

可視光通信実験用超小型衛星の開発

—世界初、超長距離地上・衛星間可視光通信の実現を目指して—

信州大学大学院理工学系研究科 教授

中島 厚

可視光通信は光通信の中でもレーザー通信と異なり目に見える光(360~830[nm]の波長を持つ電磁波：JIS Z8120の定義)を利用した無線通信である。近年の省エネの必要性から照明器具や信号機などの光源がLED に変わりつつある。これらのLED を人の目にはわからない程の速さで高速に点滅(変調)させることにより、データを送信することができる。可視光通信の主な特徴を記すと、

- (1) 可視光通信は日常生活上で目に見える光を使用するため人間に安全である。また照明に用いている数ワットという高い電力でそのまま送信する事ができる。
- (2) 照明可能な領域はそのまま可視光通信領域となり、我々の生活のあらゆる場がワイヤレス通信の場となる。
- (3) 通信状態が目に見える。指向性を持たせて通信の漏洩を防ぐ事が可能。
- (4) 現在のところ電波法などの法的規制がない。
- (5) 病院や宇宙船内では精密機器への影響から電波などの無線通信は使用できないが、可視光では影響は無いと考えられる。
- (6) 従来では不可能であった水中通信が可能となり、新たな利用の開拓、応用が進められている。

可視光通信は、照明のあるところ通信あり、という概念から日常の生活空間がそのまま通信の場となり、照明下に受光部をかざす事により通信情報を取得する事が可能となる。またより近距離においては数百Mbpsの高速通信も可能である事も報告されている。一方、長距離通信分野では、レーザー光と異なり、光の照射角が広がるため高速のデータ伝送は不向きとされるが、逆に高精度指向なしに通信が可能であるという特徴を生かす事で、比較的低速(会話程度やメール文等の情報)での長距離通信が新たな応用分野として期待されてきている。数W程度のLEDでも照射角を数度程度に絞る事により、数十km離れた距離からも視認できるため、受信側の集光能力を高める事により十分な通信回線の確保が可能となる。懐中電灯程度の小型光源で実現できる事から、例えば災害初期において数kmの長距離通信ができる簡易通信システムとしての潜在能力があると考えられる。

我が国における可視光通信の研究活動は、2001年に電子情報通信学会第3種研究会「可視光空間通信研究会」に始まり、その後可視光通信コンソーシアム(VLCC)が活動を続けている。その目的は、可視光素子を、照明、信号機、電光掲示、表示などに利用しつつ、可視光の波動性(光の波、厳密に言うと明るさの強弱)を通信に利用することで、日本発の高速、安全でユビキタス

な可視光通信システムを研究、開発、企画、標準化、普及させる事、とされている¹⁾。

可視光通信は比較的近距離通信を主としているが、長距離通信の実験も行われている。例えば、上記VLCCは、2007年9月より灯台サブプロジェクトとして既存のLED灯台を応用した長距離可視光通信の実現へ向けて活動を開始し、2008年10月には千葉県の九十九里浜において、LED灯器を使用している灯台からの発光信号に情報を載せて、長距離通信が可能であることを確認する基礎実験が行われた。この実験においてはイメージセンサを用いている(通信距離2kmでは通信速度1022bps、通信距離1kmでは通信速度1200bpsを記録)²⁾。

一方、(株)アウトスタンディングテクノロジー(OST)は、2008年から長距離の可視光通信実験を行っており、2009年では3W高輝度LEDを使用して千葉県東金市と九十九里浜の間13km、通信速度5kbpsで通信を成功させており³⁾、更に2010年には10W高輝度LEDを使用して42kmという世界最長の距離を同様の5kbpsの通信に成功している⁴⁾。

信州大学では、2010年に開催された第18回衛星設計コンテスト⁵⁾において、50kg級超小型衛星「こもれび」を提案し、設計部門で電子情報通信学会賞を受賞した。本衛星は、木曾ヒノキ等の森林植生を観測するための森林観測衛星で、そのデータ伝送に可視光通信技術を利用する事を提案した。指向性が狭いレーザー光と異なり、可視光では照射角が数度と指向性が緩やかであるため、高度な姿勢制御や追尾機能を持たない超小型衛星への利用に実現性が高いものと考えられる。その後、衛星・地上間の数百km離れた超長距離間通信の回線成立性の検討や技術開発を進め、2013年度にはH-IIA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」が打上げられる事となった⁶⁾。本衛星は、30cm立方、20kgの超小型衛星で、世界に先駆けて衛星・地上間の双方向通信実験を主ミッションとしている(2012年5月時点で、40cm立方、35kgへとサイズアップを図っている)。

