

JACCS/ACROS（航空機雲放射観測システム）による層状水雲の 放射収支観測：日射の異常吸収は無い！

No Evidence for Solar Absorption Anomaly by Marine Water Clouds Measured
by Airborne Cloud-Radiation Observing System in the JACCS Program.

浅野正二、JACCS航空機観測チーム*
気象研究所

Shoji ASANO, JACCS Aircraft Observation Team *
Meteorological Research Institute

1. はじめに

雲は太陽放射（日射）を実際にどれほど吸収するか、を巡って数十年にわたって混乱した論争が続いている。従来の観測と放射理論に基づくモデル計算との間に大きな差がある。放射モデル計算値よりも数十W/m²以上にも及ぶ過剰な日射の吸収がしばしば観測されており、理論モデルでは考慮されていない吸収物質や吸収メカニズムの有無を巡って、雲による日射の「異常吸収」の問題¹⁾として大きな争点になっている。90年代後半に入ってから問題解決を目指した航空機観測が活発になされているが、「異常吸収」の有無を確定するに至っていない。^{2) - 6)}

科学技術庁からの経費で気象研究所が中心になって推進している「雲が地球温暖化に及ぼす影響解明に関する観測研究（略称；JACCS）」の一環として⁷⁾、「異常吸収」問題の解明をめざした航空機観測を実施している。そのためには、雲層による太陽放射の収束発散を精密に測定することが必要であり、二機の航空機を用いて雲層の上下において同じ雲域を同時に観測することが、観測戦術のキーポイントである。従来の航空機観測では、この点の配慮が不足していたようである。この点に細心の注意を払った平成9年度の航空機観測によって、「異常吸収」は存在しないことを直接示す日射収支の精密な測定データが得られた。1998年2月2日の層状雲に対する日射収支解析の結果を以下に示す。

2. JACCS雲放射航空機観測システム（ACROS）

JACCS航空機観測は、日本近辺の層状雲について、雲内部の気象要素、雲を構成する粒子の性状や分布などの雲の微物理特性、および雲内外の放射場を二機の航空機を用いた同時観測により調べ、雲の構造と形成・維持の機構、および放射過程を明らかにすることを目的としている。そのために、主に雲層の上から放射観測とリモートセンシングのための飛行をするセスナ404型タイタン機（中日本航空K.K.、以下C404と略記）と、主に雲層内を飛び雲物理特性の観測をするビーチクラフトB200スーパーキングエアー（中日本航空K.K.、以下B200と略記）の二機の航空機を用いた雲と放射の航空機総合観測システム（ACROS: Airborne Cloud-Radiation Observing System）⁸⁾を開発した。B200機には、雲物理測器のみならず乱流場を測る風プローブやC404機と共通の日射計・放射計等も搭載されている。従って、雲層の上下での同期飛行により、雲層による放射収支を測定することが可能である。航空機の飛行位置は、GPS(Global Positioning System)装置により測定される。測定データのサンプリングは、乱流成分の測定データを除いて1秒毎に行われる。ACROSに用いられている測定機器を表1にまとめて示した。

* JACCS 航空機観測チーム（JACCS Aircraft Observation Team）； 浅野正二（リーダー； S. Asano）、
内山明博（A. Uchiyama）、真野裕三（Y. Mano）、村上正隆（M. Murakami）、高山陽三（Y. Takayama）

