

8 超多バンドセンサにおける大気補正の可能性

Atmospheric Correction for Satellite Hyperspectral Sensors

土田 聡

工業技術院地質調査所, 〒305-8567 茨城県つくば市東 1-1-3

Satoshi TSUCHIDA

Geological Survey of JAPAN, Higashi 1-1-3, Tsukuba, Ibaraki 305-8567, JAPAN

TEL 81-298-54-3775// FAX 81-298-54-3533// E-mail satoshi@gsj.go.jp

1. 0 はじめに

超多バンドセンサは植生や変質鉱物の特徴抽出を初め多く分野で期待され^{1)~3)}, これまでに幾つかの衛星搭載超多バンドセンサが提案されてきた。しかし, 技術的問題や打上げ失敗等によって未だ実現はしていない。このため, 航空機搭載の超多バンドセンサ (たとえば AVIRIS, Airborne Visible/Infrared Imaging Spectrometer⁴⁾) によって多くの実験がなされ, その可能性が計られてきた。しかし, 近年になり, 数多くの衛星搭載超多バンドセンサの打上げが予定され, その利用がより具体的になってきている。本論は, その利用の基礎となる大気補正の可能性について述べるものであり; センサ自身による大気補正用パラメータ算出方法およびその精度について焦点を当てた。

なお, ここでの超多バンドセンサとは可視から近赤外域に波長サンプリング幅 10nm 前後で連続的なバンドを数 100 程度持つセンサで Landsat と同等程度の空間地上分解能(30m 前後)を有するものを指す。また, 現在, 衛星搭載が計画されているものとしては COIS/NEMO(US-Navy), Warfighter/Orbview4(USAF), ARIES/ARIES1(CSIRO), PRISM(ESA), Hyperion/E01(NASA)等があり, 打上げはここ数年の間に行われる予定である⁵⁾。

2. 0 連続波長データに特徴的な計算

超多バンドセンサに処理としては, LANDSAT において利用されているような各種のバンド間演算も使用できるが, 連続波長という特性を生かした波長・輝度グラフにおけるフィッティング(重ね合せ)を基本とした方法がよく用いられる。Figure 1(Green *et al.*, 1998, Figure 6)⁶⁾が, その代表例であり, ここではセンサ(AVIRIS)から得られた放射輝度値と地表での観測データからの予測値を比較することによって, センサ自身の放射輝度補正係数の検証を行っている

る。この図では2者の間に大きな差は見られないが、この差が大きい場合には補正係数の見直し作業が必要となる。ここで通常の離散型センサと異なる点は、連続波長データにおいては、予測値における大気パラメータ設定等による僅かな違いも見分けることがしばしば可能（たとえばある分子吸収帯域だけ、特徴的に差が大きい等）なことであり、補正係数だけに全ての誤差を吸収させるような間違いを防ぐ効果がある。これは連続データの検証能力の高さと言えよう。また、上記のような補正係数検証の場合ではなく、通常の観測においては（ただし、十分な精度の補正係数を持つと仮定）、グラフ上での差を小さくなるように各大気パラメータを設定（設定方法は多様、代表例 Continuum Interpolated Band Ratio; CIBR^{7),8)}）することによって、大気パラメータ値が既知で無くとも、そのパラメータ値を算出できる。これら分子ごとのグラフ上での重ね合せ例は次章以降を参照されたい。

3. 0 分子散乱・吸収

大気補正の観点から分子散乱・吸収を考えた場合、地表面気圧・ H_2O ・ O_3 のパラメータ値を求めれば十分であろう（他のパラメータは比較的安定しており、気候値等から算出できる）。以下、散乱・吸収を分けて述べる。

3. 1 分子散乱

分子散乱（レイリー散乱）の推定においては地表面での気圧さえ得られれば、ほぼ一意的に求まる。この気圧は、分子存在比が既知で比較的その存在比が安定している分子（ O_2 ・ CO_2 等）の吸収帯を利用すれば、超多バンドセンサ自身から得ることができる⁷⁾¹⁰⁾。Figure 2 及び 3.

