

SuperDARNとあらせ衛星によるSAPSに伴う電離圏アウトフローの観測

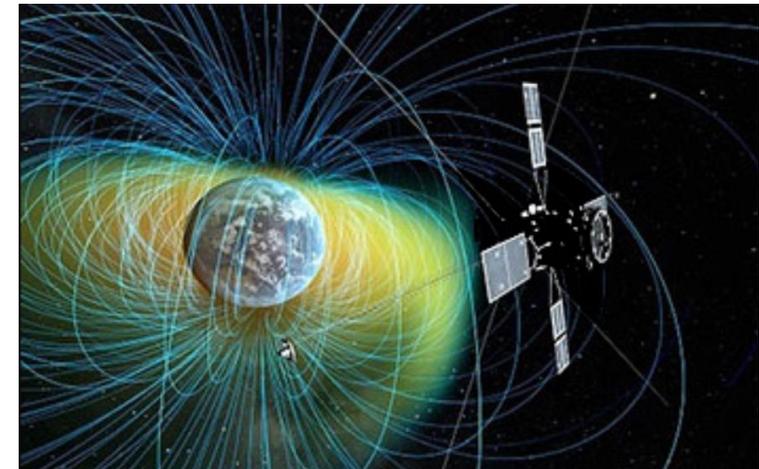
高田知弥¹⁾、西谷望¹⁾、堀智昭¹⁾、Simon G. Shepherd²⁾、浅村和史⁵⁾、熊本篤志³⁾、加藤雄人³⁾、笠原禎也⁴⁾、小路真史¹⁾、中村紗都子¹⁾、北原理弘¹⁾、土屋史紀³⁾、笠羽康正³⁾、三好由純¹⁾、風間洋一⁶⁾、S.-Y. Wang⁶⁾、C.-W. Jun¹⁾、横田勝一郎⁷⁾、笠原慧⁸⁾、桂華邦裕⁸⁾、松岡彩子⁹⁾、今城峻⁹⁾、新堀淳樹¹⁾、篠原育⁵⁾

1)名古屋大学宇宙地球環境研究所, 2) Thayer School of Engineering, Dartmouth College, 3)東北大学, 4)金沢大学, 5)宇宙航空研究開発機構 宇宙科学研究所, 6) Academia Sinica, Taiwan, 7)大阪大学, 8)東京大学, 9)京都大学



<http://www.stelab.nagoya-u.ac.jp/jpn/photo/2015/01/superdarn-2hf.html>

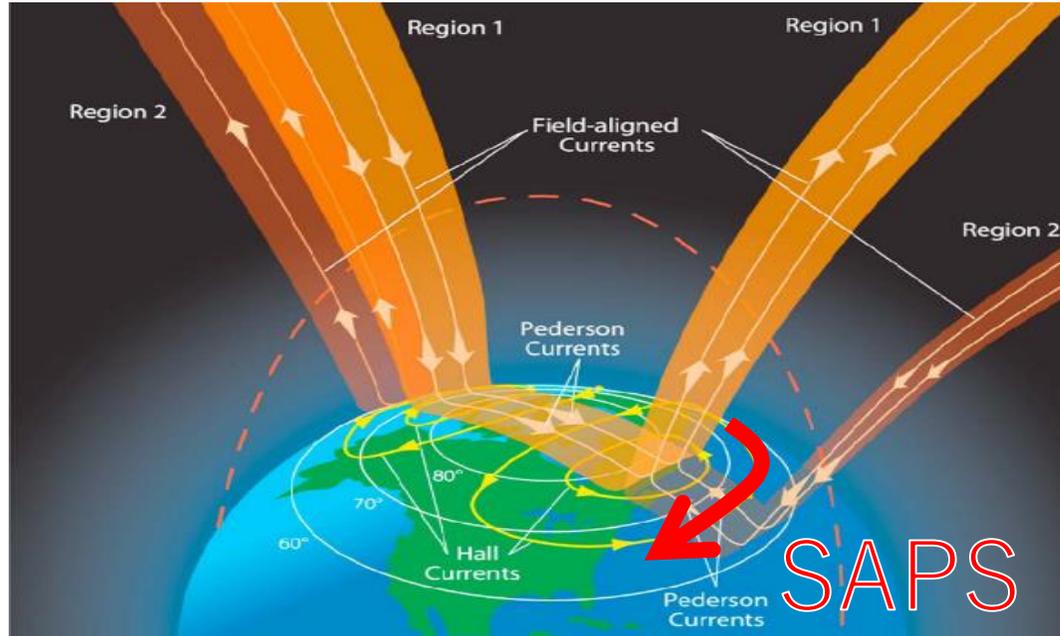
2022/2/22



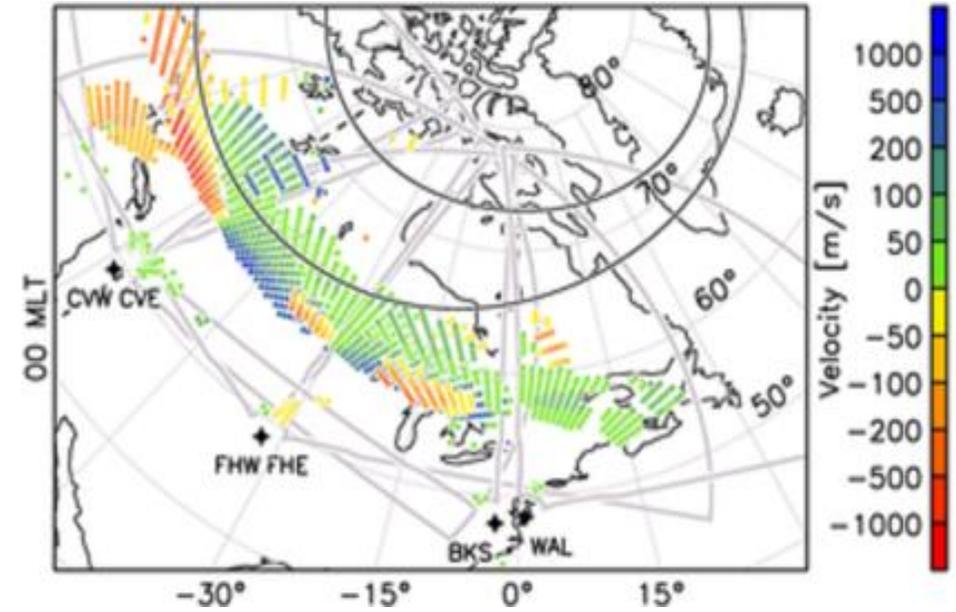
SuperDARN研究集会 高田知弥

https://www.jaxa.jp/projects/sas/erg/index_j.html

サブオーロラ帯高速流 (SAPS : Subauroral Polarization Stream)



[Le, Slavin and Strangeway, 2009]



[Clausen et al., 2012]

- 夕方から真夜中付近のサブオーロラ帯で発生する西向きのプラズマ高速流 [Foster and Burke, 2002]
- 速度は150-数1000 m/s 程度
- 強い極向きの電場と鉛直下向きの磁場による $E \times B$ ドリフトによって発生
- SAPSの高速流が引き起こす摩擦加熱により、プラズマの上昇流(イオンアップフロー)が発生

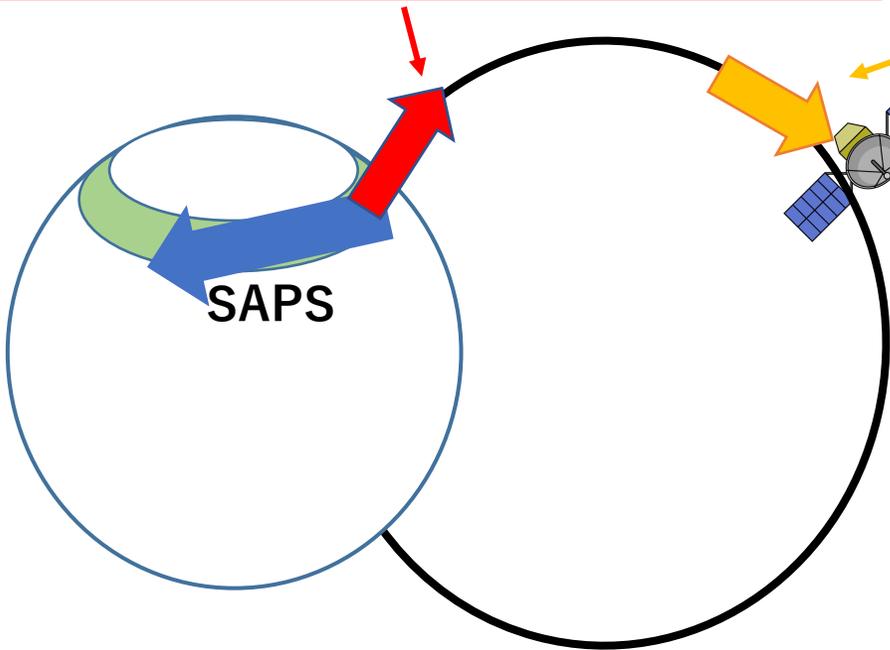
イオンアップフローとイオンアウトフロー

イオンアップフロー (上昇流)

- 電離圏で観測される鉛直上向きフロー
- 速度 < 11 km/s
- **SAPS**によって発生

イオンアウトフロー (流出)

- 磁気圏まで到達するフロー
- 速度 ≥ 11 km/s
- **電離圏イオンを磁気圏に供給**



➤ 過去の研究

- サブオーロラ帯より高緯度で、イオンアウトフロー○
- サブオーロラ帯で、0-3 km/s 程度のイオンアップフロー○
- イオンアップフロー/イオンアウトフローに注目してSAPSを同時観測×

SAPSによるイオンアップフロー



イオンアウトフロー & 電離圏イオンを供給??

本研究の動機・目的

➤ 動機

- SAPSによるイオンアップフローは、電離圏イオンを磁気圏に供給している可能性がある。
- しかし、SAPSとイオンアップフロー、イオンアウトフローとの関係を示す研究は少ない。



➤ 目的

- SuperDARNとあらせ衛星を用いてSAPSを同時観測することで、イオンアップフローがイオンアウトフローとなっているか調べる。
- SAPSが発生していることでイオンアウトフローの発生確率やイオンの流出量に影響が出ていないかを調べる。

観測機器

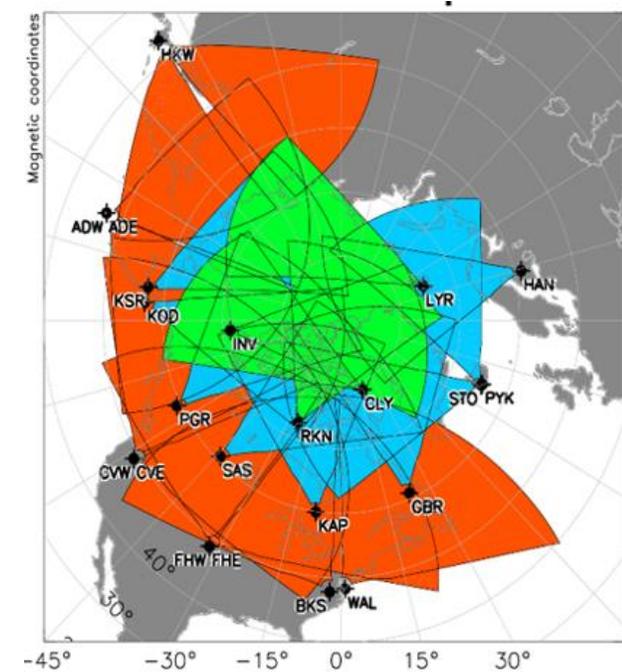
➤ Super Dual Auroral Radar Net work (SuperDARN)

- 電離圏プラズマの視線方向対流速度を観測
- HOK、HKW、CVE、CVW、FHE、FHWの中緯度レーダーを使用

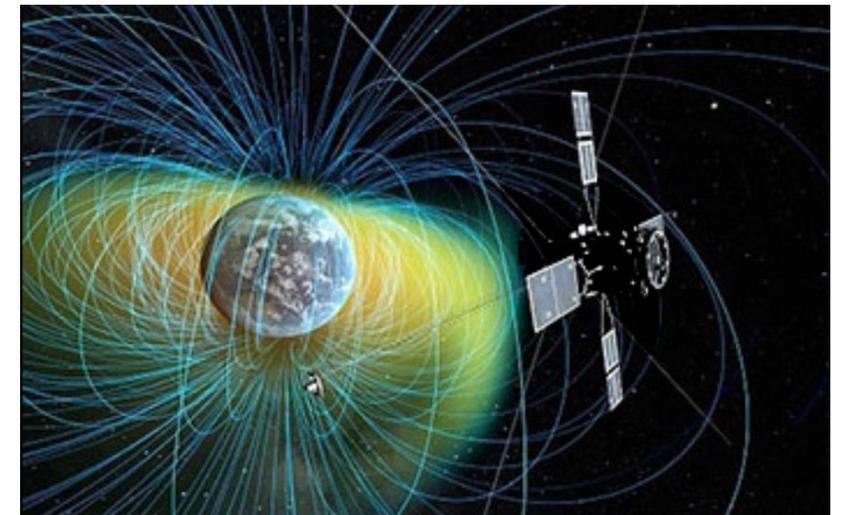
➤ あらせ衛星

- 広いエネルギー範囲の粒子や電磁場を観測

高度	~440 km (近地点)、~32000 km (遠地点)
軌道周期	~570分
軌道傾斜角	~31°
使用した機器 とデータ	LEP-e: 低エネルギー電子フラックス (19 eV-20 keV)
	LEP-i: 低エネルギーイオンフラックス (10 eV/q-25 keV/q)
	MEP-e: 中エネルギー電子フラックス (7-87 keV)
	MEP-i: 中エネルギーイオンフラックス (10-180 keV/q)
	MGF (Magnetic Field Experiment): 磁場 (8-s 時間分解能)
	PWE (Plasma Wave Experiment): 電波、電子密度



<http://vt.superdarn.org/tiki-index.php?page=Radar+Overview>



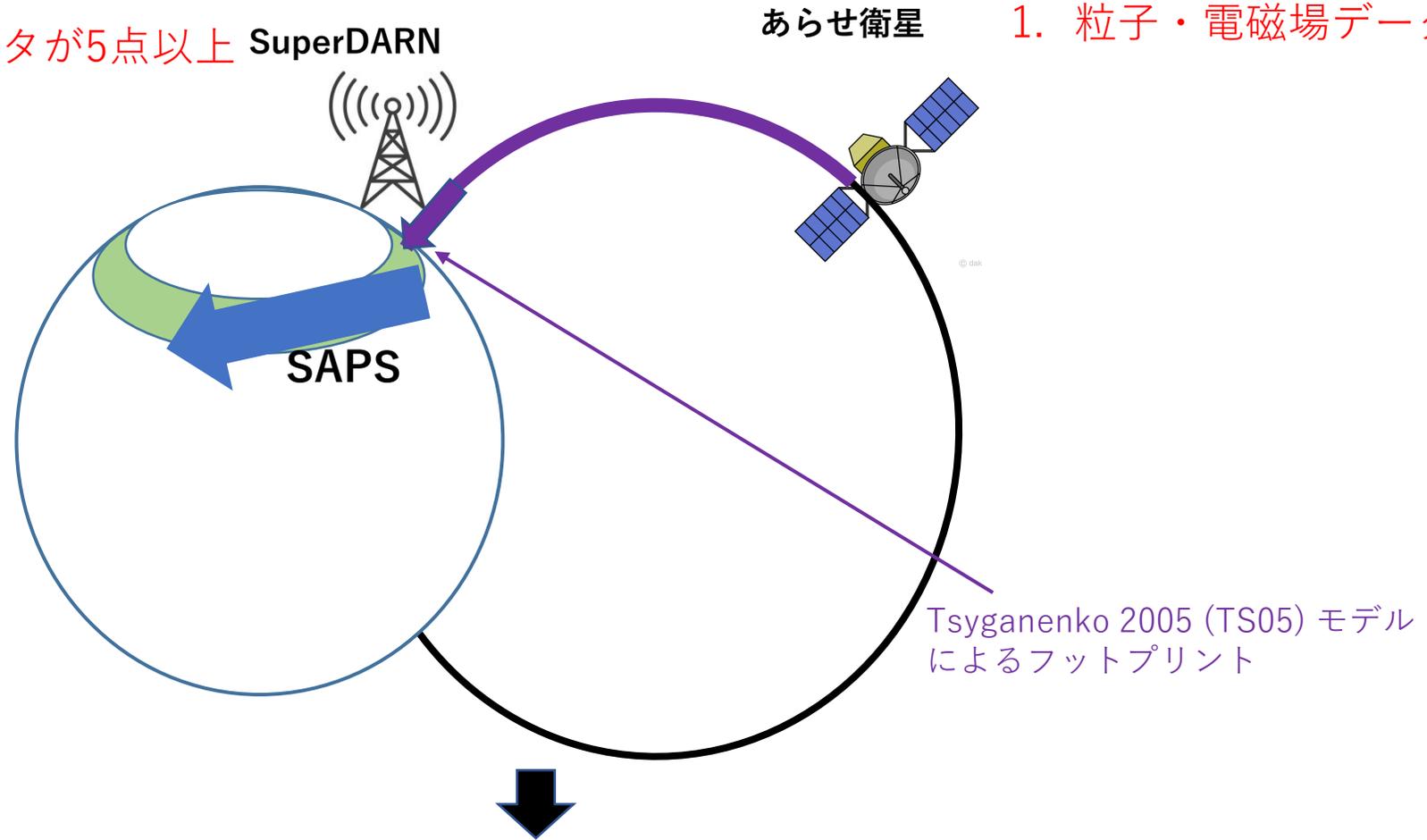
https://www.jaxa.jp/projects/sas/erg/index_j.html

