Chapter 7: Spectrum Width and Turbulence

2024.10.28 レーダーゼミ

担当：石井（京大理）

前回（6章）：Doppler velocity measurement

- 受信波の周波数シフト（=ドップラー周波数）がターゲットの移動速度に比例する

ドップラー周波数
ドップラーシフト

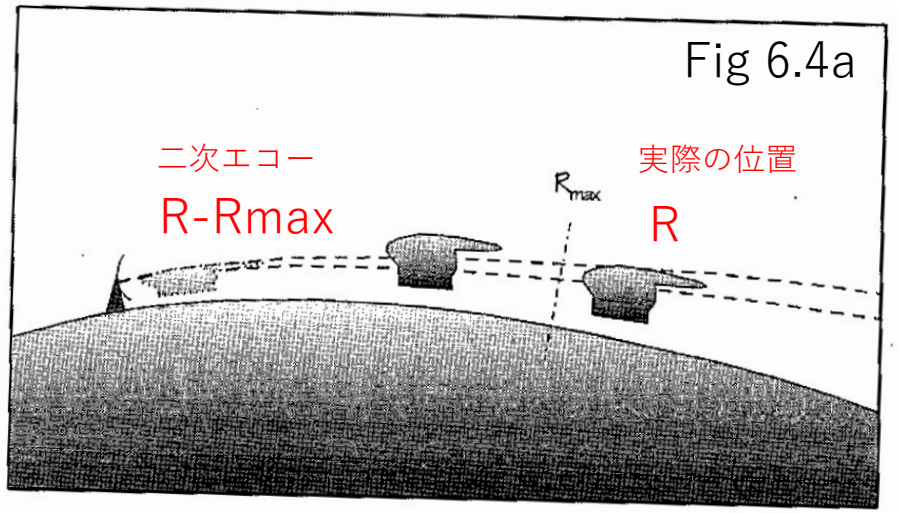
$$f = \frac{1}{2\pi}\frac{d\phi}{dt} = \frac{2V}{\lambda}$$

移動速度

- PRF・波長によって最大観測速度Vmax、最大観測範囲Rmaxが決まる

$$V_{max} = \frac{PRF\lambda}{4} \qquad r_{max} = \frac{c}{2PRF}$$

- Rmaxを超えたところにある反射体によるエコーは、**高次エコー**として本来より近い位置に表れる
- Vmaxを超える速度は**折り返し**が生じる



ドップラーレーダーがみている速度

- 観測領域に複数の反射体（例：雨粒）がある場合、個々の反射体は異なる速度を持つ
  → ドップラーレーダーで測定しているのは**観測領域の平均速度**

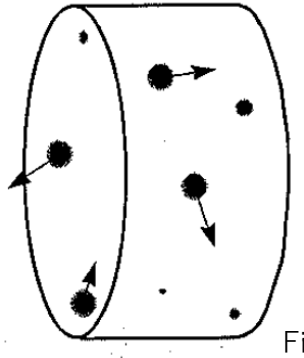
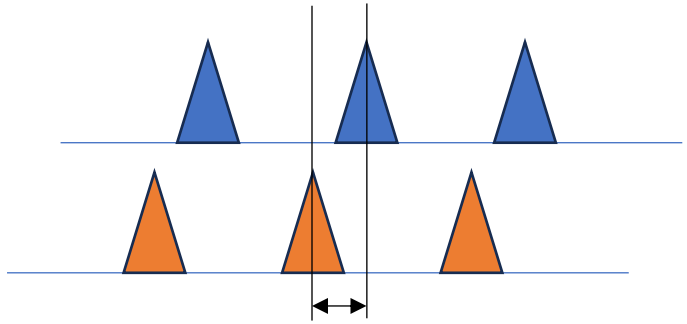