(Gao et al., 1993, Figure 2 and 3)⁹⁾に O_2 ・ CO_2 の吸収帯を示す。 O_2 の場合は760nm (960及び1270nmも検証用として利用可能)を、 CO_2 の場合は2070nmの吸収帯を利用する。これらの吸収帯に対し、モデルから放射輝度を計算し、このモデル値とセンサからの実測値のずれを算出する。次に、気圧を修正することによって、このずれを小さくし、結果、その気圧自身の値も算出できるといったものである。前述のCIBR法で求めた一例をFigure 4(Green, 1991, Figure 4 and 6)⁷⁾に示す。なお、センサ精度がSNR(Sound Noise Ratio) =200~300の場合、200m前後と報告されている¹¹⁾。

3. 2 分子吸収

前述したように分子吸収推定においては H_2O ・ O_3 を求めればよい。 H_2O の吸収帯は、幅が狭くかつ可視・近赤外域に深い吸収が複数ある(Figure 2)ため、その推定法も数多く提唱されている^{7)~14)}。一方、 O_3 は吸収帯が広い(Figure 3)ためその推定は難しい。 O_3 推定はグラフ上での重ね合せによる方法を用いれば不可能ではないが、原理的にも精度的にもまだ実利用は難しいと考えられる。よって、現時点では他の既存データ（たとえばTIROS Operational Vertical Sounder, TOVSやTotal Ozone Mapping Spectrometer, TOMS）からの O_3 に関するパラメータ値を利用した方が、精度高い大気補正が可能であろう。

H_2O の推定計算においては主に940nm前後の吸収帯を利用し、1140nmも併用する場合もあ

る。可視・近赤外域にはこの2吸収帯以外にも多数のH₂O吸収帯が存在するが、これらの吸収の大きさは大きすぎる(100%吸収で飽和)、もしくは小さすぎて推定計算に利用するには適当でないため、ほとんど利用されない。Figure 5(Green, *et al.*, 1996, Figure 10)¹²⁾は940nmの吸収帯での計算例である。算出精度は、推定方法に違いにも左右されるが、センサ精度SNR=100~400で5%程度¹²⁾の誤差があるとも報告されている。

なお、この940nmの吸収帯には植生・葉中のH₂O吸収帯もあるため、植生域では大気・植生中のH₂O区分に関する研究^{13), 15), 16)}もあり、また、同様に、雪氷域においては積雪中のH₂Oとの区分に関する研究もある¹⁷⁾。Figure 6(Moreno and Green, 1996, Figure 4)¹⁶⁾は大気と植生の吸収帯の例を示したのであり、大気・植生の吸収ピークは微妙に異なっている。

4. 0 エアロゾル散乱・吸収

エアロゾル散乱・吸収の影響は、エアロゾル種および量が決めれば求められるが、実際にこれを決定するのは困難である。これまでの衛星搭載センサに対しても多くの推定方法が提案されたが、それらの多くは海域や密植生域等に限定した手法^{18), 19)}であり、それぞれの地表面に対して特定の仮定を必要としていた。よって、現時点では地球全球における衛星データのみを用いたエアロゾル推定は困難であり、さらに、このような大気補正から得られた地表面パラメータでは地表面自身になされている仮定に束縛され十分な解析ができないとの意見も聞かれる。超多バンドセンサにおいても同様である。エアロゾルの波長特性は、特定の波長帯に鋭いピークを持つものではないため、超多バンドセンサデータのような細かい波長間隔の連続波長データであっても、その特徴抽出は難しい。超多バンドセンサデータの連続波長性を利用したエアロゾル光学的厚さ推定方法^{9), 11), 20)}も提案されてはいるが、多くの仮定を必要とし様々な条件が揃わない限り、その精度が高いとは言い難い。Figure 7(Green *et al.*, 1993, Figure 3)²⁰⁾は、その推定方法の1つ Non Liner Least Squares Spectral Fitting (NLLSSF)の例であるが、エアロゾル推定において既に地表面反射率パラメータ (Modeled Reflectance) を用いていることから、この反射率に内在する仮定の妥当性がその精度を左右することがこの図からも読み取れる。ただし、サンフォトメータ等で現地測定したエアロゾルの光学的厚さデータ等と超多バンドセンサと組み合わせによる推定方法も提案^{6), 21)}されており、これは地表面に多くの仮定を必要としないため、より高精度な推定が可能となる。Figure 8(Green *et al.*, 1996, Figure 7)²¹⁾はこの一例である。なお、この方法は現地で測定されたサンフォトメータデータ取得を必要とするが、現在、すでに地球全球を対象としたサンフォトメータのネットワーク (AERONET)²²⁾も構築されており、その利用も期待される。このネットワークにおけるサンフォトメータの設置場所は現時点では空間的にかなり粗いため、実際に利用できる場所は限られているものの、近い将来、多くの地域でその利用が可能になるかもしれない。

