

Chapter 6: Doppler Velocity Measurements

2024.10.21 レーダーゼミ
担当：石井（京大理）

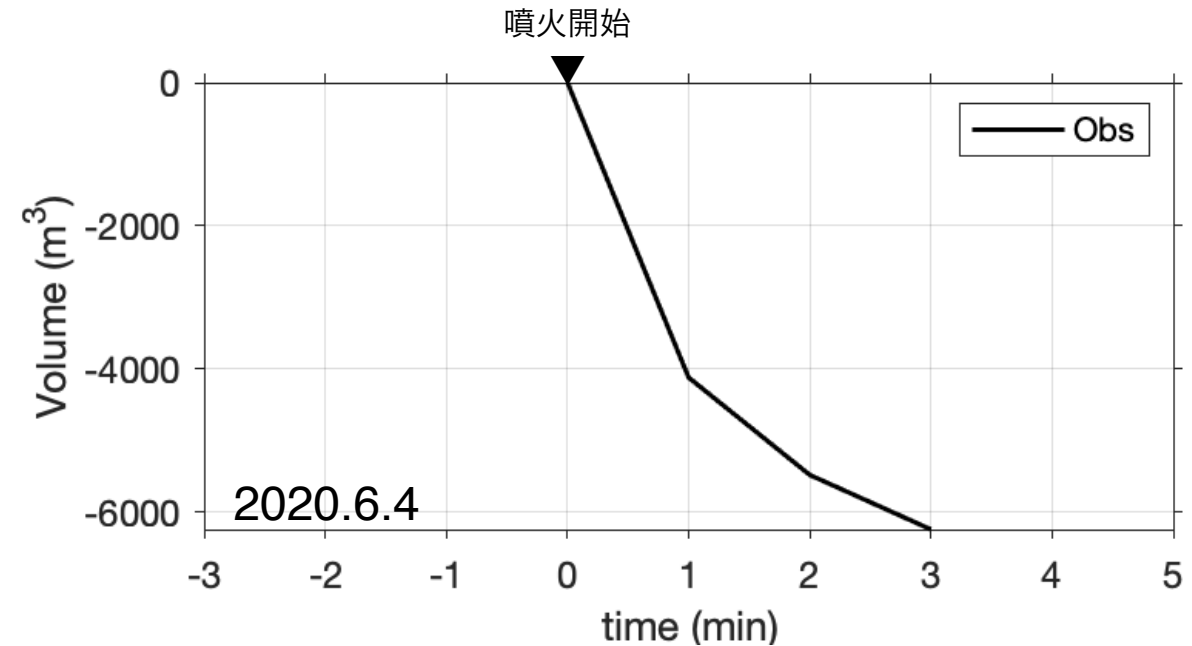


新千歳空港のドップラーレーダー

レーダー観測に興味がある理由

- 地盤変動データから得られる収縮の時間関数を評価したい(=噴出率)
- 本当に収縮から推定されるような時定数・量の火山灰が出ているのか？

→ レーダーから推定される噴出率と比較をしたい



6章の概要

- 基本原理
- ドップラーレーダーの構造
- 最大観測速度と最大観測範囲
- 最大観測範囲を超えてしまった場合
- 最大観測速度を超えてしまった場合

基本原理

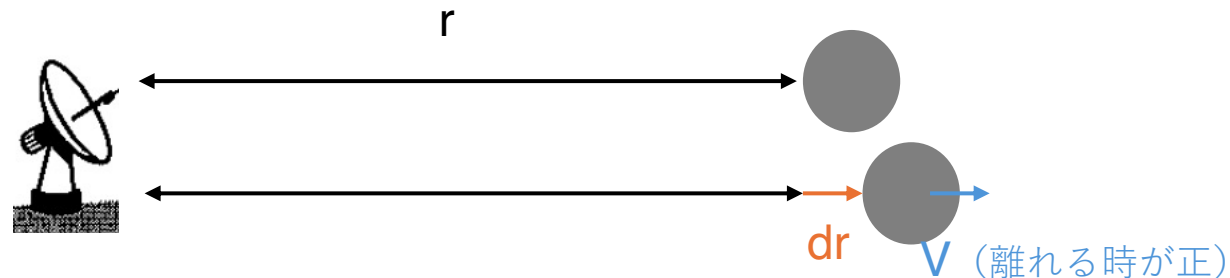
ドップラー効果：対象物の移動速度に比例した反射波の周波数shiftが生じる
→ 速度を制約

対象物が静止しているとき、

$$\text{伝播総距離} = 2r$$

$$\text{波長相当の距離} = 2r/\lambda$$

$$\text{位相} = (2r/\lambda)2\pi$$



受信波の位相

$$\phi = \phi_0 + \frac{4\pi r}{\lambda} \quad (6.1)$$



1回目のパルスと次のパルスの位相変化
(時間微分)

$$\frac{d\phi}{dt} = \frac{4\pi}{\lambda} \frac{dr}{dt} \quad (6.2)$$

$$\frac{d\phi}{dt} = \Omega = 2\pi f$$

角周波数 (6.4)



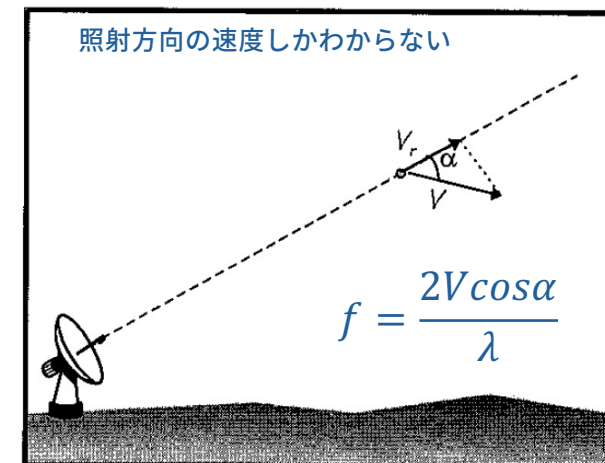
$$V = \frac{dr}{dt} \quad (6.3)$$

移動速度

$$f = \frac{2V}{\lambda}$$

ドップラー周波数
ドップラーシフト (6.5)

