

# 博士論文

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に関する研究

2014年

川江 修



# 植物シュート形態を模擬した太陽電池モジュールの 受光特性に関する研究

-目次-

要旨

1 章 緒言 .....	1
1.1 太陽電池技術の背景 .....	1
1.1.1 地球環境問題 .....	1
1.1.2 エネルギー問題 .....	2
1.1.3 太陽電池の問題点と研究事例 .....	4
1.2 研究の着目点 .....	5
1.3 植物シュートとは .....	6
1.4 研究の目的と意義 .....	7
2 章 LAPS (Light Received Analysis Algorithm) .....	9
2.1 LAPS の検討 .....	9
2.1.1 LAPS の概要 .....	9
2.1.2 LAPS で扱う植物シュートの形態 .....	9
2.1.3 植物シュートの座標系 .....	10
2.1.4 葉モデルの定義 .....	11
2.1.5 光源モデル .....	12
2.1.6 葉に到達した光子の確認方法 .....	18
2.1.7 植物シュートの受光量 .....	20
2.1.8 LAPS に用いる GA の適応度 .....	21
2.1.9 LAPS の解析フロー .....	23
2.2 LAPS による解析事例 .....	26
2.2.1 解析対象 .....	26
2.2.2 解析条件 .....	26
2.2.2.1 LAPS のパラメータ .....	26
2.2.2.2 GA のパラメータ .....	27
2.2.2.3 日射条件 .....	27
2.2.3 予備解析 .....	29
2.3 LAPS による解析結果と考察 .....	34
2.3.1 植物シュートの形態 .....	34
2.3.1.1 夏至に最適化したモジュールの形態 .....	34
2.3.1.2 冬至に最適化したモジュールの形態 .....	38
2.3.2 各モジュールの受光特性 .....	42
2.3.2.1 LAPS で最適化されたモジュールの受光量の結果 .....	42
2.3.2.2 LAPS で最適化されたモジュールの占有面積の結果 .....	44
2.3.2.3 LAPS で最適化されたモジュールの受光密度の結果 .....	46
2.4 平板状の太陽電池モジュールとの比較 .....	48
2.5 葉の同時最適化 .....	50

3 章 Expanded LAPS の開発 .....	53
3.1 Expanded LAPS の検討.....	53
3.1.1 Expanded LAPS で扱う植物シュートの形態 .....	53
3.1.2 E-LAPS で扱う植物シュートの要素と座標系.....	54
3.1.3 L-system による植物シュートの表現.....	55
3.1.3.1 L-system とは.....	55
3.1.3.2 文字と置換規則 .....	56
3.1.3.3 L-system による植物シュートの表現例と問題点 .....	58
3.1.3.4 L-system に GA を適用する際のルール .....	59
3.1.4 E-LAPS による植物シュート形態の決定方法.....	61
3.2 E-LAPS による解析.....	67
3.2.1 解析対象 .....	67
3.2.2 解析条件 .....	67
3.2.3 予備解析 .....	68
3.3 E-LAPS による解析結果と考察.....	70
3.3.1 植物シュートの形態 .....	70
3.3.1.1 夏至に最適化したモジュールの形態 .....	70
3.3.1.2 冬至に最適化したモジュールの形態.....	74
3.3.2 各モジュールの受光特性.....	78
3.3.2.1 E-LAPS で最適化されたモジュールの受光量の結果 .....	78
3.3.2.2 E-LAPS で最適化されたモジュールの占有面積の結果 .....	80
3.3.2.3 E-LAPS で最適化されたモジュールの受光密度の結果 .....	82
3.4 平板状の太陽電池モジュールとの比較 .....	84
3.5 可動型太陽電池モジュールとの比較 .....	87
3.6 通年最適化 .....	90
3.6.1 通年最適化に用いる解析条件.....	90
3.6.2 解析結果と考察 .....	93
3.6.3 各太陽電池モジュールとの比較 .....	95
4 章 結言 .....	98
記号表 .....	100
参考文献.....	101
謝辞 .....	105
研究業績一覧.....	106

## 要旨

平板状の太陽電池モジュールは大きな発電電力量を得るにはモジュールの面積を広くする必要があるのであるため、広い設置面積を必要とする。また、日射の入射角に対して指向性を有するため、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。

太陽電池モジュール導入時の課題は、いかに少ない設置面積で多くの発電電力量を得るかである。この課題を解決するには太陽電池を平板状に限定せずに、指向性を低下させてモジュールの受光密度（設置に要する面積当たりの受光量）を増加させる必要がある。

本研究では、植物の形態を模擬した太陽電池分散配置型の太陽電池モジュールを検討することにより受光密度の改善を試みる。光合成植物は光合成によってバイオマスを維持しており、受光密度の高い形態に進化していると考えられる。このことから、植物の葉を太陽電池に置換すれば受光密度の優れた太陽電池モジュールが得られると予想される。そこで、与えられた日射条件等に最適な形態の植物シュート太陽電池モジュールを求めるアルゴリズムのLAPS (Light Received Analysis Algorithm of a Plant Shoot) を開発した。LAPSでは、一点より複数の葉枝と葉が放射状に発生するロゼット型の植物シュートについて解析を行った。また、受光効率の高い直立型の植物シュートを扱うためにLAPSを拡張したExpanded LAPS(E-LAPS)を開発した。E-LAPSは直立型の植物シュートの枝分かれ構造をL-systemで表現し、GAによって形態を最適化するアルゴリズムである。

結果としてLAPSにより得られた植物シュート太陽電池モジュールの受光量は平板状の太陽電池モジュールと比較して高い値になった。しかし、受光密度は夏至の日射条件では同等の値が得られたが、冬至の日射条件では植物シュート太陽電池モジュールは平板状の太陽電池モジュールよりも劣ることが明らかとなった。E-LAPSにより得られた植物シュート太陽電池モジュールは、夏至と冬至の日射条件において平板状の太陽電池モジュールよりも優れた受光量と受光密度を示すことが明らかになった。

結論として本研究で得られた植物シュート太陽電池モジュールは優れた受光密度を持ち、また植物の形態を持つため環境への調和性も高いので、メガソーラーのさらなる高性能化やマイクログリッドの普及に貢献できるものとする。

# 1 章 緒言

## 1.1 太陽電池技術の背景

### 1.1.1 地球環境問題

近年、特に開発途上国での人口増加が著しく、図 1.1.1-1 のように世界の人口は 2050 年には 95 億人に達すると予想されている<sup>[1][2]</sup>。人口増加や経済成長に伴うエネルギー需要の拡大により、図 1.1.1-2 に示すように年々化石燃料の消費量が増えており、特にアジア大洋州の増加が近年目立っている<sup>[3]</sup><sup>[4]</sup>。現在の 1 次エネルギー消費量と確認可採埋蔵から算出すると可採年数は、石油は 54.2 年、石炭は 112 年、天然ガスは 63.6 年となり、地球規模で化石燃料の枯渇問題や資源価格の不安定化が深刻な問題になっている<sup>[5]</sup>。また、化石燃料の使用時に排出される CO<sub>2</sub> の量も図 1.1.1-3 に示すように、エネルギー需要とともに増えており地球温暖化の原因になっている<sup>[6]</sup>。地球の平均地上気温は 1861 年以降上昇しており、20 世紀中に 0.6 度上昇した<sup>[7]</sup>。早急に対策を行わなければ今世紀末には平均気温は 2.6 から 4.8 度上昇して、これに伴い海面は 0.45 から 0.82m 上昇する<sup>[8]</sup>。この規模の環境変化が起きれば大きな気候変動が発生して、大気中の CO<sub>2</sub> の増加をさらに促進するような形で炭素循環過程に影響を与えるとの報告がなされている<sup>[8]</sup>。したがって、地球規模での CO<sub>2</sub> 排出削減が急務であり、CO<sub>2</sub> を排出しない自然エネルギーに注目が集まっている。

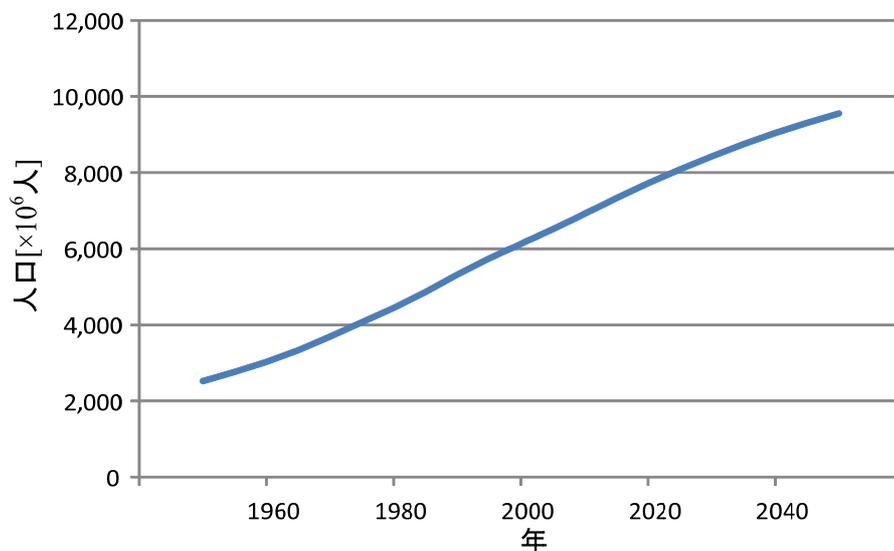


図 1.1.1-1 世界人口の推移（推計値）

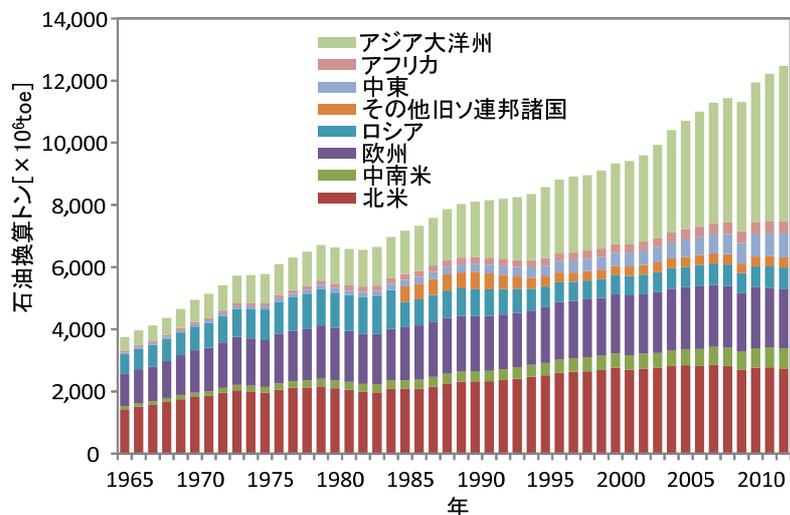


図 1.1.1-2 世界の一次エネルギー消費量の推移

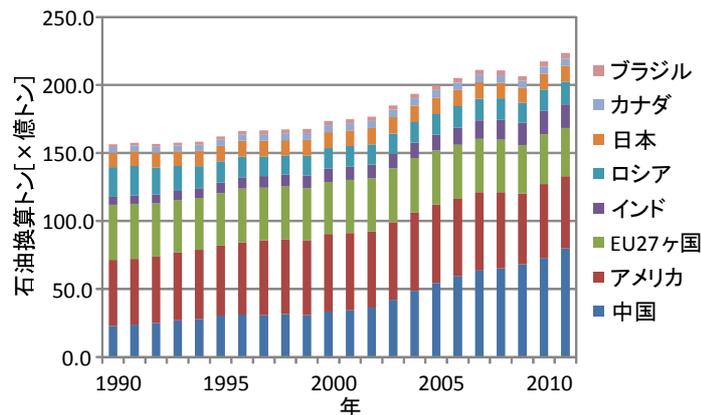


図 1.1.1-3 世界の二酸化炭素排出量の推移

### 1.1.2 エネルギー問題

日本はエネルギー資源のほとんどを輸入に依存しており、特に石油は中東に大きく依存しているため、図 1.1.2-1 に示すように 1 次エネルギーの供給やコストは世界情勢による変動する<sup>[9][10]</sup>。そこで、燃料になるウランの供給源の国の情勢が安定しているため供給やコストの変動リスクの低い原子力発電の導入を進めていたが、平成 23 年 3 月 11 日に発生した東日本大震災および東京電力福島第一原子力発電所事故を受けてエネルギー政策は見直しを求められており、新エネルギーとして再生可能な自然エネルギーに注目が集まっている。

再生可能エネルギーには太陽光、風力、潮力、地熱、バイオマスなどをエネルギー資源としたものがあり、半永久的に利用が可能で発電による CO<sub>2</sub>を増やさなため地球温暖化防止に有効である。ただし、風力、潮力、地熱はエネルギー資源が偏在しており、事前に調査して発電施設の設置場所や規模を決める必要がある<sup>[11]</sup>。また、環境や気象条件等によって発電電力量が安定しないため、この問題を解決するための研究が行われている<sup>[12][13][14]</sup>。また、バイオマスは本来食料となる穀物をバイオ燃料として利用した場合、穀物の需要が高まることによって価格が上昇して、貧困層に十分な量が供給されず飢餓を生む恐れがある。食料としての穀物の量を維持しながらバイオ燃料に利用する穀物を生産するには、現在よりも広い農地を確保するための森林伐採が懸念され、森林が減ることによる生態系への影響や保水力が失われるために水資源が確保できなくなる恐れが懸念される。さらには、二酸化炭素の固定能力が低下するため、地球温暖化につながると考えられる。

本研究で扱う太陽光発電は太陽から地球に降り注ぐ太陽光エネルギーを利用する。1時間あたりに太陽から地表に到達する太陽光エネルギーは85PWに達する。このエネルギーのうち地上で収集可能なエネルギーは1000TWと言われており、人類が2035年に消費すると予想されるエネルギー22TWと比較すると十分に大きい。したがって、太陽光エネルギーを効率よく扱うことができれば、無公害で無尽蔵なエネルギーを得ることができるといえる。また、資源の偏在性がなく、地球規模で場所を選ばずに利用可能である。

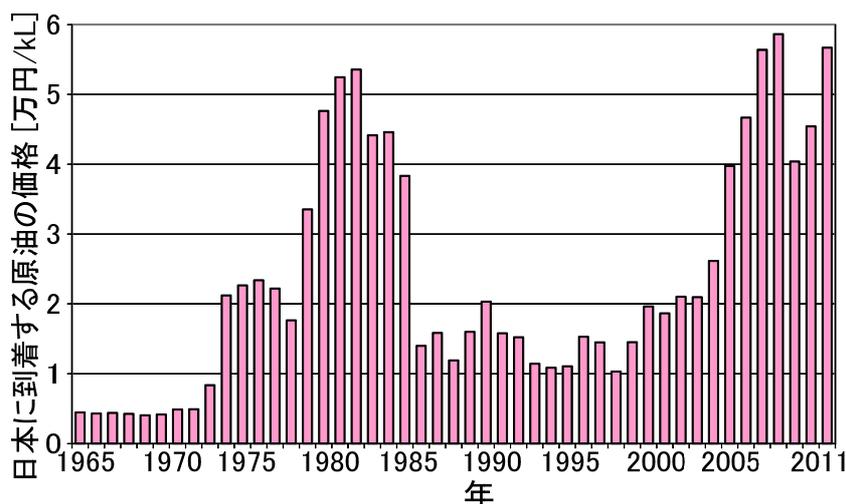


図 1.1.2-1 原油価格の変動

### 1.1.3 太陽電池の問題点と研究事例

太陽電池の問題点の一つに発電効率の低さがある。太陽電池の変換効率は材料に関する多くの研究の成果で年々改善されているが、市販品では 20%程度、研究レベルで 25%程度であり、大きな発電電力量を必要とする場合には大きな設置面積が必要になる。また、もう一つの問題点は時間による発電電力の変化である。一般的に用いられる固定型で平板状の太陽電池モジュールの発電電力量は図 1.1.3-1 に示すように時間とともに変化する。これは図 1.1.3-2 に示すように太陽の位置は仰角と方位角で表され、これらの値が日々刻々と変化するためである。太陽電池モジュールの出力電力が最大になるのは太陽との位置関係が垂直になったときであるため、太陽電池モジュールは南方向に 10 から 45 度の仰角をつけて設置するのが一般的であり、図 1.1.3-1 の例では 12 時頃に太陽電池モジュールと太陽の位置関係が 1 日を通して最も垂直に近くなり最大出力となっている。このことから、太陽電池モジュールは指向性を持つといえる。

これらの太陽電池の問題を解決するためにさまざまな研究がつけられている。研究目的は発電効率の向上や、軽量化、コスト削減などがある。

発電効率の向上に関する研究としては材料についての研究があり、例として単結晶<sup>[1]</sup>、多結晶、アモルファス、薄膜などの Si 系や<sup>[15][16][17][18]</sup>、GaAs、CIS などの化合物半導体系の太陽電池がある<sup>[19][20][21][22]</sup>。また、発電効率と温度の関係に注目して、太陽電池を冷却して発電効率を高める研究も行われている。さらに、太陽電池モジュールの設置方法や形状による発電効率の向上に関する研究も行われており、本論文の研究はこの枠組みに属する<sup>[23][24][25][26][27][28]</sup>。

軽量化とコスト削減に関する研究としては、アモルファス太陽電池、有機薄膜太陽電池、CIS 薄膜太陽電池、CIGS 薄膜太陽電池がある<sup>[29][30][31]</sup>。単結晶や多結晶 Si 太陽電池は結晶シリコンの光吸収係数が低いため素子に厚みが必要であるが、アモルファスなどの薄膜太陽電池はガラス基板上に発電効果をもつ素子を形成するため、Si の使用量が減り、また Si 結晶をスライスする工程が必要ないためコストの削減が期待できる。また、ガラス基板からの素子の引き剥がしも実用化されており、太陽電池の軽量化につながっている。

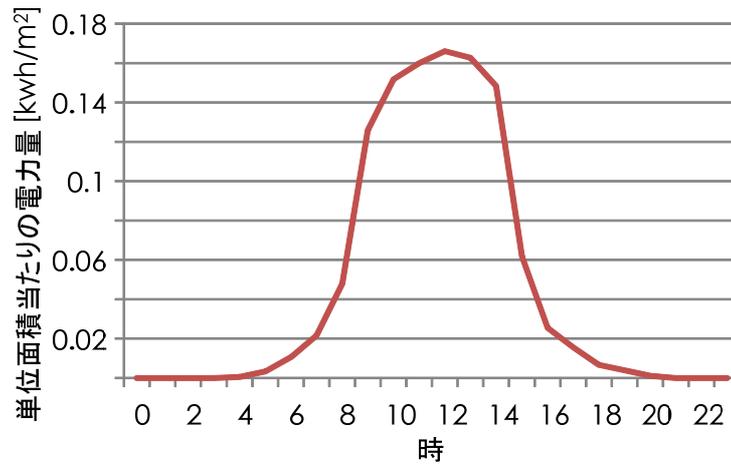


図 1.1.3-1 夏至における北海道札幌市での発電電力量

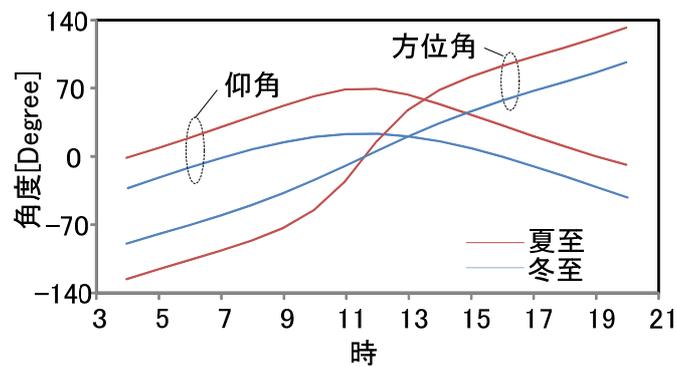


図 1.1.3-2 夏至と冬至の時間ごとの太陽の位置

## 1.2 研究の着目点

本研究では太陽電池の受光効率の改善方法として植物の形態に着目した。光合成植物は光合成によって生成される炭水化物によって個体の維持、成長に必要なエネルギーを得ている<sup>[32] [33]</sup>。また、森などの植物群落内に浸透する光は図 1.2-1 のように上層部で大部分が吸収される<sup>[34]</sup>。このことから、植物群落内に密集して生育している植物は他の植物と空間競争を行いながら、より多くの光を受光することができる形態に進化していると考えられる。すなわち、光合成植物の形態はコンパクトで高エネルギー密度の受光効率の優れた形態であると予想される。したがって、太陽電池を植物の葉と置き換えて分散配置して配置方法を最適化すれば固定型でなおかつ受光効率の優れた太陽電池モジュールが得られる。

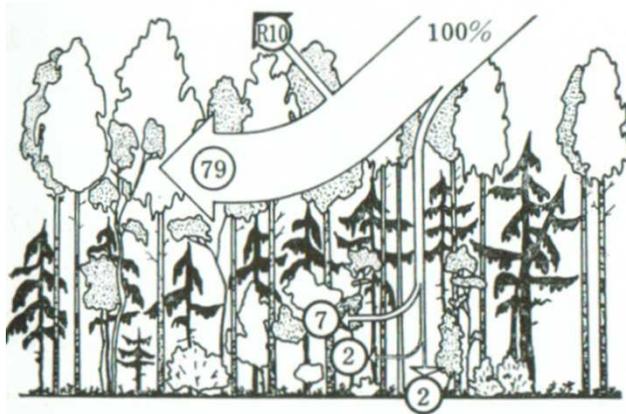


図 1.2-1 森林への光の浸透<sup>[34]</sup>

### 1.3 植物シュートとは

自然界の維管束植物の構造は図 1.3-1 に示すように地表部分のシュート系と地中部分の根茎に大別することができる<sup>[35]</sup>。シュート系を構成する要素は茎、枝、葉枝、葉であり、また、枝は図 1.3-2 のように長枝と短枝に分かれる。長枝は、枝分かれを繰り返しながら、幹とともに植物の大枠を作る。短枝は長枝より発生するいぼのようなもので、長枝と比較して非常に短い。この短枝から複数の葉が発生し、太陽光を受光する。しかし、短枝同士が近いと葉の重なりが増えて受光効率が低減するので、長枝によって短枝間の距離を稼ぎ、葉の重なりを防ぐ。植物シュートは様々な長さや成長方向を持つ枝や葉などが複雑に組み合わさって構成される。

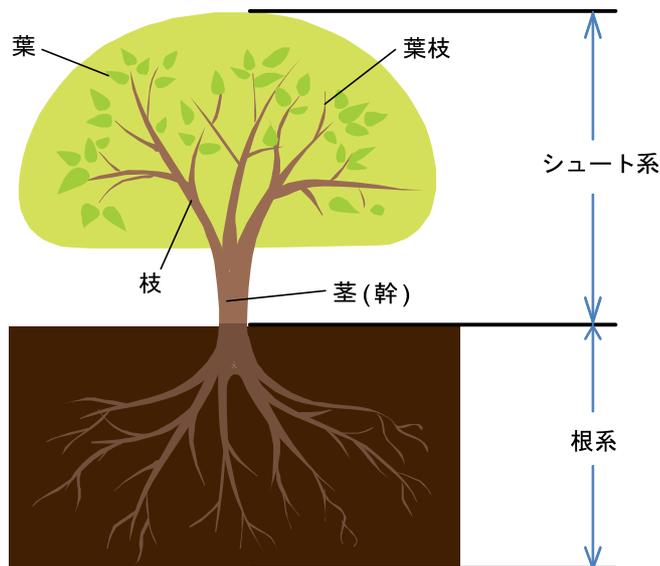


図 1.3-1 植物モデル

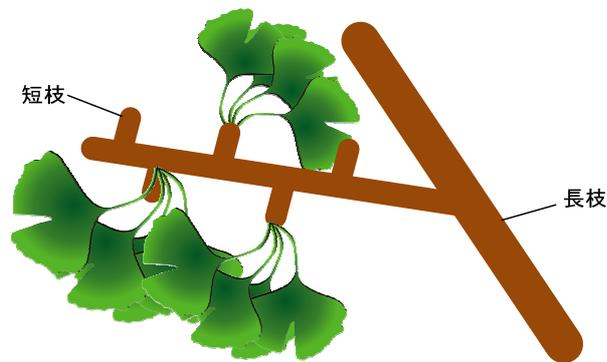


図 1.3-2 長枝と短枝

## 1.4 研究の目的と意義

本研究の目的は平板状の太陽電池モジュールの受光効率に関する問題を改善することであり、改善方法として植物シュートの形態に着目した。本研究では植物シュートの形態を持つ太陽電池モジュールを「植物シュートを模倣した太陽電池モジュール」と呼ぶ。植物シュートを模倣した太陽電池モジュールは図 1.4-1 に示すように太陽電池が立体的に配置されており、平板状の太陽電池モジュールと比較して少ない設置面積でより大きな発電電力量を得られると考えられる。さらに、複数の葉がさまざまな方向に向かって設置されて独立して発電するので、1日の最大出力電力を得られる時間は各葉で異なることになり、各時間のモジュールの発電電力量はその時間の各葉の発電電力の積算になるので、従来の平板状の太陽電池と比較して指向性が低くなる。これらのことから、本研究で得られる植物シュートを模倣した太陽電池モジュールは、固定型で指向性の低い太陽電池モジュールであり、現在一般的に使用されている平板状の太陽電池モジュールの問題点を解決することができる可能性があると言える。

ただし、植物の形態は受光効率の最大化だけで決まるわけではなく、気温、湿度、風などの日照以外の気象条件も大きな影響を与えていると考えられるので、単純に実際の植物の葉を太陽電池に置き換えても、受光効率が最大にならないと考えられる。そこで、本研究では、受光効率の最大化のみに特化した植物の形態を、コンピューターを用いた数値解析により求める。

これまでに有機薄膜太陽電池を利用した植物の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<sup>[36]</sup>、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。

本研究では受光効率を向上させる手段として、受光密度の向上を試みる。実現手段として、太陽電池モジュールの受光量の向上と設置面積の低減を目指す。

本研究の結果、受光密度の高い植物シュートを模擬した太陽電池モジュールの開発に成功すれば、平板状の太陽電池モジュールと比較して、少ない設置面積で多くの電力を発電が可能で、さらに植物の形態を持つため環境への調和性が高いので、導入が進められているマイクログリッドの有力な電力源になりうると考えられる<sup>[37]</sup>。

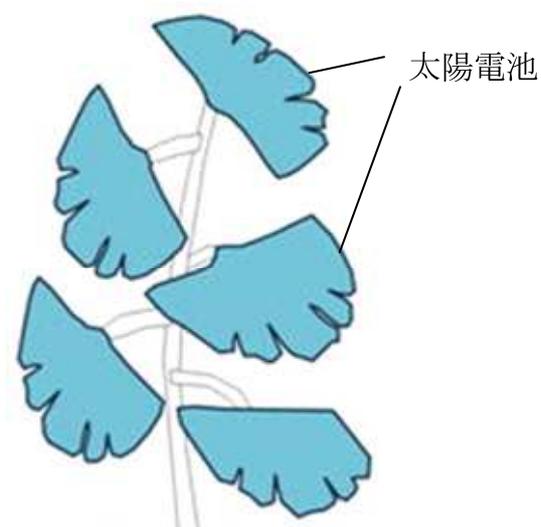


図 1.4-1 植物シュートを模擬した太陽電池モジュール

## 2 章 LAPS (Light Received Analysis Algorithm of a Plant Shoot) の開発

### 2.1 LAPS の検討

#### 2.1.1 LAPS の概要

本章では DSMS を調査するために開発した LAPS (Light Received Analysis Algorithm of a Plant Shoot) について記述する。LAPS は遺伝的アルゴリズム (GA) <sup>[38]</sup> によって植物シュート形態の受光特性を解析するアルゴリズムである。LAPS に初期パラメータ (葉の形状, 葉枝の成長開始点, 葉の数, 日射条件) 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。日射条件は, 代表日における各時間の太陽の方位角, 仰角, 水平面全天日射量で与えられる。LAPS による数値解析では, コンピューター内の x- y- z 空間座標に植物シュートと仮想太陽を設置して, 代表日に 1 日を通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と, 植物シュートが占有する面積, すなわち設置面積から受光密度を計算する。

LAPS では, 図 2.1.1-1 に示すように右手系の 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,  $\theta$ ,  $\varphi$ ,  $\gamma$  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。植物シュートは x- y- z 空間座標の原点から発生することとする。

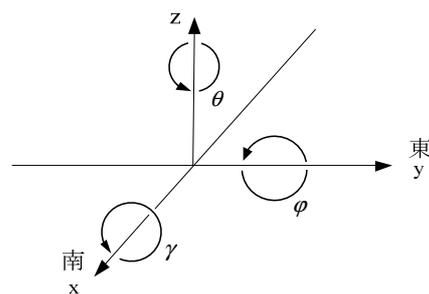


図 2.1.1-1 LAPS で用いる座標

#### 2.1.2 LAPS で扱う植物シュートの形態

植物シュートは葉, 葉枝, 枝, 幹が複雑に組み合わさって構成される。しかし, LAPS では解析の簡単化のために, 葉と葉枝だけからなる植物シュー

トについて解析を行う．図 2.1.2-1 に示すように  $x$ - $y$ - $z$  空間座標の原点から複数の葉が発生し四方に伸びる植物を想定する．葉枝の先端に葉が接続される．

また，自然界の植物の葉は様々な形状をしているが，これは自生場所の環境に最適化したためだと考えられる．したがって，葉の形状は気温や風など複雑な条件についてバランスよく最適化されていて，形状は受光効率の最大化だけでは決められていないと言える．このことから，葉の種類によって受光効率が異なると考えられる．そこで，葉の形状の違いが受光効率と植物シュートの形態に与える影響を確認するために，大きく異なる特徴を持った 3 種類の葉（イチョウ，ヤマモミジ，ハナミズキ）について解析を行う．ただし，現状の技術では十分な変換効率を持った植物の葉の形状を持つ太陽電池モジュールの製造は難しい．そこで，現在広く使われている四角形の太陽電池モジュールについても解析を行い，自然界の葉と形状を用いた場合と比較する．

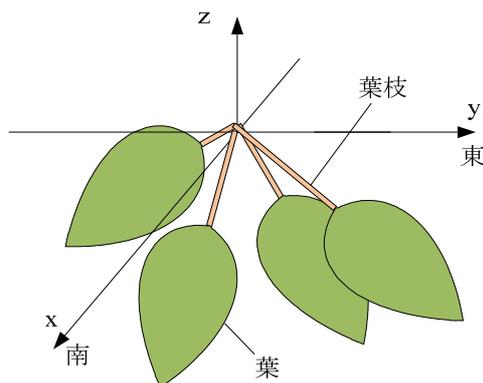


図 2.1.2-1 LAPS で扱う植物シュート

### 2.1.3 植物シュートの座標系

図 2.1.3-1 は LAPS で扱う植物シュートの座標系で，葉枝  $S$  と葉によって構成される．葉枝は成長開始点の座標と方位角  $S_{\theta,Sn}$  と仰角  $S_{\varphi,Sn}$  で表される成長方向と長さ  $S_{l,Sn}$  の 3 つの項目によって定義される．ただし，LAPS で扱う植物シュートは全ての葉枝が座標系の原点から成長するので，成長開始点の座標は全て葉枝で  $(0,0,0)$  になる．また，葉は葉枝と直線状に接続することとする．したがって，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 枚目の葉は  $S_{\theta,Sn+1}$ ， $S_{\varphi,Sn+1}$ ， $S_{l,Sn+1}$  で定義される．

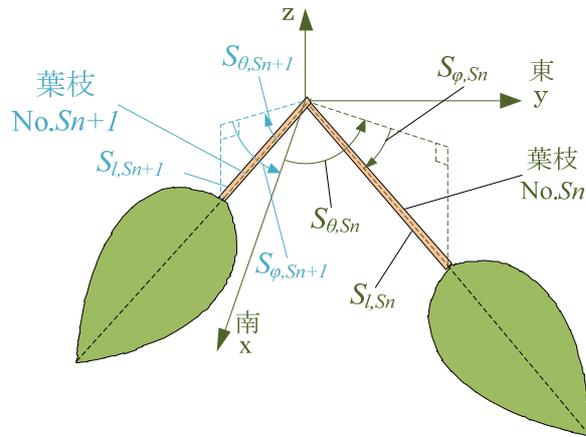


図 2.1.3-1 LAPS で用いる植物シュートの座標系

#### 2.1.4 葉モデルの定義

LAPS による解析で用いる葉モデルを図 2.1.4-1 に示すように定義する．イチョウの葉を例に挙げて葉モデルの定義方法を説明する．x-y 平面上にイチョウの葉を配置して，原点に葉柄の端部を一致させその座標を  $P_{s0}$  とする．次に葉の右端より 2 度毎に外周の座標を  $P_{s1}$  から  $P_{s73}$  と定義して，それぞれを線で結ぶことで葉の外形を作る．さらに  $P_{s1}$  から  $P_{s73}$  の点と  $P_{s0}$  を線で結ぶ．これにより葉モデルは  $P_{s0}$  と外周の 2 点からなる 72 個の三角形（面要素）の集合として表される．葉枝は， $P_{s0}$  に接続される．

例に示したイチョウの葉は，外周の点を 2 度毎に定義することにより 72 個の面要素で表したが，より小さな角度で定義すれば外周の点が増えるので詳細な葉の形状が得られる．しかし，あまり詳細な葉の形状では，面要素の数が増えてしまうので解析にかかる時間が長くなってしまう．また，葉の面積はそれほど変わらないため解析結果には大きな影響は与えないと考えられる．そこで，LAPS では十分に葉の形状を表現できる極力少ない数の外周の点を決めてそれぞれの葉モデルを定義した．また，比較を容易にするために，全ての葉の面積を  $0.11\text{m}^2$  に統一した．

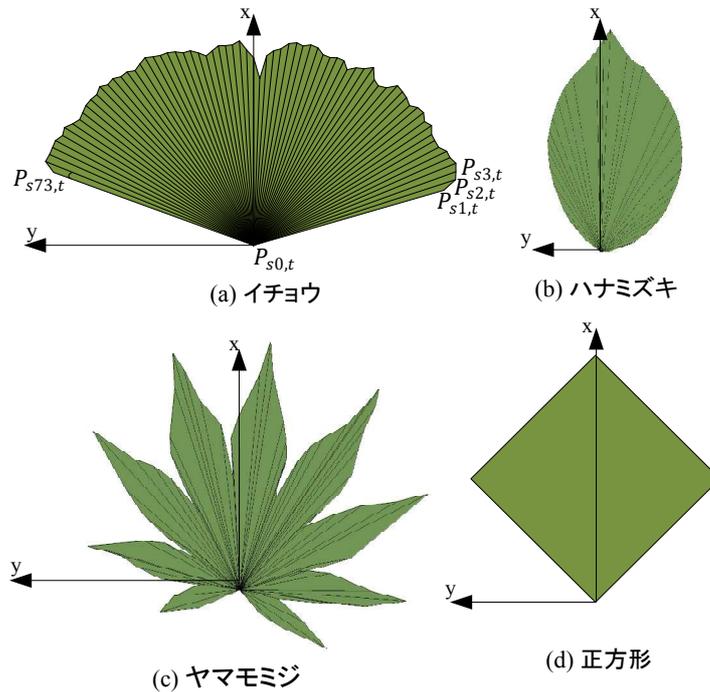


図 2.1.4-1 LAPS に用いる葉モデル

### 2.1.5 光源モデル

LAPS ではコンピューター内の仮想太陽を平板状の仮想放射光源を用いて表現する。また、日射を仮想放射光源から放射される光子として扱う。図 2.1.5-1 中に示すように解析では仮想放射光源 ( $P_{v,0}-P_{v,1}-P_{v,2}-P_{v,3}$ ) と垂直に光子を仮想放射光源上のランダムな位置から放射することで直達日射を模擬する。仮想放射光源の方位角  $V_{S,\theta}$  と仰角  $V_{S,\varphi}$  は、サンプリング時刻毎に変更する。

代表日  $g$  でのサンプリング時間  $st$  に、仮想放射光源から放射する光子数  $nq_{g,st}$  は式 (1) で計算する。ただし、 $N_a$  は代表日に仮想放射光源から放射する全光子数で、 $R_{g,st}$  は時刻  $st$  に放射する光子数の割合である。さらに  $e_{g,st}$  は代表日  $g$  の時刻  $st$  での水平面全天日射量を表す。したがって、サンプリング時間  $st$  に放射される光子は水平面全天日射量に比例する。また、代表日  $g$  において全ての光子は同じエネルギー量を持つことになる。したがって、図 2.1.5-1 中に示すように仮想放射光源から放射されて葉に到達した光子の数を積算することによって、葉が受光したエネルギー量を求めることができる。

仮想放射光源に与える時間  $st$  ごと方位角  $V_{S,\theta}$  と仰角  $V_{S,\varphi}$  と水平面全天日射量を変えることで、様々な場所の日射条件を再現することができる。例として、北海道札幌市における夏至の時間  $st$  ごとの仮想放射光源の位置 (図 2.1.5-2),

水平面全天日射量（図 2.1.5-3）と  $N_a$  を 100000 個とした場合の放射する光子数を図 2.1.5-4 に示す。

図 2.1.5-5 は x- y- z 空間座標における 4 時の日射を表している。空間座標の原点に仮想放射光源仮と平行に面積が 1/4 の太陽電池が配置されている。青色の線は仮想放射光源のランダムな位置から放射されて太陽電池に到達した光子の軌跡を表している。白い線は太陽電池に到達しなかった光子の軌道である。同様に図 2.1.5-6 は 6 時、図 2.1.5-7 は 8 時の日射を表しており、それぞれの時間において 2.1.5-5 の例と同様に太陽電池が仮想放射光源と平行に設置されている。図 2.1.5-5 を見ると他の時間と比較して仮想放射光源の光子の放射位置が粗くなっている。仮想放射光源と平行に仮想放射光源の 1/4 の面積の太陽電池が設置された場合、太陽電池が受光する光子の数は仮想放射光源が放射した光子の数の 1/4 になるのが理想である。しかし、図 2.1.5-5 の例のように、仮想放射光源から放射される光子の数が十分に多くないと、理想の値に対して誤差が生じると考えられる。また、設置される太陽電池の面積が小さくなると、すなわち形態係数が小さくなると誤差が大きくなると考えられる。そこで、図 2.1.5-5 から図 2.1.5-7 のように時間  $st$  ごとに仮想放射光源と平行な太陽電池を配置して、太陽電池が受光する光子の数を理想値と比較することにより、LAPS で用いる光源モデルの妥当性を検証する。検証に使用する仮想放射光源は面積が  $6.25 \text{ m}^2$  の正方形とした。太陽電池の形状は正方形として、面積は仮想放射光源の 1/4 の  $1.56 \text{ m}^2$  と、解析に用いる葉の面積と同じ  $0.11 \text{ m}^2$  の 2 種類とした。各時間  $st$  の仮想放射光源の位置は図 2.1.5-2 のグラフの値を、放射光子数は 2.1.5-4 のグラフの値を用いる。図 2.1.5-8 に時間  $st$  ごとに太陽電池が受光した光子数と理想値との相対誤差を示す。各時間  $st$  の受光量は 10 回検証を行った平均である。青色のグラフは太陽電池の面積が  $1.56 \text{ m}^2$  の場合である。また、赤色のグラフは太陽電池の面積が  $0.11 \text{ m}^2$  の場合である。青色のグラフでは光子の数が少ない 4 時と 20 時で相対誤差が大きくなっているが他の時間では 0 に近い値になっている。赤色のグラフでは仮想放射光源からの放射光子が最も多くなる 12 時と 13 時では相対誤差が 0 に近い値になっているが、他の時間においては青色のグラフよりも相対誤差が大きくなっている。これらのことから、放射光子数が少なくなるか、形態係数が小さくなると相対誤差が大きくなることわかる。ただし、両グラフで誤差が大きくなっている 4 時、5 時、19 時、20 時に放射される光子の数は図 2.5.1-4 から他の時間に比べて非常に少なく、受光量の結果に与える影響も非常に少ないと考えられる。他の時間帯は図 2.5.1-8 から相対誤差は低い値になっており、LAPS に用いる光源モデルは妥当であるといえる。

$$nq_{g,st} = N_a R_{g,st} = N_a \left( \frac{e_{g,st}}{\sum_{st=0}^{Day} e_{g,st}} \right) \quad (2.1.5-1)$$

