

奄美近海における下層雲の熱収支

真野裕三・村上正隆・浅野正二・内山明博 (気象研究所)

JACCS の航空機観測では、下層の層積雲の熱収支を観測してその生成・維持過程を調べることが一つの目的としている。1998年2月に奄美近海で行った層積雲の熱収支観測の概要を紹介する。

1 測器と測定法

熱収支観測では、放射フラックスと乱流フラックスの測定が中心である。

1.1 放射フラックス

全天日射計、近赤外日射計、赤外放射計を各々1台ずつ、航空機の上下に取り付けている。熱収支観測では雲の内部での放射フラックスを精度良く測定する必要がある。雲の内部での放射計ドームの状態をビデオカメラでモニターした結果 (Fig.1) を見ると、ドーム表面に多数の水滴が存在し、特に零度以下では凍結してしてしまうため正確な測定ができなことが分かった。このような水滴の付着・凍結を避けるために、放射計ドームに水滴を含んだ高速気流をあてる風洞実験を繰り返し、1) ドームの風上側に2次元状の防風壁を設ける、2) ドームと防風壁の間の淀み領域内にエアポンプで乾燥空気を送風する、ことが効果的であることが分かった。Fig.2 に航空機の放射計ドーム周辺に設けた装置を示す。この対策により、雲内部においても放射計ドームに水滴の付着・凍結はほとんど見られなくなった。

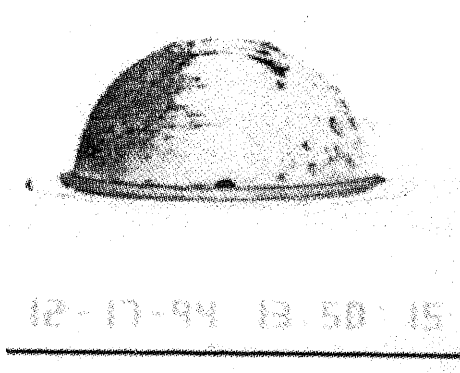


Fig.1 雲内飛行中の放射計ドームの状態

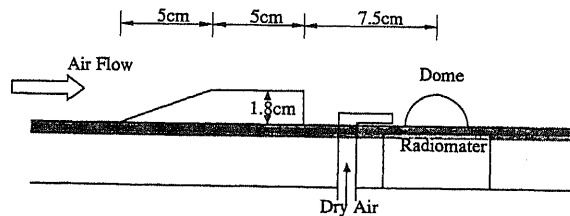


Fig.2 放射計ドームへの水滴付着・凍結の対策

1.2 乱流フラックス

顕熱フラックスと潜熱フラックスを求めるために、風3成分、気温、水蒸気量の高周波測定が必要である。

風の3成分は対気速度と対地速度の差から求められる。対気速度は、航空機の機首から突き出したノーズブームの先端にピトー管タイプの Rosemount 製 858AJ を取り付けて気流の速度と角度を測定している。高周波成分の減衰を抑えるためには圧力孔と圧力トランスデューサの間のパイプをできるだけ短くする必要があるため、圧力トランスデューサ6個をノーズブーム内部に納めた。圧力パイプ中への水詰まりを避けるために water trap を付けて、雲中でも安定した測定ができるようにした。対地速度は、中日本航空(株)所有の運動計測装置 POS/DG により速度3成分や角速度を取得している。POS/DG は、Differential GPS と併せて後解析することにより精密な運動測定が可能である。

測器の取り付け誤差やジャイロの角度誤差等の系統的な影響を除くため、同一地点をさまざまな姿勢で通過し、得られた平均風が一定であるように微調整を行った。

風の高周波成分の測定チェックのため、パワースペクトルが $-5/3$ 乗則に従っているかどうかを調べた。Fig.3 に、風のパワースペクトルを示す。水平風、鉛直風ともに $-5/3$ 乗則がほぼ成立しており、乱流成分は正常に測定できているようである。鉛直風の波長 100m 以下のスケールでは傾きが急になっているが、このスケールの成分は熱輸送に関してはあまり効かないため、熱収支観測上は重大な障害ではないと考えられる。また、波長数百 m の付近のゆるやかなピークはプルームの影響を示唆している。

気温は航空機用の白金抵抗温度計 Rosemount 102E4AL、水蒸気は露点温度計および水蒸気による紫外線の吸収を利用した Lyman- α 湿度計で測定した。

