

〔研究〕

雲及び大気観測用赤外分光放射測定装置の開発

Development of the Infrared Spectral Radiometry Equipment for Observing Atmosphere and Cloud

西本昭男 石堂能成 湊 秀幸
A. NISHIMOTO Y. ISHIDO H. MINATO

The purpose of this study is the development of high accurate measurement technologies in atmospheric IR transmission windows for experimental research on optical property of cloud. The result of this study is summarized as follows.

(1) Optical guiding system of the radiation from sky into Fourier transform infrared spectrometer has been set up at the front of the relay optics in precision measurement system of infrared radiation. This optical guiding system is consisted of scanning plane mirror, moving plane mirror, fixed plane mirror, and large size plane mirror. Angle of large size plane mirror can be adjusted, and the observation zenith angle can be changed from 20 degrees to 50 degrees at the constant azimuth angle.

(2) Using spectral radiometry system and optical guiding system mentioned above, infrared spectral radiometry of the sky in Amagasaki has been started. As preliminary examination, both the infrared radiation in fine weather and in cloudy weather have been observed. On the atmospheric IR transmission windows, from $8\mu\text{m}$ to $13\mu\text{m}$, the infrared spectral radiance distribution in fine weather has complicated shape with the wavelength. Otherwise, the infrared spectral radiance distribution in a cloudy sky has rather smooth shape, but has been changed with translation of clouds eventually.

(3) The precision measurement system of infrared radiation was improved for the radiometry with the regulation of the polarization of the light. In the preliminary experiment, the polarization of the infrared radiation from the cloud at $8\mu\text{m}$ ~ $13\mu\text{m}$ has been found to be small most can.

(4) The followings are discussed on the results of our observation : 1)The apparent temperature of the cloud. 2)The time variation in the spectral radiance of sky. 3)The dependence of the spectral radians of sky on the zenith angle.

§ 1 はじめに

地球温暖化の主要な要因である雲及び温室効果気体の観測精度の向上を図るには、実用分光観測機器等の精密な校正技術の開発が不可欠である。また、雲の赤外放射観測では、大気の吸収等の変動が観測精度に大きく影響するため、大気の窓の波長域における雲の赤外放射や輝度温度を正確に観測することが重要な課題となっている。このため、我々は、雲および、大気の光学的特性を理解するため赤外放射測定装置を開発すると共に、雲の赤外放射の実験

的研究に取り組んでいる。

本研究では、まず低温度放射の精密校正、及び実験室の窓からの雲の赤外放射の高感度測定のため、操作性にすぐれた精密フーリエ変換赤外分光器、高感度赤外検出器を整備し、近赤外～中赤外域における分光放射測定を実施可能にすることが必要であった。このため、極低温複合式ポロメータ検出器を製作・設置を行うと共に、低温度放射の参照光源として各低温度レベルを設定可能な空洞型放射光源を整備し、低温度放射の予備測定を試みた。また、低温度の赤外分光放射測定では、分光測定器自身の放射、即ちパツ

クグラウンド放射の正確な補正が必要となるが、装置の性能評価実験では、このような補正を厳密に行い、測定可能な放射温度レベルや、測定の限界性・再現性等を明らかにした¹⁾。一方、実験室の窓から雲の赤外放射等を直接的測定を可能にするため、上記の測定装置へ天空からの放射を導入するための光学系の設置が必要であった。このため、上記フーリエ変換赤外分光器の入射側に走査平面反射鏡、大型平面反射、固定平面反射鏡、移動型平面反射鏡等から構成した入射光学系を設置すると共に、大型平面反射の角度調整により、一定の方位角で、天頂角 20 ~ 50 度の範囲に天空の観測方向を設定し、天空の赤外分光放射測定を可能にした。また、この入射光学系を用い、雲および大気の高精度な赤外放射測定データを得るための実験的検討を行った。

