

■4 群 (モバイル・無線) - 4 編 (無線 LAN, 無線アクセス, 近距離ワイヤレス)**X 章 可視光通信**

(執筆者：中川正雄，春山真一郎) [2011 年 6 月 受領]

■概要■

今までの、電波と赤外線の見えない光を利用する通信ではない、見える光の利用がユビキタス通信技術として注目されている。本稿では、その歴史を示すことで、同時に原理を示す。また、セキュリティに強く、インフラ (インフラストラクチャ) を多重利用でき、位置測定の精度も良好という特性を、その送信方法、受信方法から明らかにしていく。また、応用については精度の高い測位技術やアートへの応用、盗撮防止への応用などを述べる。また、標準化についても述べる。

【本章の構成】

本章では、はじめに (X-1 節) で可視光通信技術が注目される背景を述べた後、可視光通信技術 (X-2 節)、X-3 可視光通信のシステム構成 (X-3 節)、可視光通信の応用 (X-4 節)、標準化動向 (X-5 節) について解説する。

■4 群-4 編-X 章

X-1 はじめに

(執筆者：中川正雄，春山真一郎) [2011年6月 受領]

見える光を利用した可視光通信技術が注目されている。情報を運ぶ波には、電波や赤外線という見えない波と、可視光という、見える波がある。従来の情報伝送は圧倒的に見えない波が使われている。その理由は、情報伝送が唯一の目的であり、見える必要がなく、見えることが邪魔であると思われたことなどが挙げられる。従来の情報技術は、実際の世界と並行したバーチャルな世界を築くことで進展したが、最近になり、実際の世界と情報の世界が融合するようになってきている。その代表は RF-ID による自動改札などである。実際の世界と情報の世界が正確な一致を見せる必要がある。こうしたユビキタスな技術の進展は新しい技術の登場を促す。

我々人間の持つ五感のなかで、最も利用されているものが、視覚である。受ける情報の約 8 割の情報を視覚で受け取る。物や人間を識別したり、場所を認識したりは可視光の存在のおかげである。また、照明や表示といったものが可視光によるインフラ（インフラストラクチャ）であり、一般に、インフラは、どこでもあるものというユビキタスな存在である。こうして見ると、可視光に何らかの変調をかけて情報を送ることは価値のあることだと想像できる。

本稿では、可視光通信がなんであるか、その歴史や原理、応用などを示し、明らかにしていく^{1)~5)}。

■4 群-4 編-X 章

X-2 可視光通信技術

(執筆者：中川正雄，春山真一郎) [2011年6月受領]

歴史的には赤外線よりも可視光の利用の方が簡単であり、可視光無線通信を最初に行ったのは、なんと、電話の発明者であるグラハム・ベルであった。

X-2-1 アレキサンダー・グラハム・ベルの Photophone

図 2・1 は Photophone を表すもので、太陽光をごく軽い鏡で反射させるが、その鏡は音声で振動している。太陽光は遠方で集光され、光電セルで電気に変換されてイヤホンで聞くわけである。この図は、よく知られた当時の絵から、著者が真似た絵である。

この実験は 1880 年に実施され、200 m の距離でベル本人の声が伝わった。当時としては人工の光源も少なかったので、太陽を光源として利用した。

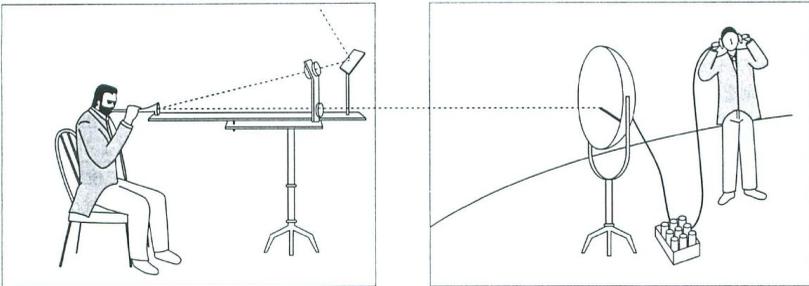


図 2・1 Photophone の概念図

X-2-2 軍用可視光通信

第二次世界大戦の記録映画や劇映画で、大西洋を航海する艦隊が、U ボートの攻撃を恐れて、無線を利用せずに、船のサーチライトを点滅させて、モールス通信を行うシーンがでてくる。あれは、まさに可視光通信である。今後の可視光通信の本質を知るうえで重要な歴史的事実である。現在ではより自動化され利用されている。その特色を箇条書きにすると次のようになる。