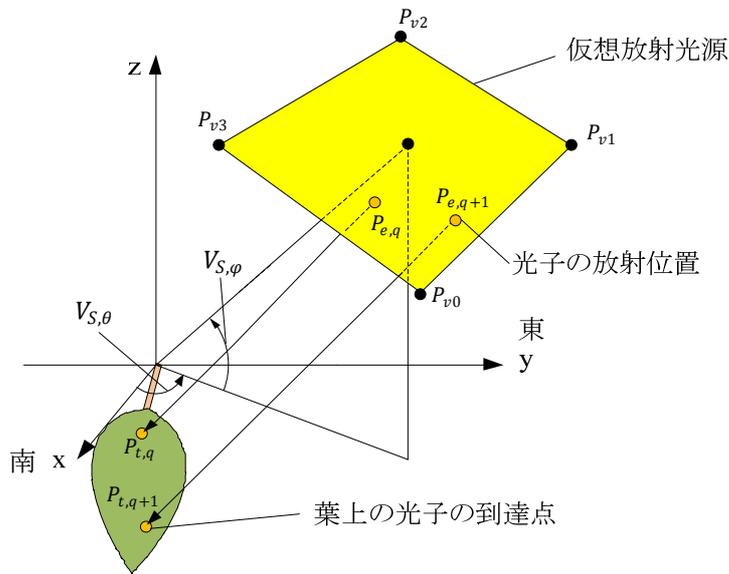


図 2.1.5-1 LAPS で用いる光源モデル

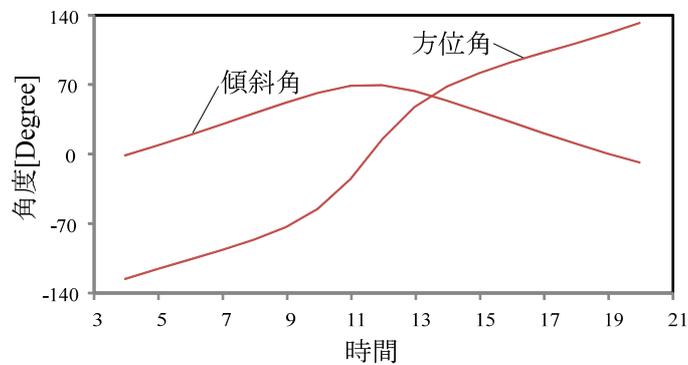


図 2.1.5-2 北海道札幌市における夏至の太陽の位置

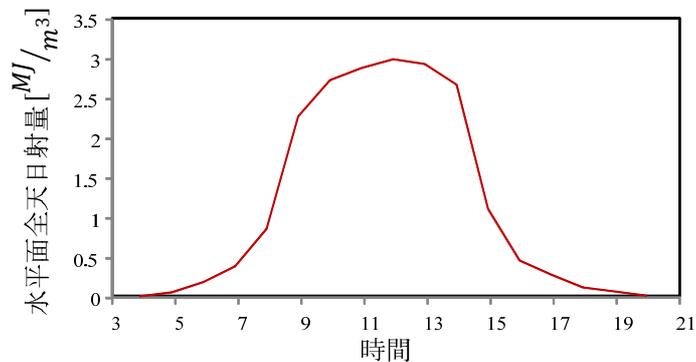


図 2.1.5-3 北海道札幌市における夏至の水平面全天日射量

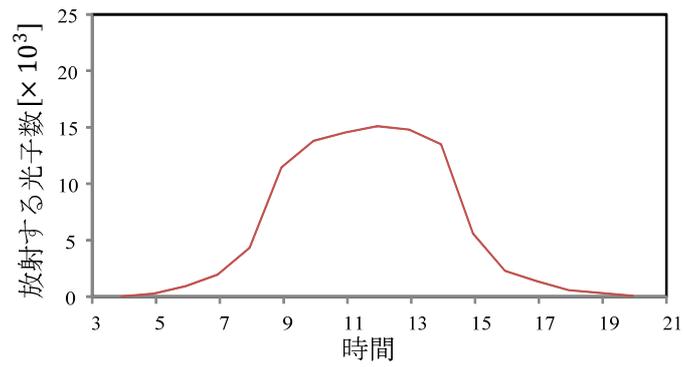


図 2.1.5-4 仮想放射光源から放射される光子の数

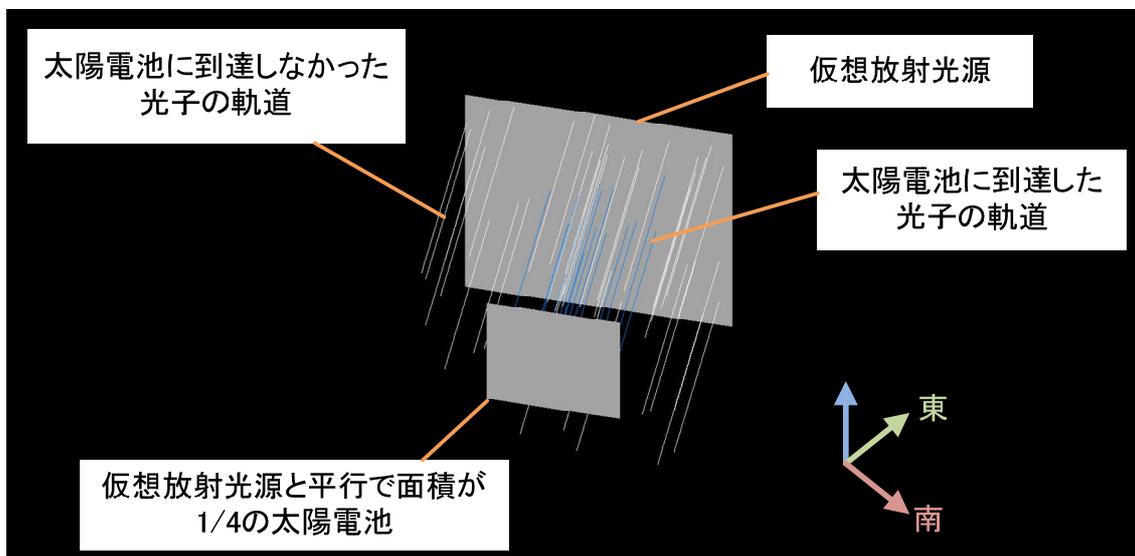


図 2.1.5-5 4時における仮想放射光源からの日射と太陽電池のモデル

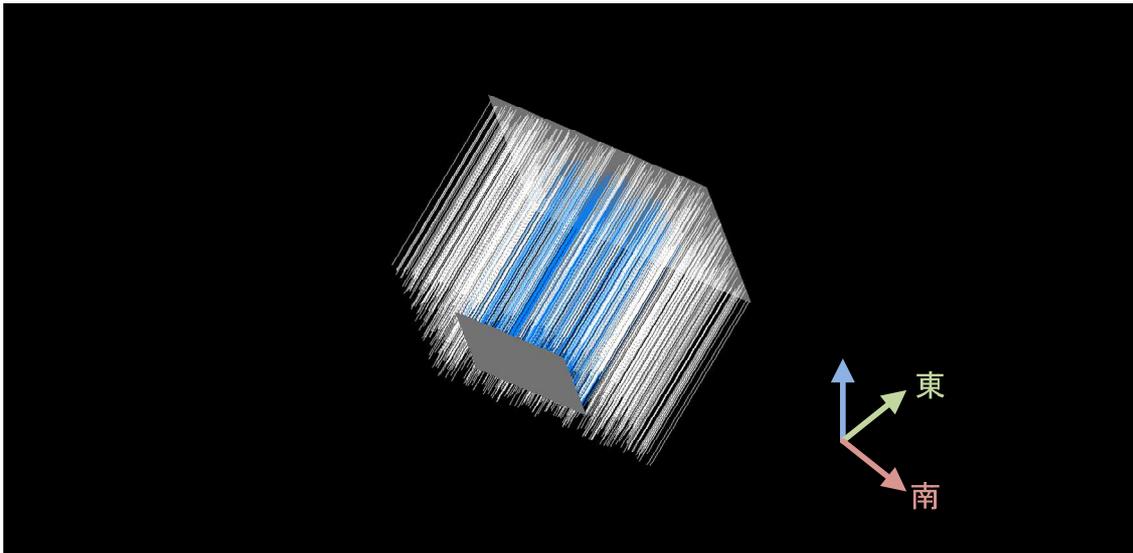


図 2.1.5-6 6時における仮想放射光源からの日射と太陽電池のモデル

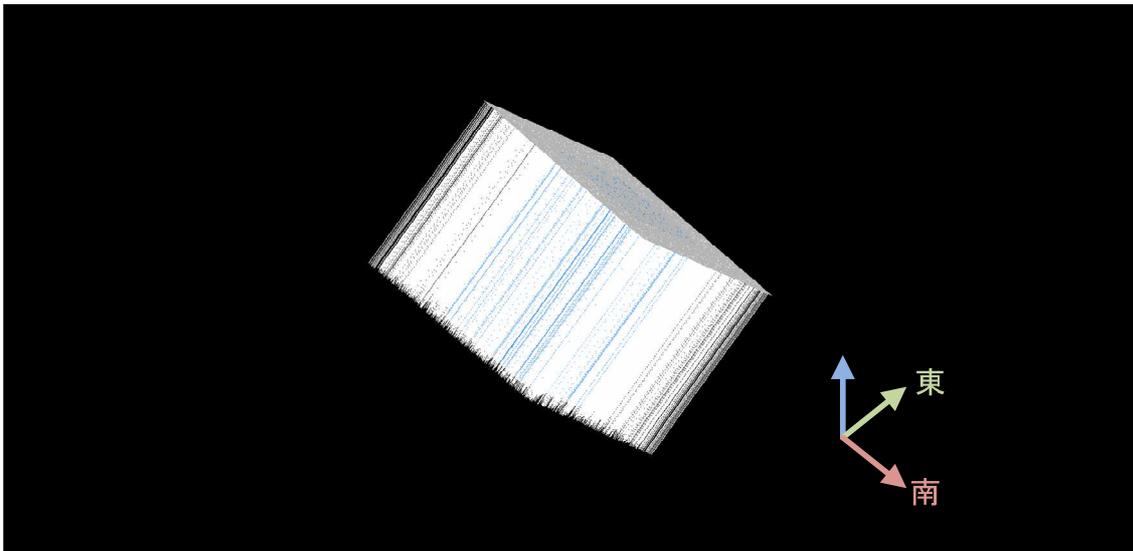


図 2.1.5-7 8時における仮想放射光源からの日射と太陽電池のモデル

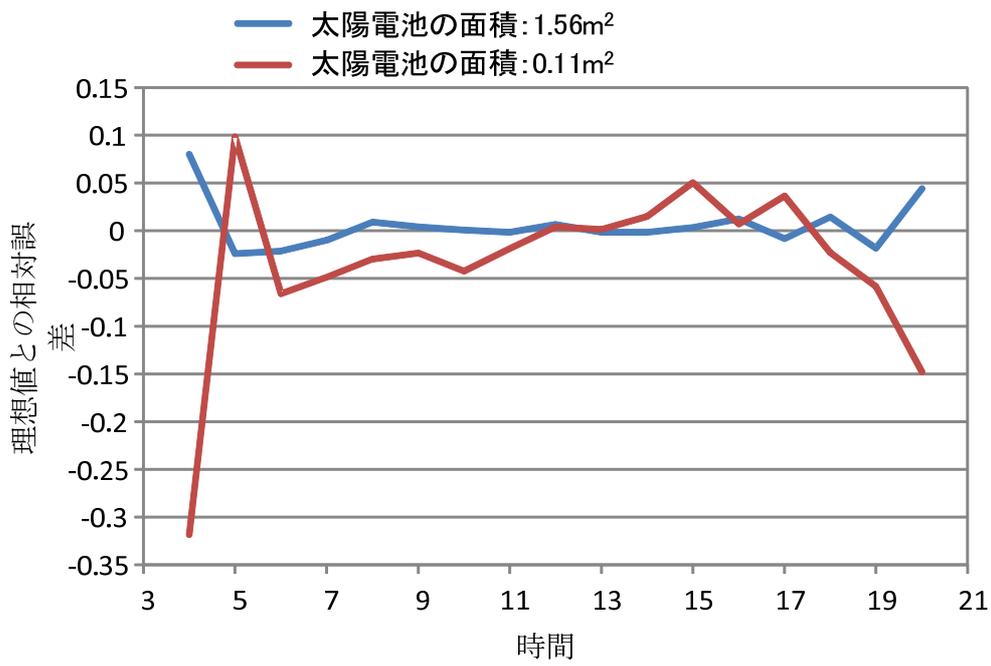


図 2.1.5-8 太陽電池の受光量の各時間における理想値と解析値の相対誤差

## 2.1.6 葉に到達した光子の確認方法

図 2.1.6-1 は仮想放射光源上の任意の点から放射された光子が葉モデルの面要素を通過するモデルである。ただし、葉モデルの面要素は無限の広さを持つ平面  $I$  に含まれるものとする。また、図 2.1.6-2 は図 2.1.6-1 の面要素を拡大した図である。また、点  $P_{g,q}$ ,  $P'_{g,q}$  は仮想放射光源から十分離れた位置に定義する。 $P_{e,q}$  と  $P'_{e,q}$  は仮想放射光源上のランダムに決めた点で、それぞれの点から放射された光子は平面  $I$  上の点  $P_{t,q}$ ,  $P'_{t,q}$  を通過して、十分遠方の点  $P_{g,q}$ ,  $P'_{g,q}$  に到達する。光子の面要素への到達を確認するには、平面  $I$  上の点  $P_{t,q}$  が面要素に内包されていることを確認する必要がある。図 2.1.6-3 のフローチャートは内包確認の手順である。まず、図 2.1.6-3 の手順①で式 (2.1.6-1) より、面要素の法線ベクトル  $\vec{N}_{t,m}$  を求める。ここで、式 (2.1.6-1) から式 (2.1.6-6) の「 $\times$ 」はベクトルの外積を表し、「 $\cdot$ 」はベクトルの内積を表す。手順②では式 (2.1.6-2) を使い  $\vec{N}_{t,m}$  と仮想放射光源の単位法線ベクトル  $\vec{V}_e$  が対向していることを確認する。対向していなければ光子は面要素の裏側に向かって放射されることになり、葉の裏側への光子の到達は受光と判断しないため、内包確認を終了する。手順③では平面  $I$  上の点  $P_{t,q}$  の座標を式 (2.1.6-3) で計算する。ただし、 $P_{e,q}$  は仮想放射光源上の任意の点、 $r_{et}$  は  $P_{t,q}$  と  $P_{e,q}$  の距離を表す。手順④では  $P_{t,q}$  が葉モデルの面要素に到達しているかを確認する。面要素は  $\vec{v}_0$  から  $\vec{v}_2$  の三本のベクトルが辺の 3 角形となっている。 $P_{t,q}$  が面要素に内包されるには、 $P_{e,q}$  から見た時に  $P_{t,q}$  が  $\vec{v}_0$  から  $\vec{v}_2$  の左側にあるときである。式 (2.1.6-4) は、 $P_{t,q}$  が  $\vec{v}_0$  の左側にある場合の条件である。同様に式 (2.1.6-5) および式 (2.1.6-6) より全ての辺の左側に  $P_{t,q}$  があるか否かを確認する。以上の方法で光子の面要素へ到達の確認を行い、いずれかの面要素に光子が到達していれば葉は光子を受光したこととしてカウントする。

$$\vec{N}_{t,m} = (P_{s1,m} - P_{s0,m}) \times (P_{s2,m} - P_{s1,m}) \quad (2.1.6-1)$$

$$\vec{V}_e \cdot \vec{N}_{t,m} < 0 \quad (2.1.6-2)$$

$$P_{t,q} = P_{e,q} + r_{et} \vec{V}_e \quad (2.1.6-3)$$

$$[(P_{s1,m} - P_{s0,m}) \times (P_{t,q} - P_{s0,m})] \cdot \vec{N}_{t,m} \geq 0 \quad (2.1.6-4)$$

$$[(P_{s2,m} - P_{s1,m}) \times (P_{t,q} - P_{s1,m})] \cdot \vec{N}_{t,m} \geq 0 \quad (2.1.6-5)$$

$$[(P_{s0,m} - P_{s2,m}) \times (P_{t,q} - P_{s2,m})] \cdot \vec{N}_{t,m} \geq 0 \quad (2.1.6-6)$$

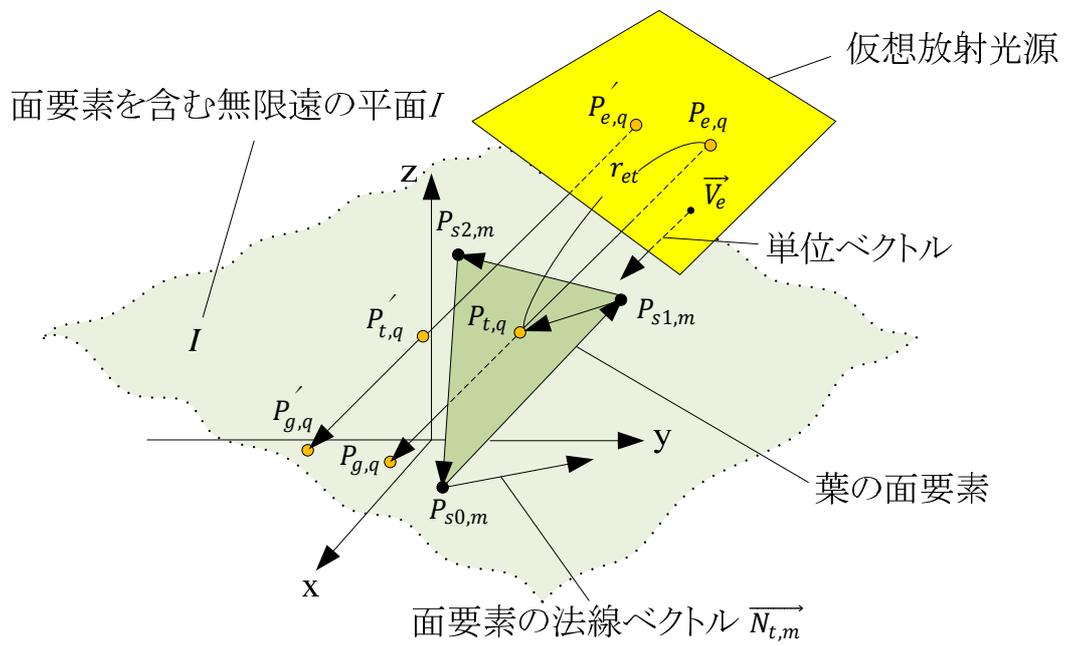


図 2.1.6-1 光子が葉モデルの面要素を通過するモデル

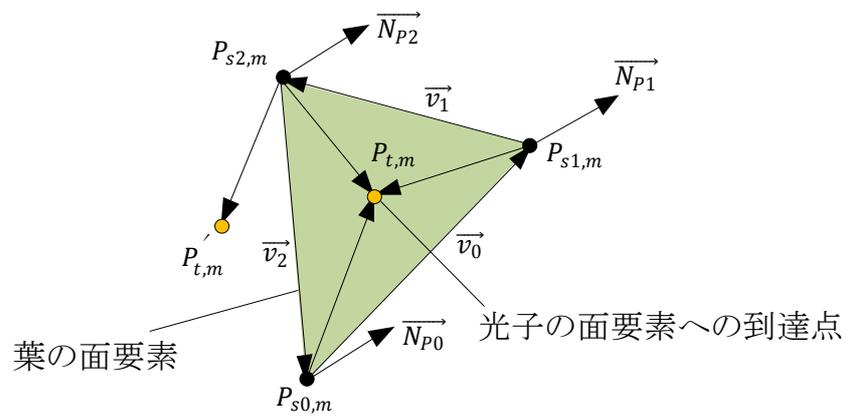


図 2.1.6-2 面要素への光子到達点内包確認モデル

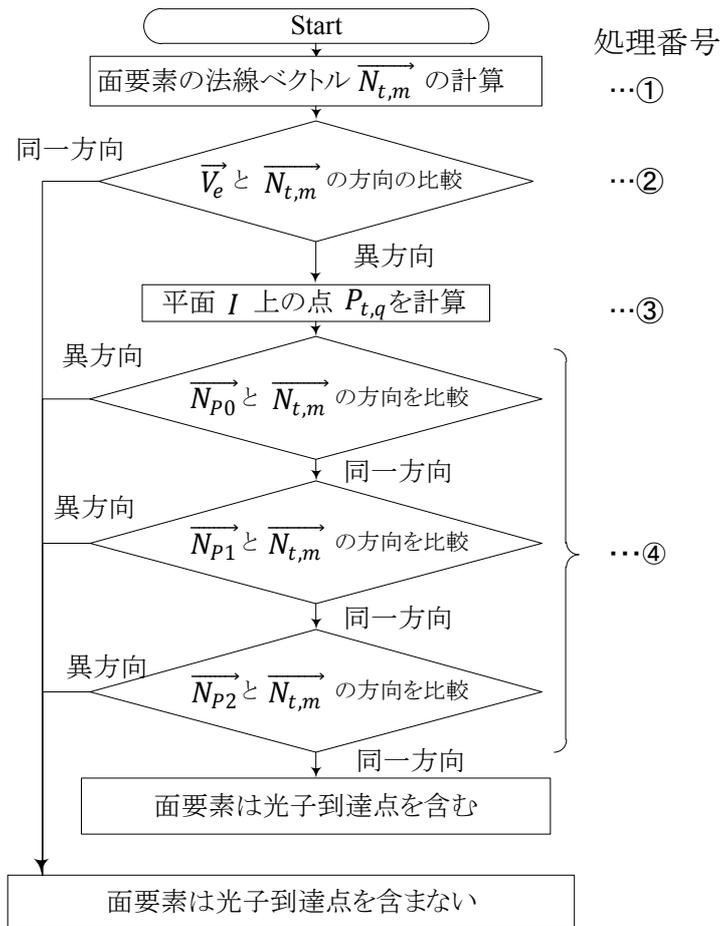


図 2.1.6-3 面要素への光子到達点内包確認フロー

### 2.1.7 植物シュートの受光量

ある代表日において、1日を通して仮想放射光源から放射されて葉に到達した光子の総数を受光量と定義する。仮想放射光源の位置は各時刻での太陽位置を模擬して、サンプリング時刻  $st$  毎に仮想放射光源の方位角  $V_{s,\theta}$  と仰角  $V_{s,\phi}$  を変化させる。式 (2.1.7-1) は各サンプリング時刻  $st$  毎に植物シュートに到達する総光子数  $J_t$  の計算式である。式の  $E_{w,k,st}$  は、時刻  $st$  に葉  $w$  の面要素  $k$  に到達する光子数を示す。また、 $J_e$  は、葉の面要素数、 $J_l$  は葉の数である。葉に衝突した光子は全て葉に吸収され、反射、透過は考慮しないものとする。

$$J_t = \sum_{w=0}^{J_l} \sum_{k=0}^{J_e} E_{w,k,st} \quad (2.1.7-1)$$

### 2.1.8 LAPS に用いる GA の適応度

LAPS は植物シュートの形態を受光密度が最大になるように最適化する。使用する染色体モデルは、各葉枝の成長方向 ( $S_{\phi,sn}, S_{\theta,sn}$ ) 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  $sn$  は葉枝の番号を表す。式 (2.1.8-1) は一般的な受光密度の式で、式中の分子は植物シュートがある代表日 1 日に受光する受光量  $\sum_{t=0}^{Day} J_{t,u}$  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 2.1.8-1)。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 2.1.8-1 の値を与えて、各個体の適応度を式 (2.1.8-1) で計算した結果を図 2.1.8-2 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  $\sum_{t=0}^{Day} J_{t,u}$  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 に近づくと適応度が急激に大きくなっている。式 (2.1.8-1) 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 2.1.8-3 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 (2.1.8-1) を用いると、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 2.1.8-3 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 (2.1.8-1) 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。

そこで本論文では、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 (2.1.8-2))。式 (2.1.8-2) 中の  $a$  は重みである。式 (2.1.8-2) 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 (2.1.8-3))。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 (2.1.8-4) で定義する。式 (2.1.8-4) 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 (2.1.8-5) で定義する。式 (2.1.8-2) から式 (2.1.8-5) 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 2.1.8-2 中の赤色のデータは GA の解析に用いた個体数を 14 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 2.1.8-1 を用いて式 (2.1.8-2)

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 (2.1.8-2) 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．

$$\frac{\sum_{t=0}^{Day} J_{t,u}}{C_u} \rightarrow \text{Maximize} \quad (2.1.8-1)$$

$$\text{Fitness} : aF_{s,u} + (1-a)F_{o,u} \quad 0 \leq a \leq 1 \quad (2.1.8-2)$$

$$F_{s,u} = \frac{\sum_{t=0}^{Day} J_{t,u}}{\sum_{u=0}^{Population} \sum_{t=0}^{Day} J_{t,u}} \quad (2.1.8-3)$$

$$F_{o,u} = \frac{F_{d,u}}{\sum_{u=0}^{Population} F_{d,u}} \quad (2.1.8-4)$$

$$F_{d,u} = 1 - \frac{C_u}{\sum_{u=0}^{Population} C_u} \quad (2.1.8-5)$$

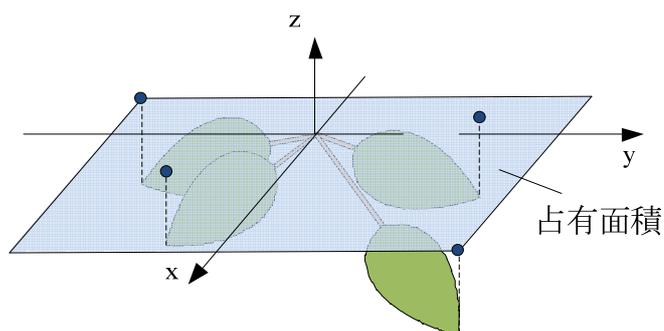


図 2.1.8-1 占有面積の定義

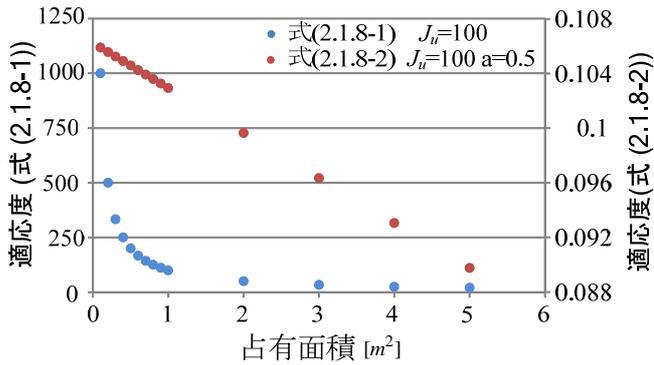


図 2.1.8-2 式による占有面積と適応度

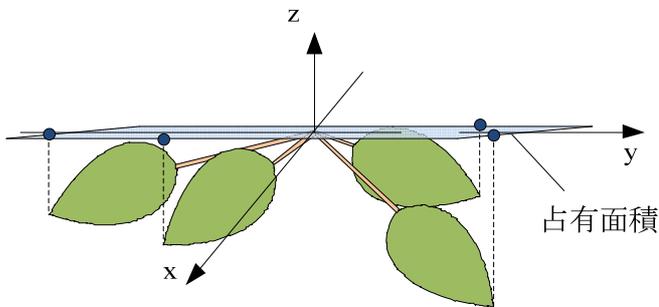


図 2.1.8-3 平面状に配置された植物シュート

表 2.1.8-1 各染色体の占有面積

	Occupation area [m <sup>2</sup> ]
Chromosome0	0.1
Chromosome1	0.2
Chromosome2	0.3
Chromosome3	0.4
Chromosome4	0.5
Chromosome5	0.6
Chromosome6	0.7
Chromosome7	0.8
Chromosome8	0.9
Chromosome9	1
Chromosome10	2
Chromosome11	3
Chromosome12	4
Chromosome13	5

## 2.1.9 LAPS の解析フロー

図 2.1.9-1 に LAPS の解析フローを示す。

手順①：初期情報の読み込み

葉モデルの形状，成長開始点，葉の数，仮想放射光源から放射される1日の光子の数，日射条件，GAのパラメータを読み込む。ただし，成長開始点の座標は(0,0,0)とする。

手順②：GAの第1世代の染色体情報を発生

GAで用いる染色体の初期世代を発生させる。染色体の数は葉の数で決まる。また，各染色体の値はランダムに与えられて，対応する葉枝の成長方向( $S_{\phi,sn}$ ,  $S_{\theta,sn}$ )および長さ( $S_{l,sn}$ )の情報を持つ。

手順③：葉の位置を決定

全ての葉枝は x- y- z 空間座標の原点から成長する．したがって，各染色体の情報を解析することとで得られる成長方向と長さから，それぞれの葉枝の空間座標内での姿勢は決定される．また，葉は葉枝と直線状に接続されるため，葉の位置も特定される．

手順④：光子の照射

2.1.5 項に示した方法でサンプリング時刻  $st$  の仮想放射光源の位置で光子を 1 個放射する．

手順⑤：光子の葉への到達確認

2.1.6 項に示した方法で光子の葉への到達を確認する．手順④と⑤を日射条件で与えられる各サンプリング時刻  $st$  の放射光子数  $nq_{g,st}$  回繰り返す．また，サンプリング時刻  $st$  での光子の放射を終えると， $st$  に 1 を加えて 23 時になるまで手順④と⑤を繰り返すことで 1 日分の全光子  $N_a$  を放射する．この過程で葉に到達した光子の合計が 1 日の受光光子数  $\sum_{t=0}^{Day} J_{t,u}$  になる．また，手順③から手順⑤までの処理をすべての染色体に対して行う．

手順⑥：適応度の計算

手順⑤で得られた受光光子数と植物シュートの占有面積から式 (2.1.8.-2) を用いて各染色体モデルの適応度を計算する．

手順⑦：遺伝子操作

手順⑥までで第 1 世代の染色体に対する処理は終わり，第 2 世代を発生させるために第 1 世代の各染色体に交叉，突然変異，エリート選択，ルーレット選択，淘汰の遺伝子操作を行う．次に，第 2 世代のそれぞれの染色体から得られる葉枝の成長方向と長さを手順③に適用することにより第 1 世代よりも適応度の高い植物シュートを得る．さらに手順④から手順⑥の処理を行い，さらに遺伝子操作を行うことにより第 3 世代の染色体を得る．この処理を初期情報の GA のパラメータで決められた世代数繰り返すことで適応度の高い染色体情報が得られる．ここまでの処理で 1 枚目の葉の最適な位置が決定される．手順①で読み込んだ葉の数が 2 枚以上の場合は手順②に戻り 2 枚目以降の葉の位置を最適化する．この時すでに最適化された葉を含んだモジュール全体の適応度が最大になるように GA が適用される

手順⑧：植物シュート形態の決定

初期条件で設定された葉の数だけ手順③から⑦まで繰り返すことにより，本論文の目的である代表日の受光密度の高い植物シュート形態が得られる．

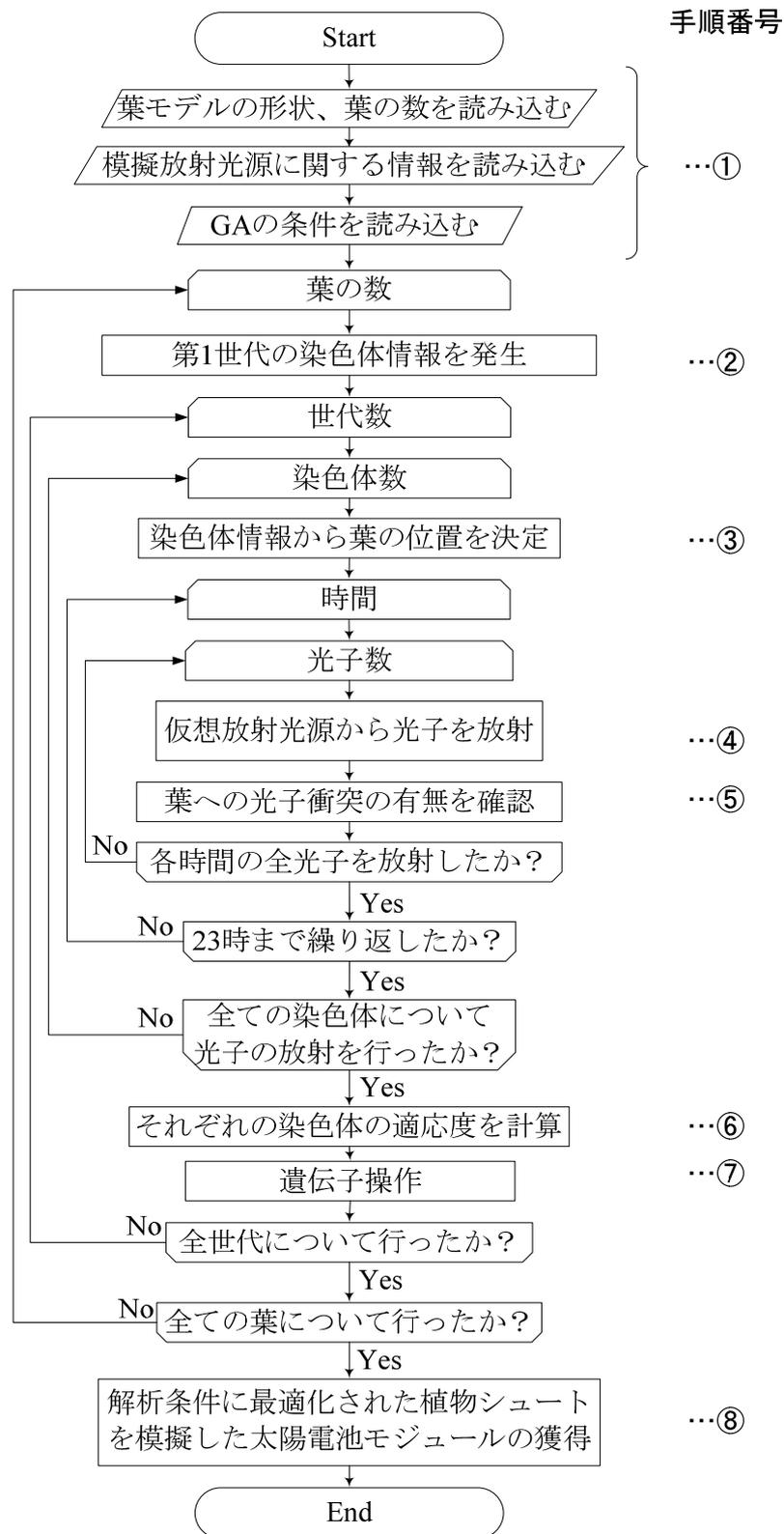


図 2.1.9-1 LAPS の解析フロー

## 2.2 LAPS による解析事例

### 2.2.1 解析対象

本論文では LAPS によって、夏至と冬至それぞれの日射条件に最適化された植物シュートを模擬した太陽電池モジュールの形態を、イチヨウ、ヤマモミジ、ハナミズキ、正方形の葉の場合について求める。それぞれの葉は図 2.1.4-1 の形状を用いる。また、すべての葉の 1 枚の面積は  $0.11\text{m}^2$  である。

本解析に用いる夏至の日射条件は年間を通して日射時間が最も長く、一方、冬至は最も短い。この両極端な日射条件について解析を行い植物シュートの形態を得ることによって、その他の時期は本論文で得られる 2 種類の形態の間の形態を持つと考えられる。

### 2.2.2 解析条件

#### 2.2.2.1 LAPS のパラメータ

LAPS で解析を行う場合、解析条件として決める必要がある植物シュートのパラメータは葉枝の成長方向 ( $S_{\phi,sn}$ ,  $S_{\theta,sn}$ ) および長さ ( $S_{l,sn}$ ) の値の範囲、扱う葉の数である。葉枝の成長方向は自然界の植物を観察して与える値の範囲を決めた。方位角は  $-180$  から  $180$  度までで全方位角を持つことができる。仰角は  $0$  から  $90$  度までの値を持つことにした。したがって、地面と水平から真下を向いた状態まで表現できる。

ここで、LAPS で扱う植物シュートは 1 点より複数の葉枝が生じる形態である。したがって、葉枝の長さが短いと葉枝の先端に接続される葉同士の重なりが増えてしまい、受光量が減ることによって受光密度が低下すると考えられる。一方、葉枝の長さが長すぎても占有面積が大きくなってしまい、受光密度は下がると考えられる。したがって、受光密度が最大になる形態とは、受光量と占有面積のバランスが取れた形態ということになる。

また、LAPS では葉枝の成長方向と長さを GA によって最適化するが、最適化対象が取りうる値の範囲が広がると、解の分解能が低下してしまい解析結果の精度が低下する。遺伝子のサイズを大きくすれば分解能を高めることができるが解析時間が長くなってしまふ。したがって、解析で取りうる最適な値の範囲を決めることは非常に重要である。成長方向はすでに述べたように、自然界の植物を観察して値の範囲を決めた。葉枝の長さは多種多様で、自然界の植物の観察によって適切な値の範囲を決めることができなかつた。そこで、次節で予備実験を行い、解析で用いる葉枝の長さの範囲を決定する。

また、LAPS で扱う葉の数も受光量や受光密度に大きな影響を与えると考えられる。LAPS では、扱う葉の数を自由に変更することができるが、葉の数が多くなると葉同士の重なりが増えてしまうことによる受光効率の頭打ちが考えられ、さらに、解析にかかる時間も長くなってしまう。そこで、最適な葉の数を選択する必要がある。そこで、予備解析として夏至の場合について葉枝の長さ、葉の数の条件を変えながら解析を行い、解析に最適な条件を求める。

#### 2.2.2.2 GA のパラメータ

試行錯誤の結果から、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  $0.34 \times 10^{-3}$  度、仰角が  $86 \times 10^{-6}$  度、長さが  $0.286 \times 10^{-3}$  mm である。

#### 2.2.2.3 日射条件

本論文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 $V_{s,\varphi}$ )を図 2.2.2.3-1 に示す。さらに理論水平面日射量を図 2.2.2.3-2 に示す<sup>[39]</sup>。また、一日に仮想放射光源から放射する全光子数 $N_a$ は夏至、冬至ともに 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 2.2.2.3-1 に示す太陽位置に設定して時刻ごとに変化させる。また、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 2.1.5-1 から図 2.2.2.3-3 の結果が得られる。

