

大学院教育における WWW 版放射伝達シミュレータの活用*

中 島 孝**

1. はじめに

地球科学全般において放射伝達に関わる知識や技術の需要が高まりつつあるにもかかわらず、放射伝達計算を行う力を持つ人材は不足している。そこで、大学や大学院等における教育が重要になってくるのであるが、1学期の授業において放射伝達の正確なイメージを学生に伝えることは難しい。筆者は2006年春学期に、東海大学の大学院授業「センサー特論」を担当する機会を得、ここで放射伝達を取り扱うことにした。授業において、板書と口頭説明を中心とした講義に加えてWWW版放射伝達シミュレータを活用した実習を行ったところ、受講生の理解度が向上する結果が得られた。また、放射シミュレーションにより得られた計算結果を学生にグラフ化させ、それを説明させることで、授業内容の理解度を把握することができた。以上の工夫は、放射伝達の教育手法として有効であると考え、ここに報告したい。

放射伝達計算は、地球におけるエネルギー収支の見積もりを行うために必須の計算技術である。近年では、将来型衛星搭載センサーのフィジビリティ研究や衛星リモートセンシングから物理量を推定するための準問題ソルバーとして利用され、また放射計算モジュールとして大気大循環モデルに組み込まれるなど、地球科学の多くの分野で使われるようになってきた。このように、放射伝達の必要性和需要が高まってきているにもかかわらず、計算を行うための知識と技

術を持つ人材の育成は進んでおらず、将来にわたる人材不足が見込まれる。地球科学が研究対象としている放射環境には、太陽照度スペクトル、大気分子散乱、大気粒子散乱、地表面との相互作用が含まれ、それらは入射角や散乱角に依存する複雑なものであるため、放射伝達の知識と技術の習得には、基礎的事項からの積み上げがどうしても必要となる。そこで、大学等における放射伝達に関する授業においては、まず座標軸の設定を行い、次に光学的厚さ、単散乱アルベド、散乱位相関数といった放射に関する諸量の定義を行い、その上で放射伝達方程式とその一般解の解説、といった流れになることが多い。しかしながら、例えば各種放射量の単位（例えば分光放射輝度 $W/m^2/sr/\mu m$ ）ひとつをとっても見慣れないものであるため、いかに丁寧な解説を行っても講義形式の授業だけでは放射伝達に対する正確なイメージを伝えることは困難である。そこで、実際に受講生に放射伝達を計算してもらう実習を授業に取り込むことが考えられる。しかしながら、FORTRAN等のプログラミング言語で書かれ、UNIXのコマンドラインで操作を行う放射伝達計算の実習を、1学期の授業に取り入れることは、受講生全員がこれらの基礎的な知識と技術を既に持っているのであれば可能かもしれないが、実際には多様なバックグラウンドを持つ学生が同居していることが多い。そこで本稿では、講義形式の放射伝達の授業に、WWWベースの放射伝達シミュレータを活用した実習を組み込み、教育的な成果を上げた事例について報告する。

2. 大学院における放射伝達の授業設計

筆者は2006年度春学期（4月～7月）に、工学部光工学専攻の修士課程1年生を対象とした「センサー特論」という大学院授業を担当する機会を得た。まず、

* Practical Use of the WWW-based Radiative Transfer Simulator on the Lecture of a Graduate School.

** Takashi Y. NAKAJIMA, 東海大学情報デザイン工学部情報システム学科.

E-mail: nkjm@yoyogi.ycc.u-tokai.ac.jp

© 2006 日本気象学会

受講生の全体像であるが、東海大学は従来から衛星センサーによる地球観測分野に力を入れてきたため、地球物理、気象、気候に興味を持つ受講生もいたが、受講生の修士課程での研究テーマは、超解像画像、衛星リモートセンシング、応用ウェーブレット変換、等々さまざまである。ほとんどの受講生には光物性、画像情報、情報システムの知識はあるが、放射伝達についての知識や概念はほとんど無い。このような学生像および環境の中、本授業では衛星搭載センサーの最適化問題 (Nakajima *et al.*, 1998 をベースに教材開発) というやや実践的な題材を用意した。筆者は、前職の宇宙航空研究開発機構 (JAXA) において多波長可視赤外イメージャーである ADEOS-II/GLI センサーを担当しており、そのときに行った研究内容を学生に伝えたいという理由に加え、「最適化問題」はセンサー設計に限らず、多くの科学分野で活用できる知識であり、最適化のための基本的な考え方や技術は、特に工学部の学生が社会に巣立ったときに必ず役立つと考えたからである。

