

## 磁気嵐に呼応する地球外気圏の水素原子の密度変動

桑原正輝(1), 吉岡和夫(1), 村上豪(2), 土屋史紀(3), 木村智樹(4), 吉川一朗(1)

(1) 東京大学, (2) ISAS/JAXA, (3) 東北大学, (4) RIKEN

### 1. はじめに

地球近傍の宇宙空間（外気圏）は、太陽風が運んでくる電磁気的な擾乱と地球大気が相互作用する領域である。地球外気圏の粒子は太陽光を共鳴散乱することで、ジオコロナを形成する。長い研究史にも関わらず、未だに解明されていない問題も残されている。私は以下の問題に着目し、研究を進めている。

最近の米国の地球周回衛星による水素原子の共鳴散乱光の観測により、地球半径の 3-8 倍の範囲に存在する水素原子の総量が、磁気嵐の発生に伴い突発的に増加するという現象が確認された（図 1）[Bailey and Gruntman, 2013]。水素原子の総量は太陽の自転や太陽活動変動の周期に対応して変動していることは知られているが、半日以内で突発的に増加するという事実は新たな発見であった。本来、中性水素は電磁気的な力の影響を受けないことから、外圏の下側領域（電離圏・熱圏）や上側領域（プラズマ圏）との相互作用による間接的要因が増加を引き起こしていることが示唆されていた。しかし、今日に至ってもその増加のメカニズムはよく理解されていないというのが現状である。また、この衛星は時間分解能が 12 時間程度であるため、磁気嵐の時間発展に対応して水素原子の密度分布の変動を捉えることができず、より高い時間分解能を持つ観測器が必要とされていた。

2013 年 9 月に地球の周回軌道から惑星の大気・プラズマの分光撮像観測を定期的に行う「ひさき」衛星が打ち上げられた。世界初の惑星専用の宇宙望遠鏡である。観測波長域は極端紫外線領域にあり、地球大気の吸収を受けない宇宙空間から天体を観測できる優位点が世界の惑星科学の分野から注目を集めている。「ひさき」衛星はその軌道高度から、前景放射として水素・ヘリウム・酸素の発光（ジオコロナ）を観測している。また、「ひさき」衛星の時間分解能は 1 分程度であり、過去のジオコロナ観測衛星よりもはるかに高い時間分解能を持ち、かつ連続的な観測を行うことができるため、磁気嵐に対応した水素原子密度の変動を捉えることができる。観測開始から現在までに磁気嵐が幾度も確認されており、その間水素原子の共鳴散乱光の増光が観測された。

「ひさき」衛星の観測結果を用いて、磁気嵐に呼応する水素原子密度の変動過程に関わる要素を検討し量的に評価した。本稿ではその結果について報告する。

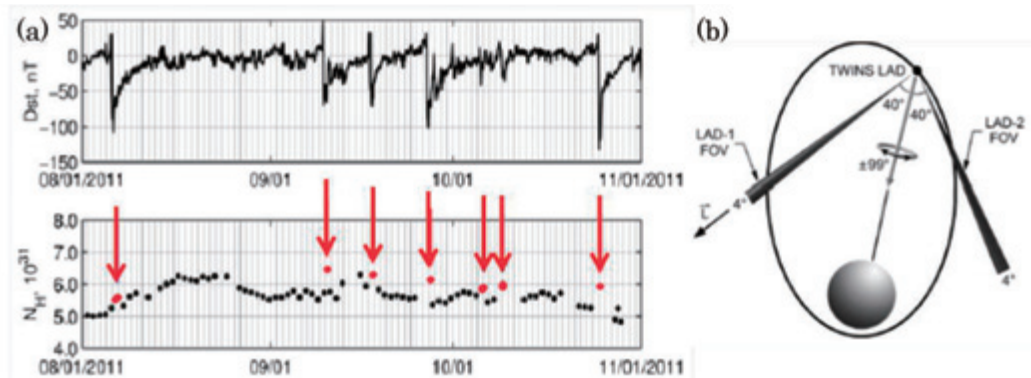


図1 TWINS 衛星による地球外気圏の水素ライマン $\alpha$ 線の観測[Bailey and Gruntman, 2013]

