

## シミュレーション的手法による大気環境情報教育

### —日射量の天頂角依存性—

伊藤 朋恭\*, 金澤洋子\*\*, 古瀬優美\*\*\*, 小寺絵莉\*\*\*\*, 田中さゆり\*\*\*\*\*

#### 要 約

学生に対して地球温暖化やオゾン層破壊など日射量が直接的に関与する大気環境問題の本質を理解させるには、コンピュータシミュレーションを用いて日射量を定量的に評価する手法が有効である。ここでは近赤外部における吸収や天頂角変化等を取り込んだ総合的な日射量シミュレーション法を提案した。

日射量の算出に必要な光学的厚みは、オゾン吸収、レイリー散乱、ミー散乱に関しては消散断面積を用いる手法を採用し、多数の吸収線の重なりから構成される水蒸気と二酸化炭素については透過率を用いる方法を採用した。250~3,000nmの波長範囲で東京を中心として国内における日射量を試算した結果、実測値と2%程度の範囲で一致し定量的にみても満足できる手法となった。

今回の方法により晴天時を対象とした直達日射量については、学生の教育上必要な簡便的シミュレーションがほぼ完成したと見なせる。今後に残された課題として曇天時に必要な散乱日射量の評価がある。

#### 1. はじめに

地球温暖化やオゾン層破壊などのいわゆる地球規模での環境問題を考えるにあたっては、環境情報の一つである日射量の概念が重要である。地球の気温を決めているもっとも重要な要素は日射量であり、その変動が地球温暖化とも密接なかかわりをもっており、またオゾン層破壊の問題もオゾ

ン濃度の減少がいかにかに紫外部の日射量増加をもたらすかという問題に帰することができる。したがって地球規模の環境問題の本質を大学教育の場で学生に理解させるためには、日射量についての定量的な扱いを簡便な方法で提示することが重要である。このような観点から著者の一人はこの数年来本誌上において日射量に関連したシミュレーションによる教育手法を提案してきた。これまで

\*大妻女子大学社会情報学部

\*\*現在：富士ソフトケーシーエス株式会社

\*\*\*現在：内閣官房（非常勤）

\*\*\*\*現在：株式会社高読

\*\*\*\*\*現在：筑波大学大学院環境科学研究科在学

扱ってきた題材は、日射量シミュレーションの入門<sup>1)</sup>、日射量シミュレーション用ソフトの開発<sup>2)</sup>、オゾン濃度の高度分布の試算<sup>3)</sup>などであり、いずれも数式的取扱いに長けていない学生を意識して、シミュレーションに必要なモデル化にあたっては対象となる複雑な事象をなるべく単純化するように配慮している。

ただこれまでの報告は、単純化を優先させるために現実問題を考える際に必要ないくつかの要件を割愛した扱いであった。例えば、試算対象としたのは太陽が頭上真上にあるときの日射量のみであり、地域による違いや季節・時刻の変化を扱っていないこと、あるいは近赤外部の日射量に大きな影響を与える水蒸気や二酸化炭素の吸収を扱っていないこと、などである。したがって、今回の論文ではこれらの要素を新たに取り入れてより幅広い適用が可能なシミュレーション法を提案した。この手法が今後学生に対して定量的・本質的な物事判断能力の向上のために機能することを期待している。

## 2. 日射量の算出方法

### 2.1 日射量算出の基本式

気象学的には、いま考えているある点に到達する太陽光のエネルギーを日射量といい<sup>4)</sup>、日射量には太陽光が吸収も散乱も受けないで直接届く直達日射量と大気中で散乱されて届く散乱日射量の両者がある<sup>5,6)</sup>。このうち本シミュレーションで扱うのはより重要な直達日射量であり、以下で述べる日射量はいずれも直達日射量を意味する。

試算対象の波長範囲は、太陽光のほぼ全域に相当する250nmから3,000nmとし、この間を表1に示す117個の波長に区分して日射量の計算を行なった。また、今回の試算地域は日本国内に限定したので、大気モデルとしてはマックラーチの中緯度モデル<sup>1,7)</sup>を用いた。この中緯度モデルには夏季用と冬季用の2種類があるが、月ごとの変化の取込みが困難なので、ここでは年間を通じて夏季中緯度モデルを用いた。試算に際しては高度100kmを大気上端と仮定し、この高度以上では太陽

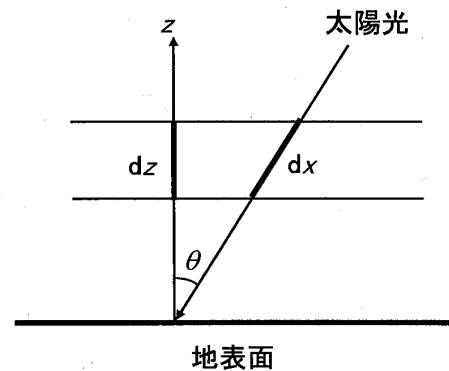


図1 光路の座標

光の減衰は起きないとした。なおシミュレーションはマイクロソフト社の表計算ソフト Excel2002 (Windows版) を用いて行なった。

日射量の算出法についてはこれまでの報告でも部分的に触れており一部重複するが<sup>1,2)</sup>、ここで今回の報告に必要な追加部分を含めてまとめておく。ある波長における大気上端日射量を  $I_0$  とすると、日射量  $I$  は次式で与えられる<sup>5)</sup>。

$$I = I_0 \exp(-\tau) \quad (1)$$

ここに  $\tau$  は光学的厚みと呼ばれる無次元の量であり、大気上端からその高度(地点)に至るまでの消散(吸収と散乱)の大きさを表す値である。一般的な光路の座標を図1に示す。通常太陽光は頭上真上の  $z$  軸方向にはなく、天頂角  $\theta$  の値が  $0^\circ$  とは異なる角度で地球に降り注ぐ。このような任意の天頂角における日射量  $I$  は、 $\theta = 0^\circ$  のときの垂直日射量  $I_N$  の値から求めることができるので、まず  $I_N$  の算出について述べる。 $I_N$  を求める場合の光学的厚みは、 $s$  を消散にかかわる物質の消散断面積(吸収断面積あるいは散乱断面積)、 $n$  をその数密度とすると次式で与えられる<sup>5,8,9)</sup>。

$$\tau = \int_z^\infty s n dz \quad (2)$$

したがって  $I_N$  は次式のようなになる。

$$I_N = I_0 \exp\left(-\int_z^\infty s n dz\right) \quad (3)$$

今回の波長範囲で日射量に実質的に影響を与えるのは、オゾン、水蒸気、二酸化炭素による各吸収と大気自身によるレイリー散乱(添え字 R) およびエアロゾル粒子によるミー散乱(添え字 M) なので、 $\tau$  は実際にはこれら5種類の光学的厚み

表1 (その1) 波長依存データ (916nm 以下)

