

直達日射の減衰と大気汚染*

藤 本 文 彦**

1. 序

直達日射量の測定から大気の透過率または大気の混濁に関する変数を定義し得ることは良く知られている。すなわち地上で測定した日射量を I 、大気外のを I_0 、天頂角を Z とすると、 $I = I_0 A^{sec Z}$ なる関係をもつ A を透過率という。

また b を現地気圧

b_0 を標準気圧

E_a を気圧 b の時の純粋乾燥大気の減衰係数としたとき、実際の大气について、

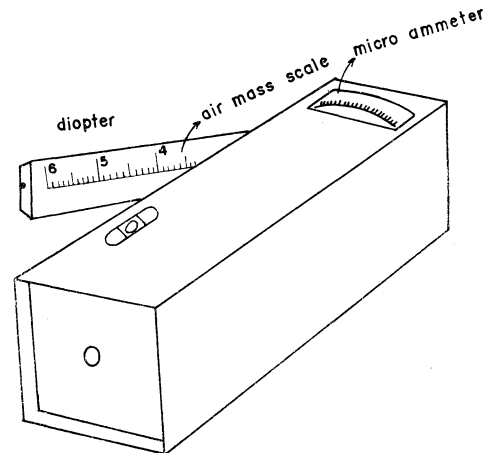
$I = I_0 \exp \left(-\frac{b}{b_0} \sec Z \cdot E_a \cdot \tau_G \right)$ なる関係が成立する場合の τ_G を Linke の混濁因子という。すなわち純粋乾燥大気、水蒸気、塵埃による大気の総合的消散係数が純粋乾燥大気の消散係数の何倍になるかを示す数値が τ_G である。これら透過率や Linke の混濁因子は大気の塵埃の大小によって変わるので大気の大気清澄度を示す目安になることは確かであるが、一方大気中の水蒸気は日射スペクトラムのうち赤から近赤外部に多くの吸収帯をもつから水蒸気が多い場合は大気の透過率が小さくなり Linke の混濁因子が大きくなるので直ちに塵埃量とは結びつかない。従って塵埃のみによる消散を知り塵埃量を推定しようとすれば水蒸気の影響を除くようフィルターや廻折格子などにより適当な波長域を選らんで日射量を測定する必要がある。Ångström の混濁係数は 0.630μ 以上の波長を透過する赤いフィルターを、Schüep の混濁因子は 0.525μ 以上の波長を透過する黄色ガラスと上に述べた赤いフィルターを用いた日射観測値から算出される。比較的最近 Volz が考案した Sun Photo meter という簡単な装置によって 0.5μ を中心とするごく狭い波長域の日射量を測定し得るようになった。この波長域で

は水蒸気による吸収を無視できる上、 O_3 の吸収もごく小さいのでその減衰はほとんど塵埃によるものだけとなり塵埃量を推定する手掛りを得る。

1965年日米大気汚染パネル・ミーティングの際大気汚染の測定に関連してこの Sun Photo meter を送られたので測候課で筆者が日射観測の一部として試験的観測を行なったがその資料および目下試験中の自記直達日射計の資料から直達日射に及ぼす大気汚染の影響を述べる。

2. Sun Photo meter の構造と測定

この測器は木製の直方形の箱で、光電池、フィルター、マイクロ電流計が内蔵されており表面には水準器の他に太陽の optical air mass を容易に知るための diopter が付いている。これには直達日射を正しく感部にとらえるための照準器がある。



第1図 sun photometer

日射は先端にある小さな穴を通して箱の中に入りレンズで集光されフィルターの上に焦点を結ぶ、フィルターを通過した日射は光電池を照射し、それによって生ずる電流をマイクロ電流計で読み取り 0.5μ の波長域の日射の強さを知ることができる。フィルターの半幅値は 0.06μ であるからほぼ 0.5μ の単色光と考えてよい。この波長域の大気外日射量に相当する電流値 μA は測器の常数として器械に付記されている。diopter の内側にスケ

* The Attenuation of Direct Solar Radiation at Normal Incidence under the Influence of the Atmospheric Pollution

** Fumihiko Fujimoto, 気象庁測候課
 …1966年2月26日受理—
 —1966年9月10日改稿受理—

ールが付いており器械全体を水平に保ちながら diopter を上下に動かしてそれに付いている照準器に光点を合わせると大気路程が簡単に求められる。かくして大気外日射量、測定した日射量および大気路程から図表を用いて 0.5μ 波長域に対する日射の消散係数-B という記号であらわす一を求めることができる。光電池は余り長く日射にさらすと老化するので長時間の連続観測はできない。

