

特集「月惑星探査の来たる10年：第二段階のまとめ」

木星における雷放電発光検出器OLD(Optical Lightning Detector)の提案

高橋 幸弘¹, 佐藤 光輝¹, 福原 哲哉¹, 栗原 純一¹,
中島 健介², 竹内 寛³, ヨアブ ヤイル⁴,
ゲオルグ フィッシャー⁵, カレン アプリン⁶

2012年7月4日受領, 2012年8月1日受理.

(要旨) 近年, 木星大気の大規模構造を決める力学や, 大気組成を決める化学過程を理解する上で, 積乱雲や雷放電観測の重要性が指摘されている. しかし, 対流強度は雲頂高度など雲本体の観測のみからでは難しい. 雷放電発光の強度, 頻度, 高度の情報はそれを補う優れた指標のひとつであるが, 通常のカメラでは時間分解能が不十分で, 積乱雲活動の定量的な評価は困難である. ここで提案する雷放電発光検出器“OLD”は, 高速撮像・画像処理によって雷放電発光の頻度から対流活動強度を求め, また色情報から高度推定することを可能にする.

1. 科学目標の背景

近年, ゾーン, ベルト(木星の縞模様のそれぞれ明るい部分と暗い部分)やオーバル等の木星の大規模構造が積乱雲の活動によって形成されているという説が提案されている. また最新の数値計算は, 個々の積乱雲の時間的変動や鉛直構造を予測しつつある. 雷放電の定量的な観測は大規模構造と積乱雲の関係を明らかにする鍵である.

近年, ガリレオ探査機の雲画像観測に基づき, 積乱雲と大規模構造が一種の共生関係にあるとする, 浅い領域起源説(木星表面に見られる大規模構造が深部の流体運動の反映ではなく表面近くで作られるとする説)の改良型アイデアがGierasch等他によって提案されている[1,2]. これは, 積乱雲の上昇気流が大気表層に達したときコリオリ力によって小規模の渦を連続的に生成し, それが結合することによって, ベルト/ゾ

ーンを形成する東西風を生み出すというアイデアである. 小規模渦と東西風の関係については観測的な検証が進んでいるが, 積乱雲の鉛直輸送フラックスとそれらとの関係については, 通常雲観測のみからは有力な情報が得られず, 研究の進展を阻んでいる.

近年, 地球大気観測において, 雷放電計測の重要性が急速に認められるようになってきた(例えば[3]及びその引用文献). 放電現象という電磁気現象と, 温度, 風速, 雲粒の粒径など一般的な気象学のパラメータとの関係は複雑で, 雷放電データを気象学で利用するというのは困難と考える風潮があった. しかし最近の人工衛星による放電発光観測や, 世界各地に設置された, 雷放電に伴う放射電波観測網の整備が進むにつれ, 実用的なproxyとしての雷放電データが注目されるようになっており, 米国等一部では, 気象予測モデルへのデータ同化も始まり, 成果をあげている(例えば[4]). 木星における積乱雲内の電荷分離機構などはまだ不明な点が多いが, 水雲の存在が予想されていること, また, 地球と類似した高高度の雲頂を持つ雲(積乱雲)の近傍で放電発光が観測されていることなどから, 同様な使い方ができると期待される. 放電現象は, メカニズムの理解の難しさがある一方で, 少ないリソ

