

かぐや電波科学を用いた月の電離層の観測

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³⁾・野田 寛大³⁾・花田 英夫³⁾・小山 孝一郎⁴⁾・Alexander Nabatov⁵⁾・二穴 喜文⁶⁾・齊藤 昭則⁷⁾・安藤 紘基⁷⁾

1) 東大理, 2) ISAS/JAXA, 3) 国立天文台, 4) 台湾国立中央大学, 5) Ukrainian Academy of Science, 6) Swedish Institute of Space Physics, 7) 京大理

1. 背景

1950～1960年代に行われた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年代の旧ソ連の月周回ミッション Luna19,22での電波掩蔽観測により、月面の日照側において高度数十 km まで広がり最大電子密度が 1000 cm^{-3} に達する電離層の存在が示唆された。しかし太陽風によるイオンの剥ぎ取り効果や月の中性大気の稀薄さ故に、電子密度はおよそ 1 cm^{-3} 理論的に見積もられており、また月の電離層の存在を否定する観測結果もある。そのため、月に電離層が存在するという考えは広く受け入れられていない。もしも月に電離層があるとなれば、太陽風による剥ぎ取り効果や電離ガスの起源についての我々の認識が不十分であることを意味するため、月の環境科学に大きなインパクトを与える事になる。「かぐや」電波科学では、子衛星である Vstar（おうな）と Rstar（おきな）を用いて月の電離層の観測を行いこの問題に決着をつける事を目的としている。

2. 電波掩蔽法

2機の子衛星はいずれも重量 45 kg、大きさ $1 \times 1 \times 0.65 \text{ m}$ のスピン安定衛星であり、軌道はほぼ極軌道である。Vstar の初期の近月点高度は約 100 km、遠月点高度は約 800 km で、Rstar の初期の近月点高度は約 100 km、遠月点高度は約 2400 km である。月は常に決まった面を地球に向けているため、電波掩蔽で観測できる領域は月の表側と裏側の境界付近に限られる。また衛星の軌道が極軌道であることから観測点の多くが北極域と南極域に集中する。

衛星は共通の発振器から作られた位相がコヒーレントな異なる周波数の電波を同時に放出し、それらを長野県の臼田宇宙空間観測所で同時に受信する（図1）。

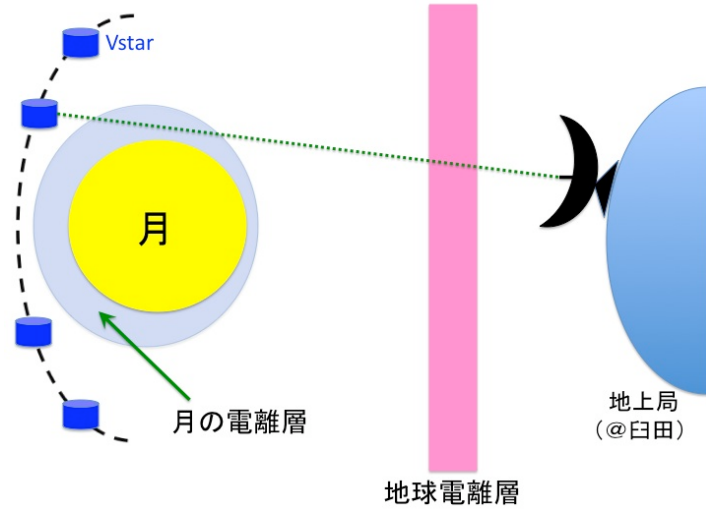


図1 子衛星1機のみを用いる場合の観測の概念図

これら2波が荷電粒子に対して異なる感度を持つことを利用して電離層の寄与だけを抽出する。時刻 t における位相のシフト量は、送信周波数が f_1 と f_2 であるような2波それぞれについて次のように与えられる。

$$\Delta\phi_1(t) = \frac{\alpha}{c f_1} N_e(t) + \beta(t) f_1, \quad (1)$$

$$\Delta\phi_2(t) = \frac{\alpha}{c f_2} N_e(t) + \beta(t) f_2, \quad (2)$$

両式の右辺第2項は搭載発振器の出力周波数の変動、軌道予測値の誤差、地球の中性大気の影響など送信周波数に比例する成分をまとめたもので、これらの比例係数の和を β と表している。ここで、

$$\alpha = e^2 / 8\pi^2 \epsilon_0 m_e \sim 40.3 \text{ m}^3 \text{ s}^{-2}$$

であり、 e は素電荷、 ϵ_0 は真空中の誘電率、 m_e は電子質量、 c は光速、 $N_e(t)$ は電波経路上の積分電子密度である。すると位相差分 $\delta\phi(t)$ は

$$\delta\phi(t) \equiv \Delta\phi_1(t) - \frac{f_1}{f_2} \Delta\phi_2(t) = \frac{\alpha}{c} f_1 \left(\frac{1}{f_1^2} - \frac{1}{f_2^2} \right) \cdot N_e(t). \quad (3)$$

