



JUICE-JAPAN WG木星衛星探査計画 -JUICE-GALA-レーザ高度計-

並木則行¹, 小林正規², 木村淳³, 荒木博志¹, 野田寛大¹, 鹿島伸悟¹, 宇都宮真⁴, 石橋高², 押上祥子¹, 小林進悟⁵, 藤井雅之⁶, H. Hussmann⁷, K. Lingenauber⁷, J. Oberst⁷

¹国立天文台/RISE, ²千葉工業大/PERC, ³東工大/ELSI, ⁴JAXA, ⁵放射線医学総合研究所, ⁶(株)ファムサイエンス, ⁷DLR

1. GALAレーザ高度計の概要/科学目標

レーザ高度計はレーザ光の飛行時間から距離を計測する装置である。GALAレーザ高度計は、トランシーバユニット (TRU)、制御 (制御・時間計測・インターフェース) ユニット (ELU)、レーザ電子回路ユニット (LEU) の3ユニットで構成され、日本チームはTRUの中の反射光受信部 (受信光学系および検出器) を担当する。全体のインテグレーションは、DLR (ドイツ航空宇宙センター) が担当する。2019年に日本からDLRに納入され、2022年にArian Vにより打上げられる。2030年に木星に到着し、2032年からガニメデ周回軌道に投入される。4ヶ月の高度500 km周回ミッション期間中には、ガニメデの形状変化などを測定する。

1.1. JUICEの科学目的とGALA

「地球以外に生命を宿す天体は存在するのか?」

木星系の大氷衛星では表層下に全球的な液体層「地下海」の存在が示唆されている。しかし地下海の存在は従来データの解釈や傍証にもとづく可能性に過ぎず、この存在を確認することは惑星科学/宇宙生命科学の最重要課題である。

レーザ高度計の役割

人工衛星と天体表面間の測距によって、多様な地形形態と分布が把握でき、氷主体の地質活動様式の理解を通して地球のプレート・テクトニクスの再考察にも繋がる。また木星から受ける固体潮汐の大きさや回転変動を測定することで、地下海の存在が推定できる。

図1.1 ガニメデ内部に地下海が存在する場合、公転における真近点離角の違いによって、氷地殻には潮汐変形が起こる。



1.2. JUICEサイエンスへの貢献

① 定量的な表面地形情報

ボイジャーやガリレオ探査機は観測領域の表面カバー率が悪く、空間解像度にも大きな不均質がある (図1.2)。氷天体への初となるレーザ測距を通して全球的に様々かつ高い空間解像度で地形の定量情報を取得することで、例えば地溝帯が示す表面拡張量から全球膨張量とその歴史 (内部温度変化や液体水 (地下海) の固化量) を見出すことが出来るようになる。

② 表面の粗さとアルベド

アルベドとフットプリント中の表面ラフネス (粗さ、すなわち、数m以上の高度変化) は反射パルスの幅から計測される。ただし、原理的に両者は区別できない画像データ等の独立したデータを使って両者を分離すれば、過去の構造地質活動と数メートルサイズの表面の粗さとの関係などが明らかになる。

③ 重力場精度向上につながる軌道決定精度向上

地下海が存在する場合の潮汐ラプ数 k_2 は0.6に、完全凍結の場合は0.06になる。地下海が存在すれば氷地殻の厚みや剛性率に応じて0.01の桁で変化するので、 k_2 の観測からガニメデ内部構造を制約できる。

④ 潮汐変形のデータ

地下海がない場合の表面の潮汐変位量はpeak-to-peakで約0.1-0.4 mであるのに対し、地下海が存在する場合のそれは約5-7 mである。この相違は極付近での地形の周期変動として有意に観測可能であり、取得した変位量からガニメデ内部の熱進化史にも大きな制約が与えられる。