Fig. 7.1

- 平均化の処理はDoppler processerの種類に依存

パルスペア方式

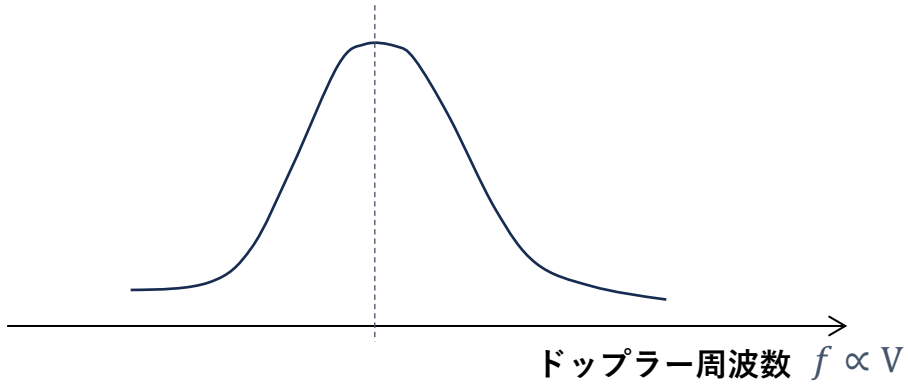
… 次のパルスの反射波との位相差を検出



$$\frac{\Delta\phi}{1/PRF} = f = \frac{1}{2\pi}\frac{d\phi}{dt} = \frac{2V}{\lambda}$$

FFT （Fast Fourier transform）方式

… 受信信号を周波数領域に変換し最大値を読む



Spectrum Width

周波数領域に変換して処理することの強み：周波数の分布がわかる
→ 観測領域の中で**どの程度速度のばらつきがあるか**を評価できる
＝ 乱流の情報

Spectrum Width（Variance of velocity）スペクトル幅（速度分散）

$$\sigma^2 = \frac{\sum (V_i - V_{ave})^2}{N - 1} \qquad (7.2)$$

V_i：個々の反射体の速度
V_{ave}：平均速度
σ：標準偏差

実際の観測値がばらつく要因は複数の反射体の存在によるものだけではない

$$\sigma_v^2 = \sigma_s^2 + \sigma_a^2 + \sigma_d^2 + \sigma_t^2 \qquad (7.3)$$

σ_v^2	σ_s^2	σ_a^2	σ_d^2	σ_t^2
観測される総分散	ウィンドシア	アンテナの運動	大きさの異なる水滴の落下速度の違い	乱流

気象学的には（火山学的にも？）これが重要かつ興味の対象

ウインドシアによる分散

- ウインドシア：2点間の風ベクトルの差を両地点の距離で除したもの
  ＝ 単位距離あたりの風速差 3成分（azimuth, vertical, radial）

  → 各成分の分散の和がウインドシアによる分散

- 鉛直方向のウインドシア… 高度によって風速が変わる
  jet気流の中…100 kt（≒180 km/h）
  ↔ jet気流の下…10–20 kt（≒18–36 km/h）

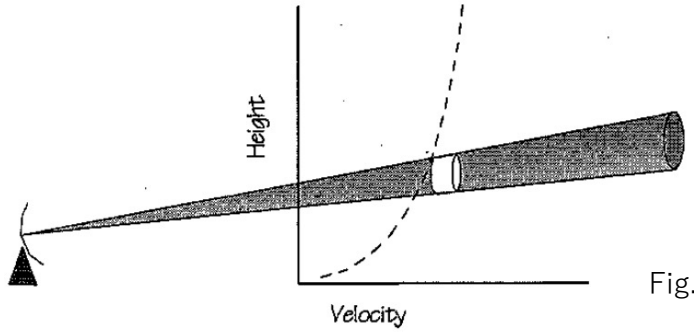
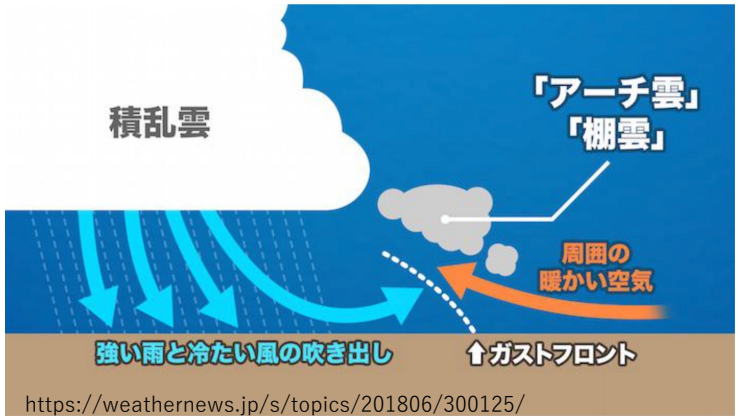


Fig. 7.2

- ドップラーレーダーで検知できる鉛直ウインドシアは温度逆転による境界層に生じることが多い
  → PPI（360°スキャン）でなくRHIモード（ある方位角の鉛直断面）を確認することで検証可能