波長 $\lambda$ nm	大気上端 日射量 <sup>20)</sup> $I_0$ $\text{Wm}^{-2}\text{nm}^{-1}$	O <sub>3</sub> 吸収 断面積 <sup>21,22)</sup> $\sigma_{\text{O}_3}$ $\text{m}^2$	H <sub>2</sub> O 吸収 因子 <sup>15,16)</sup> $b$	CO <sub>2</sub> 吸収因子 <sup>12)</sup>		レイリー散乱 断面積 <sup>23,24)</sup> $\alpha_R$ $\text{m}^2$	ミー散乱 断面積 <sup>8,25)</sup> $\alpha_M$ $\text{m}^2$
				$S$ $\text{cm g}^{-1}$	$R$ $\text{g}^{-1.2}$		
252	8.384E-02	1.133E-21				1.198E-29	1.537E-12
265	1.850E-01	9.715E-22				9.619E-30	1.462E-12
276	2.076E-01	5.496E-22				8.064E-30	1.404E-12
288	4.152E-01	1.846E-22				6.712E-30	1.345E-12
301	5.318E-01	3.643E-23				5.554E-30	1.287E-12
310	6.890E-01	1.057E-23				4.898E-30	1.250E-12
320	8.300E-01	2.798E-24				4.279E-30	1.211E-12
330	1.059E+00	7.057E-25				3.755E-30	1.174E-12
340	1.074E+00	1.493E-25				3.310E-30	1.140E-12
350	1.093E+00	0				2.929E-30	1.107E-12
400	1.429E+00	0				1.673E-30	9.686E-13
450	2.006E+00	2.565E-26				1.027E-30	8.610E-13
500	1.942E+00	1.110E-25				6.663E-31	7.749E-13
550	1.725E+00	3.511E-25				4.513E-31	7.044E-13
600	1.666E+00	5.927E-25				3.167E-31	6.457E-13
650	1.511E+00	2.848E-25				2.288E-31	5.961E-13
700	1.369E+00	1.369E-25				1.695E-31	5.535E-13
708	1.350E+00	1.227E-25				1.622E-31	5.472E-13
710	1.345E+00	1.197E-25				1.604E-31	5.457E-13
712	1.339E+00	1.167E-25	0.001			1.586E-31	5.442E-13
713	1.338E+00	1.159E-25	0.002			1.581E-31	5.438E-13
715	1.331E+00	1.123E-25	0.022			1.559E-31	5.419E-13
718	1.324E+00	1.087E-25	0.157			1.537E-31	5.400E-13
720	1.317E+00	1.051E-25	0.496			1.516E-31	5.381E-13
723	1.310E+00	1.017E-25	0.068			1.495E-31	5.362E-13
725	1.303E+00	9.832E-26	0.142			1.474E-31	5.344E-13
728	1.297E+00	9.502E-26	0.133			1.454E-31	5.326E-13
730	1.290E+00	9.176E-26	0.130			1.434E-31	5.307E-13
733	1.283E+00	8.863E-26	0.068			1.414E-31	5.289E-13
735	1.277E+00	8.555E-26	0.027			1.395E-31	5.271E-13
738	1.270E+00	8.255E-26	0.027			1.376E-31	5.253E-13
740	1.263E+00		0.022			1.357E-31	5.236E-13
743	1.257E+00		0.021			1.338E-31	5.218E-13
745	1.250E+00		0.006			1.320E-31	5.201E-13
748	1.244E+00		0			1.303E-31	5.183E-13
750	1.237E+00		0			1.285E-31	5.166E-13
785	1.149E+00		0			1.069E-31	4.936E-13
790	1.137E+00		0.012			1.042E-31	4.904E-13
795	1.125E+00		0.014			1.016E-31	4.873E-13
800	1.113E+00		0.034			9.902E-32	4.843E-13
805	1.101E+00		0.070			9.656E-32	4.813E-13
810	1.089E+00		0.034			9.418E-32	4.783E-13
815	1.078E+00		0.164			9.187E-32	4.754E-13
820	1.066E+00		0.117			8.963E-32	4.725E-13
825	1.055E+00		0.130			8.745E-32	4.696E-13
830	1.044E+00		0.111			8.534E-32	4.668E-13
835	1.032E+00		0.052			8.330E-32	4.640E-13
840	1.021E+00		0.018			8.132E-32	4.612E-13
845	1.011E+00		0.010			7.939E-32	4.585E-13
850	9.998E-01		0			7.752E-32	4.558E-13
855	9.891E-01		0			7.571E-32	4.531E-13
885	9.276E-01		0			6.587E-32	4.378E-13
890	9.177E-01		0			6.439E-32	4.353E-13
895	9.080E-01		0.069			6.295E-32	4.329E-13
902	8.945E-01		0.176			6.100E-32	4.295E-13
907	8.851E-01		0.188			5.965E-32	4.272E-13
912	8.757E-01		0.209			5.834E-32	4.248E-13
916	8.683E-01		0.258			5.732E-32	4.230E-13

表1 (その2) 波長依存データ (920nm 以上)

波長 $\lambda$ nm	大気上端 日射量 <sup>20)</sup> $I_0$ $\text{Wm}^{-2}\text{nm}^{-1}$	$\text{O}_3$ 吸収 断面積 <sup>21, 22)</sup> $\sigma_{\text{O}_3}$ $\text{m}^2$	$\text{H}_2\text{O}$ 吸収 因子 <sup>15, 16)</sup> $b$	$\text{CO}_2$ 吸収因子 <sup>12)</sup>		レイリー散乱 断面積 <sup>23, 24)</sup> $\alpha_R$ $\text{m}^2$	ミー散乱 断面積 <sup>8, 25)</sup> $\alpha_M$ $\text{m}^2$
				$S$ $\text{cm g}^{-1}$	$R$ $\text{g}^{-1.2}$		
920	8.610E-01		0.135			5.632E-32	4.211E-13
924	8.538E-01		0.149			5.534E-32	4.193E-13
928	8.466E-01		0.279			5.439E-32	4.175E-13
935	8.342E-01		0.828			5.276E-32	4.144E-13
943	8.203E-01		0.535			5.098E-32	4.109E-13
950	8.084E-01		0.581			4.948E-32	4.078E-13
954	8.017E-01		0.610			4.865E-32	4.061E-13
957	7.968E-01		0.419			4.803E-32	4.048E-13
965	7.837E-01		0.269			4.645E-32	4.015E-13
975	7.678E-01		0.158			4.455E-32	3.974E-13
981	7.585E-01		0.085			4.346E-32	3.949E-13
984	7.539E-01		0.046			4.293E-32	3.937E-13
990	7.448E-01		0.008			4.189E-32	3.914E-13
995	7.373E-01		0			4.104E-32	3.894E-13
1,000	7.300E-01		0			4.022E-32	3.874E-13
1,081	6.213E-01		0.048			2.935E-32	3.584E-13
1,093	6.028E-01		0.100			2.809E-32	3.545E-13
1,105	5.866E-01		0.253			2.686E-32	3.506E-13
1,117	5.736E-01		0.847			2.568E-32	3.468E-13
1,130	5.596E-01		1.175			2.454E-32	3.429E-13
1,143	5.456E-01		0.618			2.344E-32	3.390E-13
1,156	5.315E-01		0.562			2.237E-32	3.351E-13
1,170	5.164E-01		0.157			2.134E-32	3.313E-13
1,183	5.024E-01		0.126			2.035E-32	3.274E-13
1,198	4.862E-01		0.089			1.939E-32	3.235E-13
1,212	4.734E-01		0.101			1.846E-32	3.196E-13
1,307	3.918E-01		0.190			1.359E-32	2.964E-13
1,325	3.810E-01		0.419			1.288E-32	2.925E-13
1,342	3.708E-01		1.043			1.220E-32	2.886E-13
1,361	3.594E-01		4.067			1.155E-32	2.848E-13
1,379	3.486E-01		3.689			1.092E-32	2.809E-13
1,399	3.366E-01		3.122			1.032E-32	2.770E-13
1,418	3.272E-01		2.630			9.742E-33	2.731E-13
1,439	3.169E-01		1.443			9.190E-33	2.693E-13
1,460	3.066E-01		0.894			8.662E-33	2.654E-13
1,448	2.963E-01		0.803			8.157E-33	2.615E-13
1,504	2.853E-01		0.227			7.674E-33	2.576E-13
1,739	1.852E-01		0.099			4.221E-33	2.228E-13
1,770	1.719E-01		0.314			3.926E-33	2.189E-13
1,802	1.563E-01		1.343			3.647E-33	2.150E-13
1,835	1.475E-01		3.826			3.382E-33	2.112E-13
1,869	1.362E-01		4.123	4.969E-01	1.676E+00	3.132E-33	2.073E-13
1,905	1.249E-01		3.183	1.734E-01	1.390E+00	2.896E-33	2.034E-13
1,942	1.163E-01		1.886	9.187E+01	2.332E+01	2.673E-33	1.995E-13
1,980	1.076E-01		0.406	1.058E+02	2.460E+01	2.464E-33	1.957E-13
2,020	1.004E-01		0.108	4.977E+02	7.006E+01	2.266E-33	1.918E-13
2,062	9.494E-02		0	1.249E+02	3.525E+01	2.081E-33	1.879E-13
2,105	8.945E-02		0	5.522E+00	1.105E+01	1.907E-33	1.840E-13
2,151	8.439E-02		0	2.433E-01	2.132E+00	1.744E-33	1.802E-13
2,198	7.922E-02		0	1.789E-02	3.432E-01	1.592E-33	1.763E-13
2,410	6.300E-02		0.283	0	0	1.078E-33	1.608E-13
2,469	5.710E-02		0.692	4.219E-02	3.384E-01	9.718E-34	1.569E-13
2,532	5.208E-02		4.568	1.372E-02	2.488E-01	8.733E-34	1.530E-13
2,597	4.818E-02		12.284	8.943E-01	2.260E+00	7.824E-34	1.492E-13
2,667	4.465E-02		13.455	1.646E+04	3.364E+02	6.987E-34	1.453E-13
2,740	4.140E-02		11.046	1.618E+04	3.831E+02	6.218E-34	1.414E-13
2,817	3.832E-02		6.864	5.757E+03	2.779E+02	5.513E-34	1.375E-13
2,899	3.504E-02		2.096	1.284E+01	1.601E+01	4.869E-34	1.337E-13
2,985	3.160E-02		1.176	1.666E+00	3.792E+00	4.282E-34	1.298E-13

