

第 8 章 航空機による放射観測*

8.1 はじめに

この章では、太陽放射を日射、赤外波長域の地球放射を赤外放射と呼び、両方を含めた総称を放射とする。

成層圏大気の放射収支を直接測定する一つの方法として、前章で述べた日射ゾンデ・赤外放射ゾンデによる測定があるが、測定精度・解析方法等になお問題が残る。また赤外放射ゾンデによる測定では、日射の影響をさけるため夜間しか観測できない。航空機による放射測定の目的は、対流圏上端部における放射収支量をおさえ、放射ゾンデ観測の比較基準値を得るとともに、地表面に到達する放射に対する対流圏大気の影響を評価することにより、地上での放射観測から成層圏における放射収支の推定を可能ならしめようとするものである。もちろん直接的には、対流圏内での放射収支に及ぼす対流圏エーロゾルや水蒸気・二酸化炭素等の効果を測定し、対流圏内のエネルギー収支における放射の役割を明らかにする。

本章では、航空機を用いて行った、放射フラックス、エーロゾル等の高度分布の測定について述べる。

8.2 測定要素及び測器

この観測では、日射と赤外放射の水平面フラックス、エーロゾルの粒径別数密度、及び気温・湿度の高度分布測定に重点をおいた。用いた測器及び測定要素は表 8.1 にまとめている。それ以外に飛行高度、飛行位置（緯度・経度）、飛行速度、方位及び航空機の動揺（ピッチ角、ロール角、ヨー角）等のフライトデータについては、使用した航空機（セスナ 404）に装備されている高度計、ロラン航法装置、オメガ航法装置及び動揺測定装置による測定値を記録した。これ等のフライトデータは、後述の下向き日射フラックス測定における日射計受光面の傾きに対する補正に利用される。また、飛行地点の確認と、状況モニターのために家庭用 VTR を搭載した。昭和 58・59 年度に使用した家庭用 VTR は高高度ではうまく作動しない例もあった。

8.3 観測要領

日射・赤外放射の下向き及び上向き水平面フラックスを測定するための日射計・赤外放射計は、

* 浅野正二，忠鉢 繁，塩原匡貴，藤木明光：高層物理研究部

村井潔三，小林正治，神子敏朗：元高層物理研究部

関根正幸：気象庁観測部

表 8.1 測器及び測定要素

測 器	個数	特 性	要 素 及 び 備 考
1. 放射測器			
(I) 全波長域全天日射計 (EKO, MS-42型)	2台	$0.28 \mu\text{m} < \lambda < 2.9 \mu\text{m}$	上・下向き太陽放射フラックス
(II) 近赤外域全天日射計 (EKO, MS-800型)	2台	$0.715 \mu\text{m} < \lambda < 2.9 \mu\text{m}$	上・下向き太陽放射フラックス
(III) 赤外放射計 (EPPLEY, PIR)	2台	$4 \mu\text{m} < \lambda < 50 \mu\text{m}$	上・下向き赤外放射フラックス
2. エロゾル測器			
(I) パーティクル・カウンター (RION, KC-01型)	1台	粒径 $0.3 \mu\text{m}$ 以上 5段階	エロゾルの粒径別数密度 昭和57年度観測のみ
(II) ダスト・カウンター (DIC, PM730-S16P)	1台	粒径 $0.3 \mu\text{m}$ 以上 15段階	エロゾルの粒径別数密度 昭和58・59年度観測
3. 気温・湿度測器			
(I) 白金抵抗温度計 (MAKINO)	1台	$-65^{\circ}\text{C} < T < 35^{\circ}\text{C}$	気温 航空機用温度計シェルタ付
(II) 露点温度計 (EG&G, Model 137-C3)	1台	$-100^{\circ}\text{C} < T_d < 100^{\circ}\text{C}$	露点温度・航空機用 昭和57・59年度観測
(III) ライマン- α 湿度計 (ERC, Model BLR)	1台	高速応答	絶対湿度 昭和58年度観測のみ
(IV) 赤外放射温度計 (BARNES, IT-4)	1台	$-40^{\circ}\text{C} < T < 100^{\circ}\text{C}$	$10 \mu\text{m}$ 赤外窓領域の放射輝度温度 昭和59年度観測のみ

それぞれの受光面が水平で、視野（半球）をさまたげる障害物がない様に、航空機胴体の外側上部及び下部に平行に取り付ける（図 8.1）。エロゾル測定用の試料空気は航空機排気に汚染されない様に、機体前部の窓からマニホールドとパイプを通して採取し、カウンターに導びいた。

放射収支に及ぼすエロゾルや大気成分の効果を調べるためには、観測は雲一つない快晴日に、太陽高度の変化の少ない南中時間をはさんで、地表面の放射特性（日射反射率、赤外放射射出率等）



図 8.1 観測に使用したセスナ 404 型航空機
機体上面及び底面に日射計・赤外放射計が平行に取り付けてある。

が均一な地域の上空で、それ等の成分の高度分布を測定することが望ましい。本研究の観測では、この条件をほぼ満し、かつ、高層気象のラジオゾンデ・データや他の地上観測データが得やすい観測地域として、筑波地域上空と鹿島灘上空を選んだ。高度分布を得るために、地上 300 m (海面上 150 m) から約 6 km の間に 7~8 の高度を選び、各高度で約 4 分間 (水平距離で約 20 km) のレベル・フライトを行い、その間の平均値と分散をとった。現実には、観測時間を通して一片の雲もない観測日を選定することは困難であり、観測途中で雲が発現した場合は、データの選別により極力、雲の影響を除いた。

8.4 測定誤差

航空機観測において水平面放射フラックスの測定精度に及ぼす影響としては、上述の雲以外に航空機の動揺等による放射計受光面の水平面からの傾きや、太陽高度変化、放射測器の温度特性などの要素がある。

