重回帰、予報時間は最大 45 時間までで、時間間隔は視程と雲底が 3 時間毎、風は 6 時間毎。CIG は雲量 5/8 以上の雲の最低雲層の雲底高度。IMC は計器飛行気象状態 (視程 5 km 未満、CIG が概ね 10,000 ft 未満)。

要素	内容
視程確率	視程が 10 km 未満になる確率
最小視程	視程が 10 km 未満になると仮定したときの最小視程
雲底確率	CIG が 15,000 ft 未満になる確率
雲底高度	CIG が 15,000 ft 未満になると仮定したときの CIG
IMC 確率	IMC となる確率
風確率	最大風速が基準値を超える確率
最大風速とその風向、風向変動幅	最大風速が基準値を超えると仮定したときの最大風速とその風向、風向変動幅
最高気温	明日の日中の最高気温
最低気温	朝の最低気温 (00 UTC 初期値は明日、12 UTC 初期値は明後日)

ダンス (一括学習型 NN)、視程・雲ガイダンス (MLR) など一括学習型も継続された。これにより、2018 年現在に至るまで、逐次学習型のガイダンスが主体であるが、一括学習型のガイダンスも混在する状態が続いている。

この期間の特徴として、複数のモデルのガイダンスが運用され始めたこと、モデル・ガイダンスの統廃合が行われたことも特徴として挙げられる。よって 1996 年までのようにモデル毎に経過を記述することが難しいが、(1)ASM が RSM (領域モデル) に更新された際の対応、(2)その後 RSM が予報業務の主体となっていた期間、(3)RSM が GSM (全球モデル) に統合され GSM と MSM (メソモデル) が予報業務の主体となった時から 2018 年現在までの 3 つの期間に分けて解説する。

(1) ASM から RSM への更新 (1996 年 3 月)

1996 年 3 月に ASM が RSM (領域モデル、格子間隔 20 km、鉛直 36 層) に更新された。この際に逐次学習型のガイダンスを導入することにより、それまでのように新モデルの予測データの蓄積を待ってガイダンスの予測式を改訂することなく、RSM への更新と同時に RSM ガイダンスの運用を開始した。ただし、ASM で開発した逐次学習型ガイダンスをモデル更新と共に単純に入力データを RSM に差し替えたわけではなく、RSM の格子間隔と近く、それまで運用されていた JSM (日本域モデル、格子間隔 30 km) で 2 年間ほど逐次学習してから RSM に移行された。これは、逐次学習といっても、学習速度などのパラメータを設定するためには長期間の似た数値予報データが必要なこと、長期間の統計検証を行ってから予報業務に導入する必要があること、モデル更新の程度が大きいと逐次学習もすぐに更新に対応できるわけではないためである。

このRSM ガイダンスは、当時開始された地方天気分布予報及び地域時系列予報を実現するため、降水や天気の格子形式のガイダンスは緯度 12 分×経度 15 分（約 20 km）と高解像度化された。この解像度は 2018 年現在も維持されている⁵。要素に関しても、地方天気分布予報の基礎資料である天気ガイダンス、地域時系列予報の基礎資料である 3 時間毎の時系列気温ガイダンスが新たに運用開始となった。一方、気温確率、風確率、降水型、最大風速のガイダンスは継続されなかった（その後 2002 年に最大風速は復活した）。また、降水量ガイダンスに初めて頻度バイアス補正（第 2.9 節）が導入された。これにより降水量ガイダンスの精度が大幅に改善した。表 1.3.5 に 1996 年 3 月時点での RSM ガイダンスの一覧を示した。

なお、発雷確率は JSM のデータを用いて作成された一括学習型の NN を RSM に適用した。また、航空ガイダンスである視程及び雲底ガイダンスも、JSM の予測データを用いて MLR の手法で予測式を作成し、これを RSM に適用する対策が行われた。ただし、RSM と JSM ではモデルの物理過程や格子間隔が違うため、不安定な予測となる可能性が留意点として示されている（部内資料「新航空気象予報ガイダンスの解説（1996 年 2 月）」より）。航空ガイダンスの気温及び風速⁶については、KF への手法変更が行われた。

表 1.3.5 1996 年 3 月時点でのガイダンスの一覧。田沢（1996）を基に作成。予測式の作成には全て RSM（初期時刻は 00 と 12 UTC）が利用されている。発雷確率は一括学習型 NN、天気（雨雪判別）は PPM 方式（第 2.2 節参照）の一括学習型 NN。二次細分は当時の警報・注意報の細分区域（2018 年現在の市町村等をまとめた地域に相当。以下同様。）を示す。

要素	形式	予報対象時間	手法
天気	20 km 格子	FT=6~51、3 時間毎	NN
平均降水量			
降水確率			
最高気温	アメダス 地点	00 UTC: 明日、12 UTC: 明日・明後日	KF
最低気温		00 UTC: 明日・明後日、 12 UTC: 明日	
時系列気温		FT=6~51、3 時間毎	
最小湿度	気象官署	00 UTC: 明日、12 UTC: 明日・明後日	NN
大雨確率			
発雷確率			

