

電気分解セルを負荷とする太陽電池の最適動作点の検討

岩崎 良平¹⁾・房野 俊夫²⁾・三宅 琢磨³⁾・大塚 馨象⁴⁾

Study of optimum operation point of the photovoltaic cell combined with electrolysis cell

Ryouhei IWASAKI, Toshio BOUNO, Takuma MIYAKE, Keizou OHTSUKA

Abstract

Hydrogen is clean and environmentally friendly energy and is expected to be used for the future energy. We want to produce hydrogen by using electrolysis of water combined with photovoltaic cell. In this research, we studied the operation point of the photovoltaic cell that could be produce maximum quantity of hydrogen.

The results are as follows;

- (1) The operation point can be adjusted by the capacity (e.g. open circuit voltage, short circuit current) of the photovoltaic cell and number of electrolysis cells.
- (2) The optimal operation point that can most efficiently produce hydrogen is equal to the maximum power output point of the photovoltaic cell.
- (3) We derived the formula for obtaining the number of electrolysis cells. This formula is used with voltage ratio^{*1} and current ratio^{*2} of a photovoltaic cell.
- (4) This system can be operated with best condition by adjusting the number of electrolysis cells combined with the amount of insolation and photovoltaic cell temperature.

※1 voltage ratio ; Voltage at maximum power out put / Open circuit voltage

※2 current ratio ; Current at maximum power out put / Short circuit current

Key Words:

Hydrogen, Electrolysis of water, Photovoltaic cell, Optimum operation point

1. はじめに

化石資源を大量消費する現在のエネルギーシステムは資源の枯渇や地球温暖化の問題を併せ持っている。将来、これに代わるエネルギーシステムとして、燃料電池を中心とした水素エネルギーシステムが注目されている。このエネルギーシステムにおいて燃

料である水素をクリーンに製造する必要があり、自然エネルギーを電源とした水の電気分解による水素製造が得策であると考えられる。特に、本研究では太陽電池と固体高分子形水電解セルとの組み合わせに注目し、そのシステムで水素回収量が最大となる太陽電池の動作点について検討を行った。

1) 電気電子工学専攻大学院生

2) 佐土原高校教諭

3) 電気電子工学科技官

4) 電気電子工学科教授

2. 電解セルを負荷とする太陽電池の動作点

電解セルを負荷として接続した太陽電池の動作点は、電解セルと太陽電池の両者の I-V 特性上に必ず位置する。よって、動作点は両 I-V 特性の交点となる(図1)。動作点は、日射量変化、太陽電池の電池温度変化により太陽電池に出力変動が生じたときには常に移動することになり非常に不安定な点である。太陽電池の出力変動に対して、常にそのときの出力が最大となる点で水素を発生できれば、太陽エネルギーの有効活用が図れる。そこで、我々は水素発生量が最大となる点を最適動作点として、最大出力点との関係を検討している。

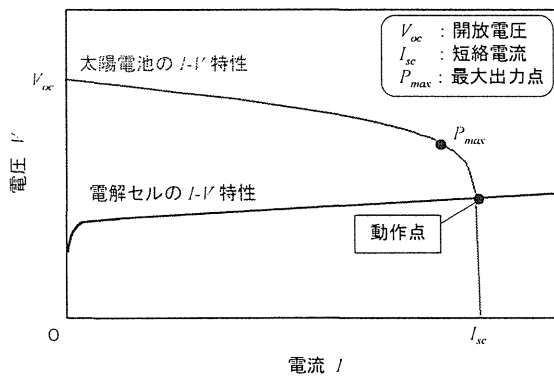


図1 太陽電池と電解セルの I-V 特性と動作点

3. 最適動作点の検討

任意の太陽電池に対して電解セルの接続台数の調整によって水素発生量が最大となる動作点を検討した。なお、電気分解における水素の発生量は流した電流値に比例するというファラデーの法則に従う¹⁾。

3.1 実験方法

動作点を求めるには太陽電池の I-V 特性と電解セルの I-V 特性を取得する必要がある。電解セルの I-V 特性は数式化することができる²⁾。また、太陽電池の I-V 特性は気象条件により変動するので、実測することにより取得した。従って動作点は数式化した電解セルの I-V 特性と実測値である太陽電池の I-V 特性との交点を読み取っている。

