

雨の短時間予報

竹村 行雄*

1. はじめに

アメダスや気象衛星など、最近テレビや新聞で目にする気象情報は、一昔前と比べると隔世の感がある。毎年のように繰り返されるように見える気象災害も、調べてみると観測や予測システムの進歩と気象への理解の深まりにつれて次第に変化しつつある^{1,2}。

人類が日々の天気変化や嵐をもたらす気圧配置の実態について理解を得たのは高々150年前のことである。無線通信の始まりと共に広い地域の気象観測データが即時的に集められ天気図が描かれるようになって、次第に大気の構造が明らかにされ、日々の天気予報が出されるようになった。最近では計算機技術の発達により、世界の主だった国々では超高速計算機を使い、物理方程式に従って大気の3次元状態を全地球規模で解析し、数日ないし1週間程度先までの気圧、気温や風などの予測を行うことが主流になっている。このような予測の方法を数値予報と呼んでおり、予報官は数値予報の出力した気圧場などの結果から晴れや曇りなどの具体的な現象の予報をしている³。数値予報は、世界各国で技術改善が競われ、天気予報に欠かせないものとなっているが、現在最新鋭の計算機を使っても予測のために必要な計算量が膨大になるため、計算機的能力上の制約から分解能は100~200 km程度であり、取り扱える物理過程^{*1}も制限されて、主として高・低気圧や前線など全般的な気圧配置の予報に役立てられている。

しかし、我々の日常生活に大きな影響を与え、時には大きな災害を引き起こす降水現象^{*2}は、高・低気圧など天気図上に示される現象に比べてはるかに局地性があり、短時間に変化することが多い。第1図は、昭和42年12

月、冬型気圧配置がゆるみ日本全体が移動性高気圧に覆われたとき(第1図-(1))、新潟県内で調べられた天気の分布である(第1図-(2)⁴)。1つの気圧配置に対して、1県内でもこれだけ多様な天気が出現する。これを簡単な言葉で表現するとすれば、「晴れたり曇ったり、所によって雨または雪」とでも説明する他はないであろう。

また、最近の大雨災害の発生状況の調べによれば、その70%は短時間の大雨がかかっている⁵。短時間の大雨は、防災活動や避難のための時間的余裕が少ないことから一層被害を出し易く、社会的経済的な関心が高まってきた。天気予報は、天気図解析をもととした従来の天気予報(総観予報)から、次第に大局的な気圧配置などの予報に基づく1日ないし数日以内の現象を対象とする短期間予報と、数時間以内に激しく変化し規模も小さな現象をきめ細かく予報する短時間予報に区別して考えられるようになってきた。

2. 降雨のメカニズム

日々の生活に影響を及ぼす大気の運動を調べると第1表に示すように様々な規模(スケール)の現象が重なり合っている⁶。それぞれの現象は特有の運動法則と空間・

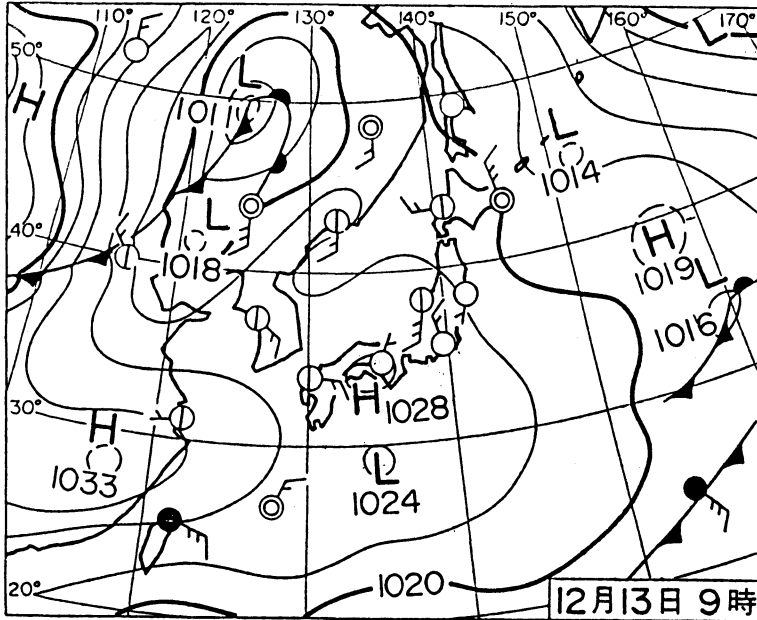
第1表 大気運動の大きさと持続時間

	大きさ	時間
超長波	10 ⁴ km	10日
高低気圧	10 ³ km	数日
前線・熱帯低気圧	10 ² km	数日
下層ジェット・雷雲群	10 ¹ km	1~数時間
雷雲・晴天乱流	1 km	10分~1時間
竜巻	10 ⁻¹ km	10分
つむじ風・風の息	10 ⁻² km	1分