次に、授業設計を行うにあたり、十数回の授業を受けた後の学生が次の3つのポイントを修得していることを想定した。すなわち、

- (a) 観測対象物により、使用するセンサーの波長帯が異なること。特に可視赤外センサーを用いた地球観測では複数波長の組み合わせにより目的が達せられること、
- (b) 解像度、ダイナミックレンジ、ノイズ特性、製造コスト等、相互依存し合うパラメータが多数あり、すなわち最適化問題であること、
- (c) 最適化を行う局面では計算機による放射伝達シミュレーションが有効であること、

である。そして、授業には板書を中心とした講義だけではなく、実習的要素を加えることにした。その実習のひとつが、Web イン

ターフェースを装備した放射伝達シミュレータを使用した放射計算実習である。計算機が発達した現代でこそ成り立つ実習であるが、板書で得た知識を実践するこの手法は、より深い放射伝達への理解を助けるのに非常に有効であった。

3. 放射伝達シミュレータ

授業で用いた放射伝達シミュレータは、宇宙航空研究開発機構 (JAXA) の Advanced Earth Observing Satellite-II (ADEOS-II) 衛星 Global Imager (GLI) プロジェクトの一環として開発され、現在も JAXA 地球観測研究センター (EORC) の WWW 上で運用されているシステムである (<http://bishamon.eorc.jaxa.jp/ENTGSS/index.html>; 第1図)。本シミュレータの主目的が、GLI のアルゴリズムおよび JAXA 地球観測センター (EOC) に整備される解析システムの開発に必要な放射計算を行うものであったため、当初は GLI および GLI の前身センサーである ADEOS 衛星搭載 Ocean Color and Temperature Scanner (OCTS) の観測シミュレーションが行えるように設計されていた。その後の開発過程において汎用的な利用が可能になったため、現在では TERRA

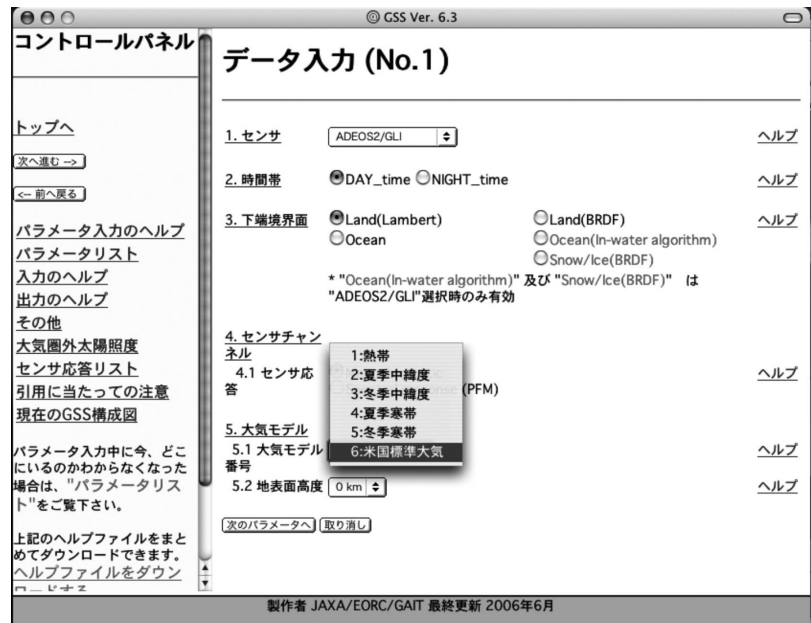


第1図 宇宙航空研究開発機構 (JAXA) のホームページで運用されている放射伝達シミュレータ (GLI Signal Simulator, GSS) の初期画面 (<http://bishamon.eorc.jaxa.jp/ENTGSS/index.html>).

