

ドップラー音波レーダー

並木道義¹・山口堅治²・松坂幸彦¹・鳥海道彦¹・本田秀之¹・
齋藤芳隆¹・井筒直樹¹・山上隆正¹・廣澤春任¹・佐藤祐一²・
森川公夫²

Doppler Sonic Radar

By

Michiyoshi NAMIKI¹, Kenji YAMAGUCHI², Yukihiro MATSUZAKA¹, Michihiko TORIUMI¹,
Hideyuki HONDA¹, Yoshitaka SAITO¹, Naoki IZUTSU¹, Takamasa YAMAGAMI¹,
Haruto HIROSAWA¹, Hirokazu SATO² and Kimio MORIKAWA²

Abstract : In order to launch larger balloon and heavier payloads, we have extended the launching field by 20m and developed a new launcher at the point of the launching field at Sanriku in 1998. Also, we have developed a "semi-dynamic" launching method which reduces risks to injure films of a balloon. In this launching method, a balloon is directly set in a uprightly floating situation after an injection of the lifting gas. Under such a circumstance, it is important to get the information of lower atmospheric wind. In 2000, a doppler sonic radar (SODAR) for three-dimensional wind field measurement up to 1,000 meters in height was installed to support the launching operations. This paper describes the function, and the performance of the SODAR.

要 旨

観測装置の大型化およびより高高度における観測を希望する科学者が増えてきたために、平成10年度に三陸大気球観測所の放球場を20m拡張し、その先端に大型放球装置を設置した。大型放球装置の完成により、容積1,000,000m³、総浮力2トン程度までの気球を放球することが可能になった。この装置の完成にともない、従来の立て上げ放球方法を改良し、気球皮膜によ

¹ 宇宙科学研究所

² 明星電気株式会社 守谷工場

り損傷を与えないセミダイナミック放球方式が開発され実用化されてきた。この放球方法は、気球を一気に大型放球装置の上に立て上げる方式であるため、放球時に地上から数百mまでの風向・風速を正確に把握する事が放球の正否を決定する大きな要因となる。平成12年度に地上から数百mまでの低層風を測定するために、ドップラー音波レーダーを用いた低層風観測装置を導入した。本論文では三陸大気球観測所に設置されたドップラー音波レーダーの機能と有用性について述べ、実際に運用している状況について報告する。

重要語：セミダイナミック放球法，低層風観測装置，ドップラー音波レーダー

1. はじめに

近年、観測器の精密化に伴う装置の大型化および高高度における質の良い観測が強く要望されるようになって来たため、従来では放球が困難であった容積1,000,000m³程度までの大気球が放球できるように、平成10年度に三陸大気球観測所の放球場を20m拡張し、その先端に大型放球装置を設置した。大型放球装置の完成により、総浮力2トン程度までの大型気球を放球することが可能になった。総浮力が1トン以上になると、従来の立て上げ放球方法では気球皮膜に損傷を与える心配があったが、この大型放球装置を用いたセミダイナミック放球方式は、気球皮膜に損傷を与えにくい放球方法であり、大型気球を安全に確実に放球することができる。この放球方法は、ヘリウムガスを注入後、気球を一気に大型放球装置の上まで立て上げる方式であるため、放球時の地上から数百mまでの風向・風速を正確に把握する事が放球の正否を決定する大きな要因となる。このため、平成12年度に低層風観測装置を三陸大気球観測所(SBC)に設置した。今回設置した低層風観測装置は、最近、地表近辺から上空にかけて、大気の風の状態を常に監視できることで需要が高まっているリモートセンシング方式のものである[1]。この方式は、空港では最近特に注目されているウィンドシアアの検出による飛行機等の安全航行に用いられているのをはじめとして、火力・原子力発電所での環境モニタリングに用いられたり、大気汚染物質拡散の監視および予測への利用、大気物理や電波伝播などの研究に広く利用されているものである。

リモートセンシング方式として、今回導入したのはドップラー音波レーダー[2]を用いる方式のものである。本ドップラー音波レーダーは数十m~数千mまでの風向風速が測定可能であり、その時間分解能は最小で2分、無人での運転が可能である。本論文では、大出力のアンテナをもち最大高度1,500mまでの水平風向風速、鉛直風速の観測が可能でドップラー音波レーダー「PA-2」の機能・特徴およびその有用性について記述する。また、三陸大気球観測所で行われた平成13年度第2次大気球実験時に得られた風観測データについて記述する。

2. セミダイナミック放球法

日本における、気球放球方式は「立て上げ放球法」と呼ばれ、気球頭部をローラー車で保持してヘリウムガスの注入を行い、総浮力量のヘリウムガスを詰めるのに必要な気球頭部長の場所をカラーで押さえ、ヘリウム充填後にローラー車がランチャー車まで移動しながら、ゆっくりと気球全体を立て上げて行き、ローラーを外して気球全体をランチャー車の上に立て上げ、ランチャー車に取り付けられたロードセルで浮力を再確認し、カラーを取り除いた後ランチャー車から気球を解放し放球する方法である。この放球方法は1982年より採用され、これまでに種々の改善は行われたが基本的には同じ放球方法で約200機以上の気球が放球されてきた[3][4]。近年、観測機器の大型化および気球の大型化に伴い、「立て上げ放球法」の長所を生かし、欠点を是正する放球方式が考案され実用化された。この方式は、「セミダイナミック放球法」と呼ばれ、気球頭部へのヘリウムガスの充填終了までは、従来の立て上げ放球法と同じであるが、充填後、ローラー車のローラーを跳ね上げることで一気に気球を

解放し、気球を回転テーブル上に設置されたランチャー(大型放球装置)上に立て上げる方法である[5][6]。図1にセミダイナミック放球方式による放球の様子を模式的に示した。この放球方法は、気球を一気に大型放球装置上に立て上げる方式であるため、気球解放時および放球時の地上から数百mまでの風向・風速を正確に把握する事が放球の正否を決定する大きな要因となる。

