

北海道陸別HFレーダーの観測を軸とした中低緯度ULF波動の特性に関する研究

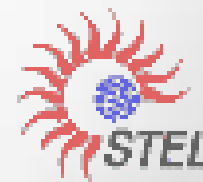
Study of characteristics of mid-latitude ULF waves based on the Hokkaido-Rikubetsu HF radar observations



松下敏法^{*1}, 関華奈子^{*1}, 西谷望^{*1}, 菊池崇^{*1}, 三好由純^{*1}, 堀智昭^{*1}, 寺本万里子^{*1},
塩川 和夫^{*1}, 湯元 清文^{*2}, Henri Reme, Howard Singer, Vassilis Angelopoulos

^{*1}名大S T E研, ^{*2}九大SERC,

^{*3}IRAP, CNRS, France, ^{*4}SWPC, NOAA, USA, ^{*1} UCLA, USA

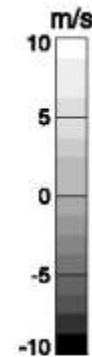
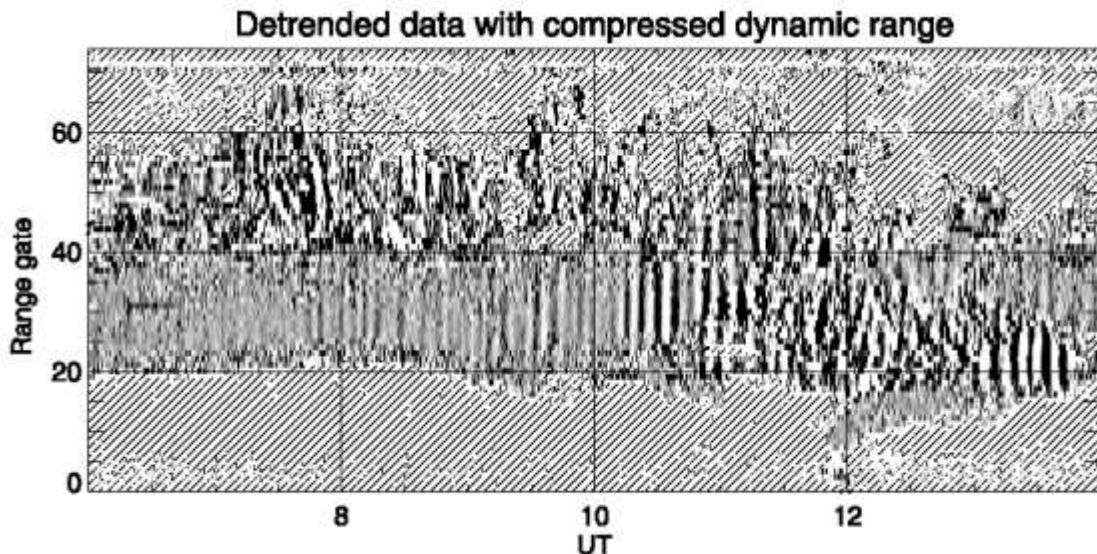
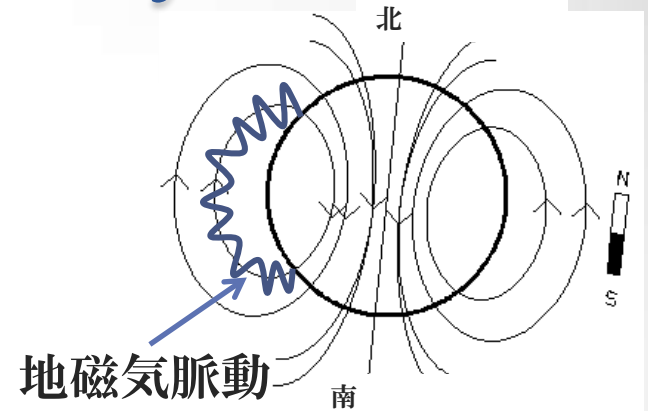


内容

- **イントロダクション**
 - ULF波動とは
 - ULF波動の駆動源
- **統計解析**
 - 2007年1月から2012年11月までの統計解析
- **イベント解析**
 - 2008年1月31日の大振幅イベント
- **結論**
- **今後の研究計画**

ULF (Ultra Low Frequency) 波動

地球磁気圏で地磁気脈動としてULF波動が磁力計やHFレーダー、科学衛星など様々な方法で観測されている。一方、中低緯度レーダーでは観測されていない。



	記法	周期 (秒)
単色	Pc1	0.2 ~ 5
	Pc2	5 ~ 10
	Pc3	10 ~ 45
	Pc4	45 ~ 150
	Pc5	150 ~ 600
広帯域	Pi1	1 ~ 40
	Pi2	40 ~ 150

TIGERレーダーでのULF波動の観測例 緯度帯
(2000年2月21日) [Ponomarenko et al., 2003]

地磁気脈動の分類
[Jacobs et al., 1964]

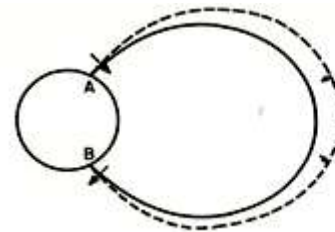
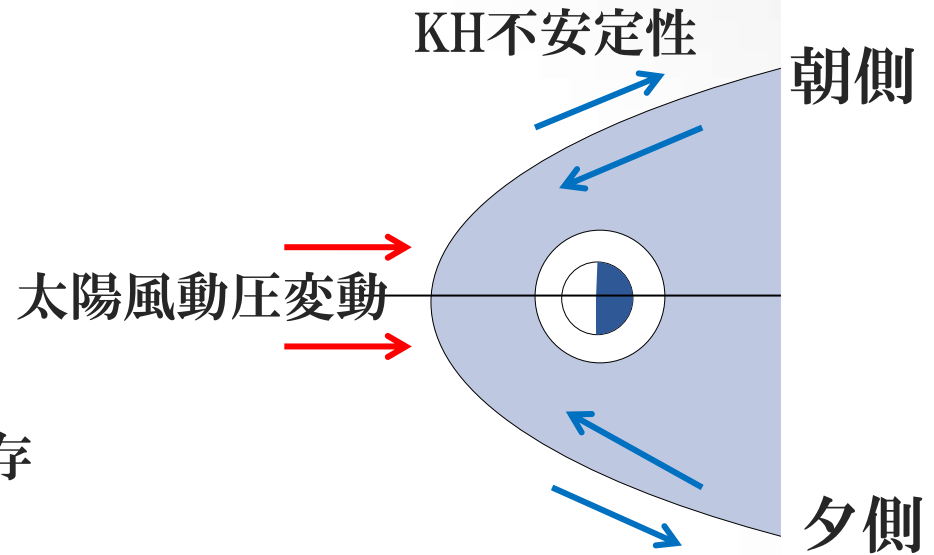
ULF波動の駆動源1

