

## 日射量シミュレーション用ソフトの作成と大気環境情報教育

伊藤 朋恭\*, 河西 智子\*\*, 田口 佳苗\*\*\*

### 要 約

日射量は、地球環境問題の多くの局面に直接的あるいは間接的に幅広くかかわっているので、環境問題を考える場合には日射量を定量的に正しく理解することが大切である。大学におけるそのための教育的手法としてコンピュータによるシミュレーションが有効であり、非理系の女子学生が大きな負担を感じることなくこのシミュレーションを行うための道具として、日射量算出プログラムソフトを開発した。このソフトは Microsoft 社の VBA 言語で記述されており、Excel 上で画面との対話を通じて、いろいろな条件下での日射量を算出しグラフ作成などを行うことができる。

授業その他の教育現場でこのソフトを実際に用いた結果、日射量がどのような条件によってどのような影響を受けるのかを、専門的知識をもたない多くの学生が容易に知ることができたことがわかった。ソフトの利用というのは、本質的理解を避けたブラックボックス的教育法ではあるが、環境問題についての理解を広げる上で非常に有用である。

### 1. はじめに

地球温暖化、オゾン層破壊、酸性雨などに代表される地球環境問題は、相互にあまり関連がない独立した事象と考えられることが多いが、これらの環境問題に共通する重要な因子の一つとして日射量がある。日射量とは、大気圏内あるいは地球上のどこかある地点に到達している太陽光のエネルギー量のことであるが<sup>1)</sup>、日射量は地表を加熱する熱量としては、地熱や化石燃料の燃焼熱などより5,000倍以上も大きく<sup>2)</sup>、事実上地球表層の唯

一のエネルギー源となっている。したがって、日射量と地球環境問題とのかかわりは大きく、わずかな日射量の変動が酸性雨の原因物質の生成量に影響を与え<sup>3-5)</sup>、また温室効果気体の増減とあいまって地球の気温を変化させている。逆にオゾン層の増減は紫外部の日射量を変化させる。したがって、日射量について正確な知識をもち定量的に把握することは、いろいろな地球環境問題を考える上での重要な出発点となる。大学において環境情報教育を行う場合にも、同じことが当てはまる。

---

\*大妻女子大学 社会情報学部

\*\*大妻女子大学 社会情報学部 (現在：さくら情報システム株式会社)

\*\*\*大妻女子大学 社会情報学部 (現在：東芝情報システム株式会社)

このような視点から、著者の1人はすでに一昨年の本誌において、非理系女子大学における環境情報教育の一環として、日射量を求める手法とその教育的効果について述べた<sup>6)</sup>。用いた手法は、パーソナルコンピュータによるシミュレーション（数値シミュレーション）であり、最近の環境問題の諸研究分野で幅広く用いられている手法である<sup>7-12)</sup>。これにより、日射量がどのような要素によってどの程度影響を受けるのかを定量的に知ることができ、環境情報の本質的理解にとって非常に有意義であることがわかった。

しかし、これらのシミュレーションにより日射量を求めるためには、かなり専門的知識が必要である。日射量と大気成分の相互関係の理解から始まり、試算法の確立、試算に必要なデータの収集、表計算ソフト上への数式の入力、結果の表示など、綿密な準備が必要である<sup>6)</sup>。事実、日射量に影響を与える要因が幅広く複雑であるだけに、これらのシミュレーション自身はかなり多岐に渡っており、これまでも何人かの卒業研究の題材として順次取上げられて改良が加えられてきている<sup>13-19)</sup>。したがって専門的知識をもたない一般の人が、環境問題で重要な意味をもつ日射量について定量的に知ることには残念ながら困難である。しかし、もしシミュレーションの内容をプログラム化してソフトウェア（ソフト）を作成すれば、誰でもが容易にそのソフトを使って結果を視覚的に表現でき、日射量がどのような要因によってどのように変動するのかを、専門的知識なしに容易に知ることができるようになる。このことは一般の人が環境問題をより身近な問題として幅広く理解する上で大きな意味をもつ。

このような意図に基づき、本論文では、専門的知識なしに誰でもが操作できる日射量シミュレーション用プログラム（アプリケーションソフト）の作成を試み、このソフトの構成や盛込むべき項目の検討と合わせて、このソフトを実際に教育現場で運用した結果について考察する。なお本ソフトは、卒業研究として先ず河西<sup>20)</sup>によって作成され、ついで田口<sup>21)</sup>によって改良を加えられた作品である。

## 2. 日射量の算出法

ソフトの作成にあたっては、先ず日射量の算出法について述べる必要がある。これについては基本的にはすでに前回の論文で詳しく触れているので<sup>6)</sup>、ここではその要点とそれ以外の補足事項を中心に述べることにする。なおここで述べるのはあくまで日射量算出の一般的方法であり、そのすべてが実際に作成したソフトに盛込まれているわけではない。

日射量には、大気中で吸収や散乱を受けずに直接その地点まで届く直達日射量と、散乱されて届く散乱日射量とがあるが<sup>22,23)</sup>、ここで扱うのは直達日射量である。先ず日射量の全体を理解するために、全波長領域における大気上端日射量と地表での直達日射量を図1に示す。大気上端日射量は実測値<sup>24)</sup>であり、地表日射量は計算値<sup>19)</sup>であるが実測値をほぼ忠実に表しているとみなしてよい。この2つの日射量の差が、大気圏を通過中に減衰した日射量の値になるが、この減衰は太陽光が大気中のいろいろな成分によって吸収・散乱（両者を合わせて消散と言う）されることにより起きる。ごくおおざっぱに述べれば、波長全域にわたって減衰しているのは散乱による効果、750 nm以上の赤外部で部分的に大きく減衰しているのは水蒸気（一部は二酸化炭素）による吸収、また左端の紫外部における減衰はオゾンと酸素による吸収の効果である。

