

降水の確率予報

立平良三* 保科正男*

1. 降水の発生確率

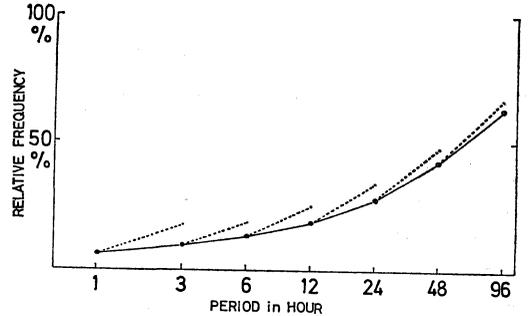
降水とは雨、雪、雹などの総称であるが、日本では雨の占める割合が大きい。降水の測定手段としては雨量計が一般的で、気象庁の地域気象観測網（アメダス）の雨量計は1mmごとにカウントする転倒ます型である。気象庁の降水量観測は大部分がアメダスに依存しているので、量的な予報業務の対象になりうるのは1mm以上の降水だけということになる。

確率の例として、サイコロの目がよく引合いに出される。どの目が出るかに関連する因子は複雑でとても予測できないが、特にどの目が出やすいという理由がなければ、1～6の目はいずれも同じ確からしきで出現すると考えられる。つまり1の目が出る確率は1/6と推定できる。

次に降水の発生する確率を考えてみよう。降水に関してはサイコロとは違って、その発生機構がかなり解っており、発生の確からしきが時間的地域的に変化する様子を予測することが可能である。これがつまり天気予報である。

降水の発生機構に関する情報が皆無でも、過去の降水の記録から経験的な降水確率を導くことはできる。これがいわゆる気候的な降水確率である。降水確率予報の解説に入る前の準備として、この気候的降水確率の実態を概観しておこう。

ある地点における降水確率を論ずる際には、まず時間の長さの指定が必要である。この指定された時間内のどこかの時点で降水があれば、「降水発生」とみなされるわけである。この時間が例えば1年とか1ヵ月というような長いものであれば、気候的降水確率は殆んど100%となり、意味がない。



第1図 都内の雨量観測点における気候的降水確率（10地点の平均値）。破線は引続く時間帯における降水発生が互いに独立と仮定した場合の降水確率。

そこで、数日以下の時間について、実際にどのように降水確率が減少して行くかを見よう。使用した降水データは次のとおりである。

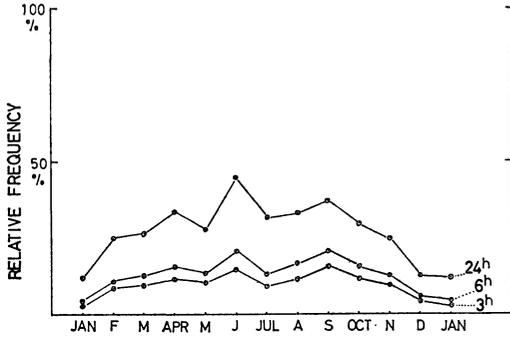
(1) 期間 1975年4月～1979年9月（4年半）の毎時降水量

(2) 地点 東京都内のアメダス雨量観測点（10地点）
以上のデータから各地点についての気候的降水確率が計算できるが、全地点の平均をとって図示すると第1図のようになる。時間が1時間に縮まると確率値も僅か6.2%に減少する。通勤所要時間は1時間程度であるから、この間に降られる確率は年平均で見れば6%程度ということである。しかし季節による変動はかなり大きく、約2%～10%程度の幅がある。

気象庁では、次節で述べるように6時間きざみで降水確率を予報する計画であるが、この場合の気候的確率は年平均で13.5%、季節変化は第2図のように約5%～20%程度の幅である。

1時間よりもっと短い時間内の降水確率がどのようになっているのかについても興味はあるが、自記紙を解

* Ryozo Tatchira and [Masao Hoshina, 気象庁予報部。



第2図 都内の気候的降水確率の季節変化 (10地点の平均値). 上よりそれぞれ24時間, 6時間, 3時間内の降水確率を示す.

析しなければならないので, ここでは割愛した.