(1) 日射計受光面傾斜に対する補正

航空機はレベル・フライトの場合でも、機体を完全に水平に保って飛行することは困難で、一般には機首を数度程上に傾けて飛行する (ピッチング)。更に機体中心軸を回転軸として左右にほぼ周期的に揺れる (ローリング)。これ等の動揺の度合は、その時の航空機に相対的な風向・風速によって変わってくるが、いずれにしても機体に平行に取り付けられた日射計の受光面と水平面との成す角は、機体の動揺によって絶えず変化する。通常、たかだか数度の傾斜であるが、この傾きは、特に太陽高度が低い場合の下向き日射フラックスの測定には深刻な影響を及ぼす。例えば、太陽高度が 30°

の場合、受光面の5°の傾きは、直達日射成分に対して約±15%の違いをもたらす。

本研究では、日射計受光面の傾きに対する補正は、下向き日射フラックスの直達成分に対してのみ施した。下向きフラックスの散乱成分及び上向き日射フラックス（反射フラックス）に対しては受光面の数度の傾きに対する影響は小さいとして無視した。但し、上向き反射フラックスに対するこの仮定は、穏やかな水面上での観測の様に、太陽光の整反射がある場合には誤差を大きくする。以下、下向き水平面日射フラックス測定における日射計受光面傾斜の影響補正について概説する。

今、真の（水平な受光面で測った）下向き日射フラックス G を、直達成分 I と散乱成分 D とに分けて

$$G = I \cdot \cos \theta_0 + D \quad (8.1)$$

と表わす。ここに θ_0 は、太陽天頂角であり、太陽高度角 h_0 とは $h_0 = 90^\circ - \theta_0$ の関係がある。

次に、実際の受光面の法線方向と太陽光の入射方向との成す角を i とすると（図8.2）、この受光面で測定される日射フラックスは、

$$G' = I \cdot \cos i + D' \quad (8.2)$$

ここでは、 $D' = D$ と仮定する。更に、水平面日射フラックスに対する散乱日射成分の割合、

$$r = D/G \quad (8.3)$$

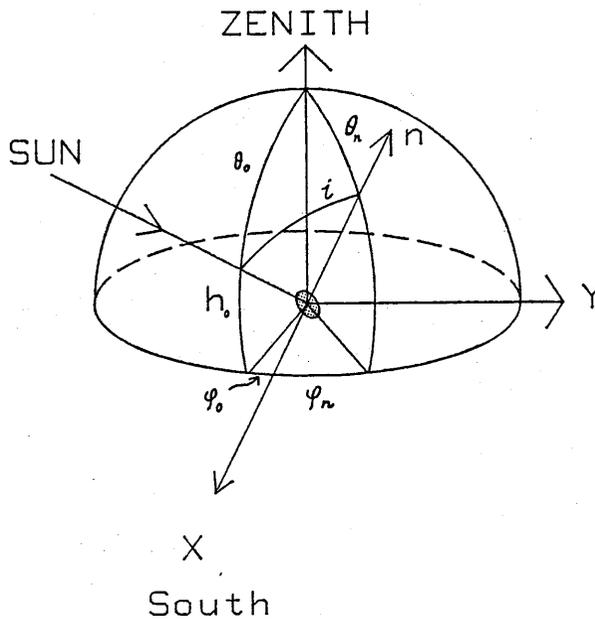


図8.2 入射太陽光線と傾斜受光面の幾何学関係、 n は、受光面の法線方向を示す

が、各高度毎に既知であるとする、式(8.1)、(8.2)及び(8.3)より、求める水平面日射フラックス G は、観測値 G' を用いて

$$G = G' \cdot \eta / (1 + r(\eta - 1)) \quad (8.4)$$

と表わせる。ここに、 η は、受光面傾斜に対する補正係数であり、

$$\eta = \cos \theta_0 / \cos i \quad (8.5)$$

で定義される。

角度 i は、太陽方向及び受光面の法線方向の天頂角と方位角を用いて

$$\cos i = \cos \theta_n \cdot \cos \theta_0 + \sin \theta_n \cdot \sin \theta_0 \cdot \cos \varphi \quad (8.6)$$

但し、

$$\varphi = |\varphi_n - \varphi_0|$$

と表わせる(図8.2参照、Kondratyev, 1977)。

従って、問題は、ピッチング、ローリング、ヨーイング等の航空機の動揺角を使って、角度 i を評価することに帰する。観測に使用した航空機・セスナ404(昭和航空K.K.)に装備されている動揺測定装置(ジャイロ)は、鉛直ジャイロと方向ジャイロを組合せたものである。ピッチ角 θ_p 、及びロール角 θ_R は、鉛直ジャイロで測定されるが、この場合基準は鉛直(重力)方向となる。ヨー角 θ_Y は、方向ジャイロで測られ、初期設定された方位が基準となる。受光面の法線の天頂角 θ_n は、ピッチ角 θ_p とロール角 θ_R の関数として、

$$\theta_n = \tan^{-1} \left(\frac{\tan |\theta_p|}{\cos \varepsilon} \right) \quad (8.8)$$

但し、

$$\tan \varepsilon = \frac{\tan |\theta_R|}{\tan |\theta_p|} \quad (8.9)$$

と表わせる。

他方、法線の方位 φ_n は、初期設定方位と角 ε 及びヨー角 θ_Y の和として与えられる。以上の様に、動揺計出力(θ_p 、 θ_R 及び θ_Y)から、補正係数 η が求まり、比 r が既知であれば、下向き水平面日射フラックスは(8.4)式により評価できる。比 r は、同時に測定されたエーロゾルの高度分布(後述)と地上での直達及び水平面日射フラックス観測値とを参考にしたモデル計算により、各高度毎に予め設定したが、この値の多少の不確かさは、 G の評価にそれ程敏感ではない。

航空機動揺に対する補正の一例を図8.3に示す。図中、○及び△は、全波長域の下向き日射フラックスをそれぞれ北向き及び南向きに飛行して測った値の平均値を示す。これ等の測定値に、日射計受光面の傾斜に対する補正、及び次項(2)と(3)で述べる太陽高度変化と日射計温度特性に対する補正を施した値が●及び▲で印で示されている。

