

2010年度 卒業論文

環境光を考慮した
コケの自動生成シミュレーション

指導教員：渡辺 大地 講師

メディア学部 ゲームサイエンスプロジェクト
学籍番号 M0107367
野村 浩毅

2010年度 卒業論文概要

論文題目

環境光を考慮した
コケの自動生成シミュレーション

メディア学部

学籍番号：M0107367

氏名

野村 浩毅

**指導
教員**

渡辺 大地 講師

キーワード

3DCG, コケ, 植物, 生長シミュレーション, 自動生成,
自然現象, フォトンマッピング

昨今、3DCGの発展は目覚しく、映画やゲームを代表とする映像コンテンツにおいて必要不可欠な技術となっている。その中でも自然景観の自動生成シミュレーションの研究が盛んである。一方で、草花や樹木と並んで自然景観に大きく影響を与える自然物の1つにコケがある。コケは日常生活において目にする機会の多い植物であり、生育する環境は一般的な土壌に留まらず、樹皮や石垣の表面、道路のアスファルトに繁殖する姿を見受けることができる。また森林や廃墟にコケが生えることによって、経年変化による印象を与える役目を果たしている。

本研究では、間接光を含む環境光を考慮したコケの自動生成シミュレーションの手法を提案した。本研究ではコケ植物の中でも蘚苔類を対象とし、コケの生育する要因をコケの個々の日射量、土壌表面の温度および湿度とした。コケは太陽からの直接光よりも間接光のほうが光合成に適しているため、フォトンマッピング法による光度分布の計算を行い日射量に反映した。コケの生育する土壌の状態を太陽および気温による熱エネルギーと水の移動によってモデル化し、生育するための温度および湿度を求めた。コケの生育する環境がどの程度生育に適しているかを数値化した環境適応度に基づいて、コケの生長および繁殖を行った。またコケは3次元モデルのポリゴン面上の自由な位置に繁殖できるため、よりリアルなコケの繁殖シミュレーションを行うことが可能となった。

目次

第1章	はじめに	1
1.1	研究背景および目的	1
1.2	論文構成	2
第2章	コケの生態	4
2.1	コケとは	4
2.2	蘚苔類	5
2.2.1	蘚苔類が繁殖する環境	5
2.2.2	蘚苔類の繁殖	6
2.2.3	蘚苔類の光合成	6
第3章	シミュレーション	8
3.1	コケの生育する要因	8
3.2	土壌のモデル化	9
3.3	コケの繁殖のモデル化	10
3.4	光度分布の計算	12
3.5	土壌状態のシミュレーション	16
3.5.1	熱エネルギー R の算出	17
3.5.2	コケの密生によるバルク輸送係数の調整	18
3.5.3	土壌含水率 θ および蒸発効率 β の算出	18
3.5.4	土壌表面温度 T_s および土壌表面湿度 rh_s の算出	20
3.6	コケの繁殖シミュレーション	21
3.7	1日ごとの処理の流れ	24
3.8	実装	25
第4章	検証と考察	27
4.1	検証	27
4.2	考察と課題	29
第5章	まとめ	32
	謝辞	34

第 1 章

はじめに

1.1 研究背景および目的

昨今、コンピュータグラフィックス（以下、CG）の発展は目覚ましいものがあり、映画やゲームを代表とする映像コンテンツにおいて必要不可欠な技術となっている。その中でも、よりリアルな自然景観の再現が重要なテーマとなっているが、CGの発展により、厳密でリアルな表現が可能になった反面、製作者側の負担が肥大化している。そのため、草花や樹木の植生および繁殖分布を筆頭に、自然景観の自動生成シミュレーションの研究および開発が盛んである [1][2]。

一方で、草花や樹木と並んで自然景観に大きく影響を与える自然物の 1 つにコケがある。コケは日常生活において目にする機会の多い植物であり、生育する環境は一般的な土壌に留まらず、樹皮や石垣の表面、道路のアスファルトに繁殖する姿を見受けることができる。また森林や廃墟にコケが生えることによって、経年変化による印象を与える役目を果たしている [3]。

このようにコケの自動生成は自然景観のシミュレーションにおいて大きな要素となり得るが、これまでコケの繁殖に重点を置いたシミュレーションの研究例は少ない。工藤ら [4] はコケの生長要因が日射および土壌の水分であると仮定し、光の当たり方と降雨による土壌の水分量からコケの繁殖シミュレーションを行っている。小笠原ら [5] はコケの生長要因を日射とコケが繁殖する土壌表面の温度と湿度であると仮定し、気温、湿度、降水量、風速、日照時間からなる気象条件と地

形、地質からなる地理条件を考慮したコケの繁殖シミュレーションを行っている。また小笠原ら [6] は先行研究 [5] を参考に、風の流れを粒子法を用いて考慮することによって、周囲の水辺による空気中の湿度の変化および地形や障害物による風の滞留を考慮したコケの繁殖シミュレーションを行っている。

先行研究 [4][5][6] における土地やコケでの光の計算方法 [7] では、太陽からの直接光と物体から反射する鏡面反射を考慮しているが、光が物体に当たったときの光の散乱や2次散乱を考慮していないため、間接光の再現が難しい。コケの特性で直接光や反射光よりも間接光のほうが繁殖に適していることから、日射量の計算方法としては不十分である。またこれらの研究はコケおよび生育環境を3次元格子状に配置したボクセルに当てはめ、ボクセルごとに日射量を計算し、土壌の状態およびコケの繁殖をシミュレートしている。そのため配置するボクセルが多くなりやすい土地のようなモデルを対象とする場合、計算量が肥大化する問題が生じる。この問題を解決するために計算領域を統合することでボクセル数を少なくした場合、再現度は著しく低くなる可能性がある。

本研究では、直接光、間接光を含む環境光を考慮したコケの自動生成シミュレーション法を提案する。本手法では、太陽からの光度分布をフォトンマッピング法によって計算し、そこから求めた光度データと気象データおよび地形・地質データから土壌の状態を構成するパラメータの計算を行う。その後コケの繁殖状況の計算では、土壌状態の計算で求めた土壌表面の温度、湿度とコケの日射量をコケの特性データと照らし合わせ、繁殖状況のシミュレーションを行う。最後に求めた繁殖分布を元にコケの3次元モデルを配置する。図1.1は、本研究におけるシミュレーション全体の流れを現したものである。

1.2 論文構成

本論文では、2章でコケの特徴と繁殖方法について説明する。3章では実際にシミュレーションを行うためのモデル化、手法と数式を説明する。4章ではシミュレーションの検証および本手法の評価と課題について述べる。5章では、全体のま

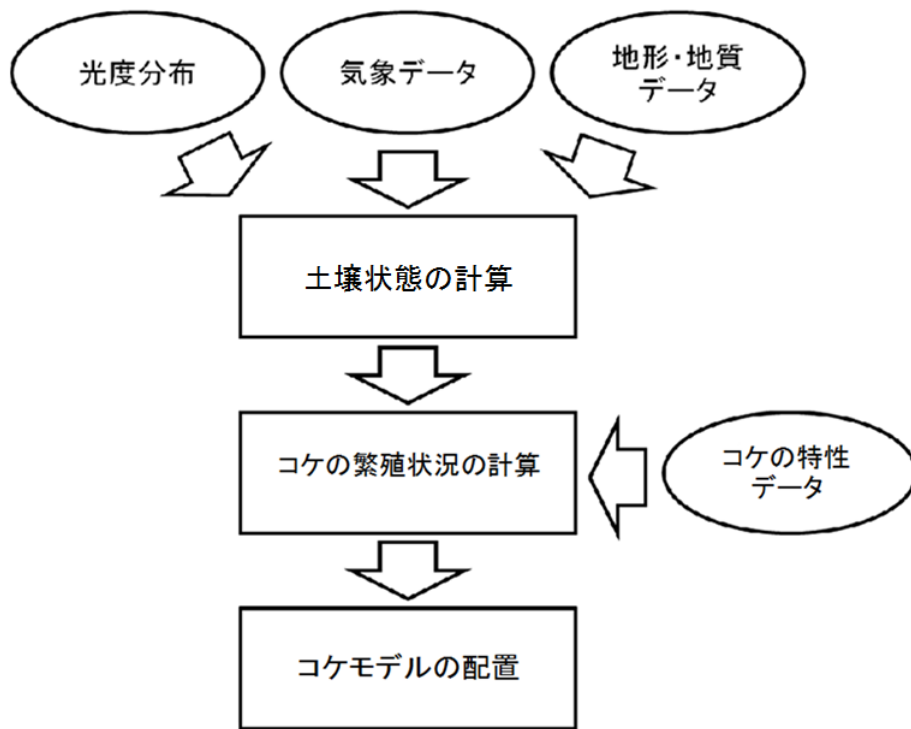


図 1.1: シミュレーション全体の流れ

とめと今後の展望について述べる。

第 2 章

コケの生態

2.1 コケとは

コケとは地表や岩の上などの土壌をはいつくばるように成長および繁殖して広がる光合成生物の総称である。日常用語のコケと呼ぶものは、コケ植物と地衣類に分類できる。コケ植物とは非維管束かつ陸上で繁殖する植物の総称であり、蘚類、苔類、ツノゴケ類がこれにあたる。コケ植物は規則的な葉や茎を持ち、多くの種類は深緑から黄緑色をしている [8]。地衣類とは菌類と藻類からなる共生生物であり、地衣類の外見はコケ植物と似るが、植物ではなく菌類である。地衣類は葉のような形態はほとんどなく、白っぽい緑、薄い青緑、青みを帯びた黒色をしている [9]。図 2.1 はコケ植物、図 2.2 は地衣類の様子である。



