

TUMSAT-OACIS Repository - Tokyo

University of Marine Science and Technology

(東京海洋大学)

放射伝達モデルへの双方向反射関数の導入と精度の
検討

メタデータ	言語: jpn 出版者: 公開日: 2017-05-25 キーワード (Ja): キーワード (En): 作成者: 坂西, 湊 メールアドレス: 所属:
URL	https://oacis.repo.nii.ac.jp/records/1426

修士学位論文

放射伝達モデルへの
双方向反射関数の導入と精度の検討

平成 28 年度
(2017 年 3 月)

東京海洋大学大学院
海洋科学技術研究科
海洋環境保全学専攻

坂西 溪

目次

目次	i
第 1 章 序論	1
第 2 章 大気放射における諸定義	2
2.1 放射エネルギー	2
2.1.1 放射輝度と放射フラックス	3
2.1.2 黒体放射とプランク関数	4
2.2 太陽放射と地球放射	5
2.2.1 太陽エネルギー	5
2.2.2 太陽と地球のエネルギー収支	6
2.3 放射伝達過程の計算	7
2.3.1 放射伝達方程式	7
2.3.2 平行平面大気放射伝達方程式	8
2.3.4 放射の散乱と吸収	11
2.3.5 太陽定数	13
2.3.6 地表面の放射特性	14
2.3.7 直達光と散乱光	15
第 3 章 放射伝達モデル	16
3.1 Rstar	16
3.2 6S	19
3.2 MODTRAN	21
第 4 章 Rstar プログラムの改良	22
4.1 目的	22
4.2 地表面反射の計算方法	23
4.2.1 Lambert 反射による計算処理	23
4.2.2 BRDF を用いた計算処理	23
4.3 Rstar プログラムに導入する BRDF モデル	25
4.3.1 HAPKE モデル	25
4.3.1 RAHMAN モデル	27
4.4 Rstar プログラムの変更箇所	29

第 5 章 BRDF 導入後の比較.....	30
5.1 比較対象と計算条件.....	30
5.2 放射輝度計算結果.....	32
5.2.1 Rstar - BRDF(HAPKE)と Rstar - BRDF(RAHMAN) の計算結果.....	32
5.2.2 Rstar - BRDF と Rstar - Lambert の比較.....	35
5.3 他の放射伝達モデルとの比較.....	38
5.3.1 Rstar - Lambert と 6S - Lambert と MODTRAN - Lambert の比較.....	38
5.3.2 Rstar - BRDF と 6S - BRDF の比較.....	40
5.3.3 Rstar - BRDF と MODTRAN - BRDF の比較.....	45
第 6 章 結論.....	49
参考文献.....	50
謝辞.....	52

第 1 章 序論

近年、地球温暖化は、環境問題の観点から国際的に大きな関心と懸念を持って議論になっている。メディアでは、気候変動や温室効果ガスの削減の議論がよく報道されているが、実際に今、地球でどのような現象が起こっているのか、今後どのように変化していくのか、把握し解決していく必要がある。

地球温暖化についてまず議論しなければならないことは、放射エネルギー収支である。放射とは電磁波の総称であり、ここでは太陽から地球に届く太陽放射と地球が宇宙空間に放出する地球放射のことを指す。地球を一つの系として見たとき、太陽放射と地球放射が等しければ地球の平均気温は変化しない。しかし、地球放射が太陽放射より小さくなった場合、地球にエネルギーが蓄積し平均気温が上昇する。これが地球温暖化である。地球放射が太陽放射より小さくなる主な原因は、温室効果ガスの増加であると言われている。大気中に存在している温室効果ガスが増加すると、地表面から放出した放射が温室効果ガスにより吸収されるようになる。一度温室効果ガスに吸収された放射は上方だけでなく下方に向けても再射出されるため、宇宙空間へ放出される放射を減少させる。その結果、地球放射が減ると考えられている。

今後、地球温暖化が地球環境に与える影響を把握するために、衛星や地上での観測・解析精度の向上、および大気科学の物理的法則を数式化した数値シミュレーションモデルの開発が重要となる。前述した太陽と地球の放射過程をシミュレーションする場合、大気と地表面の状態を反映させ、放射伝達方程式を基本とした吸収・散乱過程や地表面反射の計算を行うため、シミュレーションは複雑化する。現在、各研究所で正確な放射エネルギーの値を算出するために研究が進められている。

本研究では、シミュレーションモデルとして放射伝達モデルの開発・改良を行う。放射伝達モデルは、地球の放射エネルギー収支のシミュレーション、及び衛星データの解析を行うことができる。また、本研究で扱う放射伝達モデルの改良の対象は地表面の反射過程とする。地表面の反射過程は、地表面の構成物質によって異なるため扱いが難しい。そのため、本研究で従来の放射伝達モデルよりも地表面特性を反映することができるモデルの開発を行う。放射伝達モデルの開発により、将来的に地球温暖化問題に役立てることを目指す。

2.1.1 放射輝度と放射フラックス

放射の強さを定量的に表現するとき、単位立体角中の放射エネルギーを基本概念にとる。この場合、立体角とは、減点0から半径 r の位置にある球面上の面積 σ をその半径の2乗で割ったもので式(2.1)に定義される。

$$\omega = \sigma/r^2 \quad (2.1)$$

極座標を用いて微小立体角 $d\omega$ を求めると、図2.3に従って、半径 r の球面上の微小面積は式(2.2)となり、立体角は式(2.3)となる。

$$d\sigma = r d\theta \cdot r \sin\theta d\varphi \quad (2.2)$$

$$d\omega = d\sigma/r^2 = \sin\theta d\theta d\varphi \quad (2.3)$$

いま、図2.2に描かれた面積 dA を横切り、 dA の法線に対する角 θ の方向の微小立体角で限定されたある波長区間 $[\lambda, \lambda + d\lambda]$ における時間 dt の間の微小放射エネルギー量 dE_λ を考える。この微小放射エネルギー量は、放射輝度 I_λ に関する式(2.4)により表される。

$$dE_\lambda = I_\lambda \cos\theta dA d\Omega d\lambda dt \quad (2.4)$$

ここで、 $\cos\theta dA$ は、放射エネルギーを遮る有効面積を表している。式(2.4)は次式(2.5)のように、単色の放射強度、または単色の放射輝度を定義している。

$$I_\lambda = \frac{dE_\lambda}{\cos\theta d\Omega d\lambda dt dA} \quad (2.5)$$

したがって、単色の放射輝度の単位は、単位面積、単位時間、単位波長、そして単位立体角当たりのエネルギーである。放射エネルギーの単色の放射フラックスは、半球の全立体角にわたって積分された I_λ の法線成分として定義され、式(2.6)と書き表される。

$$F_\lambda = \int_{\Omega} I_\lambda \cos\theta d\Omega \quad (2.6)$$

全波長に対する放射エネルギーの全放射フラックスは、単色の放射フラックス

スを電磁スペクトルの波長全域にわたって積分することにより得られる。

$$F = \int_0^{\infty} F_{\lambda} d\lambda \quad (2.7)$$

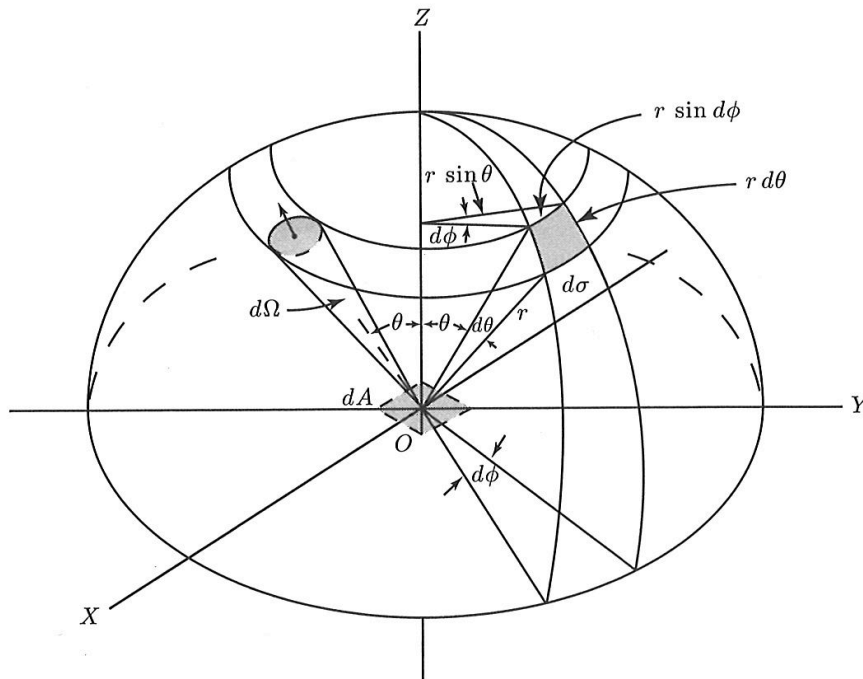


図 2.2 極座標で表された微小立体角の図^[1]

2.1.2 黒体放射とプランク関数

あらゆる物体は、その物体の温度が絶対零度でない限り、たえず電磁波を放射している。この電磁波を定量的に扱うため、黒体という理想的な物体が考え出された。黒体とは入ってきた全ての波長の電磁波を全て吸収する文字通り黒い物体である。黒体の放射フラックスは、その物体の性質と温度による。黒体放射の輝度を与えるプランク関数は振動数に対して次のように書ける。

$$B_{\nu}(T) = \frac{2h\nu^3}{c^2(e^{h\nu/kT} - 1)} \quad (2.8)$$

ここで $h = 6.6262 \times 10^{-34} \text{ Js}$ はプランク定数、 $c = 2.99793 \times 10^8 \text{ m/s}$ は光速、

$k = 1.3806 \times 10^{-23} \text{ J/K}$ はボルツマン定数であり、振動数 ν の黒体放射輝度は温度 T の関数である。この関数は、 T が大きくなるほど最大輝度が上昇する関数であり、太陽の場合は $T=5800\text{K}$ 、地球の場合は $T=255\text{K}$ の黒体放射に相当する。

2.2 太陽放射と地球放射

2.2.1 太陽エネルギー

地球のエネルギー源は太陽からの放射である。地球は公転軌道上を運行しながら、ほぼ恒常的に放射エネルギーを受け取っている。また、地球も太陽と同じように放射エネルギーを放出しており、エネルギーの均衡が保たれている。太陽から放出されるエネルギー量は、一年を通してほぼ同じであるが、地球の公転軌道が楕円形であることや地軸の傾きといった天文学的要因によって、地球が受け取る太陽放射エネルギー量は変化する。

図 2.3 のように、太陽と地球との距離は季節によって変化している。太陽と地球の平均距離は約 $1.5 \times 10^8 \text{ km}$ で、この距離が 1 天文単位 (=1AU) である。地球が最も太陽に近づく場所は近日点で、逆に遠ざかる場所は遠日点と呼ぶ。地球全体が太陽から受け取るエネルギーは距離の 2 乗に比例するため、地球と太陽の距離が 1AU のときのエネルギーと、近日点・遠日点のときのエネルギーを比較すると、±3%程度である。

太陽から地球が実際に受け取るエネルギー量については、2.3.3 節にて述べる。

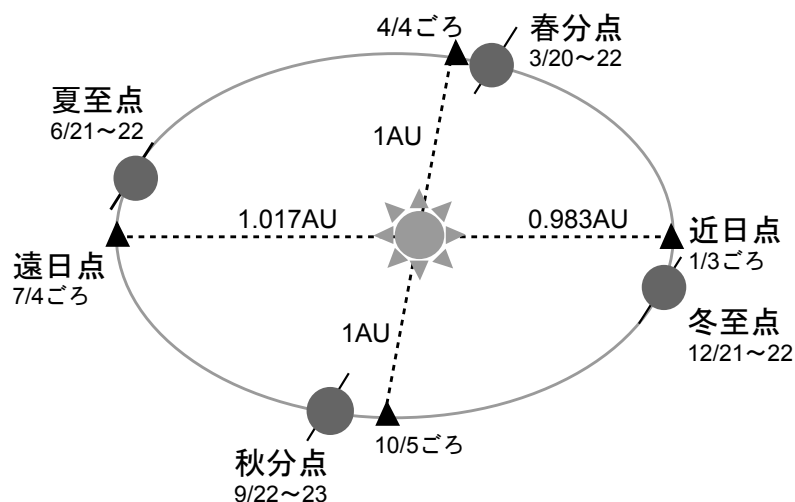


図 2.3 太陽と地球の距離の関係^[4]

2.2.2 太陽と地球のエネルギー収支

地球全体を一つのシステムとして考え、その中にあらゆる条件を平均的に取り入れたような大気と地表面からなる地球（大気-地表面系）を考える。この系に対し、大気の上端における放射平衡の条件下で、太陽放射と地球放射の配分を推算した結果を図 2.4 に示す。大気上端に入射した太陽放射は、地表面に届くまでに吸収、散乱を受け、約 3 割が大気圏外に反射される。残りの 7 割のうち、大気で 78W/m^2 、地表面によって 161W/m^2 が吸収される。吸収された太陽放射によって地球は暖められ、熱赤外線が射出される。その結果、宇宙空間に 239W/m^2 の地球放射が射出され、系は熱的平衡状態になる。

熱赤外域では、大気微量気体による吸収によって、地表面から射出された放射はすぐに吸収され、その場の温度に応じた熱放射が再射出されるために、各高度では上向きと同時に同じ程度の大きさの下向き熱赤外放射が再射出される。そのため、その高度より下の層は再射出された熱赤外放射によって暖められる。これを温室効果という。例えば、地表面では 396W/m^2 の熱放射が上向きに射出されることによって熱を失っているが、同時に大気から 333W/m^2 の再射出により暖められている。

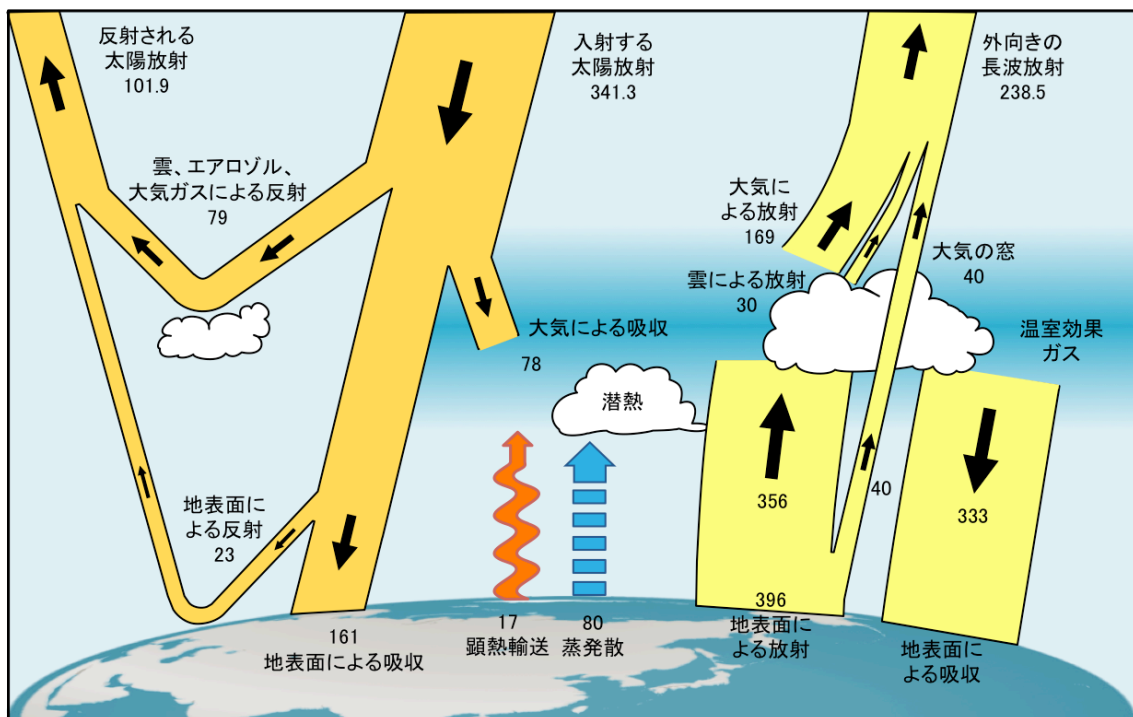


図 2.4 全球年平均の放射エネルギー (W/m^2) の収支^[5]

