



植物を模擬した太陽光発電の開発

2012年2月23日

日本機械学会計算力学部門「設計情報学研究会」

北見工業大学電気電子工学科 電力工学研究室

小原 伸哉

研究の背景

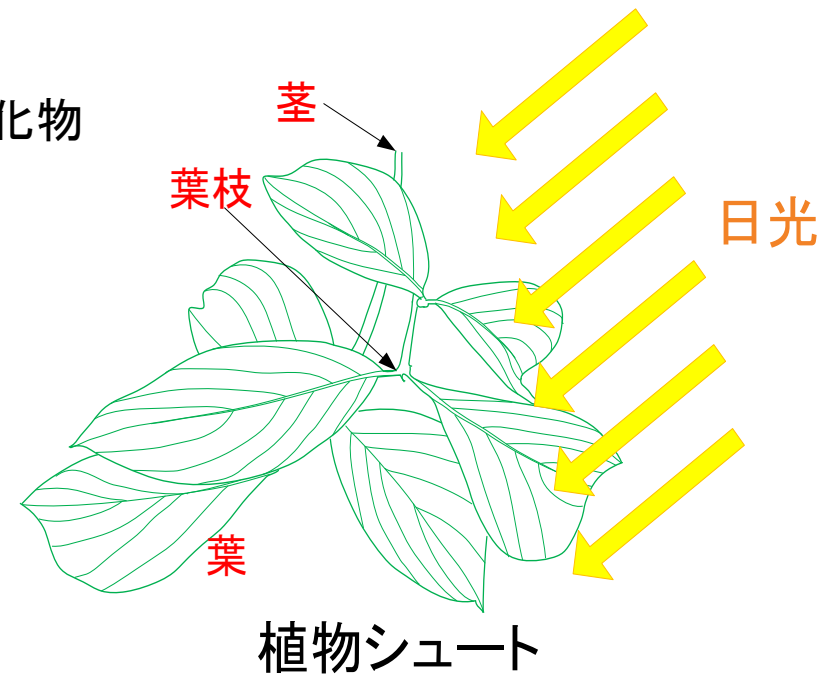
植物のバイオマスは光合成による炭水化物から成る。
したがって、特に競争相手の多い環境では、
受光量を増加させて、光合成速度を増すように
デザインされていると考えられる。



ショ糖やデンプンなどの炭水化物

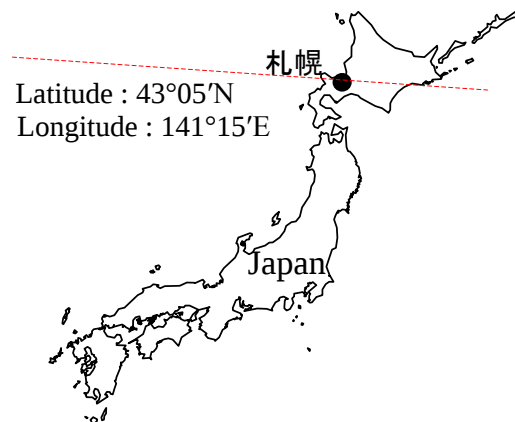
目 的

設置スペースが小さく、低指向
性の受光システムを調査する。
→用途：太陽電池モジュールの分散
配置を検討する。



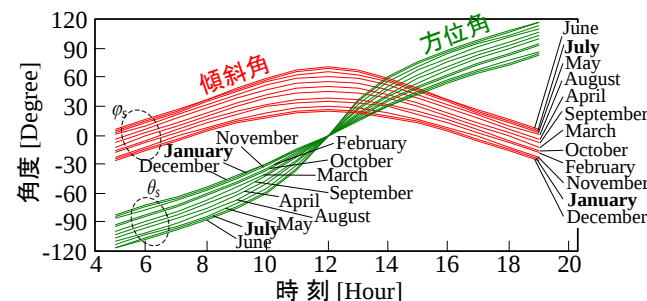
光源(太陽光)の軌跡

札幌と那覇

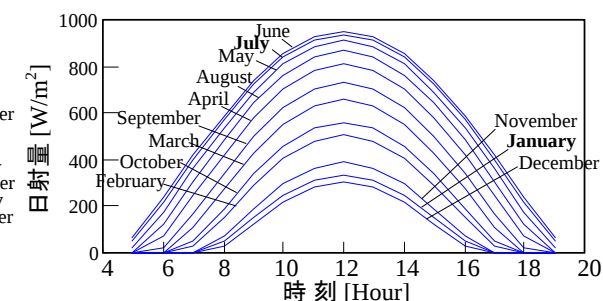


札幌と那覇での太陽軌跡

札幌

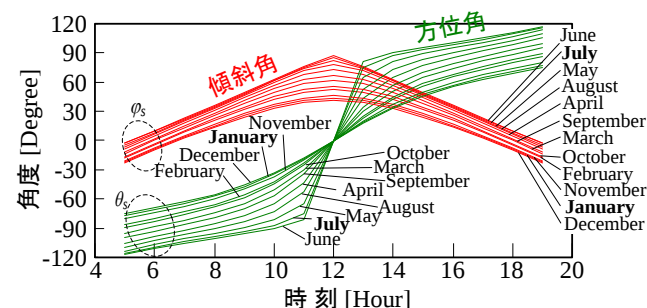


(a) 方位角と傾斜角

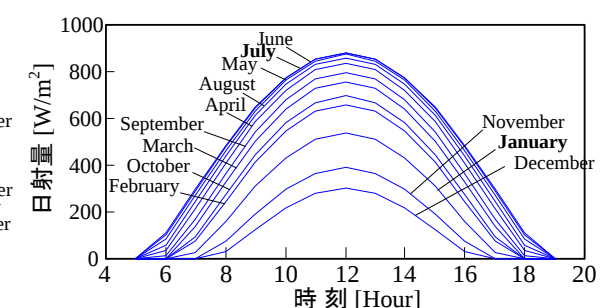


(b) 水平面日射量

那覇

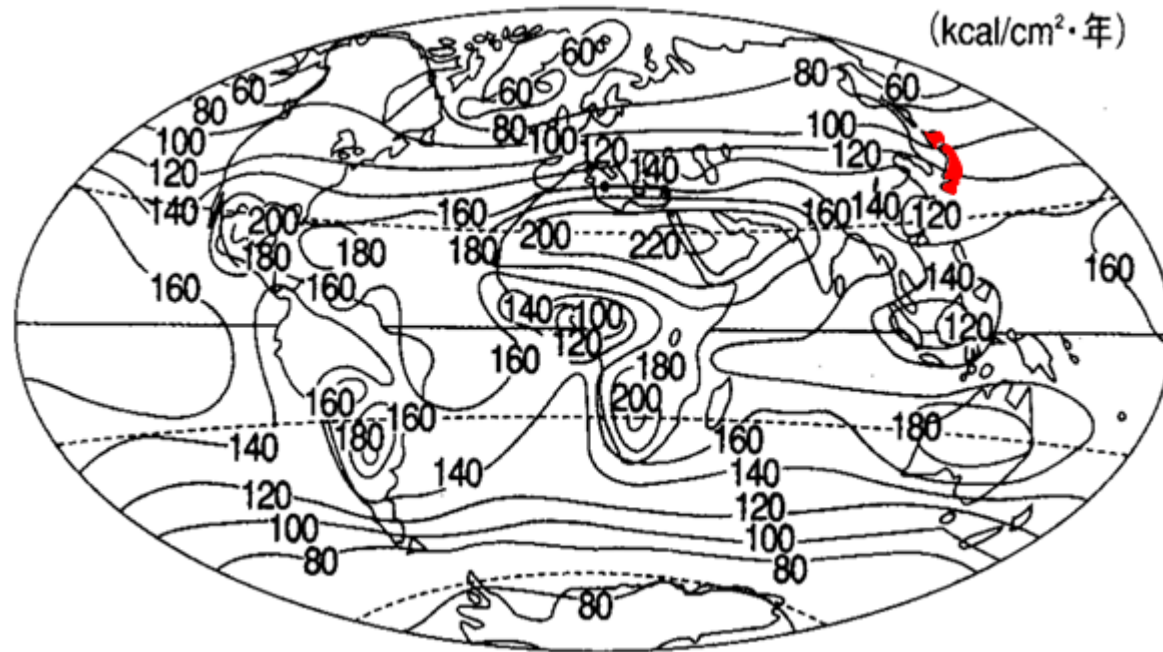


(a) 方位角と傾斜角



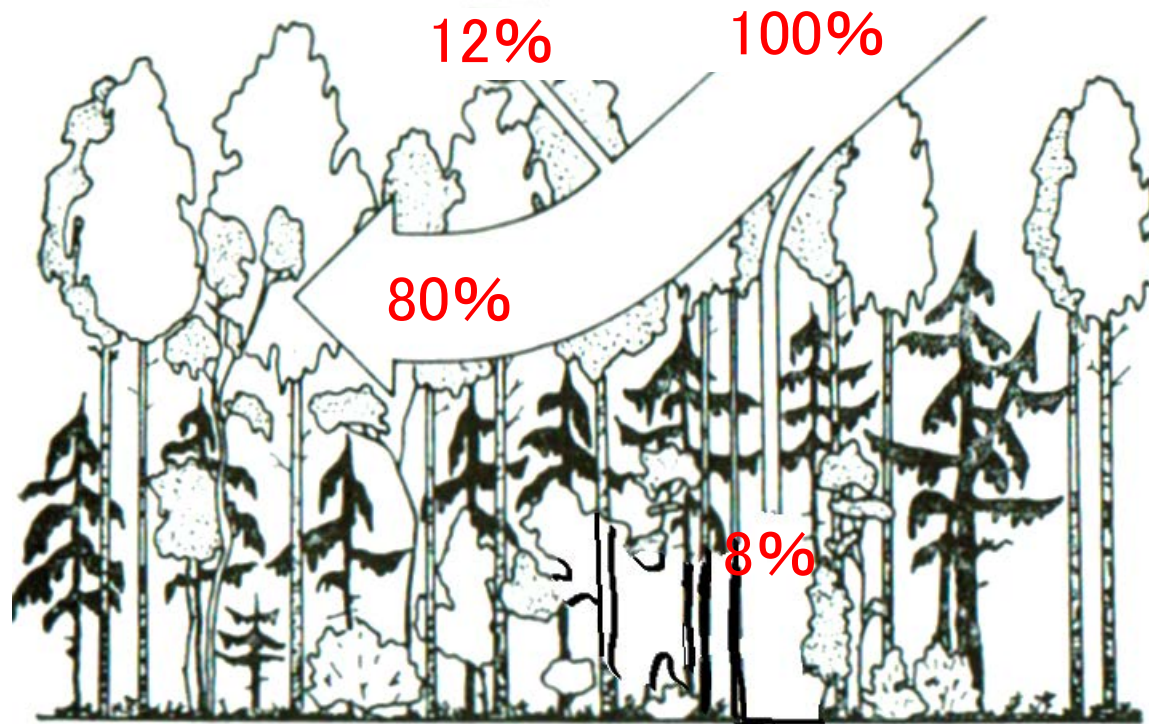
(b) 水平面日射量

地表で観測される全天日射量



日射の大きさ，太陽の軌跡によって，植物の最適形態は変化
⇒最適な受光形態の情報が得られないか？

植物間の空間競争と植物形態



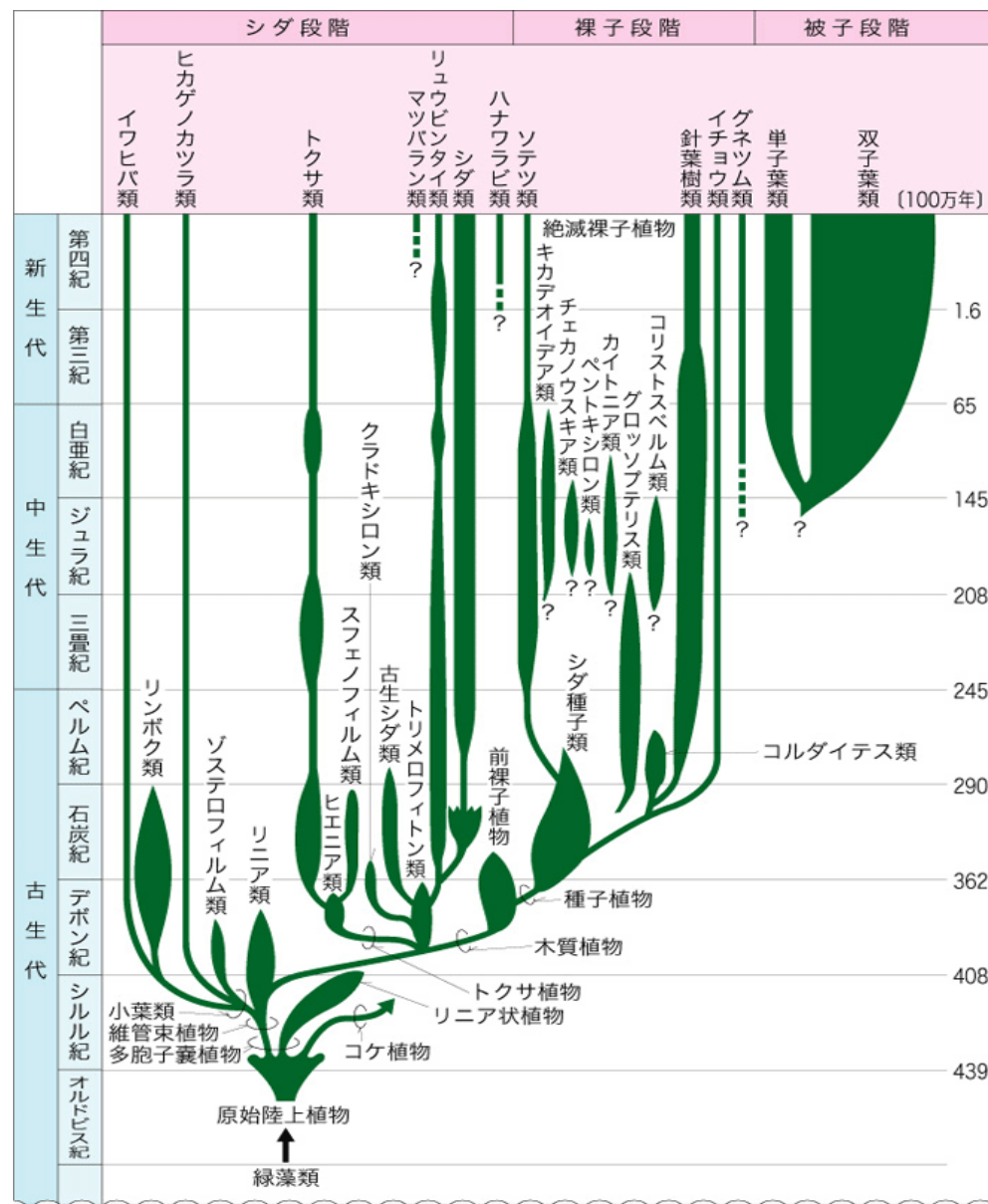
参考文献:「環境植物学」-ブナ、スギ森林の光の浸透 田崎忠良(1988)

- 植物の多くは、**受光量の増大を求めて進化**している。
- ただし個体の形態を決める要因は、受光量以外にもある？

維管束植物の系統

(維管束植物とは、植物の中から、コケ類や藻類を除いたグループ)

植物形態の進化は、
受光競争だけか？



維管束植物の系統

環境要因と植物の形態

○気候要因

光，水，温度，大気，風の条件， CO_2 濃度など

○土壌要因

地温，土壌水，水素イオン指標(pH)，通気の条件など

○生物要因

○複合要因

このような要因は，
個体の形態にどのように影響するか？

(植物形態から，受光量の最大化に係わらない要因を除く)



光合成の違いによる植物の分類(C3植物とC4植物)

C3植物

光合成の際に、カルビン回路によって炭酸固定する植物の総称(炭素原子3個からなる 3-ホスホグリセリン酸が生成される)

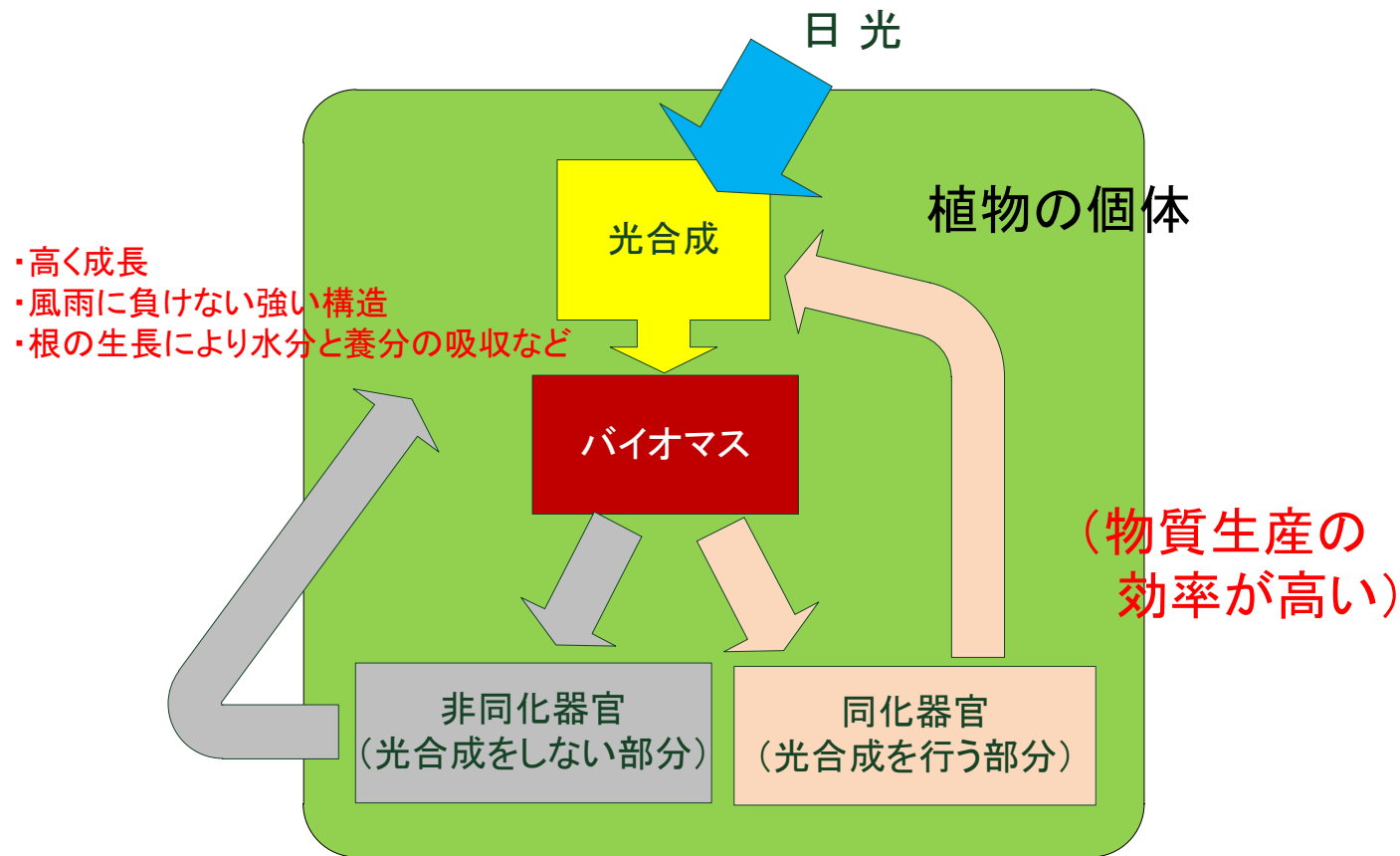
ほとんどの植物がこれに当たる。

C4植物 (後から発生)

