

かぐや子衛星 2 機による月の電離層の同時掩蔽観測

○安藤 紘基[1], 今村 剛[2], 岩田 隆浩[2], 山本 善一[2], 望月 奈々子[2], 河野 裕介[3], 松本 晃治[3], 劉 慶会[4], 野田 寛大[3], 花田 英夫[3], 小山 孝一郎[5], Alexander Nabatov[6], 二穴 喜文[7], 齋藤 昭則[8]

[1]東大・理, [2]ISAS/JAXA, [3]NAOJ, [4]上海国立天文台, [5]台湾成功大, [6]Ukrainian Academy of Science, [7]Swedish Institute of Space Physics, [8]京大・理

1. 背景

1960 年代の電波天体からの電波の月周縁部における屈折の観測や 1970 年代に行われた Luna ミッションにおける電波掩蔽観測により、密度にして最大 1000 cm^{-3} 程度の電子が月面付近に存在することが示唆された (Andrew et al., 1964; Vyshlov et al., 1976)。一方、月には地球のような磁気圏が存在しないため太陽風の誘導電場により生成されたプラズマは速やかに剥ぎ取られる。また月を取り巻く大気の密度は 10^6 cm^{-3} と稀薄である。これらを統合して考えると月近傍に存在する電子密度はせいぜい 1 cm^{-3} 程度であると理論的に見積もられている (Bauer, 1996)。もし月に電離層があるとなれば月の環境科学に対して新たな知見を得る事になる。かぐや電波科学(RS)では、月の電離層の有無を含め、その様相を探ることを目的としている。

2. 電離層生成に寄与すると思われる要素

① 中性大気の電離

月の中性大気の主成分は Ar であり、その密度は 10^4 cm^{-3} 程度と言われている (Johnson, 1971)。しかし月には地球のような磁気圏は存在せず、太陽風電場により、生成されたプラズマは速やかに剥ぎ取られる。よって電離で生成される割合と電場により剥ぎ取られて失われる割合のバランスを考えると、月面付近に存在する電子密度は、 0.1 cm^{-3} 程度であり、過去の Luna ミッションでの観測結果を説明する事は出来ない。

② ダストの光電子放出

過去のアポロミッションにより、月面付近に帯電したダストが浮遊している事が示唆された(McCoy and Criswell, 1974)。そこで帯電ダストから太陽光により光電子が放出されることで、月面付近に電離層が生成されることに繋がると考えた。

ダストの密度、ダストの光電子放出率を McCoy と Criswell(1974)や Abbas(2007)の研究結果を参考にして、光電子の生成と太陽風の剥ぎ取りによる損失のバランスを考えると最大で 200 cm^{-3} 程度の電子密度が存在する。しかし、ダストの密度や光電子放出率には誤差があるため、Luna ミッションでの観測結果を説明出来るとは言い難い。

③ 水分子の電離

Cassini や Chandrayaan の観測により月面から深さ 1-2 mm の所に水分子が存在する事が示唆された(Clark, 2009; Piter, 2009)。そこで水分子が熱脱離により月面から飛び出し、それが太陽光で H と OH に光解離され、さらにそれらが光電離されて電子が生成されると考えた。

月面から熱脱離して飛び出してくる水分子の割合を α とする。Ogawa と Shimazaki(1975)の研究結果を参考にして水分子の電離率を見積もり、電子の生成と太陽風の剥ぎ取りによる損失のバランスを考えると、月面付近に存在する電子密度は $1.6 \times 10^6 \times \alpha \text{ cm}^{-3}$ と求められる。しかし α の値は分かっていないため、水分子の電離により電離層が生成されるという結論を得るには至らない。

3. 観測手法

RSでは子衛星1機のみを用いる手法と子衛星2機を同時に用いた手法があり、私は後者を主に担当した。前者の手法では300回以上の観測により統計的な判断が有意であるが、宇宙空間や地球電離層の電子密度の寄与を避けることが出来ないため、月周辺の電子密度のみを確からしく計測することが難しい。一方後者では、Vstarの掩蔽中にRstarが地球

