



ISSN 1349-1113
JAXA-RR-04-016

宇宙航空研究開発機構研究開発報告

JAXA Research and Development Report

Venus Climate Orbiter 搭載 雷・大気光カメラの開発

吉田 純・高橋幸弘・福西 浩・堤 雅基・牛尾知雄

2005年 3月

宇宙航空研究開発機構
Japan Aerospace Exploration Agency

Venus Climate Orbiter 搭載 雷・大気光カメラの開発

吉田 純*・高橋 幸弘*・福西 浩*・堤 雅基**・牛尾 知雄***

*東北大学大学院理学研究科

**情報・システム研究機構 国立極地研究所

***大阪府立大学大学院工学研究科

Development of Lightning and Airglow Camera onboard Venus Climate Orbiter

By

Jun Yoshida *, Yukihiro Takahashi *, Hiroshi Fukunishi *, Masaki Tsutsumi **, Tomoo Ushio ***

*Department of Geophysics, Tohoku University

**National Institute of Polar Research

***Department of Engineering, Osaka Prefecture University

Abstract : We are developing a lightning and airglow camera (LAC) onboard the Venus Climate Orbiter (VCO), the Japanese Venus mission Planet-C. The LAC is a high-speed imaging sensor and measures lightning flashes and airglow emissions on the Venus nightside disk. One of the major targets of LAC is to settle controversy on the existence of the lightning of Venus. Further, the LAC observations provide us information for the charge separation mechanism, physics of sulfuric acid clouds, mesoscale planetary meteorology and impacts on atmospheric chemical processes. The regions of intense airglow emission normally distributed on the morning side of the antisolar point, which reflects that the super-rotation of the upper atmosphere modifies subsolar-to-antisolar circulation cell. So continuous observations of nightglow provide us information on the global circulation in the Venus lower thermosphere. Furthermore, we are planning to measure the 558 nm [OI] emission which was recently discovered by a ground-based telescope, but its origin is mysterious.

Both high-sensitivity and high-speed samplings are performances required for the detector of LAC. And it needs to have 8 by 8 matrix. Interference filters are used for selecting a wavelength of 777 nm [OI] for lightning flash measurement and wavelength of 551 nm [O₂ Herzberg II] and 558 nm [OI] for nightglow measurement. Individual lightning flash events are recorded with a 50 kHz pre-trigger sampling. The goal of LAC is to detect lightning events with the optical intensity of 1/100 of typical lightning events on the Earth from 1000 km altitude and to measure 100 Rayleigh airglow with signal to noise ratio (S/N) more than 10.

To realize this performance, first, we selected and examined of photo-multiplier tube (PMT) and avalanche photo-diode (APD) as a candidate of the detector of LAC. We performed an absolute calibration of the optical sensitivity and a measurement of thermal characteristics of dark current.

These results shows both PMT and APD have an ability to satisfy S/N more than 10 when LAC observes 100 Rayleigh airglow emission using them. But the problem of PMT is low quantum efficiency, while the one of APD is thermal instability of dark current. So we conclude that PMT is suitable to detect airglow emission and APD is useful to observe lightning flash. Second, we designed and developed a high-contrast optics of which reduces stray-light by an order of 10^{-11} . When the LAC observes the Venus nightside disk, the light from the sun and Venus dayside disk are serious contaminations. To reduce them, we install LAC on the surface of the satellite and set four vanes on the objective side of the camera. However, the light scattered by the surface of the satellite and the objects put on the surface, such as antenna, may seriously reduce the signal to noise ratio. We are evaluated the intensity of these scattered light using detailed models to solve this problem. The results indicate that the amount of scattered light can be sufficiently reduced by a baffle under the condition that the projecting objects put at the backward of the baffle aperture. Third, We designed of data acquisition for high-speed pre-trigger sampling. We devised a very simple trigger logic using oblivion coefficient and tested for terrestrial lightning flashes data obtained with a photometer on the ground. It is confirmed that this logic is quite useful to distinguish between the lightning signal and other noises.

概 要

現在、金星大気超回転の解明を主目的とした金星気象衛星（VCO：Venus Climate Orbiter）を打ち上げるPlanet-Cミッションが宇宙航空研究開発機構／宇宙科学研究本部を中心として進行中である。我々はVCOに搭載する雷・大気光カメラ（LAC：Lightning and Airglow Camera）の開発を行っている。LACは金星夜面における雷放電発光・大気光を2次元で高速イメージングする観測器である。雷放電観測では、まずこの現象の存在の決定的な証拠を得て、長年の論争を収束させることを目標とする。さらに、その電荷生成・分離メカニズムの解明や硫酸雲物理学の理解、惑星メソスケール気象学の発展、金星大気中における熱的・化学的寄与の見積もりなど、様々な分野に貢献することが期待される。大気光観測では、発光強度の緯度・経度分布から金星超高層大気の運動を継続的にモニターし、さらに波状構造をイメージングすることで、金星下部熱圏と下層大気の力学的結合過程の解明、金星熱圏大気大循環メカニズムの理解の進展が期待される。さらに近年、地上望遠鏡で発見された558 nm [OI] の連続観測も実施し、その発光強度分布や時間変動を捉え、オーロラとも解釈できるこの発光現象の解明を目指す。

LACのセンサーとしては、高感度を有し、かつ高速サンプリングが可能なものが要求される。また本観測器は、雷放電発光観測用に波長777 nm [OI] の干渉フィルタを採用し、50 kHzプレトリガーサンプリングでデータを取得する。一方、大気光観測時には波長551 nm [O₂ Herzberg II]、558 nm [OI] で連続サンプリングを行い、積分時間10 secで1枚の画像を作成する。VCOは金星低緯度を周回する長楕円軌道をとるが、LACはこのうち近金点（高度300 km）付近から金星より3 R_v離れた地点までの高度範囲で運用する。その際、雷放電発光観測に関しては距離3 R_vの地点から地球の平均的発光強度のものを、1000 kmの高度からはその1/100レベルのものまでを検出することを目標とする。一方、大気光に関しては発光強度100 Rのものを、SN比=10を確保して検出することを目標とする。

上記の性能を達成するため、我々は第一に、LACのセンサーとして光電子増倍管（PMT）

Photo Multiplier Tube) とアバランシェ・フォトダイオード (APD : Avalanche Photo Diode) の 2 つを検討した。いずれも 8×8 の 2 次元配列素子である。絶対感度校正実験から得られた出力電流値と、暗電流測定試験から得られた暗電流値から、本観測器で 100 Rayleigh の光源を観測した場合の暗電流統計揺らぎによる SN 比が 10 以上であることを確認した。しかしながら APD についてはバックグラウンドレベルの温度安定性が低く、光量の小さい大気光観測は適さないことがわかった。また PMT に関しては波長 777 nm における量子効率が APD に比べて小さく、雷放電発光観測は困難であることが判明した。第二に、金星夜面観測の際に視野内に混入することが予想される迷光 (太陽直達光、金星昼面光) の量を見積もり、迷光減衰要求量 11 桁を達成する高い遮光技術を有する光学系の設計・開発を行った。衛星側面に設置し片側を宇宙空間に暴露させ、対物側に 4 枚の遮光板 (vane) と 1 段バップルを取り付けた光学系を設計した。本光学系を採用する際、衛星表面を覆う金色のサーマルブランケットや設置面上にある突起物を介して、迷光が観測視野内に混入することが懸念されるため、我々は暗室内で精密な模型実験を行った。その結果、衛星突起物がベーン陰影内にある場合、その迷光量はカメラ部の 1 段バップルから検出器間の遮光対策で十分減衰可能な量であることを定量的に示した。第三に、高速サンプリング時におけるデータ取得方法の考案・検討を実施した。忘却係数という概念を用いてトリガーサンプリング方法を考案し、地上フォトメータで捉えられた地球雷放電発光の波形で試験した結果、ノイズと分離して信号を検出することに成功した。

本研究成果により、LAC 開発に必要な基礎技術の活用に見通しを立てることができた。

1. はじめに

1.1 金星における雷放電現象

1.1.1 雷放電現象

地球には、積乱雲などの激しい上昇気流に伴って雷放電が発生することがよく知られている。雷放電現象に際しては、一時的にはあるが強い光や熱、電磁波が放射され、通常の地球大気中では起こり得ない化学反応を生じさせる。近年の研究によると、雷放電によって生成される地球対流圏の窒素酸化物の量は、全球の2割、赤道域では5割にも達することが示唆されている。また雷放電現象は、電離層と地球表面とを結ぶ地球規模の電流回路（グローバル・サーキット）の駆動源としても注目を集めている。

地球の雷雲における電荷分離プロセスは、積乱雲中の鉛直対流に伴う氷晶とあられの衝突で行われることが大まかなストーリーとして知られている。気温 -10°C 以下の低温の大気中では、氷晶が正、あられ（表面が濡れている）が負に帯電し、氷晶は上昇気流で吹き上げられ、雲の上部に正電荷が分布し、あられは重力で落下して、雲の中部、下部の降水域に負電荷が分布する。この雲中の分離された正電荷が、空気の絶縁を破壊することで起こる火花放電が雲放電と呼ばれ、また雲の中部、下部の負電荷が地表に正電荷を誘導し、この正負電荷が空気の絶縁を破壊することで生じる火花放電は落雷（対地放電）と呼ばれている。

実は、大気放電現象は積乱雲中のみならず、火山噴煙中や砂嵐中에서도生じることが知られている。つまり、一般に、大気中で粒子の激しい上昇・下降運動がおこると、電荷が分離され、大規模な火花放電が発生するわけである。逆にいえば、雷放電を含む大気放電現象は、大気運動の活動度や雲粒の物性を強く反映する現象であるといえる。

この他の雷放電発生メカニズムとして、宇宙線による対流圏大気電離作用が挙げられる。また地球では、雷放電現象に伴って生じる超高層大気発光現象（sprites, elves, blue jetsなど）が最近10余年間で次々に発見されており、雷に関する研究が理論・観測・モデリングの面から精力的に行われている。

上述したことから、地球以外の惑星でも雷放電が起こることは想像に難くない。事実、木星では激しい上昇気流中で雷放電が存在することが木星探査衛星Galileoの観測などから明らかになっている。また土星や天王星、海王星にも雷活動に対応すると考えられる電磁波動現象がVoyagerによって観測されており、雷放電現象の存在が示唆されている [e.g., Desch et al., 2002; Russell, 1993]。 N_2 を主成分とする厚い大気を持つ土星の衛星タイタンにも雷放電が存在することが予測されており、土星探査機Cassiniのプローブ観測により、土星雷放電とともにさらに理解が進むことが期待される。

1.1.2. 金星雷放電現象の予測

発光形態

では、金星には雷放電現象は存在するのだろうか。よく知られているように、金星には硫酸の雲が存在する。この雲層は対流圏上部の高度約50～70 km付近にあり、惑星全体を広く覆っている。全球が分厚い雲で覆われたこの惑星にも、雷放電現象が発生していると推測されている。もし発生しているとしたら、地球のような雷雲—地上間放電は極めて起こりにくいとされている。その理由として、金星のような濃い CO_2 大気中（地表付近で90気圧）で雷放電を発生させるには大きな絶縁破壊電場が要求されることと、雲層高度が極めて高い（約40 km）ことが挙げられる。したがって金星における雷放電の形態は、雲放電が卓越することが予想される。また、雲層と電離層間の距離が地球より30～40 kmも近い金星においても、地球のspritesやelvesのような形態で発生する可能性がある。強い固有磁場が存在しない金星には宇宙線が降り注ぎやすいことから、地球に比べて宇宙線がトリガーとなって発生する雷放電が多く存在することも考えられる。

発光スペクトル

Borucki et al. [1996] は模擬金星大気（ CO_2 :96%, N_2 :4%）中におけるレーザー誘導プラズマによる放電

実験を行った。その結果、金星大気中では1気圧（高度50 km付近、雲層下部に対応）や5気圧（高度35 km付近、もやが存在する領域に対応）において放電が起これると、酸素原子の777.4 nmの輝線が強く発光すると予測されている。またこの輝線から発光エネルギー中の半分近くが放射されると見積もられている。

発光メカニズム

では金星において雷放電はどのように引き起こされるのだろうか。金星の雲はその75%が硫酸の液滴で残り25%は水蒸気で構成されていることから、金星雲中では地球のような異なった固体粒子どうしの衝突で起こる電荷分離プロセスは考えにくいとされている。しかし、理論的には液体どうしの摩擦でも電荷分離は起こりうること、気温が $-40 \sim -50$ °Cとなる雲頂付近では H_2O の含有量次第で H_2SO_4 が固相になりうることが知られている。また金星雲層中部（高度51–57 km）では固体結晶が存在する可能性があり、実際金星の雲が黄色い原因は、雲中に固体の硫黄や硫化鉄が存在しているためであるという説もある。前述したように、電荷分離プロセスは地球においても大まかなストーリーしかわかっていないのが現状であり、ましてや金星においては推測にとどまるのもやむを得ない。

以上のように、金星における雷放電が確認されれば、地球で考えられている電荷分離メカニズムの常識が覆されることは言うまでもなく、気象学や大気電磁気学、大気化学などの分野に強烈なインパクトを与えることが期待される。 H_2SO_4 雲の雲物理の理解にもつながるであろう。雷放電の時間・空間分布やその変動の様子が把握できれば、活発な対流活動領域のモニターが可能となり、雷雲発達の時空間スケールやその活動の様子など、いわゆるメソスケールの気象現象の情報が得られる。金星におけるグローバル・サーキット構造の推定にもつながるであろう。加えて、その発生頻度や1雷放電あたりのエネルギーがわかれば、金星大気中に対する化学的寄与を見積もることができる。地球と同様に窒素酸化物生成に影響を与えている他、 H_2SO_4 雲の生成消滅に大きな役割を果たしている CO や O_2 が大量に生成されることが推測されている。また、火山の噴煙中でも電荷分離が生じる可能性があることから、雷発生分布と地形データを照合させることで、金星における活火山の存在を間接的に確認できるかもしれない。さらに、地球では上述したようにspritesなどの新たな放電形態の発見もあって、地上における雷観測ネットワークが構築されつつあり、地球周回衛星にも雷観測専用のセンサーが搭載されるようになっていく。確実にその描像がわかりつつある地球の雷と、未知の部分の多い惑星の雷を調べることは、雷放電現象に対する統一的な描像の獲得につながり、また雷を主とした新しい惑星大気科学の展開を導くであろう。

1.1.3. 金星雷放電の観測

金星における雷放電現象については、これまでに多くの光学及び電磁波観測がなされてきた。以下、これらをレビューしていくにあたり、比較のため表1.1に地球雷放電の主なパラメータを示す。

表1.1. 地球雷放電の主なパラメータ。

1 雷放電あたりの発光エネルギー	$10^5 - 10^6$ J
1 雷放電あたりの全エネルギー	$10^8 - 10^{10}$ J
1 雷放電発光の継続時間	300 - 500 msec
雷放電発光の発生率	2×10^{-7} flashes/km ² /sec

光学観測

光学観測については、Venera 9/10, Pioneer Venus Orbiter (PVO), Vega Balloonsの直接探査に加えて、地上望遠鏡観測の報告例が1つ存在する。

金星夜側大気中における雷放電現象の最初の光学的な証拠は1975年、Venera 9に搭載されたGrating Spectrometer（波長域300–800 nm）によって得られた [Krasnopolsky, 1983]。約2ヵ月間の観測期間中、

1度だけ70秒間にわたって雷放電発光と思われるパルス信号が夕方側で検出された。Venera 10にも同様の観測器が搭載されたが、こちらの観測では検出されなかった。Venera 9の観測データから、発光の継続時間のピーク値は250 msecで、地球のものとほぼ同じという結果が得られている。また1雷放電あたりに放射される発光エネルギーは $7 \times 10^7 \text{ J}$ と見積もられ、これは地球の典型的なものより1–2桁以上大きな値となっている。

Venera 9に続いてPVOに搭載されたStar Trackerが金星雷放電発光の光学検出を試みた。Borucki *et al.* [1991]は、探査機が近金点付近でスピンする際、センサーが金星夜側をスキャンした延べ83 secを観測データとして解析した。データには常に高エネルギー粒子による偽のパルスが含まれており、雷放電起源と思われるパルスはこの偽のパルスと統計的に区別できなかった。雷放電発光の発生頻度の上限値として、 $1 - 4 \times 10^{-7} \text{ flashes/km}^2/\text{sec}$ という見積もりが得られており、これは地球の場合の0.5–2倍の値となっている。

さらに1985年には2基のVega Balloonが金星赤道付近の真夜中から朝側の高度50 km付近を30時間かけて飛行し、搭載されたLight Sensor (波長域400–1100 nm)で雷放電発光の検出を試みた [Sagdeev *et al.*, 1986]。しかし雷放電起源と思われるイベントは検出されなかったと報告されている。

1993年、Hansell *et al.* [1995]は地上望遠鏡 (口径153 cm)による金星夜側の雷放電発光観測を行った。観測にはコロナグラフ光学系を採用して金星昼面を掩蔽し、金星昼面からの散乱光や光学系内の回折光を抑えた。中心波長777.4 nm (半値幅0.7 nm)の干渉フィルタを用い、656.3 nm (半値幅20 nm)を比較用として選んだ。検出器には 30×30 ピクセルで18.8 frames/secのビデオフレームレートを有するCCDカメラを使用した。金星内合付近の8晩にわたって観測を行い、合計3時間45分 (うち653.6 nmの観測は45分)で6–7個の雷放電発光と思われるイベントが検出された。解析の結果、1雷放電あたりの発光エネルギーは約 $7 \times 10^7 - 2 \times 10^9 \text{ J}$ (地球平均規模のものより3桁大きい)、継続時間は20 msec未満 (地球の約1/10)、雷放電発光の発生頻度は約 $3 \times 10^{-12} \text{ flashes/km}^2/\text{sec}$ (地球の約1/1000)と見積もられている。

電磁波・プラズマ波動観測

一方、波動観測については、Venera 11/12 Landers, PVOが金星探査機として観測している他、木星探査機Galileoや土星探査機Cassiniも金星をフライバイした時に観測を行っている。

1978年、高感度ループアンテナを搭載したVenera 11/12 Landersが金星昼側に降下し、高度30 km以下で数分から15分以上にわたって継続するVLFバーストを捕らえた [Ksanofomality *et al.*, 1983]。これは金星大気中の放電現象による電磁パルスの初めての証拠となった。バーストは10 kHz帯で最大となり、また約 10 sec^{-1} から 50 sec^{-1} の割合で発生するパルスから構成されていた。これは地球雷の場合 ($\leq 20 \text{ sec}^{-1}$) に比べて高いという結果が得られている。

金星の場合、雷放電起源の電磁波は、金星電離圏や磁場の構造から、夜側の数100 Hzよりも低周波の電磁波や、数100 kHz–1 MHzよりも高周波のものが宇宙空間へ突き抜けてくることが予測されている [Grebowsky *et al.*, 1997]。1979年、PVO搭載Electric Field Detectorにより、金星夜側で100 Hzのバーストが観測された [Scarf *et al.*, 1980]。以来、このバーストの起源が雷放電に起因するものか否かをめぐって、極めて激しい論争が続いている。雷放電起源説に肯定派のグループは、磁力線トレースから推定された雷発生領域と高地との間に良い相関が見出されたことから、活火山の噴煙や地形の効果による上昇気流中で生じる雷放電が存在している [e.g. Russell *et al.*, 1988]、バーストは磁場強度が6–10 nTを超えるときや、磁場の垂直成分が強くなるときに検出されやすいことから、このバーストは雷放電起源のホイッスラーモードの波である [e.g. Ho *et al.*, 1992] といった主張をしている。これに対して否定派のグループは、バーストが電離圏ホール (金星夜側に見られる電子密度が急激に減少する領域) に対応して検出されやすいことから、ローカルな電離圏プラズマ起源の波動 (イオン音波) であると主張し [e.g. Taylor and Cloutier, 1986]、いまだに議論は収束していない。

1990年、木星探査機Galileoが金星をフライバイした。その際、搭載されたプラズマ波動観測器が金星の夜側で53分間、金星雷放電を探索した [Gurnett *et al.*, 1991]。その結果、雷放電起源と考えられるイベントが0.1

ー5.7 MHzの範囲で6個検出された。しかし観測期間中、金星電離圏の電子密度が $10^4/\text{cm}^3$ 以上であったことから、1 MHz以下の電磁波が電離圏を突き抜けることは困難であり、今回観測されたイベントのうち1 MHz以下のものに関しては何か特別な電離圏状態を考える必要があると結論付けている。また全6個のイベントが金星の夜側で起こっていたと仮定すると、雷放電発光の発生頻度は約 10^{-11} flashes/ km^2/sec となり、これは地球のそれに比べて4桁小さい値となっている。

さらに土星探査機Cassiniが1998年、1999年に行った2回の金星フライバイの際に、プラズマ波動(0.125ー5.6 MHz)観測を行った[Gurnett et al., 2001]。Cassiniは地球フライバイ時、地球雷起源の電磁波を容易に検出できたのに対し、金星フライバイ時では合計約5時間の観測時間中、統計的に有意なシグナルを検出できなかった。仮に金星に雷が存在するとしても、地球に比べてその活動度は極めて低いか、地球の雷とはかなり異なったものであろうと推測されている。

以上のように、20年余にもわたる光学・電磁波観測にも拘わらず、金星雷放電に関する議論は未だに収束していない。金星雷放電の存在に肯定的な観測結果はあるものの、それらから推定されている金星雷放電の特徴(発光エネルギー、継続時間、発生頻度など)に共通点は少ない。

光学観測に関しては、測定器の感度や時間分解能などが現象に十分対応しておらず、検出された発光パルスの発光継続時間に食い違いがあったり、地球の典型的な雷よりも2桁から3桁程度大きな発光のものしか検出されていなかったりという事実は、信憑性に疑問を投げかける要素となっている。否定的な結果が得られたPVO/Star TrackerとVega Balloons/Light Sensorによる観測に関しては、いずれも真夜中から朝側にかけてのみ行われたこと、特にPVOの観測期間については2年間にわたる108軌道のうちわずか83 secであったことを考えると、その観測時間・領域に大きな制限があり、あまりにも不足だったと言わざるを得ない。

また電磁波・プラズマ波動観測では、観測されたバーストが雷放電に起因するものか、他のプラズマ波動なのかの区別が難しく、特にPVOの観測結果の解釈は、今後も合意をみる可能性は少ないと思われる。

1.1.4. 今後望まれる金星雷放電観測

過去の観測がいわば中途半端に終わったことに鑑みれば、金星雷放電の存在は、高時間分解能と十分な感度を有する光学観測機器を用いなければ、実証することが困難であると考えられ、専用に設計された計測機器による観測の実施が強く望まれる。直接探査ミッションであるなら、さらにプラズマ波動を同時に観測することができれば、電磁波の波形と発光のタイミングから雷存在の決定的な証拠が得られるであろう。電波源の位置を導出することで、現象の発光高度の決定も可能となるかもしれない。

1.2. 金星における大気光

1.2.1. 発光スペクトル

酸素原子の557.7 nmや630.0 nmの輝線はそれぞれgreen line, red lineとも呼ばれ、地球オーロラや夜間大気光では代表的な存在である。地球と同様に熱圏高度にO, O⁺, O₂⁺が存在する金星においても557.7 nmや630.0 nmの夜間大気光が存在するのではないかという予測があった。ところが1975年、Venera 9/10がGrating Spectrometerで金星夜間大気光の可視領域(300ー800 nm)における発光スペクトルを観測した際、予想もしなかった分子スペクトル群が発見された一方、557.7 nmや630.0 nmは検出されなかった[Krasnopolsky, 1983]。翌年、そのスペクトル群は、地球の夜間大気光では発光強度の小さい酸素分子のHerzberg II帯($c^1\Sigma_u^- \rightarrow X^3\Sigma_g^-$)の $v=0$ プログレッションであることが金星大気を模した室内実験により同定された。その後、さらに詳細な解析や地上・衛星観測により、O₂のChamberlain帯($A^3\Delta_u \rightarrow a^1\Delta_g$)、Herzberg I帯($A^3\Sigma_u^+ \rightarrow X^3\Sigma_g^-$)、Atmospheric帯($b^1\Sigma_g^+ \rightarrow X^3\Sigma_g^-$)、Infrared Atmospheric帯($a^1\Delta_g \rightarrow X^3\Sigma_g^-$)が確認された(表1.2)。

表1.2. 地球と金星, 火星の酸素大気光 (Krasnopolsky [1986] より作成).

