

大気分光学の気象学及びリモートセンシングへの応用*

—1991年度日本気象学会賞受賞記念講演—

青 木 忠 生**

1. はじめに

1957年に人類初の人工衛星スプートニク号がソ連によって成功すると、米国はこれを追いかけ追い越すべく1958年 NASA の設立、1961年にはケネディ大統領がアポロ計画を発表し1970年までに人類を月に送り込むと宣言した。こうして1960年代は米ソのし烈な宇宙競争の時代となったのであるが、私が大気分光学の研究を始めたのはちょうどこのような時代であり、惑星や地球のリモートセンシング等宇宙関連ということでこの分野が追い風を受けていた頃である。水蒸気、炭酸ガスを始め各種気体の吸収パラメータの測定や放射伝達の理論的研究が盛んに行われ、1970年代に入ると AFCRL (米国空軍ケンブリッジ研究所) から今では世界中で使われている簡便な放射伝達計算プログラム、LOWTRAN、が発表され一般の使用に供せられた (Selby and McClatchey, 1972)。また 1973年に H_2O , CO_2 , O_3 , N_2O , CO , CH_4 , O_2 及びこれらのアイソトープに関する吸収線パラメータを集大成したデータベース (後に HITRAN とも呼ばれる) が公開された (McClatchey *et al.*, 1973)。

吸収線パラメータとは各吸収線の吸収特性を記述するために必要な吸収線の位置、強度、半値幅、遷移に関わるレベルの量子数、低レベル側のエネルギーなど10項目程度にわたる物理量のことであり、とくに前3者は重要である。このデータベースは主要なる大気気体について、それまで多くの研究者によって得られていた実験値あるいは理論的計算値のうち、最も真値に近いと思われるものを10年くらいかけてこつこつと集大成したもので大変な労作であった。炭酸ガスだけでも500以上の振動一回転帯が含まれており、カバーした吸収線の本数は10万本以上に及ぶ。HITRAN は LOWTRAN 同様、ユーザに無償で提供され、ユーザからのエラーの指摘や改良に関する

声を反映させ、数年毎に改訂版を出し、より正確で完全なデータベースとして成長していくことになる。最近のバージョンには前出の7種類の気体以外に多くの大気微量気体も含まれており、今度発表される予定のものでは吸収線の本数は55万本にものぼるということである。

さて、この最初の HITRAN には炭酸ガスの半値幅に対する我々の理論値も採用されており、それ自身嬉しいことではあったが、しかし一方でこのデータベースの出現は私には多少ショックでもあった。というのはこの頃私自身もこのようなデータベースの必要性を感じ、少しずつ同じようなデータを集めていたからである。しかし AFCRL のものはこの私の小さなデータベースをその規模とパラメータの完璧さにおいて圧倒していた。AFCRL がこのプロジェクトに備えている陣容と情報収集能力を考えれば今後ともこれに勝るデータベースを作れるとは思えなかった。したがって私はあっさり自分の計画を中止し、彼らの成果を使わせてもらうことにした。多分同じような事情の人が他にもかなり世界中に居たのではないと想像している。

ただこの撤退においては一抹のひっかかりがあった。それはこのような基本的データベース作りをたった一つのグループに任せて置いてよいかということである。寡占は競争原理を欠き、進歩を滞らせる可能性があるからである。公開という手段がこの点をかなり救ってくれるとは思いがこの分野の専門家の数が減っていくのは避けられないだろう。しかし、後になってフランスの一グループが今でもこのデータベース作りを AFCRL とは独立に続けていることを知った。このデータベースは GEISA と呼ばれており、23種の気体、21万本以上の吸収線を網羅している (Chedin *et al.*, 1981)。彼らの努力には敬意を表せざるを得ない。

さてこの吸収線パラメータについてもう少し立ち入ってみることにしよう。太陽光スペクトルを地上で観測すると H_2O や CO_2 の吸収のため所々虫喰いができる。これを吸収帯と呼ぶが、これはさらに第1図のように多

* Application of the atmospheric spectroscopy to meteorology and remote sensing.

