

修士論文

JEM-GLIMS 及び TARANIS 衛星搭載  
フォトメタの開発  
Development of Photometers onboard  
JEM-GLIMS and TARANIS Satellite

吉田健悟

Kengo Yoshita

北海道大学 大学院理学院 宇宙理学専攻  
惑星宇宙グループ

Planetary Space Group, Department of Cosmoscience,  
Graduate School of Science, Hokkaido University

2010年2月5日



# 要旨

雷雲地上間放電に伴い、雷雲上空の成層圏・中間圏・下部熱圏で発生する過渡放電発光現象は、発生形態によりスプライト、エルブス、ブルージェット、巨大ジェット、ヘイローなどに分類され、総称して高高度放電発光現象と呼ばれている。スプライトの発生メカニズムとして準静電場モデルが提唱されているが、数百 C・km 程度の電荷モーメントでもスプライトが発生する原因など、多くの観測事実を説明することができない。ところが近年、雷放電の水平電流が放射する電磁パルスが、雷雲上空でスプライトの発生条件を決めている可能性があることが、観測的・理論的に示唆されている。この点を明らかにするために、雷放電水平電流の電波観測と衛星からスプライトの水平構造を同時観測することが本質的である。さらに、高高度放電発光現象は多量の NO<sub>x</sub>、HO<sub>x</sub> を生成し、発生高度における化学組成に影響していることが示唆されている。地球大気全体にどのような影響を及ぼしているかを定量的に推定するには、未解明な問題として残されている高高度放電発光現象の全球発生頻度分布を明らかにする必要がある。

一方、地球大気圏起源のガンマ線放射（地球ガンマ線）は、衛星観測により 6 年間で 820 イベントが検出され、普遍的に発生する現象であることが明らかになってきた。地球ガンマ線の発生分布は雷活動が高い地域と相関があることから、雷放電に起因するとされているが、雷放電のどの放電プロセスが地球ガンマ線を生成したかを特定できていない。これは、雷放電は地上電波で、地球ガンマ線は衛星で観測しており、それぞれの観測器による時刻の絶対精度の違いが障壁となっている。発生メカニズムを特定するためには雷放電と地球ガンマ線の同時観測を実現することが本質的である。

これらの問題を解決するために、雷放電、高高度放電発光現象、及び地球ガンマ線を国際宇宙ステーションから観測する JEM-GLIMS ミッションと、小型衛星により観測する TARANIS ミッションが、それぞれ打上げに向けて進行中である。本研究では、JEM-GLIMS に搭載するフォトメタのプロトフライトモデルと、TARANIS 衛星に搭載するフォトメタのエンジニアリングモデルの開発を行なった。すでに開発を終えた試作モデルを用い、特に JEM-GLIMS 用のプロトフライトモデルの設計のために必要となる 3 つの性能評価試験を実施した。

まず第一に、光電子増倍管を光検出器に用いるフォトメタのゲインの適正値を求めるために、積分球を用いた感度校正試験を行った。その結果、要求基準の感度を 1 桁以上上回る結果が得られた。このままの高感度を維持すると、比較的少ない入射光量でもサチュレーションすると予測されるため、電流電圧変換アンプ部のシャント抵抗値を 1 桁以上小さくし、ゲインを下げる設計に変更した。一方、フォトダイオードを検出器に用いるフォトメタに対しても同様の試験を実施した。このフォトメタは逆にシャント抵抗値が低すぎて感度が不足し、ノイズ成分がアンプ部で増幅されて SN 比が悪くなっていることが分かった。このため、シャント抵抗値を 1 MΩ から 30 MΩ に大きくする様に変更した。第二に、光電子増倍管の出力ドリフト特性の測定を実施した。その結果、10% の絶対測光精度という要求基準内となることが明らかになったが、プロトフライトモデルにおいても

同様の較正データを取得し、実際の取得データに対して補正する必要があることが解った。第三に、JEM-GLIMS の観測機器取付け面の最大予想温度が、フォトメタの光検出器である光電子増倍管の保障温度の上限を超過している。このため、上限温度において光電子増倍管の損傷及び感度劣化を検証するため、高熱耐久試験を実施した。試験の結果、光電子増倍管が上限温度に達しても顕著な感度の劣化と永久損傷は確認されなかったが、万一のことを考え、検出器とフォトメタ筐体を積極的に断熱する設計に変更した。

本研究の成果として、試作モデルの評価試験を通じて JEM-GLIMS 搭載プロトフライトモデルの設計を確定することができた。また、TARANIS 衛星搭載フォトメタのエンジニアリングモデルの設計を決めるために必要な、基礎データ取得を行なうことができた。

# 目次

第 1 章 序論	1
1.1 雷放電	1
1.2 高高度放電発光現象	3
1.3 地球ガンマ線	6
1.4 本研究の目的	8
第 2 章 ミッション	9
2.1 JEM-GLIMS ミッション	9
2.2 TARANIS 衛星ミッション	17
第 3 章 JEM-GLIMS フォトメタの要求仕様	20
3.1 要求仕様概略	20
3.2 光学設計	22
3.3 検出器	27
3.4 感度設計	35
第 4 章 JEM-GLIMS 搭載フォトメタ開発	43
4.1 較正試験	43
4.2 出力ドリフト特性試験	56
4.3 高温耐久試験	60
第 5 章 TARANIS 衛星搭載フォトメタ	71
5.1 要求仕様	71
5.2 JEM-GLIMS 搭載フォトメタとの相違項目	72
第 6 章 まとめ	76
謝辞	79
参考文献	81

# 図目次

1.1	MCS における電荷分布の概念図. . . . .	2
1.2	OTD の観測により得られた雷放電の全球発生頻度分布. . . . .	2
1.3	TLEs の発光形態を示す模式図. . . . .	3
1.4	雷放電の水平電流から放射される EMP による電子密度分布. . . . .	4
1.5	カラム状スプライトと親雷放電の相関図. . . . .	5
1.6	ISUAL の観測データより求められた TLEs の全球発生頻度分布. . . . .	5
1.7	雷放電の発生頻度分布と TGFs の発生分布. . . . .	6
1.8	TGFs 発生メカニズムの概念図. . . . .	7
2.1	国際宇宙ステーション及び日本実験棟曝露部の概念図. . . . .	10
2.2	JEM-GLIMS の概念図. . . . .	10
2.3	JEM-GLIMS の構造図. . . . .	13
2.4	TLE モードの観測形態を示す模式図. . . . .	16
2.5	TARANIS 衛星の概念図. . . . .	17
2.6	TARANIS 衛星の構造図及び搭載観測機器. . . . .	19
3.1	PH1, 2, 3, 5, 6 のレンズの光路図. . . . .	23
3.2	PH4 のレンズの光路図. . . . .	23
3.3	PH1 の鏡筒の機械図面. . . . .	23
3.4	PH4 の鏡筒の機械図面. . . . .	24
3.5	フィルタ透過特性. . . . .	25
3.6	JEM-GLIMS 観測機器の観測開始時点における太陽, フォトメタ視野, 地球日照部の関係. . . . .	26
3.7	R7400U-06 の写真 (左), R7400U-20 の写真 (右). . . . .	27
3.8	PMT の形状図. . . . .	28
3.9	R7400-06 (左), -20 (右) の分光感度特性 [浜松ホトニクス]. . . . .	28
3.10	R7400-06 (左), -20 (右) のゲイン特性 [浜松ホトニクス]. . . . .	30
3.11	Q10-5 の制御電圧と, 出力電圧の関係. . . . .	30
3.12	PMT への印加電圧と PMT のゲインの関係. . . . .	31
3.13	S1227-1010BQ の写真 [浜松ホトニクス]. . . . .	32
3.14	S1227-1010BQ の分光感度特性 [浜松ホトニクス]. . . . .	33
3.15	JEM-GLIMS/PH のブロック図. . . . .	34
3.16	ISUAL により観測されたイベント. . . . .	35
3.17	SP2 及び SP4 のフィルタ透過率. . . . .	37

3.18	雷光及びスプライト発光のスペクトル. . . . .	38
3.19	762 nm 付近での雷光及びスプライト発光における大気の透過率. . . . .	39
3.20	337 nm 付近での雷光及びスプライト発光における大気の透過率. . . . .	40
4.1	感度較正試験機器のセットアップを示す概念図. . . . .	44
4.2	出力及びノイズの電圧波形. . . . .	47
4.5	較正試験の結果得られた PH3 <sub>BBM</sub> の入射光量と SNR の関係. . . . .	47
4.3	較正試験の結果得られた PH2 <sub>BBM</sub> の入射光量と SNR の関係. . . . .	48
4.6	較正試験の結果得られた PH3 <sub>BBM</sub> の入射光量と SNR の関係. . . . .	48
4.4	較正試験の結果得られた PH2 <sub>BBM</sub> の HV 値と SNR の関係. . . . .	49
4.7	較正試験の結果得られた PH2 <sub>BBM</sub> の入射光量と出力電圧値の関係. . . . .	50
4.8	BBM での PH2 <sub>BBM</sub> の信号増幅回路. . . . .	51
4.9	PFM での PH2 <sub>BBM</sub> の信号増幅回路. . . . .	51
4.10	増幅回路の初段増幅部の等価回路. . . . .	52
4.11	ゲイン = 10 M での試験結果. . . . .	53
4.12	ゲイン = 30 M での試験結果. . . . .	54
4.13	BBM での PH4 の信号増幅回路. . . . .	54
4.14	PFM での PH4 の信号増幅回路. . . . .	55
4.15	出力ドリフト特性試験実験環境の写真. . . . .	57
4.16	PH2 <sub>BBM</sub> 出力ドリフト特性試験結果. . . . .	58
4.17	PH3 <sub>BBM</sub> 出力ドリフト特性試験結果. . . . .	59
4.18	高温耐久試験環境の概念図. . . . .	62
4.19	PMT と HV ユニットへの熱電対取付けの様子を表した写真. . . . .	63
4.20	PH3 <sub>BBM</sub> 高温耐久試験出力結果. . . . .	64
4.21	PH3 <sub>BBM</sub> 高温耐久試験 SNR 結果. . . . .	64
4.22	熱解析のモデルの図. . . . .	66
4.23	熱解析結果. . . . .	67
4.24	フォトメタの構造図. . . . .	69
4.25	Unit 1 筐体の内部図. . . . .	70
4.26	Unit 1 の設計図面. . . . .	70
5.1	MCP/PH の鏡筒構造図. . . . .	73
5.2	MCP/PH の構造図. . . . .	75

## 表目次

2.1	JEM-GLIMS 諸元. . . . .	12
-----	-----------------------	----

2.2	搭載機器一覧. . . . .	13
2.3	LSI の仕様. . . . .	14
2.4	PH の観測波長域及び視野. . . . .	14
2.5	PH 仕様 . . . . .	15
2.6	VLFR 仕様. . . . .	15
2.7	VITF 仕様. . . . .	15
2.8	TARANIS 衛星諸元. . . . .	18
2.9	TARANIS 衛星搭載観測機器. . . . .	18
3.1	フォトメタ要求仕様. . . . .	21
3.2	光学系に対する要求仕様. . . . .	22
3.3	R7400-06, -20 の仕様. . . . .	29
3.4	EMCO Q10-5 の仕様. . . . .	29
3.5	S1227-1010BQ の仕様. . . . .	32
3.6	ISUAL/SP2, SP4 の観測データから得られた最大入射光量. . . . .	36
3.7	ISUAL/SP の入射瞳での入射光量の補正值. . . . .	36
3.8	光源の発光スペクトルを考慮した入射瞳での入射光量. . . . .	37
3.9	$E_{ISUAL}$ と $E_{TARANIS}$ との比較. . . . .	39
3.10	予想される TARANIS 衛星での観測入射光量. . . . .	40
3.11	予想される TARANIS 衛星での SNR. . . . .	42
4.1	PH2 <sub>BBM</sub> , PH3 <sub>BBM</sub> 較正試験使用機材. . . . .	44
4.2	PH4 較正試験使用機材. . . . .	53
4.3	出力ドリフト特性試験機材. . . . .	57
4.4	高温耐久試験に用いた機材. . . . .	61
4.5	フォトメタの熱吸収率及び放射率. . . . .	65
4.6	ガラスエポキシワッシャ及びプレートの条件. . . . .	66
4.7	熱解析の結果得られた検出器の温度. . . . .	66
5.1	MCP/PH 構成. . . . .	72
5.2	フォトメタ要求仕様. . . . .	72

# 第 1 章 序論

本研究の目的は、高高度放電発光現象 (TLEs : Transient Luminous Events) の発生メカニズムと全球発生頻度分布を特定すること、さらに地球ガンマ線 (TGFs : Terrestrial Gamma-ray Flashes) の発生メカニズムを解明することにある。この目的のために、衛星軌道上から雷放電及び TLEs を観測する衛星搭載用フォトメタの開発を行なった。第 1 章では、雷放電, TLEs, TGFs の概要と本研究の目的について述べる。

## 1.1 雷放電

### 1.1.1 雷放電と雷雲内部の電荷分布

雷放電とは、雷雲内の電荷が放電により中和される現象である。雷放電の発生形態として、雷雲地上間 (CG : Cloud-to-Ground) 放電, 雲内 (CC : Cloud-to-Cloud) 放電, 及び雲間 (IC : Intra-Cloud) 放電がある。雷雲地上間放電には雷雲内部の正電荷が中和される正極性雷雲地上間放電 (+CG 放電) と雷雲内部の負電荷が中和される負極性雷雲地上間放電 (-CG 放電) がある。

雷放電が発生するためには、雷雲内部に電荷が蓄えられる必要がある。雲内に電荷が生じるメカニズムとして、あられと水晶との衝突による電荷分離メカニズムが提唱されており、正・負電荷を担う粒子の空間的分布の違いから、典型的には、雷雲上部から正・負・正という三極構造をしていると考えられている。一方、MCS (Meso-scale Convection System) と呼ばれる規模の大きな雷雲においては、近年の気球を用いた雷雲内部の電場観測から、理想的な雷雲内部の電荷分布は図 1.1 に示す構造になっていることがわかっている [Stolzenburg and Marshall, 2008]。Stolzenburg and Marshall [2008] によれば、雲内の上昇流が存在する領域では鉛直に、雲頂から負, 正, 負, 正電荷という 4 つの電荷分布構造になっており、下降流が存在する領域では鉛直に、雲頂から負, 正, 負, 正, 負, 正電荷という 6 つの電荷分布構造になっていることが初めて示された。

雷放電の観測としては地上電波観測の他に、人工衛星による光学観測が行なわれている。図 1.2 に示す通り、Microlab-1 衛星搭載 OTD (Optical Transient Detector) の長期間観測により、低緯度の陸域で雷活動が高く、全球的には約 50 flash/s という頻度で発生していることが明らかにされている [Christian et al., 2003]。

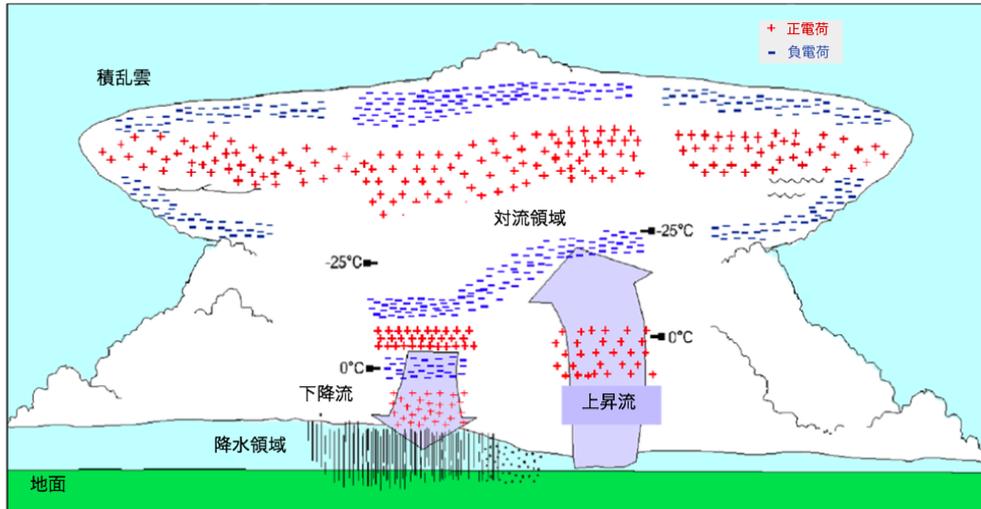


図 1.1 MCS における電荷分布の概念図. 赤色 + 印が正電荷, 青色 - 印が負電荷を示す [Stolzenburg and Marshall, 2008].

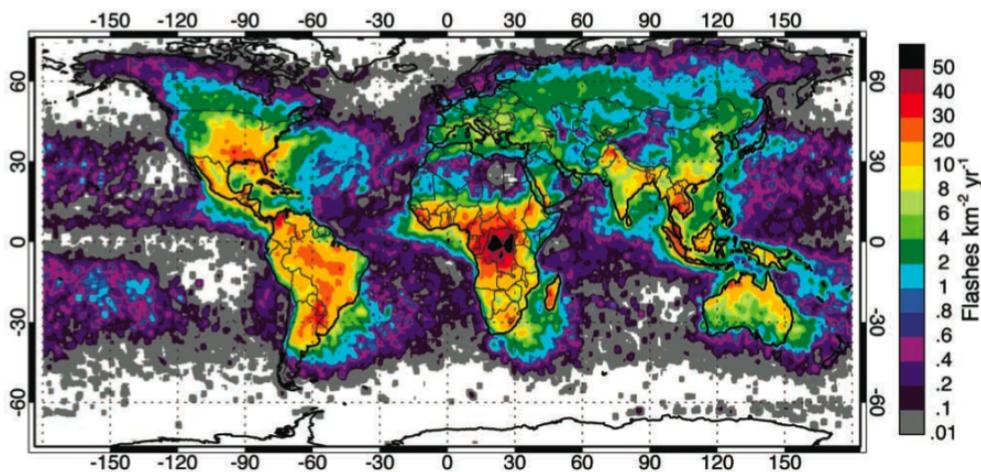


図 1.2 OTD の観測により得られた雷放電の全球発生頻度分布. カラーバーは年間に  $1 \text{ km}^2$  で発生する雷放電のイベント数に対応する. 低緯度の陸域において雷活動が活発であることがわかる [Christian et al., 2003].

## 1.2 高高度放電発光現象

### 1.2.1 高高度放電発光現象の発見

1989年に雷雲上空の過渡発光現象であるスプライトが発見された [Franz *et al.*, 1990]. その後の観測により、エルブス、ハイロー、ブルージェット、及び巨大ジェットが1990年に相次いで発見された [e.g., Fukunishi *et al.*, 1996; Barrington-Leigh *et al.*, 2001; Wescott *et al.*, 1995; Pasko *et al.*, 2002; Su *et al.*, 2003]. これら雷雲上空で発生する過渡放電発光は総称して高高度放電発光現象 (TLEs : Transient Luminous Events) と呼ばれている. TLEs の発生形態の模式図を図 1.3 に示す.

スプライトは、高度 40-90 km で発生する過渡放電発光であり、+CG 放電により引き起こされる [Bell *et al.*, 1998]. また、スプライトにはカラム状スプライトとキャロットスプライトが存在する. エルブスは、電離圏下部の高度約 90 km において水平に発光する現象である. ブルージェットは、雲頂部から上空へと放電発光する現象である. 巨大ジェットは、スプライトとブルージェットが一体となって発生した現象であると考えられている.

### 1.2.2 スプライト

スプライトは、主として +CG 放電に伴い高度 40-90 km で発生する過渡放電発光である. これまでに最も支持されているスプライトの発生メカニズムとして準静電場モデル (QE model : Quasi-Electrostatic model) が挙げられる [Pasko *et al.*, 1997].

準静電場モデルによると、まず雷雲の発達過程で電荷分離が生じると、雷雲上部に正電荷が溜まり、それと同時に雷雲上空に負電荷が引き寄せられる. あるとき +CG 放電が発生すると雷雲上部の

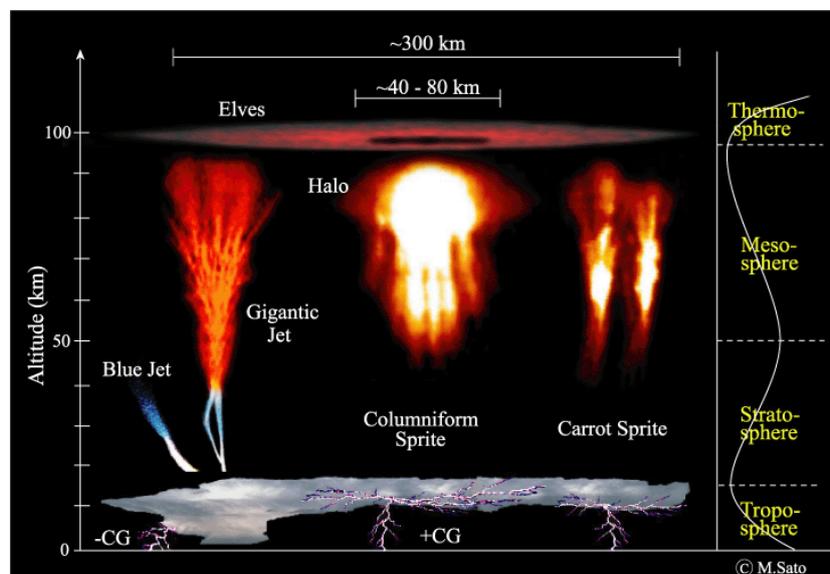


図 1.3 TLEs の発光形態を示す模式図 [Sato, 2004].

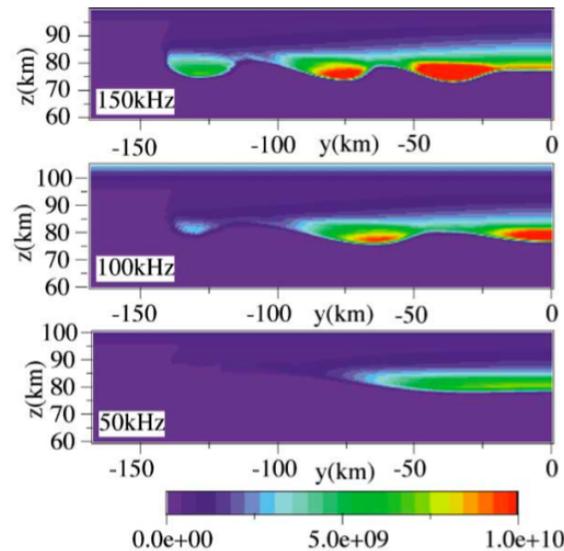


図 1.4 雷放電の水平電流から放射される EMP による電子密度分布. 上から EMP の周波数が 150 kHz, 100 kHz, 及び 50 kHz の場合. 水平電流は  $y = 0$  km,  $z = 5$  km で発生 [Cho and Rycroft, 2001].

正電荷が瞬時に取り除かれ, 雷雲内及び雷雲上空の負極性空間電荷により, 鉛直下向きの準静電場が発生する. この準静電場により, 雷雲上空の電子が上向きに加速され中性大気分子に衝突し, 二次電子が生成される. この過程が雪崩的に発生する絶縁破壊が起こり, 大気と衝突することにより励起し発光する. これが準静電場モデルによるスプライト発生メカニズムである.

しかし, 準静電場モデルだけでは説明できない観測事例が多く存在している. 例えば, 準静電場モデルでは, スプライトは親雷放電の直上で発生しなければならないが, 数 10 km 程度 (最大で 50 km 程度) 水平に離れてスプライトが発生する [Wescott et al., 2001; Füllekrug et al., 2001; São Sabbas et al., 2003] や, 準静電場理論では親雷放電の発生から 1 ms でスプライトが発生しなければならないが, キャロットスプライトなどは最大約 100 ms の遅延時間を持ってスプライトが発生する [Bell et al., 1998] などである.

これらの問題を解く鍵として近年注目されているのは, 雷放電の水平電流の寄与である [Valdivia et al., 1997]. 雷放電の水平電流により発生した電磁パルス (EMP : ElectroMagnetic Pulse) は, 電離圏と地上にて反射し, 同時に直達した EMP と干渉することによって, 雷雲上空に電子密度の非一様性を生み出すことが示唆されている (図 1.4) [Cho and Rycroft, 2001]. 他にも, 日本冬季に発生した 13 イベントのスプライト観測データの解析から, スプライトのカラムの長さや親雷放電の電荷モーメントが比例関係にあり, さらにスプライトのカラム数と親雷放電のピーク電流値とも相関があることが明らかとなった (図 1.5). 電荷モーメントと準静電場及びピーク電流値と EMP の強度はそれぞれ比例することから, スプライトの規模は準静電場が決める, 発生条件は EMP が決めていると示唆されている [Adachi et al., 2004]. これを検証するために, 衛星軌道上からの天底観測によるスプライトの水平構造の撮像が求められている.

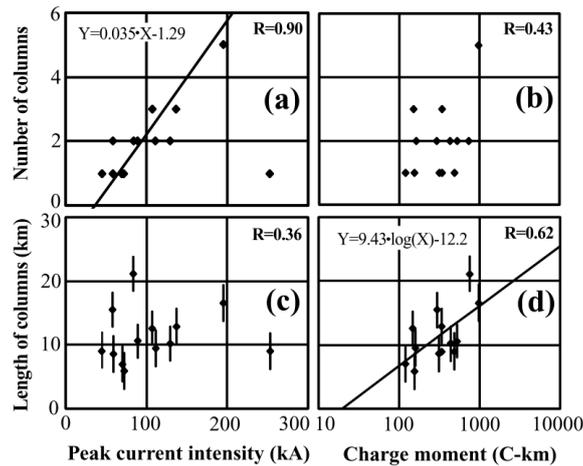


図 1.5 スプライトのカラム数とカラムの長さ, 及び親雷放電のピーク電流値と電荷モーメントの相関図. (a) から (d) の相関図は, それぞれ (a) カラム数とピーク電流値, (b) カラム数と電荷モーメント, (c) カラムの長さ とピーク電流値, (d) カラムの長さ と電荷モーメントの関係を示す [Adachi et al., 2004].

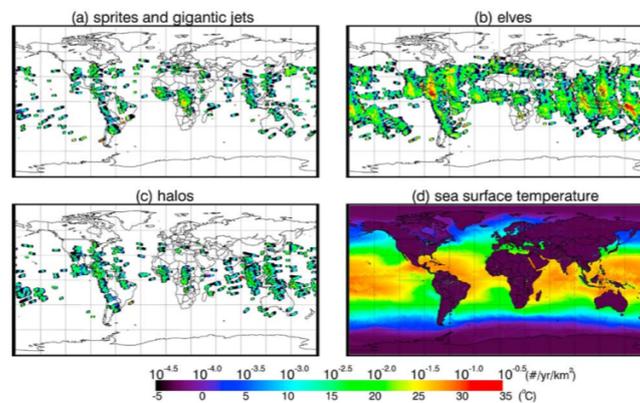


図 1.6 ISUAL の観測データより求められた TLEs の全球発生頻度分布. (a) スプライト, (b) エルブス, (c) ヘイロー, (d) 2004 年 7 月から 2005 年 12 月の平均海面温度 [Chen et al., 2008].

一方, 雷放電が励起する ELF 波動の地上観測データからスプライトの全球発生頻度やスプライトの発生地域差が解明されつつある [Sato and Fukunishi, 2003; Sato et al., 2008]. 台湾の FORMOSAT-2 衛星に搭載されたスプライト観測器 (ISUAL : Imager of Sprites and Upper Atmospheric Lightnings) による 2004 年 7 月から 2007 年 6 月の観測から, エルブス, スプライト, ヘイロー, 及び巨大ジェット の発生頻度は, それぞれ 3.23, 0.50, 0.39, 及び 0.01 event/min. であると報告されている (図 1.6) [Chen et al., 2008]. しかし, この衛星は太陽同期極軌道のため, 常に一定の LT における雷活動の観測を行なう. このため, より精度の高い全球発生頻度分布を求めるには, 全 LT を掃引観測する必要がある.

### 1.3 地球ガンマ線

地球ガンマ線 (TGFs : Terrestrial Gamma-ray Flashes) は, 1994 年にアメリカの CGRO 衛星搭載 BATSE の観測により発見された地球大気圏内に起源を持つガンマ線放射である [Fishman et al., 1994]. CGRO 衛星に続きガンマ線を観測する RHESSI 衛星により TGFs の観測がなされた. RHESSI の 2002 年 3 月から 2008 年 2 月までの観測から, 約 6 年で 820 イベントもの TGFs が発生している結果が得られている [Grefenstette et al., 2009]. TGFs の発生分布と雷放電の活動度が高い地域が一致するため, TGFs は雷放電に起因することが示唆されている (図 1.7) [Smith et al., 2005]. TGFs は, 図 1.8 のように宇宙線により生成された 2 次電子が, +CG 後発生した準静電場で加速され逃走電子となり, 制動放射が起こることにより発生すると考えられている [Lehtinen et al., 1999]. 逃走電子が磁力線に沿って移動し制動放射をするため, TGFs は磁力線方向に発生する. このため, TGFs 起因雷放電の発生位置と TGFs が衛星軌道上で観測される位置との間に, ずれが発生する. 衛星軌道上で TGFs と起因雷放電との同時観測を実現するには, 広視野で雷放電観測を行なう必要がある.

RHESSI 衛星と地上 ELF 観測網との同時観測は実現しているものの [Cummer et al., 2005], 現在の観測システムでは  $20 \mu\text{s}$  程度の絶対時間誤差があり, 継続時間 1 ms 程度の地球ガンマ線のイベントにおいて, 雷放電の前後のどちらに発生しているのか, またステップドリーダーや帰還雷撃など, 雷放電のどのプロセスで発生しているのか, という問題に対して正確な答えが出ていない. この問題を解決するために, 雷放電と地球ガンマ線の衛星軌道上からの同時観測が求められている.

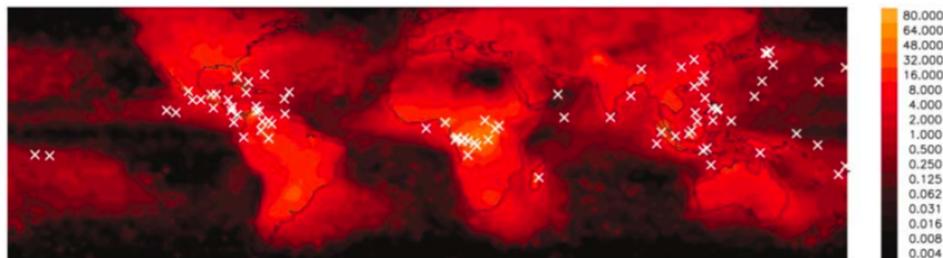


図 1.7 雷放電の発生頻度分布 (赤黒コンター) と TGFs の発生分布 (白×印) [Smith et al., 2005].

