

可視光通信実験衛星「ぎんれい」の開発 —運用結果と可視光通信の可能性—

中島スペースエンジニアリングラボ
信州衛星研究会事務局長
元信州大学ぎんれいプロジェクトマネージャ

中島 厚

1. はじめに

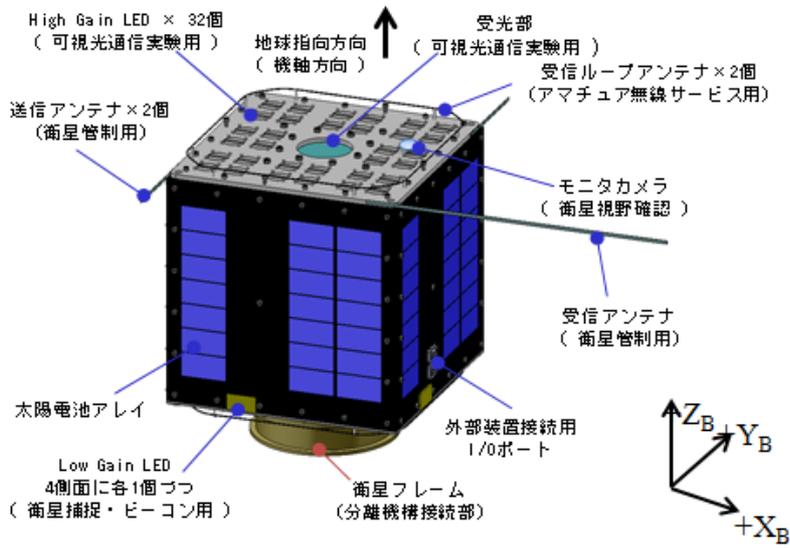
信州大学と信州衛星研究会が連携して開発した、衛星・地上間の超長距離双方向可視光通信実験衛星「ぎんれい」は平成26年2月28日未明にH-IIAロケット23号機によりNASAのGPM主衛星の相乗り副衛星として他の6大学の衛星と共に高度400km、軌道傾斜角65度の軌道に投入された。「ぎんれい」は軌道投入後約1.5か月の初期チェックを受け、4月下旬から可視光通信実験を開始し、「ぎんれい」の地上指向面に取り付けられた32個のLED (High Gain LED) の点灯により、予定通り約1等星の明るさで地上からモルス信号の視認並びに撮影することが出来た。その後、大気圏再突入した平成26年11月24日までのおよそ9か月間に58回の可視光通信実験を実施した。これら宇宙実験と地上で実施された測定データから、長距離可視光通信の実現性について評価解析を行うと共に、今後の可視光通信の実用可能性について考えてみたいと思う。

ぎんれいプロジェクトは、信州衛星研究会の場において技術開発の議論、各サブシステムの調整等を行いつながりながら進めてきた。信州衛星研究会は平成23年7月5日に第1回研究会を開催し、可視光通信をミッションとしたCubeSatクラスから50kg級の超小型衛星について検討し、9月16日開催の第2回研究会及び12月9日開催の第3回研究会においては30cm/20kg級超小型衛星の開発を目指してシステム検討を行った。その直後の平成23年12月14日にJAXAから平成25年度打ち上げのGPM主衛星の相乗り副衛星の一つとして、信州大学が提案した可視光通信実験衛星の相乗り打ち上げの採択決定が報道され¹⁾、本格的にプロジェクトがスタートした。平成24年3月16日の第4回研究会では開発状況が報告され、8月21日開催の第5回研究会は第1回衛星設計確認会と位置付けて、各サブシステムの検討内容が議論された。その後、10月17日にJAXAのPhase0/1システム安全審査会が開催され、衛星システム説明とハザード項目の確認並びにいくつかのA/Iが課せられた。審査会はNASA/JAXA関係者との合同会議である。プロジェクトは、JAXAの衛星引き渡し時期の設定から安全審査会のスケジュールがベースにあり、それに沿って衛星開発を進めていく必要に迫られた。12月26日に第6回、翌年平成25年3月21日に第7回研究会が開催され、各サブシステムの開発状況、A/Iの対応状況等が報告された。6月20日の第8回研究会は第2回衛星設計確認会としてより詳細な検討結果が報告され、7月25日開催のJAXAのPhase2システム安全審査会の準備が行われた。Phase2審査後、フライト品の組立が開始され、約1カ月半で組立が完了した。尚、Phase2で完了できなかった項目があったため、8月29日に△Phase2が開催された。9月から10月にかけて熱真空試験、振動試験、アウトガス測定、分離衝撃試験が実施され、12月5日のPhase3審査会、翌年平成26年1月23日の安全確認審査会を経て、1月30日に衛星はJAXAに引き渡された。その間、平成25年9月26日に第9回研究会、平成26年1月10日に第10回研究会を開催し、逐次進捗報告並びに技術的内容等について確認を行った。

尚、可視光通信実験衛星の英語名はShindaiSat、愛称は「ぎんれい」である (平成24年9月から3か月間愛称募集を行い、全国から4,000件以上の応募があり、平成25年1月に「ぎんれい」と命名された)。

2. 衛星概要 ^{2)~6)}

「ぎんれい」の開発は2011年12月の相乗り打ち上げの採択によりスタートし、2年2ヶ月で完成・JAXAへの引き渡しという短期開発衛星であった。図1(a)は外観と各部の名称、同図(b)はH-IIAロケットに取り付けられた写真を示す。図2は内部機器配置図で、実際の機器が取り付けられた各軸の写真も示す。



(b) H-IIAロケットに取り付けられた「ぎんれい」(JAXA提供)

(a) 各部の名称(左図)