** Tadao Aoki, 気象研究所物理気象研究部。

数の吸収線で構成されている。1本1本の吸収線は分子の量子化された内部エネルギー（電子エネルギー、分子の振動、回転エネルギーなど）間の遷移の結果生ずる。この遷移の過程で起こる他の分子との衝突や熱運動のため吸収線が広がる。大気が放射エネルギーをどれだけ吸収するかということは、この1本1本の吸収線の広がり（正確には広がりの方-これを以後吸収線形と言うことにする）によって左右される。この広がり気体種ごと、吸収線ごとに異なる。大気分光学の役割の一つはこの吸収線形を決める法則性を明らかにすることである。

2. 衝突による吸収線の広がり

熱運動によるドップラー効果はよく分かっており、これによる吸収線の広がり温度、分子量など既知の物理量で記述できガウス形になる。またこの効果と衝突による広がり（ローレンツ形）が複合した場合の吸収線形も単なる数学の問題でよく分かっており、Voigt 形と呼ばれるものになる。ただ、あまり衝突回数が多くなり、それによって分子の運動速度が頻繁に変化させられると、ドップラー効果による広がりが減少する collisional narrowing という現象が起こることが知られている (Varghese and Hanson, 1984) がここでは触れない。もっとも collisional narrowing という言葉はもう一つ別な現象にも使われている。例えばマイクロ波領域において、大気鉛直温度分布リモートセンシングに使われている酸素 60 GHz 帯は、数10本の吸収線で構成されるが、これらの吸収線は圧が高くなると互いに近づき合い、吸収帯全体としては1本1本の線幅が狭くなったのと同じような効果になってしまう (Liebe, 1977)。またこの現象は CO₂ (Gentry and Strow, 1987) や N₂O (Strow and Pine, 1988) の Q ブランチ (吸収線が密集している狭いバンド) についても起こることが知られている。これらをやはり collisional narrowing とも言うが、しかし人によって line mixing, line coupling などと呼ぶこともあり、その呼称はまだ定まっていない。

さて光の吸収によって分子の2つのエネルギーレベル間に遷移が起こる過程で、他の分子との衝突が起こるとそれによってレベルがどこかに変わってしまう。これはそのレベルの寿命を短くすることになり、不確定性原理によればそのエネルギー値をぼやけさせる。すなわち吸収線がぼやける (広がる) 所以である。

このような量子学的効果を取り入れた衝突による吸収線の広がり理論を Anderson (1949) が初めて展開し、Tsao and Curnutte (1960) がそのフォーミュレーション

をより具体化した。これらを併せて ATC 理論と呼んでいる。分子のエネルギーレベルが衝突において擾乱を受ける確率は分子間相互作用力の大きさによる。ATC 理論には分子間相互作用として双極子モーメントと線形分子の四重極子モーメントまでが考慮されており、水蒸気やオゾンのような非対称コマ分子と呼ばれる分子の四重極子モーメントまでは定式化されていなかったが、筆者らにより非対称コマ分子の四重極子まで理論が拡張されている (Aoki, 1972; Yamamoto and Aoki, 1972)。この結果、オゾンではこの四重極子相互作用が最も重要な吸収線広がり要因であり、水蒸気のように双極子モーメントの値が大きいものでも弱い吸収線においては四重極子の効果が重要になることなどが分かった。

これらの研究を含め ATC 理論はその後さらに様々な発展を見せ、前述の line coupling 等の効果も不十分ながら取り扱えるようになってきている (Rosenkranz, 1975)。1990年代後半からは大気鉛直温度のリモートセンシングでは、AMSU などのセンサによって酸素 60 GHz 帯の中の、ほとんどモノクロマティックな20くらいチャンネルを測定する方法が主流になる予定である。赤外域でも 0.2 cm⁻¹ くらいの高分解分光データが用いられる。またアルゴリズムも従来の回帰式的手法でなく、放射伝達式を逆に解くいわゆる物理的手法が使われると思われる。この場合、吸収線形の精度が非常に重要になり、この理論の真価が問われることにもなる。

ATC およびその拡張理論は吸収線の中心付近では、実験と良く一致するが、中心から離れた端の方 (wing) では実験との差が著しい。これらは line coupling を取り入れた説明によってかなり改善されるが、まだ多くの問題を残している (Cousin *et al.*, 1986)。2,400~2,700 cm⁻¹ 付近の CO₂ 連続吸収帯は 4.3 μm 帯の吸収線の wing が重畳したものであるが、その吸収係数の値については実験の方が2桁も小さくなることが知られている (Burch *et al.*, 1969)。また CO でも同様の傾向がある (Benedict *et al.*, 1962)。一方 H₂O については問題がやや込み入っている。まず、1,000 cm⁻¹ 付近のいわゆる大気の窓における連続吸収帯に関して、H₂O と H₂O の衝突による広がり (self broadening) と H₂O と N₂ など他の分子との衝突による広がり (foreign broadening) による吸収係数の比は、理論では5くらいになるのに対して実験では100以上の値が得られている (Burch and Alt, 1984)。また self broadening に関しては温度の低下とともにその値が著しく大きくなることなど (Bignell, 1970)、既存の理論では