Instrumentation of ACROS for JACCS

Quantity measured	Instrument	Characteristics	Aircraft	
[Radiation]				
Upward/downward spectral flux	Multichannel Cloud Pyranometer (MCP)	$\lambda=421, 500^*, 675^*, 760^*, 862^*, 938^*, 1080, 1225^*, 1650^*nm$	⊙*	⊙
Upward/downward solar flux	Pyranometer EKO MS-801	$0.28\mu m < \lambda < 2.9\mu m$ (WG305)	⊙	⊙
Upward/downward near-IR flux	Pyranometer EKO MS-801	$0.72\mu m < \lambda < 2.9\mu m$ (RG715)	⊙	⊙
Upward/downward infrared flux	Pyrgeometer Eppley PIR	$4\mu m < \lambda < 50\mu m$	⊙	⊙
Nadir spectral radiance	FTIR Bomen MB155	$0.71\mu m < \lambda < 20\mu m$ $\Delta\nu > 1cm^{-1}$		⊙
Nadir infrared radiance (radiation temp)	Minarad RST-10	$9.5\mu m < \lambda < 11.5\mu m$		⊙
	Barnes IT-4	$9.5\mu m < \lambda < 11.5\mu m$	⊙	
Nadir microwave radiance	Radiometrics WVR-1100 (MWR)	23.8Ghz, 31.4Ghz		⊙
[Cloud and aerosol]				
Cloud particle size spectrum	Airborne Video-Microscope System (AVIOM)	$5\mu m < D < 500\mu m$	⊙	
	PMS FSSP-100	$2\mu m < D < 47\mu m$	⊙	
	PMS OAP-2D2-C	$25\mu m < D < 800\mu m$	⊙	
Cloud liquid water content	PMS KLWC-5	$0-5g/m^3$	⊙	
Effective particle radius, LWC	Gerber PVM-100A	$2\mu m < D < 70\mu m$, $0-10g/m^3$	⊙	
Aerosol size spectrum	PMS PCASP-100X	$0.1\mu m < D < 3\mu m$	⊙	
[Thermodynamics]				
Total air temperature	Rosemount 102 thermometer	$-50C < T < 150C$	⊙	⊙
Humidity (dew point temperature)	EG&G 137-C3 hygrometer	$-65C < Td < 25C$	⊙	⊙
(water vapor absorption)	AIR Lyman- α hygrometer	$\lambda=122nm$, $-80C < Td < 50C$	⊙	⊙
3D wind field	Rosemount 858AJ gust probe		⊙	
	Rosemount 1221 pressure transducer		⊙	
	INS DELCO Carousel-IV		⊙	
True air speed	Rosemount 1332B pressure transducer			⊙
[Others]				
Cloud morphology	Video Camera-VCR system	forward/downward looking	⊙/	⊙/⊙
Pitch/roll/yaw angles	Vertical/directional gyro-system			⊙
	POS/DG310 ApplAnix		⊙	
Position latitude/longitude	GPS Trimble TNL-1000		⊙	⊙
Data acquisition	SEA DAS M200		⊙	
	Prede DAS PDX-60CH			⊙

B200: Beechcraft B200 Super King Air (Nakanihon Air Service Co., Nagoya, Japan)
 C404: Cessna 404 Titan (Nakanihon Air Service Co., Nagoya, Japan)

表 1. 平成9年度の航空機観測で用いられた「雲放射航空機観測システム(ACROS)」の測定装置.

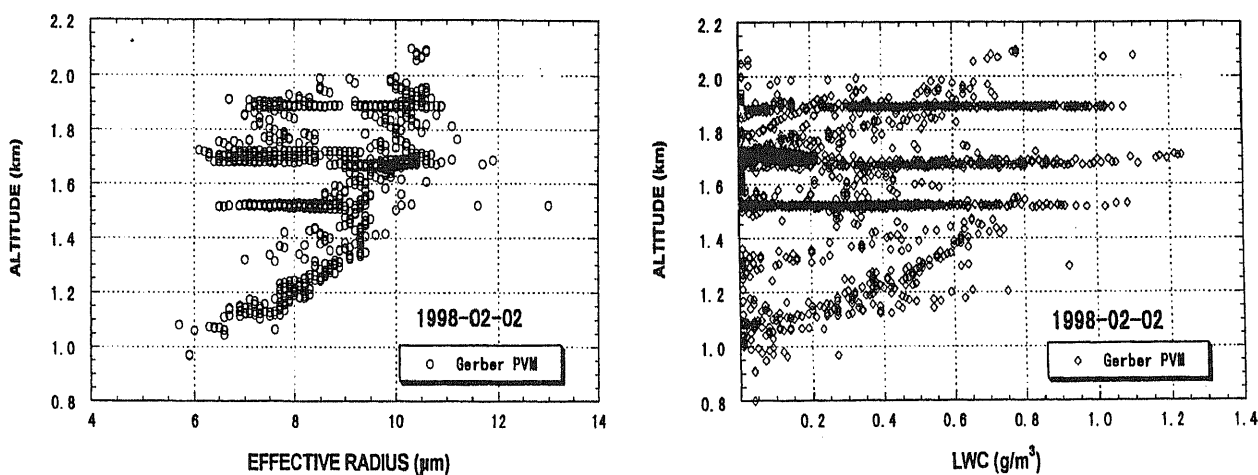


図 1. 1998年2月2日にB200機により観測された層積雲の雲物理パラメータの高度分布. (左) 雲粒子の有効半径、(右) 雲水量.