- ガストフロントもウインドシアによる分散の原因になる
  … 小規模な寒冷前線。異なる風速の明瞭な境界が生じる。



https://weathernews.jp/s/topics/201806/300125/

アンテナの運動による分散

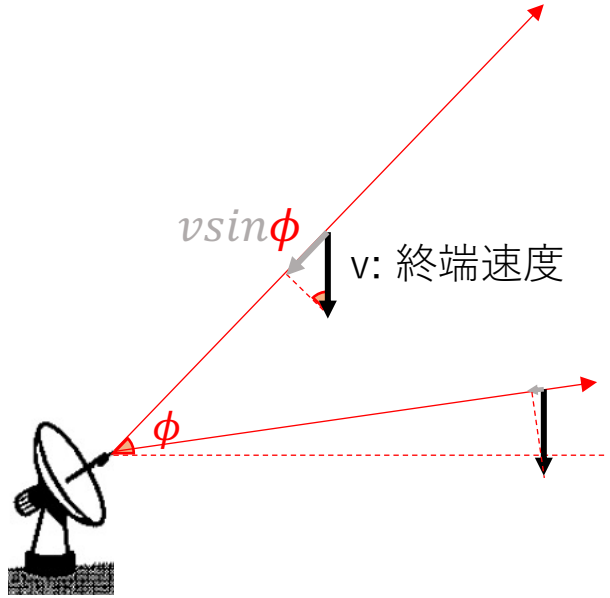
一般的にスキャンの速度は一定なので重要な問題にはならない
→ 分散を生んだとしても、方位によらず**一様の分散**

他の要因による分散をマスクすることはない
（気象学的に重要なウインドシアをやや過大評価することはあり得る）

粒子の落下速度の違いによる分散

$$\sigma_d^2 = [\sigma_{d0} sin\phi]^2 \qquad (7.4)$$

観測領域の終端速度の分散　　レーダーの仰角



- 大きな仰角で嵐をスキャンする際に重要
  … 特に鉛直上向きにスキャンする場合には、これが分散の主要な原因になる

- 1950~60年代に雨滴の分散の観測が進む
  - ✓ 分散σ_{d0}のオーダーは雨：1.0 m/s, 雪：0.2-0.5 m/s,　Melting snow (みぞれ？)：0.7 m/s
  - ✓ 雨滴のサイズ分布とは無関係
  - ✓ あられ、雹の場合は8-25 m/s程度で、粒径とレーダー波長に依存する

乱流による分散

- 気象学的にはこの項が1番重要

- レーダーで乱流を検出するには、エコーを出す反射体がないといけない
  → **clear airではダメ**
    ・特に、高い高度では検出できない
    ・低い高度なら虫・埃などが反射体として作用して、clear airでも検出できる

