

SuperDARN北海道-陸別HFレーダー を用いた太陽フレア時における 電離圏環境変動の研究

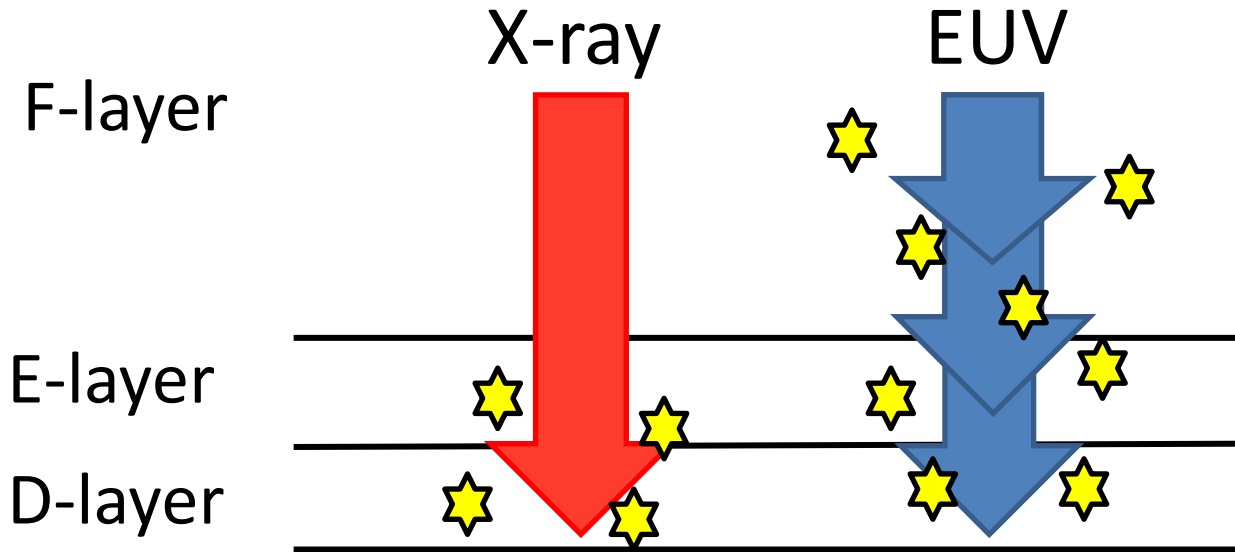
名古屋大学太陽地球環境研究所

渡辺太規, 西谷望

背景

太陽フレア

太陽フレア発生時には、X線放射量は最大で平時の約千倍の強度になり、EUVは平時に比べて数十%ほど強度が大きくなる。

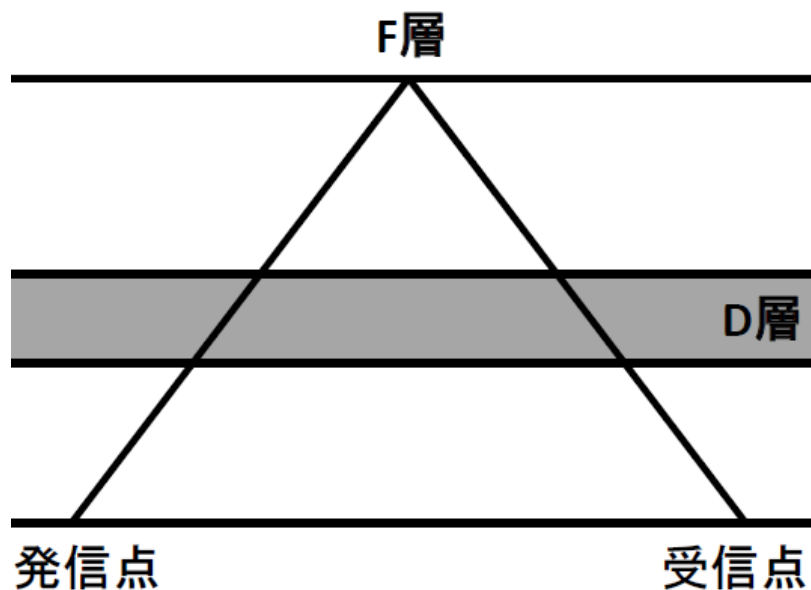


一般にEUVは電離圏全体(F層~D層)を電離し、X線はE層下部より低い領域を電離する。

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。

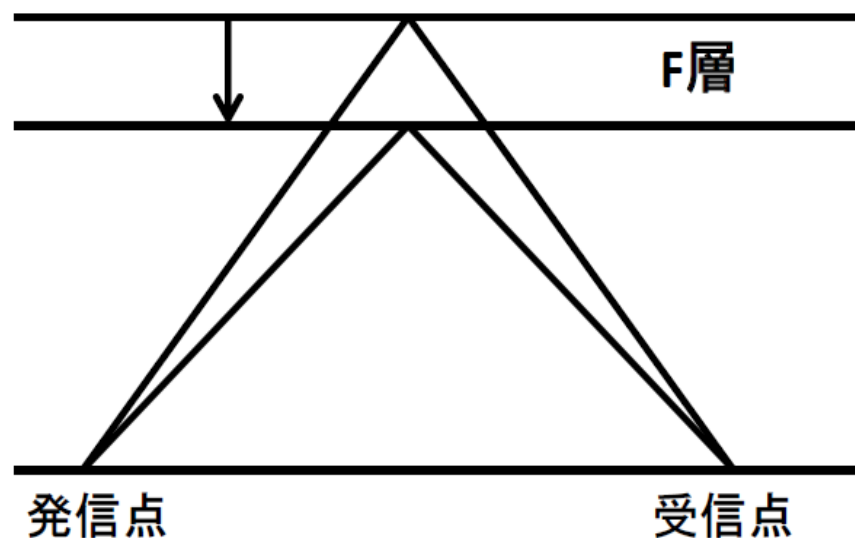
(A) 下部電離圏電子密度変化の場合

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。



(B) F層電子密度変化の場合