我が国における50kg級超小型衛星の相乗り打上げは、1986年のH-Iロケット試験機1号機にアマチュア無線衛星「ふじ1号」(主衛星は「あじさい」、他の相乗り副衛星は「じんだい」)で、以降、安価、短い開発期間を特徴とする超小型衛星は数多く打上げされるようになったが、衛星バスシステムの中でも通信系が一つのネックとなっていた。その理由は、通常、これらの衛星がS帯やアマチュア帯を主に使用しており、これら帯域は非常に混雑している事、また電波申請に国際調整が必要で、認可までに時間を要するといった点である。信州大学ではこの問題を解決する手段として、LEDを用いた新たな宇宙・地上間の双方向の通信手段としての可視光通信の可能性に注目した。以下、信州大学が開発している「可視光通信実験衛星 ShindaiSat」について紹介したい。

図1に衛星外観とLED光源、表1に主要諸元を示す。衛星寸法は40cm立方で、ロケットの分離面にはPAF239Mが取り付けられている。地球指向面は可視光通信用の送信用凹面鏡及び受信光学系(レンズ系)が配置され、他の4面には太陽電池が貼り付けられている。可視光の照射面は常に地球を指向するために、3軸制御方式が採用されているが、地磁気を主要姿勢センサとしているため数度程度の指向精度である。一方LEDの照射角は6度以下を計画しているが、本衛星の姿勢精度でも任意の地上局に指向させる事が可能である。LEDの照射角は衛星の姿勢

精度、LEDの発光する光束及び必要とされる地上照射範囲に依存し、それに応じて使用するLEDの消費電力及び個数を決定する。

現在の案では、衛星構体の4面には照射角が約100度のLow Gain LEDが取り付けられ、ロケットからの分離後の衛星姿勢安定化前に点灯して、衛星の軌道上での存在と姿勢運動の有無等を把握するために使用される。地球指向面にはHigh Gain LEDと称して32個の凹面鏡の各焦点にLEDを取り付けたダウンリンク用の光源と、アップリンク用として地上からの変調された可視光を受光するための光学系が配置されている。

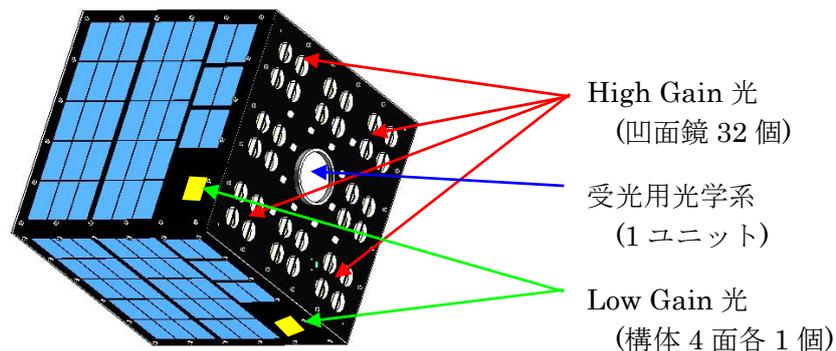


図1 可視光通信実験衛星 ShindaiSat 外観

表1 衛星主要諸元

寸法(mm)		400×400×450(PAF含む)
質量(kg)		35
軌道	高度(km)	400
	軌道傾斜角(度)	65
姿勢制御	ミッション時	3RWによる3軸制御
電力	消費電力(W)	6~100
	発生電力(W)	10
通信	バス及びアマチュア無線	アマチュアバンド
ミッション	内容	① 地上・衛星間双方向可視光通信
		② アマチュア無線サービス
		③ 地球撮影
	LED	① High Gain光(通信用) 照射角6度
	② Low Gain光(位置捕捉) 照射角100度	

衛星システムブロック線図を図2に示す。構体へのコンポーネントの配置(図3は参考例)は現在検討中であり、機器の開発は信州大学と主に長野県内の企業を中心として2011年7月に設立された信州衛星研究会と連携をとって進めている。

