

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—

伊藤 朋恭*

要 約

地球環境にかかわる情報の本質を正しく把握できるようになる手法として、表計算ソフトを用いるシミュレーション教育が有効である。特に、自然科学を専門としない女子学生に対する卒業研究段階におけるシミュレーション教育は非常に有意義である。そのための具体的題材として日射量を取りあげ、周到な前準備に基づいて学生のレベルに適合するように工夫された教育内容を提案した。

このような教育がより大きな効果を発揮するための条件として、複雑な現象を単純化された合理的モデルに組立てること以外に、学生に対する段階を踏んだ事前教育が必要不可欠である。後者の教育では、日射量に関する基礎事項、シミュレーションに必要な解法、必要なデータ源、などについて丁寧な内容を教授することが重要である。

1. はじめに

21世紀を迎えるにあたり、地球温暖化やオゾン層破壊などの問題が一段とクローズアップされている。これら地球環境にかかわる問題の今後の処理法や方向性を探るためには、これらの問題から発せられる情報の正しい理解と解釈が必要になる。環境情報に関するそのような理解を少しでも可能にするための一つの手法として、コンピュータ（パソコン）によるシミュレーション（数値シミュレーション）が有用であり、多方面で応用されている¹⁻⁷⁾。

著者は、昨年度の本誌において非理系女子大における自然科学系教育の一環としてコンピュータを用いた教育システムについて提案した⁸⁾。そこでは、教育段階をいくつかに分け、各段階にふさわしい教育内容を設定することが重要であることを述べた。その区分法として、具体的には1年次後半の教養科目としての基礎段階、2年次の専門科目としての中級段階、そして3年次の個別指導科目としてのゼミ段階、を提案した。そして3年次のゼミ段階の教育内容としてシミュレーションの初歩を取りあげ、紫外部に限定した簡単な日射量問題への適用について触れた。しかしこれら3年次での教育内容は、あくまでも4年次でのやや本格的な卒業研究レベルでのシミュレーションを想定した内容であり、卒業研究への導入段階という位置付けをもつに過ぎない。

*大妻女子大学 社会情報学部

これらの経緯を踏まえ、本稿では卒業研究レベルを中心としたシミュレーション教育について述べる。取りあげる具体的題材は、太陽からの日射量がどのような要素によってどの程度の影響を受けるのか、と言う内容であり、オゾン層の破壊や地球温暖化などの環境問題に関連した重要な題材である。この卒業研究段階におけるシミュレーション教育が、非理系女子大における環境情報の本質的理解にとって有意義な手法であることを述べ、合わせてその成果と教育効率を高めるための工夫などについて考察を加える。

2. 日射量シミュレーションの基礎と方法

太陽光（太陽が放射する電磁波）のうちある点に届いたものを気象学的に日射と言うが⁹⁾、日射は地球上における大気や生物活動の唯一のエネルギー源となっている。日射は、大気中で散乱や吸収を受けないで直接届く直達日射と、大気中で散乱された散乱光とに分けることができるが、本シミュレーションで扱うのは直達日射である。

日射のエネルギー量を意味する日射量が、どのような要素によってどのように影響を受けるのかを定量的に理解できるようにすることが、本シミュレーション教育のねらいである。この場合、大気による日射量の減衰、つまり大気中の物質と太陽光の相互作用という内容的には物理学の分野に属する題材を、いかに非理系女子学生のレベルに合致した内容に整理して提供できるのかが教育上のポイントとなる。このことを念頭において事象の本質部分は活かしつつ、学生にも理解が可能な程度に単純化した日射量シミュレーションの基礎的取扱いを具体的に本章で記述する。

なお、ここで行なうシミュレーションは数値シミュレーションであり、得られた結果を表およびグラフに表示したり、さらにはシミュレーションの全過程を応用ソフトに組上げて利用する、などの発展性を考慮して、シミュレーションには表計算ソフト Excel (Windows 版) を用いている。

2.1 消散と日射量の基本式¹⁰⁻¹²⁾

太陽から放出された光は、大気中のいろいろな成分によって吸収あるいは散乱（両者を合わせて消散という）されて弱まりながら地表に到達する。太陽光が図1に示すような光路 x に沿って進む場合、大気中に存在する1個の分子（あるいは粒子）によって消散される大きさは、次式で定義される消散断面積 s_c を用いて表される。

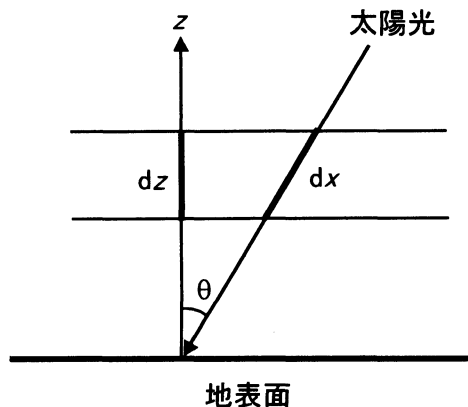


図1 光路の座標

$$s_c = -\frac{1}{I} \frac{dI}{ndx} \quad (1)$$

I は光の強度 (つまり日射量), n は消散に関与する成分の数密度であり, ともに x によって変化する。もちろん s_c は波長の関数である。

(1)式を光路 x に沿って積分すると任意の x における I を求めることができるが, いま θ を天頂角として地表から鉛直上向きに z 軸をとり x を z に置き換えると, 光路長 dx に沿っての積分を垂直高度 z に沿っての積分に置き換えることができる。

$$I = I_0 \exp\left(-\int_0^x s_c ndx\right) = I_0 \exp\left(-\sec\theta \int_z^\infty s_c ndz\right) \quad (2)$$

I_0 は $x = 0$, つまり大気上端における日射量である。したがって, n の高度分布と任意の波長における I_0 と s_c が既知であれば, (2)式によりその波長における任意の高度での I を求めることができる。なお, (2)式の右端カッコ内を $-\tau$ とおくと,

$$\tau \equiv \sec\theta \int_z^\infty s_c ndz \quad (3)$$

この(3)式で定義される τ (無次元) は光学的厚みと呼ばれ, 日射量が $1/e$ に減衰する気層の厚みに対応している。この τ を用いると(2)式は次のようになる。

$$I = I_0 \exp(-\tau) \quad (4)$$

つまり, 任意の高度 z における I を求めるには, その高度 (その高度より上層全体) での光学的厚みを求めればよいと言うことである。また I/I_0 は光の透過率 T を意味するので, 光学的厚みと透過率との間には次の関係がある。

$$T = I/I_0 = \exp(-\tau) \quad (5)$$

なお, 消散過程には吸収と散乱があり, さらに吸収や散乱にはおのおの複数の成分が関与するので, 全体としての s_c , n や τ は実際には各種成分の和として表される。添字 j を消散に関与する成分とすると,

$$\tau = \sec\theta \int_z^\infty \left(\sum_j s_{cj} n_j\right) dz = \sum_j \tau_j \quad (6)$$

また, 消散断面積は, 具体的には吸収断面積 σ あるいは散乱断面積 α で表される。

2. 2 大気上端日射量および大気モデル

(4)式から日射量を求めるためには, 各成分の消散断面積 (波長依存) と数密度 (高度依存), 大気上端日射量 (波長依存), などの数値データを入手する必要がある。自然科学に関する情報検索に不慣れな学生自身の手でこれらのデータを見つけ出すことはかなり困難なので, 基本的には教員があらかじめ検索して準備した適切なデータを用いることになる。

