総説と解説

大気光学モデル “FASCODE”——透過率計算と放射輝度

竹 内 延 夫

国立公害研究所 茨城県筑波郡谷田部町小野川 16-2 (〒305)

(1987年7月11日受理)

Atmospheric Transmittance/Radiance Model “FASCODE”
—Calculation of Transmittance and Radiance

Nobuo TAKEUCHI*

* National Institute for Environmental Studies, 16-2 Onogawa, Yatabe, Tsukuba, Ibaraki 305, Japan

(Received July 11, 1987)

1. 背景と概要

レーザーの発達とともに高感度で精密な分光計測の発展が著しい。また近年実用化されている人工衛星からの地球規模の観測では、衛星センサーは遠隔計測手法を用いており、そのためには大気的光学的性質の知見は不可欠となっている。大気的光学的性質の代表的なものは吸収、散乱、放射過程であり、それらに基づいて一定行路での透過や放射輝度が計算される。これらの正確な計算には個々の原子・分子の吸収や散乱のデータに基づいた膨大な計算を必要とするが、コンピュータの発達によって、今まで現実的ではなかった計算が比較的容易にできるようになった。任意の条件下における大気の透過率や放射輝度を計算するために AFGL (US Air Force Geophysics Lab.) で開発された大気光学モデル (Atmospheric Transmittance/Radiance Model) は、一般に公開されたプログラムとしては現在最も進んだプログラムである。AFGLのモデルには、大気を構成する気体の一本々々の吸収線データからスペクトルの半値半幅以下の高い精度で計算する FASCODE プログラム¹⁾²⁾³⁾と、その計算結果をデータベースとして分解能を粗くとしたバンドモデルを作り、計算時間を短くした LOWTRAN⁴⁾⁵⁾ プログラムがある。特に LOWTRAN は透過率や放射輝度の簡便な計算方法として気軽に使用され

ている。ここでは LOWTRAN を FASCODE との関連から簡単に説明し、その後で FASCODE の計算のアルゴリズム、使用方法、計算例などを分光計算に使用する観点から述べる。

1.1 FASCODE¹⁾²⁾³⁾ と LOWTRAN⁴⁾⁵⁾

AFGL で開発された大気光学モデルには高級言語 FORTRAN で最かれた FASCODE と LOWTRAN の2種類がある。FASCODE プログラムは HITRAN (HIGH RESOLUTION TRANSMITTANCE) 計画の一つのプログラム (現在 FASCODE だけが実用的なプログラムとして供されている) として製作されたもので、一本々々の吸収線データを基に、任意の大気条件下でスペクトルの半値半幅以下 (最小半値半幅の 1/4 まで) の高分解能で計算するように設計されており、 $0 \sim 40,000 \text{ cm}^{-1}$ ($0.25 \sim \infty \mu\text{m}$) の波長区間をカバーする。(ただし吸収線のパラメータが用意されているのは $0 \sim 17,900 \text{ cm}^{-1}$ ($0.56 \sim \infty \mu\text{m}$) の波長区間であり、それより短波長は LOWTRAN と同じく内蔵された吸収帯データを使用している。) 一方、LOWTRAN (LOW RESOLUTION TRANSMITTANCE) プログラムは FASCODE の計算結果を基に 5 cm^{-1} 刻みで収録された吸収係数のデータに、ブロードな吸収帯のデータを加えて、 $350 \sim 40,000 \text{ cm}^{-1}$ ($0.25 \sim 28.5 \mu\text{m}$) の波長区間を 5 cm^{-1} 刻みで計算し、平均化操作によって、 20 cm^{-1} の分解能で、

大気の透過率や放射輝度を計算するプログラムである。サブルーチンとして大気中の行路の計算や大気・エアロゾルのモデルの選択など多くの組込みデータを用意している。これらのサブルーチンは LOWTRAN に導入された後 FASCODE に移植されている。FASCODE は後の節で詳しく紹介するので、本節では LOWTRAN について FASCODE と関連する部分を紹介する。

LOWTRAN は広範囲のスペクトル領域に亘って分解能を気にせず、大気の透過率を予測したいという古くからの願望を実現したもので、1961年に Altshuler⁶⁾ によって提案された手法に従っている。McClatchey et al.⁷⁾ はこの手法に従って大気の吸収線を一本々々計算し、各波長での吸収係数を求め、一定の波長間隔での吸収強度を Table とした。1972年にこれを用いて計算する手法をコンピューター化して LOWTRAN の第1版が作られた。計算のプロセスは以下の $1^\circ \sim 3^\circ$ の通りである：
 1° ：大気を“mixed gas”（混合の割合が一定： CO_2 , CO , O_2 , CH_4 , N_2O ）と、水蒸気とオゾンに分け、それぞれの気体の 5 cm^{-1} 刻み（オゾンの可視、紫外領域は 200 cm^{-1} , 500 cm^{-1} 刻み）の波長での単位濃度当りの吸収係数を Table として用意する。

計算する大気は地上 120 km 迄を考えており、組込みデータでは地上 25 km 迄は 1 km 毎に、50 km 迄は 5 km 毎に、その後は 70 km と 100 km で吸収係数が与えられている。

2° ：選択した大気環境モデル（組込みモデルとして、熱帯、中緯度夏・冬、亜寒帯夏・冬、米国標準の6つのモデルが選択できるようになっている）と指定された光路に従って高度別の各層に分けて柱状分子密度（column density）を計算する。

3° ：吸収係数の表と柱状分子密度から透過率を計算する。

LOWTRAN はいろいろの機能をサブルーチンとして付加して、次第に version up された。

【LOWTRAN 2】大気中の光路の計算に地球の曲率の効果と大気屈折率による屈曲の効果を追加。

【LOWTRAN 3, 3A, 3B】放射輝度の計算、および HNO_3 の吸収の寄与を追加。

【LOWTRAN 4】高度依存性、湿度依存性を持ったエアロゾルモデルを導入し、さらに霧（fog）モデルを付加。

【LOWTRAN 5】⁴⁾ 以上のモデルを新しいものに更新。

【LOWTRAN 6】⁵⁾ 地球曲率・屈折率の効果の計算法と水蒸気の連続帯のバンドモデルを更新し、太陽や月

からの散乱光の放射の寄与を追加。またより豊富な気象条件に対応した新しいモデル（風速に依存した海洋エアロゾルモデル、鉛直構造エアロゾルモデル、絹雲モデル、雨（RAIN）モデル）を追加。

現在、多重散乱の寄与の追加が検討されている⁸⁾。

LOWTRAN プログラムは国内でも衛星画像データの大気効果補正等に積極的に用いられている⁹⁾。

1.2 FASCODE¹⁾²⁾³⁾ の特徴

FASCODE (Fast Atmospheric Signature Code) は一本々々の吸収線データに基づいて、実験室系だけでなく、地上 120 km 迄の任意の光路の透過率と放射輝度を計算するプログラムである。FASCODE の特徴を以下 $1^\circ \sim 6^\circ$ の項目に示す：

