

Analysis of the Optical Characteristics of Parabolic Trough Collectors for Solar Power Generation System

放物線樋型ミラーを用いた太陽光発電装置の光学特性の解析

Keisuke ECHIGO

越後 敬介^{*1 ‡}

Abstract

Through the analysis of the optical characteristics of parabolic trough collectors, its capability to focus sunlight on the focal point of the parabolic curve, even when light is incident at an oblique angle, was found to be advantageous.

The light-concentrating characteristics of a parabolic trough solar electric panel were analyzed in relation to the seasonal diurnal motion of the sun. A parabolic trough collector situated in the east-west direction was found to be effective for concentrating sunlight on the solar cells placed at the focal point with no adjustments during spring and autumn, and with tilt adjustments during summer and winter. A tilt-controlled model, in which the width of the mirror is ten times the width of the solar cell, was found to achieve a light concentration ratio of 7.4.

Keywords : Solar Power Generation , Parabolic trough , Solar cell , Diurnal motion

キーワード : 太陽光発電, パラボラトラフ, 太陽電池, 日周運動

1. はじめに

近年, 地球温暖化に起因した豪雨, 竜巻, 熱波など「極端な気象」が頻発⁽¹⁾しており, 温室効果ガスの排出量削減策として再生可能エネルギーの普及拡大の緊急性が増している. 太陽光発電は, 設置場所の制約条件が少なく, 普及拡大の阻害要因である「昼夜や天候による発電量の変動」, 「高い発電コスト」の課題を解決することにより大幅な進展が期待できる.

前者の阻害要因に対して「太陽光発電の電力で生成した水素を輸送, 貯蔵し, 燃料電池を用いて電力に変換」する方策が提案⁽²⁾され, 後者に対して「太陽電池の高効率化, 製造コスト低減, 光学部品を用いて集光することで発電効率を高める集光型太陽電池」⁽³⁾の研究・実用化が進められている.

筆者は, 放物線樋型ミラー (パラボラトラフ Parabolic trough) の光学特性を解析し, 日周運動により東西に変化する太陽の方向に対し追従制御なし

で, または, 装置架台の傾斜角を制御することで太陽電池上に集光し, 集光倍率の向上と設備の低価格化により発電コストの低減を実現できる燃料電池用水素の大量生産に適した太陽光発電装置を提案する.

2. 放物線ミラーの光学特性

太陽熱発電では, 太陽追尾平面ミラーを用いたヘリオスタット, 放物線樋型ミラー, 軸対称放物面ミラーで太陽光を集光し, 熱媒体を高温化することで発電する装置⁽⁴⁾が実用化されている. 集光型太陽光発電では, フレネルレンズ⁽⁵⁾, 軸対称放物面ミラー, リニアアレイ⁽⁶⁾を搭載した架台を日周運動により東西に変化する太陽の方向に対して2軸追従制御し, 太陽電池上に集光することで発電効率を高める装置の研究・実用化が進められている. 現在, 変形可能な超薄板ガラス鏡が商品化⁽⁷⁾されたことにより, 図1に示す構造の長尺放物線樋型ミラーを高精度・低コストで量産することが可能となった. 集光型太陽光発電用光学部品として効果的に適用するため放物線樋型ミラーの光学特性を解析する.

*1 ㈱不二越 工具事業部生産技術部 チーフ
(〒930-8511 富山市不二越本町 1-1-1)

e-mail : kechigo@nachi-fujikoshi.co.jp

‡ echigo@angel.ocn.ne.jp

(原稿受付: 2015年8月19日, 受領日 2016年5月13日)

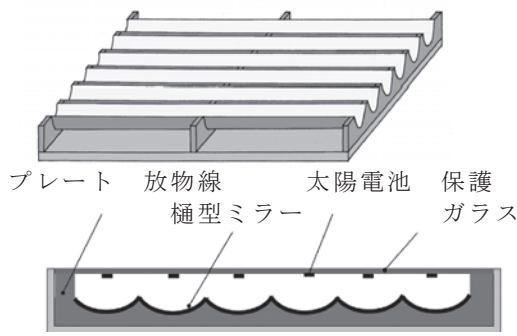


Fig.1 Parabolic trough collector solar cell construction

図1 放物線樋型ミラー集光太陽電池の構成

2.1 反射光の計算

放物線樋型ミラーの光学特性を解析するため、 $Y-Z$ 面内 ($X=0$) で Y 座標が Y_M となるミラー表面上の点 P_M で反射した光の軌跡を計算する。放物線を示す2次関数の係数を A 、形状式を式1、放物線の1階微分を式2で定義すると、鏡の表面の座標は式3、鏡の表面の外向きの単位法線ベクトル V_M は式4で求められる。図2で示される反射光の鏡から離れる方向の単位方向ベクトル V_o は、鏡に向かう入射光の単位方向ベクトル V_i 、鏡の外向きの単位法線ベクトル V_M を用いて、図3の反射の法則により式5で表される。鏡の表面上の点 P_M の反射光が点 P_M から離れ、距離 L となる位置に到達した際の座標値 P_o は式6で求められる。

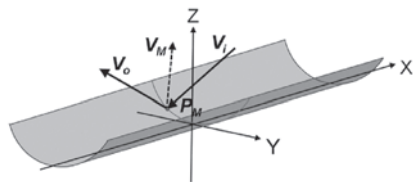


Fig.2 Vectors of incident and reflected light

図2 入射光と反射光の方向ベクトル

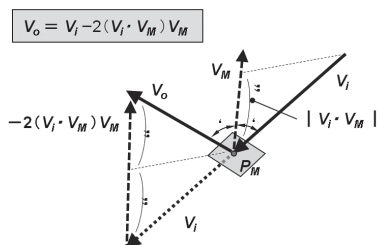


Fig.3 Vector representation of the law of reflection

図3 反射の法則のベクトル表記

$$F(Y_M) = A \cdot Y_M^2 \quad (1)$$

$$F'(Y_M) = 2A \cdot Y_M \quad (2)$$

$$P_M = \begin{pmatrix} P_{MX} \\ P_{MY} \\ P_{MZ} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ Y_M \\ F(Y_M) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ Y_M \\ A \cdot Y_M^2 \end{pmatrix} \quad (3)$$

$$V_M = \frac{1}{\sqrt{1+F'(Y_M)^2}} \begin{pmatrix} 0 \\ -F'(Y_M) \\ 1 \end{pmatrix} \\ = \frac{1}{\sqrt{1+4A^2 Y_M^2}} \begin{pmatrix} 0 \\ -2AY_M \\ 1 \end{pmatrix} \quad (4)$$

$$V_o = V_i - 2(V_i \cdot V_M)V_M \quad (5)$$

$$P_o = P_M + L \cdot V_o \quad (6)$$

2.2 垂直入射光の反射光と集光

放物線樋型ミラーに式7で定義される垂直方向から入射した光に対する反射光の軌跡について考察する。図4で示される反射光の鏡から離れる方向の単位方向ベクトル V_{oA} は、鏡に向かう入射光の単位方向ベクトル V_{iA} 、鏡の外向きの単位法線ベクトル V_M を用いて、反射の法則により式8で求められる。鏡上の点 P_M で反射した光が、点 P_M から離れ、距離 L となる位置に到達した際の座標値 P_{oA} は式9で求められる。