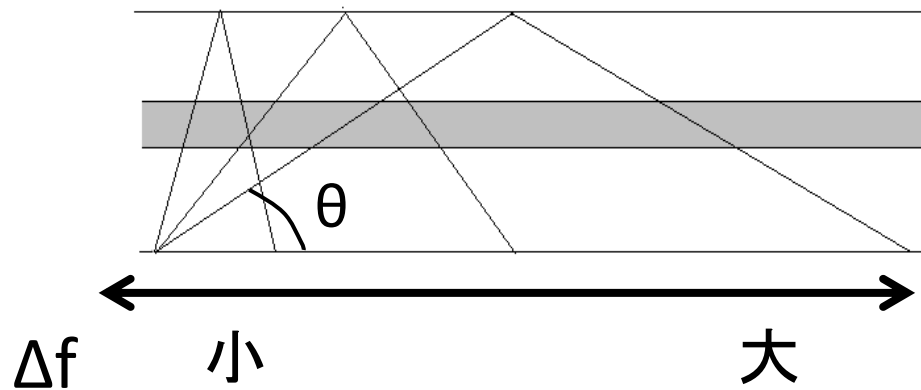
F層の電子密度が増加することにより反射高度が低下し、電波の経路が小さくなる。



ドップラーシフトのレンジ・仰角依存性

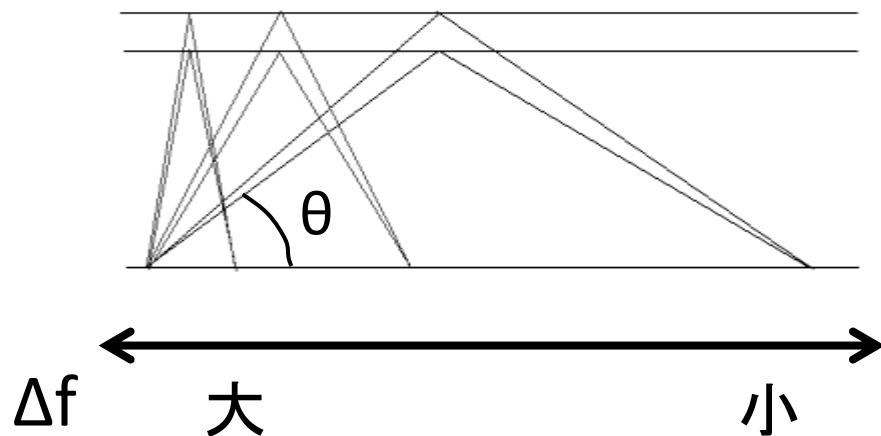
レンジ: 電波の発信点から後方散乱を受ける点までの経路長

(A) 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。

(B) F層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小さくなる。

(A)下部電離圏電子
密度変化の場合

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

d:D層の層厚 c:光速
f:周波数 N:電子密度
h:反射高度 θ:仰角

(B)F層電子密度
変化の場合

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

