

極域科学計算機システムを利用した大規模データ処理とデータ公開に関する研究集会

1. 目的

平成27年2月より極域科学計算機システムが更新され、大容量メモリと高速演算性能を生かし、より高精度のデータ解析手法の開発とシミュレーションのためのアルゴリズムの開発が重要になっている。新システムの特徴を生かしたシミュレーションならびに可視化手法に関する技術を共有することによりさらに高度な計算資源の活用を目指す。

2. 受入責任教員 宙空圏研究グループ 准教授 岡田 雅樹

3. 日時および会場

日時：2016年7月22日 10:00 - 17:00

場所：国立極地研究所 3階セミナー室

4. プログラム

10:00 - 10:30 極域科学計算機システムでの可視化手法について

10:30 - 11:15 AVS による大規模シミュレーションデータの可視化について

11:15 - 12:00 Xeon-Phi を使った高速シミュレーションコード開発について

【昼食】

13:00 - 13:20 澁谷亮輔（東京大学）：PANSY レーダーおよび中間圏拡張 NICAM を用いた中間圏準 12 時間周期波動の解析

13:20 - 13:40 山田恭平（極地研）：南極定期予報計算の導入

13:40 - 14:00 鷺見治一（米国アラバマ大学ハンツビル校）：太陽圏外圏構造の MHD 解析

14:00 - 14:20 藤田茂（気象大）・田中高史（九州大）：磁気圏電離圏結合対流生成機構—REPPU コードの結果—

14:20 - 14:40 田中高史（九州大学）、片岡龍峰（極地研）、岡田雅樹（極地研）：大容量シミュレーションデータの簡易可視化

14:40 - 15:00 門倉昭(NIPR)：極域オーロラ観測データの伝送とアーカイブ

15:00 - 15:20 Praphan Pavarangkoon、村田健史(NICT)：HpFP 通信プロトコルによるインテルサット通信性能向上に関する研究

15:20 - 15:40 岡田雅樹（極地研）：今後の極域科学計算機システムの運用と研究プロジェクトのかかわりについて

15:40 - 16:00 討論



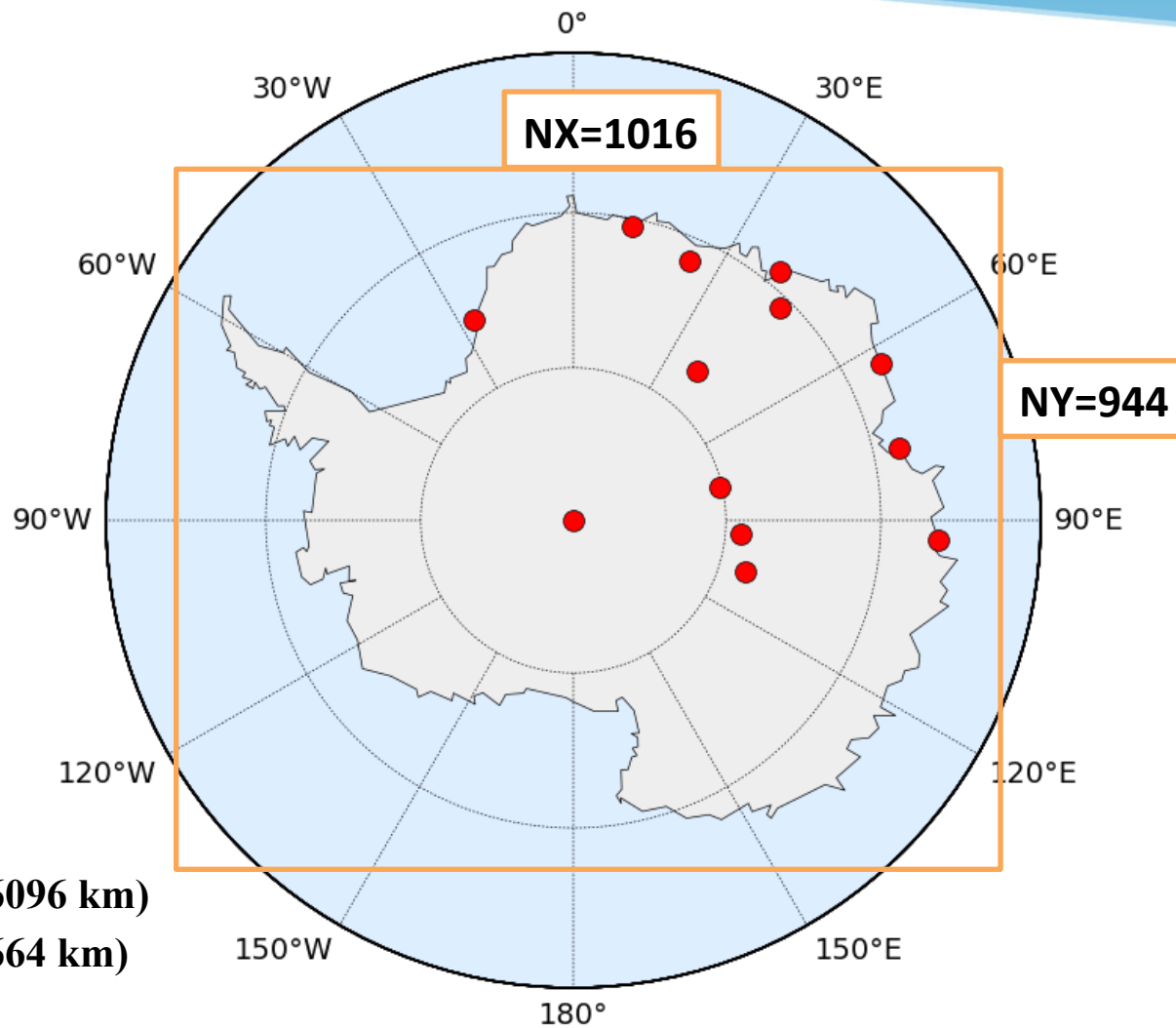
南極定期予報計算の導入

山田恭平^{*1}、平沢尚彦^{*1}
(¹極地研気水圏)

1. はじめに

- ❖ 国立極地研究所では現地観測の支援及び大気場の解析のため、2016年6月24日より、気象庁非静力学モデル (JMA-NHM; Saito et al., 2006)による南極での定期的な計算システムを試験的に導入した
 - ✓ crux, pyxis上で実行しているこの計算について紹介する

2. データ



$N_x = 1016$ grids (6096 km)

$N_y = 944$ grids (5664 km)

$N_z = 50$

$D_x = D_y = 6$ km

NODE = 16

2. データ

❖ モデル

✓ 気象庁非静力学モデル (JMA-NHM; Saito et al., 2006)

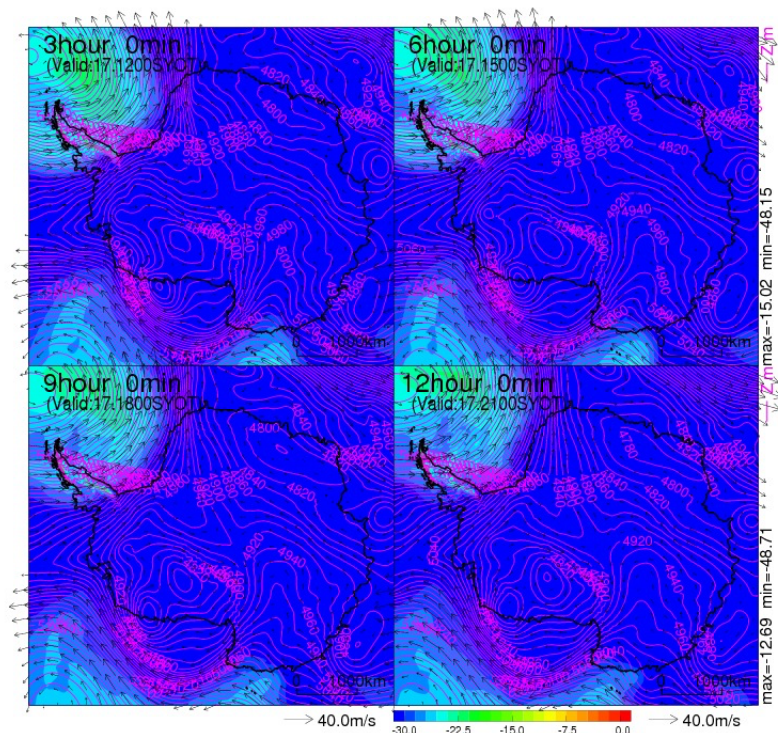
- グリーンランド実験の設定(橋本ほか, 2016)をもとに南極実験用にカスタマイズ
- 全球予報データ: 京都大学生存研究所より
- 海氷データ: 気象研究所より
 - その他地形・気候値等の定数データから地形、陸面、全球予報値、海氷の初期値および境界値を設定
- 計算時刻: 00UTC / 12UTC
- 空間解像度: 水平6km/鉛直50層
- 時間解像度: 1時間(42時間後まで)
- 出力データ(42時間後まで):
 - 500hPa: 渦度・気温・相当温位・風
 - 700hPa: 湿度・鉛直高度・風
 - 850hPa: 渦度・相当温位・鉛直高度・風
 - 地上高度: 降水量・気温・風・気圧
- グリッド数: 1016/944
- 領域: 南極全域
 - 将来的には昭和基地周辺のみでの計算を水平解像度 1km で行うことで、南極観測隊での観測範囲に集中し、昭和基地周辺の気象現象の解明に寄与する予定
- 使用ノード数: 16

3. 出力例

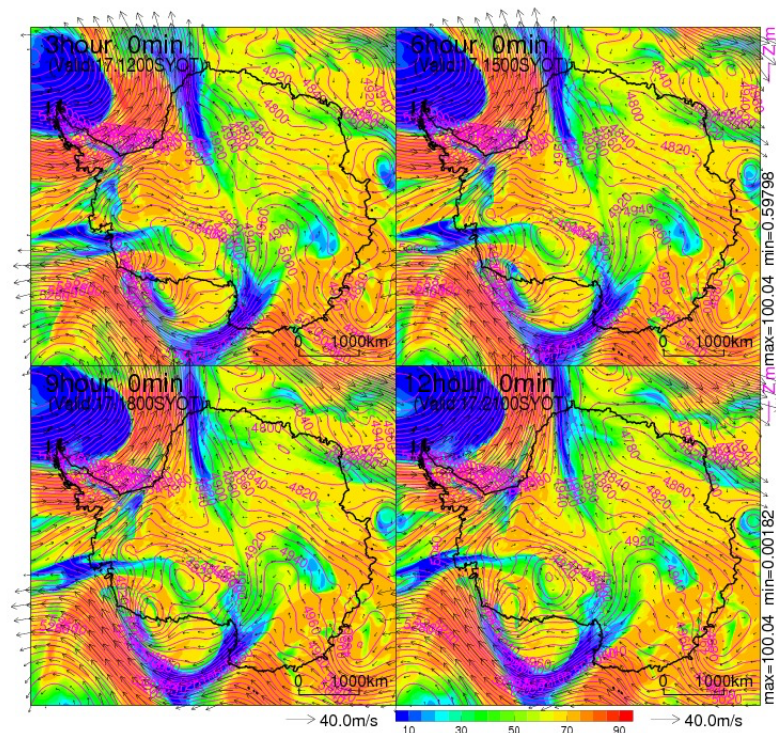
3.1. 指定気圧平面

❖ 500hPaの気温と相対湿度と風 (after 3-12hr from 2016-07-17 12UTC)

500hPa気温と風



500hPa相対湿度と風

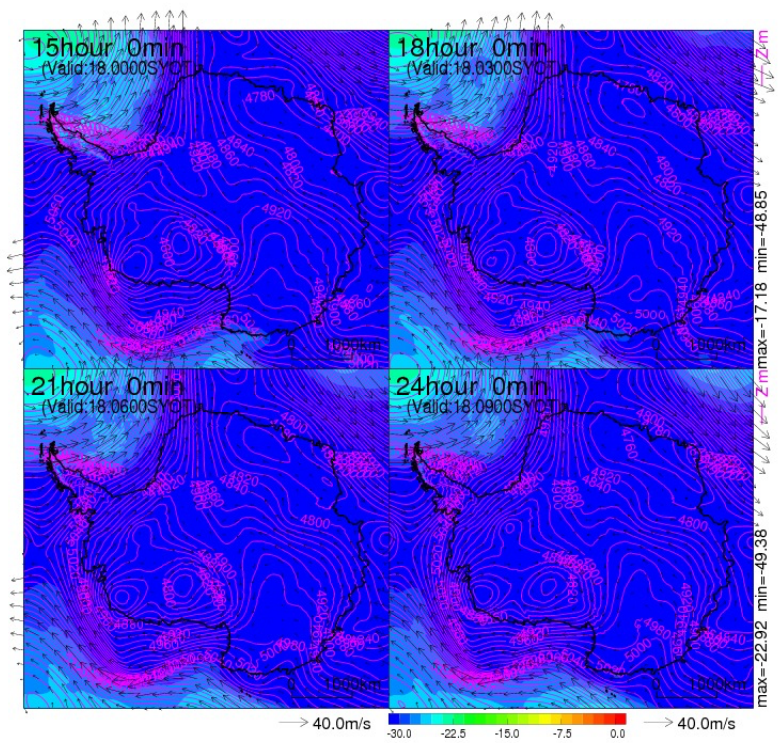


3. 出力例

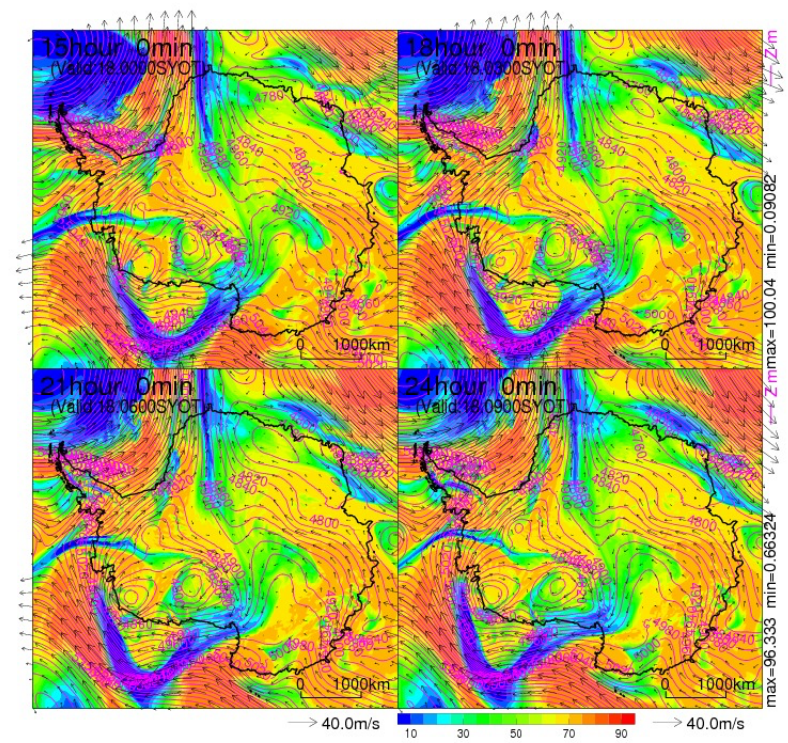
3.1. 指定気圧平面

❖ 500hPaの気温と相対湿度と風 (after 15-24hr)

500hPa気温と風



500hPa相対湿度と風

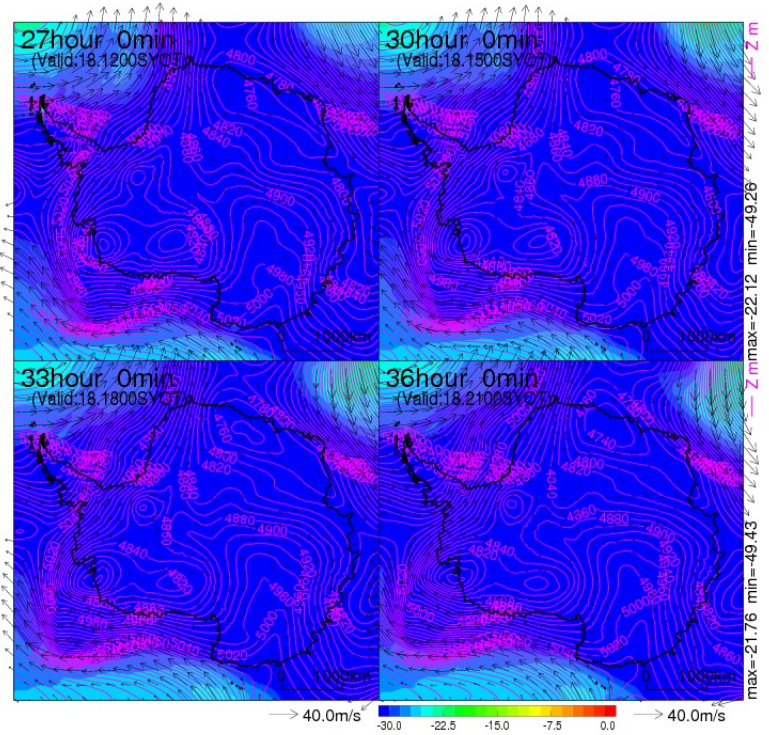


3. 出力例

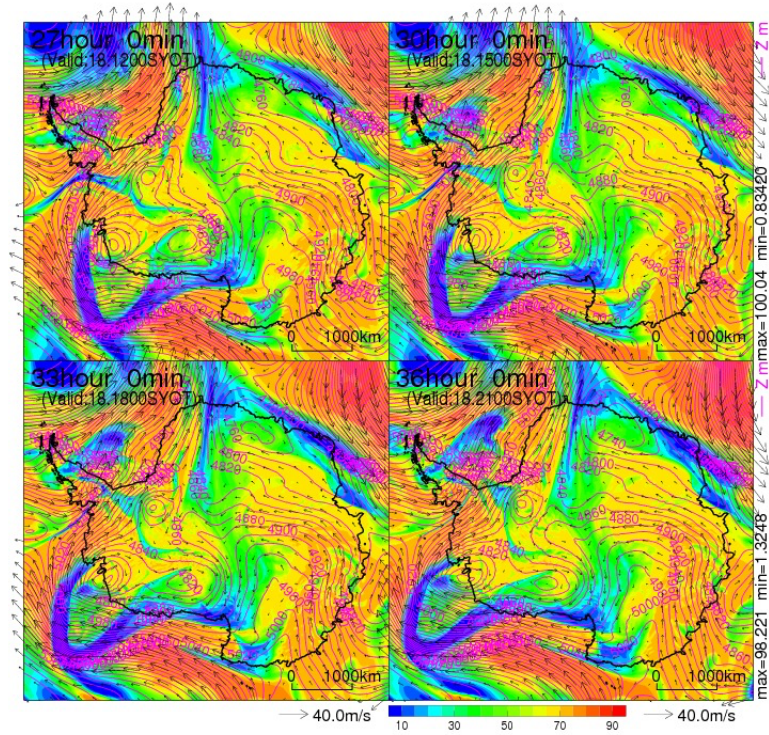
3.1. 指定気圧平面

❖ 500hPaの気温と相対湿度と風 (after 27-36hr)

500hPa気温と風



500hPa相対湿度と風

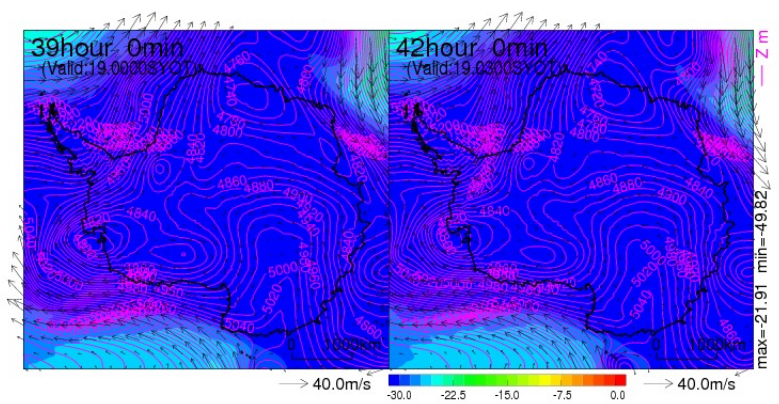


3. 出力例

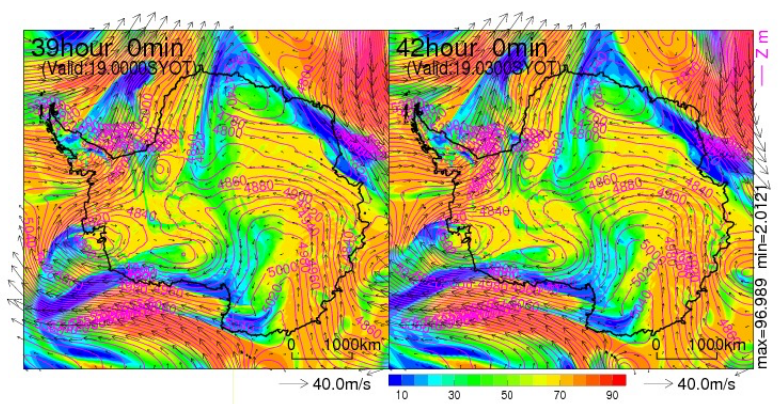
3.1. 指定気圧平面

❖ 500hPaの気温と相対湿度と風 (after 39-42hr)

500hPa気温と風



500hPa相対湿度と風



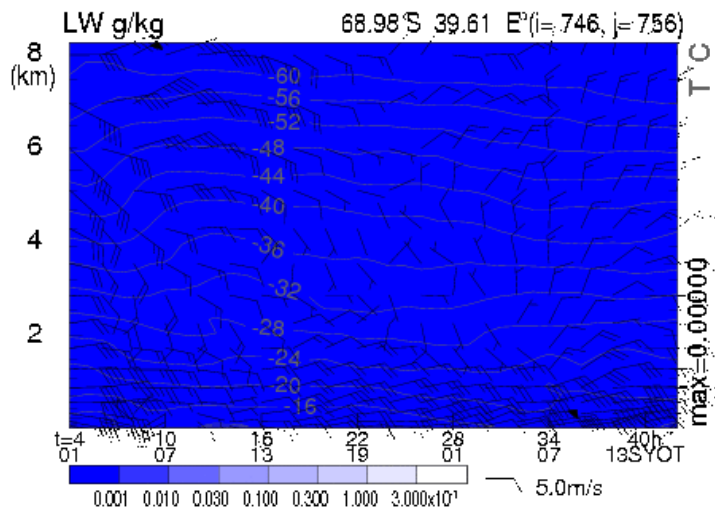
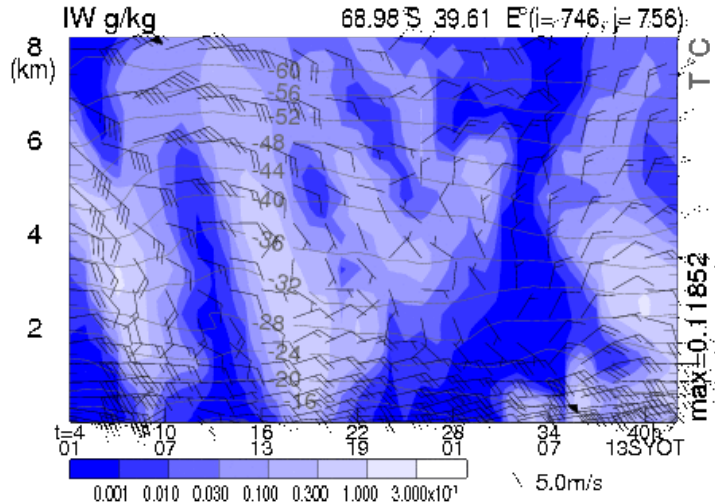
2. データ

- ❖ 出力結果は 13 の南極観測地点 (Syowa, Asuka, Mizuho, Dome-Fuji, SP, MLZ, Mirny, Halley, Mawson, Davis, Dome-Argus, Dome-B, Vostok; 将来的に追加予定) ごとに地点予報値として以下のデータを時系列に図化
 - ✓ 鉛直分布
 - 水・氷の混合比
 - 風
 - ✓ 地上
 - 下向き短波・長波放射量
 - 降水量
 - 雲量
 - 風
 - 気圧
 - 気温
 - 相対湿度
- ❖ 主要な観測基地 (昭和基地、南極点、ヴォストーク基地) に関しては Weather Quality Reporter の SYNOP データ や Antarctic Mesoscale Prediction System (AMPS) の WRF モデルとの時系列での比較
- ❖ 現時点では昭和基地に関してのみ、気温・湿度・風向・風速の鉛直プロファイルをラジオゾンデの観測値と比較
- ❖ 現在はテスト稼働中であり、図化された 指定気圧面での予報値と各観測地点での時系列変化は極地研 の公開用ウェブサーバー polaris で公開予定である。

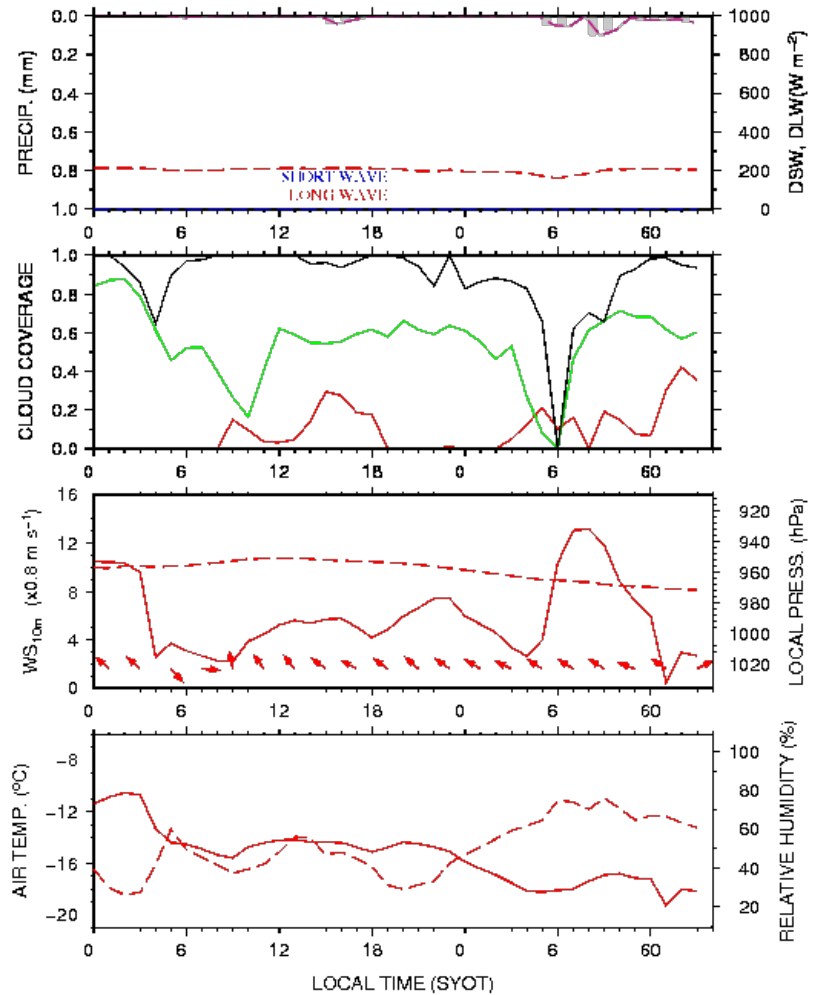
3. 出力例

3.2. 地点予報値での時間変化(昭和基地)

Initial : 2016.07.19.2100SYOT



INITIAL 201607191800UTC, 21SYOT, Syowa, nhm 10.03 m, obs 22. m

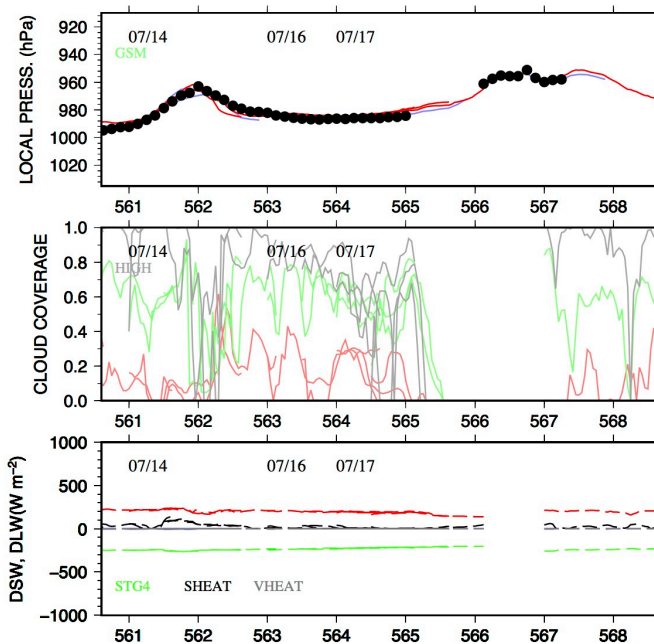
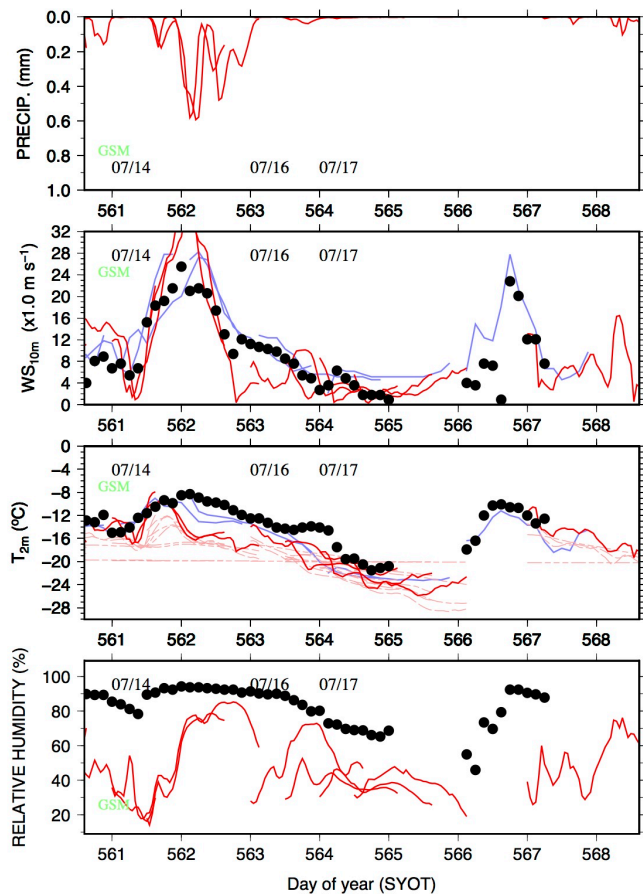


3. 出力例

3.3. 地点予報値のSYNOPSISとの比較(昭和基地)

❖ 昭和での値: 時系列: SYNOPSISとの比較

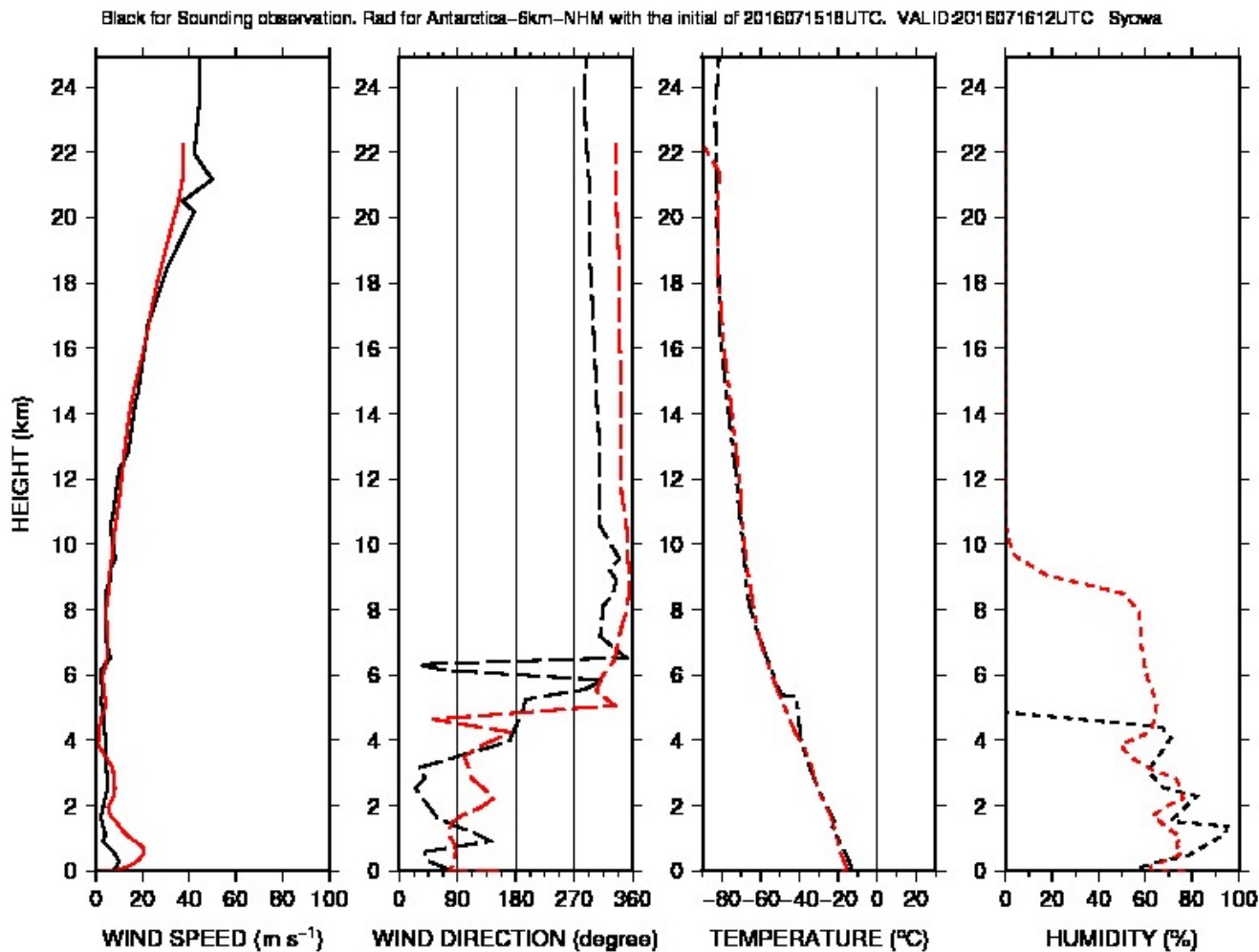
INITIAL 201607191800UTC, , Syowa, nhm 10.03/NA m, obs 29.18 m



3. Results

3.4. 地点予報値のゾンデとの比較 (昭和基地)

❖ 2016-07-15



4. Future Work

- ❖ 南極全域を覆う水平解像度6kmの計算に加え、昭和基地周辺のみの計算を水平解像度1kmで行う
 - ✓ 昭和基地周辺でのカタバ風の振る舞い
 - ✓ 氷床上と沖合での境界層の違い
 - ✓ 降水量の解像度依存性

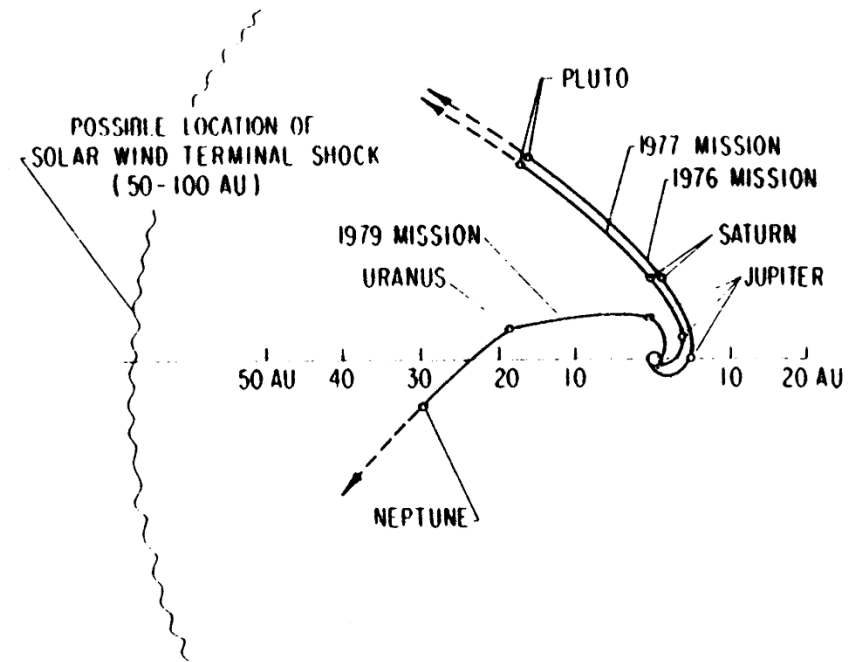
- ❖ 解析地点の追加
 - ✓ フィンランド基地 (Aboa?)
 - ✓ ノルウェー基地 (Tor, Troill?)
 - ✓ ドームC

太陽圏外圏構造のMHD解析

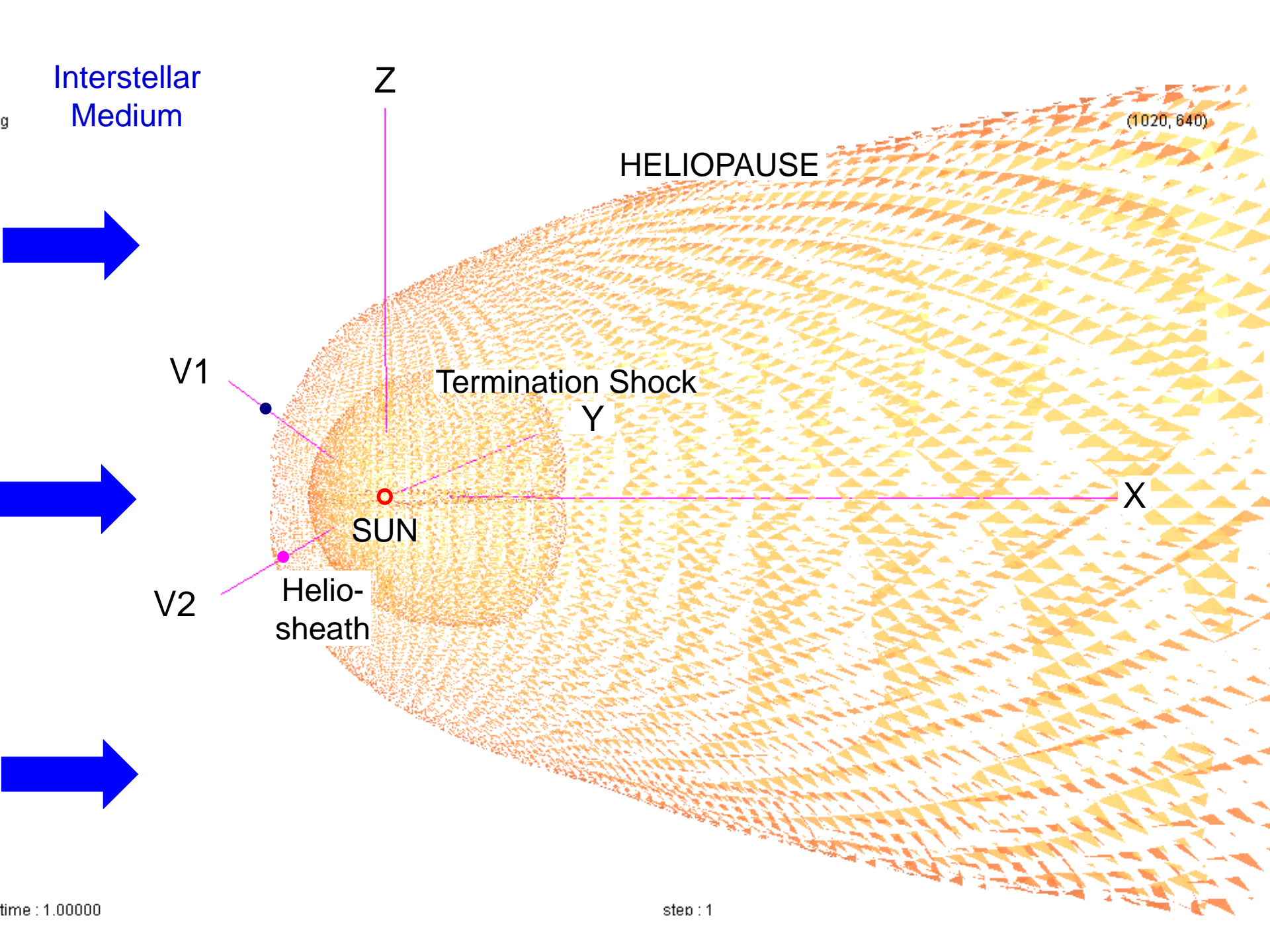
鷲見治一

共同研究者 田中高史、G.P. Zank

太陽系探査から銀河系探査へ！



“Grand Tour” missions to the outer region of solar system.
These missions were launched in 1977 and named “Voyager 1/2”



