

館野における雲とエアロゾルの地表面放射強制の見積もり

高薮 縁、松井一郎、杉本伸夫 (国立環境研)、上野丈夫 (高層気象台) 青木一真 (北大)、
対馬洋子 (地球フロンティア)、中島映至 (東京大 CCSR)

要旨：

館野高層気象台の日射・放射観測値 (BSRN 準拠) と、高精度な放射伝達モデルに高層観測プロファイルおよびエアロゾル観測値とを入力した計算とにより、地表面における雲とエアロゾルの短波・長波の放射強制を見積る手法を開発し、1996 年の一年間の値を計算した。1996 年平均では、雲+エアロゾルの短波強制は -81W/m^2 、晴天時のエアロゾル短波強制は -18W/m^2 、雲の下向き長波強制は $+47\text{W/m}^2$ と見積もられた。エアロゾルの短波強制は、エアロゾル中の煤の比率に対して敏感である。感度実験から、1996 年の各月において観測値との対応のよい煤の比率は 10-12 月が 20%、1,2,7 月が 10%、5,6,8 月が 5%、9 月が 0%であった。下向き長波成分は、水蒸気量に関して感度が大きい。館野における 1 日 2 回の定常高層観測データのみを用いた場合、夏季の晴天日の日中に限り、雲の下向き長波強制の計算値が負になってしまう事例が見付かった。これは、館野における夏季の晴天日の日中に下層水蒸気量が減少する可能性があることが原因であると推測された。

1. はじめに

地球温暖化予測研究において、雲の気候影響を正確に把握することは重要な問題である (Cess et al.1989)。現実大気における雲とエアロゾルの放射効果の全球的な推定は、気候システムを理解する上でまず必要であるが、そのためには衛星観測の利用が不可欠である。地球外放射収支における雲の効果については、ERBE(Earth Radiation Budget Experiment) データを用いて全球的な定量化が成功してきた (Hartmann 1993)。一方、地上放射収支における雲の効果については、現在 WCRP の ISCCP プロジェクト等において、衛星の可視赤外画像から得られた雲情報を用いて全球的に求める試み等がなされている (Zhang and Rossow,1993)。しかしながら、限定された衛星データによって地表面短波放射量を計算するためには、様々な仮定やモデルが入らざるを得ない。特に雲の放射特性は、データとして得にくい微物理や形態に大きく影響される。このような状況で推定精度を上げるためには、精度のよい地上観測を利用した多くの検証研究が必要である。

本研究では、館野における高層ゾンデ観測値およびスカイラジオメーター観測によるエアロゾルの光学特性値を入力した高精度放射伝達計算を行ない、BSRN 基準を満たす精度の短波放射観測データ (直達・散乱・反射日射 1 分値) と併用して雲とエアロゾルの地表面放射強制の年間値を推定した (Takayabu et al. 1998)。

2. 解析データ

解析には以下のデータを用いた。

1. 館野高層気象台 直達・散乱・反射日射観測一分値 (Eppley NIP 型, EKO B 型通風式)
2. 館野高層気象台 下向き長波放射観測一分値 (Eppley PIR 型)
3. 館野高層気象台 高層ゾンデ観測 湿度・気温プロファイル 00Z,12Z
4. スカイラジオメタ観測によるエアロゾルの光学的厚さおよび粒径分布 (晴天時のみ、約 15 分間隔)

3. 雲とエアロゾルの地表面短波強制

地表面短波強制は晴天フラックスとトータルフラックスとの差で定義される。しかしながら、観測値から晴天フラックスを求めることは、雲やエアロゾルの混入のために困難である。一方逆に、放射伝達計算からトータルフラックスを求めることは、雲のオーバーラッピングや有限雲の取り扱いのために困難である。

そこでここでは、晴天フラックスは、ラジオゾンデ観測による温度湿度プロファイルを用いたレイリー散乱大気についての計算 ($0.3\text{-}3.0\mu\text{m}$) により求め、雲+エアロゾルの地表面短波強制 (CAF)、エアロゾル強制 (AF)、および計算誤差推定値 (AE) は以下のように定義した (図 1)。Ftotal(obs), Faero(obs), Fclear(calc), Faero(calc) は各々、地表面フラックス観測値、スカイラジオメタ観測時の地表面フラックス観測値、レイリー散乱大気の地表面フラックス計算値、エアロゾルの光学特性を入れた地表面フラックス計算値である。

$$\text{CAF} = \text{Ftotal}(\text{obs}) - \text{Fclear}(\text{calc}) \quad \text{雲+エアロゾル放射強制}$$

$$\text{AF} = \text{Faero}(\text{calc}) - \text{Fclear}(\text{calc}) \quad \text{エアロゾル放射強制}$$

$$\text{AE} = \text{Faero}(\text{calc}) - \text{Faero}(\text{obs}) \quad \text{計算誤差推定値}$$

