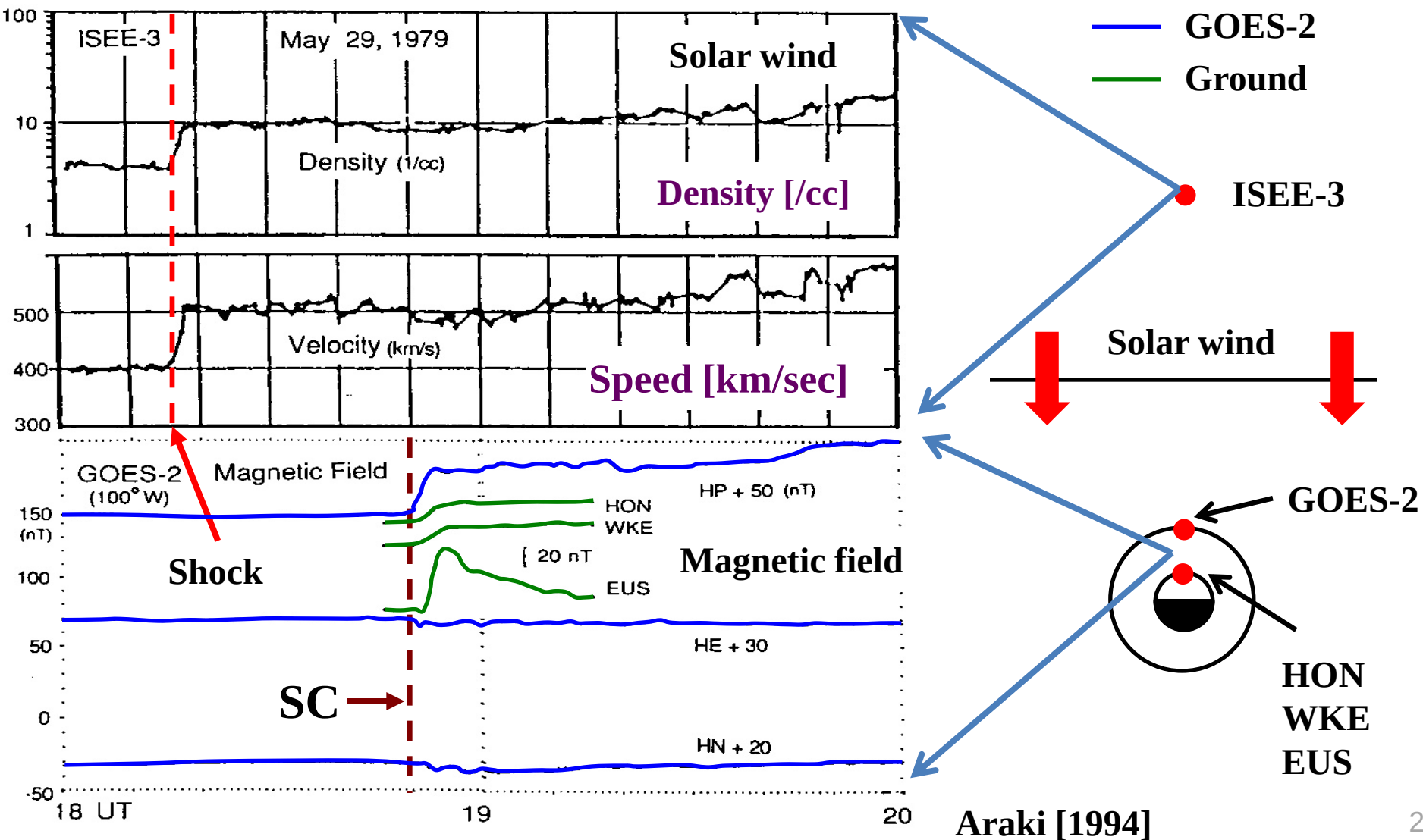


IUGONET観測データに基づく赤道域における 磁気急始(SC)の磁場振幅の季節依存性

新堀淳樹(京大RISH)、辻 裕司、菊池 崇、荒木 徹、林 寛生、
津田敏隆、池田昭大、魚住禎司、R. E. S. Otadoy、歌田久司、
B. M. Shevtsov、S. I. Solovyev、長妻 努、湯元清文、
IUGONETプロジェクトチーム

I. はじめに

I.1 磁気急始(Geomagnetic Sudden Commencement: SC)



I. はじめに

I.2 SC研究の意義

SC現象の特徴



○孤立現象

開始時刻や発生要因を見極め易い

○磁気圏－電離圏におけるプラズマ・電磁環境の急変に伴う状態遷移過程の理解に欠かせない

Ex. 太陽フレア、地震、サブストーム、成層圏突然昇温

SCの磁場振幅の持つ情報

磁気圏電流→太陽風の変動(動圧・惑星間磁場)

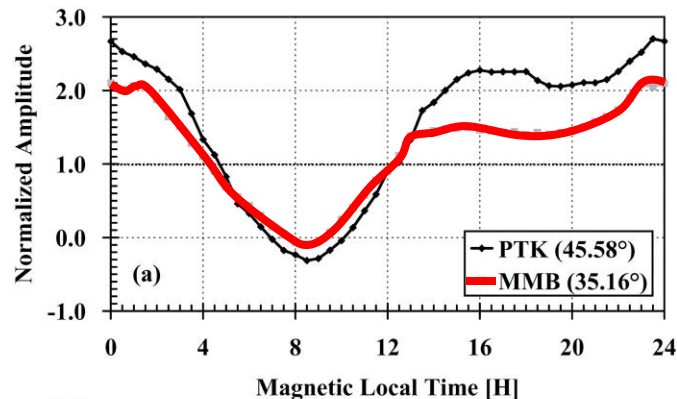
電離圏電流→電離圏の変動(地球側の変動)

電離圏の状態に関する季節変化・太陽活動依存性
(太陽紫外線、中性大気との相互作用)

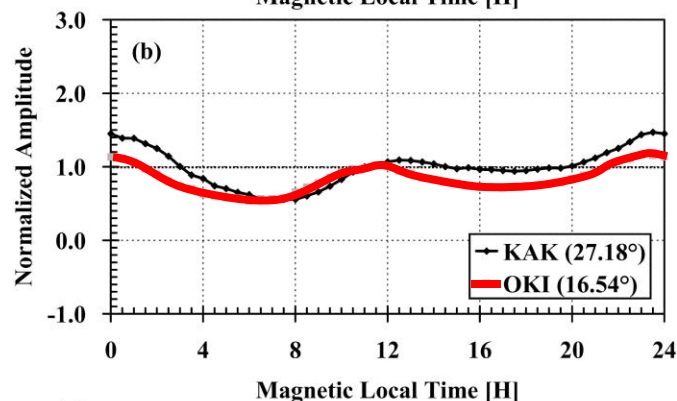
I. はじめに

I.3 SCのMI期の電流系と地上磁場変動

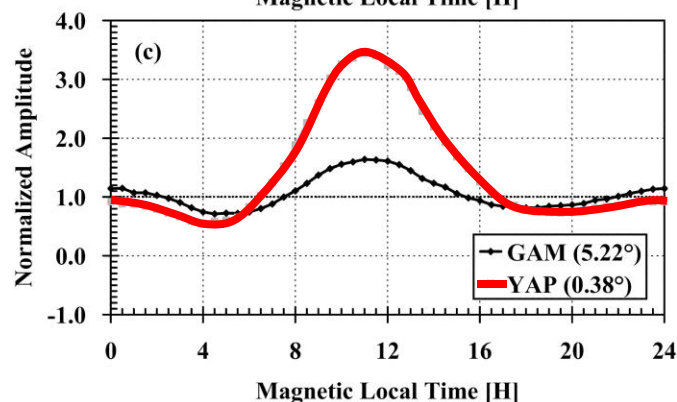
中緯度



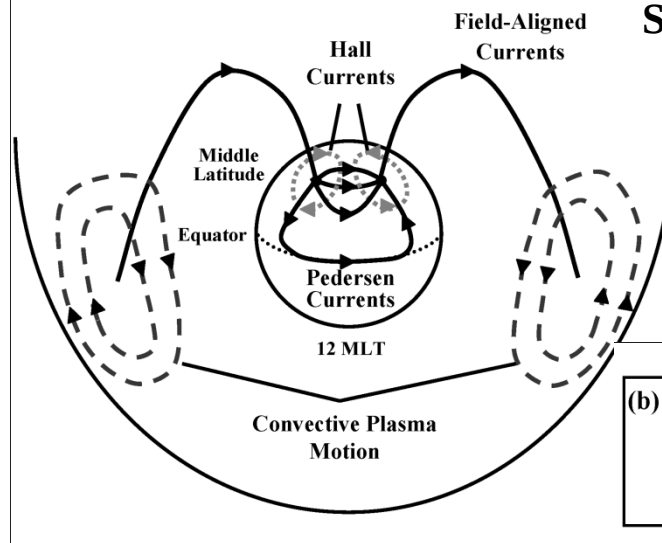
低緯度



赤道域

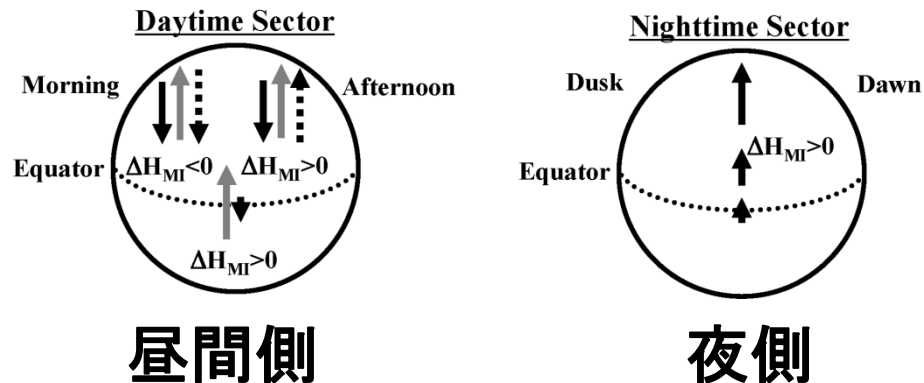


(a) MI Current System in the Magnetosphere and Ionosphere



Shinbori et al. [2009]

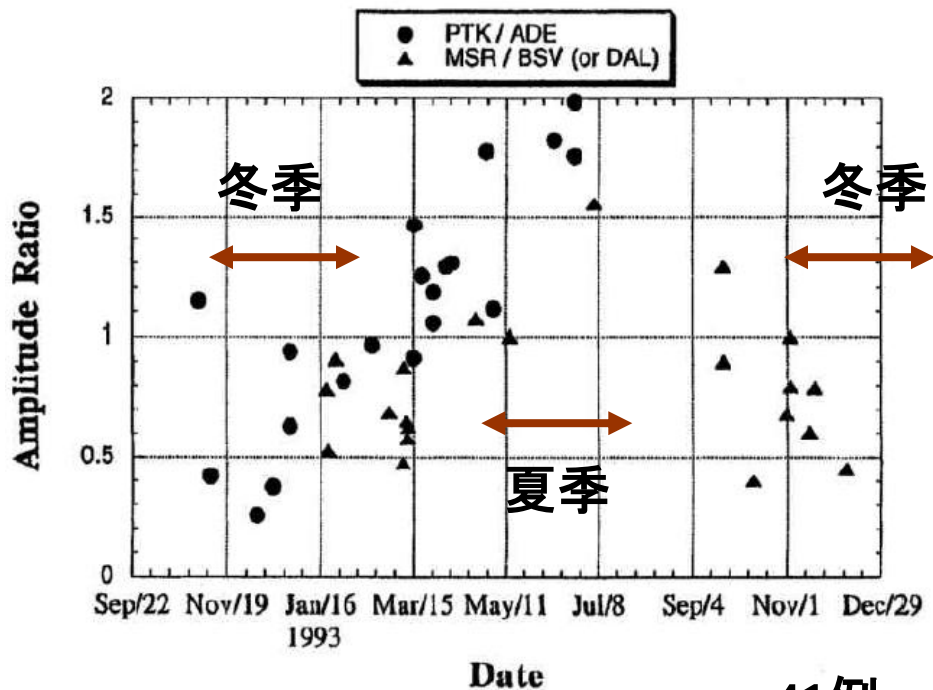
(b) Ground Magnetic Perturbations



I. はじめに

I.4 SCの磁場振幅の季節依存性

SC & SI Observed at 210° LOW-LAT. Conjugate Points

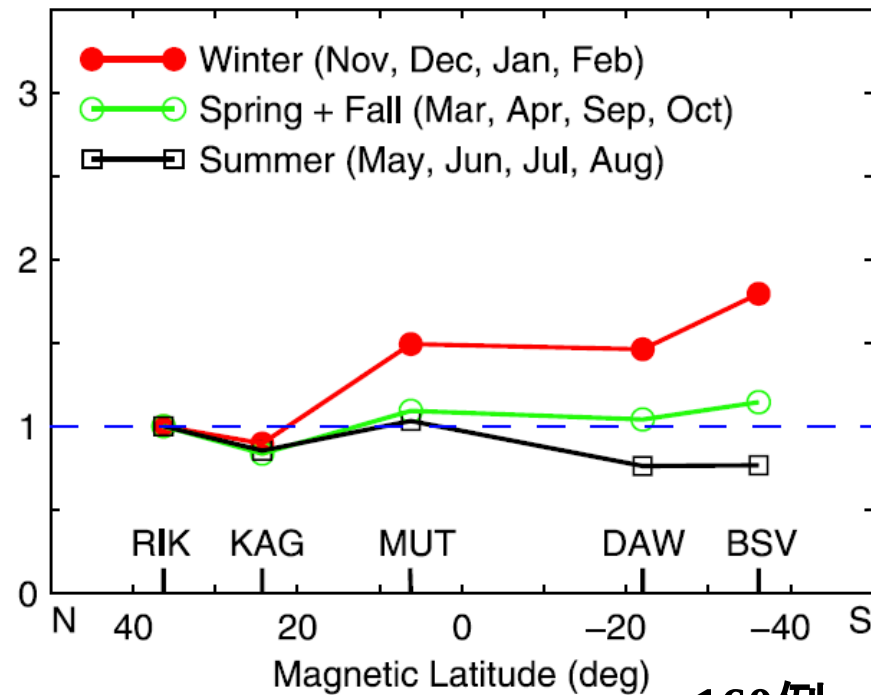


Yumoto et al. [1996]

41例

要因：電離圏電流の季節変動

(f) Southward IMF: Seasonal variations



Huang and Yumoto [2006]

160例

要因：磁軸の傾きの効果

※統計に用いているイベント数が少ない

I. はじめに

I.5 SC現象に関連した未解明事項

1. 磁気圏－電離圏結合過程

磁気圏と電離圏電場の配位過程[Araki, 1977, Kikuchi and Araki, 1979]

緯度と経度に対する季節変動とIMF依存性[Araki et al., 2006, 2009]

2. 磁気圏プラズマの応答

2-1 放射線帯粒子の生成と消失

誘導電場による加速[Wygant et al., 1994; Hudson et al., 1997]

2-2 リングカレント粒子加速

領域2型沿磁力線電流の増加[Nakano et al., 2009]

3. サブストームとの関係(shock triggered)

preconditioningの依存性[Kokubun, 1977; Kan et al., 2003]

SCとAKRとの発生時間の関係[Shinbori et al., 2003]

4. プラズマの素過程

ホイッスラー波などの波動励起[Gail and Inan, 1990; Shinbori et al., 2003]

I. はじめに

I.6 本発表の趣旨

◎1996年1月から2008年12月までの約13年間という長期間にわたる高時間分解能をもつオーロラ帯(70度)から磁気赤道で得られた地磁気の水平成分と太陽風データを調べることで以下の項目について明らかにする

- (1) 高緯度から磁気赤道領域におけるSCのMI期の磁場振幅の**磁気緯度**と**磁気地方時**の依存性

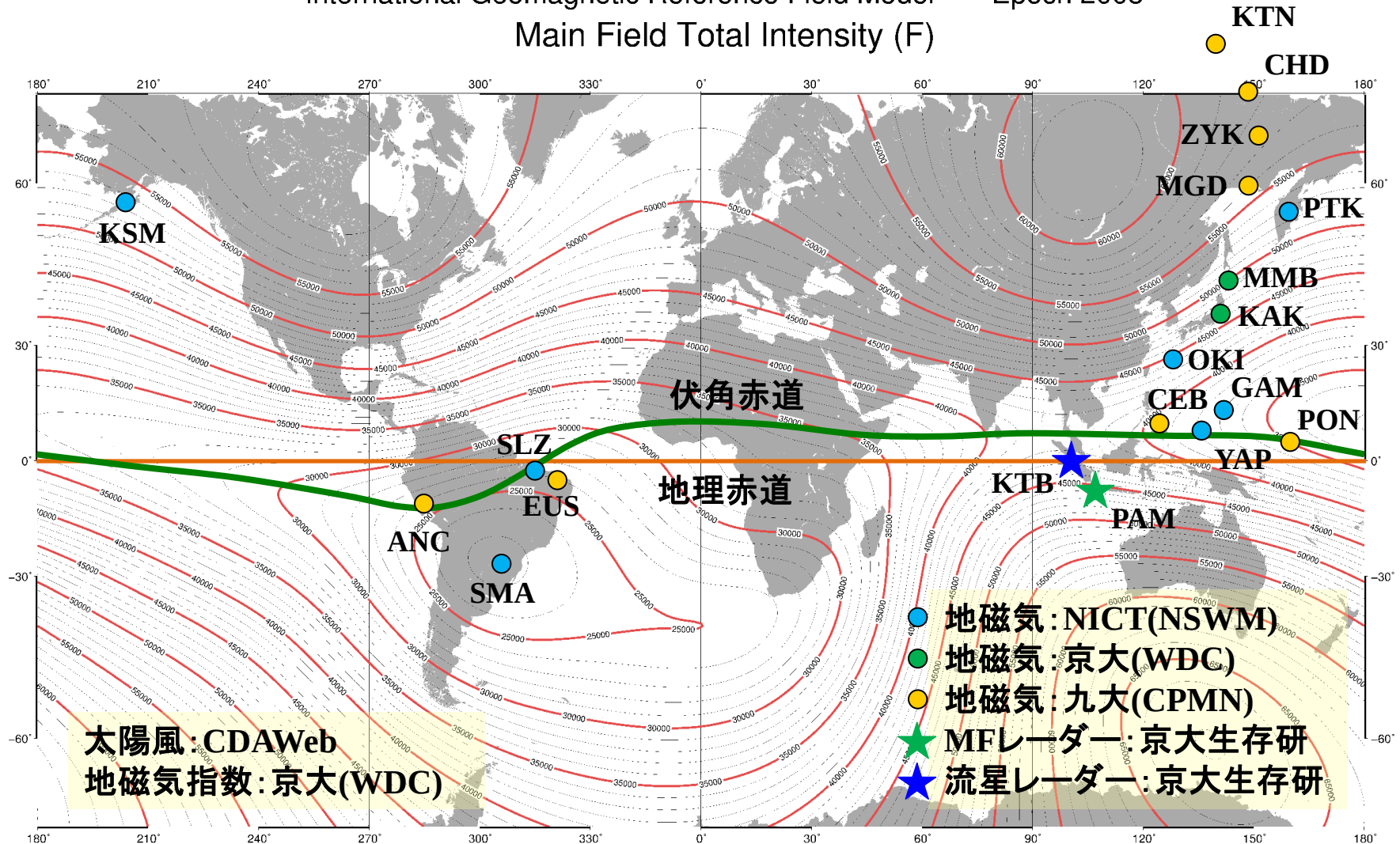
⇒緯度と磁気地方時に対してどのような季節依存性が見られるか？

- (2) その違いを生む要因は何か？

II. 観測データと解析手法

II.1 使用した地上観測点

International Geomagnetic Reference Field Model -- Epoch 2005
Main Field Total Intensity (F)



