

第4章 観測方法

4.1 概要

空港等に設置されているドップラーレーダーは、アンテナを360度スキャンして風の3次元分布を求めている。これに対してウィンドプロファイラーでは、鉛直近辺の3方向のみに電波を発射して、プロファイラー真上の風の鉛直プロファイル測定する。気象研究所のウィンドプロファイラーでは、鉛直方向、鉛直から15度北東及び北西に傾いた方向に電波を断続的（パルス）に順次発射し、その反射エコーの戻ってくるまでの時間から高さを、そしてドップラーシフトから3つのビーム方向の速度を求めている。ウィンドプロファイラーは、前述したようにパルスレーダーでありほぼ矩形のパルスをおよそある間隔で発射している。電波を発射している時間をパルス幅、パルスとパルスの間隔をパルス間隔、1秒間に発射されるパルス数をパルス繰り返し周波数と呼ぶ。また、戻ってきたエコーをサンプリングする時間を range gates, 送信したパルスが戻ってくるまでの時間を range time, 送信パルス繰り返し周波数を単位とした時間を sample time と呼ぶ。これらの値により高度分解能等観測条件が異なってくる。これは通常のレーダーとほぼ同じであり多くの解説もある（例えば小平, 立平, 1972, 小平, 1980, 気象研究所技術報告19号）。

プロファイラーの観測は、高高度モード及び低高度モードの2つのモードを切り換えて行っている。プロファイラーは後述するようにパルス幅およびビーム幅に応じた領域に存在する散乱体の reflectivity の重みの付いた平均 radial 速度を観測しているが、この reflectivity は高度により変化する。また、受信電力は距離の自乗の逆数で減る。このため信号と雑音の比は、通常観測高度と共に悪化し高層の観測では条件が悪くなる。このために、プロファイラーの観測は、パルス幅を変えた、高高度モードおよび低高度モードと呼ばれる2つのモードを切り換えて行っている。これは、パルス繰り返し周波数が同じならば、広いパルス幅程送信エネルギーが大きく、受信帯域幅を狭くできることから信号/雑音を改善できるためである。短いパルス幅を用いる低高度モードではパルス幅 $1.67\mu\text{s}$, パルス周期 $100\mu\text{s}$ で $0.5\sim 9\text{km}$ の観測を、高高度モードではパルス幅 $6.67\mu\text{s}$, パルス周期 $153.5\mu\text{s}$ で約 $4\sim 16\text{km}$ の観測を行っている。Duty cycle はそれぞれ1.6%および5%程度である。

具体的な観測手順は、まず北東方向のビームの高高度モード、低高度モード、そして北西方向ビームの高高度、低高度モード、そして鉛直方向の高高度、低高度モードのドップラーシフトを観測する。各ビームについて1分間観測を行い平均する。このため3ビームの測定をそれぞれ2モードについて行う1サイクルの観測に6分間を必要とする。平均されたデータは、この後直流成分の除去、フーリエ変換、グランドクラッター除去やノイズ除去等の処理を行い視線速度を算

出する。図4.1にこのデータを処理していくフローを示す。この様な処理を3方向のビームについて行い各方向の視線速度を求め、水平風速、風向および鉛直速度の高度分布を算出する。このように、プロファイラーでは信号/雑音を良くするために1つのパルスの反射信号ではなく、複数のパルスの信号を積算(コヒーレント積分)したものを基のデータとしている。時間で積算した時系列データはフーリエ変換により周波数領域に変換され、さらにこの領域でも積算(インコヒーレント積分)が行われる。この時間領域および周波数領域における積算すなわち平均化のタイムシーケンスを図4.2に示す。図の一番下に示した1つの送信パルスから高度毎の反射信号を120個積算し、フーリエ変換して得られたスペクトルを19個積算して3ビーム、2モードの1サイクルデータを求めている。

4.2 距離分解能

ウィンドプロファイラーから発射された電波は、大気中の散乱体により散乱され受信機に到達する。送信電波は有限なパルス幅を持ち、またビームも広がりがあるため、受信エコーは、ある体積に含まれる散乱体からのエコーを加重平均したものとなる。この体積のビーム方向の長さが高度(鉛直)分解能(range resolution)で、パルス幅により決まる。この高度分解能は(パルス幅×光速) / 2となる。図4.3は高度分解能とパルス幅の関係を時間・高度図に表したものである。

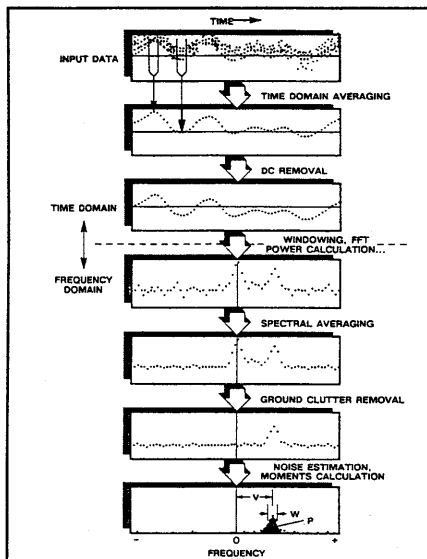


図 4.1 ウィンドプロファイラーにおけるデータ処理の模式図。点線から上が時間領域、下が周波数領域での処理を示す。時系列データを平均してフーリエ変換、ドップラーシフトを求めている(Tycho manual)。

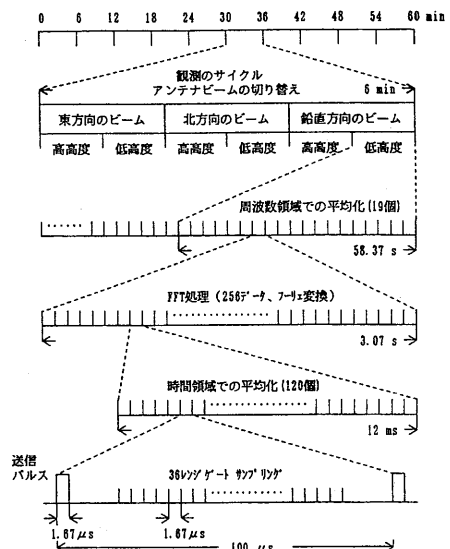


図 4.2 観測データの時間および周波数領域での平均化処理の流れ。下から上に向かってデータ処理が進んでいく。

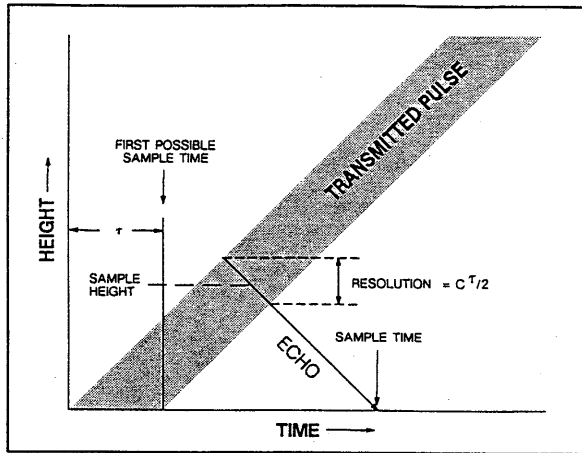


図 4.3 パルス幅 (τ) と高度分解能の模式図。ハッチをした部分が時間と共に上方へ伝搬していく送信パルスを表す。送信後のある時刻 (sample time) に受信する信号は光速とパルス幅の積の半分の高度範囲から散乱されたものとなる (Tycho manual)。

る。また送信ビームを横切る方向の距離分解能は、パルスが戻ってくるまでの時間とビーム幅とにより決まる。ウィンドプロファイラーでは鉛直および鉛直から15度傾いた方向にビームを送信しているため、両者ではこの体積が異なっており、同じパルス幅を用いると距離分解能も異なってくる。このため気象研究のウィンドプロファイラーでは15度傾いた方向のパルス幅を鉛直のものより約3.5%長くしている。低高度モードでの鉛直方向ビームのパルス幅は $1.67 \mu \text{ sec}$ 、サンプリング時間の間隔 (range gate spacing) はパルス幅と同じなので高度分解能は鉛直方向で250 mとなる。また高高度モードでの高度分解能は1000 mである。一方送信ビームを横切る方向の分解能は、ビーム幅は約4度なので高度5 kmで350 m程度となる。この体積中の散乱体が散乱波に寄与する割合を場所の関数として表したのが range weighting function である。range weighting function はアンテナのメインローブの角度分布にも依存するため、通常体積の中心付近が大きくなる。このようにパルス幅を短くすることで高度分解能を改善できる。しかし、パルス幅を短くすると送信エネルギーが弱くなる。また、占有帯域幅は矩形波ではパルス幅の逆数の十数倍程度と言われており、短いパルス程広い周波数領域を必要とする。例えば $0.5 \mu \text{ sec}$ で20 MHz以上となり周波数割当の面から問題が出てくる。さらに duty cycle を小さくする点においても技術面で限度がある (10^{-3} 程度が限界と言われる)。

4.3 観測可能な最低および最高高度

ウィンドプロファイラーにより観測できる最低高度はパルス幅 (距離分解能) と測定システムに依存する。高度分解能が250 mの場合、その代表する高度を高度分解能の $1/2$ とすると最低高度は125 mとなる。ただ、ウィンドプロファイラーは同じアンテナで送信、受信を行っている

