

## 1991年1月奄美大島における下層雲と境界層の 観測結果について

堀口 光章・永井 晴康・光田 寧

### OBSERVATIONAL RESULTS FOR LOW-LEVEL CLOUDS AND BOUNDARY LAYER ON AMAMI ISLAND IN JANUARY 1991

By *Mitsuaki* HORIGUCHI, *Haruyasu* NAGAI and *Yasushi* MITSUTA

#### Synopsis

To investigate the structure of subcloud layer of the maritime low-level clouds with interests on the process of formation and maintenance of these clouds, ground-based observation was made on Amami Island in January 1991. For the analyzed period (25~27 January), the variation of cloud amount, the height of mixed layer and the height of cloud base were observed. Furthermore, the feature of subcloud layer changed within these days. Especially on 26 th, both standard deviation of vertical wind speed ( $\sigma_w$ ) and wind shear ( $S_U$ ) increased abruptly.

#### 1. はじめに

この観測は、気候変動国際協同研究計画 (WCRP) における研究課題Ⅱ「雲の分布とその気候への影響」の一環として、海上の下層雲の形成・維持過程に関係して、下層雲下の境界層の構造を調べることを主な目的として行った。

そのために、冬季に冬型の気圧配置のもとで海上の下層雲 (層積雲) が形成されることが多い南西諸島海域において、奄美大島を基地として雲底下の大気のリモートセンシング、低層ゾンデによる測定、地上での気象測定などの手段で観測を実施した。

冬季において寒気が大陸から東シナ海上に吹き出すと、暖かい海上で対流混合層が発達する。この対流混合層が凝結高度以上に達すると、混合層の上部に下層雲 (層積雲・積雲) が形成される。この様子は1974, 75年に行われた AMTEX (気団変質実験計画) においても観測されているが、今回の観測の特徴はドップラーソーダにより大気境界層の構造の時間変化が詳細に観測されたことである。

#### 2. 観測の概要

この観測は、他の研究グループとの協同観測である層状性水雲特別観測 (南西諸島海域“雲・放射”観測, 1991年1月) の一部として行った。期間は1991年1月11日から28日までであり、奄美大島北岸の赤崎に位置する鹿児島県立奄美少年自然の家 (海拔高度約 150 m) において行った。他の研究グループにより航空機観測や特別ゾンデ観測が同じ期間に行われている。

観測で使用した測器は、ドップラーソーダ、シーロメータ、低層ゾンデ、パイロットバルーン、赤外放射温度計、地上気象要素測定装置、全天カメラである。

以上の測器のうち、ドップラーソーダは、中国環境科学研究所が開発したトリプルモノスタティック方式のドップラーソーダ HK-11 を使用して、地上 50 m から 696 m まで、高度間隔 34 m で水平風速、風向、鉛直風速及びそれらの標準偏差とエコー強度を測定した。観測での平均時間は、比較的強い風の中でもなるべく高いところまで十分な精度で測定出来るように、10分という長い時間を採用した。

シーロメータは、ヴァイサラ株式会社製の CT 12K シーロメータを使用して、雲底高度を 30 sec ごとに測定した。低層ゾンデは温湿度測定型で、パイロットバルーンと同様に経緯儀を使用して雲底までの風速、風向の測定を行った。さらに、赤外放射温度計により雲底温度の連続測定、地上気象要素測定装置により風速、風向、気温、相対湿度、日射量及び気圧の測定を行った。また、全天カメラにより雲の撮影も随時行った。

### 3. 観測結果

#### 3.1 気象状況

今回の研究では、観測期間のうち1月24日から28日にかけての期間、特に25日から27日の3日間について、解析を行った。これは、あとで示すように次第に気象状況が変化していった興味深い期間であることと、観測機器に大きな支障が起こらず、ほぼ順調に測定データが得られたことによる。

この期間の始めに南西諸島付近を低気圧が通過し、その後に冬型の気圧配置となった。Fig. 1 に名瀬上空 850 mb での気温及び風速の時間変化を示す。風速についてはどちらかといえば次第に弱まっていく傾向があるが、気温については24日から27日にかけて次第に低下している。風向は25日には西寄りであったが、26日から27日にかけては北西から北の風向となった。