⑤ 回転変動

ガニメデ内部に球殻状に地下海が存在する場合には氷地殻とマントルが力学的に分離する。他方で、秤動の振幅は氷地殻の厚さに強く依存。地下海と氷地殻の密度差が0-400 kg/m³の範囲では振幅は15-355 mに達する (氷地殻厚を0.5-25 kmと仮定)。この振幅を観測することができれば、④の変位量と組み合わせで解析することで、地下海の深さと氷地殻の厚さを分離することができるようになる。

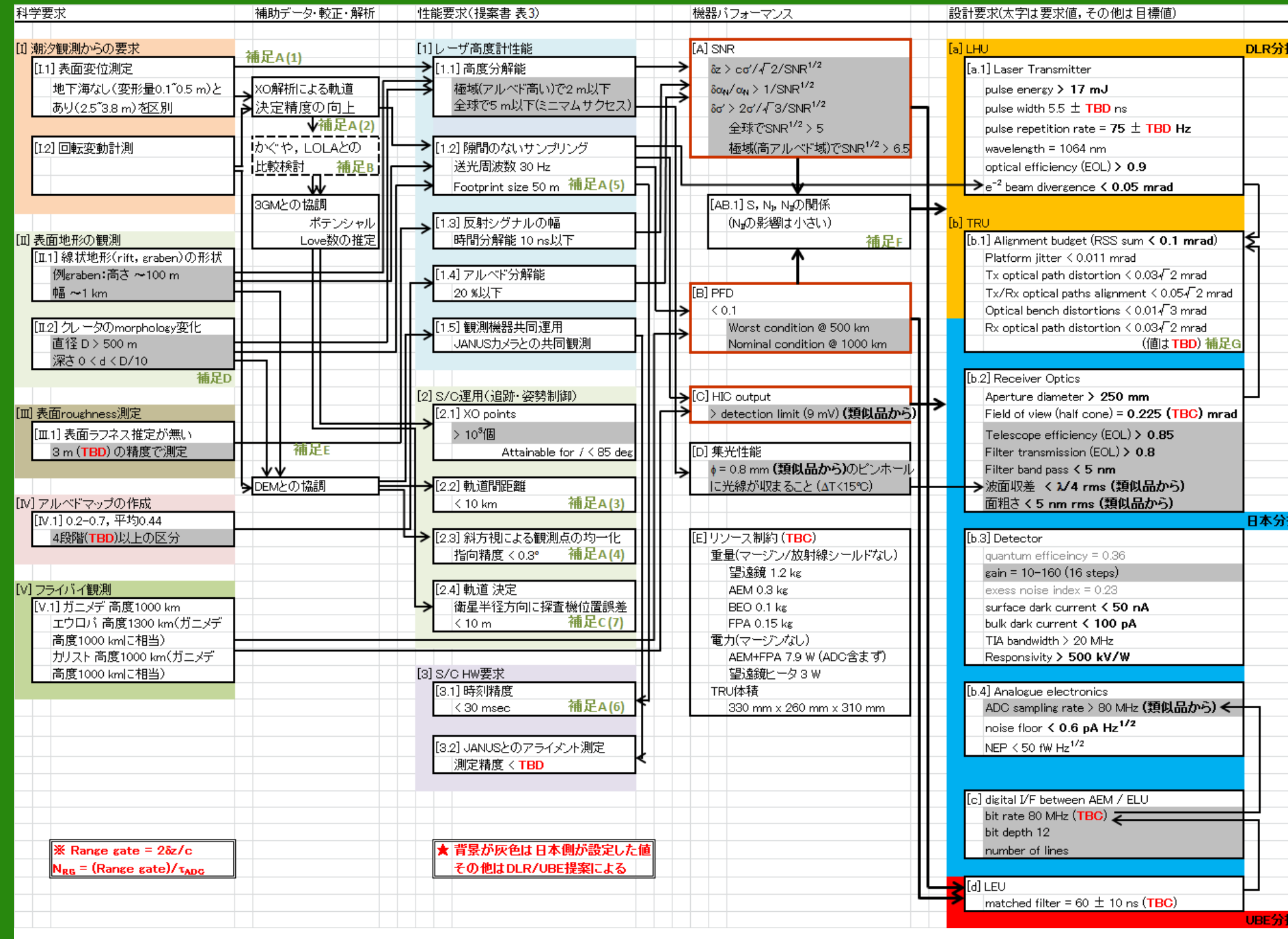


図1.4 科学目標からのブレイクダウン

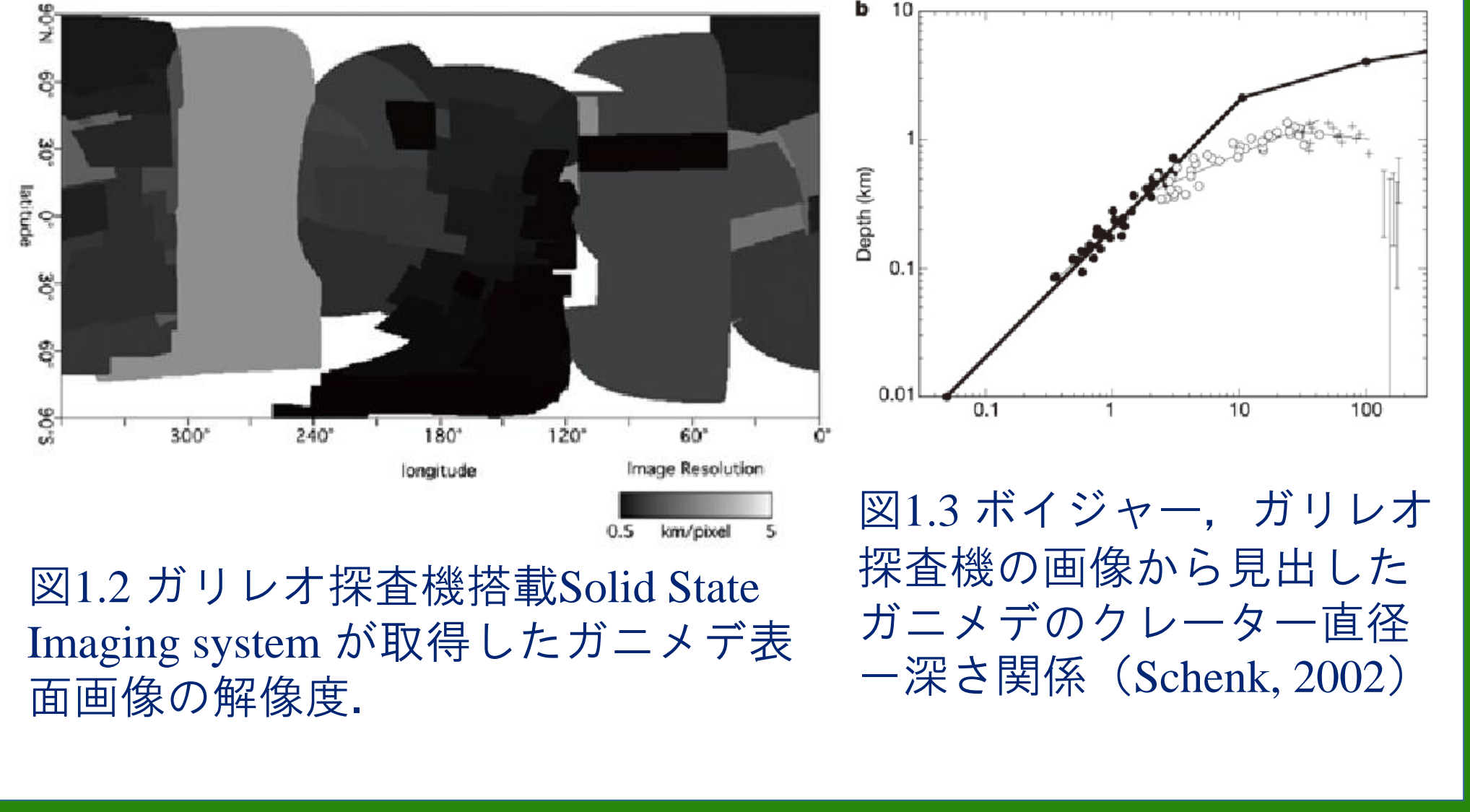


図1.2 ガリレオ探査機搭載Solid State Imaging systemが取得したガニメデ表面画像の解像度。

図1.3 ボイジャー、ガリレオ探査機の画像から見出したガニメデのクレーター直径-深さ関係 (Schenk, 2002)