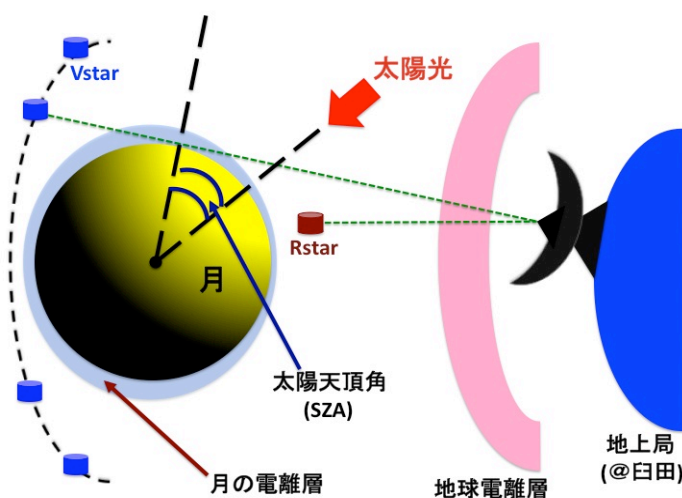


図1 電波掩蔽のイメージ

電離層をモニターし両者で得られた電子密度を互いに差し引くことで、月面近傍の電子密度のみを抽出することが出来る。しかしこの手法では、Rstar の装備の都合上用いる周波数帯が近い (S2 帯:2218 MHz と S3 帯:2287 MHz) ために観測ノイズが大きくなる。またアンテナのビーム径に 2 つの衛星が共に入っていないと、観測回数と観測領域が共に制限される。

4. 解析手法

① 位相変動量の計算

電圧値として記録された時系列データ(a)を高速フーリエ変換により複素周波数スペクトル(b)に変換する。(b)に窓関数(e)をかけてノイズを減らし、信号近傍の帯域を抽出する(c)。抽出した部分を逆フーリエ変換により複素信号(d)を作り、実部と虚部のセットから位相の変動量を逐次計算していく。

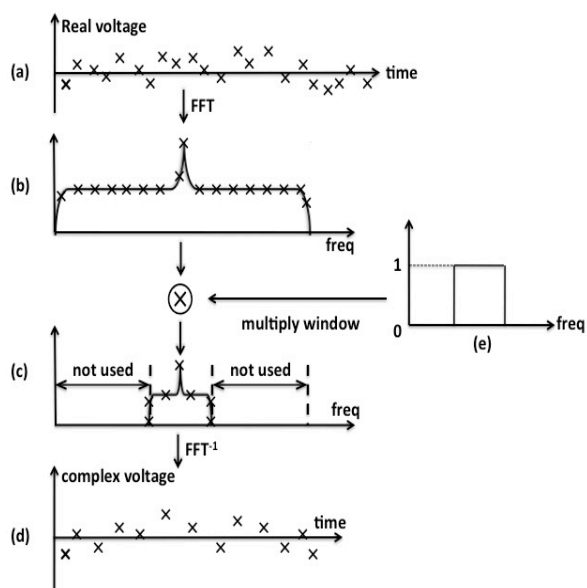


図 2 位相変動量の計算手順

② 位相差分と電子密度の計算

S2 帯と S3 帯の位相変動量を算出する(a)。その後これらの位相変動量からコラム電子密度を $Vstar \cdot Rstar$ について求め、さらに互いの電子密度を差し引いて月面近傍の電子密度算出する(b)。