解析手法と結果

1. SAPSの同時観測イベント解析 (SuperDARN&あらせ衛星)
2. イオンアウトフローの統計解析 (SuperDARN&あらせ衛星)

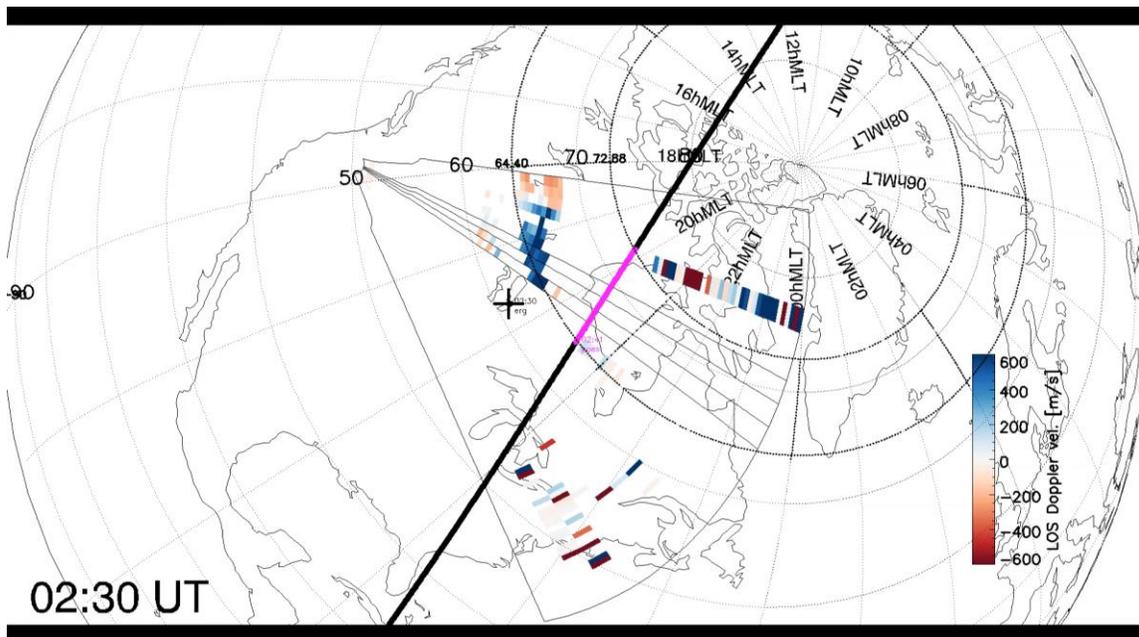
解析手法 SAPS同時観測イベントの同定

- 2. $|v_{losv}| \geq 200\text{m/s}$ のデータが5点以上 SuperDARN
- 3. フローの方向が西向き

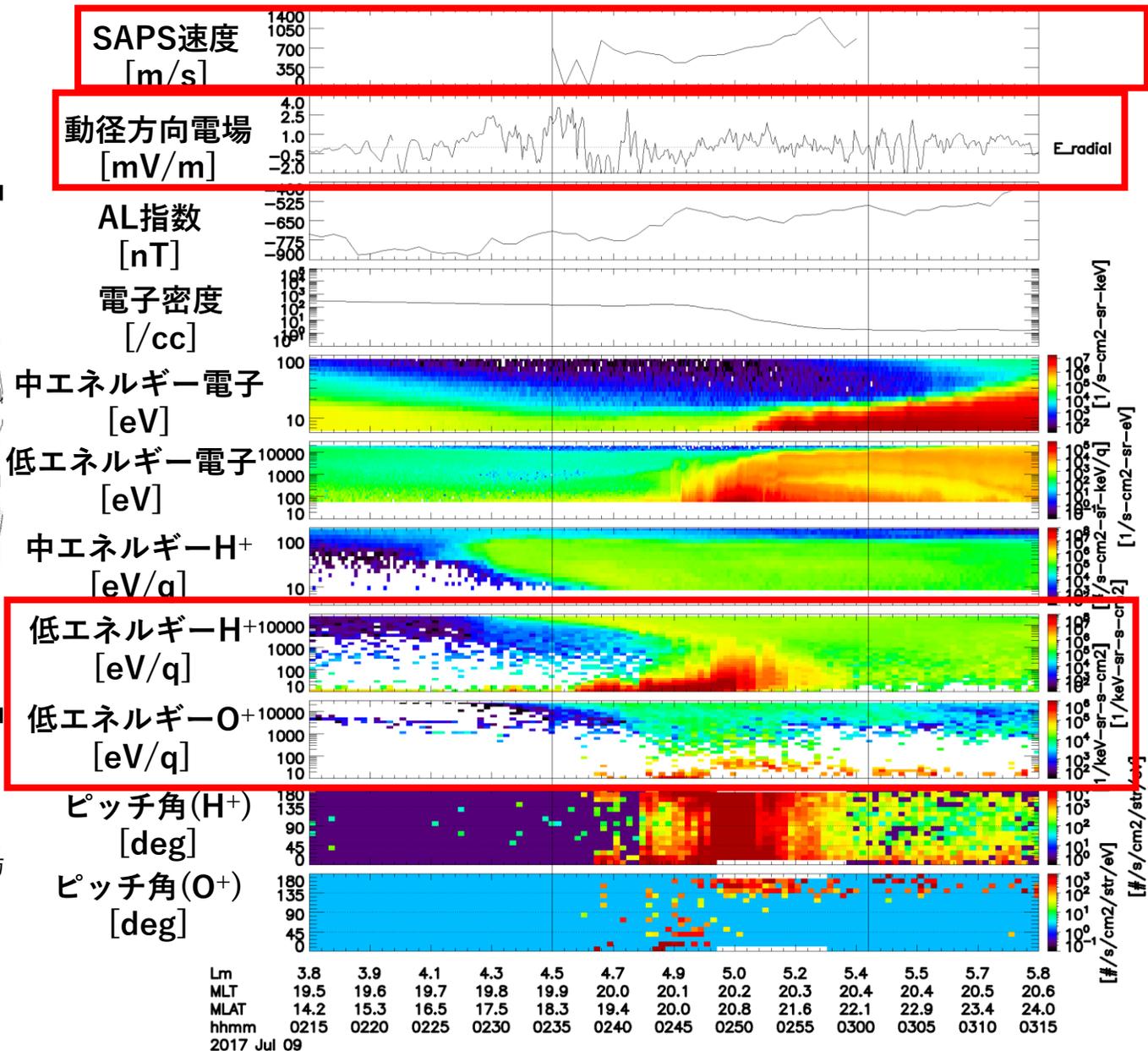


2017年6月1日~2017年12月31日に**25例**

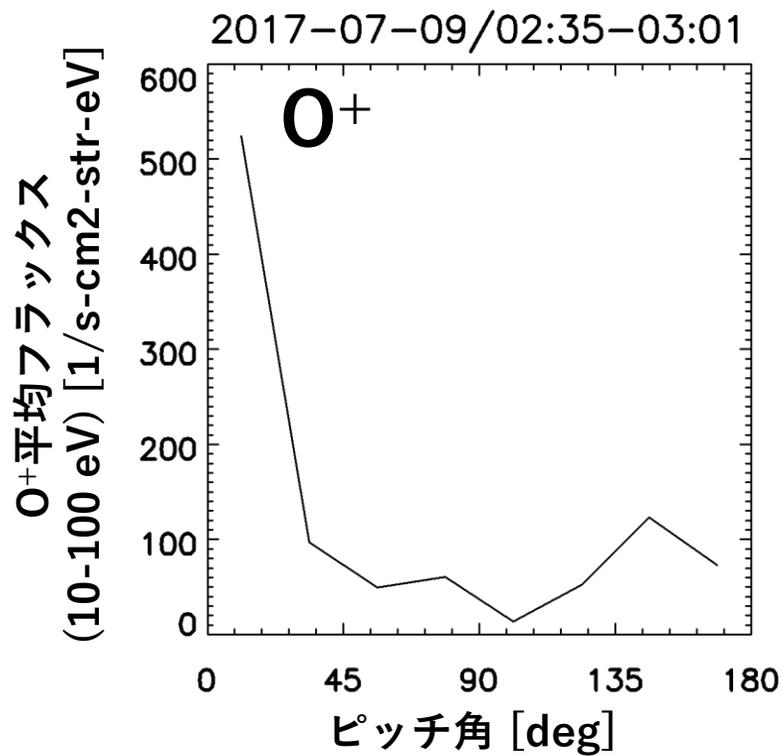
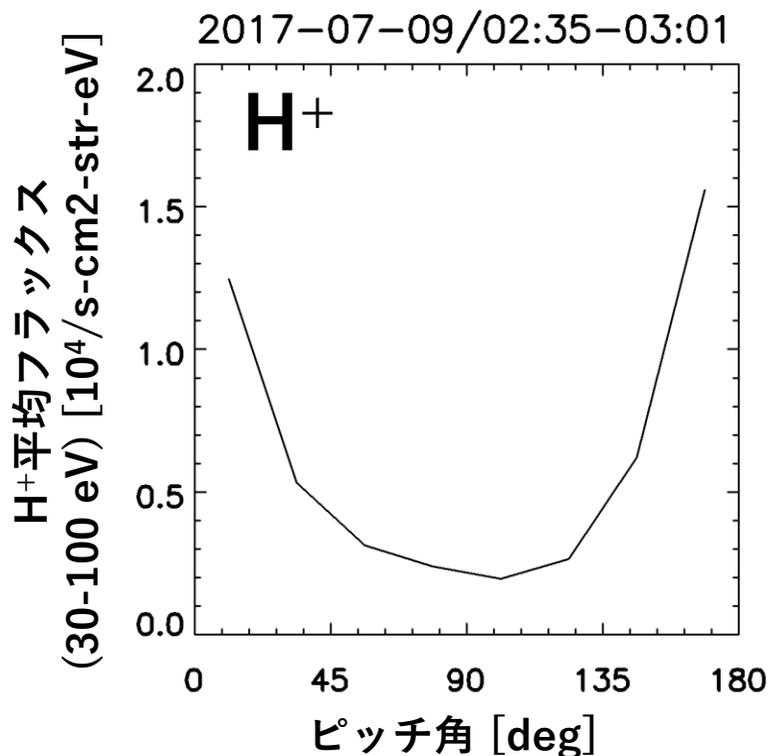
結果 あらせ衛星による電場、粒子観測



- SuperDARNで最大1400 m/sのSAPSを観測
- あらせ衛星で部分的に0-3 mV/m の動径方向外向き電場を観測
- 10-100 eV 程度の低エネルギーH⁺とO⁺のフラックスがプラズマポーズ 付近で増加



低エネルギーH⁺とO⁺のpitch角分布



- ピッチ角0°と180°方向にピーク
- 局所的にフラックスが増加



磁力線に沿って電離圏から流出してきたことを示唆
(イオンアウトフロー)



SAPSによって発生確率やフラックス量に変化は??

解析手法と結果

1. SAPSの同時観測イベント解析 (SuperDARN&あらせ衛星)
2. イオンアウトフローの統計解析 (SuperDARN&あらせ衛星)

解析手法 イオンアウトフローの統計解析 (SuperDARN&あらせ衛星) 同時観測イベントの同定

2017年6月1日~2017年12月31日

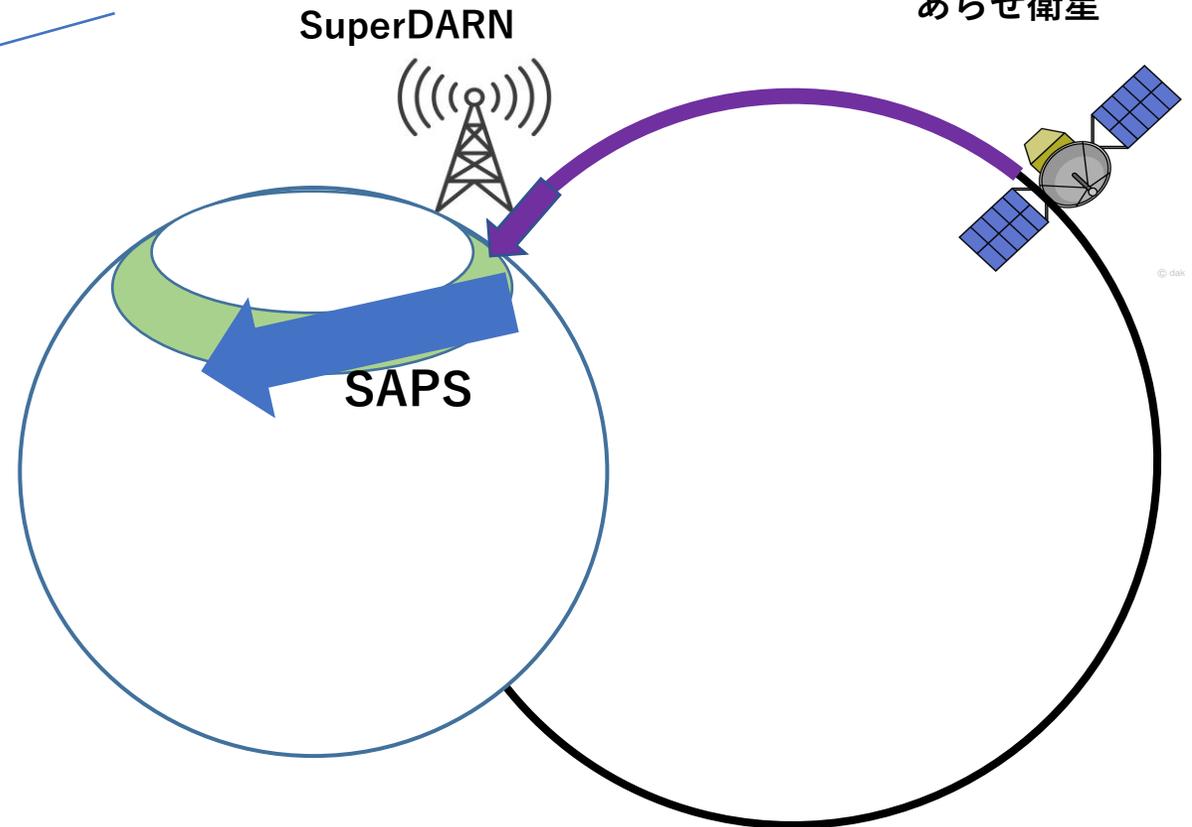
631イベント

438イベント
(# of SAPS=25)



438イベントに対して、 H^+ の平均的な
ピッチ角分布を求める。

2. v_{losv} データを取得



1. プラズマポーズを通過

電子密度が $\Delta L < 0.5$ 以内で5倍以上減少
[Carpenter and Anderson, 1992]

