

温度や湿度の局所的な環境条件を考慮した 苔のビジュアルシミュレーション

小笠原 祐治⁺ 村岡 一信⁺⁺ 千葉 則茂⁺⁺⁺

岩手県立高度技術専門学院⁺ 東北工業大学⁺⁺ 岩手大学工学部⁺⁺⁺

Visual Simulation of Moss Taking into Account Local Environment on Temperature and Humidity

Yuuji Ogasawara⁺ Kazunobu Muraoka⁺⁺ Norisige Chiba⁺⁺⁺

Iwate Technical College⁺ Tohoku Institute of Technology⁺⁺

Faculty of Engineering, Iwate University⁺⁺⁺

論文概要

よりリアルに自然景観を表現できるCG技術の開発がますます重要なテーマとなってきた。苔は日本庭園では欠くことのできない構成素材の一つであり、地面や燈籠などの石材物に苔が繁殖している様子は、風情のある印象を与える。本報告では、水辺、地形、植物や石材物などのその他の構成素材など、苔の繁殖に影響を与える生育環境を苔の繁殖シミュレーションに反映する方法を提案する。本手法では、粒子ベースの風の流れのシミュレーションにより、生育環境によって定まる温度、湿度および風速の局所的な分布を求め繁殖シミュレーションを行う。

Abstract

The CG technology for more realistically representing the natural scenery is becoming an increasingly important theme. Moss is one of the essential components of Japanese gardens. Most people may be impressed with the Japanese garden whose ground and stonework, e.g. garden lanterns, are tastefully covered by moss. In this paper, we propose the method to take into account the environmental features for the growth simulation of moss by mainly simulating the wind flow. Those features include the waterside, the ground shape and other components' shapes. In our proposed method, the local distribution of temperature, humidity and wind velocity influenced by the environmental features are estimated by employing the particle-based wind flow simulation, and used for the growth simulation of moss.

キーワード

コンピュータグラフィックス, 自然現象, 植物, 苔, 生長モデル

Computer Graphics, Natural Phenomena, Plants, Moss, Growth Model

1. はじめに

苔は日常的によく見られる植物であり、燈籠、敷石、石垣などの石造物、さらに岩場景観などでの繁殖が目につく。特に日本庭園では欠くことのできない構成素材の一つであり、重厚な経年変化や風情のある印象を与える役目を果たしている[1]。

一方、近年のCG（コンピュータグラフィックス）技術の進歩は目覚しく、映画やCMなどの映像制作において不可欠な映像生成技術であり、ますます緻密でリアルな映像生成技術が期待されている。表現対象は人工物のみならず、自然物、現象の表現法についても、活発に研究が行われている。これまで、植生や繁殖分布を考慮した自然景観の表現法として、単年生の花や森林景観を対象とした方法[2][3][4]が提案されているが、苔の表現法の開発を試みた例[5][6]は少ない。苔の自然な繁殖分布の生成や質感表現は、自然景観の表現技術の一つとして重要な課題である。

苔は環境に敏感な植物であり、繁殖状況は公害などによる環境変化の調査などにも利用されている。池や小川などの水辺、建物や植物などに囲まれた風通しの悪い場所によく繁殖する。このような自然な繁殖を実現するためには、繁殖シミュレーションにおいて、生育環境の湿度分布を近似的にでも考慮することが有効である。

本論文では、苔を含む景観のビジュアルシミュレーション法を提案する（図1参照）。提案する手法は、苔が繁殖する対象物体の周囲の状況を考慮したシミュレーションを行うものである。周囲の状況とは、池や小川などの水辺、大きな植物や石材物、建物などの物体、地形である。まず、周囲の状況を考慮した風の流れのシミュレーションを行って、局所的に生育環境における日射量、気温、湿度を求める。次に、その生育環境に基づいて、文献[6]に示される方法で苔の繁殖シミュレーションを行う。

2. 風の流れのシミュレーション

苔は一般の植物とは異なり根から栄養や水分を吸収するのではなく、体全体で水を吸収して光合成で生育する植物である[7][8]。苔の生長に必要なものは適度な受光量と水量である[9]。そのため、文献[6]においては、苔の生長を支配する要因として気温、湿度、日射量を仮定している。そして、苔が生育している環境（気温、湿度、日射量）にどの程度適応できるかを示す環境適応度を定義し、生長時間間隔（1日～数日）毎に環境適応度の値に基づいて発芽、成長、死滅、胞子の生成、無性芽の生成の制御を行い、繁殖状況を求めている。

