



天 気

1990年 8月
Vol. 37, No. 8

〔解 説〕

109 (霧; 概念モデル)

霧の Nowcasting*

沢 井 哲 滋**

1. はじめに

霧は文字通りの意味で身近な天気現象である。条件さえ整えば人間が普通に居住している場所で発生し、移動し、そして消えて行く。身近なだけに色々な名前のついた霧が存在する。盆地の底で晴れた夜に発生する放射霧、海岸地方で海からの風に乗って押し寄せて来る移流霧など、5つや6つの名前はすぐに頭に浮かぶ。

しかし、こうした本来身近なはずの霧を人間はこれまでどう扱って来たのだろうか、上述のように半経験的に名前を付けて分類はしているが、実際のある場所ある時の霧がこうした分類上でどれに対応するのかを決めるのは難しいことの方が多い。例えば、移流霧がよく押し寄せて来る海岸線で霧が観測されている場合を考えても、本当に海上で発生した霧がその観測点まで移動して来ているのか、あるいは霧がそこで発達中なのか消散中なのかさえわからないことが多い。更に、その霧が海上のどこまで続いているのか、陸上ではどのように分布しているのか、そして霧の高さはどの位かなどの基本的な情報も得られず、海上からの移流霧と分類するのが正しいかどうかを決められないことが多い。

身近な霧の観測がこのような状態では、近代化の著しい気象関係の技術の中で“灯台もと暗し”と言われても仕方がない。一方、飛行場などでは霧の発現・消散を、たとえ1時間でも2時間でも前に予測できれば、その後の航空機の能率的な運行に大きなメリットをもたらす。

そこで本稿では、第2節で霧という気象現象について基本的な考察を試み、第3節以降で1981、82年に釧路で実施された特別観測の結果などを基に、上記の灯台もと暗しとも言ふべき現状を打破する方法を考察する。実況観測をもとにした Nowcasting の手法による飛行場など特定の場所での霧の短時間予報の可能性について、できるだけ具体的に考えて行くことにする。

2. 気象現象としての霧の特徴

2.1 霧発生の原理と分類

霧の発生・消散の原理は物理過程として考えると比較的単純である。相対湿度が100%近くの状態を境にして霧が発生したり消散したりする。相対湿度が変化するのは、気温と混合比のどちらか、あるいは両方が変化するためである。そしてこの変化は断熱膨張、放射冷却、そして2つの気塊が混合する場合を除いて、地表面や雨粒など大気以外の物質と大気との間の熱と水蒸気の交換によって起こる(沢井, 1982)。沢井(1982)の第1表と第2表で相対湿度が変化する原因(素過程)について整理し直すと、それぞれ第1表、第2表のようになる。第1表では雨蒸発霧は雨粒の表面からの水蒸気の供給に重点があるが、交換という素過程が必ず熱と水蒸気の両方の交換を伴う点に注意して気温の変化も上向きに直した。第2表では素過程のうち全てに関係する相変化は省略した。

第1表の右欄にある従来からの霧の名称はこうした変化を起こす直接の原因、あるいは変化を起こしやすい場所や状況などを基に名付けられていることが多いが、その基準が一定していないことが分類を曖昧なものにして

* Nowcasting of Fog.

** Sawai Tetsuji, 気象庁予報部予報課.

第1表 霧の発生原因による分類と発生時における気温と露点温度の変化傾向。

名称	T の変化	Td の変化	従来の名称
① 断熱膨張霧	↘	→	滑昇霧
② 放射冷却霧	↘	→	放射霧
③ 混合霧	↗	↘	前線霧, 混合霧
④ 混合冷却霧	↘	↘	移流霧
⑤ 混合蒸発霧	↗	↗	蒸気霧, 蒸発霧
⑥ 雨蒸発霧	↗	↗	前線霧

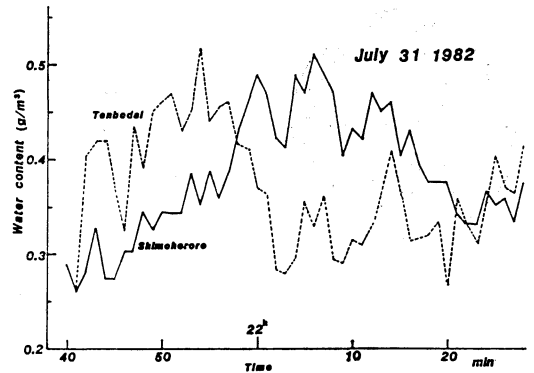
第2表 霧の発生原因による分類と物理過程(素過程)の間の対応関係。

名称\物理過程	混合	放射	交換	膨張	移流
① 断熱膨張霧				○	○
② 放射冷却霧		○			
③ 混合霧	○				
④ 混合冷却霧	○		○		○
⑤ 混合蒸発霧	○		○		○
⑥ 雨蒸発霧	○		○		

いる。素過程を基にした命名法の一例を示したのが第1・2表の左欄の名称である。実際の大气中ではこれらの原因が色々に組み合わさって霧が発生するのでますます複雑になる。