Map Date : 2005
Units (Total Intensity) : nanoTesla
Contour Interval : 1000 nanoTesla
Map Projection : Mercator

<http://www.ngdc.noaa.gov/wist/magfield.jsp>

II. 観測データと解析手法

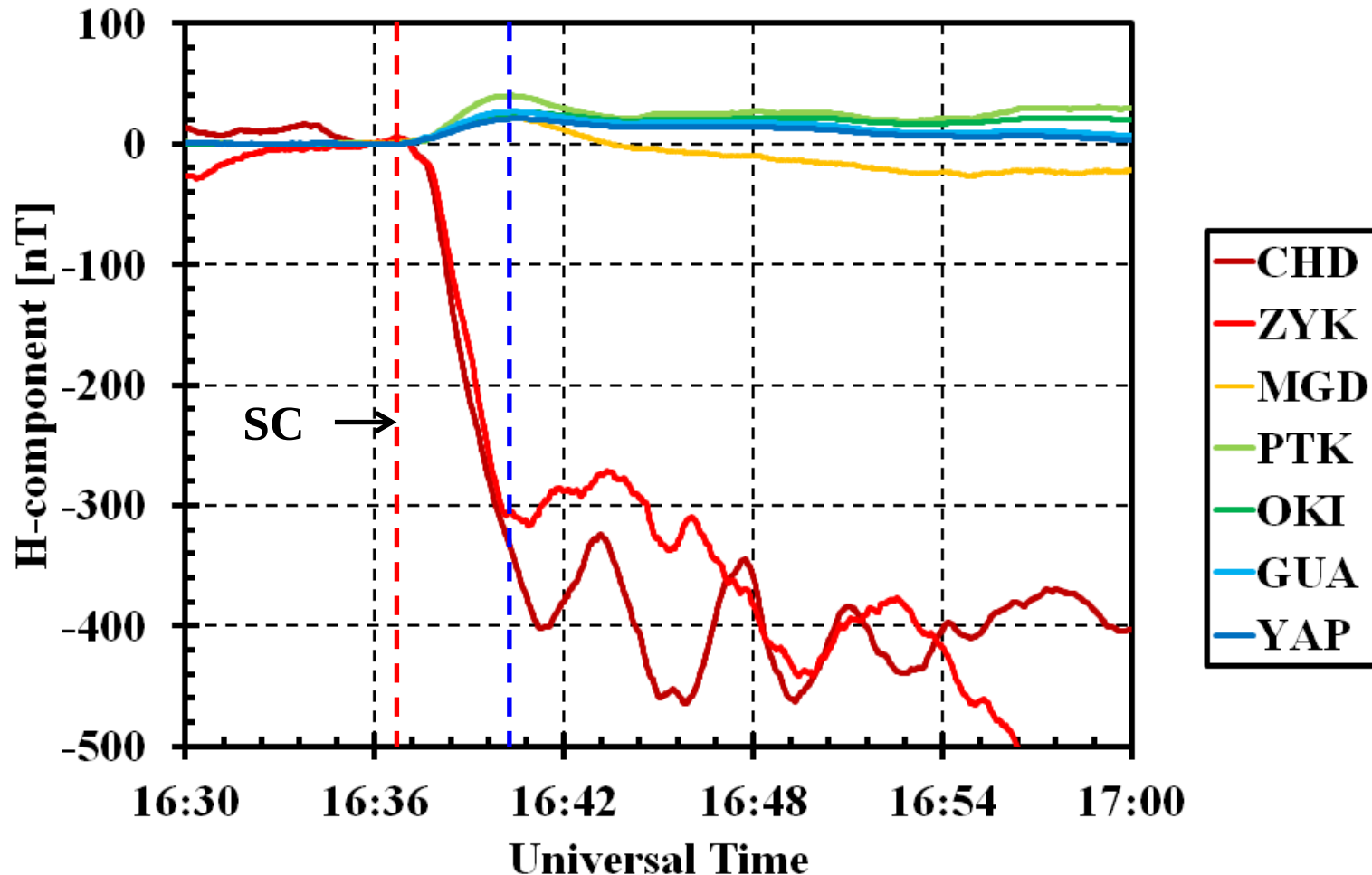
II.2 地磁気観測点、解析期間、SCイベント数

	GLAT [deg]	GMLAT [deg]	Period	SC	Data site
KTN	75.94	70.08	96/01-05/12	1450	CPMN(Kyushu)
CHD	70.62	64.66	96/01-02/05	2113	CPMN(Kyushu)
ZYK	65.75	59.74	96/01-07/06	2502	CPMN(Kyushu)
KSM	58.68	58.09	01/11-07/07	1452	NSWM(NICT)
MGD STC	59.97	53.62	96/01-07/07 07/07-08/10	3005	CPMN(Kyushu) NSWM(NICT)
PTK	52.94	45.58	97/10-08/09	2256	CPMN(Kyushu) NSWM(NICT)
MMB	43.90	35.16	96/01-08/09	3116	WDC(Kyoto)
KAK	36.23	27.12	96/01-08/12	3163	WDC(Kyoto)
OKI	24.75	16.54	96/04-08/10	2028	NSWM(NICT)
GAM	13.58	5.32	96/08-06/12	2721	WDC(Kyoto) NSWM(NICT)
CEB	10.35	0.85	98/08-05/06	1599	CPMN(Kyushu)
YAP	9.30	0.38	98/09-08/08	1442	NSWM(NICT)
PON	7.00	0.27	97/03-04/05	1631	CPMN(Kyushu)

II. 観測データと解析手法

II.3 解析手法(事例解析)

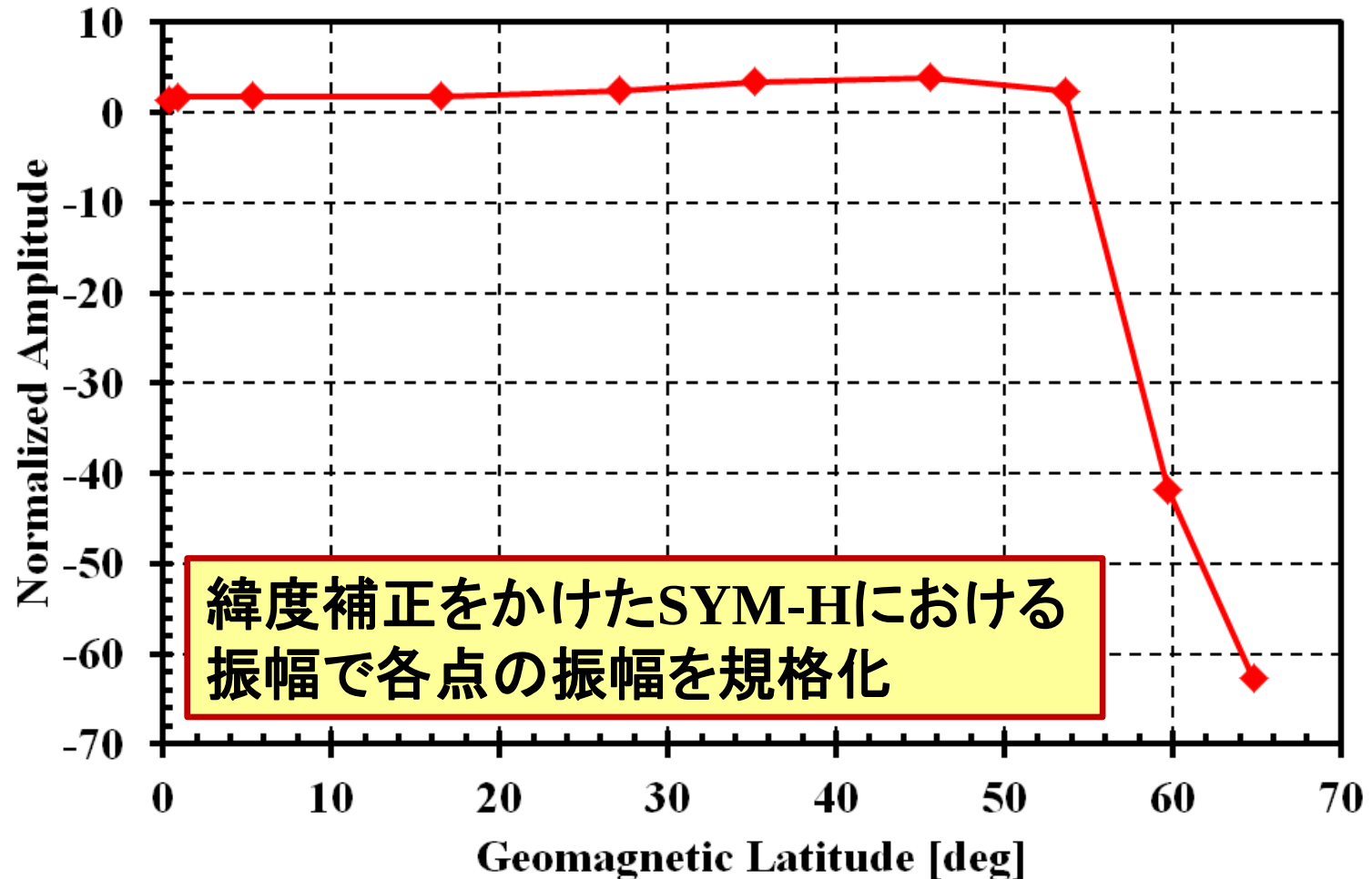
[2002年9月7日16:36:35 (UT)のSCイベント](真夜側)



II. 観測データと解析手法

II.3 解析手法(事例解析)

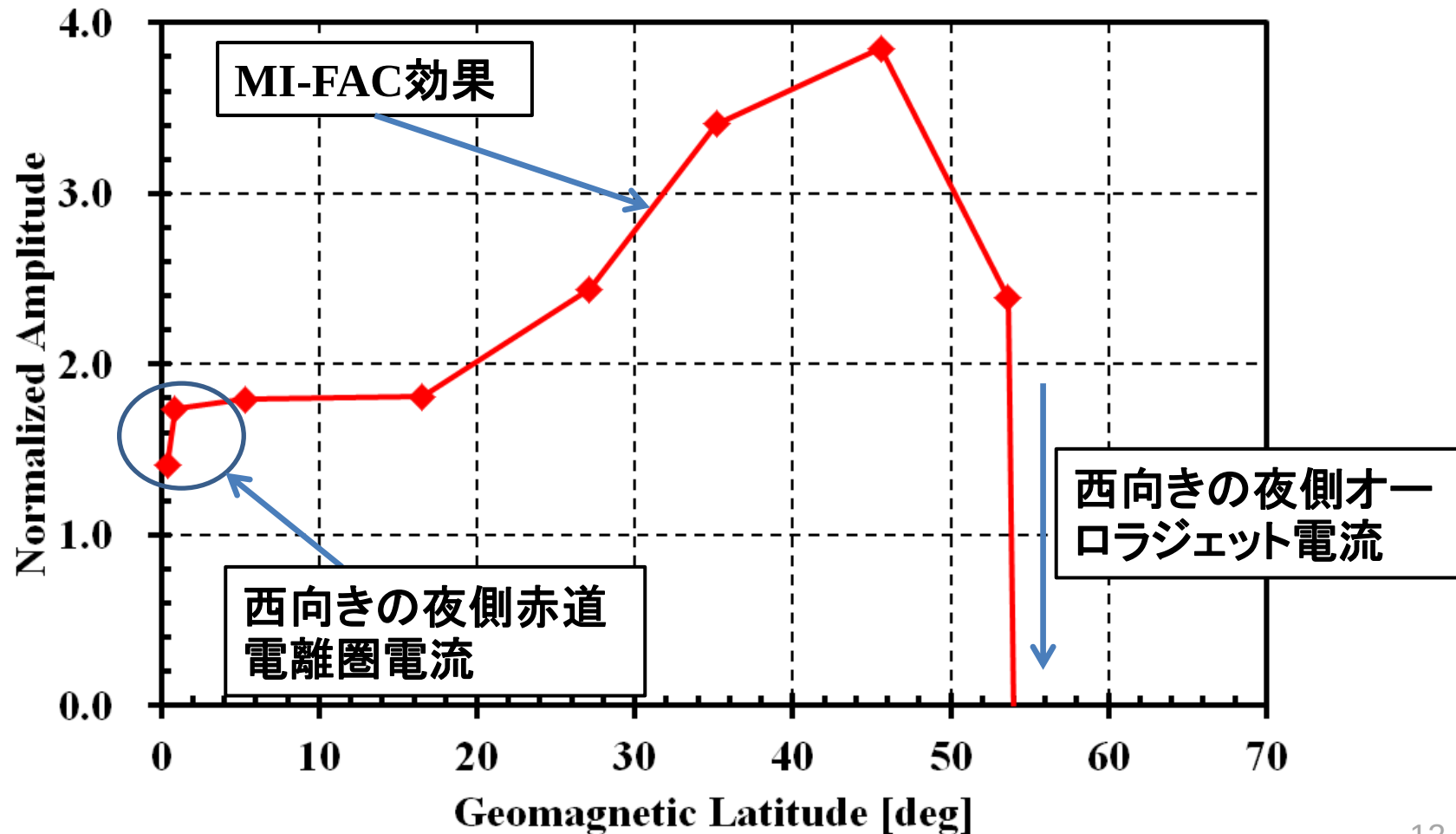
[2002年9月7日16:36:35 (UT)のSCイベント](夜側)



II. 観測データと解析手法

II.3 解析手法(事例解析)

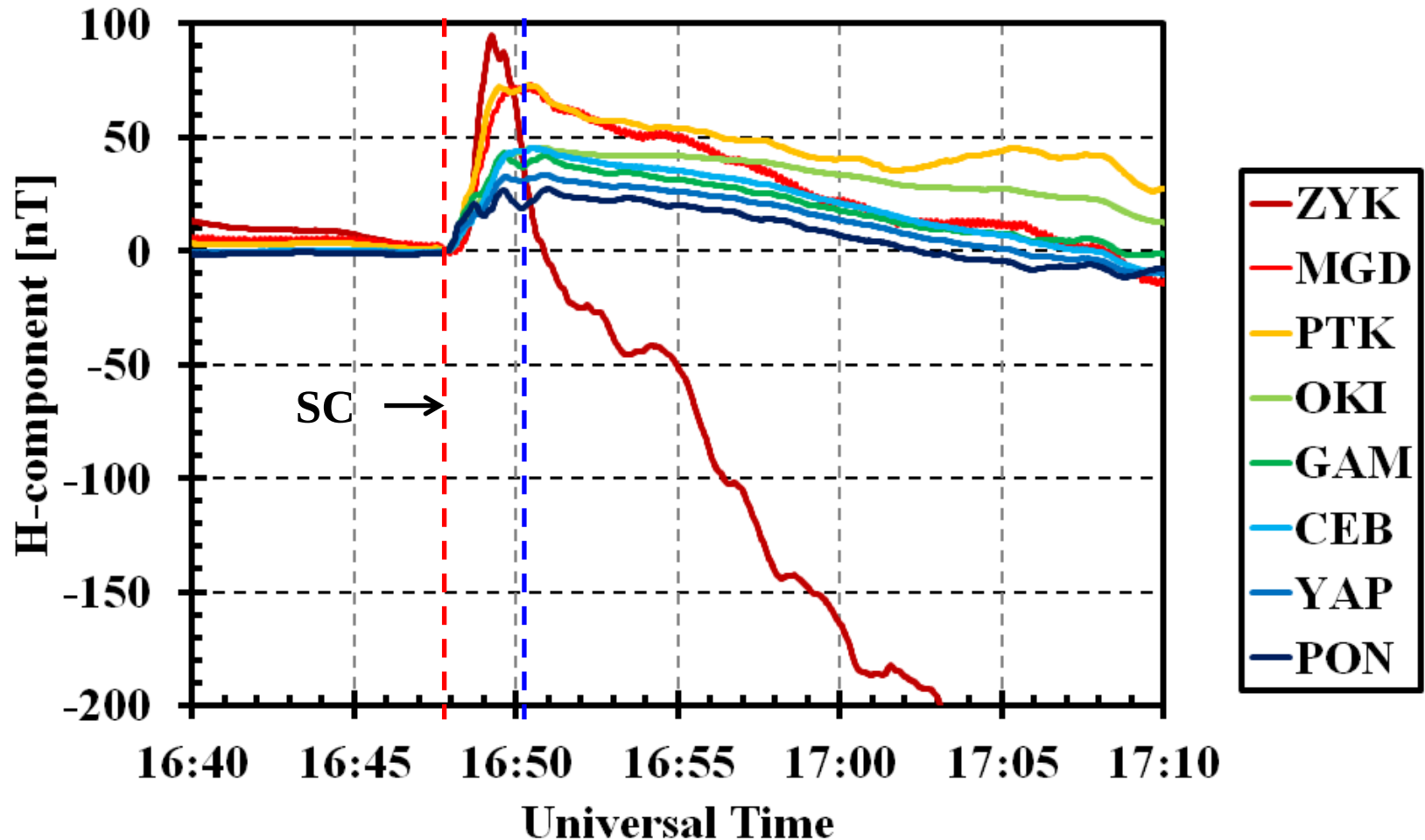
[2002年9月7日16:36:35 (UT)のSCイベント](夜側)