3. 98-02-02層積雲の雲物理特性

ここでは、1998年1月24日～2月2日の間に奄美大島北方沖の東シナ海域で観測された6ケースの層状雲の内、最も解析の進んでいる2月2日の層積雲のケースについて、観測の概況および解析結果を以下に示す。この日、東シナ海域は黄海に中心を持つ弱い移動性高気圧に覆われていたが、東シナ海には弱い寒気の吹き出しがあった。奄美大島近海は高気圧の南縁にあたり、2 km以下の高度に層積雲が広がり、その上空は快晴であった。航空機観測は、北緯29度、東経129度を中心点とする約100 km×100 kmの領域において、南中時間(12:30頃)を挟んだ11:30～14:00の時間帯になされた。この領域には、厚さの異なる層積雲が隣接する形で広がっており、観測領域の北東部で厚く、南西部で薄くなっていた。厚い雲層の雲頂は、高度が約2 kmであり、温度は2～3℃であった。雲底高度は約1.2 kmであった。他方、薄い雲層は、厚い雲層の約半分の厚さであり、雲頂温度は、4～6℃であった。雲頂温度から、これらの雲層は氷粒子を含まない水雲であったことが保証される。高度1～2 kmの雲域では湿度が高いが、上空は乾燥しており、また、雲頂より上には約300 mの高度差で数℃に達するの気温の逆転があって雲頂が抑えられていた。

図1は、雲層の微物理特性の高度分布を示す。B200により雲内で測定された、雲水量(LWC)および雲粒子の有効半径($Reff$)の高度分布には、雲層の上部ほど値が大きくなる構造が見られる。ただし、同一高度における $Reff$ の分布は、LWCの分布に比べて変動が小さく、LWCの変動による雲の濃淡はむしろ雲粒子数の変動に依っている。また、雲粒子数は、1 cc当たり100～200個と比較的少なく、海洋性層積雲の特徴を呈していた。

この日の航空機による雲と放射の総合観測は、①放射収支を調べるために雲層を挟んで、C404が雲頂より上を、B200が雲底下を水平に飛ぶメニュー、および②C404による雲物理特性のリモートセンシングとB200による検証の実地観測のために、C404が雲頂より上を、B200が雲内を水平に飛ぶメニュー、の二種類の同期飛行メニューが実施された。図2は、C404およびB200の飛行高度とそれぞれの全天日射計で測定された下向き太陽放射量を時系列で表したものである。C404による下向き太陽放射量には、機体姿勢の動揺に対する補正⁹⁾を施した。C404およびB200の両機は、11:50頃に共に雲層の上を飛んでいたが、両機による下向き太陽放射量が一致していることから、測定が適正に行われたことが分かる。図中、S-1およびS-3を付した時間帯に放射収支観測のための同期飛行、S-2の時間帯に雲物理特性のリモートセンシングのための同期飛行が行われた。それぞれの同期観測においては、一辺の水平距離が約50 kmの東西航路と南北航路を組み合わせたL字型の観測航路が設定され、C404とB200の両機は航路に沿って水平に飛行した。例えば、図3は、航路S-1におけるC404とB200の航跡を示す。両機の航跡はほぼ完全に一致しており、また、航路上における両機の時間差は1分以内であったことから、両機は同じ雲域をほぼ同時に観測したことが保証される。

4. 太陽放射収支

前節の図3の東西航路(S-1a)に沿っての同期飛行において、C404およびB200に搭載された日射計によって測定された可視域(VIS)と近赤外域(NIR)の正味の太陽放射フラックス(正味日射フラックス)の経度分布を図4に示す。ここに、正味日射量は、機体の天井マウントに取り付けた日射計で測定された下向き日射量と床底マウントに取り付けた日射計で測定された上向き日射量との差として定義され、正味として下向きの日射量を正值にとっている。また、可視域(波長 $\lambda < 0.72 \mu\text{m}$)の日射量は、全波長域日射計により測定された日射量と近赤外域($\lambda > 0.72 \mu\text{m}$)のみを測る日射計により測定された日射量との差として算出した。なお、この観測における正味日射量の測定誤差は、約 $\pm 5 \text{ W/m}^2$ と推定される。このS-1aに沿っては雲層は概して厚く、正味日射フラックスの値は比較的小さかったが、航路の西端において薄い雲層に遭遇するにつれて、正味フラックスが増大した。正味日射フラックスの分布に雲層の濃淡や凹凸構造などに起因する小さな変動が見られるものの、可視域の正味日射フラックスについて見ると、C404による雲層の上での測定値とB200による雲底下での測定値がほぼ一致しており、平均としては雲層による可視域太陽放射の吸収が無いことが示されている。他方、近赤外域についてみると、C404とB200とによる測定値の間には $70 \sim 80 \text{ W/m}^2$ の系統的な差があり、この分が雲層

