

北海道開発局の全レーダ雨量計を用いた短時間降雨予測 Short-term Rainfall Prediction Using All Radar Raingauges Installed by the Hokkaido Development Bureau

中津川 誠*

Makoto NAKATSUGAWA

北海道開発局で実施しているレーダ観測は、道央、道南、道東、道北の計4基で北海道全域がカバーされている。レーダ雨量計は降雨の分布が面的に、しかも瞬時に把握できるので、降雨の現況把握はもとより、これを利用した降雨予測にも威力を発揮することが期待される。北海道開発局で実施している洪水予測の精度向上には、正確で先行時間の長い降雨予測情報が求められている。前者の”正確さ”の問題は、降雨の初期状態とその後の発達や減衰を的確に評価できるかどうか、後者の”先行時間の長さ”は、観測範囲を拡張してより広い範囲の降雨域を観測できるかどうか依存している。本報告では、降雨の発達に地形的要因が大きく影響していると考え、地形性降雨については気象庁予報値(GPV)をもとに物理学的手法を導入することで予測を図った。さらに、それを従来の運動学的手法(移流モデル)で予測される結果に加えることによって予測精度の向上を図った。また、北海道開発局の4レーダのデータをすべて用い、観測範囲を広げて予測先行時間の拡張を目指した。

◀ 短時間降雨予測 ; レーダ雨量計 ; 移流モデル ; 地形性降雨 ; GPV ▶

The Hokkaido Development Bureau conducts radar observation of all Hokkaido, using a total of four radar raingauges, each installed in central, southern, eastern, and northern Hokkaido. Because radar raingauges can quickly detect spatial rainfall distribution, they are expected to show a remarkable ability, not only to detect the current conditions of rainfall, but also to predict rainfall. Accurate rainfall prediction data with a longer lead time is required to improve the accuracy of flood forecasts conducted by the Hokkaido Development Bureau. The accuracy of rainfall prediction data depends on how accurate the initial conditions of rainfall and the subsequent growth and decay of rainfall can be reproduced. To have a longer lead time requires the expansion of the observed area so that to detect rainfalls in a larger area. In this experiment, we predicted orographic rainfall by a physically-based method using grid point values (GPV) of the Meteorological Agency because the orographic factors markedly affect the growth of rainfall. Also, we predicted non-orographic rainfall by the method of extrapolating the time variation of rainfall pattern (the translation model). The predictions of orographic and non-orographic rainfall were combined to improve the prediction accuracy. Furthermore, all data gathered by the four raingauges of the Hokkaido Development Bureau were used to enlarge the area of observation to lengthen the lead time for predictions.

Keywords: Short-term Rainfall Prediction, Radar Raingauge, Translation Model, Orographic Rainfall, Grid Point Value (GPV)

1. はじめに

北海道開発局ではレーダ雨量計による降雨観測システムの確立を図っており、平成6年度までに道央・道南・道東・道北の4基のレーダで北海道全域がカバーされた。レーダ雨量計は地上雨量計で観測しきれない山岳地の降雨量や面的な降雨分布を捉えることができるという利点がある。しかしながら、降雨量を電波を介して間接的に計測するため、実際の降雨量との間には誤差が生じる。この問題に関してはテレメータの地上雨量データによる逐次補正（キャリブレーション）によって改善できる。結果として、実況の雨量を定性的あるいは定量的に把握することは十分可能といえる。これは降雨予測のための初期値を入手できることを意味する。

降雨予測の精度は、初期値と予測手法の信頼性に依存する。気象学の理論で言われるように、初期値の微小な誤差が予測時間を伸ばしていくにしたがって増大し、時としてカオティックな結果をもたらすこともある。したがって、観測等からいかに的確な初期値を得るかが予測精度を大きく左右する。より正確な降雨観測のため、先述したキャリブレーションのほか、雨滴粒径分布の計測等ハード面での試験研究が進められている。