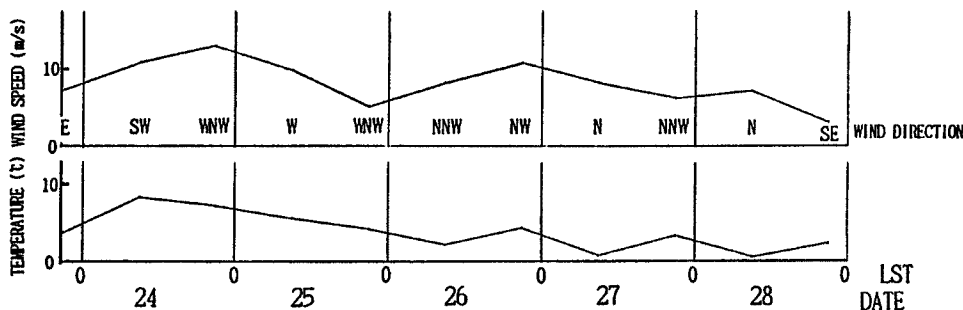


Fig. 1. Time series of temperature and wind speed at 850 mb level. Wind direction is also shown.

地上天気は、25日より27日にかけてほぼ曇天であるが、25日から26日午前中にかけて降雨が時々あった。雲量は25日には多く、ほぼ雲量 10 (下層の雲量だけで 10 近い) で、26日から27日にかけては比較的少ないという傾向があった。下層雲 (層積雲、積雲) はほぼ常に観測されたが、中層雲も27日正午頃までは地上より確認されることが多かった。

#### 3.2 対流混合層と雲底高度

大陸から吹き出した寒気中の下層大気は、暖かい海上で熱の供給を受け不安定となり対流が起こる。その結果、次第に対流混合の生じた層、すなわち対流混合層が発達する。東シナ海上をこのようにして変質を受けて、大気は南西諸島付近へ達する。なお、AMTEX 時のその状況については Ninomiya and Akiyama<sup>1)</sup> によって詳しく解析されている。

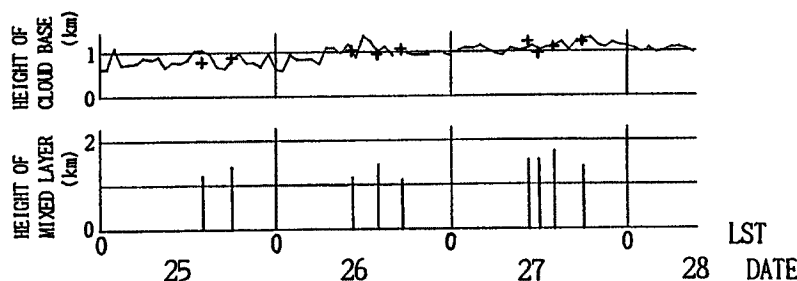


Fig. 2. Time change of the height of mixed layer and cloud base. Lifting condensation level or LCL is also shown by (+).

この対流混合層の厚さは、低層ゾンデ観測による測定で相当温位と比湿がほぼ一定である層の厚さから知ることが出来る。Fig. 2 に低層ゾンデ観測により調べられた対流混合層の厚さの時間変化を示す。25日には高度 1.2~1.4 km 程度で26日も同様の厚さであるが、27日には高度 1.5 km 以上に達している。

対流混合層が凝結高度以上に発達した時に、混合層の上部に下層雲が形成される。シーロメータにより観測された下層雲の雲底高度の時間変化を Fig. 2 に示す。25日、雲底高度は 0.6~1.1 km 程度を上下し、26日には次第に上昇して12時頃に 1.4 km 程度になるがその後下降して 1 km 程度になる。27日にはやや上昇していく傾向がある。

Fig. 2 には持ち上げ凝結高度 (lifting condensation level, LCL) も示した。ここでの持ち上げ凝結高度 (LCL) は、低層ゾンデによる測定により高度 100 m での気塊を上昇させた時の凝結高度である。持ち上げ凝結高度 (LCL) は雲底高度と比較的良く一致している。これは、雲底下で非常によく大気が混合されていることを示している。実際に低層ゾンデ観測によれば、雲底下で温位と比湿の鉛直方向での変化は小さい。