苔は環境に敏感であり、環境に応じて生える種類が変

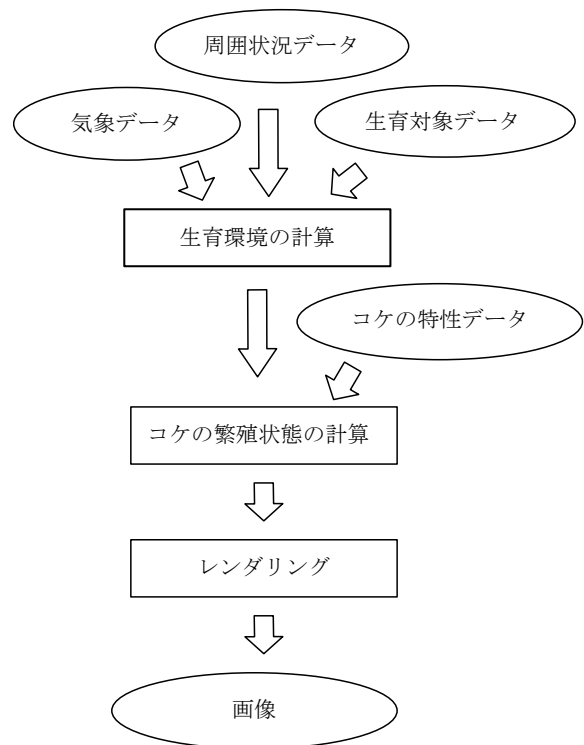


図1 シミュレーションの流れ

わる[8-13]。そのため、より自然な繁殖を実現するためには、生育に影響を与える要因をモデルに取り込むことが有効である。そこで、風の流れのシミュレーションを行い、苔の繁殖に影響を与える周囲の状況をモデルに取り込む。

2.1 周囲の状況

苔の生長を支配するものと仮定している要因である気温、湿度、日射量のうち、日射量については日射の障害となる周囲の物体を考慮している[6]。しかし文献[6]では、風の流れを阻害する周囲の障害物や湿り気を増す周囲の水辺などによる気温、湿度に対する影響は考慮していない。そこで本論文では、より自然な繁殖を実現するために、周囲の状況を考慮して風の流れによる影響を苔の繁殖シミュレーションに取入れる。そのために、風の流れのシミュレーションを行い、周囲の状況による影響を考慮する。

2.2 生育対象表面の風速

一方、苔の生育対象は、石垣、燈籠、樹皮などのように立体的な形状をしているのが一般的である。生育対象を包含するような3次元格子状に配置したボクセル集合を考え、生育対象物体の表面を含む各ボクセルを、苔の繁殖のためのセルとして利用している。セル毎の生育環境（生育対象表面の温度、湿度、日射量）を求め、苔の繁殖処理に使用している[6]。生育対象表面における温度と

湿度は、生育対象表面の風速に依存する。それは、生育対象表面に蓄えられている水の蒸発量が風速に依存するためである。生育対象表面の風速は、生育対象に吹いてくる風（2.1節で説明している周囲の影響を受けた風）の風向、風速および生育対象表面の位置によって異なる。そこで、風の流れのシミュレーションにおいてセル毎の風速を求め、生育環境の計算に用いることにする。

3. 生育環境のシミュレーションモデル

セル毎の生育環境（生育対象表面の温度、湿度、日射量）を求めるためのシミュレーションの概要を図2に示す。

セル毎の生育環境を求める場合、図2に示す周囲を含めた領域で風の流れをシミュレーションすればよいが、計算点（粒子数）が多くなり膨大な計算時間を要してしまう。そこで、領域を2つに分けて、2段階に流体シミュレーションを行い、効率化を図る。流体シミュレーションを行う空間全体をSL1と呼び、苔の繁殖シミュレーションを行う空間をSL2と呼ぶことにする。SL1は図2の破線で表された直方体領域であり、SL2は実線で表された直方体領域である。流体シミュレーションには、ここでは任意の形状に適用しやすい粒子法を用いた。