(a) 水素原子の総量と Dst 指数の相関関係

2011年8月1日から11月1日までの Dst 指数（上）と TWINS 衛星で観測された 3~8  $R_E$  の球殻内の水素原子の総量（下）を示したもの。この期間に磁気嵐が数回発生したことが確認できる。磁気嵐が発生し Dst 指数が減少した時に、3~8  $R_E$  の球殻内の水素原子の総量が増加していることが確認できる（赤矢印）。

(b) TWINS 衛星の観測時の位置関係

地球周回軌道から2つの観測器でジオコロナを観測している。12時間程度で地球を1周する。

## 2. ひさき衛星による観測

惑星の大気・プラズマの分光撮像を行う「ひさき」衛星は、高度約 1000 km を飛翔しており、軌道の遠地点・近地点はそれぞれ 1157 km, 954 km 程度で軌道傾斜角は約 30 度である（図2）。「ひさき」衛星はその低い軌道高度故に地球大気の内側から惑星を観測していることになる。そのため、得られる2次元スペクトルには地球大気の発光が混入してしまう。また、「ひさき」衛星はその地球大気の影響を取り除けるように、観測対象である惑星から視線を少しはずし、前景光のみの観測もしている。本研究では、惑星観測時と前景光観測時の2種類の観測結果を統合してジオコロナの解析を行う。図3に「ひさき」衛星が撮像したスペクトルの例を示す。

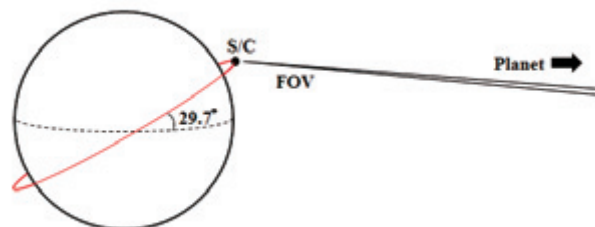


図2 「ひさき」衛星の観測時の位置関係

「ひさき」衛星は高度約 1000 km から惑星の大気・プラズマの分光撮像を行っている。遠地点・近地点はそれぞれ 1157 km, 954 km であり、軌道傾斜角は約 30 度である。点線は赤道面、赤線は「ひさき」衛星