さて、日射量の計算は波長ごとに行うが、ある

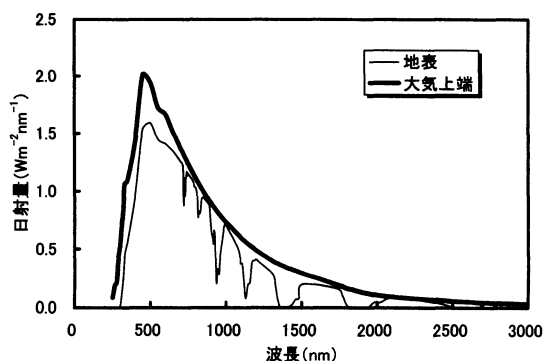


図1 大気上端および地表日射量（実測値）

波長における日射量  $I$  は大気上端日射量  $I_0$  を用いて, (1)式で表される<sup>25)</sup>。

$$I = I_0 \cdot \left( \frac{d_0}{d} \right)^2 \exp(-\tau) \\ = I_0 \cdot \left( \frac{d_0}{d} \right)^2 \exp \left( -\sum_j \tau_j \right) \quad (1)$$

$\tau$  は光学の厚みと呼ばれる無次元の量であり, 日射量が  $1/e$  に減衰する気層の厚みに対応する。ただし消散過程には各種大気成分 (添字  $j$ ) が関与するので, 実際には  $\tau$  は各大気成分の光学の厚み  $\tau_j$  の和として表される。 $(d/d_0)^2$  の項は, 太陽—地球間の距離  $d$  ( $d_0$  はその平均距離) が日ごとに变化することに対する補正項であり, 月日の関数である<sup>22, 25)</sup>。なお,  $I_0$  は  $d = d_0$  における値<sup>24)</sup> を用いる。

ある大気成分  $j$  の光学の厚み  $\tau_j$  は, その大気成分の消散断面積 (1 分子あたりの消散能力)  $s_j$  と数密度 (単位体積中の分子数)  $n_j$  を用いると (2) 式で表される<sup>6, 26)</sup>。ここで  $\theta$  は天頂角であり, 積分は高度  $z$  から大気上端 ( $z = \infty$ ) まで行う。

$$\tau_j = \frac{1}{\cos \theta} \int_z^\infty s_j n_j dz \quad (2)$$

なお, 特に太陽が真上に位置して地表に垂直に入射する (つまり  $\theta = 0^\circ$ ) ときの日射量を  $I_N$  とおくと, 任意の  $\theta$  における日射量  $I$  は, (1) 式と (2) 式から導かれる (3) 式により求めることができる。

$$I = I_0 \cdot \left( \frac{d_0}{d} \right)^2 \cdot \left( \frac{I_N}{I_0} \right)^{1/\cos \theta} \quad (3)$$

地球上の場所と季節による大気組成の変化が無視できる場合には, 場所と時間の違いはすべて天頂角  $\theta$  の変化として, また季節変化は  $\theta$  と  $(d/d_0)^2$  の変化として表すことができる<sup>22, 25)</sup>。したがって  $\theta = 0^\circ$  のときの各成分の  $\tau_j$  を用いて  $I_N$  を求めておくと, 任意の条件下での  $I$  を求めることが可能である。

対象とする波長範囲 ( $0.2 \sim 3 \mu\text{m}$ ) で, 消散に関与する成分として取上げる必要があるのは, 紫外・可視部における酸素, オゾンおよび二酸化窒素の吸収, 赤外部における水蒸気と二酸化炭素の吸収, および全波長範囲における空気分子による

レイリー散乱とエアロゾル粒子によるミー散乱である。このうち酸素<sup>27, 28)</sup>, オゾン<sup>28-30)</sup>, 二酸化窒素<sup>28, 30)</sup> および空気<sup>6, 28, 31)</sup> については吸収 (あるいは散乱) 断面積と数密度のデータが各々入手可能であり, (2) 式から光学の厚み  $\tau_j$  を求めることができる<sup>6)</sup>。一方, 水蒸気<sup>32-35)</sup>, 二酸化炭素<sup>33, 34)</sup> およびエアロゾル粒子<sup>6, 36, 37)</sup> に関しては, 吸収線の重なりや散乱断面積データの不備などの理由により単純に光学の厚みを求めることが困難なので, (2) 式を用いないで各々の光学の厚み  $\tau_j$  を別の方法で求めることにする<sup>6)</sup>。したがって (1) 式中の全消散要素に基づく光学の厚み  $\tau$  は,  $\theta = 0^\circ$  の場合, (4) 式により算出することになる。添字  $R$  と  $M$  はそれぞれ空気 (レイリー散乱) とエアロゾル (ミー散乱) を表す。

$$\tau = \int_z^\infty (s_{O_2} n_{O_2} + s_{O_3} n_{O_3} + s_{NO_2} n_{NO_2} + s_R n_R) dz \\ + (\tau_{H_2O} + \tau_{CO_2} + \tau_M) \quad (4)$$

### 3. ソフトに取入れる機能と制約

#### 3.1 日射量計算上の制約

先ず, 本ソフトで用いる日射量の消散要素についてであるが, 今回は初版のソフトということでもあり, あまり計算を複雑化する要素を含めないことにした。(4) 式に出てくる 7 個の消散要素のうち, 赤外部に吸収をもつ水蒸気と二酸化炭素については, これらの吸収が非常に多数の吸収線から構成されており, 多数の波長における日射量を計算する必要がある。したがって計算時間が増加し, 結果を示す表も非常に肥大化するので, この 2 つの消散要素を割愛することにした。幸い図 1 からわかるようにエネルギー量である日射量として重要なのは可視部であり, この部分には水蒸気や二酸化炭素の吸収は存在しない。なお, 図示の波長領域では二酸化炭素の吸収は水蒸気の吸収に比較してかなり弱いので, 2 つの消散要素を除外することは, 結果的には乾燥空気の日射量を求めることにほぼ対応する。

