

無電源光ファイバセンサおよびセンサネットワークの研究

代表研究者 深野 秀樹 岡山大学 大学院自然科学研究科 教授

1 研究背景

地球温暖化対策などから、省エネやエネルギーの有効利用などを行うグリーンエネルギー技術が注目されている。利用するエネルギーとしては、太陽光や風力などの自然エネルギーが代表的であるが、人間社会が浪費するエネルギーを有効利用する方法も提案されており、全国的に張り巡らされた光通信網における光信号のエネルギーもその有力な対象である。

現在の光通信網は低コスト化のために、局舎からユーザへの光情報伝送には、光信号が8または16等分に分岐される光スプリッタと呼ばれるパッシブ分光波器が用いられ、光スイッチなどの高コストの装置は使用されていない。この方法では、多くの場合、空きポートが存在し、そこでは光エネルギーが使われることなく浪費されている。この浪費光エネルギーを光給電デバイスにより電気エネルギーに変換し、センサなどを動かす、光通信網そのものを利用したセンサネットワークを構築することが本研究の目的である。

従来の光ファイバを利用した電力伝送では、高出力レーザ光を伝送し受信端で光を電気エネルギーに変換して機器に供給する光ファイバ給電技術が研究開発されている⁽¹⁾⁻⁽⁴⁾。比較的ハイパワーレベルでは、地上波デジタルの無給電中継器の実用化などが行われている。また、センサなどの屋外への小型機器の設置にも有効と考えられ、その応用に向けて研究開発が行われている。従来の光ファイバ給電技術は、光ファイバで伝送された光エネルギーを光電変換(PV)素子で電気エネルギーに変換し、機器に供給する。PV素子の受光層には、Si系(～1 μm帯)、GaAs系(～0.8 μm帯)、InGaAs系(～1.5 μm帯)が用いられるが、単一のpn接合よりなるフォトダイオード(PD)では、バンドギャップの関係から、光起電圧はそれぞれ最大で、0.7, 1, 0.5 V程度しかない。このため、PV素子は、基本的にはPDを直列接続しつつ、全素子に光入射して出力電圧を増大させ、機器に必要な電圧3～5 Vを得る特殊構造が必要であり⁽⁵⁾、光給電専用のものを準備する必要がある。また、GaAs系とInGaAs系では、光通信向けに応答性を中心にしたPDの技術開発は進んでいるが、エネルギー変換用のPV素子は特殊な用途である⁽²⁾。さらに、光源の高出力化を図り、光電変換した光電流により必要な電流を供給する必要があるが、数百mW以上の光パワーが要求される。また、Si-PV素子を用いると、光源の高出力の要求に加え、レーザ波長を0.8 μmや0.98 μmの短波長のものにせねばならず、光ファイバの伝送損失が小さい、通信用波長(約1.3～1.6 μm)と異なるため、光伝送損失も大きくなり、長距離応用が困難となる。

上述のように、従来の光給電では、ハイパワーの専用光源を用いることが基本にあり、微弱光パワーを有効利用する視点での研究はなされていない。一方、光通信網で家庭などに送られてくる光エネルギーは、2.8～500 μWほどの強度しかなく、これにより得られる光電流・光起電力は、機器を直接動かすためには不十分である。さらに上述のように、通信用InGaAs-PDでは光起電圧は、最大で0.5 Vと小さい。本研究では、専用のPV素子を使用することなく、光通信の普及により高効率であり、かつ、低コストとなっている一般の通信用InGaAs-PDを利用し、ここからの光電流をコンデンサに蓄積すると共に、昇圧回路を用いることによって、機器が動作するために必要な電流・電圧を確保し供給することを検討した。光ファイバを用いて給電することにより、軽量かつ長距離の送電が可能であり、素材がガラスのため耐環境性に優れ、そして、センサなどが得た情報はすぐさま光ファイバを通して送信できるなど、様々な利点がある。

これにより、今まで浪費されていたエネルギーを有効活用できるようになり、全国規模での緻密なセンサネットワークの可能性が開ける。また、本技術を応用すれば、水中、海中や悪環境下においても容易にセンサを設置することが可能となる。