II. 観測データと解析手法

II.3 解析手法(事例解析)

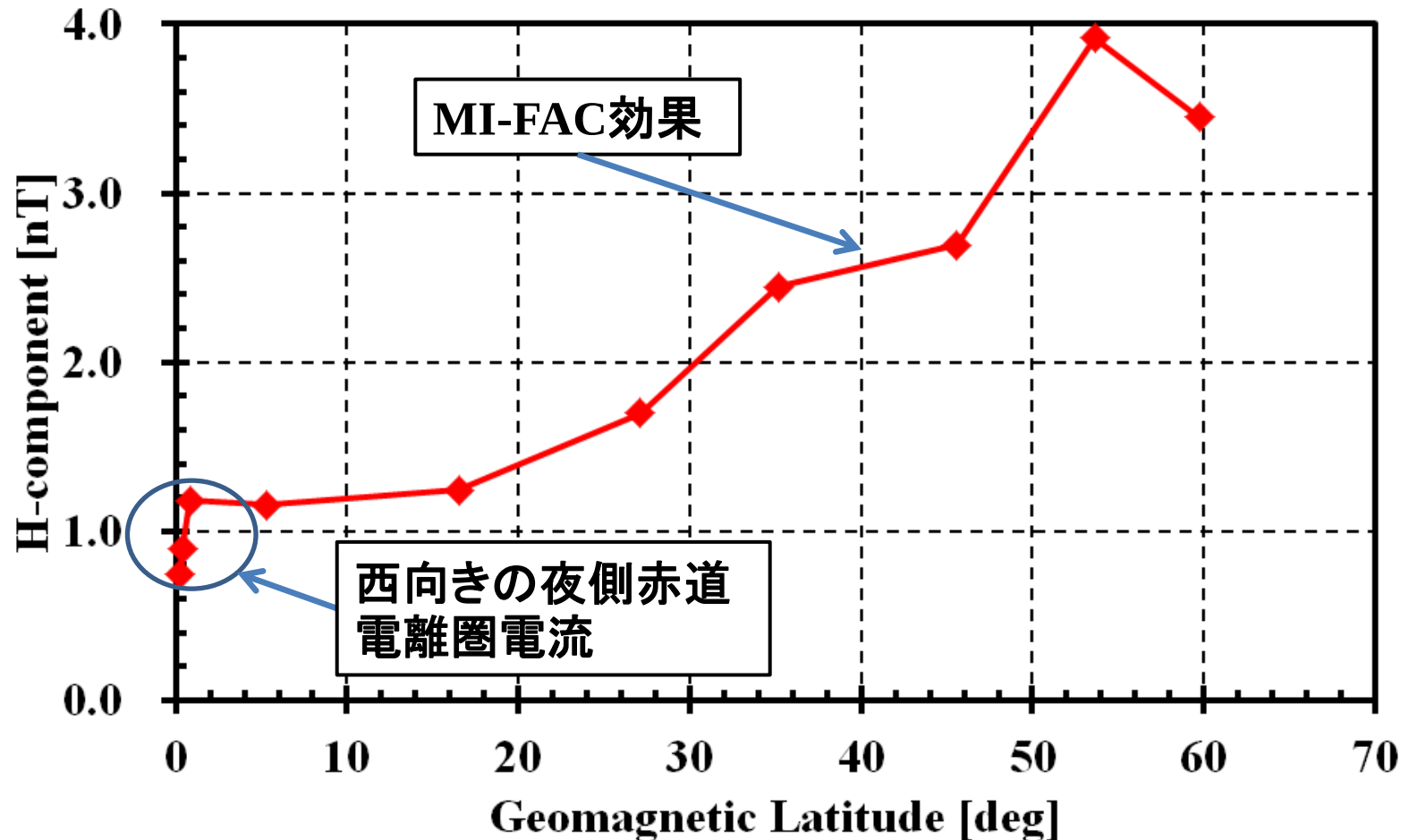
[2001年10月21日16:47:55 (UT)のSCイベント](夜側)



II. 観測データと解析手法

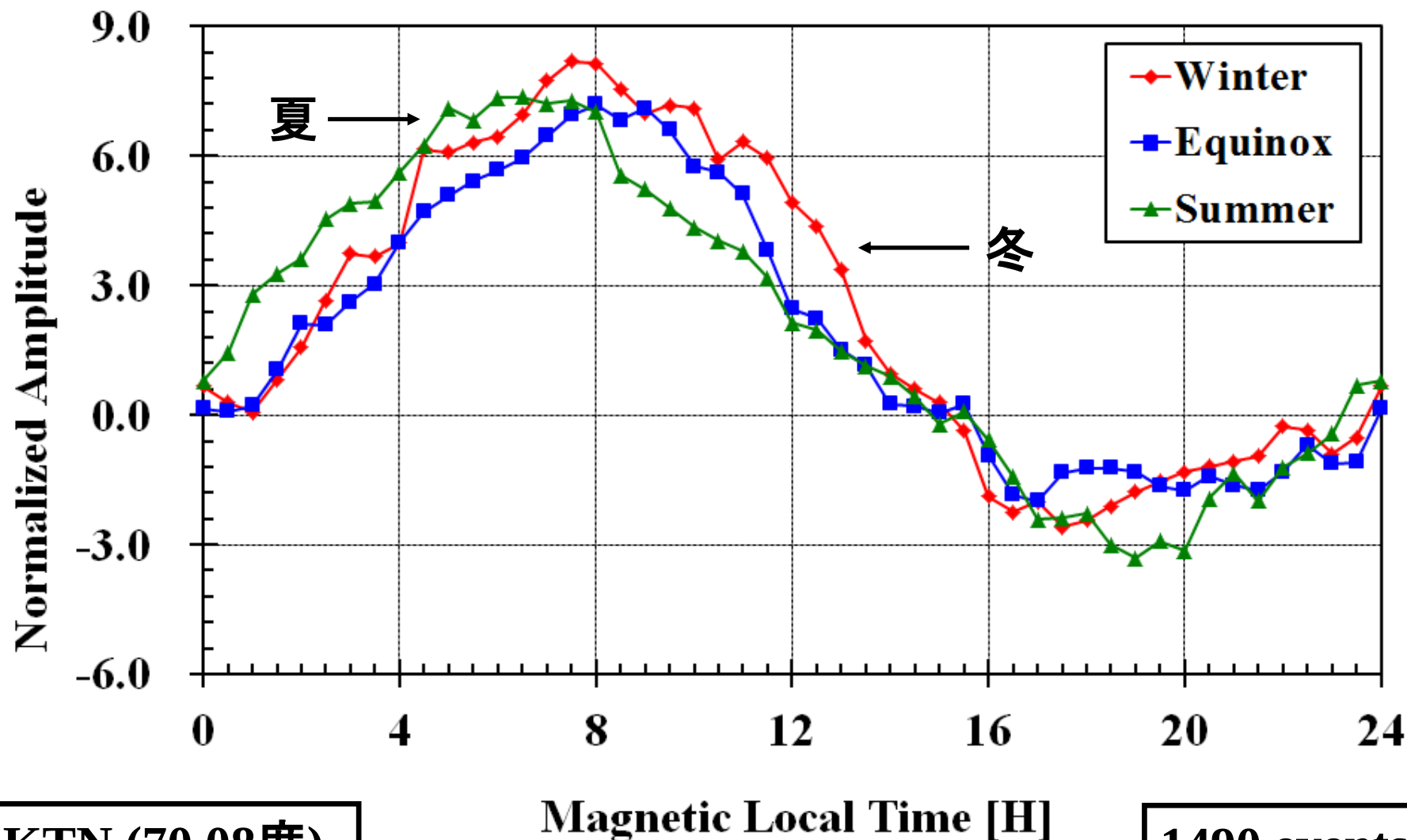
II.3 解析手法(事例解析)

[2001年10月21日16:47:55 (UT)のSCイベント](夜側)



III. 解析結果

III.0 極冠域付近における季節変動



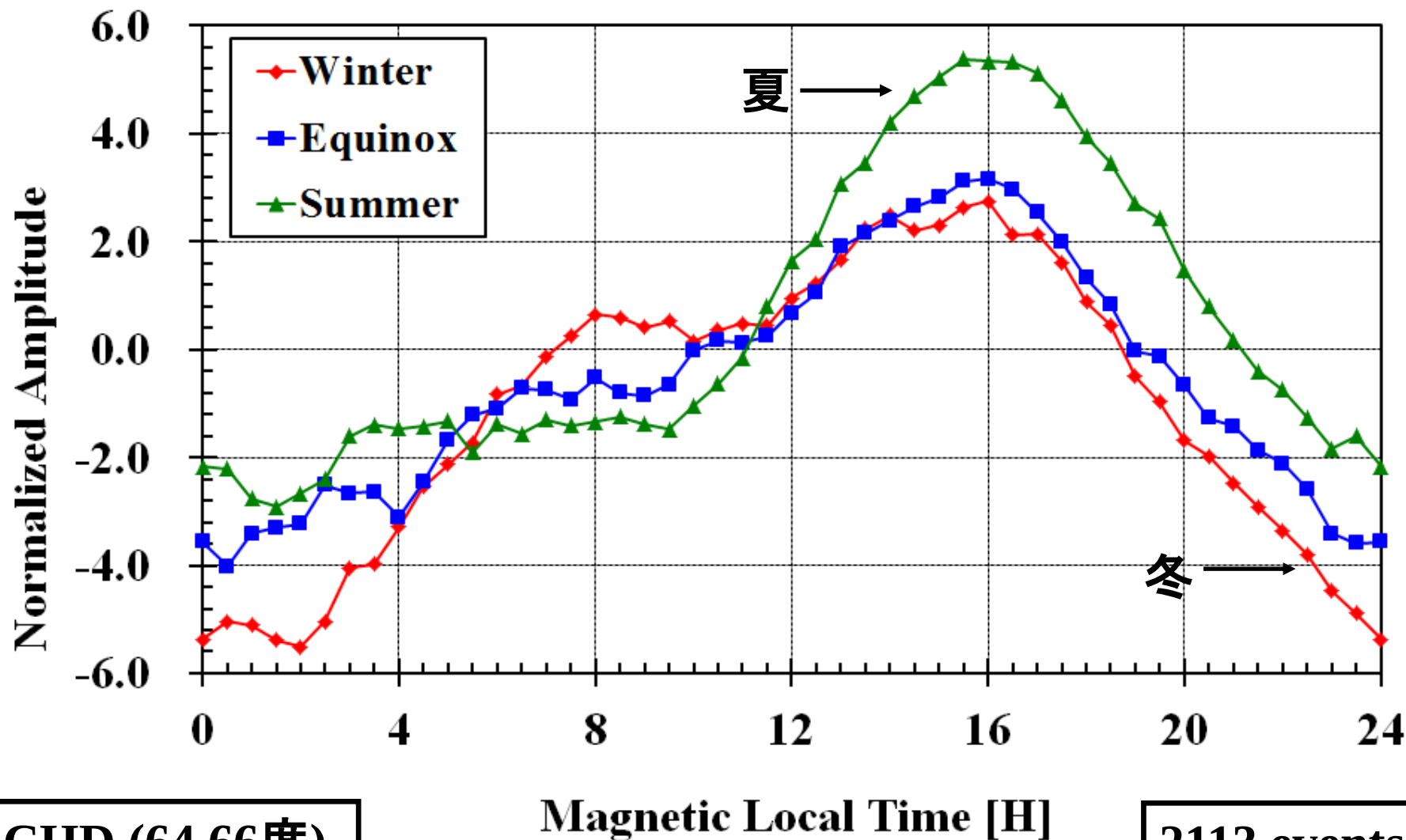
KTN (70.08度)

Magnetic Local Time [H]

1490 events

III. 解析結果

III.1 オーロラ帯における季節変動



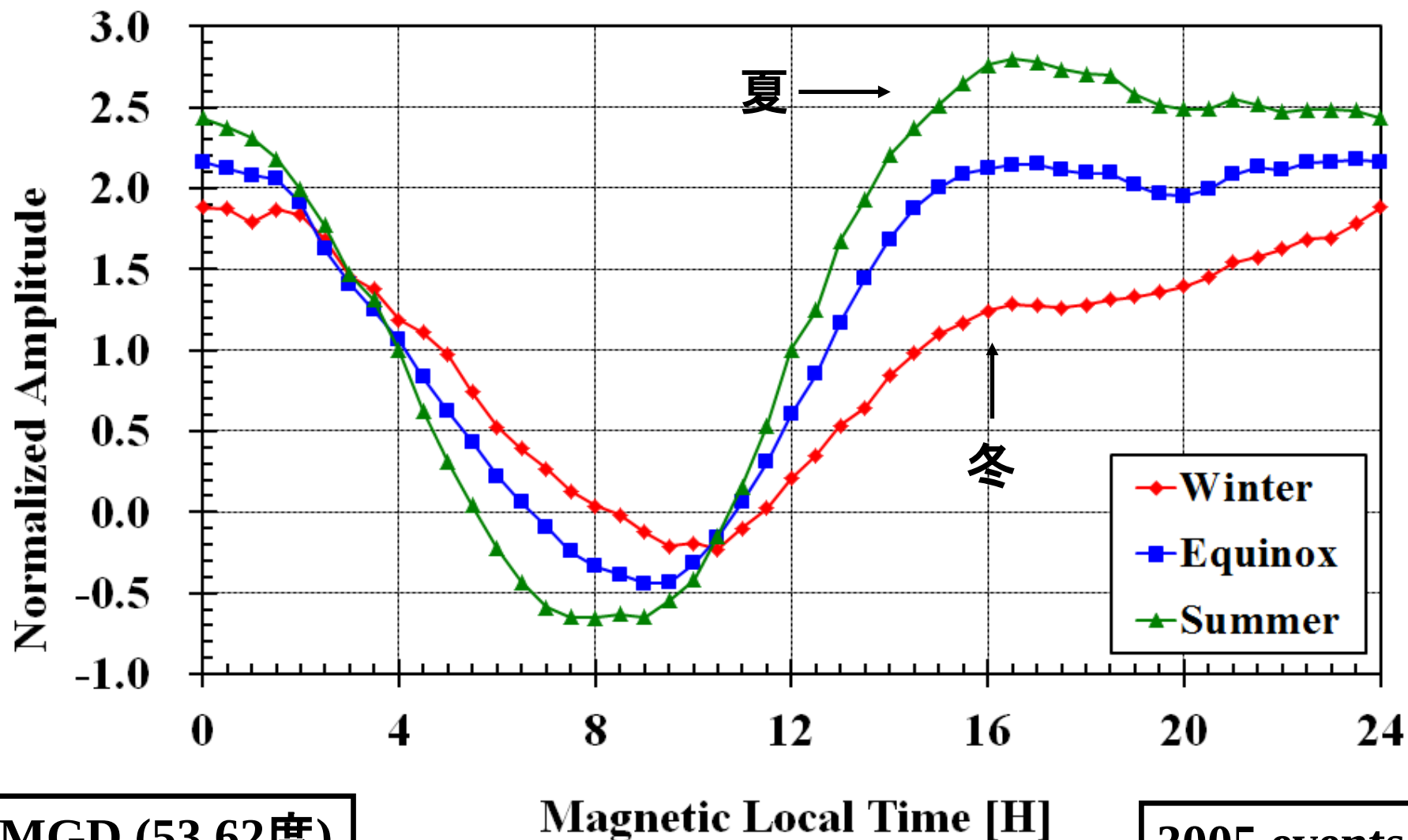
CHD (64.66度)

Magnetic Local Time [H]

