

昭和基地の地上気象観測装置更新前後のデータの均質性について

佐藤 健・東島圭志郎・安ヶ平一也・村方栄真*

Effect of replacing the surface meteorological observation system at Syowa Station on the homogeneity of data

Tatsuru Sato, Keishiro Higashijima, Kazuya Yasugahira and Eishin Murakata*

(2003年5月6日受付; 2003年9月16日受理)

Abstract: The surface meteorological observation system was replaced over two years, 1997 and 1998, at Syowa Station in Antarctica.

The new system has been formally operated since February 1st 1999. Operation of the old system was continued for one year afterward in order to compare data from both systems.

The results of comparison of both systems are as follows:

- 1) The observation data from both systems agree within the accuracy of the system. The homogeneity of old and new data has been preserved.
- 2) However, some observed quantities show differences that cannot be disregarded although they are small.
- 3) These differences originated from changes of sensor, data-processing method, and installation position.

This paper reports the results considering differences in observational values obtained from the two systems, characteristics of data and homogeneity of data.

要旨: 昭和基地の地上気象観測装置は、第39・40次隊により1997年と1998年の2カ年計画で更新された。

新システムは、1999年2月1日より正式運用を開始したが、その後1年間は旧装置での観測も継続して行い、両装置の比較のためのデータを取得した。

比較観測の結果から、次のことが分かった。

- 1) 両装置の観測データは、概ね精度の範囲内で一致し、新旧データの均質性が保たれていた。
- 2) しかし、一部の要素については、観測値に僅かであるが無視できない差異が生じていた。
- 3) これらの差異は、測器感部やデータ処理の方法、設置位置の変更など装置の仕様変更起因していた。

本稿では、これら両装置の観測値の差異とその特徴、データの均質性などについて考察した結果を報告する。

* 気象庁. Janan Meteorological Agency, Otemachi 1-chome, Chiyoda-ku, Tokyo 100-8122.

1. はじめに

南極昭和基地の地上気象観測装置は、第30次観測隊(1989年2月1日)から総合自動気象観測装置(Automated Meteorological Observation System-2(AMOS-2))地上系(以下「AMOS2」という.)を使用してきた(宮本, 1990).

第39次観測隊は、AMOS2に替わる装置として、新たにJMA-95型地上気象観測装置(以下「JMA95」という.)を設置して1998年4月1日から試験運用を開始し、続く第40次観測隊で視程計を追加整備して、1999年2月1日から正式運用を開始した(岸ら, 2002; 東島ら, 2003)

JMA95は、気象庁が1996年から国内の気象官署に順次配備している観測装置であり、その導入にあたっては、個々の測器感部から装置の構成に至るまで、様々な試験が行われた(気象庁, 1996). また、国内の基準気候観測所においては、JMA95整備後約2年間にわたって旧装置(JMA-80型地上気象観測装置)との同時比較観測が実施された.

しかしながら、これらの試験及び比較観測は国内の気象条件下で行われたものであり、昭和基地のような極地においては、装置が期待された性能を発揮するかどうか確認されていない. また、昭和基地で使用されていたAMOS2は、JMA-80型地上気象観測装置とは仕様が若干異なる.

これらのことから、昭和基地においてもJMA95の運用開始後1年間にわたりAMOS2による観測を継続して、両装置による観測値の均質性を検証するための比較データを取得した.

第3章以下では、第40次観測隊が両装置によって観測した1999年2月1日~2000年1月31日の1年間のデータを用いて装置更新前後の観測値の均質性などについて考察する. なお、特に断らない限り、個々の測器の比較に関する記述では、AMOS2の測器を「AMOS2」、JMA95の測器を「JMA95」と呼ぶことにする.

本文中の統計値は、両装置の比較検証のために、AMOS2欠測期間について、JMA95のデータも排除している. このため、「南極気象資料1999年」(気象庁, 2000)として発表されている地上気象観測統計値とは値が異なる.

2. 装置の概要と比較の方法

2.1. 装置の概要

JMA95は、測器感部、変換部及び処理部から構成されている.

測器感部のほとんどがAMOS2のものとは仕様に変更され、観測の精度が向上した. また、新たに積雪計と視程計が追加された. 気圧計、日射日照計、積雪計及び視程計は、測器感部に交換装置を実装しており、観測データを物理量に変換後デジタル出力する.

変換部では、各測器感部からの出力信号を処理し、変換の必要なものは物理量に変換した

上で、それらを統合して処理部に伝送する。また、同時に感部の動作状態も監視しており、処理部への伝送データに HK (House Keeping) 情報を付加する。

処理部では、変換部から伝送されたデータを処理し、各種統計値の算出、データ欠落時の欠測処理等を行う。処理部は2重化され、自己診断機能の他に気象電報の作成・送信の機能や原簿作成機能が付加されて、信頼性が向上するとともに多機能化が進んでいる。

JMA95 の仕様については、地上気象観測指針 (気象庁, 2002) を参照されたい。

図 1 に JMA95 及び気象資料通報局装置 (DCP) の接続概念図を、図 2 に昭和基地における測器感部の設置位置を示す。

2.2. 測器感部及びデータ処理についての主な変更

AMOS2 から JMA95 への移行により、測器感部及びデータ処理方法が変更された。以下にその概要を述べる。

温度計と全天日射計は測器感部に若干の変更があった。温度計は両装置とも白金抵抗温度計を使用しているが、感部の保護管の外径は AMOS2 で 10 mm だったものが JMA95 では 3.2 mm と細くなった。全天日射計は、いずれもサーモパイルを用いているが、受光板の形状などが異なる。

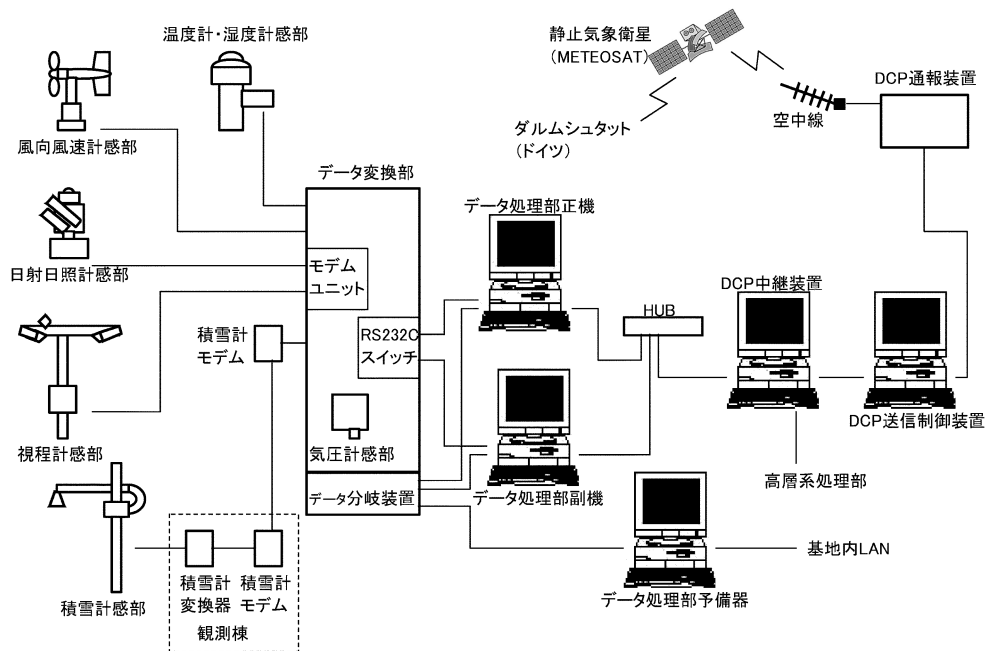


図 1 地上気象観測装置の信号系統図

Fig. 1. Schematic diagram of the surface meteorological observation system.

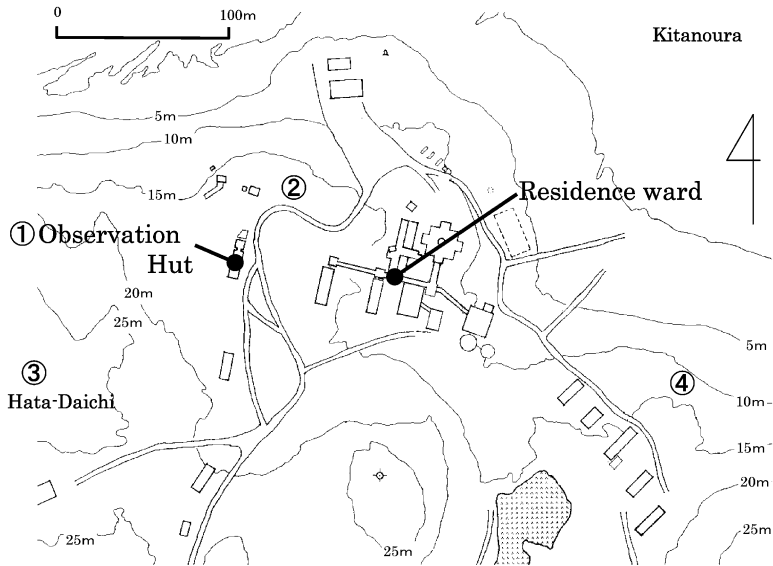


図2 昭和基地における気象観測測器の配置（国立極地研究所（1998）に加筆）

- ① 気圧計，日照計，日射計
- ② 風向風速計，温度計，湿度計，視程計
- ③ 日照計，日射計
- ④ 積雪計

Fig. 2. Locations of meteorological instruments at Syowa Station.

- ① Barometer, sunshine duration meter, pyranometer
- ② Wind vane and anemometer, thermometer, hygrometer, visibility meter
- ③ Sunshine duration meter, pyranometer
- ④ Snow depth meter

風向風速計は両装置とも風車型で形状には大きな変更はない。しかし、AMOS2では風向検出にトルクシンクロ発信器，風速検出に交流発電機を用いていたのに対し，JMA95では風向は光エンコーダ方式，風速は光パルス方式といずれも非接触方式に変更となった。さらに，感部自体も小型軽量化された。

感部の形状，測定原理ともに大きく変更されたのは気圧計と湿度計で，気圧計は円筒振動式から電気式（静電容量型），湿度計は塩化リチウム露点計から電気式（静電容量型）に変更となった。

日照計は，直達日射強度を測定することについては同じだが，AMOS2の回転式からJMA95の太陽追尾式へ変更されたため，両者の感部光学系は大きく異なる。

データ処理の大きな違いは，気圧，気温，湿度の正1分の観測値について，AMOS2では瞬間値を用いているのに対し，JMA95は前1分間の10秒毎6個のサンプリング値を平均値して求めていることである。また，これらの要素では日の極値の取り方も変更となり，AMOS2が正1分値（瞬間値）から求めているのに対し，JMA95では10秒毎の観測値（平均値）の中

から求めている。

JMA95 と AMOS2 の測器感部の仕様と、観測値の処理方法の概要を表 1 及び表 2 に示す。表中、特に断りのないものは、中浅測器（1988）、明星電気（1998）、気象庁（2002）及び各メーカーのカタログより引用した。

2.3. 比較・検証の方法

本報告では、昭和基地で地上気象観測装置により自動観測を行っている全ての要素について、新旧両装置によって観測したデータの比較と均質性に関する考察を行った。比較に用いた資料と比較の方法は、個々の気象要素により異なるので、それぞれの章に記述している。

本節では、複数の気象要素に共通する事項について記す。

2.3.1. 観測値の差異をもたらす要因の分離

2.2 節で述べたとおり、装置の更新によって、測器感部、データ処理方法、極値を求める際のサンプル数に変更となり、また一部の要素については、感部設置位置も同時に変更された。これらの変更は、観測値に対してそれぞれ異なった影響を及ぼし、複数の要因が重なることによって、観測値の偏向傾向は増長され、あるいは相殺される。このため、最終的な統計値の比較のみでは、両装置の差異がどのような要因によりもたらされたかは、明らかにできない。

また、個々の観測値が受ける影響と、平均値、極値が受ける影響とは、それぞれ異なる。

これらのことから、各気象要素の比較においては、個々の観測値、平均値、極値のそれぞれについて両装置の差異を評価するとともに、比較データの抽出の際に様々な条件を設けることにより、観測値の差異をもたらした要因の分離を試みた。

2.3.2. 感部設置位置の変更によって生じる観測値差の評価

AMOS2 の日照計は旗台地、全天日射計は気象棟前室屋上に設置されていたが、JMA95 は、両感部とも 1999 年 2 月～12 月は気象棟前室屋上、2000 年 1 月以降は旗台地に設置した。両地点は、水平距離で約 150 m 隔たり、感部設置高は旗台地の方が約 7 m 高く、周辺地物の状況も異なる。気象棟前室屋上は、北側に日射観測用太陽追尾装置、西側に旗台地、南側に高層気象観測用レドームがあり、季節によってはこれらにより日射が遮られる。

測器感部の変更による影響を排除するため、2000 年 1 月に JMA95 の感部を移設した後も、気象棟前室屋上に JMA95 の予備感部を設置し、両地点の比較データを取得して、感部設置位置の変更による影響を評価した。

2.3.3. 測器感部自体の変更による観測値差の評価

いくつかの気象要素については、測器感部自体の変更によってもたらされる観測値の差異を評価するため、感部の変更以外の要因による観測値への影響を除去したデータセットを用いて比較を行った。

気圧及び気温については、測器感部及びデータ処理方法の変更で生じる装置の応答時間の

表1 JMA95 と AMOS2 の感部仕様 (1/2)
Table 1. Sensor specifications in JMA95 and AMOS2 (1/2).

観測要素	JMA95	AMOS2
気圧	電気式気圧計 (静電容量型) (PTB220, 3 センサタイプ) 時定数: 2 秒以下 (センサ 1 個の場合) 精度: $\pm 0.2 \text{ hPa}$ 以内 (*1) 感部設置高: 20.7m (海面高) 3 つのセンサによる観測値の平均を 2 秒毎に変換部に送出する。	円筒振動式気圧計 (F-451) 時定数: 2 秒 精度: $\pm 0.2 \text{ hPa}$ 以内 感部設置高: 同左 1.25 秒毎にサンプリングした現地気圧と、気温の現在値から海面較正を行い、1 分毎に現地気圧及び海面気圧の値を処理部に送出する。
気温	電気式温度計 (白金抵抗型, Pt100 (MES-39205, JIS A 級), $\phi 3.2 \text{ mm} \times 100 \text{ mm}$) 時定数: 約 40 秒 (6m/s で通風の場合) (*4) 精度: $\pm 0.15^\circ \text{C}$ 以内 (*2) 感部設置高: 1.5m (地上高)	電気式温度計 (白金抵抗型, Pt100 (E-732, JIS 0.2 級), $\phi 10 \text{ mm} \times 150 \text{ mm}$) 時定数: 約 2~3 分 (6m/s で通風の場合) (*4) 精度: $\pm 0.5^\circ \text{C}$ 以内 (*1) 感部設置高: 同左
湿度	電気式湿度計 (静電容量型) (HMP233LJM) 時定数: RH10~90% 時 6 秒, RH90~0% 時 10 秒 (90% 応答) (*5) 精度: $\pm 5\%$ 以内 (*1) 感部設置高: 同上	塩化リチウム露点温度計 (E-771-21) 時定数: 露点上昇時 0.8 分, 下降時 3.5 分 (98% 応答) (*6) 精度: 露点温度 $\pm 1.0^\circ \text{C}$ 以内 (*1) 相対湿度 $\pm 5\%$ 以内 (*1) 感部設置高: 同左
風向	風車型風向風速計 (FF-11) 重量: 3.6kg 風向検出: 光エンコーダ方式 (8bit) 分解能: 1.4° 以下 周期常数: 10m 以下 精度: $\pm 2.0^\circ$ 以内 感部設置高: 10.1m (地上高)	風車型風向風速計 (中浅, 南極仕様) 重量: 12kg 風向検出: トルクシンクロ発信機 周期常数: 15m 対数減衰率: 0.53 精度: $\pm 5^\circ$ 以内 感部設置高: 同左
風速	風車型風向風速計 (FF-11) プロペラ: ポリカーボネイト樹脂 風速検出: 光パルス方式 (60 パルス/回転) 分解能: 0.1m/s 以下 起動風速: 0.5m/s 以下 距離定数: 5m 以下 精度: 0.2m/s 以内 (10m/s 以下), 2% 以内 (10m/s 超) 0.3m/s 以内 (10m/s 以下) (*2), 3% 以内 (10m/s 超) (*2) 感部設置高: 同上	風車型風向風速計 (中浅, 南極仕様) プロペラ: アルミニウム 風速検出: 交流発電機 起動風速: 2m/s 以下 距離定数: 8m 精度: $\pm 0.5 \text{ m/s}$ 以内 (10m/s 以下), $\pm 5\%$ 以内 (10m/s 超) 感部設置高: 同上

表1 JMA95 と AMOS2 の感部仕様 (2/2)
Table 1. Sensor specifications in JMA95 and AMOS2 (2/2).

観測要素	JMA95	AMOS2
日照時間	<p>直達日射計 (MS-101D, 太陽追尾式日射日射計 STR-02DM に搭載) 開口角: 5° (全角), 傾斜角: 1° 感度: 約 6mV/kW/m² 応答速度: 約 10 秒 (63%) 感部設置高: 24.4m (海面高, 1999.2-1999.12, 気象棟屋上) 31.5m (海面高, 2000.1-, 旗台地) 感部側の CPU において感部出力を直達日射強度に換算し, これを閾値 (120W/m²) と比較し, 閾値以上ならば日照ありのフラグを立てる. 10 秒毎に日照あり, なしのフラグを交換部に送出する.</p>	<p>回転式日照計 (MS-091) 精度: ±0.5%/F.S. (*3) 赤緯特性: ±7%以下 (赤緯±25° の変化に対して) 感部設置高: 31.5m (海面高, 旗台地) 30 秒間内の受光部からの直達日射パルスを, 閾値 (直達日射量 120W/m²) と比較し, 閾値以上ならば日照ありとして感部内変換器でカウンタをアップ, 4 カウントで日照パルスを交換部へ出力する.</p>
全天日射量	<p>全天電氣式日射計 (MS-62F, 太陽追尾式日射日射計 STR-02DM に搭載) 感度: 約 7mV/kW/m² 応答速度: 約 8 秒 (63%) 高度角特性: ±3% (天頂角 0~80°) 方位角特性: ±2% (天頂角 70° において) 精度: 10mV/kW/m²以下 ±0.5%以内(*2) 感部設置高: 24.9m (海面高, 1999.2-1999.12, 気象棟屋上) 32.0m (海面高, 2000.1-, 旗台地) 感部側の CPU において感部出力を日射強度に換算し, これを 10 秒毎に変換部に送出する.</p>	<p>精密全天日射計 (MS-801) 感度: 約 7mV/kW/m² 応答速度: 約 2.5 秒 (63%) 入射角特性: ±2% (天頂角 0~80°) 方位角特性: ±2% (天頂角 75° において) 精度: ±1.5% (0.25kW/m²における感部総合精度), ±0.5%/F.S. (*2, *3) 感部設置高: 24.9m (海面高, 気象棟屋上)</p>
積雪	<p>超音波式積雪計 (GF-212) 使用周波数: 41kHz ビーム幅: 12° 分解能: 1cm 以下 精度: ±2cm 以内(*1) 感部設置高: 9m (地上高) 10 秒毎の距離データを交換部に送出する.</p>	—
視程	<p>視程計 (現象判別付) (TZE-6P, 前方散乱計) 感部設置高: 2.15m (地上高) 前方散乱計, 温度計, 感測器からの出力を統合し, 視程, 天気等の観測値を決定して 15 秒毎に変換部に送出する.</p>	—

注) 測器感部に交換部を持つものについては, 各欄の下段に感部側の処理の概要を記した.

*1: 感部変換部総合精度, *2: 変換部精度, *3: フルスケールに対する精度, *4: 鈴木宣直 (1996a), *5: 鈴木宣直 (1996b)

表 2 変換部及び処理部での処理 (1/3)
Table 2. Data processing in conversion unit and processing unit (1/3).

観測要素	JMA95		AMOS2	
	変換部での処理	処理部での処理	変換部での処理	処理部での処理
現地気圧の現在値	感部から送られるデジタル信号(気圧値)を受信し、10秒毎の値を処理部に送出する。	前1分間にデータ変換装置が出力する10秒毎の値(6個)を平均し、これに予め設定した補正値を加えて現地気圧の正10秒値とする。 正分の正10秒値を正1分値とし、正時の正10秒値を正時値とする。		感部からの1分毎の出力を正1分値とし、正時の正1分値を正時値とする。
海面気圧の現在値		現地気圧の正10秒値・気温の正10秒値・初期設定の気圧計の高さ及び重力加速度から海面更正の式により正10秒値を求める。 正1分値及び正時値の求め方は現地気圧と同じ。		同上。
気温の現在値	温度計の抵抗値を1秒毎にサンプリングし、周波数変換及びデータ処理装置の測器感部設定で設定した係数(10°Cの抵抗値)に応じた演算式により、気温を算出し、正10秒時の値を処理部に送出する。	前1分間にデータ変換装置が出力する10秒毎の値(6個)を平均し、正時値とする。 正1分値及び正時値の求め方は現地気圧と同じ。	5秒毎にサンプリングした感部抵抗値を気温に変換し、1分毎の値を処理部に送出する。	変換部からの1分毎の出力を正1分値とし、正時の正1分値を正時値とする。
湿度の現在値	湿度計が出力するアナログ信号(電流)を1秒毎にサンプリングし、周波数変換及び演算式により湿度を算出し、正10秒時の値を処理部に送出する。	同上。	気温・露点温度から算出し、1分毎の値を処理部に送出する。	同上。
露点温度の現在値		湿度・気温の正10秒値から算出したものを正10秒値とする。 正1分値及び正時値の求め方は現地気圧と同じ。	5秒毎にサンプリングした感部湿度を露点温度に換算し、1分毎の値を処理部に送出する。	同上。
蒸気圧の現在値		同上。	露点温度から算出し、1分毎の値を処理部に送出する。	同上。
日最低海面気圧 日最高気温 日最低気温 日最小湿度		各要素の正10秒値の中から求める。		各要素の正1分値の中から求める。

表2 変換部及び処理部での処理 (2/3).
Table 2. Data processing in conversion unit and processing unit (2/3).

