

枝分かれ構造を伴う植物シュート形態を模擬した 太陽電池モジュールの受光特性

川江 修^{*1}, 小原 伸哉^{*2}

Light receiving properties of a solar cell module with the branch structure of a plant shoot

Osamu KAWAE^{*1} and Shin'ya OBARA^{*2}

^{*1} Asahikawa National College of Technology, Dept. of Technology Innovation Center
2-2-1-6 Shunkodai, Asahikawa, Hokkaido, 071-8142, Japan

^{*2} Kitami Institute of Technology
165 Kouencho, Kitami, Hokkaido, 090-8507, Japan

Received 2014

Abstract

In this study, compactification (improvement of the light receiving density) and reduction of the directivity (dependence property for the sun position) are tried to improve the efficiency of the photovoltaics using Light Received Analysis Algorithm of a Plant Shoot (LAPS). The LAPS is a method of analysis to check the form of a plant shoot that has high light receiving density by numerical analysis using GA. A big scale plant needs big energy for maintenance and growth. A characteristic of the big scale plant is to have a branch structure. Thus, it means that a branch structure is necessary to get big energy by the solar cell module simulating a plant shoot. However, conventional LAPS was not able to express the branch structure so far. Therefore L-system is applied to LAPS. The purpose of this paper is to elucidate the influence that the branch structure gives to light receiving density. The analysis is carried out under sunshine condition of the summer solstice and the winter solstice in Sapporo, Hokkaido, and used a ginkgo for the shape of the leaf. As results, solar cell modules with the branch structure of a plant shoot optimized for sunshine condition of the summer solstice and the winter solstice were obtained. As the number of leaves increased, the solar cell module with the branch structure of a plant shoot came to have higher light receiving density than that of the solar cell module without the branch structure of a plant shoot. From this, it is confirmed that the branch structure increases the light receiving density of a plant with many leaves.

key words : Numerical analysis, Solar module, Light receiving density, Plant shoot, Genetic algorithm, L-system

1. 諸 言

現在導入が進められているシリコン系太陽電池によるメガソーラーは平板状の太陽電池モジュールにより構成されるため、大きな発電量を得るにはモジュールの面積を広くする必要がある。したがって、設置に要する土地面積は定格出力に比例して増加する。また、従来の平板状の太陽電池モジュールは日射の入射角に対して指向性を有するため、太陽の位置によってふく射形態係数(木村, 1970)は常に変化するので、最大効率を得られる時間帯は年間を通して限られたものになる。この問題を解決するには太陽電池モジュールを平板に限定せず、モジュールのエネルギー密度(設置に要する面積当たりの発電量)を増加させ、さらに指向性の低下を図る工夫を要する。エネルギー密度の増加については、太陽電池セルの材料開発による変換効率の改善が有効である(大下, 2010)。また、指向性を低下させる方法としては、球状シリコン太陽電池や、両面受光太陽電池が開発されている(稲川, 2005, 上下他, 2003)。一方、本研究ではこれらの課題を改善するために植物に着目した。これまでに行

われた太陽電池と植物を関連付けた研究には、光合成の仕組みを利用した光合成型太陽電池があるが(今堀 小澤, 1998, 今堀, 2000), 筆者らは植物の形態に着目して, 植物形態を模擬した太陽電池モジュールの分散配置により改善する方法を検討している (Obara and Tanno, 2008). 光合成植物は光合成による炭水化物によってバイオマスを維持しており, 森などに密集する植物は光を得るための競争をしている. したがって光合成植物は他の植物との空間競争を行いながら, 太陽光をより多く受けることができる植物シュート (茎, 枝, 葉枝, 葉で構成) の形態に進化させていると考えられる. すなわち光合成植物のシュート形態はコンパクトで高エネルギー密度の, 優れた受光形態であると予想される. 著者らは前報までに, 植物のシュート形態を模擬した太陽電池モジュールを分散配置することで, 設置スペースが小さく, 指向性の低いソーラー発電システム (DSMS : Distributions System of a Solar Module with the form of a Plant Shoot) を調査するために, LAPS (Light Received Analysis Algorithm of a Plant Shoot) を開発して, 葉枝と葉で構成される植物シュート形態の受光特性について解析した (Obara, et al., 2008). LAPS は, 植物シュートの形態と受光量の関係を調べる手段として, 遺伝的アルゴリズム (GA) (北野, 1993) を導入した解析方法である. 本研究の目的は, 上で述べた平板状の太陽電池の設置面積と指向性の問題点を解決するために, 太陽電池モジュールを, 植物シュート形態を模擬して分散配置することで, 指向性が低く, なおかつ受光密度の大きな太陽電池を開発することである. しかしながら従来の LAPS (以降, 従来の LAPS と記述する) では葉と葉枝で構成された非常に単純なシュート形態を模擬しており, 自然界の複雑な植物形態を調査できなかった. これまでに有機薄膜太陽電池を利用した平板状ではない複雑な形態を持つ太陽電池モジュールを作製した事例はあるが (當摩, 2010), インテリア応用を想定したものであり, 太陽電池モジュールの性能を向上させるために植物の形態を利用した太陽電池モジュールの研究はされていなかった. そこで本稿では, 従来の LAPS で枝分かれ構造を扱えるように拡張することで (以降, 提案する LAPS と記述する), 自然界に近い複雑な形態を持った植物シュートの受光量を調査する. 提案する LAPS による枝分かれ構造の扱いは, 文字列を操作することによりフラクタル図形を表現できる L-system の導入により試みる (大西他, 2003). これまでに L-system によって植物を表現した研究には次の例がある. L-system で 2 次元絵画から 3 次元樹木モデルを作成する研究 (西川他, 2011). ツタの吸盤の性質に注目した L-system を用いたツタの CG モデル生成手法に関する研究 (進藤, 坂本, 2010). L-system による植物の成長に古い葉枝の淘汰を加えることにより自然な植物形態の表現を目指した研究 (Prusinkiewicz, et al., 1995). また, L-system と GA を組み合わせた研究には次の例がある. 後述する L-system の置換規則を GA で最適化することで少ない計算量で目的に応じた最適構造を求めた研究 (尾田他, 2001, 尾田, 宮西, 2001). L-system によって表現された樹木柱形状に対する多目的最適化問題について, 多目的 GA を用いることにより多様な非劣個体群を求めた研究 (今澤他, 2013). L-system の置換規則に GA を適用することによる枝分かれ構造の形成手法を示した研究 (武藤他, 1997). L-system によって得られる整形な樹状形態の枝の長さや分岐角度などに GA を適用することによって不整形な形態を得る研究 (野村他, 1998). L-system による植物の成長と形態の表現と, GA による葉の形状生成を組み合わせ, 植物をモデリングする研究 (Rodkaew, et al., 2004). 本研究での L-system と GA の取り扱いは野村らの研究に近いが, 野村らの研究では各個体の評価はユーザーの価値観による人為選択である. 一方, 本研究では各個体の評価を受光密度で行う. 本稿では, 枝分かれ構造を伴う植物シュート形態を模擬した太陽電池モジュールの受光量の有効性を確認するために, 夏至と冬至の日射条件に対して両方の LAPS による解析を行う. 枝分かれ構造の有無による受光量の影響が確認されれば, 設置場所に最適な太陽電池モジュールの形態が得られるようになる.

2. 植物のシュート形態を模擬した分散太陽電池モジュール (DSMS) の開発

植物の枝には, 図 1 (a) に示すように短枝, 長枝があり, 短枝から複数の葉枝と葉が伸びている (竹中, 2003). 従来の LAPS による解析では, 短枝から発生する複数の葉の配置を受光量に基づいて最適化するもので, 図 1 (b) のように全ての葉が一点から発生する植物シュート形態を扱った (小原, 2008). しかしながら, 一点より葉を発生させると葉の増加に伴い葉同士の重なりが多くなるため, 葉の表面に日陰が生じて植物シュート全体での受光量が制限される. 実際の樹木は長枝を持ち幼木から時間をかけて成長するが, 成長の過程で長枝の長さや成長方向を最適化することで短枝間の距離をとり葉の重なりを防ぐことにより受光量を増やしていると考えられる. 植物の成長の過程で幹から枝, 枝から葉枝のように新たな植物シュートの要素が発生して分岐 (枝分かれ) するが,

この分岐方向を成長方向として定義する。本稿では従来の LAPS に L-system を導入して植物の成長を模擬することにより、枝分かれ構造を持つ植物シュートの受光特性を解析できるようにする。提案する LAPS によって解析する植物シュート形態は、図 1 (c) のように幹から複数の枝が分岐し、さらに枝から葉枝と葉が発生している。