大気上端日射量については信頼性の高い NASA の報告値¹³⁾を用いたが, そのデータを表 1 に示す。元のデータは波長範囲 $0.1 \sim 100 \mu\text{m}$ 超に渡って掲載されているが, 太陽エネルギーの 98% が $0.2 \sim 3 \mu\text{m}$ の範囲に存在するのでシミュレーションはこの波長範囲で行なった。大気についても温度, 数密度等の高度依存性のデータが必要であり, もっともよく引用されている McClatchey らの大気モデル¹⁴⁾のデータを用いた。彼らの大気モデルには 5 種類あるが, そのうちの一つである夏季中緯度モデルのデータを表 2 に示す。なお, 計算に用いた高度範囲は地表から 100km までであるが, McClatchey らのデータでは高度 70km よりも上空のデータが不十分なので, 米国標準大気モデルのデータ¹⁵⁾で補足した。

2. 3 吸収に関与する成分

対象とする波長範囲 (0.2~3 μm) で、吸収に関与する成分として取りあげる必要があるのは、紫外・可視部のオゾンと酸素、赤外部の水蒸気と二酸化炭素である。これ以外に二酸化窒素や二酸化イオウなども存在するが、今の目的には数密度が小さいか吸収断面積が小さいかのいずれかの理由により考慮しなくてよい。紫外・可視部の吸収と赤外部の吸収とは取扱いに違いがあるので両者を分けて考える。

2. 3. 1 紫外・可視部の吸収

酸素 O_2 には Herzberg 帯と呼ばれる連続吸収が存在し、240nm より短波長の紫外線を吸収する^{16,17)}。この吸収には温度依存性はないが、圧力依存性が観測されている^{18,19)}。しかしその影響は小さいので考慮しない。用いた Herzberg 帯の吸収断面積の値¹⁹⁾は表1に示してある。

表1 波長に依存するデータ

波長	大気上端 日射量	酸素 吸収断面積	オゾン 吸収断面積	レイリー散乱 断面積	ミー散乱 光学的厚み
λ	I_0	σ_{O_2}	σ_{O_3}	α_R	τ_M
nm	$\text{W m}^{-2} \text{nm}^{-1}$	m^2	m^2	m^2	(地表)
205	1.680E-02	7.350E-28	3.625E-23	3.006E-29	1.624E-01
212	2.982E-02	6.050E-28	6.932E-23	2.582E-29	1.605E-01
219	5.404E-02	4.640E-28	1.537E-22	2.231E-29	1.587E-01
226	6.526E-02	3.210E-28	3.221E-22	1.938E-29	1.569E-01
234	6.078E-02	1.780E-28	5.897E-22	1.661E-29	1.549E-01
240	6.300E-02	1.010E-28	8.067E-22	1.485E-29	1.536E-01
252	8.384E-02		1.133E-21	1.198E-29	1.509E-01
265	1.850E-01		9.751E-22	9.619E-30	1.482E-01
276	2.076E-01		5.496E-22	8.064E-30	1.461E-01
288	4.152E-01		1.846E-22	6.712E-30	1.439E-01
301	5.318E-01		3.643E-23	5.554E-30	1.416E-01
310	6.890E-01		1.057E-23	4.898E-30	1.401E-01
320	8.300E-01		2.798E-24	4.279E-30	1.386E-01
330	1.059E+00		7.057E-25	3.755E-30	1.371E-01
340	1.074E+00		1.493E-25	3.310E-30	1.356E-01
350	1.093E+00			2.930E-30	1.342E-01
400	1.429E+00			1.676E-30	1.280E-01
450	2.006E+00		2.565E-26	1.029E-30	1.227E-01
500	1.942E+00		1.110E-25	6.676E-31	1.182E-01
550	1.725E+00		3.511E-25	4.522E-31	1.142E-01
600	1.666E+00		5.926E-25	3.174E-31	1.107E-01
650	1.511E+00		2.848E-25	2.293E-31	1.076E-01
700	1.369E+00		1.369E-25	1.699E-31	1.048E-01
750	1.235E+00		6.579E-26	1.285E-31	1.022E-01
800	1.107E+00		3.511E-26	9.902E-32	9.991E-02
850	9.880E-01		2.310E-26	7.752E-32	9.777E-02
900	8.890E-01			6.155E-32	9.579E-02
950	8.350E-01			4.948E-32	9.396E-02
1000	7.460E-01			4.022E-32	9.226E-02
1500	2.870E-01			7.753E-33	7.982E-02
2000	1.030E-01			2.363E-33	7.203E-02
2500	5.400E-02			9.216E-34	6.652E-02
3000	3.100E-02			4.190E-34	6.233E-02
備考	文献13	文献19	文献21, 22	(15)式 (文献30)	(16)式 (文献38)

オゾン O₃は350nm より短波長の紫外部に Huggins 吸収帯と Hartley 吸収帯が存在し²⁰⁾、有害な紫外線が地表に届くのを防止している。これらの吸収には温度依存性が観察されているが、このレベルのシミュレーションでは無視してよく、室温における吸収断面積のデータ²¹⁾を表1に示す。オゾンには、紫外部よりは弱い可視部にも Chappuis 吸収帯と呼ばれる吸収が存在するので、そのデータ²²⁾も合わせて表1に示す。

