

3次元レーダーによるエコー強度情報を用いた 水蒸気相変化量と大気3次元風速の同時推定手法

A Method of Estimating Three-Dimensional Wind Velocity and Conversion Rate of Water Vapor
Using Information on Echo from Three-Dimensionally Scanning Radar

中北英一*・田中 実**・椎葉充晴***・池淵周一*・高埴琢馬***

By Eiichi Nakakita, Minoru Tanaka, Michiharu Shiiba, Shuichi Ikebuchi and Takuma Takasao

A method of estimating both three-dimensional wind field and conversion rate of water vapor by the use of information on echo detected by three-dimensionally scanning radar is presented. The basic equations are consisted of three conservation equations in terms of the air with the assumption of isotropic convergence, the liquid water and saturated water vapor with the assumption of pseudo-adiabatic process. The estimated wind field is consistent with the structure of precipitation in qualitative sense and the wind field estimated from dual doppler observation in quantitative sense.

Keywords: radar, remote sensing, retrieval, rainfall prediction

1. 概 要

偽湿潤断熱過程を考慮にいれた、水蒸気相変化量およびメソβスケールでの風速を同時に3次元レーダーや衛星搭載レーダーによるエコー強度データから推定する手法を提案し、建設省のレーダーより細かい分解能を有する3次元ドップラーレーダー情報に適用するとともに、本手法が有効となる時空間スケールを調査し、建設省深山の3次元レーダーへの適用を試みる。さらに、この手法を、2台のドップラーレーダーによって同時観測された降雨事例に適用し、ドップラー観測から推定されている3次元風速を用いて、本手法によりエコー強度分布のみから算定される3次元風速分布の精度調査も行った。

なお、ここで用いたデータは1988年7月中旬に九州地方で生じた梅雨末期の豪雨時に北海道大学低温科学研究所の所有する降雪観測用高速3次元ドップラーレーダーにより観測されたもの、および1986年7月下旬の梅雨末期に建設省深山レーダーによって観測されたものである。また、精度調査に用いた3次元風速は、北海道大学低温科学研究所と気象研究所との2台のドップラーレーダーの同時ドップラー観測の基づいて気象庁気象研究所によって推定されたものをそのまま使わせて戴いた。

2. 大気3次元風速および水蒸気相変化量の同時推定手法

本手法では、降水の存在する領域では大気は飽和状態にあるとして、偽湿潤断熱過程および等方水平収束の仮定の上で、

等方水平収束を仮定した連続式

$$\frac{\partial}{\partial x}(\rho u) = \frac{\partial}{\partial y}(\rho v) = -\frac{1}{2} \frac{\partial}{\partial z}(\rho w), \quad (1)$$

0* 正会員 工博 京都大学防災研究所
(〒611 宇治市五ヶ庄)

0** 学生員 京都大学大学院

0*** 正会員 工博 京都大学工学部
(〒606 京都市左京区吉田本町)

水分の保存式

$$\frac{\partial m_l}{\partial t} + u \frac{\partial m_l}{\partial x} + v \frac{\partial m_l}{\partial y} + w \frac{\partial m_l}{\partial z} = \frac{Q}{\rho} + \frac{\rho_w}{\rho} \frac{\partial r}{\partial z}, \quad (2)$$

偽湿潤断熱過程を考慮した飽和水蒸気量の保存式

$$\left\{ -C_p \left(\frac{RT}{L} + m_s \right) / \left(\epsilon L \frac{de_s}{dT} + p C_p \right) + \frac{RT}{L p} \right\} \left\{ u \frac{\partial p}{\partial x} + v \frac{\partial p}{\partial y} + w \frac{\partial p}{\partial z} \right\} = -\frac{Q}{\rho} \quad (3)$$

の3式を基礎式とし、降水の存在する領域に対して適用する。基礎式中の諸変数は表-1に示す。

表-1 基礎式中の諸変数

ρ : 乾燥空気	ρ_s : 飽和水蒸気
ρ_w : 水の密度	ρ_l : 単位体積中の水分質量
$m_s (= \rho_s / \rho)$: 飽和水蒸気の混合比	
m_l : 水分混合比	e_s : 飽和水蒸気圧
Q : 単位体積単位時間当りの水蒸気相変化量	
r : 大気の流れに相対的な降水強度	
(u, v, w) : 風速	L : 水の潜熱
C_p : 定圧比熱	T : 気温
R : 大気	p : 気圧
	ϵ : 乾燥空気と湿潤空気とは区別しない