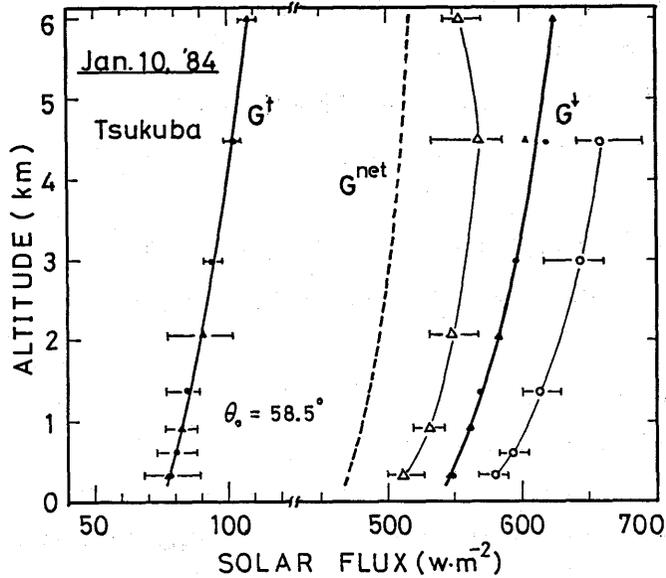


図 8.3 全波長域の上向き G^{\uparrow} 、下向き G^{\downarrow} 及び正味 $G^{net} (= G^{\downarrow} - G^{\uparrow})$ 日射フラックスの高度分布。下向きフラックスの測定値 (○：北向き飛行、△：南向き飛行) に対して航空機動揺、太陽高度変化及び日射計温度特性の補正を施した値を●、▲で示す。誤差バーは、測定値の最大・最小の範囲を示す。1984年1月10日、筑波上空

(2) 太陽高度変化に対する補正

大気における放射収支を見積るためには、高度の異なる、従って、測定時間の異なる放射フラックスの観測データを、ある同一の太陽高度に対する値に直して比較する必要がある。本研究における観測は、太陽高度変化の少ない南中時前後に行なわれたが、それでも一回の観測に要する約1時間半の内に、太陽高度は3~4°変化する。各測定時刻における太陽高度は、「惑星位置略算式」(海上保安庁水路部、1982)により算出し、全データを平均太陽高度での値に規格化した。規格化は、大気の放射伝達特性が、太陽高度角の2~3°の違いに依らないという仮定のもとに、大気に入射する太陽放射フラックスの量を、実際の太陽高度との違いに応じて変化させることにより行なった。この単純な方法は、太陽高度が更に低い ($h_0 \leq 20^\circ$) 場合には誤差を大きくする恐れがある。

(3) 放射測器温度特性

機体外に取りつけられた放射測器は、高度を変えての観測の間、幅広い範囲の温度変化を受ける。日射計は個体毎に異なる温度特性を持つので、この温度変化に伴う出力変化に対する補正を施す必要がある。観測に用いた全波長域全天日射計と近赤外域全天日射計の温度特性を、図 8.4 に示した。

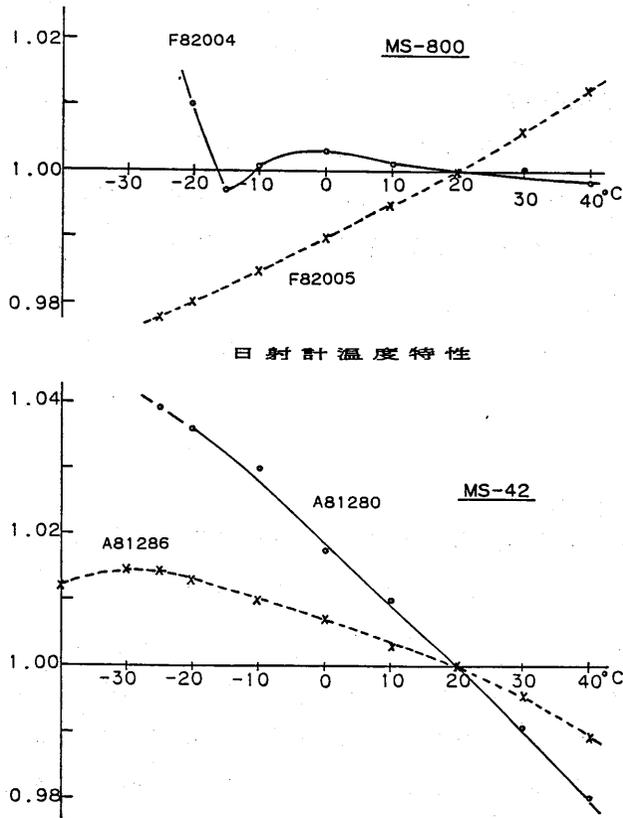


図8.4 全波長域全天日射計 (MS-42型) 及び近赤外域全天日射計 (MS-800) の温度特性

個体によっては、低温で急に特性の変わるものもある。この原因は、受光板と熱電堆の間の接着剤の特性変化によるものと考えられている。これ等の日射計は、元来地上観測用のもので、航空機観測用に特別調整されたものではないので、使用に問題が残る。

一方、赤外放射フラックスを測定するPIR赤外放射計は、それ自体温度補償回路を有しているが、カバーする温度範囲は、 -20°C から 40°C の間であり、この範囲を越えた更に低温に対しては、内蔵されている水銀電池の性能低下などにより温度補償が正常に機能しない恐れがある。このPIRには、日射を反射し、波長 $4\sim 50\mu\text{m}$ の赤外放射のみを透過する様に、干渉フィルターをコーティングしたシリコンドームが付いている。このドームは完全に太陽放射を反射することなく、一部日射を吸収し、ドームが暖たまることにより日中の赤外放射の測定に10%前後の誤差をもたらす (Enz et al. 1975, Weiss 1981, Ryzner 1982)。

但し、航空機使用の場合には、高速で流れる空気によりドームが冷され、放射計本体との温度差が小さくなるために誤差は小さいとする試験結果がある (Albrecht et al, 1974, 1977)。