2.3 放射伝達過程の計算

図 2.4 で示した放射エネルギー収支は、放射伝達理論を用いて計算することができる。ここでは、基本的な放射伝達理論について記述する。

2.3.1 放射伝達方程式

気層の中に図 2.5 のような断面積 $d\sigma$ 、長さ ds の円筒を考え、これに振動数 ν から $\nu + d\nu$ の間で放射輝度 I_ν の放射が立体角 $d\omega$ で dt 時間に入射するものとする。その結果、この気柱を通過した放射輝度が $I_\nu + dI_\nu$ であるとすれば、この気層中で吸収された放射エネルギーは式 (2.9) となり、放射の減衰は式 (2.10) と表される。

$$(I_\nu + dI_\nu)d\sigma d\omega d\nu dt - I_\nu d\sigma d\omega d\nu dt = -k_\nu I_\nu \rho ds d\sigma d\omega d\nu dt \quad (2.9)$$

$$dI_\nu = -k_\nu \rho I_\nu ds \quad (2.10)$$

ここで ρ はこの気層の密度、 k_ν は振動数 ν の放射に対する質量消散係数（質量消散断面積）を表す。この消散係数は一般に吸収と散乱の両過程を含んでいる。一方、この気層を通過している間に、気層内で生じる放射の射出と他の方向からここで考えている方向への散乱が加わり、放射輝度は強められる。そこで、この射出と散乱によって放射が増強される係数を射出係数とすると、放射の増加は式 (2.10) の考え方と同様に式 (2.11) と表される。ただし、 j_ν は振動数 ν の放射に対する質量射出係数である。

$$dI_\nu = j_\nu \rho ds \quad (2.11)$$

したがって、式 (2.10) と式 (2.11) による二つの過程が同時に成立していると考えれば、実際の放射変化は式 (2.12) となる。

$$dI_\nu = -k_\nu \rho I_\nu ds + j_\nu \rho ds \quad (2.12)$$

さらに、放射源関数 J_ν を式 (2.13) のように定義すると式 (2.12) は式 (2.14) となる。

$$J_\nu \equiv j_\nu / k_\nu \quad (2.13)$$

$$\frac{dI_\nu}{k_\nu \rho ds} = -I_\nu + J_\nu \quad (2.14)$$

ここで J_ν は I_ν と同じく放射輝度の単位を持つ。式 (2.13) は、放射伝達方程式と
 言い、全ての放射伝達過程の議論の基礎となるものである。

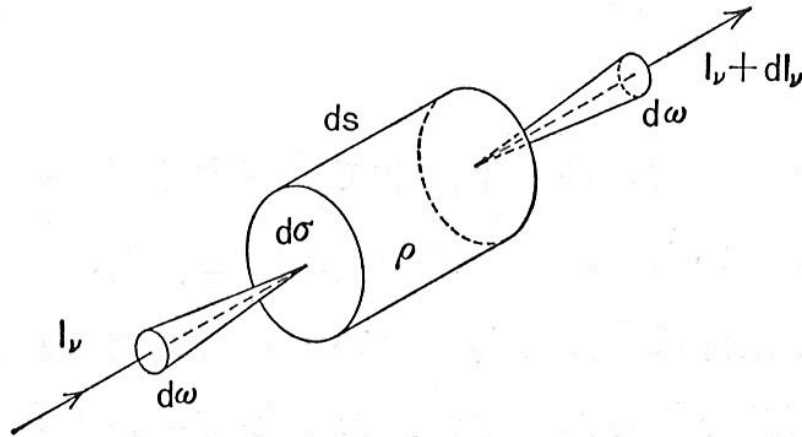


図 2.5 放射伝達概念^[2]

2.3.2 平行平面大気の放射伝達方程式

放射伝達方程式である式 (2.14) を基本とする、最も実用性の高い平行平面
 大気における放射伝達方程式について記述する。地球大気は、水平方向の広が
 りに対して鉛直方向の厚さは薄いので、平板状の気層とみなすことができる。
 つまり大気層を水平方向には均質な薄い平板状の気層の重なりとして扱うこと
 ができ、この近似方法を平行平面大気近似と呼ぶ。平行平面大気においては座
 標系を図 2.6 のように定め、放射の進行方向の距離を高さ z の関数として求める。
 図に従って s を z に変換すると、3次元空間で表した式 (2.14) は、式 (2.15) の
 ようになる。

$$-\cos \theta \frac{dI(z, \theta, \varphi)}{k\rho dz} = I(z, \theta, \varphi) - J(z, \theta, \varphi) \quad (2.15)$$

ここで、 θ は z 方向から測った放射伝達方向 s の天頂角であり、 φ は x 方向から測つ
 た方位角である。なお、記号を簡単にするためこの式以降、添字 ν を省略する。

大気の上端 ($z = \infty$) から測って垂直下向きに光学的厚さを式 (2.16) に定義

し、式 (2.17)、(2.18) とおく。

$$\tau = \int_z^\infty k\rho dz' \quad (2.16)$$

$$d\tau = -k\rho dz \quad (2.17)$$

$$\mu = \cos \theta \quad (2.18)$$

平行平面大気の放射伝達方程式は、 τ 、 μ 、 φ の関数として式 (2.19) となる。

$$\mu \frac{dI(\tau, \mu, \varphi)}{d\tau} = I(\tau, \mu, \varphi) - J(\tau, \mu, \varphi) \quad (2.19)$$

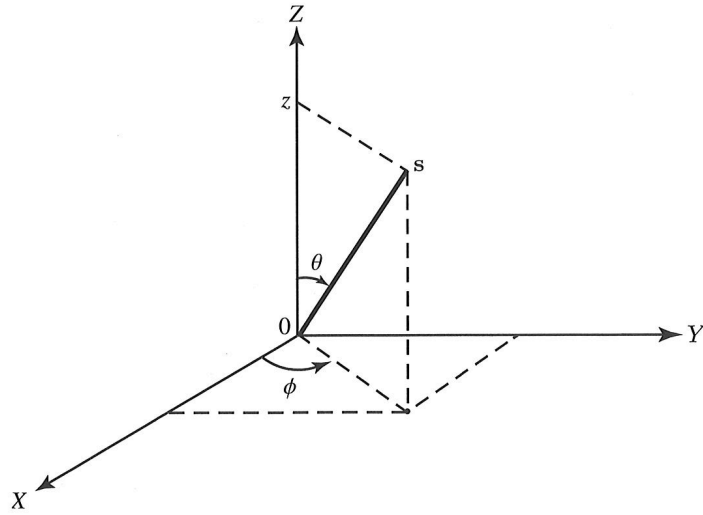


図 2.6 平行平面大気における放射伝達の座標系^[1]

図 2.6 で $\mu = \cos \theta > 0$ の方向に放射が進む場合を上向き放射とする。式 (2.19) に $e^{-\tau/\mu}$ を掛けると式 (2.20) となる。

$$\frac{d}{d\tau} \{ I(\tau, \mu, \varphi) e^{-\tau/\mu} \} = -\frac{1}{\mu} J(\tau, \mu, \varphi) e^{-\tau/\mu} \quad (2.20)$$

この両辺を図 2.7 に従って $\tau = \tau$ から $\tau = \tau_1$ まで積分すれば、 τ における上向きの放射輝度として式 (2.21) と書ける。

$$I(\tau, \mu, \varphi) = I(\tau_1, \mu, \varphi) e^{-(\tau_1 - \tau)/\mu} + \int_\tau^{\tau_1} J(t, \mu, \varphi) e^{-(t - \tau)/\mu} \frac{dt}{\mu} \quad (1 \geq \mu > 0) \quad (2.21)$$

ここで t は τ を表す補助変数である。

次に図 2.6 で $\mu = \cos \theta < 0$ の方向に放射が進む場合を下向き放射とする。
 $-\mu \equiv \mu$ と表して、式 (2.19) に $e^{-\tau/\mu}$ を掛ける。図 2.7 に示すように $\tau = 0$ から $\tau = \tau_*$ までの積分を行えば、 $\tau = \tau_*$ における下向き放射輝度は、式 (2.22) となる。

$$I(\tau_*, -\mu, \phi) = I(0, -\mu, \phi)e^{-\tau_*/\mu} + \int_0^{\tau_*} J(t, -\mu, \phi)e^{-(\tau_*-t)/\mu} \frac{dt}{\mu} \quad (1 \geq \mu > 0) \quad (2.22)$$

したがって、式 (2.21)、(2.22) によって有限大気中のある光学的厚さにおける上向き、下向き放射輝度を求めることができる。

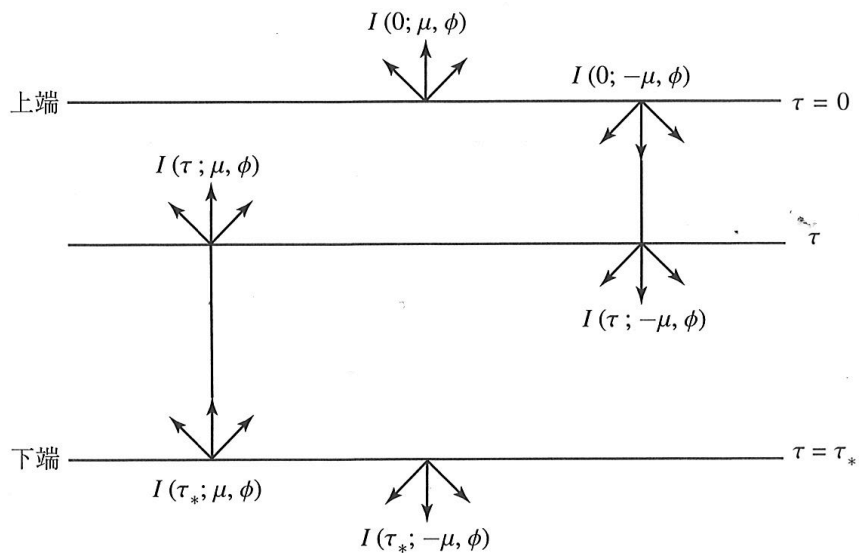


図 2.7 平行平面大気における放射輝度の概念図^[1]

2.3.4 放射の散乱と吸収

我々の目に届く光の多くは、光源から直接到達せず、散乱過程を経て間接的に到達する。散乱とは、電磁波の経路中の粒子が、入射波からエネルギーを連続的に分離して、あらゆる方向にそのエネルギーを再放射する物理過程である。大気中では、気体分子 ($10^{-4}\mu\text{m}$ 程度) から、エアロゾル ($1\mu\text{m}$ 程度)、水粒 ($10\mu\text{m}$ 程度)、氷晶 ($100\mu\text{m}$ 程度)、大きな雨粒 (1cm 程度) までの大きな範囲の粒子が散乱に関わっている。また、光の散乱が起こるとき、光の吸収を伴うことが多い。草は、赤色と青色の光を吸収して緑色の光を散乱するため、緑に見える。物体に吸収されたエネルギーは熱へ変換され、赤色と青色の光として存在しない。

2.3.1 節で記述した式 (2.9) の消散係数は吸収・散乱過程によるものである。吸収の場合は放射エネルギーの形態が変化し熱に変換されるのに対し、散乱では方向のみが変化しエネルギー変換は起こらない。この消散係数 k_ν は、それぞれの過程に応じて、質量吸収係数であり、また質量散乱係数でもある。

いま、散乱過程について考える。図 2.5 で示すように、立体角 $d\omega'$ にある入射光 I_ν が円筒 $d\phi ds$ で散乱されるとすると、散乱される放射エネルギーの割合は、式 (2.23) となり、この円筒の質量 $dm = \rho d\phi ds$ を考えれば、式 (2.24) となる。

$$k_\nu I_\nu \rho d\phi ds dv d\omega' \quad (2.23)$$

$$k_\nu I_\nu dm dv d\omega' \quad (2.24)$$

この放射エネルギーのうち入射光の進行方向から角 θ だけ離れた方向の立体角 $d\omega$ に散乱される割合は、散乱の角度分布を決める散乱分布関数 $p(\cos \theta)$ によって式 (2.25) と書き表せる。(以後、入射光側に ' を付けて表現する)

$$p(\cos \theta) \frac{d\omega}{4\pi} \cdot k_\nu I_\nu dm dv d\omega' \quad (2.25)$$

散乱分布関数の性質は、散乱にあずかる媒質によって大きく異なるが、その特性の概略を次に挙げる。

まず、式 (2.25) を散乱光の全立体角で積分すれば、式 (2.26) が散乱される全エネルギーの割合となる。

$$\int p(\cos \theta) \frac{d\omega}{4\pi} \cdot k_\nu I_\nu dm dv d\omega' \quad (2.26)$$

このとき、式 (2.27) であれば、入射した放射と散乱した放射は等しくなり、散乱過程でエネルギーの損失は無いことになる。

$$\int p(\cos \Theta) \frac{d\omega}{4\pi} = 1 \quad (2.27)$$

この場合、散乱分布関数は 1 に規格化されている。すなわち、式 (2.19) と定義し、これを単散乱アルベドと呼ぶ。 $\bar{\omega}_0 = 1$ ならば気層が完全に散乱過程だけの媒質であることを示す。 $\bar{\omega}_0 < 1$ の場合は吸仮定が存在し、 $1 - \bar{\omega}_0$ の割合で放射は吸収されて他のエネルギーに変換されていることになる。

2.3.5 太陽定数

太陽によって放出され地球の大気上端に入射する、光の波長の関数である電磁放射の分布は、太陽放射スペクトルと呼ばれている。太陽定数は、大気上端に達する太陽の全エネルギーを表す量である。太陽定数は、平均太陽-地球間距離において、太陽光線に対して垂直な面の単位面積を横切る太陽放射エネルギーフラックスとして定義され、 1366W/m^2 とされている。^[1]

図 2.8 に、 $5\mu\text{m}$ までの波長に対する 50cm^{-1} の波長区間で平均化された大気上端における太陽放射輝度の観測結果を示す。このデータは MODTRAN3.7 プログラム^[6]により提供された結果に基づき作成された。また、平均太陽-地球間距離を考慮した 5800K の温度の黒体放射も同図上に示されている。太陽放射の観測結果と黒体放射を比べるとおおよそ一致していることがわかる。太陽放射スペクトルの細かい凹凸は、太陽の大気成分（水素、ナトリウム、鉄等）の吸収により生じ、フラウンホーファー線と呼ばれている。

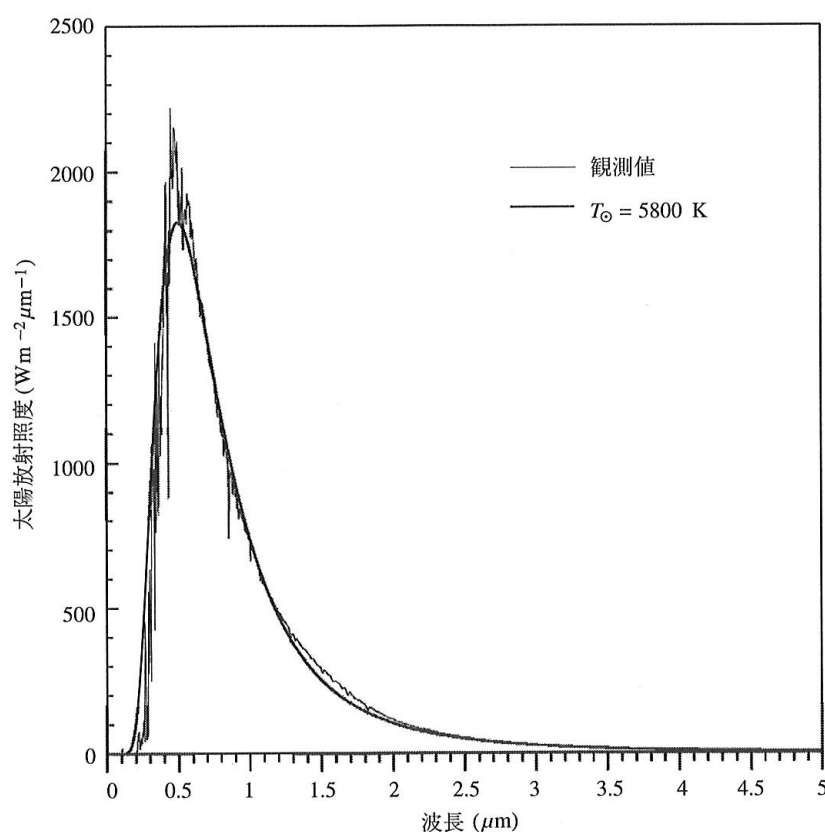


図 2.8 大気上端における波数区間 50cm^{-1} の太陽放射スペクトルと 5800K の温度の黒体放射フラックス^[1]