1.3 その他

KING 雲水量計、ガーバー式雲水量/雲粒径測定器、FSSP 等で雲物理量を測定している。

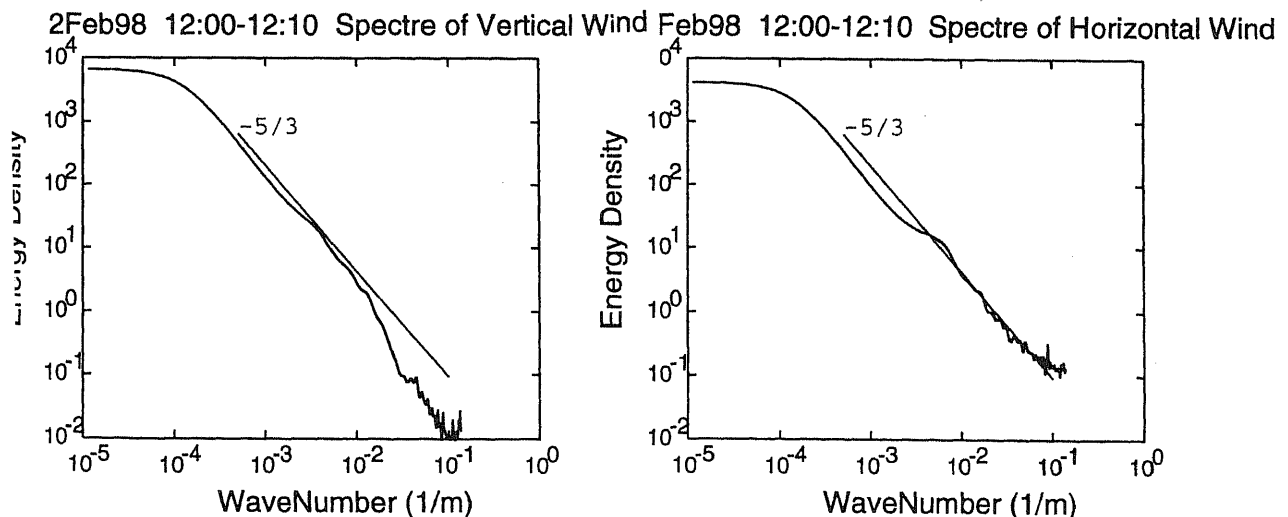


Fig.3 鉛直風(左)と水平風(右)のパワースペクトル

2 飛行方法

雲頂上から雲底下の間で多層レベルフライトを行って各レベルでの鉛直フラックスを測定する。その際、各レベルでの測定が雲の同一部分であることが望ましいため、リアルタイムの風向風速で雲が水平移動するものとして雲を追跡し各レベルフライトの中央部が雲の同一部分であるように航路を調整した。Fig.4 に熱収支観測の航跡図を示す。この方法ではラグランジュ的な観測を行ったことになる。

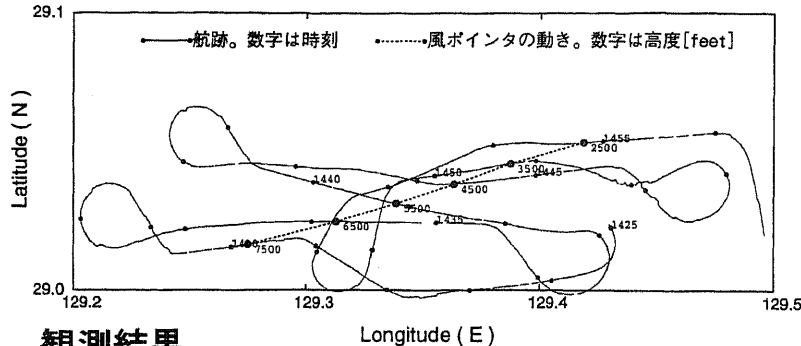


Fig.4
熱収支観測の航跡図

3 観測結果

日時：1998年2月2日 14時～15時頃 場所：奄美大島北東海域
雲の状況：下層の層積雲(水雲)、雲底1.2km、雲頂2.1km (Fig.5)
飛行高度：780m～2300mの間の6レベル

Fig.6 に放射および雲物理量の鉛直プロファイルを示す。雲の同一部分を追跡して飛行した結果、鉛直プロファイルは滑らかな分布になっている。雲頂での近赤外反射率から推定した鉛直積分雲水量は各レベルでの雲水量の積分値と同程度(約500g/m²)になっており、各レベルの測定が相互に整合性を持っていることを示している。

日射による加熱は主に雲の中央より上で顕著である。赤外放射による冷却は最上層に集中している。下層では下からの赤外放射による加熱が見られる。正味の放射加熱は最上層で強い冷却、他の層で弱い加熱となり、雲層全体としては放射加熱はほぼゼロである。観測された雲水量を与えたときの放射モデルの理論値が図中点線で示されている。観測値は理論値と非常によく合っており、雲内部の放射過程が理論どおりであることが確認された。

顕熱フラックスの収束は雲底下で正、雲層下部で負、雲層上部で正になっている。大きさは全体的に放射のそれと同程度である。ラグランジュ的な測定を行っているため風の鉛直シアがなければ水平移流の効果は無視できるが、実際には弱いシアがあった。このため、さらにシアによる水平移流の影響を加える必要がある。