太陽圏外圏の南北非対象構造

惑星間空間衝撃波による

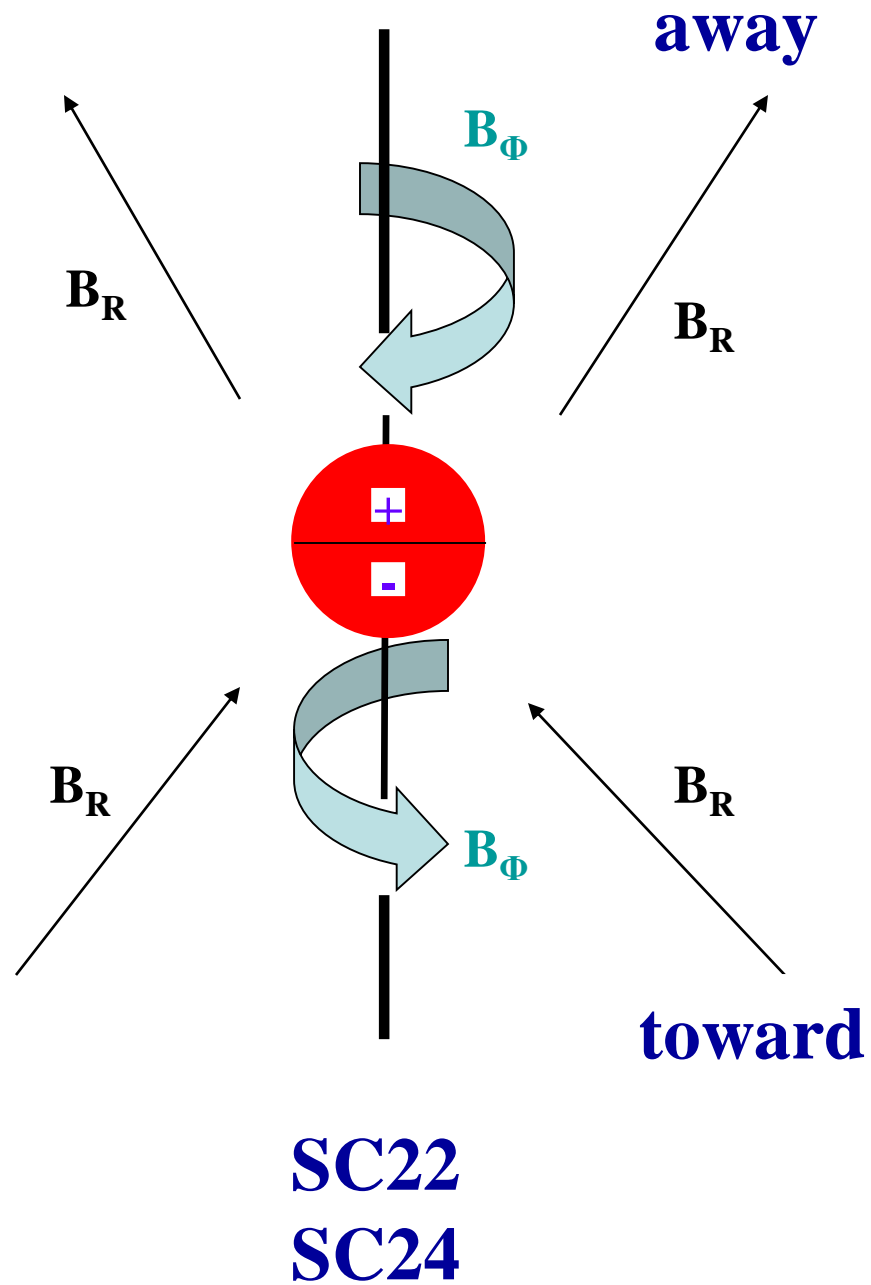
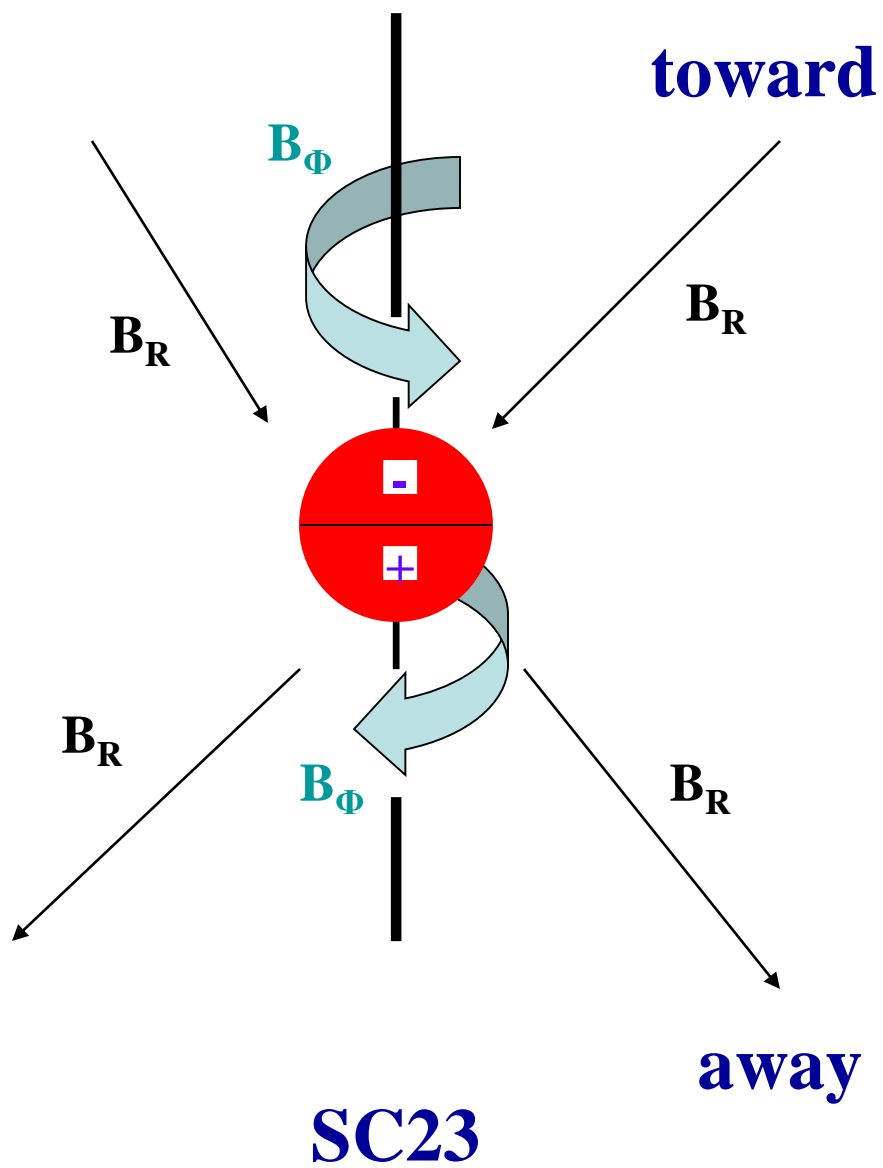
終端衝撃波面変動

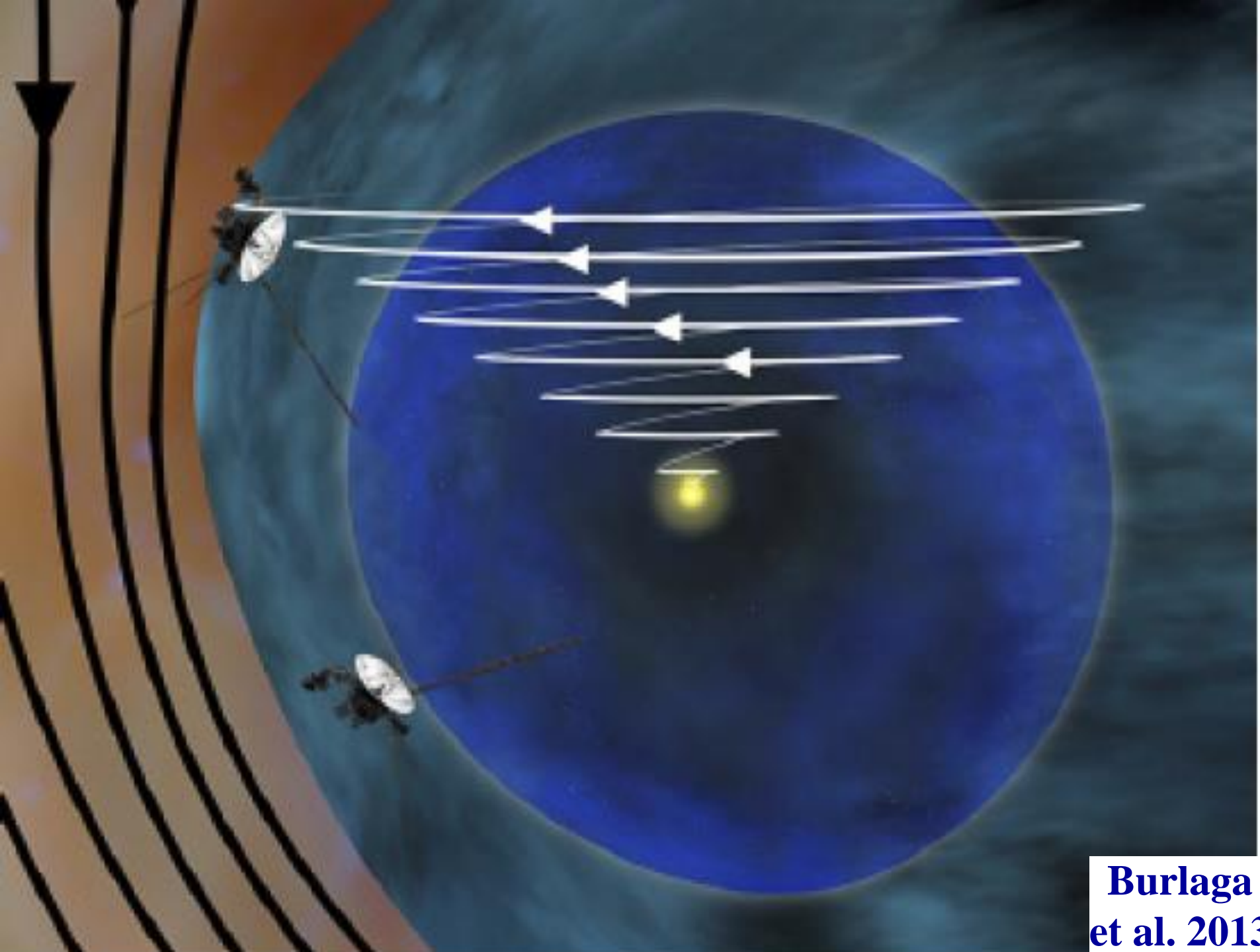
銀河宇宙線の太陽圏内圏への輸送における

太陽圏磁場構造依存性

惑星間空間衝撃波による

ヘリオポーズ面変動



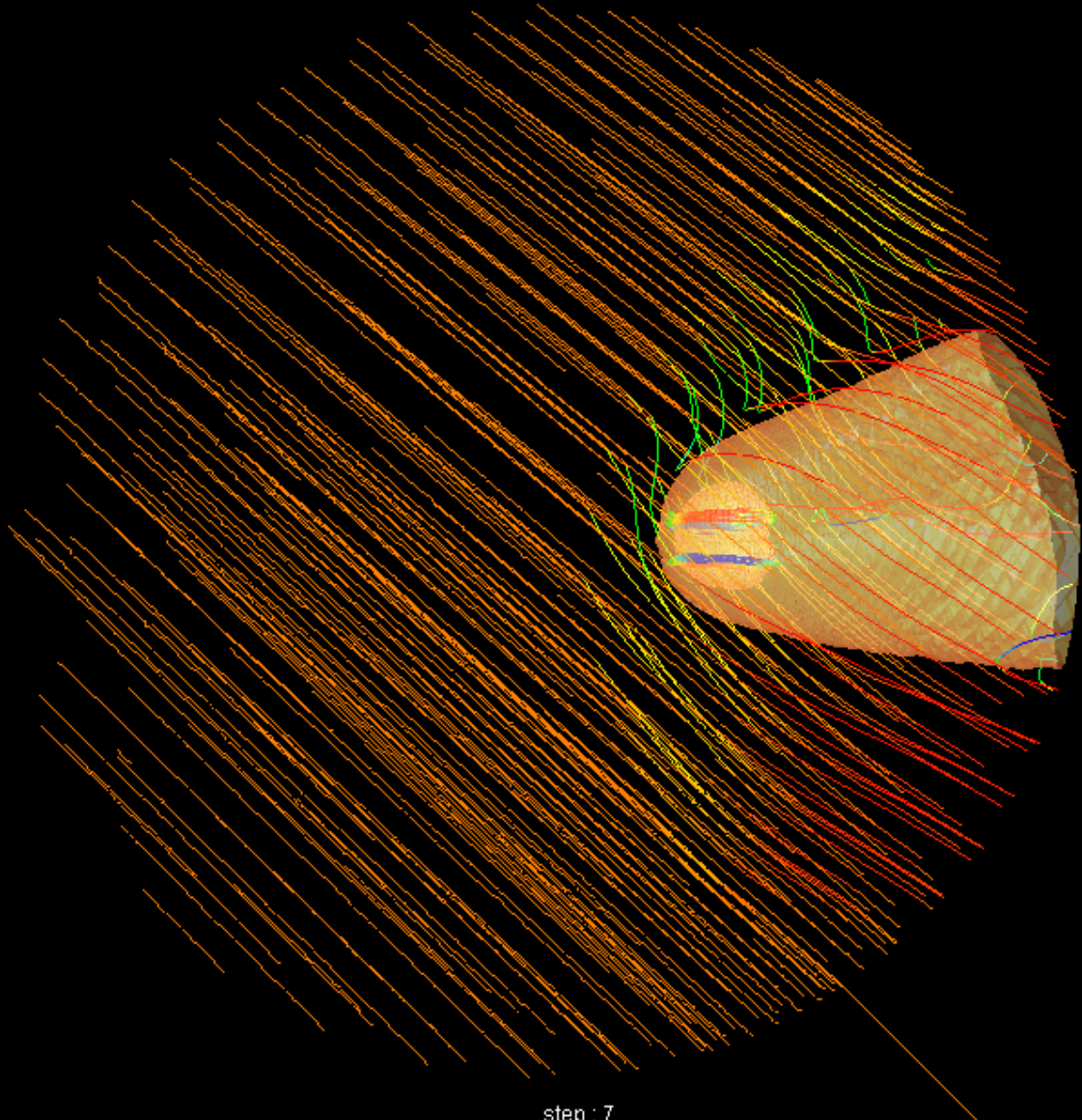


**Burlaga
et al. 2013**

North-South asymmetric structure of the Heliosphere

grid : 89 x 60 x 119

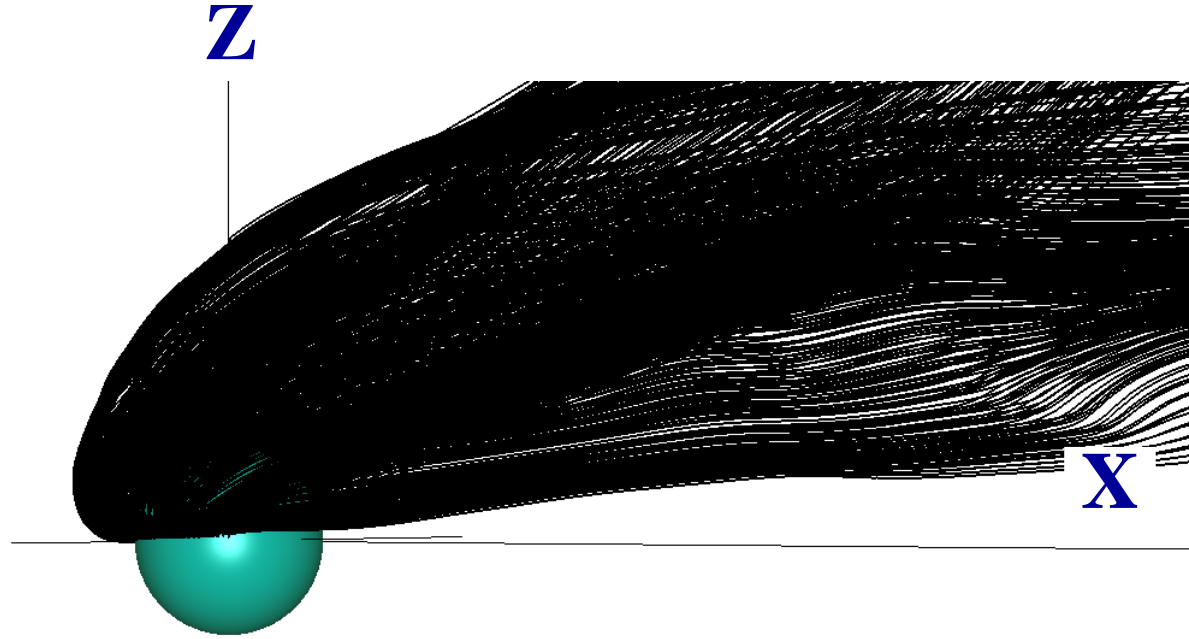
(1020, 640)



time : 43.68205

step : 7

grid : 361 x 180 x 236



**flow lines from northern
heliosphere near equator**

Seeing from lateral side

v_n_front

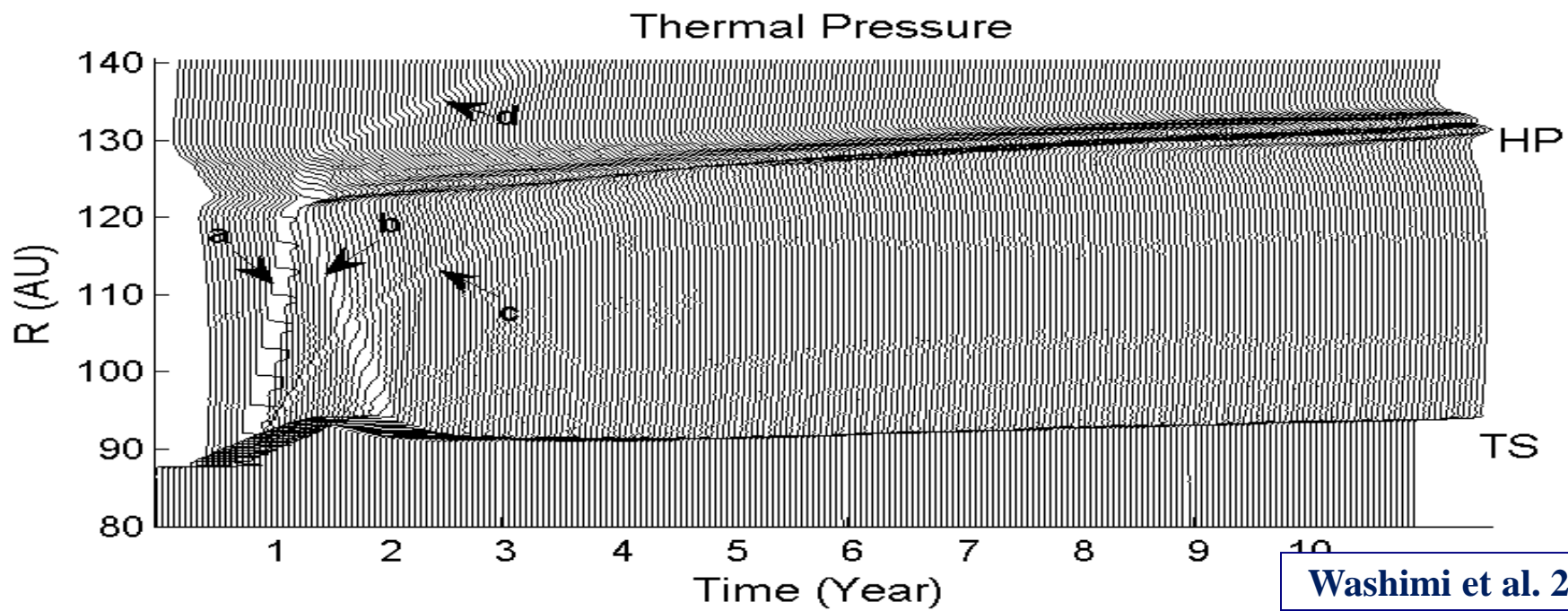
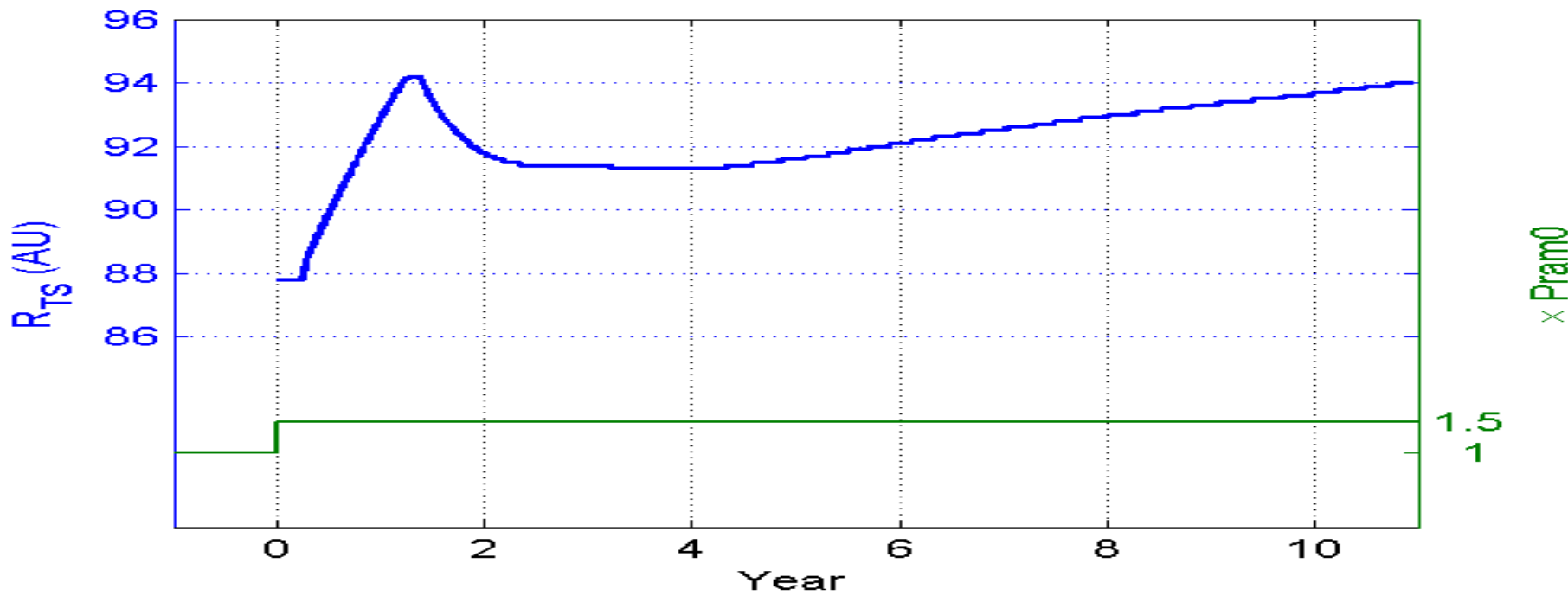
grid : 361 x 180 x 236



**flow lines from southern
heliosphere near equator**

Seeing from lateral side

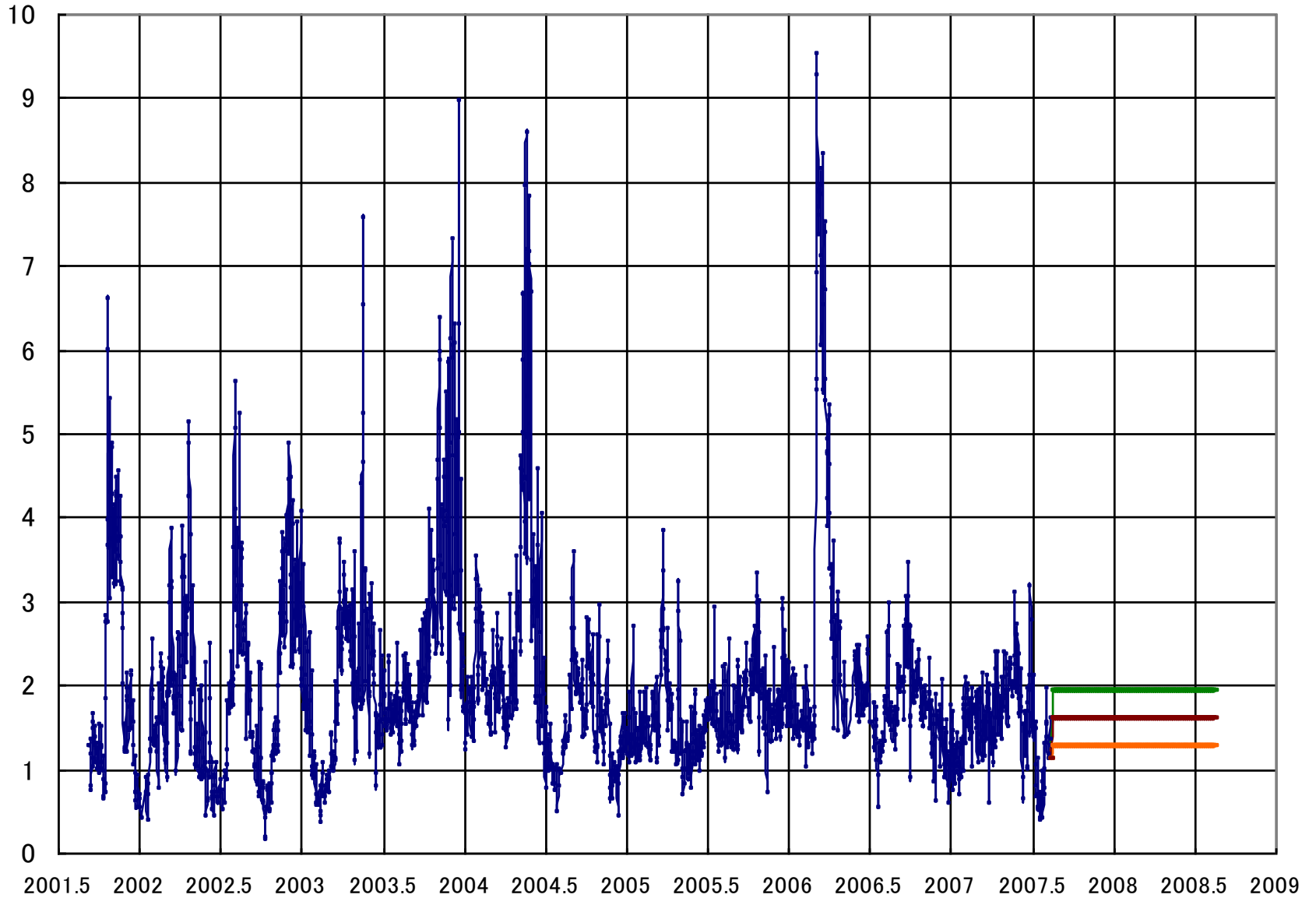
v_s_front



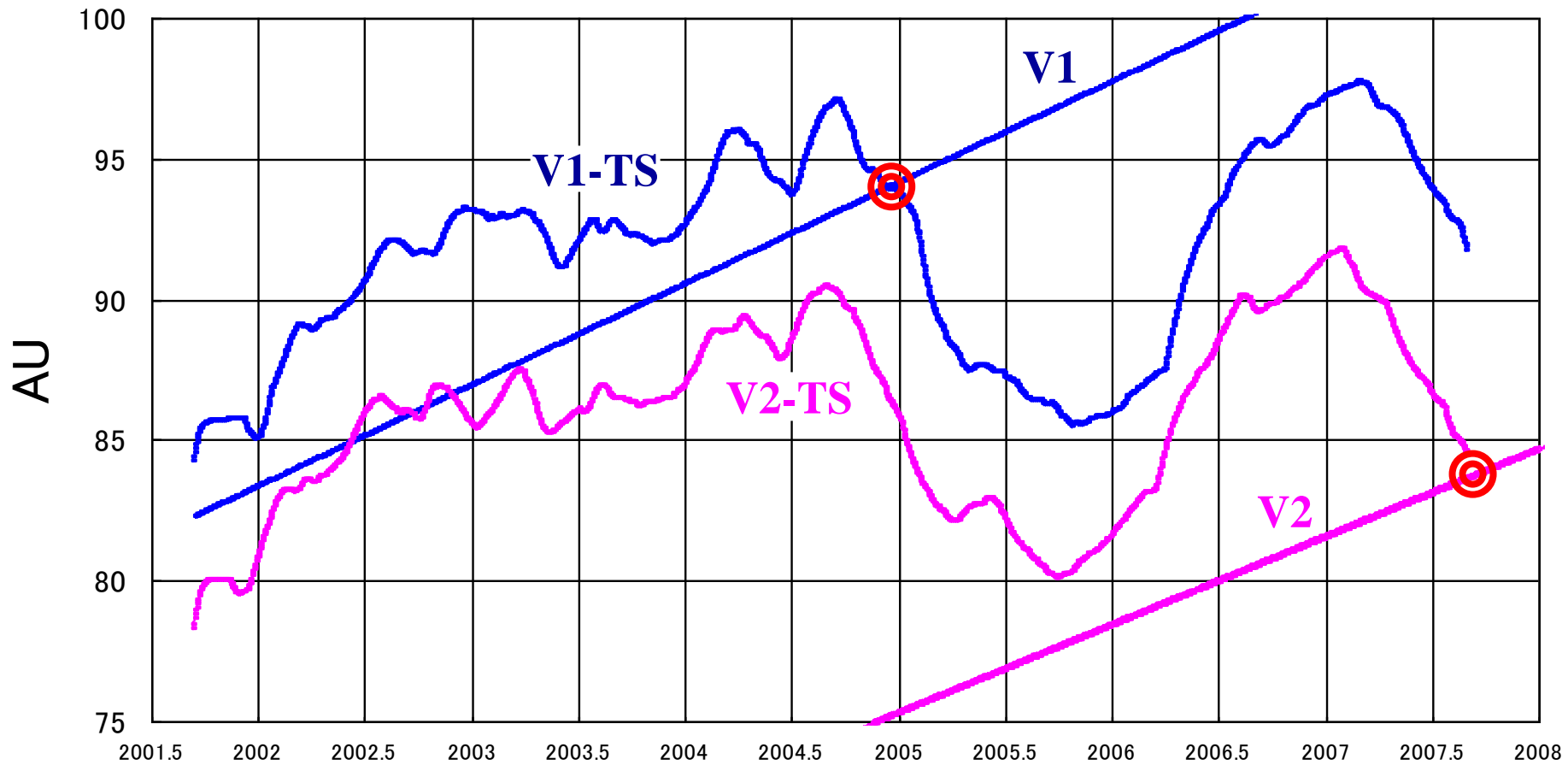
Normalized V2 Observed Ram-Pressure

Ram-Pressures after Aug 14, 2007 are assumed to be 1.0, 1.25, or 1.5 x Pram0 for forecasting where Pram0 is ram-pressure when the speed 400km/s and density 5/cc at 1 AU

10^{-9} Pa

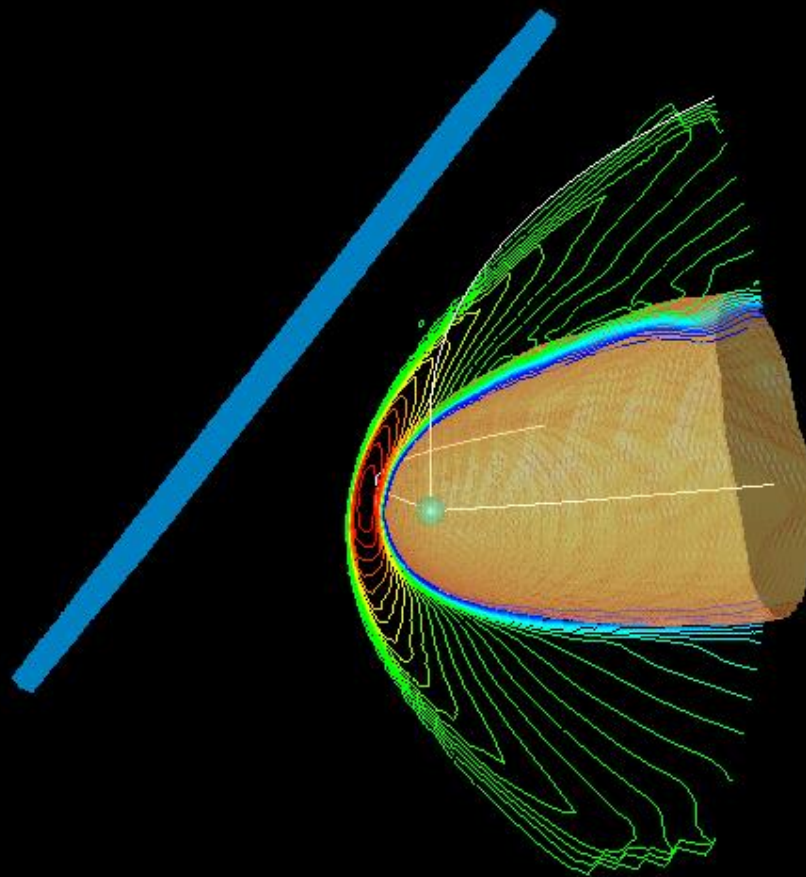


TS Positions along Sun-V1 and Sun-V2 Lines



grid : 89 x 60 x 149

(1020, 649)

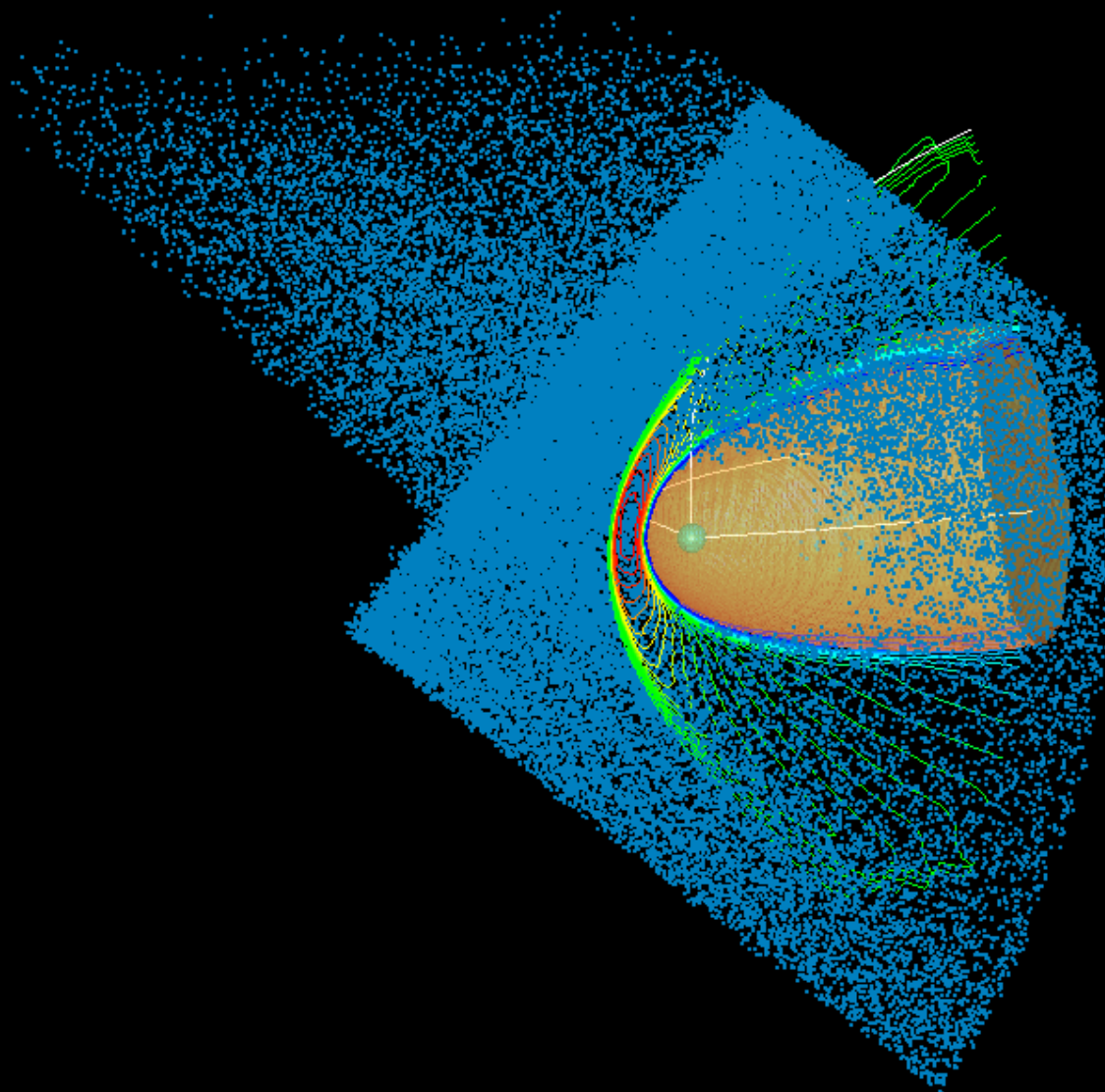


time : 39.13099

step : 7

grid : 89 x 60 x 149

(1020, 649)

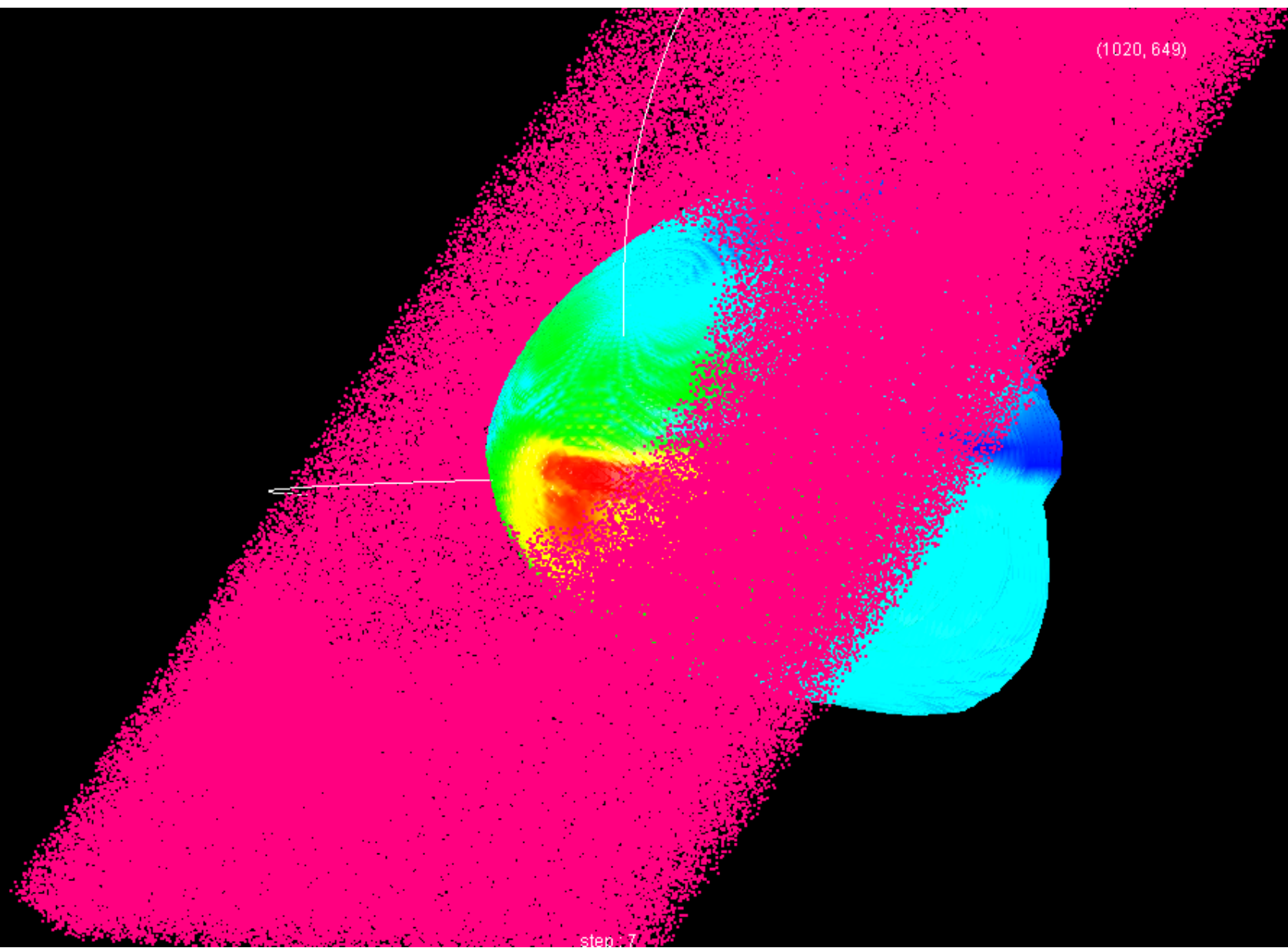


time : 39.13099

step : 7

grid : 89 x 60 x 149

(1020, 649)