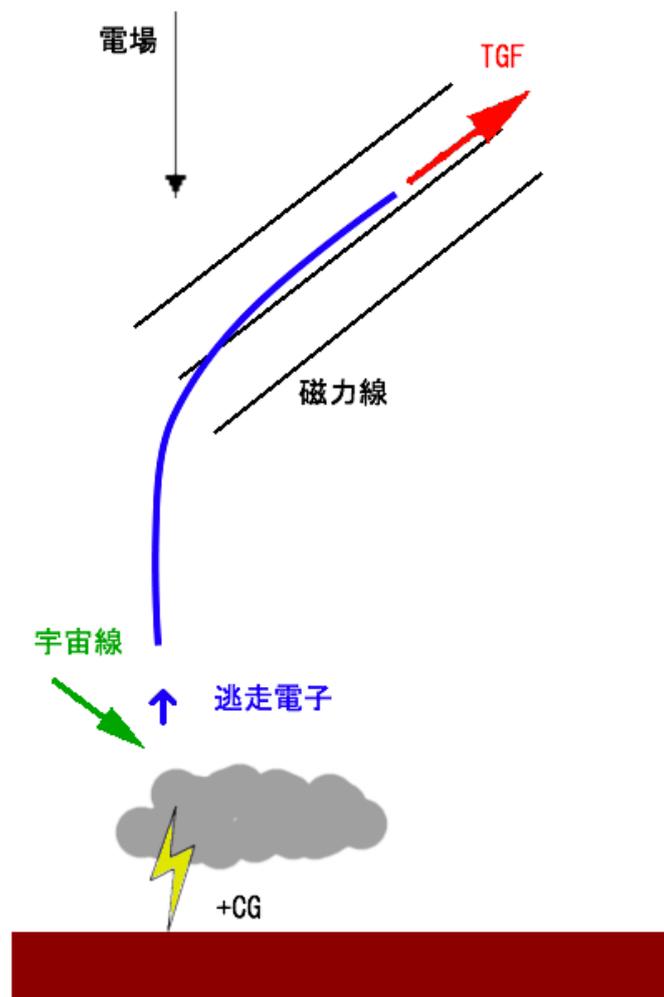


図 1.8 TGFs 発生メカニズムの概念図.

## 1.4 本研究の目的

本研究では、TLEs と TGFs の未解明な問題を明らかにすることを最終目的としている。このため、衛星軌道上からの TLEs と TGFs の観測を実現するために、JEM-GLIMS ミッション及び TARANIS 衛星ミッションに参加しており、各ミッションに搭載するフォトメタの開発を担当している。現在 JEM-GLIMS 用のフォトメタは、試作モデル (BBM : Bread-Board Model) が完成し、プロトフライトモデル (PFM : Proto-Flight Model) の開発に着手している。一方 TARANIS 衛星に搭載するフォトメタはエンジニアリングモデル (EM : Engineering Model) の開発に着手している。本研究では、これら各モデルの設計を決定することを目的として、BBM の性能評価試験として較正試験、出力ドリフト特性試験、及び高温耐久試験を実施した。

本論文では、ミッションの概要を第 2 章に、フォトメタの設計仕様を第 3 章、BBM を用いて行なった性能評価試験の結果及び JEM-GLIMS 搭載用上位モデルへの反映について第 4 章で、TARANIS 衛星搭載用 EM の設計について第 5 章で述べ、第 6 章に本論文のまとめを述べる。

## 第 2 章 ミッション

本章では, TLEs 及び TGFs を衛星軌道上から観測するために現在進行中である, JEM-GLIMS ミッション及び TARANIS ミッションについて説明する.

### 2.1 JEM-GLIMS ミッション

Global Lightning and sprItE MeasurementS on JEM-EF (JEM-GLIMS) は国際宇宙ステーション (ISS : International Space Station) の日本実験棟 (JEM : Japanese Experiment Module) の曝露部 (EF : Exposed Facility) に設置されるポート共有実験装置内部から, 雷放電, TLEs , 及び TGFs の親雷放電を観測するミッションである. 本ミッションは, 大阪大学, 北海道大学, 東北大学, スタンフォード大学をはじめとする大学機関と宇宙航空研究開発機構 (JAXA : Japanese Aerospace Exploration Agency) 宇宙科学研究本部 (ISAS : Institute of Space and Astronautical Science) の連携ミッションである. 搭載観測機器は, 光学観測機器である CMOS カメラ (LSI : Lightning and Sprite Imager) 2 台, フォトメタ (PH : PHotometer) 6 台, VLF レシーバ (VLFR : VLF Receiver) 1 台, VHF センサ 2 台からなる干渉計 (VITF : VHF InTerFerometer) で構成される. 図 2.1 に ISS 及び JEM-EF の概念図を, 図 2.2 に JEM-GLIMS の概念図を示す.

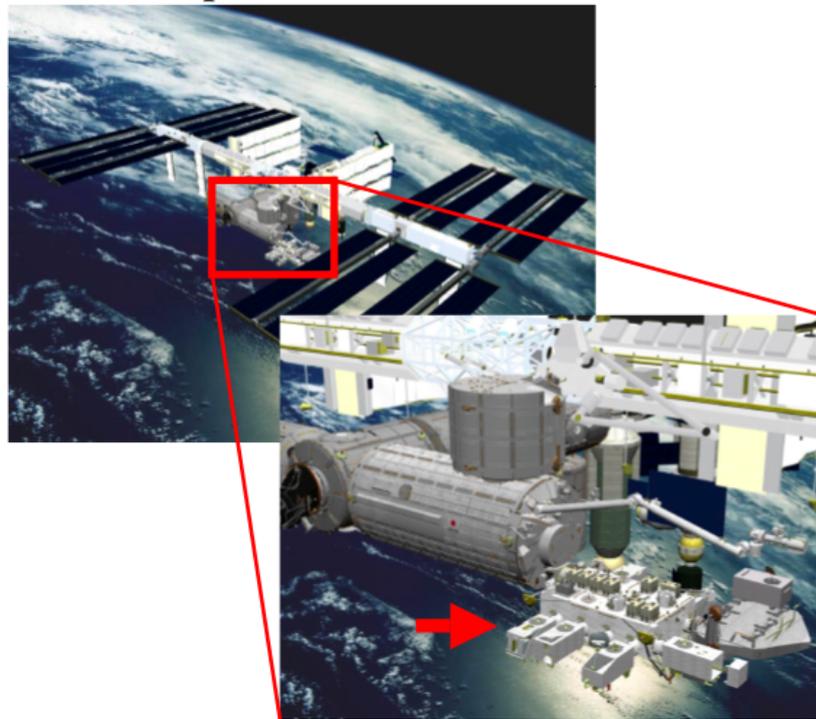


図 2.1 ISS の概念図 (上), 及び JEM・JEM-EF の概念図 (下). 矢印はポート共有実験装置 [JAXA].

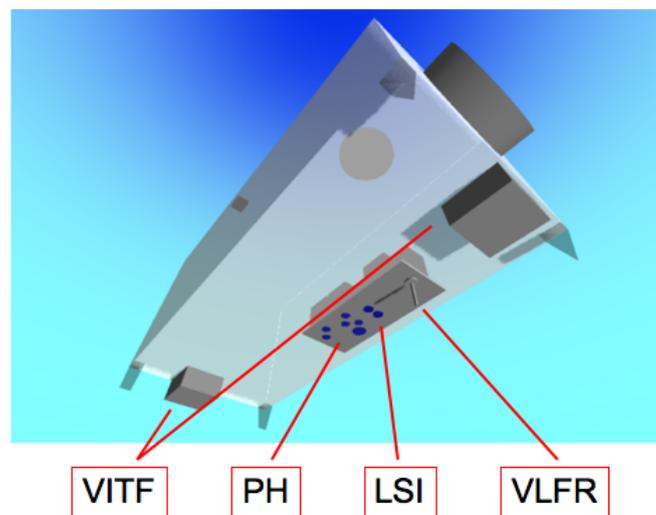


図 2.2 JEM-GLIMS の概念図. 底面は天底方向を向いている.

### 2.1.1 ミッション目的

JEM-GLIMS ミッションの目的は、下記の4つである。

- 全球における雷放電及び TLEs の発生時間空間分布の特定
- スプライトの水平空間構造の観測による発生条件の特定
- TLEs の分光観測による電子エネルギーの推定
- TGFs 励起雷放電観測による発生メカニズムの解明

それぞれの目的について説明する。

#### ■全球における雷放電及び TLEs の発生時間空間分布の特定

現行の TLEs 観測衛星である FORMOSAT-2/ISUAL とは異なり、ISS は軌道傾斜角  $51^\circ$  である。このため、全 LT にわたり TLEs を観測することが可能である。LT 固定観測では TLEs の全球発生頻度分布を導出する際に雷放電の LT 依存性を仮定することにより、誤差が大きくなるが、全 LT のスキャン観測方式ではこの誤差を低く抑えることが可能である。TLEs 及び雷放電の全球発生頻度分布の定量的な導出を行なう。TLEs の中でも、特にスプライトはその発生高度における大気組成に大きな影響を与えていることが示唆されている [Hiraki *et al.*, 2008]。TLEs の全球発生頻度分布を明らかにすることにより、全球への影響を定量的に特定する。

#### ■スプライトの水平空間構造の観測による発生条件の特定

光学観測機器による TLEs と雷放電の天底観測、及び VLFR, VITF による電波観測を行なう。目的は、TLEs の中でも特にスプライトの水平空間構造と雷放電の時間空間発展を特定し、雷放電水平電流が放射する電磁パルス (EMP) がスプライトの発生条件にどのように関わっているかを明らかにすることにある。これにより準静電場理論に強い制約を与えるとともに、発生メカニズムを特定する。

#### ■TLEs の分光観測による電子エネルギーの推定

地上光学観測では、観測される TLEs の近紫外光～青色発光 ( $\sim 350 - 500 \text{ nm}$ ) の強度が大気の透過率に大きく依存する。この大気の透過率はエアロゾルや水蒸気、オゾンによるものであるが、モデルによる大気中の透過率推定の精度が低く、地上光学観測では絶対発光強度推定に大きな誤差を含んでしまう。宇宙空間からの観測では、地上観測に比べ大気透過率の影響が少ないため、精度の良い発光強度を観測することが可能である。JEM-GLIMS のフォトメタ 6 台は、それぞれ異なる観測波長域を持つ。このフォトメタにより、TLEs を分光観測し、 $N_2^+1P$ ,  $N_2^+2P$ ,  $N_2^+1N$  のそれぞれの発光強度比から、TLEs の発生させた電子エネルギーを推定

表 2.1 JEM-GLIMS 諸元.

打ち上げ	2011 年
ミッションライフ	2 年
軌道傾斜角	51.6°
高度	~400 km
通信速度	5.5 kbps (ノミナル) (0.8, 10.2, 14.9 kbps との切替可能)

でき, 準静電場強度や発生メカニズムを議論する上で重要な要素となる. 同時にスプライトの  $N_2^+ 1N$  発光については, その存在が議論されているが, JEM-GLIMS フォトメタにより, 存在の有無を確認する.

#### ■ TGFs 励起雷放電観測による発生メカニズムの解明

TGFs を励起した雷放電の特性を, JEM-GLIMS 搭載の光学観測機器と電波観測器による観測より特定する. JEM-GLIMS はガンマ線検出器を搭載しておらず, TARANIS 衛星や同じく ISS の欧州モジュールで TLEs と TGFs 観測を行なう ASIM (Atmosphere-Space Interactions Monitor) によって得られる TGFs 観測データを用いることにより, TGFs と雷放電の関係及び発生メカニズムを特定する.

### 2.1.2 JEM-GLIMS 諸元

JEM-GLIMS は 2011 年の打ち上げ予定であり, ミッションライフは 2 年である. ISS の軌道傾斜角及び高度はそれぞれ 51.6° 及び ~400 km である. 通信速度はノミナル 5.5 kbps であり, 他の混載ミッションの稼動状況によって, 0.8 kbps, 10.2 kbps, 14.9 kbps の切替が可能である. 表 2.1 に諸元をまとめる.

### 2.1.3 搭載理学機器

JEM-GLIMS に搭載される理学機器を, 表 2.2 にまとめる. 理学機器のうち光学観測器は, 2 台の LSI, 及び 6 台の PH からなる. 電波観測器は, モノポールアンテナを用いた VLFR, 及び 2 台のパッチ型 VHF アンテナを用いた VITF で構成される. さらにこれらの観測機器を制御する理学制御ユニット (SHU : Science payload Handling Unit) で構成される.

JEM-GLIMS はミッション提案から機器製作までの時間が短いという制約がある. このためリスク要因となる新規開発品を極力避ける目的で, LSI は, 東北大学が開発した RISING 衛星の LSI の開発技術をそのまま転用する. PH は, TARANIS 衛星搭載用に開発途中のフォトメタを JEM-GLIMS 用に変更し製作する. VLFR は RISING 衛星と同一品を用い, アンテナのみ新規作成する. VITF のエレクトロニクス部は SOHLA-1 用を基に開発し, パッチ型アンテナは新規開発する. SHU は

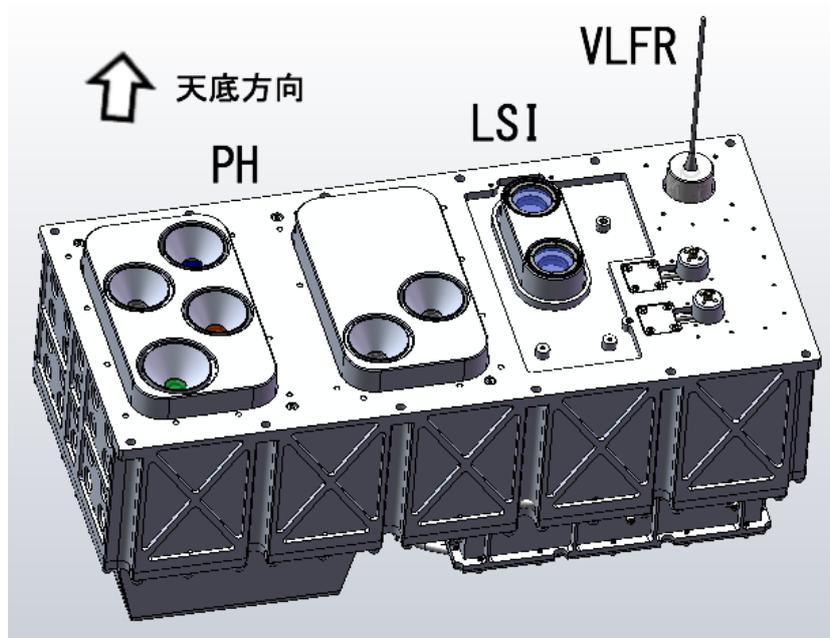


図 2.3 JEM-GLIMS の構造図. 左からそれぞれ, PH, LSI, VLFR である.

表 2.2 搭載機器一覧.

名称	略称	英語名
CMOS カメラ	LSI	Lightning and Sprite Imager
フォトメタ	PH	PHotometer
VLF レシーバ	VLFR	VLF Receiver
VHF 干渉計	VITF	VHF InTerFerometer
理学制御ユニット	SHU	Science payload Handling Unit

RISING 衛星とほぼ同一仕様とし, JEM-GLIMS 用に変更を加える. 北海道大学はこのうち LSI, PH, VLFR の開発に責任を持つ. 図 2.3 に JEM-GLIMS の構造図を示す. 左からそれぞれ, PH, LSI, VLFR となっている.

各搭載観測機器の目的と機能を以下にまとめる.

LSI 目的は, 雷放電と TLEs の発光形態について画像データを得ることである. LSI は 2 台のカメラ (LSI-1, LSI-2) からなるが, これら 2 台のカメラは観測波長が異なる. LSI-1 は主に雷放電の発光を観測するために, 中心波長  $\lambda = 768 \text{ nm}$ , 半値全幅 (FWHM) = 90 nm の透過波長域を持つフィルターを装着する. LSI-2 は主にスプライトの発光を観測するために, 中心波長  $\lambda = 762 \text{ nm}$ , FWHM = 10 nm の透過波長域を持つフィルターを装着する. LSI の仕様を表 2.3 に示す. LSI の光検出器である CMOS センサの画素数は  $512 \times 512$  であるが,  $512 \times 512$ ,  $256 \times 256$ , 及び  $128 \times 128$  という 3 段階にトリミング可能である. それぞれの画素数でのフ

表 2.3 LSI の仕様.

視野	28.7° × 28.7° (512 × 512 pixel, 29 fps において) 14.4° × 14.4° (256 × 256 pixel, 116 fps において) 7.2° × 7.2° (128 × 128 pixel, 464 fps において)
空間分解能	0.4 km (天底において)
画素数	512 × 512
画素サイズ	25 × 25 μm
画像分解能	10 bit
フレームレート	29 fps, 116 fps, 464 fps (トリミングエリアによる)
検出器	CMOS (STAR-250)
最低感度	0.1 A/W

表 2.4 PH の観測波長域及び視野.

ID	観測波長域	対象	視野	検出器
PH1	150 -280 nm	N <sub>2</sub> LBH 発光	42.7°	R7400-06
PH2	337 ± 5 nm	N <sub>2</sub> 2P (0,0) 発光	42.7°	R7400-06
PH3	762 ± 5 nm	N <sub>2</sub> 1P (3,1) 発光	42.7°	R7400-20
PH4	600 - 900 nm	N <sub>2</sub> 1P 発光	86.8 °	S1227-1010BQ
PH5	316 ± 5 nm	N <sub>2</sub> 2P (1,0) 発光	42.7°	R7400-06
PH6	392 ± 5 nm	N <sub>2</sub> <sup>+</sup> 1N (0,0) 発光	42.7°	R7400-06

フレームレートは、29 fps, 116 fps 及び 464 fps である。

PH 目的は、雷放電と TLEs の絶対発光強度の測定を行なうことである。PH はフォトメタ 6 台から構成されており、それぞれ透過波長帯域が異なるフィルターを装着している。PH1, 2, 5, 6 の検出器には光電子増倍管 (PMT : Photomultiplier Tube) の R7400-06 を、PH3 には R7400-20 を、PH4 の検出器にはフォトダイオード (PDD: Photodiode detector) を用いる (表 2.4)。PH の仕様を表 2.5 にまとめる。

VLFR 目的は、雷放電および TLEs からの VLF 電磁放射の観測である。VLFR は、150 mm のモノポール型アンテナとエレクトロニクス部からなる。アンテナは天底方向を方位角方向に無指向、仰角方向に 45° 以内で指向性を持つ。VLFR の仕様を表 2.6 に示す。

VITF 目的は、雷放電からの VHF 電波を検出し雷放電路の時間・空間進展過程の情報を得ることにある。ポート共有実験装置の底面部に 2 台の VHF パッチ型アンテナを約 1.5 m 離して設置する。また、地上方向に全角 40° 以内で無指向性である。その他の仕様を表 2.7 に示す。

表 2.5 PH 仕様

	PH1, 2, 3, 5, 6	PH4
検出限界	100 nW/m <sup>2</sup>	10 μW/m <sup>2</sup>
最大輝度	40 μW/m <sup>2</sup>	4 mW/m <sup>2</sup>
最小輝度	10 nW/m <sup>2</sup>	1 μW/m <sup>2</sup>
サンプリング周波数	20 kHz (時間分解能 50 μs)	
絶対時間精度	20 μs 以下	
A/D 分解能	10 bit	

表 2.6 VLFR 仕様.

形状	モノポール型
観測帯域	1 - 40 kHz
アンプ利得	30 dB
サンプリング周波数	100 kHz (時間分解能 10 μs)
絶対時刻精度	20 μs 以下
A/D 分解能	16 bit

表 2.7 VITF 仕様.

形状	パッチ型
観測帯域	70 - 100 MHz
入力範囲	-85 dBm ~ -35 dBm
サンプリング周波数	200 MHz (時間分解能 5 ns)
絶対時刻精度	1 μs
アンプ利得	45 dB
A/D 分解能	8 bit

#### 2.1.4 JEM-GLIMS の運用

JEM-GLIMS には、2つの観測モードが存在する。1つは、TLE モードであり、主に雷放電とそれに伴う TLEs を観測対象としている。ISS が地球夜側飛行中にのみ実施し、観測は全機器で行なう。昼

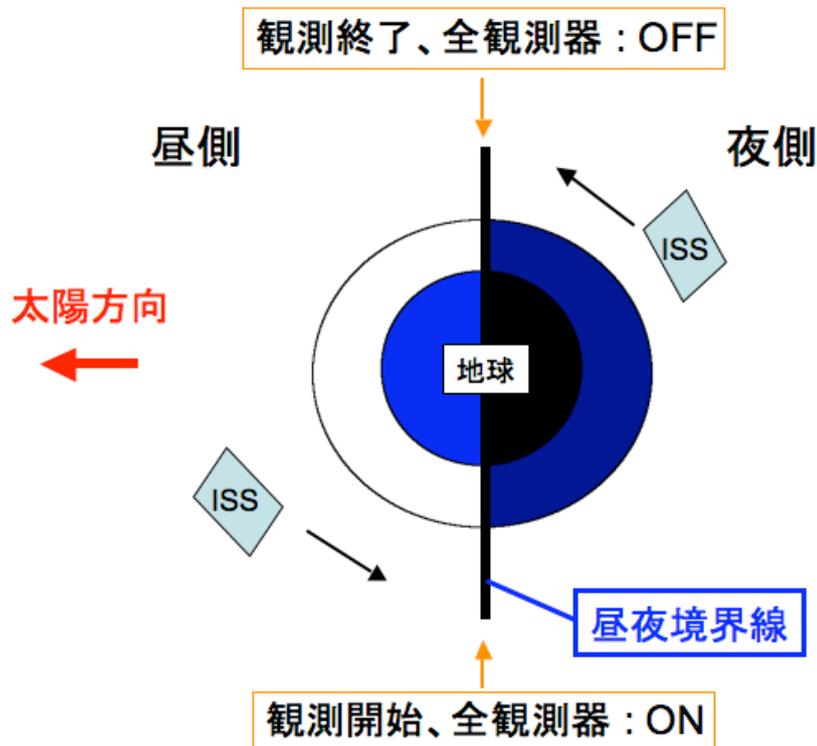


図 2.4 TLE モードの観測形態を示す模式図.

側から飛行して昼夜境界線を越えた直後に全観測器を ON にし観測を開始する. 夜側から飛行して昼夜境界線を越えた直後に全観測器を OFF にし観測を終了する. JEM-GLIMS では, イベント発生をトリガにより検出し記録する. TLE モードでは, LSI もしくは PH によりトリガをかける. 図 2.4 に模式図を示す.

もう一方の観測モードは, ITF モードであり, 主に雷放電からの発光と雷放電から放射される VHF パルス波形を観測対象としている. ISS が地球夜側飛行中は, LSI, VITF を ON にし, 昼側飛行中は VITF のみで観測する. LSI もしくは VITF によりトリガをかける.

## 2.2 TARANIS 衛星ミッション

Tool for the Analysis of RAdiation from lightNING and Sprites (TARANIS) は、フランスの国立宇宙研究センター (CNES : Centre National d'Etudes Spatiales) 主導で開発が進む小型衛星ミッションである。図 2.5 に TARANIS 衛星の概念図を示す。

### 2.2.1 ミッション目的

JEM-GLIMS と同じく雷放電, TLEs, 及び TGFs の観測ミッションである TARANIS 衛星ミッションの主要目的は以下の4つである。

- TLEs, TGFs の全球発生頻度分布の特定
- スプライトの水平構造と雷放電の関係と特定
- 雷放電起源の逃走電子と, TLEs, TGFs の関係の特定と発生メカニズムの解明
- 雷放電起源の電波と放射線帯内帯の粒子との相互作用の特定



図 2.5 TARANIS 衛星の概念図 [CNES].

表 2.8 TARANIS 衛星諸元.

打ち上げ	2013 年
ミッションライフ	2 年
軌道	太陽同期極軌道
高度	700 km
周回地方時	10-22 LT (+2 LT/年)
重量	全体 146 kg, ペイロード 50 kg
通信速度	254 kbps

表 2.9 TARANIS 衛星搭載観測機器.

名称	機器	仕様
MCP/MC	CCD カメラ 2 台	観測波長 : $762 \pm 5$ nm, 600 - 900 nm
MCP/PH	フォトメタ 4 台	観測波長 : 150 - 280 nm, $337 \pm 5$ nm, $762 \pm 5$ nm, 600 - 900 nm
XGRE	X 線・ガンマ線検出器 3 台. 観測域 : 光子 20 keV - 10 MeV, 相対論的電子 1 MeV - 10 MeV	
IDEE	電子検出器 2 台. 観測域 : 70 keV - 4 MeV	
IME-BF	LF 電場アンテナ 1 台及びイオンプローブ	観測周波数 : DC - 1 MHz
IME-HF	HF・VHF 電場アンテナ 2 台	観測周波数 : 100 kHz - 35 MHz
IMM	LF 磁場アンテナ 3 軸, 1 軸, 及びホイッスラー波検出器	3 軸 : 観測周波数 : DC - 20 kHz, 1 軸 : 観測周波数 : DC - 1 MHz

### 2.2.2 TARANIS 衛星諸元

TARANIS は 2013 年打ち上げ予定であり, ミッションライフは 2 年である. 軌道は, 高度 700 km で太陽同期極軌道である. 周回地方時 (LT) は 22 LT で, さらに 1 年につき +2 LT 毎シフトしていく. 全体の重量は 146 kg, ペイロードの重量は 50 kg となっており, 通信速度は 254 kbps の予定である. 表 2.8 にまとめる.

### 2.2.3 搭載観測機器

TARANIS に搭載される観測機器を表 2.9 にまとめる.

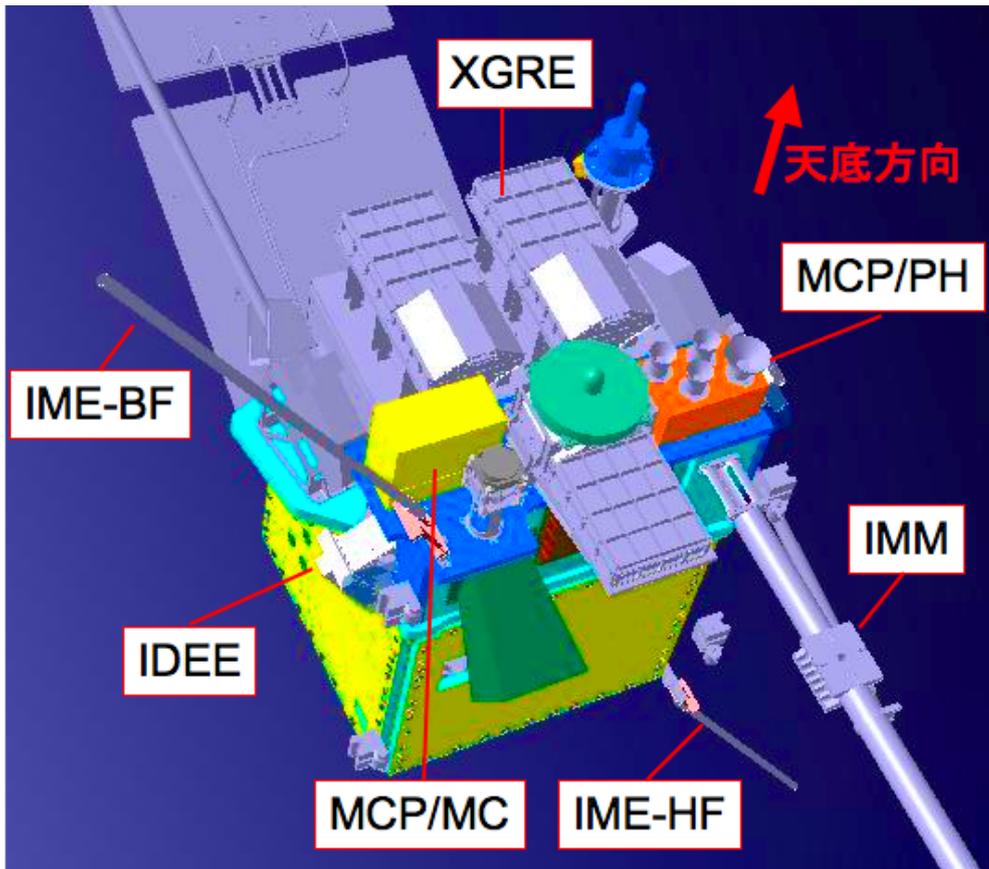


図 2.6 TARANIS 衛星の構造図及び搭載観測機器.

図 2.6 に TARANIS 衛星の構造図と搭載観測機器を示す. TARANIS 衛星も天底光学観測を行なうが, JEM-GLIMS との違いは X 線・ガンマ線検出器を搭載し, 雷放電と TGFs の同時観測を行なえる点である. フォトメタについては JEM-GLIMS 搭載フォトメタとほぼ同じ仕様である.