2.2 鉛直一次元性

霧が発生するような時は激しい気象条件のことは少ない。そして、霧発生のパテンシャルが高い気象条件は総観規模の場で基本的に決まる。一塊の霧の輪郭は、この総観場の気象条件に地形や地表面の状態など中小規模の変化を重ねた場に対応する。対流雲からなるメソスケールの擾乱では個々の対流雲が自発的に発達してまわりの場を大きく変えてしまうことが多いが、霧ではそのようなことは少なく消えてしまえばまわりは元に近い状態を保っていることが多い。対流雲が自発的あるいは active な現象なのに対し、霧は受動的あるいは passive な現象であると言える。一塊の霧の中にさらに細かい水平方向の構造がある場合は、地形や地表面の状態の細かい変化が反映している場合と、ベナール対流やロール状対流、あるいは重力波などによる繰り返し構造が見えている場合の2つが考えられる。いずれにしても、霧はこうした外部条件に起因する以外の固有の水平方向のスケールを持つことはない。



第1図 1982年7月31日～8月1日の展望台(点線)と下幌呂(実線)の霧水量(縦軸)の時間変化。時間軸は1目盛り10分。

これに対して鉛直方向についてはどうであろう。大気の下には地面、水面などのはっきりした境界があり、霧が発生するような静力学的に安定な成層をしている状況では下層大気そのものが接地逆転や低層の逆転層など特定の鉛直構造を持っていることが多い。これは地球大気が対流圏、成層圏……という鉛直構造を持つことにも対応する。霧が発生すると、その上部は長波放射により冷却し層状に発達して上下に厚くなるが、この厚さは水蒸気の鉛直分布など外部条件に依存する。対流雲の場合のように自分で水蒸気を集めるようなメカニズムが働かないことと、日射などによりまわりの環境が日変化する影響を受けることを考慮すると霧層が無制限に厚くなることはない。言い換えると、霧は放射冷却による鉛直方向への発達傾向と日変化の間のバランスで決まる固有の鉛直構造を持つはずである。地表面の状態や気象条件などが水平方向に一様な状態を仮定すると、霧も上述の繰り返し構造は別にして水平方向には一様で鉛直方向のみに構造を持って発達すると考えられる。

以上のような一塊の霧の中の水平2次元、あるいは鉛直方向を含めた3次元の細かい構造を、本稿では「内部構造」と呼ぶことにする。

2.3 変化の激しさ——小さいスケールの変化

霧は空間的にも時間的にも非常に変化の激しい現象である。ここで言う“激しい”とは大気中のスケールの小さい変化が霧の濃淡に直接反映することから来るイメージを指す。第1図は1981, 82年に釧路で実施された特別観測時における、海岸線から約7.5kmの位置にある展望台と約15kmの下幌呂での霧水量の時間変化である。海岸から内陸へ向けての風であったため、風上側の展望

台の大きなピークが約12分遅れで風下の下幌呂でも観測されている。この比較的大きなスケールの変化に重なって2～3分の短い時間スケールの変化が見える。こうした短時間の変化は釧路以外でもよく観測され、その原因には2-2節の前半で述べたベナル対流などの大気の運動が考えられるが、こうした小スケールの大気の運動がそのまま霧の発生・消滅につながるのはなぜであろうか。一般に、霧水量は大きくても 0.5 g/m^3 程度であることが多いのに対して、気温 20°C での飽和混合比は約 15 g/m^3 もあり、この時気温が 1°C 変わっただけでも飽和混合比は簡単に 1 g/m^3 近く変わってしまう。従って、大気のちょっとした運動がもとで霧水量に相当する混合比の変化が簡単に起こる可能性がある。地表面近くでは珍しくもない大気中の乱れが霧粒にとっては“生死”にかかわることになり、これが視程の変化に結びついて上述した変化の激しさの原因になると考えられる。

見方を変えると、空間的、時間的に変化の激しい霧は、大気中の乱れが相変化によって可視化され人間の目に見えるようになったものと考えてもよい。霧が発生すると下層大気はどこにでもある乱れが目に見えるようになるために、大気の状態変化が強調される。

3. 霧観測の可能性

前節の最後で見たように、霧は飽和点近傍というある意味では特殊な条件下で、大気中の小さな変化が可視化された結果であると考えられることができる。従って、霧が発生するかどうか、あるいは現在発現している霧が今後発達するかどうかなどを知るには霧そのものはもちろん、こうした大気の小きな状態変化も知る必要がある。

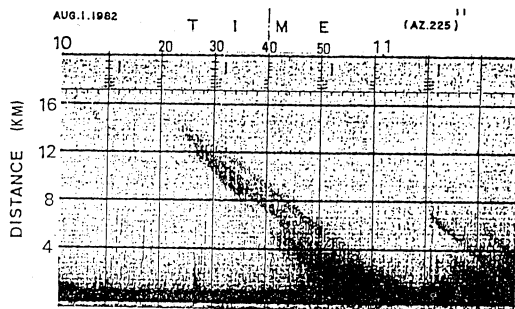
この節ではそもそも霧を観測するとはどういうことなのか、また現行の観測網が上述の意味で霧に関して如何に不十分な情報しか与えてくれないか、の2点について論ずる。

3.1 観測データの質

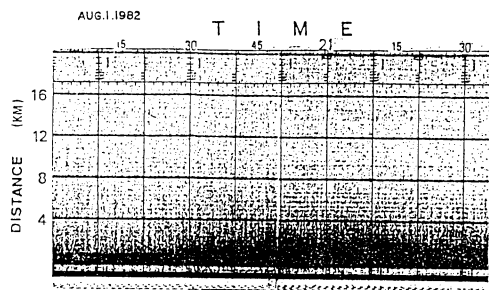
霧を含めた種々の気象現象に対する観測データの“質”つまり個々の観測データが問題にしている現象の直接的な情報をあたえるかどうか、また時間的・空間的に十分な分解能があって現象の変化を連続して追えるかどうかなど、観測データが現象に関して持つ“情報の質”について議論する。