5. 0 巻雲

超多バンドセンサにおける巻雲の大気補正は、Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS) に対して提案²³⁾されている $1.375\mu\text{m}$ の H_2O 吸収帯を用いた方法²⁴⁾が適用可能であろう。ただし、この波長帯の吸収は非常に大きいので、センサ入口の放射輝度は微弱となる。よって、この波長帯をカバーするバンドの SNR は他の波長のバンドより相対的に低くなる傾向があり、MODIS より空間分解能が高い超多バンドセンサでは十分な精度を持つ結果が得られない危険性がある。よって、他の方法による補正や衛星搭載 LIDAR (たとえば Mission Demonstration Test Satellite-2) からのデータ等による補正も考えておく必要もある。

6. 0 センサ精度

超多バンドセンサデータに対する大気補正の可能性について述べてきたが、これらの多くは AVIRIS を初めとする航空機搭載センサにおける実験によって、検証・実証されてきたものであり、ここで議論された大気補正精度も航空機搭載センサの精度上に成り立っている。Figure 9 (Green *et al.*, 1998, Figure 7)⁶⁾ は AVIRIS の SNR を示したものであり、年々改良を加え精度を高めていることが読み取れる。現在計画されている衛星搭載のセンサは SNR=100 前後(センサ・バンドごとに多少の差異は有る)であり⁵⁾、さらに放射輝度補正係数の精度も AVIRIS 等に比較すると低くなることが予想される。よって、これまでに前述した大気補正の精度(たとえば、3.2 項の H_2O の 5%誤差)も大幅に下回ることが予想される。実際の大気補正においては、既存の気象データ (GDAS・GPS・TOVS・TOMS 等) の活用・併用も常に考えておく必要がある。

7. 0 最後に

現在打上げが予定されている衛星搭載超多バンドセンサは、多種の大気パラメータ抽出可能性を持つが、その精度は決して高くなく、既存の気象データから算出されたパラメータの精度よりも劣ることが容易に予想される。しかし、超多バンドセンサの波長データ連続性は、算出されたパラメータの検証性に優れ、さらに、ピクセル毎の算出が可能なることもあり、大きな利点と持っている。

これら特徴から超多バンドセンサための大気補正を考えた場合、現時点で考え得る方法は、既存の気象データから得られた高精度のパラメータを用い基本的な大気補正を行い、その上でセンサ自身から得られたパラメータを用いて補助的な大気補正を行うことであろう。さらに、波長連続性を生かせば、その結果の検証も可能であり、各事例における大気補正の問題点の明確化、最終的なパラメータの微調整等もできるかもしれない。

以上のように、大気補正の観点からは現時点で予定されている超多バンドセンサの精度は不

十分のように感じられ、より高精度なセンサの開発が望まれる。また、センサ自身の放射輝度補正係数の信頼度も必要であろう。ただし、大気補正が必要とされている精度は、大気補正後に利用されるデータの必要精度に左右されることであり、この精度の大きさがわからない限り、必要とされるセンサ精度について厳密には言明できない。超多バンドセンサも、今後は具体的な目的に従い、その精度の向上させていくものと思われる。

謝辞：本論は”地球温暖化におけるCO₂吸収源問題におけるリモートセンシングからのアプローチ”を課題とし、有志による討議（この一部は既に発表²⁵⁾されている）を行った際に筆者が用意した資料が基礎となっている。この討議において、国立環境研究所山形与志樹博士・小熊宏之氏、東京大学六川修一助教授、三菱総合研究所関根秀真氏には多くのご助言をいただいた。特に関根氏には現在計画中の衛星搭載超多バンドセンサについて多くの情報をいただいた。以上の方々に深謝いたします。