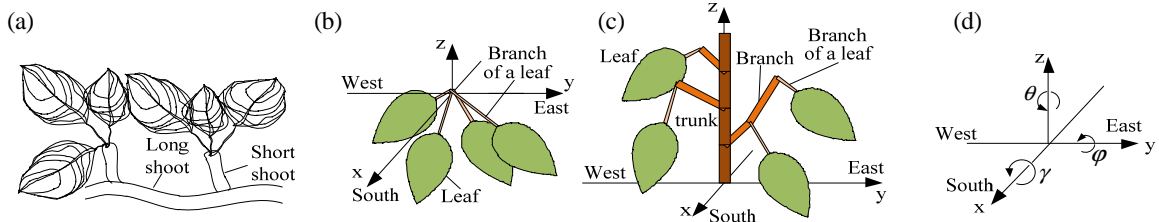


Fig. 1 (a) Example of the branch of a plant. The long shoot is a general branch. The short shoot is like lump, and plural leaves grow from its tip. (b) Example of the analysis result by conventional LAPS. The conventional LAPS expresses plural leaves growing from the tip of the short shoot. It means that all branch of leaf grow up from one point. (c) Example of the analysis result by proposed LAPS. The proposed LAPS expresses big scale plant which has branch structure. (d) Coordinate system of LAPS. Three-dimensional coordinates of right-handed system. A positive direction of the x-axis is the south. A positive direction of the y-axis is the east.

3. 解析方法

3・1 座標系

LAPS による数値解析では、コンピュータ内の x - y - z 空間座標に植物シュートモデルと仮想太陽を設置して、仮想太陽から放射される太陽光が植物シュートモデルに到達する受光量を計算する。本稿では、図 1 (d) に示すように x - y - z 空間座標を定義する。各軸の矢印の方向を正方向とし、 x 座標の正方向は南向きである。また、 θ , φ , γ は各軸を中心とした回転角度を示し、矢印の方向を正方向とする。植物シュートモデルは x - y - z 空間座標の原点から成長を始めることとする。

3・2 植物シュートの座標系

図 2 (a) は従来の LAPS を用いた場合の植物シュートモデルで、葉枝 S と葉によって構成される。葉枝は座標系の原点を分岐開始点として、方位角 $S_{\theta,Sn}$ と仰角 $S_{\varphi,Sn}$ で表される成長方向と長さ $S_{l,Sn}$ によって定義する。ただし、葉は葉枝と直線状に接続することとし、葉枝の成長方向が決まれば葉の成長方向も決まる。添え字 Sn は葉枝の番号である。2 枚目の葉枝は $S_{\theta,Sn+1}$, $S_{\varphi,Sn+1}$, $S_{l,Sn+1}$ で定義される。

図 2 (b) は、提案する LAPS を用いた場合の植物シュートモデルで、幹 M 、枝 L 、葉枝 S と葉によって構成される。幹 M は分岐開始点を赤色の空間座標系の原点として、方位角 $M_{\theta,Mn}$ と傾斜角 $M_{\varphi,Mn}$ で表される成長方向と長さ $M_{l,Mn}$ で定義する。添え字 Mn は幹の番号である。枝 L は幹 M から分岐する。分岐開始点を青色の空間座標系の原点として、枝 L を方位角 $L_{\theta,Ln}$ と仰角 $L_{\varphi,Ln}$ で表される成長方向と長さ $L_{l,Ln}$ で定義する。ここで、添え字 Ln は枝の番号である。葉枝 S は枝 L から分岐する。分岐開始点を緑色の座標系の原点として、方位角 $S_{\theta,Sn}$ と仰角 $S_{\varphi,Sn}$ で表される成長方向と長さ $S_{l,Sn}$ によって定義する。ここで、添え字 Sn は枝の番号である。植物シュートが成長して枝や葉枝が増えることにより新たな分岐が発生した場合、分岐点を新たな植物シュートの座標系の原点として成長方向と長さを定義する。例として枝と葉枝の分岐点から新たな枝が発生した場合には、分岐点を座標系の原点として $L_{\theta,Ln+1}$, $L_{\varphi,Ln+1}$, $L_{l,Ln+1}$ と定義する。

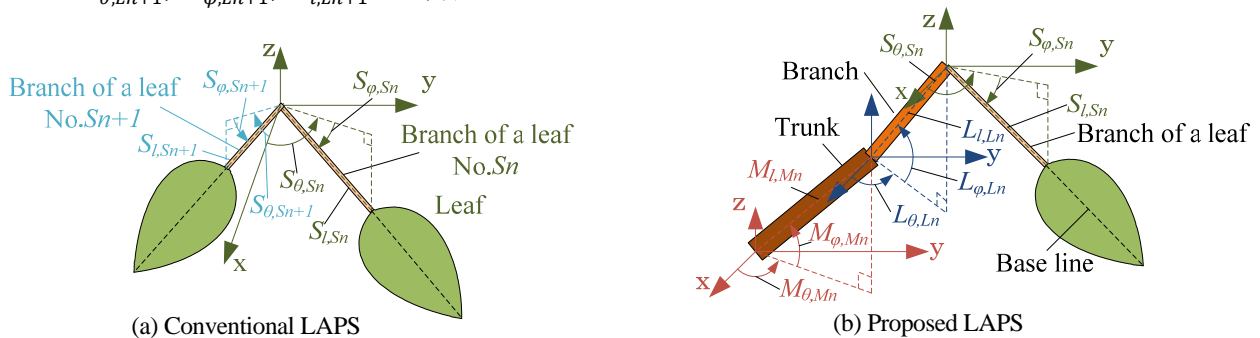


Fig. 2 Coordinate system of a plant shoot. (a) The shape of a plant shoot optimized by conventional LAPS is expressed by the branch of a leaf and the leaf. The plant shoot is expressed in the coordinate information of each branch of a leaf. (b) The shape of a plant shoot optimized by proposed LAPS is expressed by the trunk, the branch, the branch of a leaf and the leaf. The plant shoot is expressed in the coordinate information of each trunk, branch and branch of a leaf.

3・3 従来の LAPS と提案する LAPS

従来の LAPS は、パラメータ（葉の形状、日射条件、植物シュートの要素、分岐開始点）を与えると、受光効率が最大になるように植物シュートの形態を最適化するアルゴリズムである。しかしながら、扱える変数は葉の形状と日射条件である。また、分岐開始点はすべての葉枝で同一の点である。一方、提案する LAPS では、植物シュートの要素と分岐開始点は解析中に L-system によって決定する。したがって、分岐開始点は植物シュートごとに違う位置となる。そして、従来の LAPS と同様の処理で植物シュートの形態を最適化する。それぞれの LAPS に与えるパラメータの決定方法を表 1 にまとめた。また、LAPS では GA によって植物シュートの要素の成長方向と長さを最適化するが、最適化する項目が増えると探索範囲が広がり、準最適解が多数出現して最適解の選択が難しくなるので、表 2 に示すように一部項目は自然界の値を参考にして与えた。

Table 1 Parameters in conventional and proposed LAPSs

Parameter	Conventional LAPS	Proposed LAPS
Shape of the leaf	Decided manually	
Sunlight condition	Decided manually	
Element of the plant shoot	Decided manually	Decided by L-system
Branch origin point	Decided manually	Decided by L-system

Table 2 Decision variables in LAPSs

Element of the plant shoot	Growth direction	Length
The leaf branch	Decided by GA	Decided by GA
The branch	Decided by GA	Decided manually
The trunk	Decided manually	Decided manually

3・4 L-system による植物シュートの表現

L-system は形式文法的一种で、初期状態と置換規則の 2 つの文字列で構成され、初期状態に置換規則を適用することで新しい文字列を作る。また、置換規則の適用を繰り返すことにより文字列は長くなる。したがって、文字を図形に対応させることでフラクタル構造を表すことができる。図 3 は初期状態と置換規則に表 3 を用いた場合の L-system の例である。文字 ‘A’ は置換用の文字で図 3 (a) の赤い点を表し、文字 ‘B’ は図 3 (a) の直線を表す。直線の長さは本例では一定とする。また、文字 ‘[’ と ‘]’ は線の分岐開始位置と分岐終了位置を表す。ただし分岐後の線の角度は任意の値を与える。本稿では L-system の初期状態の文字列を 1 期と呼び、L-system で置換規則を適用するごとに文字列を 2 期、3 期と増やして n 回目の置換規則が適用された文字列を n+1 期と呼ぶ。例では 1 期は初期状態 “BA” から図 3 (a) になる。また、2 期は文字 ‘A’ が文字列 “[BA][BA]” に置換されて文字列 “B[BA][BA]” になり図 3 (b) になる。さらに、3 期は置換後の文字列が “B[B[BA][BA]][B[BA][BA]” になり図 3 (c) になる。このように文字列が置換規則により長くなるとフラクタル構造も大きくなる。本稿ではこの L-system の性質を応用して植物シュートの成長を表現する。