(1) 直接性、間接性

気象庁の「地上気象観測法」では、気圧、気温から始まって蒸発量まで、8つの定量的な“測定”項目が続いた後で、雲形、大気現象、そして視程という人間が眼で



(a)



(b)

第2図 釧路の霧の代表的な2つのタイプのミリ波レーダによるエコー。縦軸は距離で1目盛り4 km、横軸は時間で1目盛り10分。(a)は霧が観測点に接近して来る場合のパターン、(b)は移動のはっきりしない海岸付近のみで濃い霧のパターン(柳沢他, 1986)。

見て“観測”しなければならない項目が挙がっている。気象では“観測”と“測定”の2つの言葉を厳密には区別しないようであるが、「観測法」の前半の項目をいくら測定しても、それだけでは後半の大気現象の存在を“観測”するのは難しい点に注意する必要がある。だからこそ大気現象が独立した観測項目になっている訳であるが……。霧については湿度がわかれば霧の存在を間接的に示す指標となるはずだが、観測精度からみて湿度のデータだけでは霧が本当に存在するかどうかを知るには不十分である。従って、霧の有無に関して湿度は間接データであり、目視観測は直接データということになる。

観測とは本来“眼で見る”ことによって天気現象を識別して来たのであるから「観測法」の後半の項目に関しては目視が直接的手段となるのは当然であるが、他に霧

や雲について直接的情報を与える観測手段としては気象衛星の可視画像が、雨や雪については気象レーダのエコーがある。これらは共にリモートセンシングの手法によって人間の関与から見れば間接的であるが、それぞれ霧粒や雲粒、あるいは雨滴や雪片そのものを“見ている”という意味では直接観測と考えてよい。これらの他、定常的に得られるデータではないが、霧についてはミリ波レーダとレーザーレーダによる観測も試みられている。第2図は釧路での特別観測の際のミリ波レーダによる観測例である。海岸線から海上へビームを向けた場合の水平-時間断面を示す。(a),(b)はそれぞれ霧が移動して近づいて来る様子がわかる例と、移動のはっきりしない沿岸だけに限定された霧の例である。レーザーレーダによる観測は、十文字(1989)や阿部(1989)などが報告している。

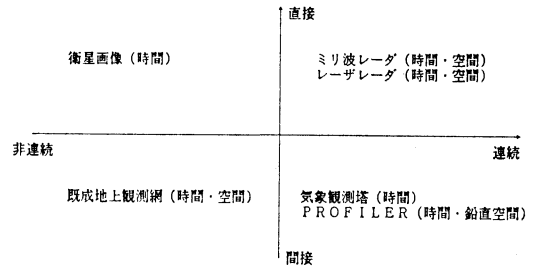
(2) 連続, 不連続

ここで言う連続か不連続かは、時間と空間の両方について考慮する必要がある。

現象の連続的追跡のために要求される観測の時間間隔や観測点の間の空間距離は、対象としている現象によって変わって来る。総観規模とか中小規模の中でもスケールが比較的大きい現象であれば、それぞれ従来からの地上観測網やアメダスなどが観測手段としてある程度確立している。また、雨滴や雪片に関しては気象レーダのエコー強度分布が時間的・空間的に連続な情報を与える。

ところが霧は、第2節で述べたように、固有の水平スケールを持たず時間的にも変動が激しく寿命と言えるようなものはない。これは空間的にも時間的にもどのようなスケールでも取り得るということであり、極端に言えば観測の時間・空間分解能ともいくら小さくてもそれだけの意味があることになる。人間の生活に対する影響を考慮するのであれば知りたいスケールもそこからおのずと決まって来るが、他の気象現象と比較した場合の霧の観測に対する要求は一般に考えられているよりもっと厳しく考えるべきである。(1)で挙げたミリ波レーダやレーザーレーダはこれらの要求をある程度満たす観測手段と考えられる。

霧の発生・消滅に係わる大気状態の把握に関しても、2-2節でまとめたように、霧が持っているはずの固有の鉛直構造に対応した大気成層状態を時間的に連続して捕らえると共に、霧の水平分布を反映した気象要素の場に関しても時間的・空間的に連続して知る必要がある。前者については一点観測であれば気象観測塔や profiler などが考えられるが後者の観測は小さいスケールでは難



第3図 本文にある直接性と連続性という情報の2つの“質”の関係を、代表的な観測手段から得られるデータについて、小さなスケールの霧に関して示す。各観測手段の後ろの括弧は時間・空間の別で、図の右側ではこれらについて連続なことを、左側では非連続なことを示す。

