

ソフトウェア無線 (SDR) を用いた航空管制用 ModeS 信号の受信と 高層気象観測への応用

江 越 航*

概 要

上空を飛行する航空機からは、航空交通管制用のために種々の信号が送信されている。この信号を用いて、高層の気象観測データを得ることを試みた。信号の受信機はシングルボードコンピュータである Raspberry Pi に、ソフトウェア無線用の USB ドングルを接続することで構築した。この受信システムを科学館の屋上に設置して、航空機から送信されるデータを変換することで、上空の気象データを直接得ることができた。本稿では、その手法、および結果について述べる。

1. はじめに

気象は毎日の生活に非常に密着した現象であり、人々の関心を引くテーマである。気象を理解するためには、大気の状態について、地表面だけでなく、上空を含めて立体的にとらえることがより効果的である。「大気の状態が不安定」なときに、しばしば集中豪雨等に見舞われるが、この現象は上空の観測データと合わせて理解することで、より説得力が増す。

上空の気象データは、気象庁による観測で、気球にラジオゾンデ (気象観測器) を吊り下げて飛揚させる方法や、地上から電波を発射するウィンドプロファイラによって上空の風を観測することが行われている。しかし、いずれも観測点はまばらであり、その他の地域の上空の気象状況は、これらの観測データを補完した、数値予報データに頼っている。

一方、上空を飛行する民間航空機からは、航空交通管制用のために、種々の信号が送信されている。ホームページには、この信号を受信することにより、飛行している民間航空機の位置をリアルタイムで表示するフライト追跡サイトも存在している。この信号を、高層の気象観測データとして活用することができれば、現在地の上空の観測値を得ることができる。[1]

さらに近年、ソフトウェア無線という技術が広く用いられるようになってきた。これは従来、無線機においてア

ナログハードウェアとして実装されていた変調器、復調器、検出器などの機能を、パソコンのソフトウェアによって実現する無線通信技術である。ソフトウェア無線用の USB ドングルを用意し、PC の USB ポートに差し込むことで、簡単に受信器が構築できる。

これらの技術を組み合わせることで、今まであまり活用されていない航空機からのデータを用いて、科学館上空の気象現象の解析を行うことを試みた。

2. 航空管制用信号の受信

2-1. 航空管制信号

航空管制において、航空機の位置を知るためのレーダーには、レーダーからの反射波を受信することで航空機の位置を捉える一次監視レーダーの他、レーダーが発射した電波を航空機に搭載されているトランスポンダが受信して、所定の応答を返す二次監視レーダー (SSR) というシステムが使われている。

二次監視レーダーの中でも、特定の航空機だけに質問電波を送って、その航空機だけから応答を返す方式がある。このような機能を ModeS と呼んでおり、現在ではほとんどの航空機のトランスポンダにこのシステムが搭載されている。

近年はさらに、航空機が自ら自機位置などの情報を周囲に常に発信する ADS-B (Automatic Dependent Surveillance-Broadcast: 自動位置送信・監視機能) という機能が搭載されている。この電波を受信して航空機の位置を表示する Flightradar24 というアプリがよく

*大阪市立科学館 学芸員
e-mail: egoshi@sci-museum.jp

知られている。

航空機に搭載されたトランスポンダからは、1090MHz の波長で応答メッセージが送信されている。ModeS で送信される応答メッセージはプロトコルが規格されており[2]、送信されるこれらのデータから、上空の気象条件を知ることが可能となる。

2-2. ソフトウェア無線

従来、放送電波を受信するラジオなどの受信器では、周波数帯に応じた高周波回路や、AM・FMなどの復調回路を、アナログ素子を用いて作られていた。

これらの回路を、ソフトウェアで置き換えた、ソフトウェア無線 (SDR: Software Defined Radio) というものが登場している。これは、パソコンに受信用ソフトウェアをインストールすることで、アナログ素子を用いて行っていた処理を実現するものである。機器としては小型の USB ドングルで販売されており、この機器でアナログの電波を PC が処理できるデジタルデータに変換する。PC に SDR ソフトをインストールすることで、AM 放送から短波放送、航空無線に至るまで、広帯域の受信機として受信可能になる。

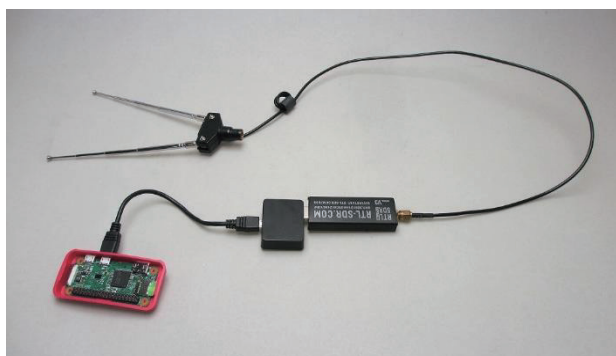


図1 ソフトウェア無線とシングルボードコンピュータ

3. 受信機の準備

3-1. アンテナの設置

ModeS 信号の受信は、小型のアンテナでも十分可



図2 屋上に設置した 1090MHz アンテナ

能だが、より広い範囲の航空機からのデータが受信できるよう、屋上に専用のアンテナを設置した。ModeS 信号は航空機から 1090MHz の電波で応答が返ってくるので、アンテナもこの周波数に感度があるものを取り付けた。