3. 新混濁因子 B について

大気中を透過する波長 λ の放射量 $I(\lambda)$ は大気外の値を $I_0(\lambda)$ とすると、

$$I(\lambda) = I_0(\lambda) \exp(-\sigma d) \quad (1)$$

であらわされる。 d は大気路程、 σ は消散係数である。 sun photometer による測定では大気分子の散乱とエアロゾルや塵埃の散乱と吸収を考えればよい。

(1) の代りに 10 を冪にした Volz の式

$$I = I_0 / F \cdot 10^{-(aKp/p_0 + B)d} \quad (2)$$

を用いる。ここで

I, I_0 : 波長 0.5μ のところの日射量と大気外日射量

F : 平均太陽距離に対する更正係数

a : 0.0674 。単位大気路程の純粋大気による消散係数 (オゾンの吸収 0.004 を含む)

K : 大気、塵埃、オゾンに対する大気路程の差を考慮した係数

$d \leq 3$ に対し $K=1$

$d=6$ 0.97

$d=10$ 0.924

P_1, P_0 : 現地気圧と海面気圧

B : 塵埃、煙霧に対する $\lambda=0.5\mu$ の消散係数

d : 大気路程 $1/\sin h$, h は太陽高度

(2) 式を見れば I, B 以外は独立に決定できる値であるから I を測れば図表によって簡単に B が求められる。この B が塵埃に密接に関係している。

Volz は次に示すように粒子は非吸収性の小球であるという仮定のもとに B と塵埃との関係を導き出した。

Junge その他の実験によれば大陸の空気中で $0.1 \leq r < 10\mu$ の細かい粒子の粒度分布は、

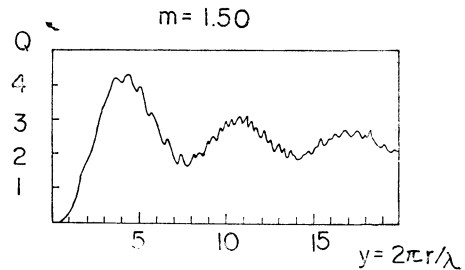
$$\frac{dN}{d(\log_{10} r)} = Cr^{-\beta} \quad (3)$$

であらわされる。ここで N は半径 r なる粒子の数、 C は常数、 $\beta \sim 3$ である。

粒子は日射を吸収せず、散乱するのみであるから、

$$B = \pi \int_0^{\infty} Q(r, \lambda, m) N(r) r^2 dr \quad (5)$$

である。ここで Q は“散乱の面積係数”で屈折率、波長ならびに粒子半径の関数である。



第2図 The Mie scattering cross-section Q as a function of the parameter y
 r : radius of particles
 λ : wave length

第2図からわかるように粒子の屈折率 $m=1.5$ の場合には $y=2\pi r/\lambda \sim 4$ のところで Q は最大値 (≈ 4) を持つ。これは $\lambda=0.5\mu$ の波長に対しては約 $r=0.3\mu$ に対応する。今すべての粒子の半径が $r=0.3\mu$ のみであるとすれば、(5) から、

$$N(0.3\mu) \sim 0.91 \times 10^8 B \text{ cm}^{-2} \quad (6)$$

しかし実際には粒子はすべてこの大きさではなく、Junge の分布に従うとすれば、(6) 式の B と同じ B を与える粒子数 N^* は (6) の N の約5倍になることが次のようにして示される。Junge の分布と (5) より

$$B = \pi \int_{0.1}^{1.0} Q(0.5, r) \cdot cr^{-4} \cdot r^2 dr \quad (7)$$

“散乱の面積係数” $Q(0.5, r)$ は $0.1\mu \sim 1.0\mu$ の平均値、2.5 位であり、(7) と (6) の B は等しいとすると $c = \frac{1}{70} \times 10^{-12} N$ となる。