本報告では、上記のような雲および大気観測用赤外分光放射測定装置の開発を中心に、実験室の窓からの雲及び大気の高精度な赤外分光放射測定について述べる。

§ 2 測定装置

常温以下における低温度放射の赤外分光計測では、放射強度が微弱となるため、放射束利用効率の高い、いわゆる明るい光学系で構成された分光器、及び高感度で安定性に優れた検出器等が必要である。このため、前報¹⁾では、低温度レベルの赤外放射の精密測定を可能にするため、フーリエ変換赤外分光光度計を使用した精密赤外分光放射測定光学系、極低温複合式ボロメータ検出器²⁾、低温度放射の参照光源とするための円錐形状の黒体型放射光源等から構成した精密赤外分光放射測定装置について詳細に報告した。以下では、この精密赤外分光放射測定装置を有効に利用し、実験室の窓からの雲および大気観測用赤外分光放射測定装置について記述する。

図 1 は、実験室の窓から天空の赤外放射を観測するため、天空放射導入用の入射光学系と共に設置した赤外分光放射測定装置の側面図を示す。入射光学系は、走査平面反射鏡 Ms、大型平面反射 M1、固定平面反射鏡 M2、移動型平面反射鏡 Mm 等から構成され、観測方向は、大型平面反射鏡 M1 の角度調整により、方位各一定で、天頂角を 20 ~ 50 度の範囲で設定することができる。この光学系による天空の赤外分光放射測定では、図に示されている走査型平面反射鏡 Ms と移動型平面反射鏡 Mm によって光路の切り換えを行い、常温付近の基準の黒体型放射光源、及び光学系における背景放射を差し引くための 77K の液体窒素表面(参照光源)を交互に測定し、これを用いて天空からの入射放射束に対応する分光放射輝度が決定される(このような入射光学系と FT-IR 分光光度計の入射開口を結び

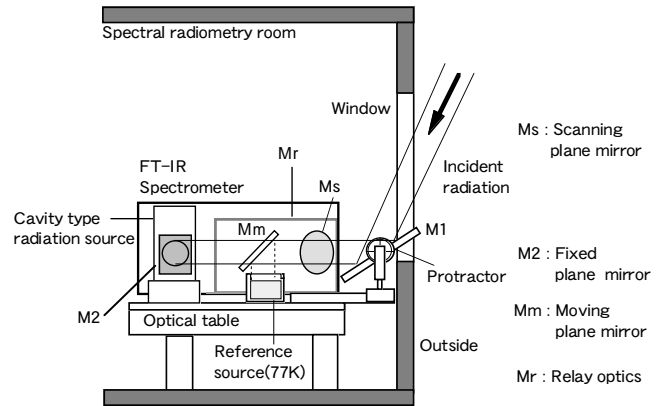


図 1 入射光学系と共に設置した赤外分光放射測定装置の構成

Fig.1 Constitution of infrared spectral radiance measurement system established with optical guiding system.

レー光学系 Mr は前報¹⁾を参照)。ただし、この場合、反射鏡 M1、M2、及び反射鏡 Mm は、それぞれほぼ同一の反射率を有する金コーティングの表面反射鏡を使用しており、各反射鏡の放射率の相違による測定精度への影響はほとんど無視できるとした。77K の参照光源は、350ml のステンレスミニボトル内の底面にカーボン製 V 溝吸収体を設置し、液体窒素を注入して構成した。この方式による参照光源は、液体窒素表面に霜や氷などが付着しないため有効に利用することができた。また、図 1 の観測用赤外分光放射測定装置において、検出器は、主として、FT-IR 分光光度計に設置されている HgCdTe 半導体検出器、または極低温複合式ボロメータ検出器²⁾を使用した。

一方、天空の放射測定にとって重要と考えられる放射の偏光方向を規定した測定を可能にするため、上記測定システムの FT-IR 分光光度計内部の光学系に赤外直線偏光子を設置した。この赤外直線偏光子は KRS-5 の基盤上に金属薄膜 (Al) を付けた後にフォトエッチング技術によって金属格子状に作製されたものである。

§ 3 測定方法

図 1 の雲及び大気観測用赤外分光放射測定装置において、天空よりの入射放射束に対する分光放射測定出力、すなわち FT-IR 分光光度計の干渉光強度出力(インターフェログラム)から天空の分光放射輝度を求めるため、分光放射輝度が既知の黒体型放射光源と比較測定を行う必要がある。