の軌道を表している。

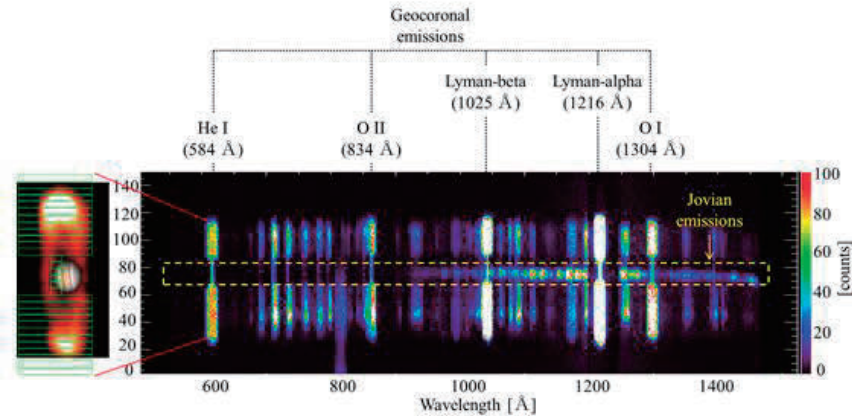


図3 「ひさき」衛星が高度 1000 km から木星を撮像したときの 2 次元スペクトル

横軸は波長方向、縦軸は空間方向を示している。「ひさき」衛星の観測波長域では水素、ヘリウム、酸素などのジオコロナの発光が確認できる。

### 3. 「ひさき」衛星で観測された磁気嵐に呼応する水素原子の発光量の増加

「ひさき」衛星は 2013 年 12 月から定常観測を開始し、2014 年 2 月には木星を観測対象としていた。そのとき木星は太陽離角約 130 度の方向に位置していたことから、「ひさき」衛星は夜側のジオコロナを観測していたことになる。2014 年 2 月 18 日から 25 日までに小規模のものも含めると磁気嵐が 3,4 回ほど発生し、地磁気擾乱の指数である Kp 指数の増加と Dst 指数の減少に伴い水素ライマン α 線の光量が増加した。その時の水素ライマン α 線の光量、Kp 指数、Dst 指数、F10.7 指数と太陽ライマン α フラックスを図 4(a)に示す。図 4(a)から Dst 指数の減少と水素ライマン α 線の光量の増加には相関関係があると考えられる。2014 年 2 月に発生した磁気嵐の中で、最も規模の大きいものは Dst 指数が -112nT まで減少した 19 日の磁気嵐である。以下、この日に焦点を当て解析する。図 4(b)には 2 月 19 日周辺の期間を拡大したものを示している。この図から水素ライマン α 線の光量は地磁気擾乱の変動に対し約 2 時間程度遅れて変動していることがわかる。また、この時の「ひさき」衛星の赤道面における視線方向の概略図を図 5 に示す。

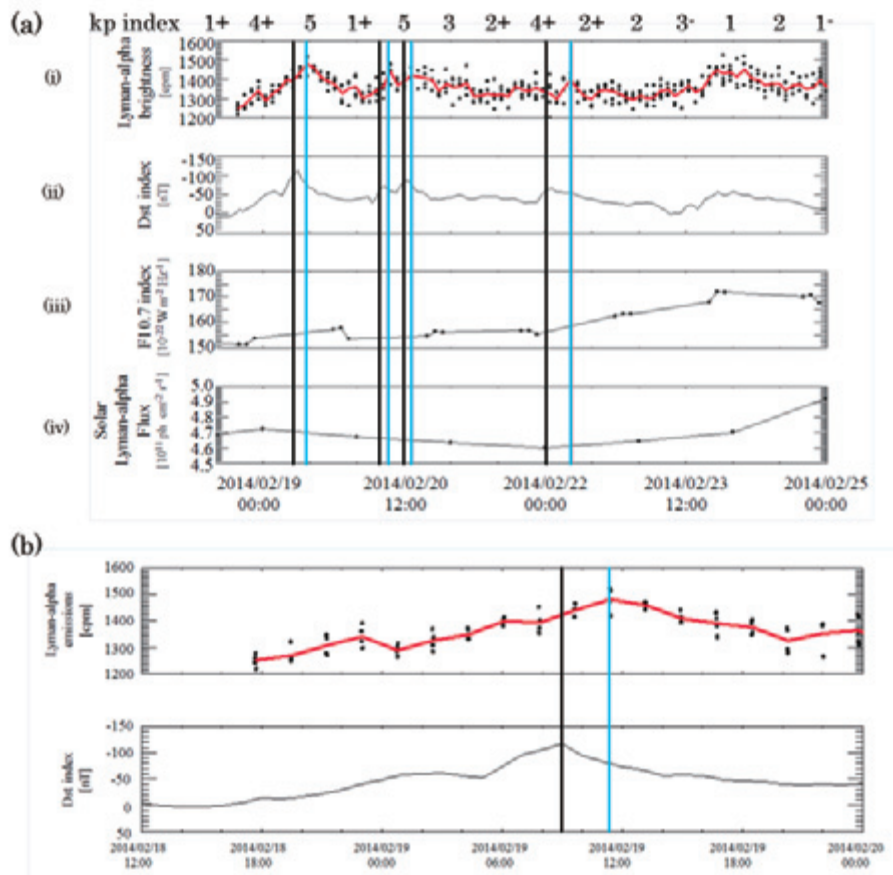


図4 水素原子の発光量とDst指数の相関関係

- (a) (i)「ひさき」衛星が地方時24時に位置しているときの水素ライマン $\alpha$ 線の光量（黒点は1分積分値、赤線はパスごとの平均値をつなげたもの。）、(ii)Dst指数、(iii)F10.7指数、(iv)太陽ライマン $\alpha$ フラックスを示している。