気象観測に適した条件

$$\sigma_v^2 = \sigma_s^2 + \sigma_a^2 + \sigma_d^2 + \sigma_t^2 \qquad (7.3)$$

気象学的には(火山学的にも？)
これが重要かつ興味の対象

σ_v^2	σ_s^2	σ_a^2	σ_d^2	σ_t^2
観測される総分散	ウィンドシア	アンテナの運動	大きさの異なる水滴の落下速度の違い	乱流

②**回転速度一定**であれば無視できる

①**低仰角**であれば無視できる

①**低仰角**であれば
Clear airでも検出できる

気象学的に重要な速度の分散を観測するには、**①低仰角　②アンテナ回転速度が一定**

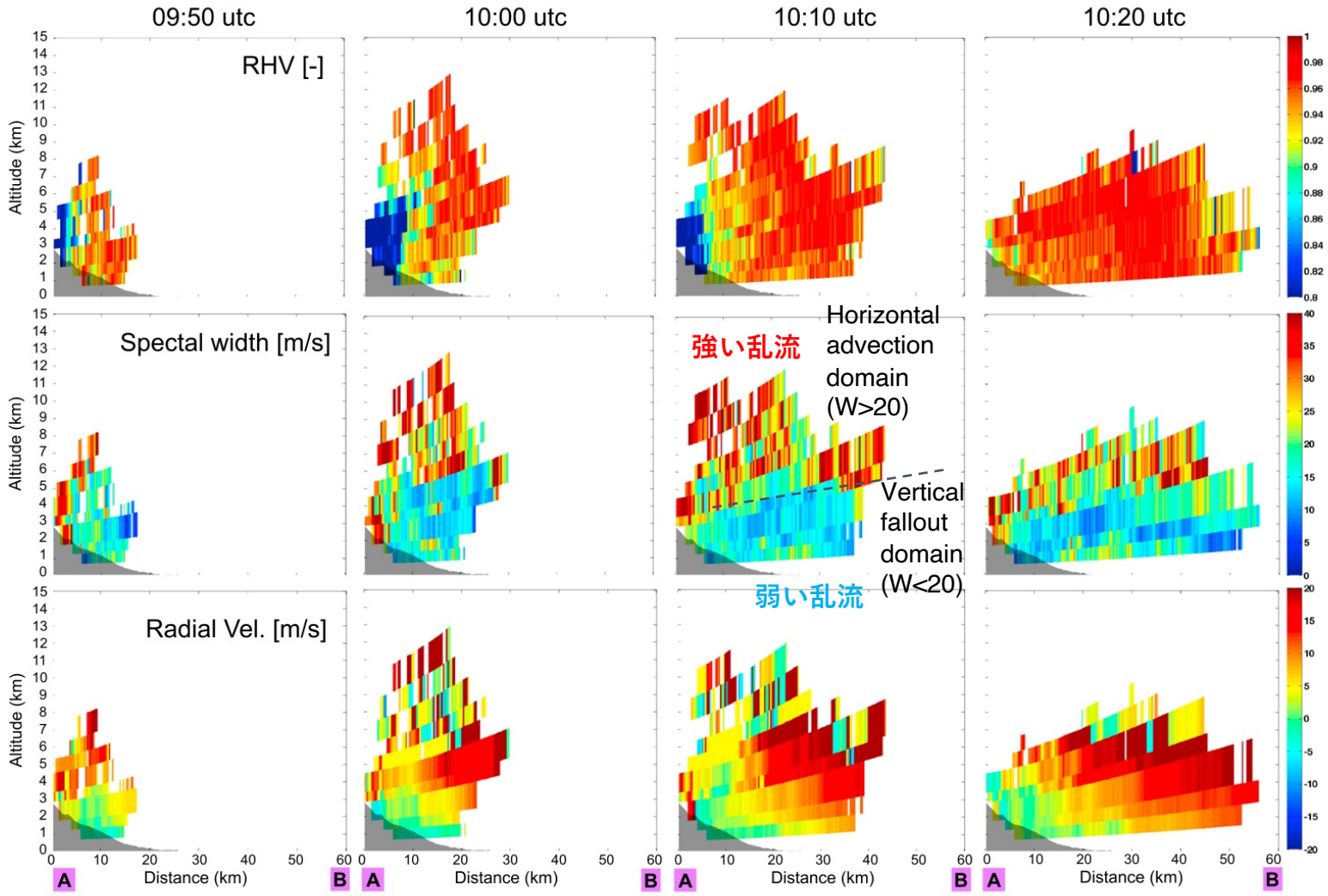
より大きなスケールの乱流の観測

より大きな乱流の構造…隣り合う点の速度差を観測して、数百mオーダーのウインドシアや乱流を検出する

- 航空機用の乱流検出レーダーはこのやり方を採用
  … ビームの照射方向に沿った複数の点で動径方向の速度を観測
  → 隣り合う点の速度変化が閾値を超えたら、乱流領域として画面表示

- NEXRAD … 3つの画面表示
  - 照射方向に連続する点のシア・速度差
  - 方位角方向に隣り合う点の速度差
  - 上記2方向の速度差（ベクトル）

おまけ：火山噴煙の観測事例



Montopoli (2015, JGR)に加筆

- エトナ火山の噴煙の二重偏波ドップラーレーダーの観測事例
- 偏波間相関係数RHV
  … 水平・垂直の2種類の電波で受信した信号の相関係数。観測領域内の散乱体の一様性を表すパラメータ。
  1に近いほど一様性が高い。
- スペクトル幅から乱流の情報
  - **W>20 … 強い乱流**
    ＝噴煙上部の膨張・水平移動する部分
  - **W<20 … 弱い乱流**
    （粒子が同じ方向に移動）
    ＝噴煙下部に降下粒子の存在

まとめ

- ドップラーレーダーで観測する速度は**観測領域の平均速度**
- 周波数領域で処理することで、領域内の**速度の分散**を評価できる　＝　**スペクトル幅**
- 観測される分散は、複数の要因の寄与によるもの
  - ウインドシア
  - アンテナの運動
  - 粒子の落下速度の違い
  - 乱流
- 観測条件を工夫することで、気象学的に重要な分散のみ（ウインドシア、乱流）を抽出できる