あらせ衛星

イベントの分類

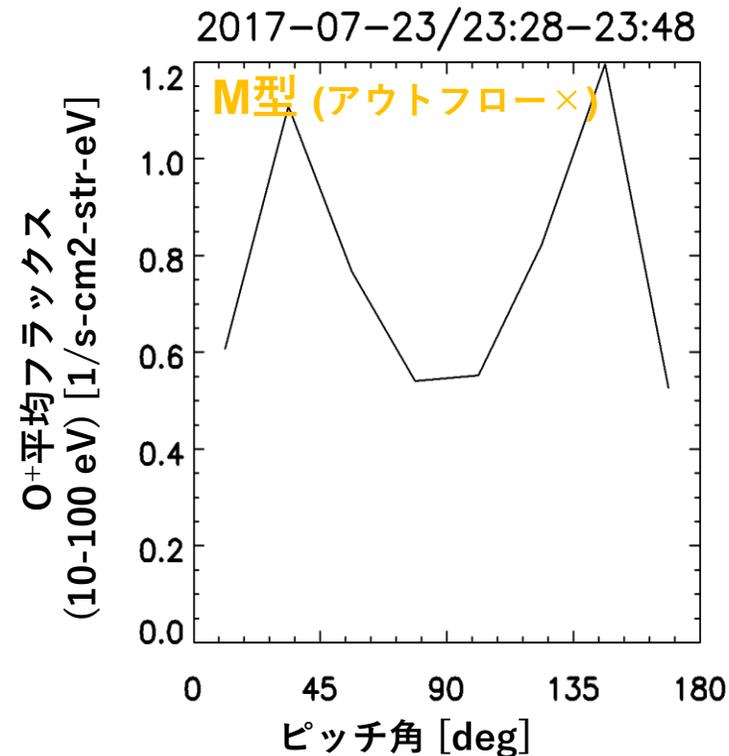
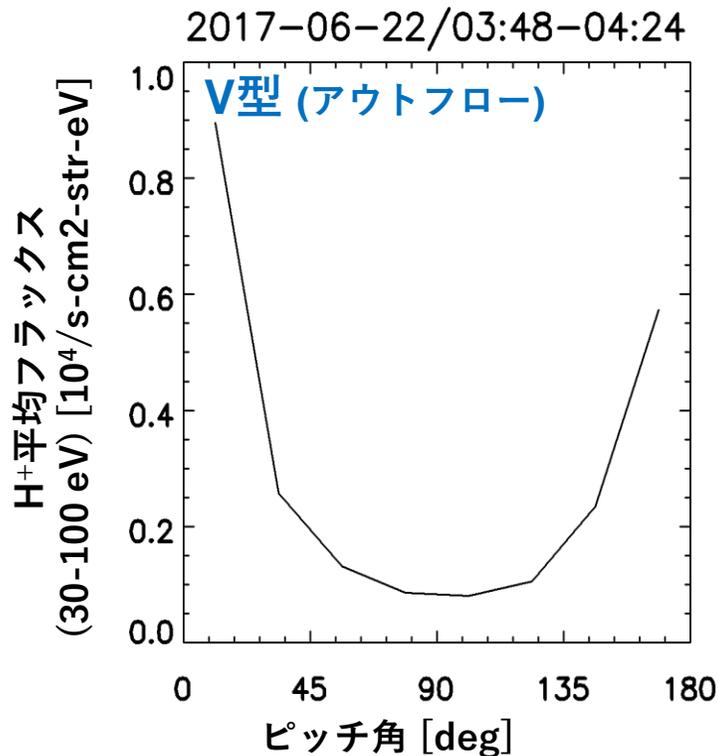
イベントの分類 (438 イベント)

① V型のピッチ角分布 (124例)

→イオンアウトフロー

② M型のピッチ角分布 (30例)

③ その他 (284例)



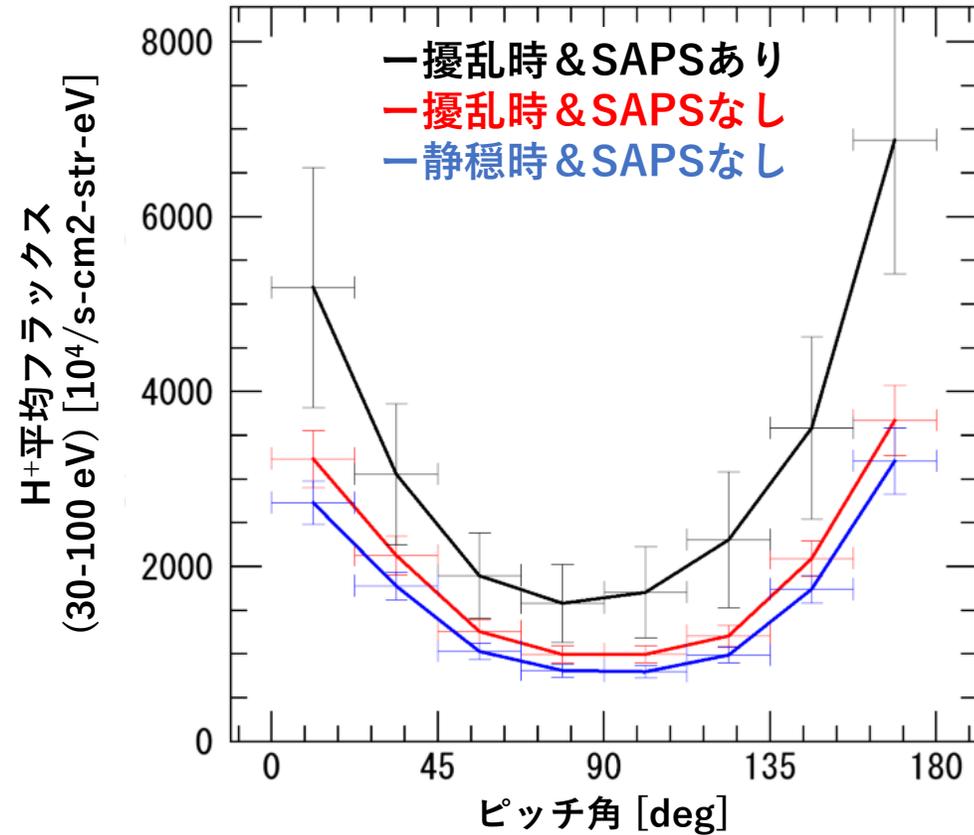
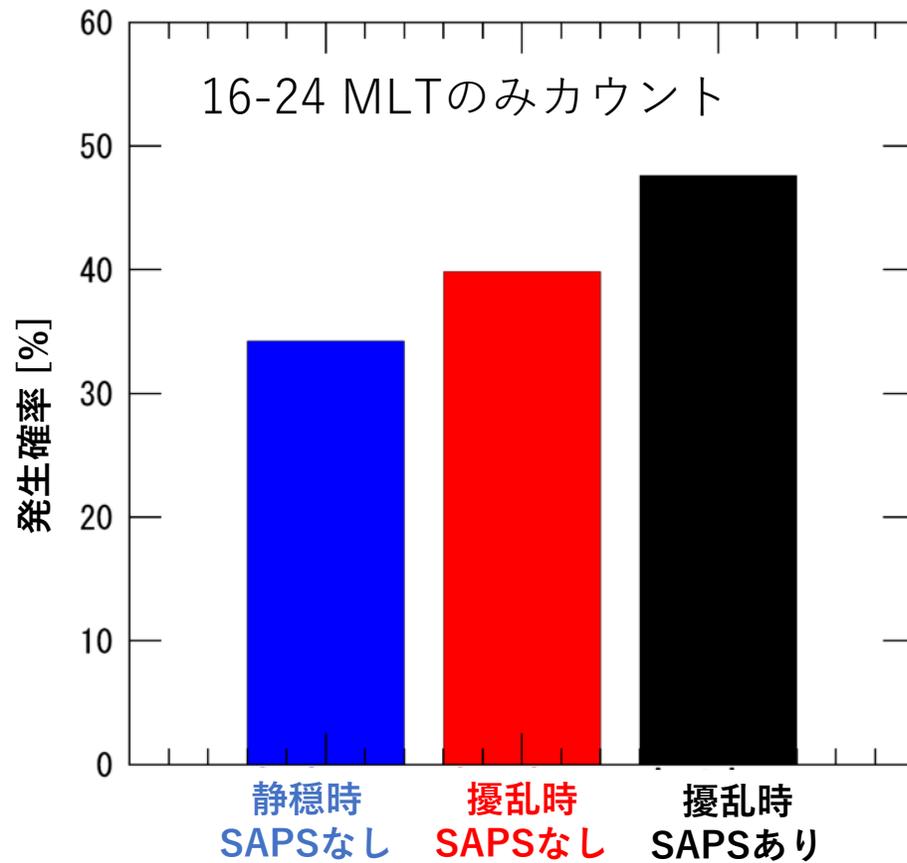
夕方側~夜側 (16-24 MLT)で①V型の発生確率が静穏時に比べて擾乱時で増加



(AL=-200~0 nT) (AL< -200 nT)

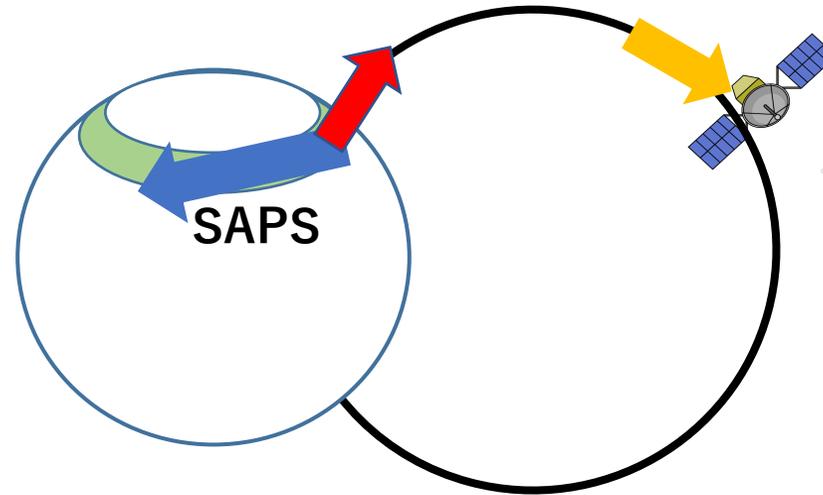
16-24 MLTに絞り、SAPSによる発生確率とフラックス量の変化を比較

結果 V型のピッチ角分布を持つH⁺の発生確率、フラックス量



- SAPSが発生していなくても、35-40%程度の発生確率がある。
- しかし、SAPS発生時には、発生確率が約8%増加する。
- SAPS発生時には、フラックスが約1.5倍 (0°、180°方向では約2倍) 増加する。

考察① イベント解析で観測された低エネルギーH⁺とO⁺



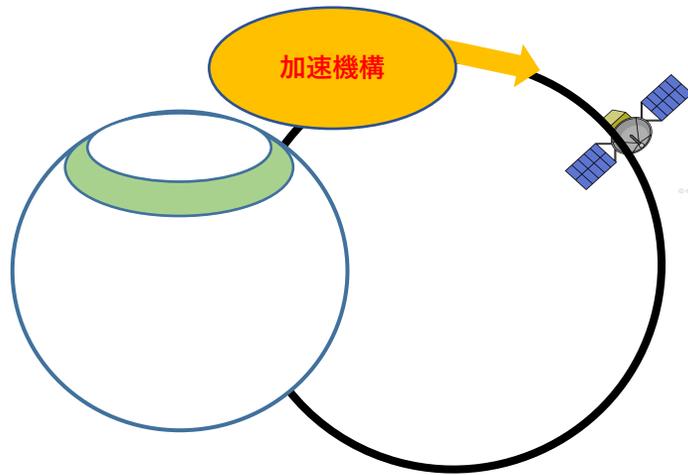
- 観測されたイオンのエネルギーが10-100 eVと低い。
- SAPSに対応する位置で局所的に発生している。
- ピッチ角分布が0°と180° (O⁺は0°)方向にピーク (V型)を持っている。



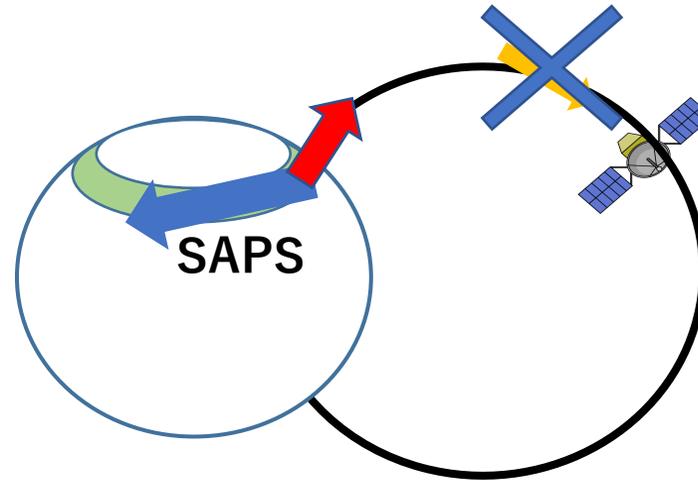
- SAPSによるイオンアップフローがイオンアウトフローとなり磁気圏で観測された。

考察②

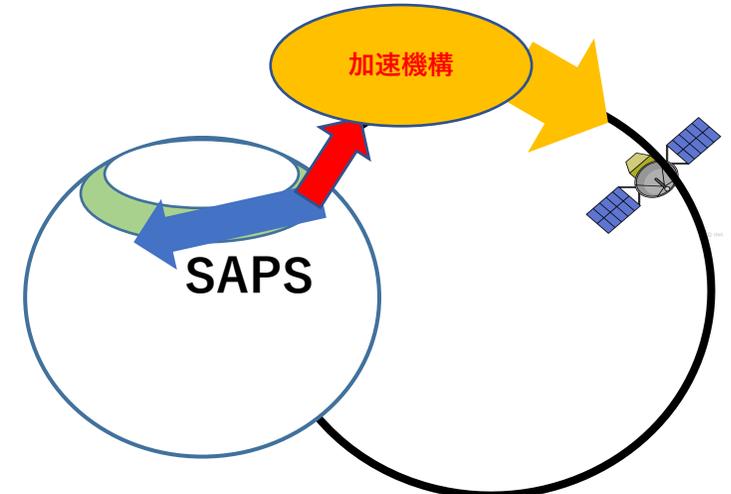
SAPSが発生していなくともイオンアウトフローが発生する原因



SAPS (アップフロー) ×
アウトフロー ○



SAPS (アップフロー) ○
アウトフロー ×



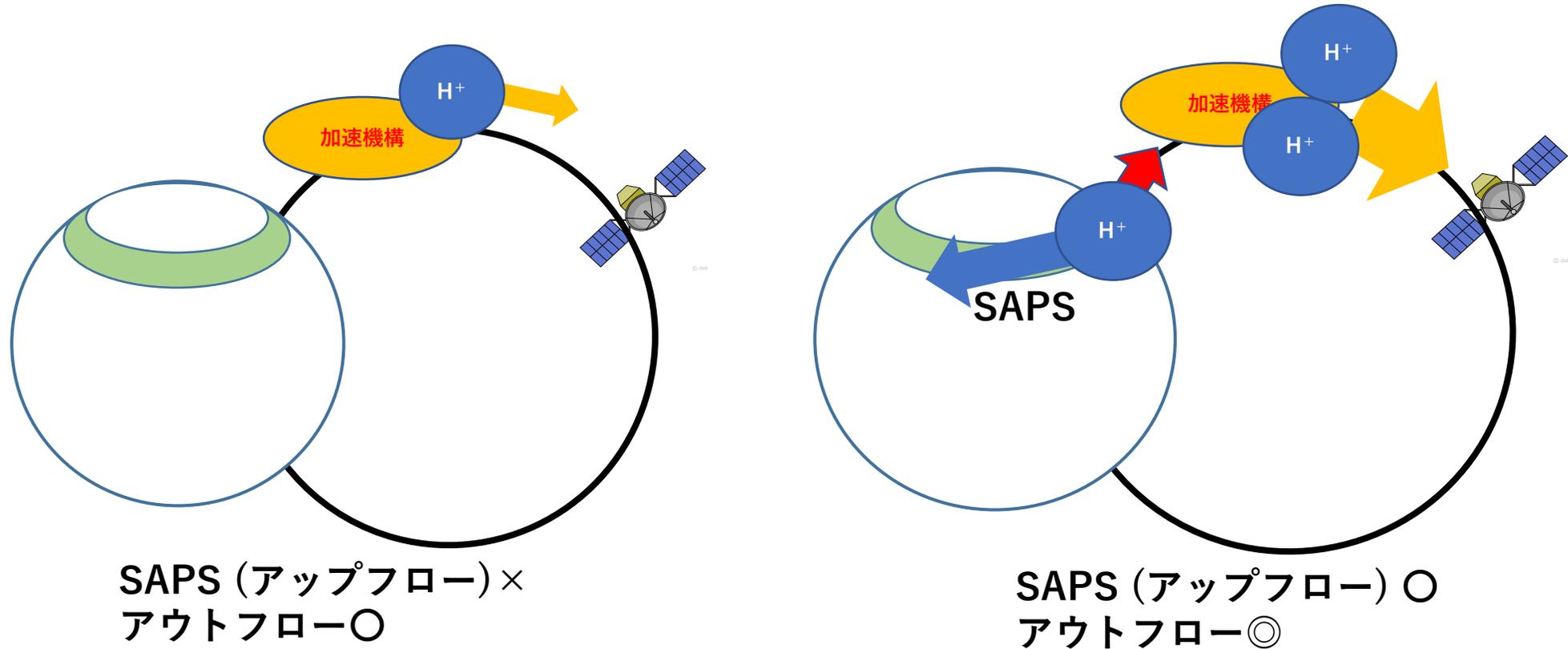
SAPS (アップフロー) ○
アウトフロー ◎

- アップフロー (0-数1000 m/s)がアウトフロー (≥ 11 km/s)になるにはさらなる加速が必要
- 高度が上昇するにつれて上向きに速度が増加 [Yeh & Foster, 1990]
- 様々な加速メカニズムが組み合わさりイオンアウトフローが発生 [Andre & Yau, 1997]



