

一番星へ行こう！ 日本の金星探査機の挑戦 その9 ～雷・大気光カメラLACの狙いと性能試験～

高橋幸弘¹，星野直哉²

(要旨) 金星における世界初の雷放電観測専用機能と微弱大気光の検出能力を兼ね備えた雷・大気光カメラ LACは、ハードウェアの製作・各種試験が完了し、実地観測に備えたパラメータ設定と詳細シーケンスの検討に入った。LACの科学的背景と目標、設計方針、これまで行った試験などについて紹介する。

1. 背景

雷放電というと気象現象のひとつではあるけれども、それが大気力学や大気化学に深く関わっており、それらの理解に本質的な役割を果たす可能性がある、ということあまり認識されていないのではないだろうか。それも仕方ないことかもしれない。地球において、雷放電発光の全球分布が初めて明らかにされたのは、1995年と1997年に打上げられた人工衛星搭載の雷放電発光センサーのデータが蓄積されてからのことなのである。リモートセンシングによって、積乱雲活動などによって起こる局所的な鉛直対流を広域にわたって連続観測することは難しいが、その対流の結果である雷放電の観測は比較的容易である。特に人工衛星からの発光観測は、1機でも広範囲の雷雲活動を同時にモニターできるという点で今後の活用に大きなポテンシャルがある。とりわけ、観測機の数に大きな制約のある惑星探査に於いて力を発揮できる可能性がある。さて、金星であるが、実はまだ雷放電の存在そのものについて、はっきりした確証がない。これまで30年近い年月にわたって、存在肯定派と否定派が激しく論争を繰り広げてきた。中には同じ著者が、別の探査機のデータをもとに、肯定的な論文と否定的な論文を、それぞれサイエンス誌とネイチャー誌に載せている例もある。雷放電の存在を支持するいくつかの観測結果にもかか

わらず結論が出ない背景には、地球での電荷分離メカニズムとして広く受け入れられている氷晶・アラレの接触理論が、金星環境では条件が満たされないということと、多くの観測が雷放電を目的としたデザインされた観測機器を使っていないことにある。氷晶・アラレの接触理論では、凍った状態の水が必要だが、金星の高温の雲層では殆どが液相だと考えられるのである。もし雷放電の存在が明らかになり、その発生頻度分布が観測的に得られれば、謎の多い金星大気活動に重要な示唆を与えることが期待される。さらに、発生頻度が高い場合には、大気組成へ影響を与えている可能性も出てくる。地球大気では窒素酸化物の20パーセントが雷放電による大気加熱によって生成されているという見積りがある。

いっぽう、金星超高層大気に化学反応によって生じる夜間大気光が存在することは古くから良く知られている。超高層大気は、昼間の太陽直下点で上昇し、それが真夜中付近で沈み込むが、そこで化学反応が促進され高度 90-100 km付近で大気光が増光すると予想される。つまり、大気光の水平分布を見れば、超高層大気のグローバルな循環の様子が分かるという訳である。金星夜間大気光の一部は地上からも比較的容易に観測できる波長(1.27マイクロメートル)であるため、観測が行われ、そこから得られた発生領域について議論されてきた。長い間、大気光領域は真夜中よりも金星の明け方側にやや偏った分布をするとされ、それは雲層に存在するスーパーローテーション(自転方向の高速東西風)の運動量が、何かしらのメカニズムで高層に

1. 北海道大学・大学院理学研究院

2. 東北大学・大学院理学研究科

yukihiro@ep.sci.hokudai.ac.jp

運ばれた結果と推測されていた。しかし最近の Venus Express の観測によると、発光場所には大きな変動があるが、系統的に明け方側にシフトしている様子は認められないといった報告がある。ただし、地上観測や Venus Express の観測は必ずしも連続性が十分ではなく、発光領域の移動の謎を解明するためには継続的な観測の積み上げが必要である。

2. LACの観測戦略

これまでの金星探査機による雷放電研究は、専用の装置ではなく元来他の目的のために設計された、あるいは汎用的な目的で作られた観測器を用いたデータ解析に基づいている。そのために、雷放電とおぼしき電波もしくは発光信号が捉えられても、それが本当に雷放電に起因するのか、あるいは別の自然現象や衛星及び周辺環境で発生した電気ノイズなのか、区別がつけられないという問題があり、それが雷研究の本質的な前進を阻んできた。Planet-C に搭載する雷・大気光カメラ LAC は、センサーの半分を雷発光検出に用いる、金星周回機初めての雷観測のためにデザインされた観測器である。雷放電発光の証拠を得ることを第一の目的として、空間分解能を犠牲にする代わりに時間分解能を上げ、一発の雷放電発光パルスの発光強度の時間変化を得ることを目標にしている。しかし、相手は“未知の”発光であり、どのような時間変化をするのか、継続時間がどのくらいなのか、まったく分からない。データを長時間連続記録しておき、試行錯誤の解析で雷の信号を取り出すことも原理的には可能かもしれないが、そうすると高時間分解能のためにデータ量が膨大になり、地球へ伝送することができなくなる。そのためイベントの前後だけを記録するトリガ方式を採用せざるを得ない。したがって、どのような雷発光パターンにも対応でき、かつ、雷以外のパルスノイズを効率よく排除するアルゴリズムが不可欠になる。地球周回の衛星観測によると、典型的な雷発光継続時間は500マイクロ秒程度とされるが、LAC ではそれよりも十分速い32マイクロ秒間隔で各チャンネルのデータサンプリングを行うこととし、単独のパルスノイズを自動的に無視するトリガロジックを考案している。