表2 高度に依存するデータ (夏季中緯度モデル)¹⁴⁾

高度	温度	気圧	大気数密度	オゾン数密度	水蒸気数密度
z	T	p	n_{air}	n_{O_3}	$n_{\text{H}_2\text{O}}$
m	K	hPa	m ⁻³	m ⁻³	m ⁻³
0	294.0	1.013E+03	2.477E+25	7.525E+17	4.684E+23
1,000	290.0	9.020E+02	2.246E+25	7.525E+17	3.111E+23
2,000	285.0	8.020E+02	2.029E+25	7.525E+17	1.974E+23
3,000	279.0	7.100E+02	1.839E+25	7.776E+17	1.104E+23
4,000	273.0	6.280E+02	1.663E+25	8.027E+17	6.357E+22
5,000	267.0	5.540E+02	1.499E+25	8.278E+17	3.346E+22
6,000	261.0	4.870E+02	1.349E+25	8.654E+17	2.041E+22
7,000	255.0	4.260E+02	1.212E+25	9.406E+17	1.238E+22
8,000	248.0	3.720E+02	1.086E+25	9.908E+17	7.026E+21
9,000	242.0	3.240E+02	9.709E+24	1.079E+18	4.015E+21
10,000	235.0	2.810E+02	8.648E+24	1.129E+18	2.141E+21
11,000	229.0	2.430E+02	7.679E+24	1.380E+18	7.360E+20
12,000	222.0	2.090E+02	6.798E+24	1.505E+18	2.007E+20
13,000	216.0	1.790E+02	5.993E+24	1.881E+18	6.022E+19
14,000	216.0	1.530E+02	5.124E+24	2.258E+18	3.346E+19
15,000	216.0	1.300E+02	4.375E+24	2.383E+18	2.543E+19
16,000	216.0	1.110E+02	3.737E+24	2.634E+18	2.141E+19
17,000	216.0	9.500E+01	3.192E+24	3.010E+18	1.874E+19
18,000	216.0	8.120E+01	2.714E+24	3.512E+18	1.673E+19
19,000	217.0	6.950E+01	2.308E+24	4.013E+18	1.639E+19
20,000	218.0	5.950E+01	1.966E+24	4.264E+18	1.506E+19
21,000	219.0	5.100E+01	1.675E+24	4.515E+18	1.706E+19
22,000	220.0	4.370E+01	1.429E+24	4.515E+18	1.706E+19
23,000	222.0	3.760E+01	1.220E+24	4.264E+18	1.807E+19
24,000	223.0	3.220E+01	1.043E+24	4.013E+18	2.007E+19
25,000	224.0	2.770E+01	8.917E+23	3.763E+18	2.242E+19
30,000	234.0	1.320E+01	2.749E+23	2.508E+18	1.204E+19
35,000	245.0	6.520E+00	1.356E+23	1.154E+18	3.680E+18
40,000	258.0	3.330E+00	6.924E+22	5.142E+17	1.439E+18
45,000	270.0	1.760E+00	3.654E+22	1.630E+17	6.357E+17
50,000	276.0	9.510E-01	1.978E+22	5.393E+16	2.108E+17
55,000	261.5	5.294E-01	1.101E+22	3.002E+16	1.173E+17
60,000	247.0	2.867E-01	5.965E+21	1.625E+16	6.351E+16
65,000	232.5	1.510E-01	3.144E+21	8.551E+15	3.344E+16
70,000	218.0	7.645E-02	1.594E+21	4.322E+15	1.691E+16
75,000	216.7	3.671E-02	7.676E+20	2.067E+15	8.105E+15
80,000	215.3	1.684E-02	3.544E+20	9.392E+14	3.700E+15
85,000	214.0	7.430E-03	1.587E+20	4.051E+14	1.614E+15
90,000	212.7	2.962E-03	6.575E+19	1.516E+14	6.235E+14
95,000	211.3	1.061E-03	2.621E+19	4.370E+13	2.020E+14
100,000	210.0	3.000E-04	1.040E+19	5.393E+11	3.346E+13

2. 3. 2 赤外部の吸収

前述の酸素とオゾンによる紫外・可視部の吸収は、幅広い波長範囲で事実上連続的に起きるので、与えられた吸収断面積の値を用いて単純に光学的厚みや日射量を求めることができる。一方、赤外部での水蒸気や二酸化炭素の吸収は、細かい吸収線が非常に多数集合してできた吸収帯から構成されており²³⁻²⁵⁾、しかも個々の吸収線の半値幅が気圧、したがって高度によって大幅に変化するのでその取扱いは単純ではない。

気象学の分野では、大気の垂直温度分布の変化などを知る目的で、大気圏を多数の層に分けて各層ごとの光の吸収・放射のバランスを求める「放射伝達」という取扱いが行なわれている^{4,7,23-26)}。この放射伝達の取扱いを拡張すると赤外部の吸収に適用可能であるが、内容的にはかなり難しい。以下に述べる取扱いは、学生のレベルにマッチするように単純化してはあるものの、放射伝達の本質を失わないように工夫した内容である。なお、この分野では波長の代わりに波数が常用されるので、ここでも波数という表現を用いることにする。

日射量を求めるには光学的厚みを知る必要があるが、光学的厚みと透過率との間には(5)式の関係があるので、放射伝達の理論的扱いにより透過率を算出することができれば光学的厚みを知ることができる。このようにして求めた水蒸気や二酸化炭素の光学的厚みを、他の消散成分の光学的厚みと合算して最終的な日射量を求めることになる。

赤外部では個々の吸収線は多数重合して吸収帯を構成しているのので、透過率についても個々の吸収線を対象とするのではなく、かなりの波数範囲にわたって広がっている吸収帯を対象として一つの平均的な透過率で代表させる。ランダムモデル^{24,25)}を用いて、吸収帯を多数の吸収線の集合として近似すると、この平均透過率 T_{av} を個々の吸収線の等価幅 W_i の和を用いて表すことができる。等価幅とは吸収の大きさを表す指標であり積分吸収能とも呼ばれる。

$$T_{av} = \exp(-\sum_i W_i / \Delta\nu) \quad (7)$$

ここに、 $\Delta\nu$ は吸収帯の幅 (波数)、 i は吸収線の番号であり和は吸収帯を構成するすべての吸収線について行なう。仮想の大気として気圧も組成も一定不変という場合には、等価幅の和 $\sum W_i$ は次式によって与えられることが提案されている^{24,25)}。

$$\sum W_i = \frac{2 \left[\sum (s_i \gamma_i)^2 \right]^2}{\sum s_i} \left\{ \left[1 + \frac{\rho x (\sum s_i)^2}{\left[\sum (s_i \gamma_i)^2 \right]^2} \right]^2 - 1 \right\} \quad (8)$$

s_i と γ_i は各吸収線の強度と半値幅、 ρ は吸収物質の密度、 x は吸収光路の長さである。

現実の大気は垂直方向に気圧が大幅に変化し、これに伴い半値幅も大きく変化する。半値幅が変化するのは、各吸収線が大気分子との衝突による広がりを持ち、その広がりが気圧によって変化するからである。したがって(8)式のままでは現実の大気に応用できないので、Curtis-Godson 近似^{24,25)}により気圧に依存する不均質な大気をそれと等価な均質な気層で置き換え、結果的に(8)式を用いることができるように工夫する。そのための方法として、光路に沿って吸収物質の重みを掛けて平均化した平均気圧 p_{av} を求め、その平均気圧における半値幅を用いるとよい。

$$p_{av} = \int p c \rho dz / \int c \rho dz \quad (9)$$

p は気圧、 c は吸収物質の相対濃度 (質量比) であり、 ρ はここでは大気の意味する。半値幅の温度変化を無視すると、半値幅は気圧に単純に比例して変化する。

$$\gamma_i = \gamma_{0i} (p_{av} / p_0) \quad (10)$$

γ_{0i} は標準気圧 p_0 における半値幅である。

(8)式中の“ ρx ”の項も、 ρ の値が高度によって変化するのでこのままでは使えない。そこで“ ρx ”の代わりに次式を用いることにする。

$$\sec \theta \int c \rho dz \quad (11)$$

以上の(10), (11)式を(8)式に代入すると、

$$\Sigma W_i = \frac{2 \left[\sum (s_i \gamma_{0i})^2 (p_{av} / p_0)^2 \right]^2}{\Sigma s_i} \left\{ \left[1 + \frac{(\sec \theta \int c \rho dz) (\Sigma s_i)^2}{\left[\sum (s_i \gamma_{0i})^2 (p_{av} / p_0)^2 \right]^2} \right]^2 - 1 \right\} \quad (12)$$

ここで(12)式中の変数を、(13)式で定義される Houghton の変数 S , R で置き換えると²⁴⁾、最終結果として(14)式が得られる。

$$S = \Sigma s_i, \quad R = \Sigma (s_i \gamma_{0i})^2 \quad (13)$$

$$\Sigma W_i = \frac{2 R^2 (p_{av} / p_0)}{S} \left\{ \left[1 + \frac{S^2 \sec \theta \int c \rho dz}{R^2 \times (p_{av} / p_0)} \right]^2 - 1 \right\} \quad (14)$$

