

SuperDARN北海道-陸別HFレーダーを用いた 夏季中間圏エコーの統計解析

津屋太志¹ 西谷望¹ 小川忠彦² 堤雅基³ 行松彰³

¹名古屋大学太陽地球環境研究所

²情報通信研究機構

³国立極地研究所

地球大気

夏季中間圏エコー(PMSE/MSE)とは？

熱圏

極低温
(150K以下)

中間圏界面(85-95km)

→地球大気の中で最も温度が低い領域 90km

中間圏界面の温度が極低温(<150 K)になる。

中間圏

帯電した氷エアロゾルが発生し、そのイオンによって電子拡散が弱められる。

50km

中性大気の乱流が電子拡散の減少と相まってレーダーの半波長スケールの構造をつくり、それらの構造が電波を後方散乱する。(Rapp and Lübken, ACP, 2004)

成層圏

対流圏

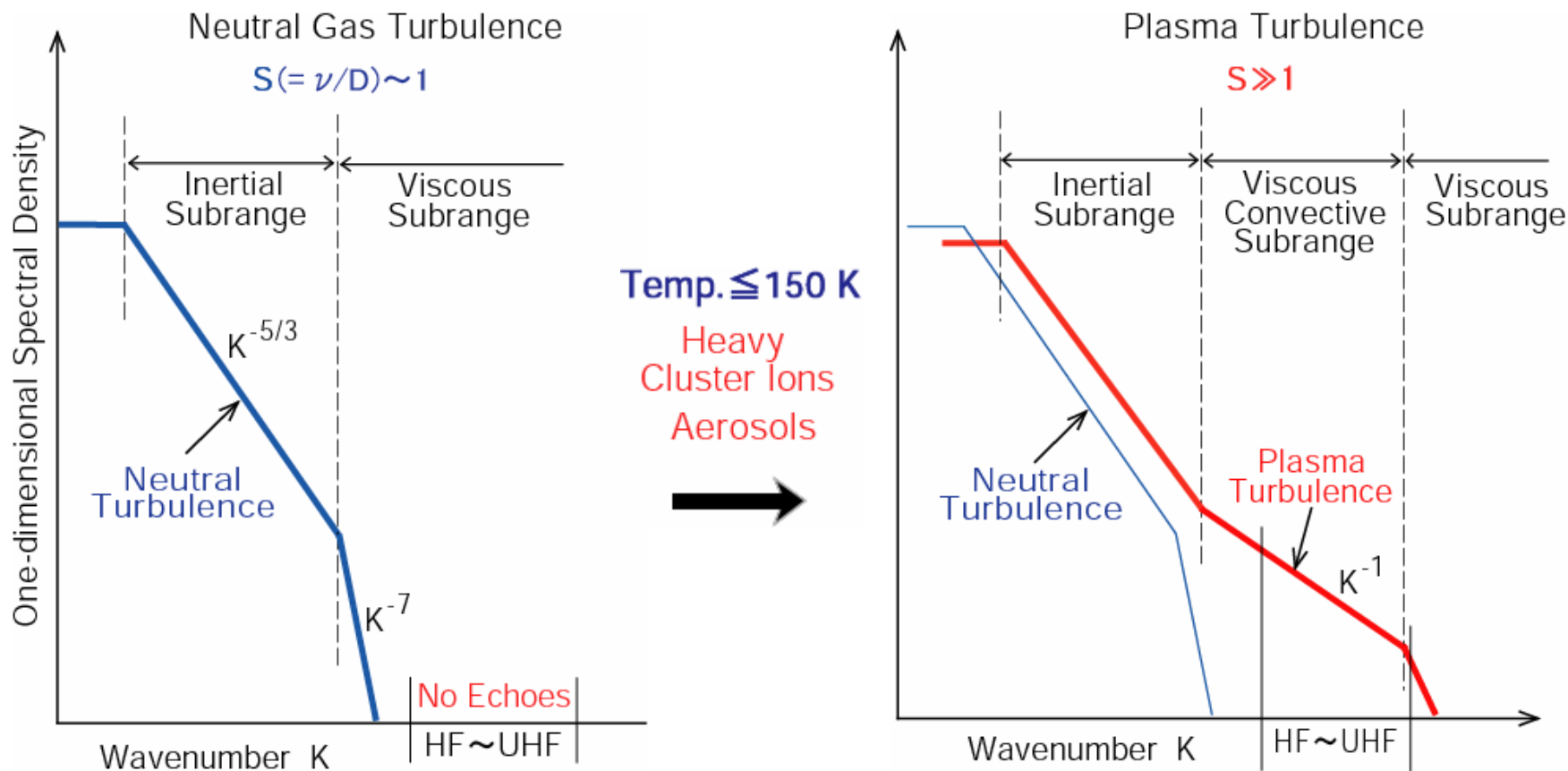
HF電波

地表

北海道-陸別 HF レーダー

夏季中間圏エコーについて(極域)

中間圏界面の温度が極低温($< 150\text{ K}$)になる。



出典: 小川忠彦 (2003, 中緯度短波レーダー研究会)

過去の研究例(PMSE/MSE)

極域

- Ogawa et al. (GRL, 2002)
HFレーダーを用いた夏季中間圏エコー(PMSE)のイベント解析
- Hosokawa et al. (GRL, 2005)
HFレーダーを用いた夏季中間圏エコー(PMSE)の統計解析
- Bremer et al. (JGR, 2005)
VHFレーダーを用いた夏季中間圏エコー(PMSE)の統計解析

中緯度

- Zecha et al. (JGR, 2003)
VHFレーダーを用いた夏季中間圏エコーの統計解析
- Ogawa et al. (JASTP, 2011)
VHFレーダーとMFレーダーを用いた夏季中間圏エコーのイベント解析
- Ogawa et al. (EPS, in press)
HFレーダーを用いた夏季中間圏エコーのイベント解析



中緯度において、HFレーダーを用いた夏季中間圏エコーの統計解析は行われていない。

研究目的

- ・北海道-陸別 HFレーダーを用いて夏季中間圏エコーを統計的に解析することで、中緯度における中間圏界面の大気動態を理解する。
- ・中緯度のHFレーダーで観測された夏季中間圏エコーを抽出するための判別条件を決定する。

※北海道付近の緯度帯においてHFレーダーを用いた夏季中間圏エコーの統計解析は世界初である。

→地理緯度:陸別(北緯43.5度)

※中間圏の温度は下層大気を含む大規模な子午面循環の影響を受けている。[PLUMB (JMSJ, 2002)]

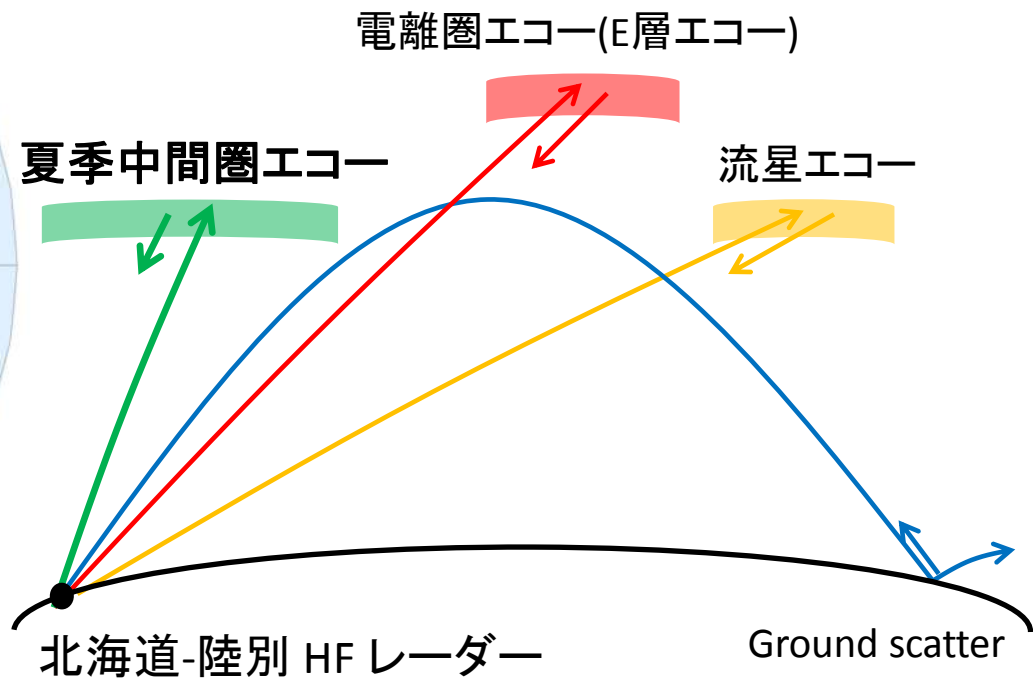
→地球温暖化を含めた環境変動を理解する上で非常に重要である。



SuperDARNレーダー網を使えば、将来的に中間圏界面の大気動態を地球全体で調べることができる。

SuperDARN 北海道-陸別 HFレーダー (Super Dual Auroral Radar Network)

北半球21基、南半球11基の、共通仕様に基づいた短波帯(8~20MHz)レーダーネットワーク。

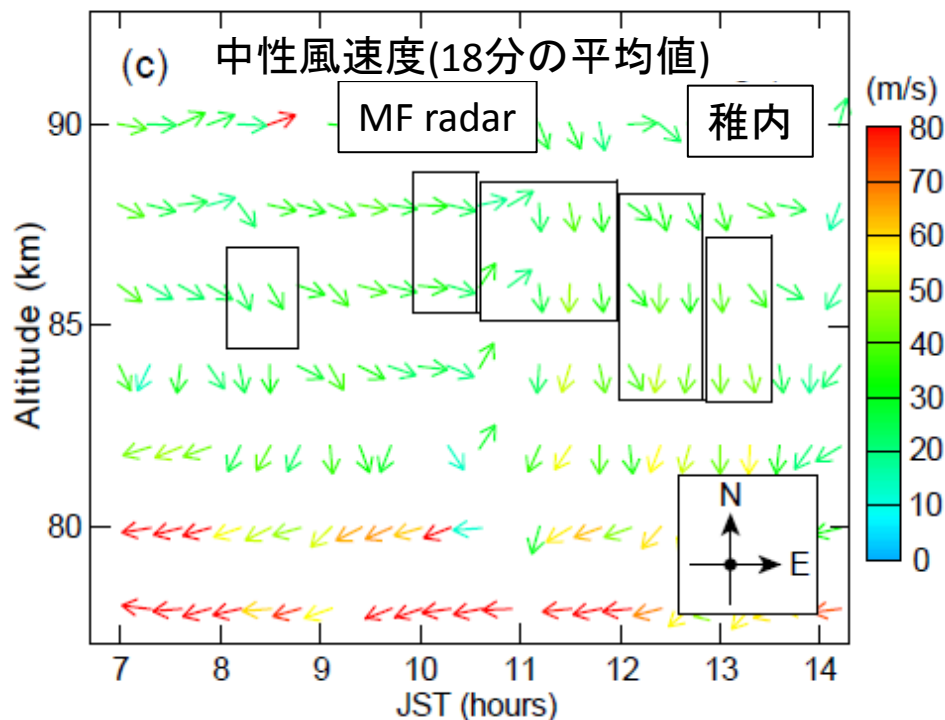
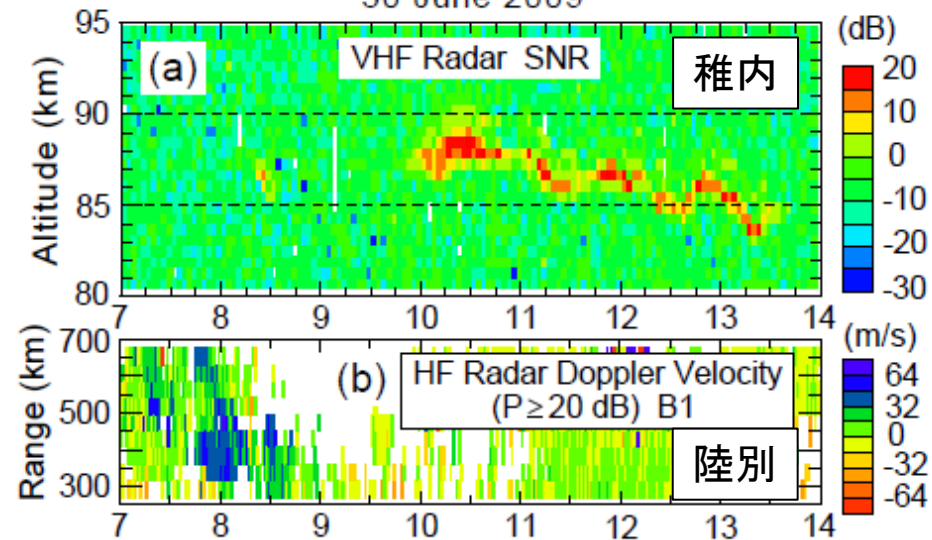


用いたデータ

- ・周波数:10.810MHz,11.070MHz
- ・モード: longscan (First range120km, 空間分解能:15km, 時間分解能: 1分)
- ・観測期間:2006年12月-現在(ただしlongscanモードのみ用いたため月平均4日程度)

夏季中間圏エコー(VHFレーダー、HFレーダー)

30 June 2009



出典: Ogawa et al. (EPS, in press)