観測要素	JMA95		AMOS2	
	変換部での処理	処理部での処理	変換部での処理	処理部での処理
風向	感部が出力する信号(風向:グレイコード、風速:ハルス)を0.25秒毎にサンプリングする。正10秒毎に、前10秒間の40個のサンプリングデータを処理し、以下のデータをデータ処理装置に送出する。 ①風速(40個)の中の最大値 ②①と同一サンプリング時刻の風向 ③風速(40個)の中の最小値 ④風程は、風速×0.25(40個)の積算値(単位はm) ⑤風向(単位ベクトル)(40個)の東西成分の積算値 ⑥風向(単位ベクトル)(40個)の南北成分の積算値 ⑦風向(40個)の中の時計回り(CW)の最大振幅 ⑧風向(40個)の中の反時計回り(CCW)の最大振幅	変換部からの出力②を正10秒の瞬間変換部からの出力⑤、⑥を正10分毎に前10分間積算した値のベクトル平均を正10分の平均風向とする。前5分間の平均風向との差が90°以上の場合は、5分間平均風向を平均風向とする。 変換部からの出力①を正10秒の瞬間風速とする。	感部が出力する風向信号を0.2秒毎にサンプリングし、1分毎に前1分間の最大風速と同時刻の風向を処理部に送出する。 感部が出力する風向信号をsinθ、cosθの2分間積算した値のベクトル平均を合成して平均風向とし、1分毎に処理部に送出する。	変換部からの1分毎の出力を正1分毎にサンプリングし、1分毎に前1分間の最大風速と同時刻の風向を処理部に送出する。
風速				同上。
風速(10分平均)		変換部からの出力④を正10分毎に10分間積算して求める。	感部が出力する信号(交流波形)を0.2秒毎にサンプリングして波数を風速に変換し、前1分間内の最大風速を1分毎に処理部に送出する。 感部が出力する信号(交流波形)を0.2秒毎にサンプリングして波数をカウントし、1分間積算値の10分間移動平均を平均風速として1分毎に処理部に送出する。	同上。
日最大風速・風向		風速(10分平均)の正10分値の中から最大のもの、日最大風速とし、同一時刻の風向(10分平均)を日最大風速の風向とする。		風速(10分平均)の正1分値の中から最大のもの、日最大風速とし、同一時刻の風向(10分平均)を日最大風速の風向とする。
日最大瞬間風速・風向		風速の正10秒値の中から最大のもの、日最大瞬間風速とし、同一時刻の風向を日最大瞬間風速の風向とする。		風速の正1分値の中から最大のもの、日最大瞬間風速とし、同一時刻の風向を日最大瞬間風速の風向とする。
日平均風速		変換部からの出力④を日積算して日風程を求め、これを時間で除して日平均風速とする。	感部が出力する信号(交流波形)を0.2秒毎にサンプリングして波数をカウントし、1分間積算値の整数部を60m風程に換算して1分毎に処理部に送出する。小数部は次の1分に繰り越す。	変換部からの1分毎の出力を積算して日風程を求め、これを時間で除して日平均風速とする。

表 2 変換部及び処理部での処理 (3/3).
Table 2. Data processing in conversion unit and processing unit (3/3).

観測要素	JMA95	処理部での処理	AMOS2	処理部での処理
日照時間	感部から送られる日照あり・なしの信号を10秒毎に受信し、処理部に送出する。	変換部が出力する正10秒毎の値を日照積算カウンタで積算し、可照開始時刻からの日照時間(日照時間)を2分単位で求める。日照時間は、それぞれ前1分間、前10分間、前1時間の日照時間の差から求める。	変換部からの出力ハルスを1ハルスあたり2分として積算し、1分毎に積算日照時間を処理部に送出する。	変換部から1分毎に出力される積算日照時間から時別の日照時間、日合計日照時間を求める。
全天日射量	感部から送られるデジタル信号(日射強度)を10秒毎に受信し、処理部に送出する。	変換部が出力する正10秒毎の値を演算し10秒間日射量(kJ/m ²)とし日射量積算カウンタを積算する。正1分毎に前1分間の日射量積算カウンタの差を求め、得られた値を全天日射量の正1分値とする。全天日射量の正10分値は前10分間の日射量積算カウンタの差から、正時値は前1時間の日射量積算カウンタの差から求める。	感部出力を1秒毎にサンプリングし、日射量に換算して積算し、1分毎に積算日射量を処理部に送出する。	変換部から1分毎に出力される積算日射量から時別の日射量、日積算日射量を求める。
積雪の深さ	感部から送られるデジタル信号(距離データ)を10秒毎に受信し、処理部に送出する。	変換部が出力する正10秒毎の雪面までの距離に音速補正を施し、測器感部設定の積雪計設置高から減じて積雪の深さの正10秒値とする。正1分値及び正時値の求め方は現地気圧と同じ。日最深積雪は、24個の正時値の中の最大値とする。		
視程	感部から送られるデジタル信号(視程等)を15秒毎に受信し、10秒毎に処理部に送出する。	変換部が出力する正10秒毎の値を正10秒値とする。正1分値及び正時値の求め方は現地気圧と同じ。		

(注) 現地気圧、海面気圧、気温、湿度、蒸気圧の日平均値は、24個の正時値を平均して求める。

差異による影響を除去するために、JMA95 による測定量の時間変化率が 0 のときのデータを抽出して、両装置の観測値差を評価した。なお、気圧においては測器の時定数が 2 秒程度と小さいため、現地気圧の当該時刻の正 1 分値と次の正 1 分値とが等しい場合を気圧変化率 0 とみなし、気温においては測器の時定数が数 10 秒程度であるため、2 分前、1 分前及び当該時刻の正 1 分値が全て等しい場合を気温変化率が 0 であるとみなした。

日照時間については、感部設置位置の差異による影響を除去するために、地物による太陽直射光の遮蔽効果が無視できる太陽高度角 5° 以上のときのデータを抽出して観測値差の評価を行った。

2.3.4. 装置の応答時間の差異によって生じる観測値差の評価

装置の応答時間は、測器感部の時定数とデータ処理方法により決定される。また、応答時間の差異によって生じる観測値差は、測定量の時間変化率の大きさによって異なる。

一般に時定数 τ の測器による観測値は、測定量のステップ状の変化に対して次式の応答関数に従って平衡に至る。 $t=\tau$ のとき $R=0.63$ であり、63% の応答を得るのに要する時間が時定数と定義される。

$$R = 1 - \frac{1}{\exp(t/\tau)}. \quad (1)$$

ここで、サンプリング間隔を 10 秒とすると、 t は $t_i=0, 10, 20, \dots$ のように離散的な値をとる。平均時間を 1 分とする場合、 i を $j-5$ から j まで変化させて、それぞれの t_i に対応する R_i を 6 個平均したものが測器の応答 R' であり、次式によって表せる。

$$R' = \frac{\sum_{i=j-5}^j \left(1 - \frac{1}{\exp(t_i/\tau)} \right)}{6}. \quad (2)$$

気圧及び気温については、感部の変更とデータ処理方法の変更を併せた装置の応答時間の差異を上式の (2) により見積もるとともに、測定量の時間変化率と、応答の遅速によって生じる観測値差との関係から、個々の観測値への影響の度合いを評価した。

なお、測定量の時間変化率は JMA95 の正 1 分値から求め、気圧においては、当該正分と次の正分の差、気温においては、1 分前の正分と当該正分の差とした。

2.3.5. 測器感部の変更と応答時間の差異による極値への影響

測器感部の変更と応答時間の差異により日極値が受ける影響は、時別値のような個々の観測値が受ける影響とは程度が異なる。

日最低海面気圧及び日最高・最低気温については、サンプル数の変更による影響を除去するために、JMA95 の正 1 分値のみから日極値のデータセットを作成し (以下「JMA95 (1m)」という.)、同じく正 1 分値から求めている AMOS2 の日極値と比較することによって、測器感部の変更と応答時間の差異による影響を評価した。

2.3.6. サンプル数の変更による極値への影響

極値を求める場合、サンプル数が多いほど捕捉率は向上するが、このことにより生じる観測値の差異の程度は、一様ではない。

日最低海面気圧、日最高・最低気温及び日最小相対湿度は、AMOS2では1日の正1分値から求めるのに対し、JMA95では1日の正10秒値から求めている。このため、サンプル数から見ると、JMA95の方がAMOS2よりも大きい(または小さい)値を捕捉する確率が高くなる。ただし、この効果の度合いは、観測地点の気候的な特性、すなわちごく短時間で測定量の急激な変化が起こり易いか否かに依存している。サンプル数の差異による影響のみを評価するために、日極値についてJMA95(1m)(正1分値から求めた日極値)と、JMA95(正10秒値から求めた日極値)とを比較した。

2.3.7. 極値を比較する際の留意事項

地上気象観測統計指針(気象庁, 1990a)では、最低海面気圧、最高・最低気温、最小湿度などの日極値の発現時刻は1分単位で表し、1日の内で同じ値が2回以上現れた場合、後に現れた時刻を極値の発現時刻と定義している。このため、両装置で発現時刻が大きく異なるものは、それぞれ別のピークを日の極値として採用している可能性がある。本報告の目的は、装置の変更による観測値の差異を明らかにすることであるため、装置の応答時間が概ね数分以内であることを考慮して、極値の比較を行う際には、発現時刻の差が±10分以内の場合のみを比較対象とした。また、極値の発現時刻が日界(0時01分または24時00分)となった場合は、単調増加中(または減少中)の値を捉えている可能性があり、本来のピークの定義とは異なるため、このようなデータも比較対象から除外した。

なお、日最低海面気圧については、同指針の規定に準じ、970 hPa以下の場合のみ求めることとしていたため、両装置の比較資料は30日分程度である。

3. 気 圧

気圧の観測については、表1に示したとおり、測器感部が円筒振動式気圧計から電気式気圧計(静電容量型)に変更になった。また、処理方法については、2.2及び表2に示したとおりの変更があった。

これらのことから、本章においては2.3節に従って次の点について検証する。

- ① 測器感部自体の変更によって生じる、観測値の系統的な差の程度を確かめる。
- ② 装置の応答時間の差異を評価するとともに、この差異によって生じる、個々の観測値及び平均値、極値の差を評価する。
- ③ サンプル数の変更によって生じる、日最低海面気圧の観測値及び発現時刻の差を評価する。

3.1. 装置の変更による観測値の系統的な差異

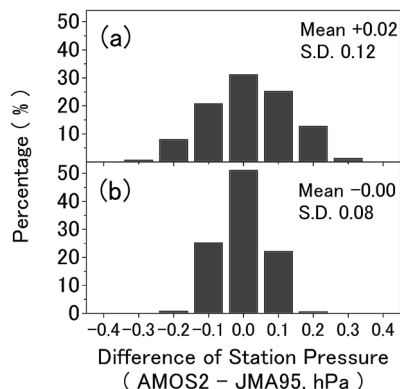
AMOS2の測器感部は1999年7月10日に交換しているため、比較期間を1999年2月1日～

図3 両装置による現地気圧の差の出現率分布（気圧変化率が $0.0\text{hPa}/\text{min}$ の場合）
横軸は両装置の観測値差，縦軸は差の出現率で，期間中のデータの総数に対する百分率で表した。
(a) 1999年2月1日～1999年7月10日（前期間，資料数181061個）
(b) 1999年7月11日～2000年1月31日（後期間，資料数241176個）

Fig. 3. Percentage distribution of frequency of occurrence of difference of station pressure observed by JMA95 and AMOS2 (In case of rate of change in station-pressure $0.0\text{hPa}/\text{min}$).

(a) Feb. 1, 1999–July 10, 1999

(b) July 11, 1999–Jan. 31, 2000



7月10日の前期間と7月11日～2000年1月31日の後期間に分け，各期間の正1分値から2.3.3に従って気圧変化率が0のときのデータを抽出した．図3a及びbに，それぞれの期間について，両装置の現地気圧観測値の差の出現率を示す．図から，両期間とも，観測値の差は0を中心に概ね $\pm 0.2\text{hPa}$ の範囲に分布している．観測値差の平均と標準偏差は，前期間がそれぞれ $+0.02\text{hPa}$ と 0.12hPa ，後期間がそれぞれ -0.00hPa と 0.08hPa ，全期間では $+0.00\text{hPa}$ と 0.10hPa であった．

両装置の気圧計は，フォルタンを基準器として毎日1回比較観測を行い，1カ月の差の平均値を翌月の器差補正值として設定している．フォルタンとの比較観測結果（資料数355個）では，AMOS2で3月に1回だけ -0.3hPa の差を観測している他は，両装置ともフォルタンとの差は $\pm 0.2\text{hPa}$ の範囲に収まっていた．また，差の月平均は，2月のJMA95が -0.14hPa となっている他は， $\pm 0.1\text{hPa}$ の範囲内であり，標準偏差は両装置とも全ての月で 0.1hPa 程度であった．

3.2. 応答時間の変更による観測値の差異

3.2.1. データ処理方法の変更を加味した装置の応答時間

測器感部の時定数は表1に示したとおり，両装置とも2秒程度である．JMA95の装置全体としての応答時間は，ステップ状の入力を仮定した場合，処理方法の変更を考慮して，2.3.4の式(2)により求めることができる．30秒後からの10秒毎の応答は，0.50, 0.67, 0.83, 1.00であり，装置としての時定数(63% 応答)は約40秒程度であることが分かる．また，AMOS2の応答は2.3.4の式(1)より，10秒後で0.99に達し，それ以後は1.00である．両者の応答を比較すると，両装置の観測値の差異は，30秒後で入力値の50%，40秒後で33%となり，60秒後には一致する．

3.2.2. 個々の観測値における応答の遅れ

図4は，3.1で示した後期間の全ての正1分値を用いて，2.3.4により，気圧変化率と両装

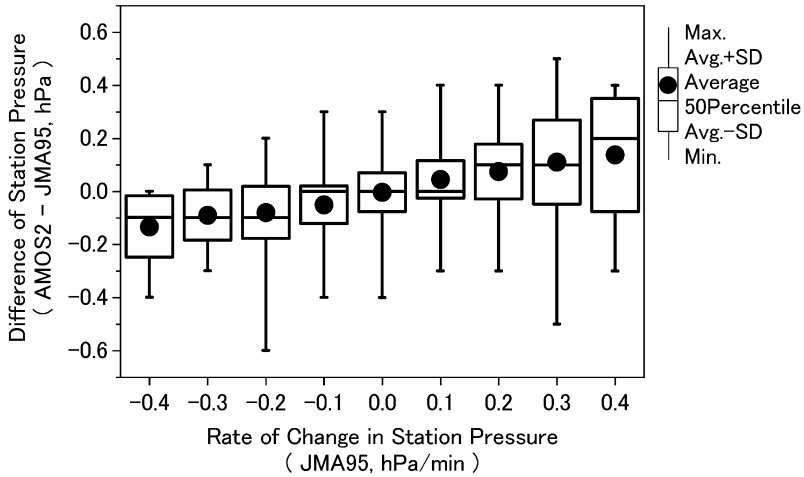


図4 気圧変化率と両装置の観測値差との関係 (1999年7月11日~2000年1月31日)
 横軸はJMA95によって観測された気圧変化率, 縦軸は両装置の観測値差で, ●は差の平均,
 ボックスは標準偏差, ボックス中央の線は50パーセントイル, バーは最大・最小を表す.

Fig. 4. Relation between rate of change in station pressure observed by JMA95 and difference of station pressure observed by JMA95 and AMOS2 (July 11, 1999–Jan. 31, 2000).

置の観測値の差との関係をプロットしたもので, 気圧変化率毎に, 観測値差の平均, 標準偏差, 50パーセントイル, 最大・最小を示している。

図から, 気圧変化率が大きい場合に, 観測値の差が大きくなっていることが分かる。気圧上昇中には, AMOS2がJMA95よりも大きく, 下降中にはその逆となり, JMA95の応答時間が長くなったことによる影響が現れている。

また, 同図において, 気圧変化率が+0.4 hPa/minの場合を除いて, 各変化率における観測値の差は危険率1%で有意であり, 直線回帰により求めた差の大きさは, 0.35 hPa/(1 hPa/min)であった。これは, 気圧変化率が当該正分をはさむ1分間で算出されていることを考慮すると, 30秒後の応答において, 1分あたりの気圧変化量の35%の差異を生じたことを意味し, 3.2.1で30秒後の応答においてJMA95がAMOS2に対して50%の遅れを持つとした見積りと概ね一致している。

この遅れにより, 1分あたり0.14 hPa (1時間あたり8.4 hPa)程度の大きな気圧変化があった場合に, 観測最小単位である0.1 hPa以上の差異として観測値に現れることになる。ただし, ± 0.2 hPa/min以上の気圧変化率の発現率は高々0.6%程度であることから, 応答の遅延によって観測値差が生じる頻度はごく小さい。

さらに, 図には示していないが, 前期間, 後期間及び全期間ともに, 全てのデータ (前期間230190個, 後期間292024個)における観測値差の平均と標準偏差は, 3.1で示した気圧変化率が0のときの平均, 標準偏差と同じであった。このことは, 多くの観測値を平均する場

合には、応答時間の差異による影響は現れないことを示している。

3.3. 日最低海面気圧値への影響

3.3.1. 応答時間の差異による影響

図5は、日最低海面気圧観測値(31日分)の資料を用いて、両装置の日最低海面気圧(a)及びその発現時刻(b)の差の出現頻度を示したものである。

図5aから、AMOS2の方がJMA95よりも低い値を観測する頻度が高く、観測値の差が -0.1 hPa 以下となった回数は14回で全体の45%であった。表3上段に示すとおり差の平均は -0.06 hPa 、標準偏差は 0.13 hPa であった。

応答時間の差異による影響のみを評価するために、2.3.5に従って両装置の正1分値から求めた日最低海面気圧を比較したところ、AMOS2とJMA95(1m)との差は 0.0 hPa となる確率が最も高く44.8%であるが、AMOS2の方が 0.1 hPa 以上低い値をとる確率も48.2%とかなり大きい。表3中段に示すように、両者の差の平均は -0.08 hPa 、標準偏差は 0.17 hPa であり、これらは図5a及び表3上段で示した両装置の差と概ね一致している。

3.3.2. サンプル数の差異による影響

サンプル数の差異による影響を評価するために、2.3.6に従ってJMA95(1m)とJMA95の日最低海面気圧の差を調べたところ、全体の95.5%が同値であり、残る4.5%でJMA95(1m)の方が 0.1 hPa 高かった。

表3下段には、JMA95(1m)とJMA95の日最低海面気圧値の差を示した。差の平均は

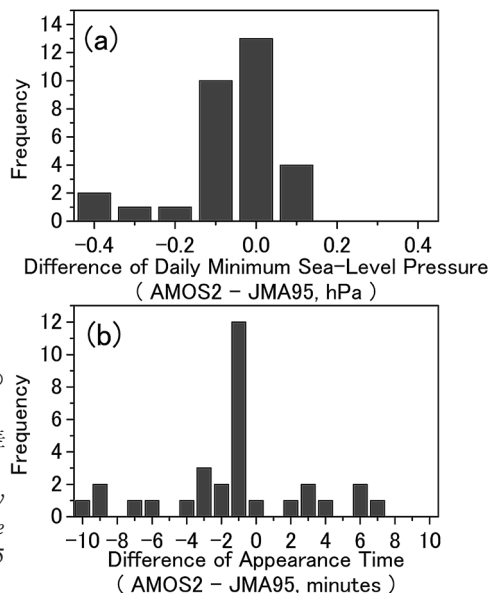


図5 両装置による日最低海面気圧の差(a)とその発現時刻の差(b)の出現頻度分布
横軸は(a)が観測値差、(b)が発現時刻差で、縦軸は出現頻度を示す。

Fig. 5. Frequency distribution of difference of daily minimum sea-level pressure (a) and difference of its appearance time (b), observed by JMA95 and AMOS2.

表3 応答時間及びサンプル数の変更が極値に及ぼす影響

Table 3. The influence on extreme value with change in response time and sampling number.

		最低海面気圧	最高気温	最低気温	最小相対湿度
日極値の差 (AMOS2-JMA95)					
資料数		31	230	246	162
極値	差の平均	-0.06 hPa	-0.03 °C *	+0.06 °C *	-1.6 % *
	差の標準偏差	0.13 hPa	0.14 °C	0.16 °C	4.3 %
発現時刻	差の平均	-1.3 分	+0.3 分	+0.5 分 *	-0.4 分
	差の標準偏差	4.2 分	3.4 分	2.7 分	3.4 分
感部の変更と応答時間の差異による					
日極値の差 (AMOS2-JMA95 (1m))					
資料数		29	229	242	164
極値	差の平均	-0.08 hPa	-0.01 °C	+0.05 °C *	-1.8 % *
	差の標準偏差	0.17 hPa	0.14 °C	0.15 °C	4.3 %
発現時刻	差の平均	-1.0 分	+0.8 分 *	+1.2 分 *	+0.3 分
	差の標準偏差	4.2 分	3.4 分	2.5 分	3.5 分
サンプル数の差異による					
日極値の差 (JMA95 (1m)-JMA95)					
資料数		267	322	317	329
極値	差の平均	+0.00 hPa *	-0.01 °C *	+0.01 °C *	+0.1 % *
	差の標準偏差	0.02 hPa	0.03 °C	0.03 °C	0.3 %
発現時刻	差の平均	-1.0 分 *	-0.7 分 *	-0.8 分 *	-0.9 分 *
	差の標準偏差	1.9 分	1.3 分	1.2 分	1.5 分

注) 差の平均に*が付されたものは、危険率1%で有意であることを示す。

+0.00 hPa で、値としては3.3.1で述べた応答時間の差異による最低海面気圧値の差よりも小さいが、危険率1%で有意となっている。

3.3.3. 発現時刻への影響

図5bで見ると、日最低海面気圧の発現時刻はJMA95の方がAMOS2よりも1分遅れる頻度が最も多く39% (12回)を占め、1分以上の遅れは74% (23回)あった。

表3には、AMOS2とJMA95 (上段)、AMOS2とJMA95 (1m) (中段)及びJMA95 (1m)とJMA95 (下段)の発現時刻差を示している。応答の遅れとサンプル数の増加は、ともに発現時刻を1.0分遅らせる効果があり、これらを合わせた効果としてJMA95はAMOS2より平均で1.3分遅れていた。

3.3.4. 日最低海面気圧値の差異をもたらす要因

3.2で解析に用いた気圧変化率はJMA95の正1分値から算出しているため、AMOS2の観測値に影響を与える数秒周期の気圧変化を捉えることはできない。

3.1及び3.2で示したとおり、気圧変化率が小さく気圧値がほぼ一定で経過するような場合には、両装置の観測値差の出現率は、平均値+0.00 hPa、標準偏差0.10 hPaの分布をしているが、この観測値差は、短時間の気圧変化に伴うAMOS2の観測値の変動を含んでいる。こ

ここでは、両装置の日最低海面気圧値の差異を、上述の観測値差の出現確率から見積もる。

AMOS2 と JMA95 の観測値差の出現確率密度関数を $f(x)$ とし、日最低海面気圧の発現時刻付近で気圧変化率がほぼ 0 となることにより、JMA95 の観測値が n 分間同じ値であったと仮定する。この n 分間の正 1 分の AMOS2 と JMA95 の観測値差 X_1, X_2, \dots, X_n 中の最小値を Y とすると、 Y を観測したときに AMOS2 の日最低海面気圧が発現することになるため、 Y は正 1 分値だけから求めた両装置の日最低海面気圧値の差に等しい。 X_i は $f(x)$ に従うため、 Y の確率密度関数 $g(y)$ は次の式で表せる。

$$g(y) = nf(y) \left(\int_y^{\infty} f(x) dx \right)^{n-1}.$$

$f(x)$ は正規分布であると仮定し、 n を 1, 2, 3 としたときの $g(y)$ を図 6 に示す。この図から明らかなように、 n が大きくなると、日最低海面気圧差の出現確率は、負の側にシフトし、AMOS2 の方が低い値を観測する確率が高くなる。 $n=2$ としたときに、観測値の差が -0.1 hPa 以下となる確率は 50% で、31 回中 16 回に相当する。これは、3.3.1 で示した実際の観測値における差の出現率 (45%, 14 回) と概ね一致している。

さらに、 $n=2$ とした上で、3.3.2 で述べたサンプル数の差異による効果を考慮して、AMOS2 の最低海面気圧が 4.5% の確率で JMA95 よりも 0.1 hPa 大きな値を観測すると仮定した場合には、分布は僅かに右側にシフトし、観測値の差が -0.1 hPa 以下となる確率は 48% (31 回中 14.9 回) で、実際の出現率にさらに近づく。

また同様に、 $+0.1$ hPa 以上となるのは約 13%、4.0 回程度と見積もられ、これも図 5a で示した実際の観測値差の出現率と一致する。

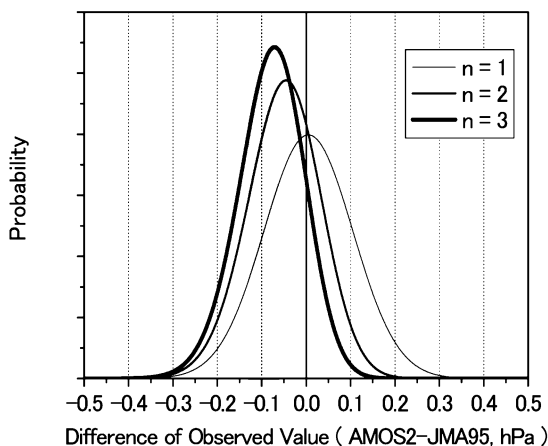


図 6 気圧一定時間の長さの変化による観測値差の出現確率分布の遷移
気圧一定時間 (n) を 1 分~3 分まで変化させた場合で、横軸は両装置の最低海面気圧の観測値差、縦軸は出現確率を示す。

Fig. 6. Succession of probability distribution of difference of observation value by change of length of constant pressure period.

