熱赤外波長域における水蒸気透過特性の簡易モデル

花 泉 弘*・藤 村 貞 夫*・椿 広 計*・豊 田 弘 道*

A Simplified Water Vapor Transmission Model in the Thermal Infrared

Hiroshi HANAIZUMI*, Sadao FUJIMURA*, Hiroe TSUBAKI* and Hiromichi TOYOTA*

1. はじめに

従来、吸収体の赤外線透過特性は、狭波長帯における分光吸収係数の平均値とそれを吸収体の量や温度、圧力に応じてその波長帯での透過率に結びつけるモデルとで与えられていた¹⁾。そのため、これらを用いて、使用する放射計の観測波長帯での透過特性を求めようとする、モデル自体が複雑な上に数値積分を必要とするため、見通しが悪く取扱いも不便であった。

この問題を解決するため、ここでは放射計の観測波長帯における吸収体の透過特性を指数関数の和で近似する簡易モデルを提案する。このモデルは、吸収体の分光透過特性を放射計の波長帯での透過特性に拡張するものであるが、加え合わせる項数が少ないため、簡便で取扱いが容易なことが特長である。

以下に、透過特性の測定法および簡易モデルとその評価について述べる。

2. 吸収体の透過特性

散乱がなく局所熱力学的平衡が成立する光路を通して測定される(擬似)黒体の分光放射輝度は放射伝達方程式で記述でき²⁾、さらにそれを簡単化することによって使用波長帯($\lambda_1 \sim \lambda_2$ と考える)における測定モデル

$$L_o = \tau L_i + (1 - \tau) L_p \quad (1)$$

を得る³⁾。ここで、 L_o は測定される放射輝度を表わ

し、 L_i は観測に用いる(擬似)黒体(温度 T_i)の放射輝度、 L_p は光路上吸収体の実効温度 T_p に対応する黒体の放射輝度を表わす。また、透過率 τ は

$$\tau = \frac{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \tau_\lambda (L_{i\lambda} - L_{p\lambda}) d\lambda}{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} (L_{i\lambda} - L_{p\lambda}) d\lambda} \quad (2)$$

で与えられる。(2)式で添字 λ は分光放射輝度を意味し、 τ_λ は分光透過率で、光路長を Z とするとき、

$$\tau_\lambda = \exp \left\{ - \int_0^Z k_\lambda \rho(l) dl \right\} \quad (3)$$

と表わせる。(3)式で $\rho(l)$ は光路に沿った吸収体の密度分布を表わす。分光吸収係数 k_λ は一般に温度と圧力によっても変化するので $\int_0^Z k_\lambda \rho(l) dl = \bar{k}_\lambda \int_0^Z \rho(l) dl = \bar{k}_\lambda Q$ とおくことにより、(2)式と(3)式から使用波長帯での透過特性

$$\tau(Q) = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} w_\lambda \exp(-\bar{k}_\lambda Q) d\lambda \quad (4)$$

を得る。ここで、 Q は光路上吸収体量¹⁾であり、 $\bar{k}_\lambda$ は実効的な分光吸収係数である。また、 $w_\lambda = (L_{i\lambda} - L_{p\lambda}) / \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} (L_{i\lambda} - L_{p\lambda}) d\lambda$ である。 $\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} w_\lambda d\lambda = 1$ なので、透過特性 $\tau(Q)$ は指数関数の重み付き平均の形で与えられることがわかる。

ここで提案するモデルは、(4)式の関係のできるだけ少ない項数 n で

$$\tau(Q) = \sum_{i=1}^n w_i \exp(-k_i Q) \quad \left(\sum_{i=1}^n w_i = 1 \right) \quad (5)$$

と近似するものである。一般に、 n が大きければ大きいほど近似の精度は向上するが、 τ の測定値に誤差が含まれ測定値の数が限られる場合には、ある n の値で最良の近似が得られる(注1)。

(注1) 測定点における残差は n が大きくなると小さくなるが、それらの間の値での近似の精度は逆に悪くなる。

† 第7回リモートセンシングシンポジウムで発表(昭56-11)

* 東京大学工学部 東京文京区本郷 7-3-1

* Faculty of Engineering, The University of Tokyo, Bunkyo-ku, Tokyo
(Received June 1, 1985)

Key Words: thermal infrared, transmittance, simplified model, absorption coefficient, precipitable water

3. 水蒸気透過特性の測定

温度分布および吸収体密度分布が一樣な（気温、湿度の安定な）室内光路の光路長を変えて水蒸気透過特性を測定した。また、測定した透過特性が正しいかどうか評価するために、これとは別に一定長の吸収セル内の相対湿度を変化させて透過特性を測定し、両者を比較した。

3.1 可変長光路による測定（手法1）

Fig. 1 に示す配置で、 $300 \times 300 \text{ mm}^2$ の氷楔状空洞を光路長を変えながら観測した。このとき、光路に沿って配置した5本の水銀棒温度計（気象庁検定済、放射シールド付）を用いて測定した温度の平均値を光路上水蒸気温度 T_p として L_p を算出し、(1)式を変形

Fig. 1 Measurement system for path transmittance

Table 1 Relative humidity by salt solutions (at 20°C)

$\text{K}_2\text{CO}_3 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	42.6%
NaCl	75.4%
KCl	84.9%
KNO_3	93.8%
.....	
Water	100%

