

天気予報ときめ細かさ

古川 武彦*

1. はじめに

気象学の非常に重要な応用分野である天気予報，その日本における歴史は優に1世紀以上も前の明治初期に遡る。現在の天気予報は気象学を始めとする観測・通信・情報処理技術の発展を基盤として，今日まで長足の発展を遂げてきた。予報技術の変遷をみると，明治中期に始まり第2次世界大戦頃まで50年以上も続いた「主観的・地上天気図時代」，ついで昭和20年代に可能となった高層気象データも利用した「主観的・地上・高層天気図時代」へと進化し，その後，昭和34（1959）年4月の真空管を用いた電子計算機IBM704の気象庁への導入による数値予報の幕開けが，現代の「客観的・数値予報時代」へと徐々に変わってきた。近年のいわゆるピンポイント予報なるものは，数値予報を利用したまさに「きめ細かい」天気予報の象徴である。また予報期間が1週間を超えてはるか1か月以上への延長を可能としたアンサンブル予報の出現も数値予報の大きな成果である。しかしながら，1か月や3か月予報のきめ細かさは北海道地方，関東甲信地方などが予報区であり，ピンポイント予報とは桁外れに広い。最近では一つの予報モデルで数日先までの短期予報から，季節予報や気候変動まですべての予報を継ぎ目なく行うことを目指したシームレス（seamless）予報なども議論されている。本稿では普段よく耳にする天気予報の「きめ細かさ」について，気象現象の基本的な性質や予報技術の観点から，その変遷を踏まえつつ考察してみたい。

2. 1世紀前の天気予報

日本における気象事業は，明治8（1875）年6月1日，東京気象台が赤坂葵町（現在の虎ノ門にあるホテルオークラ東京付近）の地に創立され，同5日から毎日3回の定常的な気象観測が始まったことに由来する。その後各地に国営および県営の測候所が開設され，最初の天気予報は，全体で22か所の測候所が開発された明治17（1884）年6月1日に発表された。当時の天気図は石版印刷（石版石を版材とした平版印刷）され，天気予報とともに警視庁や交番に掲示され，次第に地方でも掲示が広がった。また天気図の新聞への掲載は大正13（1924）年から始まった。

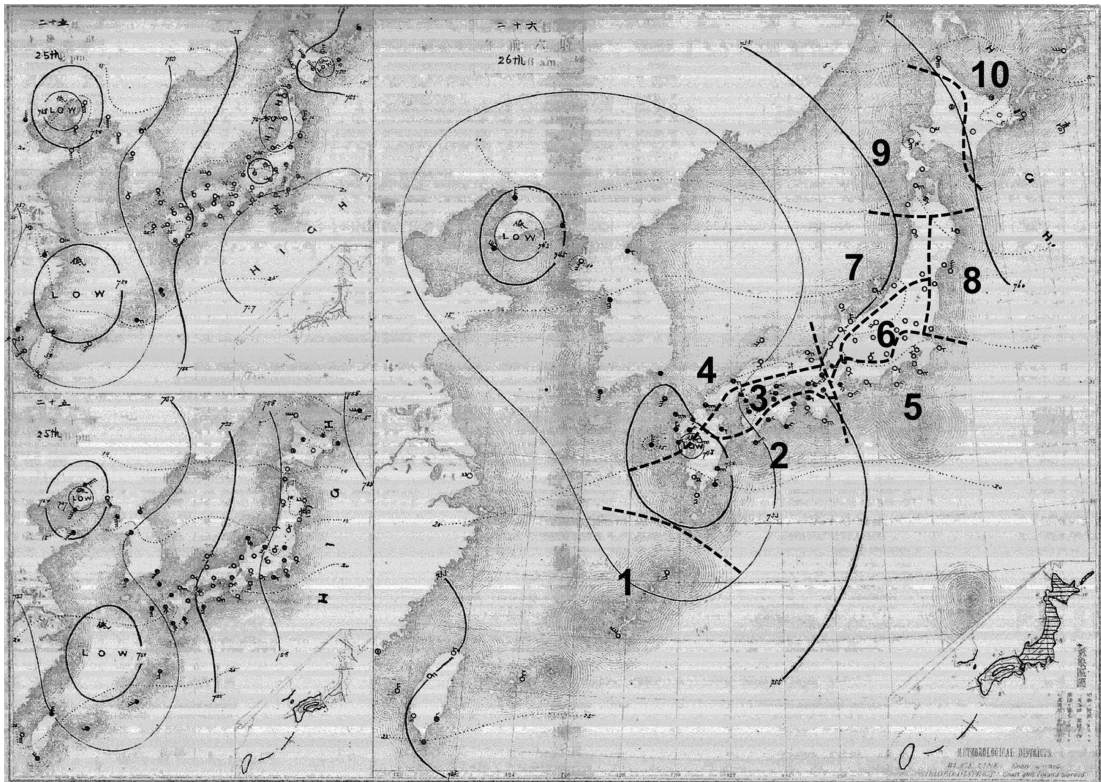
約1世紀前の天気図と予報を見てみよう。第1図は1905（明治38）年5月26日発行の天気図で，中央に当日06時の天気図，左欄に前日14時（上段）と22時（下段）の天気図も小さく併記されている。別面には（ここには示していない）約100か所（国内86，海外16）の測候所の観測データ一覧表とその右端欄に天気概況と天気予報が記載されている。天気予報の開始以来，約20年を経た時点である。