説明できない現象が発見されている。このようなことから水蒸気連続吸収帯は単体の H₂O でなく、H₂O の 2 量体あるいは多量体によるのではないかというような意見もあり、(Bignell, 1970), この点はいまだに未解決である (Grant, 1990)。

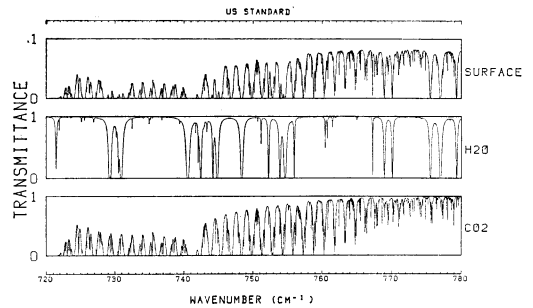
このように吸収線の広がりに関して、中心から遠い端まで全体をカバーするような統一理論はまだ生まれていない。分光学が今後解決すべき最も困難な課題の 1 つといえよう。

3. バンドモデル

これまでの議論はいわば大気分光光学における質的な困難を述べたものといえるが、一方分光データを使って実際に大気中の放射伝達を取り扱うには量的な困難とも言うべきものがある。すなわち、大気の問題に関わる吸収線の数は、AFGL (米国空軍地球物理研究所) がコンパイルした最新のデータベースには約 55 万本も登録されており、数値積分においてこれらを全て考慮するのは大型計算機をもってしても大変な計算時間を要する。まして大型計算機のない時代において吸収線を 1 本 1 本取り扱うことは不可能であった。そのような時代に生まれたのがバンドモデルの思想である。これはある波長帯 (バンド) の中に存在する吸収線を、等間隔に並んでいるとか、全くランダムに並んでいるとかモデル化し、一方吸収線強度も指数分布とか、一定とかに仮定することによってそのバンドの平均透過率が簡単な式で表せることを利用するものである。様々なモデルが提唱されてきたが、なかでも巧みなのが Mayer (1952) と Goody (1964) のランダムモデルであろう。これは吸収線の実際の位置を無視し、全くランダムに散らばっていると見なすものである。線強度については指数関数に従い、半値幅は全て等しいと仮定することによって波長方向の積分が著しく簡単化され、平均の透過率 τ は

$$\tau = \exp[-\gamma u / \sqrt{1+u}] \quad (1)$$

という実にエレガントな式に帰着する。(γ は圧, u は物質の量に比例するパラメータ)。このモデルは本来第 1 図の水蒸気のようにまさしくランダムに吸収線が並んでいるスペクトルのために考え出されたモデルであるが、その後炭酸ガスのような一見規則的に並んでいるスペクトルにもよく適用できることが分かり、このため今まで最も広く利用されてきている。気候モデルにおける放射スキームの国際比較, ICRCM (JGR, 1991, NO. D 5 参照) においても、このモデルを使っている研究者は

