

太陽電池単セルによる充電回路

竹内 一平[†] 金井 康通[‡] 黒川 浩助[†]

[†] 東京農工大学工学部

〒184-0012 東京都小金井市中町 2-24-16

[‡] NTT

〒243-0198 神奈川県厚木市森の里若宮 3-1

E-mail: ippei@cc.tuat.ac.jp

あらまし

太陽電池モジュール簡素化のため、太陽電池1セルの出力電圧を昇圧して二次電池の充電を行なう回路構成について検証した。実験の結果、太陽電池出力電圧が約0.3V以上の時に、昇圧し充電することができた。また、夜間等太陽電池からの出力が期待できないとき回路の消費電力を抑えるために昼夜判別回路を設けた。昼夜判別回路により二次電池に充電されているエネルギーの浪費を防ぐことができた。夜間の消費電力は0.1mWであり、3.7V、550mAhの二次電池を用いた場合、光照射が得られなくても1年間程度待機可能となり本システムの有効性が実証できた。

キーワード 太陽電池単セル, 昇圧回路, 充電, 昼夜判別回路

A battery charging circuit powered by a solar cell

Kazuhira TAKEUCHI[†], Yasuyuki KANAI[‡], and Kosuke KUROKAWA[†]

[†] Faculty of Engineering, Tokyo University of Agriculture and Technology

2-24-16 Nakacho, Koganei-shi, Tokyo, 184-0012 Japan

[‡] NTT

3-1 Wakamiya Morinosato, Atsugi-shi, Kanagawa, 243-0198 Japan

E-mail: ippei@cc.tuat.ac.jp,

Abstract

This paper describes a battery charging system powered by a solar cell. The system starts up by an internal rechargeable battery and boosts the voltage of the solar cell to charge the battery. The system charges the battery while the voltage of the cell exceeds 0.3 volts. To save power of the battery, the system has a control circuit which predicts a generation amount of the solar cell by a light sensor, and decides feeding power to the main circuits. The reducing power consumption is 0.1mW in nights.

Key words A solar cell, Boost converter, Battery charging circuit, Power management

1. 背景と目的

環境問題がクローズアップされ、エネルギーについても環境への負荷軽減が要望されている。太陽電池は、太陽エネルギーを電気エネルギーに直接変換し、構成が簡単で排気ガスや騒音が発生しないなど優れた特徴を持っている。

太陽電池は住宅には普及が進んでいるが、携帯機器のエネルギー源としては普及が進んでいない。これは、太陽電池モジュールの価格が高いことが主な要因となっている。太陽電池モジュールは、直列接続のための複雑なセル間配線とセル内短絡防止のための高精度なセル配置が必要であり、コストが下がりにくかった。コスト的に不利な直列接続をやめて、単体セルから発電エネルギーを得ることでセル間配線が不要となり、モジュールを簡素化できるが太陽電池単セルの出力電圧は0.5V程度であり携帯機器の動作電圧に比べかなり低い。太陽電池単セルの出力から携帯機器の動作電圧を得るには、昇圧回路により昇圧する必要があるが昇圧回路自体も電子回路であり単セルの出力電圧では動作できない課題があった。更に特性面では、太陽電池モジュールへの光量分布が均一でないと直列接続したモジュールは出力電流の大幅な低下を招き易いため、設置場所が限定される問題があった。

昇圧回路の動作に必要な電力を二次電池から供給し、単セル出力の昇圧出力により二次電池を充電するとともに携帯機器にエネルギーを供給する1W程度のシステム構成について検討した。また、単セルでは光量が不均一でも発電出力に影響されにくく、携帯機器への太陽電池利用方法として優れている。二次電池から昇圧回路に電力を供給し、太陽電池から得られる充電電力との割合である発電ゲインを高めるため消費電力の少ない昇圧回路を検討した。また夜間等は太陽電池から出力が得られないため、二次電池から昇圧回路に電力を供給することはエネルギーの無駄となる。この無駄をなくすため光センサを用いた昼夜判別回路を設け、発電ゲインが期待できない場合は、二次電池から回路への電力供給を停止する構成とした。また二次電池の過充電を避けるため過充電保護回路も搭載した。