潜熱フラックスは、Lyman- α 湿度計の動作不良のため測定できなかった。

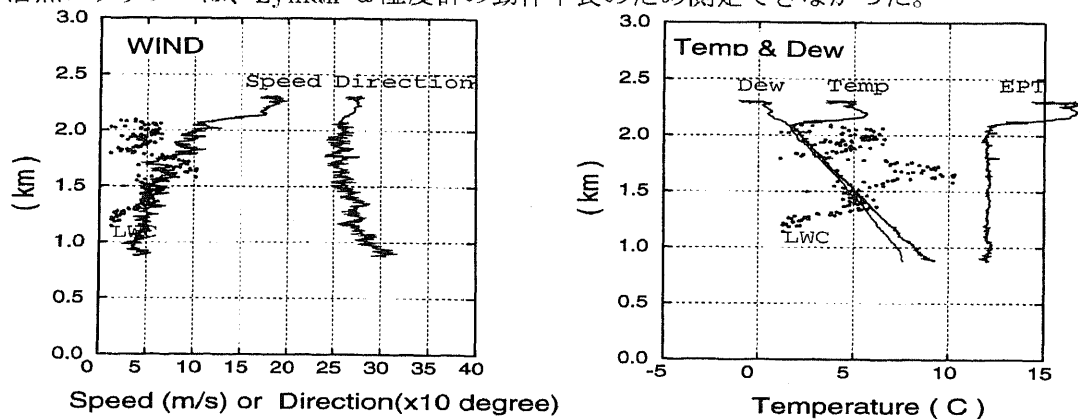


Fig.5 風・気温等の鉛直プロファイル

4 LESモデルによるシミュレーション

観測された下層雲の特徴を力学モデルで再現できるかどうかを調べた。

次のような Large Eddy Simulation モデルによる予備的な計算結果を Fig.7 に示す。

水平 幅 400km, 格子間隔 100m

鉛直 高さ 3km, 格子間隔 60m

基本方程式 非弾性系、非静水圧平衡

放射 P3 近似、ESFT(H_2O, CO_2)、ミー散乱 ($8 - 10\mu m$)

雲物理 水過程のみ。

移流 Smolarkiewicz(1986)

乱流 Sommeria(1976)

初期値 気象庁 RSM

雲頂高度、雲底高度はほぼ観測値を再現している。雲水量は、観測・シミュレーションともに水平変動が大きいいため、正確な比較はあまり意味がないものの、両者の値は同程度である。このように観測された下層雲の特徴は概ね再現できている。

今後、下層雲の生成・維持メカニズムの解明のため、熱収支の各成分が観測とシミュレーションで一致しているかどうかを確認する必要がある。

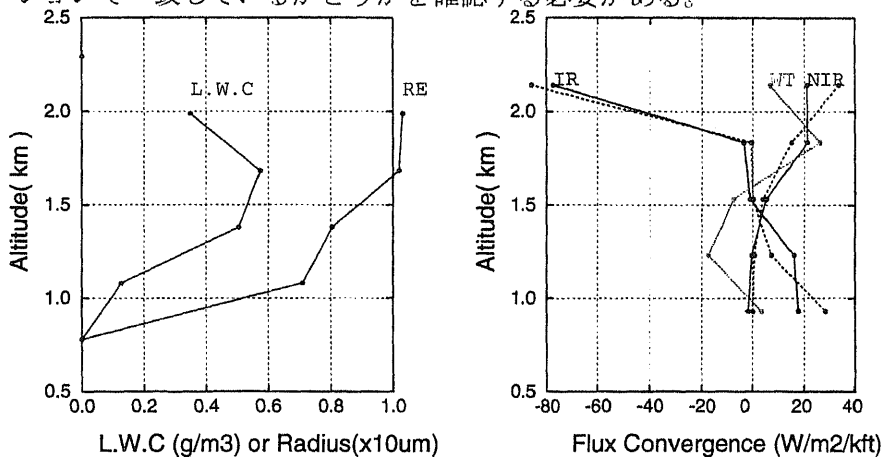


Fig.6(上) 熱収支観測での雲物理量(左)と鉛直フラックス収束量(右)
左図中の点線は放射モデルの理論値

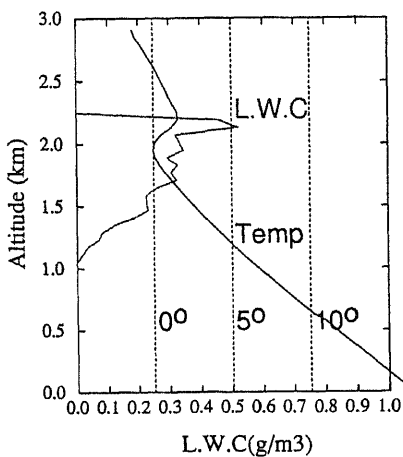


Fig.7(下) LESモデルによるシミュレーション結果。