光合成の際に、カルビン回路とは異なる経路で炭酸を固定する植物の総称(炭素原子4個をもつオキサロ酢酸が生成される)

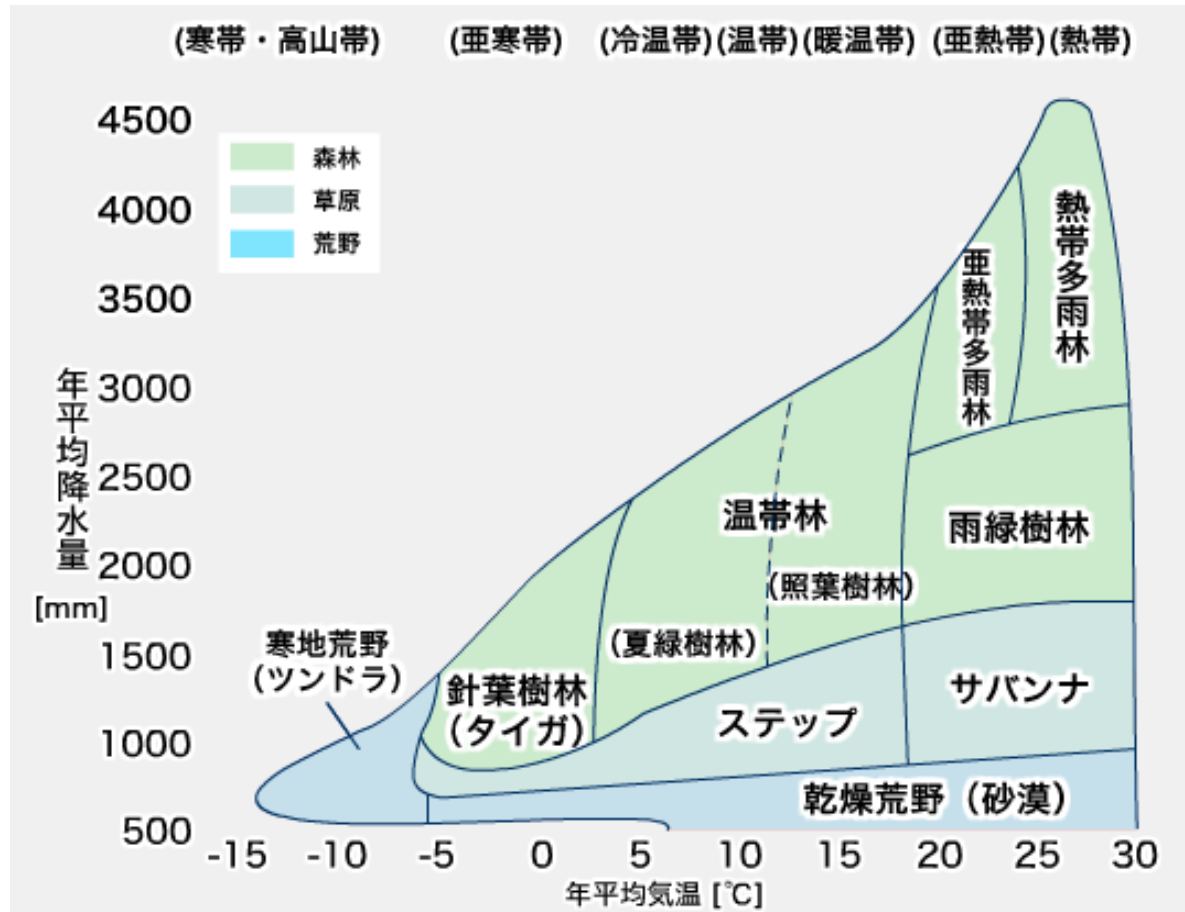
トウモロコシやサトウキビなどが含まれ、C3植物に比べて光合成速度が大きく、蒸散量が少ない⇒エネルギー植物

光合成とバイオマスの分配



○ **バイオマスの配分の違い（受光部分と支持部分）**により、
植物形態には大きな差が生じる⇒環境の影響を受ける

気温・降雨量と植物の分布



植物の形態は、気温と降雨量によって大きく異なる。
 ⇒導入地域に適した植物の形態がある。

植物形態の例

針葉樹型

- 細長い葉が斜めについているため、光が内部まで届く。
- 葉と茎の部分が近いため、非同化器官の割合（光合成しない部分）が低く、バイオマスの生産効率が高い。
- 低い位置に同化器官（光合成する部分）が集まっているため、受光競争に弱い。

広葉樹型

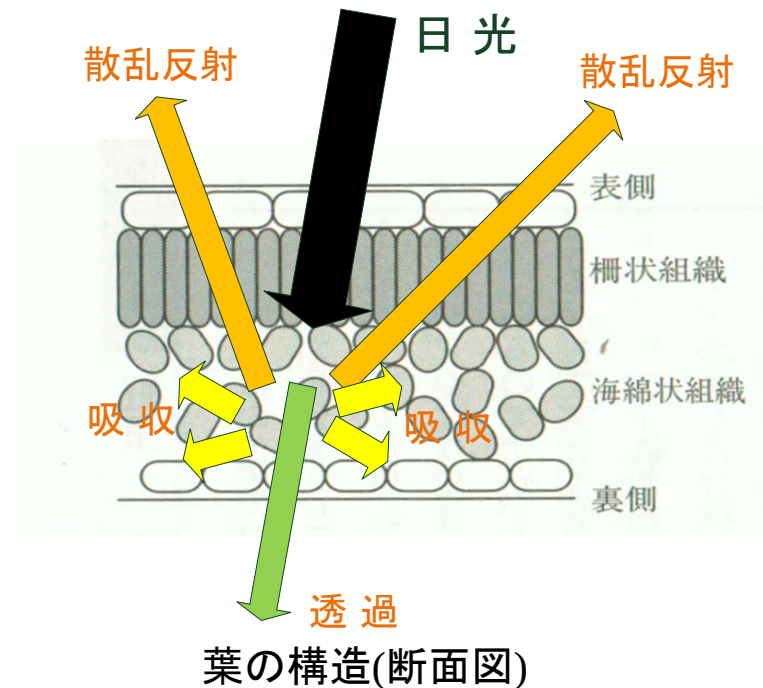
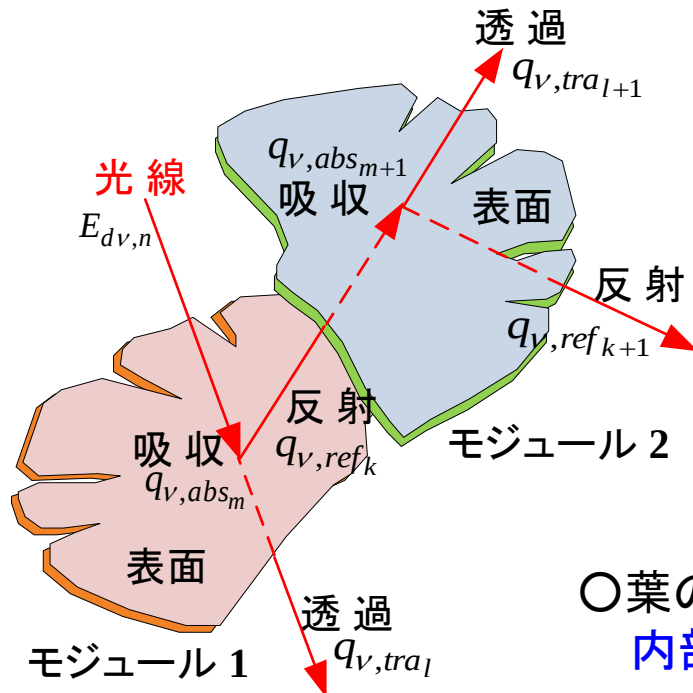
- 広い葉を上部に集まるため、光は上層部で急激に弱まる。
- 茎などの非同化器官に多くのバイオマスを要する。
- 高いところに葉が付いているため、受光競争には有利。

樹相と葉の特徴

- **熱帯雨林** (環境ストレス: 低): 常緑で葉が大きく薄い
- **照葉樹林** (環境ストレス: 乾燥小):
常緑ではあるが、クチクラ層が発達し、熱帯雨林に比べ葉がやや小さく厚い
- **広葉樹林** (環境ストレス: 乾燥大): 常緑で、細長く小さく厚い葉
- **雨緑樹林** (環境ストレス: 乾季がある): 落葉、葉は大きく薄い
- **夏緑樹林** (環境ストレス: 半年間低温): 落葉、雨緑樹林より葉は小さい
- **針葉樹林** (高いストレス環境): 常緑で、葉の表面積が小さい針葉をもつ

葉の光学モデル

解析での光線の軌跡

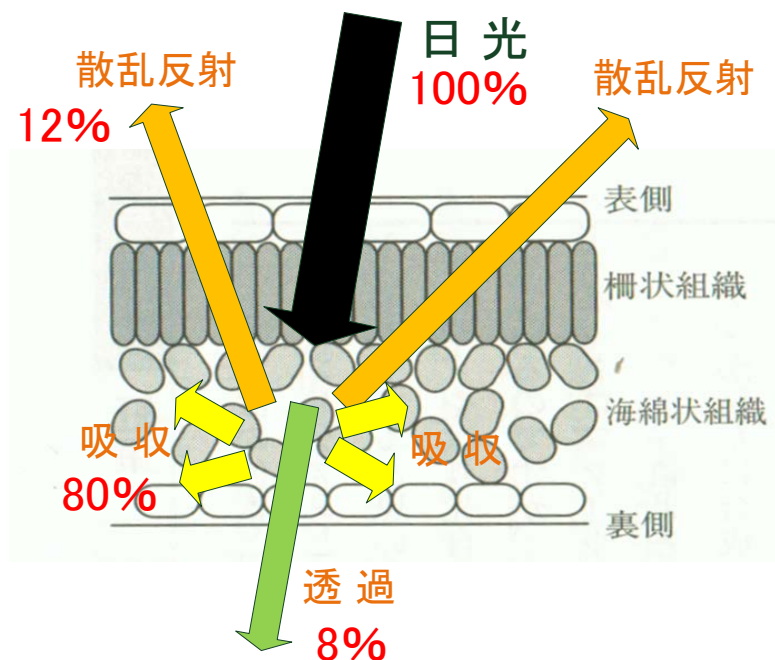


- 葉の表側から入射した光は、**柵状組織**では散乱されず**内部に誘導される**。
- 海綿状組織**に到達した光は、細胞がいびつな隙間を持つために**散乱される**。
- そのまま透過する光の割合は減少し、**散乱光の一部は葉の内部に戻るため吸収される**(**吸収割合を上げている**)。

葉の光学特性

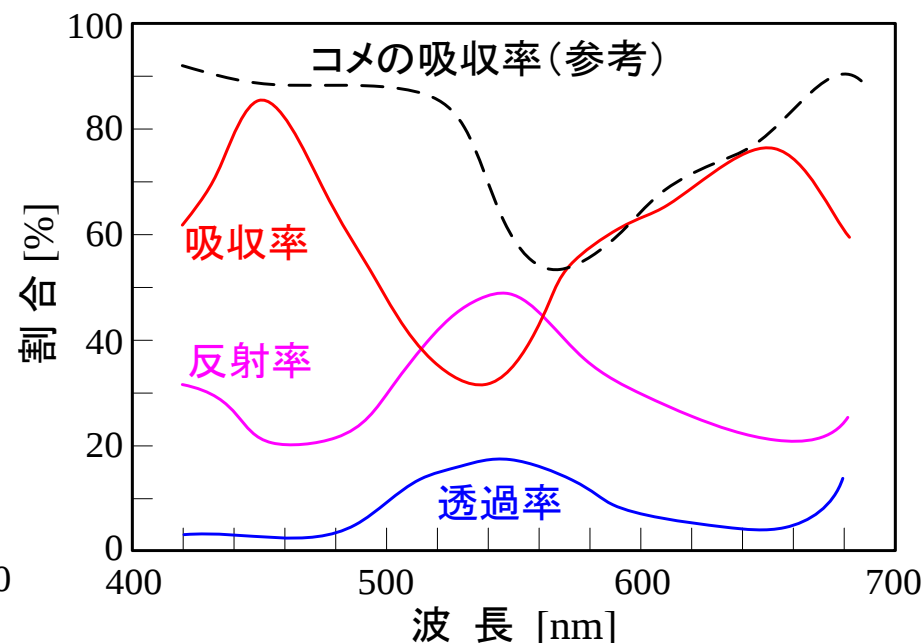
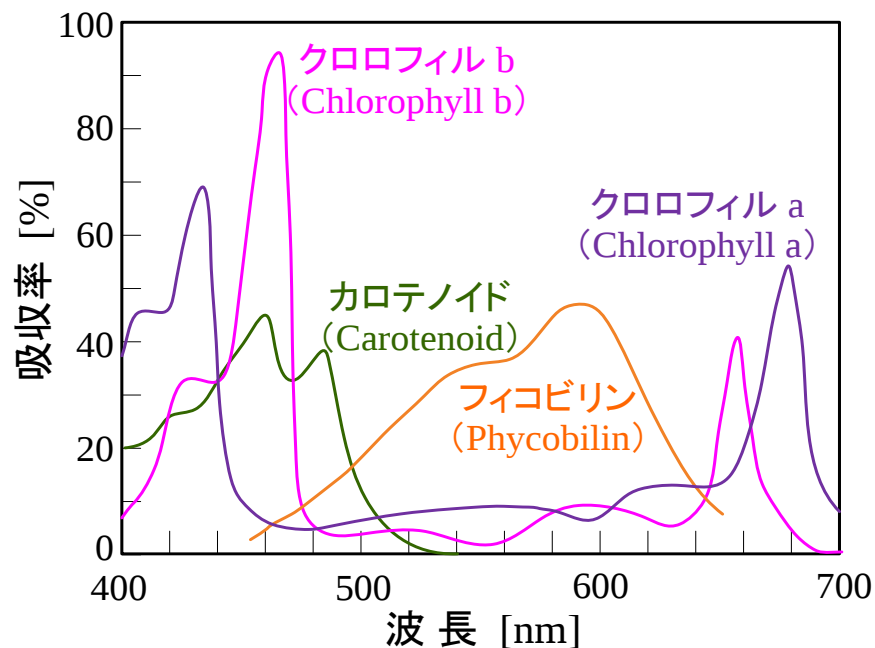
○光合成に関与する波長は380～710nmの範囲にあり、**可視域とほぼ一致**している。

○数十種類の高等植物の葉の測定結果から、平均して、**受光量の12%が反射**，**80%が吸収**，**8%が透過**する。



葉による光合成有効放射の吸収, 反射, 透過

光学特性(イチヨウ)