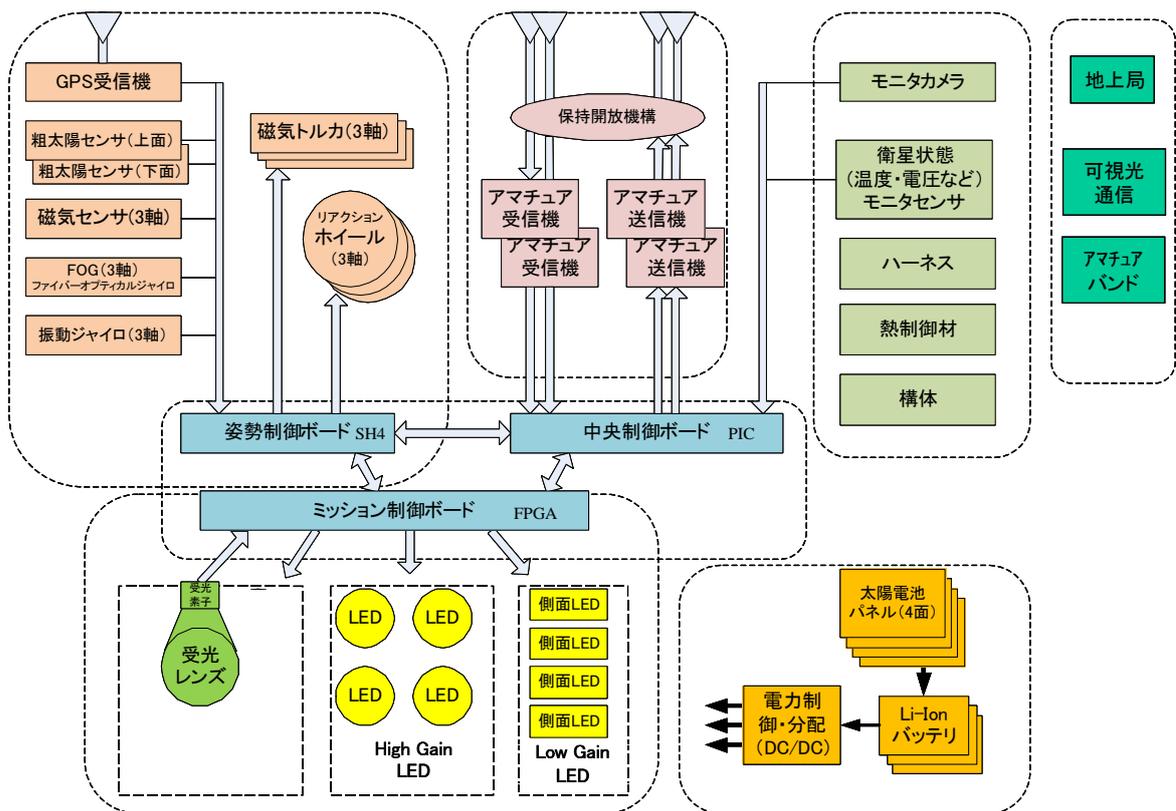


図2 システムブロック線図

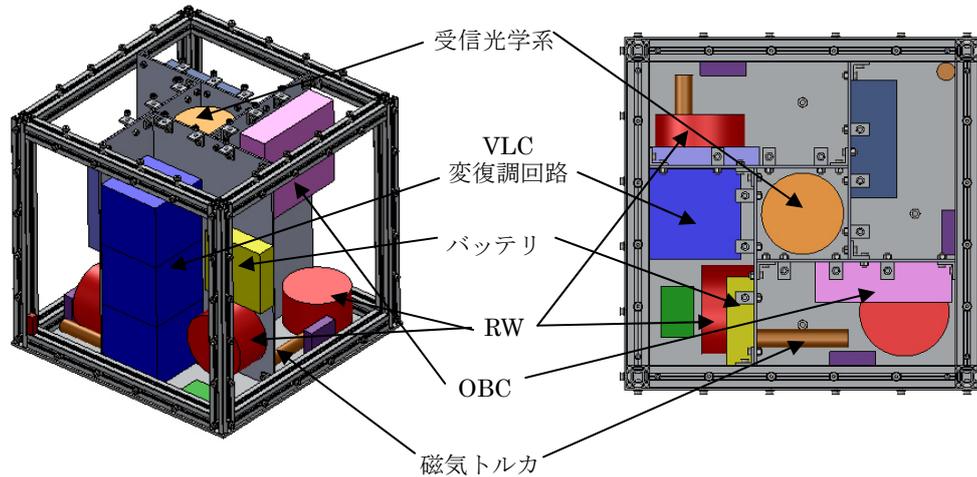
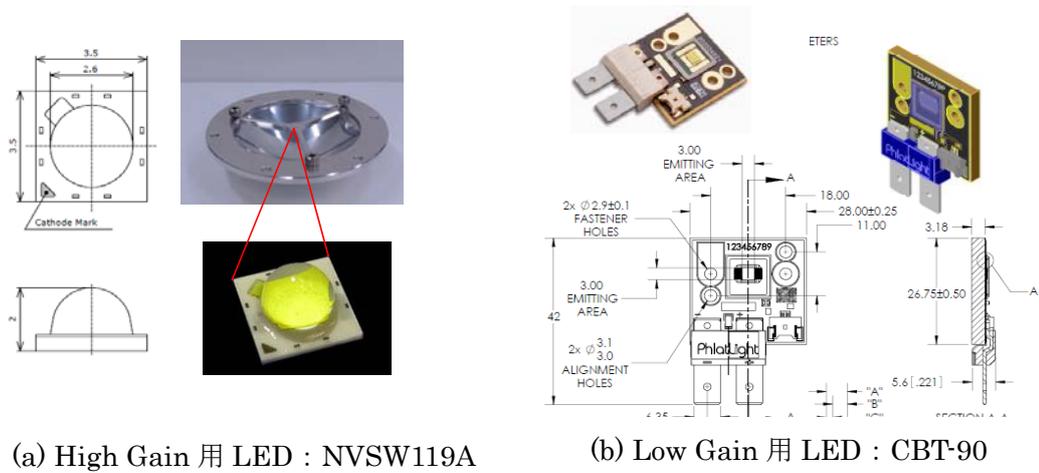


図3 機器配置例

図4(a)はHigh Gain 光に使用されるLEDで、日垂化学工業(株)製のNVSW119Aを使用し、その寸法と凹面鏡への取付け例を示す。定格3V、0.35Aで、光束は140 lumenで、最大1.5Aまで連続通電が可能である(ジャンクション温度で制約)。光源の大きさは1mm角でほぼ点光源と見なせるため、凹面鏡により6度の照射角を得る事が出来る。また、Low Gain 光用LEDは、米

Luminus 社製の CBT-90-W65S-C11 (定格 3.6V、9.0A で、光束は 1,380 lumen (最大 2,000 lumen) である (図 4(b))。



(a) High Gain 用 LED : NVSW119A

(b) Low Gain 用 LED : CBT-90

図 4 搭載予定のパワーLED

図 5 は上記 LED 光の地上への照射範囲を示す。High Gain 光は高度 400km からは約 -2 等星と同程度の明るさとみられ、肉眼でも容易に見える事から、高速変調信号によるデータ伝送の他、低速変調、例えばモールス信号で点滅させる事により、肉眼でも情報を読み取ることが可能となる。一方、Low Gain 光は 8 等星程度であるため、望遠鏡等の光学系で受光する必要がある。