3-2. 受信用コンピュータ

ソフトウェアラジオを受信するためのコンピュータとして、安価なシングルボードコンピュータである Raspberry Pi Zero WH を用いることとした。これを受信器として利用するためには、Raspberry Pi に OS をインストールしたのち、ソフトウェアラジオの制御、modeS 信号を受信、データの取り出し等のソフトウェアをインストールする必要がある。

これらのソフトウェアを個別にインストールするのは非常に手間がかかるが、Raspberry Pi の OS に組み込む形でパッケージとして配布されている受信用ソフトウェアがある。今回はそれを利用した。

今回用いたのは Raspberry Pi Zero WH である。この装置は 32bit であるので、これに対応した FlightAware から配布されている、OS の書き込み用イメージをインストールして使用した。

OS のインストールを行うと、Raspberry Pi には航空機が発信している ModeS 信号を受信・解析するための dump1090 というソフトウェアが起動する。このソフトウェアは受信した電波を、便名や位置、方位、速度などのデータに変換するので、外部から適当なポート番号にアクセスすることで、受信したデータを取り出すことが可能となる。

3-3. データ解析用コンピュータ

Raspberry Pi の適当なポートに外部の PC からアクセスすると、受信した航空機のデータを取り出すことができる。例えば、8080 ポートに接続すると、図3のように現在受信している航空機の情報が、地図上に表示される。

航空機からは、ModeS プロトコルに沿って、多様な

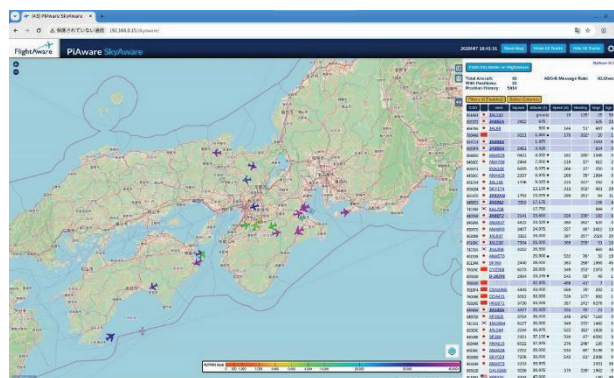


図3 信号受信の様子

データが送られてくる。ポート 30002 でアクセスすると、現在受信しているデータが、Beast AVR 形式で出力される。

今回、目的とするのは気象データであるが、ModeS で送られるデータには、直接気象データは含まれていない。しかし、次節で述べるように、いくつかのパラメータを組み合わせることにより、気温、および風向・風速を求めることが可能になる。

4. 気象データの算出

4-1. 必要なデータフォーマット

受信した ModeS データから気象データへの変換は、ホームページ上の記事を参考に、以下の手順で行った[3][4]。

ModeS の電波は、データを入れるフィールドが、1 回につき最大 56 ビットしかない。そこで、地上からの質問電波に対し、どの形式(DF: Downlink Format)で返答するかが決められている。

今回は、DF21 で指定されたダウンリンク形式の信号を受信する。この信号には、さらに BDS (Comm-B Data Selector) というデータの中身を示す識別符号がある。今回は BDS50 および BDS60 の識別子のある信号を利用する。各信号のデータの内容は次の通りである。

- ・ DF21 BDS50
トラック角度、対地速度、真対気速度
- ・ DF21 BDS60
機首方向、指示対気速度、マッハ数

合わせて、DF17 の信号も受信する。これはいわゆる ADS-B で、地上からの質問電波に関わらず、自動的に送信されている信号である。

- ・ DF17 高度、緯度、経度

これらの値は、一括で送信される訳でなく、問い合わせに対して、必要なデータが応答されている。そこで、各機体の識別番号であるスコークをもとに、同じ航空機について、これらのデータを名寄せする必要がある。

4-2. 気象データの算出

航空機は風によって流されて飛行するため、飛行中は大気との相対速度である対気速度が必要となる。一方、航空管制のためには、地面に対する速度である対地速度が重要である。そこで、前節で得たデータのうち、真対気速度から対地速度の差を求めれば、風速・風速が求められる。