図1 「ぎんれい」外観

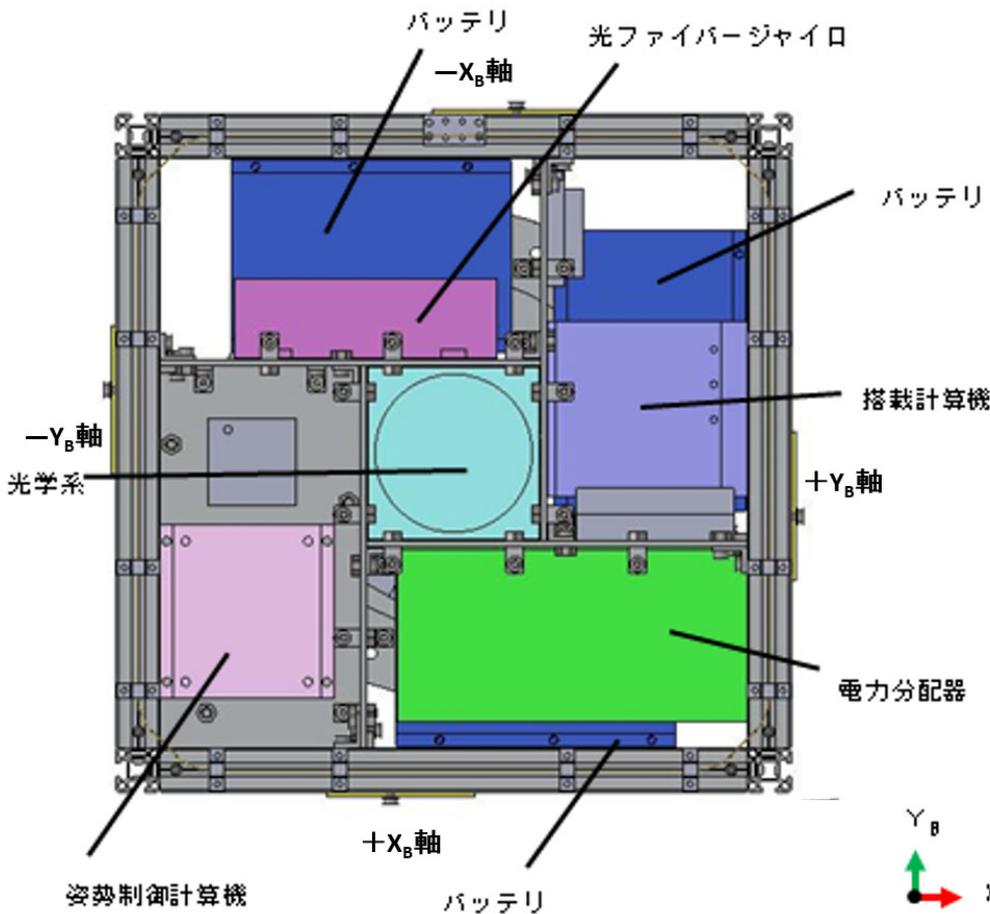


図2 内部機器配置図

表1は主要諸元で、外形寸法40cm立方(ロケット取付けリング含まず)、質量33kgの超小型衛星である。地球指向面(上面パネル)にはLED/凹面鏡が32セット(High Gain LED)取り付けられ、CW或はFSK変調されて点灯する。また側面パネルの各面にはLow Gain LEDユニットが取り付けられ、CW送信が行われる。側面パネルはCFRP製で7シリーズ3平行のGaAs太陽電池セルが貼り付けられている。電力はリチウムイオン電池で構成されたバッテリー3ユニットに蓄積される。電力量は300Whである。管制用のRFアンテナはロケットから分離後200秒後に展開し、その後連続的にCW送信されると共に衛星の上面パネルが地球磁場方向に指向するための沿磁力線制御モードに移行する。地上からのコマンドによりFM変調されたRFにより実験データ等が送信される。アマチュア無線サービス用として衛星上下にループアンテナが固定されている。内部搭載機器は、RF送受信系を介して、地上からのコマンドを受け付け・解読し、各機器の制御(電源系のON/OFFや各ボードとの通信)を行う搭載計算機、姿勢制御センサとして太陽センサと磁気センサ、軌道上の位置情報を得るためのGPS受信機、駆動装置としてリアクションホイール及び磁気トルカ、2次電池としてのリチウムイオン電池、ミッション機器であるLEDの変復調機能を有するFPGAボード及びLEDドライバーから成る。ミッション実行時である可視光通信は最大約150Wの電力を消費するが、日本上空を通過する約10分間を実験時間とすると、消費電力量は25Wh程度でバッテリー容量の10%以下であり、十分な電力を確保している。

表1 「ぎんれい」主要諸元

外形寸法		398×398×445 mm(機軸方向が 445 mm) (包絡域設計要求：400×400×450 mm)	
質量		32.9 kg (質量設計要求：30±6kg)	
姿勢制御	待機時	地心指向 (粗制御)	
	ミッション時	地上局指向 (精制御)	
軌道		高度 400km, 軌道傾斜角 65deg.	
通信	アップリンク：145MHz 帯	1200bps	
	ダウンリンク：430MHz 帯	1200bps	
電力	消費電力	待機時最大消費電力	9.4 W
		ミッション時最大消費電力(瞬間)	152 W
	最小発生電力(1 周回平均)		7.9～19.3 W
ミッション	受光用光学系		φ 80×200 mm
	発光用光学系	High Gain LED 高速通信(モールス, FSK)用	φ 35 凹面鏡 (半値角 3deg.)×32 個 (地球指向面) 15wpm, 1,200/9,600bps
		Low Gain LED ビーコン(モールス)用	LED 単体 (半値角 55deg.)×16 個 (側面パネル各 4 個) 15wpm
その他機能	アマチュア無線サービス		衛星情報ビーコン(モールス信号)送信, コマンドに対する自動応答
	モニタカメラ (衛星の視野確認用)		CMOS カメラ

3. ミッション機器

ミッション機器である可視光通信実験システムは、半値角3度を実現するための凹面鏡とその焦点面に取
り付けられるLED、変復調回路、変調された信号でLEDを点滅させるドライバー、地上からの光を受光する
光学系より構成される。

3.1 High/Low Gain LED

使用するLEDは日亜化学工業(株)のNVSW119Aで、口径35mmの凹面鏡の焦点面に配置され(図3)、約
3度の半値角で照射される。凹面鏡はアルミ製で内面は電解研磨により鏡面化している。High/Low Gain
LEDは同じ素子を使用しているが、前者(High Gain LED)は凹面鏡により照射角を狭めており、地上からは
約1等星に相当する明るさで光ることが確認されている。後者は半値角約55度で、地上からは約8等星に相
当する明るさであるが、衛星の姿勢がどのような状態でもその存在が確認できるように設計されている。肉
眼では捉えられないが、小型望遠鏡等でその光が撮影されている。

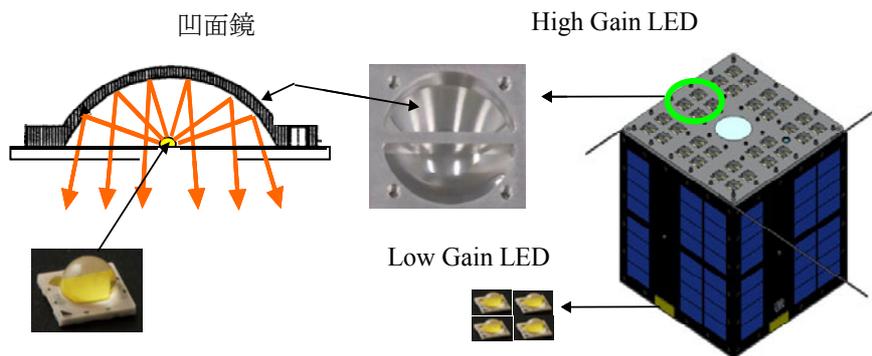


図3 High/Low Gain LEDの配置

3.2 変調回路

可視光通信変調回路は可視光によるデジタル信号を送信するためにFSK変調する。設計仕様としては、
キャリア周波数が1.942MHz、通信レート1.2/9.6kbpsでインターフェースとして変調データのUSB/RS-232C通信
機能を有する。その機能ブロック線図を図4に、地上実験装置を図5に示す。このうち、LEDユニット及び
FPGAボードの構成はフライトモデルと同じ仕様である。

