

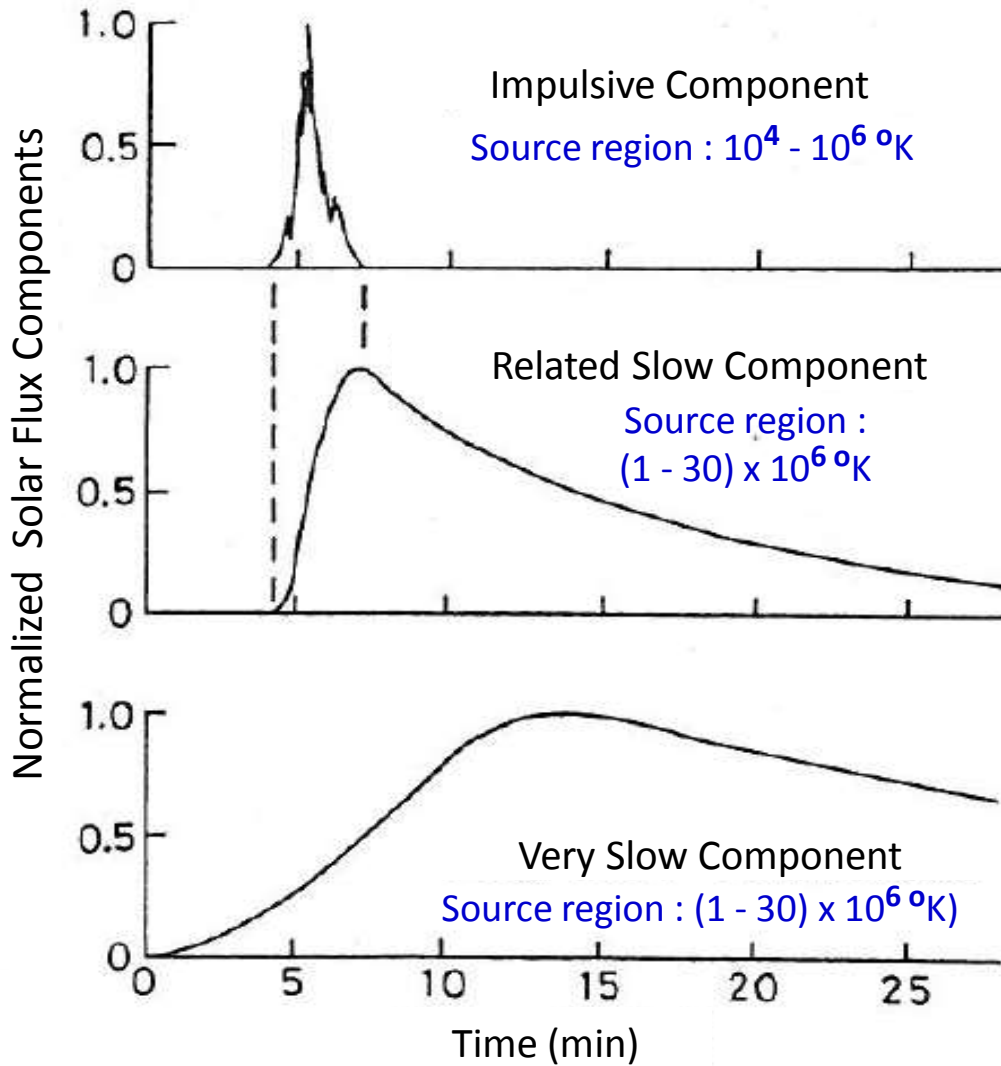


# SuperDARN北海道-陸別HFレーダーと 太陽放射強度データを用いた太陽フレア時 における電離圏環境変動の量的特性の研究

名古屋大学太陽地球環境研究所  
渡辺太規, 西谷望, 今田晋介

# 背景

Impulsive 型フレアに伴う各放射線成分の時間変化 (Donnelly, JGR, **81**, 4745, 1976)



硬X線 ( $< 1 \text{ \AA}$ ) D 層電離

EUV ( $90 \sim 1027 \text{ \AA}$ )