### 3.3 雲底下の気流の状況

ここでは、1月25日から27日の10時から20時までの時間帯について、ドップラーソーダによって測定された雲底下の大気境界層での気流の状況の変化を調べる。

まず、水平風速  $U$  の時間変化を Fig. 3 に示す。ここでは、高度 152 m から 322 m までの平均値としての水平風速の変化を示した。25日については全体的に風速値はおおよそ 10 m/s 程度であり、12時頃より次第に増加していく傾向がある。26日については、小さな変動は除いた系統的な変化として、13時30分から14時頃にかけての 5 m/s 程度の増加とその後の減少、17時40分からの増加が見られる。27日については14時頃まで次第に減少し、その後 12 m/s 前後の値が継続したが、17時頃にいったん急減してから今度は徐々に増加している。なお風向はほぼ北寄り (おおよそ 340~40度) の状態が3日も継続した。

風の場の状況をより詳しく調べるために、次の様なパラメータを定義する。

$$S_U = (U_2 - U_1) / U_1$$

ここで、 $U_1$  は高度 152 m での風速、 $U_2$  は高度 322 m での風速である。この  $S_U$  は、高度 152 m での風速に対する高度 322 m での風速の増加率であり、風速の鉛直シアーを示している。空気の鉛直混合が盛んに起これば風速の鉛直シアーは小さくなり、一方、風速の鉛直シアーが大きければシアーによる乱流の生成が盛んとなる。

この  $S_U$  の値の時間変化を Fig. 4 に示す。25日については大きな  $S_U$  値 (シアー大) が継続する時間帯は少ない。26日については13時40分まで  $S_U$  値は小さいがその後急激に増加しており、これは前記の水平風速の増加に対応してシアーが大きくなっていることを表している。この風速のシアーの大きい状態は14時10分頃をピークとして1時間ほど継続して、いったん小さくなったが、15時頃からはシアーのやや大きい状態が継続する。27日については17時頃まで  $S_U$  値は小さいが、その後やや大きくなっている。これも水平風速の増加に対応している。

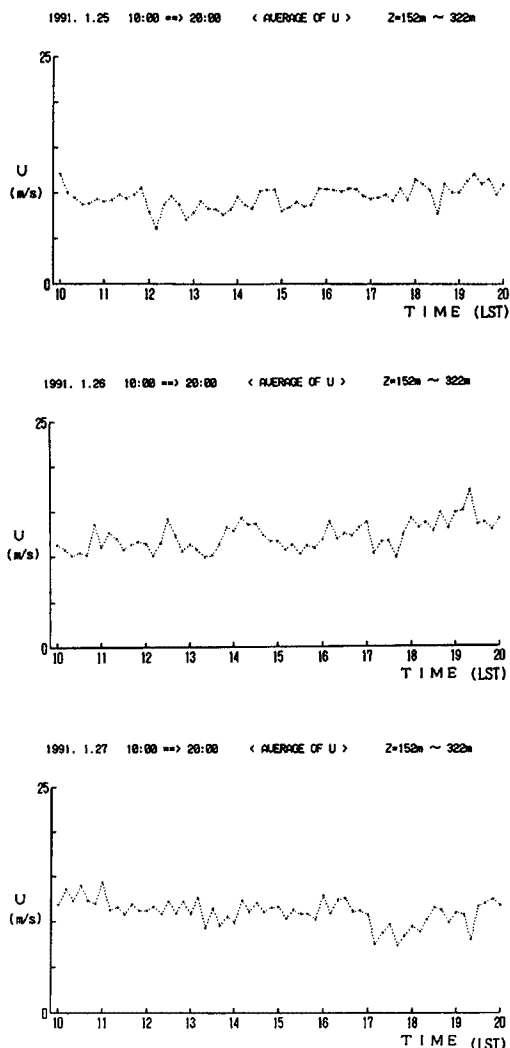


Fig. 3. Time series of horizontal wind speed ( $U$ ) averaged between 152 m and 322 m for three days (25-27 January 1991).

