

## 大気の日射吸収をめぐる話題：「異常吸収」は無い\*

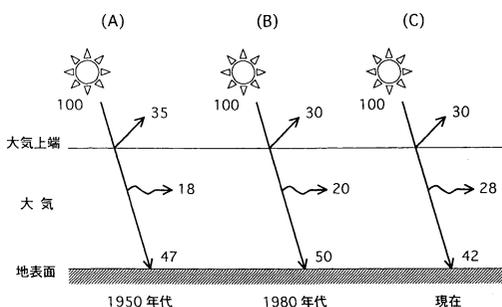
浅野 正二\*\*

### 1. はじめに

太陽からの放射は、地球上の気象・海象のエネルギー源である。地球にふり注ぐ太陽放射の一部は、空気分子やエアロソル、雲などによる散乱および地表面での反射により宇宙空間へ放散される。残りが大気および地表面で吸収されて、それらを直接加熱し、また、地表面で水蒸気を蒸発させる熱となる。太陽放射（日射とも呼ぶ）がどこで、どれだけ吸収されるかは、地表面—大気系の中での加熱分布を決定すると同時に水循環をコントロールして、大気と海洋の運動に支配的な影響を与える。しいては大気の状態としての気候に重大な影響を及ぼす。地表面—大気系における太陽放射エネルギーの分配の正確な見積りは、前世紀を通して大気放射学の大きな関心事の一つであった。最近、大気による日射吸収に関して従来の理解の修正をせまる研究の進展があったので、我々の研究成果とからめて紹介する。

### 2. 日射収支の不確定

地表面—大気系における太陽放射エネルギーの分配の見積りは、研究の進展とともに大きく変わってきた。第1図に、1950年代、1980年代、及び現代の代表的な評価の例を示す。大気上端に入射する太陽放射エネルギーを100単位（ $342 \text{ Wm}^{-2}$ に相等）としたときの地表面—大気系におけるエネルギー分配を表す。なお、1単位相等の放射エネルギー（ $3.4 \text{ Wm}^{-2}$ ）は、大気中の二酸化炭素の濃度を瞬間的に倍増した場合の温室効果（ $4 \text{ Wm}^{-2}$ ）と同程度であることに留意されたい。地球が反射する太陽放射の割合（地球のアルベド；30単位）の



第1図 全球平均・年平均状態の太陽放射収支。大気上端に入射する太陽放射エネルギーを100（ $342 \text{ Wm}^{-2}$ に相等）としたときの地表面—大気系における分配を表し、(A)1950年代、(B)1980年代、および(C)現代の代表的な見積値。

見積りに、1971年に初めて人工衛星による観測が利用され（Vonder Haar and Suomi, 1971）、地球はそれ以前の見積り（ $>35$ 単位）に比べて暗い惑星であることが明らかになった。他方、大気による日射吸収率の見積りは、時代とともに大きな値の方へ、従って、残余の地表面における吸収率は逆に小さい方へ推移している。すなわち、大気は、それ以前に考えられていたよりも、日射をより多く吸収するという方向に認識が変わってきた。このことは、大気による日射吸収が（例えば、人間活動の増大にともない）実際に強まったことを表しているのであろうか？あるいは、大気の放射特性に対する私達の理解が深まり、見積りの精度が向上した結果であろうか？前者の可能性も否定できないが、現在の評価の精度ではそれを検証することは出来ない。ちなみに、第1図の(C)にあげた現代の評価は、後述するアメリカ地球物理連合学会（AGU）のChapman Conferenceにおいて、現在の最も確からしい値として提示されたもので、スイス工科大学の大村教授グループによるGEBA（Global Energy Balance

\* News about the atmospheric absorption of solar radiation : No evidence of absorption anomaly.