本研究では、これ等の試験結果を考慮して、赤外放射フラックス測定に対する日射の影響は無視した。

(4) 気温測定に対する動熱効果

機外に突き出した温度計により指示される温度は、高速で温度計にぶつかる空気のもつ動圧、即ち運動エネルギーが熱に変換されるために、実際の気温より幾分高目にする。空気を非圧縮完全流体と見なせば理論的には動熱効果の大きさを見積ることができる。即ち、気圧 p 、空気密度 ρ 、航空機の対空速度 v とすれば、総圧 P は、

$$P = p + \frac{1}{2} \rho v^2 \quad (8.10)$$

となる。

真の気温 T_a と温度計の出力温度 T_r との間には断熱過程の仮定により、

$$T_a \cdot p^{-(\gamma-1)/\gamma} = T_r P^{-(\gamma-1)/\gamma} \quad (8.11)$$

なる関係が成り立つ。ここに指数 γ は、空気の定圧比熱と定積比熱の比である。

式(8.10)のうち $\frac{1}{2} \rho v^2$ の項が動熱効果をもたらす項であるが、実際にこの項の寄与のどれ程の割合が、温度計出力に温度として交換されるかは、温度計の構造や機体への取り付け方等により異なる。この変換係数を決定する一つの方法は、同一高度(気圧)で航空機の飛行速度を変えて、温度計の出力変化を見ることが考えられる。本研究で用いた白金抵抗温度計に対しては、変換係数の信頼できる値が、未だ決定されていないので、本報告では温度計の出力値をそのまま掲載した。なお、航空機観測と同日のラジオゾンデ・データと比較すると、動熱効果により白金抵抗温度計による値は、2～4℃高めにしている。

8.5 観測概況

昭和57年度観測

- ① 1983年1月13日、12:15～13:45 筑波上空 冬型の気圧配置 快晴
観測途中で片積雲発現(雲量1、雲底高度～2km、雲厚～200m)、エーロゾル濃度欠測
- ② 1983年1月14日、11:00～12:35 筑波上空 冬型の気圧配置 快晴

昭和58年度観測

- ① 1984年1月10日、11:24～12:51 筑波上空 弱い冬型、快晴、明け方気温の強い接地逆転、観測時にも、約500mの高度まで、ヘイズが覆っており、地上視程悪し。
- ② 1984年1月11日、10:00～11:23 筑波上空 冬型強まる、快晴
観測後半に、片積雲発現(雲量～1、雲頂高度～2km)

- ③ 1984年1月11日、11:35~13:10 鹿島灘上空 ②に引続いての観測、南方九十九里沖及び東方数十km沖に層積雲、観測区域はほぼ快晴、但し時々片積雲（雲量1~2）。

昭和59年度観測

- ① 1984年12月19日、10:00~11:10、鹿島灘上空 移動性高気圧張出し、接地混合層（高度~1.5 km）発達。観測後半に片積雲発現（雲量~1）。日射ゾンデ同時観測。
- ② 1984年12月19日、11:30~12:45、筑波上空 ①に引続いての観測、片積雲増える（雲量2~3）、高度約6 kmで、粒径~2 μm附近のエーロゾル濃度の急増。観測終了後、絹雲広がる。

8.6 測定結果

(1) 放射フラックス高度分布

航空機観測によって得られた、気温、湿度、上向き及び下向きの水平面放射フラックスの高度分布を、前節で述べた各観測毎に表8.2~表8.8に示す。表中の値は、各高度での約4分間（水平距離約20km）のレベル・フライト測定の平均値を表わす。但し、雲の影響があると思われるデータは、選別し除いた。全波長域及び近赤外域の下向き日射フラックスには、8.4節で述べた各種の補正済みであるが、気温は、白金抵抗温度計の出力温度そのままである。

(2) エーロゾルの粒径別濃度の高度分布

放射と同時に測定されたエーロゾル粒径別濃度の高度分布を、放射フラックスの観測に対応して表8.9~表8.14に示す。但し、1983年1月10日（筑波）の観測では、パーティクル・カウンター不

表8.2 1983年1月13日 筑波上空での放射フラックス測定資料

高度 (km)	気温* (°C)	露点温度 (°C)	全波長域日射 (W/m ²)		近赤外域日射 (W/m ²)		赤外放射 (W/m ²)		備 考
			下向き	上向き	下向き	上向き	下向き	上向き	
0.32	7.3	-2.7	454	66	247	49	235	357	観測時間
0.61	4.3	-3.6	480	69	252	50	221	345	12:15~13:45
0.91	2.2	-33.2	484	73	267	49	208	341	
1.37	-0.8	-35.0	495	78	272	49	190	333	平均太陽高度
2.29	-7.6	-38.5	516	81	284	50	150	305	h ₀ = 28.5°
3.17	-10.2	-45.2	535	89	300	49	132	303	
4.97	-21.5	-51.0	550	95	301	49	93	291	雲量
5.83	-27.3	-55.5	556	97	302	49	87	290	Cu 1

* 気温：動熱効果の補正なし

表 8.3 1983年1月14日 筑波上空での放射フラックス測定資料

高度 [km]	気温 * [°C]	露点温度 [°C]	全波長域日射 [W/m ²]		近赤外域日射 [W/m ²]		赤外放射 [W/m ²]		備 考
			下向き	上向き	下向き	上向き	下向き	上向き	
0.32	4.5	- 9.0	533	73	291	55	215	340	観測時間 11:00~12:35 平均太陽高度 h ₀ = 31.0° 雲量 0
0.61	1.7	- 9.2	534	75	294	54	198	327	
0.90	- 0.9	-10.6	543	77	300	55	196	318	
1.33	- 4.9	-12.9	553	79	312	53	168	307	
2.20	-11.7	-19.7	583	82	322	52	130	285	
3.08	-15.5	-41.3	600	89	334	52	106	283	
4.94	-21.2	-49.0	621	105	341	57	77	279	
5.87	-26.2	-53.4	634	108	349	58	74	267	