Emission	発光強度 [Rayleigh]			代表的な波長 (ν' - ν'')
	地球	金星	火星	
O(1S - 1D) OI green line	100	10	1	557.7 nm
O ₂ (A ³ Σ_u^+ - X ³ Σ_g^-) Herzberg I system	500	140	-	285.6 nm(0-0), 406.4 nm(0-7), 430.8 nm(0-8), 457.9 nm(0-9)
O ₂ (A ³ Δ_u - a ¹ Δ_g) Chamberlain system	200	200	-	379.6 nm(0-0), 560.6 nm(0-6), 605.5 nm(0-7), 657.2 nm(0-8)
O ₂ (c ¹ Σ_u^- - X ³ Σ_g^-) Herzberg II system	120	2700	30	306.1 nm(0-0), 479.2 nm(0-8), 512.9 nm(0-9), 551.0 nm(0-10)
O ₂ (b ¹ Σ_g^+ - X ³ Σ_g^-) Atmospheric system	6000	200	-	761.9 nm(0-0)
O ₂ (a ¹ Δ_g - X ³ Σ_g^-) IR Atmospheric system	10 ⁵	1.2x10 ⁶	-	1.269 μ m(0-0)

Veneraの分光観測以降, 大気光発光メカニズムをめぐって論争になったが, 以下, 現在までに解釈されているメカニズムを簡単にレビューする.

Green lineやred lineは以下の反応で発光する.



従って, O(1S)の生成がどのように行われるかが問題になるのだが, green lineは地球夜間大気光の代表的な存在でありながら, その励起メカニズムは未だに確定していない. 地球の場合, 主として以下の2つの励起過程が考えられている.

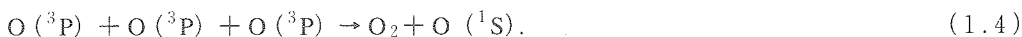
①解離再結合

電子密度の高い高度200 km付近では以下に示す解離再結合が生じると考えられている.



②2ステップ反応

酸素原子が豊富な高度100 km付近においては, 長い間, 酸素原子同士の3対衝突でできると考えられていた(Chapman Mechanism).



しかし, 現在では以下の2ステップ反応によるO₂^{*}の生成が必要であるとされている(Barth Mechanism).



実は, 現在でも2ステップ反応による励起状態O₂^{*}の正体は明らかになっていない. 消去法で考えていくと, まず1ステップ目の反応で励起されうるO₂の状態はエネルギー準位の低い順に, X³ Σ_g^- , a¹ Δ_g , b¹ Σ_g^+ , c¹ Σ_u^- , A³ Δ_u , A³ Σ_u^+ , ⁵ Π_g であるが, このうちエネルギー的に2ステップ目が可能なのはc¹ Σ_u^- ($\nu' \geq 2$), A³ Δ_u , A³ Σ_u^+ , ⁵ Π_g の4つである(図1.1). 実は(1.6)の反応と平行して,



という自然放出もあり, 地球の夜間大気光ではHerzberg I帯の発光が強いことから, A³ Σ_u^+ と考えられたこともあった. しかし, 金星で観測されたHerzberg I帯の発光強度は, この反応式から予測される値より小さいものになってしまう. A³ Δ_u については, 地球・金星ともChamberlain帯の発光強度が小さく, O₂^{*}の候補としては棄却されている. 一方, c¹ Σ_u^- ($\nu' = 0$)ではエネルギーが0.09 eV足りず, (1.6)でO(1S)を励起できないが, c¹ Σ_u^- ($\nu' \geq 2$)なら励起可能となる(振動エネルギーは量子数あたり0.1 eV程度の大きさがあるため). ⁵ Π_g については観測されたことはないが, 存在が予想される電子状態で, 理論的には(1.5)の反応の生成物は70%くらいがこの状態に入ってしまう. 結局, 「O₂^{*}の正体はc¹ Σ_u^- ($\nu' \geq 2$)」と考えても⁵ Π_g と考えても深刻な矛盾は

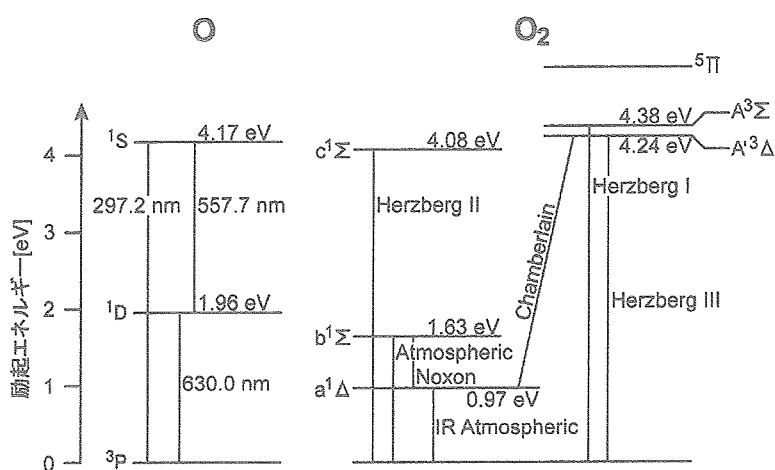


図1.1. O, O₂のエネルギー準位

生じないが、観測されない後者よりは前者の方が好ましい」という見解が強まり、最近までは $c^1\Sigma_u^-(v \geq 2)$ がO₂^{*}の正体として有力視されていた。

それでは、なぜ金星ではgreen lineやred lineの発光が検出されなかったのだろうか。まず①解離再結合の場合、O₂^{*}の解離再結合の反応係数はO₂^{*}の振動準位や電子温度に依存しているのだが、金星の場合、豊富なCO₂との衝突によってO₂^{*}の振動準位が下がり (vibrational quenching)、結果的にO₂^{*}の解離再結合から生成されるO (¹S) やO (¹D) が減少すると考えられている [Fox, 1990]。しかし、O₂^{*}の解離再結合における振動準位と反応係数との関係はよくわかっていない。次に②2ステップ反応の場合、Herzberg II帯 ($c^1\Sigma_u^- \rightarrow X^3\Sigma_g^-$) の $v' = 0$ プログレッションの発光だけが異常に強いことから、 $c^1\Sigma_u^-(v' \geq 2)$ はCO₂との衝突で振動準位が下げられてしまい、ほとんど存在していないのではないかと考えられている [Krasnopolsky, 1981]。

ところが1999年、Slanger *et al.* [2001] はハワイのKeck天文台に設置された高波長分解能 ($\Delta\lambda = 0.02$ nm) の分光器 (HIRES: High Resolution Echelle Spectrograph) で、金星のリム付近を観測したところ、金星において初めてgreen lineを発見した。発光強度は $150 \text{ R} \pm 20\%$ と見積もられ、Venera 9/10の観測結果とは大きく異なるものであった。また、酸素原子のred lineはノイズレベル以下で、上限値は20 Rとの結果が得られている。Fox [1990] のシミュレーションによると、もし解離再結合で発光するならば、green lineよりもred lineの方が、発光強度が大きくならなければならないので、今回観測されたgreen lineは主に高度100 km付近において2ステップ反応により発光したとの結論が得られている。

またSlanger *et al.* [2001] は酸素分子のHerzberg II帯 (551 – 552 nm) も観測しており、 $v' = 0$ プログレッション全体としての発光強度は5.1 kRと見積もられている。Venera 9が観測した際は2.7 kR [Krasnopolsky, 1983]、またPVOが観測した際は4 – 6 kR [Bougher and Borucki, 1994] との結果が得られたが、Venera 9/10観測時は太陽活動極小期付近であったのに対し、PVOや今回の観測では太陽活動極大期であったことから、この発光強度の違いは太陽活動との関係であると解釈されている。

さらにSlanger *et al.* [2002] では、2001年に再び同様の観測を行ったところ、Herzberg II帯は前回と同様に検出されたのに対し、green lineは検出されなかったと報告している。このように、green lineの発光は激しく時間変動しているようであり、継続的に観測されているHerzberg II帯の発光とは全く対照的である。1999年の観測時では、このgreen lineの発光は昼夜境界から周辺まで、全面に渡って見えているだけなので、一見、地球のオーロラのような現象とは考えにくい。しかし、PVOが紫外線領域において、金星夜側全半球規模で出現するオーロラのような発光現象を観測していることから [e.g., Phillips *et al.*, 1986]、green lineの正体はオーロラであるという可能性も捨てきれない。

1.2.2. 発光強度分布

金星における夜間大気光の発光強度ローカルタイム分布は特徴的である。金星大気光は、昼側で CO_2 や N_2 の光解離で生成されたC, O, Nなどの原子が昼夜間対流で夜側へ運ばれ、真夜中付近で沈降して再結合する際に励起分子が作られ発光している。従って、夜間大気光の発光強度のピークは昼夜間対流の沈み込みの位置をモニターしていることになるのだが、金星におけるそれは真夜中よりも朝側に経度で数10度偏った位置に観測されている[e.g., Allen et al., 1992]。金星熱圏高度における風のin-situ観測はこれまで実施されていないのだが、下層スーパーローテーションのような高速流は存在せず、昼夜間対流が卓越すると予想されていた。しかし近年、金星熱圏高度にもスーパーローテーション成分が存在することが示唆する事実が、金星夜間大気光発光強度分布の観測から浮上してきている[e.g., Bougher et al., 1997] (図1.2)。これは、ローカルタイムの5時付近にHeのパルジ構造が存在していることから示唆されている[e.g., Mengel et al., 1989]。この熱圏スーパーローテーションの成因については、現在明らかにされていないが、内部重力波による下層から上層への運動量輸送の帰結との見方が有力である[e.g., Zhang et al., 1996]。つまり、雲層付近の対流によって発生した内部重力波が熱圏高度まで伝搬して、飽和することにより背景風を加減速させ、金星熱圏の大気大循環に影響を与えていると考えられている。金星において、内部重力波が上層大気まで伝搬していることは、上層大気成分の密度の周期的なゆらぎ[e.g., Kasprzak et al., 1993]や大気光発光強度の周期的な変動[Bougher and Borucki, 1994]などの観測結果によって示唆されている。

また、内部重力波による運動量輸送は、通常時の金星昼側から夜側への上層大気の流れをせき止める役割を果たすと考えられている。金星夜側熱圏が昼側と比べてかなり低温であるという事実や、 CO_2 やO密度のローカルタイム分布が昼側にピークをもつ[von Zahn et al., 1983]といった観測結果を説明するためには、レイリー摩擦といったような上層大気流入の制動を考慮する必要がある[e.g., Bougher et al., 1988]。このような観点からも内部重力波が重要視されている。

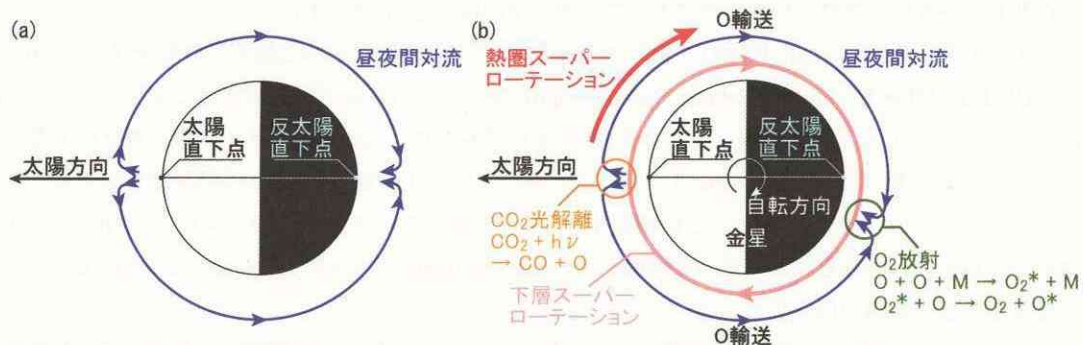


図1.2. 金星熱圏昼夜間対流と、スーパーローテーション成分による大気光発光強度ピーク位置。

(a) 昼夜間対流のみ、(b) 昼夜間対流にスーパーローテーション成分を加えたもの。(b)の場合、発光ピークの位置が反太陽直下点よりも朝側に偏る。

1.2.3. 今後望まれる金星夜間大気光観測

地球大気光のgreen lineメカニズムは、 $\text{O}_2^* = \text{O}_2 (c^1\Sigma_u^-)$ に収束しかけていたが、金星におけるgreen lineの発見によりその論拠が傾いてしまったため、再検討を迫られている。また、金星のgreen lineがなぜ観測されたりされなかったりするのかについては全くわかっていない。今後、金星大気光の2次元イメージング観測を継続的に行い、ローカルタイム分布や時間変動のようすなどを詳しく調査することが望まれる。Green lineのみならず、red lineやHerzberg II帯と観測結果を比較したり、さらにオーロラの可能性も探るために、プラズマ粒子や磁場の計測結果と発光強度との相関を調べたりすることで、その因果関係が明らかになるかもしれない。

また、金星大気光を継続的にモニターすることは、これまでin-situ観測が実施されていない金星下部熱圏にお

る風の分布を調査するという点で大変重要である。金星熱圏スーパーローテーションの成因を明らかにするためには、大気光の波状構造の2次元イメージング連続観測を行い、構造の位相速度、伝播方向、周期、水平波長などを導出すること、また内部重力波活動度の時間・空間変動を検討すること、さらにグローバルな分布を把握することが必要不可欠である。加えて、雲層から熱圏までの風速を観測して、雲層上部から熱圏まで鉛直伝播する波の特性を知ることが重要である。

1.3. 本論文の目的

以上に述べてきたことから、金星における雷・大気光観測の必要性が高まってきているといえる。雷放電観測に関しては、その存在の決定的な証拠を得て、長年の議論に決着をつけることが先決である。その存在が確認された場合、未だ謎に包まれた部分の多い電荷生成・分離メカニズムや硫酸雲物理学の理解につながる。金星雷放電が地球や木星と同様に活発な上昇気流中で発生しているとすれば、現象の全球分布や頻度を調べることは大気活動度の優れた指標になりうる。とりわけメソスケールの金星気象学、延いては地球も含めた惑星気象学の発展に貢献できる。また雷放電が金星大気中に与える熱的・化学的寄与を推定することが可能となるなど、様々な分野に与えるインパクトの大きさは計り知れない。大気光観測に関しては、発光強度の緯度・経度分布から金星超高層大気の運動を継続的にモニターし、さらに波状構造をイメージングすることで、金星下部熱圏と下層大気の力学的結合の解明、金星熱圏大気大循環メカニズムの理解の進展が期待できる。さらに近年、地上望遠鏡で発見された558 nm green lineの連続観測から、その発光強度分布や時間変動を捉え、オーロラとも解釈できるこの発光現象の正体を突き止めることが金星における電磁圏物理学的、大気化学的にも必要不可欠である。

現在、金星探査計画Planet-Cが、宇宙航空研究開発機構・宇宙科学研究本部を中心に進められている。本計画では、金星大気大循環の解明を主目的に、5つのカメラを搭載した金星気象衛星Venus Climate Orbiter (VCO) が打ち上げられる。東北大学・大学院理学研究科・惑星大気物理学分野では、そのうちの1つ「雷・大気光カメラ (LAC: Lightning and Airglow Camera)」を担当しており、上述したような背景・動機から金星の雷放電発光や大気光を2次元高速イメージング観測することを計画している。

本論文の目的は、LACに適切な検出器・光学系・現象の抽出方法を検討し、それらの成立性を示すことである。検出器に関しては高速サンプリングが可能で、かつ高い感度を有する製品を選出し、その性能を実験的に確認することで目標SN比を確保できるかどうかの検討を実施する。光学系に関しては、金星夜面を観測する際の迷光源である太陽直達光・金星昼面光を減衰させることが可能な遮光性能を有するものを考案・設計し、精密模型実験により迷光量を定量的に評価する。現象の抽出方法については、雷放電発光観測時に採用する高速プレトリガーサンプリングのロジックを考案し、サンプル試験を実施してその実用性を確認する。以下、順にPlanet-CミッションとLACの概要やその科学目標と観測計画について、検出器選定のためのSN比の検討結果について、光学系の考案・設計方法と模型実験による迷光量評価について、現象の抽出方法とサンプル試験結果について述べ、最後に本論文の結論を記す。

2. Planet-Cミッションと雷・大気光カメラ

2.1. 金星探査ミッションPlanet-C

日本の惑星探査計画であるPlanet-Cミッションは、金星気象衛星Venus Climate Orbiter (VCO) を打ち上げ、金星の大気大循環、すなわちスーパーローテーションを解明することを主目的とした世界初の惑星気象学ミッションである。本ミッションの概要については『金星探査計画書 (金星探査ワーキンググループ編, 2001年)』に記載されているので、ここでの詳細な説明は省略する。

スーパーローテーションを代表として、金星の気象学の理解が、同じ地球型惑星である火星に比べて際立って遅れている大きな理由は、惑星全体を覆う分厚い雲と大気が、雲層以下の高度グローバルな気象観測を妨げてきたことにある。過去の金星探査ミッションでは、下層大気を透過しない紫外及び中間赤外域の光による観測が実施されていたため、観測高度領域は雲頂 (高度70 km付近) より高い場所に限られた。また、雲層より下層のデータは単発的な直接プローブによるものしかなく、水平構造や時間変動の情報が得られず、波動や渦の時空間構造が捉えられなかった。これに対し本ミッションでは、1980年代後半の木星探査機Galileoの金星フライバイ時に発見された、下層大気や地表面まで大気圏外から透視できる「近赤外ウィンドウ (波長1 - 1.2, 1.7, 2.3 μm)」を採用する [Carlson *et al.*, 1991]。Planet-Cによる金星大気観測計画は、この近赤外ウィンドウを含む紫外から中間赤外まで多波長で雲パターンを10 - 20 kmの空間分解能で撮像・追跡し、大気運動を3次元的に観測して波動や子午面循環の立体構造を明らかにする (表2.1)。これに電波オカルテーションによる大気鉛直構造モニターを加えて、本格的な惑星気象探査機を構成し、金星気象研究に突破口を開こうとするものである。

表2.1. VCO搭載カメラ概要 (2003年1月現在)。

カメラ名称	諸元	観測対象	得られる主な物理量
近赤外カメラ1	観測波長=1.01 μm	昼: 雲層による太陽散乱光	下層雲構造 (50 km)
IR1: InfraRed camera 1	視野 12 度 1024x1024 SiCCD	夜: 地表からの熱放射	風速場 活火山, 地表面放射率
近赤外カメラ2	観測波長=1.65, 1.73, 2.02, 2.26, 2.32 μm	夜: 下層大気からの熱放射	下層雲構造 (50 km)
IR2: InfraRed camera 2	視野 12 度 1024x1024 PtSi		風速場, 雲粒サイズ CO 分布 (35 km)
中間赤外カメラ	観測波長=8 - 12 μm	昼夜: 雲頂からの熱放射	雲頂温度分布 (70 km)
LIR: Long-wave InfraRed camera	視野 12 度 240x240 Bolometer		
紫外カメラ	観測波長=280, 365 nm	昼: 雲頂による太陽散乱光	雲頂構造 (70 km)
UVI: UltraViolet Imager	視野 12 度 1024x1024 SiCCD		風速場 SO ₂ 分布
雷・大気光カメラ	波長=551, 558, 777, 545 nm	夜: 雷発光, O/O ₂ 大気光	雷活動の頻度・分布
LAC: Lightning and Airglow Camera	視野 12 度 8x8 PMT or SiAPD		大気光発光強度分布

本ミッションにおいて設定された現時点における軌道および探査機を表2.2にまとめる。

表2.2. VCO諸元 (2003年1月現在).