2 光給電デバイス

2-1 基本回路構成

(1) 動作の概要

図1に本研究で検討した光給電デバイスの回路構成概念図を示す。その動作概略は、次のようになる。

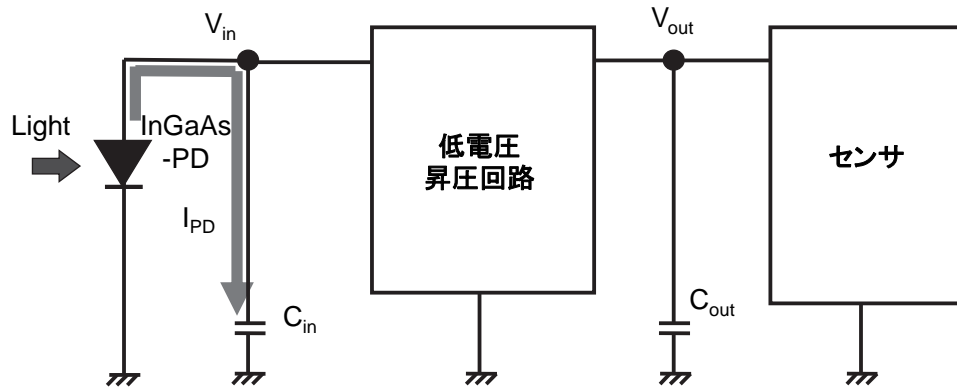


図 1：光給電デバイスの回路構成概念図

通信用レーザダイオードからの出力光を光通信用 InGaAs-PD に入射する。これにより、PD から光電流 I_{PD} が流れ始め、 I_{PD} を入力コンデンサ C_{in} に充電する。入力コンデンサ C_{in} が充電されることにより、徐々に入力側の電圧 V_{in} が上昇して行き、低電圧昇圧回路が起動する。昇圧回路としては、コイルの自己誘導を利用して、スイッチング素子により端子間電圧の昇圧を行う DC-DC コンバータとコンデンサへの電荷充電と、その充電電圧をスイッチングすることで昇圧を実現するチャージポンプ回路の 2 種類の昇圧回路の評価を実施した。昇圧出力 (V_{out}) が次段のセンサを動作させる。

本研究では、まず始めに、 V_{out} に接続する低消費電力センサデバイスとして、気象情報取得を目的に、以下の 3 つのセンサ(気圧センサ⁽⁶⁾、加速度センサ⁽⁷⁾、温度センサ⁽⁸⁾)を想定した。その大まかな仕様値は、以下のようにになっている。動作電圧については、後述の昇圧モジュールの出力設定値を考慮し、3 つがすべて動作可能な、2.35 V に設定した。

- ・気圧センサモジュール
動作電圧:DC1.71~3.6 V
通常動作電流 : 5.5 μ A
- ・3 軸加速度センサモジュール
動作電圧:DC1.6~3.5 V
通常動作電流 : 2~10 μ A
- ・温湿度センサ
動作電圧:DC2.2~5.5 V
通常動作電流 : 28 μ A

2-2 フォトダイオード

本実験で使用したものは、従来の光ファイバ給電に使われる特殊な光電変換素子ではなく、光通信用の標準の InGaAs-PD である。InGaAs は、長波長の光通信波長帯の光を受光できるように設計されたバンドギャップが小さい半導体であるため、その起電圧は、Si-PD に比べ、かなり小さくなる。光入射による光電流と光起電圧の負荷抵抗による変化を調べた。図 2 は、PD への入射光量をパラメータとし、PD への直列負荷抵抗を変えて、そこに流れる光電流とその両端の光起電圧をプロットしたものである。負荷抵抗を 30 k Ω 以上に大きくすることにより、10 μ W の微弱光強度においても 0.28 V 以上の光起電圧が確保できる。