Fig. 6.1b



ドップラー周波数

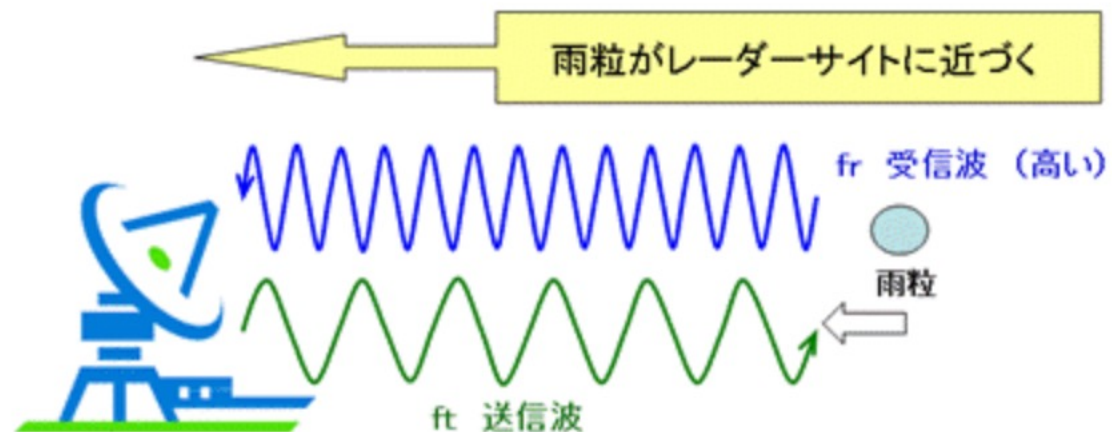
ドップラー周波数
ドップラーシフト

$$f = \frac{2V}{\lambda} = f_t - f_r$$

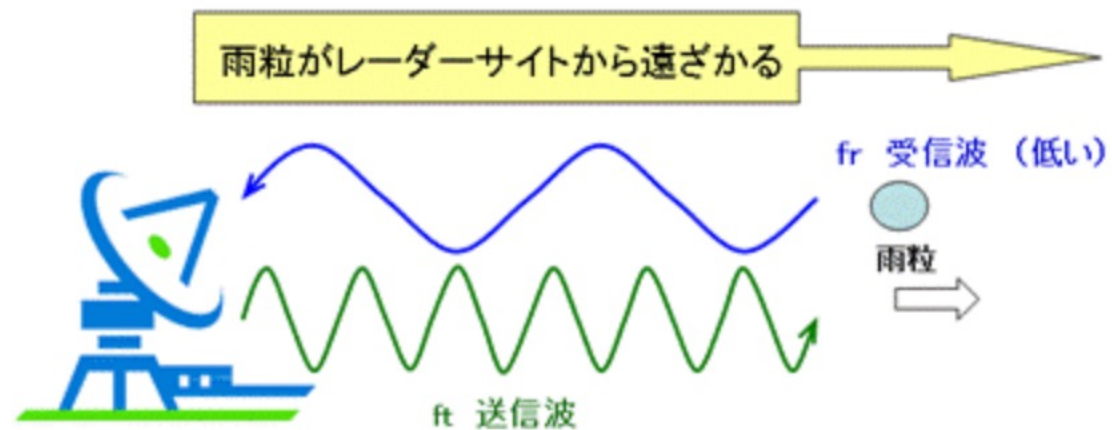
送信周波数 受信周波数

$$f = -\frac{2V}{\lambda} = f_r - f_t$$

文献によってはこっちの定義

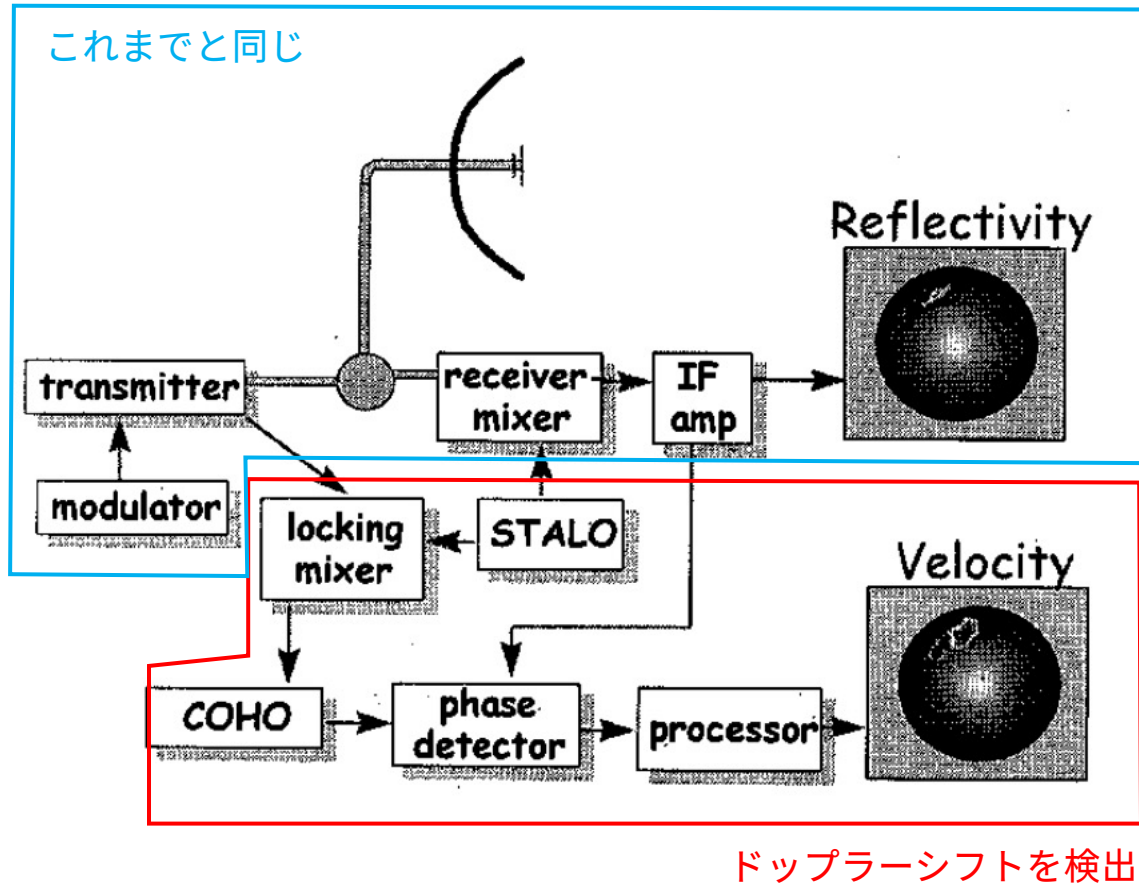


$$f < 0$$



$$f > 0$$

Block diagram of Doppler radar



Transmitter: 同じ周波数・位相のパルスを維持する能力が必要

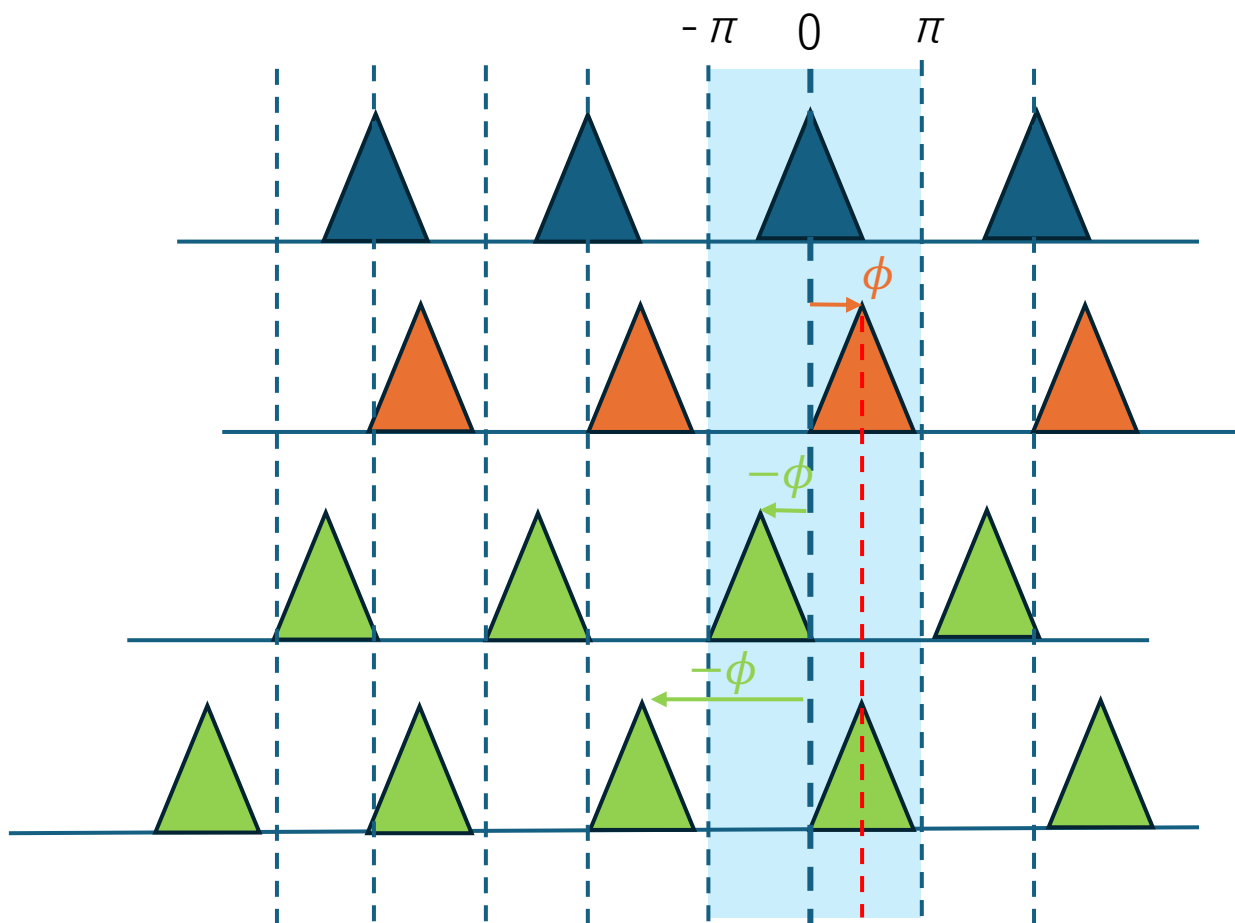
- クライストロン…周波数・位相を維持
- マグネトロン…維持できないので、各パルスの周波数・位相を保持する機構をもつ

周波数シフトの検出:

- Stable Local Oscillator (STALO; 局部発振器): 安定した周波数を維持
- STALO信号を、送信波・受信波の両方に混ぜる
→ 扱いやすいように低周波化?
- Coherent oscillator (COHO): 送信波を増幅
- Intermediate frequency (IF) amp: 受信波を増幅
- Phase detector: 位相差を検出

Maximum unambiguous velocity 最大観測速度

- π から π までの範囲の位相ズレしか検出できない
 → これを超えると真値より小さいズレとして認識してしまう



(6.5)式より

$$f_{max} = \frac{2V_{max}}{\lambda} \quad (6.7)$$

サンプリング定理より

$$f_{max} = \frac{PRF}{2} \quad (6.8)$$

$$\therefore V_{max} = \frac{PRF\lambda}{4} \quad (6.9)$$

別導出

$$\frac{d\phi}{dt} = \frac{4\pi}{\lambda} V_{max}$$

||

$$\frac{\pi}{1/PRF}$$

PRF:
Pulse Repetition Frequency (パルス繰り返し周波数)