⁵ GSM ガイダンスの解像度はこの当時と同じだが、2018 年現在、MSM ガイダンスは約 5 km 格子である。

⁶ 風向は RSM の予測値を使っており、統計処理はされていなかった。なお、その後 1997 年に風向風速共に KF の手法に移行された。

(2) RSM が予報業務の主体となっていた期間（1996 年～2007 年）

この期間は、ガイダンスの改良と拡充が積極的に行われた期間であり、複数のモデルからガイダンスが作成された期間でもある。ここでは RSM ガイダンスの改良、GSM 及び MSM⁷ を使ったガイダンスの運用開始の 2 点について説明する。

RSM ガイダンスが運用された後も新しい要素の拡充と改良が頻繁に行われた。まず、1996 年 6 月には大雨警報・注意報の作成を支援するために、最大降水量ガイダンスが開発された。その後、組織的・計画的にガイダンスの開発を行うため、1997 年に「ガイダンスワーキンググループ」が予報部内で結成されてからは、このワーキンググループの下で、多くの取組みが行われ、3 時間毎の風向風速を予測する風ガイダンスと 12 時間降雪量を予測する降雪量地点ガイダンスの配信が 1997 年 12 月から開始された。また、2000 年にかけて、天気、降水、気温ガイダンス等の改良が次々と行われた。さらに、2001 年 3 月の計算機更新の際には、天気、最小湿度、発雷確率、最大降水量ガイダンスが一挙に改良された（佐藤 2000a,b）。

航空ガイダンスでは視程ガイダンスと雲ガイダンスの改良が行われた。視程ガイダンスの目的変数は、それまで前 3 時間の 10 km になる確率とその時の視程だったが、前 3 時間の最小視程と最小視程が 5 km 未満になる確率に改良され、手法も MLR から KF に変更になった。雲ガイダンスの目的変数は、前 3 時間に CIG が 7000 ft になる確率とその場合の雲底高度及び上中下層雲量であったが、前 3 時間の最小 CIG 時の下から 3 層の雲量と雲底高度に改良され、手法も MLR から KF に変更になった。

この期間は RSM だけでなく、他のモデルを使ったガイダンスが運用開始となった。2001 年 3 月より、明後日予報を支援するために GSM を使った天気、降水量、気温、風及び最小湿度ガイダンスが運用開始となった（佐藤 2000a,b; 海老原ほか 2000）。RSM の予報時間は 51 時間であったため、GSM ガイダンスはその先の 51 時間から 72 または 75 時間後までをカバーした。また、防災気象情報の作成を支援する目的で、MSM 最大風速ガイダンスが 2003 年に運用が開始された（松本 2003）。その後 MSM の非静力学化（2004 年）の際に MSM 最大降水量ガイダンスの運用を開始した（木村 2004）。2006 年には MSM の格子間隔が 10 km から 5 km への高解像度化された。このとき、MSM を使ったガイダンスは、モデル更新に合わせて改良を行っている。表 1.3.6 に 2006 年 3 月時点のガイダンスの一覧を示した。

航空ガイダンスでも MSM が利用されるようになった。2002 年 8 月には MSM に基づく航空ガイダンスと

⁷ MSM は 1998 年 3 月から試験運用、2001 年 3 月から本運用。

表 1.3.6 2006 年 3 月時点でのガイダンスの一覧。予報対象時間の括弧内は時間間隔。発雷確率、雪水比は一括学習型 NN。最大降水量は PPM 方式の一括学習型 NN。

要素	形式	予報対象時間	モデル	手法		
定時風	アメダス地点	FT=3~51(3h)	RSM	KF		
		FT=57~75(6h)	GSM			
最大風速		FT=3~51(3h)	RSM			
		FT=3~33(3h)	MSM			
時系列気温		FT=6~51(3h)	RSM			
		FT=54~72(6h)	GSM			
最高・最低気温		明日(, 明後日)	RSM			
		明後日(, 3日後)	GSM			
降雪量地点			FT=24~48(12h)		RSM	
最小湿度		気象官署	明日(, 明後日)		RSM	NN
	明後日(, 3日後)		GSM			
天気	20 km 格子	FT=6~51(3h)	RSM	KF		
		FT=57~75(6h)	GSM			
平均降水量		FT=6~51(3h)	RSM			
		FT=57~75(6h)	GSM			
降水確率		FT=3~18(3h)	MSM			
		FT=9~51(6h)	RSM			
雪水比		FT=57~75(6h)	GSM			
		FT=6~51(3h)	RSM			
発雷確率		二次細分	FT=6~51(3h)		RSM	NN
大雨確率			FT=6~51(3h)		RSM	
1, 3 時間最大降水量	FT=6~51(3h)		RSM			
	FT=3~18(3h)		MSM			
24 時間最大降水量		FT=27~51(24h)	MSM			