日射量を求めるためには, 大気上端から地表に至るまでの各高度における大気組成に関するデー

タが必要である。単純に試算する場合には標準的な大気モデル（例えば U.S. 標準大気1976<sup>38)</sup>）を用いることも可能であるが、実際には大気組成は地球上の場所により変化し、また同一場所でも季節により変動する。この傾向は特にオゾン濃度などで顕著である。そこで、場所と季節についても少し細かく分類されている McClatchey らの大気モデル<sup>28)</sup>を用いることにした。このモデルでは、大気組成が熱帯、冬季中緯度、夏季中緯度、冬季寒帯、夏季寒帯の5つに分類されているが、ここでは夏季寒帯を除いた4つのモデルを用いることにする。ただこのモデルでは、冬季・夏季、熱帯・中緯度・寒帯という単純な区分なので、太陽—地球間の距離  $d$  の変化や天頂角  $\theta$  の変化の補正が難しい。したがって作成するソフトでは、あくまで基本となる日射量という意味で、 $d = d_0$  のときの  $\theta = 0^\circ$  における日射量  $I_N$  を求めることにする。

以上のことをまとめると、本ソフトに実際に取込む日射量の計算式は、(1)式と(4)式から得られる(5)式となる。

$$I_N = I_0 \exp \left\{ - \left( \int_z^\infty (s_{O_2} n_{O_2} + s_{O_3} n_{O_3} + s_{NO_2} n_{NO_2} + s_R n_R) dz + \tau_M \right) \right\} \quad (5)$$

計算にあたっては、大気上端を100kmとし、高度0～25km間では1kmごとに、25km～100km間では5kmごとに高度を区分し、全41高度における日射量を求めることにする。なお、用いた McClatchey らの大気モデル<sup>28)</sup>では高度が70km以上のデータが不十分なので、実際にはこれらの高度では U.S. 標準大気1976<sup>38)</sup>のデータで補足している。

用いる波長範囲は205～3,000nmであり、205～301nm間では7～12nm刻みで11点、301～350nm間では約10nm刻みで6点、350～1,000nm間では50nm刻みで13点、1,000～3,000nm間では100nm刻みで20点の波長を指定し、合計50波長における日射量を計算することにする。

### 3.2 ソフトに必要な機能

ソフトの作成に用いるプログラミング言語とし

ては、もともとの日射量シミュレーション自身が Microsoft 社の表計算ソフト Excel を用いて行われているので<sup>6)</sup>、その特性を利用する意味からも Excel に付随している VBA 言語 (Visual Basic for Applications) を用いることにする。VBA は Visual Basic 言語ではあるが、文字通り Excel というアプリケーションソフトの操作を効率よく行うためのプログラミング言語であり<sup>39, 40)</sup>、ここで用いるのは Excel 2000 に付随する VBA 6.0 である。VBA はオブジェクト指向のイベント駆動型プログラム言語であり、初心者でも見やすくわかりやすいソフトの作成が可能である。実際にプログラムを組むときは VBE (Visual Basic Editor) 上で、コードの記述やユーザーフォームの作成などを行う。

さてここで作成する日射量シミュレーションソフトに盛り込むべき機能として、以下のような事項があげられる。

①最終的な計算結果として、任意の高度における波長による日射量の変化（波長依存性）と任意の波長における高度による日射量の変化（高度依存性）の両者を求めることができるようにする。この場合、4種類の大気モデルのうちのどれか一つを画面上で選択できるようにし、波長依存性の計算においては、波長範囲をある程度自由に選択できるようにする。

②消散に関与する要素（全部で5個）を1個から5個まで自由に選択できるようにすると共に、各要素の数密度（濃度）を自由に増減できるようにする。

③いろいろな条件下で求めた日射量を10個程度までワークシート上に保存して、異なる条件下で得られた日射量の曲線をグラフ上で比較したり、各々をファイルとして記憶媒体に保存したり、印刷したりできるようにする。逆に保存してあったファイルを呼び出してプログラムの実行時に加工できるようにもする。

④さらに必要な機能としては次のような項目があげられる。まず、日射量を試算するときに用いる元データ（基礎データ）をプログラム実行中に自由に閲覧できるようにすることである。基礎

データとは、各波長における大気上端日射量、大気モデル別の各高度における大気組成、各消散要素の消散断面積の値などであり、あらかじめ何枚かのワークシートに格納されているが、これらの基礎データの閲覧は計算で得られた結果の妥当性などをチェックするときに必要となる。また、作成されたグラフの最大値・最小値などの書式をプログラム中で変更できることも望ましい。

なおVBAでは、プログラムを実行中はユーザーがExcelを操作できないという問題点がある。例えば、プログラムを実行して日射量が求まっても、プログラムを終了させない限り計算結果を示すワークシートをスクロールできない。したがって、画面からはみ出している部分の数値等をチェックできないので、ソフトの使用上かなり不便である。その対策として、本ソフトではスピンボタンの機能を用いることにした<sup>39)</sup>。

#### 4. 作成したソフトの内容

##### 4.1 ソフトの全体構成

前章の考えにより作成したソフトのファイル「日射量シミュレーション.xls」の全体構成を表1に示す。本ソフトの中核をなす演算やグラフ作成などの各プロセスの内容は、標準モジュールであるSM1「モジュール1」上にコードとして詳しく記述されている。またユーザーインターフェースとして16個のユーザーフォームUFが用意されており、ユーザーと対話しながら各種の作業を進めることができるようになっている。ワークシートWSは全部で20枚用意されており、このうちWS1～WS5までの5枚のシートには日射量の計算に必要な元データ（基礎データ）が収納されている。WS1は各波長における大気上端日射量と各消散要素の消散断面積等に関するデータであり、WS2～WS5は大気モデル別の各高度における各消散要素の数密度等のデータである。なお、各大気モデルの名称は、ソフト中では夏季熱帯、冬季温帯、夏季温帯、冬季寒帯となっている。計算結果を収納するワークシートとしてWS6～WS15までの10枚が用意されており、条