\*\* ASANO Shoji, 東北大学大学院理学研究科大気海洋変動観測研究センター。

Archive) データベース (Gilgen and Ohmura, 1999) に基づく見積りである。この見積りは、1990年代に出された他の評価(例えば, Liou, 1992; Wielicki *et al.*, 1995; Kiel and Trenberth, 1997; Li *et al.*, 1997; Wild *et al.*, 1998) の中でも、大気吸収を最も大きく見積もったものである。これら1990年代の評価の間にも最大で7単位 (約 $25\text{Wm}^{-2}$ ) の違いがあるが、1980年代までの見積りに比べると、いずれも大気による吸収を大きく見積っている。

さて、大気による日射吸収率を見積り際の最大の不確定要因となったのは、地表面日射量の全球観測データが不備であること、および、太陽放射に対する雲の効果や雲分布の実態が不確実なことである。地表面日射量の観測データに関しては、前出のGEBAやWCRP(世界気候研究計画)の下で整備されているBSRN(Baseline Surface Radiation Network; Ohmura *et al.*, 1998)の拡充、および衛星観測からの推定技術の進歩により、1990年代に大きな進展があった。また、全球における雲分布に関する知見は、1983年に開始された国際衛星雲気候計画(ISCCP; Rossow and Schiffer, 1999)等を始めとする衛星を利用した観測により急速に改善されつつある。他方、雲の日射に対する効果に関しては評価が定まらず、数十年にわたって混乱が続いた。すなわち、雲による日射吸収の従来の観測値が、放射伝達モデルによる計算値に比べて概して大きく、その違いはしばしば既存の放射知識では説明がつかない程であった。そのような現象は、雲による日射の異常吸収(anomalous absorption)と呼ばれ、その真偽あるいは原因をめぐる論争が続いた。Stephens and Tsay (1990)は、1980年代までの研究をレビューし、異常吸収の現象は可視よりも近赤外の波長域に顕著に現れると指摘した。そして、原因と考えられる3つの要因(①測定できない巨大雲粒子の影響、②エアロソル(aerosol)や水蒸気の連続吸収帯などによる吸収、③雲の不均質性の効果)を選んで、詳細に検討した。その結果、その時点の知識と観測精度ではどの要因も観測と理論との不一致を説明するには不十分であるとし、問題解決には、それぞれの要因に関係する研究をさらに精密化するとともに、日射測器や観測法の改善を図ることが必要であると指摘した。その後も、見逃している吸収物質やプロセスの有無を含めた異常吸収の“犯人探し”につながるさまざまな研究が行われた。1995年には、曇天大気の日射吸収率が、雲のない晴天大気の場合に比べて大きくなり、

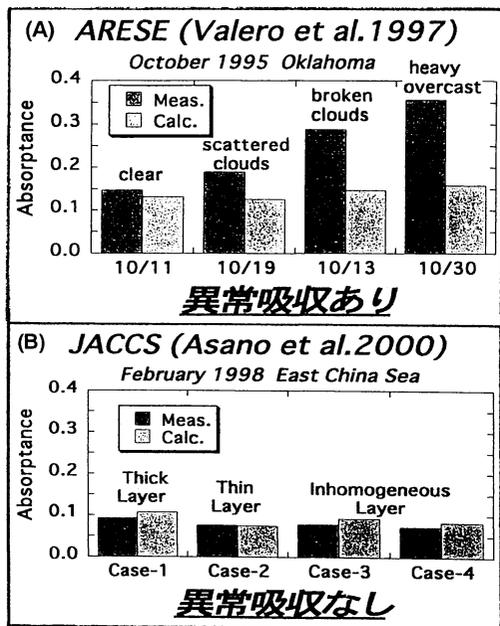
雲の存在が大気の日射吸収を著しく増強する(enhanced absorption)とする主張が相次いで現れた(例えば, Cess *et al.*, 1995; Ramanathan *et al.*, 1995; Pilewskie and Valero, 1995)。そして、異常吸収の問題は大気全体の問題に広がった。