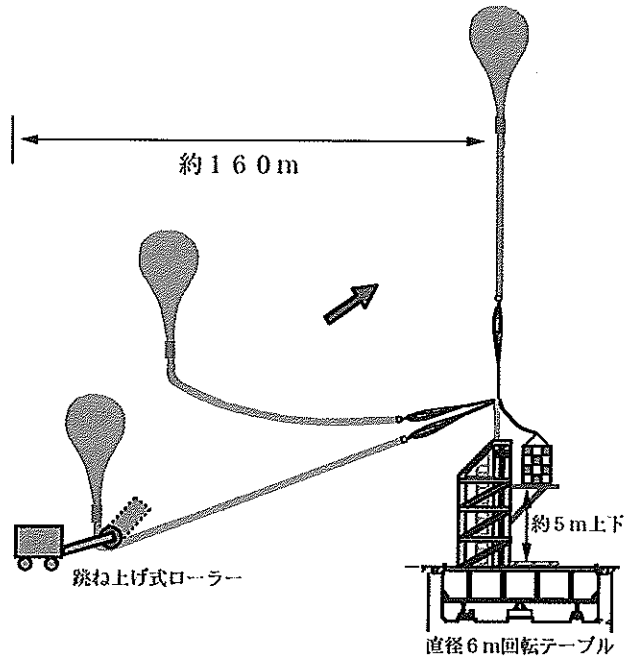


図1 セミダイナミック放球方式

平成12年度に地上から約1,500mまでの高さの風向風速を定量的に連続測定するためにリモートセンシング方式のドップラー音波レーダーを導入した。アンテナ送受信部は、送信音波のメインローブが地上建造物などの障害物と干渉しないように放球場の川向こうに設置し、制御部・データ収集部およびオフライン表示部を指令棟内に設置した。設置場所を模式的に示したのが図2である。

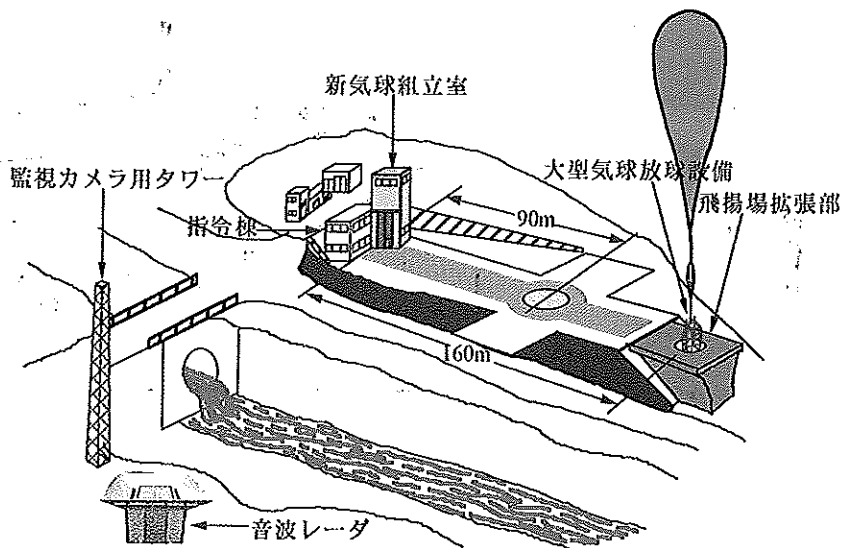


図2 ドップラー音波レーダー装置の設置場所

3. ドップラー音波レーダーの機能

従来、このようなリモートセンシングによる低層風観測は、レーウィンゾンデ、鉄塔や係留気球等に風向風速計を設置して行われてきた。しかし、レーウィンゾンデは各高度での直接観測であるため信頼性はあるが、ゴム気球の放球および航空局への通報など運用に人力と時間を要し、時間分解能が最小でも30分程度であり、我々の目的を満足させることはできない。また、鉄塔の場合、時間分解能は小さくすることはできるが、観測可能高度が100~200m程度であるうえに広大な敷地が必要となり、コストが高くなる。係留気球の場合は観測可能高度は500~1000m程度となるが、風速が5 m/s以上の強風時には収容が必要となり、無人運転には適さない。このような欠点を持つ従来までの測定方法に代わって、今回導入したドップラー音波レーダーは高度分解能10m、測定最大高度1,500m、時間分解能2分で連続無人運転ができる優れた低層風観測装置である。但し、可聴帯域の音波を使用しているため、住宅環境に充分配慮した使用が望まれる。三陸大気球観測所では、早朝5時より夜6時までの観測を行っている。

本ドップラー音波レーダーの構成およびアンテナ外観図を図3および図4に示した。本ドップラー音波レーダー装置は、防風板付きアンテナ部、制御部およびデータ収集部から構成されている。本装置は平成12年度に三陸大気球観測所に設置され、平成13年度第1次大気球実験より稼働している。制御部で高度分解能、測定高度範囲、測定時間分解能、稼働時間等を自由に設定することができる。測定された風向風速データは、ハードディスク、フロッピーディスクに収納されると同時にディスプレイ上にグラフィカル画面表示を行い、プリンターおよびシリアル回線へデータを送出する。ディスプレイ画面にはキャラクターデータ表示および各測定時間毎の風向風速のベクトルグラフィック表示することができるようになっている。設置したPA-2型ドップラー音波レーダーの主な諸元を表1に示した。