Table 3 Example of L-system

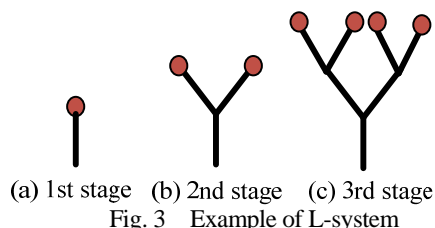
Initial Character	Replacement rule
BA	A→[BA][BA]

Table 5 Ex.Rule of L-system

Initial Character	Replacement rule
M[A]	A→LBC
	B→[S]
	C→A

Table 4 Meaning of character

Character	Character meaning
M	Trunk
L	Branch
S	Branch of leaf
[Start of branch
]	End of branch
A	Origin point of branch
B	Origin point of branch of leaf
C	Origin point of "A"



4. 提案する LAPS (植物シュートの受光量解析アルゴリズム)

4・1 解析フロー

図 4 に本稿による提案する LAPS の解析フローを示す。例として、以下に L-system の条件として表 4 と表 5 を用いた場合の解析フローの詳細を述べる。ただし、L-system の置換回数は 3 回とする。

処理 1: まず図 4 の①より、初期情報の葉モデルの形状、L-system の初期文字列、置換規則、置換回数を読み込む。初期文字列 (1 期, M[A]) を可視化したものを図 5 (a) に示す。文字 ‘M’ は幹を表すので幹が x-y-z 空間座標の原点から成長する。文字 ‘A’ は枝の分岐開始点になる。幹の成長方向と長さには固定値を与える。

処理 2: 次に図 4 の②より、3・4 項に示した方法で、L-system の初期文字列 “M[A]” に置換規則 “A→LBC” を適用して 1 期進めて 2 期とする。文字列は “M[LBC]” になり可視化すると図 5 (b) になる。1 期と

比較すると文字‘A’で表された枝に置換されていることがわかる。文字‘B’‘C’で表された点が次期以降の置換規則適用時の分岐開始点になる。この段階で枝の成長方向は決定していない。また、枝の長さは固定値を与える。

- 処理 3：図 4 の③では従来の LAPS による最適化を行う必要のある植物シュートの要素を求める。図 5 (b) で従来の LAPS による最適化が必要な植物シュートの要素は成長方向の決定していない枝である。
- 処理 4：図 4 の④では従来の LAPS で最適化する必要のある植物シュートの要素の分岐開始点を計算する。図 5 (b) で従来の LAPS による最適化が必要な枝は幹から分岐していることが分かる。また、幹は成長方向と長さが分かっているので、幹の上端の座標を計算できる。この座標が枝の分岐開始点になる。
- 処理 5：図 4 の⑤では従来の LAPS によって植物シュート形態を最適化する。ここまで処理で最適化する必要のある植物シュートの要素は枝であることと分岐開始点がわかっている。したがって、従来の LAPS に枝の分岐開始点を与えると成長方向は最適化される。
- 処理 6：図 4 の⑤までで L-system の 2 期の文字列 “M[LBC]” で表される植物シュート形態は決定する。図 4 の⑥で初期条件に設定された置換回数を確認して 1 の場合は解析を終了する。2 以上の場合、図 4 の②に戻り 3 期以降の文字列に対して処理を行う。今回の例では置換回数が 3 回なので解析は続行される。
- 処理 7：処理は図 4 の②に戻って置換規則が適用されて文字列は “M[L[S]A]” となり、可視化すると図 5 (c) になる。2 期と比較すると文字 ‘B’ は葉枝に、文字 ‘C’ は文字 ‘A’ に置換させている。この段階で葉枝の成長方向と長さは決定していない。また、3・2 で述べたように葉枝には直線状に葉が接続される。
- 処理 8：処理 3 と同様の処理を行う。図 5 (c) から 3 期は 2 期と比較して葉枝が増えていることが分かる。したがって、従来の LAPS で最適化が必要な植物シュートの要素は葉枝である。
- 処理 9：処理 4 と同様の処理を行う。従来の LAPS によって最適化が必要な葉枝は枝から分岐している。この枝の分岐開始点、成長方向、長さはすでに分かっているので、葉枝の分岐開始点は計算できる。
- 処理 10：処理 5 と同様の処理を行う。従来の LAPS で最適化される植物シュートの要素は葉枝であり、分岐開始点分かっている。したがって、従来の LAPS によって葉枝の成長方向と長さは最適化されて、3 期の文字列 “M[L[S]A]” で表される植物シュート形態は決定する。
- 処理 11：処理 6 と同様に置換回数を確認する。現在の置換回数は 2 回であり、初期条件に設定された置換回数は 3 回である。したがって、解析は続行される。
- 処理 12：処理は再度図 4 の②にもどって置換規則が適用されて文字列は “M[L[S]LBC]” となり、可視化すると図 5 (d) になる。新たな植物シュートの要素は枝で、枝から枝が分岐している。この場合は、新たに分岐した枝の成長方向の方位角度は、分岐前の枝の成長方向の方位角度と同じ値が与えられる。傾斜角度はマイナス 10 した値が与えられる。また、枝の長さは固定値である。さらに、分岐開始点は分岐前の枝から計算することができる。したがって、枝から枝が分岐した場合は、従来の LAPS を適用しない。したがって、ここまでの処理で、文字列 “M[L[S]LBC]” で表される植物シュートの形態は決定する。
- 処理 13：図 4 の⑥で置換回数が確認されて、初期条件として設定した置換回数を行ったため、ここまでの処理で提案する LAPS を終える。

本稿では幹の成長方向と長さ、枝の長さは自然界の値を参考にした固定値を与える。枝の成長方向、葉枝の成長方向と長さは従来の LAPS によって最適化する。したがって、本稿による提案する LAPS では植物シュート形態を、L-system による成長と従来の LAPS による最適化を繰り返して決める。

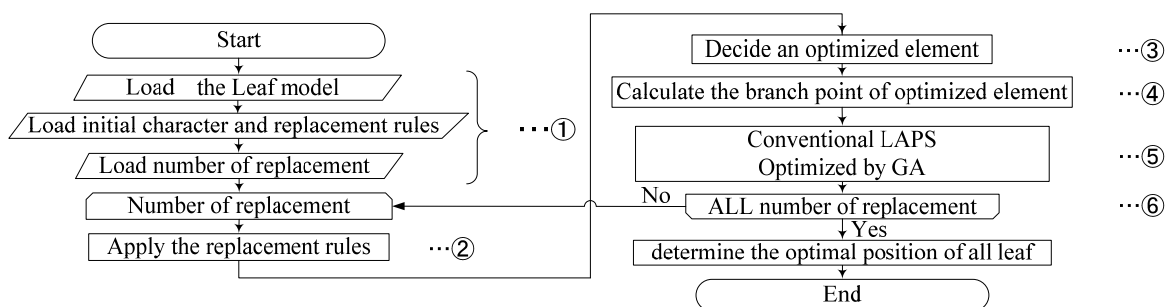


Fig. 4 Analysis flow of proposed LAPS

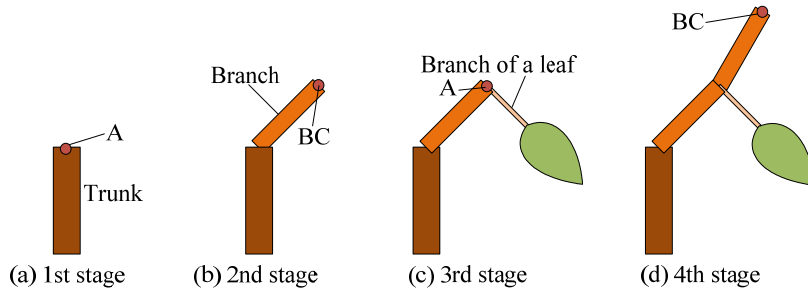


Fig. 5 Visualization of character string. (a) Visualization of character string M[A]. (b) Visualization of character string M[LBC]. (c) Visualization of character string M[L[S]A]. (d) Visualization of character string M[L[S]LBC].

