純 粹 大 氣 の 擴 散 に 就 て*

川 畑 幸 夫,** 川 崎 弘***

(1) 緒 言 視程の問題に関しては純粹大氣の擴散度を豫め波長別に知り置くことが大事であると思はれる。元來日射に對する地球大氣の透過率即ち換言すれば地球大氣に因る日射の減衰は主として次の原因に基く。

- (イ) 純粹乾燥大氣中の空氣分子に因る擴散
- (ロ) 大氣中の水蒸氣に因る擴散
- (ハ) 大氣中の瓦斯體(主として水蒸氣)に因る吸収
- (ニ) 大氣中に浮游せる塵埃粒子に因る擴散と収吸

(イ) 項の純粹乾燥大氣の空氣分子に因る擴散は Rayleigh の理論に基き King⁽¹⁾ が地球大氣に應し用した處で、其の理論は實測値とも極めてよく一致することは、齊しく認められて居る處である。空氣清澄にして、塵埃の影響を殆んど受けず、又上空の水蒸氣に因る日射減衰に對する補正も相當正確に推算されたと考へられるウヰルソン山頂に於ける Fowle⁽²⁾ の實測は明かに之を證明した。従つて日射の觀測成績を整理するに當つては、先づ此の純粹乾燥大氣の空氣分子による擴散を計算して除去した上で其の殘餘を(ロ)、(ハ)、(ニ)と關聯せしめて研究しても一向に差支へがない。故に本報文に於ては先づそれを波長別に精しく調べ、更に波長について積分し、全日射に對する透過率を(空氣分子の擴散だけを考へて)求める。斯くして得られた結果を利用して熱帶地方と溫帶地方の相違を調べ、併せて、地上の高さに依る擴散度の相違を調査した。

(2) 純粹乾燥大氣の波長別擴散圖表

純粹乾燥大氣の擴散圖表は嘗て H. H. Kimball⁽³⁾ 氏が作製したことがあるが、それは單に全日射について求められて居るので、茲では更に精しい圖表を作製することにする。

波長 λ (經), 通過空氣量 m (近似的に太陽天頂距離の secant に等しい) なる純粹乾燥大氣に

* Y. Kawabata and H. Kawasaki: A Computation of Molecular Scattering of the Earth's Atmosphere.

本報文は著者等の一人(川畑)に委託せられたる「南方圈に於ける太陽輻射線の比較研究, 學術研究會議」の道程中の一部をなすものである。

** 中央氣象臺天測課長, 氣象技師, 理學博士。

*** 中央氣象臺天測課, 氣象技手。

(1) Phil. Trans. Roy. Soc., A. 212 (1913).

(2) A. J., 38 (1913).

(3) H. H. Kimball: Measurements of Solar Radiation Intensity etc., Month. Weath. Rev. (1927).

對する日射の透過率を, $a_{a\lambda}^m$ で表せば, King¹⁾ に依り $a_{a\lambda}$ は

$$a_{a\lambda} = e^{-k} \quad k = \frac{32}{3} \left[\pi^3 (n-1)^2 \frac{H}{N_0 \lambda^4} + bH \right] \frac{P}{P_0} + D \quad (1)$$

となる。但し茲に

$$n = \text{空氣の屈折率}, \quad (n-1)10^7 = 2875.16 + \frac{13.412}{\lambda^2} 10^{-8} + \frac{0.3777}{\lambda^4} 10^{-16},$$

H = 齊一大氣の高さ = 799000 呎, P = 氣壓 (水銀柱呎),

$N_0 = 1$ 立方呎中に含まれる分子數 ($P_0 = 76$ 呎, $t = 0^\circ\text{C}$) = 2.705×10^{19} ,

b = 永久瓦斯に依つて熱へ變成されて仕舞ふエネルギー,

D = 塵埃に依る減衰項 (波長には大して關係がない)。

假定に依り, 純粹空氣分子のみを考へるのであるから先づ $b = D = 0$ と置き, 透過率 $a_{a\lambda}$ を計算し, 通過空氣量或は太陽高度を横軸にとり波長をパラメーターとしてそれを圖示すれば第1圖の如くなる。

