

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 2 年 9 月 10 日現在

機関番号：10101

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2016～2019

課題番号：16K14933

研究課題名(和文) ダイオードツリーによる樹冠の太陽光受光量の再評価と応用への基盤確立

研究課題名(英文) Reexamination of patterns of sunlight absorption in a tree crown using the Diode Tree, with an establishment of the basis for application

研究代表者

隅田 明洋 (Sumida, Akihiro)

北海道大学・低温科学研究所・准教授

研究者番号：50293551

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,900,000円

研究成果の概要(和文)：植物群落の葉群による光の総吸収量は、本影・半影と呼ばれる効果により、葉群が鉛直方向に広がるほど大きくなると予測できる。そこで、小型のフォトダイオード(太陽光パネル)を葉に摸した人工樹冠「ダイオードツリー」を製作し、葉群の鉛直方向の広がりの効果を層別の発電量によって調べた。その結果、予測とは全く逆の結果が得られた。しかし、ダイオードツリーの構造上の効果を補正すると、層の鉛直方向の広がりに無関係に層全体の光吸収量は一定となり、本影・半影の効果のない場合の理論と一致した。結果を総合すると、葉群による光吸収において、葉からの上向きの光の反射が重要な役割を果たしていることが示唆された。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究では、森林の葉群による光エネルギー吸収に関する従前の理論の成立理由に対する再評価を行った。人工樹冠を用いた実験の結果、従前の光エネルギー吸収パターンの理論では重要視されていなかった葉からの光の上向きの反射が、理論の成立に大きく貢献していることが示唆された。太陽光パネルによる発電においても、パネルから反射した光を再利用するシステムが太陽エネルギーの総吸収量を増加させる可能性も示唆された。

研究成果の概要(英文)：It is predicted that the total amount of light energy absorbed by the foliage of a plant community decreases with decreasing degree of vertical spread of the foliage due to the effects called umbra and penumbra. An artificial tree crown, the DiodeTree, which was composed of many tiny photo diodes (solar panels) that resembled foliage, was made to evaluate the effects of vertical spread of foliage on light absorption via electric outputs generated by the diodes. Unexpectedly, the result was quite opposite to the prediction. However, when an effect ascribable to the structure of the DiodeTree was corrected, light absorption patterns were the same irrespective of the degree of vertical spread of the foliage, which agreed with the theory of the light absorption under no effects of umbra and penumbra. In conclusion, it is suggested that the upward emission of light reflected from foliage plays very important role in light absorption patterns in the foliage.

研究分野：森林生態学

キーワード：樹冠 葉群 光吸収 ダイオードツリー Lambert-Beerの法則 反射光

## 様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

(1)植物群落の葉群内の光の吸収様式は Lambert-Beer の法則 (以下 LB 則) と呼ばれるモデルによって近似できることが広く知られている。葉群を構成する葉の量や葉の傾きなどが一定の条件を満たせば、光の吸収と葉の量との関係を近似する LB 則は、葉群内の葉同士の鉛直方向の間隔に無関係に一定となるはずである。その一方、実際の樹冠においては、本影・半影などと呼ばれる、葉同士の鉛直方向の間隔による光吸収への影響が存在することが知られている。

(2)それにも拘わらず樹冠内の光の吸収様式を LB 則でうまく近似できるという事実は、葉群における LB 則の成立についての解釈に何らかの庇護があることを示唆している。言い換えれば、LB 則で近似された光の吸収と葉の量との関係は、葉群内の葉同士の鉛直方向の間隔によって変化するはずである。

### 2. 研究の目的

葉群の光吸収量と葉の量との関係を近似する LB 則に対し、葉群内の葉同士の鉛直方向の間隔の違いがどのような影響を及ぼすかについて、葉群の性質の不確かな点に仮定を設けることなく推定を行うため、人工的な樹冠を用いる実験的な手法により調べることにした。これにより、既存の樹冠の光減衰モデルがなぜ近似的に成立するのか、あるいはモデルのどこに問題があるのか、について解析する。