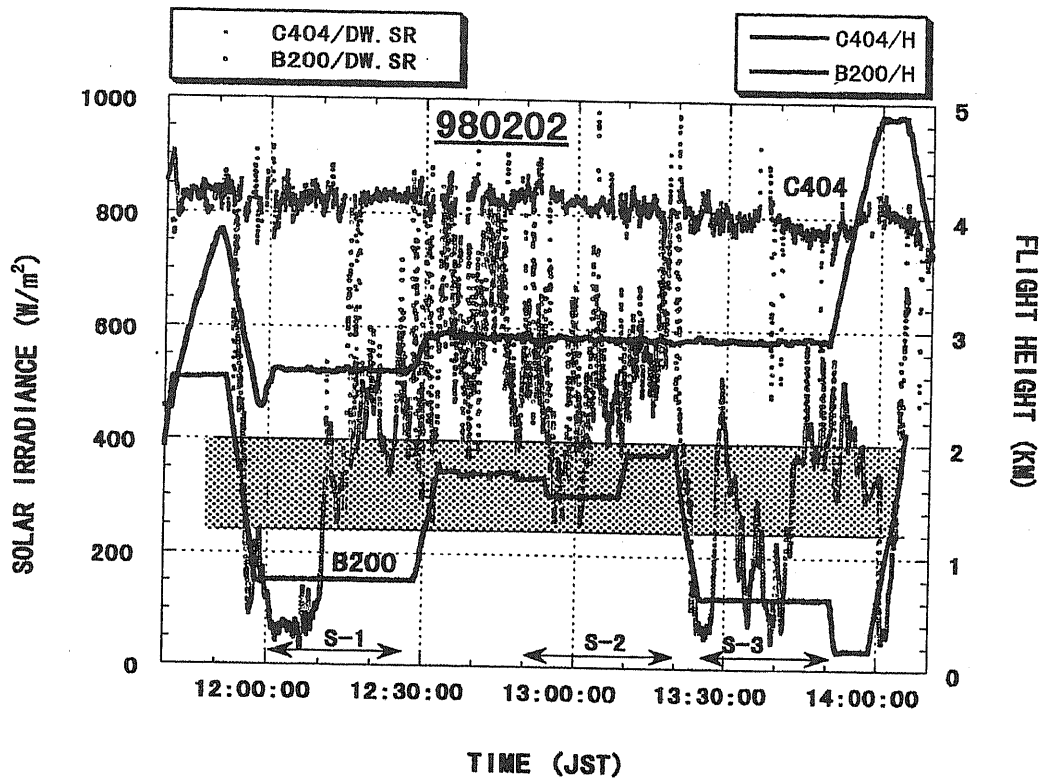


図 2. 1998年2月2日の層積雲系の航空機観測におけるC404およびB200の飛行高度 (右スケール) と、それぞれの機で測定された下向き全天日射量 (左スケール) の時系列分布. 両機は、S-1, S-2 及び S-3 の時間帯に同期水平飛行を実施.

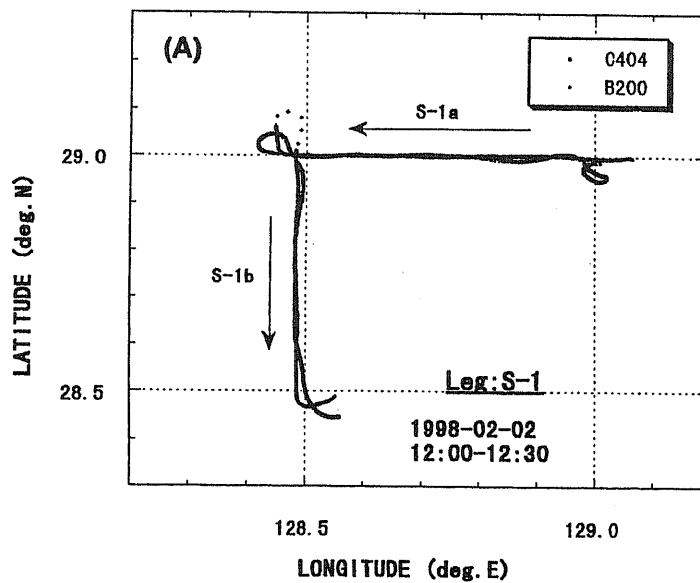


図 3. 1998年2月2日の同期飛行の時間帯 S-1 における C404 及び B200 の航跡.