* 気温：動熱効果の補正なし

表 8.4 1984年1月10日 筑波上空での放射フラックス測定資料

高度 [km]	気温 * [°C]	絶対湿度 [g/m ³]	全波長域日射 [W/m ²]		近赤外域日射 [W/m ²]		赤外放射 [W/m ²]		備 考
			下向き	上向き	下向き	上向き	下向き	上向き	
0.31	-	2.9	547	77	267	52	222	344	観測時間 11:24~12:51 平均太陽高度 h ₀ = 31.5° 雲量 0
0.61	-	1.8	555	80	272	53	212	337	
0.90	-	1.4	562	82	277	53	204	333	
1.35	-	1.1	570	84	282	53	188	322	
2.07	-	0.9	584	90	290	54	165	308	
2.96	-	-	597	95	297	53	144	295	
4.51	-	-	612	102	303	53	117	287	
6.00	-	-	626	108	307	52	88	274	

* 気温：欠測

表 8.5 1984年1月11日 筑波上空での放射フラックス測定資料

高度 [km]	気温* [°C]	絶対湿度 [g/m ³]	全波長域日射 [W/m ²]		近赤外域日射 [W/m ²]		赤外放射 [W/m ²]		備 考
			下向き	上向き	下向き	上向き	下向き	上向き	
0.31	5.1	2.3	499	71	251	50	217	329	観測時間 10:00~11:23
0.61	2.6	1.7	505	72	259	51	204	319	
0.92	- 0.3	1.5	530	73	265	49	191	313	平均太陽高度 h ₀ = 29.5°
1.38	- 3.2	1.1	531	76	267	50	173	303	
2.10	- 8.6	0.9	546	80	276	49	153	293	雲量 Cu 1
3.07	-14.9	-	565	87	288	51	120	282	
4.61	-22.5	-	592	98	300	52	91	279	
6.15	-28.5	-	594	102	303	53	78	275	

* 気温：動熱効果補正なし

表 8.6 1984年1月11日 鹿島灘上空での放射フラックス測定資料

高度 [km]	気温* [°C]	絶対湿度 [g/m ³]	全波長域日射 [W/m ²]		近赤外域日射 [W/m ²]		赤外放射 [W/m ²]		備 考
			下向き	上向き	下向き	上向き	下向き	上向き	
0.16	7.3	2.3	531	44	261	18	225	364	観測時間 11:35~13:10
0.31	5.9	2.2	536	43	264	17	218	355	
0.61	2.9	1.9	546	43	271	17	203	344	平均太陽高度 h ₀ = 31.0°
0.90	- 0.2	1.7	556	45	276	16	197	341	
1.34	- 3.8	1.3	567	48	282	16	178	326	雲量 Cu 2
2.09	- 9.7	0.9	584	52	293	16	157	317	
3.01	-16.1	-	602	57	305	17	126	299	
4.52	-22.4	-	624	66	318	20	87	291	

* 気温：動熱効果補正なし

表 8.7 1984年12月19日 鹿島灘上空での放射フラックス測定資料

高度 (km)	気温* [°C]	露点温度 [°C]	全波長域日射 [W/m ²]		近赤外域日射 [W/m ²]		赤外放射 [W/m ²]		備 考
			下向き	上向き	下向き	上向き	下向き	上向き	
0.15	9.6	- 7.4	496	38	232	16	224	356	観測時間 10:00~11:10
0.29	8.1	- 8.1	506	39	239	17	217	349	
0.59	5.7	- 8.3	519	39	250	17	204	341	平均太陽高度 h ₀ = 28.5°
1.35	- 2.0	-11.3	541	43	264	18	166	311	
1.95	- 5.8	-23.5	554	48	272	18	141	306	雲量 Cu 1
3.16	- 9.7	-35.8	571	57	281	20	114	300	
4.38	-18.2	-47.2	583	65	286	22	87	292	

* 気温：動熱効果の補正なし

表 8.8 1984年12月19日 筑波上空での放射フラックス測定資料

高度 (km)	気温* [°C]	露点温度 [°C]	全波長域日射 [W/m ²]		近赤外域日射 [W/m ²]		赤外放射 [W/m ²]		備 考
			下向き	上向き	下向き	上向き	下向き	上向き	
0.58	5.9	- 6.7	523	64	244	42	228	353	観測時間 11:30~12:45
0.88	3.1	- 7.0	540	72	253	44	217	344	
1.34	- 0.9	- 8.8	556	78	264	46	194	332	平均太陽高度 h ₀ = 30.0°
1.94	- 6.2	-14.2	573	84	275	48	159	310	
3.15	- 9.8	-35.2	594	89	289	50	125	302	雲量 Cu 2
4.37	-16.3	-48.8	606	93	296	51	104	293	
5.90	-21.8	-48.2	616	97	300	52	101	297	

* 動熱効果補正なし

表 8.9 1983年1月14日 筑波上空でのエアロゾルの粒径別濃度*の高度分布

高度(km) \ 粒径(μm)	0.32	0.61	0.90	1.33	2.20	3.08	4.94	5.87
0.3	1,881.5	1,737.7	1,458.8	822.4	97.2	79.8	134.3	114.1
0.5	326.1	269.3	241.4	158.0	21.1	15.9	22.3	19.4
1.0	82.7	71.8	69.3	33.2	5.2	3.2	0.9	3.0
2.0	30.4	25.3	25.8	11.7	4.7	0.4	0.2	0.4
5.0	3.3	3.2	3.4	2.5	1.8	0.1	0.1	0