- 1° 。最も圧力の低いとき（最高高度）のスペクトル幅 α_v （フォイクトプロファイルを仮定）の4分の1 ($\alpha_v/4$) のスペクトル精度を有する。
- 2° 。任意の環境条件（圧力、温度）における計算が可能である。
- 3° 。地上 120 km 迄の大気空間に対して地球の曲率による高度の変化や大気の屈折率による光線の曲がりの補正を取り入れて光路を正確に計算することが可能である。
- 4° 。空間における吸収と局所平衡定理に基づいた放射輝度の算出が可能である。
- 5° 。大気光学モデル（大気圧力や微量気体濃度の分布）や、エアロゾルモデル等を選択する option が豊富である。
- 6° 。フォイクトプロファイルを解析関数で近似して計算速度を速めている。

応用面からみた FASCODE の特徴は分子・原子の大気中のスペクトルを計算機によって合成できることにある。特に高層の大気中の透過率や輝度の測定は実験室で測定するのは難しいので FASCODE を使用することが特に有効である。FASCODE の応用としては

(1). 計算機によるスペクトルの合成

任意の大気条件に於けるスペクトルの合成が FASCODE の応用の基本となる。したがって全ての応用がこの項目に相当するわけであるが、一番典型的な例を挙げると、Niple は $4\text{ }\mu\text{m}$ 領域におけるスペクトルを計算し、大気中の測定データから H_2O や NO_2 の濃度を導出する方法を提案している¹⁰⁾。

(2). 微量気体や吸収の弱い気体の検出

微量気体や吸収断面積の小さい気体の濃度を吸収法で導出するには各気体の吸収スペクトルのデータが心要となる。特に高分解能の測定では単に吸収線の中心波長や断面積のデータだけでなく、各種気体が混在した状態で

の吸収プロファイルが必要となるので FASCODE が使用される。Cassidy ら¹¹⁾は中赤外半導体レーザーを光源として 5 m の多重光路セルを用いた実験で、CO₂、CH₄、N₂O の濃度を OLP (Optical Line Parameter Compilation: 1982 年版: 後出) のデータを基に決めている。OLP のデータが計算の基本となるのでその精度が高いことが必要であるが、Devi ら¹²⁾は 7~8 μm 帯の中赤外半導体レーザーを用いて、CH₄ の空気分子との衝突によるスペクトル線幅を測定して、FASCODE によって計算した結果と比較し、良い一致を得ている。紫外領域では OLP がまだ存在しないので、Trakhovsky はバンドモデルに基づいた LOWTRAN を利用してオゾン の長行路濃度測定を行っている¹³⁾。

(3). 高層大気の計測

前項と関連して、成層圏・中間圏と言った高層では実験室内でその条件の再現は難しいので、FASCODE によるスペクトルの合成が特に有効である。Rinsland¹⁴⁾らはバルーン搭載の太陽光を光源とする縁辺法（地球に接する方向の測定）で 2,400 cm^{-1} 領域の吸収スペクトルの測定と FASCODE によって計算したスペクトルとを比較して CO₂ と N₂ の吸収を確認している。Rinsland ら¹⁵⁾は同じくバルーン搭載の機器から太陽光を光源とした吸収スペクトルと FASCODE に基づいて背景光を計算してそれに酸素分子の 1,400~1,700 cm^{-1} の連続吸収帯のデータを加えて作成されたスペクトルとを比較して、成層圏酸素分子濃度の測定を行っている。Coffey ら¹⁶⁾は同じ様にして航空機から成層圏の HCN のコラム密度を得ている。

Drummond ら¹⁷⁾は Nimbus 7 衛星の SAM センサーの測定結果を OLP で計算したスペクトルの上に H₂O の共鳴蛍光を付け加えたスペクトルと比較して高度 75~85 km 領域の H₂O の混合比は約 1 ppm であるという結果を得ている。

(4). レーザー光の大気中での透過率の計算

大気中のレーザー光の透過率の情報は遠隔計測や飛翔体のトラッキングにおいて不可欠である。FASCODE では特に単色光の透過率の計算のためのメニューが用意され、任意の条件下でレーザー光の透過率が容易に計算できるようになっている。実際に 3~5 μm の大気の窓領域における DF レーザー光の CH₄ 気体による微少吸収の実測と FASCODE による計算との比較¹⁸⁾や酸素原子レーザー波長 (1.315 μm) における H₂O による吸収の実測と計算の比較¹⁹⁾がなされている。

(5). ライダーによる大気の計測

ライダー（レーザーライダー）によって大気中の微量

気体の濃度の空間分布を測定するには、他の気体が共存する大気中の状態での微量気体のレーザー波長（2 波長）における吸収係数が必要である。

この計算に FASCODE が有効な役割を果たす。例えば、Menyuk ら²⁰⁾は波長同調可能な固体レーザー（フォノンレーザー）である Co:MgF₂ レーザー (1.5~2.3 μm) を光源として、H₂O、HCl、CH₄ 濃度の空間分布を求めるときに FASCODE を利用している。また Grant ら²¹⁾は CO₂ レーザーの 5 組のレーザー線を用いて H₂O 気体濃度を求めているが、他のデータとも比較して AFGL の OLP データを基に計算すると約 30% の誤差が生じることがあることを報告している。

(6). 反転法による温度、圧力、気体濃度の導出

5.1 節、層別計算のところで触れるように、多チャンネル（波長もしくは角度）で測定したデータを基に反転法を利用して温度、気温、気体濃度の空間分布を求めることが可能である。例えば Hoell ら²²⁾は地上から ¹³C¹⁶O₂ レーザーを局部発振光とするヘテロダイン分光計を用いて大気中のアンモニアの空間分布の測定を行っている。この際に反転法に使用する荷重関数の導出に FASCODE を使用している。

(7). バンドモデルパラメーターの決定

大気の光学モデルではスペクトルの変化は緩やかで波長の刻みは粗くて良いことが多い。OLP を基にバンドモデルのパラメーターの計算のアルゴリズムが提案され、微量気体について計算された²³⁾。またこの結果は分解能 5 cm^{-1} の LOWTRAN5 の作成のときに使用されている²⁴⁾。

(8). 大気の光学モデル

さらに Wehrbein ら²⁵⁾は CO₂、O₃ の吸収、放射を取り入れて、中層大気（成層圏、中間圏）の加熱、冷却の計算に OLP や FASCODE を使用している。また、地球誕生以来の地表温度の変化の経緯を CO₂ や CH₄ の放射の性質を取り入れた議論に AFGL のプログラムが使用されている²⁶⁾。

(9). 分子分光の研究

分子分光データを解析するときには不必要な干渉気体のスペクトルが邪魔になることが往々にして生じる。この様なときに FASCODE を用いると非常に便利である²⁷⁾。

(10). 放射輝度の計算

FASCODE は放射輝度（分光放射強度）の計算も可能である。周波数（波長）の関数として大気からの放射輝度を測定し、反転法により温度の空間分布を求めるときの荷重関数を求めることができる。

本解説では分光計測的観点から任意の条件下における

吸収と透過の計算への利用に焦点を置いて FASCODE の構造, アルゴリズム, 表示法を含めた使用法を紹介する. 使用法の紹介に当たっては, 使用の際に便利のように, 豊富な option の中から希望するケースを選択する方法, あるいは任意のケースを設定する方法を紹介する.

大気放射輝度計算については, 簡単に触れるにとどめ, その詳しい紹介は別の機会に譲る.