(正しくは両機間の雲を含む気層)により吸収されている。

同様に、薄い雲層上の南北航路S-1bに沿っての正味日射フラックスの緯度分布を図5に示す。この時間帯は、ちょうど奄美地方の南中時にあたり、航空機は太陽に向かって飛行していた。雲層の下を飛んだB200による正味日射フラックスの分布には、薄い雲層の薄い部分や隙間を透過した太陽放射に起因する鋭いピークが見られる。このことは、透過した太陽放射フラックスに直達光成分の寄与が大きいことを意味している。この図では、太陽が航空機の前方から斜めに照射するとした場合の直達光成分の効果を考慮するように、B200の緯度を少しずらしてプロットした。この補正によりC404とB200による日射フラックスの変動の位置を一致させることができる。この薄い雲層の場合にも、図4の厚い雲層の場合と同じ特徴が見られる。即ち、可視域ではC404とB200による正味フラックスがほぼ一致しており、有為な吸収がない。他方、近赤外域では両者に $50\sim 60\text{W/m}^2$ の系統的な差があり、雲層により吸収されていることである。

これらのC404およびB200により測定された太陽放射フラックスから算出した可視域と近赤外域のアルベド(反射率)、透過率、および吸収率の航路S-1aおよびS-1bに沿った分布を図6に示す。厚い雲層の反射率は大きく、とくに可視域では入射光の実に90%が反射され、残りが散乱光として雲を透過している。他方、薄い雲層では、反射率と透過率が同じ程度の大きさであるが、両者は雲の厚さに依存して逆相関的な関係にある。吸収率の分布について見ると、可視域では厚い雲の場合も薄い雲の場合も平均的にはゼロ(吸収無し)であるが、ところどころで負値の極小(見かけの発散)があり、その両側で正值の極大(見かけの吸収)が見られる。これは、雲層の比較的厚い部分を水平方向に伝播する太陽放射が、薄い部分や隙間を通して下方へ漏れ出ていることの現れであり、水平方向に不均質な雲層による太陽放射伝達の特性と言える現象である。^{5), 10)} 航路S-1aの厚い雲層および航路S-1bの薄い雲層のそれぞれについて、約40kmの長さの比較的一様な部分(図4のM-1および図5のM-2)を切り出して平均した値を、放射伝達モデルによる計算値と表2にて比較する。モデル計算では、各雲層を均質な平行平板層と仮定して、有効半径や雲水量は実測値の平均値で代表した。また、光学的厚さは、C404に搭載された雲分光日射計(MCP)¹¹⁾による波長別反射率の測定から推定した¹²⁾。可視域、近赤外域および全波長域のそれぞれについて、長い距離について平均した雲層の日射収支は、測定された雲物理パラメータを用いた放射モデル計算値とかなりよく合致している。この結果は、いわゆる「異常吸収」はないことを直接示す世界で初めての観測事実である。

5. まとめ

JACCS研究活動の一環として1998年2月2日に東シナ海域にて行った層状水雲の航空機観測により、日射の「異常吸収」は無いことを直接示す証拠を得た。航空機観測では、種々の測定装置を搭載した二機の航空機を用いて、雲層を挟んでの時間的・空間的な同期飛行を放射収支観測の基本戦術とした。太陽放射測定データの解析の結果、雲層の上下における可視域の正味フラックスは測定誤差の範囲内で一致しており、雲層による有為な吸収は無いことが示された。他方、近赤外域の正味フラックスには、雲層の上下で雲の厚さに依存して $50\sim 80\text{W/m}^2$ の系統的な差があり、この差は雲層に入射する全太陽放射量の6~10%の吸収に相当する。観測された太陽放射の収支量は、実測された雲の微物理特性を用いて、平行平板状の均質雲を仮定したモデル計算値と一致した。なお、この結果は、投稿中の論文¹²⁾においてより詳細に議論されている。

(謝辞) JACCSは科学技術庁の「海洋開発及地球科学技術調査研究促進費」により平成3~11年度の9年計画として推進されている。1996年9月まで航空機観測研究チームのリーダーとしてJACCS/ACROSの開発に努めた塩原匡貴博士(現・国立極地研究所)に感謝する。航空機観測に際しては、中日本航空(株)、並びに、気象庁名瀬測候所および奄美空港出張所のご協力・ご助力を得た。また、日射計の検定には、気象庁気象測器検定センターのご協力を得た。ここに記して感謝する。