Houghton により水蒸気と二酸化炭素の主要な吸収帯について S , R の値が表で与えられているので²⁴⁾、(9)式、(11)式の値とともに(14)式に代入することにより、吸収帯の等価幅の和 ΣW_i を求めることができる。この ΣW_i の値を(7)式に代入して平均透過率 T_{av} を求め、さらに(5)式から光学的厚み τ を求めればよい。

2. 4 散乱に関する成分

散乱には2種類あり、空気分子のようにその半径が光の波長に比べて十分小さいとき（波長の0.1倍以下）にはレイリー散乱が起き、逆にエアロゾルのように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）をもつ粒子の場合にはミー散乱が起きる^{11, 26, 27)}。両者で扱い方がまったく異なるので分けて考える。

2. 4. 1 レイリー散乱

レイリー散乱はすべての気体分子によってひき起こされるので、気体成分ごとに考えないで標準的な組成の大気を対象に一括して考えるとよい。太陽光が大気全層を通過した後の地表におけるレイリー散乱の光学的厚みのデータも報告されているが^{28, 29)}、散乱断面積のデータの方が任意の高度における光の減衰を求めることができるので便利である。ここでは理論値を実験値で補正して求めた Bates らの散乱断面積のデータを用いる³⁰⁾。ただ、彼らのデータは波長 $1 \mu\text{m}$ 以下の領域のみなので、それより長波長側のデータについては大気全層による光学的厚みの波長依存性データ²⁸⁾を用いて補正し外挿した。このようにして得られたレイリー散乱断面積 α_R (cm^2) の値は、次式に示すように波長 λ (μm) のほぼ4乗に反比例して変化する。

$$\alpha_R = 4.022 \times 10^{-28} \times \lambda^{-(3.916 + 0.074 \lambda + 0.050 / \lambda)} \quad (15)$$

表1に α_R の値を示す。

2. 4. 2 ミー散乱

ミー散乱は大気中に存在するエアロゾル粒子によってひき起こされる。エアロゾルは、自然界で発生するもの以外に人為的な大気汚染に起因するものがあり、大気の混濁度、日射量、気候変動などに影響を与える²⁶⁾。したがって、ミー散乱に関連した研究は多方面で行なわれている。しかし、①ミー散乱自身の理論的取扱いがかなり難解な上に^{23,31,32)}、②エアロゾル粒子の成分が多様多様である、③粒径も0.01~100 μm の広範囲にわたる、④高度的・場所的・季節的・時間的な濃度変動が大きい、など複雑な要素を多くもつために^{26,32-34)}、シミュレーションに取り込むための標準的手法はない。特にここで目的としているレベルへの適用には多くの工夫が必要となる。

理論的取扱いは除外するとして、検討対象となる代表的な実測データには、大気の混濁度を表す混濁係数 (Ångström の混濁係数)^{11,12)}、単位体積あたりの散乱能力をあらわす散乱係数³⁴⁻³⁶⁾、および光学的厚み^{37,38)}、などがある。このうち、混濁係数は通常大気全層に対して測定されるので任意の高度での散乱を求める目的には不向きであり、また散乱係数に関しては幅広い高度範囲で細かく測定されているデータが見当たらない。そこで Toon らによる古い³⁸⁾がかなり広い高度範囲をカバーしている光学的厚みのデータを用いることにする³⁸⁾。

Toon らによると、任意の波長 λ (μm) におけるミー散乱の光学的厚み τ_M の対数は高度 z (km) と共にほぼ直線的に変化する。 a を勾配、 b を切片とすると、

$$\log \tau_M = az + b \quad (16)$$

さらに同論文によると、高度が 0 km と 12 km における τ_M の波長依存性は、かなり粗いがほぼ次式で表すことができる。

$$\log \tau_M = -0.357 \log \lambda - 1.035 \quad (z = 0 \text{ km}) \quad (17)$$

$$\log \tau_M = -1.429 \log \lambda - 2.595 \quad (z = 12 \text{ km}) \quad (18)$$

したがって(17)、(18)式を用いて任意の λ における $z = 0 \text{ km}$ と 12 km での τ_M を求め、その値を(16)式に代入すると a と b の値が決まるので、任意の高度での τ_M を求めることができる。表 1 に一例として地表 ($z = 0$) における τ_M の値を示す。

2. 5 日射量算出法のまとめ

以上の全消散過程をまとめると次のようになる。

酸素とオゾンの吸収に関してはおのおのの吸収断面積 σ_{O_2} 、 σ_{O_3} を、またレイリー散乱に関してもその散乱断面積 α_R を用いる。一方、水蒸気と二酸化炭素の吸収に関してはおのおのの光学的厚み τ_{H_2O} 、 τ_{CO_2} を、またミー散乱に関してもその光学的厚み τ_M を用いている。したがって、(6)式による全体としての光学的厚みは、吸収・散乱の断面積で表される成分と直接光学的厚みで表される成分の二つに分かれる。

$$\tau = \sec \theta \int_z^{\infty} (\sigma_{O_2} n_{O_2} + \sigma_{O_3} n_{O_3} + \alpha_R n_R) dz + (\tau_{H_2O} + \tau_{CO_2} + \tau_M) \quad (19)$$

ここに n_{O_2} 、 n_{O_3} 、 n_R は、おのおの酸素、オゾン、レイリー散乱の数密度である。

(19)式の計算に必要な数密度のデータとしては以下のデータを用いた。オゾンについては McClatchey らの大気モデル¹⁴⁾に付記されているデータを一部補正して用い、酸素については彼らの大気数密度データ (表 2 参照) に酸素の組成比 0.2095 を乗じて得た値を用いた。レイリー散乱については表 2 の大気数密度データをそのまま用いることができる。

水蒸気と二酸化炭素については、(19)式には数密度が入っていないが光学的厚みの算出過程で数密度データが必要になる。水蒸気の数密度については McClatchey らの大気モデル¹⁴⁾に付記されているデータを用い、二酸化炭素については高度によって組成が変化しないと仮定して、表2の大気数密度データに組成比0.000350を乗じた値を用いた。

ミー散乱については、ここで取り扱った方法では数密度データを必要としない。表2にはオゾンと水蒸気の数密度データが示されている。

3. 日射量シミュレーションの結果

前章で述べた基礎的取扱いに基づいて、Excel上で実際に数値シミュレーションを行なった結果について述べる。日射量の算出は波長ごとに行なうが、関与する消散成分が少なくて取扱いが単純な310nmを例にあげて説明する。なお天頂角 θ は0としてある。表1からわかるようにこの波長ではオゾン吸収、レイリー散乱、ミー散乱の3要素が関与する。必要最小限の項目にまとめて簡略化した試算結果を表3に示すが、実際のシミュレーションでは試算過程の各種数値も表に含めるので、かなり大きな表となる。表3には先ずB4からG4セルに吸収断面積などの定数データを格納しておく。次いで消散に関与する各要素ごとに光学的厚みを求めるが、(3)式の積分で定義される光学的厚みを、(数密度×消散断面積)×高度区間という「面積」の和に置き換えて求める。そのため、大気上端における光学的厚みを0として、大気上端から地表へ向けて順次計算を進める。オゾンの場合で言うと、C48セルには“=C49+\$D\$4*(B49+B48)/2*(A49-A48)”と言う数式が代入されている。レイリー散乱についても同様の考えで光学的厚みを求めるが、ミー散乱の光学的厚みは(16)式を用いるので、F37セルには“=10^(\$F\$4*A37/1000+\$G\$4)”と言う数式を代入する。なおミー散乱は45kmよりも上空では事実上寄与しないとしている。以上3要素の光学的厚みの和をG列で求めた上で、最後にH列で(4)式により任意の高度での日射量を求める。H49セルに入力する数式は“=\$C\$4*EXP(-G49)”である。