Fig. 2 Measurement system for cell transmittance

Fig. 3 Transmittance of water vapor

した

$$\tau = \frac{L_o - L_p}{L_i - L_p} \quad (6)$$

によって透過率を求めた。なお、反射鏡の直前で透過率が1となるように予め放射計を校正しておき、測定は光路に与える影響を最小限にするために氷楔状空洞を近づけながら行った。また、測定した透過率を水蒸気量と対応づけるため、(株)エース研究所製鋭感湿度計(校正済)を用いて光路の相対湿度を測定した。

3.2 吸収セルを用いる測定（手法2）

内部に調湿液を入れ両端を半透明膜で密閉した測定セルを安定な室温中に長時間放置した後に、これを通して放射輝度 L_i の擬似黒体を観測する場合にも、得られる観測値は(1)式で表せる。このときの透過率を τ_m とすると、 τ_m は擬似黒体から放射計までの透過率を表すもので、セル外光路水蒸気やセル両端の半透明膜などの不要な透過率も含まれる。これらの影響を消去するため、内部をシリカゲルで乾燥させた基準セル（内部の透過率を1と見なす）についての透過率 τ_e で正規化して測定セル内光路に対応する透過率 τ_p とした。

測定には内面を黒化し両端を斜めた切断したアルミ板製の筒 ($930 \times 240 \times 240 \text{ mm}^3$) の中に、**Table 1** に示す調湿液⁴⁾ もしくはシリカゲルに入れて、ポリ塩化ビニリデン膜で密閉したセルを用い、**Fig. 2** に示すように、二つのセルを交互に透過して氷楔状空洞と室温黒体板とを観測し、それぞれに対応して得られる観測値 L_{o1}, L_{o2} (測定セル)、 L_{o1}, L_{o2} (基準セル) を用いて透過率

$$\tau_p = \frac{L_{o1} - L_{o2}}{L_{o1} - L_{e2}} \quad (7)$$

を求めた。

3.3 測定結果

Fig. 3 に手法1による水蒸気透過特性の測定結果(“○”)と手法2による結果(“△”)とを示す。ここで、横軸は大気圧を1気圧として光路温度と相対湿度から求めた⁵⁾ 光路上の水蒸気量 (Precipitable water)⁶⁾ を表わしている。両手法による結果はよく一致しており、得られた水蒸気透過特性の正しいことがわかる。なお、手法2による透過率測定値のばらつきが大きいのは、セル内光路の透過率 ($\tau \approx 1 \sim 0.96$) に対して外部光路および半透明膜の透過率 ($\tau \approx 0.45$) が低く、測定 S/N が悪かったことによる。

4. 簡易モデルによる水蒸気透過特性の記述

ここでは、手法1による測定結果 (**Fig. 3** “○”) に

Table 2 Parameters of each models Weights w_j , absorption coefficients k_j [mm^{-1}] and cumulative contribution factors CCF

n	w_j	k_j	CCF
1	1.00	1.60	0.967
2	0.979 0.021	1.03 67.37	0.9993
3	0.979 8.6×10^{-10} 0.021	1.03 37.54 67.37	0.9993

$Q=P_w$ として(5)式に示すモデルのあてはめを行う。

Table 2 に、非線形最小2乗法を用いて $n=1\sim 3$ のモデルをあてはめた場合の係数を示す。また、 $n=3$ としたときにモデルから得られる透過特性を Fig. 2 中の実線で示す。

Table 2 を見ると、 $n=3$ の場合には事実上 $w_2=0$ となっており、透過特性が $n=2$ とするモデルで十分記述できること、さらに累積寄与率が0.9993であったことから非常に精度の高い近似となっていることがわかる。測定に用いた $6\sim 9\mu\text{m}$ 帯は、水蒸気の吸収帯を含みながら大気窓にもかかっているため分光吸収係数は複雑に変化しているが、**Table 2** の結果はそれが二つの吸収係数で代表できることを示している。

5. おわりに

放射計の観測波長帯における光路上吸収体の透過特

性を指数関数の和で近似する簡易モデルを提案した。このモデルは、加え合わせる指数関数の項数の少ないことが特長であるが、これによって観測波長帯での透過特性が簡易な関数で表わせるため、透過率から吸収体量を求めたり大気効果を解析するのに便利である。

実際に $6\sim 9\mu\text{m}$ 帯で測定した水蒸気の透過特性にここでのモデルをあてはめたところ、この波長帯では分光透過特性が複雑であるにもかかわらず、二つの指数関数の和で透過特性が精度よく近似できた。何故二つの指数関数の和でよいのかの理論的解析や一般の波長帯への拡張性についての検討は今後の課題である。

参 考 文 献

- 1) W.L. Wolfe and G.J. Zissis (Ed.): The Infrared Handbook, ERIM (1978)
- 2) S. Chandrasekhar: Radiative Transfer, Dover (1960)
- 3) C. Prabhakara, G. Dalu and V.G. Kunde: Estimation of Sea-Surface Temperature from Remote Sensing in the 11 to 13 μm Window Region, J. Geophys. Res. **79**-33, 5039/5044 (1974)
- 4) 高分子学会編: 材料と水分ハンドブック, 共立出版 (1968)
- 5) 工業計測技術体系編集委員会編: 湿度, 水分測定, 1/7, 日刊工業新聞社 (1968)
- 6) たとえば, R.D. Hudson, Jr.: Infrared System Engineering, 114/117, Wiley (1969)