打ち上げロケット	M-V
衛星姿勢	3軸制御(バイアスモーメンタム方式)
探査機総重量(Dry重量)	約480kg(約303kg)
観測機器重量	約34kg
軌道	近金点 300 km, 遠金点 13 Rv
軌道傾斜角	172°
周期	約30地球時間

2.2. 雷・大気光カメラ

VCOに搭載される5台のカメラのうち、東北大学・大学院理学研究科・惑星大気物理学分野では雷・大気光カメラ(Lightning and Airglow Camera:以下LAC)を担当している。LACは金星夜面における雷放電や大気光といった可視領域の大気発光現象を2次元高速イメージング観測する。

2.2.1. LACの科学目標

本観測器は、1.で述べた背景・動機から、以下の科学目標を掲げている。

雷放電発光

金星における雷放電現象は20年余にもわたる光学・電磁波観測にも拘わらず、その存在の有無についての議論は未だに収束していない。LACは過去の雷観測や研究結果を元に、現象に対応した高感度・高時間分解能の2次元センサーを採用し、世界初の惑星雷専用観測器を構成する。地球における平均的規模の1/100レベルの雷放電が雲の下で発生した場合でも検出できる性能を達成することで、長年の論争に終止符を打つ。雷放電現象が検出できれば、VCOに搭載される観測器で唯一鉛直対流をモニター可能なものとして金星気象学への貢献が期待される他、発光の継続時間、1フラッシュあたりの発光エネルギー、時間変動、発生頻度、全球分布などのパラメータを導出し、金星における大気化学、大気電気学的发展にも貢献する。また赤外や紫外カメラとの同時観測を行うことにより、雷放電が発生する気象擾乱状態や雲の性質を調査し、金星における電荷分離プロセスを探る。さらに近赤外カメラ1(IR1)で火山活動に伴う溶岩噴出イベントが捉えられ、加えてそれに対応した雷放電発光が検出されれば、活火山探索への利用も可能と考えられる。

大気光(オーロラ)

金星夜間大気光の発光強度ピークの位置は、金星下部熱圏における昼夜間対流の沈み込みの位置を反映している。また、ピーク位置が真夜中から朝側へシフトしている事実は、金星熱圏にスーパーローテーション成分が存在することを示唆するものである。LACは金星大気光を連続的に2次元イメージング観測することにより、発光強度分布やその時間変動を導出し、金星下部熱圏における大気運動をモニターすることで、謎に包まれた金星大気大循環の理解への手がかりを得る。またSN比=10を確保して観測することで、この現象の変調模様を検出し、赤外や紫外カメラから同時に観測される雲パターンや電波オカルテーションによる鉛直温度分布と比較する。その結果、下層スーパーローテーションにより発生した内部重力波が上層大気に伝播している様子を捉えられれば、金星下部熱圏と下層大気の力学的結合過程の解明に貢献できる。内部重力波が金星熱圏大気大循環に与える影響の大きさは、変調模様(波状構造)を継続的に観測し、水平波長や位相速度などを求めることで推定できる。さらにオーロラとも解釈できる酸素原子の558nmの発光を検出し、酸素分子のHerzberg II帯放射との違いを調べ、その正体を突き止める。

2.2.2. LAC観測計画

LACは探査機の周回軌道のうち、主に近金点付近から金星表面より3Rvの距離の間で、金星夜面観測を実施する予定である(図2.1)。これは第一に、観測される光量を確保するためである。雷放電発光のような点光源とみなせる発光は距離の2乗で光量が減衰するので、光源から近い地点でのみ観測を行うことが要求される。第二に、視野近傍にある太陽からの直達光や金星昼面からの太陽散乱光の金星夜面への混入を極力抑えるためである。探査機が日陰にいるときでない限り、金星夜面観測では視野中心からさほど遠くない方向に太陽があることが避けられず、太陽直達光の混入が問題となる。同時に、金星昼面からの太陽散乱光も夜面へ混入し、特に大気光のような発光強度の弱い現象を観測時には、これらの影響は顕著になる。従って、太陽が視野中心からできる限り遠く離れた位置にあるような状況、かつ視野内に金星昼面が入ってこないような状況が実現可能な近金点付近でのみ金星夜面の観測を行うことが要求される。他の4台のカメラは、探査機の運動が大気の高速回転と同期する遠金点付近での観測が主要なので、LACは近金点付近において十分な観測時間を確保することができると考えられる。

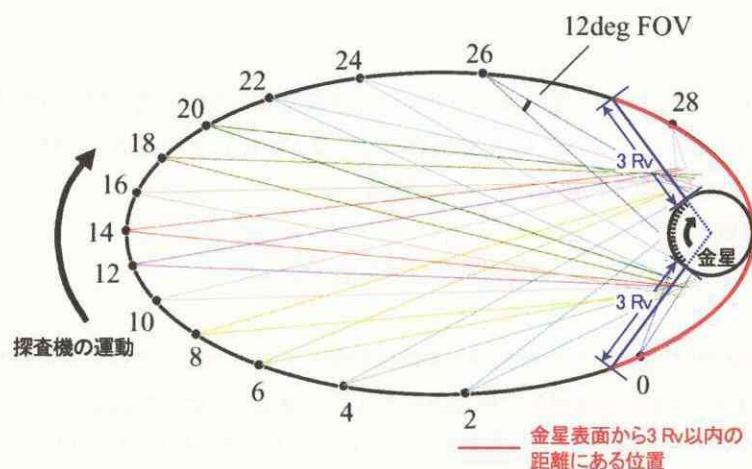


図2.1. 金星北極側から見た探査機の2時間ごとの位置。数字は時間を表す。LACはそのうち近金点付近から3Rvまでに探査機がいる間(4時間強)で、かつ金星夜面が見える時間帯に観測する予定である。

LACは前節の科学目標を達成するべく、検出目標として以下の3つを設定している。

①地球における平均的規模(発光エネルギー 10^6 J)の雷放電発光が雲層下で発生した場合でも、金星表面より3Rv離れた地点から検出可能。

②地球における平均的規模の1/100(発光エネルギー 10^4 J)の雷放電発光が雲層下で発生した場合でも、金星表面より1000km離れた地点から検出可能。

③発光強度100 Rayleighの大気光がSN比=10を確保して検出可能。

これらを実現させるべく、LACに課された開発項目は以下の3つである。

(1) 高速撮像かつ微弱光検出が可能となる検出器の選定と開発

金星における雷放電発光の継続時間はよくわかっていないのが現状だが、地球と同様に短いことを想定すると、ノイズと区別して検出するには、検出器として高速サンプリングが可能なのが要求される。かつ、発光強度100 Rayleighの大気光という、発光強度が弱い現象も検出することを目標にしているため、高ゲインかつ低ノイズの検出器の選定と開発が必要である。

(2) 高コントラスト光学系の設計と開発

本観測器は金星夜面における大気発光現象を観測するが、できるだけ多くの観測時間を確保するため、太陽や金星昼面が視野近傍にあるときでも観測を行う計画である。観測視野からそれらを外す必要があることは言うまでもないが、太陽からの直達光や金星昼面からの太陽散乱光が視野内に混入し、観測の妨げとなる恐れがある。

従って、観測視野外からの入射光が光学系初段に到達するまでに大きく減衰させることが可能な高い遮光技術を有する光学系の設計・開発が不可欠である。

(3) 高速サンプリング時におけるデータ取得方法の考案とその検討

前述したように、本観測器は雷放電発光のような高速時間変動現象を捉えることを目的としているため、データの取得は高速サンプリングで行う必要がある。連続的にサンプリングすると膨大なデータ量を残さなければならぬため、プレトリガーサンプリング方式を採用することを計画している。この方法の問題は、時々刻々変化するバックグラウンドレベルに対して、どのようにして自動的にトリガーレベルを設定し、かつリアルタイムで信号を検出可能かという点である。また、このような処理を探査機上で実行するには、できるだけ簡単なアルゴリズムが要求される。

2003年1月における本観測器の諸元は表2.3.のとおりである。

表2.3. LAC諸元 (2003年1月現在)。

観測波長(観測対象)	777 nm(雷), 551 nm(O ₂ 大気光), 558 nm(O大気光), 545 nm(BG)
半値全幅	4 nm
画素サイズ	2 mm ²
撮像素子	8x8 PMT(開口率 0.78) 又は 44ch Si APD(開口率未定)
対物レンズ	有効口径:27.4 mm, 材質:無水合成石英を1枚
焦点距離	86.1 mm
視野角	12°円
時間分解能	5x10 ⁴ samples/sec/pixel
角度分解能	1.5°
空間分解能	500 km(@3 Rv), 10 km(@1000 km)

(1) 観測波長

雷放電発光観測用としては酸素原子の777 nmを採用する。これは第一に、模擬金星大気(CO₂:96%, N₂:4%)中におけるレーザー誘導プラズマによる放電実験結果[Borucki *et al.*, 1996]や、東北学院大におけるCO₂大気中における放電実験結果[大羽他, 2003]に準ずるものである。金星大気中では1気圧(高度50 km付近、雲層下部に対応)や5気圧(高度35 km付近、もやが存在する領域に対応)において放電が発生すると、酸素原子の777.4 nmの輝線が強く発光するという結果が得られており、またこの輝線から発光エネルギー中の半分近くが放射されるとのことである。第二に、Hansell *et al.* [1995]の地上望遠鏡から777.4 nmの干渉フィルタ(半値幅0.7 nm)を用いて金星雷放電発光の検出に成功したという報告に基づくものである。本観測器では中心波長777 nm、半値全幅4 nmの干渉フィルタを用いて、金星雷放電発光の検出を狙う。

一方、大気光観測用として、一つは551 nmを採用する。これは酸素分子のHerzberg II帯で見られる回転線の一つ(0-10バンド)で、Venera 9や地上望遠鏡の分光観測でも検出されており、発光強度はこのバンド全体で720 Rayleighと見積もられている[Slanger *et al.*, 2001]。この波長で大気光を観測することにより、発光強度分布や波状構造などを導出する。もう一つの観測波長である558 nmは酸素原子の輝線であるが、これはSlanger *et al.* [2001]で発見された観測事実を受けて採用したものである。発光強度は150 Rayleigh程度と推定されており、時間変化の激しさなど謎の多いこの発光の特徴を詳しく調査する。両者ともバックグラウンドフィルタとして波長545 nmで取得する画像を用いる。551 nm, 558 nm, 545 nmとも半値幅nmの干渉フィルタを用いる。

(2) 検出器

LAC検出器の候補として、光電子増倍管(PMT; Photo Multiplier Tube)とアバランシェ・フォトダイオード(APD; Avalanche PhotoDiode)の2つを検討した。光電子増倍管は2mm角のピクセルサイズを有する全64チャンネル(8×8)の2次元配列素子だが、LACは円形の視野を持つため、そのうちの44チャンネルを使用することにする。一方、アバランシェ・フォトダイオードは、2×2の2次元配列素子しか市販品にないので、光電子増倍管と同じ44チャンネルの素子を新たに開発する必要がある。ピクセルサイズは光電子増倍管と同じ2mm角の予定である。詳細な検討結果については後述する。

(3) 光学系

硝材として耐放射線性に優れた無水合成石英のみを用い、1枚構成を採用する。単一硝材を用いるため、波長により焦点距離が1mm程度異なっているが、検出素子サイズが2mmと大きい問題にはならない。MTF(ナイキスト周波数0.25本/mm)は波長551nmおよび777nmの視野中心・端のいずれにおいても0.8以上の値をとる。スポットダイアグラムによる解析でも、視野中心で径0.5-1.0mm、視野端で径0.6-1.4mm以内に収まっている。

視野は全角12度となっており、LAC以外の5台のカメラもこの値で統一されている。

(4) 時空間分解能

サンプリング方法に関しては、LACは以下の2つのモードで観測を行うことにする。

雷放電発光観測モード：50kHzでプレトリガースAMPLINGを行い、発光が検出されたチャンネルのみトリガの前後数10msecのデータとして取得する。例えば、地球雷放電発光の1ストロークあたりの平均継続時間200 μ secを検出する場合、10点でサンプリングすることができ、高速時間変動現象にも十分対応可能である。

大気光観測モード：50kHzのサンプリングレートで連続的にデータを取得し、積分時間10-60secで1枚の画像を作成する。

また空間分解能に関しては、金星表面より3Rvの距離から観測した場合は約500km、1000kmの距離からでは約10kmとなっている。金星の大気光が水平波長500km程度の波状構造を持つとすると[e.g., Bougher and Borucki, 1994], 10sec積分で1枚の画像を作成する場合、衛星速度が最大(約11km/sec)となる近金点付近においても、この波状構造は十分検出可能であると考えられる。

2.2.3. LAC開発体制

現在、LACは以下に示すように、各大学・研究機関・メーカーと協力して開発を進めている。

表2.4. LAC開発体制

作業	担当
取りまとめ	東北大学
データ取得方法・大気光観測検討	国立極地研究所
雷放電発光観測検討	大阪府立大学
電気系, フィルタホイール, 組み立て	明星電気株式会社
光学系(レンズ)	株式会社 ニコン
光学系(バッフルなど遮光部分)	株式会社 馬越
検出器	浜松ホトニクス株式会社
システム	NEC 東芝スペースシステム株式会社

3. 検出器選定のためのSN比検討

LACの検出器として2つの素子を検討した。ここでは3.1で観測される光量を見積もり、3.2でその光量の検出が可能となる素子について、検出器の性能諸元からS/N比を検討した結果を示す。さらに3.3, 3.4では実際に検討中の素子を用いて行った絶対感度校正実験, 暗電流温度特性試験からS/N比を検討した結果について示し、3.5にまとめを記す。

3.1. 観測される光量の見積もり

2.で述べたように、LACの検出目標として以下の3つが設定されている。

(1) 地球における平均的規模 (発光エネルギー 10^6 J) の雷放電発光が雲層下で発生した場合でも、金星表面より3 Rv離れた地点から検出可能。

(2) 地球における平均的規模の1/100 (発光エネルギー 10^4 J) の雷放電発光が雲層下で発生した場合でも、金星表面より1000 km離れた地点から検出可能。

(3) 発光強度 100 R (=Rayleigh) の大気光がSN比=10を確保して検出可能。

そこで表3.1に示すような仮定をおいて、上記(1)~(3)について観測される光量を見積もる。

表3.1. 光量見積もりの仮定。

観測対象	雷放電発光	大気光
発光形態	点光源	面光源
観測波長	800 nm	500 nm
1光子あたりのエネルギー ζ	2.5×10^{-19} [J/photon]	-
発光強度	1フラッシュあたりの発光エネルギー $E_{\text{lightning}}^*$ 10^6 J (地球平均レベル) 10^4 J (地球平均の1/100レベル) *うち、金星雲頂よりその41%が放出 ^[1]	発光強度 I_{airglow} 100 R
発光継続時間 T_{duration}	200 μsec ^[2]	-
積分時間 T_{sample}	20 μsec	10 sec
観測地点 d	金星表面より1000 km, 3 Rv	-

[1] Williams and Thomason [1983] の計算によると、金星雲層中で雷放電発光が起こると、光子数の41%が宇宙空間へ放出されるという結果が得られている。

[2] 地球雷放電におけるストロークやspritesなどを含めた典型的な発光継続時間を考慮した。

1 サンプルあたり観測される光子数 N_{photon} はそれぞれ次式で表される。

$$\text{雷放電発光} \quad N_{\text{photon}} = \frac{E_{\text{lightning}} \cdot 0.41 / \zeta}{4\pi d^2 \cdot T_{\text{duration}}} \cdot T_{\text{sample}} \cdot T_{\text{filter}} \cdot T_{\text{lens}} \cdot S \quad [\text{photons/sample}] \quad (3.1)$$

$$\text{大気光} \quad N_{\text{photon}} = \frac{10^6}{4\pi} \cdot I_{\text{airglow}} \cdot T_{\text{sample}} \cdot T_{\text{filter}} \cdot T_{\text{lens}} \cdot S \cdot \Omega_{\text{pixel}} \quad [\text{photons/sample}] \quad (3.2)$$

但し, $T_{\text{filter}} = 0.7$; フィルタ透過率

$T_{\text{lens}} = 0.96$; レンズ透過率

$S = 5.9 \text{ [cm}^2\text{]}$; レンズ有効面積 (有効口径 27.2 mmに対応)

$\Omega_{\text{pixel}} = 6.9 \times 10^{-4} \text{ [str]}$; ピクセル立体角 (角度分解能 1.5° に対応, ピクセルサイズは 2 mm角)

以上の計算結果を表 3.2 に示す.

表3.2. 観測される光量の見積もり結果.

観測対象	雷放電発光 地球平均レベル	雷放電発光 地球平均 1/100 レベル	大気光 100 R
観測地点	3 Rv	1000 km	-
1 サンプルあたり観測される光子数 $N_{\text{photon}} \text{ [photons/sample]}$	1.6×10^4 (20 μsec あたり)	5.2×10^4 (20 μsec あたり)	2.2×10^5 (10 sec あたり)

雷観測時は, いずれの場合も 1 サンプルあたり 10^4 オーダーの光子数が観測されることが見込まれる. 一方, 大気光観測時に見込まれる光子数は 10^5 のオーダーであるが, これは 10 sec 積分した時の値であるので, 単位時間あたりで比較すると最も少ない光量になる.

3.2 検出器性能諸元からのSN比検討

3.2.1. 光電子増倍管

光電子増倍管 (PhotoMultiplier Tube: 以下PMT) は, 光センサの中でも極めて高感度, 高速応答の光検出器である. 現在我々が検討している位置検出型PMTは, メタルチャンネルダイノードという高ダイナミックレンジ, 高ゲインおよび高位置分解能を備えたダイノードを用いたものである. PMTについての記述は, 『光電子増倍管—その基礎と応用— (浜松ホトニクス株式会社 編集委員会, 1998年)』が詳しいので, ここでの詳細な説明は省略する.

今回検討したPMTは浜松ホトニクス社製H 7546である. これは 8×8 のマルチアノード2次元PMTで, 2 mm角のピクセルを有する (図 3.1). LACは円形の視野を持つため, 全 64 チャンネル中 44 チャンネルを使用する. しかし図 3.2 (左) からわかるように, 市販品では光電面がバイアルカリのものしかないため, 感度が 300 – 700 nm程度までしかなく, 雷放電発光観測 (777 nm) としては使用できない. 感度を 850 nmあたりまで延ばすためには, マルチアルカリ光電面をもつPMTを開発する必要がある. マルチアルカリにした時に予想される量子効率波長 777 nm付近で 0.3%, 550 nm付近で 9%程度である. また図 3.2 (右) より, 印加電圧 900 Vの時のゲインは 3×10^5 , 暗電流は $4 \times 10^{-9} \text{ A}$ (= 4 nA) 程度となることがわかる.

PMTを採用する際, 問題となるのはその耐振性である. 特に 8×8 マルチアノードのPMTは振動に弱いとされ, 衛星打ち上げ時の振動に耐えられるかどうか懸念される. 対策としては, 振動の影響をできるだけ軽減させるようなPMT固定治具の制作, 耐振性に優れたPMT構造の開発などが必要とされる. また上述したように, 赤外付近まで感度を持たせるため, 光電面の材質をマルチアルカリにしたPMTの開発が不可欠である. さらに, チャンネル間のゲインのバラツキが平均で 1 : 3 となっており, この対策も必要である.

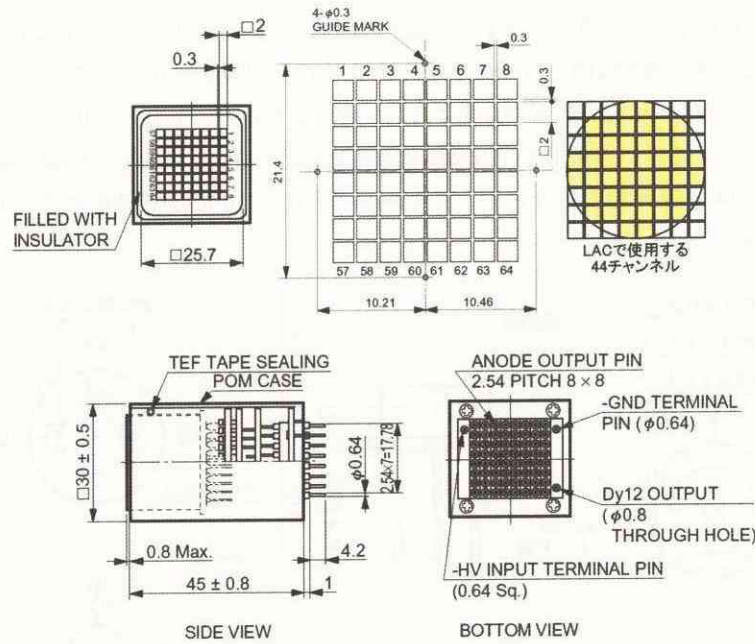


図3.1. Hamamatsu H 7546 の外形と寸法 (浜松ホトニクスカタログより作成).

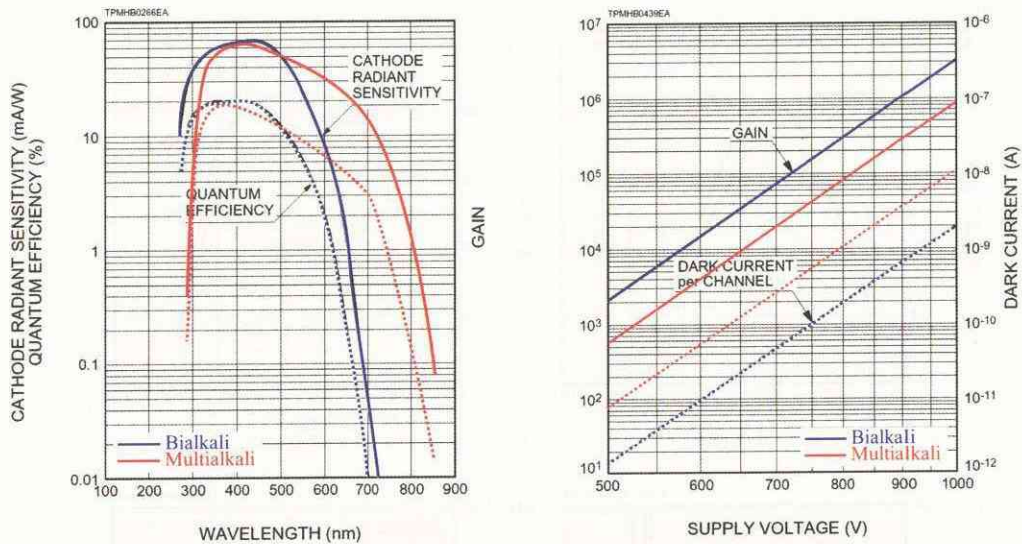


図3.2. Hamamatsu H 7546 の分光感度特性・量子効率 (左) と利得・暗電流特性 (右). 市販品は光電面にバイアルカリを使用したものしかない. マルチアルカリの特性は予想されるものを示してある (浜松ホトニクスカタログより作成).

3.2.2. アバランシェ・フォトダイオード

フォトダイオードは、半導体のPN接合部に光を照射すると電流や電圧を発生する受光素子である。入射光に対する直線性が優れ、雑音が小さく、感度波長範囲が広いといった特徴をもつ。また、小型軽量である上に、機械的強度が強いため、耐振性に優れているともいえる。動作原理は『光半導体ハンドブック (浜松ホトニクス「光半導体ハンドブック」制作委員会, 2004年)』に詳しいので、ここでの説明は省略する。

現在検討中のAPDは、浜松ホトニクス社製S 8664シリーズである。図 3.3 にこのシリーズを代表してS 8664-20K の外形と寸法を示す。S 8664-20Kは直径2.0 mmの円形の有効受光面を1つ有する。44チャンネル化するには、この素子を44個使用して2次元配列させる方法と、素子の受光面を44個に区切り、それに対応して内部構造を

開発するという方法が考えられるが、前者は1つ1つの素子の間に3-5mmの隙間ができてしまうので、後者の方法を採用することにする。量子効率は図3.4 (b) に示したように、波長777 nm付近で72%、550 nm付近で77%程度となっている。また図3.4 (d) からわかるように、ゲインが温度によって変化する。例として20°Cでゲインを100にすることを考えると、逆電圧を370 V程度加える必要がある。このとき暗電流は図3.4 (c) 中にはS8664-20 Kのデータは掲載されていないが、S8664-10 Kと30 Kの間をとるとおおよそ400 pA ($= 400 \times 10^{-12}$ A) 程度となる。

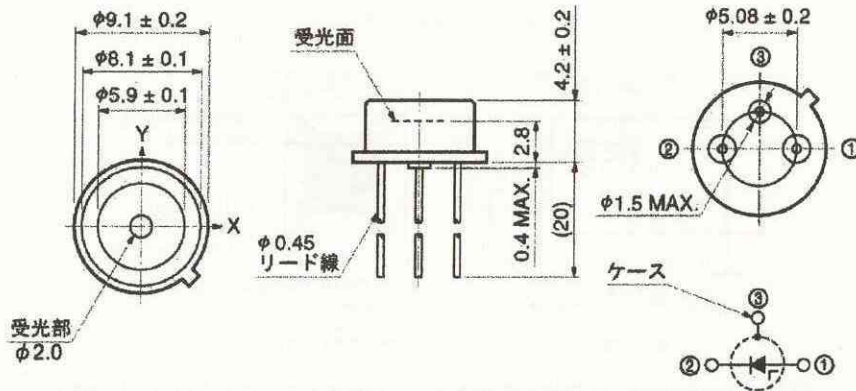


図3.3. Hamamatsu S8664-20Kの外形と寸法 (浜松ホトニクスカタログより作成).