$$\text{従って } N^* = \int_{1.0}^{1.0} cr^{-4} dr \sim 5N$$

かくして $0.1 \sim 1.0\mu$ の粒子数と新に導入した混濁因子の間は

$$N \sim 5.0 \times 10^8 B \text{ cm}^{-2} \text{ の関係で結びつけられる。}$$

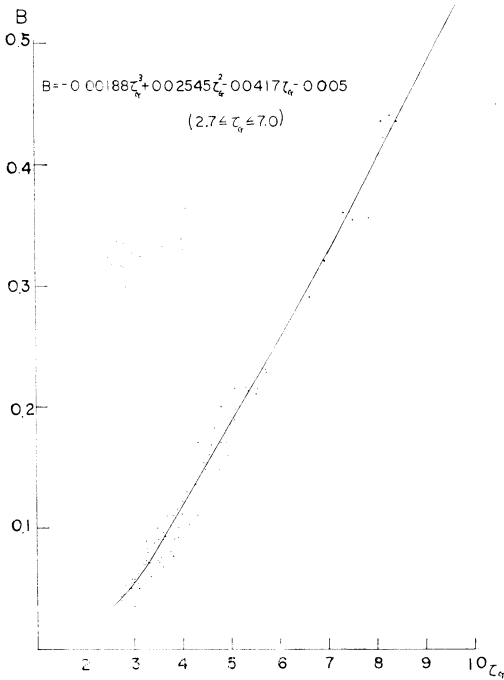
4. 観測

東京は大気の汚染が甚だしく日射の連続記録を見ると大小さまざまな振幅と複雑な“週期”で変動している。従って瞬間値を測るこの測器で I_λ を求め B の場所的、時間的または高度別の分布を算出しても代表性は少なく余り意味が無いと考えられる。

一方気象庁測候課には将来直達日射量観測の自動化をはかる目的で測器製作所に依頼した製作した自記直達日射計があり、冬季の晴天日の連続記録をとっている。この記録より得られるものは日射の全波長に対する値であ

る。従って Linke の混濁因子を算出し得る。

空の良く澄んだ日やそうでない日のいろいろの条件の下で sun photometer により日射量を測かり図表より B を求め、その観測値に対応する全波長日射量より τ_G を計算して B と τ_G の regression curve を作った。



第3図 regression curve

sun photometer の読取りと自記直達日射計の読取りの間には少くとも数秒の時間差があり、短時間のうちに日射が激しく変動する時は両者は厳密には対応しないからこのバラツキのうちにはそれに由来するものもあると思われる。この regression curve は $\tau_G=2.70\sim 7.0$ の範囲で3次の多項式で近似すると $B=-0.00188\tau_G^3+0.02545\tau_G^2-0.0417\tau_G+0.005$ となる。regression curve により求めた B の平均誤差は ± 0.009 である。

冬季の大平洋岸は乾燥しているので水蒸気の影響は比較的少ないから B と τ_G の間にはかなりの程度一次の関係が成立するはずで、 τ_G が小さくなると曲線が急に湾曲するのは、塵埃による減衰が少なくなるにつれ水蒸気の影響が目立ってくるためであろう。 $\tau_G \geq 7$ については目視により直線で近似した。

直達日射の連続記録から任意の時間の日射量を求めることができるから、これより τ_G を求め regression curve により対応する B を決定し得ることになる。

自記直達日射計は熱電対方式のもので銀盤日射計の準器と比較観測をして器械の常数を決定した。この常数は $1 \text{ cal}\cdot\text{cm}^{-2}\cdot\text{min}^{-1}$ の放射エネルギーが入射した時に熱電対の生ずる起電力を mV であらわしたものである。この常数の決定には92回の比較観測によって得られた値を平均したもので $1.51\text{mV/ly}\cdot\text{min}^{-1}$ 平均誤差 $0.02\text{mV/ly}\cdot\text{min}^{-1}$ (平均値に対し1.3%) で ± 0.02 の範囲に観測個数60すなわち約65%が入る。これは気象官署で使われている銀盤日射計とはほぼ同じ精度である。

直達日射の連続記録のうちから日射の減衰・変動の模様異なる4つの記録を示す。

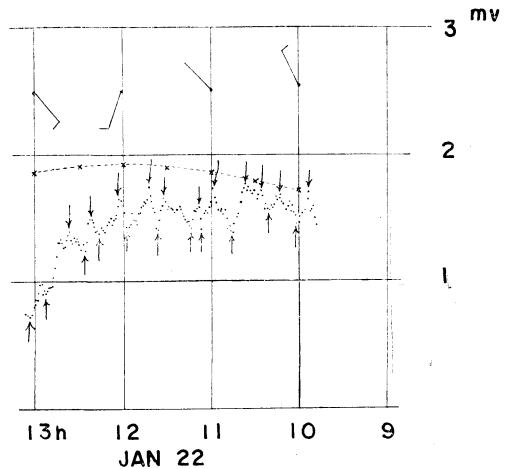
記録は1分間隔の打点式である。従って1分より短い日射の変動も当然起り得るはずであるが、この記録にはあらわれない。