の和となる。

$$\tau = \tau_{O_3} + \tau_{H_2O} + \tau_{CO_2} + \tau_R + \tau_M \quad (4)$$

これら個々の光学的厚みに対して(2)式が成立するので、オゾンの吸収、レイリー散乱、ミー散乱については、各成分の消散断面積と数密度の値から $\tau_j$  (添え字jは大気成分の識別記号) を求める<sup>2,9,10</sup>。しか水蒸気と二酸化炭素については次節に述べる別法を用いる。

## 2. 2 水蒸気と二酸化炭素の扱い

近赤外部における水蒸気と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る吸収帯から構成されており、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<sup>11-13</sup>、単純に吸収断面積の値を求めることはできない。しかしこれらの気体については以下に示すように透過率を求める方法が提案されているので、吸収断面積の代わりに透過率を用いて光学的厚みを求めることにする。一般的に透過率 $T$ は $I_N/I_0$ と定義されるので、大気成分jに関する $T_j$ の値がわかれば、 $\tau_j$ の値は(1)式を参照して次式で求めることができる。

$$\tau_j = -\ln\left(\frac{I_N(j)}{I_0}\right) = -\ln T_j \quad (5)$$

まず二酸化炭素についてであるが、その透過率を放射伝達の理論的取扱い<sup>12,13</sup>に基づいて求める数式自身についてはすでに紹介済みであり<sup>1)</sup>、今回実際にその手法を適用する。その手法を要約すれば、ある波長範囲に広がって存在する多数の吸収線の集合を一つの吸収帯として扱い、その平均的な透過率 $T_{CO_2}$ を個々の吸収線の等価幅 $W_i$ を用いて表すということである。

$$T_{CO_2} = \exp\left(-\sum_i (W_i/\Delta\nu)\right) \quad (6)$$

$\Delta\nu$ は吸収帯の幅(ここでは波数単位)、添え字iは吸収帯を構成する吸収線の番号である。等価幅の和は次式を用いて算出する。

$$\sum W_i = \frac{2R^2 \times (p_{av(CO_2)}/p_0)}{S}$$

$$\times \left\{ \left[ 1 + \frac{S^2 \times m_{CO_2}}{R^2 \times (p_{av(CO_2)}/p_0)} \right]^{1/2} - 1 \right\} \quad (7)$$

ここに、 $S$ と $R$ は二酸化炭素に関する吸収因子であり、波長に依存する値として表1に示す値がHoughtonにより報告されている<sup>12)</sup>。平均気圧 $p_{av(CO_2)}$ は(8)式で定義される値であり、 $p_0$ は標準気圧(1気圧)である。

$$p_{av(CO_2)} = \frac{\int_z^\infty p \rho_{CO_2} dz}{\int_z^\infty \rho_{CO_2} dz} \quad (8)$$

$p$ は各高度における大気圧であり、 $\rho_{CO_2}$ は二酸化炭素の密度である。また $m_{CO_2}$ は光路中の二酸化炭素の質量であり、 $\int_z^\infty \rho_{CO_2} dz$ に等しい。

水蒸気についても、二酸化炭素と同様等価幅の和を用いる方法が適用可能であるが<sup>12-14)</sup>、ここではKoepkeらによって提案された簡便な方法<sup>15)</sup>を用いることにする。彼らは近赤外部の水蒸気の吸収のうち700nm~1,000nmに存在する吸収について、各波長の地表における透過率 $T_{H_2O}$ が次式で表現できることを示した。

$$T_{H_2O} = \exp\left(-b \cdot m_{H_2O}^{f_w} \cdot p_{av(H_2O)}^{f_p}\right) \quad (9)$$

ここに $b$ は水蒸気の吸収因子であり表1に示すように波長に依存する無次元の値である。 $m_{H_2O}$ は光路中の水蒸気の質量、 $f_w(=0.53)$ と $f_p(=0.34)$ はそれぞれ透過率が水蒸気量と気圧によって変化する度合いを示すパラメータであり、用いる波長範囲では一定と見なすことができる。水蒸気の平均気圧 $p_{av(H_2O)}$ は二酸化炭素の場合の(8)式と類似の式で求める。なお、Koepkeらが求めた透過率は基本的には地表における値であるが、本論文では任意の高度における透過率もその高度における $m_{av(H_2O)}$ と $p_{av(H_2O)}$ を用いて算出した。また、Koepkeらは水蒸気について1,000nm以下の波長における $b$ の値のみを報告しているが、本論文では上記Houghtonの方法<sup>12-14)</sup>を用いてあらかじめ1,000nm以上の波長における $b$ の値を求めて使用した<sup>16)</sup>。表1にはこれら1,000nm以上における $b$ の値も記入してある。

## 2. 3 天頂角および太陽-地球間距離の補正

前節では天頂角  $\theta = 0^\circ$  のときの垂直日射量  $I_N$  の算出について述べたが、現実には地域、季節、時刻によって天頂角は大きく変化する。逆に地域、季節、時刻の変化に伴う日射量  $I$  の変化は、天頂角の変化として扱うことになる。図1から分かるように任意の天頂角で入射する光の光路長  $dx$  は  $dz/\cos\theta$  に等しいので、その光学的厚み  $\tau$  は(2)式の代わりに(10)式となり、したがって日射量  $I$  は(11)式で与えられる。

$$\tau = \frac{1}{\cos\theta} \int_z^\infty \text{sndz} \quad (10)$$

$$I = I_0 \exp \left( - \int_z^\infty \text{sndz} \right)^{1/\cos\theta} \quad (11)$$