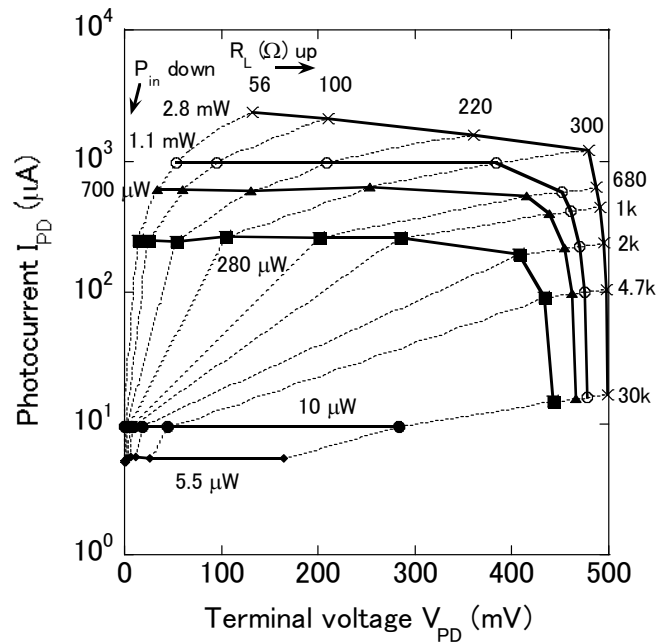


図 2: フォトダイオードの光入射による光電流と光起電圧の関係

2-3 昇圧回路

本研究では、低電圧昇圧回路として 2 タイプを比較検討した。タイプ A は、コイルの自己誘導を利用して昇圧を行うもので、250 mV~5.5 V の入力電圧で、昇圧動作を開始する。一方、タイプ B は、超低電圧動作を可能とするために、入力端に 1 : 100 のトランスが用いられ、これによって、20 mV の超低電圧から 500 mV までの電圧範囲で、昇圧動作を可能としたもので、チャージポンプ機能によって最大 5 V の出力が可能である。

(1) タイプ A (コイルの自己誘導を利用した昇圧回路)

本研究で使用した昇圧回路モジュールの回路図を図 3 に示す。

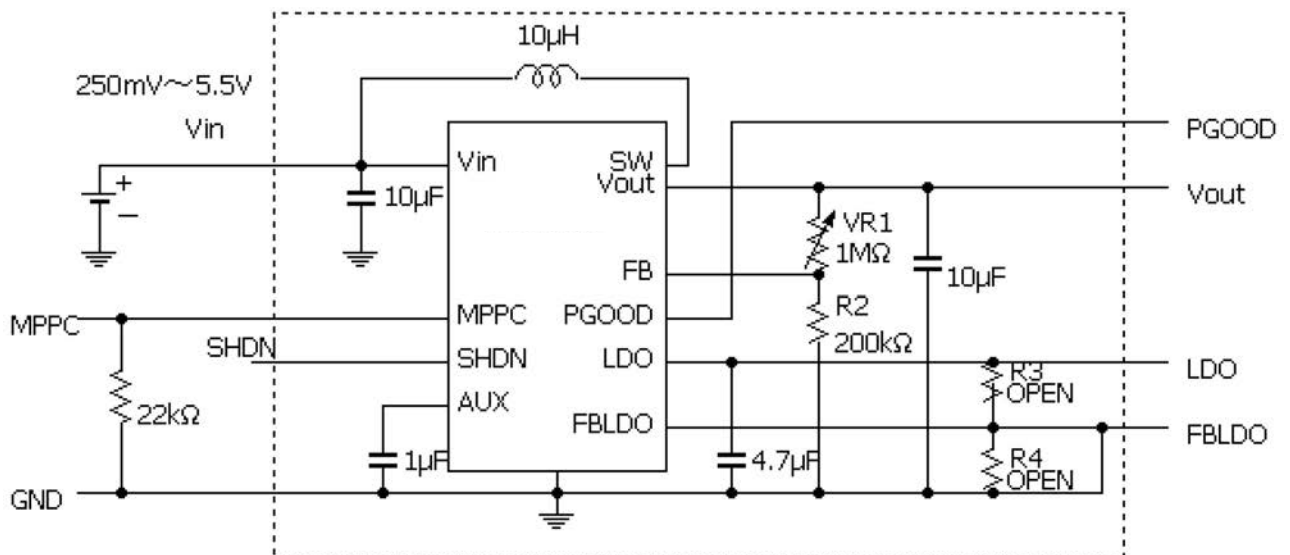


図 3 : タイプ A の昇圧回路図

この昇圧回路モジュールは DC250 mV~ 5.5 V の入力値で動作し、その昇圧出力は可変抵抗 VR1 によって 1.5~5.5 V の範囲で調節が可能である⁽⁹⁾。