2.3.6 地表面の放射特性

図 2.4 に示す通り、地表面による反射は全球年平均で 23W/m^2 程度である。この値を算出するために、地表面の反射特性が非常に重要となる。本研究では、この地表面の反射特性を対象として、Rstar プログラムの改良を行った。ここでは、地球表面の放射パラメータの基本特性であるアルベドについて記述する。

アルベドとは、ある面に入射するフラックスに対する反射フラックスの割合として定義され、放射の波長域は一般に全波長に対する平均値とされる。基本的には、地球表面のアルベドはそれを構成している各々の表面の波長別、入射角度別の反射特性を合成したものである。代表的な表面の特徴を表 2.1 に示す。

表 2.1 地表面の反射特性^{[2][7][8]}

表面	分光特性	反射特性	反射率
土壌・ 岩石	1~2 μm が最大反射 湿気により減少	後方および前方散乱 砂は強い前方散乱 ローム*は弱い前方 散乱	5~45% 湿気により 5~20%減少 平滑面は高反射 日変化（低い太陽で高反射）
植生	0.5 μm 以下で低反射 0.5~0.55 μm で極大 0.68 μm で葉緑素吸収 0.7 μm で強い反射 2 μm 以上で減少 育成期に依存	強い後方散乱 弱い前方散乱	5~25% 日変化、低い太陽で高反射 年変化
水面	0.5~0.7 μm で最大 波と混濁度に依存	強い前方・後方散乱	低反射率 日変化（低い太陽で高反射） 波と混濁度に依存
雪氷	波長とともに減少 純度、湿り気に依存	鏡面反射と拡散反射 鏡面反射は入射角に 依存	25~80%

*ローム：砂・粘土がほとんど等分に含まれている風化堆積物

地表面反射の計算には単純な反射率だけでなく、表 2.1 に示すような地表面特性が重要になる場合がある。本研究は、地表面特性をより再現するため、双方向反射関数 BRDF（後述）の導入を試みる。BRDF の導入により、土壌、植生などのその地表面に適した反射特性を再現できると予想される。地表面反射の計算については、4.2 節にて説明する。

2.3.7 直達光と散乱光

太陽放射が大気中を通過する際、直達成分と散乱成分に分けることができる。直達成分は、太陽光球面から直接地上に到達する太陽放射であり、直達光と呼ばれる。散乱成分は、大気成分により散乱・反射して天空の全方向から届く太陽放射であり、散乱光と呼ばれる。直達光と散乱光の模式図を図 2.9 に示す。

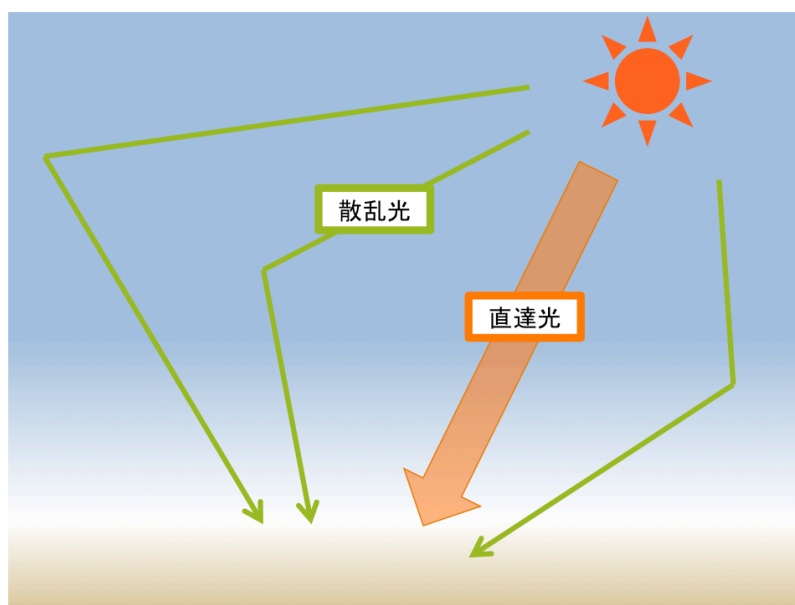


図 2.9 直達光と散乱光の模式図

第3章 放射伝達モデル

衛星が受け取る放射諸量を推定する場合や、衛星データから地表面反射率や大気の光学的厚さを推定する場合、放射伝達理論に基づくシミュレーションを行う必要がある。シミュレーションには放射伝達モデルと呼ばれるソフトウェアが用いられ、太陽天頂角、衛星天頂角を入力、また大気分子の高度分布、エアロゾルパラメータ（消散係数、単散乱アルベド、非対称因子など）の高度分布、地表面反射率などのパラメータを仮定し、放射伝達過程を通じて放射諸量を算出する。代表的な放射伝達モデルとして 6S、MODTRAN などがある。一般的に、2.3 節で記述した項目を計算し放射諸量を算出する。

3.1 Rstar

Rstar (*Radiance System for Transfer of Atmospheric Radiation*) は、東京大学大気海洋研究所の中島映至教授らが中心となって開発された放射計算プログラムである。このプログラムは衛星解析の現場で利用されており、現在は東京海洋大学の関口美保准教授によって管理されている。現在の最新版は *Rstar7* であり、本研究ではこの *Rstar7* の改良を行う。

Rstar7 は、0.17~1000 μm の波長域における大気・陸地・海洋システムでの放射場シミュレーションのための総合パッケージである。大気層に関しては海面上または地表面上に平衡平面大気が想定されている。気体吸収計算においては米国空軍の大気分子の吸収に関するデータベースである高分解能透過分子吸収線データベース (HIGHresolution TRANsmission molecular absorption database:HITRAN) の 2004 年のデータを利用した関数 k -分布法^[9] が用いられる。ここで考慮される気体は主要な 7 気体 (H_2O 、 CO_2 、 O_3 、 N_2O 、 CO 、 CH_4 、 O_2) である。 N_2 は、可視域及び紫外域以外では吸収特性がないため考慮しない。また、*rstar7* は 0.17~1000 μm までの任意の波長に関して、各気層での光学的厚さや単散乱アルベド、非等方性因子、さらに上下方向の放射フラックスの放射計算が可能である。加えて、波長をはじめ鉛直層数や雲・エアロゾルの種類などが設定可能となっている。大気のプロファイルに関しては LOWTRAN7^[10] 同様に、熱帯域・夏期中緯度域・冬期中緯度域・夏期高緯度域・冬期高緯度域および米国標準大気 (ISO2533:1975) の 6 通りの中から任意に選択できる。

Rstar にて放射伝達過程を算出する際に、入力する基本的なパラメータを表 3.1 に、入力する太陽と衛星の天頂角と方位角の関係を図 3.1 に示す。表 3.1 は、Rstar プログラム内の DATA ファイルから変更可能である。

表 3.1 Rstar における基本的な入力パラメータ

パラメータ	入力値	説明
ISOL	0 or 1	昼か夜の選択
INDA	0 or 1	放射フラックスのみの計算か、放射フラックスと放射輝度の計算を選択
INDG	0 or 1	地表面の対象を Lambert 面か海洋表面か選択
IMTHD	(-1~3)	放射フラックスかまたは放射強度の計算モデルの切り替え 詳しくは Nakajima and Tanaka (1988) ^[11] を参照
NDA	-	放射伝達方程式の天底角積分における半球ガウス積分点の数
NA0	1~	太陽天頂角の数
TH0	0~	太陽天頂角(°)
NA1	1~	衛星天頂角の数
TH1	0~	衛星天頂角(°)
NFI	1~	太陽と衛星の方位角の数
FI	0~	太陽と衛星の方位角(°)
NWL	-	波長の数
WL	0.2~	波長(micron)
GALB	-	INDG=0 ならば Lambert 面のアルベド値 INDG=1 ならば海面より 10m 上の風速値
IATM	1~6	大気プロファイルの選択
NLN	-	平行平面大気の種類の数
IPBF	1~50	平行平面大気の種類インターフェイス番号
TRH	0~1.0	相対湿度
ICN	1~4	CNPT の値を決定(総鉛直体積 or 光学的厚さ)
WLCN	-	光学的厚さを計測したスケーリング波長

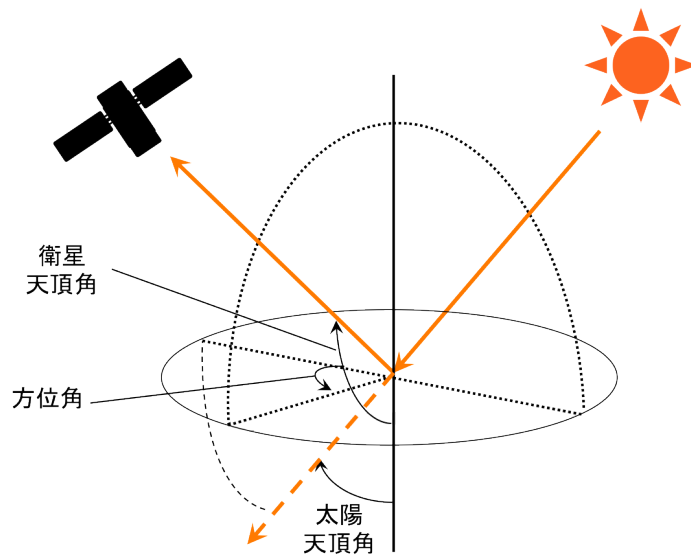


図 3.1 Rstar における太陽と衛星それぞれの天頂角と方位角

なお、表 3.1 に示してある鉛直層の数 NLN は本研究では 45 とし、IPBF を 46~1 とする。対応する高度を表 3.2 に示す。つまり、本研究では大気上端の高度が 100km、地表面の高度が 0km となる。

表 3.2 Rstar が算出する初期の対応高度 (km)

IPBF	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
altitude	0.0	1.0	2.0	3.0	4.0	5.0	6.0	7.0	8.0	9.0
IPBF	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
altitude	10.0	11.0	12.0	13.0	14.0	15.0	16.0	17.0	18.0	19.0
IPBF	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
altitude	20.0	21.0	22.0	23.0	24.0	25.0	27.5	30.0	32.5	35.0
IPBF	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40
altitude	37.50	40.00	42.50	45.00	47.50	50.00	55.00	60.00	65.00	70.00
IPBF	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50
altitude	75.0	80.0	85.0	90.0	95.0	100.0	105.0	110.0	115.0	120.0

3.2 6S

6S (*Second Simulation of a Satellite Signal in the Solar Spectrum*)^[12]とは、E. F. Vermote ら (1997)^[13]によって開発された放射伝達モデルの一つである。MODIS^[14]を用いた大気補正アルゴリズム内の計算に使用される。各衛星センサの応答関数が内蔵されており、MODTRAN^[15]などの一般的な放射伝達モデルに比べて衛星が観測する輝度値の計算が容易に行える。図 3.2、図 3.3 に入力パラメータと出力の例を示す。

6S では、地表面の反射計算において、Lambert 反射 (4.2.1 節) か BRDF を用いた反射 (4.2.2 節) かを選択式で計算することができる。本研究で改良した BRDF 導入後の Rstar と比較を行う。なお、比較の際は 6S version4.1 を用いた。

入力値	説明
0	(User-defined geometric conditions)
40.0 100.0 45.0 50.0 7 23	(SZA, SAZ, VZA, VAZ, month, day)
8	(User-defined molecular atmosphere model)
3.0 3.5	(Contents of H ₂ O-vapor (g/cm ²) & O ₃ (cm·atm))
4	(Aerosol model)
0.25 0.25 0.25 0.25	(% of dust-like, water-soluble, oceanic, & soot)
0	(Input of aerosol opt. thickness instead of visibility)
0.5	(Aerosol optical thickness at 550 nm)
-0.2	(Target at 0.2 km above the sea level)
-3.3	(Aircraft at 3.3 km above the ground level)
-1.5 -3.5	(H ₂ O-vapor & O ₃ under the aircraft are not available)
0.25	(Aerosol opt. thickness under the aircraft at 550 nm)
11	(AVHRR 1 (NOAA 9) Band)
1	(Non-uniform ground surface)
2 1 0.5	(Target reflect., environ. reflect., target radius (km))
1	(Request for atmospheric correction)
-0.1	(Parameter of the atmospheric correction)
4	(Ground surface is not polarized)

図 3.2 6S における入力パラメータ例^[a3]

```

*****
*
*           integrated values of      :
*           -----
*
*   apparent reflectance 0.0331332  appar. rad.(w/m2/sr/mic)  12.766
*           total gaseous transmittance 0.675
*
*****
*
*           coupling aerosol -wv      :
*           -----
*
*   wv above aerosol : 0.033      wv mixed with aerosol : 0.033
*           wv under aerosol : 0.033
*
*****
*
*           integrated values of      :
*           -----
*
*   app. polarized refl. 0.0015  app. pol. rad. (w/m2/sr/mic)  0.066
*           direction of the plane of polarization-27.35
*           total polarization ratio 0.044
*
*****
*
*           int. normalized values of :
*           -----
*
*           % of irradiance at ground level
*   % of direct irr.   % of diffuse irr.   % of enviro. irr
*           0.773      0.221      0.005
*
*           reflectance at satellite level
*   atm. intrin. ref.  environment ref.  target reflectance
*           0.015      0.004      0.014
*
*           int. absolute values of
*           -----
*
*           irr. at ground level (w/m2/mic)
*   direct solar irr.  atm. diffuse irr.  environment irr
*           453.572    127.012    3.163
*
*           rad at satel. level (w/m2/sr/mic)
*   atm. intrin. rad.  environment rad.  target radiance
*           5.668      1.631      5.467
*
*
*           int. funct filter (in mic)           int. sol. spect (in w/m2)
*           0.1174545                           185.589
*
*****

```

図 3.3 6S における出力例[a3]

3.2 MODTRAN

MODTRAN (*MODerate resolution atmospheric TRANsmission*)^[15]とは、US Air Force (アメリカ空軍) と Spectral Sciences 社が共同開発した放射伝達モデルである。紫外域から可視域、遠赤外域までをカバーした 0.2~100 μm の範囲の大気放射を対象としている。

図 3.4 に入力パラメータの例を示す。

MODTRAN は、地表面の反射計算において、Lambert 反射(4.2.1 節)か BRDF を用いた反射 (4.2.2 節) かを選択式で計算することができる。本研究で改良した BRDF 導入後の Rstar と比較を行う。なお、比較の際は MODTRAN4 を用いた。

```

M 4 3 0 1 0 0 0 0 0 0 1 0 -1 .0500
F 0F 0
A+ 1 1USS 0 0 0 0.000 0.000 0.000 0.000
    0.0 4.0 1.0 (CARD 2A+)
(This blank line must be here or this line should have zeros) (CARD 2A+)
40 0 0 0 (CARD 2D)
0.000e+00region #1 desert summer aerosol
.20 1.0167 .43495 .8797 .30 1.0167 .43495 .8797 .34 1.0194 .44735 .8857
.55 1.0000 .21935 .7980 .69 1.0370 .16743 .7666 1.06 1.1149 .03721 .7143
1.54 1.2084 .04348 .7689 2.00 1.0471 .04212 .8557 2.25 .90502 .03577 .8936
2.50 .77022 .05025 .9116 2.70 .66704 .08621 .9281 3.00 .62886 .11468 .9247
3.39 .81244 .12218 .8623 3.75 .78888 .10013 .8493 4.50 .67765 .10404 .8524
5.00 .60842 .10488 .8551 5.50 .51168 .11551 .8706 6.00 .36239 .15033 .9038
6.20 .33716 .15081 .9065 6.50 .31172 .15288 .9079 7.20 .67035 .20663 .7748
7.90 .28524 .12992 .8881 8.20 .30108 .18832 .8855 8.70 .60029 .25834 .7717
9.00 .82965 .33903 .6736 9.20 .83153 .34675 .6684 10.00 .80838 .34487 .6558
10.59 .69210 .27596 .6814 11.00 .66931 .25000 .6748 11.50 .62531 .23290 .6805
12.50 .52648 .20100 .7023 14.80 .49395 .19037 .6708 15.00 .48791 .18807 .6700
16.40 .46622 .17702 .6539 17.20 .46122 .17202 .6408 18.50 .44203 .18161 .6366
21.30 .48520 .26897 .5959 25.00 .45705 .22352 .5460 30.00 .40179 .25847 .5494
40.00 .36801 .23947 .4688
4.90000 180.00000
2500 2600 25 5
0