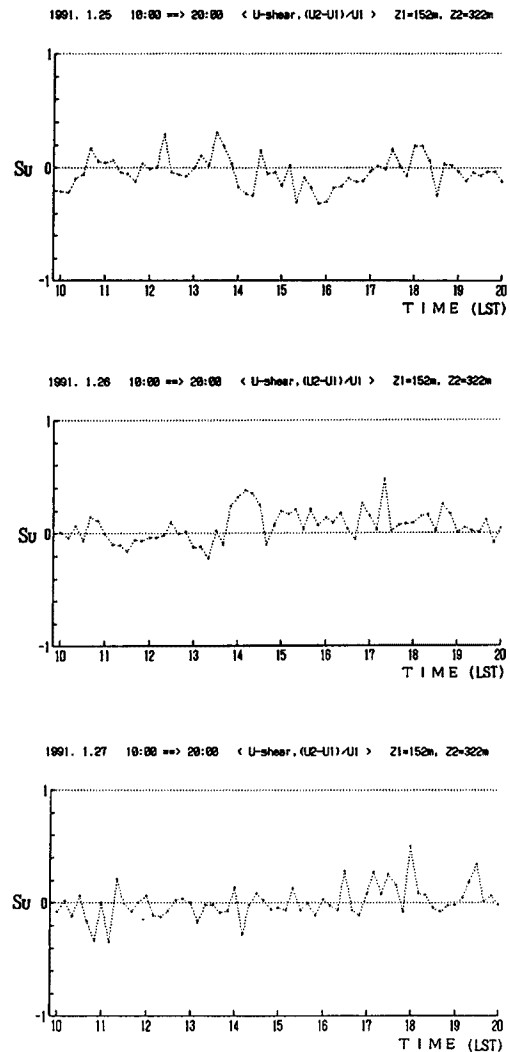


Fig. 4. Time series of the wind shear ( $S_U$ ) between 152 m and 322 m.

次に風の鉛直成分  $W$  についてその変化を調べる。ドップラーソーダは島の北岸の海拔高度 150 m の岬の上に設置したが、海岸線より数 100 m 程度離れており、地形により気流は影響を受けていると推測される。実際にドップラーソーダにより測定された鉛直風速  $W$  は、北寄りの風向の時に水平風速  $U$  に対して依存性があることが確かめられた。そこで、水平風速  $U$  と鉛直風速  $W$  との線形的な関係を最小二乗法により決めて、それからのずれを風の鉛直成分の変動  $W'$  とし、その時間変化を調べることにする。

Fig. 5 に高度 322 m での  $W'$  の時間変化を示す。25日には系統的な  $W'$  の値の変化は見られないが、26日には13時30分から14時頃にかけて系統的な  $W'$  の増加が見られ、ピーク時には 1.5 m/s 以上に達している。これは水平風速  $U$  の増加した時間に対応している。また、水平風速  $U$  の強い状態が継続した18時頃以降については、 $W'$  ではむしろ比較的弱い状態が継続する。27日については18時頃以降にやや大きな値が連続して得られている。

次に鉛直風速  $W$  の標準偏差  $\sigma_W$  の時間変化を見る。ここでの  $\sigma_W$  は、10分という平均時間のうちで取得された各データ (15~30個程度、測定状況によって変わる) の鉛直風速  $W$  の値についての標準偏差である。