のように表される。よって位相差分から積分電子密度として得ることができる。積分電子密度 $N_e(t)$ には月の電離層に加えて地球電離層や太陽風プラズマも寄与することに注意する必要がある。

3. 子衛星 1 機 (Vstar) による観測

3. 1 手法

この手法では地球電離層変動や宇宙空間の電子密度変動の影響を陽に取り除くことができず、月の電離層成分のみを抽出することが難しいが、ミッション期間中に 200 回以上の観測機会があり統計的判断が可能である。観測に用いる周波数は 2218 MHz と 8456 MHz である。

昼側の観測点における積分電子密度の時系列データにおいて、電波経路の月面からの距離が 30 km 程度より小さいところで積分電子密度が増加する傾向が見られた。そこで高度 30km 以下に電離層があると仮定し、それより上の 50 秒間の線形トレンドを月面まで外挿する(図 2 a)。この 50 秒という時間は電波経路が高度 0 km から 30 km までを横切るのにかかる典型的な時間である。その後、元データと線形トレンドとの差分をとって高度プロファイルに変換する(図 2 b)。

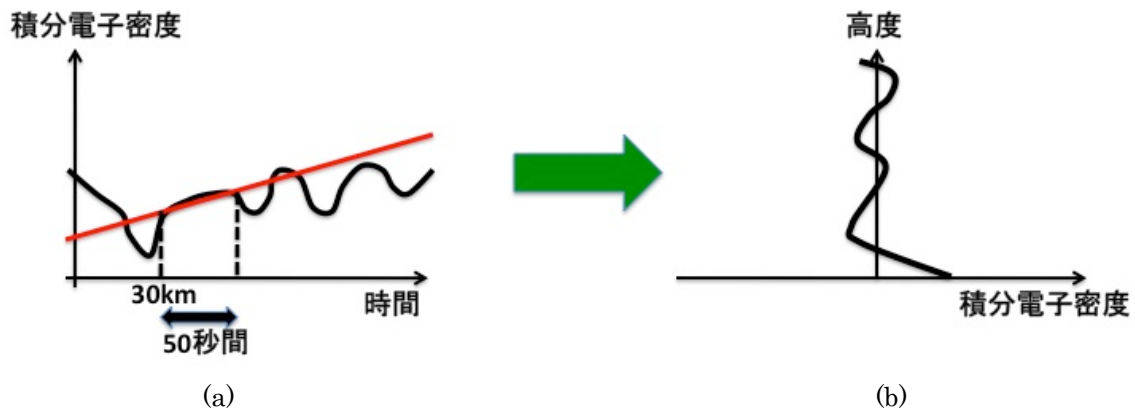


図 2 子衛星 1 機を用いる観測において積分電子量の
の時系列から月電離層成分を取り出す手順

3. 2 結果

図 3 は太陽天頂角 (以下 SZA) が 40° — 60° の領域での 10 回の観測結果をプロットしたものである。SZA $< 40^{\circ}$ にも SZA = 16° における観測が一つあるが、高度 0—30km を横切るのに約 4 分を要しており地球電離層の変動の影響を大きく受けていたため、これを除外した。図 3 では総じて高度 30km 以下において電子密度の上昇が見られる。ここでの 0.02—0.05 TECU (TECU= 10^{16} m^{-2}) 程度の増分は旧ソ連の Luna ミッションでの月電離層の観測結果と同程度である。