```

図 3.2 MODTRAN における入力パラメータ例^[15]

(入力値は CARD と呼ばれるパラメータ群によって与えられる。
詳細はマニュアル^[15]に記載。)

第 4 章 Rstar プログラムの改良

4.1 目的

Rstar は、吸収過程、散乱過程および太陽定数、プランク関数、地表面反射の計算を経て放射伝達過程を経て放射諸量を算出する。本研究では、地表面反射の計算に焦点を当てた。地表面は様々な物質で構成されており、各物質の屈折率や吸収率はそれぞれ特有な波長依存性を有しているため、地表面の反射率は固有の波長特性を持つ。Rstar では、地表面の構成物質を選択式で指定しこれらの計算処理することができる。また、海洋上では風速に依存する反射率を内部で計算することができる。しかし、反射は等方反射（Lambert 面反射）（4.2.1 節）を仮定しており、反射光の角度分布が均一なため、衛星解析等に用いるには不適切なケースもある。

そこで本研究では、Lambert 面反射の計算以外に BRDF を用いた地表面反射計算（4.2.2 節）ができるよう Rstar を改良する。一般に地表面からの反射光は、強度の違いがあり、Lambert 反射（等方反射）として扱うよりも、乱反射とする方が適当である。BRDF を導入することにより乱反射を計算することが可能となる。数種類の BRDF を導入し、Rstar における地表面の反射パターンに対応の幅を広げ、地表面反射の精度向上、ひいては衛星解析の精度の向上を目的とする。なお、プログラム内では、Lambert 反射による計算及び BRDF による計算を選択式で指定できるよう作成している。

4.2 地表面反射の計算方法

本節では、Rstar プログラムの地表面反射計算の改良に伴い追加した計算方法について記述する。従来の Rstar プログラムは、地表面反射の計算を行う際、地表面を Lambert 面と仮定し計算処理を行っていた。そこで、4.2.1 節では Lambert 面について記述し、その後、4.2.2 節にて本研究にて導入する BRDF について記述する。

4.2.1 Lambert 反射による計算処理

入射した光を散乱によってあらゆる方向に等しい放射輝度で反射するような仮想的な完全に粗い面を Lambert 面といい、このような反射を Lambert 反射、または等方反射という。Lambert 反射の模式図を図 4.1 に示す。反射率は、方向によらず $1-r$ で与えられる (r : 地表面アルベド)。Lambert 反射は、太陽放射フラックスを計算する場合などに用いる。

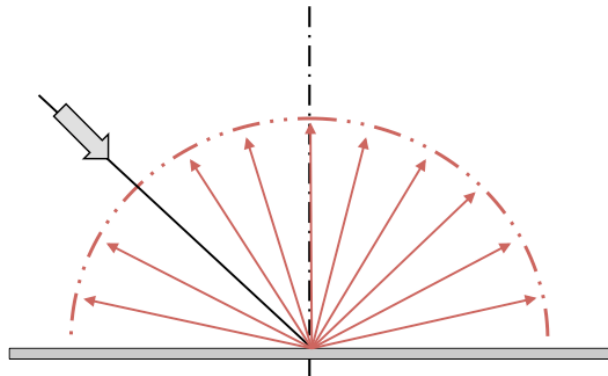


図 4.1 Lambert 反射の模式図

4.2.2 BRDF を用いた計算処理

双方向反射関数 BRDF(Bi-directional Reflectance Distribution Function)は、光の反射モデルの一つで物体表面の反射特性を表現する。この関数は、天頂角及び方位角を変数とし、入射輝度と反射輝度の比で表す。BRDF の一般式を式 (4.1) に、概略図を図 4.2 に示す。

$$R(\theta, \phi; \theta_0, \phi_0) = \frac{\pi I(\theta, \phi)}{F \cos \theta_0} \quad (4.1)$$

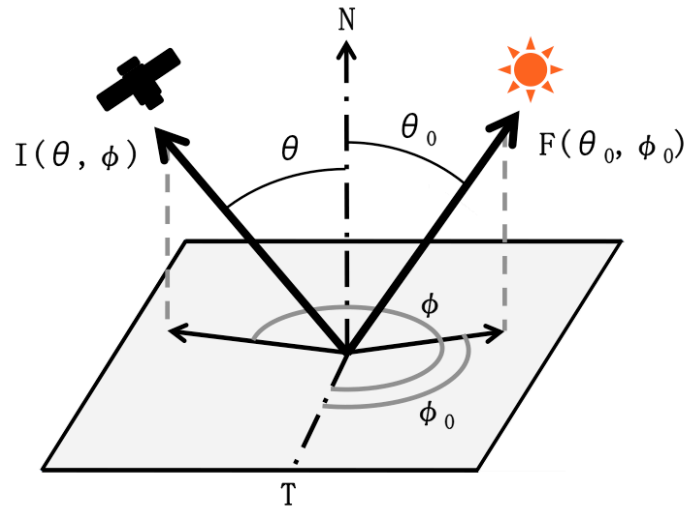


図 4.2 BRDF の概略図

なお、 $R(\theta, \phi; \theta_0, \phi_0)$ を双方向反射率、 θ, θ_0 を天頂角、 ϕ, ϕ_0 を方位角、 $I(\theta, \phi)$ を反射光の強度、 $F(\theta_0, \phi_0)$ を太陽放射フラックスとする。

BRDF は、入射光の波長に対する地球表面の光学的特性の影響を反映した乱反射を再現する事が可能である。例えば、植生や土壌からの反射は、波長依存が高いため、BRDF を用いるのが最適である。BRDF を導入することで図 4.3 に示すように、表 2.1 の地表面反射特性をより反映できると考える。本研究では、近似式を用いてモデル化した 2 つの BRDF を Rstar に組み込む。次節にて、モデル化した BRDF について説明する。

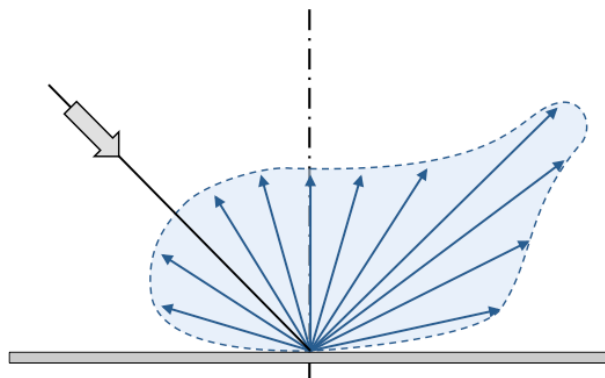


図 4.3 BRDF を用いた乱反射の模式図

4.3 Rstar プログラムに導入する BRDF モデル

Rstar に導入する BRDF のモデルは HAPKE^{[16][17][18]} および RAHMAN^{[19][20]} の 2 つである。この節でそれぞれのモデルの説明をする。

4.3.1 HAPKE モデル

Hapke (1981) ^[16]によると、無次元粒子からなる媒質の双方向反射関数の解析式は、放射伝達理論の基本原理に基づき導くことができる。この Hapke による双方向反射関数は、単散乱放射輝度が正確に導き出される。一方、多重散乱放射輝度は、表面を構成する散乱体が等方性であると仮定して 2 つの光路の近似から導き出す。

(θ_s, ϕ_s) 方向からの太陽によって地表面が照らされ、 (θ_v, ϕ_v) 方向から観測するときの双方向反射関数 ρ を考える。同じ条件下で完全に反射するランバート面の反射率に関して正規化すると、双方向反射関数は式 (4.2) となる。

$$\rho(\theta_s, \phi_s, \theta_v, \phi_v) = \frac{\omega}{4} \frac{1}{\mu_s + \mu_v} \{ [1 + B(\Theta)] P(\Theta) + H(\mu_s) H(\mu_v) - 1 \} \quad (4.2)$$

ここで、 ω は、媒体粒子の平均単散乱アルベド、 $\mu_s = \cos(\theta_s)$ 、 $\mu_v = \cos(\theta_v)$ とする。また、 Θ は、入射光と射出光間での位相角とし、式 (4.3) のように定義する。

$$\cos(\Theta) = \cos(\theta_s) \cos(\theta_v) + \sin(\theta_s) \sin(\theta_v) \cos(\phi_s - \phi_v) \quad (4.3)$$

$B(\Theta)$ は、ホットスポット効果 (*Hot spot effect*) ^[21] を説明する後方散乱関数であり、式 (4.4) のように書ける。ホットスポット効果は、例えば植生や土壌の状態によっては、後方散乱にあたる方向で太陽光の反射が特徴的に強く観測される現象である。

$$B(\Theta) = \frac{S(0)}{\omega P(0) [1 + (1/h) \tan(\Theta/2)]} \quad (4.4)$$

ただし、 $S(0)$ および h をホットスポットの振幅及び幅とする。

$P(\Theta)$ は、Henyey - Greenstein 関数^[22] によって仮定された媒体粒子の平均位相関数であり式 (4.5) のように書ける。

$$P(\theta) = \frac{1-g^2}{[1+g^2-2g \cos(\theta)]^{3/2}} \quad (4.5)$$

ただし、 g を非対称因子とし、-1 から 1 の範囲の値を取るものとする。

$H(\mu)$ は、多重散乱を考慮する関数とし、式 (4.6) のように書ける。

$$H(\mu) = \frac{1+2\mu}{1+2(1-\omega)^{1/2}\mu} \quad (4.6)$$

以上より、地表面の反射特性を表すパラメータは $\omega, g, S(0), h$ の4つとなる。例として、対象とする地表面をクローバー畑とすると、地表面の反射特性を表すパラメータは表 4.1 のようになり、その時の反射率を図 4.4 に示す。

表 4.1 地表面パラメータ (対象: クローバー畑) [18]

ω	0.101
g	-0.263
$S(0)$	0.589
h	0.046

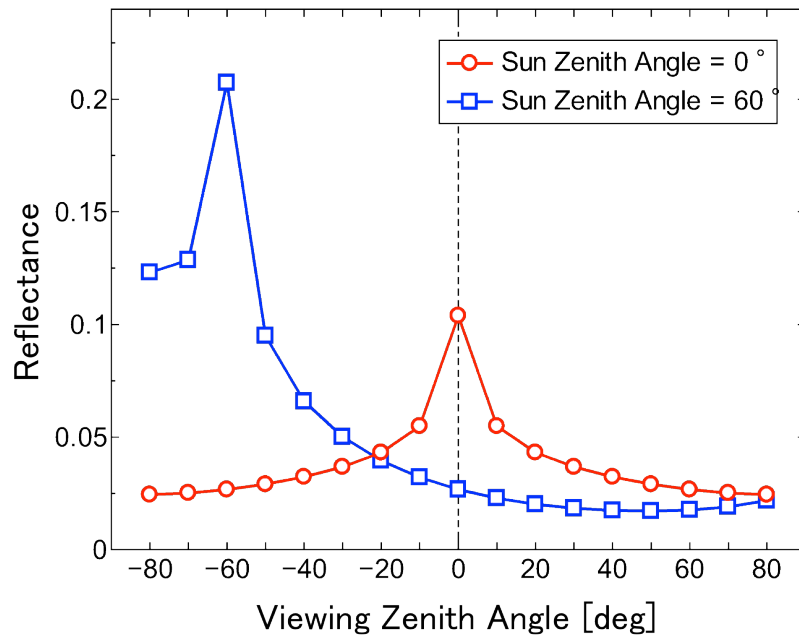


図 4.4 HAPKE モデルの反射特性

(太陽天頂角が 0、60 度ときの衛星天頂角への反射率)

4.3.1 RAHMAN モデル

Rahman ら (1993) [19][20]によると、双方向反射関数は3つのパラメータに基づいて導くことができる。可視および近赤外スペクトルの任意の地表面において半経験的にモデル化される。 (θ_s, ϕ_s) 方向からの太陽によって地表面が照らされ、 (θ_v, ϕ_v) 方向から観測するときの双方向反射関数 ρ は、式 (4.7) で与えられる。

$$\rho(\theta_s, \phi_s, \theta_v, \phi_v) = \rho_0 \frac{\cos^{k-1} \theta_s \cos^{k-1} \theta_v}{(\cos \theta_s + \cos \theta_v)^{1-k}} F(\Theta) [1 + R(G)] \quad (4.7)$$

ここで、 ρ_0 は表面反射率の強度を与える任意の値のパラメータであり、 k は表面の異方性のレベルを示す構造パラメータである。 $F(\Theta)$ は Henyey - Greenstein 関数を改変したものであり、式 (4.8) のように定義される。

$$F(\Theta) = \frac{1-g^2}{[1+g^2-2g \cos(\pi-\Theta)]^{1.5}} \quad (4.8)$$

ただし、位相角 Θ は式 (4.9) で与えられ、非対称因子 g は、前方散乱($0 \leq g \leq +1$)および後方散乱($-1 \leq g \leq 0$)の散乱量を制御する。

$$\cos \Theta = \cos \theta_s \cos \theta_v + \sin \theta_s \sin \theta_v \cos(\phi_s - \phi_v) \quad (4.9)$$

また、 $R(G)$ はホットスポット効果を説明する関数であり、式 (4.10) のように定義される。

$$R(G) = \frac{1-\rho_0}{1+G} \quad (4.10)$$

ただし、幾何学的因子 G は式 (4.11) で与えられる。

$$G = [\tan^2 \theta_s + \tan^2 \theta_v - 2 \tan \theta_s \tan \theta_v \cos(\phi_s - \phi_v)]^{1/2} \quad (4.11)$$

以上より、RAHMAN モデルにおいて双方向反射関数の地表面パラメータは ρ_0, g, k の3つが必要となる。例として、対象とする地表面をクローバー畑とす

ると、地表面の反射特性を表すパラメータは表 4.2 のようになり、その時の反射率を図 4.5 に示す。

表 4.2 地表面パラメータ (対象：クローバー畑) [19]

ρ_0	0.012
g	-0.391
k	0.811

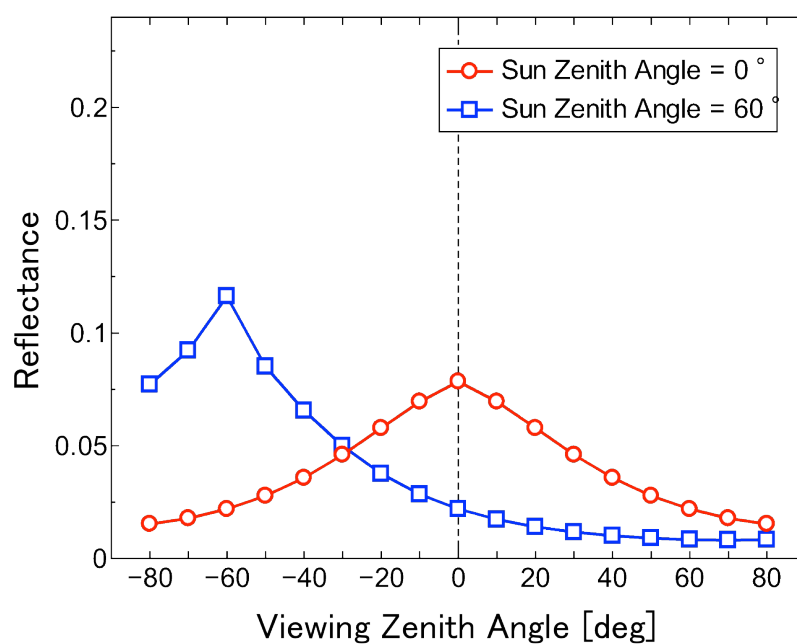


図 4.5 RAHMAN モデルの反射特性

(太陽天頂角が 0、60 度ときの衛星天頂角への反射率)