	要因(A)	要因(B)
周波数依存性	$\propto 1/f$	$\propto f$
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

→ Kikuchi et al.
(1986)
} 本研究

ドップラー速度vは $v = \frac{k \cdot d}{f^2} \cdot \frac{dN}{dt} \cdot \frac{1}{\sin \theta} - 2 \cdot \frac{dh}{dt} \sin \theta$ で表わされる。

研究の目的

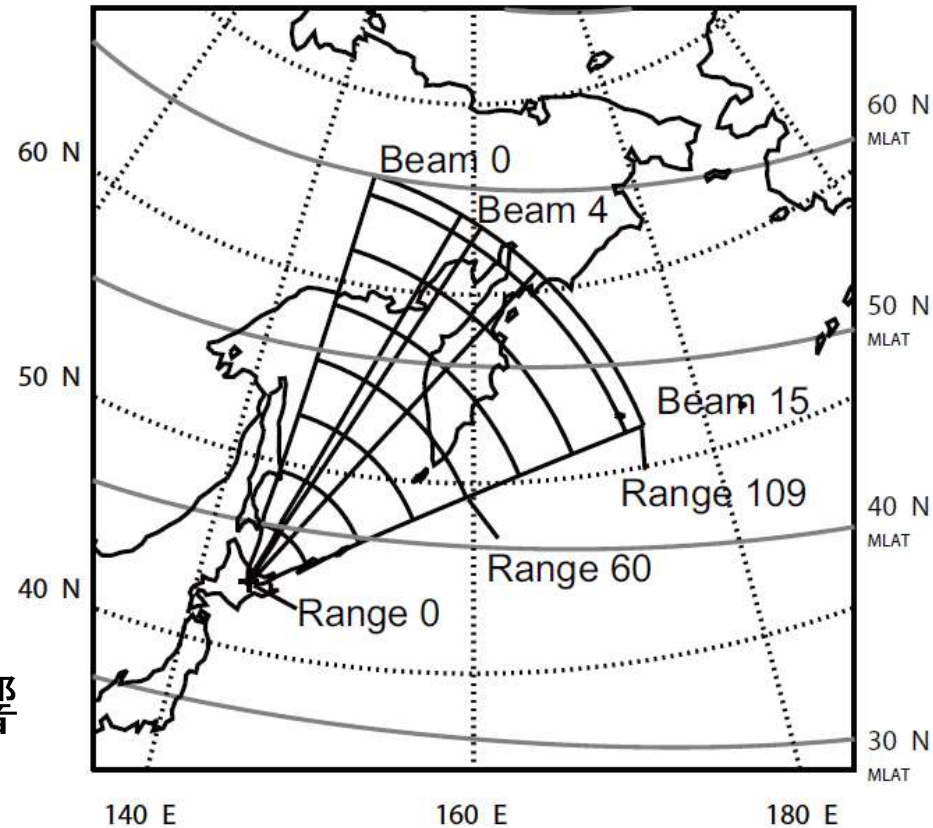
- ・北海道-陸別HFレーダーを用いて、Kikuchi et al. では研究されなかった電波のドップラー速度のレンジ・仰角依存性を解析することによって、フレア発生時に下部電離圏、F層において、どのような電子密度変化が生じているかを解明する。
- ・衛星観測によるX線、EUV放射強度データを用いて、太陽放射強度と電子密度変化量の関係を研究する。

