

## 第9章 晴天エコー

M.Maki 2024.12.09

はじめに

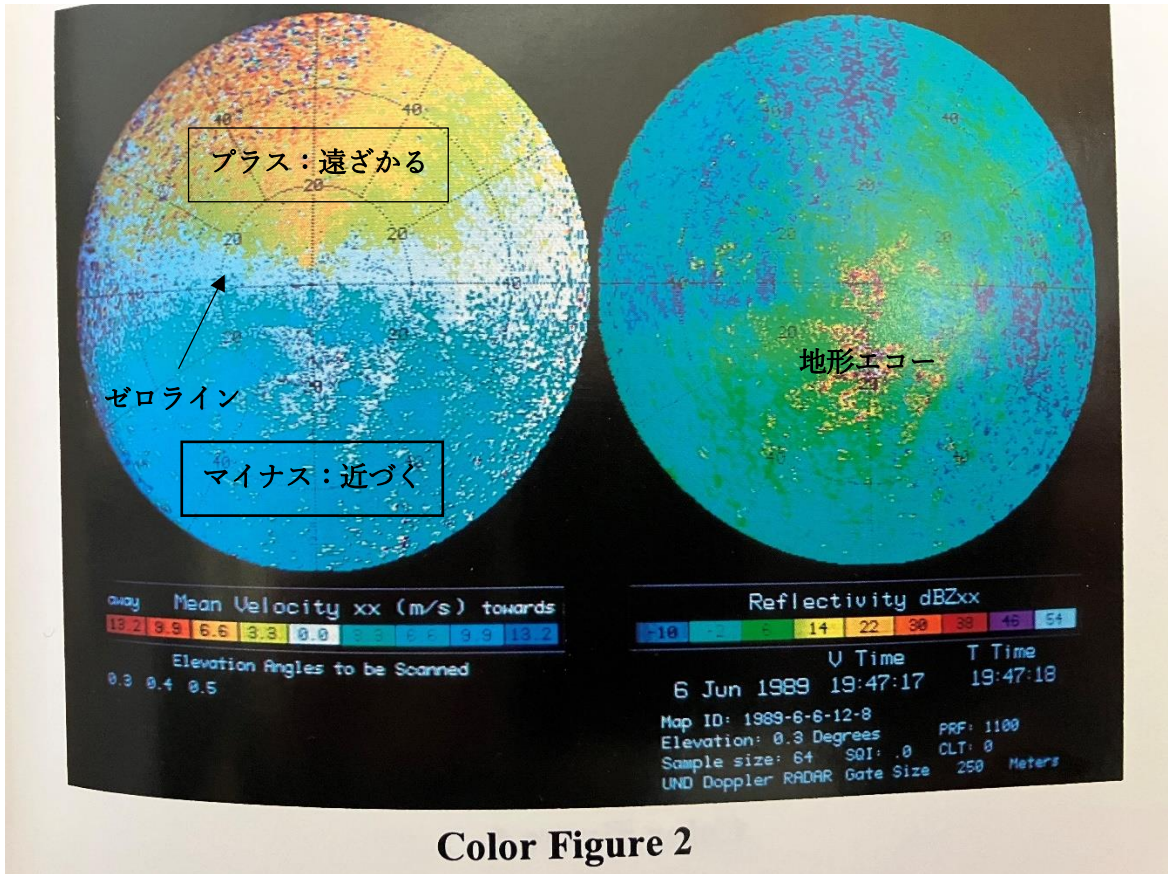
- 気象レーダは気象学的ターゲットのみならず非気象学的ターゲットのエコーを観測することがある。
  - ・非気象学的エコーの観測から気象に関する情報を引き出すことができる。
  - ・特に、風に関する情報は非気象学的エコー（特に晴天エコー）から得られる場合がある。
  - ・晴天エコーは気象レーダレーダが使われ始めた時に認識されていた。望遠鏡などを使った目視観測からエコーのもとになる物が見えなかったことからエンジェルエコーあるいはゴーストエコーと呼ばれた。
  - ・レーダ気象学の初期の段階から晴天エコーに関する多くの論文が出されている。1960年代には多くの実験から晴天エコーのソースは昆虫か鳥であるとの結論が出された。
  - ・1970年のレーダコンファレンスの予稿集の最後の論文では海上の晴天エコーは人魚との説も出た【[多分ジョーク](#)】。