しい。

第3図は以上の直接性と連続性という2つの“質”の関係を、代表的な観測手段について、小さなスケールの霧に関して図示したものである。

3.2 現行のルーチン観測と霧

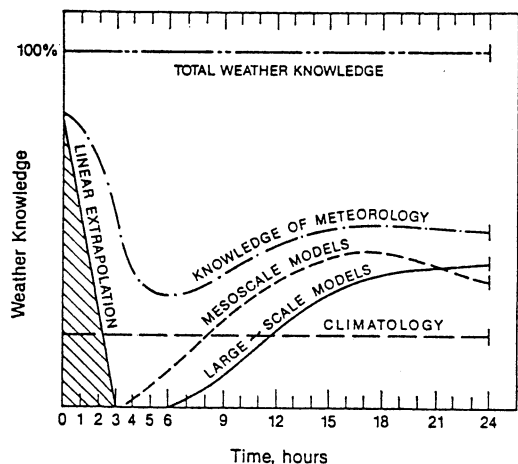
まず、気象官署による地上観測網について。

数十キロメートル離れた2つの観測点で同時に霧を観測したとしてもそれらの間に他の観測点が無ければ、霧が2点の間でどうなっているのか、ひとつながりの霧としていいのかどうかかわからない。つまり、地上観測点は霧に関してはお互いに独立した一点観測をしていて霧の水平分布を知るにはあまり役に立たない。アメダスでは日照量が唯一霧に関係するデータだが、時間分解能が不十分の上夜間や薄い霧には有効でない。

気象衛星はどうだろう。

「ひまわり」でも軌道衛星でも可視画像から霧あるいは層雲の水平分布はわかるが両者の区別はできない。更に、夜間や霧の上に雲がある時には使えず、霧がこうした条件下で発生・発達したり長時間維持される場合が多いことを考えると重大な欠点となる。夜間でも使える赤外画像では霧と地表面との間の温度差が小さいため区別がつかないことが多い。衛星は観測の時間間隔についても制約が多く時間変化の激しい霧の連続観測は事実上不可能である。静止衛星は高度が高いだけに空間分解能が悪く、海岸線付近や陸上で必要となる小さいスケールの霧の分布を知るには不十分である。

視程計は目視に比べると視程に関して客観的な情報が得られるが、一定の距離の平均値あるいは積分値という



第4図 24時間までの予報時間(横軸)と色々な手段から得られるメソ現象に関する知識の量の相対値(縦軸)の関係 (Doswell, 1986).

ことからやはり一点観測である。従って、地上観測点に視程計を配置するだけでは、そのデータを空間的に連続したものとして扱うことはできない。ただ、自動化すれば時間的に連続したデータを得るのには便利である。

以上のように現在のルーチン観測の手段ではローカルな霧の分布やその時間変化を連続的に監視することはできないことがわかる。アメダスの観測網程度の空間分解能でも湿度と視程を同時観測できれば今よりずっと改善されることは確かだが、沢井(1988)でも見たようにアメダスにもかかわらず小さなスケールの変化を伴う霧も多い。こうしたスケールの小さい霧には3-1節で示したミリ波レーダやレーザーレーダが使えそうだが、さらにデータを蓄積する必要がある。衛星については軌道衛星の AVHRR の赤外(波長 $11.0 \mu\text{m}$)と近赤外(同 $3.7 \mu\text{m}$)の2チャンネルを用いて霧と地表面の識別が可能なが報告されている(Eyre *et al.*, 1984)が、ルーチン的にはやはり観測時間の制約がある。将来、静止衛星に搭載できればもう少し使いやすくなると思われる。

4. 霧の予報

さて、いよいよ霧の予報である。この節ではメソスケールの現象の予報可能性に関する一般的な議論と霧の予報に関する問題を平行して考える。

4.1 予報可能時間のギャップ

第4図は Doswell (1986) からの引用で、予報時間(横

軸)に応じて色々な手段から得られるメソ現象に関する知識の量(縦軸)の相対値を定性的に示したものである。理想的に得られるはずの知識の量が100%である。予報時間の短い方では実況に基づいた“単純外挿”が、長い方では大規模スケールやメソスケールの“数値モデル”が知識を提供する。両者を合わせた形の一番上の曲線は経験則などを含めて現実に得られる知識の総量である。また、図の下の方の水平な直線は、気候学的に得られる知識の量を表している。これは気候値の持つ情報量と考えてよく、24時間位の時間スケールでは一定である。

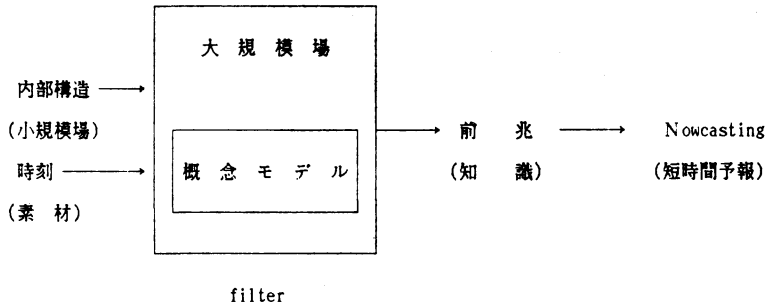
(1) 単純外挿

単純外挿の特徴は、パターン認識などを用いれば、とにかく客観的ではあるが必ずしも物理的ではないことで、寿命の短いスケールの小さな現象では予報可能時間は短い。気象現象を直接捕らえてそのままの形で予測するので結果も現象を直接表したものになり、いわゆる天気翻訳の必要はない。もちろん、数値データを外挿する場合は予測結果も数値データとなる。

単純外挿の考え方を小スケールの霧に適用するのは、3-2節で見たように現状では霧の実況把握の手段が確立されていないことからあまり実用的ではない。小スケールの霧の輪郭や内部構造がレーダなどによりリアルタイムで観測されるようになれば、雨や雪に対するのと同様に次節で述べるような実用的な外挿が可能となるはずである。