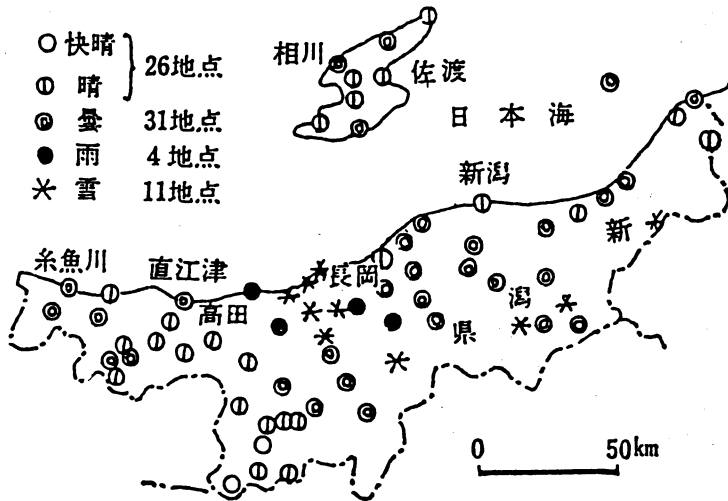
* Yukio Takemura, 気象予報課

*1 物理過程とは、大気内の現象を分解して物理学的に表現できる一連の運動、またはその取り扱い方法。例えば、断熱過程、放射過程など

*2 降水とは、雨、雪、ひょうなど、空気中から凝結し地上に降るものを総称している。



(1)



(2)

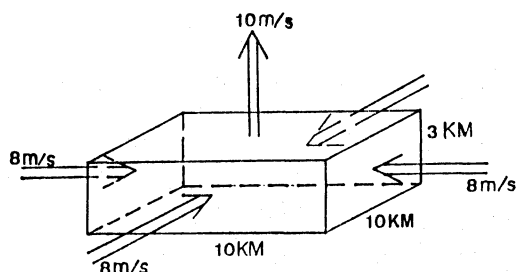
第1図 気圧配置と天気分布 昭和42年12月13日午前9時

(1) 地上天気図

(2) 新潟県内で調べられた天気の分布

時間スケールを持っており、相互に影響を及ぼしながら変化していく。前に述べた数値予報が対象とする現象は、分解能からいって数 100 km から 1000 km 以上のものとなり高低気圧や前線の配置が主となる。

降水現象は、大気運動により水蒸気を含んだ暖かい空気塊が上昇することにより起きる。上昇流が強ければ強いほど激しい雨になり、災害を引き起こすような1時間に 50~60 mm の大雨は 10 m/sec 程度の上昇気流が必



第2-(1)図 上昇気流と水平の気流の見積り

要で、ときには 30 m/sec に達することがある。

上昇気流があると、それを補うために周辺から空気の流入(収束)が必要である。この上昇気流の水平の広がりがある10 km とすると周辺からの流入速度は第2-(1)図のように 8 m/sec 程度ですむが、100 km の広がりであれば 80 m/sec になる。このように水平の大きさに比例して周辺からの流入速度は大きくなる必要があり、大雨をもたらす強い上昇気流の水平の広がり数が10 km を超えると、現実にはあり得ないような風が必要となってしまう。大雨が数10 kmの比較的狭い地域に局在し、「集中豪雨」*3 などと言われることが多いのは、このように必然性がある訳である。

降雨のもととなる水蒸気は、主として太陽の日射により海面から蒸発してできる。日射のエネルギーがすべて水の蒸発に用いられたとすると、平均して1日 10 mm 程度の降雨に相当する蒸発量である*4。また空気中の水蒸気のうち凝結して地上に落下する量(可降水量)はやはり数 10 mm 程度の雨量に相当する。1日に数 100 mm の大雨は周辺の広い地域から水蒸気を集めていることになり、もし集めることができなければ数10分程度で終わりになる。つまり大雨は広い地域から集められた水蒸気が数 10 km 程度の狭い地域に次々と補給され上昇気流が維持されるとき発生することになる。

大雨は強い上昇気流によって水蒸気が大量に凝結することによって起きる。上昇気流はこのとき発生する水蒸気の潜熱により空気が暖められ、生じる浮力により維持される。この上昇気流は周辺から大量の水蒸気を含んだ空気を吸い込み、引き続き上昇気流となって大雨を降ら

せ潜熱を放出する。集中豪雨が何時間にもわたって持続するかどうかは、上昇気流に伴って周辺から流入する空気塊が、上昇気流を維持するに十分な水蒸気(潜熱)を供給できるかどうかにかかっている。

集中豪雨が梅雨前線の近くで発生することが多いのは、前線に向かって非常に暖湿な空気を吹き続かせる場(気圧配置)を提供することと、前線が停滞性であり特定の場所に大雨を降らせる機構を留まらせることによる。

3. 観測網の整備

狭い地域に集中し、数十分で変化する大雨を捕らえるには、それに見合っただ空間的にも時間的にも充分密度が高く速報性のある実況監視・予測処理システムを必要とする。

雨量観測装置としては、地上に設置した雨量計がポピュラーであるが、最近レーダーや気象衛星など、リモートセンシング(遠隔測定)を基礎とする観測機器が取り入れられるようになってきた。雨量計は簡単な機構をしており、比較的安価に設置できると同時に安定した測定が可能である。ただ即時的な全国観測網を構築するためには、多数の観測点を通信回線で結び、集めたデータを集中管理するセンターが必要になるなど、全体的費用は必ずしも安価にはすまなくなる。

これに対し、レーダーは、1観測点で数 100 km の広い範囲を、数 km の程度の分解能で立体的に観測できることから、一つ一つの観測所の設置費用は高くとも全体的な費用は比較的安価に上げることができる。