1.3. 開発の課題 (かぐやLALT, はやぶさLIDARとの相違点)

1. 低温環境: 常温で製造し、-100~-80℃の低温環境で性能を出すための評価試験を繰り返す必要がある。
2. アライメント要求: 従来に比べて1桁厳しくなり、測定の限界に近い。BELAのLessons Learnedを取り込む必要がある。
3. モデルの数: かぐやLALTでは、EPMとFMの2モデルであったのに対して、JUICE-GALAでは、ESA/PIとの調整により、STM、EM、VM、EQM、FM、FSの6モデルを開発する。
4. PA/QA要求への対応: 従来はJAXA/ISAS基準適用であったが、今回はESA基準となり、PA要求の基準が高くなる。

2. GALA光学系開発

主鏡はDLRからの要請にそってφ300 mmとし、焦点距離は1.5 mとして設計を進めている。課題は(A) 検出器部 (FPA) の耐放射線シールドのサイズと重量を抑えることと、(B) 主鏡に非軸対称な温度ムラが生じないような熱構造設計を行うことである。以下に現状の設計ベースラインを要約する。

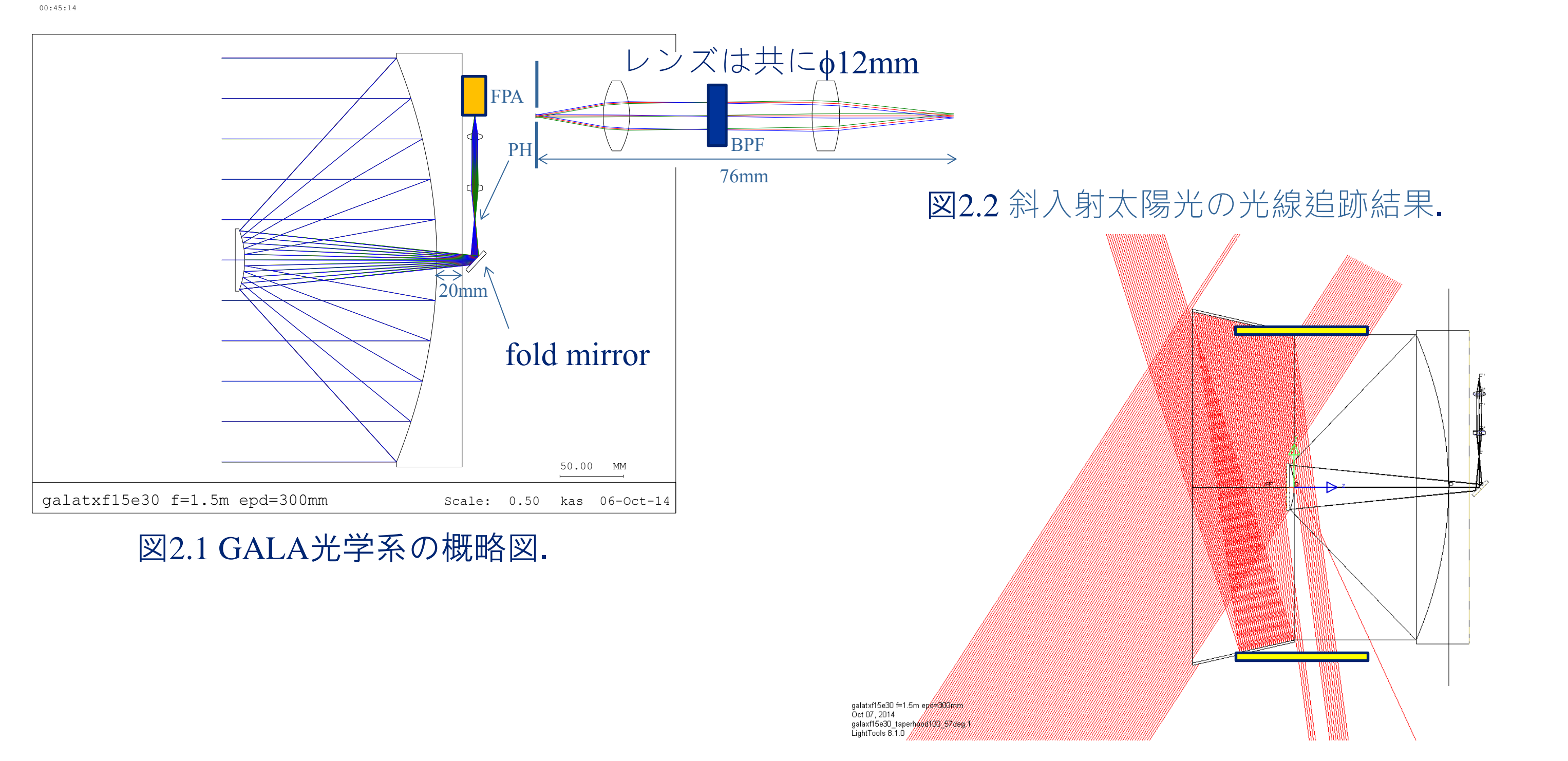


図2.1 GALA光学系の概略図。

図2.2 斜入射太陽光の光線追跡結果。

2.1. 光学ベースライン検討

2.1.1. 主鏡材料はアルミ

主鏡材料に関しては(i) アルミ切削鏡を用いて望遠鏡全体を同一材料で作る相似収縮方式、(ii) ガラス鏡を用いる低膨張・低コスト方式、さらに(iii) 部品によって異なる材料を組み合わせるハイブリッド方式、の3案についてトレードオフを行った。科学目標からのフロー (図1.4) に遡って検討し、

- (1) 望遠鏡の波面精度要求を大幅に緩和する ($\lambda/10$ rms \rightarrow $\lambda/4$ rms, $\lambda = 633$ nm)
