MAUEN

Mars Atmosphere and Volatile EvolutioN (MAVEN) Mission

第43回火星勉強会

Mahaffy et al., 2014, The Neutral Gas and Ion Mass Spectrometer on the Mars Atmosphere and Volatile Evolution Mission, Space Science Review, doi:10.1007/s11214-014-0091-1

2015年3月10日(火) 松永 和成

Abstract



- The Neutral Gas and Ion Mass Spectrometer (NGIMS)は、火星の上層大気の組成、構造、変動を 調べる。
- 中性大気と電離圏の観測や火星大気圏への太陽風へのインプットを調べるため、他の観測機器と補完し合う。
- 大気散逸率や火星大気進化モデルへのインプット を定量的に求めることが目的である。
- NGIMSは、火星表面の活性・不活性の中性粒子や MAVENの軌道(125-500km)周囲のイオンをa dual ion source and a quadrupole analyzerで観測する。

NGIMS概観



Mars Atmosphere and Volatile Evolution Mission





- EETA 79001:キセノンを含むガラス
 - 太陽からの強力な紫外線放射によって、水素の豊富な大気中で起き たhydrodynamic escapeの特徴かもしれない
- 隕石の重爆撃期においても、たくさんの大気が逃げた。
- 散逸過程
 - スパッタリング、熱的散逸、解離性再結合、風化による表面の散逸、 液体による炭酸塩の生成
- ETA89001のガラスに含まれる同位体測定や表面の炭酸塩の 観測(数箇所)は、表面での貯蔵と比べて大気散逸のほう が支配的であることを示唆している。
- キュリオシティによる観測 (大気中の重同位体が多い)
 - CO₂内のδ¹³Cが46‰、δ¹⁸Cが48‰
 - ³⁶Ar/³⁸Ar比が**5.2**
 - 大気中の水のD/H比がSMOWの~5,000‰





- Neutral mass spectrometersを搭載したViking 1,2のエアロシェルによって、120-200kmの火星上層大気成分が初めて観測された。
 - CO₂,N₂,Ar,CO,O₂,O,Noの観測
 - 十分に混合された大気
 - 上層大気の温度の違い
 - ¹⁵N/¹⁶N比は、地球の~1.75倍
 - $0_2^+, CO_2^+, O^+, CO^+, N_2^+$ の計測
- Phobosでも、大気散逸に関係のあるイオンの観測が行われた。
- MGSでは加速度計、電波掩蔽による観測が行われた。

- ~135kmと~112kmに電子密度のピーク

• Odessyは、圧力、温度、波構造、太陽のインプットによる大 気の変動、ダストローディングを観測した。



- MEXでは、ASPERA-3(イオン、電子)、SPICAM(紫外・近赤 外分光)、MaRS(電波掩蔽)、MARSIS(電子密度)という各種 機器による観測が行われている。
 - MAVENとは軌道傾斜角と近火点が異なる。
 - ASPERA-3では、最大40keV/chargeのエネルギーの中性粒子、イオン、電子の分布の測定が行われた。
 - SPICAMによる、紫外線・赤外線のnadir、limb、sun and star modesでの観測が行われた。
 - MAVENとのコラボレーションが期待できる。



- 中性粒子とイオンのより詳細なプロファイルを得ることが 期待される。
- 季節的なダストストームや太陽活動に対する大気の応答特 性を明らかにできる。
- Deep dipキャンペーン(~125-500km)においては、十分 に混合した中性大気領域や電離圏のpeak charged particle regionの観測が期待される。
- Homopauseの上からexobaseの上までの中性粒子を観測し、垂直分布を調べることが要求されている。この観測によって、中性大気の温度とスケールハイトが求まる。
- Establish the structure and composition of the upper neutral atmosphere by securing density profiles of He, N, O, CO, N₂, NO, O₂, Ar, and CO₂ along the spacecraft track
- Measure isotope ratios such as ${}^{13}C/{}^{12}C$, ${}^{18}O/{}^{16}O$, ${}^{15}N/{}^{14}N$, ${}^{40}Ar/{}^{36}Ar$, ${}^{38}Ar/{}^{36}Ar$
- Secure profiles of thermal ions O_2^+ , CO_2^+ , NO^+ , O^+ , CO^+ , C^+ , N_2^+ , OH^+ , and N^+