実状として、北海道開発局の管理する河川では、洪水時における対応に先行時間が3時間先程度までの予測情報が用いられており、その精度向上が望まれている。ここで必要となる短時間降雨予測については、レーダ雨量計データを用いて降雨域の移動や変形を過去の時間外挿から予測する手法、いわゆる運動学的手法が実用的に用いられてきた。その代表的なものとして移流モデル¹⁾があげられる。しかしながら、実際には山岳地で降雨が発達するような現象がみられ、予測精度の向上にはその評価が不可欠である。このような現象をパターン化し、定性的に予測しようとしたものに山田、日比野らの動画を用いた解析手法^{2),3)}がある。さらに、より定量的、客観的に降雨の発達・減衰を予測するため、物理学的手法に基づく降雨予測モデルが中北ら⁴⁾によって提案されている。また、宮下ら⁵⁾はドップラーレーダで気流や降雨の状態を把握し、物理学的手法によって降雨を予測している。

本報告では、気象庁の数値予報出力値（GPV）

に物理学的手法を導入して地形性降雨を予測し、それを移流モデルで予測される結果に加えることで最終的な予測結果を算出した。今回、物理学的手法と運動学的手法（移流モデル）を併用したのは、前者のみの場合、初期誤差の影響で数値的手法に基づく予測計算が不安定になる場合が考えられるからである。このほか、今回の予測手法の中では、北海道開発局の4レーダのデータをすべて用い、観測範囲を広げて予測先行時間の拡張を目指している。

2. 降雨予測の全体的な流れ

今回提案する降雨予測の手順を図-1に示す。大まかな流れとしては、(1)レーダ雨量計と気象庁数値予報データ（GPV）による予測の初期条件、境界条件の設定、(2)移流モデルと水蒸気凝結モデルによる予測の実施、という手順となる。

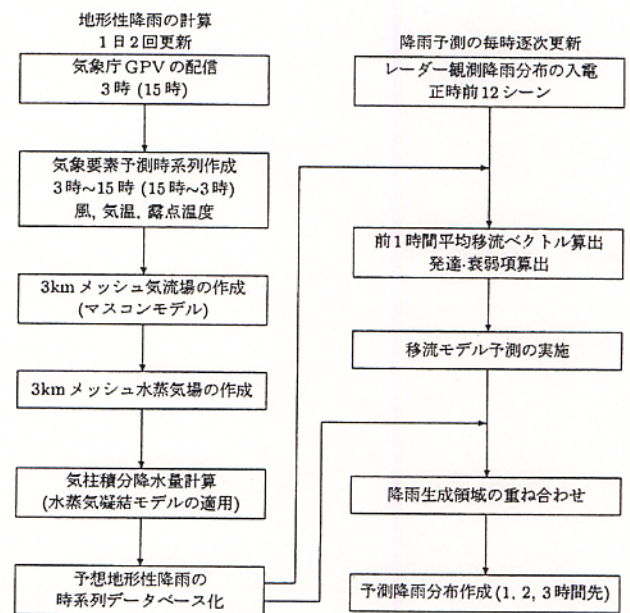


図-1 降雨予測計算の流れ

3. 解析に用いたデータの概要

3-1 レーダーデータ

レーダーデータは、位置を図-2、諸元を表-1に示す北海道開発局の稼働中の4レーダを扱う。各レーダの観測半径は表-1に示すようにいずれも定量領域半径120km、定性領域半径198kmであり、4基で北海道全域をカバーしている。ま

た、観測の空間分解能は、定量観測範囲内では方位方向に 2.8125° (360° を128等分)、動径方向には3kmとなっており、そのようなデータが5分ごとに配信される。なお、4基のうち道東レーダと道北レーダは仰角可変機能をもつ3次元スキャンレーダである。仰角については 0.2° 、 0.4° 、 0.7° 、 0.9° の4仰角で配信用の観測を実施している。このうち、遮蔽率50%未満の最も高度の低い仰角のデータを配信に用いている。また、このほかに6仰角について配信を前提としない観測を行っている。この3次元的な降雨のスキヤニングにより、降雨域の鉛直構造の把握のほか、等高度面観測(CAPPI)データの取得が可能となり、キャリブレーションの精度向上も期待できる。