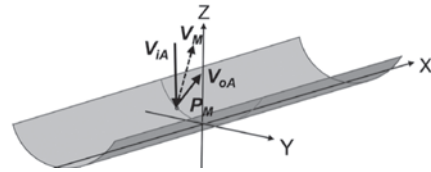


Fig.4 Vectors of perpendicular incident light and reflection

図4 垂直入射光と反射光の方向ベクトル

$$V_{iA} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ -1 \end{pmatrix} \quad (7)$$

$$V_{oA} = V_{iA} - 2(V_{iA} \cdot V_M)V_M \\ = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ -1 \end{pmatrix} - 2 \left(\frac{1}{\sqrt{1+F'(Y_M)^2}} \right)^2 \times \\ \left(\begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ -1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 0 \\ -F'(Y_M) \\ 1 \end{pmatrix} \right) \begin{pmatrix} 0 \\ -F'(Y_M) \\ 1 \end{pmatrix} \\ = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ -1 \end{pmatrix} + \frac{1}{1+F'(Y_M)^2} \begin{pmatrix} 0 \\ -2F'(Y_M) \\ 2 \end{pmatrix} \\ = \frac{1}{1+F'(Y_M)^2} \begin{pmatrix} 0 \\ -2F'(Y_M) \\ -(1+F'(Y_M)^2)+2 \end{pmatrix} \\ = \frac{1}{1+4A^2 Y_M^2} \begin{pmatrix} 0 \\ -4AY_M \\ 1-4A^2 Y_M^2 \end{pmatrix} \quad (8)$$

$$\begin{aligned}
 P_{oA} &= P_M + L \cdot V_{oA} \\
 &= \begin{pmatrix} 0 \\ Y_M \\ A \cdot Y_M^2 \end{pmatrix} + L \cdot \frac{1}{1 + 4A^2 Y_M^2} \begin{pmatrix} 0 \\ -4AY_M \\ 1 - 4A^2 Y_M^2 \end{pmatrix}
 \end{aligned} \quad (9)$$

垂直方向から入射した光が放物線楯型ミラー上の点 P_M で反射し、光の進む経路の Y 座標が 0 となる点までの距離 L_A は式 10 で求められる。

$$\begin{aligned}
 Y_M - L_A \cdot \frac{4AY_M}{1 + 4A^2 Y_M^2} &= 0 \\
 L_A \cdot \frac{4AY_M}{1 + 4A^2 Y_M^2} &= Y_M \\
 L_A &= \frac{1 + 4A^2 Y_M^2}{4A}
 \end{aligned} \quad (10)$$

式 10 の L_A を式 9 の L に代入することで、反射光が進む経路の Y 座標が 0 となる点の座標値は式 11 で求められる。この計算より、放物線楯型ミラーに垂直方向から入射した光に対する反射光は、既知の通り図 5, 6, 7 で示すように放物線の焦点の位置である座標 $1/(4A)$ に集光することが確認できる。

$$\begin{aligned}
 P_{oA} &= P_M + L_A \cdot V_{oA} \\
 &= \begin{pmatrix} 0 \\ Y_M \\ A \cdot Y_M^2 \end{pmatrix} + L_A \cdot \frac{1}{1 + 4A^2 Y_M^2} \begin{pmatrix} 0 \\ -4AY_M \\ 1 - 4A^2 Y_M^2 \end{pmatrix} \\
 &= \begin{pmatrix} 0 \\ Y_M \\ A \cdot Y_M^2 \end{pmatrix} + \frac{1}{4A} \cdot \begin{pmatrix} 0 \\ -4AY_M \\ 1 - 4A^2 Y_M^2 \end{pmatrix} \\
 &= \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ \frac{1}{4A} \end{pmatrix}
 \end{aligned} \quad (11)$$

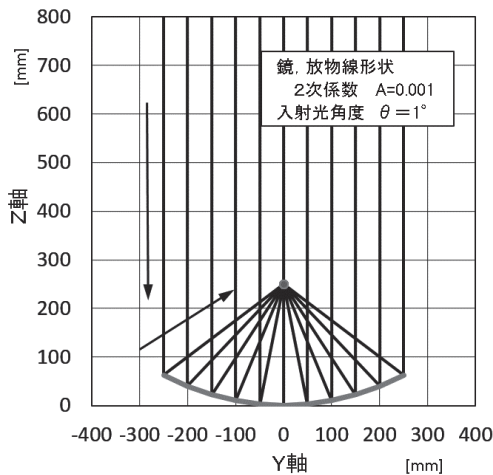


Fig.5 Reflected path of perpendicular incident light.

図 5 垂直入射光の反射光の経路 (Y・Z 面)

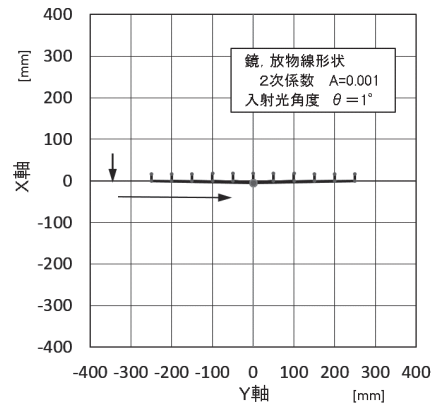


Fig.6 Reflected path of perpendicular incident light.

図 6 垂直入射光の反射光の経路 (X・Y 面)

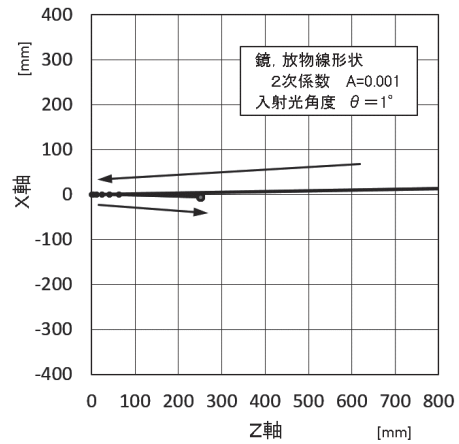


Fig.7 Reflected path of perpendicular incident light.