気象衛星については、台風や低気圧などを広い範囲で即時的に捕らえることができる非常に優れた能力を持つシステムであるが、直接観測の対象としているのは可視光や赤外線で見える雲粒(雨粒と区別される)であり、現在これから降水量を定量的に見積もるための研究が進められている処である⁷⁾。

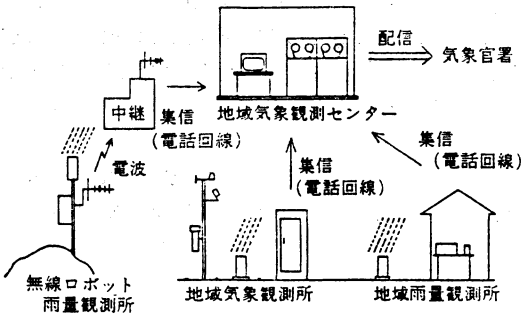
以下に簡単にアメダスとレーダーの紹介をしてみよう。

(1) アメダス

昭和46年の電電公社の電話回線網の一般データ通信への開放を契機に、気象庁は第3-(1)図のような自動気象観測網を計画した。これをアメダス(AMeDAS: Automated Meteorological Data Acquisition System: 地域気象観測システム)と呼んでいる。アメダスは自動化された観測所を電話回線で結び、中央(アメダスセンター)

*3 集中豪雨は、強さについてはっきりとした定義はないが、昭和28年8月15日の新聞報道に使われたのが最初と言われている。

*4 例えば東京で5月の平均日射量は、1日当たり約400 カロリー/cm² であり0.8グラムつまり8 mm に相当する蒸発量となる。



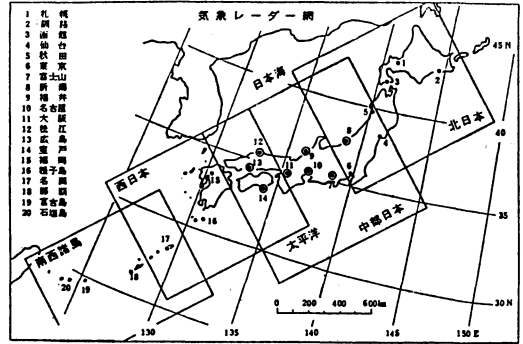
第3-(1)図 地域気象観測システム (アメダス)

雨量 観測所	約1320カ所
風 観測所	約 840カ所
気温 観測所	約 840カ所
日照 観測所	約 840カ所
積雪深観測所	約 220カ所 (展開中)

の電子計算機で集中的にデータの集配信と集計の処理を行う。昭和49年にはまず全国の1300余地点で降水量(雪ひょうなども融かして雨量に換算したもの)観測の部分が完成し、更に昭和54年には、このうち840余地点について風、気温、日照を加えた気象観測所への格上げが完成した。また雪観測についても、豪雪地帯を中心に220余地点の積雪深観測所の展開が進められ、昭和61年10月現在182地点が完成している。

アメダスの観測密度は、降水量が17km²平方に1カ所、風・気温・日照が21km²平方に1カ所となっている。これらの観測データは、平常時には毎正時の値が自動的に収集・集計され約10分後までに気象官署や一般の利用機関に配信される。また異常気象時などに必要な場合には、随時新しい観測データを照会することが可能である。アメダスは全国的な実用観測システムとしては世界随一のものとして知られており、細かな地域気象の監視体制は大きく改善された。

アメダスはもともと、水平の広がり数10km、寿命(発生してから消滅するまでの期間)数時間のメソスケール(中規模)と呼ばれる気象現象を観測・予測し事前に警告することを目標に設計されたものであり⁹、この目的のために大きな成果をあげている。しかし日常実際に経験する雨の中には、雷雨などのように水平の広がり数kmで、アメダスが対象とするものよりも更に小規模の現象によるものがしばしばある⁹。雷雨のような小規模現象の観測には、少なくとも数km²平方に1カ所またはそれ以上に密な観測網が必要となろう。しかし例え



第3-(2)図 レーダー観測網

◎で囲った地点は昭和61年3月現在デジタル化されているもの。63年3月までに更に4、5番のレーダーがデジタル化される。各四辺形は合成図として配布される4つの地域図の範囲。昭和61年3月現在、中部日本図と西日本図が作成されている。