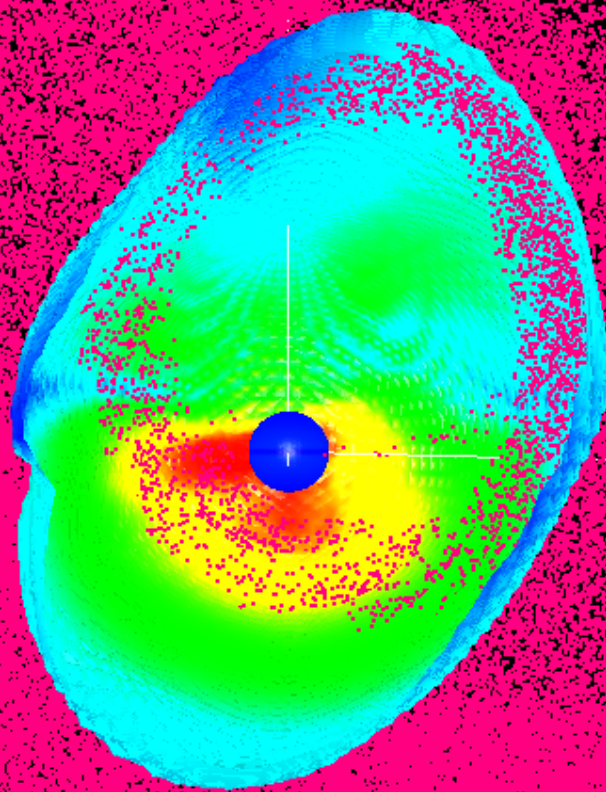


time : 27.58136

step : 7

grid : 89 x 60 x 149

(1020, 649)

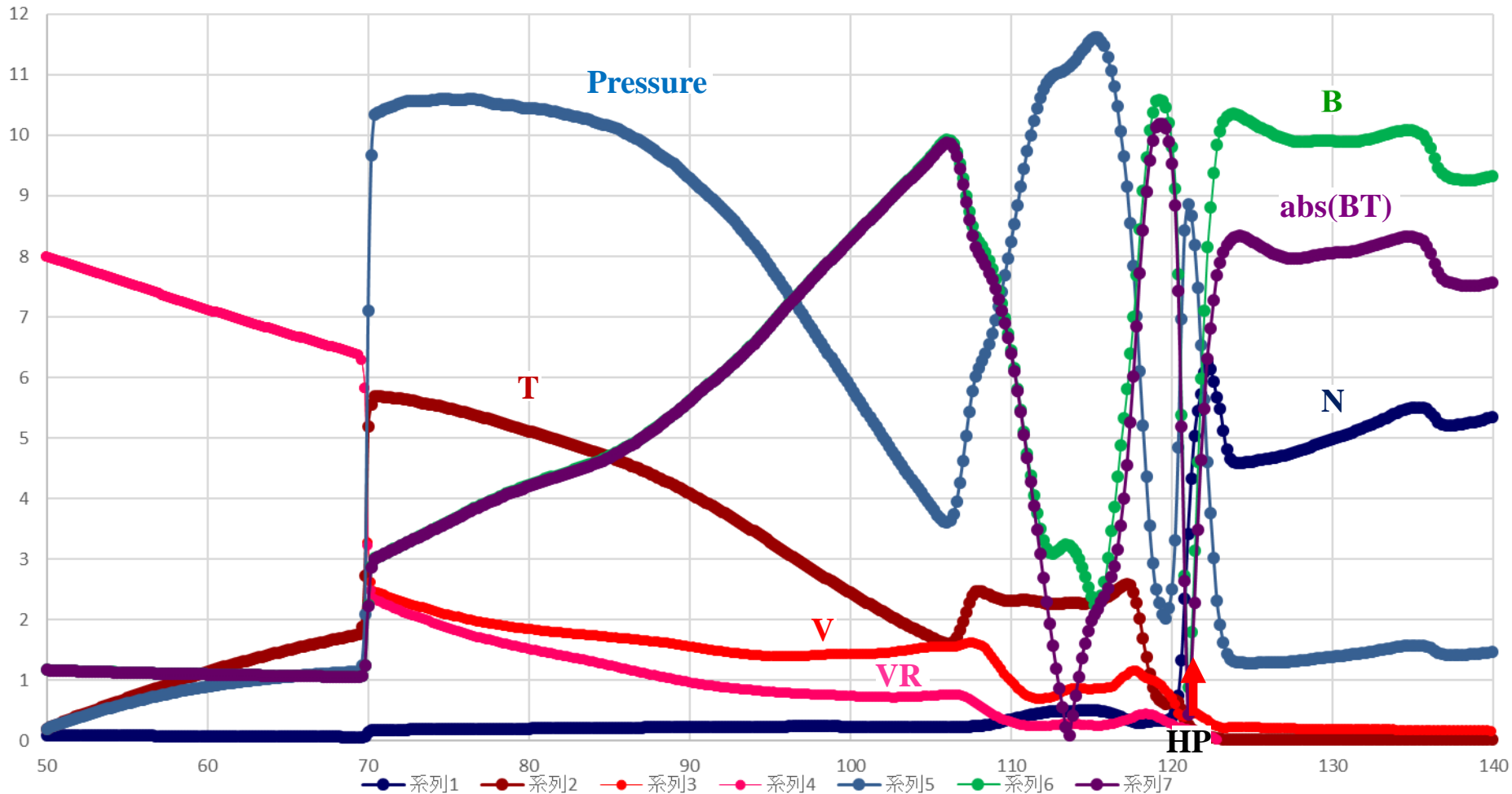


time : 27.58136

step : 7

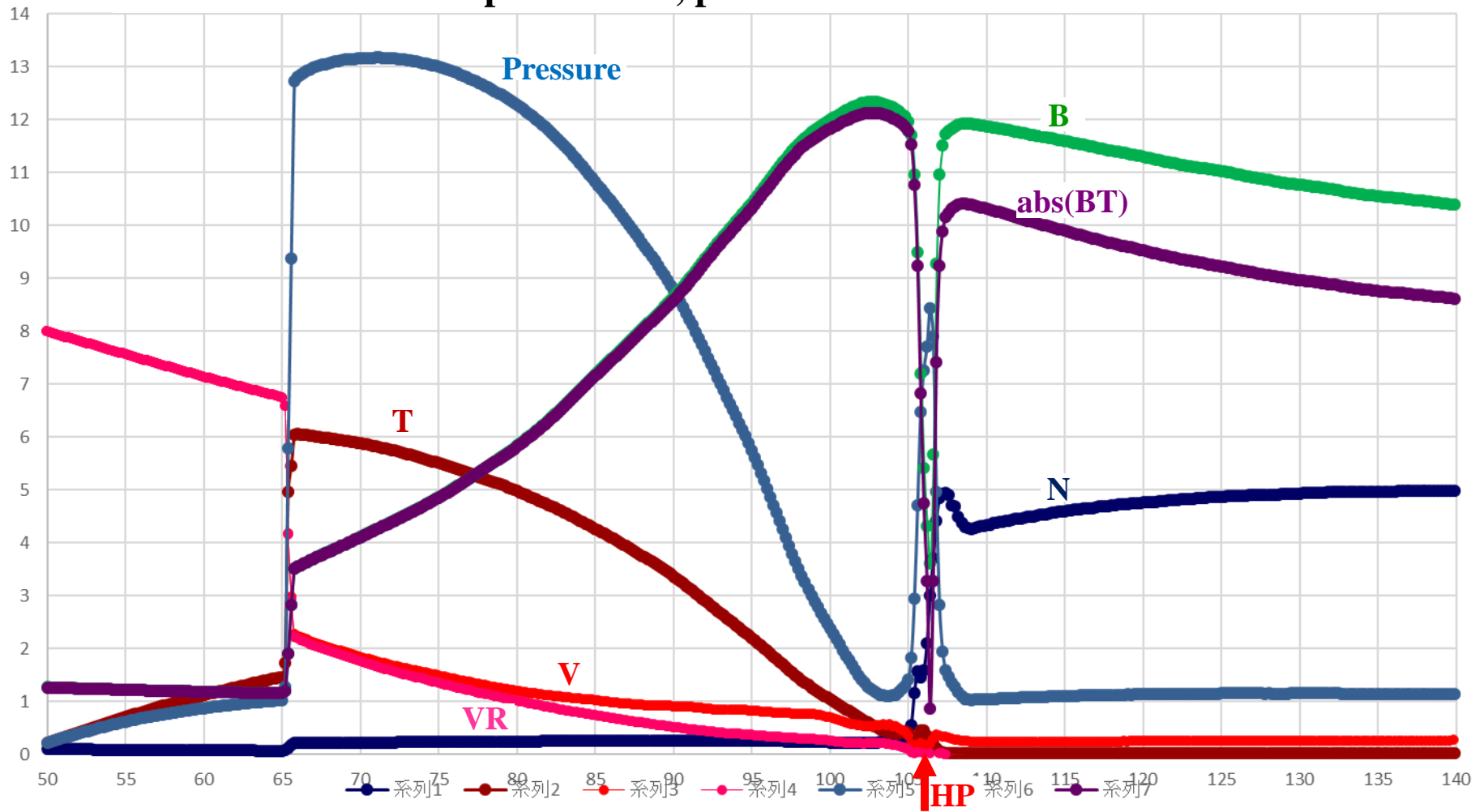
Along Sun-V1 Line (alpha=45 deg)

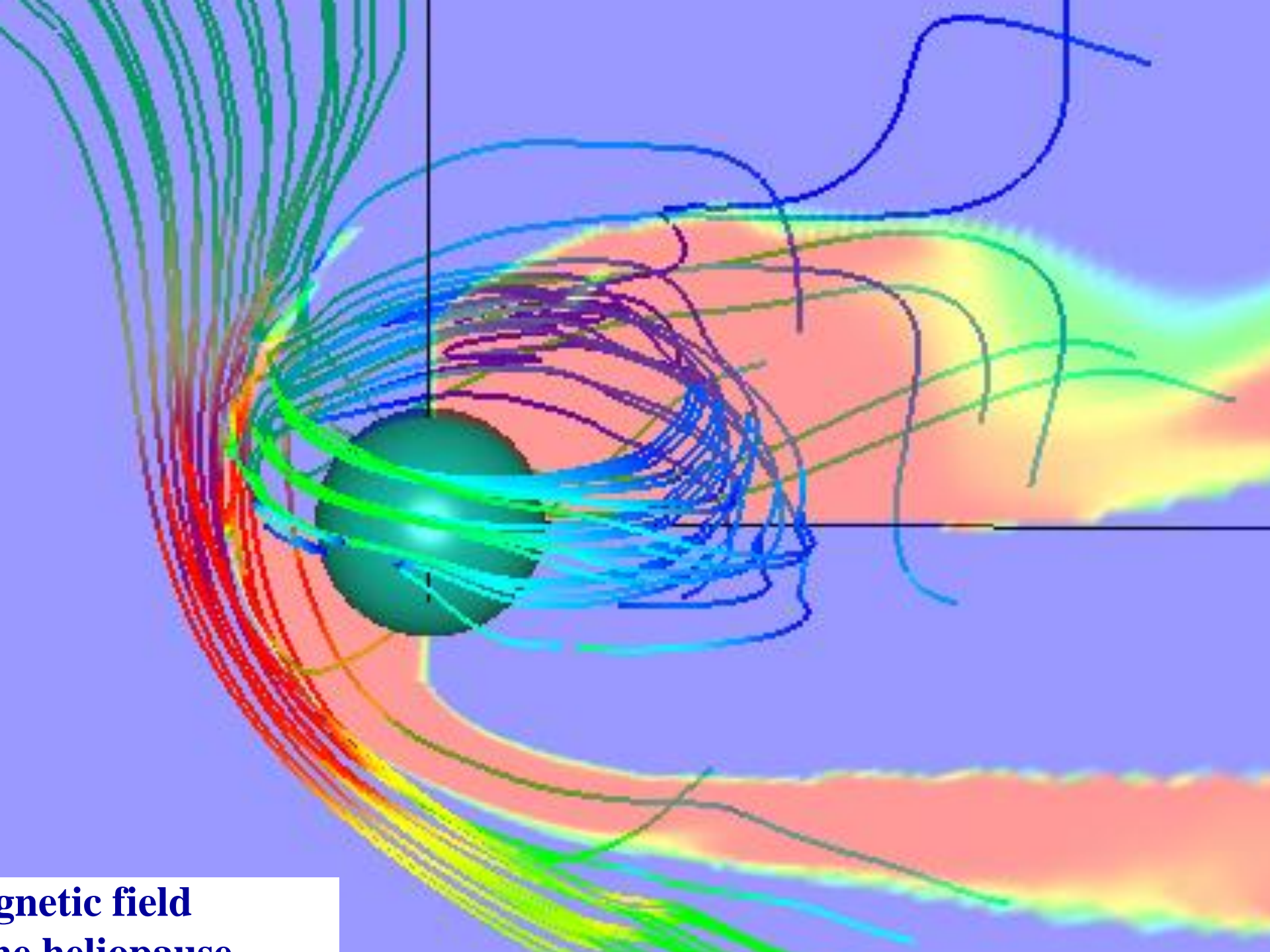
Unit: speed 50km/s, density 0.02/cc, magnetic field 0.5 μ Gauss,
temp 5×10^5 K, pressure 1.4×10^{-14} Pa



Along Sun-V2 Line (alpha=45 deg)

Unit: speed 50km/s, density 0.02/cc, magnetic field 0.5 μ Gauss,
temp 5×10^5 K, pressure 1.4×10^{-14} Pa





magnetic field
no heliopause

磁気圏電離圏対流生成機構 REPPUコードの結果

藤田茂 気象大学校

田中高史 九州大学

内容

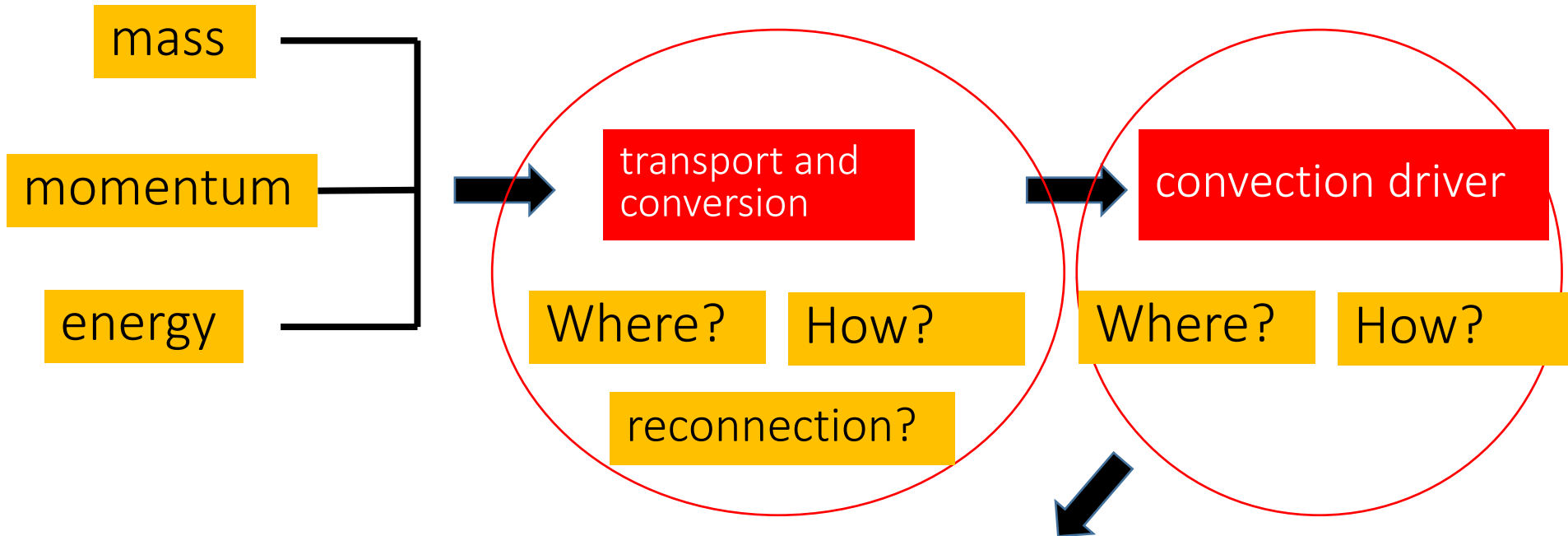
- 太陽風からR1FACのダイナモに至るエネルギーの流れ問題の再考
(太陽風と磁気圏電離圏複合系のリンクを探る)

“missing link”を埋める

Solar wind

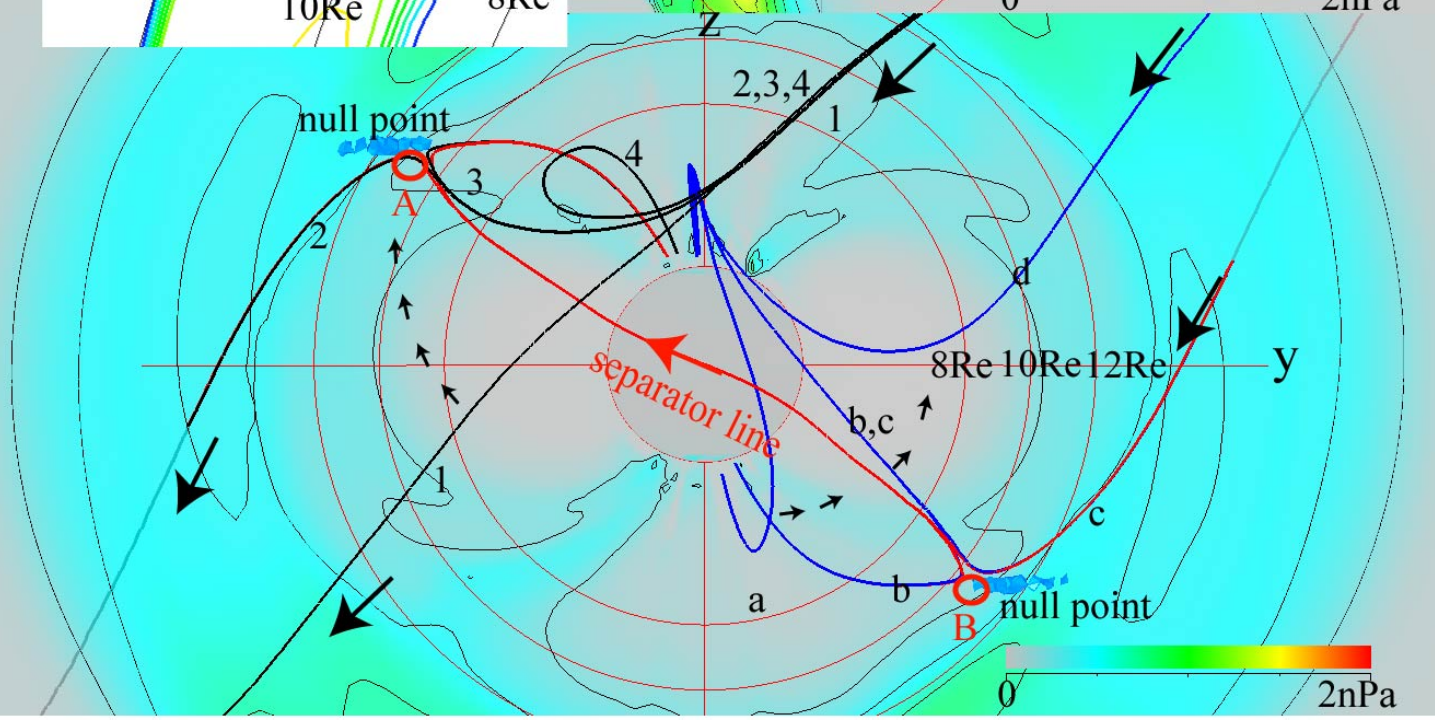
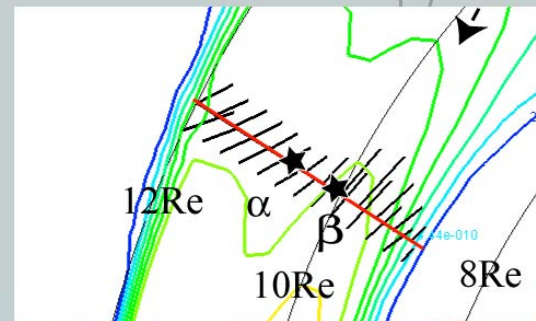
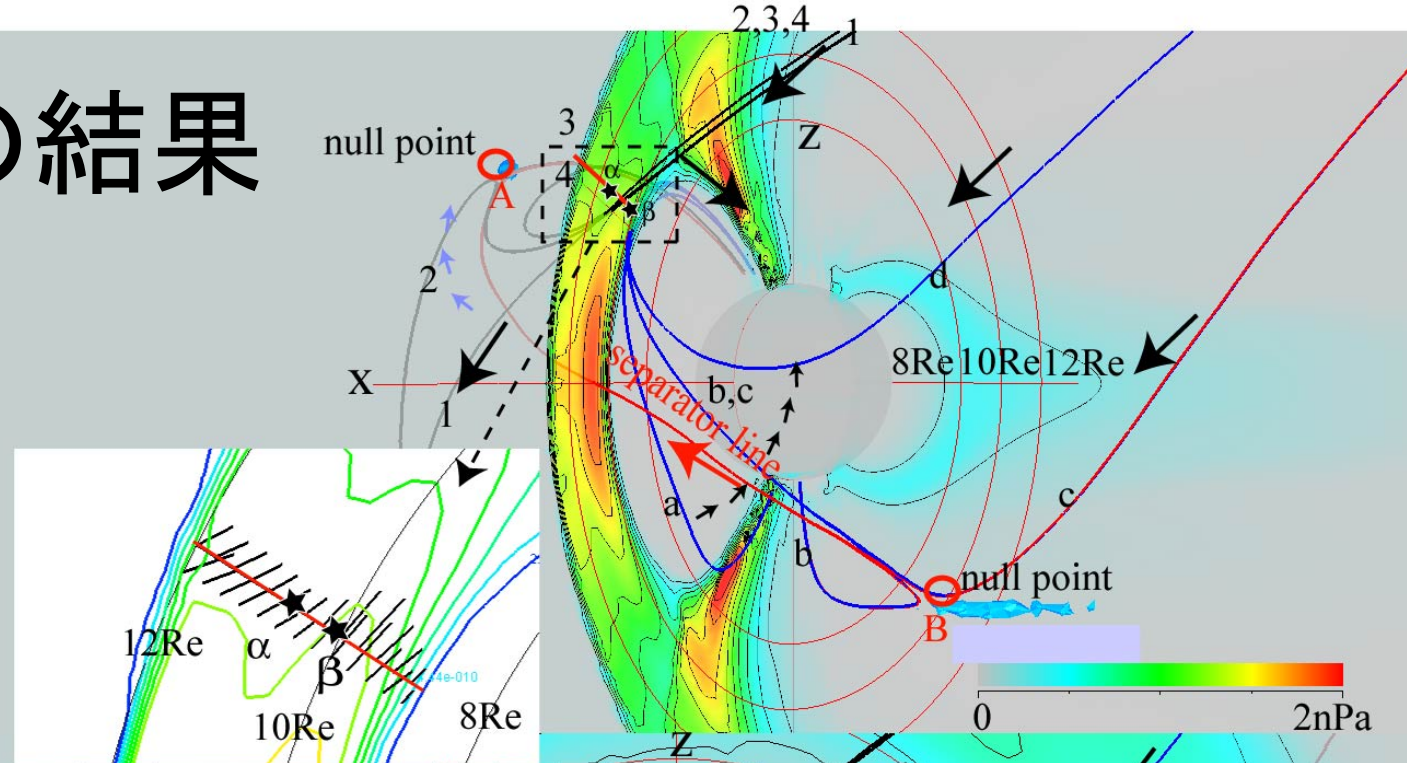
Magnetosheath - magnetopause

Magnetosphere
(cusp-mantle)

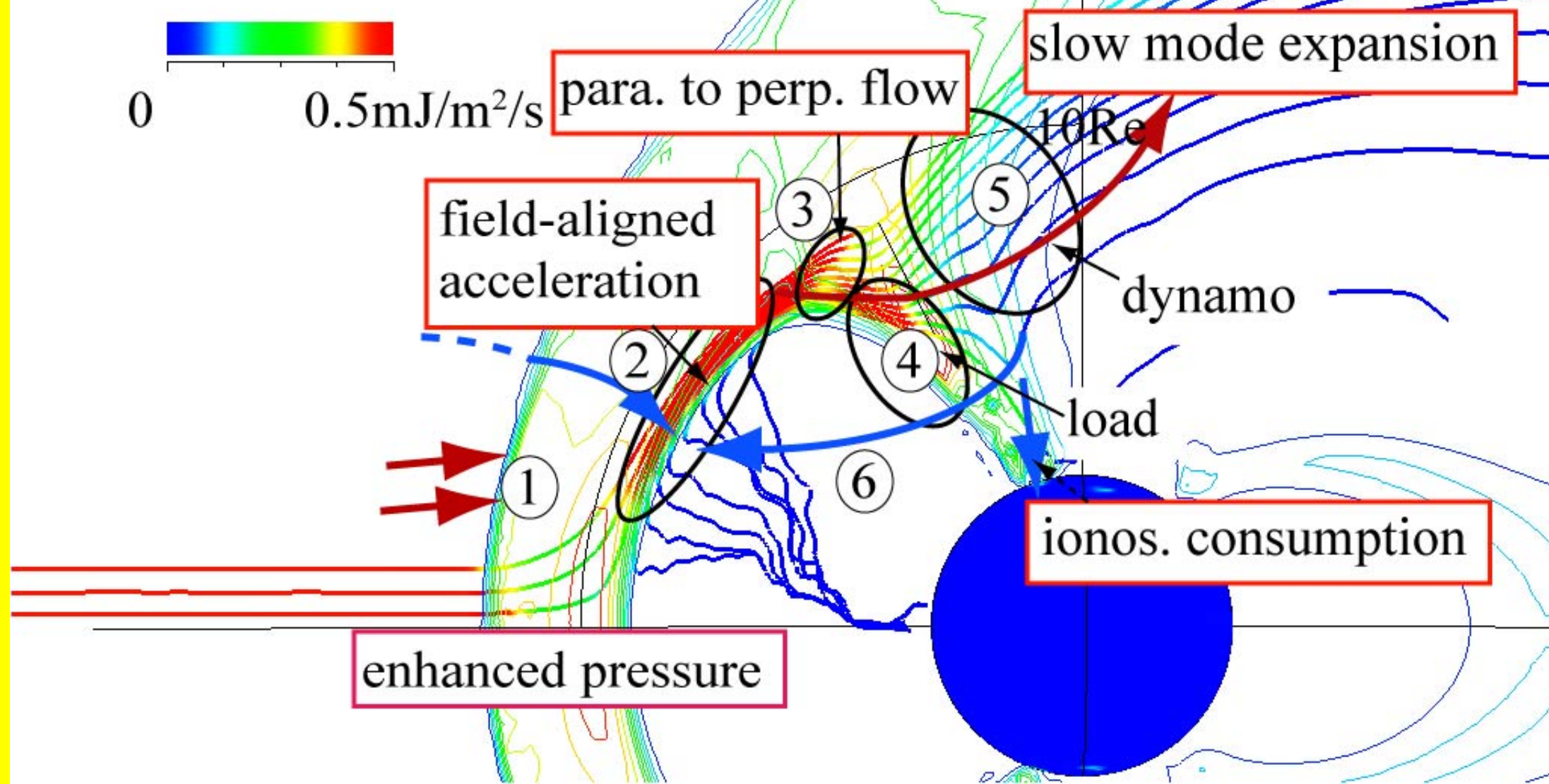


- 対流駆動源を理解することはIijima and Potemra (1976)のR1FAC系の電流源生成機構を理解することである。

球座標コードの結果

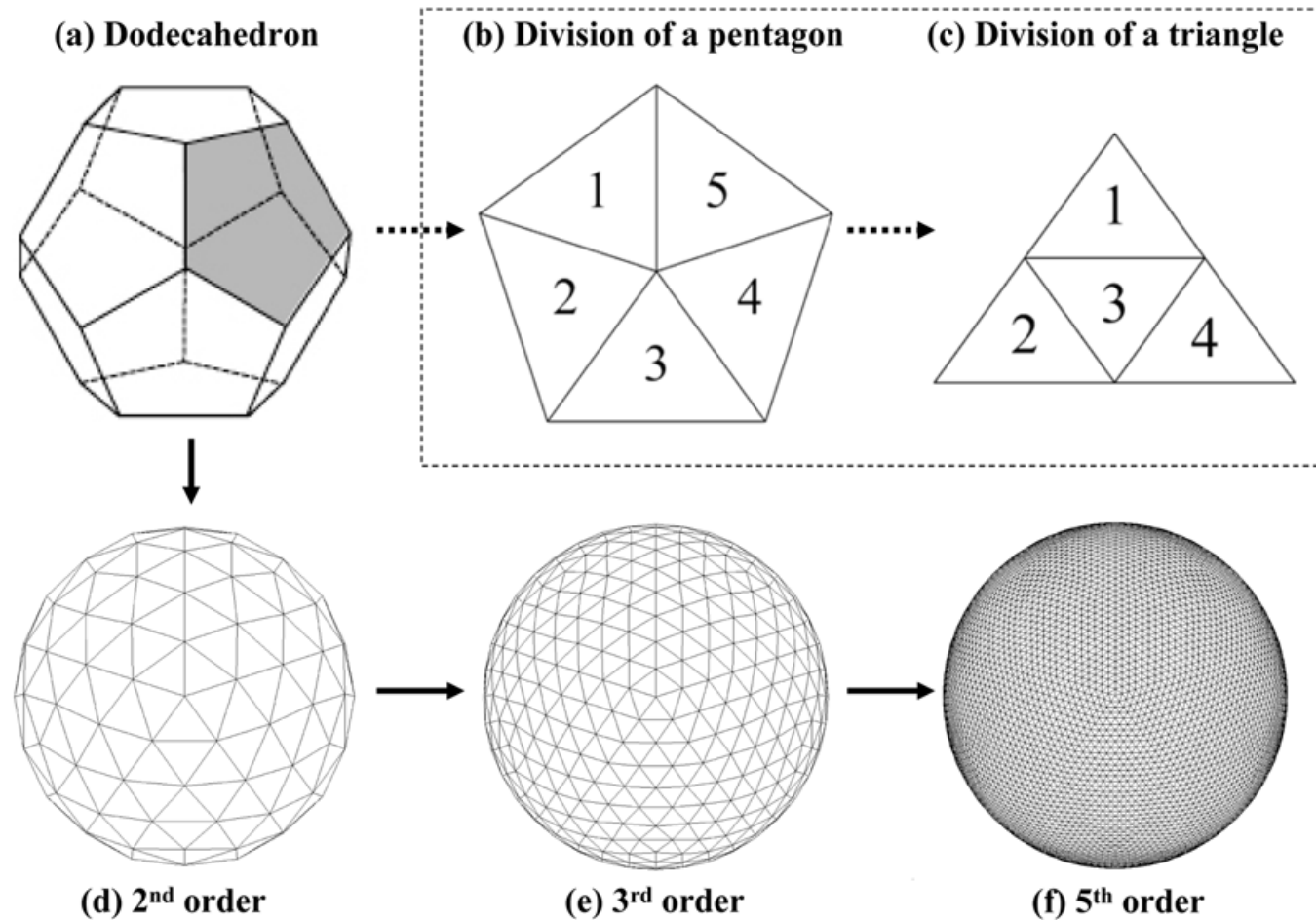


球座標コードの結果

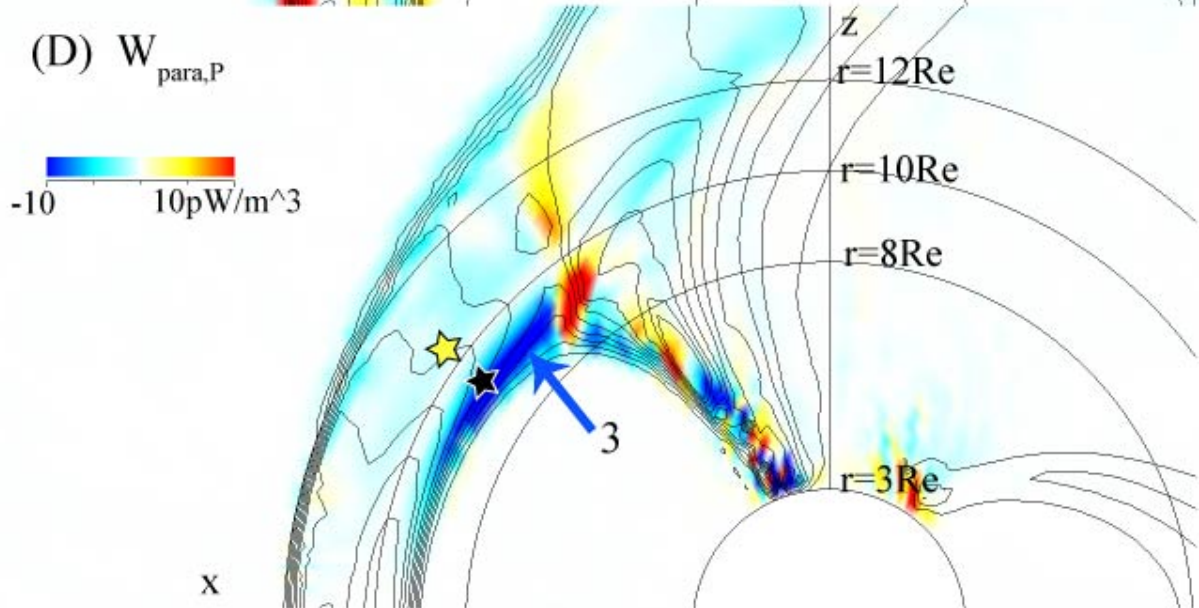
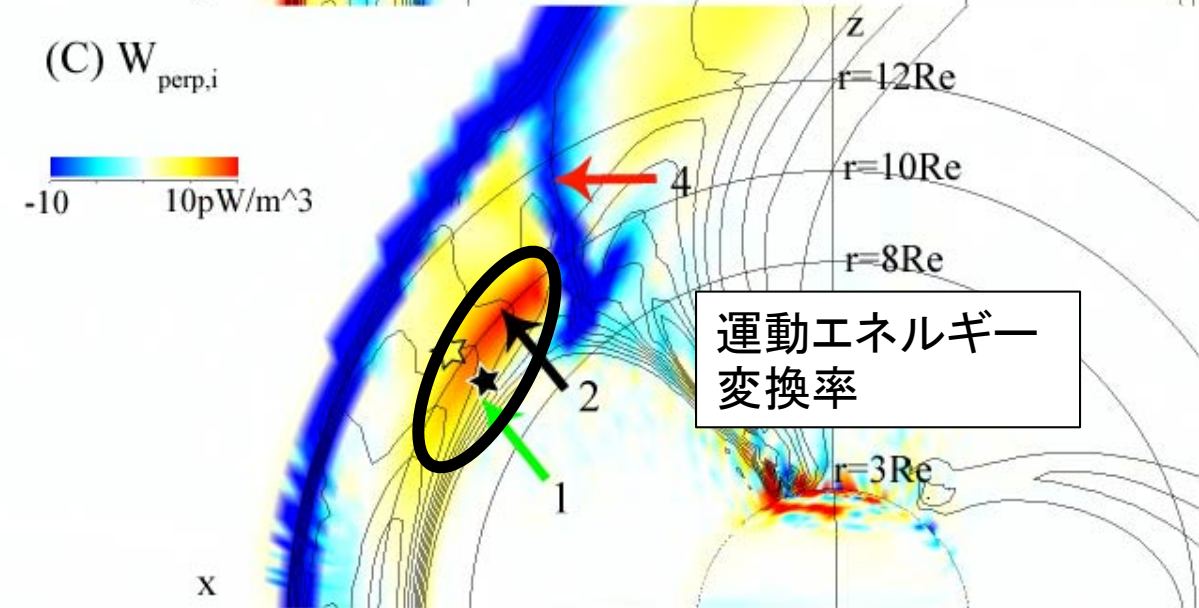
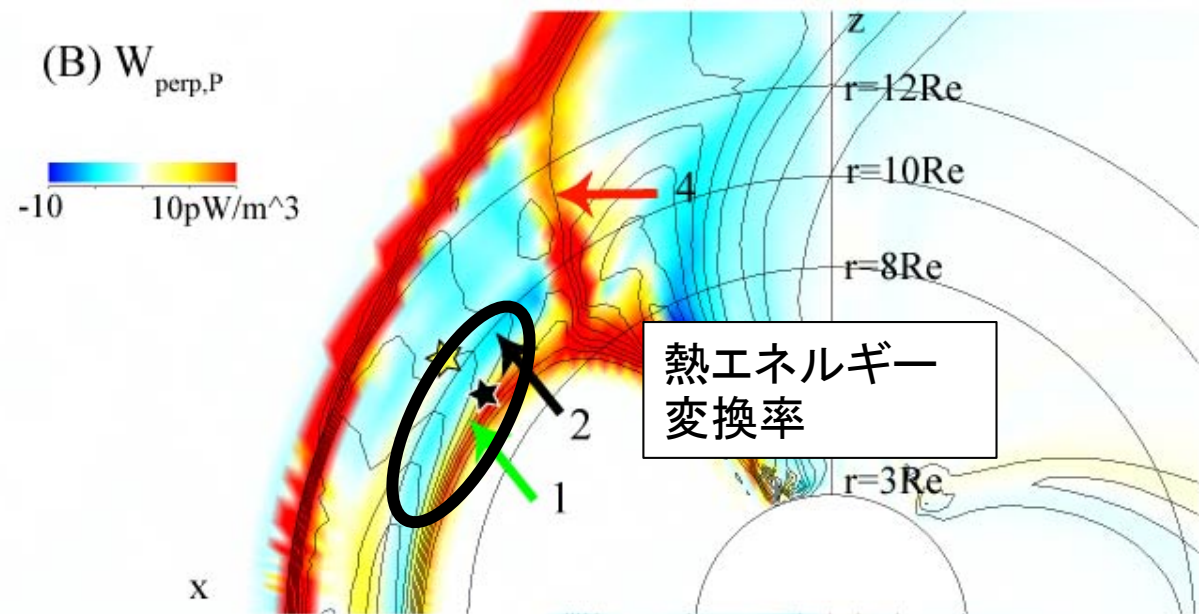
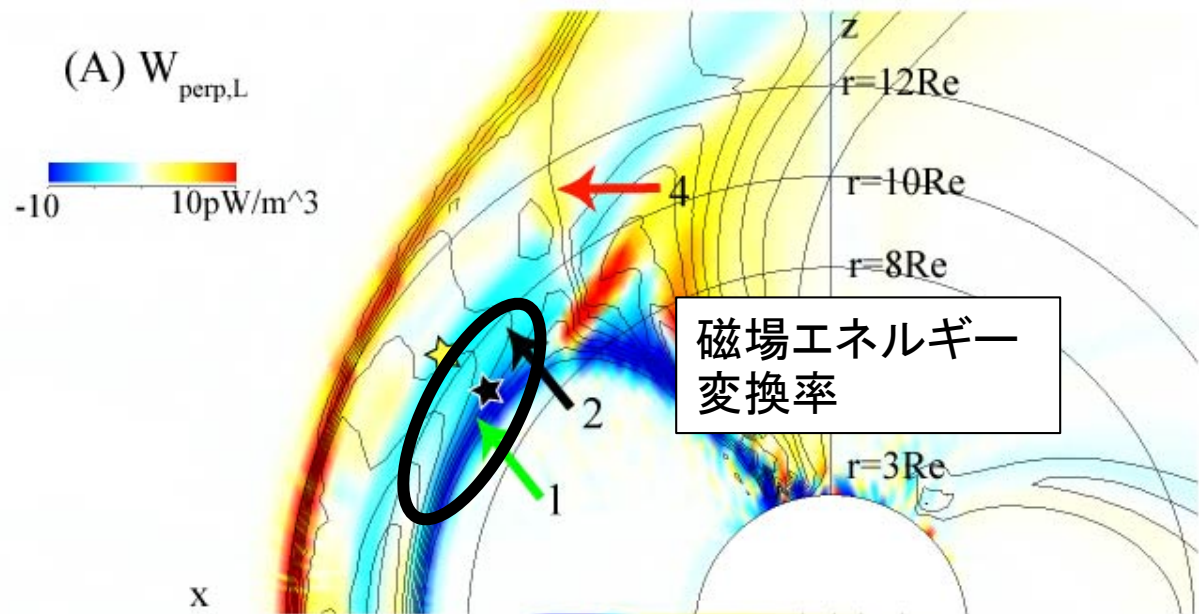