図 7 垂直入射光の反射光の経路 (X・Z 面)

2.3 斜め入射光の反射光と集光

放物線楯型ミラーに、図 8 で示す XZ 面内の楯の長手方向に斜め角度 θ から入射した光に対する反射光の軌跡について同様に考察する。XZ 面内の角度 θ の方向から入射する光の単位方向ベクトル V_{iB} を式 12 で定義する。反射光の鏡から離れる方向の単位方向ベクトル V_{oB} は、鏡に向かう入射光の単位方向ベクトル V_{iB} 、鏡の外向きの法線ベクトル V_M を用いて、反射の法則により式 13 で求められる。

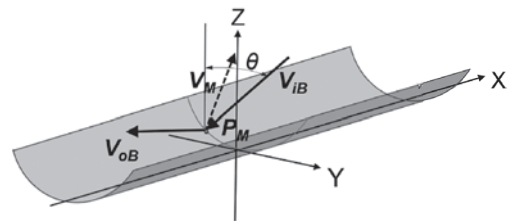


Fig.8 Vectors of oblique incident light and of reflection

図 8 斜め入射光と反射光の方向ベクトル

$$\mathbf{V}_{iB} = \begin{pmatrix} \sin\theta \\ 0 \\ -\cos\theta \end{pmatrix} \quad (12)$$

$$\begin{aligned} \mathbf{V}_{oB} &= \mathbf{V}_{iB} - 2(\mathbf{V}_{iB} \cdot \mathbf{V}_M) \mathbf{V}_M \\ &= \begin{pmatrix} \sin\theta \\ 0 \\ -\cos\theta \end{pmatrix} - 2 \left(\frac{1}{\sqrt{1+F'(Y_M)^2}} \right)^2 \cdot \\ &\quad \left(\begin{pmatrix} \sin\theta \\ 0 \\ -\cos\theta \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} 0 \\ -F'(Y_M) \\ 1 \end{pmatrix} \right) \begin{pmatrix} 0 \\ -F'(Y_M) \\ 1 \end{pmatrix} \\ &= \begin{pmatrix} \sin\theta \\ 0 \\ -\cos\theta \end{pmatrix} + \frac{\cos\theta}{1+F'(Y_M)^2} \begin{pmatrix} 0 \\ -2F'(Y_M) \\ 2 \end{pmatrix} \\ &= \frac{1}{1+4A^2Y_M^2} \begin{pmatrix} (1+4A^2Y_M^2)\sin\theta \\ -4AY_M\cos\theta \\ (1-4A^2Y_M^2)\cos\theta \end{pmatrix} \quad (13) \end{aligned}$$

鏡上の点 $\mathbf{P}_M$ で反射した光が、点 $\mathbf{P}_M$ から離れ、距離 L となる位置に到達した際の座標値 $\mathbf{P}_{oB}$ は式 14 で求められる。斜め方向から入射した光が放物線楕型ミラー上の点 $\mathbf{P}_M$ で反射し、光の進む経路の Y 座標が 0 となる点までの距離 L_B は式 15 で求められる。式 15 で求めた L_B を式 14 の L に代入することで、反射光の進む経路の Y 座標が 0 となる座標値は式 16 で求められる。

$$\begin{aligned} \mathbf{P}_{oB} &= \mathbf{P}_M + L \cdot \mathbf{V}_{oB} \\ &= \begin{pmatrix} 0 \\ Y_M \\ A \cdot Y_M^2 \end{pmatrix} + L \cdot \frac{1}{1+4A^2Y_M^2} \begin{pmatrix} (1+4A^2Y_M^2)\sin\theta \\ -4AY_M\cos\theta \\ (1-4A^2Y_M^2)\cos\theta \end{pmatrix} \\ &= \frac{1}{1+4A^2Y_M^2} \begin{pmatrix} L \cdot \sin\theta(1+4A^2Y_M^2) \\ Y_M(1+4A^2Y_M^2) - L \cdot 4AY_M\cos\theta \\ A \cdot Y_M^2(1+4A^2Y_M^2) + L \cdot \cos\theta(1-4A^2Y_M^2) \end{pmatrix} \quad (14) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \frac{1}{1+4A^2Y_M^2} (Y_M(1+4A^2Y_M^2) - L_B \cdot 4AY_M\cos\theta) &= 0 \\ Y_M(1+4A^2Y_M^2) - L_B \cdot 4AY_M\cos\theta &= 0 \\ L_B \cdot 4AY_M\cos\theta &= Y_M(1+4A^2Y_M^2) \\ L_B &= \frac{1+4A^2Y_M^2}{4A\cos\theta} \quad (15) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \mathbf{P}_{oB} &= \mathbf{P}_M + L_B \cdot \mathbf{V}_{oB} \\ &= \begin{pmatrix} 0 \\ Y_M \\ A \cdot Y_M^2 \end{pmatrix} + L_B \cdot \frac{1}{1+4A^2Y_M^2} \begin{pmatrix} (1+4A^2Y_M^2)\sin\theta \\ -4AY_M\cos\theta \\ (1-4A^2Y_M^2)\cos\theta \end{pmatrix} \\ &= \begin{pmatrix} 0 \\ Y_M \\ A \cdot Y_M^2 \end{pmatrix} + \frac{1}{4A\cos\theta} \begin{pmatrix} (1+4A^2Y_M^2)\sin\theta \\ -4AY_M\cos\theta \\ (1-4A^2Y_M^2)\cos\theta \end{pmatrix} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} &= \frac{1}{4A} \begin{pmatrix} 0 \\ 4AY_M \\ 4A^2 \cdot Y_M^2 \end{pmatrix} + \frac{1}{4A} \begin{pmatrix} \tan\theta(1+4A^2Y_M^2) \\ -4AY_M \\ (1-4A^2Y_M^2) \end{pmatrix} \\ &= \frac{1}{4A} \begin{pmatrix} \tan\theta(1+4A^2Y_M^2) \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix} \quad (16) \end{aligned}$$

X 座標 : $\tan\theta (1+4A^2Y_M^2) / 4A$

Y 座標 : 0

Z 座標 : $1/4A$

この計算から、放物線楕型ミラー上に楕の長手方向の斜めから入射した光に対する反射光は、図 9, 10, 11 で示すように入射光の傾きによらず放物線の焦点の Z 座標 $1/(4A)$ 、Y 座標 0 に集光する光学特性を持っていることが確認できる。