V_{in} 部分に電圧源を、 V_{out} 部分に電圧計を接続して測定した、入出力電圧特性 (V_{in} - V_{out} 特性) を図 4 に示す。 V_{in} が 252 mV の低電圧において、 V_{out} が所望の設定値 2.35 V への立ち上がりが確認できている。

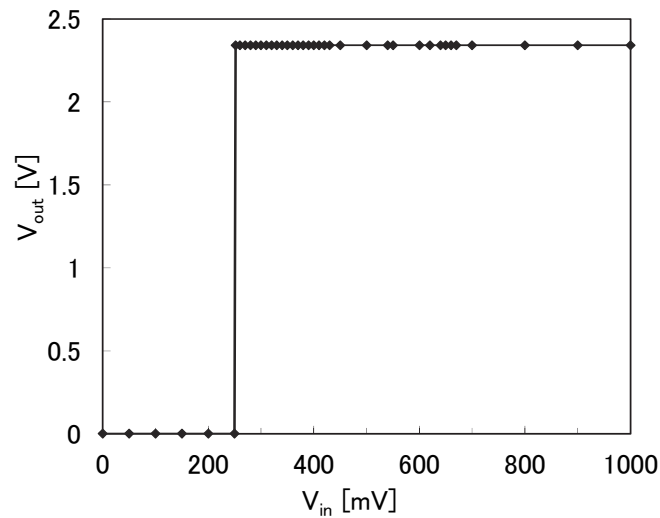


図 4：タイプ A の昇圧入出力電圧特性

タイプ A 昇圧モジュールの実負荷特性について、無負荷、負荷電流 $5 \mu A$ (負荷抵抗 470 k Ω)、および $30 \mu A$ (負荷抵抗 78 k Ω) の場合についてモジュールの起動および定常動作 (保持動作) 時に必要な電力量を求めるために、入力電流、電圧波形と出力電圧波形を測定した。入力電圧は 400 mV とし、入力電流は、 1Ω のシャント抵抗を用いて測定した。モジュールでの起動に必要な電力量は、入力電流 I_{in} と入力電圧 V_{in} の積を、出力電圧が設定値の 2.35 V までの立ち上がるまでの時間積分で求めた。負荷、起動時間、起動に必要な電力量、およびそのときの平均入力電流値についてまとめたものを表 1 に、また、モジュールの出力が 2.35 V で安定した状態について、そのときの出力保持電流、電圧および保持電力量についてまとめたものを表 2 に示す。ここで保持電力量は起動時の電力量と比較するため、起動時間に等しい間出力を保持した場合に消費される電力量とした。

表 1 タイプ A 昇圧モジュール起動電力量

負荷供給電流 [μA]	起動時間 [ms]	電力量 (起動時) [mW · s]	平均電流 [mA]	平均電圧 [mV]
無負荷 (0)	44.7	0.104	28.3	172
5	45.5	0.133	29.2	210
30	45.9	0.152	31.5	201

表 2 タイプ A 昇圧モジュール保持電力量

負荷供給電流 [μA]	電力量 (保持) [mW · s]	保持電流 [mA]	保持電圧 [mV]
無負荷 (0)	0.005	0.3	403
5	0.007	0.367	405
30	0.012	0.683	398

表 1 および表 2 について、タイプ A 昇圧モジュールは負荷供給電流の大きさに応じて起動に必要な電力量と起動時間が明確に変化していることが分かる。また、起動時の入力電流平均値に比べて出力保持電流が非常に小さく、一度起動すればごく少量の入力で連続動作が可能である。次に、負荷として各種センサを挿入した場合についての測定を行った。測定結果を表 3、表 4 にまとめる。