さらに1990年代の前半には、地表面における日射量に関しても、観測値と大気大循環モデル(GCM)等による計算値との不一致が大きな問題になっていた。これは晴天大気の場合にも生じ、おおかたのGCMによる計算値は観測値を $20\sim 40\text{Wm}^{-2}$ も過大評価した。このことは、GCMが大気による日射吸収を過小評価している可能性があることを示唆する。後の研究により、この不一致の最大の原因は、当時のGCMがエアロソルを正當に考慮していなかったことにあることが明らかになった(例えば, Wild *et al.*, 1999)。雲の異常吸収や地表面日射量の不一致の問題をめぐる1990年代半ばまでの事情については、早坂(1995)や浅野(1997)の解説を参照されたい。

### 3. 雲の異常吸収の実験観測

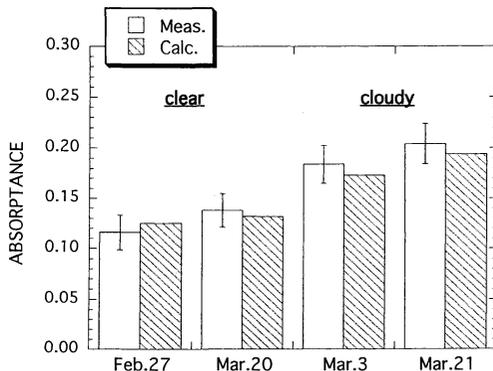
1990年代後半に、雲による日射の「異常吸収」問題の解明を目指して、日本とアメリカで独立に航空機を用いた野外集中観測が行われた。アメリカの観測は、エネルギー省が主催する大気放射観測(ARM: Atmospheric Radiation Measurement)プログラムによるARESE(ARM Enhanced Shortwave Experiment)と呼ばれるもので、1995年10月にオクラホマ州のARM SGP(Southern Great Planes)観測サイトを中心とした地域で実施された(例えば, Valero *et al.*, 1997)。日本における集中観測は、旧科技庁の経費により気象研究所が中心となって実施した「雲が地球温暖化に及ぼす影響解明に関する観測研究(1991~1999年度)」の中で、研究計画の後半に日本近海上の層状雲を対象にして行われた(文科省, 2001)。この研究プロジェクトは、その英語名(Japanese Cloud and Climate Study)を略して、JACCSと呼ばれる(Asano *et al.*, 1994)。なお、筆者は、1999年10月に現所属へ異動するまで、JACCSのプロジェクトリーダーを務めた。

ARESEおよびJACCS観測の双方において、雲による日射の吸収を直接に測定するために、雲層を挟んで飛ぶ2機の航空機による同期飛行の手法が用いられた。しかし、実際の観測法には、この問題に対する考え方の違いが見られる。ARESEでは、大気全体による日射吸収に対する雲の効果に関心があったためか、1



第2図 大気の日射吸収率の観測値とモデル計算値の比較。(A) 1995年10月のARESEにおける晴天日および曇天日の大気柱による日射吸収の比較 (Valero et al., 1997), (B) 1998年2月2日のJACCS航空機観測における東シナ海上の層積雲による日射吸収の比較 (Asano et al., 2000)。

機は雲底の直下を飛んだが、他の1機は雲頂のはるか上空の圏界面高度から観測した。第2図Aに、ARESEの結果 (Valero et al., 1997) を示す。晴天大気に比べて曇天大気の日射吸収率は雲量とともに増大し、また、観測値とモデル計算値の差も拡大しており、雲による異常吸収あるいは吸収増強 (enhanced absorption) の現象があることを示している。他方、JACCS観測では、雲層自身による吸収と雲を含む大気による吸収とを分離して問題を単純化するために、地表面の反射特性が一様な海上の層積雲を対象として雲層の近傍を観測飛行した。また、2機の飛行機に搭載された日射計の観測視野を合わせるために、それぞれ雲頂・雲底からほぼ等距離はなれて同期飛行した。このように配慮した観測の結果として、海上のきれいな (エアロソルによる汚染のない) 層積雲の場合、第2図Bに示すように吸収率の観測値とモデル計算値は一致し、異常吸収はないことを実証した (Asano et al., 2000)。かくして、両者の結果は全く相反するものとなり、雲による異常吸収の問題は解決されずに残った。



