

ドップラー気象レーダ

Doppler Weather Radar

足立 栄男
ADACHI Hideo

佐藤 祐子
SATO Yuko

従来の気象レーダは、送信機から送信される高周波パルスに対する雨滴から反射されたエコーの強度だけを観測していた。信号処理技術やデータ処理技術などの進歩に伴い、動いていく雨滴から反射されるエコーの速度すなわちドップラー速度を用いることにより、ダウンバーストや三次元の風向・風速などの高度な気象情報を提供できるようになった。

Conventional weather radar transmits high-frequency pulses from the transmitter, and only observes the intensity of echoes reflected back from raindrops. Due to recent technological advancements in signal processing, data processing, and other fields, the capability to detect echo velocity, or Doppler velocity, based on this raindrop movement has been achieved. Processing of this Doppler velocity has enabled the system to provide more sophisticated weather information on downbursts, three-dimensional wind direction and velocity, and other weather phenomena.

1 まえがき

気象レーダは、雲や雨から反射するエコーの強さをとらえ、気象状況の把握や予測を目的に気象防災の分野で幅広く利用されている。また、反射波のドップラー効果を利用し、雨や雲の動的な状況をとらえる技術も国内外で研究されてきた。

そのなかで、小規模で急激な下降風(マイクロバースト)が航空機の離発着事故の原因の一つとなっていることが米国において解明された。この結果、米国の各空港にこの現象をとらえるセンサとしてもっとも有効と考えられるドップラー気象レーダの配備が開始された。わが国においても、関西国際空港、新東京国際空港(成田)、東京国際空港(羽田)にドップラー気象レーダの配備が進められている。

一方、雲の動きをとらえるドップラー技術は、対流性の雷雲を検出する雷探知レーダとして電力会社で利用されている。

当社では、従来からドップラー気象レーダの研究・開発を進めており、1996年に東京電力(株)、97年に東京国際空港、2000年に中部電力(株)にシステムを納入した。

ここでは、ドップラー気象レーダの方式と応用について述べる。

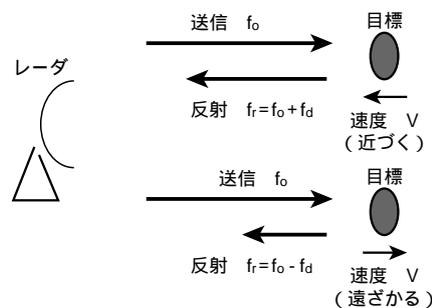
2 ドップラーレーダの原理

気象レーダは、アンテナから空間に発射された電波が雨粒や雲から反射されて戻ってくることを利用し、気象観測を行う装置である。

アンテナを方位方向に360°回転させ、電波を発射してか

ら気象エコーが受信される方位と時間を測ることにより気象エコーの位置を知ることができる。従来の強度系気象レーダでは、このとき受信した気象エコーの受信強度を用いることにより、降雨強度を算出している。これに対しドップラー気象レーダでは、受信強度に加え受信周波数の変化を用いて、気象エコーの速度情報を算出できる。

ドップラー効果は、車のサイレンの音が近づくときに音が高く聞こえ、遠ざかる時に低く聞こえるという身近な現象を用いて説明される。これと同じ現象が電波についても当てはまり、観測物がレーダに近づいている場合は受信される電波の周波数が高くなり、遠ざかる場合には周波数が低くなる(図1)。したがって、レーダが送信した周波数と反射されてきた受信周波数の差を検出することにより、観測物の移動速度がわかることになる。



ドップラー周波数 $f_d = \frac{2V}{C} = \frac{2V}{C} f_0$ (C: 光速) (: 送信波長)

図1 . ドップラーの原理 気象目標の移動速度が、ドップラー周波数の変化として受信される。
Principle of Doppler detection

3 ドップラー信号処理

従来の気象レーダでは、強度観測に地形エコーの除去や平均化などの処理をしている。ドップラー気象レーダでは、これらの処理に加えて固有の処理が必要となる。これに対して、DSP(Digital Signal Processor)の発達により高精度で高速な処理が可能になり、ドップラー速度データの信頼性向上が図られるようになった。ここでは、実用化されているドップラー気象レーダ固有の信号処理について述べる。

3.1 ドップラー速度の検出

ドップラー速度の検出には、パルスペア方式とFFT(Fast Fourier Transform)方式が利用されている。

パルスペア方式は、二つの連続した送信パルスが同一距離から反射し、受信された信号の位相差を検出してドップラー速度を求める方式である。この方式は、回路規模が小さくなることから、デジタル信号処理の分野で従来から多く用いられている(図2)。