黒線はDst指数が最小値を記録した時刻、青線は水素ライマン $\alpha$ 線の光量が最大になった時刻を示している。

Dst指数の減少に伴い、水素ライマン $\alpha$ 線の光量が増加しているのが確認できる。

- (b) (a)の(i),(ii)の2月19日周辺の期間を拡大したもの。Dst指数の変動に対し、水素ライマン $\alpha$ 線の光量が約2時間遅れて変動していることがわかる。

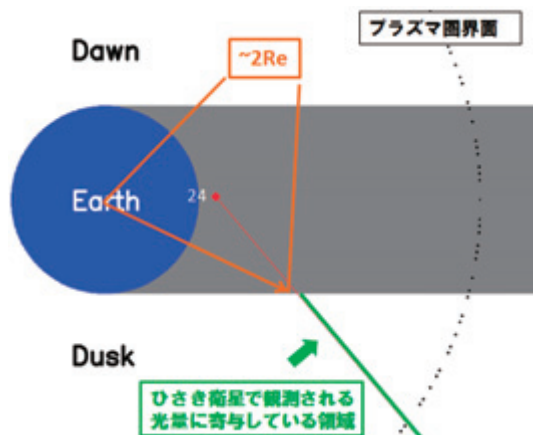


図5 2月19日の「ひさき」衛星が地方時24時に位置しているときの視線方向

「ひさき」衛星は太陽共鳴散乱光を観測している。そのため、視線と地球の影が交わる点よりも高い高度での水素原子の発光が「ひさき」衛星で観測される光量に寄与する（図5中の緑線）。2月19日の観測では「ひさき」衛星は約2 $R_E$ 以上での水素原子の発光を観測していることになる。

#### 4. 水素原子の増加メカニズム

「ひさき」衛星で観測された磁気嵐に伴う水素ライマン $\alpha$ 線の光量の増加過程について考察する。2 $R_E$ 以上では水素原子の密度が低く光学的に薄いと仮定すると、「ひさき」衛星が観測した光量は1次散乱近似できるため、計数は視線方向上の水素原子の総量に比例する。

ここで、磁気嵐に伴う水素原子密度の変動を、連続の式を基に考察する。

$$\frac{\partial n}{\partial t} + \nabla \cdot (nv) = P - L \quad (1)$$

上式の密度変動の項（左辺第1項）は観測から増加していることが確認できる。流入・流出項（左辺第2項）、生成・消滅項（右辺第1項、2項）についてはそれぞれ以下のような2つの過程を仮定する。

- 流入・流出項：熱圏の膨張による水素原子の流量の変化  
熱圏の膨張により「ひさき」衛星の視線上に流入・流出する水素原子の量が変化  
する。
- 生成・消滅項：プラズマ圏の電荷交換反応による水素原子の生成・消滅  
磁気嵐が発生すると、プラズマ圏が縮小し「ひさき」衛星の視線上に存在するイ  
オンの密度が減少する。