第3図 2000年2~3月のARESE-IIにおける晴天日および曇天日の大気柱による日射吸収の観測値とモデル計算値との比較。観測値はMRI (気象研究所) の日射計による (Asano et al., 2001a)。

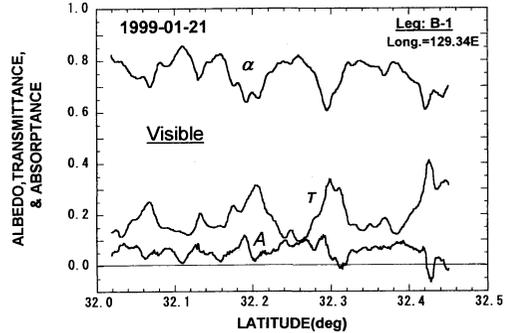
ARESE と JACCS 観測の相反する結果の原因を探り、異常吸収の問題の解決を図るために、第2回 ARESE 集中観測 (ARESE-II と呼ぶ) が計画され、JACCS への協力参加の呼びかけがあった。JACCS 側からは、気象研究所の内山博士と山崎博士が、JACCS 観測で使用した日射計を携えて参加した。集中観測は、2000年2月半ばから4月初旬まで実施され、晴天および曇天のそれぞれにつき、複数事例の良好な観測データが得られた。ただし、ARESE-II では、諸般の事情により航空機の使用は1機のみとなり、ARM SGP 地上サイトと組み合わせた集中観測の戦略がとられた。その航空機には、気象研究所を含めた3つの研究機関から異なる型の日射計が搭載された。また、ARESE-II で使用された全ての日射計の比較検定が集中観測の前後に実施され、先の ARESE の後に投げられた測器の検定精度に対する疑念 (Li et al., 1999) の再発を避ける努力がなされた。3機関の日射計で測定された大気の日射吸収率は、晴天日および曇天日のそれぞれのケースにつき、測定誤差の範囲内で互いに一致した。また、第3図に示すように観測値はモデル計算値とも一致し (Asano et al., 2001a)、ARESE-II においては異常吸収の現象は無いことが確認された。このことは、我々が JACCS 観測に採用した戦略および結果が適正であったことを裏付ける。

#### 4. AGU Chapman Conference

ARESE-II の結果を受けて、大気による日射吸収の問題の現状を総括するための会議 (AGU Chapman

Conference on Atmospheric Absorption of Solar Radiation)が、2001年8月13～16日にロッキー国立公園入り口のコロラド州エステスパークにて開催された。この会議は、A. Arking (Johns Hopkins University), V. Ramanathan (Scripps Inst. Oceanography), および S. Solomon (NOAA) の主唱により企画され、世界各国から約90名の専門家が参集した。ここでは、大気の日射吸収と気候影響、観測とモデルの比較、放射伝達と大気および地表面の光学特性、観測とモデリングの戦略、および問題の解決に向けて、等々の課題についての研究報告と詳細な検討がなされた(会議プログラムは、AGUのURL (<http://www.agu.org/meetings/cc01fcall.html/>)を参照されたい)。その結果、従前の研究では数十%以上(相対値)もあった日射吸収率の観測値とモデル計算値との不一致は、晴天大気および曇天大気のそれぞれにつき5%および15%以内に縮まり、測定誤差およびモデル入力パラメータの不確定に起因する計算誤差の範囲内でほぼ一致することが確認された。すなわち、GEBA等の地表面日射データと最新のGCMモデルによる計算値との比較では、1990年代前半までに見られたような大きな不一致は生じていない。また、JACCSやARESE-IIの観測結果は適正であり、雲による異常吸収の確認はないことが参加者の共通認識となった。少なくとも、見逃している要因がまだ残っていると看做しても、それが異常吸収現象の主因ではないという点で認識が一致した。