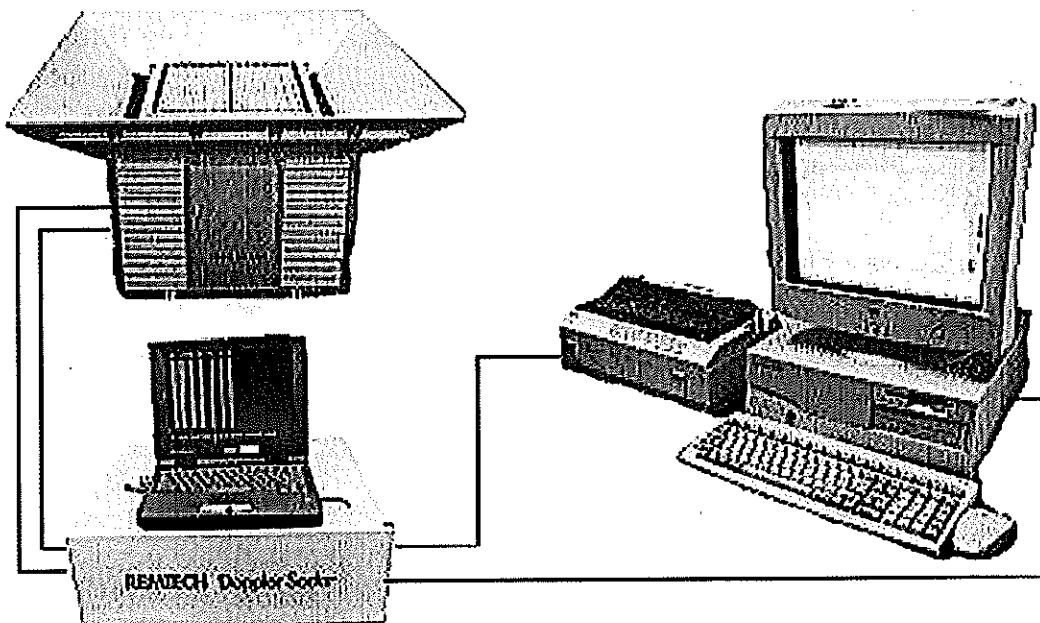
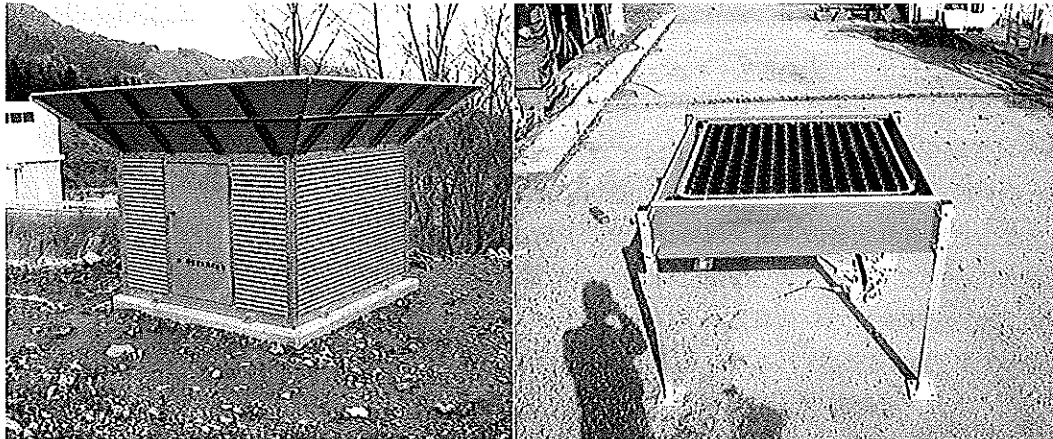


図3 本システムの構成図



防風板を取り付けた状態（運用状態） 防風板内部のアンテナ

図4 本装置のアンテナ外観図

表1 ドップラー音波レーダーの諸元 [7], [8]

アンテナ方式	フェーズドアレイ方式
アンテナ寸法	1.3m×1.3m
スピーカー個数	196素子
アンテナゲイン	25dB
ビーム幅	5度
使用周波数	2100Hz近辺の9周波
出力最大	10W
観測可能層数	10～20層
観測層厚み（距離分解能）	10～200m（1m刻みで可変）
データ平均化時間（時間分解能）	2～60分
風速観測範囲	
水平風速	0～30m/s
鉛直風速	-15～+15m/s
風速測定精度	
水平風速	0.2m/sもしくは風速の3%以下
鉛直風速	0.05m/s以下
風向測定精度	3度以下
観測項目	水平風向・風速とその標準偏差 垂直風速とその標準偏差
重量	100kg
消費電力	40W以下 1100W以下（融雪用ヒーター使用時）
動作環境	
屋外装置	気温 -30～+50℃ 湿度 10～100%
室内装置	気温 +5～+40℃ 湿度 20～80% (ただし結露無き事)

本レーダーの機能は、音波を用いたドップラーレーダーデータから上空の風向風速を測定するためのリモートセンシングである。本レーダーは、フェーズドアレイ方式の送受信アンテナから可聴帯域音波(2100Hz近辺)を鉛直方向1ビーム、天頂角15度4ビームの計5ビームを上空に送信する。送信後大気擾乱によって後方散乱された音波を送受信アンテナで受信し、その受信音波のドップラー成分を復調する。水平風向風速・鉛直風速は、復調されたドップラー信号にFFTを用いたデジタル信号処理を行った結果から計算される。また、オフライン表示器によって、観測された各層の風向風速を記録し、画面上にグラフィカルに表示することが可能になっている。図5に送信する音波レーダーのビームパターンを模式的に示した。本ドップラー音波レーダーのアンテナには発音ユニット196個が上空に向けて並べてあり、図5より鉛直方向ビームおよび天頂角15度傾けた4方向ビームを位相合成により作り出し、5方向のビームによって、順次繰り返し測定を行う。また、それぞれの発音ユニットに加える駆動信号の位相を少しずつずらすことにより、196個の発生音波の合成ビーム最大エネルギーの方向を変えることができ、鉛直方向上空から任意の角度に天頂角を任意に傾けることができる設計になっている。