球座標コードとREPPUコード(レベル6、r方向の層数240)の違い

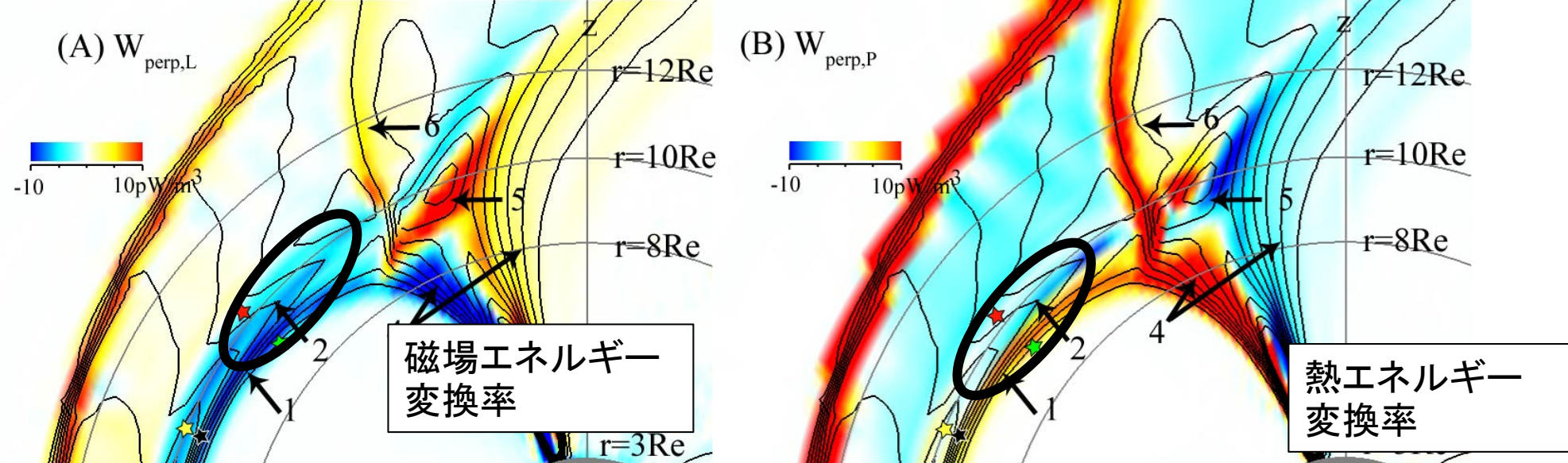
- 球座標コードはTanaka et al (2010)で使用されたもの。メッシュ幅: $0.25Re(r) \times 0.35Re$ (緯度) $\times 0.75Re$ (経度)
- 正12面体を用いたREPPUコード(レベル6)。メッシュ幅: $0.22Re(r) \times 0.20Re$ (緯度) $\times 0.31Re$ (経度)
- REPPUコードの磁場粘性係数(比抵抗係数)を1/10にしている(magnetosheathでの磁気レイノルズ数 $\sim 10^7$)



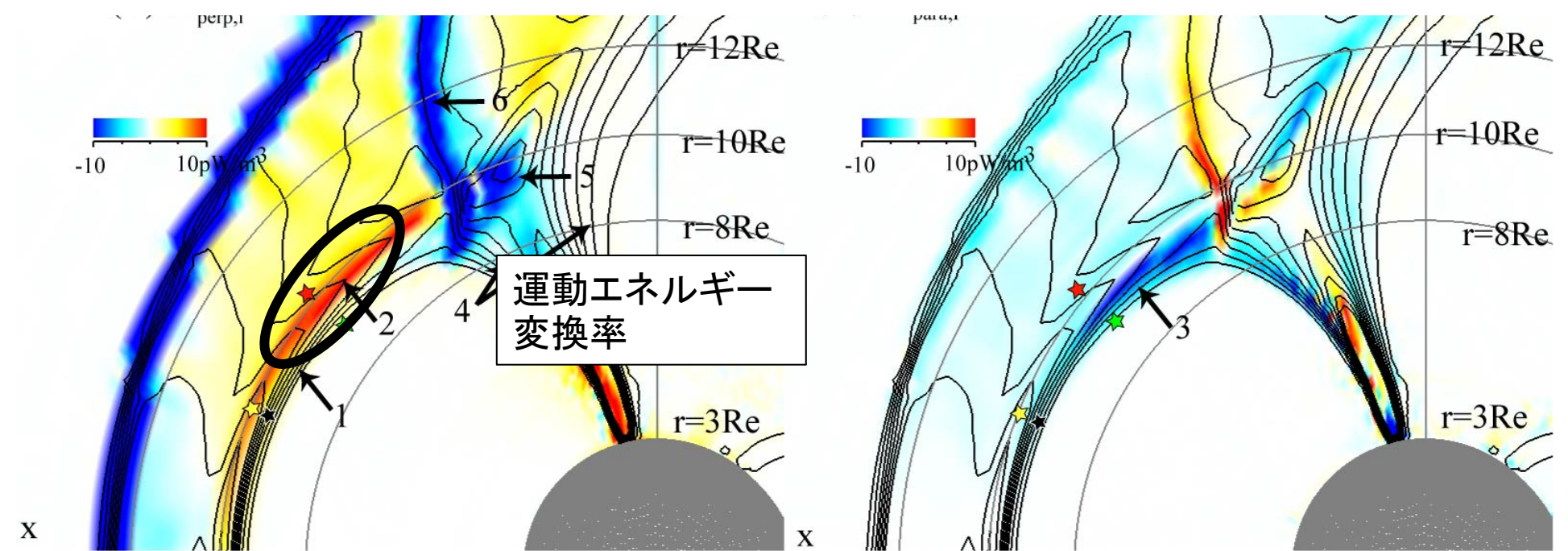
球座標コードの結果



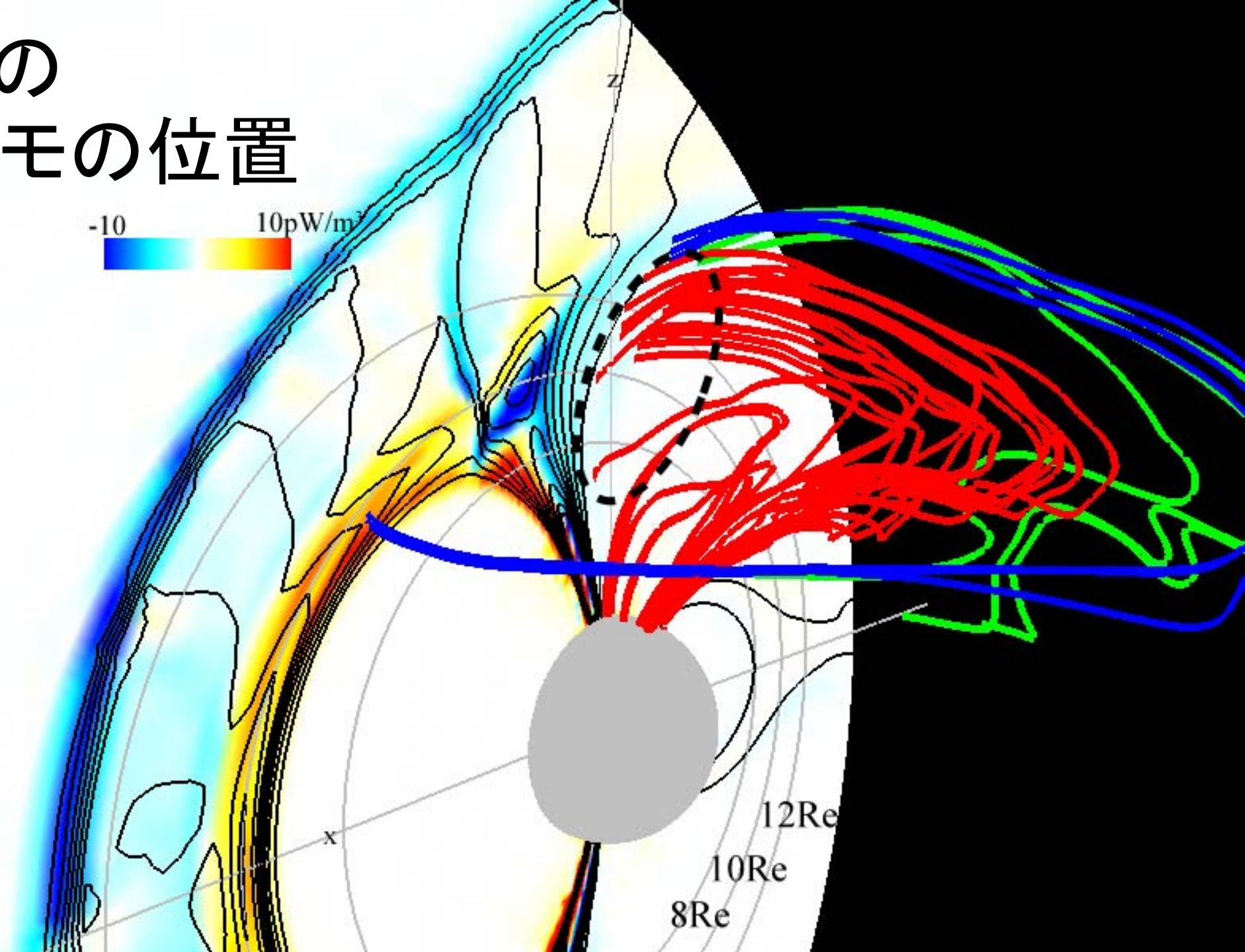
REPPU コード の結果



- Magnetopauseでのエネルギー変換がシャープな構造として解析できる

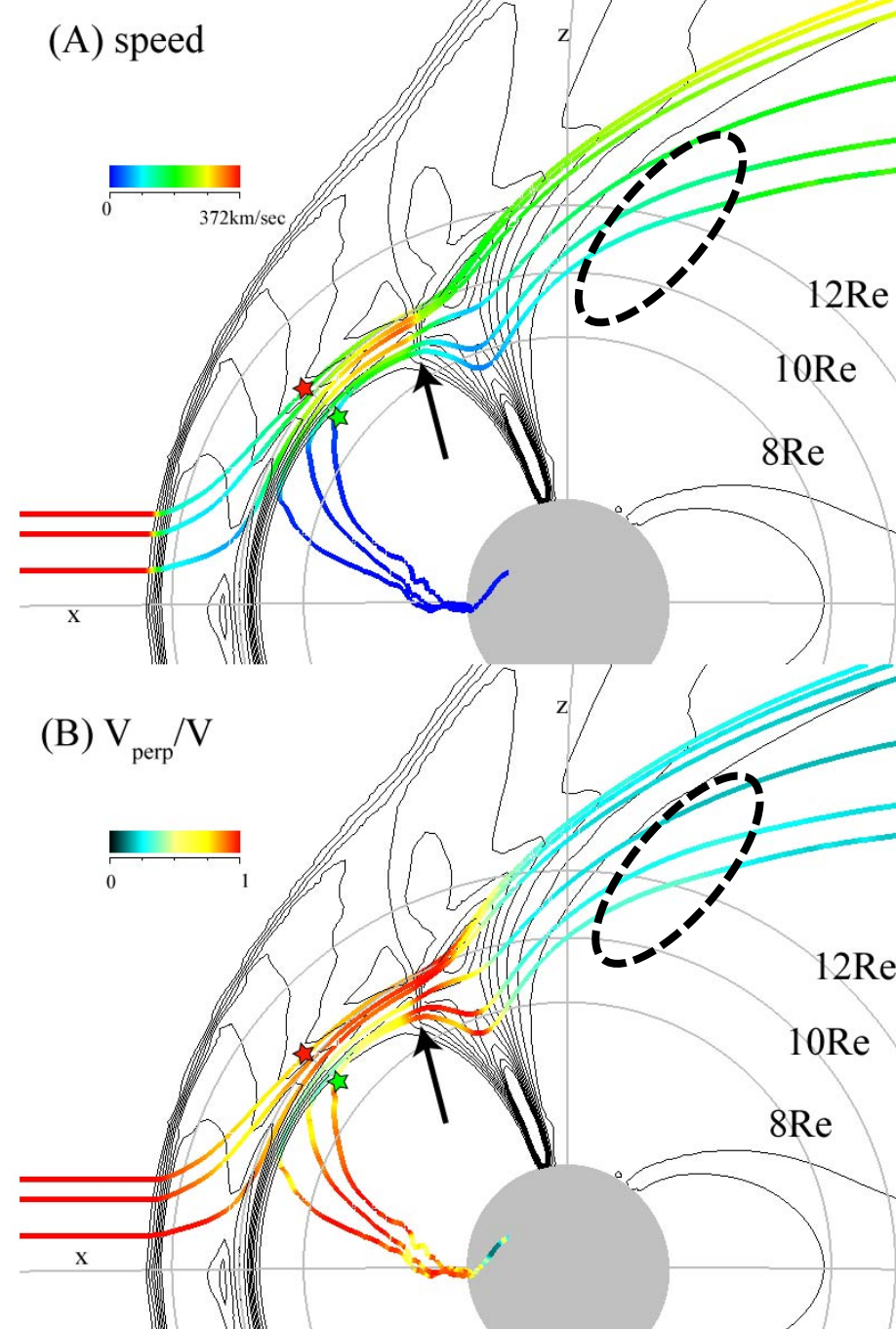


R1FACの ダイナモの位置

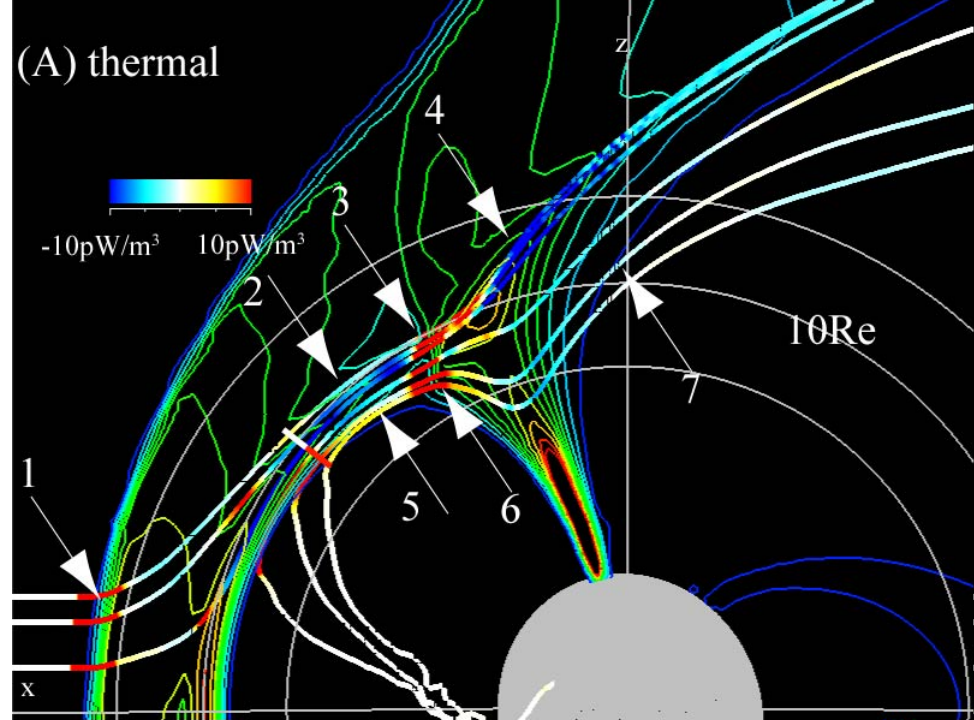


REPPUコードで 求めたbulk flowの流線

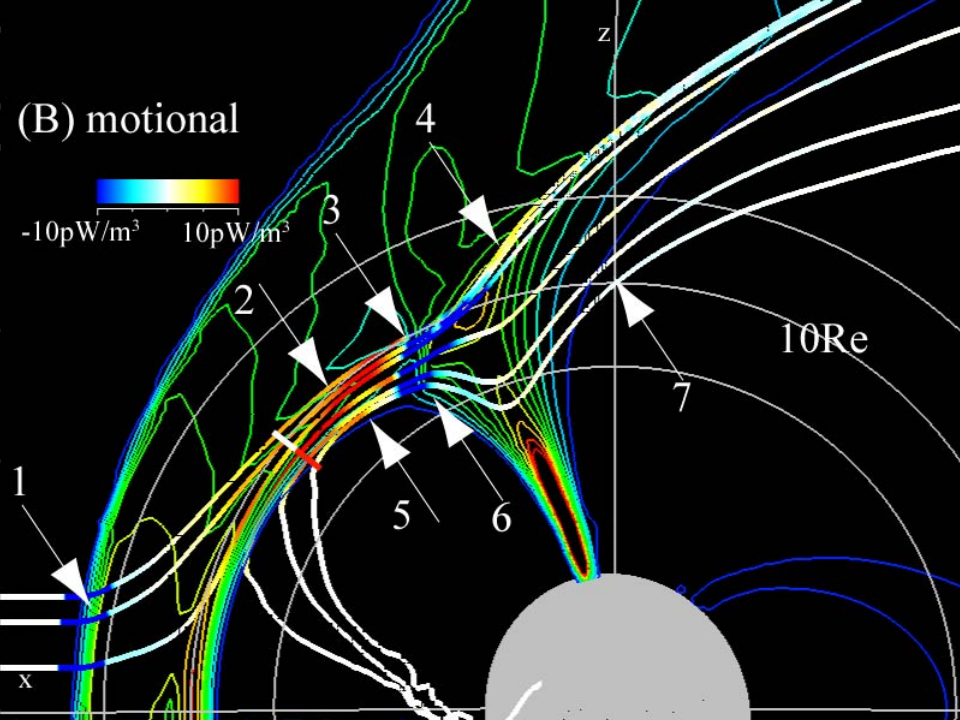
- 太陽風から流れてきたフローはR1FACのダイナモ領域には至らない。
- (球座標コードの結果では、R1FACのダイナモ領域に到達できた。)



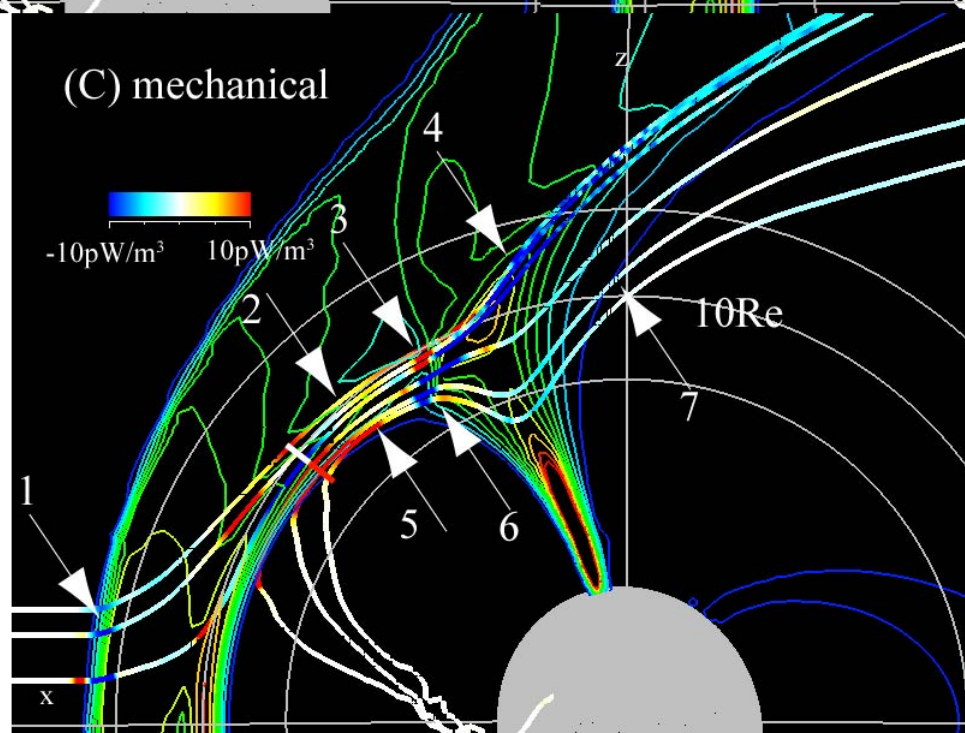
(A) thermal



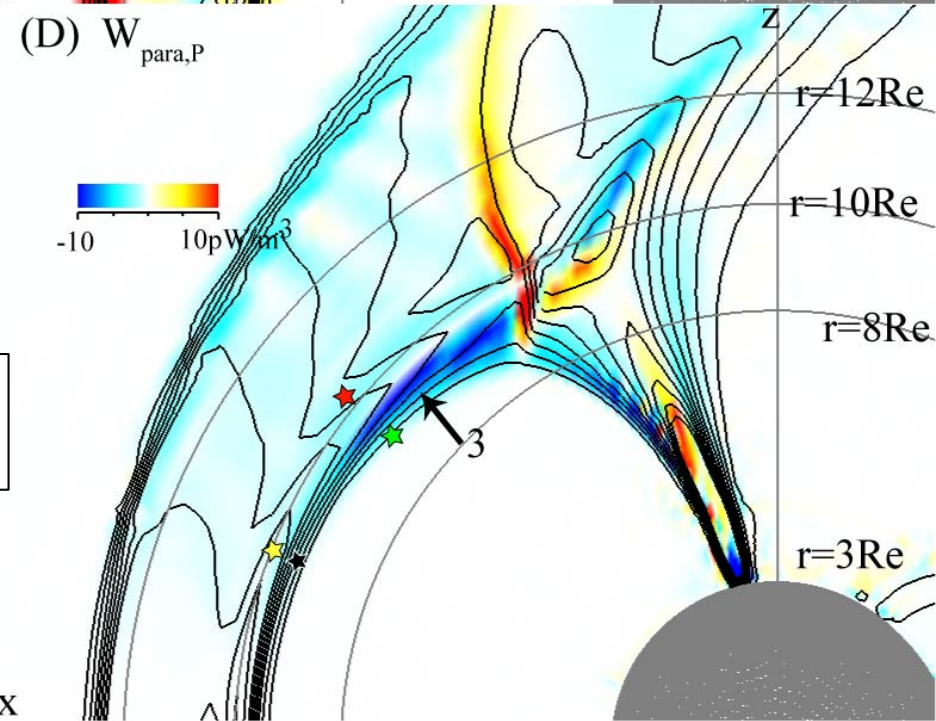
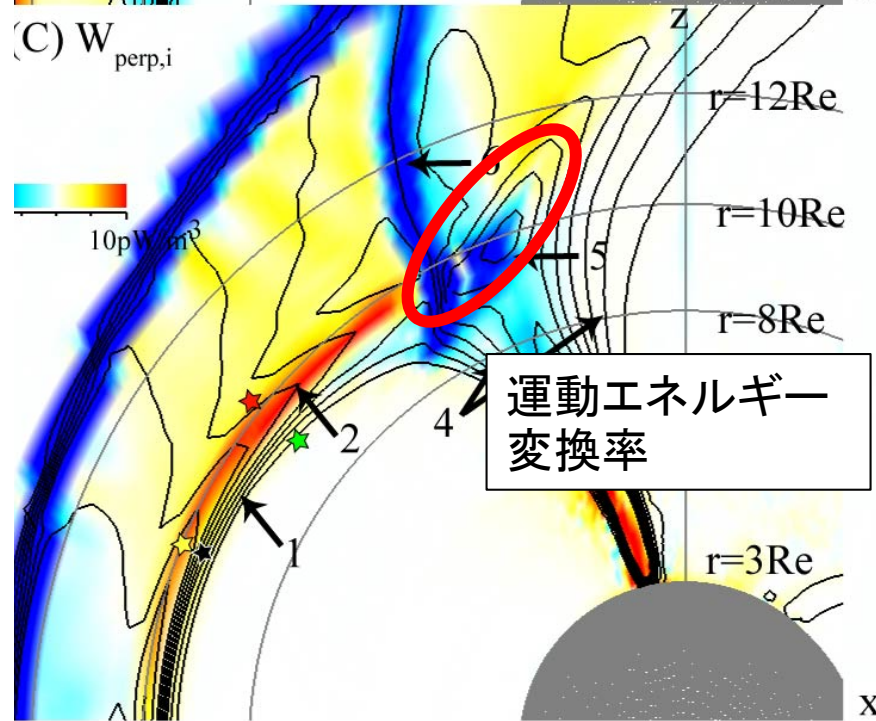
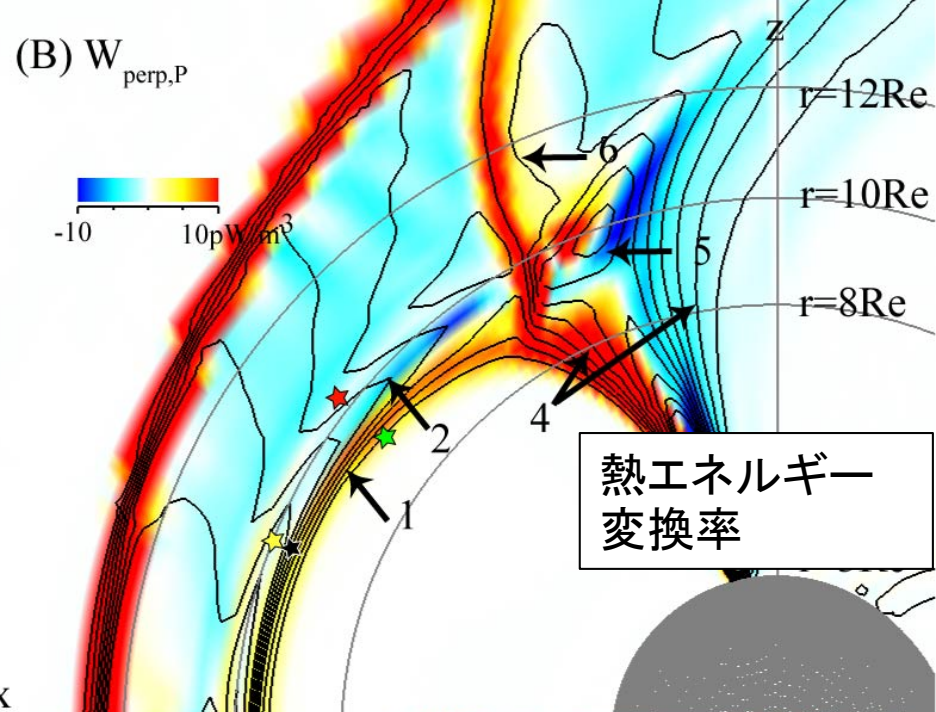
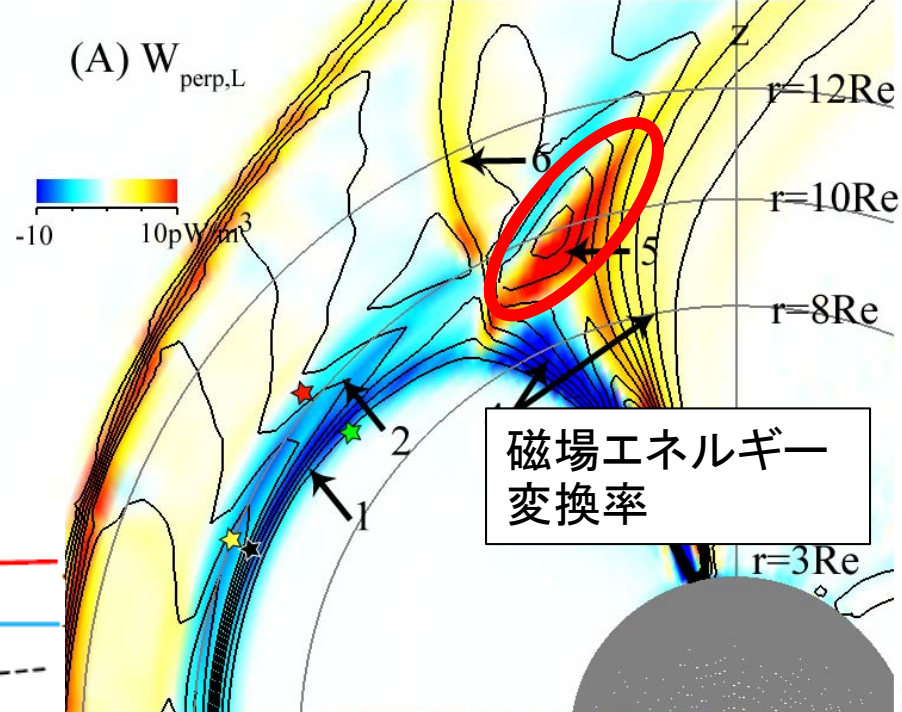
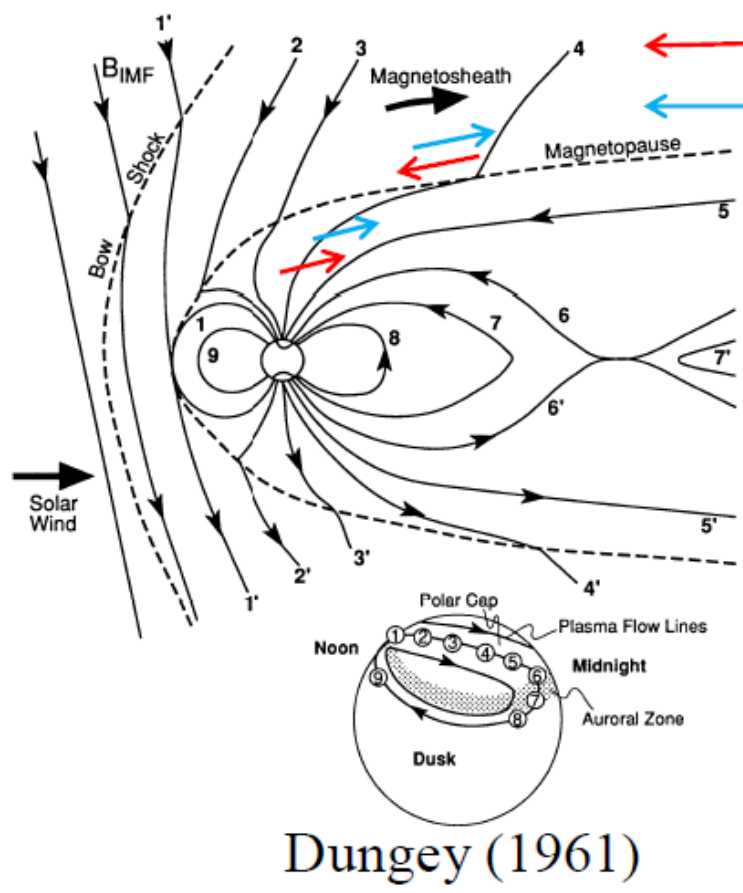
(B) motional

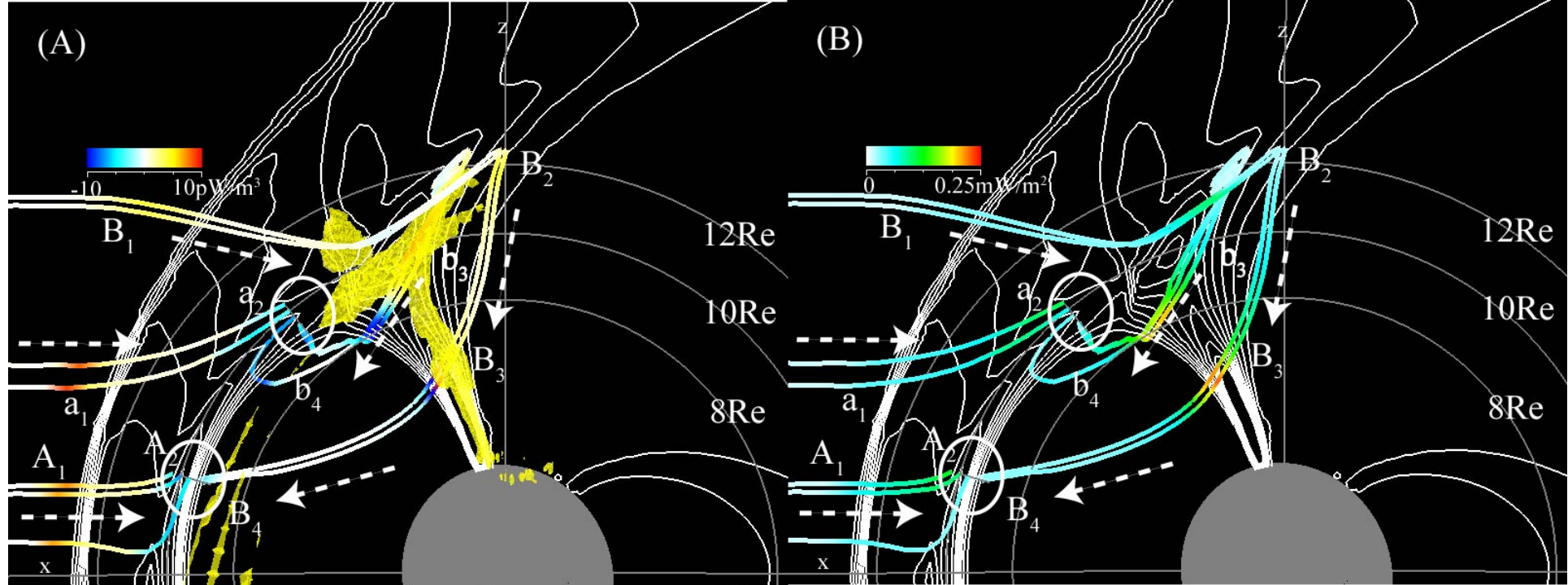


(C) mechanical

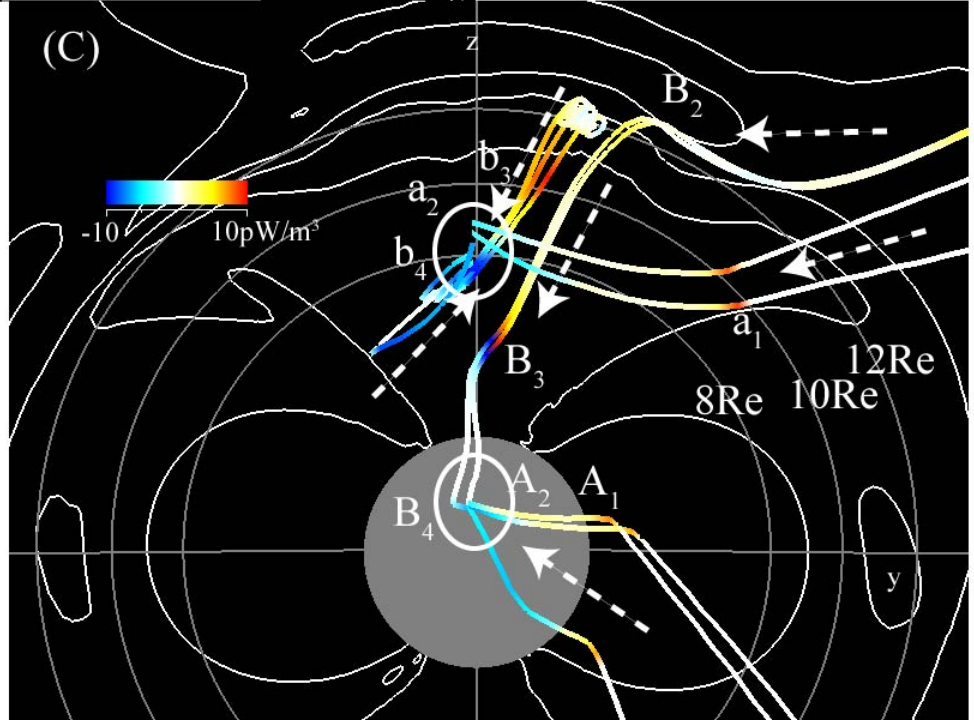


The local Dungey convection

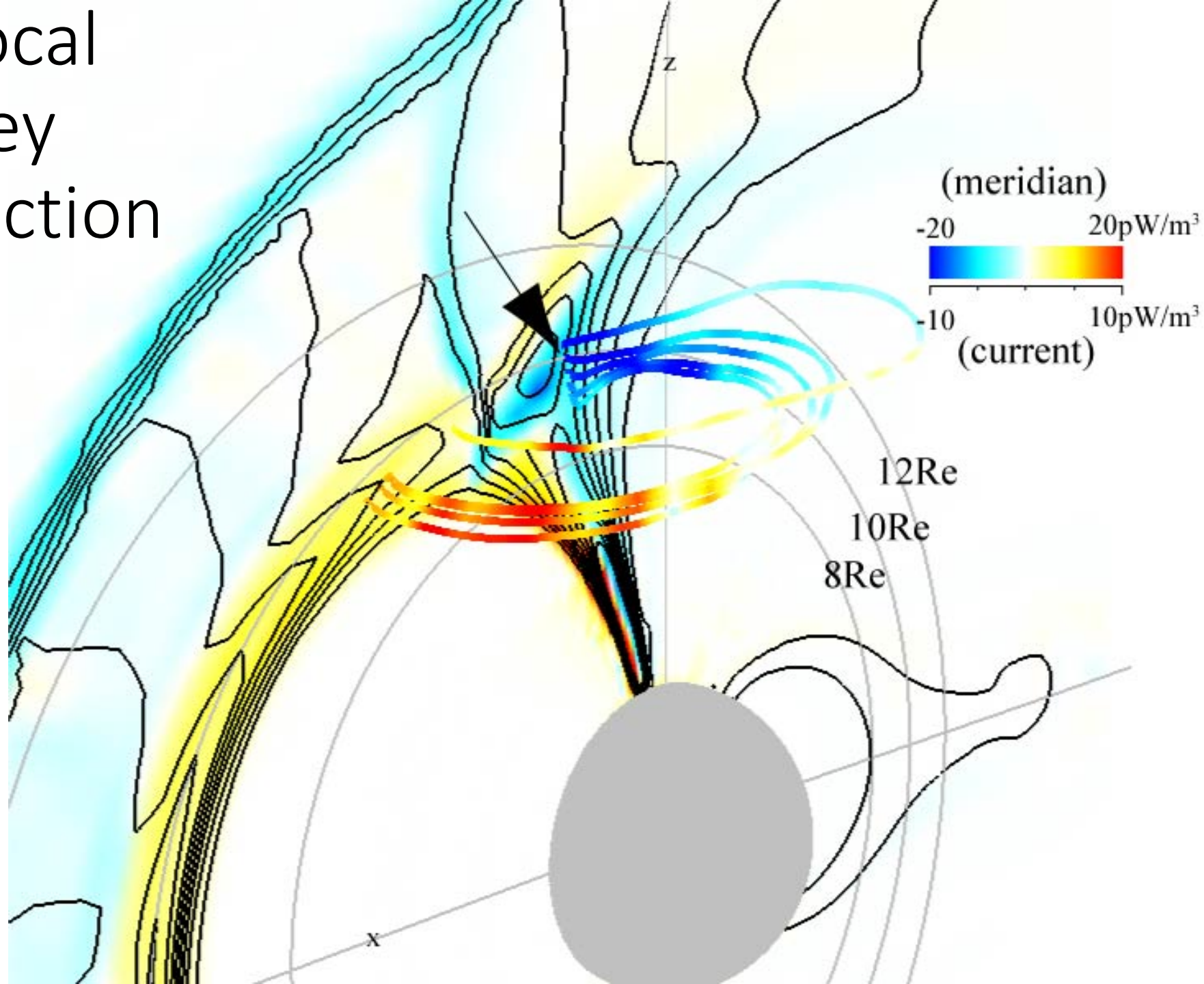




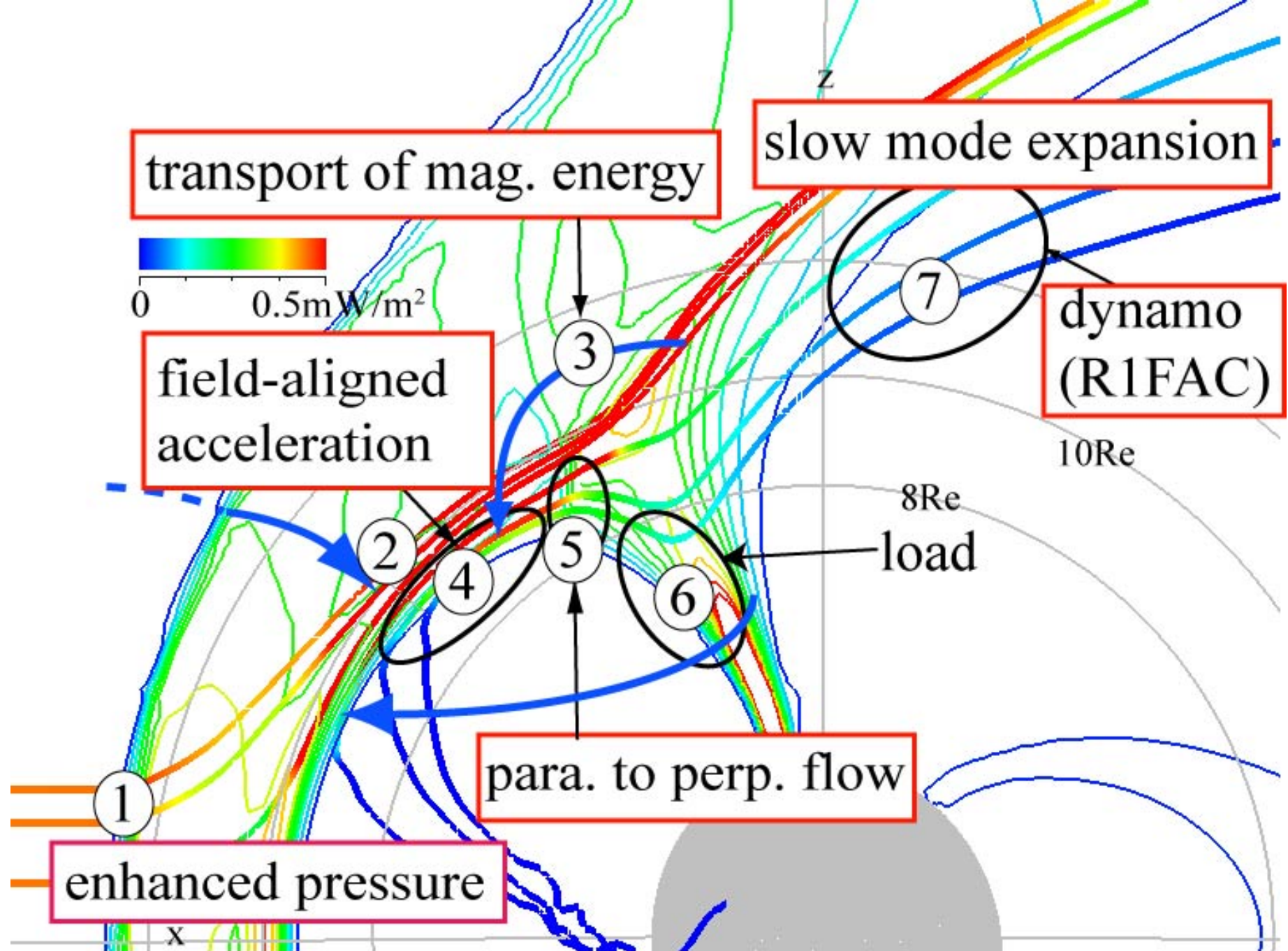
ポインティング フラックス



The local Dungey convection



REPPUコード
で求められ
た太陽風か
らR1FACのダ
イナモに至る
エネルギー
の流れ



平成28年度極地研計算機利用者研究集会, 2016. 7. 22, NIPR

大容量シミュレーションデータの簡易可視化

田中高史、片岡龍峰、岡田雅樹

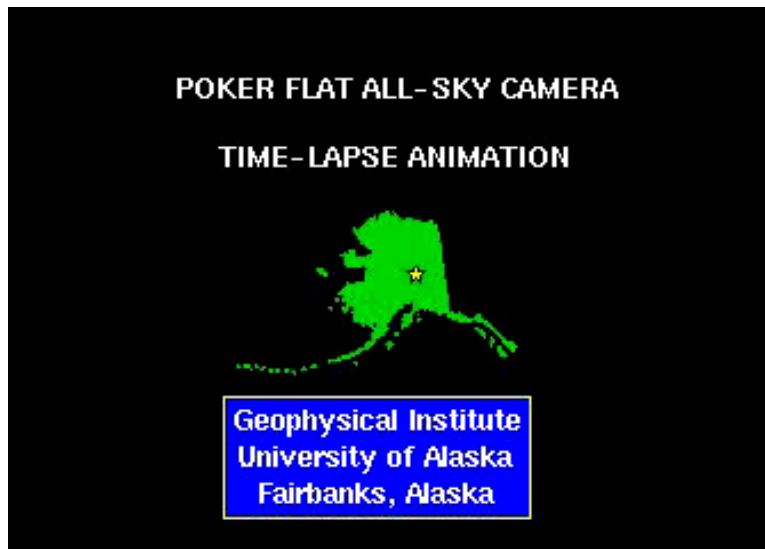
Discrete arc at Syowa Station

(onset)