* 空気100 cm^3 中に含まれる平均個数

** パーティクル・カウンター (RION, KC-01) による測定

表 8.10 1984年1月10日 筑波上空でのエアロゾルの粒径別濃度*高度分布

高度(km) \ 粒径(μm)	0.31	0.61	0.90	1.35	2.07	2.96	4.51	6.0
0.3	5,643.6	943.2	411.7	265.0	223.1	111.3	22.2	19.0
0.5	2,507.4	197.8	54.0	43.8	28.9	3.0	2.2	1.4
0.6	360.9	32.6	15.9	7.7	8.0	3.3	3.5	3.6
0.8	63.9	8.0	3.0	1.0	2.7	1.2	1.8	0.4
1.0	36.0	4.6	3.0	2.2	1.1	1.3	1.7	0.6
1.2	26.3	2.8	1.3	1.7	0.7	1.3	0.9	0.4
1.5	16.6	1.4	1.1	0.7	1.0	0.2	0.3	
2.0	7.1	1.2	0.6	0.7				
3.0	1.6	0.2						
4.0	0.5							
5.0	0.4							
6.0	0							
8.0								
10.0								

* 空気100 cm^3 中に含まれる平均個数

表 8.11 1984年1月11日 筑波上空でのエアロゾルの粒径別濃度*の高度分布

高度(km) 粒径(μm)	0.31	0.61	0.92	1.38	2.10	3.07	4.61	6.15
0.3	4,075.3	2,290.3	1,902.0	1,036.9	825.7	635.7	304.6	12.0
0.5	1,779.1	785.3	611.2	285.6	225.0	162.5	43.1	3.1
0.6	406.6	142.0	106.2	45.7	33.6	29.2	5.8	2.9
0.8	61.0	29.0	20.8	10.7	7.4	6.5	1.5	1.3
1.0	49.4	23.4	13.6	5.0	5.7	6.2	2.1	1.6
1.2	50.8	26.6	17.6	6.0	5.6	5.2	4.1	0.9
1.5	32.7	19.6	12.4	4.3	2.9	4.5	1.0	0.8
2.0	16.7	11.0	7.0	1.3	0.3	1.7	0.1	
3.0	4.7	3.1	1.8	0.1	0.7	0.7		
4.0	1.3	0.6	0.8		0.1	0.2		
5.0	0.5	0.6	0.2					
6.0	0.4							
8.0								
10.0								

* 空気 100 cm³に含まれる平均個数

表 8.12 1984年1月11日 鹿島灘上空でのエアロゾル粒径別濃度*の高度分布

高度(km) 粒径(μm)	0.16	0.31	0.61	0.90	1.34	2.09	3.01	4.52
0.3	1,631.9	2,134.7	2,056.0	1,930.4	1,707.7	848.9	677.1	39.3
0.5	475.8	729.4	701.9	642.0	566.4	252.9	181.3	18.4
0.6	87.1	120.9	116.5	103.0	90.0	37.0	44.1	4.5
0.8	20.8	26.3	23.6	26.0	20.9	7.4	28.3	2.1
1.0	16.4	21.4	19.9	16.9	14.7	7.8	8.9	2.4
1.2	15.1	20.3	23.3	18.4	16.3	6.0	4.5	3.1
1.5	11.9	13.7	15.0	13.8	11.6	2.8	5.1	0.5
2.0	9.0	8.3	8.1	8.8	6.1	1.3	4.3	0
3.0	3.1	2.7	2.5	2.8	2.0	0.3	1.9	0.1
4.0	0.4	0	0.9	0.4	0.2	0.1	0.1	
5.0		0.3	0.5	0.4	0.1		0.3	
6.0								
8.0								
10.0								

* 空気 100 cm³に含まれる平均個数

表 8.13 1984年12月19日 鹿島灘上空でのエアロゾルの粒径別濃度*の高度分布

高度(km) \ 粒径(μm)	0.15	0.29	0.59	1.35	1.95	3.16	4.38	
0.3	2,303.7	2,196.0	2,023.0	1,806.0	840.5	336.4	52.0	
0.4	749.0	728.5	622.5	570.2	231.0	66.5	10.6	
0.5	313.3	305.7	276.5	231.8	98.8	28.5	4.2	
0.6	328.7	315.8	285.8	262.2	89.5	43.3	3.4	
0.8	69.7	67.8	57.2	51.3	16.5	19.5	0.8	
1.0	62.3	64.7	55.8	48.8	21.5	31.3	1.0	
1.2	35.0	36.0	39.5	27.8	12.3	24.3	0.6	
1.5	48.3	44.7	42.2	35.5	12.0	33.3	0.2	
2.0	33.3	50.7	48.8	40.0	13.5	50.4	0.6	
3.0	20.0	28.8	26.8	21.2	12.0	35.5	0.2	
4.0	18.0	14.8	16.7	11.5	4.3	17.6	0.2	
5.0	3.7	2.3	2.5	2.0	1.3	3.3	0	
6.0	2.3	2.0	1.8	3.3	0	5.0		
8.0		0.2	0.2	0.2	0	0.3		
10.0		0.2	0	0.5	0.3	0		

* 空気 100 cm³に含まれる平均個数

表 8.14 1984年12月19日 筑波上空でのエアロゾルの粒径別濃度*の高度分布

高度(km) \ 粒径(μm)	0.30	0.58	0.88	1.34	1.94	3.15	4.37	5.90
0.3	4,547.2	4,465.0	4,213.5	3,965.2	1,331.3	334.3	253.4	78.8
0.4	1,506.4	1,487.2	1,336.0	1,127.5	360.7	56.0	83.0	31.5
0.5	693.4	666.4	573.8	463.7	162.3	21.2	27.4	20.5
0.6	742.2	741.8	609.3	468.8	181.2	28.0	18.9	47.8
0.8	181.6	198.4	155.2	115.3	54.7	16.5	3.4	29.8
1.0	234.2	257.4	194.8	129.8	69.5	23.5	4.6	48.0
1.2	144.4	144.2	123.3	82.7	51.8	16.7	2.6	42.0
1.5	147.4	145.2	133.0	85.3	51.2	24.5	2.5	58.5
2.0	177.6	177.2	147.7	112.5	69.2	34.5	2.5	109.3
3.0	100.0	79.8	72.5	56.0	36.3	25.0	0.8	98.3
4.0	62.4	38.8	38.0	35.8	27.8	15.7	0.8	66.8
5.0	14.6	9.2	9.7	7.0	6.0	2.3	0.1	16.3
6.0	32.0	10.8	11.2	8.2	5.8	2.0		22.8
8.0	5.6	1.6	1.2	0.2	0.7	0.2		1.5
10.0	4.4	1.0	0.2	0.2	0.3			0.3