衛星搭載 Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS), Tropical Rainfall Measuring Mission (TRMM) 衛星搭載 Visible and Infrared Scanner (VIRS), National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA) 衛星シリーズ搭載 Advanced Very High Resolution Radiometer (AVHRR), Geostationary Meteorological Satellite (GMS), Geostationary Operational Environment Satellite (GOES) 等の観測シミュレーションが可能

なシステムに進化している。本シミュレータは、放射伝達エンジンに東京大学

で開発された Rstar (system for transfer of atmospheric radiation) (Nakajima and Tanaka, 1986, 1988; Stamnes *et al.*, 1998) が使用され、その他多くの GLI プロジェクト研究期間中に得られた多くの成果、例えば海色 (Tanaka *et al.*, 1998), 雪氷面異方向反射特性 (Aoki *et al.*, 2000), 植生異方向反射特性 (Gobron *et al.*, 1997) が放射伝達エンジンに接続された構造となっている。放射計算の前提条件としてユーザーが決定する各種パラメータ設定では、汎用 Web ブラウザの GUI (Graphical User Interface) 機能が担当する。本シミュレータを利用するユーザーは、まず Web ブラウザ上に表示されるプルダウンメニューの操作や数値入力欄に必要な情報を入力することで、放射計算のパラメータセットを作成する (第 2 図)。次に設定項目の確認を行うページにおいて了承ボタンを押すと計算が開始され、数分の後に計算結果がユーザーのメールアドレスに送付されるという流れになっている。また、適宜パラメータの内容を解説するヘルプ画面が用意されていることも本シミュレータの特徴の 1 つである。現在、英語バージョンに加えて日本語バージョンのページも公開されている。本シミュレータの維持管理は現在でも適切に行われてお



第 2 図 放射伝達計算に必要なパラメータの設定画面。プルダウンメニュー、ラジオボタン、数値入力欄への入力によって、大気モデルの設定、波長の設定、散乱粒子等の設定等を行う。適宜、パラメータの内容を解説するヘルプが用意されている。

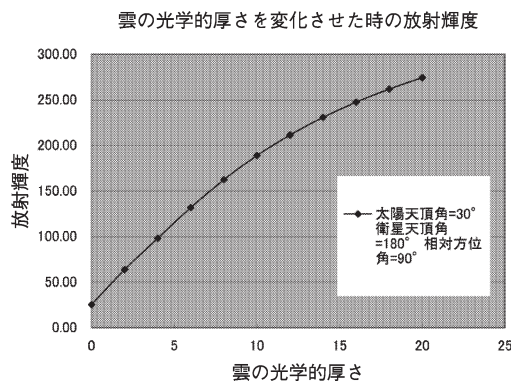
り、最近では新しい太陽照度データベース (Thuillier *et al.*, 2003) への入れ替えが行われている。

4. 実習の内容

実習では、(a) 衛星が観測する放射輝度が太陽天頂角等の関数となっていること、(b) 大気 (今回は雲を取り上げた) の光学的厚さの変化によって、衛星が観測する放射輝度が変動すること、の 2 点を学生に確認させることとした。これらを押さえることにより、講義で行った各種放射量やや複雑な単位体系の理解や、センサーを観測対象に最適化するために行う放射シミュレーションの意義の理解を促すことが出来ると考えたからである。まず、最初に第 1 表に示すような設定パラメータひとつひとつを、講義で説明した記号 (光学的厚さ τ , 太陽天頂角 θ_0 , 地表アルベド α など) との整合性を確認しながら GUI で設定させた。この操作により、講義で解説したパラメータを体験的に理解することが可能となる。このような基本設定での放射輝度の計算を 1 回行った後に、受講生それぞれに個別のテーマを与えた。ある受講生には、基本設定を元に太陽天頂角 0 度 (天頂) から 90 度 (地平線) まで 10 度刻みに変化させた計算を、またある受講