- 太陽風動圧変動

- ポロイダルモード
- 圧縮性波動
- 卓越周波数は ΔP_{sw} に依存

- KH不安定性

- トロイダルモード
- 非圧縮性波動
- 卓越周波数は V_{sw} に依存

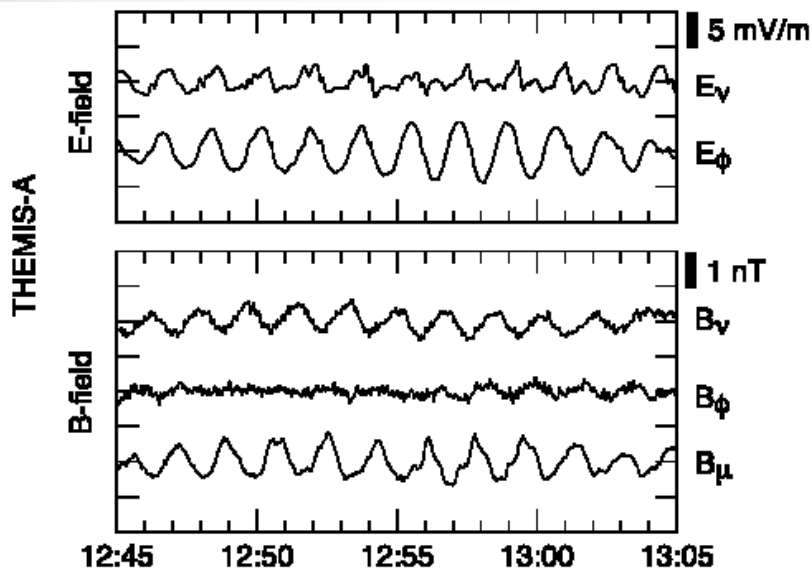


[福西 et al., 1983]

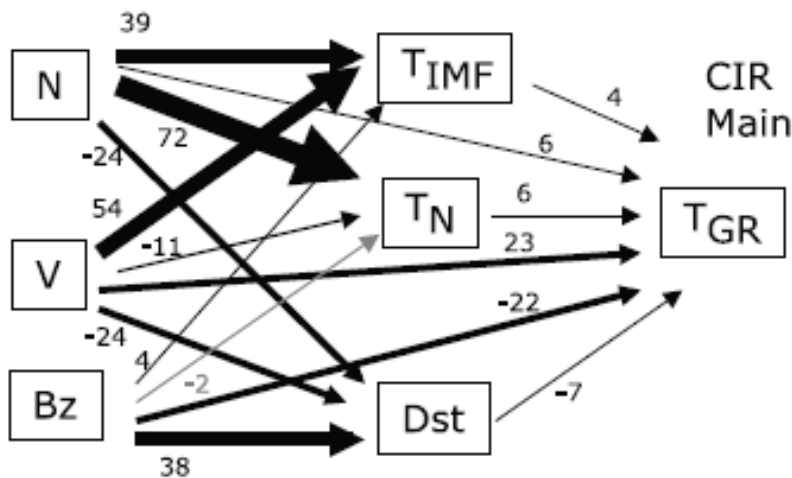
ポロイダルモード
方位角方向電場: E_{ϕ}
動径方向磁場: B_r

トロイダルモード
動径方向電場: E_r
方位角方向磁場: B_{ϕ}

ULF波動の駆動源2



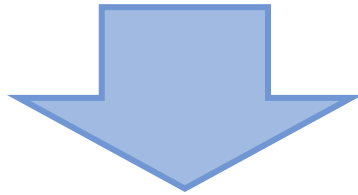
太陽風動圧駆動の観測例
(2008年10月19日)
 $V_{sw} \approx 300 \text{ km/s}$
 $N_{sw} \approx 15/\text{cc}$
 $f \approx 10 \text{ mHz}$
[Takahashi et al., JGR 2011]



[Simms et al., 2010]による回帰分析
 T_{GR} : 2~7mHz波動強度指数
(北半球の磁場観測1分値より)
 T_N 、 T_{IMF} : 密度変動、惑星空間磁場
(IMF) 変動指数
(衛星観測の1分値より)
太陽風パラメータ依存性
CIR (208イベント) の主相 では
 $\log_{10} T_{GR} \approx 0.71-0.77$

本研究の目的

- ULF波動がどれだけ低緯度および磁気圏内部に伝播するか？
- ULF波動の駆動源は何か？
 - 太陽風条件への依存性



- 中低緯度帯にある北海道-陸別HFレーダーを用いてPc5帯（150~600秒周期）のULF波動に関する統計解析を行って太陽風条件への依存性を調べる。
- 大振幅なULF波動が見られた高太陽風動圧下での特徴的なイベントに着目し、磁気圏内多点観測に基づき、駆動メカニズムと伝播過程を調べる。

統計解析

- 使用データ

- 北海道-陸別HFレーダー: ビーム5 (南北)、ビーム14 (東西)
- OMNI太陽風データの太陽風速度、密度、IMF (惑星空間磁場)

- 統計解析期間

- 2007年1月から2012年11月まで

- イベント抽出

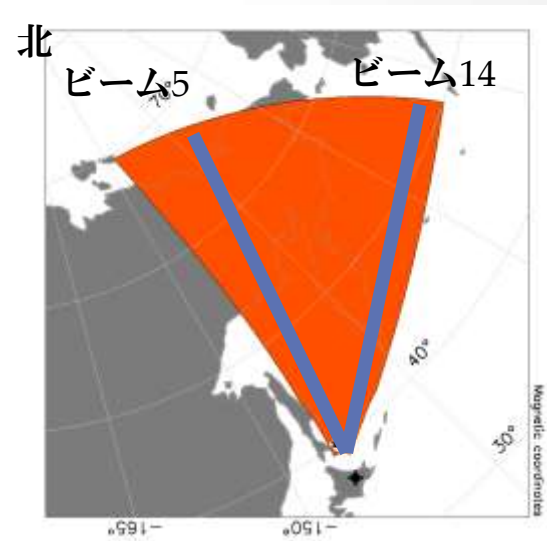
- ノイズデータの除去 ($\pm 200\text{m/s}$ 以上)
- ドップラー速度が一様である構造の抽出

$$\frac{\text{標準偏差}}{\text{平均}} < \frac{1}{\sqrt{n}} \quad (n \geq 5)$$

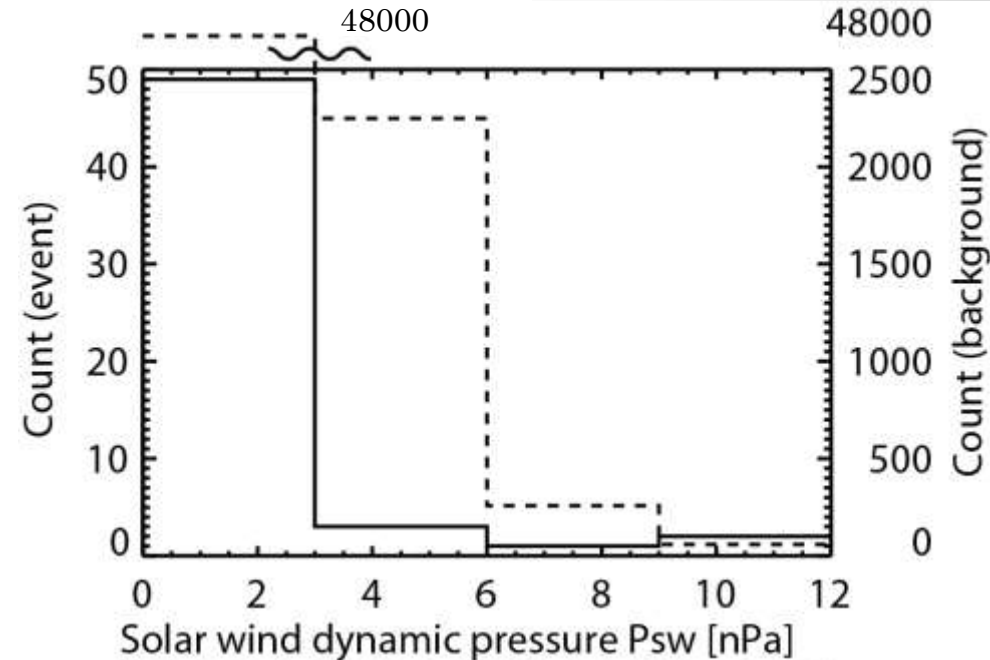
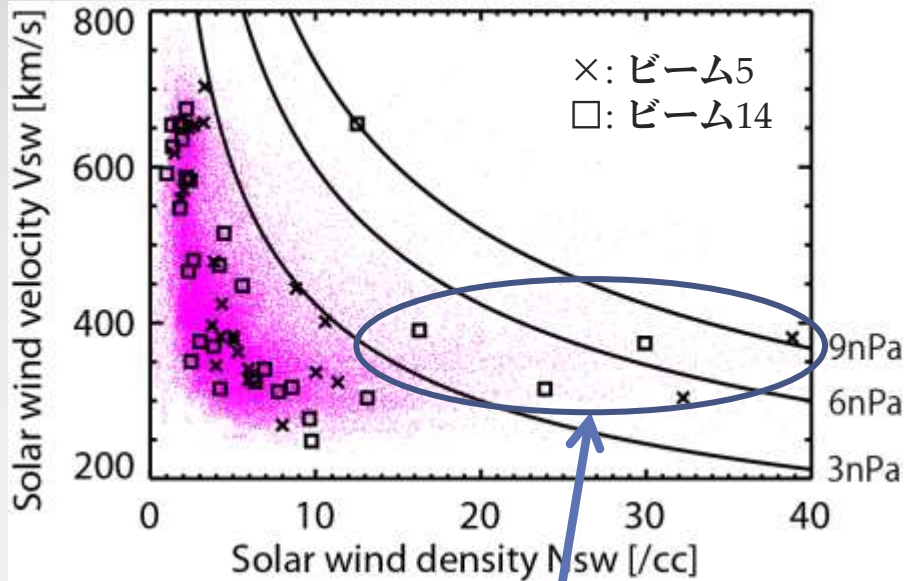
- 時間方向に補間 (10分以内)
- 20分以上のイベントを抽出
- 目視によってULF波動の特徴 (縞状構造) が見られるものを抽出

