

# 木星の中間磁気圏の擾乱に対する イオプラズマトーラスの応答

‘Responses of Io Plasma Torus to middle  
magnetosphere of Jupiter’

F. Suzuki [1]; (suzuki@astrobio.k.u-tokyo.ac.jp)

K. Yoshioka [1] ; G. Murakami [2] ; F. Tsuchiya [3] ; T. Kimura [4];

M. Kuwabara [1] ; R. Hikida [1] ; I. Yoshikawa [1]

[1]The University of Tokyo ; [2] ISAS/JAXA ;

[3] Tohoku University ; [4] RIKEN

# イオプラズマトーラス(IPT)

## ◎ Io Plasma Torus(IPT)

イオは火山を持つ衛星であり、木星磁気圏への定常的なガスの散逸(1 ton/sec、Hill et al. 1983)がある。

イオの軌道に沿って、大半径 $6R_j$  ( $R_j$ : 木星半径、71492km)のトーラス型のプラズマの分布が観測されている。

◎ 高温電子とイオンの衝突励起に起因する極端紫外(Extra Ultra Violet、EUV)領域での発光が、VoyagerやCassini等により観測された。

☆ EUV放射を維持するための電子の加熱機構は、未だ解明されていない。

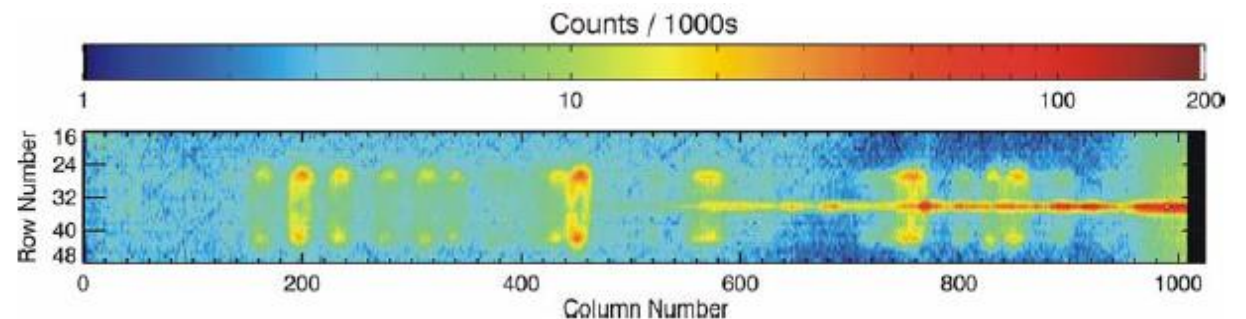


図: Cassini/UVISによるIPTのEUV発光の分光画像(Steffl et.al 2003)  
観測波長域は561 Å ~ 1181 Å

# IPTへの高温電子の流入

◎ 微量(数%)の高温電子(50 eV)の存在を仮定することでIPTの放射を説明できる。(Delamere et al. 2003)

◎ 高温電子が内向きに輸送されていることが観測によって示された。(Yoshioka et al. 2014)

◎ 50 eVの電子はIPTにおいて約1時間で熱的に緩和される。

高温電子密度の動径分布の傾きを説明するために、内向きの輸送速度は100 km/sと推定された。

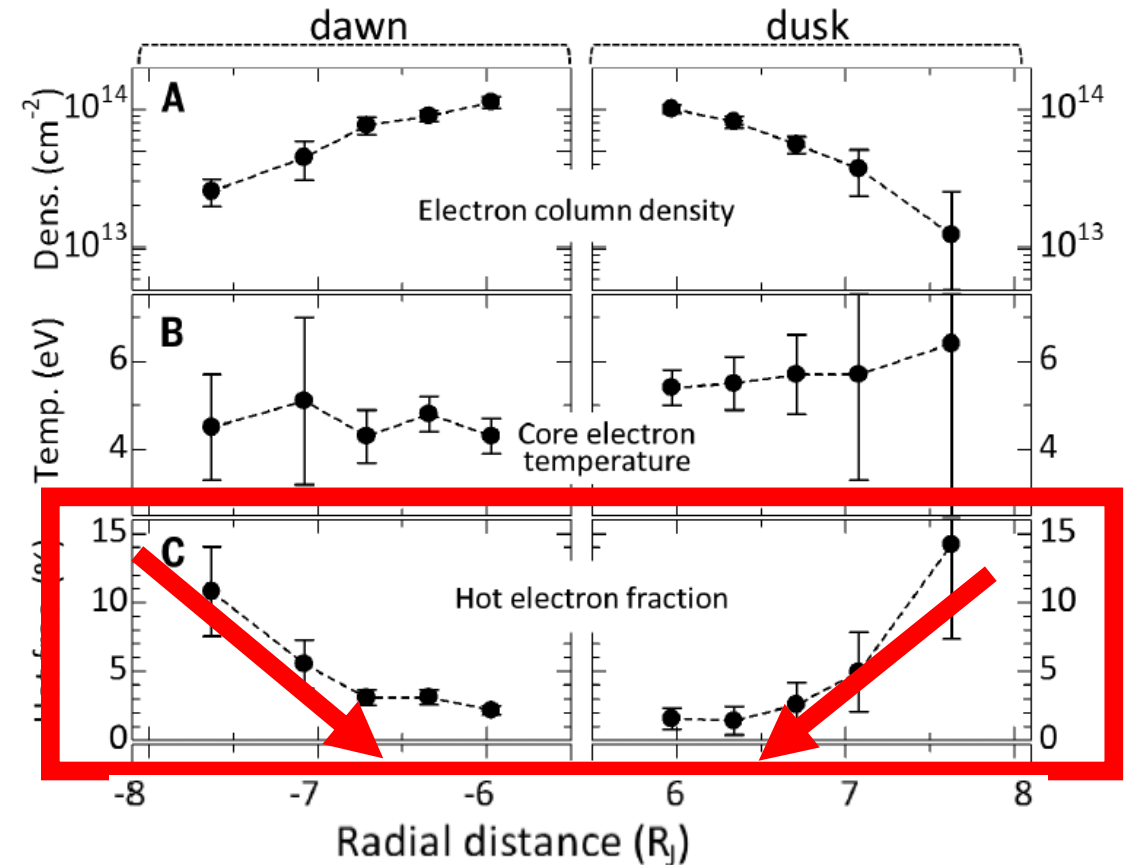


図:ひさき衛星の観測によって求められたIPTのプラズマパラメータの動径分布(Yoshioka et.al. 2014)  
(A)電子密度 (B)電子の温度  
(C)高温電子(46 eV)の割合

# IPTと木星オーロラの同時突発増光

IPTと木星オーロラが、数時間という短い時間差で突発的に増光していることが、Cassiniによって観測された。

◎ IPTの発光は内部磁気圏の状態を反映

◎ 木星オーロラの発光は中間磁気圏の活動度を反映

→内部・中間磁気圏間に未知のエネルギー輸送プロセスが存在する。

→このエネルギー輸送プロセスによって、IPTのEUV放射が維持され得るかどうかの問題となっている。

Cassiniによる観測では、観測の休止時間(約10時間)が増光のタイムスケールに比べて長く、増光の継続時間や時間差の決定は困難であった。

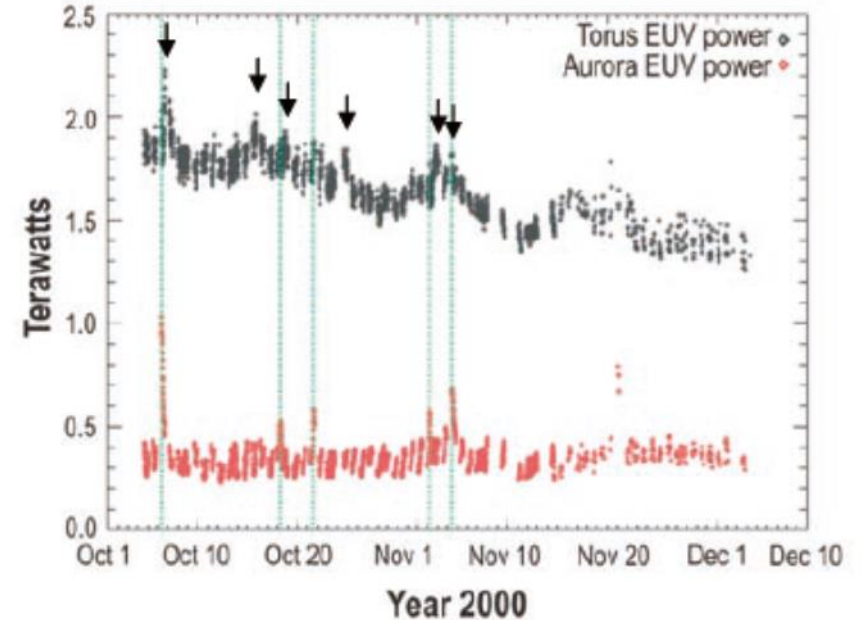


図: Cassiniが計測したIPT(黒)とオーロラ(赤)の EUVの発光強度の変化

(Yoshikawa et al., 日本惑星科学会誌 Vol.21, No1., 2012)