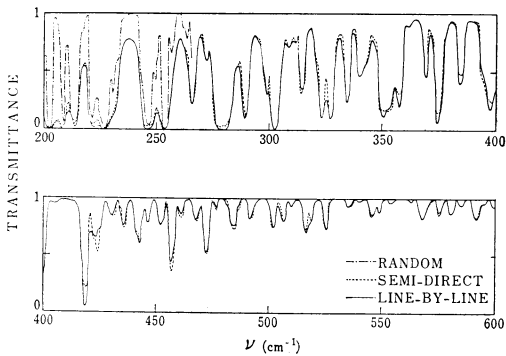


第 1 図 大気吸収線スペクトルの例。SURFACE: 全大気の吸収スペクトル, H₂O いわゆる連続吸収を除く H₂O の吸収線, CO₂: CO₂ の吸収線

多い。

ただこのモデルは同じような吸収線スペクトルが無限に広がっていることを前提にしているため、第 1 図の H₂O のように吸収線の並び方が不均質なスペクトルの中のある狭いバンドの平均透過率を求めるような場合、そのバンドの内と外のスペクトルの違いの効果が出て精度が悪くなる。例えばそのバンドの中に弱い吸収線しか無ければ、バンドの外のすぐ側に強い吸収線があってもその寄与は過小に評価されてしまうことになる。このため Wyatt *et al.* (1968) はスペクトルをいくつかのバンドに区切り、各バンドの中の吸収線は各々のバンドの中でのみランダムに散在させるモデルを考えた。線強度については各バンド毎に一桁くらいずつ異なる 5 種類くらいの値を設定している。これによると確かに不均質性の効果は改善されるが、無限項のベッセル関数や誤差関数を含む複雑な関数になってしまう。これに対して Aoki (1978 a, b) では、考えているバンドの外にある吸収線の寄与については実際のまま厳密に計算し、内側については無限に散らばる吸収線のうち、当該バンドの中に存在確率をもつものだけを考慮する。この結果バンドの外の吸収線の効果はわずか 1 項のみでより正確に表せることになり、(1) 式カッコの中に 2 項ほど付け加わるだけの簡単な式で高精度のものが得られる (第 2 図)。

さてこれらのバンドモデルによって得られる透過関数は、実際の吸収線データに近いある理想化されたスペクトルバンドの平均透過率であって真のものではない。しかしその関数形そのものは真のものに近いことが期待できる。そこで例えば (1) 式の γ や u のにおける圧や物質の量に対する比例係数を、何点かで真の値に合うように決めてやれば、それはより真のものに近い関数になる



第2図 semi-direct random band model によって計算された H_2O 回転帯スペクトル（鎖線）と random model によるもの（1点鎖線）. 実線は line-by-line による厳密計算.

であろう。ここで τ の真の値としては実験値や line-by-line による厳密計算を使うわけである。実際このようにすると、数 100 cm^{-1} もある幅広いバンドの平均透過率に対してさえ、非常に高精度のものを得ることができ、気候モデルの中の放射冷却の計算もより精密化が計れるようになる（たとえば、Shibata and Aoki, 1990）。

バンドモデルは本質的には均質な気体層における吸収スペクトルの平均透過率のパラメタライゼーションである。したがってこれだけでは気象学にとってはほとんど役に立たない。気象学においては大気の下層から上層にかけて圧、温度が変わる不均質な大気層に対する透過率が必要になるのであって、それは圧、温度の異なるいくつかの均質層の透過率を単純に重ねていくという方法では得られない。均質層の透過率を単純に重ねていくというのは実はよく見かけるミスで、このようにして計算すると吸収を過大に評価してしまうことになる。ここでは詳細を省くが、バンドモデルを不均質大気の放射伝達計算に利用するには、Curtis (1952) and Godson (1953) 法のように不均質層を等価な一つの均質層に置き換える手法や Godson (1953), Weinreb and Neuendorffer (1973) や Aoki and Shibata (1990) のように、圧、温度の異なる均質層を、物質の量を調節しながら繋ぎ合わせていくようなパラメタライゼーションの手法が必要になってくる。これらのパラメタライゼーションが適切でないとせっかく精密なバンドモデルを開発しても意味がないことになる。

4. リモートセンシング

大気の透過率を計算するには大気各層の圧、温度、物質の量などを与えてやらなければならない。ある層の物質の量や温度を少し変えれば透過率が変わり大気上端に出ていく放射量が変わるのである。すなわち、放射には大気各層の各種物理量の情報が含まれている。放射はエネルギーを運び大気・海洋にその力学的運動を引き起こしているだけでなく、それらの情報も運んでいるわけである。近年人工衛星や地上からのリモートセンシングによって大気・海洋に関する我々の知識が大いに拡大したことを考えると、この情報の運び屋としての放射もエネルギーのそれに劣らず、大気科学の重要な役割を担っているといえよう。

大気から出てきた放射には、地表や大気各層の温度、物質の量などの情報が満載されている、と言うこの言葉は非常に魅力的に響く。しかしこの満載されていることがかえってくせものである。赤外域での放射伝達式を書いて見よう。