1. 北海道大学

2. 九州大学

3. 福岡大学

4. イスラエル・オープン大学

5. オーストリア科学アカデミー

6. オックスフォード大学

yukihiro@mail. sci. hokudai. ac. jp

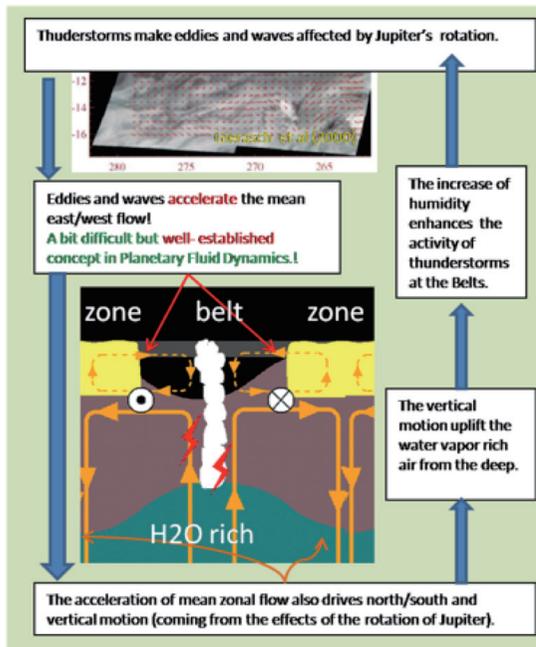


図1：木星における積乱雲と大規模構造の関係。

ースで広域を高時間分解能でカバーできるという代え難いメリットがあり、その威力は、観測網の発達した地球よりも、他の惑星でより重要な位置を占めると考えられる。

木星における積乱雲や放電の重要性については数値シミュレーション等によって指摘されてきた(例えば[5-8]など)。近年の Sugiyama 等による最新の数値計算[9,10]では、木星の3種類の雲、すなわち H_2O 、 NH_3 、及び NH_4SH の粒子からなる雲を、水平1次元×鉛直1次元の2次元で扱い、対流雲(積乱雲)の統計的な特徴と平均的な大気構造の理解を目指す段階へと進んでいる。そこから得られる非常に重要な示唆のひとつは、対流雲の爆発的な活動と静かな期間が繰り返すという予想である。さらに、その周期は対流雲下部の水蒸気量に依存することが示されている。もしこの周期を雷放電観測によって知ることができれば、透視することが難しい、深部の水蒸気量を知るための貴重な情報が得られるであろう。

図1は、木星における積乱雲と大規模構造の関係を力学及び組成の観点から示したダイアグラムである。

NASA によつ JUNO 探査機が2011年8月に打上げられ、2016年7月に木星に到着する。JUNOは2.5ミ

クロン帯の赤外線マッパー JIRAM を搭載しており、その目的の一つは、5-7 bar における水蒸気などの存在を計測することである。特に晴れ上がった hot spot と呼ばれる領域における水蒸気の鉛直分布の推定は重要な項目である。こうした、雲のない特定領域での精密測定と、雷放電による積乱雲直下の測定によって、水蒸気の分布やダイナミクスに関する情報が得られると期待される。

2. 科学目標

第一段階パネル報告の中に、「積乱雲と雷の観測による大気鉛直運動を解明」が挙げられている。木星内部には重力収縮による熱源が存在するが、この熱の鉛直輸送の相当部分を担うのが積乱雲である。積乱雲は東西風ジェットなどの大規模運動と相互作用し、温度・物質の平均鉛直分布も制約していることが推測されている。しかし、これまでの探査では、積乱雲の底部がどの深度にあるか(大気深部組成と関わる)の情報は不十分であり、また、積乱雲の分布は包括的に決定されているとは言えない。

雷放電発光はボイジャーやガリレオ探査機によって夜間に撮影されている。地球での雷放電活動に関する研究の類推から、木星あるいは土星においても積乱雲活動の本質的な情報を提供すると期待される。しかし、これまではおよそその空間分布が分かる程度で、時空間変動については殆ど分かっていない。特に、これまでの観測では個々の放電発光(フラッシュ)が時間的に分離されていないため、正確な頻度の推定ができていない。長時間露光によって複数のフラッシュが重なった画像からは光量の時間積分値は求められるが、本質はフラッシュの回数と、それらの個々の深度に関する情報である。なぜならば、表面付近で起きた発光は、エネルギーが小さくても明るく観測されるが、対流に重要な役割を果たす、深部の大規模放電発光は暗くってしまうからである。ここではJUICE(2022年頃の打上を予定している、欧州の木星及びその衛星系の周回機による探査計画)などの探査機に搭載することを想定した、個々のフラッシュを時間的に分離できる高速イメージャー“OLD”(Optical Lightning Detector)を提案する。さらに近年、スプライトと呼ばれる積乱雲の上方に出現する放電発光が存在する可能性[11]につ

いても、数値モデル及び室内実験に基づいて検討がおこなわれており、OLDで観測できる可能性がある。

3. 提案機器の概要

CMOSセンサーを用いた雷放電発光検出器によって、木星における雷放電発光の強度、位置、深さを決定する。想定する雷発光は、これまでの探査機観測([12]及びその参考文献など)から、期待される可視光のエネルギーを 10^9 Jとし、その1/10程度までの感度を確保する。Borucki等によるレーザーによる室内実験[13]によると、可視光で最も強い輝線は水素のバルマーアルファ線(H α : 656.3 nm)で、波長のプロファイルは彼らの実験で得られたものを基本に考えるが、将来的には高压放電による実験を行って確度を上げる。1つの発光の時間変動に関する情報は得られていないが、地球での落雷を参考にすると、雲上部での散乱光の継続時間は0.1 msから数10 msのオーダーと予想される。高速で時間分解された観測がまだないため頻度の推定は困難だが、これまでの観測結果から推測すると、可視光で 10^9 Jクラスの現象が、惑星面全体で10個/sのオーダーと予想される。積乱雲は惑星面全体で10ヶ所弱で活動が認められる。