以上のことから、日最低海面気圧の差異は、AMOS2の応答時間がJMA95に比べて非常に短いために、気圧変化がごく小さいときに、観測値(瞬間値)が変動することによってJMA95よりも小さい値をとることと、サンプル数の変更によってJMA95の方が小さい値をとることの両方を合わせた効果によって生じており、前者がより大きな影響を与えていたことが分かった。ただし、両装置の観測値の差が ± 0.1 hPa以内となる確率は、 $n=2$ としたときの見積りで88%、実際の観測値においては87%であることから、これらの変更は日最低海面気圧にそれほど大きな影響を与えていないと考えられる。

3.4. まとめ

- ① AMOS2とJMA95の観測値の比較から、観測値の差は0を中心に概ね ± 0.2 hPaの範囲に分布しており、また、フォルタンとの比較においても、ともに器差が許容範囲内(± 0.2 hPa)に入っていることから、観測値の決定において系統的な差異は認められなかった。
- ② JMA95で応答時間が長くなったことにより、30秒後の応答において、両装置の観測値に1分あたりの気圧変化量の35%の差異を生じたが、差の大きさが0.1 hPa以上となる頻度はごく小さい。また、多くの観測値を平均する場合には、観測値差は顕在化しない。
- ③ 応答時間の差異によって日最低海面気圧の観測値に差を生じたが、これは、気圧変化が大きいときにJMA95の応答が遅れることによる効果ではなく、気圧変化が小さいときに、AMOS2の観測値がごく短周期の気圧変動に追従することによる影響であった。
- ④ JMA95の前1分の最低海面気圧から求めた日最低海面気圧が、正1分の海面気圧から求めた日最低海面気圧よりも0.1 hPa以上低い値となる確率は4.5%である。したがって、日最低海面気圧を捕捉する上で、正10秒値を用いることは有効であった。
- ⑤ 両装置の応答時間とサンプル数の差異が日最低海面気圧の観測値に与える影響により、観測値の差が -0.1 hPa以下となる確率は48%、 $+0.1$ hPa以上となる確率は13%程度と見積もられるが、 ± 0.1 hPa以内である確率が88%であり、データの均質性を損なうほど大きくなかった。
- ⑥ 日最低海面気圧の発現時刻は、応答時間とサンプル数の変更により、1分程度遅れる傾向があった。

4. 気 温

気温の観測については、両装置とも測器感部に白金抵抗温度計を用いている。しかし、表1に示したとおり、感部の保護管の外径は、AMOS2が10 mmであるのに対し、JMA95は3.2 mmと細くなった。また、処理方法については、2.2及び表2に示したとおりの変更があった。

これらのことから、本章では2.3節に従って次の点について検証を行う。

- ① 測器感部自体の変更によって生じる，観測値の系統的な差の程度を確かめる．また，百葉箱内の感部設置位置による観測値の差異についても，併せて評価する．
- ② 装置の応答時間の差異を評価するとともに，この差異によって生じる，個々の観測値及び平均値，極値の差を評価する．
- ③ サンプル数の変更によって生じる，日最高・最低気温の観測値及び発現時刻の差を評価する．

4.1. 装置の変更による観測値の系統的な差異

4.1.1. 装置の変更による差異

両装置の正1分値から2.3.3により気温変化率が0であった時刻のデータ約18万個を抽出し，観測値差の出現頻度を図7に示した．観測値の差は， $+0.1^{\circ}\text{C}$ をピークとして概ね -0.1°C から $+0.4^{\circ}\text{C}$ の間に分布しており，平均は $+0.15^{\circ}\text{C}$ ，標準偏差は 0.11°C である．正規分布を仮定すると，この差は危険率1%で有意であった．週1回実施しているアスマン型通風乾湿計との比較観測においても同程度の差異が見られることから，両装置の観測値には，時定数の差以外に起因するバイアスが存在していたと考えられる．

さらに，1年間の日平均気温（338個）について，両装置による観測値の差の有意性を調べたところ，AMOS2の観測値はJMA95よりも平均で 0.15°C 高く，この差は1%の危険率で有意であったが，上述の，装置の時定数の影響を除去した場合の観測値の差（ $+0.15^{\circ}\text{C}$ ）を用いてAMOS2の日平均気温を補正すると，JMA95との有意な差はなくなった．このことから，平均気温の差は，両装置のバイアスの影響をそのまま反映していることが分かる．

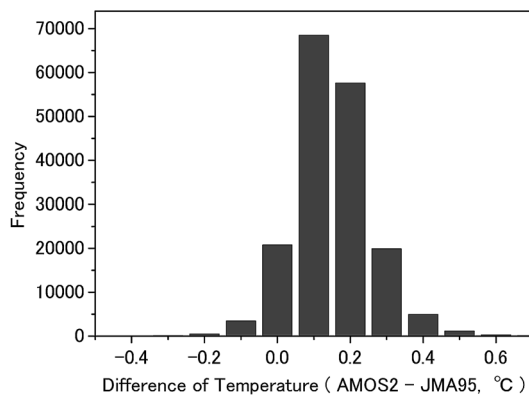


図7 両装置による気温観測値差の出現頻度分布（気温変化率が $0.0^{\circ}\text{C}/\text{min}$ の場合）

Fig. 7. Frequency distribution of difference of temperatures observed by JMA95 and AMOS2 (in case of rate of change in temperature $0.0^{\circ}\text{C}/\text{min}$).

4.1.2. 感部設置位置の変更を考慮した正味のバイアス

岸ら (2002) は, 1998 年 5 月~1999 年 1 月の日平均気温において, AMOS2 の観測値が JMA95 よりも 0.07°C 高かったと報告しているが, この期間は, 百葉箱内での測器感部の取付け位置が本報告の比較観測期間とは逆であり, このことにより, 両装置の観測値の差が 4.1.1 の結果と大きく異なっていたものと考えられる. JMA95 試験運用期間中の, 1998 年 4 月~12 月の特別値 6159 個について, 両装置の観測値の差異を調べたところ, 両者の間には $+0.05^{\circ}\text{C}$ の差 (危険率 1% で有意) があった. ここで, 比較資料として特別値を用いたが, 4.1.1 で述べたとおり, 日平均気温は時定数の差異による影響を受けない事が分かっているので, 同様に, 多くの特別値を平均する場合は, 気温変化が無いときの観測値と同等とみなして良い.

取付け位置による気温観測値の差を ΔT , AMOS2, JMA95 の気温観測値をそれぞれ T_a , T_j とし, 試験運用期間は, 比較観測期間と感部の位置が逆であったことを考慮すると, これらの観測値の間には, 次式の関係が成り立つ.

$$(T_a + \Delta T) - T_j = +0.15, \quad (1999.2 - 2000.1)$$

$$T_a - (T_j + \Delta T) = +0.05, \quad (1998.4 - 1998.12)$$

両式から, $\Delta T = +0.05$, $(T_a - T_j) = +0.10$ である.

以上のことから, AMOS2 を使用していた期間については, JMA95 による観測値と比べて, 0.1°C 高い気温を観測していたと考えられる. 時定数や通風速度, 処理方法の変更などは応答速度に影響を与えるが, 観測値にバイアスを生じさせる要因とはならない. また, 気温と観測値差との間にも相関はなかった. これらのことから, 0.1°C のバイアスは, 器差である可能性が高い.

なお, 比較観測期間については, 感部の設置位置の違いによる効果を合わせて, 実質的に $+0.15^{\circ}\text{C}$ の差が生じていた事から, 以下の議論では, AMOS2 の観測値に -0.15°C の補正を施したデータセットを用いる.

4.2. 応答時間の変更による観測値の差異

6 m/s で通風した場合の温度計の時定数は, 保護管の外径が 10 mm の場合で約 120~180 秒, 外径 3.2 mm では約 40 秒である (鈴木, 1996a). ところが, 保護管の外径が細くなることにより, 通風筒の性能が同じであれば通風速度は小さくなる. 岡野ら (1996) は保護管の外径が 10 mm の温度計を実装したときに 5.6 m/s の通風速度が得られる通風筒 (AMOS2 の通風筒と同等品) に, 保護管の外径が 3.2 mm の温度計を装着した場合の通風速度は 4.7 m/s であったと報告している. 岡野ら (1996) はまた, 外径 3.2 mm の温度計の時定数と通風速度の関係についても調査しており, 通風速度が 4 m/s を超えると時定数はほぼ一定であるとの結論を得ている. メーカーの仕様によれば, JMA95 で使用している通風筒の通風速度は 4~7

m/sである。これらのことから、本稿においては通風速度の差異は感部の時定数に影響を与えていないものとみなして議論を進める。

4.2.1. データ処理方法の変更を加味した装置の応答時間

2.3.4 の式(1)及び式(2)により、両装置の応答時間を見積もる。

図8にステップ状の入力を想定したときの時間経過と測器の応答 R_{40} , R_{40}' ($\tau=40$ 秒), R_{180} ($\tau=180$ 秒) 及び R_{70} ($\tau=70$ 秒) の様子を示した。この図から、時定数40秒の測器による10秒毎の瞬間値を1分間平均して観測値とする場合 (R_{40}' , JMA95に相当.), 約70秒で応答が0.63に達していることから、装置としての時定数は70秒程度であることが分かる。また、 R_{40}' と時定数180秒の測器 (R_{180} , AMOS2に相当.) では、60秒後の応答は、それぞれ0.54と0.28であり、 R_{180} は R_{40}' に対して60秒後の応答において約52%の遅れを持つことが分かる。

4.2.2. 個々の観測値における応答の遅れ

図9は、正1分値(約46万個)を用いて、2.3.4により、気温変化率と両装置の観測値の差との関係をプロットしたもので、気温変化率毎に、差の平均、標準偏差、50パーセンタイル、最大・最小を示している。図から、気温が上昇しつつあるときには、AMOS2はJMA95よりも低い値を、逆に下降傾向にあるときにはAMOS2の方が高い値を観測していることが分かる。これは、AMOS2の装置としての時定数がJMA95よりも大きいことに起因している。直

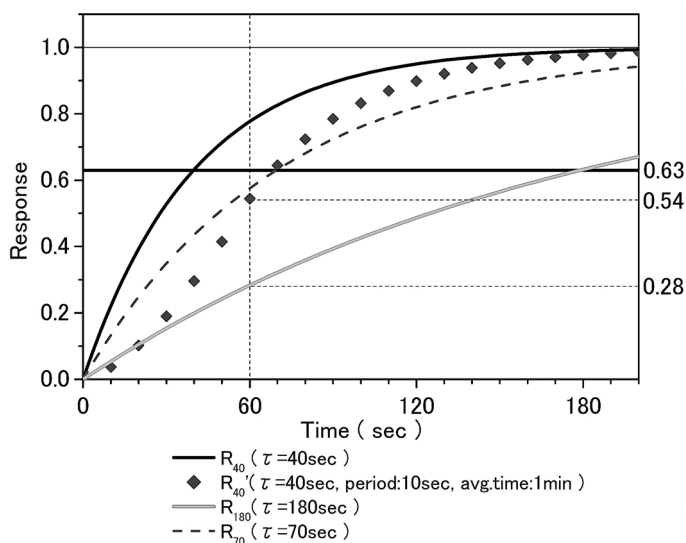


図8 ステップ状の入力に対する気温観測値の応答

横軸は入力値にステップ状の変化を与えてからの経過時間、縦軸は各測器の応答を示し、黒色実線は R_{40} (時定数40秒)、灰色実線は R_{180} (時定数180秒)、破線は R_{70} (時定数70秒)、◆は R_{40}' (時定数40秒の測器による10秒サンプリングの1分間平均) を表す。

Fig. 8. Response of temperature observed over time in response to a step-shaped input.

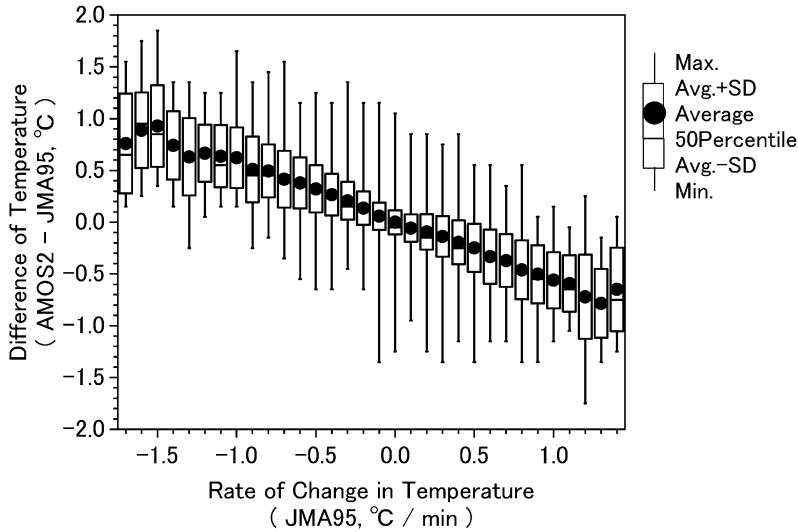


図9 気温変化率と両装置の観測値差との関係
横軸は JMA95 によって観測された気温変化率，縦軸は両装置の観測値差で，●は差の平均，ボックスは標準偏差，ボックス中央の線は 50 パーセントイル，バーは最大・最小を表す。

Fig. 9. Relation between rate of change in temperature observed by JMA95 and difference of temperatures observed by JMA95 and AMOS2.

線回帰により求めた差の大きさは $-0.55 \pm 0.03^\circ\text{C}/(1^\circ\text{C}/\text{min})$ で，AMOS2 の JMA95 に対する遅れは，1 分間の気温変化量の 55% 程度であることが分かる。これらの観測結果は，4.2.1 で述べた装置の時定数の差異から求めた応答の遅速の見積りと良く一致している。

4.3. 日最高気温・日最低気温への影響

4.3.1. 応答時間の差異による影響

装置の変更が日最高気温・日最低気温の観測値に及ぼした影響のうち，応答時間の差異による効果を評価するために，2.3.5 に従って，両装置の正 1 分値のみから求めた日最高・最低気温を比較した。

表 3 中段に示すとおり，平均で見ると JMA95 (1m) の方が AMOS2 よりも最高気温では 0.01°C 高い値を，最低気温では 0.05°C 低い値を観測している。日最低気温の差の平均は，危険率 1% で有意であった。

4.3.2. サンプル数の差異による影響

サンプル数の差異による影響を評価するために，2.3.6 に従って JMA95 (1m) と JMA95 の日最高・最低気温の差を調べた。JMA95 (1m) の値は，最高気温で 91.6%，最低気温で 91.5% が JMA95 と同じ値で，JMA95 より 0.1°C 低い(高い)値となったのが 8.1% と 8.2%， 0.2°C 低い(高い)値となったのは，ともに 0.3% であった。

表3下段には、JMA95(1m)とJMA95の日最高・最低気温の差を示した。日最高(最低)気温はサンプル数の変更により、平均で0.01°C高く(低く)なっている。この差は、何れも危険率1%で有意であった。

4.3.3. 発現時刻への影響

図10に、両装置の日極値の発現時刻差(ΔK)の出現頻度を示す。(a)が日最高気温の発現時刻、(b)が日最低気温の発現時刻で、横軸の正符号はAMOS2の発現時刻がJMA95よりも遅れた場合、負号はAMOS2が早い場合を分単位で表す。

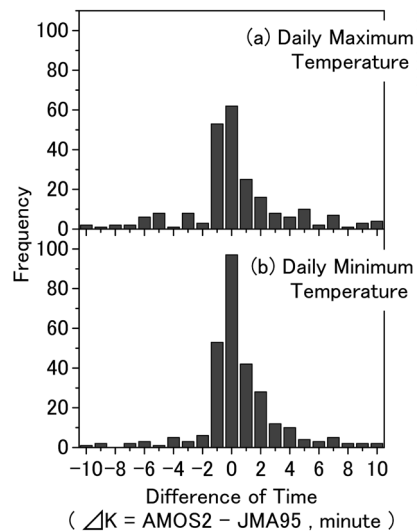


図10 両装置による気温日極値の発現時刻差の出現頻度分布

(a) 日最高気温、(b) 日最低気温

Fig. 10. Frequency distribution of difference of time of daily extreme value.

発現時刻の差は、最高気温・最低気温ともに $\Delta K=0$ の度数が最も多く、AMOS2が遅れる側($\Delta K>0$)になだらかな分布をしている。AMOS2が早い側では、 $\Delta K<-1$ で急激に度数が小さくなっている。

表3には、AMOS2とJMA95(上段)、AMOS2とJMA95(1m)(中段)及びJMA95(1m)とJMA95(下段)の発現時刻差を示している。

日最高気温・日最低気温ともに、応答時間の差異ではJMA95の発現時刻が1分程度早く、サンプル数の変更では1分程度遅くなっており、これらの変更は、発現時刻の遅速に対して逆の影響を与えていたことが分かる。両者を合わせた効果として、極値の発現時刻は0.3-0.5分JMA95の方が早まる傾向にある。JMA95の発現時刻を早めたのは、応答時間の短縮による効果である。

4.3.4. 極値の発現時刻と観測値差との関係についての考察

4.3.3で述べたとおり、装置の応答時間の差異は、両装置の日最高・最低気温の発現時刻に大きな影響を与えている。ここでは、この影響を評価するため、日最高・最低気温発現時刻前の気温変化率と発現時刻の遅速に着目して考察する。

なお、4.3.3 で述べたとおり、サンプル数の差異によって日最高・最低気温の発現時刻は JMA95 が 1 分程度遅れる傾向にあるため、以下では、 ΔK (発現時刻差) = -1 のときを、両装置の日最高・最低気温の発現時刻が同時刻であるものとみなす。

図 11 は、極値発現時の気温変化パターン毎の出現率を示したもので、(a) は AMOS2 が遅れている場合 ($\Delta K > -1$)、(b) は同時刻の場合 ($\Delta K = -1$)、(c) は AMOS2 が早い場合 ($\Delta K < -1$) を示している。黒が日最高気温、灰色が日最低気温の出現率である。

表 4 は、AMOS2 の発現時刻が遅い場合、同時刻の場合、早い場合の、両装置の日最高・最低気温の差について有意性を調べたものである。

図 11a から、AMOS2 が遅れている場合の極値発現前の気温変化型は、最高気温では上昇後下降、最低気温では下降後上昇の変化をしている頻度が多い。表 4 でも、この傾向が現れており、AMOS2 が遅れる場合の気温変化率の平均は、発現時刻の 1 分前までが大きく、1 分前から発現時刻までは変化傾向が逆転して変化率は小さい。両装置で発現時刻が同時刻か AMOS2 の発現時刻が早い場合には、図 11b 及び c に示すように、最高気温では一定後下降、

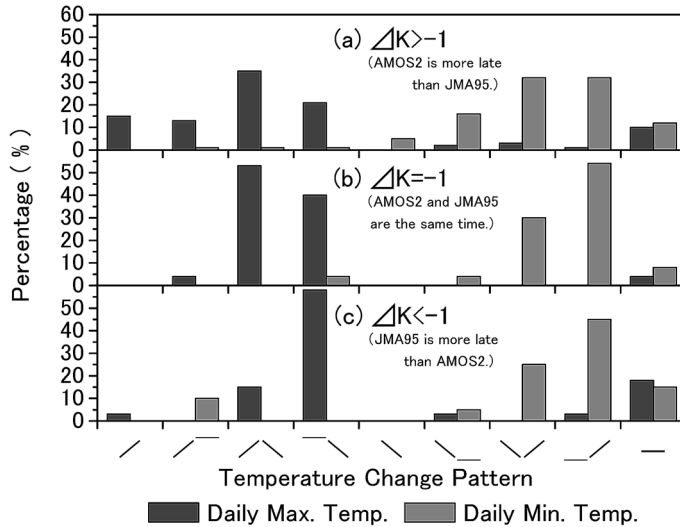


図 11 気温変化型と日最高（最低）気温の発現時刻の遅速との関係
 (a) AMOS2 の発現時刻が遅れる場合、(b) 同時刻の場合、(c) JMA95 の発現時刻が遅れる場合のそれぞれについて、日最高・最低気温発現前の気温変化型の出現率を、それぞれの場合のデータ総数に対する百分率で示した。黒色が日最高気温、灰色が日最低気温である。

気温変化型は、前 2 分間の JMA95 の気温から下の 9 通りに分類した。
 /: 上昇, / -: 上昇後一定, / \: 上昇後下降, - \: 一定後下降,
 \: 下降, \ -: 下降後一定, \ /: 下降後上昇, - /: 一定後上昇,
 -: 一定

Fig. 11. Relation between temperature change pattern and time of daily maximum (or minimum) temperature.

表4 気温の日極値の差
Table 4. Difference of daily maximum (minimum) temperature.