上の方法で求めた雲+エアロゾルの地表面短波強制の 1996 年の年間平均値は -81 W m^{-2} であった (図 2)。これは、大気上端の太陽入射の約 24% に当たる。一方、エアロゾル強制は、3-4 月を除く年間平均値が -18 W m^{-2} で、約 5% にあたる。

エアロゾルに含まれる煤の割合に対する感度実験の結果、1 月と 7 月は 10%、2 月および 10-12 月は 20%、5, 6, 8 月は 5%、9 月は 0% の煤の割合が推定された。この値は、これまでに観測されている煤の割合や都市分布と風向の関係とよく一致する。

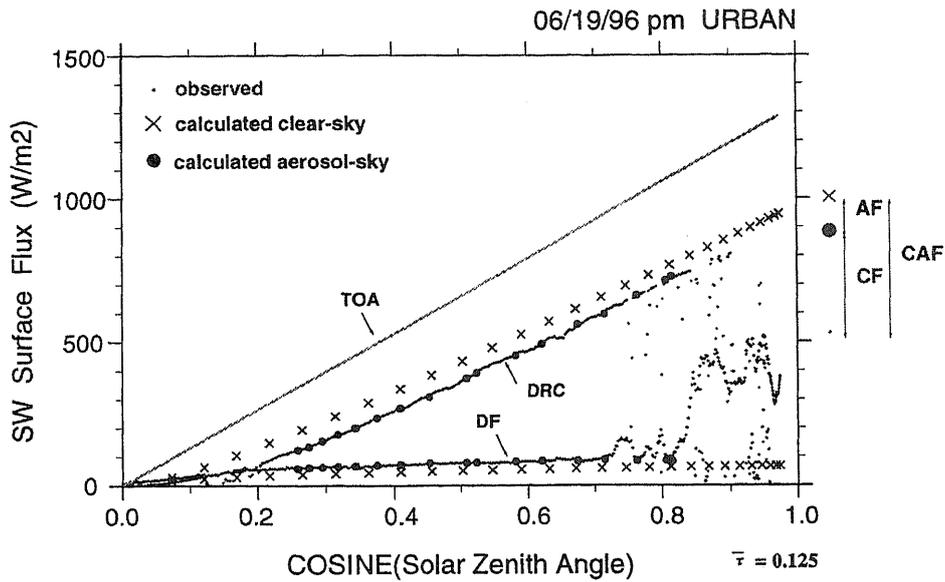


図1：1996年6月19日午後の1分平均直達・散乱日射観測値(・)、エアロゾルなしの晴天大気フラックス計算値(×)、エアロゾル観測値を入れた計算値。横軸は、太陽天頂角の余弦。直線は大気上端での入射量。この例のエアロゾルの $5\mu\text{m}$ での光学的厚さの平均値は0.13であった。