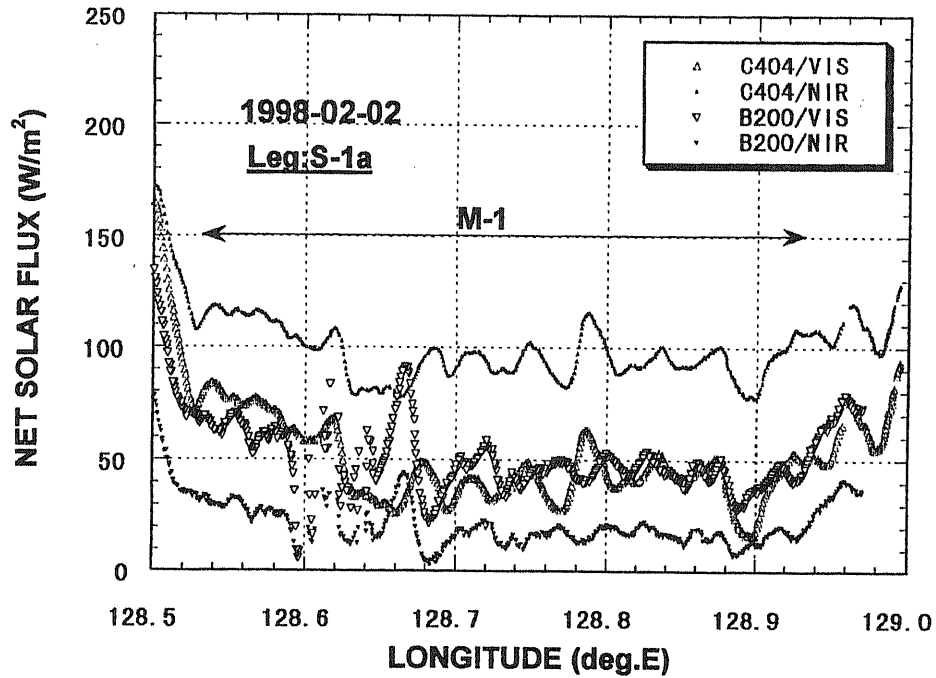


図 4. 1998年2月2日の東西方向の同期飛行路 S-1a に沿って、C404 及び B200 で測定された可視域 (VIS) と近赤外域 (NIR) の正味太陽放射フラックスの経度分布.

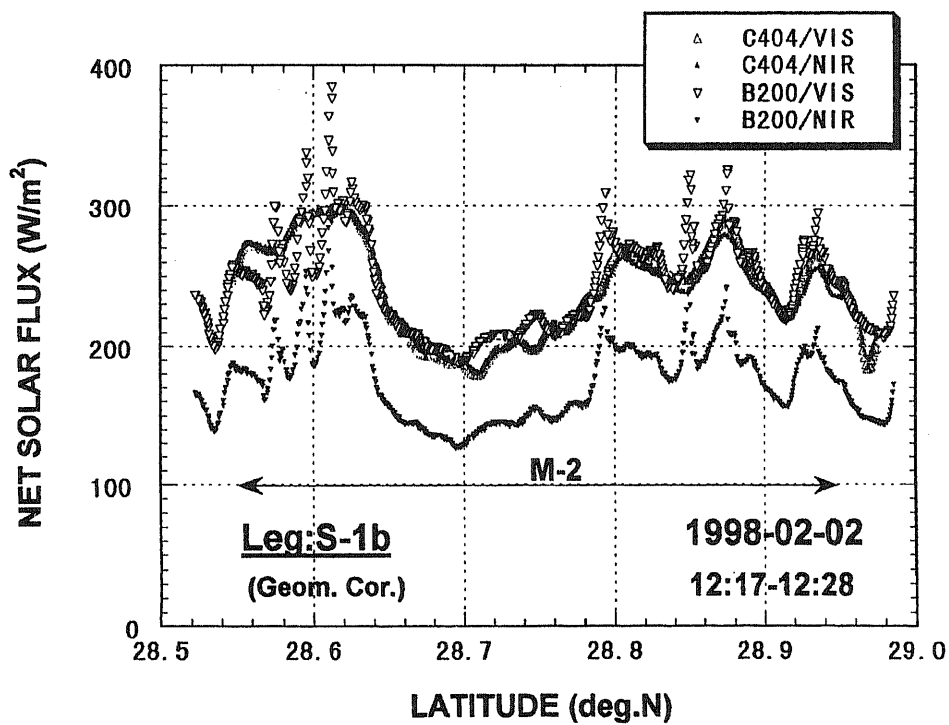


図 5. 図4に同じ. ただし、南北航路 S-1b に沿っての緯度分布. B200の位置を $L = D \tan \theta_0$ だけずらしてプロット. ここに、 D は C404 及び B200の高度差、 θ_0 は太陽天頂角。