- PFP (STATIC, SEP, SWIA, SWEA, LPW, MAG)とRemote-Sensing (IUVS)とNGIMS
 - 大気散逸と太陽からのエネルギーインプットへの応答性を調べるために、広い エネルギーレンジでのエネルギーインプットと大気パラメータを調べる。
- NGIMS+LPW
 - LPWからtotal electron densityを求めることで、NGIMSに入るion flowの減 衰を引き起こすion driftが起きたときのtotal ion densityを求める。
- NGIMS+IUVS
 - IUVSは、近火点付近ではlimb撮像を、遠火点ではdisc mapsの撮像を行う。また、高高度でのD/H比とキュリオシティのSAMによって観測された低高度大気のD/H比との比較も行う。
 - IUVSの全球図は、NGIMS、LPW、STATICによる(衛星軌道に沿った)観測を補 完する。
- NGIMS + STATIC
 - STATICとNGIMSは同エネルギー範囲の熱的イオンの観測するが、NGIMSの単位質量あたりの分解能が同位体の判別を可能にする。
 - STATICは散逸していくイオンやピックアップイオンといったsuprathermal ionを測る。

NGIMSの搭載場所と座標系





火星勉強会





- NGIMSのmass spectrometerとcontrol electronicsは、Lunar Atmosphere and Dust Explorer (LADEE) missionのNeutral Mass Spectrometer (NMS)とよく似ている。
- これまでに地球観測衛星で培われた技術が使われている。
- Quadrupole mass analyzer and detector systemsは、金星や火星の上層大気、木星の濃い大気、タイタンの大気を調べるために使われたものの改良型である。
- 直近の先行機器は、Cassini搭載のIon and Neutral Mass Spectrometer (INMS)とCONTOUR-NGIMS、Comet Rendezvous Flyby Mission (CRAF)に搭載予定だったNGIMSである。
- CONTOUR-NGIMSとCassini INMSで試されたElectrostatic 90 degrees deflectorは、二つのソースからquadrupole mass analyzer ヘイオンを多重化させる。
- CONTOUR、LADEE、Cassini INMSからの改良によって、MAVENの NGIMSのnominal sensitivityは、窒素に対して > 10⁻³ (counts/sec)/(part/cc)という感度を得ることができた。

NGIMSの内部構造





	Neutral gas sampling	 (1) open source/molecular beaming (2) closed source Thermal and suprathermal through open source Electron beam ionization 		
	Positive ion sampling			
ctrons	Ion source			
	Electron energy	75 eV		
	Ion source sensitivity	$\sim \times 10^{-3}$ counts/sec/part/cc for argon		
	Mass range	2–150 Da		
	Detector system	Detector pulse counting electron multipliers		
	Example scan modes	(1) neutral gas mode, (2) ion sampling		
小豆研究会		mode, (3) fractional scan mode in 0.1 amu steps		
	Deployment mechanism	Metal ceramic breakoff cap, pyrotechnically activated		
入午水水元				

NGIMSの電気回路





火星勉強会

Closed Ion Source



- Closed ion sourceは、地球の上層大気の探査の早い時期に開発された。
- Electron impact hot filament ion sourceと小さな開口部を持ち、衛星周 囲の大気を採取する球状のチャンバーからなる。
- ガスが開口部からclosed ion sourceに入り、質量依存しているRAM方向の 密度成分がthermalizeされる。
- イオンの出口開口部分から放出してしまう微量のガスは無視すると、容器からclosed ion sourceへ出てくる粒子iの密度は、

$$n_{S,i} = n_{a,i} \left(T_{a,i} / T_{S,i} \right)^{\frac{1}{2}} \left(exp\left(-S_i^2 \right) + \pi^{\frac{1}{2}} S_i [1 + erf(S_i)] \right)$$

$$S_i = V \cos(\alpha) / c_i, c_i = \left(2kT_{a,i} / m_i \right)^{\frac{1}{2}}$$