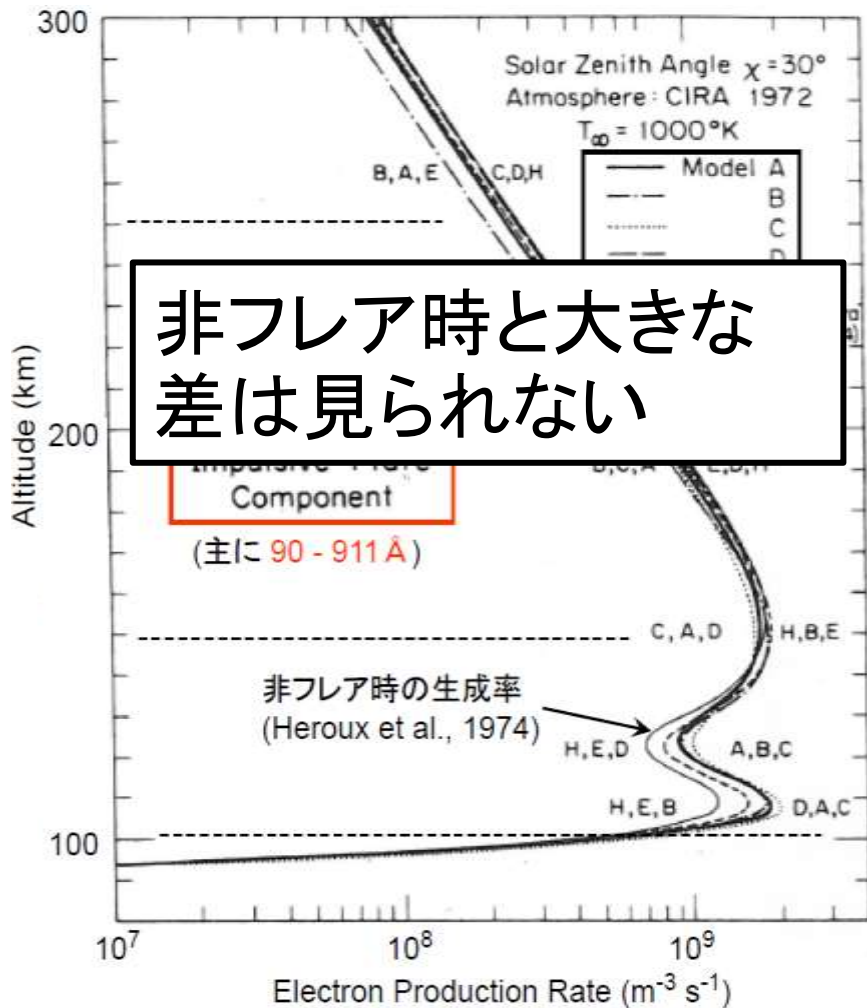
- ・E, F 層電離
  - ・強度は最大で静穏時の数十 % 増
- マイクロ波電波

コロナからの軟X線 ( $1 \sim 90 \text{ \AA}$ )

- ・D, E 層電離
  - ・強度は最大で静穏時の約1,000倍
- EUV E, F 層電離

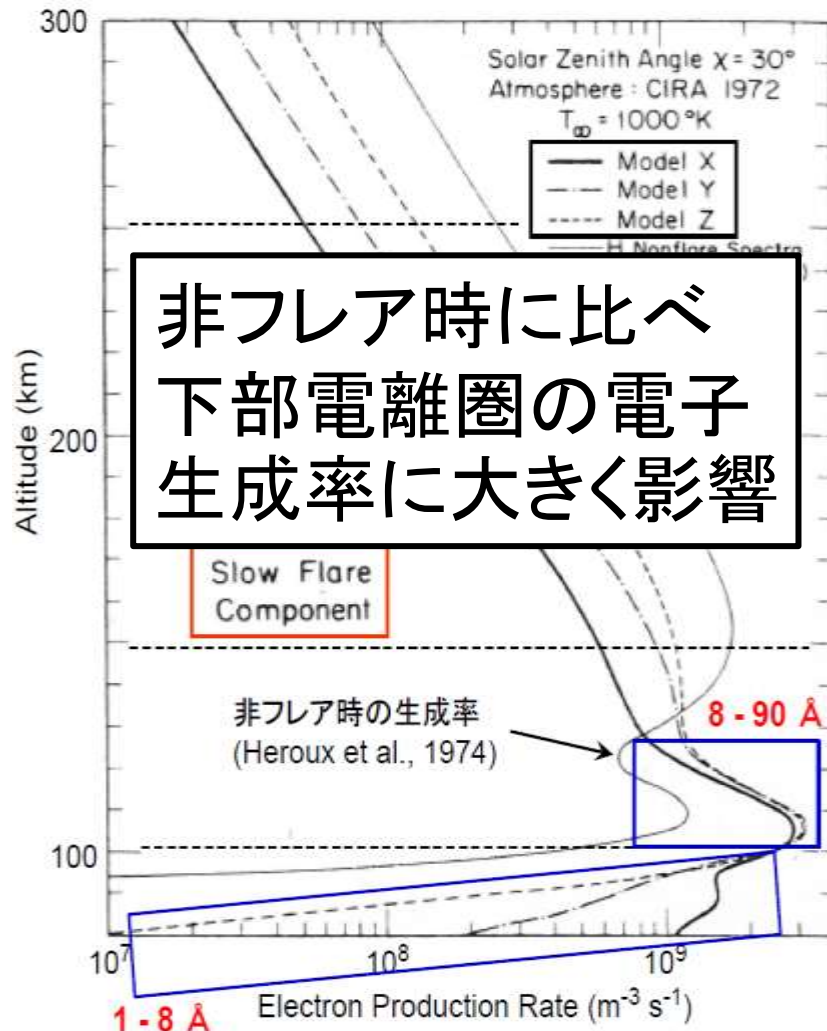
- 主に軟X線 ( $1 \sim 8 \text{ \AA}$ )、EUV も

モデルフレアの **Impulsive 成分** による電子の生成率  
(Donnelly, JGR, 1976)



非フレア時と大きな差は見られない

モデルフレアの **Slow 成分** による電子の生成率  
(Donnelly, JGR, 1976)