オーロラとイオトラスの増光現象(点線と矢印)の間に相関が見られる。

# ひさき/EXCEED

## ひさき/EXCEED

- ◎ 地球周回軌道(公転時間106分)から、木星磁気圏を継続的に観測している。
- ◎ 観測休止時間は約50分で、1分ごとに分光画像を取得する。



IPTとオーロラの、より高い時間分解能での同時観測を可能にした。

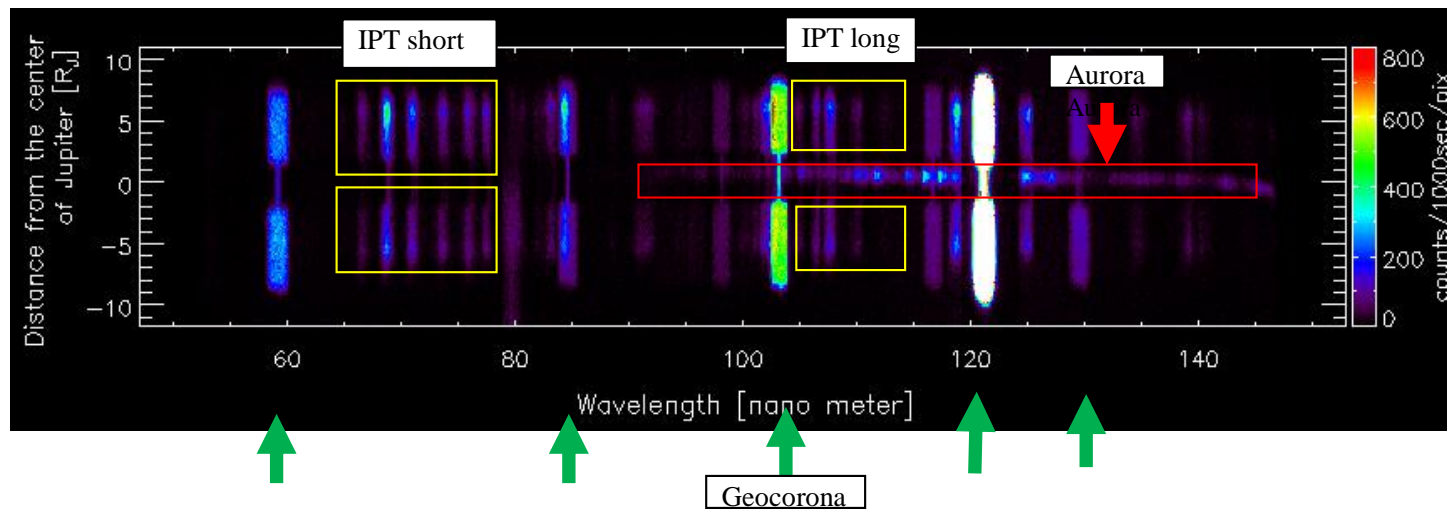


図: ひさき/EXCEEDによって得られた分光画像。  
縦軸が空間分布に対応している。

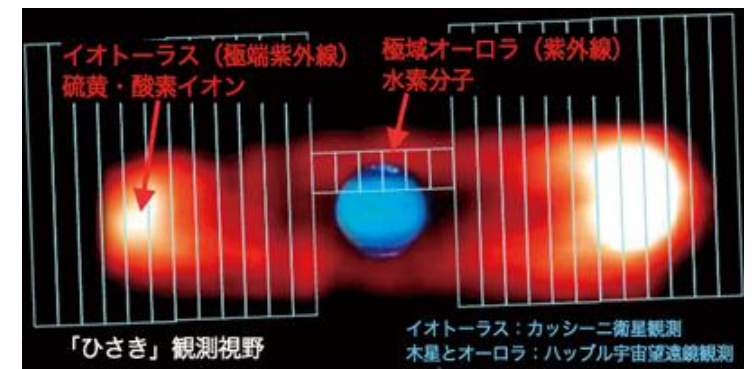


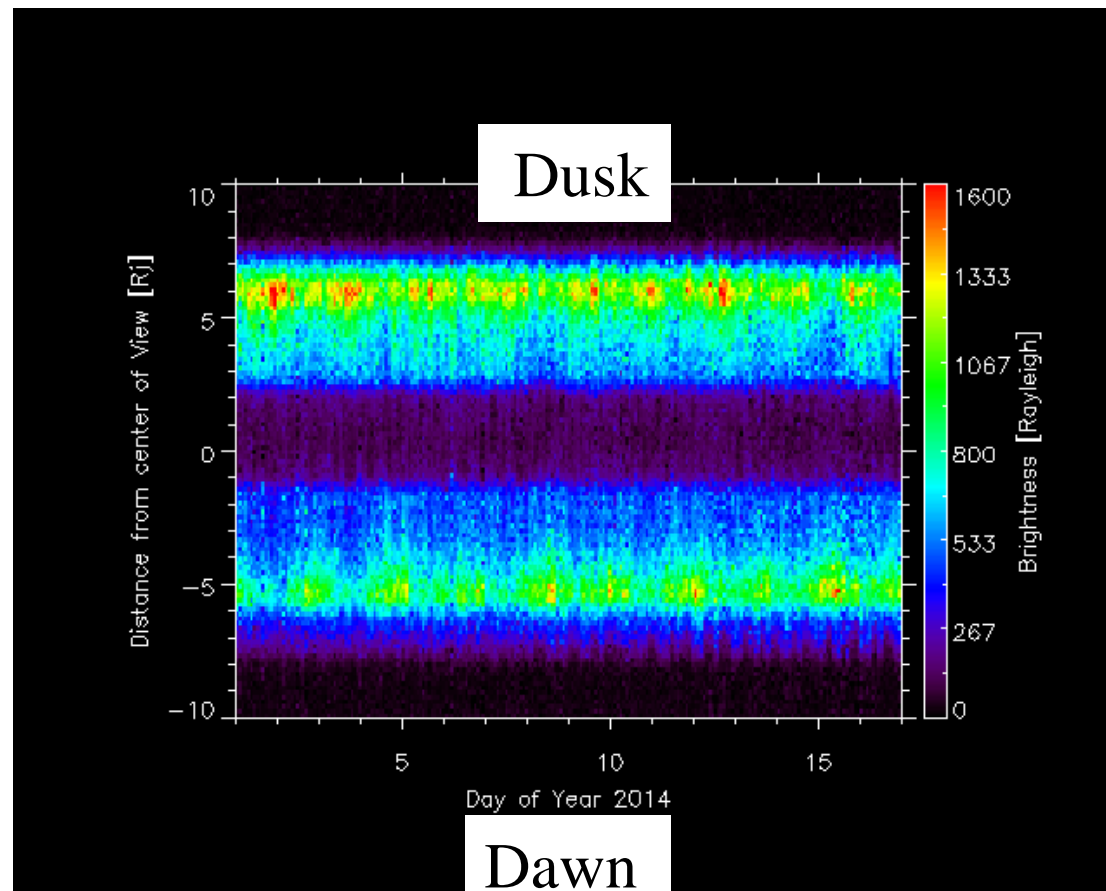
図: ひさきのスリットのイメージ  
ダンベル型スリットにより、木星オーロラとIPTを同時観測している。