- (2) 鏡面粗さの要求を大幅に緩和する (4 nm Ra \rightarrow 10 nm rms)

ことが可能であると判断し、金属鏡による望遠鏡をベースラインとすることとした。

2.1.2 主鏡・副鏡は自然冷却がノミナル

GALA検出器は常温でもっとも感度が上がる。一方、主鏡と副鏡は外部に露出しているため、積極的に保温しない限り、-100~-80℃の低温になる。そこで、熱的な分界について検討した。まず、検出器と主鏡の間にあるBEOについては、常時室温に暖めることにした。これは、BPFの設計・検証が大変容易になることと、BEOは熱容量が小さくヒータ増加分が小さいことによる。次いで、主鏡と副鏡については、GALAの電力リソースのマージンが大変少ないことから、低温望遠鏡をノミナルとした。ただし、検出器など付属ユニットを、熱的にも構造的にも望遠鏡に接続することで、定常温度をなるべく上げるように今後の熱構造設計を進める。

2.1.3 副鏡支持機構

従来は、円柱フレーム型、3本脚直結型、中央直中型の3案が並立していたが、望遠鏡を相似収縮させるためには、主鏡・副鏡の熱的距離を短くすることが重要と考え、3本脚直結型をベースラインとした。

2.1.4 バックエンド光学系は横置き (図2.1)

バックエンド光学系を副鏡の直下に縦置きとする設計は熱構造を軸対称にできるというメリットがある反面、主鏡による放射線シールドの恩恵を受けられないというデメリットがある。一方、横置きではfold mirrorが追加されるというデメリットに対して、主鏡下に広めのスペースが確保でき、レンズ径も取り扱い易いφ12 mmが採用できる。以上を総合判断して、横置きバックエンド光学系をベースラインとした。

2.1.5 フードの追加 (図2.2)