4.4 Rstar プログラムの変更箇所

BRDF の導入に当たって、Rstar プログラムの変更箇所について説明する。

図 4.6 に示す通り、Rstar プログラム内ではメインプログラム main.f から始まり、様々な過程を経て地表面を計算するサブルーチン ftrn21 へ到達する。(ここでは‘様々な過程’について説明はしない。詳しくは Rstar プログラムのソース (<http://157.82.240.167/~clastr/>) を参照。)

BRDF 導入前は、ftrn21 内でユーザーが選択した Lambert 反射または海面反射の計算を行っていた。上記 2 つのモデルの他に BRDF モデルを ftrn21 へ 2 つ追加することで、ユーザーは合計 4 つの中から選択して反射行列の計算を行うことができる。計算方法の変更は、DATA ファイルの INDG (表 3.1) の値を変更することで容易にできる。なお、ftrn21 変更に伴い、rtrn21 の変更も行っている。プログラム内の具体的な変更箇所に着いては補章にて記述する。

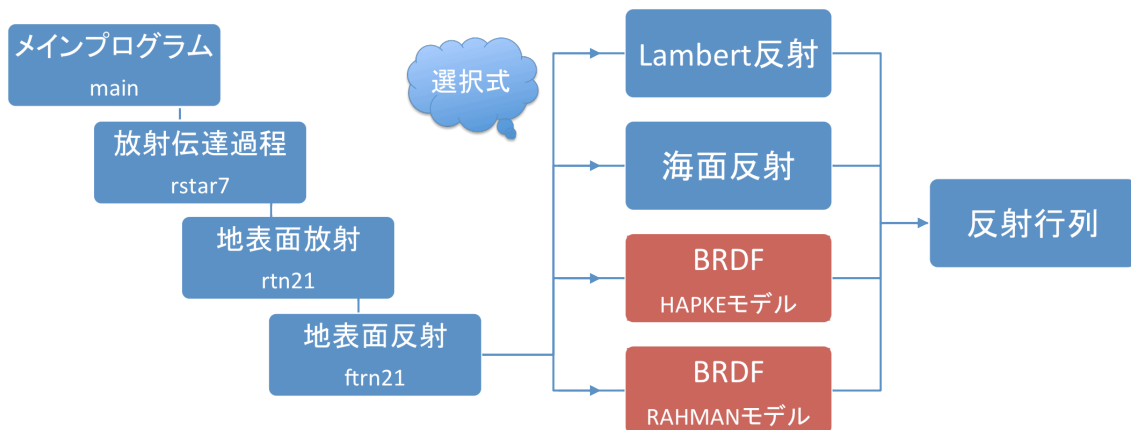


図 4.6 Rstar プログラムの階層の概略図

第 5 章 BRDF 導入後の比較

5.1 比較対象と計算条件

導入した BRDF を用いて、地表面特性が大きく反映される放射輝度を計算する。放射輝度は、大気上端で衛星が受け取る量を算出するものとする。計算した結果は、表 5.1 のように他の手法で計算した放射輝度と比較を行う。なお、それぞれの手法で計算する際、計算条件を表 5.2 のように合わせる。

表 5.1 比較対象と対応図番号

放射伝達モデル： 計算方法：	Rstar BRDF(HAPKE)
Rstar BRDF(RAHMAN)	図 5.2～図 5.5
Rstar Lambert	図 5.6～図 5.8
6S BRDF(HAPKE)	図 5.9～図 5.11、 図 5.14～図 5.15
MODTRAN BRDF(HAPKE)	図 5.16～図 5.20

表 5.2 計算条件

大気状態	US62 *1
エアロゾル	無し
対象波長	0.5 μm
太陽定数	1935.5 $\text{W}/\text{m}^2/\mu\text{m}$ *2
地表面	陸地 (クローバ畑)
大気補正	無し

*1 : U.S.標準大気モデル (1962 版)。

*2 : 波長 0.5 μm のときの太陽定数 (図 2.8 を参照)

また、比較のため、図 5.1 に示すように太陽と衛星の位置を平面的にし、法線 N からそれぞれの天頂角を定義する。以後、図 5.1 に示すような太陽天頂角を SZA (Sun Zenith Angle)、衛星天頂角を VZA (Viewing Zenith Angle) と表記する。

なお、この場合の方位角は、太陽方位角を 0° で固定し、 $VZA \geq 0$ のとき衛星方位角 0° 、 $VZA < 0$ のとき衛星方位角 180° とする。

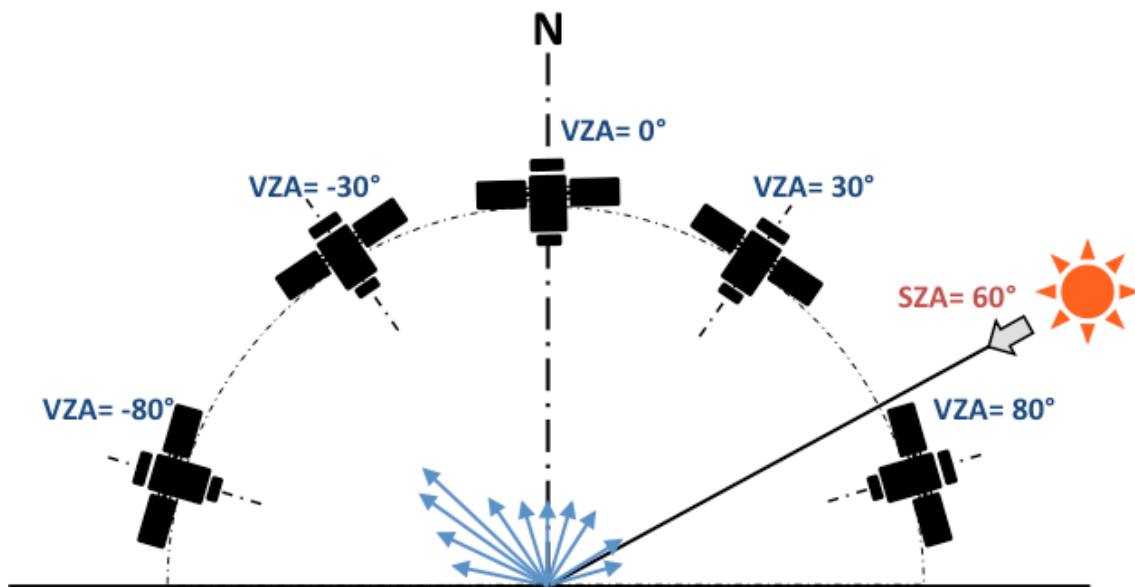


図 5.1 太陽天頂角 (Sun Zenith Angle ; SZA) と衛星天頂角 (Viewing Zenith Angle ; VZA) の関係

5.2 放射輝度計算結果

5.2.1 Rstar - BRDF(HAPKE)と Rstar - BRDF(RAHMAN)の計算結果

ここでは、Rstar にて BRDF (HAPKE モデル) の反射計算過程を経て出力した放射輝度 (以下 Rstar - BRDF(HAPKE)とする) と Rstar にて BRDF (RAHMAN) 反射計算過程を経て出力した放射輝度 (以下 Rstar - BRDF(RAHMAN)とする) の計算結果と比較について記述する。

図 5.2、図 5.3 に、 SAZ が 0° 、 20° 、 40° 、 60° に変化した時の Rstar - BRDF(HAPKE)と Rstar - BRDF(RAHMAN)を示す。また、Rstar - BRDF(HAPKE)と Rstar - BRDF(RAHMAN)の比較を図 5.4、図 5.5 に示す。

式 2.5 からわかるように、一般的に観測地点の天頂角が大きくなるほど放射輝度は増加する。図 5.2 を見ると、 SAZ の値に関係なく VZA の絶対値が大きくなるほど放射輝度は増していくのがわかる。また、図 5.2 では、 $SAZ=0\sim 60^\circ$ 全てのグラフにおいて放射輝度が局所的に増大している箇所がある。これは、図 4.4 に示してある BRDF による反射特性の影響が大きく反映されたためであると考えられる。図 5.3 も同様に BRDF による反射特性が大きく反映されている。

しかし、図 5.4、図 5.5 からわかる通り Rstar - BRDF(HAPKE)と Rstar - BRDF(RAHMAN)では、放射輝度に違いがある。HAPKE モデルでは、放射伝達の基本原理より理論的に提案されたモデルである。一方、RAHMAN モデルは、半経験的な手法でより実用的にシミュレーションできるモデルとして開発された。そのため反射特性に差が生じ、結果、図 5.4、図 5.5 のように放射輝度に違いが出たと推察される。

HAPKE モデルは、実測データとの比較・検証例が多くあり、かつ放射伝達の基本原理から理論的に導かれているため BRDF モデルの基礎となることが多い。^[23]そのため、以下の比較には HAPKE モデルを用いる。

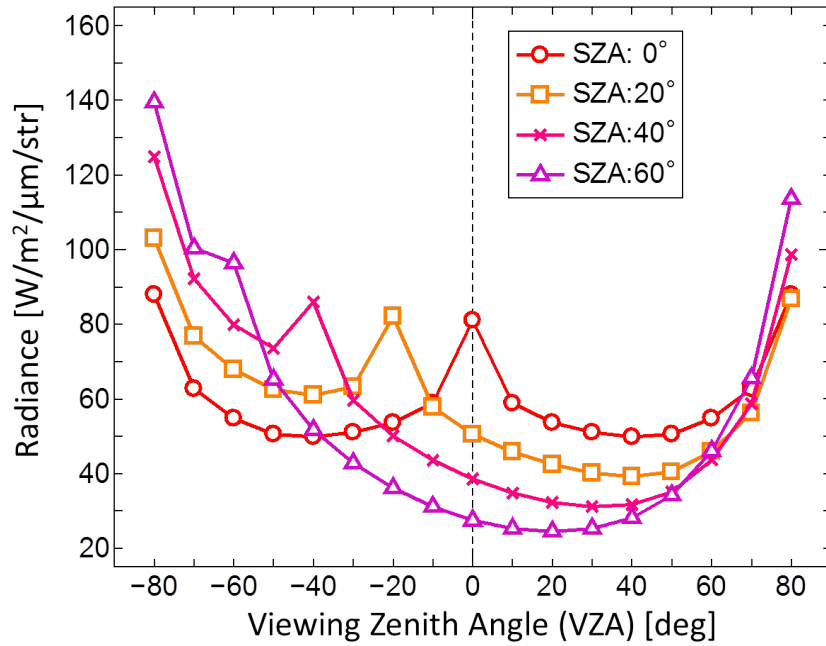


図 5.2 Rstar – BRDF(HAPKE)で計算した放射輝度 (赤、橙、桃色、紫はそれぞれ太陽天頂角が 0 度、20 度、40 度、60 度の結果を示す)

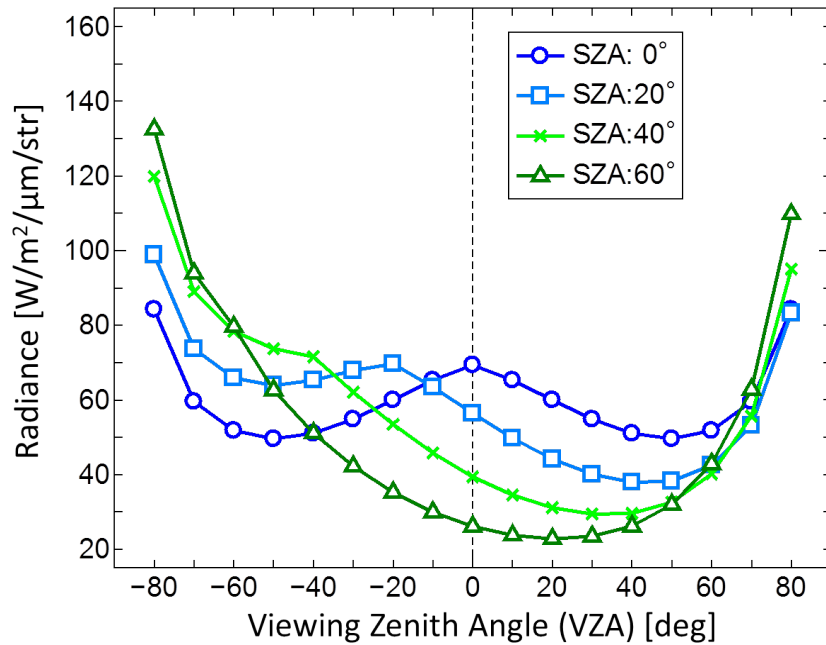


図 5.3 Rstar – BRDF(RAHMAN) で計算した放射輝度 (青、水色、黄緑、緑はそれぞれ太陽天頂角が 0 度、20 度、40 度、60 度の結果を示す)

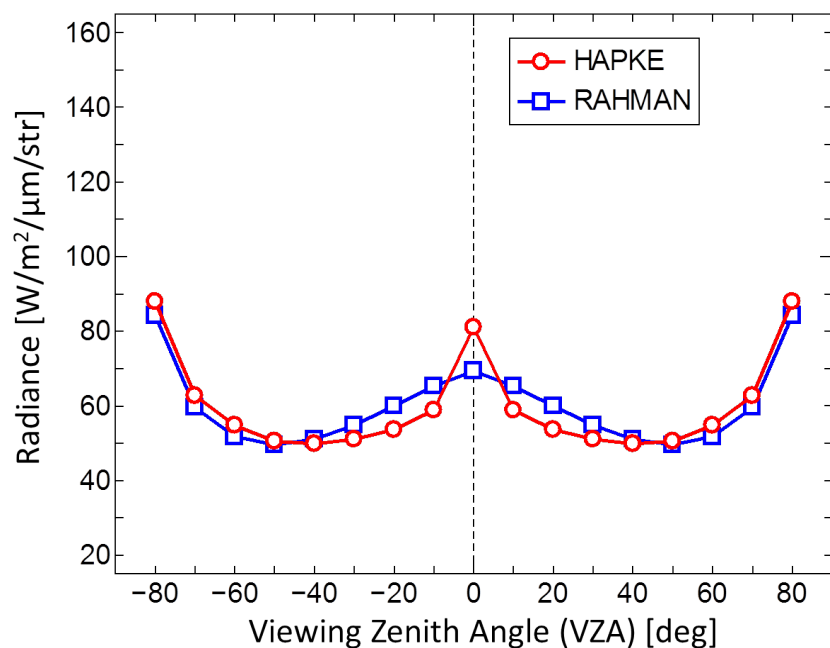


図 5.4 Rstar – BRDF(HAPKE)と Rstar – BRDF(RAHMAN)で計算した放射輝度 (SZA=0°)

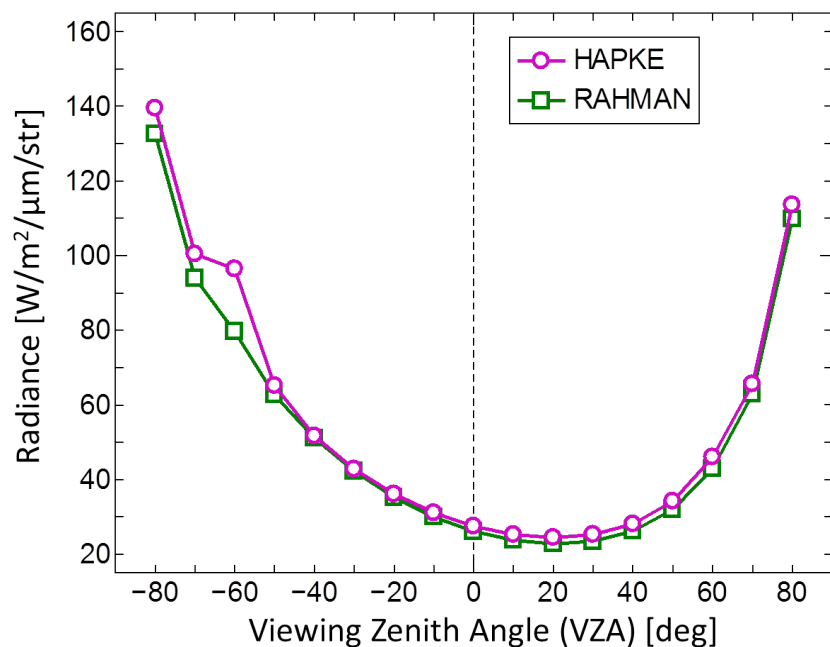


図 5.5 Rstar – BRDF(HAPKE)と Rstar – BRDF(RAHMAN)で計算した放射輝度 (SZA=60°)