ため、電波を送信した後受信に切り換える必要がある。この切り換えている間は受信できず、この時間に相当する距離だけ最低高度が大きくなる。また、パルス波形が矩形に近い程、最低高度は低くできる。しかし帯域幅との関係上、一般には完全な矩形にはできず尾を引いた様な形となっており、この点からも最低高度が制限される。また、高度が低くなるとグランドクラッターの影響が大きくなり、この点からの制限もある。気象研究所ウインドプロファイラーでは500mが最低観測高度となっている。一方、最大高度は、 $\text{光速} / (2 \times \text{パルス繰り返し周波数})$ となる。これは良く知られているように、遠方から反射されてくるエコーが次のパルスを発射した後に戻ってくるために起こるもので距離不確定性 (alias) と呼ばれている。図4.4にパルス繰り返し周波数と距離不確定性の模式図を示してある。エコー2は、送信パルス1の遠い距離から反射してきた信号か、パルス2の近くの散乱帯のものか区別できない。パルス間隔を大きく (パルス繰り返し周波数を小さく) すれば最大高度も大きくなるが、パルス数が少なくなりS/Nや時間分解能が悪くなる。気象研究所ウインドプロファイラーでは低高度モードはパルス間隔は $100 \mu \text{sec}$ でありこの場合の最大高度は15km、一方高高度モードでは、 $153 \mu \text{sec}$ のパルス間隔で最大高度は23km程度となっている。ただ、高高度では構造パラメータも小さくなり、また、距離の2乗の逆数で電力は減衰するため、高度と共に反射信号は弱くなりS/Nの点からも最大観測高度は制限される。さらにプロファイラーの高度情報を記録するメモリー数は通常36高度分に設定されている。これらの点から気象研究所ウインドプロファイラーの最大観測高度は、低高度モードで9km、高高度モードで16kmとなっている。

4.4 1, Q信号

ドップラスペクトルを求めるには狭帯域フィルターにより受信信号の周波数特性を測定すれ

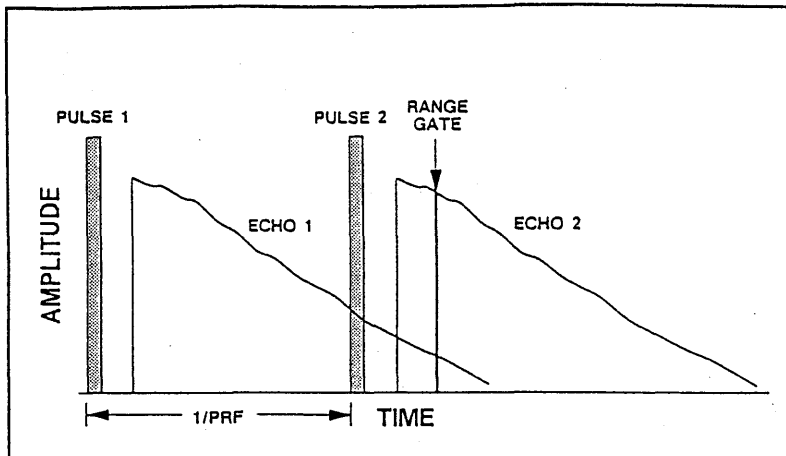


図4.4 パルス繰り返し周波数と距離不確定性の模式図。エコー2は送信パルス1の反射信号かパルス2のものか区別できない (Tycho manual)。

ば直接得られる。しかし、周波数分解能と高度分解能を両立させることが難しいため、同一高度からの反射信号を時系列データと見なしその統計処理からドップラースペクトルを求めることが良く行われている。第2章で述べたように視線速度 v_r の散乱体のドップラー角周波数 w_d 、周波数 f_d は

$$w_d = \frac{2w_0 v_r}{c} = 2\pi f_d, \quad (4-1)$$

となり、受信信号 (2-86) は、

$$E_r = BE_0 \sin[(w_0 \pm w_d)t - 2\frac{w_0 r_0}{c} + \phi_0], \quad (4-2)$$

となる。この信号はリミッター、ローノイズアンプ、高周波増幅装置を通った後中間周波数 ($f_i = 70\text{MHz}$, 角周波数: w_i) に変換される。

$$E_r = B \sin[(w_i \pm w_d)t - 2\frac{w_i r_0}{c} + \phi_0], \quad (4-3)$$

なお (4-2) での BE_0 を (4-3) では B と書いている。この信号のドップラー成分は検波器により取り出されるが、ドップラーシフト量の符号を特定することができない (小平と立平, 1972)。すなわち $+w_d$ と $-w_d$ を区別できないため、このままでは散乱体がアンテナに近づいているのかアンテナから遠ざかっているのか知ることができない。このために直交位相検波器を用いる (Theiss *et al.*, 1963, 青柳, 1986)。これは受信信号を2チャンネルに分ける。局部発信器からの信号を

$$E_r = \sin[w_i t + \phi_i], \quad (4-4)$$

とし、入力信号を

$$E_r^\pm = B^\pm \sin[(w_i \pm w_d^\pm)t + \phi_i^\pm], \quad (4-5)$$

とする。ここで w_i および ϕ_i は局部発信器からの信号の角周波数および位相を示す。肩に記した \pm は散乱体が近づく (+) および遠ざかる (-) 場合を表す。一方のチャンネル I には局部発信器の信号をそのまま、もう一方のチャンネル Q では $\pi/2$ ずらした信号を加える。それぞれのチャンネルの検波器出力信号は、角周波数 w_d^\pm で散乱体が近づいてくる場合

$$E_{\bar{r}}^+ = \frac{B^+}{2} \cos(\omega_{\bar{a}}^+ t + \phi_{\bar{a}}^+ - \phi_i) - \frac{B^+}{2} \cos(2\omega_i t + \omega_{\bar{a}}^+ t + \phi_{\bar{a}}^+ + \phi_i), \quad (4-6)$$

$$E_{\bar{q}}^+ = \frac{B^+}{2} \cos(\omega_{\bar{a}}^+ t + \phi_{\bar{a}}^+ - \phi_i - \pi/2) - \frac{B^+}{2} \cos(2\omega_i t + \omega_{\bar{a}}^+ t + \phi_{\bar{a}}^+ + \phi_i + \pi/2), \quad (4-7)$$

また、角周波数 $\omega_{\bar{a}}$ で散乱体が遠ざかる場合

$$E_{\bar{r}}^- = \frac{B^-}{2} \cos(\omega_{\bar{a}}^- t - \phi_{\bar{a}}^- + \phi_i) - \frac{B^-}{2} \cos(2\omega_i t - \omega_{\bar{a}}^- t + \phi_{\bar{a}}^- + \phi_i), \quad (4-8)$$

$$E_{\bar{q}}^- = \frac{B^-}{2} \cos(\omega_{\bar{a}}^- t - \phi_{\bar{a}}^- + \phi_i - \pi/2) - \frac{B^-}{2} \cos(2\omega_i t - \omega_{\bar{a}}^- t + \phi_{\bar{a}}^- + \phi_i + \pi/2), \quad (4-9)$$

となる。ここで $\phi_{\bar{a}}$ はそれぞれ散乱体が近づくおよび遠ざかる場合の位相を表す。各式右辺第2項は第1項と比べてはるかに周波数が大きいのでフィルターで除去すると、2つのチャンネルでの出力は

$$E_{\bar{r}}^+ + E_{\bar{r}}^- = \frac{B^+}{2} \cos(\omega_{\bar{a}}^+ t + \phi_{\bar{a}}^+ - \phi_i) + \frac{B^-}{2} \cos(\omega_{\bar{a}}^- t - \phi_{\bar{a}}^- + \phi_i), \quad (4-10)$$

$$E_{\bar{q}}^+ + E_{\bar{q}}^- = \frac{B^+}{2} \sin(\omega_{\bar{a}}^+ t + \phi_{\bar{a}}^+ - \phi_i) + \frac{B^-}{2} \sin(\omega_{\bar{a}}^- t - \phi_{\bar{a}}^- + \phi_i), \quad (4-11)$$

となる。この I および Q 信号を In Phase 成分と Quadrature 成分と呼び、この2つの信号の位相を調べることでドップラーシフトの符号が分かる。36の高度毎に取得したこれらの信号は Real Time Processor (RTP) に送られ様々な処理が行われる。

4.5 時間積分

受信信号は大気からの散乱波のみならず機器ノイズ、銀河ノイズ等様々な原因による雑音を含んでいる。一般にこの様な雑音は多くの周波数成分を含んでいる。ランダムな雑音を低減するためには、パルスを幾つか集めて受信信号を平均化する時間積分を行えば良い。ノイズが完全にランダムな場合 N 個のパルスの信号を積分することにより大気からの散乱信号電力は N^2 倍に、ノイズは N 倍に増加する。このため散乱信号電力とノイズ電力の比は $10 \log N^2 / N$ [dB] 改善されることになる (加藤他, 1982)。実際の観測でこの積分時間を変えた場合に観測結果がどう変わ

るかを図4.5に示してある。図の左半分は時間積分を右半分の1/2に設定して観測したものである。低層ではS/Nが比較的良好いため時間積分の影響は小さいが8 km以上では、時間積分の長さを短くすると異常な観測結果が多発していることが分かる。このように、積分時間を小さくするとノイズが除去できず風の観測精度が落ちることが分かる。

時間積分をすることによりフーリエ変換の演算回数を減らすことができる。ただ、あまりこの積分時間を大きくすると時間分解能が悪くなるのはもちろんだが後に述べるように速度を検出する際に不確かさが増してくる。気象研究所のウィンドプロファイラーではモードにより異なるが48～120個のパルスすなわち0.0048～0.012秒間の反射信号を平均している。