(3)式と(11)式を比較することにより、 $I$  を  $I_N$  を用いて表すと以下ようになる。

$$I = I_0 \cdot \left( \frac{I_N}{I_0} \right)^{1/\cos\theta} \quad (12)$$

また  $I_0$  は太陽-地球間の平均距離  $d_0$  における値であり、実際には太陽-地球間の距離  $d$  は日ごとに変化するので、その補正項  $(d_0/d)^2$  を掛ける必要がある。

$$I = I_0 \cdot \left( \frac{d_0}{d} \right)^2 \cdot \left( \frac{I_N}{I_0} \right)^{1/\cos\theta} \quad (13)$$

以上により、垂直日射量  $I_N$  を求めておけば、(13)式により任意の地域、季節、時刻における  $I$  を算出可能である。

なお、 $\cos\theta$  や  $(d_0/d)^2$  の値は地域(緯度)や月日・時刻等を指定することにより計算可能であり、その際に用いる式を以下に整理しておく<sup>5,8)</sup>。

$$\cos\theta = \sin\phi \sin\delta + \cos\phi \cos\delta \cos h \quad (14)$$

$$\begin{aligned} \left( \frac{d_0}{d} \right)^2 = & 1.000110 + 0.034221 \cos\eta \\ & + 0.001280 \sin\eta + 0.000719 \cos 2\eta \\ & + 0.000077 \sin 2\eta \end{aligned} \quad (15)$$

$\phi$ : その地域の緯度(北緯はプラス、南緯はマイナス)

$\delta$ : その日の太陽の赤緯 [ $= \sin^{-1}(0.398 \times \sin a)$ ,  
 $a = 4.871 + \eta + 0.033 \sin \eta$ ]

$\eta$ :  $(2\pi/365) \times i$  ( $i$  は1月1日から数えたその日までの日数)

$h$ : 南中時刻からの時角(正午を0度とし1時間あたり15度、午前はマイナス)

(なお、度はいずれもラジアンに換算して入力)

## 3. 垂直日射量の試算例

### 3. 1 水蒸気および二酸化炭素

消散に関与する5つの大気成分のうち、オゾン吸収、レイリー散乱、ミー散乱に関する試算例についてはすでに報告済みなので<sup>1)</sup>、ここでは水蒸気と二酸化炭素の吸収を中心として垂直日射量の試算例を述べる。表2に示すように、まず各高度における大気圧と密度データから平均気圧と光路中の消散成分の質量を求める。なお同表中の二酸化炭素の密度は、マックラーチの大気密度の値<sup>7)</sup>に相対質量濃度  $5.318 \times 10^{-4}$  を乗じて得た値である。次いで各波長ごとに波長に係わるデータを用いて透過率や光学的厚みを算出し、最終的に垂直日射量を求める。表2に示したのは2667nmにおける試算結果であり、水蒸気あるいは二酸化炭素が各々単独に存在する場合の値であるが、その高度変化の様子を図2に示す。高度8km以下(ほぼ対流圏に相当)では水蒸気による減衰が極めて顕著であり、地表では日射量は事実上消滅してしまうことがわかる。これに対して成層圏領域では逆に二酸化炭素の吸収による減衰の方が大きくなっている。これは対流圏と成層圏の界面付近の温度が非常に低いので、水蒸気は成層圏まで拡散することができず、したがって成層圏での水蒸気

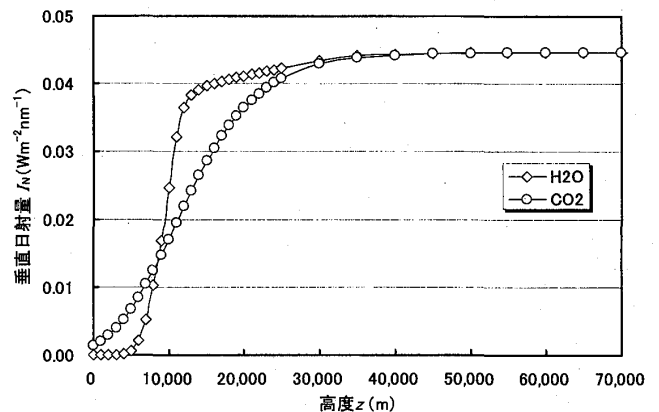


図2 水蒸気と二酸化炭素の垂直日射量の高度変化(2667nm)