Maximum unambiguous range 最大観測範囲

返ってくる信号をいつまで待つか？

… ずっと待っていることが可能なら、観測範囲に制限はない

実際は、

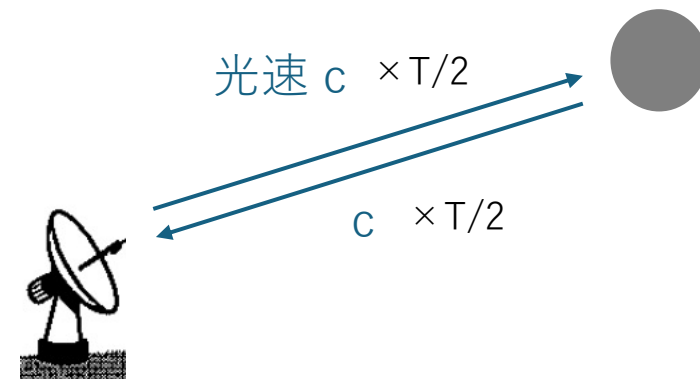
- ・ 距離の二乗に反比例して減衰
- ・ 地上の気象レーダの観測対象は最大400-500 km先

⇒ 適切なパルス間隔を設定する

パルス間隔 $T = \frac{1}{PRF}$ (6.10)

次のパルスを出すまでに、波が行って帰って来られる最大距離 $r_{\max}$

$$r_{\max} = c \times \frac{T}{2} = \frac{c}{2PRF} \quad (6.11)$$

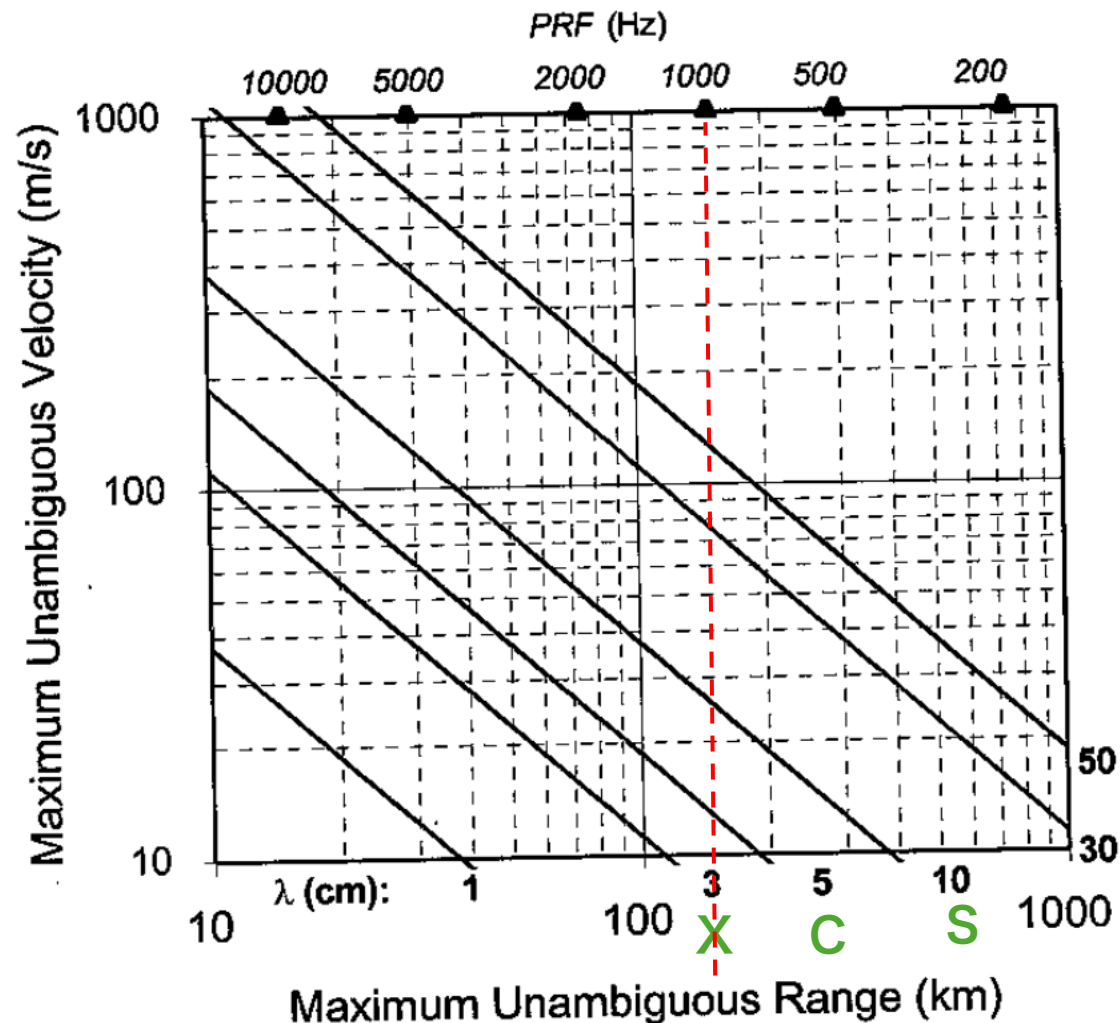


The Doppler dilemma

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

$$V_{max} r_{max} = \frac{c\lambda}{8} \quad \text{定数}$$

波長を長くすることは適切な解決策ではない
 …大きく高価なレーダーが必要になる上に、短波長の
 気象レーダーほど対象物を検知できない



例：PRF 1000Hz → $r_{max} = 150$ km

$V_{max} = \pm 25$ m/s (Sバンド)
 ± 8 m/s (Xバンド)

気象観測：>200 kmの ± 50 m/sのターゲットもあり得る

$R_{\max}$ を超えた場所にあるものはどう映るか

$R_{\max}$ より先に反射体があると、パルスが反射して戻ってくるまでに次のパルスを出してしまう

→ 次のパルスが早く戻ってきた（＝近い場所に反射体がある）と誤認識してしまう

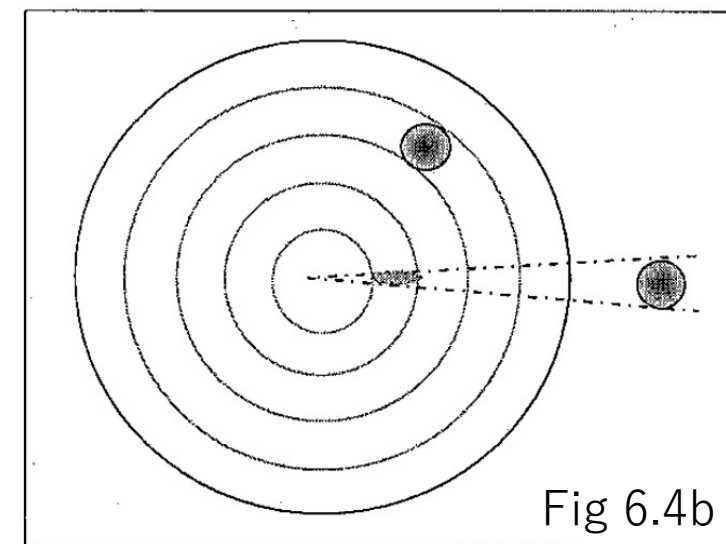
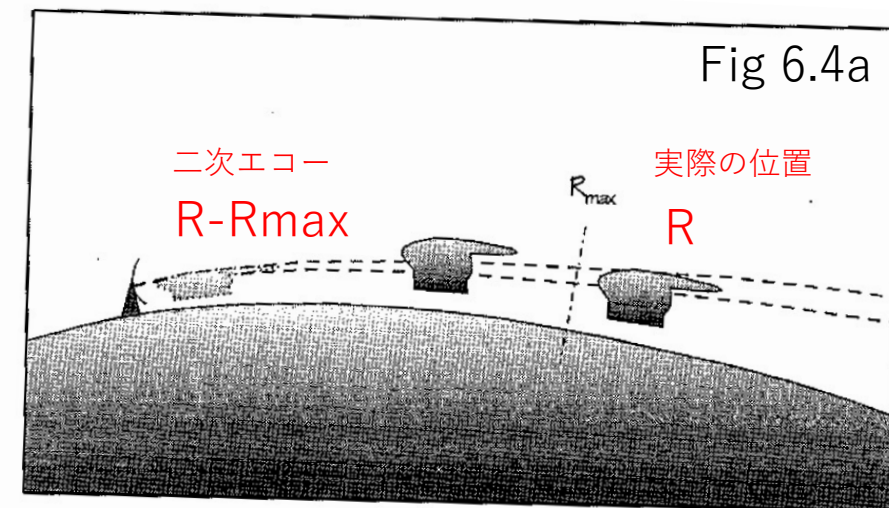
= 高次エコー (multitrip) ・ 二次エコー(second-trip)