* 空気 100 cm³に含まれる平均個数

調のため、エアロゾル観測は欠測した。表中の濃度値は、各高度での5～12回の測定の平均値で、そのサイズが対応する粒径レンジと次の粒径レンジの間に入るエアロゾルの空気 100 cm³当りの個数である。なお、使用したRIONパーティクル・カウンター及びDICダスト・カウンター共に設定された粒径レンジは、可視光に対する屈折率が1.60であるラテックス試料粒子を用いての検定による値である。表中には、これ等カウンターによる測定値をそのまま載せてあるが、屈折率が1.60より小さいと思われる実際のエアロゾルの粒径分布に引直すには実際の屈折率に応じた補正を加える必要がある。同一高度内でのエアロゾル濃度の水平分布の分散は、放射量に比べて概して大きく、粒径によっては最大値と最小値で数倍異なることもある。

(3) 大気加熱・冷却率及び反射率

放射フラックスとエアロゾル等の高度分布の同時観測から、大気の放射熱収支の高度分布と、それに及ぼすエアロゾル等の効果を評価することが可能となる。上記観測結果にもとづく詳細な解析結果の報告は、紙面の制限もあり他にゆずることとして、ここでは、上記観測から直ちに導びかれる大気加熱・冷却率及びフラックス反射率についての若干の解析事例を紹介するに止める。

図8.5は、1984年1月10日筑波上空及び翌11日鹿島灘上空での放射観測データ(図8.3、表8.4及び8.6参照)から得られた日射の吸収による大気加熱率の高度分布である。実線は、全波長域の日射フラックスの収束量から求めた加熱率、破線は、近赤外域日射フラックスの収束量から求めた加熱率で、両者ともエアロゾルによる吸収と水蒸気による吸収の両方の効果を含む。水蒸気によ

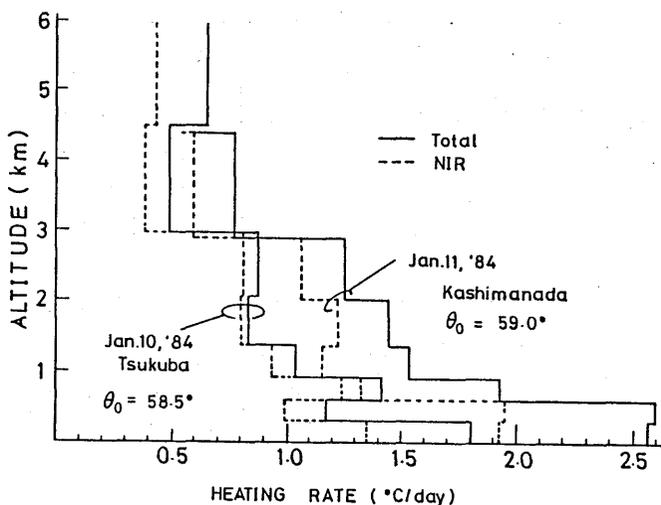


図8.5 日射吸収による大気加熱率の高度分布、
 実線は全波長域日射による加熱率、破線
 は近赤外域日射による加熱率。
 1984年1月10日 筑波上空 及び
 1984年1月11日 鹿島灘上空

る日射の吸収は近赤外域に限られているので、実線と破線の差は、エアロゾルによる可視光吸収の効果を表わす。観測日の気温・湿度分布から推算した水蒸気のみを加熱率は、3 km附近で約0.4℃/day、大気下層で0.6℃/dayと見積られる。エアロゾルのみによる日射吸収効果は、高度3 km以下の下層でより顕著で、1月10日（筑波）では、水蒸気のみ寄与の1～3倍、1月11日（鹿島灘）では2～3倍の大きさになっている。加熱率の高度分布は、エアロゾル濃度の高度分布（表8.10及び8.12）と対応している。

図8.6は、前図に対応する日射フラックスの反射率（アルベード）の高度分布を表わす。実線は、全波長域日射計に対する反射率、破線は近赤外域日射に対する反射率を表わす。筑波上空では、この時期の地表面反射の特性を反映して、近赤外域での反射率が全波長域そして可視域での反射率より大きくなっている。他方、海上（鹿島灘）では、地表面に比べて海面の小さな反射率の反映として、全体として筑波上空よりも反射率が小さく、海面が青く見えることから分かるように、可視域での反射率が近赤外域の反射率より大きくなる。近赤外域の反射率が高度に対してほぼ一定、又はやや減少気味なのは、水蒸気及びエアロゾルによる吸収の効果がエアロゾル大気による散乱の効果とほぼ打消し合うか、又は、前者が少し勝っていることの表われである。

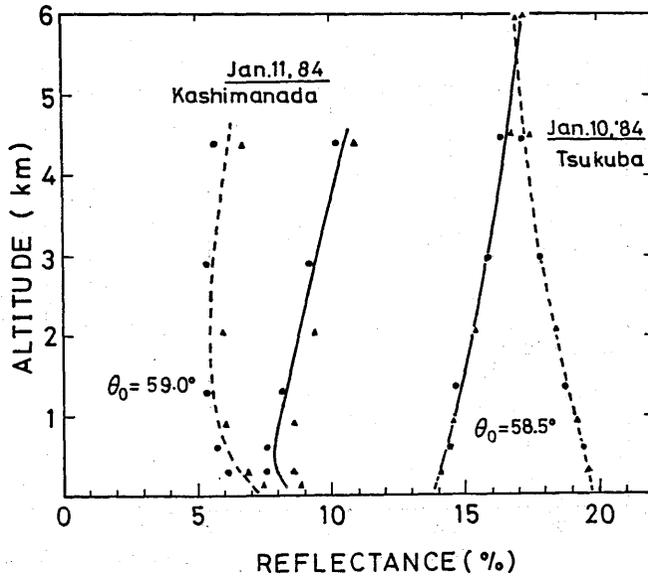


図8.6 日射フラックス反射率の高度分布、
 実線は全波長域日射に対する反射率、
 破線は近赤外域日射に対する反射率、
 1984年1月10日 筑波上空 及び
 1984年1月11日 鹿島灘上空