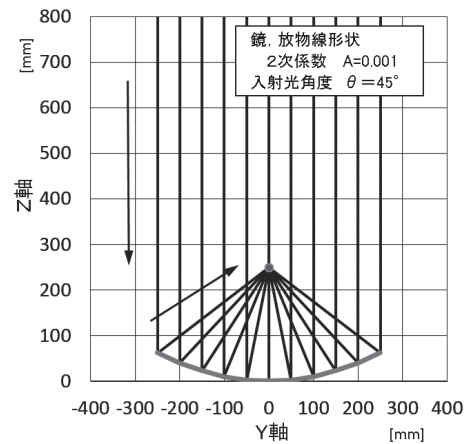


Fig.9 Reflected path of oblique incident light

図 9 斜め入射光の反射光の経路 (Y・Z 面)

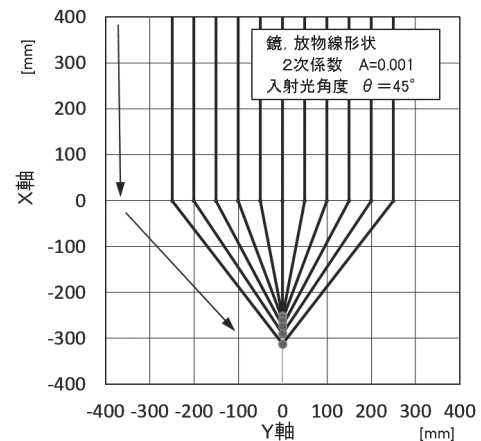


Fig.10 Reflected path of oblique incident light

図 10 斜め入射光の反射光の経路 (X・Y 面)

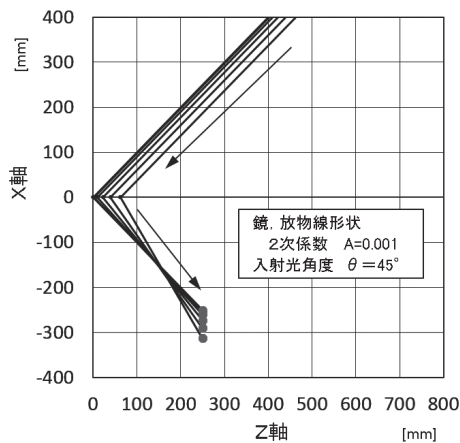


Fig.11 Reflected path of oblique incident light

図 11 斜め入射光の反射光の経路 (X・Z面)

3. 放物線楯型ミラーの適用

放物線楯型ミラーは、垂直方向から入射した光や楯の長手方向の斜めから入射した光を放物線の焦点位置に集光する特性を持つため、焦点位置の僅かに下の位置に太陽電池を配置することにより、太陽光が太陽電池上に集光され、発電効率を高めた集光型太陽光発電装置を構成することができる。

放物線楯型ミラーの楯の方向が東西となるように設置し、傾きを太陽の南中高度に調整すると、春分、秋分の日には太陽の日周運動の追従動作なしで、装置架台を固定したままで太陽電池上に集光することができる。春分、秋分の日以外の日の放物線楯型ミラーの集光特性を考察するため、各季節、各地の日周運動による太陽の軌跡を算出する。

3.1 太陽の日周運動

図 12 の日周運動による太陽の方向を示す緯度 α の地域の各季節、各時刻の太陽の位置を示す単位方向ベクトルは、式 17 のパラメータを用いて、式 18 で計算され、軌跡は図 13, 14 のグラフで表される。

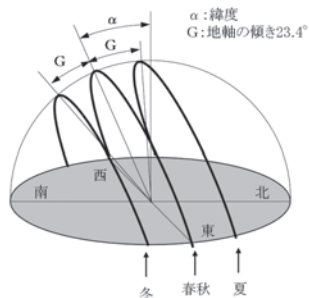


Fig.12 Diurnal trajectory of the Sun

図 12 日周運動の太陽の軌跡

α : 緯度 (北緯をプラスで表現)
 D : 北半球の春分の日を起日とする日数
 G : 地軸の傾き (23.4 度)
 $A_D = 360 \cdot D / 365$ [度]
 β : 季節の地軸の傾きの影響
 $\beta = G \cdot \sin(A_D)$ [度]
 T : 時刻 (24 時間表現)
 $\tau = 360 \cdot (T - 12) / (24)$ [度]

(17)

$$\begin{pmatrix} e_{1x} \\ e_{1y} \\ e_{1z} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \sin(\tau) \cos(\beta) \\ \cos(\alpha) \sin(\beta) - \sin(\alpha) \cos(\tau) \cos(\beta) \\ \sin(\alpha) \sin(\beta) + \cos(\alpha) \cos(\tau) \cos(\beta) \end{pmatrix} \quad (18)$$

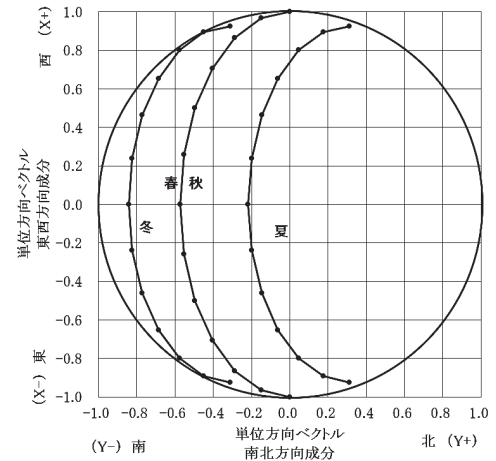


Fig.13 Diurnal motion of the Sun: top view

図 13 太陽の日周運動の軌跡：上面図

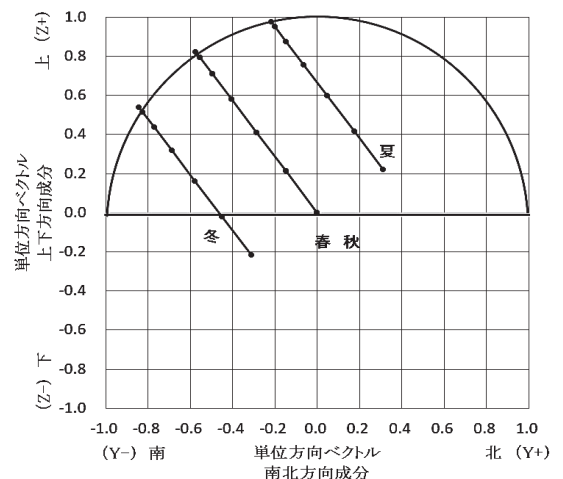


Fig.14 Diurnal motion of the Sun: side view

図 14 太陽の日周運動の軌跡：側面図

3.2 傾斜した太陽電池から見た太陽の動き

太陽の南中高度に応じて、太陽光発電装置の傾きを γ 度回転させた場合に、傾斜した太陽電池上の座標系 $(X' Y' Z')$ からみた太陽の位置を示す単位方向ベクトルは式 19 で表される。

$$\begin{pmatrix} e_{2x} \\ e_{2y} \\ e_{2z} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos(\gamma) & -\sin(\gamma) \\ 0 & \sin(\gamma) & \cos(\gamma) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} e_{1x} \\ e_{1y} \\ e_{1z} \end{pmatrix} \\ = \begin{pmatrix} \sin(\tau)\cos(\beta) \\ \cos(\alpha + \gamma)\sin(\beta) - \sin(\alpha + \gamma)\cos(\tau)\cos(\beta) \\ \sin(\alpha + \gamma)\sin(\beta) + \cos(\alpha + \gamma)\cos(\tau)\cos(\beta) \end{pmatrix} \quad (19)$$