- SAPSによるアップフローが発生する高度 400-600 km よりも高高度で、さらなる加速機構が存在する可能性を示唆。

考察③ SAPSによるイオンアップフローの役割



- SAPS発生時にイオンアウトフローのフラックス量が約1.5倍 (0°、180°方向では約2倍) 増加している。
- イオンアップフローが低高度H⁺をメインの加速領域に供給する役割を担っていると考えられる。

まとめ

- 本研究では、SuperDARNレーダーとあらせ衛星を用いて、SAPSとイオンアウトフローの発生確率、フラックス量との関係について調べた。
- **低エネルギーH⁺**がSAPSに対応する領域で**局所的**、かつ**ピッチ角分布が0°と180°にピーク**を持って観測された。
- SAPS発生時には、16-24 MLTでイオンアウトフローの**発生確率が約8%増加**する。
- **また、フラックス量については、約1.5倍 (0°、180°方向では約2倍) 増加**する。

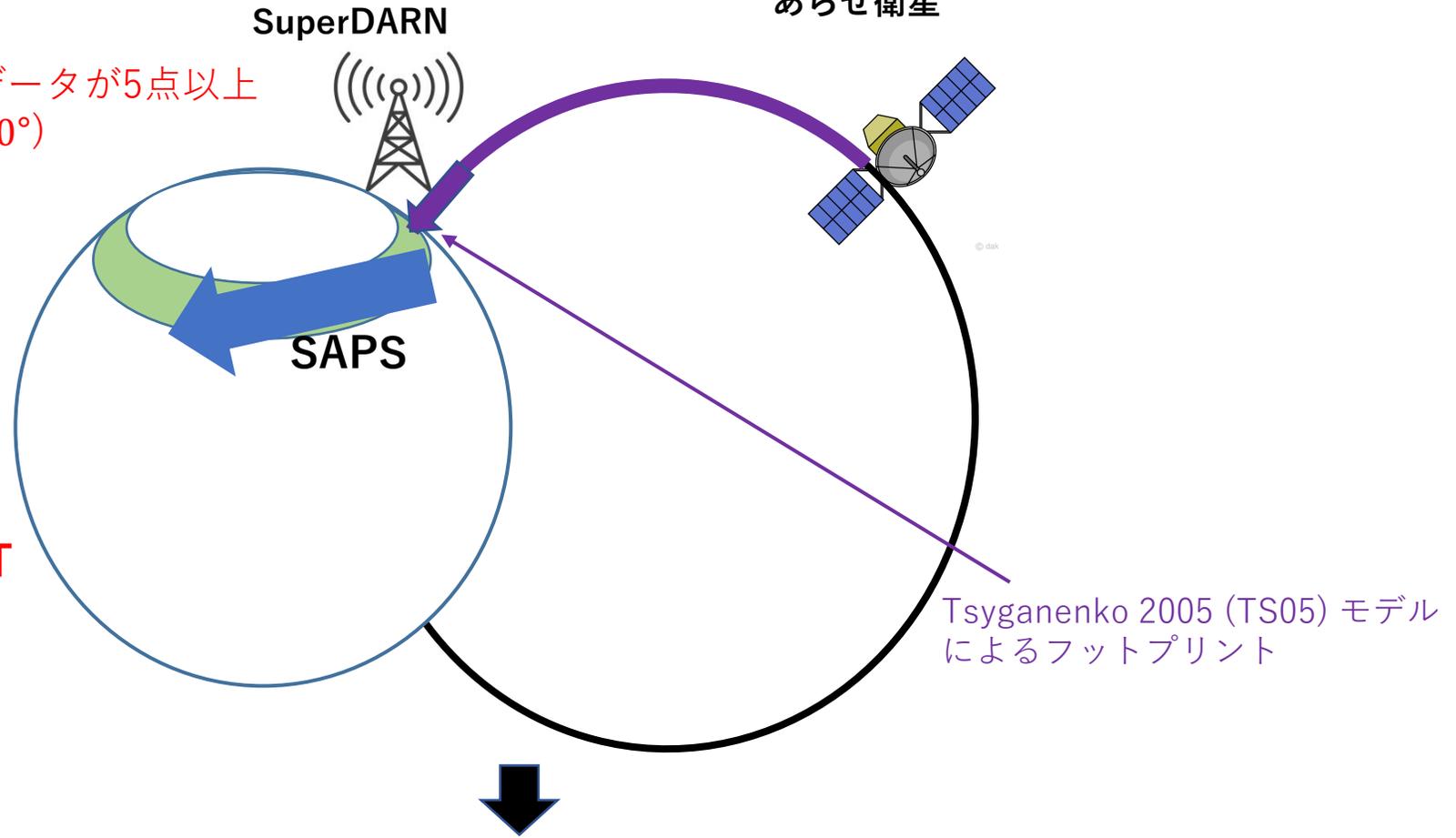
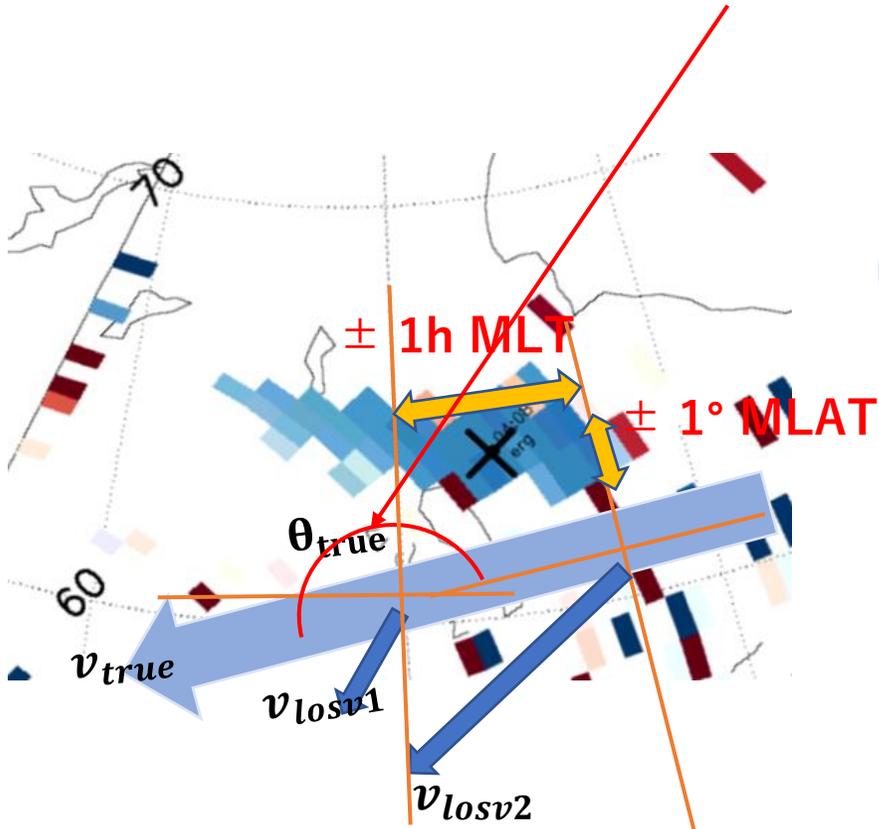
これらの結果より、

1. SAPSによるイオンアップフローがイオンアウトフローになるには、**より高高度でさらなる加速機構が必要である**。
2. SAPSによるイオンアップフローは、**低高度のイオンを高高度に供給する**という点でイオンアウトフローに重要な役割を果たしている可能性がある。

予備

解析手法 SAPS同時観測イベントの同定

- 2. フットプリント付近に $v_{losv} \geq 200\text{m/s}$ のデータが5点以上
- 3. フローの角度が西向き ($120^\circ < \theta_{true} < 240^\circ$)



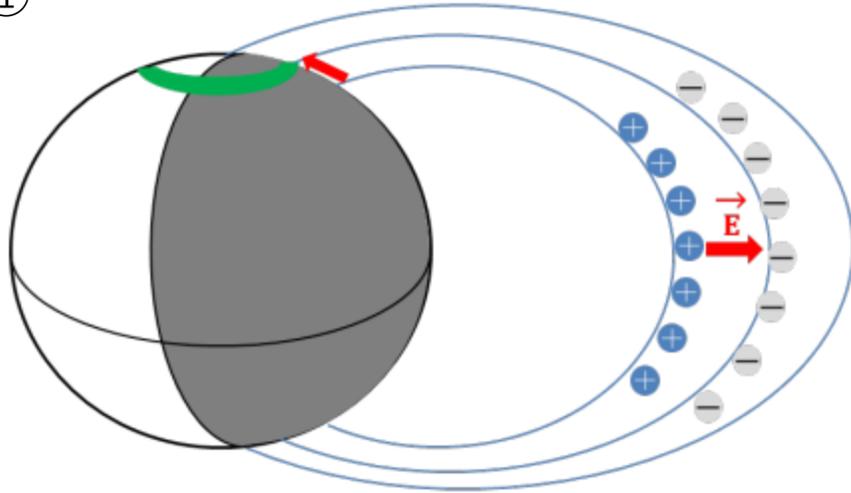
1. 粒子・電磁場データを取得
あらせ衛星

Tsyganenko 2005 (TS05) モデル
によるフットプリント

2017年6月1日~2017年12月31日に25例

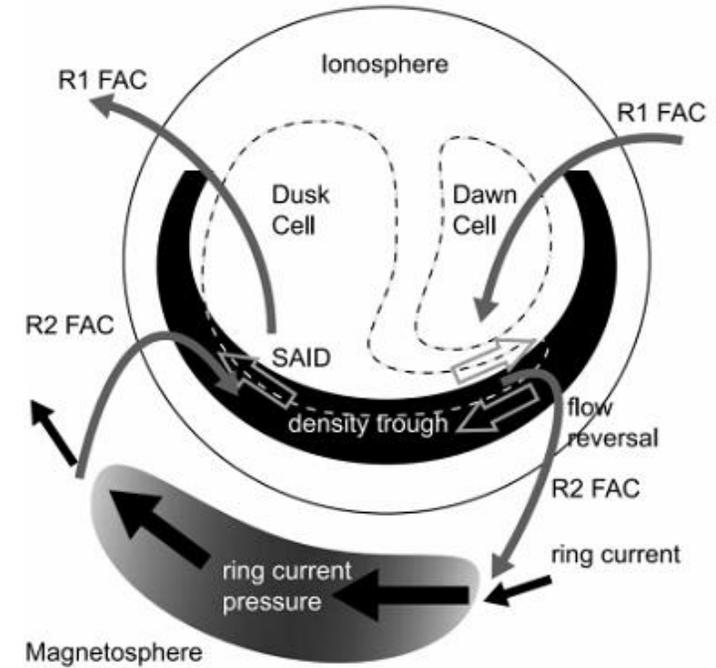
SAPSのメカニズム

①



- イオンと電子のずれにより反太陽方向に電場が発生
- ↓
- 電離圏では極向きの電場となり、鉛直下向きの磁場とのE×Bドリフト

②



極向きの電場によるE×Bドリフトにより、SAPSが発生



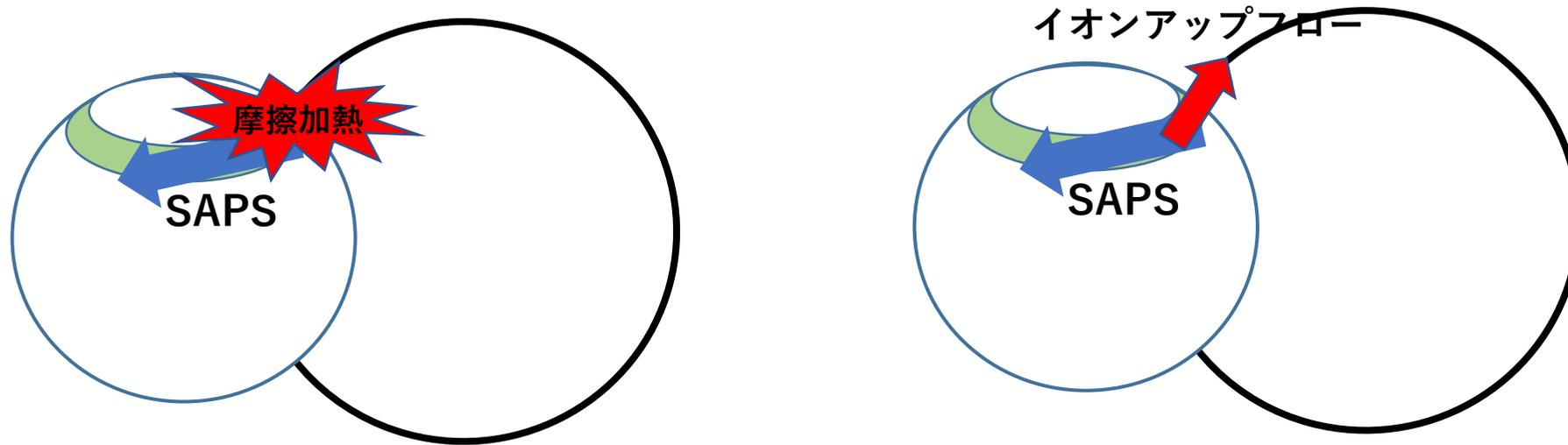
プラズマと中性大気の衝突により、再結合率が上がり、電気伝導度が減少



電流を閉じるために、強い極向きの電場が発生

フィードバック

SAPSに伴って発生する電離圏イオンのアップフロー（上昇流）



SAPSのプラズマ高速流と中性大気との衝突により摩擦加熱が発生。



鉛直方向上向きにイオン (H^+ や O^+) が上昇 (イオンアップフロー)。

Beam swinging technique

各ビームの視線方向速度 (V_{los}) と角度 (θ_{los}) から真のフローの速度 (V_{true}) と向き (θ_{true}) を推定する手法

以下を仮定すると、

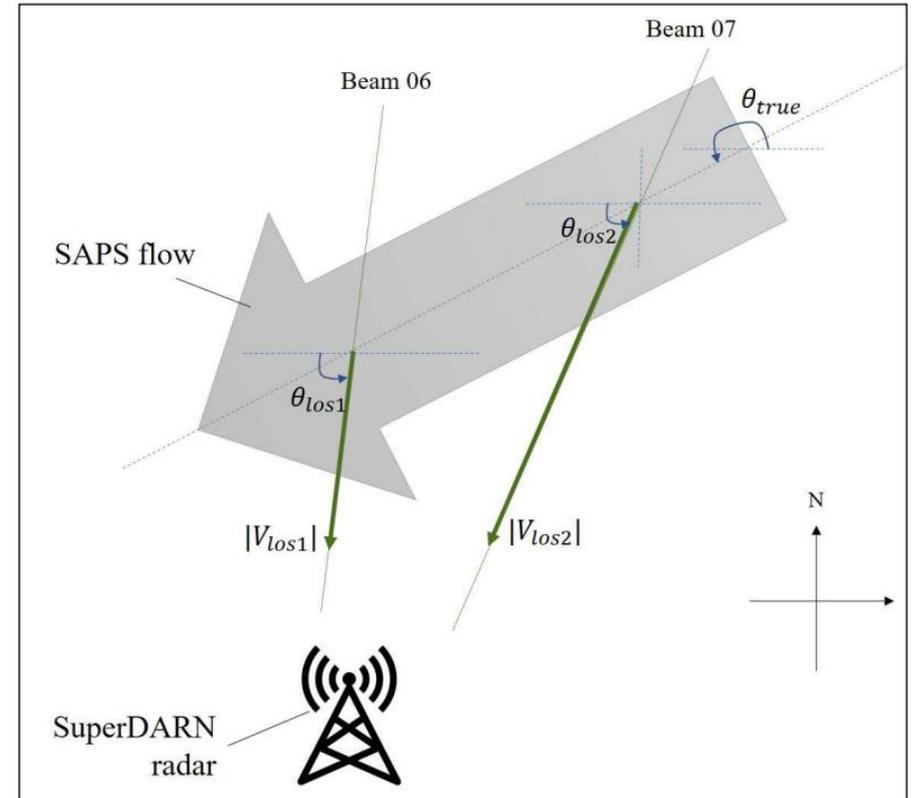
- (1) 対象となる緯度・経度範囲でフロー速度が一様であり、各ビームはフローの向きとなす角に応じてその速度成分を観測する。
- (2) 全ビームをスキャンする時間スケール(約1分)でフローが一定である。