○複数の光合成色素を持つことで、太陽光の広い波長に対応する。

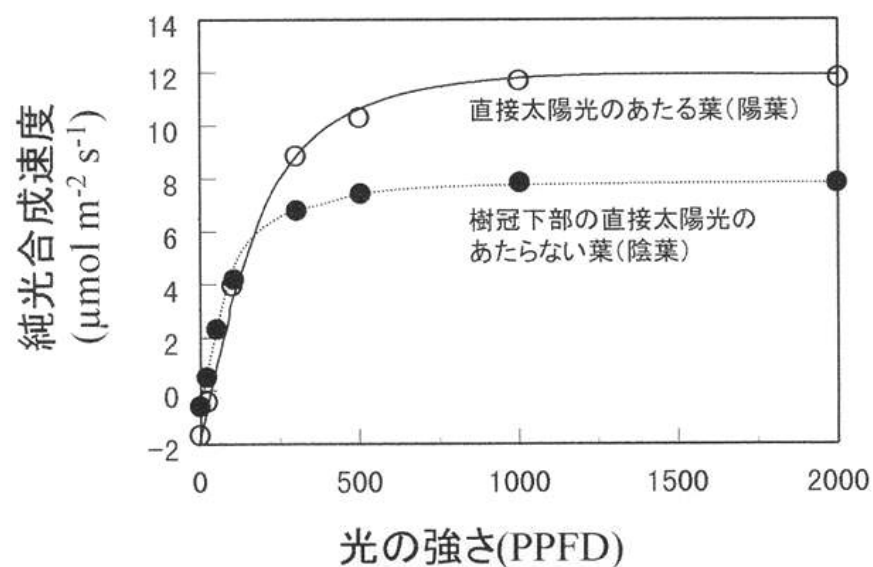
○色素の種類などは、植物(の育った環境)で異なる

⇒環境に最適化している

陽葉と陰葉

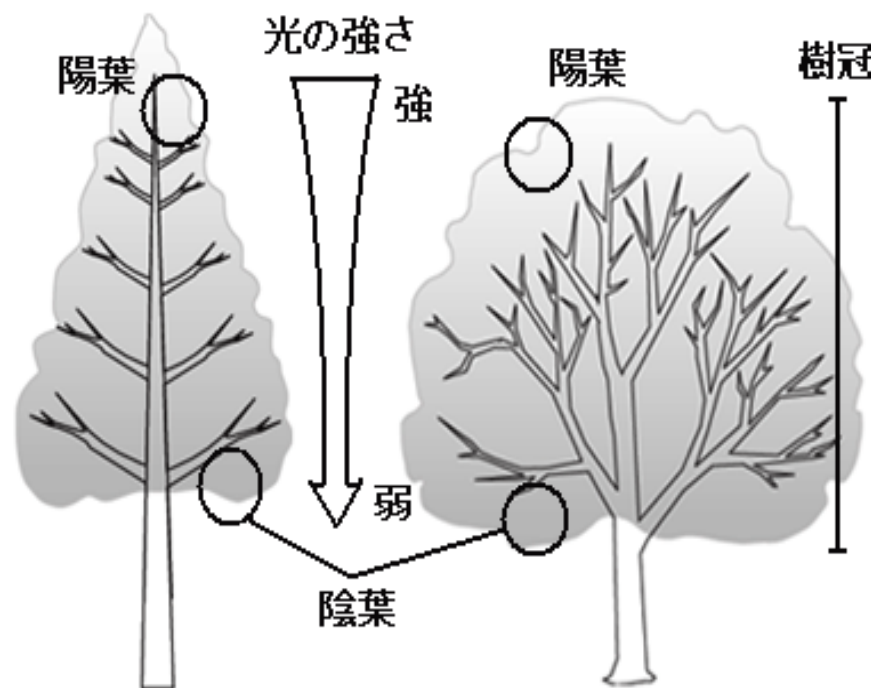
光環境に適合するように、樹冠の
 上部と下部で葉の光合成特性を
 変えている。

光の強さと光合成速度



(Terashima & Saeki 1985, Terashima 1986)

陽葉と陰葉



強い光が当たる部分では、
 光合成速度は大きい。

二酸化炭素の濃度による光合成の律速



A : 出発物
B : 中間体
C : 最終生成物

全体の反応速度は最も遅いステップによって支配される。
反応速度が $k_a > k_b$ の場合、 k_b が全体の反応を律速している。

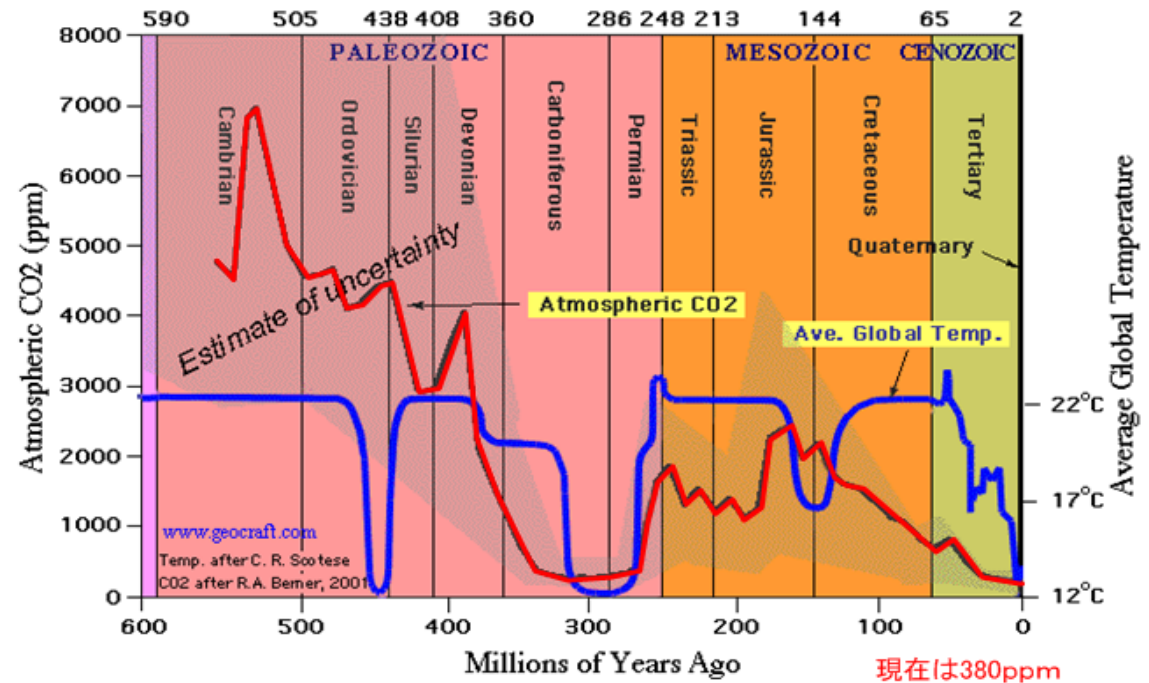


二酸化炭素の濃度による律速

この要因を除くために、

二酸化炭素濃度が高かった太古の環境の植物は、
今よりも受光特性が良いのではないか？

大気中の CO₂濃度と 植物形態

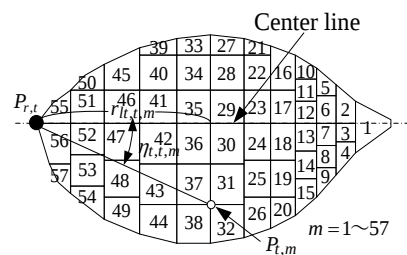


- 「CO₂濃度が高い=光合成が活発である」ので現在の植物よりも巨大なものが多かったと推察される。
- C4植物は、CO₂濃度が高い時期に登場しており、光についての生存競争や乾燥への対応にかかわる進化と考えられている。

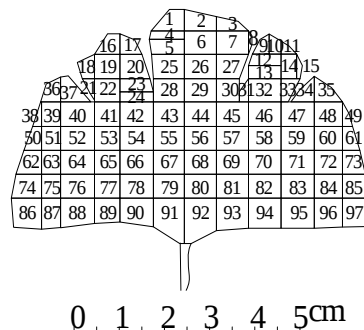


現在の植物とのシュート形態の違いは葉の大小、長短、切れ込みの有無などのわずかなものである(絶滅したイチョウ類では分裂数が多いなど)

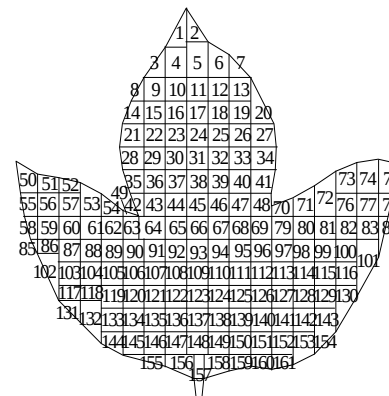
単葉と分裂葉のモデル



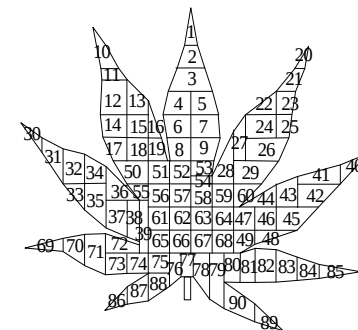
(a) ハナミズキ
(単葉)



(b) イチョウ



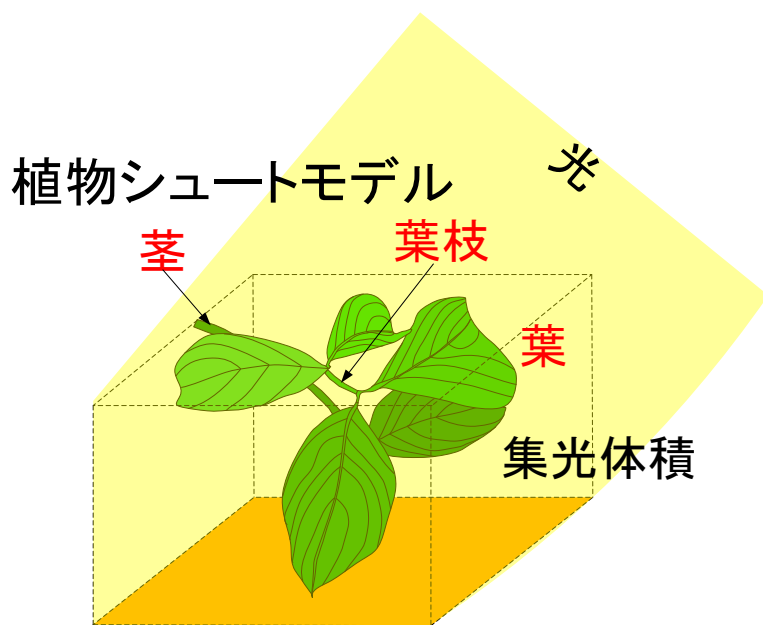
(c) カクレミノ



(d) ヤマモミジ

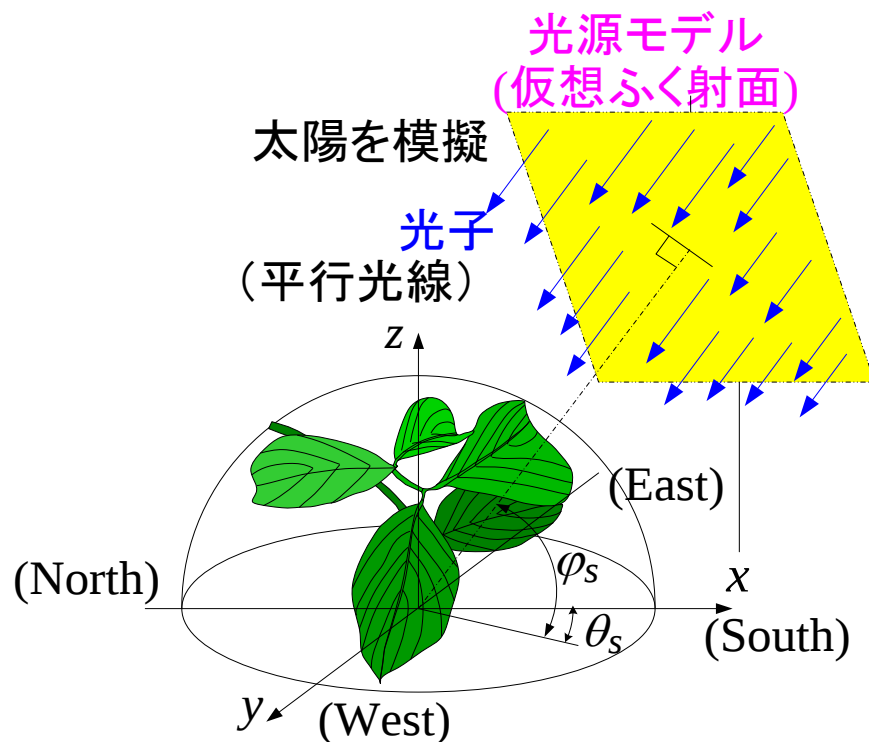
植物受光体の解析系

植物シュートと光源

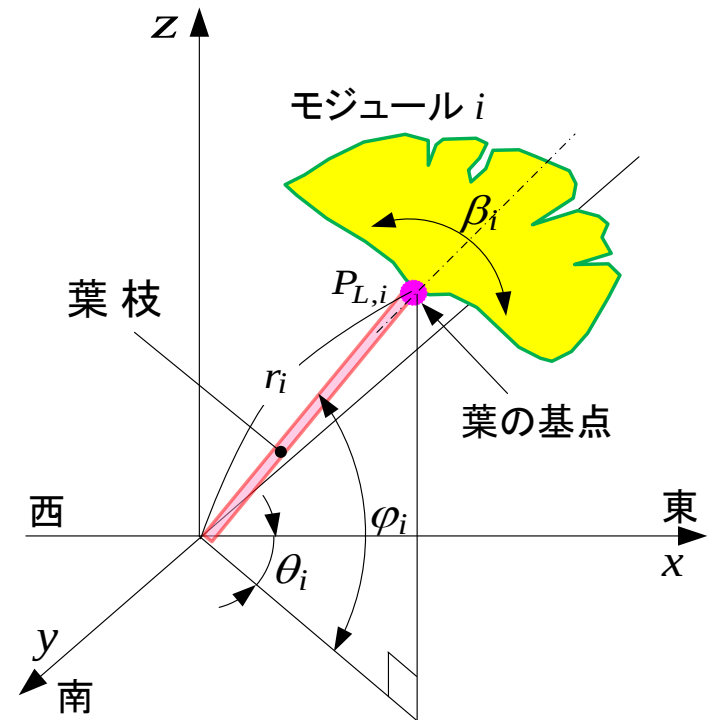
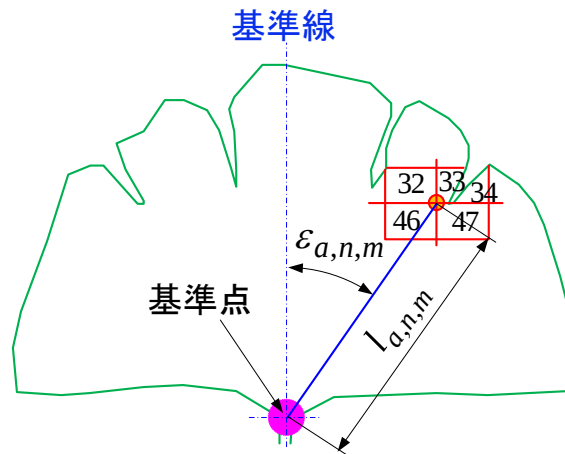
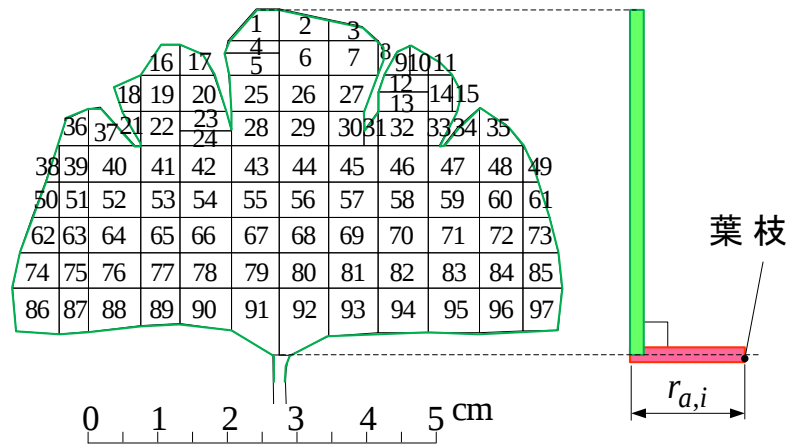