- (1) セキュリティに強い。

電波は広がるために、波の影からでも傍受できるので、セキュリティに弱い。光は方向性と影ができるので、セキュリティに強い。

- (2) インフラを共用できる

船のサーチライトは甲板を照らしたり、海上の浮遊物を照らしたり、岸を照らすのに利用するだけでなく、通信にも利用できる。インフラとしての場所や経済効率は大切な要素である。

- (3) 位置を知ることができる

艦隊で航行するとき、特に夜間には通信をしながら互いの位置を精度良く知ることができる。

上述の 3 つの箇条書きは今後の可視光通信の鍵になるものである。

X-2-3 可視光通信のインフラ

通信にとって、インフラは本質的なものである。可視光通信のインフラとはどんなものか、X-2-2の軍用通信の(2)にあるような照明との共用が考えられる。後述するような位置検出のために、照明インフラを用いた方法が利用される。インフラには2つの種類があると思う。単機能インフラと多機能インフラである。インフラの多くが開発当初は単機能の場合が多い。例えば道路がそうである。交通のみに利用されていたが、時代が経つと、下水道、上水道、そして電力伝送や電話線に用いられていて、多機能インフラの典型となった。我々の周囲を見回すと、多機能インフラが多いが、昔からあるインフラのなかで、単機能インフラに照明がある。蛍光灯とLEDの照明インフラは変調も可能で、エネルギーを常時供給する電源もあり、どこから見やすい場所にあるので、無線通信を行うのに理想的なインフラである。また、交通信号機はLEDのものも多くなり、LEDの高速変調特性を活かした可視光通信が考えられる。更に、LEDの看板やサインも使われており、可視光通信のインフラにも利用可能である。

X-2-4 可視光通信のデバイス

X-2-3「可視光通信のインフラ」でも述べたが、可視光通信に利用できる発光デバイスは現在のところ、蛍光灯とLEDである。蛍光灯通信の提案は約20年前からなされているが、変調方法の一種を図2・2に示す。インバータ式の蛍光灯が50Hzもしくは60Hzの交流から数10kHzの高い周波数の波にすると、周波数や位相を情報で変調する方法が示されている。この方法で数kbpsの変調が可能である⁶⁾。

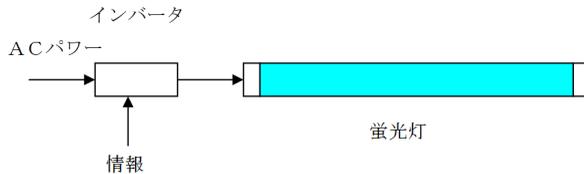


図2・2 蛍光灯における変調方法

可視光LEDについては、大別して2種類ある。蛍光剤利用の白色LEDと、単色LEDである。白色LEDには3原色(赤、緑、青)を組み合わせさせたものもあるが、変調スピードの観点からみると、単色LEDと同じである。蛍光剤利用の白色LEDは、一般的なものは青色を発光して、蛍光剤を刺激し黄色を発光させ、青とのバランスで白く見せるのである。蛍光剤発光の応答特性は青色のものより悪くなり、入力1W程度のLEDでトータルの変調スピードは3dB帯域で数MHzとなる場合もあるが、製品による。単色LEDでは、それよりも大きく、10~30MHz程度である。

受光側の素子としては、ホトダイオード(PD)として、増幅度のないPin-PDか、増幅度を持つアバランシェPDを用いる。ほとんどの場合はPin-PDが安価であるので利用される。シリコン系素子が使われる場合が多いが、最も感度の高い波長は近赤外から赤であり、波長の短い青などは感度が下がる。

赤外線の場合と同様に可視についても、発光と受光が異なる素子である場合がほとんどである。ここに着目して、可視LEDを発光にも受光にも利用する研究には⁷⁾がある。更に、LED

の背後の反射板を利用して，照明についての効率も上げながら，受光感度についても実用レベルにまで上げた研究がある⁸⁾。

■4 群-4 編-X 章

X-3 可視光通信のシステム構成

(執筆者：中川正雄，春山真一郎) [2011年6月 受領]