夜間大気光観測については、ある期間は発光領域の位置変動を追うために、日周回大気光観測のみを連続

して行うことを考えている。観測には、可視波長域で最も明るい、 O_2 ヘルツベルグII帯を使う。さらに、地上望遠鏡のスペクトル観測で見発されたOI557.7nmの発光についても、検出を試みる。このラインは観測時期によって強度や領域が大きく変動する可能性があるが、まだ観測例が数例と少なく、詳しい素性は分かっていない。

3. 機器概要

LACはカメラヘッドと電気回路部を合わせて約2kg、カメラヘッドのサイズは16 x 12 x 12 cmと非常に軽量・コンパクトに設計されている。この中に、背景光(大気光の発光輝線以外の、太陽光の漏れ込み)も含めると4色の光を観測できる機能と微弱光観測が可能な高感度、高い環境耐用性などをすべて満たすための様々な工夫がなされている。

図1に LAC のセンサーヘッド部(LAC-S)の切断図を示す。太陽が光学系内部に入ると機器の温度が上昇して悪影響を及ぼしたり、そのまま検出器に像を結ぶような場合には検出器にダメージ与えられる恐れがあるので、観測しないときにはシャッターで保護しておきたいところである。しかし今回は軽量化を優先してそのような方法はとらず、重いシャッター機構の代わりに太陽入射光量を大幅に減少させるブロッキングフィルターが先端に取り付けられている。そこを通過した光は、1枚玉非球面レンズで軽量化されたテレセントリック光学系を通過し、フォーマット8 x 8(64CH)のアバランシェフォトダイオード(APD)検出器入射

