

ヒマワリの形状モデリングと 作物群落の放射環境シミュレーション

学位論文内容の要旨

作物群落に入射した太陽放射の吸収・散乱過程は放射伝達過程とよばれる。この放射伝達過程を明らかにし定量評価することは、作物の生育予測やリモート・センシングを行うために重要である。作物群落の放射伝達過程は群落構造と密接な関係があるため、これまでに様々な作物群落の構造把握や、群落構造をモデル化する研究が行われてきた。その方法は、群落構造を葉面積や葉の向きに関する確率密度分布として表現するのが一般的であった。これに対して最近では、確率密度分布だけではわからない、より詳細な放射伝達過程を解明するため、群落を構成する作物個体の三次元形状を実測し、それをコンピュータ上に再現することで作物群落を立体的に表現する方法がとられるようになってきた。しかしこの方法では、作物の三次元形状を測定するためには多くの労力を必要とし、また得られた作物個体の三次元形状とそれで構成される群落をコンピュータ上に再現して放射伝達過程の推定する場合にも、計算に多くの時間を必要とする。したがってこれらの研究では、実測値を用いて計算結果を検証した研究はほとんどない。このため、三次元形状のモデル化を基礎としたより有効な方法が求められている。

以上のような背景を基に、本研究は、作物群落の放射伝達過程をより簡単にかつ精度よく把握することを目的に、形状が比較的単純なヒマワリを対象に、個体の三次元形状のモデル化と群落における放射環境のシミュレーション手法の開発を行ったものである。三次元形状のモデル化にはLシステムを採用し、放射環境のシミュレーションではレイトレーシング法を改良した新しい手法を開発した。また、それらのモデルを使ってシミュレーションを行い、その結果を実測値と比較して検証した。

本研究の概要は以下のとおりである。

1. 作物形状モデルの開発

作物の三次元形状をコンピュータ上に再現するため、ヒマワリを対象にLシステムを用いた作物形状モデルを開発した。

まず、ヒマワリにおける生育段階ごとの三次元形状を把握するため、日を変えて写真測量を行った。写真測量にはデジタルカメラを使用し、解析には写真測量用のアプリケーション（Photo Modeler Pro）を使用した。その結果をもとに、葉の先端、葉の基部、葉柄の基部の三次元座標を決定し、節間長、葉柄長、葉長、葉柄傾斜角、葉傾斜角、葉柄方位角、葉方位角を計算した。なお、葉の面的な広がりについては、ヒマワリの葉をサンプリングして、中央脈と5本の側脈の長さ、および中央脈と5本の側脈とのなす角度を測定した。

こうして得られた写真測量のデータを使って、Lシステムを用いた作物形状モデルを開発した。本研究で開発した作物形状モデルは、骨格部分（茎、葉柄）と葉面部分からなり、Lシステムを1ステップ実行するごとに、葉、葉柄、節間で構成されるシュートを1

つ生成し、既に生成されているシュートを1段階成長させるものという構造になっている。

骨格部分（茎、葉柄）は、写真測量で得られた生育段階（5段階）毎の、節間長、葉柄長、葉長、葉柄傾斜角、葉傾斜角、葉柄方位角、葉方位角を使ってモデル化した。節間と葉柄の生長曲線はLシステムのステップ数の関数としてロジスティック曲線で推定することができた。葉長は葉柄長に対して対数的に伸長することがわかった。葉柄の傾斜角はステップ数が1から7までは減少し、ステップ数が8以降では約 35° で一定となった。葉の傾斜角は葉柄の傾斜角とともに増加し、一次関数で表すことができた。連続する節において、葉の方位角のなす角度は葉序によって異なり、対生葉序部分では、同じ節部に着生する葉の方位角差は約 180° 、連続する節部に着生する葉の方位角差は約 90° であった。一方、互生葉序部分では、連続する節部に着生する葉の方位角差は約 135° であった。また、葉柄の方位角は葉の方位角とほぼ等しかった。