4.6 ウィンドウ

ドップラースペクトルを求めるためには、次節で述べるように時間平均した反射信号の自己相関関数をフーリエ変換する。実際に求める相関関数は有限個 (N_f) の反射信号から求めるため、本来の無限個のデータにより計算されるものとは値が異なってくる。この差を補正するのがWindowingである(日野, 1977, Harris, 1978, Doviak and Zrnic, 1992)。有限個のデータを用いるということは離散的時系列データ (nt : n は整数, t はサンプリング時間) に次のようなウエイト (d : データウィンドウ) を乗じたことに等しい。

$$\begin{aligned}
 d(nt) &= 1, & 0 \leq n \leq N_f - 1, \\
 d(nt) &= 0. & \text{他,}
 \end{aligned}
 \tag{4-12}$$

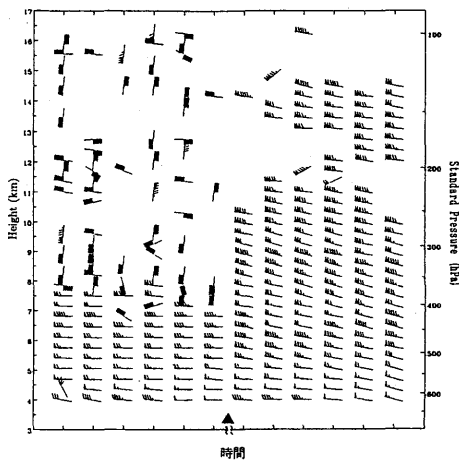


図 4.5 時間軸に記した黒い三角印から左半分の風向風速結果は、右半分に対して時間積分を半分にした観測結果を示す。8 km付近以上の高度ではS/Nが低下して異常なデータとなっている。

ある離散的時系列データ $V(nt)$ の離散フーリエ変換 $F_\infty(w)$ は

$$F_\infty(w) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} V(nt)e^{-jnwt} \quad (4-13)$$

となる。しかし、上で述べたように実際の自己相関関数は有限個 (N_f) のデータから求めるため (4-13) は

$$F_{N_f}(w) = \sum_{n=-N_f/2}^{N_f/2} V(nt)e^{-jnwt} \quad (4-14)$$

で近似される。このため、本来の無限個のデータにより計算される F_∞ とは値が異なってくる。

この有限個のデータを用いたスペクトル (S_M) は

$$\begin{aligned} S_M(f) &= \frac{t}{N_f} \sum_{l=-(N_f-1)}^{N_f-1} R(l)e^{-j^2 \pi f t l} \sum_{m=0}^{N_f-1-|l|} d^*(m)d(m) \\ &= t \sum_{l=-(N_f-1)}^{N_f-1} W(l)R(l)e^{-j^2 \pi f t l} \end{aligned} \quad (4-15)$$

となり、真の相関関数にウェイト W を乗じてスペクトルを求めることに相当する。ここで W は

$$W(l) = \frac{1}{N_f} \sum_{m=0}^{N_f-1-|l|} d^*(m)d(m+l),$$

で、ラグウィンドウと言う。箱型のデータウィンドウではラグウィンドウは

$$\begin{aligned} W(l) &= 1 - \frac{|l|}{N_f}, & -N_f \leq l \leq N_f, \\ W(l) &= 0. & \text{他,} \end{aligned} \quad (4-16)$$

と表される。ラグウィンドウをフーリエ変換したものをスペクトルウィンドウ (Q) という。箱型のラグウィンドウに対するスペクトルウィンドウ Q_0 は、

$$Q_0(f) = N_f \frac{\sin \pi N_f f}{\pi N_f f} \quad (4-17)$$

となる。有限の長さのデータから求めたスペクトルは、真のスペクトル S にスペクトルウィンドウの重みを付けたものとなる。

$$S_M(f) = \int_{-N_f/2}^{N_f/2} S(f') Q(f-f') df' \quad (4-18)$$

すなわち、スペクトルウィンドウはスペクトルの移動平均の重みを表している。

箱型および三角形の W および Q を図4.6にプロットしてある (Blackman and Turkey, 1958)。一般にスペクトルウィンドウの周波数の幅を広げると計算したスペクトルの分散が大きくなり、狭くすると信号の高周波成分が失われる。(4-15) 式のような箱型のウィンドウでは Q の裾が広く負のスペクトルが得られることがある。このため、本来のスペクトルに近い値が得られるようなウィンドウが種々考案されている (Harris, 1978)。気象研究所ウィンドプロファイラーで用いら

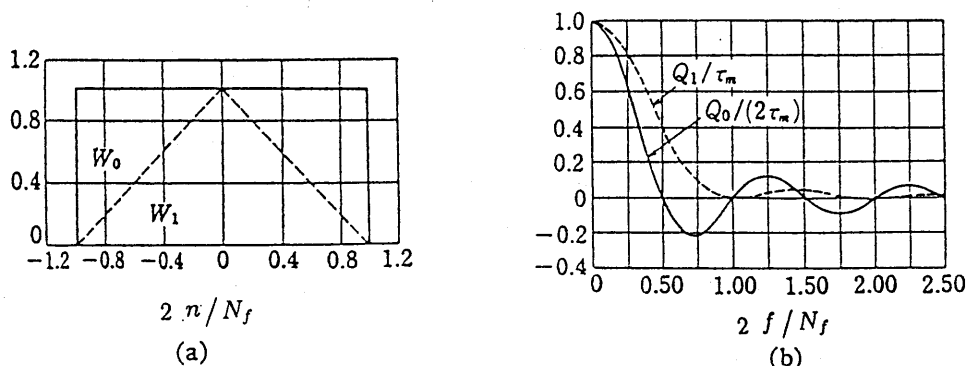


図4.6 箱型 (W_0) および三角形 (W_1) のラグ(a)およびスペクトル(b)ウィンドウ (Blackman and Turkey, 1958)。

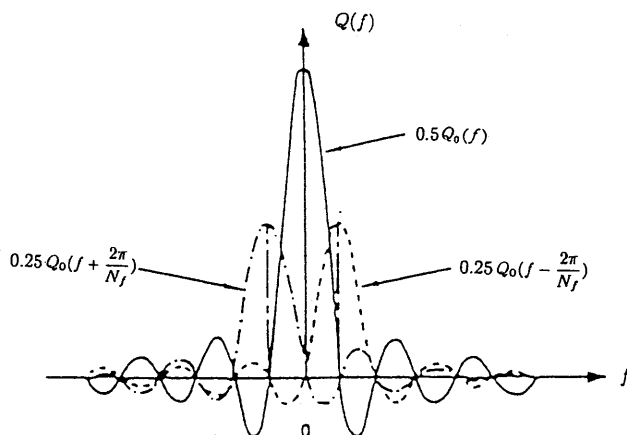


図4.7 ハンのウィンドウ (Harris, 1978)。

れているのはハン (Hann) のウィンドウ (図4.7) と呼ばれるもので

$$W(nt) = a + b \cos\left(\frac{2\pi nt}{N_f}\right), \quad (4-19)$$

と W を表す。ここで $a = b = 0.5$, $n = 0, 1, \dots$ である。スペクトルウィンドウは

$$Q(f) = 0.5 Q_0(f) + 0.25 \left[Q_0\left(f - \frac{2\pi}{N_f}\right) + Q_0\left(f + \frac{2\pi}{N_f}\right) \right], \quad (4-20)$$

と表される。

4.7 ドップラースペクトル

2章で述べたようにドップラースペクトルは、Wiener-Khintchine の関係式から、反射信号の自己相関関数を求め、そのフーリエ変換をすれば得られる。サンプリング時間 T_s で取得した M 個の時系列データ $V(m)$, $m = 0, \dots, M-1$ の自己相関 ($R(l)$) は

$$R(l) = \frac{1}{M} \sum_{m=0}^{M-|l|-1} V^*(m) V(m+l), \quad (4-21)$$

となる。ここで V^* は共役複素数を示す。これからドップラースペクトルは

$$S(f) = T_s \sum_{l=-(M-1)}^{M-1} R(l) e^{-j2\pi f T_s l}, \quad (4-22)$$

と計算できる。しかし、高速フーリエ変換法を利用すれば直接、効率的に時系列データから周波数領域 (f) でのスペクトルが求まる。受信信号 $V(mT_s)$ の i 番目のフーリエ係数 $F(f_i)$ は

$$F(f_i) = \sum_{m=0}^{M-1} V(mT_s) e^{-j2\pi f_i T_s m}, \quad (4-23)$$

となる。ドップラースペクトルは

$$S(f) = |F(f)|^2 \frac{T_s}{M}, \quad (4-24)$$

なので

$$S(f) = \frac{T_s}{M} \sum_{m=0}^{M-1} V^*(m) e^{-j2\pi f T_s m} \sum_{n=0}^{M-1} V(n) e^{-j2\pi f T_s n}, \quad (4-25)$$

として求めることができる。

気象研究所ウィンドプロファイラーでは、最も基本的には100 μ s毎にサンプリングしたデータを120個、時間間隔で12ms毎に集め平均を行い1データとしている。このデータのIおよびQ信号、256個を時系列データとして高速フーリエ変換を行い周波数領域のデータに変換している。得られたスペクトルをさらに平均する。これはスペクトルにスムージングをかけ、スペクトルピークの周波数すなわちドップラー速度を見分け易くするため行うものである。この平均化により観測可能高度が高くなるが平均するスペクトル個数(NFFT)を大きくすると時間積分の場合と同様に時間分解能が悪くなる。気象研究所のウィンドプロファイラーではモードにより異なるが19~30個のスペクトルの平均を取っている。