このような表計算を各波長ごとに実行することにより、必要な日射量を求めることができる。なお、表3のシミュレーション例ではオゾン、レイリー散乱、ミー散乱の3要素全体の光学的厚みの和を求めて全体の日射量を求めているが、個々の要素がどの程度全体の日射量の減衰に寄与しているかを知ることも重要である。その目的には、例えばオゾン単独の光学的厚みを用いてオゾンによる日射量の減衰を求めればよい。ただしこのようにして求められる個々の要素による日射量の値はあくまでも仮想的なものである。

このようにして得られたシミュレーションにより、結果としてどのような情報を知ることができるのかをほんの数例を取りあげて示す。先ず、表3で例示した310nmにおける高度依存性のグラフを図2に示すが、この図から①日射量の減衰は事実上50km以下の高度で起きる、②上空での減衰にはオゾンのみが寄与しているが、地表付近まで来るとレイリー散乱も同程度の寄与をしている、ことなどを知ることができる。なお、このとき同時にいろいろな波長で類似のシミュレーションを行なうことが重要で、そのことにより波長が310nmから大きく離れると、減衰の程度や寄与の順序がまったく変化してしまうことも知ることができる。

日射量の減衰が波長によってどのように変化するかをシミュレーションした結果を図3に示す。ただし図が複雑になるので赤外部の水蒸気と二酸化炭素の吸収は削除してある。この図からは、①波長300nm以下の極めて有害な紫外線は高度25km以下には事実上届いていない、②波長1,500nm以上の光は大気によってほとんど消散されないで地表に届く、③日射量のもっとも強い500nm前後の可視光線は大気圏を通過する間に4分の3程度に減衰し、その減衰の大部分は高度10km以下の対流圏で起きる、ことなどが理解できる。

	A	B	C	D	E	F	G	H
1	表3 日射量の高度依存性 (波長310nm, 天頂角0°)							
2		波長 λ	大気上端 日射量 I_0	オゾン 吸収断面積 σ_{O_3}	レイリー 散乱断面積 α_R	ミー 散乱断面積 勾配 a	ミー 散乱断面積 切片 b	
3		nm	$Wm^{-2}nm^{-1}$	m^2	m^2	km^{-1}		
4		310	6.890E-01	1.057E-23	4.898E-30	-8.456E-02	-8.534E-01	
5	高度	オゾン吸収		レイリー散乱		ミー散乱	全体	
6		数密度	光学的厚さ	数密度	光学的厚さ	光学的厚さ	光学的厚さ	日射量
7	z	n_{O_3}	τ_{O_3}	n_R	τ_R	τ_M	τ	I
8	m	m^{-3}		m^{-3}				$Wm^{-2}nm^{-2}$
9	0	7.525E+17	9.197E-01	2.477E+25	1.052E+00	1.402E-01	2.111E+00	8.341E-02
10	1,000	7.525E+17	9.117E-01	2.246E+25	9.360E-01	1.154E-01	1.963E+00	9.676E-02
11	2,000	7.525E+17	9.038E-01	2.029E+25	8.313E-01	9.495E-02	1.830E+00	1.105E-01
12	3,000	7.776E+17	8.957E-01	1.839E+25	7.366E-01	7.815E-02	1.710E+00	1.246E-01
13	4,000	8.027E+17	8.873E-01	1.663E+25	6.508E-01	6.432E-02	1.602E+00	1.388E-01
14	5,000	8.278E+17	8.787E-01	1.499E+25	5.733E-01	5.294E-02	1.505E+00	1.530E-01
15	6,000	8.654E+17	8.698E-01	1.349E+25	5.036E-01	4.358E-02	1.417E+00	1.671E-01
16	7,000	9.406E+17	8.602E-01	1.212E+25	4.408E-01	3.587E-02	1.337E+00	1.810E-01
17	8,000	9.908E+17	8.500E-01	1.086E+25	3.845E-01	2.952E-02	1.264E+00	1.946E-01
18	9,000	1.079E+18	8.391E-01	9.709E+24	3.342E-01	2.430E-02	1.198E+00	2.080E-01
19	10,000	1.129E+18	8.274E-01	8.648E+24	2.892E-01	2.000E-02	1.137E+00	2.211E-01
20	11,000	1.380E+18	8.142E-01	7.679E+24	2.492E-01	1.646E-02	1.080E+00	2.340E-01
21	12,000	1.505E+18	7.989E-01	6.798E+24	2.138E-01	1.355E-02	1.026E+00	2.469E-01
22	13,000	1.881E+18	7.810E-01	5.993E+24	1.824E-01	1.115E-02	9.746E-01	2.600E-01
23	14,000	2.258E+18	7.591E-01	5.124E+24	1.552E-01	9.178E-03	9.235E-01	2.736E-01
24	15,000	2.383E+18	7.346E-01	4.375E+24	1.320E-01	7.554E-03	8.741E-01	2.875E-01
25	16,000	2.634E+18	7.081E-01	3.737E+24	1.121E-01	6.218E-03	8.264E-01	3.015E-01
26	17,000	3.010E+18	6.783E-01	3.192E+24	9.512E-02	5.118E-03	7.785E-01	3.163E-01
27	18,000	3.512E+18	6.438E-01	2.714E+24	8.066E-02	4.212E-03	7.287E-01	3.325E-01
28	19,000	4.013E+18	6.040E-01	2.308E+24	6.836E-02	3.467E-03	6.759E-01	3.505E-01
29	20,000	4.264E+18	5.603E-01	1.966E+24	5.789E-02	2.854E-03	6.210E-01	3.703E-01
30	21,000	4.515E+18	5.139E-01	1.675E+24	4.898E-02	2.349E-03	5.652E-01	3.915E-01
31	22,000	4.515E+18	4.662E-01	1.429E+24	4.138E-02	1.933E-03	5.095E-01	4.140E-01
32	23,000	4.264E+18	4.198E-01	1.220E+24	3.489E-02	1.591E-03	4.563E-01	4.366E-01
33	24,000	4.013E+18	3.760E-01	1.043E+24	2.935E-02	1.310E-03	4.067E-01	4.588E-01
34	25,000	3.763E+18	3.349E-01	8.917E+23	2.461E-02	1.078E-03	3.606E-01	4.804E-01
35	30,000	2.508E+18	1.692E-01	2.749E+23	1.033E-02	4.072E-04	1.800E-01	5.755E-01
36	35,000	1.154E+18	7.245E-02	1.356E+23	5.300E-03	1.538E-04	7.790E-02	6.374E-01
37	40,000	5.142E+17	2.837E-02	6.924E+22	2.793E-03	5.810E-05	3.122E-02	6.678E-01
38	45,000	1.630E+17	1.047E-02	3.654E+22	1.497E-03	0	1.197E-02	6.808E-01
39	50,000	5.393E+16	4.741E-03	1.978E+22	8.077E-04		5.549E-03	6.852E-01
40	55,000	3.002E+16	2.523E-03	1.101E+22	4.307E-04		2.954E-03	6.870E-01
41	60,000	1.625E+16	1.300E-03	5.965E+21	2.228E-04		1.523E-03	6.880E-01
42	65,000	8.551E+15	6.450E-04	3.144E+21	1.113E-04		7.562E-04	6.885E-01
43	70,000	4.322E+15	3.048E-04	1.594E+21	5.326E-05		3.581E-04	6.888E-01
44	75,000	2.067E+15	1.360E-04	7.676E+20	2.434E-05		1.603E-04	6.889E-01
45	80,000	9.392E+14	5.657E-05	3.544E+20	1.060E-05		6.717E-05	6.890E-01
46	85,000	4.051E+14	2.104E-05	1.587E+20	4.322E-06		2.536E-05	6.890E-01
47	90,000	1.516E+14	6.329E-06	6.575E+19	1.574E-06		7.904E-06	6.890E-01
48	95,000	4.370E+13	1.169E-06	2.621E+19	4.483E-07		1.617E-06	6.890E-01
49	100,000	5.393E+11	0	1.040E+19	0		0	6.890E-01
50	オゾン吸収とレイリー散乱は高度100kmでの光学的厚みを0と置く。 ミー散乱では高度45kmの光学的厚みを0と置く。							