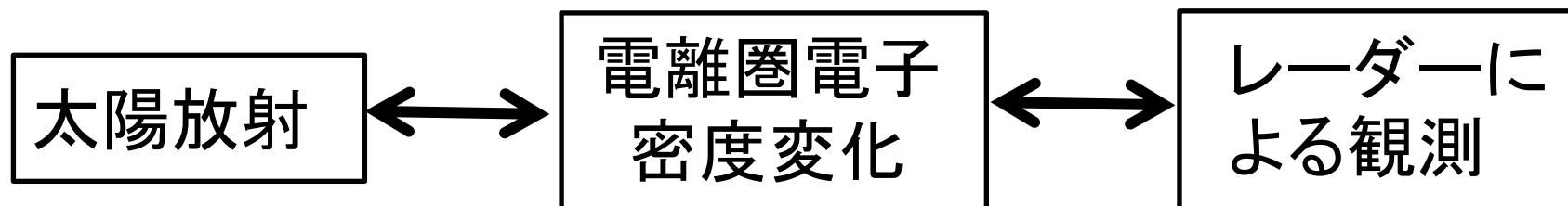


非フレア時に比べ下部電離圏の電子生成率に大きく影響

太陽フレア発生時における、電離圏電子密度変動の高度分布を観測した研究はあまり多くない。

## 研究の目的

- ・ SuperDARN北海道-陸別HFレーダーの観測より下部電離圏、F層において、それぞれどのような電子密度変化が生じているかを解明する。
- ・ RHESSI衛星, SDO衛星観測によるX線、EUV放射強度データを用いて、電子密度変化を見積もる。