上記のように現時点では観測値とモデル計算値とは完全に一致したわけではなく、例えば雲層による吸収率では、 $\pm 0.02$  ( $< 15 \text{ Wm}^{-2}$ ) 程度の不確かさが残る。ただし、これは現在の観測およびモデル計算の精度の限界に近い値である。さらに細かく論じるには、日射フラックスの測器と測定法、放射モデルの高度化と入力パラメータの現実化、雲やエアロソルの分布と光学特性の実態把握、等々における更なる改良や研究の進展を待たなければならない。ところで、晴天日の地表面日射量における不一致の改善がなされた最大の要因は、日射の測定とGEBA等の地上観測データとの精度向上に努力が払われたこと、ならびにGCM等における放射計算の精密化が進んだことが挙げられる。後者に関しては、実際的なエアロソルの光学モデル、および水蒸気連続吸収帯を含む気体吸収パラメータの最新データを放射計算に導入した効果が大きい(Wild *et al.*, 1998, 1999)。これらの進展は、放射やエアロソル



第4図 1999.01.21のJACCS航空機観測における九州西方海上の層積雲層による可視域太陽放射の反射率 $\alpha$ 、透過率T、および吸収率Aの水平緯度分布(Asano *et al.*, 2001b)。距離平均した吸収率は0.06となり、測定誤差( $\pm 0.02$ )を超えて有意である。

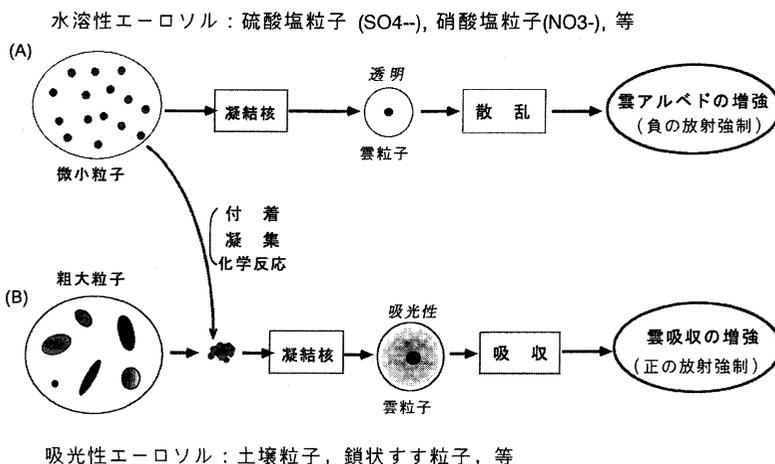
の地上観測網の整備拡充、雲とエアロソルのリモートセンシング技術、気体吸収線パラメータの精密分光測定、等々の分野における地道な研究活動の成果に支えられたものである。

会議では、異常吸収問題の一応の決着をみて、大気放射学分野が日射収支の問題に関連して次に取り組むべき重要課題についても話し合われた。雲に関しては、熱帯域の巻雲、中高緯度の混合層雲などの氷粒子を含む雲の形成過程と放射特性、および、それ等の気候影響の問題が挙げられた。エアロソルに関しては、「気候変動に関する政府間パネル(IPCC)」の最新版の報告書(IPCC, 2001)でも重要課題として指摘されているエアロソルの放射強制力、特に、人為起源エアロソルの雲過程を通じた間接的放射強制力(浅野, 1999)の評価などが挙げられた。