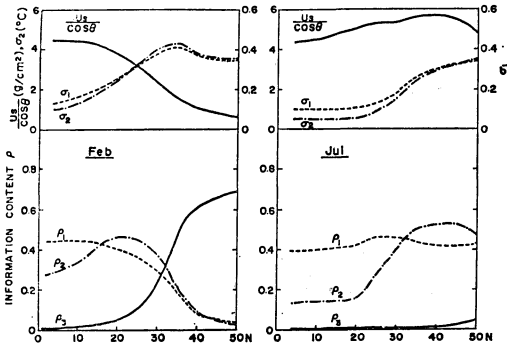
$$B(T_B) = B(T_s) \tau(p_s) + \int_{p_s}^0 B(T) \partial \tau / \partial p dp \quad (2)$$

ここで T_B は輝度温度、 B , T , p はそれぞれプランク関数、温度、圧を示し、添字 s は地表の値を示す。静止衛星ひまわりの赤外チャンネルは大気の窓とよばれる比較的透明な領域にあり、「地表が見える」ため、海面温度の測定に利用されている。いま (2) の T_B に変化を引き起こす要因として、水蒸気量、大気温度、海面温度の変化によるものの3つを考え、その標準的な大きさを b_1 , b_2 , b_3 とする。各要因の寄与率をここでは information content として次式で定義する。

$$\rho_i = b_i / \{\sum b_j + \epsilon\} \quad (3)$$

ここで ϵ は測定誤差である。 ρ を夏冬、緯度について示したのが第3図である。季節、緯度毎に各々の情報量は大きく変わり、海面温度の情報量 ρ_3 がいつも一番ではないことが分る。それどころか海面温度の成分が大きいのは冬の高緯度地方のみである。それ以外はむしろ大気の水蒸気や温度の情報が多く、このチャンネルはそれらの測定に使った方がより適当であることを示唆している。実際、熱帯海域でこのチャンネルから水蒸気量をかなり正確に求めることが可能である (Aoki and Inoue, 1980)。

さて (3) 式を注意して見ると、大気・地表系が等温の場合、 $T_B = T_s$ となり、 T_B は τ すなわち水蒸気には無関係になってしまう。これは放射を測っても水蒸気の情報はいくらも得られないことを意味する。このように水蒸



第3図 水蒸気, 大気温度, 海面温度の情報量. 上のパネルはひまわりと各緯度を結ぶ視線に含まれる水蒸気量と, 水蒸気と大気温度の初期値の標準誤差.

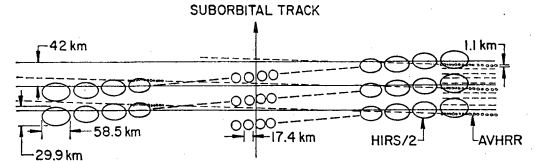
気の情報に関して情報が存在するのは, 大気にたまたま温度勾配があるからにすぎない. これは熱赤外を使って, 水蒸気や他の微量気体等を測定する場合についてすべて言えることであって, いずれも温度勾配の強さによって情報量が大幅に変わる. 大気温度に関してはどのようなケースでもほぼ一定の情報量が得られるが, それに比べると気体のリモートセンシングは砂上に建つ楼閣を見るようで, なんとも心許ない限りである. 原理的改良が望まれるところである.

受動的リモートセンシングにおいて比較的未発達な課題と言うと, もう一つ雲の影響の除去の問題があるだろう. 雲がある場合, 観測される放射 I は視野の中の雲量 n , 雲域の放射を I_c , 雲のないところの放射を R とすると

$$I = (1-n)R + nI_c \quad (4)$$

と書ける. ここで我々が大気等のリモートセンシングに使う量は本質的には, I を補正して得られる R であって I ではない. I をいくら精度良く測っても, n や I_c など雲の効果の補正が不正確であればなんの意味もないことになる. しかしながら従来は I の観測精度を向上させることと, R から大気の物理量を抽出する, いわゆる inverse method の研究にほとんどの力が注がれ, その途中の I から R を求める過程の研究はあまり多くなかった.

NOAA 衛星の鉛直温度・水蒸気分布を求めるための HIRS というセンサにおいて, 雲の影響を除去するための従来の手法は, 隣どうしの HIRS を使い各々の視野の中の雲頂や光学的性質は等しいと言うような仮定に基



第4図 HIRS と AVHRR の地上フットプリントの関係

づくものであった (Smith, 1968; McMillin 1978).