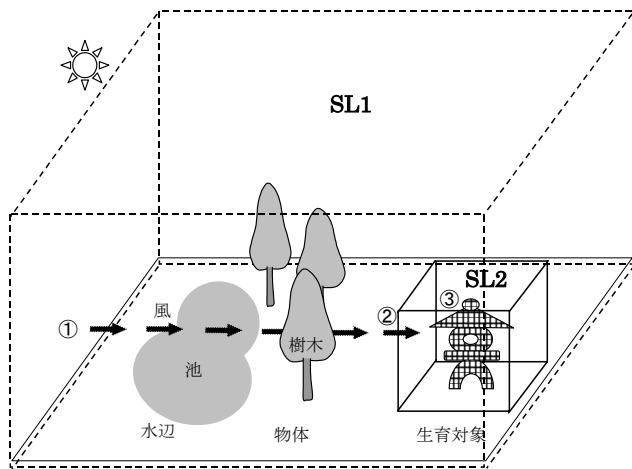


図2 シミュレーションの概要

図2に示す①には観測された気象データ（日平均）[16]の風が吹いてくるものとし、それが生育対象まで流れて行くことになるが、経路上の水辺や地形、障害物に影響を受けて変化する。SL1は範囲が広いので粒子の大きさを大きくして概略的に風の流れを捉え、①から②の生育対象直前まで風が流れることによる温度、湿度、風速、風向の変化を求める。SL2では粒子の大きさを小さくして、SL1で求めた②の風が生育対象表面をどのように流れるかをより詳細にシミュレーションを行い、局所的な生育環境を求める。

生育環境を求める処理は、前処理と苔の成長処理で用いる生育環境の計算から成る。

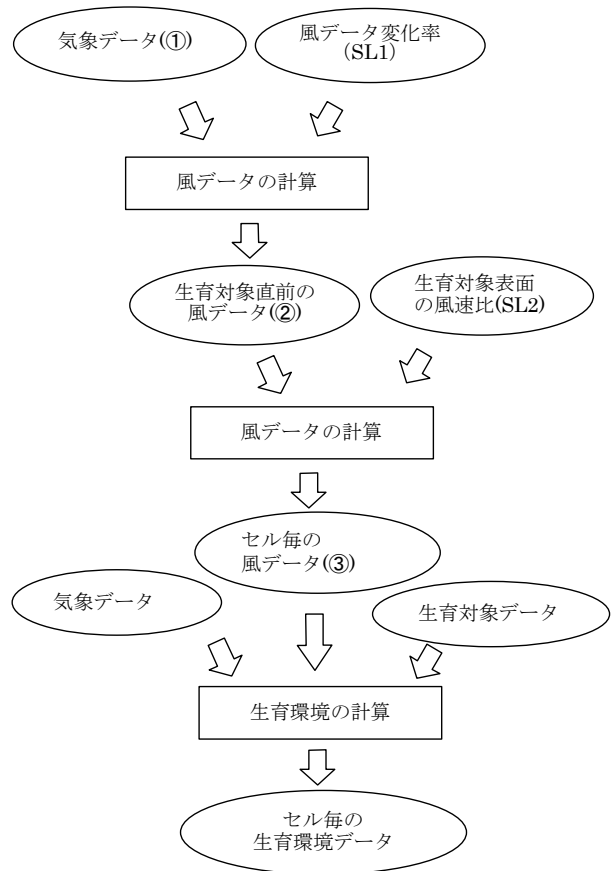


図3 生育環境の計算の流れ

3.1 前処理

苔の成長処理を行う前にSL1およびSL2で風向毎に流体シミュレーションを行い、その結果を3.2節に示す生育環境の計算に用いる。

(1) SL1におけるシミュレーション

図2に示すように、①の風（温度、湿度、風速、風向）が②の生育対象直前に到達するまでの変化を求めたい。そのため、SL1の範囲（生育対象は除く）で流体シミュレーションを行い、温度、湿度（比湿）、風速の変化率を求める。求めた変化率は、②の生育対象直前の風データを求める処理に使用する。

(2) SL2におけるシミュレーション

生育対象の形状に依存して生育対象の各セル位置における風速は異なる。そのため、生育対象を対象としたSL2の範囲で流体シミュレーションを行い、生育対象表面の風速比を求める。求めた風速比は、②の生育対象直前の風速から生育対象のセル毎の風速を求める処理に使用する。

3.2 生育環境の計算

苔の繁殖シミュレーションでは、生長時間間隔（1日～数日）毎に各セルの生育環境を求めて、苔の成長処理に用いている。セル毎の生育環境の計算は、次に示す(1)から(3)の3つのステップで行う。その流れを図3に示す。