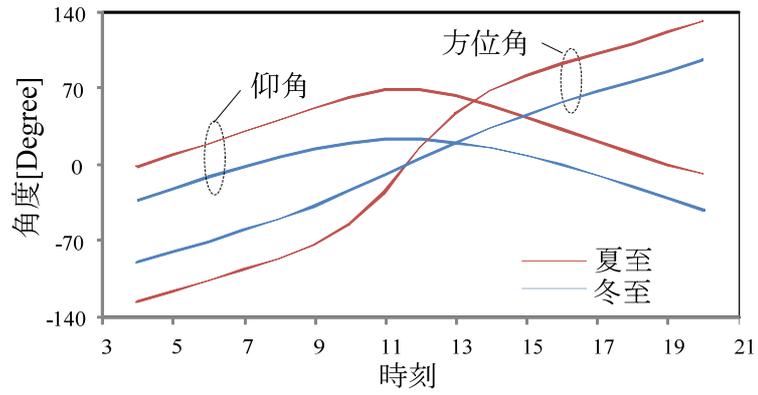


図 2.2.2.3-1 札幌での夏至と冬至の太陽の位置

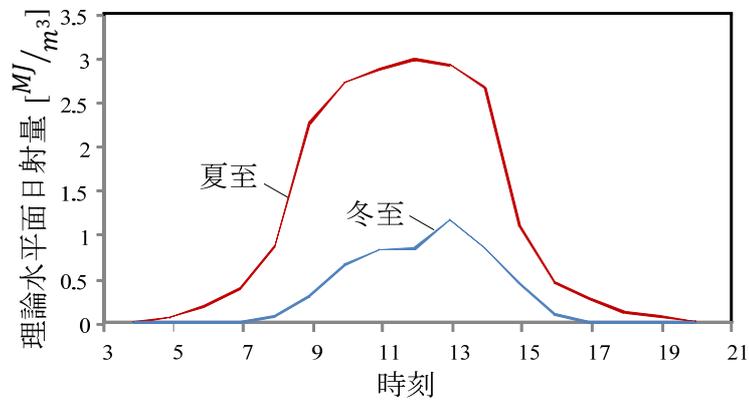


図 2.2.2.3-2 夏至と冬至の理論水平面日射量

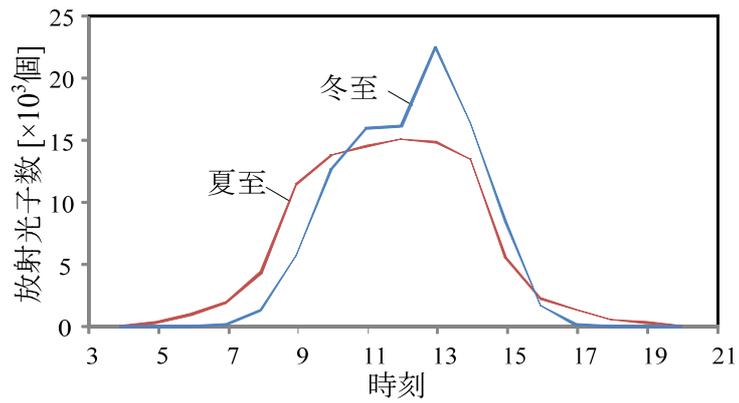


図 2.2.2.3-3 仮想放射光源から放射される光子数

### 2.2.3 予備解析

LAPSによる解析で使用する葉枝の最大長と葉の数を決定するために予備解析を行った。葉枝の最大長を100 mm,200 mm,300 mm,400 mmの4種類として、さらに夏至の日射条件で葉の数を1枚から10枚まで変化させてLAPSによる解析を4種類の葉それぞれに行った。図2.2.3-1から図2.2.3-4のグラフに横軸を葉の数として、それぞれの葉枝の最大長における占有面積を縦軸に示した。また、図2.2.3-5から図2.2.3-8のグラフに横軸を葉の数として、それぞれの葉枝の最大長における受光量を縦軸に示した。

図2.2.3-1から図2.2.3-4に着目すると、4種類の葉いずれにおいても、葉の数が増えると占有面積は増えている。特に葉枝の最大長が長くなると占有面積の増加も大きくなっている。また、葉枝の最大長が短いほど少ない葉の数で占有面積増加の頭打ちが起きている。このことから、葉枝の最大長が短いほど葉の設置場所に自由度が少なくなり、少ない葉の数で葉同士の重なりが発生していると考えられる。また、イチョウとヤマモミジに注目すると、葉枝の最大長が300mmと400mmにおいて、葉の数と占有面積の関係に大きな差が見られない。これは、予備解析では葉の数を1から10枚まで変化させているが、この葉の数では葉枝の最大長が300 mmあれば、葉同士の重なりを十分に少なくすることができるためだと考えられる。

次に受光量について着目すると、4種類の葉いずれにおいても、図2.2.3-5から図2.2.3-8より葉の数の増加に伴い受光量が増えている。葉枝の最大長が100mmや200mmでは、葉の数が4枚を超えたあたりから受光量の増加が緩やかになっている。これは、葉同士の重なりが増えているためだと考えられる。また、葉枝の最大長が300mmと400mmでは、葉の数が4枚を超えると受光量の増加は緩やかになるが、100mmや200mmの場合ほどの落ち込みは見られない。また、葉枝の最大長が300mmと400mmでは、葉の数に対する受光量の値が非常に近くなっている。これは、葉枝の最大長が300mmあれば、十分に葉同士の重なりを防ぐことができているためだと考えられ、占有面積の結果と同じ傾向を確認することができた。

以上のことから、解析に使用する葉枝の最大長は300mmが最適だと結論付けた。また、葉枝の長さが300mmの場合は、葉の数が6枚から8枚あたり占有面積の増加が鈍化している。そこで、解析に使用する葉の数は10枚とする。

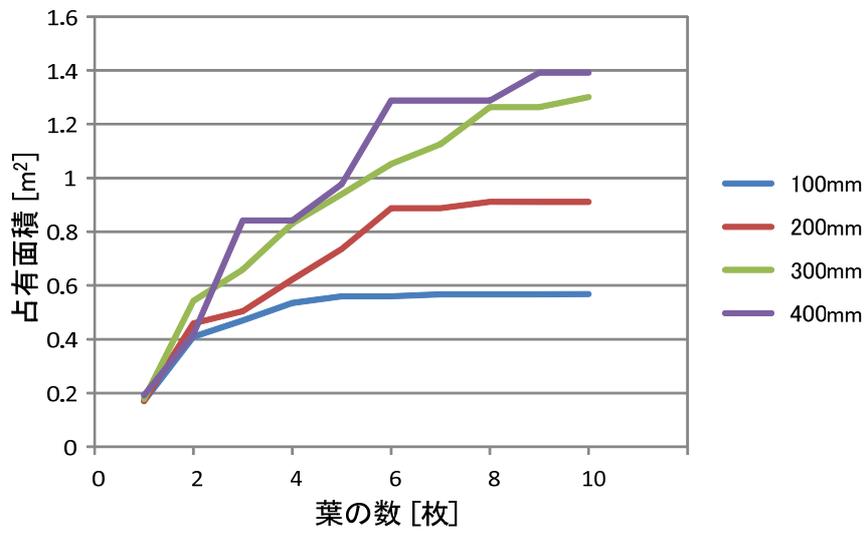


図 2.2.3-1 イチョウの葉における葉枝の最大長と占有面積

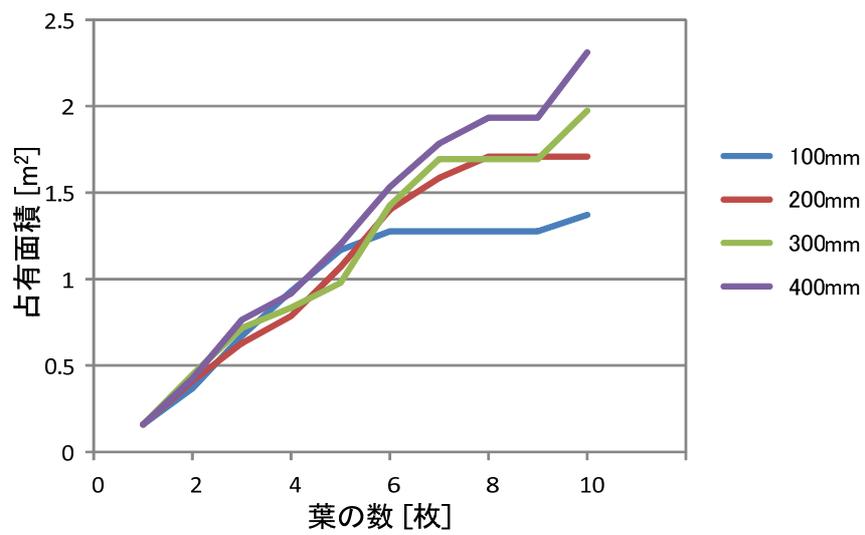


図 2.2.3-2 ハナミズキの葉における葉枝の最大長と占有面積

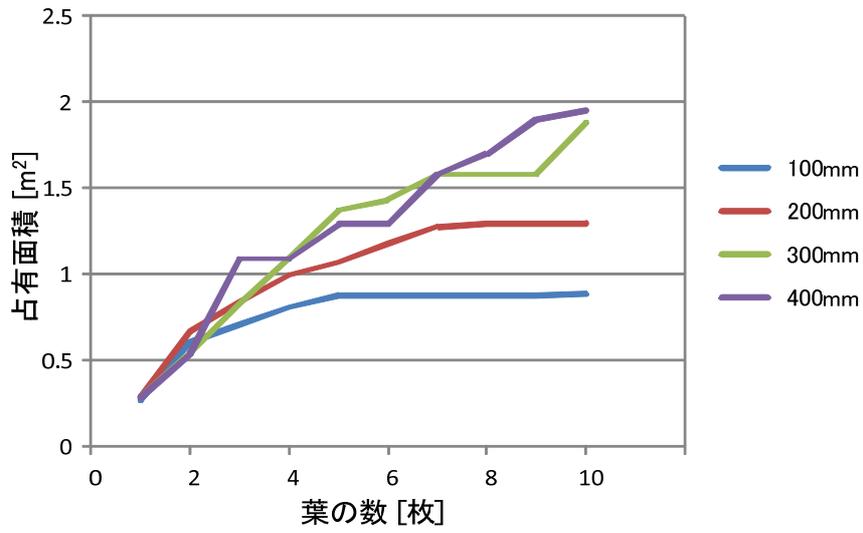


図 2.2.3-3 ヤマモミジの葉における葉枝の最大長と占有面積

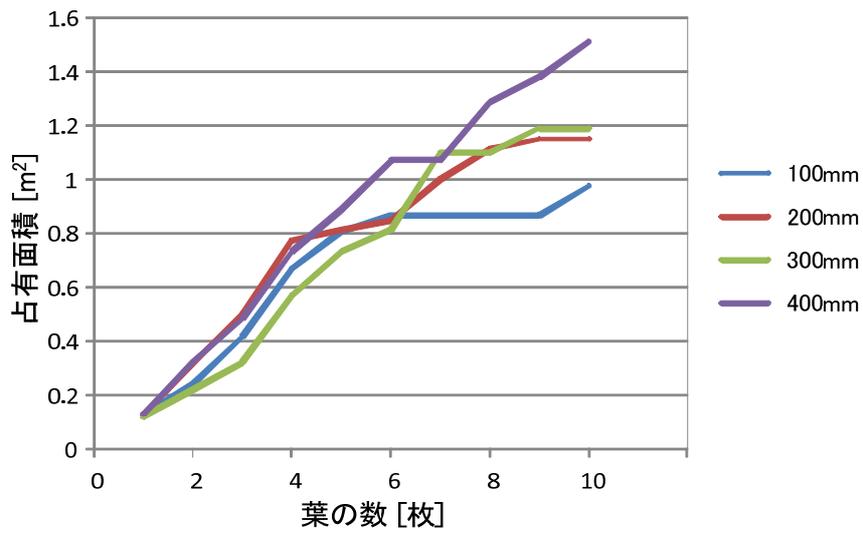


図 2.2.3-4 正方形の葉における葉枝の最大長と占有面積

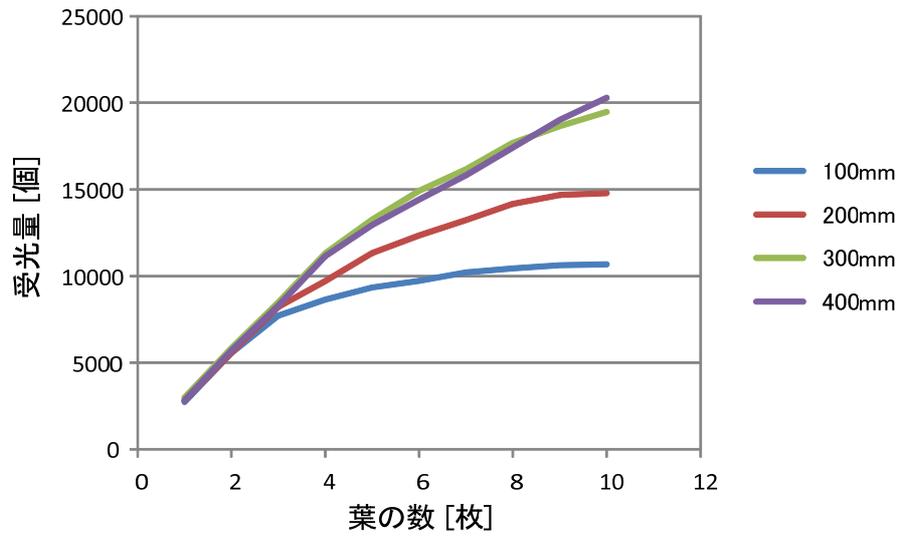


図 2.2.3-5 イチョウの葉における葉枝の最大長と受光量

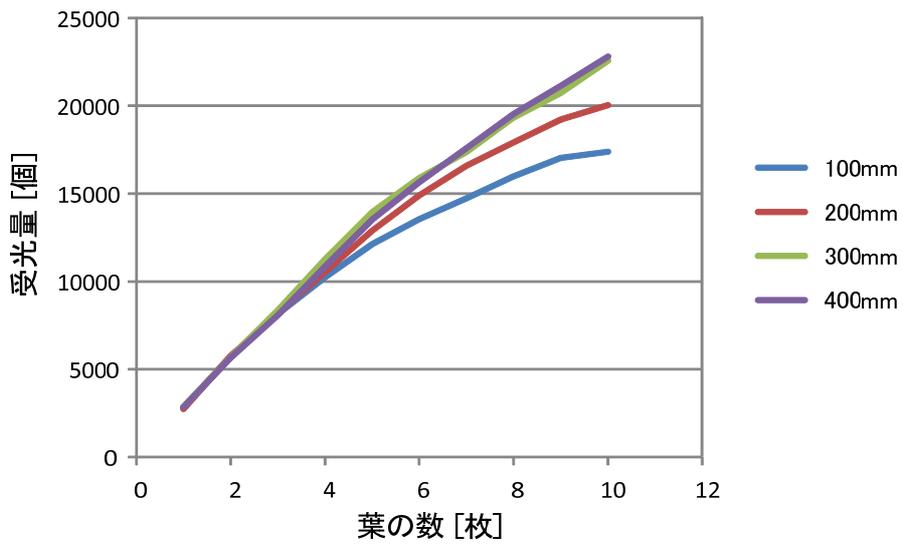


図 2.2.3-6 ハナミズキの葉における葉枝の最大長と受光量

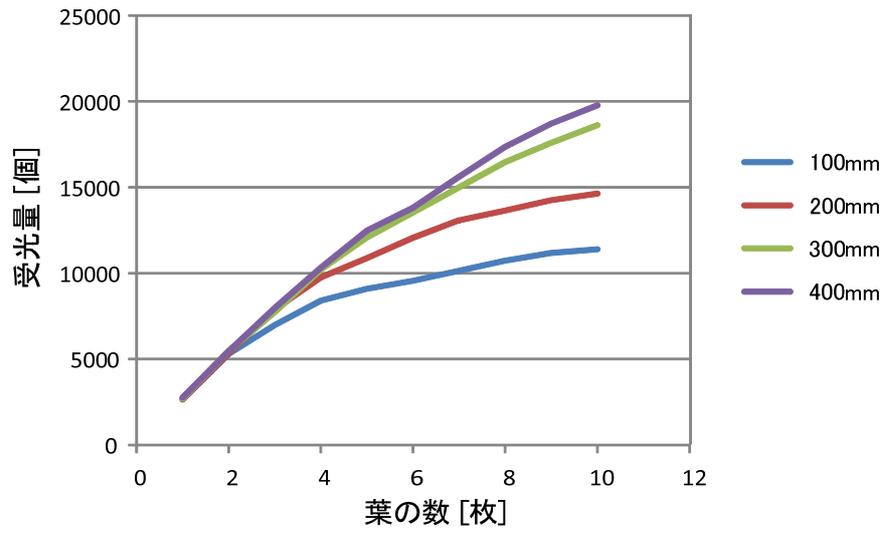


図 2.2.3-7 ヤマモミジの葉における葉枝の最大長と受光量

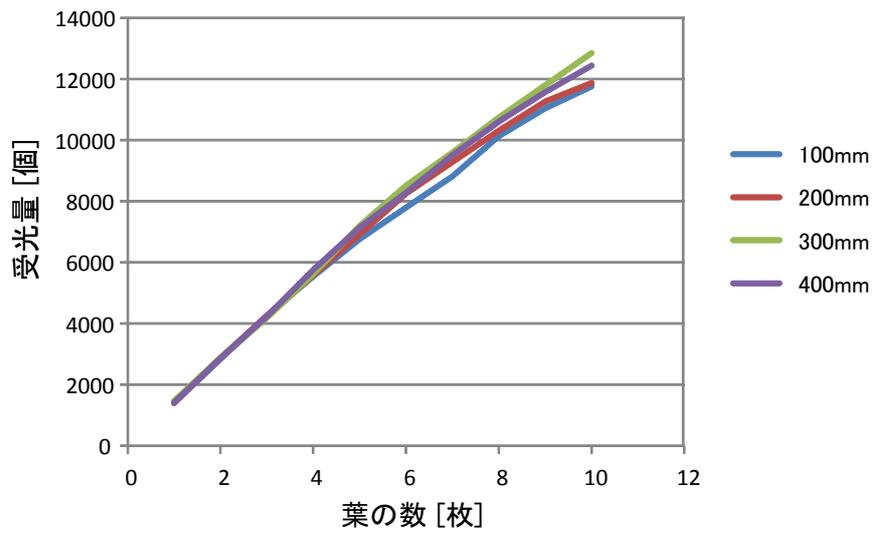


図 2.2.3-8 正方形の葉における葉枝の最大長と受光量

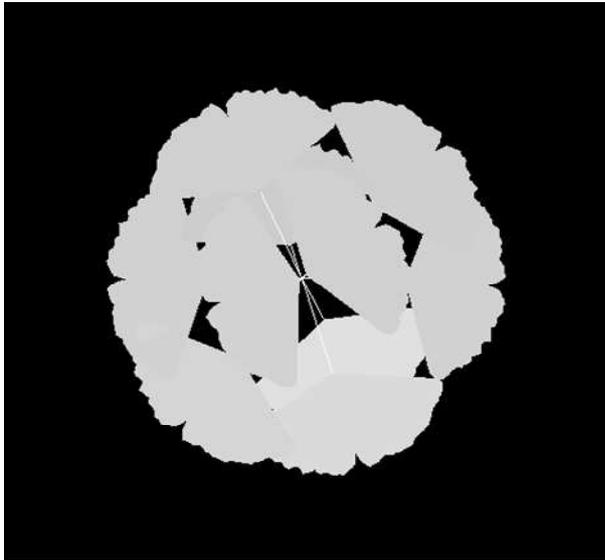
## 2.3 LAPS による解析結果と考察

### 2.3.1 植物シュートの形態

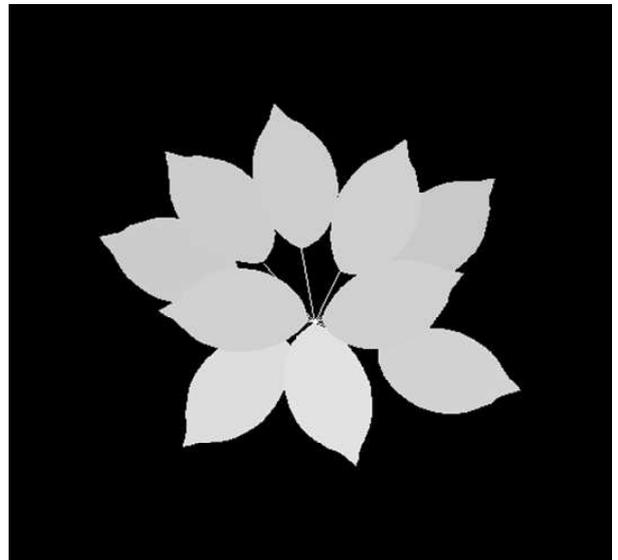
#### 2.3.1.1 夏至に最適化したモジュールの形態

夏至の日射条件に最適化されたイチョウ、ハナミズキ、ヤマモミジ、正方形の葉を持つ植物シュートを模擬した太陽電池モジュールの形態を図 2.3.1.1-1 から図 2.3.1.1-3 に示す。図 2.3.1.1-1 は各モジュールを上から見た図であり、図の下が南方向である。また、図 2.3.1.1-2 は南方向から、図 2.3.1.1-3 は西方向から各モジュールを見た図である。図 2.3.1.1-1 から図 2.3.1.1-3 より、葉の種類に関係なくすべての葉が上方向を向いて設置されていることが分かる。これは、夏至の日射は図 2.2.2.3-3 から 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 時の仮想放射光源の位置に葉を向けると最も受光量が多くなるためであり、この時間の仮想放射光源の仰角  $V_{s,\varphi}$  の値は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 2.3.1.1-1 に注目すると、LAPS では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。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。予備解析で葉の数が 6 から 8 枚以上では占有面積の増加が鈍化することを示したが、これは葉が 6 枚から 8 枚になった時点で葉の配置が図 2.3.1.1-1 に示した円状に近づいたためだと考えられる。また、この円の外側に葉を配置すると占有面積が増えてしまい、受光密度が下がってしまうため、9 枚以降の葉はこの円の範囲内に設置されることが考えられる。

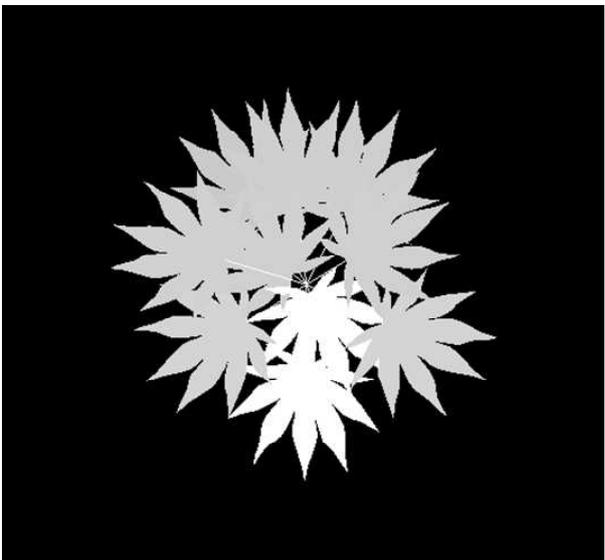
葉の形状による違いとして、図 2.3.1.1-1 から各葉を上から見るとイチョウの葉が最も隙間がなく効率よく葉を並べられていて、占有面積内に葉が効率よく敷き詰められていることがわかる。これは、イチョウの葉が円の一部分を切り取った形状になっているため、複数枚を組み合わせると円状に配置しやすい形状であるためだと考えられる。一方、分裂葉であるヤマモミジでは、葉を隙間なく敷き詰めることが難しく、また重なりも多くなっているため、占有面積内の葉の面積はイチョウと比較して少なくなっている。また、ハナミズキと正方形の葉も占有面積内の葉の面積はイチョウと比較して少ない。



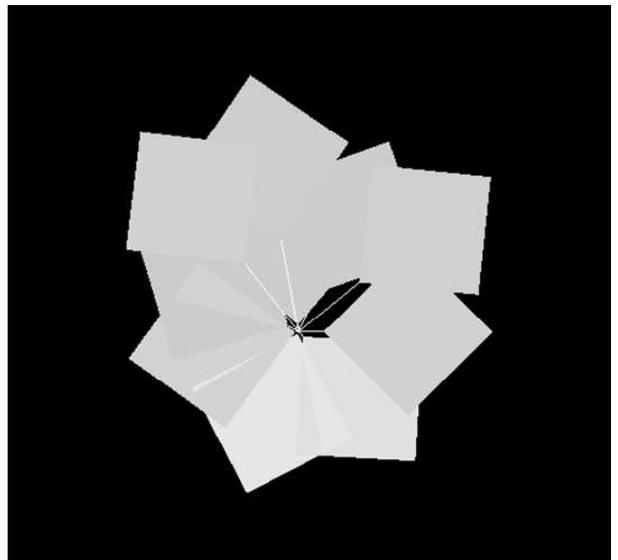
イチョウ



ハナミズキ

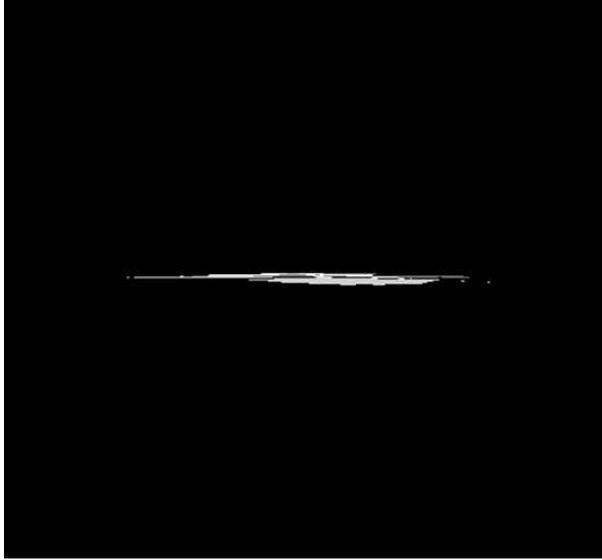


ヤマモミジ

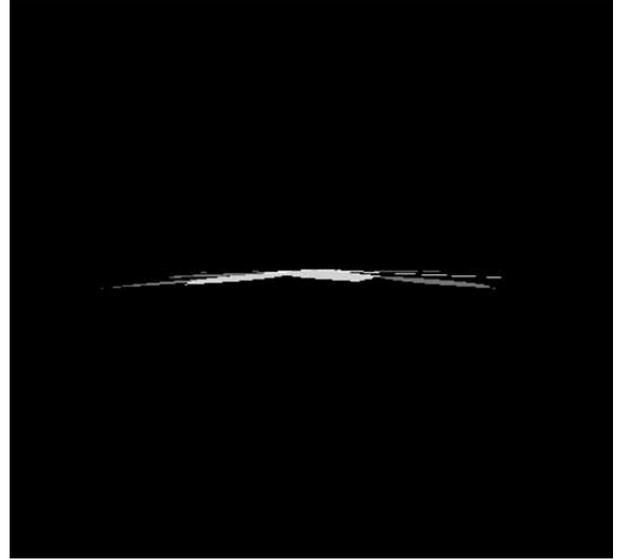


正方形

図 2.3.1.1-1 各モジュールを上から見た図



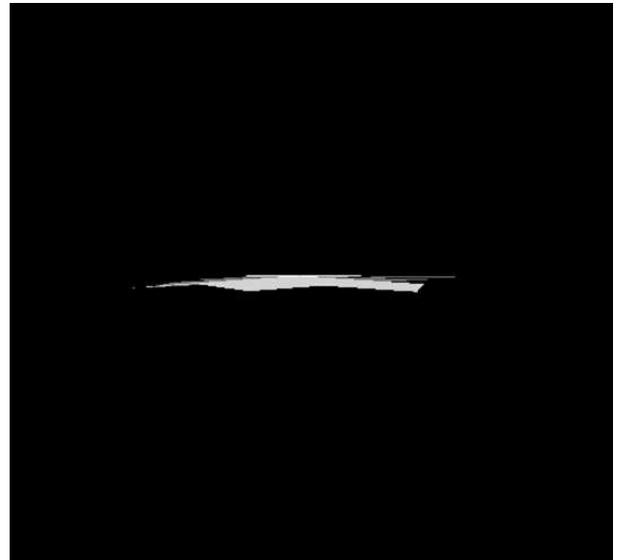
イチョウ



ハナミズキ

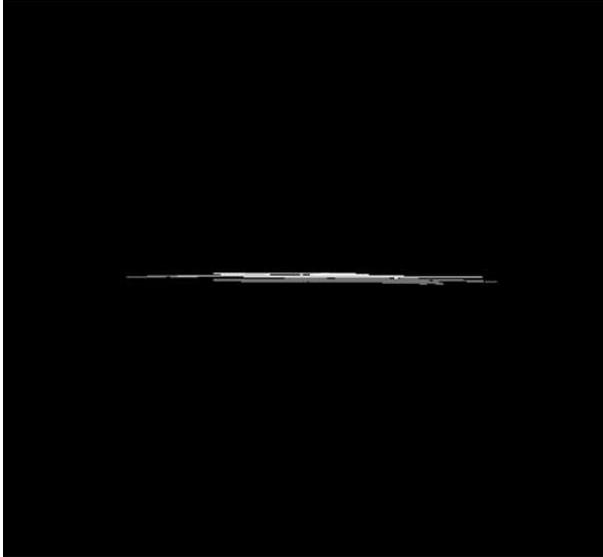


ヤマモミジ



正方形

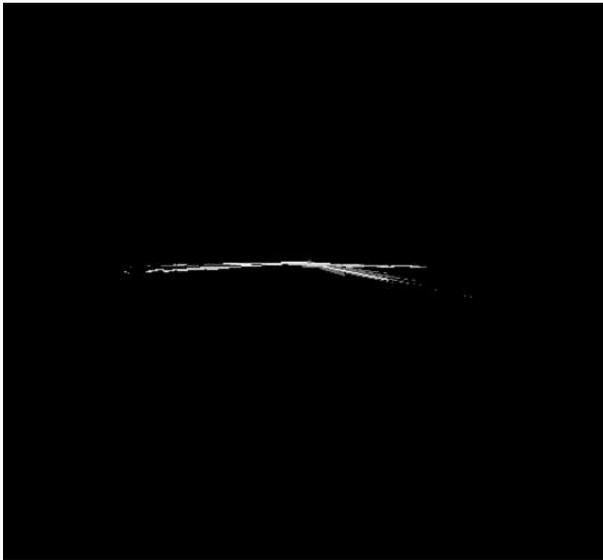
図 2.3.1.1-2 各モジュールを南から見た図



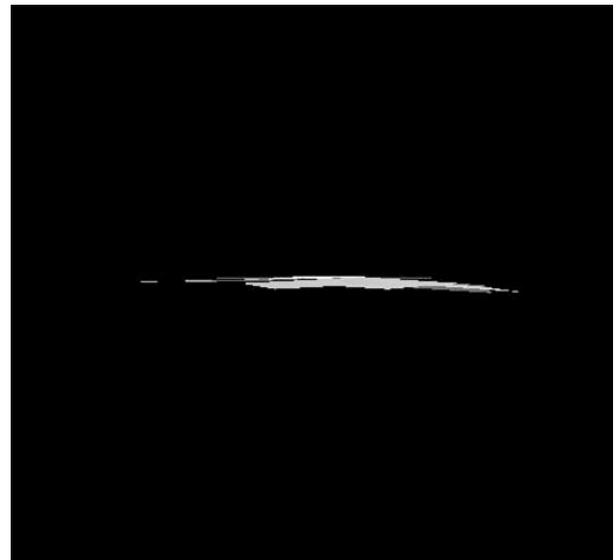
イチョウ



ハナミズキ



ヤマモミジ



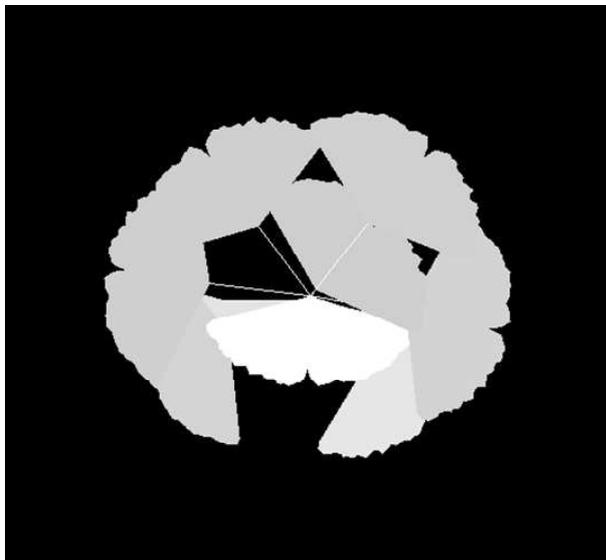
正方形

図 2.3.1.1-3 各モジュールを西から見た図

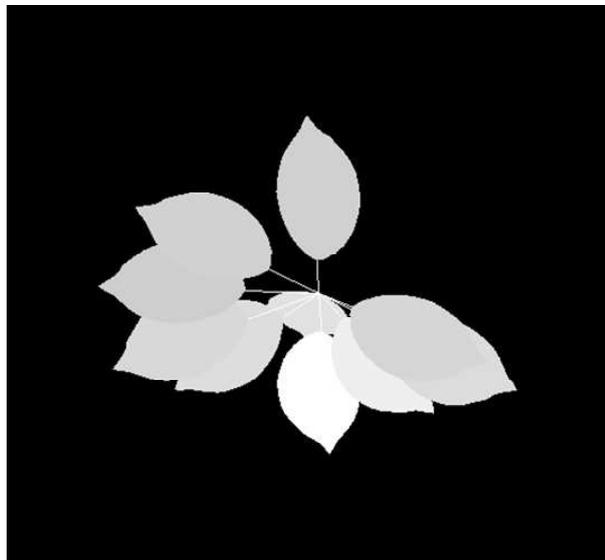
### 2.3.1.2 冬至に最適化したモジュールの形態

冬至の日射条件に最適化されたイチョウ、ハナミズキ、ヤマモミジ、正方形の葉を持つ植物シュートを模擬した太陽電池モジュールの形態を図 2.3.1.2-1 から図 2.3.1.2-3 に示す。図 2.3.1.2-1 は各モジュールを上から見た図であり、図の下が南方向である。また、図 2.3.1.2-2 は南方向から、図 2.3.1.2-3 は西方向から各モジュールを見た図である。

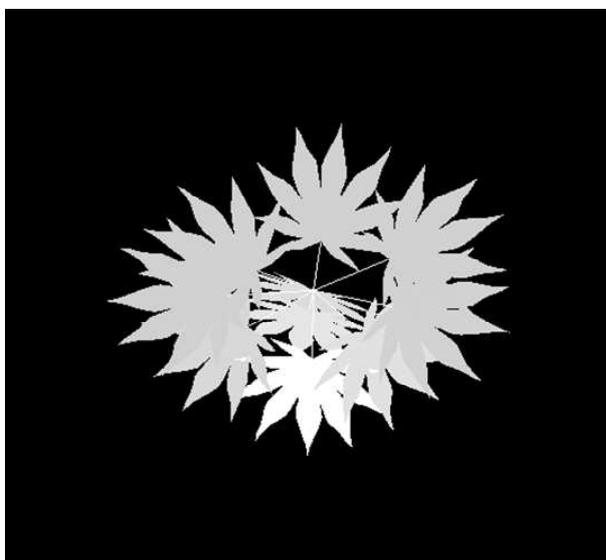
図 2.3.1.2-1 と図 2.3.1.2-2 からすべての葉の種類で南向きに設置された葉が多いことが分かる。これは、図 2.2.2.3-1 から、冬至では仰角 $V_{s,\varphi}$ の値が年間を通して最も小さく、方位角 $V_{s,\varphi}$ の変化幅も狭いので、太陽は南の空の狭い範囲で移動する。したがって、モジュールは南方向から水平に近い角度で日射を受ける。このことから、葉は南向きに設置されたときに最大の受光量が得られると考えられる。しかし、図 2.3.1.2-3 に着目すると多くの葉が上方向を向いて設置されている。これは、LAPS で扱う植物シュートは 1 点から葉枝が発生するため多くの葉を南向きに配置すると葉同士の重なりが増えてしまうため、少量でも受光するために南以外の方向に葉の重なりが少なくなるように設置された結果であると考えられる。