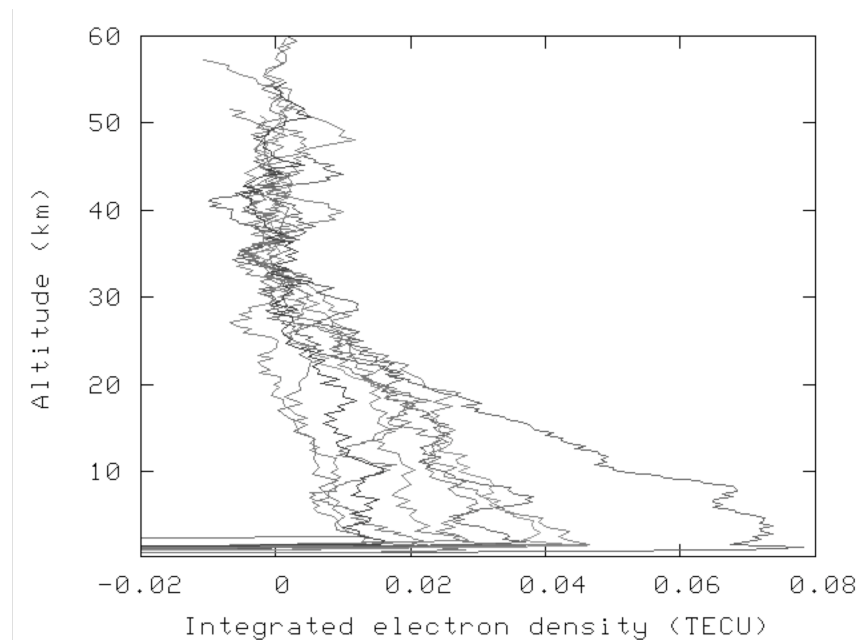


図3 子衛星1機のみを用いた場合の観測結果。 $\text{SZA}=40\text{--}60^\circ$
の10回の観測結果をプロットしたもの。

SZA 依存性を図4に示す。全体的にばらつきが大きく積分電子量は0 TECU の周囲に正負の値をもって分布しているが、これは地球電離層の変動を除きされていないためと考えられる。唯一、 $\text{SZA}=40\text{--}60^\circ$ でだけ有意な正偏差がある。このことから SZA が小さい領域で電離層が存在する可能性が高いと言えそうであるが、この領域で観測点数が少ないこと、全体的に誤差が大きいことから、引き続き観測データの蓄積と解析手法の改良を行っている。

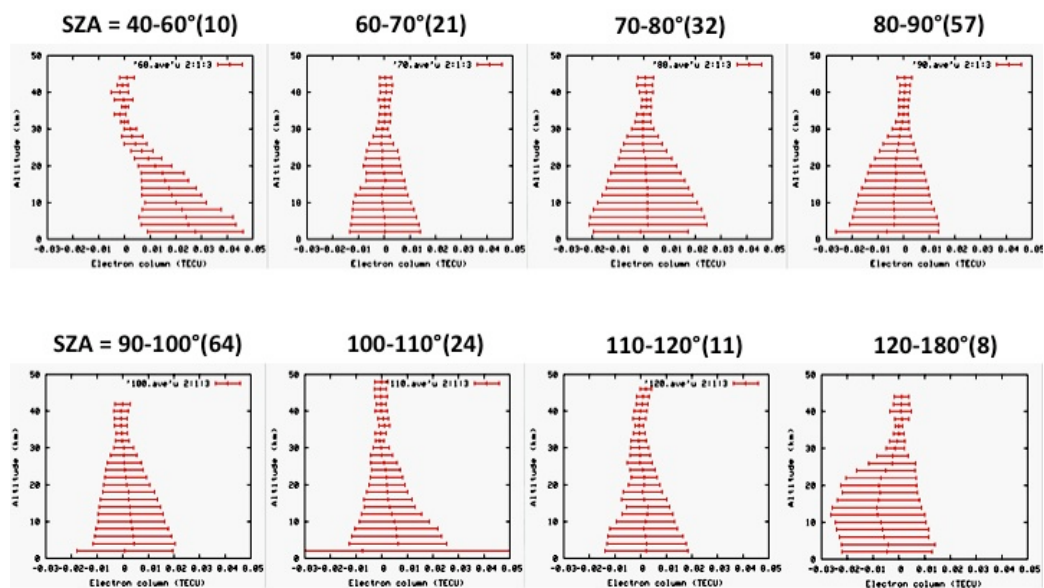


図4 子衛星1機のみを用いた場合の観測結果。SZA によって8領域に分類して、各高度での平

均値と、標準偏差で定義した誤差棒をプロットした。括弧内の数字は観測点数。

4. 子衛星 2 機による観測

4. 1 手法

Vstar の掩蔽中に Rstar が地球電離層の変動をモニターするという世界でも前例のない方法を試みた (図 5)。このとき 2 つの子衛星から送り出される電波は地球電離層や月・地球間の空間において近いところを通るため、地球電離層や宇宙空間の電子密度の影響をほぼ取り除く事が出来る。しかし Rstar の装備の都合上、位相がコヒーレントな 2 波として利用できるのが周 2218MHz と 2287MHz という近接した周波数に限られるため、電子密度に対する位相差分の感度が悪く得られる電子密度の計測誤差が大きくなる。また地上局のアンテナのビーム径に 2 つの衛星が同時に入っていないなければならないために観測できる機会が前者に比べて少なく 20 回程度である。