ここで提案する“OLD”は、バルマーアルファの狭帯域干渉フィルターを用い、ノーマルモードではフォーマット512×512ピクセルで、29 ms毎に撮像を繰り返し、ハイスピードモードでは、30×30ピクセルで0.1 msまで時間分解能を上げることができる。データは一旦画像として取得されるが、機上処理によって、位置、発光強度、及び時刻情報のみを抽出し、データ量を大幅に減らす。重量は約1 kg、センサー部及び電気回路部のサイズはそれぞれ16×7×5.5 cm及び16×12×4 cm、消費電力は4 Wを想定する。レンズについては100 g以下の広角レンズ(焦点距離50 mm以下、距離100,000 kmから解像度200 km/画素程度)を想定しているが、JUICEの最終軌道とリソースによって、焦点距離(空間解像度)を選ぶこととし、そのサイズと重量も変わる可能性がある。広角レンズの場合には、50–100 km程度と言われる発光領域の形状を捉えることは目標とせず、10万キロメートルオーダーの間隔で分布する複数の積乱雲をなるべく短時間でカバーすることを目指す。一方、JUICEのモ

デルベイロードのNAC(Narrow Angle Camera: 望遠光学系を用いた多波長フィルターカメラ)と同等の、木星面で数10km/画素で50,000km以下の範囲を集中観測する選択もあり、その場合は個々の発光領域のサイズの推定が可能になり、発光エネルギーや深度に関するより詳しい情報が得られると同時に、ノイズとの区別が容易になる。

OLD提案の画期的な点のひとつは、狭帯域フィルターのバンド幅を2種類用意(二つのイメージャから構成)し、発光輝線幅の情報を得ることで発光高度の推定を行えることである。深部での発光は大気圧によって発光輝線の幅が広がるので、2つの波長幅(FWHM)で観測された強度の比から、発光の起きた場所での圧力が分かるからである。吸収スペクトルの形状については、Borucki等の結果[13]を参考にすると、フィルターバンド幅1 nmと10 nmでは、気圧1 barと5 barでの強度比が少なくとも2倍以上の違いが出ることになる。例えば木星からの距離が1,000,000 kmの場合でも、1つの放電発光からのフォトン数は10,000–100,000個になるため、量子効率や光学系の透過率から最悪その1/100の階調になったとしても、その比率の変化を10%以下で捉えるのは困難ではない。従って、1 bar程度以下の高度解像度は達成され、高度毎に組成の違う3種類の雲領域のどこで発生したのかを特定するのは十分可能である。

また、サンプリング速度を0.1 msまで上げることで、S/N(信号対雑音)比を大幅に向上し、また各フラッシュ光度の時間変化からパルスノイズと区別ができることも大きな特徴である。それにより、これまで成功していない、木星昼間に発生する雷放電発光の観測も可能になると期待される。地球では1 nmのバンド幅のフィルターを用い、2 msの分解能で、高度700 kmから昼間の雷放電発光が行われている(TRMM衛星搭載LIS)。報告されている木星雷放電の観測光量は地球での典型の100倍程度であり、また背景となる太陽散乱光は地球での1/25程度であることから、発光バンド幅が狭い場合には、同じ観測条件でのS/N比は数1000倍改善されることになる。OLDでのフィルターバンド幅(>10 nm)、観測距離(100,000 km)、露光時間などを考慮すると、地球での雷観測とファクターで同程度のS/N比となる。一方、最近土星で昼面の雷放電発光がカッシーニ探査機によって撮影された。平

