

て、メソ擾乱の発生前からのデータを取得する。この事前に取った気象データを使って高解像メソモデルを走らせる。擾乱発生後は、メソ物理・化学モデルとレーダ等を使ってリアルタイムにリトリーバルされた3次元熱力学、気流、及び微物理構造を基に、短距離観測機が直接サンプリングのために雲内に突入する。更にモデル結果と実測値とが一致しない場合には、モデルは観測前にあらかじめ作成していたマニュアルに従って、食い違いを生じさせた可能性が高い要素についての再測を観測者側に要請する。このような観測は現段階では夢物語であるが、コンピュータの進歩、通信の進歩、そしてリアルタイム観測用簡便モデルの進歩を考えれば意外と早く実現できそうな気がしている。

参 考 文 献

- Betts, A. K. and B. A. Albrecht, 1987 : Conserved variable analysis of the convective boundary layer thermodynamic structure over the tropical oceans, *J. Atmos. Sci.*, **44**, 83-99.
- Blyth, A. M. and D. J. Raymond, 1988 : Comparison between observations of entrainment in Montana cumuli and results from a simple model, *J. Atmos. Sci.*, **45**, 1965-1972.
- Hegg, D. A., S. A. Rutledge, P. V. Hobbs, M. C. Barth and O. Hertzman, 1989 : The chemistry of a mesoscale rainband, *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, **115**, 867-886.
- Hobbs, P. V. and A. L. Rangno, 1985 : Ice particle concentrations in clouds, *J. Atmos. Sci.*, **42**, 2523-2549.
- Marecal, V. and Y. Lemaitre, 1995 : Importance of microphysical processes in the dynamics of a CSI mesoscale frontal cloud band, *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, **121**, 301-318.
- Marks, F. D. Jr., R. A. Houze, Jr. and J. F. Gamache, 1992 : Dual-aircraft investigation of the inner core of hurricane Norbert. Part I : Kinematic structure, *J. Atmos. Sci.*, **49**, 919-942.
- Nastrom, G. D. and K. S. Gage, 1985 : A climatology of atmospheric wave number spectra of wind and temperature observed by commercial aircraft, *J. Atmos. Sci.*, **42**, 950-960.
- Stith, J. L. and M. K. Polifovich, 1989 : Observations of the effects of entrainment and mixing on the droplet size spectra in a small cumulus, *J. Atmos. Sci.*, **46**, 908-919.
- Willoughby, H. E., 1990 : Temporal change of the primary circulation in tropical cyclones, *J. Atmos. Sci.*, **47**, 242-264.

102 : 501 (放射, 航空機観測)

3. 放射構造の観測

—放射に関する最近の話題と航空機観測による検証—

中 島 映 至*

1. はじめに

放射場の航空機観測は、エネルギー収支の研究のための放射フラックスの観測から、多波長イメージャーによる大気組成のリモートセンシングに至るまで幅が広い。リモートセンシングそのものが放射の観測である以上、そのほとんどすべてが放射場の研究にとって興

味がある。しかし、ここではテーマを絞って、著者が主にたずさわってきた可視・赤外放射計に関する話題を中心に議論をすることにする。マイクロウェーブ放射計による観測やレーダー、ライダーに関する観測については他の場所で語られるであろう。

可視・赤外放射計による大気放射場の観測と大気組成のリモートセンシングは、扱う波長域が太陽放射と地球放射のエネルギーの大部分が存在するスペクトル

* 東京大学気候システム研究センター。

帯に位置するために、地球・大気系のエネルギー収支の研究に直接的に係わることが多い。従って、歴史が古く比較的確立された計測技術であるにもかかわらず、昨今の気候変動に係わるいくつかの重要な問題にアプローチする有力な手法として、それを利用した精力的な研究が国際的に行なわれてきた。

2. 放射フラックスの観測

60年代から地球・大気系のエネルギー収支を直接観測することは、気象学と気候学の大きな課題であった。特に、その大きな放射効果から雲を含む大気の放射収支、特に太陽放射収支を測ることに大きな努力が図られてきた。そのためには、1機ないし2機の航空機によって雲層の上下での水平面放射ネットフラックスを測定することによって、雲層への放射エネルギー収束を測定するという極めて直接的な手法が取られてきた。しかし、観測手法の直接性にもかかわらず、これらの観測結果を調べてみると、観測された太陽放射エネルギー収束は理論値を上回るものが多く、研究者をとまどわせてきた。その大きさは 30Wm^{-2} にも及ぶ。この問題を「雲の異常吸収問題」とよぶ。この問題に関する航空機観測周辺の事情は Stephens and Tsay (1990) にまとめられている。いずれにせよ、この問題を30年近くも解決できなかったのは、航空機によって放射エネルギーフラックスを 10Wm^{-2} の精度で測ることが如何に困難であるかを物語っている。