検討に用いた電解セルの I-V 特性は V : 電解電圧 (V), M : 直列接続台数, i : 電解電流 (A) を用いて

$$V = M \times (0.19 \times i + 1.49) \quad (1)$$

と表すことができる²⁾。なお、電解液温度は 20℃一

定の数値であり、以下の検討はこの条件の下で行った。表1は使用した太陽電池、表2は電解セルの仕様であり、図2はそれぞれの概観である。また、図3は実験当日の日射条件である。

表1 太陽電池の仕様

種類	単結晶シリコン太陽電池
電極面積	0.361 (m ²)
使用状態	2枚並列 設置角度: 0°
定格	開放電圧: 26.3 (V) 短絡電流: 4.6 (A)
製造元	SHARP (株)

表2 電解セルの仕様

種類	固体高分子形電解セル
電極面積	40 (cm ²)
定格	10W
製造元	h-tec

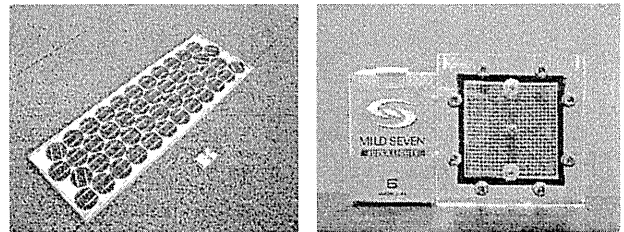


図2 太陽電池と電解セル

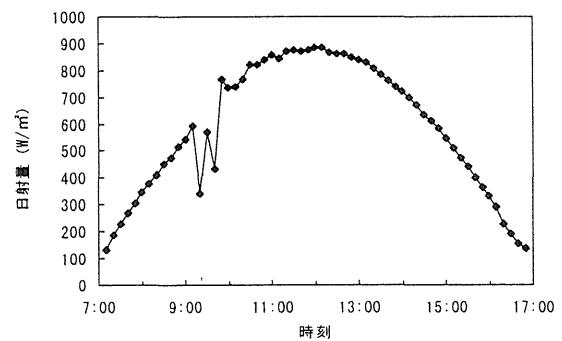


図3 実験当日の日射条件

3.2 電気分解に寄与する電流 (I_{EL}) の検討

電解セルの直列接続では、各セルに流れる電流は等しくなるので水素発生量は台数倍して検討を行う必要がある。そこで、水素発生に寄与するすべての電流を I_{EL} (A) とし、動作点電流 i (A), 直列接続台数 M を用いて $I_{EL} = M \times i$ (A) と定義して検討している(図4)。図4に示すように日射量が低い時間帯

では M が多い方が I_{EL} は大きくなり、最適台数になる。逆に日射量が高い時間帯は M が少ない方が適していることが分かる。これは、太陽電池の出力変動により、動作点が移動しているためであり、それぞれの台数は最適となる条件が異なっていることを示している。その関係を示したものが図5である。図5から、日射量・電池温度によって動作点の位置は異なるため水素発生量にも差が生じることが確認できる。