### 3. 研究の方法

小型フォトダイオード (小型ソーラーパネル) を個葉に模して空間中に配置した人工樹冠“ダイオードツリー”を作製し、樹冠による光吸収パターンを定量的に把握することとした (図 1)。



図 1 ダイオードツリーの外観

個葉を想定した約 640 個の小型 (3.9 × 4.4 mm) のフォトダイオードを直径約 20 cm の円形の平面上に手作業で半田付けして配置し、その平面 (層) を鉛直方向に 5~10 層配置した。一つの層の円面積に対するダイオードの有効発電領域の被覆率は 15.6 % である。ここから逆算すると、7 層分のダイオードの総面積が一つの層と同じ円形の土地面積全体にダイオードを敷き詰めた場合のダイオードの総面積に相当する。側方からの光入射を遮断するとともに水平的に均質な空間を模倣するため、鏡面仕上げした円筒内にダイオードツリーをいれ (図 2) 円筒に蓋をした。蓋の下面には LED 光源を配し、入射光の強さを実験中に一定に保てるようにした。

上側の層が下側の層を被陰するので、層別のフォトダイオードの発電量は下側の層になるにつれて減少する。樹冠による光の吸収様式は、この発電量の減少によって表すことができる。層別の発電量は、信号増幅器を経てデータ回収用のパソコンに送り記録する設計とした (図 1)。

層同士の鉛直方向の間隔は、ある程度可変にできる仕

様とした。これにより、層間の鉛直方向の間隔が光の吸収効率にどのように影響するかを評価した。

以上のダイオードツリー測定システムの製作は北海道大学低温科学研究所技術部スタッフが担当した。



図 2 鏡面仕上げした円筒内部のダイオードツリー

### 4. 研究成果

(1) まず、製作したダイオードツリーの各層の光吸収様式が LB 則に従うかどうかを調べた。内側を鏡面仕上げしたダイオードツリーを入れた状態で各層の光吸収量を測定した後、ダイオードツリーを入れない状態での円筒内部の自然な光の減衰による効果を差し引くことにより、ダイオードツリーのみによる光の吸収量を推定した。その結果、最も上の層から 5 層目までは、このシステムにより LB 則がほぼ完全に再現されることが確認できた (図 3)。以後 5 つの層を用いることにより、層間の鉛直方向の距離の効果調べることとした。

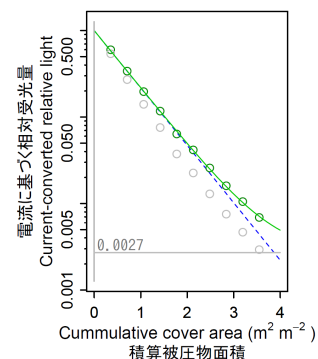


図 3 円筒内部の自然な光減衰を補正した 10 層による光吸収過程

(2) 5つの層を用い、層間の鉛直方向の間隔の効果を推定する実験を行った。鏡面仕上げした円筒内であっても自然な光の減衰が起こることから、5つの層のうち最も下側の層の地上高を固定して層間の鉛直方向の間隔を(a)5 cm, (b) 10 cm, (c) 20 cmのそれぞれに設定して比較する場合 (Case L)と、5つの層のうち最も上側の層の地上高を固定して鉛直方向の間隔を(c)20 cm, (d) 10 cm, (e) 5 cmに設定して比較する場合(Case H)の両方の実験を行った(図4)。Case LとHにおける(c)は同じものである。