その困難は、雲層の均質性、2層における観測の同時性、フラックス計の水平面補正など多くの航空機観測上の問題に起因している。丁寧な測定によって後2者の問題は取り除けるとしても、現実の雲が、多くの理論計算の基礎になっている平行平板性を満足する程度に均質であるかと言う問題は、本質的な問題を投げかけている。最近にいたるまで、雲場の非均質性の記述に多くの努力 (Kobayashi, 1991; Cahalan *et al.*, 1994) が払われているのは、そのためである。雲場が完全な平行平板であれば、雲層からのフォトンの散逸は、雲の上下端からのみで起こる。しかし、有限な雲や水平方向に不均質な雲の場合には、側面からのフォトンの散逸効果は無視することができない。実際の雲の場合には、いつもこのような現象が起こっているが、雲場の複雑性のために気候モデルに取り込むに耐えられるだけの経験則は集まっていない。Hayasaka *et al.* (1995) は、側面からのフォトンの散逸は、光吸収の無い可視域と、主に雲が太陽光を吸収する近赤外域では

同じ程度であると言う Ackerman and Cox (1981) の指摘を利用して、側方散逸の補正を行なっている。その結果によると晴天積雲などの水平方向に非常に不均質な場合、水平面フラックス計による放射フラックス観測では、雲の側面からのフォトンの散逸が無視できず、これがみかけの吸収を作り出していることを指摘している。このみかけの吸収を差し引くと雲層が吸収する太陽放射量は、多くの場合、理論値と良く一致する。最近では、この異常吸収の問題はむしろ晴天大気内に主な原因があるとして見直しが行なわれつつある (Arking, 1996)。

航空機観測の技術上の問題についても、正確な放射フラックスの測定のための努力が続けられてきた。航空機の姿勢に強く依存する直達光と、比較的安定に測定できる散乱光を分離する手法や、赤外フラックス計の問題点であるドームからの熱赤外放射の除去、より難しい分光放射フラックスの高精度観測の開発などがそれである。特に Varelo 等のグループは、アークティックヘイズ層、ピナツボ火山起源の成層圏エアロゾル層、湾岸戦争時の油井火災起源のエアロゾル層の放射エネルギー収束を求めることができた (例えば Pilewskie and Valero, 1992)。これらの研究は、エアロゾルの気候への影響において重要であるにもかかわらず今まで無視されてきたエアロゾルの光吸収特性をモデル化するという視点から重要な研究である。例えば Ohta *et al.* (1996) によると、アリゾナのレモン山頂のような対流圏中層に分類されるような大気中のエアロゾルでも、その一次散乱アルベドは人間起源の煤によって0.9程度になりうるが、このような大きな吸収の可能性については従来あまり知られていなかった。

3. 雲とエアロゾルのリモートセンシング

可視・近赤外放射計による観測で、80年代に入って大きく進歩した分野の一つに、雲やエアロゾルのリモートセンシングがある。特に、ISCCP (国際衛星雲気候計画) が行なっている FIRE という雲と放射に関する局地実験を契機にいくつかの進展が見られた。ヨーロッパでは上層雲に注目した EUCREX、日本では WCRP の雲と放射に関する航空機観測 WENPEX (West North Pacific Cloud-Radiation Experiment) が行なわれた。これらの航空機観測では、放射フラックスや波長別の放射輝度の測定が精力的に行なわれ、雲の微物理構造と放射場の関連が明らかになってきた。すなわち、光学的にこの程度の厚さの雲は、実際

に理論で予測される放射輝度やフラックス場を伴っているのか?それとも、非平行平板性が強くて、このような近似は実用的ではないのか?純粋の水で雲粒は構成されていると仮定して良いのか?それとも、可視域においても我々の知らない吸収を示すのか?このような問題は、人工衛星による全球場の導出の前に、ケーススタディーを積み重ねて明らかにする必要があるが是非ともあった。