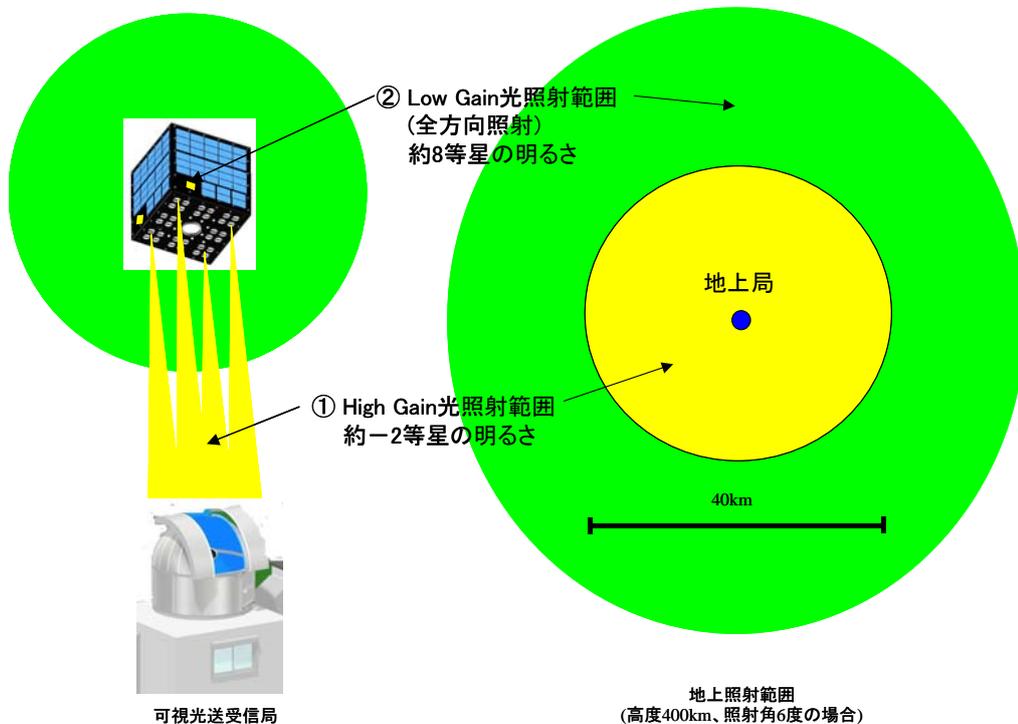


図 5 地上への照射範囲と明るさ

400km 以上の超長距離でも明るい光源として認識できれば受信側の光学系で受光・復調して情報を得る事が出来る。しかしながらこれほどの超長距離の通信実験は未だ経験が無く、特に大気の影響を十分に考慮する必要がある。そのため LED の明るさ、受信素子、受光用光学系のサイズ等をパラメータにして、10km 以上の長距離による地上実験を実施する予定である。

可視光通信の変調方式は様々検討されているが、候補としては 4 値 PPM(Pulse Position Modulation) が挙げられる。更に背景光の影響を除去するために副搬送波 SC(Sub Carrier) を用いた SC-4PPM で設計を行っている。

ダウンリンクの例として表 2 に回線設計結果を示す。主なパラメータとしては、High Gain 用 LED の光束は、凹面鏡 1 個当たり 300 lumen(2.5W) で計 9,600 lumen、照射角は 6 度、高度 400km、データ伝送量 1kbps、誤り率 1.0×10^{-5} 、受光用光学望遠鏡の口径を 1.5m としている。システムマージンをより大きくするためには、LED の光束の増加、照射角の減少、受信用光学系の口径の増加が考えられるが、光学望遠鏡の口径を大きくする事は困難であるため、集光鏡としての機能を持つ口径数メートルのパラボラアンテナの利用も考えている。

表 2 ダウンリンク回線設計結果例

No.	項目	単位	DownLink 値	備考
送信系				
1	変調方式		SC-4PPM	
2	光束	lm	9600	300 lumen × 32 個(凹面鏡)
3	ビーム広がり角	deg	6.0	
4	光波長	nm	555	
5	送信光学系損失	dB	-2.0	論文値
6	送信アンテナ利得	dB	34.7	
7	EIRP		74.1	
自由空間系				
8	伝送距離	km	400.0	
9	指向追尾精度	deg	1.0	
10	指向誤差損失	dB	-0.5	
11	伝搬損	dB	-259.1	
12	大気損失	dB	-11.8	ランベルト・ペールの法則
受信系				
13	伝送速度	bps	1000	
14	BER		1.0E-05	
15	受信光アンテナ径	m	1.5	
16	受信光アンテナ利得	dB	138.1	
17	受信光学系損失	dB	-2.0	論文値
18	受信電力	dBm	-67.1	受光素子入力
19	PD 受光感度	A/W	0.450	
20	受信電力	dBm	-111.6	受信機入力
21	所要受信機入力電力	dBm	-117.6	
22	システムマージン	dB	6.0	

アップリンクとしては、衛星搭載側の受光用光学系の口径が 80mm 程度と小型であるため、地上から強力なビームが必要となる。一例として、衛星側の LED 光束の 10 倍の 96,000 lumen を照射角 2 度で、衛星を追尾しながら照射する場合、伝送速度を 100bps に設定するとおよそ 6dB のシステムマージンが得られる。これをより大きくする手段として、光束の増加及び衛星追尾精度を向上させて照射角を小さくする事が考えられる。