また, 本プログラムを周波数変調法などの計算に拡張する場合について簡単に触れる.

2. FASCODE プログラム

FASCODE は気体の吸収線を一本々計算する高分解能な大気光学モデルの内での唯一の実用的なプログラムである. FASCODE では計算時間を短縮するために分子の運動速度で決まるドップラー拡がり (Gauss 型) と分子の衝突によって決まる衝突拡がり (Lorentz 型) との convolution で与えられる Voigt 拡がりを Gauss 関数と Lorentz 関数の 2 種類 (FASCODE2 では Voigt Error Function を加えた 3 種) の解析関数の和で近似している^{28,29,30)}. 1985 年 10 月に version up された FASCODE2³¹⁾ では計算方法に工夫を加えて, 常時 Voigt profile の計算方式を使用しても Lorentz 型や Doppler 型の場合と変わらないまでに速度を向上させている. さらに LOWTRAN 5 に付属された多くの組込み機能を受け継いでおり, OLP (Optical Line Parameter Compilation: 1982 年版) の吸収線データは 17,900 cm⁻¹ 迄であるが, 連続帯については N₂ (2,020–2,800 cm⁻¹) と O₂ (1,395–1,760 cm⁻¹), H₂O (0–20,000 cm⁻¹) のバンド, O₃ (Chappuis 13,000–23,600 cm⁻¹; Hartley-Huggins 27,370–40,800 cm⁻¹) の拡散帯を取り入れている. 従って, ∞ の波長から紫外領域の 250 nm まで計算することができる. 以下 FASCODE プログラムの紹介に当たっては FASCODE2 を中心に考える.

2.1 アルゴリズムと計算速度向上の原理

FASCODE では均一な光路の波数における光学的厚さ $k(\nu)$ を計算するのに Van Vleck and Huber³¹⁾ によって与えられる各遷移からの寄与の和として次のように示す:

$$k(\nu) = \nu \tanh(\beta\nu/2) \sum_i W(m_i) \tilde{S}_i(T) [f(\nu) + f(-\nu)] \quad (1)$$

ここで

$$\beta = hc/kT$$

$W(m_i)$: i 番目の遷移 (波数 ν_i) に対応する分子 m_i のコラム密度 (分子/cm²)

$\tilde{S}_i(T)$: 温度 T (°K) における遷移強度 (cm²/分子)

$f(\nu)$: 線形 (line profile) 関数 (1/cm⁻¹) である. $\tilde{S}_i(T)$ は

$$\tilde{S}_i(T) = (8\pi^3 \times 10^{-36} / 3hc) \cdot \mu_i^2 (1 + e^{-\beta\nu_i}) e^{-\beta E_i} / Q_v(T) Q_R(T) \quad (2)$$

で与えられる. μ_i^2 は遷移強度 (debye²), E_i は遷移の下位準位エネルギー (cm⁻¹) である. $Q_v(T)$ と $Q_R(T)$ は対応する分子種の振動および回転の分配関数である. この遷移強度 $\tilde{S}_i(T)$ の定義は AFGL の吸収線データ^{32,33,34)} (OLP: AFGL optical line parameter compilation) で用いられている $S_i(T)$ ((cm²/分子)·cm⁻¹) とは

$$\tilde{S}_i(T) = S_i(T) / (\nu_i \tanh(\beta\nu_i/2)) \quad (3)$$

の関係がある. OLP では $T=296^\circ\text{K}$, 1 気圧のデータが収録されている.

吸収線の形 $f(\nu)$ は衝突幅で決まるときには

$$f_L(\nu) = \frac{1}{\pi} \cdot \frac{\alpha_i}{(\nu - \nu_i)^2 + \alpha_i^2} \chi(|\nu - \nu_i|) \quad (4)$$

で与えられる. $\chi(|\nu - \nu_i|)$ は Lorentz 関数からのずれを示し, H₂O では連続帯として取り入れられており, CO₂¹⁷⁾ では直接与えられている. 衝突幅 (半幅) は

$$\alpha_i(T) = \alpha(T_0) (\rho/\rho_0) (T/T_0)^x \quad (5)$$

で与えられる. ρ は密度であり, x は分子に固有の定数である.

以上のように line-by-line の計算は (1) 式を逐次行うことによって各波長での光学的厚さが計算される.

FASCODE では計算速度を高めるために種々の工夫を行っている. 1) Voigt profile は積分形をしており, 解析関数でないのでその計算には時間が掛かる. FASCODE では Voigt profile を解析関数で近似し, 計算時間を短縮している. 2) 補間法を十分に活用し, 吸収線 profile の裾のように変化がゆっくりしているところでは, 計算点を粗くとして, 補間によって中間の点の値を求めて計算時間の効率化を図っている.

Voigt-profile は convolution の形で

$$f_v(\nu) = \frac{1}{\alpha_D} \cdot \frac{p}{\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{\exp(-y^2)}{p^2 + (d-y)^2} dy \quad (6)$$

$$d = (\nu - \nu_0) \sqrt{\ln 2} / \alpha_D; \quad p = \alpha_L \sqrt{\ln 2} / \alpha_D$$

と表せる. ここで α_D は Doppler limit の幅, α_L は (5) 式で与えられる衝突幅で温度・圧力の関数である.

(6) 式では α_L と α_D の 2 つの半値半幅を用いているが, FASCODE では Voigt profile の半値半幅 α_v , 1 つだけを用いる. α_v は

$$\alpha_v = \alpha_L(1+\varepsilon)/2 + \{\alpha_L^2(1-\varepsilon)^2/4 + \alpha_D^2\}^{1/2} \quad (7)$$

$$\varepsilon = 0.0990 \ln 2$$

と近似される¹²⁾. このときに Voigt parameter ζ

$$\zeta = \alpha_L/(\alpha_L + \alpha_D) \quad (8)$$

を用いて α_v を議論するのが便利である. $0 < \zeta < 0.5$ のとき α_v は α_D に近く, $0.5 < \zeta < 1.0$ のとき α_v は α_L に近い. 初版の FASCODE ではこの α_v を半値幅として Voigt profile ((6) 式) は Doppler profile と Lorentz profile との和で

$$f_v(\zeta, \alpha_v, \nu) = (1 - C(\zeta))f_D(\alpha_v, \nu) + C(\zeta)f_L(\alpha_v, \nu) \quad (9)$$

と表わした. この近似を取り入れたサブルーチンで HIRAC 1 と呼ぶ. f_D は Doppler profile で

$$f_D(\alpha_v, \nu) = \sqrt{\ln 2/\pi} \cdot \alpha_v \cdot \exp\{-\ln 2 \cdot (\nu - \nu_0)^2/\alpha_v^2\} \quad (10)$$

である. さらに f_D は非常に早く収束するが, f_L は裾を引くので, f_L を収束の速さによって f_1, f_2, f_3, f_4, f_5 の 5 つの関数 (初版の FASCODE では f_1, f_2, f_3 まで) に分け, 計算の波数領域の刻みを変えて計算の効率化を図っている. すなわち, $z = (\nu - \nu_0)/\alpha_v$ (関数 f_L, f_D は原点に関し対称なので $z > 0$ のみを考える) とするとき, f_1

は $0 \leq z \leq 4$ 以外では 0 となる関数で $\Delta z = 1/4$ (すなわち $\alpha_v/4$) の刻みで計算される. (f_D は $0 \leq z \leq 4$ の外では 10^{-7} 以下となるので無視される.) f_2 は $0 \leq z < 16$ 以外では 0 となる関数で $\Delta z = 1$ の刻みで計算される. 同様に f_3 は $0 \leq z < 64$ の区間を $\Delta z = 4$ の刻みで, f_4 は $64 \leq z \leq 256$ の区間を $\Delta z = 16$ の刻みで計算される. f_5 は $Z = 256$ における f_L の値で残差を補正する. f_1, f_2, f_3 で全体の 97% をカバーする. (したがって, 計算時間を短縮するときは f_4 を省略することができる.) 関数 f_D, f_1, f_2, f_3 の振舞いを Fig. 1 に示す.