本システムの動作と有効性について実証をおこなったので報告する。

2. システム構成

本システムの構成を図1に示す。システムは太陽電池単セル、昇圧回路、二次電池、定電圧制御回路、昼夜判別回路から構成した。二次電池は携帯機器に適したリチウムイオン電池を想定した。リチウムイオン電池の過充電を防ぐため、定電圧制御回路により電池に過充電が印加されない様にした。充電電流は太陽電池の最大出力時でも二次電池の電流制限を超えないシステム設計とし、充電電流の制御を不要とした。

システムの動作を説明する。昼夜判別回路は光センサによりシステムへの照射光量を測定し、日中など発電ゲインが期待できると判断した場合のみ、二次電池から昇圧回路に電力を供給する。昇圧回路はブーストコンバータとした。定電圧制御回路は昇圧電圧を監視して、昇圧電圧が設定電圧を超えた場合に昇圧回路内の矩形波発生回路にフィードバックを掛けPFM制御をおこなっている。

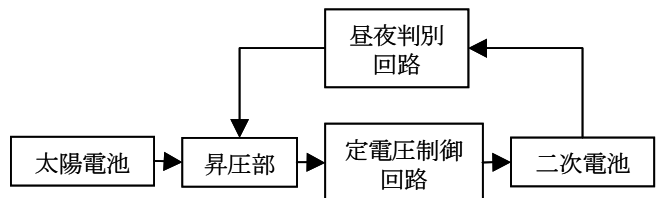


図1 システム構成のブロック図

また、発電ゲインを図2のように定義した

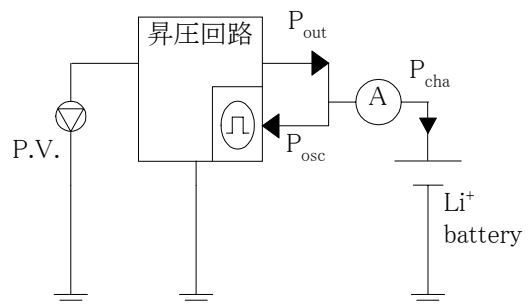


図2 発電ゲイン

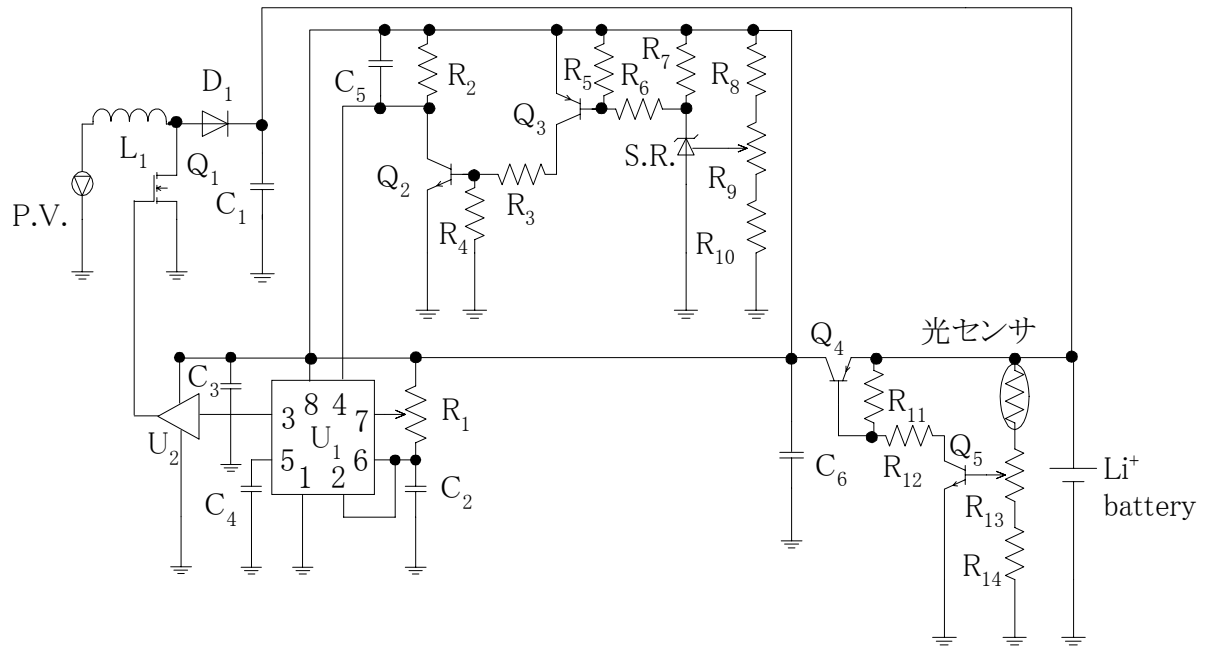


図3 システム回路図

図中の P_{out} は太陽電池の出力を昇圧した後の電力、 P_{osc} は二次電池から昇圧回路に供給される電力、 P_{cha} は二次電池を充電する電力である。これらの関係は①式であらわせられる。

$$P_{cha} = P_{out} - P_{osc} \quad \dots \textcircled{1}$$

発電ゲイン G は

$$G = \frac{P_{cha}}{P_{osc}} = \frac{P_{out} - P_{osc}}{P_{osc}} \\ = \frac{P_{out}}{P_{osc}} - 1 \quad \dots \textcircled{2}$$

である。