4・2 GA の染色体モデルと適応度

4・2・1 染色体モデル

染色体モデルは、枝の成長方向 ($L_{\phi, Ln}$, $L_{\theta, Ln}$) と、葉枝の成長方向 ($S_{\phi, Sn}$, $S_{\theta, Sn}$) および長さ ($S_{l, Sn}$) をそれぞれ 20 ビットの 0, 1 の値の羅列で表す。ここで、添え字 Ln は枝の番号を、 Sn は葉枝の番号を表す。初期世代の染色体モデルは乱数を使って決める。また、遺伝子操作と世代の更新を重ねることにより適応度の高い解を探索する。

4・2・2 適応度

本稿の提案する LAPS は L-system によって決定した代表日での植物シュートの形態を、従来の LAPS を用いて受光密度が最大になるように最適化する。ただし、従来の LAPS の目的関数は受光量の最大化であった。そこで、従来の LAPS で用いる GA の目的関数の定義を式 (1) に変更する。式 (1) は受光密度の式で、式中の分子は植物シュートが 1 日に受光する受光量 $\sum_{t=0}^{Day} J_{tu}$ で、分母 C_u は植物シュートに外接する直方体の底面積、すなわち植物シュートを設置する際に占有する面積で定義する (図 6 (a))。ここで、添え字の u は個体番号を表す。したがって、GA によって最適化された植物シュートは、ある代表日において最も受光密度の高い形態になる。例として解析に用いる植物シュートの個体数を 10 個としてそれぞれの占有面積 C_u に表 6 の値を与えて、各個体の適応度を式 (1) で計算した結果を図 7 中の青色のデータに示す。ただし、各個体が代表日 1 日に受光した受光量 $\sum_{t=0}^{Day} J_{tu}$ をそれぞれ 100 個とする。青色のデータは占有面積 C_u が 0 に近づくとき適応度が急激に大きくなっている。式 (1) の左辺が高い値になるのは、分子の総光子数が大きくなるか、分母の占有面積が 0 に近づく場合である。ここで、総光子数は有限の値だが、占有面積は 0 に近づけることが可能である。占有面積が 0 に近づくのは図 6 (b) に示すように葉が $y-z$ 平面、または $x-z$ 平面上に平面状に配置された場合である。したがって、GA の適応度の算出に式 (1) を用いると、従来の LAPS から導き出される植物シュートの形態は受光量に関係なく、図 6 (b) のように平面状に葉を設置した形態になる。ただし、平面的な形状は式 (1) で計算すると高い受光密度を得られるが、受光量を無視した形状であり、太陽電池モジュールとして優れた形状とは言えない。

そこで本稿では、この問題を解決するために、受光量と占有面積を用いた目的関数を作成する (式 (2))。式 (2) 中の a は重みである。式 (2) の $F_{s,u}$ は個体 u の受光量についての評価である。 $F_{s,u}$ は代表日 1 日に受光した全ての個体の受光量を合算した総受光量中に占める個体 u の受光量の割合として計算する (式 (3))。また、 $F_{o,u}$ は個体 u の占有面積についての評価である。 $F_{o,u}$ は式 (4) で定義する。式 (4) の $F_{d,u}$ は個体 u の占有面積 C_u が、全ての個体の占有面積の総和に占める割合の補集合であり式 (5) で定義する。式 (2) から式 (5) のように定義することにより受光量および占有面積の評価は 0~1 の値となり、適応度に与える受光量及び占有面積の影響が等しくなる。図 7 中の赤色のデータは GA の解析に用いた個体数を 10 個として、各個体が代表日 1 日に受光した光子数を 100 個、各個体の占有面積に表 6 を用いて式 (2) から適応度を計算した結果である。ただし、 a を 0.5 とする。適応度が占有面積に比例した結果になった。したがって、式 (2) を用いることにより、植物シュートの形態は平面状にならず受光密度の優れた形態が得られる。

$$\frac{\sum_{t=0}^{Day} J_{tu}}{C_u} \rightarrow \text{Maximize} \quad (1)$$

$$\text{Fitness} : aF_{s,u} + (1-a)F_{o,u} \quad 0 \leq a \leq 1 \quad (2)$$

$$F_{s,u} = \frac{\sum_{t=0}^{\text{Day}} J_{t,u}}{\sum_{u=0}^{\text{Population}} \sum_{t=0}^{\text{Day}} J_{t,u}} \quad (3)$$

$$F_{o,u} = \frac{F_{d,u}}{\sum_{u=0}^{\text{Population}} F_{d,u}} \quad (4)$$

$$F_{d,u} = 1 - \frac{c_u}{\sum_{u=0}^{\text{Population}} c_u} \quad (5)$$

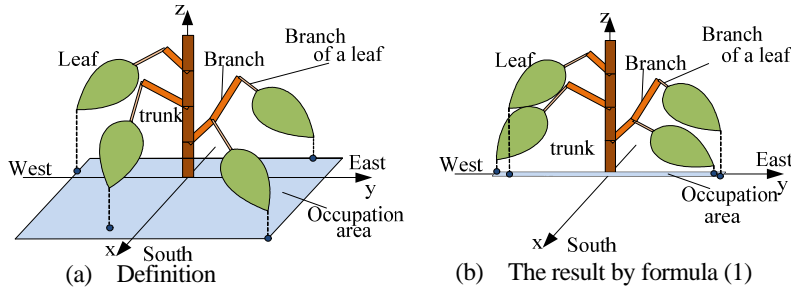


Fig. 6 Occupation area of the plant. (a) Definition of the occupation area. The occupation area of the plant shoot is defined at a quadrangular area necessary for the setting. (b) The form of the optimized plant shoot becomes planar when formula (1) is used for the calculation of the fitness of the GA.

Table 6 Occupation area of each chromosome

	Occupation area [m ²]
Chromosome0	0.1
Chromosome1	0.3
Chromosome2	0.5
Chromosome3	0.7
Chromosome4	0.9
Chromosome5	1
Chromosome6	2
Chromosome7	3
Chromosome8	4
Chromosome9	5

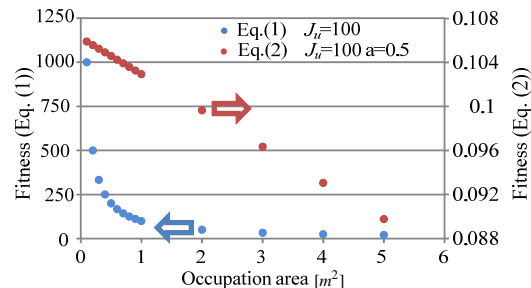


Fig. 7 Analysis of the result by formula (1) and (2). If an occupation area becomes less than 1, the graph of formula (1) (blue point) suddenly grows big. The graph of formula (2) (red point) has a constant slant.

5. 解析条件

5・1 L-system 及び GA のパラメータ

5・1・1 L-system

本稿の解析で用いる L-system のパラメータを表 7 と表 8 に示す。初期文字列として、幹、枝の分岐点、幹の成長点を与える。置換文字列は、枝の生成と枝葉と枝の成長点、枝葉と葉の生成、枝の成長点、幹の成長点と枝の分岐点と幹の成長点の 4 種類である。これらの置換規則を適用することにより植物シュートは成長する。なお、置換回数は解析結果に大きな影響を与えると考えられる。そこで、置換回数が 5 回、10 回、13 回、15 回の場合についてそれぞれ解析を行う。

5・1・2 GA

試行錯誤の結果から、従来の LAPS で用いる GA のパラメータを次のように設定した。遺伝子操作は、突然変異、交叉、エリート選択、ルーレット選択として、染色体の数は 80 個、遺伝子の長さは 1 つの設計変数に対して 20bit、最大世代数は 60 世代とする。また、突然変異の確率は 10%、交叉の確率は 50%、エリート選択は上位 30% とする。遺伝子を 20bit で表したときの成長方向と長さの最小分解能は、方位角が 0.34×10^{-3} 度、傾斜角が 86×10^{-6} 度、長さが 0.286×10^{-3} mm である。表 9 は GA で探索する植物シュートの要素の成長方向と長さの値の範囲である。

Table 7 Meaning of character

Character	Character meaning
M	Trunk
L	Branch
S	Branch of leaf
[Start of branch
]	End of branch
A	Origin point of branch
B	Origin point of branch of leaf
C	Origin point of 'A'
D	Origin point of Trunk and 'A'

Table 8 Rule of L-system

Initial Character	Replacement rule
M[A]D	A→LBC
	B→[S]
	C→A
	D→M[A]D

Table 9 Growth conditions

Leaf branch	Growth direction	$S_{\theta}=-180\sim 180$ $S_{\phi}=0\sim 90$
	Length	$S_f=0\sim 300$
Branch	Growth direction	$L_{\theta}=-180\sim 180$ $L_{\phi}=0\sim 90$
	Length	$L_f=100$
Trunk	Growth direction	$M_{\theta}=0$ $M_{\phi}=90$
	Length	$M_f=100$