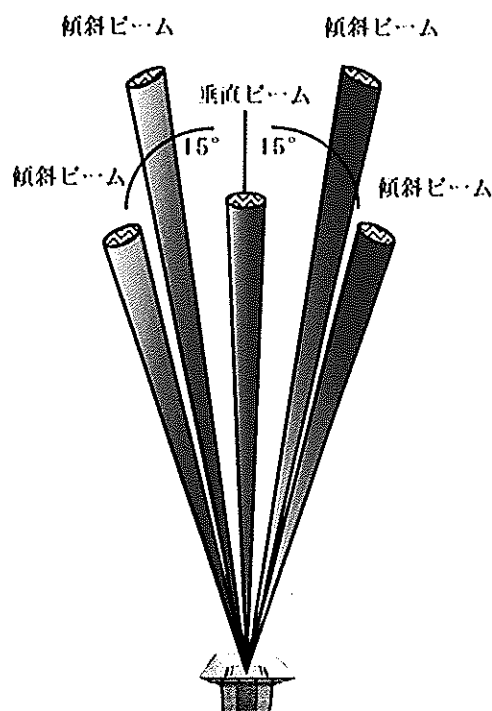


図5 本装置の送信ビームパターン

4. 本ドップラー音波レーダーの特徴

本ドップラー音波レーダーの特徴を下記に示す。

1. 本装置は設置および移動運搬を容易にするために可搬型になっている。
2. フェーズドアレイ方式のアンテナのため一つのアンテナユニットで5ビームを生成することができる
3. 多周波数符号化方式の採用により高速なデータ取得が可能となっている。

音波レーダーはパルス音波を送信し、大気からの反射音波を受信することで大気の動きを観測する。本装置ではその送信パルス音波を9種類の周波数で変調し、単一周波数での観測に比較し、観測データの信号/ノイズ比(SNR)の向上が図られている。

4. 固定反射(グランドクラッター)の除去方式が採用されている。

アンテナから放射される音波は、そのほとんどがアンテナのメインローブである上方に放射されるが、一部はサイドローブである側方に放射される。その側方放射音波が地上の物体に反射して受信されると、グランドクラッターと呼ばれるノイズ成分となり、低層風観測の精度に影響を与えることになる。本装置では同じ方向から到来するグランドクラッターを検出し、グランドクラッターエコーが最小になるように送信周波数を選択することができるように設計されており、グランドクラッターエコー成分と大気エコー成分の比から補正を行う機能を備えている。

5. リアルタイムデータ自動検定を行っている。

得られた風のドップラーデータは、リアルタイムでスクリーニングが行われ、風向風速に変換されて出力するように設計されているが、さまざまなノイズや音響環境の変化のため、ドップラーデータは常に同じSNRで得られない。本装置のソフトウェアは、無信号時に得られる雑音データから誤信号確率を統計的に算出し、

ドップラーデータの検定閾値をリアルタイムに決定する機能を有している。このため、出力される風向風速は十分に信頼が置けるものとなっている。また、3時間ごとに送受信機の型式チェックおよび電氣的雑音のチェックを行い、動作中の自己診断を行っている。問題が発生した場合には、コンソール上にエラーメッセージを出力し、速やかに知らせる機構を備えている。

6. ハードディスク、フロッピーディスク、ディスプレイ、プリンター、シリアル回線データ出力および保存。制御部のCRTはキャラクターデータおよびグラフィックによるベクトル表示が可能である。データはハードディスクにバイナリ形式のサイクリックファイルとして格納される。また、オプションハードウェアであるオフライン表示器の追加が可能である。

オフライン表示器は、制御部より出力される観測データを受信・記録し、水平風向風速のグラフィック表示、鉛直風速のグラフィック表示を行う。また、格納されているデータは、日時の指定により過去にさかのぼって表示することが可能である。

本ドップラー音波レーダーの周囲ノイズレベル値に対する観測可能な最大高度との関係を図6に示した。この図中に示した値は、気温15°C、湿度70%の地上環境下での値である。周囲のノイズレベル値が35dBAの環境下では、観測可能な最大高度は約1.5kmとなっている。

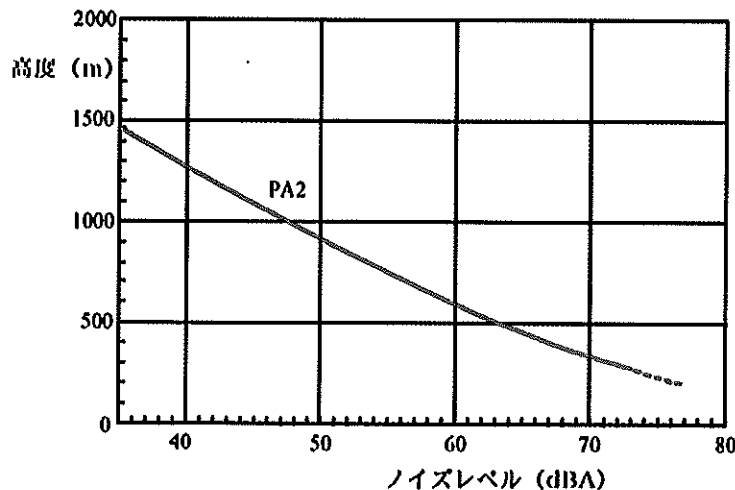


図6 ノイズレベルに対する観測可能最大高度

5. ドップラー音波レーダーによる観測結果

本ドップラー音波レーダーの観測精度を評価するために、放球場、受信棟に設置されているベーンタイプ風向風速計データと本装置データとの比較を行った。放球場のセンサーは海拔240mに設置され、受信棟のセンサーは海拔440mに設置されており、それぞれの高度における風向風速のアナログデータを三陸大気球観測所指令棟に常時伝送している。設置してある場所は多少異なるが、これら二カ所の高度における風向風速値と本ドップラー音波レーダーで観測されたそれぞれの高度での風向風速値との比較を行った。図7に午前5時から午前8時までの3時間にわたるドップラー音波レーダーで観測された風速データと放球場の山側に設置されているベーンタイプ風速計の風速データを示した。また、同日・同時刻に観測された、それぞれの風向データを図8に示した。その結果、風速および風向データの変化の様子は大変良く一致しており、それぞれの観測データからの風速差および風向差を示したのが図9および図10である。これらの図より、風速は $\pm 0.2\text{m/s}$ 以内で一致しているものが全体の62%、 $\pm 0.4\text{m/s}$ 以内で一致しているものが全体の91%であった。また、風向は ± 20 度以内で一致しているものが全体の70%であった。