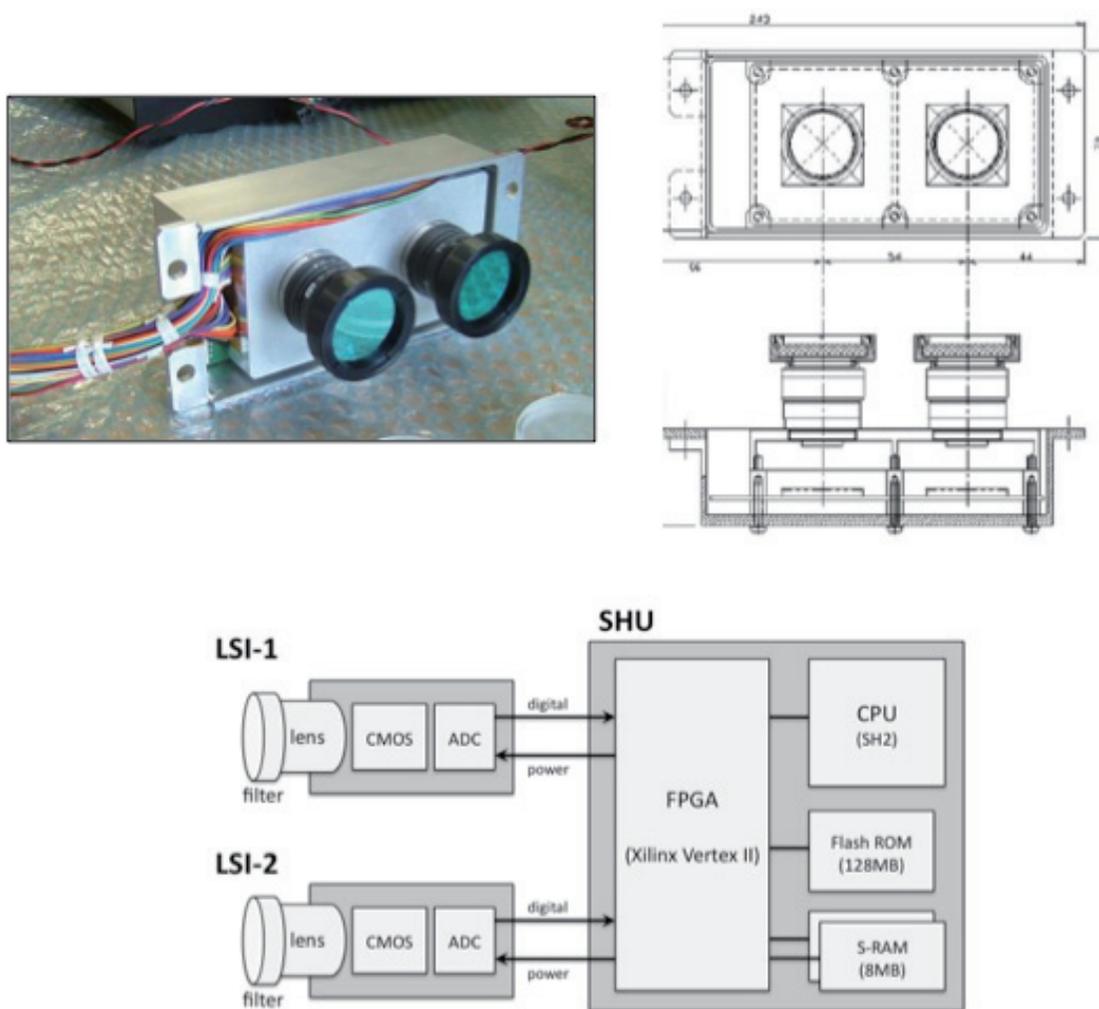


図2：同型のCMOSを用いた衛星搭載用カメラ(外観(左上)、図面(右上)、ブロックダイアグラム(下))。

均的には土星の雷発光は木星のそれに比べて、夜面でも長い間撮影できなかったほど極端に暗いことから、今回は突発的に桁違いに明るい現象が発生したことになるが、そうした現象は条件の似た木星でも起こりうると想像され、継続的な探査機観測を行えば、相当数のそうした明るい現象を捉えられる可能性がある。

図2に、地球周回衛星搭載用として開発された、同型のCMOSを用いた宇宙機搭載用の広角カメラの写真と簡単な図面とブロックダイアグラムを参考に示す。同型の機器は地球周回衛星としての環境試験を実施し、国際宇宙ステーションの雷放電・スプライト観測機器GLIMS(2012年打上)、超小型衛星RISING(2009年打

上)、RISING-2(2013年打上)に搭載される。光学系は市販のCCTVレンズをベースに宇宙利用できるものを開発し、干渉フィルターはレンズ全面(対物側)に装着する。木星探査機搭載のためには、高レベルでの放射線試験と低温環境を含む熱サイクル試験をより厳しい条件で実施する必要がある。