関数 $f_D, f_1, f_2, f_3, f_4, f_5$ から f_v を合成するには各関数 f_i の計算の刻みが異なるので, f_4 を f_3 に加え, その合計の f_3 を f_2 に, そのまた合計の f_2 を f_1 に加える. その際に次第に細かい刻みとなるので, 細かい刻みに揃えるために補間法を用いる. 初版の FASCODE では (9) 式の係数 $C(\zeta)$ は Voigt parameter ζ の関数で各々の値 (0.01 刻み) 毎に profile 上の点でずれがもっとも小さくなるように最小自乗法で求め, 予め表として与えた. FASCOD1B 以下 (したがって FASCOD2 も) ではさらに精度を上げるために, f_1, f_2, f_3, f_4 の係数を独立に取っている. これらの関数の形は Table 1 で示

Fig. 1 Function for the reconstruction of the Voigt line shape function. Doppler; f_D (peak: 0.46971864), Lorentz subfunctions; f_1 (peak: 0.28196308), f_2 (peak: 0.0337450), f_3 (peak: 0.00231693), f_4 (peak: 0.00014565, $-256 < z < 256$) and error function V_e (peak: 0.48280359, $-4 < z < 4$) are not shown.

Fig. 2 Format of AFGL optical line parameter compilation (80 columus).

Table 2 Numbers of species and lines cited in AFGL OLP compilation.

Major Component (180,956 lines)			Minor Component (97,162 lines)					
1	H ₂ O	48,876	8	NO	7,375	19	OCS	737
2	CO ₂	56,510	9	SO ₂	18,169	20	H ₂ CO	2,701
3	O ₃	43,977	10	NO ₂	9,456	21	HOCl	7,723
4	N ₂ O	15,844	11	NH ₃	5,556	22	N ₂	117
5	CO	574	12	HNO ₃	12,777	23	HCN	772
6	CH ₄	13,005	13	OH	8,490	24	CH ₃ Cl	6,687
7	O ₂	2,164	14	HF	62	25	H ₂ O ₂	2,389
			15	HCl	200	26	C ₂ H ₂	306
			16	HBr	256	27	C ₂ H ₆	4,328
			17	HI	145	28	PH ₃	2,886
			18	ClO	6,020			

cm⁻¹ の微量成分気体21種の吸収線は97,162本が収録されている。(FASCODE プログラム自体は主成分気体、微量成分気体併せて64種類まで拡張できる構造になっている)。吸収線データは1本の吸収線が FORTRAN カード1枚のイメージで作成されており、80 column に Fig. 2 の format で記録されている。項目は遷移の中心波数 ν_0 (cm⁻¹)、遷移強度 S (cm⁻¹/(分子・cm⁻²))、半値半幅 α (cm⁻¹/気圧)、下位単位エネルギー E'' (cm⁻¹)、遷移の同定、出典を区別する記号、同位体の区別、分子の種類が採録されている。収録されている主成分気体の遷移は最も長い光路(地上120 kmの点から地表面に接して再び地上120 kmの点に達する光路)を取ったとき大気吸収が10%以上となる吸収線が選択されている。(微量成分気体ではこの基準は明確でない。) 遷移強度 S は(3)式に述べた定義に従っており、半値半幅 α と共に1気圧、296 K (23°C) の値である。OLP に収録された分子の番号と収録本数を Table 2 に示す。収録された遷移については文献(33), (34)を参照されたい。最近 OLP の1986年版が入手できるようになった³⁶⁾。詳しくは Applied Optics の10月1日号(1987年)を参照して頂くことにして、簡単に概要を紹介すると各遷移線の情報は100 character で書かれている(1982年版では80 character)。これには遷移確率(Debye 単位: 部分的に空白)、self-broadening のスペクトル線幅、空気分子との衝突によるスペクトル拡がりの温度依存性((5)式の x)、遷移周波数の圧力シフト、周波数、強度、半値幅別の誤差と出典のデータも加えられている。OLP の1986年版では主成分気体、微量気体両者のデータは1つのファイルで統合され、さらに約7万本のデータが追加され、全体で348,043本となっている。

また OLP に関連したデータとして France から出て

いる GEISHA³⁷⁾ があり、FASCODE と同じ format (80 character) で書かれている。

なお連続帯については衝突励起の N₂ (2,020–2,800 cm⁻¹) と O₂ (1,395–1,760 cm⁻¹) のバンドと H₂O (0–20,000 cm⁻¹) の自己および異種衝突拡がりによる裾の拡がり、O₃ (Chappuis 13,000–23,600 cm⁻¹; Hartley-Huggins 27,370–40,800 cm⁻¹) の拡散帯を取り入れている。

2.3 プログラムの構成

FASCODE2 は約23,000行の FORTRAN で書かれたプログラムで、151のサブルーチン(その他に計40の block data と文関数) から成る。計算機のディスク上に記憶するときには約1,100 kByte のメモリーを必要とする。FASCODE2 のプログラム tree は Fig. 3 のような構成をしている。固定波長の計算をするときには subroutine LASER が用いられるが、ある波長区間のスペクトルの計算を行うときには subroutine XLAYER を使用する。【XLAYER】指定されたパラメーターに従って、光路

Fig. 3 Program structure of FASCODE2. The sequence of the calculation is shown by the number in a circle.

を層状に分け、更に下位の subroutine で光路、光学的厚さを計算する。

【OPPATH】 さらに下位の subroutine FSCATM で選択された (あるいは user が与えた) 大気モデルの気圧、温度、空気分子成分比を用いて大気中の任意の2点間の行路を地上高度別の層に分類し、その層に含まれる柱状分子数密度を種類毎に計算する。エアロゾルを選択するとき、subroutine LOWTRN で選択したエアロゾルモデルを基に波数毎の散乱、吸収強度のファイルを作成する。

【OPDPATH】 OPPTH で求められた層別の分子数密度 (柱状分子密度) を用いて下層から optical depth を計算する。さらにこの subroutine の下位にある CONTNM で連続帯の効果が取り入れられ、NONLTE で非平衡状態の放射輝度の効果が計算される。