縦軸は日射計の起電力 mV、横軸は地方真太陽時である。また横軸に風向、風力が天気図に記入されている要領で示してある。

5. 資料の解析

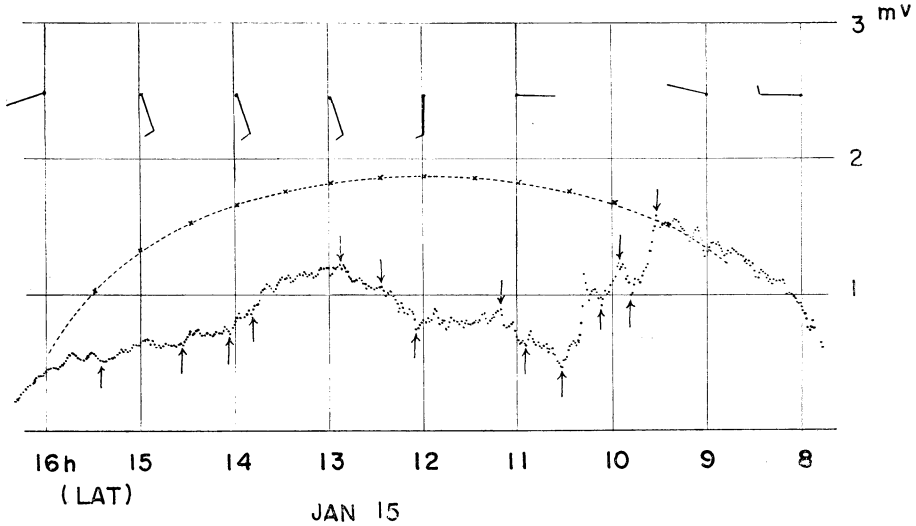
第4図に日射減衰の大きい時と小さい時の例を2つずつ示してあるが図の中の破線は1日のうちで日射量の大きな時の値から、

$I=I_0A^{sec z}$ の関係により求めた大気透過率 A が一定として30分おきの日射量を逆算したものである。破線と打点記録の差は人工的塵埃による日射量の減衰と考えて良いから両者を比らべると塵埃による日射の減衰の程度がわかる。記録に矢印を附してあるものは変動の特徴



第4図 (a)

The record of direct solar radiation
The dotted line is calculated value
by $I=I_0A^{sec z}$ every 30 min.



第4図 (b)

5.1. 減衰の大きな例

1月7, 15, 17, 22日は B の大きな値が示された時であるが、その時間的変化の様態を第5図に示してある。比較のため前年22月12日の空の澄んでいる時の値を併記してある。増減の著しい部分を示すと次表のようになる。

日付	時刻	B の 値	増減量	増減率 (1分につき)
1966	h m h m			
1. 7	14 09—14 59	0.148—0.428	+0.272	0.005
1.15	9 33—10 33	0.059—0.538	+0.479	0.008
1.17	11 30—11 50	0.225—0.580	+0.355	0.018
	13 41—13 50	0.389—0.104	-0.285	0.032
1.22	12 37—13 06	0.172—0.485	+0.313	0.011

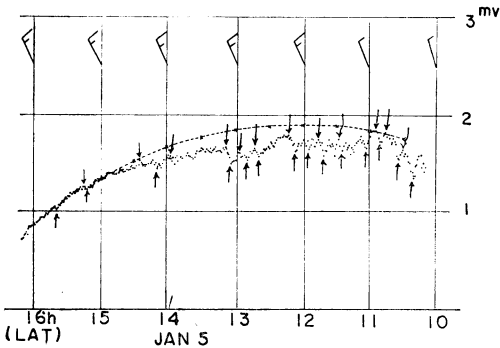
この表から見て、

(i) B が大きく変化する時間は午前、正午、午後といつでも起り特に規則性はない、

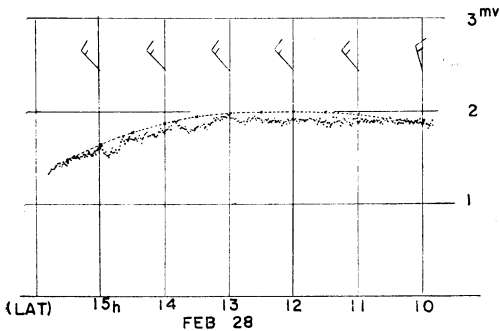
(ii) 10~20分位の比較的短い時間のうちに B 、すなわち塵埃量が2.5~3倍程度も急変することがわかる。

