

宇宙からの広視野撮像を用いた 大気光帯状構造の観測

京都大学大学院 理学研究科
佐藤大仁、斉藤昭則、穂積裕太
- 2016/3/8 大気圏シンポジウム -



国際宇宙ステーションから撮影した大気光帯状構造

1.序論 - 大気光 -

- 高度90km前後の可視光領域では、
OI 557.7 nm(緑色)
Na 589 nm (赤色)
OH Meinel Band 550.0 - 4400 nm
の発光層が支配的である。



図1: 国際宇宙ステーションから撮影した大気光

- 大気光観測は今まで、地上観測である全天イメージャや、ロケット観測、衛星観測等が行われてきた。広視野撮像観測は今まで行われておらず、そのため大きなスケールでの現象の観測が出来なかった。

1. 序論 - 中間圏ボア [Dewan and Picard, 1998 ; Fechine et al., 2005] -

- 中間圏界面付近で大気光上に生じる波動現象で、シャープなフロントとその後方に続く波や乱流を指す。
- 二つの大気光発光層の間をボアが通過することにより、大気光層上に波を生じさせる。
- ボアの通過に伴い、
上層は上方変位し暗くなり、
下層は下方変位し明るくなる。
- 位相速度は $U = 20 - 100 \text{ m/s}$ で、
フロントの長さは 1000 km 以上である。

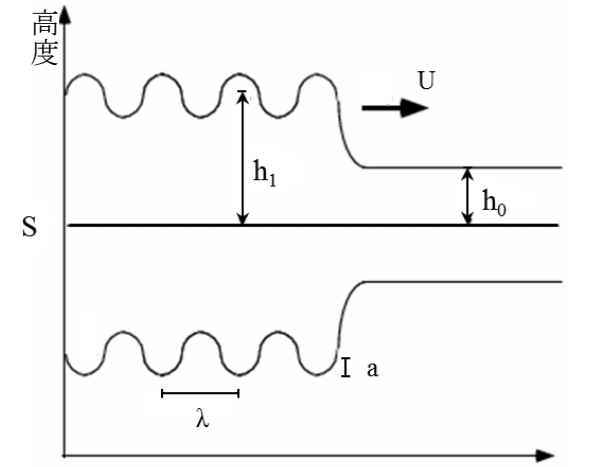


図2: 中間圏ボアの概念図 [Dewan and Picard., 1998]

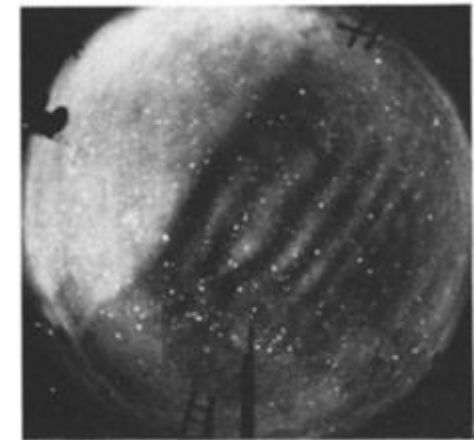


図3: ハワイで観測されたOH発光層上に生じる中間圏ボア [Taylor et al., 1995]

1.序論 - 研究目的 -

大気光帯状構造の生成過程を明らかにするため、その三次元構造を推定した。

- 国際宇宙ステーション(ISS)からデジタル一眼レフ(SLR)カメラ Nikon D3sで宇宙飛行士が撮影した写真の中に大気光帯状構造が2回観測された。
- 今回の観測のような、宇宙からの広視野高感度の撮像観測は今までおこなわれていなかったため、今までに宇宙からの撮像観測でこのような構造が観測されたことはない。そのため、この帯状構造についてはなにもわかっていない。
- 帯状構造の特徴を調べ、中間圏ボアの特徴と比較した。

2. 観測機器

ISS SLR imaging (International Space Station Single-lens reflex imaging)

- 国際宇宙ステーション(ISS)から宇宙飛行士がデジタルカメラ Nikon D3sで撮影した大気光の撮像観測を用いた。
- 本観測は今までにない広視野高感度撮像であり、今まで見られなかった大きなスケールで現象を捉えることが出来る。

ISS-IMAP/VISI

(ISS – Ionosphere, Mesosphere, upper Atmosphere, and Plasmasphere mapping/ visible-light and infrared spectrum imager)

- ISS上の撮像機器で、ISSの前方下側(前視野)と後方下側(後視野)の大気光を観測する。前視野でO₂ 762nm, Na 589nm, OI 558nm、後視野でO₂ 762nm, OH 828nm , OI 630nmの発光を観測する。

2. 観測機器

表1: 各イベントにおけるデータの詳細

	Event A	Event B
Observation period	15:13:13 UT to 15:21:28 UT on August 26, 2014	9:13:46 UT to 9:18:10 UT on October 16, 2011
Observation instrument	Nikon D3s	Nikon D3s
Time resolution	11/4 s	3 s
Exposure time	2.5 s	0.8 s
Location of ISS	Above Indian Ocean	Above North America
Resolution of images	2142 x 2844 (Green), 2142 x 1422 (Red and Blue)	4256 x 2832
Data format	RAW	JPEG
ISS-IMAP/VISI observation	Available	Not available

3.手法

大気光の縦断面の切り出し

- 図4に示した領域の縦断面を切り出す。

Volume emission rateの推定

- 観測されたリム方向の積分値から、逆問題を解いて鉛直方向のVolume emission rateを求める。ここで用いるAbel関数は大気光の上空からの観測での観測値の高度分布を計算した関数である。