5.2.2 Rstar - BRDF と Rstar - Lambert の比較

ここでは、Rstar - BRDF と Rstar にて Lambert 反射計算過程を経て出力した放射輝度（以下 Rstar - Lambert とする）を比較する。

なお、Lambert 反射の計算の際のアルベド値は、計算条件を合わせるため図 4.4 に示してある HAPKE モデルでの反射率の平均値を取る。平均値の計算には、式 (5.1) に示すように '重み' $\cos \theta_v$ を含んでいる。ただし、 ρ は双方向反射関数、 θ_v は衛星天頂角である。

$$albedo = \frac{\int_{-80}^{80} \rho \cdot \cos \theta_v d\theta_v}{\int_{-80}^{80} \cos \theta_v d\theta_v} \quad (5.1)$$

図 5.6 に SZA が 0°、20°、40°、60° に変化した時の Rstar - Lambert を示す。BRDF モデルと同様に、VZA の絶対値が大きくなるほど放射輝度は増していく。しかし、BRDF モデルと違い局所的な放射輝度の増大は見られない。Lambert 反射ではあらゆる方向へ等方的に反射するため、BRDF モデルのような反射特性は現れず、図 5.6 のような放射輝度となる。

図 5.7 と図 5.8 に、SZA が 0°、60° の時の Rstar - BRDF と Rstar - Lambert の比較を示す。Rstar - BRDF と Rstar - Lambert を比較すると、当然ながら BRDF の反射特性による違いがあるのがわかる。2 つの差異の最大値は、SZA=0° では 25.2 W/m²/μm/str (VZA=0°)、SZA=60° では 63.0 W/m²/μm/str (VZA=60°) となった。

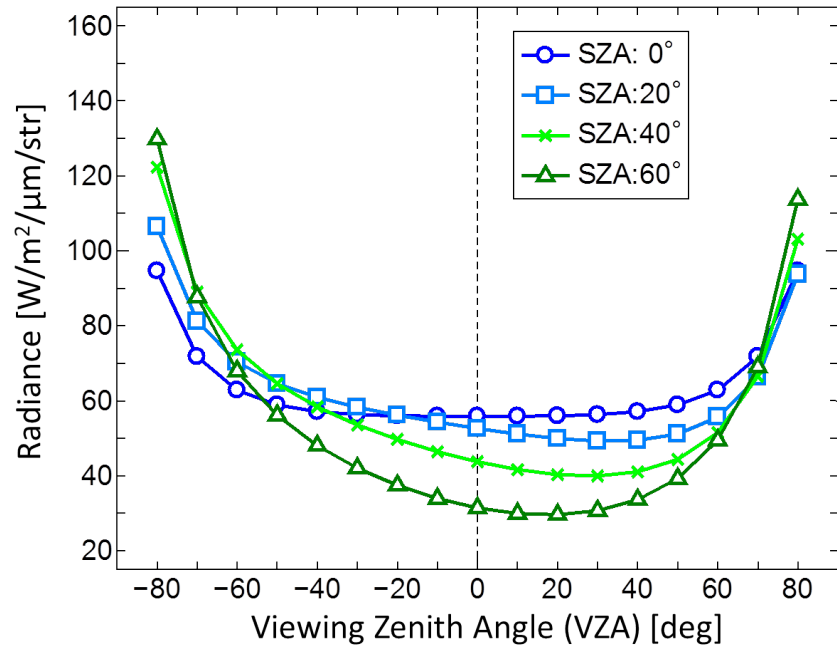


図 5.6 Rstar – Lambert で計算した放射輝度（青、水色、黄緑、緑はそれぞれ太陽天頂角が 0°、20°、40°、60°の結果を示す）

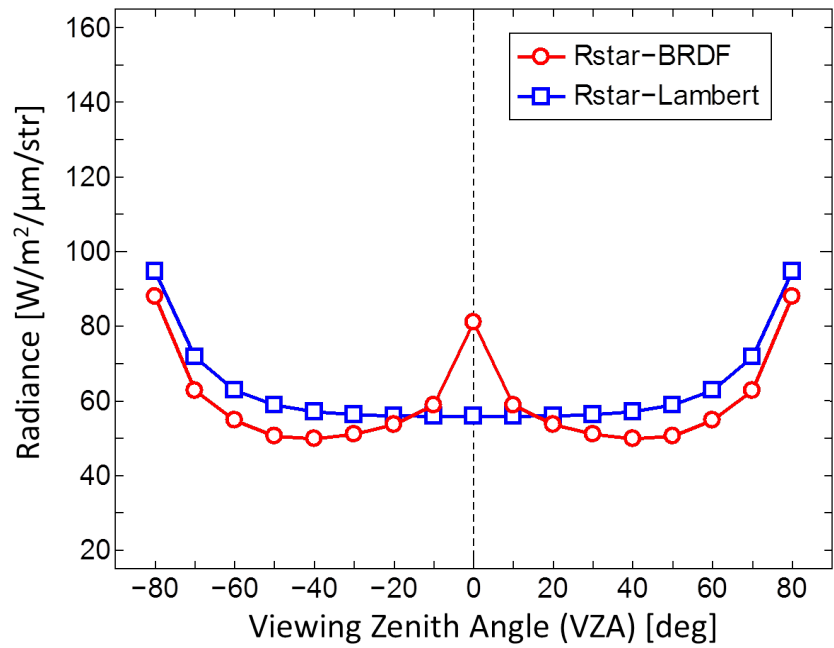


図 5.7 Rstar – BRDF と Rstar – Lambert で計算した放射輝度 (SZA=0°)

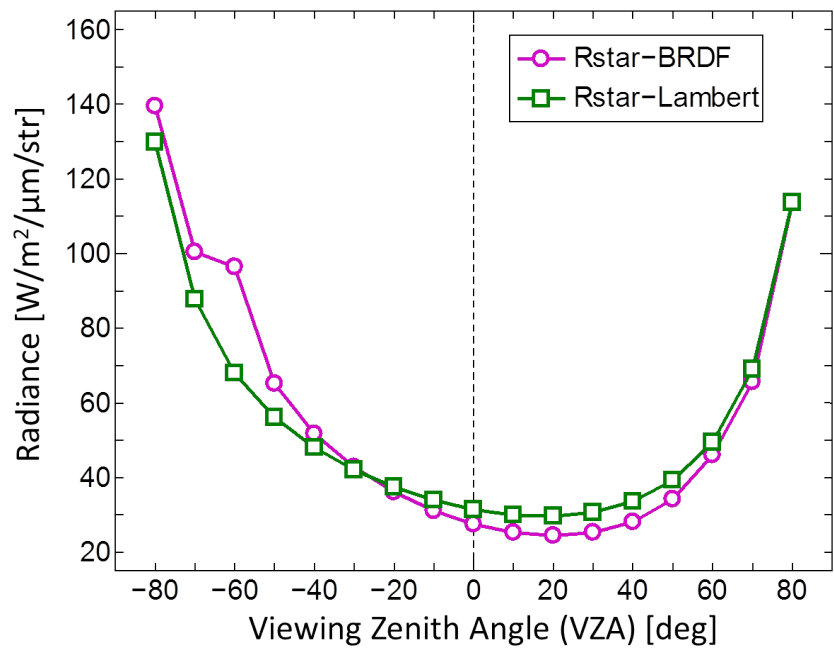


図 5.8 Rstar – BRDF と Rstar – Lambert で計算した放射輝度 (SZA=60°)

5.3 他の放射伝達モデルとの比較

Rstar - BRDF の計算結果の精度を検討するため、他の研究機関が開発した放射伝達モデルと比較を行う。比較対象には 6S と MODTRAN を用いた。

5.3.1 Rstar - Lambert と 6S - Lambert と MODTRAN - Lambert の比較

Rstar - BRDF と 6S、MODTRAN との比較を行う前に、6S、MODTRAN が比較対象として適しているか確認を行う。

Rstar - Lambert と、6S にて Lambert 反射計算過程を経て出力した放射輝度（以下 6S - Lambert とする）と、MODTRAN にて Lambert 反射計算過程を経て出力した放射輝度（以下 MODTRAN - Lambert とする）の 3 つを比較する。

図 5.9、図 5.10 に Rstar - Lambert と 6S - Lambert と MODTRAN - Lambert の比較を示す。図 5.9 と図 5.10 を見ると Rstar - Lambert と 6S - Lambert と MODTRAN - Lambert のグラフはほぼ一致する。つまり、Lambert 反射計算過程を経て出力した放射輝度に関して言えば、Rstar は、6S、MODTRAN とほぼ同じ精度であると言える。また、仮に Rstar - BRDF の計算結果が正しく出力されている場合、6S、MODTRAN でも同様な計算を行えば、近い値が出力されると予想される。従って、以下の比較に 6S と MODTRAN を用いる。

Rstar - Lambert と 6S - Lambert の差異の最大値は、 $SZA=0^\circ$ のときでは $4.8 \text{ W/m}^2/\mu\text{m/str}$ ($VZA=-80^\circ, 80^\circ$)、 $SZA=60^\circ$ のときでは $2.5 \text{ W/m}^2/\mu\text{m/str}$ ($VZA=80^\circ$) となった。Rstar - Lambert と MODTRAN - Lambert の差異の最大値は、 $SZA=0^\circ$ のときでは $4.5 \text{ W/m}^2/\mu\text{m/str}$ ($VZA=-80^\circ, 80^\circ$)、 $SZA=60^\circ$ のときでは $11.4 \text{ W/m}^2/\mu\text{m/str}$ ($VZA=80^\circ$) となった。

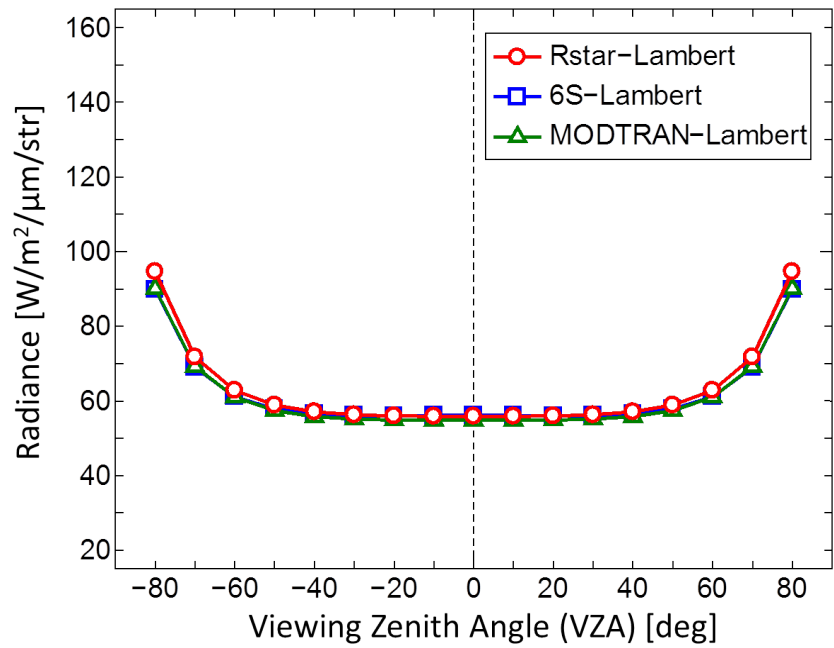


図 5.9 Rstar - Lambert と 6S - Lambert と MODTRAN - Lambert で計算した放射輝度 (SZA=0°)

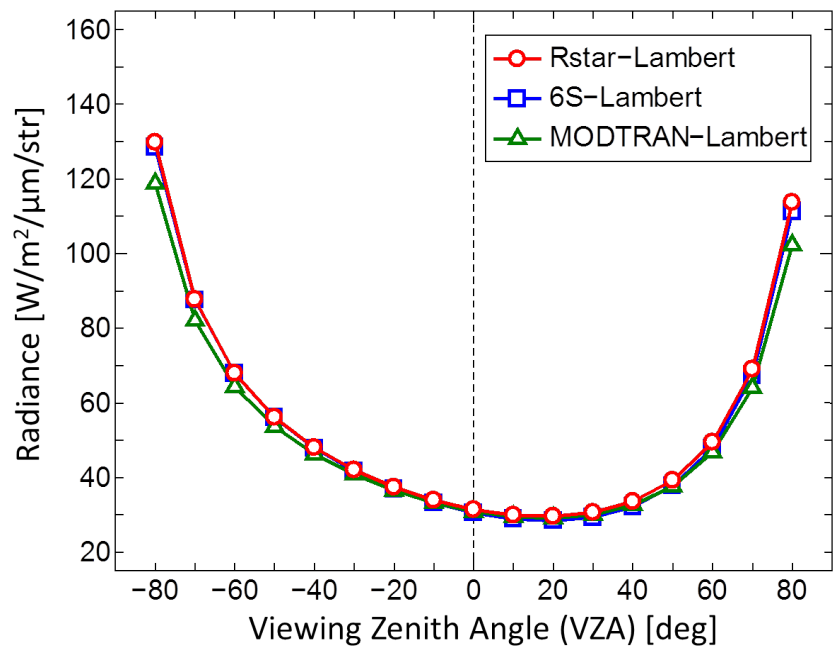


図 5.9 Rstar - Lambert と 6S - Lambert と MODTRAN - Lambert で計算した放射輝度 (SZA=60°)

5.3.2 Rstar - BRDF と 6S - BRDF の比較

ここでは、Rstar - BRDF と 6S にて HAPKE モデルを選択し、BRDF 反射計算過程を経て出力した放射輝度（以下 6S - BRDF とする）を比較する。

図 5.9 に SZA が 0°、20°、40°、60° に変化した時の 6S - BRDF を示す。また、Rstar - BRDF と 6S - BRDF の比較を図 5.10、図 5.11 に示す。図 5.10 と図 5.11 を見ると Rstar - BRDF と 6S - BRDF のグラフはほぼ一致する。Rstar と 6S で用いた BRDF モデルは同じである。そのため、Rstar - BRDF と 6S - BRDF の反射特性は同じとなり、算出する放射輝度のグラフは近い値となる。二つの差異の最大値は、SZA=0° のときでは $4.5 \text{ W/m}^2/\mu\text{m/str}$ (VZA=-80°,80°)、SZA=60° のときでは $4.7 \text{ W/m}^2/\mu\text{m/str}$ (VZA=80°) となった。