図 6 にタイプ B 昇圧モジュールの入出力電圧特性を示す。入力電圧 V_{in} が閾値 26 mV において、設定値 2.35 V への立ち上がりが確認できる。負荷特性を測定するにあたり、無負荷、負荷電流 $5 \mu A$ (負荷抵抗 470 k Ω)、 $30 \mu A$ (負荷抵抗 78 k Ω) の場合についてモジュールの起動時における入力電流、電圧波形と出力 2.35 V の立ち上がりにかかる時間を測定した。入力電圧は 400 mV とした。

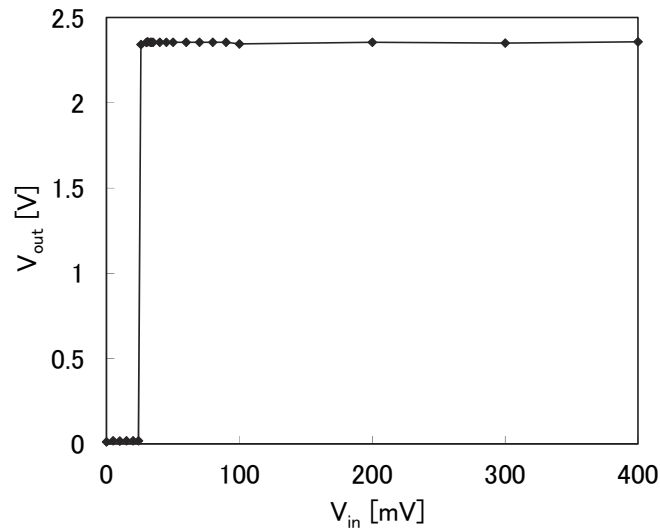


図 6：タイプ B の昇圧入出力電圧特性

負荷、起動時間、起動に必要な電力量、およびそのときの平均入力電流、電圧値についてまとめたものを表 5 に示す。また、モジュールの出力が 2.35 V で安定した状態において、そのときの出力保持電流、電圧および保持電力量を求めた。測定結果についてまとめたものを表 6 に示す。

表 5 タイプ B 昇圧モジュール起動電力量

負荷供給電流 [μA]	起動時間 [s]	電力量 (起動時) [mW \cdot s]	平均電流 [mA]	平均電圧 [mV]
無負荷 (0)	2.03	75.4	92.7	404
5	1.89	81.1	107	401
30	2.17	83.2	95.7	398

表 6 タイプ B 昇圧モジュール保持電力量

負荷供給電流 [μA]	電力量 (保持) [mW \cdot s]	保持電流 [mA]	保持電圧 [mV]
無負荷 (0)	76.4	94	404
5	80.2	106	400
30	84.7	97.5	399

表 5 および表 6 において、負荷供給電流の大きさ、また起動状態と出力保持状態いずれの場合についても

モジュールで消費される電力量、及び入力電流、電圧に大きな変化は無いことが分かる。また、負荷として負荷電流値から算出した抵抗ではなく、各種センサを挿入した場合について同様の測定を行った。測定結果を表7、表8に示す。

表7 タイプB昇圧モジュール起動電力量（センサ接続）

センサ	起動時間 [s]	電力量（起動時） [mW・s]	平均電流 [mA]	平均電圧 [mV]
気圧	1.92	81.4	106	401
加速度	2.09	80.4	95.9	395
温湿度	1.99	82.9	104	405

表8 タイプB昇圧モジュール保持電力量（センサ接続）

センサ	電力量（保持） [mW・s]	保持電流 [mA]	保持電圧 [mV]
気圧	80.7	105	400
加速度	82.8	98.7	396
温湿度	84.5	106	405