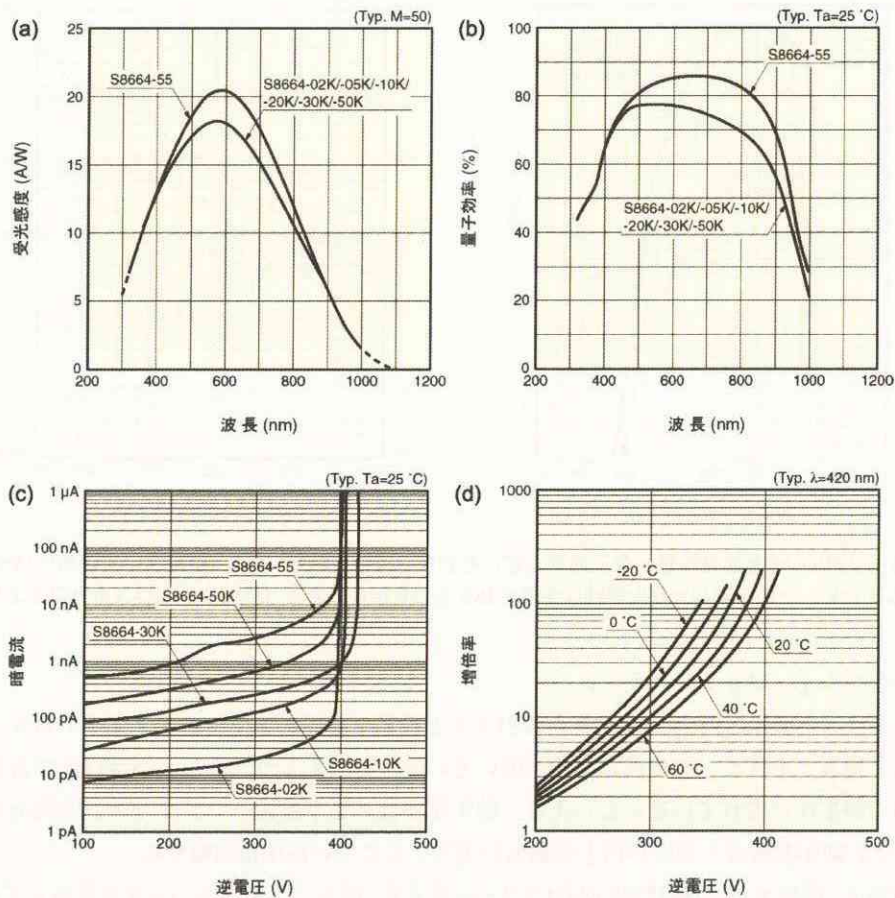


図3.4. Hamamatsu S8664シリーズの特性。(a) 分光感度特性、(b) 量子効率、(c) 暗電流、(d) ゲイン (浜松ホトニクスカタログより作成)。

前述したようにAPDは固体素子であるため、PMTに比べると耐振性はそれほど問題にならないと考えられる。APDを採用する際は、マルチアノード化（44チャンネル）の開発が必要である。またPMTと同様に、チャンネル間のゲインのバラツキ（±30%程度）に関する対策も必要である。さらに、ゲインの温度変化が懸念される（図3.4(d)参照）。衛星軌道上で感度校正の実施や、逆電圧を操作して利得を一定に保てるようなエレクトロニクスの開発などが要求される。

3.2.3. PMTとAPDの比較と成立性の検討

ここで比較のため、PMTとAPDの性能を表3.3にまとめておく。

表3.3. PMTとAPDの性能比較。

検出器	PMT	APD
ゲイン G	3×10^5	10^2
	印加電圧=900 V	逆電圧=370 V, 20°C
量子効率 η	0.3 %@777 nm 9 %@550 nm	72 %@777 nm 77 %@550 nm
暗電流 I_{dark}	4 nA	400 pA
	印加電圧=900 V	逆電圧=370 V, 20°C

ゲインはPMTの方が3桁以上高いが、量子効率はAPDの方が1-2桁以上勝る。出力値はゲインと量子効率の積で決定されるので、波長777 nmに関しては12.5倍、550 nmでは350倍程度PMTの方が上回ることになる。しかし暗電流はAPDの方が10倍ほど低いので、より低ノイズな検出器といえる。

以上の値を検出器性能諸元や暗電流測定実験結果から導出したところで、検出器の成立性を検討する。見積もるSN比は1) 光電子数統計ゆらぎによるSN比、2) 暗電流電子数統計ゆらぎによるSN比の2つであり、いずれも微弱光を検出する際、重要なものである。このとき、SN比がシグナル増倍の前後どちらかで決定されるかが確定できない（特に後者は増倍部のどこで暗電流電子が出てくるのかが不明である）。しかし増倍前と増倍後の値の間に収まるということは予想されるので、両方とも導出することにする。

1) 光電子数統計ゆらぎによるSN比

光電子数（出力電子数）の統計ゆらぎをノイズとして、光電子数との比をとる。ノイズ成分はr.m.s. (root mean square) で表すものとする。

$$\text{光電子数 (増倍前)} \quad N_e = N_{\text{photon}} \cdot \eta \quad [\text{electrons/sample}] \quad (3.3)$$

$$\text{光電子数 (増倍後)} \quad N_e = N_{\text{photon}} \cdot \eta \cdot G \quad [\text{electrons/sample}] \quad (3.4)$$

$$\text{SN比} \quad \text{SN}_{\text{signal}} = \frac{N_e}{\sqrt{N_e}} = \sqrt{N_e} \quad (3.5)$$

2) 暗電流電子数統計ゆらぎによるSN比

暗電流電子数の統計ゆらぎをノイズとして、光電子数との比をとる。

$$\text{暗電流電子数 (増倍前)} \quad N_{\text{dark}} = \frac{I_{\text{dark}} \cdot T_{\text{sample}} / G}{e} \quad [\text{electrons/sample}] \quad (3.6)$$

$$\text{但し, } e = 1.602 \times 10^{-19} \text{ [C] (電気素量)}$$

$$\text{暗電流電子数 (増倍後)} \quad N_{\text{dark}} = \frac{I_{\text{dark}} \cdot T_{\text{sample}}}{e} \quad [\text{electrons/sample}] \quad (3.7)$$

$$\text{SN比} \quad SN_{\text{dark}} = \frac{N_e}{\sqrt{N_{\text{dark}}}} \quad (3.8)$$

PMT, APDを採用した場合の見積りの結果は, それぞれ表 3.4, 表 3.5 に示すとおりである.

表3.4. PMTを採用した場合のSN比の比較.

観測対象		雷放電発光 地球平均レベル	雷放電発光 地球平均 1/100 レベル	大気光 100 R
観測地点		3 Rv	1000 km	-
増倍前	光電子数 [electrons/sample]	47	1.6×10^2	2.0×10^4
	光電子数統計ゆらぎによる SN 比	6.9	13	1.4×10^2
	暗電流電子数統計ゆらぎによる SN 比	1.2×10^2	3.8×10^2	22
増倍後	光電子数 [electrons/sample]	1.4×10^7	4.7×10^7	5.8×10^9
	光電子数統計ゆらぎによる SN 比	3.8×10^3	6.9×10^3	7.6×10^4
	暗電流電子数統計ゆらぎによる SN 比	2.0×10^4	6.6×10^4	1.2×10^4

表3.5. APDを採用した場合のSN比の比較.

観測対象		雷放電発光 地球平均レベル	雷放電発光 地球平均 1/100 レベル	大気光 100 R
観測地点		3 Rv	1000 km	-
増倍前	光電子数 [electrons/sample]	1.1×10^4	3.8×10^4	1.7×10^5
	光電子数統計ゆらぎによる SN 比	1.1×10^2	1.9×10^2	4.1×10^2
	暗電流電子数統計ゆらぎによる SN 比	5.1×10^2	1.7×10^3	11
増倍後	光電子数 [electrons/sample]	1.1×10^6	3.8×10^6	1.7×10^7
	光電子数統計ゆらぎによる SN 比	1.1×10^3	1.9×10^3	4.1×10^3
	暗電流電子数統計ゆらぎによる SN 比	5.1×10^3	1.7×10^4	1.1×10^2

SN比がシグナル増倍前で決定される場合, 両検出器ともSN比が最小の値をとる. 雷放電発光観測に関しては, いずれの場合も検出可能なレベルにあると考えられるが, PMTの方が低量子効率な分, APDに比べて雷放電発光検出は不利と思われる. 大気光に関してもいずれも目標SN比=10以上の達成が可能となっている.

以上より, 検出器諸元からSN比を検討した結果, 両検出器とも検出目標を達成できることが示された.

3.3. PMT・APD絶対感度校正実験

実際にPMTやAPDを使用して光源(特に100 Rの大気光)をモニターしたとき, どのくらいの電流値がシグナルとして出力されるのかを調べるのが不可欠である. 我々は国立極地研究所の光学機器校正室で, 積分球を用いて標準光源を測定し, 両検出器の絶対感度校正実験を行った.

3.3.1. PMT絶対感度校正実験

PMTに関しては東北大学・大学院理学研究科・惑星大気物理学分野で通常spritesやelvesなどの上層大気発光現象を地上光学観測しているMAP (Multi-anode Array Photometer) を使用した。MAPの検出器にはHamamatsu R 5900 U-01-L16という1×16のマルチアノードPMTが用いられていて、光電面の材質にはマルチアルカリが採用されているものである。MAPの電流電圧変換回路は図3.5に示すとおりで、電流電圧変換値は $2 \times 10^5 \text{ V/A}$ となっている。測定実験の模式図と写真をそれぞれ図3.6と図3.7に示す。なお、このとき実験室内の温度は 24.3°C であった。

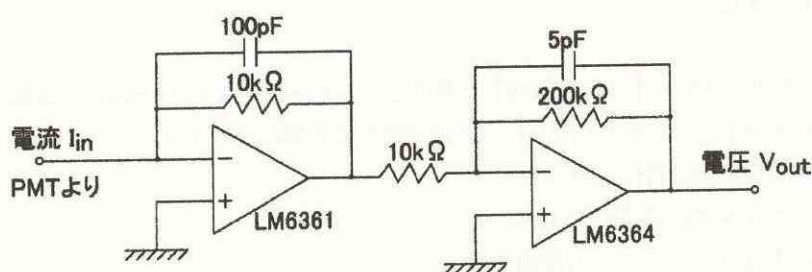


図3.5. PMTの電流電圧変換回路 [内田, 1999].

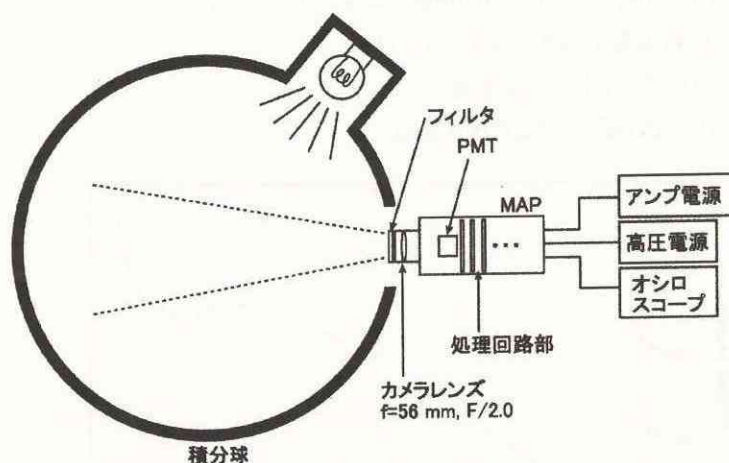


図3.6. 積分球を用いた標準光源測定の構成 (PMTの場合).



図3.7. PMT出力電圧測定実験風景.

この積分球は、波長 630 nm の発光強度 I [W/str/m²/nm] を手元で変化させることで、積分球がもつ光源の波長特性 (図 3.8) から、ある発光強度 [R] の光を出力させることができる。PMT の出力電子数 N_e [electrons/sec]、出力電流値 I_{out} [A]、出力電圧値 V_{out} [V] は、それぞれ以下の式で表される。

$$N_e = \frac{I_{PMT}}{I_{630nm}} \cdot \int L(\lambda) \cdot T(\lambda) \cdot \frac{10^6}{4\pi} \cdot S \cdot \Omega_{PMT} \cdot G_{PMT} \cdot \eta_{PMT}(\lambda) \cdot d\lambda \quad (3.9)$$

$$I_{out} = N_e \cdot e \quad (3.10)$$

$$V_{out} = I_{out} \cdot G_{AMP} \quad (3.11)$$

但し、 $I_{630nm} = 2.0 \times 10^{-6}$ [W/str/m²/nm] ; 基準となる光源の波長 630 nm における発光強度
 $I_{PMT} = 2.0 \times 10^{-7}$ [W/str/m²/nm] ; PMT 実験時の光源の波長 630 nm における発光強度
 $L(\lambda)$; 光源の波長特性 (図 3.8)
 $T(\lambda)$; フィルタの透過特性 (図 3.9)
 $S = 6.2$ [cm²] ; レンズの有効面積
 $\Omega_{PMT} = 4.1 \times 10^{-3}$ [str] ; PMT のピクセル立体角
 $G_{PMT} = 3 \times 10^5$; PMT のゲイン (印加電圧 = 895 V とした)
 $\eta_{PMT}(\lambda)$; PMT の量子効率 (図 3.2 (左))
 $e = 1.602 \times 10^{-19}$ [C] ; 電気素量
 $G_{AMP} = 2 \times 10^5$ [V/A] ; 電流電圧変換値

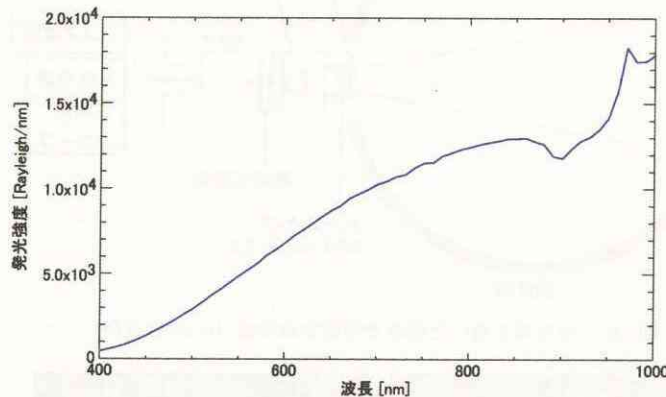


図3.8. 積分球標準光源の波長特性 (波長 630 nm で 2.0×10^{-6} W/str/m²/nm ($= 7.961 \times 10^3$ Rayleigh/nm) のとき)。

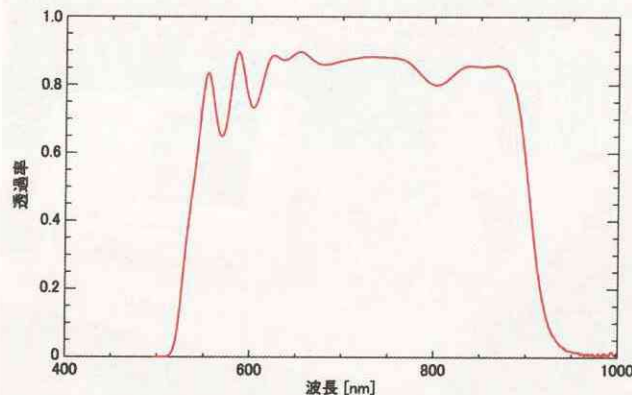


図3.9. 使用したフィルタの透過特性。

今回の実験におけるPMT出力電圧は140 mVという値が得られた。式(3.9)～(3.11)から算出された出力電圧は136 mV程度なので、今回の測定値はPMTの性能から予測されるものとほぼ同じ値が得られた。

出力電圧値 $V_{out}=140$ mVは、式(3.10)、(3.11)より出力電流値 $I_{out}=0.70$ μ A、出力電子数(光電子数) $N_e=4.4 \times 10^{15}$ electrons/secに換算される。LAC光学系で観測した場合、波長550 nmにおいては次式で表される発光強度 $I_{550\text{nm}}$ [R]に対応する。

$$I_{550\text{nm}} = N_e \cdot \frac{1}{\eta_{550\text{nm}}} \cdot \frac{1}{T_{550\text{nm}}} \cdot \frac{4\pi}{10^6} \cdot \frac{1}{S_{\text{LAC}} \cdot \Omega_{\text{LAC}}} \quad (3.12)$$

但し、 $\eta_{550\text{nm}}=0.09$; 波長550 nmにおけるPMTの量子効率
 $T_{550\text{nm}}=0.80$; 波長550 nmにおけるフィルタの透過率
 $S_{\text{LAC}}=5.8$ [cm²] ; LACのレンズ有効面積
 $\Omega_{\text{LAC}}=6.9 \times 10^{-4}$ [str] ; LACのピクセル立体角

以上より、 $I_{550\text{nm}}=633$ kRと見積もられる。出力電流値を発光強度100 Rあたりに換算すると、110 pA(出力電子数 $=6.9 \times 10^8$ electron/sec, 10 sec積分では 6.9×10^9 electrons/sample)となる。これはシグナル増倍後の値であるから、表3.4で見積もられた値(5.8×10^9 electrons/sample)よりも約19%大きいものである。

観測中は数10 mV程度でモニターすることになると、アンプのゲインは合計で 10^8 以上のものが必要とされる。従って今後、アンプを組んだ時の暗電流のゆらぎと、110 pA相当の光量を観測した際のシグナルのゆらぎをモニターする必要がある。

ここで、暗電流統計ゆらぎによるSN比を算出する。PMTの暗電流値 I_{dark} は表3.3に示すように4 nAであるから、10 sec(= T_{sample})積分したときの暗電流統計ゆらぎは、

$$I_{\text{dark (r.m.s.)}} = \sqrt{\frac{I_{\text{dark}} \cdot T_{\text{sample}} / G}{e}} \cdot e \cdot G \quad (3.13)$$

で求めることができ、44 pA (r.m.s.)という値が得られる。従って求めるSN比は次式で表すことができる。

$$\text{SN}_{\text{dark}} = \frac{I_{\text{out}} \cdot T_{\text{sample}}}{I_{\text{dark (r.m.s.)}}} \quad (3.14)$$

上式より、暗電流統計ゆらぎによるSN比は25と算出される。これは100 R大気光観測時の目標SN比=10を上回る結果である。

3.3.2. APD絶対感度校正実験

APDに関してはHamamatsu S 8664-20 Kを使用し、その逆バイアス回路、電流電圧変換回路はゲインの温度特性実験を行った時と同じものを使用した(図3.5)。測定実験模式図と写真をそれぞれ図3.10と図3.11に示す。このとき実験室内の温度は23.9℃であった。

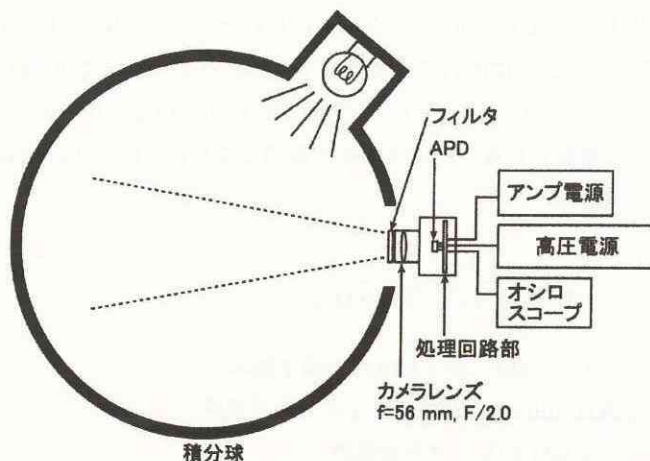


図3.10. APD出力電圧測定実験の構成.



図3.11. APD出力電圧測定実験風景.

APDの出力電子数 N_e [electrons/sec], 出力電流値 I_{out} [A], 出力電圧値 V_{out} [V] は, それぞれ以下の式で表される.

$$N_e = \frac{I_{APD}}{I_{630nm}} \cdot \int L(\lambda) \cdot T(\lambda) \cdot \frac{10^6}{4\pi} \cdot S \cdot \Omega_{APD} \cdot G_{APD} \cdot \eta_{APD}(\lambda) \cdot d\lambda \quad (3.15)$$

$$I_{out} = N_e \cdot e \quad (3.16)$$

$$V_{out} = I_{out} \cdot G_{AMP} \quad (3.17)$$

但し, $I_{630nm} = 2.0 \times 10^{-6}$ [W/str/m²/nm] ; 基準となる光源の波長 630 nmにおける発光強度

$I_{APD} = 2.0 \times 10^{-4}$ [W/str/m²/nm] ; APD実験時の光源の波長 630 nmにおける発光強度

$L(\lambda)$; 光源の波長特性 (図 3.8)

$T(\lambda)$; フィルタの透過特性 (図 3.9)

$S = 6.2$ [cm²] ; レンズの有効面積

$\Omega_{APD} = 1.0 \times 10^{-3}$ [str] ; APDのピクセル立体角

$G_{APD} = 10^2$; APDのゲイン (印加電圧 = 895 Vとした)

$\eta_{APD}(\lambda)$; APDの量子効率 (図 3.4 (b))

$e = 1.602 \times 10^{-19}$ [C] ; 電気素量

$G_{AMP} = 2 \times 10^5$ [V/A] ; 電流電圧変換値

今回の実験におけるAPD出力電圧は60 mVという値が得られた。式(3.15)～(3.17)から算出された出力電圧は350 mV程度であるのに対し、今回の測定値はAPDの性能から予測されるものより約1/6の値が得られた。

出力電圧値 $V_{out}=60\text{ mV}$ は、式(3.16)、(3.17)より出力電流値 $I_{out}=0.30\text{ }\mu\text{A}$ 、出力電子数 $N_e=1.9\times 10^{12}$ electrons/secに換算される。LAC光学系で観測した場合、波長550 nmにおける発光強度 $I_{550\text{ nm}}$ は、PMTの時と同様に式(3.12)中で $\eta_{550\text{ nm}}=0.77$ (波長550 nmにおけるAPDの量子効率)とすれば求められ、 $I_{550\text{ nm}}=95\text{ MR}$ となる。出力電流値を発光強度100 Rあたりに換算すると、0.32 pA(出力電子数 $=2.0\times 10^6$ electron/sec、10 sec積分では 2.0×10^7 electrons/sample)となる。PMTの時と同様、これはシグナル増倍後の値であるから、表3.5で見積もられた値(1.7×10^7 electrons/sample)よりも約18%大きいものである。

観測中は数10 mV程度でモニターすることになると、アンプのゲインは合計で 10^{11} 以上のものが必要とされる。従って今後、アンプを組んだ時の暗電流のゆらぎと、0.32 pA相当の光量を観測した際のシグナルのゆらぎをモニターする必要がある。

APDに関しては暗電流値を実測しているのので、その値と比較して暗電流統計ゆらぎとのSN比を算出する。

APD暗電流—逆電圧特性実験

現在検討中のAPD(Hamamatsu S8664-20K)を購入し、逆電圧に対する暗電流の変化を測定した。実験に使用したAPDの逆バイアス回路と電流電圧変換回路は図3.12のとおりである。電流電圧変換値は $1\text{ mV}/1\text{ pA}$ ($=1\times 10^9\text{ V/A}$)に設定されている。

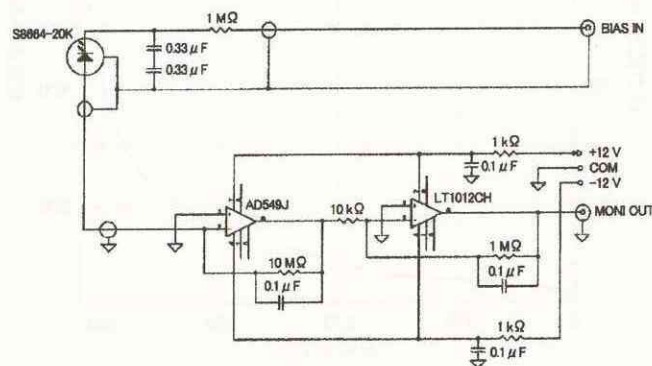


図3.12. APD暗電流—逆電圧特性実験に使用した逆バイアス回路と電流電圧変換回路。

実験の模式図と写真をそれぞれ図3.13、図3.14に示す。この実験は放射線照射試験直前に行われたもので、APDは窓材を外している。暗電流をモニターするので、APDは植毛紙で覆い、さらにその上から暗幕を被せた。高圧電源で逆電圧を0—420 Vまで10 Vずつ変化させ、オシロスコープで暗電流の変化をモニターした。測定値には電圧設定毎にデジタルデータとして取得した10000点の平均値を使用した。なお、実験中の室温は21℃であった。実験結果は図3.15のようになった。

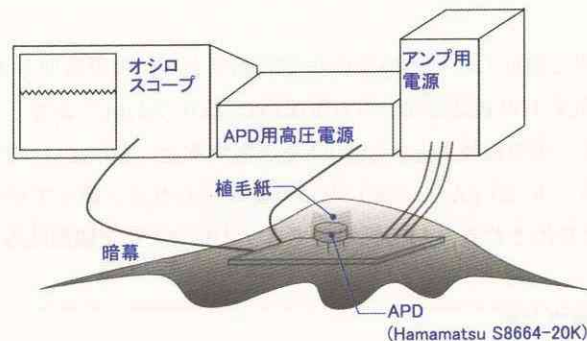


図3.13. APD暗電流—逆電圧特性実験の模式図。



図3.14. APD暗電流—逆電圧特性実験風景.