具体的に天気予報を眺めてみよう。日本全体を「気象区図」として10区の予報区に分け，それぞれを対象に予報が行われている。気象庁の現行の「地方予報区」の源流である。例えば，東京が含まれる第5区は波切（三重県大王崎付近），津，岐阜，名古屋，浜松，長津呂，沼津，横須賀，横浜，東京，熊谷，布良，銚子が含まれている。別途，東京のみが単独の予報（区）となっているのが注目される。第1図の日本地図に示した破線は，筆者が全10区を書き入れたものである。これを見るときめ細かさの一つである予報区は，いわゆる気候区分を念頭に設定されており，現在の地方ブロックと同規模の広がりである。なお，当時

* Takehiko FURUKAWA, 気象コンパス.

E-mail: takefuru@eos.ocn.ne.jp

© 2013 日本気象学会



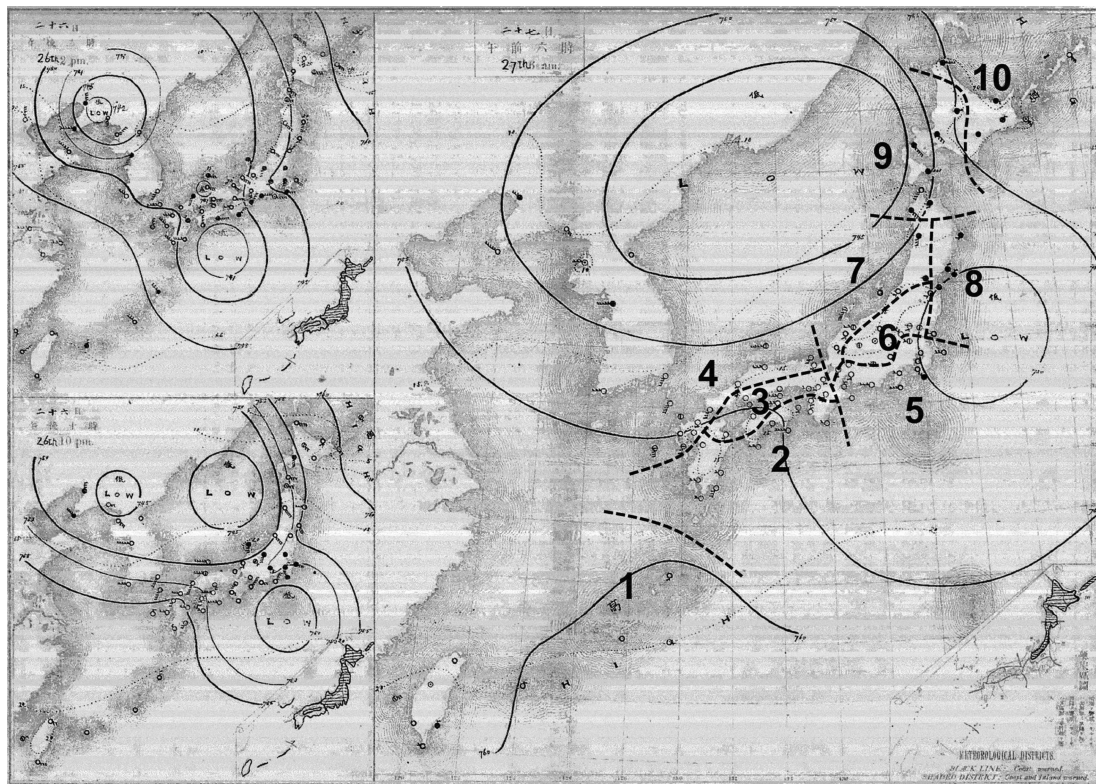
第1図 明治38(1905)年5月26日発行の天気図(中央が26日06時,左欄上が25日14時,下が同22時)(気象庁資料).