# 第3章 JEM-GLIMS フォトメタの要求仕様

## 3.1 要求仕様概略

JEM-GLIMS に搭載されるフォトメタ (PH) は、6 台のフィルタ付きフォトメタであり、それぞれ PH1-6 までの識別がされている。6 台のフォトメタは Unit 1 (PH1-PH4) と Unit 2 (PH5-PH6) の 2 つのユニットに分割して搭載される。新規開発によるリスクとコストを抑えるため、JEM-GLIMS フォトメタは TARANIS 衛星搭載フォトメタの開発技術を使い、ほぼ同一仕様となっている。

JEM-GLIMS には、雷放電及び TLEs を光学的に観測する CMOS カメラ (LSI) と PH が搭載される。LSI は主に雷放電と TLEs の発生形態を観測することが主目的である。このため、空間分解能力を有し、 $28.3^\circ \times 28.3^\circ$  の視野内を 400 m の分解能で観測する。しかし、時間分解能は低く、1 秒あたりの取得画像数であるフレームレート (fps) として通常 29 fps を用いるために、34.5 ms の分解能しかない。雷放電帰還雷撃とスプライトの発光継続時間は、典型的にはそれぞれ数 ms 程度、2 ~ 3 ms 程度であるので、LSI はこれらを時間的に分離して観測することができない。一方、PH は、空間分解能は無いものの、高いサンプリング周波数、高い時間分解能を有することが可能である。このため、雷放電や TLEs の過渡発光を時間的に分解して観測することが可能である。それぞれの過渡発光を時間分解して観測するためには、最低でも 20 kHz 以上のサンプリング周波数、 $50 \mu$  以上の時間分解能が要求される。さらに、それらの過渡発光の絶対強度測定を行なうことができる。LSI と PH の取得データを相補的に用いることで、初めて高い精度での時間・空間発展を捉えることが可能となる。

JEM-GLIMS では、各観測器のデータを連続的に取得するのではなく、過渡発光が発生した時のみデータを取得するイベントトリガ方式を採用している。LSI と PH はともにトリガ検出機能を担っており、特に PH はミッション期間中の長期に渡り高い動作安定性と信頼性が求められる。

以上の様に、JEM-GLIMS に搭載される PH に要求される機能として、次の 3 つにまとめられる。

- (A)  $50 \mu$ s の高い時間分解能で雷放電、TLEs を時間的に分解して観測する能力。
- (B) 高い精度で雷放電及び TLEs の絶対発光強度を測光できる能力。
- (C) トリガ機器として動作するために高い動作安定性と信頼性を維持する能力。

まず、(A) の機能を満足するために PH に求められる仕様は、サンプリング周波数を 20 kHz とすることである。帰還雷撃に最も短い継続時間は約  $200 \mu$ s であるので、20 kHz サンプリングでは、この発光を 4 分割して観測が可能であり、最低限必要となる仕様である。これ以上の高いサンプリング周波数では逆に 6 台のフォトメタからの取得データ量が膨大になりすぎる。このため、20 kHz サンプリング、 $50 \mu$ s 時間分解能という仕様とした。指定される受光光量のレンジについては、3.4 章で

詳細を述べるが、最小値が  $10 \text{ nW/m}^2$  で最大値が  $40 \mu\text{W/m}^2$  である。これを有意に分解するために、12 bit の深さ、つまり  $9.8 \text{ nW/m}^2/\text{digit}$  の分解能であれば最小受光光量も検出可能で、アナログ-デジタル (A/D) 変換器の分解能をその様にする決めた。

(B) の機能を満足するために、絶対較正精度を 10 % とすることを目標とした。6 台のフォトメタは  $\text{N}_21\text{P}$ ,  $\text{N}_22\text{P}$ ,  $\text{N}_2^+1\text{N}$  の発光をそれぞれ測光するが、この発光強度比から TLEs を励起した電子のエネルギー ( $E_e$ ) を推定することができる。 $E_e = 5 \text{ eV}$  のときに約 10 % の誤差でエネルギーを推定するために、PH の絶対較正精度 10 % が必要である。さらに光検出器やアンプ回路の経時変化が 5 % 以内となることを目標とした。

(C) の機能を満足するために、フォトメタに用いる光検出器を光電子増倍管 (PMT) のみならず、半導体素子であるフォトダイオード (PDD) も用いることで、故障のリスクを軽減し、長期動作安定性を確保する設計とした。

以上をまとめた、JEM-GLIMS 搭載フォトメタの要求仕様を表 3.1 に示す。なお、光学系への要求仕様、及び、期待されるされる入射光量と求められる SNR について、それぞれ 3.2 章と 3.4 章で詳細を述べる。また光学系に要求する仕様を表 3.2 に示す。表 3.1 において、絶対較正精度とは、ISS が夜側に入りフォトメタが観測開始した直後から、ISS が昼側に入り観測終了する間のフォトメタ感度の変化率であり、相対安定精度とは、JEM-GLIMS の周回毎のフォトメタ感度の変化率である。

表 3.1 フォトメタ要求仕様.

	PH1, 2, 3, 5, 6	PH4	
検出器	PMT	PDD	
アナログデジタル変換 (ADC)	10 bits		
最小輝度	$10 \text{ nW/m}^2$	$1 \mu\text{W/m}^2$	(ADC 最下位ビットの分解能)
検出限界	$100 \text{ nW/m}^2$	$10 \mu\text{W/m}^2$	(SNR = 10 or 10 ADC カウントにおいて)
最大輝度	$40 \mu\text{W/m}^2$	$4 \text{ mW/m}^2$	
較正精度	$\pm 30 \%$		
時間分解能	50 $\mu\text{s}$		(サンプリング周波数 20 kHz)
絶対時刻精度	20 $\mu\text{s}$ 以下		
絶対較正精度	10 % 以内		
相対安定精度	5 % 以内		

## 3.2 光学設計

### 3.2.1 レンズ

PH1, 2, 3, 5, 6 は  $42.7^\circ$ , PH4 は  $86.8^\circ$  の円形の視野を持つ。JEM-GLIMS は TGF 検出器を搭載しないが、同じく ISS から TLEs・TGFs を観測予定の ASIM (Atmosphere-Space Interactions Monitor) 搭載の TGF 検出器で検出した TGF の起因雷放電を JEM-GLIMS で検出するには広い視野が必要である。それゆえ、PH4 は広い視野を持つ。

JEM-GLIMS の高度が 400 km の場合に、 $42.7^\circ$  及び  $86.8^\circ$  のそれぞれの視野のフットプリントは、それぞれ半径  $\sim 156.36$  km, 半径  $\sim 378.26$  km である。また F 値は、 $42.7^\circ$  レンズにおいて  $F=1.50$ ,  $86.8^\circ$  レンズにおいて  $F=1.72$  である。光学系に対する要求仕様を表 3.2 にまとめる。

表 3.2 光学系に対する要求仕様.

	PH1, 2, 3, 5, 6	PH4
視野全頂角	$42.7^\circ \pm 0.5^\circ$	$86.8^\circ \pm 0.5^\circ$
光学系	テレセントリック屈折光学系	
F 値	1.50	1.72
有効口径	15 mm	6 mm
視野角のアライメント	$\pm 0.35^\circ$	
入射瞳直径	$\geq 10$ mm	$\geq 6$ mm
レンズ材質	合成石英	
鏡筒材質	アルミニウム	
フィルタへの入射光束全頂角	$\leq 20^\circ$	
フィルタへの入射角	$\leq 6^\circ$	
焦点位置での光束径	8 mm	

フォトメタの光学系はテレセントリック屈折光学系を用いる。テレセントリック光学系では、光がどの角度で入射しても焦点面で、光軸と平行になる。フォトメタの光学系では、焦点面の位置がフィルタ直前となっており、レンズを通過した光がフィルタへ垂直に入射する。

JEM-GLIMS の PH 用光学系は、先行開発している TARANIS 衛星搭載フォトメタの光学系の設計を基に開発する。

図 3.1 に PH1, 2, 3, 5, 6 用の  $42.7^\circ$  レンズを、図 3.2 に PH4 用の  $86.8^\circ$  レンズの光路図を示す。赤、青、緑の線はそれぞれ入射角の異なる入射光を表す。図の左より光が入射し、右端の検出器の光電面へと進行する。 $42.7^\circ$  レンズも  $86.8^\circ$  レンズも、フィルタ直前に焦点が位置するようになっている。フォトメタは、カメラと異なり空間分解能力を必要としないので、検出器の光電面で焦点を結ばない様に設計している。また、レンズの表面は AR (Anti Refraction : 反射防止) コーティングを施す。

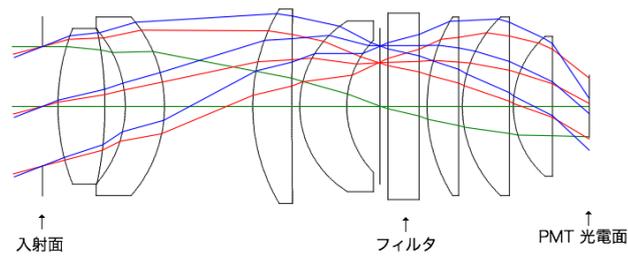


図 3.1 PH1, 2, 3, 5, 6 のレンズの光路図.

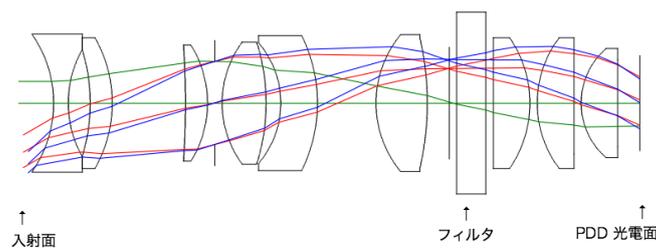


図 3.2 PH4 のレンズの光路図.

加えて, PH1 及び PH4 の鏡筒部分の機械図面を示す.

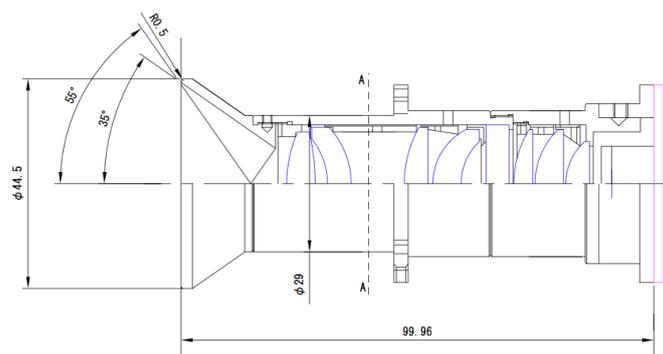


図 3.3 PH1 の鏡筒の機械図面. 単位は mm.

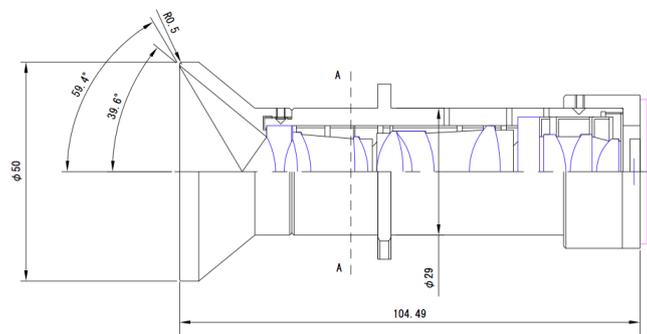


図 3.4 PH4 の鏡筒の機械図面. 単位は mm.

### 3.2.2 フィルタ

PH1-6 は, 表 2.4 で示す様にそれぞれ異なるバンドパスフィルタを装着する.  
JEM-GLIMS のフィルタ透過特性を示す。

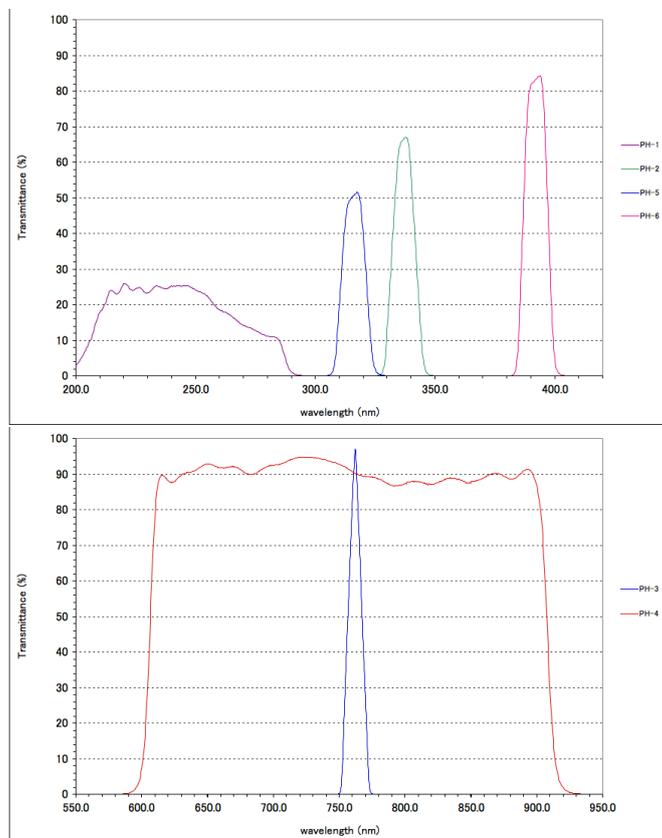


図 3.5 フィルタ透過特性. 上図は PH1, 2, 5, 6 用フィルタの透過特性, 下図は PH3, 4 用フィルタの透過特性.

### 3.2.3 バッフル

フォトメタは、ISS が昼夜境界線通過後、太陽が ISS の水平面下  $12^\circ$  になったときから観測を開始する。図 3.6 に JEM-GLIMS 観測機器が観測開始する時点での太陽、フォトメタ視野、地球日照部の関係図を示す。ISS の水平面と太陽方向のなす角が  $12^\circ$  になった時点で、地球日陰部と日照部の境界線は、ISS の天底方向から ISS の水平面側方向  $57.7^\circ$  に位置する。地球日照部からの迷光を防ぐため、 $55^\circ$  以上からの光の入射を防ぐバッフルを、フォトメタの鏡筒に取り付ける。フォトメタの迷光除去率は、バッフル未装着で 0.002 以下、バッフル装着で  $5 \times 10^{-8}$  以下と見積もっている。迷光除去率の要求基準は、 $1 \times 10^{-9}$  であり、この設計は、要求基準をほぼ満足している。

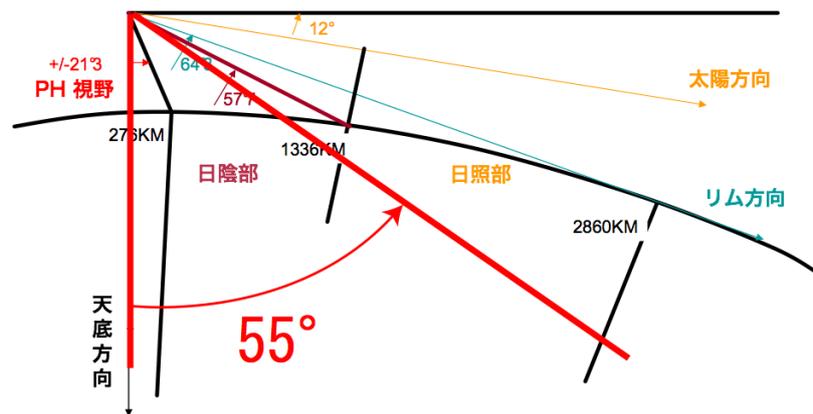


図 3.6 JEM-GLIMS 観測機器の観測開始時点における太陽、フォトメタ視野、地球日照部の関係。

### 3.3 検出器

光検出器として浜松ホトニクス製の PMT と PDD を用いる。PH1, 2, 5, 6 に R7400-06 の PMT を、PH 3 に R7400-20 の PMT を、PH 4 に S1227-1010BQ の PDD を用いる。

#### 3.3.1 光電子増倍管

小型であること、ロケット実験で実績があることから、R7400-06 及び R7400-20 を選定した。R7400-06 及び R7400-20 と同性能で、プラスチックパッケージが付属している R7400U-06 及び R7400U-20 の外観写真と形状図を図 3.7, 3.8 に示す。

R7400-06 は紫外 - 可視波長域に感度を持っており、このため PH1, 2, 5, 6 に用いる。一方、R7400-20 は可視 - 近紫外波長域に感度を持っているため、PH3 に用いる。また、それぞれの分光感度特性を図 3.9 に示す。R7400-06 及び R7400-20 の仕様を表 3.3 にまとめる。

PMT のフォトカソード (光電) 面で発生した光電子を、PMT 内部で増幅するために、ダイノードに高電圧を印加する必要がある。このため、高電圧電源素子として EMCO 製 Q10-5 を採用し、PH1, 2, 3, 5, 6 に使用する。Q10-5 の仕様を表 3.4 に、印加した高電圧に対する PMT のゲイン特性を図 3.10 に示す。

Q10-5 で高電圧電源を出力するために、0 ~ 45 V の制御電圧を入力する必要がある。Q10-5 の制御電圧と出力高圧 (High Voltage) の関係を図 3.11 に示す。また、PMT への印加電圧と PMT のゲインの関係を図 3.12 に示す。実際に使用する高圧範囲は 300 - 1000 V の範囲であり、256 段階 (8 bit) で制御する。通常は 500 V を使用する予定である。

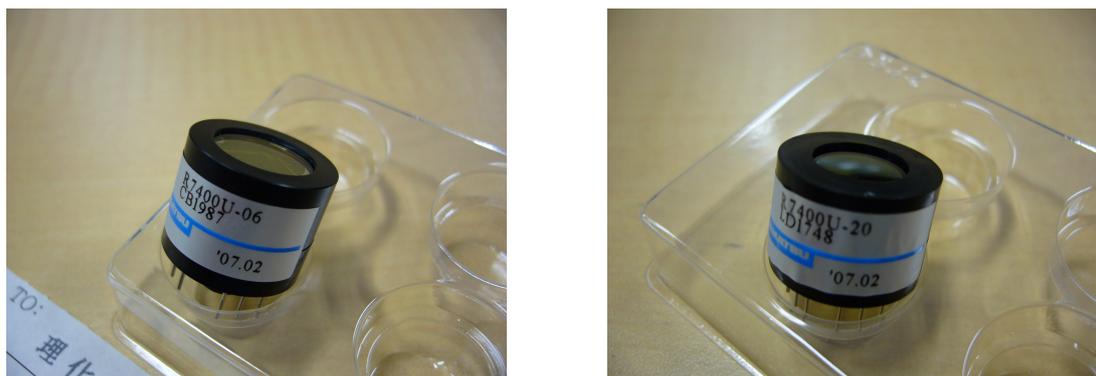


図 3.7 R7400U-06 の写真 (左), R7400U-20 の写真 (右).

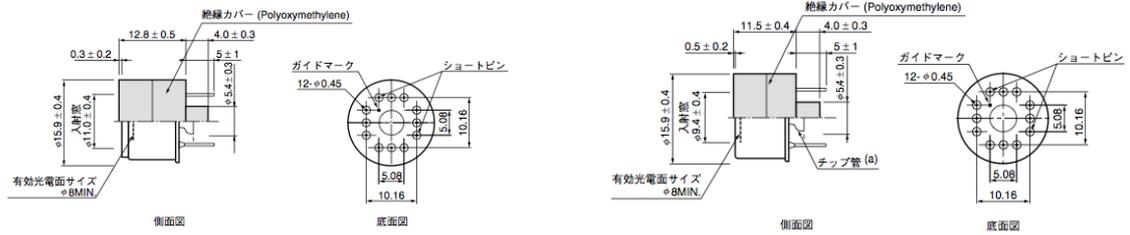


図 3.8 PMT の形状図.

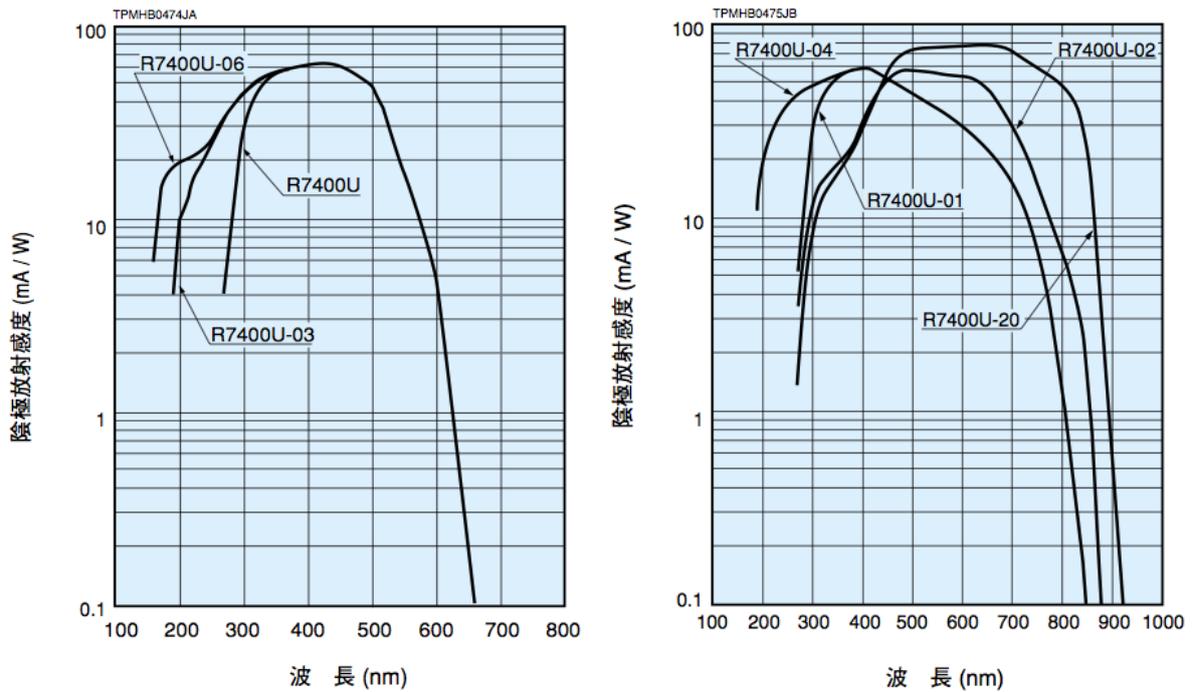


図 3.9 R7400-06 (左), -20 (右) の分光感度特性 [浜松ホトニクス].

表 3.3 R7400-06, -20 の仕様.

JEM-GLIMS PH		PH1, 2, 5, 6	PH3
型名		R7400-06	R7400-20
特徴		紫外 - 可視域用	可視 - 近赤外域用
分光感度極性	波長範囲 [nm]	160 - 650	300 - 920
	最高感度波長 [nm]	420	630
光電面種類		バイアルカリ	マルチアルカリ
窓材質		石英ガラス	硼硅酸ガラス
最大定格	陽極-陰極間電圧 [V]	1000	1000
	平均陽極電流 [mA]	0.1	0.1
	陰極放射感度 [mA/W]	62	78
ゲイン (800 V 印加時)		$7 \times 10^5$	$5 \times 10^5$
保存温度 [°C]		-80 ~ +50	-80 ~ +50
動作周囲温度 [°C]		-30 ~ +50	-30 ~ +50

表 3.4 EMCO Q10-5 の仕様.

型名	EMCO Q10-5
入力電圧 [V]	0 - 5
印加電圧 [V]	0 -1000
最大出力電流 [mA]	0.5
リップル	< 0.25 % p.p.
動作温度 [°C]	-25 ~ +70
保存温度 [°C]	-55 ~ +105

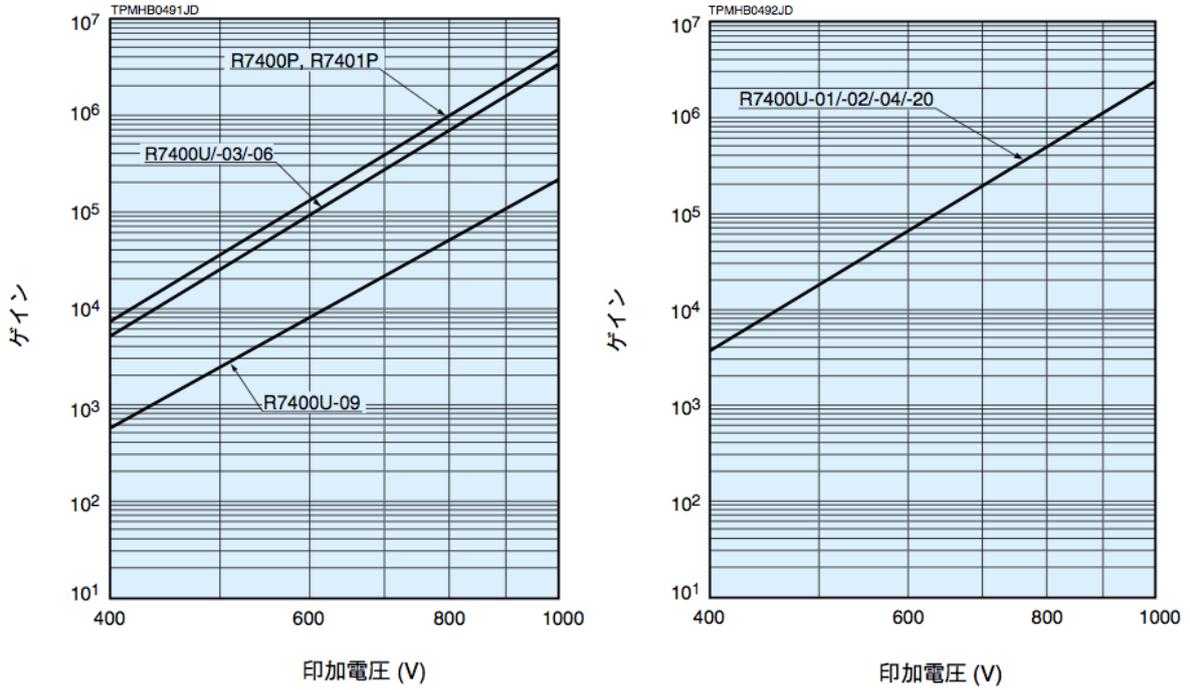


図 3.10 R7400-06 (左), -20 (右) のゲイン特性 [浜松ホトニクス].

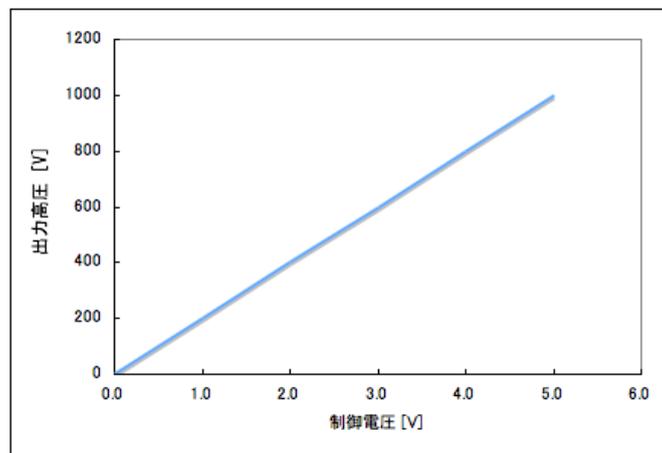


図 3.11 Q10-5 の制御電圧と, 出力電圧の関係.

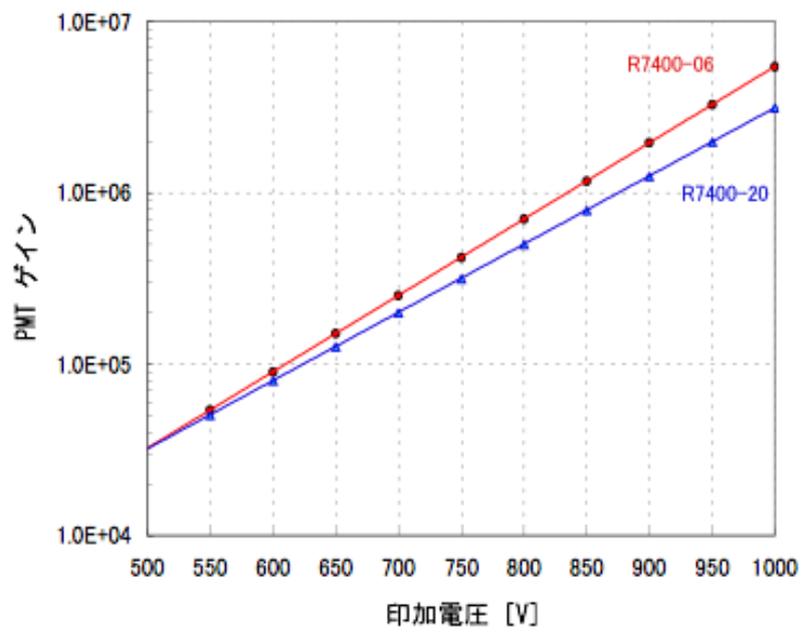


図 3.12 PMT への印加電圧と PMT のゲインの関係.

### 3.3.2 フォトダイオード

PH4 で使用する光検出器は、浜松ホトニクス製 S1227-1010BQ の PDD である。S1227-1010BQ の写真を図 3.13 に示す。表 3.5 に S1227-1010BQ の仕様を示す。また、図 3.14 に分光感度特性の図を示す。PMT には高圧素子を必要であるが、高圧素子は内部放電による故障のリスクがある。フォトメタのリスクを軽減するために、PH4 には高圧素子が必要ない PDD を用いた。

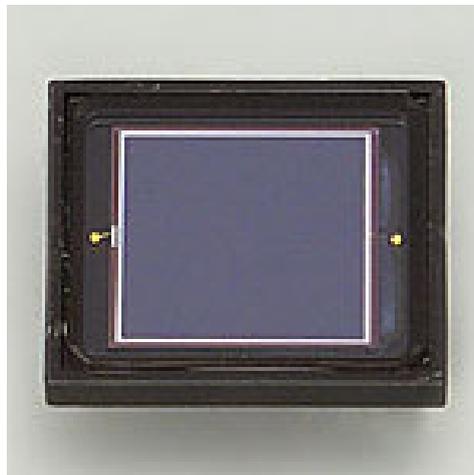


図 3.13 S1227-1010BQ の写真 [浜松ホトニクス].

表 3.5 S1227-1010BQ の仕様.

型名	S1227-1010BQ
感度波長範囲 [nm]	190 - 1000
最大感度波長 [nm]	720
(720 nm での) 受光感度 [A/W]	0.36
暗電流 [pA]	50
動作温度 [°C]	-20 ~ +60
保存温度 [°C]	-20 ~ +80

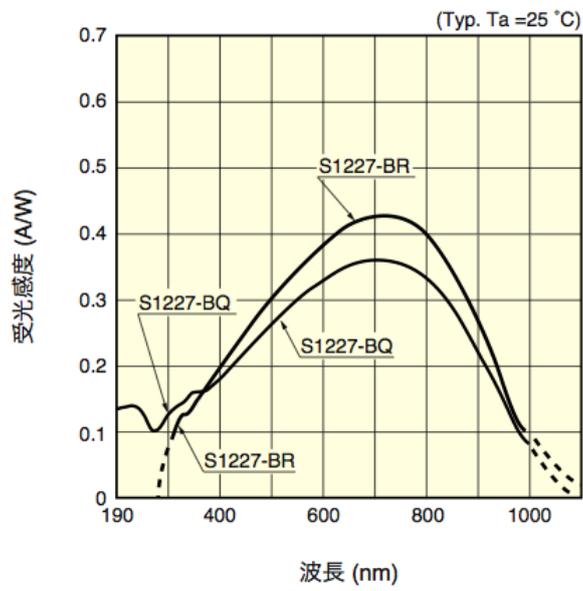


図 3.14 S1227-1010BQ の分光感度特性 [浜松ホトニクス].