表7、表8の結果も表5、表6と同様に、モジュールで消費される電力量、及び入力電流、電圧に大きな変化は無いことが分かる。これらの結果より、タイプB昇圧モジュールは起動状態と出力保持状態の差異によらず比較的大きな消費電力状態にある。これは、タイプB昇圧モジュールにおいて、入力側のトランスに交流を供給するためのFETに、昇圧コンバークICへの供給よりも大きな電流が常時流れているためであると考えられる。このように、起動に必要な電力量は、タイプB昇圧モジュールは、タイプA昇圧モジュールに比べ、約600倍も大きくなってしまふことが明らかとなった。

3 光給電による昇圧モジュール起動

タイプA及びタイプB昇圧モジュールについて、一般的な光通信に用いられる数十～数百 μ Wの光を入力と想定し、光給電による起動試験を実施した。実験はLaser Diode Controllerでレーザダイオードに電流を供給し、光カプラによって光の一部をOptical Power Meterでモニタすることで、フォトダイオードに入射する光強度を評価した。実験系を図7に示す。このとき、負荷として通常動作の気圧センサモジュールを想定し、その消費電流として5 μ Aが実際に負荷で消費されるように470k Ω の負荷抵抗を用いた。

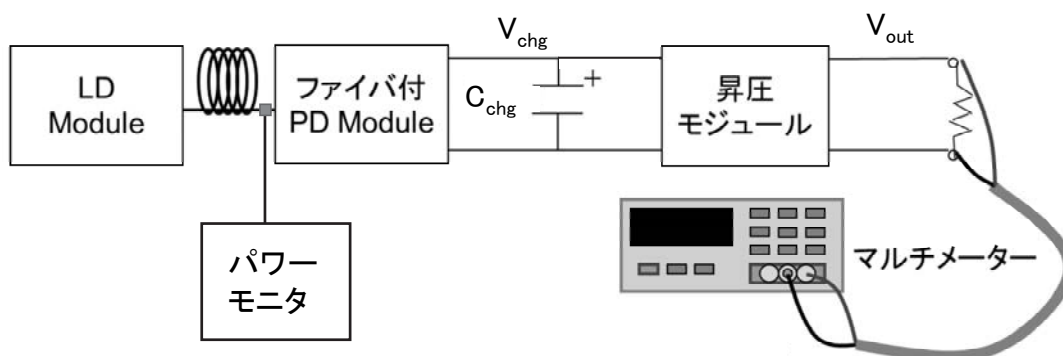


図7：光給電による昇圧モジュール起動試験回路

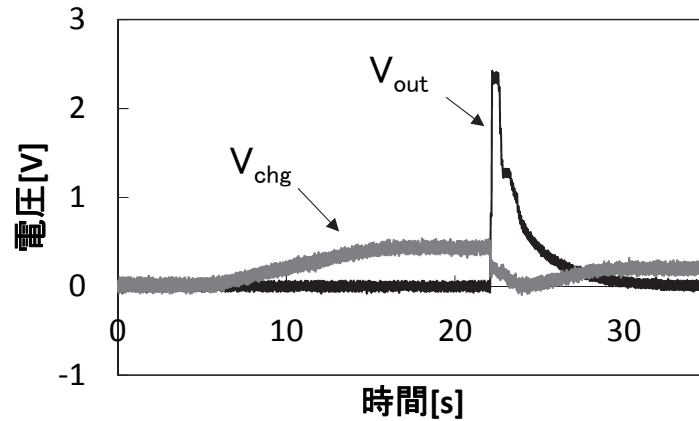


図 8：光給電による昇圧モジュール起動試験

起動に必要な電力量は、光給電での昇圧モジュール起動に必要な入力コンデンサの容量に直結しており、静電容量が大きくなり過ぎると非常に長い充電時間が必要となる。センサの想定動作間隔は 10 秒以内とする。タイプ A 昇圧モジュールは消費電力量の小ささから起動に必要なコンデンサの静電容量が小さく、また出力保持電流が起動時の平均入力電流の 100 分の 1 程度であるので、モジュール起動時だけでなく、出力保持状態においてさらに低消費電力動作が可能である。以上の点からタイプ A 昇圧モジュールを用い、入力側コンデンサ C_{chg} の容量は起動に必要な電力量を考慮して、 $4000 \mu\text{F}$ とした。また、負荷電流想定値は $5 \mu\text{A}$ とした。入射光強度を $100 \mu\text{W}$ とした場合の起動試験結果を図 8 に示す。充電時間は 9.6 秒で C_{chg} は最大まで充電され、この状態で昇圧モジュールに接続し、 2.35V までの V_{out} の立ち上がりを確認できた。充電サイクルをエンドデバイスに合わせ最適化することで $100 \mu\text{W}$ の小さい光入力でも、センサの想定動作間隔である 10 秒以内での充放電を実現できることを明らかにした。