ところで、実際の降雨量を得るには、以下の方程式により雨滴に反射した電波を変換することが必要となる。レーダの電波受信電力は一般に下記のレーダ方程式によって表される。

$$P_r = R_c \frac{FZ10^{-12}}{(r10^5)^2} 10^{-0.2K_g r} 10^{-0.1L} \quad (1)$$

$$R_c = \frac{\pi^3}{2^{10} \ln 2} \frac{P_t h}{\lambda^2} 10^{0.2G} \theta \phi \left| \frac{\epsilon - 1}{\epsilon + 2} \right|^2 \quad (2)$$

ここで、 P_r は平均受信電力、 R_c はレーダ一定数項、 P_t は送信尖頭電力、 h はパルス幅($h = c\tau$, c は光速)、 λ は送信波長、 G は空中線利得、 θ 、 ϕ は水平・垂直方向のビーム幅、 r はレーダサイトからの距離、 ϵ は誘電率、 Z はレーダ反射強度因子、 R は雨量強度、 K_g は大気ガスによる減衰、 L は給電系損失、 F は補正係数をあらわす。

以上の定数に関する各レーダの諸元は表-1に示してある。また、上式中の誘電係数 $|(\epsilon - 1)/(\epsilon + 2)|^2$ は雨の場合0.93、雪の場合0.208である。以後の検討においては基本的に上式で求まるレーダ反射強度因子 Z を比較の対象とする。因みに Z は実際上dB(デシベル)値として得られるが、慣例的にその値をdBz(デシベルゼット)値と称している。この値はいわばレーダの機械性能の違いによる影響を除いて同一の基準のもとで表した反射電波強度と言えらる。もし、これを実際の雨量強度に変換するときには経験上定式化されている次式による。

$$Z = BR^\beta \quad (3)$$

ここで、 B 、 β はレーダ定数と言われるものだが、雨や雪のタイプによって異なり、その設定は観測精度を左右する大きな要因の一つである。各レーダの B 、 β 値は地上雨量と反射強度因子との比較によって決定されているが、それについても表-1に示す。なお、レーダ反射強度因子は単位体積中において $\sum D_i^6$ (D_i は雨滴粒径)に比例することからその単位は mm^6/m^3 となる。よってdBからこの単位に合わせるために $Z' = 10 \log Z$ (Z' はdB単位、 Z は mm^6/m^3 単位)なる変換が必要である。

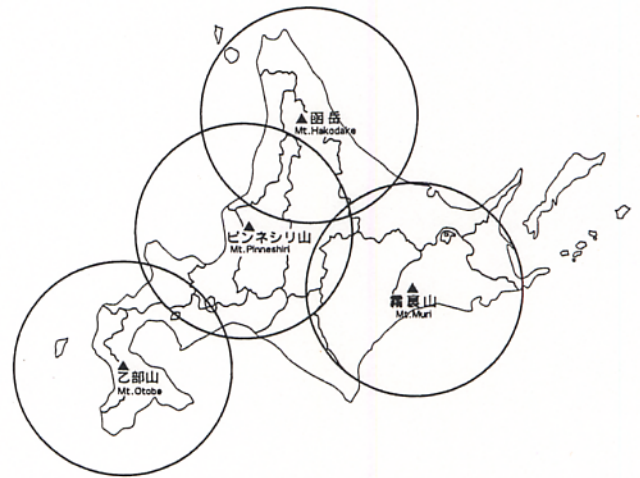


図-2 各レーダの位置

3-2 気象庁数値予報(GPV)