の気象警報は暴風警報のみであるが、区割りは天気予報と同じであった。

つぎに5月27日にたいする予報を見ると、第2・3・4区をひとまとめにして「北又ハ西ノ風概ネ曇後晴」、第5・6・7・8区をひとまとめにして「南ノ風概ネ雨後曇り」となっており、日本列島を大きく丸めた表現となっている。この例では西日本や中部地方全体がそれぞれ同じ予報となっている。予報要素は風、晴・曇天、雨で、気温は言及されていない。予報の有効期間についてみると、「天気予報欄には当日午後6時以降24時間における多望の天気を掲げる」と凡例に記されているので、予報の有効時間は24時間で、天気は1日を通して卓越する天気や風を対象としており、一種の平均値である。予報のリードタイムでみると、天気予報の掲示は昼頃と推測されるので、18時の予報のスタートまで十分なリードタイムがあったことになる。当時の予報技術は、日々の天気を高・低気圧の経路や消長と結びつけたシノプティック(総観気象

学)が対象であり、人による天気図と天気の分類や経験に基づいた主観的技術である。まだ前線の概念がなかった。天気予報のきめ細かさはこのように空間的にも時間的にも大きく丸められ、現在とは比べものにならないほど粗かった。

少し寄り道になるが、この第1図の天気図は日露戦争における日本海海戦の前日のもので、中央気象台で予報作業に用いられた。翌日の海戦の日(明治38年5月27日)に対する対馬近海の天気予報は「天気晴朗ナルモ浪高カルヘシ」と言われているが、この地域は第4区の西縁にあたる。海戦当日27日の地上天気図を第2図に示す。上述のように予報は「北又ハ西ノ風概ネ曇後晴」となっており、黄海および九州西方に中心を持つ低気圧が北東に進み、対馬海峡付近もその後面に入ると見込んだようだ。当時の予報課長岡田武松(後に中央気象台長)は第1図の天気図などを解析して現地の予報を作成し、至急電報として陸上は有線回線で、洋上は海底ケーブルで、そして最後は船舶による



第2図 明治38 (1905)年5月27日発行の天気図 (気象庁資料)。

使送便で、朝鮮半島の鎮海湾に仮泊中の連合艦隊旗艦「三笠」に送達された。その予報の原本は見当たらないが、この予報が秋山真之参謀らによって起案され、東郷平八郎司令官が大本营に打電した有名な「敵艦見ユノ報ニ接シ…、本日天気晴朗ナレ共浪高シ」につながった。予報は見事に的中したようだ (古川 2012)。「主観的・地上天気図時代」の象徴である。

3. 主観的予報から客観的予報へ

ラジオゾンデの開発による高層気象観測は昭和20 (1945) 年代初頭に実用化され、それまでの地上天気図に加えて高層天気図をも利用する「主観的・地上・高層天気図時代」へと発展した。予報技術の根幹は依然として主観的で、予報技術者のスキルがすぐれて物を言った時代であった。しかしながら1947年のチャーニー (R. J. Charney) による温帯低気圧の発達論やその後のコンピュータの導入は、1960年代後半から必然的に気象力学の摂理に則した数値予報に基づいた客観的技術へと、漸次移行を余儀なくされた。そ