表1 「日射量シミュレーション.xls」の全体構成

標準モジュール SM	
SM 1	モジュール 1
ユーザーフォーム UF	
UF 1	メインメニュー
UF 2	基礎データ
UF 3	演算メニュー 1
UF 4	演算メニュー 2
UF 5	高度依存性の演算要素
UF 6	高度範囲
UF 7	濃度選択
UF 8	濃度変化
UF 9	波長依存性の演算要素
UF10	計算済みデータ
UF11	グラフデータ選択
UF12	グラフの設定 1
UF13	グラフの設定 2
UF14	複合グラフ
UF15	印刷設定
UF16	保存
ワークシート WS	
WS 1	波長依存性のデータ
WS 2	高度依存性の夏季温帯のデータ
WS 3	高度依存性の夏季熱帯のデータ
WS 4	高度依存性の冬季温帯のデータ
WS 5	高度依存性の冬季寒帯のデータ
WS 6	計算結果 1
WS 7	計算結果 2
WS 8	計算結果 3
WS 9	計算結果 4
WS10	計算結果 5
WS11	計算結果 6
WS12	計算結果 7
WS13	計算結果 8
WS14	計算結果 9
WS15	計算結果10
WS16	計算済みデータ
WS17	グラフ作成 1
WS18	グラフ作成 2
WS19	グラフ作成 3
WS20	複合グラフ作成

件の異なる計算結果を WS 6 から順番に最大10個まで収納可能である。個々の計算結果に対応したグラフを作成するために WS17～WS19までの3枚のシートが用意されているが、これとは別に複数の結果を比較して1枚に描くための複合グラフ作成用シート WS20も用意されている。

#### 4.2 プログラムの流れ

実際にプログラムを実行すると初期化を経て、ユーザーフォーム UF 1「メインメニュー」ダイアログボックスが表示される。すべての作業はこのメインメニューを通じて行うが、その機能を図2に示す。通常は先ず「演算」を選択して日射量の計算から開始するが、この演算ループの流れを図3に示す。例えばメインメニューの演算ボタンをクリックして最初に表れるダイアログボックスが UF 3「演算メニュー1」で規定される「地域・季節の選択」画面であり、コンボボックスに示さ

れる4つの大気モデルの中から一つを選択できるようになっている。UF 4「演算メニュー2」で波長依存性か高度依存性のどちらかを選択し、ついで波長の選択へと進む。ただし波長依存性を選択した場合には、計算時間の節約と結果の肥大化を防止するために、現状では計算する波長の個数を6個に限定している。そのために波長範囲を、「全波長(205～3,000nm)」、「紫外部(205～345nm)」、「可視部(350～850nm)」、「赤外部(750～3,000nm)」の4つに分けて選択できるようにした上で、各々の波長領域にあらかじめ定めた6個の波長を割り当てている。次いで高度の選択、消散要素とその濃度の選択を行うと、日射量の演算が開始され、最初の計算結果が WS 6 上に記録されていく。演算が終了すると再びメインメニューが表示され、次の作業を選択できるようになる。



図2 メインメニュー

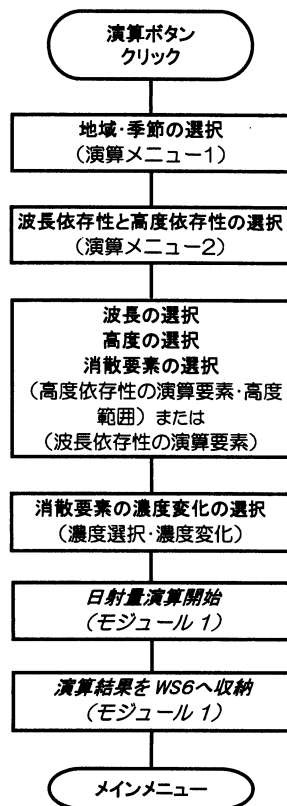


図3 演算操作の流れ

なお, すでに(5)式で示したように, ミー散乱に関しては他の消散要素と異なる方法で光学的厚みを求めるので<sup>6)</sup>, それに応じてプログラム中でも他の消散要素とは計算の流れが異なっている。

図2に示すように, メインメニューでは演算以外に, 個々のグラフ作成, 2個以上の曲線表示のための複合グラフ作成, 印刷, 保存などの機能のほかに, 基礎データを表示したり, 保存されたファイルからデータを読み込み機能などを有する。これらの機能もすべて表1に示すいずれかのユーザーフォームを経由して実行される。

## 5. ソフトを使用して

### 5.1 シミュレーションで得られる結果

作成したソフトを使用して日射量を定量的に求めることにより, 日射量に関するいろいろな情報を入手することができる。どのような情報が得られるのか, ここではいくつかの例に限定して紹介する。なお, ここで取上げるのはいずれも季節・地域の選択で夏季温帯を指定した例である。

図4は, 紫外～近赤外領域の5つの波長を用いて, 日射量が高度と共にどのように減衰するのかを表している。ソフト上では, 高度依存性を選択し, 標準濃度の全消散要素を用いて日射量を求める作業を5つの波長で繰り返し行い, 最後に複合グラフ作成機能を利用してグラフ化したものである。

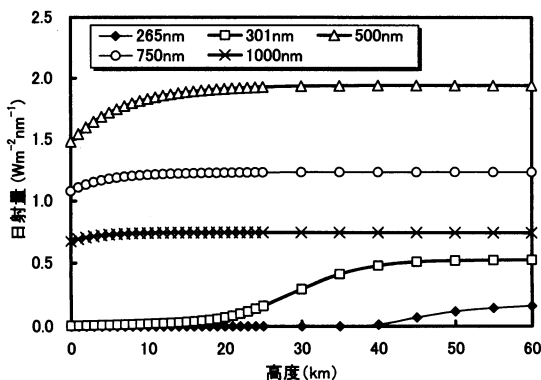


図4 標準濃度の全消散要素による日射量の高度変化(夏季温帯, 波長別)

る。紫外部の265nmと301nmの2つの波長については, 大気上端までは光が届いているものの, 高度20kmよりも上空の成層圏を通過中に, 特に265nmの場合には完全に減衰してしまい地表まで届いていない様子が理解できる。一方, 可視・近赤外部の光は紫外線とは異なり成層圏での減衰はあまり起きない。しかしこれらの波長域でも波長の短い光では対流圏に入ると明らかに減衰しはじめ, 500nmの可視光線ではほぼ20%減衰して地表に到達する。これに対して1,000nmでは対流圏でもほとんど減衰しないので, 大気上端の日射量がほぼそのまま地表に到達している。