# 研究の目的

◎ ひさき/EXCEEDによる観測データを用いて、IPTとオーロラの同時突発増光の継続時間と時間差の詳細な解析を行う。

◎ 増光時にIPTに流入するエネルギーを求め、この現象によってIPTのEUV放射に必要な高温電子は維持されるか確かめる。

◎ IPT増光の空間的な特徴を明らかにする。



図：IPT(波長650 Å ~ 780 Å)の、発光量の空間分布の時間変化。  
横軸は時間、縦軸は空間分布を示している。

# HSTによるオーロラの観測

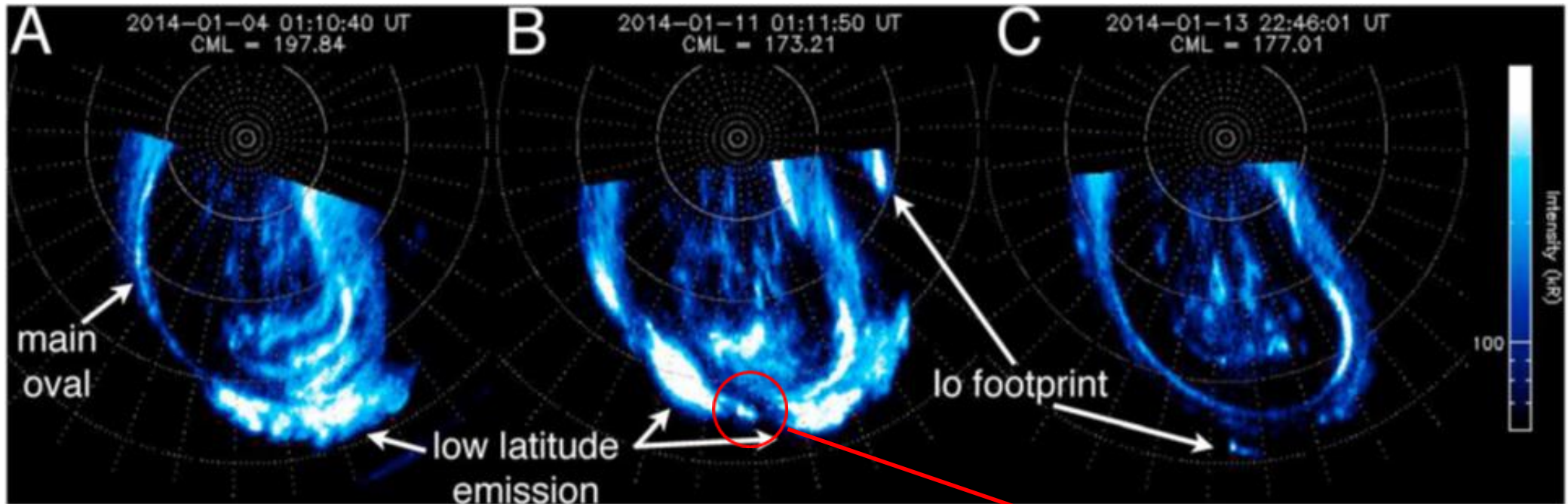


図: ひさき/EXCEEDと同時観測を行ったHubble Space Telescope(HST)によるオーロラ画像 (Kimura et.al 2015)。

Ganymede footprint

©2014年1月4日、1月11日の突発増光が観測された。

# 解析

## ◎ 解析期間

▪ 1st season: 2013年12月～2014年2月

▪ 2nd season: 2014年11月～2015年5月

※2015年1月にイオの火山の噴火が発生

Rising Phase: DoY 20-60

Declining Phase: DoY 60-100

## ◎ 波長範囲

IPT short: 650-780 Å

IPT long: 1050-1150 Å

オーロラ: 900-1500 Å

## ◎ 積分時間

IPT: 50分

オーロラ: 10分

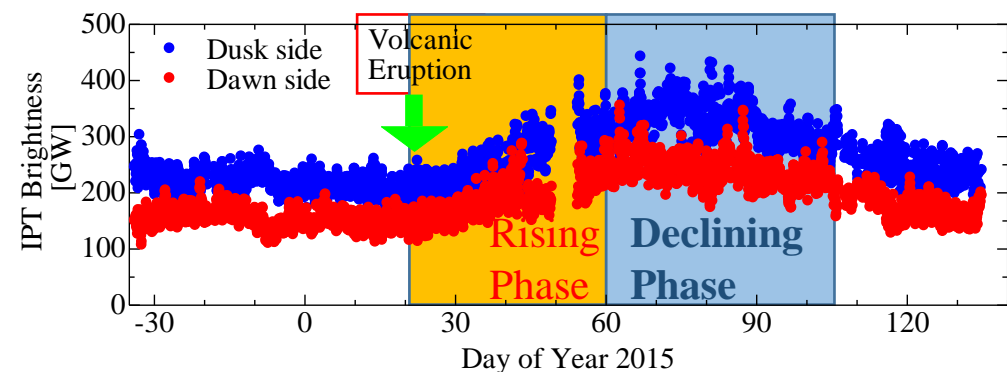
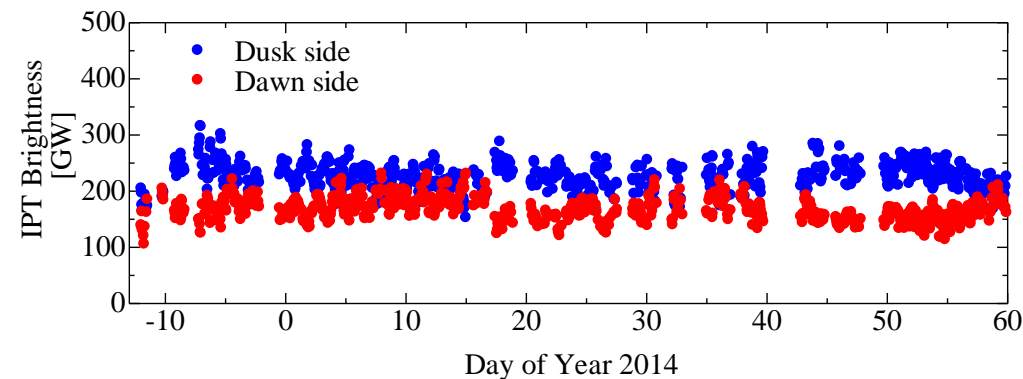
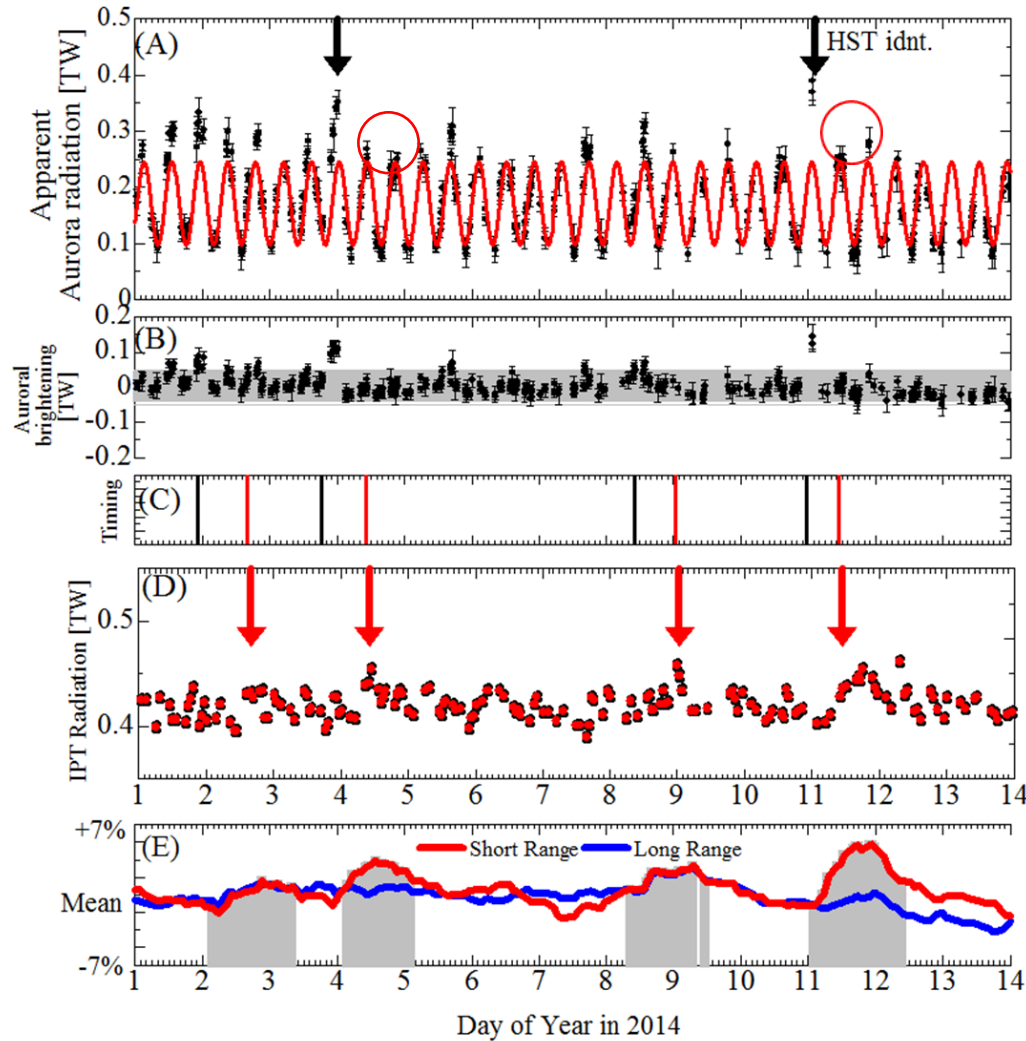


図: IPT shortの全期間における時間変動。duskとdawnの非対称性が見える。2015年1月の噴火により、IPTの発光強度は増大している。



# 増光現象の同定(1st Season)



◎ひさき/EXCEEDによってIPTとオーロラの同時突発増光が観測された。

◎IPTはオーロラの増光の10時間程度後に増光している。

◎IPT longの変動はIPT shortに比べて小さい。IPTの短波長成分の方がより電子温度の変化に敏感なため、IPT増光は高温電子密度の増大に起因する現象だといえる。

(A)オーロラ発光強度の時間変動(黒点)と10時間周期フィッティング関数(赤線)