### 発生源

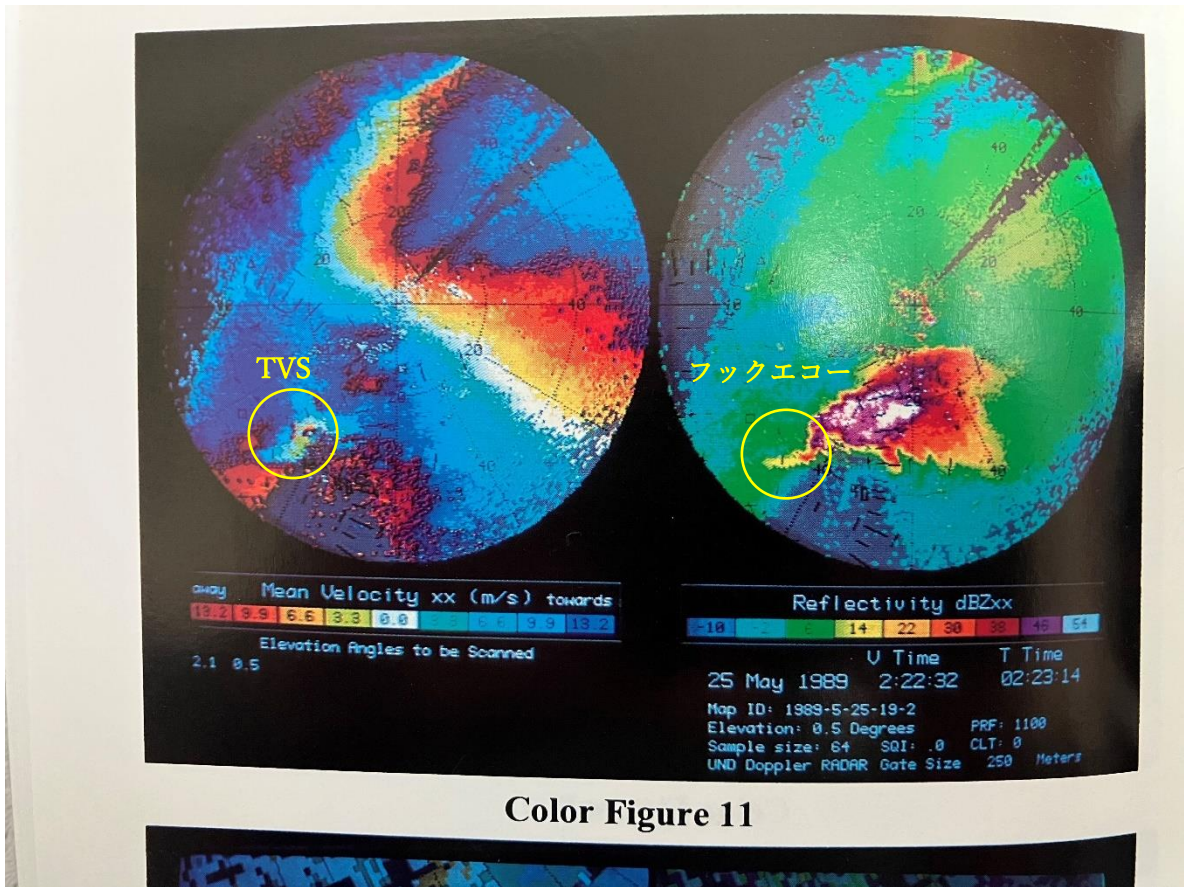
○晴天エコーのソースとして大気中の小さな粒子（昆虫、砂塵、チャフなど）と大気の屈折率勾配の二つがある。