帯状構造の水平構造の決定

- 地図上の緯度経度をパラメータとして画像上に投影し、その画像上の位置を大気光帯状構造の位置と比較することで、帯状構造の座標を決定した。[Hozumi, 2013]

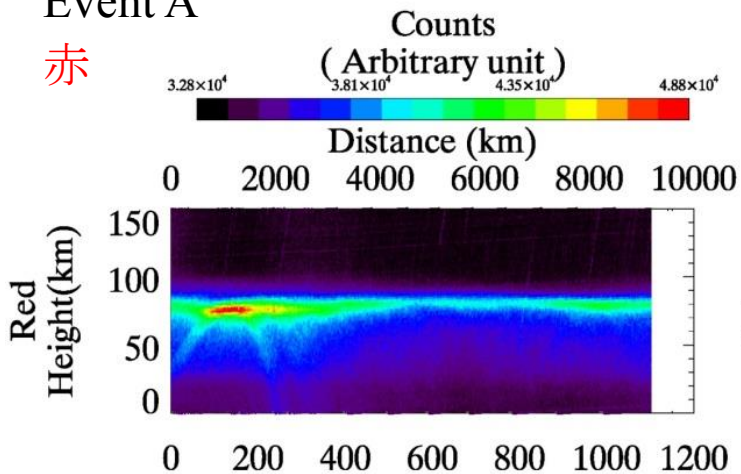
ISS-IMAP/VISIとの比較

- Event Aの観測時にISS-IMAP/VISIの同時観測が行われていたため、ISS-IMAP/VISIのデータとの比較をおこなった。

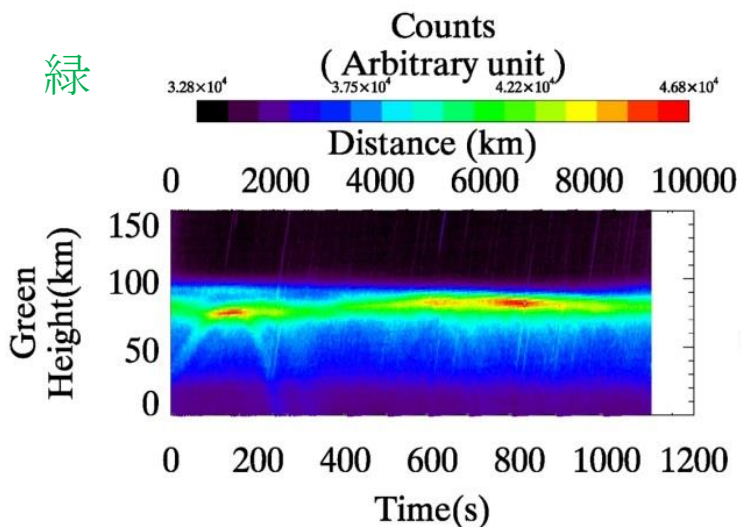
4.結果 - 大気光の縦断面の切り出し -

Event A

赤

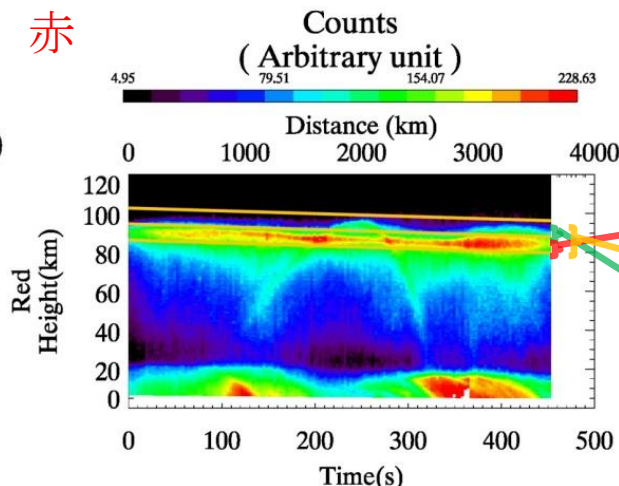


緑



Event B

赤



緑

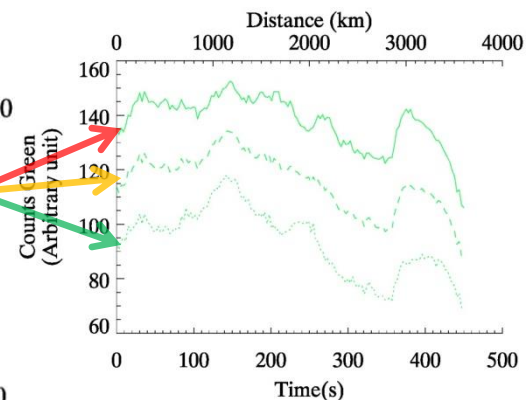
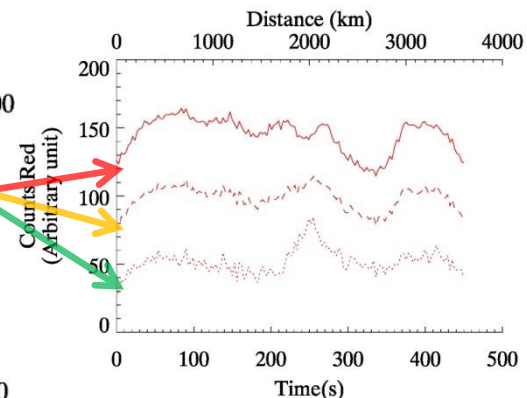
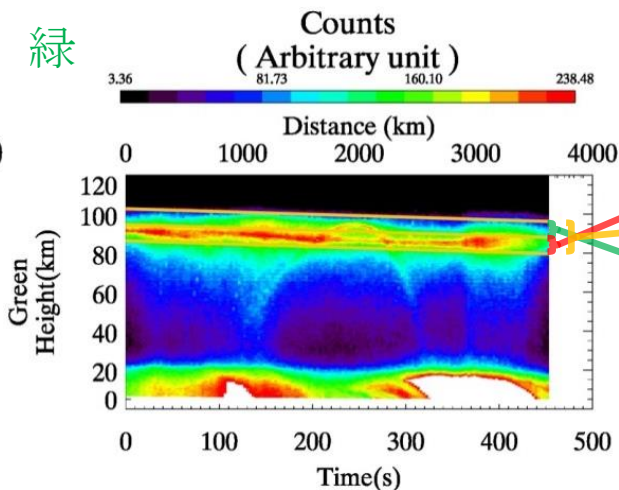