それぞれの過程の概略図を図6に示す。

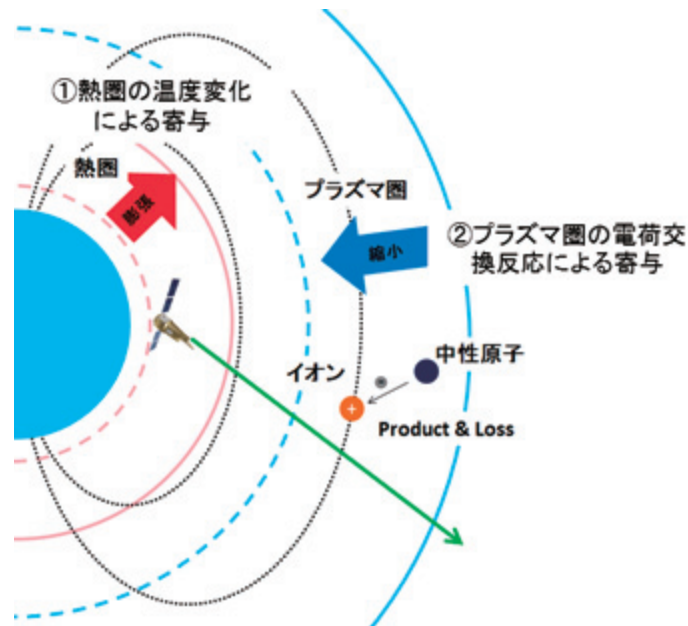


図6 熱圏の膨張による流量の変化と

プラズマ圏のイオンとの電荷交換反応による生成・消滅率の変化

青円は地球、黒点線は磁力線、赤線は熱圏界面、青線はプラズマ圏界面、緑線は「ひさき」衛星の視線方向を表している。①赤矢印は熱圏の膨張を表している。熱圏が膨張すると「ひさき」衛星の視線方向上に水素原子が流入する量が増減する。②青矢印はプラズマ圏の縮小を表している。磁気嵐が発生し、プラズマ圏界面が地球に近づくときプラズマ圏のイオンが存在できる領域が狭まる。その結果、中性原子との電荷交換の衝突周波数が低下する。

#### 4.1. 密度変動項

Dst 指数が最小値を記録した時間と水素原子の発光量が最大になった時間の計数差は「ひさき」衛星の観測から 37.25 [cpm]であることがわかる。これから、以下の2式を用いて「ひさき」衛星の視線上の柱密度の変動量を求めることができる。

$$N = \frac{10^6}{4\pi} \times I \times \Delta \times A \text{ [cps]} \quad (2)$$

$$I = 10^{-6} \times p \cdot g \int_{\text{視線}} n(L_{Los}) dL_{Los} \left[ \frac{10^6}{4\pi} \text{ photons/sec/cm}^2/\text{str} \right] \quad (3)$$

ここで、Iは光量、pは位相関数、gはg-factor、 $L_{Los}$ は「ひさき」衛星の視線方向距離、Nは計数、 $\Delta$ は立体角、Aは有効面積である。今、位相関数は1とし、g-factorを  $1.60 \times 10^{-3}$  [sec]、立体角を  $9.67 \times 10^{-7}$  [str]、有効面積を0.12とした。

視線上の柱密度  $\int_{\text{視線}} n(L_{os}) dL_{os}$  の変動量を求めると、

$$\frac{\partial n}{\partial t} = 5.02 \times 10^{10} \text{ [/cm}^2\text{]} \quad (4)$$

となる。

#### 4.2. 流入・流出項

熱圏大気が温度変化により膨張することで、「ひさき」衛星の視線上の水素原子の流量が変動することが考えられる。しかし、

- 「ひさき」衛星で観測された水素原子の発光量は地磁気変動に対して約2時間遅れて変動する。
- 先行研究の結果から磁気嵐に伴う極域へのエネルギー注入の増大が起こり、低緯度の熱圏大気が加熱され膨張するまでには、数10時間必要である[Sastri et al., 2003]。

などの理由から、水素原子の発光量の短時間での増加は熱圏大気の膨張による水素原子の増加では説明できない。よって、

$$\nabla \cdot (nv) = 0 \text{ [/cm}^2\text{]} \quad (5)$$

となる。

#### 4.3. 生成・消滅項

前項では、外気圏と熱圏の相互作用では磁気嵐に伴う水素原子の短時間での増加は説明できないと述べた。よって、水素原子の増加メカニズムは外気圏の中性大気とプラズマ圏のイオンの電荷交換のみを考える。