なお葉面部分は、サンプリングで測定した中央脈と5本の側脈の長さ、および中央脈と5本の側脈とのなす角度を使ってモデル化した。

以上の関係をLシステムのパラメータとして与えることで、生育段階の異なるヒマワリの形状を再現するモデルを作成した。このモデルで再現されたヒマワリの形状は、実際のヒマワリの形状と良く一致した。また本研究では、個体の形状測定に写真測量の手法を適用したことにより作業時間が大幅に短縮され、ヒマワリなど日周性の大きな作物においても形状変化の測定が可能となった。これにより、この手法が作物形状の測定に有効であることも明らかになった。

2. 作物群落の放射環境シミュレーション

群落モデルを使って作物群落における放射伝達過程をシミュレーションするため、コンピュータ・グラフィックの分野で利用されてきたレイ・トレーシング法を改良した新しい手法を開発した。群落モデルは本研究で開発した作物形状モデルを複数組み合わせで作成した。本研究では、レイ・トレーシング法を検証するために、作物形状モデルとは別に、空間にディスクをランダムに配置したモデルを用意し、これをディスク・モデルと定義して使用した。

まずディスクモデルを使って、太陽光線の入射角、解像度、およびディスク面における散乱の回数、散乱方向の数を変えながら、レイ・トレーシング法で放射の空間分布を推定し、群落内の放射伝達過程を推定するためのレイ・トレーシング法の適用条件を決定した。次に、作物形状モデルを使って作成した群落モデルに、ディスクモデルで決定したレイ・トレーシング法の適用条件をあてはめ、群落内の放射環境のシミュレーションを行った。このシミュレーションにより、群落内における光合成有効光量子密度（PPFD）の垂直分布、水平分布、群落のPPFDの反射率、および透過率の季節変化などを計算し、結果を圃場での実測値と比較した。比較は、繁茂期（7月）における生育段階の異なる3日（4日、14日、27日）を使った。その結果、シミュレーションによる推定値と実測値は良く一致した。群落内におけるPPFDの反射率および透過率の季節変化についても、推定値は実測値と良く一致した。

以上より、作物群落の放射伝達過程をシミュレーションで推定するには、本研究で開発した手法、すなわち、作物形状モデルを使って作成した群落モデルに、レイ・トレーシング法を改良した手法が有効であることがわかった。この手法は個体の形状が再現されているため、本手法を使えば、群落を構成する各個体におけるPPFD吸収量の推定に基づく個体間の光合成量や成長の違いなどの評価も可能になると思われる。さらに、同一個体における各葉ごとの受光量の把握を知ることができるため、受光量の多い葉と少ない葉での生育の違いや生理的な違いなども推定できる可能性もある。このように本研究で開発した手法は、作物群落の放射伝達過程だけではなく、従来の確率モデルでは得られなかった情報を得るためのひとつの有力な手法になる可能性がある。

以上のように、本研究は、作物形状モデルと作物群落の放射伝達過程のシミュレーション手法を開発し、群落内の放射環境のシミュレーションを行ったものである。本研究の成果は、これからの作物群落内の放射伝達過程等の研究に大きく貢献するものと思われる。

学位論文審査の要旨

主査	教授	浦野	慎一
副査	教授	端	俊一
副査	助教授	谷	宏
副査	助教授	平野	高司

学位論文題名

ヒマワリの形状モデリングと 作物群落の放射環境シミュレーション

本論文は4章からなる頁数113の和文論文で、図73、表1、引用文献43を含んでいる。他に参考論文5編が添えられている。

作物群落における放射伝達過程を明らかにし定量評価することは、作物の生育予測やリモート・センシングを行うために重要である。作物群落の放射伝達過程は群落構造と密接な関係があるため、これまでに様々な作物群落の構造把握やモデル化に関する研究が行われてきた。その方法は、群落構造を葉面積や葉の向きに関する確率密度分布として表現するのが一般的であった。最近では、群落を構成する作物個体の三次元形状をコンピュータ上に再現する方法がとられるようになってきたが、作物の三次元形状を測定するためには多くの労力を必要とし、また三次元形状とそれで構成される群落において放射伝達過程を推定する場合にも、計算に多くの時間を必要とする。またこれらの研究では、実測値を用いて計算結果を検証した例は少ない。このため、三次元形状のモデル化を基礎としたより有効な方法が求められている。本研究は、作物群落の放射伝達過程をより簡単にかつ精度よく把握することを目的に、形状が比較的単純なヒマワリを対象に、個体の三次元形状のモデル化と群落における放射環境のシミュレーション手法の開発を行った。