可視光通信の3つのシステム構成を示す。

X-3-1 簡易的方法

照明などの光に変調をかけ、それを単純に集光レンズ無しの PD で受光するシステムである。蛍光灯通信を研究する新潟大学の牧野先生によると 20 W×2 の蛍光灯により、9.6 kbps で、3 mm×3 mm 程度の Pin-PD で 4~5 m の到達距離がある。最も廉価であるが、受光部の利得がないために、到達距離も短く、背景光の影響も強く受けやすい。

X-3-2 イメージセンサ

集光レンズを使って、利得を上げることで、到達距離を伸ばすことができるが、レンズの後方の PD を複数個 2 次元のアレイにして並べるカメラ式の可視光通信の受信方法をイメージセンサによる方法という。図 3・1 がそのシステム図である。この方法の優れているところは広い範囲にわたって複数の LED などの照明があっても、多重伝送ができたり、それらが移動してもトラッキングできることである。しかも、背景光の影響も大きく避けることができる。2 次元アレイから信号を検出する方法は 2 種類ある。一つはビデオカメラと同じような、2 次元アレイをフレーム内でスキャンニングして検出するシリアル方法、もう一つは複数の PD を同時に検出するパラレル方法である。

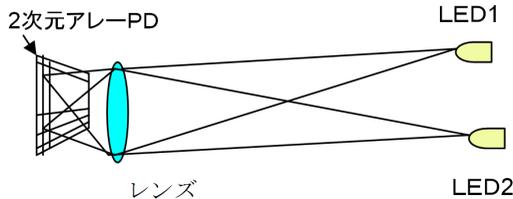


図 3・1 イメージセンサによる可視光通信システム

シリアル方法はビデオカメラのフレーム速度の速いものを改造して利用できる。特殊用途のカメラで 1 MHz のフレーム速度のものもあるが、データ速度が速くなると、フレーム周波数の制約がある。一方、パラレル方法ではフレームを構成しないので、その問題はない。ただし、PD の数が多いと、PD の後段の増幅器の数も増えて、空間的、熱的な制限があるので、PD 数を増やすことが困難である。

カシオ(株)によると 35 cm×35 cm LED の平均入力電力 25 W、白色砲弾型 LED 128 アレイ、指向角は 23 度、伝送スピード 75 Hz クロックで、受光のビデオカメラのフレームレート 150 fps、昼間、約 1 km の伝送が可能であった。高速な伝送を開発中である。また、ソニー(株)が開発した ID-Cam (4 kbps, 12 kfps) によると⁹⁾、屋内で入力 15 W 相当の LED で 40 m 程度の伝送距離とあるが、我々の測定では蛍光灯照明のある屋内通路で 100 m 以上も可能であった。何れも、シリアル方式によるイメージセンサを利用している。

このイメージセンサの利点は、単に、伝達距離を長くしただけでなく、カメラ画像を見なが

ら、どこから信号が来ているか、その信号の中身はどうかを知ることができる。例えば、ビルの照明サインに向けると、間違いなくそのビルから情報が取れるとか、交通信号機から取れるなど、面白い応用が可能である。

X-3-3 並列高速伝送

イメージセンサが複数の光源から情報を取ることができることは、高速なデータを並列にし、複数の LED に変調をかけて、個々の LED の変調速度は抑えて伝送し、受信側で、高速なデータを再構築できることを意味する。これについての提案は文献 10) になされている。ただし、送信側の LED と、受信側の PD のマッチングの問題があり、それについての解析と対策も同じ文献にある。受信の画素数が多いほど、マッチングは楽になる。

X-3-4 変調技術

変調技術は種々のものが導入できるであろう。最も簡単なものは、OOK (On Off Keying) であるが、太陽光のように変動の少ない光の影響を受けるので、何らかの搬送波を持つのが普通である。ここでは、可視光通信コンソーシアムで標準化されている LED 照明用サブキャリアインパルス-PPM (SC-I-PPM) を紹介する。図 3・2 では SC-I-PPM を上に、一般の SC-PPM を下に描いた。PPM 用のスロット間に大きな電流を流すことは一般の通信では意味がないが、照明の明るさを保つのに有効である。下の SC-PPM は昼間用になると、電力の節約になる。