FFT方式は、高速のDSPが登場し、信号処理がソフトウェア的にリアルタイムで処理できるようになったことから実用化された。

FFT方式は、受信される位相信号を周波数領域(速度領域)に変換し、速度スペクトラムの最大値を読み取ることに

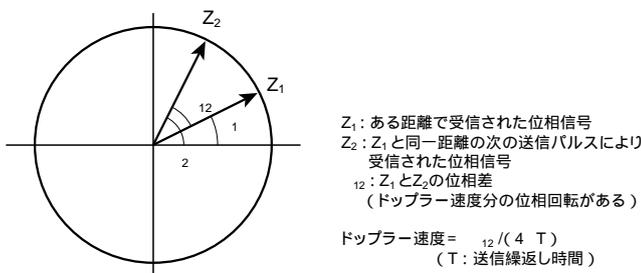


図2 . パルスペア方式による速度検出 送信パルスごとの受信信号の位相回転角から、ドップラー速度を検出する。
Velocity detection in pulse pair method

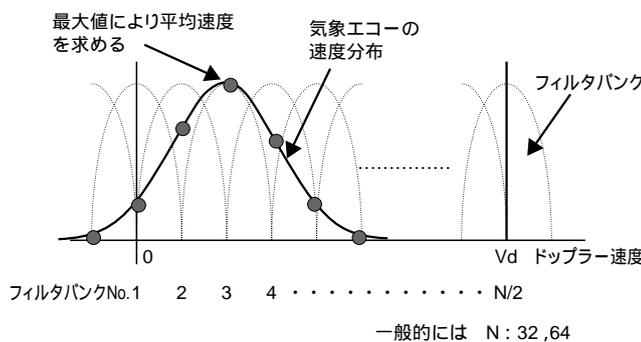


図3 . FFT方式による速度検出 受信信号をFFT処理により周波数領域に変換し、スペクトラムピークからドップラー速度を検出する。
Velocity detection in fast Fourier transform (FFT) method

よりドップラー速度を検出する方式である(図3)。

FFT方式は、パルスペア方式に比べS/N(信号/雑音)改善効果があり、微弱な気象エコーからの風をとらえようとする空港気象ドップラーレーダに採用されている。

3.2 速度折返し

移動速度の大きい気象エコーを検出するときには、受信される位相信号が送信波長の1周期を超える場合があり、ドップラー速度の検出において速度の折返しが発生する。通常、ドップラーレーダでは折返し速度が極力高くなるように繰返し周波数を高くする。Cバンド(5.3GHz)レーダで1,000pps(pulse per second)の送信繰返して送信する場合でも、 $\pm 14 \text{ m/s}$ を超える速度は折返してしまふ(折返し速度 = 波長 \times 送信繰返し周波数/4)。

このために、二つの送信繰返し周波数を交互に送信する2スタガ方式では、二つの送信繰返して検出される速度折返し特性の違いから実際の気象エコーの速度を推定する処理をしている(図4)。二つの繰返して得られる検出速度の差(V)から折返し領域を判定し、検出速度に補正を加える。この処理により最大速度検出範囲を $\pm 40 \text{ m/s}$ 以上に拡大することができる。

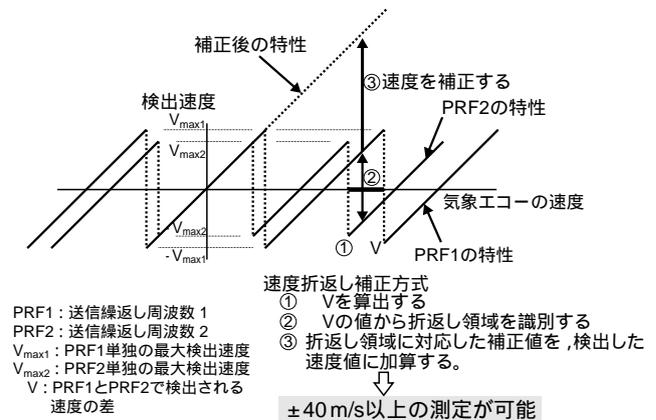


図4 . 速度折返し補正 二つの送信繰返し周波数で検出されるドップラー速度の特性の差から、実際の気象目標のドップラー速度を推定する。

Velocity ambiguity compensation

3.3 2次エコー除去

ドップラー気象レーダでは、速度折返し補正前の段階で折返し速度を高くするために、従来のレーダに比べ高い送信繰返し周波数を使用している。

このため、前のパルスで送信した電波に対する、遠くの気象目標から反射したエコーが擬似的に次のパルスの受信領域に混入してしまう場合がある。このような遠方からの擬似エコーを多次エコーと呼び、特に一つ前の送信に対する擬似エコーを2次エコーと言ふ(図5)。