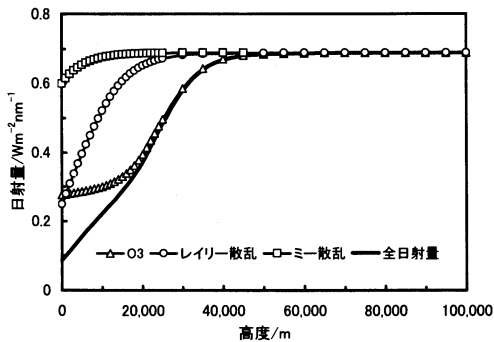


図2 日射量の高度依存性 (310nm)

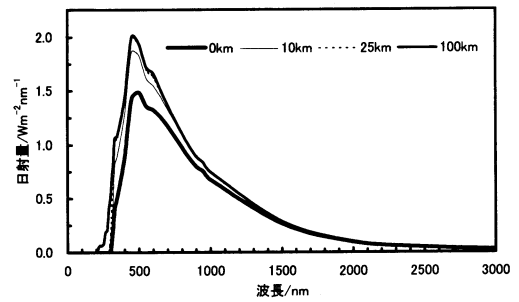


図3 日射量の波長依存性(高度：0,10,25,100km)

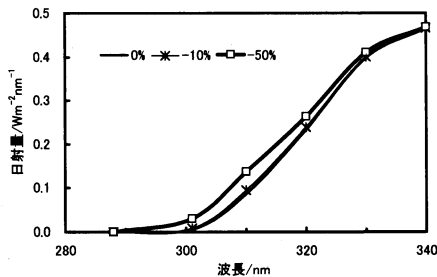
図4 オゾン濃度と地表紫外線量
(オゾン濃度減少率：0, 10, 50%)

図4は、オゾン濃度が減少すると地表に到達する紫外線量がどの程度増加するのかをシミュレーションした結果である。この結果から、①オゾン濃度の減少が10%程度であれば紫外線量はほとんど増加しない、②オゾン濃度が50%減少すると紫外線量は大幅に増加するが、その増加の割合は波長が短くより有害な紫外線ほど顕著であり、320nmでは1.13倍の増加であるのに対し301nmでは4.85倍もの増加となる、ことなどがわかる。

4. 考察

4.1 成果と効率を上げるための工夫

本稿で述べたシミュレーション内容は、過去4年間の卒業研究の指導を通じて得られたものである。環境問題の特徴でもあるが、日射量関連の事象も内容的には地学、化学、物理学などの知識を必要とする複合分野であり、非理系の学生にとってその理解は決して容易とは言えないように思う。しかし日常の指導と最終的に提出された卒業論文を通して強く感じることは、結果的には学生のもつ潜在的能力が引き出され高度な内容が期待以上に理解されており、当初の目的を十分に果たすことができていることである。そして、それまではマスコミ等を通じて表面的にしかとらえていなかった環境問題を、自分の頭の中で論理的に整理して考えることの重要性を認識し始めていることである。もちろん、例えば分子がなぜ光を吸収するのかという光と物質の相互作用の本質の理解まで教育することは、不可能ではないにせよ時間的に無理である。しかし、そういう現象が起きることを前提としてその現象を表現する数式を与えることにより、その現象がどのような要素に支配されてどのように起きるのかを理解することは十分可能である。いまの目的である環境問題関連の情報把握には、必ずしもすべての側面で物理的な理解を求める必要はない。

具体例を挙げよう。図4でオゾン濃度が減少すると地表に到達する紫外線量がどの程度増加するかを定量的に把握できた。関東上空のオゾン濃度(約300ドブソン)は最近10年間で約3%減少しているが、この減少によりどのような波長の紫外線がどの程度増加したかを類似のシミュレーションにより直ちに知る

ことができる。また、日射量を波長で積分することにより紫外部の全エネルギー量の増加を知ることもできる。さらに、図2により地表に到達する紫外線量の減少には、オゾンの吸収以外にレイリー散乱とミー散乱も寄与していることがわかる。ミー散乱はエアロゾルによって引き起こされるので、エアロゾルの濃度が増加すれば紫外線量は減少する。したがって、人間活動あるいは自然界から発生するエアロゾルの粒径と量によって、どの程度紫外線量が変化するかをシミュレーションにより求めることができる。このように紫外線量の増減はいくつかの要因が絡み合っていることを、身近な問題として定量的に理解することができよう。

当然のことながら、期待する効果をあげるためには指導する教員側にも努力と工夫が求められる。もともと指導にあたる教員自身の多くが、学生時代に環境問題に関する講義やシミュレーション的手法を教授されないで育った世代であり、しかも対象とする環境問題の多くが多分野にまたがる領域を包含している。自分としてどんな題材をどのような形でシミュレーションに取り込むことができるのかを常に心がけながら、周到的な前準備と勉強を行なう必要がある。市販の書籍にも環境関連のシミュレーションを扱ったものがいくつかあるが¹⁻⁷⁾、いま必要としているレベルで直接応用できる例はほとんどなく、結果的には目的とする題材とレベルにあったシミュレーション内容を自ら工夫することになる。また、日射量に関して第2章のシミュレーションの基礎と方法で述べた内容も、専門書等^{4,10-12,16,17,23-25)}に出ている物理学や気象学の概念や数式をそのまま取り入れるのではなく、当然学生のレベルにマッチしたシミュレーション内容となるように、本質を失わない程度に咀嚼し単純化したモデルに組み立てて取り込む必要がある。