### 3.3.3 回路部

それぞれの PH の検出器からの出力電流信号は、後段の信号増幅回路により電圧信号に変換・増幅される。このアナログ信号は SHU 内部の FPGA へと伝送され、12 bit の A/D 変換器によりデジタル信号化されて、データ記録される。フォトメタのブロック図を図 3.15 に示す。

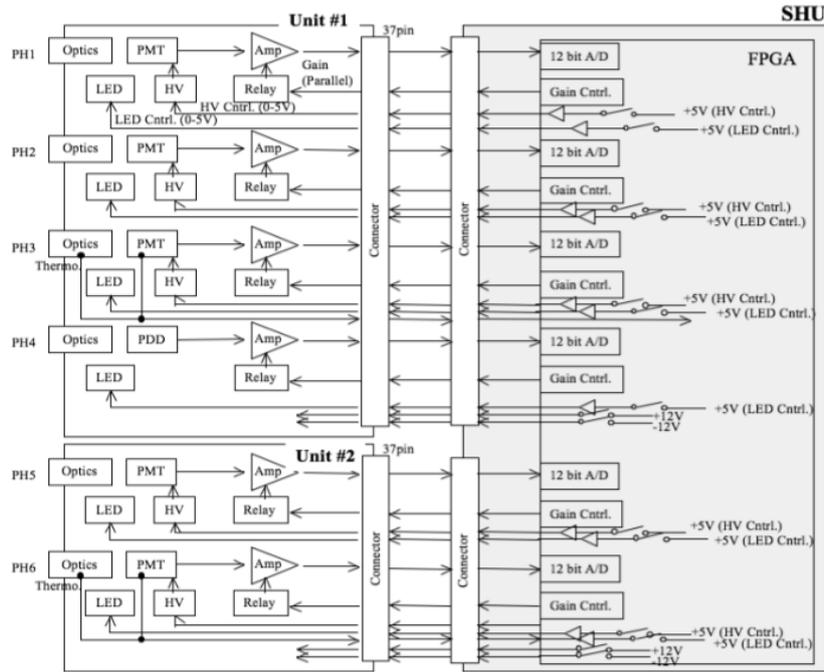


図 3.15 JEM-GLIMS/PH のブロック図。

### 3.4 感度設計

#### 3.4.1 SNR 計算

感度設計は, TARANIS 衛星搭載フォトメタの感度設計に基づいている [T. Farges and R. Binet, 2006]. ここでは, 337 nm 及び 762 nm の発光において, 予想される SNR を導出する.

スプライト, 雷放電の発光の情報は, Kuo et al, [2005] で紹介されている台湾の FORMOSAT-2 衛星搭載のスプライト観測器 (ISUAL : Imager of Sprites and Upper Atmospheric Lightnings) により観測されたスプライトイベントを用いる. 図 3.16 は, 2004/07/18 21:30:15.316 に発生したイベントの ISUAL スペクトルフォトメタ (SP : Spectrophotometer) の観測結果である. ISUAL/SP は, 6 チャンネルフォトメタである. 各チャンネルの観測波長はそれぞれ, SP1 150-290 nm, SP2 337 nm, SP3 391 nm, SP4 610-750 nm, SP5 777 nm, SP6 230-410 nm である. ここでは, SP2 337 ± 5 nm 及び SP4 610-750 nm に注目する.

図中 A の画像において, 下側の水平に長い楕円形に発光している部分が, 雷光である. その上の鉛直に長く発光している部分が, スプライトである. また, A から B まで継続して常に弱く発光してい

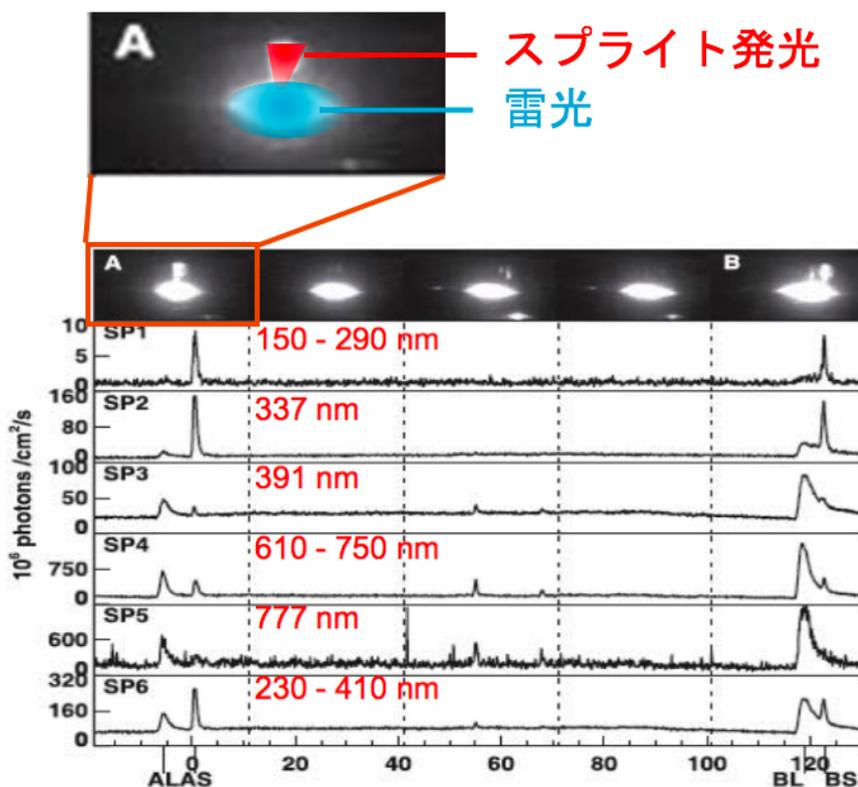


図 3.16 ISUAL により観測されたイベント. 最上段は CCD カメラの撮像画像. 下段は SP の各チャンネル. 横軸の単位は ms [Kuo et al., 2005].

るイベントは、雷放電のために発生した雲光 (Cloud illumination) であり、100 ms 程度継続していることがわかる (以降, CI : Continuous Illumination).

SP2, SP4 の観測データから求めた上記イベントでのスプライト, 雷光, 及び CI の入射光量の最大値を表 3.6 にまとめる.

表 3.6 ISUAL/SP2, SP4 の観測データから得られた最大入射光量. 単位は  $\text{ph}/\text{cm}^2/\text{s}$ .

	SP2: 337 nm	SP4: 610 - 750 nm
雷光での最大値	$30 \times 10^6$	$1230 \times 10^6$
スプライト発光での最大値	$134 \times 10^6$	$300 \times 10^6$
CI での最大値	$5 \times 10^6$	$100 \times 10^6$

上記の入射光量は、フィルタ透過波長域のスペクトルバンドの積分値である. 今、光源は白色光であると仮定し、衛星位置における入射光量を計算する. フィルタの透過波長域での平均透過率  $R$  を求め、透過光量を計算する. *Kuo et al.* [2005] で求められた発光光量  $E_{kuo}$  とフィルタ透過後の入射光量  $E_s$  の関係は以下の式で表される.

$$E_{kuo} = \frac{E_s}{R}. \quad (3.1)$$

SP2, 4 でのフィルタ透過率は、図 3.17 より得ることができる [*Mende et al.*, 2006]. SP2 における  $R$  は、0.5 であり、SP4 における  $R$  は、0.63 である.

ISUAL/SP の入射瞳での入射光量の補正值  $\Gamma$  は、光源のスペクトルを用いて以下の式で表せる.

$$\Gamma = \frac{E_e(i)}{E_{kuo}} = R \frac{\int_{\lambda} F_i(\lambda) \cdot T^*(\lambda) d\lambda}{\int_{\lambda} F_i(\lambda) \cdot T(\lambda) d\lambda}. \quad (3.2)$$

ここで、 $F_i$  は大気での吸収を考慮した光源のスペクトル、 $T$  は SP のフォトメタ透過率、 $T^*$  は数値的フィルタである、フィルタ透過波長域では  $T^* = 1$ 、それ以外波長では  $T^* = 0$  となる.  $\Gamma$  の値を表 3.7 にまとめる.

表 3.7  $\Gamma$  の値.

$\Gamma$	337 nm	610 - 750 nm
雷光	1	0.9422
スプライト	1	0.9565

フィルタの設計が、観測するスペクトルに対し良く適応しているので、表 3.7 における  $\Gamma$  の差は無視する. 光源のスペクトルを考慮した ISUAL/SP の入射瞳での入射光量を表 3.8 に示す.

TARANIS 衛星と ISUAL との入射瞳での入射光量の比  $\rho$  は、

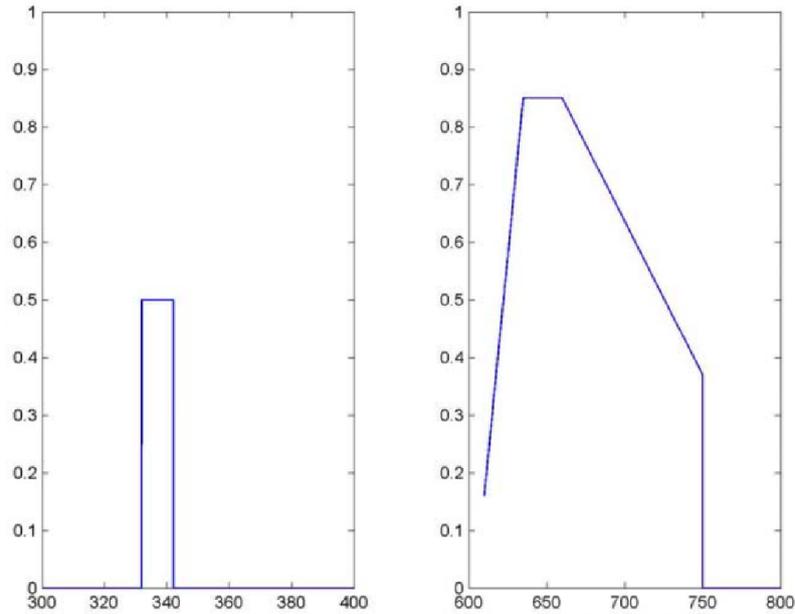


図 3.17 SP2 のフィルタ透過率 (左), 及び SP4 のフィルタ透過率 (右). 横軸は波長 [nm], 縦軸はフィルタ透過率である.

表 3.8 光源の発光スペクトルを考慮した入射瞳での入射光量.

	337 ± 5 nm (10 <sup>6</sup> ph/cm <sup>2</sup> /s)	610-750 nm (10 <sup>6</sup> ph/cm <sup>2</sup> /s)
雷光での最大値	30	1159
スプライト発光での最大値	134	287
CI での最大値	5	94

TARANIS 衛星と ISUAL それぞれの入射光量での  $\rho$  は, 以下の式で記述することができる.

$$\rho = \frac{E_{TARANIS}}{E_{ISUAL}} = \frac{Z_{ISUAL}^2(i)}{Z_{TARANIS}^2(i)} \times \frac{\int_{\lambda} \Phi_i(\lambda) \cdot \tau_{nadir}(\lambda, i) \cdot T_{TARANIS}^*(\lambda) d\lambda}{\int_{\lambda} \Phi_i(\lambda) \cdot \tau_{limbes}(\lambda, i) \cdot T_{ISUAL}^*(\lambda) d\lambda}. \quad (3.3)$$

ここで,  $i$  は光源の種類 (雷放電もしくはスプライト),  $\Phi$  は光源のスペクトル,  $z$  は光源から衛星までの距離,  $\tau$  は大気伝達関数, 及び  $T^*$  は求めるスペクトルバンドを選択するための数値フィルタである.

光源のスペクトルを図 3.18 に示す. 図 3.18 は, 観測された 600-800 nm 波長域における雷光のスペクトル及びスプライトの発光スペクトルである.

大気透過率を図 3.19 に示す. 図 3.19 は, 762 nm 付近 (730-800 nm) における放射伝達の計算を, ISUAL のリム方向と TARANIS 衛星の天底方向の 2 方向から光が到来するとして, さらにそれぞれの方向について, 高度 10 km での雷放電と高度 60 km でのスプライトを光源とした場合の計算

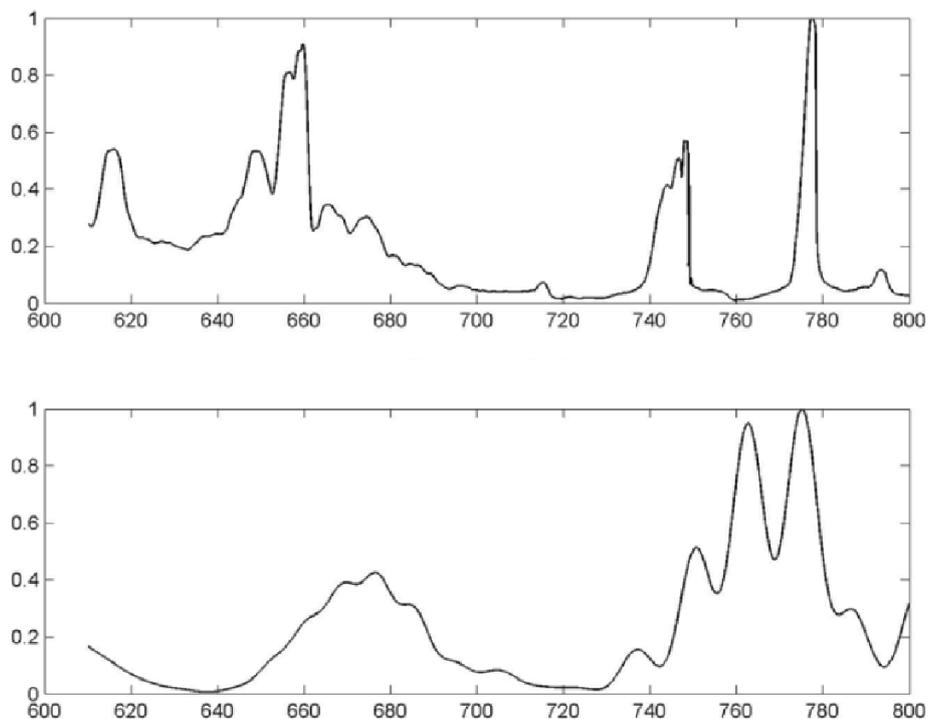


図 3.18 雷光のスペクトル (上), 及びスプライトの発光スペクトル (下). 横軸は波長 [nm], 縦軸は相対発光強度である [Orville and Henderson, 1984].

を行なった結果である. 600-800 nm の波長領域については, 762 nm 近傍を除いて, 高度 10 km 及び 50 km の光源からの発光の吸収は, おおよそない. 762 nm 近傍の吸収線は, 連続的ではなく, いくつかの短いバンド幅で構成されている. 10 km の光源からの 759-769 nm の発光における大気の平均透過率は, 天底方向について 0.87 であり, リム方向については 0.80 である.

さらに, 上記と同じ計算を紫外の 337 nm の波長について行なった結果を図 3.20 に示す. この計算の結果, 天底方向での透過率とリム方向での透過率との比は, 高度 10 km の光源に対し 1.36 であった. 一方, 高度 60 km の光源に対しては, 1.0 に近い結果となった.

TARANIS 衛星搭載フォトメタで観測した場合に期待される入射光量と, ISUAL/SP との比較を表 3.9 にまとめる.

TARANIS 衛星での天底観測では, 762 nm の波長で, 雷光の強い減衰があるため, 雷光とスプライトの発光とを切り分けることが可能である. 雷光とスプライトの発光との比は, ISUAL/SP4 (610-750 nm) において 4.04 であり, TARANIS 衛星搭載フォトメタ (762 nm を中心とする狭範囲) では 0.05 である. また, 紫外については, 光源と衛星との距離が, TARANIS 衛星搭載フォトメタのゲインを決定する主要要素となる.

波長  $\lambda$  の光子が持つエネルギーは,

$$E(\lambda_{nm}) = \frac{hc}{\lambda} = \frac{6.6 \times 10^{-34} \times 3 \times 10^8}{\lambda_{nm} \times 10^{-9}}, \quad (3.4)$$

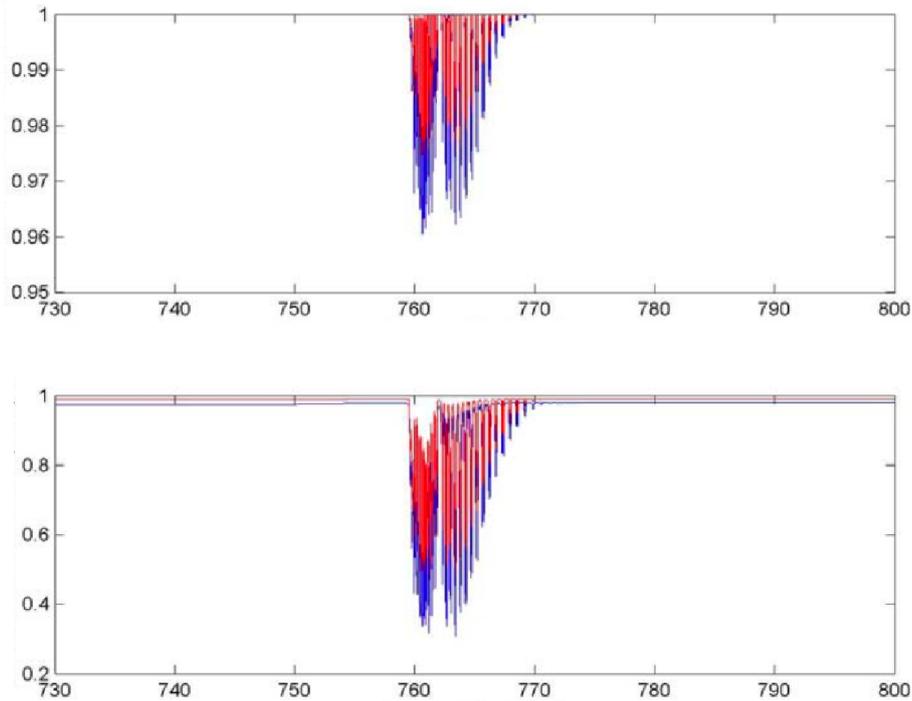


図 3.19 近紫外領域での雷光における大気透過率 (上), 及びスプライト発光における大気透過率 (下). 赤線は天底観測の場合, 青線はリム観測の場合. 横軸は波長 [nm], 縦軸は各波長における大気透過率である.

表 3.9  $E_{ISUAL}$  と  $E_{TARANIS}$  との比較.

337 nm	$E_{ISUAL}$	$\rho$	$E_{TARANIS}$
雷光での最大値	30	29.5490	886
スプライト発光での最大値	134	25.8771	3467
CIでの最大値	5	29.5490	148
762 nm	$E_{ISUAL}$	$\rho$	$E_{TARANIS}$
雷光での最大値	1159	0.1244	144
スプライト発光での最大値	287	9.8797	2835
CIでの最大値	94	0.1244	12

と表すことができる. それ故,  $E(337\text{nm}) = 5.9 \times 10^{-19} \text{ J}$ ,  $E(762\text{nm}) = 2.6 \times 10^{-19} \text{ J}$  となる. TARANIS 衛星搭載フォトメタで予想される入射光量を表 3.10 にまとめる.

次に検出器に PMT と PDD を用いた場合の SNR を求める. 最初に PDD の信号とノイズを求める. PDD の信号は入射フラックス  $F$  に依存し, PDD のスペクトル応答は  $I_{ph} = S \times F$  である. また, 入射フラックスは採用する光学系に依存する. 光学系で重要となる要素は, レンズの直径  $D_{optics}$  及

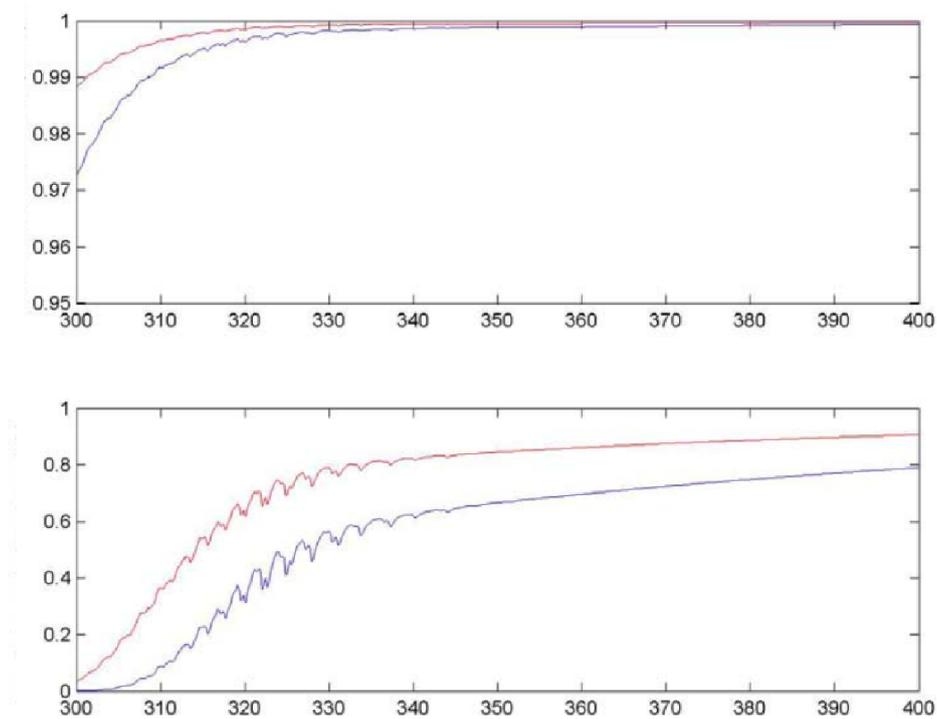


図 3.20 図 3.19 の計算を紫外の 337 nm 付近の波長に対して行なった結果. 赤線は天底観測の場合, 青線はリム観測の場合. 横軸は波長 [nm], 縦軸は各波長における大気の透過率である.

表 3.10 予想される TARANIS 衛星での観測入射光量.

	$E_{TARANIS}$ [ $\mu\text{W}/\text{m}^2$ ]	
	337 nm	762 nm
雷光での最大値	5.2	0.4
スプライト発光での最大値	20.4	7.4
CI での最大値	0.9	0.03
サチレーションレベル	45	13

びレンズとフィルタを含めた透過率である. 入射瞳における入射光量を  $E$  とすると,

$$F = T \frac{\pi D_{optics}^2}{4} E, \quad (3.5)$$

と書ける.

主なノイズはショットノイズ (ポアソンノイズ)  $i_{ph}$  と, シャント抵抗のジョンソンノイズ (熱雑

音)  $i_j$  である.  $i_{ph}$  及び  $i_j$  は次の式で表される.

$$i_{ph} = \sqrt{2eI_{ph}\Delta f}, \quad (3.6)$$

$$i_j = \sqrt{\frac{4kT\Delta f}{R}}. \quad (3.7)$$

ここで,  $e$  は電気素量,  $k$  はボルツマン定数,  $T$  は温度,  $\Delta f$  はアンプ部における周波数帯域, 及び  $R$  はシャント抵抗値である. 微弱な信号に対しては, ジョンソンノイズが優位となる.

次に PMT の信号とノイズを求める. 陰極電流  $I_k$  は, 入射フラックス  $F$  及び受光面のスペクトル応答  $S_k$  に比例する.

$$I_k = S_k \times F, \quad (3.8)$$

$$I_A = G \times I_k. \quad (3.9)$$

ダイノード段数  $n$  と PMT のゲイン  $G$  から, 各ダイノードでのゲインを  $d = \sqrt[n]{G}$  と推定する. PMT の増幅部はノイズの発生源となる. そのノイズを  $a = \sqrt{\frac{d}{d-1}}$  と表す.

主なノイズは, 温度に依存する陽極信号のショットノイズ  $I_A$  及び暗電流のショットノイズ  $I_d$  である. これらのノイズは通過帯域  $\Delta f$  に強く依存している.

$$i_A = a \sqrt{2eGI_A\Delta f} = aG \sqrt{2eI_k\Delta f}, \quad (3.10)$$

$$i_d = a \sqrt{2eGI_d\Delta f}. \quad (3.11)$$

また, これら 2 つのノイズは独立であるが, 全体のノイズは  $i = \sqrt{i_A^2 + i_d^2}$  である.

以上より SNR は,

$$\text{SNR} = \frac{I_A}{\sqrt{2eG\Delta f(I_A + I_d)}} \frac{1}{a} = \frac{I_k}{\sqrt{2e\Delta f(I_k + I_d/G)}} \frac{1}{a}, \quad (3.12)$$

となる.

特に,  $I_A \gg I_d$  のとき,

$$\text{SNR} = \frac{I_k}{\sqrt{2eI_k\Delta f}} \frac{1}{a}, \quad (3.13)$$

となる.

上記で求めた SNR を用いて, 337 nm と 762 nm の波長での TARANIS 衛星搭載フォトメタで見込まれる雷光, スプライト発光, 及び CI の最大値での入射光量毎に, PMT と PDD の SNR を計算した (表 3.11). なお, この計算では PDD は浜松ホトニクス S1336, PMT は浜松ホトニクス 9113B の特性を基にした. また, 仮定として絞り F/2, レンズ直径 10 mm 及び紫外に対し 0.45, 近赤外に対し 0.7 の大気透過率, 温度 300 K, サンプリング周波数 20 kHz の値を用いた.

表 3.11 予想される TARANIS 衛星での SNR.

337 nm	$E_{TARANIS}$ [ $\mu\text{W}/\text{m}^2$ ]	SNR	
		PMT	PDD
雷光	5.2	47.1	31.7
スプライト	20.4	93.4	104.1
CI	0.9	19.6	5.8
サチレーションレベル	45	138.7	188.5
762 nm	$E_{TARANIS}$ [ $\mu\text{W}/\text{m}^2$ ]	SNR	
		PMT	PDD
雷光	0.4	7.7	13.2
スプライト	7.4	33.4	168.3
CI	0.03	2.0	1.0
サチレーションレベル	13	44.3	248.0

## 第 4 章 JEM-GLIMS 搭載フォトメタ 開発

JEM-GLIMS 搭載用フォトメタと TARANIS 衛星搭載用フォトメタの仕様はほぼ同一であり, 開発も同時進行しているが, より先行している JEM-GLIMS 搭載用フォトメタ開発の内容について本章でまず述べる. 現在試作モデル (BBM : Bread Board Model) の製作はすでに終了しており, プロトフライトモデル (PFM : Proto-Flight Model) の開発を現在行なっている. BBM を用いた各種試験を行い PFM の設計を確定させたが, 本章ではそれら三つの試験について詳細を述べる. 実施した試験は, (1) 積分球を用いた感度校正試験, (2) 出力ドリフト特性試験, (3) 高温状況下での光電子増倍管 (PMT : PhotoMultiplier Tube) の挙動を検証する高熱耐久試験である.

### 4.1 校正試験

#### 4.1.1 PMT を用いたフォトメタの校正試験

本試験の目的は JEM-GLIMS に搭載するフォトメタの感度と信号雑音比 (SNR : Signal-to-Noise Ratio) が 3.4 章で示した要求仕様を満たしているかを検証することにある. 同時に感度校正の試験結果から, 信号増幅回路のアンプゲインを最適化することが目的である.

BBM では,  $\lambda = 337 \pm 5 \text{ nm}$  を測光するフォトメタと,  $\lambda = 762 \pm 5 \text{ nm}$  を測光するフォトメタを製作した. これらは, JEM-GLIMS に搭載するフォトメタのうち, PH2 と PH3 にそれぞれ対応し, PH2<sub>BBM</sub> および PH3<sub>BBM</sub> と呼ぶ. これら BBM フォトメタを用いて感度と SNR を実測することを目的とし, 2008 年 4 月 8 日に国立極地研究所が所有する積分球標準光源を用いて, 校正試験を実施した. 試験に用いた機材を表 4.1 に, 試験環境の概念図を図 4.1 に示す.

表 4.1 PH2<sub>BBM</sub>, PH3<sub>BBM</sub> 較正試験使用機材.

PH2 <sub>BBM</sub>	PMT (R7400U-06) フィルタ (透過波長域 337 ± 5 nm) レンズ (有効口径 7.2 mm, FOV 57°) アンプ部, HV ユニット実装小基板
PH3 <sub>BBM</sub>	PMT (R7400U-20) フィルタ (透過波長域 762 ± 5 nm) レンズ (有効口径 7.2 mm, FOV 57°) アンプ部, HV ユニット実装小基板
機材	積分球標準光源 (OL462) 出力可能波長域 : 300 - 1000 nm ハロゲンタングステン電球 (150 W) 定電圧電源 デジタルオシロスコープ テスター (電流計)

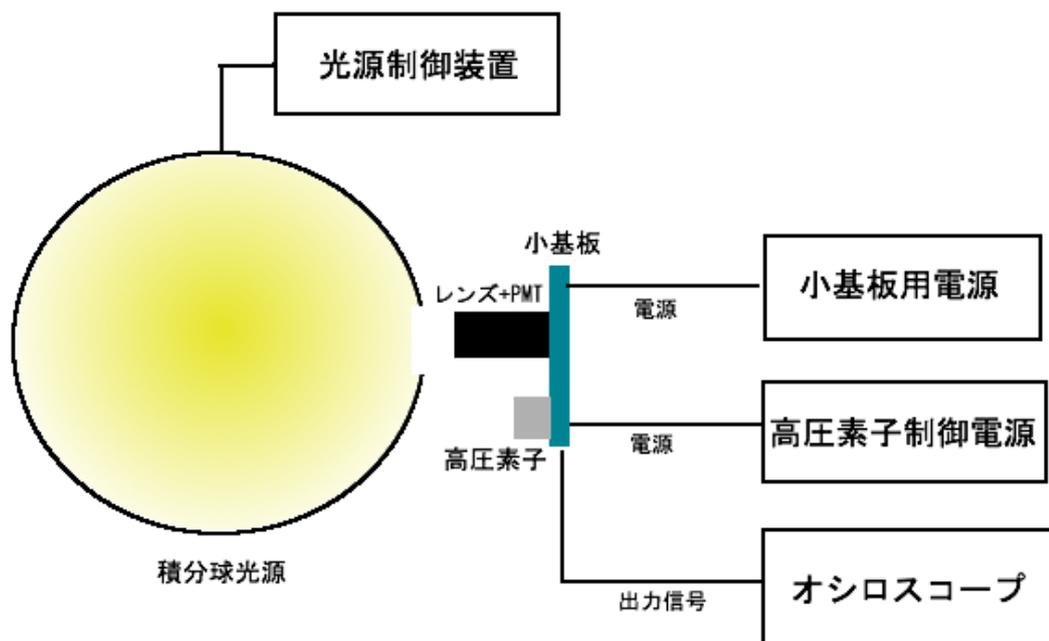


図 4.1 感度較正試験機器のセットアップを示す概念図.