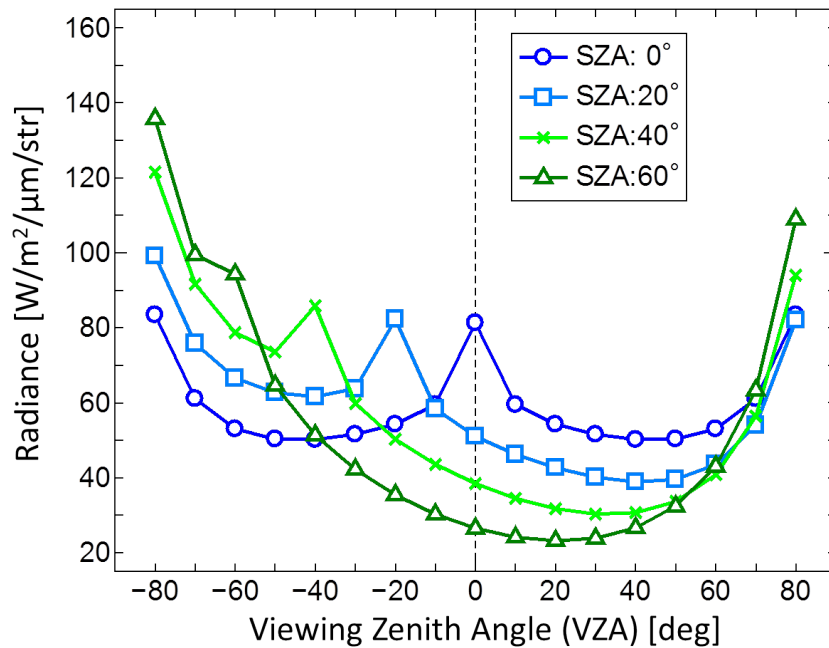


図 5.9 6S - BRDF で計算した放射輝度（青、水色、黄緑、緑はそれぞれ太陽天頂角が 0°、20°、40°、60°の結果を示す）

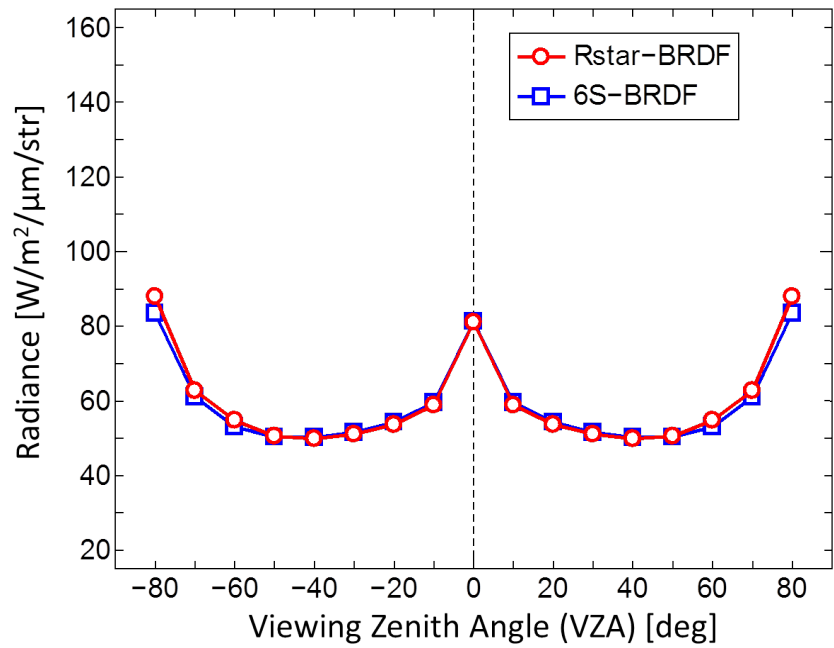


図 5.10 Rstar - BRDF と 6S - BRDF で計算した放射輝度 (SZA=0°)

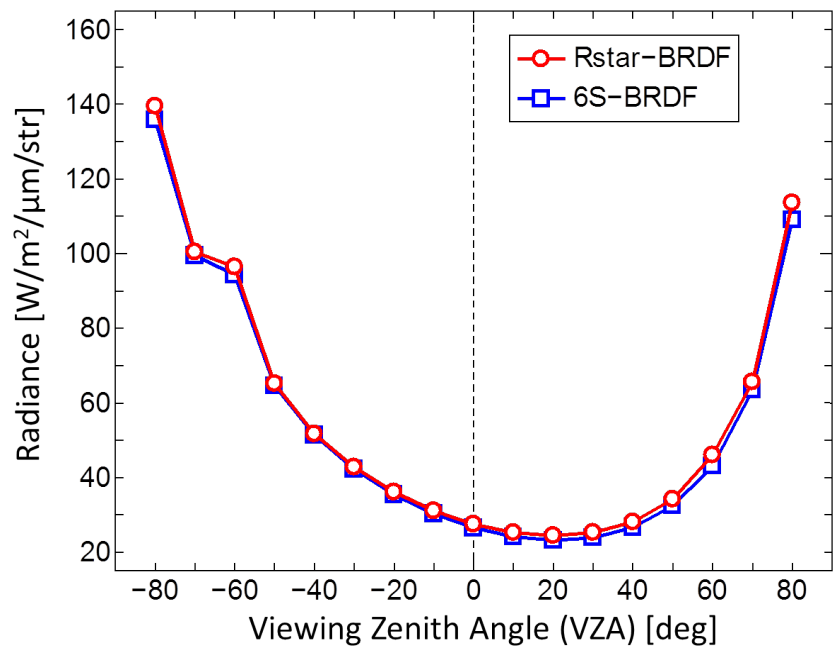


図 5.11 Rstar - BRDF と 6S - BRDF で計算した放射輝度 (SZA=60°)

ここで反射特性が同じであるのにも関わらず、Rstar - BRDF と 6S - BRDF でわずかに差異が生じる理由を考察するため、放射輝度の算出方法について考える。

Rstar - BRDF では、図 5.12 に示すような地表面で反射された直達光 (Direction) と大気から射出される放射 (Around) を、それぞれ別の手法で計算し最終的にその和を放射輝度として算出している。

一方 6S - BRDF では、図 5.13 に示すように地表面の反射における直達光と散乱光の関係を 4 パターンに分類している。4 パターンそれぞれを計算した後、大気中で射出される放射との和を放射輝度として算出している。

そこで、両者が算出する Direction と Around をそれぞれ比較する。比較結果を図 5.14、図 5.15 に示す。

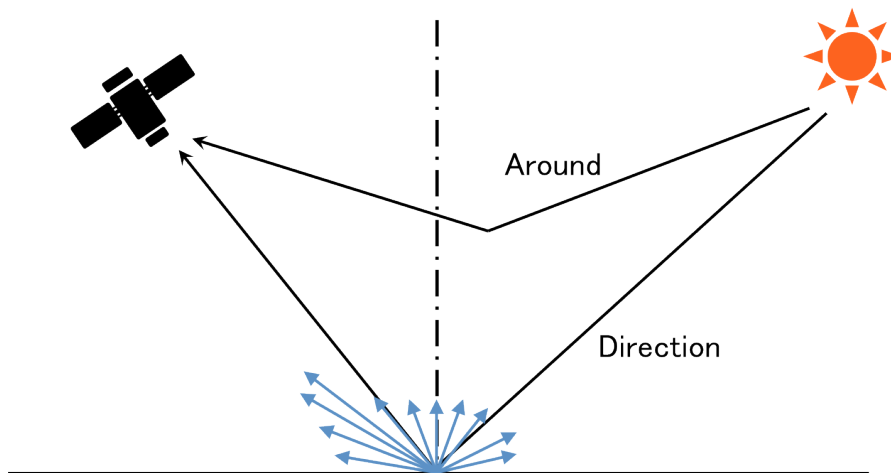


図 5.12 衛星に到達する放射

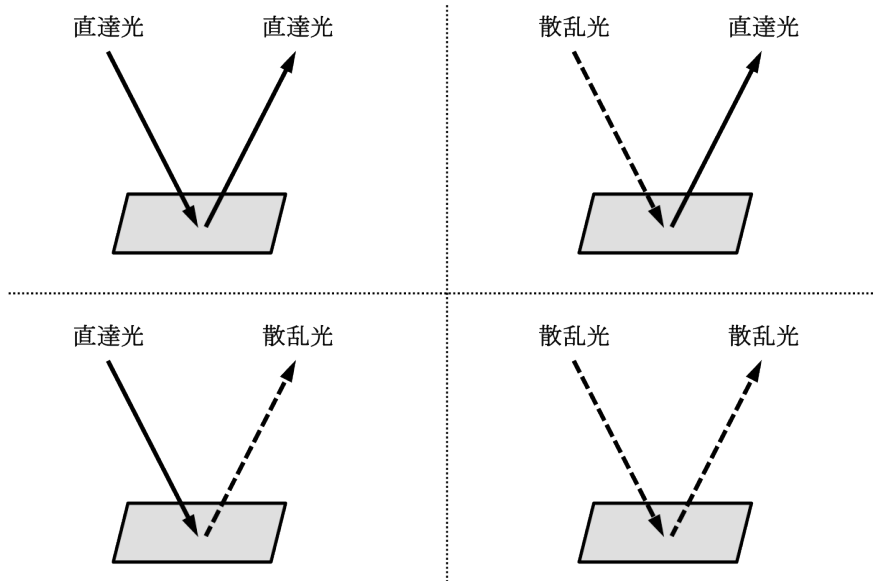


図 5.13 6S における直達光と散乱光の関係の分類^[12]

図 5.14 と図 5.15 を見ると Rstar - BRDF と 6S - BRDF の Direction のグラフはほぼ一致する。これは、前述した通り同じ BDRF モデルを用いたためであると考えられる。しかし、Rstar - BRDF と 6S - BRDF の Around を比較すると、Direction と比べて差異が大きい。これは、Around の算出方法が異なるためだと考えられる。Around における Rstar - BRDF と 6S - BRDF の差異の最大値は、 $SZA=0^\circ$ では $9.3 \text{ W/m}^2/\mu\text{m/str}$ ($VZA=-80^\circ, 80^\circ$)、 $SZA=60^\circ$ では $7.7 \text{ W/m}^2/\mu\text{m/str}$ ($VZA=80^\circ$) となった。

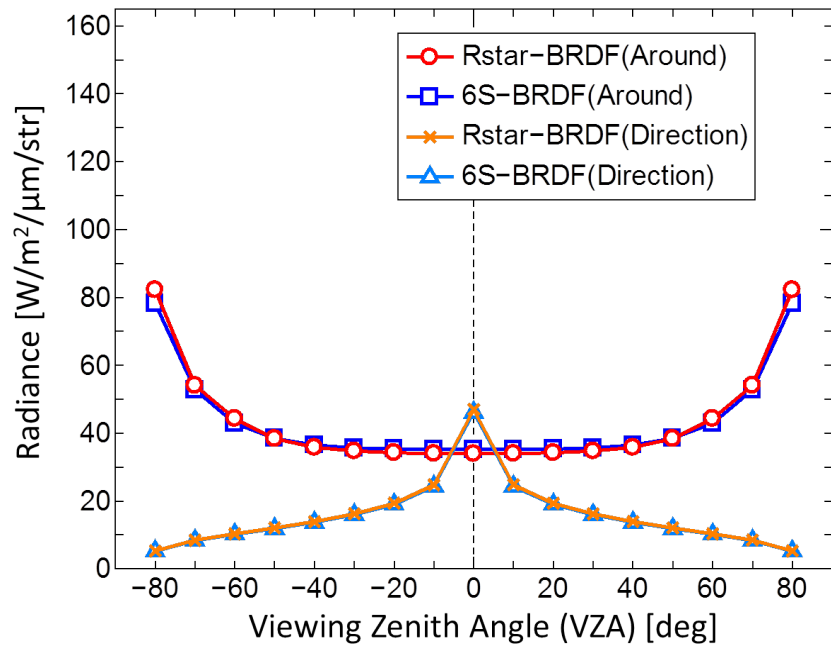


図 5.14 Rstar – BRDF と 6S – BRDF で計算した Direction と Around のみの放射輝度 (SZA=0°)

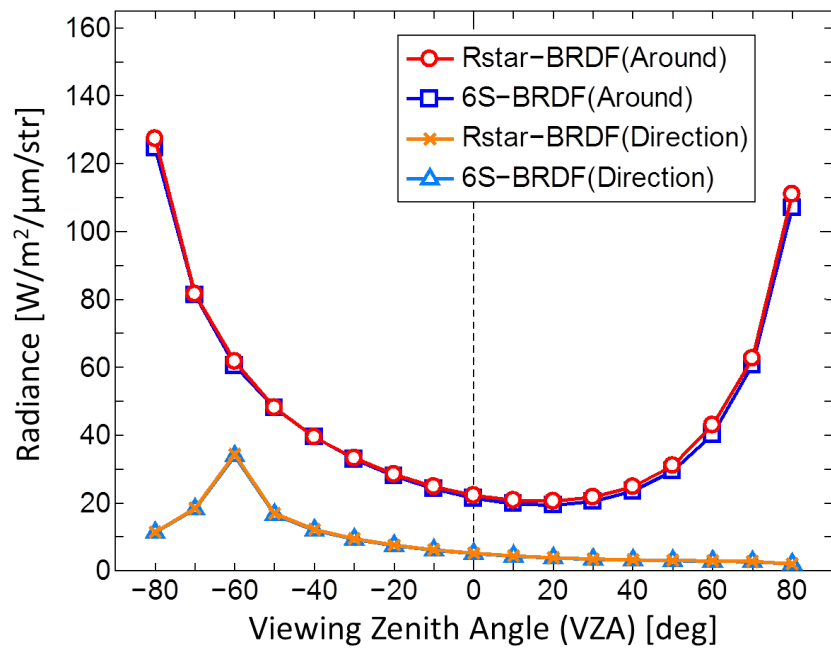


図 5.15 Rstar – BRDF と 6S – BRDF で計算した Direction と Around のみの放射輝度 (SZA=60°)

5.3.3 Rstar - BRDF と MODTRAN - BRDF の比較

ここでは、Rstar - BRDF と MODTRAN にて HAPKE モデルを選択し、BRDF 反射計算過程を経て出力した放射輝度（以下 MODTRAN - BRDF とする）を比較する。

図 5.16 に SZA が 0° 、 20° 、 40° 、 60° に変化した時の MODTRAN - BRDF を示す。また、Rstar - BRDF と MODTRAN - BRDF の比較を図 5.17、図 5.18 に示す。図 5.17 と図 5.18 を見ると Rstar - BRDF と MODTRAN - BRDF のグラフはほぼ一致する。この理由は 5.3.2 節と同様である。Rstar と MODTRAN で用いた BRDF モデルは同じである。そのため、Rstar - BRDF と MODTRAN - BRDF の反射特性は同じとなり、算出する放射輝度のグラフは近い値となる。二つの差異の最大値は、SZA= 0° のときでは $1.5 \text{ W/m}^2/\mu\text{m/str}$ (VZA= $-80^\circ, 80^\circ$)、SZA= 60° のときでは $14.2 \text{ W/m}^2/\mu\text{m/str}$ (VZA= 80°) となった。

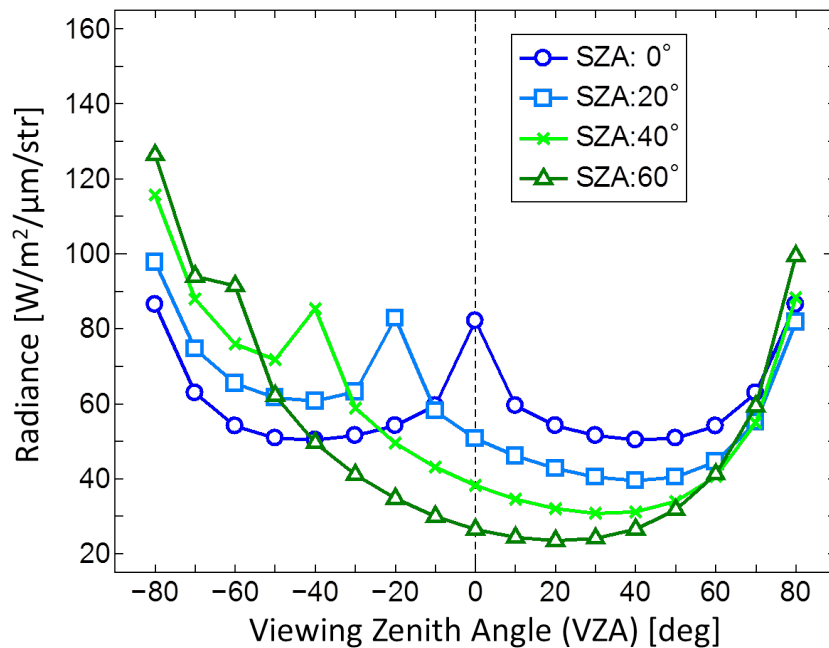


図 5.16 MODTRAN - BRDF で計算した放射輝度（青、水色、黄緑、緑はそれぞれ太陽天頂角が 0° 、 20° 、 40° 、 60° の結果を示す）