と見積もることができる。

n:密度、T:温度、a:ambient value、S:source value、V:衛星基準座標系に対する見かけの大気のバルク速度、 α :開口部に対する法線と衛星の速度ベクトルの間の角度、 c_i :最も適当な周囲のガス粒子の速度、k:ボルツマン定数

- 標準のclosed ion sourceの状態であれば、ほぼ2πステラジアンでガスを 取得し、回転する衛星上でほぼ50%のduty cycleをする予定である。
- NGIMSの観測期間中は、MAVENは三軸固定である。

Closed Ion Source



- Closed ion sourceは、地球の上層大気の探査の早い時期に開発された。
- Electron impact hot filament ion sourceと小さな開口部を持ち、衛星周 囲の大気を採取する球状のチャンバーからなる。
- ガスが開口部からclosed ion sourceに入り、質量依存しているRAM方向の 密度成分がthermalizeされる。
- イオンの出口開口部分から放出してしまう微量のガスは無視すると、容 器からclosed ion sourceへ出てくス粒子iの密度は Antechamber





- Open ion sourceは、closed ion source内の衝突によって破壊されたり、変形した0やNを測定する。
- Open ion source内では、collimating aperturesが粒子の中性ビームを形成 する。そのビームは、6-coil filament (hot, 97 % tungsten, 3 % rhenium, 0.005'') から放射された電子によってできたcrossed electron beamを通過 する。
- 一部の粒子はイオン化し、electrostatic deflector を経て、quadrupole mass analyzerとpulse counting detectorへ入射する。
- 電子ビームからできる低エネルギーのthermalized ionsを取り除くための 部分的に薄い金属グリッド由来のバイアスによって、 thermalized ionsが 部分的にrejectされる。
 - 衛星速度が4.15km/sで、機器フレームが0.89eV/amuのときには、重いthermalized ionsは効果的にrejectされ、He+のような軽いイオンは効率が悪くなる。
 - 周囲のイオンは、イオン化領域に達する前に、偏向電極によって吸入口より一掃される。
- NGIMSの稼働中は、electrostatic deflector 内のバンドパスが約25eVの電 圧設定を行う。
- イオン化領域内の中性粒子に対するopen ion sourceの効率性は、closed source内のものとほぼ同じである。(closed source内でのRAM enhancementがないとき)



- Open ion sourceは、closed ion source内の衝突によって破壊されたり、変形した0やNを測定する。
- Open ion source内では、collimating aperturesが粒子の中性ビームを形成 する。そのビームは、6-coil filament (hot, 97 % tungsten, 3 % rhenium, 0.005'') から放射された電子によってできたcrossed electron beamを通過 する。
- 一部の粒子はイオン化し、electrostatic deflector を経て、quadrupole mass analyzerとpulse courting detector へ ¹ はする Antechamber



Quadrupole Mass Analyzer and Detector



Quadrupole Mass Filter

- Mass analyzerは、四つのhyperbolic quadrupole rodsからなり、それらは平行 に配置されている。radio frequency (RF) とstatic (DC) voltagesと組み合わせ ることで、質量分析ができる。
- 電位V_{dc} + V_{ac} cos(ωt)と-(V_{dc} + V_{ac} cos(ωt))は(ω:V_{ac}の周波数)、反対側の二つのrodペアにも適用でき、その結果、2次元のquadrupole fieldは、

 $\varphi(x, y) = (V_{dc} + V_{ac} \cos(\omega t))(x^2 - y^2)/{R_0}^2$

と表される。(*R_o*:z軸(対称)から一番近いrod表面への距離、x,y:z軸と隣接した rodへの最短点に交差した軸)