- 抽出されたイベント

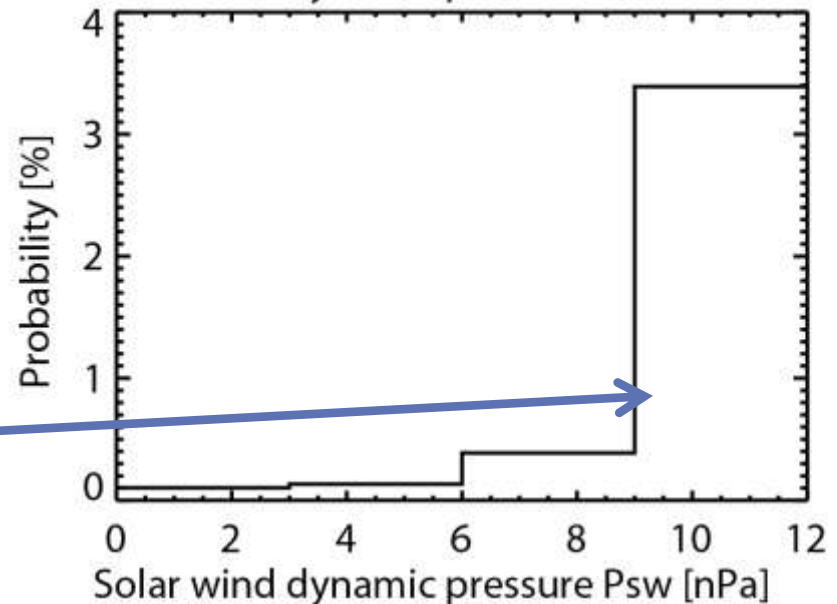
- 北海道-陸別HFレーダーから60イベント
- そのうちの太陽風データの利用できる55イベントを使用



太陽風動圧への依存性

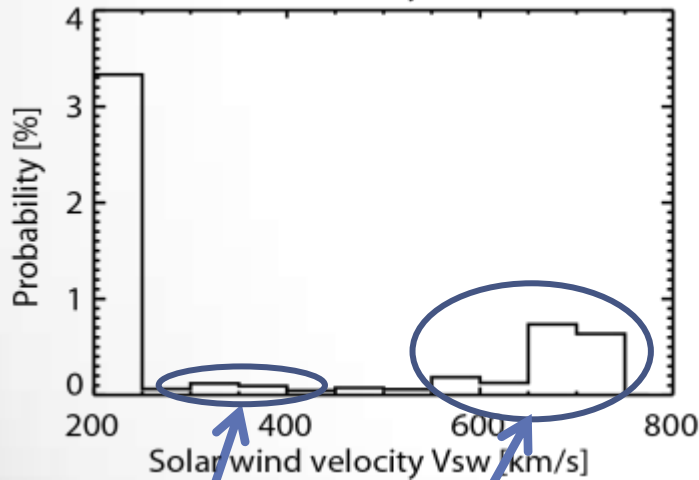
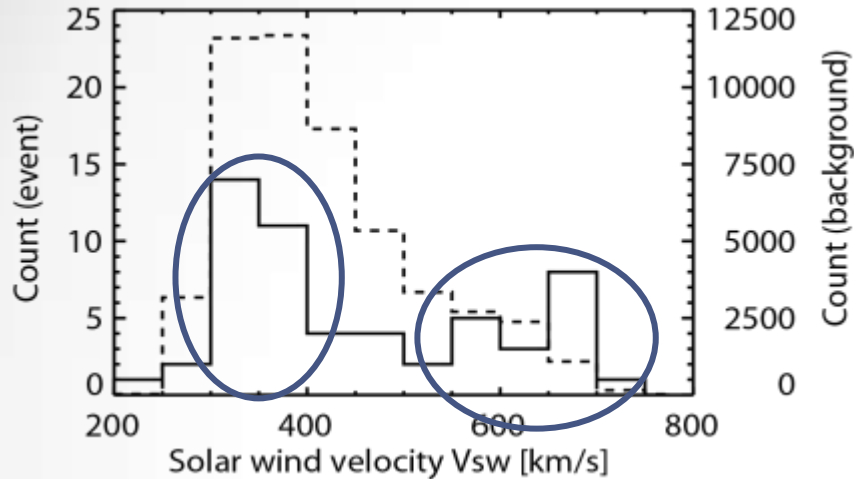