(2) 数値モデル

数値モデルは現象の入れ物としての場を気圧や気温などの数値データの分布で表現しているので、必ずしも現象そのものを表現しているとは限らない。逆に言えば、数値モデルで現象を“表現”できるということは現象がモデルの場そのものになることに等しい。中緯度の傾圧不安定波動は数値モデルの中の場として表現されるので、モデルの計算結果である気圧分布などのパターンが現象に直接対応する。これに対してモデルで直接表現できない台風や積雲対流は、それぞれ bogus やパラメタリゼーションによって現象の特徴から抽出した情報をいわば無理やり場の中へ組み込んでいる。この場合、モデルの中で場を表している数値データをいくら調べても現象そのものについての具体的な情報は得られない。この意味で現在の数値モデルで表現できるのはメソスケールの中でも大きい方だけである。しかも、精度の良い実用的な予報が可能となるのは6~48時間位先となる。数値モデルで霧を“表現”できるかどうかについては次節で議



第5図 概念モデルの位置づけ (本文参照)。

論する。

なお、数値モデルも単純外挿と同様に客観的である。

第4図には、以上のような単純外挿と数値モデルの特性から、両者によって可能な予報時間の中間に当たる3～6時間位の時間帯に得られる知識量の少ない部分、つまりギャップが生じる。この部分は経験則や気候学の知識がカバーすべきところであるが、相対的に不十分のためにギャップが生じたと言える。

4.2 ギャップの解消方法

問題としているギャップを埋めるには3つの可能性がある。

1つには経験則を整理して客観化し気候学の知識と合わせてギャップを浅くする。2つには単純外挿に物理的な考え方を採り入れることで予報時間を延長する。3つには数値モデルを用いて小さいスケールの現象を前節の意味で“表現”することにより予報時間を“短い方へ延長”する。

(1) 概念モデル

上の3つの中で1番目は、2番目の単純外挿による予報時間の延長を実現する手段の1つであり、いずれも最終的にはいわゆる「概念モデル」を作り上げるのが目標となる。概念モデルの明確な定義は無いが、立平 (1986 p 133) にもあるように現象 (システム) の発達・盛衰に関係する情報を含むことが重要と思われる。つまり、時間的・空間的な単純外挿、あるいは単なる寄せ集めの知識や経験則の主観的な適用ではなく、現象のライフサイクルの各ステージの特徴の把握とステージからステージへの移行の必然性の説明などに物理的・統計的手法を採り入れることによって知識や経験則を客観的に整理したモデルであり、短時間予報や Nowcasting に利用可能なモデルであると言うことができそうである。

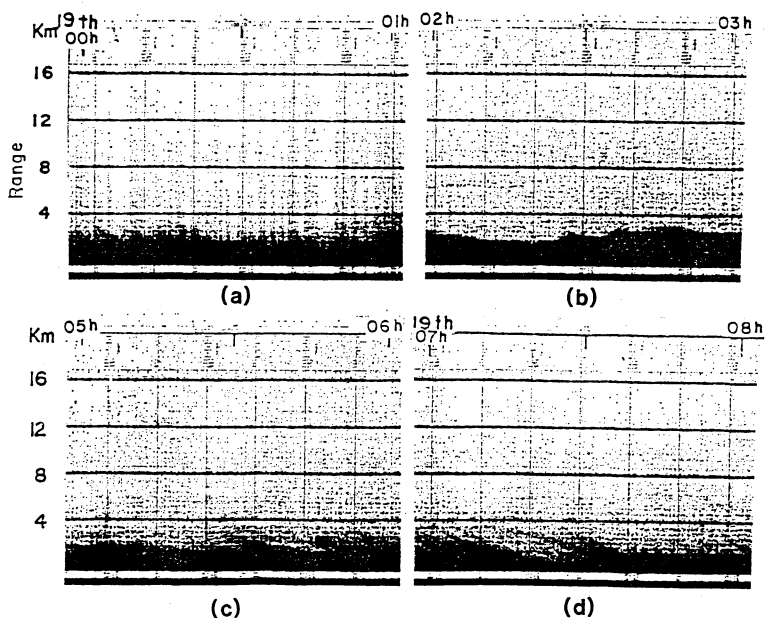
また概念モデルは小規模場の内部構造や時刻などを素

材として受取り、それらから整理された知識としての現象の変化の“前兆”を読み取る助けとなるべきものである。つまり雑多な素材から予報に有効な情報だけを抽出するという意味で、いわばフィルターのような役目をすると考えられ、第5図のように位置づけられるのではないか。概念モデルは天気翻訳は不要であり、かつ客観的な方法である。リアルタイムの実況解析と概念モデルを合わせて Nowcasting が実現することになり、概念モデルの適用はメソ現象の予報にとって有力な方法であると考えられる。

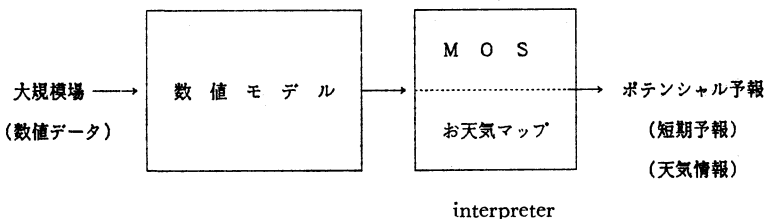
霧の概念モデルは、本来2-1節で述べた霧の種類毎に別々のモデルを組み立てることができるはずである。しかし、現状では観測データが十分でなくローカルな特徴も考慮した霧の概念モデルを組み立てるのは難しいので、ここでは2-2節での議論をもとにすべての霧に共通な性質をまとめてモデル化してみる：