して、15 時間先までの視程、雲、風のガイダンスが運用開始となった(岩倉ほか 2002)。それまであった RSM を使った航空ガイダンスは、予報時間が 45 時間で、長距離飛行用飛行場予報(TAF-L、有効期間 9~27 時間)及び短距離飛行用飛行場予報(TAF-S、有効期間 0~9 時間)の両方を支援していたが、MSM を使ったガイダンスは予報時間が 15 時間であったため、TAF-S の支援に特化したガイダンスであった。このため、RSM を使った航空ガイダンスは TAF-L ガイダンス、MSM を使ったガイダンスは TAF-S ガイダンスと呼ばれた。予測要素は前 3 時間の最小視程、視程が 5 km 未満となる確率、前 3 時間の最小 CIG 時の下から 3 層の雲量と雲底高度、3 時間毎の風、1 時間毎の時系列気温及び最高最低気温であった。その後、MSM の非静力学化(2004 年)、MSM の高解像度化(2006 年)のモデル更新に対応した(高田 2004; 山田 2004; 高田ほか 2005)。

(3) GSM と MSM が予報業務の主体となった期間(2007 年~2018 年現在)

2007 年は GSM 高解像度(20 km 格子)化及び MSM の予報時間延長という大きな変化があった。2007 年 5 月に MSM の予報時間が 33 時間に延長されたことに伴い、MSM から作成されていた TAF-S ガイダンスの予報時間を延長した(阿部 2007)。これは、2007 年 11

表 1.3.7 2007 年 5 月時点での航空ガイダンスの一覧。高田(2007)を基に作成。全て MSM から作成されており、予報時間は、00, 06, 12, 18 UTC 初期値は 15 時間、03, 09, 15, 21 UTC 初期値は 33 時間。LR はロジスティック回帰。

要素	内容	手法
視程	前 1 時間の最小・平均視程	KF
視程確率	視程が 5/1.6 km 未満になる確率	KF
雲	前 1 時間の最小 CIG 時の 3 層の雲量と雲底高度	NN
定時風	1 時間毎の風向・風速	KF
最大風速	前 1 時間の最大風速時の風向風速	KF
天気	前 1 時間の卓越天気と降水強度	お天気マップ
発雷確率	前 3 時間に空港周辺で発雷する確率	LR
時系列気温	1 時間毎の気温	KF
最高・最低気温	当日・明日の最高・最低気温	KF

月に予定されていた RSM 廃止に対応するためであるが、天気予報ガイダンスが RSM から GSM を利用したガイダンスに移行したのとは異なり、航空ガイダンスは、GSM を使ったガイダンスは作成されず、MSM のみから作成されるガイダンスに一本化された。これにより、TAF-L 及び TAF-S の両方の作成を MSM から作成されるガイダンスで支援することとなり、2018 年現在まで続いている⁸。この際に、確率のガイダンスを除く風、気温、視程及び雲の予報時間間隔は全て 1 時間になり、また定時風、平均視程、視程が 1600 m 未満となる確率、最大風速の新たな要素が追加された。表 1.3.7 に 2007 年 5 月時点での航空ガイダンスの一覧を示した。

2007 年 11 月に GSM が 20 km 格子に高解像度化するのに合わせて、それまで RSM が担っていた天気予報の支援を GSM が担うこととなり、RSM が廃止された。これにより、GSM ガイダンスに取り込まれる形で RSM ガイダンスが廃止となった(阿部 2007)。また、MSM ガイダンスについても、MSM の予報時間延長を受けて降水確率、定時風、時系列気温、最高最低気温及び発雷確率が新たに追加された。表 1.3.8 に 2007 年 11 月時点でのガイダンス(航空用除く)の一覧を示した。

RSM 廃止後は、2009 年 9 月には、市町村を対象とした警報・注意報の発表のために更新された予報作業支援システムにガイダンスを適合させるため、それまで二次細分単位(2018 年現在の市町村等をまとめた地域に相当)だった GSM・MSM 最大降水量ガイダンス及び GSM 発雷確率ガイダンスが格子単位となった。その際に、それまでは GSM 発雷確率の手法は NN であったが、MSM 発雷確率と同じロジスティック回帰となった。また、MSM ガイダンス(格子)の格子間隔は

⁸ なお、TAF-L、TAF-S も 2008 年に一つの TAF に統合された。

表 1.3.8 2007 年 11 月時点でのガイダンス（航空用除く）の一覧。阿部（2007）を基に作成。予報対象時間の括弧内は時間間隔。MSM は 00, 06, 12, 18 UTC 初期値は 15 時間予報、03, 09, 15, 21 UTC 初期値は 33 時間予報のため、ガイダンスも初期値によって予報時間が異なる。発雷確率と最大降水量は一括学習型 NN。24 時間最大降水量の FT=24（MSM は FT=21）までは実況の解析雨量も利用。