しかし HIRS より1桁小さい視野をもつ AVHRR という画像用センサのデータを使うことによって n や I_c などの情報が得られ, より精密に R を求めることができる (青木, 1980; Aoki 1980, 1982). ただこの場合, NOAA 衛星はもともと AVHRR を鉛直分布算出に使うという思想で設計されていなかったため, 両者の画像位置関係は分かっていなかった. そこで両者のチャンネルのうち光学的特性の似ているもの同士を使って, 位置関係を決定する手法を開発する必要があった (第4図). このような HIRS と AVHRR という別な測器の画像を使うというわずらわしさを避けるためには, CCD カメラを自らのセンサのなかに組み込むことが望まれるが (Aoki, 1980), 1997頃 EUMESAT (ヨーロッパ気象衛星開発機構) が POEM という衛星に搭載する予定の, 大気鉛直分布を測定する IASI (Improved Atmospheric Sounding Infrared) では, そのようなセンサが組み込まれ雲効果の除去を行う計画になっている.

4. むすび

大気分光学は AFGL の吸収線データベースや, それを使って放射伝達を計算する汎用のプログラムが流布されるに及んで, あたかも重要な課題は終了したかのような印象を持つ. 実際, 現在の気候モデルの中の晴天域放射スキームに対しては, 今後大きなインパクトはないかもしれない. しかしリモートセンシングに使うデータベースとしては全く不十分である. とりわけ高分解能センサにとってはそうである. 高分解能でなくても HIRS のような低分解能センサにおいてすら, 理論的計算と観測値には系統的な差があり, 3節でのべた physical method において理論的放射伝達を使うといっても, それは観測に合うように, パイアス量を加えたり, 理論的透過関数に経験的な補正をほどこしたものであって, まだ純粋な physical method まで発達しているとは言えない.

高分解能センサになれば、2節で述べた吸収線形の精度が直接問題になってくる。line coupling はCO₂ や N₂O の Q ブランチや O₂ の 60 GHz 帯にしか顕著に見られないのか、他の隣接し合った吸収線にもあるのではないのか？ 各吸収線の位置は圧とともにどのくらいシフトするのか？ 吸収線幅の温度依存は？ 有限衝突時間の影響はどのように現れるのか？ 等々。これらの間にたいして現在の分光理論およびデータは全く不十分にしか応えていない。これらを各吸収帯および数十万本の吸収線に対して調べ上げる必要があるわけで、非常に困難な物理学の問題とともに、気の遠くなるような量の問題を抱えている。大気分光学の道のりは非常に遠いと言わねばならない。

謝 辞

私の大気放射学への道すじを付けて下さったのは東北大学時代の山本先生、田中先生である。吸収線形という私にとっては手に余るような難問に誘い込まれしばらく浮き上がって来なかったが、その間田中先生には終始励ましをいただいた。

気象衛星センターでは中島忍氏、井上豊志郎氏、加藤一靖氏らとリモートセンシングに関して興味ある仕事をする事ができた。また気象研究所では柴田清孝氏とバンドモデル及びその実用化に関する研究を行い、深堀正志氏、青木輝夫氏とは新しいリモートセンシングの技術開発に取り組んでいる。これらの方々および大学、気象庁における同僚、上司の方々にいただいた励ましやご支援、議論に改めて謝意を表します。

引用文献

- 青木忠生：極軌道衛星(TIROS-N)における HIRS/2 と AVHRR 画像の位置合わせについて。気象衛星センター技術ノート, 2, 15-26, 1980.
- Aoki, T., 1972: A study on the line shape of the collision broadened spectral lines, Dissertation, Tohoku Univ.
- , 1978 a: Semi-direct band models for the transmittance calculation. J. Meteor. Soc. Japan. 56, 112-120.
- , 1978 b: Semi-direct random band model for exponential-tailed S⁻¹ intensity distribution. J. Meteor. Soc. Japan. 56, 508-516.
- , 1980: Statistical determination of clear radiance from cloud-contaminated radiances. J. Meteor. Soc. Japan, 58, 528-536.
- , 1982: An improved method to re-