んな中、筆者は昭和40年代に気象庁の「全国予報技術検討会」に何度か陪席したが、まだ各地に予報の名人が割拠し、予報の虎の巻は同僚にも見せなかったほどである。気象庁は2012年、第9代目のスパコンに更新を行った。世間ではよくコンピュータ予報と揶揄されるが、それは単なる出来合いの自動的なマシンではなく、人のこれまでの知恵がコンピュータという記憶・計算ツールに凝縮・集積された総合的なシステムから生産されるものであり、モデルのメンテナンスからバージョンアップに至るまで、今後も人の介在が不可欠な動的なシステムである。

3.1 ピンポイント予報

客観的予報のきめ細かさの典型例は、いわゆるピンポイント予報であり、民間気象事業者のセールスポイントの一つとなっている。そのきめ細かさは、テレビで見るとほとんどが市町村名で表示されるが、インターネットなどでは市・町村・区・郵便番号・観光地・駅などを入力すれば、即座に自動的に予報が閲覧できる仕組みになっている。空間的なきめ細かさを見る

と、形式的には数 km という「ピンポイント」である。つぎに予報要素を見ると、天気は天気マーク、気温や風向・風速などは数値あるいは文字、グラフで表示されている。予報の時間的なきめ細かさ（時間解像度や時間刻み）は多くは3時間であり、予報期間は30時間程度である。第3図はピンポイント予報の例としてウェザーニューズ社のインターネット上の予報（御殿場）を十数時間分切り出したものである。驚くなかれ1時間刻みで表示され、数時間のスパンでの天気変化が予測されている。なお、後述のように気象庁ではこのような1時間刻みの天気予報は行っておらず、インターネットで見る限り外国では見られない。

このようなピンポイント予報は、元はと言えば筆者が気象庁予報課に在職中の1996年3月に始まった天気などの地域的分布を表す「分布予報」と、それを特定の格子点で展開した「時系列予報」である。時間解像度は3時間、空間解像度は20 km であった。その技術的根拠は、当時の数値予報モデル（RSM（Regional Spectral Model）と呼ばれる日本周辺域を対象とした20 km の水平解像度を持つ予測モデル）と、そのGPV（Grid Point Value, 格子点予測値）を引数として得られる天気や気温、降水などについての予測資料である「ガイダンス」である。これらのガイダンスは、20 km メッシュのきめ細かさで48時間先までの時系列として、ほとんど自動的に計算することを可能とした。このガイダンスは気象庁部内での天気予報作業などへの利用はもちろん、予報業務許可事業者などの部外には、RSM のGPV とともに一般財団法人気象業務支援センターを通じて提供が開始された。最初のピンポイント予報は、こうした環境を踏まえて出現したものである。

ここでピンポイント予報の基礎となっている最近の数値予報モデルを見ると、従来のRSMは、20 km 格子に高解像度化された計算領域が地球全体のGSM（Global Spectral Model）に置き換わり、一方、

RSMは10 km 格子化してMSM（Meso-Scale Model）へと発展した後に、さらに静力学近似を外して、浮力の効果を許した非静力学モデルへと進化し、現在ではMSMの格子間隔も5 km で日本周辺をカバーしている。こうした予測モデルの精緻化は、基本的には数値予報モデルの初期値の解析方法の改善（4次元同化など）や最先端のスーパーコンピュータの導入によって実現したものである。

ちなみに、現在公開されている天気に関連するガイダンスは、地点形式と格子点形式の2種類がある。まず天気、降水量などについては20 km の格子点形式のみであり、しかも3時間刻みであり、1時間刻みではない。一方、地点形式は気温、日最高気温、日最低気温、風がアメダスポイント（約800か所）を対象に公開されており、3時間および1時間刻みである。気象官署ではさらに最小湿度が加わる。このほかGSMおよびMSMのGPVも公開されている。したがって、民間の気象事業者は、これらのGPVと気象庁のガイダンスをもとに、独自の予報技術を加味して、あるいは機械的な編集や内挿を施すことによって、自社のピンポイント予報を作成していると推測される。このことは奇妙なことだが、同じ地点の同じ時間帯についての予報が、気象事業者やテレビ局などによって、それぞれ異なっているのが現実である。しかしながら、こうした予報の精度を客観的に検証あるいは評価することは、観測手段からみてもかなり厄介である。気象庁では、例えば晴れや曇りの観測は、県規模の地方気象台における目視観測を行っているほか、晴れや曇りの指標である日照時間の観測は、地方気象台と測候所に設置されている約100か所での日射計と、約800か所のアメダス地点での太陽電池を用いて行っている。したがって、日照時間の空間解像度は約20 km である。GSMの空間解像度は20 km であることを考慮すると、後述するように、ピンポイント予報といえども、天気予報としての空間的きめ細かさは、100 km 規模