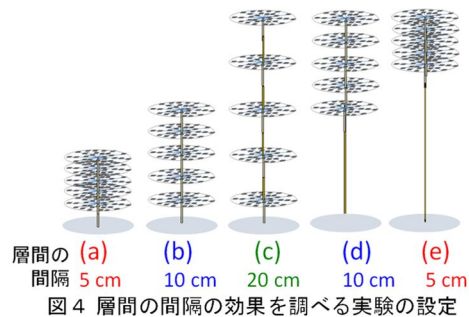


図4 層間の間隔の効果を調べる実験の設定

Case LにおいてもCase Hにおいても、円筒内の自然な光減衰の効果に対して補正を行わない場合、層間の間隔が狭いほどLB則を表すグラフの直線の傾きが緩やかであった(図5左)。このことは層間の間隔が狭いほど一番下の層まで光がよく当たっていることを意味し、予想とは全く逆の結果となった。

層間の間隔が狭くなるほど本影・半影効果による光吸収量の減少が現れるとの予想に反する結果が得られた理由として、使用したダイオードの表面がガラスできており、下面から上面への光の反射が著しいこと、層の配線設計上、層と層との間隔を5 cmより狭くできなかったため、1辺が5 mmに満たないダイオードによる本影・半影効果がほとんど現れなかったこと、等が考えられる。

さらに、円筒内部の自然な光減衰の影響を補正すると、層間の間隔が異なる3つの実験のグラフはほぼ完全に重なった(図5右)。これらの結果は、LB則が必要とする仮定を十分満たさない植物群落においてもLB則がよく成立する理由として、葉からの光の上向き反射が重要な役割を果たしていることを示唆している。また、本ダイオードツリーシステムが、散乱光条件下におけるLB則の実験系を理想的に再現していたことを示している。

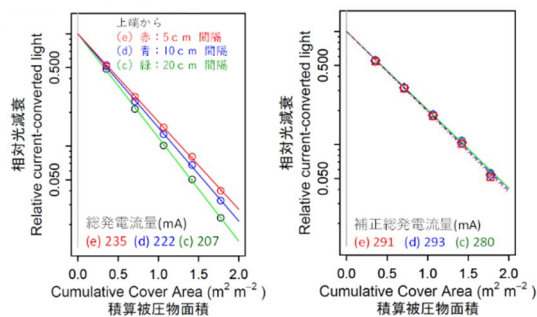


図5 ツリー上端からの層間の間隔の違いによる比較  
左、円筒内部の光減衰の補正前；右、補正後。層の下端の位置を固定した a, b, c 間の比較 (省略) もほぼ同様の結果が得られた。

(3) さらに、光源の形状を変えたり、円筒の内部を黒体スプレーによって円筒内壁からの光の反射を極力抑えたシステムや、5層のうちの上から3層の結果だけを取り出した場合の値と、5層のうち下から2層を取り除いた残り3層の結果とを比較するなどを行ったが、層の間隔が同じならLB則のグラフの傾きも同じという結果に変化はなかった。さらに試みとして、ある層の上側表面からの上向き反射光の強さを光量子センサーを用いて測定してみたところ、その層の発電量の1/4程度の強さを示すことがあった。以上の結果もまた、実際の群落における光の吸収において、葉の下面から上向き光の反射による寄与を評価することが非常に重要であることを示唆している。

(4) そこで、ある層の上面からその上の層の下面への反射がどの程度あるかを調べるため、ダイオードを層の両面、すなわち、層の上側だけでなく下側にも配置したシステム、および、ダイオードの下面に黒体スプレーによって反射を抑えたシステムの製作に取りかかった。この際、設計を工夫して、層と層との間隔を1 cm程度にまで狭くできるようにしてある。これらのシステムはほぼ完成し、予備的な調整を行う段階にある。本課題の研究期間終了後もこれらを使用した研究を継続する予定である。

本課題の実験では側方からの光の入射を抑えるためにダイオードツリーを円筒に入れて実験を行ったが、円筒に入れない状態では、側方からの光の入射によって各層の発電量は最も上層の発電量と大きく変わらない値を示した。層の下面からの反射光も発電に利用するシステムを製作すれば、狭い土地面積の中でより多くの光を吸収する太陽光発電システムに応用できることが期待される。

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計5件（うち査読付論文 3件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 2件）