各観測機器による観測例

・VHFレーダーで中間圏界面付近に、強い散乱が観測された時間帯で、HFレーダーの近いレンジに強いエコーが観測された。

→このエコーは夏季中間圏エコーであると考えられる。

・そのエコーのドップラー速度とMFレーダーの風速データを比較すると良い一致を示す。

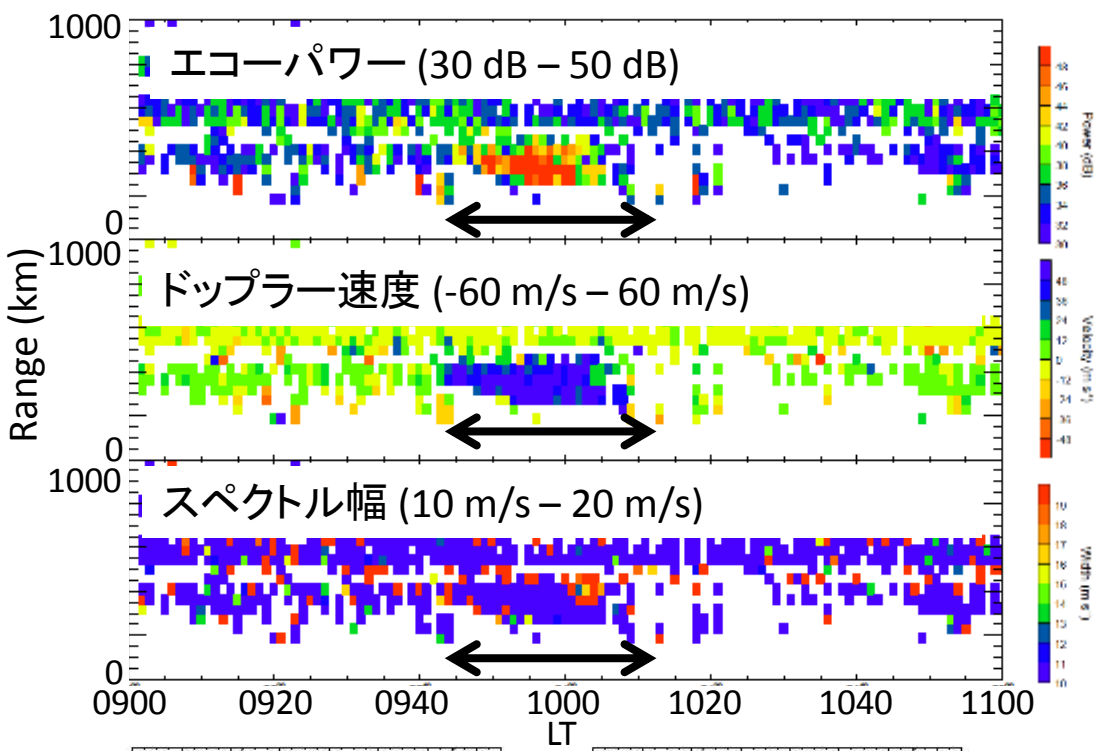
HFレーダーによる観測例

・同じ時間において、どのビームでもほぼ同じレンジにエコーが得られる。

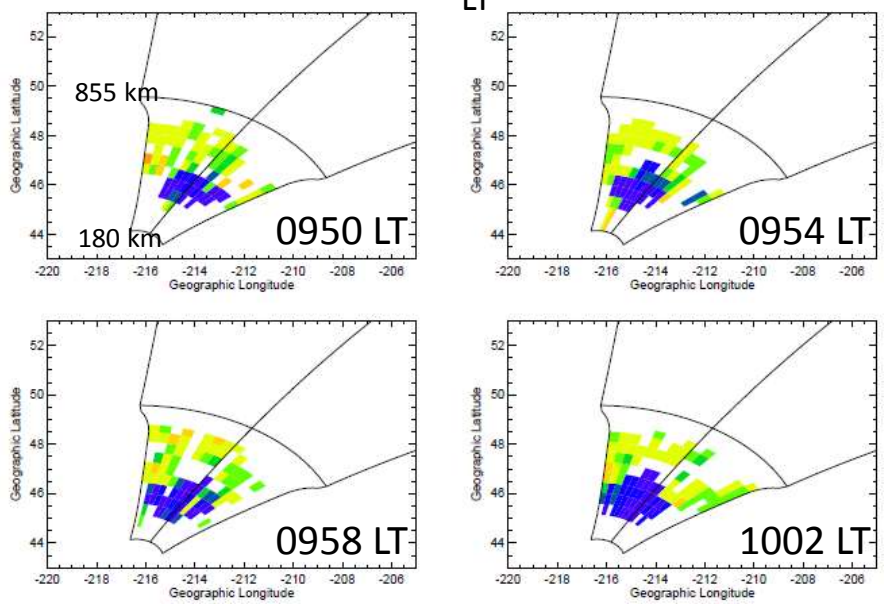
・夏季中間圏エコーはレーダーに向かってくる方向のドップラー速度を持ち、構造が近づいてくるように見える。

→E層エコーではなく夏季中間圏エコーであると考えられる。

夏季中間圏エコー(エコーパワー> 30 dB) 2012年6月28日 (0900 LT - 1100 LT)



- ・エコーパワーが強い。
(多くが40dB以上)
- ・南向きのドップラー速度を持つ。
(30m/s - 60m/s)
- ・スペクトル幅が小さい。
(ほとんどが10m/s以下)
- ・どのビームでもほぼ同じレンジにエコーが得られる。



特徴が過去の研究結果 [Ogawa et al. (EPS, in press)] と一致し、夏季中間圏エコーであると考えられる。

$$\text{発生率} = \frac{\text{夏季中間圏エコーが観測されたデータの数}}{\text{全観測数}} \times 100$$

※ただしground scatterのデータ、またノイズと思われるデータは分母・分子から除く。
 ※夏季中間圏エコーがE層エコーによって隠されてしまう場合は考えないものとする。

・ground scatter の判定条件

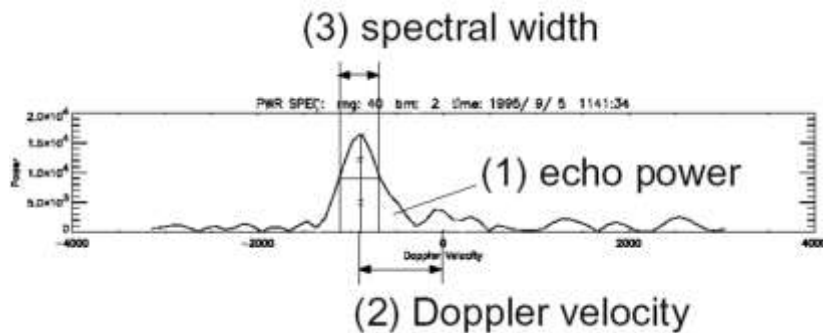
$$|\text{ドップラー速度}| \leq 30[\text{m/s}] - \frac{1}{3} \times \text{スペクトル幅}$$

・ノイズの判定条件

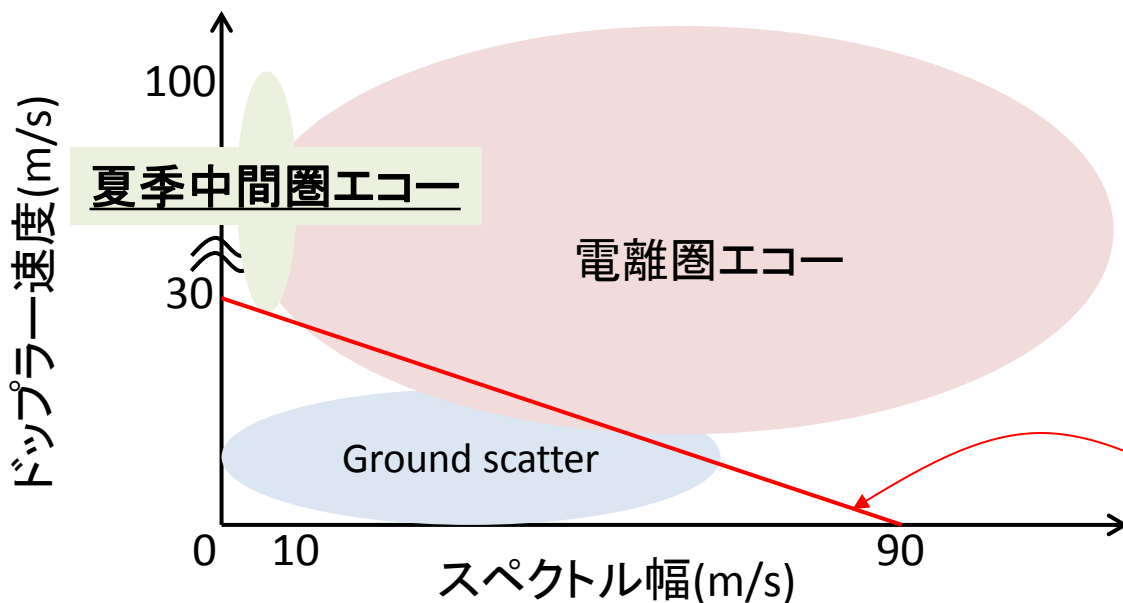
$$|\text{ドップラー速度}| \geq 3500[\text{m/s}]$$

or

$$|\text{隣り合うドップラー速度の差}| \geq 300[\text{m/s}]$$



出典:筒井 卒業論文 (2008)



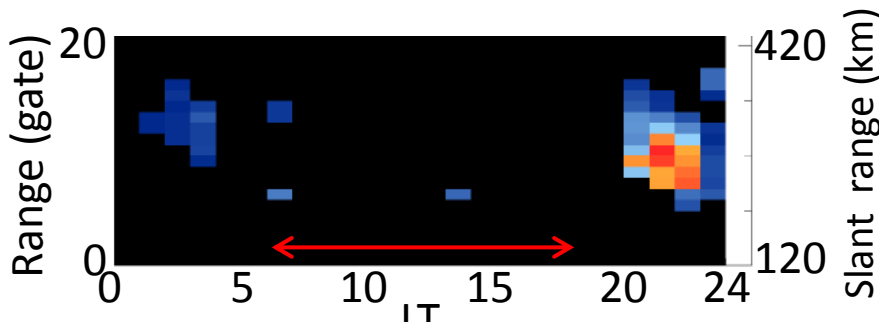
夏季中間圏エコーの判別条件

- 1:エコーパワー>30 dB
 - 2:0m/s<ドップラー速度<100 m/s
 - 3:スペクトル幅<10 m/s
 - 4:継続時間>3 min
- 1,4は流星エコーとの区別
 2,3は電離圏エコーとの区別

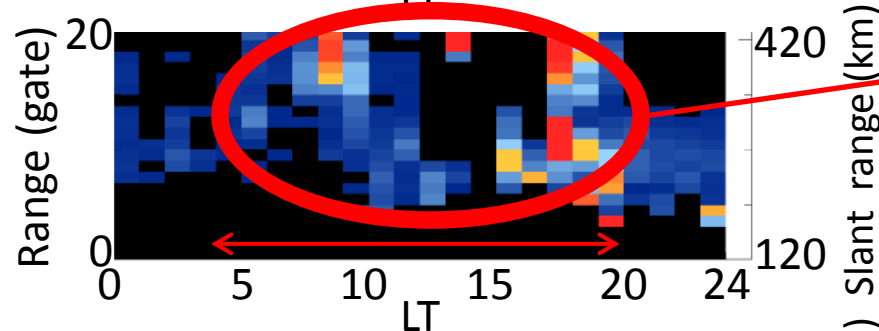
ground scatter の判定条件

夏季中間圏エコーの発生率(2010年3月-2011年2月)

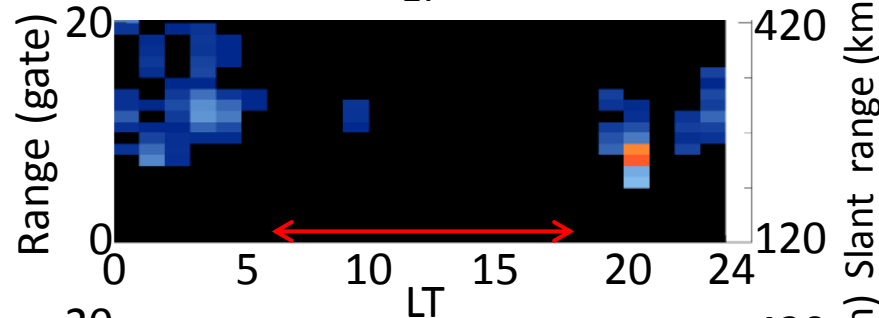
春
(3-5月)



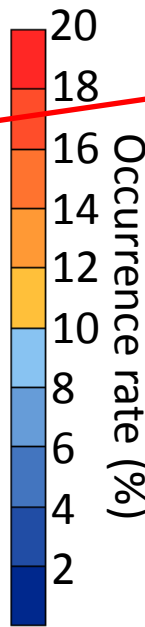
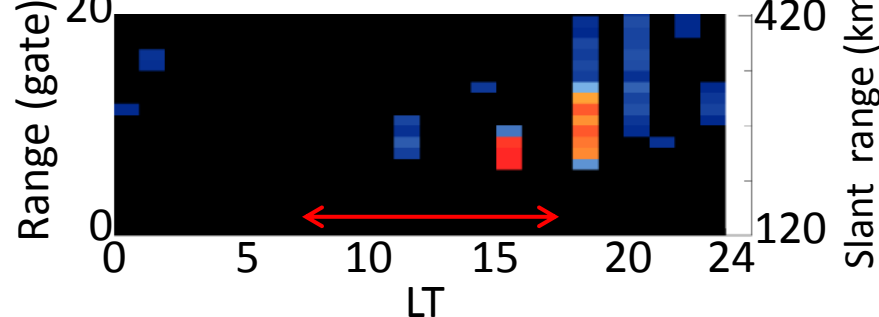
夏
(6-8月)



秋
(9-11月)



冬
(12-2月)



解析結果

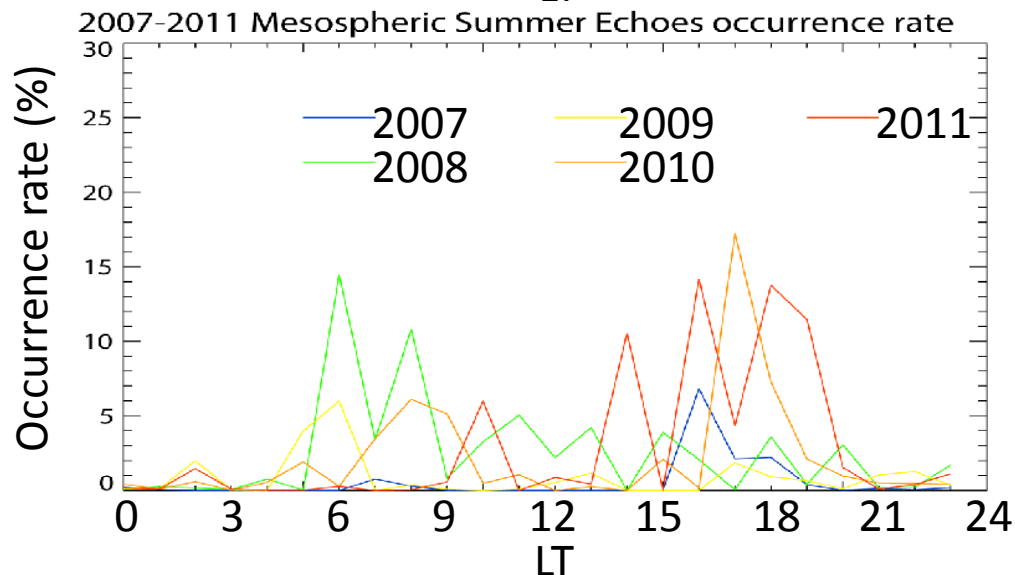
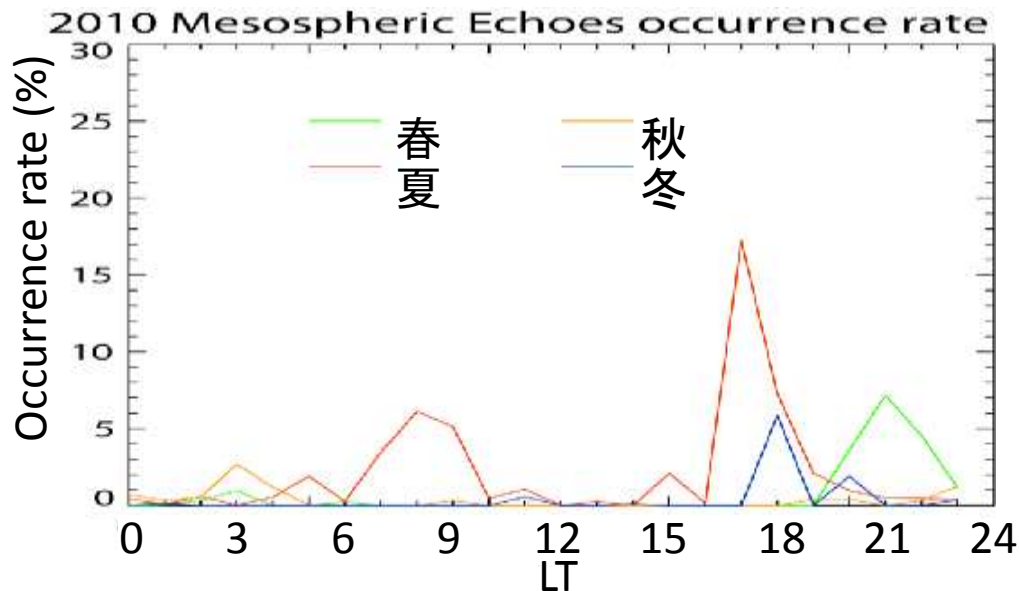
季節・LT依存性について