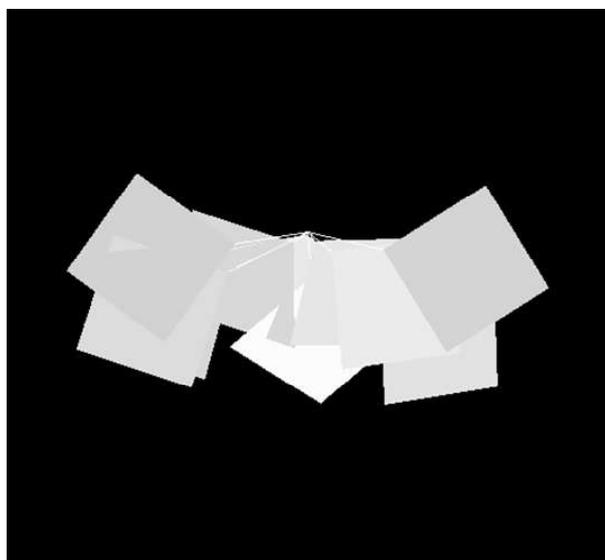
イチョウ



ハナミズキ

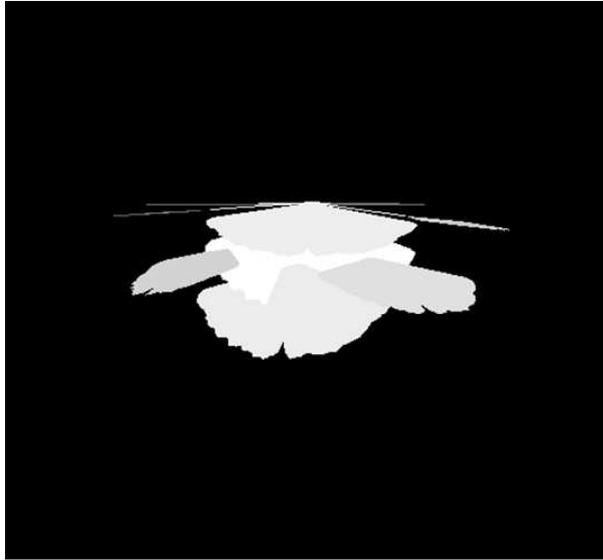


ヤマモミジ

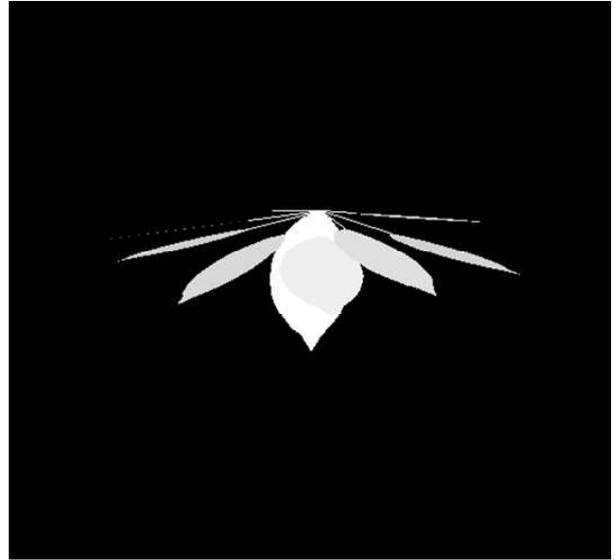


正方形

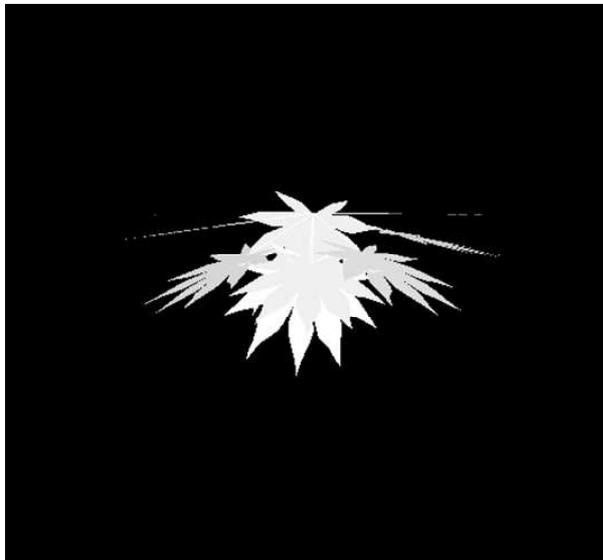
図 2.3.1.2-1 各モジュールを上から見た図



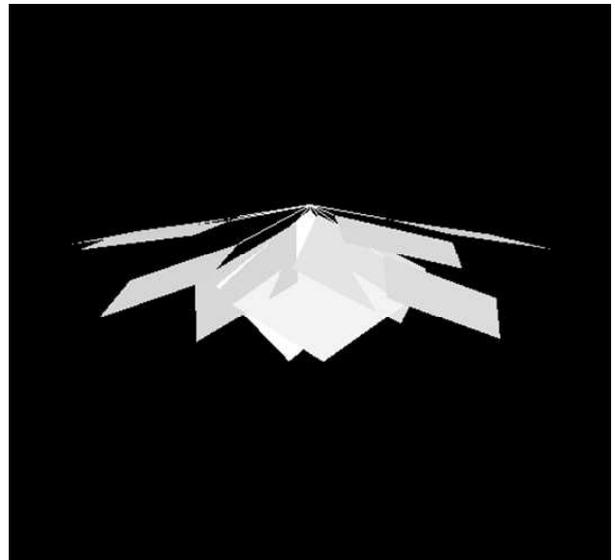
イチョウ



ハナミズキ

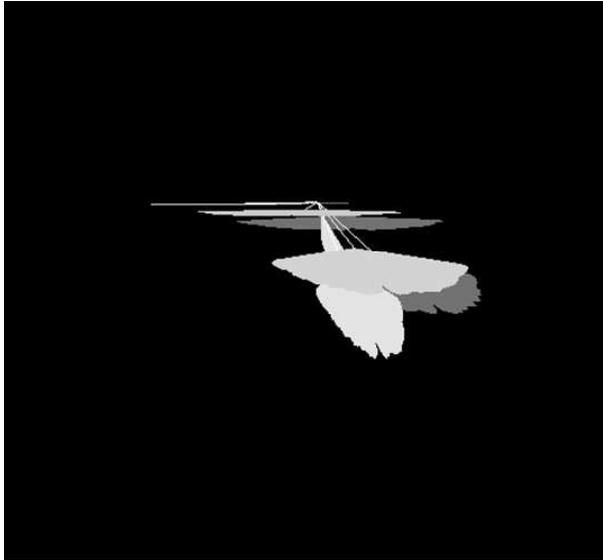


ヤマモミジ

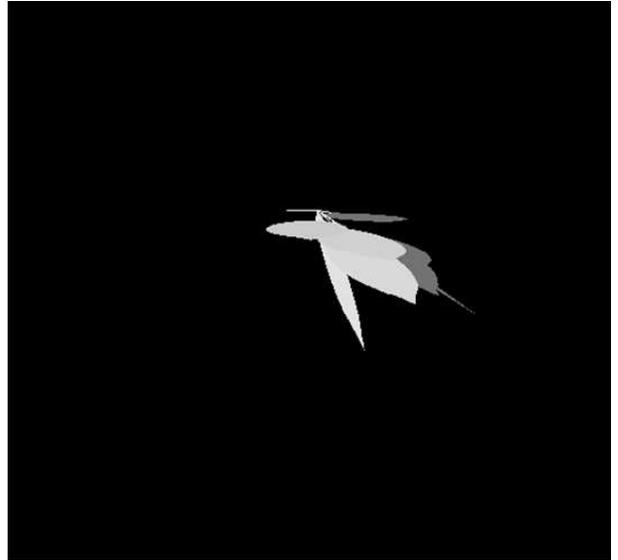


正方形

図 2.3.1.2-2 各モジュールを南から見た図



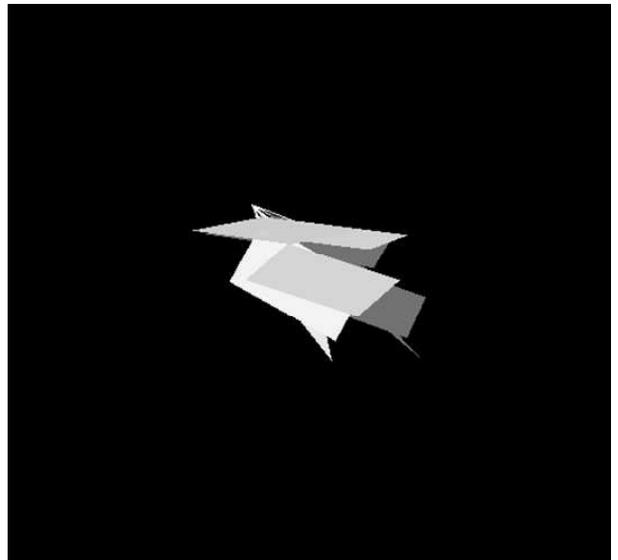
イチョウ



ハナミズキ



ヤマモミジ



正方形

図 2.3.1.2-3 各モジュールを西から見た図

## 2.3.2 各モジュールの受光特性

### 2.3.2.1 LAPS で最適化されたモジュールの受光量の結果

LAPS によって夏至および冬至の日射条件に最適化された植物シュートを模擬した太陽電池モジュールの受光量を図 2.3.2.1-1 と図 2.3.2.1-2 に示す。夏至および冬至の日射条件において、葉の数の増加とともに受光量が増加することを確認できた。

夏至の日射条件ではハナミズキの葉のモジュールがすべての葉の数において最も優れた受光量を示した。これは、図 2.2.2.3-1 からわかるように、夏至の日射条件では多くの光子が上方向からモジュールに照射される。また、すべての葉の形状で葉 1 枚当たりの面積は同じである。したがって、上方向からの図 2.3.1.1-1 において、最も葉の重なりが少ないモジュールが最も受光面積が大きくなり受光量が最大になる。図 2.3.1.1-1 のハナミズキの葉のモジュールが最も葉の重なりが少ないことから確認できる。また、イチョウの葉とヤマモミジの葉の場合はすべての葉の数において、ほとんど受光量が同じになった。

また、LAPS による解析結果は自然界のロゼット型に類似している<sup>[40]</sup>。多くのロゼット型の植物は細長い形状の葉を持つため、ロゼット型で最も受光効率が高い形状の葉は細長い葉だと言える。本解析で使用した葉で一番近いのはハナミズキの葉であり、最も高い受光量を示した。したがって、この結果は自然界における植物の進化の結果と一致する。

冬至の日射条件では、イチョウ、ハナミズキ、ヤマモミジの葉は全ての葉の数において、近い値の受光量を示した。これは図 2.2.2.3-1 からわかるように、冬至の日射条件では多くの光子が南方向から低い仰角でモジュールに照射される。したがって、地面に対して垂直に近い角度で南向きに設置された葉の受光量が多くなる。しかし、LAPS は 1 点から葉を成長させるために、モジュールの中でこの理想的な条件で設置できる葉は、葉の形状によらず少ないと考えられる。これは、グラフの傾きが夏至の場合と比較して小さく、葉 1 枚当たりの受光量が少ないことから確認できる。

また、夏至および冬至の日射条件において、正方形の葉のモジュールは他の葉のモジュールと比較して受光量が著しく小さくなっている。

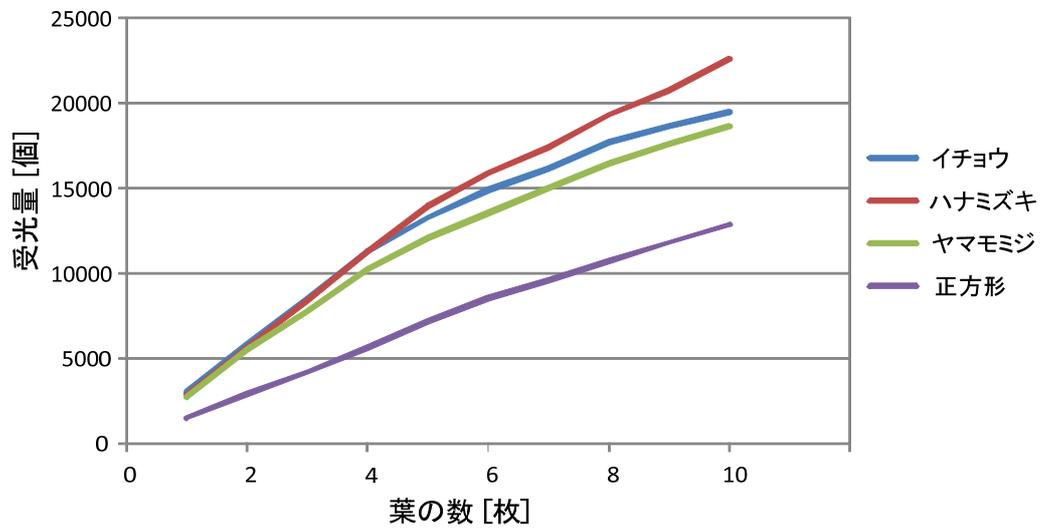


図 2.3.2.1-1 夏至における各モジュールの受光量

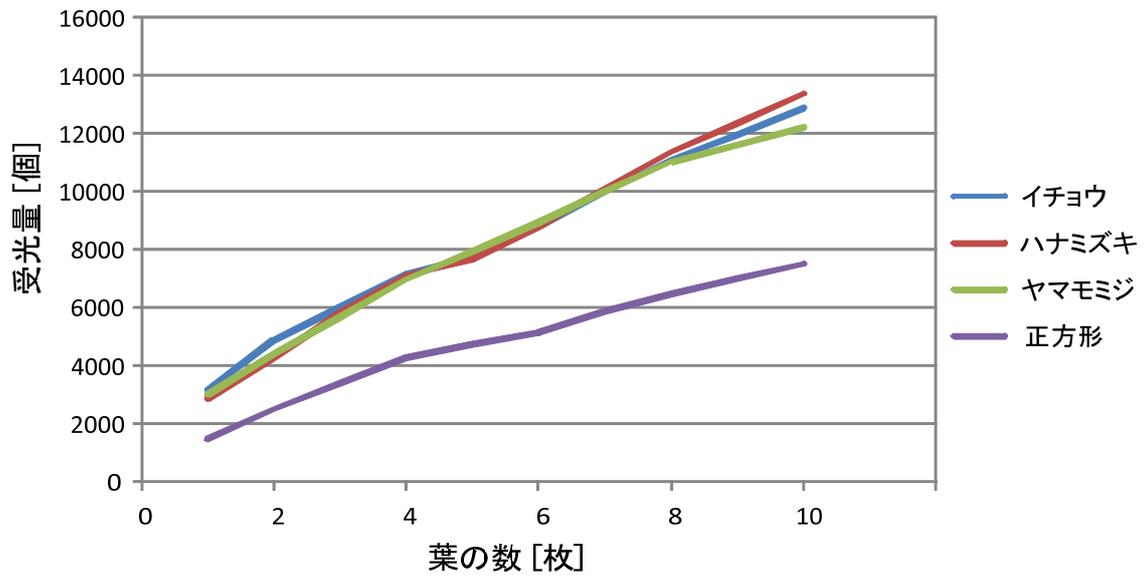


図 2.3.2.1-2 冬至における各モジュールの受光量

### 2.3.2.2 LAPS で最適化されたモジュールの占有面積の結果

LAPS によって夏至および冬至の日射条件に最適化された植物シュートを模擬した太陽電池モジュールの占有面積を図 2.3.2.2-1 と図 2.3.2.2-2 に示す。夏至および冬至の日射条件において、葉の数の増加とともに占有面積が増加するが、葉の数に比例して増え続けるわけではなく、ある値で増加が鈍化することがわかった。

夏至の日射条件では、全ての種類の葉において、葉の数が 7 枚を超えたあたりから、占有面積の増加が鈍化している。これは、前節でも述べたが、夏至の日射条件では上方向から光子が照射されるため、上方向に向かって葉は配置される。この時葉同士の重なりを最小にするため葉は円状に配置される。この円が小さければ占有面積が小さくなる。イチョウと正方形の葉が、ハナミズキやヤマモミジの葉に比べて小さな占有面積となっている。これは、イチョウの葉は円の一部の形状をしているため、複数の葉を組み合わせると円状の配置にしやすいためだと考えられる。

冬至の日射条件では、葉の数が 7 枚までは、占有面積が夏至に最適化されたモジュールの 75% 程度の値を示している。夏至に最適化されたモジュールは 7 枚以降で占有面積の上昇が鈍化したのに対し、冬至に最適化したモジュールはここから急に占有面積が大きくなり、ハナミズキとヤマモミジの葉は葉の数が 10 枚の時点で夏至に最適化したモジュールに近い値になっている。これは、冬至の日射条件では、仮想放射光源の仰角が低いため、光子は地面に水平に近い角度で葉は照射されるため、葉は地面に垂直に近い角度で配置されるのが理想的である。しかし、図 2.3.1.2-2 と図 2.3.1.2-3 で示したように、理想的な角度で配置される葉は少数であり、他の葉は地面に水平に近い角度で配置されている。この配置方法は夏至の日射条件の場合と同じであるため、葉の数が増えるにしたがって夏至に最適化したモジュールの設置面積に近づいたと考えられる。

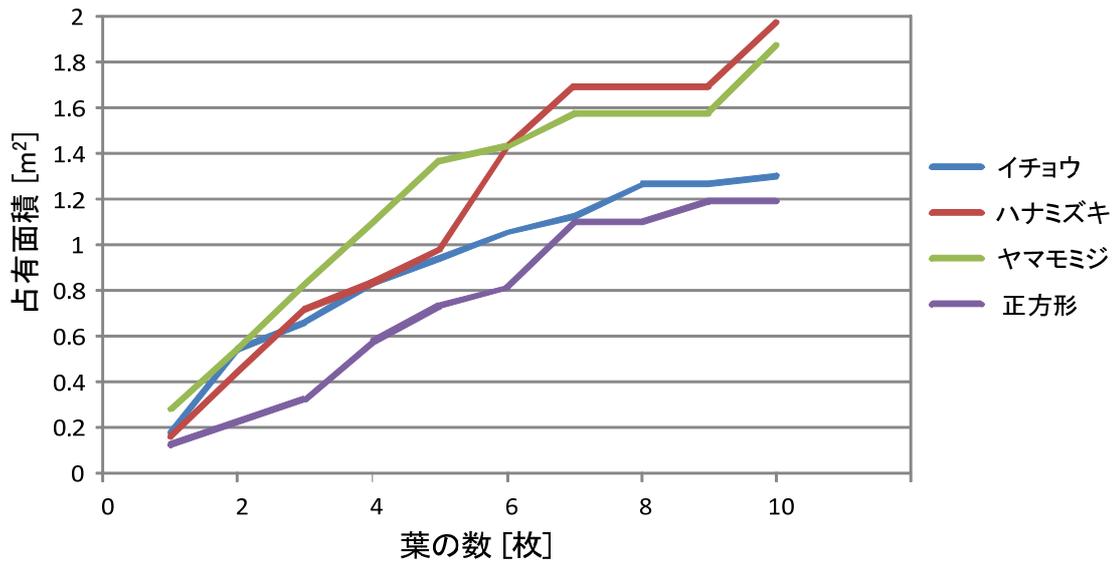


図 2.3.2.2 -1 夏至における各モジュールの占有面積

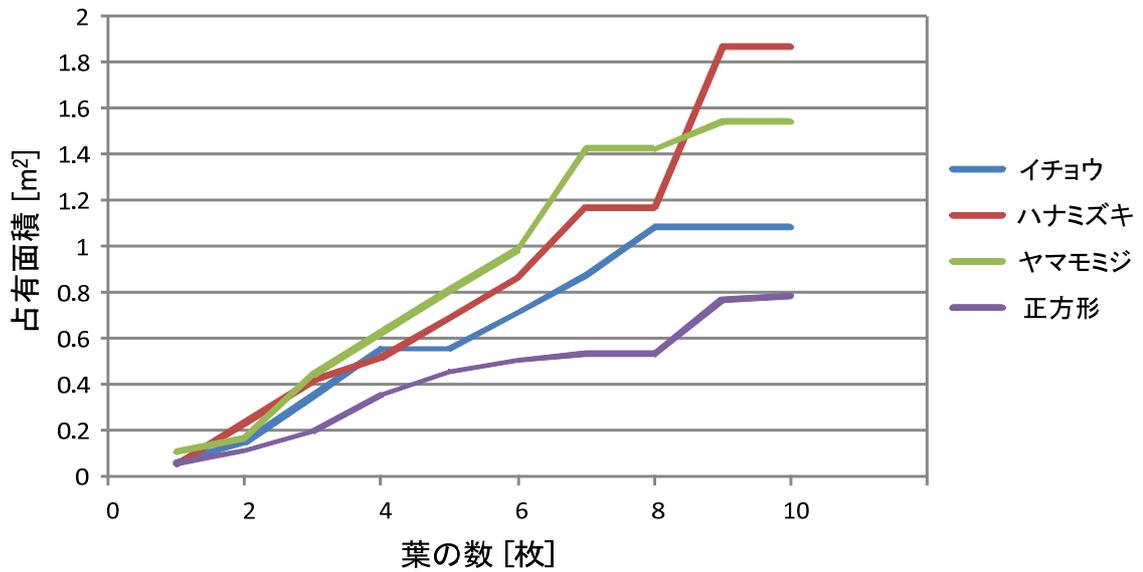


図 2.3.2.2-2 冬至における各モジュールの占有面積

### 2.3.2.3 LAPS で最適化されたモジュールの受光密度の結果

LAPS によって夏至および冬至の日射条件に最適化された植物シュートを模擬した太陽電池モジュールの受光密度を受光量と占有面積から式 2.1.8-1 を用いて求めた。結果を図 2.3.2.3-1 と図 2.3.2.3-2 に示す。夏至および冬至の日射条件で、葉の数が 2 枚までは、非常に大きな受光密度を示している。ただし、この場合は葉の数が少ないため非常に小さな占有面積になっており、式は反比例の式で分母が小さな値となるため、解である受光密度が非常に大きな値を示したと考えられる。しかし、この時の受光量もまた、葉の数が少ないため非常に小さな値となっている。したがって、受光密度は高いが実用的ではなく、意味のない結果だと考えられる。

夏至の日射条件では、イチヨウの葉では葉の数の増加とともに受光密度が若干増加したが、他の葉では横ばいか減少傾向を示した。イチヨウの葉は、図 2.3.2.1-1 と図 2.3.2.2-1 から受光量と占有面積は葉の数の増加に伴って増えており、また、ともに葉の数が多くなると増加も緩やかになっている。しかし、若干ではあるが受光量の増加量が占有面積の増加量を上回ったため、受光密度が緩やかな上昇傾向を示したと考えられる。ハナミズキとヤマモミジの葉は、受光量はイチヨウの葉と大きく変わらないが、図からもわかるように葉が効率よく配置されておらず、占有面積が大きくなってしまったため、イチヨウの葉と比べて受光密度が小さくなったと考えられる。

冬至の解析結果では、受光密度は全ての葉において同様の傾向を示し、葉の数の増加とともに緩やかに減少した。これは、冬至の日射条件では、前節で示したように正方形以外の葉の受光量はそれぞれ近い値を示したので、それぞれの葉の受光密度違いは、占有面積の値によってきまる。占有面積は前節に示したように葉の数が 7 枚までは葉の数に比例して、葉の数が 7 枚を超えると急激に占有面積が大きくなる。したがって、全ての葉において、同様の受光密度の傾向が見られたと考えられる。

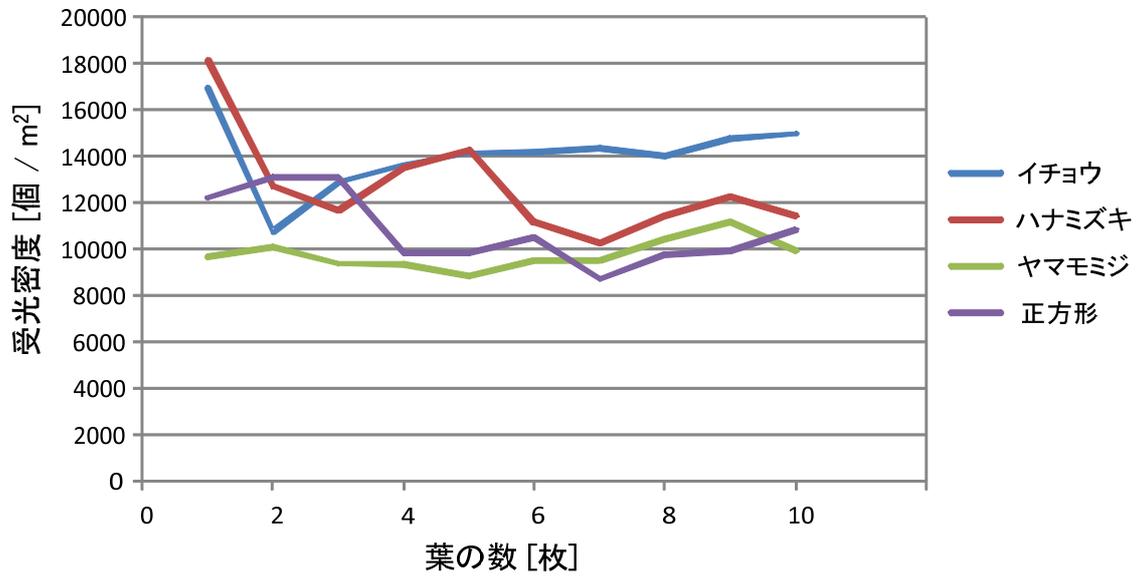


図 2.3.2.3-1 夏至における各モジュールの受光密度

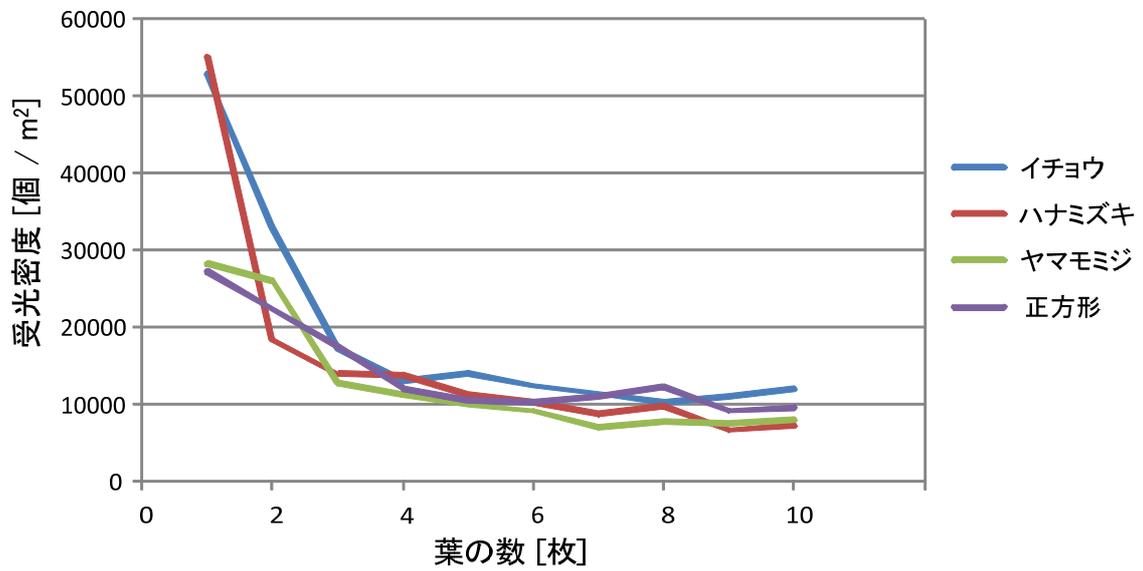


図 2.3.2.3-2 冬至における各モジュールの受光密度

## 2.4 平板状の太陽電池モジュールとの比較

本節では一般的に使用されている平板状の太陽電池モジュールと LAPS によって得られた植物シュートを模擬した太陽電池モジュールの受光特性を比較する。植物シュート太陽電池モジュールは夏至と冬至両方の日射条件で最も高い受光密度を示したイチヨウの葉のモジュールを代表とする。各モジュールには夏至と冬至の日射を照射してそれぞれの受光密度を求める。平板状のモジュールは、北海道札幌市に設置する際に理想とされる地面に対して 43 度の角度で南向きに設置された状態で夏至と冬至両方の日射を受けることにする。イチヨウの葉のモジュールは夏至と冬至それぞれの日射条件に最適化されたモジュールを使用する。

イチヨウの葉のモジュールは、葉の数を 1 枚から 10 枚まで変化させて、それぞれの受光密度を求める。葉 1 枚の面積は  $0.11\text{m}^2$  なので、平板状のモジュールも面積を  $0.11\text{m}^2$  の倍数として複数用意して、モジュールの太陽電池の面積を等しくして受光特性を比較する。

図 2.4-1 は横軸をイチヨウの葉の数と平板の面積とした時の各モジュールの受光量である。夏至の日射条件ではイチヨウの葉のモジュールが平板状のモジュールの 2 倍程度の受光量を示した。一方、冬至の日射条件ではイチヨウの葉のモジュールと平板状のモジュールで受光量に大きな差は見られなかった。

図 2.4-2 は横軸をイチヨウの葉の数と平板の面積とした時の各モジュールの占有面積である。平板状のモジュールは、夏至と冬至の日射条件で同じモジュールを使用しているので、占有面積は同じ値である。夏至と冬至それぞれに最適化されたイチヨウの葉のモジュールは、平板状のモジュールと比べて共に大きな占有面積を示した。これは、太陽電池の面積が各モジュールで同じだが、平板状のモジュールは全く隙間がないのに比べ、イチヨウの葉のモジュールは隙間ができてしまうため、大きな占有面積を示したと考えられる。

図 2.4-3 は横軸をイチヨウの葉の数と平板の面積とした時の各モジュールの受光密度である。夏至の日射条件ではイチヨウの葉のモジュールと平板状のモジュールの受光密度は近い値を示した。これは、イチヨウの葉のモジュールは受光量で平板状の太陽電池モジュールよりも大きな値を示しているが、占有面積が大きくなってしまっているためであると考えられる。一方、冬至の日射条件では、平板状のモジュールがイチヨウの葉のモジュールの 1.5 倍程度の受光密度を示した。これは、受光量ではイチヨウの葉のモジュ

ールと平板状のモジュールに大きな差はないが、イチヨウの葉のモジュールの占有面積が大きいためだと考えられる。

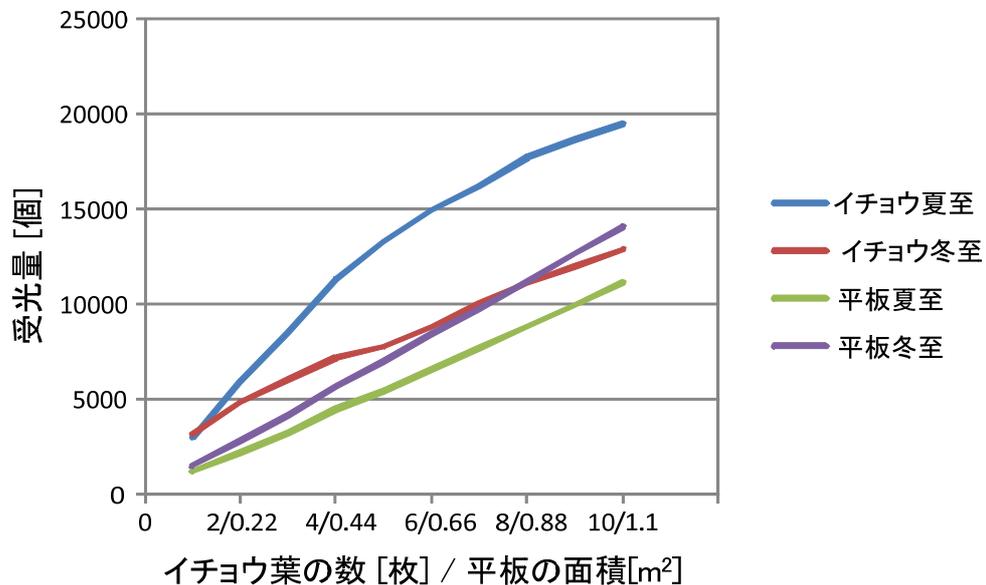


図 2.4-1 受光量についての比較

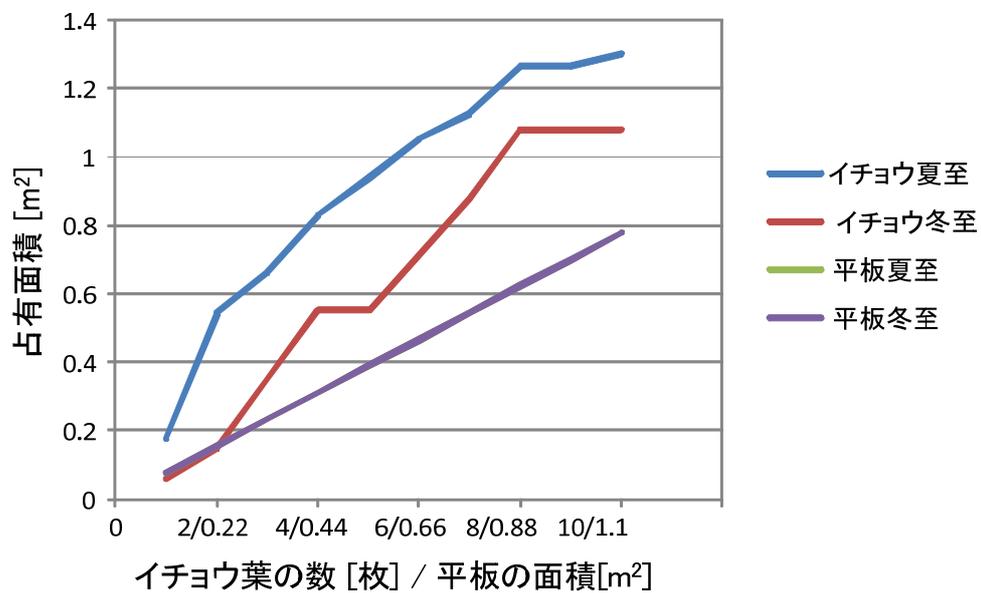


図 2.4-2 占有面積についての比較

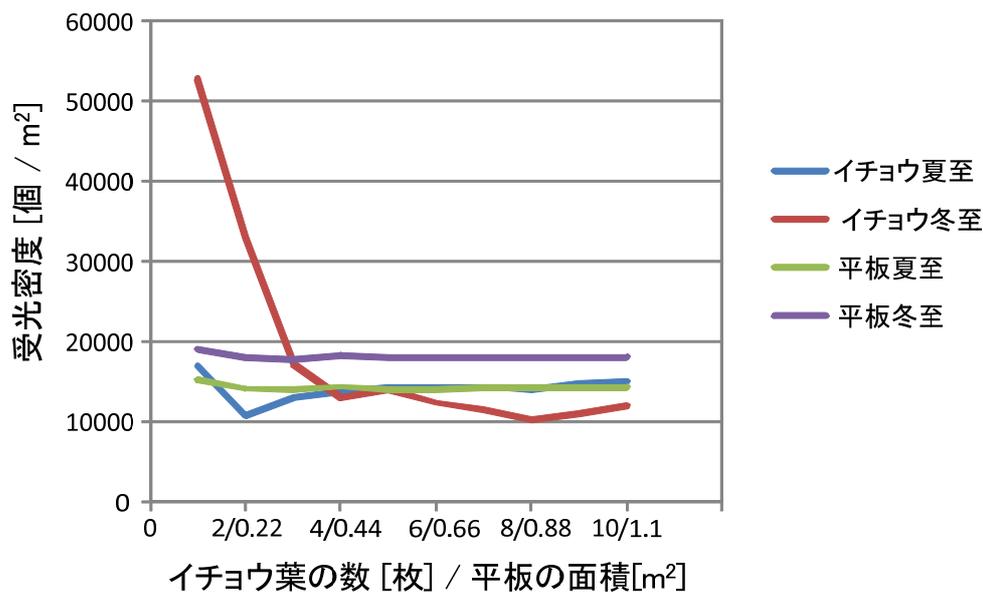


図 2.4-3 受光密度についての比較

## 2.5 葉の同時最適化

LAPS では、複数の葉を持つ植物シュートを模擬した太陽電池モジュールの受光効率の高い形態を求める方法として、葉の配置を1枚ずつ最適化することでモジュール全体の受光密度を高くする方法を用いた。この方法は一度に最適化する葉は常に1枚であるため、GAで最適化する染色体は1対である。ただし、葉を1枚ずつ最適化するために、2枚目以降の葉はすでに決定されている葉に影響を受けて設置位置が決定される。したがって、複数枚の葉を持つ太陽電池モジュールでは、葉の配置が最適化されていない恐れがある。

そこで、複数の葉を同時に最適化する場合についても解析を行い、1枚ずつ最適化した場合と比較する。解析に用いる葉の形状はイチョウ、葉の数は10枚、日射条件は夏至とした。また、GAには2.2.2.2号で示したパラメータを用いる。

結果を図2.5-1に示す。赤色のグラフは葉を1枚ずつ最適化した場合の受光密度の解析結果である。(1)のグラフは葉を1枚ずつ最適化した場合と同じ値の個体数と世代数を用いて10枚の葉を同時に最適化した場合の受光密度の解析結果である。(1)の場合のほうが、1枚ずつ最適化した場合と比較して低い受光密度になった。これは、10枚を同時にGAで最適化するには染色体が10対必要になるので、1枚の葉を最適化する際に用いたGAのパラ

メータでは準最適解を求めることができなかつたためだと考えられる。そこで、GA に用いる個体数と世代数の値を変化させて解析を行った。(2) のグラフは、世代数を変化させずに個体数を 10 倍の 800 個にした場合の受光密度の解析結果である。この場合、1 回の GA に必要な計算量は 1 枚ずつ最適化した場合の GA と比較して 10 倍になる。ただし、1 枚ずつ最適化した場合は 10 枚の葉を最適化するために GA を 10 回繰り返す必要があるが、同時最適化では 1 回で済むため、LAPS としての計算量は同等になる。結果として個体数の増加に伴う受光密度の値の増加は確認できなかった。(3) のグラフは個体数を 80 個、世代数を 300 世代にした場合の受光密度の解析結果である。この場合の計算量は 1 枚ずつ最適化した場合の 1/2 になる。結果として受光密度の値は増加が見られたが、1 枚ずつ最適化した場合と比較して低い値になった。(4) のグラフは、世代数をさら増やして 600 世代とした場合の受光密度の解析結果である。計算量は 1 枚ずつ最適化した場合と同等になる。結果として (3) の場合と比較して値の増加は見られなかつた。(4) のグラフは個体数を 800 個、世代数を 600 世代とした場合の受光密度の解析結果である。この場合の計算量は 1 枚ずつ最適化した場合の 10 倍になる。結果として 1 枚ずつ最適化した結果より 5% 低い値になった。1 枚ずつ最適化した場合に近い値となったが、計算にかかる時間は 10 倍になっている。

本節の結論として、1 枚ずつ葉の配置を最適化する解析方法は、複数の葉を同時に最適化する解析方法に近い解が得られ、さらに計算時間は 1/10 となり高速であるので、本節で検証した解析条件では、1 枚ずつ最適化したほうが優れているといえる。

ただし、複数の葉を同時に最適する方法は理想的であり、GA の条件をさらに詳細に検証すれば、さらに優れた結果を得られる可能性がある。また、GA の条件は最適化する葉の数によって変化すると考えられるので、今後さらに検討を続ける。

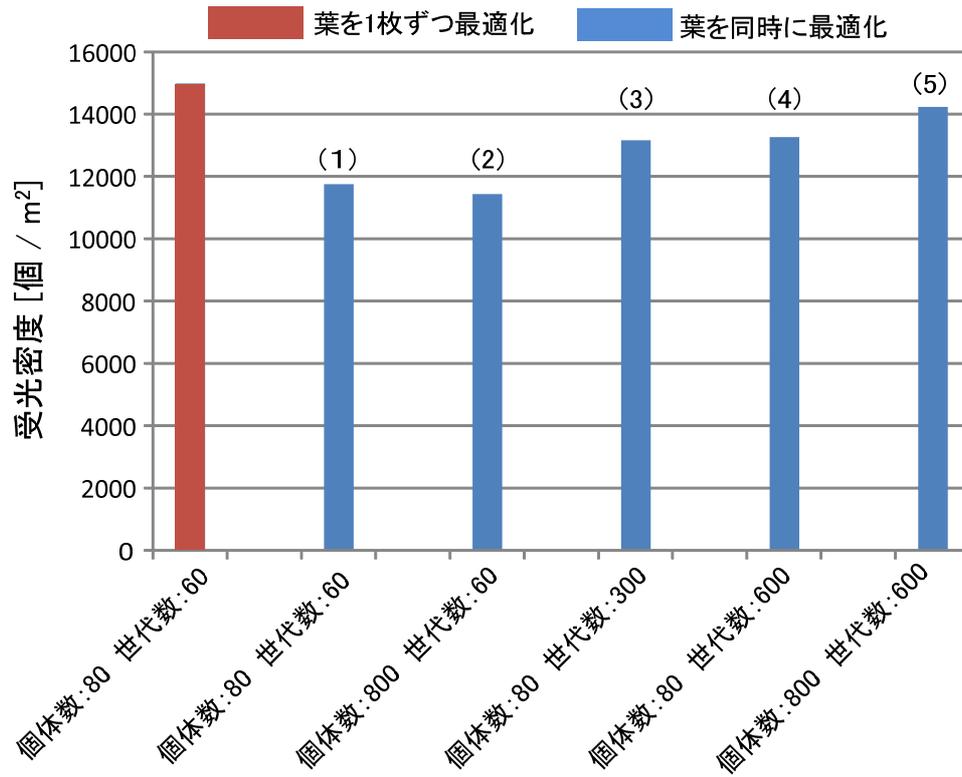


図 2.5-1 葉の配置方法と GA の条件に対する受光密度の比較

## 3章 Expanded LAPS の開発

### 3.1 Expanded LAPS の検討

#### 3.1.1 Expanded LAPS で扱う植物シュートの形態

LAPS では、1点から複数の葉枝が発生する、葉枝と葉のみからなる単純な植物シュートについて解析を行った。しかし、この形態の植物シュートは葉の数が増えるに伴い受光量は増加するが、占有面積も広がってしまうために受光密度の改善が得られなかった。