- ・鉛直方向に固有のスケール、あるいは構造がある。
- ・水平方向には固有のスケールはない。但し、小さなスケールの内部構造はあり得る。
- ・固有のライフサイクルはない。日変化の影響は受ける。

霧の概念モデルの組み立てに使いそうな例として、特別観測の際のミリ波レーダによる観測例を挙げておく (第6図、沢井, 1988)。1981年7月19日00時から08時までのエコー変化の中で、特徴のある4つのステージについて1時間ずつの長さで切り出したものである。霧が出現したばかりの (a) ではエコーの縁がぼやけているが、1時間後の (b) では縁が非常にはっきりして、沿岸で濃く発達した霧が沖合に向かっては急激に薄くなるような分布を示している。午前2時という時刻を考慮すると霧の最盛期に当たる特徴と考えてよいであろう。日の出直後の (c) では再び縁がぼやけ、その2時間後の (d)



第6図 霧の変化の前兆を示すと急われる内部構造のミリ波レーダによる観測例 (1981年7月19日). 第2図と同様の図.



第7図 数値モデルの位置づけ (本文参照).

では斜めに走る筋が見えるようになる。日射の影響で層積雲のような構造を持ち始めていたと推定される。(e)から(d)への変化は日変化として霧が消散していく過程を示していると考えられる。こうした内部構造の時間変化の仕方は、釧路の沿岸霧タイプの特徴として概念モデルに組み込むことができるのではないかと。しかし、一例だけではどうにもならない。

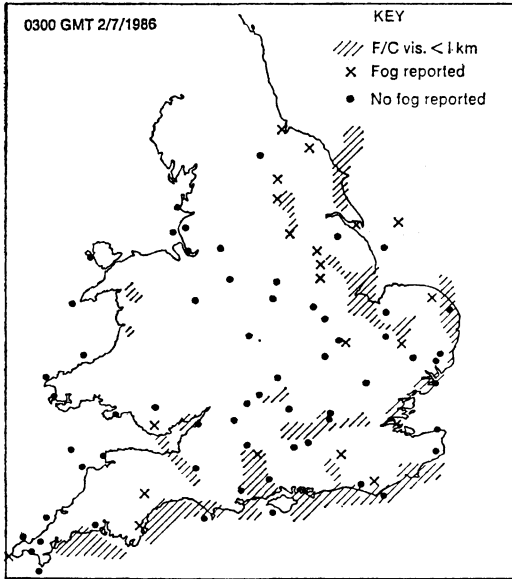
(2) 数値モデル

これに対して3番目の数値モデルによる“延長予報”の可能性はどうであろうか。

数値モデルで直接、計算あるいは予測の対象となるのは「地上気象観測法」の前半の項目の中でも気圧から風までの数値データであり、降水量以降はパラメタリゼーションなどの仮定をおいた上で計算される。後半の各種

の大気現象については、前半の項目についての計算結果を基に統計処理をしたり critical な値を仮定したりして、天気翻訳 (interpretation) をした上で始めて直接的情報が得られる (第7図参照)。

霧も他の大気現象と同じく数値モデルの中で直接計算されるものではなく、critical な過飽和度や粒度分布などを仮定した上で間接的に表現される。ところが2-3節で見たように、大気中では少しの乱れで霧水量程度の飽和混合比の変化が起こり得るし、一方、数値モデルでは気温や混合比の予報誤差が対応する霧水量より大きいこともごく普通に起こり得る。誤差は初期値の精度にも大きく左右されるが、湿度の測定精度が良くないなどの理由から混合比の初期の分布を正確に知ることは難しい。さらに2-1節で議論したように、霧が発生する場合の気



第8図 狭領域の数値モデルで霧を予報した例としてイギリス気象局の場合 (Golding, 1987, 1986年7月2日03 GMT)。ハッチの部分でモデルで1 km以下の視程が予報(9時間前)された領域、×印は実況で霧が報告された観測点、●印は実況で霧が報告されなかった観測点。

温や混合比の変化には大気とそれが接している地表面との間の熱や水蒸気の交換が原因の一つとなるから、境界条件と接地境界層における鉛直方向の物理量の交換過程の表現も重要であるが、このパラメタリゼーションがまた非常に難しい。結局、大気下層の小さな乱れやそれが起こる過程を explicit に表現していない数値モデルでは霧の発生・消滅の様子を explicit には表現できないことになる。

数値モデルの中で小さいスケールの現象を直接場として“表現”するためにはそれに見合った解像度と初期値が要求される。解像度の向上については、最近の計算機事情の好転にもかかわらず記憶容量や計算時間など十分な計算機資源の確保は今のところ難しい。初期値については更に厳しく、アメダスのスケールに対応する 20 km 程度の密度の観測値でさえ、数値モデルの入力として適当な3次元の数値データの形でルーチ的に得るのは当面まず不可能と考えてよい。大きなスケールのモデルの計算結果を初期値として貰って来るのは、霧のようにライフサイクルのすべてのステージでまわりの場の影響を