##### 4.3.1. 生成率の見積もり

プラズマ圏のイオンとの電荷交換反応による水素原子の生成を考える。水素原子の生成に関わるのは以下の反応だと考えられる。



外気圏の中性ヘリウムとプラズマ圏の水素イオンが電荷交換し、ヘリウムイオンと中性水素になる。しかし、約2 R<sub>E</sub>以上の高度では中性のヘリウムはほとんど存在しない。よって、磁気嵐の発生に伴いプラズマ圏が縮小し、視線上のイオン密度が減少しても上式の反応による生成率の変化はほとんど無視できるほど小さい。以上のことから

$$P = 0 \text{ [/cm}^2\text{]} \quad (7)$$

となる。

#### 4.3.2. 消滅率の見積もり

水素原子の消滅が起きるのは以下の 2 つの反応である。



(8)の反応では外気圏の中性水素とプラズマ圏の水素イオンが電荷交換し高速の中性水素が生まれ散逸してしまい、ジオコロナの光量には影響しなくなる。(9)の反応では電荷交換により中性だった水素がイオンになる。

磁気嵐が発生すると「ひさき」衛星の視線方向上のイオン密度が減少する。その結果、電荷交換反応の衝突周波数が低下し、相対的に水素原子が増加すると考えられる。

(8)、(9)の反応で重要なのは水素原子と衝突するイオンの量である。プラズマ圏の高度  $2 R_E$  以上の領域では、全体のイオンに対する存在比のほとんどを  $\text{H}^+$ が占めており、その割合は約 90%である。 $\text{H}^+$ に次いで多いイオンが  $\text{He}^+$ で数%程度と言われている。以下、これらの反応でどの程度水素原子が増加するかを

- 水素原子の密度分布
- イオンの密度分布
- プラズマ圏界面の地心距離
- 電荷交換断面積と  $\text{He}^+$ の入射速度

の 4 つを仮定し、見積もる。

##### ■ 水素原子とイオンの密度分布

図 7 に本研究で用いた外気圏の水素原子とプラズマ圏のイオンの密度分布を示す。

外気圏の水素原子の密度分布は IMAGE 衛星による観測で得られた分布を用いる。地心距離と水素原子の密度の関係式は以下の式で表される。

$$n(r) = 12000 \times \exp(-r/0.85) + 310 \times \exp(-r/4.6) \text{ [/cc]} \quad (10)$$

「ひさき」衛星は夜側のジオコロナを観測しているため  $\varphi = 180^\circ$  の密度分布を用いる (図 7(a))。

プラズマ圏のイオンの密度分布は OGO-5 衛星によって観測されたイオン分布を用いる。水素イオンとヘリウムイオンをそれぞれ全イオンの 90%、10%とした (図 7(b))。



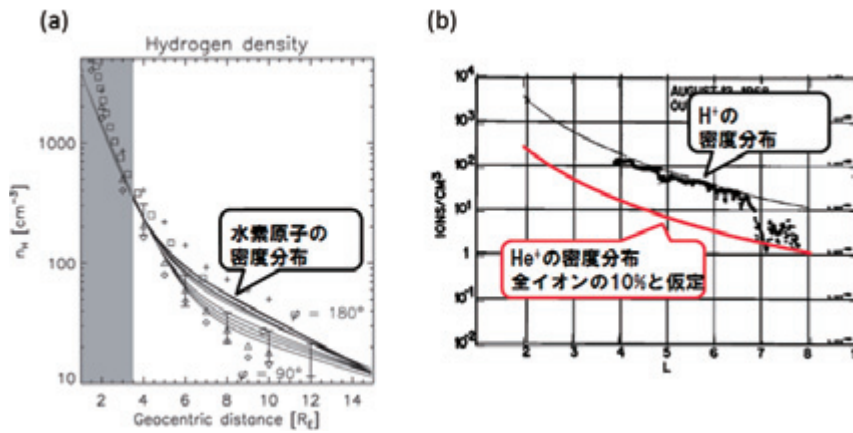


図7 外気圏の水素原子とプラズマ圏イオンの密度分布

(a) IMAGE 衛星の観測から得られた水素原子の密度分布。横軸に地心距離、縦軸に水素原子の密度を示している。 $\phi$ は太陽天頂角を表している。[Østgaard et al., 2003]

本研究では、 $\phi = 180^\circ$  の夜側の分布を用いる。

(b) OGO-5 衛星の観測から得られたプラズマ圏イオンの密度分布。横軸に L 値、縦軸にプラズマ圏のイオン密度を示したものの。実線は密度が  $1/R^4$  で減少することを表したものであり、 $L=2$  でイオン密度が  $3 \times 10^3$  ions/cm<sup>3</sup> となるように規格化されている。[Chappell et al., 1970]