要素	形式	予報対象時間	モデル	手法
定時風	アメダス地点	FT=3~84(3h)	GSM	KF
最大風速		FT=3~84(3h)	RSM	
		FT=3~15/33(3h)	MSM	
時系列気温		FT=3~75(3h)	GSM	
		FT=1~15/33(1h)	MSM	
最高・最低気温		明日、明後日（、3日後）	GSM	
	当日、明日	MSM		
降雪量地点		FT=24~72(12h)	GSM	NN
最小湿度	気象官署	明日、明後日（、3日後）	GSM	
天気	20 km 格子	FT=6~75(3h, FT57 から 6h)	GSM	KF
平均降水量		FT=6~75(3h, FT57 から 6h)	GSM	
		FT=3~15/33(3h)	MSM	
降水確率		FT=9~81(6h)	GSM	
		FT=9~15/6~30(6h)	MSM	
雪水比		FT=6~84(3h)	GSM	
発雷確率	FT=3~15/33(3h)	MSM	LR	
発雷確率	二次細分	FT=6~84(3h)	GSM	NN
3時間大雨確率		FT=6~84(3h)	GSM	
		FT=6~84(3h)	GSM	
1, 3 時間最大降水量		FT=3~15/33(3h)	MSM	
		FT=6~51(24h)	GSM	
24 時間最大降水量		FT=3~15/33(24h)	MSM	

5 km と詳細化された。その他、雪水比ガイダンスは最大降雪量ガイダンスに変更され、大雨確率ガイダンスは廃止された。最近では、視程分布予想の追加（MSM 2011 年、GSM 2013 年）、GSM・MSM24 時間最大降水量ガイダンスの手法を NN から MLR に変更（2013 年）、時系列湿度ガイダンスの追加（2016 年）、MSM 降雪量地点ガイダンスの追加や仕様拡充（2016 年）等が実施された。また、降水、気温、風、発雷確率ガイダンスなど定期的に改良が行われ、予測精度が改善している。

また、航空ガイダンスも、定期的に改良と拡充が行われている。主な改善としては、視程ガイダンスの改良（2010 年）、雲ガイダンスの改良（2008 年）、風ガイダンスの改良（2010, 2013 年）、雲底確率ガイダンスの追加（2010 年）、ガストガイダンスの追加（2011 年）が行われた。また、TAF の予報時間延長に対応す

るため、航空ガイダンスの予報時間も 39 時間に延長された（2013 年）。さらに、空域予報を支援する資料として、積乱雲量の改良と雲頂高度の追加（2007, 2009 年）、着氷指数の追加（2008 年）、乱気流指数の追加と改良（2010, 2014 年）が行われ、空域予報もガイダンスを基本とした予報作業に変わってきた。

気象庁のガイダンスは以上の経過を辿って 2018 年現在に至っている。2018 年現在のガイダンスの一覧については、第 4.1 節を参照願いたい。

参考文献

- 阿部世史之, 2007: ガイダンス類の解説. 平成 19 年度数値予報研修テキスト、気象庁予報部, 48-49.
- 海老原智, 酒井喜敏, 山田芳則, 2000: 天気予報ガイダンス. 平成 12 年度数値予報研修テキスト、気象庁予報部, 28-35.
- 岩倉晋, 松本逸平, 大林正典, 2002: 航空ガイダンス. 平成 14 年度数値予報研修テキスト、気象庁予報部, 46-51.
- 木村陽一, 2004: 最大降水量ガイダンス. 平成 16 年度数値予報研修テキスト、気象庁予報部, 48-50.
- 気象庁予報部, 1986: 短期間予報用ガイダンスの解説. 予報技術資料第 35 号.
- 気象庁予報部, 1991: 天気予報ガイダンスの解説. 予報技術資料第 41 号.
- 松本逸平, 2003: RSM 及び MSM 最大風速ガイダンス. 平成 15 年度数値予報研修テキスト、気象庁予報部, 43-46.
- 佐藤豊, 2000a: RSM 天気ガイダンスの改善と GSM 天気ガイダンスの開発. 平成 12 年度量的予報研修テキスト、気象庁予報部, 63-70.
- 佐藤豊, 2000b: RSM 最小湿度ガイダンスの改善と GSM 最小湿度ガイダンスの開発. 平成 12 年度量的予報研修テキスト、気象庁予報部, 71-78.
- 高田伸一, 2004: TAF-S 視程ガイダンス. 平成 16 年度数値予報研修テキスト、気象庁予報部, 53-55.
- 高田伸一, 工藤淳, 新美和造, 2005: 航空気象予報. 平成 17 年度数値予報研修テキスト、気象庁予報部, 49-62.
- 高田伸一, 2007: 航空気象予報ガイダンス. 平成 19 年度数値予報研修テキスト、気象庁予報部, 87-93.
- 田崎允一, 此田進, 1994: 航空気象ガイダンスの利用例について. 航空気象ノート、気象庁航空気象管理官, 48, 39-49.
- 田沢秀隆, 1996: 予報支援資料. 平成 7 年度量的予報研修テキスト、気象庁予報部, 43.
- 山田雄二, 2004: TAF-S 雲ガイダンス. 平成 16 年度数値予報研修テキスト、気象庁予報部, 56-57.
- 保科正男, 安富裕二, 此田進, 1982: 短期間予報用最終製品型予測資料（ガイダンス）の作成手法. 気象庁研究時報, 34, 239-276.