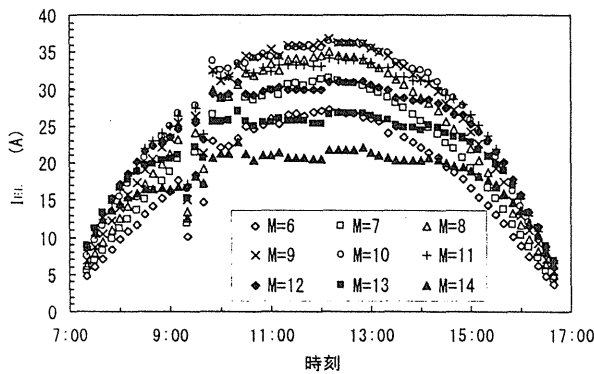


図4 時刻に対する I_{EL}

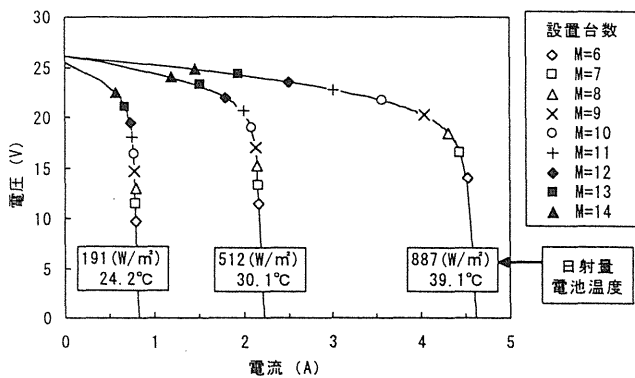


図5 各日射量域における動作点の一例

3.3 I_{EL} が最大となる動作点の検討

I_{EL} が最大となるを I_{ELmax} とすると、

$$I_{ELmax} = M_{opt} \times i_{opt} \quad (2)$$

M_{opt} : 最適台数

i_{opt} : I_{ELmax} となるとき動作点電流 (A)

となる。このときの i_{opt} について太陽電池の電流比 β (=最大出力点電流: I_{pmax} / 短絡電流: I_{sc})³⁾ を用い

て検討した (図6)。図6より i_{opt}/I_{sc} は I_{pmax}/I_{sc} に対して非常に近い値になっていることが分かる。つまり、 I_{EL} を最大にする動作点は太陽電池の最大出力点であることを示している。

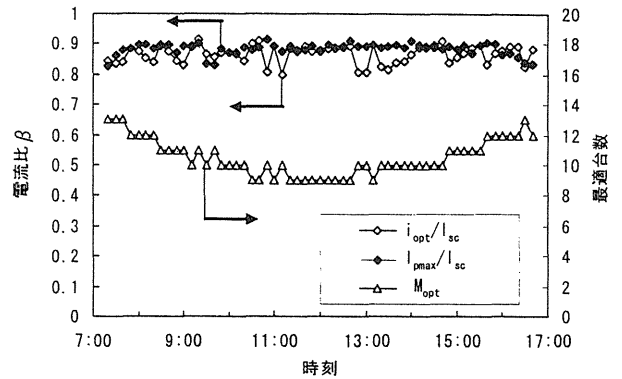


図6 時刻に対する電流比と最適台数

3.4 水素発生量の接続台数による損失

ここまでの検討で日射量・電池温度の変化に対して、電解セルの台数調整により動作点が太陽電池の最大出力点に合うように調整することが得策であることを明らかにした。ここでは、台数を調整しない場合に1日を通して生じる水素発生量の損失について検討を行った。運転時間に対する累積電流量を図7に示す。ここで、累積電流量とは1日を通して電気分解に寄与した電流を累積した値である。また、「 M =切り替え」とは、常に最適となる台数に調整した場合のことを意味している。図8に実験当日 (条件: 図3) に回収できる水素量と台数の関係を示す。水素回収量はファラデーの法則において電流効率を100%として算出し、標準状態における値である。

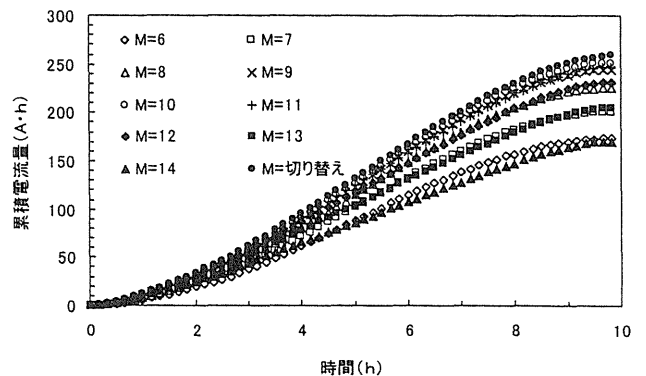


図7 運転時間に対する累積電流量

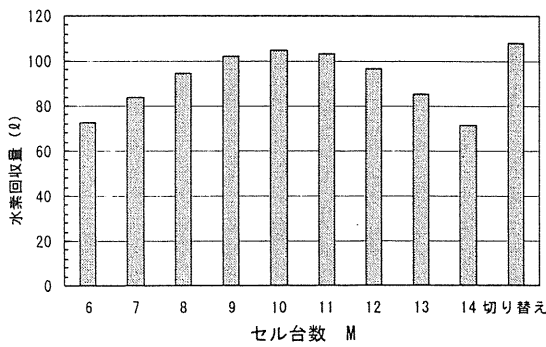


図8 実験当日(条件: 図3)に回収できる水素量

図7において、台数によって曲線の形状が異なっているが、これは、最適台数に近い時間帯では累積電流量の増加が大きくなるが、最適台数から外れると累積電流の増加量は低下するため台数、時間帯によって増加量に差が生じるためである。