測定では、まず図 1 における移動型反射鏡 Mm を光路中より移動すると共に、走査型平面反射鏡 M1 を固定型平面反射鏡 M2 および設定温度 T_s の黒体型放射光源側に向け、波数 ν 、FT-IR 分光光度計における干渉計の光路差 x での黒体型光源からの入射放射束 $B_s(\nu, T_s)$ に対する検出器出

力, すなわち次式で表されるインターフェログラム $I_s(x)$ を求める。

$$I_s(X) = \frac{1}{2} \int_{-\infty}^{\infty} \{B_s(\nu, T_s) + E(\nu, T_{BG})\} \exp[j2\pi\nu x] dx \quad (1)$$

ここで, $B_s(\nu, T_s)$ は, 比例定数 k , 絶対温度 T_s の黒体型放射光源の真の分光放射輝度を $W_s(\nu, T_s)$, 光学系のもつ装置特性を $\tau_0(\nu)$ とすると次式の関係で示される。

$$B_s(\nu, T_s) = kW_s(\nu, T_s)\tau_0(\nu) \quad (2)$$

また, (1)式において, $E(\nu, T_{BG})$ は, 光学系におけるバックグラウンド放射束に対応するが, この放射束は, 移動型平面反射鏡 M_m を光路中に置き, 次の(3)式で表される液体窒素温度の参照光源に対する検出器出力 $I_{BG}(x)$ として得られる。

$$I_{BG}(X) = \frac{1}{2} \int_{-\infty}^{\infty} E(\nu, T_{BG}) \exp[j2\pi\nu x] dx \quad (3)$$

次に, 天空よりの入射放射束に対応する分光放射出力の測定では, 図1における走査型平面反射鏡 M_s を大型平面反射鏡 M_1 側に向け, 波数 ν , 温度 T , FT-IR 分光光度計における干渉計の光路差 x での天空よりの入射放射束 $B(\nu, T)$ に対する検出器出力, すなわち次式で表されるインターフェログラム $I(x)$ を求める。

$$I(X) = \frac{1}{2} \int_{-\infty}^{\infty} \{B(\nu, T) + E(\nu, T_{BG})\} \exp[j2\pi\nu x] dx \quad (4)$$

ここで, $B(\nu, T)$ は, 絶対温度 T の天空の真の分光放射輝度を $W(\nu, T)$, 光学系のもつ装置特性を(2)式の場合と同一として $\tau_0(\nu)$ とすると次式の関係で示される。

$$B(\nu, T) = kW(\nu, T)\tau_0(\nu) \quad (5)$$

従って, 天空の真の分光放射輝度 $W(\nu, T)$ は, (1), (3), (4)式で表されるインターフェログラムの検出器出力測定値を用いて, 次式のように与えられる。

$$W(\nu, T) = \frac{B(\nu, T)}{B_s(\nu, T_s)} \cdot W_s(\nu, T_s) = \frac{F^{-1}[I(X) - I_{BG}(X)]}{F^{-1}[I_s(X) - I_{BG}(X)]} \cdot W_s(\nu, T_s) \quad (6)$$

ここで, 記号 $F^{-1}[\]$ は, それぞれ差のインターフェログラムのフーリエ逆変換であることを示す。なお, (6)式の具体的計算は, フーリエ変換赤外分光法の手順に従い, インターフェログラムに対するアポダイゼーション関数の使用や, 位相補正処理等を考慮して行う必要がある。