表2 水蒸気と二酸化炭素の垂直日射量

高度	気圧 <sup>7)</sup>	水蒸気				二酸化炭素			
		密度 <sup>7)</sup>	光路中の H <sub>2</sub> O量	平均気圧	垂直日射量	密度 <sup>7)</sup>	光路中の CO <sub>2</sub> 量	平均気圧	垂直日射量
<i>z</i>	<i>p</i>	$\rho_{H_2O}$	$m_{H_2O}$	$p_{av}(H_2O)$	$I_{N(H_2O)}$	$\rho_{CO_2}$	$m_{CO_2}$	$p_{av}(CO_2)$	$I_{N(CO_2)}$
m	atm	g cm <sup>-3</sup>	g cm <sup>-2</sup>	atm	W m <sup>-2</sup> nm <sup>-1</sup>	g cm <sup>-3</sup>	g cm <sup>-2</sup>	atm	W m <sup>-2</sup> nm <sup>-1</sup>
0	1.000E+00	1.400E-05	2.982E+00	8.131E-01	8.519E-12	6.333E-07	5.491E-01	5.017E-01	1.399E-03
1,000	8.904E-01	9.300E-06	1.817E+00	7.285E-01	2.814E-09	5.743E-07	4.887E-01	4.469E-01	2.045E-03
2,000	7.917E-01	5.900E-06	1.057E+00	6.477E-01	2.876E-07	5.188E-07	4.340E-01	3.972E-01	2.884E-03
3,000	7.009E-01	3.300E-06	5.967E-01	5.718E-01	9.433E-06	4.704E-07	3.846E-01	3.524E-01	3.936E-03
4,000	6.199E-01	1.900E-06	3.366E-01	5.034E-01	1.126E-04	4.253E-07	3.398E-01	3.117E-01	5.215E-03
5,000	5.469E-01	1.000E-06	1.916E-01	4.430E-01	6.375E-04	3.835E-07	2.993E-01	2.750E-01	6.725E-03
6,000	4.808E-01	6.100E-07	1.110E-01	3.917E-01	2.110E-03	3.450E-07	2.629E-01	2.420E-01	8.455E-03
7,000	4.205E-01	3.700E-07	6.203E-02	3.453E-01	5.214E-03	3.100E-07	2.302E-01	2.123E-01	1.039E-02
8,000	3.672E-01	2.100E-07	3.302E-02	3.027E-01	1.026E-02	2.778E-07	2.008E-01	1.857E-01	1.249E-02
9,000	3.198E-01	1.200E-07	1.652E-02	2.619E-01	1.694E-02	2.483E-07	1.745E-01	1.619E-01	1.473E-02
10,000	2.774E-01	6.400E-08	7.312E-03	2.158E-01	2.477E-02	2.212E-07	1.510E-01	1.406E-01	1.707E-02
11,000	2.399E-01	2.200E-08	3.011E-03	1.546E-01	3.214E-02	1.964E-07	1.301E-01	1.217E-01	1.947E-02
12,000	2.063E-01	6.000E-09	1.610E-03	9.512E-02	3.655E-02	1.738E-07	1.116E-01	1.049E-01	2.187E-02
13,000	1.767E-01	1.800E-09	1.220E-03	6.432E-02	3.838E-02	1.533E-07	9.526E-02	9.003E-02	2.424E-02
14,000	1.510E-01	1.000E-09	1.080E-03	5.141E-02	3.915E-02	1.310E-07	8.104E-02	7.708E-02	2.651E-02
15,000	1.283E-01	7.600E-10	9.921E-04	4.358E-02	3.965E-02	1.119E-07	6.890E-02	6.604E-02	2.862E-02
16,000	1.096E-01	6.400E-10	9.221E-04	3.786E-02	4.005E-02	9.556E-08	5.852E-02	5.666E-02	3.054E-02
17,000	9.378E-02	5.600E-10	8.621E-04	3.342E-02	4.037E-02	8.163E-08	4.966E-02	4.863E-02	3.229E-02
18,000	8.016E-02	5.000E-10	8.091E-04	2.992E-02	4.065E-02	6.940E-08	4.211E-02	4.176E-02	3.387E-02
19,000	6.861E-02	4.900E-10	7.596E-04	2.702E-02	4.091E-02	5.903E-08	3.569E-02	3.589E-02	3.527E-02
20,000	5.874E-02	4.500E-10	7.125E-04	2.460E-02	4.113E-02	5.027E-08	3.023E-02	3.087E-02	3.651E-02
21,000	5.035E-02	5.100E-10	6.645E-04	2.244E-02	4.136E-02	4.284E-08	2.557E-02	2.656E-02	3.761E-02
22,000	4.314E-02	5.100E-10	6.135E-04	2.042E-02	4.159E-02	3.654E-08	2.160E-02	2.285E-02	3.857E-02
23,000	3.712E-02	5.400E-10	5.610E-04	1.857E-02	4.181E-02	3.120E-08	1.822E-02	1.963E-02	3.942E-02
24,000	3.179E-02	6.000E-10	5.040E-04	1.678E-02	4.205E-02	2.666E-08	1.532E-02	1.684E-02	4.017E-02
25,000	2.734E-02	6.700E-10	4.405E-04	1.494E-02	4.232E-02	2.280E-08	1.285E-02	1.439E-02	4.083E-02
30,000	1.303E-02	3.600E-10	1.829E-04	7.544E-03	4.347E-02	7.030E-09	5.392E-03	6.361E-03	4.296E-02
35,000	6.436E-03	1.100E-10	6.534E-05	3.611E-03	4.412E-02	3.467E-09	2.767E-03	3.162E-03	4.379E-02
40,000	3.287E-03	4.300E-11	2.708E-05	1.845E-03	4.438E-02	1.771E-09	1.458E-03	1.636E-03	4.420E-02
45,000	1.737E-03	1.900E-11	1.157E-05	9.516E-04	4.451E-02	9.343E-10	7.818E-04	8.780E-04	4.441E-02
50,000	9.388E-04	6.300E-12	5.245E-06	4.858E-04	4.458E-02	5.058E-10	4.217E-04	4.852E-04	4.452E-02
55,000	5.226E-04	3.506E-12	2.792E-06	2.709E-04	4.461E-02	2.816E-10	2.249E-04	2.703E-04	4.458E-02
60,000	2.830E-04	1.898E-12	1.441E-06	1.472E-04	4.463E-02	1.525E-10	1.163E-04	1.467E-04	4.461E-02
65,000	1.490E-04	9.994E-13	7.160E-07	7.764E-05	4.464E-02	8.040E-11	5.810E-05	7.713E-05	4.463E-02
70,000	7.547E-05	5.055E-13	3.396E-07	3.931E-05	4.464E-02	4.076E-11	2.781E-05	3.887E-05	4.464E-02
75,000	3.624E-05	2.422E-13	1.526E-07	1.905E-05	4.465E-02	1.963E-11	1.271E-05	1.869E-05	4.465E-02
80,000	1.663E-05	1.106E-13	6.438E-08	8.931E-06	4.465E-02	9.062E-12	5.537E-06	8.666E-06	4.465E-02
85,000	7.335E-06	4.824E-14	2.466E-08	4.023E-06	4.465E-02	4.058E-12	2.257E-06	3.848E-06	4.465E-02
90,000	2.924E-06	1.864E-14	7.931E-09	1.693E-06	4.465E-02	1.681E-12	8.220E-07	1.611E-06	4.465E-02
95,000	1.047E-06	6.039E-15	1.760E-09	6.714E-07	4.465E-02	6.703E-13	2.341E-07	6.715E-07	4.465E-02
100,000	2.962E-07	1.000E-15	0.000E+00	0.000E+00	4.465E-02	2.659E-13	0.000E+00	0.000E+00	4.465E-02

注：波長 = 2667nm,  $I_0 = 4.465 \times 10^{-2} \text{Wm}^{-2}\text{nm}^{-1}$ ,  $b = 13.455$ ,  $S = 1.646 \times 10^6 \text{cmg}^{-1}$ ,  $R = 3.364 \times 10^2 \text{g}^{-0.5}$ ,  $\Delta\nu = 100 \text{cm}^{-1}$

表3 地表垂直日射量 (代表的な波長のみ)

波長	大気上端 日射量	全日射量	オゾン	水蒸気	二酸化炭素	レイリー	ミー
$\lambda$	$I_0$	$I_N$	$I_{N(O_3)}$	$I_{N(H_2O)}$	$I_{N(CO_2)}$	$I_{N(R)}$	$I_{N(M)}$
nm	$W m^{-2} nm^{-1}$	$W m^{-2} nm^{-1}$	$W m^{-2} nm^{-1}$	$W m^{-2} nm^{-1}$	$W m^{-2} nm^{-1}$	$W m^{-2} nm^{-1}$	$W m^{-2} nm^{-1}$
252	8.384E-02	8.689E-46	1.290E-44			6.404E-03	7.392E-02
301	5.318E-01	6.103E-03	2.234E-02			1.614E-01	4.786E-01
500	1.942E+00	1.564E+00	1.923E+00			1.683E+00	1.823E+00
720	1.317E+00	8.725E-01	1.305E+00	9.506E-01		1.275E+00	1.260E+00
935	8.342E-01	2.011E-01		2.105E-01		8.248E-01	8.064E-01
1000	7.300E-01	7.011E-01		7.300E-01		7.237E-01	7.072E-01
1130	5.596E-01	7.667E-02		7.927E-02		5.567E-01	5.441E-01
1325	3.810E-01	1.848E-01		1.898E-01		3.799E-01	3.720E-01
1504	2.853E-01	1.912E-01		1.956E-01		2.848E-01	2.793E-01
1869	1.362E-01	1.403E-04		1.432E-04	1.358E-01	1.361E-01	1.339E-01
2020	1.004E-01	4.339E-02		8.389E-02	5.278E-02	1.004E-01	9.884E-02
2532	5.208E-02	2.578E-05		2.612E-05	5.208E-02	5.207E-02	5.143E-02
2985	3.160E-02	4.383E-03		4.469E-03	3.133E-02	3.160E-02	3.127E-02

密度が極めて低くなるためである。二酸化炭素に関しては大気圏全体を通じて相対濃度はほぼ一定である。

### 3.2 地表垂直日射量

これ以降は実用上重要な地表の日射量に話を限定する。

消散に関与する5つの大気成分すべてについて、117個の各波長における垂直日射量を求め、そのうちの代表的な波長における試算結果を表3に示す。同表で「全日射量  $I_N$ 」と記した数値が、5成分すべてが共存する場合の地表垂直全日射量であり、それ以外の各成分に関する日射量は、その成分が単独に存在するとした仮想的な日射量である。図3には全日射量の波長依存性を、大気上端日射量と対比して示す。700nmよりも長波長側で全日射量がピーク状に深くえぐられている箇所が何箇所か存在するが、これはこの波長域における水蒸気の吸収に起因する。そのことを示すために図4に水蒸気による日射量  $I_{N(H_2O)}$  と全日射量  $I_N$  とを比較して載せるが、少なくとも900nm以上の長波長域においては、両者が事実上一致して