8. 0 引用文献

- 1) Goetz, A.F.H. and Herring, M., The High Spectral Resolution Imaging Spectrometer (HIRIS) for EOS, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 27, 1989.
- 2) Goetz, A.F.H. and Davis, C.O., The High Spectral Resolution Imaging Spectrometer (HIRIS), Science and Instrument, *J. Imaging Syst. Technol.* 3, 131-143, 1991.
- 3) Vane, G. and Goets, A.F.H., Terrestrial Imaging Spectrometry: Current Status, Future Trends, *Remote Sens. Environ*, 44, 117-126, 1993.
- 4) Vane, G., Green, R.O., Chrien, T.G., Enmark, H.T., Hansen, E.G. and Porter, W.M., The Airborne Visible/Infrared Imaging Spectrometer (AVIRIS), *Remote Sens. Environ*, 44, 127-143, 1993.
- 5) 関根, 私信.
- 6) Green, R.O., Parvi, B., Faust, J., Williams O. and Chovit, C., Inflight Validation of AVIRIS Calibration in 1996 and 1997, *Proc. Seventh Annual Airborne Earth Science Workshop, JPL Pub.*, 1998.
- 7) Green, R.O., Retrieval of Reflectance from AVIRIS-Measured Radiance Using a Radiative Transfer Code, *Proc. Third Annual Airborne Earth Science Workshop, JPL Pub.* 91-28, 200-210, 1991.
- 8) Carrere, V. and Conel, J.E., Recovery of Atmospheric Water Vapor Total Column Abundance from Imaging Spectrometer Data Around 940 nm – Sensitivity Analysis and Application to Airborne Visible/Infrared Imaging Spectrometer (AVIRIS) Data, *Remote Sens. Environ*, 44, 179-204, 1993.
- 9) Gao, B.-C., Heidebrecht, K.B. and Goetz, A.F.H., Derivation of Scaled Surface Reflectances from AVIRIS Data, *Remote Sens. Environ*, 44, 165-178, 1993.
- 10) Green, R.O., Conel, J.E. and Roberts, D.A., Estimation of Aerosol Optical Depth and Pressure Elevation, Water Vapor and Calculation of Apparent Surface Reflectance from Radiance Measured by the Airborne Visible/Infrared Imaging Spectrometer (AVIRIS) using a radiative transfer code, *SPIE, 1937, Imaging Spectrometry of the Terrestrial Environment*, 2-11, 1993
- 11) Green, R.O., Roberts, D.A. and Conel, J.E., Characterization and Compensation of the Atmosphere for the Inversion of AVIRIS Calibrated Radiance to Apparent Surface Reflectance, *Proc. Sixth Annual Airborne Earth Science Workshop, JPL Pub.* 96-4, 135-146, 1996.
- 12) Schlapfer, D., Borel, C.C., Keller, J. and ITTEN, K.I., Atmospheric Pre-Corrected Differential Absorption Techniques to Retrieve Columnar Water Vapor: Application to AVIRIS 91/95 DATA, *Proc. Sixth Annual Airborne Earth Science Workshop, JPL Pub.* 96-4, 209-217, 1996.
- 13) Gao, B.-C. and Goetz, A.F.H., Column atmospheric water vapor and vegetation liquid water retrievals from Airborne Imaging Spectrometer Data, *J. Geophys. Res.*, 95, 3549-3564, 1990.
- 14) Bruegee, C.J., Conel, J.E., Margolis, J.S. et al., In-situ Atmospheric Water-vapor Retrieval in Support of AVIRIS Validation, *SPIE*, 1298, 150-163, 1990.
- 15) Green, R.O., Conel, J.E., Margolis, J.S., Bruegee, C.J. and Hoover, G.L., An Inversion Algorithm

- for Retrieval of Atmospheric and Leaf Water Absorption from AVIRIS Radiance with Compensation for Atmospheric Scattering, *Proc. Third Annual Airborne Earth Science Workshop, JPL Pub.91-28*, 51-61, 1991.
- 16) Moreno, J.F and Green, R.O., Surface and Atmospheric Parameter Retrieval from AVIRIS Data: The Importance of Non-Linear Effects, *Proc. Sixth Annual Airborne Earth Science Workshop, JPL Pub.96-4*, 175-184, 1996.
 - 17) Green, R.O. and Dozier, J., Measurement of the Spectral Absorption of Liquid Water in Melting Snow with an Imaging Spectrometer, *Proc. Fifth Annual Airborne Earth Science Workshop, JPL Pub.95-1*, 91-94, 1995.
 - 18) Kaufman, Y.J. and Sendra, C., Algorithm for Automatic Atmospheric Corrections to Visible and Near-IR Satellite Imagery, *Int. J. Remote Sens.*, 9, 1357-1381, 1988.
 - 19) Kaufman, Y.J. and Tanre, D., Strategy for Direct and Indirect Methods for Correcting the Aerosol Effect on Remote Sensing: From AVHRR to EOS-MODIS, *Remote Sens. Environ.*, 55, 65-79, 1996.
 - 20) Green, R.O., Conel, J.E. and Roberts, D.A., Estimation of Aerosol Optical Depth and Additional Atmospheric Parameters for Calculation of Apparent Reflectance from Radiance Measured by the Airborne Visible/Infrared Imaging Spectrometer, *Proc. Fourth Annual Airborne Earth Science Workshop, JPL Pub.93-26*, 73-76, 1993.
 - 21) Green, R.O., Conel, J.E., Margolis, J., Chovit, C. and Faust, J., In-Flight Calibration and Validation of the Airborne Visible/Infrared Imaging Spectrometer, *Proc. Sixth Annual Airborne Earth Science Workshop, JPL Pub.96-4*, 115-126, 1996.
 - 22) Holben, B.N., Eck, T.F., Slutsker, I., Tanre, D., Buis, J.P., Setzer, A., Vermote, E., Reagan, J.A., Kaufman, Y.J., Nakajima, T., Lavenu, F., Jankowiak, J. and Smirnov, A., AERONET - A Federated Instrument Network and Data Archive for Aerosol Characterization, *Remote Sens Environ.* 66, 1-16, 1998.
 - 23) Gao, B.-C., and Kaufman, Y.J., Selection of 1.375 μm MODIS Channel for Remote Sensing of Cirrus Clouds and Stratospheric Aerosols from Space, *J. Atmos. Sci.*, 52, 4231-4237, 1996.
 - 24) Gao, B.-C., Goetz, A.F.H. and Wiscombe, W.J., Cirrus Cloud Detection from Airborne Imaging Spectrometer Data using the 1.38 μm Water Vapor Band, *Geophys. Res. Lett.*, 20, 301-304, 1993.
 - 25) 六川修一・山形与志樹・土田聡・小熊宏之・関根秀真, 温室効果ガス削減問題における今後のリモートセンシングの役割, 日本リモートセンシング学会第25回学術講演会論文集, 77-80, 1998.