2113 events

III. 解析結果

III.2 中緯度における季節変動



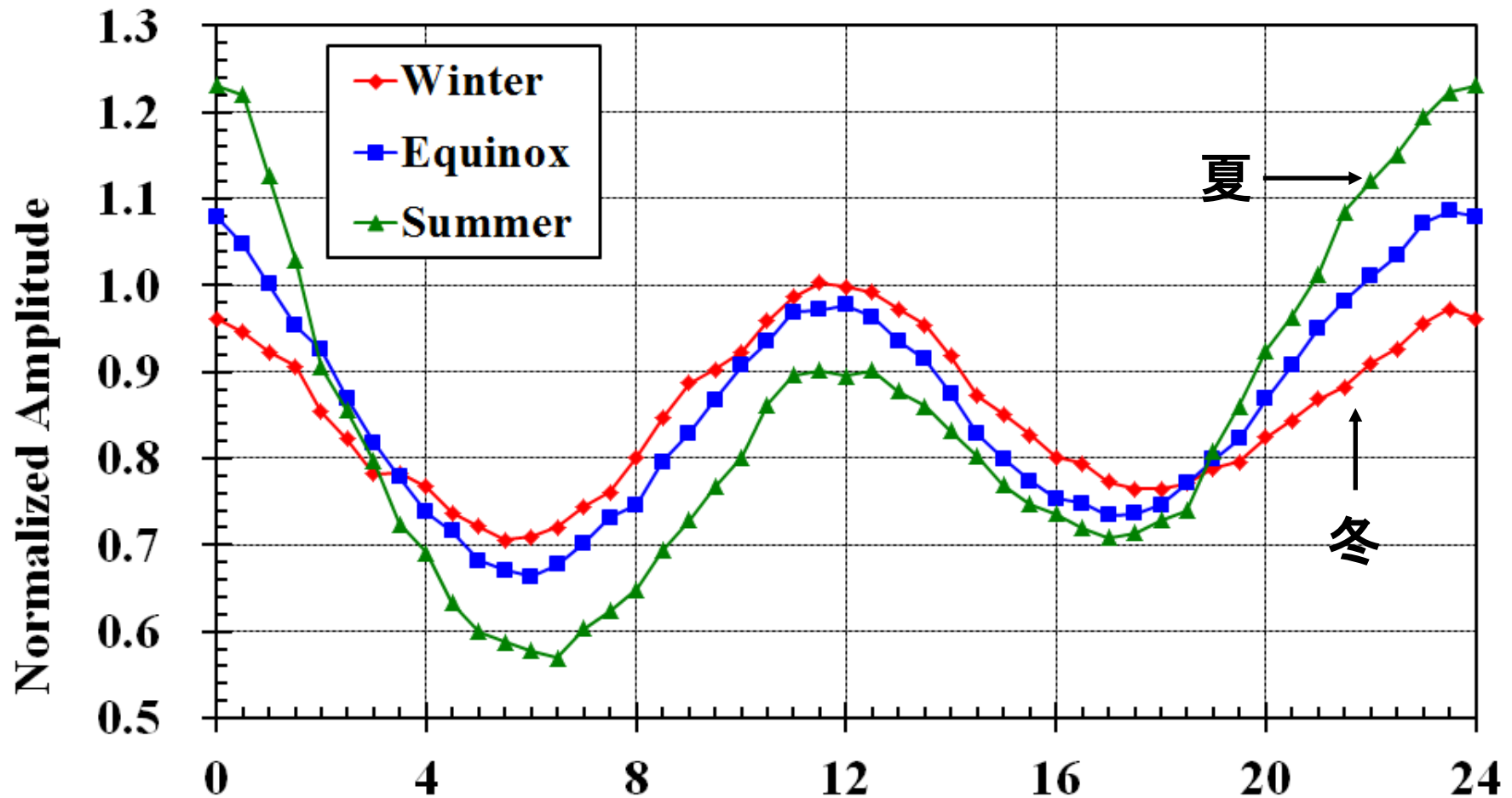
MGD (53.62度)

Magnetic Local Time [H]

3005 events

III. 解析結果

III.3 低緯度における季節変動



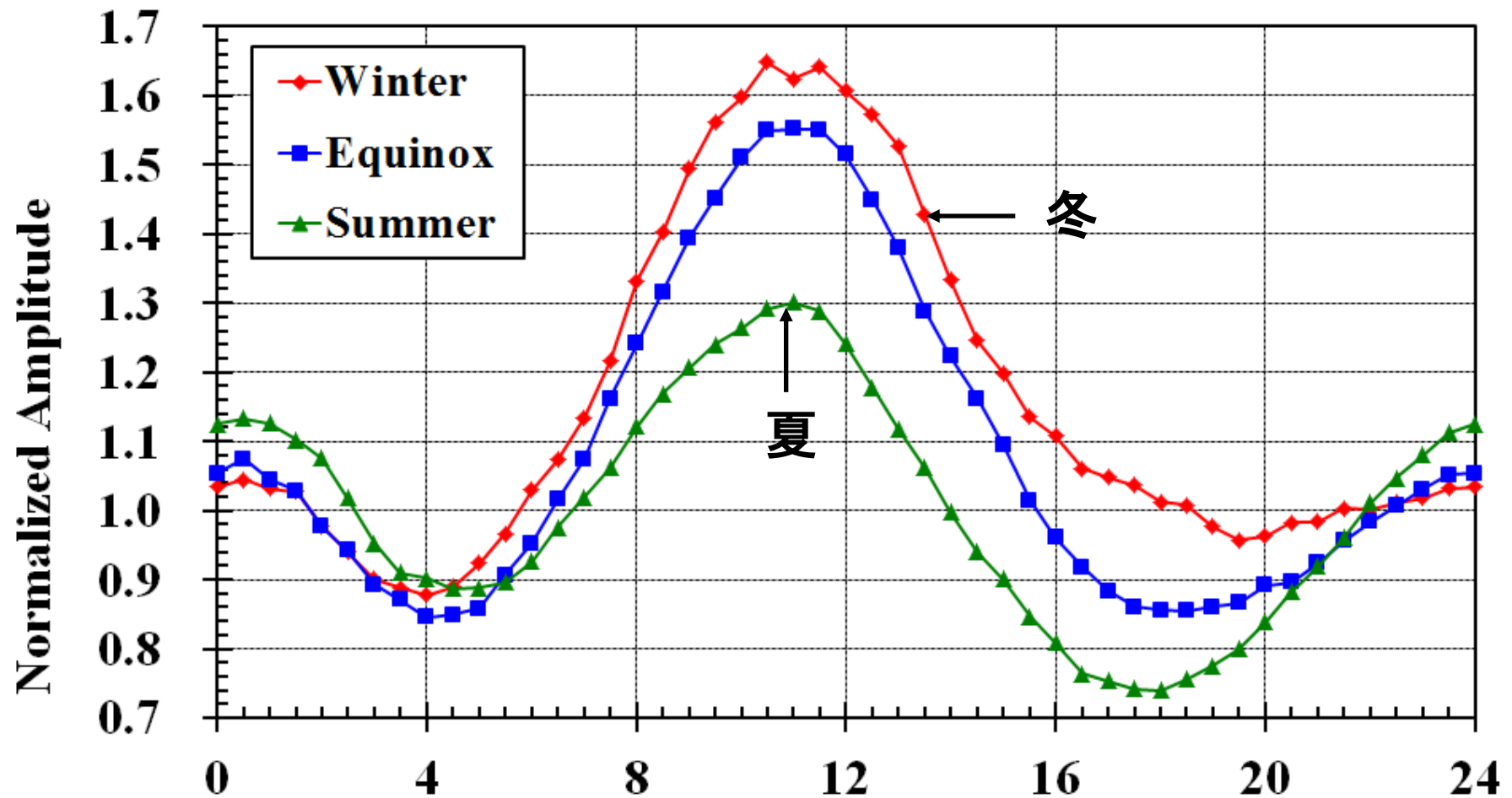
OKI (16.54度)

Magnetic Local Time [H]

2028 events

III. 解析結果

III.4 準赤道における季節変動



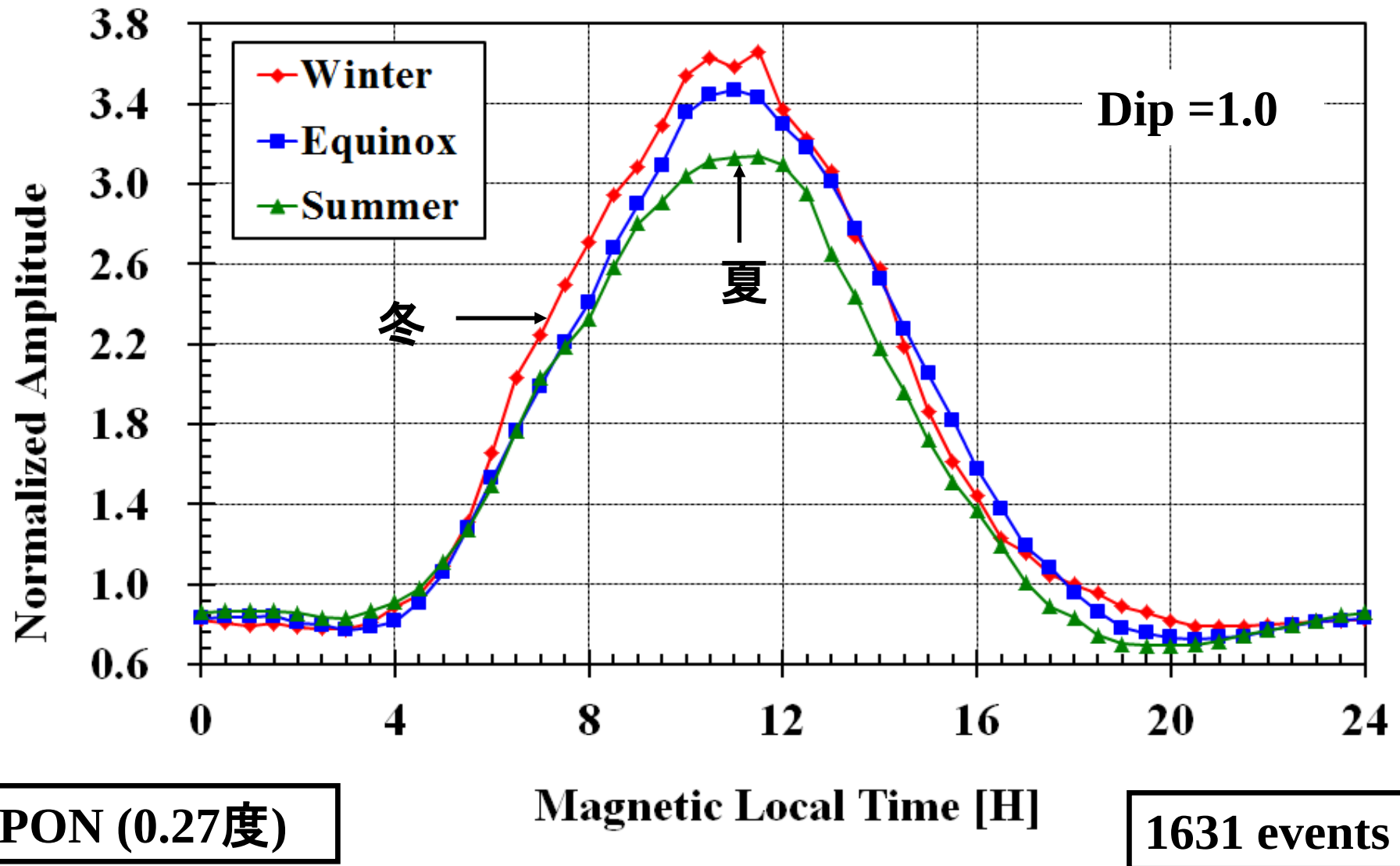
GAM (5.32度)

Magnetic Local Time [H]

2721 events

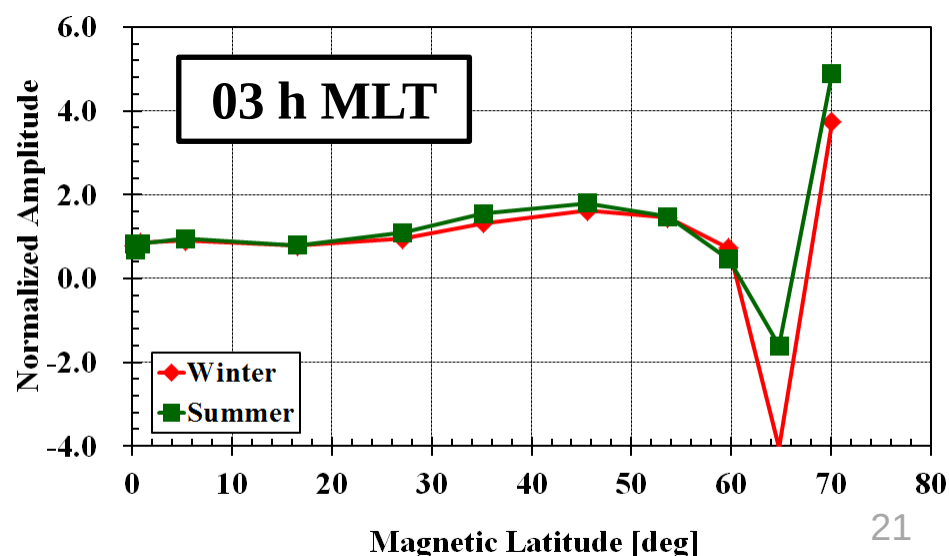
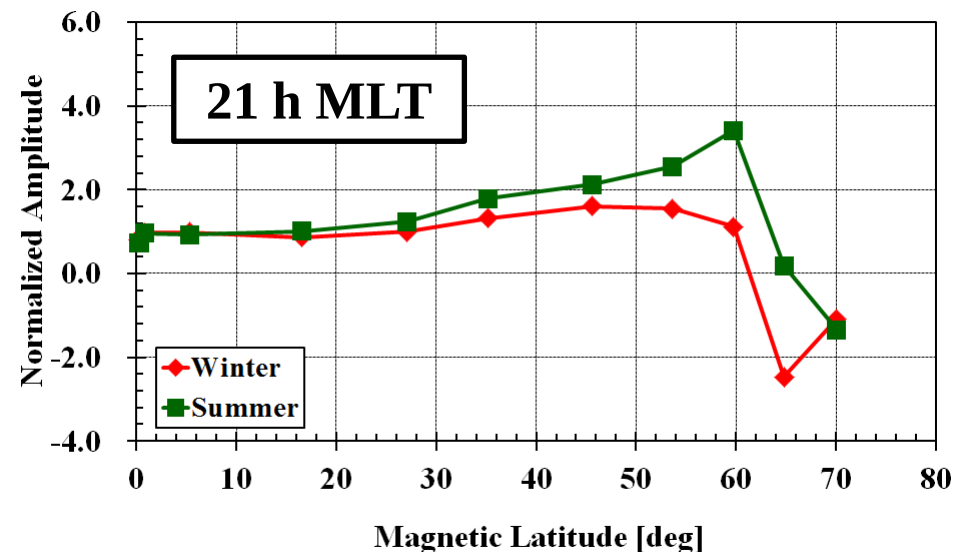
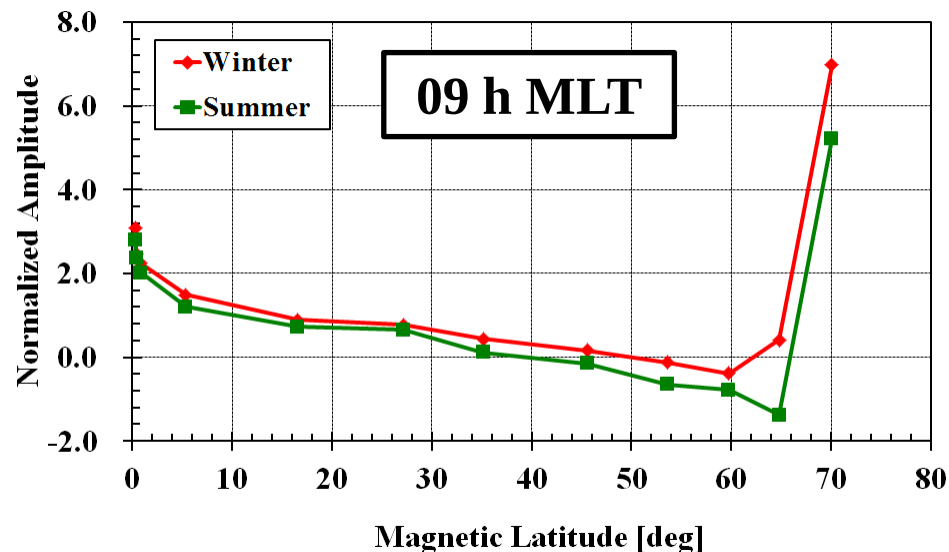
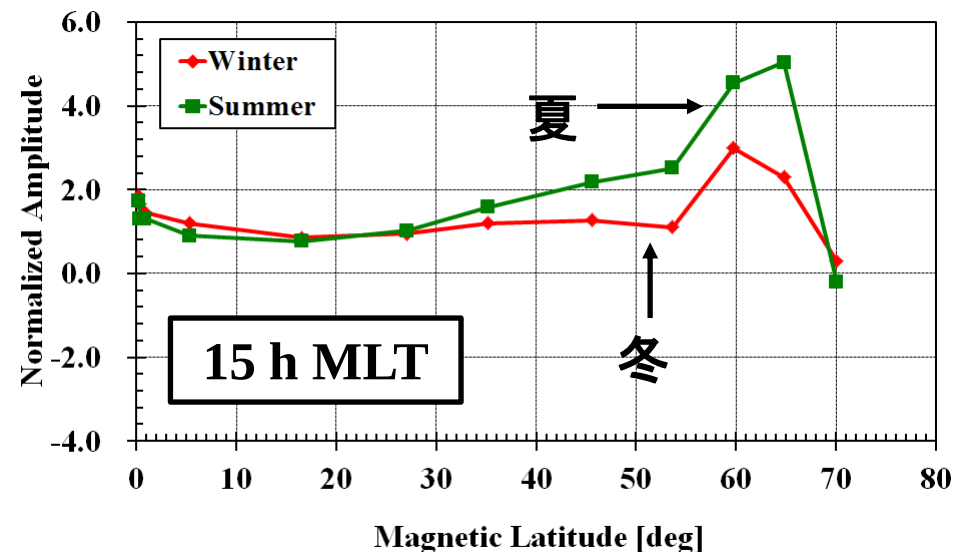
III. 解析結果

III.5 伏角赤道における季節変動



III. 解析結果

III.6 季節依存性の緯度変化



III. 解析結果

III.7 季節変動の解析結果のまとめ

(1) 中緯度以北(MMB→CHD)

昼間側: **DP2型の磁場変化が夏季に最大**(冬:夏=1:2, 緯度50度)

夜側: 中緯度とオーロラ帯で季節に対する応答の仕方が異なる

中緯度: **夏季に振幅が増加**(冬:夏=3:4, 緯度50度)

→R-1型の沿磁力線電流の効果[Araki et al., 2006]が夏季に最大

オーロラ帯: **冬季に磁場変動が著しく増加**(冬:夏=5:2, 緯度65度)

→西向きのオーロラジェット電流の強度が冬季に大きいことを示唆

(2) 低緯度以南(OKI→PON)