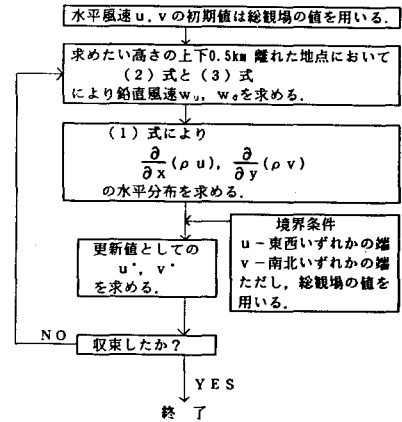


図-1 算定手順

ここで、湿潤断熱過程とは、飽和した気塊が断熱膨張・圧縮を受ける過程をいい、水蒸気・水滴間の相変化にともなう潜熱の放出・吸収が存在するために、水蒸気を含まない乾燥断熱過程とは気温変化と圧力変化の関係が異なる。さらに湿潤断熱過程の前に設けられている「偽」という言葉によって、放出された潜熱が大気を暖めることだけを考慮し、大気中に存在する水滴を暖めることは無視することを示している。

上記3式の諸変数の内 r, m_l はレーダー情報より求める^{1),2)}。また、 u, v の初期値および T, p, ρ は総観場の値を用い、 T, p, ρ に関しては定常とし、 m_s, e_s はこれらより求める。つまり、(3)式に必要な情報としての気温 T に、気塊そのものの気温ではなく総観場の値 T_0 を用いる。これは偽湿潤断熱過程を考慮していないということではなく、偽湿潤断熱過程に従う温度変化量およびそれにとまう飽和混合比の変化量の算定式に存在する T に T_0 を代入するということであって、常に気塊の温度が総観場の値 $T_0(x, y, z)$ となるという仮定を設けているわけではない。つまり、 m_s のものの値を必要とするのではなく、その気塊の動きに沿った変化量を必要とすることから有効な近似であるといえる。

さて、最終的に u, v, w, Q が未知数となる。その算定手順を図-1に示す。図中の w_u, w_v は解を求める高さのそれぞれ上下 0.5 km 離れた鉛直風速の値であり、微分はすべて中央差分で近似する。また、収束の判定としては、前ステップの u, v と更新値の u^*, v^* とが、すべての格子点において $\max_{x,y} \{|u - u^*|, |v - v^*|\} < 10^{-6}$ を満たせば、解が収束したものとし計算を終了する。このようにして得られた収束後の u^*, v^* を用いて、(2), (3) 式から求めたい高度における鉛直風速 w と水蒸気相変化量 Q を求める。与えられた境界条件のもとでは、差分化した基礎式は u, v, w, Q の格子点値に関する連立1次方程式を成すので、収束解が局所解であることはない。

3. 研究用高分解能レーダー情報への適用結果

ここでは諸変数の内、総観場の値を用いるものについてはすべてレーダーサイト上空における高層観測データの値を使用する。ただし、すべて水平面内では一定とし鉛直方向にのみ変化するとする。また境界条件を与える位置は、風向と雨域を考慮に入れて、西端および南端とした。図-2は水平風速の算定

結果にレーダーエコーの強度分布図を重ねたもので、ベクトルの長さは時速の10分の1を表わしている。図-3,4はそれぞれ鉛直風速、水蒸気相変化量の算定結果を3次元的に表示したものである。これらは5.25(km)四方内の r, m_1 のデータを平均して平滑化したものを用いた3km高度に対する結果である。ただし、レーダーデータは水平方向には0.25km×0.25km、鉛直方向には0.5kmごとに確保してある。

図-3,4を見ると水蒸気相変化量 Q と鉛直風速 w の分布形態はまったく同じで、鉛直方向の風が上昇しているところでは Q は正、すなわち水蒸気が水分に変化しており、下降しているところでは負となっている。これは2.の仮定による。また、定量的には、本ケースは対流圏界面まで発達したかなり強い対流性降雨であり w に関してみれば平滑化のスケールからみても妥当である。また、 Q のオーダーが、既に関発し建設省深山のレーダーデータに適用している水蒸気相変化量推定手法^{1),2)}による算定結果と一致しており妥当な値といえる。さらに、図-5(等値線は20,30,35,40,45,50,55(dBZe))の(a),(b)は(c)の黒線上の鉛直断面内におけるレーダーエコーの強度分布と風速分布を示したものである。この図より、鉛直方向に延びている強エコー部(網かけ部分周辺)で下降流が、右側では上昇流が見られる。これは、レーダーエコーとドップラー速度から推定した本ケースの下層風の状況の模式図である図-6と比べても、現象をよく説明付けている良好な算定結果といえる。