#### ○微粒子

- ・強い風を伴う砂塵嵐が発生すると多量の砂塵が巻き上げられレーダエコーとして検出される。
- ・風が強くなくても多くの昆虫が大気中を漂うときには晴天エコーとして検出される。
- ・昆虫エコーの特徴を調べることで昆虫の分布、移動する高度、気象場との関係を調べることができるため radar entomology（レーダ昆虫学）の学問分野が登場した（Clark, 1997）。【[最近では鳥の生態をレーダを使って研究する radar ornithology（レーダ鳥類学）が登場](#)】
- ・観測されるドップラー速度は厳密には昆虫の移動速度の動径方向の速度成分であるが、昆虫が空気と一緒に流されていると仮定して観測されたドップラー速度から風向・風速を推定できる。
- ・1台のドップラーレーダから風向・風速の鉛直プロファイルを求める有名な方法として VAD 法（Velocity Azimuth Display 法, Lhermitte and Atlas 1961）がある。【[これを発展させた VVP 法（Volume Velocity Processing 法, Waldteufel and Corbin 1979）や MVVP 法（Modified Volume Velocity Processing 法, Koscielny et al. 1982）がある。最近はあまり使われない。複数台のドップラーレーダ観測による風向・風速の三次元分布が求められるようになっている。また、ドップラー速度を数値モデルの初期値として同化することで風向・風速を推定する手法が実用化されている。](#)】
- ・Color Fig. 2 の説明



・ Color Fig. 11 の説明



## 紛らわしい発生源

- ・ Figure 9.1 8月にカンサス市で観測された仰角 6.7 度のレーダ反射因子の PPI 画像。
- ・ レンジ 25km-30km に -5dBZ のリング状のエコー，レンジ 20km に -20 から -15dBZ の晴天エコー。
- ・ 当時の気象条件だけではこの晴天エコーのソース（昆虫か屈折率の勾配か）を決められない。

【著者はいろいろな気象状況を考察して，この事例のソースは不明であると結論づけているが昆虫説を信じたいようである。Figure 9.1 の場合，レンジ 25-30km のリング状エコーの高度は約 3km である。この高度に昆虫が広範囲に分布しているとは考えにくいので私はこの昆虫説には懐疑的で安定層での屈折率の勾配ではないかと推定する。晴れた日に X バンドでもこのような上空の同心円状の晴天エコーを見た経験がある（1990 年頃）が，X バンドでは屈折率の勾配を検知できるほど感度は無いとの計算結果もある。近年はドローンなどでその場観測ができるようになったので答えが出ているかもしれない】

## 屈折率の勾配

屈折率  $N$  は次式で表される。

$$N = \frac{77.6}{T} \left( P + 4810 \frac{e}{T} \right) - 4.03 \times 10^7 \frac{N_e}{f^2} \quad (3.5)$$

ここで  $T$  は気温 (K)， $P$  は気圧 (hPa)， $e$  は水蒸気圧 (hPa)， $N_e$  は自由電子の数密度 ( $\text{m}^{-3}$ )， $f$  は使用したレーダ周波数 (Hz) である。短距離で気圧が急変することがないことおよび自由電子の影響はイオン層のみに限られるので，通常の気象レーダ観測では  $N$  は気温，湿度，レーダ周波数に依存すると考えて良い。従って，晴天エコーのソースとしては気温または水蒸気が急変するような乱流からの散乱現象である。そして，乱流は使用するレーダ周波数で検出できる大きさの散乱（ブラッグ散乱：乱流の大きさが波長と同等かそれ以下）である必要がある。残念ながら航空機に搭載されているレーダの波長はブラッグ散乱を検出できるほど感度は良くない。また X，C，S などのマイクロ波の場合もブラッグ散乱を検出できるのはまれである。【著者はこのことから晴天エコーのソースを昆虫であると考えているようである】ブラッグ散乱の検出には波長が 30cm から 6m の波長が利用される。説明は省略するが，ウィンドプロファイラーがこの波長帯を使っており風向・風速の鉛直プロファイルを測定している。より詳細は Gossard and Strauch (1983) や Doviak and Zrnich (1993) を参照。

## 検出可能な風の現象

○晴天エコーの発生源として 2 種類考えられる。

- ・ マイクロ波レーダの場合最も可能性があるのは昆虫であろう。晴天エコーは春から秋にかけて多く見られ冬には極めて少ない。また「その場観測」の検証実験も有る。
- ・ 屈折率の勾配はウィンドプロファイラーなどの波長（10m～20m）で検出可能。