第1表 受講生に設定させた基本パラメータ。

パラメータ名	設定値
センサー名	ADEOS2/GLI
チャンネル番号	13 (678 nm)
地表面設定	ランベルト面 (アルベド $\alpha=0.05$)
太陽天頂角 θ_0	30度
衛星天頂角 θ	180度 (天底向きを0度とした)
相対方位角 ϕ	90度
大気モデル	米国標準大気
散乱微粒子の設定	水粒子, log-normal 粒径分布, モード半径 $8\mu\text{m}$, 標準偏差1.5, 波長 $0.5\mu\text{m}$ での光学的厚さ $\tau=10$



第3図 受講生が放射伝達シミュレータを使って計算した結果を基にエクセルで作成したグラフの例。放射輝度の単位は (W/m²/sr/μm)。第1表の大気分子モデルや角度設定等を使用し、水雲の光学的厚さを0から20まで変化させた結果が示されている。

生には雲の光学的厚さを0から20まで徐々に変化させた計算を、という具合である。それぞれの計算結果をエクセルでグラフに起こさせ(第3図)、後日の授業で、得られたグラフについて簡単に紹介させる工夫も行った。実習に要する時間は90分授業2回分であった。

5. まとめ

授業後に学生に依頼したアンケートの結果(第2表)から判るように、WWW版放射伝達シミュレータの活用の評判は良く、理解度の向上に役だったことが示唆される。また、教員側としても、得られた計算結果を学生に説明させることで、授業内容の理解度を把握することができた。特に実習後、多くの質問が出るようになり、放射伝達への好奇心を励起することが

第2表 学期末に行ったアンケートからの抜粋。

学生 A	実習や実験があったため、衛星観測を身近なものに感じる事が出来た。ネットでの計算はとても便利であったので、これからの授業で採用しても良いと思う。
学生 B	システムに値を入力するときに、個々のパラメータの詳細な説明があったので、講義で出てきたパラメータとの関連性や意味がつかみやすかった。特に少人数の授業では実習形式の授業は良いと思う。Web上の計算は、レスポンスが遅いのが難点。
学生 C	パソコンによる放射輝度のシミュレーションを行うことにより、どのような条件で観測したときにどのような結果が得られるかを実際にイメージすることができ、良かったと思う。

出来たように思われた。以上に述べてきたように、短期間の授業においては、放射伝達を理解させるために本シミュレータを用いることが有効であることが判った。なお、本授業が成立するためには、ブラウザが稼働する人数分のパソコンと、システムが送信した計算結果のメールを受信するツールの存在が前提であるが、前者については計算機室等にある普通のWindowsやMacintoshマシンで十分であるし、後者についてはWebメールを利用するか、あるいは最近の学生はほぼ全員がメール機能付きの携帯電話を所有しているため、授業の進行には支障が無かった。なお、メール配信される計算結果は、大気分子プロファイル等の設定情報までが記載される詳細モードと、必要最低限の結果のみを配信するモードが用意され、メールの受信環境に応じてユーザーがコントロールすることが出来る(第4図)。

本シミュレータを利用すると、これまでの放射伝達計算で必要であったプログラムコードのコンパイル、テスト計算による動作確認、エディタを使った計算条件のセットアップ、等の作業を省略することが出来る。実際、修士レベルの学生が以上の作業を行うには、教員のサポートがあったとしても最低数日以上を要するのが現状である。教育的な側面からは、これらの面倒な作業をあらゆる場面で省力化することには筆者にも大きな抵抗がある。従って、本シミュレータを利用するのは今回のような授業で実習を行う場合に限定し、研究室に配属されている卒業研究生や大学院学生が研究で放射伝達計算を行う場合には、初心に立ち返り、上記の作業を課すことを基本としていることを強調したい。