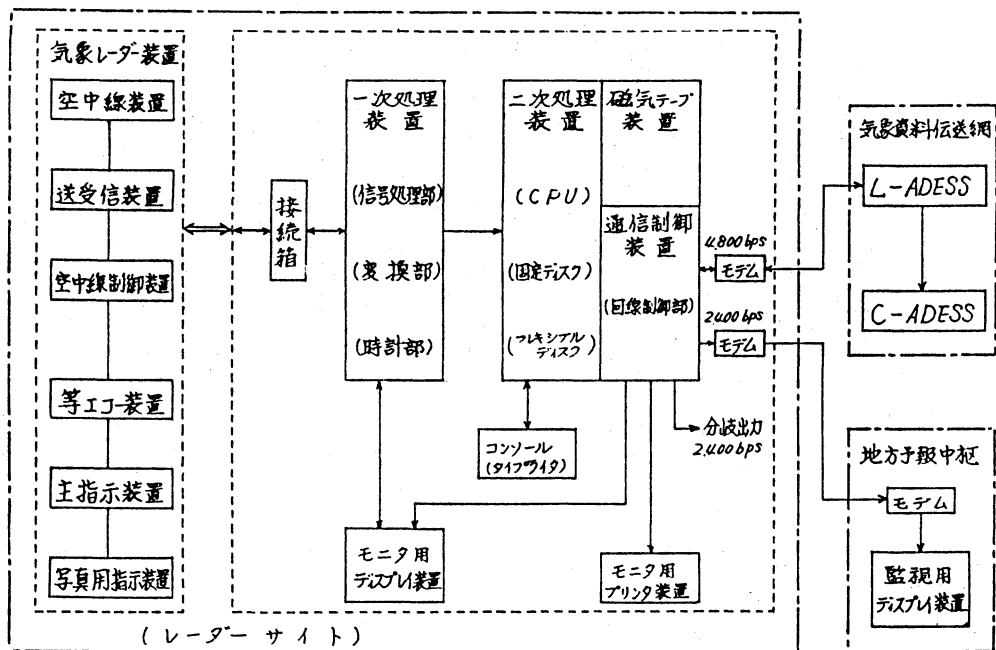
ば雨量観測については、地上の観測所の数をアメダスの約4倍の8km²平方に1カ所程度の密度で設置した場合、一つの降雨事例について、±25%以内の雨量値を得る観測所の数はやっと50%程度であり、更に約300倍の1km²平方に1カ所までふやしても±10%程度のばらつきがあることが報告されている¹⁰。このように地上観測所の数を増すことは、維持・管理面等で観測密度に比例して経費が膨大なものになることは当然として、観測データの代表性など効果の面からも限界がある。

(2) 気象レーダー

気象レーダーはおよそ300km範囲内の降水の位置・強さなどを1~数kmの高分解能で把握でき、移動や変化の様子なども即時連続的に捕らえられるという優れた特性をもっている。

気象庁は昭和20年代から気象レーダー網の整備を進め、全国に20カ所の観測所を設置し(第3-(2)図)、台風・大雨・雷雨などの発見や追跡に利用してきた。しかしレーダーは、観測の原理が降水粒子からの電波の反射を測定するというリモートセンシングに基づくことから観測精度上一定の誤差が避けられないこと、山や地物からの反射エコーなど降水以外の情報が重なること、膨大な情報量の処理・伝送の難しさなど、様々の困難のため、従来アメダス等の地上観測網を補って雨域の定性的把握に利用されてきた。

しかし、昭和50年代にはいって、レーダー利用上最大の難点である山岳など地形反射エコーの除去がデジタル技術の進歩により可能となり¹¹、アメダス・気象衛星な



第3-(3)図 レーダーエコーデジタル化装置の構成

レーダーエコーデジタル化装置はミニコンピュータよりなり、既設の気象レーダー本体に付加され、本体を制御し、受け取った情報を処理編集して、利用者向けに伝達する。

ど他の観測データや予測資料と組み合わせたレーダー情報の高度利用の展望が開けてきた。

気象庁は大量データの高集信処理・計算機による高度処理・電話回線等による利用者への比較的簡便な手段による提供などを目的として、昭和56年以来、以下のようなレーダーエコーデジタル化計画¹²を推進している。即ち、

- ① 既設レーダー装置本体にレーダーエコーデジタル化装置を付加し、観測を即時自動化して、観測データを計算機処理可能な形とする。
- ② 得られた情報を中央の処理システムに集める。
(必要な場合はそのまま利用者にも提供する)。
- ③ 集められた情報は、アメダスやその他の観測データなどと組み合わせて高度処理する。
- ④ 結果を、気象官署と防災関係機関や一般の利用者に提供する。

というものである。

昭和62年3月現在、レーダーデジタル化は第3-(2)図の富士山、新潟、福井、名古屋、大阪、松江、広島、室戸岬、福岡、種子島の10レーダーで完成しており、62年度中には仙台、秋田のレーダーも完成する予定である。

(3) レーダーエコーデジタル化装置の信号処理^{13,14}

第3-(3)図にレーダーエコーデジタル化装置によるデータ処理系統を示す。気象レーダー装置本体は、デジタル化装置の制御を受け、予め定められた手順にしたがって一定時間間隔でアンテナ仰角を変更しながら自動運転され、得られた映像情報は一次処理装置・二次処理装置を経て必要な情報種目に編集され通信制御装置より利用者に提供される。

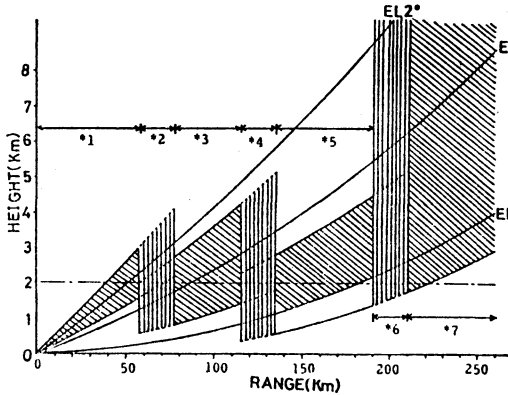
ア. 一次処理装置

レーダーアンテナの走査により得られた生の反射電波信号から、地形反射エコーを約 50 dB (十万分の1) に抑圧 (地形除去) すると同時に、不必要な中心付近の情報を整理し座標変換を行い、500 km × 500 km (富士山レーダーは 1000 km × 1000 km) の範囲を 2.5 km × 2.5 km 毎に区切ってレーダーによる降水粒子の反射強度分布を作成する。