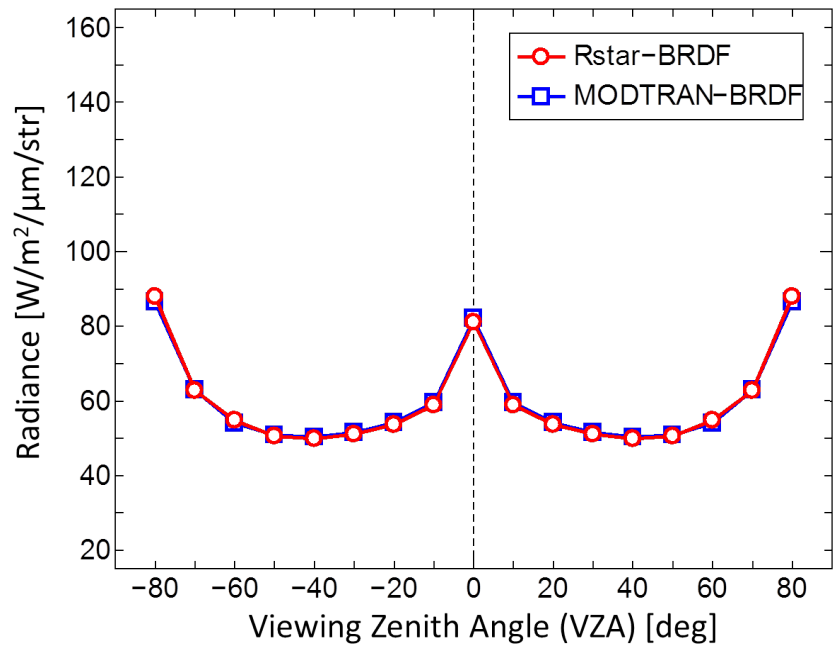


図 5.17 Rstar - BRDF と MODTRAN - BRDF で計算した放射輝度 (SZA=0°)

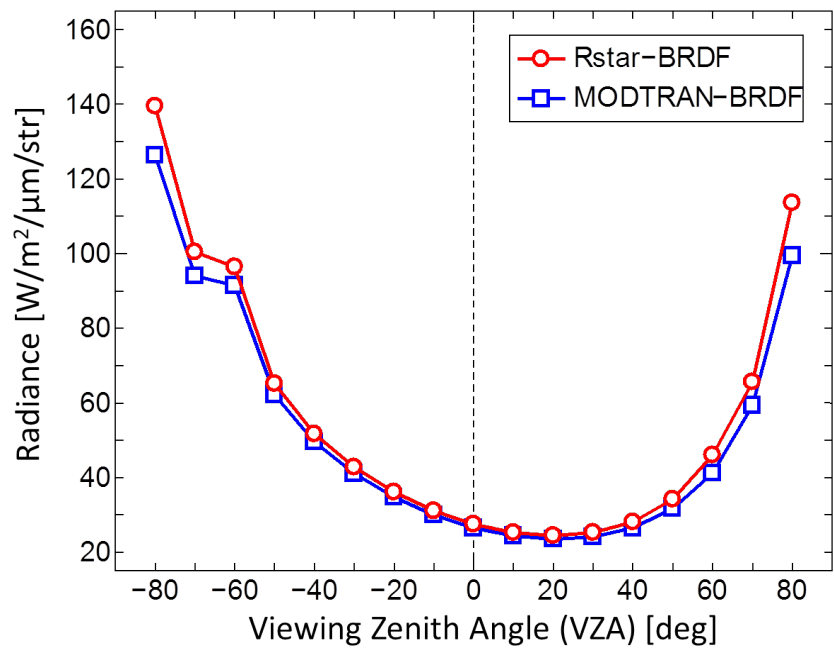


図 5.18 Rstar - BRDF と MODTRAN - BRDF で計算した放射輝度 (SZA=60°)

ここで反射特性が同じであるのにも関わらず、Rstar – BRDF と MODTRAN – BRDF でわずかに差異が生じる理由を考察する。

5.3.2 節で述べたように、Rstar – BRDF では地表面で反射された直達光 (Direction) と大気から射出される放射 (Around) を、それぞれ別の手法で計算し最終的にその和を放射輝度として算出している。また、MODTRAN – BRDF でも同様な計算方法を用いている。しかし、Rstar と MODTRAN とでは、Around の計算過程が異なる。そこで、両者が算出する Direction と Around をそれぞれ比較する。比較結果を図 5.19、図 5.20 に示す。

図 5.19 と図 5.20 を見ると Rstar – BRDF と MODTRAN – BRDF の Direction のグラフはほぼ一致する。つまり、Direction の計算においては Rstar と MODTRAN の精度はほぼ等しい。しかし、Rstar – BRDF と 6S – BRDF の Around を比較すると、Direction と比べて差異が大きい。これは、前述したように Around の算出方法が異なるためだと考えられる。Around における Rstar – BRDF と MODTRAN – BRDF の差異の最大値は、 $SZA=0^\circ$ では $1.7 \text{ W/m}^2/\mu\text{m}/\text{str}$ ($VZA=-80^\circ, 80^\circ$)、 $SZA=60^\circ$ では $13.9 \text{ W/m}^2/\mu\text{m}/\text{str}$ ($VZA=80^\circ$) となった。

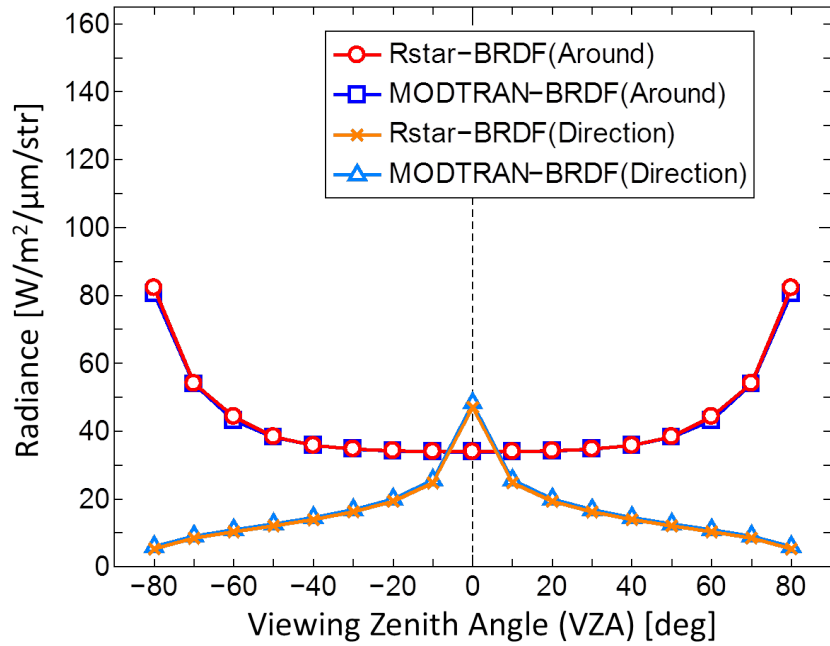


図 5.14 Rstar – BRDF と MODTRAN – BRDF で計算した Direction と Around のみの放射輝度 (SZA=0°)

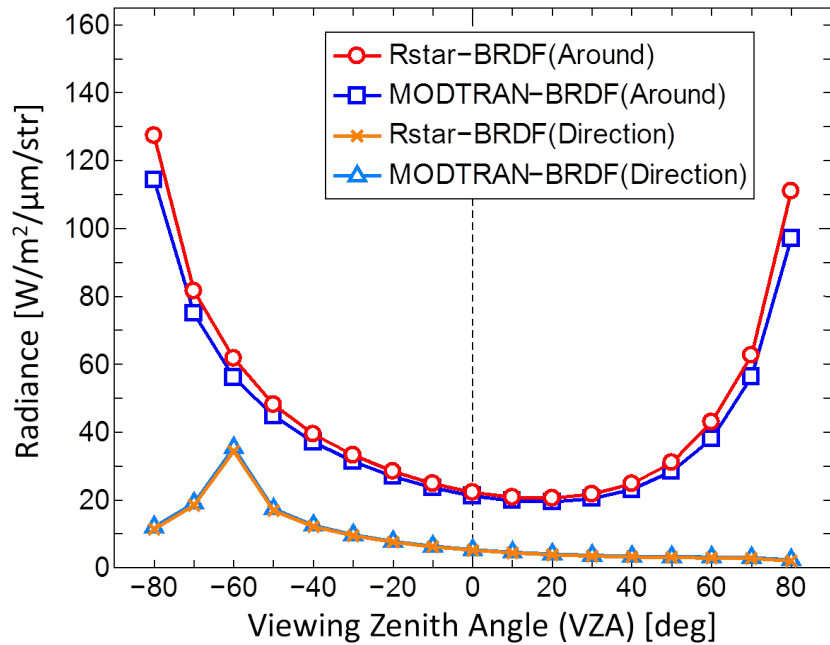


図 5.14 Rstar – BRDF と MODTRAN – BRDF で計算した Direction と Around のみの放射輝度 (SZA=60°)

第 6 章 結論

5 章の結果をもとに本研究の結論を記述する。

- **Rstar** の地表面反射過程において、**Lambert** 反射計算もしくは **BRDF** による反射計算かを選択できるように変更した。2 種類の **BRDF** を導入することで反射パターンの対応の幅が広がったと言える。また、導入した **BRDF** モデルにより算出した放射輝度は、地表面特性を反映することができた。
- **Rstar** の **BRDF** を選択して算出した放射輝度と、**6S** の **BRDF** を選択して算出した放射輝度とを比較すると、ほぼ一致する値となった。**6S** は、数多くある放射伝達モデルの中で代表的なモデルであり、ベンチマークテストで優れた値を算出している^[24]。そのため、**BRDF** を導入した **Rstar** の精度は実用的水準だと考えられる。
- **Rstar** の **BRDF** を選択して算出した放射輝度と、**MODTRAN** の **BRDF** を選択して算出した放射輝度とを比較すると、ほぼ一致する値となった。**MODTRAN** は、**6S** と同様に各研究機関にしばしば用いられる代表的なモデルである。そのため、**BRDF** を導入した **Rstar** の精度は実用的水準だと考えられる。
- **Rstar** と **6S** や **MODTRAN** とを比較した時、わずかに差異が生じる原因は、「モデルの不完全性」であると推察する。シミュレーションモデルの誤差の原因は一般的に「外部データの不完全さ」、「モデルの不完全さ」、「非線形不安定性の問題」にあるとされる^[25]。放射伝達モデルは、その複雑さ故に半経験的な近似式を用いることが多く、同じ現象であっても放射伝達モデルによって異なったアルゴリズムで計算されることがある。そのため、**Rstar** や **6S**、**MODTRAN** といった放射伝達モデルに同一の外部データを用いても、算出される計算結果はそれぞれ異なったと考えられる。
- 今後の展望としては、地表面反射計算に **BRDF** モデルのさらなる追加、実測値との検証による **Rstar** の改良を目指す。

参考文献

- [1] K. N. Liou (2002) : An Introduction to Atmospheric Radiation 2nd Edition, Academic Press. (藤枝鋼・深堀正志 共訳 : 大気放射学, 共立出版)
- [2] 会田 勝 (1982) : 大気と放射過程, 東京堂
- [3] 柴田 清孝 (1999) : 応用気象学シリーズ 1 光の気象学, 朝倉書店
- [4] 日本太陽エネルギー学会編 (2012) : 太陽エネルギーがわかる本, オーム社
- [5] K. E. Trenberth, Fasullo, J. T., and J. Kiehl (2009) : Earth's Global Energy Budget, Bulletin of the American Meteorological Society, 90(3), 311–323p
- [6] G. P. Anderson, R. H. Picard and J. H. Chetwynd (1995) : Proceedings of the 17th annual review conference on atmospheric transmission models, Special Report No. 274, 467p., Phillips Laboratory Geophysics Directorate, MA
- [7] F. L. Bartman (1967) : The refractance and scattering of solar radiation by the earth Contr. No. NASr-54(03), Univ. of Michigan
- [8] K. Ya. Kondratyev (1972) : Radiation Processes in the Atmosphere. WMO No.309, 214p
- [9] M. Sekiguchi, T. Nakajima (2008) : A k-distribution-based radiation code and its computational optimization for an atmospheric general circulation model, J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer, vol.109, 2779–2793p
- [10] F. X. Kneizys, E. P. Shettle, W. O. Gallery, J. H. Chetwynd, L. W. Abreu, J. E. A. Selby, S. A. Clough, and R. W. Fenn. (1988) : Users' Guide to LOWTRAN7, Report No. AFGL-TR-88-0177, Air Force Geophys. Lab., Hanscom AFB, MA, 138p
- [11] T. Nakajima, M. Tanaka (1988) : Algorithms for radiative intensity calculation in moderately thick atmospheres using a truncation approximation, J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer, vol.40, 51-69p
- [12] MODIS LAND SURFACE REFLECTANCE, Science Computing Facility : <http://6s.ltdri.org/index.html>
- [13] E. F. Vermote, D. Tanré, J. L. Deuzé, M. Herman and J. J. Morcrette (1997) : Second Simulation of the Satellite Signal in the Solar Spectrum

- (6S) , An Overview, IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, Vol. 35, No. 3, 675-686p
- [14] MODIS -Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer- :
<https://modis.gsfc.nasa.gov/>
- [15] Spectral Sciences Incorporated, MODTRAN :
http://modtran.spectral.com/modtran_index
- [16] B. W. Hapke (1981) : Bidirectional reflectance spectroscopy 1. Theory, J. Geophys. Res., 86, 3039-3054p
- [17] B. W. Hapke (1986) : Bidirectional reflectance spectroscopy 4. The extinction coefficient and the opposition effect, Icarus, 67, 264-280p
- [18] B. Pinty, M. M. Verstraete, R. E. Dickinson (1990) : A Physical Model of the Bidirectional Reflectance of Vegetation Canopies 2. Inversion and Validation, J. G. R., vol 95, no d8, 11767p
- [19] H. Rahman, B. Pinty, M. M. Verstraete (1993) : Coupled Surface-Atmosphere Reflectance (CSAR) Model 1. Model Description and Inversion on Synthetic Data, J. G. R., vol 98, no d11, 20779-20789p
- [20] H. Rahman, B. Pinty, M. M. Verstraete (1993) : Coupled Surface-Atmosphere Reflectance (CSAR) Model 2. Semiempirical Surface Model Usable With NOAA Advanced Very High Resolution Radiometer Data, J. G. R., vol 98, no d11, 20791-20801p
- [21] R. Lacaze, J. -L. Roujean (2001) : G-function and HOt SpoT (GHOST) reflectance model: application to multi-scale airborne POLDER measurements, Remote Sens. Environ., 76, 67-80p
- [22] L. G. Henyey, Greenstein, J. L. (1941) : Diffuse radiation in the Galaxy, Astrophysical Journal, vol. 93, 70-83p
- [23] 土田 聡 (2000) : 可視、近赤外域における地球大気～地表面系放射伝達～第二章 陸面のモデル～, 日本リモートセンシング学会誌, 20(1), 71-86p
- [24] RT Codes -Official code comparison Web site of the MODIS atmospheric correction group- : <http://rtcodes.ltdri.org/index.html>
- [25] 中島 映至・田中 英一 (2013) : 正しく理解する気候の科学 -論争の原点にたち帰る, 技術評論社

謝辞

本研究を進めるにあたり、終始ご指導して頂きました関口美保准教授には心から御礼を申し上げます。修士 1 年からの研究室配属で、未熟であった私に一人からご教授を頂きました。関口美保准教授のご指導を賜り、本研究を修士論文として形にすることができました。また、多くのアドバイスをいただきました副指導教員の村山利幸教授に御礼申し上げます。

副査をして頂きました岩坂直人教授に御礼を申し上げます。

修士論文の作製や発表練習の際、ご指導していただきました東京大学大気海洋研究所の大方めぐみさんに御礼を申し上げます。

そして、共に過ごした同研究室の修士 2 年の平戸遼介君や修士 1 年の佐藤拓也君、また 4 年生の皆さんに、深く感謝いたします。

最後に、私の 6 年間にわたる学生生活を経済的にも精神的にも支えてくれた父母、兄弟、姉妹に感謝致します。