- 2-19.5(19.5-150.5)Daの質量範囲では3.0(1.4)MHzの周波数が使われる。
- ソフトウェア制御によって、温度や周波数ずれを相殺するRF内の小さな振幅の変化が作られる。この修正によって機器稼働温度の範囲が-20℃から+40℃に保たれる。
- V_{dc}は、別の質量依存するバイアス電圧(V_{bias})を持つ。質量ピーク幅を減少させ、質量分解能を高めたRFの状態で、イオンが質量分解に十分な時間(サイクル)を費やすことができるように調整しながら、バイアス電圧を調節する。

Quadrupole Mass Analyzer and Detector



Detector Assembly

- イオン収束レンズシステムと二つのredundant off-axis continuous channel electron multipliersから構成される。
- イオン収束レンズシステムは、四つのレンズから成り、それらのレンズは quadrupole analyzerとmultipliersの間に位置している。電圧範囲は-200Vから 550Vで、analyzerからdetectorにイオンが収束するようにレンズが使われて いる。
- Photonis model 4870-channeltron electron multipliersは、ゴダードで組み立 てられた。
- NGIMSのmultipliersは、平均ゲインが~5×10⁷、数百万カウント/秒、バック グラウンドノイズが1カウント/分より低い時にsaturateする。
- Multipliersは、quadrupoleの軸外に位置しており、偽のフォトンや中性子の 発見を避けている。



- 機器の反応を評価するために、calibration gas reservoir を組み込まれている。
- N₂, CO₂, Ar, Kr, Xeがcalibration用のガスとなっている。
- Ionization regionのゲッターがすぐ近くにあるため、機器 をピンチオフする前にキャリブレーションするのは難しい が、N₂, CO₂でcalibrationすることで、calibration factor が導出できる。
- 500km以下の観測時に、mass spectrometerに残留ガス が入らないように、calibration gas reservoirは二つのマ イクロバルブで封止されている。
- Calibrationは数週間のインターバルで遠火点付近で行われる。
- 7-12ミクロンの管を使ってNGIMSのclosed sourceにガス が注入される。(イオン源に1×10⁻⁶ Torrの圧力)





- NGIMSの主電源は、3Aのresettable circuit breakerと通常は28V DC (動作範囲 22V DC-36V DC)で使われるバスからなる。
- ヒーターは三つ(Bakeout, HTR1, HTR2)ある。
- NGIMSの大部分の電子機器は、Main Electronics Box (MEB)に搭載されている。
 - PS/HV—Power Supply/High Voltage
 - CDH-Command Data Handling
 - CTL-Control
 - IF- Ion Focus
 - CS—Closed Source
 - OS-Open Source
- Radio frequency (RF)とDetector (DET)はquadrupole mass analyzer housingに取り付けられている。



- NGIMSは、高度500km以下になると10個のシーケンスフェイズに入る。
- それぞれのフェイズにおいて、m/zの値とイオン源を選択するテーブ ルを介して、detector saturationを避けるために信号を減衰させる。
- 1/10 amuの分解能による観測は、機器のバックグラウンドを観測するために低高度を通過する前後で使われる。
- Calibrationモードは、通常のサイエンスシーケンスの一部ではないが、
 機器のパフォーマンスの経年変化を調べるために行われるときがある。
- 高度500km以上では、機器はスタンドバイモードのままである。





- NGIMSは、受動的な熱設計で、内部の熱を逃がすためにMEBの三側面と QMSの一側面にSilver Teflon coated radiatorsがついている。
- 残りの機器は、Germanium Black Kapton MLI blanketsで覆われている。 (開口部は除く)
- 通常のサイエンス軌道は約4.5時間である。大部分の機器の稼働温度域は、-20℃から+50℃である。
- NGIMSは、スタンバイモード(20W)が一軌道の大部分を占める。サイエンスモード(40W)は近火点を中心に24分(最大で1時間)で、フィラメントを温める。サイエンスモードに先立ってcalibrationピリオド(37W)がある。
- Deep dipキャンペーンでは、近火点が125kmになり、RAM方向の表面が aero heatingで温められる。(モデルでは10分毎に0.065W/cm² 増える)
- Survival mode(-30°Cから+65°C)
 - NGIMSのパワーは低下し、Base Plate上のsurvival Kapton strip heatersが使われる。
- Decontamination mode
 - Ion Source Coverが180℃以上になると、Inconel sheathed flexible heatersで溜まった混入物質を 排除する。