昼間側: **夏季よりも冬季に磁場振幅が最大**(冬:夏=1.6:1.3, 緯度5.3度)

→東向きの赤道ジェット電流の強度が冬季に大きいことを示唆

夜側: 基本的に中緯度と同じ傾向(冬:夏=1.0:1.1, 緯度5.3度)

IV. 考察

IV.1 電離圏伝導度と電流の基本事項

電離圏電流と電場の関係式(オームの法則)

$$\mathbf{J}_{\perp} = \Sigma_P \mathbf{E}_{\perp} - \Sigma_H \frac{\mathbf{E}_{\perp} \times \mathbf{B}}{B}$$

電離圏伝導度

$$\Sigma_P = \int \left(\frac{\nu_{en}}{\nu_{en}^2 + \omega_{ge}^2} + \frac{m_e}{m_i} \frac{\nu_{in}}{\nu_{in}^2 + \omega_{gi}^2} \right) \frac{n_e e^2}{m_e} dz = \int k_P n_e dz$$

$$\Sigma_H = - \int \left(\frac{\omega_{ge}}{\nu_{en}^2 + \omega_{ge}^2} + \frac{m_e}{m_i} \frac{\omega_{gi}}{\nu_{in}^2 + \omega_{gi}^2} \right) \frac{n_e e^2}{m_e} dz = \int k_H n_e dz$$

$$\nu_{in} = 2.6 \times 10^{-15} (n_n + n_i) \sqrt{M_n}$$

$$\nu_{en} = 5.4 \times 10^{-10} n_n \sqrt{T_e}$$

$$\omega_{gi} = \frac{q_i B}{m_i}$$

$$\omega_{ge} = \frac{e B}{m_e}$$

$$n_k = n_{k0} \exp \left(- \frac{m_k g_k}{k_B T} z \right) = n_{k0} \exp \left(- \frac{z}{H_k} \right)$$

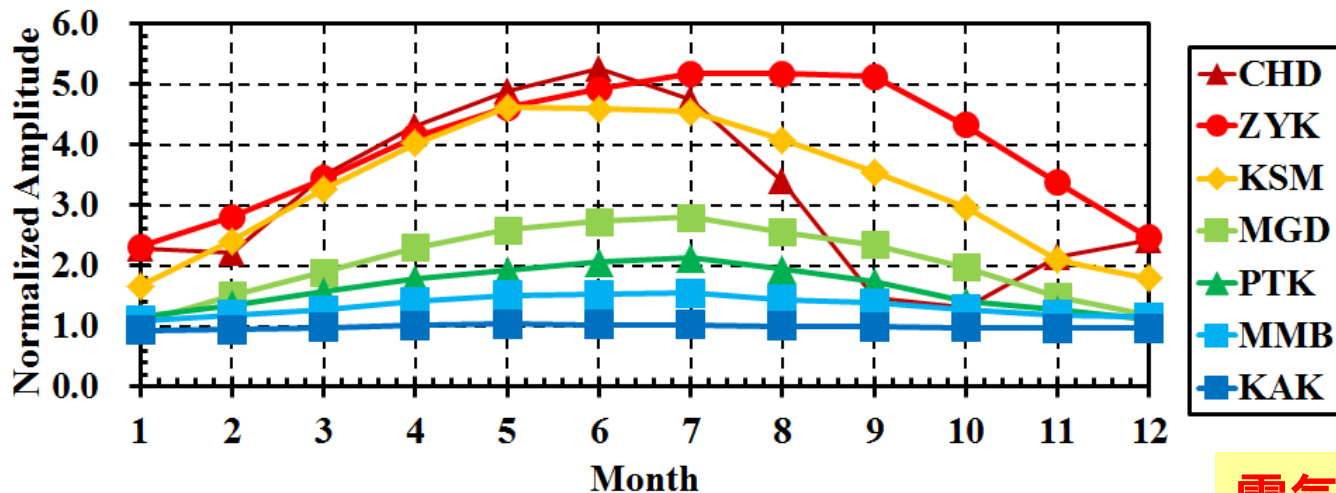
①電離圏のプラズマ密度、②磁場強度、③中性粒子との衝突周波数に依存

⇒①太陽EUV放射、電離圏電子密度構造(熱圏風に依存)

③中性大気のスケールハイトに依存

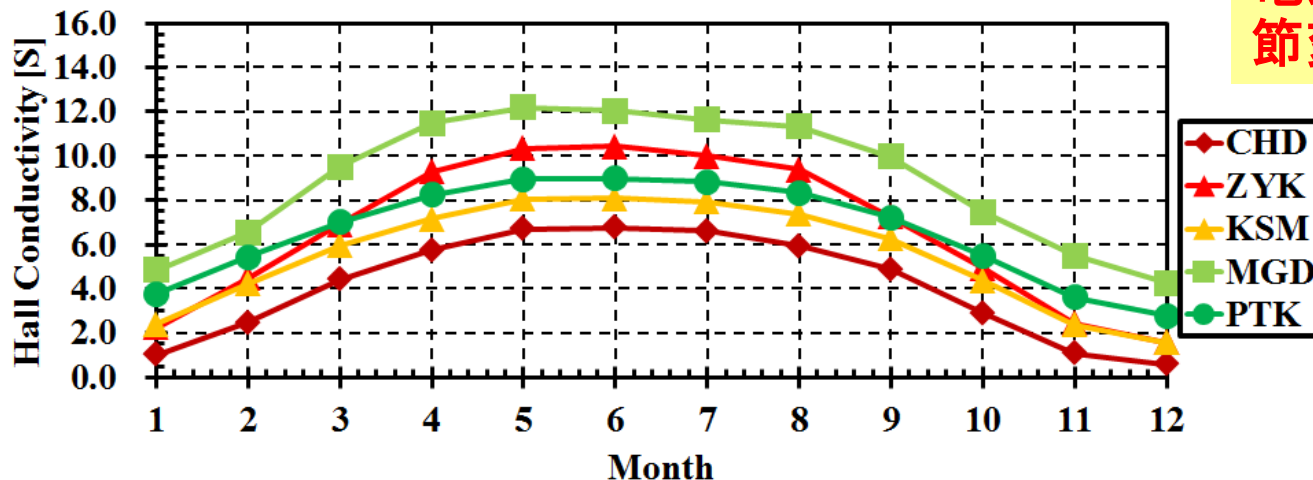
IV. 考察

IV.2 電離圏伝導度とオーロラ帯・中緯度のSC振幅の比較



中緯度における
SC振幅の月別平
均推移

電気伝導度と振幅の季
節変動の傾向が一致

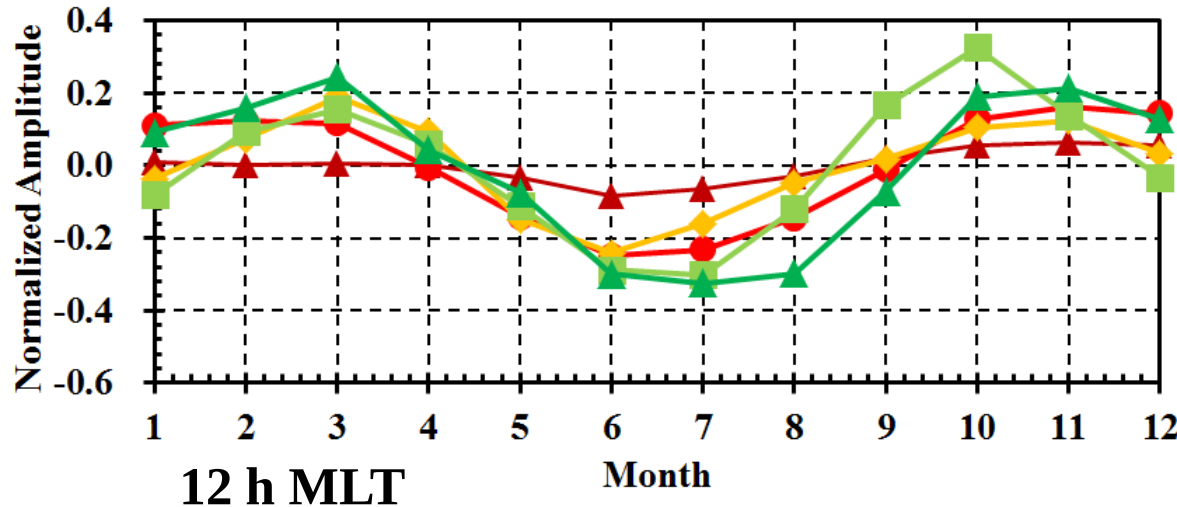


各観測点における
Hall伝導度

電離圏電流の季節変化を反映するとともに、夜側の振幅の季節変動から夏季の時期にFACの強度が強いことが推察される

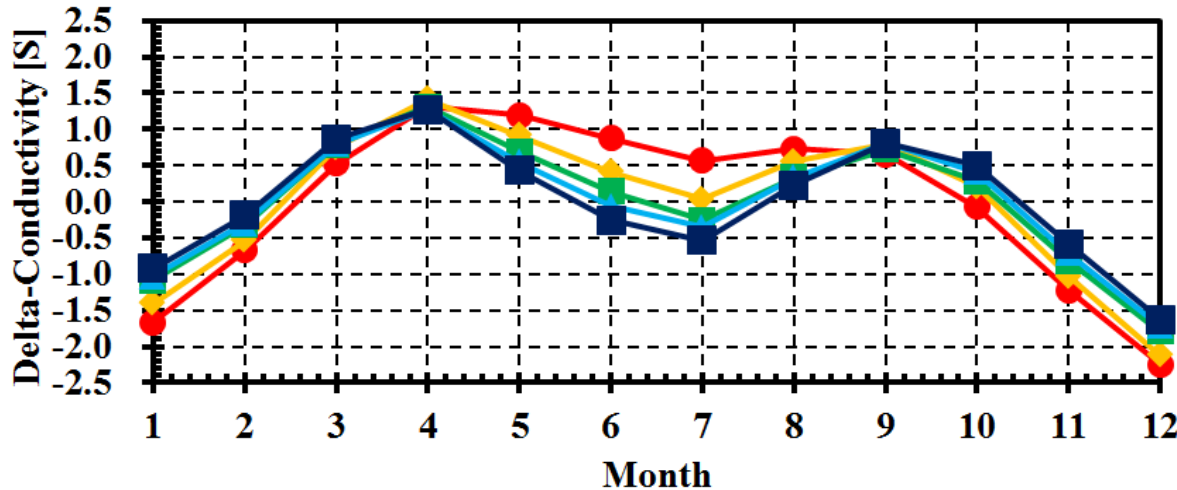
IV. 考察

IV.3 電離圏伝導度と赤道域でのSC振幅の比較



赤道域における
SC振幅の月別平均推移
(年平均値を除去)

電気伝導度と振幅の季節
変動の傾向が一致しない

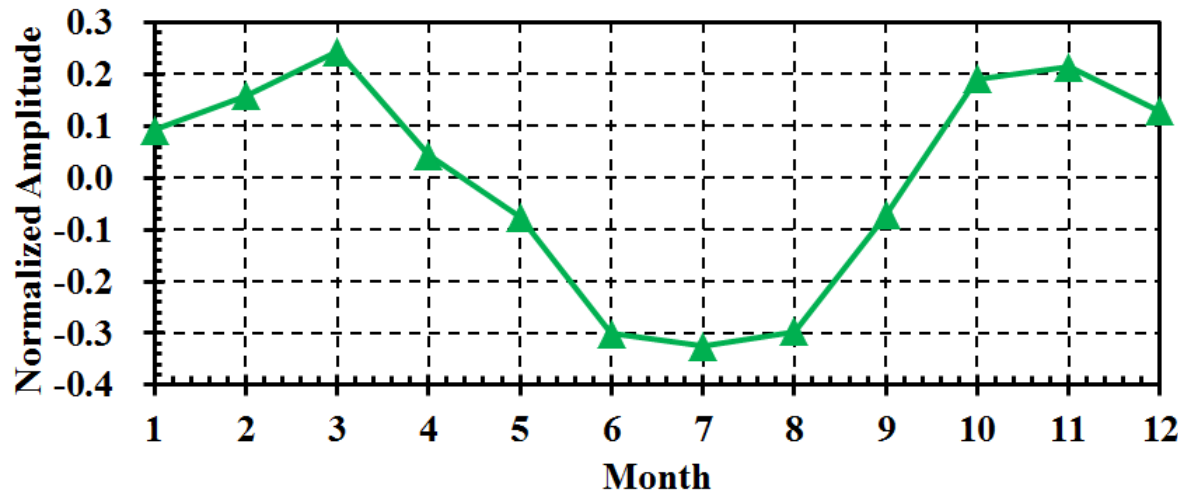


5つの観測点にお
ける電離圏電気
伝導度の変化
(年平均値を除去)

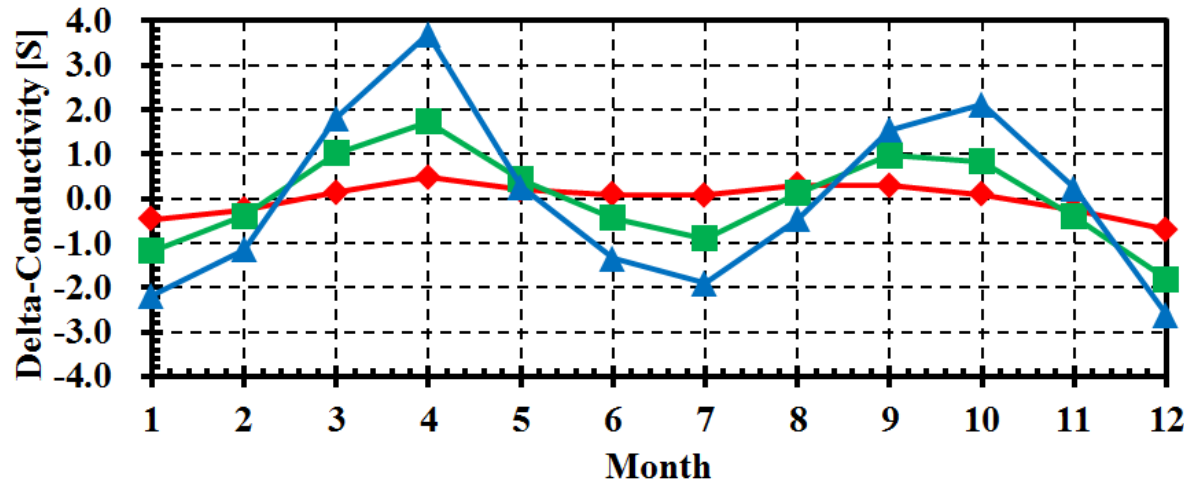
Hall伝導度の季節変動だけでは説明できない(ほかの成分を見る必要あり)

IV. 考察

IV.4 電離圏伝導度と赤道域でのSC振幅の比較



赤道域における
SC振幅の月別平均推移
(年平均値を除去)



PONの観測点に
おける電離圏電
気伝導度の変化
(年平均値を除去)

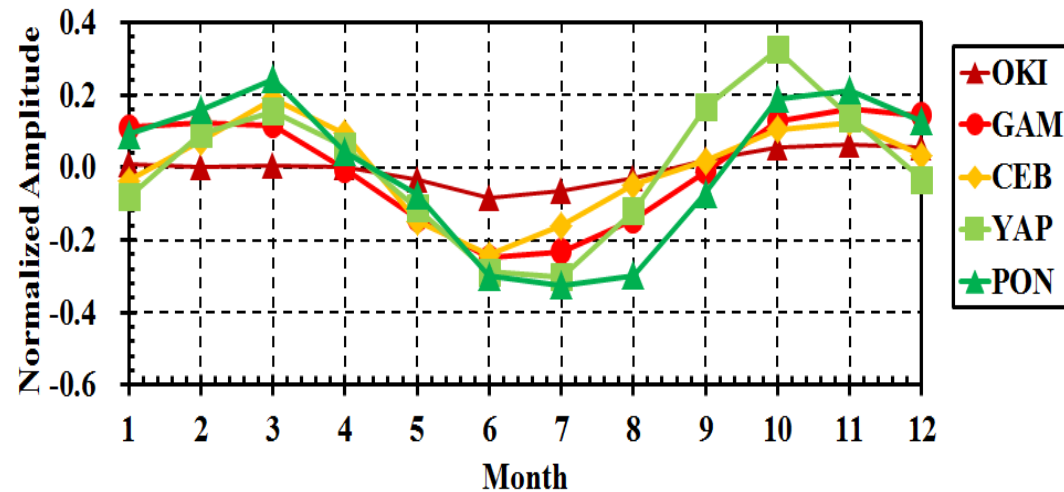
$$\Sigma_C = \Sigma_P + \frac{\Sigma_H^2}{\Sigma_P}$$