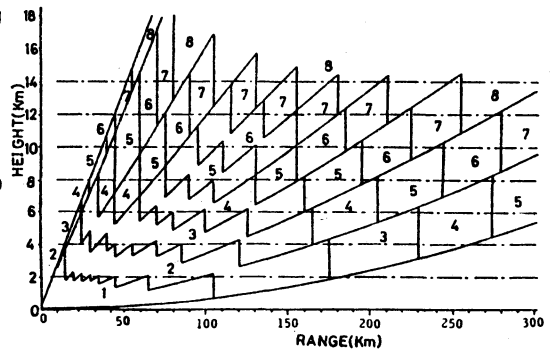
イ. 二次処理装置

一次処理装置からのデータをもとに、エコー強度、エコー頂高度、一時間積算降水強度の情報を作成し、記憶媒体に保存する。

(ア) エコー強度



a. 3仰角観測によるエコー強度データ作成方法 (CAPPI)



b. 10仰角観測によるエコー頂高度データ作成方法

第3-(4)図 レーダーデジタル化装置の二次処理装置の処理

一次処理装置の3つの仰角の反射をもとに、探知範囲内に均質に観測できるよう地上の降水量との相関が高い2000 mの定高度の平面図の型 (CAPPI, Constant Altitude Plan Position Indication) に編集し、(第3-(4)図-a), 同時に電波干渉などによる雑音を除去する。この情報はある観測時刻の降水の空間的な広がりを与え、降水をもたらず気象現象の空間的な構造を示す。

(イ) エコー頂高度

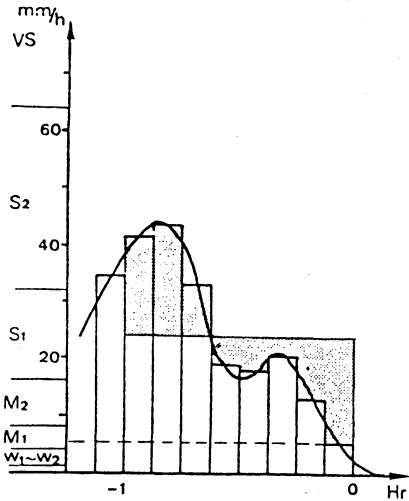
正時の観測時には、 $0^{\circ} \sim 15^{\circ}$ の範囲で設定された10個のアンテナ仰角を順次変化させながら観測し、得られた反射強度分布をもとに各メッシュ (2.5km \times 2.5kmの広さ) にどの高度までエコーがあるかを検出し (第3-(4)図-b), 一画面の情報とする。

このエコー頂高度データは、従来から雷雲など対流性降水の鉛直方向の発達を指標として重要視されてきたもので、レーダーのデジタル化計画の中にも取り込まれた。

(ウ) 一時間積算降水強度

(ア) で述べたエコー強度データは時々刻々変化する降水強度のある瞬間に得られた値であり、一定の時間にわたってどの程度雨量があったかを知るためには適当な情報ではない。

一般に雨雲は強さが変化すると同時に移動していくので、地上の固定点で見ると刻々強さが変化して見える。第3-(5)図の模式図の例では、1時間に強さが曲線で示されたように変化したとすると、これを8回の観測により棒グラフで近似して積算し、1時間の降水量 (一時間積算降水強度) とする。この例で言うと、正時の観測で



第3-(5)図 レーダーエコー強度と一時間積算強度の関係

曲線がエコー強度の時間変化とすると、一時間積算強度はこれを1時間に8回の観測により棒グラフで近似して積算することになる。この例では正時のエコー強度は M_1 、積算値は 24 mm

はエコー強度は M_1 (並の下) で1時間あたり5 mm 相当の強度であるが、1時間の積算では 24 mm となり S_1 (強の下) 相当の雨雲が1時間上空に留まったと同等であったことになる。

一時間積算降水強度は、後で説明されるように (第4-(1)図) アメダスで平常時集められる1時間雨量値と組み合わせると大雨・洪水の監視などに利用される^{15,16}。

ウ. 通信制御装置

二次処理装置により作成された情報は、通信制御装置により近隣の地方予報中核官署の表示装置（監視用ディスプレイ）と、気象庁本庁のデータ処理センターに送信される。

4. 降水短時間予報技術

(1) 予報の考え方

前章で述べたように、社会経済上大きな影響を与える降水現象については、アメダスやレーダー、更には気象衛星などにより、観測の分解能や速報性が最近急速に改善されてきた。観測システムのこのような改善を受けて、下記のように正確な実況把握を基礎とする目先数時間までのきめ細かな予報が可能になってきた。

即ち、

- ① アメダス・レーダーや気象衛星などの観測網により詳細な降水実況を把握する。
- ② その広がりや強度の時間変化を検出する。
- ③ ②で検出された結果をもとに、運動学的に外挿し適当な補正を加えて、数時間後までの降水量の分布を推定する。

というものである。ここで“運動学的に”とは、運動の背後にある物理法則には当面ふれず、強さや広がりの変化を追跡し、その変化を外挿して予測することを意味する。

(2) 処理の流れ

短時間予報は、以下のような手順を経て実施される。

a. レーダーの合成

レーダーの探知範囲はおよそ 300 km であるが、山岳などの遮蔽によりそれぞれのレーダーから見えにくい地域があったり、数時間先までの予報であっても降水域が移動し一つ一つのレーダーの探知範囲に留まらないことなどから、個々のレーダーを個別に利用しただけでは降水域の移動が十分追跡できない。