発電ゲインは P_{osc} と P_{cha} が等しいとき $G = 1$ となり、 P_{out} が発生しない場合は $G = -1$ である。

②式より発電ゲインを高めるには、 P_{out} を大きくするか P_{osc} を小さくするかである。 P_{out} は太陽電池の面積を大きくしたり、昇圧回路の変換効率を高めればよく、 P_{osc} は消費電力を抑えればよい。

3. 回路構成

本システムの回路図を図3に示す。以下、図1に示した回路ブロックごとに説明する。

3.1 昇圧回路

本研究で用いた昇圧回路を図4に示す。回路構成が容易なブーストコンバータを用いた。他励式とすることで、システム全体の制御を容易にするとともに、発振回路の消費電力の低減をねらった。

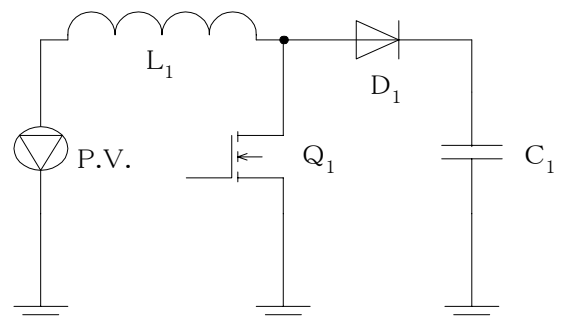


図4 ブーストコンバータ

3.2 矩形波発生回路

矩形波発生回路は矩形波発振回路とドライバ回路から構成した。矩形波発振回路として、バイポーラトランジスタ(図5)とCMOS構成(図6)のタイマーICを用いた2種類のマルチバイブレータを検討し、消費電力と駆動能力について比較した。比較結果を表1に示す。CMOS型の構成が消費電力と駆動能力の点でバイポーラ型の構成より優れた結果が得られた。バイポーラ構成非安定マルチバイブレータの出力電圧波形を図7に示す。バイポーラ構成は出力電圧の立ち下がりには急峻な波形が得られるが、立ち上がりには時間がかかる特徴がある。立ち上がりは時定数 $R_4 \times (C_2 + C_{Q4})$ により決まるので、立ち上がりを急峻にするには、 R_4 を小さくすれば良いが、消費電力の増大を招くことになる。一方、CMOS構成非安定マルチバイブレータの出力電圧波形を図8に示す。CMOS構成なので消費電力を低減できるがファンアウトが小さいので、バッファによるドライバを付加した。発振周波数が約45kHzの時にバッファ回路を含め消費電力が0.65mWとなった。特性比較結果から、矩形波発振回路はタイマーICを用いたCMOS構成のマルチバイブレータとバッファによる構成とした。