図5は, 図4で示された日射量の減衰にどの消散要素が寄与しているかを探るために, 標準濃度の消散要素が各々単独で存在するとした場合の日射量の高度変化を示したものである。波長301nmにおける計算例であるが, この波長では酸素は消散に関与しないので, オゾン, 二酸化窒素, レイリー, ミーの4つの消散要素を用いて別々に高度依存性の計算を行い, 最後にこれらすべてを同時に含む「全」の計算を行って, 複合グラフを作成した。実際の日射量は当然「全」に相当する。地表近くではわずかに差があるとは言うものの, 「全」は全高度域でオゾン単独の日射量と極めてよく一致している。つまり, 301nmの日射量が地表にごくわずかししか届かないのは, 成層圏に存在するオゾンの吸収によることが明確に裏付けら

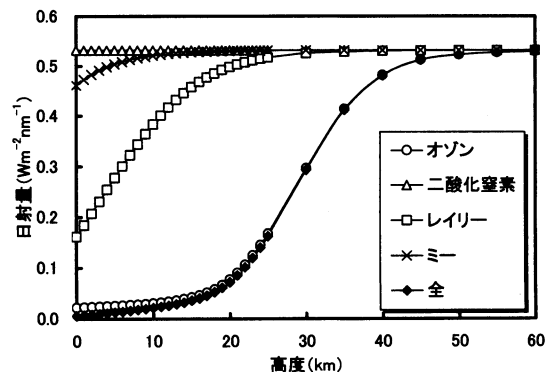


図5 標準濃度の各消散要素による日射量の高度変化(夏季温帯, 波長301nm)

れている。実は、この波長ではレイリー散乱による減衰も大気圏下部では非常に大きいのであるが、オゾンによる吸収があまりにも強すぎて、レイリー散乱の影響が実際の日射量にはほとんど反映されないことも分かる。ただしオゾンによる吸収は、可視部にある非常に弱い吸収を無視すれば、事実上350nm以下の波長に限定される。また、ここには示さないが波長を変えて行った計算から、レイリー散乱とミー散乱の影響は共に波長が長くなるほど弱くなり、しかもレイリー散乱の方がミー散乱よりもより早く影響が弱まることが分かった。したがって500nmを境として、この波長以下ではレイリー散乱による日射量の減衰が大きく、これ以上ではむしろミー散乱による減衰の方が大きくなる。このことから、図4に示した波長500nmにおける対流圏内での減衰には、2つの散乱効果が同程度に寄与していることが分かる。

図5で、生物に有害なUV-Bという波長域に属する301nmの紫外線が、成層圏を通過中にオゾンにより吸収され、地表にはごくわずかししか届かないことを述べた。それではオゾン濃度が標準濃度よりも減少したら地表到達紫外線量がどの程度増加するのであろうか。そこで消散要素としてオゾンのみを選択し、その濃度を変えて高度依存性の計算を数回繰返した結果を複合グラフにまとめたのが図6である。オゾン濃度が標準濃度の半

分である50%減少の場合には、地表紫外線量が実に約5倍に増加してしまう。南極では、たとえそれが春というある時期に限定されているとはいえ、オゾン濃度が20年前に比べて半分に減少しているといわれており<sup>41)</sup>、ゆゆしき問題である。301nm以外の紫外線で同種の計算を行うことにより、紫外線の増加率は波長によって大きく異なることも知ることができる。

地球に供給されるエネルギー源という意味では、日射量のうちでも特に可視光線が重要である。この可視部の日射量に影響を与えるのは主として散乱効果であるが、このうちレイリー散乱は空気分子による散乱でありその影響度は不変といえる。一方、ミー散乱は大きさが波長よりやや小さいかそれ以上の半径(波長の0.1倍～25倍程度)をもつエアロゾル粒子による散乱である<sup>36, 42)</sup>。エアロゾル粒子は自然界と人間活動の両者によって発生しその濃度はかなり変動するので、ミー散乱の大きさも変動することになる。そこで消散要素としてエアロゾルのみを選択し、標準濃度と標準濃度の2倍の場合について波長依存性の計算を行い、複合グラフに描いたのが図7である。エアロゾル濃度が2倍になると明らかに日射量は減少し、500nm付近の波長では13%程度の減少となる。地表へのエネルギー収支を用いた非常に大まかな計算法<sup>2)</sup>によると、仮に地表への日射量が全波長範囲で13%減少すると地球の気温

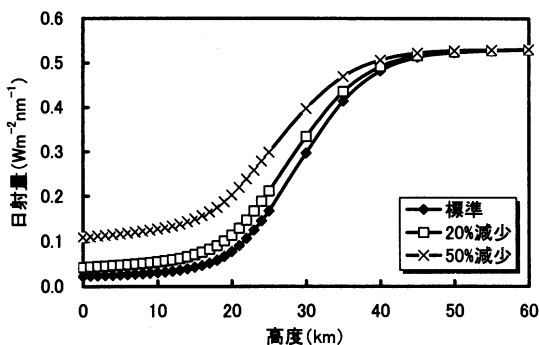


図6 オゾン濃度の変化による日射量の変化  
(夏季温帯、波長301nm、消散要素はオゾンのみ)

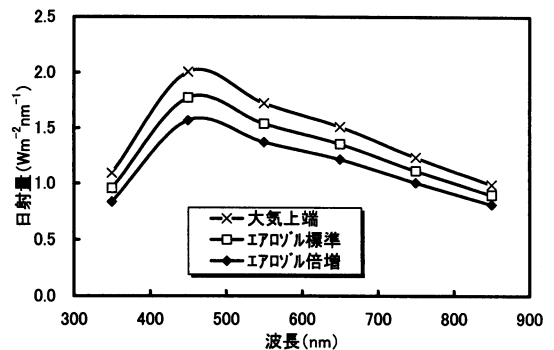


図7 エアロゾル濃度の変化による地表到達日射量の変化  
(夏季温帯、可視部、消散要素はエアロゾルのみ)