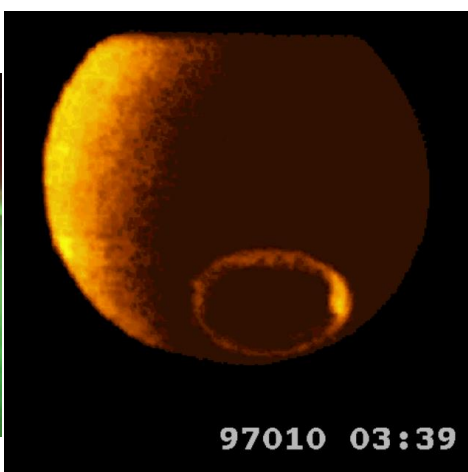
Substorm onset at Syowa Station

(onset)



オーロラの全体像の観測

テクノロジーの進化→原因の追及→磁気圏(衛星)観測

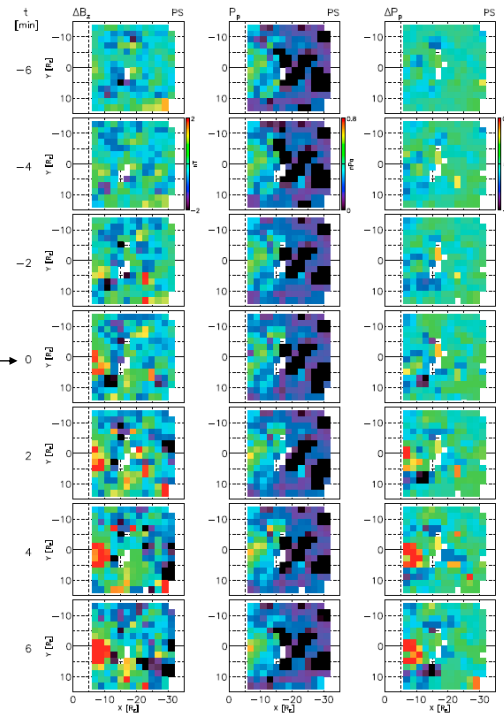


低解像度の衛星観測

全体構造推定の困難

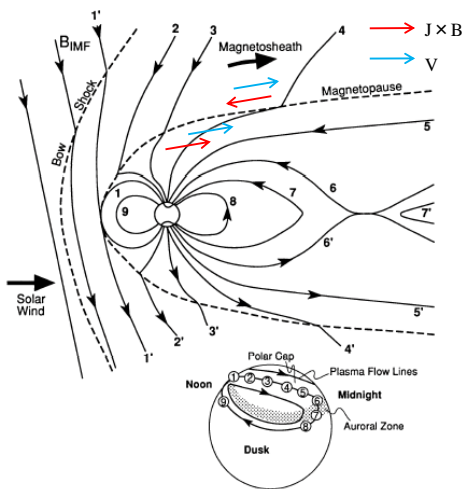
Δ 磁場Z成分・圧力・ Δ 圧力

オンセット \rightarrow 0

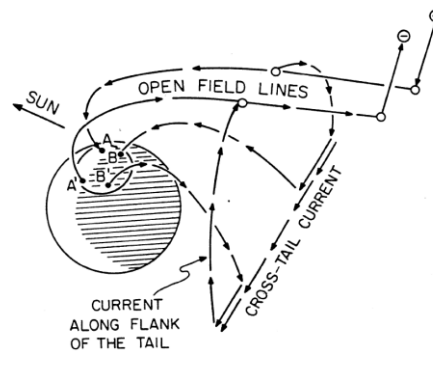


Traditional excitation of convection by the magnetic tension

(Solar wind kinetic energy \rightarrow magnetic tension \rightarrow momentum)

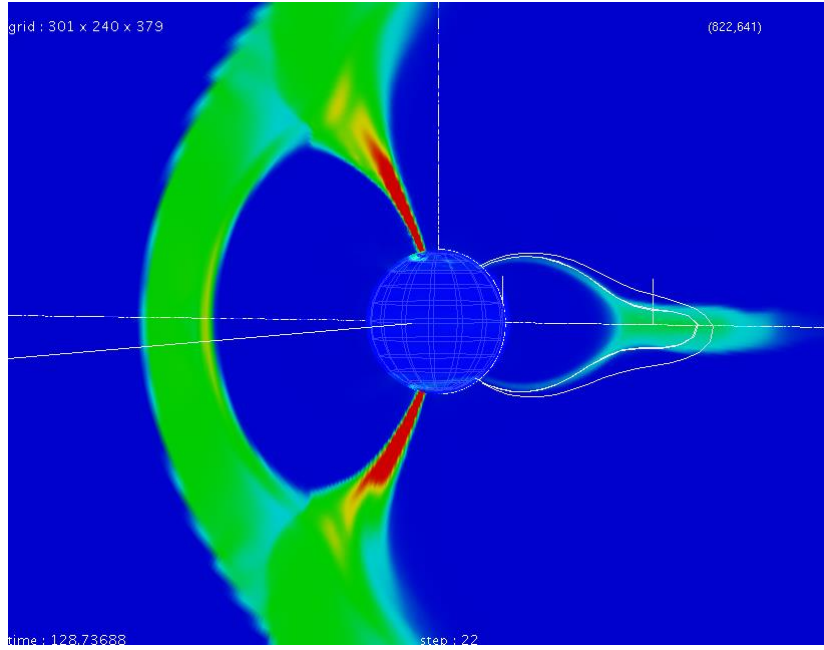


Dungey(1961)

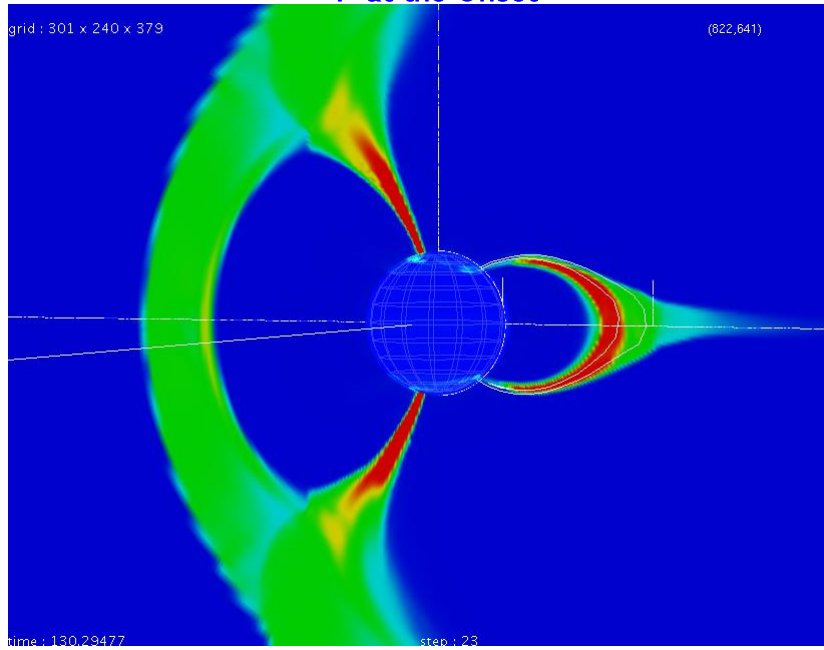


Stern (1983)

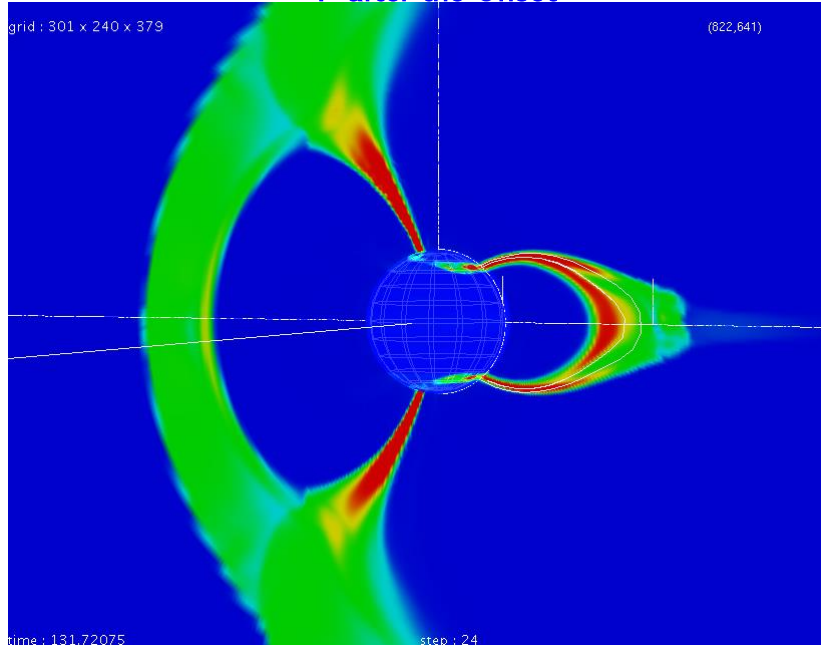
P before the Onset



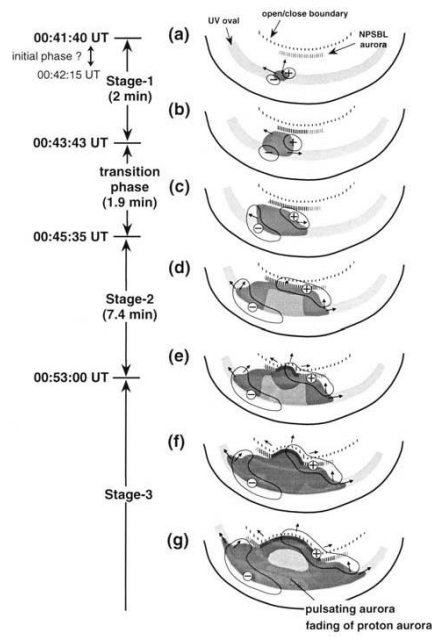
P at the Onset



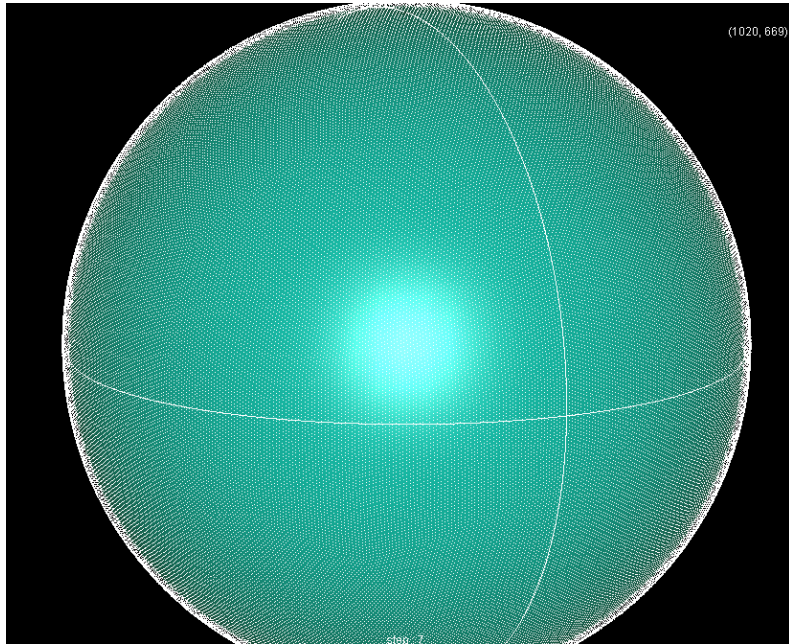
P after the Onset



Ground observation (Kadokura, 2002)

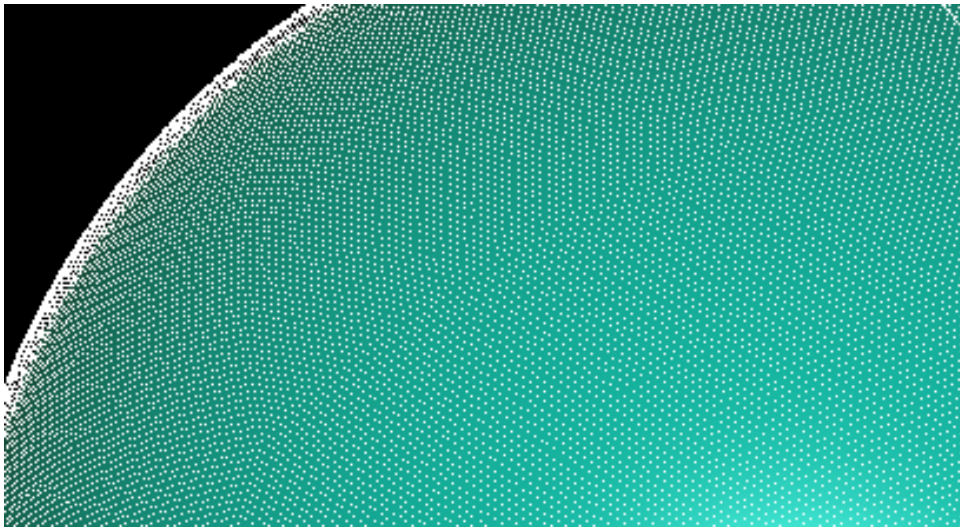


12面体分割格子／高解像度シミュレーション

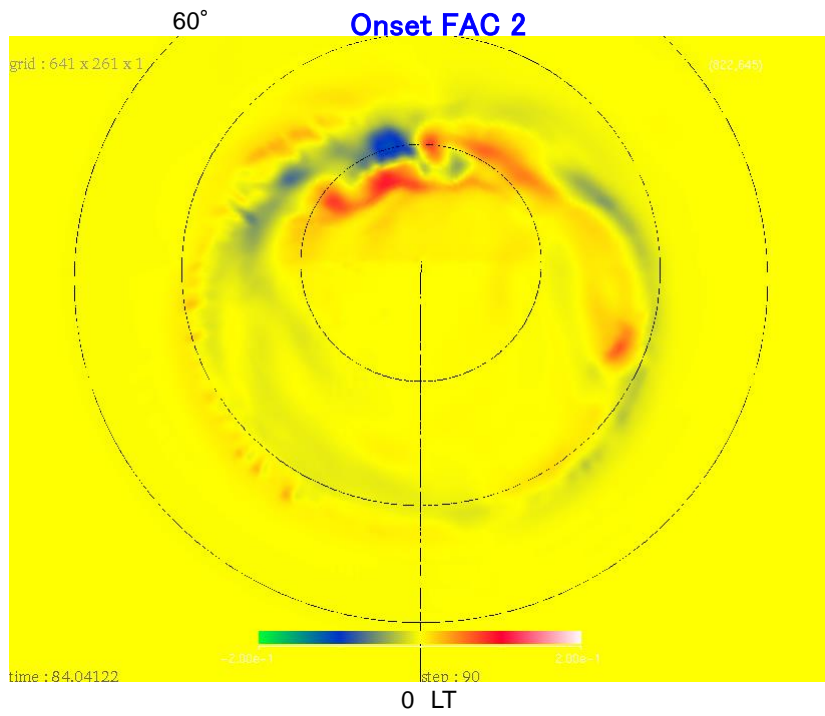
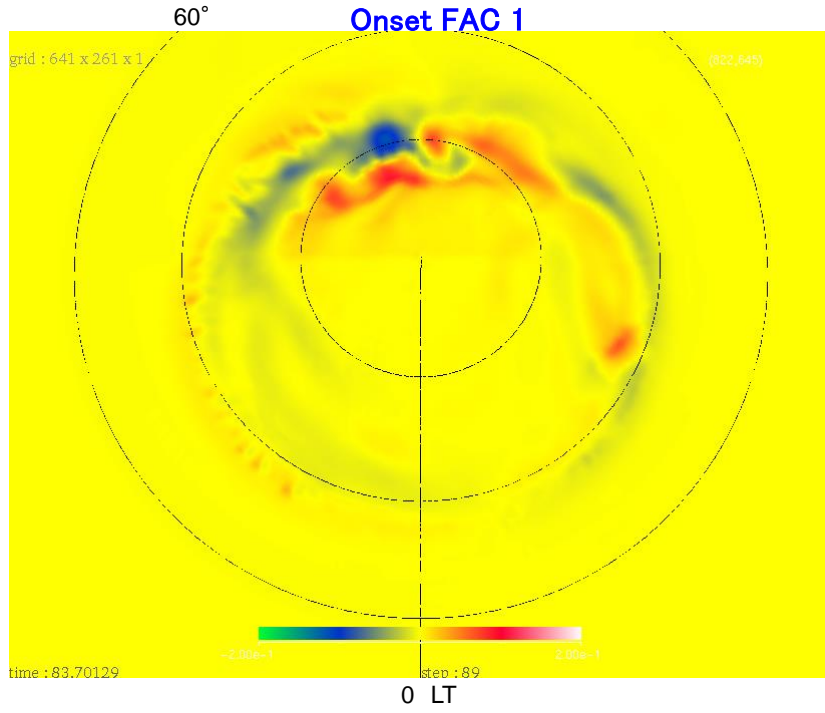


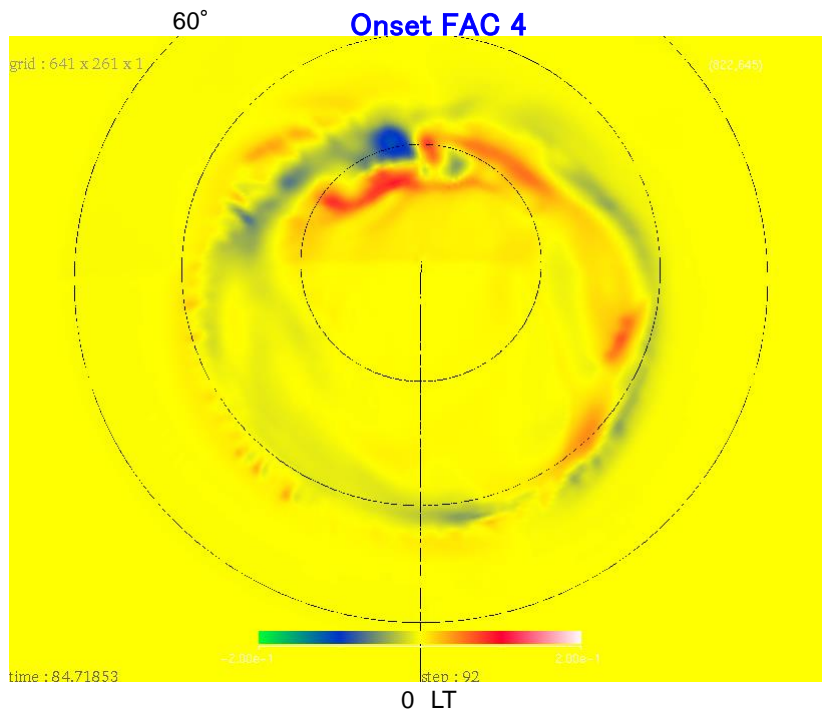
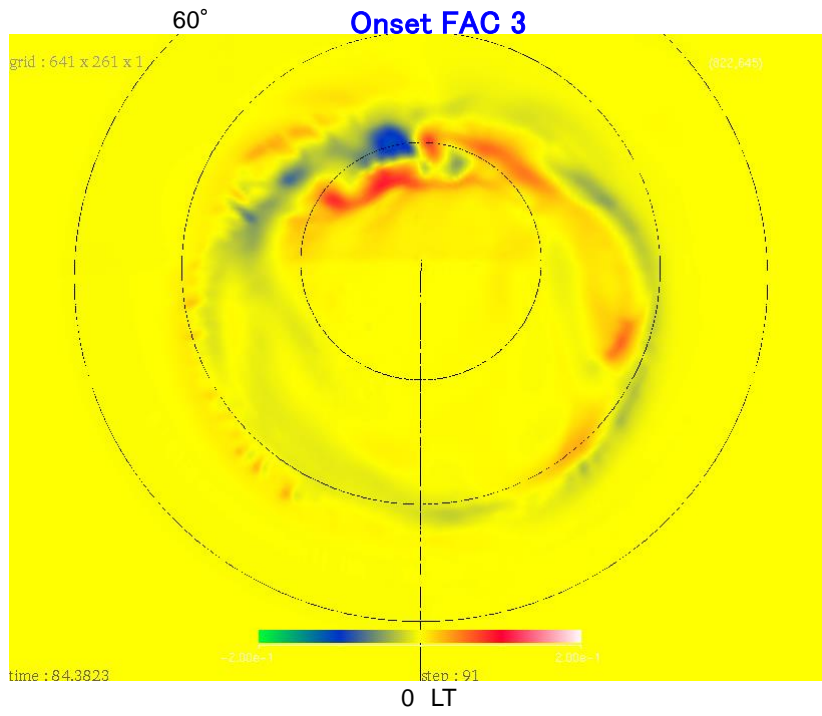
11

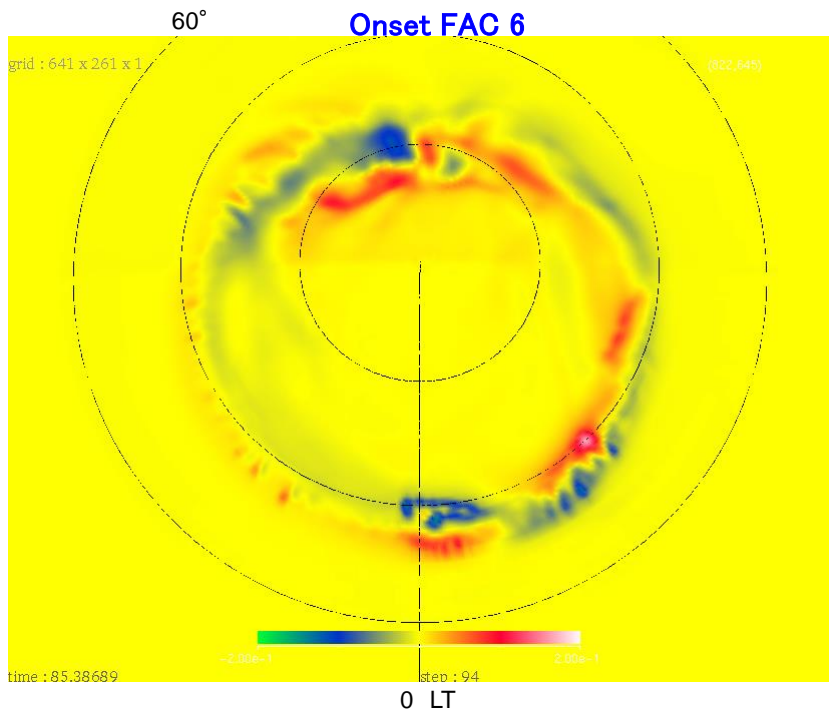
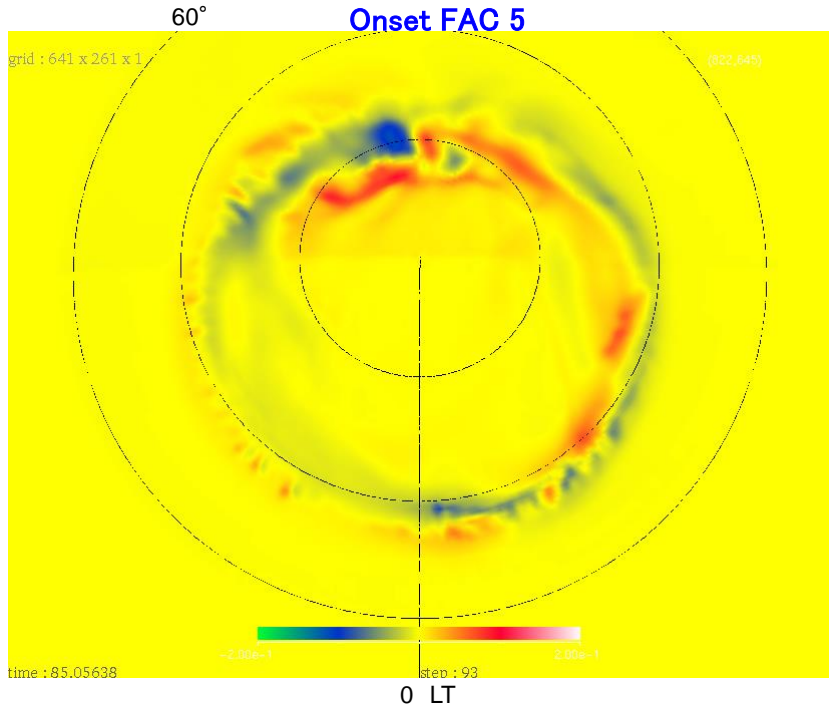
12面体分割格子／高解像度シミュレーション

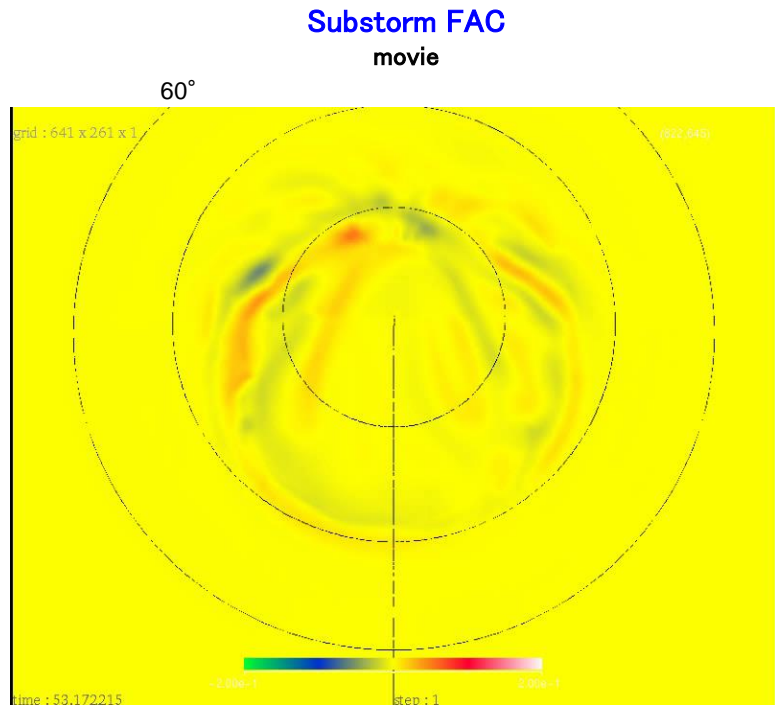
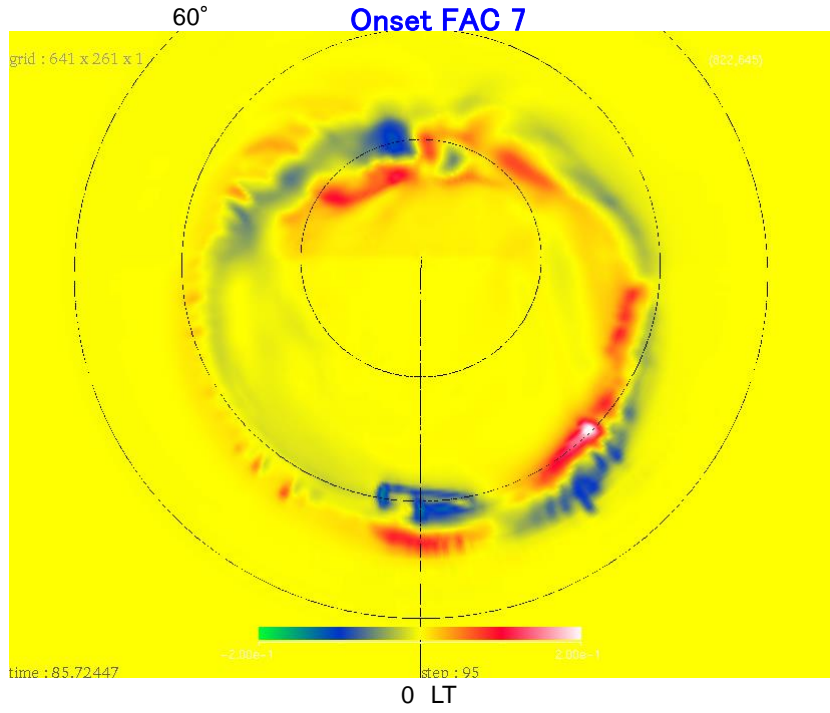


12

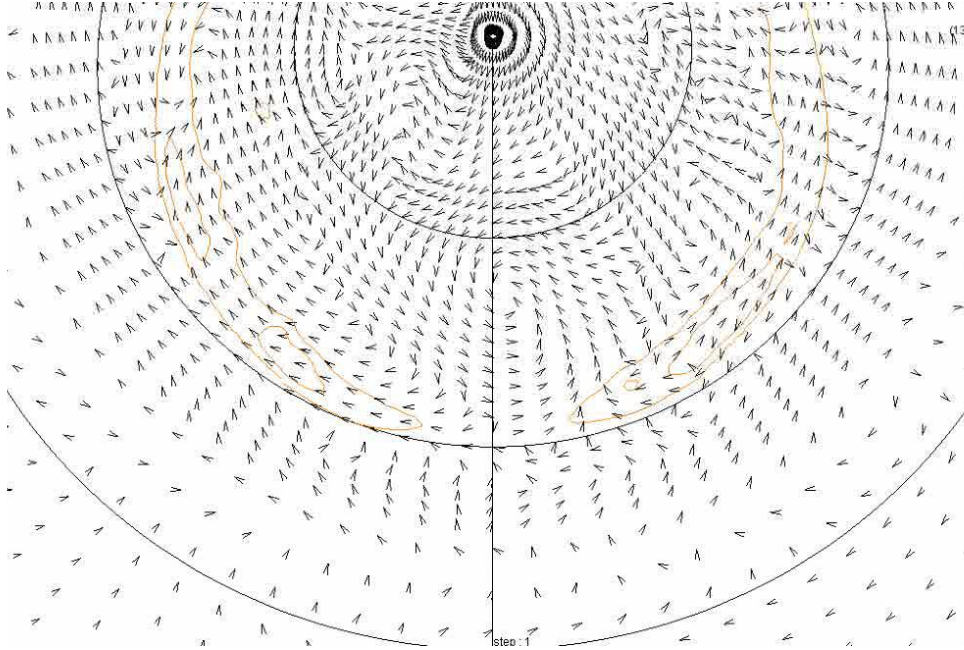




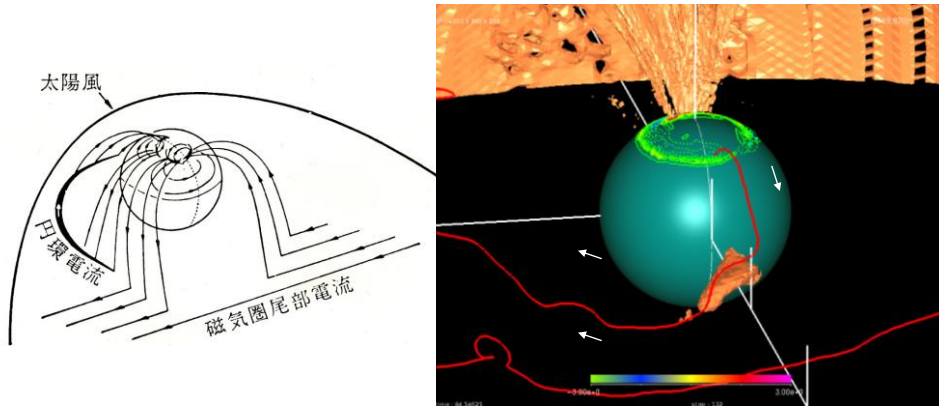




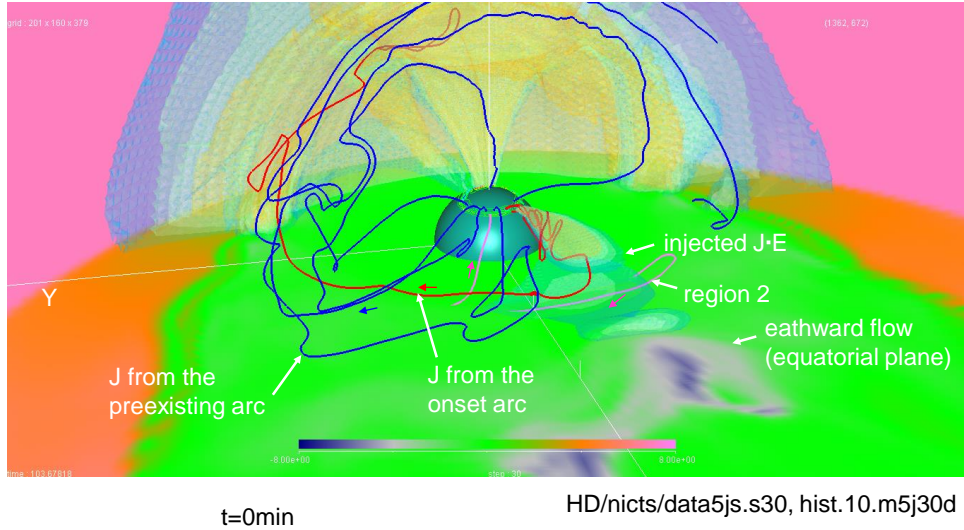
Ionospheric current system associated with the substorm



Current wedge (左)と地球近傍ダイナモ(右)



Formation of the near-earth dynamo at the onset
 (shading: V_x , red lines: from onset arc, blue lines: from preexisting arc)

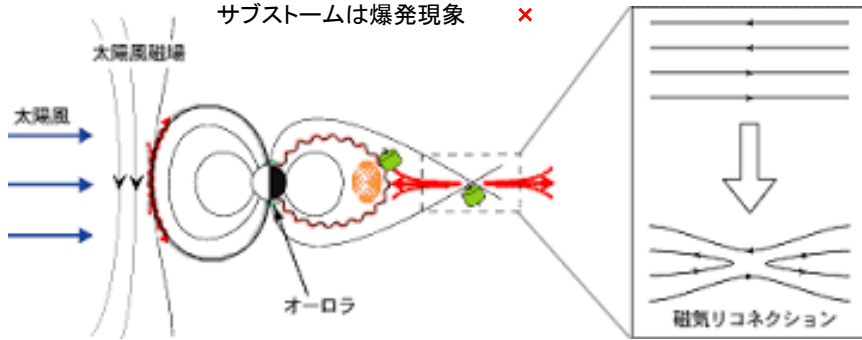


23

衛星観測からの推論

サブストームの再現→MHDシミュレーションの解像度
 FACの起源・ダイナモ・シアアの形成
 M-I結合系・対流の状態遷移

- サブストームは異常プラズマ過程の現れ × → CW 誤り
- サブストームはMHDの破れ ×
- サブストームは不安定現象 ×
- サブストームは爆発現象 ×

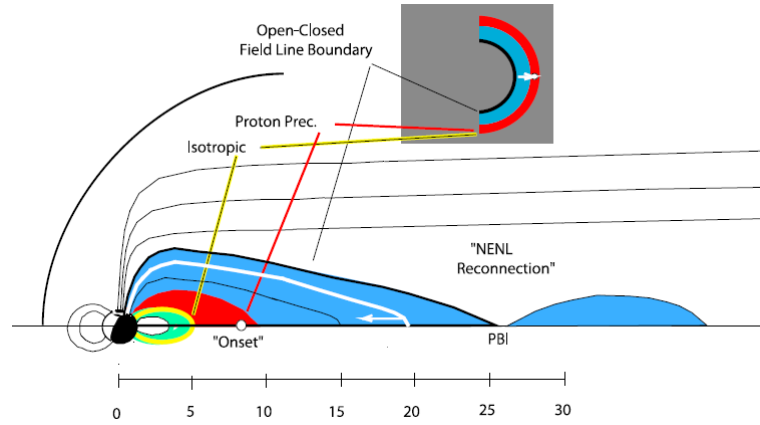


local structureによるサブストームの説明は誤り

24

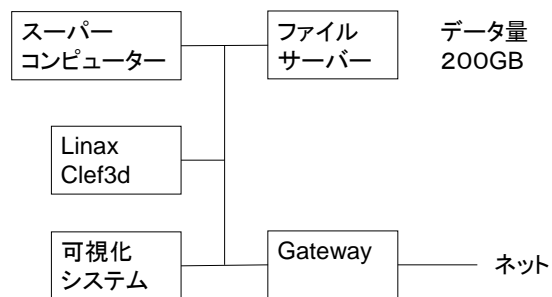
観測結果の理由づけ→いい加減な描画

Mende et al. (2011)



簡易可視化ソフトClef3D

磁気圏-電離圏結合システム用可視化ソフト



73 サブストームオンセットの詳細構造：CWの誤り（論文）

74

75 概要

76

77 解像度の極めて高いグローバルシミュレーションを開発した。これにより計算したサブス
78 トームシミュレーションの解は、電離圏でサブストームオンセットの詳細を再現する。オー
79 バルの赤道側から始まるオンセット、その2分後に始まる **westward traveling surge (WTS)**
80 などを、観測と同じように再現できる。次に、電離圏の各変動に対応する磁気圏変動を明ら
81 かにした。オンセットは地球近傍ダイナモにより起こる。地球近傍ダイナモは、**squeezing**
82 による圧力上昇と、**near earth neutral line (NENL)**の影響による南北方向の磁場垂直流に
83 より、駆動される。圧力上昇は沿磁力線フローの効果である。オンセット開始は、NENL か
84 らのフローが、内部磁気圏の赤道面に到達する前である。フローが到達するのは、オンセッ
85 トから2分後、WTSが開始するところである。これによって拡大相がさらに発展する。地球
86 近傍ダイナモの解がオンセットの詳細を極めて忠実に再現することを見れば、**current**
87 **wedge (CW)** は誤りであると結論せざるを得ない。

88

89 1. 序論

90

91 オーロラの動態に基づき、サブストームという概念が提案された[Akasofu, 1964]。それ以
92 来観測でも、理論でも多くの研究が行われてきた。サブストームが執拗に研究されるのは、
93 そこに磁気圏構造の基本特性が現れていると信じられているからであろう。サブストーム
94 には見掛けとして、成長相、オンセット、拡大相、回復相があり[McPherron, 1970, 1979]、
95 オンセットに不連続性が現れることが最大の特徴である。この不連続性の理由を説明しな
96 ければサブストームは解決にはならず、この点が中心課題であろう。

97

98 1-1. サブストームの観測とモデル

99

100 電離圏変動の観測では、成長相の **N-S arc**、**quiet arc**、オンセットの **initial brightening**、
101 拡大相の **westward traveling surge (WTS)**、オメガ、トーチ、などが順次発生する
102 [Elphinstone et al., 1993]。これらのオーロラ変動には、それぞれに磁気圏と電離圏を結ぶ
103 電流系の発達に対応している[Kamide et al., 1996]。これらは明確な事実であり、どのよう
104 に起こっているかは良く研究されている。問題はその原因、すなわちこれらに対応する磁気
105 圏変動は何かということである。この点が明白になって初めて問題が解決といえるであろ
106 う。**N-S arc** や **quiet arc** はオンセットを予言しているようにも見える[Donovan et al., 2008]。
107 これはオンセットと磁気圏構造との対応を考える際に、重大なヒントを与えていると思わ
108 れている。オンセットはなぜ予言されるかを説明することが出来なくては、正しい対応構造

109 になっていないであろう。それらを含め、一連のオーロラ変動が一体として説明出来なければ、サブストームが解明されたとは言い難い。電離圏変動と磁気圏変動との対応は衛星観測
110 や地上一衛星同時観測で解明できると思われていた。
111

112

113 衛星観測では、磁気圏のサブストームの特徴的な変動がいくつも発見されている[Baker et
114 al., 1996]。尾部では Thinning、bursty bulk flow (BBF)、flux rope、プラズモイド、内部
115 磁気圏ではインジェクション、双極子化、D-deflection、地球近くでは二重層などの発見が
116 あった。しかしこれらは局所的構造であり、観測される場所に原因と結果がそろっているわ
117 けでなく、変化はグローバル構造変動の一環であろうと思われる。したがって、局所的磁気
118 圏変動と全体構造とはどの様に結びつくかは、やはり簡単には分からない。衛星で観測され
119 るのは部分であり、予想はいろいろとあっても、衛星観測から各変動と全体構造とのつなが
120 りについて確証は得にくい。

121

122 これまでのサブストーム研究では、current wedge (CW) [Chu et al., 2014]が形成されると
123 いうのが、オンセット FAC を説明する唯一のモデルである。オンセットの原因は、夜側プ
124 ラズマシート赤道面における局所の変動であり、magnetohydrodynamics (MHD) の破れ
125 や不安定またはテイルフローの刺激が CW を誘発すると推定した[Lui, 1996; Baker et al.,
126 1996]。この思考では、オンセットのシーケンスはリコネクション、BBF、CW から組み立
127 てられてきた[Nakamura et al., 2011]。またこのようなオンセットシーケンスに関する予
128 想は、衛星観測で立証できると思われて来た。各要素は相互に無関係ではないようだが、し
129 かし衛星観測の分解能では、はっきりとした要素間の対応(例えばテイルフローと静止軌道
130 擾乱の対応)を認めるに至らない[Ohtani et al., 2006]。決定的な証明には、電流線をトレ
131 スして CW を確認することが必要であろう。当然それは不可能であるので、衛星観測はや
132 はり部分から全体を推定することに留まってしまう。

133

134 これまでの多くの研究にも関わらず、サブストーム研究の到達度についてはなぜか共通認識
135 がない。問題はかなり解決したと考えるか、いまだまったく未解決であると見るべきか、そ
136 の点からして合意ができない。例えば quiet arc について磁場曲率により散乱された電子の
137 落下であるという前提で多くの研究が進められている一方で[Sergeev et al., 2012]、quiet
138 arc は磁気圏の運動を電離圏に伝えようとする region-1 field-aligned current (FAC) の顕
139 在化である[Tanaka, 2015]とする全く別の見解がある。別の例では、オーロラの動態 (pre-
140 onset アーク) からサブストームオンセットに至るプラズマシートの変動シーケンスが明ら
141 かになり、サブストームはかなり解決された[Lyons et al., 2011]、という報告があるかと思
142 えば、オンセット前のプラズマシートの様相は電離圏のごく狭い領域にしか投影されず、
143 pre-onset アークはローブからの投影である[Tanaka, 2015, Ebihara and Tanaka., 2016]と
144 いう否定的報告がある。プラズマシートを電離圏の広範囲に投影するため、Mende et al.