表1 発振回路の特性比較

	バイポーラ型	CMOS型
最低動作電圧	0.6V	1.2V
消費電力(4.2V 入力時)	21mW	0.65mW
出力波形	△	○

(動作電圧 4.2V、スイッチング周波数 45 kHz)

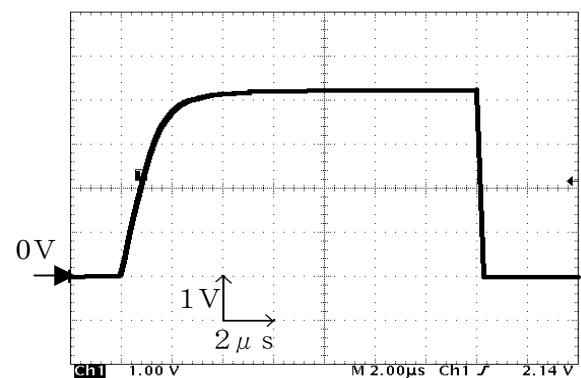


図7 バイポーラ構成非安定マルチバイブレータの出力波形

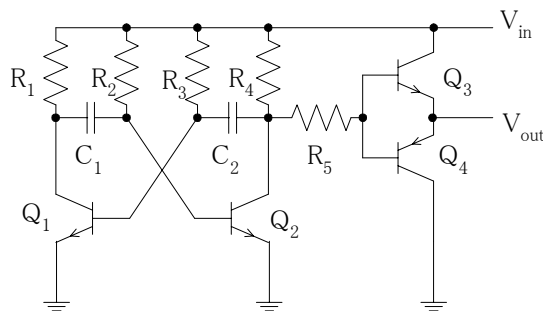


図5 バイポーラ型非安定マルチバイブレータ

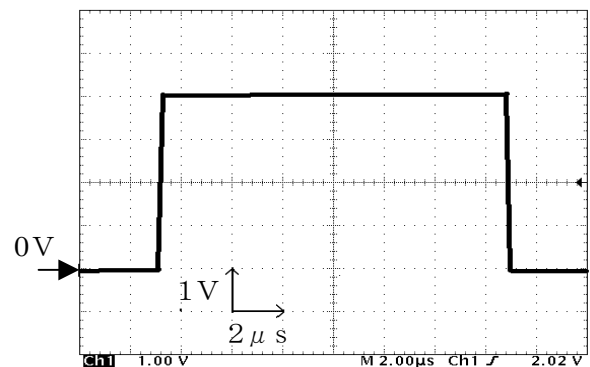


図8 CMOS構成非安定マルチバイブレータの出力波形

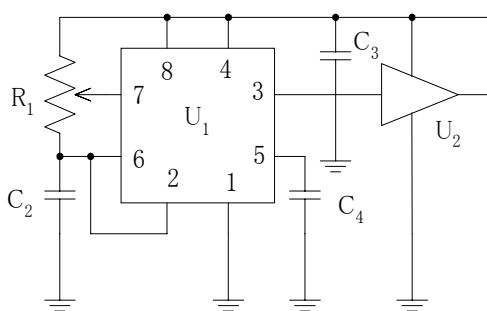


図6 CMOS型非安定マルチバイブレータ

3.3 定電圧制御回路

リチウムイオン電池の過充電を防ぐため、太陽電池の出力を昇圧した後の電圧は高い精度で定電圧化することが求められる。一般にリチウムイオン電池の充電終止電圧は $4.20 \pm 1\%$ 程度の精度が必要とされるため、これを満たすように定電圧制御しなければならない。

検討した定電圧制御回路を図9に示す。昇圧した電圧 V_{in} をシャントレギュレータと R_8 、 R_9 、 R_{10} による設定値と比較して、昇圧回路の出力電圧が設定電圧より高ければトランジスタ Q_2 が導通し前節の矩形波発振回路の動作を禁止して昇圧回路の動作を止める構成となっている。