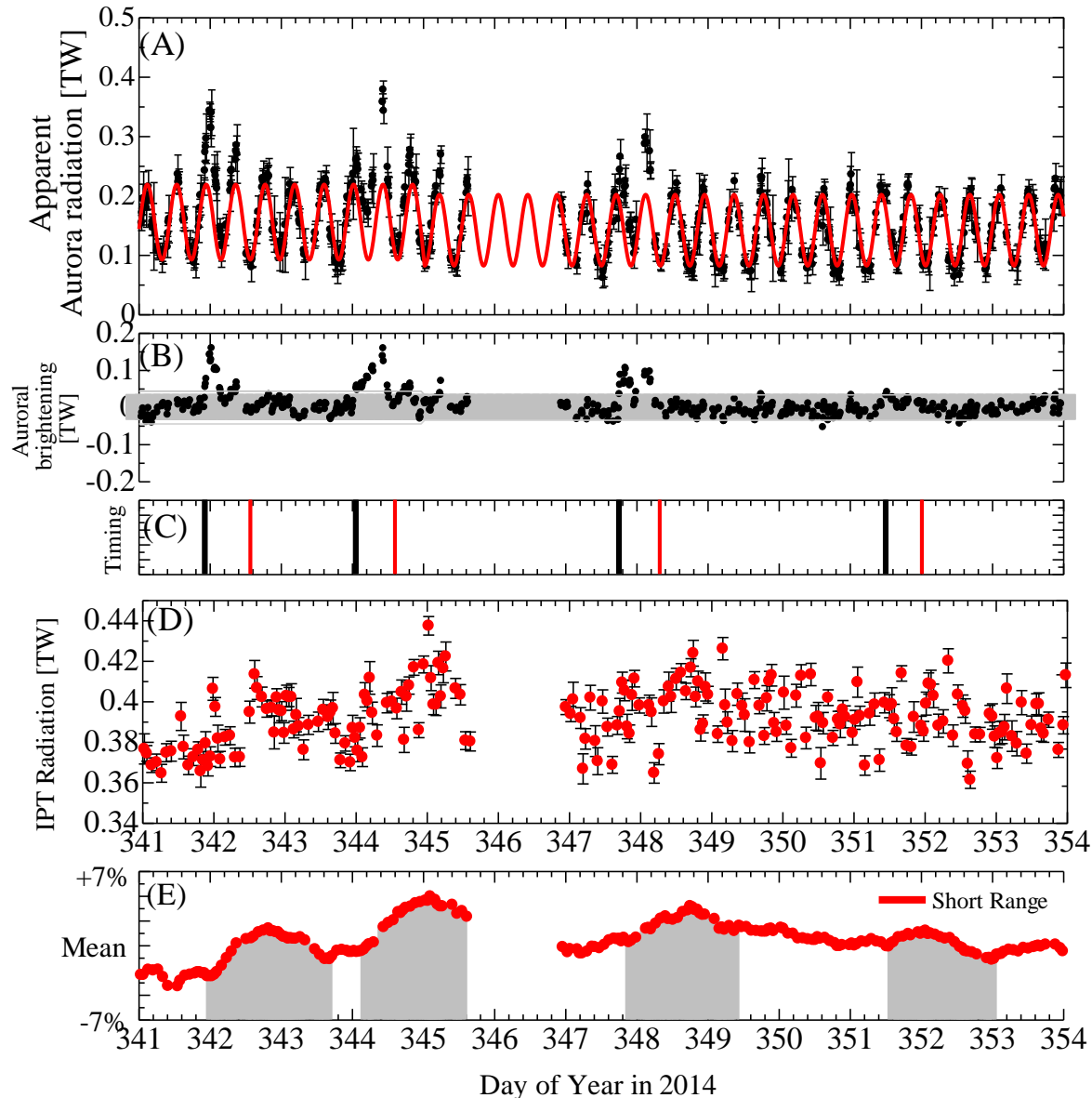
(B)オーロラ発光強度のフィッティング関数との残渣

※データが二点以上連続して標準偏差を超えた場合、「増光」と判定した。

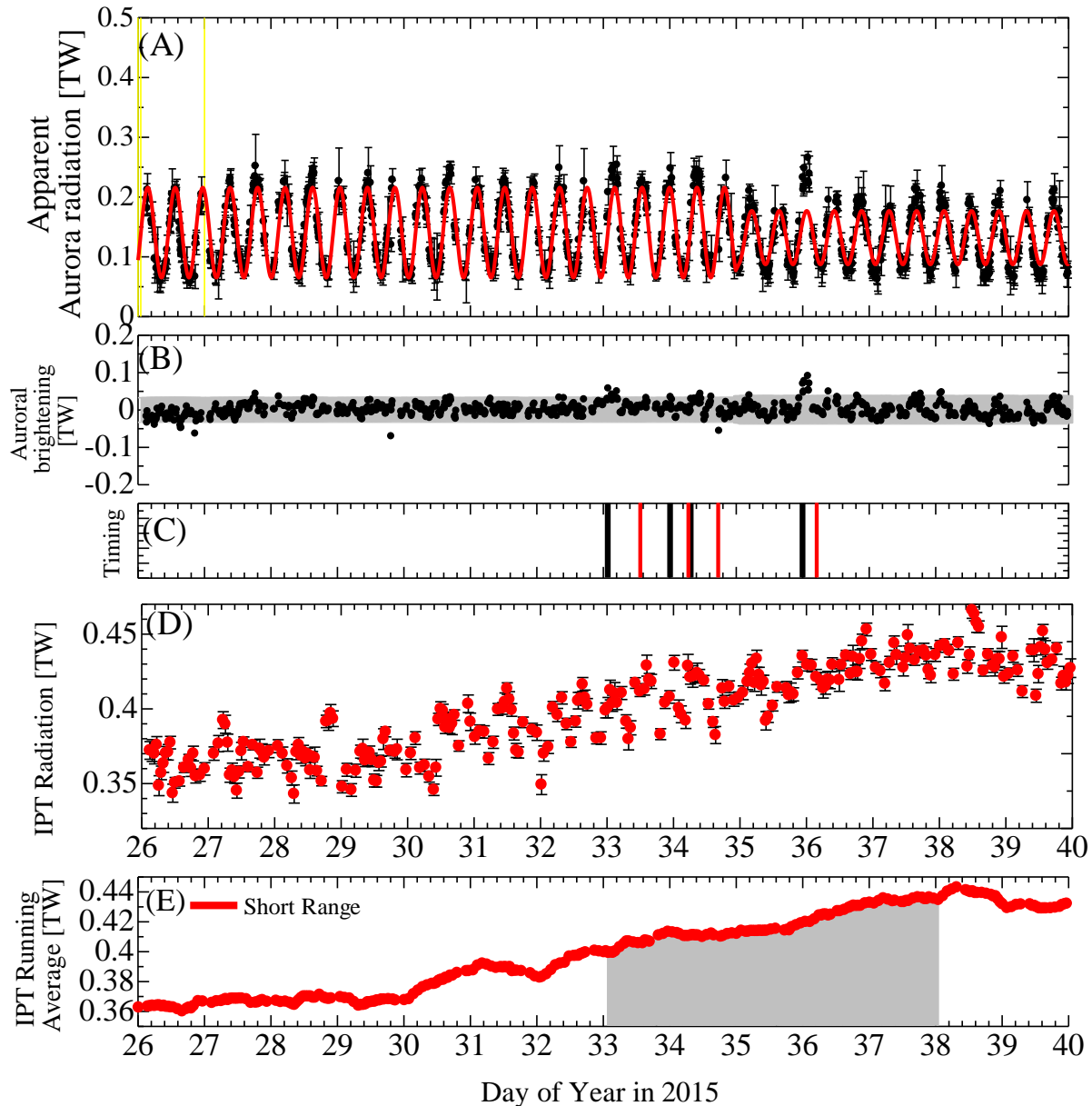
(D)IPT shortの発光強度の時間変動 (E)IPT short(赤)、long(青)の20時間移動平均

# 増光現象の同定(2nd Season)

Quiet period  
during 2nd season



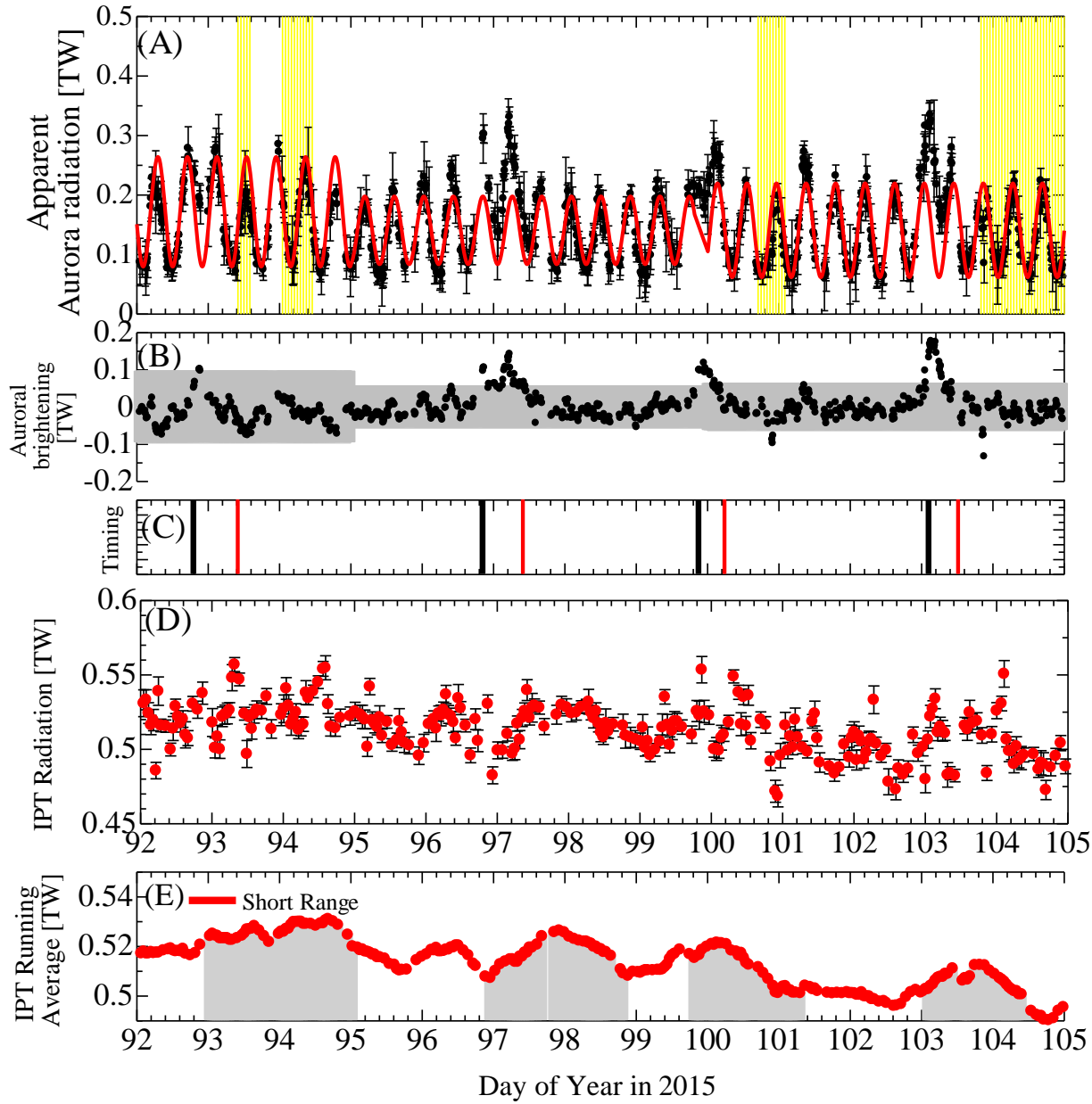
# 増光現象の同定(2nd Season)