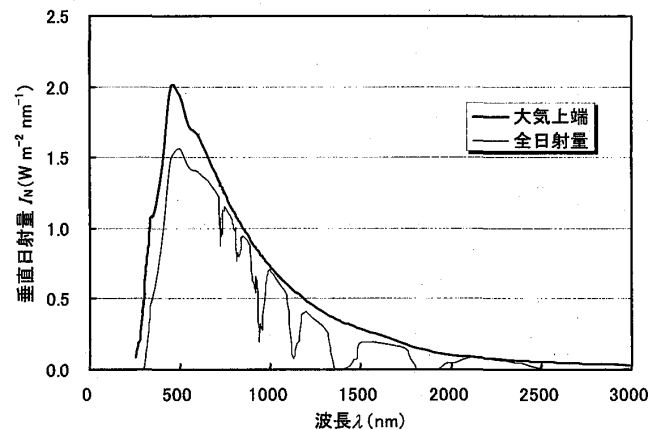


図3 地表垂直全日射量の波長変化

いることが分かる。

一方水蒸気の吸収が起きない700nm以下の短波長側における全日射量の減衰は図5に示すように主に散乱効果による。同図によると特にレイリー散乱は波長が短い領域で顕著となり、700nm以下の領域における減衰の主役を担っているが、ミー散乱の効果も無視できない。なおもっとも波長が短い320nm以下の領域で全日射量とレイリー散乱日射量との間にかなりずれが生じているのは、この領域でオゾンの吸収が顕著になるから



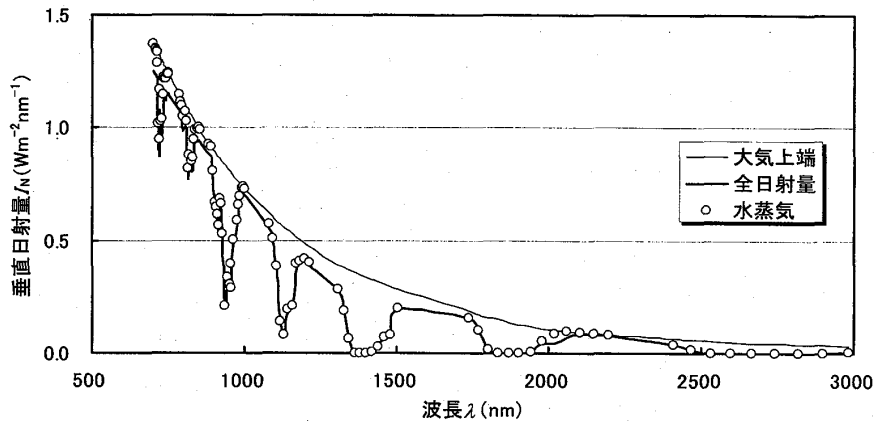


図4 地表垂直全日射量と水蒸気日射量

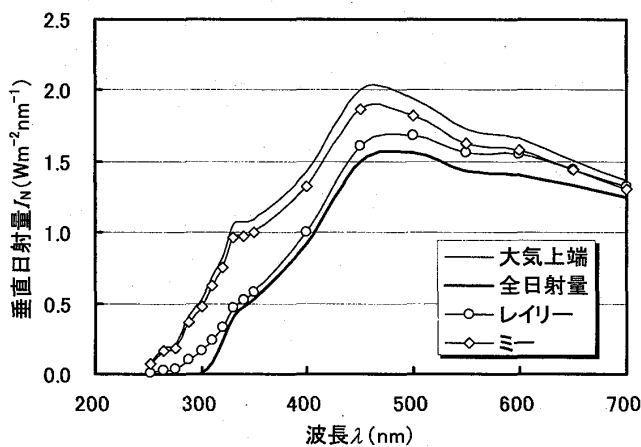


図5 地表垂直全日射量と散乱日射量

であり、オゾン層破壊で問題となっている紫外線はこの300nm前後の紫外線である。

#### 4. 地域・季節・時刻変化の試算例

##### 4.1 東京の全日射量

3章で地表における垂直日射量(垂直全日射量)  $I_N$  を算出済みなので、(13)式を用いることにより任意の地域・季節・時刻における全日射量  $I$  を求めることができる。そこで国内の代表地域として東京(北緯36度)を選び、6月15日を指定して時刻毎の全日射量を117個の波長別に求めた。表4はその結果をいくつかの代表的な波長に限定して示したものである。なお(14)式の変数  $h$  の定義から分かるように、日射量は正午を境として午前と午後とで同じように変化するので、午前のみを対象として試算すればよい。夏季は太陽からの距

離が遠くなる時期であり、 $(d/d_0)^2 = 0.9681$  という値が示すように6月15日に大気上端に到達している日射量は、標準距離のときより3.2%少ない。また時刻による全日射量の変化は、波長によって著しく異なる。早朝は日中に比べて天頂角が大きく太陽光の光路が長くなるので、減衰を受けやすい波長では日射量が大幅に弱くなる。例えば、減衰がほとんど起きない1,000nmの赤外線では12時と6時の日射量比が1.14とあまり変化しないのに対して、935nmの赤外線では水蒸気による吸収が強いのでこの比は100にもなる。同様にオゾンによる吸収が起きる紫外線領域についても時刻による変化は大きく、301nmにおける12時の紫外線量は6時の200万倍にもなる。

##### 4.2 東京の全日射量：波長積算値および時間積算値

日射量の単位は  $Wm^{-2}nm^{-1}$  であり、1秒間に受け取るエネルギー量(J)を波長幅1nm当たりで表現した値である。地球が受け取るエネルギー量という意味では、この1nmあたりの日射量とは別に、全波長範囲にわたって積算した値(波長積算日射量)が重要である。そこで東京の全日射量に関して、隣接する2波長の平均日射量と波長区間幅の積を求め、これを117個の全波長区間について積算することにより波長積算日射量を求めた。その結果を表5と図6に示す。毎月の15日についての計算例であるが、季節によっては早朝は日の出前となるので、日射量は0としてあ

表4 東京の全日射量 [6月15日,  $(d/d_0)^2=0.9681$ , 代表的な波長のみ]