図5: 縦断面のカウント値の時間変化(Event A)

図6: 縦断面及び特定の高度のカウント値の時間変化(Event B)

4.結果 - Volume emission rateの推定 -

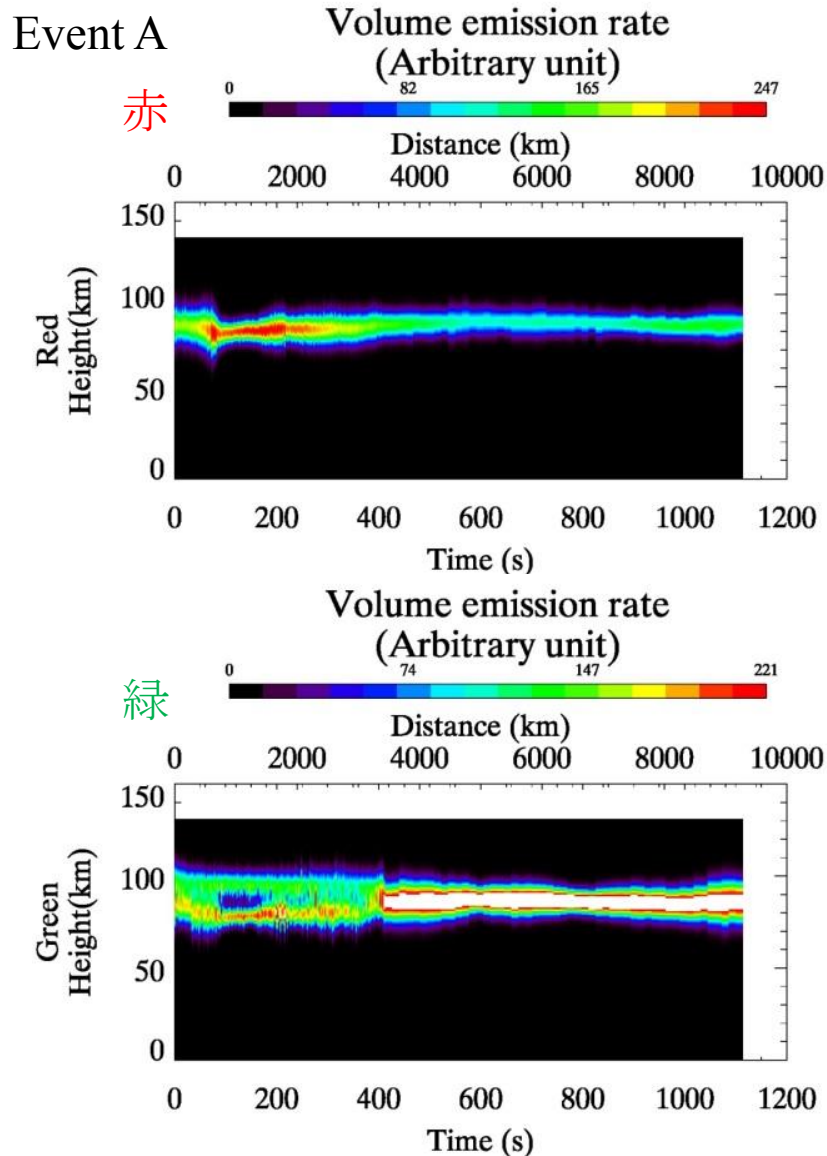


図7: Volume emission rateの時間変化(Event A)