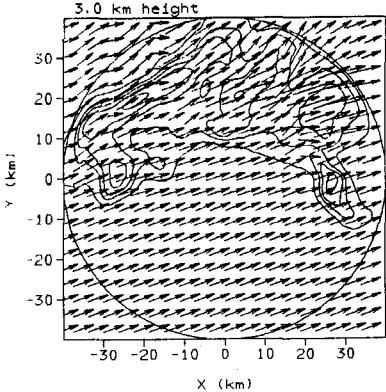


図-2 水平風速の算定結果

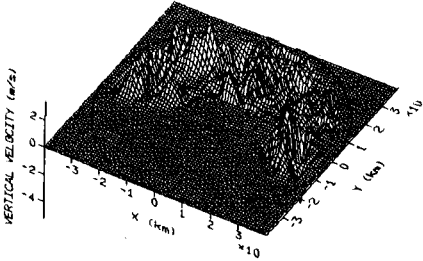


図-3 鉛直風速の算定結果

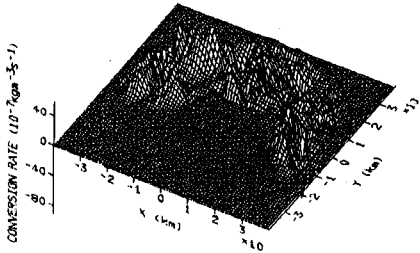
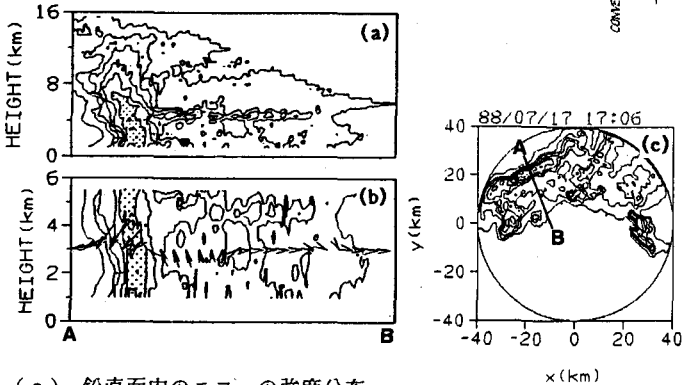


図-4 水蒸気相変化量の算定結果



(a) 鉛直面内のエコーの強度分布
(b) 鉛直断面内の風速分布
(c) エコーの強度分布

図-5 鉛直断面内のレーダーエコーの強度分布と風速分布

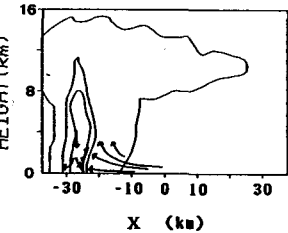


図-6 下層風の状況の模式図

4. 本手法が有効となる空間スケールの調査および建設省深山レーダーへの適用結果

3.では1つの平滑化スケールに対しての結果を示したが、実際は種々の平滑化スケールに対して適用している。たとえば、深山レーダーの水平分解能(3km×3km)に近い2.75km×2.75kmでの平滑化

スケールでは、上昇、下降流とも最大 $15[\text{m/s}]$ 程度の値が算定されるのに対し、 $10.25\text{km} \times 10.25\text{km}$ の平滑化スケールでは最大で $4[\text{m/s}]$ 程度、 $15.25\text{km} \times 15.25\text{km}$ では最大で $0.8[\text{m/s}]$ となる。したがって、これより大きな平滑化スケールでは本手法を適用することが無意味となり、逆に既に発表した方法¹⁾、つまり鉛直風速を0とした上で総観スケールの水平風速を用いて(2)式のみから Q を推定するという方法が有効となる。この既発表の方法を開発した短時間降雨予測手法に利用する際には $15\text{km} \times 15\text{km}$ 、20分内の r, m_i を平均して平滑化して得られた結果を利用しており²⁾、その適用スケールが有効であることになる。また、 $9\text{km} \times 9\text{km}$ 、20分以下の平滑化スケールであれば、本手法を深山レーダーに適用できることになり、以下 $9\text{km} \times 9\text{km}$ 、20分の平滑化スケールの 3.5km 高度に対する適用結果を示す。