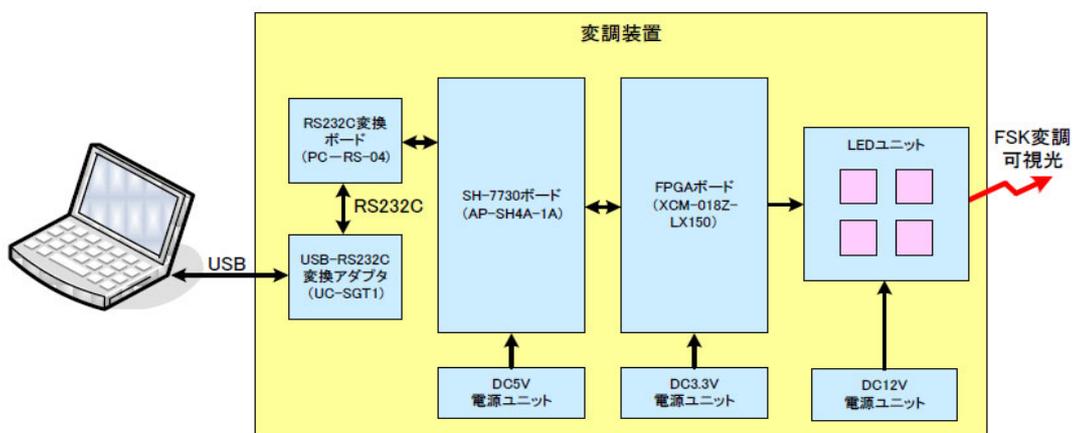


図4 変調回路機能ブロック線図

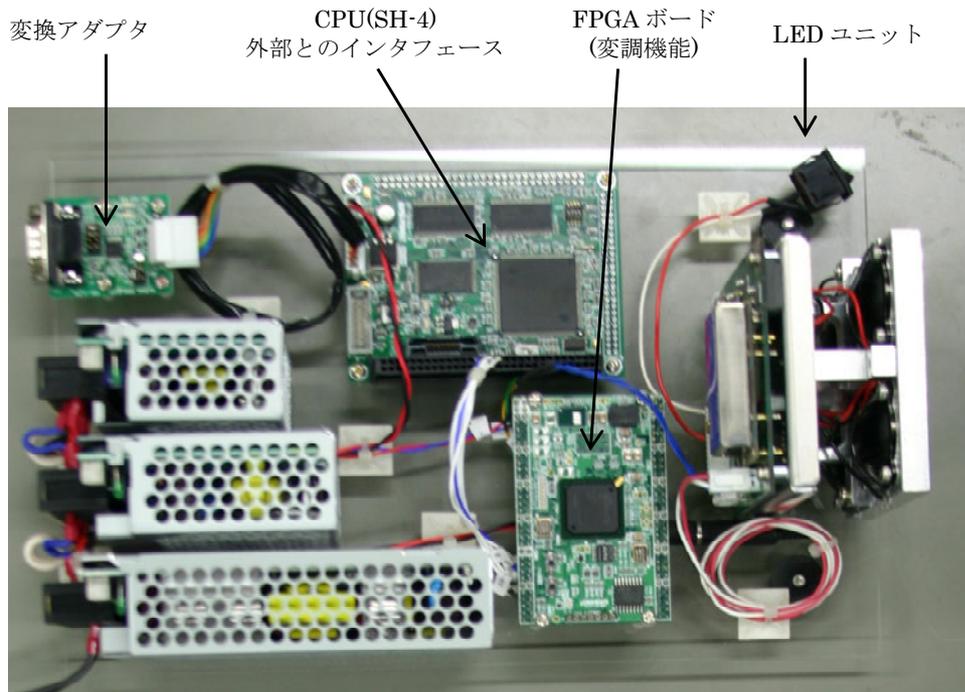


図5 地上実験用変調回路

3.3 復調回路

可視光通信復調回路は可視光によるFSK変調されたデジタル信号を復調する。受光素子は3x3のアレイ状に配列されているため、9チャンネルの復調機能を有する。設計仕様は、キャリア周波数:1.887MHz、通信レート1.2/9.6kbps、復調器は9ch独立、受光強度信号は9ch独立に各受光素子の出力(RSSI)を送出する。インターフェースは復調データのRS-232C通信機能であり、その機能ブロック線図を図6に、地上実験装置を図7に示す。RSSI出力は姿勢制御ボードを経由して搭載計算機に転送され、地上からのコマンドによりテレメトリデータとして取得する。一方、姿勢制御モードがリアクションホイール駆動モードに入っていると、RSSI出力が検出され次第自動的に地上からのLED光を追尾するモードに移行し、地上・衛星間のクローズドループ構成となり、アップリンクデジタル通信回線が確立する。受光ユニット及びFPGAボードの構成はフライトモデルと同等である。