光化学反応を考え、電離圏電子密度変化量を見積もる。

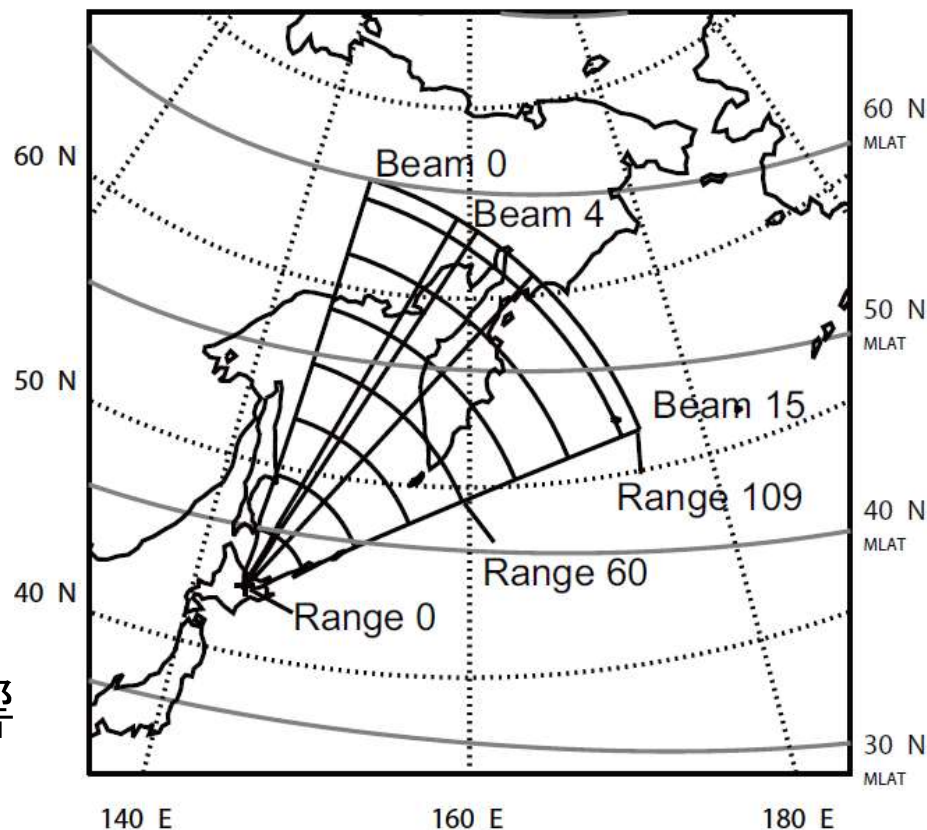
ドップラーシフトの性質を解析し、電離圏電子密度変化量を見積もる。

# 北海道-陸別HFレーダー

- ・ SuperDARNレーダーの一つ
- ・ 現在あるSuperDARNレーダーの中で最も低緯度を観測できる。



- ・ 太陽天頂角が小さいので太陽フレアの影響が良く見られる。
- ・ 緯度の違いによる太陽放射の影響の変化が小さい。

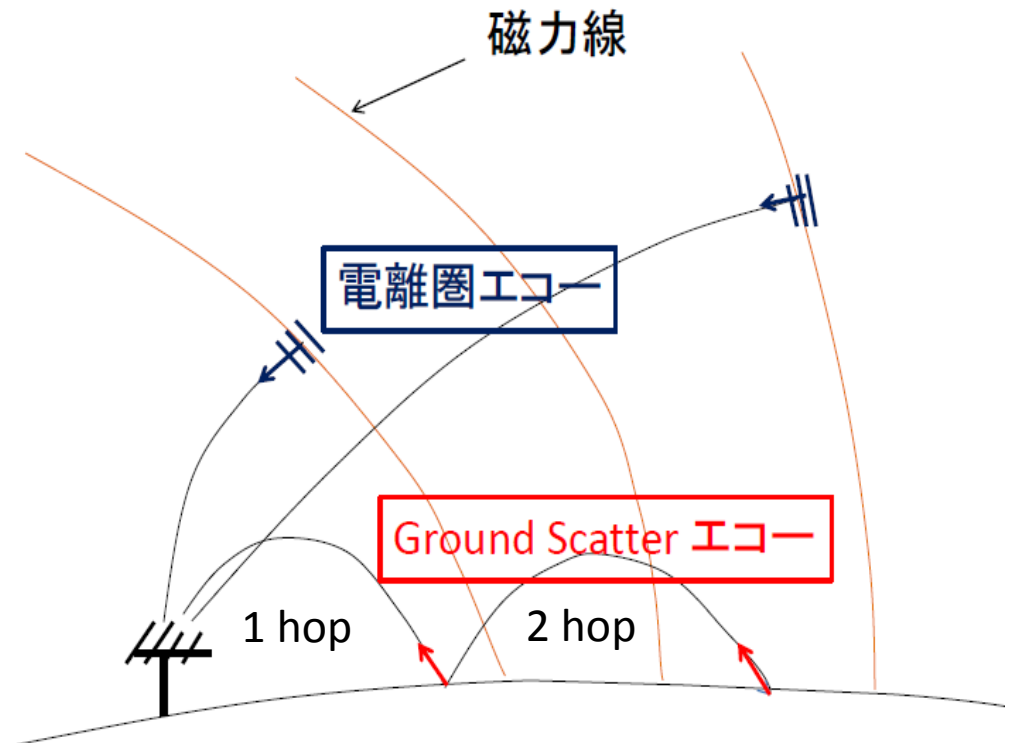


## エコーの種類

**電離圏エコー** : 電波が電離圏の不規則構造で後方散乱され返ってくるエコー

**ground scatterエコー** : 電波が一回または数回電離圏下部と海面や地面の間を繰り返して反射し、地表および海面の不規則構造から後方散乱を受けて返ってくるエコー

本研究では**ground scatterエコー(1 hop)**に注目した。

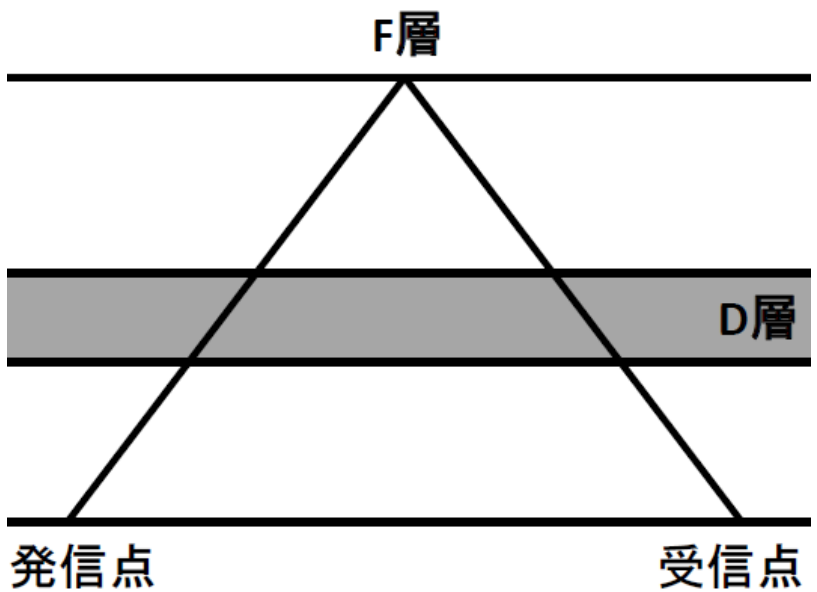


# 太陽フレア発生時、短波帯電波にドップラーシフトが生じる。

Kikuchi et al. (1985)