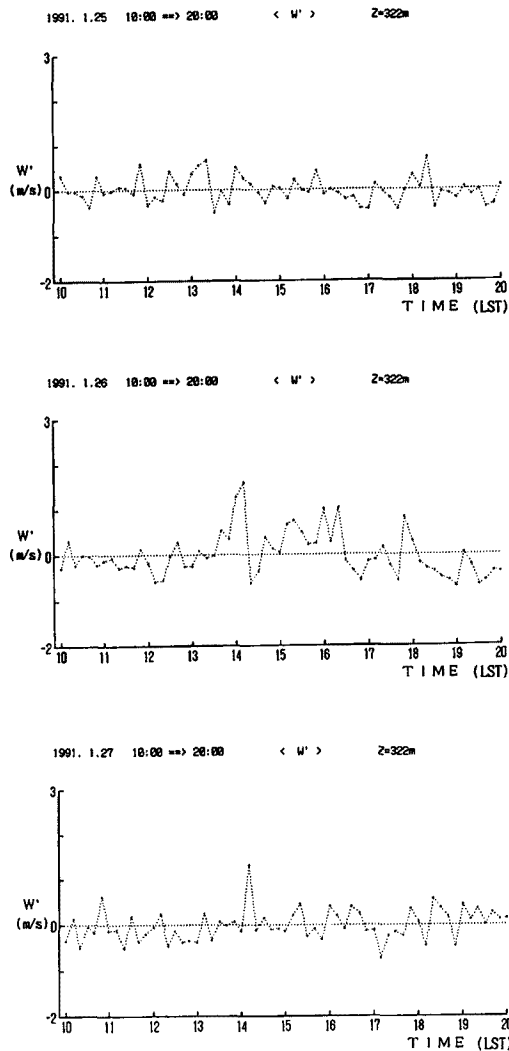


Fig. 5. Time series of the deviation of vertical wind speed ( $W'$ ) at 322 m.

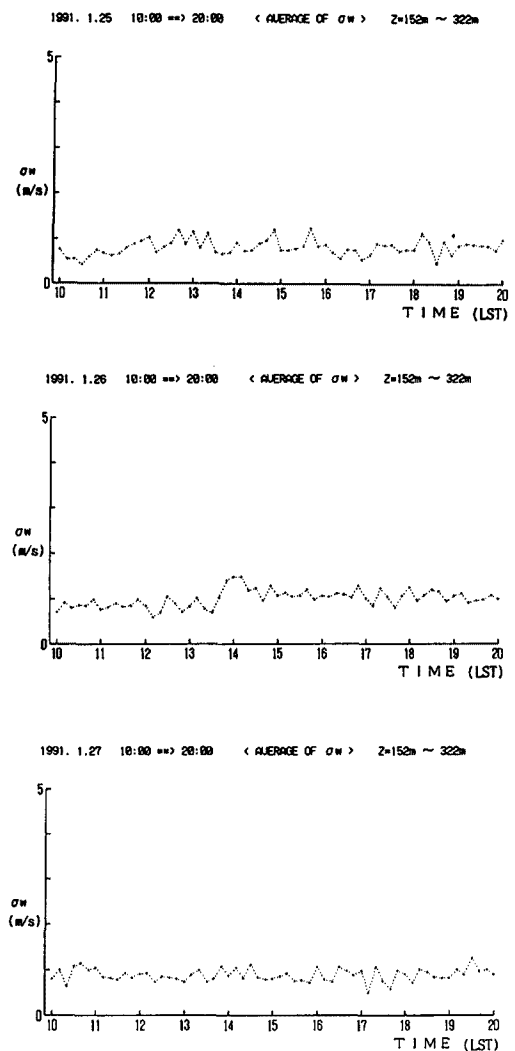


Fig. 6. Time series of standard deviation of vertical wind speed ( $\sigma_W$ ) averaged between 152 m and 322 m.

従って、10～20秒程度の時間スケールの鉛直風速の変動を示している。さて、高度 152 m から 322 m まで平均した  $\sigma_W$  の時間変化を Fig. 6 に示す。25日については特に目立った系統的な変化は見られず、0.5～1.2 m/s 程度である。26日については10時から13時30分までは同様に 0.8 m/s 程度であるが、13時30分から14時頃にかけて急激に増加して 1.5 m/s 程度となり、その後減少して15時頃以降は 1.1 m/s 前後の値が継続する。この13時30分から14時頃にかけての増加は  $U$  や  $W'$  の増加に対応したものである。27日についてはあまり系統的な変化は見られず、25日同様に 0.5～1.2 m/s 程度の値である。