そこで、各レーダーから集められた観測値をもとに、それぞれの探知域の重なりを利用して有効な区域を取捨選択し一枚の図面に合成する。

b. アメダスによるレーダーデータの較正

レーダー観測は、地上数100mから数1,000mの上空に分布する降水粒子（雨滴、雪粒、ひょうなど）からの電波の反射測定に基づいており、適当な仮定のもとに、得られた反射強度を地上の降水量に換算しているが、必ずしも1対1の関係は得られない。

気象庁では全国に配置した1,300余カ所のアメダス観

測所の雨量データと、レーダー観測のデータを比較することにより、リアルタイムにレーダー観測の較正を行い、5 km×5 km の区域毎の詳細な雨量実況の把握を行っている（第4-(1)図）。

c. 移動や変化の検出

a, bにより予測開始時刻までに得られた詳細な降水域を時間的に追跡して、移動や変化を検出する。

d. 時間的外挿

cの結果を受けて、最新の観測値（合成図）を時間的に補外（外挿）し数時間先までの降水量分布の第1次推定値を得る。

e. 強度の補正

過去の変化傾向をそのまま将来まで延長できることは実際には少なく、様々の要因により新しい変化傾向が出てくる。様々の要因のうち、地形効果は強い影響力を持っていることが知られている。地形効果の顕著な例としては、梅雨や台風期など、暖候期の太平洋側の南東斜面での大雨や、冬の日本海側の大雪などが知られており第4-(1)図の降水分布からも地形効果の影響が読み取れる。

気象庁では地形効果の大きさについてはこれまでの調査や物理的考察のもとに、準力学的な地形性降水シミュレーションモデルを利用している¹⁷。

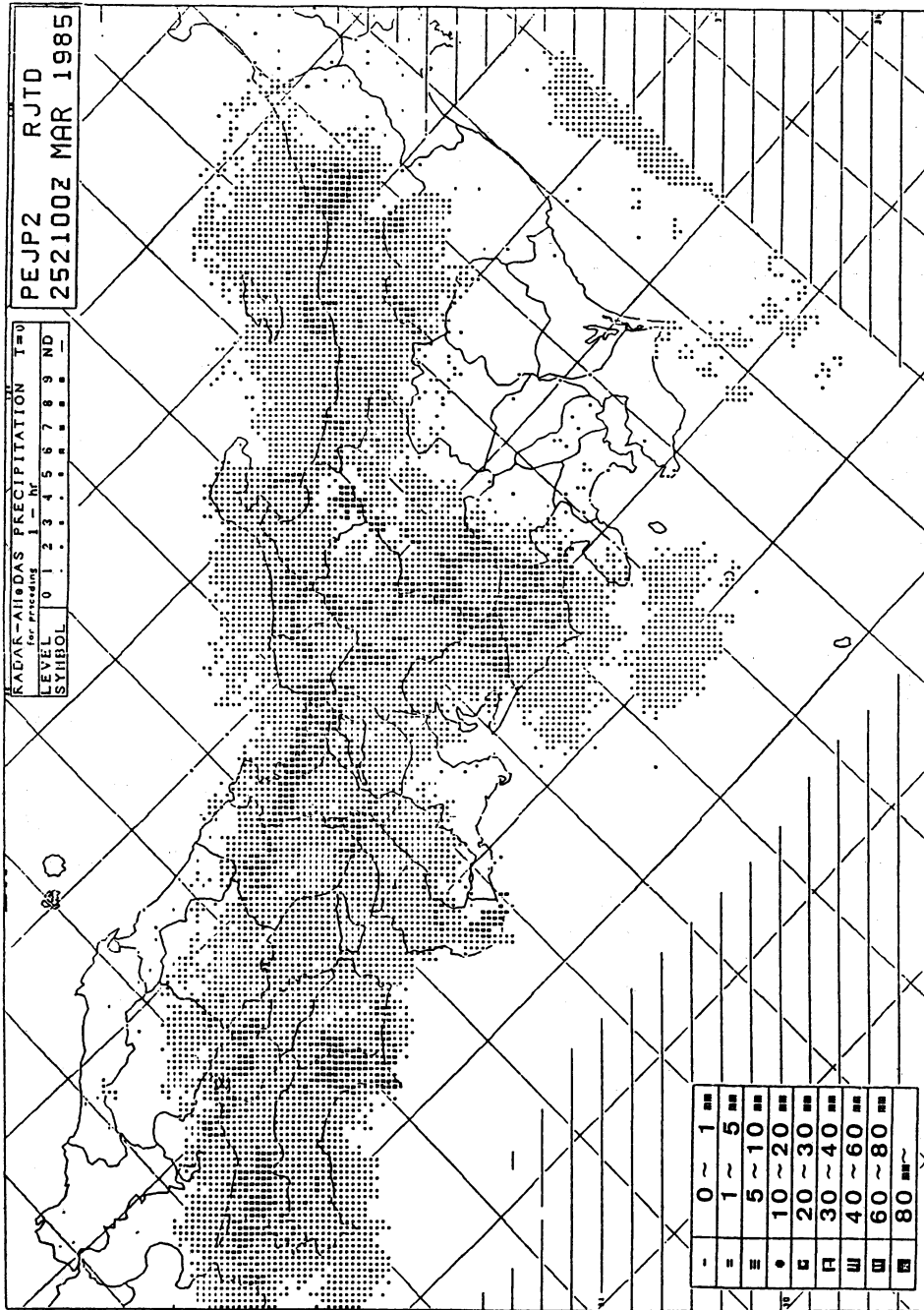
d. で得られた第1次推定値に対し、この結果に基づき降水量の増加や減少の補正を加える。