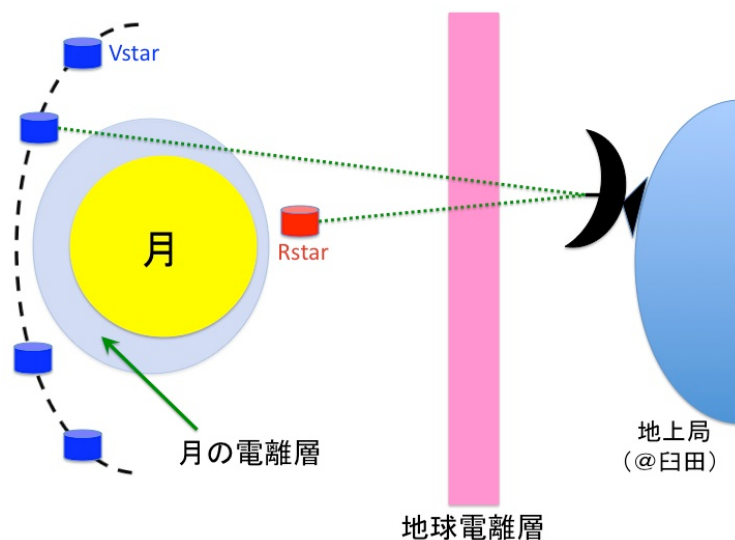


図 5 子衛星 2 機を用いる場合の観測の概念図

Vstar と Rstar それぞれの電波経路上の電子密度の時系列を求め、それらの差をとる (図 6 a)。この時点で月電離層以外の寄与は除かれていることが期待されたが、実際には月面から遠く離れた場所においても積分電子密度は一定値にならず大きな変動が観察された。その変動の一部は記録した信号に含まれるノイズに起因すると思われるが、詳細は現時点では不明である。そこで子衛星 1 機のとときに同様に高度 30 km 以下に電離層があると仮定し、そこから上側の 100 秒間の線形トレンドを月面まで外挿する (図 6 b)。そして元データと線形トレンドとの差分をとり高度プロファイルに変換する (図 6 c)。