TATENO SW CLOUD+AEROSOL, D-AEROSOL FORCING

1996 mean CAF: -81 W/m^2 (24%) 354 days

AF : -18 W/m^2 (5%) 91 days

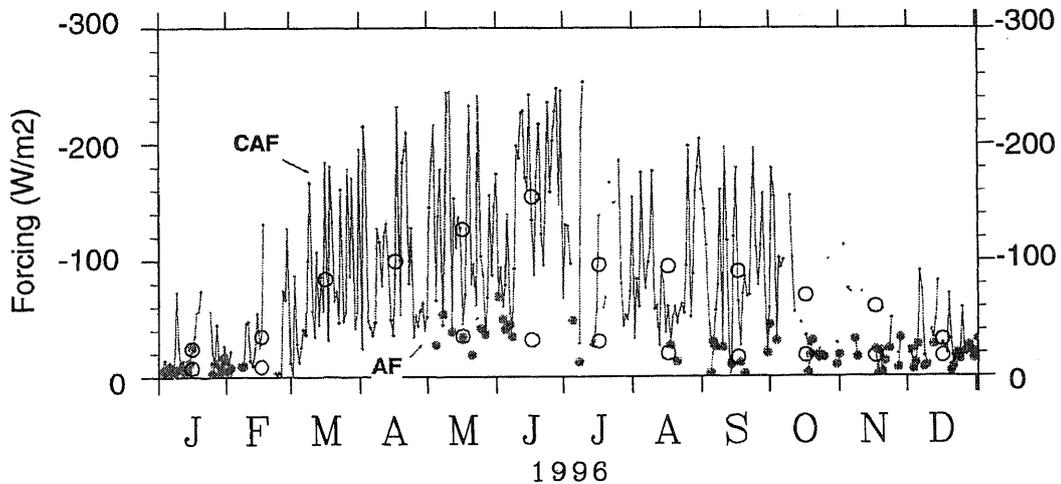


図2：1996年の雲+エアロゾル地表短波放射強制(CAF)とエアロゾル地表短波強制(AF)の時系列。直線と●は日平均値、○(上：CAF、下：AF)は月平均値。図上部に年平均値を示す。ただし、2/8-4/30および7/12-7/30はエアロゾルデータ欠測。

4. 雲の地表面長波強制

雲の下向き長波強制は、短波強制と同様に館野高層気象台の下向き長波観測値 FLWtotal(obs) と 1 日 2 回のラジオゾンデ観測による大気プロファイルを用いた放射伝達計算 (3-100 μ m) により求めた晴天フラックス FLWclear(calc) との差から推定した (図 3 a)。

$$CFLW = FLW_{total}(obs) - FLW_{clear}(calc) \quad \text{雲の下向き長波放射強制}$$

ところが、夏季の日中に $FLW_{total}(obs) < FLW_{clear}(calc)$ となってしまう事例があることが解った (図 3 b)。この 7 月 17 日について、つくば域降雨観測実験による水蒸気観測値を詳しくしらべて見ると、日中に下層水蒸気量が減少していることが解った。つまり 00z と 12z の高層観測の内層により、日中の可降水量が過大評価され下向き晴天長波放射の過大評価をもたらしていることが推測された。

そこで、ここで年平均長波放射強制を推定するにあたっては、長波放射の日変化が小さいことを前提にしてゾンデ観測の存在する 00z と 12z の値のみを用いた。結果を図 4 に示すが、雲の下向き長波強制の 1996 年平均値は $+47W m^{-2}$ と見積もられた。

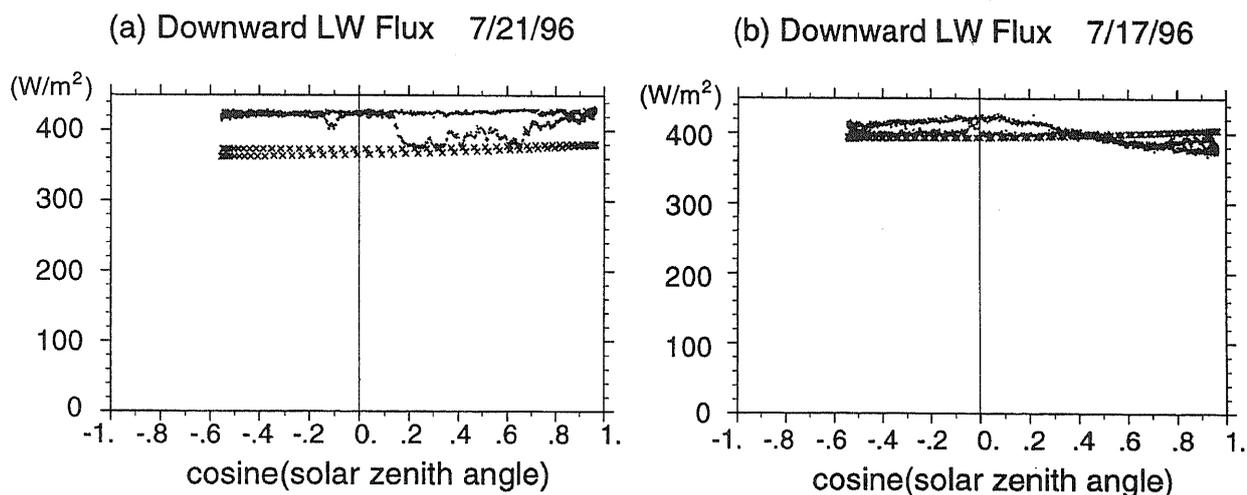
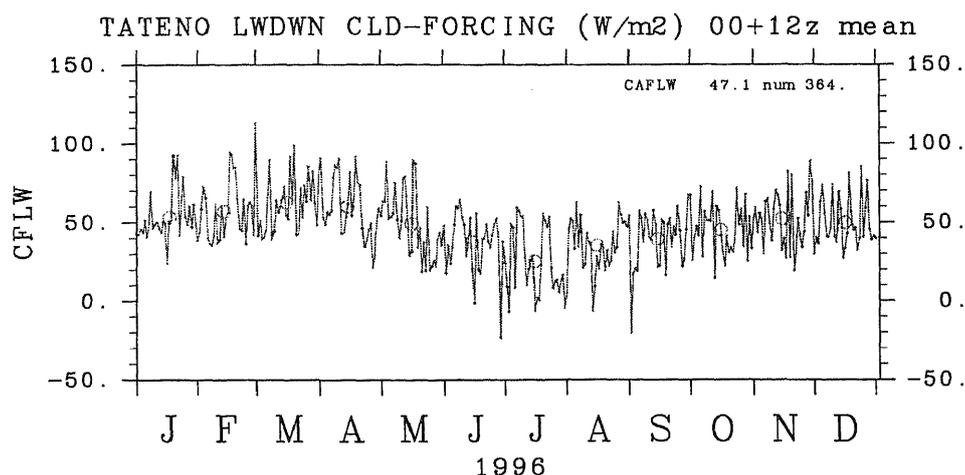