また数値予報モデルの予測値から、水蒸気の分布や風系など降雨系（機構）を維持する大局的な場の情報を取り込んで変化の傾向をより正しく考慮するなど、精度向上をはかっている。

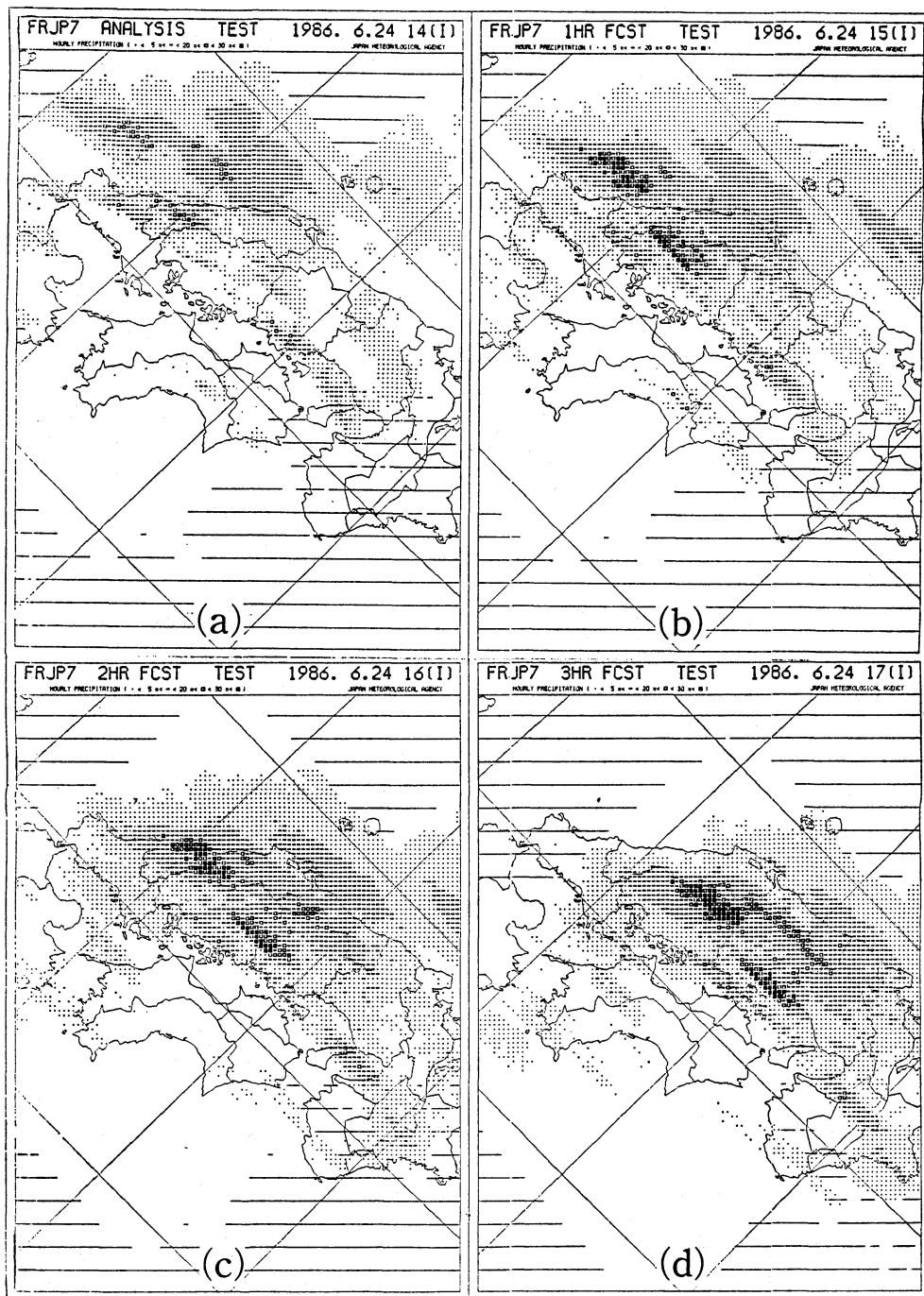
(3) 降水短時間予報の例

第4-(2)図は気象官署に実験的に配信されている降水短時間予報の出力図の一例である。この例は昭和61年6月24日午後、梅雨前線の活発化に伴い、中国地方を中心として発生した大雨に対するものである。予測は午後2時を初期時刻としており、その後順に1時間毎に3時間後までの各1時間降水量が示されている。

この図によれば、初期時刻に島根県西部から山口県沖にあった20~30 mmの雨域が、やや強まりながら次第に東進し、中国地方各地で強い雨になることが示されている。この予測に対応する時間帯の、15時35分頃、広島県双三郡三和町では竜巻が発生しており、予測図では15時の広島県中部の強い雨域に対応しているものと考えられる。降水短時間予報は直接竜巻を予測するものではな