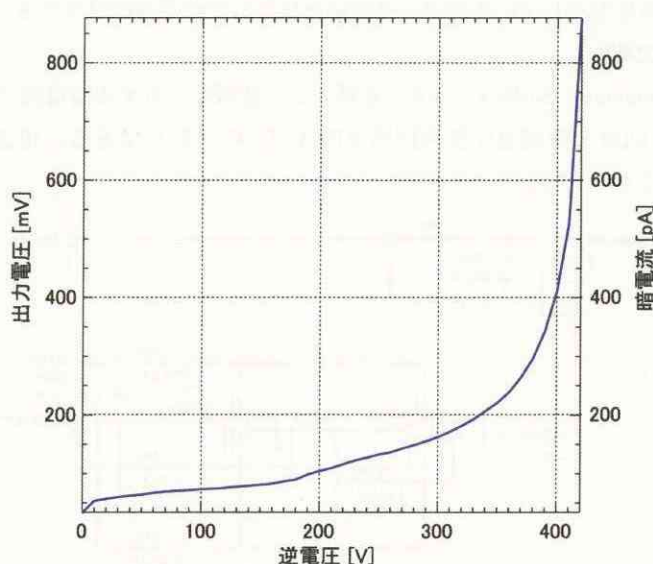


図3.15. APD出力電圧（暗電流）—逆電圧特性.

図3.15より、逆電圧370 V（20℃でゲイン100）のとき、暗電流は265 pA（出力電圧値265 mV）であることがわかった。暗電流値が急激に上昇する逆電圧300—400 V間の変化に注目すると、今回の測定結果では約2.2倍上昇している。図3.7(c)を見てみると、今回使用したAPDと同じシリーズであるS8664-10 Kでは約10倍、S8664-30 Kでは約4倍であることを踏まえると、今回の測定結果では逆電圧上昇に対する暗電流の増加が緩やかであったということがわかる。これは、高いゲインが必要とされるような微弱光の観測には、有利な結果であるといえる。

ここで、暗電流測定実験結果と前述した絶対感度校正実験結果から、暗電流ゆらぎによるSN比を算出する。絶対感度校正実験で得られた大気光100 R観測時の出力電流値 I_{out} は0.32 pAである。このときの逆電圧370 V、室温23.9℃であったことを考え、暗電流値 $I_{dark} = 265$ pAを採用すると、10 sec (= T_{sample}) 積分したときの暗電流統計ゆらぎは式(3.13)より、0.21 pA (r.m.s.) という値が得られる。従って求める暗電流統計ゆらぎによるSN比は式(3.14)より15と算出される。APD採用時でも、100 R大気光観測時の目標SN比=10を上回る結果が得られた。

3.3.3. 絶対感度校正実験まとめ

今回の絶対感度校正実験の結果を表3.6に示す。算出された暗電流統計ゆらぎによるSN比も示す。

表3.6. 絶対感度校正実験結果まとめ.

検出器	PMT	APD
発光強度 100 R における出力電流 [pA]	110	0.32
(出力電子数 [electrons/sec])	(6.9×10^8)	(2.0×10^6)
暗電流統計ゆらぎによる SN 比	25	15

いずれの検出器を用いた場合でも、100 R 大気光観測時の目標 SN 比 = 10 を上回る。以上のように実際に検出器を用いて SN 比を検討した場合でも、それらの成立性を示すことができた。

3.4. PMT・APD暗電流温度特性試験

PMT・APDの暗電流の温度に対する安定性を調べるため、明星電気株式会社において暗電流温度特性試験を行った。

3.4.1. PMT暗電流温度特性試験

PMTは3.2.1でも述べたHamamatsu H 7546を用いた。実験のセッティングと用いたチャンネルの配置を図3.16に示す。周囲温度を -20°C から 40°C まで4段階変化させて測定を行った。高圧は 900 V (ゲイン 10^6) に設定した。

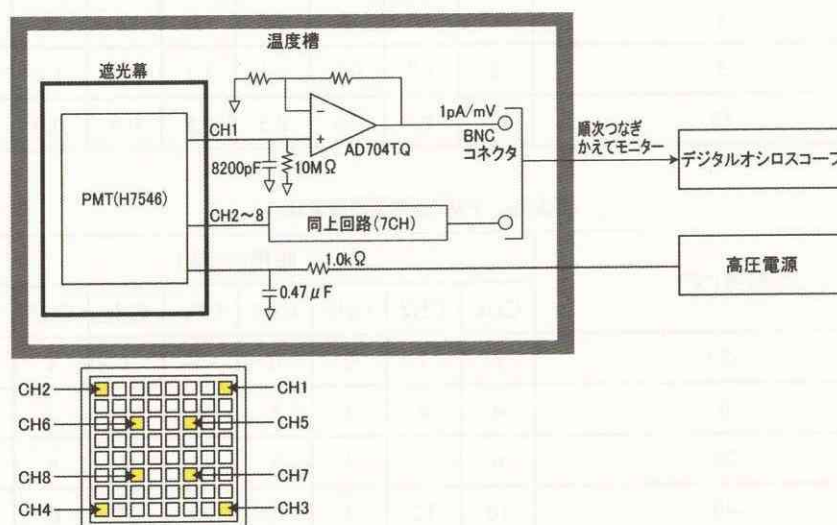


図3.16. PMT暗電流温度特性試験治具.

まず出力暗電流値の生データに対し、大気光観測モードで想定している最短積分時間 10 sec の区間で移動平均をとった (図 3.17)。続いて、発光強度 100 R の大気光観測時に予想される出力電流値 110 pA に対して、暗電流値 (10 sec 移動平均) のゆらぎと温度変化率が積分時間内で十分小さいかどうかの検討を行った。表 3.7, 図 3.18, 図 3.19 に測定結果のまとめを示す。

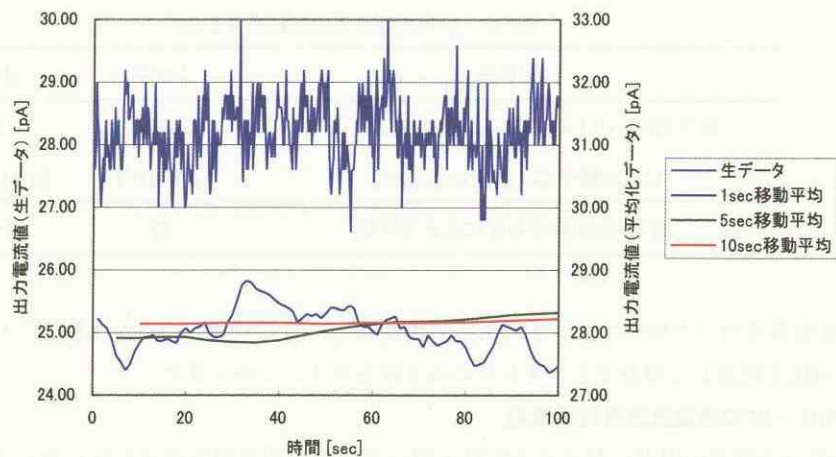


図3.17. PMT暗電流温度特性試験で得られた出力電流波形の一例と移動平均をとったもの (CH3, 0℃).

表3.7a. 平均化処理によるPMT暗電流ゆらぎ幅.

平均化時間(sec)	ゆらぎ幅(pAp-p)							
	CH1	CH2	CH3	CH4	CH5	CH6	CH7	CH8
1	4.5	3.7	2	2.5	2	2	2	2
5	2	1.7	0.8	1.1	1.1	1.1	1.2	1
10	1.2	1.2	0.6	0.5	0.8	0.8	0.9	0.7

表3.7b. PMT暗電流温度変化.

温度(℃)	暗電流(pA)							
	CH1	CH2	CH3	CH4	CH5	CH6	CH7	CH8
-20	3	1	0	0	2	1	1	1
0	4	4	1	3	4	1	3	3
20	6	7	3	3	13	2	6	6
40	10	12	3	11	25	17	14	16

表3.7c. PMT暗電流値の平均温度変化率.

温度区間(℃)	平均温度変化率(pA/℃)							
	CH1	CH2	CH3	CH4	CH5	CH6	CH7	CH8
-20 - 0	0.05	0.15	0.05	0.15	0.1	0	0.1	0.1
0 - 20	0.1	0.15	0.1	0	0.45	0.05	0.15	0.15
20 - 40	0.2	0.25	0	0.4	0.6	0.75	0.4	0.5

表3.7d. PMT暗電流値のゆらぎ幅温度変化 (10sec平均値).

温度(°C)	揺らぎ幅(pAp-p)							
	CH1	CH2	CH3	CH4	CH5	CH6	CH7	CH8
-20	1	0.5	0.7	0.5	0.7	0.7	0.4	0.8
0	0.5	0.5	0.5	1	0.7	0.7	0.5	0.9
20	1.2	1.2	0.6	0.5	0.8	0.8	0.9	0.7
40	1.2	0.8	1	0.7	1	0.7	1	1.3

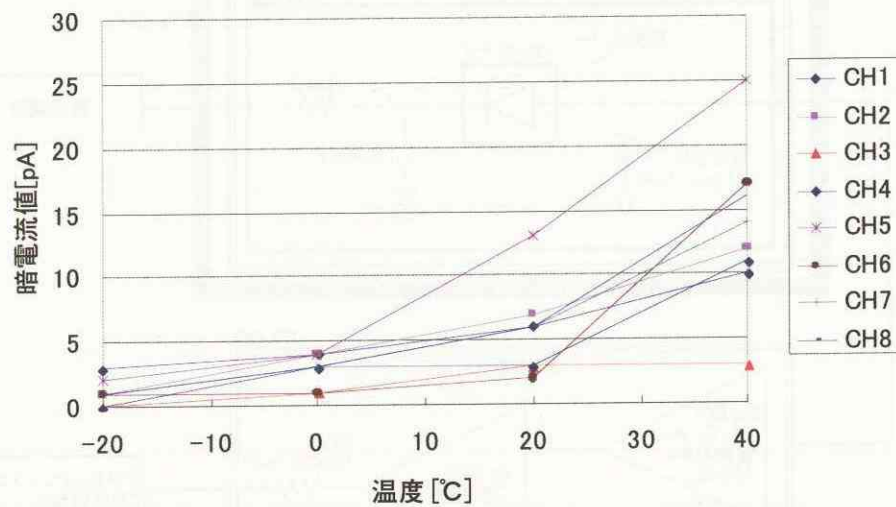


図3.18. PMT暗電流温度特性.

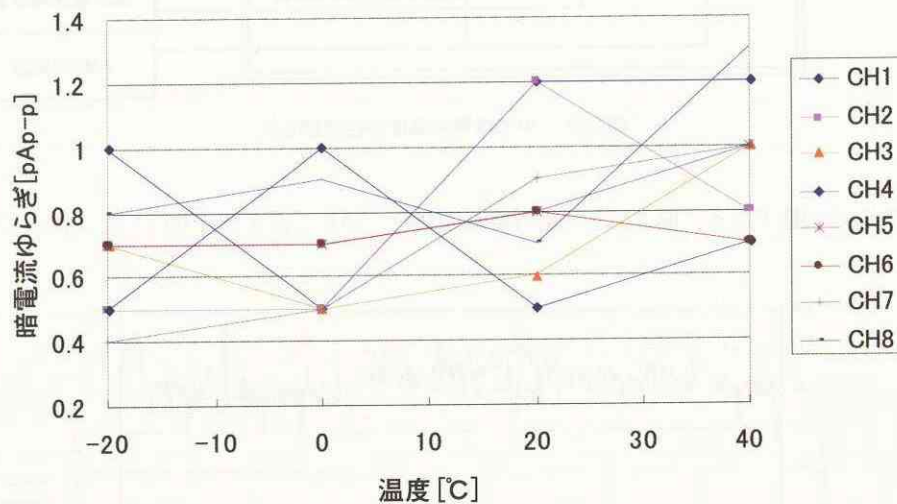


図3.19. PMT暗電流値のゆらぎ幅温度変化 (10 sec平均値).

チャンネル間にバラツキはあるものの、暗電流の平均温度変化率の最大値は $-20 \sim 0$ °Cでは $0.15 \text{ pA}/\text{°C}$ 、 $0 \sim 20$ °Cでは $0.45 \text{ pA}/\text{°C}$ 、 $20 \sim 40$ °Cでは $0.75 \text{ pA}/\text{°C}$ という結果が得られた。暗電流のゆらぎ (10 sec移動平均) の最大値は -20 °Cで 1 pAp-p 、 0 °Cで 1 pAp-p 、 20 °Cで 1.2 pAp-p 、 40 °Cで 1.3 pAp-p であった。以上より、PMTで大気光 100 R を観測する場合、予想出力電流値が 110 pA に対してSN比 $= 10$ 以上確保するためには、例えば 0 °Cに保った状態で、温度変動量を $(110 [\text{pA}] / 10) / 0.45 [\text{pA}/\text{°C}] = 24$ °C以下に抑える必要があることが

わかった。これは十分実現可能な温度制御範囲であるといえる。暗電流ゆらぎ幅とのSN比については $110 \text{ [pA]} / 1 \text{ pAp-p} = 110$ と、目標SN比 = 10 を十分達成可能であるといえる。

3.4.2. APD暗電流温度特性試験

APDは3.2.2でも述べたHamamatsu S 8664-20 Kを用いた。実験のセッティングと用いたチャンネルの配置を図3.20に示す。PMTの実験と同様、周囲温度を $-20 \text{ }^\circ\text{C}$ から $40 \text{ }^\circ\text{C}$ まで4段階変化させて測定を行った。高圧電源は 370 V (ゲイン100) に設定した。

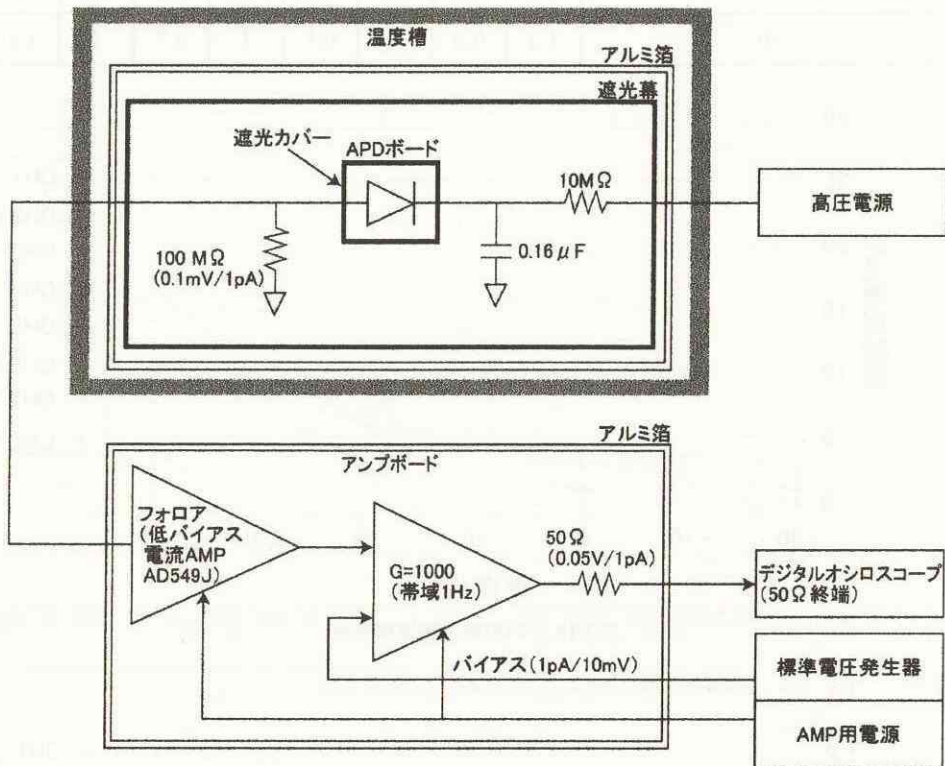


図3.20. APD暗電流温度特性試験治具.

評価方法はPMTと同様である。図3.21に出力電流波形の一例を、表3.8、図3.22、図3.23に測定結果のまとめを示す。

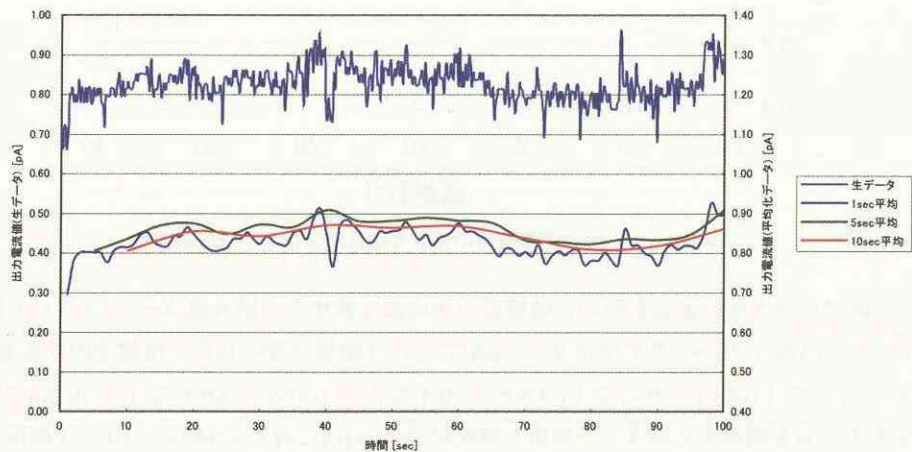


図3.21. APD暗電流温度特性試験で得られた出力電流波形の一例 (0°C).

表3.8a. APD暗電流ゆらぎ幅の温度変化.

温度(°C)	揺らぎ幅(pAp-p)(HV 370V の値)		
	1sec 平均	5sec 平均	10sec 平均
-20	0.15	0.08	0.03
0	0.17	0.09	0.04
20	0.2	0.12	0.06
40	0.25	0.15	0.07

表3.8b. APD暗電流温度変化.

温度(°C)	暗電流(pA)		
	HV 370V	HV 270V	HV 170V
-20	162	156	154
0	195	158	156
20	363	242	204
40	1149	634	431

表3.8c. APD暗電流値の平均温度変化率.

温度区間(°C)	平均温度変化率(pA/°C)
-20~0	1.65
0~20	8.4
20~40	39.3

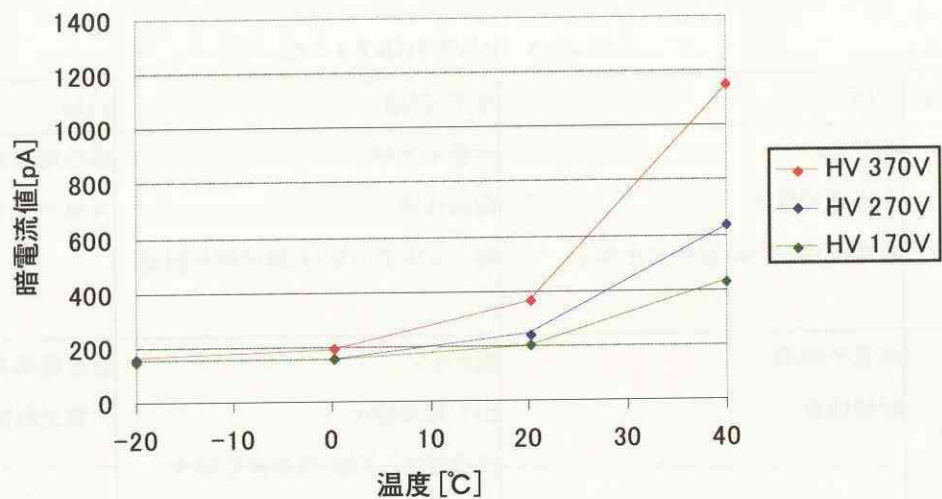


図3.22. APD暗電流温度特性.