のメソスケール現象およびさらに大きな現象の時間的推移を単に1時間間隔で見ているに過ぎず、10 km 規模で変化するような局地的な細かい天気を予測している訳ではない。なお、現在、気象庁では水平解像度が2 km の非静力学数値予

日(曜日)	22(土)														
時間(時)	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	
天気															
降水量(mm/h)	0	0	1	1	1	2	2	2	3	3	2	1	1	0	
気温(℃)	4	4	4	4	4	4	4	5	6	7	7	8	8	9	
風向	西	西	西	北西	北西	北	北	北東	北東	北東	北東	北	北	北	
風速(m/s)	3	3	3	3	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	

第3図 ウェザーニューズ社のピンポイント予報の例。

報モデル (LFM, Local Forecast Model) を運用しているが、このモデルは未だピンポイント予報には反映されていない。

3.2 アンサンブル予報

アンサンブル予報は、1週間程度が予測の限界と言われている大気予測可能性 (predictability) を克服すべく開発された近年のアプローチである。もちろん数値予報モデルを利用している。現在、週間天気予報のほか、季節予報 (1か月・3か月予報、暖・寒候期予報) に用いられている。さらに台風の進路予報にも採用されている。歴史的に見れば、1か月予報が1996年3月から、3か月予報が2003年3月から運用が開始された。台風予報は2008年からである。なお、週間天気予報は1988年に開始されたがアンサンブル予報を採用したのは2001年からである。

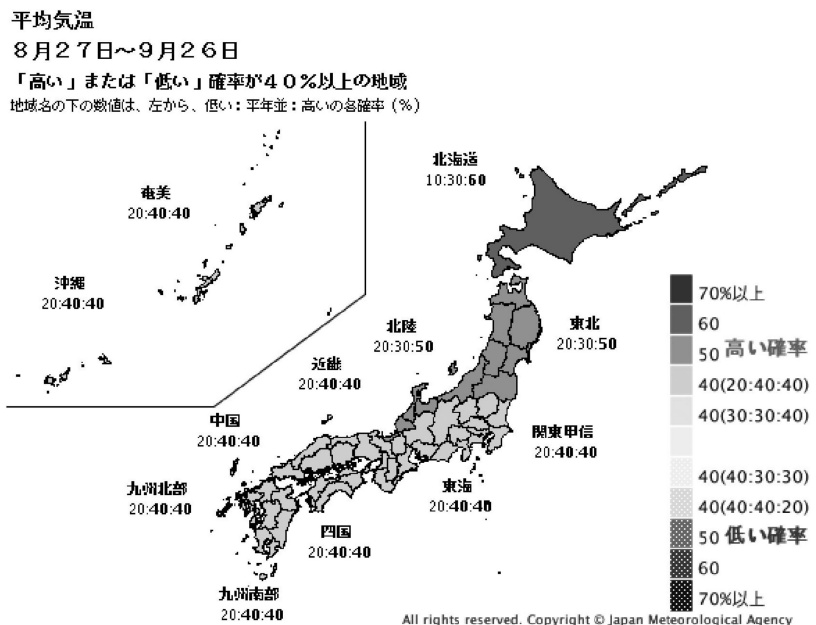
アンサンブル予報は、手短かに言えば大気の運動が本質的に持つカオス (chaos, 混沌) という初期値感性を利用して、予報期間を延ばすべく開発された技術である。具体的には、初期値に対する感性を逆手にとって、あらかじめ観測値の周りに人為的な初期値を集団として数十個 (メンバーと呼ばれる) 与えて、メンバーごとに独立に予報を実行し、そのバラツキ具合を評価して予報とする立場である (例えば古川・酒井2004)。仮にある地域・時間帯で50メンバーのうち35メンバーが降水を予測していれば、降水確率は70%と予報 (表現) される。したがってアンサンブル予報は通常の単一の初期値に基づく断定的な一つの予報ではなく、確率的に表現される。別の言い方をすれば、予報が確率密度で捉えられるので、今日・明日の天気予報やピンポイント予報など一つの値で表現される予報とは、きめ細かさの次元が異なる。