どうやって二次エコーだと判断するのか

- 目で外を見る
- 形状 … 二次エコーはnarrow, wedge-likeでレーダーの向き
- (stormの) 高さ … 一般的な高さより小さい
Thunderstorm : 8-15 km
- 反射率 … 距離の二乗で減衰している

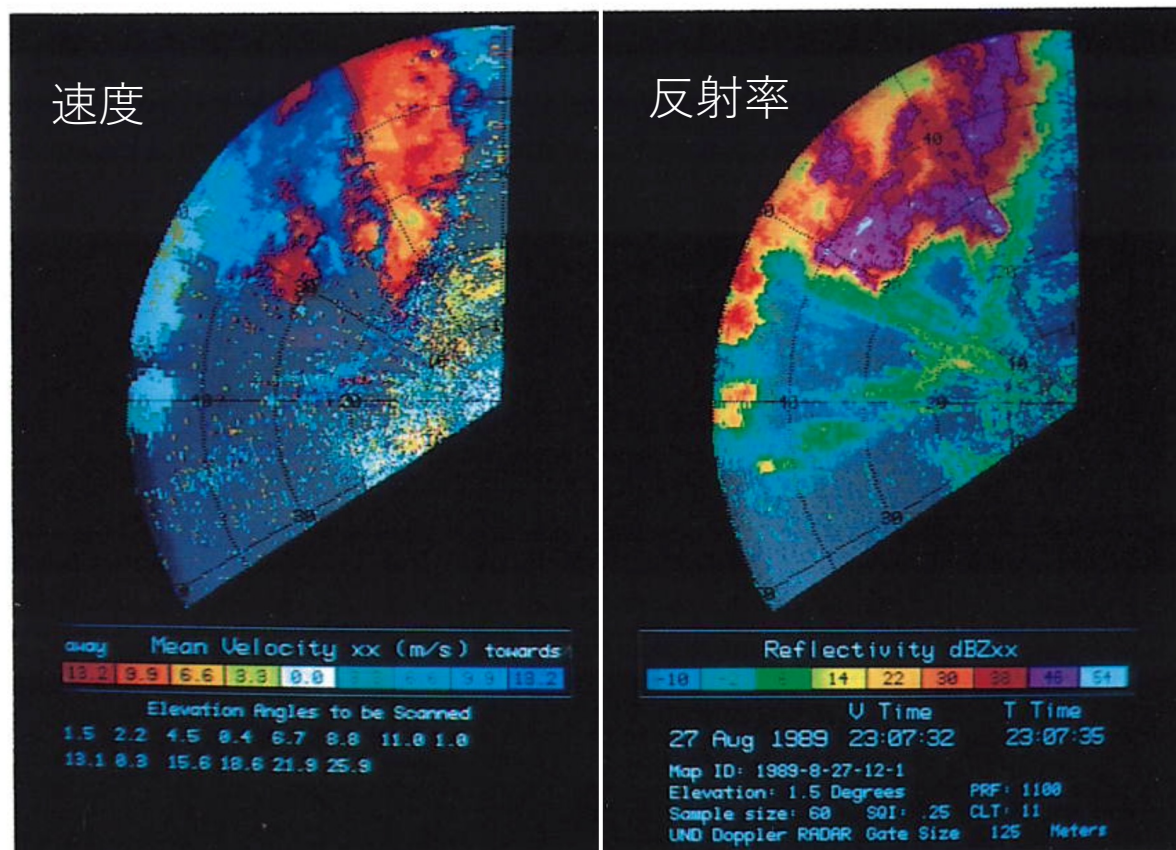
最も確実な方法は「PRFを変える」

→ $R_{\max}$ が変わるため、二次エコーであれば場所が変わる



画面表示の見方（巻末Color Figure）

UND (University of North Dakota)
のCバンドドップラーレーダー観測結果



カラスケール
←→
赤 青
遠ざかる 近づく

※赤方偏移に由来

カラスケール
←→
青 赤
弱 強

期待されるもの

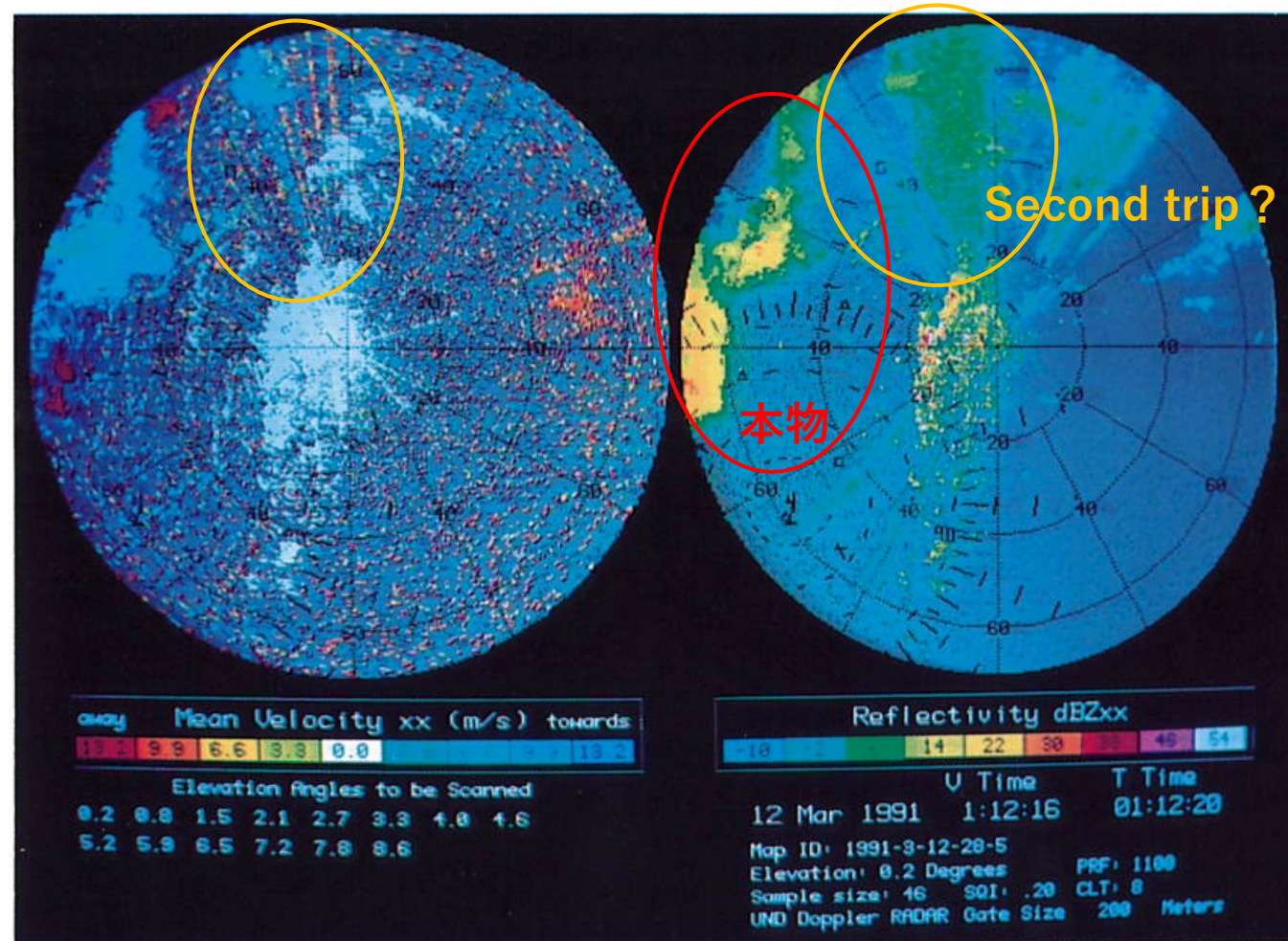
空間的にgradualな変化であるはず
⇔ 急激に変化している場所はfoldingの可能性

嵐は内側に向かって反射率が上がる
⇒寒色系の細い帯が暖色系の領域を囲む

2 次エコーの観測例(1)