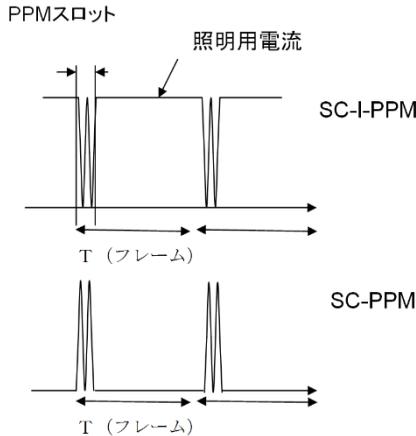


図 3・2 サブキャリアインパルス-PPM とサブキャリア PPM

2 PPM を利用した白色 LED の伝達特性について理論と実験がよく一致するとの報告がある。詳細は文献 11) に譲るが、LED と PD の特性を以下の表 3・1 に示す。

電気段増幅器 40 dB と 60 dB において、BER (Bit Error Rate) においてよい一致を見た。40 dB と 60 dB では 3 倍程度の到達距離の差がある。この理論を利用すれば、可視光通信の設計に役立つ。ビットレートと必要送信電力、ビットレートと通信可能距離、送信光電力と通信可能距離の関係が、より高速なビット速度においても分かる。なお、蛍光灯を利用した場合は、インバータの 40 kHz の電源周波数を FSK (Frequency Shift Keying) 変調にすることが多い。

表 3・1 2PPM 白色 LED 実験の仕様

送信光電力：4.8 mW	放射半値角度：70 度	データレート：100kbps
PD 受光面積：19.6mm	受光変換効率：0.34A/W	電気段増幅度：40/60dB
電流電圧変換インピーダンス：1kV/A	測定距離：3m まで	

X-3-5 他の方法との比較

可視光のライバルである電波と赤外線との比較をする。電波は透過しやすく、回折しやすいので、携帯電話などには便利であるが、場所を限定しようとする問題になる。アンテナからの電力を少なくしても、場所の精度がとりにくい。微弱電力にすると、ある程度の精度を出すことができるが、膨大な数の、電源を必要とする新たなインフラを設置しなければならない。こうしたインフラは屋内の景観の邪魔になる。また、部屋やパーティションを跨いだりして、別の部屋やコーナーを指示するなどの問題も起こり得る。X-5「可視光通信の応用」のデジタル万引き防止方法のようなものに利用すると、売り場を限定にしにくい。他の売り場にも届くので、逆に問題を起す。電源無しの方法としては、RF-ID を利用した方法が考えられるが、通信距離が短いので、壁などに貼り付ける必要がある。それを人間やロボットが探して利用しなければならない。また、壁の美観や、手に届く場合は、いたずらなどの対象になりやすいし、X-3-1 項にも示すが、光の方向は分かる視覚障害のある人や、歩行の困難な人には使いにくい。

赤外線の特性はほとんど同じであるので、最も強敵であるが、これも膨大な数の、電源を必要とする新たなインフラを設置しなければならない。人間には、どの方向から光が来るのが分からないので、視覚障害者に利用しにくい。また、屋内の景観の邪魔になるなどの問題が多い。

■4 群-4 編-X 章

X-4 可視光通信の応用

(執筆者：中川正雄，春山真一郎) [2011年6月 受領]

X-4-1 ユビキタス可視光通信

GPS のような衛星の電波を利用できない，オフィス，地下街など屋内において，位置に関する情報をこまめに正確に送るユビキタス通信技術に可視光通信技術は相応しい。図 4・1 に実証実験の写真を示す。これは，CEATEC Japan 2004 においての実験であり，携帯電話端末に可視光受光機能を付加したのが日本電気(株)，送り側の LED 照明はパナソニック(株)，アイデアは慶應義塾大学が担当した。データレートは 4.8 kbps，LED 照明は各チップ 1 ワット入力 6 個のチップで一組の照明である。照明から送られたビーコン ID 情報をもとに，その ID の Web に情報を取りに行く方式である。視覚情報をも利用して，すなわち，位置情報を示す原点を見ることができるので，確実に自分の位置が分かる。更に，視覚障害者の多くは像は見えないが，光の方向が分かるので，このシステムを利用すれば，視覚障害者をも音声で導くことができる¹²⁾。