1か月予報で具体的に試してみよう。時間解像度は予報期間の第1週と第2週の平均値、残りの2週と月平均値がそれぞれ発表されている。予報の地域的広がり

は北海道地方など全国を11ブロックに分けた領域ごとの平均値で、当然その中では同じである。また予報内容は平年値を基準に、3階級「低い (少ない)」「平年並」「高い (多い)」がそれぞれ出現する確率で表示され、各階級に予測メンバーの何%が入るかによって自動的に決められる。気温を例にとると、予報区ごとに「低い」「平年並」「高い」が「20%」「30%」「50%」のように確率が予報される。「平年並」以上は80%の確率となるが、それでも20%の確率で低くなることを意味している。第4図は1か月予報のこのような表示例を示す。季節予報ではアンサンブル予報技術を用いているが、予報のきめ細かさは、このように大きく丸められ、また確率的であることが大きな特徴である。

週間予報もアンサンブル予報が用いられているが、この場合は低気圧などの個々の擾乱の振る舞いを追跡しており、少なくとも日の単位のきめ細かさで予報が可能であり、予報区も県域程度の広がりである。なお、気象庁は降水の有無の予報について、「予報の適中のしやすさ」を示す信頼度 (ABCの3段階) を付しているが、これはアンサンブル予報の降水についてのメンバーのバラツキ具合で決められている。予報のきめ細かさを信頼度という指標で補っている。

一方、1か月や3か月予報の場合でも、約30分刻みで数値積分 (予測計算) を行っているため、任意の格



第4図 1か月予報の例 (気象庁資料)。

子点について30日間の時系列を日毎に出力・表示することは可能であるが、現在のところ、日の解像度で予報するほどの精度がないため、上述のような平均状態で予報が行われている。ちなみに米国ではある民間事業者が15日予報を行っている。最近、気象庁は民間が10日予報を行うことを認めた。

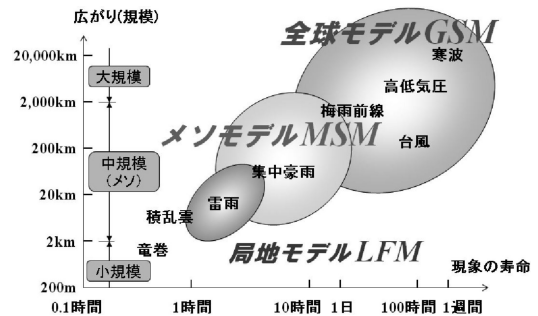
なお、季節予報や気候変動予報などでマルチアンサンブルモデルという新しい試みがある。国内外の気象機関の予報センターや大学などで行われている個々の予報をそれぞれアンサンブルメンバーの一つとして扱うもので、それらのパラツキ具合で予測の信頼性を向上させようとしている。

4. 予報期間ときめ細かさ

これまで見てきた予報のきめ細かさは、まず気象現象のスケールと密接に関係している。よく知られているように、大気中には積雲対流（積雲や積乱雲など）という短い時間スケール（あるいは寿命）で小さい空間スケールを持つ現象から、集中豪雨や前線などのメソスケール、高・低気圧などのシノプティックスケール、偏西風の蛇行やブロッキングなどの地球規模の現象まで、種々のスケールの現象が同じ時間軸の中で生起している。第5図はこれらの現象を時間と空間を座標として表したものであるが、時間スケールの長い現象ほど空間スケールも大きいという性質を持っていることを意味している。しかも重要なことは、それぞれの現象は発生・維持している固有の物理過程を持っているが、決して他の現象と独立ではなく、互いに力を及ぼし、かつエネルギーを輸送し合っている複雑系であるという点である。