図 6 は、口径 70mm の凹面鏡の焦点に NVSW119A を 1 個 (2.5W) で発光させ、10km の距離から撮影した写真である。実験目的としては、LED 消費電力と 10km 先の視認性(明るさ)の比較、照射角の確認で、LED を変調した通信実験ではない。実験中に長野県飯田市の夜景に、西空に傾く金星がカメラの視野に入り、明るさの比較も可能となった。2.5W LED は約 -4 等星で、大気の減光を受けた金星よりも明るく視認する事が出来た。本実験から求められた明るさと、LED 電力、照射角、距離から求まる明るさの計算値と比較を行う事により、400km の距離からの明るさをより正確に推定する事が可能となった。

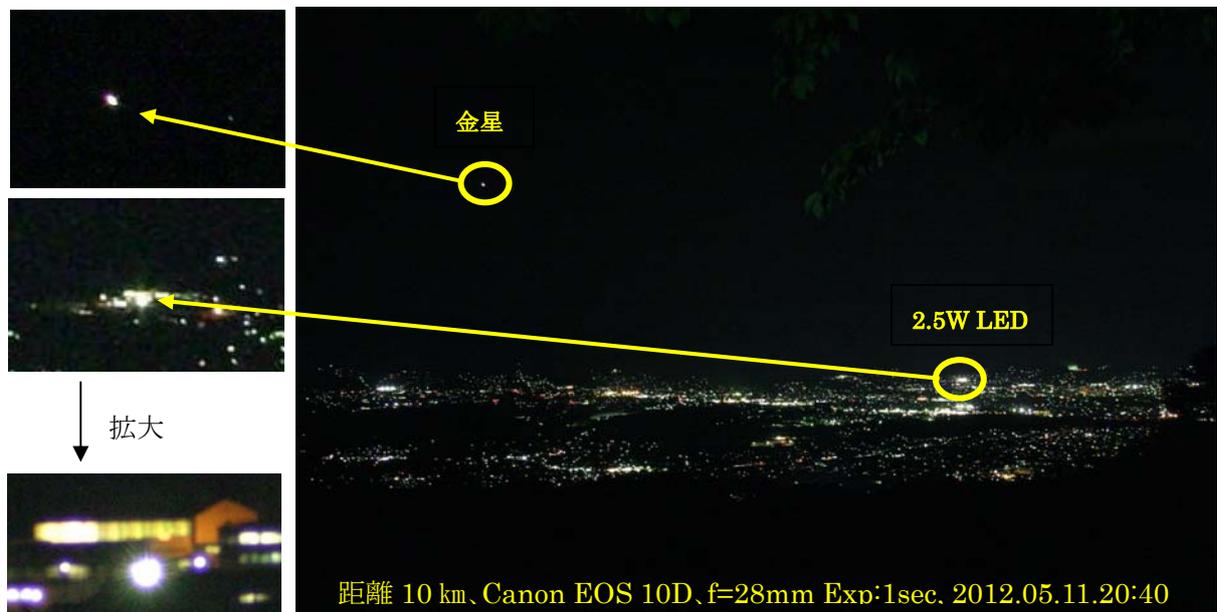


図 6 距離 10 kmにおける LED 視認性実験

図 7 は本衛星の地上局ネットワークの例である。図中の光学望遠鏡は低軌道衛星の追尾機能を有している国内の施設で、受信装置を取り付ける事により本衛星からの情報を受信する事が出来、そのデータは地上ネットワークにより信州大学管理局に集約される。信州大学地上局としては、工学部のある長野市と、サイトダイバーシティとして伊那市(光害の少ない入笠高原)への設置も検討されている。また、送受信可能な移動局も検討中で、衛星利用としての各種イベント(小中学校の校庭等での受光や通信実験等)に利用される。運用方法については今後関係機関と連携をとりつつ決定する予定である。

図 8 は可視光通信の発展性を示した図で、海中、地上、宇宙とあらゆる空間での利用の広がりが予想される。信州大学では、今回の衛星・地上間通信実験の成果を得て、次期ミッションとして衛星間通信へと展開する計画である。