また記録と図を見ると波動のような明瞭なものではないが“周期”に似たある時間間隔での増減が認められる。

1月22日の9~12h40m, 1月17日の8h30m~10h00mは20分前後の“周期”をもつ比較的大きな振幅の変動がしばしばあらわれる。1月5日の B の変化も長周期の変動と見られぬこともない。

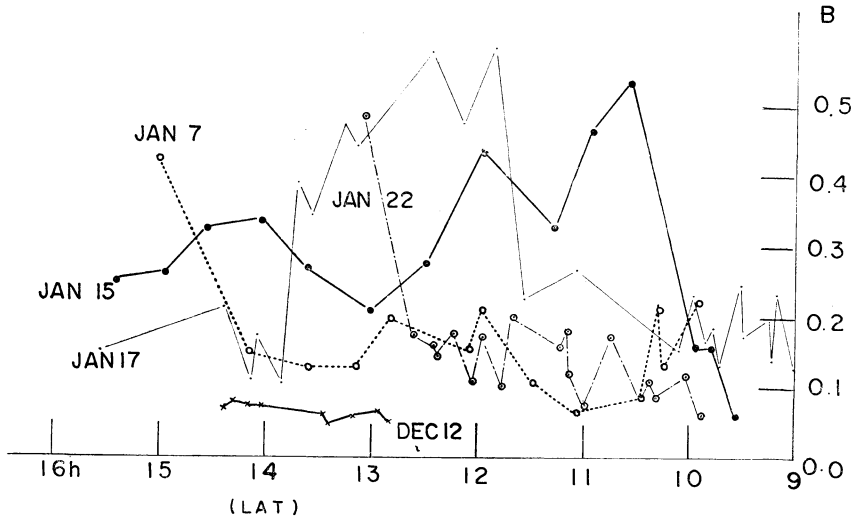


第4図 (c)

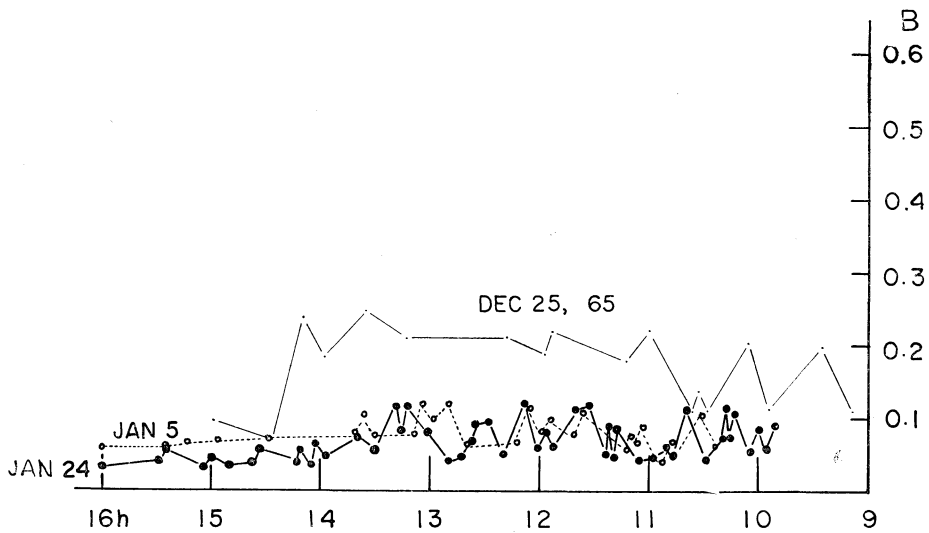


第4図 (d)

のある部分で、この点に対する日射量を求め、 τ_G を計算し B に換算したものの時間的変化を図にあらわして見ると塵埃の変化がわかることになる(第5図 a, b)。



第5図 (a) The variation of B



第5図 (b) The variation of B

混濁の大きい日でも1月15日、7日のように“周期”的変動の少ない時と1月22日、17日のようにある時間にそれが顕著にあらわれる場合がある。これらの変動は塵埃の拡がりの不均一性によるものであろうが濃淡が波状構造をすることがあるのかも知れない。