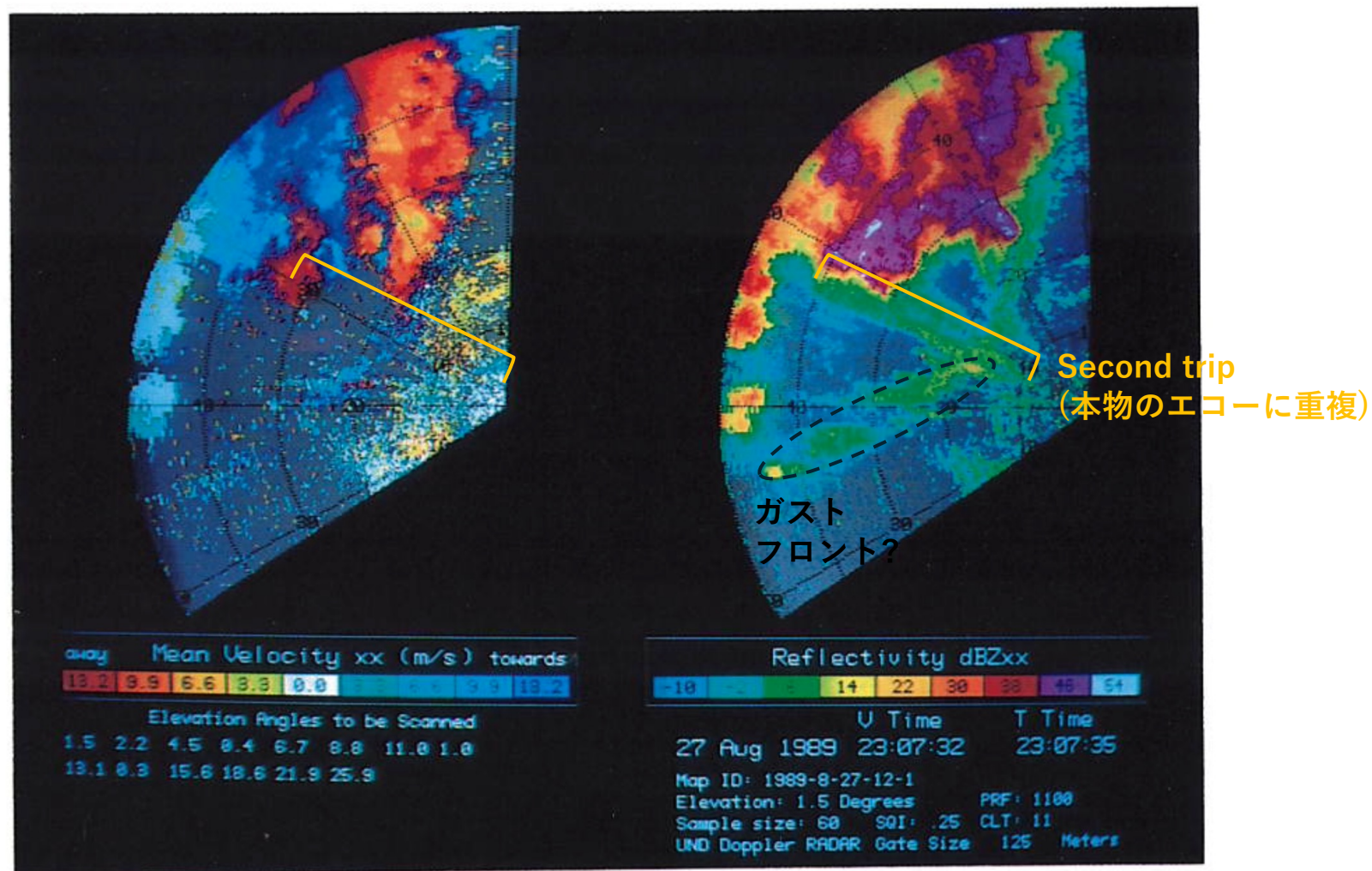
速度表示には出ない

※速度表示画面：シグナルの強さが閾値以上で、速度の分散が閾値以下のエコーしか表示しない



Color Figure 6

観測例(2)

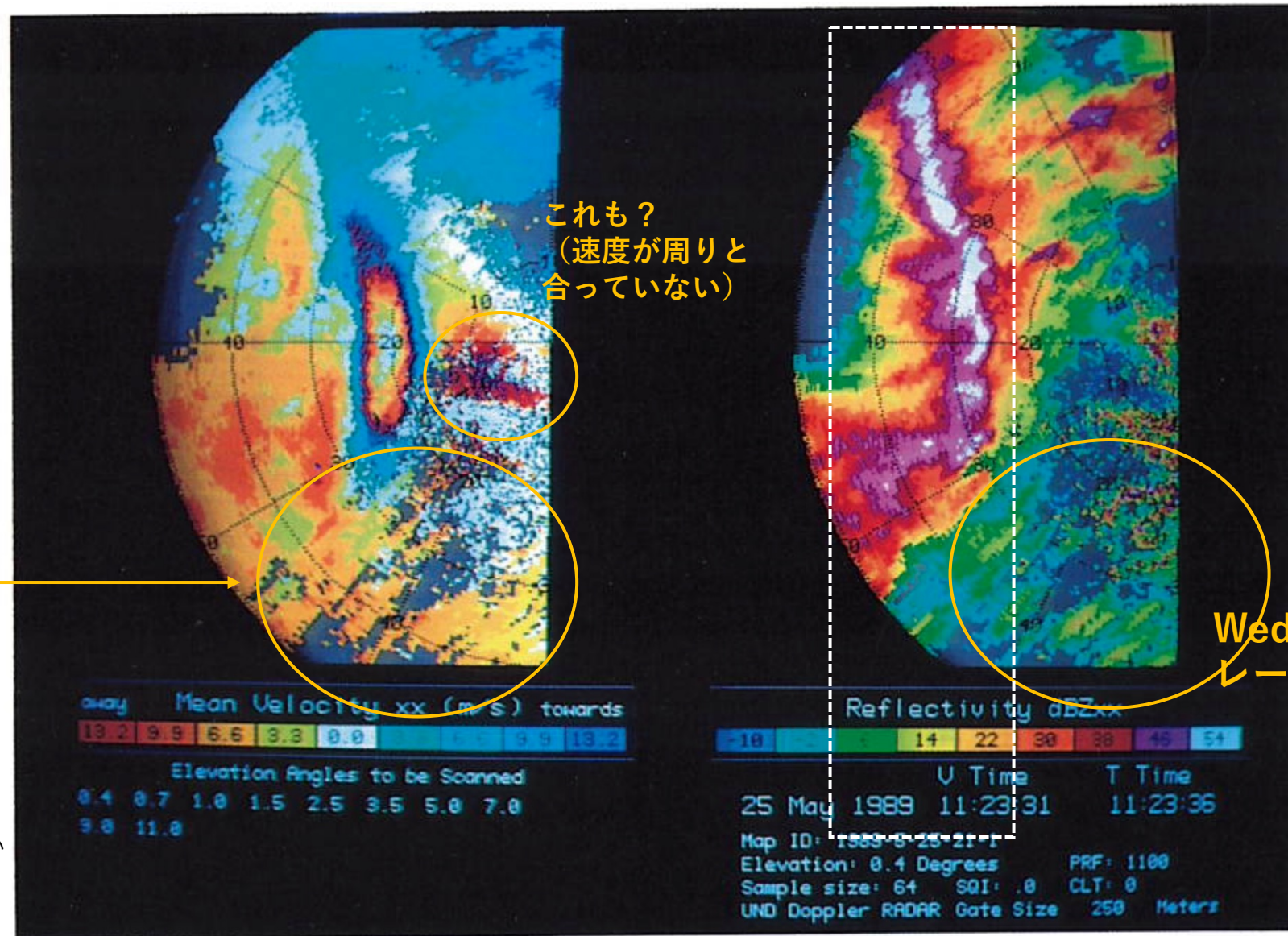


Color Figure 7

観測例(3)

この場合は速度にも
表示されている
(SQI: 0)