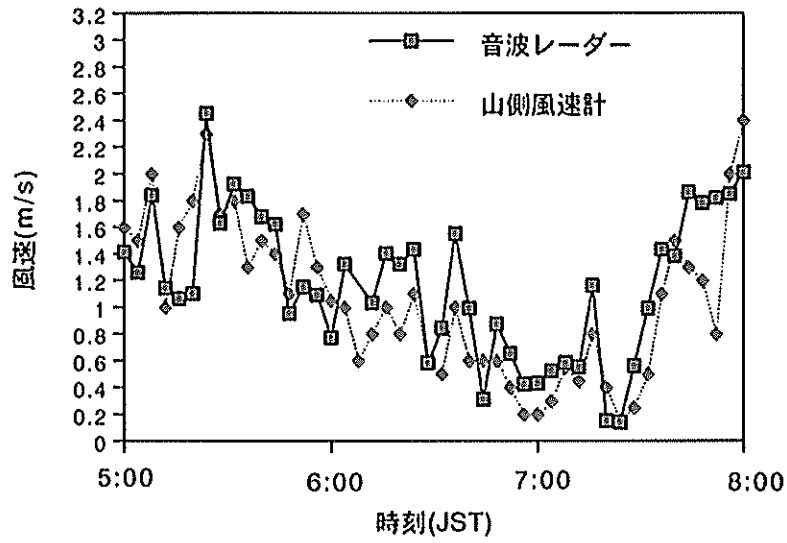


図7 放球点での風速データとの比較図

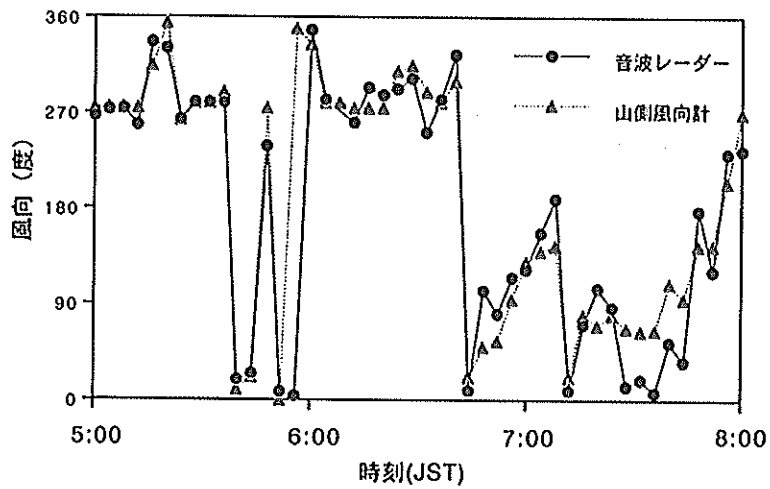


図8 放球点での風向データとの比較図

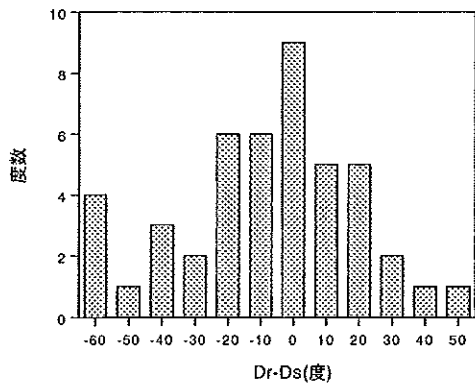


図9 レーダーと風速計との風向差分布

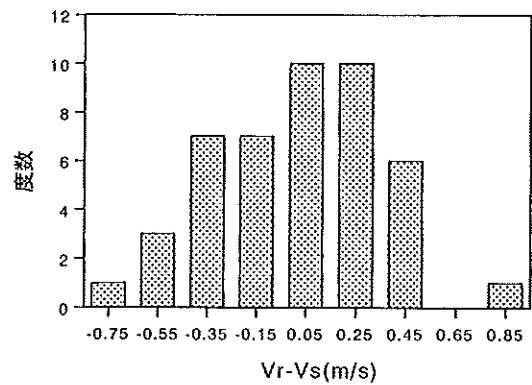


図10 レーダーと風速計との風速差分布

次に海拔440mの受信棟に設置されているベーンタイプ風向風速計とドップラー音波レーダーで観測された高度200mのデータとの比較を行った。図11に午前5時から午前8時までの3時間にわたるドップラー音波レーダーで観測された高度200mの風速データと受信棟に設置されているベーンタイプ風速計の風速データの結果を示した。また、同日・同時刻に観測された、それぞれの風向データを図12に示した。その結果、風速および風向データの時間変動の様子は大変良く一致した傾向を示しており、それぞれの観測データからの風速差および風向差を図13および図14に示した。これらの図より、風速は $\pm 0.2\text{m/s}$ 以内で一致しているものが全体の70%、 $\pm 0.4\text{m/s}$ 以内で一致しているものが全体の93%であった。また、風向は ± 20 度以内で一致しているものが全体の66%であり、ほとんどのデータは ± 30 度以内にはいっている。