2. 降水発生の時間的相関

3時間内のどこかで降水が発生する確率 P_3 と, その3時間を構成する各1時間内に降水が発生する確率 P_1 との関係は, 降水の特性によりさまざまである.

降水が一度発生したら長時間持続する特性を示すとき, つまり相関の高いときは,

$$P_3 \approx P_1 \tag{1}$$

逆に, ある1時間内の降水の有無が引続く1時間内の降水の発生と無相関ならば, 確率の定理により,

$$P_3 = 1 - (1 - P_1)^3 \tag{2}$$

さらに, ある1時間内に降水があれば, しばらくは降水が発生しにくいという降水特性, つまり逆相関のときは,

$$P_3 \approx 3P_1 \quad (P_1 \ll 1 \text{ の場合}) \tag{3}$$

つまり, 降水の特性によって P_3 は $P_1 \sim 3P_1$ の間の特定の値をとるわけである. 第1図で P_1 は6.2%(0.062)であるから,

- 正相関の場合 $P_3 \approx 6.2\%$
- 無相関 " $= 17.5\%$
- 逆相関 " $\approx 18.6\%$

実際の P_3 は9.9%であるから, 現実の降水現象はかなり正相関的な性格を持っていることがわかる. 事実, 引続く1時間内の降水の有無について相関をとると, 相関係数で約0.6程度の値が得られる(東京, 暖候期).

同様な計算は3時間, 6時間など, もっと長い時間の降水確率についても行うことができる. 3時間と6時間の降水確率を例にとると,

$$\text{正相関} \quad P_6 \approx P_3 = 9.9\%$$

$$\text{無相関} \quad P_6 = 2P_3 - P_3^2 = 18.8\%$$

$$\text{逆相関} \quad P_6 \approx 2P_3 = 19.8\%$$

実際の P_6 は第1図に示されているように13.5%で, やはりかなりの正相関がある. 48時間や96時間になると, 実際の降水確率は無相関の場合に非常に近くなるが, それでも僅かながら正相関の傾向が残っている(第1図参照).

3. 降水確率の予報

前節までに取扱ってきたのは降水発生の気候的な確率である. 降水確率を予報しようとする場合, 何も他に情報がなければこの気候的な降水確率を発表する他ない. しかし実際には各種の天気図や数値予報などの資料があるので, その状況に応じて気候的降水確率を増減することができるわけである. 顕著な低気圧が接近しつつあるような時は100%近い降水確率が予想されようし, 逆に冬型の気圧配置が見込まれるとき首都圏の降水確率は殆んど0%と予想されよう.

前節で述べたように降水確率を扱うときには, まず時間の長さを指定する必要がある. 気象庁の計画では6時間きざみの降水確率を予報することになっているが, これは実用的見地から決められたものである.

今の短期予報技術では6時間きざみの降水確率の場合, いつも100%近い値で予報できるわけではないが, それでも平均して50%近い水準に達している. この程度なら実用的に見て使いにくいということはなさそうである. もっと時間きざみを細かくして, 例えば1時間きざみにすると, 時間的にきめ細かくはなるが, 雨のときでも平均すると15%程度の確率値しか予報できず, かえって利用しにくくなる.

現在の予報技術というものは, 気候的降水確率を2~3倍程度高める働きをするものであるから, 1時間きざみの気候的降水確率が第1図のように6%程度しかなければ, 降水確率予報もごく小さい値に押えられてしまうわけである.

確率予報は降水の有無についてだけではなく, 例えば大雨の有無とか雷雨の有無などについても実施が可能である. 大雨の定義を「3時間に30mm以上」とすると, 東京(大手町)において6時間内に大雨の降る気候的確率は暖候期でも僅か0.2%程度である. これを予報技術によって引上げたとしても, せいぜい数%程度の大雨確率予報となり, 甚だ利用しにくい.