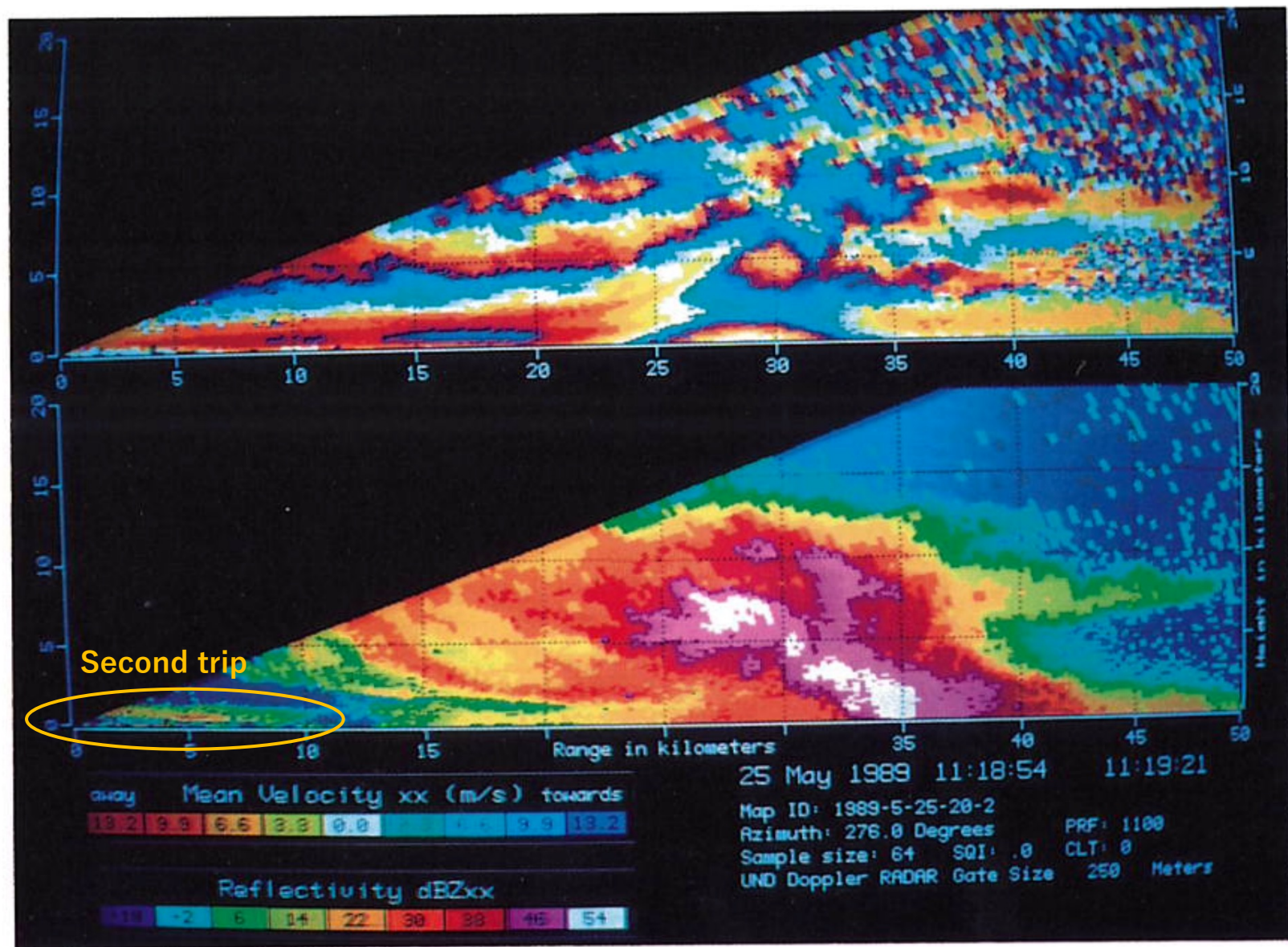
メインエコーと
似た速度、向きを持つ
→ これだけでは判断が難しい



Color Figure 9

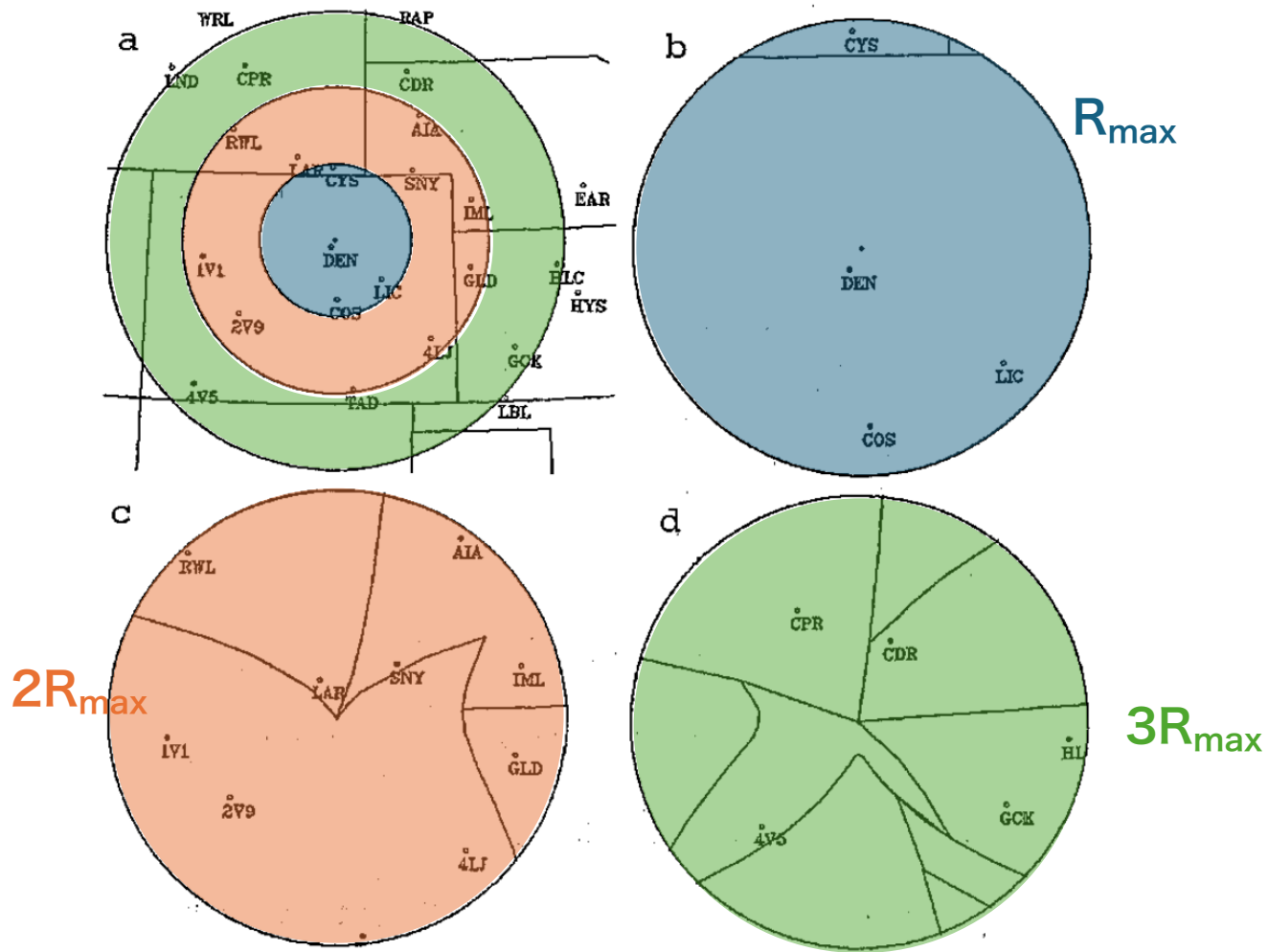
観測例(4)

- メインエコーと繋がっていない
- 高さが低い (1km程度)
- グラウンドクラッターのようには見えない (下部に弱い領域)