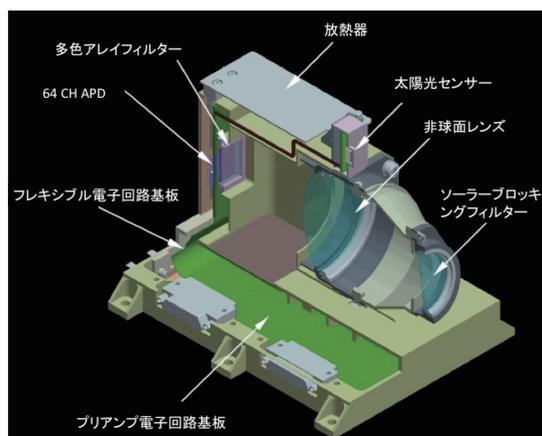


図1: LACのセンサーヘッド部(LAC-S)の切断図

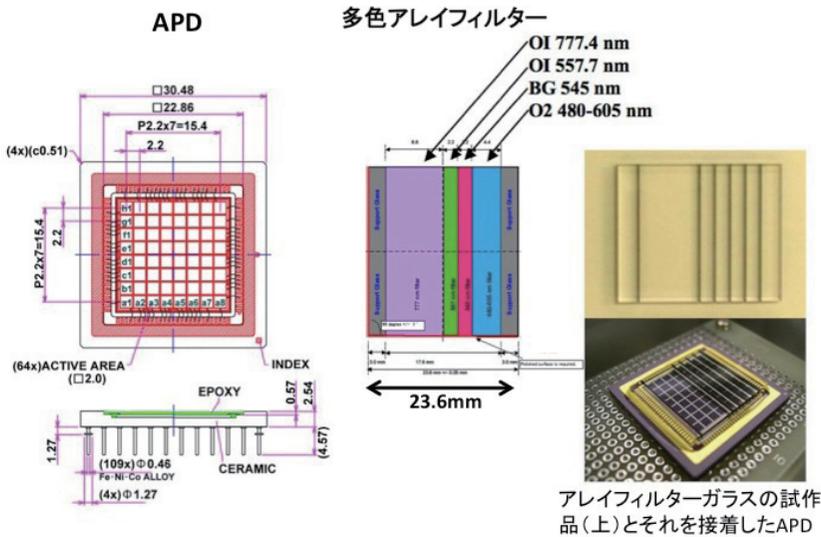


図2：64チャンネル APDと多色アレイフィルター



図3：積分球を用いた感度校正試験の様子

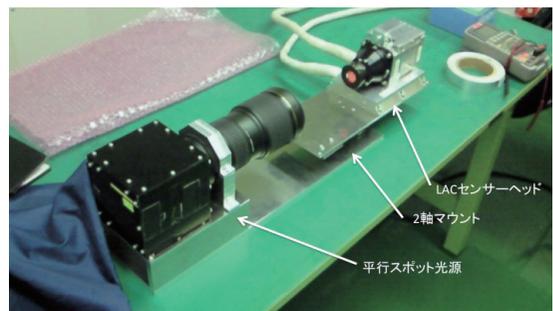


図4：クロストーク測定の様子

面に結像する。テレセントリック光学系は、視野のどの位置の光も同じ角度で干渉フィルターに入射するための工夫で、それによって透過波長特性を一様に行うことができる。

フィルターレットを用いずに、複数の狭帯域フィルターを使用するために、APDの入射面には、短冊状の干渉フィルターを張り合わせた多色アレイフィルターを接着している。その様子を図2に示す。各ピクセルの視野は約2度四方であり、8 x 8全体で16.0度四方の正方形型の視野になっている。これは距離3金星半径において、金星ディスクの内接四角形よりもやや小さめの大きさである。APDの8 x 8のチャンネルのうち、左半分は雷放電観測用のOI 777 nmフィルタ

ーが占める。この波長は、実験室における金星大気を模した放電実験で、最も顕著な輝線である。

雷観測モードで運用中は、それぞれのチャンネルが32マイクロ秒間隔でサンプリングを行い、どれかのチャンネルに雷放電起源と判断される過渡発光が認められると自動的にトリガがかかり、そのチャンネルのトリガタイミングの前後のデータのみを記録する仕組みになっている。トリガロジックは、発光前の背景レベルを決める時間の長さ、トリガをかける発光強度のしきい値、時間平均する長さなどを数値パラメータとして運用時に指定することができ、それによって様々な発光パターンへの対応を図っている。感度は、距離3金星半径において、地球の雷放電発光強度の平均規模以下のものを、近地点付近では同じく1000分の1以下の発光も捉えられるよう設定されている。ちなみに、過去の地上望遠鏡による観測では、金星の放電発光は

地球平均の100倍の光量を持つと見積もられている。

APDの残る右半分領域は大気光観測用に用いられ、OI 558 nm, バックグラウンド(545 nm), O₂ヘルツベルグII(480 - 605 nm)が並ぶ。こうして得られる大気光各波長の視野は縦に細長いものであるが、これを衛星の姿勢をゆっくり変化させながら金星面を走査することで、金星夜面の全経度の大気光分布を画像として再生することができる。1チャンネルの視野(約2度四方)当りの露光時間は30 - 90秒を想定している。

4. 性能試験

これまで、LACは各種の環境試験と校正試験をほぼ順調にこなし、金星での観測に十分な見通しが立っている。その過程では、他の搭載カメラと異なるやや特殊な課題に注意が払われてきた。LACのセンサーは今回新規開発したマトリックス型のAPDであるが、8 x 8というフォーマットはこの種のセンサーとしては異例の大型サイズであり、いろいろな面で初めての経験も多かった。その性能は概ね満足できるものであったが、必ずしも設計段階の予想とは一致していなかった部分もある。APDは光電子増倍管に比べ、格段に高い振動・衝撃および温度耐性と、雷観測波長において10倍以上の量子効率を持つなど優れた特徴を持つ反面、温度変化によって出力信号のバイアス等が大きく変化するため、大気光などの微弱光の観測では温度の安定性に特別の注意が必要である。数値モデルと、温度可変の真空槽中での動作試験に基づく軌道上での温度予測を基準に、その温度付近での信号出力について、条件を変えながら測定を繰り返した。図3は国立極地研究所の積分球を用いた測定の様子である。この実験によって、適切に背景光チャンネル出力を差し引くことで、OI 558 nm大気光の有無や、O₂ヘルツベルグII帯の発光強度変化を捉えることができることが確認された。また図4はチャンネル間のクロストーク測定の様子である。カメラの望遠レンズを利用したコンパクトな平行スポット光源とゴニオステージを組み合わせた2軸マウントを製作し、光学及び電気系を含めた総合的なクロストーク測定と視野校正を行い、要求性能を満たすことが確かめられた。さらに、ファンクションジェネレータを使って生成された、いくつかのパルス波形パターンを発光ダイオード光源を用いて入

力し、トリガロジックが正常に機能することも確認した。

現在、LACハードウェアの個別の開発と試験を完了し、金星での本番の観測に即したパラメータ設定や運用シーケンスの検討・策定を進めている。