図 2.1: コケ植物



図 2.2: 地衣類

2.2 蘚苔類

コケとは蘚類，苔類，ツノゴケ類の総称であるコケ植物および地衣類を指すが，本研究ではコケ植物の蘚類および苔類(以下，蘚苔類)を繁殖シミュレーションの対象とする．蘚苔類の一個体は小型であり，多くの種類は高さが数 cm である．形態は茎と葉が区別できる茎葉体と，葉と茎がはっきり区別できず扁平な葉状体に分けることができる．蘚類は茎葉体である種類が多く，苔類は葉状体である種類が多い．蘚苔類は主に茎葉体，葉状体による区分によって分類されており，生育の特徴と繁殖方法はほぼ同一である [8]．この個体が密生して繁殖したものが，図 2.3，図 2.4 となる．



図 2.3: 密生した茎葉体:スギゴケ



図 2.4: 密生した葉状体:ゼニゴケ

2.2.1 蘚苔類が繁殖する環境

蘚苔類は基本的に陸上で生活するが，少ないながら淡水中に生育する種類も存在する．海水中に生育する蘚苔類は確認されていない．蘚苔類は湿った環境を好む種類が多く，温暖湿潤気候である地域や環境に多く繁殖する．雲霧林では樹木に大量の蘚苔類が着生する例があり，蘚苔林と呼ぶ．蘚苔類の種類によっては乾燥した環境にも適応する種類は存在する．湿った環境を好む種類は花壇や庭園などの壤土，川や池などの水辺付近に繁殖する．乾燥に強い種類は水捌けの良い砂質土やアスファルト，岩の表面に繁殖する．道路の脇やタイルの隙間に繁殖して

いるものは乾燥に強い種類である。他にも昆虫等の動物などあらゆる場所に生育することが可能な、適応力の高い植物である [8][10].

2.2.2 蘚苔類の繁殖

蘚苔類の繁殖方法は、無性生殖と有性生殖の2種類が存在する。無性生殖とは葉など体の一部がちぎれたものが別個体として増殖する方法である。ちぎれたものは無性芽という種の一つとなって近傍に落下し、そこで発芽し成長する。有性生殖とは孢子で繁殖する方法であり、風雨によって移動した孢子が定着した場所で発芽するというものである。成長した蘚苔類は茎および枝に雌雄の生殖器官を作る。精子は2本の鞭毛を持ち、雨の日などに水中を泳いで卵子に達し受精を行う。そのため繁殖の際には雨ないしは水の存在が必要不可欠となる。孢子は無性芽に比べ寿命が長く、十数年におよぶものも存在する。配偶体は雌雄同株のものが多く、雌雄異株の場合でも外見上大きな差が見られない場合が多い [8].

2.2.3 蘚苔類の光合成

蘚苔類は一般の植物とは異なり、根から養分や水分を吸収することはせず、体全体で水分を吸収して光合成を行う植物である。蘚苔類の根の部分は仮根と呼び、主に体を支えるために存在する。蘚苔類が光合成を行う際には体が湿っているか、定着している土壌が水分を含んでいる必要がある。だが直射日光のような強い光では体表面や生育環境の水分が蒸発してしまうため、光合成が行えない。また蘚苔類は直射日光が当たる水辺のような高温多湿の環境下では、生育環境から気化した水分の影響で蒸し枯れてしまう場合が多い。そのため多くの種類の蘚苔類は、日射量が少なく朝露が体を濡らす朝方か、間接光による淡い光によって光合成を行う [8][11][12]. 図 2.5, 図 2.6 は、直接光の当たる壁でのコケの繁殖と、間接光のみが当たる壁でのコケの繁殖の違いを表している。図 2.5, 図 2.6 から、コケの繁殖には直射光よりも間接光のほうが繁殖に適していることがわかる。よってコケの繁殖シミュレーションを行う場合は間接光の再現が重要になる。



図 2.5: 直接光の当たる壁



図 2.6: 間接光のみ当たる壁

第 3 章

シミュレーション

日常用語のコケと指すものの中で，本研究では3次元土地モデルにおける蘚苔類の繁殖シミュレーションを行う．なお以下でコケと記述するものは蘚苔類のことを指す．シミュレーションを行うにあたって，ユーザが気象条件および地理条件を設定する．ユーザが設定した太陽の位置から，フォトンマッピング法によって光度分布を求める．フォトンマッピング法によって得た光度データと設定した気象データおよび地形・地質データから土壤の状態を構成するパラメータの計算を行う．その後土壤状態の計算で求めた土壤表面の温湿度とコケの日射量をコケの特性データと照らし合わせ，繁殖状況のシミュレーションを行う．最後にコケの繁殖箇所にコケの3次元モデルを配置したものを表示する．

3.1 コケの生育する要因

2章で述べたように，コケの生育には日光の中でも間接光などによる淡い光が重要になる．また氷点下や猛暑のような環境ではコケは繁殖しづらいため，コケが繁殖する場所の温度も考慮する必要がある．コケが光合成を行うために必要な水分は，コケの表面についたものを使用する．そのためコケが繁殖する土壤中の水分だけでなく，土壤表面での湿度が生育に大きく関わってくる．よって本研究ではコケの生育する要因は，コケの個々の日射量，土壤表面の温度および湿度であ

ると仮定する。土壌表面の温度および湿度は、気象条件および地理条件が影響する。表 3.1 に土壌状態に影響する気象条件と地理条件の要素を示す。

表 3.1: 土壌状態に影響する気象条件および地理条件

気温 [K]
相対湿度 [0 ~ 1]
日射量 [W/m ²]
降水量 [mm]
降水日数 [日]
風速 [m/s]
可照時間 [h/24h]
日照時間 [h/24h]
太陽高度 [°]
地形 (光度分布, 地形の起伏)
地質 (腐植土, 砂質土, アスファルト)

3.2 土壌のモデル化

コケの繁殖シミュレーションを行う土地モデルは、ポリゴンメッシュによって形成する 3次元モデルで表す。コケの繁殖する場所は地面、岩の上や樹皮など立体的な形態をしているため、形態による光の当たり方の違いで環境が大きく変わる。そのためコケの繁殖を支配する土壌は、ポリゴンメッシュによって形成する 3次元モデルのポリゴン面上に展開しているものとし、光度分布を土壌の状態に反映する。土壌の地質は、3次元モデルのポリゴンメッシュに貼るテクスチャの色情報を元に決定する。図 3.1 は本シミュレーションで使用した 3次元モデルである。こげ茶色の部分は腐植土を、黄土色の部分は砂質土を、灰色の部分はアスファルトの地質を表す。

土壌表面において、気温 T および太陽からの日射量 S によって発生する熱エネルギー R は、土壌中の水分を水蒸気にするエネルギーである潜熱 ιE に変わる。同時に空気を暖めるエネルギーである顕熱 H と地表面温度に対する放射冷却による

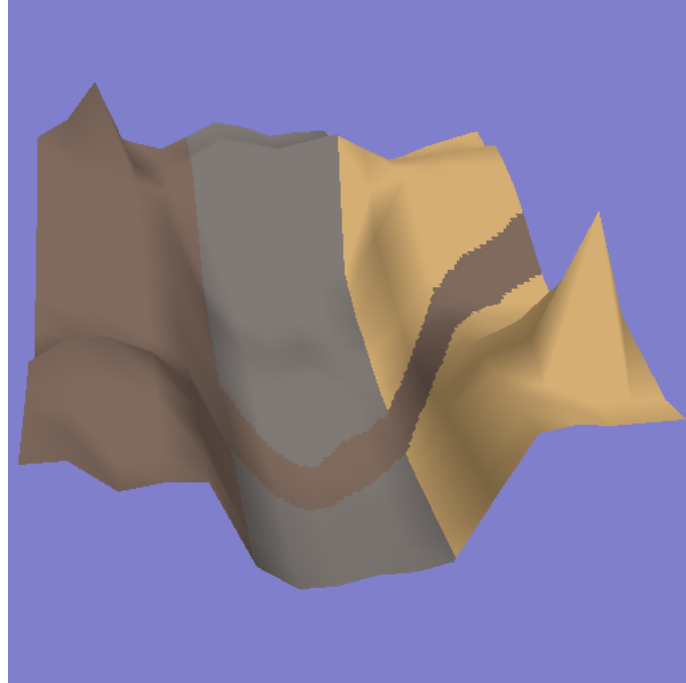


図 3.1: コケの繁殖する対象を再現する 3次元モデル

熱放射 σT_s^4 によって大気中に熱エネルギーが移動する. そして最終的に残った熱エネルギーが, 土壌表面の温度 T_s となる. また熱エネルギーによって蒸発した水分と大気中の相対湿度 rh が, 土壌表面の湿度 rh_s となる. 即ち地表面温度 T_s と地表面湿度 rh_s は, 土壌での熱エネルギー R と水の移動の一環として定まる [13]. 図 3.2 は, 土壌における熱エネルギーの移動関係をモデル化したものである.