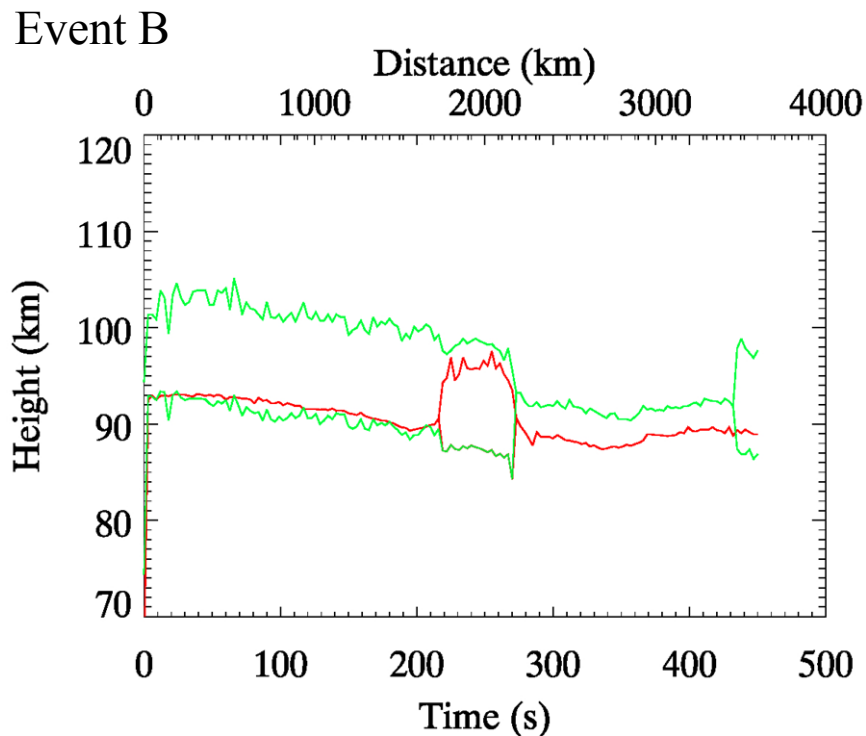
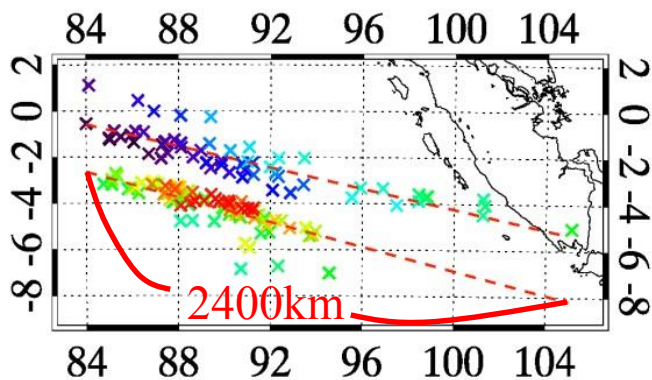


図8: Volume emission rateのピーク高度の時間変化(Event B)

Event BはJPEG画像を用いて求めており、JPEG画像作成の非可逆圧縮によってピーク高度の情報のみが信用できる。

4.結果 - 帯状構造の水平構造の推定 -

(a) Horizontal boundary
(Event A)

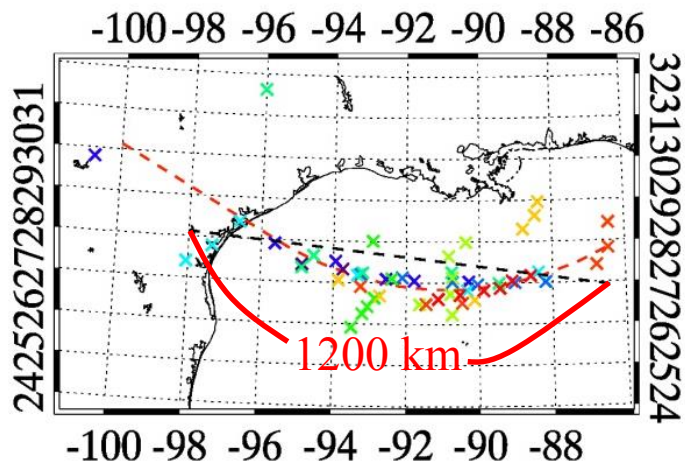


×775	×855
×780	×860
×785	×865
×790	×870
×795	×875
×800	×880
×805	×885
×810	×890
×815	×895
×820	×900
×825	×905
×830	×910
×835	×915
×840	×920
×850	×925
	×930

Event A



(b) Horizontal boundary
(Event B)



×27052
×27062
×27072
×27082
×27092
×27102
×27112
×27122
×27132
×27142

Event B



図9: 帯状構造の水平構造

図10: 画像上での帯状構造の推定構造

4.結果 - ISS-IMAP/VISIとの比較 -

SLR imagingから推定した大気光帯状構造の位置とISS-IMAP/VISIの観測結果を比較した。ISS-IMAP/VISIの観測ではOI 557.7nmに帯状構造は観測されなかった。