純粹大氣の分子擴散だけを考へるならば, 通過空氣量の變化に依る透過率の相違は, 長波長域よりも短波長域に於て著しかるべきことは常識的にも明らかなことであるが, それが圖に如實に示されて居る。例へば赤外日射 $\lambda = 7000 \text{Å}$ であると, 太陽が天頂にあるとき約 97% 透過し, 太陽が地平線附近にあつても (通過空氣量 8 は太陽高度約 7° に當る) 75% 以上透過するが, 例へば紫外線 $\lambda = 3000 \text{Å}$ であると太陽がたとへ天頂にあつても僅かに 32%, 地平線附近では 0% 即ち擴散されて殆んど地表には到達しない。又赤外域に於ては透過率は通過空氣量に殆んど直線的に比例して減少するが, 波長が短くなるほど最初天頂附近で急激に減少し, 後徐々に減少する傾向がある。太陽が天頂にある場合 ($m=1$) と太陽が地平線附近にあるとき ($m=8$,

$m=7$) の場合の透過率の絶対値が最も著しく異なるのは $\lambda = 4000 \text{Å}$ 附近であつて, 此の波長附近は大氣外日射のエネルギーが比較的大なることを考へ合せれば, 上の事實は重要な意義を存すると言はねばならぬ。

太陽高度の時間的變化は緯度に依り, 又季節 (太陽赤緯) に依り一定ではないが, 大體に於て日出時及び日没時の時即ち m の大なる時は大きく, 南中時に近い程即ち m の小さいときは高度變

1) L. V. King: On the Scattering and Absorption of Light in Gaseous Media. etc. Phil. Trans. Roy. Soc. London, A 212, 375-433. (1913).

化は少い。従つて日射日積算量のやうな時間につき總和したものを考へる場合には、圖のやうに m を等間隔にとつては正しい概念は得られない。 m が大きい方ほどスケールを縮めておく必要があるが、其の縮め方は緯度と季節によつて一様でないから、假に太陽高度を一様に横軸にとつて調べてみると（圖が混み入るので製圖困難なために圖は省略する）赤外域輻射は透過率が極めて大なるは勿論、太陽高度 30° 以上では殆んど太陽の高さに無關係に一定に近いことがわかる。之に反して紫外線になると太陽高度 60° 以下で既に透過率は著しく減少する。此のことは地表面上に於ける各種波長の太陽輻射の強度分布に對して重要な意義を有する。即ち空氣分子による擴散だけを考へるならば、長波長輻射は主として可照時だけで定まるが、紫外域日射は可照時の他に太陽高度に著しく左右せられ、たとへ可照時が同一であつても、太陽高度の變化する有様によつて著しい相違がある。例へば熱帶地方に於ては、可照時が年中殆んど一定であるから、長波長輻射も亦殆んど一定であるが、それにも拘らず紫外線量は多少年變化をなすことが推察される。又溫帶寒帶地方でも、長波長輻射は大體可照時に比例して増減するが、紫外線量は其の他に太陽高度の變化の影響が加はるので更に著しい年變化をすることになる。

第 2 圖

同じことであるが、通過空氣量をパラメーターとして輻射線の波長と透過率 α_{λ}^m を $m=1, 2, \dots, 8$ について求めたのが第 2 圖である。勿論地面 $z=0$ に於ける値を示す m が大きくなれば紫外線は殆んど地面までは到達しないで、散亂されて虚空へ擴がつて仕舞ふが、長波長となるに従ひ透過率は m に關せず略々 1 に近づく。

地上 $1\text{ km} \cdots 6\text{ km}$ に於ける α_{λ}^m も同様にして求められる。此の場合には前の $P=P_0=76$ 縷の代りに實際に其の層位の氣壓を用ひればよい。