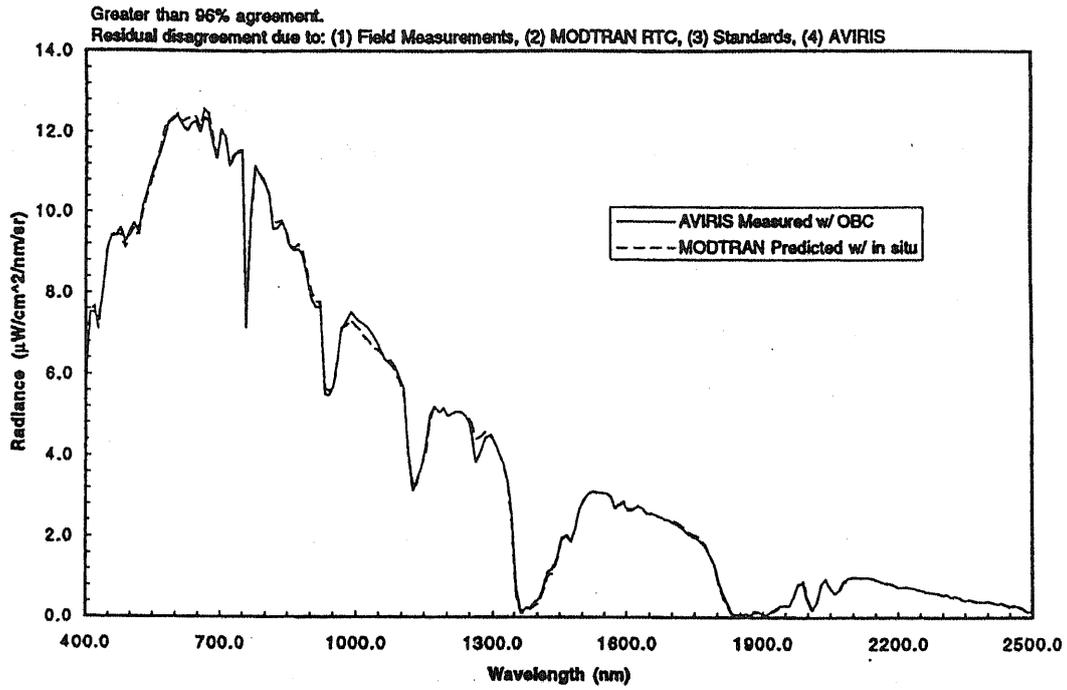


Figure 1 波長・放射輝度グラフにおけるフィッティング例 (Green *et al.*, 1998, Figure 6)⁶⁾

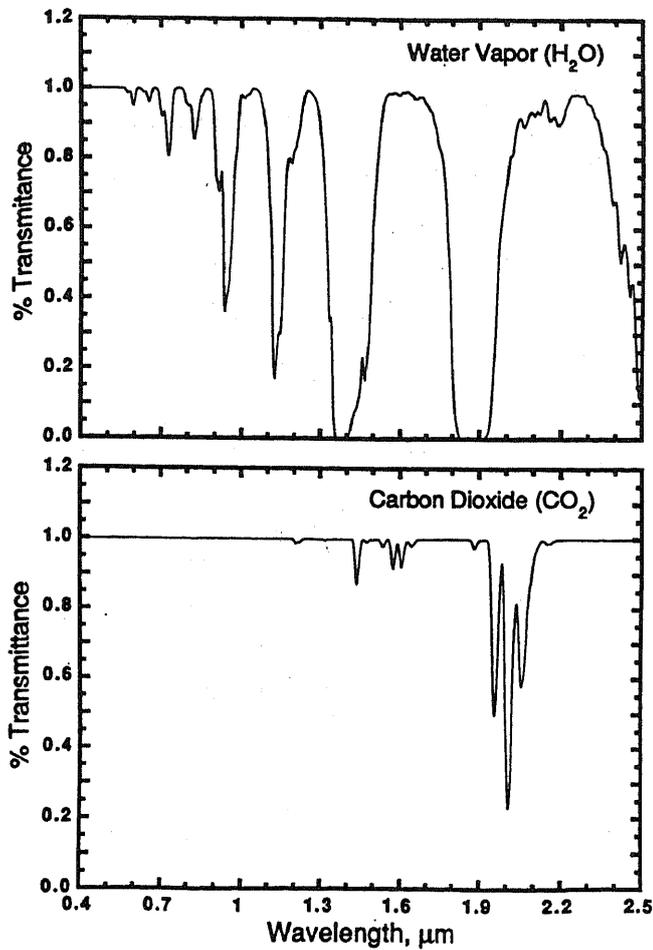


Figure 2 H₂O・CO₂の透過率 (Gao *et al.*, 1993, Figure 2)⁹⁾