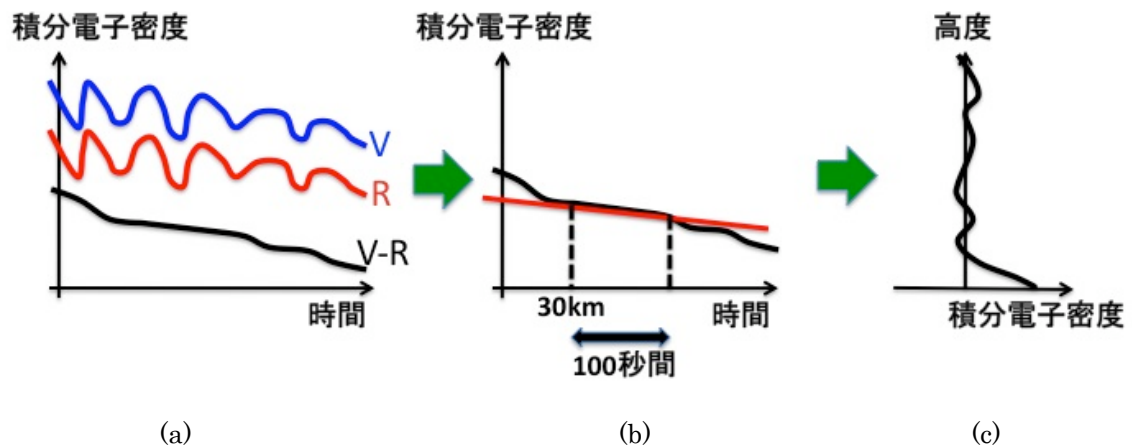


図6 子衛星2機を用いる観測において積分電子量の
時系列から月電離層成分を取り出す手順

4. 2 結果

結果を SAZ によって分類したものを図7に示す。 $SAZ < 70^\circ$ の観測データはない。夜側 ($SAZ > 90^\circ$) では全ての観測が低高度で0 TECU 付近で正負に分布しており、月の電離層が存在する可能性は低いと思われる。一方、 $SAZ=70-90^\circ$ の領域では、電子密度が月面付近で有意に増加しているように見えるものが2例ある。この事から何らかの条件下では昼側の SAZ が比較的大きな領域でも月の電離層が存在する可能性がある。しかし各データのばらつきが激しく誤差はおよそ 0.01—0.02TECU ぐらいであるために、より慎重な議論が必要である。

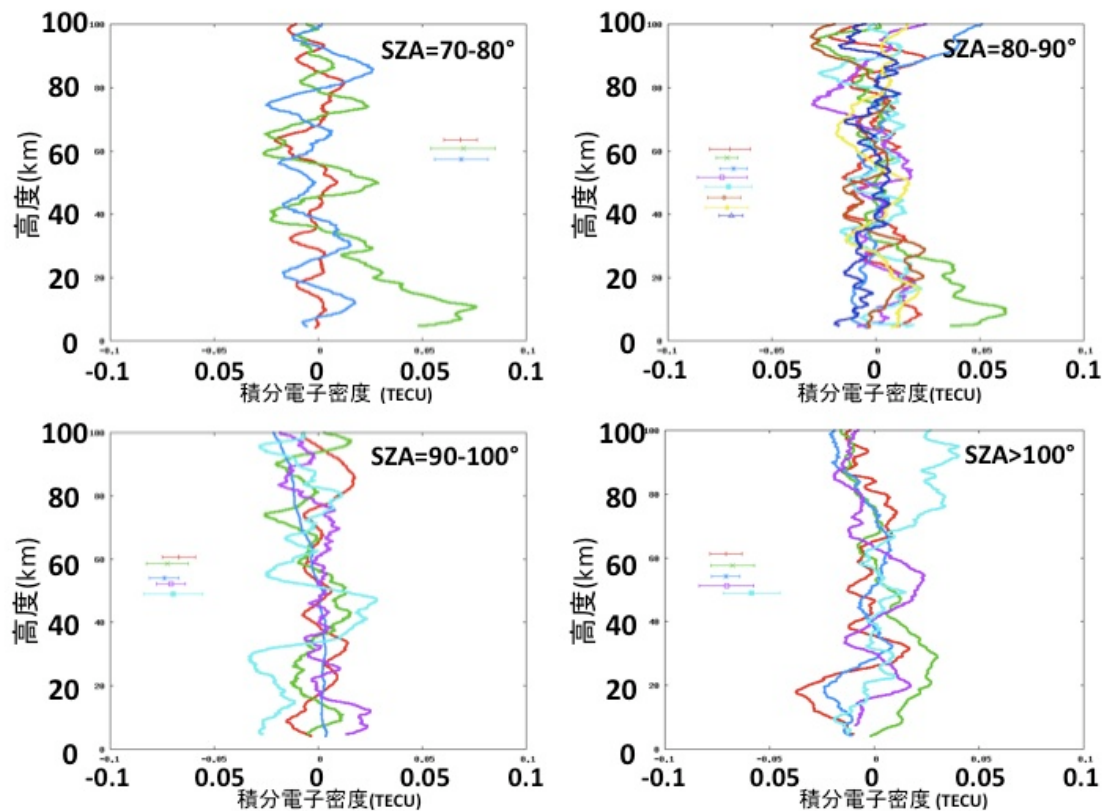


図 7 子衛星 2 機を用いた場合の観測結果。図中の誤差棒は、高度 30 km 以上の 100 秒の線形トレンド推定範囲の標準偏差をそれぞれの観測について示したものの

3. まとめと今後の展望

子衛星 1 機のみによる観測では SZA が小さい領域で月面付近での電子密度の上昇が見られた。また子衛星 2 機を用いた観測では昼側の SZA が比較的大きいところで電子密度の上昇が見られる場合がある。 今後の展望としては月の電離層の存在についての統計的かつ理論的なアプローチを行いたい。前者については SZA、緯度、太陽風磁場についての関連性を現在調査中である。後者については生成メカニズムを考え理論モデルの構築を目指している。