植物シュート体積当たりの受光量を
 “体積密度 $[\text{cm}^{-3}]$ ”と定義する。

仮想ふく射面

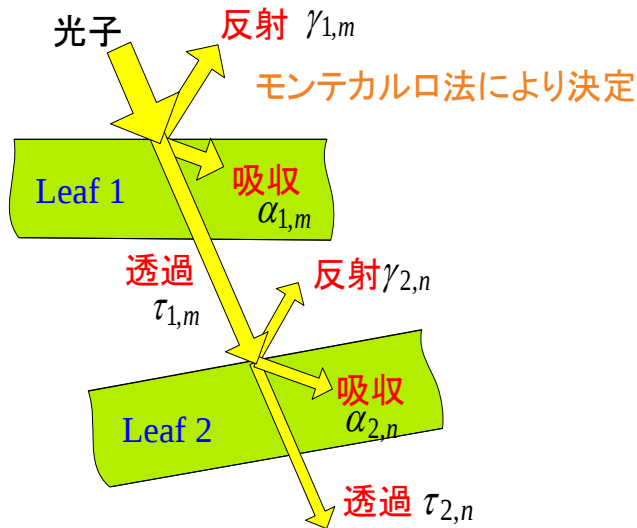


受光体(イチヨウ)のモデル

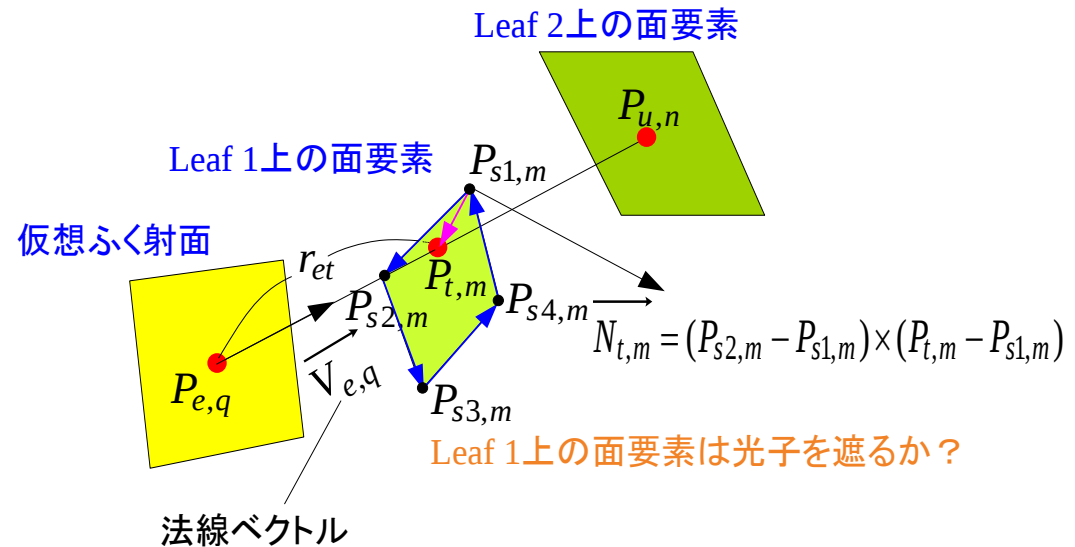


光子の軌跡と遮光チェック

葉の光学系



光子の遮光チェック



○Leaf 2上の影を以下の解析で決める

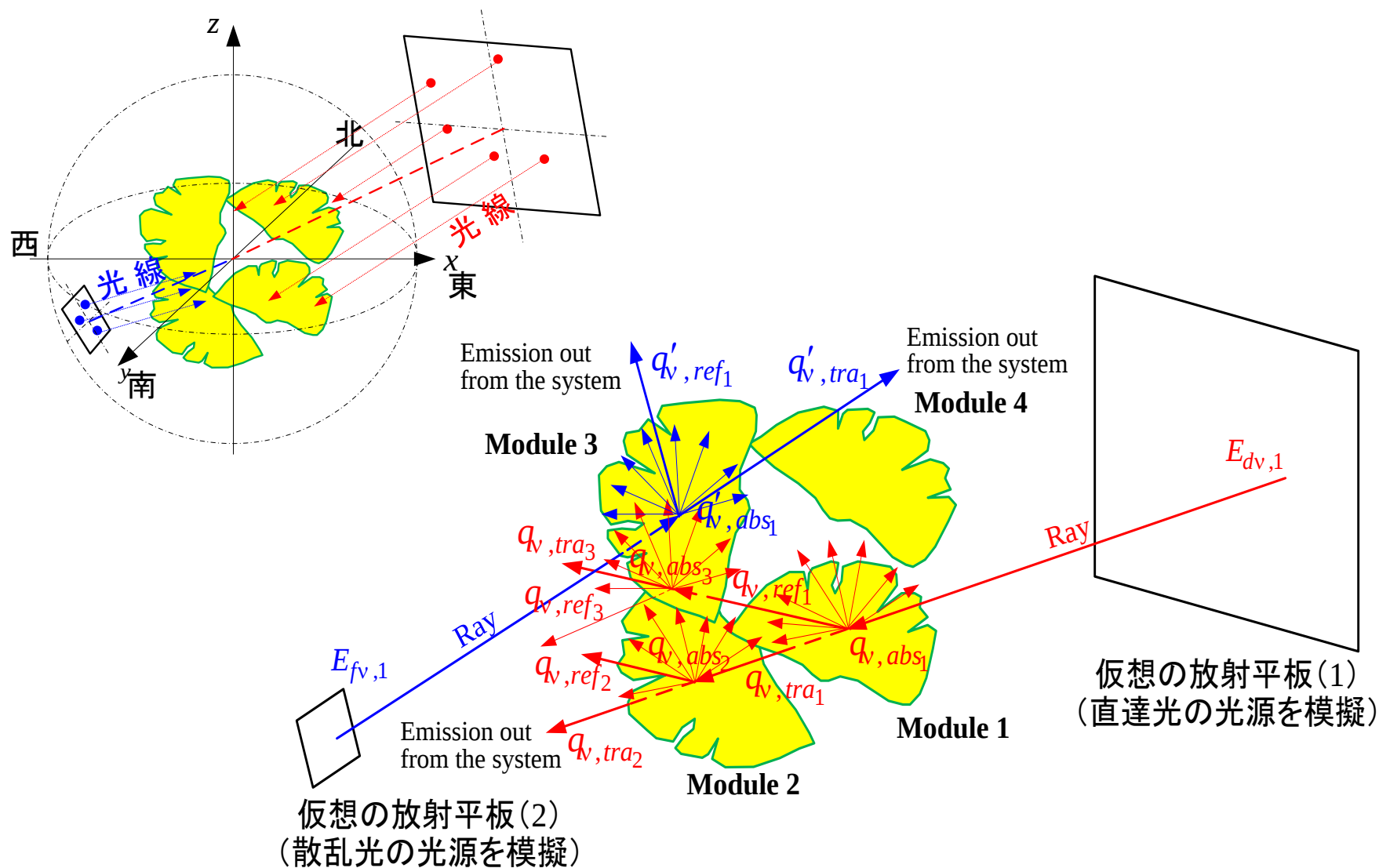
Leaf 1上の光子の座標 $\Rightarrow P_{t,m} = P_{e,q} + r_{et} \cdot \overrightarrow{V_{e,q}}$

頂点 $P_{s1,m}$ の法線座標 $\Rightarrow \overrightarrow{N_{t,m}} = (P_{s2,m} - P_{s1,m}) \times (P_{t,m} - P_{s1,m})$

Leaf 1上での、面要素の各辺を表すベクトルの左側に $P_{s1,m}$ が見えると、

光子はLeaf 1上の面要素に遮られている。 $\Rightarrow [(P_{s2,m} - P_{s1,m}) \times (P_{t,m} - P_{s1,m})] \cdot \overrightarrow{N_{t,m}} \geq 0$

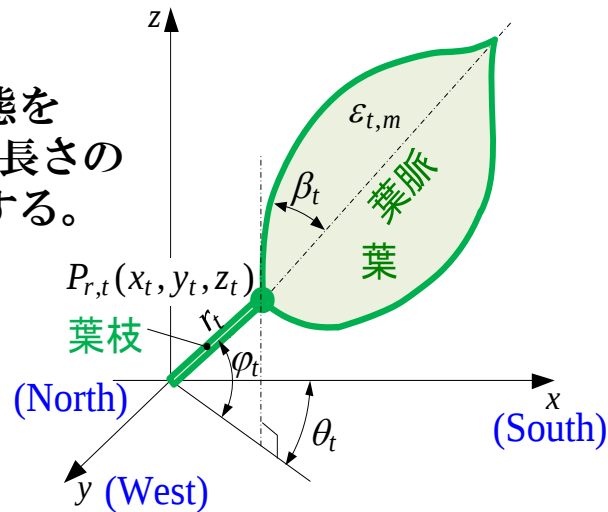
直達日射と散乱日射のモデル



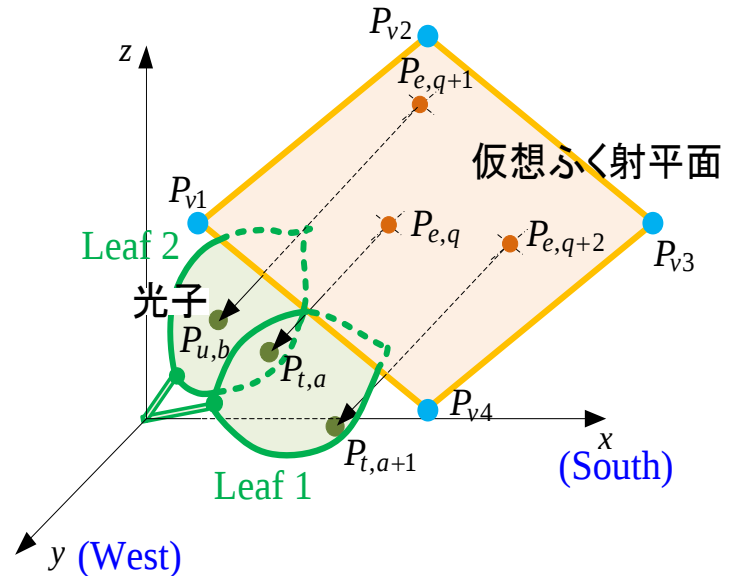
植物シュートの座標系とGAの染色体モデル

植物シュートの座標系

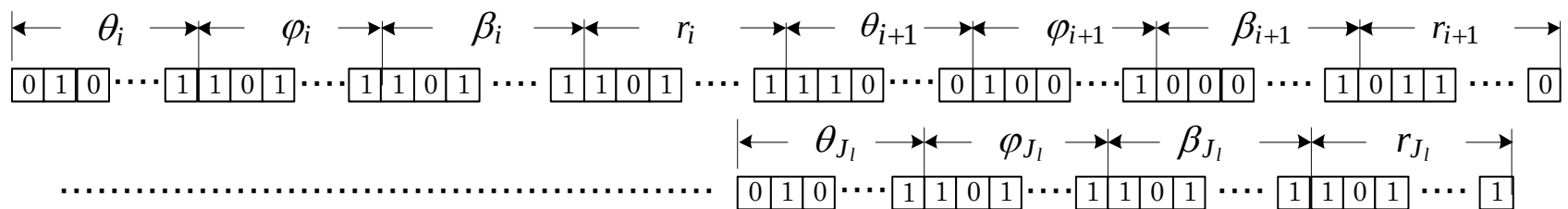
植物のシュート形態を
 3つの角度と1つの長さの
 組み合わせで表示する。



光源のモデル

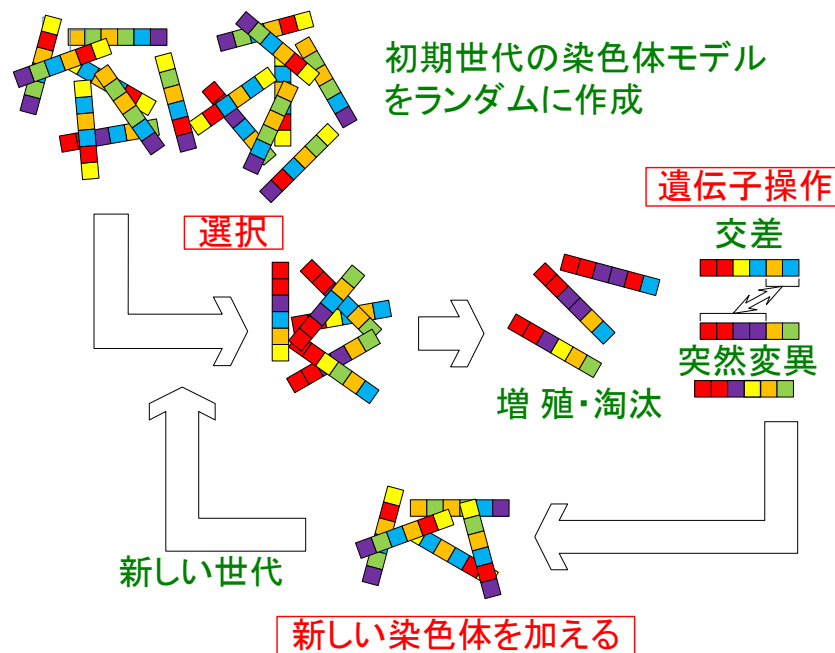


染色体モデル

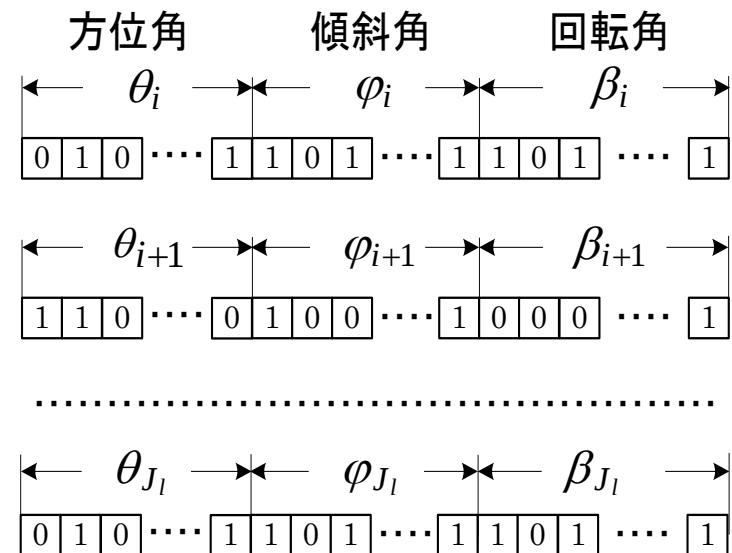


遺伝的アルゴリズム(GA)による最適配置の探索

染色体モデルの進化

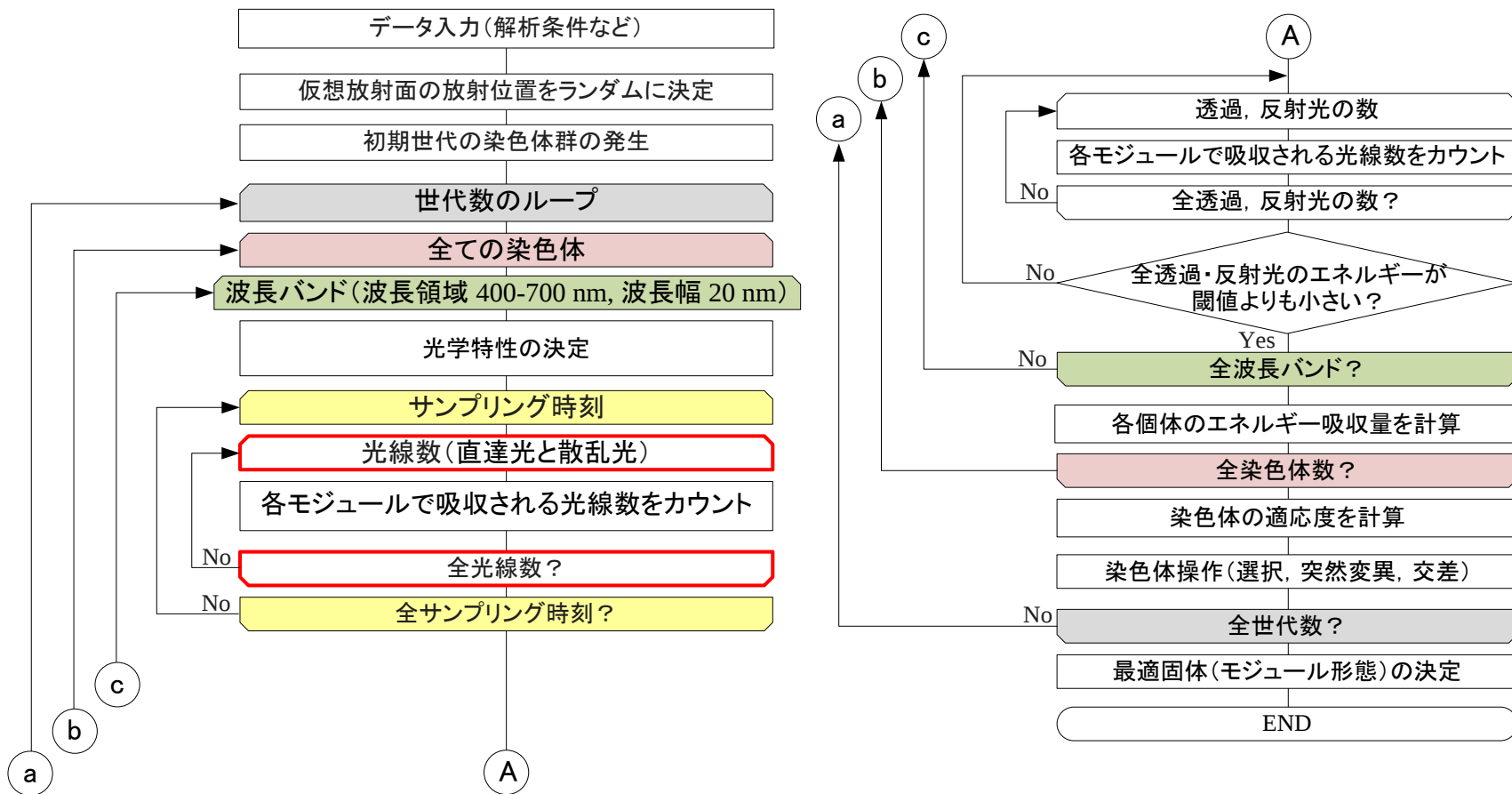


染色体モデル



- コンピュータの中で、生物 (染色体) の進化を模擬する
- この染色体モデルの遺伝子コードを解読することで、植物シュートの最適形態を得る。

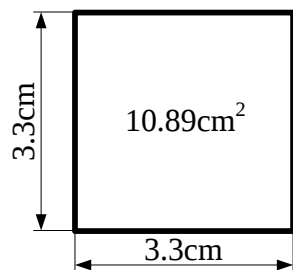
解析アルゴリズム



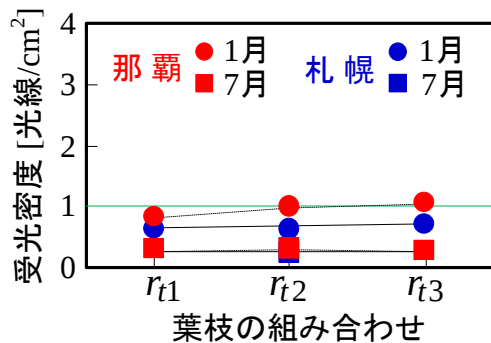
受光モジュールの形と受光密度の関係

同じ形態の葉を4枚用いた。
 葉枝は以下の組み合わせ。

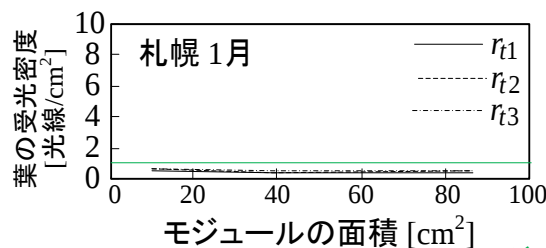
- r_{t1} : (0, 30, 60, 90mm)
- r_{t2} : (0, 20, 40, 60mm)
- r_{t3} : (0, 50, 100, 150mm)



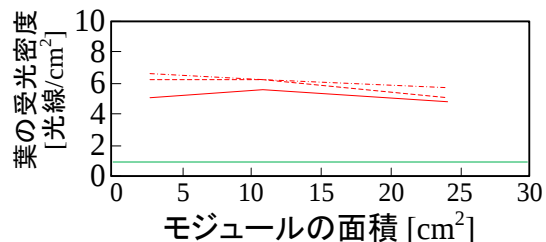
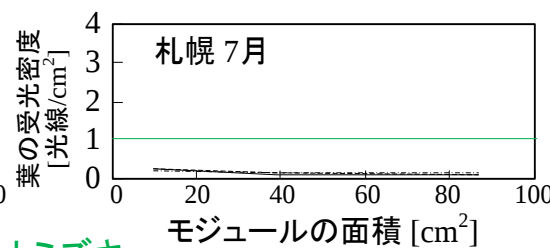
正方形モジュール