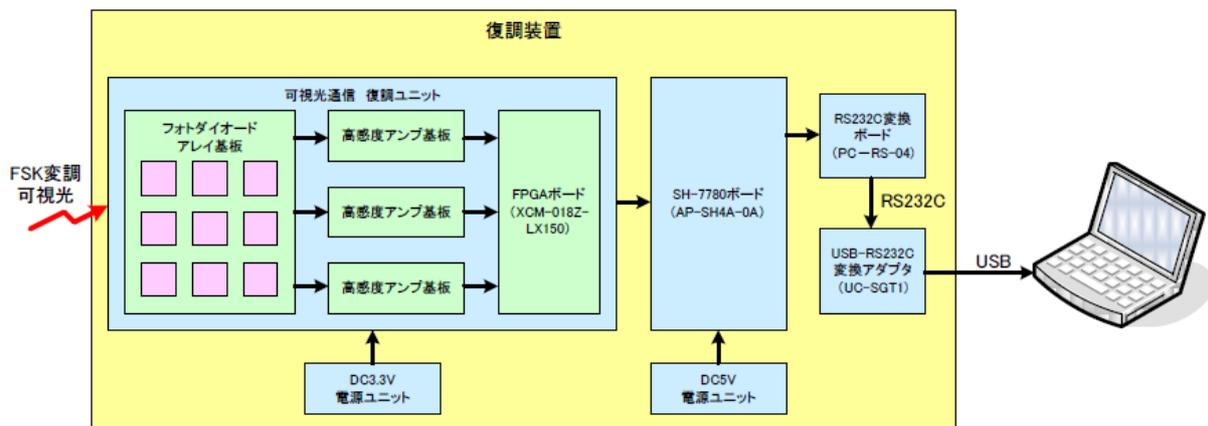


図6 復調回路機能ブロック線図

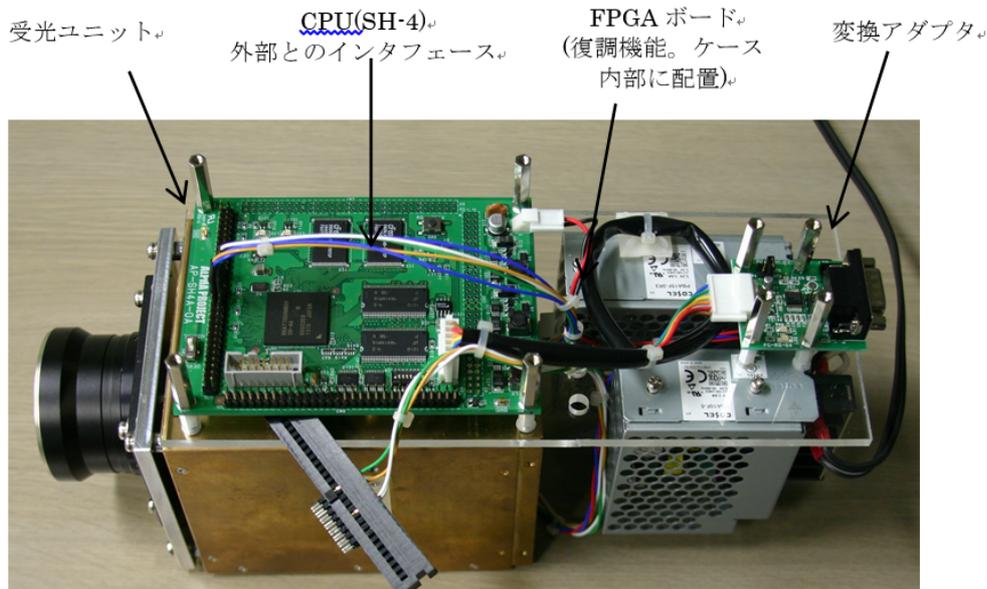


図7 地上実験用復調回路

3.4 地上実験による評価

フライト品と同等の装置(EM相当品)を用いた地上実験を実施し、距離による受光レベルの評価を行った。図8(a)は受光側で、3×3のPDが口径280mm／焦点距離2800mmの光学系(望遠鏡)の焦点に配置されている。9素子はそれぞれ独立にFSK信号の復調及び光量(RSSI)を検出する。「ぎんれい」搭載用光学系はφ80mm／f=200mm)。 (b)は送信側のLEDで、4個のLED/凹面鏡から成る1ユニットを地上実験で使用している。「ぎんれい」にはこれが8ユニット搭載されている。

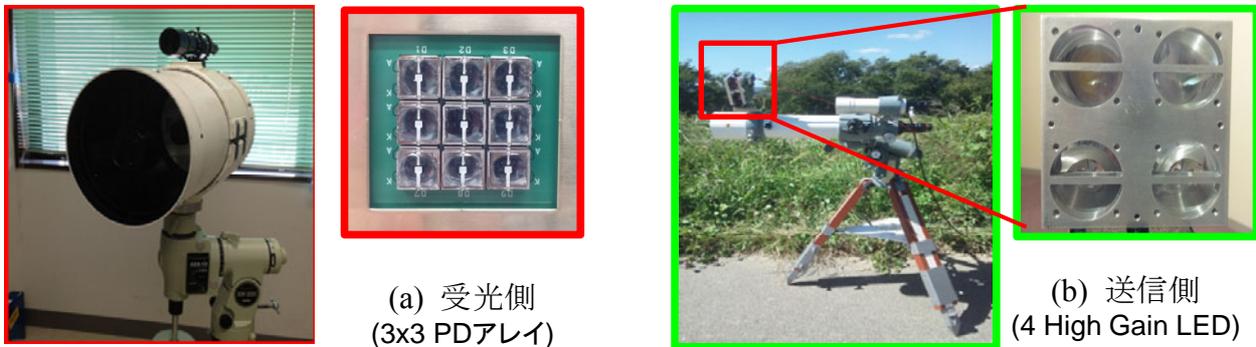


図8 地上実験装置

可視光通信の受信電力減衰特性として、

$$10 \log P_{out} = 10 \log P_0 - 40 \log r - 20 \alpha r \log e \quad (1)$$

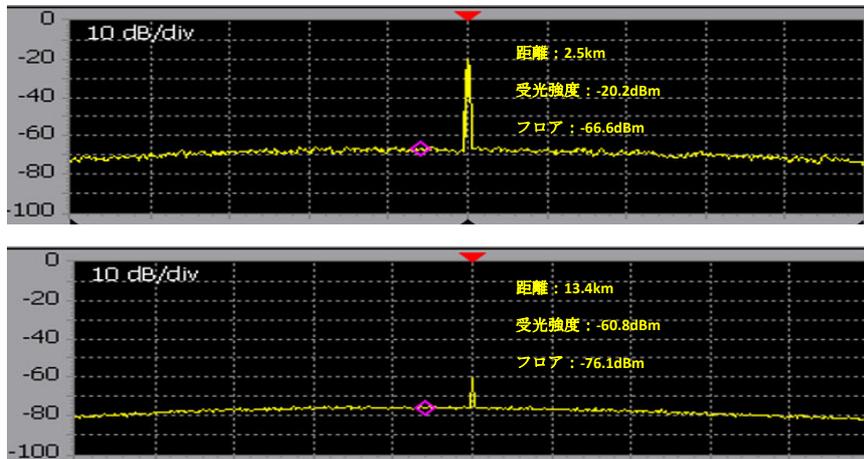
$$P_0 = R (S \beta I_0)^2 \quad (2)$$

ここで

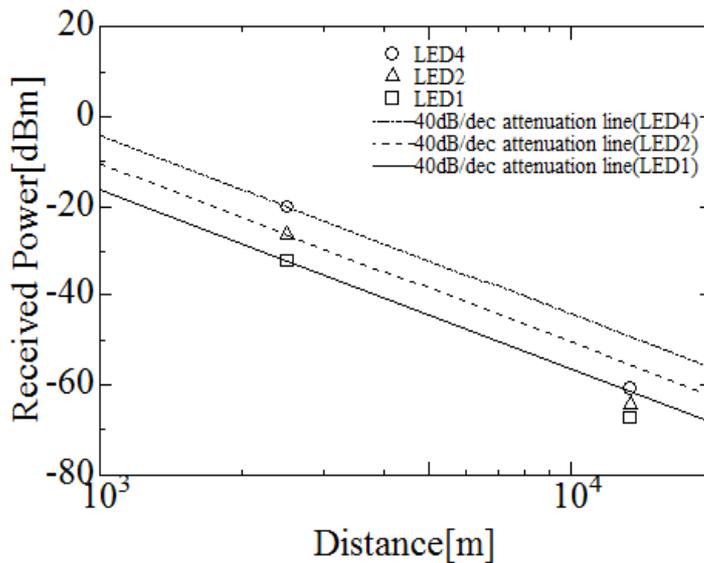
P_{out} : 受信電力、 r : 距離、 R : 内部抵抗、 β : 変換効率、 S : 照射面積、 I_0 : 単位距離での光源の放射照度、 α : 大気減数係数である。(1)式第2項は距離減衰、第3項は大気減衰に相当する。