4.8 観測可能最低, 最高風速

ウィンドプロファイラーのパルス繰り返し数(PRF)は10000/秒(パルス間隔:100 μ sec)あるいは6500/秒(153.5 μ sec)で、この割合で各高度からの散乱信号をサンプリングしている。この離散的にサンプリングされた値をフーリエ変換して信号に含まれている周波数を調べるわけだが、この場合PRF/2以上の周波数を信号が持っても無意味な低周波信号として観測される。これはfrequency aliasingと呼ばれている(図4.8, 小平と立平, 1972)。図の例のようにパルス繰り返し数を10Hzとした場合、観測できる最大の周波数は5Hzとなる。この場合7Hzの信号を受信しても3Hzと観測されてしまうことになる。

このPRF/2の周波数をナイキスト周波数(f_N)あるいは折り重ね周波数と呼ぶ。ウィンドプロファイラーでは、この周波数は500Hzあるいは3250Hzと風速10m/sでのドップラーシフトの周波数約26.7Hzに比べ十分大きい。しかし、これは反射信号1サンプルをフーリエ変換する場合である。実際にはS/Nの関係から上で述べたように時間や周波数域での積分、平均を行っている

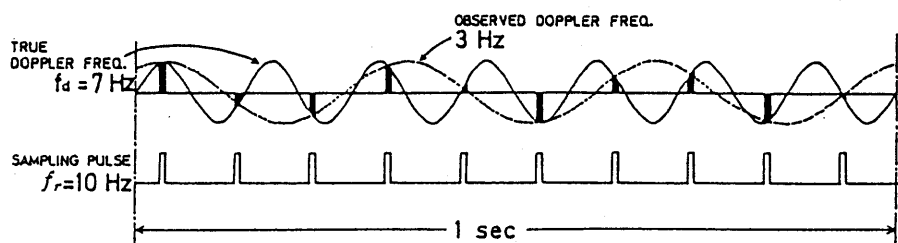


図 4.8 ドップラー周波数の折り返し。パルス繰り返し数を10Hzとした場合、観測できる最大の周波数は5Hzとなる。7Hzの信号を受信しても3Hzと観測されてしまう(小平と立平, 1972)。

ため実際のサンプリング率はパルス繰り返し周波数よりずっと小さくなる。すなわち時間平均するデータ数をNCOH, スペクトルのポイント数をNFFTとするとナイキスト周波数および観測可能な最大ドップラー速度 (v_{max}) は,

$$f_N = \frac{\text{PRF}}{2\text{NCOH}}, \quad (4-26)$$

$$v_{max} = \lambda \cdot \frac{\text{PRF}}{4\text{NCOH}}, \quad (4-27)$$

となる。PRF=10000, NCOH=50では $f_N=100\text{Hz}$, $v_{max}=37.5\text{m/s}$ となる。なお、この値は送信電波のビーム方向の視線速度に対するものである。実際の風速(視線速度)がこの最大の観測可能速度を越えると観測結果は不明確になるが、周囲のデータからこの不明確性を取り除く方法が開発されている (Miller *et al.*, 1994)。また周波数(速度)分解能 (Δf (Δv)) は,

$$\Delta f = \frac{\text{PRF}}{\text{NCOH} \cdot \text{NFFT}}, \quad (4-28)$$

$$\Delta v = \lambda \cdot \frac{\text{PRF}}{2\text{NCOH} \cdot \text{NFFT}}, \quad (4-29)$$

で、NFFT=256とすると、 $\Delta f=0.78\text{Hz}$, $\Delta v=0.29\text{m/s}$ となる。

4.9 ノイズ除去

4.5で述べたように受信信号は、大気からの散乱波のみならず機器ノイズ、銀河ノイズ等様々な原因による雑音を含んでいる。図4.9はドップラースペクトルの一例 (May and Strauch, 1989) でドップラー速度 v のドップラー信号(ハッチ)と共にあらゆる周波数域に雑音が存在している。これらの雑音は4.5で述べたように時間で平均し雑音を低減しても完全には取り除けない。観測機器からの雑音の例を図4.10に示す。図4.10 aは、送信器およびアンテナを切り放した時、図4.10 bはさらにT/Rスイッチを切り放した時の出力、標準偏差およびノイズ数を示したものである。縦軸は高度(m)を表す。(a)で多く表れていたノイズの数は(b)では大幅に小さくなっており、T/Rスイッチノイズを発生していることが分かる。ノイズ出力および標準偏差については、上層ではほとんど差は無いが最下層では(a)では大きい値を示すものが(b)では大幅に小さくなっていることが分かる。

ドップラー速度等を算出する前にこのような雑音をドップラースペクトルから除去しておく必要

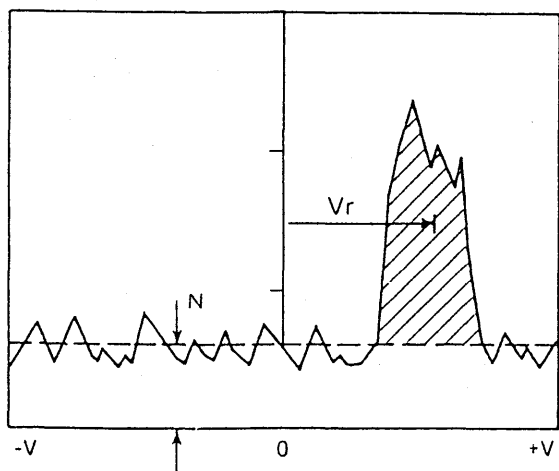


図 4.9 ドップラスペクトルの模式図。ハッチをした部分が大気からの信号によるスペクトルで V_r がドップラー速度を表す。N と記してあるのが雑音レベル (May *et al.*, 1989)。

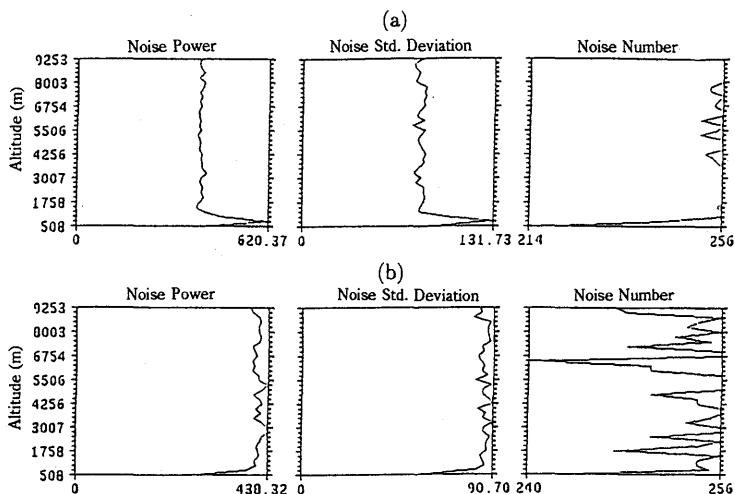


図 4.10 送信器およびアンテナを切り離れた時の観測器からの雑音 (a) およびさらに T/R スイッチを切り放した時の雑音 (b)。縦軸は高度 (m)。

がある。雑音の大きさを決める方法は種々あるが、気象研究所ウィンドプロファイラーで用いているのは、Hildebrand and Sekhon (1974) による方法である。この方法では、雑音を白色と仮定するもので、雑音レベルを決めるアルゴリズムは次のとおりである。 N 個のスペクトル密度 S_n を考える。ウィンドプロファイラーの大気からの信号およびノイズをガウス形と仮定し、以下の手順で雑音レベルを決めている。

- (a) p ポイント running 平均をしたスペクトルをつくる。
- (b) 適当なしきい値を決め、その値以上のスペクトルデータを除外した新しいスペクトルを作る。
- (c) しきい値を種々に変え、(b)の方法で作ったスペクトルが白色雑音であるか否かを判定する。

白色雑音となるしきい値レベルを雑音レベルとする。

スペクトルが白色雑音の場合次式で示すパラメータ R_1 と R_2 の比は 1 となる。これを利用して、スペクトル (S_n) が白色雑音であるか否かを判定する。

$$R_1 = \frac{\sigma_N^2}{\sigma^2}, \quad (4-30)$$

$$R_2 = \frac{P^2}{Qp}, \quad (4-31)$$

ここで

$$\sigma^2 = \frac{\sum f_n^2 S_n}{\sum S_n} - \left(\frac{\sum f_n S_n}{\sum S_n} \right)^2, \quad (4-32)$$

$$P = \frac{\sum S_n}{N}, \quad (4-33)$$

$$Q = \sum \frac{S_n^2}{N} - P^2, \quad (4-34)$$

$$f_n = \frac{n}{T}, \quad (4-35)$$

σ_N は白色雑音の分散で、ドップラースペクトルの最小および最大周波数を各 f_{min} および f_{max} とすると

$$\sigma_N^2 = \frac{(f_{max} - f_{min})^2}{12}, \quad (4-36)$$

となる。

ここで、 p は running 平均する個数、 N はスペクトルのポイント数 (NFFT)、 T はデータ数である。この過程を模式的に表したのが図4.11 (Hildebrand and sekhon, 1974) で、(a)が雑音を除去する前の元のスペクトルを表す。このスペクトルから大気からの散乱信号を除いて残ったスペクトルが白色か否かを判定する。(b)が(a)の実線より大きい信号を除去したもの、(c)が(a)の点線より大きい信号を除去したスペクトルを示す。残ったスペクトルが白色ならばそのスペクトルを雑