PH2<sub>BBM</sub> で用いる PMT は R7400U-06 であり, 実際の打上げで用いるのは, R7400-06 となる.

”U” が付与されている PMT にはポリアセタール製の絶縁カバーが付いているが、フライトに用いる PMT は、そのカバーが付いていないものとする。レンズの有効口径と視野は、フライト用にはそれぞれ 10 mm, 42.7° と仕様変更している。

PH3<sub>BBM</sub> で用いる PMT についても PH2<sub>BBM</sub> と同様に、絶縁カバー付きの R7400U-20 を用いているが、フライト用には R7400-20 を用いる。有効口径と視野についても、PH2<sub>BBM</sub> と同様にフライト用には 10 mm, 42.7° に変更する。

PMT は、アンプ部、高電圧電源素子 (HV ユニット)、および信号インターフェイス用のコネクタが実装された小基板上に装着される。アンプ部は、PMT からの電流信号を電圧信号に変換するアンプと、電圧信号増幅アンプ、ローパスフィルタ、およびバッファアンプで構成される。HV ユニットには直流 (DC) 0 ~ +12 V の電圧を入力すると、0 ~ +1000 V が出力され、PMT に印加される。アンプ部で増幅された PMT の出力信号、HV ユニットへの入力電圧信号、およびアンプ部への  $\pm 12$  V 電源は、小基板に実装したコネクタを通じて伝送される。この小基板は、PH2<sub>BBM</sub>, PH3<sub>BBM</sub> とともに全く共通の仕様となっている。

図 4.1 に示すようにフィルタ内蔵レンズ部に PMT を装着し、これをアンプ部、HV ユニットが実装された小基板と結合する。このフォトメタを積分球の開口部から挿入する。さらに、小基板に実装したコネクタからのびる HV ユニット制御用電源ケーブルとアンプ部用電源ケーブルを、それぞれ定電圧電源に接続する。その上で、フォトメタと積分球開口部を暗幕により遮光した。積分球の光源出力は、専用の光源制御装置により制御する。フォトメタの出力は、オシロスコープにより計測する。本試験では、次に述べる試験 A と試験 B の 2 種類を行なった。両試験の概要は以下のとおりである。

**試験 A** PMT に印加する HV ユニットからの高圧電源を一定値にして、積分球光源の出力を変更し、フォトメタへの入射光量を変化させる。このときのフォトメタの出力電圧値 (直流成分平均値) とノイズ電圧値 (交流成分実効値) を計測した。出力電圧値とノイズ電圧値の比を求めることにより SNR を求め、入射光量を変化させた時の SNR との関係性を明らかにする。

具体的な実験の手順は、以下の (1) - (7) に従う。

- (1) アンプ部に  $\pm 12$  V の一定電圧を印加し、HV ユニット制御用電圧の出力電圧を一定値に設定しておく。
- (2) 積分球の光源出力を設定する。
- (3) 光源出力が安定するまで待つ。
- (4) オシロスコープを DC (Direct Current) 結合に設定し、フォトメタ出力信号波形を表示させ、スナップショットにて直流成分の平均値を読む。これを 3 回くり返し、その平均値を出力電圧値とする ( $V_{sig}$ )。
- (5) オシロスコープを AC (Alternating Current) 結合に設定し、フォトメタ出力信号波形を表示させ、スナップショットにて交流成分の実効値を読みとる。これを 10 回くり返し、その平均値をノイズ電圧値とする ( $V_{noise}$ )。
- (6) 光源出力を変更する。
- (7) (3) から (6) の手順をくり返す。

以上の計測から, SNR を式 (4.1) により求める.

$$SNR = V_{sig.}/V_{noise}. \quad (4.1)$$

試験 B 積分の光源出力を制御してフォトメタへの入射光量を一定値にし, PMT に印加する HV ユニットからの高圧電源を変化させる. このときのフォトメタ出力電圧値とノイズ電圧値を計測した. 出力電圧値とノイズ電圧値の比を求めることにより SNR を求め, 高圧電源の電圧値を変化させたときの SNR との関係性を明らかにする. 具体的な手順は, 以下の (1) - (7) に従う.

- (1) アンプ部に  $\pm 12 \text{ V}$  の一定電圧を印加し, 積分球の光源出力を一定値にしておく.
- (2) 積分球光源に電源を投入し, 光源出力が安定するまで待つ.
- (3) HV ユニット制御用電源の出力電圧値を設定し, PMT に印加する.
- (4) オシロスコープを DC 結合に設定し, フォトメタ出力波形を表示させ, スナップショットにて直流成分の平均値を読む. これを 3 回くり返し, その平均値を出力電圧値とする ( $V_{sig.}$ ).
- (5) オシロスコープを AC 結合に設定し, フォトメタ出力波形を表示させ, スナップショットにて交流成分の実効値を読みとる. これを 10 回くり返し, その平均値をノイズ電圧値とする ( $V_{noise}$ ).
- (6) 高圧制御電源の出力電圧値を変更する.
- (7) (4) から (6) の手順をくり返す.

試験 A と同様に式 (4.1) によって SNR を計算した.

出力とノイズの電圧波形を, オシロスコープで表示させた例を図 4.2 に示す.

PH2<sub>BBM</sub> を用いた試験 A, B の結果を図 4.3, 4.4 に示す. 試験 A では HV ユニットの出力電圧値を 375 V に設定した. 試験 B ではフォトメタへの入射光量を  $1.28 \times 10^{-9} [\text{W}/\text{m}^2]$  に設定した.

表 3.1 に示す通り, PH2<sub>BBM</sub> の試験では,  $1.0 \times 10^7 [\text{W}/\text{m}^2]$  という入射光量において SNR = 10 となることが要求基準である. 図 4.3 に示す通り, 試験 A では, 入射光量  $I$  に対して  $\sqrt{I}$  に比例して SNR が増加していることが解る. この測定結果から SNR = 10 となる点で光量がとなり, 要求基準を満たしていることが判明した. 次に, 図 4.4 試験 B では, 各高圧値での SNR にばらつきがみられるものの, SNR が高圧値によらず, ほぼ SNR > 10 であり, また一定である結果が得られた. つまり, 3.50 V 以上の高圧値では線形性がほぼ保たれていることが明らかになった.

PH3<sub>BBM</sub> を用いた試験 A, B の結果を図 4.5, 4.6 に示す. 試験 A では高圧を 375 V に設定した. 試験 B では入射光量を  $2.00 \times 10^{-8} [\text{W}/\text{m}^2]$  に設定した.

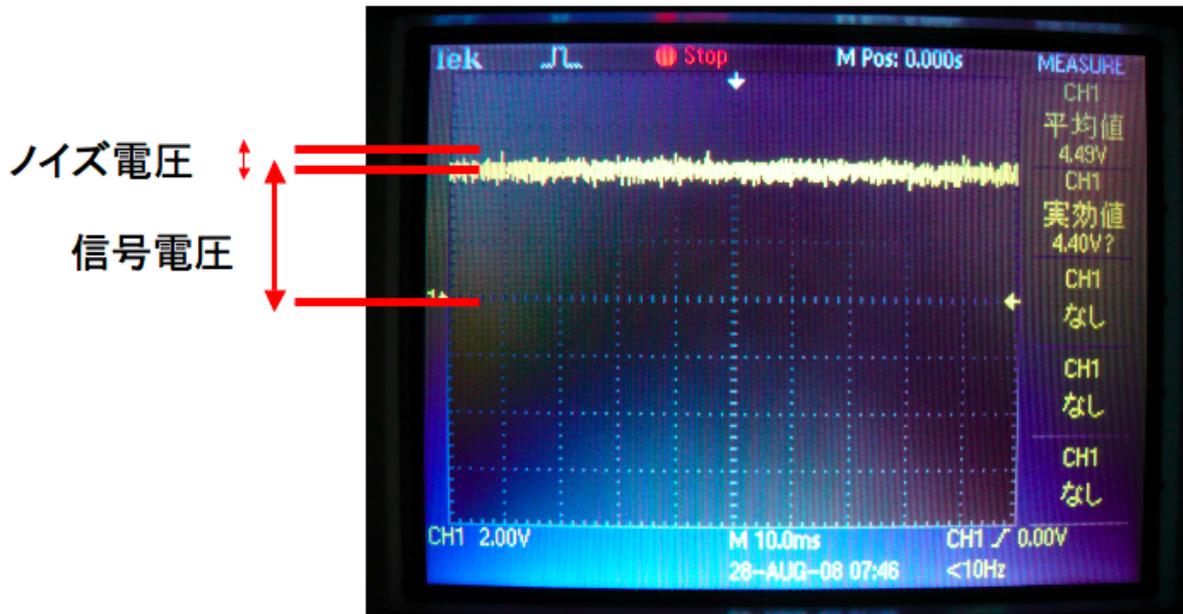


図 4.2 出力及びノイズの電圧波形.

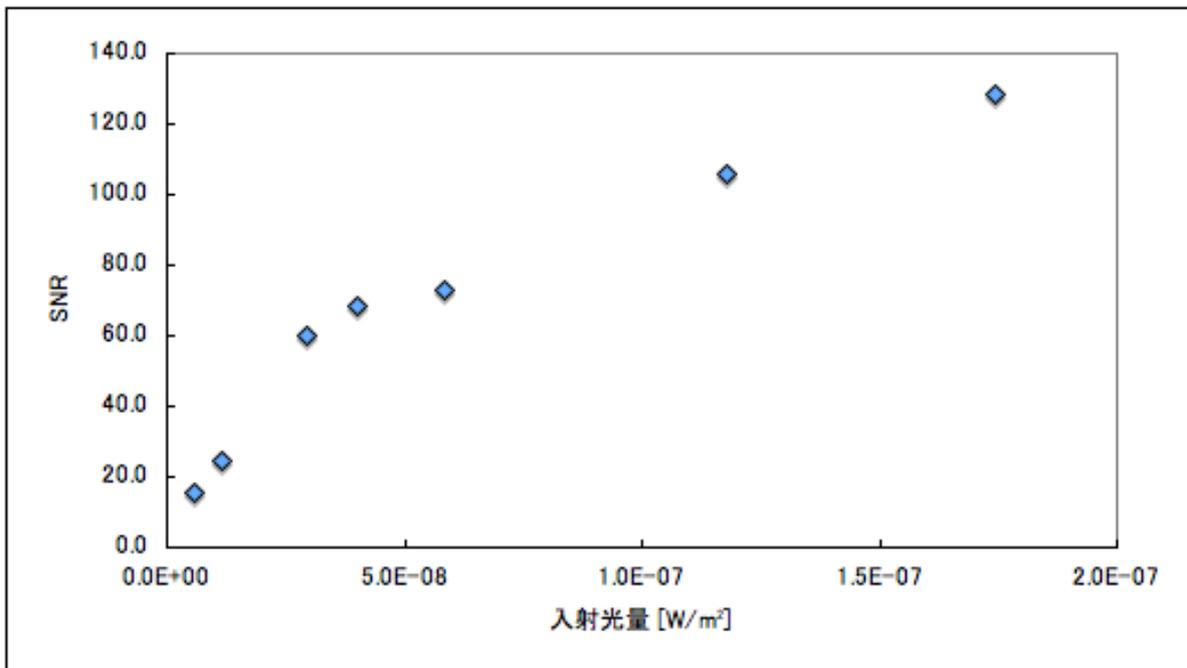


図 4.5 HV ユニットの出力電圧を一定にし、フォトメタへの入射光量を変化させた時の入射光量と SNR との関係を示す測定結果. HV = 375 V, PH3<sub>BBM</sub> を用いた測定結果.

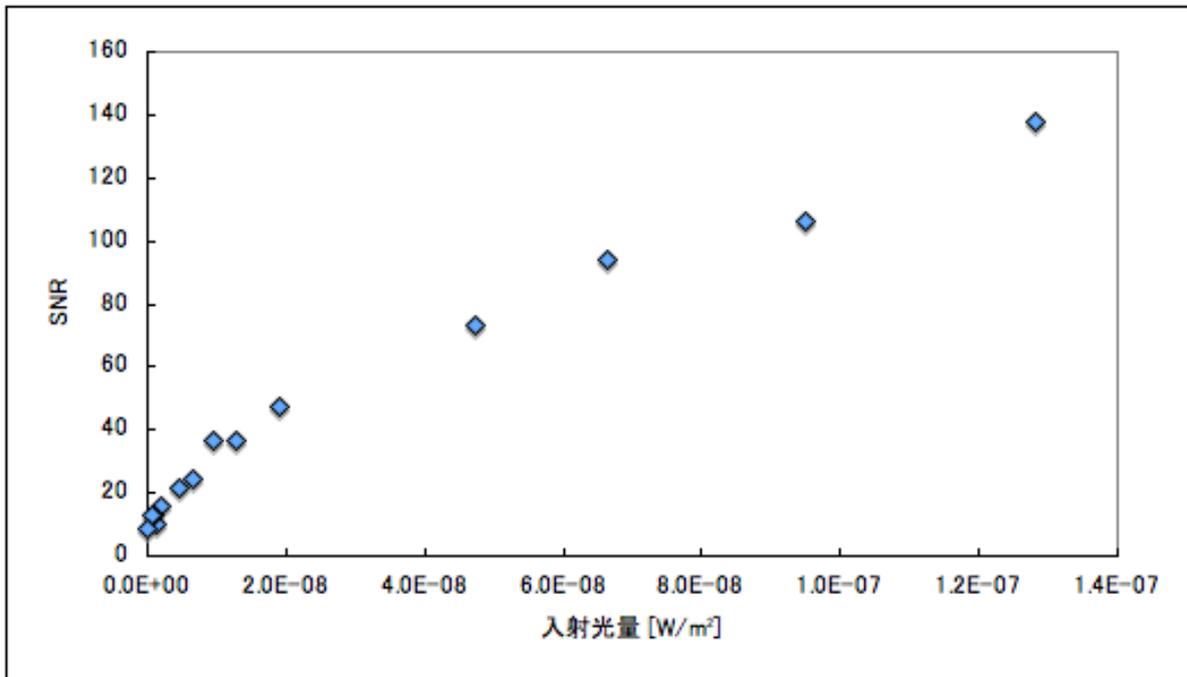


図 4.3 HV ユニットの出力電圧を一定にし、フォトメタへの入射光量を変化させた時の入射光量と SNR との関係を示す測定結果. HV = 375 V, PH2<sub>BBM</sub> を用いた測定結果.

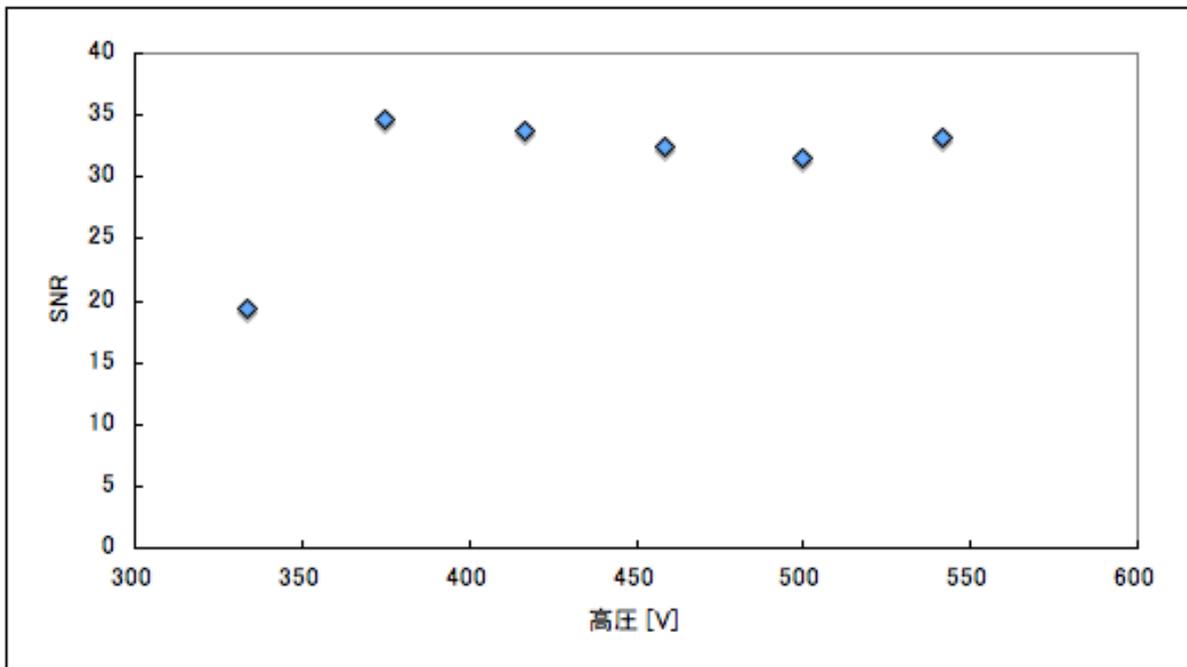


図 4.6 フォトメタへの入射光量を  $2.00 \times 10^{-8}$  [W/m<sup>2</sup>] と一定にし、HV ユニットの出力電圧値を変化させた時の HV 値と SNR との関係を示す測定結果. PH3<sub>BBM</sub> を用いた測定結果.

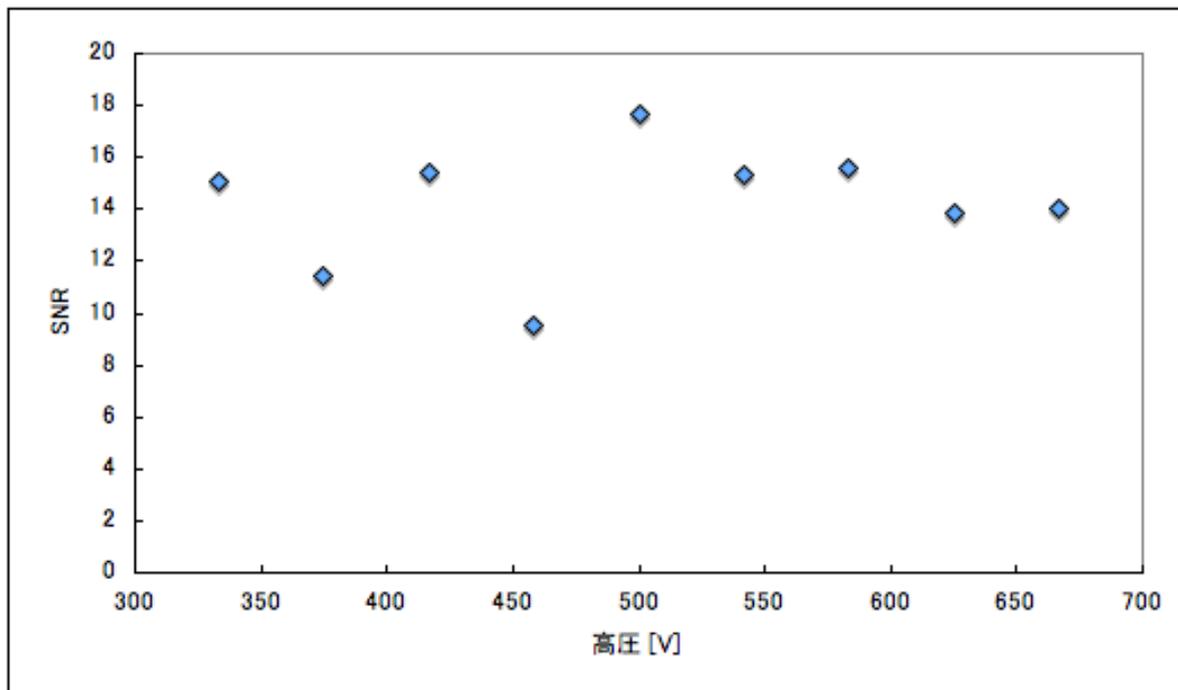


図 4.4 フォトメタへの入射光量を  $1.28 \times 10^{-9} [\text{W}/\text{m}^2]$  と一定にし, HV ユニットの出力電圧値を変化させた時の, HV 値と SNR との関係を示す測定結果. PH2<sub>BBM</sub> の測定結果.

PH3<sub>BBM</sub> の試験では, PH2<sub>BBM</sub> と同様に  $1.0 \times 10^7 [\text{W}/\text{m}^2]$  という入射光量において SNR = 10 となることが要求基準である. 図 4.5 から, 試験 A では, 入射光量 I に対して  $\sqrt{I}$  に比例して SNR が増加している. SNR = 10 となる光量が  $5.6 \times 10^{-9} [\text{W}/\text{m}^2]$  となり, 要求基準を満たしていることが明らかとなった, つぎに, 図 4.6 から試験 B では, 各高圧値での SNR が, 高圧値によらず, SNR > 10 かつ一定の結果である. このため, 350 V 以上の高圧値では線形性がほぼ保たれている結果が得られた. HV 値が低いことによる線形性のやぶれの可能性が考えられる.

較正試験の結果としては, PH2<sub>BBM</sub>, PH3<sub>BBM</sub> とともに, 要求基準を満たしており高い SNR を実現できている結果を得ることが確認できた. しかし, PH2<sub>BBM</sub> の出力は最大予測入射光量である  $40 \times 10^{-5} [\text{W}/\text{m}^2]$  より低い入射光量で, 出力電圧レンズの最大値である +5 V を上回る. この結果は, 図 4.7 に示されている通りで, HV ユニットの出力電圧を 375 V と一定にし, 入射光量を  $1.3 \times 10^{-10} [\text{W}/\text{m}^2]$  から  $1.3 \times 10^{-7} [\text{W}/\text{m}^2]$  まで変化させたときの出力電圧値の測定結果である. PH3<sub>BBM</sub> でも同様の測定結果が得られた. この結果から PH2<sub>BBM</sub>, PH3<sub>BBM</sub> は感度が高すぎ, ゲインを 1 桁以上低下させることが必要である.

PH2 用および PH3<sub>BBM</sub> 用のアンプ部の回路構成は図 4.8 の通りである. PMT 直後の増幅器は, PMT からの電流信号を電圧信号に変換する機能を持つ. この増幅器に接続されている抵抗値 ( $R_s$ ) はシャント抵抗値と呼ばれ, 入力電流 ( $I_{in}$ ) と出力電圧 ( $V_{out}$ ) には式 4.2 の関係がある.

$$V_{out} = I_{in}R_s. \quad (4.2)$$

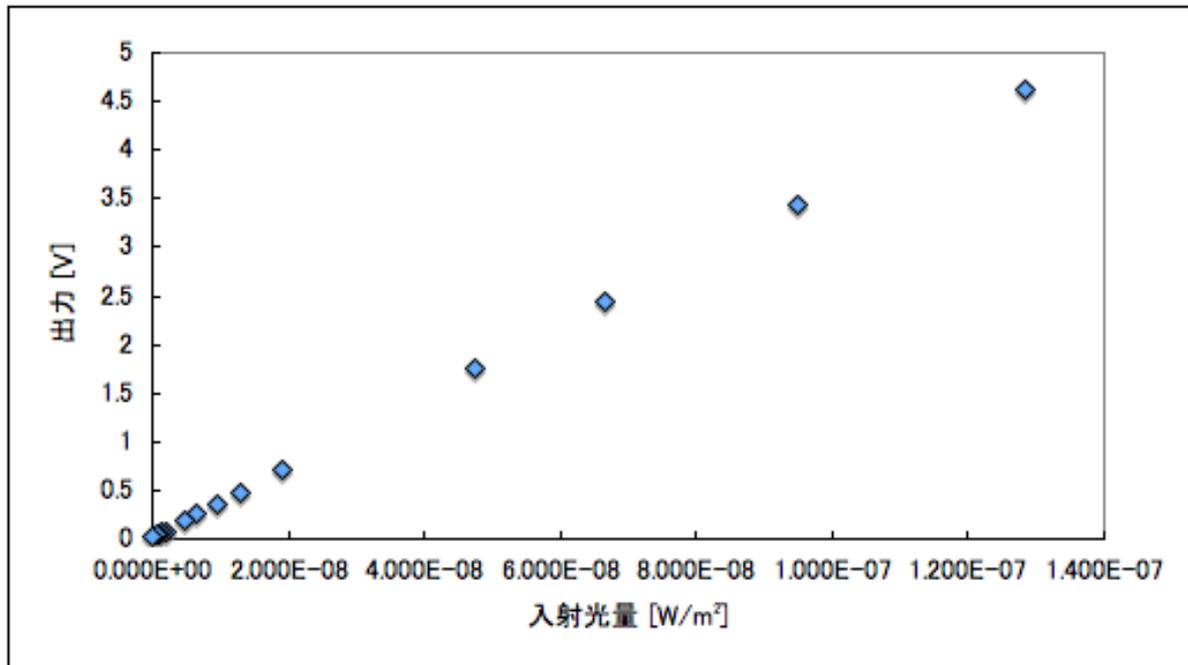


図 4.7 HV ユニットの出力電圧を一定にし、フォトメタへの入射光量を変化させた時の入射光量と出力電圧との関係を示す測定結果. HV = 375 V, PH2<sub>BBM</sub> を用いた測定結果.

つまり、シャント抵抗が増幅率を決めている。較正試験の結果を踏まえ、初段の電流信号を電圧信号に変換する増幅器のシャント抵抗の抵抗値を変更し、PFM では図 4.9 の回路に変更するよう様に決定した。さらに、BBM では、シャント抵抗の抵抗値は  $1 \times 10^6$  であったが、PFM では、 $15 \times 10^3$ ,  $30.1 \times 10^3$ ,  $75 \times 10^3$ , および  $150 \times 10^3$  の 4 段階に切換可能とし、相対的に  $\times 1$ ,  $\times 2$ ,  $\times 5$ ,  $\times 10$  倍に変更が可能である。同様に PMT に印加する高圧電源の値は  $0 \sim 1000$  V の範囲で切換可能とした。通常観測時は、 $350 \sim 1000$  V の範囲で使用し、これによって増幅率を  $2 \times 10^3$  から  $2 \times 10^6$  の範囲で 3 桁変更可能である。総合的に 4 桁の範囲で増加率を任意に変更可能となる設計とし、スプライト発光を高い SNR で確実に観測できる様な設計に決めた。

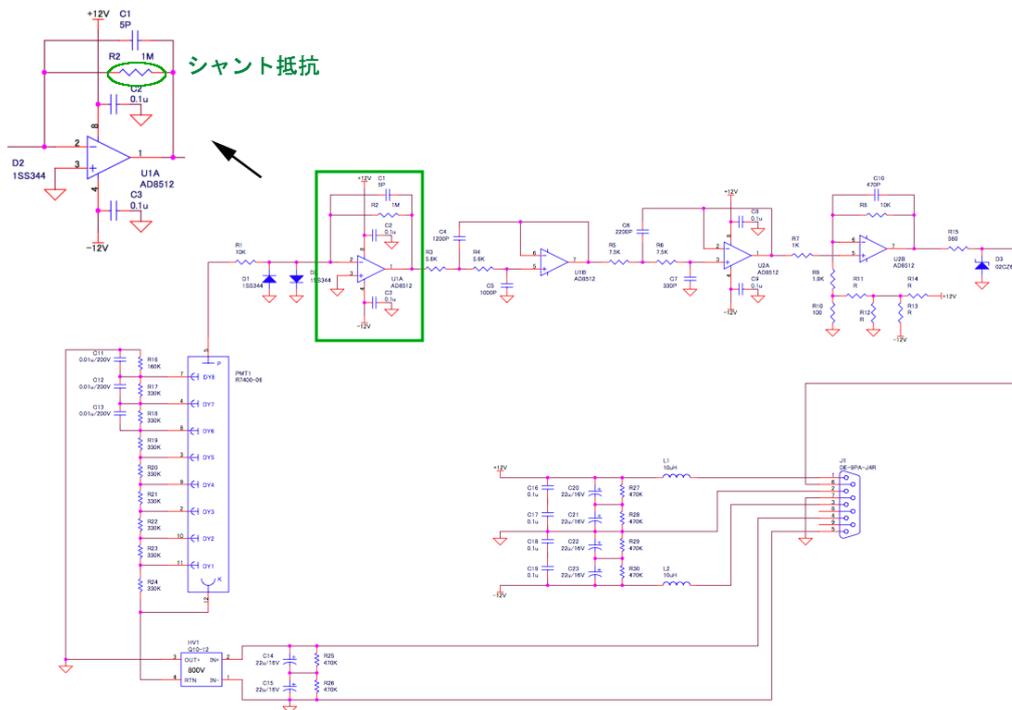


図 4.8 BBM での PH2<sub>BBM</sub> の信号増幅回路.

シャント抵抗

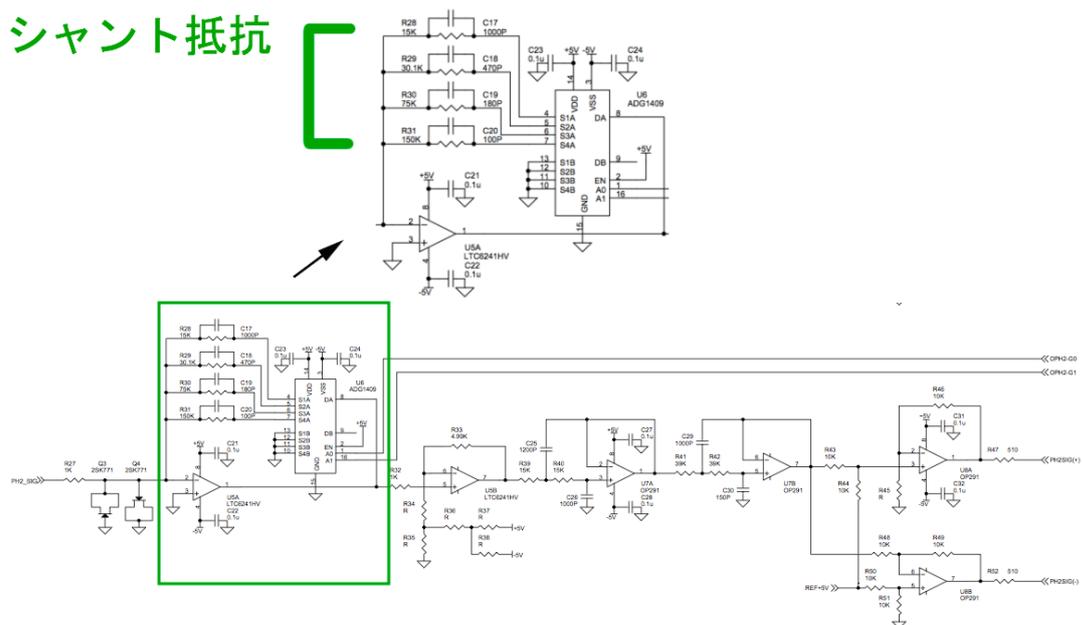


図 4.9 PFM での PH2<sub>BBM</sub> の信号増幅回路.