- trieve the clear radiance from partially cloudy spots of radiometer on board satellite. J. Meteor. Soc. Japan. 60, 758-764.
- , and T. Inoue, 1982: Estimation of the precipitable water from the IR channel of the geostational satellite, Rem. Sens. Environ., 12, 219-228.
- , and K. Shibata, 1990: Some developments of the method to apply band models to an inhomogeneous atmosphere, J. Meteor. Soc. Japan, 68, 385-394.
- Benedict, W.S., R. Herman, G.E. Moore and Silverman, 1962: The strengths, widths, and shapes of lines in the vibration-rotation bands of CO. Astrophys. J., 135, 277-297.
- Bignell, K. J., 1970: The water vapour infrared continuum, Quart. J. Roy. Meteor. Soc., 96, 390-403.
- Burch, D.E. and E.L. Alt, 1984: Continuum absorption by H₂O in the 700~1,200 cm⁻¹ and 2,400~2,800 cm⁻¹ windows, AFGL-TR-84-0128.
- , D.A. Gryvnak, R.R. Patty, and C.E. Bartky, 1969: Absorption of infrared radiant energy by CO₂ and H₂O IV. Shapes of collision-broadened CO₂ lines. J. Opt. Soc. Am., 59, 267-280.
- Chedin, A., H. Husson, N.A. Scott, I. Cohen-Halleh, and A. Berroir, 1981: La Banque de donnees, GEISA, Laboratoire de Meteorologie Dynamique du CNRS.
- Curtis, A.R., 1952: Discussion of a statistical model for water-vapour absorption by R.M. Goody. Quart. J. Roy. Meteor. Soc., 78: 638-640.
- Gentry, B. and L.L. Strow, 1987: Line mixing in a N₂-broadened CO₂ Q branch observed with a tunable diode laser. J. Chem. Phys., 86, 5722-5730.
- Godson, W.L., 1953: The evaluation of infra-red radiative fluxes due to atmospheric water vapour. Quart. J. Roy. Meteor. Soc., 79, 367-379.
- Goody, R.M., 1952: A statistical model for water vapour absorption. Quart. J. Roy. Meteor. Soc., 78, 165-169.
- Grant, W.B., 1990: Water vapor absorption coefficients in the 8~13 micron spectral region: A critical review. Appl. Opt., 451-462.
- Liebe, H.J., G.G. Gary, and J.D. Hopponen, 1977: Atmospheric oxygen microwave spectrum-Experiment versus theory. IEEE Trans. Ant. Propa., AP-2, 327-335.
- Mayer, H., 1947: Methods of opacity calculations,

- Los Alamos, LA-647.
- McClatchey, R.A., W.S. Benedict, S.A. Clough, D.E. Burch, R.F. Calfee, K. Fox, L.S. Rothman, and J.S. Garing, 1973: Atmospheric absorption line parameters compilation, AFCRL-TR-0096.
- McMillin L.M., 1978: An improved technique for obtaining clear radiances from cloud-contaminated radiances. *Mon. Wea. Rev.*, **106**, 1590-1597.
- Rosenkranz, P.W., 1975: Shape of the 5 mm oxygen band in the atmosphere. *IEEE Trans. Anten. Propa.*, AP-23, 498-506.
- Selby, J.E.A. and R.A. McClatchey, 1972: Atmospheric transmittance from 0.25 to 28.5 μm : Computer code LOWTRAN 2, AFCRL-72-0745.
- Shibata, K. and T. Aoki, 1989: Infrared radiative scheme for the numerical models of weather and climate. *J. Geophys. Res.*, **94**, 14923-14943.
- Smith, W.L., 1968: An improved method for calculating tropospheric temperature and moisture from satellite radiometer measurements. *Mon. Wea. Rev.*, **96**, 387-396.
- Strow, L.L. and B.M. Gentry, 1986: Rotational collisional narrowing in an infrared CO_2 Q branch studied with a tunable-diode laser. *J. Chem. Phys.*, **84**, 1149-1156.
- , and A.S. Pine, 1988: Q-branch line mixing in N_2O : Effects of 1-type doubling. *J. Chem Phys.* **85**, 1427-1434.
- Tsao, C.J. and B., 1960: Curvature: Line widths of pressure broadened spectral lines. AFCRL-60-278.
- Weinreb, M.P. and A.C. Neuendorffer, 1973: Method to apply homogeneous path transmittance models to inhomogeneous atmospheres. *J. Atmos. Sci.*, **30**, 662-666.
- Wyatt, P.J., V.R. Stull, and G.N. Plass, 1962: Quasi-random model of band absorption. *J. Opt. Soc. Am.*, **52**, 1209-1217.
- Yamamoto, G. and T. Aoki, 1972: Line broadening theory of asymmetric top molecule. *J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer*, **12**, 227-241.