図 8.7 は、1984年12月19日筑波上空での観測による赤外放射及びそれによる大気冷却率の高度分布を示す。この日の特徴は露点温度分布等(表 8.8)に表われている様に、地上約 1.5 kmの高さまで混合層が発達しており、この内でエアロゾル濃度がほぼ一様で大きくなっている(表 8.14)。更に高度 6 km附近で再び湿度が高くなり、また比較的大きな粒径のエアロゾル濃度が急増している。混合層内では、上向きフラックス F_{IR}^{\uparrow} が高度と共に急激に減少しているが、下向きフラックス F_{IR}^{\downarrow} もほぼ同様の割合で変化しているので、正味フラックス F_{IR}^{net} の高度変化は小さく、従って冷却率も小さな値となっている。このエアロゾルの濃い混合層内で、赤外放射冷却率が、エアロゾルが存在しないとした場合よりも若干小さくなるという今回の観測例は、エアロゾルの附加が大気下層の赤外冷却を強めるという従来のモデルによる理論研究(例えば、Ackerman et al. 1976, Harshvardhan and Cess, 1978)と反する。この点に関しては、今後更に詳細に分析する予定である。

下向きフラックスが、高度約 4.5 kmから 6 kmにかけて減少することなく、ほぼ一定の値となっているのは、上空に何か赤外放射を強く吸収・射出する物質が存在することを示唆しており、前述の粒径約 $2 \mu\text{m}$ のエアロゾル(雲粒?)の急増と良く対応している。ただし、この上層のエアロゾル層の存在は、目視では認知出来なかったし、日射に対するはっきりした影響は認められなかった(表 8.8 参照)。

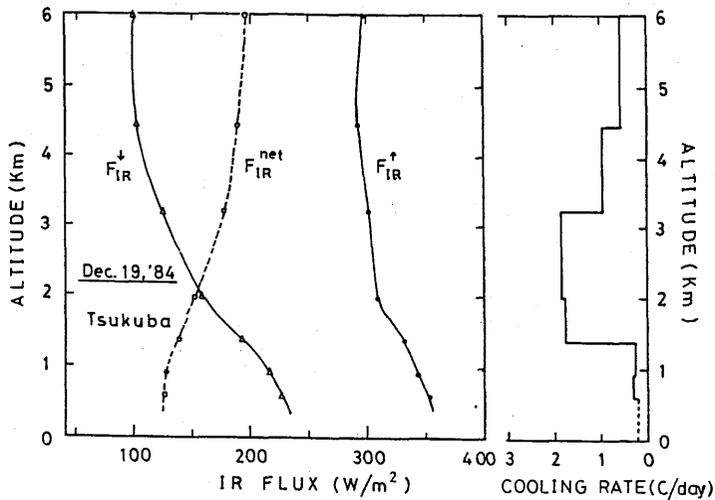


図 8.7 赤外放射フラックス及び赤外放射冷却率の高度分布。

上向きフラックス F_{IR}^{\uparrow} 、下向きフラックス F_{IR}^{\downarrow} 、及び正味フラックス F_{IR}^{net} 、
1984年12月19日 筑波上空

8.7 まとめ

本章では、航空機による日射及び赤外放射の水平面フラックス、エアロゾル濃度等の測定・解析法を詳述し、測定結果を記載した。放射とエアロゾル、気温・湿度の同時観測により、冬季対流圏の放射収支に及ぼすエアロゾルや水蒸気等の効果を解明するための基礎資料が蓄積された。解析の結果、エアロゾルの日射吸収による大気加熱の効果は、水蒸気による効果の2～3倍大きいこと、放射加熱・冷却の高度分布はエアロゾル濃度の高度分布等と密接に関連していること、更にエアロゾル濃度の高度分布は接地逆転や混合層など気温・湿度分布と関係が深いこと等が分った。

謝 辞

航空機観測に際し、昭和航空K. Kの方々には御協力を戴きました。資料の一部の整理・解析に宮田 洋氏（現松山地方气象台）の御協力を得ました。日射計の温度特性の検定には、気象庁日射検定室の方々に御助力を得ました。また、エアロゾル測器等の使用に当っては、気象研究所の多くの方々に便宜をはかっていただきました。関係された皆様の御厚情に感謝します。

参 考 文 献

- Ackerman T. P., K-N Lion and C. B. Leovy, 1976 : Infrared radiative transfer in polluted atmosphere. *J. Appl. Meteor.* **15**, 28 - 35.
- Albrecht, B. and S. K. Cox, 1977 : Procedure for improving pyrgeometer performance. *J. Appl. Meteor.* **16**, 188 - 197.
- Albrecht, B., M. Poellot, and S. K. Cox, 1974 : Pyrgeometer measurements from aircraft. *Rev. Sci. Instrum.* **45**, 33 - 38.
- Enz, J. W., J. C. Klink, and D. G. Baker, 1975 : Solar radiation effects on pyrgeometer performance. *J. Appl. Meteor.* **14**, 1297 - 1302.
- Harshvardhan and R. D. Cess, 1978 : Effects of tropospheric aerosols upon atmospheric infrared cooling rates. *J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer*, **19**, 621 - 632.
- 海上保安庁水路部, 1982 : 惑星位置略算式
天測暦（昭和57年度版）

Kondratyev, K. Ya, 1977 : Radiation regime of inclined surfaces.

WMO, Tech. Note No 152.

Ryznar, E and M. R. Weber, 1982 : Comments "On the performance of pyrgeometer with silicon domes "

J. Appl. Meteor. 21, 1208 - 1210

Weiss, A., 1981 : On the performance of pyrgeometer with silicon domes.

J. Appl. Meteor. 20, 962 - 965.