可視光通信実験衛星光学追跡ネットワークの構築

プロ・アマ(全国のアマチュア天文家、天文部等)を問わない全員参加型の宇宙通信の実現

- 信州大学(長野市)における可視光送受信局と複数の受信局(伊那市他)及び移動式受信局
光学望遠鏡の他、2m以上の凹面鏡で集光する装置も検討
- JAXA,NICT,天文台等の大型望遠鏡による受信局網の構築



図7 信州大学地上局構想と国内における低軌道衛星追尾機能を有する光学望遠鏡

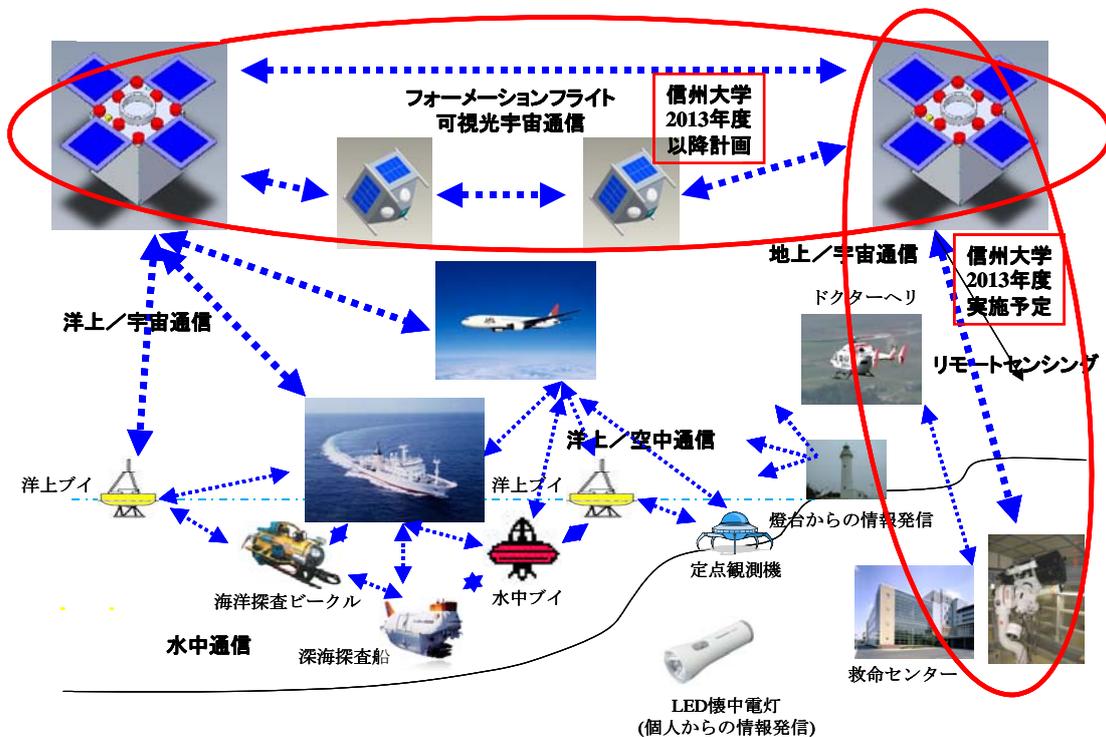


図8 可視光通信の発展性と信州大学の計画

可視光通信は、日常生活においては照明機器のLED化に伴い、生活の場がワイヤレス通信の場となり、さまざまな情報を容易に得る事が可能になりつつある。一方、高効率、高輝度のパワーLEDの技術開発に伴い、光学系との組み合わせにより数十kmの長距離通信も可能となり、目で見える通信として新たな発展が期待されている。信州大学が2013年度に打上げ予定の「可視光通信実験衛星 ShindaiSat」は、数百kmの超長距離通信に可視光を利用する世界で初めての試みであり、その成果は将来の新しい宇宙通信システムの確立に多大な寄与をもたらすものと確信している。

参考文献

- 1) <http://www.vlcc.net/>
- 2) <http://www.vlcc.net/modules/xpage2/index.php?id=3>
- 3) <http://www.ot-c.co.jp/pg64.html>
- 4) <http://www.ot-c.co.jp/pg69.html>
- 5) <http://www.satcon.jp/history/list18.html>
- 6) http://www.jaxa.jp/press/2011/12/20111214_sac_subpayload_j.html