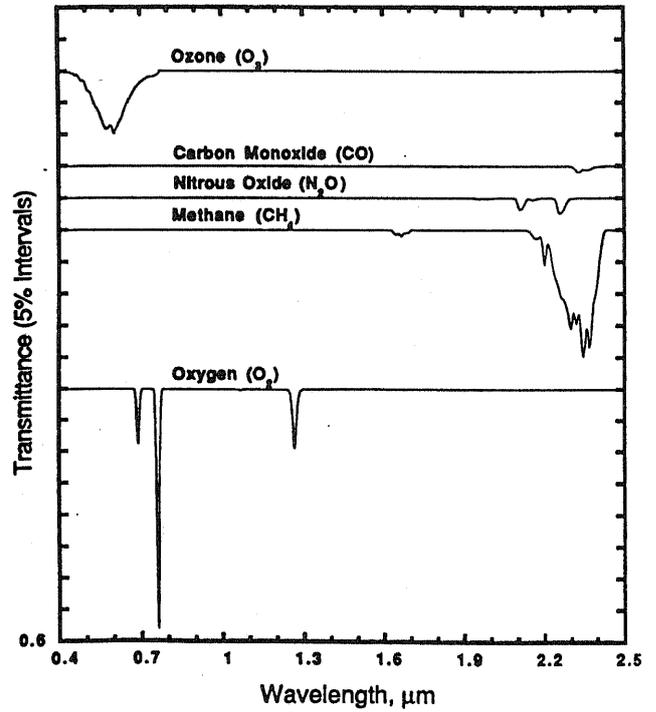


Figure 3 O₃・CO・O₂・CH₄の透過率
(Gao *et al.*, 1993, Figure 3)⁹⁾

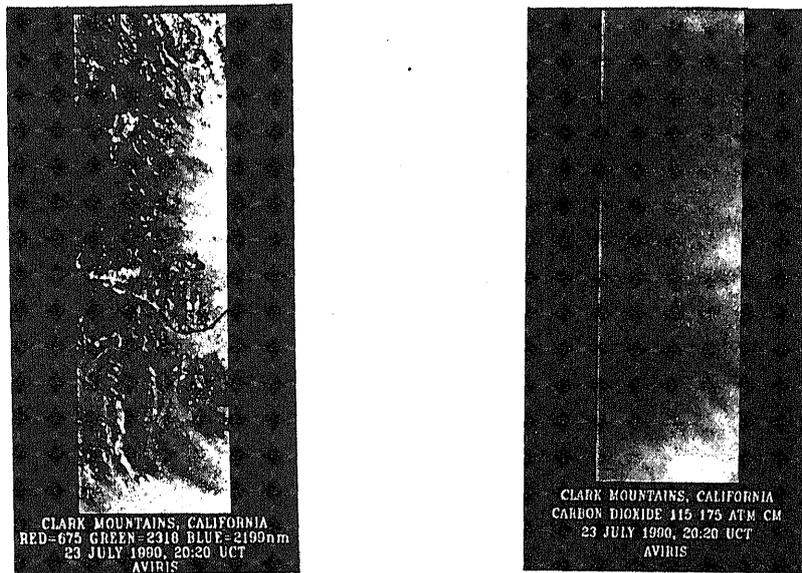


Figure 4 気圧推定のための CO₂ 濃度. 左図は AVIRIS 画像. 右図が CO₂ 濃度 (Green, 1991, Figure 4 and 6) ⁷⁾