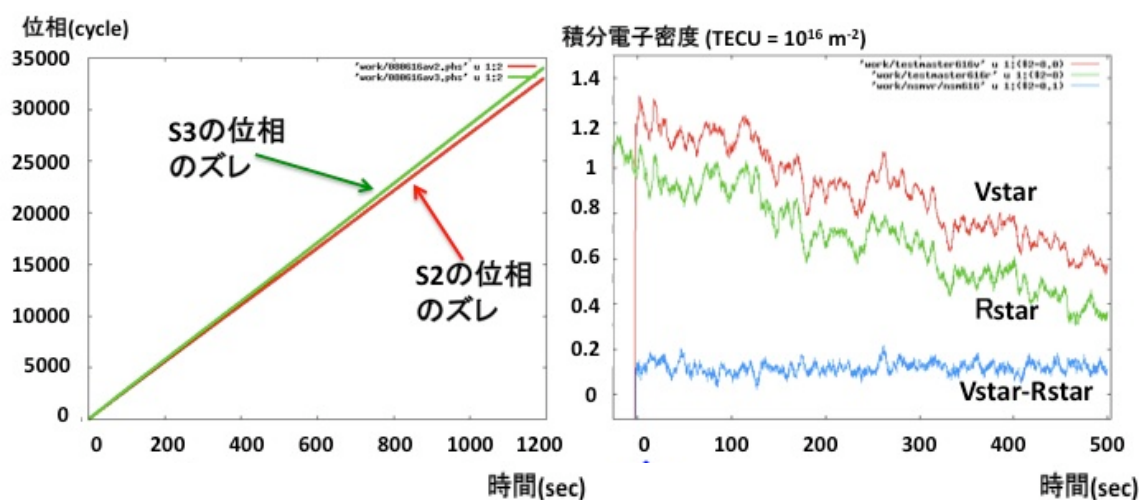


図 3 位相差分を電子密度の計算

③ 高度プロファイルへの変換

時系列データ(a)に対して、高度 30 km 以下に電離層があると仮定し、そこから 100 秒間の傾向を一次関数で fitting し外挿する(b)。そして元データから外挿分を差し引いて、それを高度プロファイルに変換する(c)。

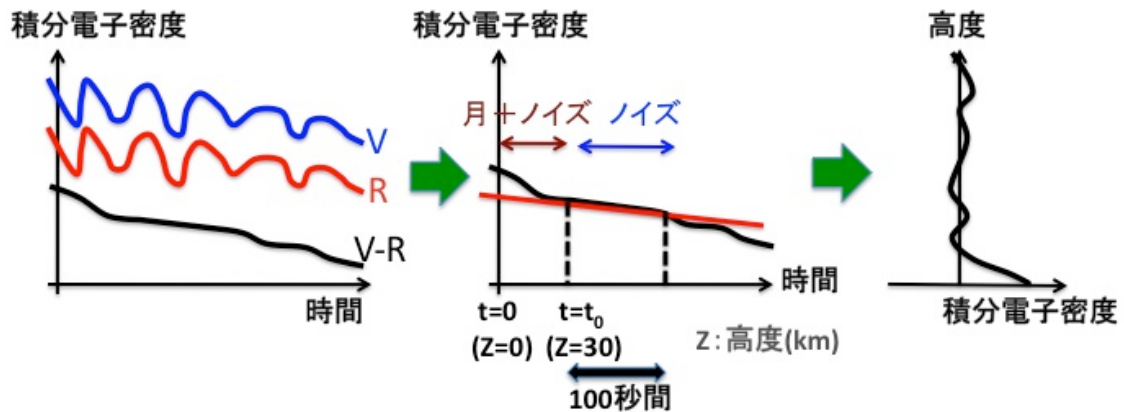


図 4 高度プロファイルへの変換

5. 解析結果

平均的には電子密度の増分は見られないが、例外的に 2008 年 8 月 8 日 (SZA = 74.4°) と 2008 年 6 月 16 日 (SZA = 82.2°) の 2 例において有意な増分が見られた。故に電離層は何かしらの条件の下で突発的に生成されると考えられる。