木星雷放電の1つの発光のライトカーブは分かっているが、地球での放電の類推から、雲上部での散乱光の継続時間は0.1 msから数10 msのオーダーと予想される。最大のS/N比を得るために最速では0.1 ms周期で画素切り出しを行うと共に、標準の29 ms/フレームを基本とする。

[主な仕様]

観測波長：バルマーアルファ (H α) 656.3 nm

フィルターバンド幅 (FWHM)：1 nm 及び 10 nm

時間及び空間分解能

ノーマルサンプリング：全画素読み出し (512 × 512 画素) で 29 ms

高速サンプリング：最速 ~ 0.1 ms (30 × 30 画素)

木星面での解像度：< 10 km - 2000 km / 画素 (距離による)

観測カバー範囲：全球 (ただし同時である必要はない)

あるいは積乱雲近傍 (> 2000 km)

重量, サイズ, 消費電力：約 1 kg, 16 × 7 × 5.5 cm (センサー部) 及び 16 × 12 × 4 cm (電気回路), 4W (ただし, 衛星リソースに応じて変更可能)

4. 他の観測機器との相乗効果

積乱雲と大規模構造の関係を明らかにするためには, 雷放電活動, 水平風速場, 雲頂高度分布の三者をほぼ同時に把握することが本質的である. そのために, 探査機には, メタン吸収バンドをカバーする, 近赤外撮像装置, できればスペクトル観測のできるイメージャの搭載が望ましい. メタン吸収バンドは雲頂より上のメタンコラム量から雲頂の気圧を求めることが可能だからである. JUICE でいえば, NAC (狭角カメラ) や WAC (広角カメラ) がそれに相当する. 雲の詳細画像から, 雲をトラッキングして水平風速ベクトルの分布を出し, 小規模渦の強度や大規模構造の風速を定量的に求めることと, スペクトル撮影から雲頂高度を推定することが目的である. 渦度, 水平風速, 雲頂高度, それに雷放電から推定される積乱雲内の鉛直フラックス変動が, 整合的であるかどうか, Gierasch 等のアイデアを検証する一つの有力な方法になる. 雷放電は, 積乱雲内での上昇気流のフラックスの指標として, その時間変化を捉えるための有効な指標になることが, 地球での観測で指摘されている. 積乱雲周辺の雲観測のトラッキングからは, 上昇した大気が発散する際に生成する小規模渦を定量的に捉え, さらに大規模構造の雲トラッキングから東西風の時空間変動を計測することで, それらが積乱雲からのエネルギーの流れに整合的かどうかを検証する. さらにその東西風と調和的な子午面循環は大規模構造の雲頂高度を決定する要因

であることから, その高度推定も同じ観測器のデータから得られると好都合である.

もうひとつの可能性は地上望遠鏡による観測である. 北海道大学は惑星観測優先の 1.6 m 望遠鏡をこの目的に利用する計画がある. また国内の大学コンソーシアムによる, 1-2 m クラスの望遠鏡による世界的なネットワークの活用も, ひとつの可能性である. さらに近年の高速ビデオ撮像及び最大エントロピー法などを用いた高解像度画像処理技術の向上によって, アマチュア天文家が取得した観測データからも, 高い精度で東西風の変動を捉えることが可能になってきている.

参考文献

- [1] Gierasch, P. J. et al., 2000, *Nature* 403, 628.
- [2] Ingersoll, A. P. et al., 2000, *Nature* 403, 630.
- [3] Price, C. et al., 2011, *Surv. Geophys.* 3, 733.
- [4] Mansell, E. R. et al., 2007, *Monthly Weather Rev.* 135, 1732.
- [5] Nakajima, K. et al., 2000, *Geophys. Res. Lett.* 27, 3129.
- [6] Yair, Y. et al., 1995, *J. Geophys. Res.* 115, 2421.
- [7] Schneider, T. and Liu, J., 2009, *J. Atmos. Sci.* 66, 579.
- [8] Gibbard, S., 1995, *Nature* 378, 592.
- [9] Sugiyama, K. et al., 2006, *Geophys. Res. Lett.* 33, L03201.
- [10] Sugiyama, K. et al., 2011, *Geophys. Res. Lett.* 38, L13201.
- [11] Yair, Y. et al., 2009, *J. Geophys. Res.* 114, E09002.
- [12] Dyudina, U. A. et al., 2004, *Icarus* 172, 24.
- [13] Borucki, W. J. et al., 1996, *Icarus* 123, 336.