### 3.4 各状況の対応

この25日から27日にかけての間に、雲の状況などと雲底下の気流の状況は前記のように大きく変化している。その対応を見ると、25日は降雨はあるが、雲の状況は下層雲量の多い状態が継続し、その意味では変動が少ないが、やはり下層での気流の状況も鉛直風速  $W$  の標準偏差  $\sigma_W$  や風速の鉛直シア  $S_U$  で見て変動の少ない状態が継続している。26日は前日と比較して非常に変動の激しい日となり、下層雲量の多い状況か

ら比較的少ない状況へと変化している。雲底高度の連続記録を見ても、25日の雲底が明瞭で高度変化の少ない状況から26日は変動が激しい状況になっている。下層の気流も特に13時30分以降変動が激しい状況が継続する。27日については同様な状況が雲については継続するが、26日後半に比較して下層の気流の変動は少ない。またこの日は対流混合層の厚さが3日の間での最高に達する。

#### 4. 考 察

以上の観測結果は、大陸から吹き出してきた寒冷な大気が暖かい海上で気団変質（対流混合層の発達）を受けて空間変化している中のある一地点だけで見たものであるから、大気と雲の空間変化について把握するためには、気象衛星などの観測資料を使用することが必要である。今回のケースでは下層雲の上に中層雲が存在することが多く、気象衛星のデータは有効に使用することが出来なかったが、今後出来るだけ他の観測資料、すなわち航空機、船舶による観測資料や、高層気象観測資料などを使用して研究を進めて行く予定である。

ここでは、今回解析を行った1月25日から27日の3日間について、得られたデータから下層雲と雲底下の境界層の状況について考察を行う。

なお、1987年の FIRE (First ISCCP Regional Experiment) 強化観測期間中に Hignett<sup>2)</sup> により行われた、カリフォルニア沖の雲層を上部に持つ境界層の観測では、明瞭な日変化が示されている。今回の解析期間においては、雲量や雲底高度などについて、明瞭な日変化を見いだすことは出来なかった。これは、この時期にこの海域で出来る雲に対して日射の影響は小さいことを示唆している。

さて、1月25日から27日の3日間についての状況であるが、混合層と雲底の高さは25日から27日にかけて次第に上昇している。この期間、下層大気的气温(850 mb 面)は低下している。混合層の高さの変化は、この下層大気的气温の低下と関係していることが考えられる。すなわち、海面水温(SST)の変化はこの期間中においてそれほど大きくないので、気温の低下は海面と大気との温度差を大きくし、それにより海面から大気への顕熱輸送量が大きくなる。これは混合層の発達をもたらす、混合層の高さを上昇させたと推測することが出来る。一方、雲底高度の上昇については、気温の低下と共に下層大気が乾燥化したことが考えられる。

1月25日から27日にかけての間に、雲の状況などと雲底下の気流の状況は両者とも大きく変化しており、雲層と雲底下層の状況の関連性が考えられる。25日から27日までの下層雲と対流混合層の状況の変化を見ると、25日に比べて27日では対流混合層がより発達しているが、雲量は逆に少なくなっている。これは対流が雲を形成する時の状況が、25日では対流活動は穏やかであるが比較的一様であり、27日では対流活動は激しいがより組織化されて非一様性が強いと考えられる。また、混合層の上の大気の状態の影響も考えられる。低層ゾンデ観測によれば、25日には混合層の上でも大気湿度は高いが、27日では混合層の上では非常に乾燥している。これが混合層上部に形成される雲の状態に影響していることが考えられる。25日から27日までの3日間の中で、雲底下層の気流について大きな変動は26日だけに見られる。この26日には、25日のような状況から27日に比較的近い状況へと変化しているが、その遷移状態であり変動が激しいものと推測出来る。

この26日の14時頃に見られる、鉛直風速の急増などを伴った水平風速の増加について、特に鉛直風速の標準偏差と風速の鉛直シアの関係の変化を、13時30分までとそれ以降に分けて Fig. 7 に示す。ここでの鉛直風速の標準偏差は大気の現時点での混合の進行状況(対流活動)を反映し、風速の鉛直シアは大気が鉛直混合された度合いを示していると考えられる。この日全体では弱い正の相関( $\sigma_w$ が大きい時、 $S_U$ も大きい)が見られ、13時40分以降、両方とも増加している。このような関係についてより詳しく調べ解釈していくことは今後の課題である。