は10℃も低下することになる。

## 5.2 教育現場で使用して

最近大学における情報リテラシー教育<sup>43)</sup>はその必要性を増しているが、同時に、今後もますます必要性が増す自然科学面での教育と情報入手の手段としてのコンピュータの活用も盛んになっている。特に複雑な自然界の現象を単純なモデルに組み立ててコンピュータ上で再現するシミュレーションの分野<sup>44)</sup>ではその傾向が強い。このことは自然科学を専門とする学生の場合のみならず、非理系の学生教育にもあてはまる。したがって、21世紀の女性に必要な自然科学的素養を女子大で育成する手段としてのシミュレーション教育は重要である。その視点から、著者の1人はこれまでに大気環境問題に関するシミュレーション教育の具体的内容について報告してきた<sup>6-8)</sup>。ただ、そこで用いられている手法は、シミュレーションに必要な準備と作業を各々のユーザーが一から十まですべて行う必要がある。つまりある環境問題をシミュレーションするのに必要な専門知識の勉強から始まって、表計算ソフト Excel へのデータと数式の入力を経て、結果を出力するまでのすべての過程を完全に理解して実行する必要がある。この作業を通じて、学生本人は当該環境問題の本質を十分理解できる能力を身につけることができ、教育的意味合いは大きい。しかし、残念ながらこの教育法で教育できる学生数は必然的に非常に限定されてしまう。

一方では、本質的理解からは遠のくにしても、より多くの学生に環境問題を理解してもらう教育も大切である。非常に多くの情報が氾濫し、小学校入学以来大学に至るまでの間に学ぶべき内容が飛躍的に増大している現在では、学生にとって多くのことをすべて深く学ぶことは不可能である。自分の専門については深く学ぶ必要があるが、それ以外については物事を合理的に判断できる程度の教養的素養を身につけるという程度にならざるを得ない。その意味で、今回作成した日射量シミュレーション用ソフトは、特別な事前教育を受けることなく、日射量がどのような条件によってど

のような影響を受けるのかを知ることができ、多くの学生が環境問題についての理解を深める上で非常に有用である。もちろん、本来は最も重要であるはずの日射量算出の仕組みなどは、プログラムの奥深くにしまい込まれておりまったく表には出てこない。逆にこのブラックボックス的使い方が、多くの学生にとってなじみ易い要因ともなっている。以下では本稿で作成したソフトを、教育現場等で実際に使用して感じた教育効果などについて述べる。

先ず、本学部の社会環境情報学専攻3年生向けの必修のコンピュータ実習授業における使用例である。この授業では、全体としては社会科学から自然科学にわたる各種環境問題に関する題材を、主に Excel のワークシートを用いて試算や分析を行って、環境問題に対する理解を深めている。その中の1週分の題材として本稿で作成したソフトを使っている。このソフト自体はかなり広範囲の内容を含んでいるので、1週分の題材としては、オゾン層の破壊に関連して関心の深い紫外線に焦点を絞っている。具体的には、①オゾン濃度が減少すると地表に到達する紫外線量がどれだけ増加するか（その波長依存性）、②上空から地表に至るまでの各高度で紫外線量がどのように変化するのか、そして任意課題としての③空気の散乱（レイリー散乱）が紫外線量にどのような影響を与えるか、という課題である。ほとんどすべての学生にとって VBA プログラムの使用は初めてということもあり、この1週分だけで8千字程度のマニュアルを作成して学生に参照させている。ただし日射量を求める原理などは、説明する時間も紙面的ゆとりもないのでほとんど何も記載しておらず、もっぱらコンピュータ操作上の細かい指示が中心である。この点教育的には幾分不安もあるが、原理を理解させるために要する労力は教員・学生の双方にとって予想以上に大きく、現実にはソフトを使って得た結果から何らかの情報を把握させる方がむしろ好結果を生むようである。90分という限られた時間の中でマニュアル片手にあまり本質を考えることなくソフトを使うことになるが、波長を選択したり消散要素を選択したりという作業

を通じて、自動的に紫外線量に影響を与える因子についての理解が深まる。さらに、結果として例えば図6のようなグラフを得てレポートとして提出する段階で、どの高度にオゾンが存在するのか、オゾン濃度が半減すると紫外線量が何倍に増えるのか、それは波長によって変化するのか、などについても理解が可能となる。先ほど述べた教養的素養を培うという意味では、計算法まで立ち入らないこの程度の理解で十分と言えよう。必修授業であるだけに、自然科学的思考が苦手な学生もかなりいるが、ソフトを使っただけの学習法ということなので、程度の差はある程度理解は得られているようである。その理解の程度は学生が提出するレポートで判断可能である。

ソフトといういわば出来上がっている一つの作品を使う場合には、通常の授業以外にもいろいろなデモンストレーションの場がある。オープンキャンパスにおける体験授業で高校生にこのソフトを実際に使ってもらうとか、大学祭にゼミとして参加しこのソフトをいろんな階層の人に使ってもらうなどである。このことを通じて、大学と来校者との間のよりよいコミュニケーションをはかることができ、一方では環境問題を大学外の人に多少なりとも理解していただくよい機会ともなっている。ここでは、30台のWindows機が設置されている実習室で行った大学祭での使用例について述べる。進め方としては、各ユーザー（来室者）がチューターの操作する画面をモニターしながらチューターの解説を聞き、それに合わせてユーザー自身もソフトを操作するという方法である。1回20～30分程度の所要時間とし、内容的には関心の深さからみてオゾン濃度の減少がどれだけ紫外線量を増加させるのかについて、高度依存性のグラフを描かせるのがよい。そのグラフを印刷して各ユーザーが持ち帰ることができるようにしておく。実際にはソフトを使う前に前半の10分程度の時間で、オゾンホールを経年変化や太陽光の全波長域スペクトルなどの図をモニター画面に示しながら予備的解説を行うと、その後で用いるソフトの内容についての心理的準備ができて効率がよくなる。あらかじめオゾンと紫外線との関係