1.4 海外のガイダンス¹

ここでは海外の気象機関が2018年現在運用または試験運用しているガイダンスについて簡単に紹介する。まず、1972年から既にMOSガイダンスの運用を開始し、気象庁が参考にした米国気象局のガイダンスについて述べる。次に、多くのガイダンスを運用し、かつ先進的な統合型ガイダンス²の開発を早くから進めているドイツ気象局のガイダンスについて紹介する。また、気象庁と同様に様々な機械学習の手法を用いているフランス気象局のガイダンスについて述べる。その後、英国気象局、カナダ気象局、香港天文台、韓国気象庁のガイダンスについて簡単に触れる。最後に気象庁と他国との相違点について解説する。なお、ここでの情報は、各国の気象機関のホームページ(HP)、論文及びWMOのTechnical Progress Report³等からの情報を基にしている。

1.4.1 米国気象局のガイダンス

表1.4.1に米国気象局(NWS)で運用中または試験運用中のガイダンス(2018年現在)を示す。NWSでは運用当初から全て地点形式のガイダンスを継続していたが、2006年より地形を考慮して地点ガイダンスを格子に配分した格子形式ガイダンスGMOS(Gridded MOS)の運用を開始している(Glahn et al. 2009)。2018年現在、格子間隔は2.5 kmで、かつ15種類の予測要素があり、気温や降水のみならず風や相対湿度等の格子形式ガイダンスを運用しているのが特徴である。また、2012年5月よりアンサンブル予報のガイダンスであるEKDMOS(Ensemble Kernel Density MOS)の正式運用を開始している(Veenhuis 2012)。NWSとカナダ気象局(CMC)の全球アンサンブル予報を合わせた41メンバー毎の最高・最低気温、定時の気温と露点温度の予測を作成し、それらの予測と予測誤差を用いてカーネル密度推定⁴を行い、かつスプレッド/スキルの関係式で補正して確率密度関数(PDF)を作成している。さらに、最近ではGMOS, EKDMOS, NWSの全球モデル(GFS)と全球アンサンブルシステム(GEFS)等の多くのガイダンスとモデル予測値をブレンドし、1時間先から10日先までのシームレスなガイダンスを提供するNBM(National Blend of Models)の開発を行っており、利用するモデルや予測要素を徐々に拡充している(Ruth et al. 2017)。このほかに、飛行場予報のた

¹ 高田 伸一

² 複数の数値予報結果(アンサンブル予報含む)に対してそれぞれガイダンスを作成し、それらを統合して一つのガイダンスとするもの。

³ WMOの以下のURLから取得 <http://www.wmo.int/pages/prog/www/DPFS/ProgressReports/2015/GDPFS-NWP-2015.html>

⁴ 確率変数(ここでは予測値)の確率密度を推定する手法の一つ。

めに、GFSガイダンスをMETAR等の観測で毎時修正し、1時間から25時間先までの予測を提供するLAMP(Localized Aviation MOS Program)を2005年から運用し、改良が続けられている(Ghirardelli and Glahn 2010)。

また、ガイダンスの予測要素も多く、3・6・12時間の複数の時間幅の発雷確率、シビアな発雷の確率(雷があった場合の条件付確率)、着水性降水の確率(降水があった場合の条件付確率)、視程障害種別(煙霧、霧、雪等のカテゴリ)など他国ではあまり見られない要素も作成されている。地点形式のガイダンスでは降水量や降雪量等は値そのものを直接予測するのではなく、幅を持ったカテゴリで作成されていることが特徴である。

ガイダンスに利用する統計手法としては、線形重回帰(MLR)のみが使われているのが大きな特徴である。KF等の逐次学習型は利用されていないため、モデル更新への即時対応が難しいが、同一手法を用いているため、開発・運用コストは低いと考えられる。

1.4.2 ドイツ気象局のガイダンス

ドイツ気象局(DWD)は地点形式ガイダンスと警報用の確率型格子形式ガイダンス、TAF用ガイダンス、アンサンブル型ガイダンスなど数種類のガイダンスを運用している(Hess et al. 2015)。どれもDWD及び欧州中期予報センター(ECMWF)のモデルの個々の数値予報からMOS方式のガイダンスを作成し、それらを結合して1つのガイダンスとして作成されている。

地点形式ガイダンスは、DWDの全球モデル(ICON)から作成したガイダンス、ECMWFの全球モデル(IFS)から作成したガイダンスの2つがあり、かつ2つの予測結果を最適に結合したMOSMIXという統合型ガイダンスを作成している(Veira et al. 2017)。世界中の約5400の地点について、気温、最高・最低気温、露点温度、風向風速、ガスト、ガスト確率、天気、6・24時間降水量、6・24時間降水確率、全雲量、上・中・下層雲量、日照時間などの多くの要素を作成している。統計手法は、確率にはロジスティック回帰(LR)を利用し、ほかの要素にはMLRを利用している。240時間先まで3時間毎の予測が提供され、最新の観測でガイダンスを毎時修正している。

警報用の確率型格子形式ガイダンスは、自動警報を作成するための予測資料の一つとして開発されている。前述したIFS, ICON, DWDの領域アンサンブルモデル、ECMWFの全球アンサンブルモデル、DWDの全球アンサンブルモデルにLRを適用して各々の確率型ガイダンスを作成し、それを最適に組み合わせて時空間の解像度を統一し、ModelMIXという統合型ガイダンスが作成される(Reichert et al. 2017)。格子間隔は1 km、予報時間は24及び75時間予報、要素はガスト、降雪量・長雨・吹雪・大雨・雷雨・霜・融雪・霧など