レーダを用いた降雨量の把握のほか、物理学的手法による地形性降雨の再現・予測には風の状態、温度の状態、水蒸気の状態が必要となる。それを与えるものとして、気象庁数値予報モデルの出力データ(GPV:Grid Point Value)がある。GPVデータとしては、気象庁のRSM(Regional Spectral Model)の出力値が関係機関に配信されているので、その利用を図る。表-2にその諸元を示す。なお、表に示すようにGPVは9時と21時に更新されるが、データ収集、解析、配信等に6時間を要するため、図-1のように配信時間は15時と翌日の3時となる。GPVの出力例として図-3に風速場、図-4に気温場の例を示す。

4. 降雨予測の初期条件と境界条件の設定

降雨予測のための初期条件および境界条件として、レーダ雨量計やGPVから降雨、気流、温

表-1 各レーダーの諸元

項目	道央	道南	道東	道北
位置 (緯度)	北緯 43° 29 22	北緯 42° 2 14	北緯 43° 00 47	北緯 44° 39 48
位置 (経度)	東経 141° 42 36	東経 140° 16 40	東経 143° 43 28	東経 142° 24 55
設置個所	ピンネシリ山	乙部岳	霧裏山	函岳
送信尖頭電力 P_t	250 KW	250 KW	250 KW	250 KW
送信パルス幅 τ	2 μ s	2.1 μ s	2.05 μ s	2.15 μ s
送信周波数	5260 MHz	5270 MHz	5270 MHz	5270 MHz
送信波長 λ	5.7 cm	5.693 cm	5.693 cm	5.693cm
空中線形式	4m ϕ 円形パラボラ	4m ϕ 円形パラボラ	4m ϕ 円形パラボラ	4m ϕ 円形パラボラ
駆動速度	5 rpm	5 rpm	5 rpm	5 rpm
空中線ビーム幅	垂直 1.03° 水平 1.02°	1.10° 1.11°	1.10° 1.10°	1.02° 1.10°
空中線利得 G	45 dB	44.33 dB	44.02 dB	44 dB
給電系損失 L	5.1 dB	6.9 dB	7.4 dB	7.4 dB
大気減衰 K_g	0.01 dB/km	0.01 dB/km	0.01 dB/km	0.01 dB/km
補正係数 F	8.52 dB	8.52 dB	8.52 dB	8.52 dB
最小受信電力 S_{min}	-110 dBm	-110 dBm	-110 dBm	-110 dBm
観測仰角	一定	一定	4仰角または10仰角	4仰角または10仰角
観測範囲	定量半径 120km 定性半径 198km	定量半径 120km 定性半径 198km	定量半径 120km 定性半径 198km	定量半径 120km 定性半径 198km
基本メッシュ	距離方向 3km 方位方向 128 等分	距離方向 3km 方位方向 128 等分	距離方向 3km 方位方向 128 等分	距離方向 3km 方位方向 128 等分
B, β	降雨8mm/h 未満 B=180, β =1.6 降雨8mm/h 以上 B=410, β =1.2	降雨7mm/h 未満 B=70, β =2.26 降雨7mm/h 以上 B=420, β =1.34	B=200, β =1.8	B=380, β =1.35

表-2 気象庁GPV(RSM)の概要

1日2回更新 日本時間9時, 21時 (T=0)
 格子分解能は緯度・経度20分 (約30km)
 時間分解能は24時間先まで3時間毎 (T=0, 3, 6, 9, 12, 15, 18, 21, 24)
 ただし, 地上については1時間毎
 予測値要素 地上 : 気圧, 気温, 露点温度差, 水平風速
 高層 (850hPa, 700hPa, 500hPa)
 : ジオポテンシャル高度, 気温, 露点温度差, 水平風速