したがって、天気予報のきめ細かさは、本来的に個々の気象現象が持っている空間的および時間的変化をどれだけ忠実に予測し、表現できるかと言い換えることができる。

例えば積乱雲の場合、10 km 程度の広がりとし1時間程度の寿命を持っているので、その振る舞いを予測するためには、まずその実態をきちんと観測する必要があり、おそらく100 m 程度の空間解像度と秒単位の時間解像度が要求される。さらに積乱雲の内部では水蒸気の凝結・蒸発、雲粒や氷粒の生成などが起きているから、その様子を忠実に表現する物理過程の把握も必要である。したがって、観測と予測モデルが完全で、かつ数値計算のツールがあつて、初めて個々の積乱雲の振る舞いの予報が可能となる。竜巻でも同様であ



第5図 種々の現象の時間・空間スケールとそれらを予測する数値予報モデル（室井ちあし氏作成）。

る。実際、研究レベルでは、このような予測実験が行われている。

しかしながら、予報期間が48時間で予報区域が日本周辺の場合を考えてみると、その期間内には域内で多数の積乱雲などの発生や消滅が繰り返され、また、高・低気圧や前線も通過し、集中豪雨も起こりうる。このような予測モデルを走らせるためには、予報区の全域を100 m 規模の格子で覆い、秒単位で予測計算を行う必要があり、また初期条件や境界条件（地形など）を100 m 規模で与える必要がある。さらに予報の発表時刻までに莫大な計算を終え、かつ実用的なリードタイムを確保する必要がある。予報期間が1週間や1か月となれば、予報の対象区域は地球規模となり、計算量も莫大となる。同時に初期値の敏感性が顕著になる。これらの現象をすべて包括した一つの数値予測モデルで行うことは、現在のところ観測技術やコンピュータの制約などから困難であるため、それぞれ別のモデルを組立てて予測を行っている。第5図には、予報しようとする現象のスケールに対応した数値予報モデルを示す。

現行の短期予報では、高・低気圧などのシノプティックな現象が主対象であるため、予測モデルとしてGSMを走らせている。一方、数値予報の原則によると、ある現象を適切に表現するためには、その現象の4分の1程度の空間的刻みで格子間隔をとる必要があるが、GSMは格子間隔が20 kmだから、メソスケール現象および高・低気圧の振る舞いは十分記述できるが、海陸風や局地的な天気、風は、本来表現できない。また個々の積雲のような小さな現象は陽には記述できないため、格子間隔以下の現象の効果を格子点値の関数としてモデルに取り込むパラメタリゼーショ

ンの手法を用いている。このように GSM は高・低気圧の発生や発達、前線の形成などを予測の主対象としているので、その GPV を引数とした天気や降水のガイダンスのきめ細かさも、あくまで現象を 20 km 刻みで予測していると見るべきである。社会のニーズがいくら強くても、それ以上のきめ細かさは GSM では無理である。3 節で触れたピンポイント予報におけるきめ細かさも、本来このような文脈で理解されるべきである。

ここで天気予報における「予報区」について触れておこう。予報区は地域的な「きめ細かさ」の指標の一つである。気象庁は種々の天気予報を発表する際、それぞれ「予報区」を対象に行っており、それらは「全国予報区」、「地方予報区」、「府県予報区」の 3 階層である。日々の天気予報の場合は府県予報区を「一次細分区域」と呼ばれる区域に細分している。これは、気候特性などを考慮し、複数の市町村を束ねたものである。一次細分区域は近年の数値予報モデルの精緻化に伴って細分化が進み、現在では県域を 5 個程度まで分割されている。例えば東京都（多摩、23 区）の場合、多摩西部、多摩南部、多摩北部、23 区北部、23 区南部に細分化されている。テレビではこのような区分で放映される。週間天気予報は府県予報区が予報区であり、場合によって地方予報区に丸められている。季節予報は地方予報区が主対象である。ここでは触れなかったが、気象警報などの予報区は、第一次細分区域をさらに市町村単位に細分した「第二次細分区域」に分割している。これは気象警報などに伴う「避難勧告」「避難指示」が市町村長の役割と定められていることを考慮したものである。