## 5. エアロソルの間接放射効果

最後に、雲による日射の吸収に関連して、人為起源エアロソルによる放射効果のメカニズムについて、1つの仮説を提案したい。これは、JACCS航空機観測において、1999年1月21日に九州西方沖にて観測した層積雲の事例解析により見いだされた。この時の層積雲は中国大陸から東シナ海への寒気の吹き出しに伴って発生した。この事例では、第4図に示されるように可視域においても有意の吸収が検出された。雲は、水溶性あるいは吸湿性のエアロソルを核として、水蒸気が凝結してできた雲粒子の集合体であり、また、純粋の

人為起源水溶性エアロソルの放射効果



第5図 人為起源の水溶性エアロソルが介在する雲-放射の相互作用過程の模式図。(A) および (B) は、それぞれ雲層による太陽放射の反射(アルベド)および吸収の放射効果の増大をもたらすプロセスを表す(Asano *et al.*, 2001b).

水物質(水蒸気、水滴、氷晶)は可視光を吸収しないことが知られている。仮に、凝結核のエアロソルが光を吸収する物質を含むとしても、凝結核のサイズが成長した雲粒子のサイズに比べて桁違いに小さい場合には、雲粒子は可視光に対して有効な吸収性を示さない。詳細な議論は Asano *et al.* (2001b) に譲るがこの事例の場合、観測された雲の微物理特性および空気塊の流跡線解析から判断して、層積雲は東アジア大陸から輸送されたエアロソルによって汚染されていたと推察される。中国北西部の砂漠地帯で巻き上げられた土壌粒子が、中国東部の工業地帯上空を通して輸送される間に、その周囲にたくさんの硫酸塩粒子等の水溶性エアロソルを付着する。そのような粒子を凝結核とした雲粒子は吸光性を帯びたと推察される(第5図参照)。土壌粒子や水溶性エアロソルは強弱の違いはあるが、ともに吸光性を有する。もちろん、比較的大きな土壌粒子等がそのまま凝結核となった雲粒子も吸光性を呈し得るが、そのような雲モデルに対して計算された反射光の波長分布は実測された分光反射率と合わなかった。

雲過程を通した人為起源エアロソルの間接的な放射効果としては、エアロソルの付加が雲粒子数の増加と粒径の減少をもたらす、それが雲の反射率を増加させるとする効果(第1種間接放射強制力)があり、比較的薄い雲の場合に有効と考えられている。また、雲粒

子径が減少するため降雨となる効率が減少し、雲の寿命が延びるとする過程(第2種間接放射強制力)があげられる。両方ともに、結果として雲が日射を反射する効果を増強し、地表面-大気系を冷やす方向に作用する(例えば、IPCC, 2001; 浅野, 1999)。他方、第5図Bに示されたエアロソル-雲-放射のプロセスがもたらす効果は、日射(特に、可視光)を吸収して、雲層を暖める方向に作用する。この効果は、雲が比較的厚い場合に有効になると考えられる(Twomey, 1977)。すなわち、人為起源の硫酸塩粒子などの水溶性エアロソルが長距離輸送される間に土壌粒子などの吸光性の粗大粒子に付着し、それらが凝結核になることにより、雲粒子が可視光に対しても吸光性を持つようになる。そして、雲が十分に厚い場合には、第1種および第2種の間接放射効果とは逆方向の放射効果が勝る可能性がある。つまり、この解析結果は、人為起源エアロソルの輸送途上における変質が放射強制力に重大な影響を及ぼしうることを示唆している。残念ながら、この事例ではエアロソルや雲粒子の組成の測定は行われなかったため、ここに提起したプロセスが実際に機能していたかどうかは検証できない。実態解明に向けたさらなる観測研究が待たれる。