図9は距離2.5kmと13.4kmから、LEDを1個点灯、2個点灯、4個点灯した場合に、口径28cmの望遠鏡に取り付けたPDで検出された受信電力を測定した結果である。距離2.5kmを通る40dB/decの減衰ラインに対して、距離13.4kmの場合は6～11dB小さな値を示している。LED1個の場合は減衰ラインより6dB小さいが

その理由は距離の差10.9km分の大気減衰によると考えられる。他方、LEDの数が増加するとより大きな9～11dBの差が生じるが、その理由は6dB分の大気減衰とLED間の平行光からのずれ(3～5dBの減光)によると考えられる。尚、光衛星間通信実験衛星「きらり」の実験においては晴天時の大気減衰が約3dB、やや雲有りで減衰は6～11dBと報告されている⁷⁾。



(a) 受光強度(距離:2.5km/13.4km)(LED4個点灯)



(b) 距離による受光強度の変化

図9 地上実験による受光強度の減衰特性

図10にダウンリンクを確立するための受光素子を選択するために、PD、アバランシェフォトダイオードAPD及び光電子増倍管PMTについてS/Nを測定した。室内(距離25m)において、発光側は「ぎんれい」搭載凹面鏡1個、受光側は口径80mm/焦点距離100mmのレンズを用い、各受光素子の出力をスペクトルアナライザで測定した(減光フィルタを用いて距離換算)。PMTを用いることにより、PDに比較して約50dBの感度向上が見込めるため、PMTを使用することを前提に「ぎんれい」からのLED光の受信電力を推定する。

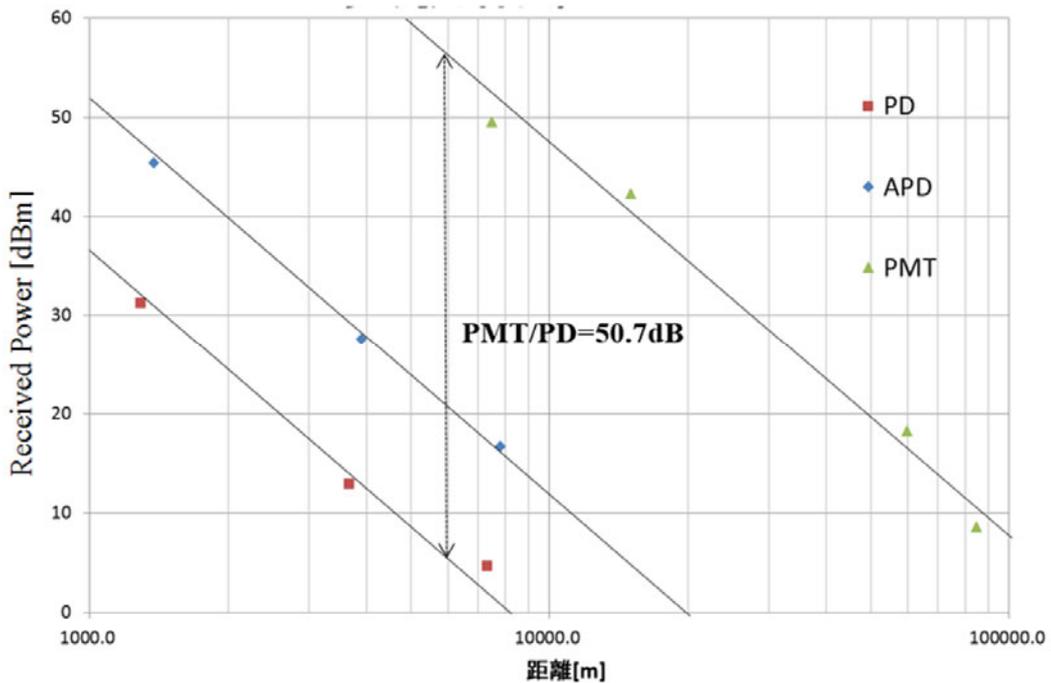


図10 各受光素子のS/N比較

図11の減衰ラインは距離11.7kmの実測値及び室内での測定値のフィルタ距離換算値をプロットしたものである。発光側は凹面鏡1個、受光側は口径80mmの光学系を使用し、スペクトルアナライザで測定。PMTのフロアレベルは-103dBmであり、「ぎんれい」の32個のLED点灯時は300kmの距離でも口径80mmのレンズで受光した場合の受信電力は-81dBmで復調可能なS/N>20dBを満足するが、この中には大気減衰(6dB以上)、並行光からのずれの影響が考慮されていないため、より受信電力に余裕を持たせる必要がある。口径28cmの望遠鏡を使用する場合は、受信電力が-60dBmと推算され、十分な余裕があるとと言える。実際の運用においては、口径28cmの望遠鏡並びに口径1mの望遠鏡にPMTを取り付けて実験を行ったが、天候不順により受光できる機会がなく大気圏再突入を迎えてしまい、データ取得には至らなかった。

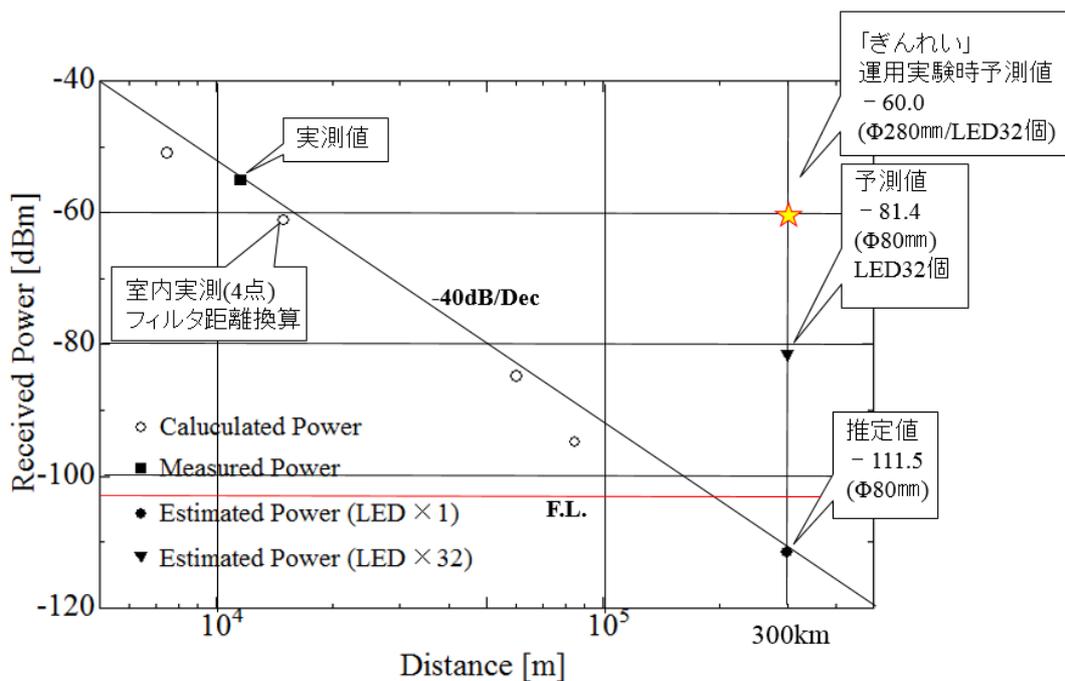


図11 PMTの受信電力

4. 「ぎんれい」の運用

「ぎんれい」は平成26年2月28日午前3時37分(JST)に打ち上げられ、24分17秒後にロケットから分離された。「ぎんれい」の国際標識等は下記の通り。

名称(国際登録): ShindaiSat
愛称: GINREI(ぎんれい)
コールサイン: JR0ZST
国際標識: 2014-009A
衛星カタログ番号: 39572