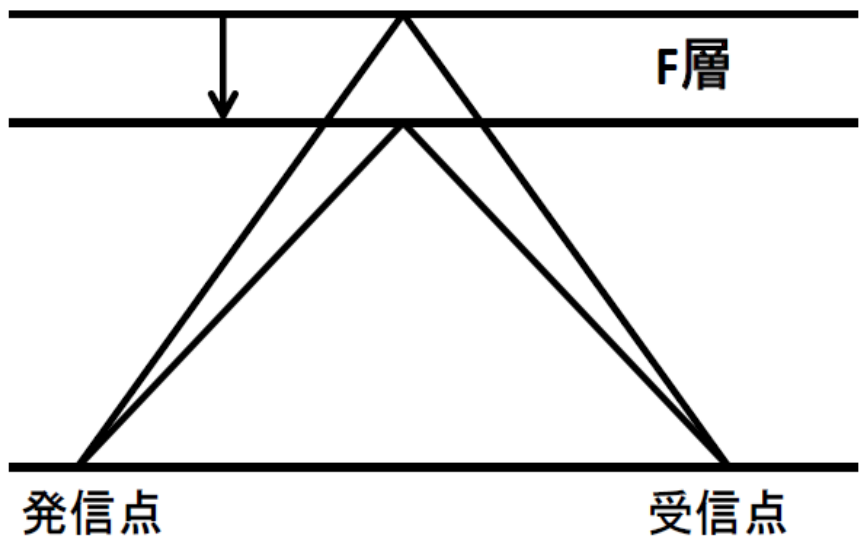
## (1) 下部電離圏電子密度変化の影響

下部電離圏(nondeviating slab)の電子密度が増加することにより屈折率が小さくなり、電波の見かけの経路が小さくなる。



## (2) F層電子密度変化の影響

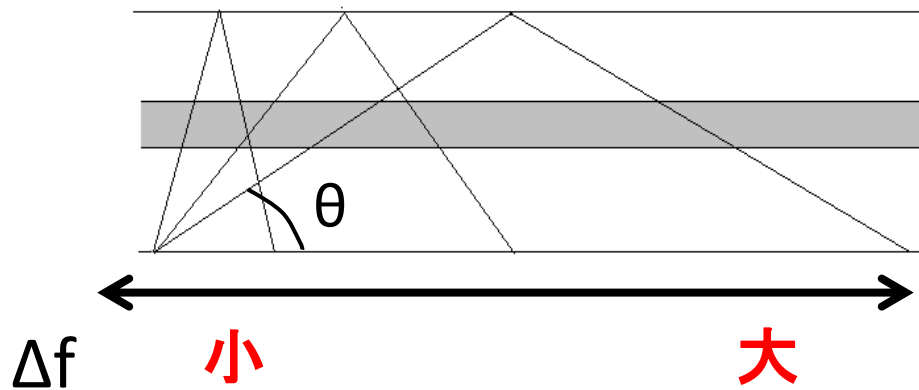
F層の電子密度が増加することにより反射高度が低下し、電波の経路が小さくなる。



# ドップラーシフトのレンジ・仰角依存性

レンジ: 電波の発信点から後方散乱を受ける点までの経路長

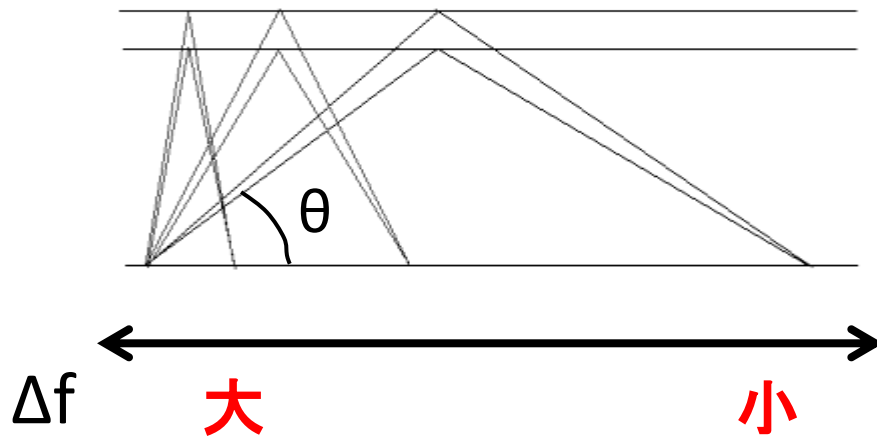
## (1) 下部電離圏電子密度変化の場合



レンジが大きくなるほど(仰角が小さくなるほど)ドップラーシフトは大きくなる。

$$\Delta f = \frac{k \cdot d}{c \cdot f} \cdot \frac{dN}{dt} \cdot \frac{1}{\sin \theta}$$

## (2) F層電子密度変化の場合



レンジが小さくなるほど(仰角が大きくなるほど)ドップラーシフトは大きくなる。

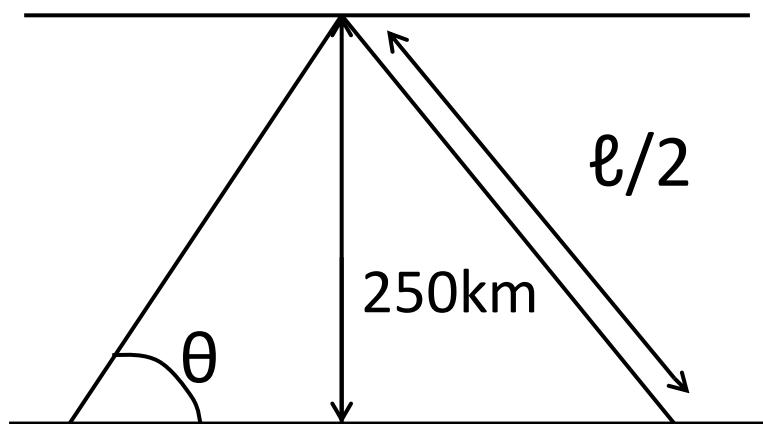
$$\Delta f = -2 \frac{f}{c} \cdot \frac{dh}{dt} \cdot \sin \theta$$