(3). 全日射に對する擴散圖表

これまで吾々は透過率を波長別に考へたのであるが實際には銀盤日射計を使用した如く直達全日射として測定された場合が多い。

今大氣外日射を $I_{0\lambda}$ とすれば實際地面で觀測さるべき日射量 $I_{m\lambda}$ は純粹大氣に對しては

第 1 表

λ in cm	0 km $a_{a\lambda}$	1 km $a_{a\lambda}$	2 km $a_{a\lambda}$	3 km $a_{a\lambda}$	4 km $a_{a\lambda}$	5 km $a_{a\lambda}$	6 km $a_{a\lambda}$
2.8×10^{-5}	0.215	0.261	0.316	0.383	0.464	0.564	0.682
2.9 "	0.267	0.315	0.372	0.439	0.518	0.611	0.720
3.0 "	0.321	0.370	0.426	0.491	0.567	0.653	0.753
3.1 "	0.372	0.421	0.477	0.539	0.611	0.691	0.782
3.2 "	0.422	0.470	0.524	0.583	0.650	0.724	0.807
3.3 "	0.469	0.516	0.567	0.623	0.686	0.754	0.828
3.4 "	0.513	0.558	0.607	0.659	0.717	0.779	0.847
3.5 "	0.554	0.597	0.642	0.692	0.745	0.802	0.863
3.6 "	0.592	0.632	0.675	0.721	0.770	0.822	0.877
3.7 "	0.627	0.664	0.704	0.747	0.792	0.840	0.890
3.8 "	0.658	0.694	0.731	0.770	0.812	0.855	0.901
3.9 "	0.689	0.703	0.740	0.778	0.818	0.860	0.905
4.0 "	0.714	0.744	0.776	0.810	0.845	0.881	0.919
4.1 "	0.737	0.766	0.796	0.827	0.859	0.892	0.927
4.2 "	0.759	0.786	0.813	0.842	0.871	0.902	0.934
4.3 "	0.779	0.803	0.829	0.855	0.883	0.911	0.940
4.4 "	0.796	0.819	0.843	0.867	0.893	0.918	0.945
4.5 "	0.813	0.834	0.856	0.878	0.902	0.925	0.950
4.6 "	0.827	0.847	0.867	0.888	0.909	0.932	0.954
4.7 "	0.841	0.859	0.878	0.897	0.917	0.937	0.958
4.8 "	0.853	0.870	0.887	0.905	0.924	0.942	0.961
4.9 "	0.864	0.880	0.896	0.913	0.930	0.947	0.964
5.0 "	0.874	0.889	0.904	0.919	0.935	0.951	0.967
5.1 "	0.883	0.897	0.911	0.925	0.940	0.955	0.970
5.2 "	0.892	0.904	0.918	0.931	0.944	0.958	0.972
5.3 "	0.899	0.911	0.923	0.936	0.948	0.961	0.974
5.4 "	0.906	0.918	0.929	0.940	0.952	0.964	0.976
5.5 "	0.913	0.923	0.934	0.945	0.955	0.966	0.978
5.6 "	0.919	0.929	0.938	0.948	0.959	0.969	0.979
5.7 "	0.924	0.933	0.943	0.952	0.961	0.971	0.980
5.8 "	0.929	0.947	0.946	0.955	0.964	0.973	0.982
5.9 "	0.934	0.942	0.950	0.958	0.966	0.975	0.983
6.0 "	0.938	0.945	0.953	0.961	0.969	0.976	0.984
6.1 "	0.942	0.949	0.956	0.963	0.970	0.978	0.985
6.2 "	0.945	0.952	0.959	0.966	0.972	0.979	0.986
6.3 "	0.949	0.955	0.961	0.968	0.974	0.980	0.987
6.4 "	0.952	0.958	0.964	0.970	0.976	0.982	0.988
6.5 "	0.955	0.960	0.966	0.971	0.977	0.983	0.989
6.6 "	0.957	0.963	0.968	0.973	0.978	0.984	0.989
6.7 "	0.960	0.965	0.970	0.980	0.980	0.985	0.990
6.8 "	0.962	0.967	0.971	0.981	0.981	0.986	0.990
6.9 "	0.964	0.969	0.973	0.982	0.982	0.986	0.991
7.0 "	0.966	0.970	0.975	0.983	0.983	0.987	0.991
7.5 "	0.974	0.978	0.981	0.987	0.987	0.990	0.994
8.0 "	0.980	0.983	0.985	0.990	0.990	0.993	0.995
8.5 "	0.986	0.988	0.990	0.993	0.993	0.995	0.997
9.0 "	0.988	0.989	0.991	0.994	0.994	0.995	0.997
9.5 "	0.990	0.992	0.991	0.995	0.995	0.996	0.998
10.0 "	0.992	0.993	0.994	0.996	0.997	0.997	0.998
10.5 "	0.993	0.994	0.995	0.997	0.997	0.998	0.998
11.0 "	0.995	0.995	0.996	0.997	0.998	0.998	0.999
11.5 "	0.995	0.996	0.997	0.998	0.998	0.998	0.999
12.0 "	0.996	0.997	0.997	0.998	0.998	0.999	0.999
12.5 "	0.997	0.997	0.998	0.998	0.998	0.999	0.999
13.0 "	0.997	0.998	0.998	0.999	0.999	0.999	0.999