6. おわりに

AGU Chapman 会議を総括して、Ramanathan 博士

は、現時点での最も正しいと思われる日射収支の値として、第1図Cの見積りを挙げた。大気と地表面における吸収の見積りには依然として $\pm 2$ 単位 ( $7 \text{ Wm}^{-2}$ ) 程度の不確定があると思われるが、第1図Cの値は、現在も教科書等に引用されている1980年代の見積りとは大きく異なる。すなわち、1980年代までは、大気は、太陽放射をあまり吸収せず(高々20単位)、第一近似として太陽放射に対してかなり透明であるとみなされていた。実際には、大気は地球に入射する太陽放射の1/4強を吸収する。教科書等の古い記述の修正が必要となろう。また、多くのGCMにおいても、最新の水蒸気の吸収係数や実際的なエアロソルの導入などの見直しが必要となろう。

雲や大気による日射の「異常吸収」論争の一応の決着をみて、大気放射分野の関心は一方では人為起源エアロソルの気候影響評価の問題にシフトすると思われる。この問題の解明は、地球温暖化の予測の信頼性を高める上で最重要課題の1つとされる(IPCC, 2001)。これに関連して我が国では、先進的なプロジェクト研究(例えば、中島, 1999)が既に進行中であり、また、類似のプロジェクト研究も開始されようとしている。しかしながら、人為起源エアロソルは、さまざまなメカニズムをとおして気候の変調に関わっており、また、個々のメカニズムには未解明の問題が数多く残されている。なにより人為起源エアロソルの実態が不明である。ともかく一筋縄では行かない問題である。この問題解明には、放射のみならず広範な専門分野の研究者が結集して、連携することがなにより大切であろう。若い人達の果敢なチャレンジに期待したい。

## 謝 辞

JACCS計画は、旧科技庁の「海洋開発及地球科学技術調査研究促進費」により実施され、航空機観測はその中で気象研究所のJACCS航空機観測チームにより行われた。航空機観測の実施にあたっては、気象庁諸官署の理解と協力を得た。ARESE-II共同観測に際しては、T. Ackerman博士を始めとする数多くのARM関係者の助力を得た。また、観測データの解析や作図には、東北大学院生の谷園雅代君および朽木勝幸君の助力を得た。本稿で紹介したJACCS関連の研究成果は、これら関係した諸氏の熱意と努力のたまものである。ここに記して深謝する。

## 参 考 文 献

- 浅野正二, 1997: 気候変動と放射—太陽放射収支に関する最近の話題から, 測候時報(気象庁), **64**, 6, 4-16.
- 浅野正二, 1999: 気候系の放射エネルギー収支に及ぼす対流圏エアロゾルの効果, エアロゾル研究, **14**, 214-220.
- Asano, S. and JACCS/MRI Research Group, 1994: Japanese cloud and climate study (JACCS): research plan and preliminary results, Preprints 8th Conf. Atmos. Radiation (Amer. Meteor. Soc.), 282-284.
- Asano, S., A. Uchiyama, Y. Mano, M. Murakami and Y. Takayama, 2000: No evidence for solar absorption anomaly by marine water clouds through collocated aircraft radiation measurements, J. Geophys. Res., **105**, 14, 761-14, 775.
- Asano, S., A. Uchiyama, A. Yamazaki and K. Kuchiki, 2001a: Solar radiation budget from the MRI radiometers for the clear and cloudy air-columns in the ARESE-II, J. Geophys. Res., (submitted).
- Asano, S., A. Uchiyama, A. Yamazaki, J.-F. Gayet and M. Tanizono, 2001b: Two case studies of winter continental-type water and mixed-phased stratocumuli over the sea. II: Absorption of solar radiation, J. Geophys. Res., (accepted).
- Cess, R. D. *et al.*, 1995: Absorption of solar radiation by clouds: Observations versus models, Science, **267**, 496-499.
- Gilgen, H. and A. Ohmura, 1999: The Global Energy Balance Archive, Bull. Amer. Meteor. Soc., **80**, 831-850.
- 早坂忠裕, 1995: 大気は太陽放射をどれだけ吸収するのか? 天気, **42**, 789-797.
- IPCC, 2001: Climate Change 2001: The Scientific Basis, Cambridge Univ. Press, p307-312.
- Kiehl, J. T. and K. E. Trenberth, 1997: Earth's annual global mean energy budget, Bull. Amer. Meteor. Soc., **78**, 197-208.
- Li, Z. L. Moreau and A. Arking, 1997: On solar energy disposition: A perspective from observation and modeling, Bull. Amer. Meteor. Soc., **78**, 53-70.
- Li, Z., A. P. Trishchenko, H. W. Barker, G. L. Stephens and P. Partain, 1999: Analyses of Atmospheric Radiation Measurement (ARM) program's Enhanced Shortwave Experiment (ARESE) multiple data sets for studying cloud absorption, J. Geophys. Res., **104**, 19, 127-19, 134.
- Liou, K.-N., 1992: Radiation and Cloud Processes in