赤道ジェット電流を形成するCowling伝導度も冬期に極小、春・秋に極大

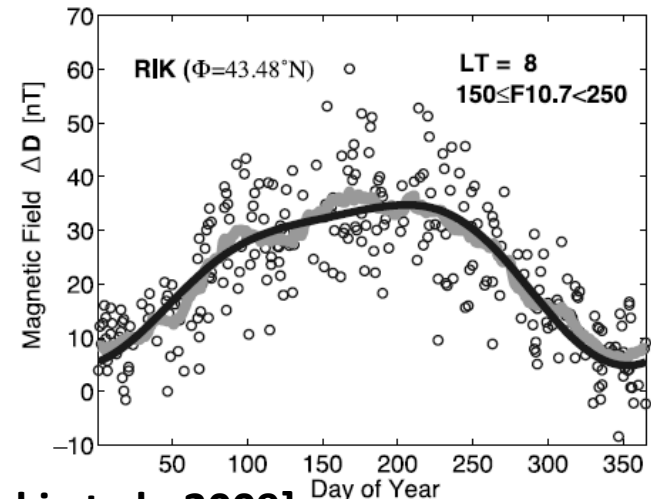
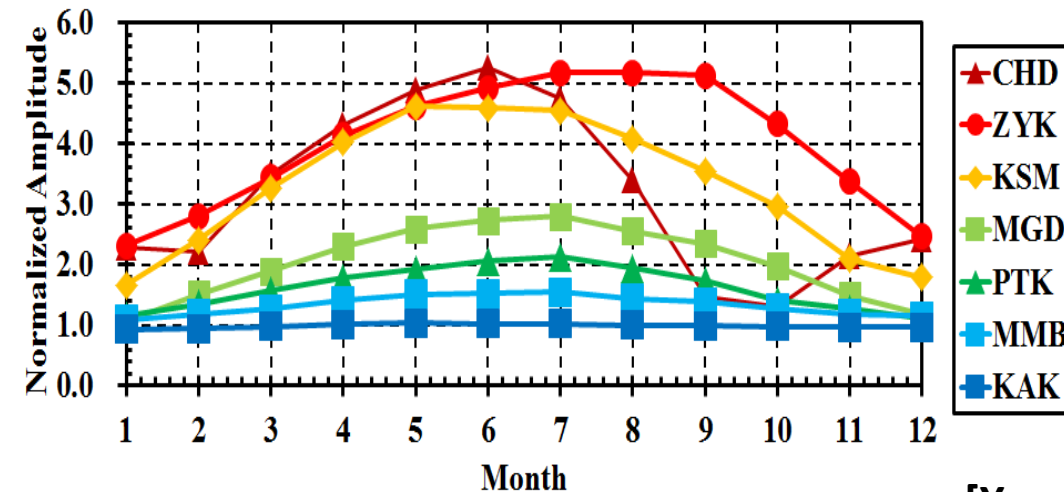
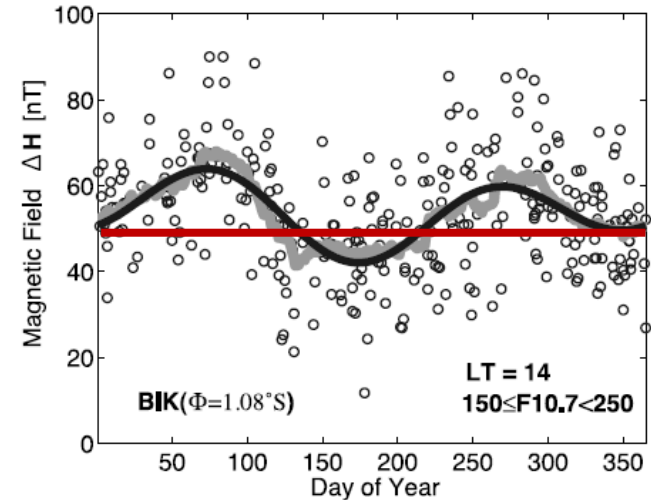
IV. 考察

IV.5 赤道域におけるSCとSq振幅の季節変動の類似性

SC振幅の季節変動



Sq振幅の季節変動



[Yamazaki et al., 2009]

IV. 考察

IV.6 電離圏電流と電場の関係

(1) SC振幅⇒磁気圏電場による電流

$$J = \underline{\Sigma} \cdot E$$

(2) Sq振幅⇒電離圏ダイナモ 電場による電流

$$J = \underline{\Sigma} \cdot (U \times B)$$

季節変動の類似性⇒電離圏電気伝導度の季節変動を反映

(1) IRIモデルは、電離圏D、E領域のプラズマ密度、組成分布を正しく記述できているか？

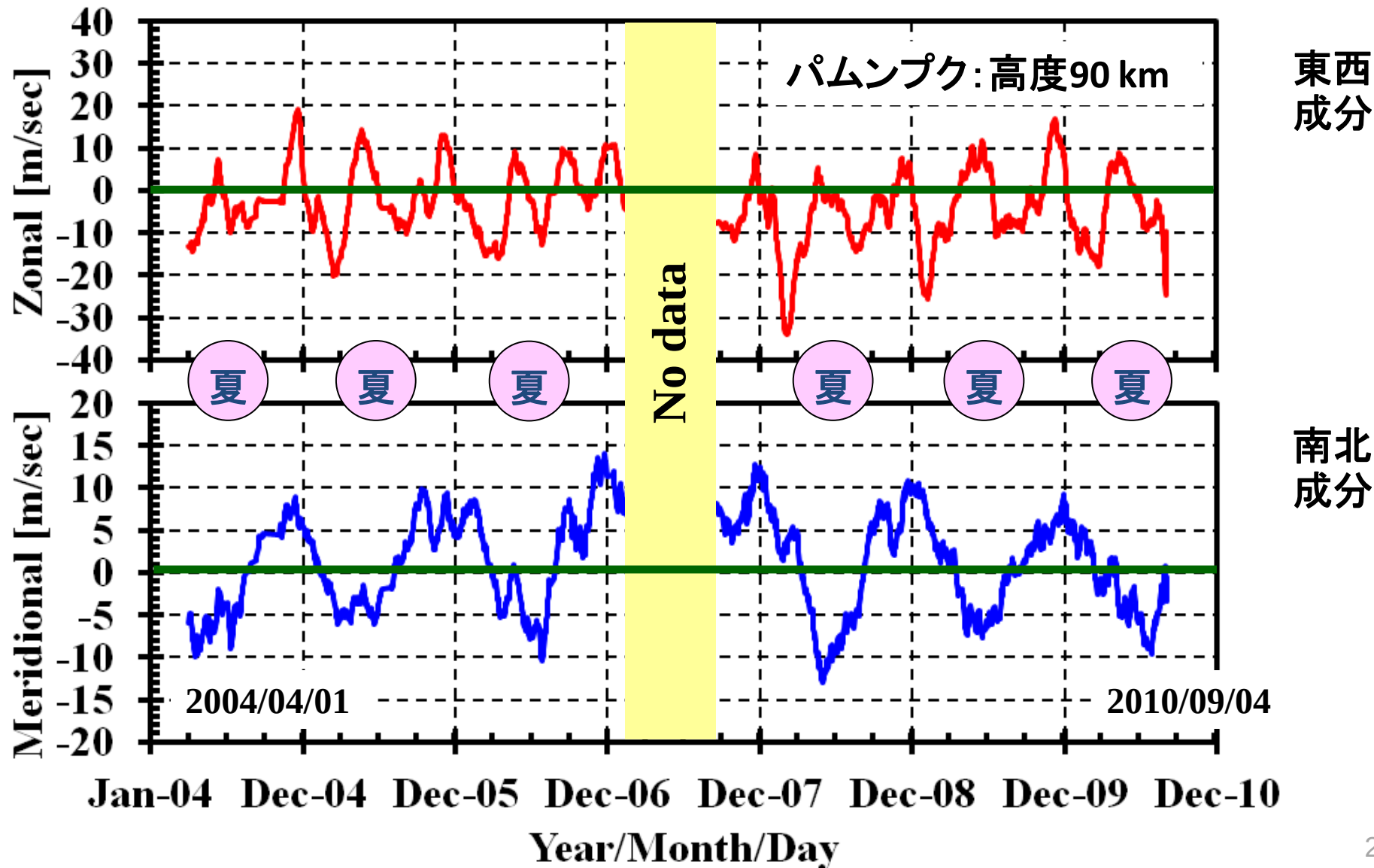
⇒きちんと表現できていないという報告例もある

(2) Cowling伝導度の導出の仮定は正しいか？

(3) 下層大気圏との結合関係は？

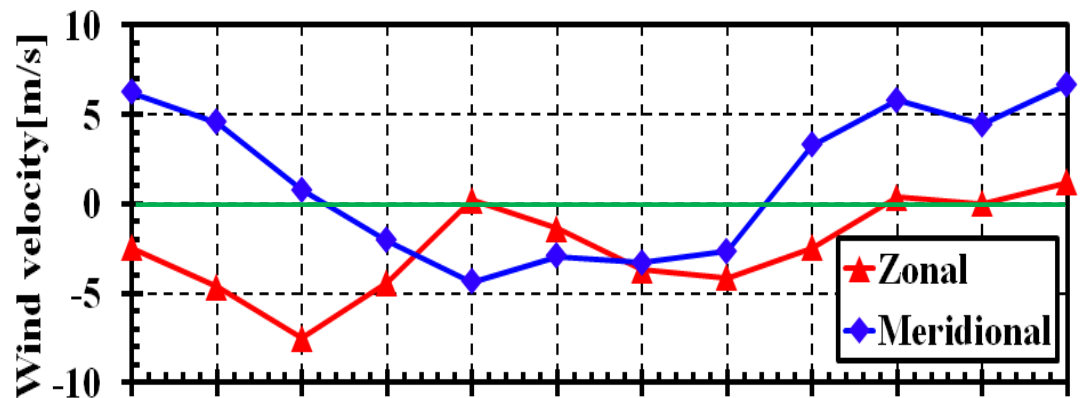
IV. 考察

IV.7 赤道熱圏下部領域の風速の長期変動



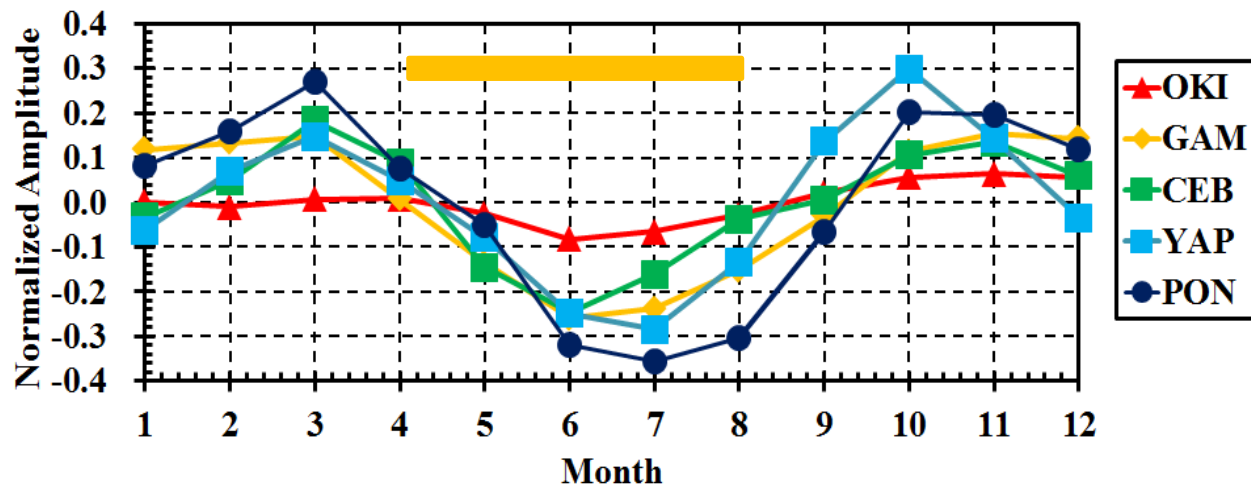
IV. 考察

IV.8 熱圏風と低緯度・赤道でのSC振幅の比較



コタババン+パムンプク

高度86-100 kmの熱圏東西と
南北風速の季節変動
[2002-2010年]



赤道域におけるSC振
幅の月別平均推移
(年平均値を除去)

熱圏領域における南北風が北風となる時期にSC振幅が減少

→熱圏風が電気伝導度(Cowling伝導度)を変化させている可能性あり

IV. 考察

IV.9 そのほか解決すべき事項

(1) 熱圏風との相互作用

伏角緯度の低い赤道電離圏での中性大気風の輸送に伴う電離圏プラズマ密度構造の変化による電気伝導度の変化

特に、電離圏F領域の寄与

(2) 大気圏との絡み

成層圏-中間圏-熱圏・電離圏結合

中間圏・熱圏領域での大気のスケールハイトの変化に伴う電離圏プラズマ密度の変化

⇒IUGONETの核となる研究内容

V. 結論

(1)オーロラ帯・中緯度におけるSCの磁場変動の日変化には、**明瞭な季節依存性**が存在する。

昼間側に現れる**DP2型の磁場変動**は、**電離圏電気伝導度の比較的高い夏季に最大**になる

夜側での磁場変動は、**中緯度では夏季に振幅が大きくなり**、逆に**オーロラ帯では、冬季にその変動が顕著に大きくなる**

→中緯度の磁場変化= R-1型FACの作る磁場効果

→→MI期に形成されるR-1型電流系は、電圧源である

→オーロラ帯における磁場変動=電離圏電流

→ →**西向きのオーロラジェット電流の強度が冬季に大きい**

→ →→冬季では、オーロラ帯におけるオーロラ電子の降込みのフラックスが大きい

V. 結論

(2)低緯度以南領域の昼間側のSCの磁場振幅は、サブオーロラ帯・中緯度のものと異なり、**夏季よりも冬季において最大**となる。

この傾向は、**地磁気日変化の季節変動とも類似**する。

→**東向きの赤道ジェット電流の強度が冬季に大きい**ことを示唆

この傾向は、電離圏モデルから導出される電離圏電気伝導度の季節変動の傾向に合わない

→IRIモデルがE領域を正しく記述できていない可能性。

(3)**異なる分野間のデータ**(今回の場合:太陽風・地磁気・伝導度モデル・中間圏・熱圏風)**の統合解析、比較、検討を容易に行える環境(TDASソフト)**によって、これまでわからなかった物理プロセスの解明への糸口を見いだせる

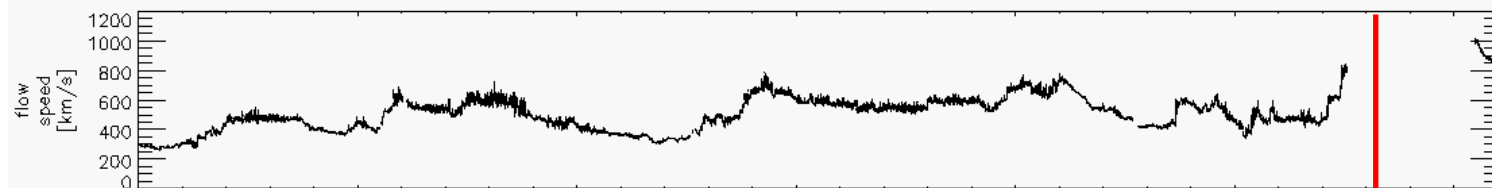
⇒**IUGONETのメタデータデータベース・統合解析ツールが各個人の研究推進の手助けになり、副産物的な別のサイエンスを生む**

V. 結論

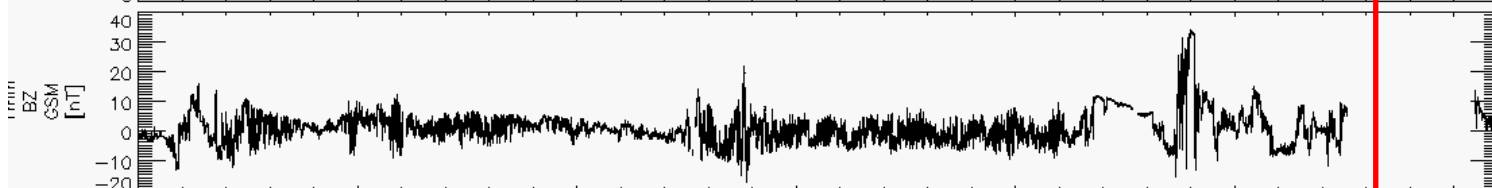
V.1 磁気嵐と熱圏風変動との関係

[2003年10月の一ヶ月プロット]