図8より、実験当日は $M = 10$ が固定台数では水素回収量が最大となる。これは、 $M = 10$ が最適台数に近くなる気象条件が多く出現したことと、最適台数から外れるときの水素回収量の損失の大きさが影響していると考えられる。説明のために、図9に台数に対する水素発生量の一例を示す。

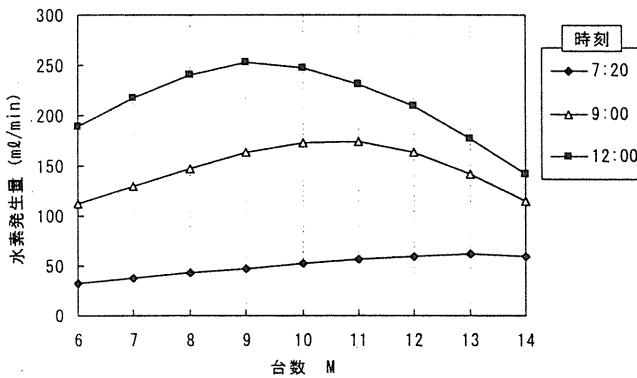


図9 台数に対する水素発生量の一例

図9より、12:00において最適となっている $M=9$ が7:20においては最適台数にはならないが、最適である $M = 13$ に比べて水素発生量の差は約 13.8 (ml/min)である。逆に、12:00においては最適である $M = 9$ と $M = 13$ の水素発生量の差は約 83.5 (ml/min)であり。日射量が高い時間帯ほど台数による水素発生量の損失が大きくなる傾向がある。従って、高日射量域で最適近くとなる $M = 9, 10$ は低日

射量域では最適台数からは大きく外れるものの水素発生量ではそれほど大きな損失が生じていないことが分かる。

1日を通して $M = 10$ が最適になったのは、気象条件と台数による損失の大小の影響によるものであると考えられる。

3.5 水素発生量の接続台数による損失

これまではある1日についての検討を行ってきた。ここでは、実際に屋外に設置することを想定して日射条件の異なる条件のデータを測定し比較・検討を行う。比較する際の条件を次のようにする。

- ①太陽電池の設置角度は 0° (地面に対して水平)とする。
- ②日射量 $150 (W/m^2)$ 以下では、太陽電池の出力がほとんど得られないため、日射が無いものとして扱う。
- ③水素発生量はファラデーの法則において電流効率を100%とし、標準状態において算出した値である。
- ④電解セルの電解温度は一定 ($20^\circ C$) としている。

表3に実験条件、図10に各実験日における日射量、図11に実験当日に回収できる水素量を示す。

表3 実験条件

	実験日時	気圧 (hPa)
CASE-1	H. 16 10月16日	1004~1010.5
CASE-2	H. 16 12月14日	1012~1019
CASE-3	H. 16 12月29日	1006~1007
CASE-4	H. 17 1月6日	1007~1011