### 4.1.2 PH4 較正試験

本試験も PH2<sub>BBM</sub>, PH3<sub>BBM</sub> の較正試験と同様に, 第 3.3 章で示した要求仕様を満たしているかを検証することにある. 同時に感度較正の試験結果から, 信号増幅回路のアンプゲインを最適化することが目的である.

BBM では,  $\lambda = 600 - 900 \text{ nm}$  を測光するフォトメタを製作し, これは, JEM-GLIMS に搭載するフォトメタのうち, PH4 に対応し, PH4<sub>BBM</sub> と呼ぶ. これら BBM フォトメタを用いて感度と SNR を実測することを目的とし, 2008 年 12 月 22, 23 日に適当な初段増幅部のゲインを求めるため, 国立極地研究所の積分球を用い較正試験を実施した.

PH4 は検出器に PDD を用いている. PDD をフォトメタとして使用する際に, 増幅回路のゲインを決定する必要がある. ゲインを決定する際に, DC オフセットを低く抑えるため, 増幅回路の初段増幅部のゲインをなるべく高くする必要がある. しかし, 同時にローパスフィルタとしてカットオフ周波数  $f = 1/(2\pi R_s)$  が, ゲインを決めるシャント抵抗値  $R_s$  に依存し, ゲインを高くするほど, 低い周波数にシフトする.

そのため, 初段増幅部のゲインの適正值を求める必要があった.

本試験では, 初段増幅部の等価回路 (図 4.10) を用いた試験用基板製作し, 用いた. 初段増幅部のゲインの値は, 回路中のシャント抵抗 (図中矢印 R) の抵抗値になる. シャント抵抗値を変化させ, 各抵抗値において, PDD への入射光量を変化させ, 出力電圧とノイズ電圧を計測し, SNR を求め, ゲインの値を求める. 試験に用いた機材を表 4.2 に示す. 試験環境は 4.1.1 と同様である.

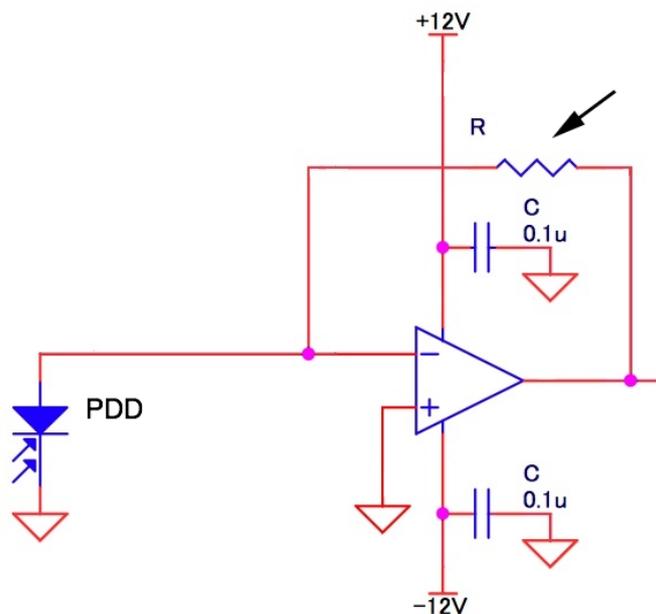


図 4.10 増幅回路の初段増幅部の等価回路. 図中矢印部の抵抗がシャント抵抗.

シャント抵抗値が  $10 \text{ M}\Omega$ , つまりゲインが  $10 \text{ M}$  の結果を図 4.11 に, シャント抵抗値が  $30 \text{ M}\Omega$ ,

表 4.2 PH4 較正試験使用機材.

PH4 <sub>BBM</sub>	PDD (S1227-1010BQ) 試験用基板 フィルタ (透過波長域 : 600 - 800 nm) レンズ無
機材	積分球標準光源 (OL462) 出力可能波長域 : 300 - 1000 nm ハロゲンタングステン電球 (150 W) 定電圧電源 デジタルオシロスコープ テスター (電流計)

つまりゲインが 30 M の結果を図 4.12 に示す. PH4 の試験では, フォトメタへの入射光量が  $1.0 \times 10^{-5}$  において SNR が 10 となることが要求基準である.

図 4.11 に示す通り, ゲイン = 10 M では, SNR が 10 となる光量が,  $5.2 \times 10^{-4}$  となり, 要求基準を満足していない. 図 4.12 に示す通り, ゲイン = 30 M では, SNR が 10 となる光量が,  $6.1 \times 10^{-6}$  となり要求基準に近い値となっている. これらの結果から, 初段増幅部のゲインは 10 M から 30 M の間が適当であると示すことができた. この値は TARANIS 衛星の高度 700 km での予想入射光量の場合であり, JEM-GLIMS の高度 400 km では入射光量が TARANIS 衛星に比べ約 4 倍に増加することが考えられる. これは, 入射光量が光源からの距離の 2 乗に反比例するためである. そのため, JEM-GLIMS では試験結果の  $10 \times 10^6$  から  $30 \times 10^6$  の 1/4 のゲインである  $5 \times 10^6$  程度となる.

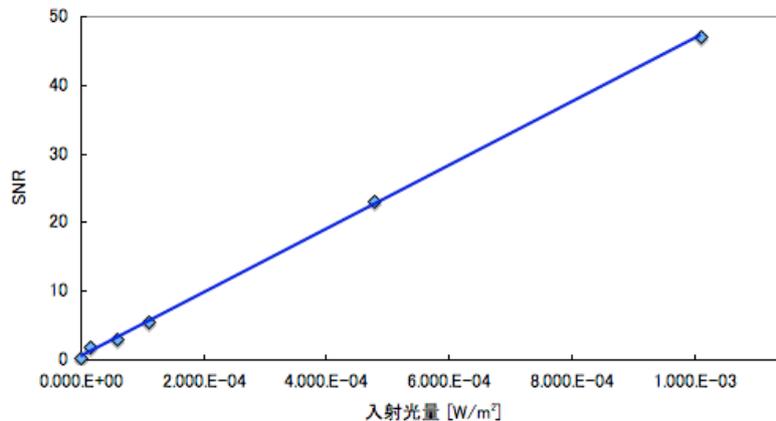


図 4.11 フォトメタへの入射光量を変化させた時の入射光量と SNR との関係を示す測定結果. シャント抵抗値は 10 MΩ, PH4<sub>BBM</sub> を用いた測定結果.

PH4 の較正試験では初段増幅部のゲインの適正值の範囲を得ることができた.

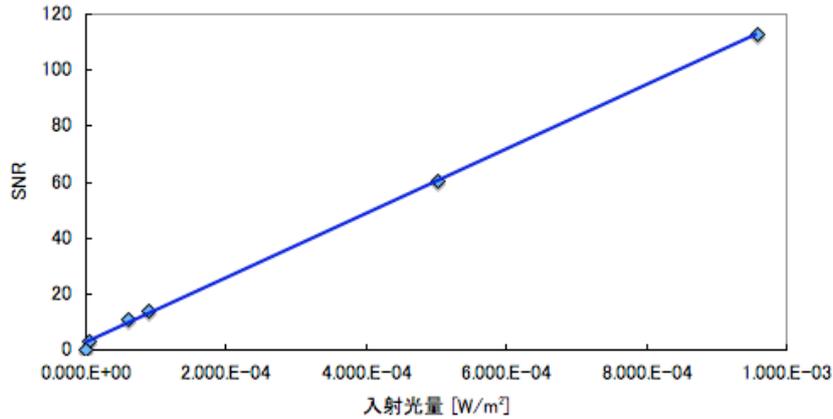


図 4.12 フォトメタへの入射光量を変化させた時の入射光量と SNR との関係を示す測定結果。シャント抵抗値は 30 MΩ, PH4<sub>BBM</sub> を用いた測定結果。

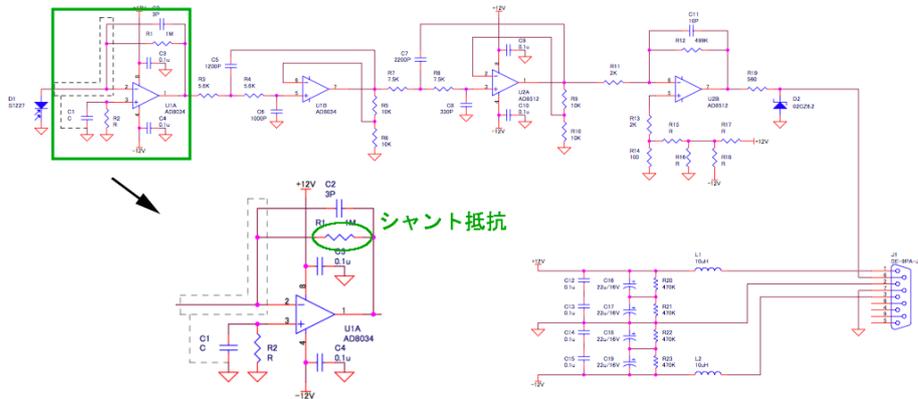


図 4.13 BBM での PH4 の信号増幅回路。

BBM での PH4 用信号増幅回路は図 4.13 であった。PFM での PH 4 用信号増幅回路を図 4.14 に示す。BBM でのシャント抵抗の抵抗値は  $1 \times 10^6$  であったが、PFM では、 $499 \times 10^3$ ,  $1 \times 10^6$ ,  $2.49 \times 10^6$ , 及び  $4.99 \times 10^6$  に変更している。また、ノイズを軽減する目的でカットオフ周波数 10 kHz のローパスフィルタが含まれている。PH4 のゲインは JEM-GLIMS の高度を考慮した値になっている。

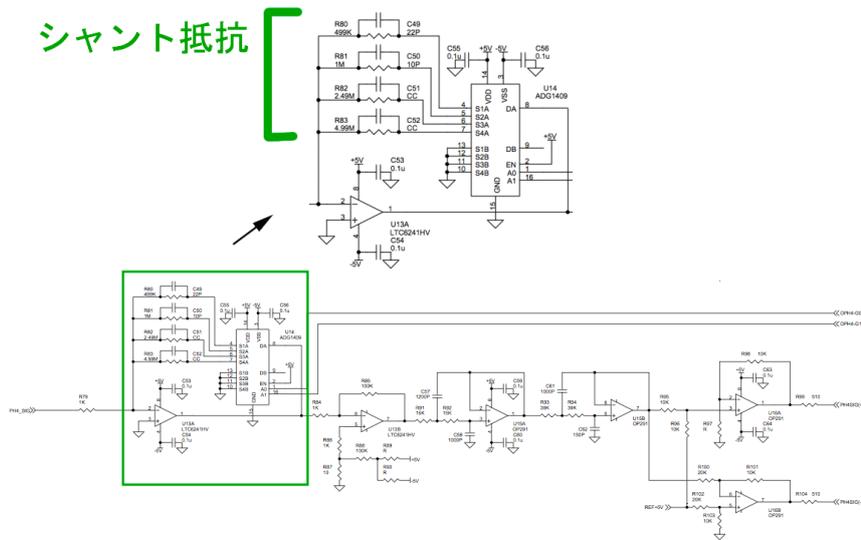


図 4.14 PFM での PH4 の信号増幅回路.

## 4.2 出力ドリフト特性試験

フォトメタが観測開始した直後から、観測終了する間のフォトメタの感度変化、及び飛翔体の周回毎の感度変化があれば、これを補正しなければならない。補正を行なうには、フォトメタの絶対測光精度と相対安定精度のデータが必要である。また、この各精度が要求仕様を満たしているか検証する必要がある。

フォトメタの絶対測光精度と相対安定精度を求め、HV ユニット制御用電源投入時からの出力ドリフト特性を得るため、PH2<sub>BBM</sub>、PH3<sub>BBM</sub> を用いて、2008年8月28日に、北海道大学にて出力ドリフト特性試験を実施した。

ISSの1周回は約90分である。昼45分、夜45分として、フォトメタの電源を45分間ON、その後45分間OFFとする。これを1サイクルとし、5サイクル行い、出力を測定し、絶対測光精度と相対安定精度を求める。光源の出力は一定にし、高圧は600Vで行なった。表4.3に試験に使用した機材を、図4.15に試験環境の写真を示す。光源にはLEDライトを箱に入れて、白紙で覆い一様光源にしたものを用いた。図4.15のように、光源には電流計を接続し、定電圧電源から電源を供給する。光源から、~217cmほど離れた位置にフォトメタを設置し、定電圧電源を用いて、アンプ部とHVユニットに電源を供給する。フォトメタからの出力は、オシロスコープで計測する。夜側45分の開始時から、以下の手順にて試験を実施した。

- (1) アンプ部、HV ユニット制御用電源の電圧を一定に設定しておく。
- (2) 光源用電源の電圧を一定に設定しておく。
- (3) 部屋を消灯し、照明は光源のみにする。
- (4) 夜側開始時にアンプ部、HV ユニット制御用に電源を投入し、フォトメタで観測を開始する。
- (5) オシロスコープをDC結合に設定し、フォトメタ出力波形を表示させ、スナップショットにて直流成分の平均値を読む。これを3回くり返し、その平均値を出力電圧値とする ( $V_{sig}$ )。
- (6) オシロスコープをAC結合に設定し、フォトメタ出力波形を表示させ、スナップショットにて交流成分の実効値を読みとる。これを10回くり返し、その平均値をノイズ電圧値とする ( $V_{noise}$ )。
- (7) 光源に接続されている電流計から電流値を読み取る。
- (8) (5)、(6)、(7)の手順を5分毎に行なう。
- (9) 夜側開始から45分後にアンプ部、HV ユニット制御用電源の電源を落とす。
- (10) 昼側を模して部屋の照明を点灯させる。
- (11) 45分間待機し、(3)の手順から繰り返す。
- (12) (3)から(11)を5サイクル繰り返す。

出力電圧の経過時間最終安定値 ( $V_{finish}$ ) と電源投入時の出力電圧値 ( $V_{start}$ ) を計測し、絶対測光精

表 4.3 出力ドリフト特性試験機材.

PH2 <sub>BBM</sub>	PMT R7400U-06 アンプ部, HV ユニット実装小基板 レンズ (有効口径 2 mm, 視野 57°) フィルタ無
PH3 <sub>BBM</sub>	PMT R7400U-20 アンプ部, HV ユニット実装小基板 レンズ (有効口径 7.2 mm) フィルタ無
機材	定電圧電源, テスター デジタルオシロスコープ, 光源

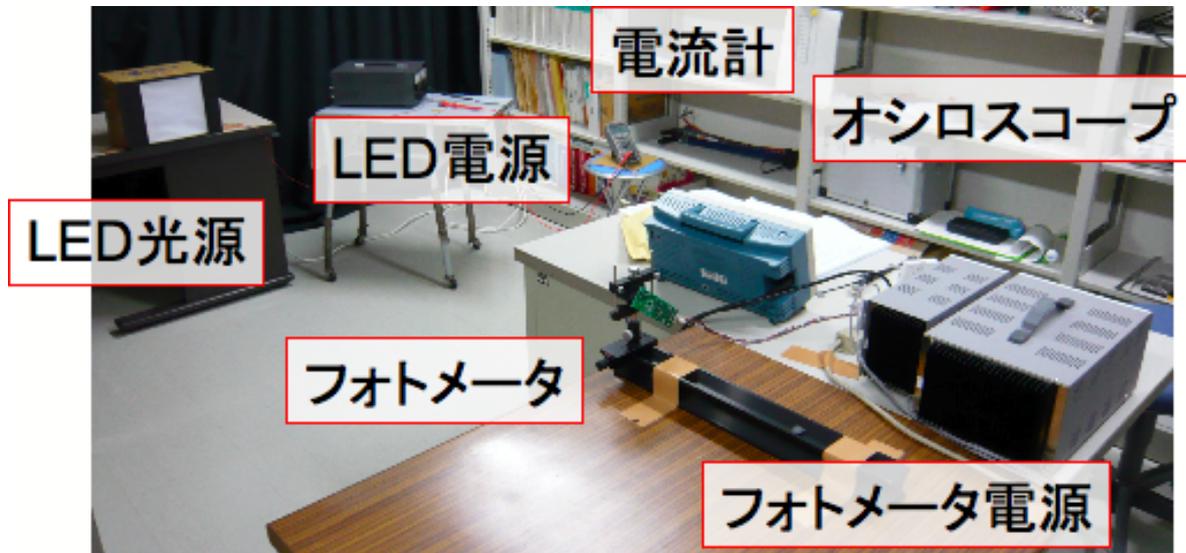


図 4.15 出力ドリフト特性試験実験環境の写真.

度 ( $S_{absolute}$ ) を式 4.3 から求める.

$$S_{absolute} = (V_{start} - V_{finish}) / V_{finish} \quad (4.3)$$

一方, 各サイクルの  $V_{finish}$  の差を  $V_{finish}$  の平均値で割った値を相対安定精度とする.

図 4.16, 4.17 に PH2<sub>BBM</sub>, PH3<sub>BBM</sub> の出力ドリフト特性試験結果を示す. 電源投入時から 5 分程度は出力の低下が見られる. これが絶対測光精度である. また, サイクルでの最終安定値の相違が相対安定精度である. 表 3.1 に示す通り, この試験における要求基準は, 絶対測光精度が 10 % 以内であり, 相対安定精度が 5 % 以内である. 図 4.16 より, PH2<sub>BBM</sub> では, 絶対測光精度 ~ 5.25%, 相対安定精度 ~ 0.22% であった. 図 4.17 より, PH3<sub>BBM</sub> では, 絶対測光精度 ~ 11.79%, 相対安定精度 ~ 2.46% であった. 出力ドリフト特性試験では, PH2<sub>BBM</sub>, PH3<sub>BBM</sub> のどちらも要求基準をほぼ満た

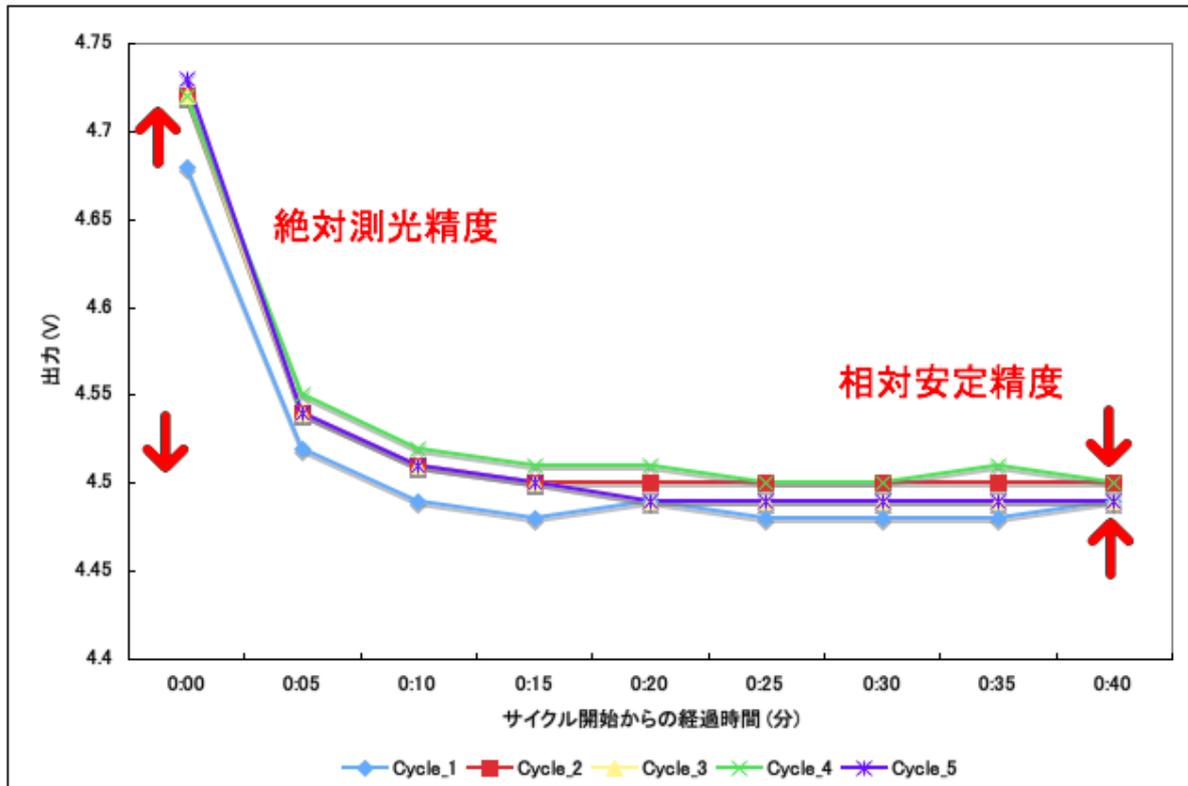


図 4.16 電源投入時からの経過時間と出力電圧の関係を示す測定結果. PH2<sub>BBM</sub> を用いた測定結果. 青線, 赤線, 黄線, 緑線, 紫線がそれぞれ, 1, 2, 3, 4, 5 サイクル目の測定結果を示す.

している結果が得られた.

出力ドリフト特性試験によって, BBM における 高圧投入直後の出力ドリフト特性が得られた. PFM は BBM とは増幅回路が異なるため, 打上げ前の較正試験時に再試験を実施し, 較正データをあらかじめ取得しておく必要がある. この較正データをもとに, 実際に打ち上げ後に取得したデータに対して, 補正をかける必要がある.

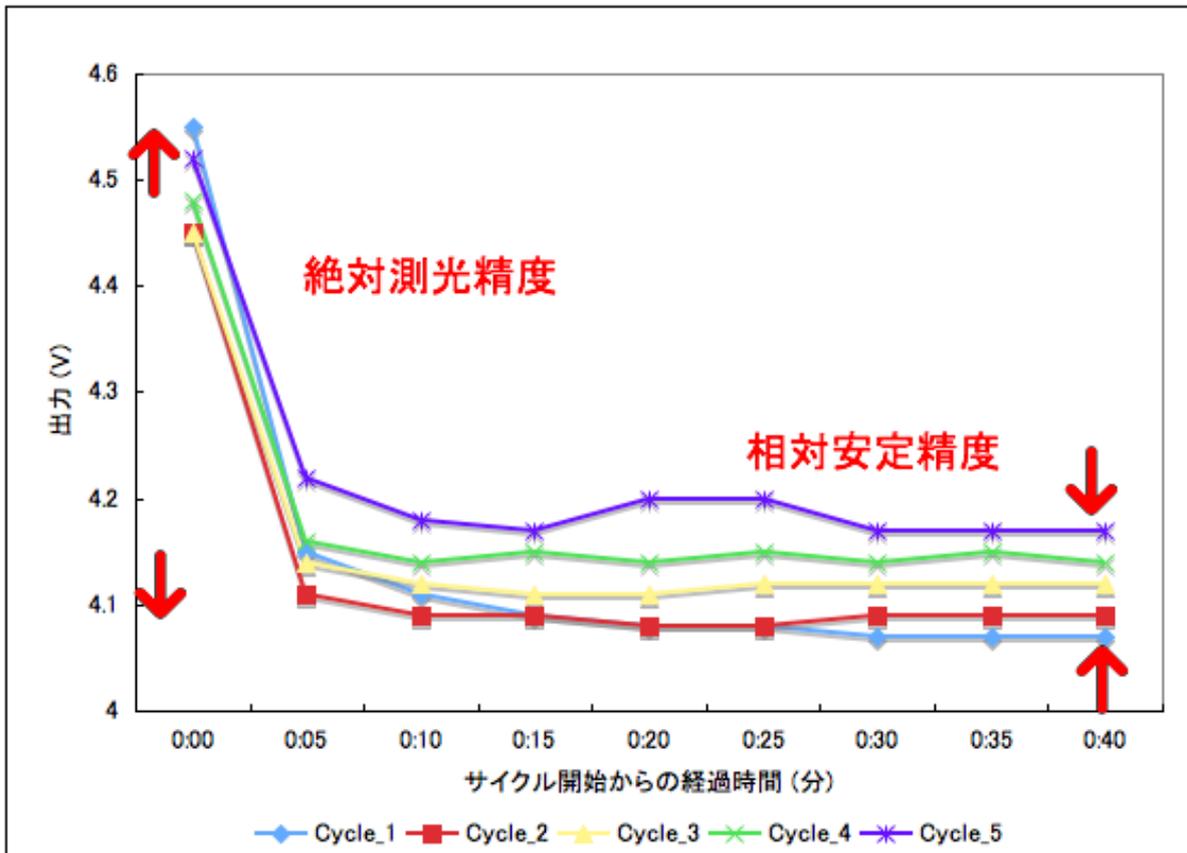


図 4.17 電源投入時からの経過時間と出力電圧の関係を示す測定結果. PH3<sub>BBM</sub> を用いた測定結果. 青線, 赤線, 黄線, 緑線, 紫線がそれぞれ, 1, 2, 3, 4, 5 サイクル目の測定結果を示す.

### 4.3 高温耐久試験

JEM-GLIMS の機器取り付け面の最大予想温度範囲は、 $-47 \sim +52^{\circ}\text{C}$  である。加えて、温度マージンが  $\pm 8^{\circ}\text{C}$  あるので、衛星バス部からミッション機器への機器動作要求許容温度範囲は、 $-55 \sim +60^{\circ}\text{C}$  となる。PMT 光電面の保障温度は  $+50^{\circ}\text{C}$  までであり、この温度を越えると、光電面金属薄膜が再蒸発してしまう恐れがある。

このため、PMT に熱を伝えない様にする熱対策を行なう必要があった。熱対策として、以下の2項目を実施した。

- PMT の高温耐久試験

2009年9月16日に JEM-GLIMS 機器に要求される機器動作上限温度である  $+60^{\circ}\text{C}$  における PMT の動作、SNR、及び耐久性を検証するため、槽内の温度を設定温度に保つ恒温槽を用いて高温耐久試験を実施した。

- フォトメタの断熱対策

フォトメタの熱モデルを東北大学工学部の協力により Thermal Desktop ソフトウェアを用いて作成した。この熱モデルを用いて機器取り付け面の温度が  $+60^{\circ}\text{C}$  の場合における、フォトメタ内部の温度構造を解析した。PMT に熱が伝導しない様により断熱性を高めるため、機器取り付け面とフォトメタ筐体の接合部を単純にアルミニウム材質を結合させるのではなく、ワッシャ、筐体の底面、及び鏡筒部と検出器部の接合部をガラスエポキシに変更する。同時に、放熱面を熱制御ミラー (OSR : Optical Solar Reflector) に変更し、JEM-GLIMS 内部側のフォトメタ筐体を多層断熱材 (MLI: Multi Layer Insulator) にて覆い、JEM-GLIMS の他機器からの熱輻射を軽減させる。

まず、PH2<sub>BBM</sub>、PH3<sub>BBM</sub> を用いた高温耐久試験について述べる。本試験では、株式会社エーディーの恒温槽を使用させて頂いた。SNR については、PMT の陽極暗電流が温度上昇に比例して増加するため、SNR が低下することが予想される。

本試験ではレンズ及びフィルタは使用せず、PMT とアンプ部及び HV ユニットが実装された小基板のみを使用し、機材には、定電圧電源、テスター、オシロスコープ、温度センサを用いた。温度センサの3つの熱電対は、PMT 側面、高圧電源素子、及び恒温槽内に設置し、PMT、高圧電源素子、及び恒温槽内の温度を計測した。光源には、黒い厚紙の小箱に自家用車用電球を内蔵したものを製作し、使用した。光源の電源には、定電圧電源を用いて、光源の出力を一定とした。光源を恒温槽の窓外側に取付け、光源以外の光の入射を防ぐため、黒模造紙にて遮光した。定電圧電源にて、フォトメタ小基板と HV ユニットに電源を供給し、オシロスコープにてフォトメタの出力を読み取る。試験に用いた機材を表 4.4 にまとめる。また、機器のセットアップ状況を示すブロックダイアグラムを図 4.18 に示し、熱電対の取付けの様子を表す写真を図 4.19 に示す。恒温槽の温度設定は、 $-30, -20, -10, 0, +10, +20, +25, +30, +35, +40, +45, +50, +55, +60^{\circ}\text{C}$

とし、1 時間毎に手動で切替えた。具体的な試験の手順を以下に示す。

- (1) 恒温室を  $-20^{\circ}\text{C}$  に設定。
- (2) PMT 及び HV ユニットの温度が安定するまで待つ。
- (3) 温度の安定後、アンプ部, HV ユニットの電源を投入する。
- (4) オシロスコープを DC 結合に設定し、フォトメタ出力波形を表示させ、スナップショットにて直流成分の平均値を読む。これを 3 回くり返し、その平均値を出力電圧値とする ( $V_{sig.}$ )。
- (5) オシロスコープを AC 結合に設定し、フォトメタ出力波形を表示させ、スナップショットにて交流成分の実効値を読みとる。これを 10 回くり返し、その平均値をノイズ電圧値とする ( $V_{noise}$ )。
- (6) 光源電流値を測定。
- (7) 光源点灯。光源が安定するまで待つ。
- (8) (4) から (6) をくり返す。
- (9) (2) から (9) の手順を、指定の温度においてくり返し実施する。
- (10) 恒温槽の温度を  $+25^{\circ}\text{C}$  に変更する。
- (11) (2) から (9) をくり返し行なう。

本試験では、 $+25^{\circ}\text{C}$  を基準とし、 $+60^{\circ}\text{C}$  にした後に、 $+25^{\circ}\text{C}$  で再度計測を行い、高温による不可逆変化が生じてないかチェックを行なった。また、試験後に PMT の外観を目視し、破損の有無を確認した。各温度におけるフォトメタの出力電圧とノイズ電圧を計測し、SNR を導出した。

表 4.4 高温耐久試験に用いた機材。

PH2 <sub>BBM</sub>	PMT R7400U-06 アンプ部, HV ユニット実装小基板 レンズ, フィルタ無
PH3 <sub>BBM</sub>	PMT R7400U-20 アンプ部, HV ユニット実装小基板 レンズ, フィルタ無
機材	恒温槽 定電圧電源, デジタルオシロスコープ 温度センサ (熱電対), テスター (電流計) 光源 (電球)

入射光量を一定とした場合の PMT の温度と出力電圧との関係および SNR との関係を、それぞれ図 4.20, 4.21 に示す。図 4.20 が示す通り、周囲温度が  $+30^{\circ}\text{C}$  を越えると、温度上昇と共に出力の低

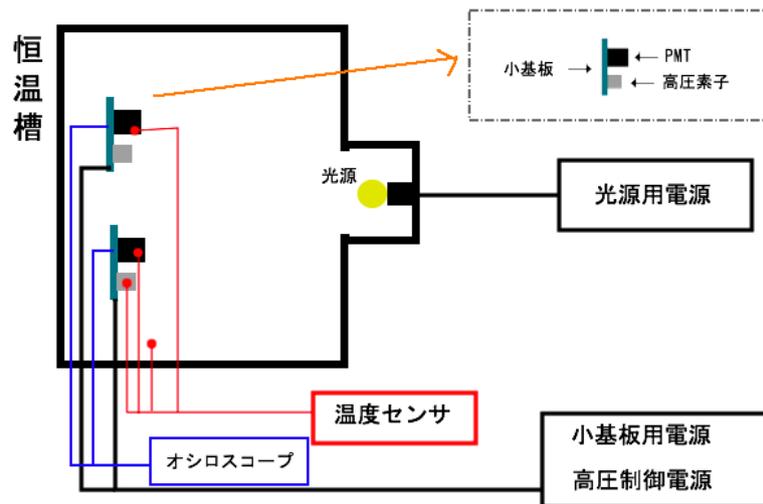


図 4.18 高温耐久試験環境の概念図.