Thermal Balance and Thermal Vacuum Tests





- Deep dip時に予測される最悪の熱条件での実験の結果、MEBのCDH部 分が34℃に届いた。しかし、稼働温度範囲の-20℃から+50℃を満た していた。
- 熱真空試験においては、MLI blanketingにより温度の変遷が早く行われた。
- 極熱、極寒試験においても特筆するような問題は起きなかった。

Thermal Balance and Thermal Vacuum Tests





 Comprehensive performance tests (CPT)においても全動作温度範囲に わたって安定した質量ピークを示した。(0.1Da scan)

NGIMS Operation and Calibration



The Neutral Gas and Ion Mass Spectrometer on MAVEN



Fig. 8 NGIMS operational modes are illustrated and described in the text

NGIMS Operation and Calibration







- Neutrals modeは、中性風によるopen sourceの信号の減衰を修正する ために、open sourceとclose sourceが交互に表示される。
- 図のボックスは30ミリ秒の積分期間で、全測定は約1秒程度。



- 高度~5000kmに達すると、NGIMSのスタンバイ状態が終了し、サイエンス運用が始まる。
 - filament/multiplierのペアの電源オン
 - センサ内の化学ノイズを評価するためにバックグラウンドスペクトル を測定
 - バックグラウンドスキャンの完了後、機器が熱平衡に達するまで約50
 分間保持
 - 500km以下になったらウォームアップフェイズ終了
 - Mode (neutrals or ion), source (open or close) に適切な電位設定、 マステーブルに従って必要な質量スペクトルを取得
 - Scanning sequenceの変更も可能(特定の高度と予想される信号レベル にあわせて)
- 衛星が近火点に近づいて、再び500km以上に達するまでの25分間にNGIMSの観測が行われる。(再びスタンバイ状態へ)
- ミッション期間中、NGIMSチームは火星で観測された大気状況に 合わせたNGIMSの設定ファイルを作成し、uplinkする予定。

Telemetry



- 二つの異なる方法によるデータ取得
 - Instrument Team Facility (ITF)によるreal-time dataflow
 - post-event file retrieval
- ITFで生データが解凍され、様々な専用のGSEソフトウェア ツールおよびデータベースによって処理される。
- NGIMSテレメトリに含まれる科学関連パケットとハウス キーピングデータからキャリブレーションが行われる。
- データセットは、MAVENチームによって使用するために、 データベースに置かれる。



Fil #	Emission (µA)	CEM#	Species	EI cross section ^b (A°) ²	Absolute Sensitivity (cts/s)/(part/cc)	Normalized Sensitivity (cts/s)/(part/cc)/(A°) ²
1	250	1	⁴⁰ Ar	2.52	2.84×10^{-02}	1.13×10^{-02}
1	50	1	40 Ar	2.52	1.83×10^{-03}	7.26×10^{-04}
1	250	1	⁸⁴ Kr	3.45	2.03×10^{-02}	5.89×10^{-03}
1	50	1	⁸⁴ Kr	3.45	1.38×10^{-03}	4.00×10^{-04}
2	250	2	40 Ar	2.52	3.03×10^{-02}	1.20×10^{-02}
2	50	2	40 Ar	2.52	2.36×10^{-03}	9.36×10^{-04}
2	250	2	⁸⁴ Kr	3.45	2.27×10^{-02}	6.57×10^{-03}
2	50	2	⁸⁴ Kr	3.45	1.90×10^{-03}	5.51×10^{-04}