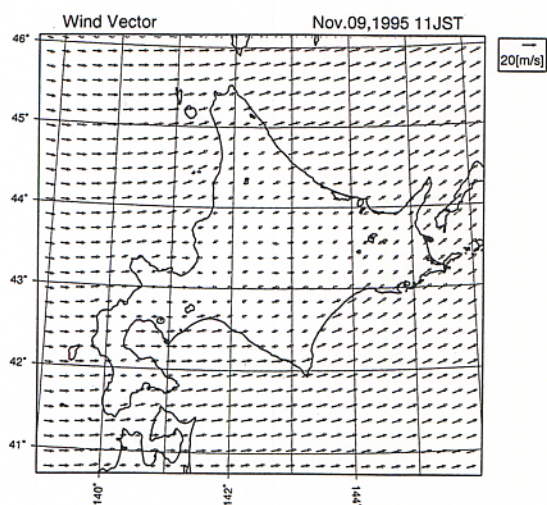


図-3 GPVで与えられる地上気流場の例

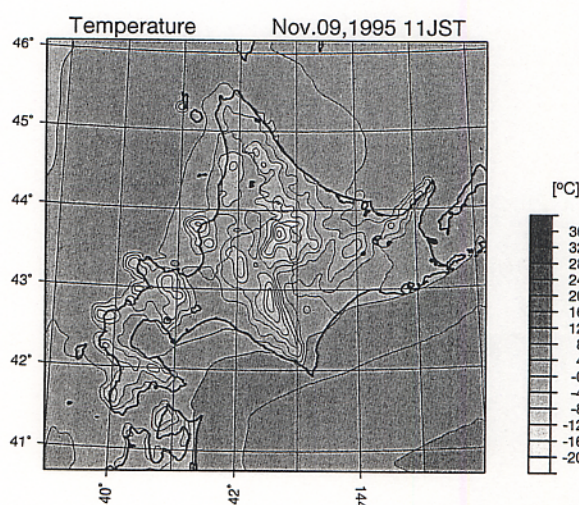


図-4 GPVで与えられる地上気温場の例

度、水蒸気の状態を設定する。GPVデータの補間は、空間的には線形内挿による。また、時間的には3時間ごとに予測値が更新されるまでは一定の値を用いる。例えば、0時から3時までの間は0時の予測値を用い続ける。

4-1 解析対象領域

解析対象領域は、緯度 40° 10 経度 137° 15 を南西端、緯度 46° 10 経度 147° を北東端とした領域 (図-5) である。そこで、上記の領域を東西 260 メッシュ×南北 260 メッシュに分割した緯度経度直交座標系を採用した。これは、約 3km メッシュに相当し、レーダー観測の空間分解能を損なわない大きさである。

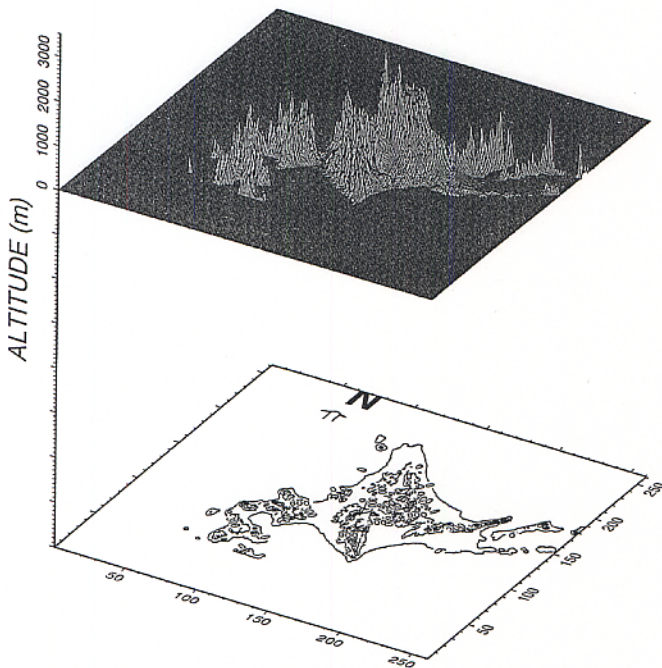


図-5 解析対象領域

4-2 降雨場の設定

上記対象領域において、得られるレーダーデータを合成処理し、北海道全域をカバーする降雨量分布のデータを作成する。合成処理とは複数のレーダーサイトから等距離にある線を境界線とし、それより近いほうのレーダーのデータを使うことによって両レーダーの覆域をカバーするデータを作るものである。これが移流モデルによる降雨予測の初期値となる。