図10は太陽電池の出力電圧が $0.5V$ における充電終止電圧付近の充電時間と充電電圧の関係である。充電電圧が $4.2V$ になると定電圧制御回路によりシステムの昇圧動作が禁止される。そのため、充電電圧がこれ以上増加しない。しかし、常に二次電池から昇圧回路に電力供給されているので充電電圧が徐々に減少する。そして、電圧が下がり再び充電が可能と定電圧回路が判断すると二次電池の充電が再開される。充電動作はこれを繰り返しておこなっている。また、図10より充電終止する電圧は $4.21V$ で、充電再開電圧は $4.17V$ であり、これらの電圧の差は $4.20V$ の 1% 以内に収まっていることよりこの定電圧制御回路の構成でリチウムイオン電池を充電可能であることが検証できた。

また、この回路の消費電力は最大で $1mW$ であった。

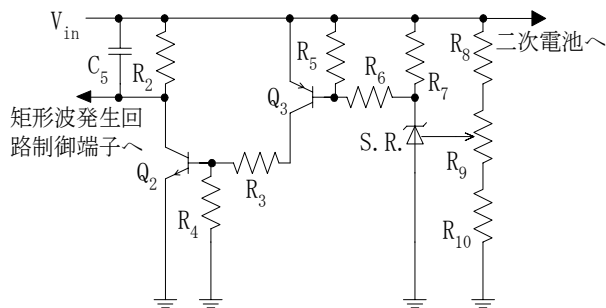


図9 定電圧制御回路

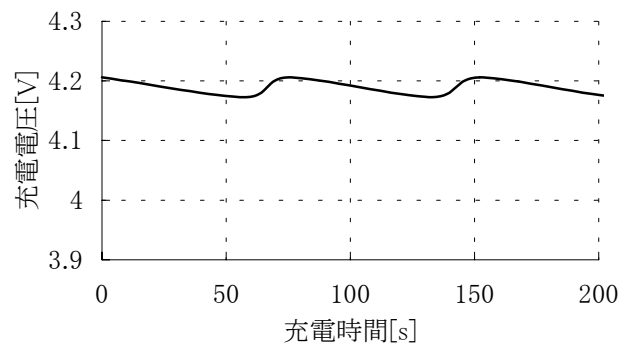


図10 充電時間－充電電圧特性

3.4 昼夜判別回路

図11は昼夜判別回路がシステムにない場合の充電電力 P_{cha} と発電ゲイン G の関係である。

P_T は発電ゲイン G が 1 となる充電電力である。 P_{cha} が P_T より大きい場合、発電ゲイン G が 1 を超えて投資した電力よりも大きな電力を得ることができる。また、 P_{cha} が P_T より小さい場合は、発電ゲイン G は 1 未満となり昇圧回路を動作させない方が良い。

$P_{cha} > P_T$ のときに昇圧回路を動作させる方法として、光センサにより P_{cha} を予測して P_T 以上であれば昇圧回路に電力を供給する昼夜判別回路を設けた。

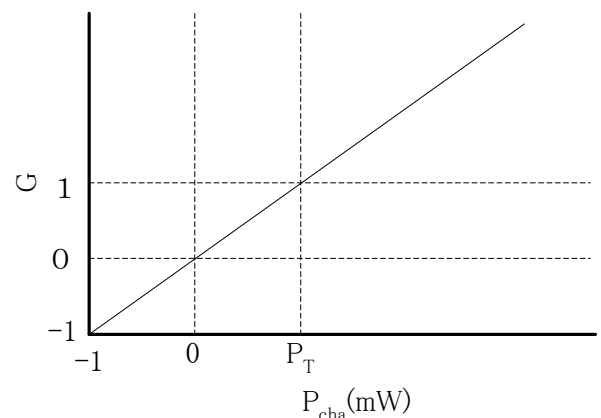


図11 充電電力－発電ゲイン特性

昼夜判別回路の構成を図12に示す。光照射により光センサの抵抗値がシステムの発電ゲインが得られる値まで減少すると、 Q_5 が導通して、二次電池から矩形波発生回路と出力電圧制御回路に電力が供給される構成とした。