	AMOS2 が 1~11分遅い	発現時刻が 同時刻	AMOS2 が 1~9分早い	全データ
日最高気温 データ数	144	53	33	230
1分間の気温変化率の平均 (JMA95, °C/min)				
2分前から1分前まで	+0.11	+0.09	+0.02	+0.09
1分前から発現時刻まで	-0.04	-0.17	-0.07	-0.08
最高気温の差 (AMOS2-JMA95, °C)	-0.05*	-0.00	+0.03	-0.03*
日最低気温 データ数	176	50	20	246
1分間の気温変化率の平均 (JMA95, °C/min)				
2分前から1分前まで	-0.08	-0.04	-0.04	-0.07
1分前から発現時刻まで	+0.06	+0.14	+0.09	+0.08
最低気温の差 (AMOS2-JMA95, °C)	+0.09*	+0.01	-0.04	+0.06*

注) 気温差の欄の*印は、危険率1%で有意であることを示す。

起時は全て JMA95 での極値の発現時刻を基準とし、AMOS2 の起時に+1 分の補正を加えている。

最低気温では一定後上昇の変化パターンが卓越している。これらは、AMOS2 は JMA95 に比べ、応答が遅いために、最高（最低）気温が発現する際に急激な気温上昇（下降）を伴うと、発現時刻に遅れを生じることを示している。

表4で両装置の気温差を見ると、日最高・最低気温ともに AMOS2 が遅れた場合に極値に有意な差があり、全体としても AMOS2 は JMA95 より、日最高気温では 0.03°C 低い値を、日最低気温で 0.06°C 高い値を観測していた。

極値の差は、測器の時定数が増えたことと、サンプル数が増えたことの影響により生じており、これらの要因による極値の差異は、いずれも極値発現時の気温変化が急であるほど大きい。

4.4. まとめ

① 百葉箱内の設置位置の影響を除去すると、AMOS2 は JMA95 よりも 0.1°C 高い気温を観測していた。この差は測器の総合精度 ($\pm 0.5^\circ\text{C}$) の範囲内であるが、長期間の気候変動等の調査においては、データの取扱いに注意を要する。

② 測器感部の保護管が細くなったことと、データの処理方法が増えたことの影響により、応答時間は AMOS2 の 180 秒程度から JMA95 では 70 秒程度に短縮された。AMOS2 は JMA95 に比べ、60 秒後の応答において、前 1 分間の気温変化量の 55% の遅れを持っていた。

③ JMA95 の前 1 分の最高・最低気温から求めた日最高・最低気温が、正 1 分の気温から求めた日最高・最低気温よりも、0.1°C 以上高い（または低い）値となる確率は最高気温で

8.4%, 最低気温で 8.5% である。したがって、日最高・最低気温を捕捉する上で、正 10 秒値を用いることは有効である。

④ 応答時間とサンプル数の差異によって、AMOS2 は JMA95 より日最高気温では 0.03°C 低い値を、日最低気温では 0.06°C 高い値を観測していた。①の結果を考慮すると、AMOS2 は JMA95 よりも日最高気温で 0.07°C 、日最低気温では 0.16°C それぞれ高い値を観測していた。

5. 湿度

湿度計の感部は、表1に示したとおり AMOS2 の塩化リチウム露点計 (Dewcel) から JMA95 では電気式湿度計 (静電容量型, 以下単に「電気式湿度計」という。) に変更になった。また、処理方法については、2.2 及び表 2 に示したとおりの変更があった。

これらのことから、本章では次の点について検証する。

- ① 測器感部の変更は、湿度の検出方法自体の変更を伴うものである。このため、この変更により、観測値に生じる系統的な差異の程度を評価する。
- ② サンプル数の変更によって生じる、日最小相対湿度の観測値及び発現時刻の差を評価する。

5.1. 測器感部の変更による観測値の系統的な差異

5.1.1. 両装置の観測値の差異

電気式湿度計は、センサの高分子薄膜に水分子が吸着されたときの、静電容量の変化を検出して湿度を測定する測器であり、低温下においても安定して動作する。

一方、塩化リチウム露点計は、塩化リチウム水溶液 (以下単に「塩化リチウム」という。) の吸湿性と、結晶の析出に伴う電気伝導度の急変を利用して露点温度を測定する測器であり、昭和基地では、1968 年 2 月から湿度計感部として使用してきた。しかし、蒸気圧の平衡を検出するために、塩化リチウムを用いていることから、相変化による観測値の乱れを避けることができない。国内の気象官署においても、塩化リチウム露点計導入初期から北海道などの寒冷地で同様な乱れが観測され、原因究明のために様々な考察がなされた (気象庁測器課・札幌管区気象台測器課, 1972)。塩化リチウムが相変化を起こす温度 (転移点) はいくつかあり、 -16.5°C 、 0.0°C 、 12.5°C などが知られている (鈴木, 1996b)。昭和基地においては、このような乱れが発生した場合には、アスマン型通風乾湿計による観測を実施するか、自記記録を内挿して特別値を求めた。

塩化リチウムの転移点における相変化によって観測値に乱れが生じた例として、図 12 に 1999 年 7 月 24 日 6 時~7 月 25 日 11 時の、塩化リチウム露点計と電気式湿度計の 1 分毎の露点温度観測値の経過を示す。これを見ると、相変化による観測値の乱れの前後で、塩化リチ

ウム露点計と電気式湿度計の観測値が逆転していることが分かる。

図 13 には、特別値 8098 個を用いて、塩化リチウム露点計による露点温度観測値と両装置の露点温度差との関係を示した。図中の○は露点温度が塩化リチウムの転移点よりも高いとき（以下このグループを「G+」と表す.）、●は転移点よりも低いとき（同「G-」）を表し

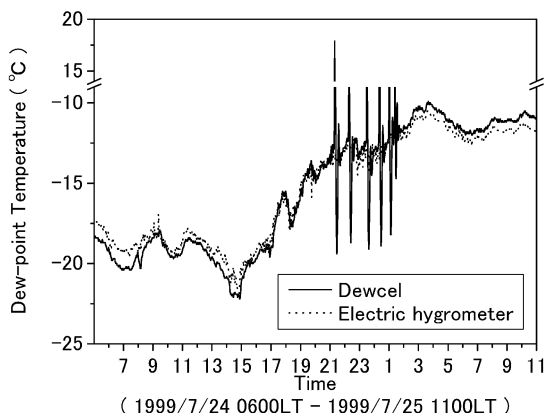


図 12 塩化リチウム水溶液の相変化による露点温度の乱れの観測例 (1999 年 7 月 24 日 06 LT-25 日 11 LT)
横軸は時刻、縦軸は露点温度で、実線は塩化リチウム露点計による観測値、点線は電気式湿度計による観測値を表す。

Fig. 12. Example of observation of disorder of dew-point temperature caused by change of phase of LiCl aqueous solution (July 24, 1999, 06 LT-July 25, 1999, 11 LT).

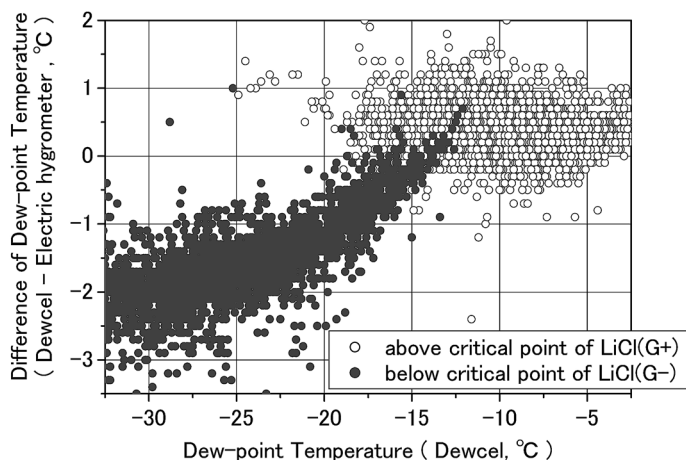


図 13 電気式湿度計と塩化リチウム露点計による露点温度観測値の差
横軸は塩化リチウム露点計による露点温度観測値、縦軸は両装置の観測値差を示し、○は露点温度が転移点よりも高いとき（「G+」グループ、資料数 4294 個）、●は転移点よりも低いとき（「G-」、資料数 3428 個）を表す。

Fig. 13. Scatter-diagram of dew-point temperature measured by Dewcel, and difference of dew-point temperature observed by electric hygrometer and Dewcel.

ている。転移点に対応する露点温度は一義に決まるが、実際の感部では、必ずしも転移点の温度で相変化が起こるわけではない。そこで図 13 では、自記記録に現れた相変化による観測値の乱れから、観測値が明らかに $G+$ または $G-$ に属するとみなせる場合の特別値を抽出してプロットし、どちらのグループに属するか定かでないものを除外した。

$G+$ は塩化リチウム露点計による露点温度が -25°C より高い範囲に分布し、両装置の露点温度差はほぼ一様で、差の平均は $+0.4^{\circ}\text{C}$ 、標準偏差は 0.3°C であった。相対湿度で見ると、差の平均は $+1.5\%$ 、標準偏差は 1.8% であり、観測値の差は測器の精度の範囲内である。これに対し、 $G-$ は塩化リチウム露点計による露点温度が -12°C より低い範囲に分布し、露点温度が低くなるにつれて、露点温度差も負偏差が大きくなっている。 $G+$ 及び $G-$ の分布領域は、露点温度 -15°C の付近で一部重なっている。

以上のことから、転移点の下側（露点温度 -12°C 未満）では、両装置の観測値の間には、明らかに露点温度に依存した系統的な差異が生じていたことが分かった。

週 1 回の点検で実施したアスマン型通風乾湿計との比較観測からも、上で述べた系統的な差異が塩化リチウム露点計の特性によることが確認できた。塩化リチウム露点計及び電気式湿度計の観測値とアスマン型通風乾湿計との湿度差をそれぞれ ΔHd 、 ΔHe とすると、 ΔHe が露点温度に依存せず、ほぼ一定であるのに対し、 ΔHd は、転移点の温度の上下で図 13 と同様の分布をしていた。各観測値差の平均値と 95% の信頼区間は、 ΔHe では $-2\pm 1\%$ 、 $\Delta Hd+$ （転移点の上側）では $0\pm 1\%$ でいずれも測器精度の範囲内であったのに対し、 $\Delta Hd-$ （同下側）では $-13\pm 2\%$ と著しく大きかった。

5.1.2. 露点温度に依存した観測値差の評価

5.1.1 で述べたとおり、転移点の下側では両装置の観測値の差は、露点温度に依存している。転移点の上側で観測値の差がほぼ一定であったことを考慮すると、塩化リチウムが相変化を起こして転移点の上側から下側へ（または下側から上側へ）遷移した際に生じる観測値差の変化量も、露点温度に依存していると考えられる。

相変化前後の観測値差と、相変化を生じたときの露点温度との関係を調べるために、5.1.1 で用いた $G+$ 、 $G-$ の各グループからさらに、相変化の直前の特別値 P （その時の塩化リチウム露点計による露点温度を $T D d$ とし、両装置の露点温度差を $\Delta T D$ とする。）と直後の特別値 P' （同 $T D d'$ 及び $\Delta T D'$ とする。）の組合せを抽出した。 $P P'$ は 33 組抽出でき、図 14 に P を始点、 P' を終点とする矢印で示した。

$G+$ から $G-$ へ向かう矢印は、始点が $T D d = -15^{\circ}\text{C} \sim -25^{\circ}\text{C}$ の範囲にあって下向き、 $G-$ から $G+$ へ向かう矢印の始点は $T D d = -13^{\circ}\text{C} \sim -20^{\circ}\text{C}$ にあって上向きとなっている。ほぼ全ての矢印が観測値差 0°C の線を横切っており、図 12 に示した相変化前後における両装置の観測値の逆転が、相変化に伴って常に起こっていたことを示している。各矢印の縦軸への射影は、相変化前後の観測値差の変化量 (Δ) を表すことになるが、相変化の前後で電気式湿

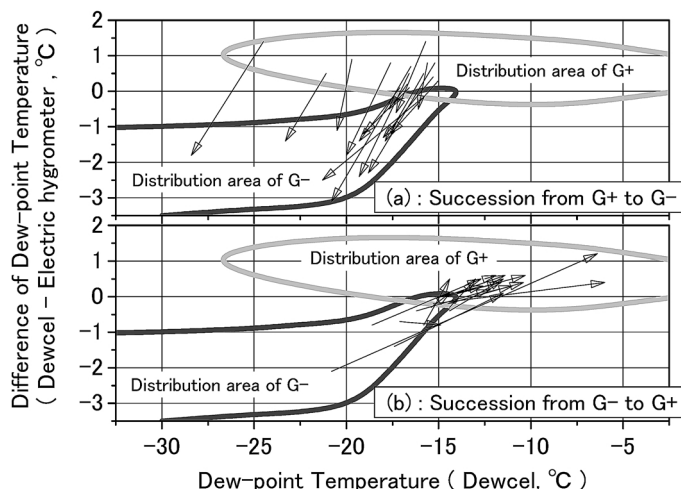


図 14 相変化前後の露点温度差の遷移

図 13 に示した「G+」、「G-」のグループから、相変化直前及び直後の特別値の組を抽出し、両者を結ぶ矢印で表した。横軸は塩化リチウム露点計による露点温度観測値、縦軸は両装置の観測値差を示す。灰色実線及び黒色実線で囲んだ領域は、図 13 で見た G+、G- の分布域を示している。
(a) 「G+」→「G-」の遷移、(b) 「G-」→「G+」の遷移

Fig. 14. Succession of differences of dew-point temperature at time of change of phase.

度計の観測値は均質であるので、 Δ は相変化に伴う塩化リチウム露点計の観測値の遷移量と等価である。

相変化に伴う塩化リチウム露点計の遷移量と、相変化が起こったときの転移点下側 (G-側) の露点温度との関係を示したのが図 15 である。横軸は PP' の組の転移点下側の端点における露点温度 (TDD または TDD')、縦軸は PP' 間の両装置の露点温度差の差 ($\Delta = |\Delta TD - \Delta TD'|$) で、“●” は「G+」→「G-」の転移で生じた変化量，“○” は「G-」→「G+」で生じた変化量を表している。

これらの点から求めた回帰直線の傾きは -0.24 (95% 信頼区間 ± 0.07) であった。また、転移点の下側の露点温度が -15°C 以上のときは、グループ間の転移による露点温度の遷移は 1°C 未満で塩化リチウム露点計の精度の範囲内であるが、転移点の下側の露点温度が -15°C 未満の時には、これより大きくなる。

以上のことから、相変化が生じたときの露点温度が低いほど、相変化の前後で塩化リチウム露点計の観測値の遷移量が大きく、結果として転移点の下側で両装置の観測値の差が大きくなっていくことが分かる。

5.1.3. 観測値差の露点温度依存性を生じさせる原因についての考察

図 16 に、塩化リチウムの転移点の温度における露点温度について、Washburn (1923) に掲載されている水蒸気圧から算出した値 (理論値) と、観測で使用している換算曲線によって

算出した値（実用値）との差を示す。横軸が塩化リチウムの温度に対応する露点温度の実用値で、縦軸が理論値と実用値の差を表している。○は転移点、黒色実線が塩化リチウムの三水塩と二水塩の混在、破線が二水塩、点線が二水塩と一水塩の混在、灰色の実線が一水塩の状態を表す。

図から、露点温度が -15°C 以上のときは理論値と実用値との差は概ね 1°C 未満となっているが、それより露点温度が低くなると、両者の差は測器の精度の範囲を超えてくる。これは、

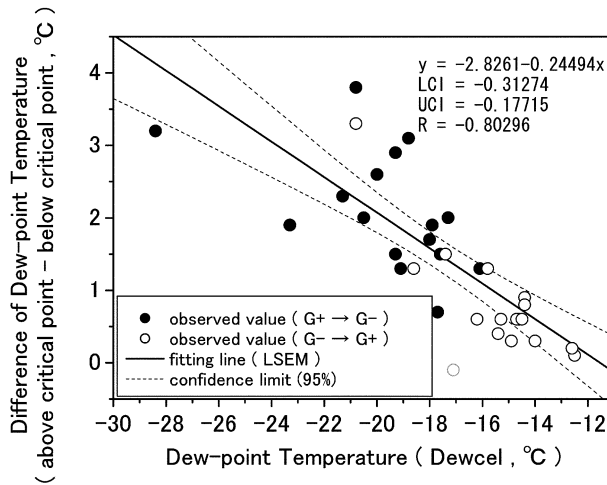


図 15 塩化リチウム水溶液の相変化に伴う露点温度の遷移
横軸は転移点下側の露点温度観測値，縦軸は転移に伴う両装置の観測値差の変化量を示す。●は「G+」→「G-」の転移で生じた露点温度の遷移，○は「G-」→「G+」による遷移を表し，全ての点から求めた回帰直線と95%信頼区間を実線と破線で示した。

Fig. 15. Scatter-diagram of succession of dew-point temperatures with change of phase of LiCl aqueous solution.

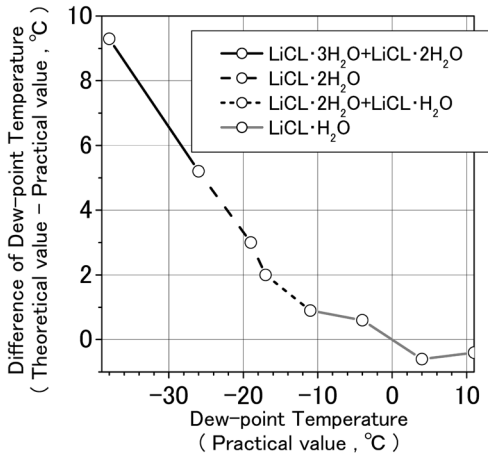


図 16 塩化リチウム水溶液の転移点における露点温度の理論値と実用値との差
横軸は露点温度の実用値，縦軸は理論値と実用値の差を示す。○は転移点における理論値と実用値との差，黒色実線は三水塩と二水塩の混在，破線は二水塩，点線は二水塩と一水塩の混在，灰色実線は一水塩の状態を表す。

Fig. 16. Difference between theoretical value and practical value of dew-point temperature at critical point of LiCl aqueous solution.

5.1.2 で述べた **G+**、**G-** のグループ間の転移に伴う露点温度の正味の変化量が大きくなる温度と一致している。また、 -15°C 未満のときの各点から求めた回帰直線の傾きは、 -0.34 ± 0.04 (95% 信頼区間) であり、図 15 で示した回帰直線の傾きとほぼ一致している。

一般に、塩化リチウム露点計の感部温度と露点温度との関係を実験的に求めると、理論値とは一致しない(鈴木, 1996b)。このため、実際の校正結果を元にした換算式によって露点温度を求めているが、露点温度が -17°C 以下(感部温度 12.5°C の転移点に対応)の場合には、相変化を起こした際に、感部温度と露点温度の関係が、この換算曲線から外れて理論曲線に近い振る舞いをするのではないかと推察される。

これらのことから、**G+**、**G-** のグループ間の転移によって生じる露点温度の遷移は、塩化リチウム露点計の露点温度換算曲線が、感部温度 12.5°C 以下で理論曲線から大きく離れているために生じていたと考えられる。

塩化リチウム露点計の動作原理に起因する測定誤差については、柳原(1980)などによって多くの報告がなされている。彼らは、感部に塗布された塩化リチウム水溶液の相転移に伴う水溶液の飽和水蒸気圧の変化が、実用の換算曲線では必ずしも正確に表現されていないことを指摘しており、上述の結果も、これらの報告を支持するものである。

5.1.4. 感部の変更が統計値に与える影響

図 17 に、両装置で観測した月平均湿度と月最小湿度を示す。図から、月平均気温が -10°C を下回る 5 月~10 月の間は、月平均湿度で最大 12%、月最小湿度で最大 7% の差異がある。このことから、湿度の観測に塩化リチウム露点計を使用していた期間について、低温時に、湿度の値を 10% 以上過小に評価していたと考えられる。

しかし、過小評価の度合いは、そのときの露点温度と、塩化リチウム露点計に塗布された塩化リチウムの相により大きく異なることから、一律な補正を行うことはできない。

5.2. サンプル数の差異による日最小相対湿度への影響

サンプル数の差異による影響を検証するために、2.3.6 により JMA95 (1m) と JMA95 の日最小相対湿度の差異を調べたところ、全体の 92.7% が同値で、残る 7.3% で JMA95 (1m) の方が 1% 大きかった。

表 3 (下段) には、JMA95 (1m) と JMA95 の日最小相対湿度の差を示した。日最小相対湿度においては、処理方法の変更により平均で 0.1% 小さい値を観測し、発現時刻は平均で 0.9 分遅れている。

ただし、観測値の差は最大でも 1%、AMOS2 の方が大きい値を観測していた程度で、5.1 に示した測器感部の変更による観測値の差異に比べて、影響はごく小さい。

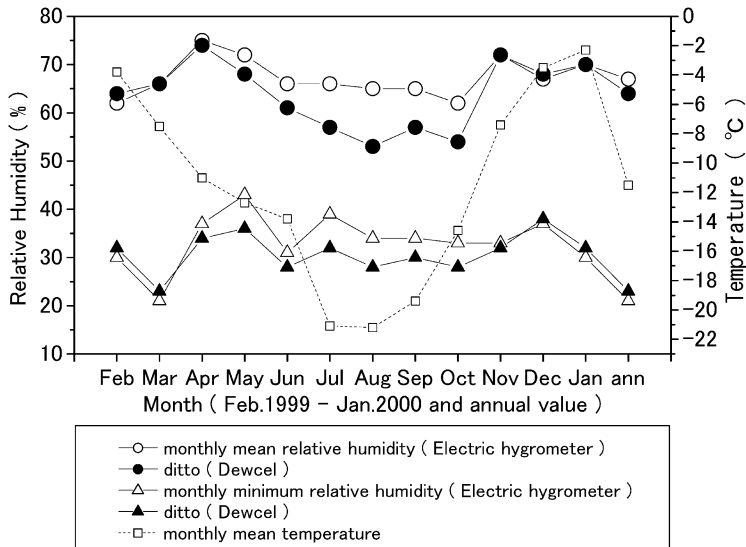


図 17 電気式湿度計と塩化リチウム露点計の月平均湿度及び月最小湿度の比較
横軸は月，縦軸は湿度または気温を示す。○は月平均相対湿度（電気式湿度計），●は同（塩化リチウム露点計），△は月最小相対湿度（電気式湿度計），▲は同（塩化リチウム露点計），□は月平均気温を表す。

Fig. 17. Comparison of monthly mean and minimum relative humidity observed by electric hygrometer and Dewcel.