結局、天気予報の空間的・時間的なきめ細かさは、予報対象の現象と数値予報モデルの格子間隔（水平解像度）に一義的に依存する。当然、その格子点で代表される地域的広がりの中では、予報はどこでも同じである。このきめ細かさを最小単位として、予報区内（一次細分区域など）の天気が規定され、必要に応じて、より大きな予報区（地方予報区など）に丸められる。しかし、その逆は不可能であり、内挿によるきめ細かさは単なる便法に過ぎないであろう。

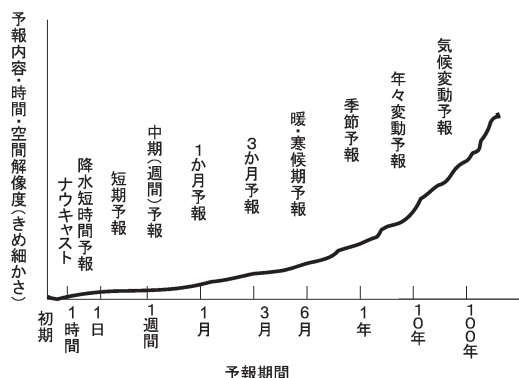
第 6 図はこれまで述べた天気予報の内容のきめ細かさと天気予報の有効期間の関係をまとめた概念図である。気象庁の予報メニューに加えて、気候変動の予測までを書き込んだ。なお、ナウキャストは数値予報ではなく、現象の運動学的な保存性に着目した降水域な

どの予測である。

縦軸がきめ細かさの程度を表す。簡便のため 1 次元で示したが、本来は時間・空間解像度、内容ごとの次元を持っている。予報期間が長くなるにつれて、縦軸の振幅（空間・時間・予報要素の丸め）が増大する、すなわちきめ細かさが粗になることを意味している。同時に予報期間が長くなるにつれてアンサンブル予報が採用されるため、きめ細かさは次第に確率的に規定される。

いま仮に第 6 図と同じ形式で約 20 年前の天気予報の技術を描いてみれば、ピンポイント予報は日の目を見ていなかったし、週間予報は始まったばかり、季節予報は統計的手法であった。現在の予報メニューとそのきめ細かさは、気象学や観測技術、コンピュータの能力を最大限に取り込んだ最前線と言える。考えてみれば、メソスケール予報、シノプティック予報、季節予報、ENSO（南北振動）予報、10 年規模および気候変動予報のそれぞれの間には、本来人為的な境界を引く科学的根拠はないが、現実作業および予測モデルの複雑性から、日本を始め他の国々でもそれぞれ予報期間毎に分けて、個別に予報モデルを走らせている。しかしながら、それぞれのスケールで分けたこうした予報は、前述のように究極的にはリンクしていることから、これらのすべての予報を斉一のフレーム（unified framework）で、継目なく行おうとする「シームレス天気予報」が指向されている。

近年、インターネットやスマートフォンが個人や家庭に急速に広まっている。天気予報のきめ細かさは今後も技術の進歩とともに、より進化を遂げることは間違いないが、同時にユーザーの側でも公開されている



第 6 図 予報期間と天気予報の内容・時間空間解像度の概念図。

予測データを利用し、IT を駆使してマイフォーキャストに加工する方向に進むと思われる。筆者は時々パソコンを持参しながら外国を旅するが、気象機関のホームページは綺麗で見やすく、また非常に分かりやすいものが多い。また新聞の気象情報欄にも大きな紙幅が割かれ、カラフルで親しみを覚える。日本の天気予報の表示にも、気象学の論理に従いながらも、よりユーザーフレンドリーな工夫が望まれる。

最後に、本稿の作成に当たり、藤部文昭氏（気象研

究所）に貴重な助言と支援を頂いたことを感謝いたします。

参 考 文 献

- 古川武彦，2012：人と技術で語る天気予報史—数値予報を開いた金色の鍵。東京大学出版会，299pp.
古川武彦，室井ちあし，2012：現代天気予報学—現象から観測・予報・法制度まで。朝倉書店，220pp.
古川武彦，酒井重典，2004：アンサンブル予報（新しい中・長期予報と利用法）。東京堂出版，284pp.