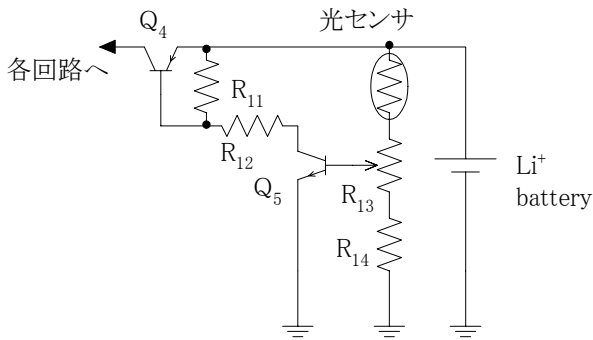


図12 昼夜判別回路

4. 実験と結果

図3のシステムを実験にて実証した。定量的な特性評価をおこなうため、太陽電池と二次電池を定電圧源に置き換えた。太陽電池電圧は0.0Vから0.6Vまで可変した。また二次電池の電圧は4.2Vとした。

本システムについて以下の項目について特性を評価した。

- 充電可能電圧の評価：
システムが動作する太陽電池入力電圧範囲
- システムが起動可能な二次電池電圧：
昇圧回路等を駆動でき二次電池を充電することができる二次電池電圧範囲
- 昼夜判別回路の有効性
- 発電ゲインの評価

4.1 充電可能電圧の評価

太陽電池出力電圧と充電電圧との関係を図13に示す。太陽電池の出力電圧が約0.3Vを超えると太陽電池の出力電圧を昇圧し定電圧制御回路により4.2Vの定電圧を得られ充電することができた。し

かし、太陽電池の出力が約0.3V以下の場合は、システムを動作させるために二次電池から供給される電力がシステムに入力させる太陽電池出力電力より大きいため、二次電池を充電することができなかった。

次に、図14に太陽電池の出力電圧が0.6Vのときの充電電流と充電電圧の関係を示す。定電圧制御回路により太陽電池の出力は4.2Vに定電圧化されていることがわかる。また、充電電流は最大で約15mA得ることができた。日射変動などで太陽電池の出力が小さくなると充電電圧は定電圧制御されているので、二次電池の充電電流は小さくなる。そして、太陽電池の出力電圧が0.3V以下になると充電電流を得ることができない。

図13、14をもとにシステムが太陽電池単セルで動作可能か検証をおこなった。太陽電池単セルは、快晴時において約0.5V程度の出力電圧が見込まれる。上記の結果よりシステムは0.3V以上で動作することが確認できているため、太陽電池単セルで二次電池を充電できることが検証できた。

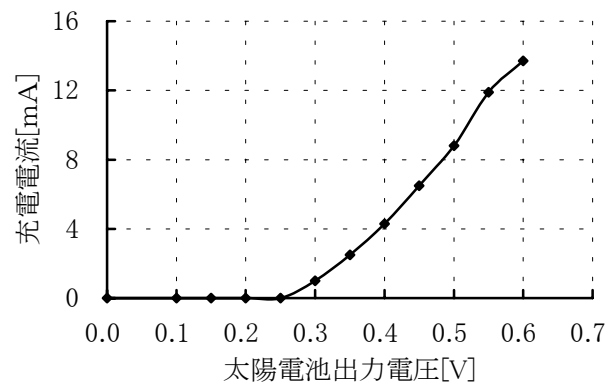


図13 太陽電池の出力電圧－充電電圧特性

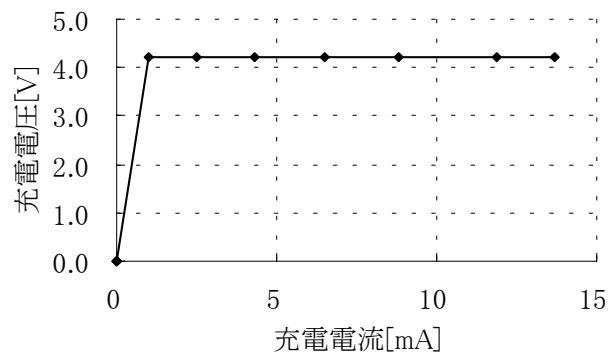


図14 充電電流－充電電圧特性

4.2 システムが起動可能な二次電池電圧

定電圧制御回路と矩形波発生回路を駆動させ、昇圧回路を動作させて二次電池の充電を可能とさせる二次電池の電圧を測定した。実験の結果、システムに約0.3V以上の太陽電池の出力電圧を印加してある場合、二次電池の放電電圧が1.5V以上であれば昇圧回路が動作し二次電池を充電することができた。今回、二次電池として想定したリチウムイオン電池は放電終止電圧が約3.0Vなのでリチウムイオン電池の動作範囲での充電動作が検証できた。