受けやすい現象では、メソスケールの場を元々表現していないモデルの出力であるから意味がない。

予報のための計算に使える時間は、例えば12時間予報であれば最新の観測値を入力した後4～5時間後に予報結果を出せばよいのに対して、3～6時間予報では少なくとも2時間位後には結果を出さなくてはならず条件が格段に厳しくなる。

以上のような理由から、数値モデルで小さいスケールの霧がいつどこで起きるかを3～6時間以上に予報するのは極めて困難と言える。大きなスケールの場で霧が発生しやすい状況、つまり霧のポテンシャルが高い状況は表現できるので、ポテンシャルが低い状況から高い状況への変化は数値モデルで表現が可能である。しかし、こうした変化傾向の途中、地表面付近のいつどこで critical な飽和点を越えて霧になるかを予測するのが困難なのである。

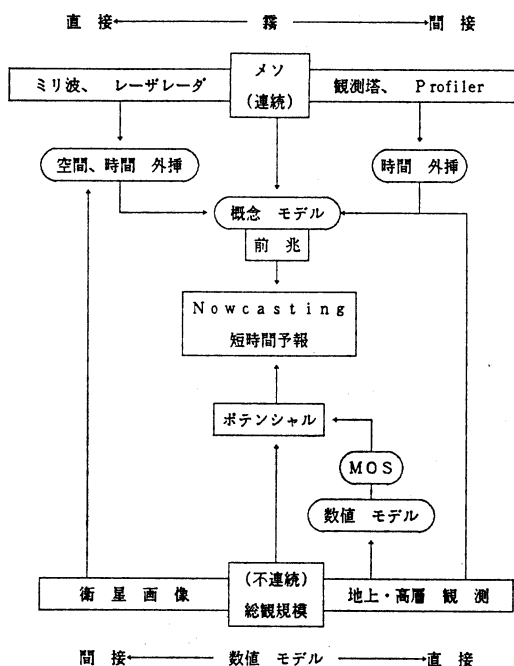
数値モデルで霧を予報した例としてイギリス気象局の狭領域モデルの計算結果を第8図に示す。斜線を付けた領域と×印が重なっていればよい訳だが、モデルでは主に東から南にかけての海岸に近い地域で霧が予報されていて大きなスケールで見ると実況と合っているが、個々の観測点では一致しない所が多くある。

5. 霧の Nowcasting

5.1 小さいスケールの霧の観測

霧の観測を一般的に考えるために、霧がその場所で発生する場合と他の場所で発生したものが移動して来る場合に分けて考える。

霧がその場所で発生する場合には、2-2節で述べた意味で、そこでの下層大気場の鉛直構造の把握が重要である。霧の移動や消散の予測のためにはミリ波レーダなどにより霧を直接観測することも必要だが、霧の発生を予測するためには霧が最初に発生することが多い場所に、例えば観測塔や profiler などを設置して気温や湿度それに風の鉛直分布を観測し、大気の成層状態の変化を連続的にモニターすることが重要となる。ゾンデなどでは連続観測が難しい。霧が発生するような時は普通安定成層をしているので、接地層より上の部分の気象要素の鉛直分布は小さいスケールの地表面の影響をあまり受けず、より大きなスケールの大気の状態を表していると考えられる。従って、接地層より上の情報は大きな変化傾向を知るのにも有効と考えられる。レーダなどによる霧の直接観測もこうした気象要素の変化と対応させて解析する必要がある。



第9図 霧の Nowcasting System におけるデータの流れと、種々の予報手段の関係。矢印がデータの流れを、楕円の中は予報手段を表す。

これに対し霧が観測点に移動して来る場合には、霧の塊やその前面の移動の様子、あるいは内部構造の変化をミリ波レーダやレーザーレーダなどで連続的に直接観測するのが重要で、これと概念モデルを基に時間的・空間的に外挿するのが予報の第一歩となる。霧の通り道が特定できればそこに視程計を設置してモニターするのも有効であろう。さらに、移流霧のように海上から陸上へと途中で消散しながら徐々に侵入して来る場合には、上記の霧がその場所で発生する場合と同様に、大きな変化傾向としての霧の侵入の前兆を知る目的から下層大気鉛直構造の時間変化の把握も重要である。

ここでミリ波レーダとレーザーレーダによる霧観測の特徴をまとめておく。ミリ波レーダは釧路での特別観測で用いられているが、普通の気象レーダより波長が短い分だけ小さな水滴まで見えるが、直径 $30\mu\text{m}$ 程度以上の霧粒が含まれていないと反射強度はほとんど期待できない。従って、釧路や根室など北日本の太平洋岸で発現する移流霧のように比較的大きな霧粒を含む霧ならよいが、放射霧のように小さい霧粒ばかりの霧は原理的に観

測できない。

レーザーレーダは反対に小さな霧粒はもちろんもっと小さなエアロゾルのような微粒子でも観測できるが、可視光線を用いる限り反射が大き過ぎてビームが霧の内部に透過せず結果として探知距離が短くなるとか、昼間は観測しにくいなどの問題がある。そこで、もう少し波長の長い赤外域のレーダを用いるのが最適と思われる(十文字, 私信)。

両方のレーダで問題となるのは陸上を観測する場合のグランド・エコーの影響であるが、十文字(1989)は海岸線から 7.5 km の距離にある陸上の観測点から海上を見るという条件で途中の陸上の霧を観測しているので、見晴らしのよい場所でまわりとある程度高度差があれば陸上でも観測可能である。