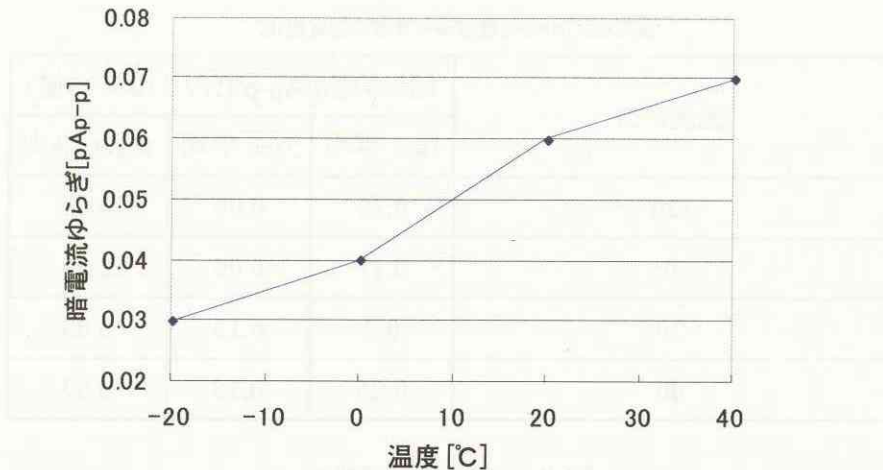


図3.23. APD暗電流値のゆらぎ幅温度変化（10 sec平均値）。

PMTの時と同様の議論をすると、APDで大気光 100 Rを観測する場合、予想出力電流値が 0.32 pAに対してSN比 = 10以上確保するためには、例えば高圧 370 V、0 °Cに保った状態で、温度変動量を $(0.32 \text{ [pA]} / 10) / 8.4 \text{ [pA/°C]} = 0.004 \text{ °C}$ 以下に抑える必要があることがわかった。この温度範囲を制御するのは大変困難であると考えられる。暗電流ゆらぎ幅とのSN比については $0.32 \text{ [pA]} / 0.04 \text{ pAp-p} = 8$ と、目標SN比 = 10を確保できない。

3.4.3. 暗電流温度特性試験まとめ

APDは暗電流値の温度変化率が、大気光 100 R観測時に予想されるシグナルの電流値に比べて大きく、観測中の温度制御要求が大変厳しいものとなっている。しかし、PMTに関しては十分検出可能であるといえる。したがって、APDで大気光観測を実施するのは難しいと考えられる。一方で、検出器性能諸元からSN比を見積もった際にも述べたように、雷放電発光観測に関しては、長波長側でも量子効率が高いAPDで観測した方が有利であるといえる。

3.5. まとめ

以上の検討結果を踏まえて、表3.9にまとめを記す。

重量面に余裕があれば、雷放電発光観測用にAPD、大気光観測用にPMTと、2センサーを採用するという案も挙げられる。しかし、どちらか1つのセンサーで雷放電発光・大気光を観測するのは困難だと考えられる。

表3.9. 検出器検討結果まとめ。

検出器	長所	短所・課題	結論
PMT	高ゲイン 出力電流値大 暗電流ゆらぎ幅・温度変化率小	低量子効率 耐振性悪 要マルチアルカリ光電面製品開発	雷放電発光観測:不適 大気光観測:適
APD	高量子効率 耐振性良	低ゲイン 出力電流値小 暗電流ゆらぎ幅・温度変化率大 要マルチアノード型製品開発	雷放電発光観測:適 大気光観測:不適

4. 光学系の設計概念と迷光評価

LACは金星夜面の大気発光現象を観測するが、できるだけ多くの観測時間を確保するため、また観測領域を明暗境界線付近まで拡大するため、太陽や金星昼面が視野近傍にあるときでも観測を行いたい。その際、太陽直達光や金星昼面からの太陽散乱光が視野内に混入し、観測の妨げとなる恐れがある。ここでは4.1でこれら迷光の光量を見積もり、どの程度減衰できれば雷や大気光の検出が可能となるかを議論する。4.2では迷光対策としての光学系の設計概念を述べ、4.3では模型実験による迷光評価を行った結果について記す。

4.1. 迷光量とS/N比の見積もり

太陽や金星昼面をLAC視野内に入れた場合、1サンプル（雷観測モード：20 μ sec、大気光観測モード：1sec）あたりに観測される太陽直達光、金星昼面光の光子数（それぞれ N_{Sun} 、 N_{Venus} とする）は以下の式で見積もることができる。

太陽直達光

$$N_{Sun} = B_{Sun} \Omega_{Sun} S_{LAC} \Delta\lambda \cdot \frac{1}{\zeta} \cdot T_{sample} T_{filter} T_{lens} \quad [\text{photons/sample}] \quad (4.1)$$

金星昼面光

$$N_{Venus} = \left(B_{Sun} A \cdot \frac{\Omega_{Sun}}{\pi} \right) \cdot S_{LAC} \Omega_{FOV} \Delta\lambda \cdot \frac{1}{\zeta} \cdot T_{sample} T_{filter} T_{lens} \quad [\text{photons/sample}] \quad (4.2)$$

但し、 $B_{Sun} = 10^{3.23}$ [W/cm²/str/ μ m]；太陽面輝度（波長800nm；雷）

$10^{3.45}$ [W/cm²/str/ μ m]；太陽面輝度（波長500nm；大気光）

$\Omega_{Sun} = 1.3 \times 10^{-4}$ [str]；太陽立体角

$S_{LAC} = 5.8$ [cm²]；LACレンズの有効面積

$\Delta\lambda = 4$ [nm]；FWHM

$\zeta = 2.5 \times 10^{-19}$ [J/photon]；1光子あたりのエネルギー（波長800nm；雷）

4.0×10^{-19} [J/photon]；1光子あたりのエネルギー（波長500nm；大気光）

$T_{sample} = 20\mu$ sec；雷観測モード

10sec；大気光観測モード

$T_{filter} = 0.70$ ；フィルタ透過率

$T_{lens} = 0.96$ ；レンズ透過率

$A = 0.80$ ；金星アルベド

$\Omega_{FOV} = 3.4 \times 10^{-2}$ [str]；視野立体角

表4.1に見積もりの結果を示す。

表4.1. 迷光量見積もり。

迷光源	太陽直達光	金星昼面光
光量（800 nm；雷） [photons/sample]	2.8×10^{11}	2.5×10^9
光量（500 nm；大気光） [photons/sample]	1.5×10^{17}	1.3×10^{15}

ここで、3.1節で見積もった1サンプルあたりに観測される雷、大気光の光量と、表4.1の太陽直達光、金星昼面光の光量との比をS/N比として見積もる。これらの結果より、雷放電発光観測をする場合は、観測される光量よりも太陽直達光が7-8桁、金星昼面光が5-6桁上回る。また100Rの大気光を観測する場合は、太陽光直達光は12桁、金星昼面光は10桁も上回る。いずれの観測を行う場合でも、太陽や金星昼面を完全に観測視野から外し、かつバップルなどを用いて観測器への混入を抑える工夫が要求される。

表4.2. 迷光とのS/N比見積もり。

観測対象	雷放電発光	雷放電発光	大気光
	地球平均レベル	地球平均 1/100 レベル	100 R
観測地点	3 Rv	1000 km	-
1 サンプルあたりに観測される光子数*	1.6×10^4	5.2×10^4	2.2×10^5
N_{photon} [photons/sample]			
S/N 比(太陽直達光)	5.7×10^{-8}	1.8×10^{-7}	1.5×10^{-12}
S/N 比(金星昼面光)	6.5×10^{-6}	2.1×10^{-5}	1.7×10^{-10}

参考のため、表3.2で見積もった値を再掲。

続いて迷光量をどの程度減衰できれば検出可能となるかを見積もる。観測される雷放電発光あるいは大気光の光子数 N_{photon} に量子効率を乗じて電子数に換算したものをシグナル、 γ 倍に減衰された迷光量に量子効率を乗じて換算された電子数のゆらぎをノイズとして、(雷観測の場合に関しても) S/N 比=10を確保できるような迷光減衰量 γ を以下の式から算出する。但し、3.2.3節でも述べたように、 S/N 比はシグナル増倍前後のどちらで決まるかが確定できないので、今回もどちらの場合も見積もることとする。なお、量子効率に関しては検出器(PMT, APD)によって異なるため、どちらを用いた場合も計算する。

シグナル増倍前

$$\text{太陽直達光} \quad SN_{\text{Sun}} = \frac{N_{\text{photon}}\eta}{\sqrt{\gamma N_{\text{Sun}}\eta}} = 10 \quad (4.3)$$

$$\text{金星昼面光} \quad SN_{\text{Venus}} = \frac{N_{\text{photon}}\eta}{\sqrt{\gamma N_{\text{Venus}}\eta}} = 10 \quad (4.4)$$

シグナル増倍後

$$\text{太陽直達光} \quad SN_{\text{Sun}} = \frac{N_{\text{photon}}\eta G}{\sqrt{\gamma N_{\text{Sun}}\eta G}} = 10 \quad (4.5)$$

$$\text{金星昼面光} \quad SN_{\text{Venus}} = \frac{N_{\text{photon}}\eta G}{\sqrt{\gamma N_{\text{Venus}}\eta G}} = 10 \quad (4.6)$$

但し、 $\eta = 0.003$; PMTの量子効率 (波長 777 nm ; 雷)
 0.72 ; APDの量子効率 (波長 777 nm ; 雷)
 0.09 ; PMTの量子効率 (波長 550 nm ; 大気光)
 0.77 ; APDの量子効率 (波長 550 nm ; 大気光)
 $G = 3 \times 10^5$; PMTの増倍率 (印加電圧 900 V)
 100 ; APDの増倍率 (逆電圧 370 V, 20 °C)

以上の計算結果を表 4.3, 表 4.4 に示す。これらより, S/N比がシグナル増倍前で決定される場合, S/N比=10 を確保して検出するとき, 大気光 100 R を観測する場合が最も大きな迷光減衰量 (10^{-10}) を要求される。この結果を踏まえて, 今回我々は LAC の迷光減衰量の目標として, 大気光 100 R を観測する場合の最大の迷光減衰量である 10 桁という値を設定する。

表4.3. 100 R大気光をS/N比=10 確保して検出するのに必要な迷光減衰量 γ (S/N比がシグナル増倍前で決定される場合)。

観測対象		雷放電発光 (地球平均レベル)		雷放電発光 (地球平均 1/100 レベル)		大気光 (100 R)	
		3 Rv		1000 km		-	
観測地点		3 Rv		1000 km		-	
検出器		PMT	APD	PMT	APD	PMT	APD
迷光源	太陽直達光	2.9×10^{-8}	6.9×10^{-6}	2.7×10^{-8}	6.4×10^{-6}	2.8×10^{-10}	2.5×10^{-9}
	金星昼面光	3.3×10^{-6}	7.9×10^{-4}	3.0×10^{-6}	7.3×10^{-4}	3.3×10^{-8}	2.8×10^{-7}

表4.4. S/N比=100 確保して検出するのに必要な迷光減衰量 γ (S/N比がシグナル増倍後で決定される場合)。

観測対象		雷放電発光 (地球平均レベル)		雷放電発光 (地球平均 1/100 レベル)		大気光 (100 R)	
		3 Rv		1000 km		-	
観測地点		3 Rv		1000 km		-	
検出器		PMT	APD	PMT	APD	PMT	APD
迷光源	太陽直達光	8.7×10^{-3}	6.9×10^{-4}	8.1×10^{-3}	6.4×10^{-4}	8.4×10^{-5}	2.5×10^{-7}
	金星昼面光	0.99	7.9×10^{-2}	0.90	7.3×10^{-2}	9.9×10^{-3}	2.8×10^{-5}

迷光減衰量 10 桁を達成した時の迷光電子数統計ゆらぎによる S/N 比 (SN_{Sun} , SN_{Venus}), 光電子数統計ゆらぎによる S/N 比 (SN_{signal}) と暗電流電子数統計ゆらぎによる S/N 比 (SN_{dark}) の 3 つの総合 S/N 比 (SN_{total}) を見積もる。各ノイズ成分が独立であると仮定すると, 総合 S/N 比は次式で求めることができる。

$$\frac{1}{SN_{total}} = \frac{1}{SN_{Sun}} + \frac{1}{SN_{Venus}} + \frac{1}{SN_{signal}} + \frac{1}{SN_{dark}} \quad (4.7)$$

計算結果を表 4.5 に示す。

表4.5. 総合S/N比見積もり。

観測対象		雷放電発光	雷放電発光	大気光
		地球平均レベル	地球平均 1/100 レベル	100 R
観測地点		3 Rv	1000 km	-
増倍前	総合 S/N 比 (PMT)	5.6	11	8.4
	総合 S/N 比 (APD)	85	1.7×10^2	8.4
増倍後	総合 S/N 比 (PMT)	3.1×10^3	6.1×10^3	4.6×10^3
	総合 S/N 比 (APD)	8.5×10^2	1.7×10^3	84

上表より, 総合 S/N 比が最小となるシグナル増倍前で決定される場合でも, S/N 比=10 を概ね満足しているといえる。100 R 大気光を S/N=10 確保して観測する場合は, 積分時間を 15 sec にすればよいということになる。

これに関連して、検出に必要なダイナミックレンジについて考える。いま仮に迷光減衰量10桁が実現できたとすると、表4.1より雷放電発光を観測する場合は積分時間が $20\mu\text{sec}$ と短いため、太陽直達光に関しては28 photons/sampleに、金星昼面光に対しては全て減衰させることが可能となる。一方、大気光の場合、太陽直達光は 1.5×10^7 photons/sampleに、金星昼面光が 1.3×10^5 photons/sampleまで減衰されるが、このうち光子数の多い太陽直達光の値が主としてバックグラウンドレベルとなる。このとき、大気光100 RをS/N比=10確保して検出する場合、必要な階調D [階調] は以下のようにして求めることができる。

$$D = 10 + \frac{N_{\text{Sun}} \gamma}{N_{\text{grad}}} \quad (4.8)$$

$$N_{\text{grad}} = \frac{N_{\text{photon}}}{10} \quad (4.9)$$

但し、 N_{grad} [photons/階調] ; 1階調あたりの光子数

$N_{\text{Sun}} = 1.5 \times 10^{17}$ [photons/sample] ; 大気光観測時の太陽直達光光子数

$\gamma = 10^{-10}$; 迷光減衰量

$N_{\text{photon}} = 2.2 \times 10^5$ [photon/sample] ; 観測される大気光の光子数

以上を計算すると、 $D = 691$ [階調] となり、1ピクセルあたり10 bit (1024階調) あれば十分であることがわかる。

4.2. 光学系の設計概念

前節で示したように、LACは10桁の迷光減衰量を達成できるような、高い遮光技術を有する光学系が要求される。我々は現在、遮光対策用光学系として2つの方法を検討している。

4.2.1. 2段バツフル型

バツフルは遮光技術の中でも最も主要な方法の一つである [Breault, 1995]。バツフルの設計方法は以下のとおりである。

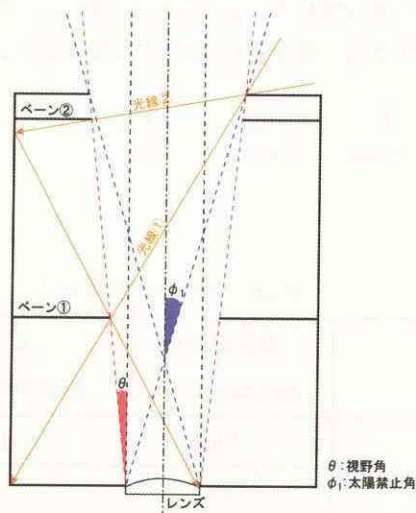


図4.1. バツフルの設計概念図。

バツフル設計方法 (図4.1.参照)

(1) 視野角 θ 、太陽禁止角 ϕ_1 を決める。太陽禁止角の定義は「太陽直達光が光学系初段 (レンズあるいはフィルタ) にあたらない限界での、視野中心から太陽までの角度」となっている。

(2) 入射角 $\theta_i > \phi_1$ の光線をバツフル内で2回以上散乱させて減衰させることを考える。まず光線①が1回散乱で光学系初段にあたるのを防ぐために、ベーン (遮光板) ①を置く。

(3) 次に、ベーン①を置いて光学系初段に1回反射であたってしまう入射光線②を防ぐため、ベーン②を置く。以下、この繰り返しでベーンを置いていく。

しかし現時点において、1段バッフルで望める迷光減衰量は4-5桁程度であるといわれている。その理由として、バッフルの塗料あるいはメッキでは入射光は完全には吸収できないこと、ベーンのエッジ部分に入射光があたると強い反射光、散乱光が光学系初段へ到達してしまい、それを防ぐエッジ加工は困難であることなどが挙げられる。さらに高い減衰量が要求される場合は、バッフルを2段にする方法がある(図4.2)。2段バッフルの設計方法は、以下のとおり。

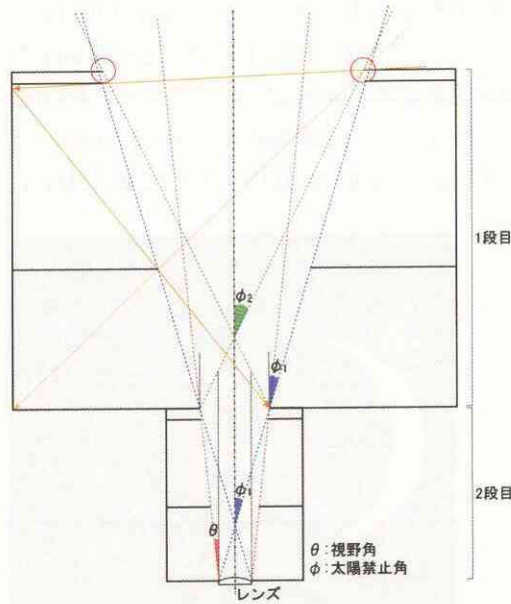


図4.2. 2段バッフルの設計概念図。

2段バッフル設計方法(図4.2参照)

(1) バッフルの対物側に、新たに視野角 ϕ_1 、太陽禁止角 $\phi_2 (> \phi_1)$ のバッフルを設ける。このとき、最も対物側のベーンのエッジ(図4.2中の○で囲んだ部分)が光学系初段から見えないようにするため、その内側のベーンを太陽禁止角 ϕ_1 のライン(青い点線)よりも視野中心方向に少し伸ばしておく。2段目(対物側)のバッフル内で入射角 $\theta_i > \phi_2$ の入射光線を2回以上反射させ、減衰させる。

(2) 1段バッフルは $\phi_1 < \theta_i < \phi_2$ の入射光を2回以上反射させ、減衰させる。

このようにして、1段バッフルよりもさらに減衰量を高めようというものである。2段バッフルを採用した場合のLACのイメージ図を図4.3に示す。実際には重量を軽減するため、円筒状ではなくコーン状にしている。

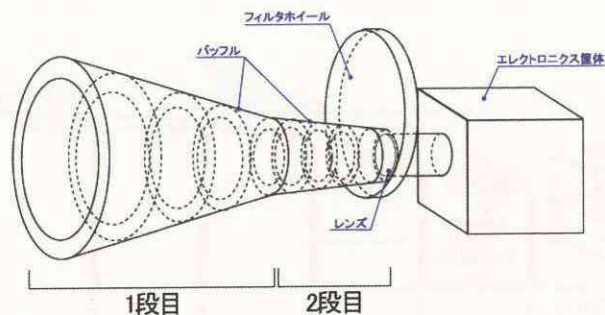


図4.3. 2段バッフルを採用したLACのイメージ。

しかし、1段で4桁程度の迷光減衰量が望めるとしても、この方法は理論的には8桁までしか達成できないと考えられ、LACの目標値である10桁には及ばない。レンズと検出器の間の空間にベーンを置いてその部分もバツフル構造にすることで、3段バツフルのような形状にすることも考えられるが、LACにおけるレンズ-検出器間の距離は86.1 mmなので、それほど高い減衰量は望めないと考えられ、依然として迷光減衰量10桁は困難である。

また、図4.2からも分かるように、2段にするとバツフルの巨大化が避けられず、重量面へのインパクトが懸念される。また本ミッションではカメラは衛星内部に取り付けられていることになっており、口径の大きさは衛星内部への熱流入量に変化を与える。さらに、観測の最低ラインと考えている $\phi_2 = 26^\circ$ を採用すると、 $\phi_1 = 16.5^\circ$ 程度が最適なのだが、レンズ口径30 mm程度では、バツフル全長は約500 mm、バツフル口径は約300 mm、重量は約1200 gと大型・大重量のものになってしまう(ただし、板の厚みを0.5 mm、材質はアルミニウムを仮定している)。

さらに、2段にすることにより太陽禁止角 ϕ_2 が大きくなる。これは観測時間が少なくなることを意味する。図4.4に示すように、例えば視野角 6° (全角 12°)、太陽禁止角 $\phi_2 = 26^\circ$ (全角 52°)の2段バツフルを採用した場合、金星昼側が見えているときに金星表面から3Rvの地点から観測できる領域はごく小さなものに限られてしまう。

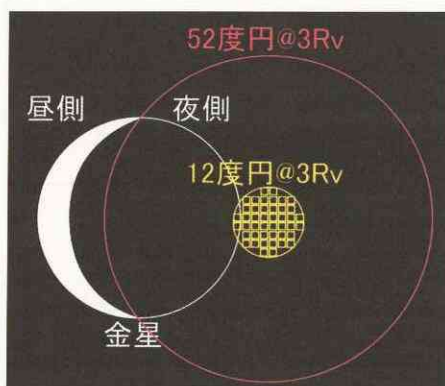


図4.4. 金星表面から3Rvの地点から見た金星と12度円、52度円の大きさの関係。

4.2.2. 多重ベーン+1段バツフル型

そこで我々は現在、迷光減光量をさらに上げるべく、取り付け位置を衛星内部から衛星側面へ変え、複数のベーンと1段バツフルからなる光学系を考案している。

近年、コロナグラフのオカルターを応用した高性能遮光技術が登場した。先のバツフルでは、太陽禁止角外からの入射光を、バツフル内壁やベーンにおいてできるだけ多く反射・散乱させ、減衰させていく方法だった。これに対して、今回紹介する方法は、片側を宇宙空間に曝露し、かつ多重ベーンを対物側に設置し、ベーンのエッジで生じた回折光のみを減じていくというものである(図4.5、図4.6)。例えば視野から5度離れた入射光を12桁以上減衰させることができると報告されている[*Buffington et al.*, 1996; *Buffington*, 2000]。以下、設計方法を述べる。

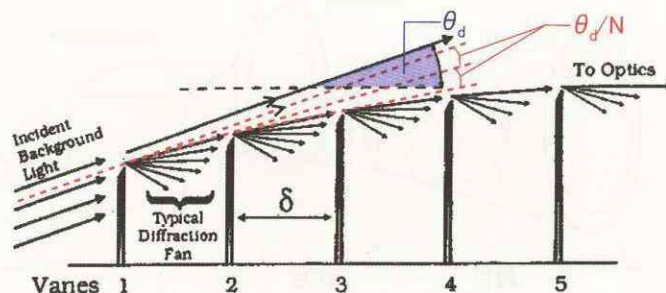


図4.5. ベーン設計概念図 (*Buffington* [2000] を改変)。

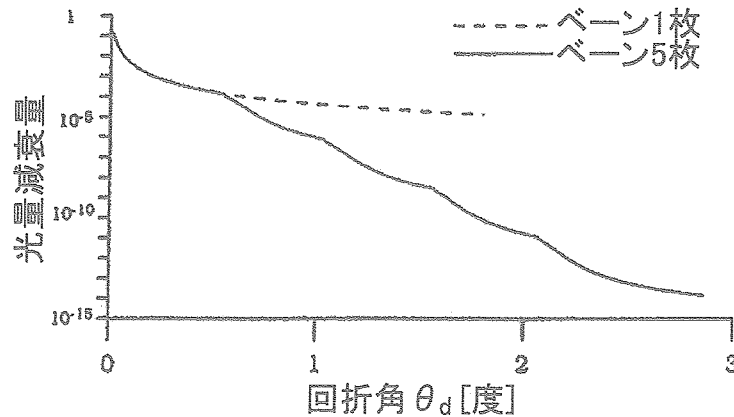


図4.6. ベーン設置枚数（ベーン設置間隔 $\delta = 4$ cm）と、回折角，光量減衰量の関係（Buffington [2000] を改変）。

多重ベーン設計方法

視野から θ_d 度離れた迷光を N 枚のベーンで減衰させることを考える。ベーンの高さは、各ベーンで回折光を θ_d/N 度ずつ視野外へ逃すように、以下の式で決定される。

$$L_{i+1} = L_i + \delta \tan \left[\frac{\theta_d}{N} \cdot \{N - (i+1)\} \right] \quad (4.10)$$