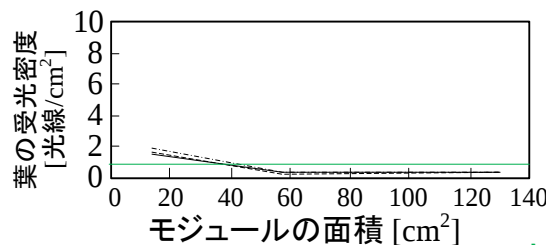
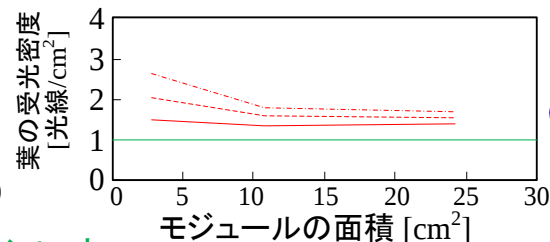
受光密度の解析結果



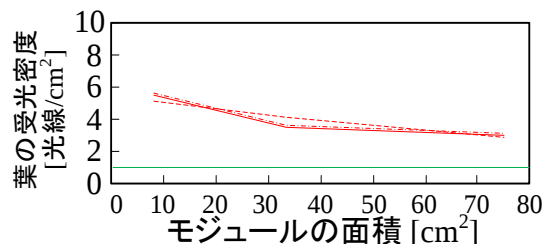
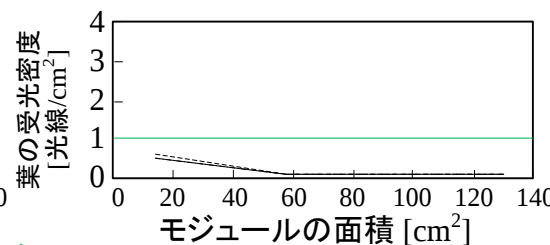
ハナミズキ



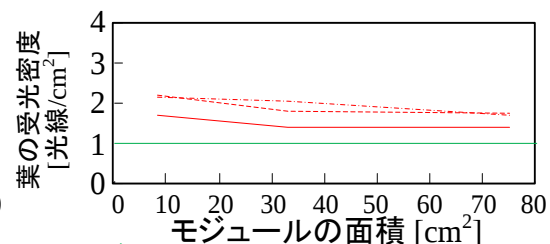
イチョウ



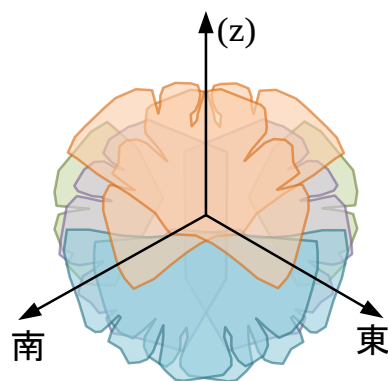
カクレミノ



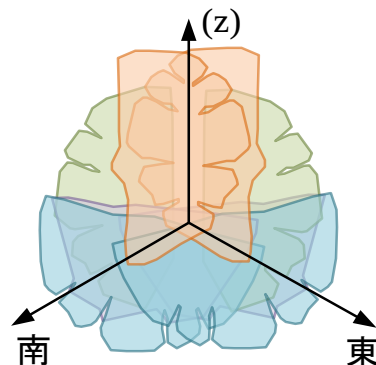
ヤマモミジ



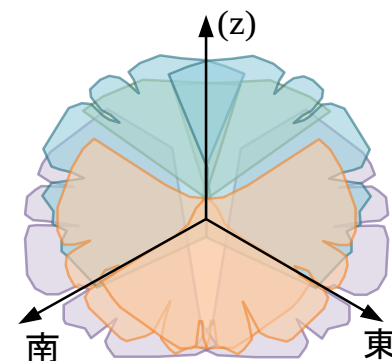
受光モジュールの配置(イチヨウの光学特性を使用)



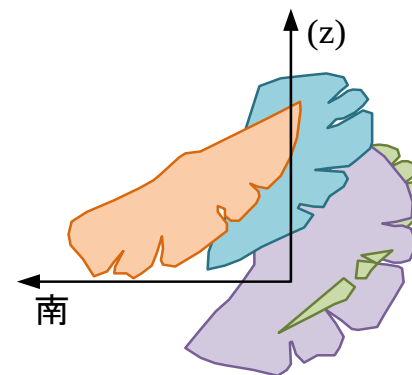
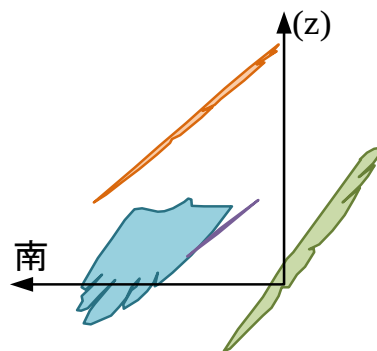
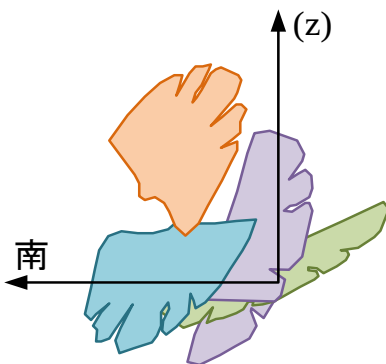
2月代表日の10:00



2月代表日の12:00

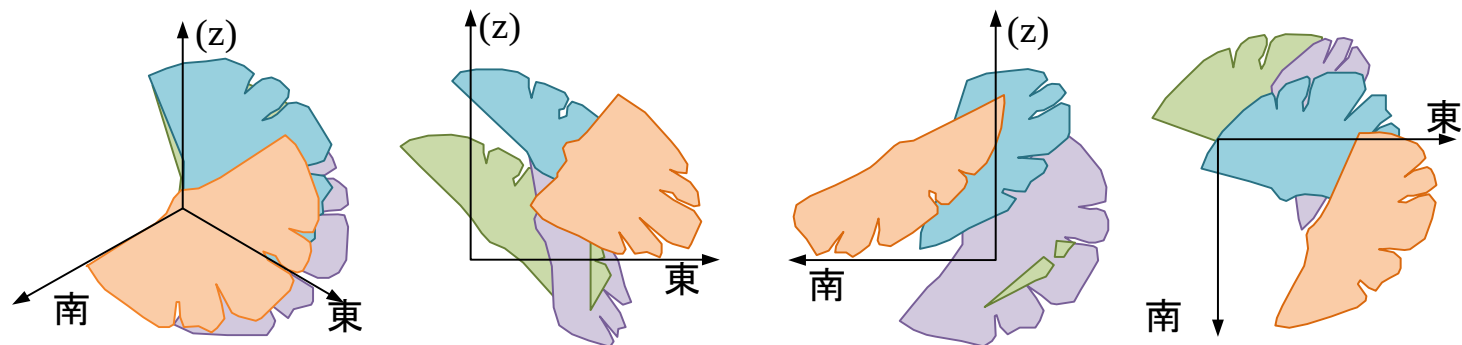


9月代表日の10:00

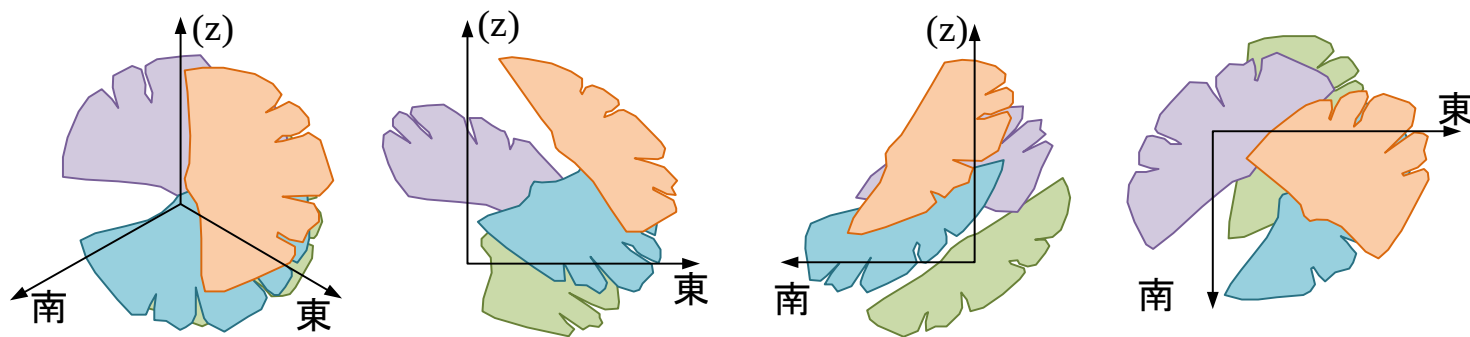


・各月代表日のサンプリング時刻について最適化

イチョウモジュールの配置結果 直達日射と散乱日射(透過率を考慮する場合)



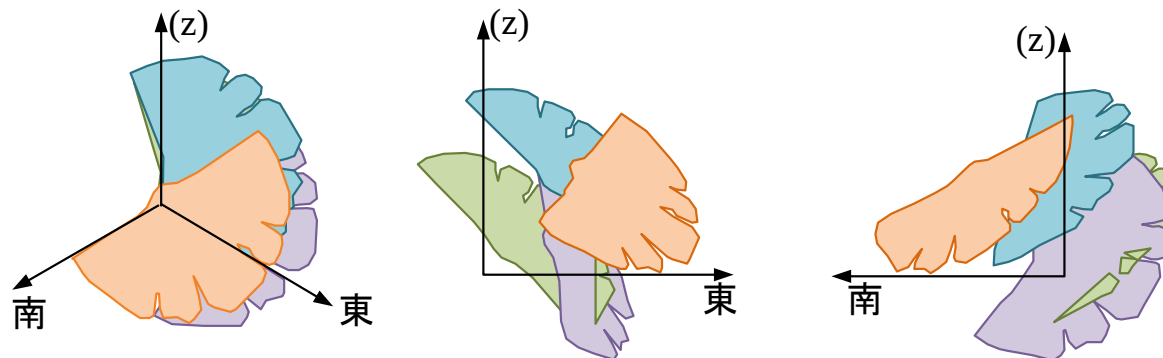
(a) 直達日射のみの場合



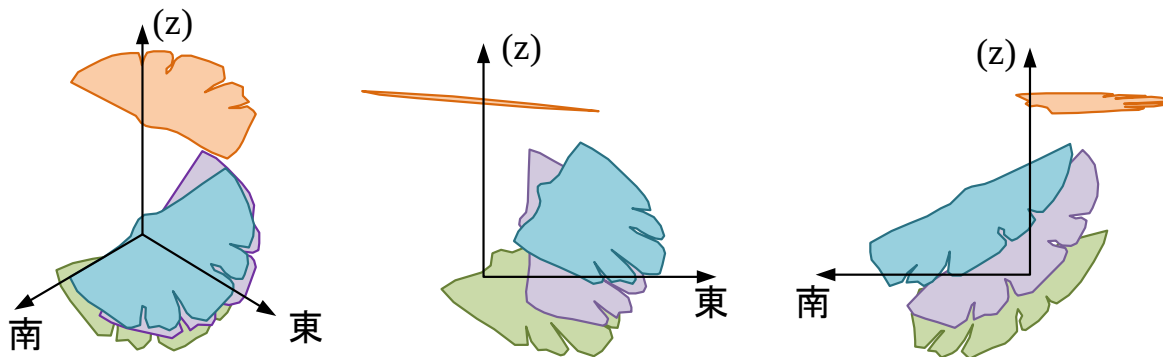
(b) 直達日射と散乱日射を考慮した場合

札幌, 9月代表日, 10:00am

イチヨウ受光モジュールの配置結果 (モジュールの表と裏の光合成速度が異なる場合)



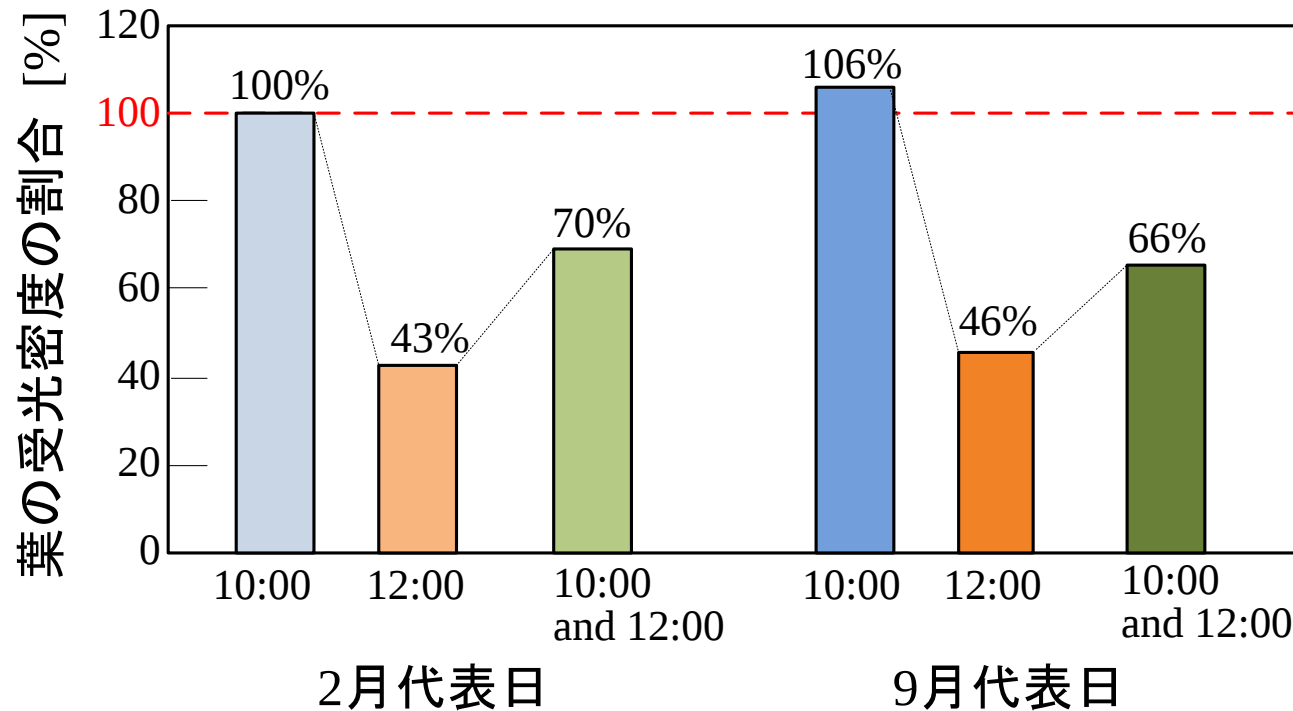
(a) 葉の裏側の光合成速度が表の30%の場合



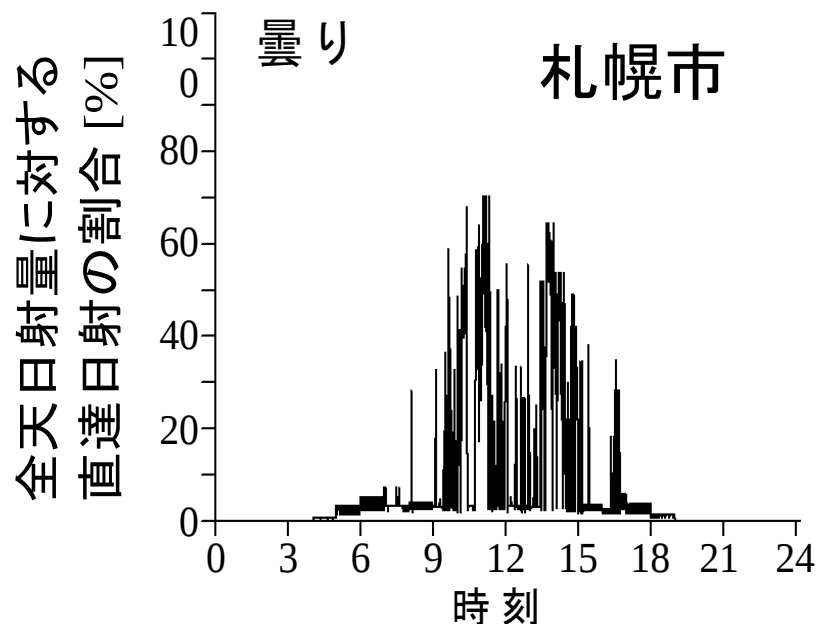
(b) 葉の裏側の光合成速度が0%の場合

9月代表日の10:00am, 直達日射のみ

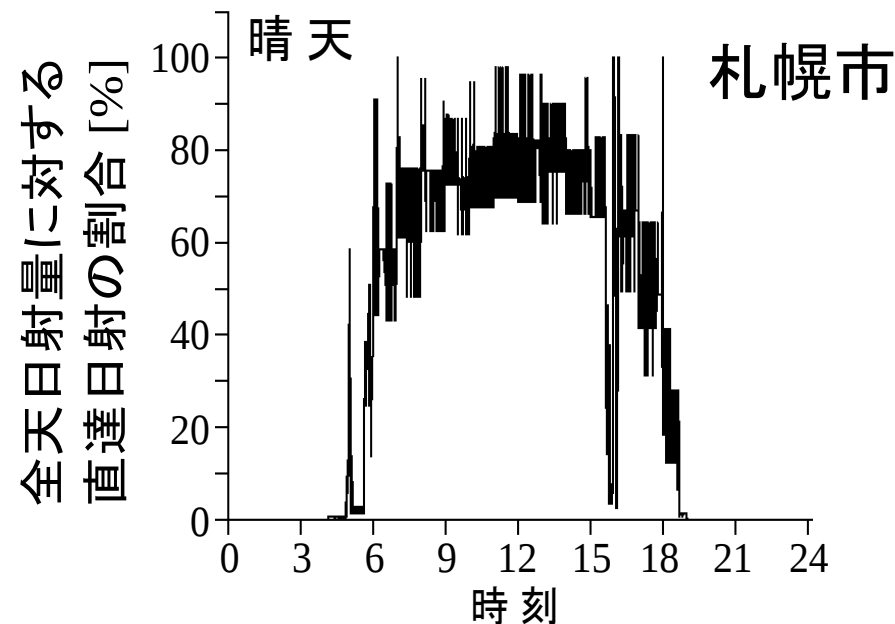
受光量の解析結果 (複数の太陽位置について最適化した場合)