- 背景では高動圧の場合は少ない。
- 高動圧ULFイベントでは速度より密度の寄与が大きい。
- 高太陽風動圧下でULF波動イベントが発生しやすい。



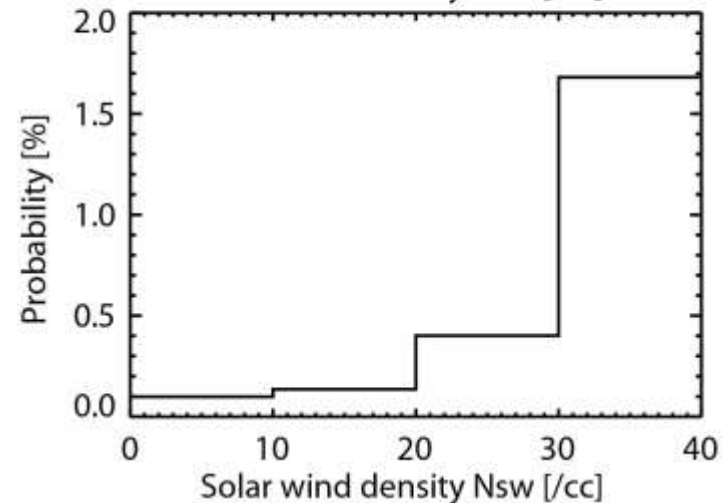
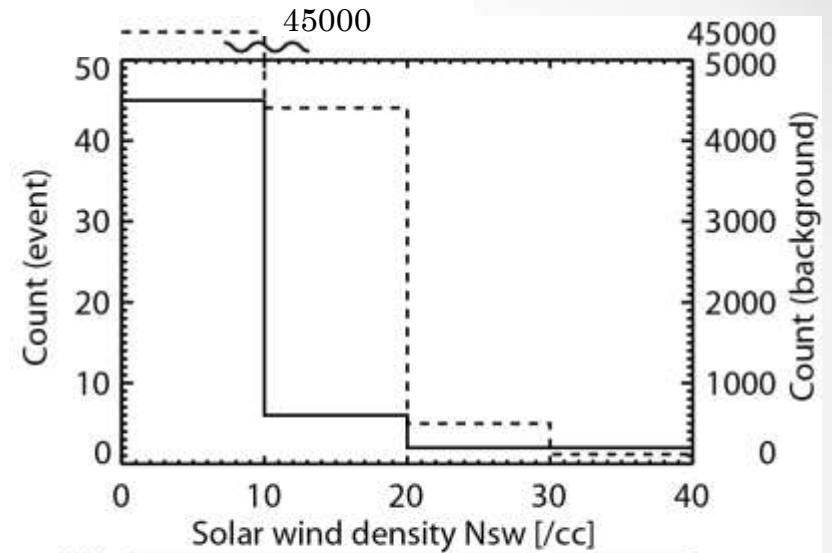
太陽風速度および密度への依存性

太陽風速度



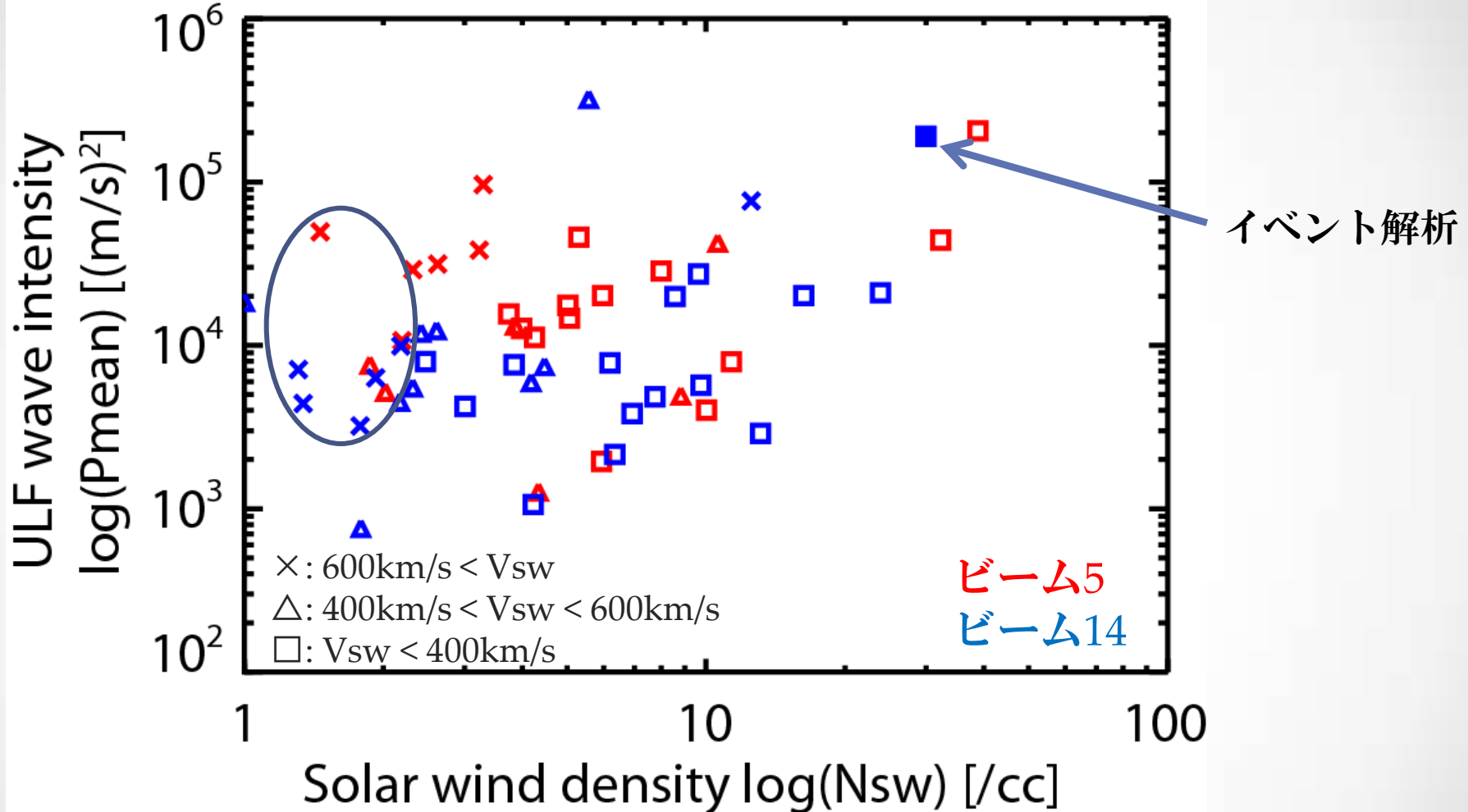
400km/sと600km/sあたりに
2つのピークが見られる。

太陽風密度



高太陽風密度下でULF波動イベントが発生し
やすい。

ULF波動強度と太陽風密度の関係



- 高速太陽風下では低密度でも強度が大きい。
- 低速太陽風下太陽風密度とULF波動強度に相関が見られる。
- (ビーム5: 0.27、ビーム14: 0.49)

結論

• ULF波動の駆動源

- 統計解析の結果から、600km/sを超える高速太陽風条件下では、KH不安定性による駆動と矛盾しない。
- 400km/s程度の低速太陽風では、低速太陽風では太陽風密度とULF波動強度の間に正の相関があり、太陽風動圧変動による駆動を示唆している。
- 地磁気緯度 42° の電離圏で観測された大振幅ULFイベントの解析結果は、地心距離に依存せずグローバルに類似した周波数特性を示しており、太陽風動圧変動によって直接駆動されたULF波動であることを示している。

• ULF波動の伝播経路

- イベント解析時の各観測点への波動の到達時間差は、太陽風動圧変動で駆動されたULF波動が、昼側磁気圏から夜側磁気圏に向かって速進磁気音波で伝播していると解釈できる。

