

FRCGC Technical Report

No. 7

モンテカルロ法を用いた曇天大気および
植生キャノピーの放射伝達のモデル化

岩渕 弘信・小林 秀樹

独立行政法人 海洋研究開発機構
地球環境フロンティア研究センター

2006年12月1日

Modeling of radiative transfer in cloudy atmospheres and plant canopies using Monte Carlo methods

Hironobu Iwabuchi and Hideki Kobayashi

December 1, 2006.

目次

第 1 章 序論	1
第 2 章 放射モデルの基礎	3
2.1 モンテカルロ放射モデルの理論	3
2.1.1 モンテカルロ法による放射伝達計算	3
2.1.2 モンテカルロ放射伝達アルゴリズムの基本	4
2.1.3 簡単なモンテカルロ放射伝達モデルの例	7
2.2 大気の放射特性	10
2.2.1 座標系と大気・地表面モデル	10
2.2.2 気体吸収	11
2.2.3 レーリー散乱	12
2.2.4 ミー散乱：エアロゾルと雲粒子	15
2.2.5 粒径分布のモーメントと体積混合比	16
2.2.6 粒径分布で重み付け平均した光学特性	18
2.2.7 エアロゾルの吸湿成長	20
2.3 植生キャノピーの放射特性	24
2.3.1 葉面の光学的特性	24
2.3.2 放射伝達モデルにおける葉面の扱い	28
2.3.3 森林・草地キャノピーの構造	30
第 3 章 基本的なアルゴリズム	33
3.1 乱数の生成	33
3.1.1 一様乱数の生成	33
3.1.2 変換法（逆関数法）	34
3.1.3 LUT 法	37
3.1.4 棄却法（採択-棄却法）	37
3.1.5 重み付け法	39
3.1.6 メトロポリス法	40
3.1.7 合成法	41
3.1.8 乱数生成法についてのまとめ	41
3.2 放射源からの射出	43
3.2.1 射出エネルギーとモデル光子の分布	43

3.2.2	太陽放射	45
3.2.3	点光源	45
3.2.4	熱放射	46
3.2.5	重要度に基づいた放射源空間分布の修正	49
3.2.6	等方的に射出する放射源	50
3.3	レイトレーシング	60
3.3.1	モデル光子とオブジェクトの交差	60
3.3.2	三次元空間におけるオブジェクトとモデル光子の関係	61
3.3.3	起伏形状のある地表面とモデル光子の関係	67
3.3.4	空間分割法	70
3.3.5	境界ボリューム法	70
3.4	衝突過程	72
3.4.1	衝突確率と衝突点の決定	72
3.4.2	吸収の扱い	75
3.4.3	混合媒体の扱い	77
3.4.4	ロシアンルーレット法と光子分割法	80
3.5	散乱	82
3.5.1	散乱過程	82
3.5.2	モンテカルロ法による散乱の扱い	87
3.6	反射	93
3.6.1	定義	93
3.6.2	BRDF を考慮した反射の扱い	95
3.6.3	等方反射: ランバート面	97
3.6.4	拡散・鏡面混合モデル: DSM model	101
3.6.5	Rahman-Pinty-Verstraete (RPV) BRDF モデル	109
3.6.6	Li-Sparse-Ross-Thick (LSRT) BRDF model	118
3.7	屈折	129
3.7.1	スネルの法則とフレネルの式	129
3.7.2	地球大気中の屈折の扱い方	131
3.7.3	地球大気の屈折率	132
3.8	放射照度と加熱率の計算	134
3.8.1	放射量の定義とモンテカルロ法によるサンプリング	134
3.8.2	方法 I: 透過率のランダムサンプリング	136
3.8.3	方法 II: 透過率の解析的サンプリング	137
3.8.4	方法 III: ハイブリッド法	139
3.8.5	方法 IV: 吸収のみ解析的に扱う方法	140
3.9	局所推定法	142

3.9.1	局所推定法の原理.....	142
3.9.2	ADF (Angular Distribution Function) の定義.....	146
3.10	球面効果の扱い.....	149
3.10.1	球面効果の概要.....	149
3.10.2	球面効果の補正：line of sight.....	150
3.11	波長積分.....	157
3.11.1	地球外太陽放射照度及び光量子束密度.....	157
3.11.2	波長積分計算.....	158
3.12	群落光合成量.....	162
3.12.1	単葉の光合成速度計算モデル.....	162
3.12.2	放射伝達モデルによる吸収光合成有効放射量（APAR）計算方法.....	163
第4章	計算効率の改良.....	167
4.1	最大消散係数法.....	167
4.1.1	最大消散係数法の原理.....	167
4.1.2	MCS法の効率についての考察.....	169
4.2	分散減少法.....	170
4.2.1	Exponential transformation 法.....	170
4.2.2	寄与関数の修正.....	171
4.2.3	トランケーション近似.....	175
4.2.4	衝突強制法.....	181
4.2.5	数値拡散.....	183
4.2.6	直達光と一次散乱光の半解析的計算.....	184
4.3	並列化.....	186
4.3.1	並列プログラミング.....	186
4.3.2	モンテカルロ法における並列計算法 I: 光子群分割型.....	186
4.3.3	モンテカルロ法における並列計算法 II: 空間分割型.....	187
第5章	モデルの紹介と計算例.....	190
5.1	簡単なモンテカルロ放射コード.....	190
5.2	大気放射伝達モデルの紹介.....	193
5.2.1	放射モデル MCARaTS.....	193
5.2.2	MCARaTS を用いた計算例.....	197
5.3	植生放射伝達モデルの紹介.....	202
5.3.1	植生キャノピーの三次元放射伝達モデル.....	202
5.3.2	計算例.....	206

第 6 章 結論	209
謝辞	210
Appendix.....	211
A1 解析的な粒径分布	211
A1.1 Power-law distribution.....	211
A1.2 Gamma distribution.....	211
A1.3 Modified Gamma distribution	213
A1.4 Lognormal distribution (Number density).....	214
A1.5 Lognormal distribution (Volume density).....	215
A2 混合媒体の光学特性	216
A3 波長平均した光学特性	219
A4 エーロゾルの鉛直分布	220
A5 方向ベクトルによる光子の輸送の表現.....	222
A5.1 光子の移動（輸送）	223
A5.2 方向の回転（散乱）	223
A5.3 二つのベクトル間の角度.....	223
A6 二次元平面上のランダムな方向の決定：極座標法.....	225
A7 数学関数.....	226
A7.1 $\cos^{-1}x$	226
A7.2 $\exp(-x)$	226
A7.3 $1 - \exp(-x)$	227
A7.4 $\sin(x), \cos(x)$	227
References	229