総観場の値は既発表の方法¹⁾によって算定した。また、 r, m_i は、ブライトバンドによる推定誤差をできるだけ小さくするために文献1)の方法に改良を加えた算定手法²⁾を用いて推定した。

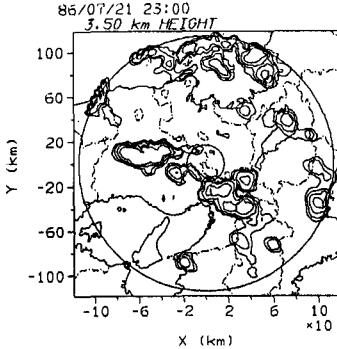


図-7 3次元風速と同時推定した水蒸気相変化量の水平分布

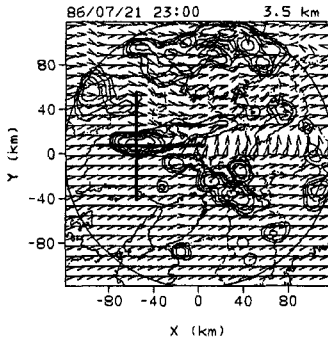


図-8 算定した水平風速分布と算定に用いた降雨強度分布

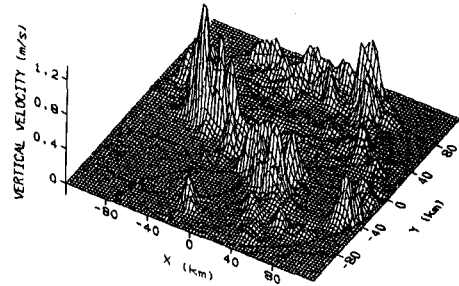


図-9 算定した鉛直風速の水平分布

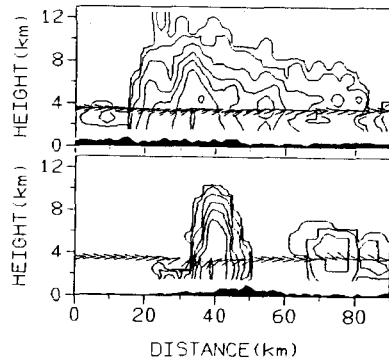


図-10 東西ないし南北鉛直断面内におけるエコー強度分布と算定した風速分布(断面の位置は図8参照)

図-7は水蒸気相変化量の算定結果で、等値線は、絶対値が $1, 2, 4, 8, 16 \times 10^{-7} \text{kg/m}^3$ について示しており、実線が正値を表し、破線が負値を表す。若干の蒸発域が算定された以外は、既発表の方法による同じ平滑化スケールの算定結果とほとんど同じである。一方、図-8は算定した水平風速を算定に用いた r の等値線 ($1, 2, 4, 8, 16, 32, 64 \text{mm/h}$) とともに示してある。境界条件に依存はするものの、総観場の水平風速からのずれが算定されている。図-9は鉛直風速の分布図であり、3.と同様 Q の正負に w の正負が依存している。算定値は高分解能レーダーの同平滑化スケールの結果よりも若干小さいが、平滑化スケールからみて妥当な値といえる。一方、図-10は兵庫県中央部上空に存在する対流性降雨の東西および南北の鉛直断面内における平滑化されていないエコー強度分布と算定された風速分布である。平滑化スケールが3.より大きいため、強雨域での下降流は算定されていないが、対流性降雨に向かう上昇流、特に南北断面の分布では3.と同様対流性エコーの南方寄りに上昇流が算定されている。