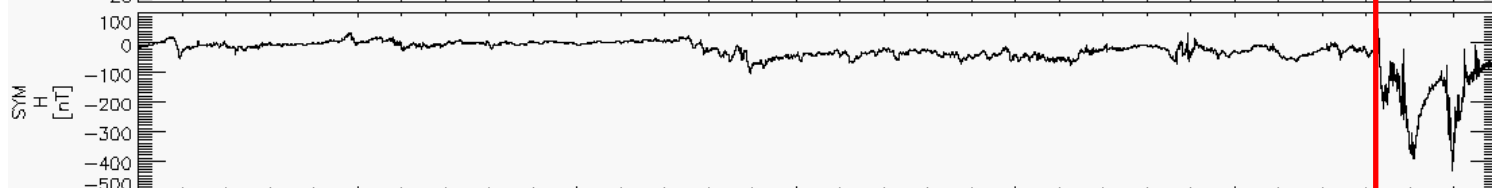
V_{sw}



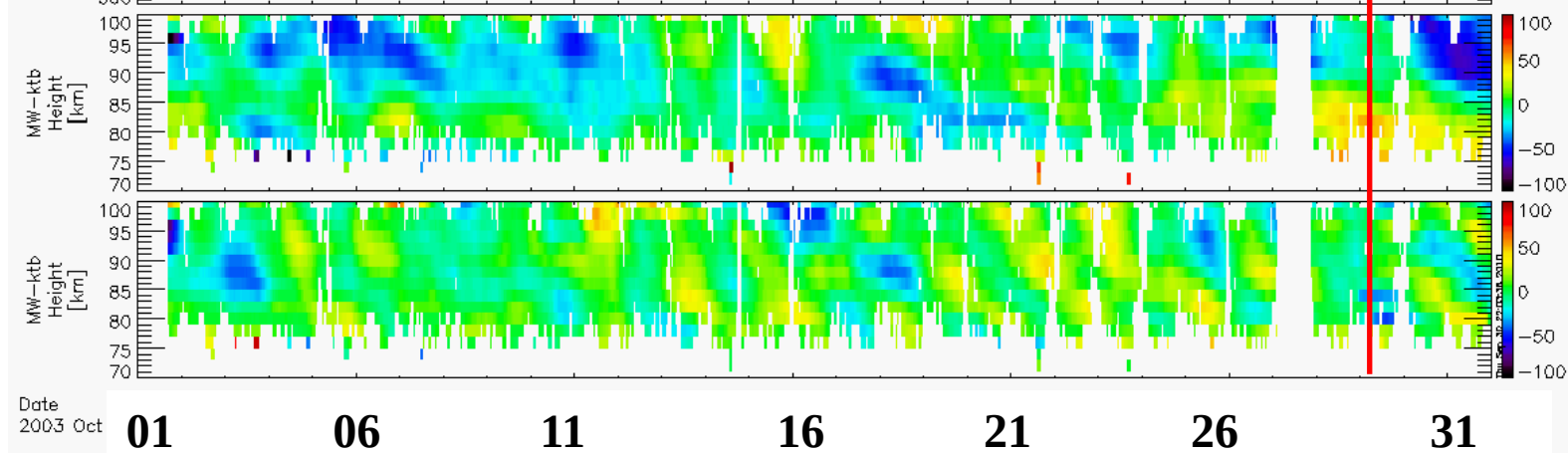
IMF B_z



SYM-H指数

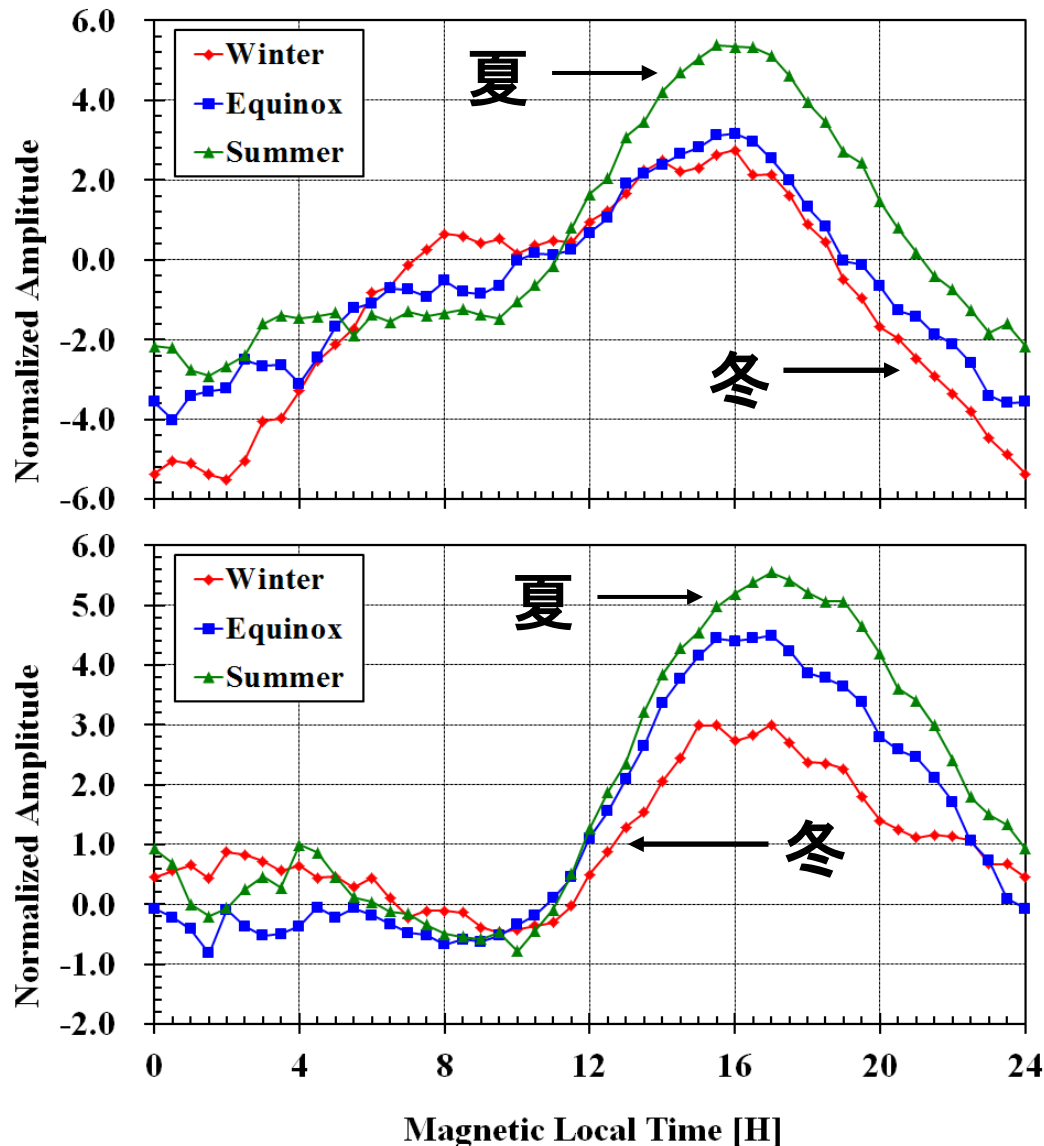


熱圏下部・中間圏の風速
(70-100 km)



III. 解析結果

III.1 オーロラ帯・サブオーロラ帯における季節変動



上段: CHD (64.66度)

下段: ZYK (59.74度)

夏: 5, 6, 7月

春・秋: 2, 3, 4, 8, 9, 10月

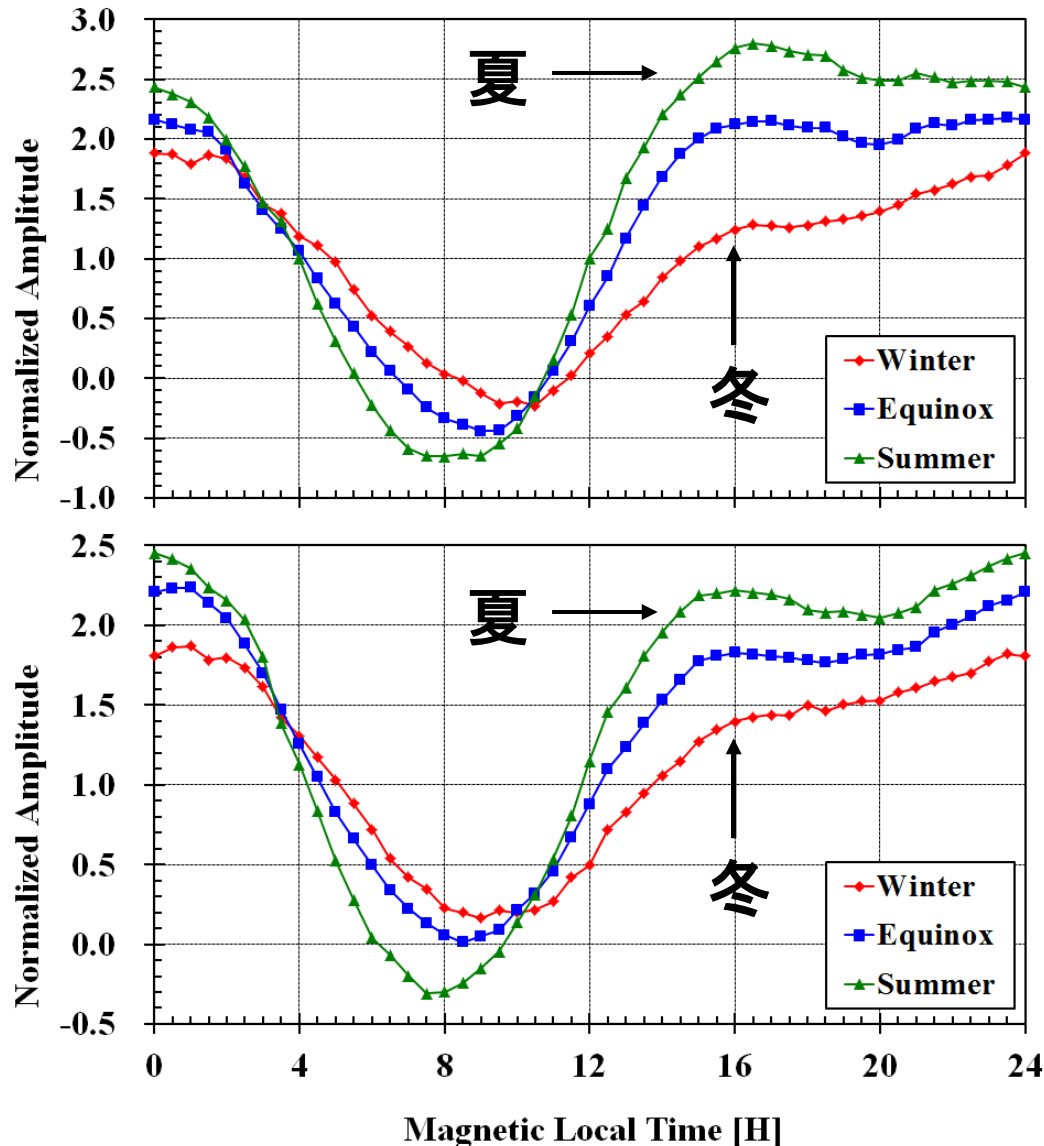
冬: 11, 12, 1月

○午後側の振幅が夏季に最大となる

○夜側の西向きオーロラジェット電流による効果が冬季に最大となる(CHD)

III. 解析結果

III.2 中緯度における季節変動



上段:MGD (53.62度)
下段:PTK (45.58度)

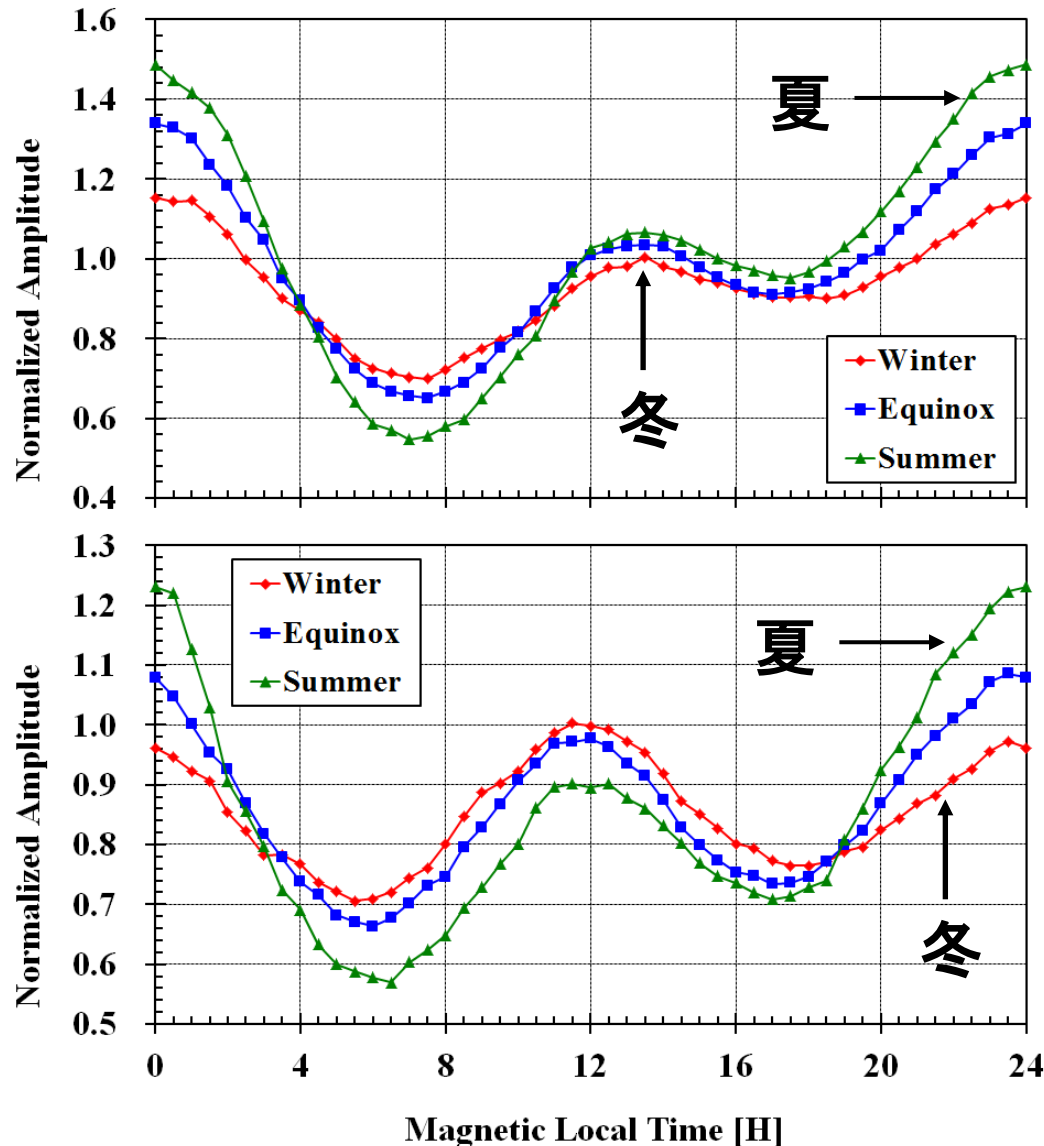
夏:5, 6, 7月
春・秋:2, 3, 4, 8, 9, 10月
冬:11, 12, 1月

○昼間側での**DP2型**の
振幅が**夏季**に最大となる

○**夜側**での**振幅**も同様に**夏季**に最大となる

III. 解析結果

III.3 低緯度における季節変動



上段: KAK (27.12度)

下段: OKI (16.54度)

夏: 5, 6, 7月

春・秋: 2, 3, 4, 8, 9, 10月

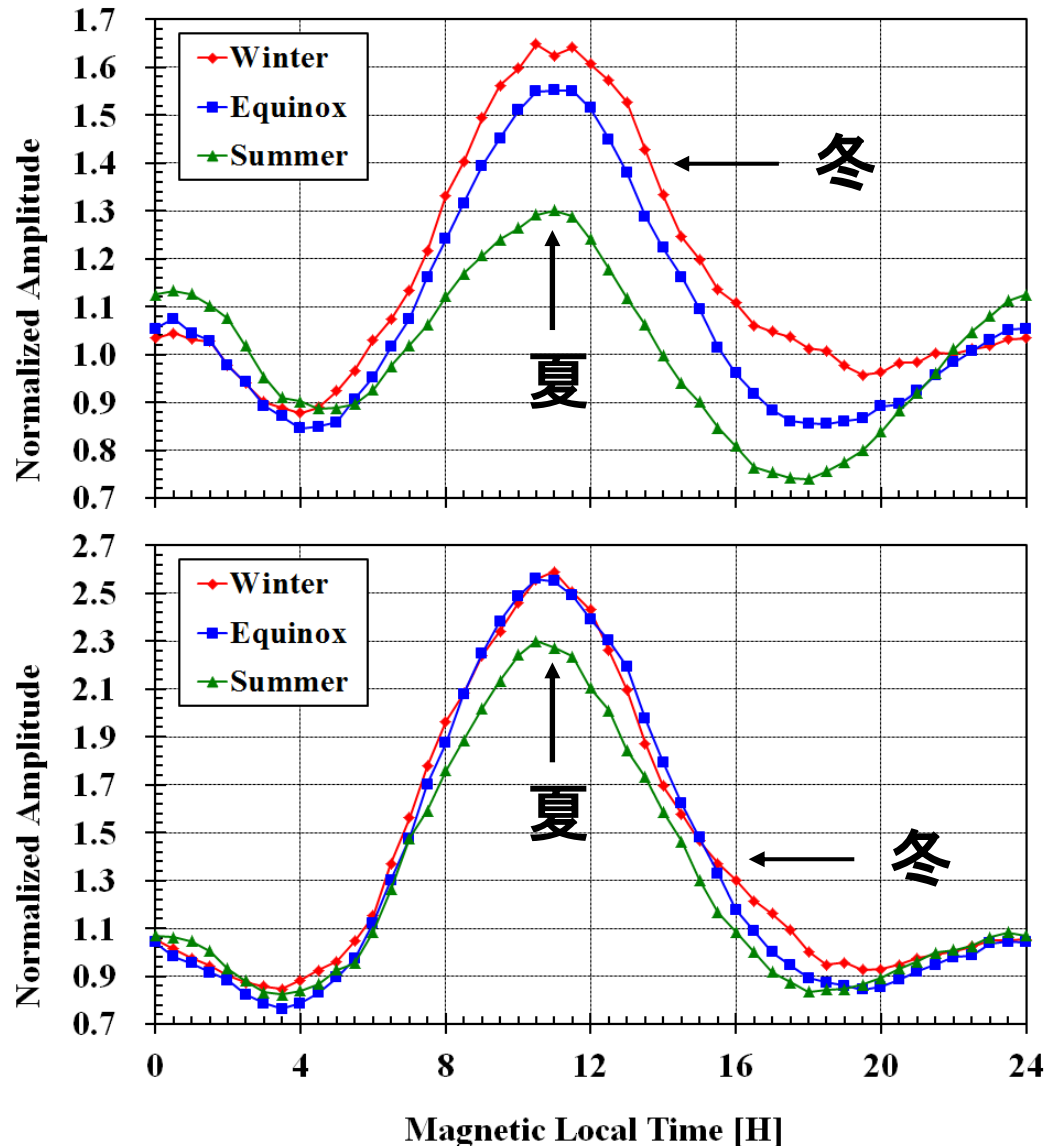
冬: 11, 12, 1月

○夜側での振幅も同様に夏季に最大となる

○KAKとOKIにおける
昼間側(12 h MLT)の
振幅の季節の傾向が
逆になる

III. 解析結果

III.4 準赤道・赤道における季節変動



上段: GAM (5.32度)

下段: CEB (0.85度)