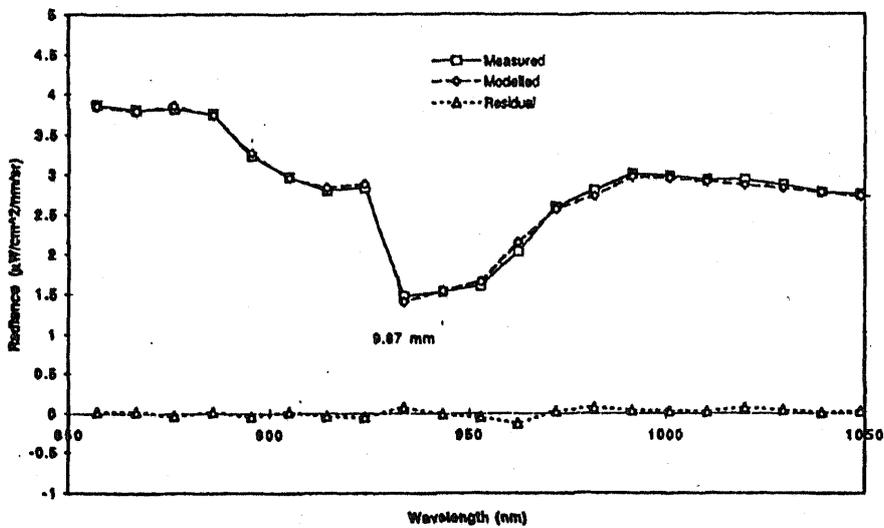


Figure 5 940nm の吸収帯での計算例 (Green, et al., 1996, Figure 10) ¹²⁾

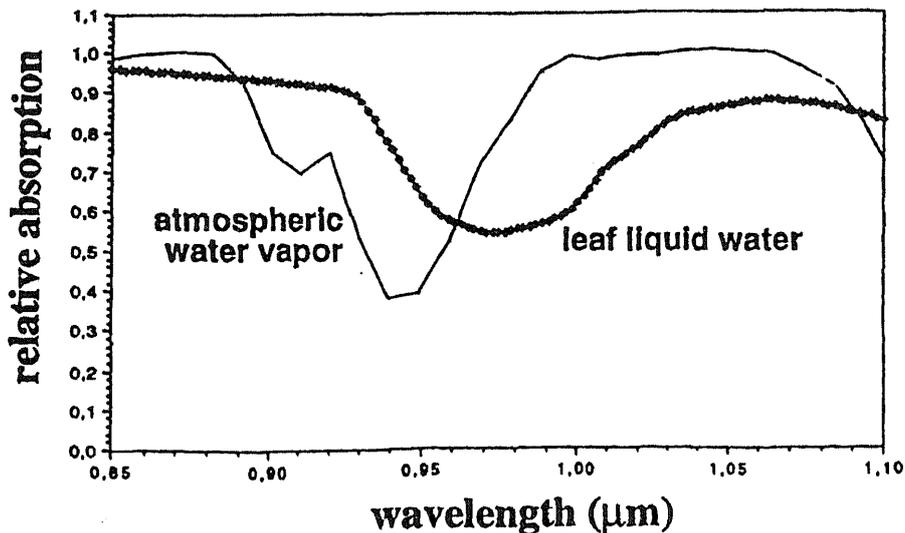


Figure 6 大気と植生の吸収帯の違い (Moreno and Green, 1996, Figure 4) ¹⁶⁾

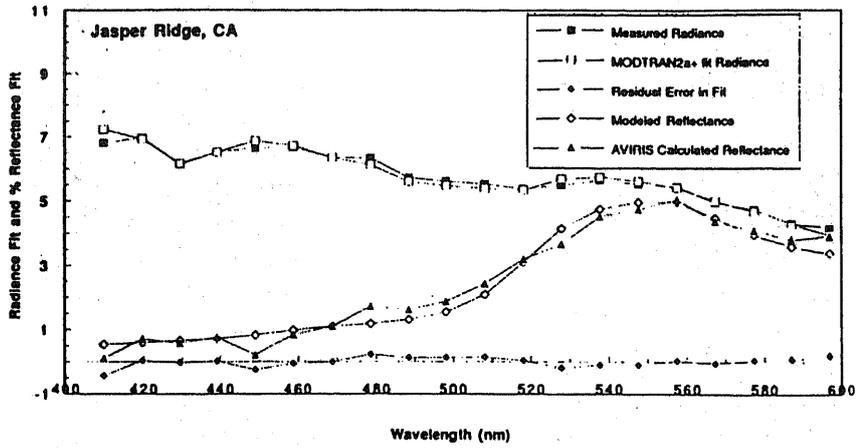


Figure 7 フィッティングによるエアロゾル推定例 (Green *et al.*, 1993, Figure 3) ²⁰⁾