5. 2台のドップラー観測から得られる3次元風速を用いた精度調査

図-11(a)は、精度調査に用いた降雨事例の3km高度のエコー強度分布、(b)は2台のドップラー観測から推定されている3km高度の水平風速分布の内、精度調査に用いた領域内での水平分布を示したものの、(c)は(b)の水平風速分布から算定した収発散量 $\text{div}(u, v)$ の水平分布であり、これらを観測値と呼ぶことにする。(a)の等値線は20,30,35,40[dBZe]に関して描いてあり、30[dBZe]以上の部分には斜線を施してある。(b)の矢印の長さは時速で表した風速に一致する。(c)に関しては、絶対値が0,5,10,20,30($\times 10^{-4}$)[sec^{-1}]に対する等値線を描いてあり、実線は負の領域(収束域)、鎖線は正の領域(発散域)を表す。一方、図-12(a)は本手法を用いてエコー強度分布から推定した風速分布である。算定には、観測値の u を北端の境界条件、 v を東端の境界条件として用いた。(b)は(a)の算定時に得られた $\text{div}(u, v)$ の水平分布である。ただし、本手法による算定値の方が細かなスケールで算定されていたので、水平面内の移動平均によって平滑化を行いスケールを合わせてある。

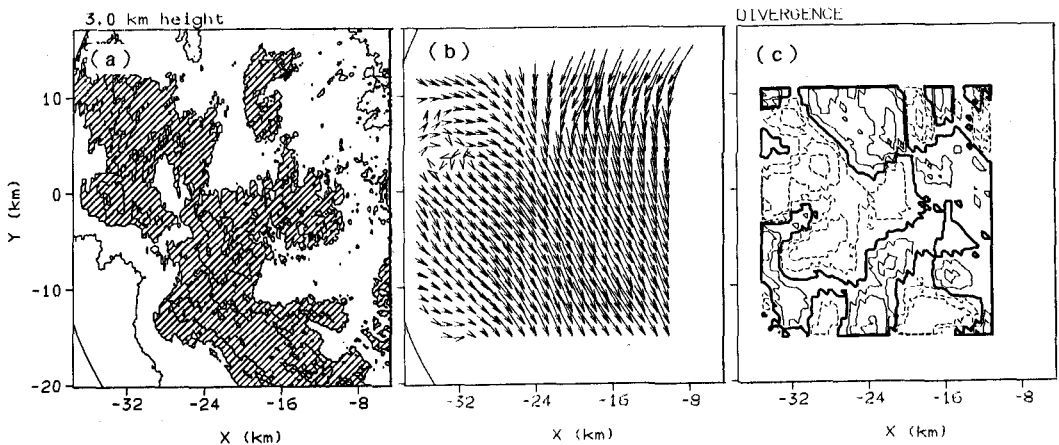


図-11 3 km高度のエコー強度分布(a)とデュアルドップラー観測から推定された水平風速分布(b)およびその収発散量分布(c)。

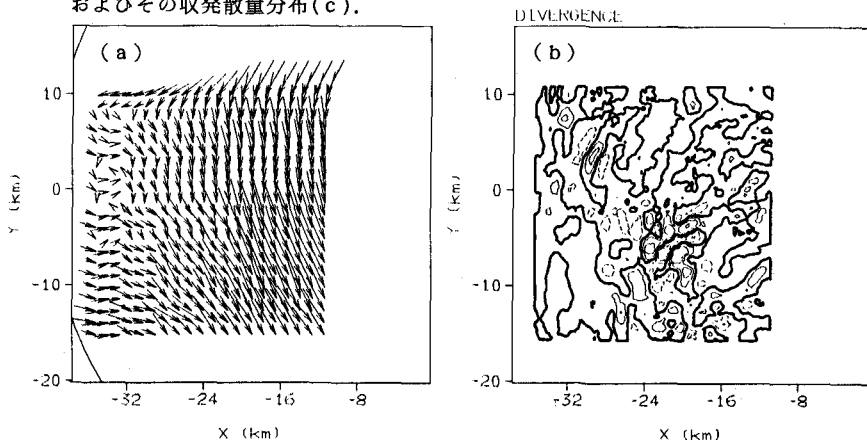


図-12 エコー強度分布から算定した3 km高度の水平風速分布(a)と平滑化した収発散量分布(b)。

この図を見て驚くことは、観測値を境界条件だけにしか用いていないにも関わらず、エコー強度のみからこれだけ精度良く水平風速が算定できることである。すなわち、水平風速の境界条件が得られれば、ドップラー観測によるものに近い精度で、エコー強度から水平風速が推定できることになる。