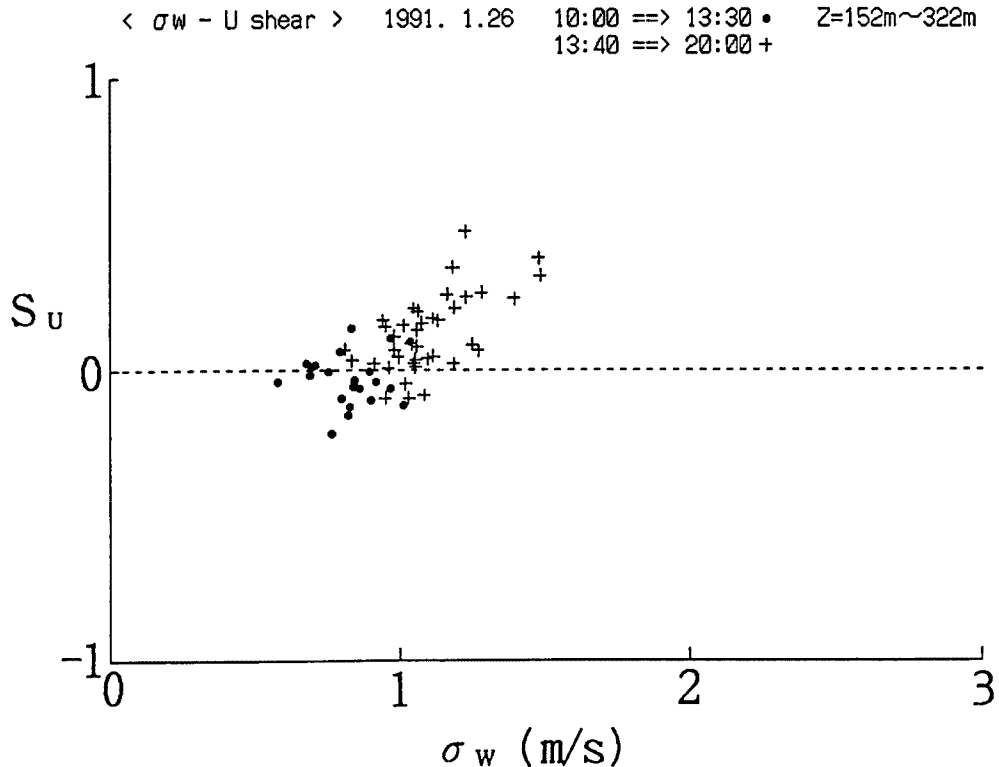


Fig. 7. The relation between  $\sigma_w$  and  $S_U$  before 1330 (•) and after 1340 LST (+) 26 January.

## 5. ま と め

海上の下層雲の形成・維持過程に関して、下層雲下の境界層の構造を調べることを主な目的とし、冬季に冬型の気圧配置のもとで海上の下層雲が形成されることが多い南西諸島海域において、奄美大島を基地とし、1991年1月に観測を実施した。

今回解析を行った期間(25~27日)について、雲量の変化と共に雲底高度や対流混合層の高さの変化が観測され、それに伴って、雲底下層の気流の状況も変化した。26日の14時頃には、水平風速と鉛直風速の増加に伴って、鉛直風速の標準偏差と風速の鉛直シアが両方とも増加する現象が見られた。

今回は観測期間のうちでも最後の時期のデータのみを解析したが、これ以前のデータも今後解析して今回の解析の比較資料としていく予定である。

## 謝 辞

観測にあたり、現地において援助をいただいた深浦卓二所長を始め奄美少年自然の家の方々に感謝の意を表します。

## 参 考 文 献

- 1) Ninomiya, K. and T. Akiyama: Structure and heat energy budget of mixed layer capped by inversion during the period of polar outbreak over Kuroshio region, J. Met. Soc. Japan, Vol. 54, 1976, pp. 160-174.
- 2) Hignett, P.: Observations of diurnal variation in a cloud-capped marine boundary layer, J. Atmos. Sci., Vol. 48, 1991, pp. 1474-1482.