3.3 コケの繁殖のモデル化

本研究では, コケの繁殖場所は 3次元モデルのポリゴン面上および密生したコケモデルの表面とする. 本手法によって無性芽および胞子を空中に生成した場合, 無性芽および胞子に対して 3次元モデルのポリゴン面または他のコケに接触するまで落下処理を行う. 接触しなかった場合はそのコケは消滅する. コケの繁殖する座標は右手系のワールド座標系を用いて, y 軸の正方向を上とする. 3.1節で述べたように, コケが生育する要因は日射量, 土壌表面の温度および湿度であると

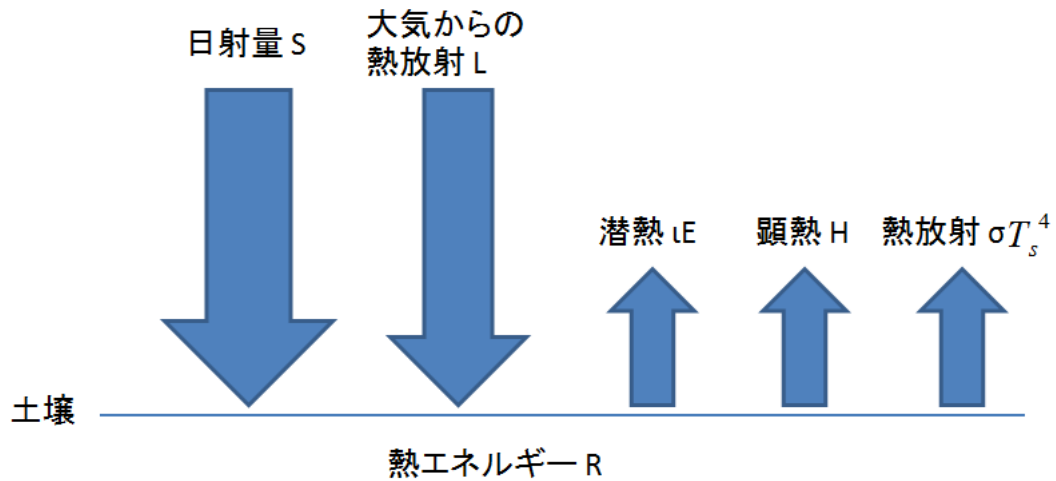


図 3.2: 熱エネルギーの移動

仮定する。得た日射量 S ，地表面温度 T_s ，地表面湿度 rh_s がコケの生育にどの程度適しているかを比較し，コケの生育に適しているかを判断する。日射量 S ，地表面温度 T_s ，地表面湿度 rh_s がコケの生育に適している度合いを数値化したものを環境適応度と呼称する [4][5][6]。環境適応度に基づいて生長および死滅，無性芽および胞子の生成，種子の発芽を行う。表 3.2 に繁殖するための要素と比較するコケのパラメータを示す。

表 3.2: コケのパラメータ一覧

繁殖可能な温度域
繁殖可能な湿度域
繁殖可能な日射量域
生長係数
生長の閾値
発芽閾値
死滅閾値

コケの種類に応じた繁殖可能な温度域，湿度域，日射量域と得た日射量 S と地

表面温度 T_s , 地表面湿度 rh_s を比較することで環境適応度を求める。そして環境適応度で得た数値を元に生長および死滅のしやすさを表す生長係数, 生長か衰退を決める生長の閾値, コケの死滅を決定する死滅閾値と照らし合わせ, 生育および死滅を再現する。またコケの生長が一定まで達した時, 無性芽および胞子を生成する。無性芽はコケが死滅するまでの総生長量が一定間隔増加するごとに1つ生成するものとする。胞子はコケが死滅するまでの総生長量が一定以上であり, 胞子を生成することが可能な環境である場合, 胞子を生成するものとする。また環境適応度と無性芽および胞子が発芽するかを決める発芽閾値を照らし合わせ, コケの繁殖を再現する。コケの繁殖処理はコケごとの環境適応度を元に, 次の段階ごとに行った。

1. 発芽処理
2. 生長および死滅処理
3. 無性芽の生成処理
4. 胞子の生成処理

発芽処理, 生長および死滅処理, 無性芽および胞子の生成処理はシミュレーション時間中の1日ごとに行う。シミュレーションの開始時にはコケの初期配置を行う。配置する位置は3次元モデルのポリゴン面上からランダムに決定する。またコケの胞子は風雨によって運ばれるため, シミュレーションの環境外から飛んでくる可能性がある。そのためシミュレーション時間中の一定間隔ごとに胞子を1つ配置する。配置する位置の決定方法は初期配置と同様である。

3.4 光度分布の計算

本研究は3次元土地モデルを対象とするため, 地形が複雑な形態であってもシミュレーションが可能である必要がある。また2.2.3項で述べたように, コケの繁殖には直接光よりも間接光のほうが適しているため, 光が土地や物体に当たった

時の光の拡散を考慮する。またコケが繁殖することによって光が遮断されたり、裸地だった部分にコケが繁殖することで土壌状態が変化することが考えられる。このことから本シミュレーションではコケの繁殖による光の当たり方の変化を考慮する必要がある。シミュレーションの経過による光度分布の変化の再現が容易である必要がある。先行研究 [4][5][6] の手法 [7] や一般的な手法であるモンテカルロレイトレーシング法では間接光の再現が困難であるため採用が難しい。間接光を再現する手法としてラジオシティ法 [14] とフォトンマッピング法 [15] があるが、本手法ではコケの繁殖状況が変わるごとに光度分布を計算しなおす必要がある。計算処理 1 回につき処理時間が長いラジオシティ法では計算量が肥大化してしまう問題が生じる。また本シミュレーションでは必要なのは光度分布の把握であり、反射時の色の変化は再現しないため、ラジオシティ法による精密な計算は必要ない。本研究ではフォトン数を任意に変えることで処理時間、計算精度を変えることが可能なフォトンマッピング法を用いて光度分布を求める。

フォトンマッピング法 [15] とは広域照明の再現が可能なレイトレーシング手法の 1 つである。フォトンマッピング法の処理はフォトン追跡処理と画像描画処理の 2 段階に分けることができる。フォトン追跡処理では、光源からいくつもの粒子を放出し、モデルとの交点を計算していく。モデルと交差した粒子は表面材質の特性を考慮しつつ、反射、透過、屈折、吸収して空間に配置する。この粒子のことをフォトンと呼称し、空間内のフォトン吸収した各座標の記録をフォトンマップと呼ぶ。そして画像描画処理では、作成したフォトンマップから光度や色を算出し、画像としてレンダリングを行う。図 3.3 は、フォトン光源から散布し、光の拡散、反射、屈折を考慮してフォトンマップを作成するところを表している。なお本研究では光源からの直接光および拡散光を考慮したフォトン追跡処理のみを利用し、作成したフォトンマップを元に空間内のモデルを対象とする光度分布を計算していく。