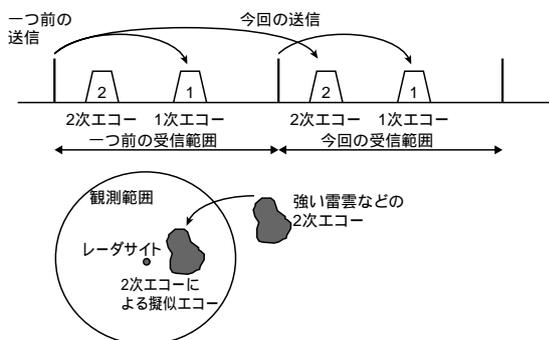


図5 .2次エコーの概念 送信繰返し周波数の高いドップラー気象レーダでは、一つ前の送信による遠距離エコーが観測範囲内に混入する。Second-trip echo

2次エコーの除去方式として、2重PRF(Pulse Repetition Frequency)方式と位相制御方式がある。ここでは、空港気象ドップラーレーダで使用されている位相制御方式を紹介する。

この方式は、送信パルスごとに1次エコー(観測範囲内)と2次エコーの位相関係が一致しないように、送信パルスの位相を制御することにより2次エコーを除去し1次エコーだけを抽出する方式である。この方式の速度領域における処理概念を図6に示す。

位相制御を行わない場合には、1次エコーと2次エコーは速度領域上において別々の速度として分布する(図6(a))。位相制御方式では、受信信号に対して位相制御の値に応じた位相補正を加えることにより1次エコーを拡散させ、2次エコーだけを積み上げることができる(図6(b))。この状態で2次エコーを除去し(図6(c))、今度は1次エコーが積み上がるように位相補正をかけることにより、1次エコーだけを抽出する(図6(d))。

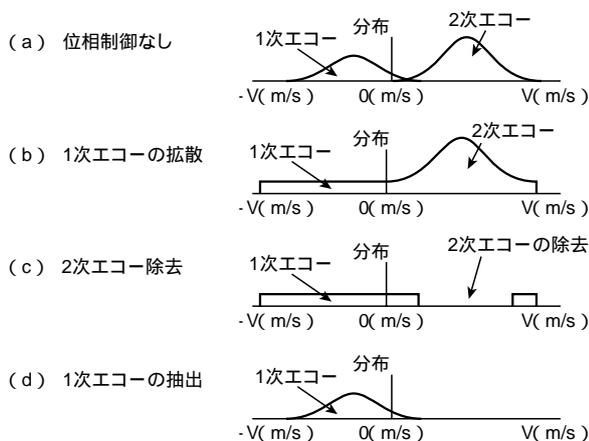


図6 .位相制御方式による2次エコー除去 送信パルスの位相を制御し、1次エコーと2次エコーが混在した受信信号を周波数領域で分離することにより2次エコーを除去する。Rejection of second-trip echo using random phase method

4 ドップラーレーダの応用

ドップラー気象レーダから得られる速度データは、レーダの空中線(アンテナ)ビーム方向の平均速度である。ドップラー気象レーダでは、得られたドップラー速度データを基に、運用目的に合わせて加工処理をしている。

その一例として、ダウンバースト検出と三次元的な風向風速の検出方式について述べる。

4.1 ダウンバースト検出

ウィンドシヤの一つであるダウンバーストは積雲あるいは積乱雲の下で強い風の吹出しを伴った下降気流であり、その水平規模は数キロメートル以下と小さく、寿命も10分以下と短い現象である。特に、水平規模で4キロメートル以下のダウンバーストをマイクロバーストと呼ぶ。離発着時に航空機がこの現象に遭遇した場合には、重大な事故となる可能性がある(図7)。

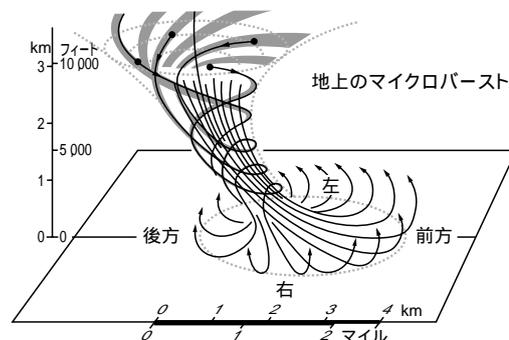


図7 .マイクロバーストの概念 マイクロバーストは、積乱雲の下で強い風の吹出しを伴う下降気流の一つである。Schematic view of microburst

ダウンバーストの下降気流は、地上に達すると水平方向に吹き出すため、ドップラー気象レーダから観測した場合、ダウンバーストの吹出しを中心として風向・風速が急激に変化する。このときレーダ側では、近づく強風が観測され、反対側では遠ざかる強風が観測される。この速度の急変領域をとらえることによりダウンバーストの位置及び規模を検出することができる(図8)。