4.3 昼夜判別回路の有効性

昼夜判別回路の有効性を検証するために昼夜判別回路がシステムにない場合、夜間のシステム全体の消費電力は昼間のシステム全体の消費電力と同等の値とし評価をおこなった。まず、昼夜間にシステム全体が消費するエネルギーを測定した。

昼夜判別回路をシステムに搭載している場合、昼間の消費電力は9mW、夜間の消費電力は0.1mWであった。また、昼夜判別回路がシステムに搭載していない場合は、昼夜ともに消費電力は9mWである。システムの待機電力は二次電池が供給しているので、昼夜判別回路の有効性を二次電池の連続放電継続時間から検証した。ただし、二次電池が満充電の状態から二次電池が放電を終止するまでの間のシステム待機時間を比較した。二次電池の連続放電継続時間を算出するにあたり、二次電池として想定したリチウムイオン電池の容量は3.7V、550mAhとした。計算の結果、昼夜判別回路が搭載されていない場合、不日照条件下においてシステムの稼働時間はわずか9日間であったが、システムに昼夜判別回路が搭載されている場合、1年間はシステムが稼働することがわかった。これにより昼夜判別回路の有効性を検証することができた。

4.4 発電ゲインの評価

二次電池から昇圧回路に供給される電力は4.3節より昼間にシステムが消費する電力と等しいので $P_{o,c}$ は9mWである。発電ゲインが1となる充電電力は2章の②式より9mWなので P_T は9mWである。この値を基に昼夜判別回路の抵抗値を設定し、

評価をおこなった。測定の結果、図15に示す充電電力と発電ゲインの関係が得られた。

図15より発電ゲイン1が得られる充電電圧 P_T は9mWであった。また、充電電力が P_T より小さい場合は発電ゲインが0となり、昼夜判別回路が機能していることがわかる。

2章の②式より昼間等、システムの充電が期待できる時、発電ゲイン G は P_{cha} に対しリニアに増加する。

図15から、昼夜判別回路が有効に機能していることがわかる。

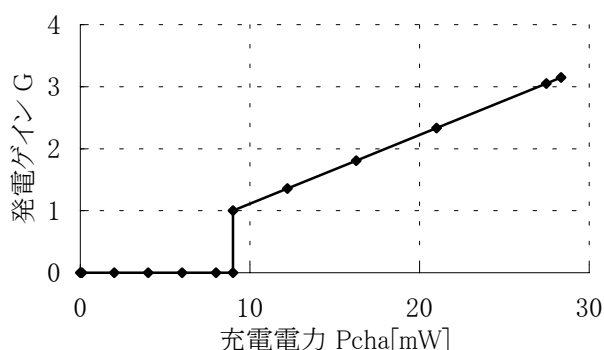


図15 充電電力ー発電ゲイン特性

5. まとめ

太陽電池単セルの出力電圧を昇圧し、昇圧した後の電力を二次電池に充電する回路構成について検討をおこない実験により評価した。太陽電池単セルの出力電圧が小さいため、二次電池により昇圧回路を起動し太陽電池出力を昇圧することで二次電池の充電と外部に電力を供給する構成とした。

システムは、太陽電池1セル、昇圧回路、矩形波発生回路、出力電圧制御回路、昼夜判別回路から構成した。

実験の結果、太陽電池の出力電圧が0.3V以上で二次電池を充電することができた。また、二次電池電圧が1.5V以上で昇圧回路を起動できた。昼夜判別回路の搭載により、夜間の消費電力を9mWから0.1mWへの低減ができた。これは、太陽電池から出力が得られなくても3.7V、550mAhの二次電池の場合1年間待機することができたことがわかった。上記から本システムの有効性が実証できた。