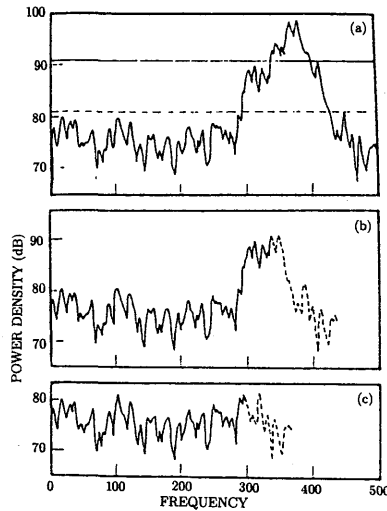


図 4.11 雑音レベルを推定しグラウンドクラッターを除去する過程の模式図。(a)が観測スペクトル、(b)が実線で示したしきい値より大きい信号をカットしたもの、(c)が点線のしきい値を用いて得たスペクトルである。(b)あるいは(c)のスペクトルが白色か否かを調べて雑音レベルを決定する (Hidebrand and Sekhon, 1974)。

音レベルと推定するものである。なお、気象研究所ウインドプロファイラーでは $p = 3$ で計算を行っている。

4.10 グラウンドクラッター除去

地表面から反射してくるエコーをクラッター雑音と呼び、前述した雑音と同様に受信信号から取り除く必要がある。これは送信電波のサイドローブ等により地表面に送信電波が当たり引き起こされる。アンテナサイドローブを減らすことやフェンスをアンテナ周囲に作って地表面の影響を小さくしたり (Becker and Sureau, 1966), グラウンドクラッターの解析 (Sato and Woodman, 1982, Barton, 1985) 等の努力が成されているが完全になくすことは困難で、特に低層大気の観測に障害となる。図4.12は、915MHzパラボラアンテナを用いた境界層レーダーにより観測したドップラーズペクトルである (Russel and Jordan, 1991)。(a)がフェンスなしで得たもので下層で中心 (点線) のドップラー速度ゼロ付近に大きなグラウンドクラッターが表れている。一方(b)がアンテナの周囲にフェンスを用いて観測したもので、フェンスによりグラウンドクラッターが除去されていることが分かる。

地表面からのクラッターは、ドップラーズペクトルの中心 (ドップラー速度=0) に表れ、非常に狭いスペクトル幅を持っている。このスペクトル強度および幅は大気からの信号と重なっており両者を分離することが困難である (図4.13, Russel and Jordan, 1991)。図の左側のピークが大気からの散乱信号、右側がクラッターを示す。クラッターによりドップラー速度ゼロ付近の信号が妨害されている。そこで、中心付近の大気の散乱によるスペクトルは観測不能と考えて、

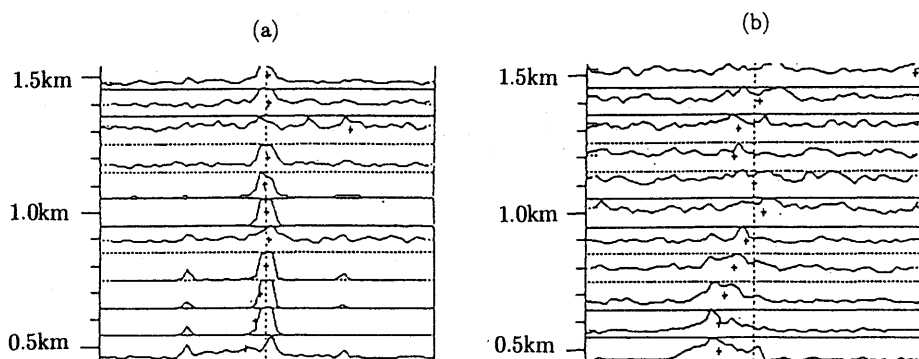


図 4.12 フェンスなしで観測したドップラースペクトル (a) およびフェンスを用いて得たスペクトル (b)。フェンスによりグラウンドクラッターが除去されていることが分かる (Russel and Jordan, 1991)。

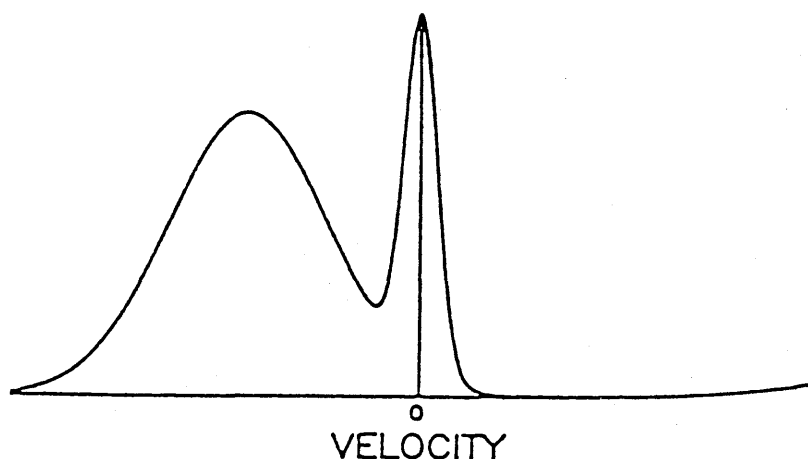


図 4.13 グラウンドクラッターによる信号はドップラー速度ゼロ付近にあるが、大気からの散乱信号とも重なっており速度ゼロ近辺の大気信号が妨害されている (Russe and Jordan, 1991)。

周りのデータからスペクトル中心付近のデータを補間する方法でグラウンドクラッター影響を除外する。すなわち、グラウンドクラッターが存在すると考えられるスペクトルの中心付近領域を決め、この領域のスペクトル密度を領域の外の値により直線あるいは指数関数により内挿した値により置き換えるものである。気象研究所ウインドプロファイラーでは、この領域として中心からのスペクトルポイント数を3点とし、直線補間にしたものをグラウンドクラッターとして大気散乱によるスペクトルから除外している。

4.11 モーメントの計算

ドップラースペクトルには平均風速や風速のばらつき、また反射強度に関する情報が含まれている (図4.14)。図の f_D がドップラーピーク周波数、 w_f がスペクトル幅、 N がノイズレベルを表している。大気散乱によるドップラースペクトルがきれいなガウス分布をしている場合はその

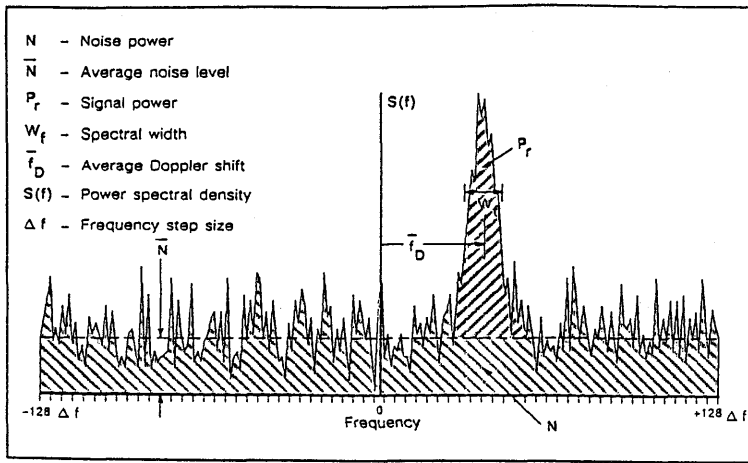


図 4.14 ドップラースペクトルの模式図 (Tycho manual)。

ピークの周波数（ドップラー速度）がサンプリング領域の平均視線速度となり，またピークから $1/e$ の幅がスペクトル幅となる。平均風速等を算出するには，まず大気からの信号のピークとして最大の強度を持つピークを見つける。このピークからドップラーシフト周波数を検出する方法としては，通常のドップラーレーダーで良く用いられているパルスペア方式，MEM法 (Maximun Entropy method) (Klostermeyer,1986)，非線形最小 2 乗法によりガウス関数にフィッティングする方法，またスペクトルの周波数に関するモーメントを計算する方法がある (Woodman, 1985, Yamamoto *et al.*, 1988, May *et al.*, 1989)。気象研究所ウインドプロファイラーではモーメント法を用いている。モーメントを求める周波数積分は最大のスペクトル強度を持つピークについて行う。ただし，グラウンドクラッターは除去しておく。

ドップラースペクトルの最大のピークを分解能領域あるいはドップラー速度で積分したゼロ次モーメント

$$P_0 = \int S(r, v) dv, \quad (4-37)$$

が平均の受信パワーを表す。ドップラースペクトルにドップラー速度 v の重みをつけて分解能領域で積分した 1 次モーメント (P_1) は

$$P_1 = \int v S(r, v) dv, \quad (4-38)$$

で平均ドップラー速度となり，ウインドプロファイラーの基本的な出力である。ドップラースペクトルにドップラー速度の平均値からの差の自乗の重みをつけて分解能領域で積分した 2 次モー