大雨の気候的確率を大きくする実用的な方法として,

気象庁では予報領域を広げることで対処している。日本を第3図のように7区域に分割し、それぞれの区域内のどこかで大雨(30mm/3hr)が発生する気候的確率ならば暖候期には15%程度に達する。これを予報技術によって数倍まで引上げれば実用上使いやすい大雨確率予報が出せるわけである。

4. 確率予報のメリット

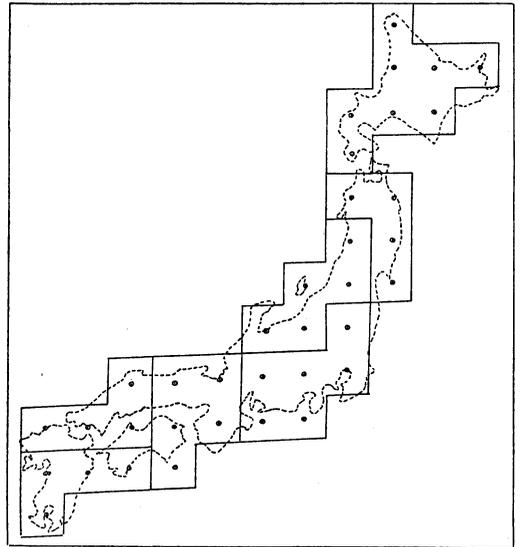
一般に天気予報を利用する際にはその精度をよく理解しておく必要がある。東京都の明日の天気予報の成績は、気象庁の自己採点によると年間平均80点程度である。終戦後の75点程度に比べて着実に向上はしているが100点に達する道は遠くわしい。当分は外れる可能性もあることを見込んで天気予報を利用しないと、かえって損害を被ることもある。

明日の天気予報に雨が降っているとき、実際に雨がふる率は約60%である。つまり「明日は雨」という予報は実は「明日、雨の降る確率は60%」ということなのである。しかしこの60%というのは平均の確率であって、場合によっては100%近い確からしきで「雨」と予報できるときもあるし、五分五分に近いときもある。だから日々の予報に降水の確率を付けるようにすれば便利であろうというのが確率予報の発想である。

天気予報の利用のされ方は多様で、予報の利用価値を見積ることは容易でない。そこで簡単なモデル化による考察がしばしば行われている。この種の調査の結果によると、一般に確率予報の利用価値は、殆んどすべての種類の利用者にとってカテゴリー予報より大きいことが示されている¹⁾。また米国における実際の予報に適用した調査によると、従来のカテゴリー予報を確率予報に変えることによって生ずる利用価値の増大は、確率予報と完全適中予報との差に匹敵するという結果が得られている²⁾。

これらの調査はいずれも、降水に対する対策費(C)と、対策をとらなかったために生ずる損失(L)との比C/Lを指数とした解析である。要するにC/Lと降水確率の予報値の大小関係によって、対策をとるかどうか判断すれば、最も効率的な対応がとれるということである。C/Lは降水確率と同様に、0~1の値をとるものと考えてよい。

具体的な例として、Cを傘を用意する費用としよう(持運びの不便さも含めて)。Lは傘なしで雨に遭った場合の損害である。Lは老幼年やドレスアップした人にと



第3図 大雨確率を予報する場合の地域区分。

ってはかなり大きく、カジュアルな若者にとってはごく小さいだろう。つまり、

ドレスアップ 老幼年	} →L 大→C/L 小	小さな降水確率 でも傘を持つ
カジュアル 青壮年	} →L 小→C/L 大	大きな降水確率 のときだけ傘を持つ

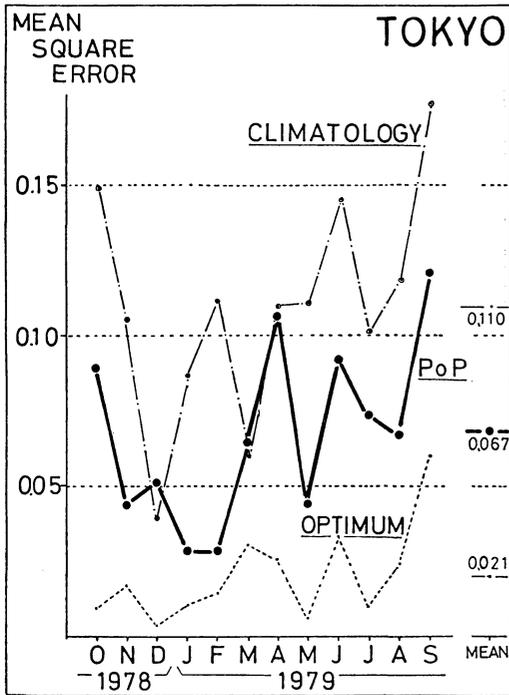
これは単なる一例で、降水による損害は色々な形態がありうるし、またそれに対する対策もさまざまである。しかしそれぞれのC/Lを推定して、降水確率との大小で対策をとるかどうか判断すれば効果的なことは明かである。カテゴリー予報ではこのようなきめ細かい対応は不可能なのである。