Table 3 NGIMS closed source sensitivities for He, Ar and Kr^a

^aThis sensitivities will be updated following the first in-flight calibration activity

^bElectron impact ionization cross sections are from Rejoub et al. (2002)

- 装置の感度は、He、Ar、Kr、Xeの静的モードで測定された。
- センサーがpinched offされた後の感度は、機器内に封入された希ガスの混合物を連続的に観測して、測定された。
- サイエンスフェイズでは、校正ガス(N₂, CO₂,O₂,Ar)がセンサーに漏 れ込むと予想されるので、感度の調整を行う必要がある。



Closed Source Sensitivities

• S_n :質量 m_s 、70eVでのelectron ionization cross section σ_s で規格化された感度

$$S_a = S_n \cdot C_{RF}(m_s) \cdot \sigma_s$$

*C_{RF}*は、感度補正係数で、0.71(*m_s* ≤ 20.5)、1.00(*m_s* > 20.5)

Open Source Sensitivities

- サイエンス期間中に、He, N₂, Arを使って感度補正。
- Open とclosedの絶対感度Oaは、

$$O_a = \frac{S_a(m_{ref}) \cdot n_c(m_{ref})}{n_o(m_{ref})} C_{EN}(m_s)$$

n_c:Closed sourceで測定された参考種m_{ref}のdead time corrected count rate, n₀:Open sourceで測定された参考種m_{ref}のdead time corrected count rate, C_{EN}エネルギー補正係数で、open sourceのエネルギー応答を考慮するもの。この補正係数は、サイエンス期間の早い段階で導出 される。



Ion Sensitivities

- Open sourceのフィラメントがオフの時にopen sourceで取得されたイオンと、open sourceが中性のときにイオンをスイープするion deflector platesで観測されたイオンは、quadrupole detectorsにはいる。このときのデータを基にシミュレーションから予測されている偏光電圧を有効にする。
- イオン感度は、LPWの電子密度と比較することで求まる。

$$I_a = \frac{D_e}{n_I} \cdot C_{EN}(m_s)$$

n_c:全ての質量チャンネルのdead time corrected count rateの合計, D_e:LPWで観測された電子密度、C_{EN}:機器からエネルギー反応から求めたエネルギー補正係数(open sourceから求めたものと同じ)



Calibration Configuration

- Mass spectrometerのキャリブレーションをpinch offや認定試験の前に 行った。それは、イオン源カバーの代わりにセンサーと較正機器が取 り付いたflanged transition jointを用いて行った。
- 混ざった希ガス(He,Ar,Kr,Xe)の0.1amu分解能は、50µAのフィラメン ト発光をもつclosed source modeで集められる。これによって示され るスペクトラムは、フィラメントやセンサーからの排ガスによるバッ クグラウンドを含む希ガスのピークである。
- これらのバックグラウンドはbreak-offされ、イオン源が真空の宇宙に 曝されれば、排出されて低くなる。

Instrument Sensitivity

- 高いまたは低い発光下でのclosed sourceの希ガスの気体測 定値から、機器の参考感度を導出した。
- 装置の感度は分子断面積の関数で、類似の実験室での較正 が火星上層大気と関連性のある活性ガス、希ガス感度の外 挿を可能にするために行われている。



Cross Talk and Linearity

- ⁴Heのピークを使った隣接した物質とのcross-talkは、6×10⁻⁵より低かった。
- これより、cross-talkは同位体比を測定する上での制限要因では ない。
- Channel electron multipliersの線形性を機器の飽和まで観測した。
- 機器のダイナミックレンジの上限に達している。
- 注意深いdeadtimeの補正が必要となる。





Temperature Stability

異なる温度下での機器のスペクトル観測は、質量のピークが0.2amuの範囲で一致した。





In Situ Calibration and Characterization

- 運航中または試運転のフェイズでのキャリブレーションは、
 今後の運用環境における機器の特性付けに役立つ。
- その場でのキャリブレーションは、機器の性能の長期的な 変化を調べることに役立つ。