ダウンバーストの検出例を図9に示す。図中の楕円(だえん)に示す場所がマイクロバーストの発生を示し、楕円内の数値がマイクロバーストの強さを最大速度差として示している。

4.2 三次元の風向・風速検出

ドップラー気象レーダで検出されるドップラー速度は、空中線ビーム方向の速度であり、三次元的な降雨や雲の風向・風速をとらえたものではない。ドップラー速度のデータを基に三次元の風向・風速を検出する方式にVVP(Volume Velocity Processing)法がある。

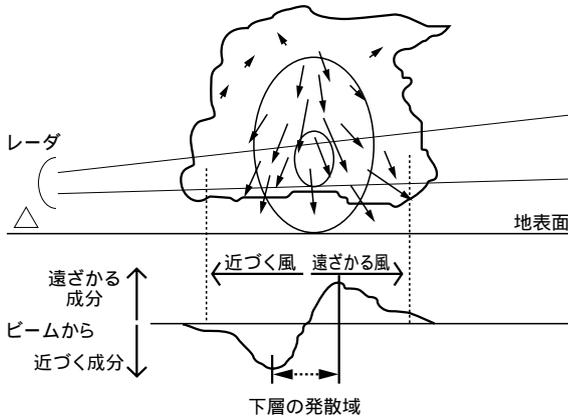


図8 . ダウンバーストの検出 レーダで観測されるドップラー速度の急激な変化からダウンバーストを検出する。
Detection of downburst

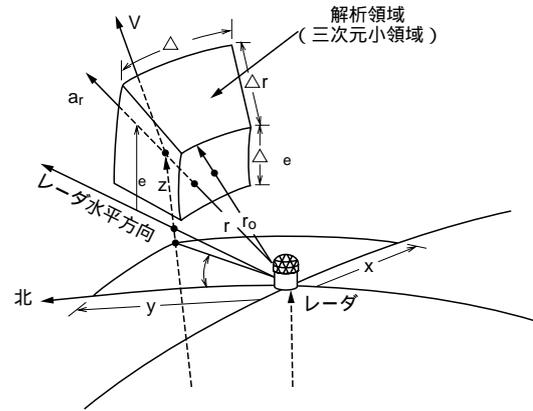


図10 . VVP法 有限な三次元小空間のドップラー速度データを回帰計算することにより、その空間内の平均風ベクトルを求める。
Volume velocity processing (VVP) method



図9 . ダウンバースト検出画像 赤色の楕円によりダウンバーストの発生位置が示される。
Display of downbursts

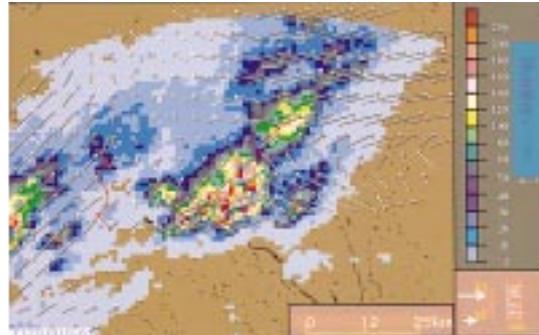


図11 . VVP法による風ベクトル表示 VVP法により求めた風ベクトルにより、雲の動きを読み取ることができる。
Display of velocity vector using VVP method

VVP法はレーダビームを含む有限な三次元小領域を規定し、この領域内で収集される数千もの極座標系のドップラー速度データについて回帰計算を行うことにより、三次元小領域内における平均の風ベクトルを求める方式である(図10)。

VVP法で算出された気象エコーの風ベクトルをユーザーに提供することで、ユーザーは直感的に雲の動きを把握することができる。

また、得られた風ベクトルのデータを利用することにより、雲の移動予測などへの応用も期待できる(図11)。

5 あとがき

米国では既に、全国的ネットワークとしてドップラー気象レーダが配備されており、その他の諸外国でもその配備が進められている。わが国においても、今後、ドップラー気象レーダが数多く利用されていくものと期待される。

今後も、最新技術の研究・開発を継続し、より高度な情報を提供できるシステム作りを推進していく。

文 献

- (1) Richard, J. Doviak; Dusan, S. Zrnica. Doppler Radar and Weather Observation. Second Edition. California, Academic Press, Inc., 1993, 562p.
- (2) T. Theodore Fjita. THE DOWNBURST. 東京(社)日本航空機操縦士協会, 1985, 160p.



足立 栄男 ADACHI Hideo
情報・社会システム社 小向工場 電波応用システム技術部
グループ長。
気象レーダ・防災システムの開発に従事。
Komukai Operations



佐藤 祐子 SATO Yuko
情報・社会システム社 小向工場 電波応用システム技術部主
務。
気象レーダ・防災システムの開発に従事。気象予報士。
日本大気電気学会, アメリカ気象学会会員。
Komukai Operations