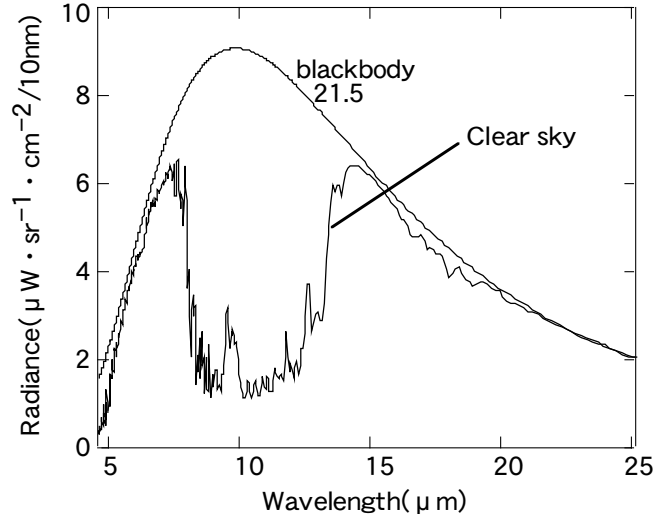


図2 天頂角30度に対する青空の分光放射輝度の測定例。これらのスペクトルは1996年3月6日, 夕刻において測定された。

Fig.2 Measurement example of spectral radiance of a clear sky for zenith angle 30 degrees. These spectrums were measured in an evening on March 6, 1996.

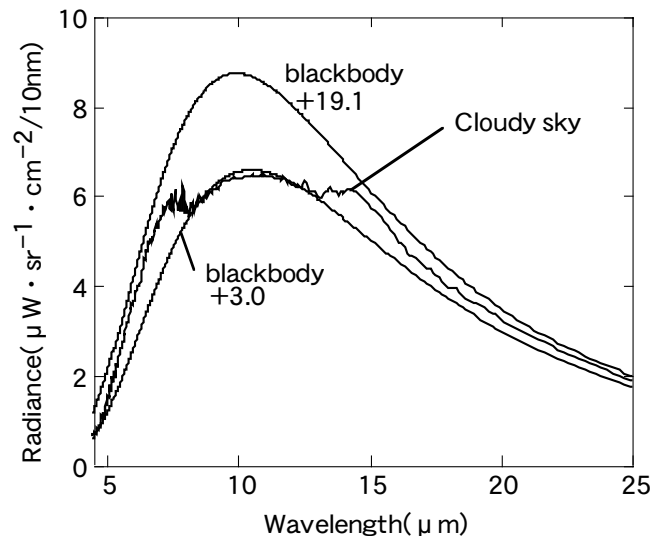


図3 天頂角30度に対する曇り空の分光放射輝度の測定例。これらのスペクトルは1996年3月6日, 夕刻において測定された。

Fig.3 Measurement example of spectral radiance of a cloudy sky for zenith angle 30 degrees. These spectrums were measured in an evening on March 6, 1996.

§ 4 測定結果と検討

実験室の窓から天空の赤外放射を観測するための赤外分光放射測定装置については前節の図1に示したが, ここでは, まず, この装置に基づく天空の赤外分光放射観測の予備実験結果について述べる。

図2は, 上記測定装置を用いて実験室の窓から測定した尼崎における天空の赤外分光放射輝度の分布曲線の測定例

を示す。この測定結果は、1997年3月6日、17時30分ごろの晴天時(気温21.5)において、複合式ポロメータ検出器を用い、波数分解 8cm^{-1} で、実験室の窓(南側)から天頂角30度方向について測定したものである。この測定における分光放射輝度は、前節の測定方法に基づき、黒体型光源との比較によって測定した。図3は曇天時における測定例を示す。以上のような天空の予備実験では、波長 $8\sim 13\ \mu\text{m}$ の大気の窓領域において、晴天時の放射スペクトルは図2に示すように複雑な変化を示し、曇天時では、図3に見られるように比較的起伏の小さい放射スペクトルが得られた。さて、図2において、波長 $3\ \mu\text{m}$ (図では一部示されていないが) $\sim 8\ \mu\text{m}$ 、および $14\ \mu\text{m}$ 以上の強い放射帯は濃度の高い低高度域の炭酸ガス(主として $4.3\ \mu\text{m}$ 付近および $15\ \mu\text{m}$ 付近)および水蒸気(主として $6.3\ \mu\text{m}$ 付近)の振動回転帯に相当し、波長 $8\sim 13\ \mu\text{m}$ の放射の少ない領域では、顕著なものとして $9.6\ \mu\text{m}$ のオゾン層からの放射が存在している。またこの領域でのその他の放射はほとんど炭酸ガスや水蒸気の弱い放射によるものと考えられている⁴⁾。