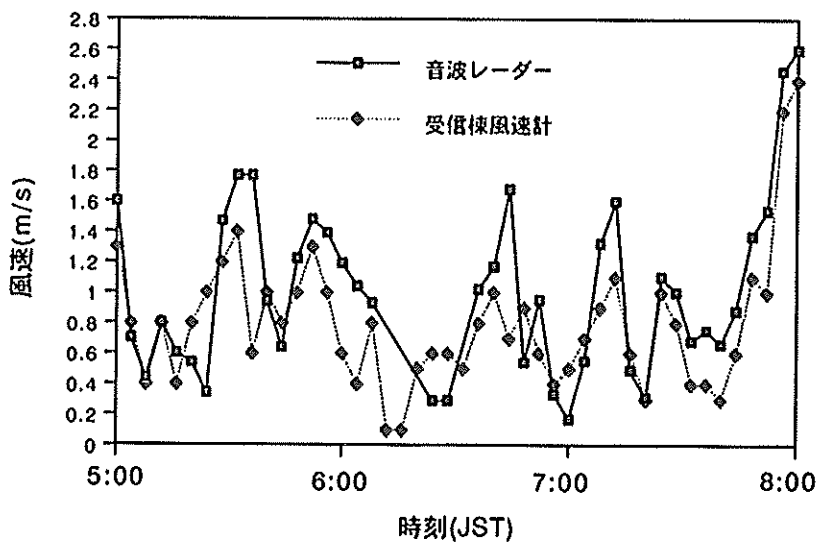


図11 受信棟での風速データとの比較図

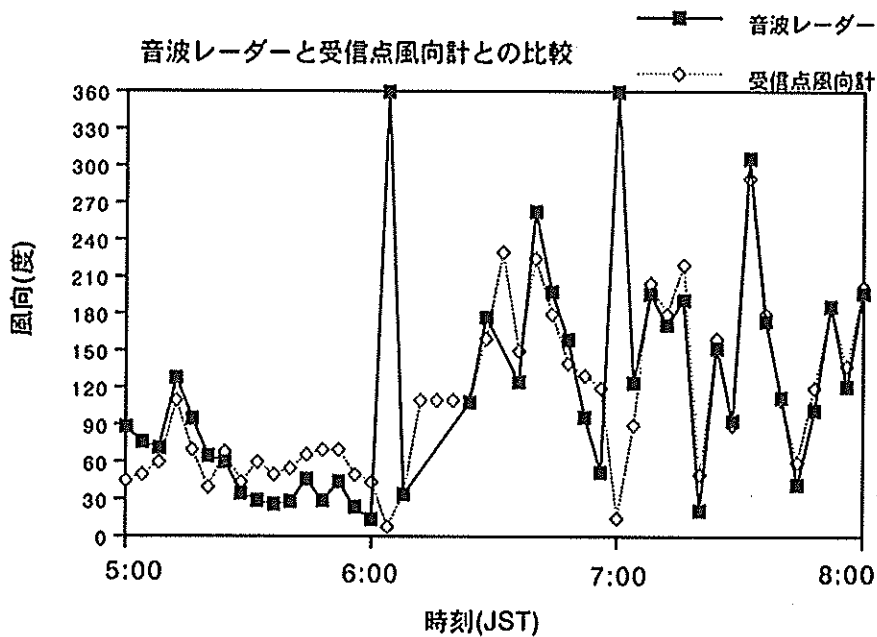


図12 受信棟での風向データとの比較図

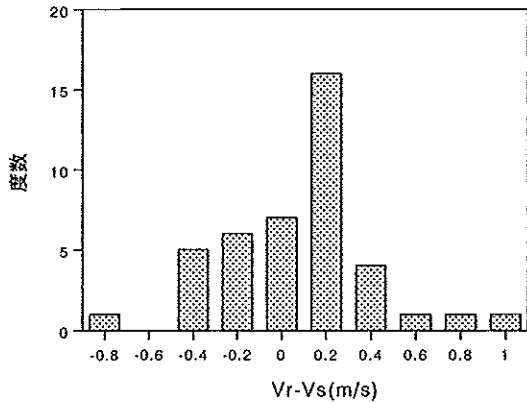


図13 レーダーと風速計との風速差分布

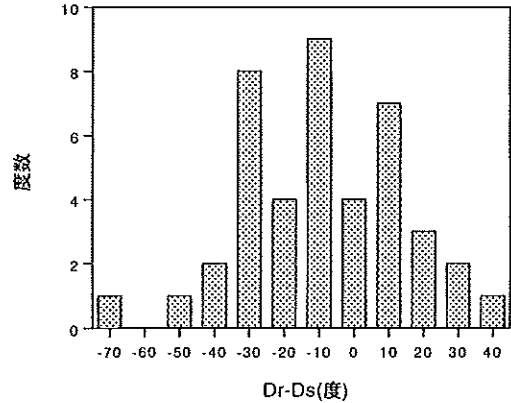


図14 レーダーと風速計との風向差分布

次に平成13年第2次大気球実験期間中に本装置によって得られた風の観測結果の一例を示す。大気球B30-69号機は平成13年9月1日6時00分に放球されたが、その放球前後2時間の高度に対する風向風速の分布を図15に示した。この図はオフライン表示装置によって出力されたもので、横軸が時刻、縦軸が高度を表し、同図内の矢印の向きおよび色調が風向の方向、矢印の大きさが風速の速さを表している。大気球の放球前の低層風現況を詳細に知るために、データの高度分解能は10mと最小の分解能が選択されていた。また、データの時間分解能は同図上では4分間となっているが、実際のデータの取得間隔は2分毎に設定されていた。これは、グラフ表示時に時間のスパンを2時間と指定したため、データが間引きされて表示されているためである。放球4分前は、地上近辺から高度200mにわたって1.4m/s程度の北北東の風が吹いており、放球を行った6時には地上で北の風0.8m/s、高度200mで北の風1.2m/sの状況下であったことがわかる。6時16分頃より風速1m/s程度の西風に変化し、その後、高度の高い方から徐々に東風に変化し、6時52分には完全に風ぎの状態は終了し海風に変化し