北海道-陸別HFレーダー

- ・SuperDARNレーダー網の一つ
- ・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。

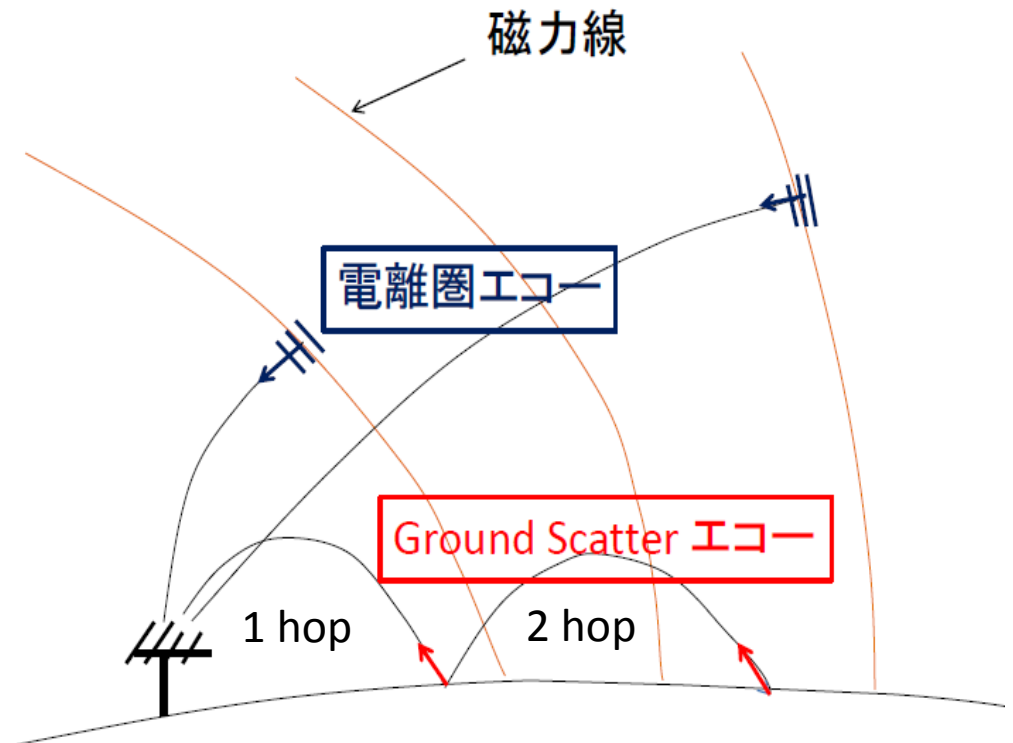


エコーの種類

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

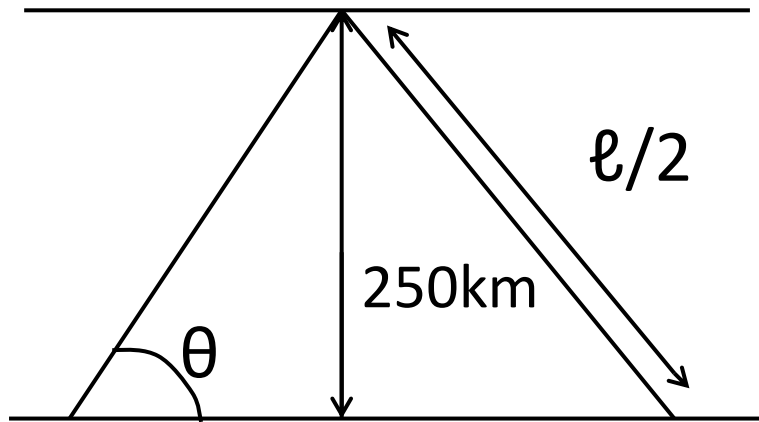
ground scatterエコー : 電波が一回または数回電離圏下部と海面や地面の間を繰り返し反射し、地表および海面の不規則構造から後方散乱を受けて返ってくるエコー