一方、図4は、図1の測定装置において偏光方向を規定することによって測定した天空(雲)の分光放射輝度の測定例を示す。この測定における偏光方向は、装置に設定した赤外直線偏光子を回転し、黒体型放射光源の測定での検出器出力が最大となる方向を0度の偏光方向、検出器出力が最小となる方向を90度の偏光方向として規定するようにした。また図4の測定例は、それぞれの偏光方向において黒体型放射光源と比較測定を行うと共に、この黒体型放

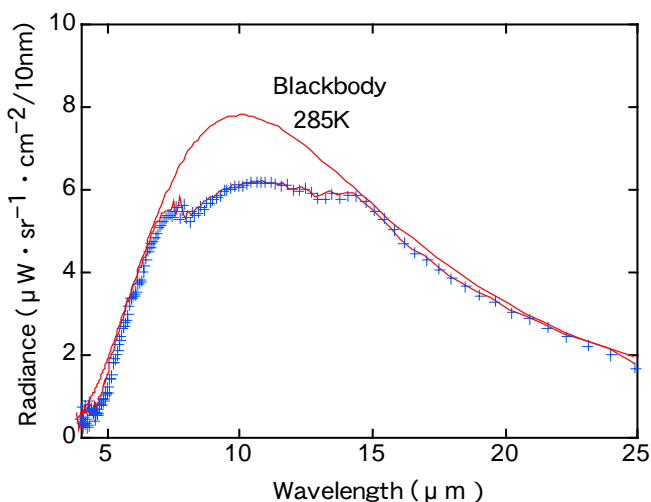


図4 偏光方向を規定することによって測定した天空(雲)の分光放射輝度の測定例
(実線は0度の偏光方向を示し、×印は90度の偏光方向を示している)

Fig.4 Measuring example of the spectral radiance of the sky (cloudy) measured by regulating the polarized light direction. (The continuous line shows polarized light direction of the 0 degrees, and × mark shows polarized light direction of the 90 degrees.)

射光源はほぼ無偏光であると仮定して測定したものである。結果として、図4の測定例では、各偏光方向における雲の分光放射輝度に大差なく、無視できる程度であると推察された。しかし、このような偏光の観測は雲の状態(氷床の雲)などを詳細に知る上で重要であり今後も引き続き観測を行っていく必要があると考えられる。

次に、地上(実験室の窓)からの雲及び大気の赤外分光放射観測による見かけの雲温度の推定、天空放射の時間的変動、および天空放射の角度依存性などの実験的検討を述べる。

4.1 雲の見かけの温度

地上からの遠隔的放射測定から温度を推定する方法は、次の四つに分類されている⁴⁾。

- (a) 比較的広い波長域の放射束を検出する方法。
- (b) 比較的狭い波長域の放射束を検出する方法。
- (c) 放射束の波長分布の形から、最大の放射束を与える波長を抽出する方法。
- (d) 非常に狭い2波長域または多波長域の放射束の比を求める方法。

このような測定方法は黒体の放射との比較測定法であるが、放射率に波長選択性を有する放射体では、放射率が一定とみなせる範囲に測定システムの波長域を限定する上記(b)項の方法が基本とされている。

そこで、本システムにおける赤外域の分光放射輝度の測定から雲の放射温度を地上から推定する場合には、放射束の波長域が $8\sim 13\ \mu\text{m}$ の大気の窓に限定されるとしても比較的波長の測定データが得られことから、上記(b)項、あるいは(d)項ともやや異なる面積比較方法が推定精度の面で有利であると考えられる。すなわち、 $8\sim 13\ \mu\text{m}$ の大気の窓の波長域であっても、測定値にはやや複雑な起伏が残存(測定の波数分解にもよるが)していることから、同波長域下での面積比較による方法は推定精度の向上が容易に伺える。図3の測定例では、黒体の分光放射輝度分布との比較による雲の見かけの温度(輝度温度)の推定結果を示している。当然のことながらこのような遠隔的な輝度温度推定は、雲の放射率や大気の透過率を無視した結果であり、実際の温度より低く見積もられることは明らかである。このような放射温度の推定における測定対象の放射率や、大気の透過率の補正は、当初からの最大の問題であり、今後も取り組んでいかなければならない重要な課題である。