但し、 L_i ：対物側より i 番目のベーンの高さ、 δ ：ベーン間の距離

またこの手法は、図 4.7 に示すように、ベーンの数やその高さ、配置する間隔を変えることで、 θ_d や迷光減衰量をコントロールすることができる。

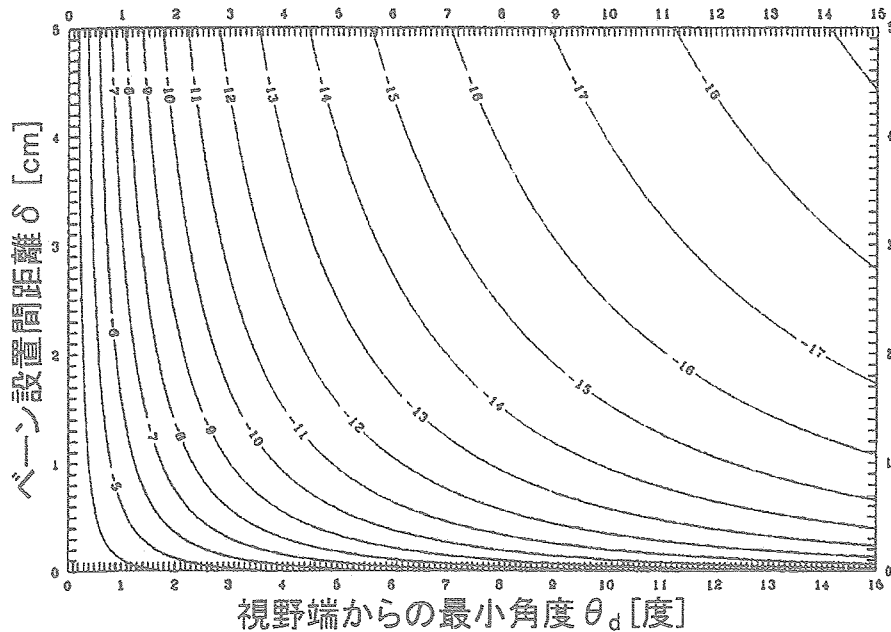


図4.7. ナイフエッジにおける回折光シミュレーションから得られた迷光減衰量と、迷光源の視野からの角度 θ_d とベーンを設置する間隔 δ の関係（Buffington *et al.* [1996] を改変）。ベーン 5 枚を使用し、迷光の波長は 500 nm のときのもの。例えば、視野から 5 度離れた迷光を 12 桁減衰させたいときは、ベーンを 1.5 cm 間隔で設置すればよいことがわかる。

さらに、この手法は既に NASA ミッション（STEREO/HI；Solar TERrestrial RELations Observatory/Heliospheric Imager）でも採用されている手法であり [Socker *et al.*, 2000]，実用化されつつある。

我々はこの技術のLACへの応用を検討した。その設計図を図4.8に示す。ペーンを5枚、それらを設置する間隔は15mmとし、図4.7から $\theta_d=3$ 度の迷光を9-10桁減衰できる設計になっている。図4.8下図中の影の領域が視野中心から16度離れた迷光の光量を9-10桁減衰できる領域であるが、仮に一段バッフルとレンズ-センサー間のバッフル構造で合計7桁の迷光減衰量が実現できれば、ペーンで減衰させる光量は3桁でLACの目標(合計10桁)を達成できることになる。

ここで、衛星側面に設置する以上、その設置面にはLAC以外の突起物が存在する可能性がある。突起物(アンテナなど)の中で、図4.8下図中の影の領域よりも上に突出するようなものがあると、太陽直達光などが照射して反射光・散乱光を生じさせる恐れがある。そのため、LACはこの5枚のペーンに、1段バッフルを加えた光学系を採用する。このバッフルの役割は、衛星突起物からの迷光の反射光・散乱光を減衰させることにある。しかし、対物側から最遠のペーンから1段バッフルの最も対物側のペーンの間には、上述したような長い突起物を設置しないことが必要と考えられる。そのような位置に突起物があると、バッフル内部に強い反射光や散乱光が入射するからである。

多重ペーン+1段バッフル型を採用するメリットは「2段バッフルよりも大きな迷光減衰量が達成可能である」ということ以外に、以下の利点が挙げられる。

(1) 大きさ、重量が小さくなる。

図4.7のバッフルの大きさは100mm以下であり、2段バッフルよりもかなり小型になる。また、ペーン、バッフルを0.5mm厚のアルミニウムで制作すると、合計500g程度になり、2段バッフル時の1/2以下の重量に抑えることができる。

(2) 2段バッフル採用時に比べて観測時間が長く確保できる可能性がある。

片側を宇宙空間に曝露しているため、一見、観測期間が半減してしまうように見えるが、太陽禁止角が2段バッフル時に比べて小さくなり(図4.8の場合16度)、より昼側ディスクに近い夜側領域を観測可能となるため、より多くの観測時間を確保することが期待できる(図4.9)。

(3) ペーンのエッジ部分に対する工作精度は2段バッフル時ほど高いものは要求されない。

2段バッフル時は後方(レンズ側)への反射・散乱を極力抑えるため、ペーンのエッジ部分の加工に高い工作精度が要求されるのに対し、この方法は回折光のみを減衰させればよいので、それほど高い工作精度は必要ない。

以上のことから、現在LACは多重ペーン+1段バッフル型を採用することにしている。

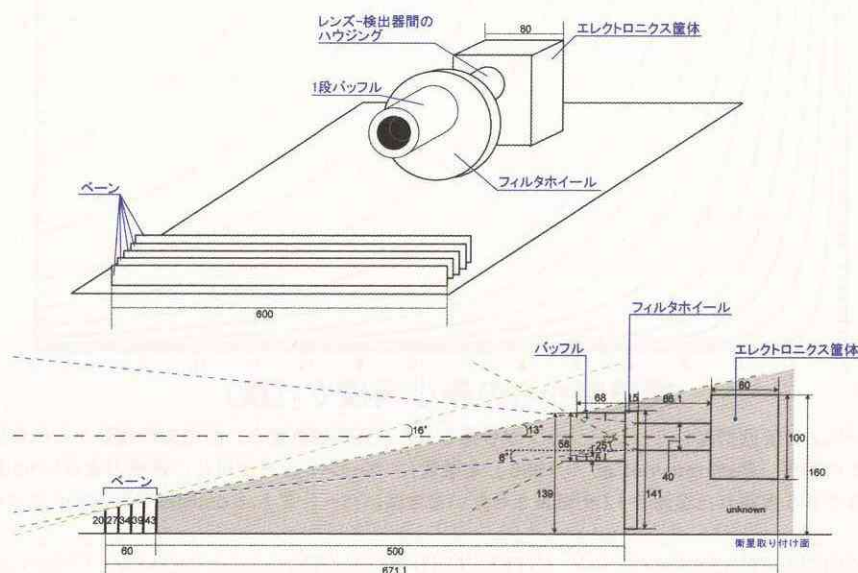


図4.8. 多重ペーン+1段バッフル型を採用したLACの概観図(上)と断面図(下)。単位はmm。

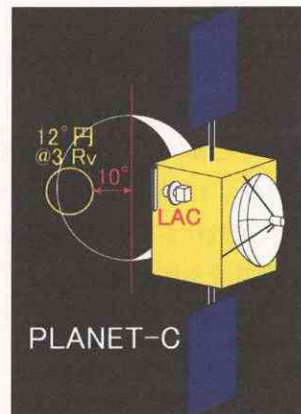


図4.9. 金星表面から3Rvの地点から見た金星と、多重ベーン+1段バッフル型を採用した場合の12度円の位置・大きさの関係。

4.3. 模型実験による衛星突起物からの反射・散乱光量評価

LACは10桁の迷光減衰量を達成するため、衛星側面に設置することを検討している。しかし、LAC設置面上にはLGA (Low Gain Antenna) がLAC近傍に取り付けられることが決まっており、太陽・金星昼面光がLGAを介してその反射光・散乱光がLACのバッフル内部へ混入することが懸念される。さらに衛星側面は金色のサーマルブランケット (MLI: Multi Layer Insulation) で覆われているので、LGAからの反射・散乱光がそのMLIを介して、バッフル内部へ入ってくる危険性もある。

上記した反射光・散乱光を数値計算で求めることは簡単ではないと思われる。そこで我々は図4.8に基づいて、実物大のLACとLGAの模型を精密に制作し、加えて太陽を模擬した光源を制作することで、観測時の衛星側面の状況を再現して上記した反射光・散乱光の光量を測定した。

4.3.1. 実験概要

図4.10に示すように、暗室内にLAC、LGAの模型と、太陽を模擬した光源を設置し、光源の照射角度を変えてLACバッフル内部に入射する光子数を計測した。いま仮に1段バッフルとレンズ-検出器間のバッフル構造での迷光減衰量の合計が 10^{-7} を実現できるとすると、ベーンにおける迷光減衰量は 10^{-3} あればよいことになる。LGAを設置してもLACバッフル内に混入して来る光量が、光源の光量の 10^{-3} 以下であれば、LGAの影響は無視できると考えられる。しかし、あくまでこの1段バッフル+レンズ-検出器間バッフルは、LGAなどの衛星突起物やMLIからの散乱光を減衰させる目的で設置させることにし、多重ベーンのみで迷光減衰要求 10^{-10} を達成することを目標とする。

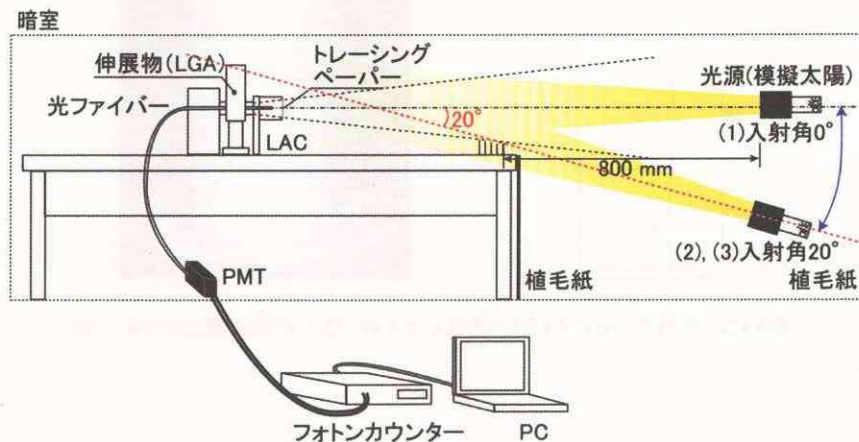


図4.10. LAC模型実験概要。

LACの模型は図4.8と同じ寸法で制作した。表面はサーマルブランケットのポリイミドフィルム（宇部興産製UPILEX[®]-S）で覆い、その中に梱包材などを入れて実際の衛星における凹凸感を再現した（図4.11）。バツフルの開口部から入射する全光量を測定するため、開口部には拡散性の良いトレーシングペーパーを貼り付け、バツフル中には光ファイバー（口径1mm）をLACバツフル先端から30mmの位置に設置しPMT（Hamamatsu H6240-01）を通してフォトンカウンターで光子数を計数した。LGAは現在設定されている大きさ（図4.12）を元に白い厚紙で制作した。光源はハロゲンランプに加えて拡散性を持たせるためにオパールガラスやトレーシングペーパーを使用した。また、暗室内壁からの反射光・散乱光を極力抑えるため、光源は拡散性を持ちつつも、ある程度の方向性を持つものを制作し、暗室内に照射される範囲をできるだけ小さくした（図4.13）。同様の目的で、図4.14のように植毛紙を光源の背面と実験台の前面に貼り付けた。



図4.11. LAC模型写真。金色のサーマルブランケット表面素材で覆われている。

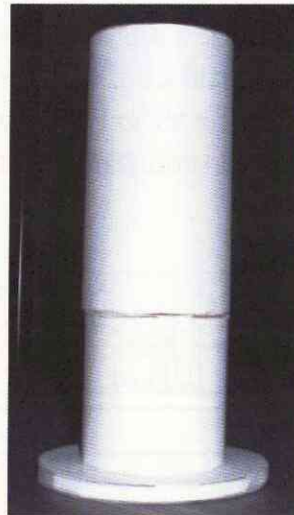
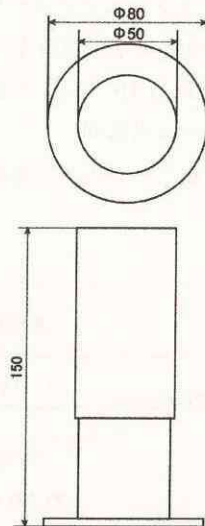
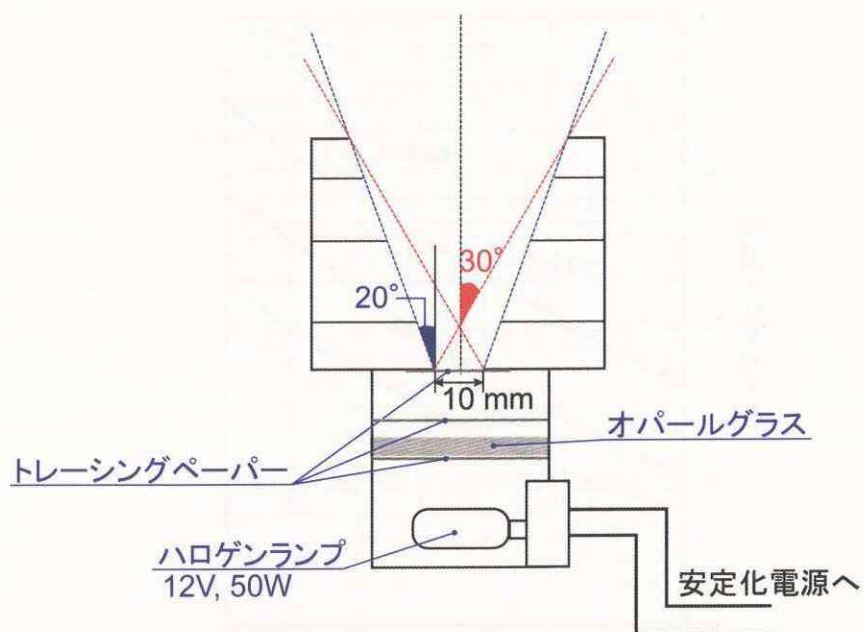


図4.12. 現時点におけるLGAの形状とサイズ（左）とLGA模型の写真（右）。



実験に使用した光子カウンター（サイエンテックス製PHC-2001）は10 Mcps (1×10^7 counts/sec) まで計数可能である。また、PMT (Hamamatsu H 6240-01) のダークカウント特性を図4.15に示す。気温20℃で46 cps程度である。

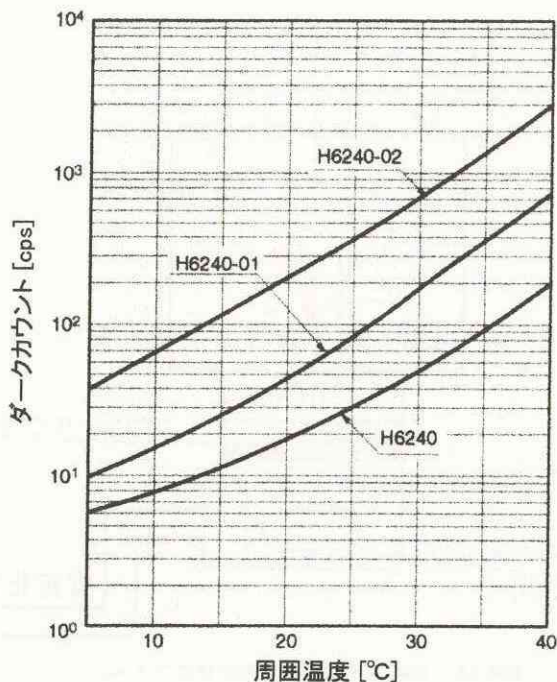


図4.15. Hamamatsu H6240 シリーズのダークカウント特性 (浜松ホトニクスカタログより改変).

実験は以下の3通りを行った。

- (1) 模擬太陽を視野中心に向かって照射した場合 (入射角0度)
- (2) (1)よりも20度下から照射した場合 (入射角20度, LGAなし)
- (3) (2)と同じ状態でLGAをLACバップル近傍に設置し, LGAの先端が模擬太陽光に照射されている場合。

但し(2),(3)に関して, 今回製作した模型は入射角16度の光はLACのバップルに照射しない設計になっているはずだったが, 実際に入射角16度の光を照射したところ, LACバップル上部に照射していた。これは工作精度の問題と考えられる。従って, LAC全体がベーンの陰に隠れる入射角20度を採用した。さらに(3)に関しては, LGAを設置する位置を①LACバップル先端よりもセンサー側と②LACバップル先端よりも光源側の2通りにして行った (図4.16)。なお, LGAの高さは現時点ではLACバップルよりも10 mm程度しか高くないので, 光源を入射角20度から照射した場合, LGA全体はベーンの影の中にあった。しかし, LGAは今後高さがさらに高くなる可能性があるので, LGA模型の下に50 mmの台を置いて現在設定されている高さよりも高くし, 入射角20度の光が入射したときにLGA先端に照射されるような実験も行った。①の場合, LGA先端部分は1 cm程度, ②の場合は2 cm程度照射されていた。

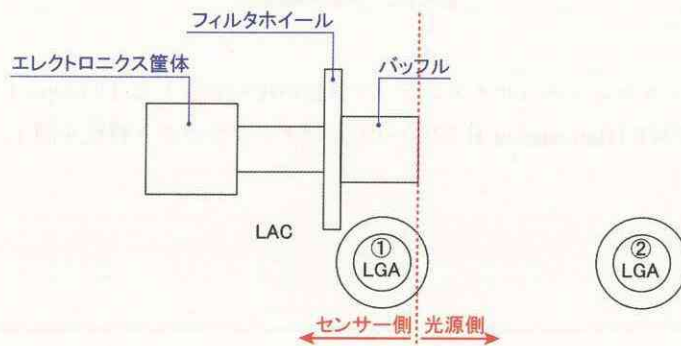


図4.16. LACとLGAの位置関係 (上から見た図)。

暗室中のダークレベル（光源を照射しないとき）のカウント数の平均値は32 cpsであった。実験中の室内温度は21℃であったことから、図4.15のダークカウント特性に近い値が得られた。従って、今回実験に使用した暗室には、室外からの光の入射はほとんどないと考えてよい。

以上を踏まえた上で、表4.6に実験結果を示す。

表4.6. 模型実験結果. カウント数は平均値を示す。

入射角	0°	20°	20°	20°	20°
LGA	—	なし	あり※1	あり①※2	あり②※2
図4.17	b	c	d	e	f
カウント数 [cps]	2.2×10^6	1.7×10^2	1.7×10^2	2.0×10^2	3.1×10^2

※1：LGAの高さは現時点のもので測定。

※2：LGAの高さを現時点より50mm高くして測定。①、②は図4.16中の番号に対応

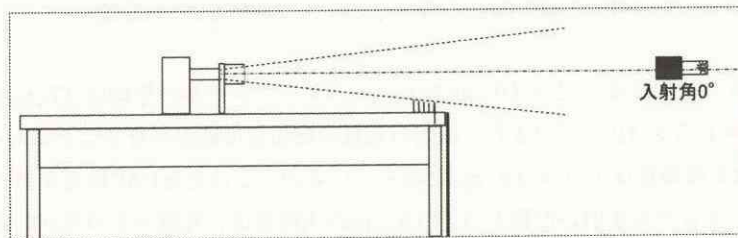


図4.17a. 入射角0度の場合（光源OFF）。

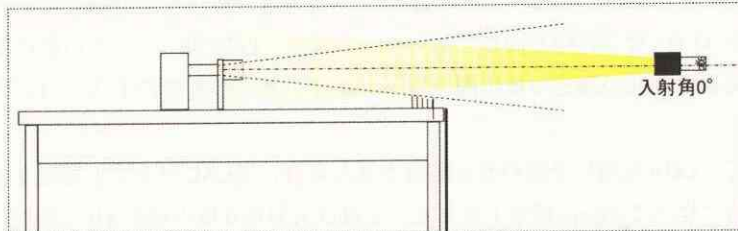


図4.17b. 入射角0度の場合（光源ON）。

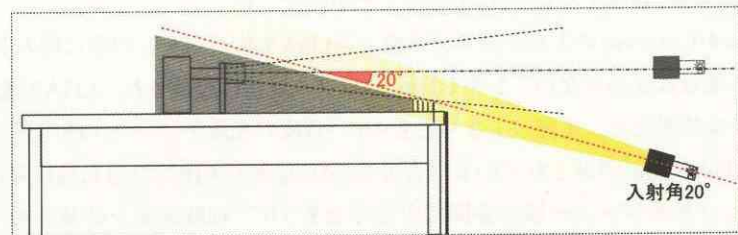


図4.17c. 入射角20度の場合（LGAなし）。

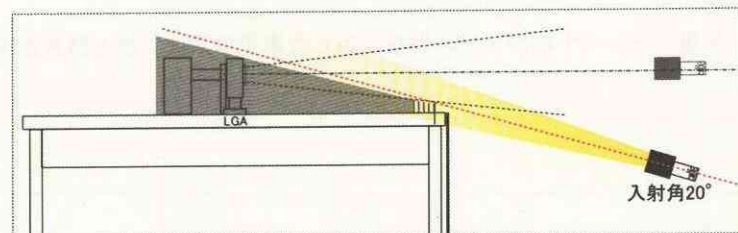


図4.17d. 入射角20度の場合（LGAベーン陰影）。

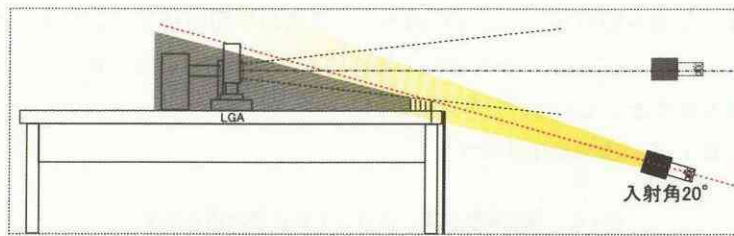


図4.17e. 入射角 20 度の場合 (LGAバツフル先端より検出器側).

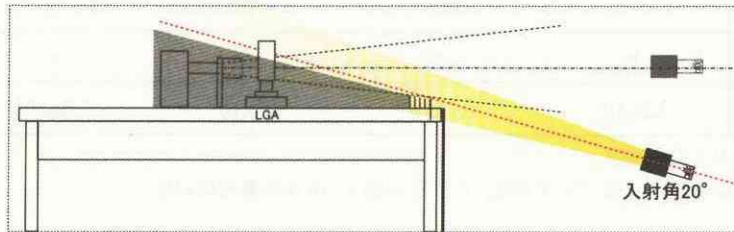


図4.17f. 入射角 20 度の場合 (LGAバツフル先端より光源側).