○観測例

## 風

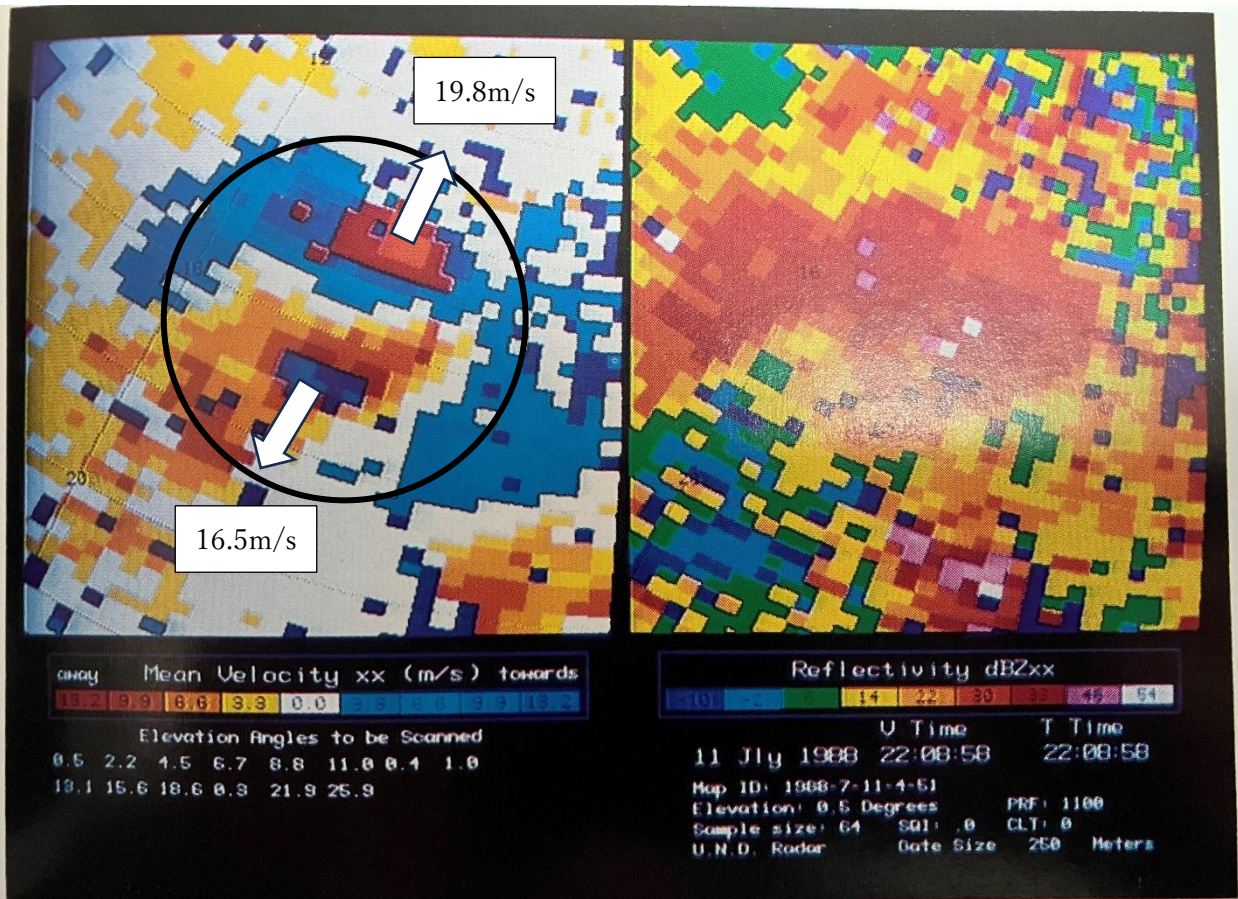
前節で述べているので省略

## マイクロバースト

マイクロバーストとは発達した積乱雲から地表面に向かって発生し破壊的な強風を引き起こす下降気流で空間規模が 4km 以下のものを言う。マイクロバーストは 1974 年にシカゴ大学の故藤田哲也博士により発見された。航空機の離発着時の墜落事故を引き起こすためドップラーレーダで計測出来る