次にフォトン放射する光源について述べる。フォトンマッピング法におけるフォトンの放射方法は、コンピュータグラフィックスの分野で典型的な光源である

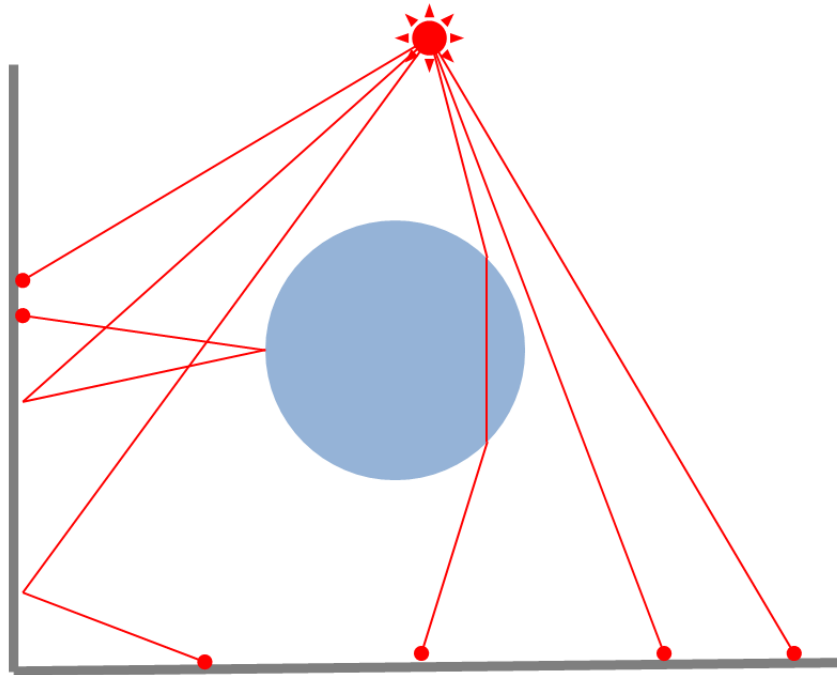


図 3.3: フォトン追跡処理

点光源，指向性光源，面光源などを考慮できる．本研究では自然界の太陽光を再現するため，フォトンを放射する光源は四角い平面光源とし，天球上における太陽の見かけの通り道である黄道に光源を配置する．四角い平面光源が黄道上に配置する様子を図 3.4 で表す．

ある一定輝度の平面光源からフォトンを放射する方向は，まず平面光源上の点をランダムに選び，その点と平面の法線からランダムに方向を選ぶ．図 3.5 は，平面光源からのフォトン放射を表したものである．2つの一様に分布した乱数を $\xi_1 \in [0, 1]$ ， $\xi_2 \in [0, 1]$ とすると，平面光源上の任意の点におけるフォトンの放射方向 \mathbf{w}_d は式 (3.1) となる．

$$\mathbf{w}_d = (\arccos(\sqrt{\xi_1}), 2\pi\xi_2) \quad (3.1)$$

式 (3.1) は球面座標を用いている．すなわち， $\arccos(\sqrt{\xi_1})$ は光源表面の法線となす角度であり， $2\pi\xi_2$ は法線周りの回転角である．

物体がまばらに配置された空間や光源と物体の距離が遠い場合，多くのフォト

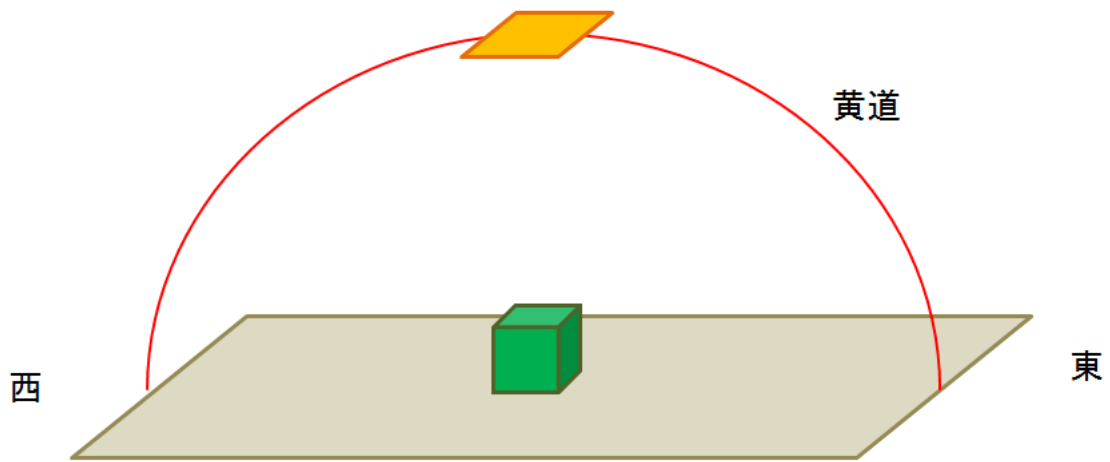


図 3.4: 黄道上に配置した平面光源

ンがどの物体にも接触しないことが考えられる。この状況を回避するため、フォトンが放射する方向を限定する。本シミュレーションでは全てのモデルを内包する球を設定し、フォトンの放射方向が設定した球と接触しない場合において、再度フォトンの放射方向を設定する。

次にフォトンが物体に交差した時の挙動について述べる。光源から放射したフォトンが物体に接触すると、反射、透過、吸収のいずれかが起こるが、自然界において光の透過および鏡面反射が起こることは少ない。そのため本シミュレーションでは、フォトンが物体にぶつかった時の挙動は拡散反射および吸収のいずれかとする。反射および吸収のどれになるかは、接触した物体表面の材質によって確率的に決定する。フォトンが拡散反射面に接触した場合、フォトンマップに格納される。そして交差した地点の半球内において、法線となす角度の余弦に比例する確率に従ってランダムに拡散反射されたフォトンの方向を決定する。すなわち、フォトンが接触した交点を新たな光源として用いており、フォトンの拡散反射方向は式(3.1)によって決定する。またフォトンの拡散反射が起こるかどうかは接触した物体の反射率によって決定する。例として、1000個のフォトンが反射率0.5の物体表面にぶつかった場合、半分の500個のフォトンは拡散反射を行わずにフォトン

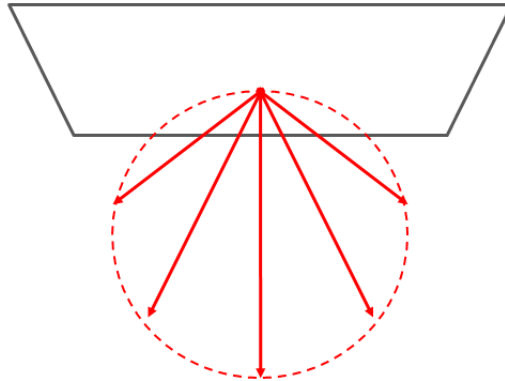


図 3.5: 平面光源のフォトン放射

マップに格納され、もう 500 個は拡散反射を行ってフォトンマップに格納される。

3.5 土壌状態のシミュレーション

3.1 節で述べたように、コケの繁殖する要因を個々の日射量および生育する土壌表面の温湿度と仮定した。3.2 節で述べたように、土壌表面の温湿度は土壌での熱エネルギーと水の移動の一環として定まるため、コケが生育する土壌状態のシミュレーションを行う必要がある。この土壌状態のシミュレーションによって得た土壌表面の温度 T_s および湿度 rh_s をコケの繁殖シミュレーションに反映する。

前述したように、土壌状態を支配する要因は気象条件と地理条件である。表 3.3 の気象条件と土壌ごとの地質の違い、土壌の含水率 θ と蒸発効率 β 、コケの繁殖による水分蒸発の抑制から、土壌表面での温度 T_s と湿度 rh_s の日平均を求めることができる [13]。

土壌の表面温度 T_s を求めるために、日射量 S と大気からの熱放射 L によって発生する熱エネルギー R を求める。熱エネルギー R の一部が潜熱 ιE 、顕熱 H および地表面の熱放射 σT_s^4 として大気中に移動し、最終的に残った熱エネルギーが地表面温度 T_s となる。このとき潜熱 ιE および顕熱 H はコケの繁殖状況と土壌の状態によって大きく変化する。土壌付近にコケが密生して繁殖することにより、土

表 3.3: 土壌状態を支配する気象条件

記号	意味
S	日射量 [W/m^2]
T	気温 [K]
rh	相対湿度 [0 ~ 1]
P	降水量 [mm]
U	風速 [m/s]
N_0	可照時間 [h/24h]
N	日照時間 [h/24h]

壤の水分蒸発を抑える効果が発生する。そのため潜熱 ιE および顕熱 H は、土壌周囲のコケの繁殖状況による顕熱輸送のバルク輸送係数 C_H を考慮する必要がある。また土壌中の水分を蒸発させるエネルギーである潜熱 ιE は、土壌の含水率と地質による蒸発のしやすさが関わってくる。よって降水による土壌含水率 θ の変化と地質の違いによる土壌中水分の蒸発効率 β を考慮する。土壌の表面湿度 rh_s は、大気の相対湿度 rh と土壌中水分の蒸発効率 β 、気温 T および地表面温度 T_s によって定まる。以下の各節で地表面温度 T_s と地表面湿度 rh_s を求めるための要素を個別に述べていく。

3.5.1 熱エネルギー R の算出

熱エネルギー R は日射量 S および大気からの熱放射 L から求めることができる。各土壌の日射量 S は、フォトンマップと土壌の3次元座標を照らし合わせ、一定範囲に存在するフォトン数によって決定する。大気からの熱放射 L は雲の有無が影響するため、大気の熱放射におよぼす雲の効果を表す係数 C を式 (3.2) で求める。また大気からの熱放射 L は、雲の効果を表す係数 C と日照率 A から式 (3.3) によって求める [13]。なお日照率 A は $A = N/N_0$ で表す。

$$C = 0.826A^3 - 1.234A^2 + 1.135A + 0.298 \quad (3.2)$$

$$L = \sigma T^4(1 - 0.26C) \quad (3.3)$$

日射量の一部は光の反射および拡散によって大気中に放射する。そのため地表面の反射率であるアルベート係数 ref を用いて、日射量の反射も含めた熱エネルギー R を求める。地表で熱になるエネルギー R は式 (3.4) で求める [13].