λ in cm	0 km $a_{a\lambda}$	1 km $a_{a\lambda}$	2 km $a_{a\lambda}$	3 km $a_{a\lambda}$	4 km $a_{a\lambda}$	5 km $a_{a\lambda}$	6 km $a_{a\lambda}$
13.5×10^{-5}	0.998	0.998	0.998	0.999	0.999	0.999	0.999
14.0 "	0.998	0.998	0.999	0.999	0.999	0.999	1.000
14.5 "	0.998	0.998	0.999	0.999	0.999	0.999	1.000
15.0 "	0.998	0.999	0.999	0.999	0.999	0.999	1.000
15.5 "	0.999	0.999	0.999	0.999	0.999	1.000	1.000
16.0 "	0.999	0.999	0.999	0.999	0.999	1.000	1.000
16.5 "	0.999	0.999	0.999	1.000	1.000	1.000	1.000
17.0 "	0.999	0.999	0.999	1.000	1.000	1.000	1.000
17.5 "	0.999	0.999	0.999	1.000	1.000	1.000	1.000
18.0 "	0.999	0.999	0.999	1.000	1.000	1.000	1.000
18.5 "	0.999	0.999	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
19.0 "	0.999	0.999	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
19.5 "	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
20.0 "	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000

$$I_{m\lambda} = I_{0\lambda} a_{a\lambda}^m \quad (2)$$

となり、従つて全日射の透過率 a' は

$$(a')^m = \frac{\sum (I_{0\lambda} a_{a\lambda}^m)}{\sum I_{0\lambda}} \quad (3)$$

となる。

先づ $I_{0\lambda}$ の値として Linke の Meteorologische Taschenbuch に與へられた値を用ひて、 $I_{m\lambda}$ の相對強度を求めれば第 3 圖の如くなる ($\lambda = 7\mu$ 以上は波長のスケールの異なることに注意)。第 3 圖は地上 1 杆、2 杆、……、6 杆の層位に於ける $I_{m\lambda}$ を別々に與へてある。吾々が實際に觀測する測候所は必ずしも常に海面高にあるとは限らず、通常は海拔 H 米に在り、又上空に於ける日射のエネルギー分布は乾燥大氣に對してはどのような工合になつて居るかと言ふことを知り置く必要があつたからである。計算は簡單で單に (1) 式の k に於て $P = P_0 = 76$ 糎とした代りに、實際に其の層位の氣壓を Hann の公式から與へればよい。

此の圖からわかることは第 1 には地面附近では通過空氣量によつて $I_{m\lambda}$ は可成り相違するが、地上 6 杆ともなれば、太陽が天頂にあつても地平線の方角にあらうとも $I_{m\lambda}$ には大した變化がないと言ふ事柄である。第 2 にわかることは、地面附近と上空 6 杆附近とでは、無論上空になるほど $I_{m\lambda}$ は大きいが、然し吾々が常識で考へるほど大きくはないことである。例へば $m = 1.1$ の場合について言へば地面で $I_{1.1, \lambda = 4800\text{\AA}} = 53$ で 6 杆となつても 61 にすぎない。即ち其の差は全體の 2 割にも足りないのである。地上 6 杆と言へば其處の氣壓は 189 糎で、空氣の過半が此の層以下にあるにも拘らず空氣分子の擴散は 2 割位の違ひがあるだけである。

そこで愈々全日射に對する透過率 a' を (3) から求めることが出来る。それが第 4 圖である。地面附近では透過率は通過空氣量と共に可成り變化するが、上層程變化は少く、地上 6 杆ともなれば太陽が殆んど水平方向で通過空氣量 8 (太陽高度 7°) となつても透過率は優に 0.9 以上で、

第 3 圖

日射は一日中殆んど減衰することなく到達する。

(4). 熱帯地方と温帯地方の比較

以上の計算結果を利用して、純粹乾燥大氣中にある空氣分子の擴散作用のみを考へた場合に、熱帯地方と温帯地方で直達日射にどんな相違があるかを調べてみよう。

今太陽の天頂距離を z ，時角を t とすれば、一般に水平面日射量は $I_{0\lambda} \cos z$ であるから日射日積算量は

$$I = 2 \int_0^{-\tan \varphi \tan \delta} I_{0\lambda} (a_{\lambda'})^m \cos z dt \quad (3)$$

となる。但し φ は觀測地點の緯度， δ は赤緯である。

$$\cos z = \frac{1}{m} = \sin \varphi \sin \delta + \cos \varphi \cos \delta \cos t \quad (4)$$

を上式に代用すれば

$$I = 2 \int_0^{-\tan \varphi \tan \delta} \frac{1}{m} I_{0\lambda} a_{\lambda'}^m dt \quad (5)$$

今熱帯地方の代表として、赤道をとり、温帯地方の代表として、少々南に過ぎるが緯度 30° をと

第 4 圖

第 5 圖 (左)

第 5 圖 (右)

り, 更に夏冬の代表として夫々 7 月 1 日, 1 月 1 日を取り, (4) 式により $t=0, 1, 2, \dots$ の各時刻に對する m を求め, (5) に依つて若干の波長につき $\frac{1}{m} I_{0\lambda} a_{\lambda}^m$ を作れば第 5 圖の如くなる. 之等の曲線と座標軸間の面積は夫々當該波長の輻射量に比例するものである. それを求めて見ると次表の如くなる.