LAPS で扱った植物シュート形態は、地面に沿って展開されるロゼット型の比較的小型の植物にみられるもので、冬季、早春の時期に地面に葉を接して地熱を利用するための形状である<sup>[41]</sup>。十分に気温が上がり成長後期になると植物は幹、枝、葉枝、葉が組み合わせり複雑な形状を持った大型な直立型になって光合成の効率を高める<sup>[42]</sup>。

そこで、LAPS を拡張して幹、枝、葉枝からなる枝分かれ構造を扱えるようにすることで、図 3.1.1-1 のような複雑な大型の植物の受光特性について解析を行う。この拡張した LAPS を Expanded LAPS と呼ぶ(以降、E-LAPS と記述する)。本研究では植物シュートの枝分かれ構造を、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

[43][44][45]

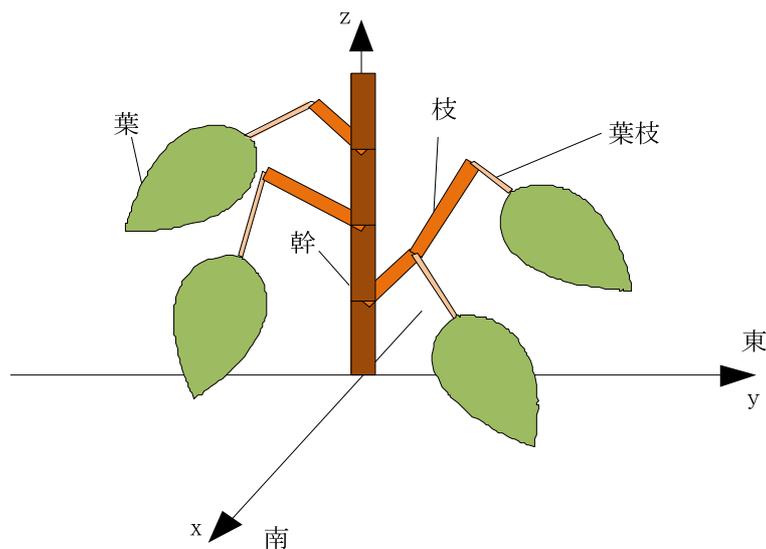


図 3.1.1-1 E-LAPS で扱う植物シュートモデル

### 3.1.2 E-LAPS で扱う植物シュートの要素と座標系

図 3.1.2-1 は、E-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  $M$  は成長開始点を赤色の空間座標系の原点として、方位角  $M_{\theta, Mn}$  と仰角  $M_{\phi, Mn}$  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。幹からの分岐点を枝の成長開始点とする。成長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  $L_{\phi, Ln}$  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。枝からの分岐点を葉枝の成長開始点とする。成長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  $S_{\phi, Sn}$  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成長開始点として、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  $L_{\theta, Ln+1}$ 、 $L_{\phi, Ln+1}$ 、 $L_{l, Ln+1}$  と定義する。

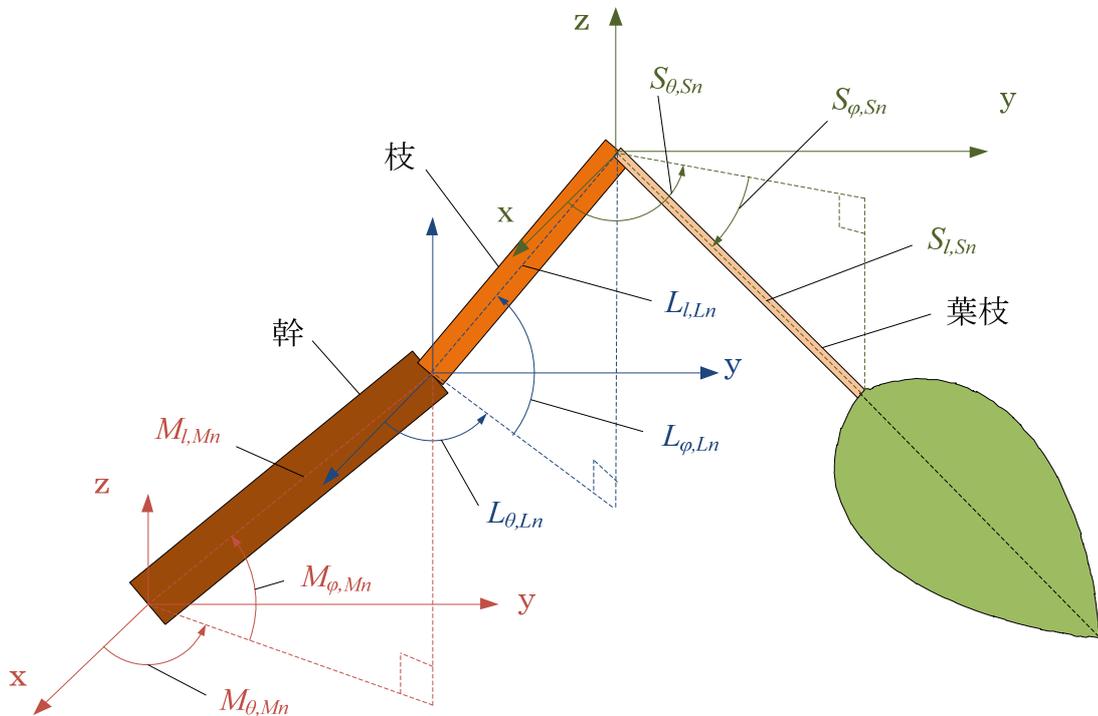


図 3.1.2-1 E-LAPS で扱う植物シュートの座標系

### 3.1.3 L-system による植物シュートの表現

#### 3.1.3.1 L-system とは

L-system は Aristid Lindenmayer によって提唱された、単細胞生物や単純な多細胞生物の細胞分裂機構の数理のモデルである。L-system は、自然界のフラクタル構造(自己相似)を人工的に模擬するアルゴリズムで、複雑な枝分かれ構造を作り出す。L-system を応用した研究としては、樹木の枝分かれ構造や地中の根などの植物の成長や、道路網などの都市機構のシミュレーションに用いられる<sup>[46][47][48][49]</sup>。

L-system は、初期状態と置換規則の 2 種類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て可視化することでフラクタル構造を表すことができる。図 3.1.3.1-1 は初期状態と置換規則に表 3.1.3.1-1 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 3.1.3.1-1 の赤い点を表し、文字‘B’は図 3.1.3.1-1 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必要がある。E-LAPS では L-system の初期状態の文字列を 1 期と呼び、L-system での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”から可視化すると図 3.1.3.1-1 の (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 3.1.3.1-1 の (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 3.1.3.1-1 の (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。本論文ではこの L-system の性質を応用して植物シュートの成長を表現する。

表 3.1.3.1-1 L-system の例

初期文字列	置換規則
BA	A→[BA][BA]

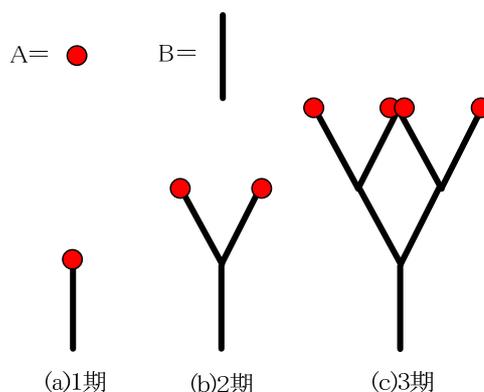


図 3.1.3.1-1 L-system の例

### 3.1.3.2 文字と置換規則

E-LAPS で扱う植物シュートの要素は幹，枝，葉枝，葉の 4 種類とする．これらの要素を使って複雑な枝分かれ構造を持つ植物シュートを表現するために，各要素と L-system で使用する文字を表 3.1.3.2-1 のように対応させる．葉枝には必ず LAPS と同様に葉が直線状に接続される．したがって，葉枝の設置位置が決まれば葉の設置位置も決まるため，L-system は葉に対応する文字を持たない．

植物シュートは文字列が長くなることによって成長する．また，文字「[」によって分岐する．しかし，文字列の置換規則を適切に与えなければ，例えば葉枝から新たな幹が発生するなど，結果として得られる植物シュートは不自然な形態になってしまう．そこで E-LAPS では以下のルールを与えた．

- ① 幹 M からは枝 L が分岐する．
- ② 枝 L からは葉枝 S が分岐する．
- ③ 枝 L は成長して伸びることができる．
- ④ 幹 M は成長して伸びることができる．
- ⑤ 葉枝は成長しない．

ルール①から④を文字列と対応する植物シュートの要素で可視化したものが図 3.1.3.2-1 である．文字列でルール①を表現した場合，“M”が置換規則によって“ML”になったことになり，この場合の置換規則は，“M→M[L]”となる．これは，既に存在している植物シュートの要素“M”を新たに発生する要素“M[L]”で上書きしてしまうことになり，実際の植物を考えると不自然である．そこで植物シュートには対応しない特別な置換専用文字を導入する．置換専用文字を使用して，ルール①から④を可視化したものが図 3.1.3.2-2 である．ルール①では置換前の文字列は“MA”となり，置換後の文字列は“M[L]”なので，置換規則は“A→[L]”となり，既存の幹を残したまま新たな枝の分岐が表現されている．②から④の場合も同様に既存の要素を残したまま新たな要素の分岐，成長を表現できている．

表 3.1.3.2-1 文字と植物シュートの対応

文字	対応する植物シュート
M	幹
L	枝
S	葉枝
[	分岐開始位置
]	分岐終了位置

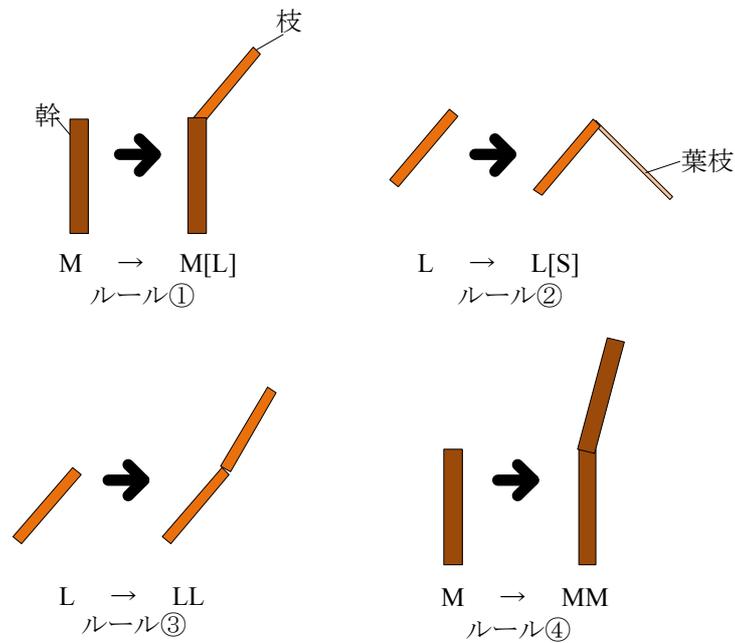


図 3.1.3.2-1 文字列の置換の可視化

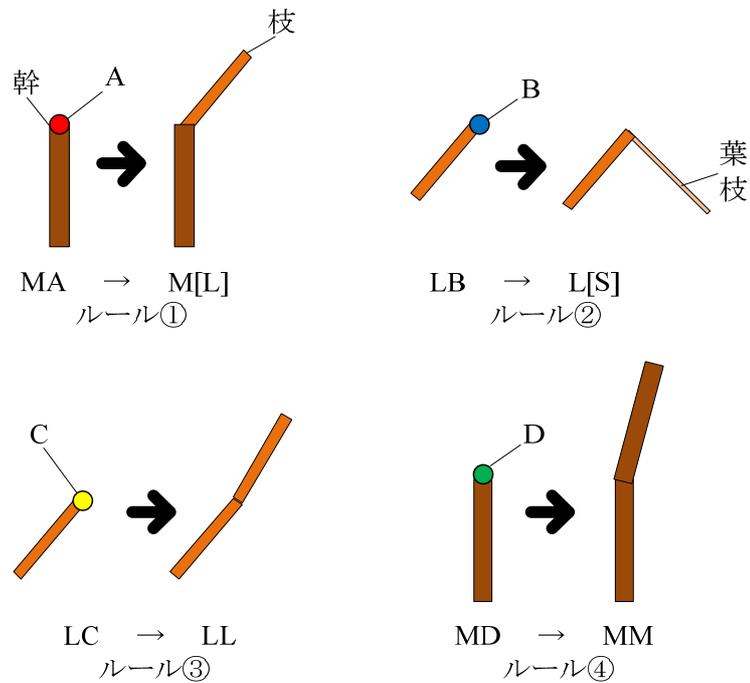


図 3.1.3.2-2 置換専用文字の置換の可視化

### 3.1.3.3 L-system による植物シュートの表現例と問題点

表 3.1.3.3-1 は L-system による初期状態と置換規則の例である。初期状態（1期，M[A]）を可視化したものを図 3.1.3.3-1 の（a）に示す。置換規則が適用された 2期の文字列は“M[LBC]”となり，可視化すると図 3.1.3.3-1 の（b）のようになる。同様に 3期の文字列は“M[L[S]A]”，4期の文字列は“M[L[S]LBC]”となり，可視化すると図 3.1.3.3-1 の（c），（d）のようになる。このように，文字列を置換規則で置き換えることにより植物の成長を表現することができる。ただし，図 3.1.3.3-1 の（e）は図 3.1.3.3-1 の（d）と同じく 4期の文字列の“M[L[S]LBC]”を可視化した図であるが，L-system では植物シュートを構成する幹，枝，葉枝の数や枝分かれ位置は決められるが，3.1.2項に示した成長方向や長さの値には任意の値を与えるひつようがあり，与える数値を変えると同じ文字列でも異なった植物シュートになる。したがって，L-system による文字列からは植物シュートの形態を 1 つに決定することはできない。

表 3.1.3.3-1 文字と植物シュートの対応例

文字	対応する植物シュート
M	幹
L	枝
S	葉枝
[	分岐開始位置
]	分岐終了位置
A	枝の成長開始点
B	葉枝の成長開始点
C	文字“A”の置換専用文字

表 3.1.3.3-2 初期状態と置換規則の例

初期状態	置換規則
M[A]	A→LBC
	B→[S]
	C→A

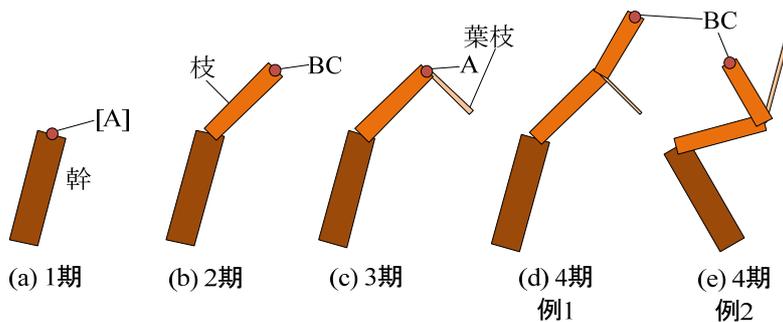


図 3.1.3.3-1 植物シュート成長の表現例

### 3.1.3.4 L-system に GA を適用する際のルール

E-LAPS では、L-system と GA を組み合わせて植物シュートの形態を最適化する。L-system と GA を組み合わせた研究は、これまでもいくつか行われているが、植物の受光密度の最大化を目的にしたものはなかった [50][51][52][53][54][55]。L-system は植物シュートの新たな要素が発生して分岐・成長する際に、成長方向や長さに任意の値を与える必要がある。この新たな要素の成長方向と長さを GA によって最適化する。

GA による最適化が必要になるのは、植物シュートの新たな要素が発生した場合で、以下の 4 つが考えられる。

- ①葉枝が分岐
- ②枝が分岐
- ③枝が成長して伸びる、
- ④幹が成長して伸びる

ただし、E-LAPS の GA は LAPS と同様に植物シュート全体の受光密度が最大になるように形態を最適化する。

①は文字列の一部に“[S”が生じた場合である。この場合は新たに発生する葉枝に葉を接続することができるので、新たに生じた葉を含む植物シュート全体の受光密度が最大になるように GA によって葉枝の成長方向と長さを最適化できる。しかし、幹や枝には葉を接続できないので光子を受光する手段を持たないため、GA による最適化を適用できない。そこで、次のように各場合にそれぞれルールを決めて、植物シュート形態を最適化することにした。

②は文字列の一部に“[L”が生じた場合である。ただし、枝が分岐できるのは、幹からのみとする。この場合は、自然界の植物を観察した結果、北方向に比べて南方向に向かって多くの枝が幹から分岐していることから、枝は日射を多く受けられる方向に向かって分岐すると仮定した。そこで、図 3.1.3.4-1 の(a)のように枝の先に 90 度の角度で葉を取り付けて、GA による解析を行う。ただし、このときの GA は受光量の最大化を目的関数として最適化を行う。解析の結果、幹から分岐した枝は、最も日射を受けられる方向を成長方向とする。枝の長さは解析条件であらかじめ与えられた定数とする。

③は文字列に“L”が生じた場合である。この場合は、図 3.1.3.4-1 の(b)に示すように新たに成長した枝の成長方向の方位角度に、成長前の枝の成長

方向の方位角度と同じ値が与えられる．仰角はマイナス 10 した値が与えられる．また，枝の長さは解析条件であらかじめ与えられる定数とする．

④は文字列に“M”が生じた場合である．本研究では幹は地面に対して垂直に成長するものとする．したがって，図 3.1.3.4-1 の(c)に示すように幹は直線状に成長する．また，幹の長さは解析条件であらかじめ与えられる定数とする．

以上のことから，GA による最適化が必要なのは文字“[”が生じた場合であることがわかる．また，文字“[”の次の文字が“S”の場合には，GA の染色体には，葉枝の成長方向と長さが含まれ，次の文字が“L”の場合には，GA の染色体には，枝の成長方向の情報が含まれる．表 3.1.3.4-1 に各植物シュートの要素の成長方向と長さの決定方法を示す．

また，一度の置換規則の適用で，複数の最適化が必要になった場合は，2.5 節に示したように，同時に最適化すると最適化する項目の数によって GA のパラメータが変化してしまうことから，E-LAPS では文字列の左側から順に 1 項目ずつ最適化の処理をすることにする．

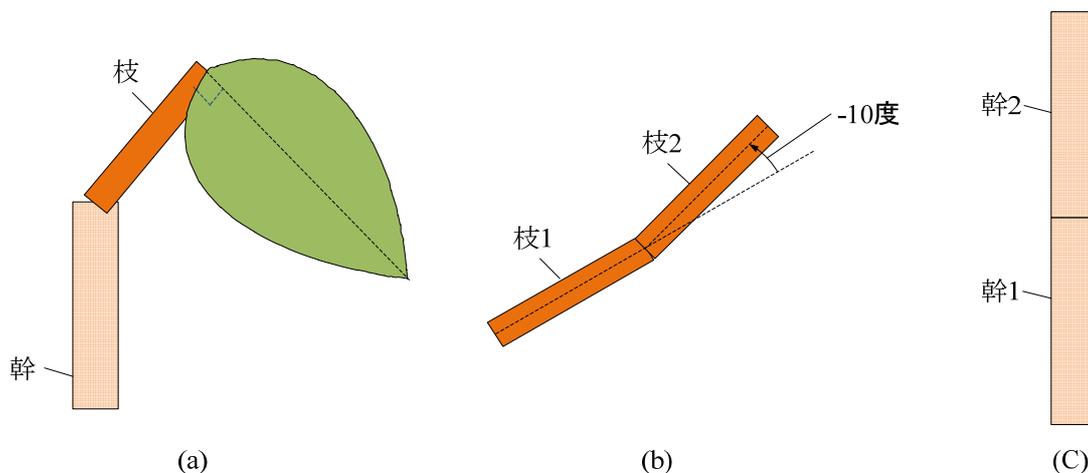


図 3.1.3.4-1 植物シュート成長のルール

表 3.1.3.4-1 各植物シュートの成長方向と長さの決定方法

	成長方向	長さ
葉枝	GAで決める	GAで決める
枝	GAで決める	初期値として与える
幹	初期値として与える	初期値として与える

### 3.1.4 E-LAPS による植物シュート形態の決定方法

図 3.1.4-1 に E-LAPS の解析フローを示す. 例として, L-system に表 3.1.4-1 の文字と表 3.1.4-2 の初期状態と置換規則を用いた場合の E-LAPS による植物シュート形態の決定方法を以下に示す.

手順①: 解析条件の読み込み

葉モデルの形状, 仮想放射光源から放射される 1 日の光子の数, 日射条件, L-system の初期状態, 置換規則, 置換回数, GA のパラメータを読み込む.

手順②: L-system の置換規則の適用

3.1.3.1 項に示した方法で, L-system の初期状態 “M[A]D” に置換規則 “A→LBC” を適用して 1 期進める. 文字列は “M[LBC]D” になる.

手順③: 文字列から, GA に必要な染色体数を計算

手順②で得た文字列を解析して, GA に必要な染色体数を計算する. 文字列 “M[LBC]D” には分岐開始位置 ‘[’ が 1 個あるので染色体は 1 個必要になる. また, ‘[’ の前の文字は ‘M’ で次の文字は ‘L’ であるため幹からの枝の分岐であることがわかる. したがって, GA の染色体には枝の成長方向の情報が含まれる.

手順④: GA の第 1 世代の染色体情報を発生

GA で用いる染色体の初期世代を発生させる. 染色体の値はランダムに与える.

手順⑤: 葉の位置を決定

文字列 “M[LBC]D” と染色体情報から植物シュート形態を算出して葉の位置を決定する. まず, 文字 ‘M’ から幹を発生させる. 1 本目の幹なので添え字  $M_n$  は 1 になる. また, 幹の成長方向は 3.1.3.4 項で示したように地面と垂直になるため, 方位角  $M_{\theta,1}=0$ , 仰角  $M_{\phi,1}=-90$  となる. 長さ  $M_{l,1}$  は初期条件として与えられる. 次に文字列 “[L” より, 幹から枝が分岐することがわかる. したがって, 幹の端点が枝の成長開始点になり, この点の座標は計算により求めることができる. この枝は 1 本目なので添え字  $L_n$  は 1 になる. 分岐後の枝の成長方向 (方位角  $L_{\theta,1}$  と仰角  $L_{\phi,1}$ ) は染色体情報で与えられる. また, 長さ  $L_{l,1}$  は初期条件として与えられる. 文字列 “BC” と文字 “D” は植物シュート形態には関係しないので, 文字列 “M[LBC]D” と第 1 世代の染色体情報から得られた植物シュートは, 可視化すると図 3.1.4-2 の(A)のようになる.

ただし、今回の枝は幹から分岐しているため、3.1.3.4項に示したように、枝の先に葉と取り付けて図3.1.4-2の(B)の状態にする。

手順⑥：光子の照射

2.1.5項に示した方法で仮想放射光源より光子を1個放射する。

手順⑦：光子の葉への到達確認

2.1.6項に示した方法で光子の葉への到達を確認する。日射条件で与えられる各サンプリング時刻  $st$  の放射光子数  $nq_{g,st}$  回繰り返す。また、サンプリング時刻  $st$  での光子の放射を終えると、 $st$  に1を加えて23時になるまで手順⑥と⑦を繰り返すことで1日分の全光子  $N_a$  を放射する。この過程で葉に到達した光子の合計が1日の受光光子数  $\sum_{t=0}^{Day} J_{t,u}$  になる。また、手順⑤から手順⑦までの処理をすべての染色体に対して行う。

手順⑧：適応度の計算

2.1.8項に示した式(2.1.8-2)から各植物シュートの適応度を計算する。ただし、枝の最適化の際には、式(2.1.8-2)の  $a$  には1が与えられる。すなわち最適化対象が枝の場合は植物シュート全体の受光量が適応度として計算される。

手順⑨：遺伝子操作

手順⑧までで第1世代の染色体に対する処理は終わり、第2世代を発生させるために第1世代の染色体に選択、交叉、突然変異、淘汰の遺伝子操作を行う。次に、第2世代の染色体から得られる枝の成長方向を手順⑤に適用することにより第1世代よりも適応度の高い植物シュートを得る。さらに手順⑥から手順⑧の処理を行い、⑨の遺伝子操作を行うことにより第3世代の染色体を得る。この処理を初期条件で決められた世代数繰り返すことで適応度の高い染色体情報が得られる。

手順⑩：染色体情報の決定

手順⑨で得られた適応度の高い染色体情報を幹から分岐する枝の成長方向（方位角  $L_{\theta,1}$  と仰角  $L_{\phi,1}$ ）の値が決定する。ここで、一時的に取り付けた葉を削除することで、図3.1.4-2の(C)のようになる。今後この枝の成長方向は解析が進んでも変化しない。

手順⑪：置換回数の判定

手順⑩までで L-system の第1期の文字列“M[LBC]D”に対する植物シュート形態は決定する。初期条件に設定された置換回数が2以上の場合は、手順②に戻り第2期以降の文字列に対して処理を行う。ここで、第2期に行われる処理を簡単に説明する。

- A) 第 2 期の文字列は手順②から “M[L[S]A]M[A]D” となる。
- B) 手順③の処理から必要な染色体は 3 個となる。しかし、左側の ‘[’ は第 1 期の段階での GA による解析で決定しており、また、右側の “[” は次の文字が “A” なので今回の最適化の対象にならない。また、中央の ‘[’ の前の文字は “L” で、次の文字は ‘S’ なので枝から葉枝が分岐していることがわかるので、葉枝は最適化の対象になる。したがって、必要な染色体は 1 個である。この葉枝は 1 本目なので添え字  $S_n$  は 1 になる。染色体には 3.1.3.4 で示したように、成長方向（方位角  $S_{\theta,1}$  と仰角  $S_{\phi,1}$ ）と長さ  $S_{l,1}$  の情報が含まれる。また、“]M” から幹 1 と枝 1 の分岐点から幹 2 が発生する。2 本目の幹なので添え字  $M_n$  は 2 になる。幹の成長方向は 3.1.3.4 項で示したように地面と垂直になるため、方位角  $M_{\theta,2}=0$ 、仰角  $M_{\phi,2}=-90$  となる。長さ  $M_{l,2}$  は初期条件として与えられる。
- C) 手順⑤では第 1 期で得られた植物シュートの枝 1 の端点を成長開始点として、第 1 世代の染色体情報から得られる成長方向と長さで葉枝を設置する。葉枝には葉が接続される。また、幹 1 の端点到幹 2 を設置する。したがって、可視化すると図 3.1.4-3 の(A)のようになる。
- D) 手順⑥以降は、第 1 期と同じ処理が行われ、図 3.1.4-3 の(B)のように最適化される。

また、第 3 期以降は手順②に戻りこれまでの処理を繰り返す。

手順⑫：植物シュート形態の決定

初期条件で設定された置換回数だけ手順①から⑫まで繰り返すことにより、本論文の目的である代表日の受光効率の高い植物シュート形態が得られる。

このように、E-LAPS では、L-system による植物シュートの成長と GA による形態の最適化を繰り返すことで、受光効率の高い植物シュート太陽電池モジュールを求める。

表 3.1.4-1 L-system で使用する文字と対応する植物シュート

文字	対応する植物シュート
M	幹
L	枝
S	葉枝
[	分岐開始位置
]	分岐終了位置
A	枝の成長開始点
B	葉枝の成長開始点
C	文字”A”の置換専用文字
D	幹の成長開始点と 文字”A”の置換専用文字

表 3.1.4-2 L-system で使用する初期状態と置換規則

初期状態	置換規則
M[A]D	A→LBC
	B→[S]
	C→A
	D→M[A]D

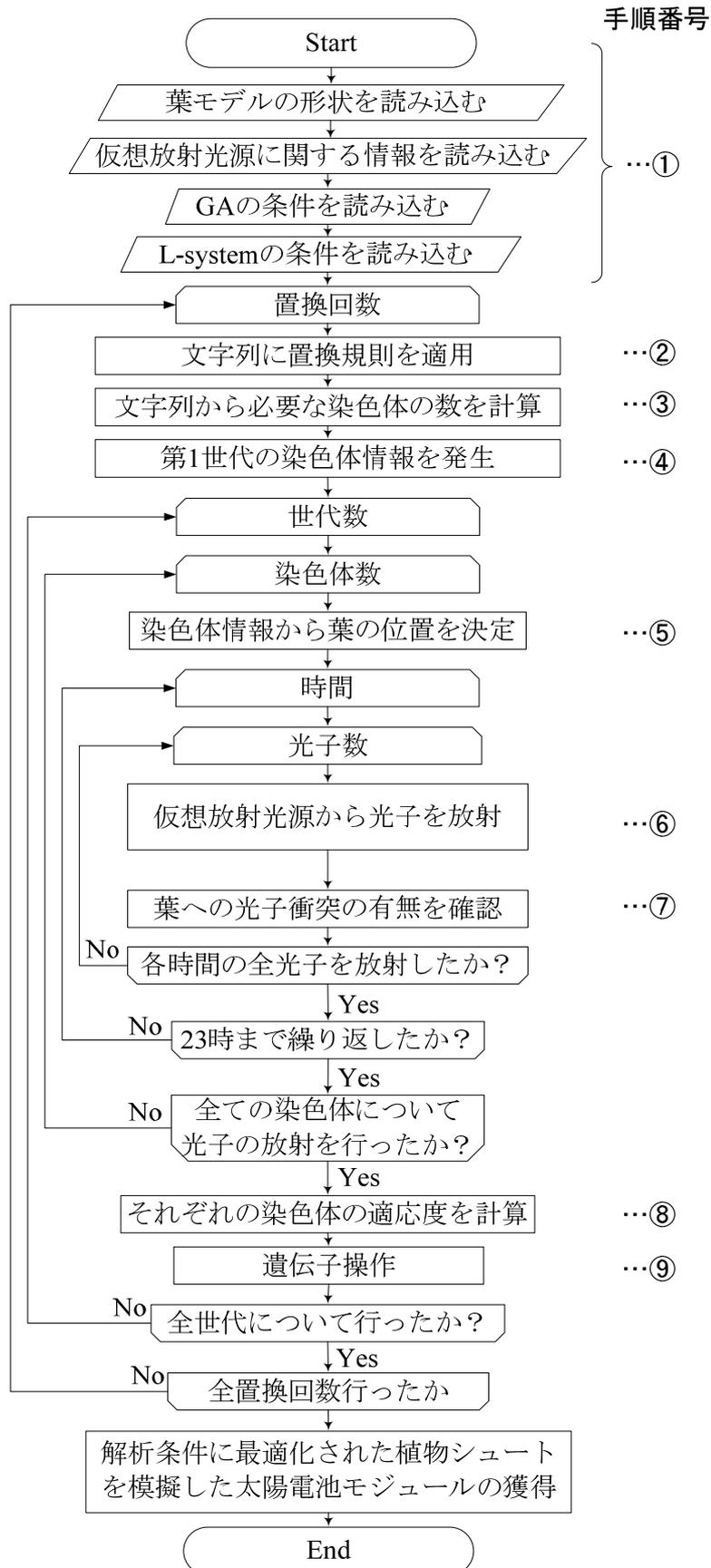


図 3.1.4-1 E-LAPS のフローチャート

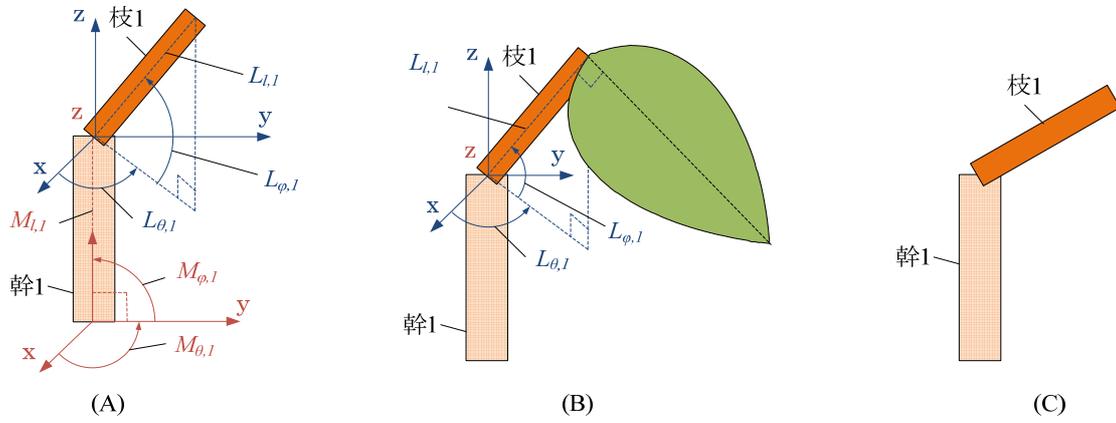


図 3.1.4-2 文字列 “M[LBC]D” の可視化手順

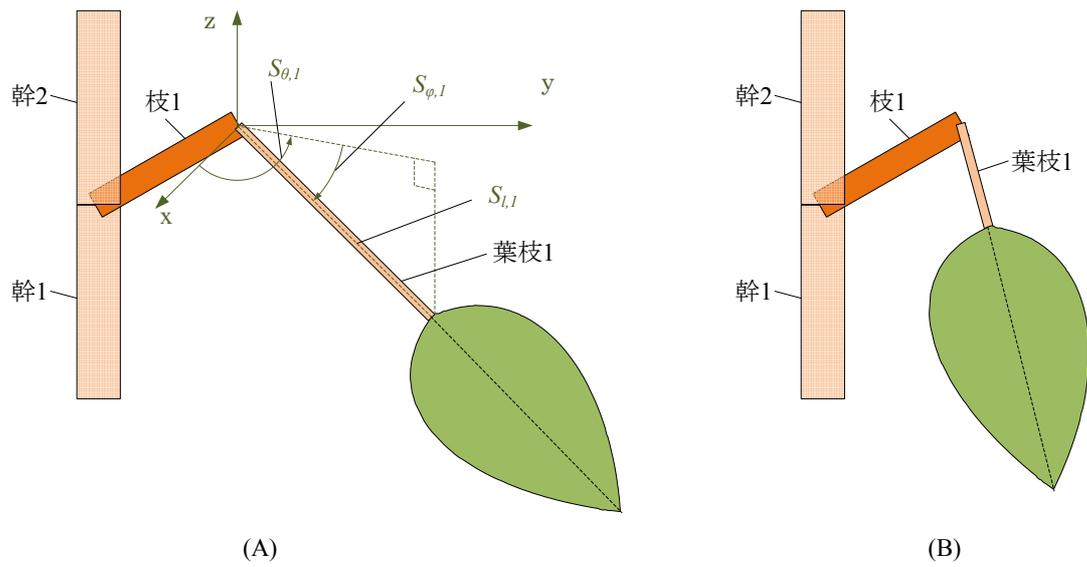


図 3.1.4-3 文字列 “M[L[S]A]M[A]D” の可視化手順

## 3.2 E-LAPS による解析

### 3.2.1 解析対象

本論文では E-LAPS によって、夏至と冬至それぞれの日射条件に最適化された植物シュートを模擬した太陽電池モジュールの形態を、イチヨウ、ヤマモミジ、ハナミズキ、正方形の葉の場合について求める。それぞれの葉は LAPS による解析の場合と同じものを用いる。E-LAPS で対象とする植物シュートの要素は、幹、枝、葉枝、葉とする。

本解析に用いる夏至の日射条件は年間を通して日射時間が最も長く、一方、冬至は最も短い。この両極端な日射条件について解析を行い植物シュートの形態を得ることによって、その他の時期は本論文で得られる 2 種類の形態の間の形態を持つと考えられる。

### 3.2.2 解析条件

E-LAPS による解析に、解析条件として決める必要がある植物シュートのパラメータは葉枝の成長方向 ( $S_{\phi,Sn}$ ,  $S_{\theta,Sn}$ ) および長さ ( $S_{l,Sn}$ ) の値の範囲、枝の成長方向 ( $L_{\phi,Ln}$ ,  $L_{\theta,Ln}$ ) の値の範囲、L-system の初期状態、置換規則、置換回数である。葉枝と枝の成長方向は LAPS と同じ値の範囲を用いる。また、葉枝の長さの範囲も LAPS の予備解析の結果から、0 から 300mm を値の範囲とした。L-system の初期状態と置換規則は表 3.1.4-2 を用いる。

ここで、E-LAPS で扱う植物シュートは幹や枝により複雑な枝分かれ構造を持つことにより、葉枝の成長開始点を様々な場所に分散させて葉の設置位置の自由度を増やすことによって、葉同士の重なりを減らし受光効率を向上している。したがって、幹や枝の長さが短いと、枝分かれ構造の十分な効果が得られない。また、長すぎると植物シュートが大型化してしまい、占有面積が大きくなってしまう。そこで、本研究では、試行錯誤の結果から、幹と枝の長さに定数として 100 mm を与えることにした。

また、E-LAPS による解析では、葉の数は L-system の置換回数によって決まる。置換回数が多ければ、葉の数が増えて受光量が増すと考えられるが、枝分かれ構造が複雑になり、実際の植物シュートを模擬した太陽電池モジュールの製造が難しくなる。そこで、予備解析として、置換回数を変えながら受光効率を計算して、最適な置換回数を求める。

また、GA に用いるパラメータは LAPS と同じ値にした。日射条件も LAPS と同じように、夏至と冬至の条件で解析を行った。E-LAPS による解析で用

いるパラメータの値をまとめて表 3.2.2-1 に示す.

表 3.2.2-1 E-LAPS で用いる各パラメータの値

葉枝	成長方向	$S_{\theta}=-180\sim 180$ $S_{\varphi}=-90\sim 0$
	長さ	$S_l=0\sim 300$
枝	成長方向	$L_{\theta}=-180\sim 180$ $L_{\varphi}=-90\sim 90$
	長さ	$L_l=100$
幹	成長方向	$M_{\theta}=0$ $M_{\varphi}=-90$
	長さ	$M_l=100$

### 3.2.3 予備解析

予備解析では LAPS で最も優れた受光特性を示したイチヨウの葉を用いて、L-system の置換回数を 5 回, 10 回, 13 回, 15 回とした場合の夏至の日射条件における解析結果を図 3.2.3-1 と図 3.2.3-2 に示す. 図 3.2.3-1 は置換回数と葉の数の受光量の関係である. 図 3.2.3-1 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に受光量が増加する. 図 3.2.3-2 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  $1.4 \text{ m}^2$  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, モジュールの葉数が十分増えて占有面積が飽和すると受光密度は葉の数に比例する. 図 3.2.3-2 の結果から, 葉の数が 16 枚程度あれば占有面積は収束することから, 本論文では余裕をもって葉の数が 25 枚になる置換回数が 10 回の場合について詳細を述べる.