表 1.4.1 NWS のガイダンス。2017 年 10 月時点の NWS の HP (<http://www.weather.gov/mdl/>) の情報を基に作成。全ガイダンスが線形重回帰の手法を使っている。NWS ではガイダンスのことを単に MOS (Model Output Statistics) と呼ぶことも多いため、表ではその略称を使用する。表中のシビア確率は雷がある場合における条件付確率、着水性降水の確率と雪の確率は降水がある場合における条件付確率である。NAEFS (North American Ensemble Forecast System) は NWS と CMC の全球アンサンブル予報 (41 メンバー)。なお、表以外にも Marine、River Basin、Coop Station の観測を使った GFS ガイダンス、NAM (North American Mesoscale Forecast System; NWS の領域モデル) を使った GMOS (試験運用中) 等があるが、ここでは省略する。

種別	形式、利用モデル等	要素
GFS MOS (短期)	地点 (2040 地点) FT=6~84 (3 時間毎)、GFS (00・06・12・18 UTC 初期値)	定時気温、最高・最低気温、定時露点温度、雲量、定時風 (風向・風速)、6・12 時間降水確率、6・12 時間降水量 (カテゴリ)、24 時間降雪量 (カテゴリ)、6・12 時間発雷確率、6・12 時間シビア発雷確率、6 時間着水性降水確率、6 時間雪確率、降水種別、シーリング、視程 (カテゴリ)、視程障害種別
GFS MOS (延長予報)	地点 (2022 地点) FT=24~192 (12 時間毎)、GFS (00・12 UTC 初期値)	定時気温、最高・最低気温、定時露点温度、雲量、最大風速、6・12 時間降水確率、6・12 時間降水量 (カテゴリ)、12・24 時間発雷確率、12 時間着水性降水確率、12 時間雪確率、降水種別、24 時間降雪量 (カテゴリ)
NAM MOS	地点 (1687 地点) FT=6~84 (3 時間毎)、NAM(00・12 UTC 初期値)	定時気温、最高・最低気温、定時露点温度、雲量、定時風 (風向・風速)、降水確率 (6、12 時間)、6・12 時間降水量 (カテゴリ)、24 時間降雪量 (カテゴリ)、発雷確率・条件付きシビア発雷確率 (6、12 時間)、シーリング、視程 (カテゴリ)、視程障害種別
GMOS	格子 (2.5 km 格子) FT=6~192 (3 時間毎)、GFS (00・12 UTC 初期値)	定時気温、最高・最低気温、定時露点温度、雲量、定時風 (風向・風速)、ガスト、6・12 時間降水確率、6・12 時間降水量、24 時間降雪量、相対湿度、3・6・12 時間発雷確率、卓越天気
EKDMOS	格子 (2.5 km 格子)・地点 (2884 地点)、FT=6~192 (3 時間毎)、NAEFS (00・12 UTC 初期値)	気温、露点温度、最高・最低気温の PDF (確率密度関数) と各 41 メンバーの予測。試験運用中として、風速、降水量の 6 つの閾値を超える 6・12 時間確率。
LAMP	格子 (2.5 km 格子)・地点 (1678 地点) FT=1~25 (1 時間毎)、GFS (00・06・12・18 UTC 初期値) を毎時観測で更新	地点形式は気温、露点温度、風向・風速・ガスト、降水確率、6 時間降水確率、降水有無、降水タイプ、発雷確率、発雷の強さ、対流雲の確率、対流雲の強さ、着水性降水確率、雪確率、降水種別、全雲量、シーリング、降水があった場合のシーリング、視程、降水があった場合の視程、視程障害種別。格子形式は対流雲、発雷、気温、露点温度、シーリング、視程、全雲量、風向・風速
NBM (開発中)	格子 (2.5 km 格子)、FT=1~10days、GFS、GEFS、GMOS、EKDMOS など 15 の予測を入力し毎時更新	定時気温、最高・最低気温、定時露点温度、12 時間降水確率、6 時間降水量、定時風 (風向・風速)、ガスト、雲量、シーリング、視程、1 時間降水確率インデックス、1 時間降水量、相対湿度、最大・最小相対湿度、卓越天気、降雪量

の確率がある。

1.4.3 フランス気象局のガイダンス

表 1.4.2 にフランスのガイダンスの概要を示す。フランス気象局 (Météo France) は、KF を気温、湿度及び雲量に利用している。また、MLR、KF、DA (Discrimination Analysis; 判別分析)、ランダムフォレスト (第 2.10 節参照) 等の多くの手法を採用している。

形式は一部格子形式があるが、基本的には地点形式で作成されている。また、利用モデルは基本的に全球モデルであるが、2015 年時点で、自国の領域モデル AROME で気温と湿度を試験的に作成している。