145 [2011] は厚いプラズマシートを描いた。このような構造はシミュレーションの解としては
146 決して得られない[Tanaka, 2015]。観測データを全体構造に関連付けたいという意欲は理解
147 できるが、力学構造を考えずに関連づけても、間違いを信奉するだけであろう。

148

149 1-2. サブストームシミュレーション

150

151 オンセットの不連続性を全体構造から理解しようとする研究が無いわけではない。例とし
152 て、状態遷移という概念がある。古くは、thermal catastrophe モデルがある[Goertz and
153 Smith, 1989]。状態遷移は、地磁気変動の解析などからも推定される[Sitnov et al., 2000]。
154 全体構造のバランスが変動し、遷移が起こるというイメージであるが、磁気圏-電離圏結合
155 系の力学構造が具体的でないのがネックであろう。状態遷移の力学構造を具体化するため
156 に、シミュレーションを応用する研究もある[Tanaka, 2000; Shao et al., 2003]。

157

158 磁気圏-電離圏結合を取り入れたグローバルシミュレーションで、サブストームオンセッ
159 トを再現するようになった[Tanaka, 2000; Tanaka et al., 2010; Tanaka, 2015; Ebihara,
160 and Tanaka, 2015a, 2015b, 2016]。グローバルシミュレーションの解像度を上げ、FAC を
161 詳細に計算できるようにすると、電離圏サブストームが再現されることが分かった。これは
162 MHD 範囲内でのオンセット再現であり、伝統的サブストーム理論の全く反対の方向ともい
163 える。このような研究は、電離圏変動 (N-S arc, quiet arc, initial brightening, WTS など)
164 の再現が良くでき、観測との整合性が極めて高い。シミュレーションの結果は 3 次元磁
165 場・プラズマ構造を全て保有しており、磁気圏との対応も正確に調べられる。この対応が今
166 までの予想通りであれば、世の中はハッピーであろう。しかし現実には、既存のモデルはほ
167 とんど否定される。シミュレーション結果では、オンセットに対応する磁気圏の変動は、地
168 球近傍ダイナモである[Ebihara, and Tanaka, 2015a]。これは初めて CW でないオンセッ
169 トモデルの登場である。ここではオンセット FAC は、過渡的圧力場の形成とそれによる熱
170 エネルギーから電磁エネルギーへの変換で生成される。オンセット点からの上向き電流は
171 地球近傍ダイナモまでは FAC であるが、地球近傍ダイナモと激しく相互作用を行った後磁
172 力線方向から逸れ、赤道面方向および西方に向かう[Tanaka, 2015; Ebihara, and Tanaka,
173 2015a]。このような圧力領域と一体となった FAC 生成メカニズムは、オンセットに限らず、
174 磁気圏対流の一般論ともなっている[Tanaka, 2007]。CW からサブストームを理解し、観測
175 を考察する時には、赤道面の変動が構造を保存したまま電離圏まで沿磁力線投影されると
176 という仮定が用いられる。地球近傍ダイナモによるオンセットの解はそのようにはならない。
177 もっと地球近くでオンセットが駆動される。一般的にも FAC の生成は磁気圏物理学の最重
178 要事項であり、それは対流励起と表裏一体である [Iijima, 2000]。まずこれが明確でなくて、
179 サブストームが明確になるわけではない。

180

181 伝統的サブストームモデルのように、サブストームの各変動を粒子散乱、リコネクション、
182 不安定、CW などのようなローカルな現象と結びつけるだけでは、理解が完結しないように
183 見える。前述のように、それは **thinning** や双極子化などが、磁気圏全体変動の一部だから
184 である。その全体構造の変動がサブストームに結びつく過程が解明されなくてはならない。
185 すなわち、サブストームと共に、全体構造とその変動を知る必要がある。全体構造を考察す
186 る時は、出発点は磁気圏の閉じ込めであろう。この構造については、あまり疑問の余地は無
187 いように見える。各種擾乱を考えるには、閉じ込めの次のレベルである対流する磁気圏が必
188 要であろう。その中での FAC 生成とエネルギーの変換とが明確でなくてはならない。シミ
189 ュレーションではまず対流が自己無撞着的に再現され、その延長上にサブストームが発生
190 する[Tanaka et al., 2010]。この設定が伝統的なサブストーム理論では及ばない点である。

191

192 1-3. 対流駆動とサブストーム

193

194 シミュレーション研究によって、対流の構造自身も明確になった。特に FAC の生成メカニズ
195 ムが明確になった[Tanaka, 2007]。高解像度シミュレーションの結果では、Dungey 対流か
196 ら予想されるような、シース流の運動エネルギーで駆動されるダイナモ[Palmroth et al.,
197 2010; Hamlin et al., 2012]や、マグネトシース流から電離圏への直接的ストレス伝達
198 [Wilder et al., 2015]は再現されない。したがってテイルマグネトポーズを過ってポインテ
199 イングフラックスが直接磁気圏に流入することは無い。太陽風磁場と地球磁場の結合では、
200 まずヌルーセパレーター構造により開磁場が生成される。開磁気圏では CF 電流によって、
201 テイルマグネトポーズから、昼側マグネトポーズにエネルギーが運ばれる。昼側で加熱され
202 たマグネトシースプラズマが磁気圏中に侵入し、マグネトポーズ内側のカスプーマントル
203 に熱エネルギーが蓄えられる。Slow mode expansion [Watanabe et al., 2014] によって、
204 この熱エネルギーが磁気圏内で電磁エネルギーを分散する。Region-1 FAC とテーター電流
205 は、このカスプーマントル領域のダイナモで生成される。テーター電流はプラズマシートの
206 対流をとおして、プラズマシートに熱エネルギーを蓄えるように作用する。この熱エネルギ
207 ーが環電流領域のダイナモで電磁エネルギーに変換され、region-2 FAC が生成される。サ
208 ブストームの場合を含め、運動エネルギーが直接電磁エネルギーに変換されることはない。
209 シミュレーションでは、サブストームオンセットは対流変動に伴う圧力領域の移動と、それ
210 による地球近傍ダイナモの形成である[Tanaka, 2015; Ebihara and Tanaka, 2015a]。ここ
211 ではオンセットは CW の生成ではない。サブストームにおいても、FAC の増加と対流は一
212 体である。

213

214 シミュレーション研究の結果では、成長相、オンセット、拡大相における磁気圏、電離圏双
215 方の変動が再現され、それらの一部としてオンセットが発生する。**thinning** はプラズマシ
216 ート対流のカバランスと関連して発生する。それは磁気張力と圧力のバランス下では、プラ

217 ズマシートが滞留することが原因である[Tanaka et al., 2010]。Quiet arc は成長相の対流
218 を電離圏に伝えるために発生する region-1 FAC の顕在化である[Tanaka, 2015]。粒子落下
219 は電流の原因ではなく、結果である。インジェクションは、対流経路と圧力領域がより内部
220 の磁気圏へ移動することの現れである。この一環として地球近傍ダイナモが発生する
221 [Ebihara, and Tanaka, 2015a]。またこれらの変動の基本にはプラズマシート対流を維持す
222 るカバランスの変更があり、その一端が双極子化である[Tanaka et al., 2010]。ここにカバ
223 ランスが明示的に登場することになり、これは状態遷移の力学構造として必須である。WTS
224 はインジェクションで出来た高圧域の東西への拡大と、電離圏での Hall 電流の発散の複合
225 作用である[Ebihara, and Tanaka, 2015b]。このように、サブストームの電離圏変動が磁気
226 圏の全体構造にどう関連しているかについて、対流構造の変動に原因を求め、一貫した説明
227 を提供するようになった。

228

229 1-4. オンセットの詳細構造

230

231 シミュレーションが再現するサブストームは既存モデルを否定する。さてどうするか。我々
232 はここでさらなる確信を得るため、オンセットの詳細構造を問題にしたい。観測では、オン
233 セットには詳細構造があることが分かっている[Kadokura et al., 2002]。オーバルの赤道側
234 で initial brightening が発生し、3分ほど留まる。次いで極側と西側に拡大し、オーバルと
235 極冠の境界に達すると、西側により高速に拡大して行き、WTS に発展する。このようなオン
236 セットの詳細が磁気圏のどのような構造に対応するかを、説明する必要がある。このよう
237 な構造が電離圏にあることは観測による事実であり、その磁気圏対応が分かれば、オンセッ
238 トの原因もおおのずと確定してくるはずである。伝統的なサブストーム研究では、このよう
239 な変動を、赤道面でのリコネクションのダイナミクスに求めている[Saito et al, 2010; Ieda et
240 al., 2016]。本論文では、地球近傍ダイナモによる別の説明を試みる。これによって、より
241 自然な説明が可能となる。また地球近傍ダイナモの信憑性が高まる。地球近傍ダイナモによ
242 ってオンセットの詳細を再現するためには、これまでよりさらに解像度を上げたシミュレ
243 ーションが必要とされる。

244

245 本論文では、地球近傍ダイナモの応用で、オンセットの詳細を説明する。これらのオンセッ
246 トの詳細は、CW や不安定に依存したオンセットでは理解できないであろう。地球近傍ダイ
247 ナモは、対流構造の変動と遷移による圧力分布の変動を反映し、全体構造の変動とサブスト
248 ームオンセットの結びつきを与える。このようなメカニズムで、地球近傍ダイナモの変動、
249 オンセットの詳細、全体構造の変動が連動して理解できることを示したい。このような比較
250 では、オンセットの不連続性を与える状態遷移の力学構造[Tanaka et al., 2010]も明快にな
251 る。

252

253 2. シミュレーションモデル

254

255 計算には REPPU (REProduce Plasma Universe) コードレベル7を用いる。このコード
256 では、磁気圏はポテンシャル磁場を消去した MHD 方程式で計算する [Tanaka, 1994]。ここ
257 で、 x 軸は太陽向き、 y 軸は地球公転の反対方向、 z 軸は北である。MHD シミュレーショ
258 ンの性能を決めるものは、なんといっても格子の構造 (密度) である。REPPU では多数の
259 格子を適用しても計算が安定に行われるように、見かけ特異点の無い、非構造格子を用いる。
260 12 面体の各面を 5 つの三角形に分割し、60 三角形で球を覆い、これをレベル 1 とする。一
261 つの三角形を 4 つに分割し、これをレベル 2 とする (240 三角形)。以下レベル 7 まで、分
262 割を進める [Moriguchi et al., 2008; Nakamizo et al., 2009]。レベル 7 では、球面上の格子
263 は 245,760。相似の球を半径方向に重ね、3 次元磁気圏総格子数は、93,388,800 である。格
264 子の範囲は $3 Re \sim 300 Re$ 、格子の最小サイズは、 $0.06 Re$ である。数値スキームは有限体積
265 total variation diminishing (TVD) スキームを用いる [Tanaka, 1994]。有限体積は 6 角柱も
266 しくは 5 角柱になる。

267

268 REPPU コードレベル 7 は FAC の分解能を上げることをめざして開発されたコードで、2
269 次元電離圏上 ($1 Re$) にも多数の格子点がある。57 度より高緯度側で磁気圏と結合した格
270 子点が 245,760、低緯度側では結合しない格子点がそれと同数程度ある。電離圏でも、見
271 かけ特異点の無い、非構造格子を用いる。電気伝導度のモデルの与え方は、クリティカルであ
272 り、結果を大きく左右する。電気伝導度は、太陽天頂角、 $3 Re$ から投影した圧力、温度、
273 FAC の関数として定義する [Tanaka, 2000]。電離層消滅時定数は、30 秒程度にセットす
274 る。これらから、電離層のホール、ピダーセン電流の連続性を計算し、得られたポテンシャ
275 ルを $3 Re$ に逆投影する。これは MHD 計算の内部境界条件 (磁場垂直速度) となる。

276

277 計算は磁気圏と電離圏を結合させて行う。大量計算に耐えるため、OMP-MPI ハイブリッド
278 並列を用いる。使用する CPU は 1000 台程度を必要とする。シミュレーションでは標準的
279 な太陽風の下で、北向き interplanetary magnetic field (IMF) の時の準定常磁気圏を作る。
280 次に IMF B_z を南に変更し、そのままの状態 で計算を進める。成長相、オンセット、拡大相
281 が順次再現される。このようなグローバルシミュレーションの解像度を極限まで上げると、
282 サブストームが再現されることが分かってきた。

283

284 3. シミュレーションの解

285

286 サブストームは非 MHD 過程の顕在化であるというイメージは、広く行きわたっているよ
287 うである。これを世界の趨勢と思えば、本研究はこれまでの全く逆に行くものであろう。し
288 かし本報告のような高解像度を持ったグローバルシミュレーションはこれまでは存在して

289 いない。したがって、以下のようにこれまでにない結果が得られてもなんの不思議もない。

290

291 3-1. 電離圏の様相

292

293 まずサブストーム進行の全体像を概観するため、シミュレーションで得られた AU、AL イン
294 デックスを示す(第1図)。北緯 68 度に沿った複数の点で、東向きホール電流を計算し、
295 これから地上磁場 H 成分の変動を予測した。この図の時刻で IMF が南に変わるのが 6 分、
296 オンセットが 68 分である。このオンセットは第2図に示す、initial brightening の時刻で
297 ある。以下の図では、この 68 分を基準に(0 分として)時刻を示す。マイナスの時刻はオン
298 セット前になる。第1図で、AU、AL インデックスは、観測と同じように変動するのが
299 見て取れる。成長相、オンセット、拡大相の大局的な様相は、以前の報告でも述べたとおり
300 である[Ebihara and Tanaka, 2015a]。

301

302 電離圏オンセットの詳細構造を予測するため、第2図に電離圏での FAC の分布を示す。第
303 2 図では、オンセット前では、region-1、region-2 FAC の全体構造が再現される。この図か
304 ら、上向き FAC にアーク状のオーロラ分布が対応すると考える。上向き FAC から予測す
305 ると左中のパネルで、Initial brightening の位置は 1 LT 辺りで、68 度付近から発生する。
306 夕方から延びている上向き FAC の延長(quiet arc に相当する)と比較すると、2 度程赤道
307 寄りである。オンセットから 2 分程度は、Initial brightening に相当する上向き FAC の強
308 度は増していき、増加した電流の中心位置は余り動かない。上向き FAC の増加に対応し
309 て、オンセットより赤道側の下向き region-2 FAC、オンセットより朝側の下向き region-1
310 FAC、オンセットより朝側の上向き region-2 は、共に連動して増加する。2 分 30 秒ほど
311 して WTS が発生し(右下)、西方に広がって行く。このようなシーケンスは、観測とよく
312 似ている[Kadokura et al., 2002]。この論文では特に、オンセットから WTS 発生までの約
313 2 分がどのような磁気圏変動に対応するかを明らかにしたい。

314

315 WTS の先頭と極側の淵に、強い上向き FAC が発生するのが見られる。これはホール電流
316 の発散による効果である[Ebihara and Tanaka, 2015b]。この後は、WTS は夕方方向に発
317 展して行く。6 分後までに、WTS は 20 LT 辺りまで達して、消滅する。WTS の発生・消
318 滅の間に、沿磁力線電流は、全体的に著しく増加し、拡大相の様相を呈する。第2図以降の
319 WTS の伝搬については、Ebihara and Tanaka [2015b]に詳しい報告がある。

320

321 3-2. 地球近傍ダイナモの生成

322

323 シミュレーションでは磁気圏変動として、成長相における Thinning、オンセットから拡大
324 相の時に発生する、near earth neutral line (NENL)、BBF、双極子化、D 偏向、フロー

325 braking、WTS、拡大相でのプラズマシートの回復、NENL の後退などが逐次再現される
326 [Tanaka et al., 2010; Tanaka 2015; Ebihara and Tanaka, 2015a, 2015b, 2016]。これらの
327 変動の基には流れ場、圧力場、磁場構造の変動がある。今回の結果では、電離圏オンセット
328 が 1 LT 子午面で発生するのに対応し、NENL 発生後の磁気圏内の流れ場、圧力の変動は、
329 2 LT の子午面で先導的に発生している。

330

331 シミュレーションでは、オンセットの直接的な原因は、地球近傍ダイナモの形成である。第
332 3 図はオンセット点から延びる磁力線 (赤線)、8.1Re での圧力の増加領域 (contour)、地球
333 近傍ダイナモの位置 (shading) がどのようになっているかを示す。地球近傍の東西南北に
334 狭い領域で圧力上昇がみられる。高圧領域の上部にロード、下部にダイナモが生成される。
335 オンセットはダイナモの西端の磁力線上で発生する。これらの圧力とダイナモの生成は、
336 Ebihara and Tanaka [2015a]、Tanaka[2015]で既に報告されているとおりでである。第 3
337 図のように、オンセットが起こるのは、赤道面で 10 Re より内側で閉じる磁力線上である。
338 これが NENL 形成より先に内部磁気圏からサブストームオンセットが始まると思わせた構
339 造であり、near-earth onset という説を生んだ[Donovan et al., 2008]。これは CW を想定
340 するからそうなるのであって、地球近傍ダイナモの場合は、NENL から出発する擾乱でも、
341 電離圏ではオーバルの赤道側から擾乱が開始する。その詳細は Tanaka [2015] に報告され
342 ている。

343

344 第 4 図はオンセット直後 (左) と、WTS が始まる時 (右) の、赤道面圧力分布である。一
345 部挿入として、1 LT 子午面の圧力分布も描いてある。白線はオンセット点を通る磁力線で
346 ある。オンセット時にはプラズマシート内端の赤道面で圧力増加がすでに起こっている。こ
347 れから繋がる圧力増加域は磁力線に沿って電離圏に達する。WTS の発生時点における磁気
348 圏構造では、赤道面で圧力の 2 重ピークが形成されている。外側のピークは、フローブレイ
349 キングに対応する[Tanaka et al., 2010]。フローブレイキングに接続される高圧域が地球方
350 向に伸び、磁力線に沿った圧力増加はさらに上昇するのが見られる。これは拡大相の様相で
351 ある。このようにオンセットはフローブレイキング以前に既に開始している。フローブレイ
352 キング以前にもプラズマシート内端の圧力が増加しているのは、この時点でも NENL から
353 の影響自体はあることを示し、これは磁気張力の増加による変化であろう。

354

355 オンセット点を通過する電流線については既に報告されているが[Tanaka, 2015]、第 5 図に
356 類似の図を示す。第 5 図ではボリュームレンダリングはダイナモの分布、コンターは第 4 図
357 の赤道面圧力分布を再描画してある。ボリュームレンダリングから、バウショックダイナモ、
358 カスプダイナモ、地球近傍ダイナモの 3 つが識別できる。オンセット点からの上向き電流
359 として、赤、青、白の 3 本の電流線が書いてある。オンセット点からの赤い電流線は、地球
360 近傍ダイナモと激しく相互作用し、その後は沿磁力線から外れ、一旦赤道面方向に向かい、

361 さらに西向きとなって、最終的にマントルに向かう。同じく青は、地球近傍ダイナモに近づく
362 くとすぐに沿磁力線からはずれ、西方に向かう。同じく白は、地球近傍ダイナモと相互作用
363 した後、下向き沿磁力線電流となって、朝方の **region-1 FAC** に繋がる。このように、オン
364 セット点からの上向き **FAC** は多様な経路を描く。地球近傍ダイナモと **FAC** の相互作用の
365 様相は、**Tanaka[2015]**と比較しても、また異なった形状であり、さらなる多様性が予想さ
366 れる。

367

368 第 6 図に 12LT と 1LT の子午面に沿った圧力分布が、オンセットの前後でどのように変動
369 するかを示す。特にプラズマシート内端付近での変化に着目したい。オンセット直前からオン
370 セットにかけて、圧力分布の形状は余り変化せず、圧力の値が上昇している。これは磁気
371 張力の増加に対応している。**NENL** はオンセット 5 分前に既に形成されている。オンセッ
372 トの 56 秒後には、高圧部分は縮んで、プラズマシート内側境界にへばりつくように、沿磁
373 力線分布になっている。この時は $x=10R_e$ 辺りのプラズマシートも多少薄くなっている。
374 したがって、この縮み方は、**squeezing** と考えられる[**Haerendel, 2011**]。オンセットの 1 分
375 53 秒後には圧力が多少 2 重ピークになり、フローブレーキング効果が現れ始めている。こ
376 の後第 4 図右の状態になっていく。

377

378 3-3. 磁気圏対流の発達

379

380 第 7 図はオンセットから **WTS** の発達の間、プラズマシートフローの発展を示す。表示は
381 12LT と 1LT の子午面に沿ったもので、速度は $-V_x$ である。オンセット時点では **NENL** から
382 地球向き流は、プラズマシート赤道面のフローブレーキング領域に達していない。この
383 フローブレーキング領域は、プラズマシート内端の高圧域のすぐテイル側にできる[**Tanaka**
384 **et al., 2010**]。しかしこの時点でも、**plasma sheet boundary layer (PSBL)**に沿った流れは
385 地球まで存在する。後から(第 8 図)示すように、これは沿磁力線流である。内部磁気圏赤
386 道面上のフローブレーキングは、オンセットに 2 分程遅れて顕著になる。フローブレーキ
387 ングの効果で、沿磁力線流が再増加する。ブレーキングフローはオンセットの 6 分後に地
388 球に最接近するが、この時はもう **WTS** は終わっているタイミングである。ブレーキングフ
389 ローは、その後に後退する。後退に伴い、沿磁力線流がさらに強化され、内部磁気圏の高圧
390 閉磁場領域が膨張する。これらの変動と共に、インジェクション領域は東西に拡大する。

391

392 速度 V_x の時系列変動を第 8 図に示す。これは、第 7 図の白線に沿ってデータを抽出し、ケ
393 オグラムにしたものである。地方時は 1LT、距離 $8.2 R_e$ 、0 度は赤道面、90 度は極であ
394 る。 $8.2 R_e$ での速度場の時系列から、**PSBL** で卓越する地球向き流は、主に沿磁力線流であ
395 ることが分かる。さらにローブ中のテイル向き流も、同様に沿磁力線流である。**PSBL** の沿
396 磁力線地球向き流は、成長相の期間からずっと存在する。**PSBL** の流れは、拡大相でもほと

397 んど沿磁力線流である。このような状況は観測と一致する [Du et al., 2011]。
398
399 $V_y V_z$ 成分では、磁場直角方向の流れが主な成分考えられる。第 9 図は $V_y V_z$ 磁場直角成分
400 のケオグラムを示す。成長相における特徴的な変動として、垂直流のプラズマシートへの侵
401 入阻止と、 y 方向のシア構造が見られる。後に示すように、これらの構造はテイルでより
402 鮮明である。Tanaka[2015]に示されているように、これらは **Thinning** および **Quiet arc** の
403 生成と関連している。 V_z の侵入阻止によってプラズマシートの滞留を生み出す共に、フラ
404 ックス imbalance (プラズマシートに入るフラックスが、出るフラックスより少ない) によ
405 り **thinning** という結果を引き起こす。垂直流 V_z は侵入阻止されるので、 y 方向に曲がる。
406 これによる y 方向のシアを電離圏に伝える FAC は、**quiet arc** を生成する [Tanaka, 2015]。
407
408 オンセット後は V_x が増加するが (第 8 図)、増加の初期には成長相からの延長の沿磁力線
409 流が主に増加するように見える。 V_x の磁場垂直成分もオンセットと共に、広範囲で多少増
410 加するが、全領域一斉ではない。沿磁力線流は一旦減少し、2分後から拡大相に向けて再度
411 増加してゆく。この再増加は V_x 磁場直角成分と共に到達し、磁場直角成分はさらに内部の
412 磁気圏でブレーキングフローとなるであろう。したがってこれは **BBF** に相当するが、**MHD**
413 の範囲では完全に **bursty** にならず、疑似的な **BBF** と見るべきである。全体として、オン
414 セット後 4 分間の V_x 変動は、2 段階の変動に見える。第 8 図でブレーキングフロー最接近
415 時には、磁場垂直流が大きくなる。これはフローブレーキングが $8.2Re$ 以内に接近するか
416 らである。オンセット後 8 分を過ぎると、内部磁気圏は膨らんでいく。この時はフローブレ
417 ーキング領域も後退し、第 8 図で再び沿磁力線流が卓越する。オンセット 2 分後以降の沿
418 磁力線流は、フローブレーキングで磁場垂直から平行に変換された流れである。
419
420 オンセット後の磁場垂直流の侵入は、 V_y 成分、 V_z 成分で顕著である (第 9 図)。すぐに全
421 体が一様に増加するように見える。赤道向き垂直流 V_z の侵入は深くまでおよび、オンセッ
422 ト直後に V_x 磁場平行成分が増加する領域を内包する。この構造は **Ebihara and Tanaka**
423 [2015a]でも報告されており、地球近傍ダイナモの形成と対応しているであろう。この時の
424 構造を要約すれば、磁場平行流によって圧力領域が形成され、 V_z 磁場垂直成分によって電
425 場に対応するダイナモ流が形成される。
426
427 3 - 4. 磁気圏尾部の変動
428
429 $12.5Re$ の領域は、双極子成分が卓越する内部磁気圏よりやや外側で、地球に近いテイルの
430 部分である。この領域での流れ場の変動はどうなっているか第 10、11 図に示す。成長相の
431 V_x 変動では、ローブのテイル向き流、プラズマシート (PSBL) の地球向き流が明確に分離
432 する。これらは、大部分が沿磁力線流である。プラズマシート流はほとんどが PSBL に集

433 申し、プラズマシートの中心では、わずかな地球向き磁場垂直流が存在するのみである。
434
435 成長相での V_y と V_z の変動からは、垂直流の阻止と、 y 成分のシア構造が見てとれる。
436 ローブでの V_z はプラズマシートへ向かう弱い対流を示す。しかしこの流れは不連続を示し、
437 プラズマシートに侵入すると弱くなる。同時に V_y 成分は、ローブプラズマシート境界前
438 後でシア構造を示す。これらは、成長相ではローブからプラズマシートに侵入する対流は
439 弱く、プラズマシートはローブの対流に比べ滞留することを示す。しかしながらこの間でも、
440 電離圏対流は 2 セル構造であり、電離圏に流れが弱い部分があるわけではない。この磁気圏
441 対流と電離圏対流の差を解消するのが **thinning** である [Tanaka et al., 2010; Tanaka, 2015]。
442
443 オンセット後は、プラズマシートで地球向き流 (V_x) が卓越し、これは磁場垂直流 (BBF)
444 である。この流れに対しては、オンセットの 20 分くらい前からすでに発生の兆候が見られ
445 る (第 10 図下)。すなわち成長相で既に BBF が存在することを示す。この磁場垂直流は、
446 滞留を解消する流れであり、これによって拡大相の対流全体がプラズマシートを含めて進
447 展し、**thinning** は解消される。このような流れ構造が発生するのは、磁気張力によって x 方
448 向に加速が生じるからであり、その背後にはプラズマシートでの力バランスの変更がある。
449 この力バランス変更こそオンセットの不連続性の元にある状態遷移である [Tanaka et.
450 al., 2010]。赤道面から少し離れば、流れはイレギュラーである。すなわちプラズマシー
451 トからローブにかけて、激しく変動する磁場垂直流 V_x が発生している。またテイル向き平
452 行流にもイレギュラーな変動が重なる。これらについては、原因、観測との対応など、まだ
453 不明である。
454
455 オンセットでの磁場垂直流 (V_y , V_z) の変動は、一斉に開始する (第 11 図)。対流と同じ
456 方向の流れが、ローブからプラズマシートにかけての全領域で同時に起こる。12.5 Re では、
457 この変動開始は、8.2 Re に比べると 1 分ほど早い。1 分差はこの変動がプラズマシートから
458 内部磁気圏へ波及していくことを示す。したがって NENL の発生が広範囲で垂直流変動の
459 震源となっていると予想される。地球方向への伝搬は、**dipolarization front** として観測さ
460 れているものであろう。これらの変動は、オンセットに伴って対流がプラズマシートに侵入
461 し、滞留が解消され全ての輸送量やエネルギー変換の量が大きくなることに対応する。第 8
462 図に示されるように、 V_x 磁場平行流が内部磁気圏 (PSBL) に達するには 2 段階の増加が
463 ある。しかし、磁場垂直方向の変化はテイルから内部磁気圏まで直達のように見える。 V_x
464 変動の第 2 段階が到達するのは、磁場垂直流より遅く、オンセットの 2 分後、フローブレ
465 ーキングが始まる時点である。この時点では V_y 成分の反転も見られるが、この原因は良く
466 分からない。
467
468 3 - 5. エネルギー変換の変遷

469

470 プラズマシートの形成に共存するように、エネルギー変換は常に発生している (第 12 図)。
471 これは対流に伴う必然的構造である。プラズマは溜まっているわけではなく、一方で常に補
472 給され、また他方で流出しているからである [Tanaka, 2007]。内部磁気圏では、成長相、拡
473 大相の全体を通して、プラズマシートの外縁では $\mathbf{J} \cdot \mathbf{E} > 0$ 、内側には必ずしも連続的ではな
474 いが $\mathbf{J} \cdot \mathbf{E} < 0$ の領域が現れる (第 12 図上)。プラズマシートでは $\mathbf{J} \cdot \mathbf{E} > 0$ の期間が多く、
475 $\mathbf{J} \cdot \mathbf{E} < 0$ はほとんど現れない (第 12 図下)。

476

477 内部磁気圏では成長相の間、外側で $\mathbf{J} \cdot \mathbf{E} > 0$ 、内側で $\mathbf{J} \cdot \mathbf{E} < 0$ の構造が安定的に続く。これ
478 は、プラズマが磁場の力で閉じ込められる時、すなわちローブからプラズマシートに移流す
479 る時が $\mathbf{J} \cdot \mathbf{E} > 0$ であり、解放される時、すなわちプラズマシートから昼側磁気圏に向う時
480 に、熱エネルギーでダイナモが駆動される状態が $\mathbf{J} \cdot \mathbf{E} < 0$ と理解できる。この内部磁気圏の
481 ダイナモが駆動する電流系は主に region-2 である [Tanaka, 2007]。成長相の進行とともに
482 全体に低緯度側に移行するのは、thinning の反映である。

483

484 内部磁気圏から少し先のプラズマシートでは、成長相の間ほとんど何時も $\mathbf{J} \cdot \mathbf{E} > 0$ で、常に
485 テンションがプラズマに仕事をする状態である。プラズマは圧縮されつつ閉じ込められて
486 いる。全体系で見れば、閉じ込めに働く電流はテーター電流であろう。成長相では、region-
487 1 FAC も PSBL に近い領域を流れるが [Tanaka, 2015]、こちらは force free であり、閉じ
488 込めには働かない。これらの電流系のダイナモは、共にカスプーマントルにある [Tanaka,
489 2015]。テーター電流はカスプーマントルから出て、フランクを通った後 PSBL に繋がり、
490 region-1 はカスプーマントルから出て、フランクを通った後電離圏に向い、quiet arc に繋
491 がる。

492

493 内部磁気圏では、オンセットの時に短期間だけ緯度 0 度から 14 度の広域に亘って、 $\mathbf{J} \cdot \mathbf{E} < 0$
494 が発生する (第 12 図上)。これが地球近傍ダイナモに相当する。圧力の形成は磁力線に沿っ
495 て注入されるプラズマにより発生し、この圧力が仕事し、ダイナモが駆動される。このダイ
496 ナモは非定常的であるが、オンセット region-1 FAC (第 5 図) を駆動する。ダイナモは圧
497 力領域の西側にも広がるので (第 3 図)、第 12 図上では、オンセットの瞬間に $\mathbf{J} \cdot \mathbf{E} < 0$ が
498 広範囲に現れる。オンセットでの圧力分布の変動はプラズマシート全体で見れば、圧力領域
499 の内部への移動であり (第 6 図)、これが最内部の磁気圏では、磁力線に沿った移動になる。
500 磁気圏全体構造から見ると、この変動は squeezing に相当するのではないか [Haerendel,
501 2011]。これは、オンセットの開始機構を反映している。磁場垂直流 V_x が赤道面で内部磁
502 気圏に到達し、インジェクションとなると、ロードが広範囲に広がる。インジェクション領
503 域の東西拡大と共に WTS が発生し、ダイナモは WTS と共に拡大域の先端の方に移動する
504 [Ebihara and Tanaka, 2015b]。そのため第 12 図上の拡大相では、高緯度側のロードに比

505 べて、低緯度側のダイナモが弱くなる。拡大相では内部磁気圏のダイナモは、region-2 FAC
506 を駆動する。なお低緯度側にも弱いロードとダイナモが広範囲に分布するが、こちらの役割
507 は良く分からない。

508

509 オンセット後の拡大相では、エネルギー変換が時間的に変動し易い。この時は全体にエネル
510 ギー変換の強度が増しているのが特徴である。この原因は、対流がプラズマシートに浸透し、
511 磁気圏の内部を回ることと、電離圏の電離伝導度が上昇していることである。内部磁気圏で
512 は力のバランスは、成長相でプラズマが磁場の力で閉じ込められている状態と同じである。
513 すなわちプラズマが閉じ込められる時に $\mathbf{J} \cdot \mathbf{E} > 0$ であり、プラズマが解放される時に $\mathbf{J} \cdot$
514 $\mathbf{E} < 0$ である。カバランスはテンションと圧力の間で成り立ち、流体の運動エネルギーは重
515 要でない[Tanaka et al., 2010]。

516

517 テイル領域ではオンセット後でも、ダイナモ $\mathbf{J} \cdot \mathbf{E} < 0$ の領域は生成されない。これはテイル
518 では常にテンションがプラズマを閉じ込めようとしていることに対応する。テイルでは磁
519 気張力がプラズマ加速を生じ、BBF となって滞留を解消しているため、カバランスはテン
520 ションと加速度の間で成り立つ[Tanaka et al., 2010]。このためオンセットからやや経った
521 時は、フローブレーキングに伴って、 $\mathbf{J} \cdot \mathbf{E} < 0$ の領域が生成されるがこともあり得るが、こ
522 れは熱エネルギーに変換され、FAC の生成には繋がらない[Tanaka et al., 2010]。

523

524 4. 討論と結論

525

526 本報告では、グローバルシミュレーションの解像度を上げればサブストームが再現できる、
527 という研究をさらに進めた。この方向をめざした研究は既に報告されているが[Tanaka
528 2015; Ebihara and Tanaka, 2015a]、本報告での新たな点は、さらに解像度を上げれば、オン
529 ンセットの詳細構造[Kadokura et al., 2002]まで再現ができる、という点である。オンセッ
530 トの一連の変動は、地球近傍ダイナモによって引き起こされる。地球近傍ダイナモでは第 2
531 図のように、NENL から出発する擾乱を考えると、電離圏でのオンセットがオーバル赤道
532 側から始まることが可能である[Tanaka, 2015]。さらに本論文で、オンセットの詳細も自然
533 に説明できることが示された。リコネクション、地球向き流、CW のシーケンスがオンセッ
534 トの原因とする既存の発想では、オンセットの詳細構造を説明するために、赤道面で複雑な
535 リコネクションダイナミクスを想定しなければならない[Kadokura et al., 2002; Saito et al.,
536 2010; Ieda et al., 2016]。本報告の説明では、そのような不自然なものは必要ない。オンセ
537 ットはブレーキングフロー到達前に起こっている。シミュレーションによるこれらの結果
538 から、フローブレーキングと CW による伝統的オンセットは間違いと推定される。