南中高度に合わせて傾斜させた太陽電池上の座標系からみた太陽の軌跡は図 15, 16 となる。太陽電池上の座標系で上記の軌跡で移動する太陽からの入射光に対して、放物線樋型ミラーで反射した光の軌跡を求め、焦点位置に設置した太陽電池の平面上における反射光の位置を計算することで、各地域、時刻、季節の集光特性が解析できる。

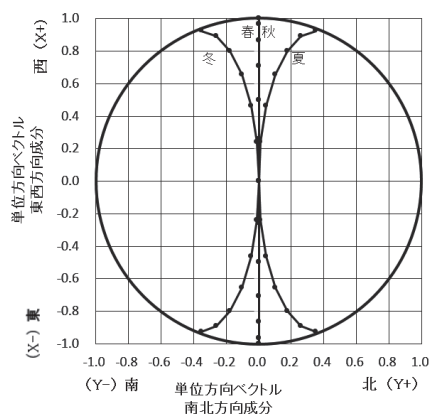


Fig.15 Trajectory of the Sun as seen from tilted solar cells

図 15 傾斜した太陽電池から見た太陽の軌跡：上面図

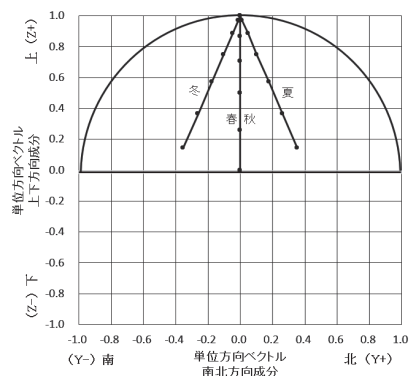
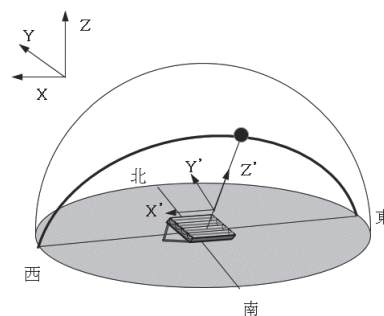


Fig.16 Trajectory of the Sun as seen from tilted solar cells

図 16 傾斜した太陽電池からみた太陽の軌跡：側面図

3.3 一軸・傾斜角制御モードの運用

図 17 で示すように、放物線樋型ミラーを用いた集光型太陽電池の樋の方向が東西となるように設置し、放物線の焦点の位置に配置した太陽電池上に集光するように装置架台の傾斜角を 1 軸制御する傾斜角制



御モードについて解析する。

Fig.17 Installation of parabolic trough collectors

図 17 放物線樋型ミラーの設置

放物線樋型ミラー上の傾斜した座標系の $X' Z'$ 面上に太陽が位置するように装置架台の傾斜角を制御することで、日周運動で位置が変化する太陽からの光を放物線の焦点位置に配置した太陽電池上に集光できる。図 18 に傾斜角制御モードにおける南中高度を基準とした各季節の架台の傾斜角調整量、図 19 に鏡上の $X=0$ 位置で反射した光の夏至の各時刻における太陽電池上の集光位置の解析結果を示す。

日周運動により東西方向に変化する太陽の方向に対しては追従制御を行わずに、装置の傾斜角のみを制御する 1 軸制御の架台を用いて、焦点位置付近に配置した太陽電池上に太陽光を集光できることを確認した。

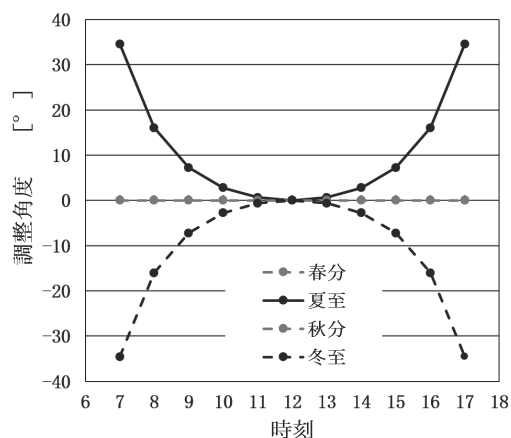


Fig.18 Tilt-control mode (tilt angle adjusted for each season)

図 18 傾斜角制御モード（各季節の傾斜角調整量）

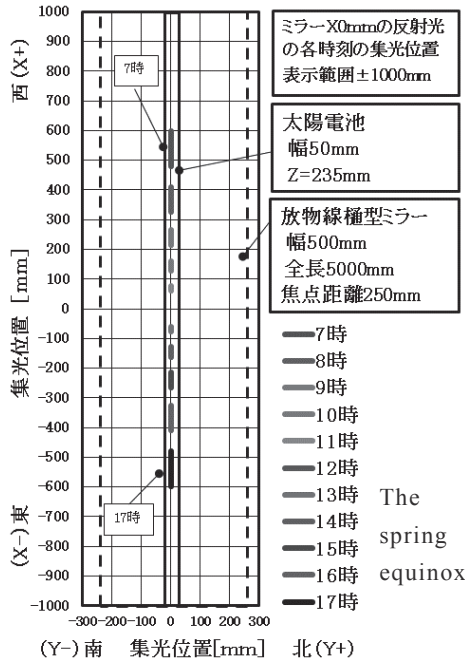


Fig.19 Tilt-control mode (Light concentration point)
図 19 傾斜角制御モード (夏至の各時刻の集光位置)