$$R = (1 - ref)S + L \quad (3.4)$$

3.5.2 コケの密生によるバルク輸送係数の調整

植物が生育している場所では、裸地に比べて土壌の水分蒸発を抑える効果がある。その状況を再現するため、コケが密生している場所では顕熱輸送のバルク輸送係数 C_H を大きくする。これにより潜熱の割合が小さくなり、土壌水分の蒸発量が減少する。バルク輸送係数を式 (3.5) で求めるものとする [5].

$$C_H = C_{H \min} + (C_{H \max} - C_{H \min}) \frac{m}{M} \quad (3.5)$$

$C_{H \min}$ は裸地でのバルク輸送係数を表し、0.0015 とする。 $C_{H \max}$ は密生地でのバルク輸送係数を表し、0.0030 とする。 m は一定範囲内に繁殖しているコケの数を表し、 M は一定範囲内に繁殖できるコケの最大数である。

3.5.3 土壌含水率 θ および蒸発効率 β の算出

地質の違いにより、土壌が含むことのできる水の割合を示す最大含水率 θ_{SAT} や土中水分の蒸発効率 β が大きく変わる。地質ごとに設定するパラメータを表 3.4 に示す。 F_1 , F_2 は水分蒸発のしやすさの実験式 $F(\theta)$ を求めるための定数である。 θ_{SAT} は土壌の最大含水率を表す [13]。また腐植土と砂質土のパラメータは参考文献 [13] に記述しているものを採用した。アスファルトのパラメータは参考文献 [13] に記述されていなかったため、他土壌と比較し表 3.4 のものと仮定した。

土壌の体積含水率 θ を求めるために、土壌のモデルとしてバケツモデルを用いる。バケツモデルとは地表面の水収支計算に用いるものである。地表面を一定の容量を持ったバケツに例え、降水によってバケツに水が溜まり、バケツから溢れ

表 3.4: 地質のパラメータ一覧

土壌種類	F_1	F_2	θ_{SAT}
腐植土	2.16×10^2	10.0	0.490
砂質土	8.32×10^5	16.6	0.392
アスファルト	7.25×10^7	19.4	0.012

た水を流出として捉えている [16]. 日ごとの各土壌の水量 O_i は前日の水量 O_{i-1} と降水量 P_i , 潜熱 E_i から式 (3.6) で求める [13]. また水量 O_i はバケツの最大含水量 O_{SAT} を超えた分は流出する. バケツの最大含水量 O_{SAT} は式 (3.7) で求める [13].

$$O_i = O_{i-1} - (24 \times 60 \times 60 \times E_i - P_i) \quad (3.6)$$

$$O_{SAT} = h\theta_{SAT} \quad (3.7)$$

土壌の体積含水率 θ は土壌の深さ h および日ごとの水量 O_i から式 (3.8) で求めることができる [13]. 土壌の深さ h の単位は mm で計算を行う. 土壌の深さ h は y 軸方向の土壌の厚さによって決定する. また y 軸方向の土壌が存在しない壁の側面のような土壌の場合, 土壌の深さ h を 1 として処理を行う. 土壌水分量の変化および地表面温湿度の変化は土壌表面での状況が大きな要因となるため, 本研究では h が 1000 を超える場合は 1000 に固定して計算を行う.

$$\theta = \frac{O_i}{h} \quad (3.8)$$

式 (3.9) は地質それぞれの水分蒸発のしやすさの実験式 $F(\theta)$ を表す [13]. 土壌中の水分の蒸発効率 β は土壌の体積含水率 θ , 顕熱のバルク輸送係数 C_H および $F(\theta)$ に依存し, 式 (3.10) で求める [13].

$$F(\theta) = F_1(\theta_{SAT} - \theta)^{F_2} \quad (3.9)$$

$$\beta = \left(1 + \frac{C_H U F(\theta)}{D_{ATM}}\right)^{-1} \quad (3.10)$$

3.5.4 土壌表面温度 T_s および土壌表面湿度 rh_s の算出

土壌の表面温度 T_s と気温 T の差 δT は、熱エネルギー R 、蒸発効率 β 、バルク輸送係数 C_H 、気温 T に対する飽和比湿 e_{SAT} および飽和比湿の温度に対する変化量 Δ から、式 (3.11) で求めることができる [13]。また、気温 T における飽和水蒸気圧 e_{SAT} は、式 (3.12) によって求める。気温 T に対する飽和比湿 q_{SAT} は、式 (3.13) によって求める [13]。なお、本シミュレーションで使用する定数を表 3.5 に、気温が 20 °C での値を定数として扱う係数を表 3.6 に示す。

$$\delta T = T_s - T \cong \frac{R - \sigma T^4 - \iota \rho \beta C_H U \{q_{SAT}(1 - rh)\}}{4\sigma T^3 + c_P \rho C_H U + \iota \rho \beta C_H U \Delta} \quad (3.11)$$

$$e_{SAT} = 6.1078 \times 10^{7.5(T-273.15)/(T-35.85)} \quad (3.12)$$

$$q_{SAT} = \frac{\left(\frac{0.622e_{SAT}}{p}\right)}{1 - \left(\frac{0.378e_{SAT}}{p}\right)} \quad (3.13)$$

表 3.5: 定数一覧

記号	意味	式
σ	ステファン-ボルツマン定数	$5.67 \times 10^{-8} [\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-4}]$
p	大気圧	1013[hPa]
ref	アルベート係数	0.2

表 3.6: 20 °C の値を定数として扱う係数一覧

記号	意味	式
D_{ATM}	水蒸気分子拡散係数	$2.54 \times 10^{-5} [\text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}]$
ι	水の気化の潜熱	$2.543 \times 10^6 [\text{J}/\text{kg}]$
ρ	空気密度	1.19[kg/m ³]
$c_P \rho$	空気の体積熱容量	$1.21 \times 10^3 [\text{J} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{m}^{-3}]$

また土壌中の水分を水蒸気にするエネルギー ιE は式 (3.14) で求めることができる [13].

$$\iota E = \iota \rho \beta C_H U \{q_{SAT}(1 - rh) + \Delta \delta T\} \quad (3.14)$$

飽和比湿の温度に対する変化率 Δ は式 (3.15) によって求める [13].

$$\Delta = \frac{dq_{SAT}}{dT} = \frac{6.1078(2500 - 2.4T)}{0.4615(273.15 + T)^2} \times \frac{0.622p}{(p - 0.378e_{SAT})^2} \quad (3.15)$$

土壌表面での湿度 rh_s は, 土壌の表面温度 T_s と気温 T の差 δT と相対湿度 rh , 土壌の蒸発効率 β から式 (3.16) で求める [13].

$$rh_s = \beta + rh \frac{q_{SAT}(1 - \beta)}{q_{SAT} + \Delta \delta T} \quad (3.16)$$

3.6 コケの繁殖シミュレーション

3.1 節で述べたように, コケの繁殖を支配するのは日射量 S , 土壌表面の温度 T_s と湿度 rh_s であると仮定した. そのためコケの種類ごとに, 日射量 S と土壌状態のシミュレーションで得た土壌表面の温度 T_s と湿度 rh_s がどの程度繁殖に適するかを求め, 生長, 繁殖, 死滅を判断するパラメータが必要となる [4][5][6]. 表 3.7 に繁殖するための要素と比較するコケのパラメータを示す.