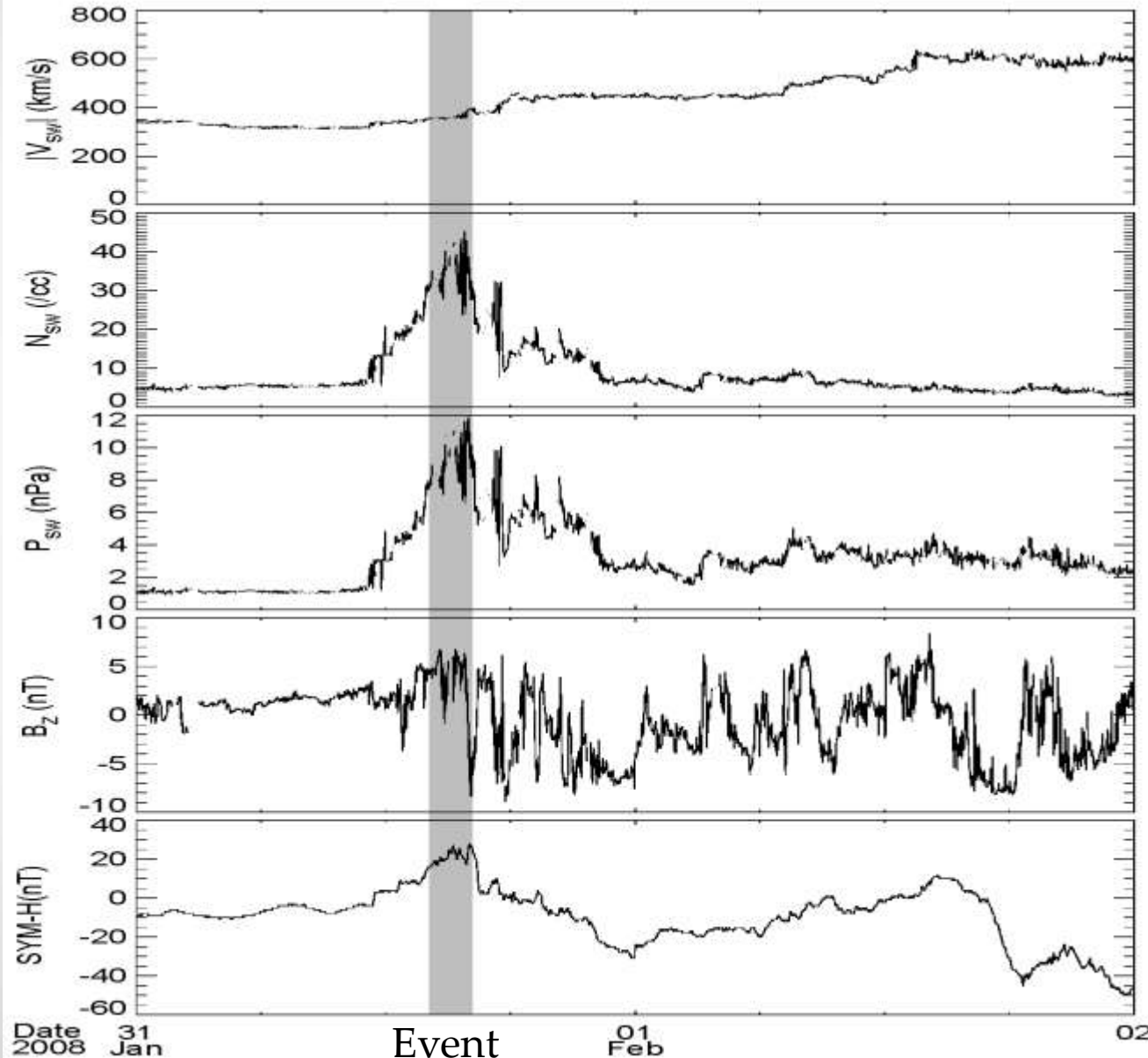
今後の研究計画

- 中低緯度に拡大したSuperDARN観測を用いた研究
 - 米国で8基のレーダーの建設、運用が始まりつつある。そのため、同時観測可能なMLT時間幅の拡大した利点を活かし、ULF波動のグローバルな特性を明らかにしたい。
- Van Allen Probesによる放射線帯の直接観測との比較
 - 昨年打ちあがった、Van Allen Probesによる内部磁気圏赤道面での直接観測を活かして、磁気圏内の地上・衛星多点観測の比較に基づき、ULF波動が放射線帯粒子加速に果たす役割の研究を行う予定である。
- シミュレーションとの比較
 - 環電流のダイナミクスとULF波動の励起、伝播を矛盾なくシミュレートできるGEMISISリングカレントモデル（RCモデル）と放射線帯粒子の軌道追尾計算を行うGEMISIS放射線帯モデル（RBモデル）を組み合わせて、放射線帯電子の輸送、加速に与える影響を観測と比較していく予定である。
 - また、経験モデルではなく電場分布と矛盾しないプラズマ圏モデルの導入などの改良もしていきたい。



イベント解析 (2008年1月31日)

イベント時の太陽風状態 (CIRイベント)



低速

$V_{sw} \approx 350$ km/s

高密度で変動

$N_{sw} \approx 35$ /cc

高動圧で変動

$P_{sw} \approx 10$ nPa

主に北向きIMF

磁気圏が圧縮されている

Kpインデックス $\approx 0\sim 2$

磁気圏静穏時

使用データと観測位置

31 January 2008

1500UT

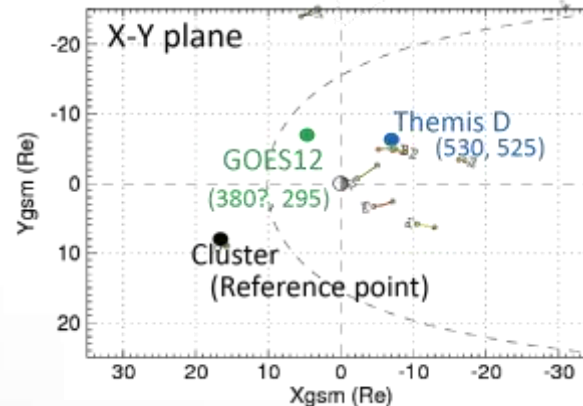
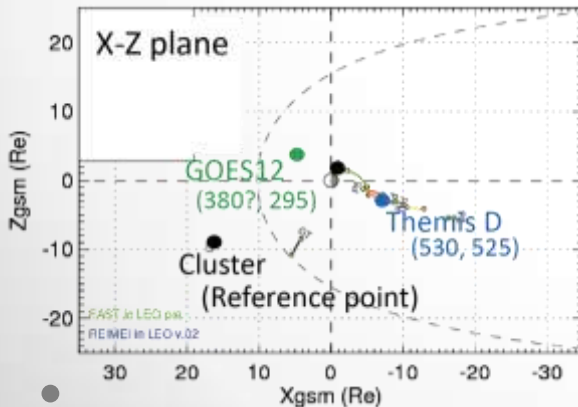
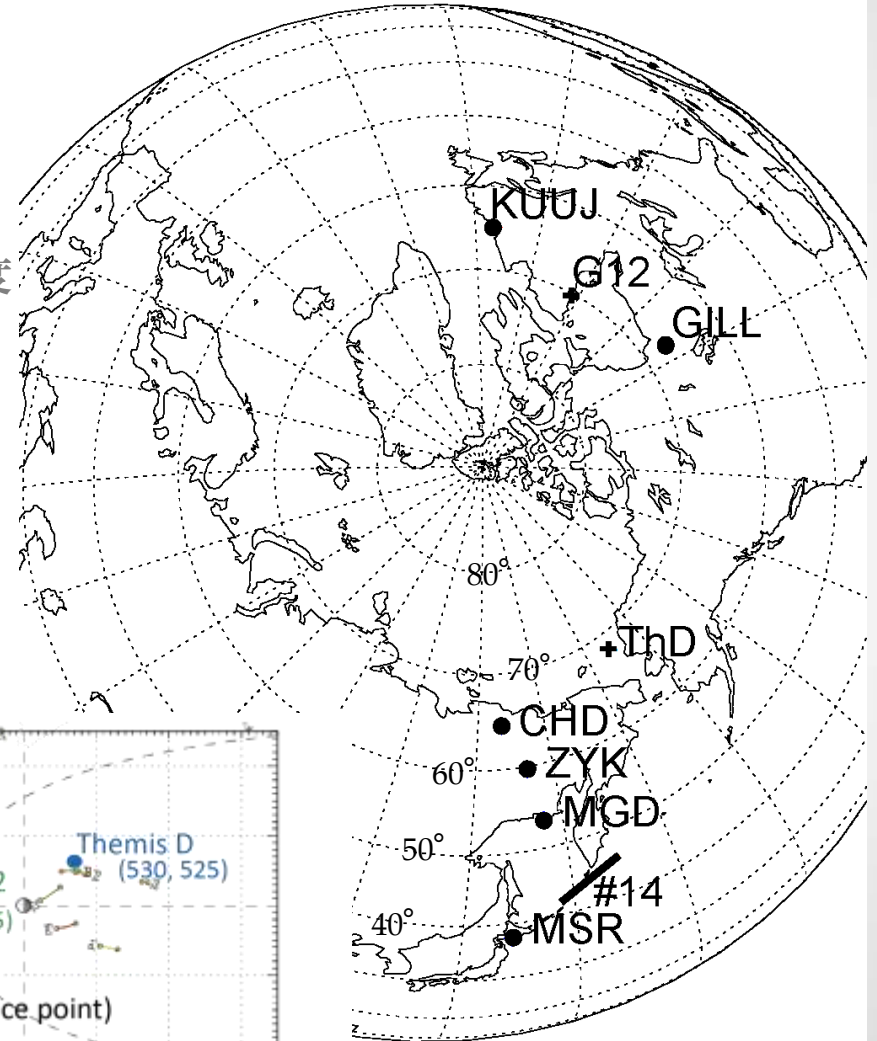
1200