第 2 表 緯度 $\varphi=0^\circ$ 及び 30°N に於ける 1 月 1 日, 7 月 1 日の當日の波長別日射
(in $10^{-3} \text{ gcal} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{min}^{-1}$)

(純粹大氣の空氣分子の擴散に因る減衰のみを考慮せる場合)

	$\lambda=3.5$	$\lambda=4.0$	$\lambda=4.5$	$\lambda=4.7$	$\lambda=4.9$	$\lambda=5.0$	$\lambda=5.5$	$\lambda=6.0$	$\lambda=6.5$	$\lambda=7.0$	$\lambda=7.5$	$\lambda=8.0$	$\lambda=8.5$	$\lambda=9.0$	$\lambda=9.5$	$\lambda=10.0$
$\varphi=0^\circ$, 1 月 1 日	12.1	25.2	38.2	40.7	42.6	41.4	40.4	41.0	37.9	35.0	31.0	26.7	24.3	20.8	18.7	16.1
$\varphi=0^\circ$, 7 月 1 日	12.5	25.5	37.9	40.1	40.9	41.4	39.9	40.3	38.0	35.1	31.2	26.9	23.7	20.1	19.5	15.5
$\varphi=30^\circ\text{N}$, 1 月 1 日	4.2	11.1	18.1	19.5	20.8	21.1	21.0	21.5	20.3	19.1	16.8	14.7	13.3	11.8	10.5	8.9
$\varphi=30^\circ\text{N}$, 7 月 1 日	15.9	31.7	48.1	50.5	50.5	50.8	50.6	50.1	46.4	43.1	38.5	32.5	29.9	25.1	23.4	20.2

各 種 の 比 率

$\varphi=0^\circ$ に於ける 1 月 1 日/7 月 1 日	0.968	0.988	1.008	1.015	1.042	1.000	1.013	1.017	0.997	0.997	0.994	0.993	1.025	1.035	0.959	1.039
$\varphi=30^\circ\text{N}$ に於ける 1 月 1 日/7 月 1 日	0.264	0.350	0.376	0.386	0.412	0.415	0.415	0.429	0.438	0.443	0.436	0.452	0.445	0.470	0.449	0.441
1 月 1 日に於ける $\varphi=30^\circ\text{N}/\varphi=0^\circ$	0.347	0.440	0.474	0.479	0.488	0.510	0.520	0.524	0.536	0.546	0.542	0.551	0.547	0.567	0.561	0.553
7 月 1 日に於ける $\varphi=30^\circ\text{N}/\varphi=0^\circ$	1.272	1.243	1.269	1.259	1.235	1.227	1.268	1.243	1.221	1.228	1.234	1.208	1.262	1.249	1.200	1.303

比率表中第 1 行は赤道に於ける冬の日射と夏の日射の割合を示すものであるが, それによつて見るに, 日射の減衰を單に純粹空氣分子の擴散に因るとする限り, 一年中變化がなく, 其の比は殆んど 1 に近いことが知られる. 之に反して, 北緯 30° ともなれば第 2 行より明らかなる如く冬は夏より著しく小さく, 長波長域に於ては冬は夏の約 45% 内外, 紫外域に於ては 30% 以下である. 即ち緯度が高くなれば冬の日射は全體として夏の日射よりも小さくなるが, それは紫外線ほど強く, 例へば $\lambda=3500\text{\AA}$ では 26% で, 大體紫外域の 2 倍位の減少を示す

第 3 行は冬期に於ける北緯 30° と赤道との比を示す 冬期に於ては 長波長輻射は大體夏の半分強, 紫外線は約 1/3 位となる. 然るに第 4 行を見るに夏期に於ては寧ろ北緯 30° の日射は赤道よりも 2 割乃至 3 割強く, 而も波長によつては殆んど變化がない. 之は太陽が北回歸線 (北緯 23.5°) の直上に近く, 北緯 30° の方が赤道より餘計に照射されるためであるが, 赤道でも矢張り太陽は直上に近い (年中) 結果である.