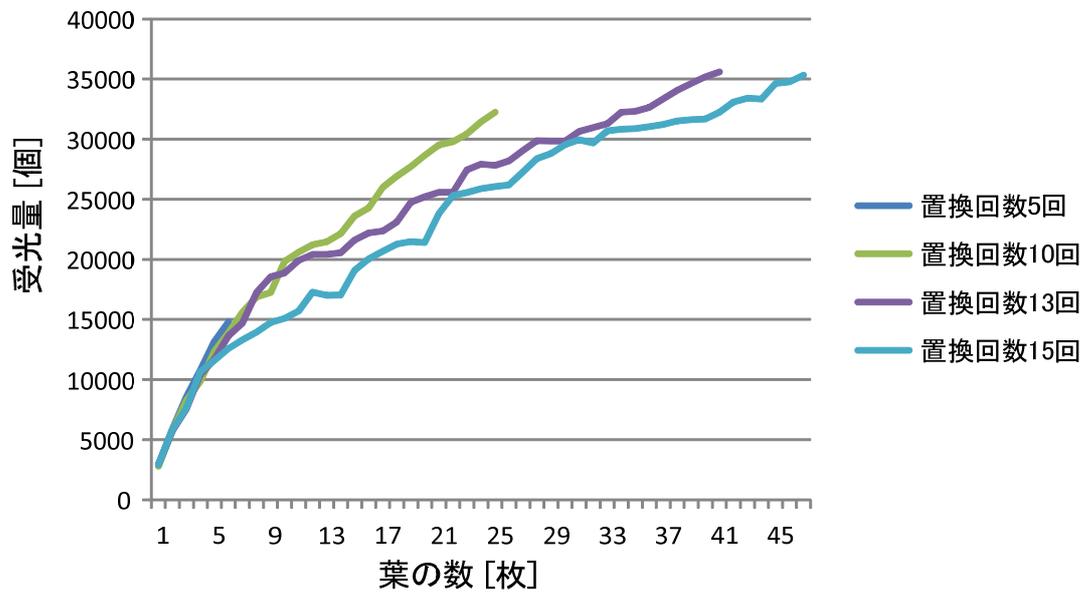


図 3.2.3-1 各置換回数における受光量

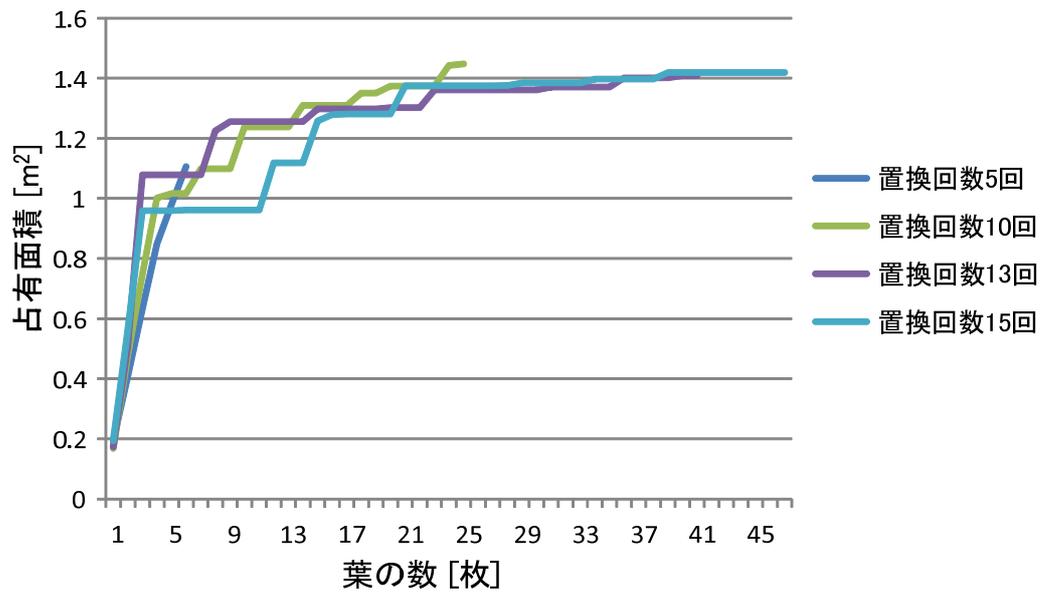


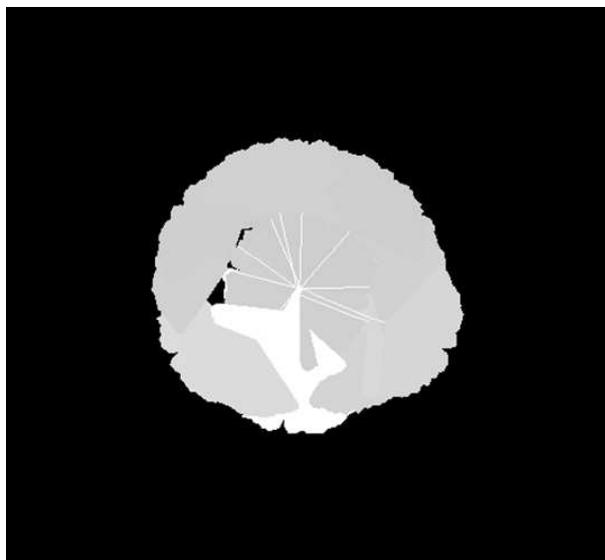
図 3.2.3-2 各置換回数における占有面積

### 3.3 E-LAPS による解析結果と考察

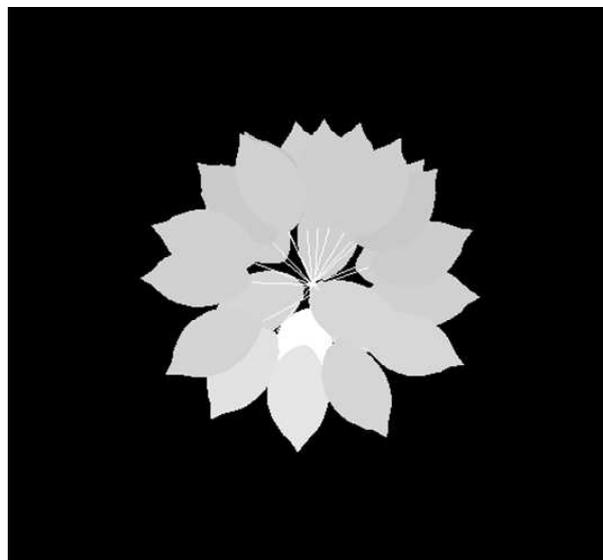
#### 3.3.1 植物シュートの形態

##### 3.3.1.1 夏至に最適化したモジュールの形態

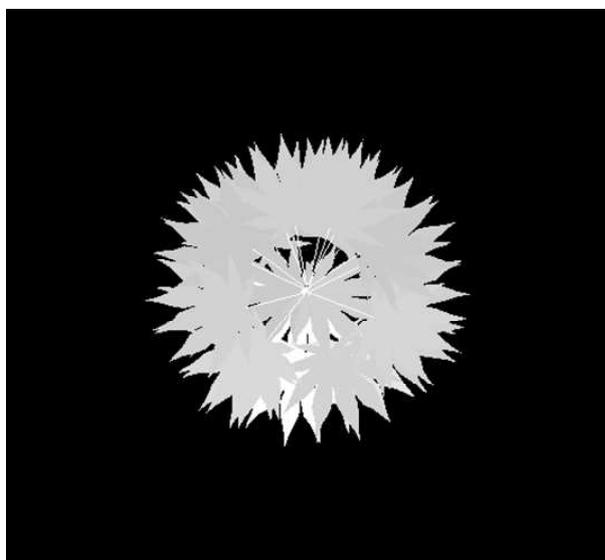
E-LAPS によって夏至の日射条件に最適化されたイチヨウ、ハナミズキ、ヤマモミジ、正方形の葉を持つ植物シュートを模擬した太陽電池モジュールの形態を図 3.3.1.1-1 から図 3.3.1.1-3 に示す。図 3.3.1.1-1 は各モジュールを上から見た図であり、図の下が南方向である。また、図 3.3.1.1-2 は南方向から、図 3.3.1.1-3 は西方向から各モジュールを見た図である。図 3.3.1.1-1 から図 3.3.1.1-3 より、葉の種類に関係なくすべての葉が上方向を向いて設置されていることが分かる。これは、LAPS による解析結果と同じ傾向であり、上向きに設置される理由も LAPS と同様であると考えられる。また、上からみた図 3.3.1.1-1 に注目すると、LAPS の場合と比較して、隙間なく葉が敷き詰められていることがわかる。また、横からみた図 3.3.1.1-2 と図 3.3.1.1-3 から、葉は様々な高さに分散配置されており、LAPS の場合のように葉の数が増えることによる葉同士の重なりを生じさせずに葉を敷き詰めている。ただし、ヤマモミジがわかりやすいが他の葉も同様に上層部の葉はドーナツ状に配置されており、中心部には葉が配置されていない。これは、仮に葉が上層部で円盤状に敷き詰められると光子は上層部ですべて吸収されてしまい、下層部の葉に光子が届かない。したがって下層部にも光子がいきわたるように、上層部の葉がこのように配置されたと考えられる。



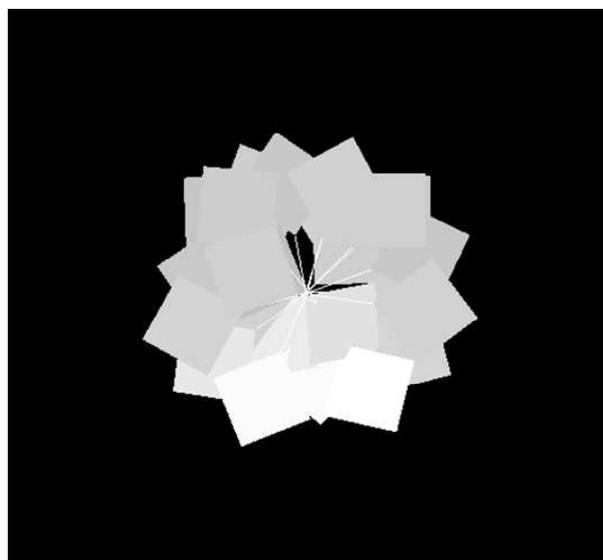
イチョウ



ハナミズキ

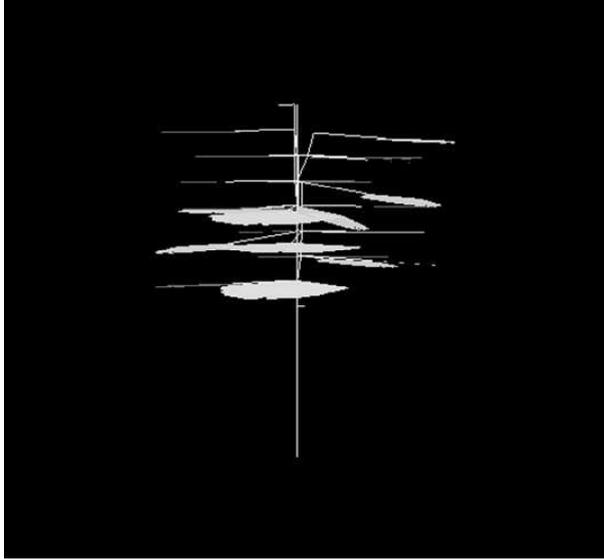


ヤマモミジ

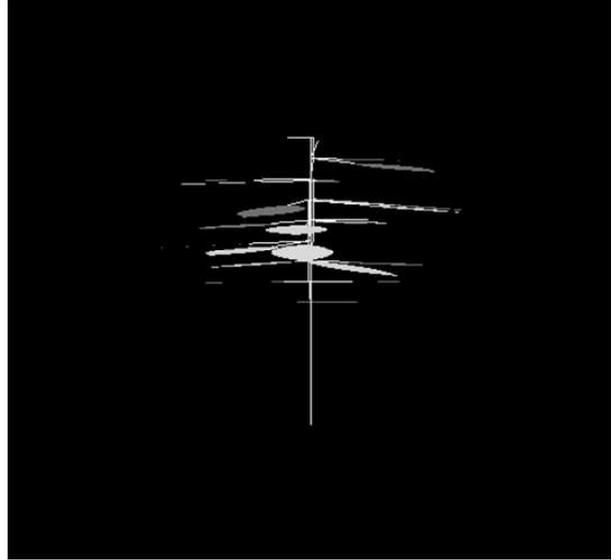


正方形

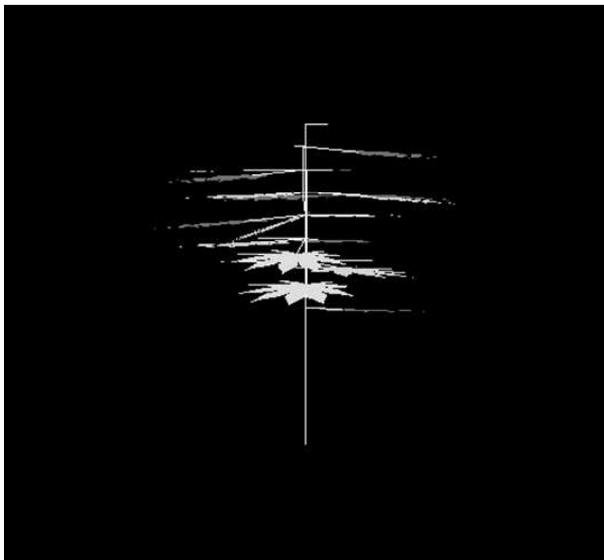
図 3.3.1.1-1 各モジュールを上から見た図



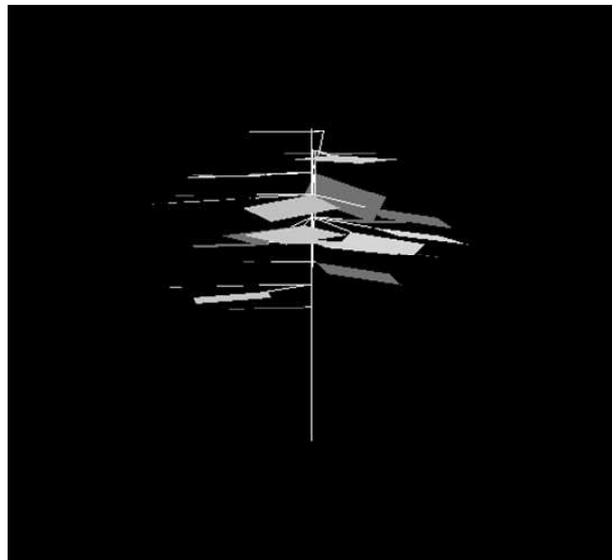
イチョウ



ハナミズキ

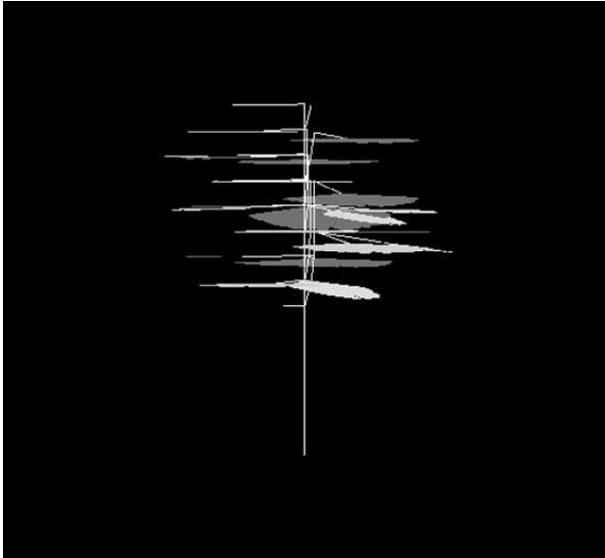


ヤマモミジ

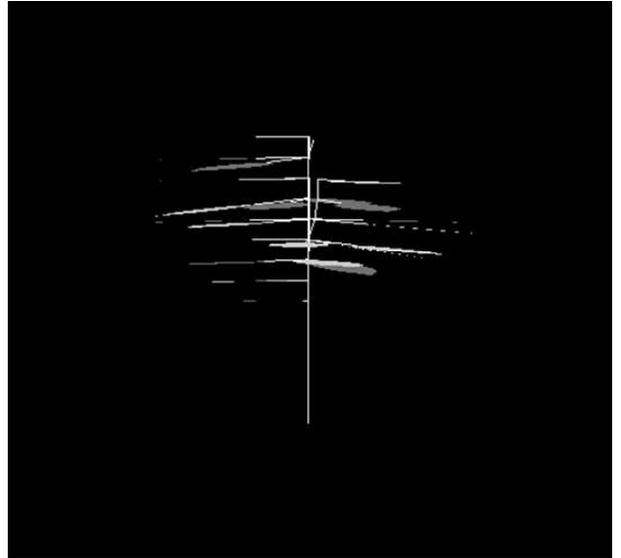


正方形

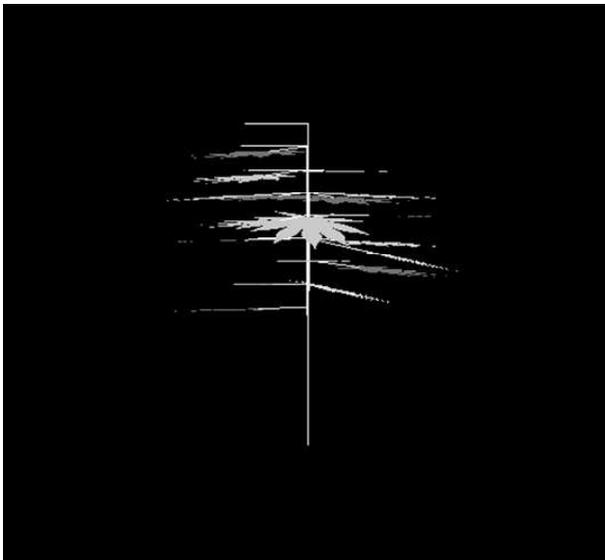
図 3.3.1.1-2 各モジュールを南から見た図



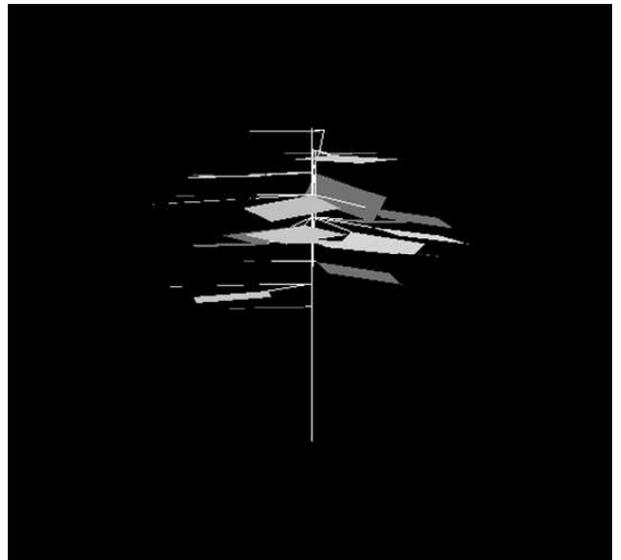
イチョウ



ハナミズキ



ヤマモミジ



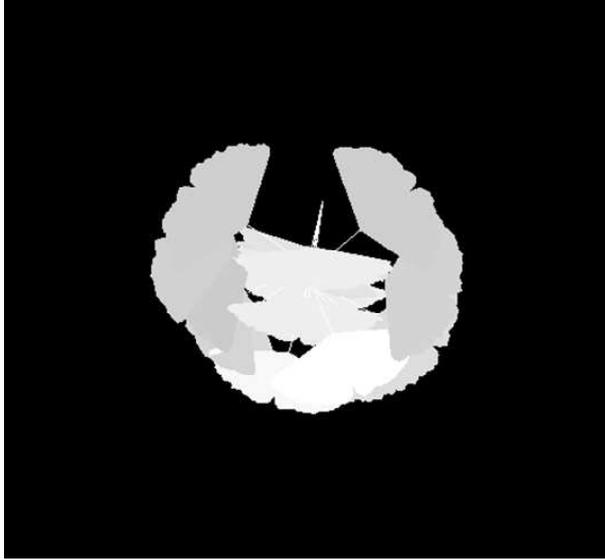
正方形

図 3.3.1.1-3 各モジュールを西から見た図

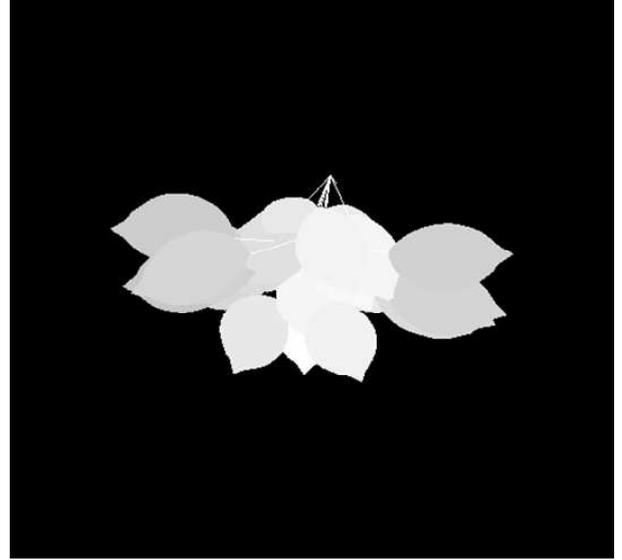
### 3.3.1.2 冬至に最適化したモジュールの形態

E-LAPS によって夏至の日射条件に最適化されたイチヨウ、ハナミズキ、ヤマモミジ、正方形の葉を持つ植物シュートを模擬した太陽電池モジュールの形態を図 3.3.1.2-1 から図 3.3.1.2-3 に示す。図 3.3.1.2-1 は各モジュールを上から見た図であり、図の下が南方向である。また、図 3.3.1.2-2 は南方向から、図 3.3.1.2-3 は西方向から各モジュールを見た図である。図 3.3.1.2-1 から図 3.3.1.2-3 より、葉の種類に関係なく多くの葉が光子の到来する南向きに設置されており、また、上方向に並べられていることがわかる。LAPS では南方向を向いて設置できる葉の数は少なく受光に不利だと考えられる北方向にも葉が配置されていたが、E-LAPS では葉が様々な位置に立体的に配置できるために配置の自由度が増しており、多くの葉が南向きに配置されている。ただし、真南ではなく、若干ではあるが全てのモジュールが西方向を向いている。これは、図 2.2.2.3-2 から、冬至の日射のピークが太陽が真南に来る 12 時ではなく西に傾く 13 時ころにあるためだと考えられる。

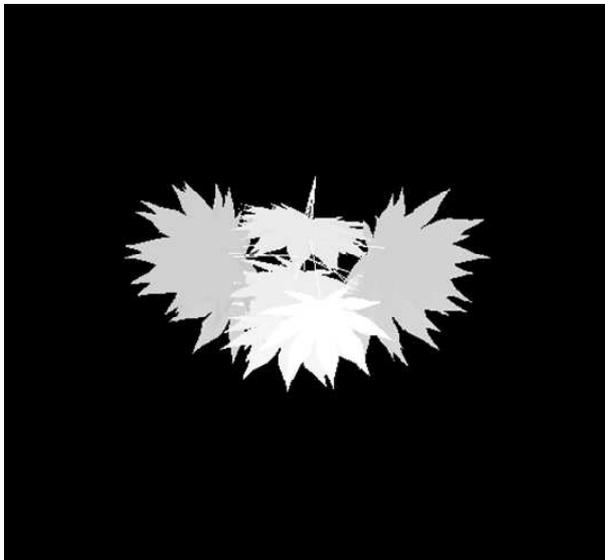
また、図 3.3.1.2-2 と図 3.3.1.2-3 から南以外の方向に配置された葉も、重なり合うことなく南東または南西方向に立体的に配置されており、LAPS と比較して効率よく光子を受光していると考えられる。



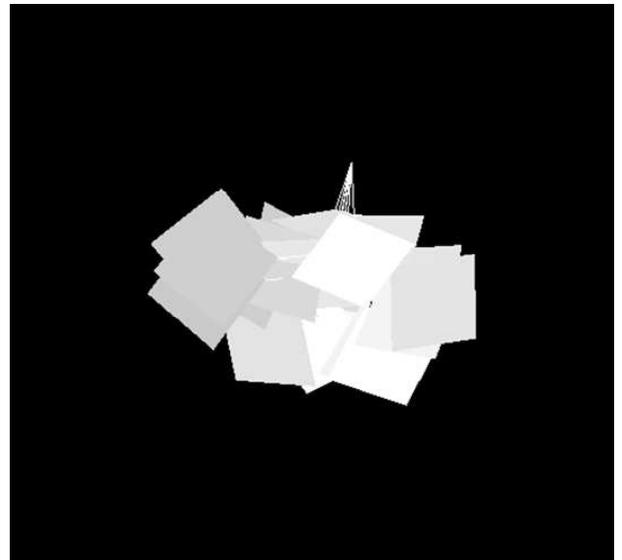
イチョウ



ハナミズキ

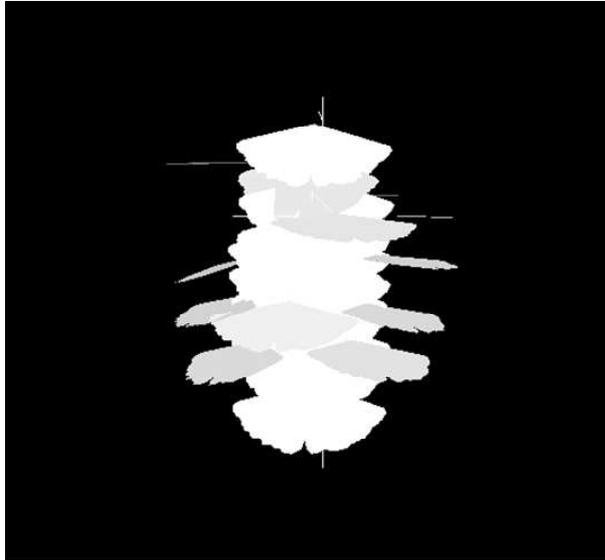


ヤマモミジ

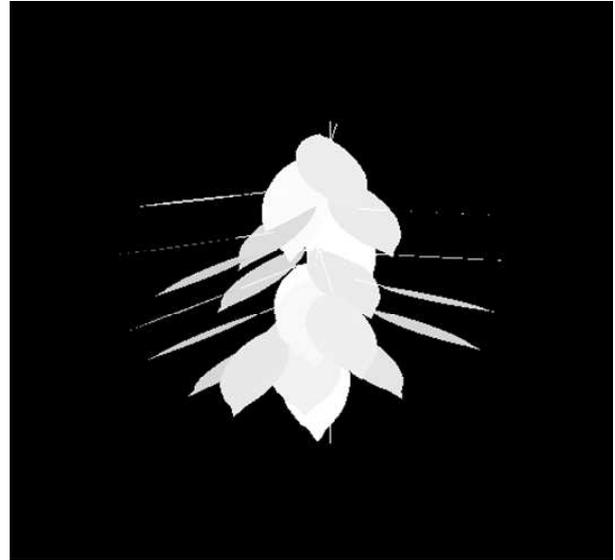


正方形

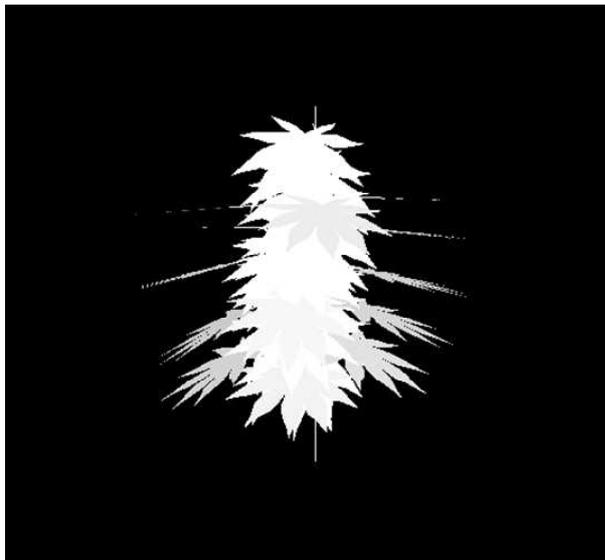
図 3.3.1.2-1 各モジュールを上から見た図



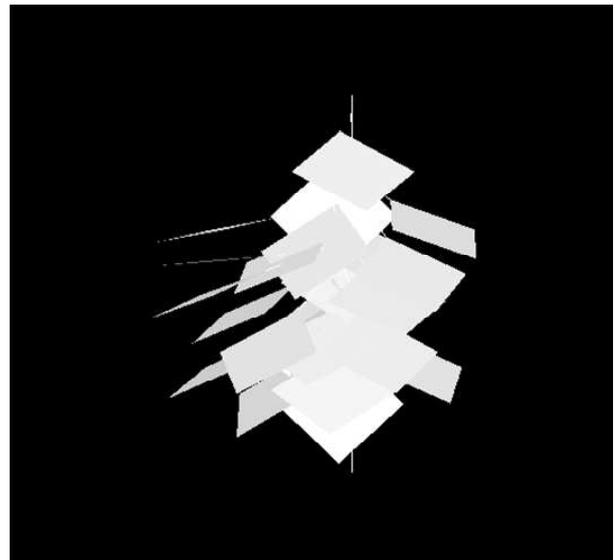
イチョウ



ハナミズキ

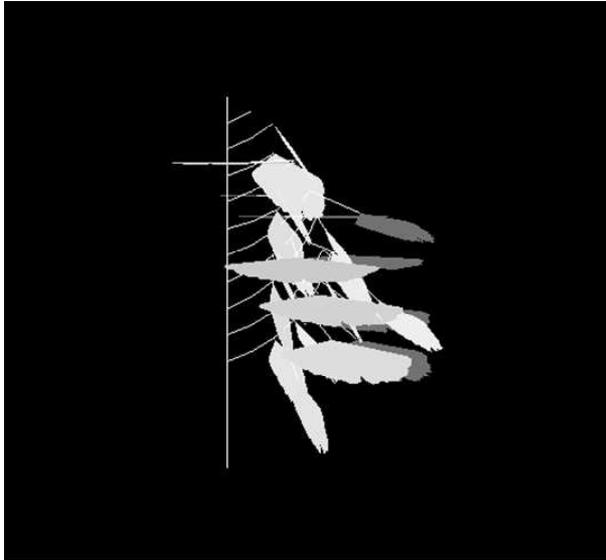


ヤマモミジ

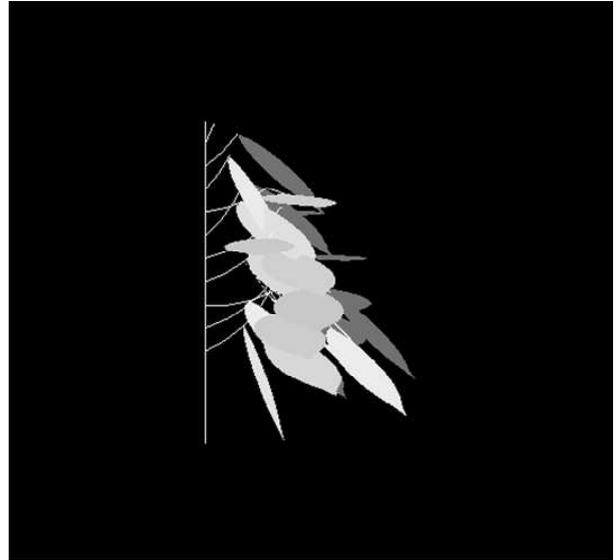


正方形

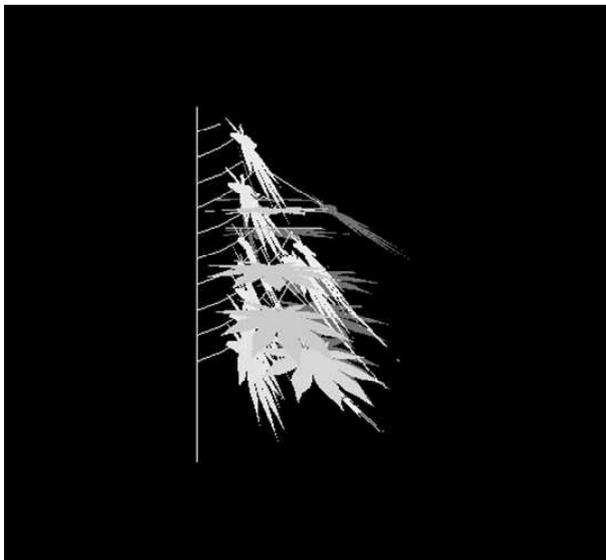
図 3.3.1.2-2 各モジュールを南から見た図



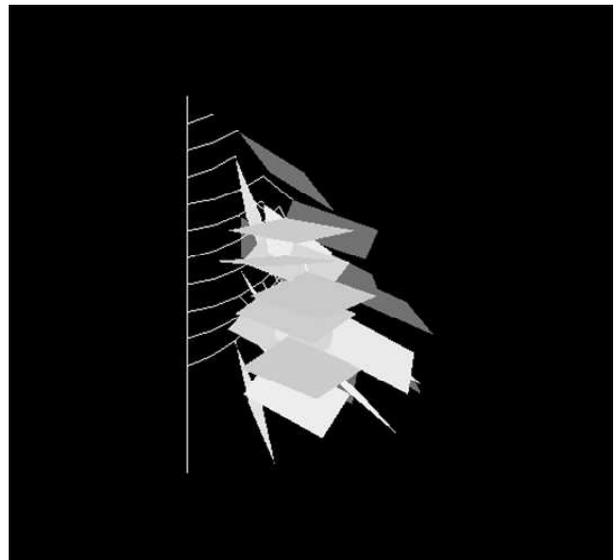
イチョウ



ハナミズキ



ヤマモミジ



正方形

図 3.3.1.2-3 各モジュールを西から見た図

### 3.3.2 各モジュールの受光特性

#### 3.3.2.1 E-LAPS で最適化されたモジュールの受光量の結果

E-LAPS によって夏至および冬至の日射条件に最適化された植物シュート  
を模擬した太陽電池モジュールの受光量を図 3.3.2.1-1 と図 3.3.2.1-2 に示す。  
夏至および冬至の日射条件において、葉の数の増加とともに受光量が増加す  
ることを確認できた。

夏至と冬至の日射条件両方においてハナミズキの葉のモジュールがすべ  
ての葉の数で最も優れた受光量を示し、イチョウとヤマモミジの葉に受光量  
の差は見られなかった。また、正方形の葉は、他の形状と比較して特に低い  
受光量を示した。

夏至の日射条件では、葉は上方向からの光子を効率よく受光するために放  
射状に広がって円状に葉が配置されているため、他の葉と比べて長細い形状  
のハナミズキの葉は重なりが少ないためだと考えられる。また、イチョウと  
ヤマモミジの葉はハナミズキと比較して横に広い形状をしているため、葉同  
士の重なりが増えてハナミズキと比較して受光量が低下したと考えられる。  
また、全ての種類の葉において、数が増えると受光量の増加が緩やかになっ  
ている。これは、E-LAPS は葉の設置の自由度は高いが、葉の数が多くなると  
LAPS ほどではないものの葉同士の重なりが増えて、葉の増加が受光量に  
与える影響が少なくなったためだと考えられる。

冬至の日射条件では、葉は南方向から地面に対して水平に近い角度で照射  
される光子を効率よく受光できるように、葉は地面に垂直に近い角度で配置  
される。また、図 2.2.2.3-1 からわかるように仮想放射光源は南の空の狭い  
範囲で移動するので、葉が効率よく光子を受光できる設置範囲は狭いと考  
えられる。図 3.7.1-2 からイチョウやヤマモミジの葉では多くの葉が南方向を  
向いて縦に並んで葉が設置されているため、光子が多く照射される南  
方向から見ると葉の重なりが多くなっている。一方、ハナミズキの場合も南  
方向を向いて縦に葉を配置しているが、イチョウやヤマモミジの葉の場合と  
違い、縦一列に並ぶのではなく左右に分散されて配置されている。これは、  
ハナミズキの葉が長細い形状をしているために、多少葉が左右にずれても効  
率よく光子を受光できる範囲から外れないためだと考えられる。このことか  
ら、葉同士の重なりを最小にして設置できるため、イチョウやモミジの葉よ  
りも受光量が増えたと考えられる。

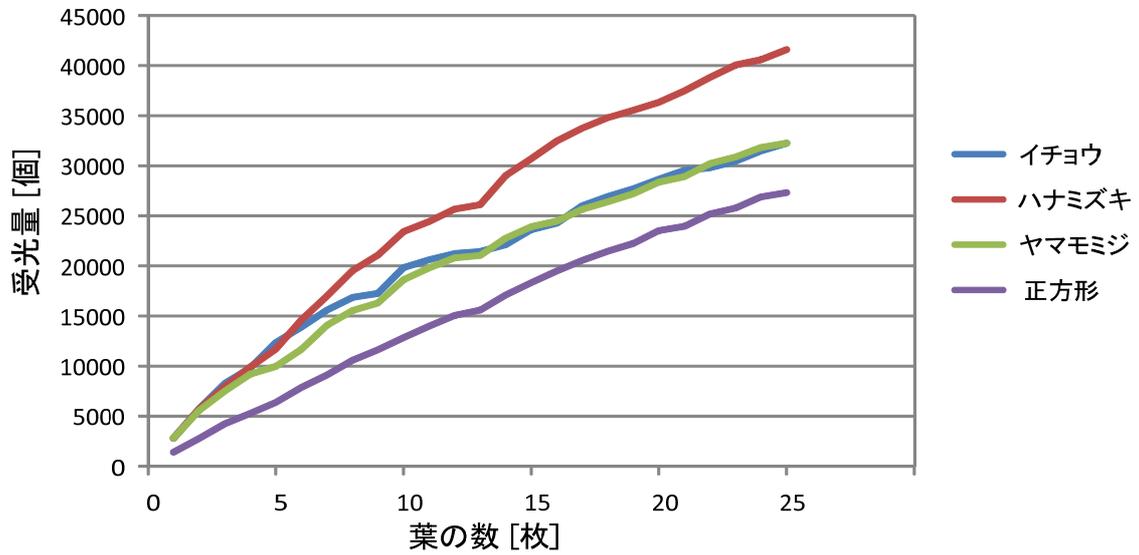


図 3.3.2.1-1 夏至に最適化された各モジュールの受光量

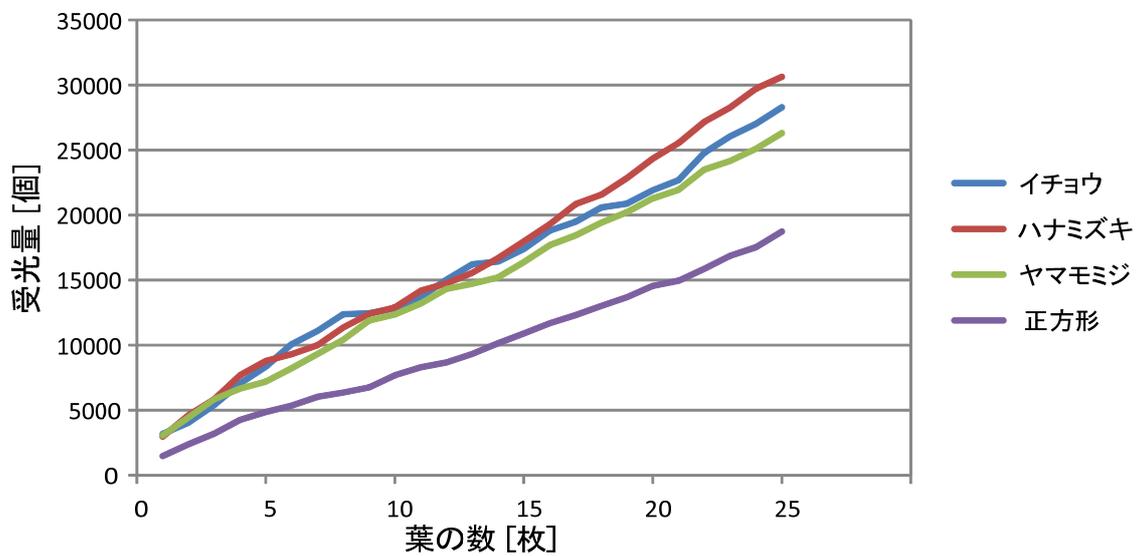


図 3.3.2.1-2 冬至に最適化された各モジュールの受光量

### 3.3.2.2 E-LAPS で最適化されたモジュールの占有面積の結果

E-LAPS によって夏至および冬至の日射条件に最適化された植物シェードを模擬した太陽電池モジュールの占有面積を図 3.3.2.2-1 と図 3.3.2.2-2 に示す。夏至および冬至の日射条件において、15 枚未満では葉の数の増加とともに占有面積が増加するが、葉の数に 15 枚を超えると増加は鈍化してある値で飽和することがわかった。これは、E-LAPS による植物シェードは立体的に配置されるが、占有面積は図 2.1.8-1 に示したように、植物シェードに外接する直方体の底面積によって平面的に定義されるため、葉の数が 15 枚程度で十分な占有面積を確保した後は、この占有面積内で葉が立体的に配置されたためだと考えられる。