に関するコンピュータ実習であることを意識しての来室者ということもあり、終了後もかなり質問が出るなど、関心の深さをうかがい知ることができる。特に印象的だったのが、経済学部男子学生のグループが、ソフト操作上では表面に出ない紫外線量の計算の中身について熱心に質問したり、小学生の男の子と一緒に見えた若い父親が、描かれたグラフの意味について一生懸命子供に説明している姿である。とはいえ、大学祭でのコンピュータ実習にはかなり課題もある。現在では大学祭の主体は屋外のいわゆる模擬店が中心であり、建物内で行われるコンピュータ実習に人を集めることは必ずしも容易ではない。いきおい、簡単なゲームなども一緒に準備することになるが、小学生に席を占拠されかねない。いずれにせよ老若男女いろいろなレベルの人が対象となるので、それに対応するだけの準備は必要である。また、ソフト操作のチューター役としてゼミの4年生5、6名が一人ずつ交代で担当したが、大部分は日射量について素人なので事前の特別訓練も欠かせない。

その他、公開講座やオープンキャンパスでの全体説明会などでも、あらかじめ本ソフトを用いて作成したグラフをもとに説明したり、指定校訪問時に本ソフトをフロッピーに収納して持参し、解説マニュアルと共に高等学校に配布して本学部の授業の一端を紹介するなどして活用している。また卒業研究でも、二酸化炭素の海洋への取込み量のシミュレーションなど、日射量とは別の環境問題に関するVBAプログラムを作成する場合に、本ソフトの基本構造や考え方は大いに参考になっている。

## 6. おわりに

地球温暖化や紫外線の増加といった地球環境問題に、直接・間接に幅広く関係する日射量の値を、多くの人になじみ深い表計算ソフトExcel上で、画面上の指示にしたがって容易に算出しグラフ化できるアプリケーションソフトを作成し、さらにこのソフトを実行して得られるシミュレー

シミュレーション結果の解釈と教育現場での使用効果について述べた。あまり抵抗を感じることなく、日射量について多数の学生や学外者にある程度までの理解を与えることができるという意味で、このようなソフトの開発と使用は大きな意味をもつ。このソフトでは、水蒸気を含まない乾燥空気を対象にしているとはいえ、日射量の消散を事実上支配している5つの消散要素すべてについて、200~3,000nmという太陽光のほぼ全波長範囲において、濃度変動の場合も含めて日射量の計算が可能である。データの保存や印刷の機能、複合グラフの作成なども可能であり、かなり使い勝手もよく高機能である。

しかし、一方では今後改良が求められる機能も少なくない。一つは、波長依存性を選択したときに用いる波長の個数である。現在のソフトでは、実際には50個の波長が登録されているが、計算結果として得られる表の肥大化を抑えることを主な理由として、一度に用いることができる波長の個数を6個に限定しており、しかもその波長はあらかじめプログラム中で指定されている。実際に計算を行う場合にも、最大で登録してある50個の波長すべてを用いることができるような工夫が必要である。さらに水蒸気（および二酸化炭素）の存在を無視している点に関しても改善が望まれる。地表に到達する日射量は水蒸気による吸収の影響を受けており、その吸収は赤外部に限定されるとはいえ、図1に見るように決して無視できる大きさではない。すでに2章で述べたようにその計算法自身は確立しているので、二酸化炭素の吸収と水蒸気の吸収を何らかの形でプログラム中に取込む努力が必要である。

より本質的な改善が望まれる事項として、本ソフトが求めている日射量が、太陽—地球間距離 $d$ が平均距離 $d_0$ に等しく、なおかつ天頂角 $\theta = 0^\circ$ における日射量 $I_N$ であることがあげられる。例えば、冬季寒帯で太陽が真上に来る $\theta = 0^\circ$ という状況はあり得ないわけで、このこと自体が本プログラムの粗さを示している。何らかの工夫により、地域・季節により異なる4つの大気モデルに対してこれらの補正を行うことが望まれる。

なお、本ソフトの作成と本論文の執筆にあたっては、土佐美也子<sup>13)</sup>、小高栄子<sup>14)</sup>、会田一奈<sup>15)</sup>、金澤洋子<sup>16)</sup>、鈴木紀子<sup>17)</sup>、市倉真理子<sup>18)</sup>、古瀬優美<sup>19)</sup>の各卒業研究がその基盤にあることを付記して、謝意を表する次第である。

ここで作成したアプリケーションソフト「日射量シミュレーション.xls」を頒布ご希望の方は、その旨ご連絡下さい。

## 参考文献

- 1) 日本気象学会編, 1998年, 気象科学事典, 東京書籍.
- 2) 進藤勇治編著, 1993年, 地球を包む大気, オーム社.
- 3) 安成哲三編, 1999年, 大気環境の変化, 岩波書店.
- 4) 日本化学会編, 1990年, 大気の化学, 学会出版センター.
- 5) 真木太一, 2000年, 大気環境学—地球の気象環境と生物環境, 朝倉書店.
- 6) 伊藤朋恭, 2000年, シミュレーション的手法による地球環境情報の把握—日射量を題材として, 社会情報学研究, 9, 45–61.
- 7) 伊藤朋恭, 1999年, 科学にうとい女子学生を減らすための実践的教育法—表計算ソフトの活用について, 社会情報学研究, 8, 127–137.
- 8) 伊藤朋恭, 2001年, シミュレーション的手法による大気環境情報教育—二酸化炭素の海洋への取込み, 社会情報学研究, 10, 51–63.
- 9) 横山長之編, 1991年, 地球環境シミュレーション, 白亜書房.
- 10) 横山長之編, 1992年, 大気環境シミュレーション—大気の流れと拡散, 白亜書房.
- 11) 横山長之編, 1993年, 海洋環境シミュレーション—水の流れと生物, 白亜書房.
- 12) 河村哲也, 1998年, 環境科学入門—地球環境問題と環境シミュレーションの基礎, インデックス出版.