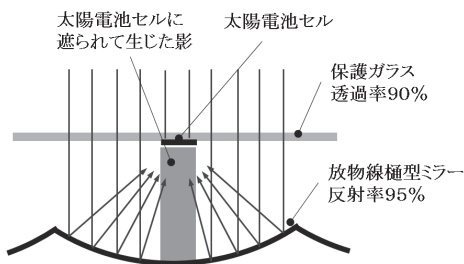


Fig.20 Analysis condition of the light concentration ratio
図 20 集光倍率の解析条件

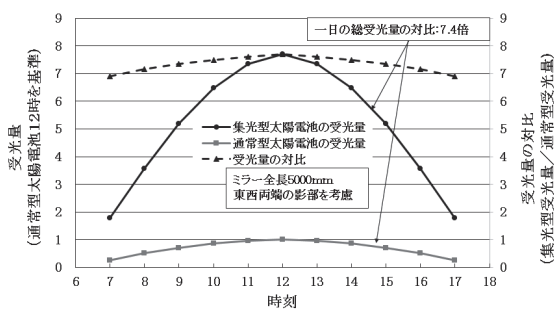


Fig.21 Tilt-control mode (Concentrated light intensity)
図 21 傾斜角制御モード (夏至の集光量)

放物線楯型ミラーの製作精度, 太陽電池の発電効率, 太陽電池の価格, ミラーの価格, 設置場所の晴天率を条件として, 発電コストが最小となるように放物線楯型ミラーの幅に対する太陽電池の幅の比率で最適設計を行うことができる. 今回は太陽電池の幅を放物線楯型ミラーの幅の 10 分の 1 として解析を実施した.

集光倍率の解析は, 図 20 で示すように, 保護ガラスを透過し, 太陽電池セルに遮られず, 放物線楯型ミラーで反射し, 太陽電池セル上に集光した光強度を用いて算出する. 放物線楯型ミラーで集光した太陽電池の受光量, 通常の太陽電池の受光量とその対比の解析結果を図 21 に示す. 一日の総受光量の対比では, 通常の太陽電池の 7.4 倍の光を受光し, 発電量が受光量に比例するモデルでは集光倍率 7.4 倍による発電量の増加が期待できる.

夏至, 冬至の場合, 図 18 で示すように架台の一日の移動範囲は 35 度と大きい. 朝 7 時, 夕方 17 時の受光量は正午に比べて 4 分の 1 と小さいこと考慮して, 太陽電池の発電量と架台の駆動装置の消費電力を比較し, 駆動装置の動作時刻を限定することで移動角度範囲を削減し, 架台駆動の消費電力を抑えることで発電コストの最小化を狙う運用を行うことができる.

従来の 2 軸制御の集光型太陽光発電装置の場合, 夕方と朝の太陽の方角が異なることから, 夕方から朝にかけて架台駆動装置を動作させる必要がある. 放物線楯型ミラー太陽光発電装置の場合, 夕方と朝の架台の傾斜角が同じであることから, 夕方から朝にかけて装置架台の傾斜角の駆動装置を動作する必要がなく, 消費電力を抑えるメリットが生じる.

3.4 日周運動の非追従・傾斜角固定モードの運用

放物線楯型ミラー太陽光発電装置の架台の傾斜角を南中高度に設定し, 傾斜角度を固定する動作モードについて考察する. 架台の駆動にエネルギーを消費しないことで発電コストの最小化を狙うものであり, この運用について考察する. 太陽電池の幅を楯型ミラーの 5 分の 1 の幅とした条件で解析を行う.

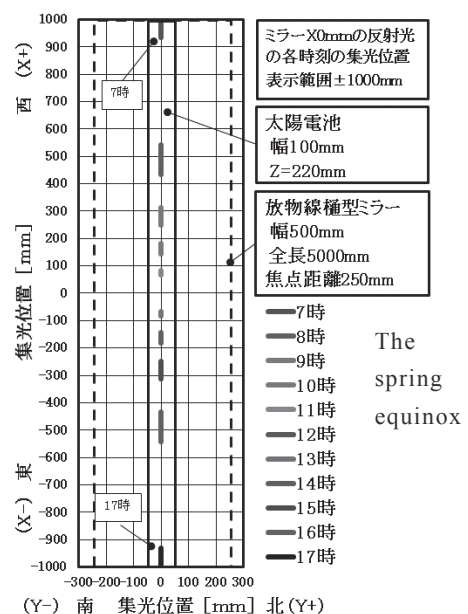


Fig.22 Fixed-tilt mode (light concentration point)
図 22 傾斜角固定モード (春分の各時刻の集光位置)

春分の日周運動に対して、放物線の焦点位置に配置した太陽電池上の平面の集光位置の解析結果を図 22、集光型太陽電池の受光量、通常型太陽電池の受光量とその対比を図 23 に示す。一日の総受光量の対比では、通常の太陽電池の 3.3 倍の光を受光し、発電量が受光量に比例するモデルでは集光倍率 3.3 倍による発電量の増加が期待できる。

傾斜角固定モードの運用で夏至の時の日周運動による太陽の軌跡に対して、反射光の集光位置の解析結果を図 24、太陽電池上の受光量、通常型太陽電池に対する受光量とその対比を図 25 に示す。架台の傾斜角を南中高度に固定した場合において、一日の総和で 2.4 倍の受光量となり、固定した場合でも集光の効果があることを確認した。

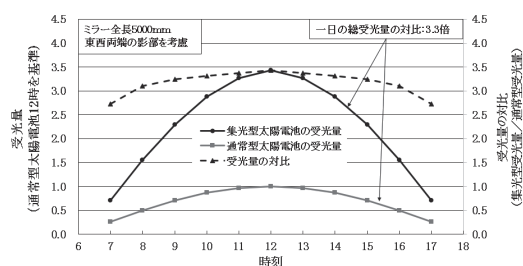


Fig.23 Tilt-control mode (Concentrated light intensity)

図 23 傾斜角固定モード（春分の集光量）

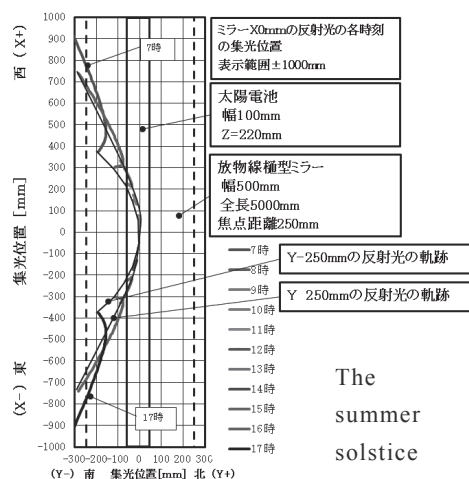


Fig.24 Fixed-tilt mode (light concentration point)