初期運用においては、LEDが正常に点灯するか、またその明るさはどの程度か等を確認するために、LED点灯実験を行った。姿勢の安定は沿磁力線制御により行われた。具体的には、High Gain LEDが搭載されている上面パネル(+Z_B面)が磁場方向に対して±15度以内の精度で指向するように設計されている(オンオフ制御によるリミットサイクル)。軌道周回につれて+Z_B軸回りに回転力が作用し、5~10deg/s程度のスピンの発生している。このスピンは3軸の磁気トルクを駆動することにより減衰させることが可能であるが、初期運用においては姿勢決定システムが正常に移行していないためスピンの残った状態で実験を行った。LED可視光通信においては+Z_B軸回りのスピンは特に影響を与えないが、衛星が角運動量を持つため、ニューテーション運動が発生し、+Z_B軸指向方向が地上に対して直線的に移動しないため、地上からの観測可能地域の予測に不確定さが出る結果となった。

図12は平成26年4月26日午前1時台のパスの「ぎんれい」の軌道及びHigh Gain LED光が地上をトレースする範囲を示したもので、各地に観測を依頼した。その結果、北海道陸別町の銀河の森天文台において、午前1時46分37秒にビデオカメラで撮影することに成功した。明るさは恒星との比較から1.5等星と算出された。当初の予測時間より約20秒遅れの天空上の位置で観測されたが、その原因はニューテーション運動に伴うものと推察される。

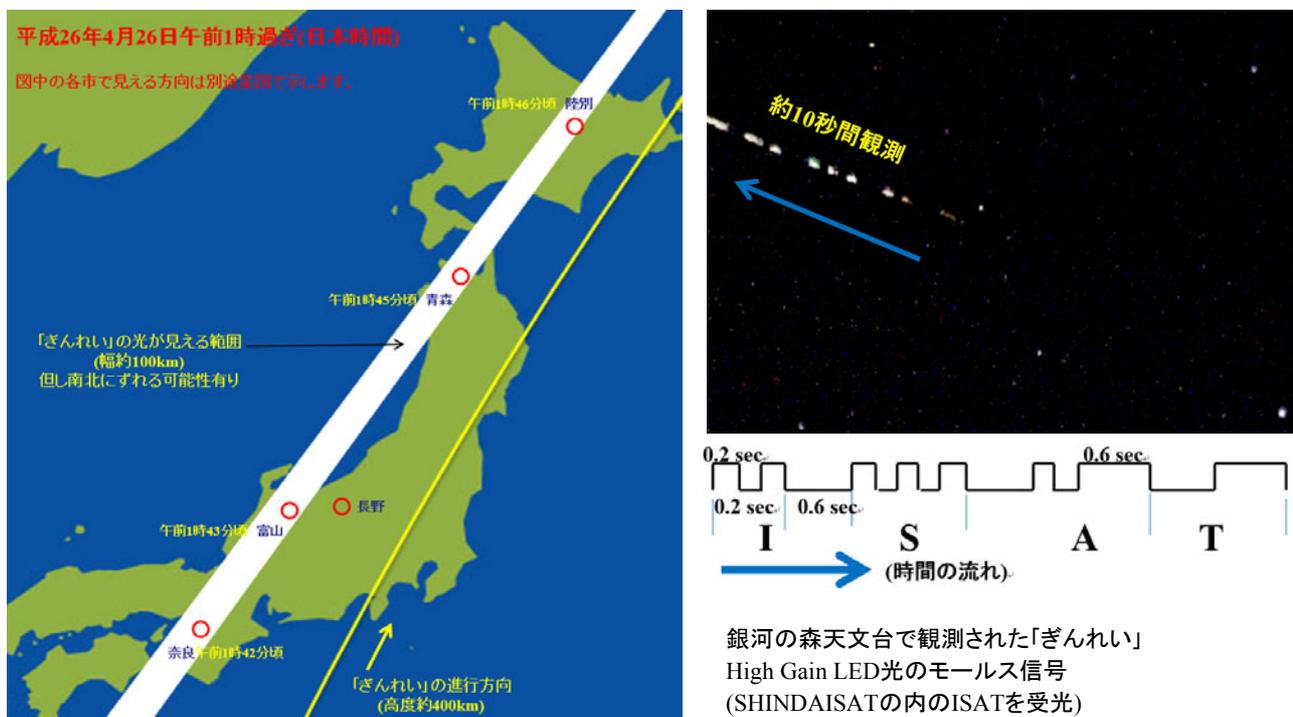


図12 第2回LED点灯実験

図13は平成26年5月28日に実施された第6回LED点灯実験で、Low Gain LEDをモールス点灯させた時の、岡山県美作市で午前1時50分50秒と同56秒に撮影された2コマの合成画像である。明るさは8等星以下である。