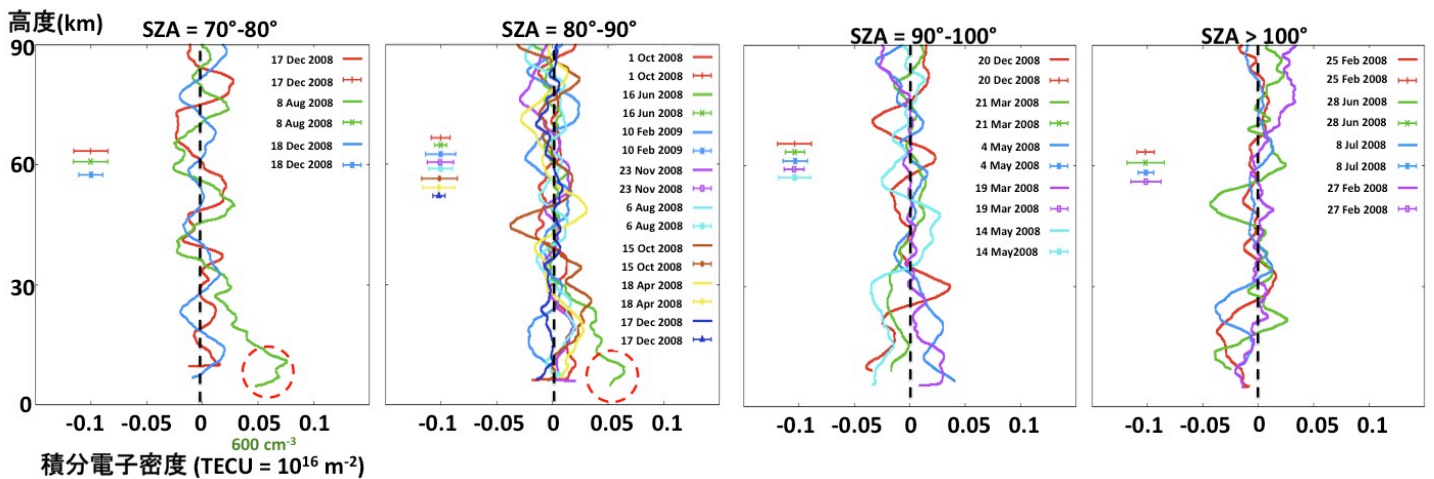


図 5 解析結果を SZA で分類した。横軸は積分電子密度 (TECU = 10^{16} m^{-2})、縦軸は高度 (km) である。また誤差棒は高度 30 km から 90 km における電子密度のばらつきを表す。赤い丸で囲った部分が顕著な電子密度の増分を示す。

6. 考察

① 地球磁気圏と月

月が地球磁気圏にあるとき、月は太陽風の影響を避けることができ、電子密度が増大すると考えた。しかし観測の間に月が地球磁気圏にあったのは、2008年3月21日と2008年10月15日の2回であり、この日はいずれも電子密度の増大は見られなかった。したがって月が地球磁気圏にあることが電子密度の増大に繋がる可能性は低いと思われる。

② 流星群衝突によるダストの大量噴出

しし座流星群のような大規模な流星群が月面に衝突し、ダストが大量に巻き上げられて電子密度の増大に繋がると考えた。しかし、大規模な流星群が確認された日と観測日が一致することは無かった。故に流星群の衝突により電子密度の増大を説明する事は出来ない。

③ 巨大な隕石が衝突したことによるダストの大量噴出

電子密度の増分が見られた観測の直前に、偶然巨大な隕石が観測点付近に衝突し、大量のダストが噴出して光電子放出につながったと考えられる。だが、巨大な隕石がいつ、どこに落ちたか、というデータは無いため決定的な結論を得るには至らない。

④ 水分子の局所的密集

電子密度の増分が観測された領域では、水分子が他の領域よりも多く存在しているとすると、それだけ生成される電子密度が増大すると考えられる。しかし、水分子の分布についての詳しいデータはまだ無いため、推論の域に留まる。

⑤ 残留磁場による光電子の保護

月には固有磁場はないものの、残留磁場が存在するという事が知られている。従って、電子密度の増大を観測した地点の残留磁場が他の領域に比べて強く、それが生成された光電子を保護すると考えた。

図6は高度100 kmにおける残留磁場の強度を常用対数で示したものである。これを見ると電子密度の増大が確認された地点の残留磁場は、他の領域に比べて弱い事が分かる。したがって、残留磁場により光電子が保護される可能性は