5・2 太陽の軌道と全天日射量

本稿では北海道の札幌市への植物シュート太陽電池モジュールの設置を想定する。札幌での夏至、冬至の各時刻での太陽位置（方位角 $V_{S,\theta}$ と仰角 $V_{S,\phi}$ ）を図8 (a) に示す。さらに理論水平面日射量を図8 (b) に示す (NEDO, 2013)。また、一日に仮想放射光源から放射する全光子数 N_a は100,000個とする。仮想放射光源の大きさは、シュート全体に光子が到達するように設定して1辺2.5 mの正方形とする。仮想放射光源の中心座標を図8に示す太陽位置に設定して時刻ごとに変化させる。また、従来のLAPSで用いた時刻毎の仮想放射光源から放射される光子数の計算式から図8 (c) の結果が得られる。

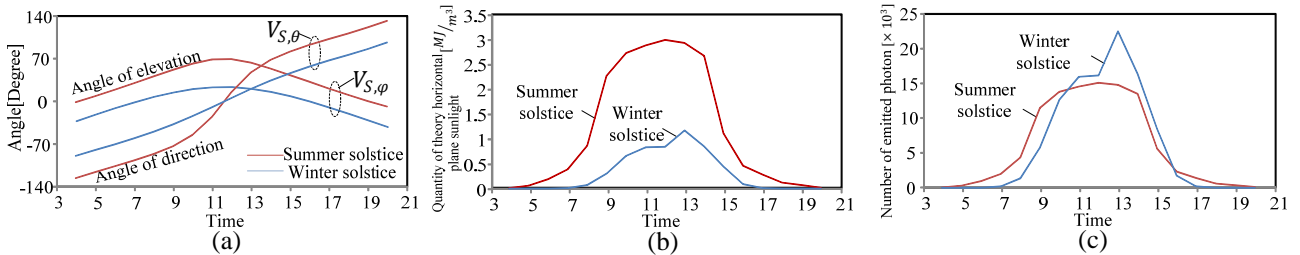


Fig. 8 (a) Position of the sun in Sapporo. This figure shows the angle of elevation and the direction of the sun at the summer solstice (red line) and the winter solstice (blue line) in Sapporo, Hokkaido. (b) Quantity of theoretical horizontal plane sunlight in Sapporo. (c) Number of emitted photon. This is the graph which converted the quantity of horizontal plane sunlight into the number of emitted photons from a sham emission source of light. The number of photons emitted per day is 100,000.

6. 解析結果

6・1 置換回数による受光量と占有面積の変化

L-systemの置換回数を5回、10回、13回、15回とした場合の夏至における解析結果を図9に示す。図9 (a) は各置換回数と葉の数の受光量の関係である。図9 (a) の結果から、解析で葉の数が増えると、置換回数にはあまり影響せず受光量が増加する。図9 (b) は葉の数と占有面積の結果で、すべての置換回数において、葉の数が16枚近辺で占有面積が $1.4 m^2$ になり、以降、占有面積の増加は収束する。冬至の解析結果でも上と同様の傾向であったことから、モジュールの占有面積を固定したときの受光密度は葉の数に比例する。図9 (b) の結果から、置換回数10回で葉の数が16枚程度であれば占有面積は収束することから、本論文では置換回数が10回の場合について詳細を述べる。

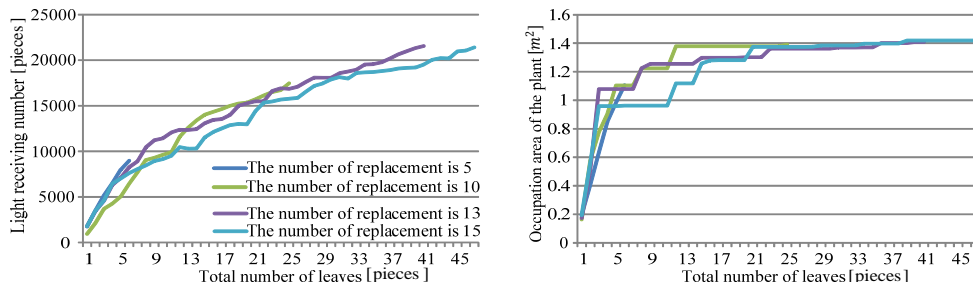


Fig. 9 Analysis results of the light receiving number and the occupation area of the plant when the number of the replacement is changed 5,10,13 and 15 times. (a) is the relation between the number of leaves and the light receiving number. (b) is the relation between the number of leaves and the occupation area of the plant.

6・2 植物シュートの形態

6・2・1 夏至に最適化したモジュールの形態

それぞれの LAPS で夏至に最適化されたモジュールの形態を図 10 に示す。モジュールを西から見た図、南から見た図において、従来の LAPS (図 10 (a) から (c)) と提案する LAPS (図 10 (d) から (f)) による解析結果では、ともに多くの葉が上を向いて設置されている。これは、図 8 (c) から日射が 9 時から 14 時に集中しており、また、各時間の日射量の差は小さいため、中間の 11 時から 12 時の太陽の位置に葉を向けると最も受光量が多くなるためである。さらに、夏至では仰角 $V_{s,\varphi}$ の値が年間を通して最も大きくなるため、多くの葉が上を向いて設置されたと考えられる。また、上から見た図に注目すると、従来の LAPS、提案する LAPS とも葉が円状に設置されている。これは、上からの日射を効率よく受光するため、葉の重なりを最小にした結果だと考えられる。

ここで、従来の LAPS に注目すると葉が一点より発生するため、モジュールの上部に円状に葉が隙間なく平面的に配置されている。しかし、葉の数が多くなると平面を構成する葉に余剰が生じる。そこで、上方向以外からの日射を受光するために、斜めに葉が設置されている。一方、提案する LAPS では枝分かれ構造を持つため、葉がさまざまな場所から発生する。したがって、立体的に葉が配置され葉間の距離が確保できるので、葉の重なりが少なくなり受光効率が高くなると考えられる。

6・2・2 冬至に最適化したモジュールの形態

それぞれの LAPS で、冬至に最適化されたモジュールの形態を図 11 に示す。モジュールを西から見た図、南から見た図において、従来の LAPS (図 11 (a) から (c)) と提案する LAPS (図 11 (d) から (f)) による解析結果では、ともに多くの葉が南方向を向いて設置されている。また、提案する LAPS の解析結果では、西寄りに多くの葉が設置されている。これは、図 8 (a) から、冬至では仰角 $V_{s,\varphi}$ の値が年間を通して最も小さく、方位角 $V_{s,\theta}$ の変化幅も狭いので、太陽は南の空の狭い範囲で移動する。したがって、モジュールは南方向から水平に近い角度で日射を受ける。さらに、図 8 (c) から、13 時に日射量のピークがあるので、真南よりも西寄りの方向からの日射が多くなるためだと考えられる。従来の LAPS で最適化されたモジュールは提案する LAPS で最適化されたモジュールと比較して、葉の設置方向が南向き以外のものが多い。これは、葉の数が少ない状態では葉を南に向けて設置できるが、一点から葉が発生するため、葉の数が多くなると葉の重なりが増えてしまう。したがって、受光効率が悪いながらも重なりを防ぎ少量でも日射を見込める南以外の方向に葉が設置されたと考えられる。

6・3 LAPS で最適化したモジュールの受光量の結果

本稿で行った従来の LAPS と提案する LAPS による解析で得られた夏至、冬至それぞれに最適化されたモジュールはそれぞれ 25 枚の葉を有している。これらの葉は一度に全て配置されるのではなく、植物の成長を模擬して 1 枚ずつ順に配置される。本節ではモジュールに配置される葉の数を 5 枚から 1 枚ずつ増やしていき、それぞれの葉の数の状態での受光量を確認した結果を図 12 に示す。図 12 では、従来の LAPS で最適化した植物シュートは夏至、冬至において、葉の数が少ない状態では葉の数の増加に伴い受光量が増えている。しかし、葉の数が多くなるにつれて受光量の増加量は少なくなる。これは、従来の LAPS では葉が 1 点より発生するため葉の数が多くなるにつれて重なりが大きくなり、新しい葉が発生してもモジュール全体の受光量が増えないためだと考えられる。したがって、さらに葉の数が多くなると従来の LAPS では、葉の重なりが増えるだけで受光量の増加は見込めないと考えられる。