Color Figure 10

Multi-trip echo map projection



- 高次エコーが出るものとして、画面表示を変える
- 地図上に高次エコーが生じた場合の地名や重要箇所の位置を示しておく

$V_{\max}$ を超える速度はどう映るか

例：西風（一様風）が吹いているとき

$V_{\max}$ を超えた速度は折り返される

Velocity aliasing

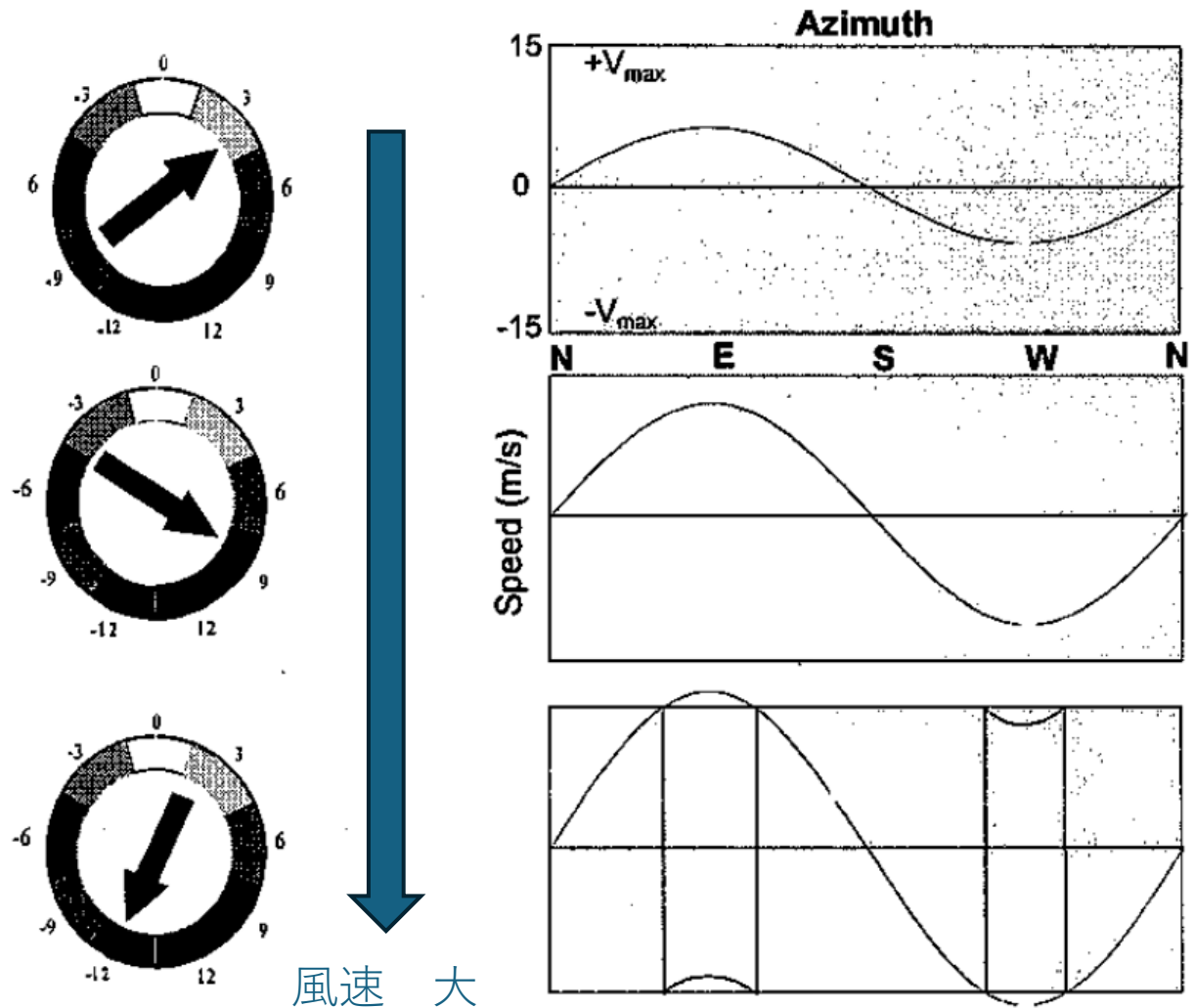
Folding

= 誤った速度、向きの表示になる

$V_{\max}$ を超えた場合

実際の風： 17 m/sで遠ざかる風（西風）

表示： 13 m/sで近づく風（東風）

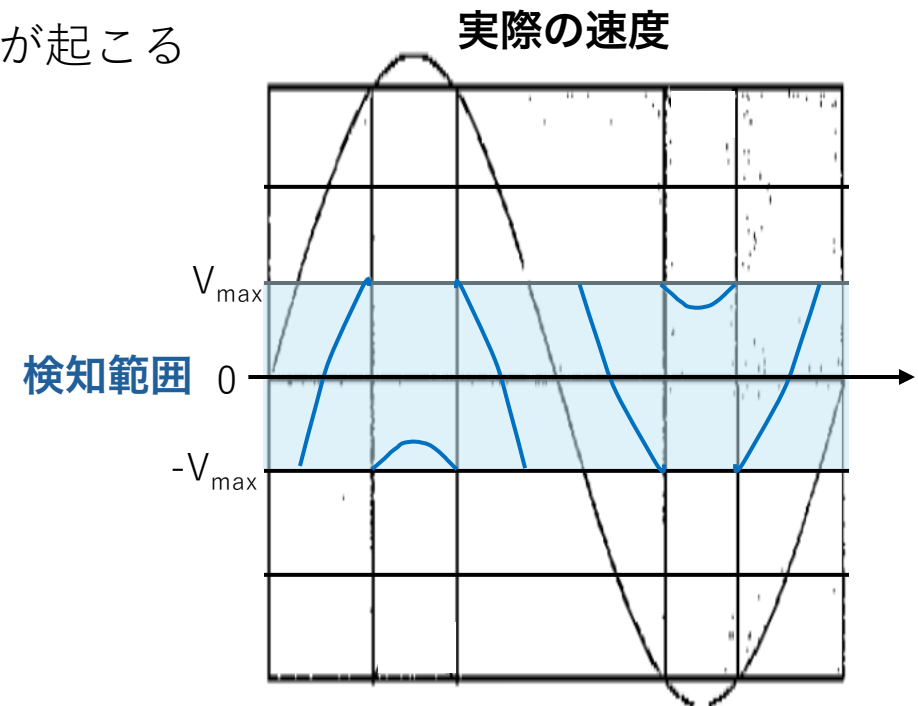


Recognizing velocity aliasing

- 認識しやすいエイリアシング… 大きなエコーの中に生じた速度不連続
例：遠ざかる嵐の中に逆向きの速度を持つ部分
- 認識が難しいもの
 - エイリアシングが起こっているエコーが完全に孤立している（周りに比較できるエコーがない）
… 実際に起こることは稀
 - 短波長(Cバンド、Xバンド)のレーダーで複数回の折り返しが起こる