夏: 5, 6, 7月

春・秋: 2, 3, 4, 8, 9, 10月

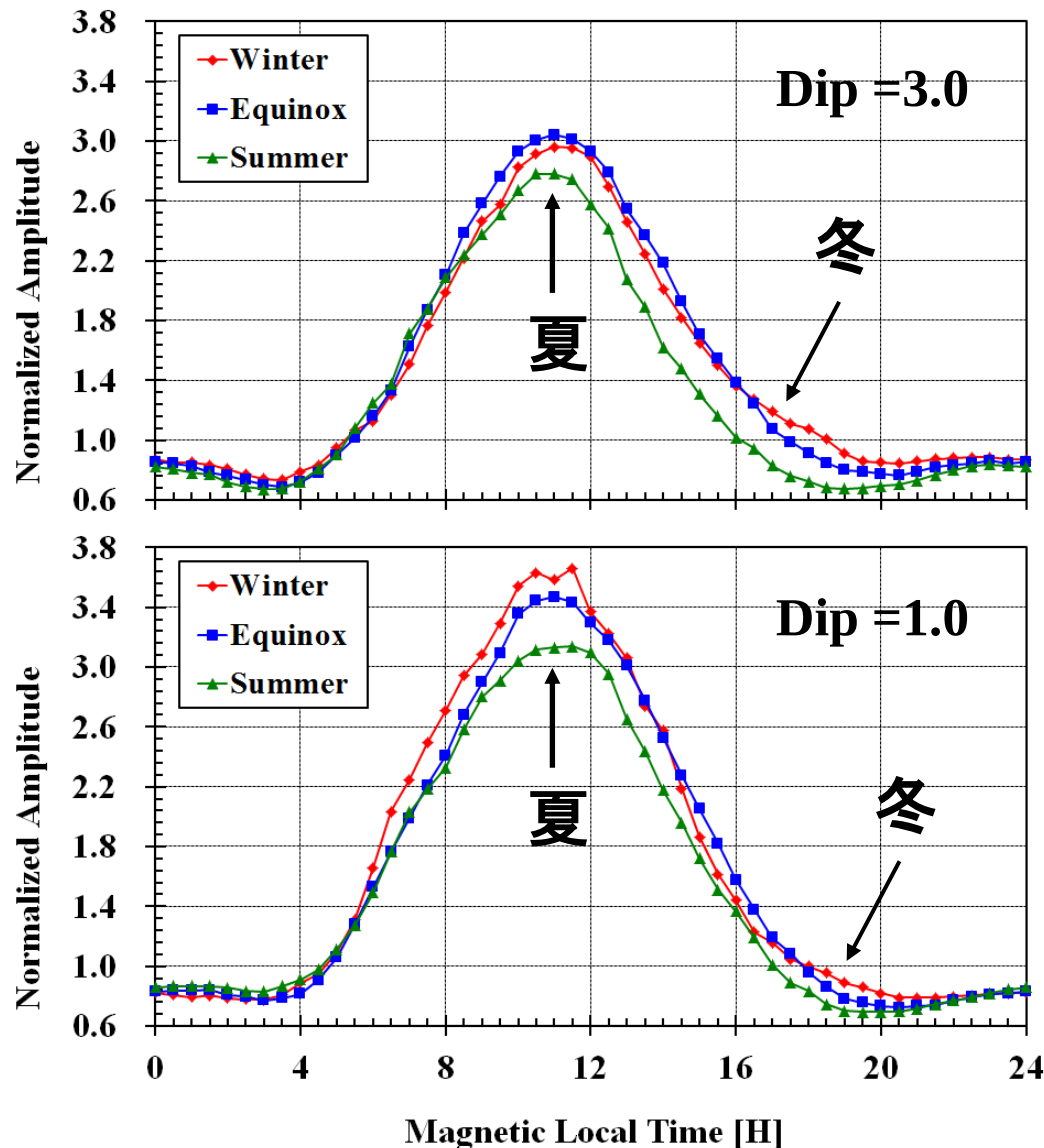
冬: 11, 12, 1月

○夜側での振幅も同様に夏季に最大となる

○昼間側(8-16 h MLT)の赤道ジェット電流による磁場振幅は夏季に最小となる

III. 解析結果

III.5 伏角赤道における季節変動



上段: YAP (0.38度)

下段: PON (0.27度)

夏: 5, 6, 7月

春・秋: 2, 3, 4, 8, 9, 10月

冬: 11, 12, 1月

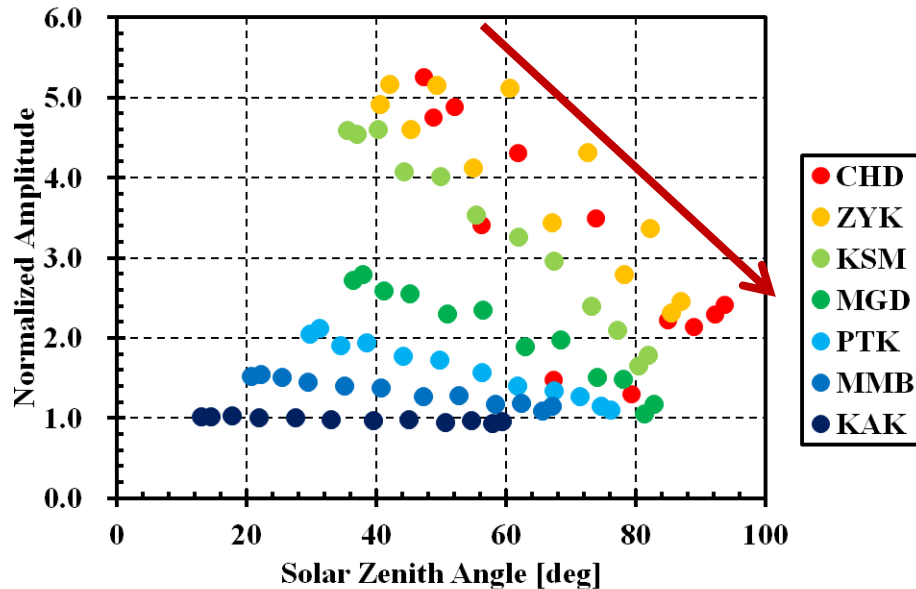
○昼間側(8-16 h MLT)
の赤道ジェット電流に
よる磁場振幅は夏季
に最小となる

○夜側ではほとんど季
節変化が見られない

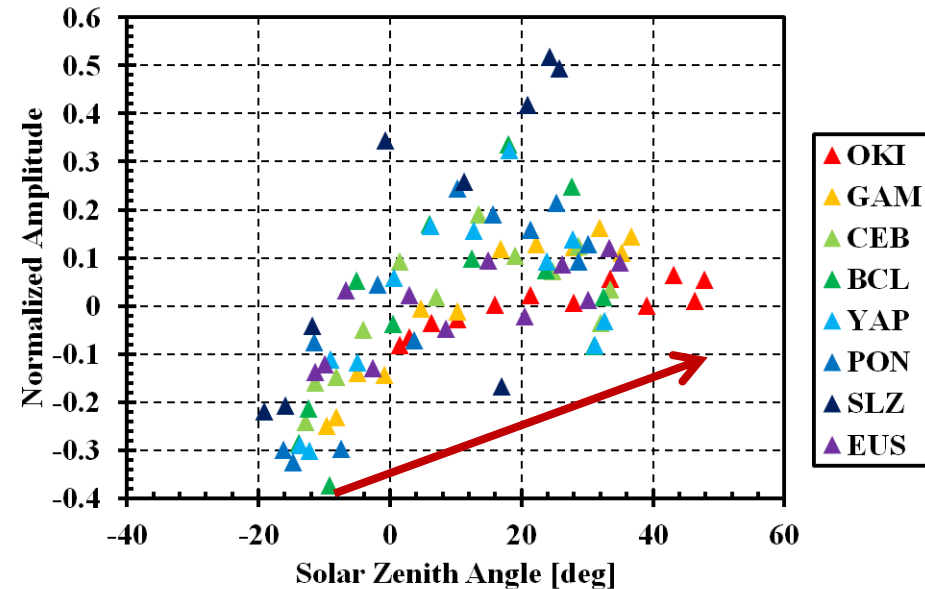
III. 解析結果

III.7 太陽天頂角依存性

(1) 中緯度領域(15 h MLT)



(2) 低緯度・赤道域(12 h MLT)



夏至

冬至

夏至

冬至

オーロラ帯・中緯度域と低緯度・赤道域とは逆の傾向にある

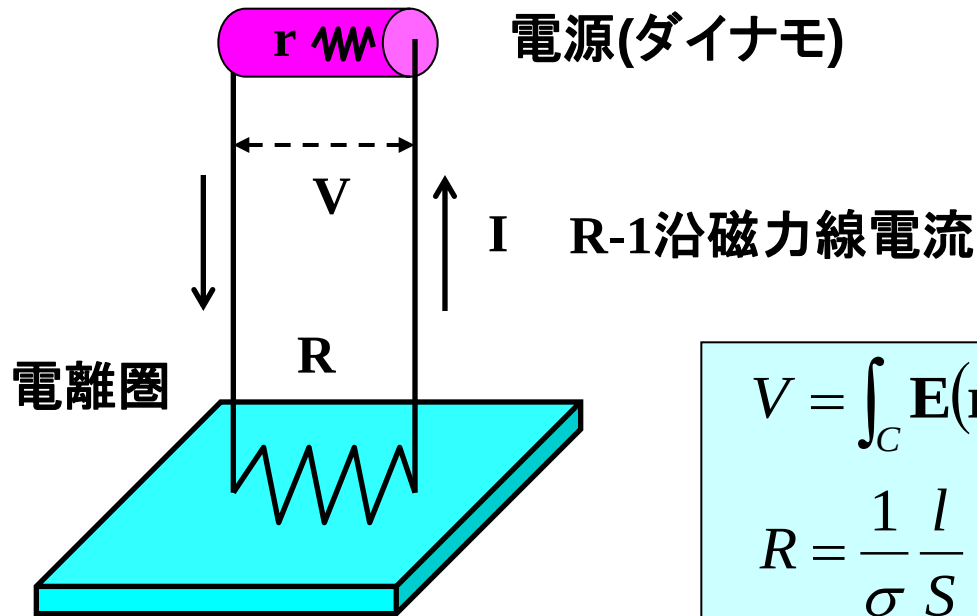
→ 中緯度: 太陽天頂角の増加とともに振幅が減少

赤道域: 太陽天頂角の増加とともに振幅が増加

IV. 考察

IV.3 中緯度の日変化からわかるSCの電流系の性質

中緯度のSC振幅の日変化は電離圏電流の季節変化を反映する



V: 電源の電圧
R: 電離圏の抵抗
I: 沿磁力線電流
r: 電源の内部抵抗

$$V = \int_C \mathbf{E}(\mathbf{r}) \cdot d\mathbf{r} = \int_C -(\mathbf{V}_{sw} \times \mathbf{B}) \cdot d\mathbf{r}$$

$$R = \frac{1}{\sigma} \frac{l}{S} \quad (\sigma: \text{電気伝導度})$$

電流回路に対するオームの法則

$$I = \frac{V}{r + R} = V(r + R)^{-1}$$

※内部抵抗の正体
プラズマ波動など

IV. 考察

IV.3 中緯度の日変化からわかるSCの電流系の性質

① $r \ll R$ の場合

$$I \approx \frac{V}{\textcircled{R}} \left(1 - \frac{r}{R} \right)$$

電離圏の抵抗の
大きさをFACの強
度が決定

→ 電圧源

明瞭な季節変動が存在

→ 夏季: 大、冬季: 小

電離圏の電気伝導度を素直に
反映

② $r \gg R$ の場合

$$I \approx \frac{V}{\textcircled{r}} \left(1 - \frac{R}{r} \right)$$

ダイナモの内部抵
抗の大きさをFAC
の強度が決定

→ 電流源

季節変動は不明瞭

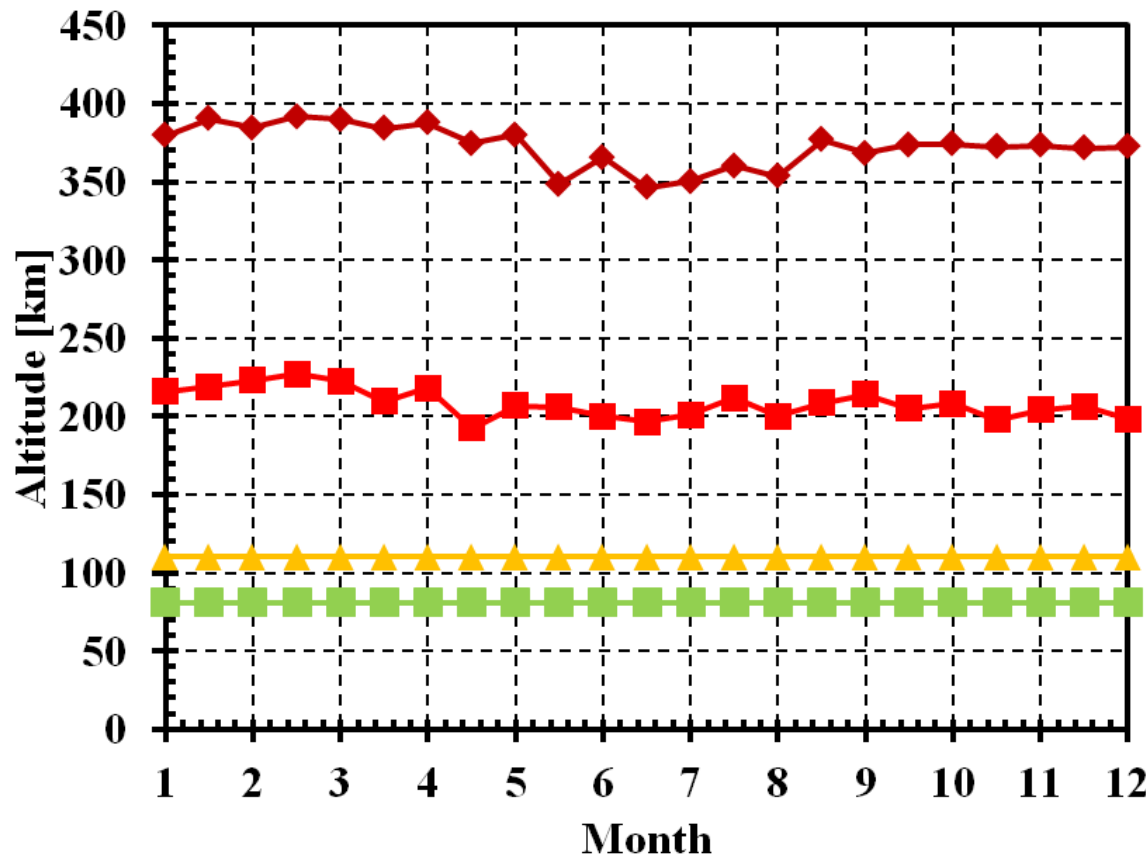
→ 夏季、冬季ともに不変化

電離圏の電気伝導度を素直
に反映しにくい

IV. 考察

IV.7 電気伝導度モデルの問題??

IRIモデルから求められた電離圏D、E、F1とF2領域の密度がピークとなる高度の季節変化



赤道領域
PON(7.00N, 158.33E)
2006年1-12月

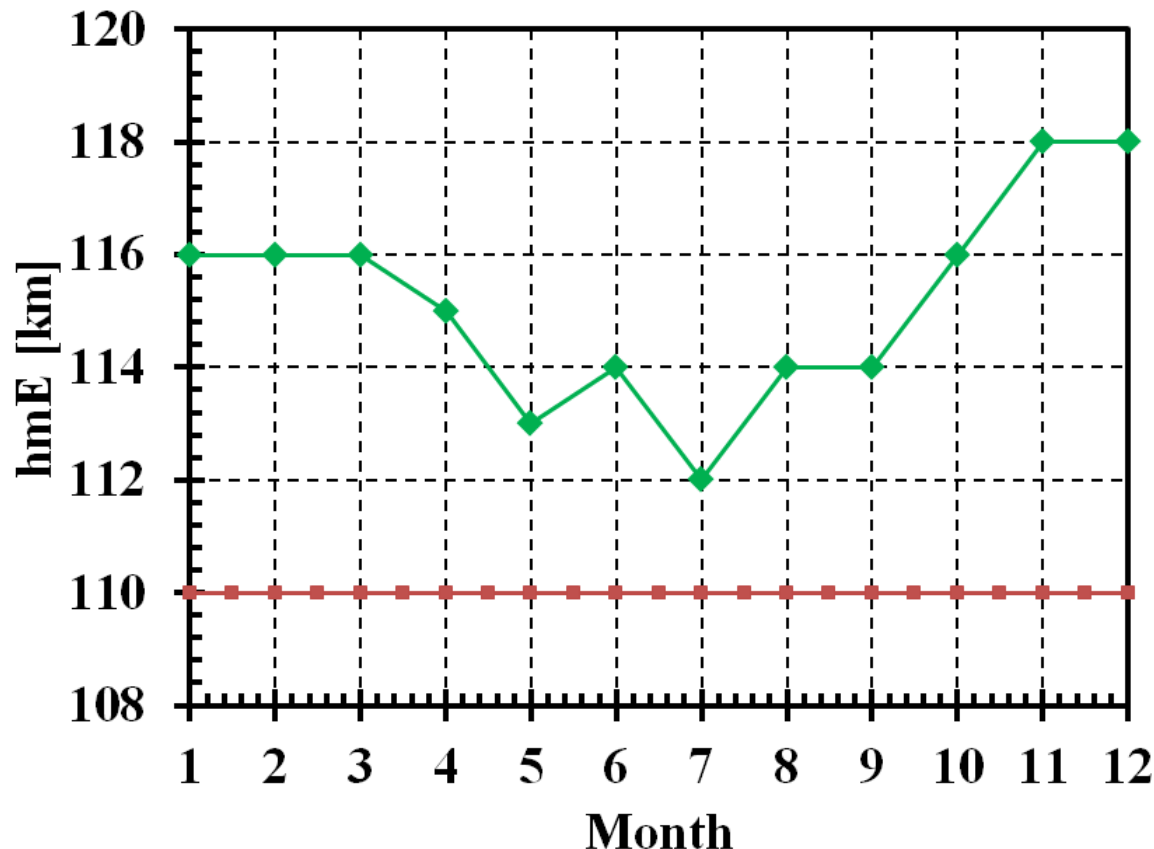


電離圏E領域以下の高度は季節に関係なく一定高度

IV. 考察

IV.7 電気伝導度モデルの問題??

国分寺における電離圏E領域の密度がピークとなる高度の季節変化(IRIモデルと観測との比較)



低緯度

KBJ(35.71N, 139.49E)

2006年1-12月

◆ Obs.
■ IRI

IRIモデルから出された
電離圏E領域の高度と季節
変動が観測データを説明
できていない