収発散量の分布について観測値と算定値を比較してみると、まず、値そのものは観測値とよく一致している。さらに、水平分布そのもので比較しても、一部局所的には符号が逆転しているものの、観測値

布における中央から左に広がる正の領域、中央下から東方に湾曲しながら延びている負の領域など、全体系としては良く似た分布となっている。

以上、おもに水平風速分布に関して、すなわち、本質的には $\partial w / \partial z$ に関する調査を進めてきた。最後に、鉛直風速成分 w そのものの水平分布に関する調査結果を示す。

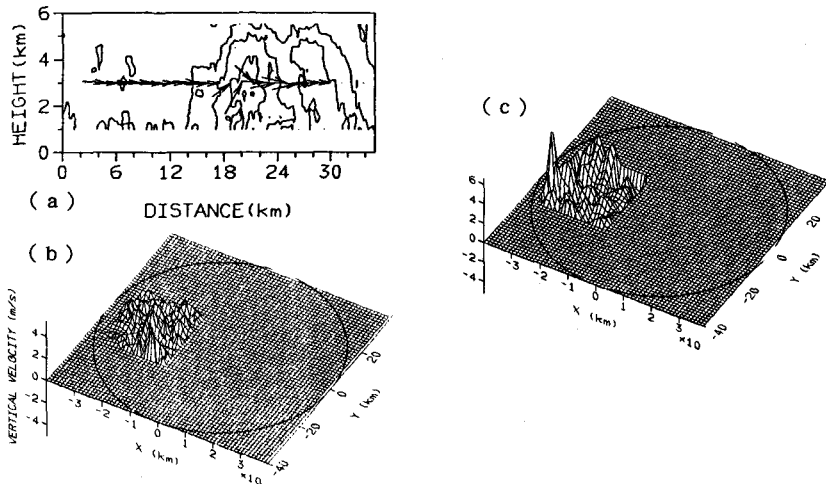


図-13 算定した鉛直風速分布((a), (b))と観測値(c)。

図-13(a)に鉛直断面内の算定風速をエコー強度とともに示す。3., 4.の適用結果と同様、強エコーの風上で上昇流、強エコー部下降流が算定されており、やはり定性的には満足の行く結果が得られている。(b)は、算定した鉛直風速の水平分布、(c)はドップラー観測による水平風速の3次元分布から推定されている鉛直風速の観測水平分布である。本手法により算定された w の大きさは、ドップラー観測から推定されている値と一致しているものの、分布形態が似ていないのは、水平一様な T , p を(3)式に用いているために、エコー強度の鉛直分布の影響を強く受け、無関係であるはずの $\partial w / \partial z$ と w の算定値の間に、対応関係が生じているためである。

6. 結 論

水平風速および水平収発散分布の推定結果から、本研究で対象としたスケールの現象に関しては、水平速度場を構成する水平収発散成分と渦度成分のうち、本質的には水平収発散量成分を通して良好に水平風速を推定できることがわかる。ただし、本研究で用いた等方水平収束の仮定は、渦度分布に関する1つの仮定であり、渦無し流れを仮定しているわけではない。算定方法の簡略化のためにこの仮定を用いたが、渦無し流れとしての算定手法としても完成させておき、本研究の算定結果と比較する予定である。本手法の大きな利点は、 w を大気の下端からの積分によって求めるのではなく、任意の高度に関して直接求められるところにある。したがって、すでに得られている $\partial w / \partial z$ の推定の良好さを土台として、他の降雨事例や積雲モデルによる数値計算の算定結果への適用を通して、今後の課題としての調査を進め、この利点を生かした形でグローバルな推定手法としての完成も目指したい。

最後に、レーダー情報は名古屋大学水圏科学研究所の藤吉康志助教、建設省淀川ダム統合管理事務所、ドップラー観測による風速分布は推定値の作成者である気象庁の石原正仁様(当時気象研究所)から、利用に関するコメントとともに御提供戴きました。ここに、心から謝意を表する次第であります。

【参考文献】

- 1) 中北・椎葉・池淵・高棹(1988):3次元レーダー情報を用いた水蒸気相変化量推定の試み, 水文・水資源学会研究発表会要旨集, pp.210-213.
- 2) 中北・山浦・椎葉・池淵・高棹(1990):3次元レーダー情報を用いた降雨生起場の推定と短時間降雨予測手法の開発, 京大防災年報第33号B-2, pp.193-212.