このような測定のために、NASA は80年代初期にはすでに7チャンネルの雲放射スキャナー (NASA/MCR) を実現している (Curran *et al.*, 1981)。イギリス気象局では、1方向のみを見る8チャンネルの放射計 (UK/MCR; Rawlins and Foot, 1990)、日本では気象研究所の波長別水平面フラックス計が製作された (Asano *et al.*, 1995)。この時期、航跡雲が示す人間起源のエアロゾル-雲相互作用が注目されるようになって、等価粒径の測定が極めて重要になってきた (Radke *et al.*, 1989)。Rawlins and Foot (1990) の先駆的な航空機観測に引き続いて、Nakajima *et al.* (1991) は可視、近赤外放射輝度の解析から得られた海洋性層積雲粒の等価粒径の空間変動パターンが実測値と良く一致することを示した。特に、光学的厚さと等価粒径の間には、正の相関を示すことも負の相関を示すこともあることが明らかになった。これは霧粒の存在によって雲の光学的特性が大きく変化することを意味している。特に、航跡雲ではこの変化はドラマティックに起こる。このような知見は雲-エアロゾル相互作用の気候影響を見積もるために重要である。ここで、これらの観測は、NASA の高高度観測機 ER-2によって初めて可能であったことを指摘しておく必要がある。

また、雲の異常吸収の問題にせまるために、雲層内の拡散領域での放射場から雲層の放射フラックス収束を測定しようとする極めてユニークな試みが King *et al.* (1990) によって行なわれた。この放射計を Cloud Absorption Radiometer (CAR) と呼ぶ。FIRE における海洋性層積雲の観測では、顕著な異常吸収は発見できなかった。

90年代に入って、航空機観測は世界的に大きく発展し、航空機観測第3世代に入ったと言える。測器に着目してみると、高度な放射計が新たに製作されている。NASA では EOS-AM/MODIS シミュレーターである50チャンネル (0.55ミクロンから14.2ミクロン) の MAS (King *et al.*, 1996) や224チャンネル (0.4ミクロンから2.45ミクロン) の AVIRIS (Vane *et al.*,

1984)、NASDA の ADEOS2/GLI シミュレーターとも言うべき46チャンネル (0.4ミクロンから12.45ミクロン) の AMSS (NASDA, 1995)、イギリス気象局の16チャンネル (0.55ミクロンから12.0ミクロン) の SAFIRE (Foot, 1996) などの多波長スキャナーなどがそれである。

この時期、気候問題と直結する多数の航空機観測が行なわれている。すなわち、航跡雲に関する観測 (MAST; Platnick *et al.*, 1996) や飛行機雲に関する観測 (SUCCESS)、熱帯上層雲に関する観測 (SEAPEX)、都市起源エアロゾルによる雲の変質に関する観測 (TARFOX) (Tropospheric Aerosol Radiative Forcing Observational Experiment) などが行なわれた。日本では科学技術庁の JACCS において雲と放射の航空機観測が持続的に行なわれている。ここでは、欧米の観測が、多機関、多国的に測器や航空機を持ち寄った共同観測によって行なわれていることを指摘しなければならない。各機関が蓄積した80年代のハードウェアへの投資がこのような形で開花したとも言える。日本では残念ながらシステムの硬さからこのような進展が必ずしも行なわれていない。

最後に、近年、人工衛星リモートセンシングを支援する手法として代替校正が盛んになってきた事に言及したい。これは、太陽光やランプによって衛星搭載放射計をフライト時に校正する手法に対して、リモートセンシングの成果物を地上観測で得られる検証データに一致するように放射計の検定値も同時に逆問題として求めようと言うものである。気候研究に必要な長期の衛星観測にとって、代替校正手法は非常に強力でも比較的安価な校正手法を提供しようとしている。このような手法が可能になったのは、述べてきた様な80年代における航空機観測や地上観測をもとに、現実の現象を良くシミュレートできる大気放射伝達モデルが確立されてきたことによる。このような観点からも宇宙機関は地上支援観測システムと航空機観測システムへの投資を重視している。

4. 結論

このように概観してみると、過去30年間にわたって、航空機による放射観測は気象と気候の重要な問題解決に大きく貢献してきたと言える。衛星観測がより高度になるにつれて、それを支援する手法として、航空機観測はその重要性をますます増してきた。規模も大きくなっている。それを反映して、最近の欧米の航空機

観測に関する論文は、1つの論文に登場する著者名が多くなってきたと思う。余談ではあるが、つい最近、タイを訪れた際に、人工降雨実験のためにエアロコマンダー十数機が気象観測を行なっているのを見てきた。日本でも貴重なノレンバーク粒子計数器も装備されていると言う。