4.2 天空放射の時間的変動

図5、図6は、それぞれ夏季における晴天時と曇天時における天空の時間的変動の測定例である。これらの測定例

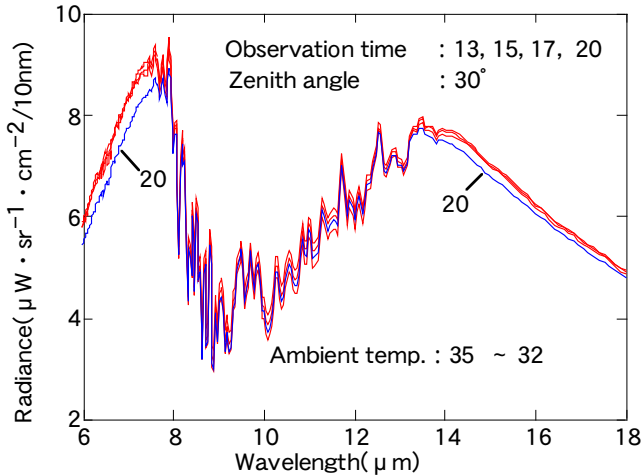


図5 晴天時における分光放射輝度の時間的変化
(1998年8月11日測定)

Fig.5 Time variation in a clear sky of spectral radiance.
These spectrums were measured in August 11, 1998.

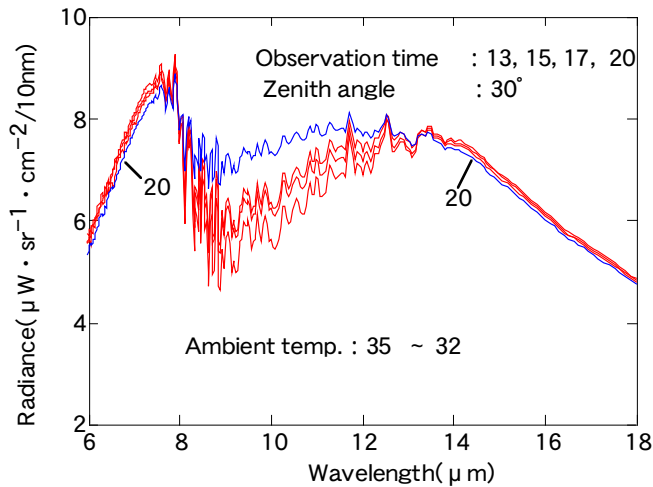


図6 曇天時における分光放射輝度の時間的変化
(1998年8月13日測定)

Fig.6 Time variation in a cloudy sky of spectral radiance.
These spectrums were measured in August 13, 1998.

は、波長4～25 μmの常温付近の赤外放射測定に有用なHgCdTe半導体検出器を用い、波数分解4cm⁻¹で、昼間から夜間(13時～20時)にかけて1時間間隔でおこなった。ただし、両図では、分布曲線が重畳するため測定の一部を省略した。これらの測定の間、周囲環境温度は、35(13時～)から32(～20時)までの変化であった。図において晴天時(図5)の分光放射輝度分布は、波長8～13 μmの大気窓での複雑なスペクトル変化を示すが、分布全体において昼間(13～17時)における時間的変動は比較的小さい。しかし、夜間20時での分光放射輝度分布は、特に波長8～13 μmの大気窓以外において、昼間より低下している。この変化は、当然のことながら周囲環境温度の変化に対応していると考えられる。曇天時(図6)の分光放射輝度分布は、波長8～13 μmの大気窓において雲の不均一性と移

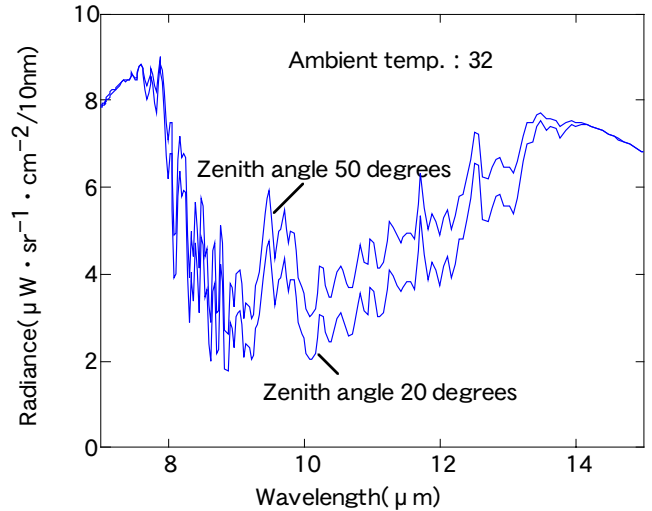


図7 各天頂角に対する晴天時の分光放射輝度測定例
(1998年8月20日夕刻)

Fig.7 Spectral radiance measuring example in a clear sky for several zenith angle.