5.3. まとめ

① 測器感部の変更で，両装置の観測値には露点温度に依存した系統的な差異を生じた。この差異は，露点温度が概ね -15°C 未満のときに現れ，露点温度が低いほど差異が大きい。月平均気温が -10°C を下回る5月~10月の間は，月平均湿度で最大12%，月最小湿度で最大7%の差異がある。

② ①の観測値の差異は，塩化リチウム露点計の特性（相変化）により生じたものである。塩化リチウム露点計での観測に用いられてきた露点温度換算曲線は，塩化リチウム水溶液の液温と飽和水蒸気圧との関係を校正して求めているが，この曲線は理論曲線と必ずしも一致していない（鈴木，1996b）。露点温度に依存した観測値差をもたらした原因として，理論曲線と実用換算曲線との間での状態の遷移が考えられる。

③ JMA95の前1分の最小相対湿度から求めた日最小相対湿度が，正1分の相対湿度から求めた日最小相対湿度よりも1%以上小さい値となる確率は7.3%である。したがって，日最小相対湿度を捕捉する上で，正10秒値を用いることは有効である。

6. 風向風速

風向風速計感部は，両装置とも風車型風向風速計を使用しているが，表1に示したとおり

風向・風速の検出方法と感部の重量が大きく異なり、JMA95では応答性能が大幅に改善された。

データの処理方法は、表2に示したとおり大きな変更はない。ただし、日最大風速については、AMOS2では毎分の前10分間平均風速の中から求めたが、JMA95では、正10分の前10分間平均風速から求めるように変更した。これは、国内の気象官署の統計方法に準じたものである。

これらのことから、本章では以下の点について検証する。

- ① 平均風速及び瞬間風速において、観測値に生じる系統的な差異の程度を確認する。
- ② 日最大風速について、統計方法が変更になったことによる観測値への影響を評価する。
- ③ 両装置の風向観測値に生じる系統的な差異の程度を評価する。

6.1. 装置の変更による風速観測値の系統的な差異

6.1.1. 平均風速

時別の平均風速を用いて、各時刻のJMA95による平均風速と両装置の風速差の関係を図18に示した。灰色の実線とハッチは、風速別の観測値差の平均と、測器の精度の範囲を表している。

図から、2 m/s 超の範囲では、個々の観測値の差は、差の平均値に対して、概ね測器の精度の範囲内に分布していることが分かる。2 m/s 以下で差の平均が -0.42 m/s と風速値の20%以上となっているのは、両装置の起動風速の差異に起因している。2 m/s 超、10 m/s 以下で

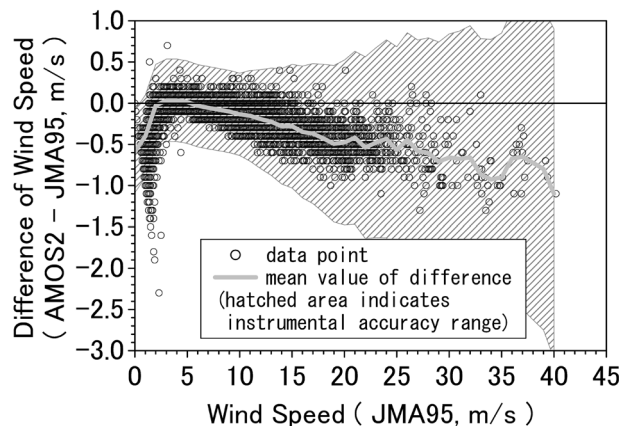


図18 JMA95の風速に対する両装置の風速差の分布
横軸はJMA95による平均風速観測値、縦軸は両装置の観測値差を示す。灰色実線は風速毎の風速差の平均、ハッチは測器精度の範囲を表す。(資料数8667個)

Fig. 18. Scatter-diagram of wind speed measured by JMA95, and difference of wind speed observed by JMA95 and AMOS2.

は、観測値の差の平均は -0.01 m/s 、標準偏差は 0.11 m/s である。また、 10 m/s 超では、観測値の差は、風速が大きくなるにつれて増大し、平均すると、AMOS2による平均風速観測値はJMA95よりも $2.0\pm 0.1\%$ (99%信頼区間)小さい。このことは、日平均風速、年平均風速にも影響を及ぼしており、表5右に示す通り、年平均風速は、JMA95の方が 0.2 m/s (3.0%)大きく、この差は危険率1%で有意である。

これらは、岸ら (2002) が報告した値と良く一致している。なお、岸ら (2002) は、1998年4月1日~1999年1月25日までの資料で、JMA95による平均風速観測値が、AMOS2よりも17%大きかったと報告していたが、これは、この期間に使用していたJMA95の測器感部で内部の結線が外れ、感部形式の識別符号が正常に出力されていなかったことにより、プロペラ回転数を風速に換算する係数に誤った値が用いられていたためであることが、後の調査で分かった。

6.1.2. 瞬間風速

図19に、正10分の観測値 (277日分) を用いて、JMA95の前1分間最大瞬間風速と両装置の前1分間最大瞬間風速の差との関係を示した。これを見ると、風速が 25 m/s 程度より大きいとき、風速差が極端に大きくなっていることが分かる。正1分の資料から、 25 m/s 以上の強風時における風速差は、最大で -18.8 m/s に達し、同時刻のJMA95の観測値 43.3 m/s

表5 JMA95とAMOS2による日最大風速及び日平均風速の差異
Table 5. Difference of daily maximum and mean wind speed observed by JMA95 and AMOS2.

装置及び日最大風速を求める元となる平均風速のサンプリング間隔	日最大風速の年平均値と差の有意性 (m/s)	日平均風速の年平均値と差の有意性 (m/s)
AMOS2 (1分毎)	12.6	6.5
JMA95 (正10分)	12.6	6.7
JMA95 (1分毎)	12.8	

注) 2つの平均値の間に危険率1%の有意差がある場合を●、有意差がない場合を○で表す。

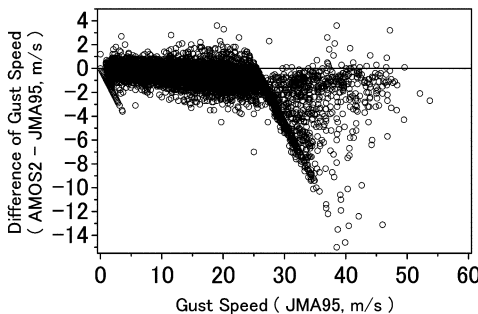


図19 JMA95の瞬間風速に対する両装置の瞬間風速差の分布
横軸はJMA95による瞬間風速観測値、縦軸は両装置の観測値差を示す。

Fig. 19. Scatter-diagram of gust speed measured by JMA95, and difference of gust speed observed by JMA95 and AMOS2.

の43%に及ぶことが分かった。

風速 25 m/s を超えるときに両装置の観測値の差が極端に大きくなることについては、6.1.3 で述べる。

風速 2 m/s 以下では、観測値の差の平均は -0.62 m/s、標準偏差は 0.53 m/s であり、また、2 m/s 超、10 m/s 以下のときには、差の平均 -0.13 m/s、標準偏差 0.25 m/s であった。さらに、10 m/s 超、25.6 m/s 未満のときには、AMOS2 による瞬間風速観測値は JMA95 よりも平均で $3.3 \pm 0.1\%$ (99% 信頼区間) 小さかった。これらの値は、6.1.1 で述べた平均風速における両装置の観測値の差よりも若干大きく、感部の応答性能の向上による影響は、瞬間風速においてより顕著に現れていたことを示している。

6.1.3. 25 m/s 以上の強風時における AMOS2 観測値の異常

AMOS2 の正 1 分の瞬間風速と前 1 分間最大瞬間風速のデータ (277 日分) を用いて、強風時における AMOS2 の瞬間風速観測値の異常について調べた。

図 20 は、AMOS2 の瞬間風速の出現頻度を示したもので、(a) が正 1 分の瞬間風速、(b) が前 1 分間最大瞬間風速である。瞬間風速、最大瞬間風速とも、0.1–1.1 m/s の間の風速はほとんど出現しておらず、0.0 m/s が突出している。これは、AMOS2 の起動風速が 2 m/s 程度であることに起因しており、装置の異常ではない。一方、風速 10 m/s 以上では、正 1 分の瞬間風速の出現頻度が漸減しているのに対し、前 1 分間最大瞬間風速は、風速 25 m/s 程度までは出現頻度が徐々に小さくなっているが、25.2–25.5 m/s が大きく、25.6 m/s 以上の風速の出現頻度が極端に小さくなっている。これが、25 m/s 以上での両装置の風速差の増大と対応しており、AMOS2 の前 1 分間最大瞬間風速の観測値において何らかの異常があったこと、同時

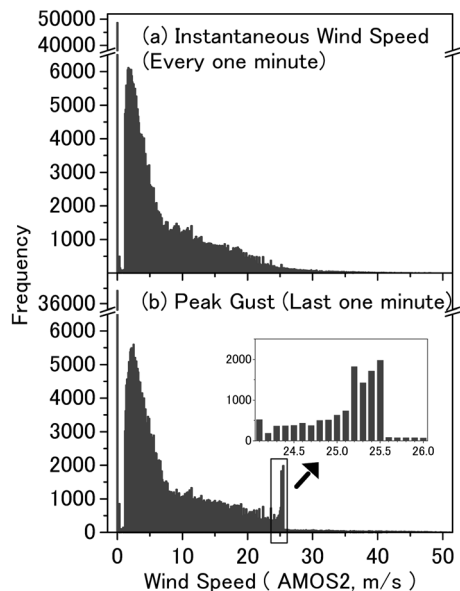


図 20 AMOS2 の瞬間風速出現頻度
(a) 正 1 分の瞬間風速
(b) 前 1 分間最大瞬間風速

Fig. 20. Frequency distribution of gust speed observed by AMOS2.

に正1分の瞬間風速の観測値は正常であったことを示している。

この異常について、AMOS2の正1分の瞬間風速と正1分の瞬間風速に対する前1分間最大瞬間風速の比（以下「瞬間風速比」という。）との関係を図21に示した。風速20m/s以下の領域では、瞬間風速比の平均値（図中●）は概ね1.2程度、同25パーセンタイル（図中○）は1.1程度であるが、20m/sを超えると両者はともに急速に1に近づく。この傾向は最大値（図中×）において顕著で、図中①に示すとおり、風速15m/sから25.5m/sの範囲で1.8から1へと直線的に小さくなっている。これは、前述の25.5m/sを超える最大瞬間風速が観測され難い現象と対応している。また、図中②で示すとおり、25.5m/s-30m/sの範囲では、瞬間風速比の25パーセンタイルはほぼ1となっており、この範囲で、前1分間最大瞬間風速が正1分の瞬間風速と同じ値になり易い状況があったことが分かる。

このことに関してAMOS2の製造メーカーに調査を依頼したところ、風向風速変換器内の最大瞬間風速算出のアルゴリズムに不具合があり、最大瞬間風速は25.6m/s以上または51.2m/s以上の値が観測され難い状況であったことが分かった。ただし、風速のアナログ記録及び正1分の瞬間風速は正常であったため、気象庁南極観測事務室において、これらの値を用いてAMOS2導入以来の不具合のあったデータについて、2002年3月までに修正が施された。

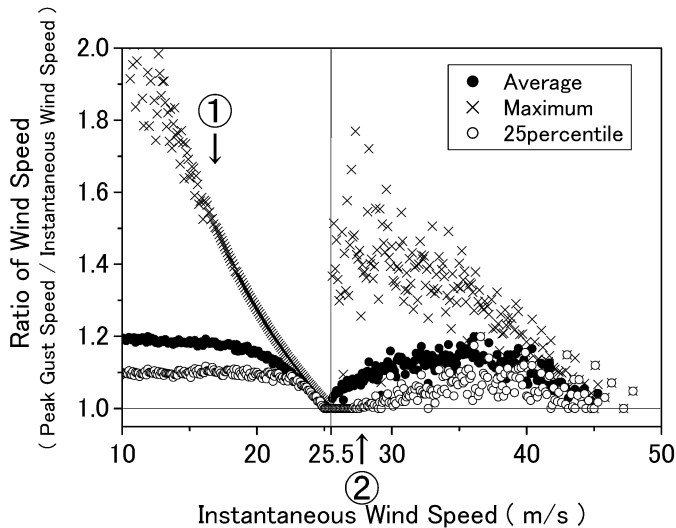


図21 AMOS2の正1分の瞬間風速に対する前1分間最大瞬間風速の比
横軸は正1分の瞬間風速、縦軸は正1分の瞬間風速に対する前1分間最大瞬間風速の比を示し、●は風速比の平均、○は同25パーセンタイル、×は同最大値を表す。

Fig. 21. Ratio of peak gust in last 1 min against instantaneous wind speed, observed by AMOS2.

6.2. 統計方法の変更による日最大風速への影響

日最大風速の観測値（353個）を用いて、JMA95による観測値と両装置の観測値差（図中×）との関係を図22に示す。統計方法の変更による効果のみを評価するために、JMA95の毎分の前10分間平均風速から求めた日最大風速（従来の統計方法により求めた値、以下「JMA95 (V1)」という。）との差（図中○）も、同じ図にプロットした。AMOS2とJMA95 (V1)との差は、風速の増大とともに大きくなっており、2 m/s 超、10 m/s 以下の範囲では、差の平均は-0.01 m/s、標準偏差は0.11 m/sであるが、10 m/s 超の範囲では、AMOS2がJMA95 (V1)よりも $1.9 \pm 0.2\%$ (99%信頼区間)小さい。これらは、6.1.1で述べた両装置の平均風速の差異と良く一致する。これに対し、AMOS2とJMA95との差は、風速による寄与が小さくて、ばらつきも大きく、10 m/s 超の範囲でAMOS2がJMA95よりも $0.6 \pm 0.3\%$ (同)小さい程度である。

図23に、三者による日最大風速の階級別日数を示す。図を見ると、ほとんどの階級でJMA95 (V1)による観測値が最も多くなっており、特に25 m/s 以上及び30 m/s 以上の階級では、AMOS2やJMA95に比べて14-33%も日数が増えている。また、AMOS2とJMA95とを比較すると、15 m/s 未満の階級でAMOS2の日数が多く、逆に15 m/s 以上の階級ではJMA95の日数が僅かに多くなっている。これらは、統計方法の変更によってJMA95の日最大風速が小さくなる効果よりも、応答性能の向上によってJMA95の平均風速がAMOS2

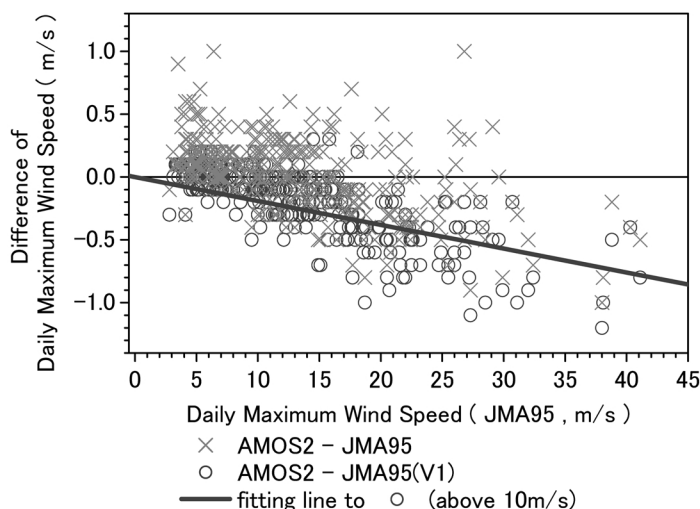


図22 JMA95の日最大風速に対する両装置の日最大風速差の分布
 横軸はJMA95による日最大風速値、縦軸は両装置の日最大風速の観測値差を示す。×はAMOS2とJMA95の差、○はAMOS2とJMA95 (V1)との差で10 m/s以上の領域について回帰直線も示した。

Fig. 22. Scatter-diagram of daily maximum wind speed measured by JMA95, and difference of daily maximum wind speed observed by JMA95 and AMOS2.

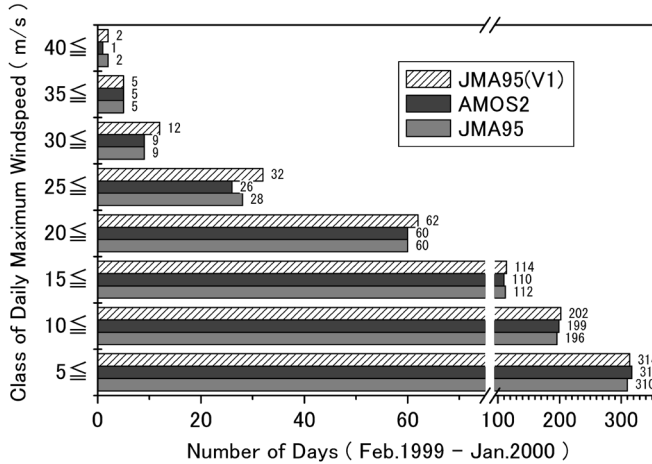


図 23 日最大風速の階級別日数
縦軸は風速階級，横軸は日数を示し，黒色は AMOS2，灰色は JMA95，ハッチが JMA95 (V1) を表す。

Fig. 23. Number of days according to rank of daily maximum wind speed observed by JMA95 and AMOS2.

よりも大きくなることの影響を強く反映している。

表 5 に，三者の日最大風速の年平均値を示す。AMOS2 と JMA95 の間には有意な差はないが，JMA95 (V1) と他との間には，0.2 m/s の有意な差がある。

6.3. 平均風向観測値の差異

6.3.1. 平均風向観測値の差異

図 24 に風速別風配図を示す。資料は平均風向の正 10 分値 (277 日分) を用い，風速の階級区分は JMA95 の平均風速による。

風速 2 m/s 未満では，両装置の風配図はかなり異なった形をしているが，これは AMOS2 の起動風速が約 2 m/s と大きいために，弱風時には真の風向に追従できていないためと考えられる。風速 2 m/s 以上 5 m/s 未満の時には，両者は良く一致しているが，5 m/s 以上では，JMA95 は AMOS2 に比べて，CW 方向 (時計回り) に 1 方位ずれたような形状となっている。特に，5-20 m/s の風速範囲で見ると，方位 6-8 で両装置の平均風向出現頻度に大きな差がある。

風配図に現れた平均風向の差異について定量的に評価するために，上の資料から平均風速 5 m/s 以上のときを抽出し (資料数 17337 個)，風向差を数値化して風向との関係を示したのが図 25 である。横軸は JMA95 による平均風向，縦軸は 36 方位の風向差を AMOS2 が JMA95 に対して CW 方向にずれている場合を正，CCW 方向 (反時計回り) の場合を負として示している。方位別の風向差の平均 (黒丸) とともに，95% 信頼区間 (点線) も示した。この図

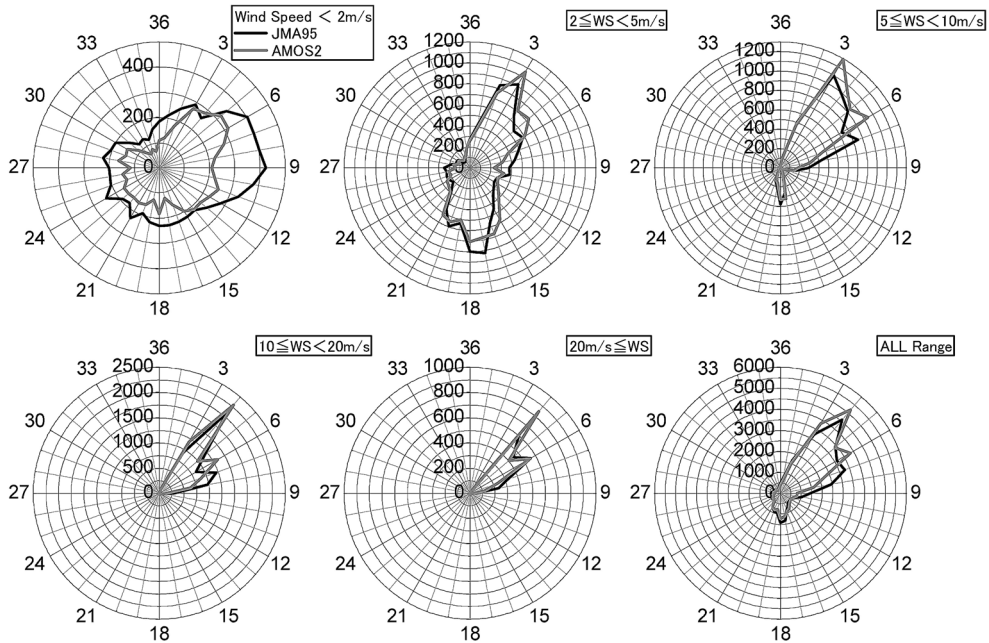


図 24 JMA95 の風速階級区分による両装置の風配図

風向は 36 方位で、動径方向に出現頻度を示している。黒色実線が JMA95、灰色実線が AMOS2 の観測値を表し、風速階級は JMA95 による。

Fig. 24. Wind roses, according to rank of wind speed as measured by JMA95, observed by JMA95 and AMOS2.

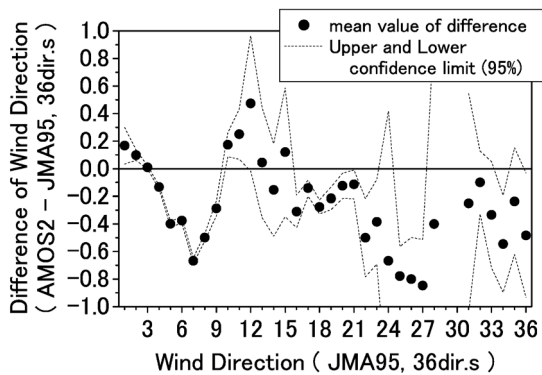


図 25 JMA95 の風向に対する両装置の風向差の分布 (平均風速 5m/s 以上)

横軸は JMA95 の平均風向、縦軸は両装置の風向差で、いずれも 36 方位で示す。●は風向差の平均、点線は差の平均の 95% 信頼区間を表す。

Fig. 25. Distribution of wind direction by JMA95, and difference of wind direction observed by JMA95 and AMOS2 (in case of wind speed 5 m/s or more).