直達日射と散乱日射



(a) 2007年7月9日

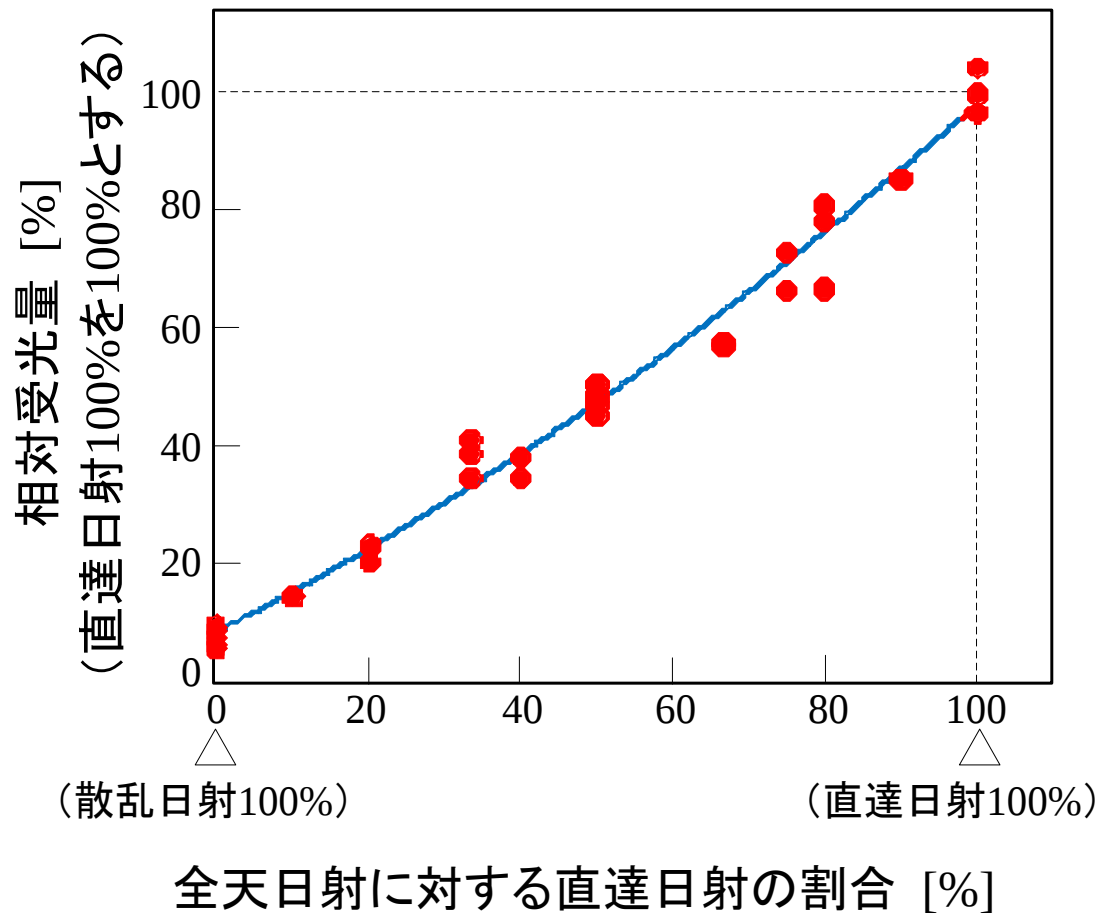


(b) 2007年7月14日

○地域によって直達日射と散乱日射の割合が異なる。

例えば、赤道付近では日射が強いが、雲が多いため散乱日射の割合が大きいなど⇒植物は環境に最適化している

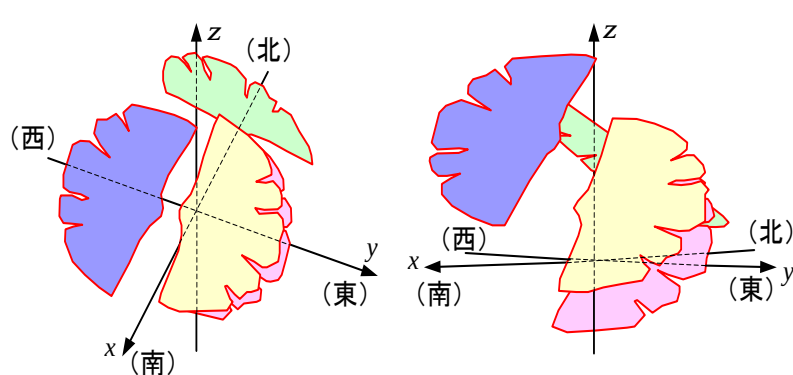
イチヨウ受光モジュールの受光特性 (透過率=0)



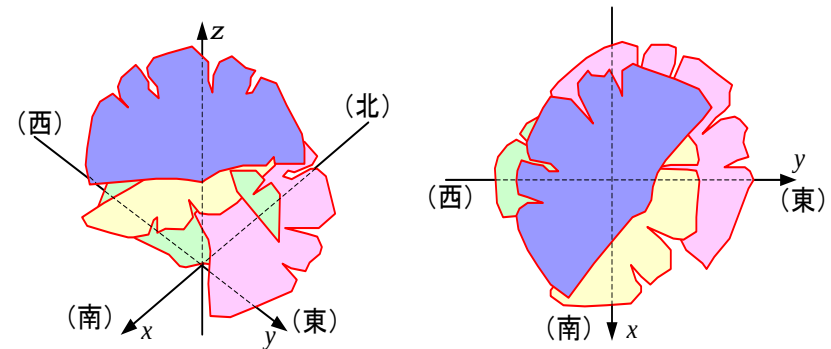
解析条件

- ・イチヨウシュートモデル (葉4枚)
- ・葉枝の長さ: 10, 25, 40, 55 mm
- ・仮想ふく射面のサイズ(直達光): 100 mm(幅高さ)
- ・仮想ふく射平板(直達光)と座標系中心との距離: 500 mm
- ・光線の数: 1000 (1時間あたり)
- ・仮想ふく射面(直達光)の位置: 方位角 90°, 傾斜角 45°
- ・GAのパラメータ
 - 選択: 上位15の染色体モデル
 - 突然変異確率: 0.2
 - 染色体モデル: 300
 - 世代数: 40

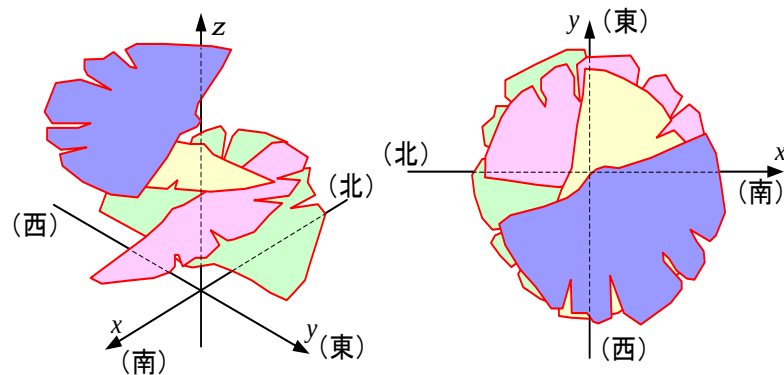
イチョウモジュールの配置結果 直達日射と散乱日射(透過率=0の場合)



(a) 0 % (直達日射のみ)



(b) 50 %



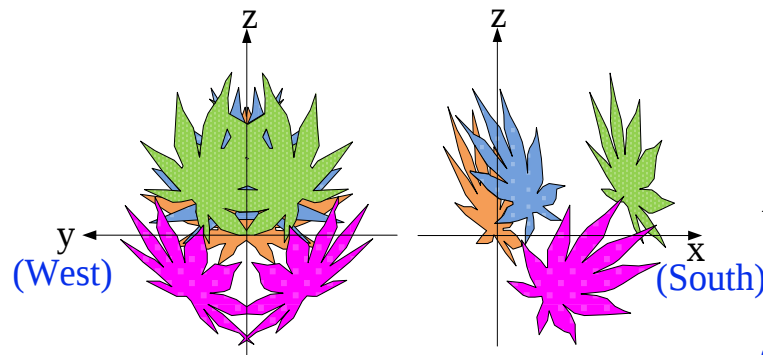
(c) 100 % (散乱日射のみ)

全天日射に対する散乱日射の割合 [%]

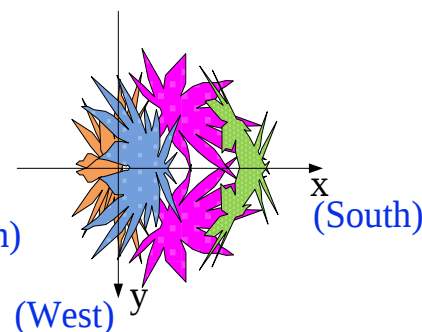
- 7月代表日の全ての時刻の太陽軌跡について最適化
- 散乱日射の割合を大きくするに従って、モジュールの配置の指向性は弱くなる。

札幌と那覇におけるヤマモミジの最適形態結果

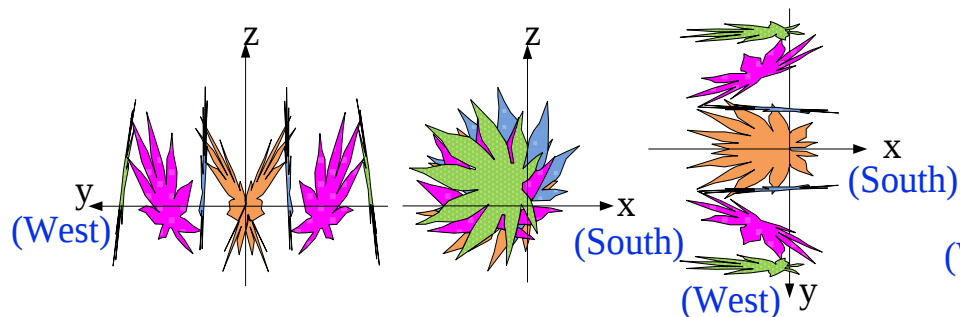
札幌, 1月



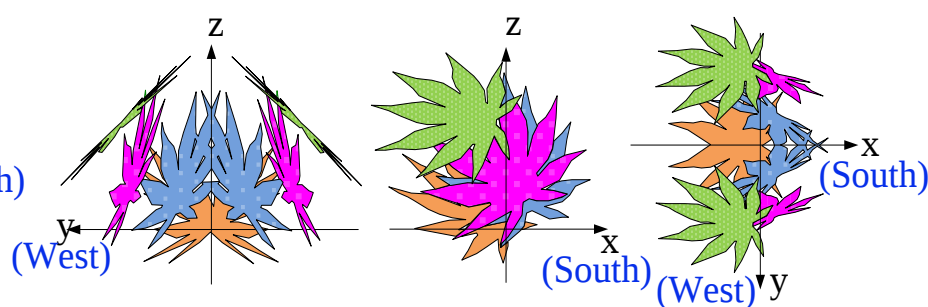
太陽の軌跡の違いは
 植物シュート形態に大きく影響する。



札幌, 7月



那覇, 1月



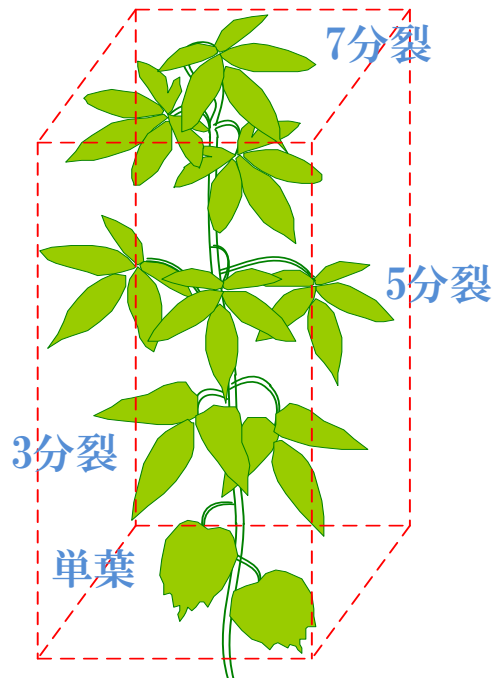
- ・同じ場所の太陽の方位角と傾斜角の軌跡: 7月 > 1月
- ・同じ日の太陽の傾斜角の軌跡: 那覇 > 札幌

ケナフ個体モデルの解析

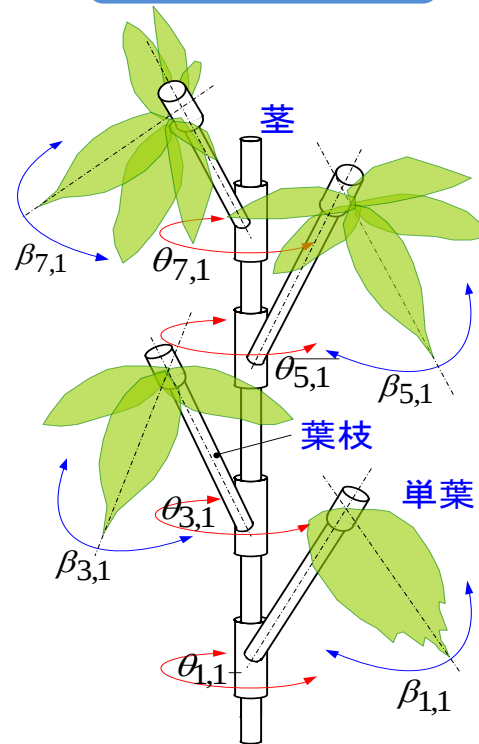
ケナフの葉の分裂数は、
 高さで異なる。

- ・ 各角度を染色体モデルで表す
- ・ 各長さは与える

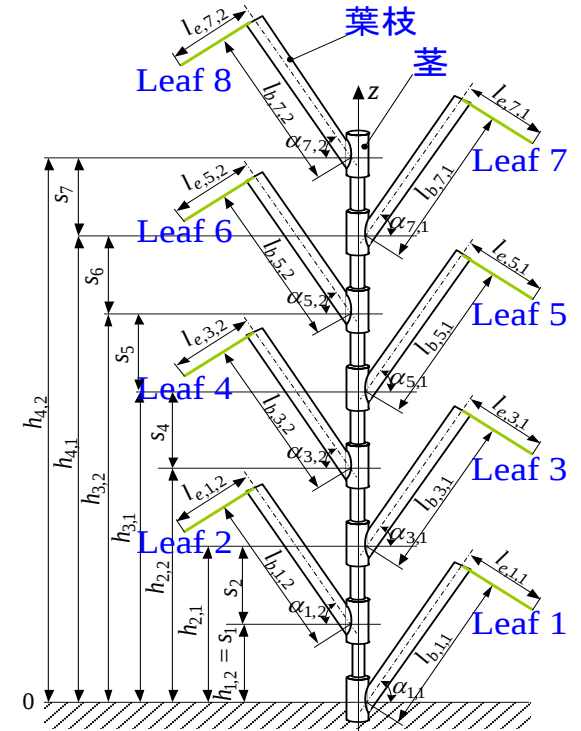
ケナフの個体



シュートモデル



シュートモデルの変数

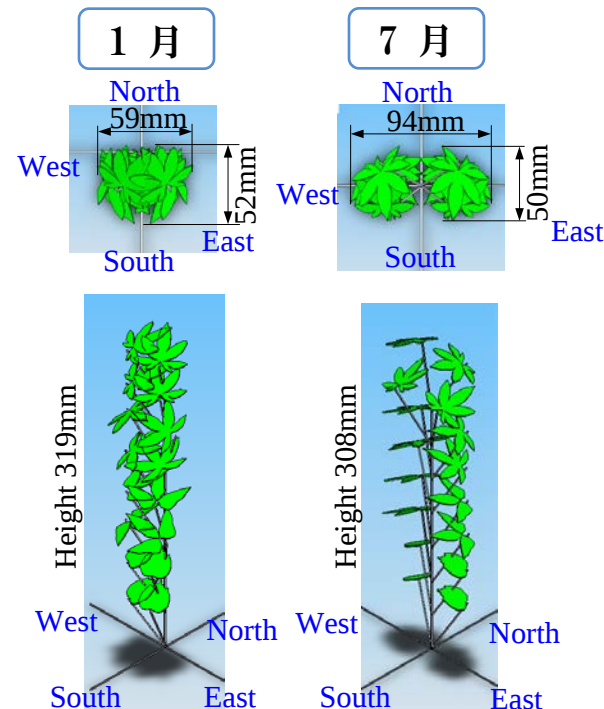
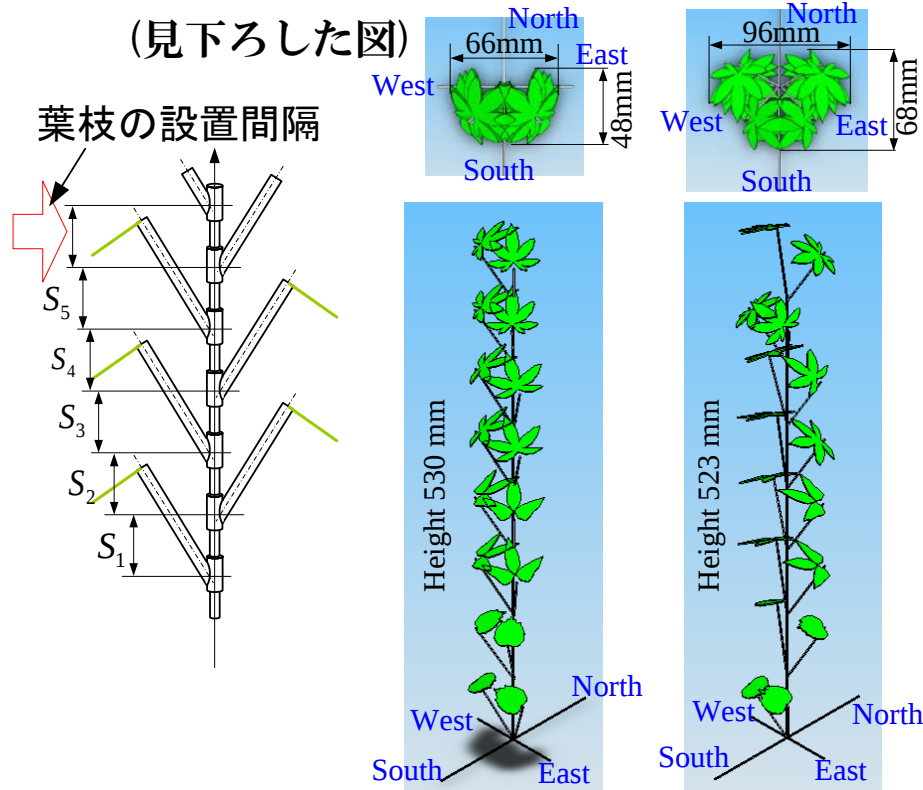