高度500 kmの周回では、最悪、光軸から57度の方向から太陽光が直接入射する可能性がある。この直達太陽光は迷光の原因であるとともに主鏡に温度分布を生じさせる恐れがあるので、フードを取り付けることとした。フードの高さは、直達光が主鏡に到達しないことを条件に1段、100 mm以上とする。

3. GALA電気系開発

GALAアナログエレキモジュール (AEM) の開発項目はAPD-HIC (宇宙実績、耐放射線性、センサのゲイン安定) とAEM (EMC対策、RFMとの高速I/F) である。

3.1. APD-HIC開発

3.1.1. 宇宙実績: 長期間ミッションであり、高い信頼性が要求される。宇宙用Lidarの実績が多数あるExcelitas社 (旧PerkinElmer) のものを採用。かぐや、はやぶさ2、BELAでも実績あり。MIL-PRF-38534, MIL-STD-883を適用する。

	GALA	かぐやLALT	はやぶさ2 LIDAR	BELA
APDセンサー	C30954 (標準品・0.8mmφ)	C30954 (標準品・0.8mmφ)	C30954 (標準品・0.8mmφ)	C30954 (標準品・0.8mmφ)
プリアンプ信号帯域	110MHz (TBD)	>25MHz (110-120)	>100MHz (110-120)	25MHz
NEP	0.06 pW/Hz ^{1/2}	<0.12 pW/Hz ^{1/2} (0.01-0.02)	<0.12 pW/Hz ^{1/2}	0.02 pW/Hz ^{1/2}
Responsivity	2250 kV/W (TBD)	500 kV/W	500 kV/W	?
暗電流	50 nA	<150nA (30-40)	<150nA	90 nA
バイアス電圧	300 - 400 V	265-440 V (350-360)	265 - 440 V	<400V
HICに含まれるコンポーネント	APDセンサ TIA T-sensor TE-cooler HV0- μ スイッチ	APDセンサ TIA T-sensor HV0- μ スイッチ	APDセンサ TIA T-sensor HV0- μ スイッチ	APDセンサ TIA T-sensor TE-cooler 温度補償回路
Life time	10 years	?	?	8 years
TID	30 krad	20 krad	20 krad	20 krad

3.1.2. 耐放射線性: 木星磁気圏内の過酷な放射線環境に耐える必要がある。

シールドで30 kradまで低減するとともに、TIDおよびTNIDで性能劣化を評価する。また、放射線評価モデルによる実証試験を実施する。

略語	モデル	備考
BBM	放射線評価用モデル	・フライト品と同じロットのAPDセンサーを使い、耐放射線性評価試験を実施する。
EM	エンジニアリングモデル	・センサーはフライト品と同じロット ・HIC回路設計はFM等価・部品レベル (宇宙規格品) はフライト品と同じロットのもの、ただしスクリーニングを経ない。
FM	フライトモデル	・製造管理: MIL-PRF-38534 (Class H) ・スクリーニング: MIL-STD-883