d: 下部電離圏の層さ c: 光速 f: 周波数  
N: 電子密度 h: 反射高度  $\theta$ : 仰角



## レーダーのground scatterエコーの仰角の算出

電波の反射高度を250kmで一定と仮定すると仰角 $\theta$ は、電波の経路長 $l$ を用いて



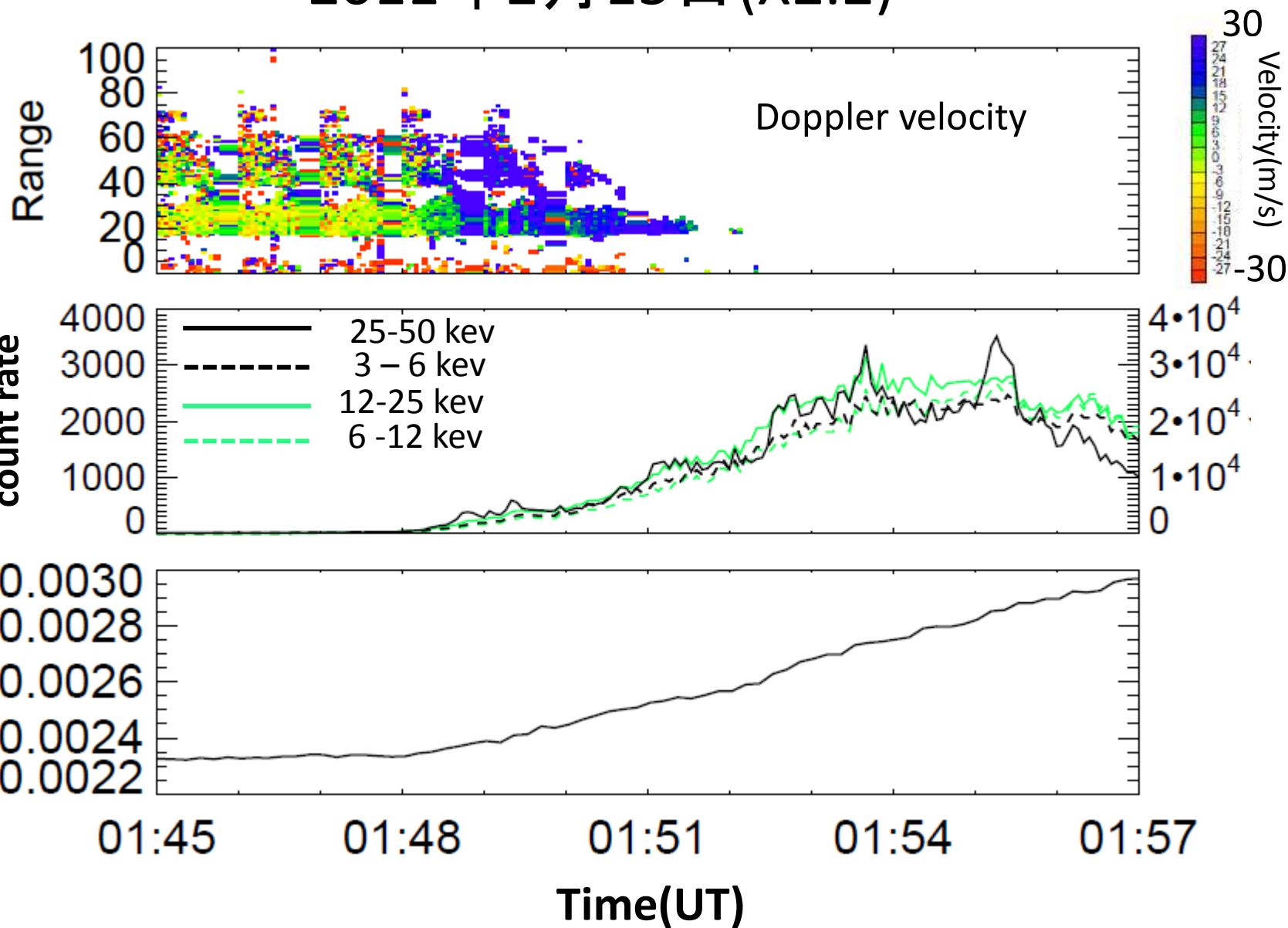
$$\sin \theta = \frac{250}{l/2}$$

➡ 
$$\theta = \arcsin \frac{250}{l/2}$$

と表わすことができる。

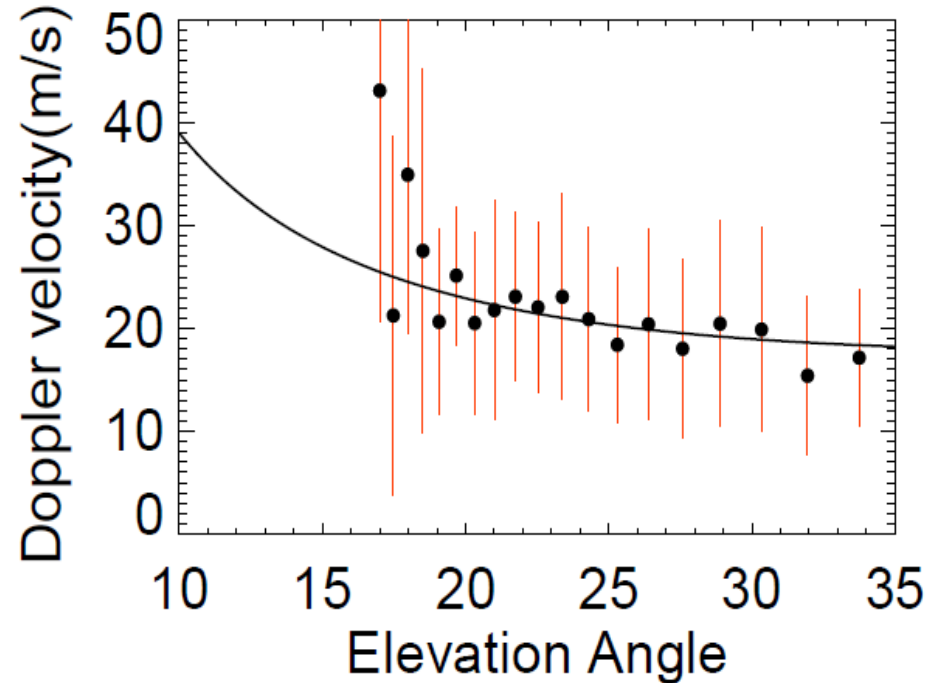
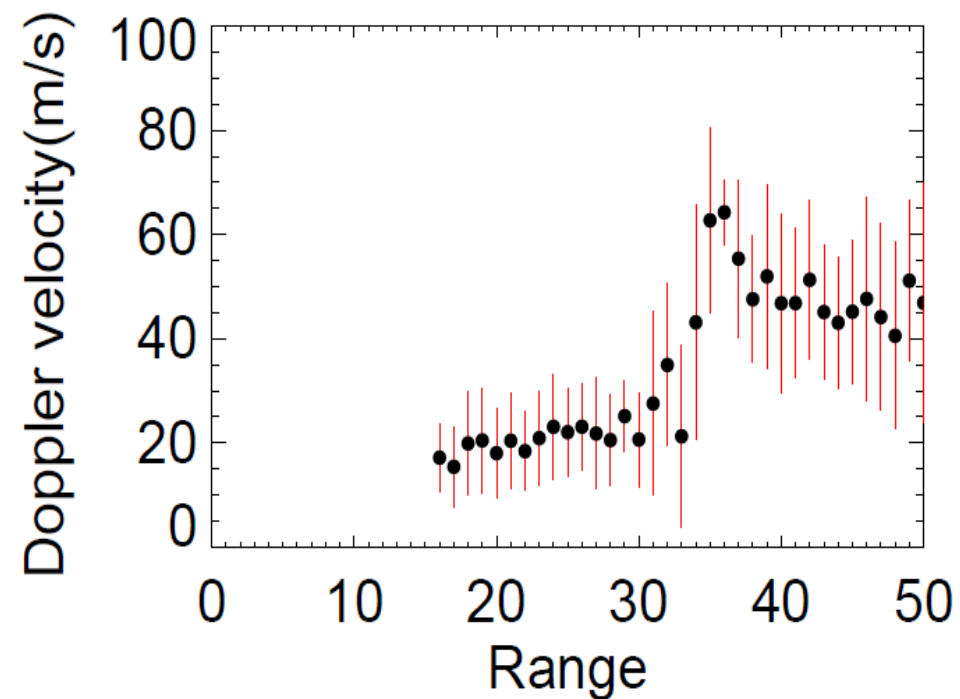
# 結果

2011年2月15日(X2.2)



# 01:49UTにおけるレンジ・仰角とドップラー速度の関係

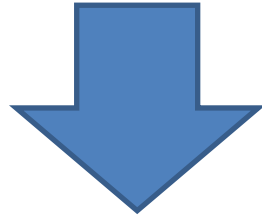
	要因(A)	要因(B)
仰角依存性	$\propto 1/\sin\theta$	$\propto \sin\theta$
レンジ依存性	正の相関	負の相関