・夏の日中に多く観測された。

・この中緯度での結果は過去の極域における統計解析である

Hosokawa et al. (GRL, 2005)の結果と一致する。

※ただし発生率の絶対値とピーク時間は異なる。



考察

- PMSEは中間圏界面の極低温に関連して夏に多く観測される。

[Hosokawa et al. (GRL, 2005)]

- 夏極の中間圏界面付近の温度は子午面循環によって低下することが知られている。[富川喜弘 (平成20年度, MTI-handbook)]

- 本研究の結果は極域におけるPMSEの結果と似た特徴を持つ。
→中緯度の**中間圏界面付近にも極低温の領域**が生成していることを示唆する。

- 本研究では、中性風の影響を受けることで極低温の領域が極域から中緯度に運ばれているのではないかと考え、南向きのドップラー速度を持つエコーを抽出した。

- 少なくとも今回抽出したエコーに関しては、上記のシナリオに一致する結果が得られた。

発生率の絶対値とピーク時間について

- 発生率の絶対値は高くても20%程度であった。
- 特に0900 LT付近と1800 LT付近に発生率のピークがあることがわかった。

まとめ(夏季中間圏エコー統計解析)

- ・中緯度における夏季中間圏エコーについて統計解析を行った。
- ・本研究で用いた判定条件によって抽出した中間圏界面エコーは夏の日中に多いという結果となった。
- ・今回の解析結果は季節依存性、LT依存性共に極域(緯度60度以上)における先行研究であるHosokawa et al. [2005]と似た結果であった。
- ・極域と同様な特徴を持つ構造が中緯度でも存在することが示された。

課題

- ・夏季中間圏エコーの高度分布を同定する。
 - エコーが観測された時の中間圏界面付近の大気動態を調べることができる。
 - エコーのより正確な判別条件を設定することができる。(Es層エコーとの区別)
- ※しかし北海道レーダーにはレンジと位相差のオフセットがあるため、まずはそのオフセットを求める必要がある。

北海道-陸別 HFレーダーの位相差オフセットとその求め方

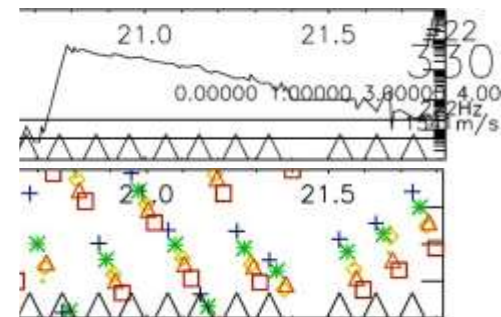
- ・北海道レーダーでは送受信アンテナと受信アンテナで位相差を測定している。
- ・その位相差から仰角を求め、高度を推定することができる。

※しかし北海道レーダーには様々な要因により位相差にオフセットがある。

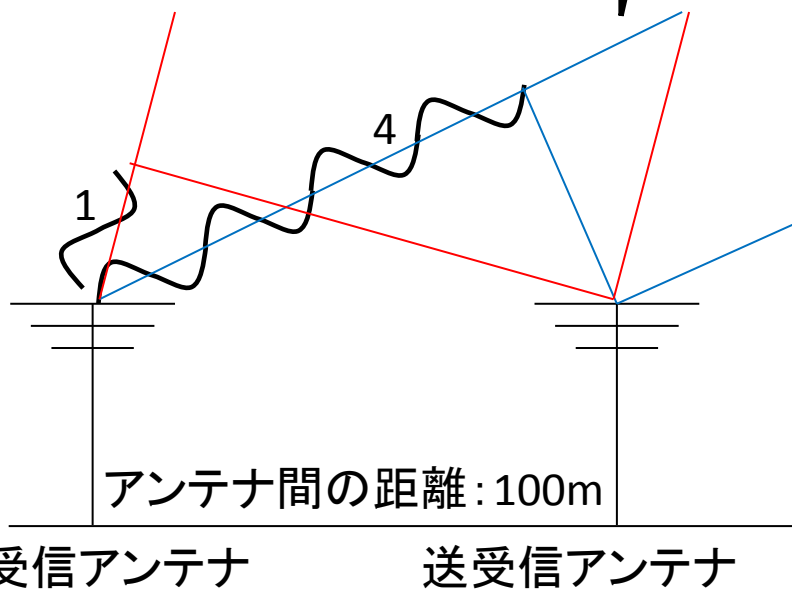
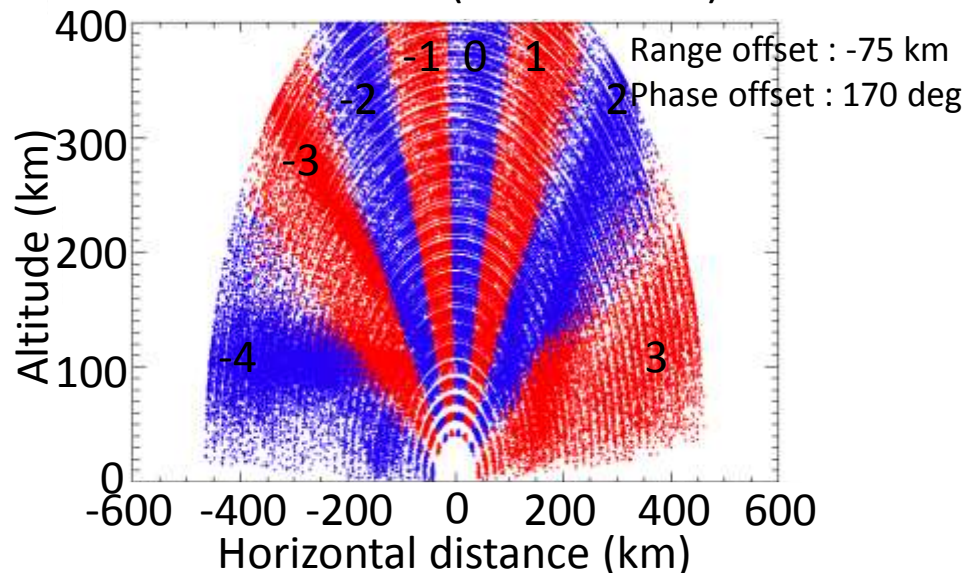
流星エコーの高度推定を行うことで、位相差のオフセットを求める。

流星エコーとは

- ・流星飛跡でレーダーの電波が後方散乱されたエコー
- ・高度70km - 110kmに分布

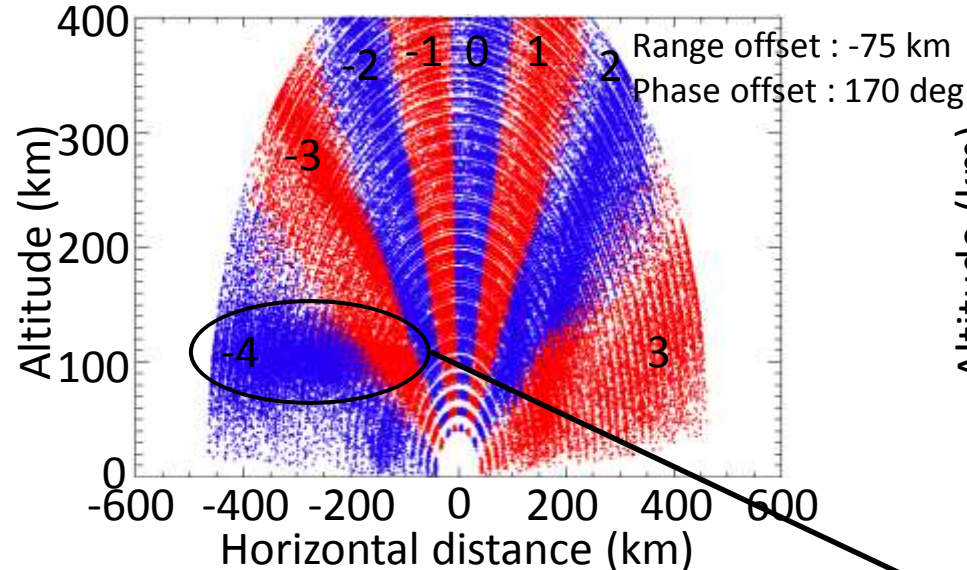


2011年9月4日(15 kmモード)

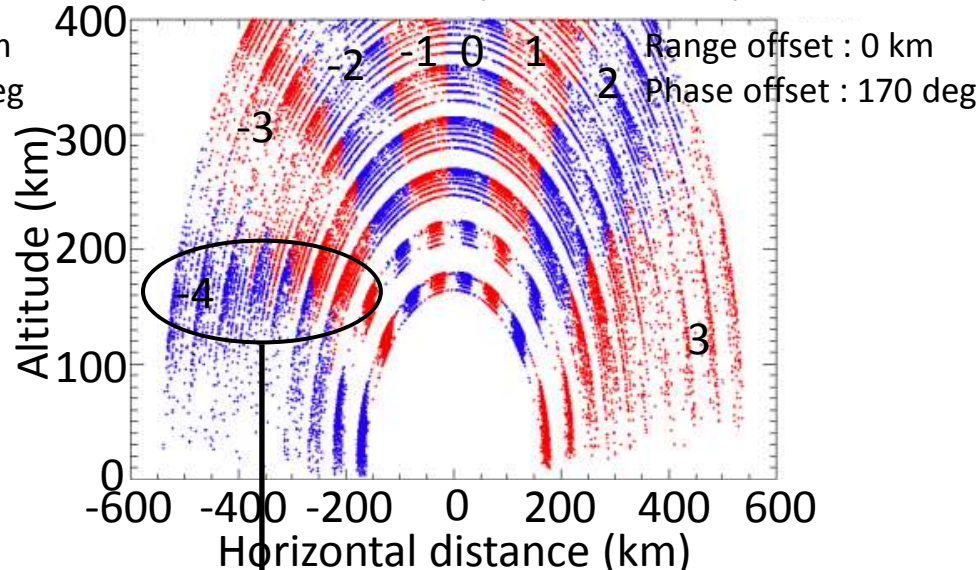


流星エコーの高度推定

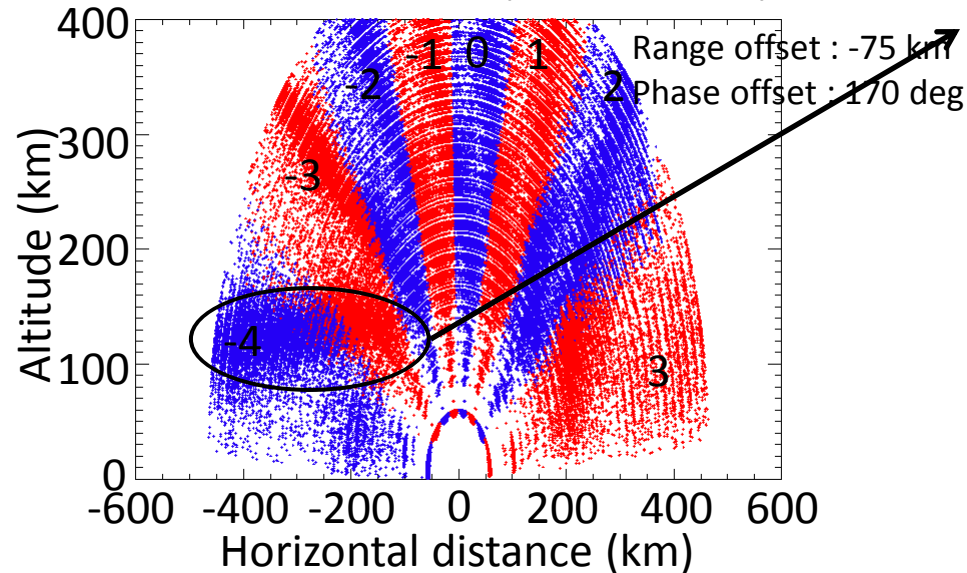
2011年9月4日(15 kmモード)



2012年6月28日(45 kmモード)



2012年12月12日(15 kmモード)