● 地上観測データ

- 磁力計データ (B_H 東西成分)
 - CHD、ZYK、MGD、MSR (1秒値)
 - KUUJ、GILL (0.5秒値)
- 北海道-陸別HFレーダーのドップラー速度
ビーム14 (1分値)

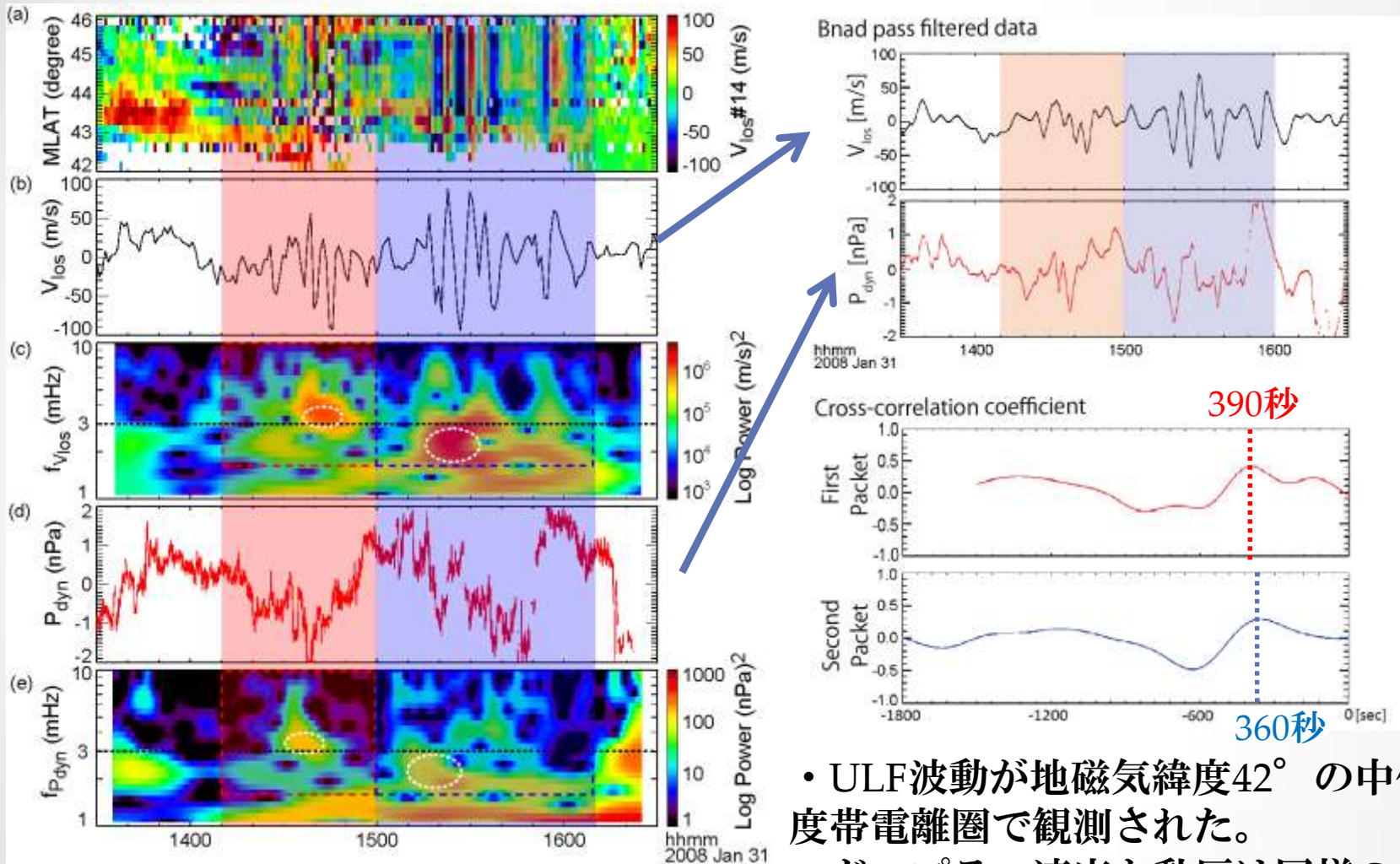
● 衛星観測データ

- Cluster : 動圧P (4秒値)
- Themis-D : 動径方向磁場Br (3秒値)
- GOES-12 : 動径方向磁場Br (0.5秒値)



0000
MLT

太陽風動圧と低緯度電場観測の比較



2つのパケット構造

($f = 3.5\text{mHz}$, 1410~1500UT)