下が見られた.  $+60^{\circ}\text{C}$  にする前後で,  $+25^{\circ}\text{C}$  での出力は, 2.23 と 2.25 とほぼ変化がない結果であった. 図 4.21 が示すとおり, SNR は温度による変化が顕著でない結果となった. PMT の温度が  $+60^{\circ}\text{C}$  に達する前後で, それぞれ  $+25^{\circ}\text{C}$  において測定した SNR も, 237 と 232 とほぼ変化がない結果であった. 目視による PMT の確認を行なったが, 破損は見られたなかった.  $\text{PH2}_{\text{BBM}}$  についても同様であった. この結果から, フォトメタの温度が万が一  $+60^{\circ}\text{C}$  に達しても, 破損する可能性が低いことが示された.

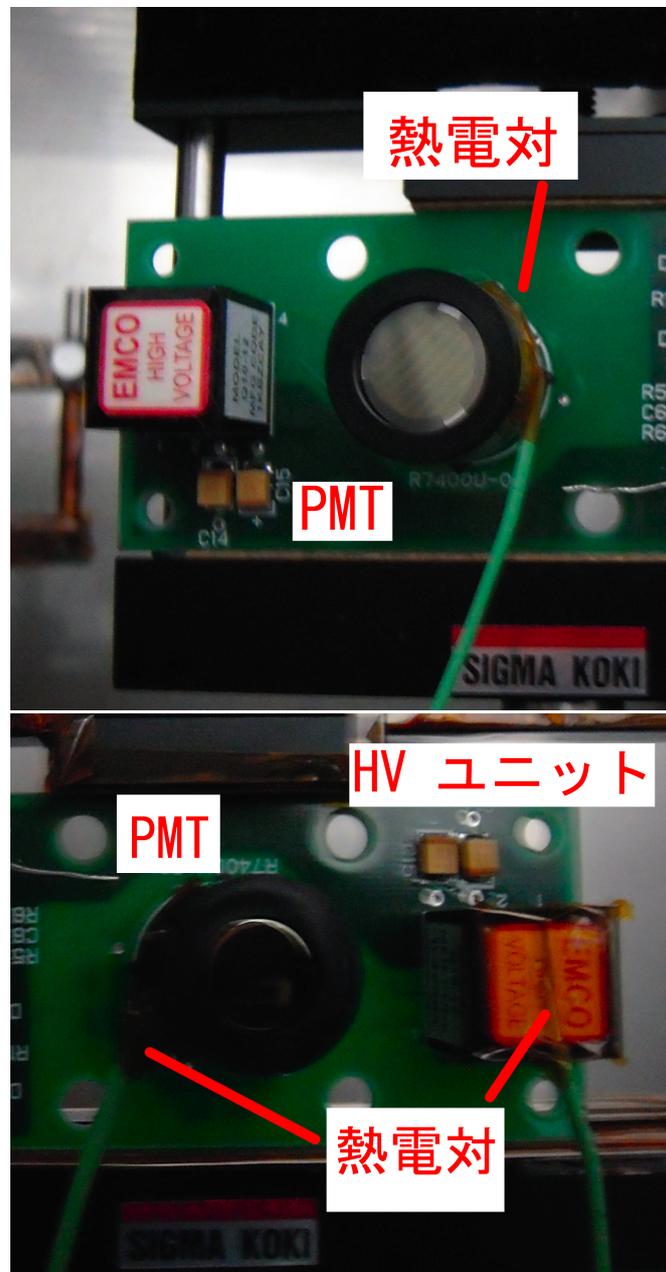


図 4.19 PMT と HV ユニットへの熱電対取付けの様子を表した写真.

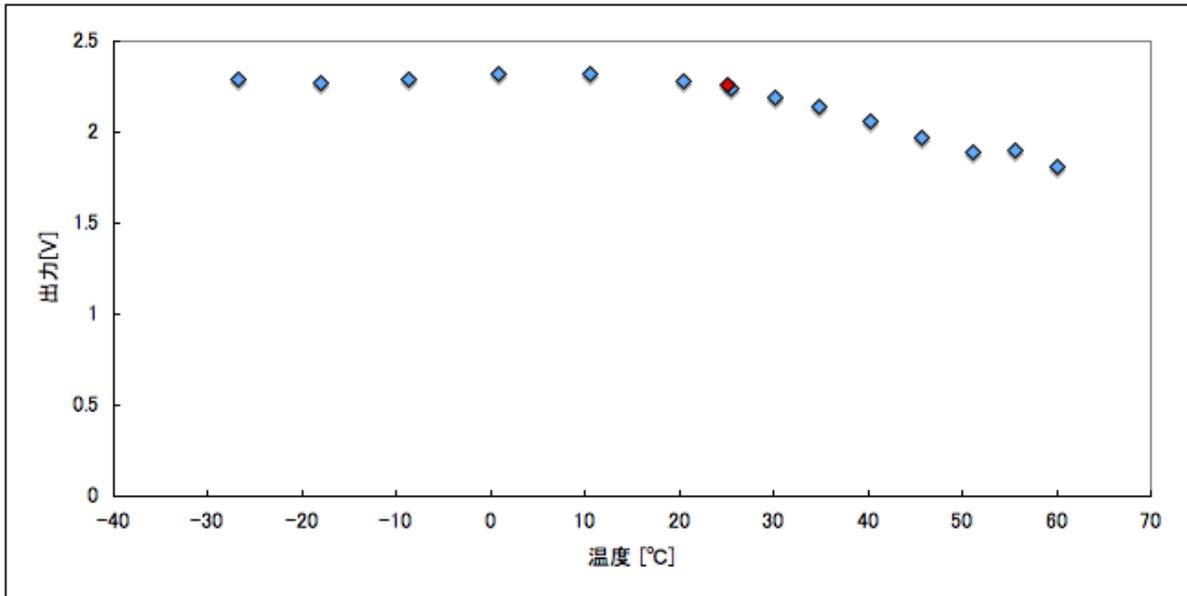


図 4.20 フォトメタへの入射光量を一定にした場合の, PMT の温度と出力電圧の関係を示す測定結果. 赤点は +60 °C での測定後, 再度 25 °C での測定した結果. PH3<sub>BBM</sub> を用いた測定結果.

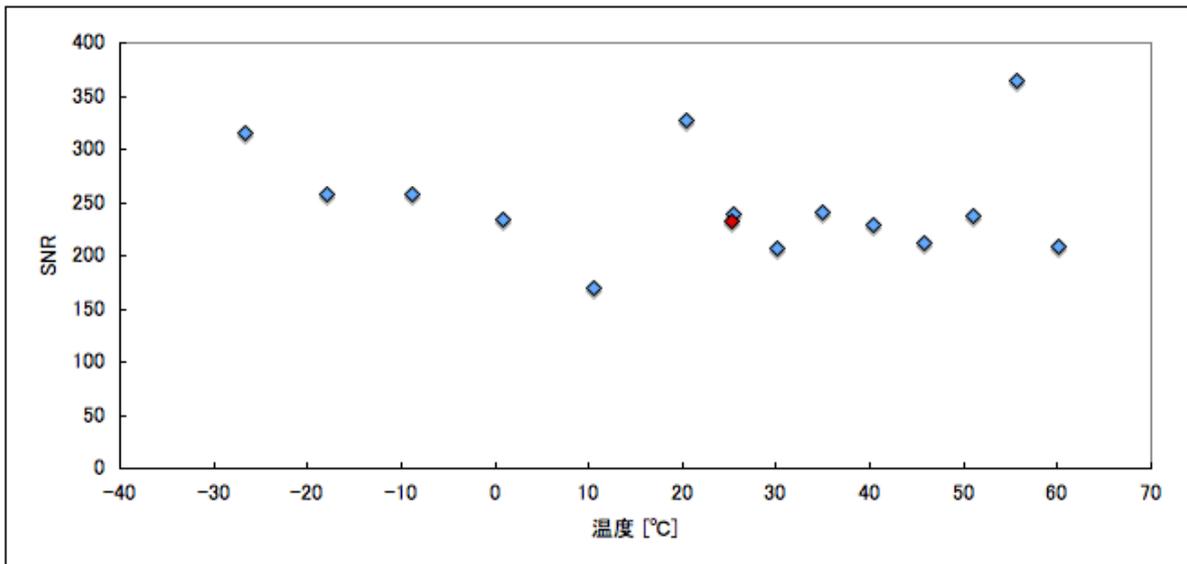


図 4.21 フォトメタへの入射光量を一定にした場合の, PMT の温度と SNR の関係を示す測定結果. 赤点は +60 °C での測定後, 再度 25 °C での測定した結果. PH3<sub>BBM</sub> を用いた測定結果.

### 4.3.1 断熱対策

次に断熱対策として東北大学の工学部のグループが行なったフォトメタの熱解析について述べる。まず、フォトメタの地球側を向いている面(放熱面)のみで、熱の流出入があり、それ以外は断熱されているという最も単純化したモデルで熱解析を行なった。その結果、機器取付け面とフォトメタ筐体の接合部で十分な断熱をしなければ、フォトメタの温度が許容温度範囲内にならないことが判明した。そのため、フォトメタの多節点熱モデルを Thermal Desktop ソフトウェアを用いて作成し、より単純な熱解析を実行した。機器取付け面とフォトメタ筐体との接合部にガラスエポキシワッシャのみを挟んだ場合、機器取付け面とフォトメタ筐体の接触面にガラスエポキシプレートのみを挟んだ場合をそれぞれ解析した。熱解析のモデルの条件は、フォトメタの全質量は約 2 kg、ノード数は 210、発熱量はメイン基板 1.54 W 及び小基板 1 つにつき 0.06 W、放熱面は白色ペイントである。機器取付け面の温度は高温条件で +60 °C、低温条件で -55 °C、地球温度は高温条件で +6 °C、低温条件で -14.9 °C としている。また、フォトメタ筐体外部を多層断熱材 (MLI : Multi Layer Insulator) で覆うことを想定している。フォトメタの熱吸収率及び放射率を表 4.5 に示す。また、解析は地球模擬の箱で放熱面を覆い熱収支を計算している。軌道上の細かな熱収支は考慮していない。地球の温度は、筐体と完全断熱された放熱面が日陰と日照を繰り返した場合の簡易熱解析結果である高温条件で +6 °C、低温条件で -14.9 °C の値を用いている。

モデルの図を図 4.22 に示す。青色部分が機器取付け面、灰色部分が筐体、緑色部分が基板、及び赤・黄・黄緑・紫色部分は鏡筒である。

この解析では、ガラスエポキシワッシャ及びプレートの条件を表 4.6 に示す値を用いた。ワッシャは外直径 9 mm、内直径 5.5 mm が 11 本の場合について解析した。また、基板の材質は Cu 4.4 %、ガラスエポキシ 95.6 % を考えており、熱伝導率は 17.7 W/m/K である。

熱解析の結果示された PMT の温度の時間変化を図 4.23 に示す。この結果、PMT の温度は、+20 °C から、800 分程度で約 +45 °C まで上昇し、平衡温度に達することが示された。得られた検出器の平衡温度を表 4.7 に示す。厚さ 5 mm のガラスエポキシワッシャを挿入した場合には、機器取付け面の温度が +60 °C であっても PMT の温度は +45.5 °C に収まることが示された。

表 4.5 フォトメタの熱吸収率及び放射率。

	表面	吸収率	放射率
鏡筒内側	黒アルマイト	0.14	0.84
バッフル内側	鏡面	0.005	0.005
鏡筒外側及びバッフル外側	アルミ無垢	0.16	0.035
ガラスエポキシ	ガラスエポキシ	0.8	0.8
筐体内側	アロジン 1000 処理アルミ合金	0.17	0.1
筐体外側	MLI	0.05	0.05

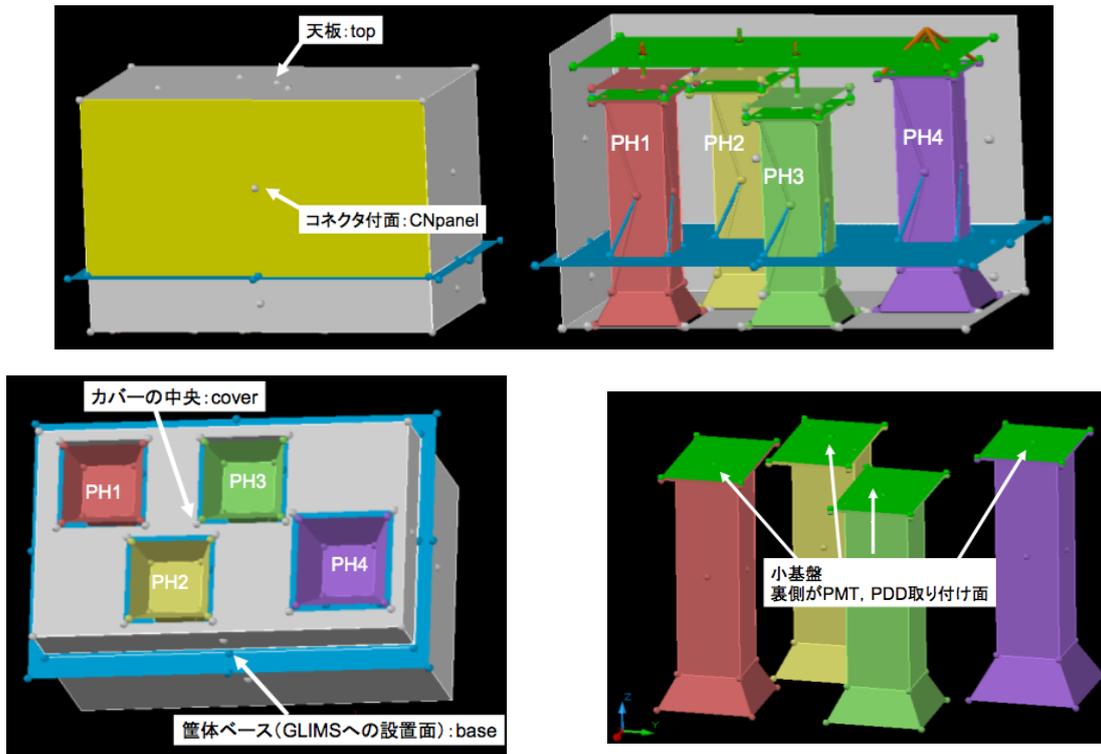


図 4.22 熱解析のモデルの図.

表 4.6 ガラスエポキシワッシャ及びプレートの条件.

	ワッシャ	プレート
ガラスエポキシ熱伝導率	0.000471 W/mm/K	
機器取付け面との接触面積	440 mm <sup>2</sup>	5600 mm <sup>2</sup>
厚さ	5 mm	5 mm

表 4.7 熱解析の結果得られた検出器の温度 [°C].

	ワッシャのみ		プレートのみ	
	高温条件	低温条件	高温条件	低温条件
PH1 PMT	45.5	-17.3	57.2	-48.3
PH2 PMT	45.5	-17.3	57.2	-48.3
PH3 PMT	45.5	-17.3	57.2	-48.4
PH4 PDD	46.3	-16.7	57.9	-47.6

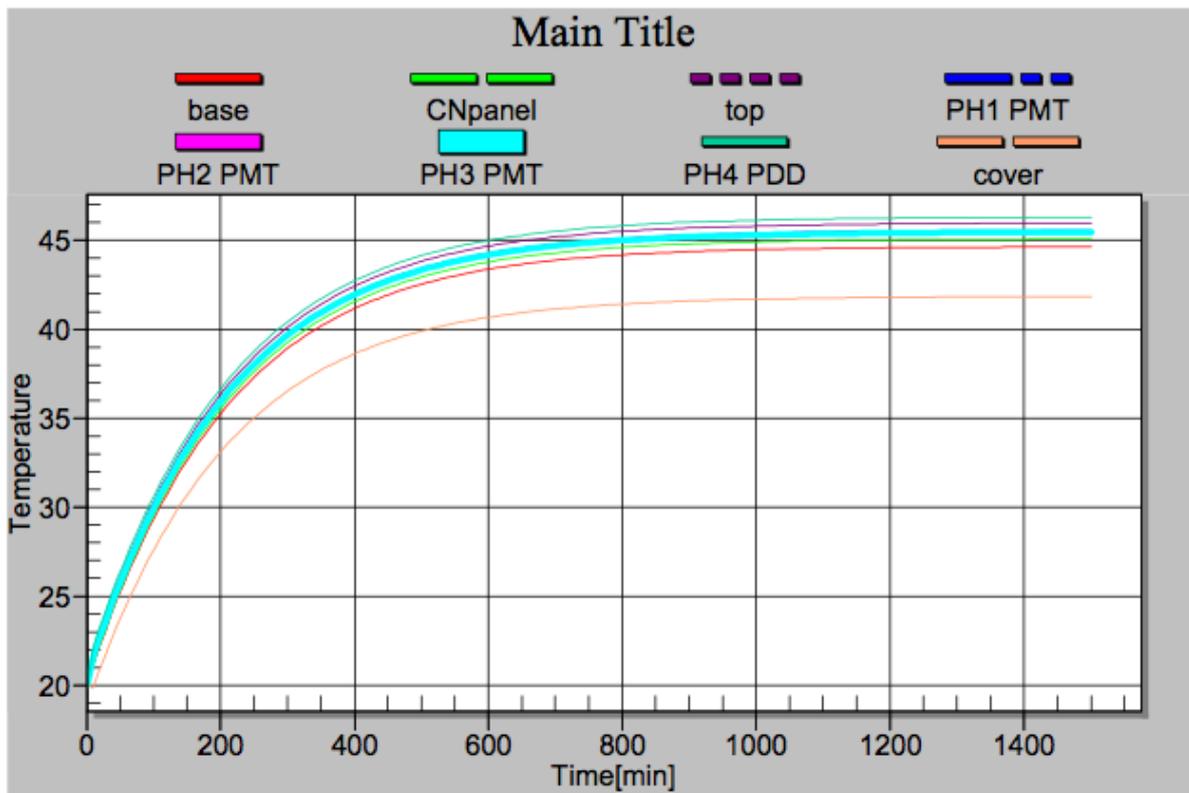


図 4.23 熱解析の結果示された検出器とフォトメタ筐体温度の時間変化を示す図. base は筐体の底面であり, 機器取付け面に接している面である. top は筐体の天板, CNpanel はコネクタ付面, 及び cover は放熱面の中央である.

### 4.3.2 試験結果の構造への反映

熱モデル計算の結果 PMT への断熱性を向上させたフォトメタ構造図を図 4.24 に示す。PH1-4 が Unit 1 に、PH5-6 が Unit 2 にそれぞれ搭載される。矢印方向が天底方向である。Unit 1 の内部構造を図 4.25 に示す。図の下向きが天底方向となっている。内部には、PH1-4 の筐体がそれぞれ搭載されている。鏡筒の上端に検出器取付け面 (小基板) があり、筐体上部のエレクトロニクス基板と接続されている。

図 4.25 のようにフォトメタ筐体と機器取付け面との接合部を厚さ 5 mm のガラスエポキシワッシャにて固定し、さらに筐体の機器取付け面側に厚さ 5 mm のガラスエポキシプレート を挟み込み、熱絶縁させている。これに加え、放熱面を白色プレートもしくは OSR に変更し、MLI にて筐体を覆う予定である。

試験結果を反映した PFM における Unit 1 の設計図面を図 4.26 に示す。レンズは鏡筒と一体構造となったフランジ部をボルトにより固定する。レンズには検出器が搭載された小基板が取り付けられており、この小基板を鏡筒部にボルトで固定する。小基板からの信号はフレキシブルケーブルによりエレクトロニクス基板と電氣的にインターフェイスする。天底方向のカバーは、ISS 滞在クルーが船外活動時に安全を保てるようにする目的の有人安全対策ために取り付けられている。

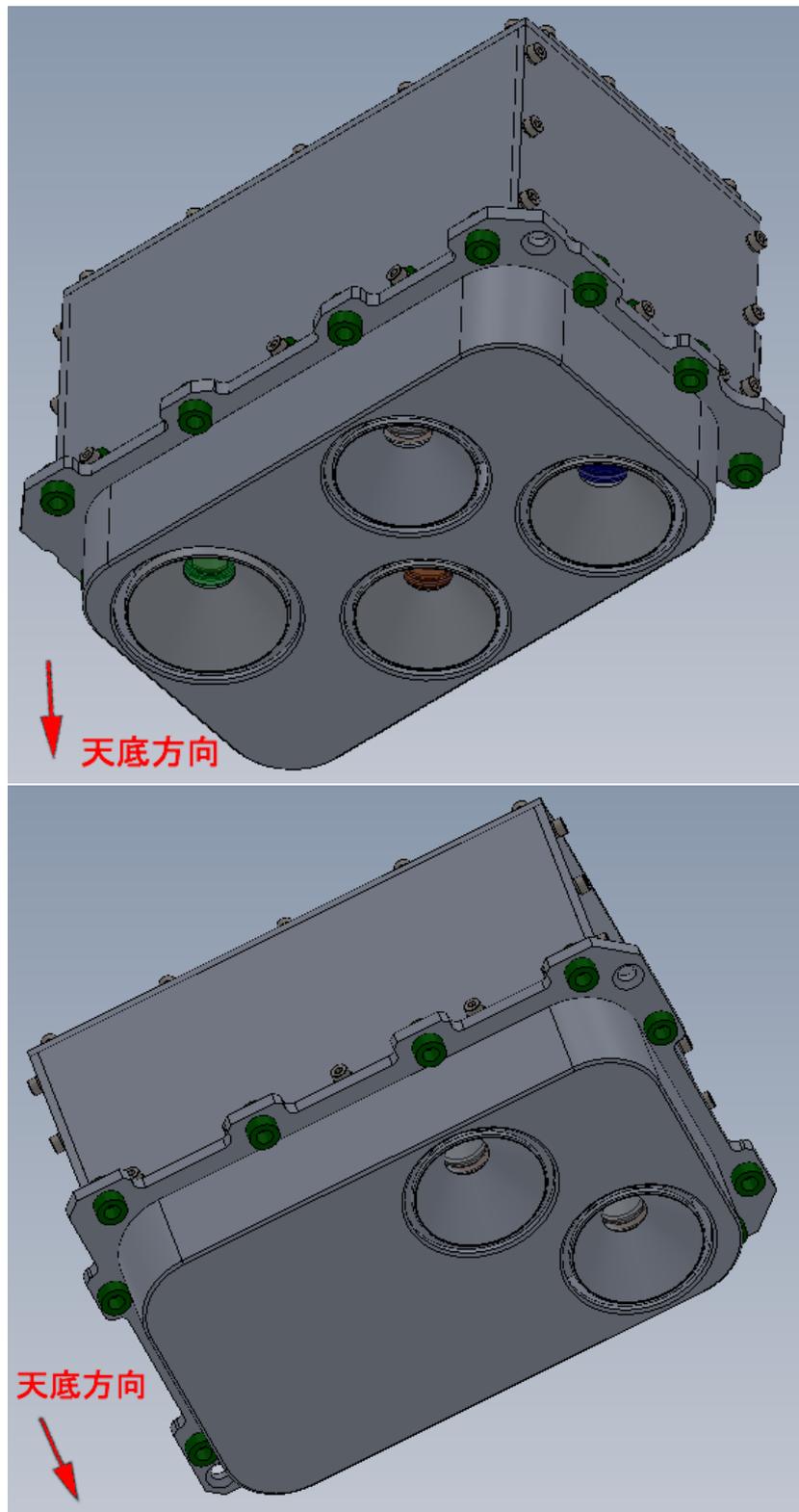


図 4.24 フォトメタの構造図. 上図が Unit 1, 下図が Unit 2 の構造図である. 矢印は天底方向を指している.

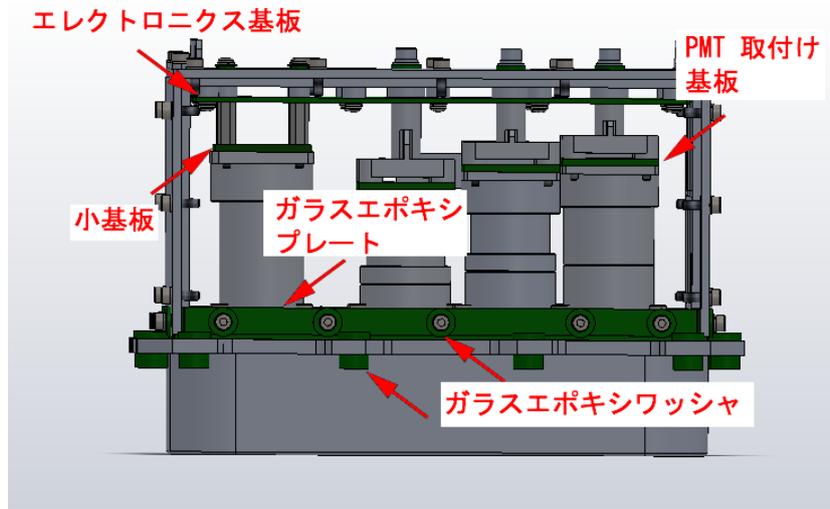


図 4.25 Unit 1 筐体の内部図. 矢印で示した緑色の部分がガラスエポキシ素材の部分.

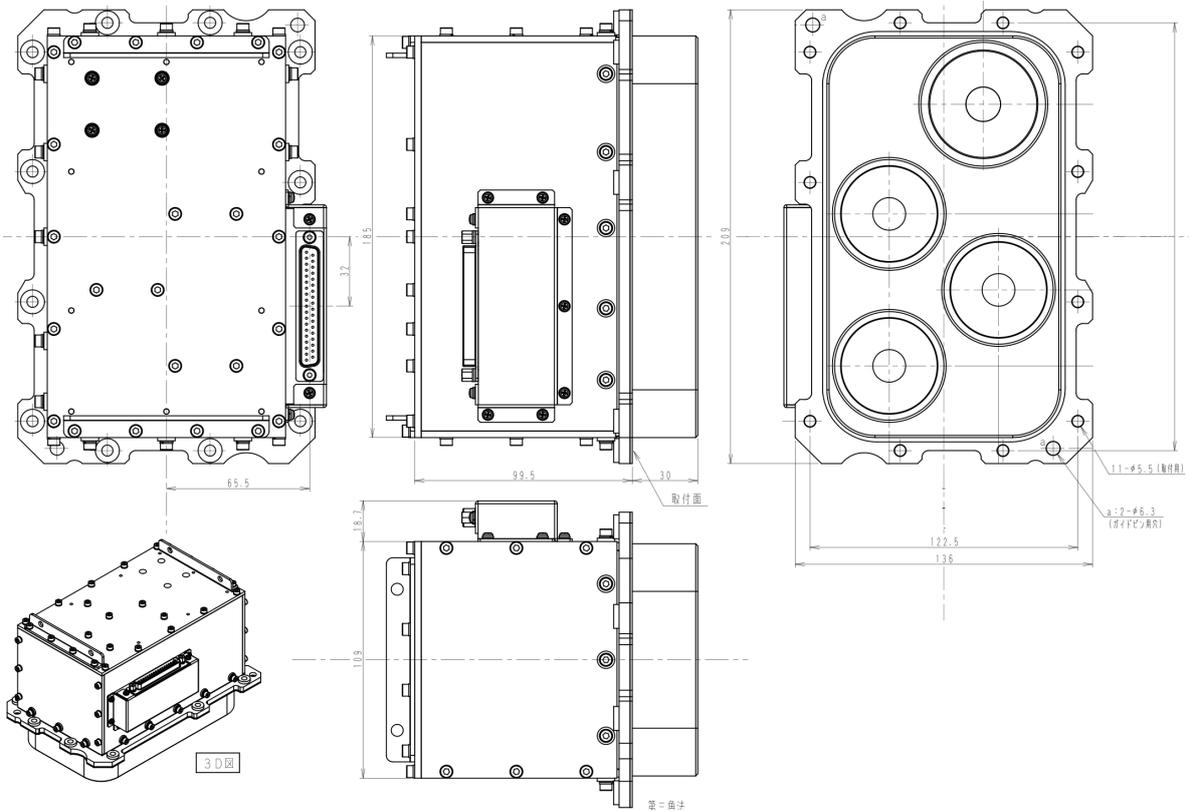


図 4.26 Unit 1 の設計図面. 値の単位は mm.

# 第 5 章 TARANIS 衛星搭載フォトメタ

## 5.1 要求仕様

JEM-GLIMS 搭載フォトメタの開発に先行して, TARANIS 衛星搭載用のフォトメタの開発は進めていた. 第 3 章, 第 4 章で述べたとおり, JEM-GIMS 搭載のフォトメタの仕様は, TARANIS 衛星搭載用フォトメタの仕様をベースとしており, 共通点は多い. しかし, JEM-GLIMS では ISS の JEM 曝露部に設置されるポート共有実験装置に, TARANIS 衛星では単独の衛星バスにそれぞれフォトメタが搭載される. このため, 軌道高度, バス部の仕様等が異なることから, それに応じてフォトメタ光学系, エレクトロニクス部, 筐体などの仕様が全く異なる. 以下, それらの詳細について述べる.