【XMERGE】 透過率が光学的厚さか、放射輝度の計算かによって必要な量に変換し、層別の量を加え合わせて、光路全体の量を計算する。

【ADARSL】 subroutine LOWTRN の中で製作したファイルを基にエアロゾルの吸収や散乱の寄与を各波長での光学的厚さに加えるプログラムである。

【LASER】 一個または複数の波長での透過率を計算するルーチンでレーザー光の透過率を計算するのに適している。

【SCANFN】 分光器のスリット関数で透過光の加重平均をとる。

【FLTRFN】 狭帯域の光学フィルターや分光器のスリットを通したときの透過率である。

【PLTFAS】 プロッターに作図するルーチンである。

3. 使用法

本節では実際に FASCOD2 を使用する手順を紹介する。これには Fig. 4 に示すように OLP データから入力ファイル FILE3 を作ってから、計算条件を SYSIN.DATA として指定して、全光路に亘る光学的厚さあるいは透過率、放射輝度を FILE 10~12 に作成し、それを PLTFAS によって図示するものである。以下、計算の手順に従って使用法を説明する。

3.1 入力ファイルの準備

OLP (Optical Line Parameter) に収録されている吸収線データのうち、透過率のプロファイルの計算に必要なデータは遷移の中心波長 λ_0 、遷移の強度 S 、半値半幅 α 、遷移の下位準位のエネルギー E'' と分子の種類である。FASCOD2 では遷移波数の低い方から高い方へ順次並べられたデータから指定した範囲内の選択された分子

Fig. 4 Process of calculation of the optical thickness and radiance by FASCOD2.

種の全ての吸収線を計算する。OLP は主成分気体 (Major component: Fig. 4 での OLP MJ.DATA) ばかりでなく、微量気体 (trace gas: OLP TR.DATA) や user が提供する吸収線データも加える必要がでてくる。FASCOD2 には BCDMRG が用意されており、主成分気体の OLP MJ.DATA や微量成分の OLP TR.DATA やその他 user が用意したデータファイルから FASCOD2 に直接入力できる FILE 3 を作成する。プログラム BCDMRG は1つもしくは2つのファイルから計算に取り入れる吸収線を波数順に並べる機能の他に、非局所平衡定理に基づいて放射輝度を計算するときに必要な遷移の上準位や下準位の振動準位の指標を書き込む機能も有する。

3.2 パラメーターの設定

透過率・放射輝度の計算に関与する分子は入力ファイル (IFILE 3) 製作の際に選定されるが、その他の環境条件 (温度、湿度、実験室内・大気環境の区別: 高度、大気条件、エアロゾル条件、雲・霧・雨など) や光路は SYSIN.DATA として FORTRAN のカードのイメージで入力するようになっている。入力項目を見るとどのような条件が設定できるかも分かるので、カードの順に従

って紹介する。

[CARD 1.1] 計算の識別用のメモ (80文字)。

[CARD 1.2] このカードはどのような計算を行うかを選択するスイッチの役割を果たしている。以下の項目を選択するようになっている。

IHIRAC: 計算方式 (LINE-BY-LINE, NLTE, 中心の寄与の除外など),

ICNTNM: 連続帯の選択,

IAERSL: エアロゾル (LOWTRAN モデル) の選択,

IEMIT: 光学的厚さのみか放射輝度も含むか,

ISCAN: 装置関数との convolution,

IFILTR: フィルター透過量の計算,

IPLT: プロッターへの表示,

ITEST: 1 を選択すると FASCODE に内蔵されたデータ (波数領域: $0\text{--}50\text{ cm}^{-1}$) を入力データ (FILE 3) として用いてプログラムが正しいかどうかチェックする。

IATM: 大気モデル,

IMRG: 層別計算の加え方, IMRG の値の指定によって FILE 10 に各層の光学的厚さ, 全積算量, 最後の層の光学的厚さのいずれかが記録される。

ILAS: レーザー波長の計算, などの選択

[CARD 1.3] 計算範囲 (cm^{-1} : 一回の計算範囲は最大 525 cm^{-1}), 刻み (cm^{-1}).

[CARD 1.4] 境界 (地表面) の温度と放射率.

[CARD 1.5] 大気モデルが選択されなかったとき ($\text{IATM}=0$), 大気層の数, 構成分子数, 平均温度・圧力, 光路, 層別分子の密度など大気構造を user が与える。

[CARD 2.1] 大気モデルが選択されたとき ($\text{IATM}=1$), 大気モデルの選択, 光路の種類 (ITYPE), 層の作成法, などを与える。

[CARD 2.2-2.4] ITYPE=1: 水平光路

2: H1 から H2 への斜め光路

3: H1 から宇宙への斜め光路,

に応じて, 両端高度, 距離, 角度, 地球へ接するかどうかを規定する。

[CARD 2.5-2.6] 組込みモデルを使用しないとき ($\text{MODEL}=0$), 大気層の境界の位置や分子密度を与える。

[CARD 3.1] IHAZE $\neq 0$ のとき, LOWTRAN5, LOWTRAN 6 に組込まれたものと同じエアロゾル, 雲, 霧, 雨のモデルや減衰係数の指定を行う。

[CARD 3.2-3.6] 巻雲の高度の指定や user 指定のエアロゾルデータを供給する。

[CARD 4.1-4.N] ILAS ≥ 2 のとき計算するレーザー波

長 (波数: cm^{-1}) を指定する。

[CARD 5.1] 装置関数と convolution を取る

(ISCAN=1) のとき, 半値幅, 関数形, convolution をとる対象 (吸収, 透過, 放射輝度) を指定する。

[CARD 6.1] ISCAN=2 のとき, 計算結果をさらに補間して細かい刻みでの結果を得る。

[CARD 7.1-7.N] IFILTR = 1 のとき, CARD 7.2-7.N で与えられるフィルター関数を用いてフィルター透過量を計算する。

[CARD 8.-8.3] IPLT=1 のときプロッターに出力するためのパラメーターを指定する。プロッターのコマンドは計算機によって若干異なるので修正する必要がある。

プロッターを使用して表示した例は 4 節の計算例を参照されたい。

またプログラムが正しく動くかチェックするために試験入力データ (Fig. 4 の SYSIN.DATA, FILE 5) とそのときの出力データ (計算途中でのプリンターへの出力と XY プロッターへの出力) が用意されており, プログラムが正しいかを確認できるようになっている。

この様に入力ファイル (Fig. 4 の FILE 3) を用意すると後は必要な計算条件は SYSIN.DATA から設定できるようになっている。計算された結果は FILE 10, 11, 12 に保存される。

3.3 拡張的使用法

FASCODE はプログラムをそのまま使用する以外に計算した光学的厚さをもとにさらに他の用途に使用することが可能である。その方法としては

1) subroutine XMERGE で FILE 10 (11, 12) を製作した後, FILE 10 のデータを読みだして別のプログラムで計算する。

2) FASCOD2 の中で, FILE 10 を製作した後, 別の subroutine を挿入して, 計算を行う。

拡張的な使用法の例としては FASCOD2 で CH_4 の $3.39\text{ }\mu\text{m}$ の吸収線を計算した後, 実際に近い条件で周波数変調法のスペクトルを計算し, 感度の計算を行った例³⁸⁾が相当する。