本研究では、水素イオンを全イオンの 90%、ヘリウムイオンを全イオンの 10% と仮定した。

■ プラズマ圏界面の地心距離

地磁気活動度に対応するプラズマ圏界面の地心距離は OGO-5 衛星の観測により経験的に明らかになっており、 $L_{pp} = 6 - 0.6K_p$  で表される。ここで  $L_{pp}$  は L 値で表したプラズマ圏界面の位置である。この式を用いて 2 月 19 日周辺のプラズマ圏界面の位置を概算したものを図 8 に示す。

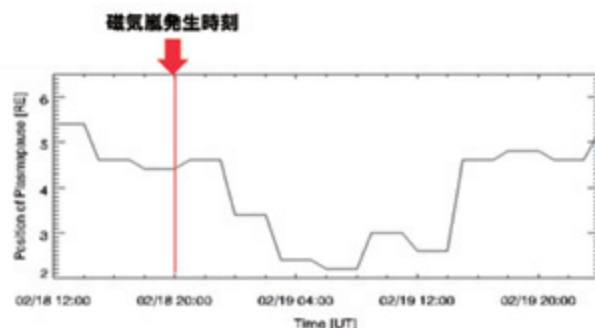


図8 2月18-19日のプラズマ圏界面の高度

OGO-5 衛星の観測により得られた  $K_p$  指数とプラズマ圏界面の関係式  $L_{pp} = 6 - 0.6K_p$  から 2 月 18-19 日のプラズマ圏界面の位置を概算したもの。磁気嵐発生に伴いプラズマ圏界面は約  $2 R_E$  の高度まで近づいたことが確認できる。

#### ■ 電荷交換断面積とイオンの入射速度

水素原子とイオンの電荷交換反応において

$$\begin{aligned} \text{電荷交換衝突断面積 } \sigma &: 10^{-15} \text{ [cm}^2\text{]} \\ \text{入射イオンの速度 } v &: 1.4 \times 10^6 \text{ [cm/s]} \end{aligned}$$

と仮定した。

以上の仮定から、衝突周波数を計算する。

イオン1つが水素原子密度  $N_H$  [/cc] の空間で単位時間当たりに衝突する頻度は

$$f = N_H \sigma v \text{ [回/sec]} \quad (11)$$

である。ここで  $N_H$  [cc] は水素原子の密度である。イオンの密度を  $N_{ion}$  [cc] とすると、単位空間での衝突回数  $N$  は

$$N = N_{ion} \times f \text{ [/cc/sec]} \quad (12)$$

となる。また、「ひさき」衛星の視線方向の距離を  $L_{Los}$  [cm] とすると、この視線上での総衝突回数は、

$$N_{total} = N \times L_{Los} \text{ [回/cm}^2\text{/sec]} \quad (13)$$

となる。

上記のように計算すると、水素原子の消滅量の変化は

$$L = -1.38 \times 10^{10} \text{ [/cm}^2\text{]} \quad (14)$$

となる。

#### 4.4. 結果

以上の結果をまとめると、(1),(4),(5),(7),(14)式から

$$\frac{\partial n}{\partial t} + \nabla \cdot (nv) = P - L$$

となる。

連続の式を基に考察した結果、磁気嵐に伴う水素原子の増加過程は、プラズマ圏イオンとの電荷交換による密度変動で説明できるという結果を得た。

## 5. その他の中性粒子の発光

図 3 に示したように「ひさき」衛星はヘリウム原子や酸素原子の発光も観測している。図 9 に 2 月 18–25 日の水素原子、酸素原子、ヘリウム原子の発光と Dst 指数を示す。この図から読み取れるように、水素原子以外の発光は地磁気変動に対応した変動はない。「ひさき」衛星は高度約 2 RE 以上での発光を観測していると述べたが、その高度には酸素原子やヘリウム原子はほとんど存在しないためである。磁気嵐が発生し、プラズマ圏が縮小したとしてもプラズマ圏界面はせいぜい 2 RE 程度までしか近づかない。よって、酸素原子やヘリウム原子はその影響を受けないのである。このことから、磁気嵐に伴う水素原子の密度変動を引き起こす物理過程は、2 RE 以上の高度でのプラズマ圏のイオンとの電荷交換によるものであると示唆される。