5. 確率予報の精度

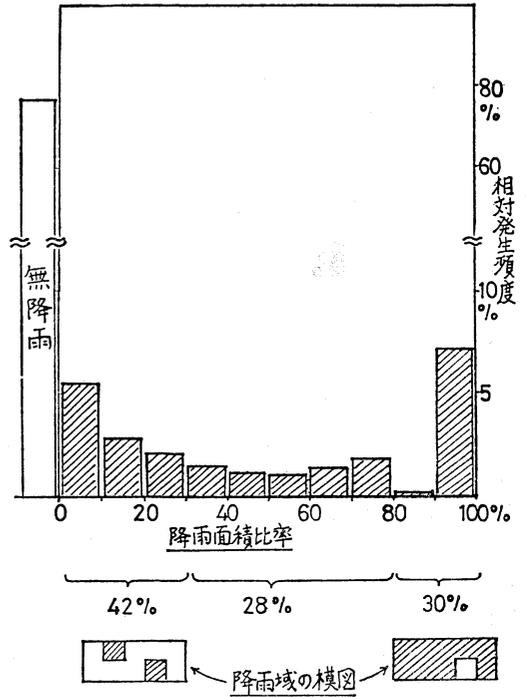
確率予報の精度の評価には、平均平方誤差(Mean Square Error)が使われることが多い。確率予報値 P_{FCT} に対して実況値を P_{Obs} とすると、

$$MSE (\text{Mean Square Error}) = \overline{(P_{FCT} - P_{Obs})^2} \quad (4)$$

実況値としては降水があるかないかの二通りしかないので、 P_{Obs} は1.0または0.0の値をとる。実際的には降水確率予報は府県単位に発表される計画なので、その場合の精度の評価は、府県内の各雨量観測点について(4)式でMSEを計算し、それらを更に平均することによって得られる。米国では確率予報のMSEを、提案



第4図 東京都の降水確率予報(PoP)の成績。都内の10観測点についての月平均の Mean Square Error で表現してある。比較のため climatology 予測と optimum 予測の成績も記入してある。climatology 予測とは、暖候期(4月~9月)および寒候期(10月~3月)の気候的降水確率を毎日の予測値とするものである。



第5図 東京都内における6時間降雨量の面積比率の頻度分布(1974年11月~1978年4月)。

者の名を付けて Brier Score と呼ぶことがある³⁾。

天気予報の精度の評価を直観的に解りやすくするには、単純かつ基本的な技術による予報を同じ手法で評価したものと比較するとよい。降水確率予報の場合は、いつも各季節の気候統計によって得られた降水頻度を予報する、いわゆる気候的予報の MSE を計算し、これを何%減少できたかによって精度を表現することが多い。この評価法では、米国でも日本でも約30%程度の改善(減少)が達成されている。

第4図は1978年10月(Oct.)から1979年9月(Sep.)までの1年間について、東京都の降水確率予報の成績(Mean Square Error)を月毎に平均したものである⁴⁾。中央の太線が降水確率予報(PoP: Probability of Precipitation)の MSE であるが、比較のため、気候的予報(climatology)の成績も細線で記入してある。月毎に変動はあるが平均して PoP は climatology よりかなり

誤差が少なく、改善率は年平均で見ると、

$$(0.110 - 0.067) / 0.110 = 0.39 \dots 39\% \quad (4)$$

第4図の PoP は実は MOS 方式でコンピューターに計算させたもので、実際には最終的に予報官による補正によりもう少し精度が上がるものと思われる。MOS 方式については次節で説明する。