ケナフ個体モデルの最適形態の結果

札幌の太陽軌跡，
 受光量の最大化目的

葉枝の設置間隔を65mm
 に固定した場合

葉枝の設置間隔を35mm
 に固定した場合



葉枝の間隔が広いと，
 準最適解が多く出現する。

ケナフ個体モデルの受光量と体積密度の解析結果

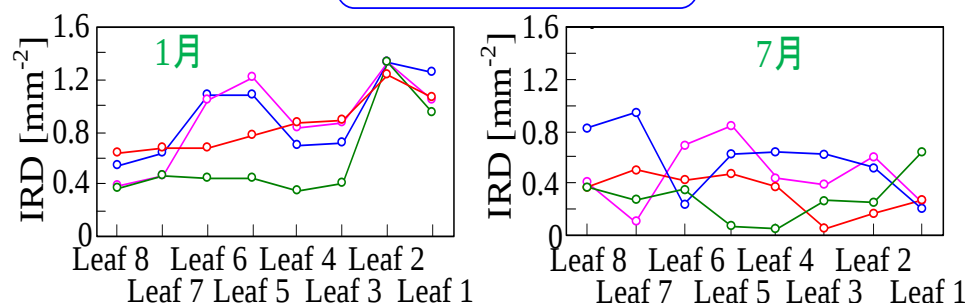
分裂葉の配置パターン

Leaf 8-Leaf 7-Leaf 6-Leaf 5-Leaf 4-Leaf 3-Leaf 2-Leaf 1

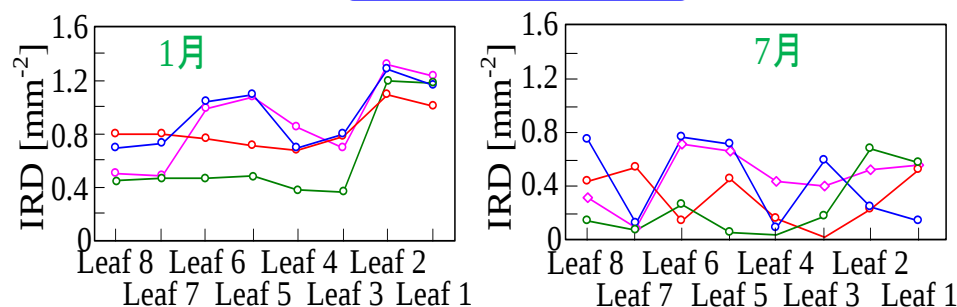
— 7-7-5-5-3-3-1-1 — 3-3-3-3-3-1-1 — 5-5-5-5-5-1-1 — 7-7-7-7-7-1-1

受光量の最大化目的の結果

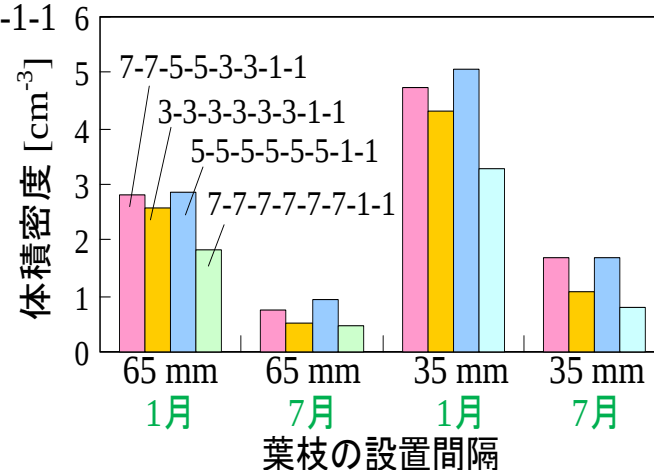
葉枝の設置間隔 65 mm



葉枝の設置間隔 35 mm



体積密度の結果



IRD(受光量)=(葉に到達した光子数/葉の面積) [mm⁻²]

体積密度=全葉に到達した光子数/個体モデルの設置容積 [cm⁻³]