4. 計 算 例

大気中で透過率を計算する場合, 水蒸気 (湿度) の影響が問題になることが多い³⁹⁾。とくに水蒸気の吸収のある近赤外領域の $930\text{--}960\text{ nm}$ ($10,400\text{--}10,800\text{ cm}^{-1}$) と $1.35\text{--}1.43\text{ }\mu\text{m}$ ($7,000\text{--}7,450\text{ cm}^{-1}$) について東京における冬 (1 月) と夏 (7 月) の透過率の比較を Fig. 5 (930 nm 帯) と Fig. 6 ($1.3\text{ }\mu\text{m}$ 帯) に示す。

前節で述べたように, FASCODE では一回の計算で

AMOUNTS (MOL/CM²)

N ₂	2.608	10 ²³
H ₂ O	1.180	10 ²¹
CO ₂	8.994	10 ¹⁹
O ₃	5.291	10 ¹⁵
N ₂ O	7.407	10 ¹⁶
CO	2.645	10 ¹⁷
CH ₄	4.233	10 ¹⁷
O ₂	2.513	10 ²¹

(a)

AMOUNTS (MOL/CM²)

N ₂	2.365	10 ²³
H ₂ O	5.996	10 ²¹
CO ₂	8.327	10 ¹⁹
O ₃	4.899	10 ¹⁵
N ₂ O	6.858	10 ¹⁶
CO	2.449	10 ¹⁷
CH ₄	3.919	10 ¹⁷
O ₂	2.327	10 ²¹

(b)

Fig. 5 Transmission through the 10 m-path atmosphere in the (200)-(000) band region (930-960 μ m). (a) Typical transmission in winter (January) in Tokyo: temperature (T) 4.7°C, relative humidity (R.H.) 53%, pressure (p) 1014.8 mb. (b) Typical transmission in summer (July) in Tokyo: T=25.2°C, R.H.=77%, p=1009.7 mb.

AMOUNTS (MOL/CM**2)

N2 2.608 10²²H2O 1.180 10²⁰CO2 8.994 10¹⁸O3 5.291 10¹⁴N2O 7.407 10¹⁵CO 2.645 10¹⁶CH4 4.233 10¹⁶O2 2.513 10²⁰

(a)

AMOUNTS (MOL/CM**2)

N2 2.365 10²²H2O 5.996 10²⁰CO2 8.327 10¹⁸O3 4.899 10¹⁴N2O 6.858 10¹⁵CO 2.449 10¹⁶CH4 3.919 10¹⁶O2 2.327 10²⁰

(b)

Fig. 6 Transmission through the 1 m-path atmosphere in the (101)-(000) band region (1.35-1.43 μm). (a) Typical transmission in winter (January) in Tokyo: temperature (T) 4.7°C, relative humidity (R. H.) 53%, pressure (p) 1014.8 mb. (b) Typical transmission in summer (July) in Tokyo: T=25.2°C, R. H.=77%, p=1009.7 mb.

Fig. 7 Atmospheric transmission at the ground level for the midlatitude-summer atmospheric model. The wavelength region is $5\mu\text{m}\sim\infty$ ($0\sim2,000\text{ cm}^{-1}$). The path length is 1 m.

525 cm^{-1} が限度である。そこで波数では短い区間となる長波長領域を選び、 $\lambda=5\mu\text{m}\sim\infty$ ($0\sim2,000\text{ cm}^{-1}$) の区間を4つに分けて計算し、Fig. 7に示す。計算条件としては FASCODE に組み込まれている大気光学モデルの内、中緯度の夏モデル (midlatitude summer model: 地上での温度、湿度、圧力は 21°C , 75% (14 g/m^3), $1,013\text{ mb}$ である。また N_2 , CO_2 , O_3 , N_2O , CO , CH_4 ,

O_2 の濃度はそれぞれ 77.3%, 330 ppm, 0.03 ppm, 0.28 ppm, 0.075 ppm, 1.6 ppm, 20.95% である) を選択した。光路長は 1 m である。Fig. 7 では4枚を1つの図となるように貼合わせてある。

Figs. 5, 6, 7 には大気の主成分の地上における透過率の計算例を示した。微量気体成分含めた計算例として大気のモデルとして中緯度地方の夏モデルを取り、地上

AMOUNTS (MOL/CM $\times$ 2)

N_2	1.947×10^{23}
H_2O	6.488×10^{17}
CO_2	6.488×10^{19}
O_3	3.932×10^{17}
N_2O	3.146×10^{16}
CO	2.556×10^{15}
CH_4	2.399×10^{17}
O_2	1.789×10^{21}
NO	0.000×10^0
SO_2	0.000×10^0
NO_2	0.000×10^0
NH_3	0.000×10^0
HN_3	1.966×10^{17}

(a)

AMOUNTS (MOL/CM²)

N2	1.948	10 ²³
H2O	0.000	10 ⁰
CO2	0.000	10 ⁰
O3	0.000	10 ⁰
N2O	0.000	10 ⁰
CO	0.000	10 ⁰
CH4	3.932	10 ⁹
O2	1.789	10 ²¹
NO	0.000	10 ⁰
SO2	0.000	10 ⁰
NO2	0.000	10 ⁰
NH3	0.000	10 ⁰
HNO3	1.966	10 ¹⁷

(b)

AMOUNTS (MOL/CM²)

N2	1.947	10 ²³
H2O	6.488	10 ¹⁷
CO2	6.488	10 ¹⁹
O3	3.932	10 ¹⁷
N2O	3.146	10 ¹⁶
CO	2.556	10 ¹⁵
CH4	2.399	10 ¹⁷
O2	1.789	10 ²¹
NO	0.000	10 ⁰
SO2	0.000	10 ⁰
NO2	0.000	10 ⁰
NH3	0.000	10 ⁰
HNO3	1.966	10 ¹⁷

(c)

Fig. 8 Calculation of the trace gas in the atmosphere. Here a case where nitric acid is located at 20 km altitude with the concentration of 1 ppm (roughly 200 times thicker than the typical value). (a) nitric acid with air. The path is 1 km. The midlatitude summer model is used. (b) Pure HNO₃ in no absorption air. The other condition is the same as the case (a). (c) The profile of (a) is scanned by slit function with the half width of 0.1 cm⁻¹.

20 km に HNO_3 が 1 ppm 存在した場合の光路 1 km に対する $5.7\sim 6.0\ \mu\text{m}$ ($1,660\sim 1,760\ \text{cm}^{-1}$) の領域の透過率を Fig. 8(a) に示す. このときの HNO_3 と非吸収気体以外の気体が存在しない場合の透過率の計算を Fig. 8(b) に示した. また分解能が半値半幅 $0.1\ \text{cm}^{-1}$ である分光器のスリットを通して受光したときのスペクトル波形を Fig. 8(c) に示す.

このように条件を設定して容易に大気中の透過率や光学的厚さを計算でき, 局所平衡定理を仮定して放射輝度を求めることができる.

FASCOD2 では一回で計算できる波長範囲は 500cm^{-1} である. その計算時間は, 含まれる遷移の本数にも依るが, 1 気圧では HITAC M280 を用いた場合, CPU 時間で約20~40秒である.

5. 結 び

以上 FASCODE について分光計測への応用の観点から単一の層について, 主として吸収, 光学的厚さといった観点から述べた. FASCODEは成層圏に至る環境大気で使用することを主目的として製作されており, それらに関連した事情についてここで補足する.