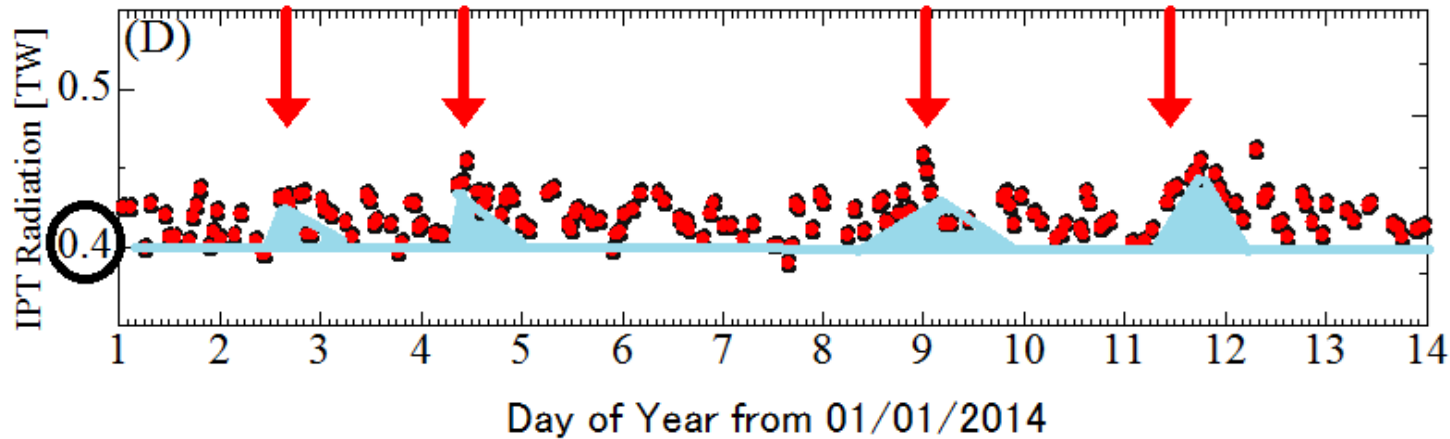
Rising phase  
in 2nd season

# 増光現象の同定(2nd Season)

Declining phase  
in 2nd season



# 結果1: 突発増光でIPTに流入するエネルギー

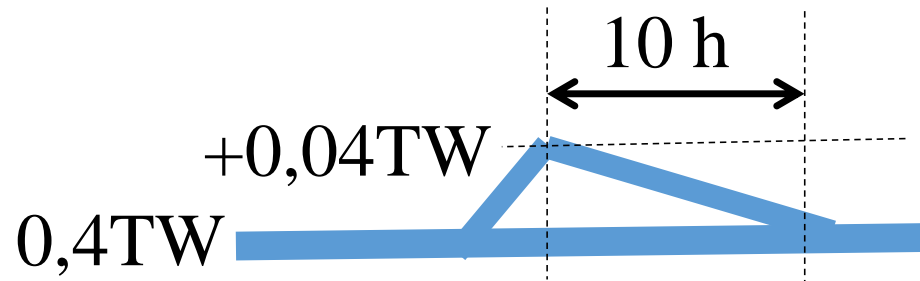


Cf.

Delamere&Bagenal model (2003)

$$\frac{Hot\_ele.\_in.}{UV\_rad.\_out.} = 26 - 67\%$$

## Schematic light curve



◎ この突発増光現象によってもたらされるエネルギーは、IPTのEUV放射の維持には不十分である。

$\Sigma Injections$

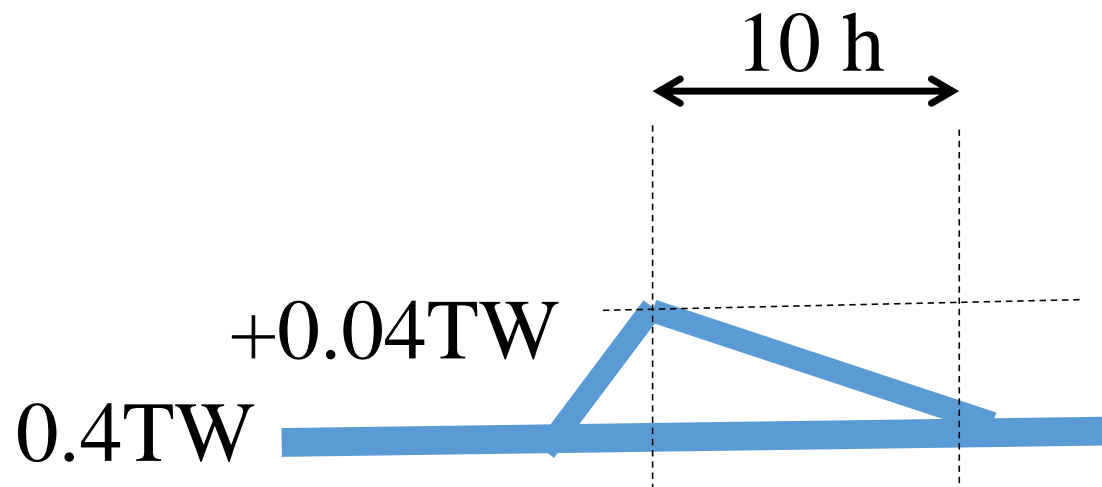
$IPT\_cnst$

$$= \frac{0.04[TW]}{0.4[TW]} \times \frac{4 \times 10 hours}{14 days}$$

< 2%

## 結果2: 増光の継続時間(1st Season)

### Schematic light curve



Yoshioka et al.によって示された高温電子の内向き輸送において、速度は100 km/sではなく20 km/sである。

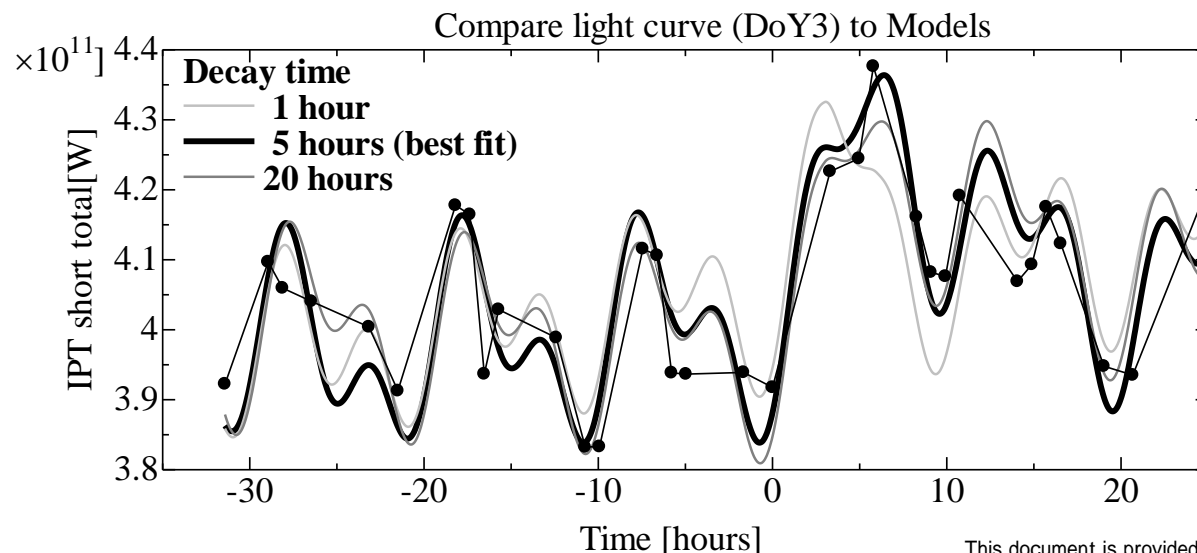
(緩和時間が長ければ、より遅い速度の輸送で高温電子がIPTの内側まで到達するため)