### 5.1.1 要求機能

#### (A) 雷放電, TLEs 発光の高時間分解能測光観測

雷放電および TLEs の過渡発光を, 高い時間分解能で絶対測光観測することが第一の要求機能である. 第 3 章でも述べたとおり, 雷放電帰還雷撃の発光の時定数は最小で  $200 \mu\text{s}$  程度であるので, 最低でもこれを 4 分割してサンプリングできる性能が必要である. このため, サンプリング周波数は  $20 \text{ kHz}$  としており, JEM-GLIMS と同様である. 分解能に関しても, JEM-GLIMS と同様に 12 bit の深さとしており,  $1 \text{ LSB (Least Significant Bit)} = 10 \text{ nW/m}^2$  という設計にしている.

#### (B) 高い動作安定性

TARANIS 衛星に搭載される理学観測機器は, フォトメタ以外に CCD カメラ, X 線/ガンマ線検出器, 電子計測器, 電場アンテナ, 磁場アンテナが搭載される. JEM-GLIMS と同様に, これらの観測機器のデータは連続的に取得されるのではなく, イベント・トリガ形式をとる. 全ての観測機器のなかでトリガ機能を有する機器は, フォトメタのみに限られる. このため, JEM-GLIMS 以上に高い動作安定性と高信頼性が要求される. TARANIS 衛星に搭載するフォトメタは 4 台であり, JEM-GLIMS 搭載フォトメタの PH1-PH4 と観測波長は同一である. それぞれに使用する光検出器も同一で, PH1, PH2: 光電子増倍管 (R7400-06), PH3: 光電子増倍管 (R7400-20), PH4: フォトダイオード (S1227-1010BQ) である. JEM-GLIMS と同様に高い動作安定性を確保するために, PH4 の光検出器のみ, 半導体素子であるフォトダイオードを用いる. 光電子増倍管は高電圧電源ユニット (HV ユニット) を必要とするため, HV ユニット自身の損傷や放電による破損などにより, PH1-PH3 の検出器が動作不能に

陥っても、PH4 だけは正常動作を維持するように、リスクを分散させる設計としている。

### 5.1.2 要求仕様

5.1.1 章に示すフォトメタへの要求機能を満足するために、TARANIS 衛星搭載フォトメタ (MCP/PH) は、4 台のフィルタ付きフォトメタで構成し、表 5.1 に示す帯域の測光観測を行う。MCP/PH は PH1 から PH4 までの識別 ID が振られている。PH1 は JEM-GLIMS 搭載 PH1 と同様に、 $N_2$  の LBH バンドの観測を行う。同様に、PH2, PH3 は  $N_2 2P(0,0)$ ,  $N_2 1P(3,1)$  の発光を観測する。また、PH4 は TGFs の親雷放電の検出を目的として、主に雷発光の  $N_2 1P$  を検出する。視野の要求は表 5.1 に示すとおりで、設計を共通化させる目的のために JEM-GLIMS 搭載フォトメタへの視野要求仕様を、TARANIS 衛星搭載フォトメタへの視野要求と同一としている。その他の TARANIS 衛星搭載フォトメタの要求仕様は、表 5.2 に示すとおりにまとめられる。

表 5.1 MCP/PH 構成.

	観測波長 [nm]	視野 [°]	検出器
PH1	150 - 280	42.7	PMT (R7400-06)
PH2	337 ± 5	42.7	PMT (R7400-06)
PH3	762 ± 5	42.7	PMT (R7400-20)
PH4	600 - 900	86.8	PDD (S1227-1010BQ)

表 5.2 フォトメタ要求仕様.

	PH1, 2, 3	PH4	
検出器	PMT	PDD	
アナログデジタル変換 (ADC)	12 bits		
最小輝度	10 nW/m <sup>2</sup>	1 μW/m <sup>2</sup>	(ADC 最下位ビットの分解能)
検出限界	100 nW/m <sup>2</sup>	10 μW/m <sup>2</sup>	(SNR = 10 or 10 ADC カウントにおいて)
最大輝度	10 μW/m <sup>2</sup>	1 mW/m <sup>2</sup>	
較正精度	± 30 %		
時間分解能	50 μs		(サンプリング周波数 20 kHz)
絶対時刻精度	10 μs 以下		

## 5.2 JEM-GLIMS 搭載フォトメタとの相違項目

5.1 章で述べたように、JEM-GLIMS 搭載フォトメタは ISS のポート共有実験装置に、TARANIS 衛星搭載フォトメタは小型衛星バスに搭載され、それらバス部の機械・熱環境が全く異なる。このた

め, JEM-GLIMS で進めた機械・電気・熱設計に関し, TARANIS 衛星用に修正する必要がある. さらに, それぞれの軌道高度が異なることから, フォトメタの光学系や信号増幅部に関して修正を行う必要がある. これらの点について以下に詳細を述べる.

### 5.2.1 光学系仕様

そもそも, PH1-PH3 の視野要求が  $42.7^\circ$ , PH4 の視野が  $86.8^\circ$  であることは, TARANIS 衛星搭載の CCD カメラとの視野共通性を持たせるために決められた. TARANIS 衛星搭載フォトメタの光学系の設計はテレセントリック屈折光学系であり, レンズ構成, F 値, 有効口径, フィルタ仕様, 鏡筒機械設計は, 基本的に JEM-GLIMS と全く共通である. また, バッフルに関する要求仕様も, もともと TARANIS 衛星搭載フォトメタに対するものであり, 基本的には JEM-GLIMS 搭載フォトメタと同一である. しかし, JEM-GLIMS 搭載フォトメタでは, ISS 特有の安全審査対策を施しており, 図 3.3 および図 3.4 に示すとおり, PH4 のバッフルの径を小さくし, かつ PH1 から PH4 の各バッフル先端のエッジ部分を材質の厚みの分だけ曲率をつけて加工することとしていた. しかし, TARANIS 衛星搭載用フォトメタでは, 図 5.1 に示すとおり, PH4 のバッフル径をもととの設計通り  $\phi 75$  としており, かつバッフルの先端はシャープエッジとしている.

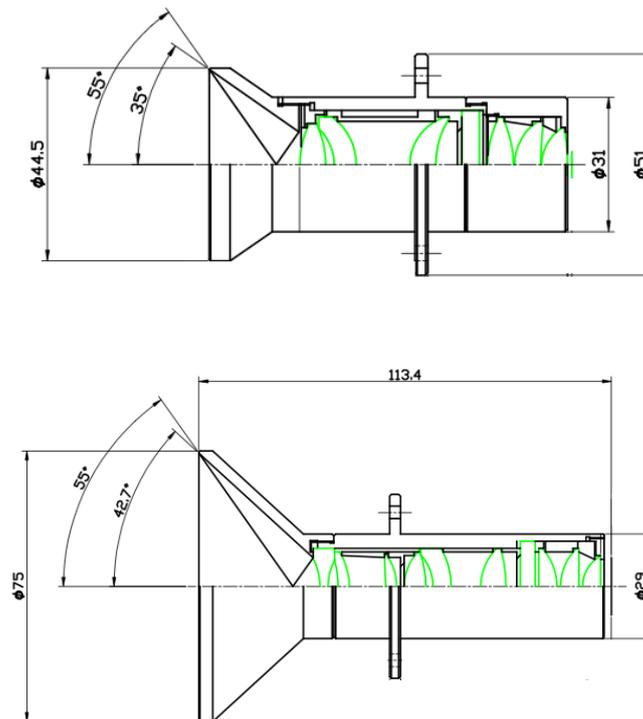


図 5.1 MCP/PH の鏡筒構造図. 上図は PH1-3 の鏡筒構造図, 下図は PH4 の鏡筒構造図.

### 5.2.2 アンブ部仕様

本研究で実施した BBM を用いた感度較正試験の結果をもとに, JEM-GLIMS 搭載用フォトメタの電流電圧変換アンプ, 電圧増幅アンプ, およびローパスフィルタからなるアンプ部の構成を決定した. TARANIS 衛星搭載フォトメタ用のアンプ部も基本構成は, JEM-GLIMS 用フォトメタアンプ部と同一とする. ただし, 軌道高度が ISS の場合は 400 km であり, TARANIS の場合は 700 km である. スプライト高度を 100 km と仮定すると, TARANIS 衛星位置で光学系に入射する光量は 1/4 に減少する. フォトメタの増幅率は, PMT に印加する HV 値を変更することによって 3 桁, 電流電圧変換アンプで 1 桁の, 合計 4 桁のダイナミックレンジがあるので, 光量が 1/4 になっても十分な感度で雷放電と TLEs を測光できると予測されるが, より十分な SNR を得るために, TARANIS 衛星搭載用に最適化したシャント抵抗値を選択する必要があるかを慎重に検討する必要がある.

### 5.2.3 機械・熱設計

JEM-GLIMS 搭載フォトメタでは, 鏡筒部が突き出ている面が構体と取付く機械設計となっている. しかし, TARANIS 衛星搭載フォトメタでは, それと反対側の面が衛星構体と取付く設計となっている. TARANIS 衛星搭載フォトメタの構造図を図 5.2 に示す. 構造解析ソフトウェア (Pro Engineering および NASTRAN) を用いた JEM-GLIMS 搭載用フォトメタの構造解析を実施しており, 十分な機械強度が確保されていることが確認されている. TARANIS 衛星搭載フォトメタに対しても同様の構造解析を実施し強度評価を行う予定であり, その結果をみて光学系取付け方法, および筐体設計の変更が必要かを検討する. JEM-GLIMS ではポート共有実験装置の温度範囲が  $-47^{\circ}\text{C}$  から  $+52^{\circ}\text{C}$  と規定されている. このため, フォトメタに特別な断熱設計を施さなければならなかった. しかし, TARANIS 衛星では, フォトメタが取り付く面の温度は  $-25^{\circ}\text{C}$  一定で制御されることになる. この温度は光検出器の補償温度範囲であり, 積極的な断熱対策は必要ないと考えている. しかし, 太陽や地球面からの熱輻射によってフォトメタ内部で温度勾配が発生し, 時間変化をするということは避ける必要がある. 温度勾配が時間変化すると, 光検出器の熱雑音レベルが時間と共に変化し, 10% の絶対測光精度を保証できなくなる可能性が高いからである. このため, フォトメタ全体を MLI にて覆う設計とする予定である.

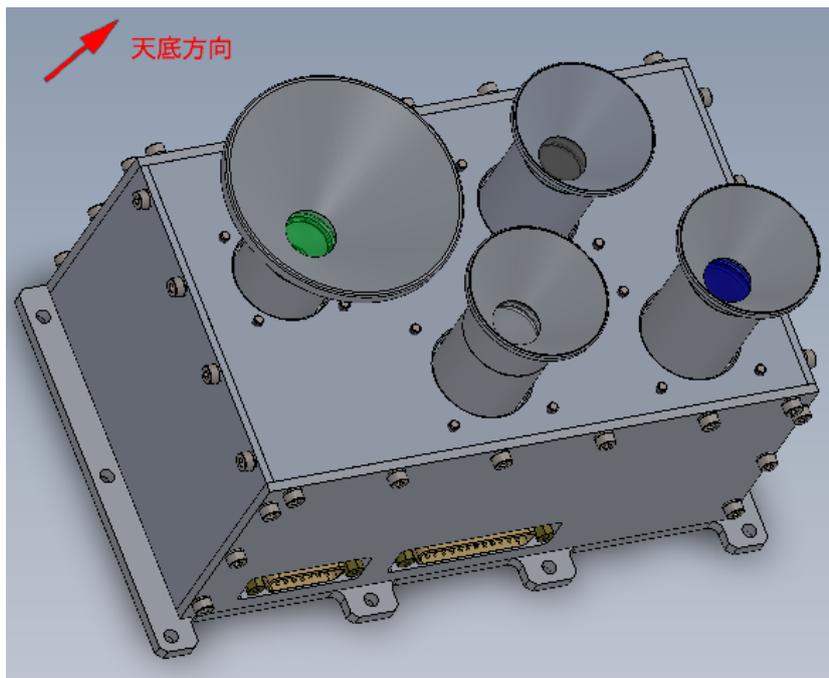


図 5.2 MCP/PH の構造図.

## 第 6 章 まとめ

スプライトの発生メカニズムについては、+CG に伴い雷雲上空で発生する下向きの準静電場により電子が加速され、高層大気の大気分子と衝突し励起発光させるという、準静電場モデルが提唱されているが、スプライトの発生条件が、未解決となっている。この点については、水平電流による電磁パルスが発生メカニズムに大きく寄与している可能性がある。この点を検証するには、雷放電水平電流の電波観測と衛星軌道上からスプライトの水平構造の観測が本質的である。さらに、TLEs は、発生領域での化学組成に影響を与えることが示唆されている。この影響が地球大気に与える影響を定量的に推定するには、TLEs の全球発生頻度分布が必要である。

一方、TGFs は RHESSI 衛星の観測により、6 年間で 820 イベントが検出され、普遍的に発生する現象であることが明らかになってきた。また、TGFs は、発生地域が雷活動が高い地域と相関があることから、雷放電に起因することが示唆されている。しかし、TGFs が発生する雷放電のプロセスを特定できていない。両者の関係を明らかにするためには、雷放電と TGFs を同じ時刻基準で観測する必要がある、衛星軌道上からの同時観測が本質的である。

これらの問題を解決するために、国際宇宙ステーションから雷放電、TLEs、及び TGFs を観測する JEM-GLIMS ミッションと、小型衛星により観測する TARANIS 衛星ミッションが打上げに向けて進行中である。我々のグループは、JEM-GLIMS の 6 チャンネルフォトメタの PFM、及び TARANIS 衛星の 4 チャンネルフォトメタの EM の開発を行なっている。

JEM-GLIMS 搭載用フォトメタは雷放電及びスプライトの発光強度を測定し、スプライトの電子エネルギーの推定を行なう。そのために、フォトメタの PH1, 2, 3, 5, 6 及び PH4 について、最小輝度がそれぞれ  $10 \text{ nW/m}^2$ ,  $1 \mu\text{W/m}^2$ , 検出限界がそれぞれ  $100 \text{ nW/m}^2$ ,  $10 \mu\text{W/m}^2$ , 最大輝度がそれぞれ  $40 \mu\text{W/m}^2$ ,  $4 \text{ mW/m}^2$ , 絶対較正精度が 10 % 以内、及び相対安定精度 5 % 以内という仕様が要求される。さらに、フォトメタはイベント・トリガ機能を有するために高い動作安定性と信頼性が要求される。

本研究では、既に開発を終了したフォトメタの試作モデルを用いて、フォトメタが要求仕様を満たすことを実験により検証するとともに、それらの結果をふまえて特に JEM-GLIMS の PFM の設計を決定することを目的とする。このために、BBM を用いた 3 種類の性能評価試験を実施した。

まず、フォトメタのゲインの適正値を求めるために、国立直値研究所の積分球を用いてフォトメタの較正試験を行った。その結果、要求基準を 1 桁以上上回る感度及び SNR を有しているという結果が得られた。このままの高感度を維持すると、比較的少ない入射光量でもサチュレーションすることが心配されるため、アンプ部における電流電圧変換のシャント抵抗値を 1 桁以上小さくし、ゲインを下げる設計に変更した。一方、フォトダイオードを検出器に用いるフォトメタに対しても同様の試験を実施した。このフォトメタは逆にシャント抵抗値が低すぎて感度が要求基準に対し 1 桁以上が足らず、ノイズ成分がアンプ部で増幅されて SNR が悪くなっていることが分かった。このた

め、シャント抵抗値を  $1\text{ M}\Omega$  から  $30\text{ M}\Omega$  に大きくする様に変更する様にした。さらに、打上げ後に最適な感度と SNR を得られる様に、PMT で 3 桁のゲインを、アンプ部で 1 桁の合計 4 桁の範囲でゲインを調整できる設計とした。

次に、1 回の地球夜側観測時間における感度変化、及び夜側の観測時間と昼側の非観測時間の繰り返しによる感度変化を補正する目的で、光電子増倍管の出力ドリフト特性の測定を実施した。その結果、10% の絶対精度という要求基準内であることが示されたが、PFM においても、同様の較正データを取得し、補正する必要があることが解った。

次に、JEM-GLIMS の観測機器取付け面の予想温度範囲の上限が  $+60\text{ }^{\circ}\text{C}$  と、フォトメタの検出器として用いる光電子増倍管の保障動作温度の上限  $+50\text{ }^{\circ}\text{C}$  を超過しているため、 $+60\text{ }^{\circ}\text{C}$  での検出器の故障の有無と感度変化を検証するため、高温耐久試験を実施した。この試験では、光電子増倍管の温度が  $+60\text{ }^{\circ}\text{C}$  に達しても感度劣化と永久損傷が発生しないことが示されたが、万一のことを考え、検出器とフォトメタ筐体を積極的に断熱する設計に変更した。観測器取付け面とフォトメタ筐体との接合部などをガラスエポキシワッシャ及びガラスエポキシプレートにて断熱する設計となった。この設計の熱解析では、機器取付け面が  $+60\text{ }^{\circ}\text{C}$  の場合でも、検出器の温度は  $+45\text{ }^{\circ}\text{C}$  程度に抑えられる結果となっている。

本研究の成果として、JEM-GLIMS については、BBM の評価試験を通じて現在のフォトメタ設計にて要求仕様を十分に満足することが確認され、BBM の設計をもとにさらに上位モデル設計を進めて良いと判断した。さらに、これらの試験の測定結果から、JEM-GLIMS 搭載用フォトメタの PFM の設計を確定することができた。続いて実施されるフォトメタ単体の機能試験と性能評価試験を通じて、2011 年の打ち上げを目指す。TARANIS 衛星フォトメタについては、EM の設計に必要な基礎的なデータを取得することができた。



# 謝辞

初めに本研究に取り組む機会を与えて下さった. JEM-GLIMS ミッションチーム及び TARANIS ミッションチームに感謝の意を表す. また, 東北大学工学部のグループの協力により, フォトメタの熱解析の結果を使用させていただいた. 東北大学工学部の坂本祐二助教, 石川晴香氏には心より感謝申し上げます. また, 執筆には地球流体電脳倶楽部が開発した電脳スタイルを使用させて頂いた. 開発者の方々に敬意を表す.

本論文を執筆するにあたり, 多くの方, とりわけ惑星宇宙グループの皆様にご支援を頂いた.

まず, 平素よりご厚情を賜りました教官の方々に感謝の意を述べたい. 指導教官である佐藤光輝講師には, 研究について絶えずご助言をいただきました. ミッションに参加させて頂き, 本研究にたどり着いたことは幸運であると感じています. 今まで数限りないご迷惑をおかしてしまったにも関わらず, 本当に熱心に, また丁寧にご指導頂きました. 深謝申し上げますとともに, 誠に恐縮しております. 高橋幸弘教授には, 東北大に在籍されていた頃より, 研究に対する考え方をご高説頂き, さらに研究に関しましても多大なご支援を賜りました. 厚く御礼申し上げます. 渡部重十教授には, 研究室配属当初より科学や研究生活について学ばせて頂きました. また, ロケット実験という貴重な体験もさせて頂き, 心より感謝申し上げます. 倉本圭教授, 石渡正樹准教授, 小高正嗣助教には, 普段の研究室生活からゼミまで幅広くご助言を頂き, また, 研究外のことについても多くを学ばせて頂きました. 心より感謝申し上げます.

諸先輩方にも, 多大なご尽力を頂きました. 山下幸三氏には, ご多忙な身でありながら, 私の稚拙な質問にも真摯に対応して頂いた. 誠にありがとうございます. 山下達也氏, 鶴巻亮一氏には, 本論文の校正をして頂いただけでなく, 私生活においても多大なご支援を賜ったことを心より厚く御礼申し上げます. また, 後輩である柳芳紀氏には, 執筆中に抱えていた雑務等を, 快く引き受けて下さり, 大変感謝している. 研究室の同期である徳永, 齊藤, 嘉瀬がいなければ, ここまでの道のりはなかったであろう. 敢えて多くは述べない. ありがとう. 惑星宇宙グループの方々のおかげで, 研究室で生きていくことができました. 本当にありがとうございます.



## 参考文献

- 1 Adachi, T., H. Fukunishi, Y. Takahashi, and M. Sato (2004), Roles of the EMP and QE field in the generation of columniform sprites, *Geophys. Res. Lett.*, 31, L04107, doi:10.1029/2003GL019081.
- 2 Barrington-Leigh, C. P., U. S. Inan, and M. Stanley (2001), Identification of sprites and elves with intensified video and broadband array photometry, *J. Geophys. Res.*, 106(A2), 1741-1750.
- 3 Bell, T. F., S. C. Reising, and U. S. Inan (1998), Intense continuing currents following positive cloud-to-ground lightning associated with red sprites, *Geophys. Res. Lett.*, 25(8), 1285-1288.
- 4 Blanc, E., F. Lefeuvre, R. Roussel-Dupré, and J. A. Sauvaud (2007), TARANIS: A microsatellite project dedicated to the study of impulsive transfers of energy between the Earth atmosphere, the ionosphere and the magnetosphere, *Adv. Space Res.*, 40, 1268—1275, doi:10.1016/j.asr.2007.06.037.
- 5 Chen, A.B., C. L. Kuo, Y. J. Lee, H. T. Su, R. R. Hsu, J. L. Chern, H.U. Frey, S.B. Mende, Y. Takahashi, H. Fukunishi, Y. S. Chang, T. Y. Liu and L. C. Lee, (2008), Global distributions and occurrence rates of transient luminous events, *J. Geophys. Res.*, 113, A08306, doi:10.1029/2008JA013101.
- 6 Chern, J. L., R. R. Hsu, H. T. Su, S. B. Mende, H. Fukunishi, Y. Takahashi, and L. C. Lee (2003), Global survey of upper atmospheric transient luminous events on the ROCSAT-2 satellite, *J. Atmos. Sol. Terr. Phys.*, 65, 647-659, doi:10.1016/S1364-6826(02)00317-6.
- 7 Cho, M. and M. J. Rycroft, (2001), Non-uniform ionisation of the upper atmosphere due to the electromagnetic pulse from a horizontal lightning discharge, *J. Atmos. Sol. Terr. Phys.*, 63(6), 559-580.
- 8 Christian, H., and S. Goodman (1987), Optical Observations of Lightning from a High-Altitude Airplane. *J. Atmos. Oceanic Technol.*, 4, 701-711.
- 9 Christian, H. J., R. J. Blakeslee, and S. J. Goodman (1989), The Detection of Lightning From Geostationary Orbit, *J. Geophys. Res.*, 94(D11), 13,329-13,337.
- 10 Christian, H. J., et al. (2003), Global frequency and distribution of lightning as observed from space by the Optical Transient Detector, *J. Geophys. Res.*, 108(D1), 4005, doi:10.1029/2002JD002347.

- 11 Cummer, S. A., Y. Zhai, W. Hu, D. M. Smith, L. I. Lopez, and M. A. Stanley (2005), Measurements and implications of the relationship between lightning and terrestrial gamma ray flashes, *Geophys. Res. Lett.*, 32, L08811, doi:10.1029/2005GL022778.
- 12 Farges T. and R. Binet (2006), Contribution to the TARANIS photometer trade-off, TARANIS document.
- 13 Fishman, G. J., Bhat, P. N., Mallozzi, R., Horack, J. M., Koshut, T., Kouveliotou, C., Pendleton, G. N., Meegan, C. A., Wilson, R. B., Paciesas, W. S., Goodman, S. J., Christian, H. J. (1994), Discovery of intense gamma-ray flashes of atmospheric origin, *Science*, 264, 1313, doi:10.1126/science.264.5163.1313.
- 14 Fukunishi, H., Y. Takahashi, M. Kubota, K. Sakanoi, U. S. Inan, and W. A. Lyons (1996), Elves: Lightning-induced transient luminous events in the lower ionosphere, *Geophys. Res. Lett.*, 23(16), 2157-2160.
- 15 Füllekrug, M., D. R. Moudry, G. Dawes, and D. D. Sentman (2001), Mesospheric sprite current triangulation, *J. Geophys. Res.*, 106(D17), 20,189-20,194.
- 16 Grefenstette, B. W., D. M. Smith, B. J. Hazelton, and L. I. Lopez (2009), First RHESSI terrestrial gamma ray flash catalog, *J. Geophys. Res.*, 114, A02314, doi:10.1029/2008JA013721.
- 17 Hiraki, Y., Y. Kasai, and H. Fukunishi (2008), Chemistry of sprite discharges through ion-neutral reactions, *Atmos. Chem. Phys. Discuss.*, 8,2311-2336.
- 18 Kuo, C.-L., R. R. Hsu, A. B. Chen, H. T. Su, L. C. Lee, S. B. Mende, H. U. Frey, H. Fukunishi, and Y. Takahashi (2005), Electric fields and electron energies inferred from the ISUAL recorded sprites, *Geophys. Res. Lett.*, 32, L19103, doi:10.1029/2005GL023389.
- 19 Kuo, C.-L., A. B. Chen, Y. J. Lee, R. R. Hsu, H. T. Su, S. A. Cummer, L. C. Lee, H. Frey, S. B. Mende, Y. Takahashi, and H. Fukunishi (2007), Modeling elves observed by FORMOSAT-2 satellite, *J. Geophys. Res.*, 112, A11312, doi:10.1029/2007JA012407.
- 20 Lefeuvre, F., E. Blanc, R. Roussel-Dupré, J. A. Sauvaud, and J. L. Pinçon (2008), TARANIS—A micro-satellite project dedicated to the physics of TLEs and TGFs, *Space Sci. Rev.*, 137, 301—315, doi:10.1007/s11214-008-9414-4.
- 21 Lehtinen, N. G., T. F. Bell, and U. S. Inan (1999), Monte Carlo simulation of runaway MeV electron breakdown with application to red sprites and terrestrial gamma ray flashes, *J. Geophys. Res.*, 104, 24, 699-24, 712.
- 22 Lofthus, A., and P. H. Krupenie (1977), The spectrum of molecular nitrogen, *J. Phys. Chem. Ref. Data*, 6, 113-307.

- 23 Mende, S.B., Y.S. Chang and A.B. Chen et al. (2006), Spacecraft based studies of transient luminous events, sprites, elves and intense lightning discharges. In: M. Fullekrug, V.A. Mareev and M. Rycroft, Editors, NATO Science Series, Mathematics, Physics and Chemistry, Springer, Heidelberg, pp. 123–150.
- 24 Milikh, G., J. A. Valdivia, and K. Papadopoulos (1998), Spectrum of red sprites, *J. Atmos. Sol. Terr. Phys.*, 60, 907-915.
- 25 Orville, R. E., and R. W. Henderson (1984), Absolute spectral irradiance measurements of lightning from 375 to 880 nm, *J. Atmos. Sci.*, 41, 3180-3187.
- 26 Pasko, V. P., U. S. Inan, T. F. Bell, and Y. N. Taranenko (1997), Sprites produced by quasi-electrostatic heating and ionization in the lower ionosphere, *J. Geophys. Res.*, 102(A3), 4529-4561.
- 27 Pasko, V., M. A. Stanley, J. D. Mathews, U. S. Inan, and T. G. Wood (2002), Electrical discharge from a thundercloud top to the lower ionosphere, *Nature*, 416, 152-154.
- 28 São Sabbas, F. T. T., D. D. Sentman, E. M. Wescott, O. Pinto Jr., O. Mendes Jr., and M. J. Taylor (2003), Statistical analysis of space-time relationships between sprites and lightning, *J. Atmos. Sol. Terr. Phys.*, 65, 525-535.
- 29 Sato, M., and H. Fukunishi (2003), Global sprite occurrence locations and rates derived from triangulation of transient Schumann resonance events, *Geophys. Res. Lett.*, 30(16), 1859, doi:10.1029/2003GL017291.
- 30 Sato Mitsuteru (2004), Global lightning and sprite activities and their solar activity dependences, Ph. D. thesis, Tohoku University.
- 31 Sato M., Y. Takahashi, A. Yoshida and T. Adachi (2008), Global distribution of intense lightning discharges and their seasonal variations, *J. Phys. D: Appl. Phys.* 41 234011 (10pp) doi: 10.1088/0022-3727/41/23/234011.
- 32 Simpson, G. C., and F. J. Scrase (1937), The distribution of electricity in thunderclouds, *Proc. R. Soc. London, Ser. A*, 161, 309.
- 33 Smith, D. M., L. I. Lopez, R. P. Lin, and C. P. Barrington-Leigh (2005), Terrestrial gamma-ray flashes observed up to 20 MeV, *Science*, 307, 1085-1088, doi:10.1126/science.1107466.
- 34 Stolzenburg, M., and T. C. Marshall (2008), Charge structure and dynamics in thunderstorms, *Space Sci. Rev.*, 137, 355, doi:10.1007/s11214-008-9338-z.
- 35 Su, H. T., R. R. Hsu, A. B. Chen, Y. C. Wang, W. S. Hsiao, W. C. Lai, L. C. Lee, M. Sato, and H. Fukunishi (2003), Gigantic jets between a thundercloud and the ionosphere, *Nature*, 423,

- 974-976, doi:10.1038/nature01759.
- 36 Valdivia, J. A., G. Milikh, and K. Papadopoulos (1997), Red sprites: Lightning as a fractal antenna, *Geophys. Res. Lett.*, 24(24), 3169-3172.
- 37 Wescott, E. M., D. Sentman, D. Osborne, D. Hampton, and M. Heavner (1995), Preliminary results from the Sprites94 Aircraft Campaign: 2. Blue jets, *Geophys. Res. Lett.*, 22(10), 1209-1212.
- 38 Wescott, E. M., H. C. Stenbaek-Nielsen, D. D. Sentman, M. J. Heavner, D. R. Moudry, and F. T. S. Sabbas (2001), Triangulation of sprites, associated halos and their possible relation to causative lightning and micrometeors, *J. Geophys. Res.*, 106(A6), 10,467-10,477.
- 39 大久保 敦史 (2004), Characteristics of VLF/ELF Sferics Associated with Winter Sprite Events in Japan, 東北大学大学院理学研究科修士論文.
- 40 日本大気電気学会 (2003), 大気電気学概論, コロナ社.
- 41 近藤 哲志 (2009), 中層・超高層大気過渡発光現象および雷放電の飛翔体観測に関する研究, 東北大学大学院理学研究科修士論文.