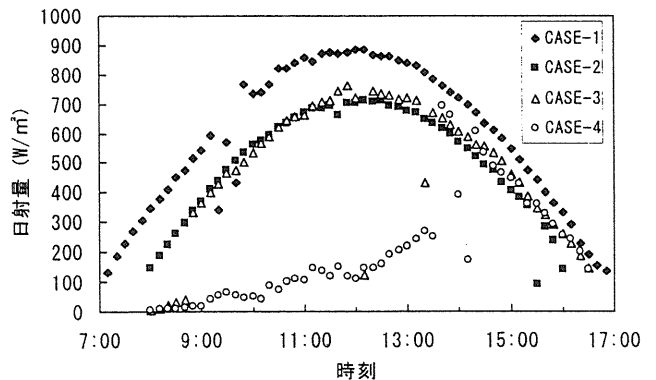


図10 実験日の日射条件

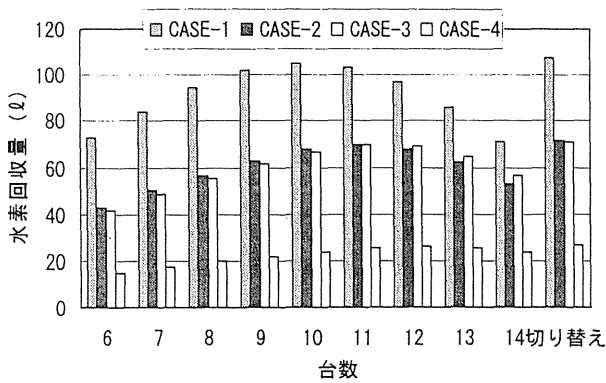


図 11 実験日に回収できる水素量

CASE-1~CASE-4 の実験結果から、日射条件の異なる CASE-1, 2, 4 においては通日の最適台数が異なっている。また、日射パターンの良く似た CASE-2, 3 では最適台数、水素回収量が等しくなった。すべての CASE において、通日の最適台数から 1 台程度ずれた場合でもほとんど同程度の水素を回収できることが分かる。さらに、台数を切り替えた場合が大きく得をするという結果にはならなかった。これは、電解セルが太陽電池の最大出力点に対して高い追従性を持っていることを示しており、固定台数でも効率よく水素を回収できる可能性があることを示している。また、CASE-4 のように低日射日では、際立って最適と言える台数は存在せず、台数による水素発生量の損失が少なくなっている。前述したように、低日射量域においては水素発生量の台数による損失が少なくなるが、低日射日においても同様の結果になっていることが確認できる。

以上のことから、台数を固定するのであれば、高日射量域で最適となるように設定することが得策であると考えられる。

3.6 水素回収量の指標の検討

実際に装置を構成するにあたって、水素回収量について気象条件に寄与しない指標を得る必要がある。まず、CASE-1 において積算日射量に対する水素回収量を検討した (図 12)。積算日射量とは日射量と日照時間の積を積算したものである。

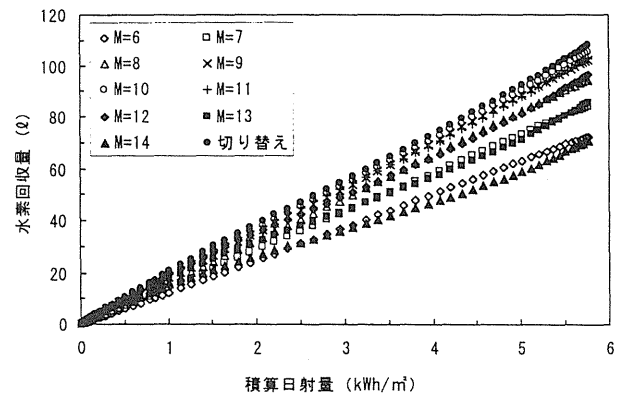


図 12 積算日射量に対する各台数の水素回収量
【CASE-1】

図 12 より、 $M =$ 切り替え においては積算日射量に対して線形性を示した。 $M =$ 切り替え では、常に最大出力点付近での運転となる。太陽電池の最大出力は日射量に対して線形的に増加し、電解セルへの入力が増加する。さらに、電解セルは入力に対して水素発生量が線形的に増加するので、積算日射量と水素回収量が線形的を示すものと考えられる。また、その他の固定台数では最適台数から外れる時間帯において損失が生じているために線形性を示さないものと考えられる。 $M =$ 切り替え において日射条件の異なる日を比較して積算日射量の指標としての可能性を検討した (図 13)。

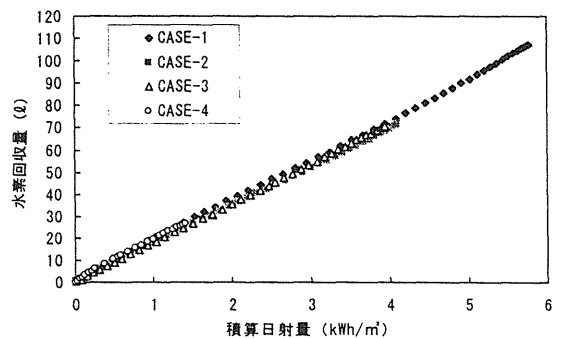


図 13 積算日射量に対する水素回収量
【CASE-1~4 M=切り替え】

表 4 直線近似式

CASE-1	$y=18.5x$	$R^2=0.9994$
CASE-2	$y=17.4x$	$R^2=0.9997$
CASE-3	$y=17.9x$	$R^2=0.9998$
CASE-4	$y=19.5x$	$R^2=0.9946$