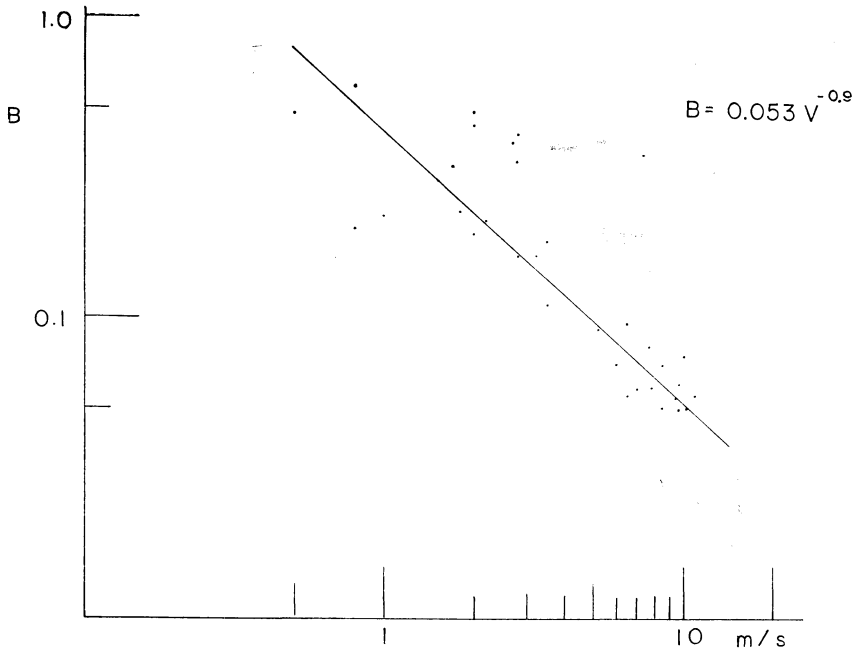
日射の減衰の大きい日は概して風が弱い時である。ただし1月7日の夕方近くの著しい減衰の時は幾分強い風が対応している。

5.2. 日射の減衰の少ない場合

1月5日、2月28日の記録および透過率から求めた計

算曲線と比べてわかるように日射の減衰はきわめて少ない。前と同様に記録の特徴のある部分から日射量を求め、 τ_g を計算し B の時間変化を図示してゆくと前の4例に比して数分の一、ときには10%位の値である。しかしながら日によってあるいは同じ日でも時刻によって変動の様相が異なってくる。

1月5日は13hすぎまでは振幅のわりあい小さい変動が認められるが、14h以後はほとんどそれが消えてしまう。2月24日のように1日全体として見ると日射の減衰はごく少ないが、こまかく見ると短時間に(1~2分)



第6図 The relation between B and wind velocity

かなり振幅の大きい変動のある場合がある。

5.3. B と風速

日射の減衰の小さい日は予想されるように概して風が強い。細かい変動を除いた平均状態について言えば風速が7~8 m/s あるときは風速が2 m/s 以下の日に比べて B は数分の一位である。

B と風速の関係を示すと第6図のようになる。縦軸は B, 横軸は風速 m/s である。

風向を考慮していないこと、休日や朝のように工場など汚染源の活動のない時を同じに扱っていることなどのため、かなりバラツキがあるが、この図から B と風速 V の間に $B=0.053V^{-0.9}$ の関係が見出された。

6. 都心と郊外との混濁因子の差

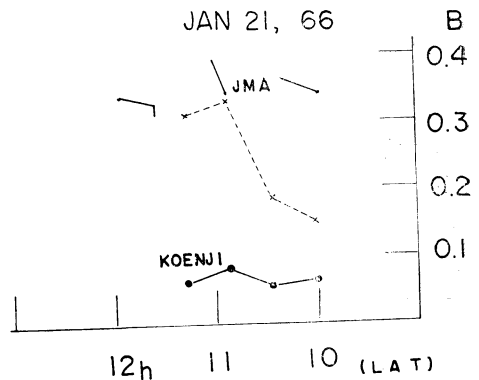
昨秋から気象研究所において太陽の周辺光の拡がりから直達日射計の開口角に及ぼす影響を調らべるため、高層物理研究部第二研究室と測候課で共同研究を行なっているが、その折の直達日射量から τ_g を求め B に換算したものと、本庁の(自記直達日射計)より得たものとを比較する。気研で行なったものは銀盤日射計であるから連続観測はできないのでこの観測時刻に対応した自記直達日射計の10分の打点記録より平均値を求めこれを日射量として τ_g を求めたものである。

第7図 a-c に両地点の B の差を示す。図中に本庁

の風の観測値が記入してあるが、風の強い12月13日、1月7日は塵埃が風に流され均一化するため B の差に少ないが風の弱い12月25日、1月21日は本庁の B は気研のものに比べて2~4倍に達している。