4 まとめ

本研究では、コイルの自己誘導を利用して昇圧を行うタイプ A とチャージポンプ回路にトランスを組みこむことで超低電圧動作を可能とするタイプ B の 2 つの昇圧モジュールについて、それぞれ特性評価を行った。タイプ A 昇圧モジュールは、タイプ B 昇圧モジュールの 600 分の 1 程度の電力量で起動できることが明らかとなった。この結果から、タイプ A 昇圧モジュールとコンデンサを用いた光給電による起動試験を行った。入力側に挿入するコンデンサの容量は起動電力量を考慮して、 $4000 \mu\text{F}$ とすることで、入力光強度 $100 \mu\text{W}$ 程度において、エンドデバイスとしての使用を予定している各種センサの駆動に十分な出力が得られ、10 秒以下のサイクルでセンサを起動できることが確認できた。今後は、マイコンによる電子制御も組み込み、供給電力のマネジメントを、負荷側のセンサに合わせて最適化することで、系統全体の消費電力をさらに削減できる技術開発を行う。

【参考文献】

- (1) Hiroshi Miyakawa, Yosuke Tanaka, and Takashi Kurokawa: Design approaches to power-over-optical local-area-network systems, APPLIED OPTICS, vol. 43, pp.1379-1389 (2004).
- (2) 山下育男:光ファイバ給電技術とその利用, 電子情報通信学会誌, vol.91, no. 8, pp. 721-276 (2008).
- (3) G. Böttger, M. Dreschmann, C. Klamouris, M. Hübner, M. Röger, A. W. Bett, T. Kueng, J. Becker, W. Freude, and J. Leuthold: An Optically Powered Video Camera Link, IEEE PHOTONICS TECHNOLOGY LETTERS, vol. 20, no. 1, pp. 39-41 (2008).

- (4) Rafael Pena, Carlos Algora, Ignacio R. Matias, and Manuel Lopez-Amo: Fiber-based 205-mW (27% efficiency) power-delivery system for an all-fiber network with optoelectronic sensor units, APPLIED OPTICS, vol. 38, no. 12, pp. 2463-2466 (1999-4).
- (5) Rafael Peña, Carlos Algora: Evaluation of mismatch and non-uniform illumination losses in monolithically series-connected GaAs photovoltaic converters, PROGRESS IN PHOTOVOLTAICS: RESEARCH AND APPLICATIONS, vol. 11, issue 2, pp. 139–150 (2003).
- (6) LPS331AP MEMS pressure sensor: 260-1260 mbar absolute digital output barometer, Datasheet, STMicroelectronics.
- (7) ADXL362: Digital Output MEMS Accelerometer, Datasheet, Analog Devices.
- (8) SHT1x / SHT7x: Humidity & Temperature Sensor, Datasheet, Sensirion.
- (9) LTC3105: 400mA Step-Up DC/DC Converter with Maximum Power Point Control and 250mV Start-Up, Datasheet, Linear Technology.
- (10) LTC3108: Ultralow Voltage Step-Up Converter and Power Manager, Datasheet, Linear Technology.

〈 発 表 資 料 〉

題 名	掲載誌・学会名等	発表年月
Optically Powered Voltage Supply Device for Effective Utilization of Optical Energy in the Fiber-to-the-Home Network	Electronics and Communications in Japan, 96(10), 37-42 (2013).	2013. 9. 11
微弱光で動作する光給電回路の設計と評価	電子情報通信学会 2013 ソサイエティ大会, B-13-37	2013. 9. 20