◎IPTの増光の継続時間は約10時間である。

→高温電子の緩和時間を1時間と仮定すると、この継続時間を説明できない

高温電子の緩和時間を5時間程度とすると、この継続時間を説明できる。

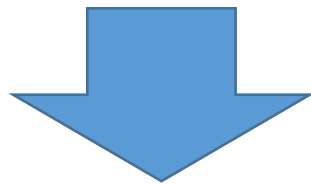
(下図参照)



## 結果2: 増光の継続時間(1st Season)

緩和時間が1時間より長いことは、高温電子の温度が50 eVより高温であることを意味している。

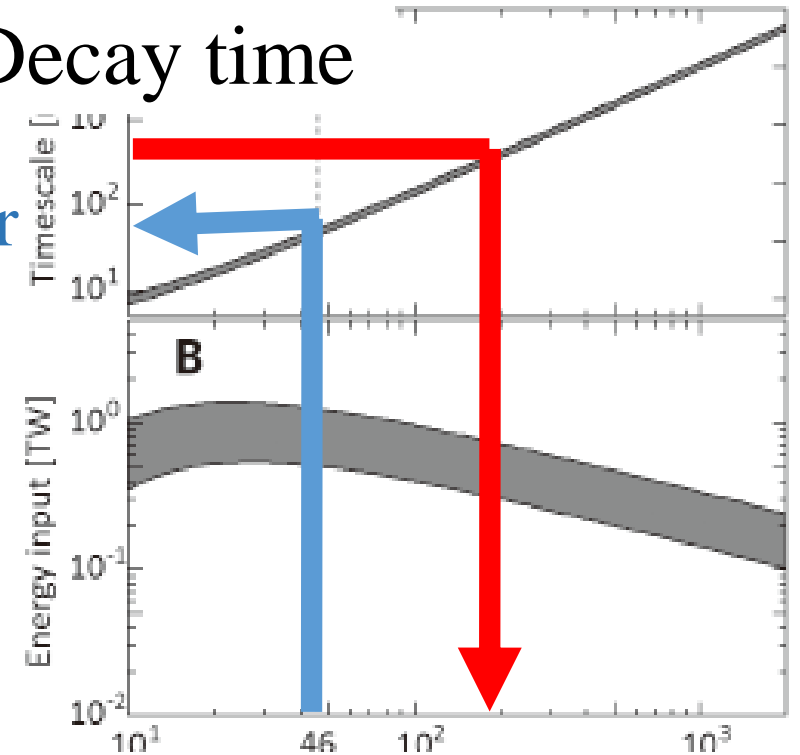
緩和時間が5時間とすると、高温電子の温度は200 eVである。



高温電子の温度は、50 eVではなく200 eVである。

## Decay time

5 hour  
1 hour



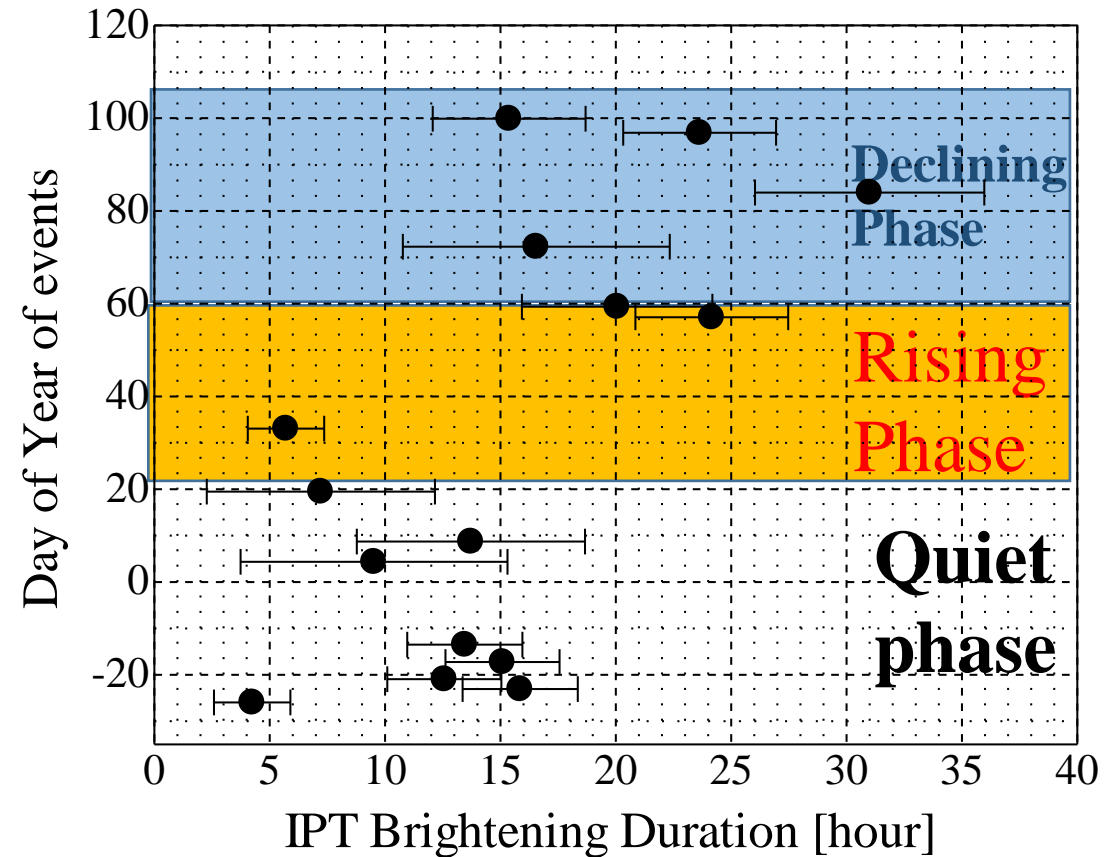
## Hot electron temperature

dependences on the hot electron temperature. (A) The collisional relaxation time scale between the hot and core electrons. (B) Total energy input from the hot component to the core component as a function of hot electron temperature. These values are calculated with parameters derived from the innermost regions shown in Fig. 3 (averaged over dawn and dusk). For both panels, the range of the plotted values corresponds to  $1\sigma$  error. The black dashed line marks the case when the hot electron temperature is 46 eV.

# 結果2: 増光の継続時間(2nd Season)

◎Declining phaseではIPT増光の継続時間が長くなっている。

- 「噴火によりIPTの電子やイオンの密度が増えた」ことを考えると、高温電子の緩和時間は短くなるはずである。
- それを凌駕するだけの、より高温な電子が中間磁気圏から流入するようになったことの結果だと考えられる。