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



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 θ は、電波の経路長 l を用いて



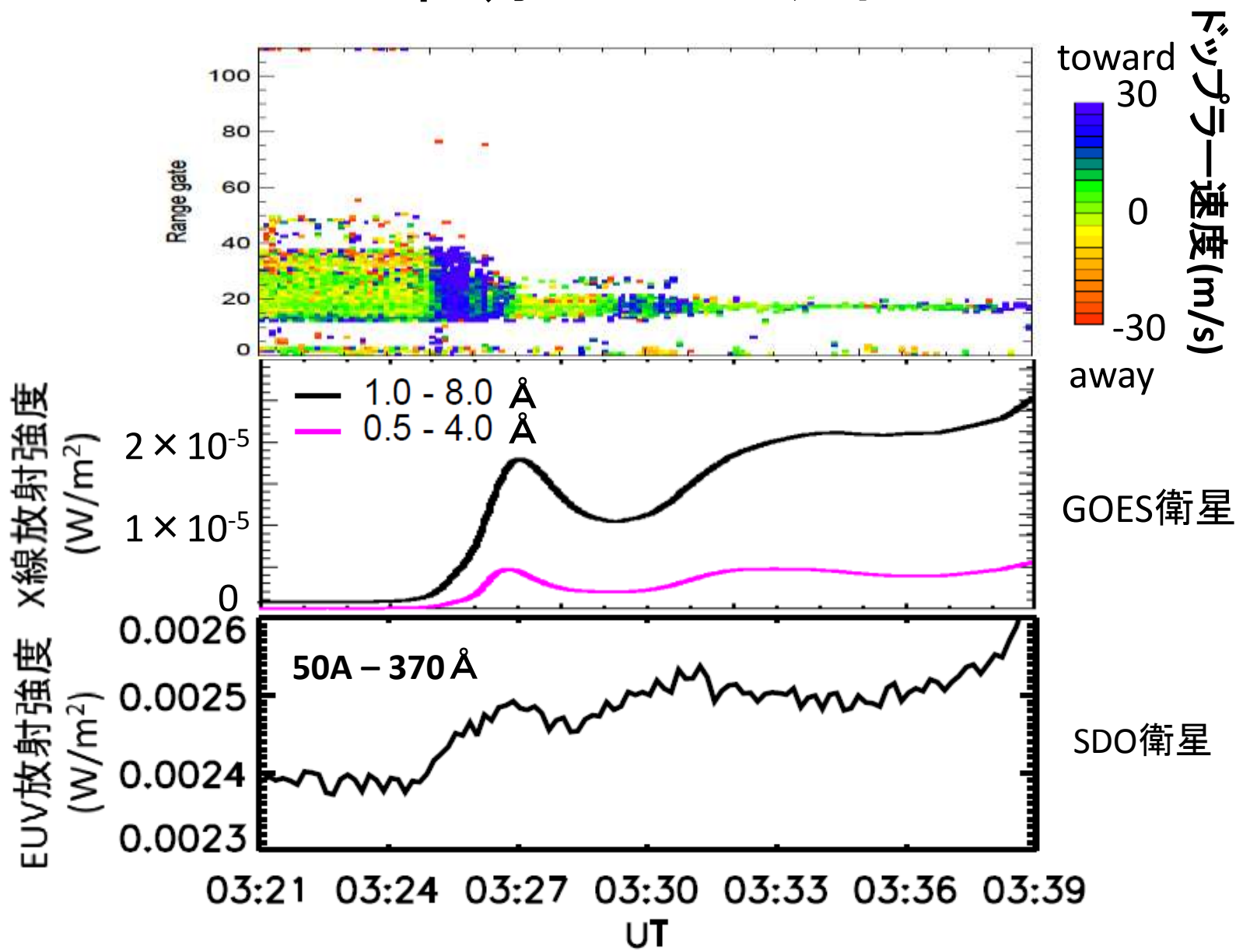
$$\sin \theta = \frac{250}{l/2}$$

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

と表わすことができる。

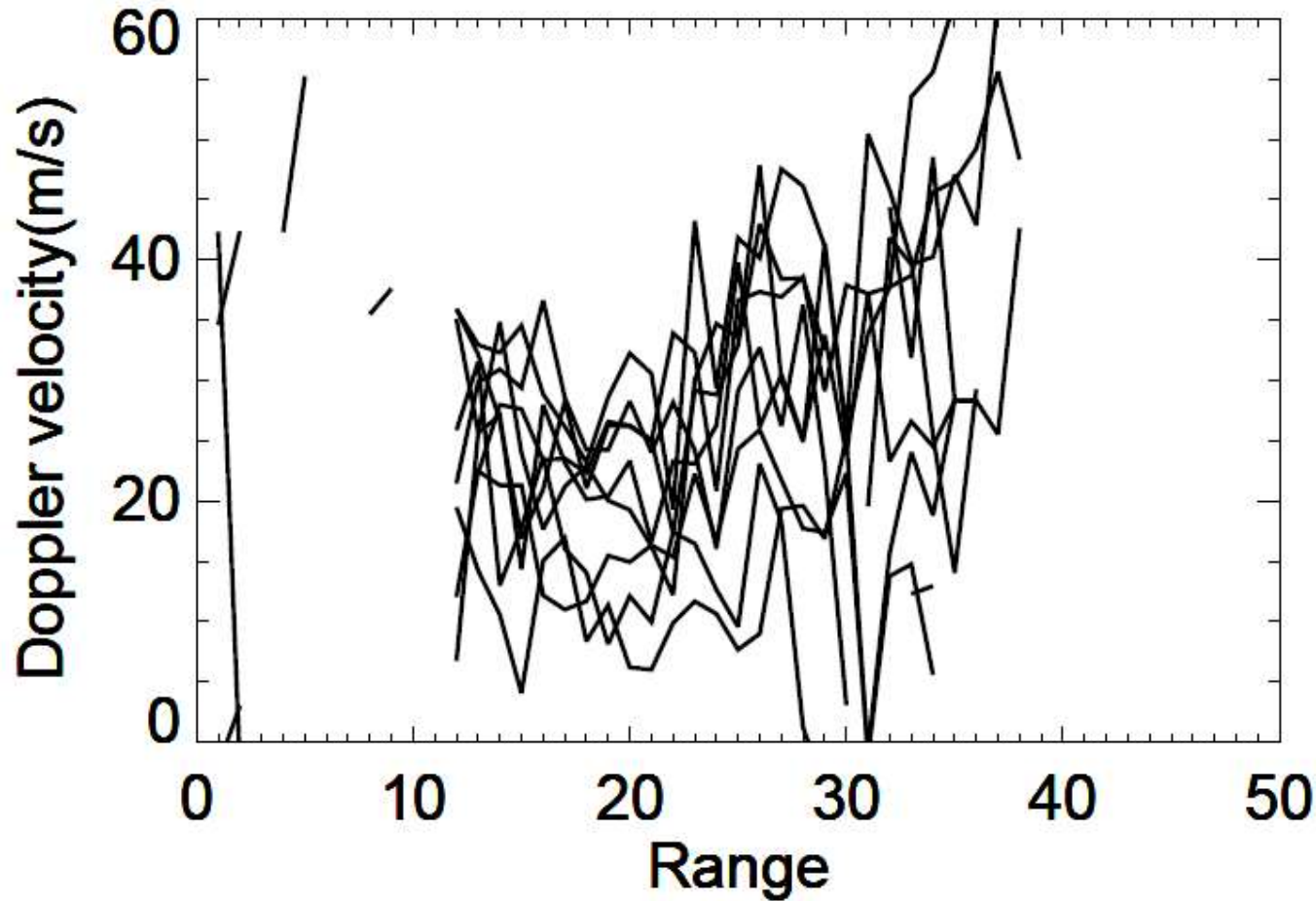
結果

2012年3月9日のフレアイベント



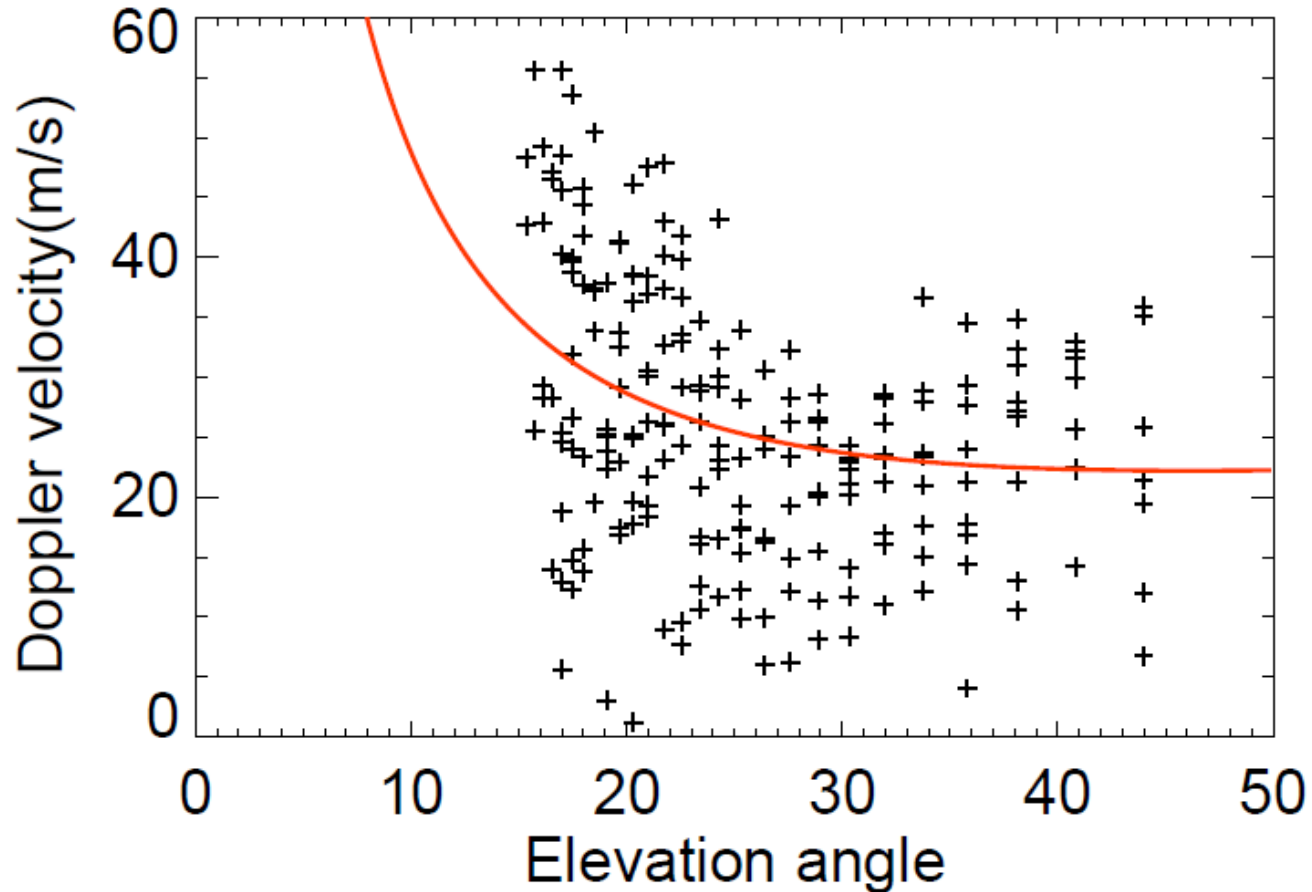
03:25UTにおけるレンジゲートとドップラー速度の関係

	要因(A)	要因(B)
レンジ依存性	正の相関	負の相関



03:25UTにおけるドップラー速度と仰角の関係

	要因(A)	要因(B)