- 13) 土佐美也子, 1998年, 大気環境シミュレーション—オゾン濃度の減少にともなう紫外線強度変化の予測, 平成9年度卒業研究.
- 14) 小高栄子, 1999年, オゾン減少による紫外線強度変化シミュレーション—エアロゾルによる散乱の影響, 平成10年度卒業研究.
- 15) 会田一奈, 2000年, 大気環境シミュレーション—大気成分と日射量, 平成11年度卒業研究.
- 16) 金澤洋子, 2001年, 赤外部を中心とする日射量シミュレーション, 平成12年度卒業研究.
- 17) 鈴木紀子, 2001年, 大気圏のオゾン濃度シミュレーション, 平成12年度卒業研究.
- 18) 市倉真理子, 2002年, 大気環境シミュレーション—オゾンの濃度分布と紫外線量, 平成13年度卒業研究.
- 19) 古瀬優美, 2002年, 大気環境シミュレーション—季節・地域による日射量の変化, 平成13年度卒業研究.
- 20) 河西智子, 2000年, 大気環境シミュレーション—VBAによる大気成分と日射量の視覚化, 平成11年度卒業研究.
- 21) 田口佳苗, 2001年, 日射量シミュレーション—VBAによるプログラミング, 平成12年度卒業研究.
- 22) 柴田和雄ほか編, 1987年, 太陽エネルギーの分布と測定, 学会出版センター.
- 23) 近藤純正, 2000年, 地表面に近い大気の科学—理論と応用, 東京大学出版会.
- 24) D. R. Lide Ed., 1994年, CRC handbook of chemistry and physics (75th Ed.), CRC Press (Original report: M. P. Thekaekara, 1974年).
- 25) 近藤純正編, 1994年, 水環境の気象学—地表面の水収支・熱収支, 朝倉書店.
- 26) 小川利紘, 1991年, 大気の物理化学—新しい大気環境科学入門, 東京堂出版.
- 27) K. Yoshino *et al.*, 1988年, Improved absorption cross-sections of oxygen in the wavelength region 205-240nm of the Herzberg continuum, *Planet. Space Sci.*, 36, 1469-1475.
- 28) 茅陽一編, 1993年, 地球環境工学ハンドブック, オーム社 (原報: R. A. McClatchey *et al.*, 1972年).
- 29) L. T. Molina *et al.*, 1986年, Absorption cross sections of ozone in the 185- to 350-nm wavelength range, *J. Geophys. Res.*, 91, 14501-14508.
- 30) 松野太郎ほか, 1981年, 成層圏と中間圏の大気, 東京大学出版会.
- 31) D. R. Bates, 1984年, Rayleigh scattering by air, *Planet. Space Sci.*, 32, 785-790.
- 32) 柴田清孝, 1999年, 光の気象学, 朝倉書店.
- 33) 広田勇ほか訳, 1981年, 大気物理学, みすず書房 (原著: J. T. Houghton, 1976年).
- 34) 会田勝, 1982年, 大気と放射過程—大気の熱源と放射収支を探る, 東京堂出版.
- 35) P. Koepke *et al.*, 1978年, Water vapor: Spectral transmission at wavelengths between 0.7 $\mu$ m and 1 $\mu$ m, *Appl. Optics*, 17, 2114-2118.
- 36) 朝倉正ほか編, 1995年, 新版気象ハンドブック, 朝倉書店.
- 37) O. B. Toon *et al.*, 1976年, A global average model of atmospheric aerosols for radiative transfer calculations, *J. Appl. Meteor.*, 15, 225-246.
- 38) D. R. Lide Ed., 1994年, CRC handbook of chemistry and physics (75th Ed.), CRC Press (Original report: NASA, 1976年).
- 39) 杉松秀利, 1999年, はじめてのExcel 2000 VBA, ナツメ社; 大村あつし, 1999年, かんたんプログラミング Excel 2000 VBA 基礎編, 技術評論社; アスキー書籍編集部編, 1999年, Excel 2000 VBA リファレンス, アスキー; 安部一義ほか, 2000年, Excel 2000 VBA ハンドブック, ナツメ社.
- 40) 伊藤朋恭, 1997年, スペクトルデータ情報の共有化—共通フォーマット化赤外スペクトルデータのパソコン上での利用, *社会情報学研究*, 6, 37-50.

- 41) 日本気象協会編，2000年，気象年鑑2000年版，大蔵省印刷局。
  - 42) 地球環境データブック編集委員会編，1993年，ひと目でわかる地球環境データブック，オーム社。
  - 43) 例えば，内桶誠二ほか，2001年，情報リテラシー，学術図書出版；富山大学情報処理教育研究会編，1999年，大学生の情報リテラシー入門第3版，学術図書出版。
  - 44) 岡崎 進，2000年，コンピュータシミュレーションの基礎，化学同人。
-

## Preparation of Software to Simulate the Amount of Solar Radiation Energy and Its Use in Education for Atmospheric Environmental Information

TOMOYASU ITO\*, TOMOKO KASAI\*\* and KANAE TAGUCHI\*\*\*

*\*School of Social Information Studies, Otsuma Women's University*

*\*\*School of Social Information Studies, Otsuma Women's University  
(Present Affiliation : Sakura Information Systems Co. Ltd.)*

*\*\*\*School of Social Information Studies, Otsuma Women's University  
(Present Affiliation : Toshiba Information Systems Co. Ltd.)*

### Abstract

The amount of solar radiation energy relates directly and indirectly to many global environmental problems, and its quantitative and correct understanding is an important factor in university education for these environmental problems. Numerical simulation working on spreadsheets using a personal computer is an effective method for such an education, and the authors have developed software to simulate the change in amounts of solar radiation energy. The software is described by VBA programming language on Excel and simulation is carried out under various conditions through dialogue with a computer.

It has been revealed through actual usage of this software in classes and other opportunities that many women students not familiar with natural science are able to understand without a great deal of difficulty important factors affecting the change in amounts of solar radiation energy. Therefore use of this kind of software is beneficial in environmental education though software itself is rather blackbox in nature as an educational tool.

### Key Words (キーワード)

Amount of solar radiation energy (日射量), Software (ソフトウェア), Simulation (シミュレーション), Atmospheric environment (大気環境), Environmental information (環境情報), Education in science (科学教育), VBA (ヴィビーエー)