# 結果3: 増光の時間差

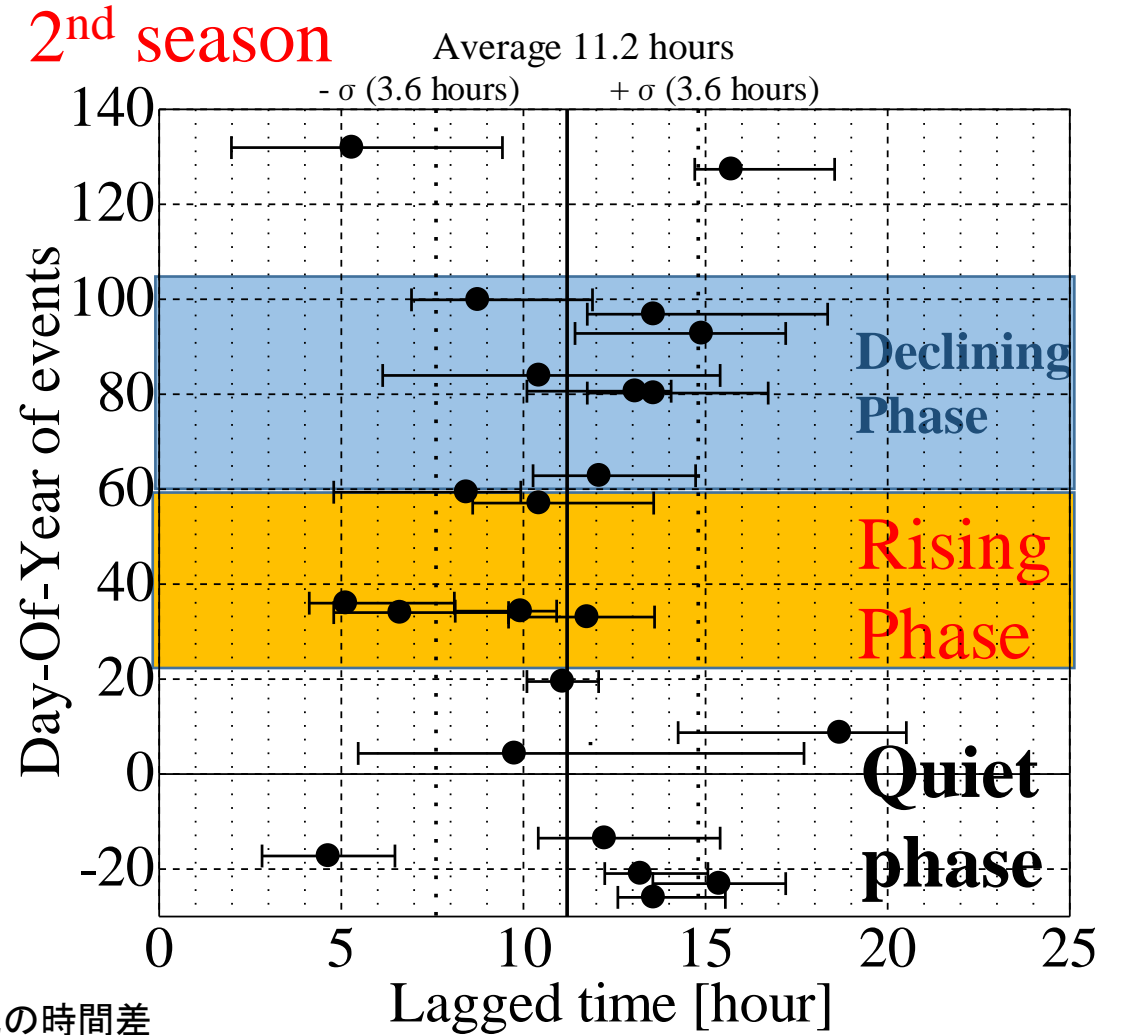
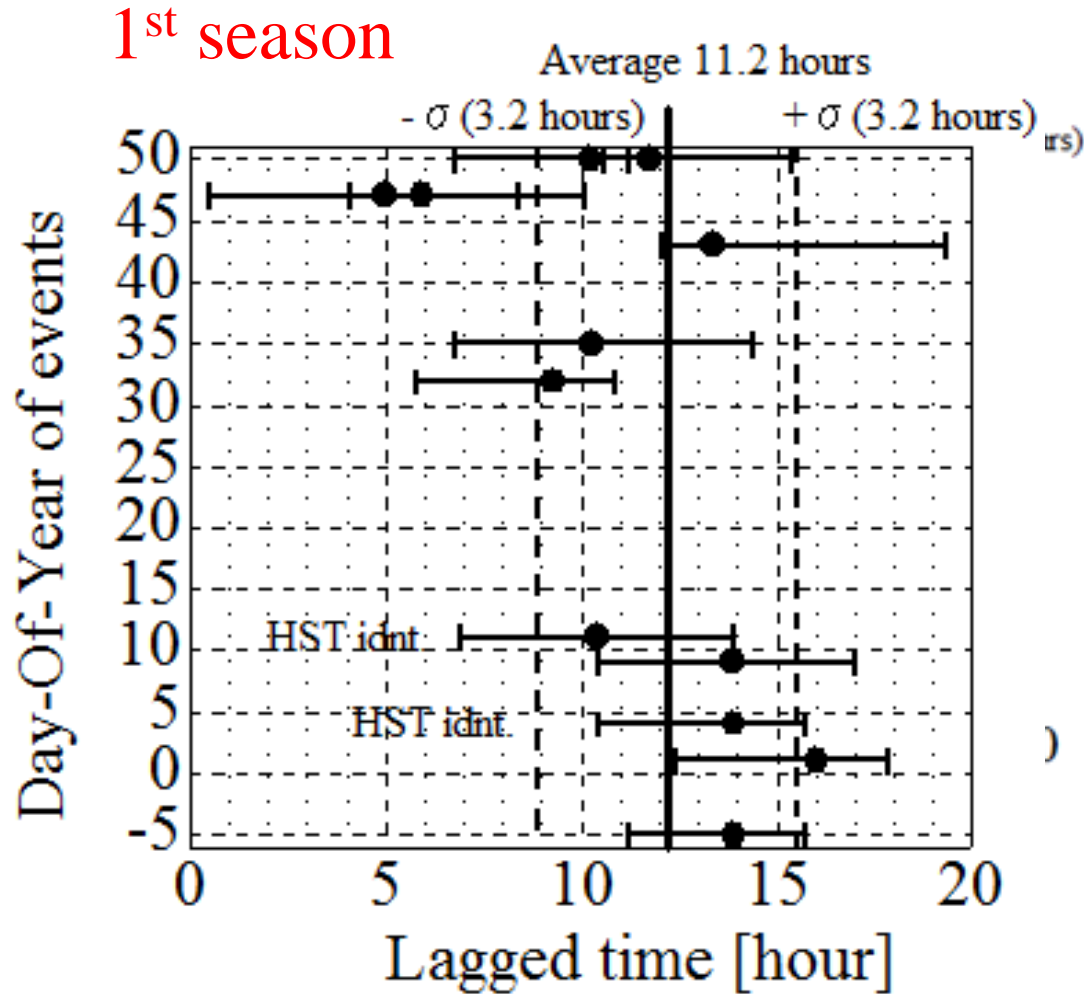
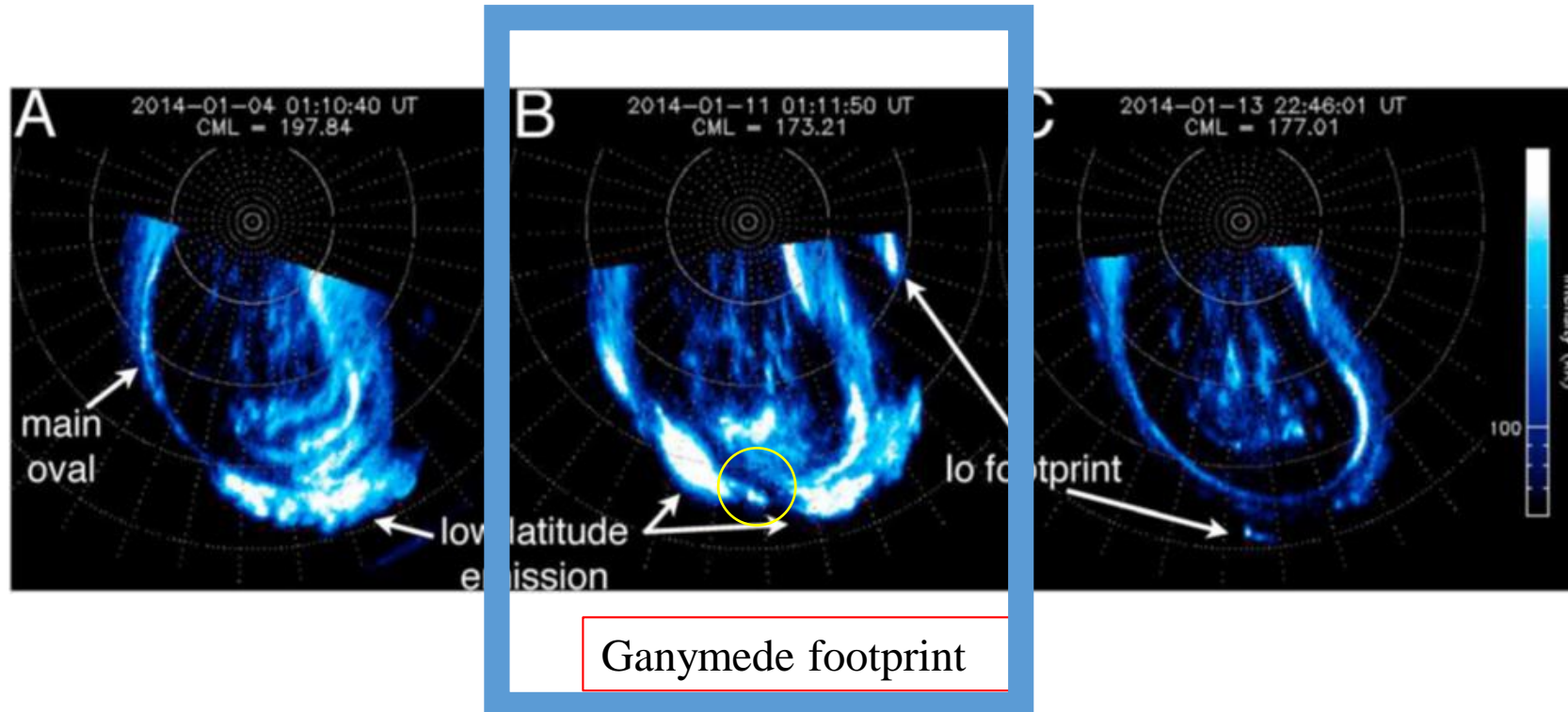


図: IPTとオーロラの増光の時間差  
 エラーバーは主に観測休止期間による。

イオの火山の噴火時、平穏時ともに、**増光の時間差が11.2時間であることが求められた。**

# 結果3: 増光の時間差



◎時間差から、高温電子の内向き輸送の出発点が求められる。

Start Point

$$= \text{Io orbit } (6R_J) + 20\text{km/sec} \times \text{Lagged time } (11.2 \text{ hours})$$