539

540 オンセットの後 2 分間で、フローブレーキングの前、この期間は内部磁気圏にとってどの

541 ような変動なのかが、最大の論点である。プラズマシート赤道面の圧力ピークはまだ一つで
542 あり（第4図）、これがフローブレーキングの前と思われる理由である。一方地球近傍ダイ
543 ナモは形成済みである（第3図）。この2分間にテイルでは、BBF流が既に存在している。
544 このBBF流は、成長相から存在していた磁場垂直流が強化したものである（第10図）。し
545 かしこのBBFフローは、赤道面ではまだオンセット領域 ($x > 10R_e$) に到達していない（第
546 7図）。内部磁気圏に対しては別途 PSBL を通って運ばれる変動が増大しており、これは V_x
547 の沿磁力線流によるもので、磁場垂直流である BBF フローが発生する以前からずっと存在
548 している（第8図）。しかし内部磁気圏でも、PSBL の V_z の変動は NENL に直結してい
549 る。以前のレベル6を用いた計算では[Ebihara and Tanaka, 2015a]、これら2分間の変動
550 をまだ十分に分離していない観がある。

551

552 地球近傍ダイナモのエネルギー変換メカニズム ($\mathbf{J} \cdot \mathbf{E}$) は、流れ場と結合している。磁場垂
553 直流（電場）はオンセットの瞬間に内部磁気圏・プラズマシートの中に侵入している（第9
554 図、第11図）。 x 方向では磁場垂直流はすぐにはフローブレーキングにならず、地球に繋
555 がる沿磁力線圧力領域の生成には寄与せず、沿磁力線圧力領域は squeezing に伴う磁場平行
556 流によってもたらされている。このような赤道に向かう磁場垂直流による電場と、磁場平行
557 流による圧力の生成によって、圧力領域の下側もしくは西側に、地球近傍ダイナモが形成さ
558 れる（第3図）。これらは region-1 のダイナモと同じように、圧力差によって駆動されるダ
559 イナモであるが、異なる点もある。Region-1 FAC の場合は、高圧域が磁場平行流により生
560 成されるのは同じであるが、Slow mode expansion によってカスプ側の高圧とローブ側の
561 低圧が定常的に維持される。これに対して地球近傍ダイナモでは、非定常的構造であるので、
562 下流側を低圧に保つメカニズムが無くても一瞬ならダイナモが形成される。

563

564 以上のサブストームオンセットの構造を纏めれば、以下のようになる。内部磁気圏の圧力場
565 の形成には、squeezing による PSBL の沿磁力線流が主要な役割を果たしている（第6図）。
566 一方全領域で NENL の影響が磁場垂直流に及んでいる（第9、11図）。これらにより地球
567 近傍ダイナモが構成される（第3、5図）。フローブレーキングは、オンセットではまだ働か
568 ないが（第7、8図）、拡大相ではサブストームを進行させる。

569

570 本報告で示された速度場の時系列変動は、Tanaka et al. [2010]に示された対流の状態遷移
571 にぴったり一致する。成長相の対流は、プラズマシートの滞留で特徴づけられる。赤道に向
572 かうローブの対流は、プラズマシート境界前後で y 方向に曲がり、シア構造を生成する。
573 滞留がオンセットで解消されるメカニズムは、プラズマシートで磁気張力と加速度のカバ
574 ランスが発生し、電離圏対流（静電場）と連動しないプラズマシートフローを作ることであ
575 る。これは BBF 発生機構でもある。第10、12図で示されたプラズマシート変動はまさに
576 そのようになっている。第11図の磁場垂直流の変動も、成長相でのプラズマシートの滞留

577 と、オンセットでの対流の侵入を表しており、全てが首尾一貫している。BBF はオンセッ
578 トの前にもある程度存在する（第 10 図）という点も観測に一致する。

579

580 磁気圏変動は全体が観測できない。磁気圏対流も磁気圏サブストームも部分的にしか観測
581 できないものである。サブストームを仮想的にリコネクション、フロー、CW のシーケンス
582 で理解しようとし、観測をそれに当てはめようと推論を重ねてきたのが、今までの研究の実
583 態であろう。この過程で対流の全体構造の理解についての曖昧さ（特に FAC の起源につい
584 ての曖昧さ）が、サブストームに伝染している。衛星観測からの磁気圏変動推定は、低解像
585 度、部分だけの解析、電離圏対応の曖昧さに弱点がある。統計的な処理による磁気圏の描画
586 では解像度が低く [Miyashita et al., 2009]、本論文で示したようなオンセットの詳細構造と
587 の対応などは、まず検出できない。一方で電離圏対流が存在することは、観測からの事実で
588 ある。レーダーによる直接観測や [Ruohoniemi and Greenwald, 2005]、地磁気変動から等
589 価電流を求めるような間接的観測でも、明らかである。サブストームも電離圏では全体像が
590 観測される。したがってことの真贋は電離圏で決着するのが良い。それを示すものが第 2 図
591 であり、第 2 図によって、シミュレーションによるサブストームに信憑性が与えられる。本
592 報告で分かるように、シミュレーションは観測との対応がとれる段階に達した。

593

594 部分の観測から全体を推定しようとする伝統的な磁気圏研究では、既成モデルの延長とし
595 て、本論文で問題としたようなオンセットの二段階発展（詳細構造）の理由を、もっぱら赤
596 道面でのリコネクションダイナミクスに押し付けようとする [Saito et al, 2010; Ieda et al.,
597 2016]。不思議なことに、リコネクションがどんなに遠方でも、赤道面だけで全体構造が決
598 定され、後は全て沿磁力線投影になっている。これまではそれを否定する手段もなかったの
599 で、それが生きていたのでしょう。グローバルシミュレーションで解が得られるようになった
600 現在では、電離圏変動が赤道面領域の構造をそのまま投影している、というような解は得
601 られていない。

602

603 間違いに走った原因はいくつかあるでしょう。根本原因はダンジェー対流でしょう。ダイナ
604 モをさほど重視しないダンジェー対流では、リコネクションが突出してしまう。その延長で
605 リコネクションフローの刺激による CW を連想し、これを唯一のサブストームオンセット
606 の原因とした。同時に自発的不安定による CW は、すっかり下火になった。最近の例とし
607 て、Juusola et al. [2011]や Chu et al. [2014]などの introduction を読めば、まさにその軌
608 跡をなぞっている。またダンジェー対流は 2 次元ヌルで単純理解し易いので、2 次元リコネ
609 クションを予想する。すると、リコネクションジェット、磁場エネルギーの解放などという
610 バーチャルな構造がイメージされ、CW と結びついた。これがサブストームは MHD の破
611 れ、テイルに蓄積されたエネルギーの放出、というような錯誤を生み出したのではないか。

612

613 References

614

615 Akasofu, S.-I. (1964), The development of the auroral substorm, *Planet. Space Sci.*, 12(4),
616 273–282, doi:10.1016/0032-0633(64)90151-5.

617

618 Baker, D. N., T. I. Pulkkinen, V. Angelopoulos, W. Baumjohann, and R. L. McPherron,
619 Neutral line model of substorms: Past results and present view (1996), *J. Geophys. Res.*,
620 101, 12,975.

621

622 Chu, X., et al. (2014), Development and validation of inversion technique for substorm
623 current wedge using ground magnetic field data, *J. Geophys. Res. Space Physics*, 119,
624 1909–1924, doi:10.1002/2013JA019185

625

626 Donovan, E., W. Liu, J. Liang, E. Spanswick, I. Voronkov, M. Connors, M. Syrjasuo, G.
627 Baker, B. Jackel, T. Trondsen, M. Greffen, V. Angelopoulos, C. T. Russell, S. B. Mende,
628 H. U. Frey, A. Keiling, C. W. Carlson, J. P. McFadden, K.-H. Glassmeier, U. Auster, K.
629 Hayashi, K. Sakaguchi, K. Shiokawa, J. A. Wild, and I. J. Rae (2008), Simultaneous
630 THEMIS in situ and auroral observations of a small substorm, *Geophys. Res. Lett.*, 35,
631 L17S18, doi:10.1029/2008GL033794.

632

633 Ebihara, Y., and T. Tanaka (2015a), Substorm simulation: Insight into the mechanisms
634 of initial brightening, *J. Geophys. Res. Space Physics*, 120, doi:10.1002/2015JA021516.

635

636 Ebihara, Y., and Tanaka, T. (2015b), Substorm simulation: Formation of westward
637 traveling surge, *J. Geophys. Res. Space Physics*, 120, doi:10.1002/2015JA021697

638

639 Ebihara, Y., and Tanaka, T. (2016), Substorm simulation: Quiet and N-S arcs preceding
640 auroral breakup, *J. Geophys. Res. Space Physics*, 121, doi:10.1002/2015JA021831

641

642 Elphinstone, R. D., J. S. Murphree, D. J. Hearn, W. Heikkila, M. G. Henderson, L. L.
643 Cogger, and I. Sandahl (1993), The auroral distribution and its mapping according to
644 substorm phase, *J. Atmos. Terr. Phys.*, 55(14), 1741–1762, doi:10.1016/0021-
645 9169(93)90142-L.

646

647 Goertz, C. K., and R. A. Smith (1989), The thermal catastrophe model of substorms, *J.*
648 *Geophys. Res.*, 94, 6581.

649
650 Haerendel, G. (2011), Six auroral generators: A review, *J. Geophys. Res.*, 116, A00K05,
651 doi:10.1029/2010JA016425.
652
653 Hamrin, M., O. Marghitu, P. Norqvist, S. Buchert, M. André, B. Klecker, L. M. Kistler,
654 and I. Dandouras (2012), The role of the inner tail to midtail plasma sheet in channeling
655 solar wind power to the ionosphere, *J. Geophys. Res.*, 117, A06310,
656 doi:10.1029/2012JA017707.
657
658 Ieda, A., Y. Nishimura, Y. Miyashita, V. Angelopoulos, A. Runov, T. Nagai, H. U. Frey, D.
659 H. Fairfield, J. A. Slavin, H. Vanhamäki, H. Uchino, R. Fujii, Y. Miyoshi, and S. Machida
660 (2016), Stepwise tailward retreat of magnetic reconnection: THEMIS observations of an
661 auroral substorm, *J. Geophys. Res. Space Physics*, 121, doi:10.1002/2015JA022244.
662
663 Iijima, T. (2000), Field-aligned currents in geospace: Substance and significance, in
664 *Magnetospheric Current Systems*, *Geophys. Monogr. Ser.*, vol. 118, edited by S. Ohtani
665 et al., 107–129, AGU, Washington, D. C.
666
667 Juusola, L., N. Østgaard, E. Tanskanen, N. Partamies, and K. Snekvik (2011),
668 Earthward plasma sheet flows during substorm phases, *J. Geophys. Res.*, 116, A10228,
669 doi:10.1029/2011JA016852.
670
671 Kamide, Y., W. Sun, and S. - I. Akasofu (1996), The average ionospheric
672 electrodynamics for the different substorm phases, *J. Geophys. Res.*, 101, 99,
673 doi:10.1029/95JA02990.
674
675 Lui, A. T. Y. (1996), Current disruption in the earth's magnetosphere: Observations and
676 models, *J. Geophys. Res.*, 101, 13,067.
677
678 Lyons, L. R., Y. Nishimura, H.-J. Kim, E. Donovan, V. Angelopoulos, G. Sofko, M. Nicolls,
679 C. Heinselman, J. M. Ruohoniemi, and N. Nishitani (2011), Possible connection of polar
680 cap flows to pre- and post-substorm onset PBIs and streamers, *J. Geophys. Res.*, 116,
681 A12225, doi:10.1029/2011JA016850.
682
683 McPherron, R. L. (1970), Growth phase of magnetospheric substorms, *J. Geophys. Res.*,
684 75, 5592–5599.

685
686 McPherron, R. L. (1979), Magnetospheric substorms, *Rev. Geophys.*, 17, 657–681,
687 doi:10.1029/RG017i004p00657.
688
689 Miyashita, Y., et al. (2009), A state-of-the-art picture of substorm-associated evolution of
690 the near-Earth magnetotail obtained from superposed epoch analysis, *J. Geophys. Res.*,
691 114, A01211, doi:10.1029/2008JA013225.
692
693 Mende, S. B., H. U. Frey, V. Angelopoulos, and Y. Nishimura (2011), Substorm triggering
694 by poleward boundary intensification and related equatorward propagation, *J. Geophys.*
695 *Res.*, 116, A00I31, doi:10.1029/2010JA015733.
696
697 Moriguchi, T., A. Nakamizo, T. Tanaka, T. Obara, and H. Shimazu (2008), Current
698 systems in the Jovian magnetosphere, *J. Geophys. Res.*, 113, A05204,
699 doi:10.1029/2007JA012751
700
701 Nakamizo, A., T. Tanaka, Y. Kubo, S. Kamei, H. Shimazu, and H. Shinagawa (2009),
702 Development of the 3-D MHD model of the solar corona-solar wind combining system, *J.*
703 *Geophys. Res.*, 114, A07109, doi:10.1029/2008JA013844.
704
705 Nakamura, R., W. Baumjohann, E. Panov, A. A. Petrukovich, V. Angelopoulos, M.
706 Volwerk, W. Magnes, Y. Nishimura, A. Runov, C. T. Russell, J. M. Weygand, O. Amm,
707 H. - U. Auster, J. Bonnell, H. Frey, D. Larson, and J. McFadden (2011), Flux transport,
708 dipolarization, and current sheet evolution during a double - onset substorm, *J. Geophys.*
709 *Res.*, doi: 10.1029/2010JA015865.
710
711 Ohtani, S., H. J. Singer, and T. Mukai (2006), Effects of the fast plasma sheet flow on the
712 geosynchronous magnetic configuration: Geotail and GOES coordinated study, *J.*
713 *Geophys. Res.*, 111, A01204, doi:10.1029/2005JA011383.
714
715 Palmroth, M., H. E. J. Koskinen, T. I. Pulkkinen, P. K. Toivanen, P. Janhunen, S. E.
716 Milan, and M. Lester (2010), Magnetospheric feedback in solar wind energy transfer, *J.*
717 *Geophys. Res.*, 115, A00I10, doi:10.1029/2010JA015746.
718
719 Ruohoniemi, J. M., and R. A. Greenwald (2005), Dependencies of high-latitude plasma
720 convection: Consideration of interplanetary magnetic field, seasonal, and universal time

721 factors in statistical patterns, *J. Geophys. Res.*, 110, A09204, doi:10.1029/2004JA010815.
722

723 Saito, M. H., Y. Miyashita, M. Fujimoto, K. Liou, Y. Saito, and J. B. Sigwarth (2010),
724 Stepwise feature of aurora during substorm expansion compared with the near - Earth
725 tail dipolarization: Possible types of substorm dynamics, *J. Geophys. Res.*, 115, A02207,
726 doi:10.1029/2009JA014572.
727

728 Sergeev, V., Y. Nishimura, M. Kubyshkina, V. Angelopoulos, R. Nakamura, and H. Singer
729 (2012), Magnetospheric location of equatorial prebrealip arc, *J. Geophys. Res.*, 117,
730 A01212, doi:10.1029/2011JA017154.
731

732 Shao, X., M. I. Sitnov, S. A. Sharma, K. Papadopoulos, C. C. Goodrich, P. N. Guzdar, G.
733 M. Milikh, M. J. Wiltberger, and J. G. Lyon, Phase transition-like behavior of
734 magnetospheric substorms: Global MHD simulation results, *J. Geophys. Res.*, 108(A1),
735 1037, doi:10.1029/2001JA009237, 2003.
736

737 Sitnov, M. I., A. S. Sharma, K. Papadopoulos, D. Vassiliadis, J. A. Valdivia, A. J. Klimas,
738 and D. N. Baker (2000), Phase transition-like behavior of the magnetosphere during
739 substorms, *J. Geophys. Res.*, 105, 12,955.
740

741 Tanaka, T. (1994), Finite volume TVD scheme on an unstructured grid system for three -
742 dimensional MHD simulation of inhomogeneous systems including strong background
743 potential fields, *J. Comput. Phys.*, 111, 381, doi:10.1006/jcph.1994.1071.
744

745 Tanaka, T. (2000), The state transition model of the substorm onset, *J. Geophys. Res.*,
746 105, 21,081, doi:10.1029/2000JA900061.
747

748 Tanaka, T. (2007), Magnetosphere-ionosphere convection as a compound system, *Space*
749 *Sci. Rev.*, 133, 1–72, doi:10.1007/s11214-007-9168-4.
750

751 Tanaka, T. (2015), Substorm auroral dynamics reproduced by the advanced global M-I
752 coupling simulation, In *Auroral dynamics and space weather*, *Geophys. Monogr. Ser.*, vol.
753 215, edited by Y. Zhang, p. 177, AGU, Washington D. C.
754

755 Tanaka, T., A. Nakamizo, A. Yoshikawa, S. Fujita, H. Shinagawa, H. Shimazu, T. Kikuchi,
756 and K. K. Hashimoto (2010), Substorm convection and current system deduced from the

757 global simulation, *J. Geophys. Res.*, 115, A05220, doi:10.1029/2009JA014676
758
759 Watanabe, M., S. Sakito, T. Tanaka, H. Shinagawa, and K. T. Murata (2014), Global
760 MHD modeling of ionospheric convection and field-aligned currents associated with IMF
761 By triggered theta auroras, *J. Geophys. Res.*, 119, doi: 10.1002/2013JA019480.
762
763 Wilder, F. D., S. Eriksson, and M. Wiltberger (2015), The role of magnetic flux tube
764 deformation and magnetosheath plasma bata in the saturation of region 1 field-aligned
765 current system, *J. Geophys. Res. Space Physics*, 120, 2036-2051,
766 do10.1002/2014JA020533.
767
768 Figure captions
769
770 Figure 1. Simulated AU and AL indices. In this fugue, southward turning of the IMF
771 occurs at 9 min, and the onset occurs at 68 min (vertical line). The onset time coincides
772 with the timing of left middle panel in Figure 2.
773
774 Figure 2. Development of the FAC (color shading) in the ionosphere, before and after the
775 onset. Time proceeds from top to bottom and left to right. This time onterval includes the
776 initial brightening (left middle) and the start of the WTS (right bottom). Initial
777 brightening occurs at 68° latitude and 1 LT.
778
779 Figure 3. $J \cdot E$ (color shading) and pressure (contour) on the $r=8.2 R_E$ spherical surface
780 in the northern tail region. A red line is the magnetic field line that passes through the
781 onset point.
782
783 Figure 4. Pressure distribution on the equatorial plane and 1 LT meridian plane (insert).
784 White lines are magnetic field lines that pass through the onset point.
785
786 Figure 5. 3-D distribution of the dynamo (volume rendering) and 2-D distribution of
787 pressure on the equatorial plane (contour). Blue, red and white lines show current lines
788 that pass through the onset point. Contour lines reproduce the color shading in Figure 4
789
790 Figure 6. Development of pressure distribution in the 12 LT and 1 LT meridian planes.
791 Time proceeds from top to bottom and left to right.
792

793 Figure 7. Development of earthward flow in the 12 LT and 1 LT meridian planes. Time
794 proceeds from top to bottom and left to right.
795
796 Figure 8. Keograms for V_x (lower) and $V_{\perp x}$ (upper) at $r=8.2 R_e$ and 1 LT in the tail.
797 These keograms are made along the inner white circle in Figure 7.
798
799 Figure 9. Keograms for $V_{\perp y}$ (upper) and $V_{\perp z}$ (lower) at $r=8.2 R_e$ and 1 LT in the tail.
800 These keograms are made along the inner white circle in Figure 7.
801
802 Figure 10. Keograms for V_x (lower) and $V_{\perp x}$ (upper) at $r=12.5 R_e$ and 1 LT in the tail.
803 These keograms are made along the outer white circle in Figure 7.
804
805 Figure 11. Keograms for $V_{\perp y}$ (upper) and $V_{\perp z}$ (lower) at $r=12.5 R_e$ and 1 LT in the tail.
806 These keograms are made along the outer white circle in Figure 7.
807
808 Figure 12. Keograms for $J \cdot E$ at $r=8.2 R_e$ and 1 LT in the tail (upper), and at $r=12.5 R_e$
809 and 1 LT in the tail (lower). These keograms are made along the inner and outer white
810 circles in Figure 7.

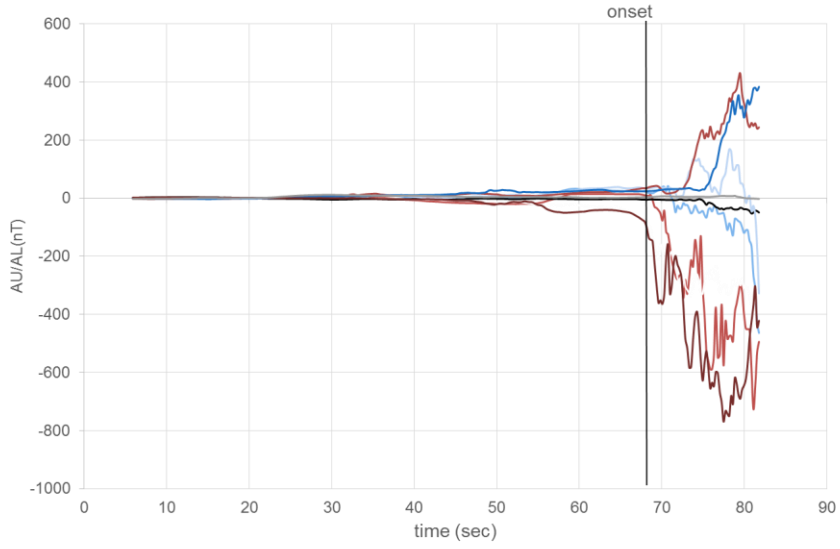
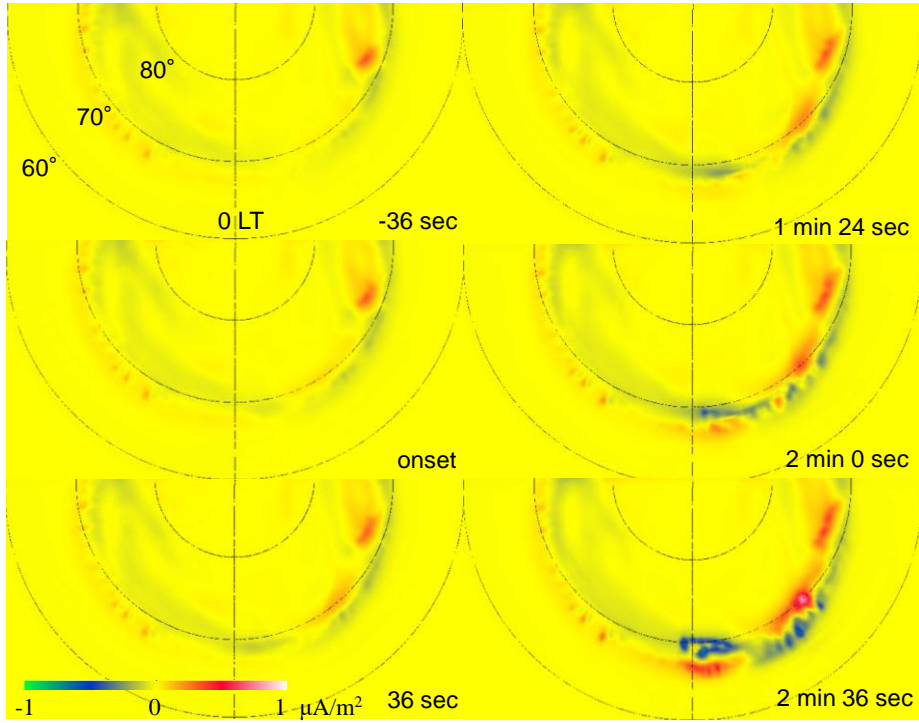


Fig. 1



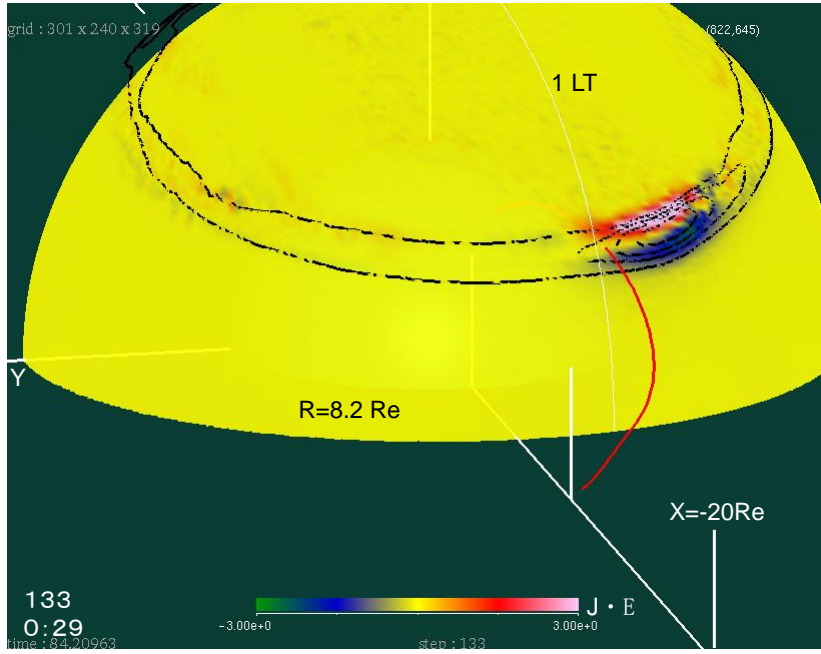


Fig. 3

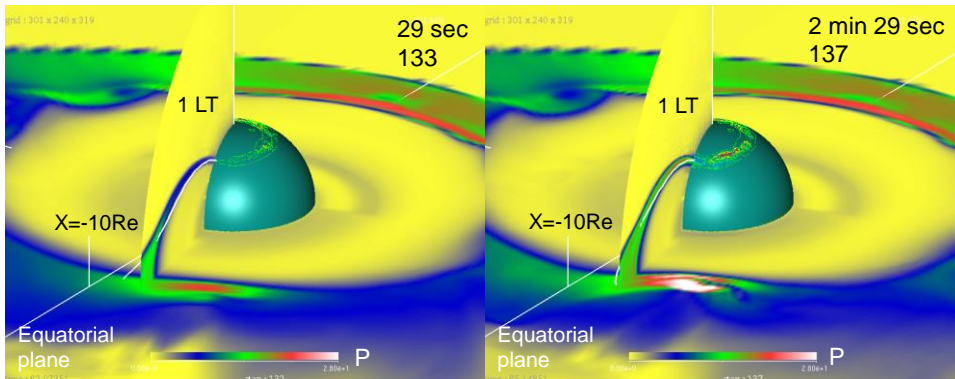


Fig. 4

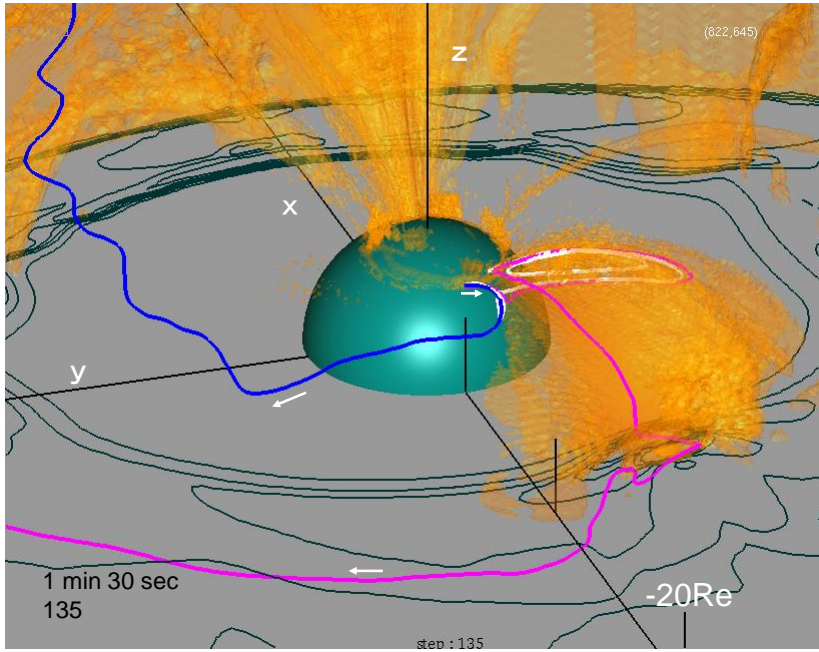


Fig. 5

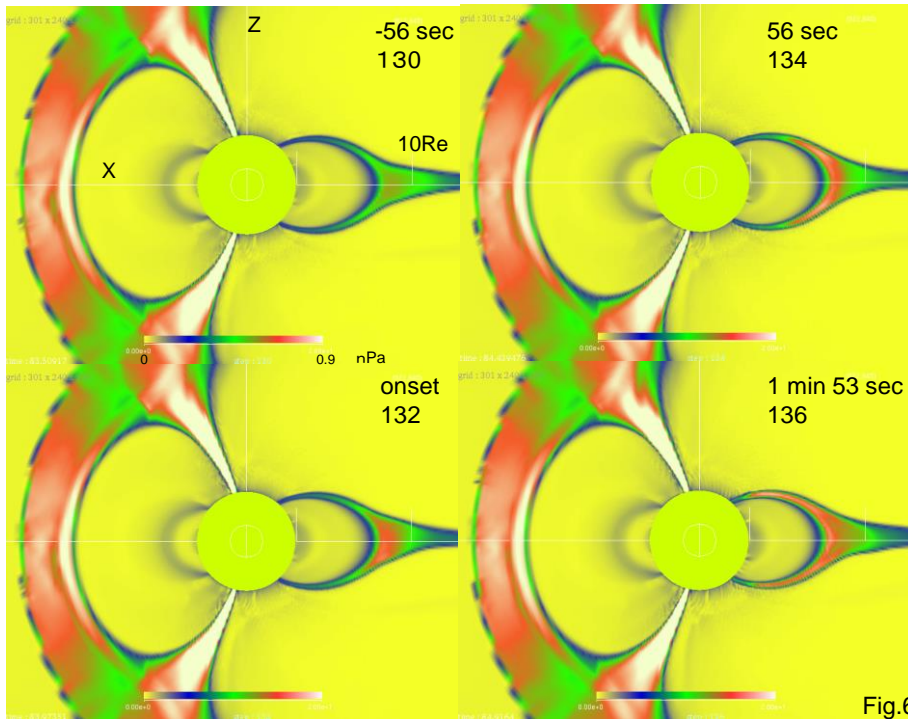
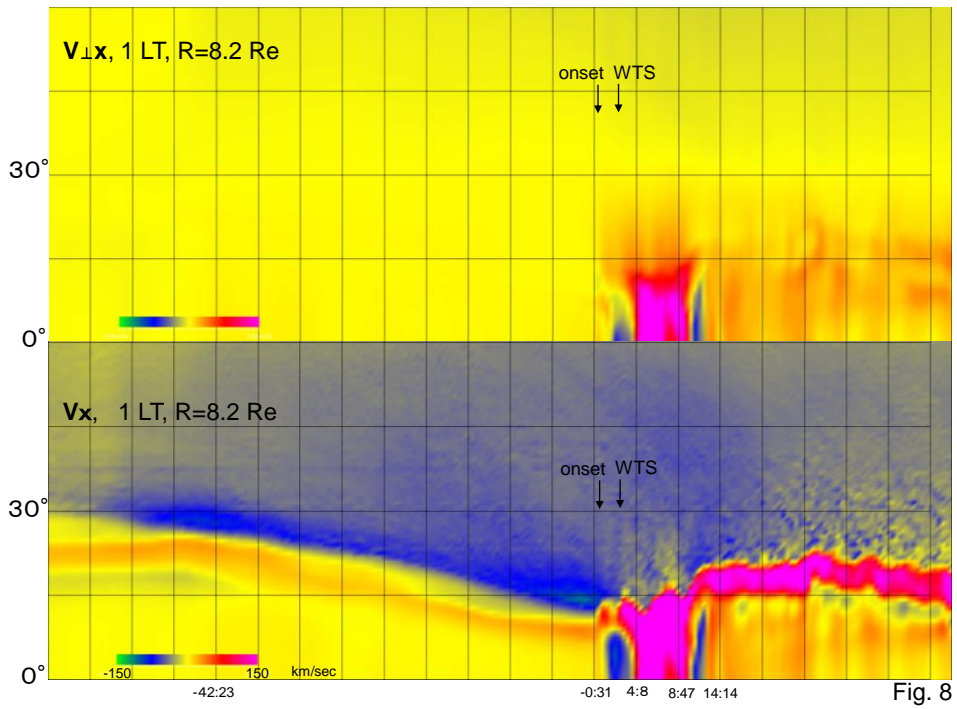
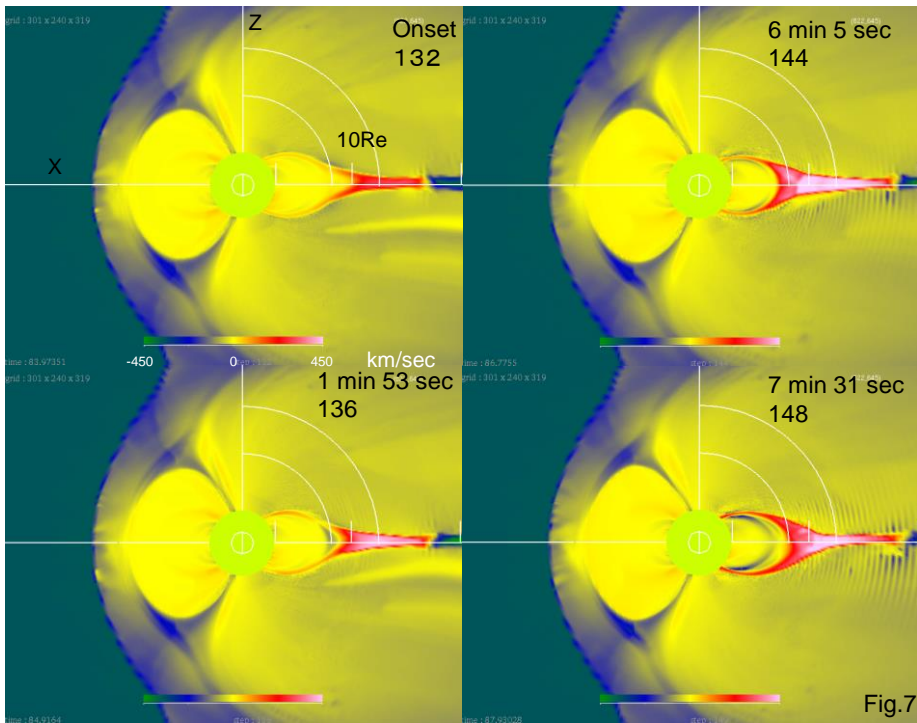


Fig.6



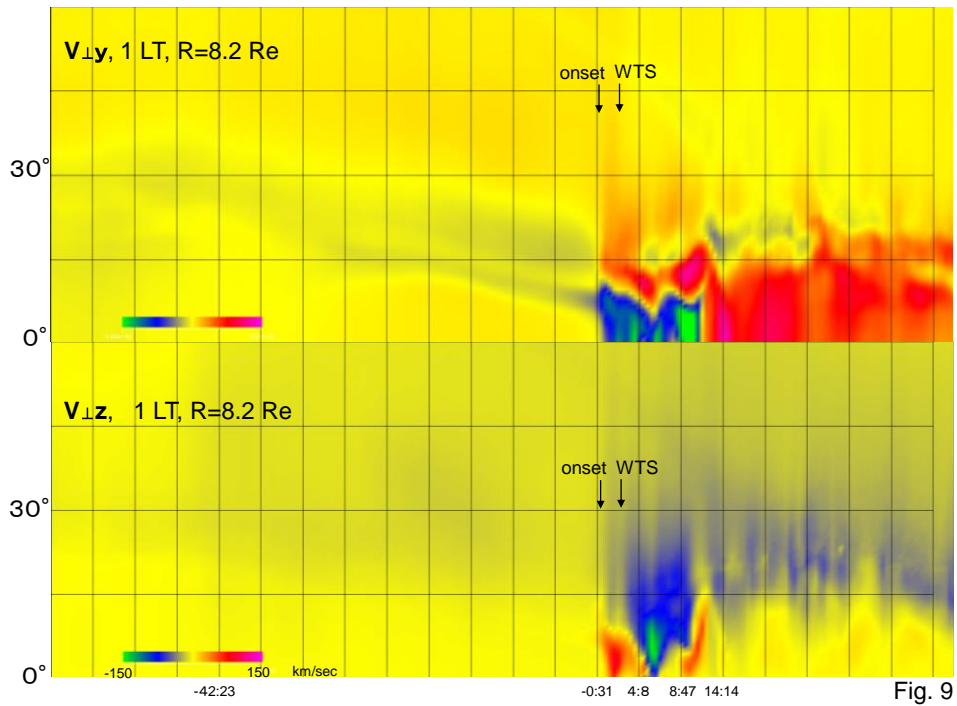


Fig. 9

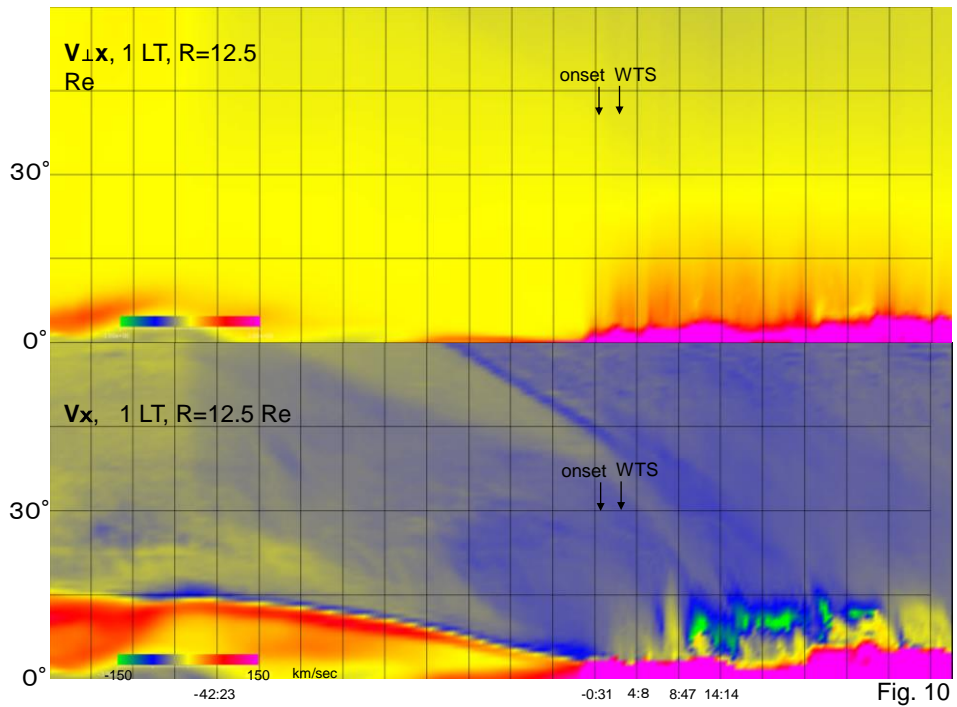
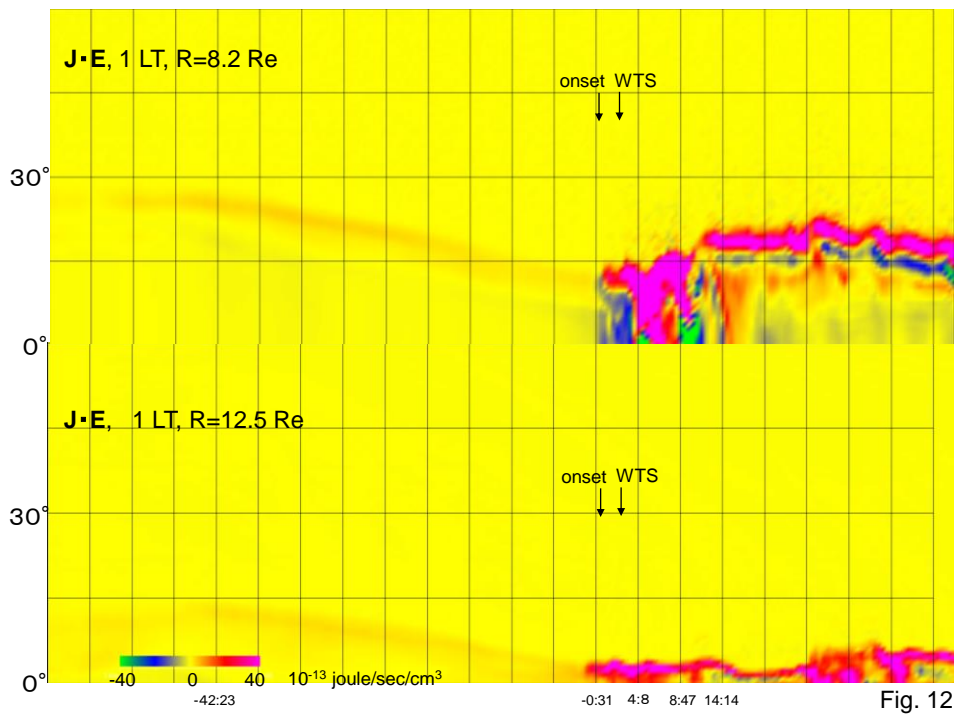
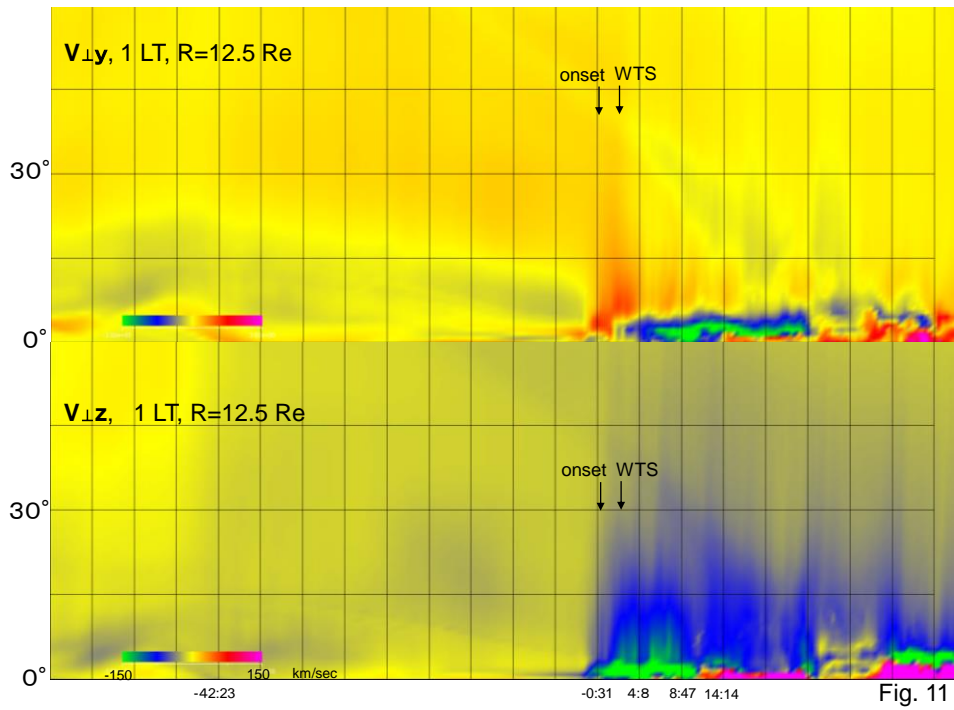