東京都の1年間の6時間雨量を統計した結果によると、東京都のほぼ全域(80%以上)で雨が降る回数は全体の30%にしか過ぎず、逆に都内の所々(30%以下)で降る場合は42%にも達する(第5図参照)⁷⁾。例えば都内の30%の領域で雨が降るようなとき、降水確率予報は、「30%」と発表するのが最適(optimum)と考えてよからう。しかしこの optimum 予報でも誤差は0%ではない。つまり雨の降った30%の領域に対しては100%と予報すべきであったのだから、誤差は70%(0.7)と評価され、降らなかった70%の領域では誤差30%(0.3)と受取られる。面積の重みをつけて東京都全体の平均自乗誤差を計算すると、

$$0.7^2 \times 0.3 + 0.3^2 \times 0.7 = 0.21 \quad (5)$$

このような方法で optimum な確率予報の平均自乗誤差(MSE)を月毎に計算しプロットしたのが第4図の点線

である。月によって大きく変動し9月 (Sep.) の optimum などは寒候期の PoP を上廻るほどの誤差になっている。

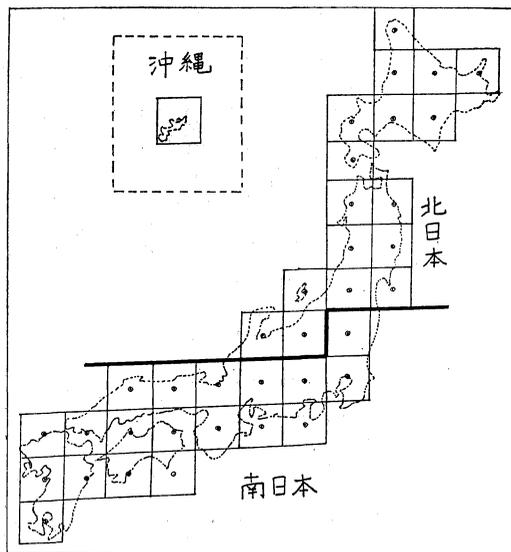
optimum 予報の MSE は、降水面積比率が50%のとき最大 (0.25) となり0% (無降水) と100% (全域の降水) のとき0になることは容易にわかる。第4図の9月のように optimum の MSE が大きいのは、都内に部分的に降る雨が多かったことを物語っている。

optimum の MSE が大きい季節には、仮に最適の確率予報が出されたとしても、各地域の住民に対しては「予報がかなり外れた」という感じを与えていることになり、この辺に天気予報への苦情の一因がある。東京都一本の予報ではなく、地域細分した予報を発表すればこの問題点は解決できるが、目先数時間ならともかく、12時間先とか24時間先の予報ではとても無理である。テレビの天気予報を見ても、府県を細分するどころか、東京、神奈川、埼玉などはかなり似通った予報になっていることが多い。

気象庁から発表される注意報や警報は、主として目先数時間内の烈しい気象現象についての警戒を呼びかけるもので、最近のレーダー、地域気象観測網、気象衛星などのいわゆるメソ観測網の整備により府県を細分した表現が可能になってきた。しかし、もっと先の予報となると特殊な場合を除き当分は府県単位の発表を原則とせざるをえず、従って最良の予報でも「外れた」と受け取られる事態は簡単には解消しない。

6. 降水確率の予測手法

降水確率の予報値は最終的には予報担当者の判断により決定されるが、判断のガイダンスになる確率値が客観的自動的に計算され、予報担当者の判断を支援している。このガイダンスは Model Output Statistics (略称 MOS) と呼ばれる手法によって計算されている。この MOS 手法は米国でまず実用化され、降水確率だけな



第6図 MOS方式の降水確率ガイダンス (PoP) の地域区分。

く各種の天気現象の予測に利用されている⁵⁾。

MOS 手法を簡単に説明すると、次のようなことになる。

- (1) 各格子点における数値予報の計算結果 (output) と格子点のまわりの降水実況との対応を統計的に処理して、output から降水確率を推定する式を導いておく。
- (2) ルーチンの数値予報の計算が終わったら、予報時間に対応する output の値を式に代入して降水確率の予測値を計算する。

気象庁では、6層プリミティブモデルの output を potential predictor としてスクリーニング手法で降水確率を推定する重相関1次回帰式を導き、これを使って各格子点の降水確率を予測している。