$$V_{los} = V_{true} \cos(\theta_{true} - \theta_{los})$$

2点以上のデータ (V_{los}, θ_{los}) があれば、

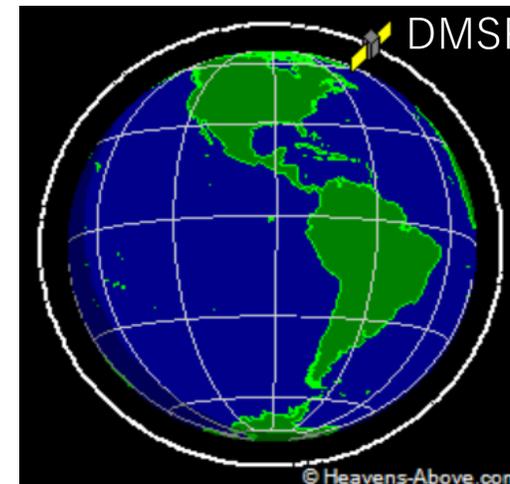
- $V_{los1} = V_{true} \cos(\theta_{true} - \theta_{los1})$
- $V_{los2} = V_{true} \cos(\theta_{true} - \theta_{los2})$
- \vdots

最小二乗法フィッティングにより、(V_{true}, θ_{true}) が求められる。

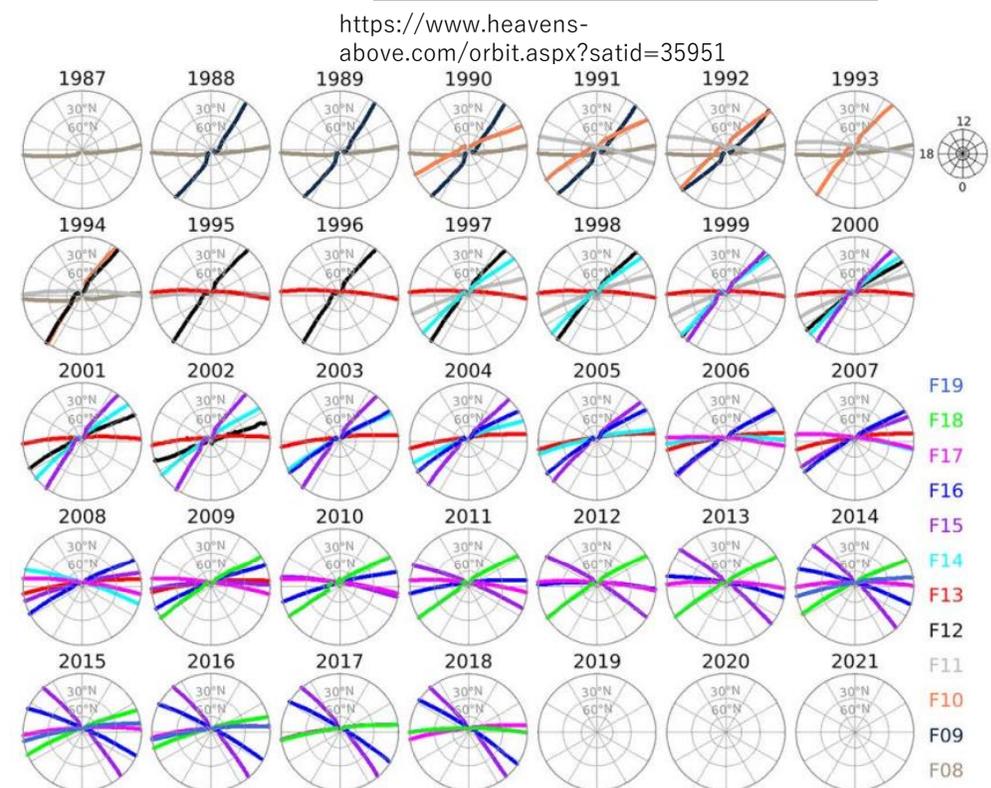


DMSP衛星

軌道高度	約833 km
軌道周期	約101 分
使用した機器	SSIES3: ドリフト速度等 SSJ5: 降り込みフラックス



- 2017年には、F15-F18が飛行していた。
- あらせ衛星のデータが使用可能な2017年以降は、夕方~夜側を飛行していない。

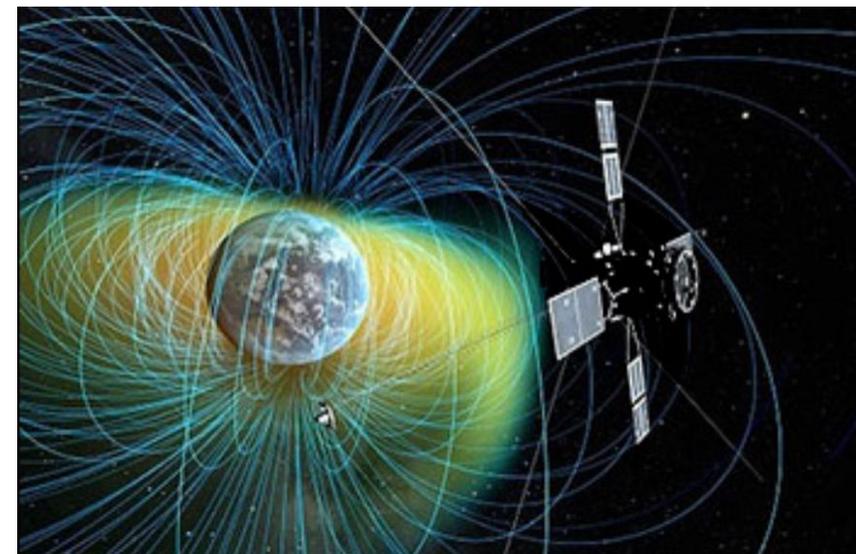


Cai et al., 2019

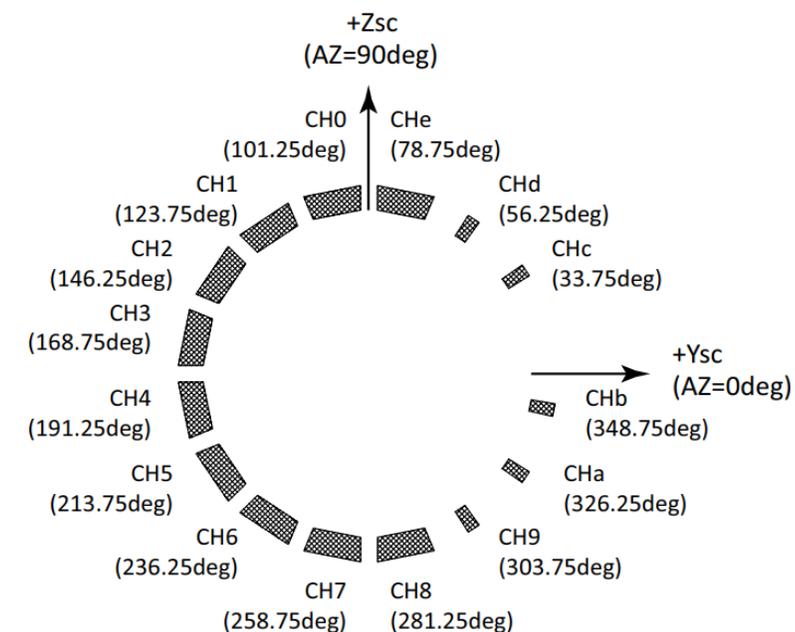
あらせ衛星

軌道高度	近地点: 約440 km 遠地点: 約32000 km
軌道周期	約570 分
使用した機器	LEP-e: Low-energy particle experiments - electron analyzer (19 eV-20 keV) LEP-i: Low-energy particle experiments - ion mass analyzer (10 eV/q-25 keV/q) MEP-e: Medium-energy particle experiments - electron analyzer (7-87 keV) MEP-i: Medium-energy particle experiments - ion mass analyzer (10-180 keV/q) MGF: Magnetic field experiment (8-s 磁場) PWE: Plasma Wave Experiment (電場、電子密度)

- 本研究では、主に低エネルギーイオン分布を調べるためにLEP-iを用いた。
- LEP-i (CH0-8) では、角度分解能16°程度でピッチ角分布を求めることができる。



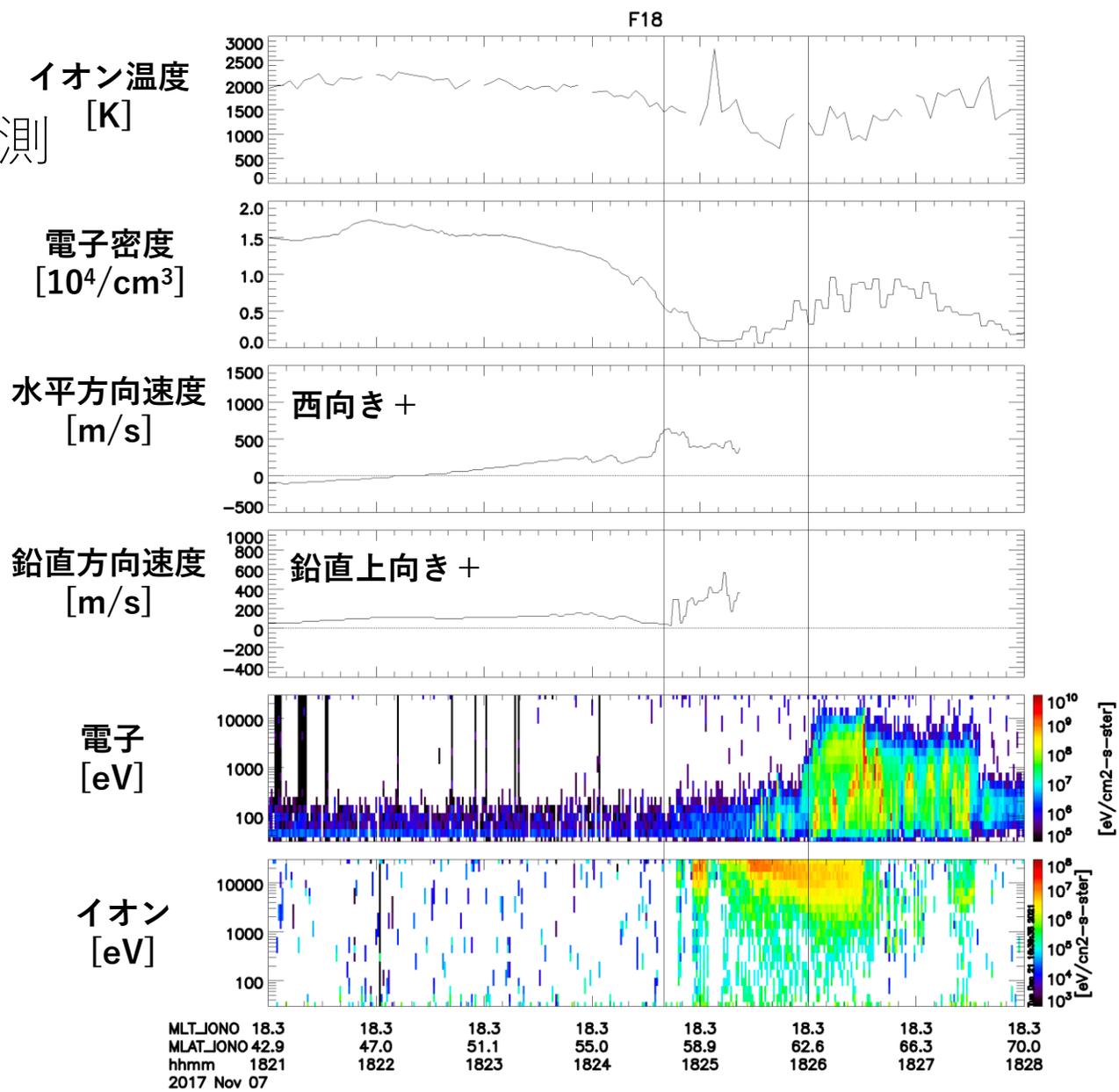
https://www.jaxa.jp/projects/sas/erg/index_j.html



Asamura et al., 2018

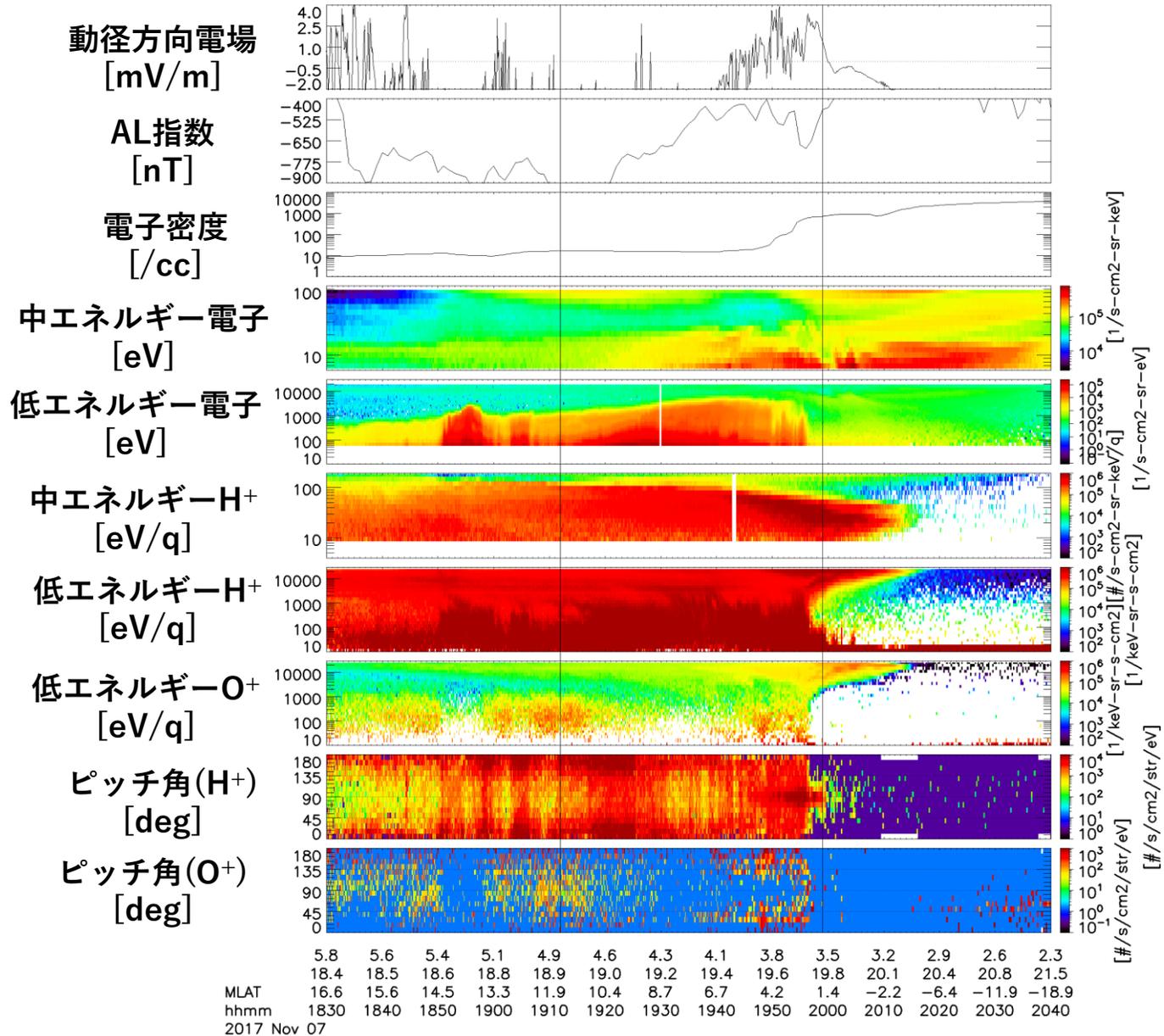
SAPS同時観測 (DMSP & あらせ) DMSP衛星によるイオンアップフローの観測