シミュレーション教育がその有用性を発揮するためにはさらにいくつか注意すべき点がある。そのうち特に重要なのは、段階を踏んだ教育と事前教育の必要性である。本稿で述べた内容は4年間の卒業研究を通じて得られた最終結果であり、この間順次レベルアップしたシミュレーション内容を取り入れている。卒業研究レベルのシミュレーションといえどもかなり高度な内容を包含しているので、最初からすべて完成した内容を盛り込むことは指導者側にも学生側にも消化不良をひき起こす。最初は、変数因子の数を落としたりより単純なモデルから開始して大まかな結果を得て手法の正当性を体得し、その経験を踏まえて翌年度以降に順次変数因子の個数を増やしたりより厳密なモデル化を行うことにより完成させていくことが重要である。個々の学生にとっても先輩の実績の延長上で勉強していると言う実感をもてるので理解も早い。

次に必要なのはシミュレーションを行なうための事前教育の徹底である。毎年行うシミュレーション内容は順次進展するので、その内容に合わせてシミュレーションに必要なメモ(簡易テキスト)を作成し、学生が自らシミュレーションを進められるように事前の個別指導あるいは特別講義を行なうことが望ましい。ここに述べたシミュレーションに関して実際に作成した事前教育用メモは、毎年3万字程度にも及ぶかなり膨大なものであり、その内容は①シミュレーションの目的と位置付け、②日射量に関する基礎事項、③シミュレーションに必要な解法の候補とその内容、④必要なデータ集と学術論文の候補と内容、⑤参考書籍、などである。学生のレベルに合わせてこの事前教育にどの程度のエネルギーが注入されたかで、最終的に得られる成果が大きく左右されると言える。第2章のシミュレーションの取扱い法でも数学的記号がある程度出てくるが、例えば積分の意味とそれを和で置き換える手法などを理解させる努力が必要である。ただ、現実には毎年異なる学生に対して一から教育を始めなければならず、しかもシミュレーションの進行と共にその内容が深くなり、教育上の負担が増えるのも事実である。

4.2 シミュレーション教育について

大学の自然科学系教育におけるコンピュータ利用の意義や問題点についてはすでに前報⁸⁾で触れた。ここでは特にコンピュータによるシミュレーション教育について、環境問題とのかかわりに重点をおいて考

察する。

一般に科学的な事象を解明する手法は、理論的方法、実験的方法、およびシミュレーション的方法の3つに大別される¹⁾。このうちシミュレーションによる方法は、当該事象を適当にモデル化することによりコンピュータ上に実験的な環境を作りだし、実際の実験では測定が困難な環境下での問題をも数値的に解いていく手法である。したがって理論的方法と実験的方法の両者の利点をもち合わせており、環境問題を考える上で非常に有用な手法である。この場合重要なことは、複雑な現象をいかに合理的で単純なモデルに組み上げるかということである。特に地球環境問題では、対象として取りあげている事象に関与する要素の数が非常に多く、あらゆる要素をモデルに取り込むことは実際的ではない。事象に大きな寄与をしている要素を漏れなく網羅する一方で、マイナーな要素は切り捨てるといふ、誤りなき要素の選択がシミュレーションにとって不可欠の技術である。

実は在来の大学教育においても、自然科学系ではもちろんのこと非自然科学系の分野でもシミュレーションの基礎概念は講義という形で一部取り入れられてきた。しかし多数の数値計算を必要とする理系にあっては、コンピュータを用いないシミュレーションは事実上意味をもたなかった。また、非理系では例えば経営学の分野などで、経営上のさまざまな意思決定の手法としてシミュレーションの概念が講義されてきたが³⁹⁾、現実にはそのねらいがうまく機能しなかった。その最大の理由は、モデルの表現に決して高等ではないがとにかく数学が使われおり、結果的に学生が拒絶反応を示すと言う単純な事実である。さらに在来の授業では提示されたモデルについてその意味合いを深く考えたり操作したりすることができないからである。その意味でコンピュータの普及によるシミュレーション教育の導入は、特に自然科学系において画期的な重要性をもつ。

一般にシミュレーション的手法が環境問題によく利用される最大の理由は、複雑な自然界の現象を比較的単純なモデルに組み立てることにより、環境問題の将来の状況をコンピュータ上ですばやく予測し、早い段階での対策を模索することができるからである。この場合大学教育における二次的な効果として、環境問題のモデル化とモデルによる試算の過程を通じて、環境問題と環境情報のもつ本質の意味を把握する能力が身につくことを挙げることができる。なぜなら、シミュレーションそのものが環境問題のコンピュータ上での再現であり、環境問題に関与する各要素がどのように変化すればどのような環境情報となって反映されるかを知ることができるからである。

Excelに代表される表計算ソフトは、ワープロソフトやインターネットとともにコンピュータリテラシー教育の基本を成すツールである。表計算ソフトが、ビジネスや家庭における単なる事務的データ処理に限らず科学の分野でも大いに威力を発揮できそうなことは、多少なりとも表計算ソフトを利用した科学者なら容易に気づくところである^{8,40-43)}。ハードウェアと基本ソフトWindowsの高機能化ともあいまって、表計算ソフトは自然科学部門でも急速に利用され始めており、特にデータ解析⁴⁴⁾や基礎物理学部門のシミュレーション⁴¹⁻⁴³⁾などでの利用が顕著である。表計算ソフトを用いるシミュレーションでは、モデルに沿って順次数式を入力していった結果が直ちに数値として反映されるので、事象の流れの理路整然とした把握が可能となる。これが、表計算ソフトをシミュレーションの土俵として用いるときの最も重要な教育上の意味であり、少なくとも自然科学系のコンピュータ教育では必須の要素である。

シミュレーション用のツールとして、一方では汎用シミュレーション専用ソフトも市販されている。その一つである「STELLA日本語版」(パーシティブエーブ社)は、特に時間的に変化する現象に対して有効であり、画面上で対話形式でモデルを作成すると、自動的に方程式が組立てられていく。画面上に各要素間の関係が表示されるのでモデルの全体像を直感的に把握しやすいと言う特徴をもつが、一方ではシミュレーションの流れをきちんと記述しないブラックボックス的な使い方であり、事象の本質の流れを追っていく欠点がある。したがって、自然科学系の教育⁴⁵⁾にも使えるが、むしろ前述の経営学³⁹⁾などの学生

用として最適であろう。

本稿では、Excelのワークシート上のセルに必要な数式を入力していくという形式のシミュレーション法を述べた。このプロセスをExcel付随のプログラム言語VBAで記述することにより、誰でもが容易に使える形のシミュレーションソフトに組上げることができる。これにより特別の事前教育を受けることなしに、日射量がどのような要素によりどのように影響を受けるのかを知ることができる。ただしこの場合には、上記STELLAの場合よりもさらに内容を伏せたままのブラックボックス的ツールになり、本質の理解に迫ると言う意味での教育には不向きである。

5. おわりに

著者の属する社会情報学部のようにあまり理系とはいえない学部の女子学生が、地球環境にかかわる情報の本質を正しく把握できるようになるための手法として、卒業研究段階でのシミュレーション教育が有意義であることを、日射量という具体的題材をもとに述べた。