表 3.7: コケのパラメータ一覧

記号	意味
T_0, T_1	繁殖可能な温度域 ($T_0 < T_1$)
rh_0, rh_1	繁殖可能な湿度域 ($rh_0 < rh_1$)
S_0, S_1	繁殖可能な日射量域 ($S_0 < S_1$)
n_T, n_{rh}, n_S	各要素の許容度 ($0 < n \leq 1$)
α_g	生長係数 ($0 < \alpha_g < 1$)
τ_g	生長の閾値 ($0 < \tau_g < 1$)
τ_b	発芽閾値 ($0 < \tau_b < 1$)
τ_d	死滅閾値 ($0 < \tau_d < 1$)

あるコケの種類において，日射量 S ，地表面温度 T_s ，地表面湿度 rh_s が繁殖可能な日射量域 $S_0 \sim S_1$ ，温度域 $T_0 \sim T_1$ ，湿度域 $rh_0 \sim rh_1$ に適しているほどコケは生長し，反対にそぐわなければ徐々に衰退していく．日ごとの環境適応度 G を式 (3.17) によって定義する [5].

$$G = g(T_s, T_0, T_1, n_T) g(rh_s, rh_0, rh_1, n_{rh}) g(S, S_0, S_1, n_s) \quad (3.17)$$

式 (3.18) は各生長要因がどの程度適しているかを表したものである．そして式 (3.18) で求めた数値と各要素の許容度 n と照らし合わせて各要素の適応度を求める．各要因の適応度を示す関数 g を，式 (3.19) と定める [5].

$$s(x, x_0, x_1) = \exp \left\{ \frac{-4 \log 2}{(x_1 - x_0)^2} \left(x - \frac{x_1 + x_0}{2} \right)^2 \right\} \quad (3.18)$$

$$g(x, x_0, x_1, n) = \begin{cases} \frac{1}{2} + \left(s(x, x_0, x_1) - \frac{1}{2} \right)^n & \left(s(x, x_0, x_1) > \frac{1}{2} \right) \\ \frac{1}{2} - \left(\frac{1}{2} - s(x, x_0, x_1) \right)^n & \left(s(x, x_0, x_1) \leq \frac{1}{2} \right) \end{cases} \quad (3.19)$$

x_0 および x_1 はあるコケの種類において繁殖できる環境の領域であり， x が x_0 および x_1 と同じ場合関数 g は 0.5 となる．許容度 n とは，コケの種類ごとに設定した温度，湿度，日射量に対する許容範囲を表す．許容度 n が大きいほど，繁殖可能な領域外であっても関数 g の値の変化は小さく，関数 g の上下はなだらかに変化する．よって繁殖するための許容範囲が大きくなる．反対に許容度 n が小さいほど，繁殖可能な領域外であった場合関数 g の値が急激に変化する．よって繁殖するための許容範囲が小さくなる．なお許容度 n が 1 の時，式 (3.19) は正規分布と相似する [5].

コケは種類によって繁殖速度や成長力が変わるため，表 3.7 の生長係数 α_g および生長の閾値 τ_g によって，種類による繁殖力の違いを表す．日ごとの環境適応度 G ，生長係数 α_g および生長の閾値 τ_g から，1 日あたりの生長量 D を式 (3.20) とする [5].

$$D = \alpha_g (G - \tau_g) \quad (3.20)$$

そして発芽してから死滅するまでの総合計の生長量 G_{moss} を式 (3.21) として求める。

$$G_{moss} = \sum_{i=1}^j D_i \quad (3.21)$$

j はコケが発芽してから死滅するまでの日数を、 D_i は日ごとの成長量 D を表している。あるコケの総生長量 G_{moss} が表 3.7 の死滅閾値 τ_d を下回りかつコケが衰退している状態である場合、そのコケは死滅するものとする。

あるコケの総生長量 G_{moss} が一定間隔増加するごとに、そのコケから一定距離の場所に無性芽を 1 つ生成する。無性芽を生成する親コケの位置 \mathbf{M} と向きを全方向からランダムに取った単位ベクトル \mathbf{I} および親コケと無性芽の距離を表す定数 k から式 (3.22) で生成する無性芽の位置 \mathbf{B} を決定する。

$$\mathbf{B} = \mathbf{M} + k\mathbf{I} \quad (3.22)$$

ただし生成した位置 \mathbf{B} が他のコケまたは 3 次元モデルのポリゴン面上に隣接せず、空中に浮いている状況の場合、コケはポリゴン面上または他のコケに接触するまで落下する。接触しなければ消滅する。本シミュレーションでは総生長量 G_{moss} が 0.5 増えるごとに無性芽を生成する。

胞子が生成可能な環境で、あるコケの総生長量 G_{moss} が一定以上である場合、そのコケから一定距離の場所に胞子を 1 つ生成する。胞子を生成する親コケの位置 \mathbf{M} と親コケの場所から見た胞子を生成する向き \mathbf{I}_N および親コケと胞子の距離を表す定数 l から、式 (3.23) で生成する胞子の位置 \mathbf{Q} を決定する。なお親コケの場所から見た胞子を生成する向き \mathbf{I}_N は、親コケの繁殖するポリゴン面の法線ベクトル \mathbf{N} とのなす角 ϕ が $0^\circ < \phi < 45^\circ$ または $135^\circ < \phi < 180^\circ$ となる範囲で向きがランダムとなる単位ベクトルとする。

$$\mathbf{Q} = \mathbf{M} + l\mathbf{I}_N \quad (3.23)$$

胞子も無性芽と同様に、空中に浮いている状態で生成した場合は落下処理を行い、他のコケまたは土壤に接触しなければ消滅する。本シミュレーションでは総

生長量 G_{moss} が 2.0 以上かつコケが生長している状態である場合、胞子を生成するものとする。なお無性芽および胞子が 3 次元モデルの裏面に落下した場合、無性芽および胞子は消滅する。無性芽および胞子を生成した場所にすでにコケが存在する場合、コケの種類と生長量に応じた優先度によって消滅するコケを決定する。

種子である無性芽および胞子が生成してから一定日数が経過し、定着している土壌の環境適応度が生育にそぐう場合、無性芽および胞子が発芽するものとする。発芽は環境適応度 G および無性芽または胞子が生成してからの日数 L を式 (3.24) に当てはめ、求めた値が表 3.7 のコケの種類に応じた発芽閾値 τ_b を超えたときに行う [5]。

$$G \times g(L, L_0, L_1, 1) > \tau_b \quad (3.24)$$

なお胞子の場合 $L_0 : 60$, $L_1 : 365$ とし、無性芽の場合は $L_0 : -60$, $L_1 : 60$ とする。

3.7 1日ごとの処理の流れ

本シミュレーション中で日ごとに変化する要素は、フォトンマップと土壌状態とコケの繁殖状況である。土壌にコケが繁殖することによって光が遮断されたり、反射する方向が変わる。そのため光度分布はコケの繁殖状況によって変化するため、フォトンマップは日ごとのコケの繁殖状況を考慮して計算しなおす必要がある。土壌状態およびコケの繁殖状況は光度分布の影響を受けるため、フォトンマップ同様日ごとに計算する。

シミュレーション時間中の 1 日ごとの処理は以下のようになる。最初に太陽高度、地形データ、コケの繁殖状況からフォトンマッピング法によってフォトンマップを生成する。次に生成したフォトンマップ、気象データ、地質データを元に土壌状態を構成するパラメータを計算する。そしてコケに当たる日射量と、土壌状態の算出で得た地表面温度と地表面湿度からコケの繁殖と生長を計算する。シミュレーション時間中の 1 日ごとの土壌状態の計算は、次の段階順に計算を行う。

1. 熱エネルギー R の算出
2. コケの密生によるバルク輸送係数 C_H の調整
3. 土壌含水率 θ および蒸発効率 β の算出
4. 土壌表面温度 T_s の算出
5. 潜熱輸送量 ιE の計算
6. 土壌表面湿度 rh_s の計算

シミュレーション時間中の1日ごとのコケの繁殖状況の計算は、3.3節で示した順に処理を行う。1日ごとのコケの生長量を求める流れを図3.6に示す。図中のカッコ内の記号は、次の処理へ引き渡すパラメータを示す。

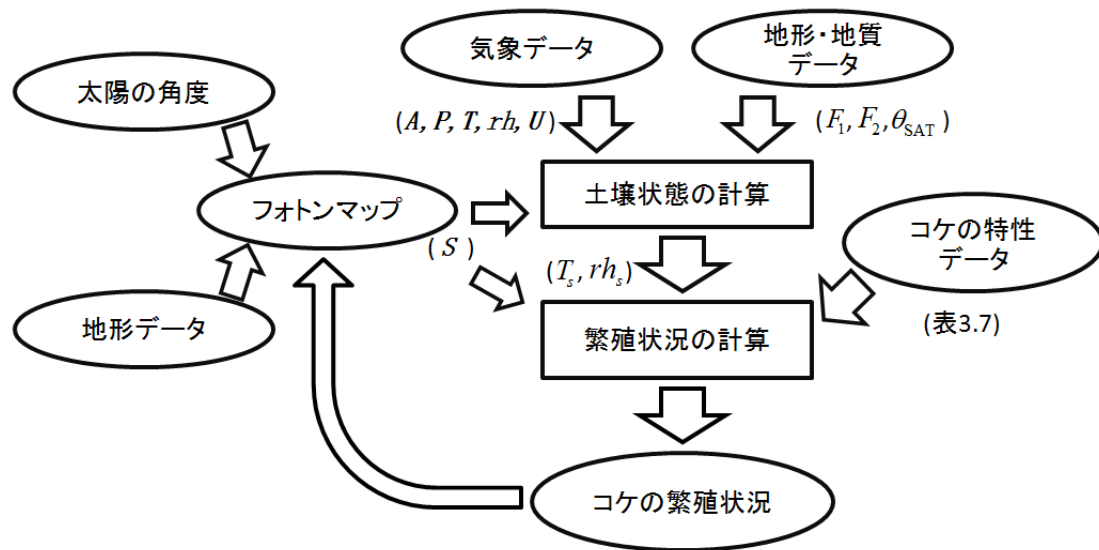


図 3.6: 生長処理の流れ

3.8 実装

コケの自動生成シミュレーションを 3D グラフィックツールキットである Fine Kernel Tool Kit System[17] を用いて実装を行った。なお光子マップとコケの