5.1 層別計算

CARD 2-2~2-4 で設定された光路が異なる高度を持つとき一定の幅を持つ高度毎の大気の層に分けてその層に含まれる分子数 (column density) を計算する. 層の数は, 最大 67 層まで設定することが可能であるが, FASCODE の内部に組み込まれている分け方では LOWTRAN6 (1.1 節参照) と同じく地上から 120 km までを 33 層に分けている. スペクトル幅は粗いところから計算し次第に細分かする方が計算が容易であるので, 圧力 (気圧) は高い方から低い方へ計算する. そのため高度が高い点から地球へ一度接近して再び離れるときでもそれぞれの層にある分子数を予め積算し, 下層から計算する方法を採用している. 隣合う層の間のスペクトル幅の比は 2 倍を越えないように配慮されており, 圧力比によって, 分割の幅は 4:5, 3:4, 2:3, 1:2 と整数比になるように選ばれており, 計算する点 (波数値) の変更がなるべく少なくなるように配慮されている.

最近地球大気の観測に使用されるようになった分光センサー⁴⁰⁾にはサウンダーと limb scanner がある. サウンダーは地上方向の大気からの放射を複数の波長帯で測定し, 途中での吸収によってそれぞれの層からの放射に寄与する量 (これを weighting function という) が異なることを利用してその層にある分子密度または温度を求める測定器である. また limb scanner では衛星

から地球をかすめるようにして方向を変えながら太陽光の透過光を測定し, その違いから分子密度を求める. サウンダーでも limb scanner でも反転問題を解く方法によって分子密度を求める. この weighting function の計算や方向別の透過量の推定に FASCODE は大きな効果を発揮する.

5.2 放射輝度

ここで大気的光学的厚さから放射輝度を求める手順を簡単に紹介する.

放射に関する用語は色々異なった定義が用いられているが, ここでは単位時間に単位面積を通過する電磁波のエネルギー (放射束密度) を放射輝度と呼ぶ⁴¹⁾. FASCODEでは放射輝度の計算を上空から地上方向を眺める (E_{down} : 計算されるのは上向きの flux) ととき, 地上から上空を眺めるとき (E_{up} : 計算されるのは下向きの flux) との二つに分けている (Fig. 9). いずれの場合も大気の層を n 層に分けて (下から 1, 2, 3, $\dots$, n と数える), それぞれの層 i の中では吸収されたエネルギー ($1 - T_i$) が局所平衡定理によってその層の温度 θ で決まる黒体放射 ($p(\theta, \nu)$) によって再放出されるものと仮定する. E_{down} の計算では地表面 (温度 θ_0) の放射, E_{up} の計算では最上層 (温度 θ_n) の放射は大気の減衰を受けて観測地点へ達する. 途中の層を源とする放射はその後の光路での減衰を受ける⁴⁰⁾⁴¹⁾. FASCODE では光学的厚さの計算で下層 (圧力の高い方) から計算して行くので, 放射輝度も下層から上層へ計算を積み上げていく. このとき, i 層での放射輝度は

$$E^{\text{up}}(i) = E^{\text{up}}(i-1) + (1 - \Delta T_i) P(i) T(i-1)$$

Fig. 9 Scheme of calculation of radiance for up-looking cases. $T(i) = T(i-1) \cdot \Delta T_i$.

$$E^{\text{down}}(i) = \Delta T_i E^{\text{down}}(i-1) + (1 - \Delta T_i) P(i) \quad (12)$$

で与えられる。ここで E^{up} , E^{down} は上向きおよび下向きに観測するときの放射輝度である。 ΔT_i は i 層での透過率で、 $T_i = T_{i-1} \cdot \Delta T_i$ の関係がある。 $P(i)$ は i 層の温度で決まるプランクの放射の式で

$$P(i) = \frac{2hc^2\nu^3}{\exp(hc\nu/k\theta) - 1} \quad (13)$$

である。(12) 式の計算では $hc\nu/k\theta > 80$ によって2つの領域を分け、ほぼ $P(\nu)$ の平均値を黒体放射の計算に用いている。FASCODE の放射輝度計算では n 層 (組み込まれたモデルによって自動的に決めることも user がデータを与えることも可能である) に分けたそれぞれの層の光学的厚さと温度で与えられる下向き (E^{up})、または上向き (E^{down}) の放射輝度あるいは式(13)を用いて換算した観測地点での輝度温度を波長の関数として計算することができる。以上は局所的な熱平衡状態が成立しているときの計算であるが、層別の非平衡温度あるいは非平衡温度が分子種別に与えられているときには、非平衡状態の計算も可能である。またプログラムを多少いじることによって大気が加熱されるか、あるいは冷却されるかの地球の熱収支の計算にも応用することが可能である。

5.3 今後の問題点

第2版 (FASCOD2) となって非常に便利となった FASCODE プログラムであるが、さらに残っている課題には、1) OLP の高精度化、2) 超 Lorentzian (line profile) の記載、がまず挙げられる。これらは新しい '86 年版の OLP³⁶⁾ にはかなり改良されたデータが収録されているが、その特長を生かすためにはさらに FASCODE を改訂することが必要となろう。次に放射輝度導出に関してであるが、3) 多重散乱 (multiple scattering) の組み込み、4) 太陽放射 (solar radiation: LOWTRAN6 では既に取り込まれている) の組み込み、が望まれる。さらに最終的には取り組まなければならない問題に、5) 光路の揺らぎ (turbulence) がある。これは現在の FASCODE プログラムでは同じ層の中では気圧も温度も一定で分子密度に揺らぎがなく光はいつも同じ光路を通過することになっているが、実際には地表付近ではゆらぎのために光路が歪むことが起こり得る。この様な効果を取り入れることも最終的には必要となるであろう。

以上 FASCODE を分光計測に使用するときに必要な情報の紹介という観点から紹介した。FASCODE の本来の目的である大気の透過・放射輝度の予測という観点の紹介はまた別の機会に譲りたい。

最後に本解説で紹介した FASCODE プログラムは CDC (Control Data Corporation) 社の64ビット計算機用の言語で書かれており、IBM compatible の FORTRAN に修正するに当たっては国立公害研究所計算機室の古川満信氏、塚田良一氏、猪爪京子氏の多大な協力があったことを記し感謝する。またプログラムの修正・改良には大島徹也氏 (慶応大学理工学部) の協力があったことを記し、感謝する。