(1) 生育対象直前の風データの計算

3.1節(1)で求めた温度、湿度（比湿）、風速の変化率および気象データ（①）から生育対象直前の風データ（②）を近似計算する。

(2) セル毎の風データの計算

(1)で求めた生育対象直前の風データ（②）および 3.1節(2)で求めた風速比を用いて、セル毎の風データ（③）を計算する。温度、湿度は生育対象直前の風データ（②）の値を用いる。

(3) セル毎の生育環境データの計算

気象データおよびセル毎の風データ（③）、生育媒体データから、文献[6]に示されている方法で生育環境を計算することができる。

4. 風の変化を求める手法

図2に示す①の風（温度、湿度、風速、風向）が周囲の状況によって③の生育対象に到達するまでの変化を求めたい。そのために、粒子法の一つである MPS 法（Moving Particle Semi-implicit method）[13]を用いて、空気の流れをシミュレーションすることによって、温度、湿度（比湿）、風速、風向の変化を求める。なお、シミュレーションにおいては、湿度（相対湿度）を直接扱うのではなく、空気と水分の重量比である比湿として扱い、結果を湿度に変換する。

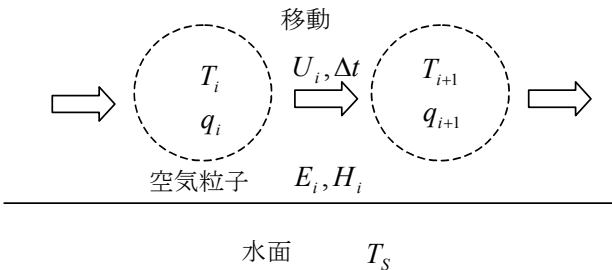


図4 粒子の移動

粒子法とは、流体を粒子の集まりで近似し、流体の基礎方程式であるナビエ・ストークス方程式を粒子点で離散化するラグランジェ型のシミュレーション法である。

4.1 比湿および温度の変化

図2に示すSL1の範囲において流体シミュレーションを行うことにより、地形や障害物の影響を反映した空気の流れが分かり、風速および風向を求めることができる。温度および湿度に変化を与える最も大きな要因は水辺である。図4に示すように空気粒子が水面上を Δt 秒間移動する際に、水面からの蒸発および顕熱の影響を受け比湿および温度が変化する[14][15]。

水面上を風速 U_i の風が吹いている場合の顕熱量 H_i （空気を暖めるエネルギー）および蒸発量 E_i は、次式で求めることができる[14]。

$$H_i = c_p \rho \cdot C_H U_i \cdot (T_s - T_i) \quad (1)$$

$$E_i = \rho \cdot C_E U_i \cdot (q_{SAT}(T_s) - q_i) \quad (2)$$

$$q_i = q_{SAT}(T_i) \cdot rh \quad (3)$$

H_i : 顕熱輸送量 (Wm^{-2})

E_i : 蒸発量 (mms^{-1})

U_i : 風速 (ms^{-1})

rh : 風の相対湿度 (0～1)

ρ : 密度 (1.20kgm^{-3})

C_E : 潜熱バルク輸送係数

C_H : 顕熱バルク輸送係数

q_i : 比湿 (kgkg^{-1})

$q_{SAT}(T)$: 気温 T に対する飽和比湿

$$q_{SAT}(T) = \frac{0.622(e_{SAT}/p)}{1 - 0.378(e_{SAT}/p)}$$

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

p : 大気圧 (1013.2hPa)

T_s : 水温 ($^{\circ}\text{C}$)

T_i : 気温 ($^{\circ}\text{C}$)

$c_p \rho$: 空気の体積熱容量 ($1.21 \times 10^3 \text{JK}^{-1}\text{m}^{-3}$)

水面上では潜熱バルク輸送係数 C_E と顕熱バルク輸送係数 C_H はほぼ等しく、次式で計算することができる[14]。 C_E および C_H を C と記述することにする。

$$C = C_E = C_H$$

$$= \begin{cases} 1.45(v/D)^{-2/3} \text{Re}^{-0.6} & \text{Re}=10 \sim 2.5 \times 10^3 \quad (4a) \\ 0.664(v/D)^{-2/3} \text{Re}^{-0.5} & \text{Re}=2.5 \times 10^3 \sim 1.5 \times 10^4 \quad (4b) \\ 0.037(v/D)^{-2/3} \text{Re}^{-0.2} & \text{Re}=1.5 \times 10^4 \sim 6.5 \times 10^6 \quad (4c) \\ 0.2275(v/D)^{-2/3} (\log_{10} \text{Re})^{-2.58} & \text{Re}=6.5 \times 10^6 \sim 10^9 \quad (4d) \end{cases}$$

$$Re = X \cdot U / \nu \quad (5)$$

X : 水面上の移動距離 (m)

$$X = U \cdot \Delta t$$

ν : 分子動粘性係数 ($1.51 \times 10^{-5} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$)

D : 水蒸気の分子拡散係数 ($2.54 \times 10^{-5} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$)

ρ および $c_p \rho$ は温度に依存するが変化は小さいので定数として扱う. ここでは 20°C における値を用いることにする.