図 24 傾斜角固定モード（夏至の各時刻の集光位置）

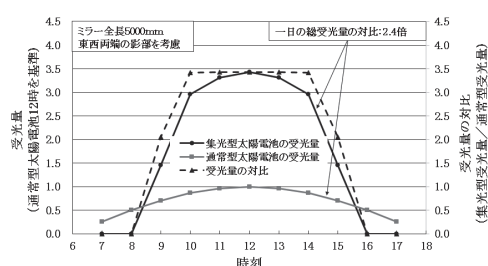


Fig.25 Fixed-tilt mode (Concentrated light intensity)

図 25 傾斜角固定モード（夏至の集光量）

3.5 放物線楕円型ミラーの集光範囲

太陽電池の幅を楕円型ミラーの幅の 5 分の 1 とした設計において、装置の設置角度を、南中高度基準に $\pm 4^\circ$ で調整、固定した時の春分、秋分時の集光位置を図 26 に示す。設置角度誤差 $\pm 4^\circ$ でも太陽電池上に集光することから、設置角度誤差 0° に調整、固定した場合は、黄道 ± 4 度の幅の範囲の光を太陽電池上に集光する光学特性を持つことが分かる。

フレネルレンズ、軸対称放物面鏡を用いた従来の集光型太陽電池は、太陽の位置周辺の光を集光するのに対し、図 27 で示すように放物線楕円型ミラーの集光型太陽電池は天球上の太陽の軌跡の ± 4 度の幅のエリアの光を集光する特性を持つ。集光エリアが広いことにより、拡散光の状態となる曇天時において従来の集光型太陽電池に比べ集光することができ、晴天に対する曇天時の発電量の低下の割合を低減できる特長がある。

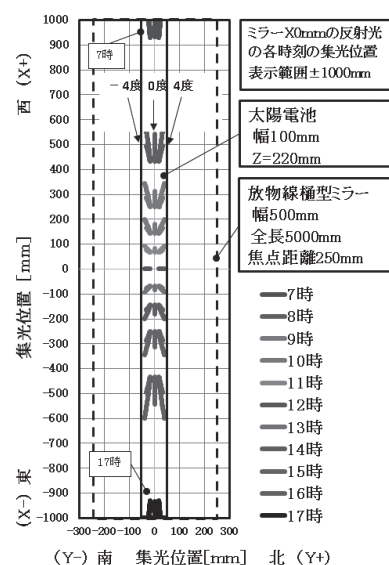


Fig.26 Installation angle and light concentration point

図 26 装置の設置角度と集光位置（春分・秋分）

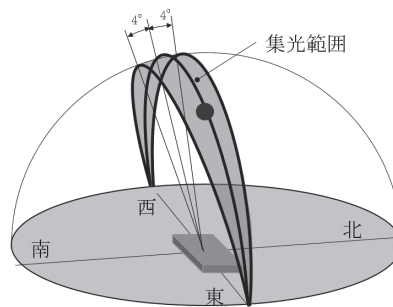


Fig.27 Light concentration range of trough collector

図 27 放物線楕円型ミラーの集光範囲

4 楯型放物面集光方式の特長

放物線楯型ミラー集光型太陽電池の集光特性以外の特長について考察する。

太陽光発電の普及には、発電コストの低減が重要である。太陽光発電装置の発電コストは、一般的に式 20 で計算⁽⁸⁾される。

$$\begin{aligned} \text{発電コスト} &= \frac{\text{建設費} + \text{運転維持費} + \text{廃棄処理費}}{\text{運転期間内総発電量}} \\ \text{運転維持費} &= \text{固定資産費} + \text{修繕費} \\ &\quad + \text{人件費} + \text{土地賃貸料} \end{aligned} \quad (20)$$

傾斜角を調整する架台は 1 軸制御であり、高精度な制御を必要としないため、搭載架台の製造費、修繕、保守費用の低価格化が期待できる。

大規模太陽光発電に適用する場合、土地賃貸料を少なくすることが重要である。2 軸制御による従来のフレネルレンズ方式等の集光型太陽電池と放物線楯型ミラー方式の集光型太陽電池の設置例を図 28、29 に示す。放物線楯型ミラー方式は、装置の東西方向の間隔を狭くすることができ、土地に対する設備の集積度を高めることができ、土地賃貸料を低減することができる。

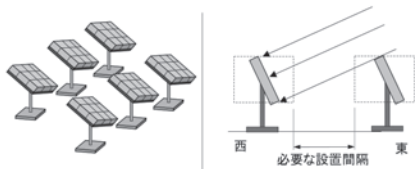


Fig.28 Installation of Fresnel lens solar collector cells
図 28 フレネルレンズ集光太陽電池の設置

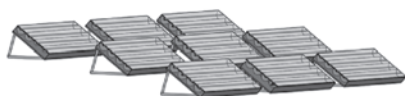


Fig.29 Installation of parabolic trough collector solar cells
図 29 放物線楯型ミラー集光太陽電池の設置

フレネルレンズ、放物面ミラーを用いた集光型太陽電池は、2 軸追従制御のため構造が弱く風による損傷が課題であり、対策⁽⁹⁾が研究されている。放物線楯型ミラー用の架台傾斜制御装置は 1 軸制御であり強度を高めた構造に設計が可能である。南北に防風ネットを設置して風による損傷の課題に対処するのも容易である。

図 30 に放物線楯型ミラー集光型太陽電池を燃料電池用の水素を生成するための電気分解水素生成装置に接続したシステム図を示す。放物線楯型ミラーの集

光型太陽電池は、時間帯により長手方向の端部の太陽電池において反射光を受けず発電量が小さくなる特徴がある。

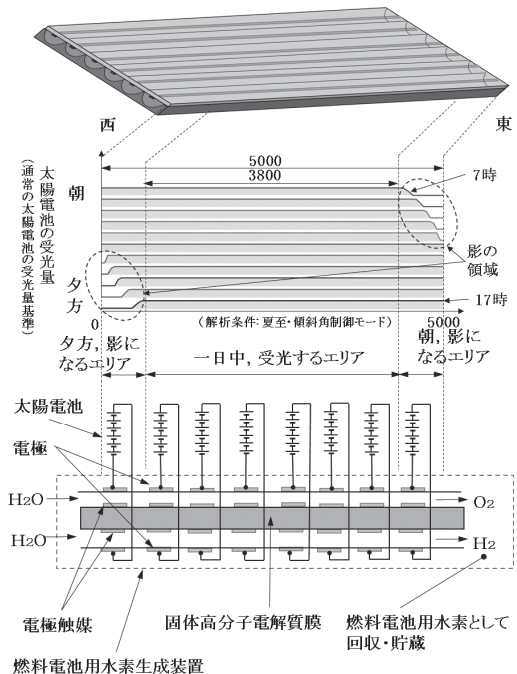


Fig.30 Hydrogen generator and method of connection
図 30 燃料電池用水素生成装置との接続方法

パワーコンディショナに接続した場合は、太陽電池セル全体を直列に接続することとなり、受光量が低下したセルの影響が全体に波及し全体の発電量を大幅に低減する問題が生じる。しかし、電気分解水素生成装置に接続した場合は、電気分解用電極を個々に独立した回路として接続することが可能であり、放物線楯型ミラーの端部で影により受光量の低下したセルの影響が装置全体に波及することを防ぎ、効率的に燃料電池用の水素を生成することができる。