流星エコーの真の分布と考えられる。

結果

15 kmモード

- ・レンジのオフセット: -75 km
- ・位相差のオフセット: 170度

45 kmモード

- ・レンジのオフセット: 0 km
- ・位相差のオフセット: 170度

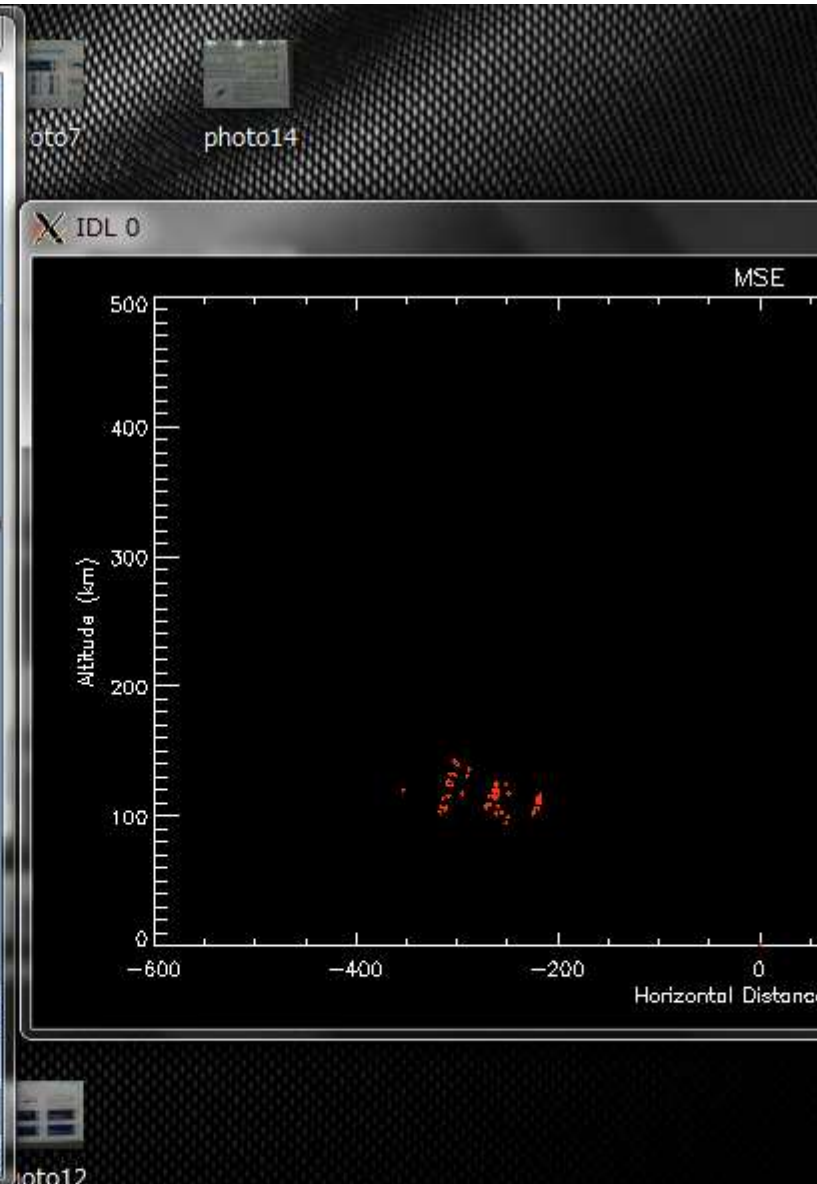
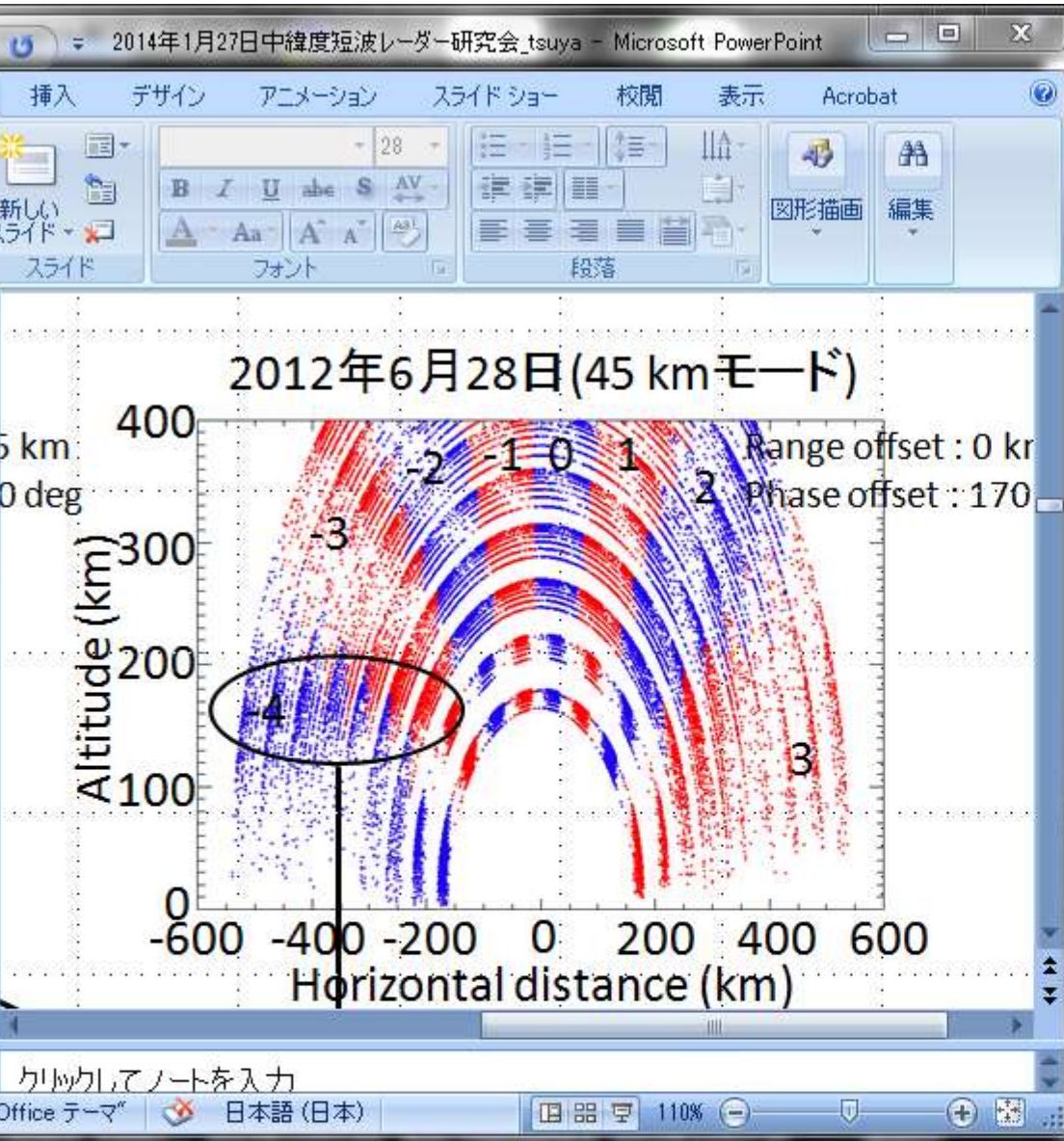
まとめ(流星エコー高度推定)

- ・SuperDARN北海道-陸別HFレーダーのレンジと仰角(位相差)オフセットを求めた。
- ・15 kmモードではレンジのオフセットが-75 km、位相差のオフセットが**170度**であるという結果となった。
- ・45 kmモードではレンジのオフセットが0 km、位相差のオフセットが**170度**であるという結果となった。
- ・しかし短波レーダーで観測される流星エコーの高度(70 km – 110 km)を考えた場合、やや高め(90 km – 200 km)に分布している。

今後の課題

- ・流星エコーの高度がやや高めに分布することについて考える。
(→現在の手法ではHFレーダーで観測されたエコーの高度を正確に求めることは難しい→新たな手法が必要。)
- ・夏季中間圏エコーについても同様の方法で高度推定を行い、流星エコーの高度分布との比較をする。

初期結果(MSEの高度推定)



クリックしてノートを入力

Office テーマ 日本語(日本)

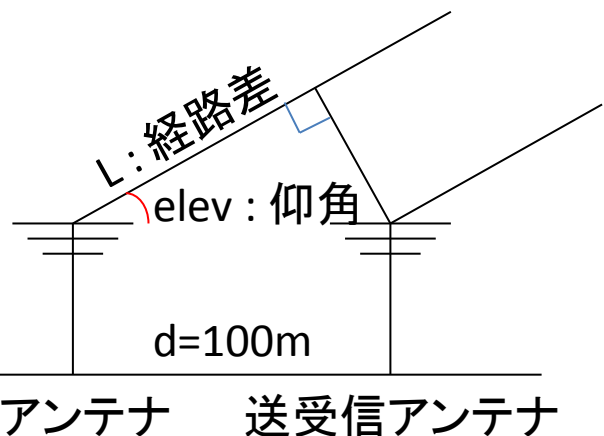
110%

極域科学シンボ...

セミナー発表

photo12

北海道-陸別 HFレーダーの位相差オフセット



位相差は経路差と波長から求められる。
※ただし経路差が電波の波長より長い点に注意
(→経路差内に含まれる波長の数を n とする。)

$$\Delta\phi = \frac{L}{\lambda} \times 2\pi - 2n\pi \Leftrightarrow L = \frac{\lambda}{2\pi} \Delta\phi + n\lambda$$

$\Delta\phi$: 位相差

仰角は位相差から求められる。

$$L = d \cos(\text{elev}) \Rightarrow \text{elev} = \arccos\left(\frac{\lambda}{d} \left(\frac{\Delta\phi}{2\pi} + n\right)\right)$$

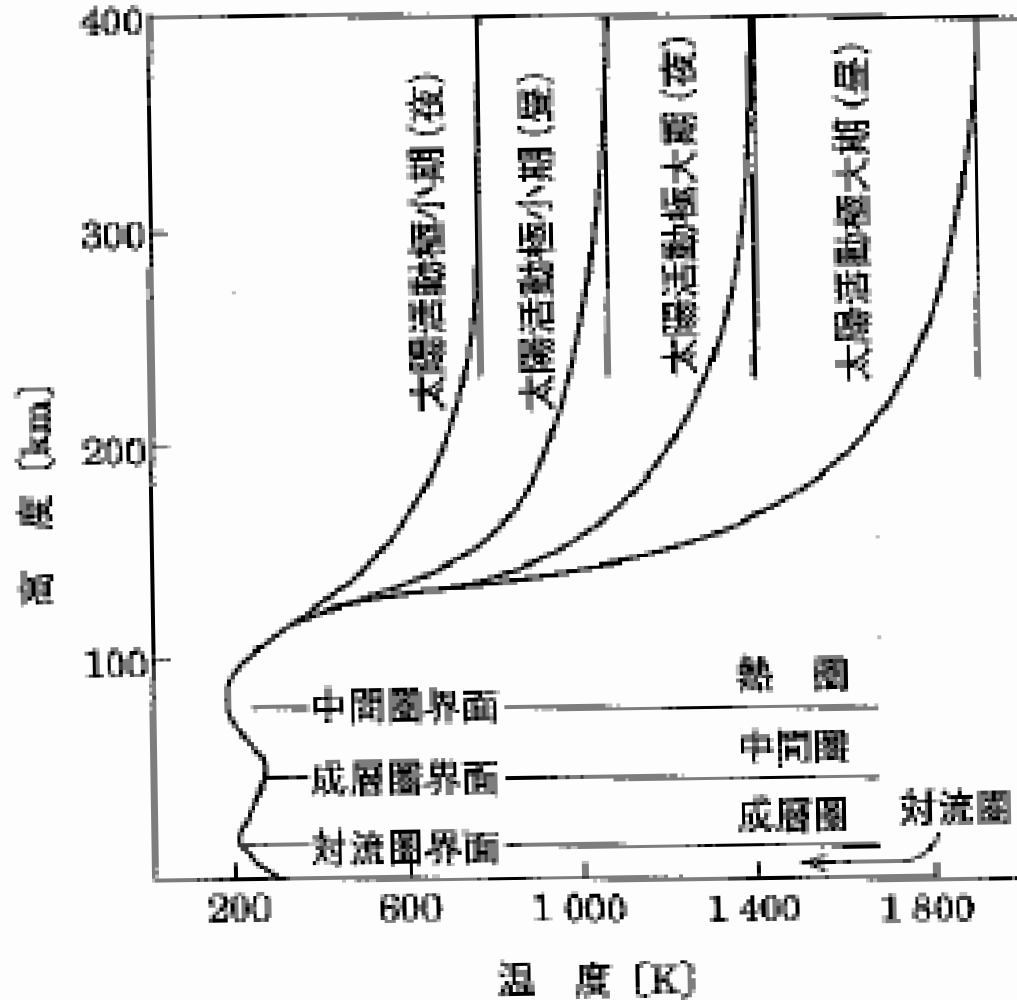
※しかし実際は位相差にオフセットがあるため観測データは以下の式になる。

$$\underline{\text{elev}} = \arccos\left(\frac{\lambda}{d} \left(\frac{\Delta\phi + a}{2\pi} + n\right)\right)$$

a : 位相差のオフセット

流星エコー(高度70 km – 110 km
に分布)の高度推定を行うことで、
位相差のオフセットを求める。

中性大気の温度分布



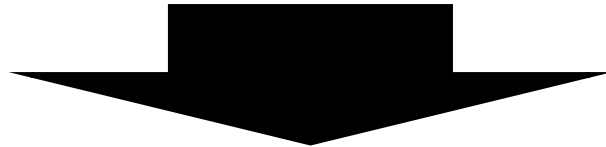
中間圏界面

- ・高度90 km付近の領域(夏季には85 km)
- ・地球大気の中で最も温度が低い領域

出典：恩藤忠典, 丸橋克英 (2000)

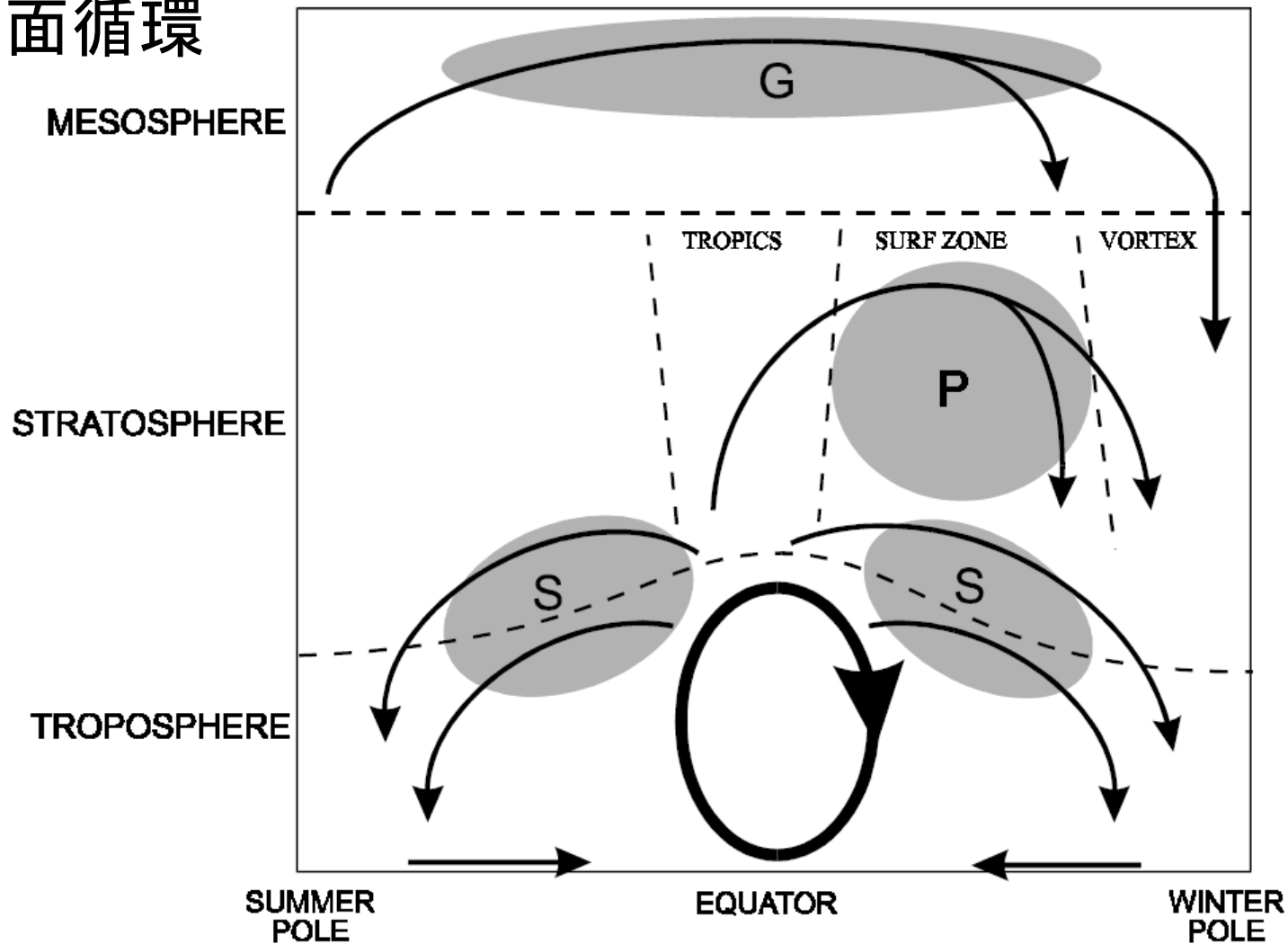
中間圏界面

- ・高度90 km付近の領域(夏季には85 km)
- ・地球大気の中で最も温度が低い領域
- ・中間圏の温度は下層大気を含む大規模な子午面循環の影響を受けている。[PLUMB (JMSJ, 2002)]



中間圏界面の大気動態を調べることは地球大気温度のモニタリングになりうる。

子午面循環



出典：R. Alan PLUMB (JMSJ, 2002)