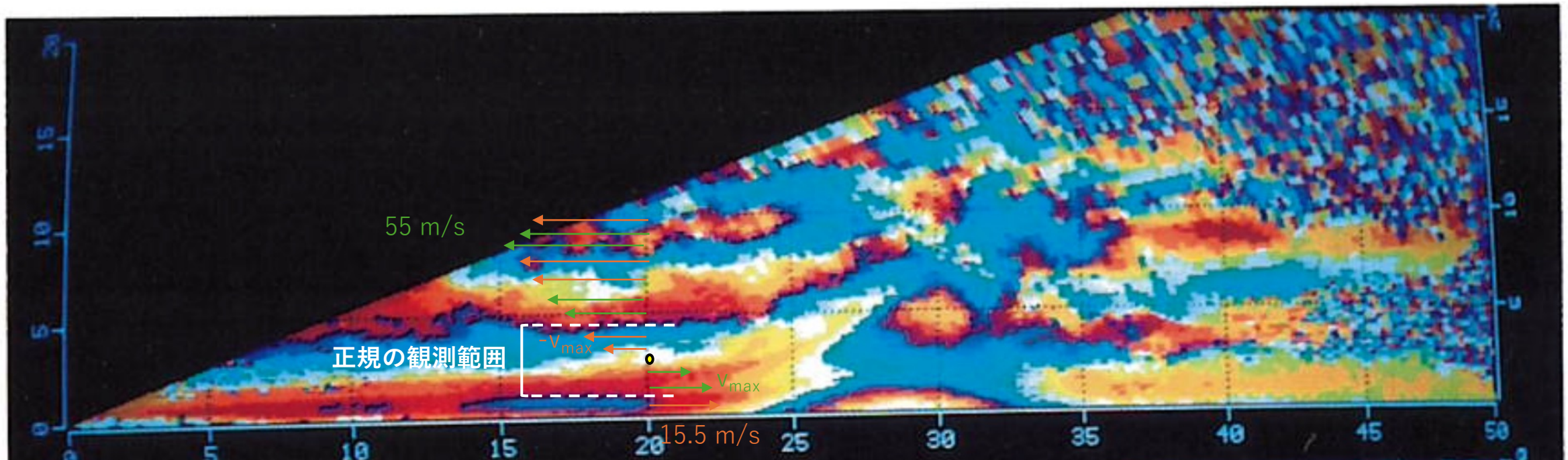
参考：
$$V_{max} = \frac{PRF\lambda}{4}$$

… 画面表示から直感的に理解することはかなり難しい



速度折り返しの観測例

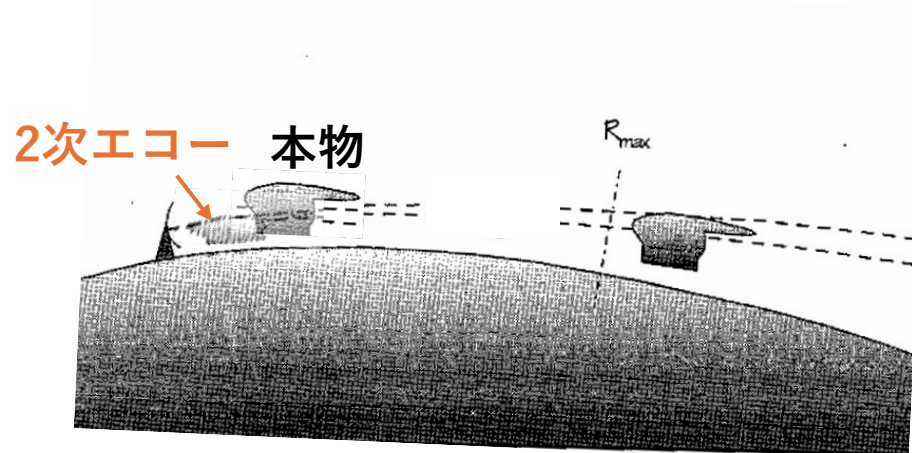
✓ 青と赤が隣接しているところで折り返しが起きている



Color Figure 10

折り返し以外の原因で生じる速度不連続

1. 2次エコーが本物のエコーにかぶる



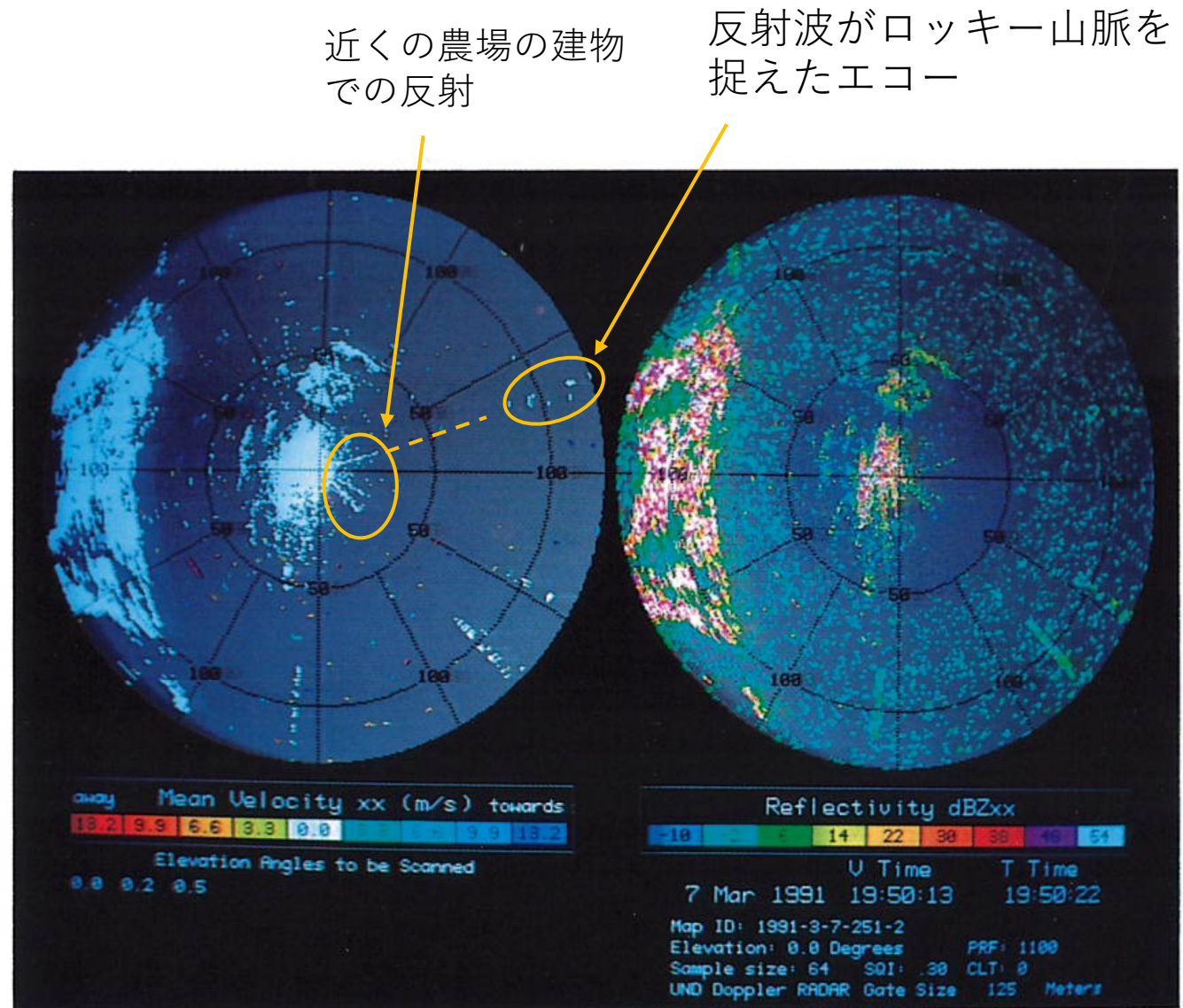
2. 近くの反射体（ビルなど）で反射した波が遠くの嵐を検知する
3. レーダーの回転と不完全なビームパターンによるもの

構造物等による反射波

- 近くの反射体（ビルなど）で反射した波が遠くの嵐を検知する
 …速度の値は正しい
 方位は反射体の向きを指す

⇒ 非常に明瞭な速度不連続を生む

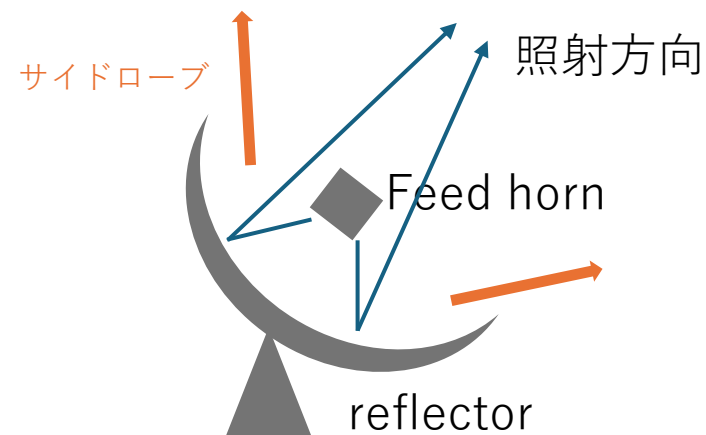
- 対策は
 - レーダーの位置を変える
 - 反射体の除去
- … いつも同じazimuthに生じる
 （一度認識してしまえば、判断は容易になる）



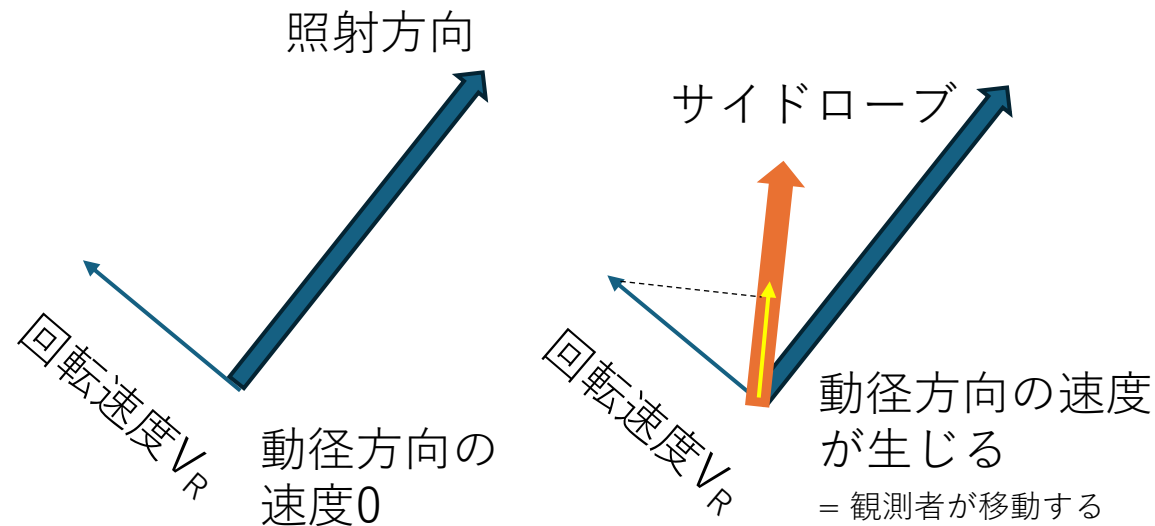
Color Figure 1

不完全なビームパターンによる擬似エコー

- ✓ 全てのエネルギーがレーダーのリフレクターに当たらない
 - サイドローブのエネルギーが本来の照射方向とは違う向きに飛んでいき、どこかで反射
 - 照射方向に反射体があると誤認識



- ✓ アンテナの回転によるドップラー効果
 - Feed hornはアンテナの回転軸上にないので回転速度を持つ
 - Feed hornの回転はアンテナの向きに直交
 - 理想的にはfeed hornの動径方向の速度は0
 - サイドローブの照射方向がずれていると動径方向の速度が生じる
 - 建物など（静止物体）に当たるとターゲットに対するアンテナの相対速度のエコーが観測される



高次エコー・速度の折り返しへの対策

✓ 速度の折り返し … **速度不連続の自動検出・除去システム**

✓ 高次エコー … **PRFを変えるシステム**

- 複雑な処理が必要
- 速度の折り返しにも対応

見たい場所をカバーするように最適なPRFを自動で選択するシステム

例：空港上空のマイクロバーストを監視

→ 遠い嵐による2次エコーを最小化するPRFを選ぶ

(最初に低いPRFで遠い嵐の位置を確認しておき、移動すればPRFを変える)

まとめ

- 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
 - PRF・波長によって最大観測速度 $V_{\max}$ 、最大観測範囲 $R_{\max}$ が決まる
 - $R_{\max}$ 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
 - $V_{\max}$ を超える速度は**折り返し**が生じる
- どれが本物のエコーなのかはさまざまな情報（と経験？）を総合して判断する
自動除去システムも導入されている

火山観測への示唆

- 見たい領域が決まっているので対策が可能
 - 近傍での観測… $R_{\max}$ は大きくなって良い, 火口直上の速い噴出や噴石の飛散を検出できるPRFを設定
 - 遠方での観測…噴煙の移流を追跡できる設定（気象観測と同じような条件）
- 遠方の嵐による高次エコーと噴煙の重複等には注意が必要？
- 噴煙の強い乱流の評価（次章で扱う）が重要か