These spectrums were measured in an evening on August 20, 1998.

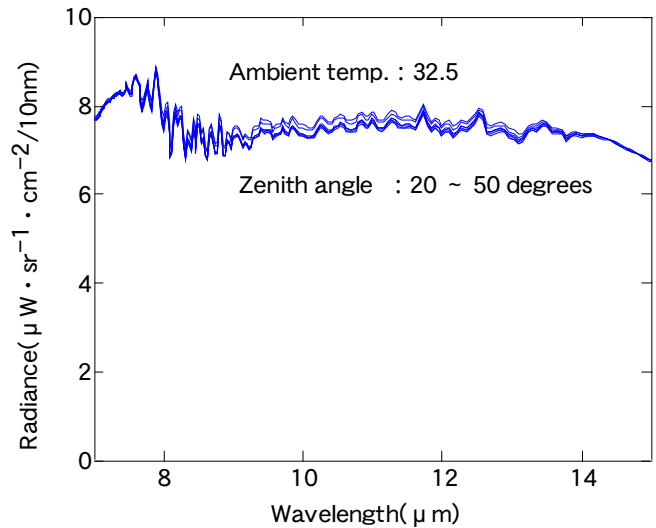


図8 各天頂角に対する曇天時の分光放射輝度測定例
(1998年9月1日昼間)

Fig.8 Spectral radiance measuring example in a cloudy sky for several zenith angle.

These spectrums were measured in September 1, 1998, at daytime.

動に伴う輝度変化を示したが、大気窓以外での輝度分布の変化は晴天時(図5)の場合と類似している。

従って、上記のような時間的変動の測定例によると、天空の赤外分光放射輝度は、周囲環境温度の変化に高い依存性を有するが、太陽光の存在する昼間部と存在しない夜間部において大差なく、分光放射輝度分布への太陽光の直接的影響は小さいと推察される。

4.3 天空放射の天頂角依存性

図7、図8は、上記4.2の場合と異なる日の夏季における晴天時と曇天時において測定した天空放射の天頂角依

存性の測定例を示す。これらの測定は、上記と同一のHgCdTe半導体検出器を用い、波数分解 4cm^{-1} で、天頂角20度から50度までを5度間隔でおこなった。

図7は、晴天時における天空放射の分光放射輝度分布の角度依存性を示す。これらの輝度分布は、大気窓の領域において、天頂角度と共に規則的に変化することを示唆している。ただし、図では見やすさのため20度と50度のみについて示した。一方、大気窓以外では、天頂角度とは無関係にほぼ一定値を示した。これらの測定に対し、一般的に天空の放射層の厚さは天頂角の増加とともに増大する。すなわち、晴天時での大気窓の波長領域における観測値は、高層のオゾン層のような密度の低い放射層を地上から観測することになるため天頂角依存性が顕著となる。また、大気窓以外の波長領域の観測値は、炭酸ガスや水蒸気のように強い放射でかつ低高度で密度が高い放射層を地上から観測することになるため天頂角度とは無関係にほぼ一定値になると考えられている^{5),6),7)}。

一方図8は、天空放射の曇天時における分光放射輝度分布の角度依存性を示す。同図から伺えるように、曇天時における観測では、大気窓において晴天時のような天頂角依存性はほとんど見られない。すなわち、雲は、遠方のオゾン層等の放射を遮ると共に高い放射率を有し、マクロ的には均等拡散面の放射体であると仮定すると、このような場合の雲の分光放射輝度は天頂角度とほぼ無関係に一定値になると推定される。