メント (P_2) は

$$P_2 = \int |v - \bar{v}|^2 S(r, v) dv, \quad (4-39)$$

でスペクトル幅を表し、空間の乱れやシアーの情報を含んでいる。

4.12 風向風速の東西、南北成分の算出

今までの処理は RTP 法により行われてきた。以下の処理はデータ処理装置で行われる。ウィンドプロファイラーでは3方向に電波を発射しビーム方向の視線速度を求めている。鉛直方向から θ 、北から東方向 $\pi/2 + \phi$ 回転したビームの視線速度を V_E 、 θ 、北から ϕ 回転した方向のビームの視線速度を V_N 、鉛直方向のビームの視線速度を V_Z とする (図 4.15)。いずれもアンテナから遠ざかる方向を正とする。水平風速の東西成分を U (東方向を正)、南北成分を V (北方向を正)、鉛直成分を W とする。 $\phi = 0$ の場合の水平風速と視線速度とは次の関係にある。

$$V_E = U \sin \theta + W \cos \theta, \quad (4-40)$$

$$V_N = V \sin \theta + W \cos \theta, \quad (4-41)$$

$$V_Z = W. \quad (4-42)$$

あるいは、天頂角 θ 、北から時計方向に測った方位角 ϕ のビームの視線速度 V_r は

$$V_r = U \sin \phi \sin \theta + V \cos \phi \sin \theta + W \cos \theta, \quad (4-43)$$

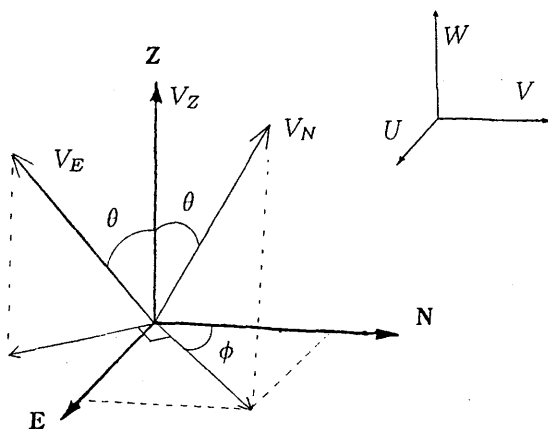


図 4.15 ウィンドプロファイラーによる水平風の算出ベクトルの模式図。 V_N 、 V_E および V_Z が視線速度、 U 、 V 、および W が風速を表す。

となる。3つのビームで水平風を求めるためには、各高度で風が水平方向に均一であることが不可欠である。収束や小さい対流がある時のように水平面上、すなわち3つのビームで風が等しくない場合は誤差をもたらす。この様な不均質性がある場合は、5つのビームを用いることが有効である (Strauch *et al.*, 1987)。

この3ビームの視線速度から水平風を算出する条件は、風向風速が観測時間内および水平に一様であることで、特に鉛直流の一様性が重要となる (Strauch *et al.*, 1987, Weber *et al.*, 1992)。小さいスケールの対流や激しい降水時などでこの水平一様性が満たされなくなるため計算した水平風に大きな誤差をもたらす (Wuertz *et al.*, 1988)。例えば、水平風20m/sの場合に鉛直流に1m/sの誤差があると水平風の計算値は24m/sとなり20%の誤差となる。

4.13 出力

観測した風向風速の鉛直プロファイルやスペクトル幅等の結果は、ディスプレイ、レーザープリンター、磁気テープ等に出力される。またドップラースペクトルも得ることができる。図4.16-18にこれら出力結果の例を示す。

図4.16は、1991年9月18日に観測した水平風ベクトルの時間鉛直断面図である。縦軸が高度、

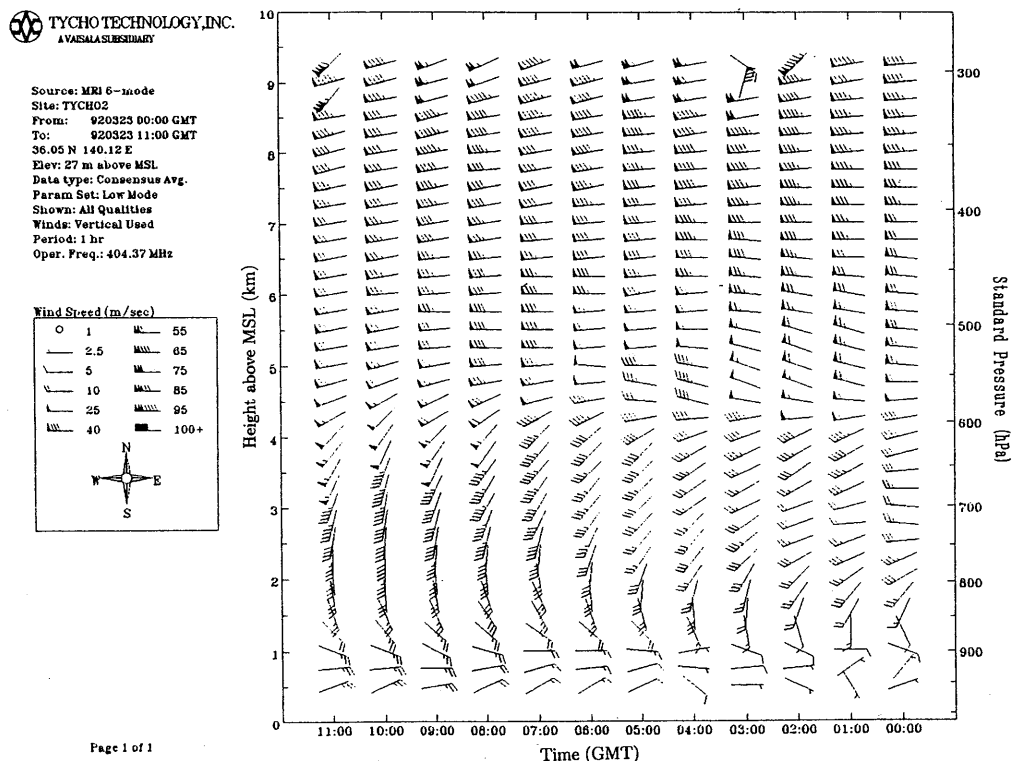


図4.16 ウィンドプロファイラーの観測例。風向風速の時間高度断面図。

横軸が時間 (GMT) で右から左へと時間が進む。低高度モードの観測結果で 500 m から 9 km までの風の鉛直プロファイルの 1 時間平均値をプロットしてある。図 4.17 は、1991 年 9 月 18 日 23 時 (GMT) における風速の鉛直プロファイル(a), 風向の鉛直プロファイル(b), 視線速度(c), 散乱波電力(d), そしてスペクトル幅の鉛直プロファイル(e)をプロットしてある。長い波線が東に傾いたビーム, 点線が北に傾いたビームそして 1 点鎖線が鉛直ビームを示す。図 4.18 は、低高度モード 36 高度でのドップラスペクトルを示したもので左下が最下層の 500 m, 右上が 9253 m のものである。各スペクトルの中心がドップラー速度がゼロで、横軸のフルスケールは 15.32 m/s である。スペクトルピークの中心付近に記入されている縦線は平均ドップラー速度のを示している。なお、この図は東方向に傾いたビームのスペクトルでその強度は規格化してある。

4.14 品質管理

3 ビーム, 36 高度についての視線速度, 受信強度およびスペクトル幅が 6 分毎に VAX コンピュータに送られてくる。この内, 視線速度データを 5 個あるいは 10 個すなわち 30 分あるいは 1 時間分のデータから平均の風速を求めている。これらのデータは、前述したように時間平均等により

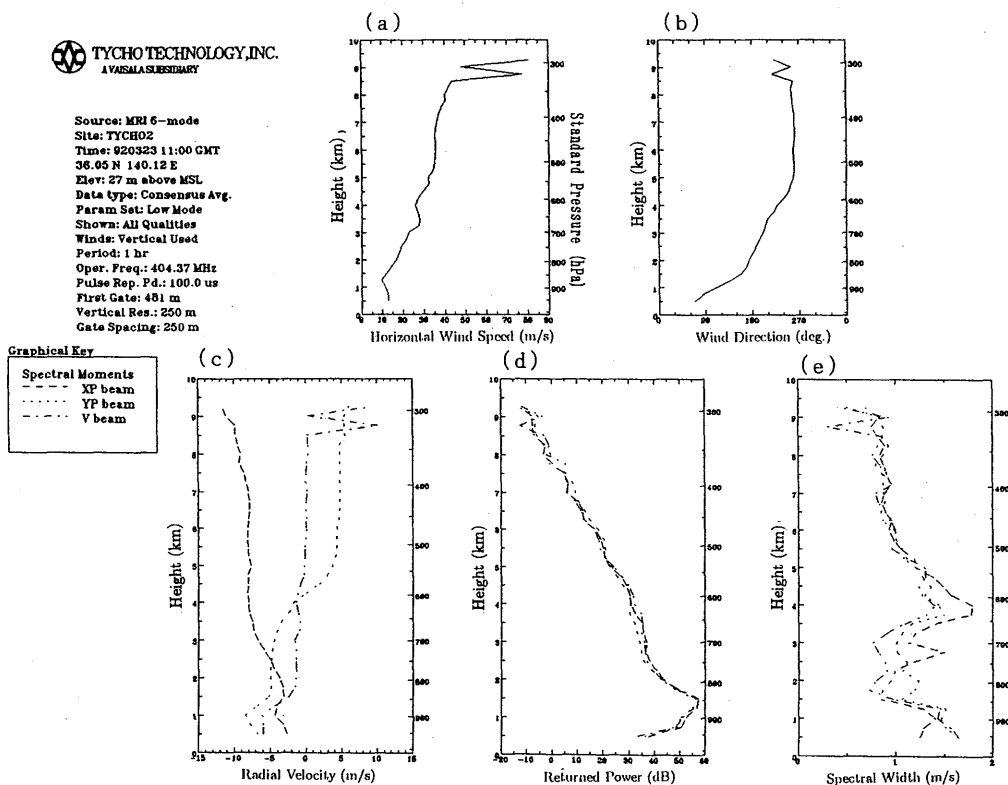


図 4.17 ウィンドプロファイラーの観測例。水平風の高度分布 (a), 風向の高度分布 (b), 視線速度の高度分布 (c), 受信電力の高度分布 (d), スペクトル幅の高度分布 (e)。