科学技術が万能である考えられた時代の負の遺産が今日の環境問題とも言えるので、自然科学系と社会科学系の調和した社会情報学部のような学部は極めて有意義と言えよう。その意味では、少し以前まで純粋に自然科学系の環境で育ってきた著者自身にとっても生きがいを感じるができる。しかし一方では、このような学部における自然科学系教育は、助手、大学院、実験室、実験設備など、いろいろな面で教員に対する支援体制が貧弱で、大きな困難に直面せざるを得ないのも事実である。現実の自然科学系の教育は、それにたずさわる多くの教員の献身的な努力の上に成り立っていると言えよう。

なお、本稿で述べたシミュレーションを卒業研究として実際に実行してきたのは、土佐美也子⁴⁶⁾、小高栄子⁴⁷⁾、会田一奈⁴⁸⁾の諸君である。ここにその努力に謝意を表したい。

参考文献

- 1) 河村哲也, 環境科学入門, インデックス出版, 1998.
- 2) 時岡達志ほか, 気象の数値シミュレーション, 東京大学出版会, 1993.
- 3) 二之宮弘ほか, パソコンによる水環境流れ解析, 朝倉書店, 1997.
- 4) 横山長之, 地球環境シミュレーション, 白亜書房, 1991.
- 5) 横山長之, 大気環境シミュレーション, 白亜書房, 1992.
- 6) 横山長之, 海洋環境シミュレーション, 白亜書房, 1993.
- 7) 茅陽一, 地球環境工学ハンドブック, オーム社, 1993.
- 8) 伊藤朋恭, 科学にうとい女子学生を減らすための実践的教育法, 社会情報学研究, 8, 127-137, 1999.
- 9) 日本気象学会, 気象科学事典, 東京書籍, 1998.
- 10) 小川利紘, 大気の物理化学, 東京堂出版, 1991.
- 11) 竹内清秀ほか, 地表に近い大気, 東京大学出版会, 1981.
- 12) 柴田和雄ほか, 太陽エネルギーの分布と測定, 学会出版センター, 1987.
- 13) D. R. Lide, CRC handbook of chemistry and physics (75 th Ed.), CRC Press, 1994 (出典: M. P. Thekaekara, 1974).
- 14) 茅陽一, 地球環境工学ハンドブック, オーム社, 1993 (出典: R. A. McClatchey et al., 1972).
- 15) D. R. Lide, CRC handbook of chemistry and physics (75 th Ed.), CRC Press, 1994 (出典: NASA, 1976).

- 16) 松野太郎ほか, 成層圏と中間圏の大気, 東京大学出版会, 1981.
- 17) 島崎達夫, 成層圏オゾン, 東京大学出版会, 1989.
- 18) A. S. C. Cheung et al., Absorption cross section measurements of oxygen in the wavelength region 195–241 nm of the Herzberg continuum, *Planet. Space Sci.*, 34, 1007–1021, 1986.
- 19) K. Yoshino et al., Improved absorption cross-sections of oxygen in the wavelength region 205–240 nm of the Herzberg continuum, *Planet. Space Sci.*, 36, 1469–1475 (1988).
- 20) 杉光英俊, オゾンの基礎と応用, 光琳, 1996.
- 21) L. T. Molina et al., Absorption cross sections of ozone in the 185– to 350–nm wavelength range, *J. Geophys. Res.*, 91, 14501–14508, 1986.
- 22) 文献16) の図 2. 3.
- 23) 柴田清孝, 光の気象学, 朝倉書店, 1999.
- 24) 広田 勇ほか (原著: J. T. Houghton), 大気物理学, みすず書房, 1981.
- 25) 会田 勝, 大気と放射過程, 東京堂出版, 1982.
- 26) 朝倉正ほか, 新版気象ハンドブック, 朝倉書店, 1995.
- 27) 茅 陽一, ひと目でわかる地球環境データブック, オーム社, 1993.
- 28) C. Frohlich et al., New determination of Rayleigh scattering in the terrestrial atmosphere, *Appl. Optics*, 19, 1773–1775, 1980.
- 29) A. T. Young, On the Rayleigh–scattering optical depth of the atmosphere, *J. Appl. Meteor.*, 20, 328–330, 1981.
- 30) D. R. Bates, Rayleigh scattering by air, *Planet. Space Sci.*, 32, 785–790, 1984.
- 31) 大喜多敏一, 大気保全学, 産業図書, 1982.
- 32) 関根征士, 混濁大気の光学的特性, *照明学会誌*, 71, 333–338, 1987.
- 33) 半田暢彦, 大気水圏科学からみた地球温暖化, 名古屋大学出版会, 1996.
- 34) 林田佐智子ら, SAGE II で観測された成層圏エアロゾル消散係数の波長依存性の時間・空間変動について, *日本リモートセンシング学会誌*, 18, 32–41, 1998.
- 35) P. H. Wang et al., Inference of stratosphere aerosol composition and size distribution from SAGE II satellite measurements, *J. Geophys. Res.*, 94, 8435–8446, 1989.
- 36) G. Hanel, Vertical profiles of the scattering coefficient of dry atmospheric particles over Europe normalized to air at standard temperature and pressure, *Atmos. Environ.*, 32, 1743–1755, 1998.
- 37) D. Nagel et al., Vertical distribution of the spectral aerosol optical depth in the Arctic from 1993 to 1996, *J. Geophys. Res.*, 103, 1857–1870, 1998.
- 38) O. B. Toon et al., A global average model of atmospheric aerosols for radiative transfer calculations, *J. Appl. Meteor.*, 15, 225–246, 1976.
- 39) 森田道也, 経営システムのモデリング学習, 牧野書店, 1997.
- 40) 伊藤朋恭, 社会科学系学科における化学基礎演習問題の教育法—表計算ソフトの利用, 第12回私情協大会予稿, 68–69, 1998.
- 41) 小林健一郎 (原著: C. W. Misner ほか), スプレッドシートによる物理学シミュレーション, アジソン・ウェスレイ, 1998.
- 42) 森下悦生, Excel で学ぶ流体力学, 丸善, 2000.
- 43) 阿部吉信, Excel による波動シミュレーション, 共立出版, 2000.

- 44) 赤間世紀, Excel によるデータ解析入門, ムイスリ出版, 2000.
 - 45) 岡野道治ほか, 理工系システムのモデリング学習, 牧野書店, 1997.
 - 46) 土佐美也子, 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, 1998.
 - 47) 小高栄子, 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, 1999.
 - 48) 会田一奈, 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, 2000.
-

Understanding of Global Environmental Information by Simulation Procedure: Amount of Solar Radiation

TOMOYASU ITO

School of Social Information Studies, Otsuma Women's University

Abstract

Computer simulation working on spreadsheets is an effective educational method for essential understanding of global environmental information. This method is especially important for education in graduation thesis course of women students not familiar with natural science. An example subject for such a simulation introduced here is the change in amounts of solar radiation, and its detailed content which is elaborately designed to fit the student level through careful preparation is proposed.

The usefulness of the education based on this kind of simulation mainly depends on two factors. One is the construction of a simple and reasonable model by extracting only essential parts from complex phenomena, and the other is for each student to receive full preliminary lectures as to fundamentals on solar radiation, analytical methods for the simulation, and data sources necessary for the simulation etc.

Key Words (キーワード)

Environmental information (環境情報), Simulation (シミュレーション), Excel (エクセル), Solar radiation (日射), Absorption (吸収), Scattering (散乱), Graduation thesis (卒業研究)