1. 著者名 隅田明洋・森章一・千貝健・小野数也・加藤由佳子・佐藤陽亮・齋藤史明	4. 巻 23
2. 論文標題 ダイオードツリー製作における問題と対応	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 北海道大学低温科学研究所 技術部技術報告	6. 最初と最後の頁 4 - 5
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Chen Lei, Sumida Akihiro	4. 巻 8
2. 論文標題 Patterns of Branch Growth and Death in Crowns of Sakhalin Spruce, <i>Picea glehnii</i> (F. Schmidt) Mast	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Forests	6. 最初と最後の頁 26 ~ 26
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.3390/f8010026	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

1. 著者名 Chen Lei, Sumida Akihiro	4. 巻 32
2. 論文標題 Effects of light on branch growth and death vary at different organization levels of branching units in Sakhalin spruce	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Trees	6. 最初と最後の頁 1123 ~ 1134
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1007/s00468-018-1700-5	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Sumida Akihiro, Watanabe Tsutomu, Miyaura Tomiyasu	4. 巻 8
2. 論文標題 Interannual variability of leaf area index of an evergreen conifer stand was affected by carry-over effects from recent climate conditions	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Scientific Reports	6. 最初と最後の頁 13590
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1038/s41598-018-31672-3	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

1. 著者名 隅田明洋・森章一・千貝健・平田康史・佐藤陽亮・齋藤史明・加藤由佳子・小野数也・若土もえ	4. 巻 24
2. 論文標題 ダイオードツリーの光吸収様式.	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 北海道大学低温科学研究所 技術部技術報告	6. 最初と最後の頁 1 - 3
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計6件 (うち招待講演 1件 / うち国際学会 0件)

1. 発表者名 隅田明洋, 森章一, 千貝健, 平田康史, 佐藤陽亮, 齋藤史明, 加藤由佳子, 小野数也, 若土もえ
2. 発表標題 小型ソーラーパネルを配した人工樹冠 (ダイオードツリー) による樹冠の光吸収過程再評価の試み
3. 学会等名 日本植物学会第82回大会 広島国際会議場 (広島市)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 隅田明洋, 森章一, 千貝健, 平田康史, 佐藤陽亮, 齋藤史明, 加藤由佳子, 小野数也, 若土もえ
2. 発表標題 ダイオードツリーの光吸収様式
3. 学会等名 第24回低温科学研究所技術部技術報告会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 隅田明洋・宮浦富保・渡辺力
2. 発表標題 針葉樹林の葉量は過去数年の気象の影響を受ける
3. 学会等名 平成29年度 北海道植物学会大会 (招待講演)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 隅田明洋・森章一・千貝健・小野数也・加藤由佳子・佐藤陽亮・齋藤史明
2. 発表標題 ダイオードツリー製作における問題と対応
3. 学会等名 第23回低温科学研究所技術報告会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 隅田明洋, 森章一, 千貝健, 佐藤陽亮, 齋藤史明, 中坪俊一
2. 発表標題 樹木葉群の光吸収様式を推定するダイオードツリー作製の概要
3. 学会等名 第22回低温科学研究所技術報告会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 隅田明洋, 森章一, 千貝健
2. 発表標題 人工樹冠「ダイオードツリー」で樹木の葉群の光吸収過程を調べる
3. 学会等名 第4回北海道大学部局横断シンポジウム
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究協力者	森 章一  (MORI Shoichi)		

## 6. 研究組織（つづき）

	氏名 (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究協力者	千貝 健  (CHIGAI, Takeshi)		
研究協力者	小野 数也  (ONO Kazuya)		
研究協力者	加藤 由佳子  (KATO Yukako)		
研究協力者	齋藤 史明  (SAITO Fumiaki)		
研究協力者	佐藤 陽亮  (SATO Yosuke)		
研究協力者	平田 康史  (HIRATA, Yasushi)		
研究協力者	若土 もえ  (WAKATSUCHI Moe)		
研究協力者	陳 磊  (CHEN Lei)		