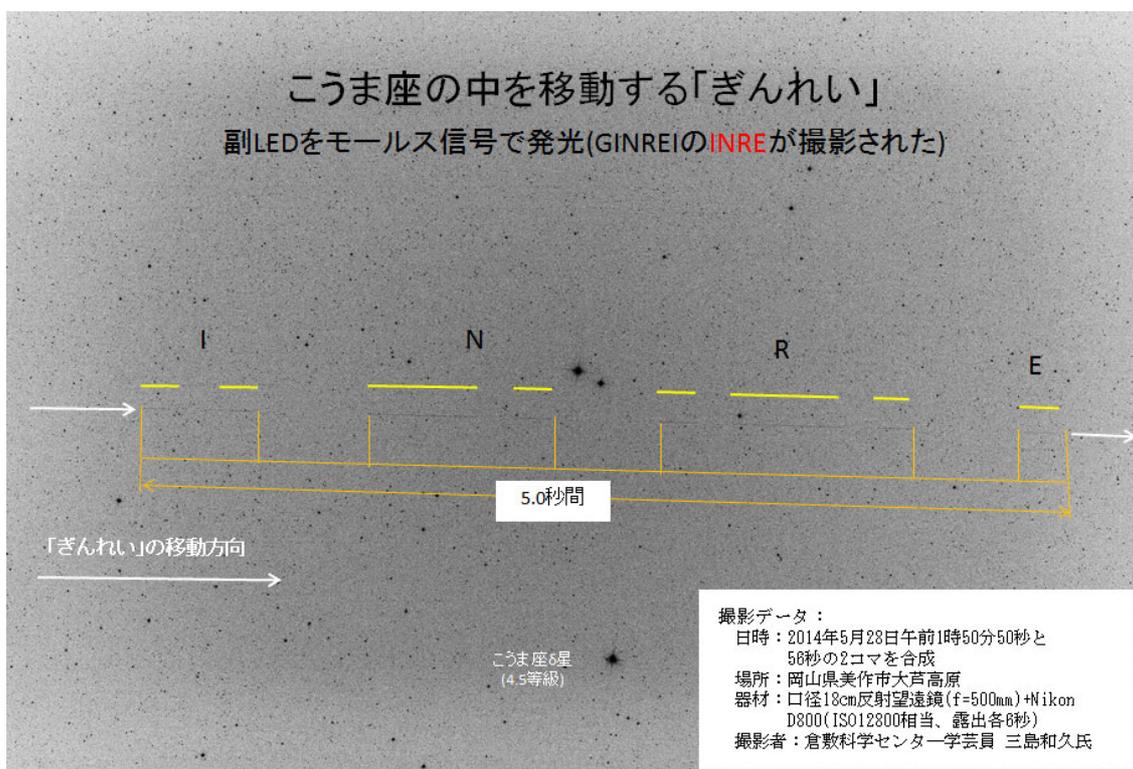


図13 Low Gain LED光のモールス信号

High Gain LEDはモールス変調の他、デジタル信号を送信するためにFSK変調される。FSK変調はキャリア周波数が1.942MHz、通信レート1.2/9.6kbpsでデータ伝送が行われる(ダウンリンク)。アップリンク用として、地上からのFSK変調された信号を復調するために、口径80mmのレンズの焦点面に3x3のアレイ状に配列された素子(フォトダイオードPD)で受光される。送信側との混信を避けるためにキャリア周波数は1.887MHzで、復調器は9ch独立で行われる。またRSSIも9ch独立に出力され、そのデータは地上からのLED光を自動追尾するために姿勢制御ボードに転送され、リアクションホイールを駆動する(地上・衛星間のクローズドループ姿勢制御)。

実際の運用においては、ダウンリンク及びアップリンクの確認をとることが出来なかった。ダウンリンクにおいては、受光素子として衛星搭載と同じPD及びより高感度のPMTを採用した受光装置を開発し、口径1mの望遠鏡(富山市天文台及び銀河の森天文台)に取り付けて実験を行ったが、スペクトルアナライザでの受信を確認できなかった(入射光がなかった)。地上実験からは、PMTを使用した場合は十分な強度の受光レベルが得られたが、実際に実験を実施できた機会は数回しかなかったため、気象条件、衛星の姿勢運動の関係で、LED光が地上局方向に照射する機会が得られなかったことによる。一方、アップリンクに関しても大気圏再突入直近の平成26年11月18日に青森県八戸市において双方向通信実験を実施したが(図14)、雲に覆われて地上からのLED光は「ぎんれい」に到達しなかった。地上受光系は口径28cmの望遠鏡にPMTを取り付けてスペクトルアナライザで解析する準備を整えたが、「ぎんれい」からのLED光を確認することが出来なかった。アップリンク用のLED光源は搭載型LEDよりもより点光源に近いLED(NCSW170A(日亜化学工業(株)製))を採用し、口径120mmのレンズ系で半値角0.3度に集光する設計を行って製作した(7灯を用いて300km遠方で 10^{-4} ルクスの照度)。



図14 双方向可視光通信実験

5. 運用履歴

平成26年4月24日の第1回実験から大気圏再突入2日前の11月22日までに56回の公開実験並びに2回の予備実験を実施。表2に後半の実験履歴を示す。High Gain LEDのモールス点灯は23回計画したがその内3回は不点灯、FSK変調点灯は22回計画し4回が不点灯、Low Gain LEDは13回のモールス点灯を実施した。不点灯の主な理由はコマンド不通による。地上から目視或は撮影してLED光が確認された回数は7回であった。確認できなかった主な理由は天候不順(曇り空等)により遮光されたこと、一地点からの観測時間が20秒程度と非常に短いため観測が困難であること、ニューテーション運動により地球指向面が観測地点と一致しなかったこと等が挙げられる。

表2 運用履歴(第35回～最終)

実験NO.	日時 (日本時間)	主LED		副LED		結果	
		モールス	FSK	モールス	点灯	観測	
						確認	PD/PMT取付け他
35	9月3日午後7時台		○		○	×	PD(銀河の森天文台口径1m望遠鏡)
36	9月4日午後7時台	○			○	×	
53	9月29日午前3時台		○		○	○	PD(富山市天文台口径1m望遠鏡)
55	10月2日午前2時台		○		○	×	PD(富山市天文台口径1m望遠鏡)
37	10月15日午後10時台	○			○	×	
38	10月16日午後10時台	○			○	×	
39	10月18日午後9時台		○		○	×	
40	10月19日午後9時台		○		○	×	
41	10月21日午後8時台		○		○	×	
42	10月22日午後8時台	○			×	×	バッテリー電圧の回復が遅いためLED点灯実験中止
43	10月25日午後7時台	○			○	×	アップリンク(モールス)実験
44	10月28日午後5時台		○		○	×	アップリンク(モールス)実験、PMT(富山市天文台口径1m望遠鏡)
45	10月29日午前3時台		○		○	×	PMT(富山市天文台口径1m望遠鏡)
46	10月29日午後6時台		○		×	×	電波不通のためLED点灯せず。太陽光反射が各地で観測
47	10月30日午前3時台		○		×	×	電波不通のためLED点灯せず
48	11月2日午前2時台		○		○	×	
49	11月3日午前2時台		○		×	×	電波不通のためLED点灯せず
50	11月15日午後9時台		○		○	×	PMT(銀河の森天文台口径1m望遠鏡)
51	11月16日午後9時台		○		○	×	PMT(銀河の森天文台口径1m望遠鏡)
52	11月17日午後8時台		○		×	×	HKデータ取得のためLED点灯実験中止
53	11月18日午後8時台		○		○	×	双方向可視光通信実験。28cm望遠鏡で受光
54	11月20日午後8時台		○		○	×	アップリンク(モールス)実験。28cm望遠鏡で受光
55	11月21日午後7時台		○		○	×	アップリンク(モールス)実験。28cm望遠鏡で受光
56	11月22日午後7時台		○		○	×	アップリンク(モールス)実験。28cm望遠鏡で受光

6. 可視光通信の可能性

「ぎんれい」プロジェクトでは、衛星・地上間の超長距離双方向可視光通信実験を行ったが、より近距離の範囲において照明と通信を融合した分野への応用が期待されている。通信距離と応用分野の例を下記に示す。