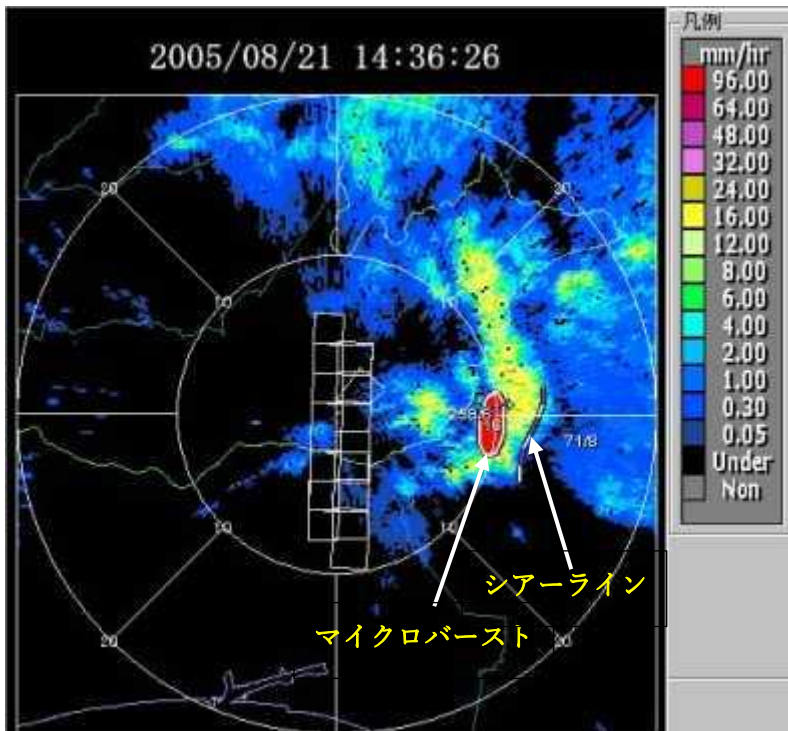
気象現象で最も重要なものの一つとされている。マイクロバーストの発生メカニズムとして、落下する降水粒子が周りの空気を引きずり下ろす力、降水粒子の蒸発による空気塊の冷却、氷粒子の融解による空気塊の冷却の三つが考えられる。マイクロバーストには降水粒子を伴う湿ったマイクロバーなわかないマイクロバーストがある。前者の場合レーダエコーは降水粒子からの散乱信号によるものである。後者の場合は地上から巻き上げられた昆虫、デブリ、砂ぼこりからの散乱信号である。

カラー写真5は1988年7月11日にステープルトン空港の近くでUNDレーダにより観測された湿ったマイクロバーストのエコーのレーダ反射因子である。54dBZの反射因子が観測されておりこのマイクロバーストにより多くの航空機が着陸できなかった。



Color Figure 5

マイクロバーストの自動検出アルゴリズムが MIT のリンカーン研究所で開発され NEXTRAD および TDWR システムに組み込まれている。【下図は日本の気象庁の検出例】