参考文献

- 1) H. J. P. Smith, D. J. Dube, M. E. Gardner, S. A. Clough, F. X. Kneizys and L. S. Rothman: FASCODE—Fast Atmospheric Signature Code (Spectral Transmittance and Radiance) AFGL-TR-78-0081 (1978).
- 2) S. A. Clough, F. X. Kneizys, L. S. Rothman and W. O. Gallery: Atmospheric Spectral Transmittance and Radiance: FASCOD1B, Proc. of SPIE, **277**, Atm. Transm. (1981).
- 3) S. A. Clough, F. X. Kneizys, E. P. Shettle and G. P. Anderson: Atmospheric Radiance and Transmittance: FASCOD2, Proc. 6th Conf. Atmos. Rad. (May 1986).
- 4) F. X. Kneizys, E. P. Shettle, W. O. Gallery, J. H. Chetwynd, Jr., L. W. Abreu, J. E. A. Selby, R. W. Fenn and R. A. McClatchey: Atmospheric Transmittance/Radiance: Computer Code LOWTRAN 5, AFGL-TR-80-0067. 233pp. (1980).
- 5) F. X. Kneizys, E. P. Shettle, W. O. Gallery, J. H. Chetwynd, Jr., L. W. Abreu, J. E. A. Selby, S. A. Clough and R. W. Fenn: Atmospheric Transmittance/Radiance: Computer Code LOWTRAN 6, AFGL-TR-83-0187. 200pp. (1983).
- 6) T. L. Altshuler: Infrared Transmission and Background Radiation by Clear Atmosphere, GE Report 61 SD 199, AD-401923.
- 7) R. A. McClatchey, R. W. Fenn, J. E. A. Selby, F. E. Volt and J. S. Garing: Optical Properties of the Atmosphere (third edition), AFCRL Report AFCRL-72-0497. (1972).
- 8) R. G. Isaacs, W.-C. Wang, W. D. Worsham and S. Goldenberg: Appl. Opt. **26**, 1272 (1987).
- 9) 川田剛之, 川端一弘, 日下 迢, 上野季夫: 日本リモートセンシング学会誌, **3**, 21 (1983).
- 10) E. Niple: Appl. Opt. **20**, 3481 (1980).
- 11) D. T. Cassidy and J. Reid: Appl. Opt. **21**, 2527 (1982).
- 12) V. M. Devi, C. P. Rinsland, M. A. H. Smith and D. C. Benner: Appl. Opt. **24**, 2788 (1985).
- 13) E. Trakhovsky: Appl. Opt. **24**, 3519 (1985).
- 14) C. P. Rinsland, M. A. H. Smith, J. M. Russel III, J. H. Park and C. B. Farmer: Appl. Opt. **20**, 4167 (1981).

- 15) C. P. Rinsland, M. A. H. Smith, R. K. Seals, Jr., A. Goldman, F. J. Murcray, D. G. Murcray, J. C. Larsen and P. L. Rarig: *J. Geo. Res.* **87**, 3119 (1982).
- 16) M. T. Coffey, W. G. Mankin and R. J. Cicerone: *Science* **214**, 333 (1981).
- 17) J. R. Drummond and C. T. Mutlow: *Nature* **294**, 431 (1981).
- 18) D. H. Leslie and G. L. Trusty: *Appl. Opt.* **20**, 1941 (1981).
- 19) T. A. Wiggins: *Appl. Opt.* **20**, 3481 (1981).
- 20) N. Menyuk and D. Killinger: *Appl. Opt.* **26**, 3061 (1987).
- 21) W. B. Grant, J. S. Margolis, A. M. Brothers and D. M. Tratt: *Appl. Opt.* **26**, 3033 (1987).
- 22) J. M. Hoell, C. N. Harvard and B. S. Williams: *Geo. Res. Letters* **7**, 313 (1980).
- 23) J. H. Pierluissi and K. Tomiyama: *Appl. Opt.* **19**, 2298 (1980).
- 24) D. C. Robertson, L. S. Bernstein, R. Haimes, J. Wunderlich and L. Vega: *Appl. Opt.* **20**, 3218 (1981).
- 25) W. M. Wehrbein and C. B. Leovy: *J. Atmos. Science* **39**, 1532 (1982).
- 26) J. T. Kiehl and R. E. Dickinson: *J. Geo. Res.* **92**, 2991 (1987).
- 27) K. L. Lehmann, G. J. Sherer and W. Klemperer: *J. Chem. Phys.* **77**, 2953 (1982).
- 28) S. A. Clough, F. X. Kneizys and J. H. Chetwind, Jr.: Algorithm for the Calculation of Absorption Coefficient—Pressure Broadened Molecular Transitions, AFGL-TR-77-0164, (1977).
- 29) E. E. Whiting: *J. Quant. Spectr. Rad. Trans.* **16**, 611 (1976).
- 30) J. F. Kielkopf: *J. Opt. Soc. Am.* **63**, 987 (1973).
- 31) J. H. Van Vleck and D. L. Huber: *Rev. Mod. Phys.* **49/4**, 939 (1977).
- 32) R. A. McClatchey, W. S. Benedict, S. A. Clough, D. E. Burch, R. F. Calfee, K. Fox, L. S. Rothman and J. S. Garing: AFGL Atmospheric Line Parameters Compilation, AFCRL-TR-73-0096. (1973).
- 33) L. S. Rothman, R. R. Ganache, A. Barbe, A. Goldman, J. R. Gillis, L. R. Brown, R. A. Toth, J. M. Flaud and C. Cany-Peyret: *Appl. Opt.* **22**, 2247 (1983).
- 34) L. S. Rothman, A. Goldman, J. R. Gillis, R. R. Ganache, H. M. Pickett, R. L. Pointer, M. Husson and A. Chedin: *Appl. Opt.* **22**, 1616 (1983).
- 35) W. L. Rigway, R. A. Moose and A. C. Cogley: Atmospheric Transmittance/Radiance Computer Code FASCOD2, AFGL-TR-82-0392.
- 36) L. S. Rothman: *Appl. Opt.* **Oct. 1** (1987) 号印刷中.
- 37) A. Chedin, N. Husson, N. A. Scott, I. Cohen-Hallaleh and A. Berroir: "GEISHA" data bank 1984 version. Laboratoire de Meteorologie Dynamique.
- 38) 竹内延夫, 大島徹也: *分光研究*, **36**, 265 (1987).
- 39) 竹内延夫: 半導体レーザーを光源とする大気湿度の測定について—AFGL 大気光学モデルによる検討. 第4回光波利用センシング研究会予稿, 49-52. (1986. 12. 3).
- 40) 竹内延夫: *日本リモートセンシング学会誌* **6**, 99 (1986).
- 41) 会田 勝: 大気と放射過程, 気象学のプロムナード **8**, 東京堂出版, 280pp, 1982.

【校正時の追加】

米国 Massachusetts 州 Cape Cod で開かれた Laser & Optical Remote sensing の topical meeting (1987 9/28-10/1) の後, Boston 郊外にある Air Force Geophysics Lab. (AFGL) に FASCODE を製作したグループを訪ねた. R. W. Fenn, S. A. Clough は退官し, 現在の担当は HITRAN data base が L. S. Rothman, LOWTRAN が F. X. Kneizys, FASCODE が G. P. Anderson, エアロゾルモデルが E. P. Shettle である. OLP の 1986年版では CO₂, H₂O のデータが大いに改良されている. データの比較・校正には AFGL におけるスキャン長 2 m の FTIR を用いているばかりでなく, GEISHA チーム (仏) を含めた世界各国のグループとも連絡をとってデータの改良に努めている. 日本の研究グループとも連絡を取りたいとのことであった. 多重散乱についてはすでに FASCODE, LOWTRAN に組み込むためにプログラムが完成している (R. G. Isaacs et al: Multiple scattering treatment for use in the LOWTRAN and FASCODE models, AFGL-TR-86-0073). これらを盛り込み, 新項目を含んだ86年版 OLP のデータを有効に使用できる FASCOD3 が間もなく完成することであった. 大気の揺らぎ (turbulence) についてはすでに別のプログラムが完成しているが FASCODE, LOWTRAN と組み合わせる予定は無いとのことであった.