- 水平方向速度が増加
→ SAPS
- イオン温度が増加
→ 摩擦加熱
- 鉛直方向速度が増加
→ イオンアップフロー

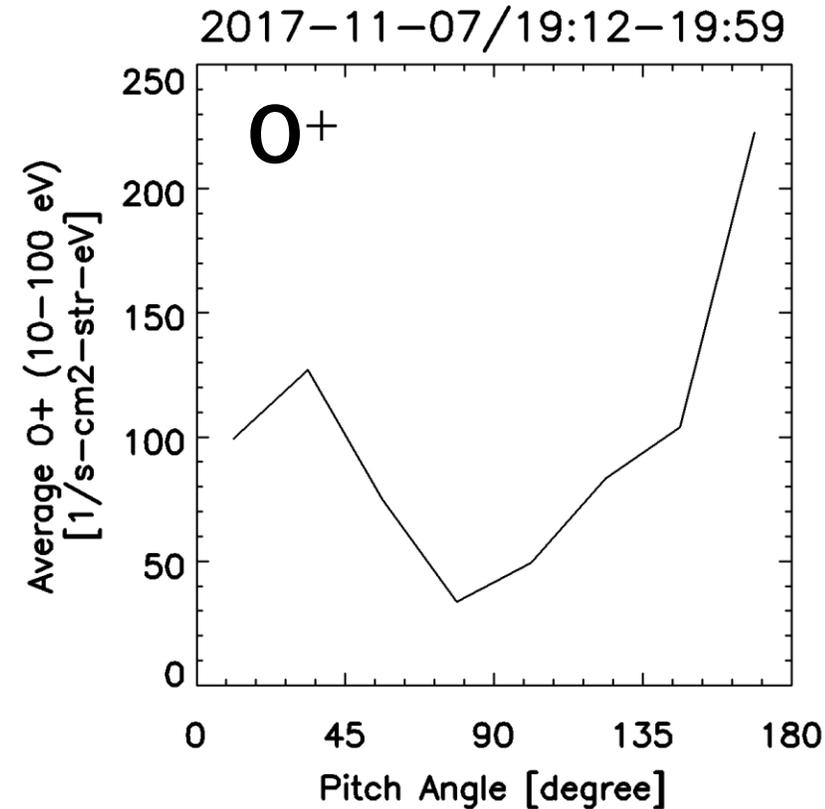
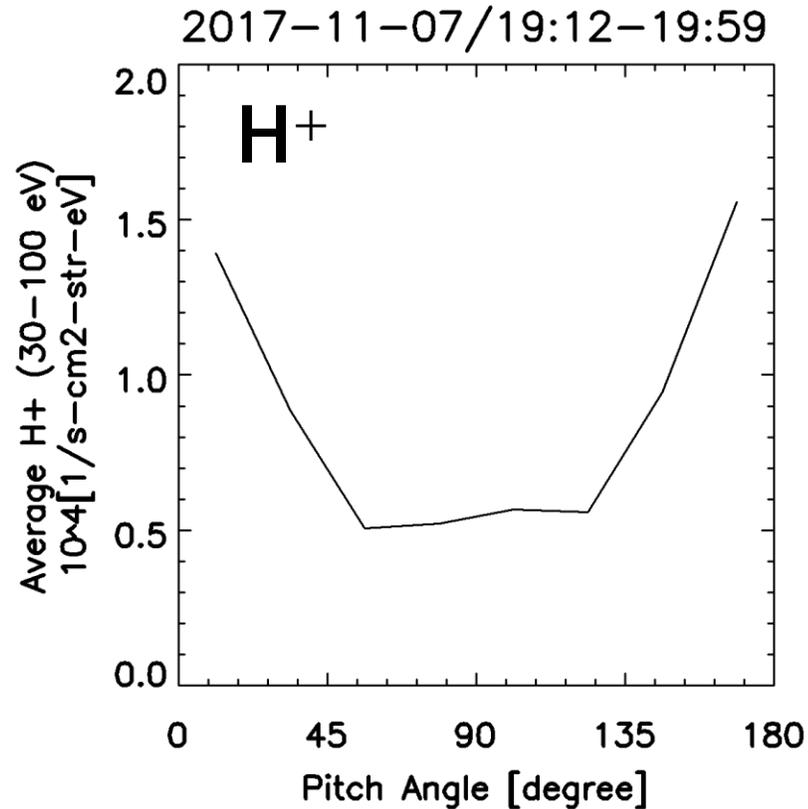


SAPS同時観測 (DMSP & あらせ) あらせ衛星による電場、粒子観測

- 0-4 mV/m の動径方向外向き電場を観測。
- 1-100 eV 程度の低エネルギーH⁺とO⁺のフラックスがプラズマポーズ付近で増加。



あらせ衛星で観測された低エネルギーH⁺とO⁺のピッチ角分布



- H⁺はピッチ角0°と180°方向にピークを持っている。
- O⁺はピッチ角180°方向にピークを持っている。

解析手法 イオンアウトフローの統計解析 (SuperDARN&あらせ衛星) 同時観測イベントの同定

2. ± 1 MLAT、 ± 1 h MLT以内で
プラズマ流速データを取得

1. プラズマポーズを通過

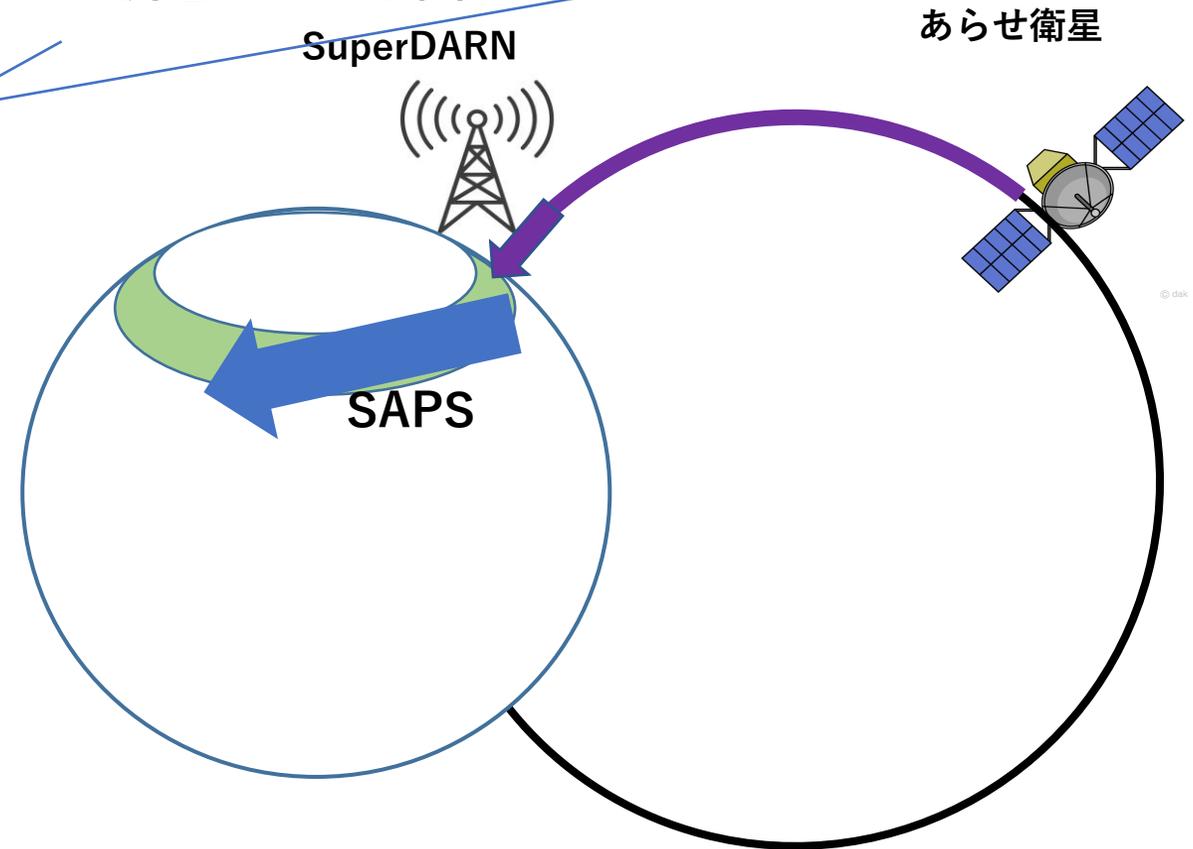
2017年6月1日~2017年12月31日

631イベント

438イベント
(# of SAPS=25)

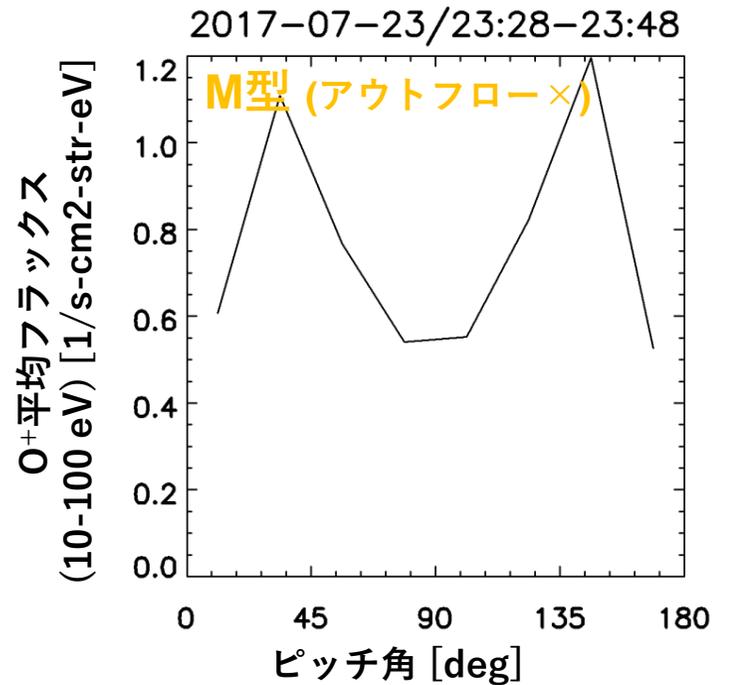
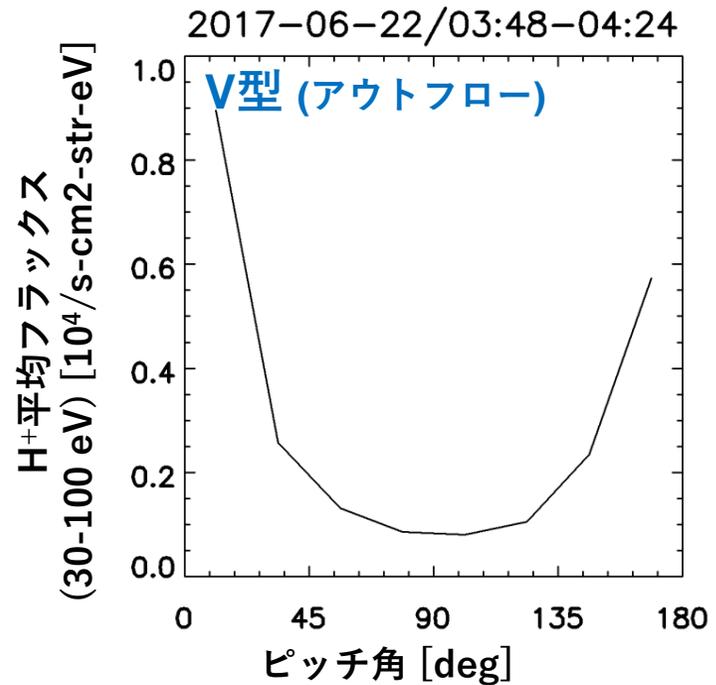


プラズマポーズの位置 $\pm 0.5 R_E$ の30-100 eVの
H+の平均 ピッチ角分布を求める。



プラズマポーズ：電子密度が $\Delta L < 0.5$ 以内で5倍以上減少 [Carpenter and Anderson, 1992]

イベントの分類



①V型のピッチ角分布をもつイオンが観測されたイベント (124例)

1. jH^+ (ピッチ角=0-22.5°) + jH^+ (ピッチ角=157.5-180°) > 2 × $j90^\circ H^+$
2. jH^+ (ピッチ角=0-22.5°) > jH^+ (ピッチ角=22.5-45°)
3. jH^+ (ピッチ角=157.5-180°) > jH^+ (ピッチ角=135-157.5°)

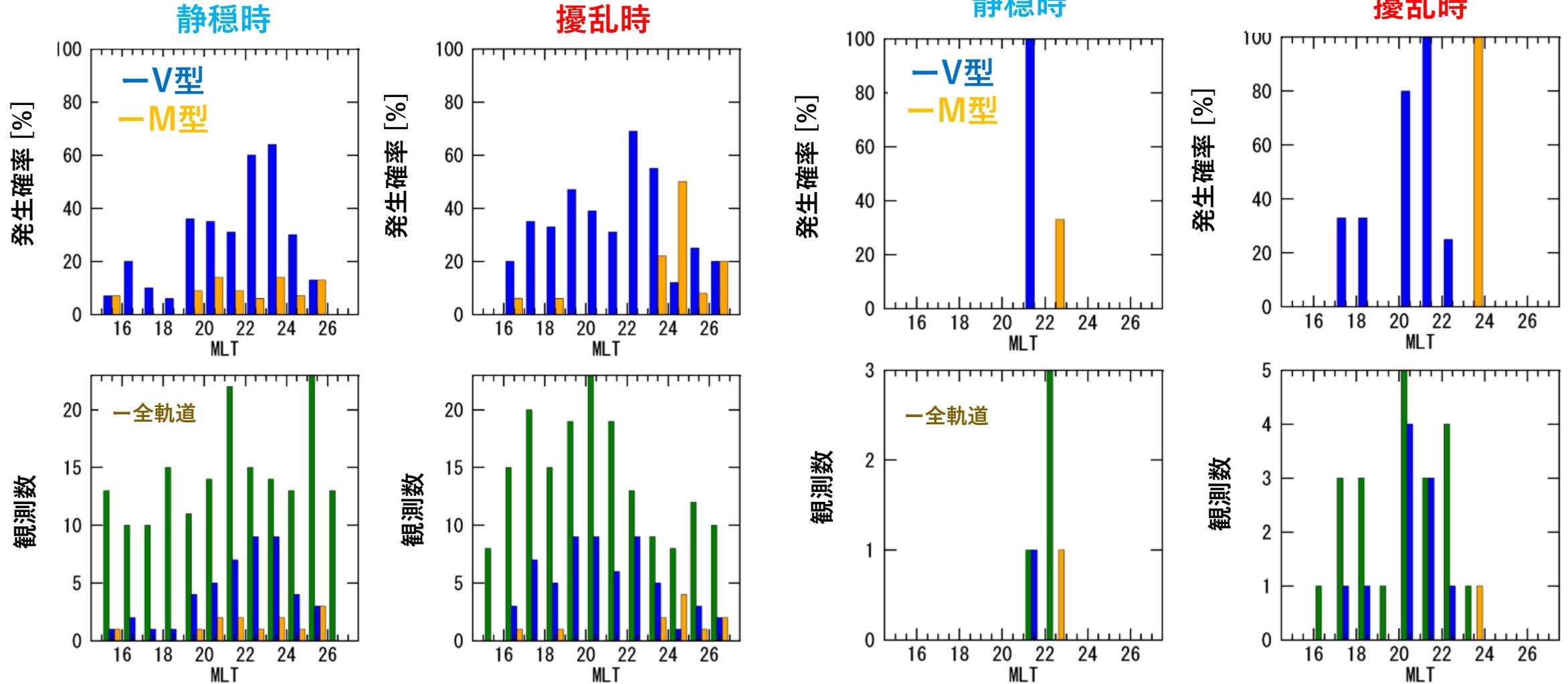
②M形のピッチ角分布を持つイオンが観測されたイベント (30例)