- the Atmosphere, Oxford Univ. Press, p10-12.
- 文部科学省, 2001 : 「雲が地球温暖化に及ぼす影響解明に関する観測研究」, 最終成果報告書, 文部科学省研究開発局, 177pp.
- 中島映至 (研究代表者), 1999 : 「アジア域の広域大気汚染による大気粒子環境の変調」, 科学技術振興事業団戦略的基礎研究 (1999-2003年度).
- Ohmura, A. and H. Gilgen, 1993 : Re-evaluation of the global energy balance, Interaction between Global Climate Subsystems, The Legacy of Hann, Geophys. Monogr., No. 75, IUGG, 93-110.
- Ohmura, A., *et al*, 1998 : Baseline Surface Radiation Network (BSRN/WCRP) : New precision radiometry for climate research, Bull. Amer. Meteor. Soc., **79**, 2115-2136.
- Pilewskie, P. and F. P. J. Valero, 1995 : Direct observation of excess solar absorption by clouds, Science, **267**, 1626-1629.
- Ramanathan, V., B. Subasilar, G. L. Zhang, W. Conant, R. D. Cess, J. T. Kiehl, H. Grassl and L. Shi, 1995 : Warm pool budget and shortwave cloud forcing : A missing physics? Science, **267**, 499-503.
- Rossow, W. B. and R. A. Schiffer, 1999 : Advances in understanding clouds from ISCCP, Bull. Amer. Meteor. Soc., **80**, 2261-2287.
- Stephens, G. L. and S.-C. Tsay, 1990 : On the cloud absorption anomaly, Quart. J. Roy. Meteor. Soc., **116**, 671-704.
- Twomey, S. 1977 : The influence of pollution on the shortwave albedo of clouds, J. Atmos. Sci., **34**, 1149-1152.
- Valero, F. P. J, R. D. Cess, M. Zhang, S. K. Pope, A. Bucholtz, B. Bush and J. Vitko, Jr., 1997 : Absorption of the solar radiation by cloudy atmosphere : Interpretations of collocated aircraft measurements, J. Geophys. Res., **102**, 29, 917-29, 927.
- Vonder Haar, T. H. and V. Suomi, 1971 : Measurements of the Earth's radiation budget from satellite during a five-year period. Part I : Extended time and space measurement, J. Atmos. Sci., **28**, 305-314.
- Wielicki, B. A., R. D. Cess, M. D. King, D. A. Randall and E. F. Harrison 1995 : Mission to planet Earth : Role of clouds and radiation in climate, Bull. Amer. Meteor. Soc., **76**, 2125-2154.
- Wild, M., A. Ohmura, H. Gilgen, E. Roeckner, M. Giorgetta, J.-J. Morcrette, 1998 : The disposition of radiative energy in the global climate system : GCM-calculated versus observational estimates, Climate Dynamics, **14**, 853-869.
- Wild, M. 1999 : Discrepancies between model-calculated and observed shortwave atmospheric absorption in area with high aerosol loadings, J. Geophys. Res., **104**, 27, 361-27, 373.