から、風向差及びそのばらつきは方位によって一定ではなく、方位 1-3、10-15 で正值を示し、方位 5-9、22-27 で大きな負値を示していることが分かる。特に、方位 7、8 では、 -0.5 方位 ~-0.7 方位のずれがあり、風配図の形状の相違と一致している。

6.3.2. 風向変動の特性

風向、風速別の瞬間風向の振れ幅を図 26 に示した。資料は JMA95 の正 10 分の観測値 (278 日分) を用い、風速階級は前 1 分間最大瞬間風速の 1 m/s 毎に、風向区分は同じく前 1 分間最大瞬間風速の風向 (36 方位) 毎に層別化し、各区分毎の前 1 分間内の瞬間風向の振れ幅 (360 方位) を平均して、15° 毎の階級で示している。

方位 12 付近を中心に、振れ幅が 45° 以上の大きな領域があるが、この方向は、測風塔から見て、基地中心部の主要建築物が密集している方向にあたる (図 2)。建物の風下に発生した乱れによって、風向の振れ幅が大きくなっているものと考えられる。

方位 1-4 では、弱風から強風時まで、一貫して 30°-45° の振れ幅を持っており、隣り合う 5-8 の領域とは、明らかに振れ幅が異なる。この方向には、AMOS2 の風向風速計感部が設置されているほか、海岸線に向かって作業工作棟、仮作業棟が位置し、さらにその先には、アンテナ島の東端部分が迫り出している (図 2 及び図 38 参照)。

両装置の風向差が大きかった方位 5-8 は、風速によらず、風向の振れ幅が 30° 以下で小さい領域になっている。この方向は、海岸線に向かって開けており、一様な風が吹き易い状態である。

風速が大きい方位及び風向の振れ幅が小さい方位は、図 25 において風向差のばらつき (信頼区間) が小さい方位と概ね一致している。

平均風向観測値の差異については、そのばらつきは風向変動の特性を反映していることが分かったが、特定の風向で大きな差異を生じた原因は不明である。

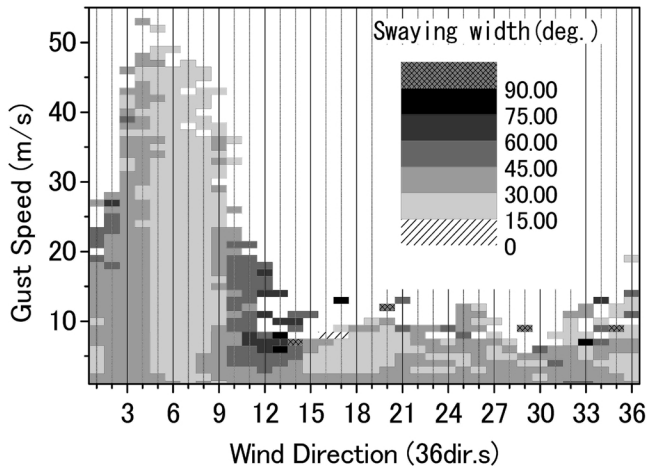


図 26 最大瞬間風速とその風向に対する風向振れ幅の分布
横軸は前 1 分間最大瞬間風速の風向を 36 方位で示し、縦軸は同最大瞬間風速値を示す。風向の振れ幅は 360 方位で 15° 毎の階級で色分けして表している。

Fig. 26. Distribution of swaying width as a function of peak gust and the wind direction.

6.4. まとめ

- ① 測器感部の変更により、両装置の平均風速の観測値には系統的な差異が生じており、2 m/s 以下では平均 0.42 m/s 程度、10 m/s 超では風速の 2.0% 程度 JMA95 の方が大きな値を観測している。年平均風速では、JMA95 の方が 0.2 m/s (3.0%) 大きかった。
- ② 瞬間風速においては、両装置の観測値の差は平均風速における差異よりもやや大きく、2 m/s 以下で 0.62 m/s、10 m/s 超では 3.3% 程度 JMA95 が大きい値を観測している。
- ③ 日最大風速に関する統計方法の変更は、① で述べた両装置の観測値の差異を打ち消す効果があり、日最大風速の年平均値は、有意な差はない。また、階級別日数でも① による観測値の差異を相殺する効果があった。
- ④ 両装置の平均風向観測値は、方位 5-9 (36 方位) で顕著な差異が見られ、この方位では、AMOS2 の観測値は、JMA95 に比べて 0.7 方位程度 CCW 方向にずれた値を観測していたが、この差をもたらした原因の特定には至らなかった。

7. 日照時間

日照時間の観測については、AMOS2 では測器感部に回転式日照計を用い、極昼対策として 2 台の感部を設置して、時刻により切り替えて観測していたが(宮本, 1990)、JMA95 では太陽追尾方式を採用したことにより日照計 1 台で観測できるようになった。本章において、回転式日照計を単に「回転式」といい、太陽追尾式日照計を「追尾式」という。表 1 及び表 2 に示すとおり、両装置とも直達日射強度を測定し、規定の閾値以上となった場合に日照があったものとして、その時間を積算して日照時間を求めているが、感部光学系及びサンプリング間隔が大きく異なる。また、測器感部の設置位置も変更があった。

これらのことから、本章においては 2.3 節に従って次の点について検証する。

- ① 2.3.2 により、感部設置位置の変更によって生じる、観測値の系統的な差異の程度を確認する。
- ② 感部及びサンプリング間隔の変更が、観測データに与えた影響の大きさを検証する。
- ③ 上記①、②を合わせた効果として、両装置の月別の合計日照時間に生じる系統的な差異を評価する。

7.1. 設置位置の変更による観測値の差異

図 27a は、2000 年 1 月に旗台地と屋上で観測した追尾式の特別の日照時間差をプロットしたものである。横軸は方位角、縦軸は高度角で、差が生じたときの太陽位置に、差の大きさに比例する大きさのマークをプロットしてある。方位角 150°-200°付近で屋上の観測値が旗台地の観測値よりかなり小さくなっているのは、高層観測用レドームにより、感部が日陰になっていたためである。表 6④ に示すとおり、2000 年 1 月における感部設置位置による観測

値の差は+10.2h (+2.7%)であった.

1999年2月~12月の気象棟前室屋上(追尾式)と旗台地(回転式)との日照時間合計値の差は+27.5h (+1.8%)であり(表6⑤), 追尾式同士の差よりも小さくなっているが, これ

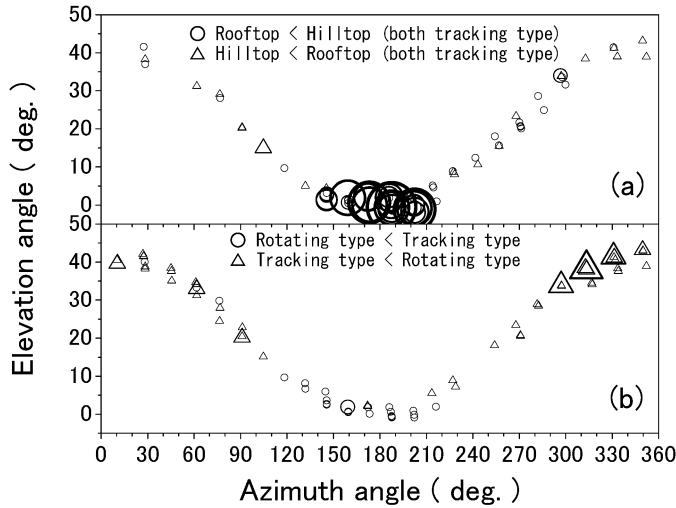


図 27 太陽位置に対する特別日照時間差の分布 (2000年1月)
 横軸は太陽方位角, 縦軸は太陽高度角を示し, プロットの大きさは, 差の大きさを表す.
 (a) 追尾式(気象棟屋上)と追尾式(旗台地)との比較 (○: 旗台地が大きい場合, △: 気象棟屋上が大きい場合)
 (b) 回転式(旗台地)と追尾式(旗台地)との比較 (○: 追尾式が大きい場合, △: 回転式が大きい場合)

Fig. 27. Distribution of difference of hourly sunshine duration as a function of solar position (January 2000).
 (a) Comparison between "tracking type" which was installed on the roof of the meteorological instrument hut and on top of Hata hill.
 (b) Comparison at the same position at top of Hata hill between "tracking type" and "rotating type".
 Size of plotted marks is proportionate to difference.

表 6 測器感部及び設置位置の変更による日照時間の差

Table 6. Difference of sunshine duration with change of sensor and change of observation location.

データ期間	回転式 (旗台地)	追尾式 (旗台地)	追尾式 (屋上)	差
1999.02-2000.01	1941.4	1910.2 (1999.2-12: 屋上, 2000.1: 旗台地)		+31.2(+1.6)①
1999.02-2000.01 (太陽高度角 5° 以上)	1691.3	1677.3 (同上)		+14.0(+0.8)②
2000.01	377.0	373.2 373.2	363.0	+3.8(+1.0)③ +10.2(+2.7)④
1999.02-1999.12	1534.5		1507.0	+27.5(+1.8)⑤

注) 単位は時間, 差の欄の () 内は, 追尾式(屋上または旗台地)の観測値に対する割合を百分率で示す.

は、通年の比較であるため地物による観測値の差が比較的小さい時期の資料も含んでいることなどによると考えられる。

7.2. 装置の変更による観測値の差異

図 27b は、同図 a と同様に、2000 年 1 月について回転式と追尾式（旗台地）の日照時間差をプロットしたものである。設置場所が同じであるにもかかわらず、太陽高度角が高いときに回転式の観測値が追尾式より大きくなる場合が多く見られる。また、太陽高度角が低いときには、僅かではあるが追尾式の方が大きな値を観測する傾向にある。表 6③ に示すとおり 2000 年 1 月の合計日照時間は、回転式が 377.0h、追尾式（旗台地）が 373.2h で、その差は 3.8h（1.0%）であった。

図 28 に、回転式と追尾式（気象棟屋上及び旗台地）の日照時間差の出現頻度分布を示す。資料は、1999 年 2 月～2000 年 1 月の特別値から、2.3.3 により、太陽高度角が 5°以上のときのみを抽出した（3360 個）。図から、回転式が追尾式よりも大きな日照時間を観測する頻度やや多くなっていることが分かる。表 6② に示したとおり、この期間の日照時間の差は +14.0h（+0.8%）であった。

これらのことから、地物による直射光の遮蔽の効果を除去してもなお、両装置の観測値には系統的な差異があったことが分かる。

7.2.1. 特別日照時間と日照時間差との関係

両装置の日照時間観測値の対応を見るために、図 28 と同じ資料を用い、追尾式の特別日照時間と両装置の日照時間観測値の差との関係を図 29 に示した。

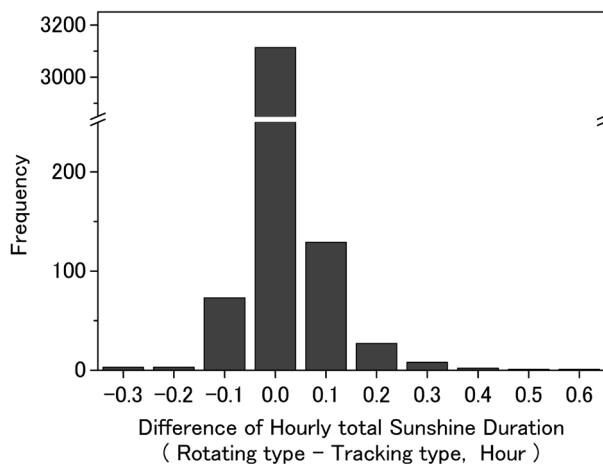


図 28 両装置による特別日照時間差の出現頻度分布（太陽高度角 5°以上）

Fig. 28. Frequency distribution of difference of hourly total sunshine duration between “tracking type” and “rotating type” (in case of solar elevation angle 5° or more).

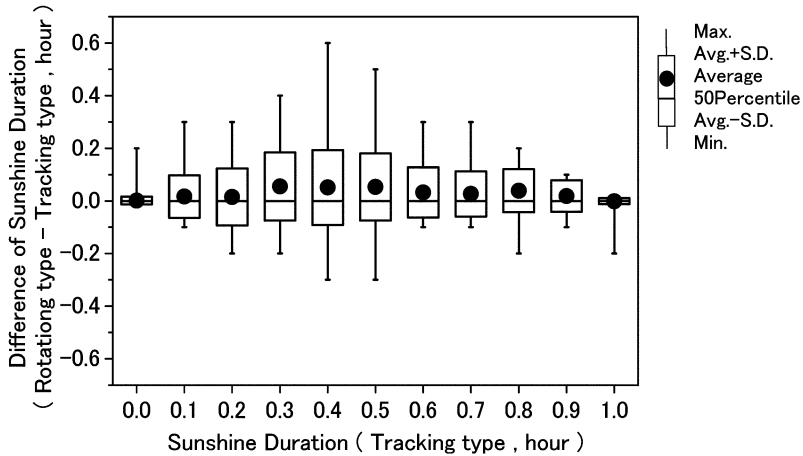


図 29 追尾式の特別日照時間と両装置の日照時間差との関係（太陽高度角 5° 以上）
 横軸は追尾式によって観測された特別日照時間，縦軸は両装置の観測値差で，●は差の平均，
 ボックスは標準偏差，ボックス中央の線は 50 パーセントイル，バーは最大・最小を表す。

Fig. 29. Relation of sunshine duration observed by “tracking type”, and difference of hourly total sunshine duration observed by “tracking type” and “rotating type” (in case of solar elevation angle 5° or more).

平均値（図中●）で見ると，追尾式の日照時間が 0.1–0.9 時間のときに，回転式の方が大きな日照時間を観測しており，この範囲で両装置の観測値の対応が悪いことが分かる。特に 0.3–0.5 時間の範囲では，回転式の方が追尾式よりも平均で 0.05 時間程度大きな値となっている。また，観測値差が大きい範囲では，観測値差のばらつき（図中ボックス）も大きくなっている。

日照時間 0.3–0.5 時間は，下層雲が天空に散在している状況と推察でき，観測値差のばらつきが大きいことは，感部設置位置が離れているために，下層雲による直射光の遮蔽に時間的な差異を生じることなどが考えられる。回転式が平均的に大きな日照時間を観測していることについては，主に後述する感部の入射角特性に起因していると考えられる。

7.2.2. 回転式の入射角依存性

回転式では，地軸と平行な軸の周りを回転する散乱反射鏡により太陽光を受光部に導くため，太陽の赤緯の変化に対し，感度が完全に一樣になっているとはいえない。

図 30 は，1999 年 2 月–2000 年 1 月の特別値を用い，両装置の日照時間に差が生じたときの太陽位置を極座標系にプロットしたもので，(a) は回転式の観測値が追尾式よりも大きい場合，(b) はその逆の場合である。日照時間差の出現位置は，太陽方位角への依存はほとんど見られないが，(a) で夏至の太陽軌道に沿って，回転式が追尾式よりも大きな値を観測する頻度が高いことが分かる。

図 31 は，太陽の赤道座標上の位置による，特別日照時間差の出現率を示したものである。

横軸は太陽の赤緯，縦軸は時間差の出現した回数に対する百分率を表し，黒色は回転式が追尾式より大きい場合，灰色はその逆の場合である．資料は，1999年2月～2000年1月の時別値から，太陽高度角 5° 以上の時刻を抽出し，さらに，回転式の南北2台の内，北側の感部による観測値のみを用いた．図から，追尾式の方が日照時間を大きく観測する率（灰色）は，太陽赤緯が低い（横軸右方）ほど大きく，回転式が大きな観測値をとる（黒色）のは，太陽赤緯が高い（横軸左方）ほど率が高いことが分かる．

太陽高度角 5° 以上の資料のみを用いて1年間の日照時間を積算すると，表6②に示すとおり，回転式による観測値は追尾式よりも14.0h（0.8%）多い程度であり，また，太陽赤緯が高く，赤緯特性の影響が大きいと思われる2000年1月においても，両装置の差は1.0%で

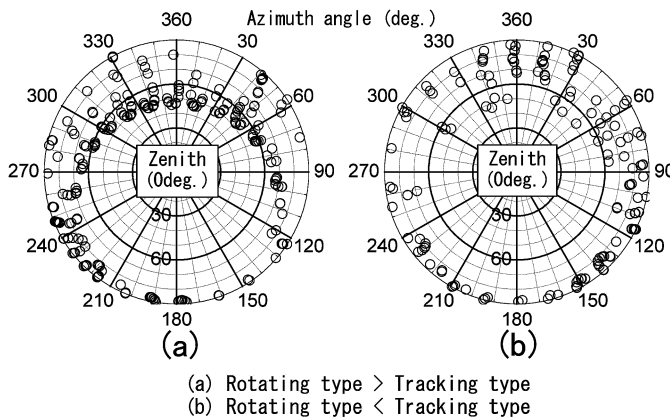
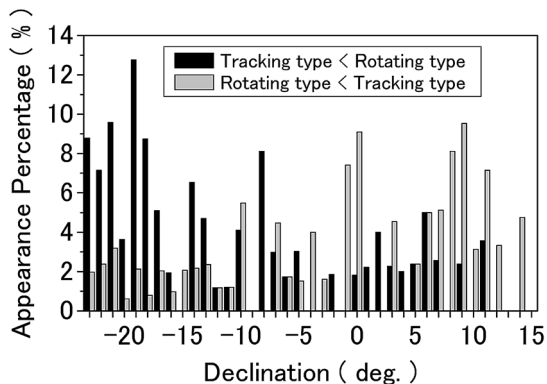


図30 両装置による時別日照時間差が生じた太陽位置の分布
円周方向は太陽方位角，動径方向は太陽天頂角を示す。
(a) 回転式の観測値が追尾式より大きい場合
(b) 追尾式の観測値が回転式より大きい場合

Fig. 30. Solar positions where difference of sunshine duration observed by “tracking type” and “rotating type” occurred.

図31 太陽赤緯毎の時別日照時間差出現率（AMOS2北側感部，太陽高度角 5° 以上）
横軸は太陽赤緯，縦軸は出現率を示す．黒色は回転式の観測値が大きい値を観測した率，灰色は追尾式の観測値が大きい値を観測した率を表す．

Fig. 31. Percentage of observations showing difference in sunshine duration with solar declination (only northerly sensor of AMOS2 used; in case of solar elevation angle 5° or more).



あった(表6③)。これらは何れも回転式の赤緯特性(赤緯 $\pm 25^\circ$ に対して $\pm 7\%$)と比べるとごく小さい。

7.2.3. 回転式の南側感部と追尾式との差異

回転式の南側感部については21時~03時が運用時間帯であり、太陽方位角では 225° ~ 135° に相当する。この方位では、図30に示すとおり、装置による系統的な観測値の差異は見られない。ただし、図30のデータ期間は、気象棟屋上に設置された追尾式の資料を含んでおり、地物による遮蔽効果が大きく影響している。

両装置とも旗台地に設置されていた期間の資料を用いた図27bから、設置位置の僅かな違いと、回転式の入射角依存性とを合わせた効果として、回転式の南側感部では追尾式よりも小さい値を観測する傾向にあった。

7.2.4. サンプル数の変更による観測値の差異

サンプリング間隔の変更により、追尾式は回転式の3倍のサンプルによって日照時間を積算することになる。10秒毎3回の直達日射観測値が閾値以上となるかどうかによって、両装置の日照時間観測値は表7のようなパターンを取りうる。回転式は0秒にサンプリングし、追尾式は0, 10, 20秒の3回サンプリングするものとし、直達日射が閾値以上の場合を○、閾値未満の場合を×で表す。1分間(6個)のサンプルを考えると、64通りの組合せがあり、日照時間の差が0となるのはその内の14通り(22%)のみである。しかし、実際の観測値では、1分間内の直達日射強度のサンプルが閾値以上となるかどうかは独立な事象ではない。追尾式の10秒生データを用いて、10秒毎の日照フラグを積算した場合と、30秒毎の日照フラグを3倍して積算した場合とで、1分間内の日照時間に生じる差異を調べたところ、全体の99.5%が同じ値となった。また、1年分(523615分)を積算しても、10秒サンプリングの方が20分多いだけだった。

表7 サンプリング間隔の変更による日照時間の差
Table 7. Difference of sunshine duration with change of sampling interval.

サンプリング時の直達日射強度 ○: 120W/m ² 以上 ×: 120W/m ² 未満			追尾式による日照時間 (10秒毎サンプリング)	回転式による日照時間 (00秒のみサンプリング)	日照時間差
00秒	10秒	20秒			
○	○	○	30秒	30秒	±0秒
○	○	×	20秒	30秒	+10秒
○	×	○	20秒	30秒	+10秒
○	×	×	10秒	30秒	+20秒
×	○	○	20秒	0秒	-20秒
×	○	×	10秒	0秒	-10秒
×	×	○	10秒	0秒	-10秒
×	×	×	0秒	0秒	±0秒

7.3. 月合計日照時間の差異

図32に、両装置による月合計日照時間の差を示す。黒色は全データの積算、灰色は太陽高

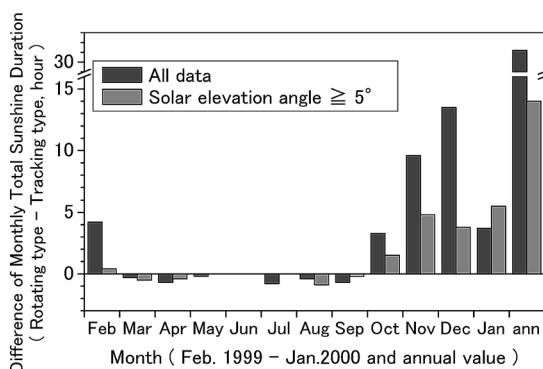


図 32 両装置の月合計日照時間の差
横軸は月、縦軸は両装置の月合計日照時間差を示す。黒色は全データの積算、灰色は太陽高度角 5° 以上の場合を表す。

Fig. 32. Difference of monthly total sunshine duration observed by JMA95 and AMOS2.