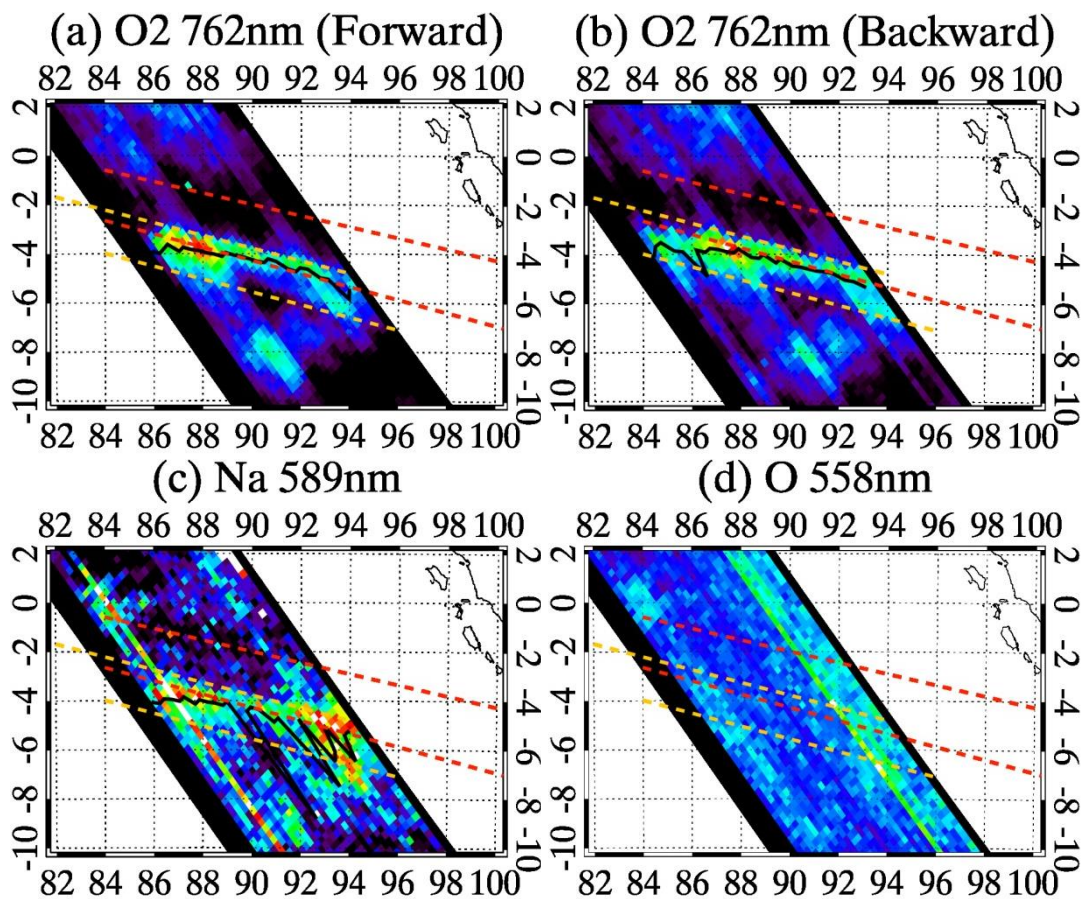


図11: ISS-IMAP/VISIの同時観測

5. 考察 - 発光層の特定(Event A) -

- 求めた Volume emission rate から緑色チャンネルでは2層の発光層が、赤色のチャンネルでは1層の発光層が観測された。
- 赤色の発光強度と緑色の下層の強度がおおよそ2:1であった。
- Nikon D3sではNa 589 nmの発光は、赤:緑がおおよそ2:1で観測される。
- 高度90km前後における緑色の発光は、Na以外ではOI 557.7nmの発光のみである。

緑色の下層と赤色の層は Na 589nmの発光

緑色の上層は OI 557.7nmの発光

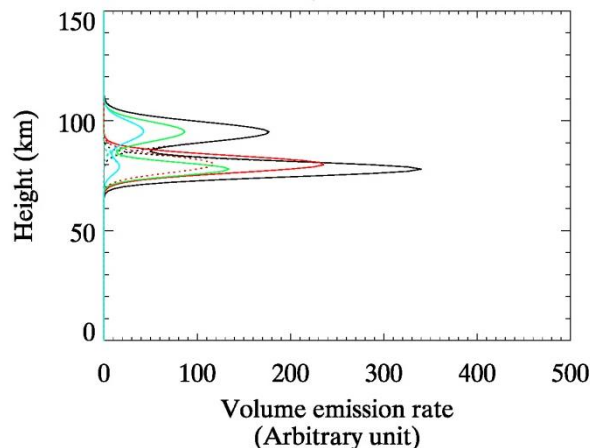


図: Volume emission rateの一例

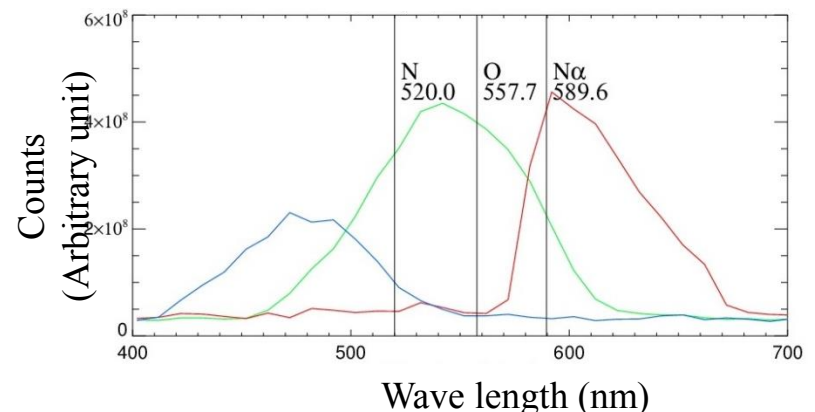


図: Nikon D3sの可視光波長に対するRGBカウント

5. 考察 - 発光層の特定(Event B) -

- Volume emission rateから、赤色では $t = 210 - 270\text{s}$ で2層、その他で1層に見えている。緑色では $t = 270\text{s}$ 以前で2層、以降で1層に見えている。
- 高度90km前後で赤色にも緑色にも感度をもつ発光は、Naのみである。
- 緑色の下側の発光と、赤色の下側の発光がほぼ同じ高さに位置している。
- 高度90km前後における緑色の発光は、Na以外ではOI 557.7nmの発光のみである。
- 高度90km前後における赤色の発光は、Na以外ではOHの発光のみである。