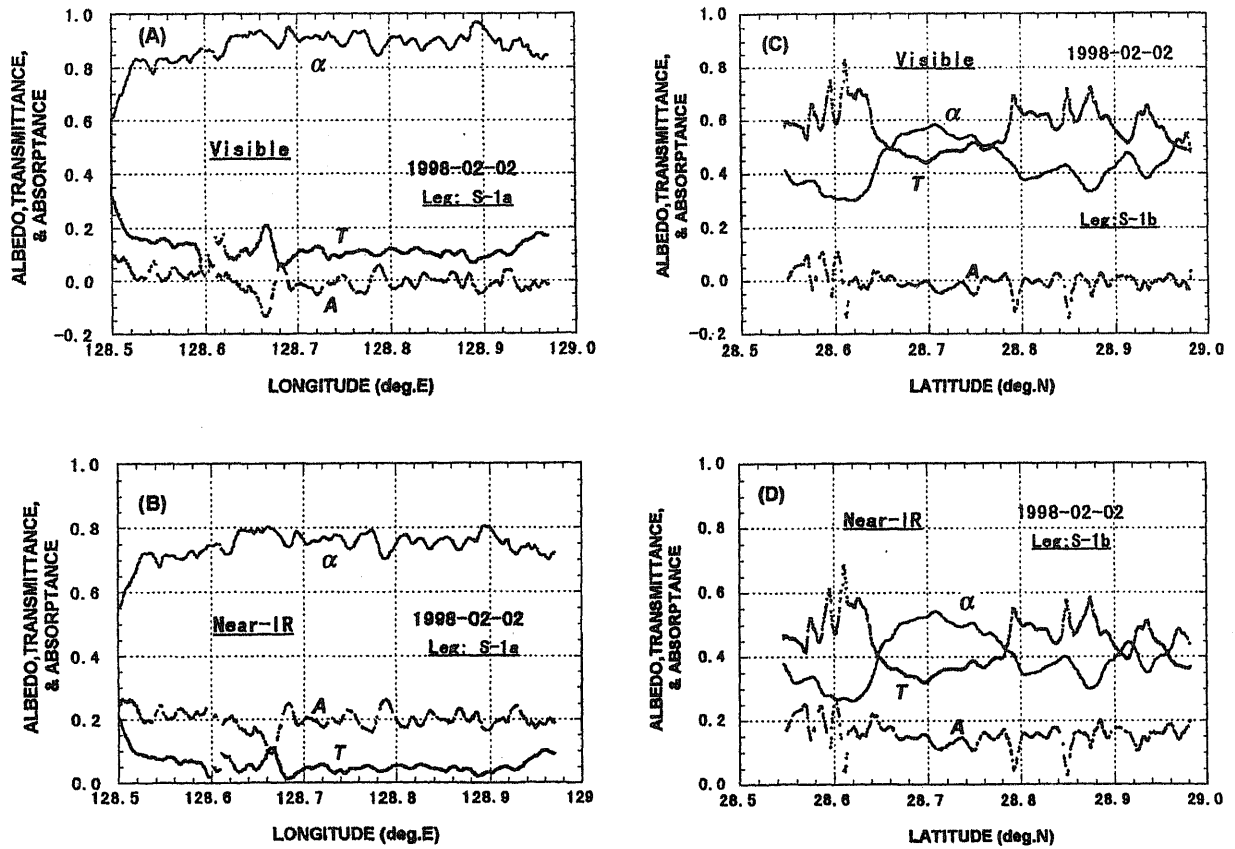


図 6. 1998年2月2日に観測された層積雲の近赤外域(上)と可視域(下)の太陽放射に対する反射率(アルベド) α 、透過率 T 及び吸収率 A の航路 S-1a (左)、及び S-1b (右) に沿っての分布。

SOLAR RADIATION BUDGET DUE TO CLOUD LAYERS

[1] Case M-1 (Thick layer)

Averaged over Longitude = 128.53~128.93° E along Leg S-1a.
 $\theta_s = 46.5^\circ$