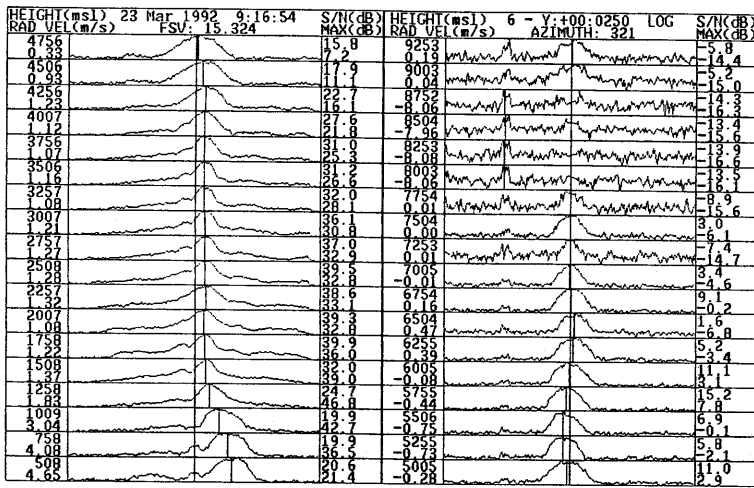


図 4.18 ウィンドプロファイラーの観測例。鉛直ビーム，低高度モードでの観測例を示す。左半分が 508 m から 4756 m まで，右半分が 5005 m から 9253 m までのドップラースペクトルである。中心がドップラー速度ゼロ，フルスケールは 15.32 m/s である。各高度のスペクトルピーク付近に記したバーが平均ドップラー速度を示している。

白色雑音やグラウンドクラッターは一応取り除かれている。しかし，観測時にプロファイラー上空を航空機が飛んでいたりとそのその擾乱は大きなノイズを生む。図 4.19 は航空機によると思われる擾乱により 8000 m 付近のドップラースペクトルが大きく乱された例である。また，気象条件により著しく S/N が劣化した場合も視線速度に大きな誤差を含むことがある。観測された 10 個の鉛直プロファイルデータ，すなわち 36 高度×10=360 個の中に，上記の様な原因で不良な値が含まれていると，計算した毎時の風速値も不良になってしまう。これを避けるために 10 個の

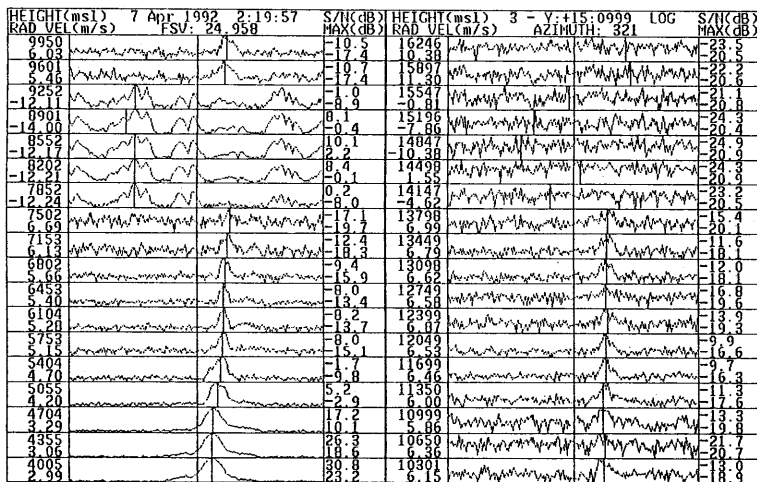


図 4.19 7 km から 9 km にかけて大気擾乱によるドップラースペクトルの乱れが観測され，その前後の風速と大きく変わっている例。

鉛直プロファイルデータの内の不良データを判別し毎時の風速を計算する場合にこの不良データを除外しようとするのが品質管理である。品質管理の方法は、基本的には時間あるいは空間（高度）において周囲のデータと比較して著しく異なるデータを取り除こうとするものである（Weber *et al.*, 1993, Yoe *et al.*, 1992）。当初はデータ処理装置（マイクロ VAX II）で時間軸の連続性をチェックする品質管理を行っていた。しかし、必ずしも不良データが十分取り切れていないため新たな品質管理手法を開発しパソコン上で不良データを取り除く処理を行っている。

(1) 品質管理手法（方法A）

10個のデータを比較して、著しく他のデータと離れているものを不良データとして取り除くもので、consensus average法と呼ばれている。取り除き方は次のとおりである。

- (a) 10個の内のある測定された視線速度から $\pm 2 \text{ m/s}$ の範囲にあるデータが他の9個の中に幾つあるか調べる。
- (b) 上の(a)を10個のデータについて行い $\pm 2 \text{ m/s}$ の範囲にあるデータの数が最も多い値を基準の視線速度とする。
- (c) 基準値から $\pm 2 \text{ m/s}$ の範囲外のデータは不良とし、範囲内のデータのみ用いて毎時の値を計算する。なお範囲内のデータ数が規定データ数（3 - 5個）以下では毎時の値は欠測とする。

(2) 品質管理手法（方法B）

上記の品質管理法ではまだ不良データが十分取り切れていない。また、方法Aは1時間平均についてのみ適用しており、30分平均のデータが必要な場合にも対応できないため新しい品質管理手法の開発を行った。この開発した方法および（A）の手法のフローを図4.20に示す。(a)が方法A、(b)が方法Bのフローを示している。開発した方法の手順は次のとおりである。

(a) 受信信号強度のチェック

受信信号強度が低高度モードでは -15 dB 以下、高高度モードでは -22 dB 以下のデータを不良とする。このしきい値は多数のデータを調べ経験的に決めているが、測定システムや大気条件で最適な値は変化するためやや緩い条件としている。

(b) スペクトル幅のチェック

観測されたドップラースペクトルのなかには非常に幅の狭いスパイク状のピークがノイズとして表れることがある。図4.21はスパイク状ノイズの観測された例で、高度4000m付近に鋭いピークが表れている。この鋭いピークは強度も大きいため除外しておかないとこのドップラーシフトを視線速度として計算機が処理してしまうことがある。このため、受信信号のスペクトル幅が 20 cm/s より小さいピークをノイズとして除外する。

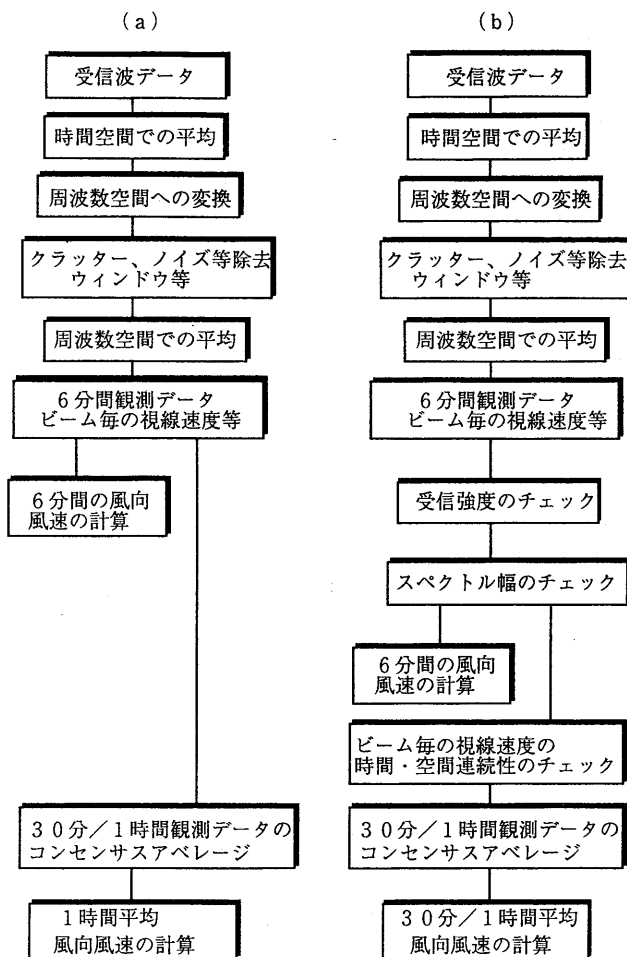


図 4.20 品質管理のフロー。(a) が方法 A, (b) が方法 B の流れ図を表す。

(c) 時間、空間的データチェック

コンセンサス平均によるチェックで VAX 上では時間軸でのみ行っていたのを高さ方向にも広げて行う。視線速度の時間・高度からなる 2次元の表を考える (図 4.22)。図で 2重丸の付いたデータの品質管理を行う場合、隣接した時間・空間での観測値 (白丸) と比較して規定値より大きく異なる場合は 2重丸のデータを不良とする。(a)は、12個の隣接したデータと比較するもので時間-空間座標の端を除いた部分のデータ (ハッチ) に適用し、最下層から 2番目および観測開始/終了から 2番目のデータについては 8個の隣接したデータでチェックを行う(b)。なお、最下層および開始最初および最終データのチェックは行わない。品質管理を行うデータの周りの 12個、あるいは 9個のデータのうち品質管理を行うデータから $\pm 2 \text{ m/s}$ の範囲にあるデータを選ぶ。選ばれたデータ数が規定数以上あればそのデータは妥当と判断し、規定以下