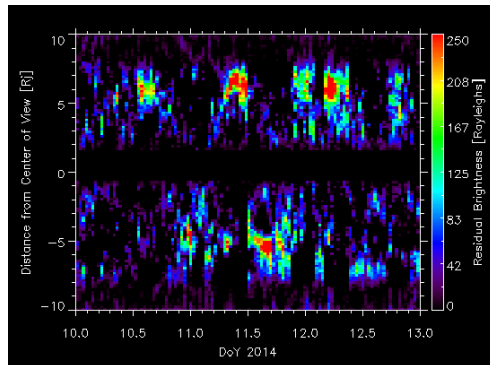
$$= 14 \pm 3 R_J$$

※ガニメデの軌道半径は15  $R_J$ である。

# 結果4: IPT増光の空間的特徴

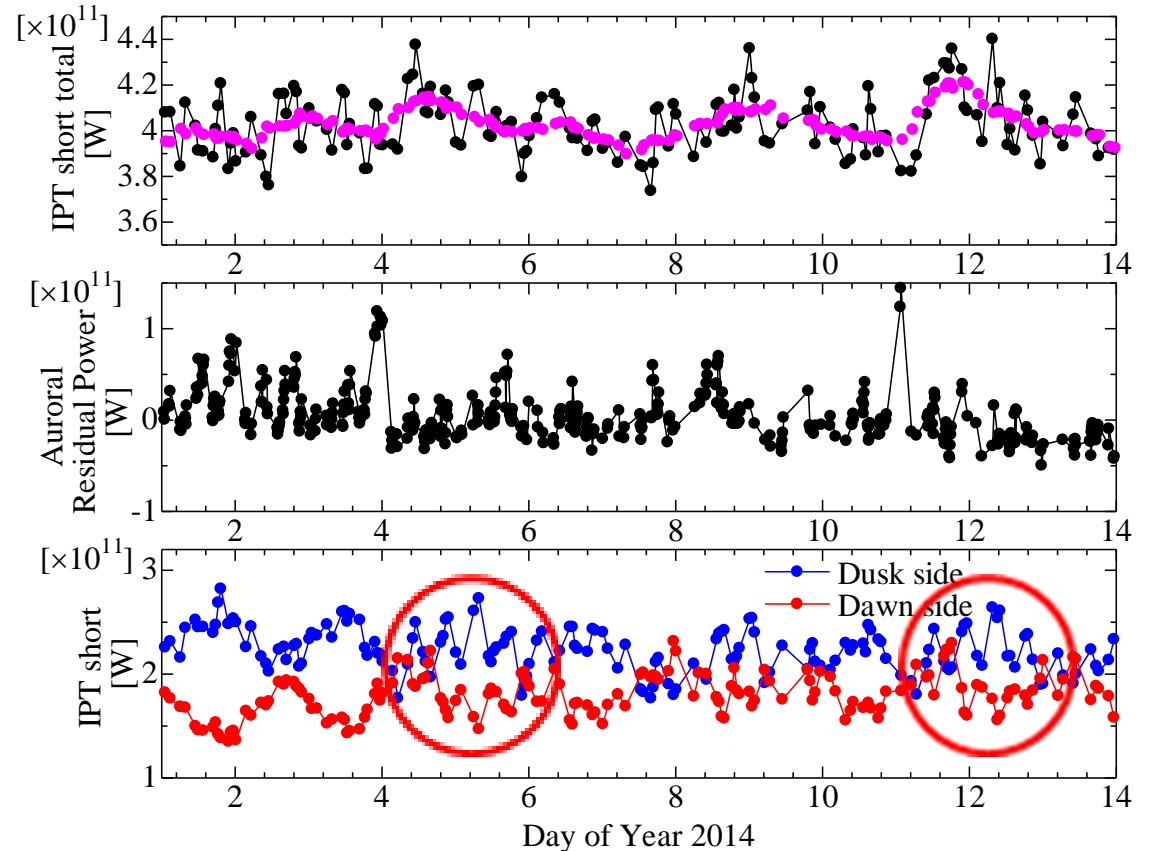
IPTとオーロラの同時突発増光を境に、dusk側、Dawn側で10時間周期変動が増大する様子が見られる。

→「IPT突発増光は局所的な増光であり、増光箇所が木星磁場と共回転することでduskとdawnで交互に見られる」とすれば説明できる。



左図: 縦軸が空間分布、横軸がIPT shortの時間変化を表すグラフから42時間周期成分を取り除いたもの

ひさき/EXCEEDの分解能でも、増光箇所の移動の様子が見える。



上図: IPT shortの発光強度の時間変化(黒)とその移動平均(紫)

中図: オーロラのフィッティング残渣の時間変化

下図: IPT shortの発光強度のDawn側(赤)、Dusk側(青)の時間変化  
イオ公転周期に由来する42時間周期と、木星の自転周期である10時間周期の変動が見られる。

# 結果4: IPT増光の空間的特徴

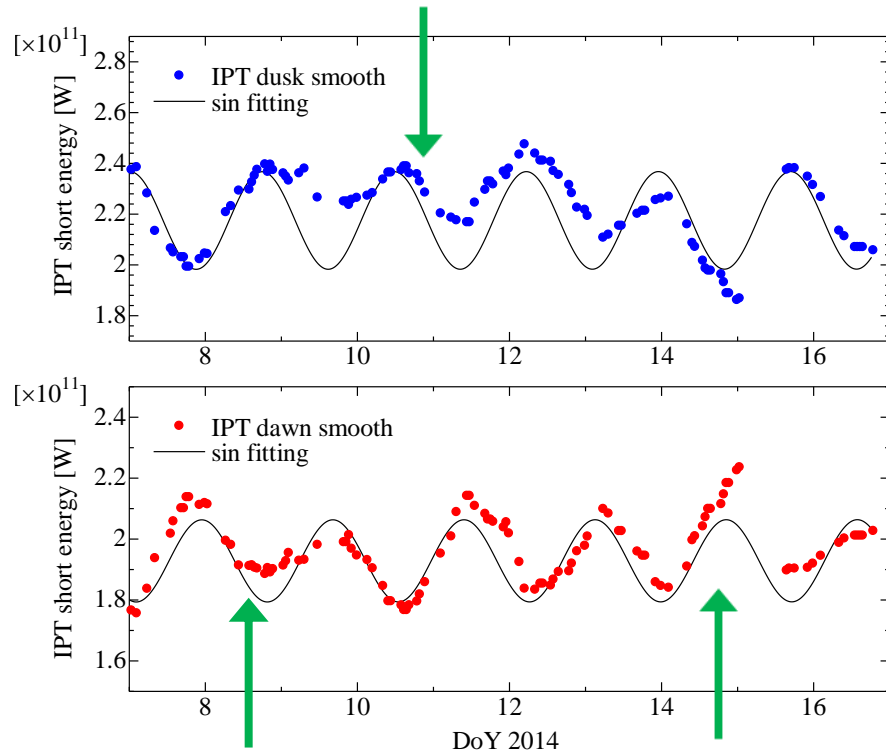
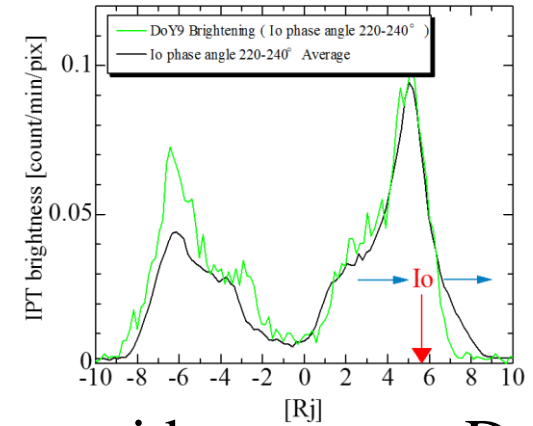


図 IPT dusk,dawn成分の時間変化と周期成分

上図: dusk 20時間移動平均(青点)とsinフィッティング(黒線)  
 下図: dawn 20時間移動平均(赤点)とsinフィッティング(黒線)

◎ DoY9の増光、DoY15の増光では主にdawn側が増光している。  
 DoY11の増光ではdusk側が増光している。



Dawnside

Duskside

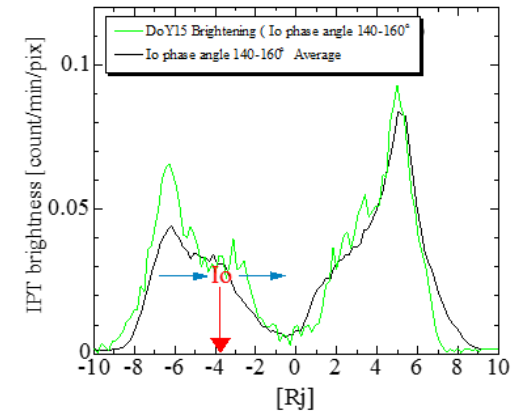


図. 増光時のIPT輝度の空間分布  
 緑: 増光時のIPT輝度  
 黒: イオ位相角が同じデータの平均

◎ Dawn側が局所的に増光している。

# まとめ

◎ ひさき/EXCEEDの高い時間分解能の観測により、IPTとオーロラの同時突発増光現象の詳細な解析に成功した。

◎ 中間磁気圏(約14 R<sub>j</sub>)から内部磁気圏への高温電子(200 eV)の輸送(輸送速度20 km/s)の存在を明らかにした。

◎ この機構によってもたらされるエネルギーは、IPTのEUV放射の維持には不十分である。

◎ イオの火山の噴火による影響が中間磁気圏に及ぶと、より高い温度の電子がIPTに輸送されるようになる。

◎ IPTの増光は局所的な現象であり、増光箇所は木星磁場と共回転している。