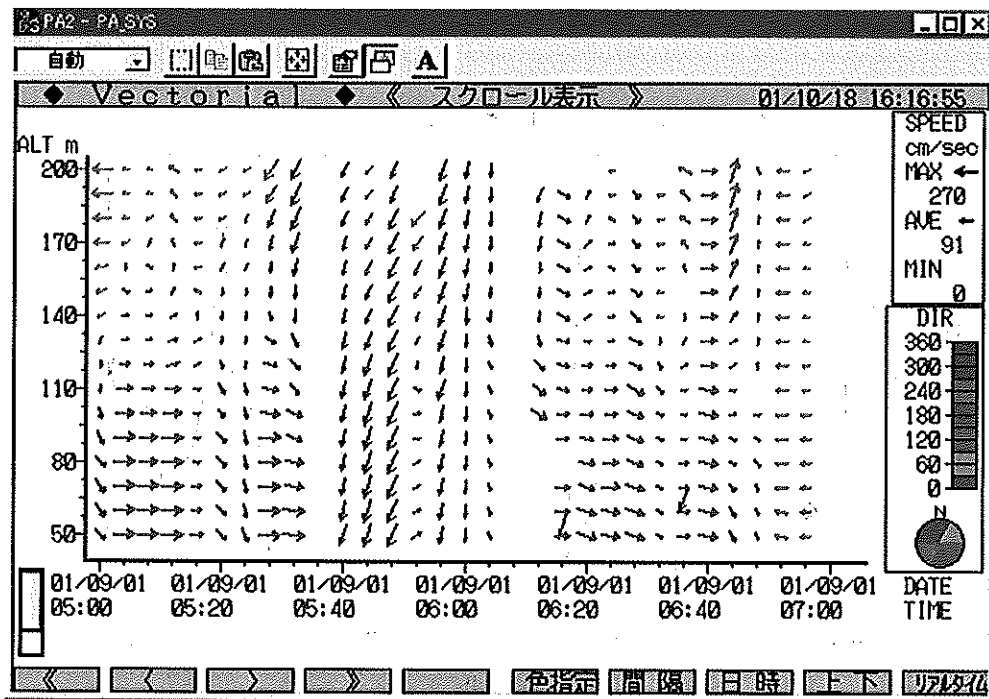


図15 音波レーダーによって観測された高度に対する風向風速の時間変化（平成13年9月1日5時～7時取得）

たことがわかる。また、この図の右側上部に、指定した高度までの平均風速、最高風速および最小風速値が指定した時間分解能間隔で表示されている。放球方式がセミダイナミック放球方式になったことによって、無風近い風ぎの時間帯に放球時間を設定することができ、本ドップラー音波レーダーのデータの時間変化を監視しつつ放球することができるようになった。

また、図15中の6時10分頃、高度100m以下の領域で観測データが欠測となっている。この領域のデータについて保存されているテキストデータを解析した所、周囲雑音の上昇は大きくないが、有効データ数(Valid data)が少なくなっていることが判明した。また、大気音波反射係数が小さくなっている傾向がデータから見られることから、大気の状態の変化時に大気擾乱が小さくなり、大気音波反射係数が小さくなったものと考えられる。以上の結果より、本ドップラー音波レーダー装置は大気球放球作業中の低層風の連続モニター装置として、大変有効な装置であることが実証された。平成13年9月1日6時に放球されたB30-69号機のセミダイナミック放球法の模様を図16に示した。図16-1は、観測装置が回転テーブル上の大型放球装置にセットされ、気球にヘリウムガスを充填している様子を示している。図16-2は、気球にヘリウムガスの充填が完了し、気球がローラー車から解放される直前を示している。図16-3は、気球がローラー車から解放された直後を示している。図16-4は、気球が一気に大型放球装置の上に立ち上がっていく様子を示している。図16-5は、気球のカラーが解放され、観測器が大型放球装置より放球され、気球が上昇していく様子を示している。