図 4・1 ユビキタス可視光通信—CEATEC 04 実証実験—

X-4-2 ITS への応用

ITS とは Intelligent Transport Systems の略であり，車車間通信，路車間通信，歩行者 ITS などに分類できる。いずれの場合にも可視光通信はテーマになる。従来から研究の多いのは路車間通信の中の交通信号機の通信であり，情報伝送に 2 種類考えられている。信号機の LED チップすべてを同一のデータで変調する方法¹³⁾と，チップを異なるデータで伝送する並列伝送の方法であり，受信にはイメージセンサを利用する¹⁴⁾。伝送距離として，後者では 100 kbps で，30～50 m の最長到達距離がある。

X-4-3 その他の応用

(1) 移動搬送車への応用

工場などで，移動搬送車が利用されるが，そこにも可視光通信の利用が企画されている。日

本電気(株)と村田機械(株)による商品では、搬送車には2つの変調されたLEDが取り付けられる。異なったIDにすれば、移動する方向も鋭くセンシングできる。天井にイメージセンサを配置してセンシングし、センサの位置は既知であるので、搬送車の位置を測定し記録する。

(2) アートへの応用

光は人間にとって、特別の存在である。人間の存在そのものを支えているからだと思う。暗闇に差し込む光に、何らかのメッセージを感じる人は多い。岡山県立大学の児玉由美子助教授の作品では、芸術としての光に音楽などの情報を入れて、光のメッセージ性を高めるのに成功している。

(3) デジタル万引き防止システム

本屋さんの万引き被害は大きな問題のようである。最近の本そのものは盗まないが、本のページを携帯のカメラで盗み撮るデジタル万引きが問題になっているが、有効な防止策は知られていない。カメラを利用するときは当然であるが、光が必要であり、本のページの反射を利用して。この照明の光を符号で変調し、カメラのシャッターを切る動作を禁止できるように設計すれば有効な防止策になる。ほかにも、美術館での盗撮を禁止したい場合にも利用できるなど、カメラによる犯罪、プライバシー、著作権の被害防止に役に立つと思われる。

■4 群-4 編-X 章

X-5 標準化動向

(執筆者：中川正雄，春山真一郎) [2011年6月 受領]

可視光通信の標準化は現時点で日本のみで行われ、可視光通信コンソーシアムで実施されている¹⁵⁾。ここでは、可視光 ID システムの標準化の検討を過去 2 年間にわたって行ってきた。これを受けて、JEITA（電子情報技術産業協会）の AV & IT システム標準化委員会が審査をしている。

複数の可視光通信システムを規格を守らずに実用化すると、お互いの通信機器が干渉しあったり、既存の赤外線機器などに影響を与えたりする。可視光通信システム全般に共通する基本的な規格は、そのような混乱を避けるための最低限の指針を提示すること、及び様々なアプリケーションに共通的に必要な最低限の要件を定義することを目的としている。具体的には、可視光通信の光の波長の範囲を 380~780 nm とし、アプリケーションごとにその波長範囲内で 1 nm 単位の任意の範囲を決めることができるとし、図 5・1 に示されているように、主として光強度を特定の周波数を持つ正弦波を、データで変調させるサブキャリア方式を用い、異なるアプリケーションごとに、異なるサブキャリア周波数を割り当てることでアプリケーション間の干渉を防ぐ方式を提案している。

サブキャリア周波数の割り当ては、図 5・1 のように大きく 3 領域に分けられている。領域 1 は比較的低速な通信速度で送信し、可視光 ID システムがこの領域を用いている。領域 2 は、インバータ蛍光灯、インバータ HID などの光源がノイズ光がこの領域 2 のなかで強く放射するので、可視光通信には適していない。また、領域 3 のサブキャリア周波数は、高速通信を行うのに適しているが、その標準化はまだ行われていない。

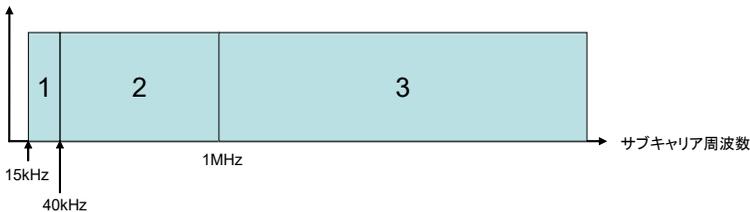


図 5・1 JEITA に提案中の標準化可視光のサブキャリア伝送方式

可視光 ID システムは領域 1 のなかのサブキャリア周波数である 28.8 kHz のサブキャリア周波数帯域を使用し、データレートは 4.8 kbps という比較的低速な通信速度で送信し、変調方式はサブキャリア 4 値 PPM としている。また、この方式では上記の ID 情報以外にテキストストリングなど、ユーザが任意に決めるデータも送れるように設計されている。