1. jH^+ (ピッチ角=22.5-45°) + jH^+ (ピッチ角=135-157.5°) > 2 × $j90^\circ H^+$
2. jH^+ (ピッチ角=0-22.5°) < jH^+ (ピッチ角=22.5-45°)
3. jH^+ (ピッチ角=157.5-180°) < jH^+ (ピッチ角=135-157.5°)

イオンアウトフローの統計解析

SAPSなし

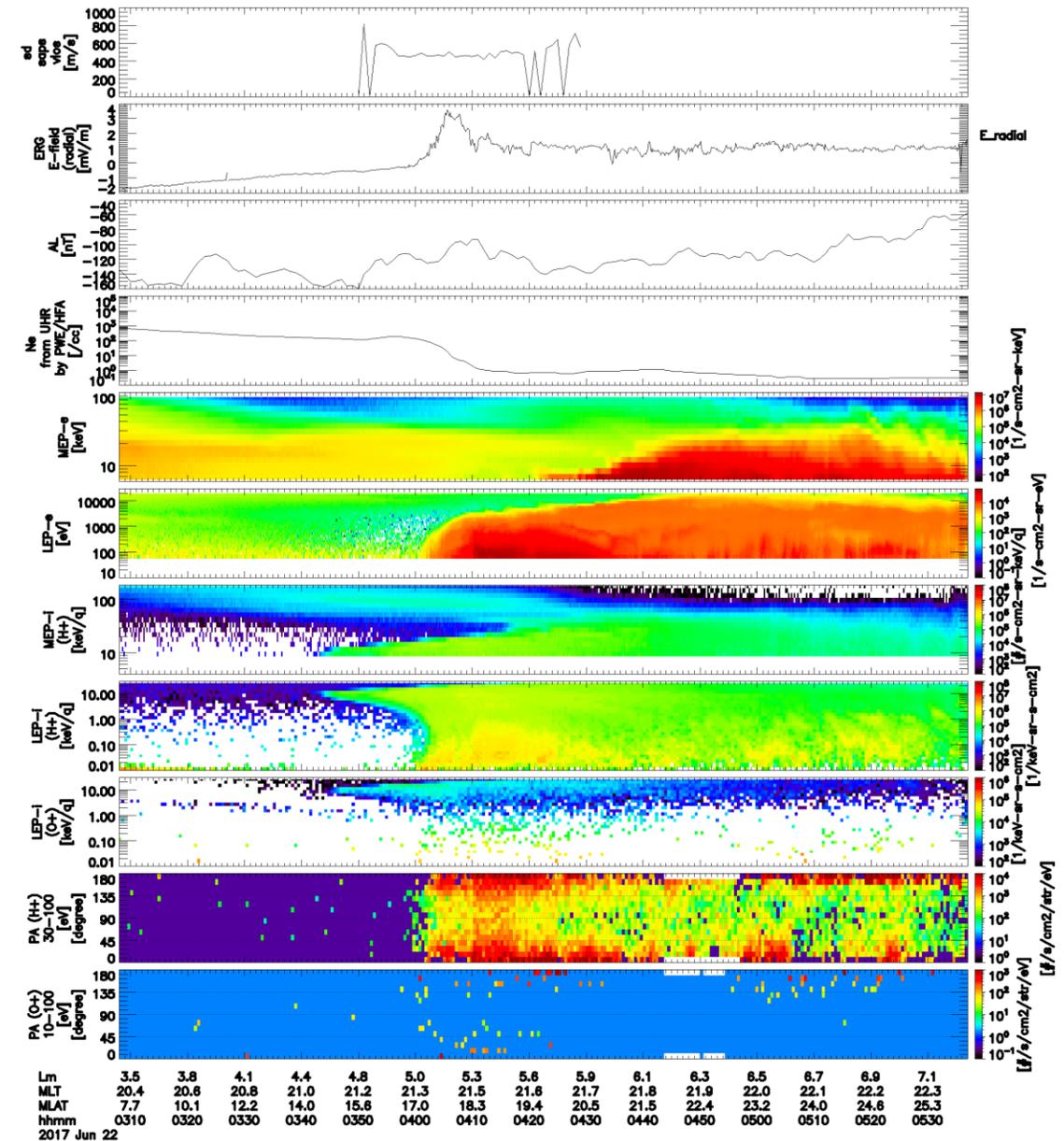
SAPSあり



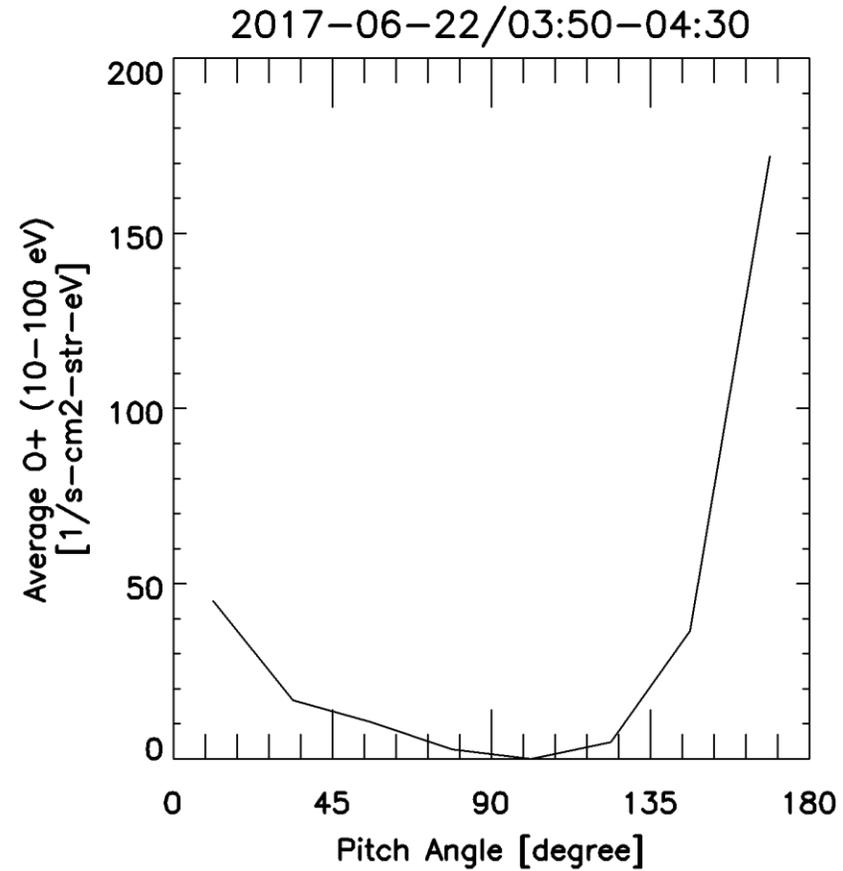
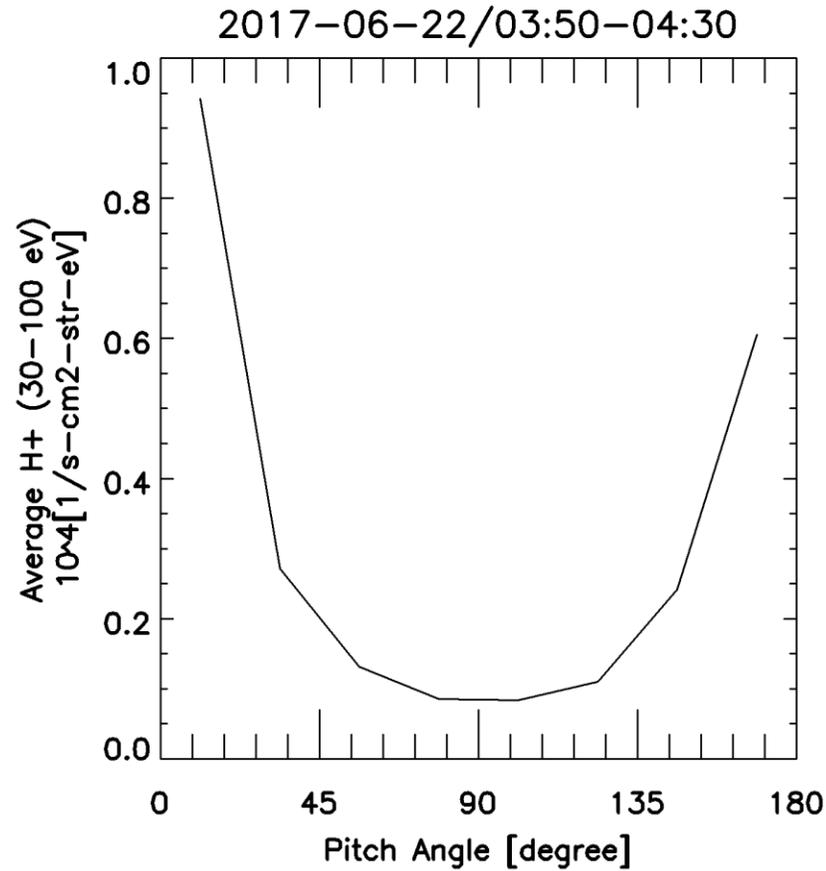
- 夕方側~夜側 (16-24 MLT)でV型の発生確率が静穏時に比べて擾乱時で増加

その他の結果 2017-06-22

- SuperDARNで最大800 m/sのSAPSを観測
- あらせ衛星で3 mV/m 程度の動径方向外向き電場を観測
- →電離圏に投影するとSAPSを駆動する極向き
- 1-100 eV 程度の低エネルギーH⁺とO⁺のフラックスがプラズマポーズ付近で増加

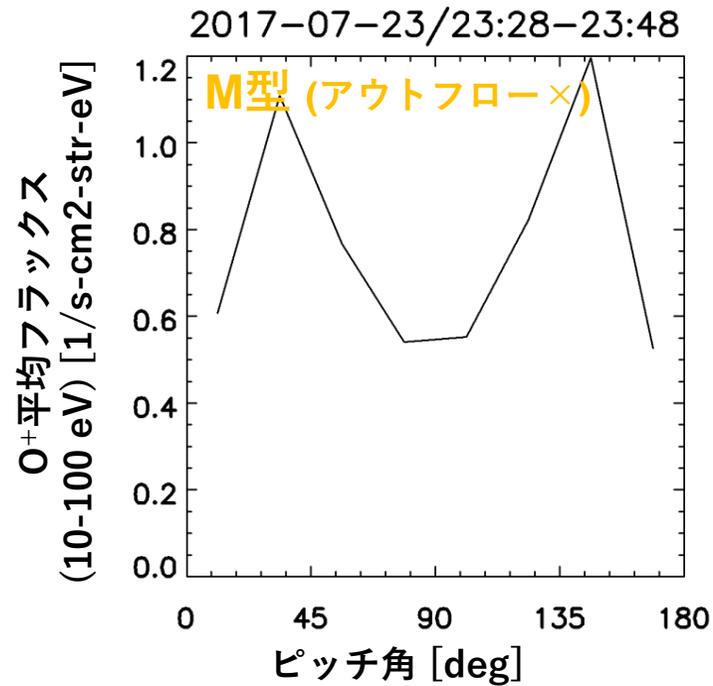
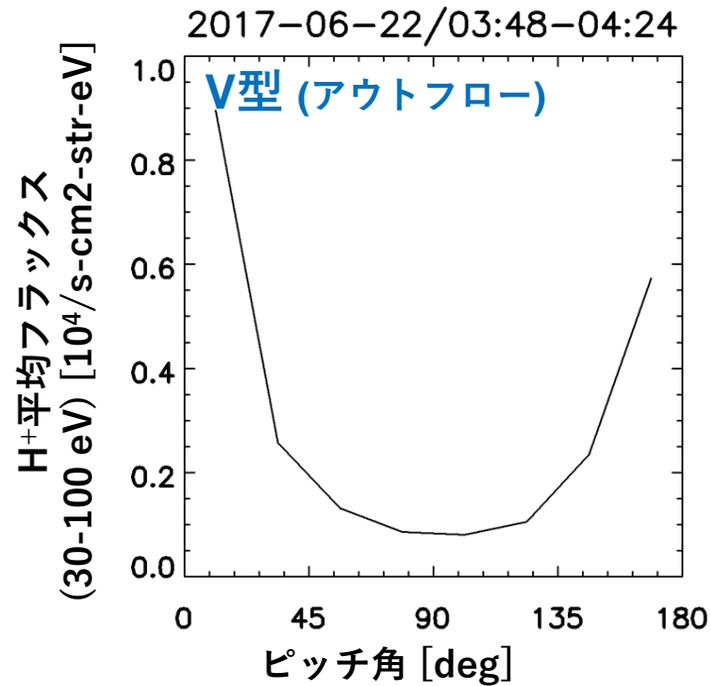


ピッチ角分布



- H⁺はピッチ角0°と180°方向にピークを持っている。
- O⁺はピッチ角180°方向にピークを持っている。

M型のピッチ角分布

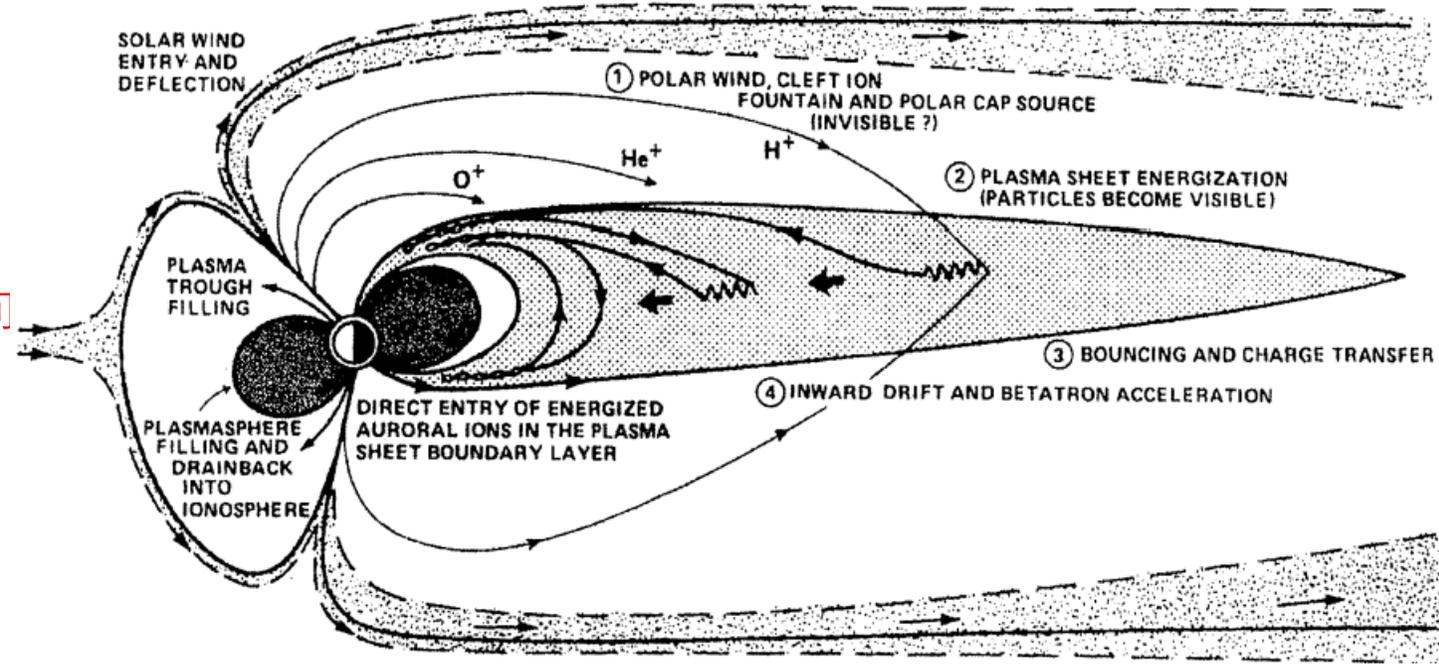


1. イオンアウトフローにより磁気圏に流出 (V型)
2. 時間が経過し、ピッチ角散乱を受け、ロスコーンより小さい角度のイオンが地球に落ちる (M型)