4-3 気流場の設定

GPV から得られる気流場をモデル境界値 (500hPa (ほぼ接地境界層上端と想定) の風速

成分) として活用し、マスコンモデルによって、レーダー 3km メッシュ単位の気流場を内挿する。この方式によって、大規模な場における時空間変動を取り込むことができ、更にマスコンモデルによって地形に起因する小スケールの気流の変動を計算することが可能になるものである。

マスコンモデルは、Shermann⁶⁾により提案された気流の計算法である。基本原理は、複雑地形上での大気の質量保存則を満足し、かつ実測された風速と計算された風速の誤差を最少にする気流場を求めるものである。ここでは、GPV で与えられる気流場の予想値を初期条件および境界条件として、マスコンモデルを適用する。基礎式としては、次に示す質量保存則と (実測-計算) 誤差の最小条件式となる。

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (4)$$

$$E = \int [\alpha_1^2(u - u_0)^2 + \alpha_1^2(v - v_0)^2 + \alpha_2^2(w - w_0)^2] dx dy dz \quad (5)$$

ここで、風の3次元成分を (u, v, w) 、その実測値を (u_0, v_0, w_0) 、風の修正量に対する重み係数を α_1, α_2 とする。この (4) 式を満足しつつ E を極小にする条件を Lagrange の未定定数法で定式化し、 u, v, w を求める。

4-4 温度場・水蒸気場の設定

温度場、水蒸気場については、地上、850hPa、750hPa、500hPa 各高度面における気象庁格子値を 3km 格子に内挿して作成した。ここでの水蒸気場とは、GPV より得られる気温、露点温度などから算出される比湿、水蒸気圧によって表される。

5. 降雨予測手法

図-1 に示すように、降雨予測に際しては、予測計算の安定性を考慮して運動学的手法と物理学的手法の併用を図る。前者は、過去の降雨域の移動を時間的に外挿し、未来の降雨域と降雨量の予測をおこなうものである。その代表的な手法として今回は後に示す移流モデルを用いる。物理学的手法とは、気象庁の数値予報出力値 (GPV) から得られる風速、温度、水蒸気量などの状態量に基づき、物理方程式を時間積分して

予測をおこなうもので、厳密かつ客観的な結果を算出できる。すなわち、物理学的手法では、降雨域の単なる移動だけではなく、発達や減衰を再現することも可能である。しかしながら、通常は非線形方程式を数値的に解くことになるので、初期誤差の影響が積分時間とともに増大し、結果の発散を招くことがある。両者の利点を生かし、欠点を補い合うことが運動学的手法と物理学的手法の併用をおこなった理由である。今回のモデルの特徴を概略的に言うと、降雨域の大局的な動きを移流モデルで予測する一方、地形の影響で時間的に変動する降雨生成量を、GPV情報に基づく水蒸気凝結モデルで予測し、付加したものである。

5-1 移流モデル

移流モデルは、降雨域が流れ（移動ベクトル）に乗って移動し、かつ降雨域自体が発達・衰弱を継続しながら降雨強度を変化させていくとしたモデルである。モデルの基本式を下記に示す。

$$\frac{\partial z}{\partial t} + U \frac{\partial z}{\partial x} + V \frac{\partial z}{\partial y} = Q \quad (6)$$

$$\begin{aligned} U &= c_1x + c_2y + c_3 \\ V &= c_4x + c_5y + c_6 \\ Q &= c_7x + c_8y + c_9 \end{aligned} \quad (7)$$