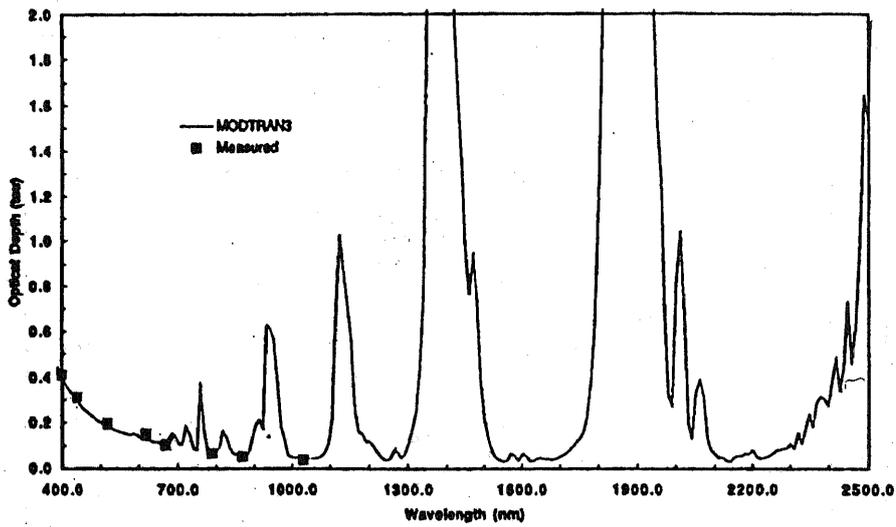


Figure 8 サンプトメータデータとの組み合わせによる推定方法例 (Green *et al.*, 1996, Figure7) ²¹⁾

At AVIRIS reference radiance 0.5 reflectance, 23.5 zenith, mid summer atmosphere, sea level.

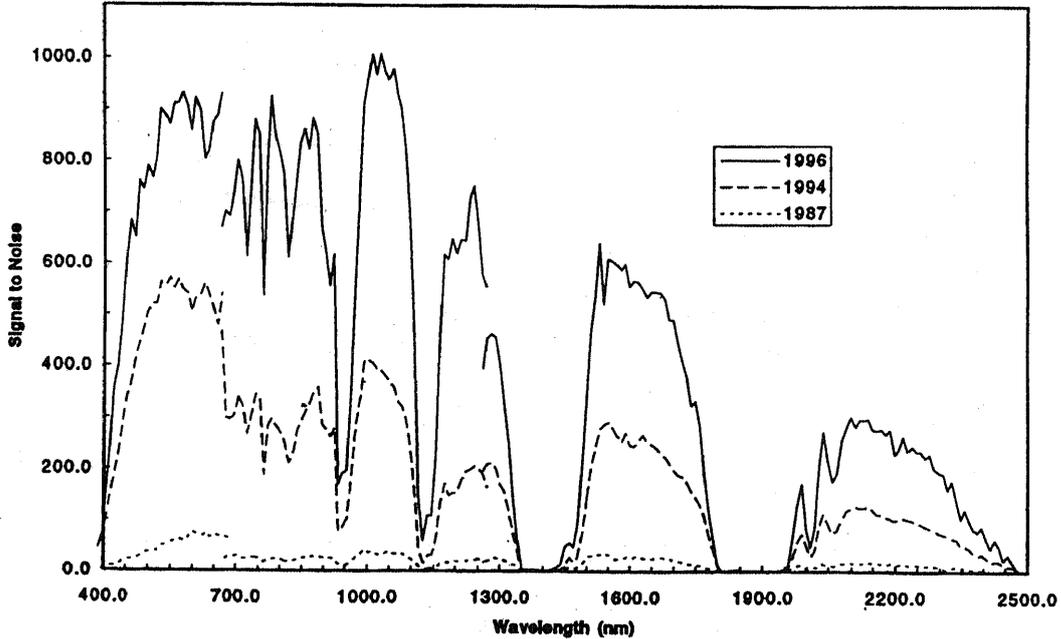


Figure 9 AVIRIS の SN 比 (Green *et al.*, 1998, Figure 6) ⁶⁾