Fig. 10



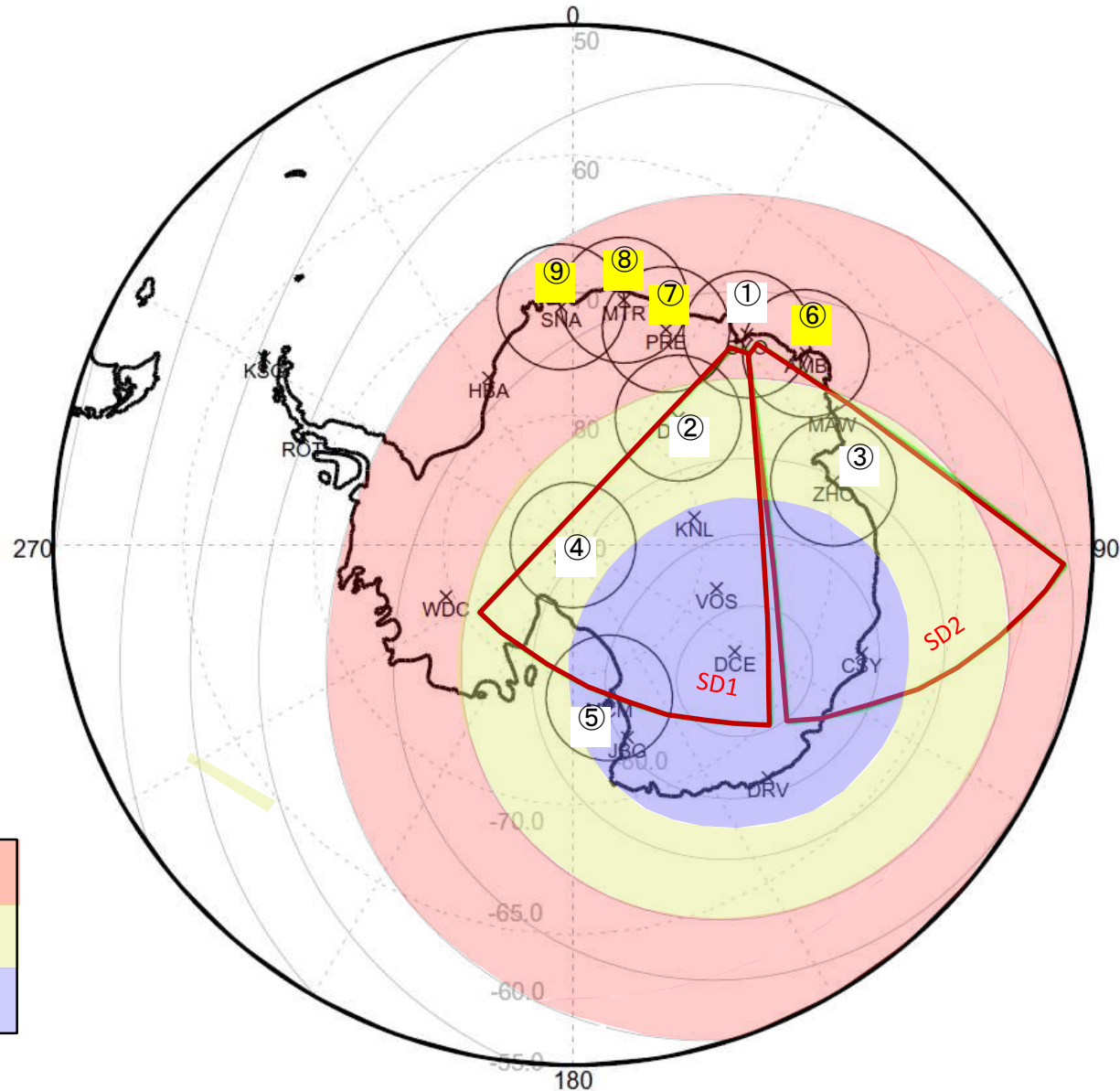
極域オーロラ観測データの伝送とアーカイブ

門倉昭

極地研

宙空圏研究グループ

南極域オーロラ観測ネットワーク



- ①昭和基地(日本)
- ②ドームふじ(日本)
- ③中山基地(中国)
- ④南極点基地(米国)
- ⑤マクマード基地(米国)
- ⑥アムンゼン湾(無人)
- ⑦ベルギー基地付近(無人)
- ⑧マイトリ基地(インド)
- ⑨サナエ基地(南ア)

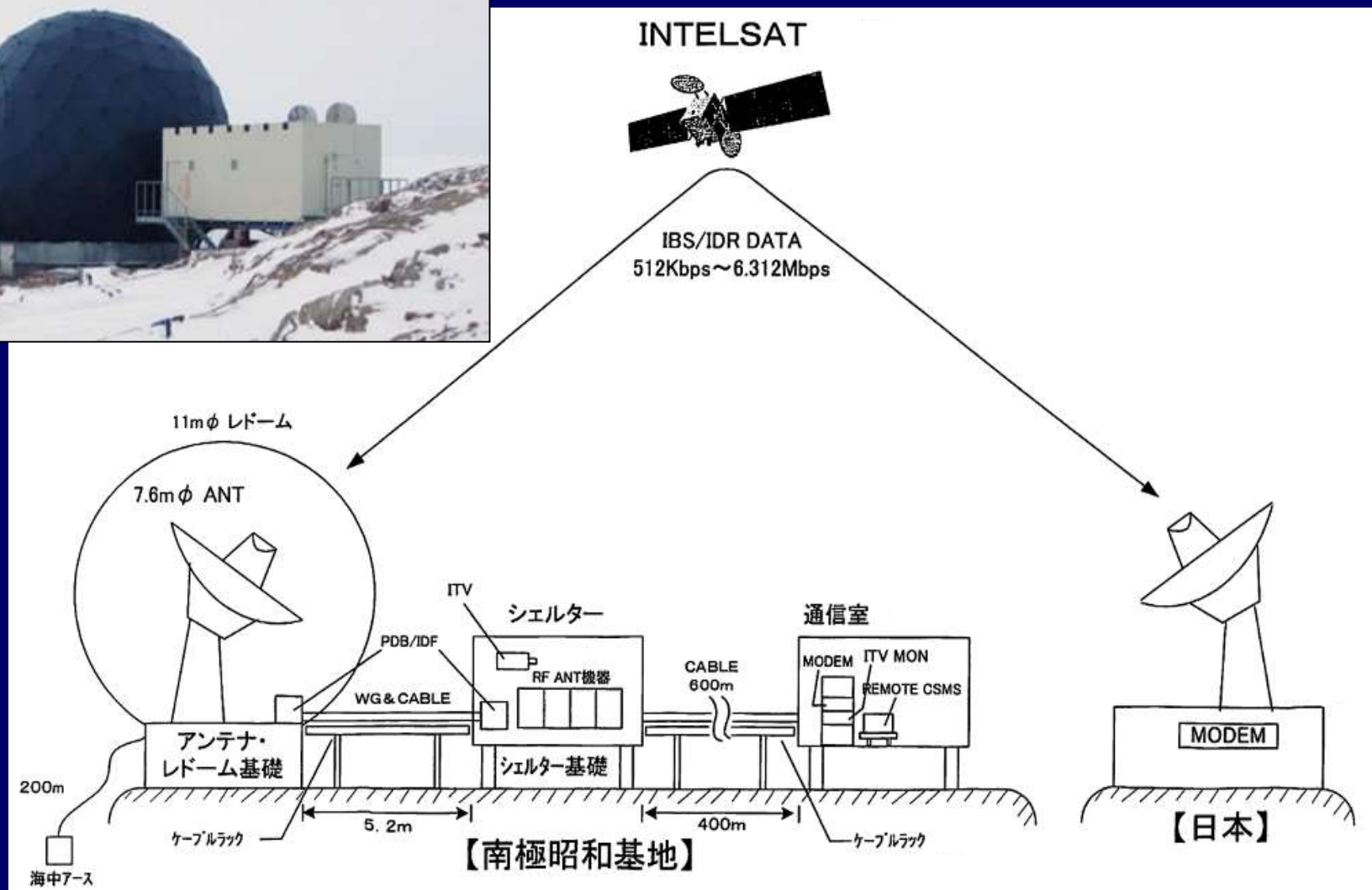
円や扇型:
高度120 kmでの
全天カメラと
SuperDARN
レーダーの視野

昭和基地でのオーロラ光学観測



昭和基地と国内との間の通信ネットワーク

インテルサット衛星回線 常時接続 3 Mbps



南極点基地



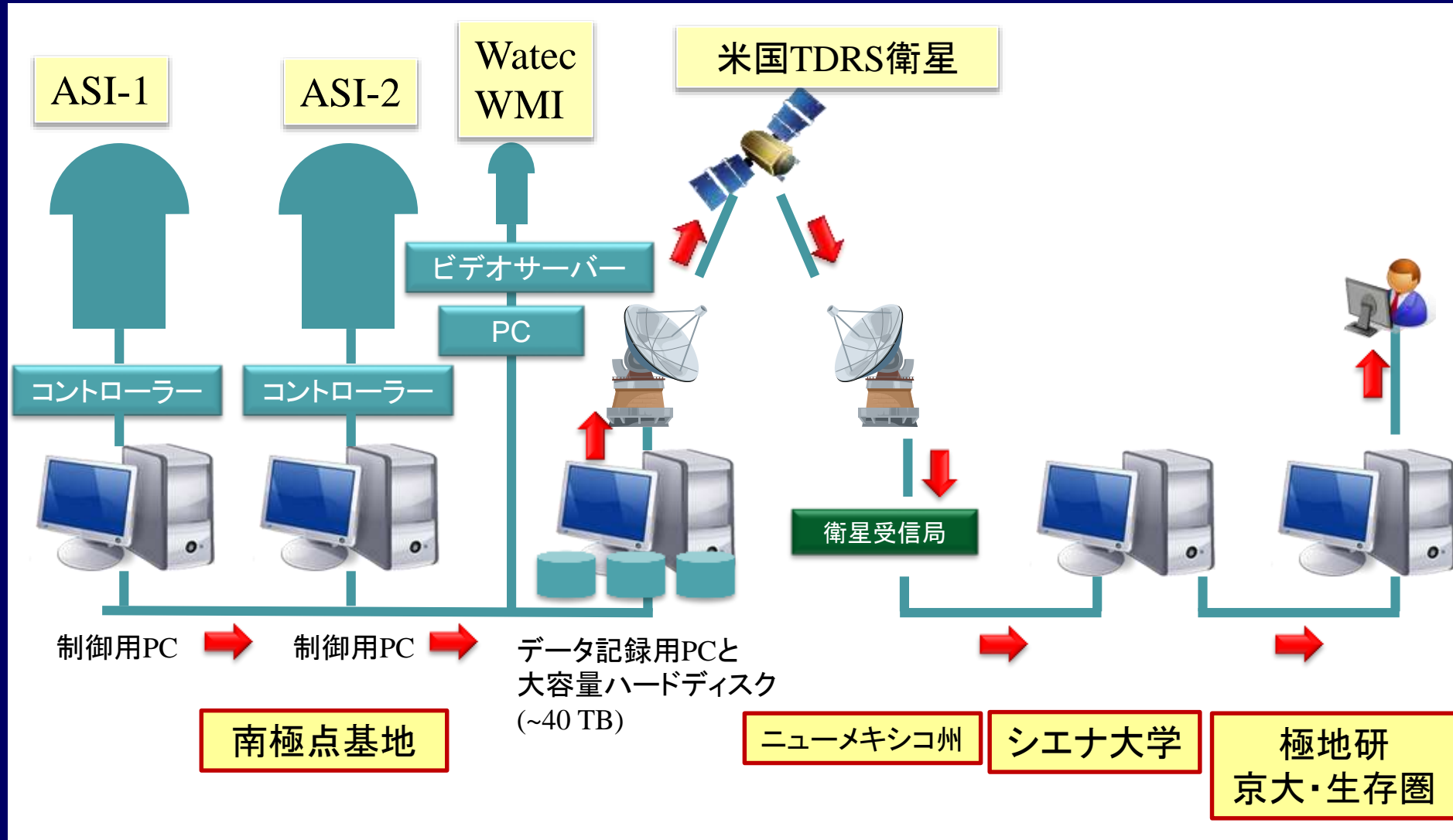
南極点基地でのオーロラ光学観測

ASI-1 & WMI

ASI-2 & Watec

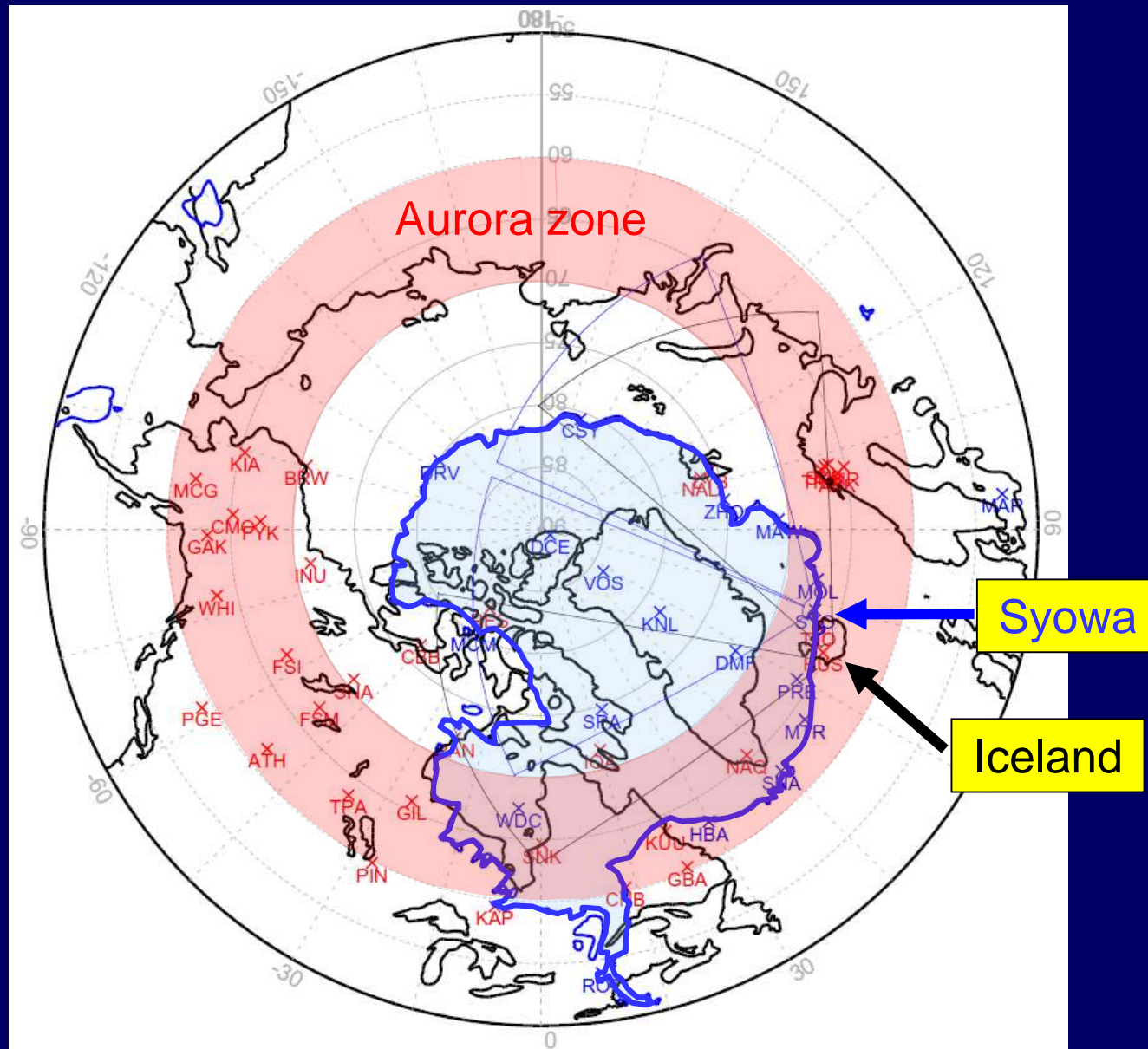


南極点全天オーロライメージャデータ伝送

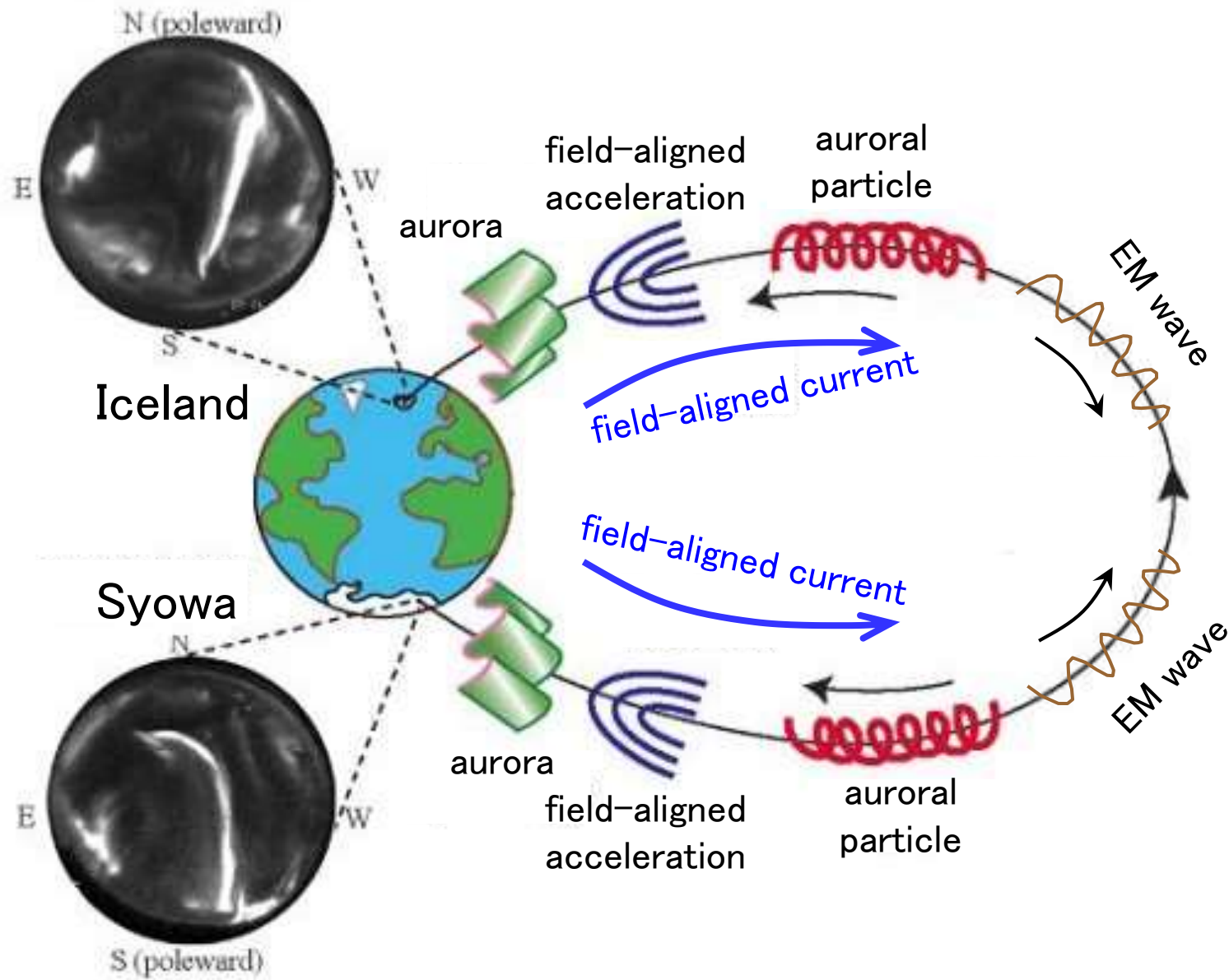


Iceland – Syowa Auroral Conjugate Observation

Mapping on Geomagnetic coordinates



Syowa-Iceland Auroral Conjugate Observation



Conjugate Stations

Husafell



Tjornes



Syowa



Conjugate point of Syowa Station in Iceland (IGRF)



Current system at Husafell (Augastadir)



Current system at Tjornes (Manarbakki)



オーロラ観測データ

◆ 南極域：

■ 昭和基地：

- 全天カメラ：7種類：CDC, EAI-1,2, PAI-1,2, Watec, ATV
- 掃天フォトメータ：SPM

■ 野外観測点：

- 無人才オーロラ観測装置：全天カメラ：AWI

■ 外国基地：

➤ 南極点基地：

- 全天カメラ：8種類：ASI1,2, AWI：428,558,630,670,BW,color
- 広角カメラ：2種類：NWI；558,630

➤ マクマード基地：

- 全天カメラ：4種類：AWI：558,630,670,color

➤ 中山基地：全天カメラ：CDC

オーロラ観測データ

◆ 北極域:

■ アイスランド:

➤ フッサフェル:

全天カメラ: 2種類: Watec、ATV; 掃天フォトメータ: SPM

➤ チョルネス:

• 全天カメラ: 3種類: CAI, Watec, ATV

■ トロムソ:

➤ 全天カメラ: 8種類: CDC, ATV, AWI: 428,558,630,670,BW,color

➤ 広角・狭視野カメラ: 2種類: NWI

■ ロングイヤビン:

➤ 全天カメラ: 7種類: CDC, AWI: 428,558,630,670,BW,color

➤ 狭視野カメラ: 1種類: NWI

➤ スペクトログラフ: ASG

オーロラ観測データ: 伝送方法: 南極域

昭和基地

CDC	WinPC -> ftp (インテルサット) -> 所内PC -> ftp -> 所内NAS
EAI, PAI	WinPC -> ftp (インテルサット) -> 所内PC -> ftp -> 所内NAS
Watec	ビデオサーバー -> ftp -> WinPC -> scp (インテルサット) -> crux
ATV	ビデオサーバー -> http
SPM	WinPC -> scp (インテルサット) -> crux

オーロラ観測データ: 伝送方法: 南極域

無人オーロラ観測装置

観測装置 → ftp(インマルサットBGAN) → 所外サーバー → crux

南極点基地

現地PC → (通信衛星) → 米国内特定サイト → wget → crux

マクマード基地

現地PC → scp(通信衛星) → 所内サーバー

中山基地


現地PC → ftp(通信衛星) → 所内PC → ftp → 所内NAS

オーロラ観測データ: 伝送方法: 北極域

アイスランド: フッサフェル	
Watec	ビデオサーバー -> ftp -> 現地NAS -> scp -> crux
ATV	ビデオサーバー -> http
SPM	WinPC -> scp -> crux
アイスランド: チョルネス	
Watec	ビデオサーバー -> ftp -> PC -> scp -> crux
ATV	ビデオサーバー -> http
CAI	WinPC -> ftp -> 所内PC -> ftp -> 所内NAS
トロムソ・ロングイヤビン	
	現地PC -> scp -> 所内サーバー

オーロラ観測データ:アーカイブ

- 昭和基地: [オーロラ観測全般](#)
[CDC](#) [EAI-1](#) [EAI-2](#) [PAI-1](#) [PAI-2](#) [Watec\(含アイスランド\)](#)
[SPM](#)
- 南極点基地:
[ASI](#) [Watec](#) [AWI&NWI\(含トロムソ、ロングイヤビン\)](#)



今後の極域科学計算機システムの運用と研究プロジェクトの関わりについて

岡田雅樹

極域データセンター

1. 極域科学計算機システムの運用
 - a. シミュレーション基盤整備
 - b. データ収集、公開
2. 昭和基地向け衛星回線の運用
 - a. テレビ会議
 - b. トラフィック管理
3. 極地研ネットワーク、昭和基地ネットワークの運用
 - a. セキュリティ管理
 - b. メール、DNS運用

研究テーマ

1. 大規模計算機シミュレーション基盤システムの構築
2. 昭和基地向け衛星回線を利用した研究
 - a. 衛星回線の効率的な利用
 - b. 観測隊の活動に有益な情報基盤整備、開発
3. GoogleAppsを使った基盤整備

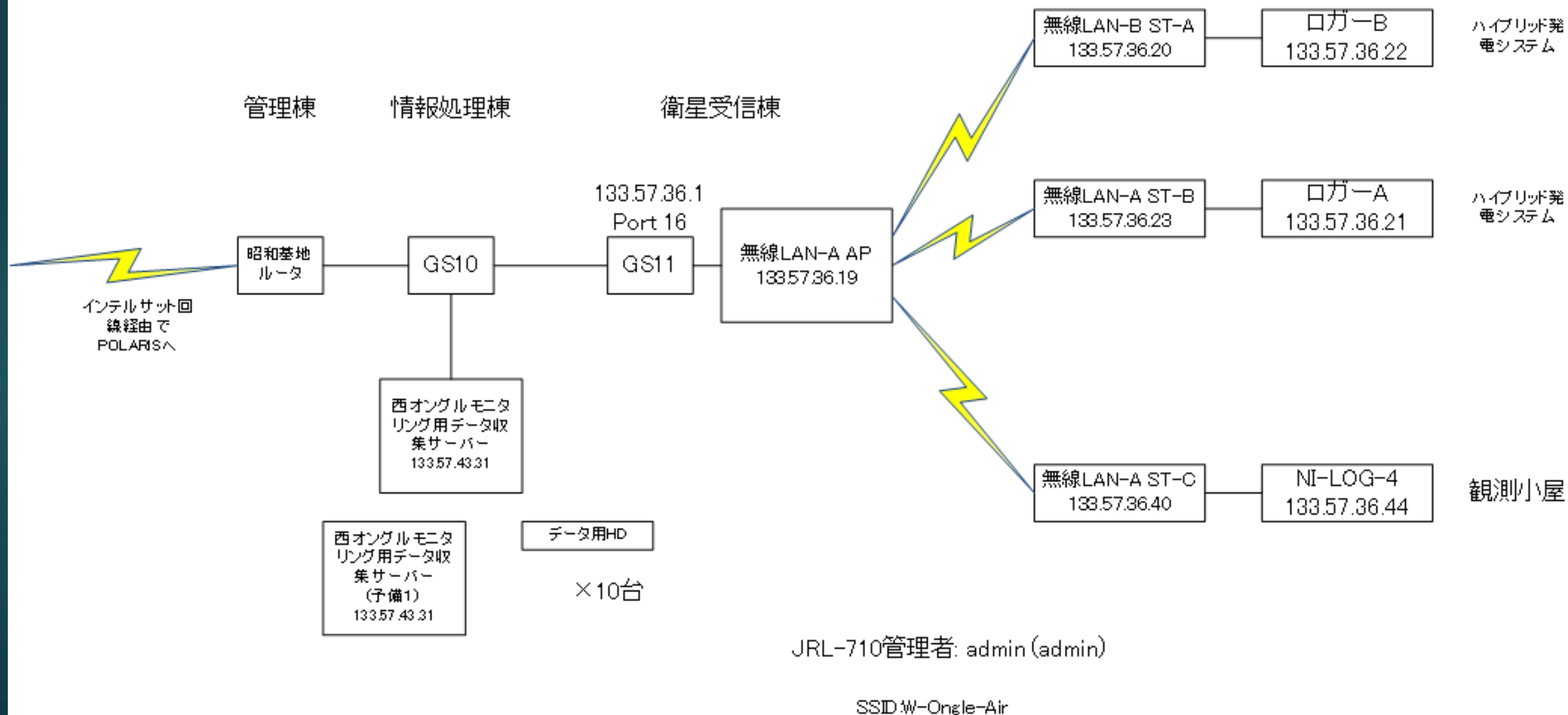
NI社製 CompactRIO

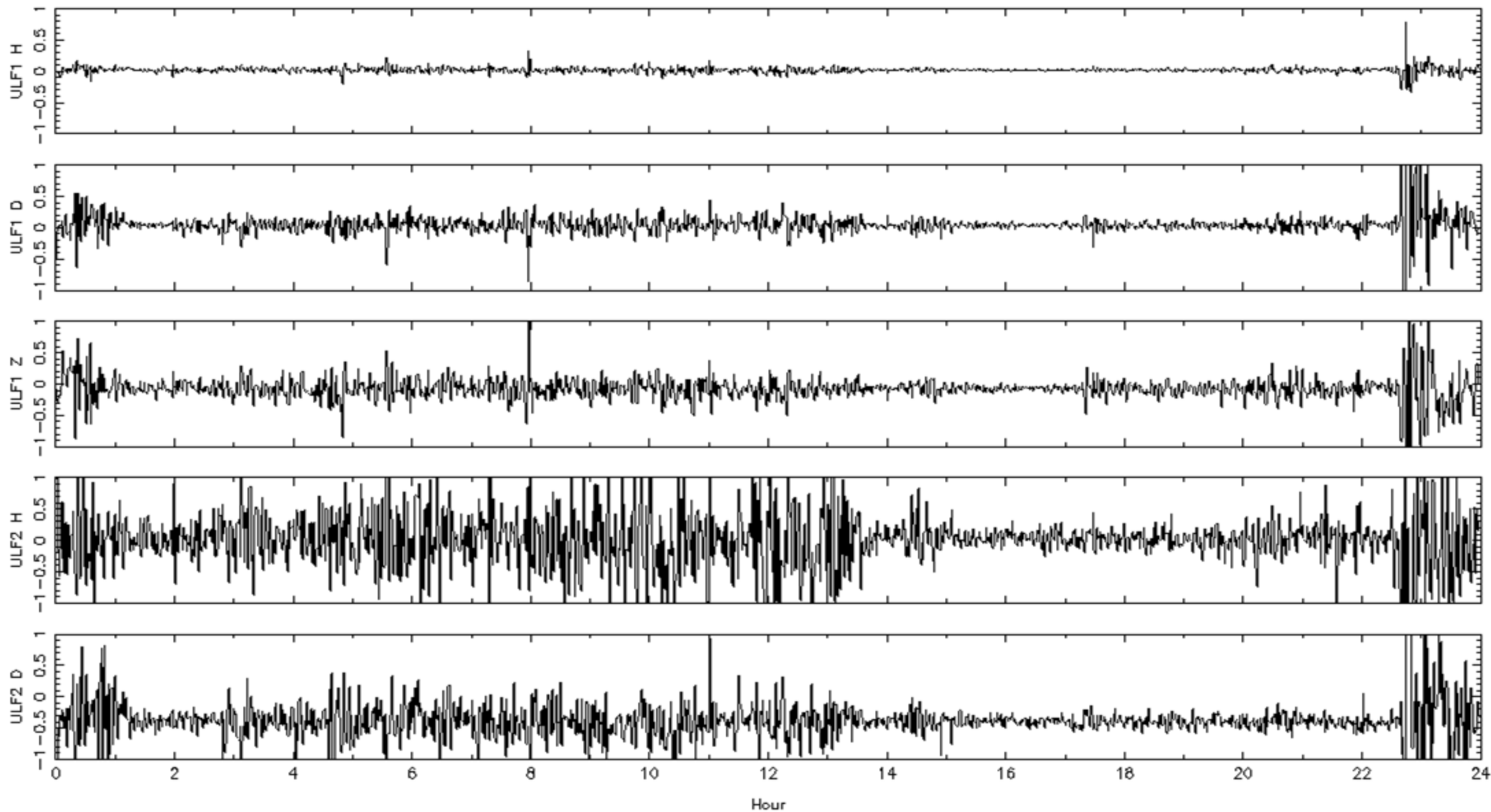


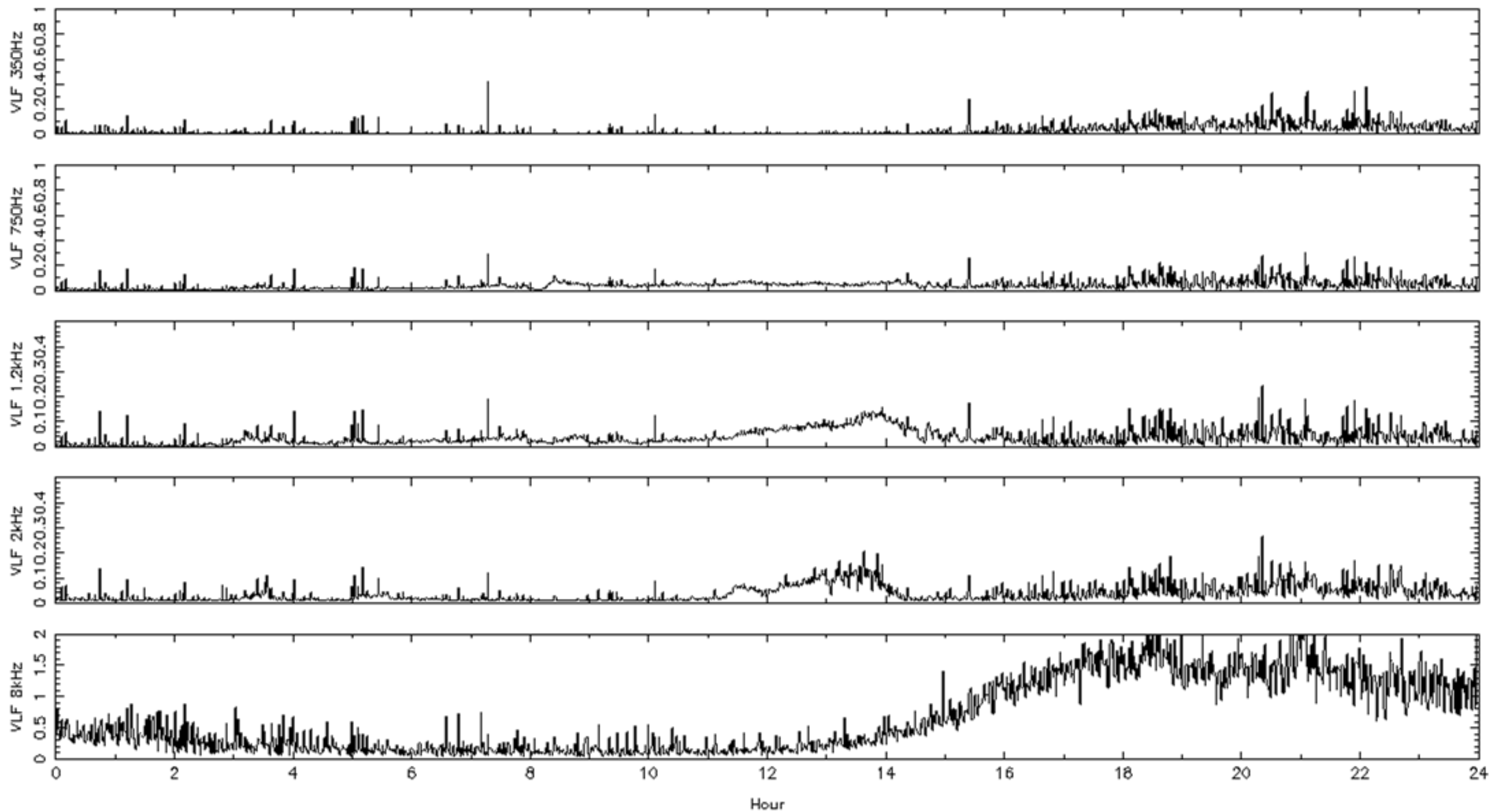
ネットワーク構成

昭和基地

西オングル

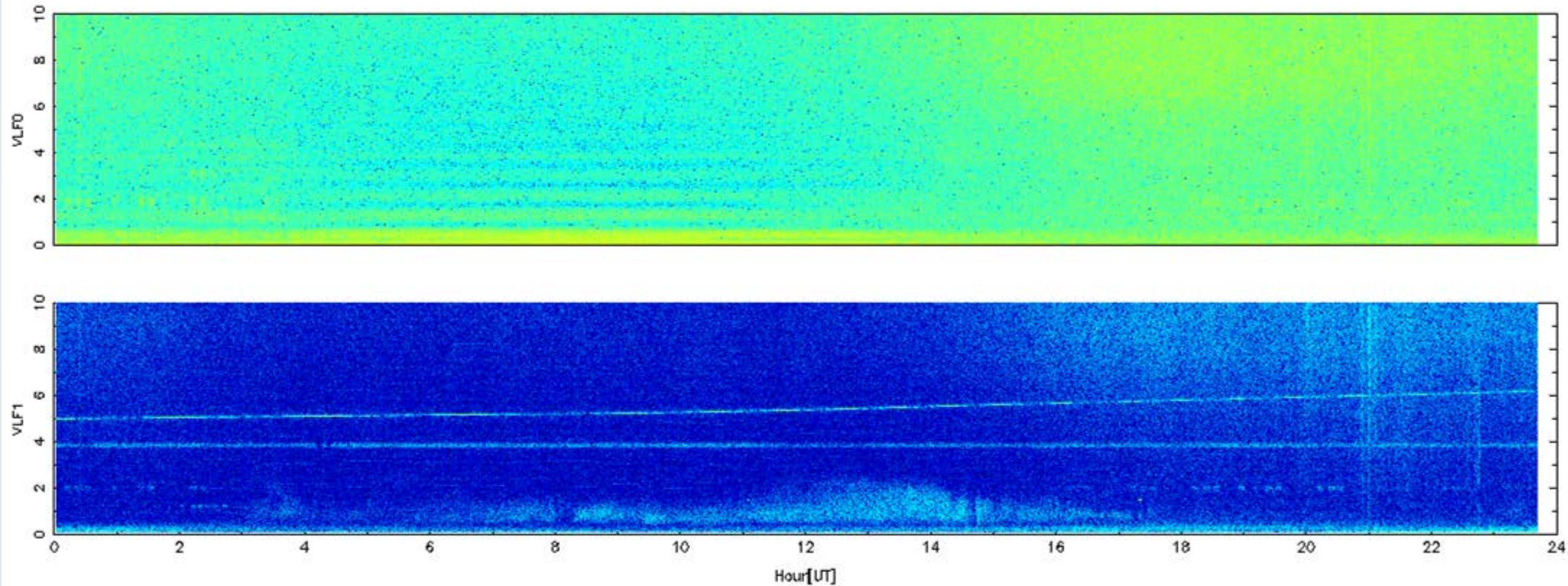






VLF-WBデータ

WO3_c20160703_VLFWB



今後の研究の方向

1. 西オングル島自然電波観測 (VLF観測)
2. FPGAを使った低温環境でのデータ収録
3. 衛星回線を使った高効率データ伝送
4. 野外調査に利用可能な緊急通信情報基盤
5. 大規模シミュレーション環境整備
6. 大規模データ解析、公開基盤整備
7. 高速シミュレーションコード開発
8. 情報セキュリティ管理基盤整備