空気粒子が水面上を Δt 秒間移動する場合, 水面に接している空気粒子が顕熱量 H_i および蒸発量 E_i の影響を受ける. そのため, 空気粒子の温度と比湿の変化は, 次式に示すように, 空気粒子が水面に接する面積 S に比例することになる.

$$\begin{aligned} \Delta T_i &= T_{i+1} - T_i \\ &= \frac{H_i \cdot S}{c_p \rho \cdot V} \cdot \Delta t \end{aligned} \quad (6)$$

$$\begin{aligned} \Delta q_i &= q_{i+1} - q_i \\ &= \frac{E_i \cdot S}{\rho \cdot V} \cdot \Delta t \end{aligned} \quad (7)$$

r : 粒子の半径 (m)

S : 粒子の水面に接する面積 (m^2)

$$S = (2r)^2$$

V : 粒子の体積 (m^3)

$$V = (2r)^3$$

空気粒子が水面上を隙間なく満たしているとするため, S および V は立方体を想定した面積および体積とする. S および V は温度に依存して変化するが, ここでは定数として扱う. 図 2 に示す①から②へ到達するまでの温度と比湿の変化量 ΔT および Δq は, 次式で求めることができる.

$$\Delta T = \sum_i \Delta T_i \quad (8)$$

$$\Delta q = \sum_i \Delta q_i \quad (9)$$

4.2 近似計算

苔の生長時間間隔 (1 日～数日) 毎に生育環境を求めているが, その度に前節に示した流体シミュレーションを行うにはシミュレーション時間がかかり過ぎる. また,

気象データは日平均のデータであり, 1 日中一定の値とは限らないので, 本研究では以下のような近似的な流体シミュレーションの方法を採用した. 同じ場所で, 風向が等しい場合のシミュレーション結果をもとに, 図 2 に示す①における気温 T_0 , 比湿 q_0 , 風速 U_0 および水温 T_s が変化した場合の温度, 比湿, 風速の変化を近似的に計算する. 比湿 q_0 は, 式(3)で求められる.

ここで, 次式のようにシミュレーションの時間間隔 Δt を風速 U_0 に反比例させると, 風速 U_0 が変化しても Δt 毎の粒子の移動距離は等しくなる.

$$U_0 \cdot \Delta t = X_0 \quad (10)$$

さらに, 粒子の挙動も等しいと見なせるものとする, 以降に示すように近似できる.

シミュレーションの時間間隔 Δt を 0.01 秒, 風速 U_0 を 3m (年平均の風速は約 3m [14]) とすると, X_0 は 0.03 となる. この条件でシミュレーションを行った結果を近似計算に用いる場合, バルク輸送係数 C の計算値を図 5 に示す.

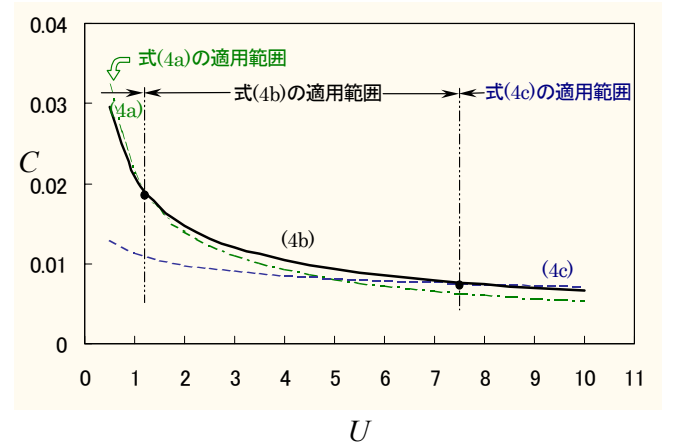


図 5 風速 U と潜熱バルク輸送係数 C

Re が風速 U に依存するので, 式(4a), 式(4b), 式(4c)を用いることになるが, 図 5 から分かるように式(4b)のみを用いても誤差が少ないので, 式(4b)のみを用いることにする. すると, 式(4b)は, 次式のように書き換えることができる.