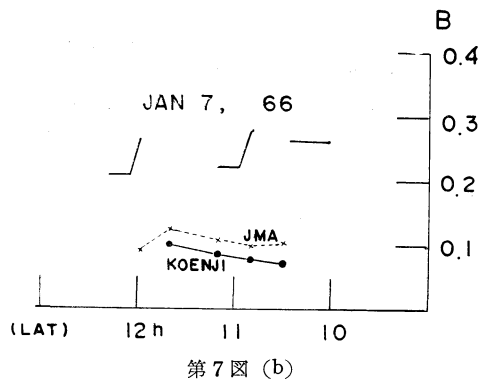
7. 都心の戦中・戦後の混濁因子の差

東京の銀盤日射計による直達日射量の定常観測は昭和10年2月から昭和39年9月まで約30年間行なわれた。この間に支那事変、大東亜戦争、敗戦、復興と世の様の移り代るに従って自動車がごく少なくなった時期や工場の

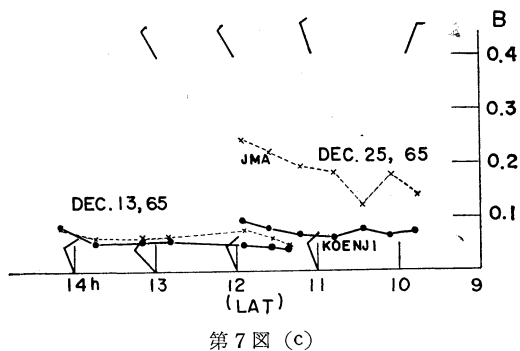


第7図 (a)

The difference of B between the central region of Tokyo and Koenji, the suburb of Tokyo.



第7図 (b)



第7図 (c)

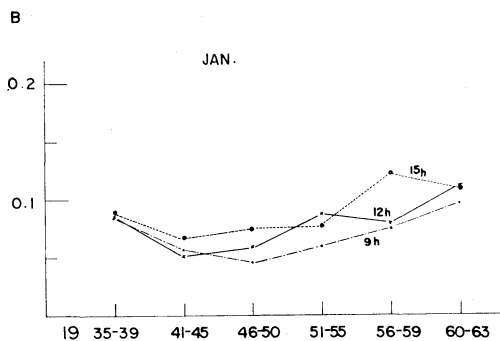
年	1 月			2 月			12 月			註									
	9	12	15	9	12	15	9	12	15										
昭和	平均回数	平均回数	平均回数	平均回数	平均回数	平均回数	平均回数	平均回数	平均回数										
10—14	3.51	50	3.50	57	3.53	37	3.37	54	3.30	57	3.45	38	3.77	43	3.59	50	3.57	34	支那事变 大東亜戦争 敗戦後 復興期 神武景気 最近
16—20	3.05	47	2.94	54	3.24	34	2.88	35	3.00	45	3.47	21	3.28	30	3.61	38	3.58	27	
21—25	2.84	35	3.07	41	3.36	35	3.03	26	3.20	45	3.59	18	2.88	37	3.30	52	3.41	35	
26—30	3.10	27	3.53	49	3.39	25	4.07	17	4.05	31	3.48	15	3.36	28	3.53	35	3.63	17	
31—34	3.36	26	3.44	35	4.08	24	3.78	17	4.05	26	4.50	19	3.83	36	3.86	33	4.24	22	
35—38	3.69	51	3.90	52	3.88	36	4.02	50	4.02	50	4.74	27	4.24	51	4.19	55	4.38	41	

(混濁因子の平均値)

操業が極度に低下した時もあった。銀盤日射計は経年変化がごく少ないのでこれによる混濁因子の比較はかなり信憑性が高いと考えてよい。適當年数ごとに区切り 9h, 12h, 15h について平均したものを次表に示す、年数は4年または5年切りであるがもともとの観測は年によって晴天日数が異なり観測回数が違うから影響を及ぼす社会情勢による区切りの方が合理的である。

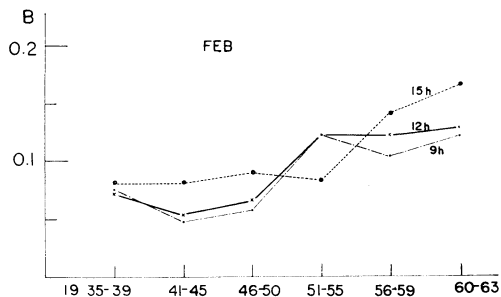
この平均混濁因子よりさきの regression curve により B に換算してその変化を図示する (第8図 a. b. c)。