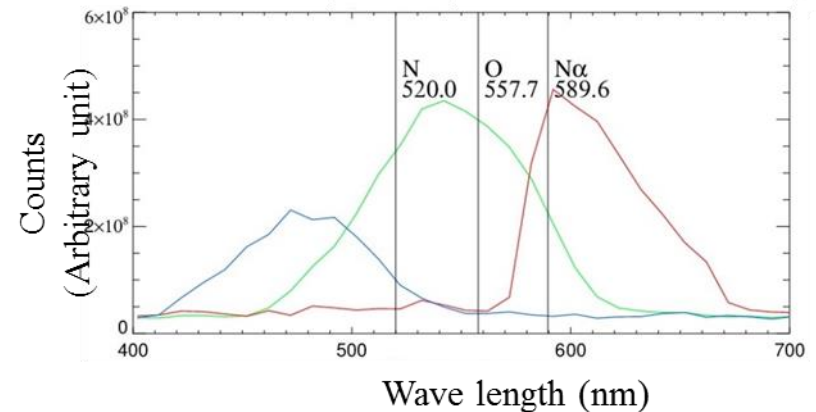


図: Nikon D3sの可視光に対するカウント比

緑色の下層と
赤色の下層は
Na 589nmの発光

緑色の上層は
OI 557.7nmの発光

赤色の上層は
OHの発光

5. 考察 - 三次元構造の推定(Event A) -

- Volume emission rateやISS-IMAP/VISIの観測結果からOI 557.7nmの層はほぼ同じ高さ(約94km)に位置し、明るさに変化がない。
- Na 589nmの層は $t = 60 - 80s$ で下方変位(83 - 78 km)しながら明るくなり、 $t = 80 - 200s$ で上方変位(78 - 81 km)しながら暗くなる。

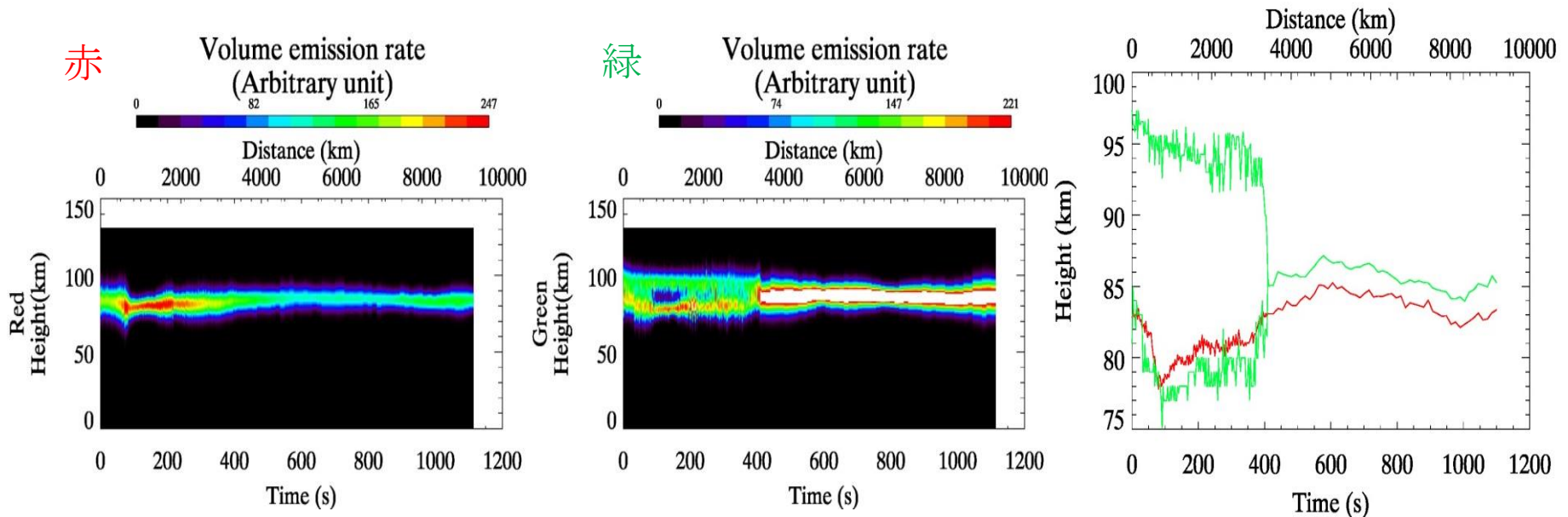


図: Event Aの赤色・緑色のVolume emission rate及びそのピーク高度の時間変化

5. 考察 - 三次元構造の推定(Event B) -

- Volume emission rateのピーク高度の時間変化からNaの発光層はほぼ同じ高さ(約90km)に位置している。
- OI 557.7nmの発光層は $t = 270$ s前後で下方変位(98 - 93 km)する。
- OHの発光層は $t = 220$ s前後で上方変位(90 - 97 km)し、 $t = 270$ s前後で下方変位(94 - 91 km)する。