第4-(1)図 レーダーアメダス雨量合成図(部分、上下の端が一部削除されている)
レーダー観測とアメダスの観測を組み合わせて得られた雨量(降水量)の分布、5 km
平方毎の区域の平均雨量が図中左下の記号を用いて表現されている。



第4-(2)図 降水短時間予報の例(昭和61年6月24日14時初期値)。現在気象庁で業務実験中に配布されたもの

- a. 14時 初期時刻
- b. 15時 1時間後
- c. 16時 2時間後
- d. 17時 3時間後

いが、大気他の条件も整うことにより予測された強い雨域の中に竜巻が発生したものとして、非常に興味深い例である。

5. 降水短時間予報の利用

近年、台風については観測や予測システムの改善がなされ、突然の襲来による大きな被害はほとんど無くなった。しかし台風がもたらす総雨量は場合によっては1,000 mm を超えることがあり、十分な注意が必要である。また台風の周辺に比較的一様に広がる10~20mm程度の強さの雨域の中にも、所々局所的に非常に強い雨域が潜んでいることもある。

梅雨期の大雨については、昭和57年の長崎豪雨や昭和58年の山陰豪雨が記憶に新しい。これほどではなくとも1時間に50 mm程度の雨は日本全国ほとんどどこにも発生可能である¹⁸。

このようにしばしば被害の引き金となる短時間の大雨に対し、機敏な防災活動の立ち上げや避難行動の開始のため、大雨の実況や予報を的確に伝達し、住民一人一人が自分にどの程度危険が差し迫っているか明確に認識できるようにすることが大切であろう¹⁹。

また降水は限度を超えた場合災害を引き起こす元凶となる反面、貴重な水資源として欠かせないもので、ダム建設や水路の開削など従来からその有効利用がはかられてきたが、今後ますます増大する水需要に応えるために、的確な降水情報に基づき、治水設備等の総合的な管理を進め一層効率的な利用が求められることになろう。

降水短時間予報は、様々の観測と情報の処理システムの進歩を受けて、やっとその一步を歩み出した処である。今後電子技術の一層の進歩に伴い、文字多重放送、CAPTAIN や INS 等、様々のメディアによる情報伝達手段や各機関での情報利用処理システムの普及により、各種の定量的な気象予報情報が社会的にますます重要な役割を担っていくことになるものと予想される。

文 献

1. 倉島 厚, 原 達也, 1972: 死者数からみた気象災害の変遷について, 研究時報 24.8, 317~332.
2. 倉島 厚, 舟田久之, 中鉢幸悦, 1984: 1970年代の台風の死者災害について, 研究時報 36.1, 15~22.
3. 高橋浩一郎, 1978: 天気予報, 天気 25.4, 45~

53.

4. 気象庁, 1975: 天気予報-1-, 気象百年史, 377~392.
5. 桑原 豊, 1985: 大雨に関する防災気象情報について, 研究時報 36.5, 199~205.
6. Orlanski, A. 1975: Rational Subdivision of Scales for Atmospheric Process, Bull. Am. Met. Soc., 56, 527~530.
7. 小佐野慎悟, 元木敏博, 鈴木和史, 1986: GM S データとエコー強度から降水強度を推定する試み(その2), 昭和60年全国予報技術検討会資料(気象衛星センター), 1~21.
8. 木村耕三, 1973: 地域気象観測網, 特にその争点について, 測候時報 40.9, 333~347.
9. 木村耕三, 1973: 気象観測への目下の課題(特にメソ現象について), 天気 20.6, 279~287.
10. 秋田地方気象台, 仙台管区気象台, 1972: 八郎瀧干拓地における降雨特別観測報告, 仙台管区技術資料第5号 昭和46年降雨特別調査報告, 35~63.
11. 立平良三, 清水紀雄, 小佐野慎悟, 1976: 地形性エコーと重畳した降水エコーの強度測定, 研究時報 28.9-10, 313~316.
12. 下島省吾, 1983: レーダーエコー・デジタル化システム, 測候時報 50.4, 292~301.
13. 桜岡 勉, 1982: レーダーエコーデジタル化装置について, レーダー観測技術資料 第31, 11~44.
14. 春日 信, 1983: レーダーエコーデジタル化へ, 気象 '83-7, 32~35.
15. 竹村行雄, 1982: 雨量実況図, 予測図等の処理について, レーダー観測技術資料 第31, 118~125.
16. 竹村行雄, 1983: デジタルレーダーの利用, 気象 '83-10, 34~37.
17. 立平良三, 1976: 雨滴成長を考慮した地形性降雨の計算, 天気 23-2, 27~32.
18. 気象庁, 1984: 再現期間30年・50年の月最大1時間降水量, 日本気候図1980年版, 26~32.
19. 藤吉洋一郎, 1979: “はれたり, くもったり, ところにより…”, 気象情報放送の改善のために, 気象 23, 6, 6~10.

その他レーダー観測とその情報の利用については、気象研究ノート90(1967), 112(1972), 120(1974), 139(1980)などが、また気象衛星観測とその情報の利用については、気象研究ノート111(1972), 113(1972), 145(1982), 148(1983)などが参考になる。

また最近の天気予報については、立平良三(1986)、新しい天気予報(東京堂)に、諸外国の短時間予報の開発状況については、Browning, K.A.(1982)、Nowcasting, Academic Press に1981年ドイツのハノーバーで開催された国際シンポジウムまでの状況が紹介されている。