波長	垂直全日射量	6時	7時	8時	9時	10時	11時	12時
		cos $\theta$						
$\lambda$	$I_N$	0.2332	0.4254	0.6045	0.7582	0.8762	0.9504	0.9757
nm	$W m^{-2} nm^{-1}$	全日射量 $I$ ( $W m^{-2} nm^{-1}$ )						
252	8.689E-46	1.832E-190	3.216E-105	1.390E-74	7.946E-60	5.142E-52	4.250E-48	6.734E-47
301	6.103E-03	2.456E-09	1.414E-05	3.176E-04	1.422E-03	3.143E-03	4.679E-03	5.285E-03
500	1.564E+00	7.439E-01	1.131E+00	1.315E+00	1.414E+00	1.469E+00	1.498E+00	1.506E+00
720	8.725E-01	2.180E-01	4.842E-01	6.451E-01	7.407E-01	7.969E-01	8.267E-01	8.360E-01
935	2.011E-01	1.810E-03	2.850E-02	7.676E-02	1.237E-01	1.593E-01	1.808E-01	1.879E-01
1000	7.011E-01	5.944E-01	6.427E-01	6.610E-01	6.701E-01	6.749E-01	6.773E-01	6.781E-01
1130	7.667E-02	1.075E-04	5.062E-03	2.021E-02	3.938E-02	5.605E-02	6.690E-02	7.063E-02
1325	1.848E-01	1.655E-02	6.730E-02	1.114E-01	1.420E-01	1.615E-01	1.722E-01	1.757E-01
1504	1.912E-01	4.961E-02	1.078E-01	1.424E-01	1.629E-01	1.749E-01	1.812E-01	1.832E-01
1869	1.403E-04	2.035E-14	1.252E-08	1.507E-06	1.515E-05	5.140E-05	9.484E-05	1.144E-04
2020	4.339E-02	2.661E-03	1.352E-02	2.426E-02	3.215E-02	3.731E-02	4.020E-02	4.114E-02
2532	2.578E-05	3.359E-16	8.554E-10	1.715E-07	2.205E-06	8.517E-06	1.678E-05	2.065E-05
2985	4.383E-03	6.396E-06	2.942E-04	1.165E-03	2.260E-03	3.210E-03	3.827E-03	4.039E-03

表5 東京の波長積算日射量 ( $Wm^{-2}$ , 毎月15日)

	6時	7時	8時	9時	10時	11時	12時
1月	0	0	389.8	622.2	729.2	779.5	794.5
2月	0	153.5	545.3	710.6	792.0	831.6	843.6
3月	0	431.9	670.1	782.8	842.5	872.6	881.9
4月	231.0	583.1	738.4	820.5	866.5	890.5	897.9
5月	418.2	650.9	767.6	833.7	872.2	892.6	899.0
6月	478.0	672.1	774.9	834.9	870.4	889.4	895.3
7月	452.3	660.7	768.5	830.8	867.3	886.8	892.9
8月	327.1	612.6	746.4	819.6	861.4	883.3	890.1
9月	51.0	504.0	696.4	792.4	844.6	871.3	879.6
10月	0	287.5	600.2	737.5	807.4	842.0	852.6
11月	0	11.1	453.5	654.8	750.0	795.4	809.1
12月	0	0	337.4	591.8	706.9	760.5	776.4

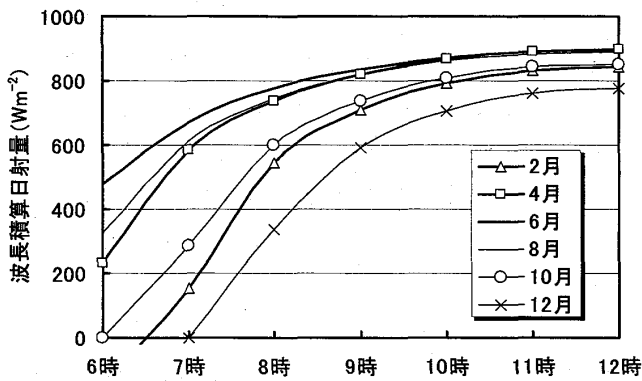


図6 波長積算日射量（東京，毎月15日）

表6 各地の波長積算日射量 ( $Wm^{-2}$ )

	沖縄	東京	宗谷
北緯 (度)	26	36	46
6月15日・12時	900.6	895.3	882.6
12月15日・12時	849.5	776.4	656.5

る。4月～8月の12時における日射量は $900Wm^{-2}$ 程度ではほぼ同一の値であるが、時刻が早くなると6月，8月，4月の順に日射量が次第に弱まることがわかる。1年を通じて最も弱くなる12月の場合でも、12時の日射量は $776Wm^{-2}$ 程度あり、6月に比べても15%程度の減少に過ぎない。しかし12月の場合は早い時刻になると急激に日射量が弱まっている。

図7には、東京が一日全体で受ける全日日射量を示す。この全日日射量は、表5の各時刻における波長積算日射量を3,600倍して加算した値であり、午後の日射量を考慮して、12時以外の時刻分について2倍してある。晴天を仮定すれば、最大値を示す6月の全日日射量は $35.8MJm^{-2}$ であり、もっとも少ない12月でも $20.1MJm^{-2}$ のエネルギーを受けとっている。東京における年間を通算した合計の全日日射量は $347MJm^{-2}$ となる。

国内の1世帯が年間に消費するエネルギーは、電力・ガス・石油等を合わせて $45,000MJ (= 12,500kWh)$ 程度である<sup>17)</sup>。仮に各世帯が $50m^2$ の屋上面積をもつ1戸建の住宅で太陽光を受光したとすると、年間あたりの受光エネルギーは $6,300,000MJ$ となる。これは年間消費エネルギー量の140倍に相当し、晴天率やエネルギー変換効率を考慮しても、数値上は余裕のあるエネ

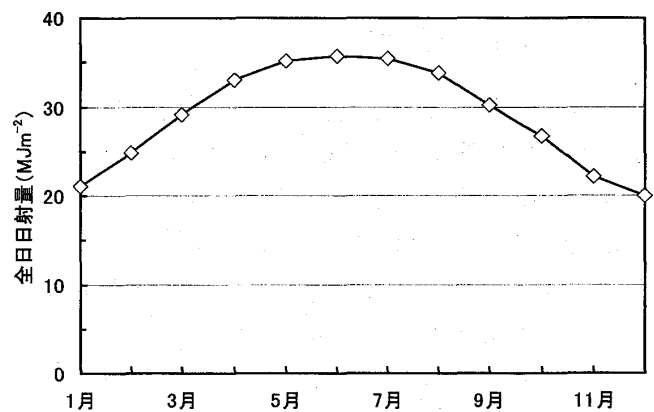


図7 全日日射量（東京，毎月15日）

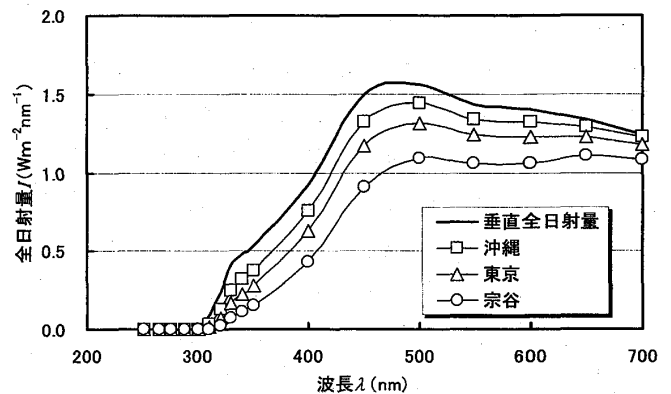


図8 全日日射量の地域差（12月15日12時）

ギー量といえる。

#### 4.3 全日日射量の地域差

全日日射量の地域による変化を見るために、これまで試算してきた東京（北緯36度）以外に、沖縄（北緯26度）と宗谷（北海道・北緯46度）についても全日日射量を試算した。一例として、これら3地域で求めた12時の波長積算日射量データを表6に示す。意外なことにもっとも日射が強い時期に相当する6月15日では、3地域の波長積算日射量の違いはわずかであり、沖縄と宗谷を比較しても2%未満の違いに過ぎない。一方、日射がもっとも弱い時期に相当する12月15日では、沖縄は宗谷の1.29倍の波長積算日射量を有する。図8には地域による違いが比較的顕著に起きる波長700nm以下の領域の全日日射量を示すが、沖縄と宗谷の全日日射量比は301, 350, 500nmの各波長で315, 2.67, 1.38である。