図 3: 1996 年 7 月 21 日 (a) と 7 月 17 日 (b) の 1 分平均下向き長波放射観測値 (・) と晴天下向き長波放射計算値 (×)。横軸は、太陽天頂角の余弦。



/raid2/.../tateno/mplcflw.f

16:21:55 98/ 5/20

図4：1996年の雲の地表面下向き長波放射強制(CFLW)の時系列。直線は日平均値、○は月平均値。ただし、00Zと12Zでの値のみ用いた。

5. 今後の課題

1. スカイラジオメタによるエアロゾル光学特性の推定値は、複素屈折率の仮定に依存する。今回利用したスカイラジオメタ観測によるエアロゾル特性のうち、特に粒径分布は観測放射量との一致が悪かった。本研究の枠外ではあるが、粒径分布データが短波放射の観測値と矛盾しないことを検証として、エアロゾル光学特性の推定方法を検討する必要がある。特に今回の研究の中で短波放射量との best fit によりエアロゾル中の煤の割合を推定したが、本来はこの結果をエアロゾルの光学特性の推定にフィードバックする必要がある。
2. 晴天長波放射の計算値が実測値を上回る事例の理由として、夏季日中の水蒸気量の過大評価を推測したが、今後、実際の大気観測データを用いて検証し、水蒸気の連続観測値等を用いることによる推定方法の改良を検討する予定である。
3. 館野のような精度の高い地上観測データを多く収集し、短波・長波の雲・エアロゾルの放射強制の推定事例を増やし、衛星データを用いた全球的な地上放射フラックス計算の検証を行う。

謝辞

可降水量の連続観測データおよび臨時高層観測データについては、つくば域降雨観測実験からご提供いただきました。RSTAR5 を用いた放射伝達計算に当たって、国立環境研の日暮明子博士および宇宙開発事業団の中島孝氏にお世話になりました。

参考文献

- Cess, R. D. et al, 1989: Interpretation of cloud-climate feedback as produced by 14 atmospheric general circulation models. *SCIENCE*, 245, 513-516.
- Hartmann, D. L., 1993: Radiative Effects of Clouds on Earth's Climate. *Aerosol-Cloud-Climate Interactions*, Academic Press, 151-173.
- Takayabu, Y.N., T. Ueno, T. Nakajima, I. Matsui, Y. Tsushima, K. Aoki, N. Sugimoto, and I. Uno , 1998: Estimate of the cloud and aerosol effects on the surface radiative flux based on the measurements and the transfer model calculations. Part I: Shortwave forcing in Tateno, Japan, *submitted to J. Meteor. Soc. Japan*.
- Zhang, Y.-C. and Rossow, W. B., 1995: Calculation of surface and top of atmosphere radiative fluxes from physical quantities based on ISCCP data sets. 1. Method and sensitivity to input data uncertainties., *J. Geophys. Res.*, 100, 1149-1165.