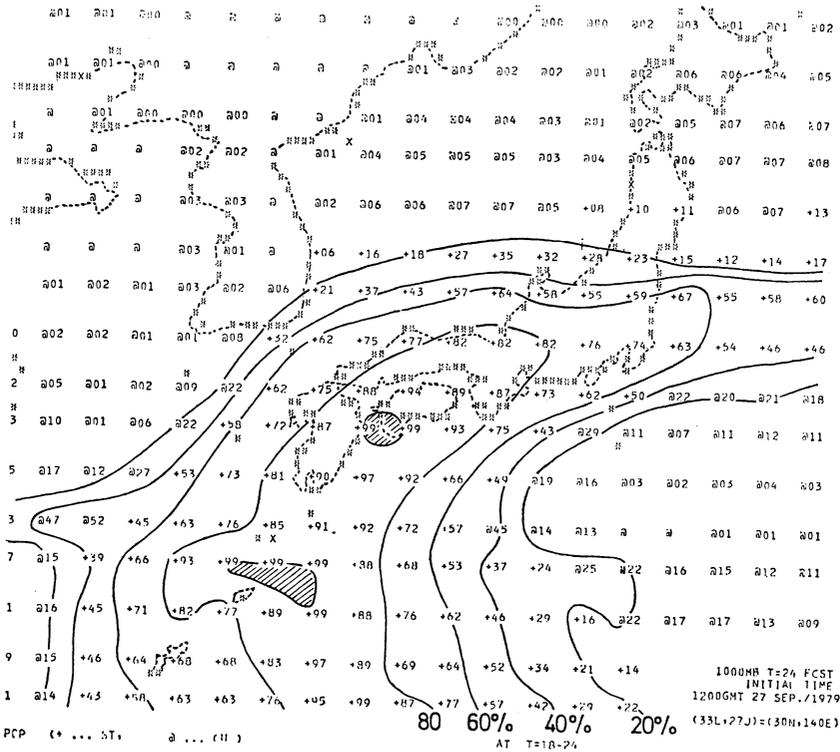
output は約 130 km 間隔の格子点に出力され、日本全国は第6図のように37の格子点でほぼカバーされる。

第1表 MOS方式の降水確率ガイダンス (PoP) の予測因子 (南日本, 暖候期)

降水の型	第1因子	第2因子	第3因子	第4因子	第5因子	重相関係数
層状性	DWL (30%)	$\overline{\omega^*_{900}}$ (23%)	$\overline{T^*_{700}}$ (20%)	NE ₃₀₀ (14%)	$\overline{Q \cdot V}$ (13%)	0.720 (従属データ)
対流性	DWL (30%)	$\overline{\omega^*_{900}}$ (21%)	\overline{OGR} (8%)	VOR ₈₀₀ (22%)	$\overline{T^*_{600}}$ (19%)	

因子の記号の説明 (添字は等圧面を示す)

DWL: 相対湿度85%以上の湿潤層の厚さ, VOR: うず度, OGR: 地形性降雨指数, ω : 上昇流, Q: 比湿, |V|: 風速, T: 気温, NE: 風の北東成分, $QV: \sum_i Q_i \times |V_i| \times \Delta P_i$



第7図 MOS方式の降水確率ガイダンス (PoP) の例. 1979年9月27日21時を初期時刻とする. $T=18\sim 24$ の予測 (28日の15~21時の間に降水が発生する確率). +および@は数値予報の格子点を示し, それぞれ降水の型が層状性あるいは対流性であることも意味している.

降水の場合は風や気温と違って毎日発生するわけではないので, データ不足を補うため, MOS予測式をメッシュ毎に作成せず, 第6図のように北日本, 南日本, 沖縄の3地域毎に共通したものを導いている.

南日本の各メッシュに対するMOS予測式に含まれるpredictor (予測因子) を第1表に示す. 対流性と層状性の判定はやはりMOS方式の予測式により決定し, そのあとそれぞれ別の予測式によって降水確率の値が計算されるわけである. 予測因子の説明を見ても解るように, 数値予報のoutputをそのまま使うのではなく, 次のような各種の事前処理がなされている.