繁殖データは、KD-Tree[18][19][20]によるデータ構造を用いる。理由として、フォトンマップもコケの繁殖データもフォトンおよびコケ同士の最近傍距離を求める必要があるが、両者とも全検索で行うと処理時間が肥大化するためである。フォトンマップはフォトンの最近傍距離を求めることでフォトンの密度および一定範囲内のフォトン数を検索することができる。コケが無性芽を生成するとき、コケが密生した場所では密生体の表面から無性芽の生成を行い、内側のコケは生長はするものの無性芽の生成は行わない。このときコケが密生しているかを調べるために、コケ同士の最近傍距離を求める必要がある。

またフォトンマップおよびコケの繁殖データは、シミュレーション時間中の1日ごとに変わるが、その日のうちに生成された状況から大きく変化することはない。よってフォトンマップおよびコケの繁殖データはKD-Treeの整列法によって整理したものを使用する[15]。コケのモデルは図3.7に示すものを使用した。またコケが自然に繁殖しているように再現するため、繁殖場所に $1/f$ ノイズを与え、コケのモデルをランダムに回転させた。本シミュレーションではフォトン数を8192個、コケの最大繁殖数を16384体とした。



図 3.7: コケの3次元モデル(スギゴケ)

第 4 章

検証と考察

4.1 検証

本シミュレーションに使用した環境を表 4.1 に示す。表 4.2 は、実装した際に考慮したコケの種類とパラメータの値の一覧である。

表 4.1: 実行環境

OS	Windows 7 Enterprise
CPU	Intel(R) Core(TM)2 Duo CPU E8400 @3.00GHz
メモリ	4.00GB

図 4.1 と図 4.2 は 3 章で述べたモデルおよび手法によって生成したコケの繁殖シミュレーションの結果とフォトンマップを並べたものである。また図 4.1 は間接光を考慮したときの、図 4.2 は間接光を考慮しなかった時のコケの繁殖状況とフォトンマップである。なおシミュレーション期間は 300 日、コケのモデルの大きさを 1cm とし、土地モデルを $2m \times 2m \times 1.5m$ とした。設定した気象データは参考資料 [21] を元に表 4.3 とした。土地モデルの奥側に光を遮断するための屋根を設定した。図 4.1 を見ると、間接光を考慮することによって奥側の床、屋根の裏側にもフォトンが配置されている。その結果、屋根の裏や奥側の床にもコケが繁殖を広げている。反対に、図 4.2 は間接光を考慮しないため奥側の床や屋根の裏にフォトンが配置されず、フォトンの配置が極端なためコケの繁殖にも大きく影響が出ている。

表 4.2: コケのパラメータ値

	ギンゴケ	ハイゴケ	スギゴケ
T_0	274.15	276.15	278.15
T_1	299.15	295.15	297.15
n_T	1	1	1
rh_0	0.8	0.9	0.85
rh_1	1.2	1.1	1.15
n_{rh}	0.5	0.5	1
S_0	0.0	0.0	0.0
S_1	60.0	40.0	50.0
n_S	1	1	1
α_g	0.3	0.25	0.3
τ_g	0.1	0.1	0.075
τ_b	0.4	0.35	0.37
τ_d	0.1	0.15	0.12

図 4.3 は設定した気温の差が繁殖に影響していることを表している。左側が気温を 288.15K に、右側が 293.15K に設定し、それ以外の気象条件は全て表 4.3 と同じとした。左側はコケが広く繁殖している反面、右側は気温が高くコケの繁殖にあまり適さないため繁殖が遅れている。

表 4.3: 設定した気象データ

気温 T	288.15[K]
相対湿度 rh	0.73
降水量 P	1861.2 [mm/年]
降水日数 P_d	180[日/年]
風速 U	0.2[m/s]
可照時間 N_0	8.0[h]
日照時間 N	6.0[h]
太陽の入射角	90.0 [°]

4.2 考察と課題

本研究では間接光を含む環境光を考慮したコケの自動生成シミュレーションができた。太陽からの直射光と間接光をフォトンマッピング法によってまとめて計算することが可能となり、より光の当たり方の違いによる繁殖の差を再現できた。日射量の違いによるコケの繁殖の違いのシミュレーションはできたが、いくつかの課題が残っている。

1つ目に、時間経過およびコケの繁殖に伴う経年変化が考慮できてない点がある。コケが繁殖する環境は土地のみならず岩や燈籠などの立体物にも当てはまる。しかし岩や燈籠などは長い年月をかけて風化が起き、形状が変化する。日射量や繁殖環境から、コケは立体物の隙間や凹凸部分に繁殖するため、風化による変形は考慮する必要がある。

2つ目に雨などの水の流れを考慮できてない点がある。先行研究 [6] で風の流れを考慮し、本研究で間接光を含む環境光の考慮が可能となった。しかしコケの繁殖は風、日射量と同様に水分の存在が大きな要因となっている。よって水の流れを考慮したシミュレーションが必要である。

最後に環境汚染などによる環境変化を考慮していない点がある。本研究で取り扱った蘚苔類を含むコケ植物および地衣類は、自身の体表面の水分を吸収して生育する。体表面の水分をそのまま吸収するため、雨が吸収した大気汚染物質をそのまま取り込み、死滅していく。そのためコケ植物および地衣類の多くは環境汚染度の試査生物となっている。環境汚染による生育の変化も、コケの自動生成シミュレーションにおいて重要である。

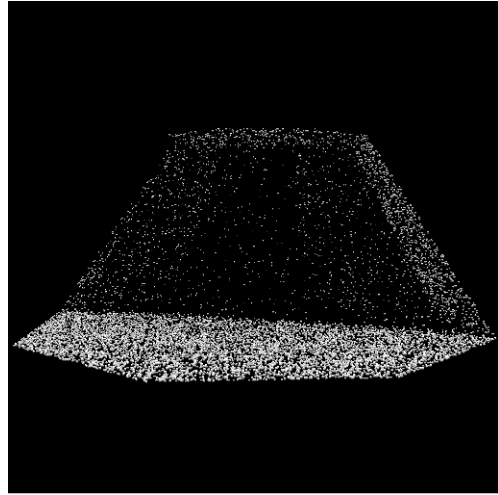
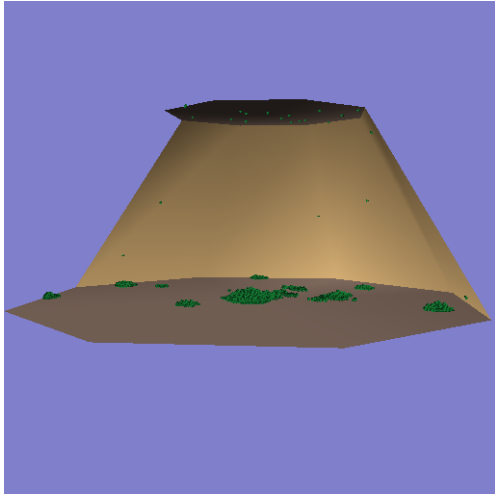


図 4.1: 間接光ありのコケの繁殖状況とフォトンマップの比較

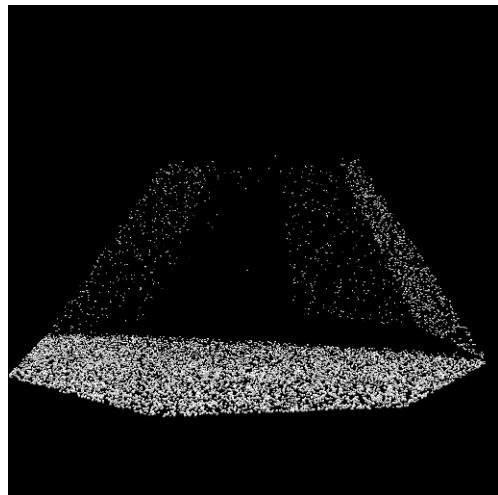
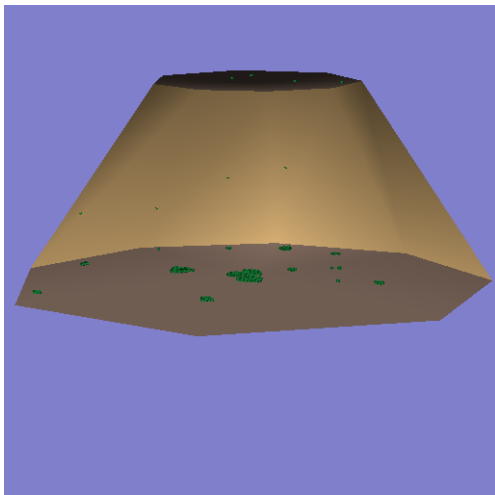