レンジに対し正の依存性、仰角に対し負の依存性を示した。  
→下部電離圏電子密度変化の影響

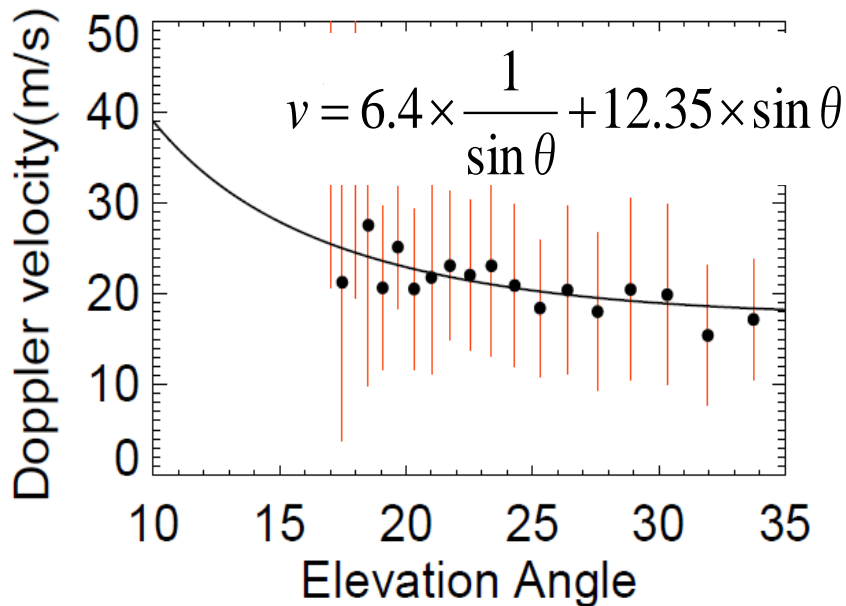
# 仰角依存性解析による電子密度変化量の推定

ドップラー速度は  $v = \frac{k \cdot d}{f^2} \cdot \frac{dN}{dt} \cdot \frac{1}{\sin \theta} - 2 \cdot \frac{dh}{dt} \sin \theta$  と表わすことができる。



d:下部電離圏の層さ c:光速 f:周波数  
N:電子密度 h:反射高度  $\theta$ :仰角

最小二乗法により  $v = a \times \frac{1}{\sin \theta} + b \times \sin \theta$  にフィッティング



$k=8.06 \times 10^{-11}$ 、 $f=11$ (MHz)を用いて、  
下部電離圏の電子密度変化量は

$$d \cdot \frac{dN}{dt} = 9.6 \pm 3.9 \quad (10^{12} \text{個}/\text{m}^2 \cdot \text{s})$$