No.	出力項目			
1	<input type="radio"/>	波長及び太陽照度 (5.3 [KB])		
2	<input checked="" type="checkbox"/>	大気情報 (3.9 [KB])		
3	<input type="radio"/>	最上層における上方及び下方のフラックス (0.1 [KB])	<input type="radio"/>	全層(50層)における上方及び下方のフラックス (1.5 [KB])
4	<input type="radio"/>	最上層における各角度に対する放射輝度 (0.2 [KB])	<input type="radio"/>	全層(50層)における各角度に対する放射輝度 (1.2 [KB])
ファイルサイズ: 約 <input type="text" value="9"/> [KB]				

第4図 メールで配信される計算結果の詳細度を指定するページ。大気分子プロファイル等を含めた詳細な結果配信,あるいは大気上端における上向き放射輝度のみ配信するというように,きめ細やかな指定が可能である。

今回の実習では,最大4名の学生が同時にアクセスしたが,処理の集中により,計算およびメール配信が滞る場面が見られた(アンケートでも指摘あり)。十数名程度の学生による同時アクセスにも対応できるよう,同時処理できるプロセス制限数の増加,想定外操作を起因とするサスペンド状態からの迅速な復帰,CPUとRAMの増設等,の工夫と改善が望まれる。なお,本シミュレータの放射エンジンであるRstarは,筆者らが主宰しているOpenCLASTR(「オープンクラスター」と読む)(<http://www.ccsr.u-tokyo.ac.jp/~clastr/index.html>)という研究成果のアーカイブシステムにおいて公開され,研究と教育の範囲において自由に利用することが出来る。

今後も,地球科学全般において放射伝達計算の需要が高まることが予想される。学生そして地球科学の研究者らによる本シミュレータの活用と不具合情報等のフィードバックは,よりよい教育環境および研究環境の構築に必要となる。筆者も類似の事例を積み重ね,良質な大学院教育を行いたいと考えている。

謝 辞

実習時のシステムサポートにおいては,宇宙航空研究開発機構(JAXA)地球観測研究センター(EORC)の堀 雅裕研究員に迅速な対応を頂いた。JAXAにおける放射伝達シミュレータの維持への努力に対する謝意と共に御礼申し上げる。Web画面の掲載についてはJAXAから協力を頂いた。

参 考 文 献

Aoki, T., T. Aoki, M. Fukabori, A. Hachikubo, Y.

Tachibana and F. Nishio, 2000: Effects of snow physical parameters on spectral albedo and bi-directional reflectance of snow surface, *J. Geophys. Res.*, **105**, 10219-10236.

Gobron, N., B. Pinty, M. M. Verstraete and Y. Govaerts. 1997: A Semidiscrete model for

the scattering of light by vegetation, *J. Geophys. Res.*, **102**, 9431-9446.

Nakajima, T. and M. Tanaka, 1986: Matrix formulation for the transfer of solar radiation in a plane-parallel scattering atmosphere, *J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer*, **35**, 13-21.

Nakajima, T. and M. Tanaka, 1988: Algorithms for radiative intensity calculations in moderately thick atmospheres using a truncation approximation, *J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer*, **40**, 51-69.

Nakajima, T. Y., T. Nakajima, M. Nakajima, H. Fukushima, M. Kuji, A. Uchiyama and M. Kishino, 1998: Optimization of the Advanced Earth Observing Satellite II Global Imager channels by use of radiative transfer calculations, *Appl. Opt.*, **37**, 3149-3163.

Stamnes, K., S.-C. Tsay, W. Wiscombe and K. Jayaweera. 1998: Numerically stable algorithm for discrete-ordinate-method radiative transfer in multiple scattering and emitting layered media, *Appl. Opt.*, **27**, 2502-2509.

Tanaka, A., T. Oishi, M. Kishino and D. Roland, 1998: Application of the neural network to OCTS data, S. G. Ackleson and J. Campbell, Eds., *Proc. XIV Ocean Optics Conference*, Hawaii, ref. No. 1042, USA.

Thuillier, G., M. Hers, P.C. Simon, D. Labs, H. Mandel, D. Gillotay and T. Foujols, 2003: The solar spectral irradiance from 200 to 2400 nm as measured by the SOLSPEC spectrometer from the ATLAS 1-2-3 and EURECA missions, *Solar Physics*, **214**, 1-22.