スケールの小さな霧を対象とする場合、衛星や通常の地上観測網は解像度から考えて発生のポテンシャルを知るための手段となる。

5.2 霧の Nowcasting System

Nowcasting には3-1節で議論した意味で連続的な観測と、概念モデルに基づいたリアルタイムの解析が必要である。

霧を対象とする Nowcasting System に関しては第9図を見て頂きたい。Nowcasting あるいは短時間予報を出すまでのフロー図である。上段にはメソスケールの霧を捕らえるための観測手段を、下段には総観規模の場や現象を捕らえるための観測手段を挙げてある。最上段と最下段にはそれぞれ霧と数値モデルに対して各観測手段が直接的情報を与えるのか間接的情報を与えるのかの区別が示してある。両者は逆の関係にある(4-2節の(2)参照)。また、上段の観測手段からはメソスケールの現象について空間的・時間的に連続な情報が得られるのに対し、下段の総観規模を対象にした観測手段からは当然不連続な情報しか得られない。

上段の観測手段から得られるデータは総観場の情報と合わせて概念モデルというフィルターを通し、4-2節の(1)で述べたようにして霧の変化に対応する前兆現象を抽出することで Nowcasting に利用できる。観測データを空間的・時間的に外挿して得られる結果もこれに加わる。

下段の観測手段はメソスケールの現象の変化に関するポテンシャルを与え、概念モデルの適用可能性についてのガイドラインとなる。

数値モデルは主に総観場の数値データを取り込んで数値データを予測する。統計モデルやパラメタリゼーシ

ンをもとにした凝結量予測などを通じて天気翻訳をした上で、メソスケールの現象をポテンシャルとして予測する。ポテンシャルはいつどこで現象が発生するかに関して、直接的ではないが確率的な情報として Nowcasting に利用できる。

6. まとめ

本稿で言いたかったことは次の点である：

- (1) 霧は水蒸気の飽和点近傍というある意味では特殊な条件下で、大気中の過飽和領域だけが可視化された結果であると考えられることができる。
 - (2) その結果、大気中の小さな変化が可視化される形で霧が発生したり消滅したりすることになり、霧は空間的にも時間的にも非常に激しく変化する。
 - (3) 霧の観測には直接性や連続性など、その与える情報の質に注目して能率の良い観測をする必要がある。
 - (4) その意味から霧のルーチン観測の現状は全く不十分である。
 - (5) 霧の概念モデルは色々な霧についてローカルな特徴を加味したものを組み立てるべきだが、観測データの蓄積が不十分で現状では難しい。
 - (6) 霧一般に適用できる概念モデルは：
 - ・鉛直方向には固有のスケールあるいは構造があるが、水平方向にはない
 - ・固有のライフサイクルはないが、日変化の影響は受ける
 などが考えられる。
 - (7) 数値モデルは天気現象に対して間接的表現であること、小さいスケールの表現の困難さ、混合比の変化に対する感度不足、などのため小さいスケールの霧についてはポテンシャル予報のみ可能である。
 - (8) 霧の Nowcasting あるいは短時間予報には概念モデルが必要となるが、モデルを有効に機能させるには種々のデータをその特徴に応じた種々の方法で加工してリアルタイムで使いこなすのが重要である。
- 以上の(5)以降の霧の概念モデルの組み立てから短時

間予報に到るまでには、ある場所の霧に関する直接的、かつ連続的情報を含む観測データの蓄積がまず必要である。そのためには、飛行場など特定の場所で観測塔やレーダなどによる継続した観測を実施することが第一歩である。ローカルな霧に関して今までほとんどなかった直接的、かつ連続的な“上質”なデータがリアルタイムで使えるのであるから、とにかく観測を開始すれば概念モデルの組み立て前であっても、何らかの単純外挿により今まで考えられなかったような予報が可能となる可能性が大きい。

7. 謝 辞

本稿の内容については、気象庁の立平良三氏、白木正規氏、及び西本洋相氏から有益なコメントを頂き、よりわかりやすくすることができたと思う。ここに記して感謝いたします。

参考文献

- 阿部成雄, 道本光一郎, 引地 功, 遠峰菊郎, 1989: 三沢飛行場におけるライダーを用いた霧の観測, 天気, 36, 643-649.
- Doswell, C.A., 1986: Short-Range Forecasting, Mesoscale Meteorology and Forecasting, American Meteorological Society, Cnap. 29, 689-719.
- Eyre, J.R., J.L. Brownscombe and R.J. Allam, 1984: Detection of Fog at Night Using Advanced Very High Resolution Radiometer (AVHRR) Imagery. Met. Magazine, 113, 266-271.
- Golding, B.W., 1987: Short Range Forecasting over the United Kingdom using a Mesoscale Forecasting System. Short- and Medium-Range Numerical Weather Prediction. Japan Meteorological Society, 563-572.
- 十文字正憲, 内山晴夫, 1989: レーザレーダによるやませ観測, 八戸工業大学紀要, 第8号, 44-56.
- 沢井哲滋, 1982: 霧の理解のために, 天気, 29, 731-747.
- , 1988: 釧路の海霧, 天気, 35, 555-566.
- 立平良三, 1986: 新しい天気予報, 東京堂出版, pp 186.
- 柳沢善治, 石原正仁, 沢井哲滋, 1986: ミリ波レーダによる海霧の観測, 天気, 33, 603-612.