1.4.4 その他の国のガイダンス

(1) 英国気象局

英国気象局 (Met Office) のガイダンスに関する情報は HP 上でほとんど公開されていないため、論文等から収集した情報から概要のみを記述する。Met Office では、数値予報のバイアスの補正のために、気温、湿度及び風に対して KF が適用されている。また、天気

カテゴリを決めるためにファジーロジック⁵が利用されている。視程、降水種別等には気象庁と同様に診断手法が利用されている (Bennett et al. 2014; Haywood et al. 2008)。

Met Office でも、多くのモデルの予測結果を最適な重みで結合し、予測値と確率を作成している (Optimal blended forecasts と呼ばれている)。地点形式については、KF を使ってモデルバイアスを除去することにより、モデル解像度の違いによる影響を軽減してから結合している。降水量、風、気温の格子形式については、粗い解像度のモデルの予測を結合する際に、地形を考慮したダウンスケーリングを行って適切に結合が行われている (Bennett et al. 2014; Sheridan et al. 2010)。

(2) カナダ気象局

カナダ気象局 (CMC) も MLR または DA を使っているが、大きな特徴として、UMOS (Upgradable MOS) という MLR 及び DA の予測式を月に 4 回アップグレー

⁵ ある現象の有無を条件式や関数等を用いて 0-1 の中間的な値で出力する方法。

表 1.4.2 Météo France のガイダンス一覧。2015 年の WMO の Technical Progress Report を基に作成。MLR は線形重回帰、KF はカルマンフィルタ、DA は判別分析。ARPEGE は Météo France の全球モデル (4 日先、水平格子間隔は約 7.5–37 km の可変)、PEARP は Météo France のアンサンブル予報システム、IFS は ECMWF の全球モデル、MIX は ARPEGE と IFS のミックス、AROME は Météo France の領域モデル (水平格子間隔は 1.3 km)。

モデル	形式、予報時間、初期値	要素	手法
ARPEGE	地点 (要素で可変) FT = 3~ 最大 102 (3 時間毎) 00・06・12・18 UTC 初期値	気温、日最高・最低気温、湿度、日最大・最小湿度、全雲量、日射量	MLR+KF
		露点温度、風向・風速	MLR
		全雲量、視程確率、ガスト確率	DA
	格子、FT、初期値は地点に同じ	全雲量	ランダムフォレスト
PEARP	地点 (要素で可変) FT = 3~ 最大 102 (3 時間毎) 06・18 UTC 初期値	気温、日最高・最低気温、風速	MLR (各メンバー)、KF (アンサンブル平均)
		風速	MLR と更正処理
		6 時間降水量	更正処理
IFS	地点 (要素で可変) FT = 1~ 最大 180 (1, 3, 6 時間毎) 00・12 UTC 初期値	気温、日最高・最低気温、湿度、日最大・最小湿度	MLR+KF
		全雲量	DA
		風向・風速	MLR
MIX	地点、FT = 1~ 最大 102 (1, 3 時間毎) 00・06・09・12・18・21 UTC 初期値	気温、日最高・最低気温	MLR+KF
EPS	地点 (要素で可変) FT = 1~ 最大 180 (1, 3, 6 時間毎) 00・12 UTC 初期値	気温、日最高・最低気温、風速、湿度、日最大・最小湿度	MLR (各メンバー)、KF (アンサンブル平均)
AROME (試験中)	地点、FT=1~ 最大 42 (1 時間毎) 00・06・12・18 UTC 初期値	気温、日最高・最低気温、湿度、日最大・最小湿度	勾配ブースティング+単純フィルタリング

ドできるシステムを導入している (Wilson and Vallée 2002)。モデル更新の場合には新旧モデルが混在したデータで回帰を行うが、旧モデルのデータを徐々に減らし、最後には新モデルのデータのみで回帰を行うといった手法である。これによりモデル更新に徐々に対応でき、かつ逐次学習型のような完全な変動型ではないため、より安定な予測が可能と思われる。

この UMOS は主に CMC の領域モデル (RDPS) のガイダンスに使われており、3 時間毎の気温と露点温度、風向・風速、6・12 時間降水確率、全雲量の 4 カテゴリ毎の確率、海上風が作成されている。全球モデル (GDPS) においては、気温のみに利用されている。

気温以外の GDPS ガイダンスとして降水確率、全雲量、風向風速が運用されている。これらは、PPM 方式を利用しているが、PPM 方式で問題となるモデルバイアス (第 2.2 節) を軽減するために、ある期間で計算したバイアスを減じる後処理を行っている。

(3) 香港天文台

香港天文台は、気温、湿度、露点温度、風、天気、雲量のガイダンスを作成しており、KF、MLR、LR が利用されている。また、ECMWF の IFS と ENS、気象庁の GSM、NWS の GFS、Meso-NHM (気象庁の非静力学モデルを香港付近で利用) の予測を結合し、9 日先までの統合的な予測である OCF (Objective Consensus Forecast) を作成している。

(4) 韓国気象庁

韓国気象庁では、領域モデル (RDAPS) の予測を用いて、気温、最高・最低気温、全雲量、降水確率、降水種別、相対湿度、風向・風速が作成されている。気温には KF が用いられているが、その他は MLR が用いられている。全球モデル (GDAPS) では、最高・最低気温、降水種別、全雲量の 3 つが作成されている。最高・最低気温には KF が用いられている。