§ 5 むすび

大気窓(8~13 μm)を中心とした赤外域における雲などの天空からの放射の分光測定装置として、FT-IR分光器、天空放射導入用光学系、常温の黒体型放射光源、液体窒素温度(77K)の参照光源、極低温複合式ボロメータ検出器、及びHgCdTe半導体検出器等を用いた実験室の窓からの雲および大気観測用赤外放射観測装置を作製し、いろいろの条件での天空の赤外分光放射測定を実施した。これらの測定例をもとに若干の検討を行ったが、これらを要約すると以下のようである。

(1)8~13 μm の大気窓の波長域であっても、雲の赤外分光放射測定値にはやや複雑な起伏が残存していることから、輝度温度の算出は同波長域下での面積比較による方法が有用と推定された。

(2)偏光方向を規定した分光放射輝度の測定結果では、各偏光方向における雲の分光放射輝度に大差なく無視できる程度であると推察された。しかし、このような偏光の観測は雲の状態などを詳細に知る上で重要であり引き続き観測を行っていくことが必要と考えられる。

(3)天空放射の時間的変動の測定では、天空の赤外分光放射輝度は、周囲環境温度の変化に高い依存性を有するが、太陽光の存在する昼間部と存在しない夜間部において大差なく、分光放射輝度分布への太陽光の直接的影響は小さいと推察された。

(4)晴天時における天空放射の分光放射輝度分布は、大気窓の領域において、天頂角度と共に規則的に変化することを示唆した。

(5)曇天時における観測では、大気窓において晴天時のような天頂角依存性はほとんど見られなかった。マクロ的に雲は均等拡散面の放射体であると仮定され、その分光放射輝度は天頂角度とほぼ無関係に一定値になると推定された。

今後、このような天空の赤外放射観測では、画期的な手法の雲および大気放射観測技術の開発が期待され、大気窓領域における分光放射輝度と輝度温度のより正確な決定の問題等の検討や、いろいろの気象条件での観測を長期的に続行することが重要と考えられる。

謝 辞

本研究の推進にあたっては、電子技術総合研究所の山根茂大阪ライフエレクトロニクス研究センター長、遠藤忠基礎計測部長らのご指導とご援助に負うところが大きく心から厚く御礼を申し上げます。

参 考 文 献

- 1) 湊、西本、石堂：“常温環境における微弱赤外分光放射測定の検討”，電総研彙報(本号)。
- 2) 湊、西本、石堂：“極低温複合式ボロメータ検出器の開発”，平成9年度(第30回)照明学会全国大会講演論文集153。
- 3) 湊、西本、石堂：“低温度放射の赤外分光計測システムの開発と実測定”，平成9年度電気関係学会関西支部連合大会講演論文集S10-3。
- 4) 赤外線技術研究会編：“赤外線工学-基礎と応用”，オーム社(1991)。
- 5) R.Sloan, John H. Shaw and D. Williams: "Infrared Emission Spectrum of the Atmosphere", J. Opt. Soc. Am., 45, 6 (1955) 455.
- 6) E. E. Bell, L. Eisner, J. Young and R. A. Oetjen: "Spectral Radiance of Sky and Terrain at Wavelengths between 1 and 20 Microns. II. Sky Measurements", J. Opt. Soc. Am., 50, 12 (1960) 1313.

- 7) 高木 亨，松井松長：中間赤外域における背景放射の分光分布，分光研究，6,3 (1967) 112.

(1998.10.26 受付)

著 者 紹 介



西 本 昭 男

Akio NISHIMOTO

大阪ライフエレクトロニクス研究センター 赤外
応用計測ラボ

nishimoto@etl.go.jp

微弱赤外分光放射計測技術に関する研究，及び赤
外応用計測技術等の研究に従事。



石 堂 能 成

Yoshinari ISHIDO

大阪ライフエレクトロニクス研究センター 赤外
応用計測ラボ

ishido@etl.go.jp

微弱赤外分光放射計測技術に関する研究，及び赤
外応用計測技術等の研究に従事。



湊 秀 幸

Hideyuki MINATO

大阪ライフエレクトロニクス研究センター 赤外
応用計測ラボ

minato@etl.go.jp

微弱赤外分光放射計測技術に関する研究，及び赤
外応用計測技術等の研究に従事。