仰角依存性	$\propto 1/\sin\theta$	$\propto \sin\theta$



下部電離圏の電子密度変化の影響が大きいと考えられる。

プロットした点を $v = a \times \frac{1}{\sin \theta} + b \times \sin \theta$ にフィッティングを行った結果

$$v = 8.00 \times \frac{1}{\sin \theta} + 15.40 \times \sin \theta \quad \text{という曲線が得られた(赤線)}。$$

$$v = \frac{k \cdot d}{f^2} \cdot \frac{dN}{dt} \cdot \frac{1}{\sin \theta} - 2 \cdot \frac{dh}{dt} \sin \theta \quad \text{と比較すると} \quad \frac{k \cdot d}{f^2} \cdot \frac{dN}{dt} = 8.00$$

$k=8.06 \times 10^{-11}$ 、 $f=11(\text{MHz})$ 、 $d=30 \times 10^3(\text{m})$ を用いて、下部電離圏の電子密度変化量は

$$\frac{dN}{dt} = 4.00 \times 10^8 \quad (\text{個}/\text{m}^3 \cdot \text{s}) \quad \text{と見積もることができた。}$$

統計解析

- ・2006年12月-2012年3月の、日本時間0600LT-1800LTに起きたM2.0クラス以上の29のフレアイベントの解析を行った。
- 計24のイベントで明確なドップラーシフトの正の変化を観測した。
- ・24のイベントのうち11のイベントでドップラーシフトはレンジ依存性を示し、いずれもレンジに対し正の相関を示した。



下部電離圏電子密度変化の影響が大きいことを示す。

→Kikuchi et al.,1986 の結果と一致する。

- ・その他13のイベントでは明確なレンジ依存性を示さなかった。



- ・F層電子密度変化も影響している可能性
- ・ノイズ等の影響により正確なデータが得られていない可能性

	クラス	Local time	a	硬X線 変化量	軟X線 変化量	EUUV 変化量
2011年3月9日	X1.5	08:19	14.00	0.853	1.95	10.6
2011年9月7日	X1.8	07:36	46.40	3.58	9.17	51.1
2011年8月9日	X6.9	17:02	16.80	17.9	30.05	22.9
2012年3月7日	X5.4	09:07	23.2	1.22	3.04	10.7

単位はいずれも(10⁻⁵W/s・m²)

まとめ

- ・北海道-陸別HFレーダーにより、太陽フレア発生時にground scatterエコーに、ドップラーシフトの正の変化を観測した。
- ・11のイベントで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。
→この11のイベントで生じたドップラーシフトの変化はD層電子密度変化による影響が大きいと考えられる。
- ・ドップラーシフトの時間変化とX線,EUV放射強度の時間変化は一致した。

今後の予定

レーダーのドップラーシフト特性から太陽放射強度を見積もるモデルの確立。

- ・太陽放射強度を用いて化学反応モデルより電離圏電子密度変化量を見積もる。
- ・ドップラーシフト特性と太陽放射強度の相関を見出す。