一方、提案する LAPS で最適化したモジュールは夏至、冬至において葉の総数に関係なく、葉の数が多くなると受光量が増えている。これは、提案する LAPS は枝分かれ構造を持つため、新しく発生する葉は既存の葉との重なりを最小限にして日射を効率よく受光できる位置に配置されるためだと考えられる。ただし、夏至において提案する LAPS で最適化されたモジュールは、葉の数が少ない状態では従来の LAPS で最適化されたモジュールより受光量が低い。これは、夏至の日射の特徴が関係していると考えられる。6・2・1 項でも述べたように、両方の LAPS において葉は 11 時から 12 時の太陽の位置に向かって設置されている。従来の LAPS では葉が一点より発生するため平面状に葉が設置されているので、太陽から見ると時間に関係なくモジュールは 1 枚の平面に見える。一方、提案する LAPS は枝分かれを持つため葉に高低差が生じる。したがって、11 時から 12 時の太陽の位置から見るとモジュールの葉は 1 枚の平面に見えるが、他の方向から見ると葉は分散されて配置されている。そ

のため、時間帯によっては太陽から見ると葉に重なりができるので受光量が減ると考えられる。

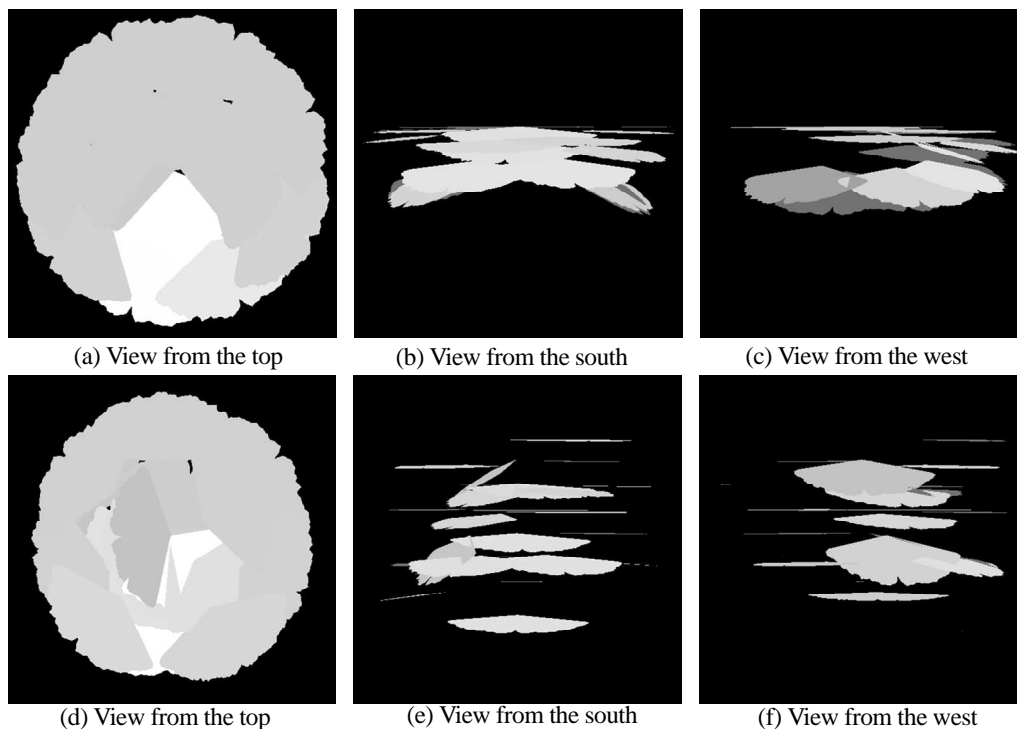


Fig. 10 Analysis result of the plant shoot solar module optimized on the summer solstice. (a) and (d) View from the top. As for the analysis result by conventional and proposed LAPS, leaves are arranged in circular shape. (b) and (e) View from the South. As for the analysis result by conventional LAPS, leaves are installed upward densely. As for the analysis result by proposed LAPS, leaves are distributed to up and down, and overlap of leaves are little. (c) and (f) View from the West, As for the analysis result by proposed LAPS, all leaves turn to upper direction or from the Southwestern to the Southeast direction. As for the analysis result by proposed LAPS, some leaves turn from the Northwest to the Northeast direction.

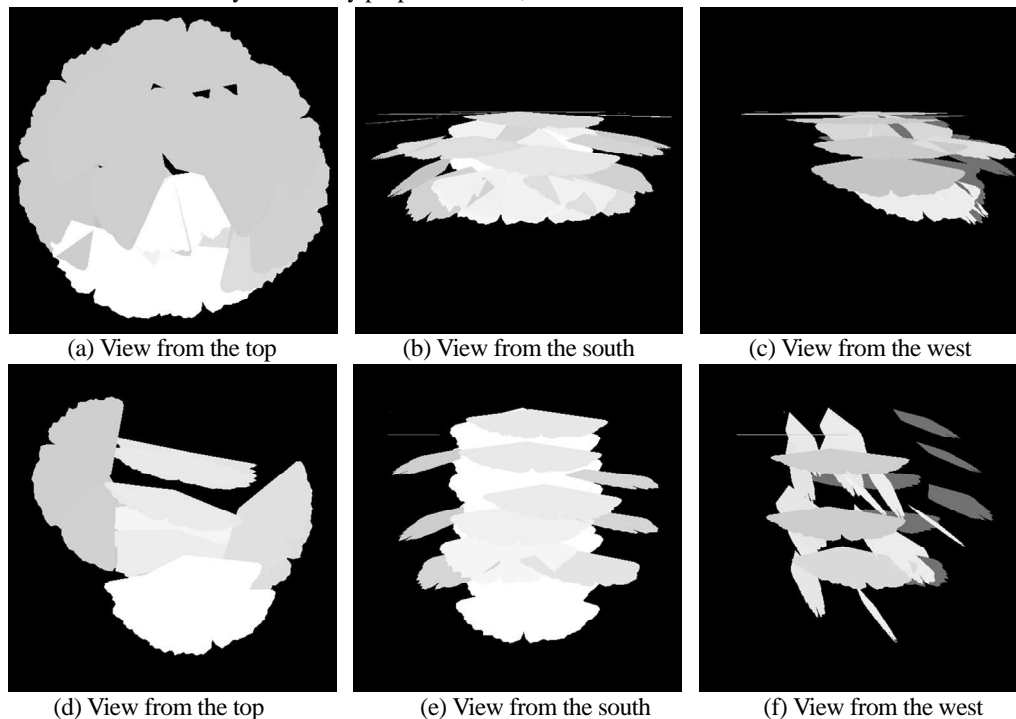


Fig. 11 Analysis result of the plant shoot solar module optimized on the winter solstice. (a) and (d) View from the top. As for the analysis result by conventional LAPS, leaves are arranged in circular shape. As for the analysis result by proposed LAPS, leaves are installed in the South side. (b) and (e) View from the South. As for the analysis result by conventional LAPS, leaves are installed southward, and overlap of leaves are much. As for the analysis result by proposed LAPS, leaves are installed to South direction. (c) and (f) View from the west, As for the analysis result by proposed LAPS, the angle of elevation of leaves is small and overlap of leaves is little. As for the analysis result by conventional LAPS, overlap of leaves are large.

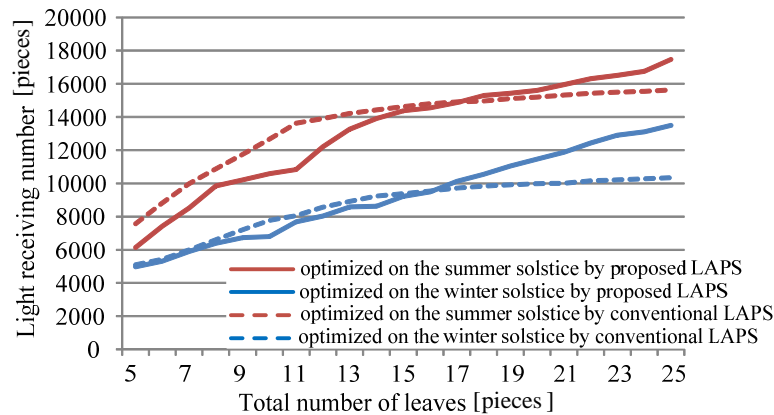


Fig. 12 Analysis result of the light receiving number. This graph shows light receiving number when the total number of the leaves is changed from 5 to 25 pieces. When the number of leaves is as above 17 pieces, the light receiving number of a module optimized by proposed LAPS becomes big.