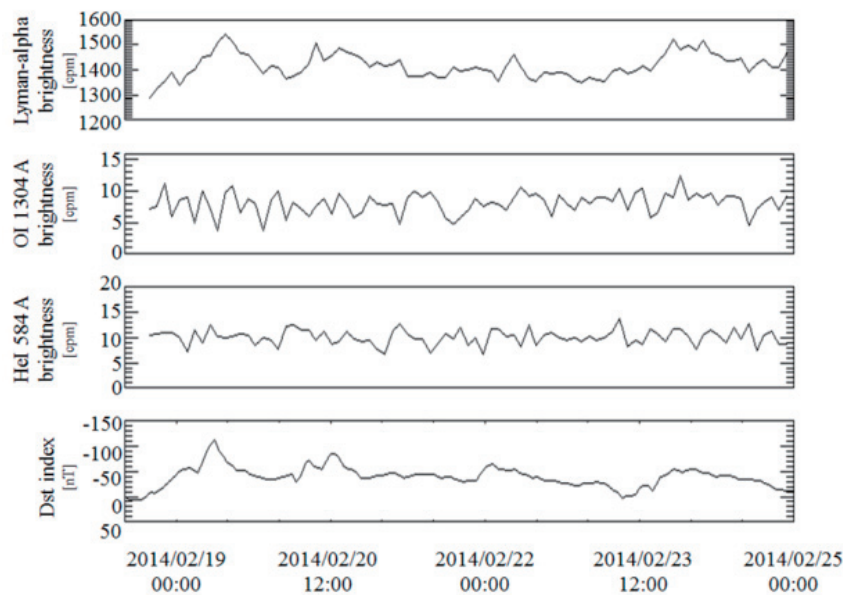


図 9 その他の原子の発光

上から 2 月 18–25 日の水素原子、酸素原子、ヘリウム原子の発光と Dst 指数を示している。

水素原子の発光量の変動は地磁気擾乱の指数である Dst 指数の変動に対し相関があるように見えるが、酸素原子やヘリウム原子にはそのような傾向は見られない。

## 6. まとめ

2014年2月19日に「ひさき」衛星により磁気嵐に呼応する地球外気圏の水素原子の密度変動が確認された。先行研究よりも高い時間分解能での観測から、地磁気変動と水素原子の密度変動には数時間程度の時間差があることが判明した。

水素原子の増加過程を推定し、変動量を定量的に見積もった。その結果、磁気嵐に伴う水素原子の増加を引き起こす物理過程は、プラズマ圏のイオンとの電荷交換で説明できるという結果が得られた。

## 7. 謝辞

This study is supported by Grants-in-Aid for Scientific Research (15H05815) of Japan Society for the Promotion of Science.

## 8. 参考文献

- [1] Bailey, J., and M. Gruntman, Observations of exosphere variations during geomagnetic storms, *Geophys. Res. Lett.*, 40, 1-5, 2013
- [2] Chappell, C. R., Harris, K. K., and Sharp, G. W., A Study of the Influence of Magnetic Activity on the Location of the Plasmasphere as Measured by OGO 5, *J. Geophys. Res.*, 75(1), 1970.
- [3] Østgaard, N., Mende, S. B., Gladstone, G. R., and Lauche, H., Neutral hydrogen density profiles derived from geocoronal imaging, *J. Geophys. Res.*, 108(A7), 1300, 2003.
- [4] Sastri, J. H., Sridharan, R., and Pant, T. K., Equatorial Ionosphere-Thermosphere System During Geomagnetic Storms, Disturbances in Geospace: The Storm-Substorm Relationship, *Geophysical Monograph 142*, 2003.