葉の形状に注目すると、夏至と冬至の日射条件でハナミズキの葉が最も大きな占有面積となった。これは、他の葉と比較して長細い形状のため、葉を設置した際に外周方向へ大きく影響したためだと考えられる。

夏至の日射条件では図 3.3.2.2-1 に示すようにイチョウの葉が他の葉と比較して非常に小さな値になった。これは、夏至の日射条件では図 3.3.1.1-1 に示すように上方向からの日射を効率よく受光するために、葉が円状に広がっている。イチョウの葉は円の一部の形状をしているので、円状に葉を設置しやすい形状であったため占有面積が小さくなったと考えられる。

冬至の日射条件では図 3.3.2.2-2 に示すように、正方形の葉が最も小さな占有面積となった。図 3.3.1.2-1 に示すようにイチョウの葉以外は上からみると長方形に近い形状で設置されている。正方形の葉は長方形の形状に最も効率よく配置できるため、占有面積が小さくなったと考えられる。

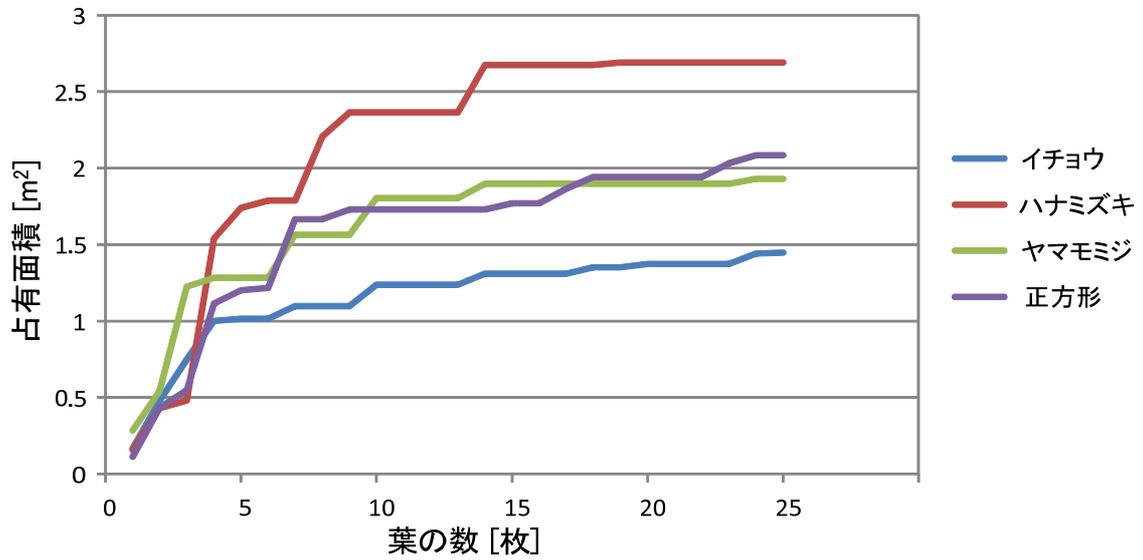


図 3.3.2.2-1 夏至に最適化された各モジュールの占有面積

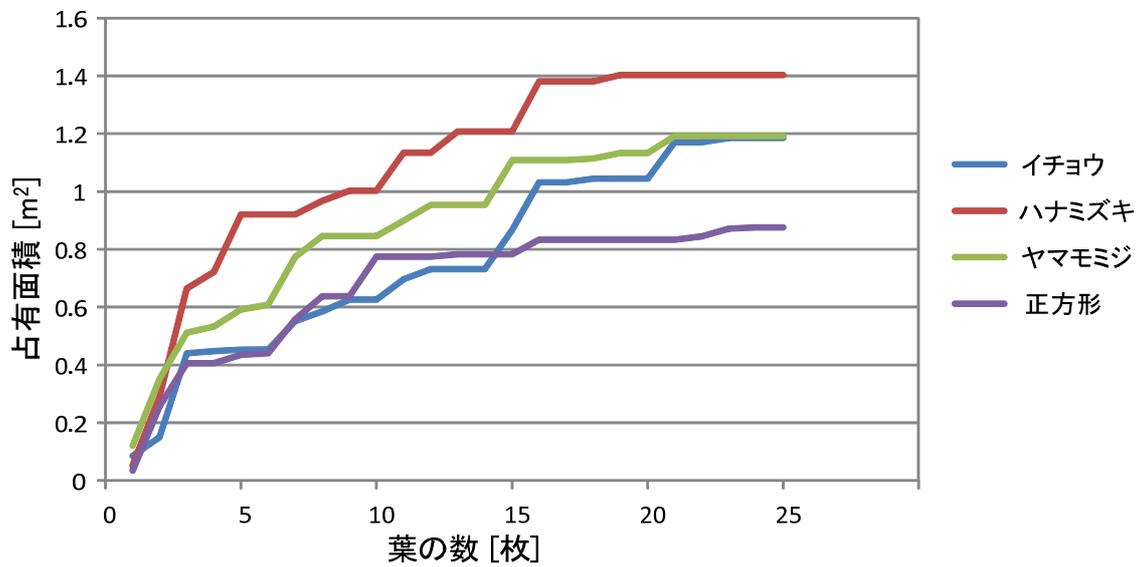


図 3.3.2.2-2 冬至に最適化された各モジュールの占有面積

### 3.3.2.3 E-LAPS で最適化されたモジュールの受光密度の結果

E-LAPS によって夏至および冬至の日射条件に最適化された植物シュート  
を模擬した太陽電池モジュールの受光密度を受光量と占有面積から式  
2.1.8-1 を用いて求めた。結果を図 3.3.2.3-1 と図 3.3.2.3-2 に示す。夏至およ  
び冬至の日射条件で、葉の数が 3 から 4 枚までは、非常に大きな受光密度を  
示している。ただし、この場合は葉の数が少ないため非常に小さな占有面積  
になっており、式は反比例の式で分母が小さな値となるため、解である受光  
密度が非常に大きな値を示したと考えられる。しかし、この時の受光量もま  
た、葉の数が少ないため非常に小さな値となっている。したがって、受光密  
度は高いが実用的ではなく、意味のない結果だと言える。

夏至の日射条件では図 3.3.2.3-1 に示すように、すべての葉の種類におい  
て葉の数の増加とともに受光密度が増加することが確認できた。これは、葉  
の数が増えると受光量は増えるが占有面積はある値で飽和する E-LAPS によ  
って最適化されるモジュールの特徴である。特にイチョウの葉は他の葉と比  
較して大きな値を示した。これは、受光量はハナミズキよりも小さくヤマモ  
ミジと同程度の値であったが、占有面積が他の葉と比較して非常に小さな値  
を示したためだと考えられる。また、正方形の葉が最も低い値であった。

冬至の日射条件では図 3.3.2.3-2 に示すように、葉の数が 15 枚程度までは  
受光密度が横ばいだが、以降はすべての葉において受光密度が増加している。  
また、イチョウの葉が 15 枚程度までは最も受光密度が高かったが、占有面  
積の飽和が生じて以降は、葉の形状による受光密度の大きな違いは見られな  
かった。

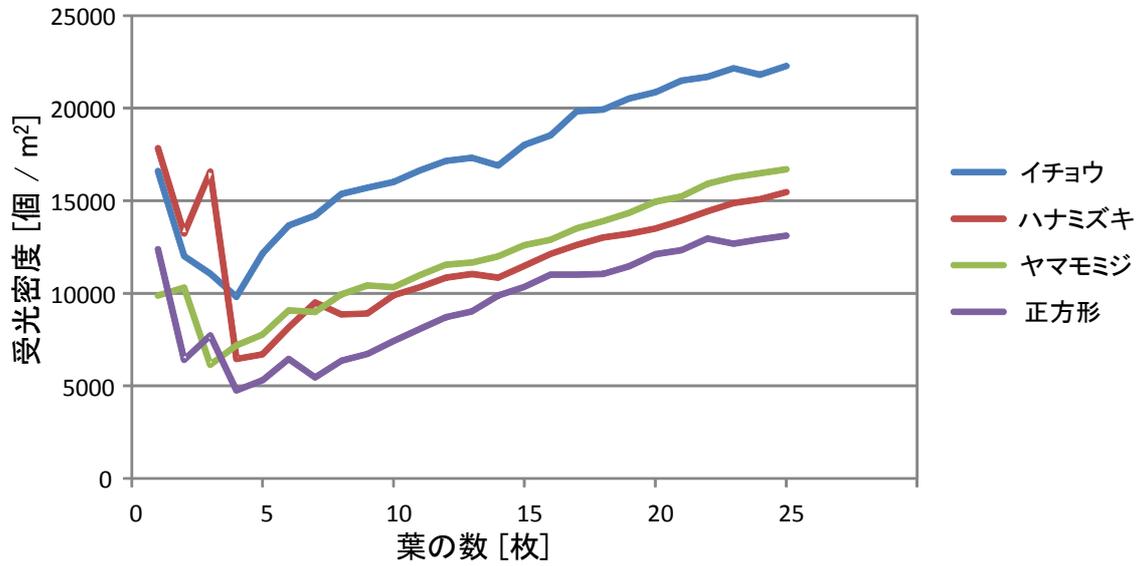


図 3.3.2.3-1 夏至に最適化された各モジュールの受光密度

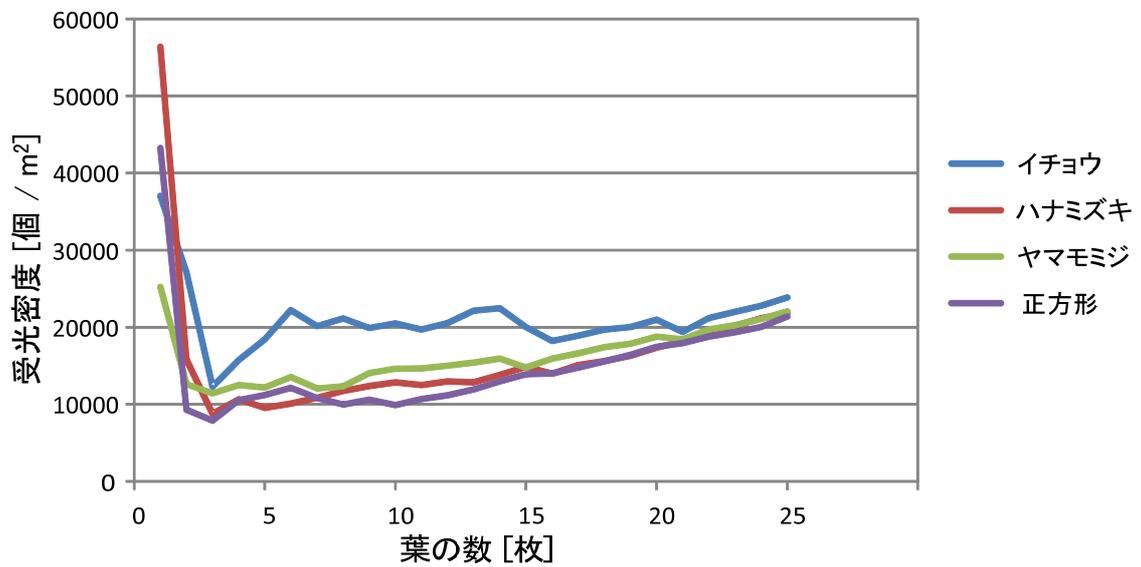


図 3.3.2.3-2 冬至に最適化された各モジュールの受光密度

### 3.4 平板状の太陽電池モジュールとの比較

本節では一般的に使用されている平板状の太陽電池モジュールと E-LAPS によって得られた植物シュートを模擬した太陽電池モジュールの受光特性を比較する。植物シュート太陽電池モジュールは夏至と冬至両方の日射条件で最も高い受光密度を示したイチヨウの葉のモジュールを代表とする。各モジュールには夏至と冬至の日射を照射してそれぞれの受光密度を求める。平板状のモジュールは、北海道札幌市に設置する際に理想とされる地面に対して 43 度の角度で南向きに設置された状態で夏至と冬至両方の日射を受けることにする。イチヨウの葉のモジュールは夏至と冬至それぞれの日射条件に最適化されたモジュールを使用する。

イチヨウの葉のモジュールは、葉の数を 1 枚から 25 枚まで変化させて、それぞれの受光密度を求める。葉 1 枚の面積は  $0.11\text{m}^2$  なので、平板状のモジュールも面積を  $0.11\text{m}^2$  の倍数として複数用意して、それぞれのモジュールの太陽電池の面積を等しくして受光特性を比較する。

図 3.4-1 は横軸をイチヨウの葉の数と平板の面積とした時の各モジュールの受光量である。夏至の日射条件ではイチヨウの葉のモジュールの受光量は葉の数が増えると増加が緩やかになっている。これは、3.3.2.1 項にも示したように、葉同士の重なりが増えてきたために、葉を増やしても受光効果が少なくなっているためである。一方、平板状のモジュールは増えた面積全てが受光効果を示すため、葉の面積に比例して受光量が増えている。したがって、さらに葉の数を増やしてもこの傾向は続くと考えられるので、イチヨウの葉のモジュールと平板状のモジュールの受光量は葉の数が増えると逆転すると考えられる。また、今回と異なる条件で解析を行えば受光量の逆転が起きる葉の数を大きくすることができると考えられるが、植物シュートモジュールは葉同士の重なりを完全に防ぐことは困難であるため、逆転は必ず起きると予想される。一方、冬至の日射条件ではイチヨウの葉のモジュールは葉の数が 8 枚以上では平板状のモジュールよりも少ない受光量となった。

図 3.4-2 は横軸をイチヨウの葉の数と平板の面積とした時の各モジュールの占有面積である。平板状の太陽電池モジュールは、夏至と冬至の日射条件で同じモジュールを使用しているため占有面積は同じ値である。夏至に最適化されたイチヨウの葉のモジュールは葉の数が 16 枚までは平板状のモジュールより大きな占有面積を示したが、17 枚以上では横ばいとなっている。一方、平板状のモジュールは、太陽電池の面積が占有面積に比例するため増

加は止まらない。したがって、さらに葉の数を増やすと、各モジュールの占有面積の差はさらに大きくなると考えられる。一方、冬至に最適化されたイチョウの葉のモジュールは葉の数が7枚以上で平板状のモジュールよりも小さな占有面積を示しており、各モジュールの占有面積の差は、葉の数の増加によってさらに大きくなると考えられる。

図 3.4-3 は横軸をイチョウの葉の数と平板の面積とした時の各モジュールの受光密度である。夏至の日射条件でイチョウの葉のモジュールが葉の数が8枚以上になると平板状のモジュールの受光密度より大きくなっている。平板状のモジュールの受光密度は横ばいなのに対して、イチョウの葉のモジュールの受光密度は葉の数とともに増えているので、葉の数の増加に伴いさらに差が広がると考えられる。冬至の日射条件では、イチョウの葉のモジュールは平板状のモジュールよりも葉の数によらず優れた受光密度を示した。また、葉の数が16枚までは、イチョウの葉のモジュールと平板状のモジュールの受光密度が共に横ばいだったが、葉の数が17枚を超えるとイチョウの葉のモジュールの受光密度は増加し始める。一方、平板状のモジュールの受光密度は横ばいのままのため各モジュールの差が大きくなっており、さらに葉の数を増やすと差はさらに大きくなると考えられる。

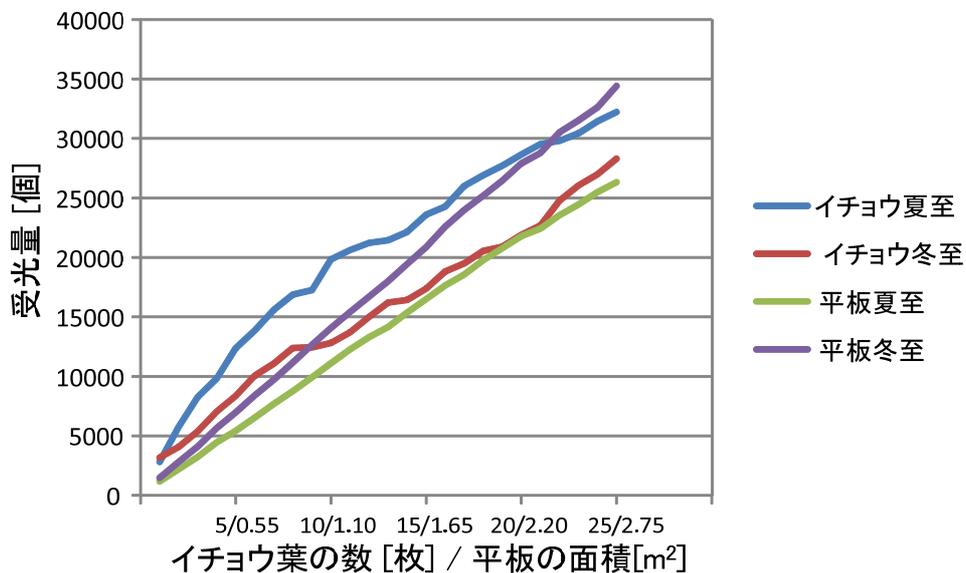


図 3.4-1 受光量についての比較

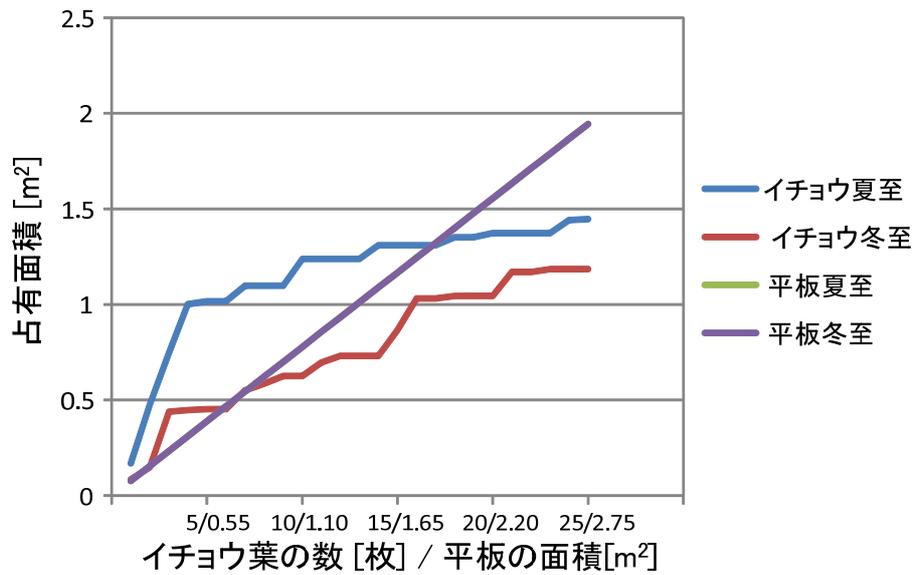


図 3.4-2 占有面積についての比較

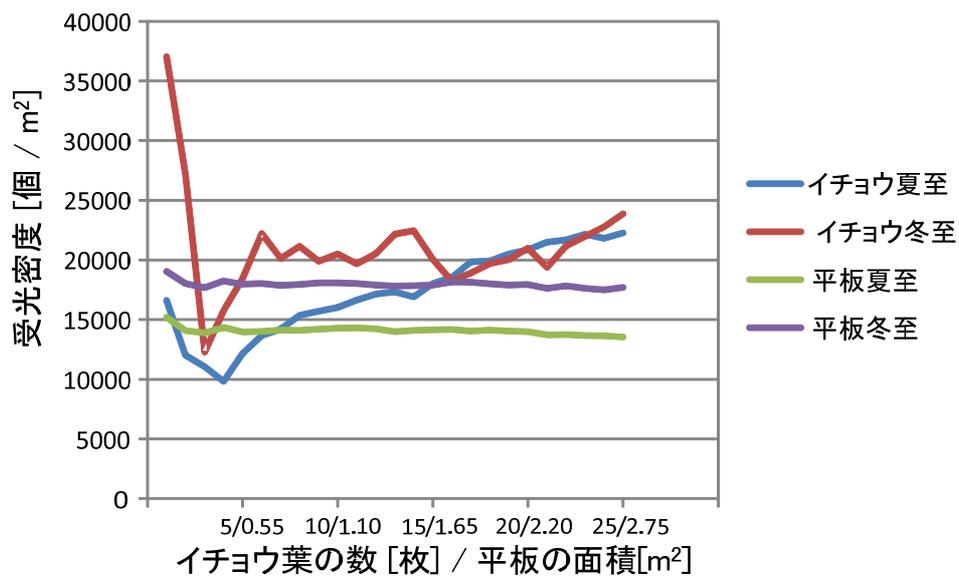


図 3.4-3 受光密度についての比較

### 3.5 可動型太陽電池モジュールとの比較

本節では可動型太陽電池モジュールである平板状の太陽電池で構成された太陽追尾型の太陽電池モジュールと植物シュート太陽電池モジュールの受光特性を比較する。植物シュート太陽電池モジュールは3.4節と同様にイチヨウの葉のモジュールを代表とする。可動型太陽電池モジュールの太陽追尾方法としては、仰角と方位角の両方を制御する完全追尾方式と、どちらかだけを制御する仰角追尾方式と方位角追尾方式が考えられるので、それぞれの場合について受光特性を求める。

可動型太陽電池モジュールは仰角方向と方位角方向の2軸が稼働するモジュールを想定する。各時間で可動型太陽電池モジュールに与えられる仰角と方位角は仮想放射光源に与えられる各時間の仰角と方位角と同じ値を用いる。したがって、完全追尾方式では太陽電池と仮想放射光源は全ての時間において平行になる。仰角追尾方式は方位角を0度として太陽電池を南方向に固定して仰角のみを変化させることで仮想放射光源を追尾する。方位角追尾方式は仰角を43度に固定して方位角のみを変化させることで仮想放射光源を追尾する。

イチヨウの葉のモジュールは25枚の葉で構成され、太陽電池の合計面積は2.75m<sup>2</sup>とする。また、可動型太陽電池モジュールの太陽電池は形状を正方形として、面積をイチヨウの葉のモジュールと等しくした。日射条件として夏至と冬至の条件を用いて、それぞれの日射条件における受光量と受光密度を求める。また、イチヨウの葉のモジュールの占有面積は3.3.2.2で求めた値を用いる。可動型太陽電池モジュールの占有面積は、太陽電池が地面と垂直になった状態が最であり、平行になった状態が最大である。ただし、稼働時に障害物等との衝突を防ぐには占有面積が最大になる領域を確保しておく必要がある。したがって、本節では可動型太陽電池モジュールの受光密度の計算には占有面積として太陽電池の面積である2.75m<sup>2</sup>を用いる。

図3.5-1と図3.5-2のグラフは夏至と冬至の日射条件における受光量の解析結果である。夏至と冬至の日射条件で可動型の太陽電池モジュールがすべての追尾方式において、イチヨウの葉の太陽電池モジュールよりも高い受光量を示した。また、可動型の中でも完全追尾方式の太陽電池モジュールが最も受光量が大きくなっている。これは、他の太陽電池モジュールと異なり常に太陽電池と仮想放射光源が平行な状態が保たれるため、当然の結果であるといえる。また、夏至の日射条件では方位角追尾方式が仰角追尾方式よりも高い受光量を示している。これは、図2.2.2.3-1に示すように、夏至の日射

条件では仮想放射光源の方位角の変化量が年間を通して最大になり、仰角の変化量との差が最も大きくなるためだと考えられる。一方、冬至の日射条件では方位角の変化量が年間を通して最少であり、仰角の変化量と差が少ないことから、方位角追尾方式と仰角追尾方式で受光量に違いは見られなかった。

図 3.5-3 と図 3.5-4 のグラフは夏至と冬至の日射条件における受光密度の解析結果である。夏至と冬至の日射条件において、イチヨウの葉のモジュールが可動型太陽電池モジュールよりも高い受光密度を示している。これは、可動型の太陽電池モジュールは衝突を防ぐために占有面積が大きくなるためだと考えられる。

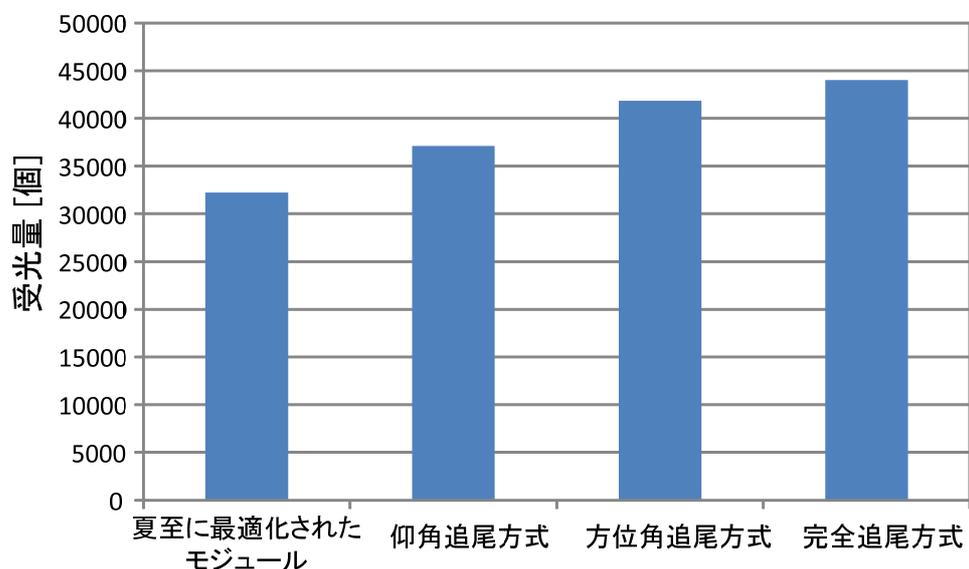


図 3.5-1 夏至の日射条件における各モジュールの受光量

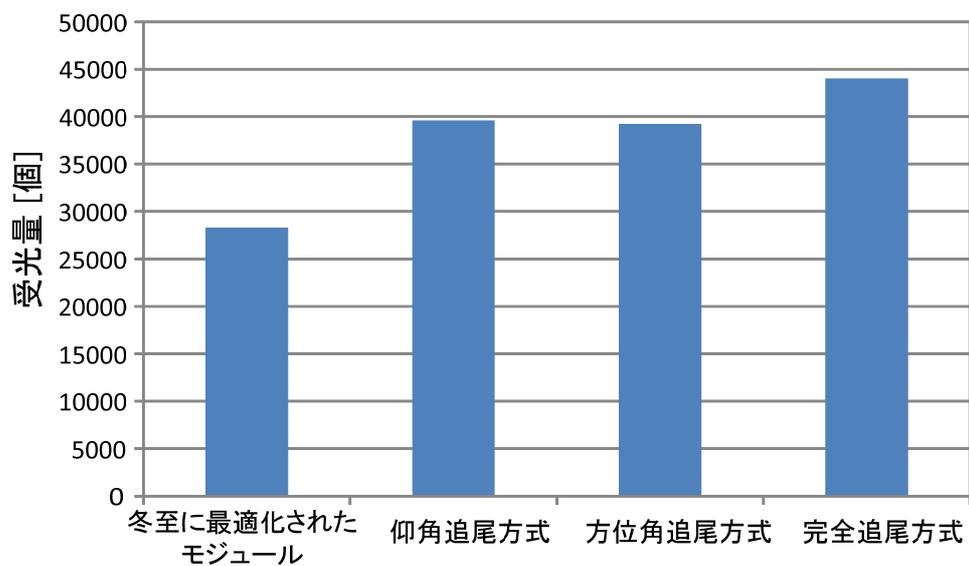


図 3.5-2 冬至の日射条件における各モジュールの受光量

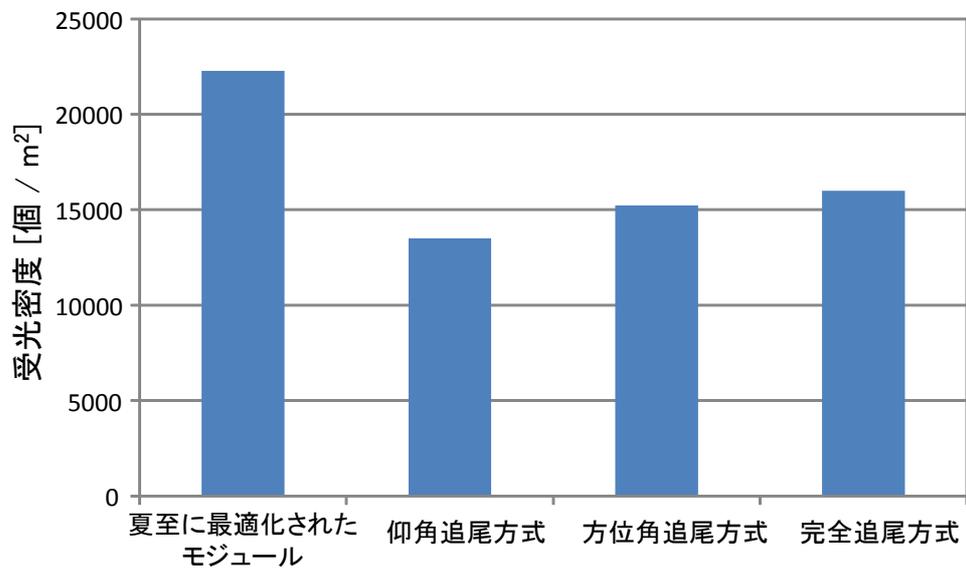


図 3.5-3 夏至の日射条件における各モジュールの受光密度

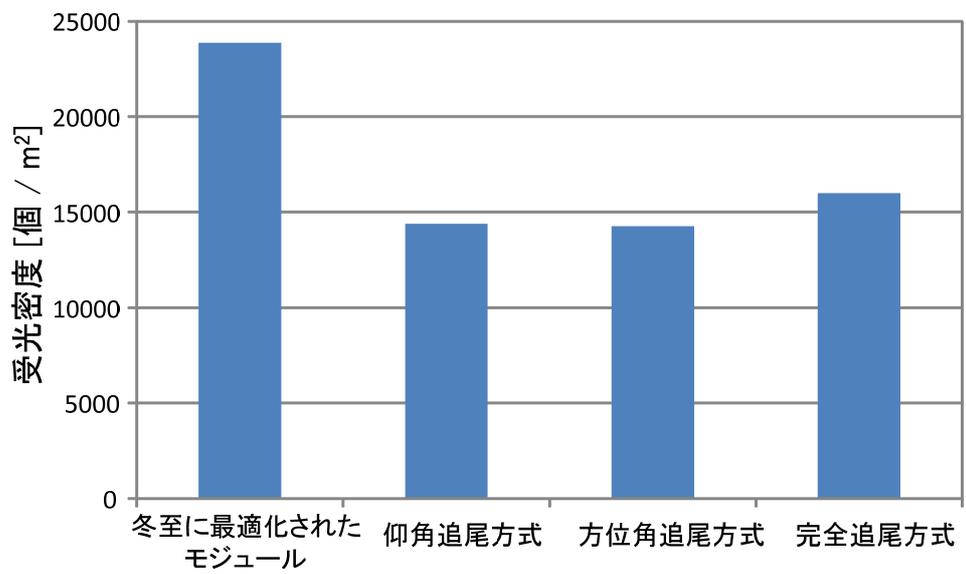


図 3.5-4 冬至の日射条件における各モジュールの受光密度

## 3.6 通年最適化

### 3.6.1 通年最適化に用いる解析条件

これまでの解析で E-LAPS により夏至と冬至それぞれの日射条件に最適化された植物シュート形態を模擬した太陽電池モジュールは、平板状の太陽電池モジュールと比較してそれぞれの日射条件において優れた受光密度を示すことを明らかにした。しかし、太陽電池モジュールは 1 年を通して使用されるため、通年で最適な形状を求める必要がある。そこで、本節では通年の日射条件を用いて E-LAPS による解析を行い、年間を通して高い受光密度が得られる植物シュートを模擬した太陽電池モジュールを求める。

本節では北海道札幌市への植物シュートを模擬した太陽電池モジュールの設置を試みる。解析には植物シュート太陽電池モジュールの年間受光量が必要であるが、1 年 365 日分の日射を解析するには解析時間が非常に長くなってしまふ。そこで、本論文では各月ごとに代表日  $g$  を決定して、代表日  $g$  の受光量をその月の受光量とする。そして、12 か月分を合算することにより年間受光量を計算する。ただし、代表日  $g$  は各月の 15 日とした。

各月の代表日における時間  $st$  ごとの仮想放射光源の方位角  $V_{s,\theta}$  と仰角  $V_{s,\phi}$  を図 3.6.1-1 に示す。また、図 3.6.1-2 に示す各月の代表日  $g$  の時間  $st$  における水平面日射量は、式 3.6.1-1 に示すように各月の全ての日の時間  $st$  における水平面日射量の平均値とした。解析に使用する月  $sm$  の時間  $st$  に放射する光子数を式で定義する。ただし、 $N_a$  は 1 年間に放射される光子の総和とする。解析に用いる  $N_a$  は 600,000 個とした。この場合の各月の各時間  $st$  における光子の放射数を図 3.6.1-3 に示す。また、解析に日射条件以外の条件は 3.2.2 項で示したのものも使い、L-system の置換回数を 10 回、太陽電池モジュールはイチョウの葉の形状とした。

$$e_{g,sm,st} = \frac{\sum_{sd=0}^{Month} e_{g,sm,st,sd}}{Month} \quad (3.6.1-1)$$

$$nq_{g,sm,st} = N_a R_{g,sm,st} = N_a \left( \frac{e_{g,sm,st}}{\sum_{sm=0}^{Year} \sum_{st=0}^{Day} e_{g,sm,st'}} \right) \quad (3.6.1-2)$$

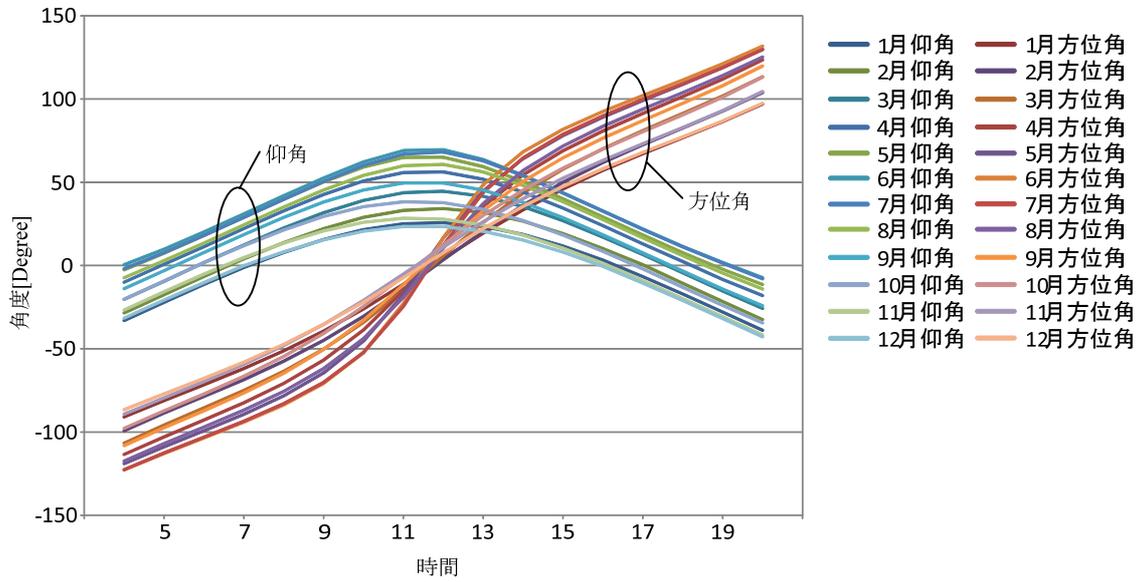


図 3.6.1-1 各月の代表日における時間ごとの仮想放射光源の位置

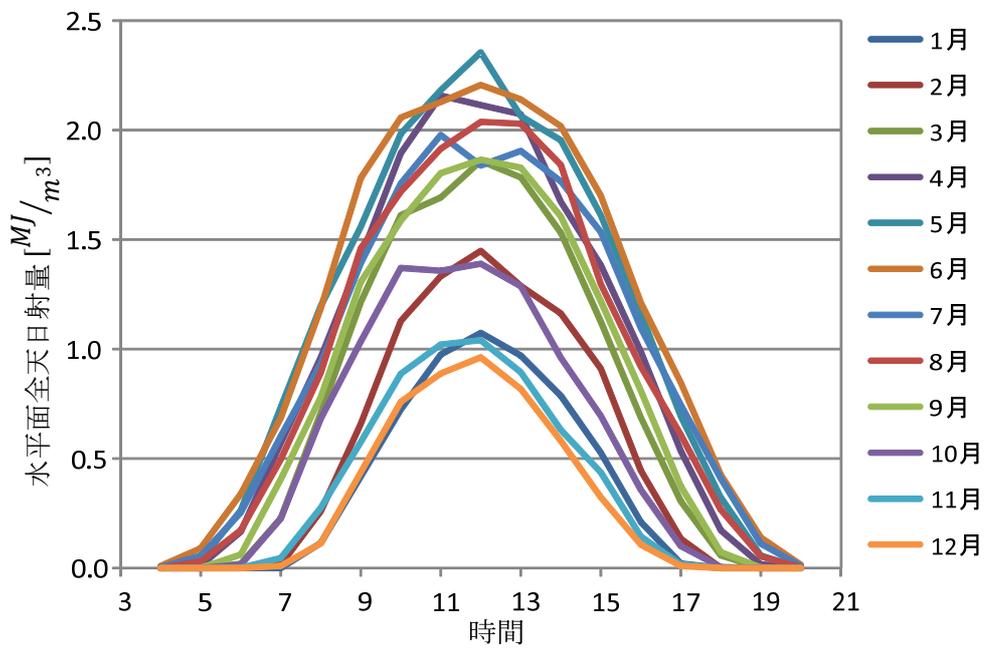


図 3.6.1-2 各月の代表日における時間ごとの水平面全天日射量

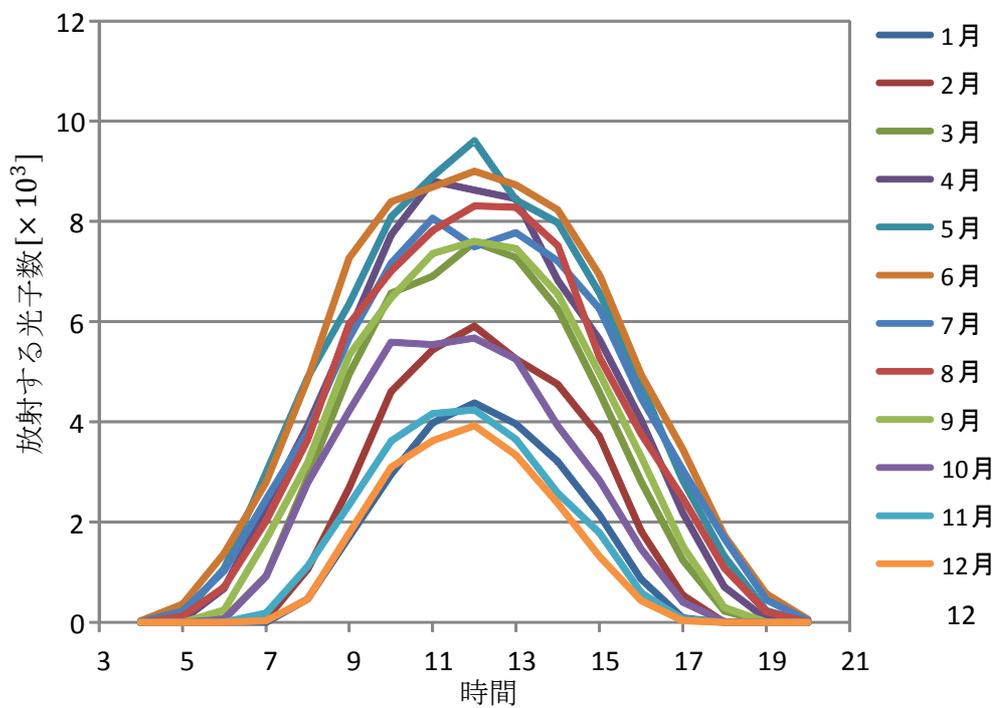


図 3.6.1-3 各月の代表日における時間ごとの仮想放射光源から放射される光子数

### 3.6.2 解析結果と考察

通年日射に最適化した植物シュート形態を模擬した太陽電池モジュールを図 3.6.2-1 から図 3.6.2-3 に示す。図 3.6.2-1 は太陽電池モジュールを上から見た図であり、図の下が南方向である。また、図 3.6.2-2 は南方向から、図 3.6.2-3 は西方向から太陽電池モジュールを見た図である。図 3.6.2-1 から上からの光子を効率よく受光するため隙間なく葉が配置されていることが分かる。これは 3.3 節で解析を行った夏至に最適化した太陽電池モジュールと同じ特徴である。また、図 3.6.2-2 と図 3.6.2-3 に注目すると、夏至に最適化した太陽電池モジュールの様に上向きに配置されている葉と、冬至に最適化した太陽電池モジュールの様に南向きに配置された葉の両方を持つことが分かる。3.3 節では日射条件として両極端となる夏至と冬至について解析を行ったが、本節で解析した通年日射に最適化した太陽電池モジュールは夏至と冬至それぞれに最適化した太陽電池モジュールを組み合わせた形態になった。これは、通年日射による様々な方向から放射される光子に対応したためであり、上向きに配置された葉は夏至に近い日射条件による光子の受光を担当し、南向きに配置された葉は冬至に近い日射条件による光子の受光を担当していると考えられる。また、中間の日射条件では両方の葉によって光子が受光されていると考えられる。