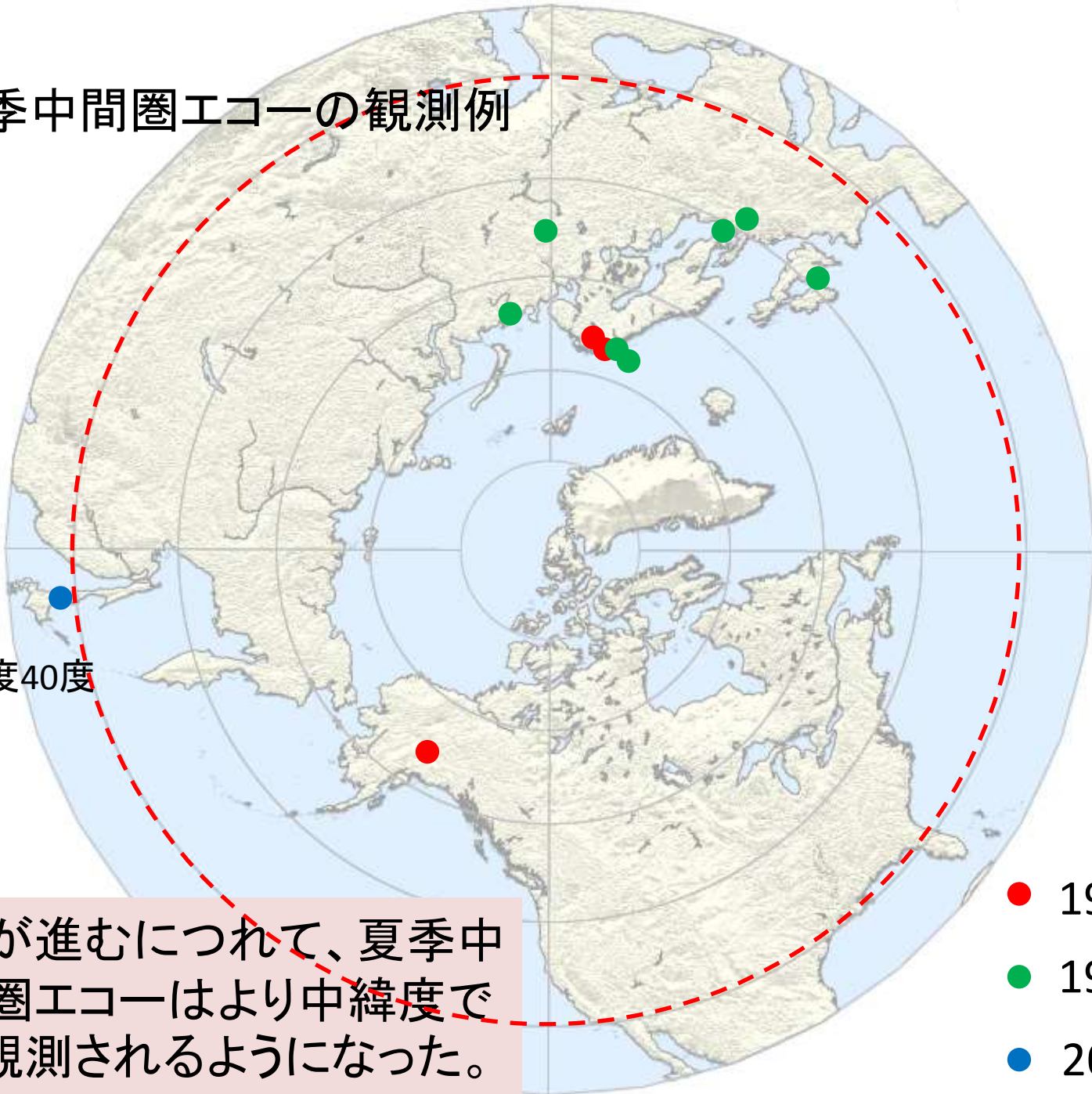
中間圏の温度は子午面循環の影響を受けている。

夏季中間圏エコーの観測例

緯度40度

年が進むにつれて、夏季中間圏エコーはより中緯度でも観測されるようになった。

- 1990年以前
- 1990年代
- 2000年以降



過去の研究例(PMSEと関連しているもの)

極域

- Hosokawa et al. (GRL, 2005)
HFレーダーを用いた夏季中間圏エコー(PMSE)の統計解析
- Bremer et al. (JGR, 2005)
VHFレーダーを用いた夏季中間圏エコー(PMSE)の統計解析
- Ogawa et al. (GRL, 2002)
HFレーダーを用いた夏季中間圏エコー(PMSE)のイベント解析

中緯度

- Ogawa et al. (JASTP, 2011)
VHFレーダーとMFLレーダーを用いた夏季中間圏エコーのイベント解析
- Ogawa et al. (EPS, in press)
HFレーダーを用いた夏季中間圏エコーのイベント解析
- Kubo et al. (GRL, 1997)
MULレーダーを用いた中間圏界面エコーの統計解析
- Zecha et al. (JGR, 2003)
VHFレーダーを用いた夏季中間圏エコーの統計解析

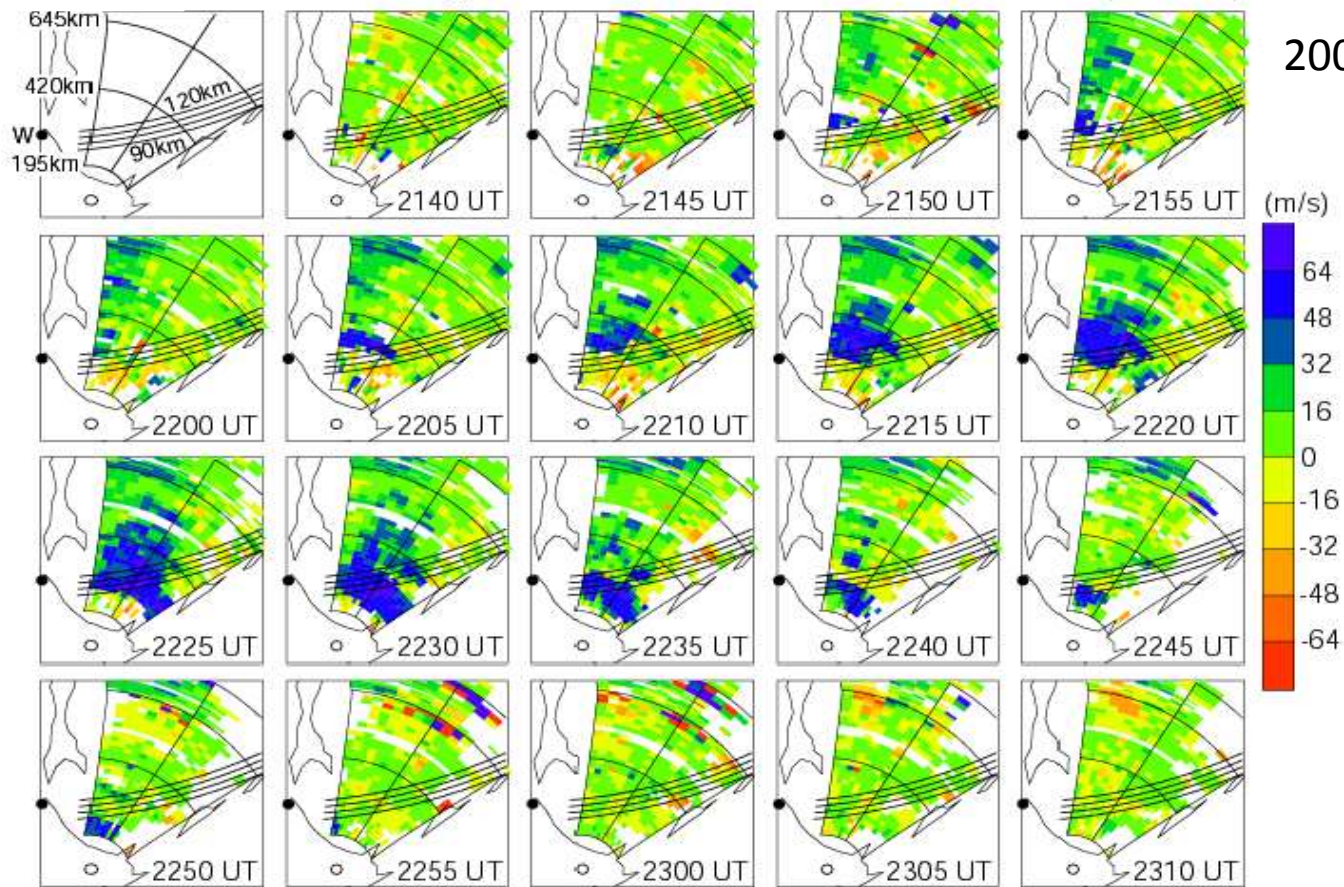


中緯度において、HFレーダーを用いた中間圏界面エコーの統計解析は行われていない。

夏季中間圏エコー

HF Radar Doppler Velocity ($P \geq 10$ dB) 15 June 2009 (9.1 MHz)

2009年6月15日

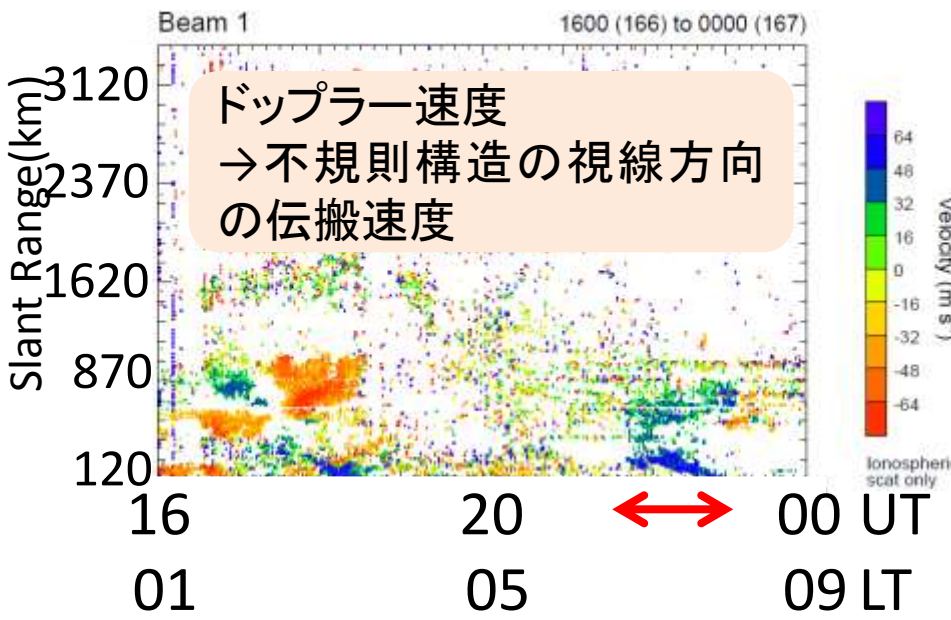
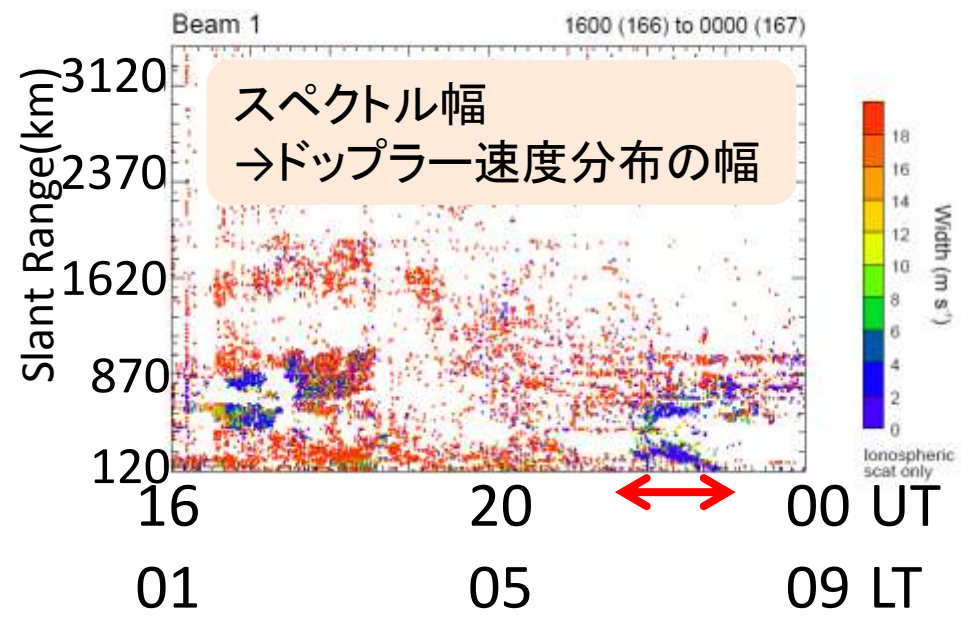
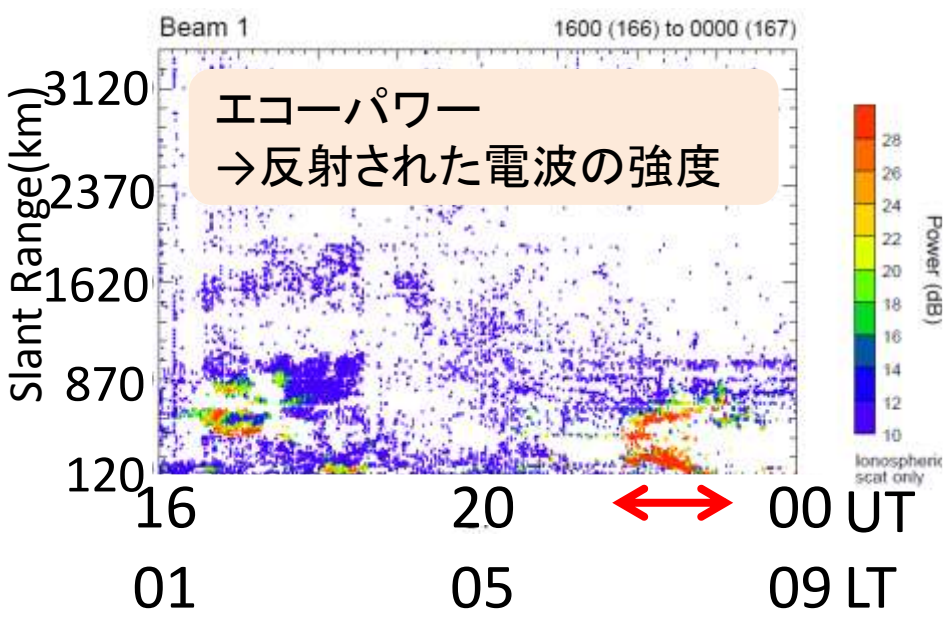


出典: Ogawa et al. (2010, 中緯度短波レーダー研究会)

- ・同じ時間において、どのビームでもほぼ同じレンジにエコーが得られる。
- ・夏季中間圏エコーはレーダーに向かってくる方向のドップラー速度を持ち、構造が近づいてくるように見える。
- E層エコーではなく夏季中間圏エコーであると考えられる。

中間圏界面エコー(イベント)