	C404 DW Flux [W/m ²]	C404 Net Flux [W/m ²]	B200 Net Flux [W/m ²]	Absorbance (%) Meas. [Calc.]	Albedo (%) Meas. [Calc.]	Cloud Model (Z=1.2~2.0km)*
Total	825	144	67	9.3 [10.7]	82.6 [82.0]	$\tau_{500}=90$ $R_{eff}=9\mu\text{m}$ $LWC=0.65\text{g/m}^3$ $u_{H_2O}^\dagger=5.0\text{g/m}^3$
Near-IR	391	97	19	19.8 [22.7]	75.4 [72.4]	
Visible	434	47	48	-0.2 [0.0]	89.2 [90.5]	

[2] Case M-2 (Thin layer)

Averaged over Latitude = 28.55~28.95° N along Leg S-1b.
 $\theta_s = 45.8^\circ$

	C404 DW Flux [W/m ²]	C404 Net Flux [W/m ²]	B200 Net Flux [W/m ²]	Absorbance (%) Meas. [Calc.]	Albedo (%) Meas. [Calc.]	Cloud Model (Z=1.2~1.6km)*
Total	828	484	422	7.6 [7.5]	41.5 [42.7]	$\tau_{500}=7$ $R_{eff}=8\mu\text{m}$ $LWC=0.09\text{g/m}^3$ $u_{H_2O}^\dagger=5.0\text{g/m}^3$
Near-IR	398	240	177	15.9 [15.6]	39.7 [40.2]	
Visible	429	244	245	-0.3 [0.0]	43.2 [45.0]	

*) Altitudes of the cloud layer.
 †) Water vapor amount in the cloud layer.

表 2. 距離平均した太陽放射収支の観測値とモデル計算値 [Calc.] との比較。厚い雲層(図4中のM-1について平均)と薄い雲層(図5中のM-2について平均)の場合。

6. 引用文献

- 1) Stephens, G.L. and Si-Chee Tsay, 1990: On the cloud absorption anomaly. *Q.J.R.Meteorol. Soc.*, **116**, 671-704.
- 2) Pilewskie, P. and F.P. Valero, 1995: Direct observations of excess solar absorption by clouds. *Science*, **276**, 1626-1629.
- 3) Valero, F.P., R.D. Cess, M. Zhang, S.K. Pope, A. Bucholtz, B. Bush, and J. Vitko Jr., 1997: Absorption of solar radiation by the cloudy atmosphere: Interpretations of collocated aircraft measurements. *J. Geophys. Res.*, **102**, 29917-29927.
- 4) Wendish, M. and A. Keil, 1998: Evidence for enhanced absorption of solar and UV radiation by polluted boundary layer clouds. *J. Geophys. Res.* (submitted).
- 5) 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.
- 6) Francis, P.N., J.P. Taylor, P. Hignett, and A. Slingo, 1997: On the question of enhanced absorption of solar radiation by clouds. *Q.J.R.Meteor. Soc.*, **123**, 419-434.
- 7) Asano, S. and JACCS/MRI Research Group, 1994: Japanese Cloud-Climate Study (JACCS): Research plan and preliminary results. *Preprints 8th Conf. Atmos. Radiation* (23-28 January 1994, Nashville, TN), *Am. Meteor. Soc.*, 282-284.
- 8) Shiobara, M., S. Asano, M. Murakami, Y. Mano, Y. Tanaka, A. Uchiyama, and T. Tanaka, 1996: An airborne cloud-radiation observing system for aircraft-based experiments in the Japanese Cloud-Climate Study (JACCS). *Preprint 2nd Int'l GEWEX Conf.* (17-21 June 1996, Washington D.C.), 371-372.
- 9) Asano, S. and M. Shiobara, 1989: Aircraft measurements of the radiative effects of tropical aerosols: I. Observational results of the radiation budget. *J. Meteor. Soc. Japan*, **67**, 847-861.
- 10) Marshak, A., A. Davis, W. Wiscombe, and R. Cahalan, 1997: Inhomogeneity effects on cloud shortwave absorption measurements: Two-aircraft simulations. *J. Geophys. Res.*, **102**, 16619-16637.
- 11) Asano, S., M. Shiobara, Y. Nakanishi, and Y. Miyake, 1995: A multichannel cloud pyranometer system for airborne measurements of solar spectral reflectance by clouds. *J. Atmos. Oceanic Tech.*, **12**, 479-487.
- 12) Asano, S., M. Shiobara, and A. Uchiyama, 1995: Estimation of cloud-physical parameters from airborne solar spectral reflectance measurement for stratocumulus clouds. *J. Atmos. Sci.*, **52**, 3536-3576.
- 13) Asano, S. and JACCS Aircraft Team, 1998: No evidence for solar absorption anomaly by marine water clouds through collocated aircraft radiation measurements. *J. Geophys. Res.* (submitted).