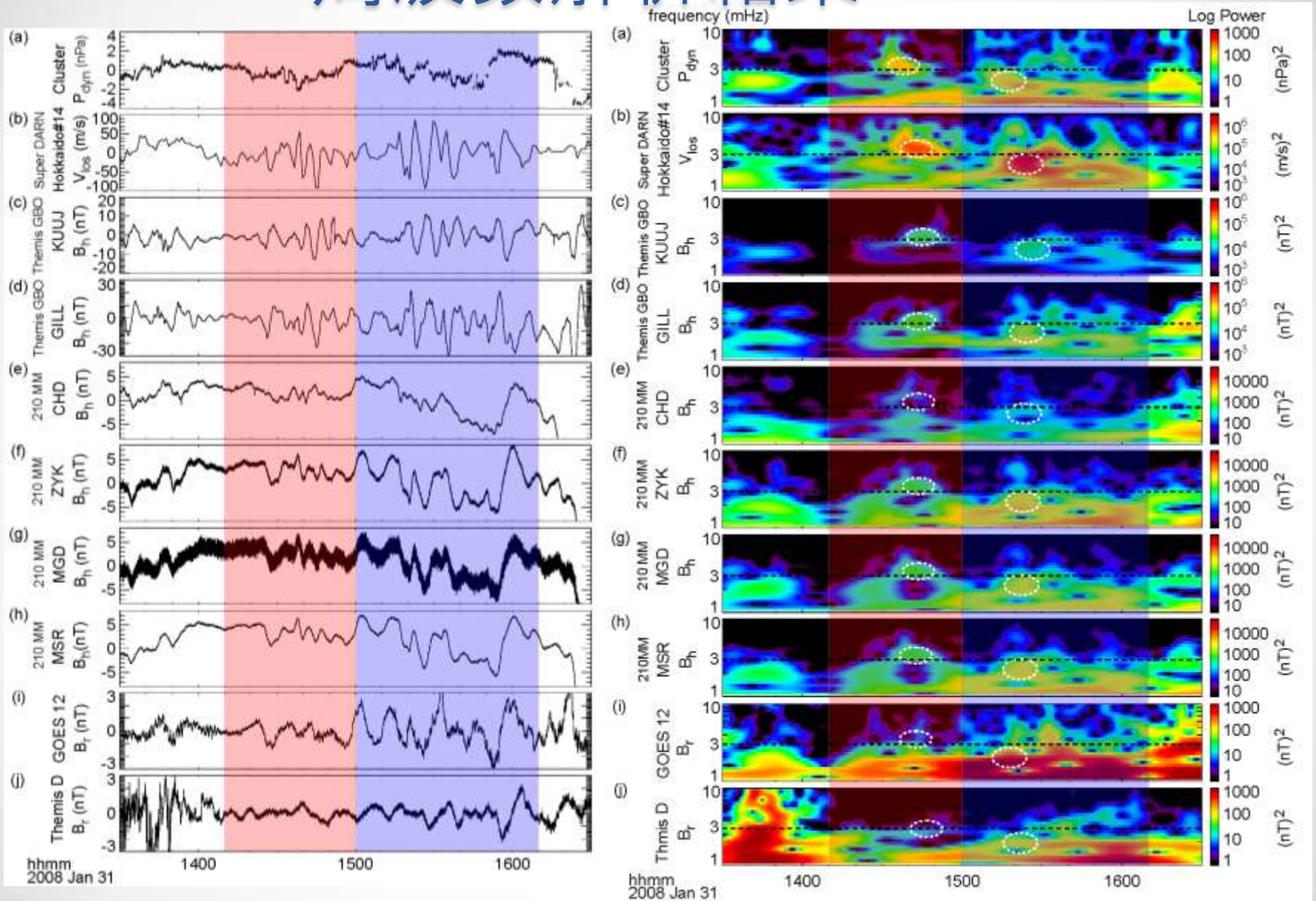
($f = 2.0\text{mHz}$, 1500~1610UT)