可視光 ID システムを用いた位置情報サービスの概念とは、照明器具、誘導灯、交通信号機、LED インジケータなどから ID 情報や一般データを受信することにより、位置情報や商品情報などのデータを受信することができる。この方式を用いると、可視光通信のユーザがビル内のどの部屋にいるかという正確な位置情報が分かり、GPS 衛星からの電波が届かない地下街やビル内でも使用できる特徴がある。

むすび

可視光通信技術について解説した。今後の展開であるが、ともかく、よい応用を見つけ出して、実用化していくことである。いきなり、公共的インフラに導入するのは困難なものがあるが、以上に幾つかの例で述べたようなシステムの利用から入るのがよいであろうし、幾つかの具体例も出ている。

■参考文献

- 1) 中川正雄：“可視光通信,” 月刊オプトロニクス, vol.22, no.261, pp.120-125, Sep. 2003.
- 2) 春山真一郎：“可視光通信,” 電子情報通信学会論文誌 A, vol.J86-A, no.12, pp.1284-1291, 2003.12.
- 3) 中川正雄：“ユビキタス可視光通信,” 電子情報通信学会論文誌 B, vol.J88-B, pp.351-359, 2005.2.
- 4) 中川正雄：“可視光通信,” 映像情報メディア学会誌, vol.60, pp.1908-1913, 2006.12.
- 5) 中川正雄(監修), 可視光通信コンソーシアム(編)：“可視光通信の世界,” 工業調査会, 2006.2.
- 6) 牧野秀夫, 鉄元秀夫, 松坂典広, 前田義信, 石井郁夫, 廣野幹彦, 丸山武男：“一般照明器具を用いた新しい位置情報転送方式,” BME, vol.41, p.490, 札幌, 2003.6.
- 7) 岡本研正：“超高輝度 LED を用いた非同期光ピンポン通信,” 1991 年電子情報通信学会秋期大会講演論文集分冊 4, p.73, 1991.9.
- 8) 安倍尚吾, 春山真一郎, 中川正雄：“LED を光受信機として使う新方式の検討,” 光通信システム電子情報通信学会技術研究報告(光通信システム研究会), OCS2006-77, 2007.1.
- 9) 松下伸行, 日原大輔, 後 輝行, 吉村真一, 暦本純一：“ID Cam: シーンと ID を同時に取得可能なスマートカメラ,” 情報処理学会論文誌, vol.43, no.12, pp.3664-3674, 2002.12.
- 10) S. Miyauchi, T. Komine, S. Haruyama, and M. Nakagawa：“Parallel Wireless Optical Transmission Using High Speed CMOS Image Sensor,” Proc. of International Symposium on Information Theory and Its Applications, (ISITA04), Parma, Italy, pp.72-77, Oct. 2004.
- 11) 杉山英充, 春山真一郎, 中川正雄：“可視光通信における通信可能距離の解析と実験,” 電子情報通信学会技術研究報告(ワイドバンドシステム), WBS2006-61, pp.25-30, 2007.3.
- 12) X. Liu, H. Makino, S. Kobayashi, and Y. Maeda：“An Indoor Guidance System for the Blind Using Fluorescent Lights -Relationship between Receiving Signal and Walking Speed,”
- 13) 28th IEEE EMBS Annual International Conference, Paper SaEP7.6 Aug. 30-Sept. 3, 2006, New York City, New York, USA.
- 14) M. Akanegawa, Y. Tanaka, and M. Nakagawa：“Basic study on traffic information system using LED traffic lights,” IEEE Transactions on ITS, vol.2, no.4, 197-203, Dec. 2001.
- 15) 山里, 増田, 岡田, 片山：“LED 信号機と車載カメラを用いた光空間通信,”
- 16) 電子情報通信学会信号処理研究会技術研究報告, SIP2006-58, pp.25-30, 2006.7.
- 17) 可視光通信コンソーシアムホームページ, <http://www.vlcc.net>