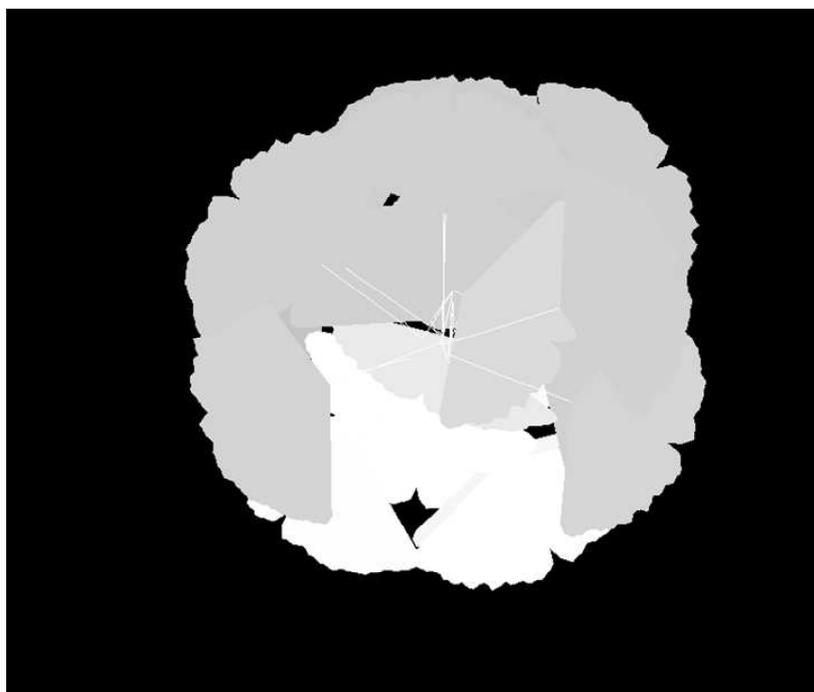


図 3.6.2-1 通年日射に最適化した太陽電池モジュールを上から見た図

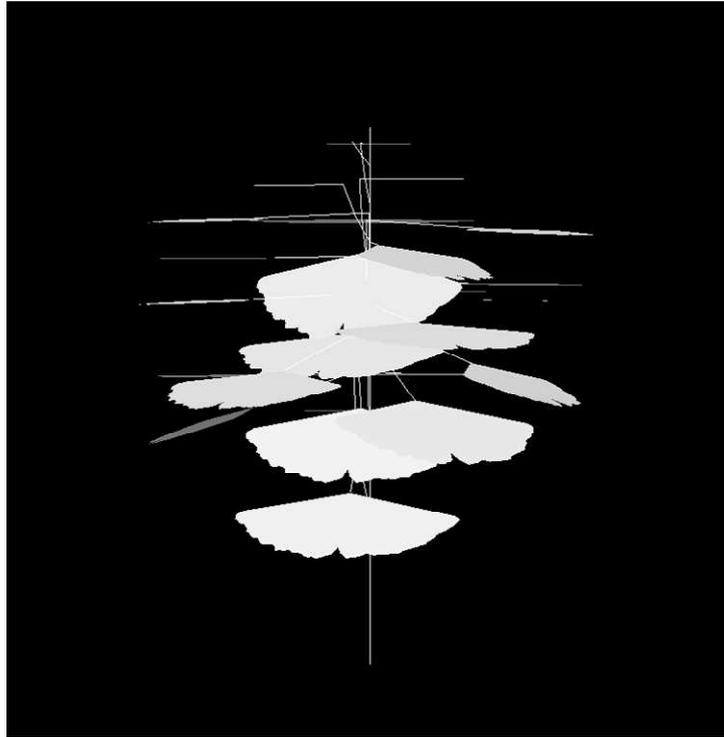


図 3.6.2-2 通年日射に最適化した太陽電池モジュールを南から見た図

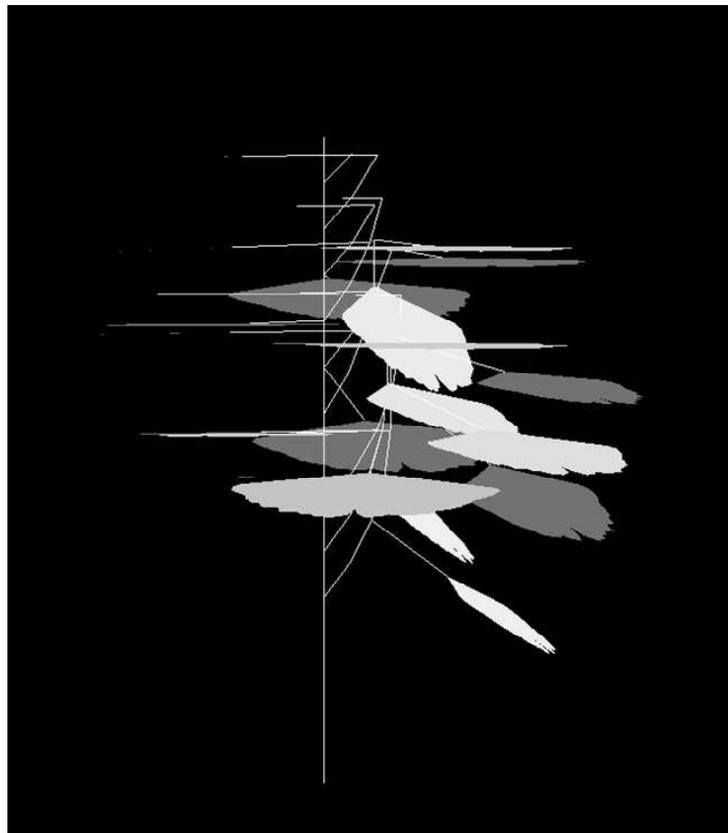


図 3.6.2-3 通年日射に最適化した太陽電池モジュールを西から見た図

### 3.6.3 各太陽電池モジュールとの比較

本項では E-LAPS によって通年日射に最適化されたモジュール，夏至に最適化されたモジュール，冬至に最適化されたモジュール，43 度の角度で南向きに設置された平板状のモジュールそれぞれに通年の日射を与えた場合の各モジュールの受光特性を比較する．ただし，夏至および冬至それぞれに最適化されたモジュールはイチョウの葉のモジュールを用いる．図 3.6.3-1 のグラフに各モジュールの通年での受光量を示す．通年日射に最適化されたモジュールが最も大きな受光量を示している．次に大きな受光量を示したのは平板状のモジュールであった．夏至と冬至に最適化されたモジュールは，平板状のモジュールと比較して低い受光量になった．これは，夏至および冬至それぞれに最適化されたモジュールは年間を通して両極端な日射について最適化されているため，他の期間の受光効率が低くなってしまったためだと考えられる．通年日射に最適化されたモジュールは，図 3.6.2-2 と図 3.6.3-3 から，夏至および冬至に最適化されたモジュールの両方の特徴を持つので，年間を通して大きな受光効率が得られ，結果として大きな受光量を得られたと考えられる．

図 3.6.3-2 のグラフに各モジュールの占有面積を示す．通年日射に最適化されたモジュールは夏至に最適化されたモジュールに近い占有面積となった．これは，通年日射に最適化されたモジュールは夏至および冬至それぞれに最適化されたモジュールの特徴を併せ持ち，また，夏至に最適化されたモジュールは冬至に最適化されたモジュールよりも大きな占有面積をもつことから，通年日射に最適化されたモジュールの占有面積は夏至に最適化されたモジュールに近い値になったと考えられる．

図 3.6.3-3 のグラフに各モジュールの受光密度を示す．通年日射に最適化されたモジュールが最も大きな受光密度を示した．また，E-LAPS によって最適化されたすべてのモジュールが平板状のモジュールよりも大きな占有面積を示した．これは，E-LAPS によって最適化されたモジュールは葉が立体的に配置されるために平板状のモジュールよりも占有面積が小さくなるので，式 2.1.8-1 で求められる占有面積が大きな値を示したと考えられる．

図 3.6.3-4 のグラフに各モジュールの月ごとの受光密度を示す．通年日射に最適化されたモジュールと冬至に最適化されたモジュールは年間を通して平板状のモジュールよりも大きな受光密度を示した．夏至に最適化されたモジュールは冬期間で平板状のモジュールよりも受光密度が小さくなった．これは，通年日射に最適化されたモジュールは冬期間の受光に適した葉を持つが，夏至に最適化されたモジュールは冬期間の受光に適した葉を持たない

ために冬期間の受光量が低くなってしまい、占有面積が近い値の両モジュールの冬期間の受光密度に差が出たと考えられる。

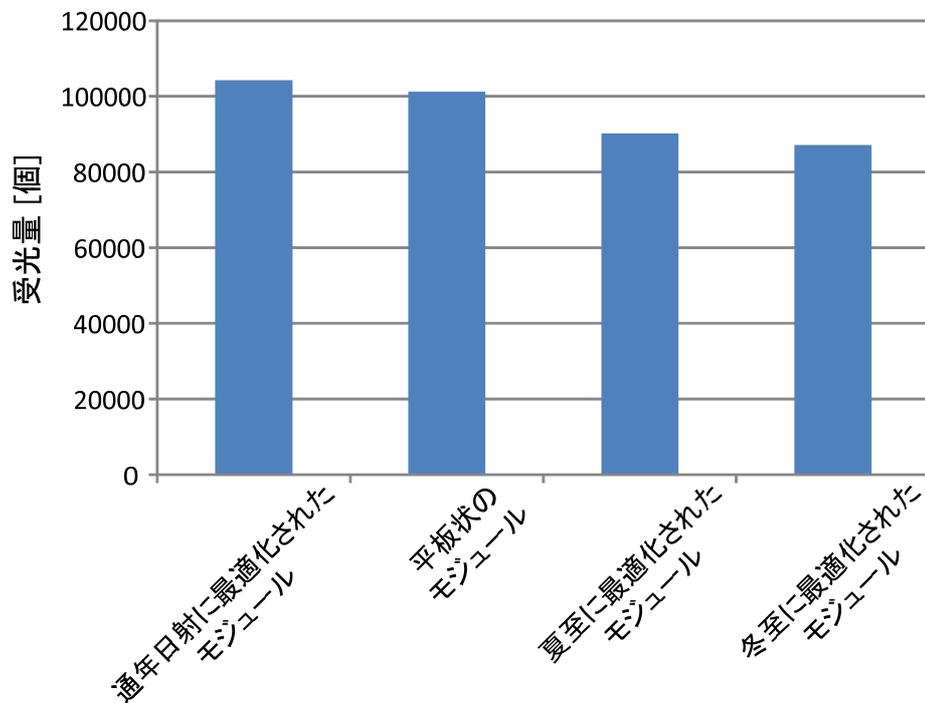


図 3.6.3-1 各モジュールの受光量の比較

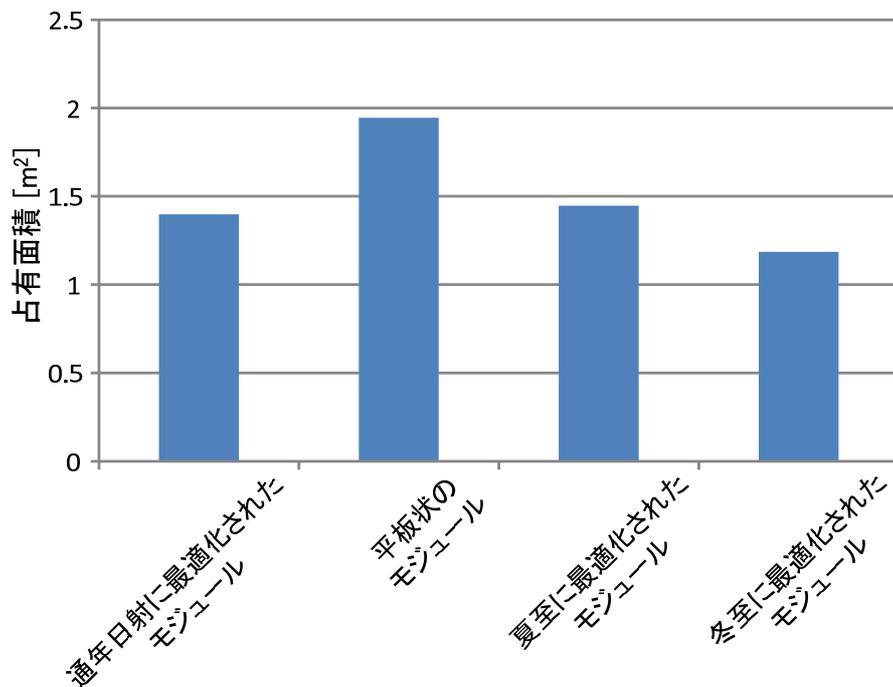


図 3.6.3-2 各モジュールの占有面積の比較

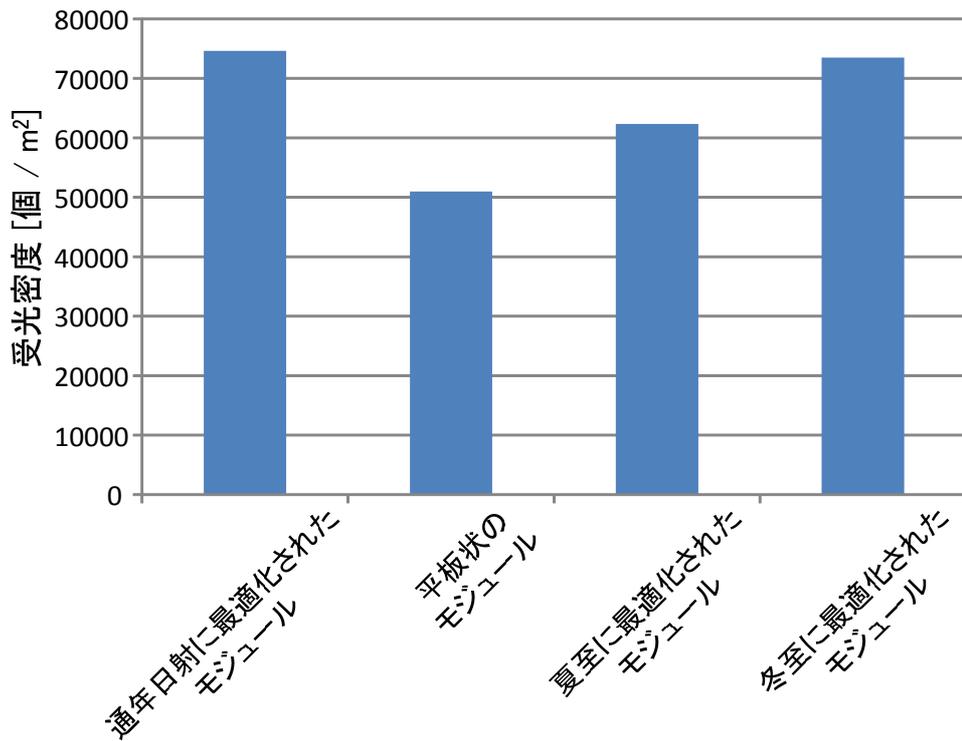


図 3.6.3-3 各モジュールの受光密度の比較

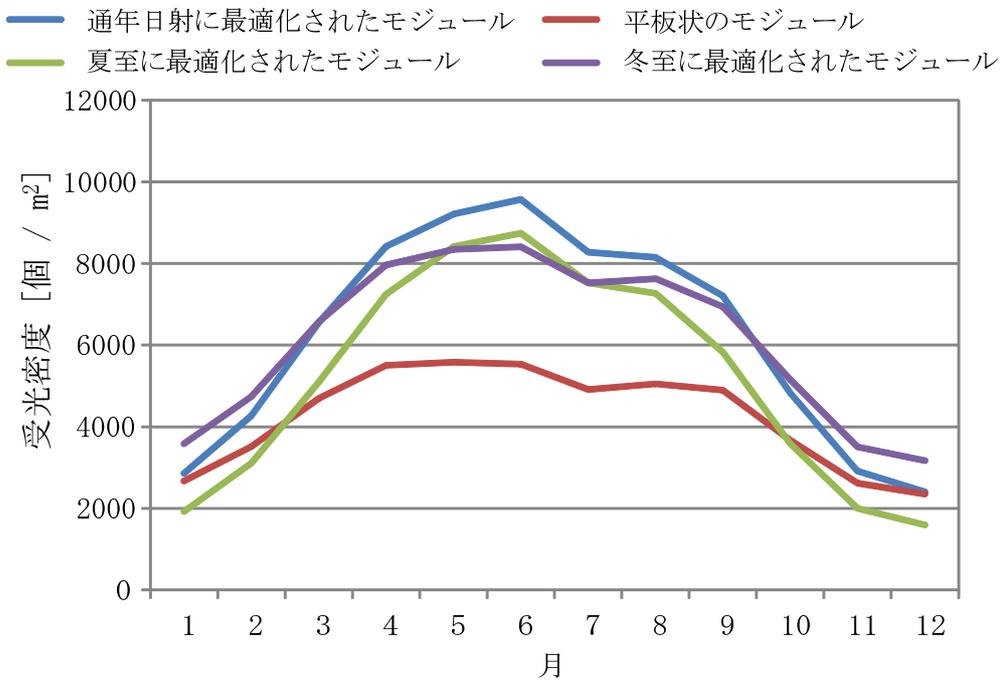


図 3.6.3-4 月ごとの各モジュールの受光密度の比較

## 4 章 結言

本論文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、LAPSを開発して、イチヨウ、ハナミズキ、ヤマモミジ、正方形の4種類の形状の葉につい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、LAPSの問題点をL-systemの導入により解決したE-LAPSを開発して、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、受光密度を計算して、一般的に使われている平板状の太陽電池モジュールと比較した。この結果、以下の結論を得た。

- (1) 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、葉の数が増えると受光量の増加は緩やかになった。一方、E-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。ただし、1枚新しく葉が増えることによるモジュール全体の受光量増加に対する効果は、葉の数が増えるごとに小さくなっている。
- (2) 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か葉を増やすと、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。E-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) 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。E-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。

- (4) LAPS によって得られたモジュールの受光密度は、平板状のモジュールと比較して、夏至の日射条件では同等の値となり、冬至の日射条件では 70% 程度の値しか得られず、平板状の太陽電池モジュールに劣る結果となった。また、葉の数を増やしても受光密度の改善は見られないと予想される解析結果となった。
- (5) E-LAPS によって得られたモジュールは、夏至と冬至の両方の日射条件において、平板状のモジュールより優れた結果を示した。また、葉の数の増加に伴い更なる受光密度が得られると予想される解析結果が得られた。
- (6) 4 種類の葉の形状について夏至と冬至に最適化した植物シュートを模擬した太陽電池モジュールを求めて受光特性を比較したが、全ての場合において、自然界の植物の葉が正方形の葉を上回る結果となった。これは、自然界の植物の葉が正方形に進化していないことと合致する。
- (7) E-LAPS によって通年の日射条件に最適化したイチヨウの葉のモジュールは通年の日射条件において、平板状のモジュールよりも高い受光密度を示した。

以上のことから、受光密度について E-LAPS によって最適化することにより、現在広くに使われている平板状の太陽電池モジュールよりも優れた受光効率をもった太陽電池モジュールを求めることに成功した。また、日射条件や葉の形状などの条件を適切に E-LAPS に与えることによって、設置場所に最適化されたフレキシブルな太陽電池モジュールを得られるので、マイクログリッドなどの面積の限られた場所で運用する太陽電池モジュールを柔軟に扱うことができると考える。しかしながら、植物シュートを模擬した太陽電池モジュールは構造が複雑になるため、製造コストや強度については今後の課題と考える。また、LAPS や E-LAPS で複数の葉を同時に最適化する場合には、GA に用いる各パラメータの最適値をさらに検討する必要がある。

## 記号表

$a$	: 式 (2.1.8-2) の $F_0$ の重み
$C$	: 植物シュートの占有面積 [ $\text{m}^2$ ]
$E_{w,k,t}$	: 時刻 $t$ に葉 $w$ の面要素 $k$ に到達する光子数
$e$	: 水平面全天日射量 [ $\text{MJ}/\text{m}^2$ ]
$F_d$	: 占有面積の総和に占める割合の補集合
$F_0$	: GA での占有面積の評価
$F_S$	: GA での受光量の評価
$J$	: 植物シュートに到達する総光子数
$J_e$	: 葉の面要素数
$J_l$	: 葉の数
$L$	: 植物シュートの枝
$M$	: 植物シュートの幹
$N_a$	: 1日に放射する総光子数
$\vec{N}_S$	: 葉の面要素の法線ベクトル
$\vec{N}_p$	: 葉の面要素の頂点における法線ベクトル
$nq$	: 放射する光子数
$P_e$	: 仮想放射面上の放射位置の座標
$P_g$	: 地表 ( $x$ - $y$ 平面) に到達した光子の地表の座標
$P_s$	: 葉の面要素の頂点座標
$P_t$	: 葉に到達した光子の葉上の座標
$P_v$	: 仮想放射光源の頂点座標
$R_{g,st}$	: サンプル時刻 $st$ に放射する光子数の $N_a$ に対する割合
$S$	: 植物シュートの葉枝
$\vec{V}_e$	: 仮想放射光源の単位法線ベクトル
$V_S$	: 仮想放射平面の位置
ギリシャ文字	
$\theta$	: 方位角 [degree]
$\varphi$	: 仰角 [degree]
添え字	
$g$	: 代表日
$K,m$	: 葉の面要素番号
$Ln$	: 枝の番号
$l$	: 植物シュートの要素の長さ
$Mn$	: 幹の番号

*mt* : サンプルング月  
*q* : 模擬する光子番号  
*Sn* : 葉枝の番号  
*st* : サンプルング時刻[O'clock]  
*t* : 時刻[hour]  
*u* : 植物シュートの個体番号  
*w* : 葉の番号

## 参考文献

- [1] World Population Prospects: The 2012 Revision, <http://esa.un.org/wpp/>
- [2] 総務省統計局「世界の統計 2014」, <http://www.stat.go.jp/data/sekai/0116.htm>
- [3] BP「Statistical review of world energy 2013」,  
<http://www.bp.com/en/global/corporate/about-bp/energy-economics/statistical-review-of-world-energy.html>
- [4] 資源エネルギー庁「エネルギー白書 2014」,  
<http://www.enecho.meti.go.jp/about/whitepaper/>
- [5] BP 統計 2012, [http://www.bp.com/ja\\_jp/japan/report/bp-statistics.html](http://www.bp.com/ja_jp/japan/report/bp-statistics.html)
- [6] 環境省「世界のエネルギー起源 CO2 排出量 2011 年」,  
<http://www.env.go.jp/earth/ondanka/shiryo.html>
- [7] IPCC 第 3 次報告書, <http://www.data.jma.go.jp/cpdinfo/ipcc/index.html>
- [8] IPCC 第 5 次報告書, <http://www.data.jma.go.jp/cpdinfo/ipcc/ar5/index.html>
- [9] 財務省「貿易統計」, <http://www.customs.go.jp/toukei/info/>
- [10] 「資源エネルギー庁」, 「エネルギー白書 2013」
- [11] 牧野 禎紀, 地熱開発促進調査の現状と見通し, 日本エネルギー学会誌, Vol.87, No.10, 2008, pp.806-811.
- [12] 雪田和人, 藤本晃司, 後藤泰之, 一柳勝宏, 大島貴充, 林二一, フライホイールを用いた風力発電装置の出力変動抑制の検討, 日本機械学会, 第13回動力・エネルギー技術シンポジウム講演論文集, 2008, pp.141-142.
- [13] 小林大悟, 野口雄平, 山暗由大, 金子成彦, 牛島宏太, 自然エネルギー電源の出力変動抑制におけるガスエンジンの利用, Dynamics and Design Conference 2011 CD-ROM論文集, 2011.
- [14] 牛込和也, 舟木剛, 自然エネルギーの出力変動抑制に向けたEDLCの充放電制御システムに関する考察, 電子情報通信学会, 信学技報, EE2011-39, 2011, pp.47-52.
- [15] 長谷川光洋, 平田憲司, 高山環, 舟谷友宏, 冬木隆, 多結晶シリコン太陽電池の作製における室温レーザードーピング, 電子情報通信学会, 信学技報, SDM2010-189, 2010, pp.25-28

- [16]丸山英治, 単結晶シリコンを利用した高効率太陽電池の開発動向, 日本結晶成長学会誌, Vol.36, No.4, 2009, pp.28-33.
- [17]宇佐美德隆, 藤原航三, 杓掛健太朗, 中嶋一雄, Siバルク多結晶の組織制御による太陽電池の高効率化, 電子情報通信学会, 信学技報, SDM2008-15, 2008.
- [18]森勇藏, 垣内弘章, 芳井熊安, 安武潔, 松本光弘, 江畑裕介, 大気圧プラズマCVD法による太陽電池用アモルファスSiの超高速成膜, 精密工学会誌, Vol.68, No.9, 2002, pp.1077-1081.
- [19]蔵之内真一, 中澤達夫, 電着法によるCIS系薄膜の堆積, 電子情報通信学会, 信学技報, CPM97-132, 1997, pp.103-109.
- [20]橋本佳男, 櫻井純一, 伊東謙太郎, GaAs等の化合物半導体表面のよう素処理の効果, 電子情報通信学会, 信学技報, CPM95-44, 1995, pp.7-10.
- [21]田中竜彦, 川崎正雅, 伊藤幸一, 大澤潤, 土田縫夫, 梶川総一郎, マイクロマシン用GaAs太陽電池, 電子情報通信学会, 信学技報, ED99-47, CPM99-21, SDM99-21, 1999, pp.43-48.
- [22]高本達也, 池田英治, 安居院高明, 栗田博, 山口真史, InGaP/GaAs タンデム構造太陽電池, 電子情報通信学会, 信学技報, ED98-26, CPM98-11, SDM98-26, 1998, pp.77-84
- [23]辻浩彰, 角舎輝典, 折板屋根を架台とした太陽電池の通気冷却による発電効率向上に関する研究, 日本建築学会東海支部研究報告集, 第42号, 2004, pp.481.
- [24]小糸康志, 山口鉄洋, 堀内康洋, 井村英昭, 鳥居修一, 太陽電池冷却用トップヒート型熱サイフォンの熱輸送特性に関する研究(開放および密閉型システムの比較), 日本機械学会講演論文集, No.45, 2004, pp.105-106.
- [25]遠藤 拓也, 宇田川光弘, 南成晃, 太陽電池の設置方法の太陽光発電量への影響, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 1993, pp.59-60.
- [26]工藤満, 野崎洋介, 秋山一也, 谷内利明, 円筒型太陽電池モジュールの日射特性, 電子情報通信学会, 信学技報, EE2000-40, 2000.
- [27]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.
- [28]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.
- [29]櫛屋勝巳, CIS系を中心とした薄膜太陽電池, 電子情報通信学会誌, Vol.93, No.3, 2010, pp.194-197.
- [30]和田隆博, 根上卓之, 高効率CIGS太陽電池, 電子情報通信学会, 信学技報, EDM98-27, CPM98-27, SDM98-27, 1998, pp.85-91.
- [31]藤掛伸二, 吉田隆, 市川幸美, 夏目文夫, フレキシブルアモルファス太陽電池, 電子情報通信学会, 信学技報, ED98-24, CPM98-9, SDM98-24, 1998, pp.61-67.
- [32]上野修, 植物における太陽エネルギーの蓄積(1) 光合成のメカニズム, 日

- 本エネルギー学会誌, Vol.89, 2010, pp.60-66.
- [33]近藤始彦, 植物における太陽エネルギーの蓄積(2) 光合成と作物, 日本エネルギー学会誌, Vol.89, 2010, pp.172-178.
- [34]田崎忠良, 環境植物学, 朝倉書店, 1978.
- [35]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
- [36]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.
- [37]小原伸哉, 川江修, Balaji Rengaraja, 植物シュート太陽電池モジュールを用いたソーラー水電解による自立エネルギー住宅の計画, 空気調和・衛生工学会論文集, No.178, 2011, pp.1-10.
- [38]北野宏明, 遺伝的アルゴリズム, 産業図書, 1993.
- [39]NEDO日射量データベース, <http://www.nedo.go.jp/library/nissharyou.html>
- [40]杉野守, 原産地を異にするタルホコムギ諸系統の日長と温度に対する成長反応, 近畿大学農学部紀要, 第10号, 1977, pp.11-22
- [41]桑原達雄, 阿部二郎, 森山真久, 入来規雄, 吉田みどり, 高田兼則, 秋播コムギ品種の生理・生態的形質と雪腐病被害との関係, 育種学雑誌 Vol. 47, No. 3, 1997, pp.271-277
- [42]杉野守, 1粒系小麦の早生系および晩生系における花成と成長反応の比較生理学的研究(Ⅱ), 近畿大学農学部紀要, 第11号, 1978, pp.11-24
- [43]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.
- [44]A.Lindenmayer. Mahtmatical models for cellular interactions in development :1 filaments with one-sided inputs, J. Theoret. Vol.18, 1968, pp.280-299.
- [45]A.Lindenmayer. Mahtmatical models for cellular interactions in development :2 simple and branching filaments with two-sided inputs, J. Theoret. Vol.18, 1968, pp.300-315.
- [46]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.
- [47]R. Yodthong, C. Somporn, S. Suchada, L. Chidchanok and C. Prabhas, Animating Plant Growth in L-System by Parametric Functional Symbols, INTERNATIONAL JOURNAL OF INTELLIGENT SYSTEMS, VOL.19, 2004, pp.9-23.
- [48]A. Coelho, M. Bessa, A. Augusto Sousa and F. Nunes Ferreira, Expeditious Modelling of Virtual Urban Environments with Geospatial L-systems, COMPUTER GRAPHICS forum, Vol. 26, No.4, 2007, pp. 769-782.
- [49]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.
- [50]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.
- [51]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.
- [52]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.
- [53]尾田十八, Kundu,S., 斉藤誠, 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.
- [54]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.
- [55]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.

## 謝辞

本論文は国立大学法人北見工業大学において寒冷地・環境・エネルギー工学専攻博士後期課程の3年間の研究成果をまとめたものです。

本研究の遂行及び本論文をまとめるにあたり、北見工業大学大学院教授 小原伸哉博士には、大変多くのご助言、ご指導を賜りました。ここに厚くお礼申し上げます。研究の成果を学会で発表する機会を数多くいただき、素晴らしい経験を積むことができました。今後の研究活動に活かさなければならないと考えております。

本研究を行うにあたり、モレル・ホルヘ特任研究員には研究や英語について多くのご助言を賜りました。感謝申し上げます。

社会人学生として北見工業大学大学院に在籍するにあたり、一関工業高等専門学校 川合政人助教には多くの助言を賜りました。感謝申し上げます。

本論文のテーマについて、田中英一氏、中井真五氏、安立託弥氏には共に切磋琢磨していただきました。感謝申し上げます。

研究や学会発表において、森實優太氏をはじめとする電力工学研究室の皆様の奮闘する姿は、私の研究における活力になりました。感謝申し上げます。

2015 年 3 月

## 研究業績一覧

### 1. 学術論文（学位論文関係）

- 1) 川江修, 小原伸哉, 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, 日本機械学会論文集, 2015, Vol.81, No.821, pp.1-14.
- 2) 小原伸哉, 川江修, Balaji Rengaraja, 植物シュート太陽電池モジュールを用いたソーラー水電解による自立エネルギー住宅の計画, 空気調和・衛生工学会論文集, 2011, No.178, pp.1-10.

### 2. 学術論文（その他）

- 1) Shin'ya Obara, Osamu Kawae, Masahito Kawai, Yuta Morizane, A Study of the Small-Scale Energy Networks of the Japanese Syowa Base in Antarctica by Distributed Engine Generators, Applied Energy, 2013, Vol.111, pp.113-128.
- 2) Shin'ya Obara, Osamu Kawae, Masahito Kawai, Yuta Morizane, The Facility Planning and Electric Power Quality of the Saroma Lake Green Microgrid by the Interconnection of Tidal Power Generation, PV and SOFC, Journal of Power and Energy Systems, JSME, 2013, Vol.7, No.1, pp.1-17.
- 3) Shin'ya Obara, Osamu Kawae, Masahito Kawai, Yuta Morizane, A Study of the Installed Capacity and Electricity Quality of a Fuel-Cell-Independent Microgrid that Uses Locally Produced Energy for Local Consumption, International Journal of Energy Research, 2013, Vol.37, No.14, pp.1764-1783.
- 4) Shin'ya Obara, Masahito Kawai, Osamu Kawae, Yuta Morizane, Operational Planning of an Independent Microgrid Containing Tidal Power Generators, SOFCs, and Photovoltaics, Applied Energy, 2012, Vol.102, pp.1343-1357

### 3. 国際会議プロシーディングス

- 1) Shin'ya Obara, Masahito Kawai, Osamu Kawae, Yuta Morizane, A Study of the Installed Capacity and Electricity Quality of an Independent Microgrid with Tidal Power Generation, Photovoltaics, and Fuel-Cell,

- Proceedings of the Energy & Materials Research Conference (EMR 2012), 2012, pp. 386, Torremolinos, Spain.
- 2) Eiichi Tanaka, Shin'ya Obara, Osamu Kawae, Shingo Nakai, Daisuke Konno, Development of a Plant Configuration Photoreceptor Optimized for the Objective of Maximizing Light-Received Quantity, Proceedings of the 2nd International Conference on Energy Systems and Technologies (ICEST 2013), 2013, Cairo, Egypt,
  - 3) Osamu Kawae, Shin'ya Obara, Light Receiving Properties of the Solar Cell Module with Branch Structure of a Plant Shoot, Proceedings of the 8th International Symposium on Environmentally Conscious Design & Inverse Manufacturing (EcoDesign 2013), 2013, P-D-3, pp.1-5, Jeju Island, Korea.
  - 4) Osamu Kawae, Shin'ya Obara, Light receiving properties of the solar cell module with branch structure of a plant shoot, Proceedings of the Grand Renewable Energy 2014, International Conference and Exhibitin (GRE2014), 2014, Tokyo.
4. 国内講演予稿集
- 1) 小原伸哉, 川江修, RENGARAJA Balaji, 植物シュート太陽電池モジュールを用いたソーラー水電解による自立エネルギー住宅の計画, 第 50 回日本機械学会道支部講演会, 日本機械学会北海道支部講演会講演概要集, 2011, Vol.50, pp.81-82.
  - 2) 川江修, 小原伸哉, 植物シュート太陽電池モジュールによる自立エネルギー住宅の計画, 第 22 回環境工学総合シンポジウム 2012, 日本機械学会環境工学総合シンポジウム講演論文集, 2012, Vol.22, pp.393-395.
  - 3) 川江修, 小原伸哉, 田中栄一, 中井信五, 植物シュート太陽電池モジュールによる受光性能の改善に関する研究, 第 22 回環境工学総合シンポジウム 2012, 日本機械学会環境工学総合シンポジウム講演論文集, 2012, Vol.23, pp.279-281.
  - 4) 安立託弥, 小原伸哉, 川江修, RENGARAJA Balaji, 植物シュート太陽電池モジュールを用いたソーラー水電解による自立エネルギー住宅の計画, 平成 25 年電気学会電子・情報・システム部門大会, 電気学会電子・情報・システム部門大会講演論文集(CD-ROM), 2013, Vol.2013, pp.ROMBUNNO.PS6-1.

- 5) 安立託弥, 小原伸哉, 川江修, 緯度変化における植物シュート型太陽電池モジュールの受光形態の調査, 平成 26 年度電気・情報関係学会北海道支部連合大会, 電気・情報関係学会北海道支部連合大会講演論文集(CD-ROM), 2014, Vol.2014, pp. ROMBUNNO.74