図 4.2: 間接光なしのコケの繁殖状況とフォトンマップの比較

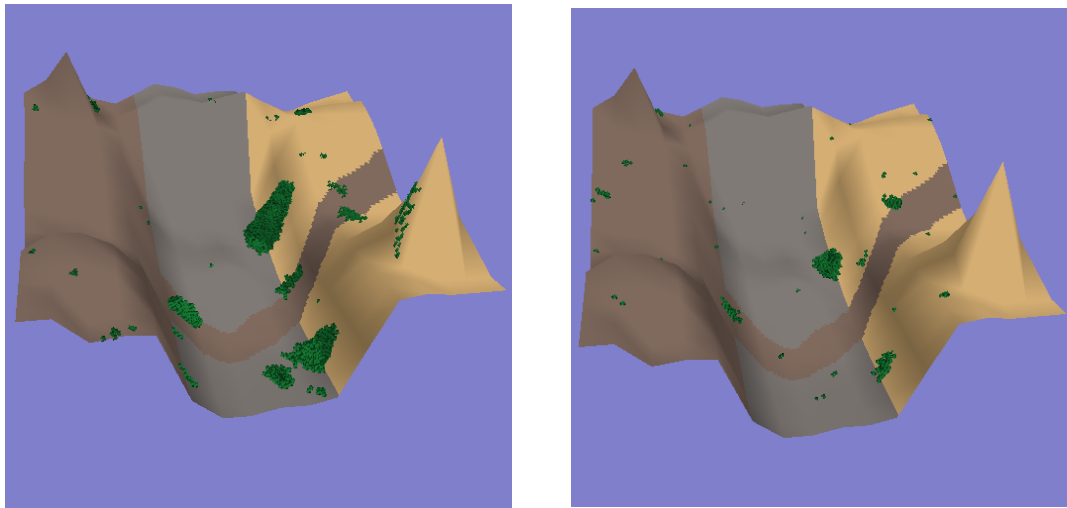


図 4.3: 気温による繁殖状況の違い

第 5 章

まとめ

本研究では、既存の手法では考慮することが難しかった間接光を含む環境光を考慮したコケの自動生成シミュレーションの手法を提案した。本研究ではコケ植物の中でも蘚苔類を対象とし、コケの生育する要因をコケの個々の日射量、土壌表面の温度および湿度とした。コケは太陽からの直接光よりも間接光のほうが光合成に適しているため、フォトンマッピング法による光度分布の計算を行い日射量に反映した。コケの生育する土壌の状態を太陽および気温による熱エネルギーと水の移動によってモデル化し、生育するための温度および湿度を求めた。コケの生育する環境がどの程度生育に適しているかを数値化した環境適応度に基づいて、コケの生長および繁殖を行った。またコケは3次元モデルのポリゴン面上の自由な位置に繁殖できるため、よりリアルなコケの繁殖シミュレーションを行うことが可能となった。

しかし日射量の違いによるコケの繁殖の違いのシミュレーションはできたが、いくつかの課題が残っている。コケが繁殖する環境は長い年月をかけて風化が起きて形状が変化するため、風化による変形は考慮することでより経年変化の印象を与えることが可能となる。またコケの繁殖は風、日射量と同様に水分の存在が大きな要因となっているため、水の流れを考慮したシミュレーションが可能となればより自然なコケの繁殖を再現することができる。コケは環境汚染などによる環境変化に敏感な生物である。環境汚染による生育の変化をシミュレーションに取

り入れることが出来れば，自然景観の再現だけでなく，現実空間と比較して環境汚染の度合いを調べることができる。

謝辞

渡辺先生三上先生.

長きに渡るご指導有難う御座いました.

先生方のお話やご指摘は大変勉強になりました.

岩手大学 千葉則茂教授.

不躰な申し出にも関わらず資料をお送りくださいました.

深く御礼申し上げます.

竹内先生.

研究室選抜からの告白に始まり大変お世話になりました.

勉学だけでなく身の回りのことまで心遣いいただき感謝いたします.

大学院の先輩方.

お土産大変美味しゅうございました.

研究を始めるにあたり、先輩方のご意見大変参考になりました.

辛い時期に涙したときのお心遣い、忘れません.

研究室の同級生様.

私がここで研究を進めることができたのは皆様のおかげです.

皆様全てが恩人です。

特に成田悟様，成田晃様。

研究への指摘から雑談までお付き合いいただき有難う御座いました。

一緒に飲むお茶，大変美味しゅうございました。

お二方には正直頭が上がりません。

感謝の念，お伝えしきれません。

父上様。

私が大学に進学できたのも，辛くとも齧り付けたのも，貴方のおかげです。

成人式に杯を交わせなかったことだけが心残りです。

母上様。

父上様が先立ったにも関わらず大学に行くことを許してくれました。

口では言えませんが，いつも感謝しております。

幼い弟妹達の世話，有難う御座います。

皆様様にはご心配をお掛け致し申し訳ありません。

最後になりましたが，お世話になった全ての方々に心から御礼申し上げます。

参考文献

- [1] 金山 知俊, 阪田 省二郎, 増山 繁. 分枝規則を再現し, 光, ホルモンの影響を考慮した樹木の生長モデル. 電子情報通信学会論文誌. D-II, No. 8, pp. 1362–1373, 1996.
- [2] Interactive Data Visualization. Speed tree. <http://www.speedtree.com/>.
- [3] Yanyun Chen, Lin Xia, Tien-Tsin Wong, Xin Tong, Hujun Bao, Baining Guo, Heung-Yeung Shum. Visual simulation of weathering by γ -ton tracing. *SIGGRAPH 2005*, pp. 1127–1133, 2005.
- [4] 工藤 宗伸, 村岡 一信, 千葉 則茂. 生態を考慮したコケのビジュアルシミュレーション. グラフィクスとCAD/Visual Computing 合同シンポジウム'99, 1999.
- [5] 小笠原 祐治, 村岡 一信, 千葉 則茂. 生育環境を考慮したコケのビジュアルシミュレーション. 画電誌, Vol. 31, No. 4, pp. 496–503, 2002.
- [6] 小笠原 祐治, 村岡 一信, 千葉 則茂. 温度や湿度の局所的な環境条件を考慮したコケのビジュアルシミュレーション. 芸術科学会論文誌, Vol2, No.1, pp.31-39, Vol. 2, No. 1, pp. 31–39, 2003.
- [7] 千葉 則茂, 八重 樫一仁. 地表面日射量を求める高速アルゴリズム. 電子情報通信学会論文誌, Vol. J173-D-2, No. 1, pp. 28–35, 1990.
- [8] 岩月 善之助. 日本の野生植物-コケ. 平凡社, 2001/02.

- [9] 国立科学博物館. 地衣類の探求. <http://research.kahaku.go.jp/botany/chii/>.
- [10] 岩月 善之助, 伊沢 正名. 山溪フィールドブックス 14 しだ・こけ. 山と溪谷社, 1996.
- [11] MOSSPLAN. コケに関する基礎知識. <http://mossplan.co.jp/moss/intro/index.htm>.
- [12] 手塚 直人, 岡田 雅善, 条 克己. コケ園芸コツのコツ. 農山漁村文化協会, 2003.
- [13] 近藤 純正. 水環境の気象学. 朝倉書店, 1994.
- [14] C.M. Coral, K.E. Torrance, D.P. Greenberg, B. Battail. Modeling the Interaction of Light Between Diffuse Surfaces. , *Computer Graphics*, Vol. 18, No. 3, pp. 213–222, 1984.
- [15] Henrik Wann Jensen. フォトンマッピング-実写に迫るコンピュータグラフィックス. オーム社, 2002/7.
- [16] Manabe S. The atmospheric circulation and the hydrology of the earth's surface. *Mon. Wea. Rec.*, Vol. 97, pp. 739–774, 1969.
- [17] 渡辺 大地. Fine kernel tool kit system. <http://fktoolkit.sourceforge.jp/>.
- [18] Jon L. Bentley. Multidimensional binary search trees used for associative searching. *Communications of the ACM*, Vol.18, No.9, pp.509-517, 1975.
- [19] Jon L. Bentley, Jerome H. Friedman. Data structures for range searching. *Computing Surveys*, Vol.11, No.4, pp397-409, 1979.
- [20] Jon L. Bentley, Bruce W. Weide, Andrew C Yao. Optimal expected-time algorithms for closest point problems. *ACM Transactions on Mathematical Software*, Vol.6, No.4, pp.563-580, 1980.
- [21] 国立天文台. 理科年表. 丸善株式会社, 2007.