1. 作物形状モデルの開発

ヒマワリの三次元形状を把握するため、デジタルカメラで生育段階ごとに日を変えて写真測量を行った。解析には写真測量用のアプリケーション (Photo Modeler Pro) を使用した。その結果をもとに、葉の先端、葉の基部、葉柄の基部の三次元座標を決定し、節間長、葉柄長、葉長、葉柄傾斜角、葉傾斜角、葉柄方位角、葉方位角を計算した。また、ヒマワ

リの葉から、中央脈と5本の側脈の長さ、および中央脈と5本の側脈とのなす角度を測定した。

こうして得られたデータを使って、Lシステムを用いた作物形状モデルを開発した。作物形状モデルは、骨格部分（莖、葉柄）と葉面部分からなり、Lシステムを1ステップ実行するごとに、葉、葉柄、節間で構成されるシュートを1つ生成し、既存のシュートを1段階成長させる構造になっている。

骨格部分は、写真測量で得られた生育段階（5段階）毎の、節間長、葉柄長、葉長、葉柄傾斜角、葉傾斜角、葉柄方位角、葉方位角をLシステムのステップ数の関数として直接、あるいは間接的に推定することができた。また、葉面部分は、サンプリングで測定した中央脈と5本の側脈の長さ、および中央脈と5本の側脈とのなす角度をLシステムのステップ数の関数としてモデル化することができた。

以上の関係をLシステムのパラメータとして与えることで、生育段階の異なるヒマワリの形状を再現するモデルを作成した。このモデルは、実際のヒマワリの形状と良く一致した。本研究では、写真測量を適用したことにより作業時間が大幅に短縮され、ヒマワリなど日周性の大きな作物においても形状変化の測定が可能となった。

2. 作物群落の放射環境シミュレーション

作物群落における放射伝達過程をシミュレーションするため、コンピュータグラフィックの分野で利用されてきたレイトレーシング法を改良した新しい手法を開発した。群落モデルは本研究で開発した作物形状モデルを複数組み合わせで作成した。また、レイトレーシング法を検証するために、空間にディスクをランダムに配置したディスクモデルを用意した。

まずディスクモデルを使って、太陽光線の入射角、解像度、およびディスク面における散乱の回数、散乱方向を変えながら、レイトレーシング法で放射の空間分布を推定し、群落内の放射伝達過程を推定するための適用条件を決定した。次に群落モデルを使った放射環境のシミュレーションを行い、群落内における光合成有効光量子密度（PPFD）の垂直分布、水平分布、群落の反射PPFDと透過PPFDの季節変化などを計算した。その結果（推定値）を圃場での実測値と比較した結果、実測値と良く一致した。群落内における反射PPFDと透過PPFDの季節変化についても、推定値は実測値と良く一致した。

以上より、作物群落の放射伝達過程を推定するには、本研究で開発した手法が有効であることがわかった。この手法は個体の形状が再現されているため、群落を構成する個体ごと、あるいは同一個体における各葉ごとの受光量を計算することが可能となり、従来の確率モデルでは得られなかった情報を得ることができる。

以上のように本研究は、作物群落の放射伝達過程をより簡単にかつ精度よく把握することを目的に、作物の三次元形状をモデル化するための新しい手法と、三次元形状で再現し

た群落における放射伝達過程を明らかにするための手法の開発を行ったものである。その成果は学術上、応用上高く評価される。よって審査員一同は、武田知己が博士(農学)の学位を受けるのに十分な資格があると認めた。