ここで、 $c_1, c_2, c_3, \dots, c_9$ は、移流ベクトル、発達・衰弱量のパラメータである。降雨域の移動ベクトル (U, V) および発達・衰弱量 Q はモデル式を差分化して、2時刻の降雨分布を与えることで決定する。決定にあたり、移動ベクトルおよび Q は2次元平面分布を仮定する。このことにより移動ベクトルは動きの発散・収束・回転などを表現することが可能となっている。最近の適用例では Q 項を考慮しないこともあるようだが、単純移流だけでは降雨現象にそぐわないため計算にあたっては Q 項を考慮して行っている。

5-2 水蒸気凝結モデル

地形性降雨の予測においては、大気を鉛直方向に4層（地上－925hPa, 925hPa－800hPa, 800hPa－600hPa, 600hPa－400hPa）に分割し、風速、気温、露点温度という気象条件を気象庁数値予報出力値（GPV）により与える。気象条件を3kmメッシュ単位に内挿するために、前節で示したように気流についてはマスコンモデルを

適用し、気温や水蒸気の状態（比湿、水蒸気圧）についてはGPVから線形内挿する。手順としては、3kmメッシュ単位の気象条件のもとに、水蒸気凝結モデルを適用計算し、地形性降雨を各予測時刻に対して計算する。凝結量の計算手順を図-6に示す。これによれば、GPV等からモデルの適用に必要な情報を得た後、空気塊の上昇にともなう湿潤断熱過程のなかで水蒸気凝結量を算出するような手順となっている。このなかでは、(1) 上昇気流による空気塊の上昇、(2) 上昇量（高度）を静力学方程式で気圧に変換、(3) 湿潤断熱過程にある空気塊の熱エネルギー保存則により温度変化算出、(4) 温度変化にともなう飽和水蒸気量の変化量算出、という計算過程を経る。最終的に飽和水蒸気量の変化量（増分）が水蒸気凝結量として地形の影響で生成される降雨量となる。なお、空気塊はレーダで降雨が観測される個所については、至る所で飽和していると仮定する。湿潤断熱過程にある空気塊の熱エネルギー保存式は次式に示される。

$$(c_{pd} + q_s c_{pv}) \frac{dT}{T} - R_d \frac{dP_d}{P_d} + d \left(\frac{q_s L_c}{T} \right) = 0 \quad (8)$$

ここで、 c_{pd} は乾燥空気の定積比熱、 c_{pv} は水蒸気の定積比熱、 q_s は飽和比湿、 R_d は乾燥空気の気体定数、 P_d は乾燥空気気圧、 L_c は水蒸気の潜熱、 T は気温であり、なお、この計算はGPVの更新時刻にあわせて1日2回更新する。

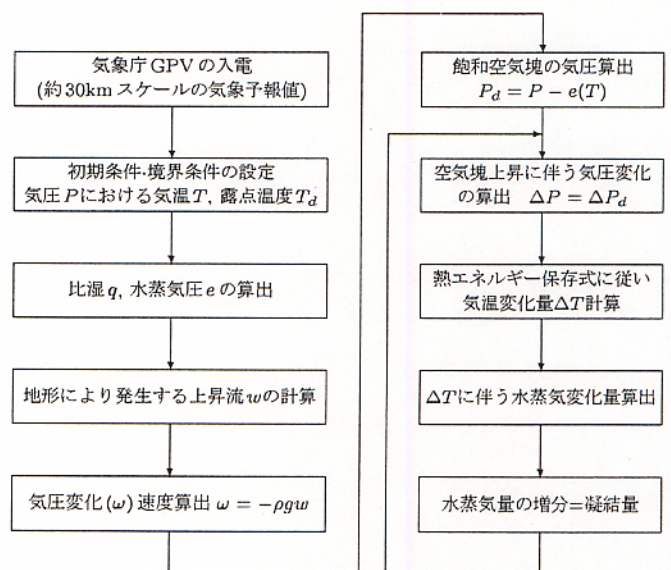


図-6 凝結量の計算手順