$$\begin{aligned} C &= C(U) \\ &= 0.020856 \cdot (U)^{-0.5} \end{aligned} \quad (11)$$

式(6)および式(7)は次式のように書くことができる.

$$\Delta T_i = k_i (T_s - T_i) \quad (12)$$

$$\Delta q_i = k_i (q_{sAT}(T_s) - q_i) \quad (13)$$

$$k_i = 0.03 \cdot \frac{S}{V} \cdot \left(\frac{U_i}{U_0} \right)^{0.5} \cdot C(U_0)$$

すると、 $k_i \ll 1$ であり、式(8)および式(9)は次式のよ
うに近似できる。

$$\Delta T = \left(\sum_i k_i \right) \cdot (T_s - T_0) \quad (14)$$

$$\Delta q = \left(\sum_i k_i \right) \cdot (q_{SAT}(T_s) - q_0) \quad (15)$$

そこで、周囲の状況による気温と比湿の変化率 A_T と A_q を次式のように定義する。

$$A_T = \frac{\Delta T}{C(U_0) \cdot (T_s - T_0)} \quad (16)$$

$$A_q = \frac{\Delta q}{C(U_0) \cdot (q_{SAT}(T_s) - q_0)} \quad (17)$$

ΔT および Δq の値は、前節で示した方法でシミュレ
ーションを行い生育対象に到着した粒子の平均を用いる。
また、次式に示す風速比 A_U も求める。

$$A_U = \frac{U_d}{U_0} \quad (18)$$

U_d : 生育対象直前の風速 (ms^{-1})

A_T , A_q , A_U を風向毎にあらかじめ求めておくこと
により、気象条件 (気温 T_0' , 相対湿度 rh' , 風速 U_0' ,
水温 T_s' , 風向) が与えられた場合、次式で生育対象直
前の風のデータを近似計算することができる。

$$T_d' = T_0' + A_T \cdot C(U_0') \cdot (T_s' - T_0') \quad (19)$$

$$rh_d' = \frac{q_0' + A_q \cdot C(U_0') \cdot (q_{SAT}(T_s') - q_0')}{q_{SAT}(T_d')} \quad (20)$$

$$U_d' = A_U \cdot U_0' \quad (21)$$

T_d' : 生育対象直前の気温

rh_d' : 生育対象直前の相対湿度

U_d' : 生育対象直前の風速 (ms^{-1})

4.3 植物の処理

植物では葉や枝の間を風が通ることができるため、建
物や石材物とは異なり空気の流れを完全には阻害しない。

その状況を反映するために、植物が存在する部分に空気
粒子が到達した場合、次式で空気粒子の速度を減衰させ、
通り抜けることができるようにする。

$$U_{i+1} = U_i \exp(-R_U \cdot \Delta t \cdot U_i) \quad (22)$$

R_U : 風速の減衰係数

R_U は枝や葉の密度等に依存するが、本シミュレーシ
ョンにおいては R_U を 0.5, 粒子の直径を 0.5m としてい
る。粒子法のシミュレーション例を図6に示す。

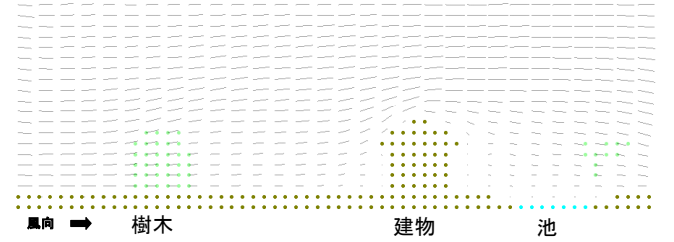


図6 流体シミュレーション

垂直方向の断面図であり、粒子の速度ベクトルを表示
したものである。図6に示すように、樹木、建物および
池がある。樹木の占める領域は薄い緑色の点 (●) で示
しており、粒子が速度を落としながら樹木を通り抜けて
いく様子がわかる。また、樹木の直前で迂回する流れも
あることが分かる。