## 5. 考察に代えて

今回太陽光のほぼ全波長範囲を対象として、消散に実際に影響を与える成分すべてをとり込み、任意の高度、地域、季節、時刻において日射量を試算する方法を提唱しいくつかの試算例を紹介した。これにより、これまでの報告<sup>1,2)</sup>では不十分であった日射量シミュレーションの全容が一応整ったことになり、大学教育において大気環境問題に関する本質的理解へ近づけることがより容易になったと考える。

全体像が完成したことを受けて、試算結果がどの程度実測値を反映しているかを見ておきたい。実測データとしては新エネルギー・産業技術総合開発機構<sup>18)</sup>が公開している「技術情報データベース」を用いる。今回の試算では雲がまったく存在しない晴天時の日射量を求めているので、そのような条件の日が出現しやすいことを考慮して、6月については宗谷（稚内）で、12月については東京で実測値との比較を行なった。本データベースでは日中完全に晴天であった日として、6月の宗谷では5日分、12月の東京では7日分の各時刻における実測日射量が提供されており、12時における値を平均して6月の宗谷は $3.00\text{MJm}^{-2}$  ( $=833\text{Wm}^{-2}$ )、12月の東京は $1.46\text{MJm}^{-2}$  ( $=406\text{Wm}^{-2}$ )の値とした。ただし、提供されているデータは地表に水平な面積 $1\text{m}^2$ あたりが受け取る直達日射エネルギーであり、本研究と比較するためには天頂角を用いて太陽光に対して垂直な面積 $1\text{m}^2$ が受け取るエネルギーへの変換が必要である。この補正を行なうと、6月の宗谷における12時の実測日射量は $902\text{Wm}^{-2}$ 、12月の東京は $794\text{Wm}^{-2}$ となる。一方本研究における試算では、すでに波長積算日射量として表6に示したように各々883と776 $\text{Wm}^{-2}$ の値を得ており、実測値とは2%程度の範囲で一致する。このように今回提案した手法は定量的にも十分満足できる内容であり、学生指導上でも効果を上げることが期待できる。

なお今回試算に用いた波長範囲は250~3,000 nmであり、太陽光の大部分の波長域をカバーしているとはいえ、表1に示す大気上端日射量の波

長積算値から求められる全太陽光エネルギーは $1,322\text{Wm}^{-2}$ である。この値は太陽定数<sup>19)</sup>として知られる $1,367\text{Wm}^{-2}$ より3.3%低く、結果的に本試算では大気上端日射量として実際の値より3.3%小さい数値を用いたことを意味する。このことが試算で求めた日射量が実測値より多少低めに出た一因と考えられる。

今回のモデルを用いて学生を教育するにあたり、一つの問題点として水蒸気と二酸化炭素の吸収の取扱いがある。これらの吸収は上述の放射伝達概念に基づく取扱いを基本とするが<sup>11-13)</sup>、その内容をきちんと理解することは一般的にかなり困難である。このうち水蒸気については、本報で紹介したようにKoepke<sup>15)</sup>により提唱された経験的な関係式を用いることにより簡便化を図ることができ、理解を容易ならしめる事が可能である。今後は二酸化炭素についてより理解が容易なシミュレーション法を工夫することが望まれる。また用いる大気モデルについても、地域や季節による変化を反映したデータを探し出すことが必要であろう。

今回報告した手法を今後に発展させる方向の一つとして、曇天時の日射量の評価を挙げることができる。曇天時の日射量には、今回対象とした晴天時の直達日射量以外に散乱日射量が含まれ<sup>5,6)</sup>、しかも晴天率が低くなるほど散乱日射量の寄与が大きくなる<sup>18)</sup>。また太陽から地球に降り注ぐ入射エネルギーは、直達日射量と散乱日射量の両者を含めた全日射量で与えられるので、例えば地球温暖化の問題と関連付けて日射量を考えるためには、散乱日射量の評価が必要となってくる。

## 参考文献

- 1) 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.
- 2) 伊藤朋恭, 河西智子, 田口佳苗, 2002年, 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, 社会情報学研究, **11**, 13-26.

- 3) 伊藤朋恭, 鈴木紀子, 市倉真理子, 2003年, シミュレーション的手法による大気環境情報教育-オゾン濃度分布の試算, 社会情報学研究, **12**, 59-72.
- 4) 日本気象学会編, 1998年, 気象科学事典, 東京書籍.
- 5) 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.
- 6) 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.
- 7) 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).
- 8) 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.
- 9) 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.
- 10) 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.
- 11) 柴田清孝, 1999年, 光の気象学, 朝倉書店.
- 12) 広田勇ほか訳, 1981年, 大気物理学, みすず書房 (原著: J. T. Houghton, 1977年, *The physics of atmosphere*, Cambridge University Press).
- 13) 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.
- 14) 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.
- 15) 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.
- 16) 小寺絵莉, 2003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15年度卒業研究.
- 17) 日本エネルギー経済研究所編, 2003年, EDMC/エネルギー・経済統計要覧 (2003年版), 省エネルギーセンター.
- 18) 新エネルギー・産業技術総合開発機構 (NEDO): [www.nedo.go.jp](http://www.nedo.go.jp).
- 19) 朝倉正ほか編, 1995年, 新版気象ハンドブック, 朝倉書店.
- 20) D. R. Lide Ed., 1994年, CRC handbook of chemistry and physics (75th Ed.), CRC Press (原報: M. P. Thekaekara, 1974年).
- 21) 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.
- 22) 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.
- 23) D. R. Bates, 1984年, Rayleigh scattering by air, *Planet. Space Sci.*, **32**, 785-790.
- 24) C. Fröhlich *et al.*, 1980年, New determination of Rayleigh scattering in the terrestrial atmosphere, *Appl. Phys.*, **19**, 1773-1775.
- 25) 半田暢彦編, 1996年, 大気水圏科学からみた地球温暖化, 名古屋大学出版会.

## Education on Atmospheric Environmental Information by Simulation Procedure : Zenith Angle Dependence of Solar Radiation Energy

TOMOYASU ITO\*, YOKO KANAZAWA\*\*\*, YUMI FURUSE\*\*\*\*,  
ERI KODERA\*\*\*\*\*, SAYURI TANAKA\*\*\*\*\*

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

\*\*Present Affiliation : Fujisoft KCS Co., Ltd.

\*\*\*Present Affiliation : Cabinet Secretariat

\*\*\*\*Present Affiliation : Koudoku Co., Ltd.

\*\*\*\*\*Present Affiliation : University of Tsukuba (Master's Program)

### Abstract

Computer simulation to quantitatively evaluate solar radiation energy is an effective technique to let students better understand the essence of atmospheric environmental problems such as global warming or ozone depletion which is directly related to the amount of solar radiation energy. The authors have proposed in this paper a general simulation method for solar radiation energy including terms of absorption in near infra-red region and change in zenith angle.

Optical depths necessary for evaluation of solar radiation energy have been simply calculated by using the dispersion cross-section for ozone-absorption, Rayleigh- and Mie-scatterings, but optical depths for absorptions of water and carbon dioxide have been estimated through the transmittance since these absorptions consist of complex lines. Results calculated for domestic areas including Tokyo at wave-lengths between 250 and 3,000nm agree with observed values within 2% difference, showing that the proposed method provides a satisfactory tool for quantitative estimation. In the future, it will be desirable to add the estimation of scattered solar radiation energy which is important in cloudy sky.

### Key Words (キーワード)

Solar radiation energy (日射量), Zenith angle (天頂角), Absorption (吸収), Scattering (散乱), Simulation (シミュレーション), Atmospheric environment (大気環境), Education in environmental information (環境情報教育)