2009年6月15日

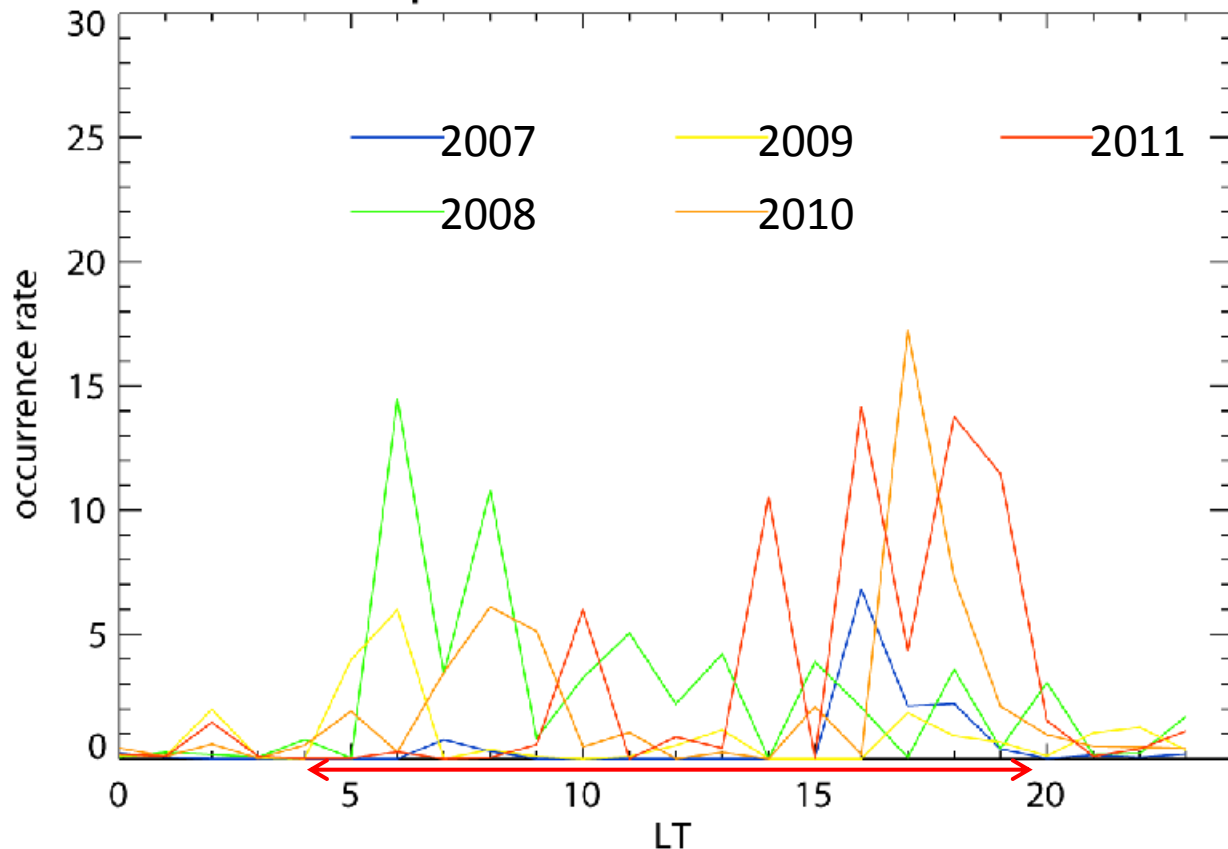


- ### 中間圏界面エコーの判別条件
- 1:エコーパワー>30 dB
 - 2:0 m/s<ドップラー速度<100 m/s
 - 3:スペクトル幅<10 m/s
 - 4:継続時間>3分

※ground scatter は除く。
1,4は流星エコーとの区別
2,3は電離圏エコーとの区別

結果・考察

2007-2011 Mesospheric Summer Echoes occurrence rate



LT依存性について

・日中(特に 5:00 LT-10:00 LT, 15:00 LT-20:00LT)に多く観測された。

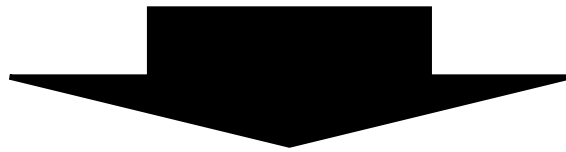
・この結果について日中に多い点は極域における統計解析であるHosokawa et al. [2005]の結果と一致するが、発生率のピークの時間は極域における結果とは異なる特徴が得られた。

考察

- ・太陽放射による昼と夜の電離度の違いに起因する。
- ・極域での統計解析の結果(12:00 LTに発生率のピークを持つ)と異なる原因として、12:00 LT付近に中間圏界面エコーが観測されないメカニズムが働いた可能性が考えられる。

流星エコー

- ・流星飛跡でレーダーの電波が後方散乱されたエコー
- ・短波レーダーでは高度70 km – 110 kmに分布
- ・流星飛跡はその背景の中性風によって流される。



流星エコーのドップラー速度、レンジ分布、仰角分布から中性風の水平速度とその高度分布（高度70 km – 110 km）を同定する。

※中間圏界面エコーのドップラー速度もその背景の中性風に影響を受けている。

流星エコーの高度推定

②到来角 (Angle of Arrival) 推定

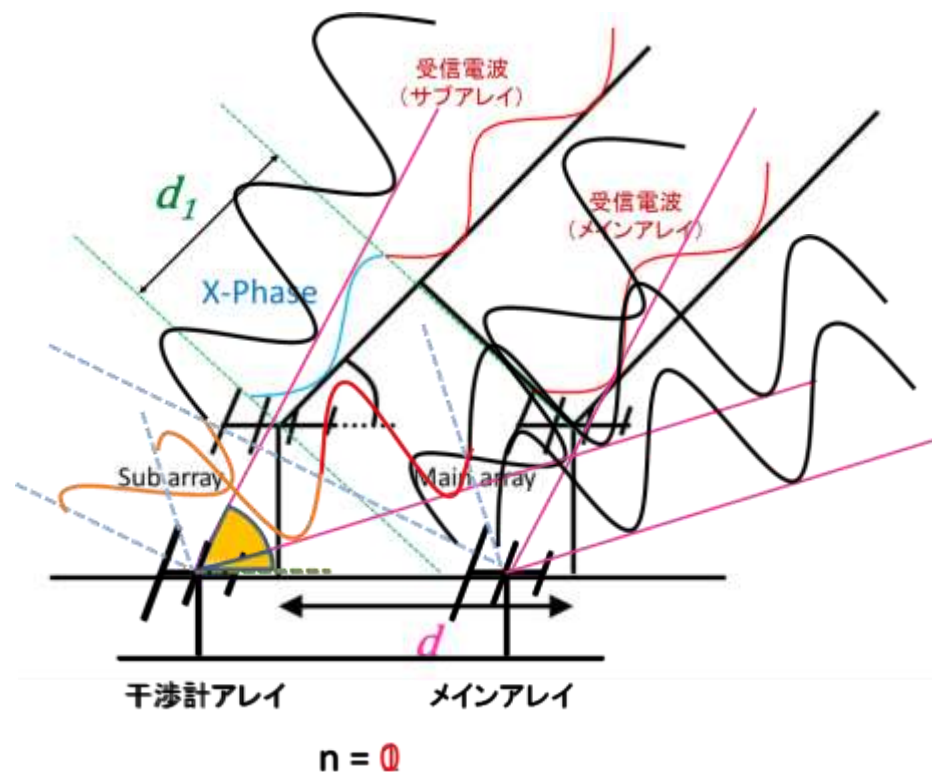
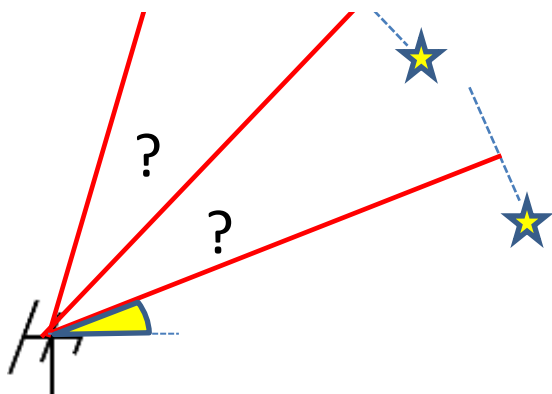
干渉計から得られるX-Phaseの値($-180^\circ \sim 180^\circ$)から到来角を推定。

到来角は一つに決まらず、いくつかの候補をもつ。

$$\text{経路差 } d_1 = \frac{\lambda}{360} (X + 2n\pi) = d \cos A_E \text{ より}$$

$$\text{到来角 } A_E = \cos^{-1} \left[\frac{\lambda}{d} \left(\frac{X}{360} + n \right) \right]$$

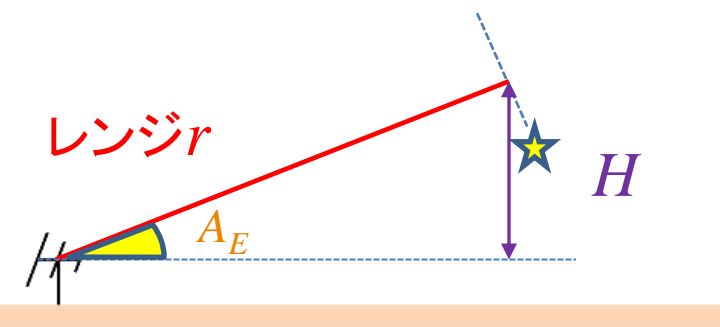
高度が70~110kmに最も近いものを到来角とする。



流星エコーの高度推定

③高度の決定

$$\text{高度 } H = r \times \sin A_E$$



ただし、

- ・ビームナンバー(0~15)による方位角の違い
- ・メインアレイと干渉計アレイの配置(間隔100m, 高低差2.89m)
- ・地球の丸み

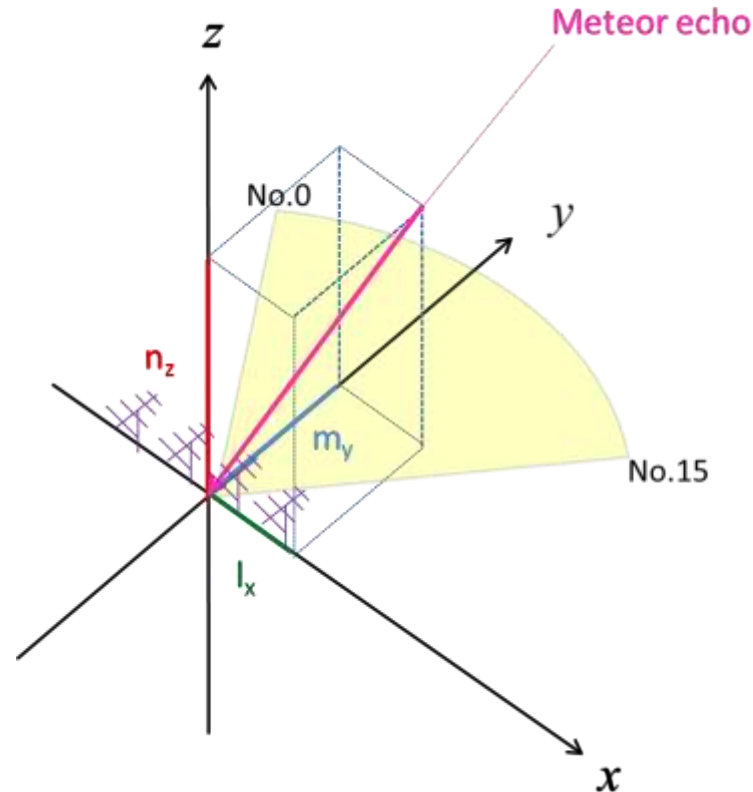
の三つの要因を考慮した計算が必要



3次元の単位ベクトルを用いた考え方

出典: 窄山 卒業論文 (2013)

高度推定 単位ベクトルを用いた考え方



エコーの到来方向を向いた単位ベクトル (l_x, m_y, n_z) を考える

$$l_x = \sin[3.24 \times (7.5 - b)]$$

b : ビームNo. (0~15)

$$m_y = \frac{\lambda}{d} \left\{ \frac{X}{360} + n \right\}$$

X : X-Phaseの値 (-180~180°)

$d=100$ [m]: アンテナ間隔

$\lambda \doteq 27$ [m]: 送信電波波長

x : アンテナが並んでいる方向

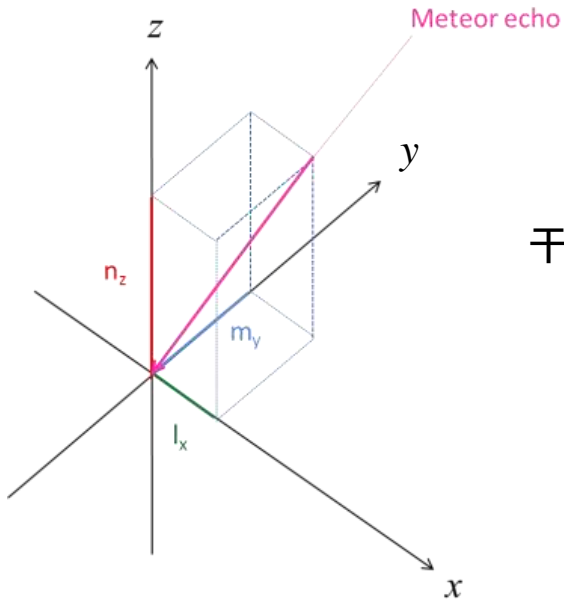
y : ビーム送信方向の中心

(No.7, 8の中間)

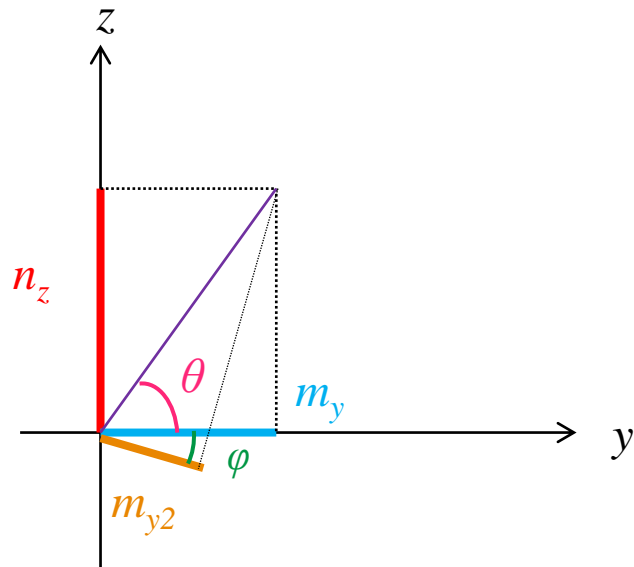
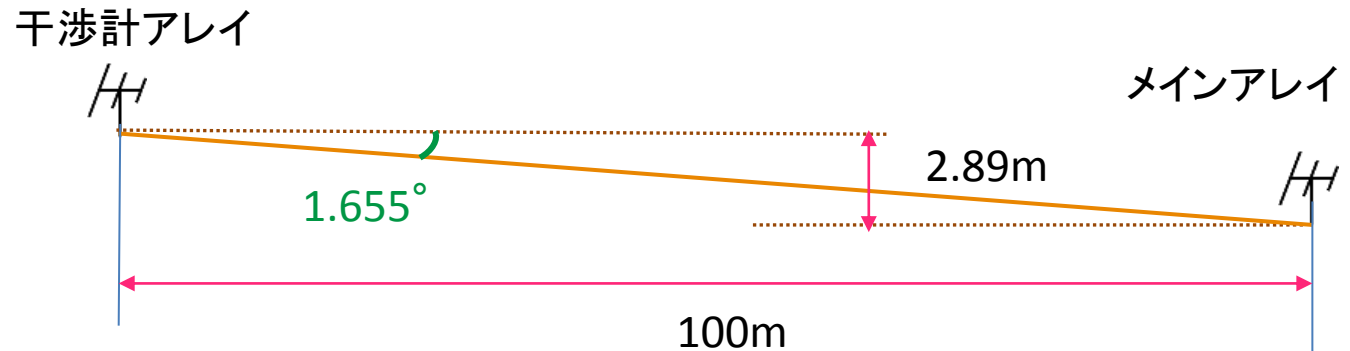
z : 鉛直方向