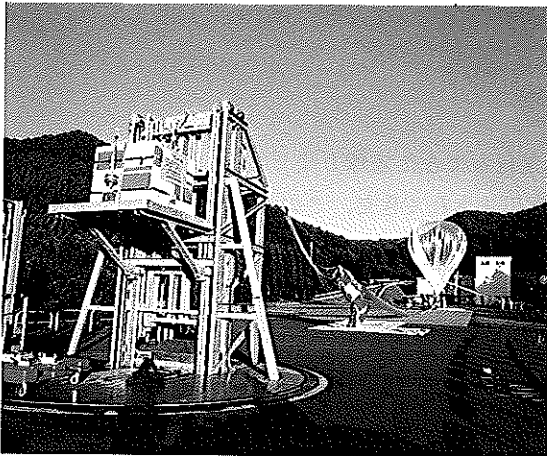


図 16-1 観測装置を大型放球装置にセット

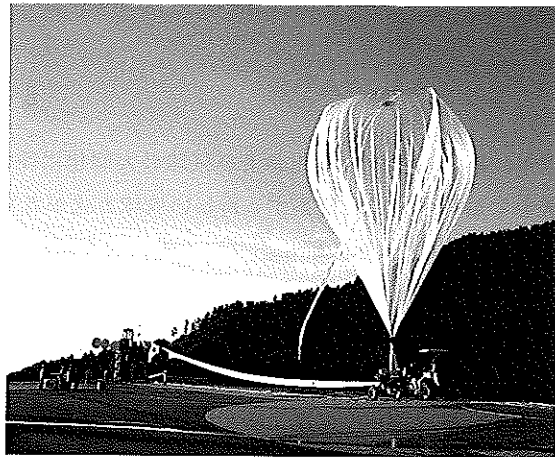


図 16-2 気球が解放される直前

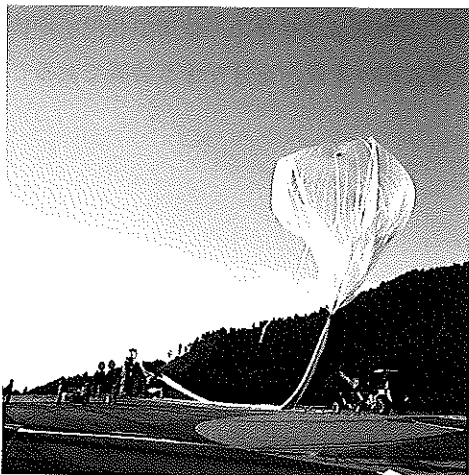


図 16-3 気球が解放された直後

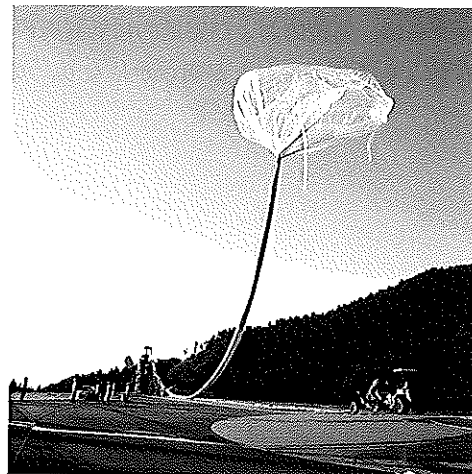


図 16-4 気球が一気に立ち上がっていく様子

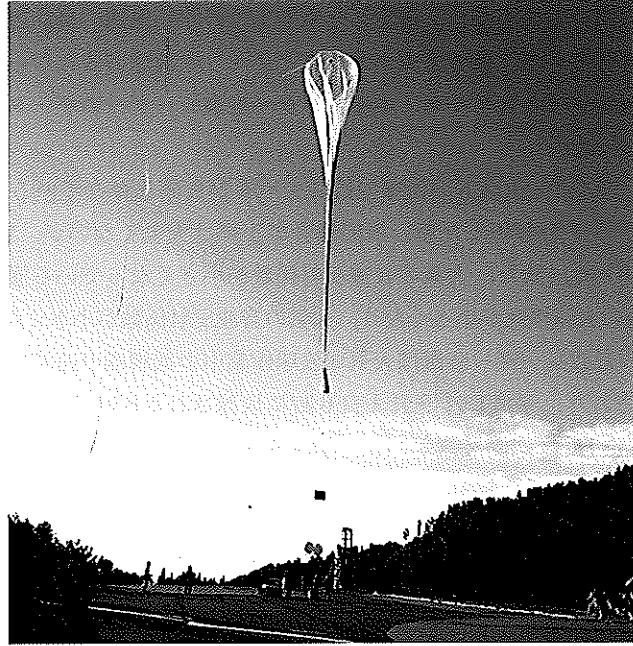


図 16-5 観測器が放球され、気球が上昇していく様子

6. まとめ

近年、観測機器の大型化および気球の大型化に伴い、従来行ってきた放球方法である「立て上げ放球方法」の長所を生かし、欠点を是正する新しい放球方式が考案され実用化されてきた。この方式は「セミダイナミック放球法」と呼ばれ、気球頭部にヘリウムガスを充填終了までは、従来の立て上げ放球法と同じであるが、充填後、ローラー車のローラーを跳ね上げることで一気に気球を解放し、気球を回転テーブル上に設置されたランチャー（大型放球装置）上に立て上げる方法である。この放球方法は、気球を一気に放球装置の上に立て上げる方式であるため、放球時の地上から数百mまでの風向風速を正確に把握する事が放球の正否を決定する大きな要因である。このため、平成12年度に地上から約1,500mまでの高さの風向風速を定量的に連続測定するためにリモートセンシング方式のドップラー音波レーダー装置を設置した。

本論文ではドップラー音波レーダー「PA-2」の機能・仕様・特徴について述べ、ドップラー音波レーダーによって得られた風向・風速観測データと既設ベントタイプ型風速計との比較検討を行った。その結果、本ドップラー音波レーダーは、連続的および定量的に低層風観測が可能であり、大気球放球作業中の低層風状況を把握する上で大変有効な手段であることが明らかになり、安全・確実な大気球放球の支援が充分できる装置であることが示された。

謝 辞

本ドップラー音波レーダーのアンテナ部および屋内筐体の設置工事にあたり、ご助力をいただいた、宇宙科学研究所三陸大気球観測所の現地スタッフの皆様に感謝いたします。

参 考 文 献

- [1] 竹内・近藤「大気科学講座1 地表に近い大気」、東京大学出版会（1981）

- [2] 山口・渡辺「ドップラー音波レーダーPA-2型」, 超音波 TECHNO Vol.10 No.2 (1998)
- [3] Akiyama H., J. Nishimura, M. Namiki, Y. Okabe, Y. Matsuzaka and H. Hirose : A new static launch method for plastic balloons, Adv. Space Res. Vol.3, No.6, pp.97-100, 1983
- [4] Akiyama H., J. Nishimura, N. Yajima, Y. Okabe, Y. Matsuzaka, M. Fujii, T. Yamagami, M. Namiki, S. Takanari, S. Ohta, H. Hirose and S. Saraapriya : An improvement of the static launch method, Proc. of 16th ISTS., Sapporo, pp.1903-1908, 1988
- [5] 並木道義, 松坂幸彦, 鳥海道彦, 内田右武, 平山昇司, 小松俊郎, 本田秀之, 井筒直樹, 斎藤芳隆, 太田茂雄, 山上隆正, 廣澤春任, 松本敏雄, 児玉康資, 本間容博 : 大型放球装置を使用した大気球の放球, 宇宙科学研究所報告, 特集 第41号, pp.25-34, 2001
- [6] Yamagami T., M. Namiki, Y. Matsuzaka, M. Toriumi, Y. Uchida, S. Hirayama, T. Komatsu, H. Honda, N. Izutsu, Y. Saito, S. Ohta, H. Hirose and T. Matsumoto : Semi-dynamic launching method for scientific balloons, COSPAR, 2000, in press
- [7] "REMTECH GENERAL CATALOGUE", REMTECH (1996)
- [8] "Operation and Maintenance Manual for the PA1, PA2, PA1-LR and RASS", REMTECH (2000)