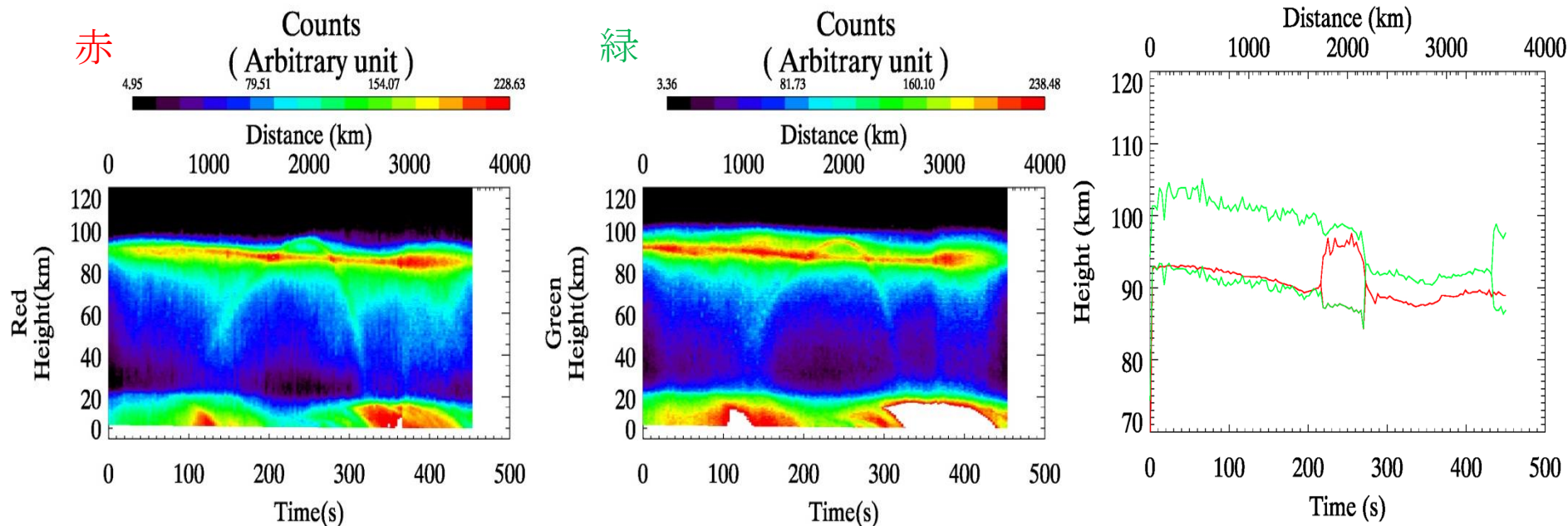


図: Event Bの赤色・緑色の縦断面とVolume emission rateのピーク高度の時間変化

5. 考察 - 大気光帯状構造の三次元構造 -

Volume emission rate、水平構造、縦断面の時間変化より、大気光帯状構造の三次元構造は図のようなものと推定した。

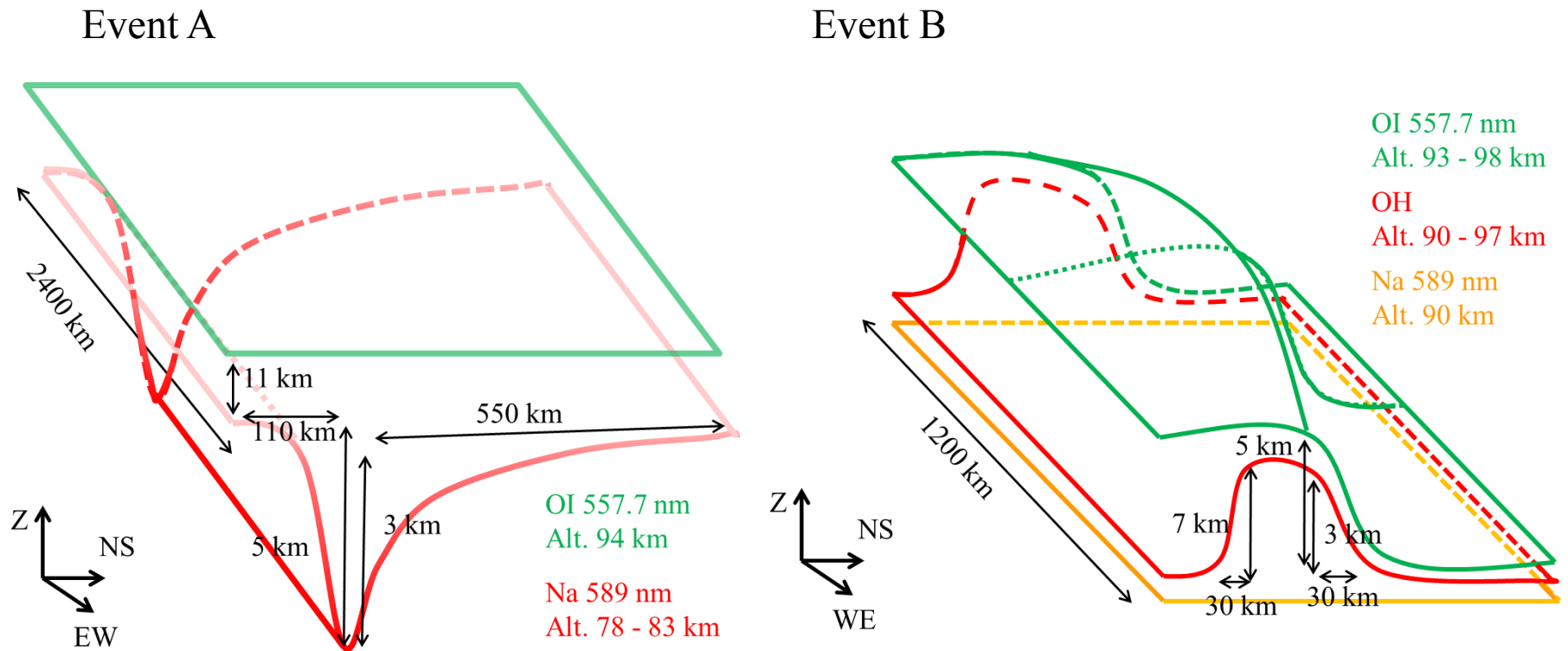


図12: 帯状構造の三次元構造

5. 考察 - 中間圏ボアとの比較 -

- シャープなフロントを持つ。
- フロントの前後で発光層が鉛直方向に変位する。
- 下層が下方変位と同時に明るくなる。(Event A)
- 構造のスケールが類似している。
 - › 鉛直変位
中間圏ボアの鉛直変位は約1 - 4km程である
[Smith et al., 2003, 2005; Yue et al., 2010]。
 - › 鉛直変位の水平距離
中間圏ボアの鉛直変位の水平距離は、約30 - 100km(フロント)と、約100 - 600km(フロントの後方)である
[Smith et al., 2003]。