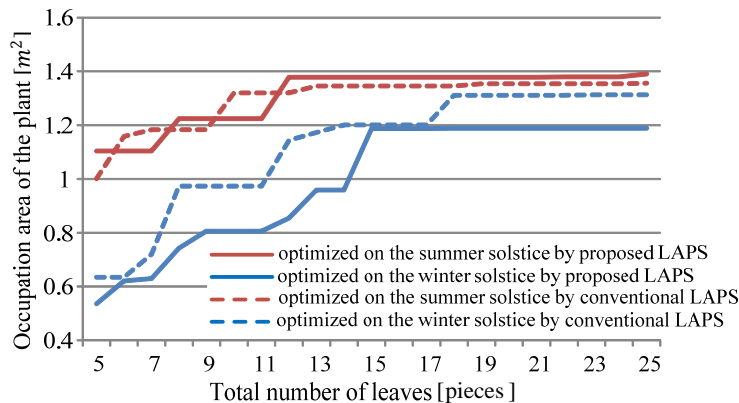


Fig. 13 Analysis result of the occupation area of the plant. This graph shows the occupation area when the total number of the leaves is changed from 5 to 25 pieces. Except for the module optimized on the winter solstice by proposed LAPS, those converge the occupation area of a close value.

6・4 夏至と冬至に最適化したモジュールの占有面積

6・2節と同様にモジュールに配置される葉の数を5枚から1枚ずつ増やしていき、それぞれの葉の数の状態での占有面積の結果を図13に示す。夏至に最適化されたモジュールの占有面積は、従来のLAPS、提案するLAPSともに葉が12枚以上では横ばいになっている。これは、夏至に最適化されたモジュールは上からの日射に最適化されているため、図10(a)のように上から見ると葉は円状に広がっており、12枚目の葉で円が完成したと考えられ、13枚目以降の葉は、設置面積を増やさないように設置されたと考えられる。冬至に最適化されたモジュールは、南方向からの日射に最適化されるため、提案するLAPSによる解析では、南側に多くの葉が鉛直に近い角度で設置されており、占有面積は小さな値となった。一方、従来のLAPSによる解析では、6・2・2項に示した理由から、葉が円状に広がってしまい、夏至に最適化した場合に近い占有面積となり、提案するLAPSと比較して大きな値になった。

6・5 夏至と冬至に最適化したモジュールの受光密度

6・3節と同様にモジュールに配置される葉の数を5枚から1枚ずつ増やしていき、それぞれの葉の数の状態での受光密度を確認した結果を図14に示す。夏至に最適化されたモジュールでは、葉の数が18枚以上となると、提案するLAPSの受光密度が高くなる。また、占有面積は、6・4節で述べた葉が円状に広がっているという理由から、葉をさらに増やしても従来のLAPS、提案するLAPSとも、変わらないと考えられる。さらに、受光量は、6・3節で述べたように、葉をさらに増やすと提案するLAPSでは日射を効率よく受光できる位置に配置され受光量が増えるが、従来のLAPSでは葉の重なりが増えるだけで受光量は増えないと考えられる。したがって、従来のLAPSの受光密度の増加は止まり、提案するLAPSの受光密度は、葉の増加に伴い増えると考えられる。

また、冬至に最適化された太陽電池モジュールでは、夏至に最適化された場合と同じ理由から葉の数が17枚以下では受光量に大きな違いは見られない。さらに、18枚以上では従来のLAPSでは受光量の増加が止まっている

が、提案する LAPS では葉の数に比例して受光量が増えている。また、6・4 節で述べたように、提案する LAPS は南側に集中して葉が設置されているが、従来の LAPS では円状に葉が広がっているため、占有面積は提案する LAPS が従来の LAPS と比較して常に小さくなっている。したがって、提案する LAPS の受光密度が葉の数によらず従来の LAPS より大きくなった。また、従来の LAPS では葉の数の増加に伴う受光密度の上昇がみられないが、提案する LAPS では葉の数が 15 枚以上になると、葉の増加に伴って受光密度が増えている。

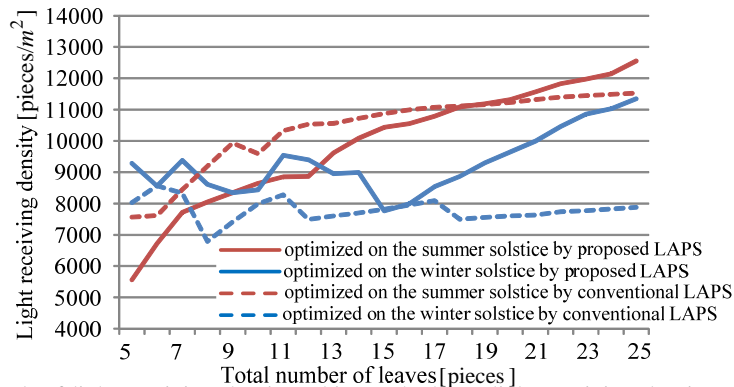


Fig. 14 Analysis result of light receiving density. This graph shows light receiving density when the total number of the leaves is changed from 5 to 25 pieces. When the number of leaves increases, the light receiving density of module which is optimized by the conventional LAPS reaches the limit. But the light receiving density of the module which is optimized by proposed LAPS increase with increasing the number of leaves.

7. 結 言

本稿では枝分かれ構造を伴う植物シュート形態を模擬した太陽電池モジュールを調査するために、従来の LAPS に L-system を加えた提案する LAPS を開発して、数値解析により夏至と冬至の日射条件に最適な太陽電池モジュールの形態を求めた。また、それぞれの太陽電池モジュールの夏至と冬至における受光量、占有面積、受光密度を計算した。この結果、以下の結論を得た。

- (1) 従来の LAPS によって得られたモジュールは全ての葉が一点から発生するため、葉の数が増えるにつれて重なって陰になる部分が増えるので、葉の数が多くなると受光量の増加は止まった。一方、提案する LAPS によって得られたモジュールは枝分かれ構造を持つので葉は様々な場所から発生することができることから、葉の重なりが抑制されて葉の数の増加に伴い受光量も増加することが分かった。これらの傾向は夏至、冬至の両方に見られた。
- (2) 従来の LAPS によって得られたモジュールの占有面積は、葉の数を増やすと夏至、冬至の日射条件で近い値になった。これは、全ての葉が一点から発生するため、受光を得るために葉の重なりを最小限にしながら葉を増やすと、日射条件に関係なく円状に配置されるためだと考えられる。提案する LAPS によって得られたモジュールの占有面積は、夏至の日射条件では形状が上からの日射に最適化されるため、円状に葉が配置され従来の LAPS によって得られたモジュールの占有面積と近い値になった。冬至の日射条件では形状が低い傾斜角からの日射に最適化されるため、葉が地面 ($x-y$ 平面) に対して縦に設置されるので、占有面積は他の場合に比べて低い値になった。
- (3) 従来の LAPS によって得られたモジュールは、葉の数の増加に伴う受光量の増加は葉の数が一定数を上回ると止まる。また、占有面積も一定の値に収束することから、受光密度についても葉の数を増やしても改善が見込めない。提案する LAPS によって得られたモジュールは、葉の数の増加に伴い受光量が増えて、占有面積は一定の値に収束することから、葉の数の増加に伴う受光密度の向上が見込まれる。

以上のことから、受光密度について従来の LAPS よりも提案する LAPS による解析結果が優れているので、枝分かれ構造を表現できる提案する LAPS は有効であることを確認できた。ただし、植物シュート太陽電池モジュールの実用化に向けて、太陽電池モジュールの重量や、風、雪などに対して十分な強度を持つ必要がある。また、枝分かれ構造を持つので構造が複雑であることから設置コストの低減技術を考慮することが課題である。したがって、受光密度、強度、コストからなる多目的関数を対象とした多目的 GA を導入して解析を行い別報にて報告する。

記号表

a	: 式 (10) の F_0 の重み	ギリシャ文字	
C	: 植物シュートの占有面積 [m ²]	θ	: 方位角 [degree]
F_d	: 占有面積の総和に占める割合の補集合	φ	: 傾斜角 [degree]
F_0	: GA での占有面積の評価		
F_S	: GA での受光量の評価	添え字	
J	: 植物シュートに到達する総光子数	Ln	: 枝の番号
L	: 植物シュートの枝	L	: 植物シュートの要素の長さ
M	: 植物シュートの幹	Mn	: 幹の番号
S	: 植物シュートの葉枝	Sn	: 葉枝の番号
V_S	: 仮想放射平面の位置	t	: 時刻 [hour]
		u	: 植物シュートの個体番号