1.4.5 気象庁との比較

日本の気象庁と海外気象機関との大きな相違点は、気象庁は多くの要素に KF 及び NN といった逐次学習型のガイダンスを運用していることである。外国では Météo France では気温と湿度、雲量の 3 要素に KF を、Met Office では気温と湿度、風に KF を利用しているが、気象庁のように気温、湿度、風のみならず降水量、降水確率、降雪量、視程等の多くの要素に逐次学習型のガイダンスを利用している国はない。

利用モデルに関しては、NWS, DWD, Météo France など多数のガイダンスを運用している国では全球モデルを使ったガイダンスが主流である。領域モデルを使ったガイダンスは、他国でも見られるものの、気象庁は全球モデルのガイダンスよりむしろ領域モデルを使ったガイダンスの方が多く、他国と異なっている。

また、NWS, DWD, Météo France, Met Office などでは複数のモデルを使ったガイダンスを最適に結合し、均一な空間・時間解像度の統合型ガイダンスを開発・運

用している。特に DWD の ModelMIX では、自国及び ECMWF の決定論予報とアンサンブル予報を全て使って多くのガイダンスを作成した後に結合し、警報の作業に利用されている。また、NWS や Met Office でも顕著現象の予測に多くのモデルやガイダンスを結合しており、これらの統合型ガイダンスは、今後のガイダンスの主流となると考えられる。

予測要素の種類については、NWS が一番豊富であるが、気象庁は世界的にみれば、かなり多くの要素のガイダンスを作成している。また、2018 年現在は他国も格子形式のガイダンスを作成しているが、地点形式のガイダンスが主である。前述したように気象庁はガイダンスの運用開始当初から格子形式のガイダンスを運用しており、地点形式は少ないことが大きな特徴である。

参考文献

- Bennett, A., I. Pearman, S. Moseley, C. Jones, J. Canvin, S. Jackson, and B. Wright, 2014: Met Office post-processing of operational NWP forecasts. *Conference WWOSC 2014, Montreal, August 2014*, <https://www.wmo.int/pages/prog/arep/wrrp/new/wwosc/documents/ACB-WWOSC2014-v2.pdf>.
- Ghirardelli, J. E. and B. Glahn, 2010: The Meteorological Development Laboratory 's Aviation Weather Prediction System. *Wea. Forecasting*, **25**, 1027–1051.
- Glahn, B., K. Gilbert, R. Cosgrove, D. P. Ruth, and K. Sheets, 2009: The Gridding of MOS. *Wea. Forecasting*, **24**, 520–529.
- Haywood, J., M. Bush, S. Abel, B. Claxton, H. Coe, J. Crosier, M. Harrison, B. Macpherson, M. Naylor, and S. Osborne, 2008: Prediction of visibility and aerosol within the operational Met Office Unified Model. II: Validation of model performance using observational data. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, **134**, 1817–1832.
- Hess, R., J. Glashof, and C. Primo, 2015: Calibration with MOS at DWD. *ECMWF Calibration Meeting 12 February 2015*, <https://software.ecmwf.int/wiki/display/FCST/Calibration+Meeting+12+February+2015>.
- Reichert, B., R. Hess, T. Hirsch, P. James, C. Lenhart, J. Paller, W. Raatz, T. Schleinzer, G. Schroder, and R. Thehos, 2017: The operational warning decision support system AutoWARN for forecasting and nowcasting severe weather at DWD. *EMS Annual Meeting : European Conference for Applied Meteorology and Climatology 2017, Dublin, Ireland*, **14**, EMS2017-849, <http://meetingorganizer.copernicus.org/EMS2017/EMS2017-849.pdf>.
- Ruth, D. P., D. T. Myrick, and M. Peroutka, 2017: Developing the National Blend of Models for National Weather Service Operations. *97th American Meteorological Society Annual Meeting, Seattle, WA.*, <https://ams.confex.com/ams/97Annual/webprogram/Paper313249.html>.
- Sheridan, P., S. Smith, A. Brown, and S. Vosper, 2010: A simple height-based correction for temperature downscaling in complex terrain. *Meteorol. Appl.*, **17**, 329–339.
- Veenhuis, B. A., 2012: Spread Calibration of Ensemble MOS Forecasts. *Mon. Wea. Rev.*, **141**, 2467–2482.
- Veira, A., R. Hess, S. Trepte, G. Vogt, and B. Reichert, 2017: Model Output Statistics for Point Forecasts at Deutscher Wetterdienst: Current Status and Future Developments. *EMS Annual Meeting : European Conference for Applied Meteorology and Climatology 2017, Dublin, Ireland*, **14**, EMS2017-378-1, <http://meetingorganizer.copernicus.org/EMS2017/EMS2017-378-1.pdf>.
- Wilson, L. J. and M. Vallée, 2002: The Canadian Updateable Model Output Statistics (UMOS) System: Design and Development Tests. *Wea. Forecasting*, **17**, 206–222.