$$n_z = \sqrt{1 - l_x^2 - m_y^2}$$

高度推定 単位ベクトルを用いた考え方



メイン-干渉計アレイの高低差を考慮した m_{y2}

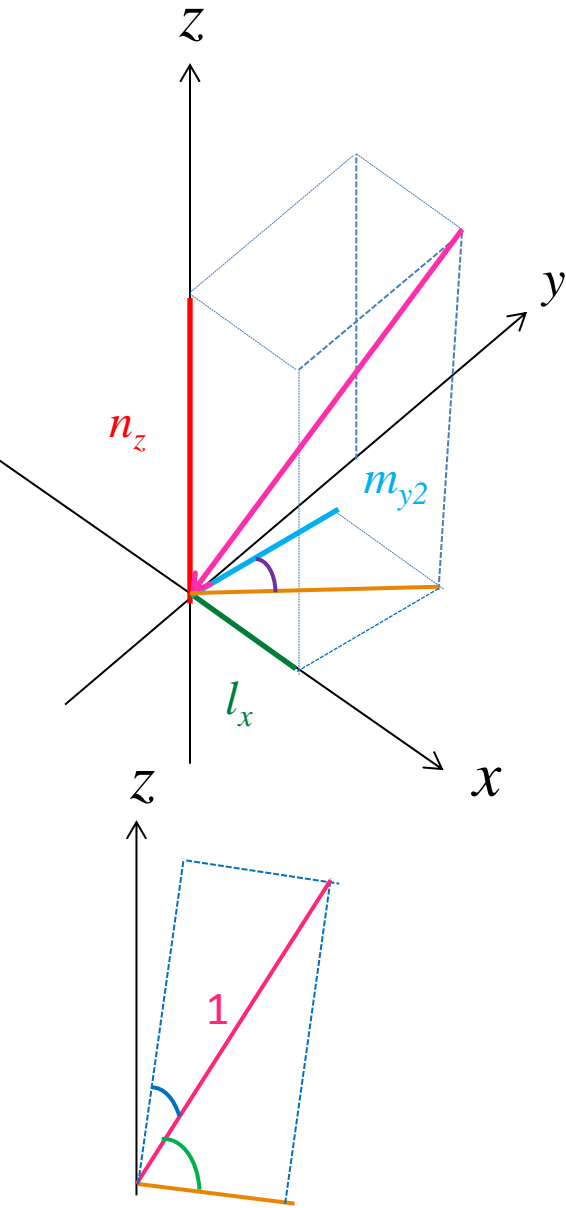


$$\cos(\theta + \varphi) = \cos \theta \cos \varphi - \sin \varphi \sin \theta \text{ より}$$

$$m_{y2} = m_y \times \cos \varphi - \sin \varphi \times n_z$$

$(\varphi = 1.655^\circ)$

高度推定 単位ベクトルを用いた考え方



$$\text{天頂角 } A_Z = \sin^{-1} \frac{\sqrt{l_x^2 + m_{y2}^2}}{1}$$

$$\text{到来角 } A_E = 90^\circ - A_Z$$

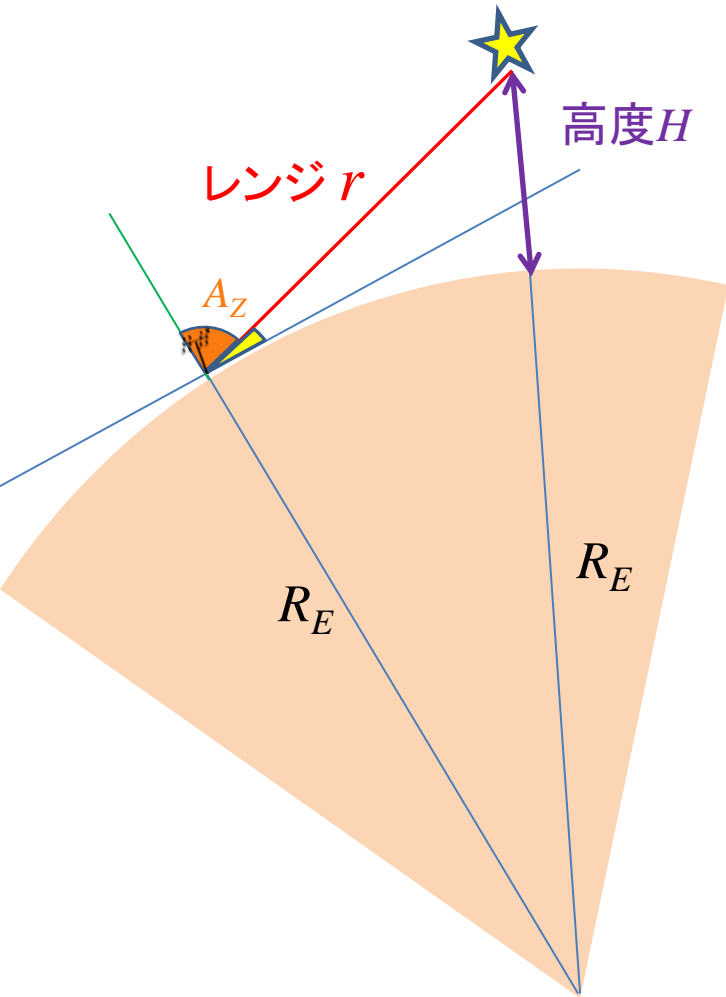
$$\text{方位角 } A_A = 90^\circ - \tan^{-1} \frac{m_{y2}}{l_x}$$

レーダーから流星エコーまでの水平距離 d_H は

$$d_H = r \sin A_Z \cos A_A$$

(r :レンジ)

高度推定 単位ベクトルを用いた考え方



地球半径

$R_E = 6378137\text{m}$

地球の丸みを考慮すると
余弦定理より

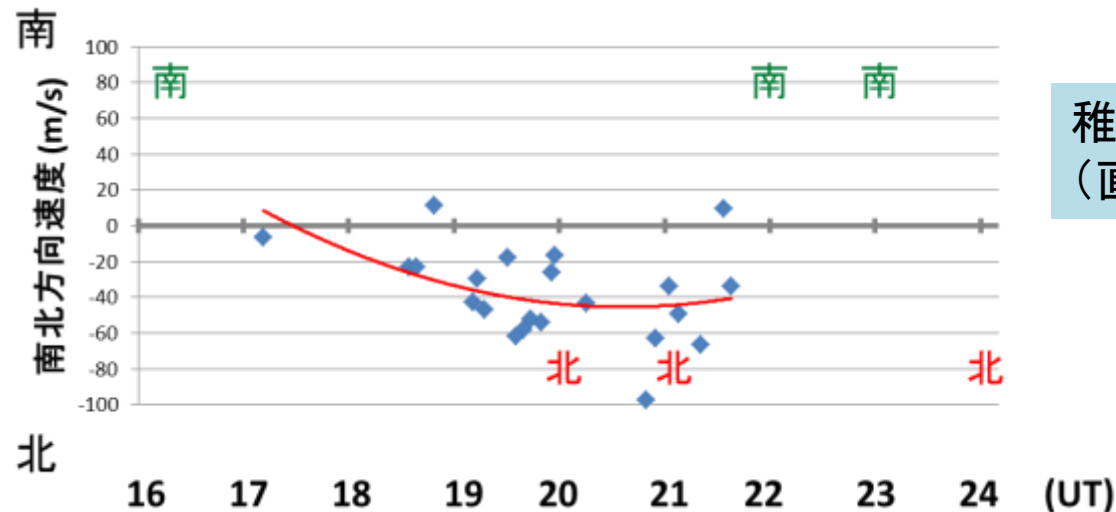
$$\begin{aligned} R_E + H &= \sqrt{R_E^2 + r^2 - 2R_E r \cos(90^\circ + A_Z)} \\ &= \sqrt{R_E^2 + r^2 - 2R_E r \cos(180^\circ - A_Z)} \end{aligned}$$

$$\text{高度 } H = \sqrt{R_E^2 + r^2 + 2R_E r \cos A_Z} - R_E$$

中性風の水平速度の南北成分・東西成分(高度90~110km)

2011年9月5日
0100 - 0900 LT

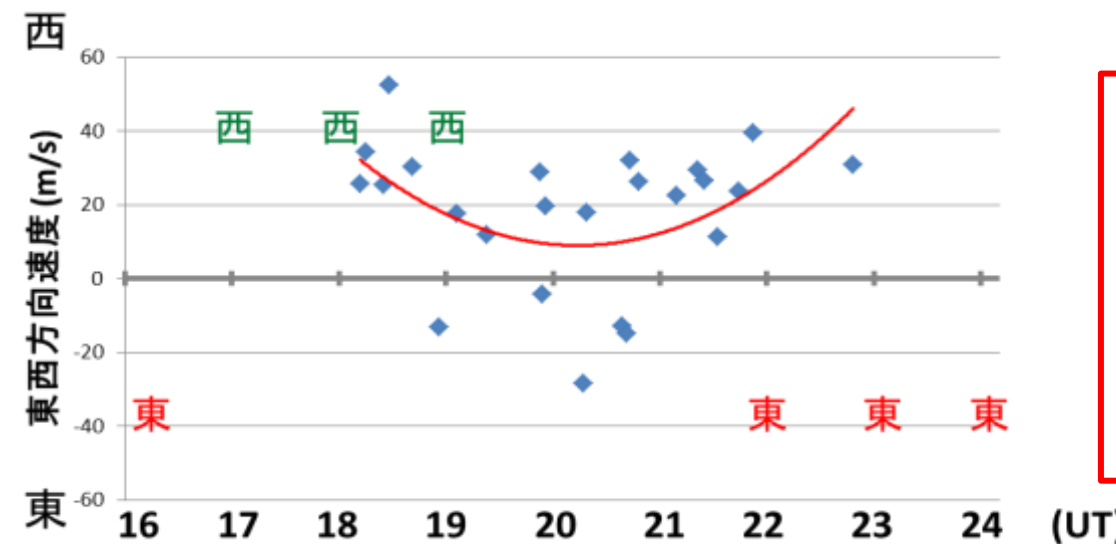
南北成分 (ビームNo.0~2より推定)



稚内MFLレーダー
(直上のみ観測)



東西成分 (ビームNo.13~15より推定)

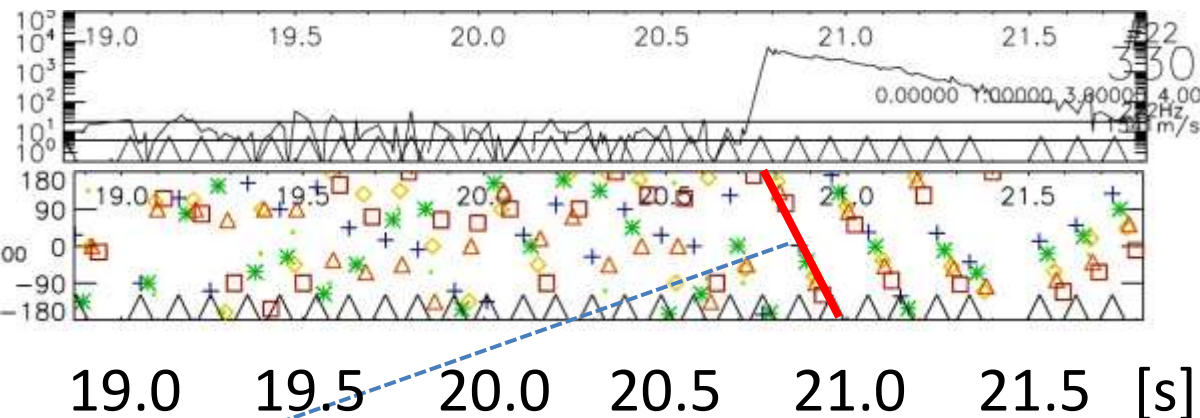


MFLレーダーとはあまり一致せず

⇒サンプル不足、高度推定
の不確かさが原因?

出典: 窄山 卒業論文 (2013)

中性風の速度推定法



Power
Phase

Phaseの変化率 ω_d

出典: 窄山 卒業論文 (2013)