このような状況のもとで、日本の気象・気候コミュニティが自由に使用できる航空機が存在しないと言うのは、今後、大きなハンディを我々が持ち続けることを意味している。唯一、コミュニティでシェアして活躍しているのは、NASDA のチャーター機である。しかし、これも飛行時間の制約から衛星ミッションをサポートするために特化せざるを得ない状況にある。今後、我々のコミュニティが使用できる航空機を導入する努力をしなければならないだろう。またこれらの大型プロジェクトを支えるためには、重要な問題解決のために局面局面で人が集中し、個人に負担のかからない流動的なプロジェクト型の研究体制と社会構造の実現が日本でも必要である事を指摘して、結論としたい。

参 考 文 献

- Ackerman, S. A. and S. K. Cox, 1981 : Aircraft observations of the shortwave fractional absorptance of non-homogeneous clouds, *J. Appl. Meteor.*, **20**, 1510-1515.
- Arking, A., 1996 : Absorption of solar energy in the atmosphere : Discrepancy between model and observations, *Science*, **273**, 779-782
- Asano, S., M. Shiobara and A. Uchiyama, 1995 : Estimation of cloud physical parameters from airborne solar spectral reflectance measurements for stratocumulus clouds, *J. Atmos. Sci.*, **52**, 3556-3576.
- Cahalan, R. F., W. Ridgway, W. J. Wiscombe, S. Gollmer and Harshvardhan, 1994 : Independent pixel and Monte Carlo estimates of stratocumulus albedo, *J. Atmos. Sci.*, **51**, 3776-3790.
- Curran, H., L. Kyle, L. R. Blaine, J. Smith and T. D. Clem, 1981 : Multichannel scanning radiometer for remote sensing cloud physical parameters, *Rev. Sci. Instrum.*, **52**, 1546-1555.
- Foot, J. S., 1996 : Information on SAFIRE, Private communication.
- Hayasaka, T., N. Kikuchi and M. Tanaka, 1995 : Absorption of solar radiation by stratocumulus clouds : Aircraft measurements and theoretical calculations, *J. Appl. Meteor.*, **34**, 1047-1055.
- King, M. D., W. P. Menzel, P. S. Grant, J. S. Myers, G. T. Arnold, S. E. Platnick, L. E. Gumley, S.-C. Tsay, C. C. Moeller, M. Fitzgerald, K. S. Brown and F. G. Osterwisch, 1996 : Airborne scanning spectrometer for remote sensing of cloud, aerosol, water vapor, and surface properties, *J. Atmos. Oceanic Tech.*, **13**, 777-794.
- King, M. D., L. F. Radke and P. V. Hobbs, 1990 : Determination of the spectral absorption of solar radiation by marine stratocumulus clouds from airborne measurements within clouds, *J. Atmos. Sci.*, **47**, 894-907.
- Kobayashi, T., 1991 : Reflected solar flux for horizontally inhomogeneous atmosphere, *J. Atmos. Sci.*, **48**, 2436-2447.
- Nakajima, T., M. D. King, J. D. Spinhirne and L. F. Radke, 1991 : Determination of the optical thickness and effective radius of clouds from reflected solar radiation measurements. Part II : Marine stratocumulus observations, *J. Atmos. Sci.*, **48**, 728-750.
- NASDA, 1995 : AMSSの仕様について, NASDA報告書.
- Ohta, S., M. Hori, N. Murao, S. Yamagata and K. Gast, 1996 : Chemical and optical properties of lower tropospheric aerosols measured at Mt. Lemmon in Arizona, *J. Global Environ. Eng.*, **2**, 67-78.
- Pilewskie, P. and F. P. J. Valero, 1992 : Radiative effects of the smoke clouds from the Kuwait oil fires, *J. Geophys. Res.*, **97**, 14541-14544.
- Platnick, S., P. A. Durkee, K. Nielsen, J. P. Taylor, S.-C. Tsay, M. D. King, R. J. Ferek and P. V. Hobbs, 1996 : The role of background cloud microphysics in ship track formation, *J. Atmos. Sci.*, submitted.
- Radke, L. F., J. A. Coakley, Jr. and M. D. King, 1989 : Direct and remote sensing observations of the effects of ships on clouds, *Science*, **246**, 1146-1149.
- Rawlins, F. and J. S. Foot, 1990 : Remotely sensed measurements of stratocumulus properties during FIRE using the C130 aircraft multi-channel radiometer, *J. Atmos. Sci.*, **47**, 2488-2503.
- Stephens, G. L. and S.-C. Tsay, 1990 : On the cloud absorption anomaly, *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, **116**, 671-704.
- Vane, G., M. Chrisp, H. Enmark, S. Macenka and J. Solomon, 1984 : Airborne Visible/Infrared Imaging Spectrometer : An advanced tool for earth remote sensing, *Proc. IEEE Int'l Geosci. Remote Sensing Symposium, SP 215*, 751-757.