- ULF波動が地磁気緯度 42° の中低緯度帯電離圏で観測された。

- ドップラー速度と動圧は同様の周波数特性を示した。

- 伝播に360秒程度の時間差があった。

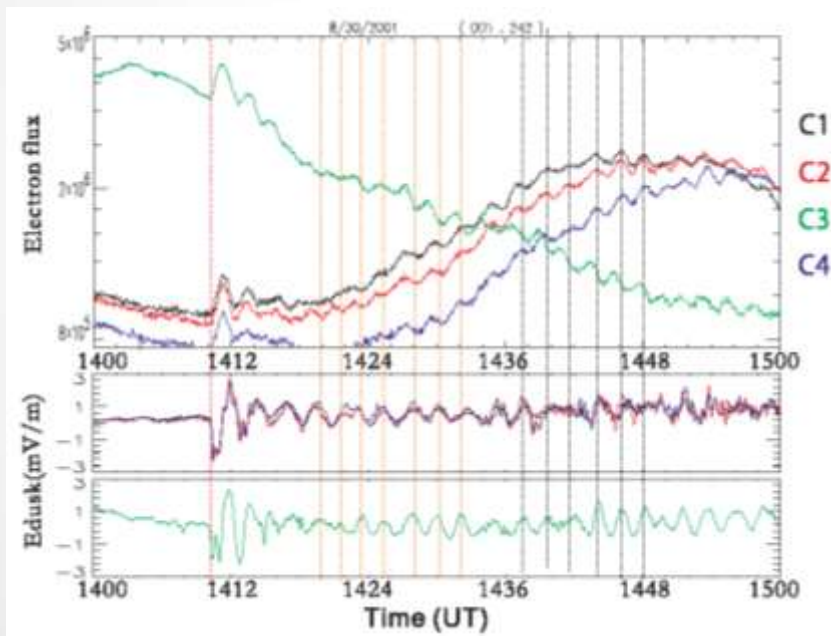
周波数解析結果



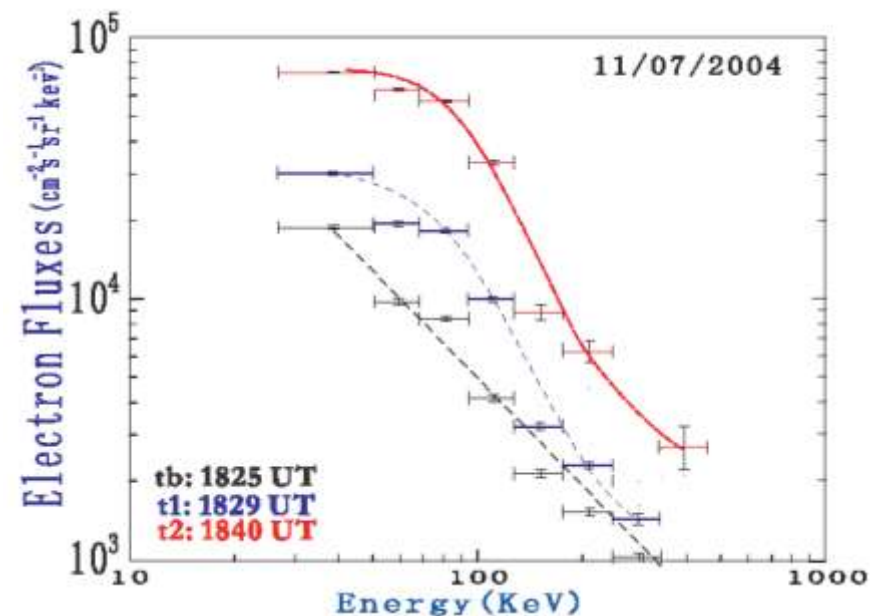
- 磁気圏内各点でグローバルに動圧とよく似た周波数特性を表している。

ULF波動と放射線帯粒子加速

- ULF波動に伴う電場加速と磁場圧縮が粒子加速に寄与
- 特に電場加速が重要だと指摘されている。



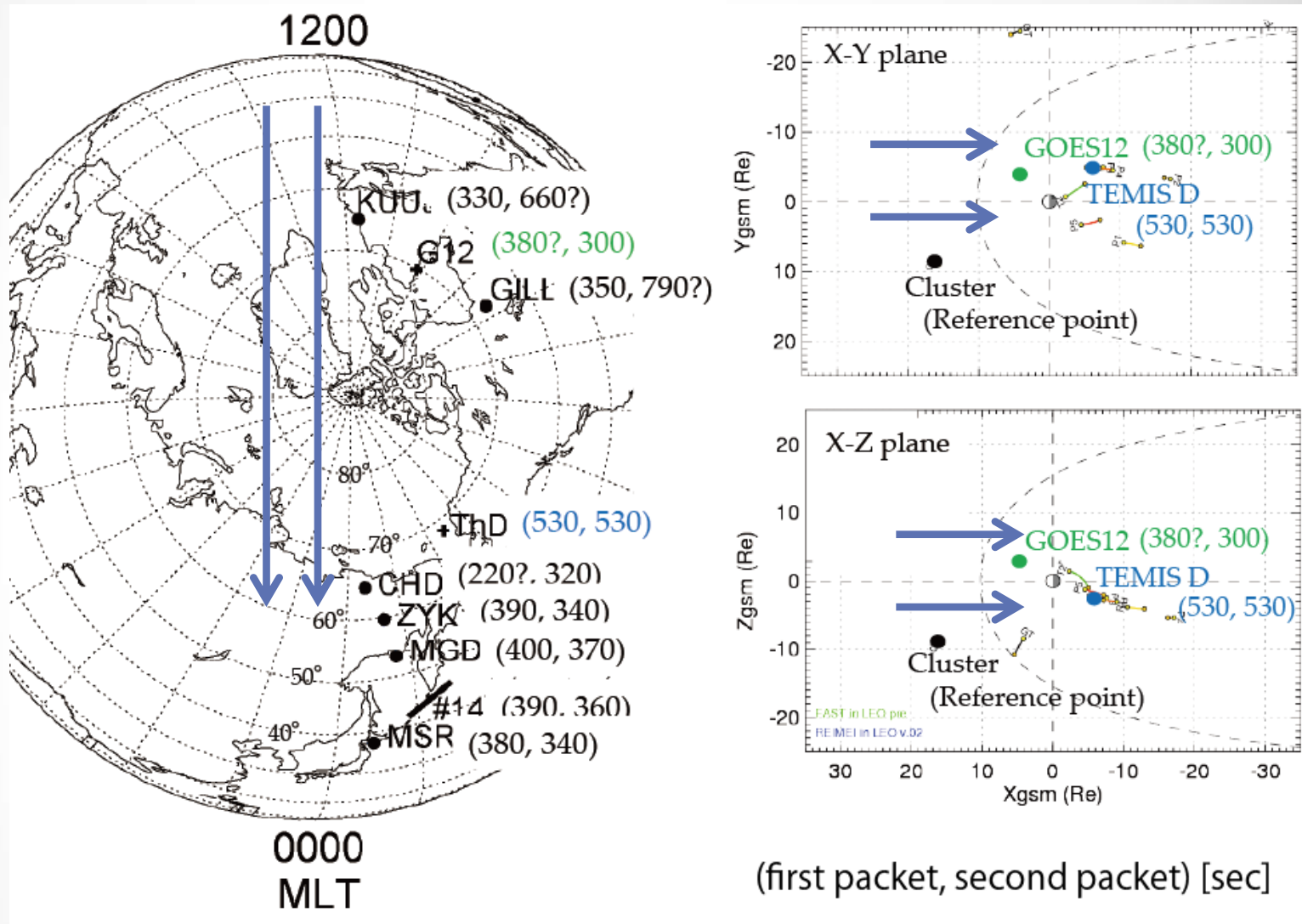
昼側の夕方方向電場と電子フラックスの関係
[Zong et al., 2009]



昼側の粒子エネルギーと電子フラックスの関係
[Zong et al., 2009]

t1が磁場圧縮を表し、
t2が電場加速を表す。

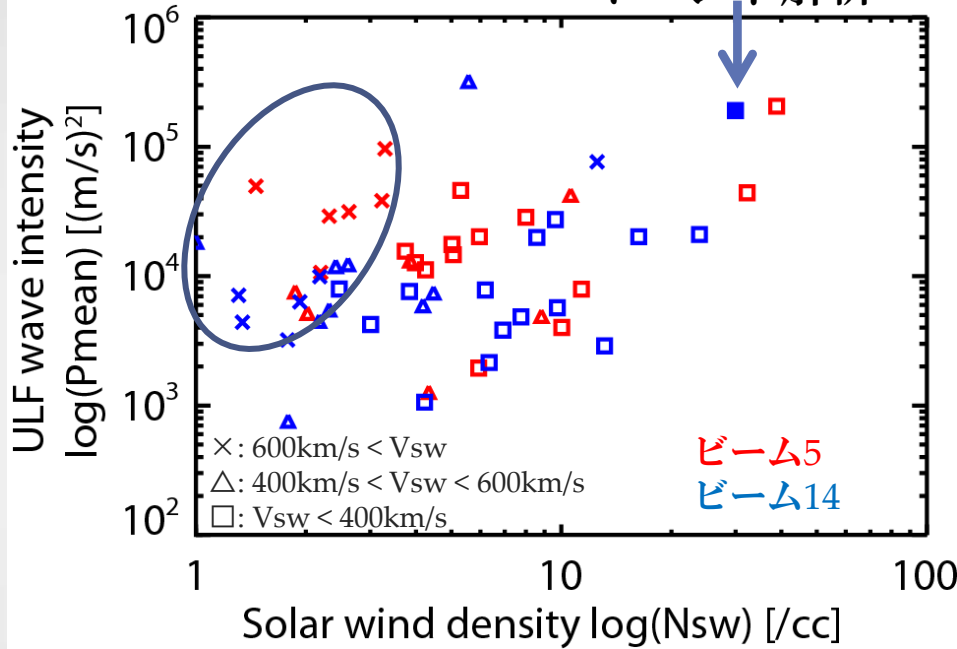
相互相関解析結果



昼側磁気圏の方が夜側磁気圏より早く伝播されている。

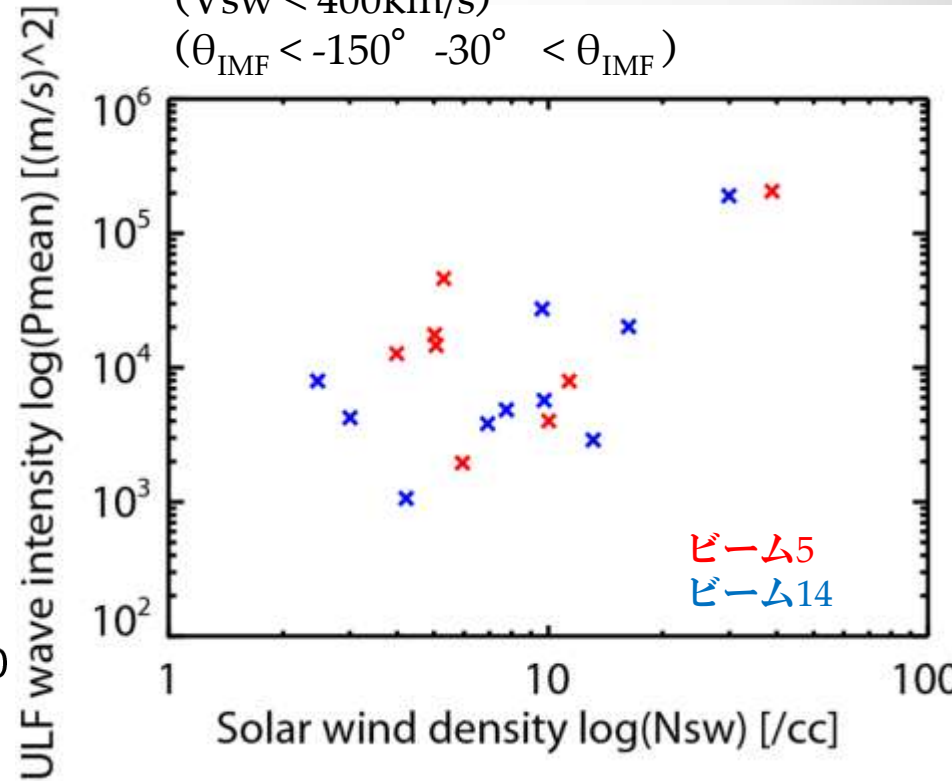
ULF波動強度と太陽風密度の関係

全イベント



高速太陽風下では低密度でも強度が大きい。
南北成分の方がULF波動強度の大きい傾向にある。

低速でIMF南向きでないイベント
($V_{\text{sw}} < 400 \text{ km/s}$)
($\theta_{\text{IMF}} < -150^\circ - 30^\circ < \theta_{\text{IMF}}$)



太陽風密度とULF波動強度に相関が見られる