流星エコーの(=中性風の)視線方向速度は

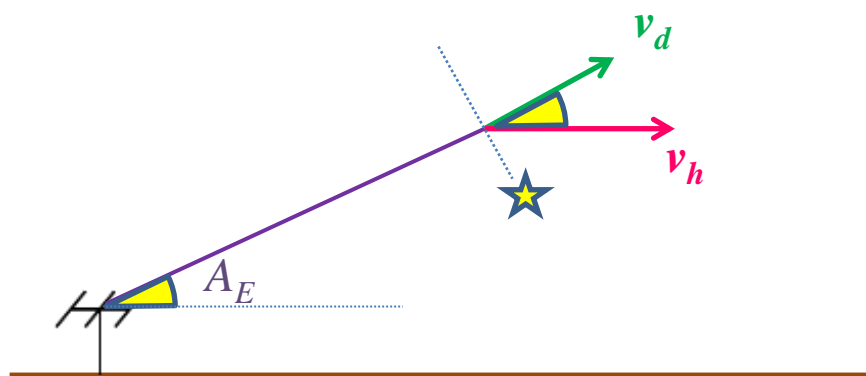
$$v_d = \frac{c\omega_d}{4\pi f}$$

c : 電波の速度 f : 送信周波数

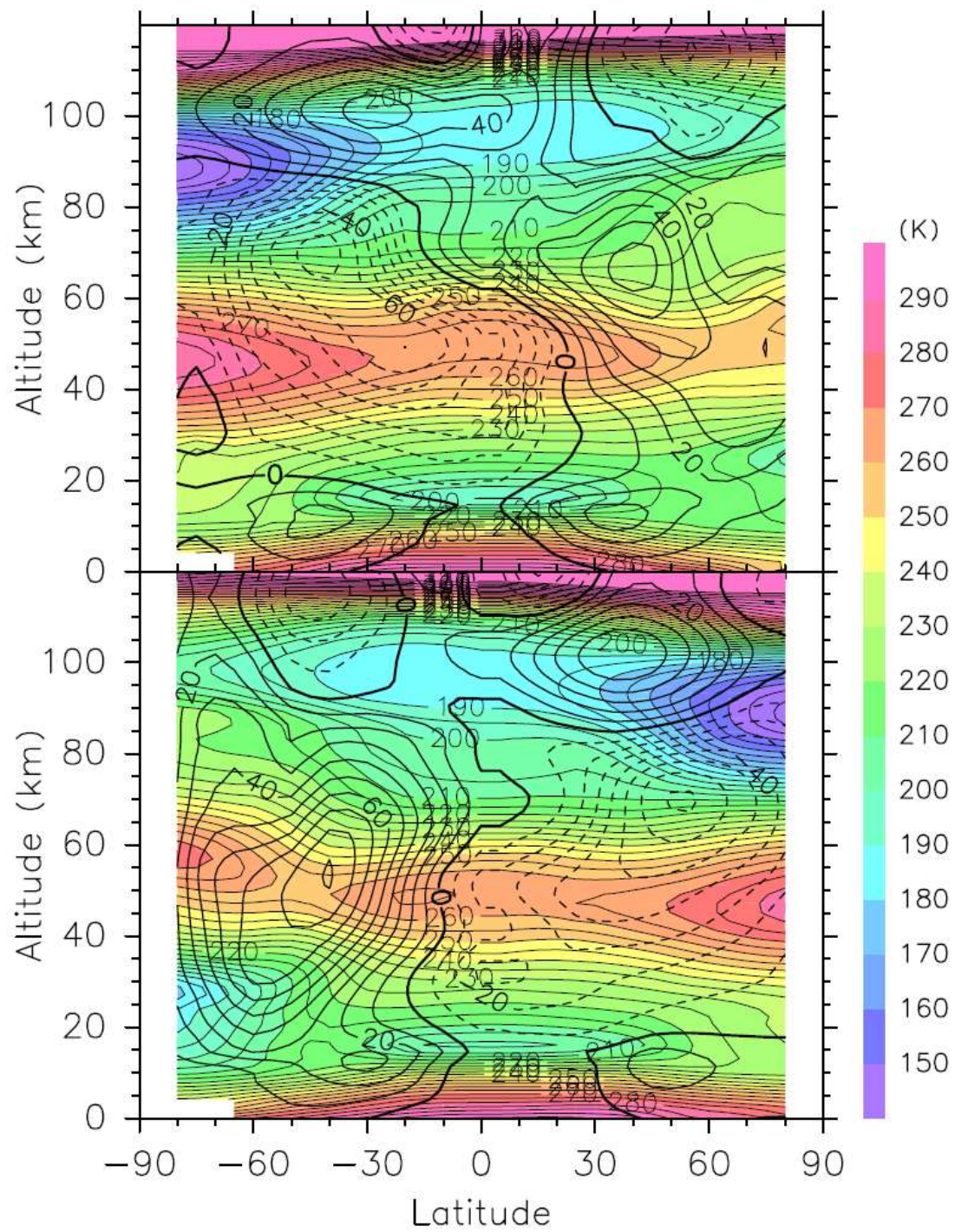
※ $v_d > 0$ のとき、レーダーに近づく方向

中性風の水平速度は

$$v_h = v_d \times \frac{1}{\cos A_E}$$



※ 鉛直成分は無視される

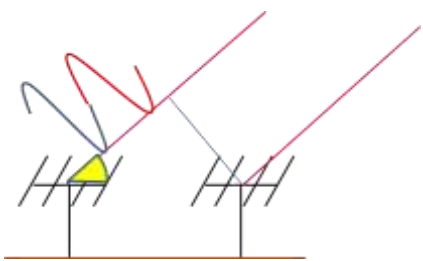
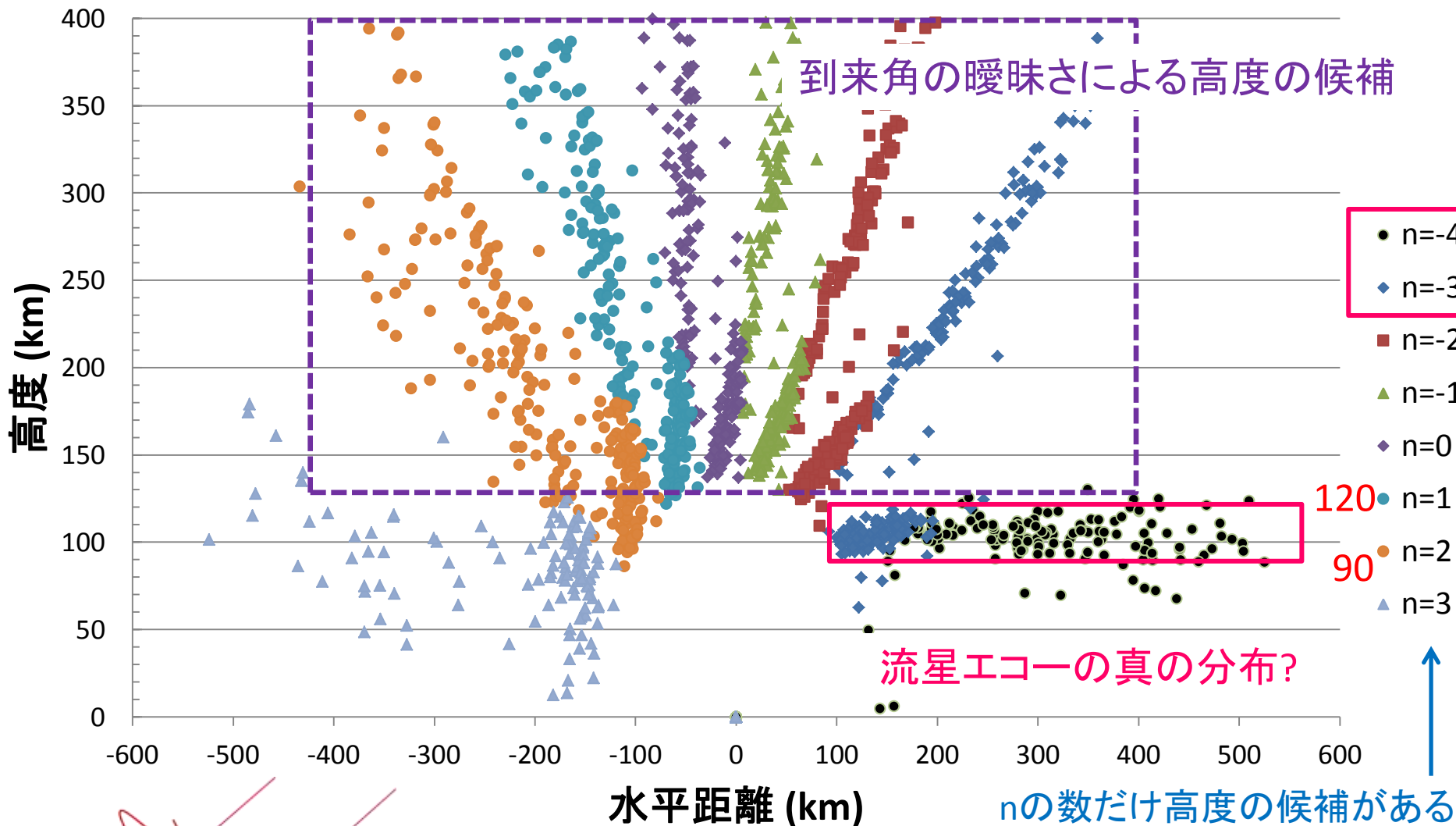


流星エコーの高度推定結果

2011年9月5日

0100 - 0900 LT

267 samples, Range offset : -75 km, X-Phase offset: 170 deg



$$m_y = \cos^{-1} \left[\frac{\lambda}{d} \left(\frac{X}{2\pi} + n \right) \right]$$

出典: 窄山 卒業論文 (2013)

窄山 卒業論文 [2013] では自動抽出プログラムが使用できなかった。



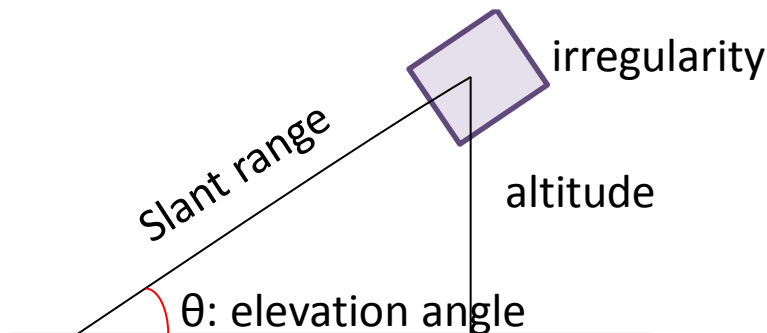
今後の課題

- ・流星エコーの自動抽出プログラムを使って、より多くの流星エコーを調べる。
 - レーダーのオフセットを決定する。
 - 中性風の高度分布を得る。



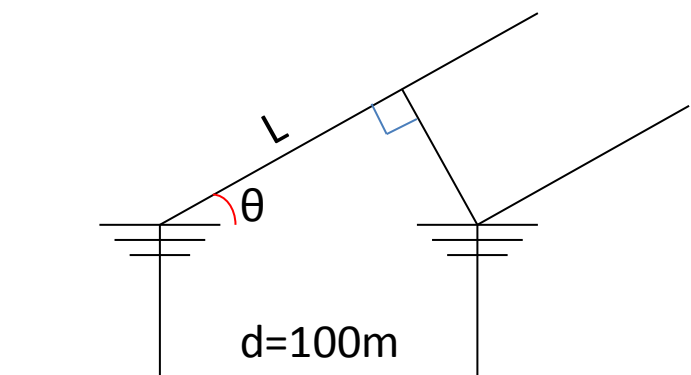
- ・夏季中間圏エコーをより正確に抽出できる条件を考える。(速度と高度からE層エコーとの区別をする。)
- ・夏季中間圏エコーを統計的に解析し、速度と高度を調べることで、中間圏界面の大気動態についてより詳細に理解する。

北海道-陸別 HFレーダーの仰角オフセット



$$altitude = slant\ range \times \sin(\underline{elev})$$

位相差は経路差と波長から求められる。
 ※ただし経路差が電波の波長より長い点に注意
 (→経路差内に含まれる波長の数をnとする。)

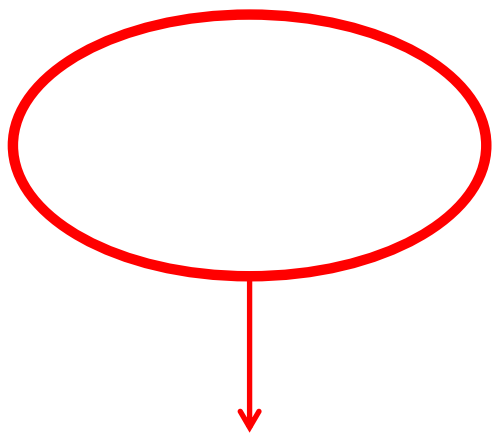
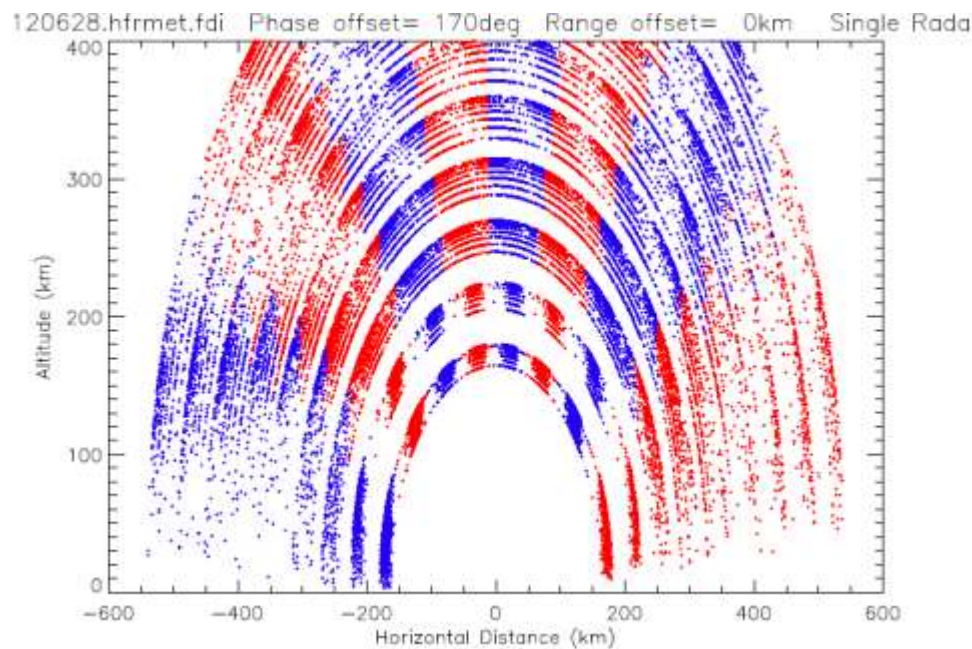


$$\Delta\phi = \frac{L}{\lambda} \times 2\pi - 2n\pi \Leftrightarrow L = \frac{\lambda}{2\pi} \Delta\phi + n\lambda$$

$$L = d \cos(\underline{elev}) \Rightarrow \underline{elev} = \arccos\left(\frac{\lambda}{d} \left(\frac{\Delta\phi}{2\pi} + n\right)\right)$$

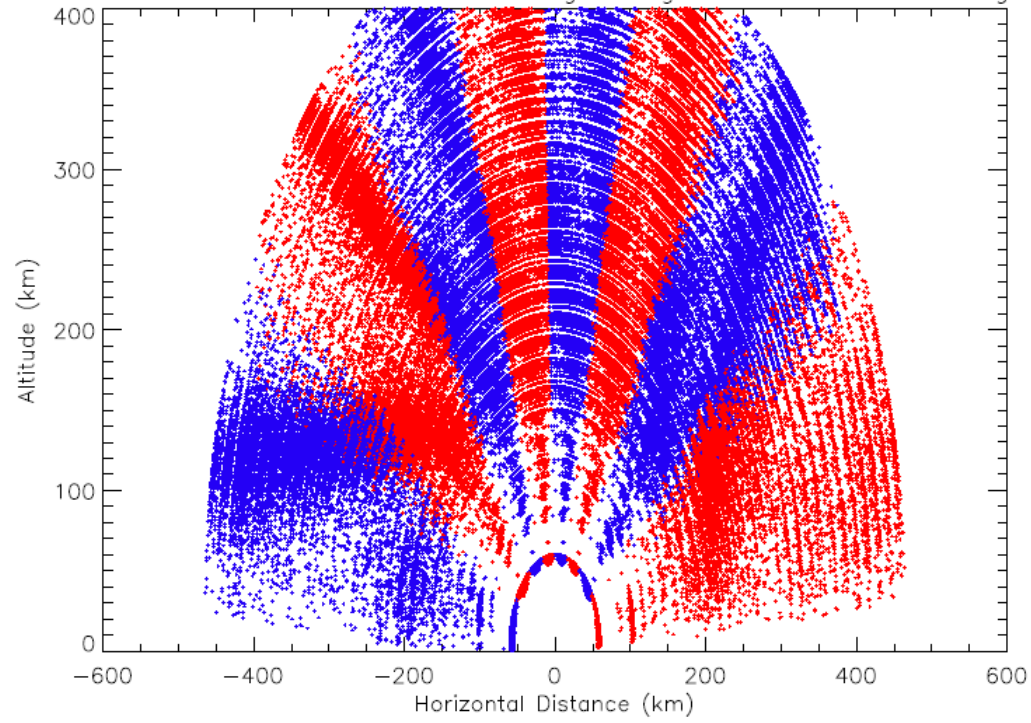
$\Delta\phi$: 位相差
 L : 経路差

流星エコーの高度推定(解析中)



流星エコーの真の分布?

121212.hfrmet.fdi Phase offset= 170deg Range offset=-75km Single Radar



まとめ(流星エコー高度推定)

- ・SuperDARN北海道-陸別HFレーダーのレンジと仰角(位相差)オフセットを求めた。
- ・15 kmモードではレンジのオフセットが-75 km、位相差のオフセットが170度であるという結果となった。
- ・45 kmモードではレンジのオフセットが0 km、位相差のオフセットが170度であるという結果となった。
- ・しかし短波レーダーで観測される流星エコーの高度(70 km – 110 km)を考えた場合、やや高め(90 km – 200 km)に分布している。

今後の課題

- ・流星エコーの高度がやや高めに分布することについて考える必要がある。
- ・夏季中間圏エコーの高度を求め、その高度における中性風速度と夏季中間圏エコーのドップラー速度を比較する。
- ・高度情報を夏季中間圏エコーの判別条件として加える。