4.4 セル毎の風データ

生育対象の形状に依存して、風速は生育対象表面の位
置によって異なる。そのため、生育対象を対象とした範
囲 (図2のSL2) で粒子法を用いて流体シミュレーショ
ンを行い、セル毎に風速 (近傍の風速) を求める。4.2
節の場合と同様に、風速が変わっても空気粒子の挙動は
等しいと見なすことにすると、風向毎に風速比と生育対
象直前の風速からセル毎の風速を求めることができる。

各セルにおける風の温度および湿度は、生育対象直前
の値 T_d' , rh_d' を用いることにする。本シミュレーシ
ョンでは、粒子の直径を 5cm としている。

5. 繁殖シミュレーションの例

繁殖シミュレーションを行い本手法の効果を確認した。
周囲の状況が異なる次の3つの場合について、燈籠にお
ける苔の繁殖シミュレーションを行った。

実験例1: 周囲に障害物がない場合

実験例2: 北側に 2m の塀がある場合

実験例3: 西側に 5×7m の池がある場合

それぞれの実験例について、繁殖シミュレーションによ

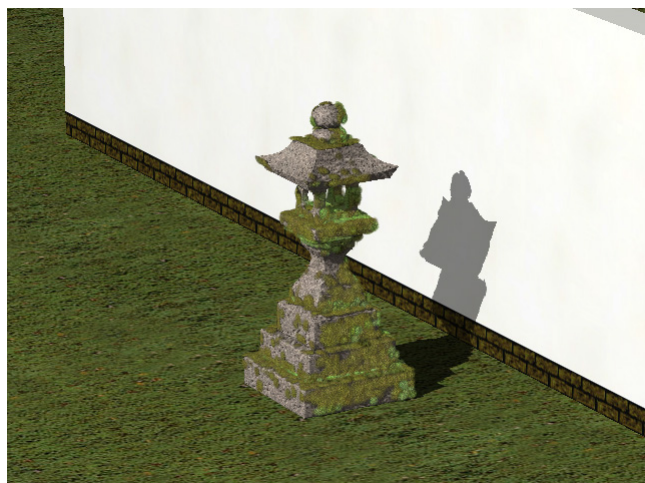


(a)南東から見た画像



(b)北西から見た画像

図7 実験例1の生成画像



(a)南東から見た画像



(b)北西から見た画像

図8 実験例2の生成画像



(a)南東から見た画像



(b)北西から見た画像

図9 実験例3の生成画像

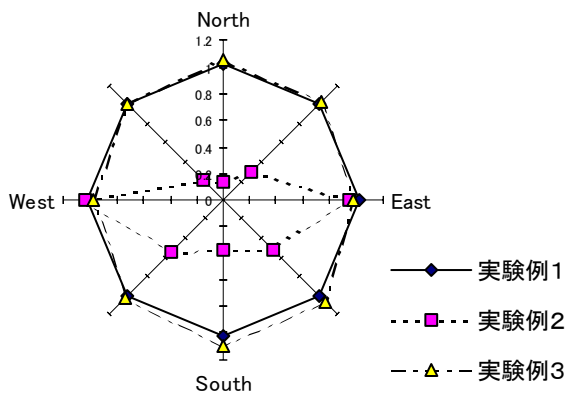


図 10 風速比 A_U

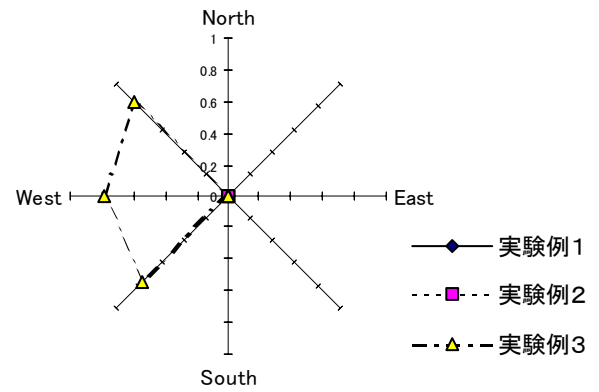


図 12 比湿の変化率 A_q

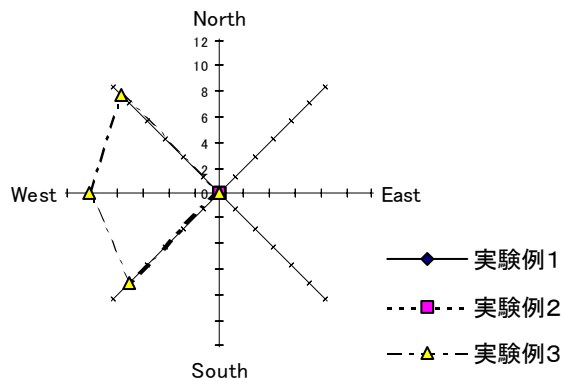


図 11 気温の変化率 A_T

る画像を図 7, 図 8, 図 9 に示す. 燈籠の高さは 1.5m であり, セルの大きさは 2cm である. また, それぞれの実験例について, 方向毎 (8 方向) の風速比 A_U を図 10 に, 気温の変化率 A_T を図 11 に, 比湿の変化率 A_q を図 12 に示す.