入射角 0 度ときのカウント数は 2.2×10^6 cps であった。ダークレベルの平均値 32 cps であるので、今回の実験では $32 / 2.2 \times 10^6 = 1.5 \times 10^{-5}$ 、つまり 5 桁弱の光量の変化まで測定できることになる。

入射角 20 度で LGA なしの場合には 1.7×10^2 cps となっているが、このとき LAC は完全にペーンの影に入っていたので、この値からダークレベルを引いた約 1.4×10^2 cps の大部分は、光源からの光が暗室内壁に照射されることで生じた散乱光のうち、植毛紙で減衰できなかった成分であると考えられる。

LGA の高さを現時点のもので測定した時、この場合は LGA の位置に関わらず LGA 全体がペーンの影の中に隠れていた時は、カウント数は LGA なしの時と同じであった。つまり、LGA がバツフルの影に隠れている時は、バツフル内に入射してくる光量は今回の測定の検出限界以下であり、光源の光量の 1.5×10^{-5} 以下ということになる。

LGA の高さを高くして、LGA 先端に光源の光を照射させた場合、① LAC バツフル先端よりもセンサー側に置いた場合は、LGA なしの時に比べて 30 cps 程度上昇した。これは入射角 0 度の時の 10^{-5} 程度 (1.5×10^{-5}) の値である。一方、② LAC バツフル先端よりも対物側に置いた場合は、LGA なしの時に比べて 1.4×10^2 cps 程度増加し、光源の光量の 10^{-4} 程度 (6.5×10^{-5}) であることがわかった。

以上のことから、LGA が LAC の高さよりも高くなる場合、LGA 全体がペーンの影に隠れるような位置にあればバツフル内に入ってくる光量は変わらない。しかし LAC バツフル近傍に設置され、LGA 先端 2 cm 程度に光源の光が照射されてしまうような状況だと、光源の少なくとも 10^{-5} 程度の光量がバツフル内へ混入してくることが定量的に求められた。仮に LGA 先端が照射されている場合でも LAC 光学系全体での迷光減衰量の目標である 10 桁を達成するには、1 段バツフルとレンズ-検出器間で少なくとも 10^{-5} 程度迷光を減衰させればよいことになる。1 段バツフル初段に MLI からの散乱光が直達しないように、バツフル禁止角を設定すれば、この減衰量は十分達成可能であると考えている。

今回の実験結果より、多重ペーン + 1 段バツフル型を採用した本光学系は、迷光減衰要求量 10^{-10} を十分達成できることが示された。

5. 高速トリガーサンプリング方法の検討

雷観測モードでは、プレトリガーサンプリングを検出方法として採用する。全44チャンネルといっても20 kHzの高速で連続サンプリングを続けてはデータ量が膨大になってしまうので、シグナルを検出したときのみ、その発光チャンネルだけトリガーの前後数10 msecのみデータとして残すことを検討している。しかし、バックグラウンドレベルは時間変動するだけでなく、観測領域や観測位置によっても変化する。いかにしてトリガーレベルを自動的に設定し、かつリアルタイムでシグナルを検出するかがこの方法の難点である。しかも探査機上で処理するべく、できるだけ簡単なアルゴリズムが要求される。ここでは5.1で忘却係数という概念を用いた検出方法を紹介する。5.2ではその方法を用いて実施した検証試験の結果について示し、その成立性について検討する。

5.1. 忘却係数を用いた自動検出システム

検討中の自動検出システムは以下のとおりである。

(1) まず新しい平均値 A_{new} と2乗平均値 S_{new} は、現在のデータ D 、過去の平均値 A_{old} および2乗平均値 S_{old} を使い、忘却係数 α という概念を用いて、以下のように表す。

$$A_{\text{new}} = A_{\text{old}} \cdot \alpha + D \cdot (1 - \alpha) \quad (5.1)$$

$$S_{\text{new}} = S_{\text{old}} \cdot \alpha + D^2 \cdot (1 - \alpha) \quad (5.2)$$

このようにして A_{new} と S_{new} をずっと更新していく。

(2) あるしきい値 β を考え、

$$D > A_{\text{old}} + \beta \cdot \sqrt{S_{\text{old}} - (A_{\text{old}})^2} \quad (5.3)$$

となったとき、シグナルありと判断し、検出する。

以上、この方法で使用するパラメータは2つ (α, β) である。主に雷シグナルの立ち上がりの速さ (サンプル速度にも関係) により α の調整が必要である。また、検出したい雷シグナルの強度により β が決まる。

5.2. 検証結果

この方法を用いて、地上から光電子増倍管を用いて検出した地球の雷放電フラッシュのデータを元に、シグナルが検出されるかどうかを検証してみる。 α を0.9, 0.99, 0.999, 0.9999とし、 β は5で固定した場合の結果を図5.1に示す。この図より、 $\alpha = 0.99, 0.999$ に設定すると、このデータセットにおける雷放電発光を見事検出することに成功していることがわかる。 $\alpha = 0.9$ では小さすぎてノイズを拾いやすく、また雷シグナルがある部分を検出できていない。また、 $\alpha = 0.9999$ では大きすぎて、小さい雷シグナルが検出できないことがわかる。以上より、パラメータの設定次第で、雷放電に起因する発光パルスを十分検出可能であることが示された。

なお、強いシグナルが検出されると、(1)で更新されていく $A_{\text{new}}, S_{\text{new}}$ は、ノイズレベルから遠ざかり、大きな値に更新され、しばらくするとまたノイズレベルに戻っていく。この結果、もし非常に強い雷シグナルが連続しておこった場合、後の方のシグナルを検出し損なう可能性がある。これを避けるには、強いシグナルが検出されたら、 α の値を非常に1に近づけて、更新の速度を遅くして、シグナルが弱くなったら元に戻すという方法がある。これにより、平均値と2乗平均値により、ノイズレベルをよりうまく反映させることができる。ただしこの方法ではパラメータの数は多くなるので、遠隔操作の手探り運用では最適化が難しく、ハードウェアもやや難解になると考えられるので、さらに検討を重ねていく必要がある。

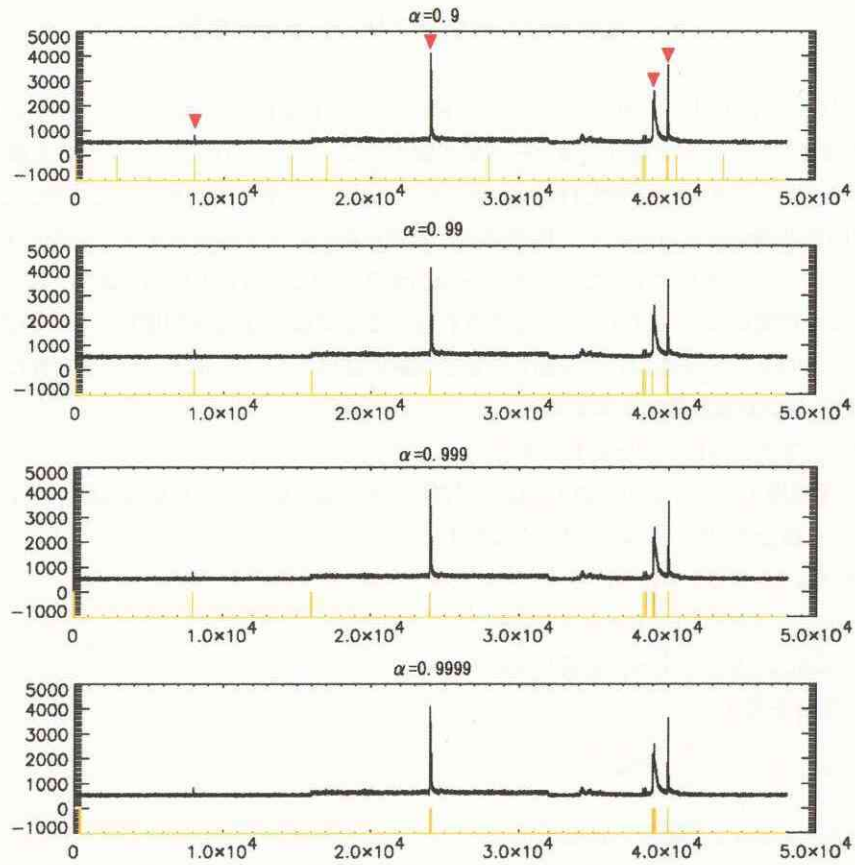


図5.1. 本検出システムを用いて検出された雷放電フラッシュ（上から忘却係数 $\alpha = 0.9, 0.99, 0.999, 0.9999$ ）. 一番上の図中にある▼は雷フラッシュが発生したときのデータを示す. 各図中下の黄色の縦線が有意な変化（雷シグナル）ありと判断した部分を表す. なお, 図中の不連続なバックグラウンドレベル変化は3つの雷データを連結させたときに生じるものである.

6. 結論と今後の課題

日本の金星探査衛星VCOに搭載することが計画されている雷・大気光カメラ (LAC) について、その検出器と光学系の検討と評価を行った。

VCOは世界初の本格的な惑星気象衛星で、金星の大気大循環の解明を主目的としている。LACは探査機に搭載されるカメラ5台のうちの一つであり、全角6度の視野を持ち、検出器には全44チャンネルの2次元素子を採用する。LACは金星夜面における雷放電発光(観測波長777 nm [OI])を50 kHzサンプリングで高速撮像することで、世界初の金星雷放電現象の検出を目指すとともに、金星におけるメソ気象学の理解を進展させる。また金星夜間大気光(観測波長551 nm [O₂], 558 nm [OI])を10–60 sec積分で2次元イメージング観測し、金星の特に熱圏における大気大循環の理解や下層大気と超高層大気の力学的結合の解明に貢献する。

LACは上記科学目標を達成するべく、検出目標を以下のように設定する。

(1) 地球における平均的規模(光エネルギー 10^6 J)の雷放電発光が雲層下で発生した場合でも、金星表面より3 Rv (1 Rv = 6052 km; 金星平均半径)離れた地点から検出可能。

(2) 地球における平均的規模の1/100(光エネルギー 10^4 J)の雷放電発光が雲層下で発生した場合でも、金星表面より1000 km離れた地点から検出可能。

(3) 発光強度100 Rの大気光がS/N比=10を確保して検出可能。

本研究ではこれらを達成するべく、LACに課された以下の開発項目についてそれぞれ検討した。

観測される光量を見積もり、それらの検出が可能となる素子として光電子増倍管(PMT)とアバランシェ・フォトダイオード(APD)の2種類を検討した。

1. (1)~(3)の場合で観測される光子数を見積もった結果、雷放電発光観測時は 10^4 photons/sample、大気光観測時は 10^5 photons/sampleのオーダーであった。

2. PMTとAPDの特長・性能を比較し、各々の開発項目について整理した。ゲインの面ではPMTの方が3桁以上大きい。量子効率ではAPDが1–2桁上回る。特にPMTの長波長側での量子効率の低さは深刻で、雷放電発光観測はAPDに比べて相当不利であることがわかった。

3. 両検出器に関して、絶対感度校正実験を行った。100 Rの光源をモニターした時の、PMTに関しては110 pA、APDに関しては0.32 pAという出力電流値が算出された。暗電流統計ゆらぎとのS/N比はそれぞれ25、15となり、いずれも目標S/N比=10を上回る結果が得られた。

4. 両検出器に関して、暗電流温度特性試験を行った。APDで100 Rの光源をモニターする場合、予想される出力電流値に比べて暗電流のゆらぎ幅・温度変化率がかなり大きく、積分時間10 sec内の温度変化を0.004 °C以下に抑える必要があることが判明し、大気光観測は困難であると結論付けた。

結論として、雷放電発光観測なら長波長側でも量子効率の高いAPDを、大気光観測ならゲインが高く温度安定性の良いPMTを採用するのが最適であることがわかった。重量面に余裕があれば、雷放電発光観測用にAPD、大気光観測用にPMTと、2検出器を採用するという案も考えられるが、どちらか1つのセンサーで雷放電発光・大気光を観測するのは困難だと結論付けた。今後、APDほどではないがPMTよりも耐振性・量子効率に優れたMCP(Micro Channel Plate)についての検討を実施する必要があると考えられる。

続いて、LACは金星夜面の大気発光現象を検出するにあたり、視野近傍にある太陽からの直達光や金星昼面からの太陽散乱光が観測の妨げになると予想されたため、高い遮光技術を有する光学系の設計・開発を行った。

5. 観測される迷光(太陽直達光、金星昼面光)の光子数を見積もった結果、これらは(1)–(3)の場合に検出される雷放電発光・大気光の光子数よりも最大で12桁上回るものであった。太陽、金星昼面を完全に観測視野から外し、かつそれらからの迷光が視野外から光学系に混入しないよう高性能の遮光技術をLAC光学系に取り入れることが必要不可欠である。実際に要求される迷光の減衰量が最大となるのが、検出目標(3)を達成する場

合の10桁と見積もられ、この値をLACの迷光減衰量の目標値に設定する。

6. 10桁の迷光減衰量を実現させるべく、多重ベーン+1段バッフル型の光学系を設計した。これは対物側に設置した数枚の遮光板（ベーン）で、太陽光などの迷光源の光量を 10^{-9} – 10^{-10} 程度減衰可能で、目標値達成の可能性が大きく開かれた。さらにこの方法は、観測時間の拡大や機器全体の小型化・軽量化などの面にも期待できるものである。

今回設計したLACは衛星側面に取り付ける必要があることから、衛星突起物を介して迷光がLAC光学系内に混入し得ることが懸念される。我々はこれらの影響を定量的に測定するため実物大のLACと突起物、模擬太陽光源を制作し、突起物設置によるLACバッフル内への迷光混入量を定量的に測定した。その結果、LACの1段バッフル先端よりもセンサー側に突起物が設置され、かつ突起物先端付近に迷光が照射された場合、光源の光量の 10^{-5} 程度がLACバッフル内へ侵入することが明らかになった。突起物設置への対策としては、観測中突起物を完全に対物側ベーンの影に隠れるような位置に設置するか、1段バッフルから検出器の間までに迷光を5桁以上減衰させればよいことになる。1段バッフルから検出器間までで見込める迷光減衰量は7桁となっており、1段バッフル初段にMLIからの散乱光が直達しないようにバッフル禁止角を設定すれば、この減衰量は十分達成可能であると考えている。このような遮光技術は今後、太陽のような明るい天体の近傍の惑星観測や、惑星昼面を遮蔽した惑星夜面の観測など、幅広い応用が期待されるものである。

最後に、雷放電発光観測の成否を分ける、高速トリガーサンプリング時におけるデータ取得方法の考案とその実用性についての検証試験を行った。

7. データに忘却係数という重みをかけ、平均値と2乗平均値をリアルタイムで更新していくこの方法は、地球で得られた雷フラッシュをノイズと区別して見事検出することに成功した。

今後、実際に電気系BBM (Bread Board Model) を製作して、ストロボや自然雷を光源とした地上実験を行い、その性能を確認していく必要がある。

謝 辞

本研究を進めるにあたり、金星探査ワーキンググループの方々には数多くの有益なご助言をいただきました。ここに深く感謝いたします。

参 考 文 献

- [1] Allen, D., D. Crisp, and V. Meadows, Variable oxygen airglow on Venus as a probe of atmospheric dynamics, *Nature*, 359, 516-519, 1992.
- [2] Borucki, W. J., C. P. McKay, D. Jebens, H. S. Lakkaraju, and C. T. Vanajakshi, Spectral irradiance measurements of simulated lightning in planetary atmospheres, *Icarus*, 123, 336-344, 1996.
- [3] Borucki, W. J., J. W. Dyer, J. R. Phillips, and P. Phan, Pioneer Venus Orbiter search for Venusian lightning, *J. Geophys. Res.*, 96, 11, 033-11, 043, 1991.
- [4] Bougher, S. W., M. J. Alexander, and H. G. Mayr, Upper atmosphere dynamics : Global circulation and gravity waves, in *Venus II*, edited by S. W. Bougher et al., Univ. of Arizona Press, Tucson, 259-291, 1997.
- [5] Bougher, S. W., and W. J. Borucki, Venus O₂ visible and IR nightglow : Implications for lower thermosphere dynamics and chemistry, *J. Geophys. Res.*, 99, 3759-3776, 1994.
- [6] Bougher, S. W., R. E. Dickinson, E. C. Ridley, and R. G. Roble, Venus mesosphere and thermosphere, III, Three-dimensional general circulation with coupled dynamics and composition, *Icarus*, 73, 545-573, 1988.
- [7] Breault, R.P., Control of stray light, in *Handbook of Optics II*, edited by M. Bass, sponsored by OSA, chapter 38, 1995.
- [8] Buffington, A, Improved design for stray-light reduction with a hemispherical imager, *Appl. Opt.* 39, 2683-2686, 2000.
- [9] Buffington, A., B. V. Jackson, and C. M. Korendyke, Wide-angle stray-light reduction for spaceborne optical hemispherical imager, *Appl. Opt.* 35, 6669-6673, 1996.
- [10] Carlson, R. W., K. H. Baines, L. W. Kamp, P. R. Weissman, W. D. Smythe, A. C. Ocampo, T. V. Johnson, D. L. Matson, J. B. Pollack, and D. Grinspoon, Galileo infrared imaging spectroscopy measurements at Venus, *Science*, 253, 1541-1548, 1991.
- [11] Desch, S. J., W. J. Borucki, C. T. Russell, and A. Bar-Nun, Progress in planetary lightning, *Rep. Prog. Phys.*, 65, 955-997, 2002.
- [12] Fox, J. L., The red and green lines of atomic oxygen in the nightglow of Venus, *Adv. Space Res.*, 10, 31-36, 1990.
- [13] Grebowsky, J. M., R. J. Strangeway, and D. M. Hunten, Evidence for Venus lightning, in *Venus II*, edited by S. W. Bougher et al., Univ. of Arizona Press, Tucson, 125-157, 1997.
- [14] Gurnett, D. A., P. Zarka, R. Manning, W. S. Kurth, G. B. Hospodarsky, T. F. Averkamp, M. L. Kaiser, and W. M. Farrell, Non-detection at Venus of high-frequency radio signals characteristic of terrestrial lightning, *Nature*, 409, 313-315, 2001.
- [15] Gurnett, D. A., W. S. Kurth, A. Roux, R. Gendrin, C. F. Kennel, and S. J. Bolton, Lightning and plasma wave observations from the Galileo flyby of Venus, *Science*, 253, 1522-1525, 1991.
- [16] Hansell, S. A., W. K. Wells, and D. M. Hunten, Optical detection of lightning on Venus, *Icarus*, 117, 345-351, 1995.
- [17] Ho, C.-M., R. J. Strangeway, and C. T. Russell, Control of VLF burst activity in the nightside ionosphere of Venus by the magnetic field orientation, *J. Geophys. Res.*, 97, 11, 673-11, 680, 1992.
- [18] Kasprzak, W. T., H. B. Niemann, A. E. Hedin, S. W. Bougher, and D. M. Hunten, Neutral composition measurements by the Pioneer Venus Orbiter mass spectrometer during orbiter reentry, *Geophys. Res. Lett.*, 20, 2747, 1993.

- [19] Krasnopolsky, V. A., Oxygen emission in the night airglow of the earth, Venus and Mars. *Planet. Space Sci.*, 34, 511-518, 1986.
- [20] Krasnopolsky, V. A., Lightnings and nitric oxide on Venus, *Planet. Space Sci.*, 31, 1363-1369, 1983.
- [21] Krasnopolsky, V. A., Excitation of oxygen emissions in the night airglow of the terrestrial planets, *Planet. Space Sci.*, 29, 925-929, 1981.
- [22] Ksanofomality, L. V., F. L. Scarf, and W. W. L. Taylor, The electrical activity of the atmosphere of Venus, in *Venus*, edited by D. M. Hunten et al., Univ. of Arizona Press, Tucson, 565-603, 1983.
- [23] Mengel, J. G., D. R. Stevens-Rayburn, H. G. Mayr, and I. Harris, Non-linear three dimensional spectral model of the Venusian thermosphere with super-rotation, II, Temperature, composition and winds. *Planet. Space Sci.* 37, 707-722, 1989.
- [24] Phillips, J. L., A. I. F. Stewart, and J. G. Luhmann, The Venus ultraviolet aurora : Observations at 130.4 nm, *Geophys. Res. Lett.*, 13, 1047-1050, 1986.
- [25] Russell, C. T., Planetary lightning, *Annu., Rev. Earth Planet. Sci.*, 21, 43-87, 1993.
- [26] Russell, C. T., M. von Dornum, and F. L. Scarf, Planetographic clustering of low-latitude impulsive electric signals in the night ionosphere of Venus, *Nature*, 331, 591-594, 1988.
- [27] Sagdeev, R. V., V. M. Linkin, V. V. Kerzhanovich, A. N. Lipatov, A. A. Shurupov, J. E. Blamont, D. Crisp, A. P. Ingersoll, L. S. Elson, R. A. Preston, C. E. Hildebrand, B. Ragent, A. Seiff, R. E. Young, G. Petit, L. Boloh, Yu. N. Alexandrov, N. A. Armand, R. V. Bakitko, and A. S. Selivanov, Overview of VEGA balloon in situ meteorological measurements, *Science*, 231, 1411-1414, 1986.
- [28] Scarf, F. L., W. W. L. Taylor, C. T. Russell, and L. H. Brace, Lightning on Venus : Orbiter detection of whistler signals, *J. Geophys. Res.*, 85, 8158-8166, 1980.
- [29] Slanger, T. G., D. L. Huestis, P. C. Cosby, N. L. Chanover, K. S. Anderson, New ground-based measurements of the Venus nightglow, (abstract) *Eos Trans, AGU, Spring Meet. Suppl.*, SA41A-17, 2002.
- [30] Slanger, T. G., P. C. Cosby, D. L. Huestis, and T. A. Bida, Discovery of the atomic oxygen green line in the Venus night airglow, *Science*, 291, 463-465, 2001.
- [31] Socker D. G., R. A. Howard, C. M. Korendyke, G. M. Simnett, and D. F. Webb, The NASA solar terrestrial relations observatory (STEREO) mission heliospheric imager, *Proc. SPIE*, 4139, 284-293, 2000.
- [32] Taylor, H. A., Jr., and P. A. Cloutier, Venus : Dead or alive ? , *Science*, 234, 1087-1091, 1986.
- [33] Williams, M. A., and Thomason, L. W., Optical signature of Venus lightning as seen from space, *Icarus*, 55, 185-186, 1983.
- [34] von Zahn, U., S. Kumar, H. Niemann, and R. Prinn, Composition of the Venus atmosphere, in *Venus*, edited by D. M. Hunten et al., Univ. of Arizona Press, Tucson, 299-430, 1983.
- [35] Zhang, S., S. W. Bougher, M. J. Alexander, The impact of gravity waves on the Venus thermosphere and O₂ IR nightglow, *J. Geophys. Res.*, 101, 23, 195-23, 205, 1996.
- [36] 内田亮宏, Elvesの時間空間構造と発光機構に関する研究, 東北大学修士論文, 1999.
- [37] 大羽康弘, 板橋宏典, 後藤幸弘, 長ギャップ炭酸ガス放電に対する光学的測定, 日本大気電気学会『大気電気研究』第63号, 2003.
- [38] 金星探査ワーキンググループ編, 『金星探査計画提案書』, 2001.
- [39] 浜松ホトニクス株式会社 編集委員会, 『光電子増倍管 —その基礎と応用—』, 浜松ホトニクス株式会社, 1998.
- [40] 浜松ホトニクス「光半導体ハンドブック」制作委員会, 『光半導体ハンドブック』, 浜松ホトニクス株式会社, 2004.

宇宙航空研究開発機構研究開発報告 JAXA-RR-04-016

発行日 2005年3月31日
編集・発行 独立行政法人 宇宙航空研究開発機構
〒182-8522
東京都調布市深大寺東町七丁目44番地1
TEL 0422-40-3000(代表)
印刷所 株式会社 フジプランズ
東京都大田区東海3-8-2 TSKビル

©2005 JAXA

※本書(誌)の一部または全部を著作権法の定める範囲を超え、無断で複写、複製、転載、テープ化およびファイル化することを禁じます。
※本書(誌)からの複写、転載等を希望される場合は、下記にご連絡ください。
※本書(誌)中、本文については再生紙を使用しております。

<本資料に関するお問い合わせ先>

独立行政法人 宇宙航空研究開発機構 情報化推進部 宇宙航空文献資料センター



宇宙航空研究開発機構
Japan Aerospace Exploration Agency