と見積もることができた。

# 光化学反応モデルによる電子密度変化の推定

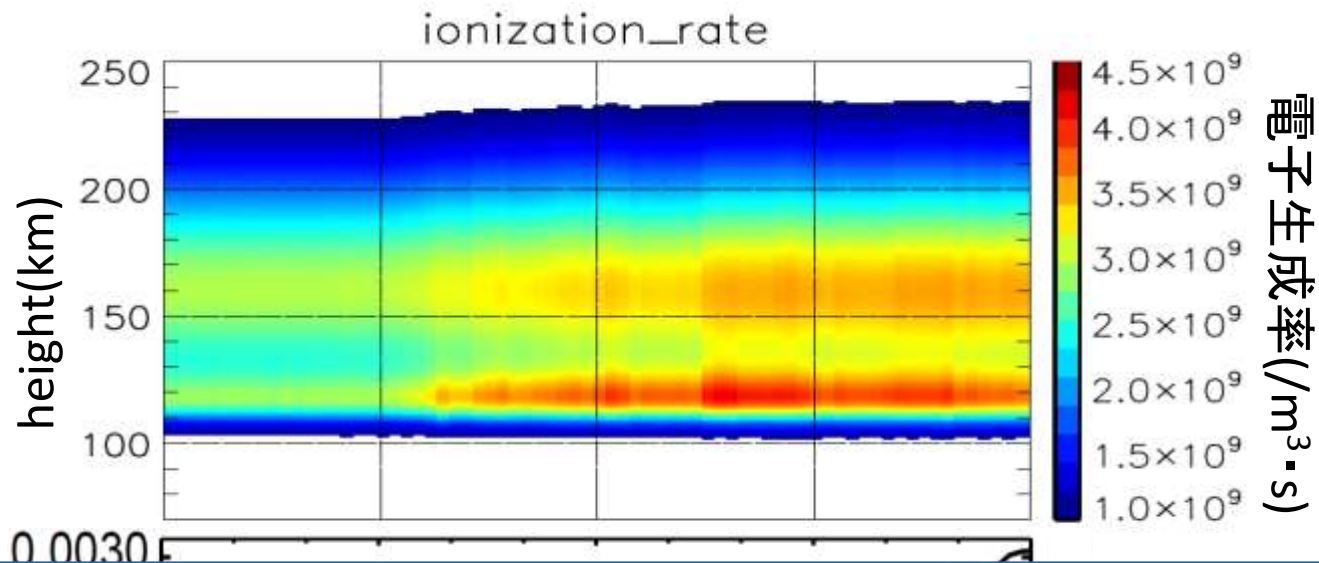
光学的深さ  $\tau(\lambda, z) = \sec\chi \sum_x \sigma_{abs}(x, \lambda) \int_z^\infty n(x, z') dz'$

光のフラックス  $\Phi(\lambda, z) = \Phi(\lambda, \infty) \exp\{-\tau(\lambda, z)\}$

電子生成率  $q(z) = \int_0^\infty \Phi(\lambda, z) \sigma_{ion}(x, \lambda) n(x, z) d\lambda$

$\chi$ : 太陽天頂角  $\sigma_{abs}, \sigma_{ion}$ : 吸光断面積、光イオン化断面積  
 $n$ : 中性粒子密度  $x$ は中性粒子の種類( $O_2, N_2, O, N$ のみを考える)

$\sigma$ はFennelly and Torr (1992)より、 $n$ はMSISモデルより、 $\Phi(\lambda, \infty)$ はSDO衛星のEVEによる観測よりそれぞれ得た。



高度120-170km付近に電子生成率増大のピーク。下部電離圏は？  
 →50 Å ~ 1020 Å の波長帯のEUVしか考慮していないためD層では影響が見えない

電子の消滅がイベント前の生成率と等しく、イベント中一定と仮定  
 01:49UTにおいて高度70-120kmでの平均電子密度変動量

$$\frac{dN}{dt} = q - L \quad \rightarrow \quad d \cdot \frac{dN}{dt} = 7.09 \quad (10^{12} \text{個}/\text{m}^2 \cdot \text{s})$$

# まとめ

- ・北海道-陸別HFレーダーにより、フレア発生時にground scatter エコーに、ドップラーシフトの正の変化を観測し、その時間変化とX線,EUV放射強度の時間変化は一致した。
- ・ドップラーシフトはレンジに対し正の相関、仰角に対し負の相関を持った。
- 下部電離圏電子密度変化の影響が強い
- ・ドップラーシフトの仰角依存性を定量的に解析し、電子密度変化量を見積もることができた。
- ・太陽放射強度データを用いて、電子密度変化量を見積もることができた。

## 今後の課題

- ・X線帯の放射の影響を考える必要がある。
- ・多くのイベントを解析し、統計的にレーダーによる観測と太陽放射強度変動の対応を探る。