1月の太陽の移動範囲は狭いため、
 7月に比べて体積密度は大きい



夏季での体積密度の改善が必要

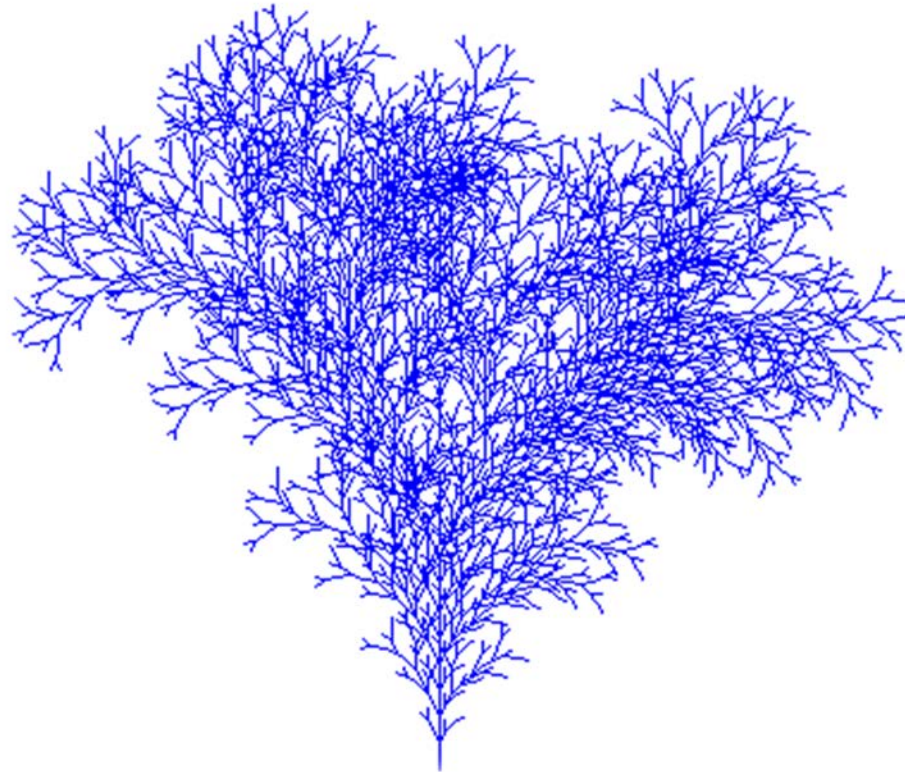
植物シュート受光体の解析結果

植物シュート形態を伴う受光システムについて、
遺伝的アルゴリズムを用いて受光量とモジュールの配置を
調査した。

この結果、太陽位置、直達光と散乱光の割合、モジュールの
表と裏の光学特性の違いを考慮した、葉モジュールの最適配置
を計画できるようになった。

L-systemによる枝分かれ構造

L-systemで作成した枝分かれの例





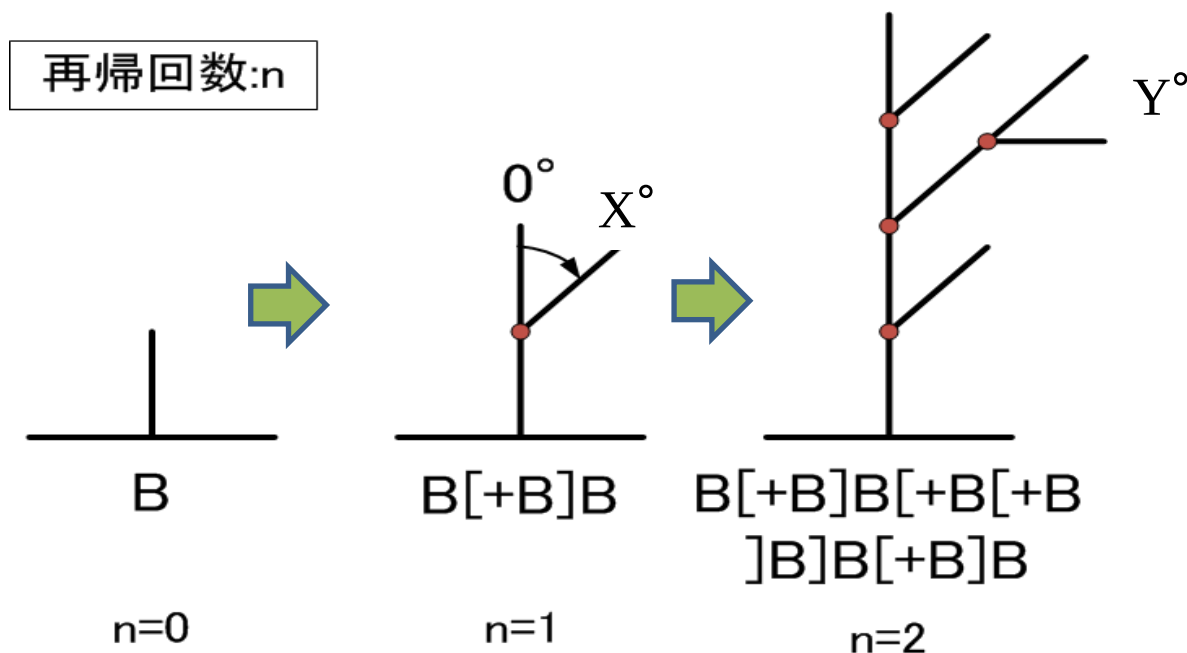
L-systemとは

- 自然界のフラクタル構造を人工的に模擬する
アルゴリズム
- 分岐の規則を文字列で与える

例 初期状態:B 書き換え規則:B[+B]B

B	一定距離進む
+	進行方向を+X度ずらす
-	進行方向を-Y度ずらす
[	分岐前の座標データを記憶
]	分岐前の座標データを抽出

B:Branch



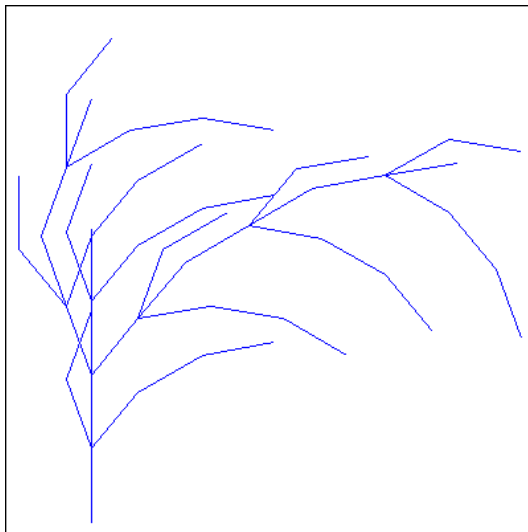
受光量の最大化目的による枝分かれ構造の最適化

L-systemのパラメータ(分岐角度, 再帰回数など)をGA(遺伝的アルゴリズム)により最適化する。

初期状態	B
枝の角度	20度
再帰回数	2回

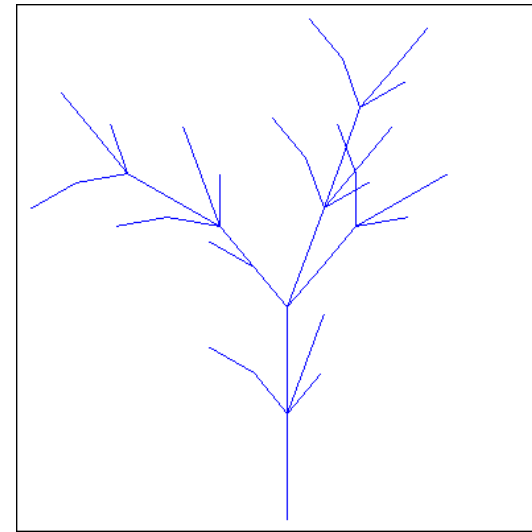
Case ①

$B[++B[+B+B]][-B[++B]]B$

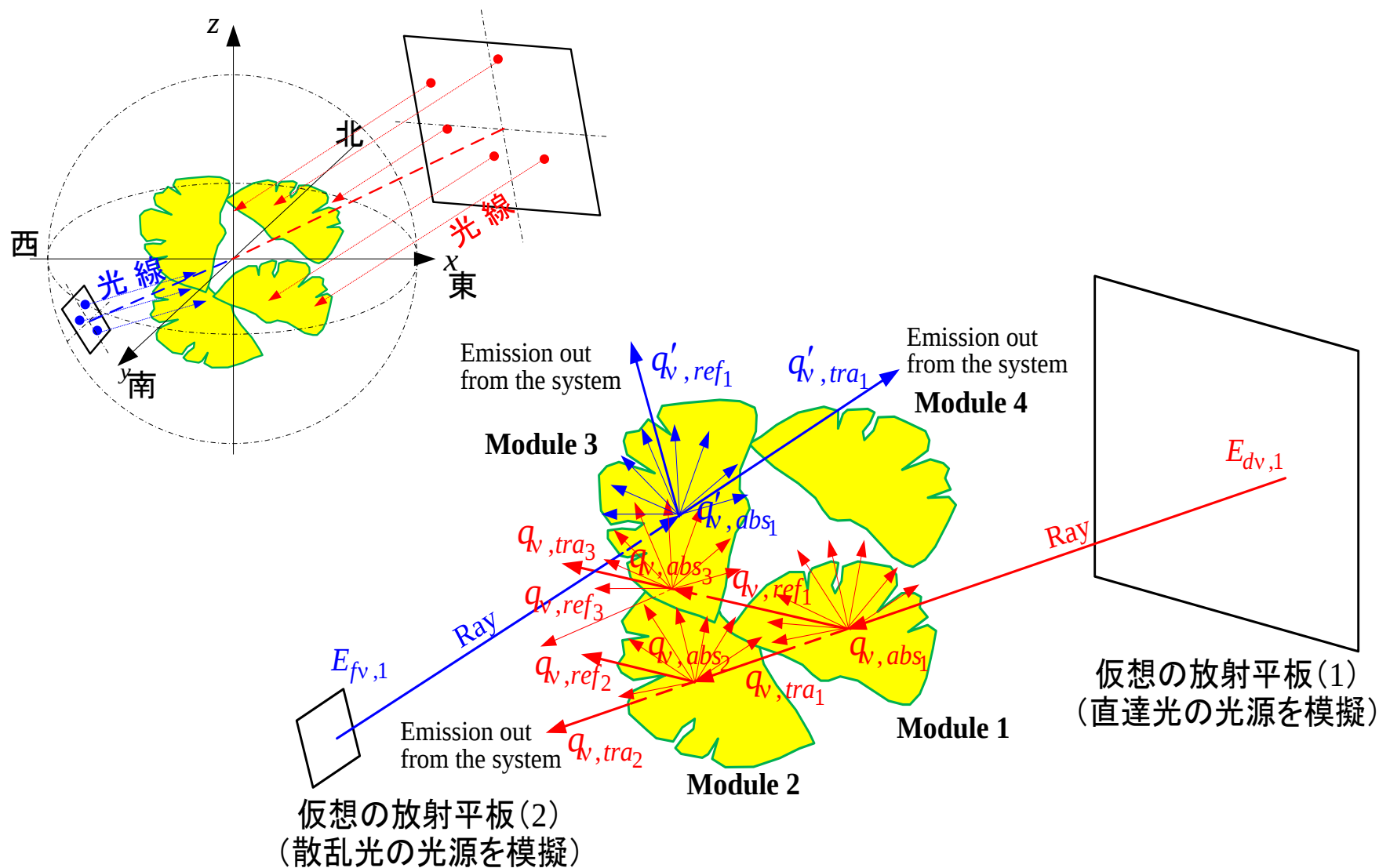


Case ②

$BB[+BB][--B[-B]][++B]$

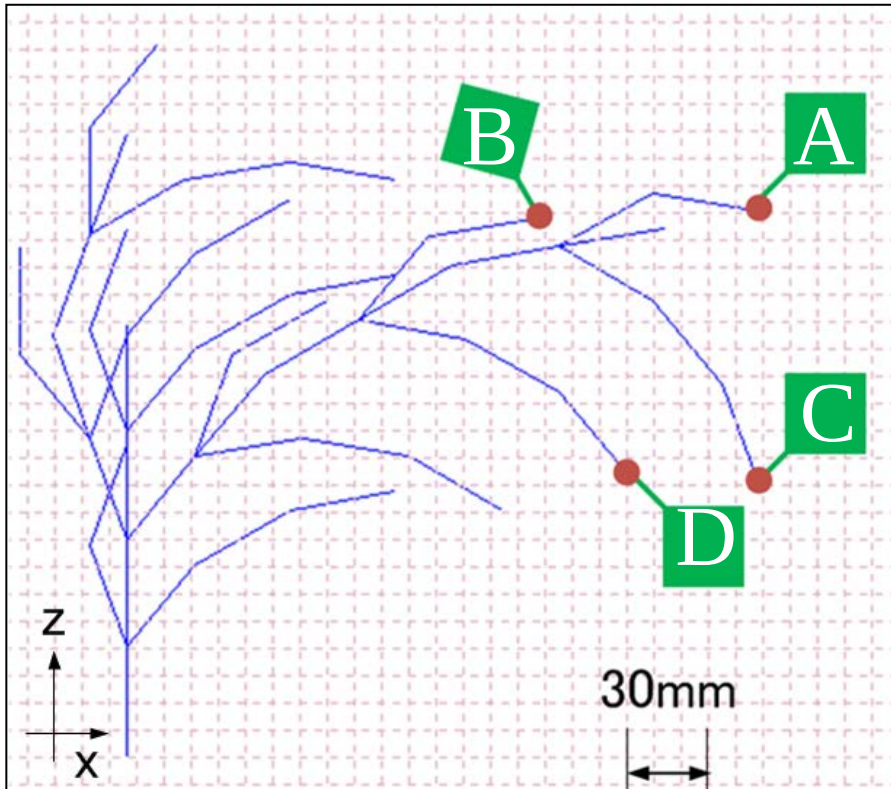


直達日射と散乱日射のモデル

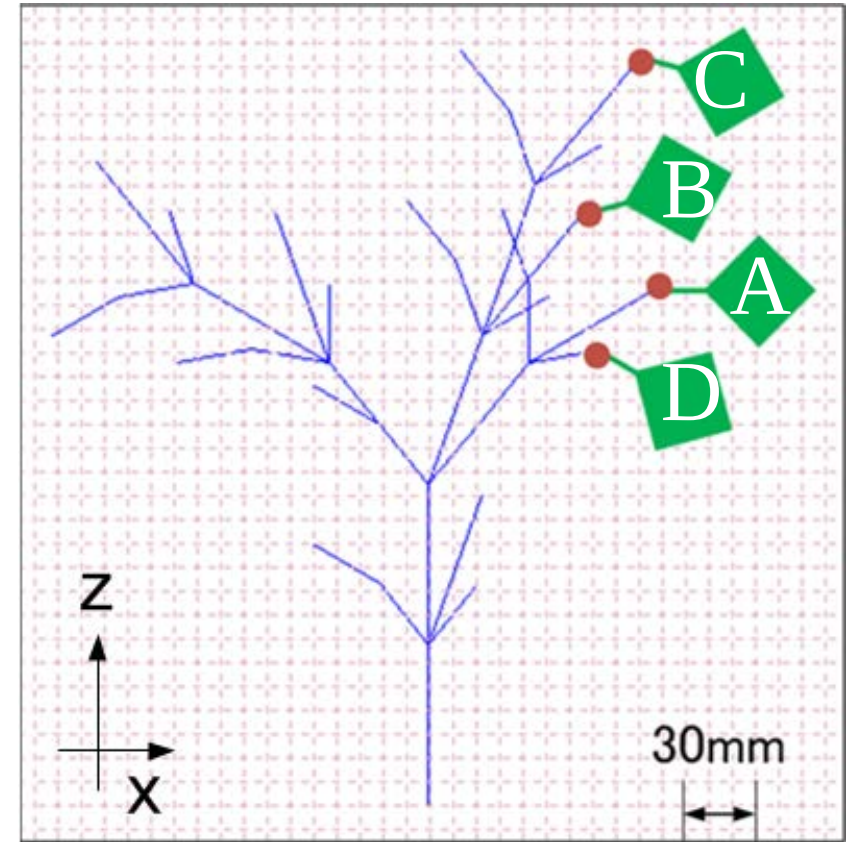


枝の先に正方形の葉をつけたときの，受光量の違い

Case ①



Case ②



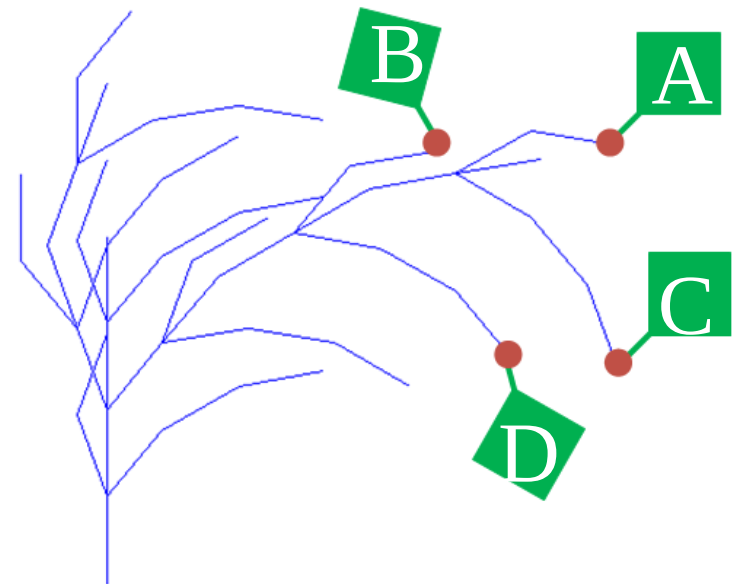
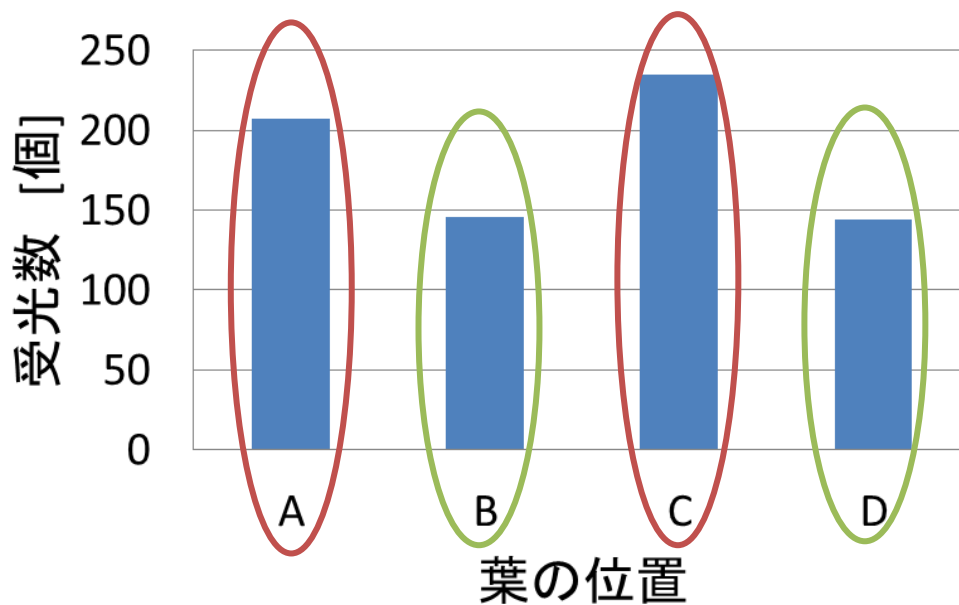
○1本の枝に1枚の葉を付ける(合計4枚)

○太陽の位置: 南向き

Case ①の受光量の解析結果

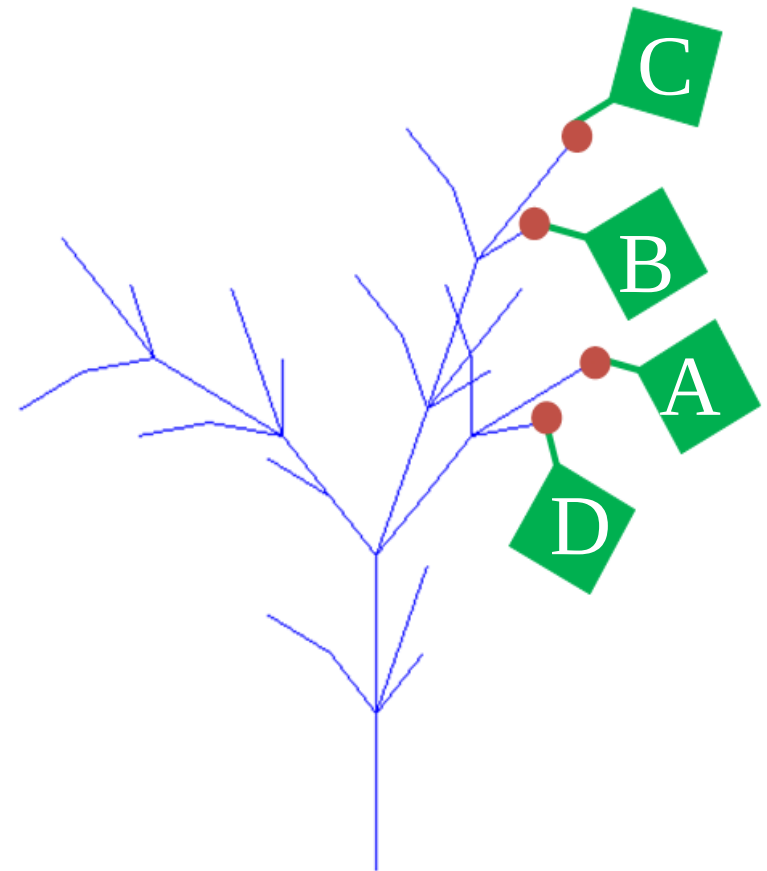
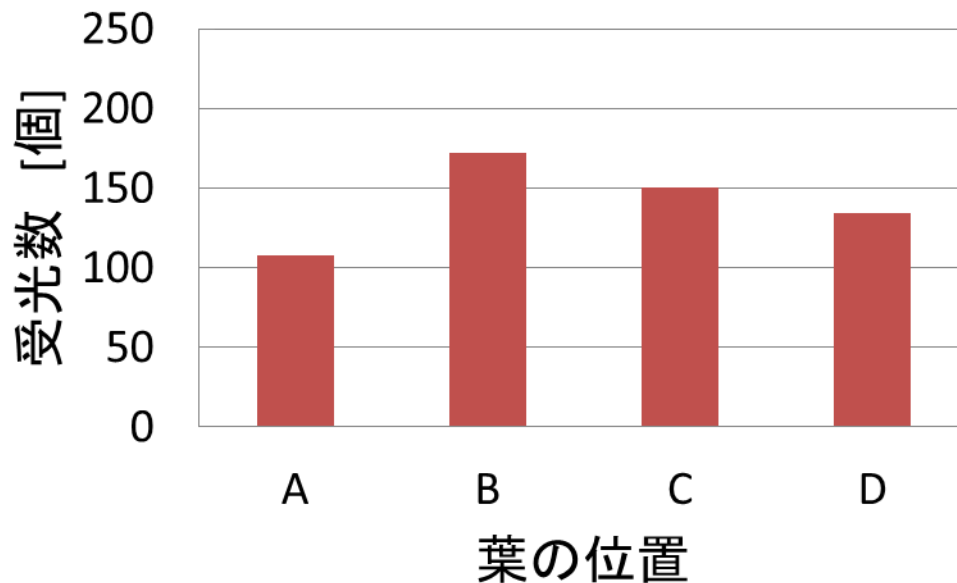
○葉A,C 植物シュート同士の重なり合いがない

○葉B,D 遮へいにより受光量が減少する



Case ②の受光量の解析結果

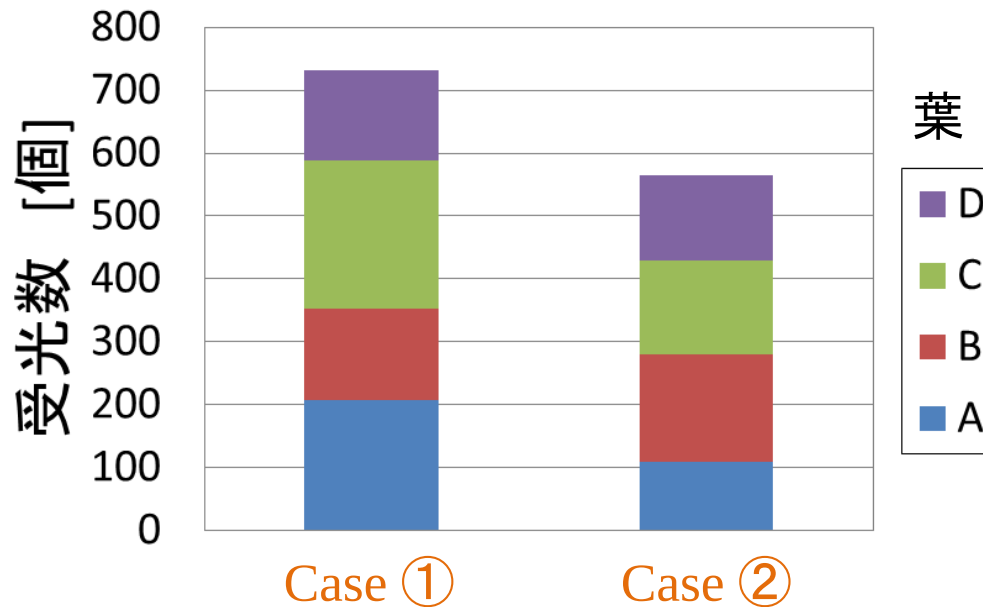
○各葉ごとの受光量の差が少ない



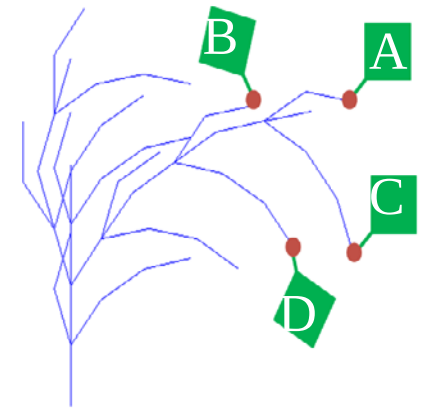
Case ①とCase ②の比較

枝分かれによって、各葉の受光量が大きく変化することは確認された。

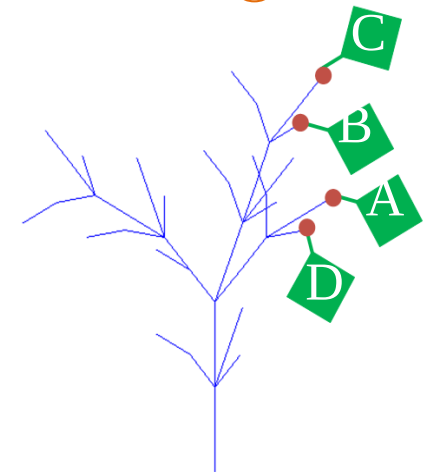
➡ 実際の植物シュートを用いて、GAにより枝分かれ構造を最適化する。



Case ①

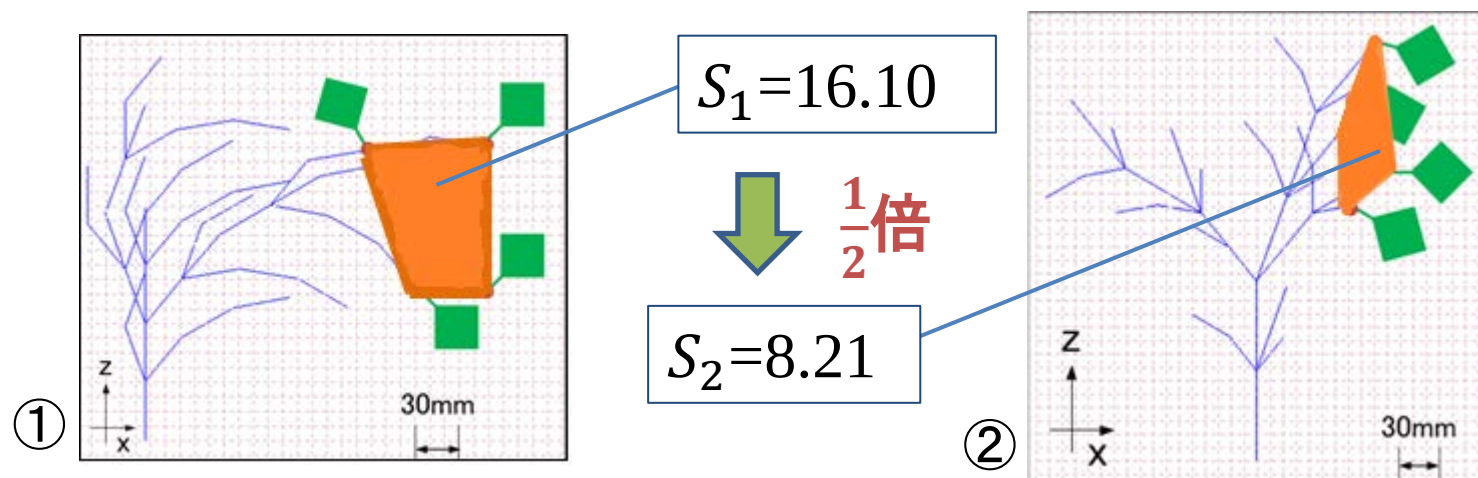


Case ②



単位面積当たりの受光数

□ 面積 S_1, S_2 (cm^2)



□ 単位面積当たりの受光数 P_1, P_2

① $P_1 = \frac{\text{総受光数}}{S_1}$

$P_1 = 45.47$ (個/ cm^2)

② $P_2 = \frac{\text{総受光数}}{S_2}$

$P_2 = 68.70$ (個/ cm^2)

1.5倍

今後の展開

- OL-systemによる枝分かれ規則に，受光量の最大目的を伴うGAを組み込む。
 - これにより，枝分かれ含む植物シュート形態を最適化する。
 - 大型計算機，並列計算による大規模計算を実施する。
- (多くの点で，実際の植物を模擬するには至っていない)



ご清聴ありがとうございました。