度角が 5° 以上のときのみを積算したものである。太陽高度角 5° 以上の時の差を見ると、10月頃から大きくなり、11月~1月はほぼ同程度である。一方、全データの差は、12月をピークとして10月~2月の夏季に差が大きいが、2000年1月には感部の移設により設置位置による差が解消され、太陽高度角 5° 以上の積算値における差と同程度になっている。

これらのことから、月合計日照時間においても、感部及びその設置位置の変更により観測値に系統的な差異が生じていたことが分かった。観測値の差は、10月~2月の夏季に大きくなるが、その大部分は感部設置位置の変更に起因するものであるため、2000年1月以降はかなり小さくなっている。

7.4. まとめ

- ① 感部設置位置の変更によって、日照時間の観測値に系統的な差異が生じた。2000年1月の比較資料から、夏季における月合計日照時間は旗台地での観測値の方が10.2h (2.7%) 大きかった。
- ② サンプル間隔の変更による観測値の差異は認められなかったが、回転式の入射角特性によって回転式の観測値は追尾式に比べて0.8%-1.0%大きかった。ただし、差の大きさは回転式の赤緯特性の範囲内である。
- ③ 上記①、②により、1999年2月及び10月~12月の月合計日照時間において回転式の方が4~14h程度大きな値を観測したが、2000年1月に追尾式の感部を移設したことにより、差は縮小された。

8. 全天日射量

全天日射量は、両装置ともにサーモパイル型の全天日射計によって観測しているが、表1及び表2に示すとおり、感部の精度、サンプリング間隔、設置位置などが異なる。

測器感部は、JMA95が外周部にヒートシンクを接合した1枚の円形の黒色受光板を用いて、受光板の半径方向の温度差によって生じる熱起電力を検出する方式であるのに対し、AMOS2は円形及びリング状の、面積の異なる2枚の黒色受光板の間の熱起電力を検出する方式を用いている。受光板の材質も両者で異なる。これらのことにより、感部自体の精度、応答速度等は、AMOS2の方がJMA95より優れている。

JMA95では、測器感部は太陽追尾装置に取り付けられているため、感部の方位角依存性は補償されている。

以上のことから、本章においては次の点について検証する。

- ① 2.3.2により、感部の設置位置の変更により生じる、観測値の系統的な差異の程度を確認する。
- ② 測器感部の変更により、両装置の観測値に生じる系統的な差異の程度を、特に感部の入射角特性に注目して評価する。

8.1. 設置位置の変更による観測値の差異

図33(a1)-(a3)には、2000年1月に旗台地と気象棟屋上で観測したJMA95の日射量の差の出現頻度を示している。資料は、大気現象が観測されていない日の正1分値(19日分)を用いており、(a1)が全天日射量、(a2)が直達日射量の鉛直成分、(a3)が散乱日射量である。散乱日射量は、 0.0kJ/m^2 のほかに $+1.8\text{kJ/m}^2$ 付近に出現頻度のピークがあり、気象棟屋上の方が大きな値を観測する頻度が多く、これがそのまま全天日射量の差にも反映されている。

表8には、各日射量の2地点間の差の大きさをまとめた。全天日射量に対して、直達日射鉛直成分が占める割合は、気象棟屋上で66.5%、旗台地で68.1%であり、散乱日射に比べて2倍程度の大きさがある。しかし、2地点間の全天日射量の差に関しては、散乱日射量の差が92.1%を占めており、残り的高々7.9%が直達日射量の差である。また、太陽高度角が低いとき(5°以下)には、直達日射量が全天日射量の観測値に与える影響はごく小さく、観測値に占める割合で0.4-0.5%、2地点間の差に対する割合では0.2%である。これらのことは、両地点の全天日射量観測値において、地物による直射光の遮蔽効果はそれほど大きな影響を与えていなかったことを示唆している。

全天日射量の期間中の合計では、気象棟屋上での観測値の方が旗台地に対して2.7%大きくなっているが(表8)、これは主に、後述する両感部の高度角特性の差異と周囲の地物からの散乱光による影響を合わせた効果である。

両感部の高度角特性の差異と周辺地物の散乱による観測値への影響を除去するため、上記

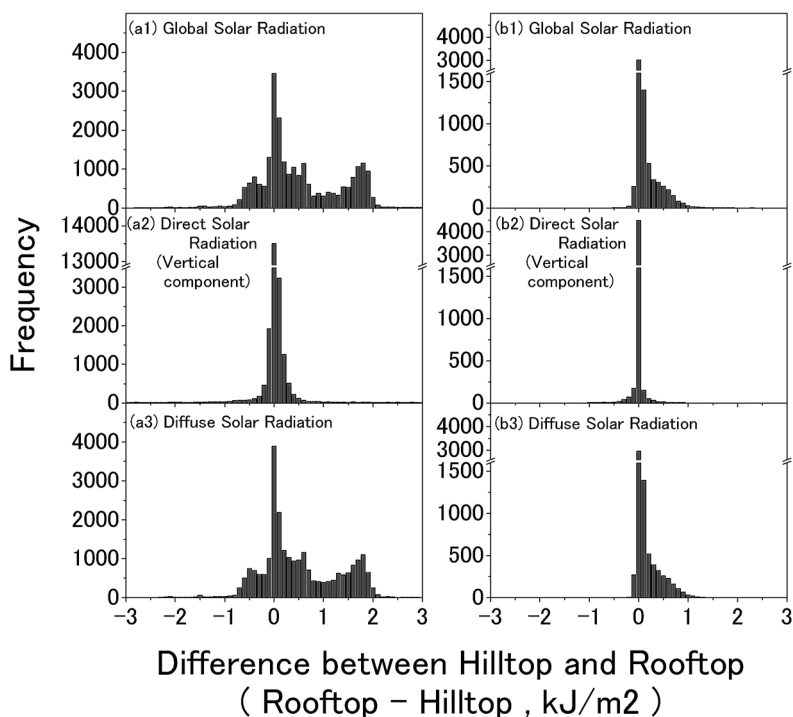


図 33 感部設置位置の違いによる日射量観測値差の出現頻度分布 (2000 年 1 月)
 横軸は両地点の 1 分間積算日射量の差, 縦軸は差の出現頻度を示す。
 (a) 大気現象が観測されなかった日の気象棟屋上 (JMA95) と旗台地 (JMA95) との比較
 (a1) 全天日射量, (a2) 直達日射量, (a3) 散乱日射量
 (b) 日照なし (直達日射強度 120 W/m^2 未満) の日の気象棟屋上 (JMA95) と旗台地 (JMA95) との比較
 (b1) 全天日射量, (b2) 直達日射量, (b3) 散乱日射量
 Fig. 33. Frequency distribution of difference of solar radiation observed at rooftop and hilltop (Jan. 2000).
 (a1)–(a3) 19 days in Jan. 2000. (b1)–(b3) Direct solar radiation less than 120 W/m^2 .

期間の資料から, 日照なし (直達日射強度 120 W/m^2 未満) の時間のみを抽出し, 図 33 (a1)–(a3) と同様に各日射量の差の出現頻度を同図 (b1)–(b3) に示した. 表 8 に示したとおり, 日照なしの場合に直達日射鉛直成分が全体に占める割合は 1.7% に過ぎないことから, データ抽出によって高度角特性による影響をほぼ除去できたと考える. 図から, (b1), (b3) では, (a1) 及び (a3) で見られた $+1.8 \text{ kJ/m}^2$ 付近のピークはなくなっており, この部分が感部の高度角特性の差異と周辺地物の散乱によってもたらされた観測値差であったと考えられる.

なお, (b1) 及び (b3) で観測値差の出現頻度は, 負の側がシャープに切れ落ちているのに対し, 正の側にはなだらかに分布している. これは, 直射光が弱い場合でも気象棟屋上の感部が周辺の測器等からの散乱光の影響を受けていた可能性を示唆しており, 表 8 に示したと

おり、日照なしのときの全天日射量は、気象棟屋上の方が旗台地よりも2.0%大きかった。

表9には、JMA95とAMOS2で観測した全天日射量の差を示しているが、2000年1月については、AMOS2の観測値は、JMA95（旗台地）よりも2.5%大きく、JMA95同士の比較結果と同程度であった。

図33で解析に用いた散乱日射量は、全天日射量から直達日射量の鉛直成分を差し引くことで求めており、両感部の入射角依存特性が除去されていない。このため、上で得られた結果を評価するには、旗台地と気象棟屋上に設置したJMA95の両感部について、入射角特性の差異を確認しておく必要がある。

図34は、JMA95（気象棟屋上）とJMA95（旗台地）との全天日射量観測値の差のJMA95（旗台地）の観測値に対する比と太陽位置の関係を示したもので、(a)が太陽高度角、(b)が

表8 JMA95により観測された日射量の差（2000年1月の19日間）

Table 8. Difference of solar radiation observed by JMA95 during 19 days in January 2000.

	気象棟屋上	旗台地	両地点の差	
			19日間合計 (旗台地に対する比, %)	
全天日射量				
全データ	529.91	516.14	+13.77	(+2.7)
日照なし	55.57	54.50	+1.07	(+2.0)
全データに対する比(%)	10.5	10.6	7.8	
日照があり、太陽高度角30°以上	289.83	278.73	+11.10	(+4.0)
全データに対する比(%)	54.7	54.0	80.6	
散乱日射量				
全データ	177.32	164.64	+12.68	(+7.7)
全天日射量(全データ)に対する比(%)	33.5	31.9	92.1	
直達日射量(鉛直成分)				
全データ	352.59	351.50	+1.09	(+0.3)
全天日射量(全データ)に対する比(%)	66.5	68.1	7.9	
日照なし	0.94	0.95	-0.01	(-1.1)
全天日射量(日照なし)に対する比(%)	1.7	1.7	0.9	
太陽高度角5°以下	2.25	2.34	-0.09	(-3.8)
全天日射量(全データ)に対する比(%)	0.4	0.5	-0.2	

注) 単位はMJ/m²。

表9 AMOS2とJMA95により観測された全天日射量

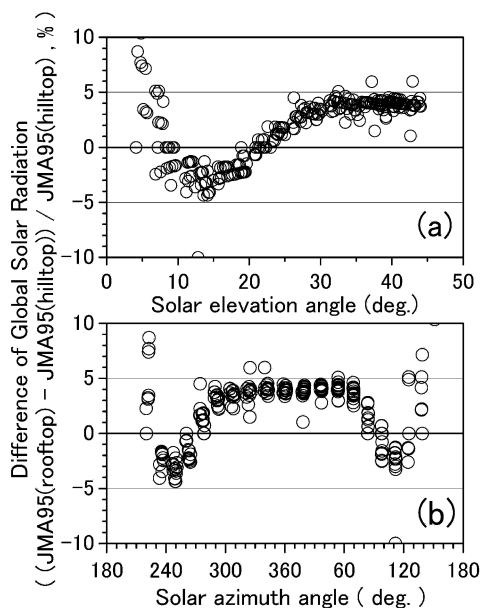
Table 9. Global solar radiation observed by AMOS2 and JMA95.

期間	積算値 (MJ/m ²)		差	
	AMOS2	JMA95	MJ/m ²	JMA95に対する比(%)
1999.2-2000.1 (5572時間)	4075.4	4046.7 (R)	+28.7	+0.7
2000.1 (706時間)	828.3	808.2 (H)	+20.1	+2.5
		829.3 (R)	-1.0	-0.1

注) JMA95の欄のRは気象棟屋上での観測値、Hは旗台地での観測値であることを示す。

図 34 気象棟屋上と旗台地に設置した JMA95 の全天日射量の差異 (2000 年 1 月)
横軸は, (a) が太陽高度角, (b) が太陽方位角で, 縦軸は両地点の観測値差の旗台地に対する比を示す。
(a) 高度角特性, (b) 方位角特性

Fig. 34. Difference of global solar radiation observed by JMA95 at rooftop and hilltop (Jan. 2000).
The abscissa is (a) solar elevation angle, (b) solar azimuth angle.



太陽方位角である。資料は、2000 年 1 月の 19 日間の全天日射量時間積算値から、入射角特性を強調するために日照時間 1.0 h の時のみを抽出した。

図 34a から、両感部の差は、太陽高度角 10° – 30° で大きく変化し、 30° 以上では気象棟屋上の方が 4% 程度大きな値を観測している。表 8 で見ても、日照があって太陽高度角 30° 以上のときの両地点の差は +4.0% で、上述の結果と一致する。高度角 10° 以下では、一部で気象棟屋上の方が大きな値となっているが、全天日射計では、受光面の入射角依存性に加え、ガラスドームの屈折や分光特性なども観測値に影響を与えるため、太陽高度角が低いときの観測値の差異については評価が難しい。

図 34b からは、太陽が東側にある場合に、僅かだが西側の場合よりも差が大きくなっている。このことは、東側から直射光を受けるときに、気象棟屋上の感部が地物による散乱光をより多く受けていたことを示唆している。

8.2. 感部の変更による観測値の差異

図 35 には、気象棟屋上での観測値のみを用いて、両装置の全天日射量の時間積算値に $\pm 2\%$ 以上の差異を生じたときの太陽位置を示している。太陽高度角 15° 以上では、北~西方向で AMOS2 の観測値の方が大きくなっており、 15° 以下では全方位にわたって JMA95 の方が大きな値を観測している。

図 36 は、AMOS2 と JMA95 (気象棟屋上) との全天日射量観測値の差の JMA95 (気象棟屋上) の観測値に対する比と太陽位置の関係を示したもので、(a) が太陽高度角, (b) が太

陽方位角である。資料は1年間の時別積算値から日照時間1.0hのときのみを抽出した。(a)ではAMOS2の方位角依存性の影響を除去するために、方位 330° - 30° のデータのみを使用し、(b)では太陽高度角 25° - 35° のデータのみを使用した。

図36aから、両装置の差は太陽高度角 20° 付近で+2%程度、それ以上の高度角では0に近

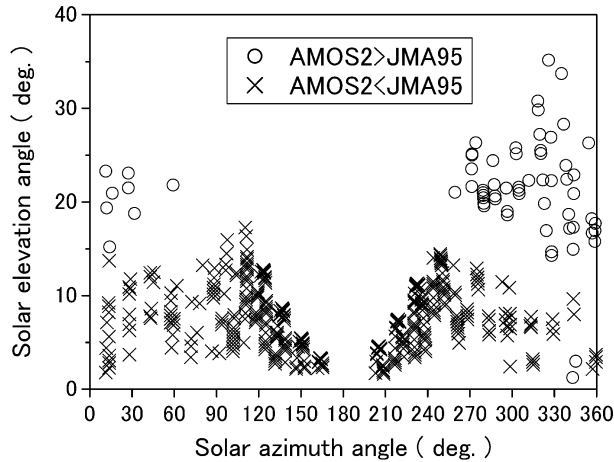


図35 気象棟屋上における両装置の全天日射量に $\pm 2\%$ 以上の差が生じた太陽位置
横軸は太陽方位角、縦軸は太陽高度角を示し、○はAMOS2の方が大きい
場合、×はJMA95の方が大きい場合を表す。

Fig. 35. Solar positions where difference of global solar radiation was $\pm 2\%$ or more.

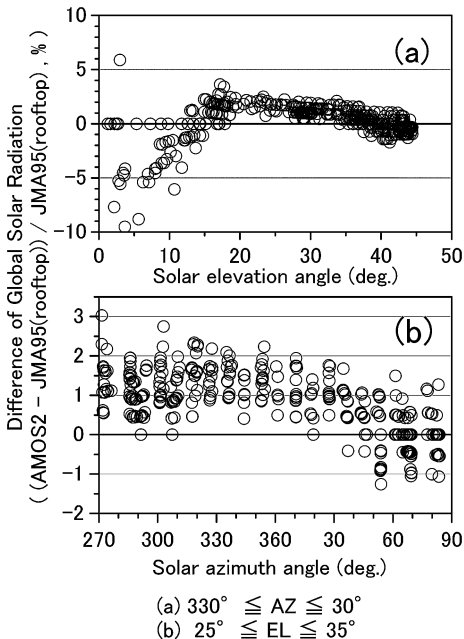


図36 気象棟屋上に設置した両装置の全天日射量の差異
横軸は、(a)が太陽高度角、(b)が太陽方位角で、縦軸は両装置の観測値差のJMA95
に対する比を示す。
(a) 高度角特性 (太陽方位角 330° - 30°)
(b) 方位角特性 (太陽高度角 25° - 35°)

Fig. 36. Difference of global solar radiation observed at rooftop.

The abscissa is (a) solar elevation angle, (b) solar azimuth angle.

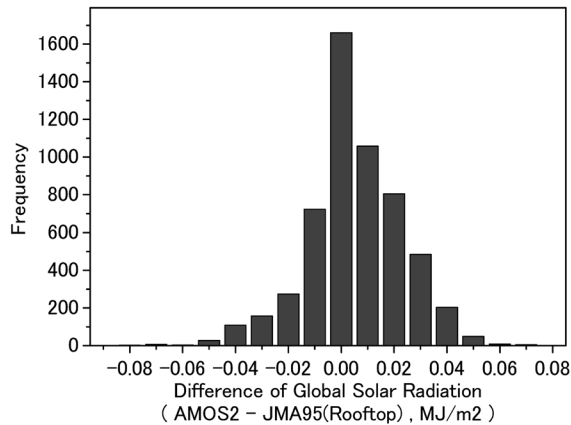


図 37 気象棟屋上における全天日射量観測値差の出現頻度分布

Fig. 37. Frequency distribution of difference of global solar radiation observed by JMA95 and AMOS2 at rooftop.

づいている。また、図 34a と同様に、太陽高度角 15° 付近を境に特性が逆の傾向となっているが、前述のとおり、低い高度角における観測値の差異については評価が難しい。

図 36b では、太陽方位角 270° – 30° で AMOS2 の方が 1.5% 程度大きな値を観測している。

図 37 は、気象棟屋上で観測した両装置の全天日射量時間積算値の差の出現頻度である。観測値の差は、概ね 0 を中心に分布しているが、AMOS2 の方が大きな値を観測する頻度がやや多い。差の平均は、 0.005 MJ/m^2 で、期間中 (5572 時間) の差の合計 28.68 MJ/m^2 は同期間の全天日射量積算値の 0.7% にあたる (表 9)。

8.3. まとめ

① 感部を気象棟屋上から旗台地に移設したことにより、他の測器や近接する建築物からの散乱光の影響が除去され、旗台地での観測値は気象棟屋上よりも 2.7% 小さくなった。また、同じく設置位置の変更により、地物による直射光の遮蔽効果が小さくなったが、このことによる全天日射量観測値の増大はほとんどない。ただし、これらはともに 2000 年 1 月における比較から得られた結果であり、通年の影響については別に評価する必要がある。

② 全天日射量の観測値は、測器の変更によって方位角依存性が除去されたが、測器自体の精度は JMA95 の方が劣っているために、入射角依存性はかえって大きくなった。ただし、両装置の観測値の差は 0.7% 程度であり、測器の精度の範囲内である。

9. 総合的な評価

8 章までを総括すると次のようになる。

気圧の観測値に関しては、系統的な差異は認められなかった。

気温の観測値は、AMOS2の方がJMA95よりも0.1°C高かった。この差は測器の総合精度の範囲内であるが、長期間の気候変動等の調査においては、データの取り扱いに注意が必要である。

湿度の観測においては、塩化リチウム露点計（AMOS2）の特性により、露点温度に依存した系統的な差異が生じた。このため、長期間のデータを取り扱う場合には、十分注意する必要がある。

風速の観測値は、測器感部の応答性能の向上によって若干の差異が認められるが、測器の精度の範囲内に収まっており、データの均質性は保たれている。ただし、風向の観測値には特定の方位において顕著な差異が見られるため、長期間のデータを扱う際には注意が必要である。

日照時間の観測値は、AMOS2の感度の入射角依存性によって差異を生じていた。2000年1月以降は、JMA95の観測値はAMOS2の観測値に比べ、夏季において1.0%程度小さいため、長期間のデータを扱う際には注意を要する。また、感部設置位置が異なっていた1999年2月～1999年12月については、JMA95のデータを使用する場合、地物の影響で観測値が小さくなっていることを考慮する必要がある。

全天日射量の観測値については、装置の変更前後で均質性が保たれていたと考えられる。ただし、設置位置の違いにより、観測値に年間での程度の差異を生じるかを評価するには、今後の資料の蓄積を待たなければならない。気象棟屋上では、下向き日射放射観測を継続しており、精度の高いデータが蓄積されていることから、この資料を用いた評価がなされれば、

表 10 AMOS2 と JMA95 の統計値の比較（年別値）
Table 10. Comparison of statistics of AMOS2 and JMA95(annual values).

	資料数	AMOS2	JMA95	差
海面気圧 (hPa)				
時別値の年平均	8504	984.7	984.7	+0.0
年最低海面気圧	43	937.8	937.9	-0.1
気温 (°C)				
時別値の年平均	8503	-11.3	-11.5	+0.2*
年最高気温	345	+4.9	+4.9	0.0
年最低気温	345	-37.5	-37.7	+0.2
湿度 (%)				
時別値の年平均	8098	65	68	-3*
風速 (m/s)				
時別値の平均				
全データ	8675	6.6	6.7	-0.1*
10m/s 以下のとき	6590	3.6	3.7	-0.1*
10m/s 超のとき	2085	16.0	16.3	-0.3*
年最大風速	354	40.6	41.1	-0.5
年最大瞬間風速	350	51.9	54.6	-2.7
日最大風速 10m/s 以上日数	354	199	196	+3
日照時間 (h)				
時別値の年合計	4637	1943.0	1914.5	-28.5

注) 平均値の差に*が付されたものは、危険率1%で有意であることを示す。

表 11 AMOS2 と JMA95 の統計値の比較 (月別値)
Table 11. Comparison of statistics of AMOS2 and JMA95 (monthly values).

	2000年												全年	
	1月	2月	3月	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月		
月平均気温	資料数	29	28	30	30	21	30	31	27	30	25	27	30	12
	AMOS2 (°C)	-2.2	-3.6	-7.2	-10.9	-11.6	-13.7	-21	-21.4	-19.2	-14.7	-7.3	-3.4	-11.3
	JMA95 (°C)	-2.4	-3.8	-7.3	-11	-11.7	-13.8	-21.1	-21.5	-19.4	-14.9	-7.4	-3.6	-11.5
差 (°C)	+0.2*	+0.2*	+0.1*	+0.1*	+0.1*	+0.1*	+0.1*	+0.1*	+0.1*	+0.2*	+0.2*	+0.1*	+0.2*	
日最高気温の月平均	資料数	30	28	31	30	21	30	31	29	30	28	27	30	12
	AMOS2 (°C)	0.6	-1.0	-4.9	-8.6	-8.5	-10.6	-17.4	-17.5	-15.9	-11.7	-4.4	-0.7	-8.4
	JMA95 (°C)	0.5	-1.2	-5.0	-8.8	-8.6	-10.6	-17.5	-17.6	-16.0	-12.0	-4.6	-0.8	-8.5
差 (°C)	+0.1*	+0.2*	+0.1*	+0.2*	+0.1*	+0.0	+0.1	+0.1*	+0.1*	+0.3*	+0.2*	+0.1*	+0.1*	
日最低気温の月平均	資料数	30	28	31	30	21	30	31	29	30	28	27	30	12
	AMOS2 (°C)	-5.4	-6.6	-10.1	-13.5	-14.9	-17.0	-24.7	-25.3	-23.2	-18.9	-10.8	-6.5	-14.7
	JMA95 (°C)	-5.6	-6.7	-10.2	-13.6	-15.0	-17.3	-25.0	-25.5	-23.5	-19.1	-11.0	-6.7	-14.9
差 (°C)	+0.2*	+0.1*	+0.1*	+0.1*	+0.1*	+0.3*	+0.3*	+0.2*	+0.2*	+0.3*	+0.2*	+0.2*	+0.2*	
月平均相対湿度	資料数	28	28	29	28	12	22	25	23	29	21	21	28	12
	AMOS2 (%)	70	64	66	74	69	61	57	55	57	54	71	68	64
	JMA95 (%)	70	62	67	75	72	66	66	66	65	62	71	67	67
差 (%)	+0*	+2*	-1	-1	-3	-5*	-9*	-9*	-11*	-8*	+0	+1*	-3*	
月最小相対湿度	資料数	30	28	27	25	12	22	26	23	29	22	18	28	12
	AMOS2 (%)	32	32	23	34	36	28	32	28	30	28	32	38	23
	JMA95 (%)	30	30	21	37	43	31	39	34	34	34	33	37	21
差 (%)	+2	+2	-2	-3	-7	-3	-7	-6	-4	-4	-5	+1	+2	
月平均風速	資料数	29	27	31	30	29	30	31	27	30	28	27	29	12
	AMOS2 (m/s)	4.6	6.9	8.4	9.8	8.0	8.6	6.2	5.1	5.4	4.4	5.5	5.1	6.5
	JMA95 (m/s)	4.7	7.1	8.6	10.1	8.1	8.8	6.5	5.4	5.6	4.6	5.6	5.1	6.7
差 (m/s)	-0.1*	-0.2*	-0.2*	-0.3*	-0.1*	-0.2*	-0.3*	-0.3*	-0.3*	-0.2*	-0.1*	-0.0*	-0.2*	
最多風向	資料数	742	672	744	720	720	720	744	712	720	729	711	639	8573
	AMOS2 (16 方位)	NE	ENE	NE	ENE	NE	NE	NE	NE	NE	NE	NE	NE	NE
	JMA95 (16 方位)	NE	ENE	ENE	ENE	NE	NE	NE	NE	ENE	ENE	NE	NE	NE
月合計日照時間	資料数	27	20	25	12	6	-	3	18	23	23	21	27	12
	AMOS2 (hour)	372.3	214.3	121.8	39.9	10.3	-	2.2	53.8	134.9	197.3	250.8	444.8	1842.4
	JMA95 (hour)	368.6	210.4	122.7	40.6	10.5	-	3.0	55.8	135.6	195.9	242.4	430.6	1816.1
比 (AMOS2/JMA95)	1.010	1.019	0.993	0.983	0.981	-	0.733	0.964	0.995	1.007	1.035	1.033	1.014	
日積算全天日射量の月平均	資料数	29	27	31	30	31	30	31	29	30	29	27	30	12
	AMOS2 (MJ/m ²)	28.3	17.3	8.2	2.5	0.2	0.0	0.1	1.4	6.5	15.2	24.8	32.1	11.4
	JMA95 (MJ/m ²)	27.6	17.1	8.1	2.4	0.3	0.0	0.1	1.4	6.4	15	24.5	32.1	11.3
差 (MJ/m ²)	+0.7*	+0.2*	+0.1*	+0.1*	-0.1	0.0	-0.0	0.0	0.0	+0.1	+0.2*	+0.0	+0.1	