文 献

- 今堀博, 植物の光合成に基づいた有機太陽電池, 応用物理, Vol.69, No.10(2000), pp.1192-1195.
- 今堀博, 小澤真一郎, 光合成をモデルとした有機分子による光電池, 表面科学, Vol.19, No.6(1998), pp.412-416.
- 今澤和貴, 佐々木睦朗, 坪井善隆, 吉田長行, L-System による形状表現に関する研究 -樹木ラーメン構造の構造形態創生-, 法政大学大学院デザイン工学研究紀要, Vol.2(2013).
- 稲川郁夫, 球状微小シリコン太陽電池実用化開発, 表面技術, Vol.56, No.1 (2005), pp.18-21.
- 上下利男, 江口吉雄, 今津康博, 荒木一郎, 上松強志, 松熊邦浩, 両面受光型太陽電池の基本応用技術の開発, 電気学会論文誌 B, Vol.123, No.8 (2003), pp.947-955.
- 木村健一, 建築設備基礎, 国際人間環境研究所(1970).
- 北野宏明, 遺伝的アルゴリズム, 産業図書(1993).
- 武藤至, 柴田良一, 野村和也, 人工生命理論による構造形態形成の基礎的研究 L-system と GA の利用, 日本建築学会東海支部研究報告集, Vol.35(1997), pp.265-268.
- NEDO 日射量データベース <<http://www.nedo.go.jp/library/nissharyou.html>>, (参照日 2013 年 4 月 5 日).
- 西川翔平, 藤代一成, 大野義夫, 絵画中の樹木の対話的 3次元モデリング, 情報処理学会第 73 回全国大会講演論文集 (2011) ,pp.73-75.
- 野村和也, 武藤至, 長尾彩, 遺伝的アルゴリズムによる構造形態の形成法 :L システムによる整形な形態の不整形化の試み, 日本建築学会学術講演梗概集. A-2, 防火,海洋,情報システム技術(1998), pp415-416.
- 小原伸哉, 植物シュート形態を伴う太陽電池モジュールの受光特性, 空気調和・衛生工学会論文集, No.138 (2008), pp.39-48.
- Obara, S. and Tanno, I., Arrangement analysis of leaves optimized on photon flux density or photosynthetic rate, Journal of Computational Science and Technology, Vol.2, No.1(2008), pp.118-129.
- Obara, S., Tanno, I. and Shiratori, T., Study on low directivity condensing equipment for solar power collection based on a single leaf shoot shape, Journal of Thermal Science and Technology, Vol.3, No.3(2008), pp.499-510.
- 尾田十八, Kundu, S., 齊藤誠, 進化的 L システムによる最適形態創生法に関する研究, 日本機械学会論文集 A 編, Vol.67, No.653 (2001), pp.121-126.
- 尾田十八, 宮西潤, 進化的 L システムを用いたトラス構造位相の最適設計, セルオートマトン・シンポジウム講演論文集, Vol.1 (2001), pp.168-170.
- 大下祥雄, 太陽電池開発の最前線, 精密工学会誌, Vol.76, No.1 (2010), pp.39-32.
- 大西克彦, 蓮池祥一, 北村喜文, 岸野文郎, インタラクティブな生長シミュレーションによる仮想樹木モデルの生成, 電子情報通信学会技術研究報告, Vol.103, No.106 (2003), pp.27-32.
- Prusinkiewicz, P., Hammel, M., Mech, R. and Hanan, J., The artificial life of plants, Artificial life for graphics, animation, and virtual reality, SIGGRAPH '95 Course Notes, Vol.7(1995), pp.1-38.
- Rodkaew, Y., Chuai-aree, S., Siripant, S., Lursinsap, C. and Chongstitvatana, P., Animating plant growth in L-System by parametric functional symbols, International Journal of Intelligent Systems, Vol.19(2004), pp.9-23.
- 進藤亜梨, 坂本雄児, 吸盤の働きを考慮したツタの CG モデル生成手法, 電子情報通信学会技術研究報告, Vol.109,

No.414(2010), pp.233-238.

當摩哲也, 有機薄膜太陽電池, 映像情報メディア学会誌, Vol.64, No.9 (2010), pp.1327-1329.

竹中明夫, 木の形作りと資源獲得, 生物科学, Vol.54, No.3 (2003), pp.131-138.

References

- Imahori, H., Organic solar cells based on photosynthesis, *Oyobuturi*, Vol.69, No.10(2000), pp.1192-1195 (in Japanese).
- Imahori, H. and Ozawa, S., Organic-based photovoltaic cell mimicking photosynthesis, *Journal of The Surface Science Society of Japan*, Vol.19, No.6(1998), pp.412-416 (in Japanese).
- Imazawa, K., Sasaki, M., Tsuboi, Y. and Yoshida, N., Representation of shape using Lindenmayer System - Computational morphogenesis of tree rahmen -, *Bulletin of Graduate Engineering Studies of Hosei University*, Vol.2(2013) (in Japanese).
- Inagawa, I., Development and practical application of spherical micro silicon solar cell, *Journal of The Surface Finishing Society of Japan*, Vol.56, No.1(2005), pp.18-21 (in Japanese).
- Joge, T., Eguchi, Y., Imazu, Y., Araki, I., Uematsu, T. and Matsukuma, K., Basic application technologies of bifacial photovoltaic solar modules, *IEEJ Transactions on Power and Energy*, Vol.123, No.8 (2003) , pp.947-955 (in Japanese).
- Kimura, K., Fundamental theories of building services, *International Research Institute on Human Environment* (1970) (in Japanese).
- Kitano, H., *Sangyotosyo, Identekiarugorizumu*(1993)(in Japanese).
- Mutou, I., Shibata, R. and Nomura, K., Structure morphogenetic basic study by the artificial life theory, *Reports of study of Architectural Institute of Japan*, Vol.35(1997), pp.265-268(in Japanese).
- Nedo, Quantity of sunlight database available from <<http://www.nedo.go.jp/library/nissharyou.html>>, (accessed on 5 April,2013) (in Japanese).
- Nishikawa, S., Ohno, Y., Fujishiro, I., Interactive 3D modeling of the tree of the picture, *Proceedings 73th National Convention of IPSJ*(2011), pp.73-75(in Japanese).
- Nomura, K., Mutou, I. and Nagao, A., Structural form generation by Genetic Algorithm : From regular shape due to L-systems to irregular forms, *Summaries of technical papers of Annual Meeting Architectural Institute of Japan. A-2, Fire safety, off-shore engineering and architecture, information systems technology* (1998), pp.415-416(in Japanese).
- Obara, S., Light received characteristic of a solar cell module with a plant shoot configuration, *Society of Heating, Air-Conditioning and Sanitary Engineers of Japan papers*, No.138 (2008), pp. 39-48 (in Japanese).
- Obara, S. and Tanno, I., Arrangement analysis of leaves optimized on photon flux density or photosynthetic rate, *Journal of Computational Science and Technology*, Vol.2, No.1(2008), pp.118-129.
- Obara, S., Tanno, I. and Shiratori, T., Study on low directivity condensing equipment for solar power collection based on a single leaf shoot shape, *Journal of Thermal Science and Technology*, Vol.3, No.3(2008), pp.499-510.
- Oda, J., Kundu, S. and Saito, M., Study on optimum structural design using Evolutionary L system, *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series A*, Vol.67, No.653 (2001), pp.121-126 (in Japanese).
- Oda, J. and Miyanishi, J., Optimun layout design of the truss structure using Evolutionary L system, *Collected Abstracts of the Symposium on cellular automaton*, Vol.1 (2001), pp.168-170 (in Japanese).
- Ohshita, Y., Recent advances in solar cells, *Journal of the Japan Society for Precision Engineering*, Vol.76, No.1 (2010), pp.39-32 (in Japanese).
- Onishi, K., Hasuike, S., Kitamura, Y. and Kishino, F., A study for interactive modeling trees by using growth simulation, *IEICE Technical Report*, Vol.103, No.106(2003), pp.27-32 (in Japanese).
- Prusinkiewicz, P., Hammel, M., Mech, R. and Hanan, J., The artificial Life of plants, *Artificial life for graphics, animation, and virtual reality, SIGGRAPH '95 Course Notes*, Vol.7(1995), pp.1-38.
- Rodkaew, Y., Chuai-aree, S., Siripant, S., Lursinsap, C. and Chongstitvatana, P., Animating plant growth in L-System by parametric functional symbols, *International Journal of Intelligent Systems*, Vol.19(2004), pp.9-23.
- Shindo, A. and Sakamoto, Y., Model generation method for climbing plants considering behavior of sucker for computer graphics, *IEICE technical report*, Vol.109, No.414(2010), pp.233-238(in Japanese).
- Taima, T., Fabrication of organic photovoltaic module, *The Institute of Image Information and Television Engineers Journal*, Vol.64, No.9 (2010), pp.1327-1329 (in Japanese).
- Takenaka, A., For further understanding of the functional aspects of tree architecture development, *Seibuthukagaku*, Vol.54, No.3(2003), pp.131-138 (in Japanese).