磁気圏尾部からの輸送

1. 磁気圏尾部に流出
2. 対流電場により、地球方向に輸送
3. 磁場の強化に伴い、**磁場に垂直な方向の速度が増加。**

第一断熱不変量 $\mu = \frac{mv_{\perp}^2}{2B}$

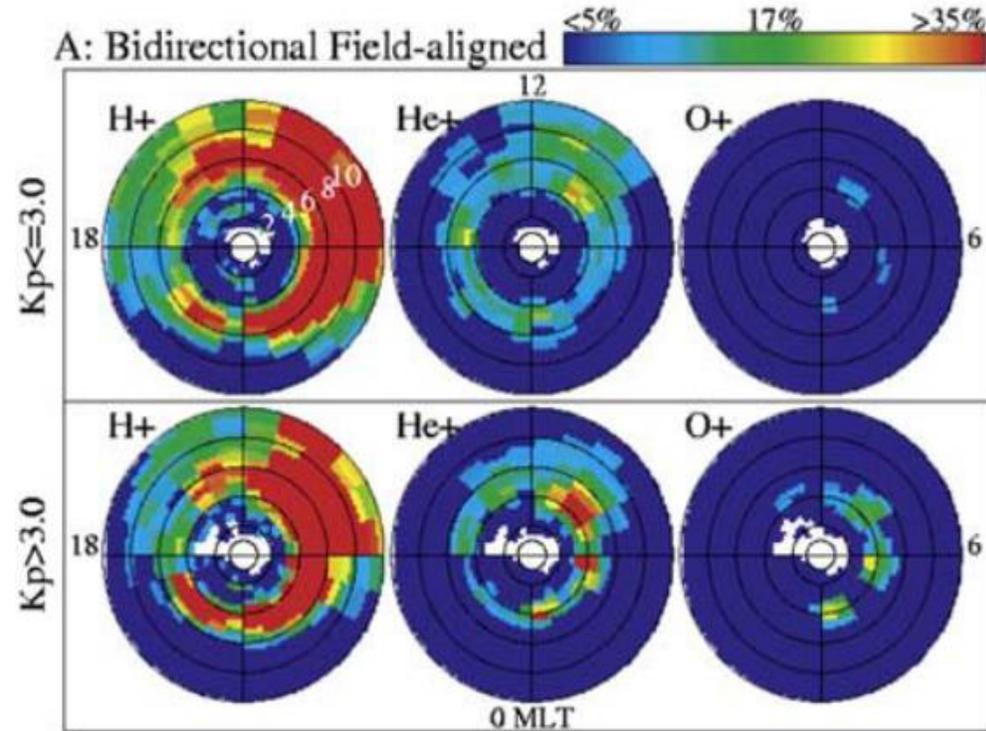


(Chappell et al., 1987)

V型がイオンアウトフローである理由

- エネルギーが10-100 eVと低い。
→プラズマシート (数 keV) と比べて非常にエネルギーが低い。
- SAPSに対応する位置で局所的に発生している。
→地球方向に輸送されてきたイオンの場合は、もっと広範囲に広がっているはず。
- ピッチ角分布が0°と180° 方向にピーク (V型) を持っている。
→地球方向に輸送されてきたイオン、または時間が経過してピッチ角散乱を受けたものではない。

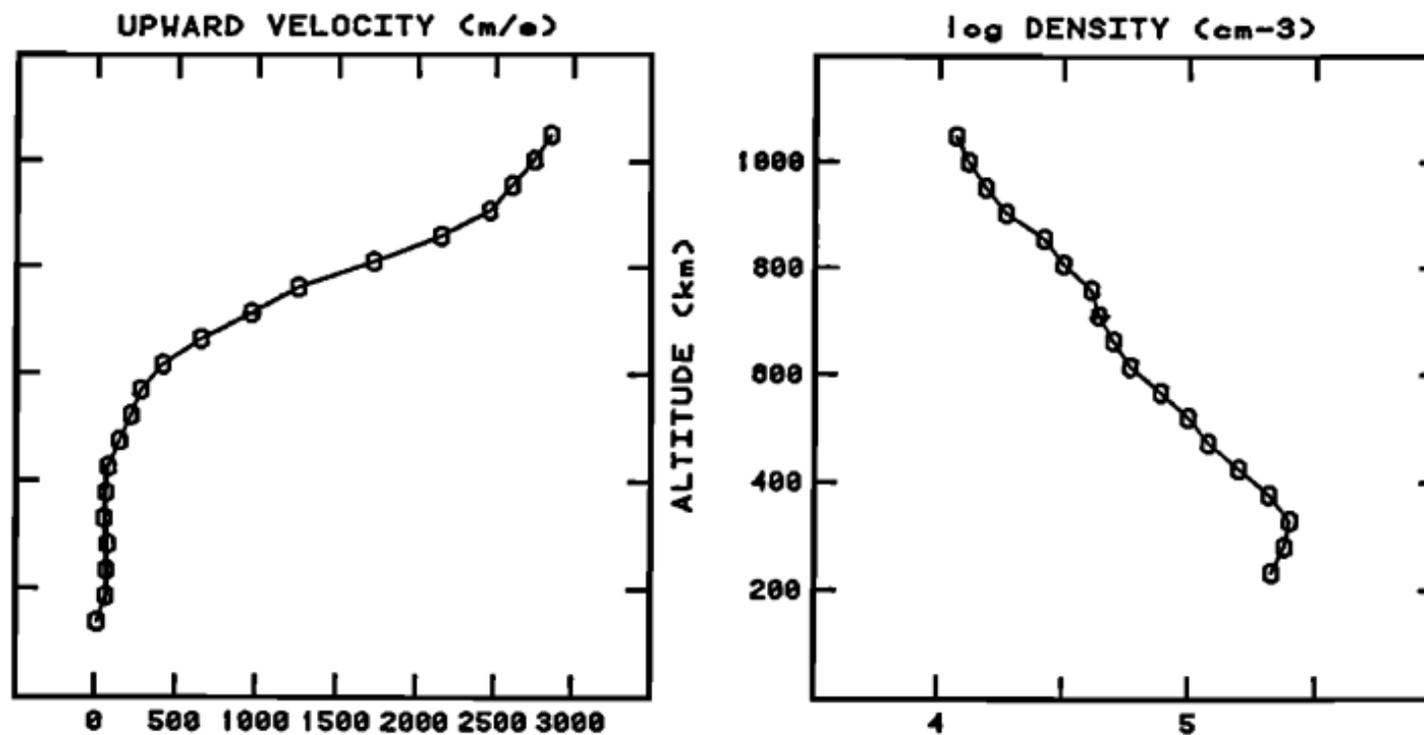
Warm plasma cloak



Giles, 1993

- 0-100 eV 程度のイオン集団 [Chappell et al., 2008]
- Bidirectionalなピッチ角分布
- 磁力線に平行方向から 30° 程度の広がりをもつ [Nagai et al., 1983]

Yeh & Foster, 1990

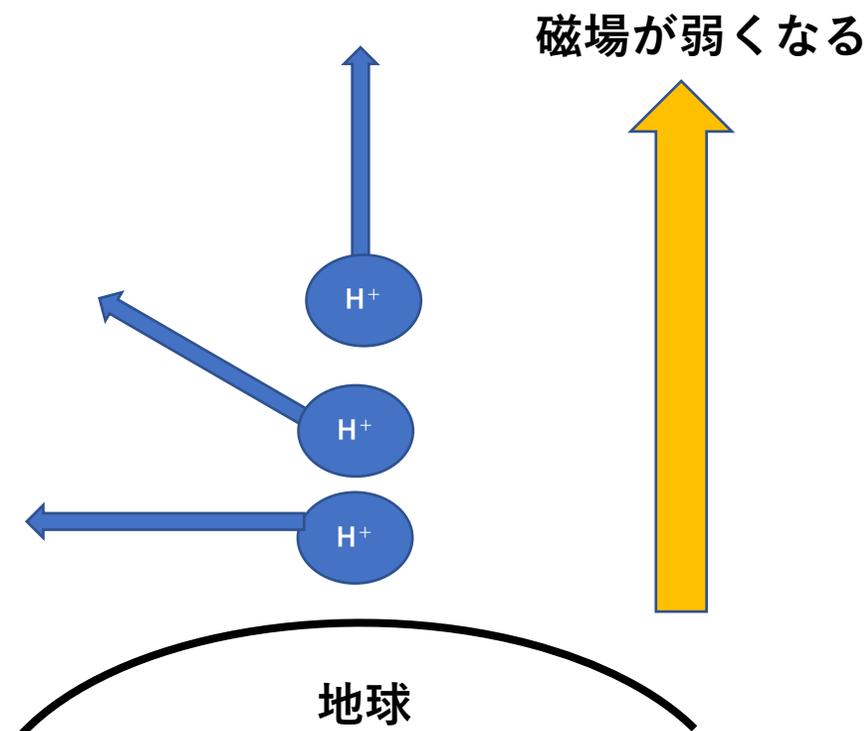


- 高度 400km程度から鉛直上向き速度が徐々に増加
- 高度が上昇するにつれてさらに速度が増加

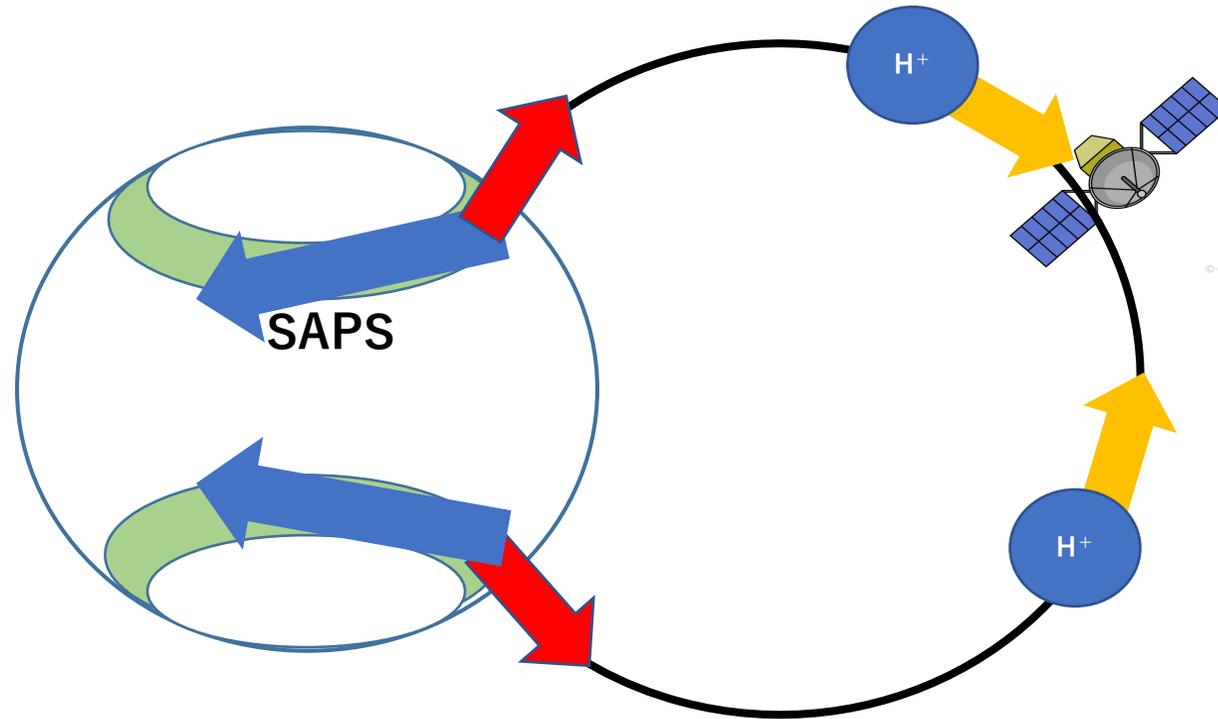
イオンコニックス

1. 磁力線に垂直方向に加速
(波動粒子相互作用など)
2. 上向きに移動するにつれて磁場が減少
3. 第一断熱不変量の保存により垂直方向速度 v_{\perp} が減少

第一断熱不変量 $\mu = \frac{mv_{\perp}^2}{2B}$

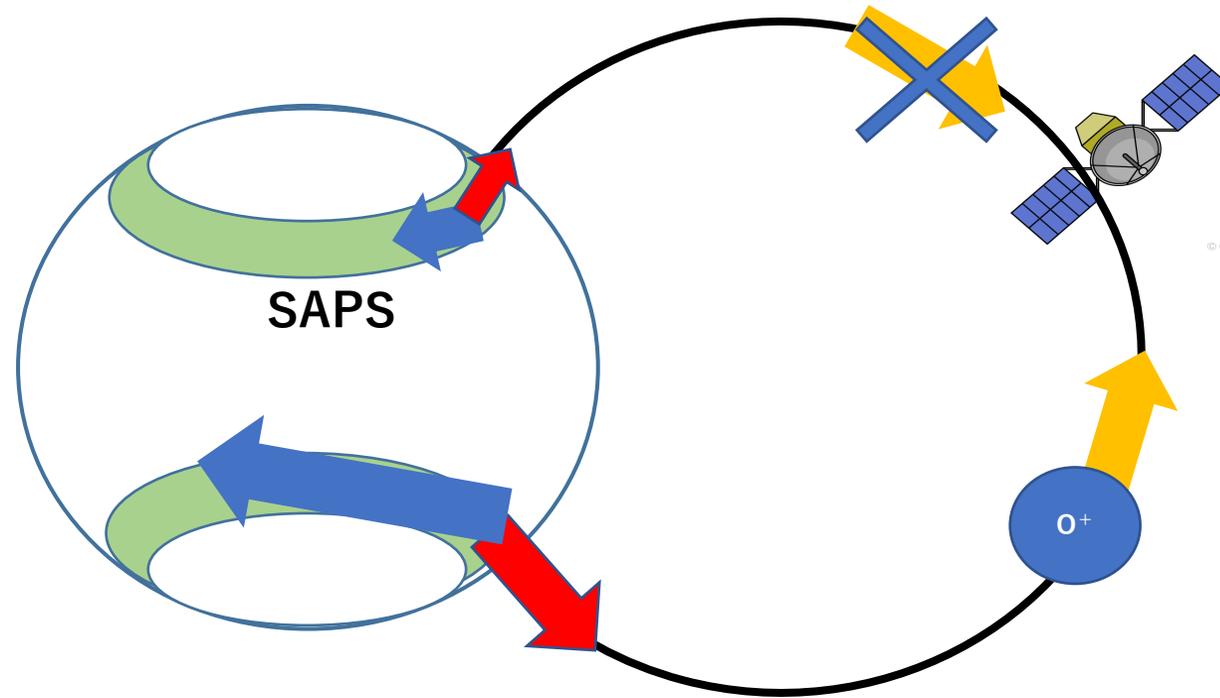


H⁺がBidirectionalな理由



- SAPSは南北の磁気共役点で発生する [Parkinson et al., 2005]。
- 南半球でもイオンアップフローが発生している可能性が高い。

O^+ の南北非対称性



- SAPSの速度、時間変動は南北で完全に一致するわけではない [Kunduri et al., 2012]。
- O^+ の南北非対称性は、SAPSの時間変動のずれやローカルな速度のずれなどの南北非対称性による可能性がある。