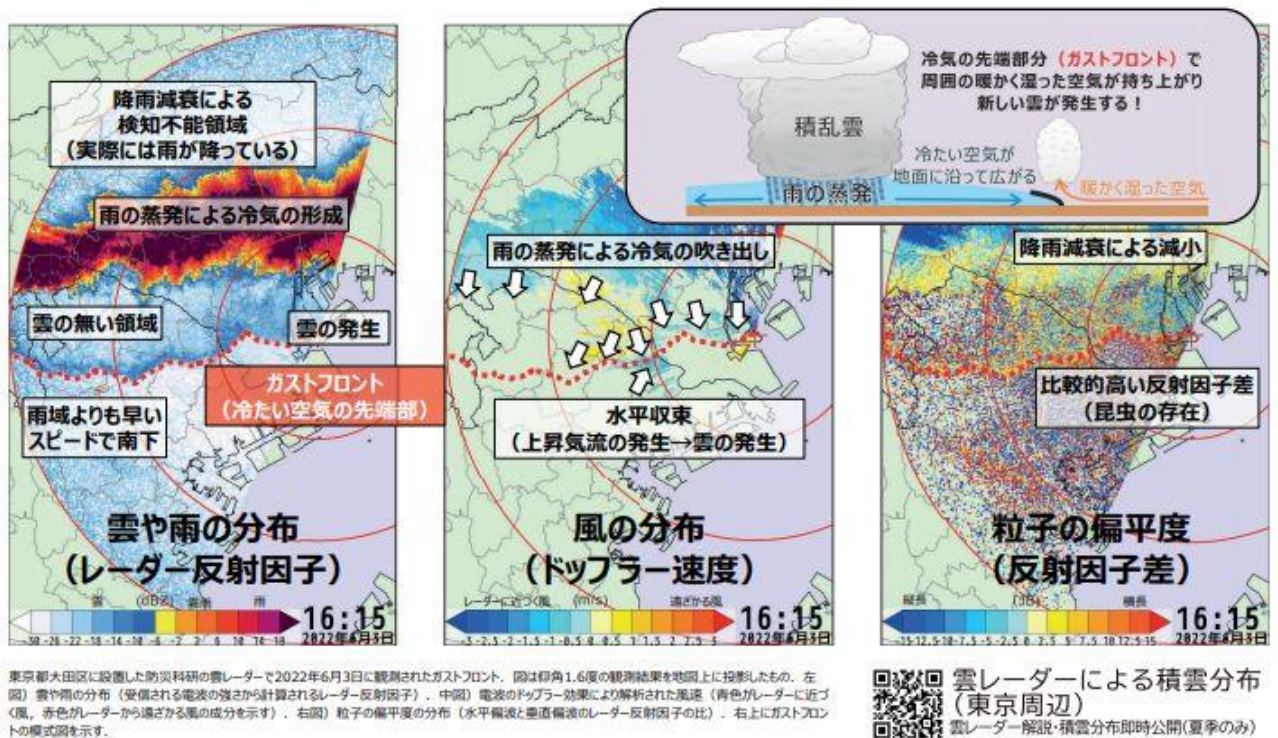


【気象庁ホームページ（千歳空港ドップラーレーダ）より】

### ガストフロント

ガストフロントは発達した積乱雲からの外出気流の先端部に出来る突風域である。積乱雲の進行方向前方に形成され積乱雲が衰弱あるいは消滅しても伝搬し続ける。

ガストフロントは反射強度、ドップラー速度、スペクトル幅の表示画面上で同定することができる。反射強度のエコーは地面からまき上げられた昆虫やそれを食べる鳥からのものである。エコーの強さはゼロから 20dBZ である。ドップラー速度の強さはガストフロントの後方で最も強くガストフロントの移動速度よりも大きい。この事実からドップラー速度の勾配からガストフロントの位置を同定できる。但し、ガストフロントの移動方向がレーダビームの方向と同じ場合はガストフロントを同定することは容易であるがガストフロントの移動方向がビーム方向と直交する場合にはドップラー速度の情報は利用出来ない。ガストフロント付近は激しい乱流状態にあるのでドップラーспекトル幅の値は大きくなる。スペクトル幅はガストフロントの移動方向がビームと直交する方向でも有意な値をとるのでスペクトル幅の情報はガストフロントの同定に有効なパラメータである。



【防災科研ホームページより】

## 乱流

○ドップラーレーダーが測定するスペクトル幅

- ・乱流の強さを知るための有力なパラメータの一つ。
- ・乱流が弱くても風の鉛直シア（風向が高さ方向で急変する場所）や水平シアがあるところでは大きくなる。
- ・大きなスペクトル幅が観測される現象としてはガストフロント、マイクロバーストの境界、積乱雲の外縁部分、前述したブラッグ散乱の素である乱流域などである。

【この説の議論は噴火に伴って発生する噴煙柱や火砕流のモニタリングにスペクトル幅が有力なパラメータである可能性を示唆している。実際に SVO-XMP レーダーの RHI 観測からスペクトル幅が降雨中の噴煙柱の検出に利用できそうだという例が出てきている】

## クラッター

○山の斜面、平坦地、海面などの地形からからの反射エコーのこと。

- ・地物によるものをグランドクラッター(地形エコー)海面からのものをシークラッター(海面エコー)と言う。
- ・クラッターは気象現象の観測にとって邪魔になるので通常はフィルターを使って除去される。