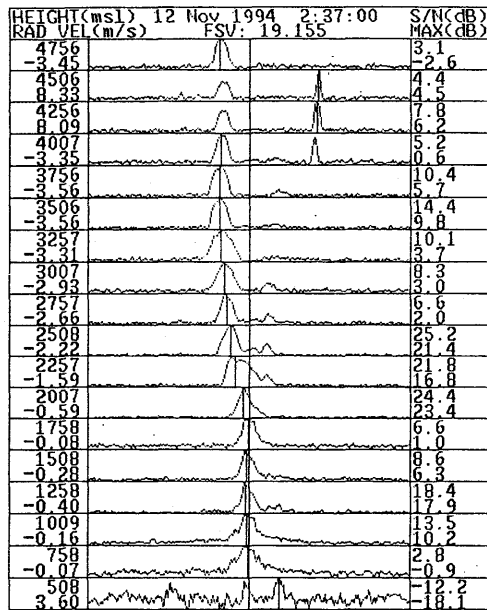


図 4.21 スパイク状ノイズが現れたドップラースペクトルの観測例。高度 4 km から 4.5 km にかけて右側に半値幅の狭いピークが表れている。

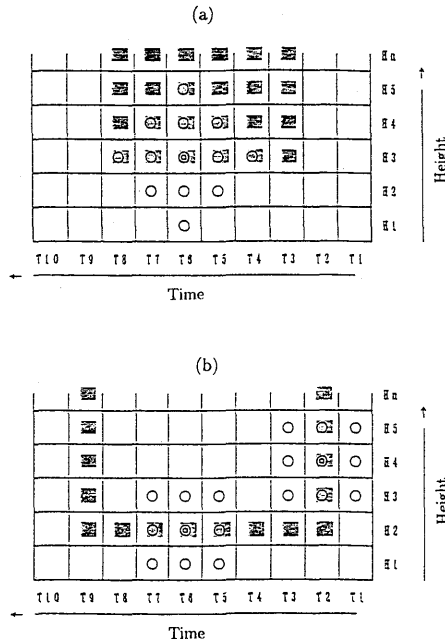


図 4.22 方法 B における品質管理の方法の模式図。2 重丸の付いたデータの品質管理を行う場合隣接した時間・空間での観測値(白丸)と比較して規定値より大きく異なる場合は 2 重丸のデータを不良とする。(a) は、12 個の隣接したデータと比較するもので時間-空間座標の端を除いた部分のデータ(ハッチ)に適用し、最下層から 2 番目および観測開始/終了から 2 番目のデータについては 8 個の隣接したデータでチェックを行う (b)。なお、最下層および開始最初および最終データのチェックは行わない。

ならば異常値として欠測とする。このチェックをすべてのデータについて行い、妥当とされた値のみを用いて30分あるいは1時間毎の風速を求める。現在、規定値は、12個のデータを用いる場合は3個(高高度モード)あるいは4個(低高度モード)、そして9個のデータを用いる場合は2個(高高度モード)あるいは3個(低高度モード)として品質管理を行っている。

方法Aと方法Bにより品質管理を行って得られた風速の時間・高度断面図を図4.23に示す。(a)が方法Bによる結果、(b)、(c)および(d)は方法Aによるものでそれぞれ規定データ数を3、4および5とした結果を示してある。規定データ数3では不良データが十分取り切れていないことが分かる。一方規定データ数5では条件が厳しすぎて観測データが少なくなってしまう。これらに対し方法B(a)は異常な結果もなくまたデータ数も十分確保されている。図4.24は、2つの品質管理手法の結果とゾンデによる観測値を比較したもので、風向および風速について調べてある。実線は方法Aとゾンデとの差を、点線は方法Aとゾンデの差(絶対値)から方法Bとゾンデの差(絶対値)を引いたものでプラスの値は方法Bにより改善されたことを示す。方法Bにより総じてゾンデデータに近づいていることが分かる。図4.25は2つの品質管理により得られた風向風速(実線)の鉛直プロファイルをゾンデ観測(点線)結果と比較したものである。方法Aは6および7km付近で異常値となっているのに対し方法Bは全高度でほぼゾンデと良い一致をしている。

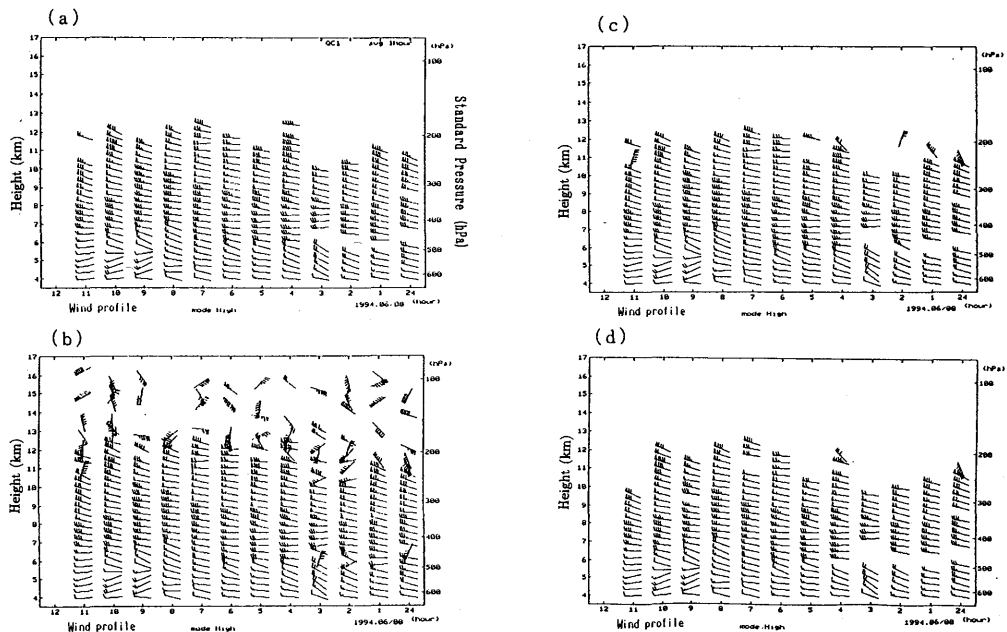


図 4.23 2つの品質管理による得られた風向風速時間高度断面図。(a)は方法B、(b)、(c)、(d)は方法Aだが規定データ数を各3、4、5にしたもの。

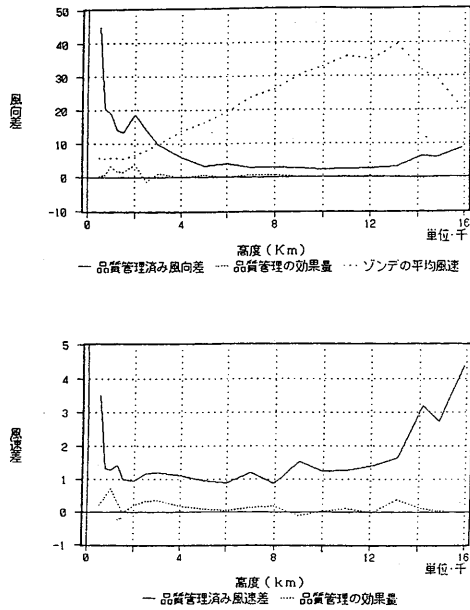


図 4.24 2つの品質管理手法によるウインドプロファイラー観測結果とゾンデの比較結果。実線がプロファイラーとゾンデの測定値の差（絶対値），点線が方法 A とゾンデの差（絶対値）から方法 B とゾンデの差（絶対値）を差し引いた値を示す。上の図に風向，下に風速についてプロットしてある。上の図の破線はゾンデによる平均風速を示す。

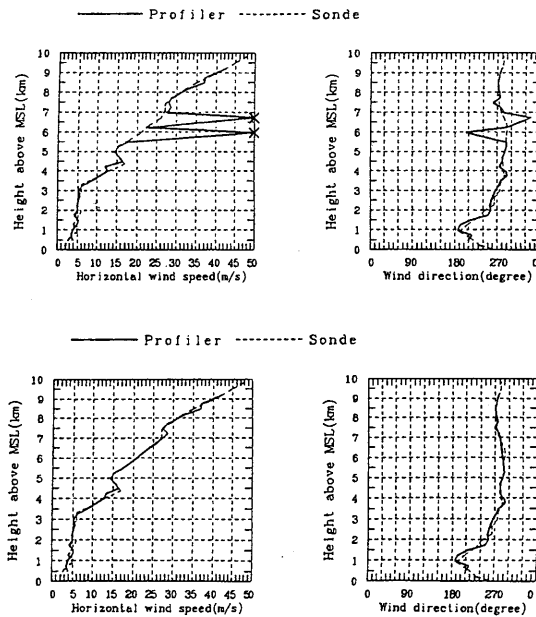


図 4.25 2つの品質管理手法によるウインドプロファイラーとゾンデによる観測結果の鉛直プロファイル。上の図が方法 A，下の図が方法 B で，実線がウインドプロファイラーによる測定，点線がゾンデによる測定結果を示す。