(注) 平均値の差に*が付されたものは、危険率1%で有意であることを示す。

周辺の地物による観測値への影響を定量的に見積もることができるであろう。

ここで改めて、AMOS2とJMA95の各種統計値を、表10及び表11に示す。

8章までの各要素の比較においては、様々な条件のもとで比較のためのデータを抽出し、平均、合計などは任意の期間について求めている。これに対し表10、表11は両装置の観測データが完全に揃っていることを条件とし、統計期間及び処理の方法については地上気象観測統計指針（気象庁、1990a）に準じている。このため表に示した統計値は、8章までに述べた値とは若干異なる場合がある。また、日照時間及び全天日射量については、JMA95の感部を2000年1月に旗台地に移設するとともに気象棟屋上での比較観測も実施したが、旗台地での観測値を正規のものとして採用している。

10. 積雪計・視程計

地上気象観測項目の内、隊員による目視観測の種目には、雲、大気現象、視程、積雪の深さがある。今回、JMA95の整備により積雪計と視程計が新たな測器として導入された。積雪計による観測は、正式種目として運用するが、視程については、目視による観測を正規のものとしているため、視程計による観測は参考値として扱う。本章では、これらの測器による観測について概説する。

10.1. 積雪計

積雪計は、表1及び表2に示したとおり、雪面に向けて設置した送受波器から超音波パルスを送直下方に送出し、雪面からの反射波を検知して、送波から受波までの時間から積雪の深さを計測する測器である。観測は1cm単位で自動的に常時行われる。

昭和基地におけるこれまでの積雪観測の概要と、積雪計の導入にあたっての観測場所の選定について記し、昭和基地における積雪計による観測の特徴と、1999年2月1日から2000年1月31日までに観測したデータを雪尺の観測値と比較した結果について述べる。

10.1.1. 昭和基地における積雪の観測

南極域における水収支を考える上で、積雪量の季節変動や経年変化を把握することは重要であり、定常気象部門では、第1次隊から雪尺による海氷上の積雪観測を実施している。観測は、昭和基地周辺の海氷上に数本の雪尺を設置し、月に1回~数回程度それぞれの雪尺について雪面上の長さを測定することによって行った。

しかし、風の強い昭和基地付近では、積雪の状態は僅かな地形の差や氷山の配置などによって大きく影響を受け、同じ海氷上であっても、100mも離れれば1m以上の積雪深差を生じることもある。

現在は、昭和基地から300mほど離れた北の浦に、20m四方、10m間隔で9本の雪尺を設置し、週1回程度の割合で雪面上の長さを測定してそれぞれの積雪深を求め、9本の平均を

海氷上の積雪の観測値としている。

今回の積雪計の整備に際し、積雪の深さの観測場所を昭和基地東部地区の観測棟下の海岸に設けた(図38)。

10.1.2. 観測場所の選定

一般に積雪の深さは、観測場所の環境に大きく依存することから、昭和基地を代表し得る観測場所を選定することは大変重要である。観測場所の選定は国内の設置条件に準じて第38次隊と第39次隊が行い、選定にあたっては次の点に留意した。

- ① 主風向(NE)側に開けており、風を遮るものがないこと。
- ② 雪面が水平に近く、平坦であること。
- ③ 露岩地帯で設置が容易であること。
- ④ 電源線、信号線の敷設が可能な範囲であること。

図38に見るように雪尺と積雪計の設置位置は300m程度離れており、雪尺の設置場所は、海氷上で広範囲にわたり平坦で特に風上側に障害となるものがない。一方、積雪計の設置場所は、風上側には障害となるものはないが、陸上の標高10m程度の緩やかな傾斜地になっているため、海氷上よりは雪が積もりやすい。なお、第39次隊では、積雪計の設置時に感部直下の地面を整地し、半径2m程度を水平にした。

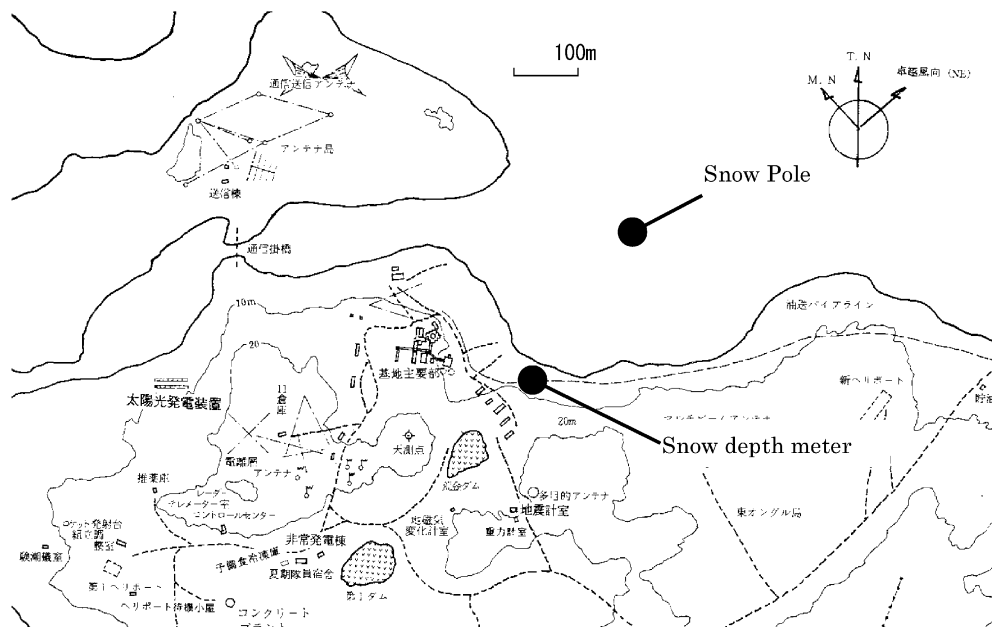


図38 昭和基地における積雪計と雪尺の設置位置(国立極地研究所(1998)に加筆)

Fig. 38. Installation point of snow depth meter and snow pole at Syowa Station.

10.1.3. 観測値の安定性

超音波式積雪計は計測に高周波の信号を用いるため、ノイズ対策が重要となる。また、雪面の状態によって反射波の強度が低下すると、S/N比が低下して観測値に乱れを生じる。昭和基地でも積雪深が数10cm程度上下するような観測値の乱れが生じる場合があり、信号線のシールド、アースの変更などの措置を施したが、顕著な改善は見られなかった。積雪計の設置場所を整地してもなお、雪面が5°程度傾斜していることも反射強度を低下させる原因になっていたと考えられる。

気象庁では超音波式積雪計の運用にあたり、年に2回程度動作状況の点検を行う。この際、積雪計変換部において「信頼性レベル」、「ノイズレベル(平均値)」及び「ノイズレベル(最大値)」を表示させ、これらのパラメータが規定の範囲内であることを確認している。「信頼性レベル」は条件の良いときで15-30db、強風時などの条件の悪いときで10-20dbであり、レベルが高いほど安定した計測が行われていることを示す。一方、「ノイズレベル(最大値)」は通常20db以下であり、値が小さいほどノイズが小さい。また、「ノイズレベル(最大値)」が「ノイズレベル(平均値)」の1.5-2倍以上である場合は装置の異常が疑われる。

昭和基地においては、観測値の乱れが頻発し始めた1999年7月以降、毎日1回これらのパラメータをモニタして、装置の動作状況を監視した。図39は、1999年7月~12月の積雪計の信頼性レベル、ノイズレベルの日々の変化を示したものである。8月までは、信頼性レベルが一時的にかなり低下することはあっても、ほぼ10-15db程度のレベルを維持していた。しかし9月~10月にかけては信頼性レベルが10db以下の低い状態が続き、ノイズレベルも大き

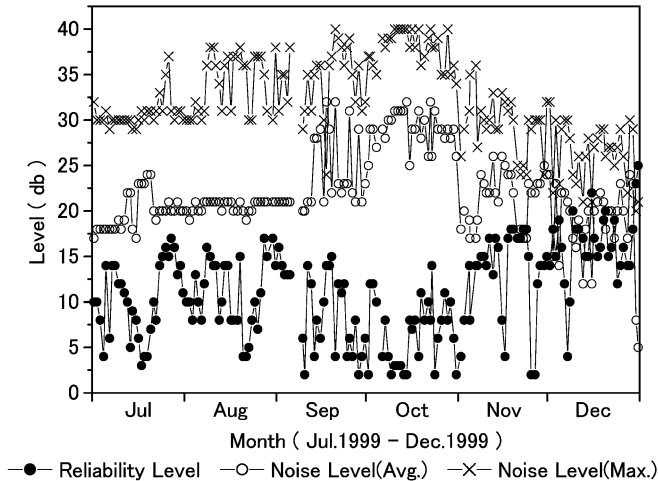


図39 積雪計の信頼性レベル及びノイズレベルの経時変化(1999年7月~12月)

●は信頼性レベル, ○はノイズレベル(平均値), ×はノイズレベル(最大値)を表す。

Fig. 39. Time series of reliability level and noise level on snow depth meter (July 1999-Dec. 1999).

くなっている。この期間、観測値の乱れも激しく、特別値を全て欠測とする日もあった。11月以降は信頼性レベルが上昇する一方ノイズレベルは低下し、観測値は安定するようになった。

観測値の乱れと気象状態との関係を見るために、信頼性レベルのモニタ値と、そのときの風速、気温、湿度、蒸気圧との相関を調べたところ、風速、湿度とは相関がほとんどなく、気温及び蒸気圧とは0.5程度の相関があった。一般的に、超音波式積雪計では強風時に信頼性レベルが低下するが、相関係数で見ると、風速との相関は弱く、気温及び蒸気圧との間に相対的に強い相関が見られる。このことは、気温によって雪面の状態が変化し、反射波の強度に影響を与えている可能性を示唆している。

10.1.4. 雪尺と積雪計による観測値の比較

1999年2月1日から2000年1月31日までに観測したデータから、両者による観測値の統計的な接続の可能性について考察する。

図40は、積雪計による日最深積雪の観測値(365日)と海水上の雪尺の観測値(46回)とを比較したものである。図からは、絶対値の差が大きいものの増減の傾向は良く一致していることが分かる。両者の相関係数は0.76、回帰直線の傾きは 0.38 ± 0.13 (99%信頼区間)であった。

増減傾向が一致していることから雪尺と積雪計との間に相関関係があり、雪尺による観測を今後も継続することによって、その関係をより詳細に明らかにすることができる。観測場所の変更や測定方法の違いにより数値的には接続できないが、統計的な手法を用いて積雪計による観測値を補正することによって、海水上における積雪の深さを推定することができ

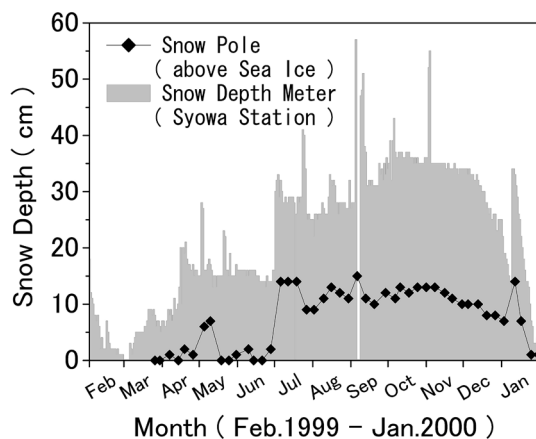


図40 雪尺(海水上)と積雪計(昭和基地内)の日最深積雪観測値の比較
◆は雪尺の観測値、灰色棒グラフは積雪計による日最深積雪を表す。

Fig. 40. Comparison of snow depth between snow pole (above sea ice) and snow depth meter (Syowa Station).

ば、一定のトレーサビリティを担保できる可能性がある。

10.2. 視程計

昭和基地では、AMOS2 とは別に、視程計（降雨強度計付、WIVIS）を参考測器として使用していた。JMA95 では、視程計（現象判別付）が導入され、視程、大気現象、現在天気等が、常時観測・記録されるようになった。しかし、これらの観測項目は、昭和基地では目視で実施することとしているため、新しい視程計も、観測値は参考とするにとどめた。表 1 及び表 2 に感部の仕様と処理方法の概要を示す。

図 41 に、3 時間毎の資料を用いて、目視による視程の観測値と、視程計の観測値との比較を示す。視程は、目視と視程計とで良く対応している。

図 42 は 1999 年 5 月 2-4 日に発生したブリザード時の視程観測例で、JMA95 の視程計と WIVIS 及び目視による視程の観測値を示す。JMA95 の視程計が地上約 2 m に設置されているのに対し、WIVIS は気象棟屋上の地上高約 5 m の位置に設置されている。このため、WIVIS では、JMA95 よりも視程の値を大きく観測する傾向がある。また、WIVIS は 3 km モードで運用しているため、これを超える視程は観測されない。

図から 5 月 3 日の 06 LT 頃までの間は、WIVIS と JMA95 の観測値は比較的良く一致しているが、ブリザードの後半では、WIVIS の観測値は JMA95 及び目視の観測値から大きくずれている。

現在天気については、目視観測が 4677 コード（気象庁、1990b）によって天気を定義しているのに対し、視程計による観測では 4680 コード（同）によって定義されている。また、4680 コードでは、「地ふぶき」・「細氷」に関する定義はあるものの、JMA95 では、実際には使用していない。表 12 は、目視と視程計による現在天気を比較したもので、目視により観

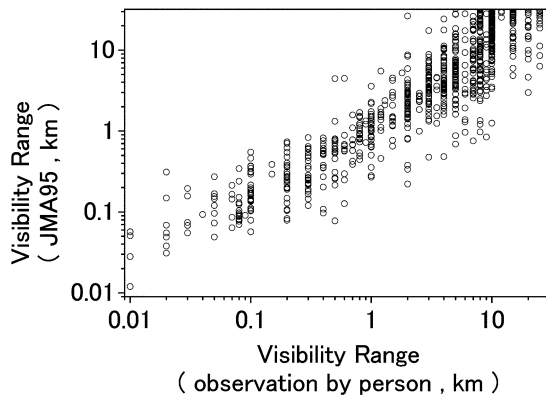


図 41 目視と視程計（JMA95）による視程観測値の比較

Fig. 41. Comparison of visibility range between observation by person and JMA95.

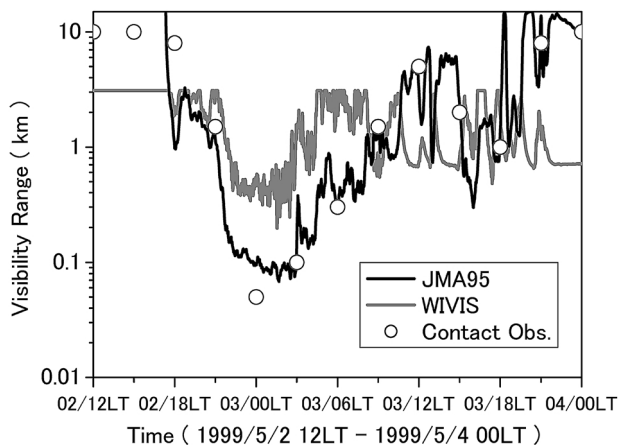


図 42 ブリザード時の JMA95, WIVIS 及び目視による視程の比較 (1999 年 5 月 2 日 12LT-5 月 4 日 00LT)

黒色実線は JMA95, 灰色実線は WIVIS, ○は目視による観測値を表す。

Fig. 42. Comparison of visibility range with blizzard among JMA95, WIVIS and observation by person (May 2, 1999, 12LT-May 4, 1999, 00LT).

表 12 目視観測による現在天気と視程計により判別された現在天気との比較

Table 12. Comparison of present weather between observation by person and weather sensor.

目視による現在天気 (4677 コード)	視程計で観測された現在天気 (4680 コード) の出現率 (総数に対する百分率, %)														総数 (視程計の捕捉率 %)								
	00-03 大気水象なし	04-05 煙霧	10 もや	21 降水があった	22 霧雨又は霧雪があった	23 雨があった	24 雪があった	25 霧又は水霧	26 着氷性の霧雨又は着氷性の雨があった	50-53 霧雨	54-56 着氷性の霧雨	64-66 着氷性の雨	67-68 みぞれ又は霧雨と雪	70-73 雪		74-76 凍雨	77 霧雪	78 氷晶	80-81 雨性降水	86-87 しゅう雪	欠測又は保守中		
00-03 大気水象なし	97.1	0.3	0.3		0.1	0.4	0.6				0.2			0.1		0.2	0.2			0.5	0.2	1948 (97.1)	
10 もや	50.0		25.0				25.0																4 (25.0)
22 雪があった	27.8		1.9		7.4		35.2	14.8			1.9				1.9		3.7	1.9			3.7		54 (35.2)
27 雪あられがあった	100.0																						1
28 霧又は水霧があった																							1 (0.0)
36-37 低い地ふぶき	42.1	10.5					5.3	10.5		5.3	10.5						5.3						19 (42.1)
38-39 高い地ふぶき	7.7	0.9	0.9				1.3	7.7		18.3	26.4	3.4	5.1	9.4	2.6	6.4					4.3	6.0	235 (75.9)
40 離れた霧又は水霧	66.7																						9 (66.7)
42-49 霧又は水霧				14.3					42.9		14.3					28.6							7 (85.8)
70-75 雪	4.5		0.2	0.8		1.6	1.6		18.2	0.2	9.2	1.9	4.6	26.8	5.7	13.5	1.1	0.5	5.9	3.8			628 (87.6)
76 細水	41.7			16.7		8.3		8.3								8.3	8.3			8.3			12 (24.9)
87 雪あられ											100.0												2 (100.0)

注) 視程計が大気現象を概ね正しく捕捉したとみなせるものに、網掛けを施した。

測した現在天気を、視程計ではどのように観測したかを、現在天気の発現総数に対する百分率で示している。発現数が最も多い「雪」は、JMA95 では「雪」・「降水」・「霧雪」などとして判別している。「降水」とは、液体か固体かの判別ができない場合に用いる。「高い地ふぶき」は、該当する天気が JMA95 で使用できないことから、「着氷性の霧雨」・「降水」・

「雪」などと判別している。

表を見ると全体の2/3が大気水象なしであり、JMA95では、その97.1%を捕捉している。高い地ふぶきと雪は全体の30%を占めているが、それぞれ、75.9%と87.6%を降水現象として捉えている。霧も42.9%が対応し、霧雨、霧雪として捉えたものも含めると85.8%を捕捉している。このことから、視程計による観測は実況監視には非常に有効であり、また、南極用に現象判別のアルゴリズムが見直されれば、現象の捕捉率向上も期待できるが、現在天気コードのままでは、目視観測を完全に代替することは難しい。

謝 辞

2カ年計画での昭和基地の地上気象観測装置更新の初年度にあたり、仕様書の作成から機器の調達、輸送、設置までを限られた期間に完遂し、試験運用までこぎつけた岸隆幸氏ほか第39次の気象隊員ならびに、これを支えた高尾俊則前南極観測事務室長をはじめとする気象庁関係官及び極地研究所の関係官に敬意を表します。

40次の越冬開始と同時に新装置の正式運用に移行できたのは、これらの方々のご尽力の賜物です。

この報告をまとめるに際し、野村保夫南極観測事務室長、金戸進東京航空地方気象台観測課長ならびに土井元久観測システム整備運用室調査官にご指導をいただきました。また、北村吉識前札幌管区気象台測器課長、留萌測候所の山下正也主任技術専門官ほか多くの方々に、非常に有用なご助言をいただきました。さらに、横河ウェザックの小倉裕三氏、明星電気の柴角一氏には観測装置に関する各種資料を提供していただきました。厚くお礼を申し上げます。

最後に、越冬期間中、様々な形で観測を支援していただいた第40次観測隊の皆様、気象庁、極地研究所の関係官及び日射日照計の移設にあたって支援いただいた第41次観測隊の皆様へ感謝します。

文 献

- 東島圭志郎・佐藤 健・安ヶ平一也・村方栄真・河原恭一 (2003): 第40次南極地域観測隊気象部門報告1999. 南極資料, 47, 171-271.
- 岸隆幸・安田毅彦・吹田俊明・堀川和久・大河原望 (2002): 第39次南極地域観測隊気象部門報告1998. 南極資料, 46, 318-376.
- 気象庁 (1990a): 地上気象観測統計指針. 東京, 124 p.
- 気象庁 (1990b): 国際気象通報式 (第8版). 東京, 497 p.
- 気象庁 (1996): 測器特集. 測候時報, 63, 243-286.
- 気象庁 (2000): 南極気象資料, 1999年. 東京, CD-ROM.
- 気象庁 (2002): 地上気象観測指針 (2002). 東京, 181 p.
- 気象庁測器課・札幌管区気象台測器課 (1972): 塩化リチウム露点計の異常記録について. 測器技術資料 (気象庁), No. 4713.
- 国立極地研究所 (1998): 基地要覧, 1998年. 東京, 160 p.

- 明星電気 (1998): JMA95 型地上気象観測装置技術解説書 (平成 10 年度).
- 宮本仁美 (1990): 昭和基地での総合自動気象観測装置の更新. 測候時報, **57**, 253-269.
- 中浅測器 (1988): 地上気象観測装置取扱説明書.
- 岡野タイ子・恩房寿夫・宮武真一 (1996): 白金抵抗温度計の試験. 測候時報, **63**, 253-256.
- 鈴木宣直 (1996a): 温度計. 気象研究ノート, **185**, 鈴木宣直編. 東京, 日本気象学会, 13-24.
- 鈴木宣直 (1996b): 湿度計. 気象研究ノート, **185**, 鈴木宣直編. 東京, 日本気象学会, 25-36.
- Washburn, E. W. (1923): *International Critical Tables of Numerical Data, Physics, Chemistry and Technology*, 3. London, U.S. National Research Council, 444 p.
- 柳原一夫 (1980): 塩化リチウム露点計の原理と誤差について. 測器技術資料 (気象庁), No. 5507.