低いと思われる。

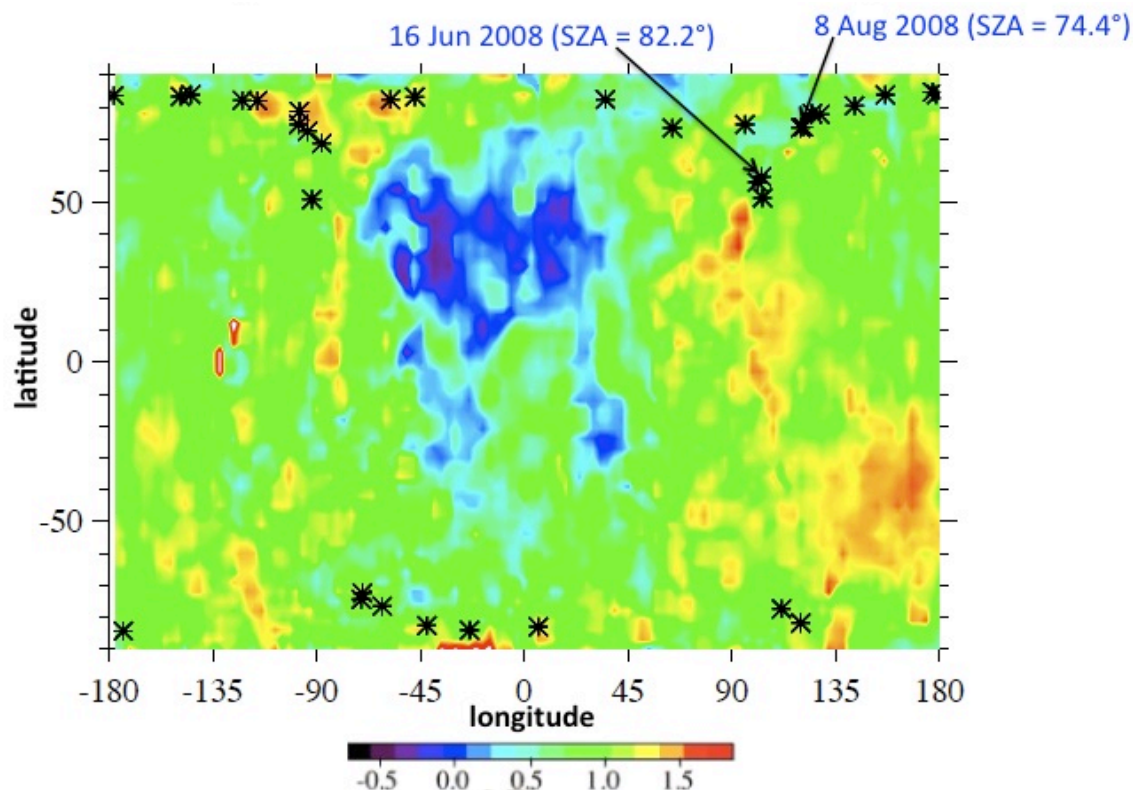


図 6 高度 100 km における残留磁場の強度を常用対数で表示したもの(単位は nT)。黒い印は観測点を表す。

7. まとめ

子衛星 2 機を用いた世界初の同時観測により月の電離層の観測を行った。その結果、観測した領域では平均的には電子密度の増分が見られなかった。これは Luna mission とは異なる結果である。しかし 2 例だけ例外的に電子密度の増分が見られた。よって、SZA の大きい昼側では月の電離層は突発的に生成すると考えられる。

この突発的に生成する要因として巨大隕石の衝突によるダストの巻き上げや水分子の局所的な密集が考えられるが不確定要素がある。これらについては今後の探査により得られることを期待する。そして同時観測を将来行う上で、S 帯と X 帯を利用して観測ノイズを十分に小さくし、かつ低緯度の観測を行うことで、月の電離層の有無に決定的な結論を下すことが出来ると確信している。

参考文献

- Abbas, M. M., D. Tankosic, P. D. Craven, J. F. Spann, A. Leclair, and E. A. West, 2007, Lunar dust charging by photoelectric emissions, *Planetary and Space Science*, **55**, 953-965.
- Andrew, B. H., N. J. B. A. Branson, and D. Wills., 1964, Radio observation of the Crab nebula during a lunar occultation, *Nature*, **203**, 171-173.
- Bauer, S. J., 1996, Limits to a lunar ionosphere, *Anzeiger Abt. 2*, **133**, 17-21.
- Clark, R. N., 2009, Detection of adsorbed water and hydroxyl on the moon, *Science*, **326**, 562-564.
- Johnson, F. S., 1971, Lunar atmosphere, *Rev. Geophys. Adv Space Phys.*, **9**, 813-823.
- McCoy, J. E. and D. R. Criswell, 1974, Evidence for a high altitude distribution of lunar dust, *Proceeding of the 5th Lunar Conference*, **3**, 2991-3005.
- Ogawa, T. and T. Shimazaki, 1975 Diurnal variations of odd nitrogen and ionic densities in the mesospheric and lower thermosphere-Simultaneous solutions of photochemical-diffusive equations, *Journal of Geophysical Research*, **80**, 3945-3960.
- Piter, C. M., 2009, Character and spatial distribution of OH/H₂O on the surface of the moon seen by M 3 on Chandrayaan-1, *Science*, **326**, 568-572.
- Vyshlov, A. S., 1976, Preliminary results of circumlunar plasma research by the Luna 22 spacecraft, *Space research*, **16**, 945-949.