- (1) 数値予報のoutputには細かいノイズが重畳している場合があるので, 周囲の格子点を含めた9点平均値も予測因子としている (—の付いた因子).
- (2) 降水確率との関係が1次的でない予測因子についてはその2次の項も含めている (*の付いた因子).
- (3) 各種のoutputを組合せ, 降水発生に直接関連す

ような合成予測因子にして使用する. 例えばOGRやDWL, また第1表にはないがBBM (ブラックボックス指数) などがこれに相当する.

気象庁の数値予報 (6層, プリミティブモデル) は1日2回, 09時と21時を初期時刻として24時間先まで計算されている. MOS方式のガイダンスの計算には6時間毎の計算結果が用いられている. 6時間きざみの降水確率の場合は, その期間の始めと終りの時刻のoutputを平均したものを予測因子とし次の予報期間の予測値が出力される.

- 初期時刻後 6~12時間 ($T=6\sim 12$)
- // 12~18時間 ($T=12\sim 18$)
- // 18~24時間 ($T=18\sim 24$)

第7図は1979年9月27日21時を初期時刻とする $T=18\sim 24$ の予測で, 28日の15~21時の間に降水が発生する確率の分布を示している. 予報担当者はこれから担当府県の降水確率を読みとり, 補正を加えて発表するわけで

ある。

第7図を見てわかるように、一つの格子点の代表する領域は一般に府県よりも大きく、これをガイダンスとして発表する降水確率予報も府県単位がせいぜいである。しかし地形効果が卓越するような特殊な場合には、府県内の地形に着目して府県を細分した予報の発表が可能であるが、季節風の雪のほかはその頻度は小さい。

7. あとがき

予報を確率的に表現すればその利用価値が著しく増大することは疑問の余地がないように思われる。しかしこれはあくまで利用者が確率値に対応して最適な行動をとることを前提としての話である。これまでのカテゴリー予報に慣れた利用者が確率予報を使いこなすにはかなりの準備期間を必要としよう。しかし、とにかく確率予報が発表されていなければその利活用についての具体的な検討はむずかしいのではないかということで、気象庁では今年の6月から試験的に確率予報を始めることにした。

具体的には、毎朝の東京地方の天気予報につづけて、「午後3時～9時の間に雨の降る確率は～%」という形になる。これは前夜21時をイニシャルとする数値予報から導かれた $T=18\sim 24$ のガイダンスをもとにし、予報官の補正を加えて発表されるわけである。このテストに対する利用者の反響を参考にしながら、今後の確率予報のあり方を考えてゆくことになろう。

確率予報は降水に限らず雷や風、気温などの気象現象についても可能である。また降水を扱うにしても、単に

降水の発生する確率だけではなく、ニーズに応じて指定された降水量以上が降る確率も予報することができる。予報期間についても明日・明後日までのいわゆる短期予報に限らず、週間予報や長期予報の発表形式としても効果的と考えられる。今後、確率表現はそのメリットが認識されるにつれて、各種の予報に取り入れられるようになる。なお確率予報全般についての文献や経済効果については安田(1979)⁶⁾を参照すると便利である。

終りにあたり、降水確率予報の実用化に協力いただいた気象庁予報課短期予報担当の諸兄に謝意を表したい。

文 献

- 1) Murphy, A.H., 1977, The Value of Climatological, Categorical and Probabilistic Forecasts, *Mon. Wea. Rev.*, 105, 803-816.
- 2) Thompson, J.C., 1962: Economic Gains from Scientific Advances and Operational Improvements in Meteorological Prediction, *J. Appl. Met.*, 1, 13-17.
- 3) Brier, G. W., 1950: Verification of Forecasts Expressed in Terms of Probability, *Mon. Wea. Rev.*, 78, 1-3.
- 4) 饒村 曜, 1980: PoP の精度の地域差, 研究時報, 印刷中.
- 5) Klein, W.H. and H. R. Glahn, 1974: Forecasting Local Weather by Means of Model Output Statistics, *Bull. Amer. Mer. Soc.*, 55, 1217-1227.
- 6) 安田敏明, 1979: 気象業務の経済効果と確率予報, 測候時報, 46, 211-219.
- 7) 立平, 保科, 1978: 「所によって一時雨」をめぐって, 測候時報, 45, 191-193.