(1) 数百m程度までの距離

懐中電灯は最も多く私たちの日常生活で使用されている照明器具であるが、これに通信機能を付加させることにより利便性が向上する。特に大規模災害時においては、携帯電話が不通の初期の通信システムの確保と安否の確認、情報伝達に大きな役割を果たすと思われる。例えば、建屋に取り残された人の情報を救難ヘリから確認する場合、本装置を用いることにより直接会話が可能となり、正確な情報を得ることができるため、短時間に多くの地点の情報を取得することができるようになる。信州衛星研究会では、日常生活では懐中電灯として使用するが、必要に応じて会話ができる、懐中電灯型双方向可視光通信装置の開発を行っており、早期の実用化を目指している。図15はその試作モデルで、150m程度の双方向実験に成功している。

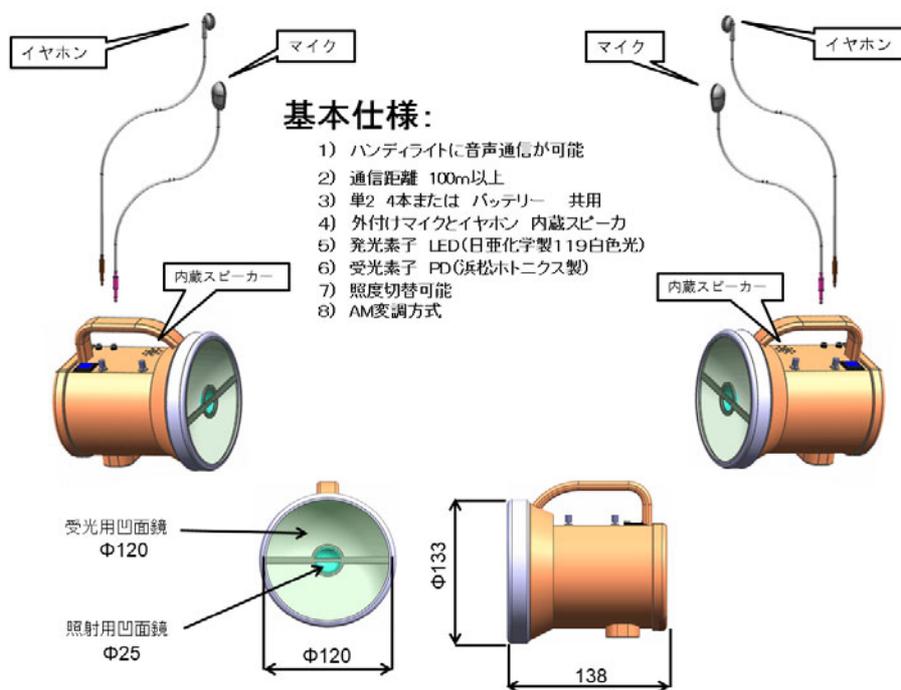


図15 懐中電灯型双方向可視光通信装置

(2) 数百m～数km程度

一方又は両方を固定して手振れを防ぎ、特に受光側光学系の大口徑化、受光素子の感度向上により、上記懐中電灯でも通信が可能となる。

(3) 数km～数十km(見通しのきく範囲)

追尾機能を持つ投光器／受光器により地上における灯台ネットワークの構築が可能となる。光源の確認後、自動指向・追尾システムとする。「ぎんれい」で開発された送受光系がそのまま利用可能。

(4) 衛星間通信(数百km以上)

電波を使用しない可視光だけの通信システムの実現。比較的広い照射角のため、姿勢及び追尾精度が緩和され、フォーメーションフライトする衛星間の通信システムとして利用可能と思われる。

7. あとがき

信州大学と信州衛星研究会が連携して開発した、世界初のLED可視光を用いた衛星・地上間の双方向可視光通信実験衛星「ぎんれい」の開発と実験結果について述べた。「ぎんれい」は約2年間という短期間で、基本設計からフライトモデルの製作・試験まで行われた。軌道投入後、CWビーコンは正常に機能し、またFMコマンド送信／テレメトリ受信、LEDの変調・点灯も正常に行われ、地上からもほぼ予想通りの明るさで観測された。姿勢制御の基本は、FOGレートダンピングを入れた沿磁力線制御であり、LED点灯実験も沿磁力線制御モードで行われたが、リアクションホイールを用いた地上局指向モードは太陽センサ・GPSによる姿勢決定系に不具合が生じ実現できなかった。

超長距離の可視光通信として、モールスモードでのダウンリンクは眼視及び画像取得で確認された。FSK変調されたデジタル信号は、富山市天文台並びに銀河の森天文台の口径1メートルクラスの望遠鏡に受光装置を取り付けて実験を行ったが、「ぎんれい」の姿勢制御系が地上局指向モード移行できなかったため地上局からLED光をとらえることが出来ずデータ受信に至らなかった。地上実験の解析から、受光素子にPMTを用いることによって比較的小型の光学系(口径28cm程度)でも可視光通信が可能であることが明らかとなった。地上からFSK変調されたLED投光器を「ぎんれい」に向けて照射するアップリンク実験も行ったが、「ぎんれい」側の受光確認を示すテレメトリデータ取得はできなかった。

可視光通信は光通信の一つであり、近距離通信としては高速データ伝送が可能であることが報告されているが、可視光の広がりによる減衰、非コヒーレント光によるS/Nの限界等により、レーザー通信のように長距離・高速データ通信の特性を有している訳ではない。一方、広がり光ゆえのポインティング精度の緩和、日常生活における利用が制限されない、照明と通信機能の融合等を特徴とした分野での活用を進めていくべきであろう。

信州衛星研究会では、「ぎんれい」の成果を生かして、懐中電灯型双方向可視光通信装置の開発を行っており、日常生活における可視光通信の実用化を目指している。■

参考文献

- 1) http://www.jaxa.jp/press/2011/12/20111214_sac_subpayload_j.html
- 2) 中島厚:「ぎんれい」による可視光通信実験結果とその応用について、3F03、第59回宇宙科学技術連合講演会、鹿児島、2015.
- 3) 中島厚他:超小型衛星「ぎんれい」を用いた長距離可視光通信実験、3C03、第58回宇宙科学技術連合講演会、長崎、2014.
- 4) A. Nakajima et al.: "ShindaiSat", a Visible Light Communication Micro-satellite, 9th IAA Symposium on Small Satellite for Earth Observation, IAA-09-0209P, Berlin, 2013.
- 5) 中島厚:可視光通信実験用超小型衛星の開発、Space Japan Review 4 & 5, pp1-9, No.79, April/May, 2012(日本語版SJR4&5月号(No.79)).
- 6) A. Nakajima et al.: ShindaiSat : A Visible Light Communication Experimental Micro-Satellite, ICSOS (International Conference on Space Optical Systems and Applications), 1569603077, Ajaccio, 2012.
- 7) NICT情報通信機構 ワイヤレスネットワーク研究所宇宙通信システム研究室HP (<http://www2.nict.go.jp/wireless/spacelab/lasersatellitetech/index.html>)