実験例 2 では, 南側に塀が東西に伸びており, 南北方向の風をさえぎるかたちになっている. 図 10 に示されているように, 南北方向の風速が小さくなることが分かる. そのため, 燈籠の表面からの水分の蒸発が抑えられ, 実験例 1 と比較して苔がより多く繁殖している.



図 13 庭園のシミュレーション例

実験例3では、図11および図12に示されているように西側の池の方向から風が吹いている場合、比湿の変化率 A_q が大きいので比湿が増える。また、気温の変化率 A_T も大きいので、気温が池の水温に近づく。池の水温を冬は10℃で夏は20℃としており、気温変動を抑えるようにはたらいっている。そのため、実験例1と比較して気温および湿度が苔の繁殖により適した条件となるので、苔がより多く繁殖している。

庭園におけるシミュレーション例を図13に示す。池の中に島があり、燈籠に苔が繁殖している風景である。燈籠の南側に樹木があり直射日光による乾燥を軽減し、周囲の池により湿度が保たれ、また池の周りには樹木があって風を和らげている環境になっている。

6. ま と め

本論文では、温度や湿度の局所的な環境条件を考慮した苔の繁殖シミュレーション法を提案した。本手法は、繁殖対象の周辺にある小川や池などの水辺、および地形や建物、樹木などの物体を考慮して、よりの確に周囲の状況を反映して生育環境を求めることによって、より自然な苔の繁殖を行うものである。シミュレーション例とそのレンダリング結果により、本手法の効果を示した。

今後の課題としては、より苔らしい質感を表現するためのレンダリング法の開発、生育媒体の経年変化の表現法と苔の表現法との融合、日射量計算の高速化などが挙げられる。

謝辞

本研究の一部は、通信・放送機構「地域提案型研究制度」に係わる研究開発課題による。

参考文献

- [1]三宅陽子, 藤代一成: “苔の発生に伴う石の風化”, 情報処理学会全国大会 6F-02, 2002
- [2]O. Deussen, P. Hanrahan, M. Pharr, B. Lintermann, R. Mech and P. Prusinkiewicz: “Realistic modeling and rendering of plant ecosystems,” SIGGRAPH98, pp.275-286, 1998.
- [3]村岡一信, 千葉則茂, 高橋 匡, 斎藤伸自: “季節変化に基づく山岳景觀画像生成方法の検討”, 画電誌, Vol.22,no5, pp466-474, 1993.
- [4]N.Chiba,K.Muraoka,A.Doi,J.Hosokawa: “Rendering of forest scenery using 3D textures,” The Journal of Visualization and Computer Animation, Vol.8, pp.191-199, 1997.

- [5]工藤宗伸, 村岡一信, 千葉則茂: “生態を考慮した苔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.
- [6]小笠原祐治, 村岡一信, 千葉則茂: “生育環境を考慮した苔のビジュアルシミュレーション,” 画電誌, Vol.31,no4, pp496-503, 2002.
- [7]井上浩: コケ, 東海大学出版会, 1986
- [8]大悟法滋, 井上浩: シダ・コケ類の生態と観察, 築地書館, 1975.
- [9]MOSS PLAN: “苔に関する基礎知識,” <http://www.sunfield.or.jp/~naoto-t/index.htm>.
- [10]服部, 岩月, 水谷: 原色日本蘚苔類図鑑, 保育社, 1972
- [11]野口彰: 日本産蘚類概説, 図鑑の北隆館, 1976.
- [12]岩槻善之助: 日本の野生植物 コケ, 平凡社, 2001
- [13]越塚誠一: 数値流体力学, 培風館, 1997
- [14]近藤純正: 水環境の気象学, 朝倉書店, 1994.
- [15]小倉光義: 一般気象学[第2版], 東京大学出版会, 1999.
- [16]気象庁ホームページ: “電子閲覧室”, <http://www.data.kishou.go.jp/>.