太陽光発電の電力で水素を生成した場合、水素の形態でエネルギーの貯蔵、輸送が可能になるメリットが生じ、土地賃貸料が安く、年間日射量の大きい地域、国に本システムを設置、運用し、生成した水素をエネルギー消費地域に輸送し、燃料電池を用いてエネルギー化する運用ができるようになる。

太陽電池を図 30 の「一日中受光する範囲（夏至 3800mm の範囲）」に設置すると長手方向に集光量のムラが生じないため、パワーコンディショナに接続した運用ができる。

焦点位置 250mm の放物線楯型ミラーの太陽電池を 220mm の位置に設置した場合の太陽電池の幅方向の光量分布を図 31 に示す。幅方向の様な光量分布は、太陽電池の設置位置、ミラー形状を調整することで得られる。調整後の光量分布を図 32 に示す。

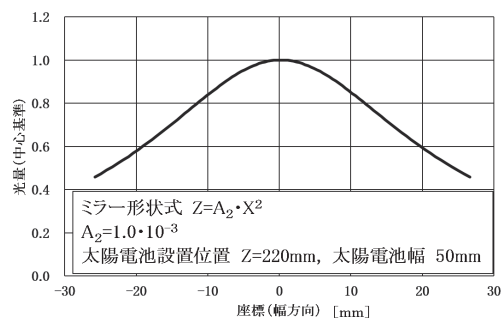


Fig.31 Light intensity distribution (before adjustment)

図 31 太陽電池幅方向の光量分布（調整前）

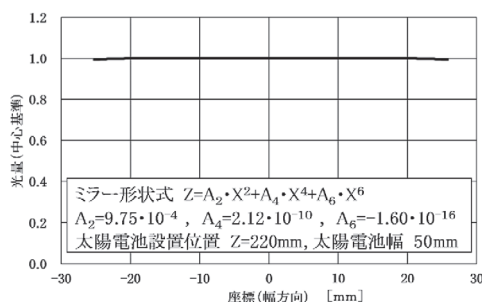


Fig.32 Light intensity distribution (after adjustment)

図 32 太陽電池幅方向の光量分布（調整後）

低倍率の集光型太陽電池として球状微小シリコン太陽電池⁽¹⁰⁾が開発されているが、光学系と小型の特殊な太陽電池を一体化した構造であり設計変更が容易でなく、新たに開発された変換効率の高い太陽電池を容易に採用することができない。

放物線楯型ミラー集光型太陽電池は、単純な装置構成で、板状の太陽電池を用いており、開発された発電効率の高い、低発電コストの太陽電池を容易に選定、使用することができる。装置の低発電コスト化のための最適設計は、採用する太陽電池、放物線楯型ミラーに対する太陽電池の幅の比率、放物線形状の選定で行うため、設計変更、改造が容易なモジュール化設計が可能である。開発や装置設置の当初から太陽電池の発電効率、鏡や太陽電池の価格、鏡の製作精度が大幅に変化した場合にも対処できる。従って発電コスト低減のための設計変更や装置の改造が可能であり、リスクを回避することができる。

放物線楯型ミラーを用いた太陽電池は、燃料電池用の水素の低コスト、大量生産に適しており、再生可能エネルギーの普及拡大に適した太陽光発電装置といえる。

5. 結言

本研究では、次の結果を得た。

- (1) 放物線楯型ミラーは、楯の長手方向を東西方向に設置し、太陽の光が楯の方向の斜めから光を受けるように傾斜角を調整することで、放物線の焦点位置の長手方向に配置した太陽電池上に集光することができる。
- (2) 放物線楯型ミラー集光型太陽電池の特性として、太陽電池の幅をミラーの幅の $1/10$ とした設計モデルの傾斜制御モードでの解析において、集光倍率 7.4 倍が得られた。
- (3) 設置場所、太陽電池の価格、発電効率、放物線楯型ミラー形状の製作精度の条件の変化に対して、放物線楯型ミラーの幅に対する太陽電池の幅の比率の最適設計や平易な構造のためモジュール化設計により、運用をしながら改造による最適化を容易に行うことができる。
- (4) 放物線楯型ミラーの集光型太陽電池は、天球上の円弧の幅の広い範囲からの光を集光することで、晴天時に対する曇天時の発電量の低下の割合を低減できる。
- (5) 集光型太陽電池を電気分解水素生成装置に接続することで独立して回路接続でき、影により発電が低下したセルの影響が装置全体に波及することを防ぐことができる。
- (6) 放物線ミラーの形状を調整することにより、太陽電池に適した幅方向に様な光量分布が得られる。

謝辞

太陽光発電、光学の自己研鑽と知識習得の契機を与えた超精密加工機の各ユーザー企業と不二越に感謝いたします。

参考文献

- 1) 全国地球温暖化防止活動推進センター(May,2016)
http://www.jccca.org/pamphlet_panel/panel/
- 2) NEDO, NEDO 再生可能エネルギー技術白書第 2 版,557-566(2014),森北出版,東京
- 3) NEDO,太陽光発電開発戦略(Aug,2015)
<http://www.nedo.go.jp/content/100575154.pdf>
- 4) Hiromichi Nishimura,Trend of Concentrating Solar Power, THE CHEMICAL TIMES,226,18-23(2012)
- 5) Noboru YAMADA,Optical analysis and experiment if 550 x off-axis XR concentrator photovoltaic modules, Journal of JSES,39(4),61-69(2013)
- 6) Shinichiro OKE,Low-concentration Linear-Array Photovoltaic System with Two-axis Sun Tracking, 電気学会論文誌 B,129(9),1154-1155(2009)
- 7) Katsutoshi Fujiwara,Ultra Thin Glass,NEW GLASS,— 24(2)90-93(2009)
- 8) NEDO,NEDO 再生可能エネルギー技術白書第 2 版,109-110(2014),森北出版,東京
- 9) Masanori Mihara,Aerodynamics of a concentrator photovoltaic system of a subdivided-panel type,第 222 回風光学シンポジウム論文集 22,191-196(2012)
- 10) Takashi Minemoto,Spherical Si Solar Cells Fabricated by the Dropping Method,全国大会 平成 17 年電気学会全国大会論文集, 135(2005)