月ごとに 9h, 12h, 15h の変化を示してあるが概して戦中と敗戦直後の B の値は谷になっており31年以後の値は約2倍ほどの大きさを示している。東京の平均的塵埃量がどのように変化したかを知る1つの手掛りとを与えるものである。注意すべきことは直達日射量の定常観測は1日3回地方真太陽時の9h, 12h, 15hに限られるので中間に日射が甚だしく減衰したような場合は観測にかからない。また透過率0.50未満の時は資料から除かれるのでそのような日は結果にあらわれないのである。従ってここにあげた平均状態は実際より B が小さくなっているはずである。各年の τ の最小値を前と同じように平均したものが次表である。

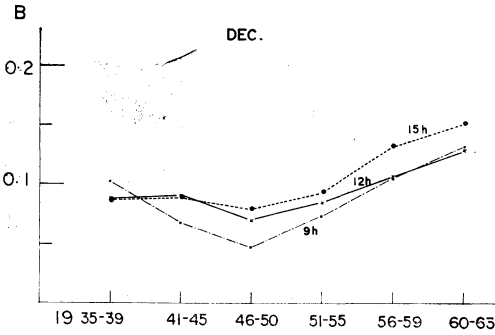


第8図 (a)

The change of B for these 30 years



第8図 (b)



第 8 図 (c)

年	1 月			2 月			12 月		
	9h	12h	15h	9h	12h	15h	9h	12h	15h
16—20	2.04	1.90	2.23	2.37	2.03	2.67	2.15	2.07	2.50
21—25	2.16	1.94	2.31	2.15	2.24	2.35	2.02	1.98	2.06
26—30	2.79	2.51	2.62	3.10	2.71	2.99	2.66	2.56	2.43
31—34	2.53	2.27	2.44	2.80	2.39	3.18	2.53	2.62	2.59
35—38	2.37	2.39	2.45	2.63	2.76	3.00	2.77	2.57	2.72

Linke の混濁因子の最小値からみると大気汚染がやましく言われるようになった近年でも風の強い大陸寒波の侵入して来た日などは大気の澄んでいる日がある。しかし戦中や戦争直後には混濁因子が2以下になる日がありあったが最近では昭和37年1月3日15hに1.89という値が1つあるのみである。その点からいえば以前に比して大気は混濁していると言って良い。

8. 結 び

sun photometer により 0.5μ 波長の日射量が観測されこれから水蒸気の影響のない塵埃による消散係数 B を求めることができる。この B は非吸収性粒子という仮定のもとに、Junge の粒度分布をもとにして塵埃量と関係づけられている。塵埃が非吸収性であるということは問題がありそうに思われる。

しかしながら筆者が以前水平面日射量の記録とゴルチンスキー日射計に遮蔽リングをとり付け天空光の連続記録を同一記録計に書かせたところ水平面日射量の変動と天空光の変動が逆位相に、変化するという事に気がついた。すなわち水平面日射量が減少する時は天空光が増加するのである。この事実は日射量の減少は塵埃の散乱による効果が大いであることを示すが、煙霧の著しい時には両者の変動が同じ位相になることも観測された。このような場合は塵埃の周囲に水蒸気などの吸収性物質がクラスターになって日射を吸収することもあり得るので本文で述べた仮定は成立しない。例に出した1月15日の著るしく大きな B はこのような場合に相当し誇大な塵埃を示しているかも知れない。

また本文で使用した regression curve は冬季の蒸気圧の小さい時の観測値である。従って暖候期のものは形が当然違って来るのであろう。この研究に使用した sun photometer は産業気象課より拝借したものである。また気象研究所との共同研究の資料を使わせて頂いたこと、いろいろの問題について御教示を頂いた嘉納博士に厚くお礼を申し上げます。

文 献

- 1) McCormick, R.A. and Baulch, D.M. 1962: The Variation with Height of the Dust loading over a City as determined from the Atmospheric Turbidity, APCA Journal, Vol 12, 492-495.
- 2) Junge, C. 1955: The Size Distribution and Aging of Natural Aerosols as Determined from Electrical and Optical Data on the Atmosphere, J. of met. 12.
- 3) Volz, F. 1959: Photometer mit Selen-Photoelement zur Spektralen Messung der Sonnenstrahlung and zur Bestimmung der Dunstrübung, Archiv für Met. geoph. und Biokl. ser B Band 10, 1, Heft 100.
- 4) 山本義一, 1956: 気象輻射学, 気象学講座, 地人書館.