図13から、CASE-1~3に比べて極端に日射条件の異なるCASE-4においても、積算日射量と水素発生量は線形性を示し、傾きも他に比べてそれほど大きくは変わらないことが確認できた。このことから、積算日射量を用いれば水素発生量のある程度見積もれることが確認できた。

直線近似式については理論的に検討すると

$$Y = \eta \times X \times S \times \text{電解セルの入力に対する水素発生量} \quad (3)$$

ここで、水素発生量を Y (ℓ)、積算日射量を X (Wh/m²)、太陽電池の効率を η 、太陽電池の電極面積を S (m²)

電解セルの入力に対する水素発生量の値については電解セルの I-V 特性、ファラデーの法則から、1 (kWh) の入力に対して約 202.9 (ℓ/h) であることが算出でき、太陽電池の効率 η は約 0.13 である。これらの値を(3)式に代入したところ、 $Y = 19.0 \times X$ となり直線近似式に近い値を得ることができる。以上のことから、積算日射量を指標として用いることにより、水素回収量を見積もることが可能であり、また、その係数は算出が可能であることが確認できた。

4. 最適台数の導出

電解セルの接続台数 M を調整することにより動作点が太陽電池の最大出力点と一致するような数式の検討を行った。(1)式の i, V が太陽電池の最大出力点電流・電圧となるような M は

$$M = \frac{V_{ocT} \times \{1 - 0.0039 \times (t - T)\} \times \alpha}{a \times K \times \beta \times A + b} \quad (4)$$

T : 基準の電池温度 (°C)

V_{ocT} : 電池温度 T °C における開放電圧 (V),

t : 電池温度 (°C), K : 短絡電流係数,

α : 電圧比 (最大出力点電圧 / 開放電圧),

β : 電流比, A : 日射量 (W/m²),

a : 電解セルの抵抗係数, b : 電解セルの分解電圧

となり、CASE-1, 4 において実験条件を代入して実測値と比較したものが図14, 15 である。図14, 15 に示すように気象条件が異なる状況においても実測値に近い値を得ることが確認できた。

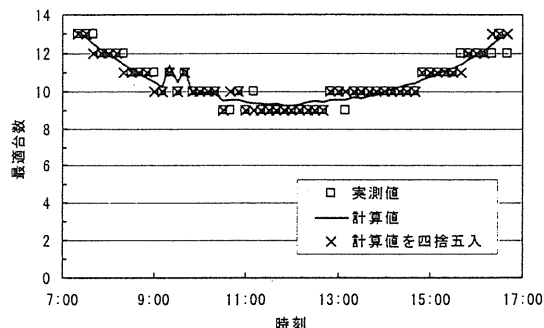


図14 CASE-1における計算値と実測値【CASE-1】

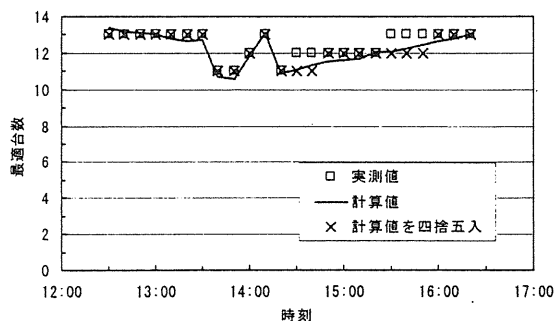


図15 CASE-4における計算値と実測値【CASE-4】

5. まとめ

本研究を総括すると以下のようにまとめられる。

- (1) 水素回収量が最大となる最適動作点は、太陽電池の最大出力点と一致する。
- (2) 電解セルの接続台数による水素発生量の損失は高日射量域ほど大きくなるので、高日射量域で最適となるように台数を設定することが得策であると考えられる。
- (3) 積算日射量を指標として用いることにより、構成した装置の水素回収量を見積もることが可能である。
- (4) 太陽電池の電圧比・電流比を用いて最適台数を数式から導くことができ、実験値に近い値を得ることができた。また、台数を切り替える指標が日射量・太陽電池温度であることを明らかにした。

参考文献

- 1) 今井弘「新一般化学」(株)化学同人 1997.9
- 2) 熊谷他 宮崎大学工学部紀要 第33号 2004.10
- 3) 大塚他：平成14年度 電気関係学会
電力・エネルギー部門大会 No. 193 (2002)