3.1.3 センサのゲイン安定性: APDセンサは大きな温度依存がある。

HIC内のペルチエ冷却器による高精度 ($\pm 1^\circ\text{C}$) の温度制御を行う。

3.2. AEM開発

3.2.1. EMC対策: 同じ装置内に大電流が流れるレーザーユニットがありEMCが懸念される。実際に、BELAではレーザ電源のリップルによる影響が問題となっている。

AEM側にDC/DC電源を持つことで、レーザ電源からの完全切り離す設計とする。

3.2.2. RFMとの高速I/F: 12 bit \times 2 MS (10 msec @ 200M S/sを想定) のデータを、1/30秒以内にRFMへ伝送する必要がある。

高速LVDS出力のあるADCを採用することで、400 MSPSまで対応可能である。

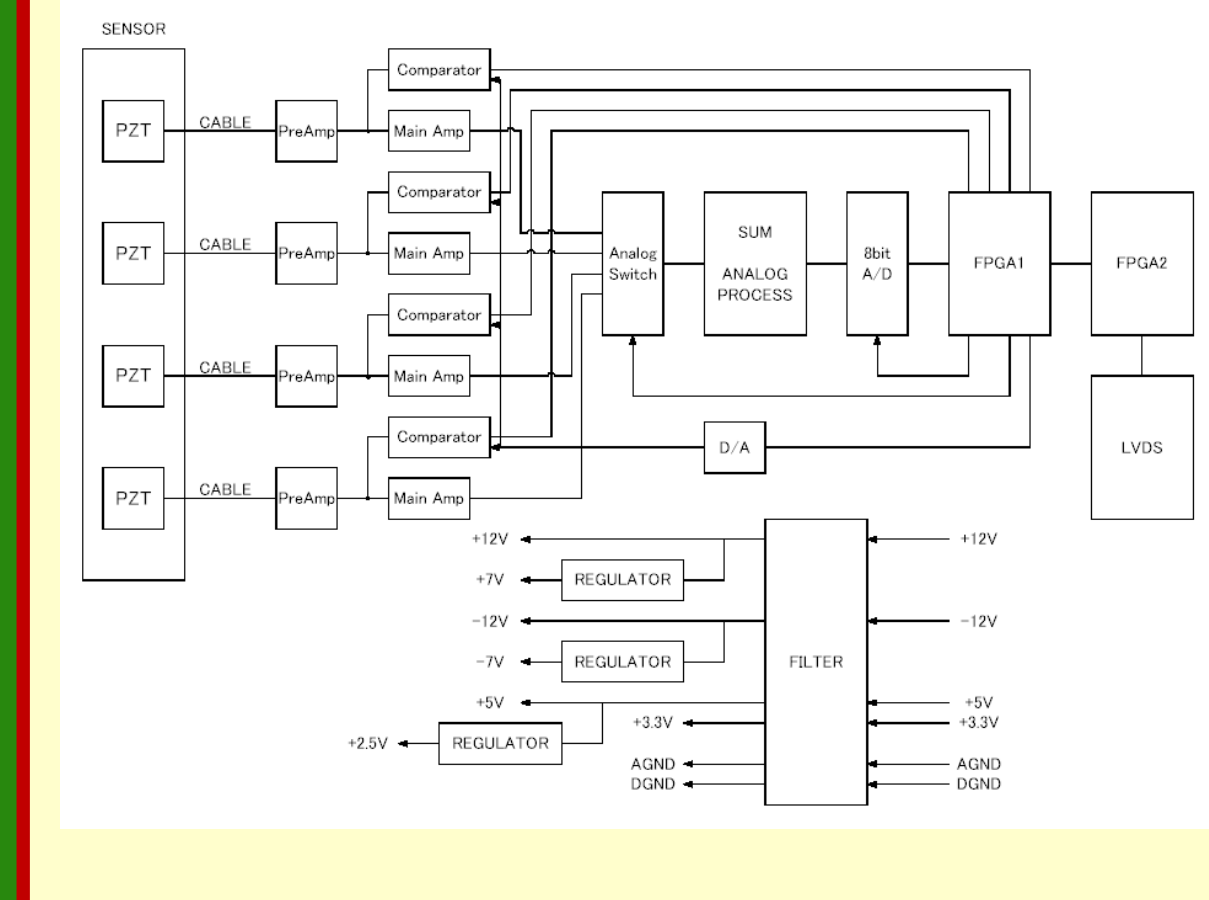


図3.1 AEM信号処理回路: ヘリテージペピコロノボMDM-Eの信号処理回路。

- MDM-Eの構成 (GALAでの変更点)
- ・プリアンプ (不要、APD-HIC側にあり)
- ・トリガー用コンパレータ (不要、RFMから対ミゲバ駆)
- ・メインアンプ (有、可変アンプ)
- ・アナログスイッチ (不要、シングルチャネルの為)
- ・サムアンプ (不要、シングルチャネルの為)
- ・ADC (有、サンプリング40M \rightarrow 200M)
- ・FPGA (有)
- ・LVDS (有)
- ・DC/DC (有)