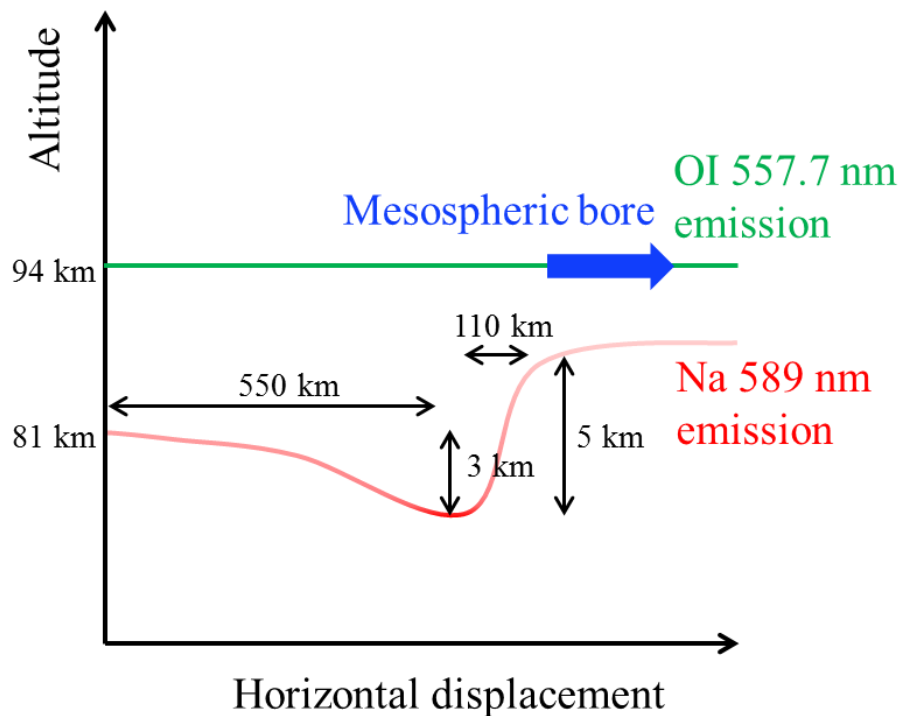


中間圏ボアと解釈

5. 考察 - 大気光帯状構造時の中間圏ボア -

大気光帯状構造の三次元構造と中間圏ボアの特徴から、Event A, B時には以下のように中間圏ボアが伝播したと思われる。

Event A



Event B

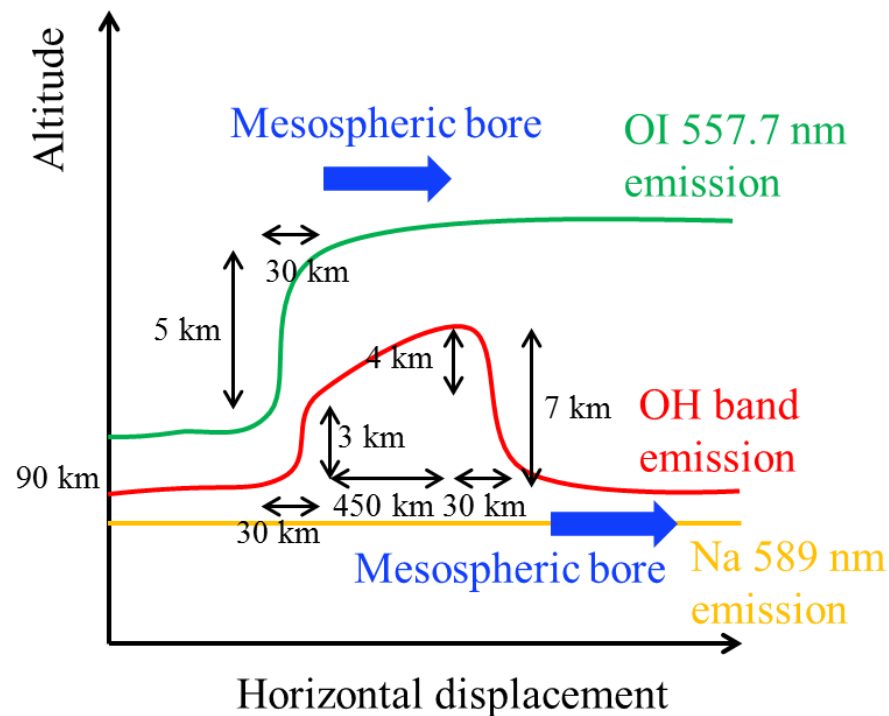


図13: 帯状構造における中間圏ボア

5. 考察 - 中間圏ボアの全体構造 -

- Event A, Bが中間圏ボアであれば、本研究で中間圏ボアのフロントの長さが2400 km 以上にわたることが示される。
- 中間圏ボアは大気光の高度が変わることによって生じる現象だと考えられてきたが、本研究によってそれが確認された。

6.まとめ

- ISSからのデジタルカメラNikon D3sによる撮像で観測された大気光帯状構造の三次元構造を推定し、その発生要因に言及した。
- 帯状構造の三次元構造は、Na 589nm, OI 557.7nm, OH Meinel Bandの発光層が上下に変位するものであることがわかった。
- 大気光帯状構造は、その構造の類似性から中間圏ボアであると考えられる。
- それぞれのイベントについて中間圏ボアがどのように伝播し、発光層を変位させたのかを議論した。
- 本イベントが中間圏ボアであれば、中間圏ボアのフロントの長さが2400 km 以上にわたると示される。また本研究によって、中間圏ボアが大気光発光層の高さ変化によるものだということが確認された。