○クラッターが役に立つこともある！

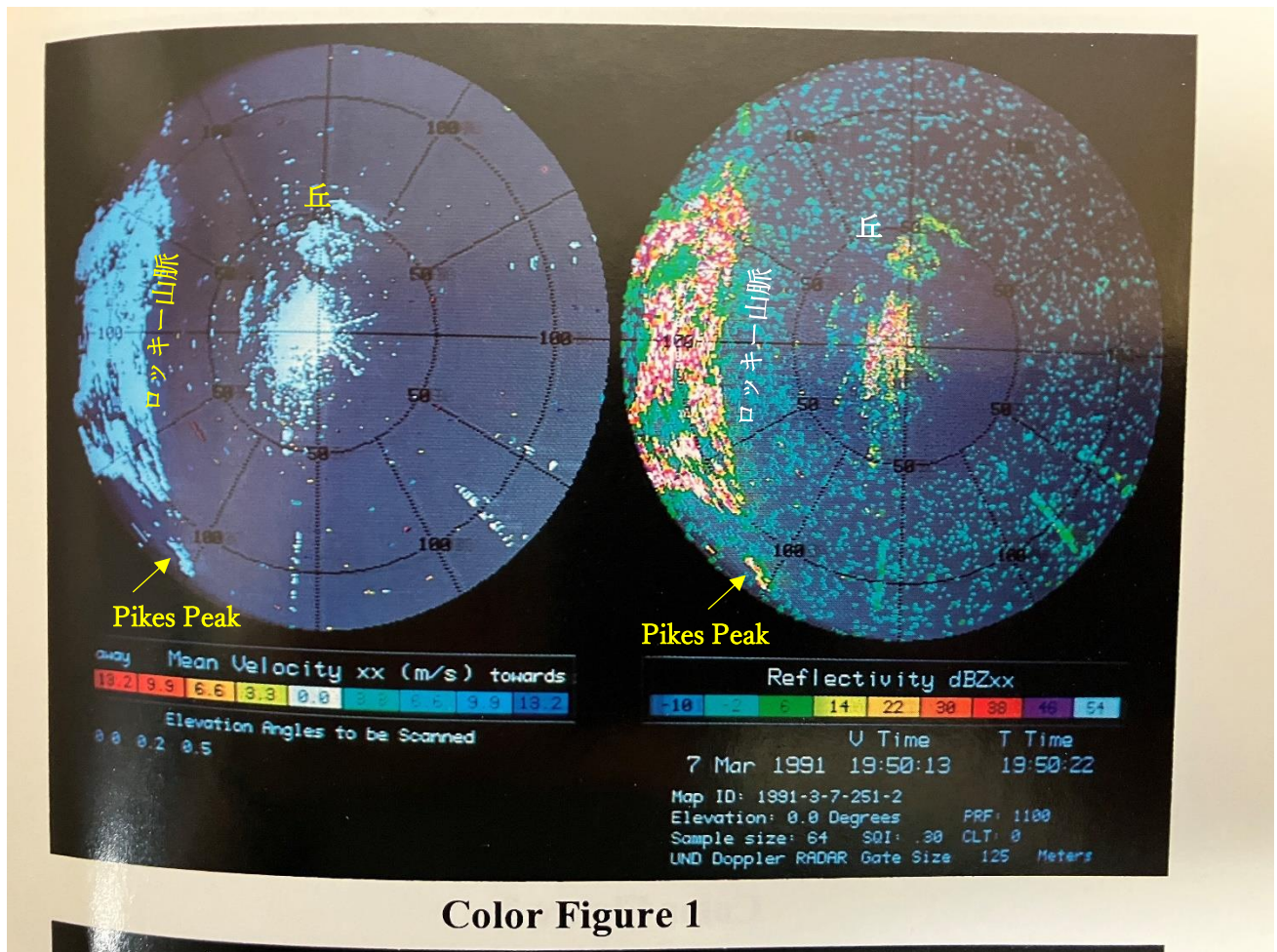
- ・“クラッターは友達”：いつもそこにあるので、見えなかったりエコーパターンがいつもと違ったりした場合にはレーダーの異常であることがわかる。
- ・位置がわかっているグランドクラッター（例えば電波塔など）はレーダーの測定レンジが正しいかどうかの判断に使える。
- ・電波塔などの反射エコーの強さはレーダーシステム（特に受信機あるいは送信機）が正常化どうかのあ

判定に利用出来る。お気に入りの電波塔を見つけておくと良い。

- ・クラッターエコーの強さから研究用レーダの受信機のキャリブレーションエラーを補正することができた (1972年と1973年のNCARの研究用レーダが11dBから12dBも異なっていた)。

○グランドクラッターの例 (カラー写真1)

- ・レーダ近傍のクラッター：丘、建物、木など レーダの北30km-50kmのエコー：丘 レーダの西80km-120km ロッキー山脈、方位角220°-215°のエコー：Pikes Peak, そのほか拡大するとレーダ近くの電波塔のエコーが認められる



Color Figure 1

○速度を持ったクラッター

- ・ドップラー速度を持った点状のエコーは車、鳥、航空機の可能性がある。