気温については、マッハ数と対気速度から求められる。マッハ数 M_a は、流体の流れの速さ v (この場合は対気速度)と音速 a の比で定義される。

$$M_a = v/a$$

一方、理想気体の音速 a は、比熱比 γ 、気体定数 R 、モル質量 M 、温度 T から

$$a = \sqrt{\gamma RT/M}$$

で求められる。このためマッハ数と対気速度が分かれば、上 2 式より気温が求められることになる。

5. 高層気象観測

5-1. データ受信例

図は、2026 年 4 月 7 日 21 時から 1 時間の間に、同じ機体で DF17、および DF21 の BDS50、BDS60 のすべての信号を受信できた航空機の位置を示している。この時は、およそ 1,500 件のデータを受信している。

科学館を中心に、遠くは四国沖からのデータを受信しているが、多くは紀伊山地より北寄りを飛ぶ航空機からの信号となっている。一方、科学館の北側は高層マンションがあり見通しが効かないため、相対的に受信データが少なめになっている。

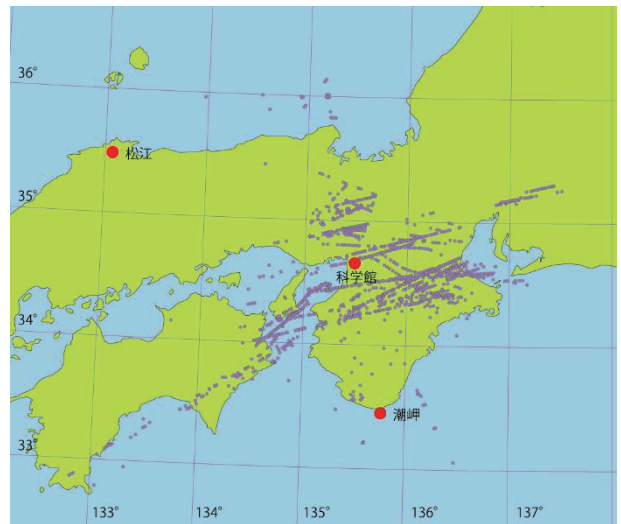


図4 航空機からのデータ受信例

5-2. 気象データ

このデータのうち、科学館を中心とする、東経 135～136 度、北緯 34.2～35.2 度の 1 度×1 度の範囲のデータを選び、前節の方法に基づいて、上空の温度と風速を算出したグラフを図5、6に示す。

グラフには、同じ時刻の潮岬、松江での高層気象観測データも示した。

データのばらつきはあるものの、概ねラジオゾンデによる高層気象観測と矛盾のない結果が得られている。測定結果は、航空機の最大高度に対応して、高度 12,500m までのデータとなっている。また高度 5,000m 以下では、測定データのばらつきが大きくなっている。

今回のデータでは、潮岬・松江のうち、科学館から遠い松江の観測データの方がより近い値になっている

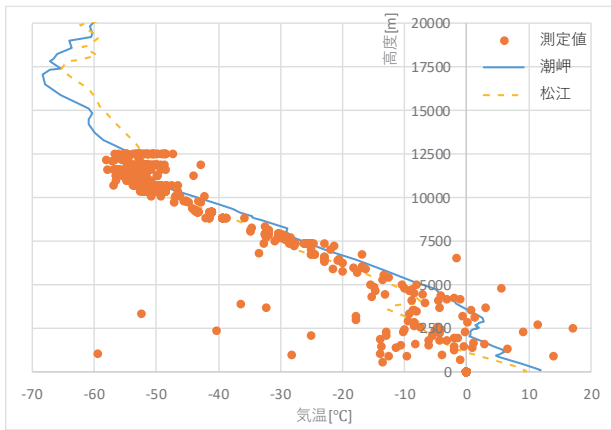


図5 上空の気温

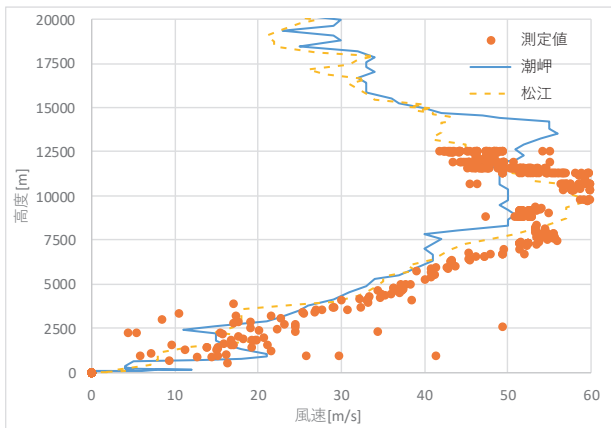


図6 上空の風速

が、理由の判定にはさらに多くの観測が必要である。

さらに科学館に近い狭い範囲の値を得るため、科学館を中心とする、0.5 度×0.5 度の範囲でグラフを描かせてみたところ、高度 6,000m 以下の範囲ではほとんどデータが得られなかった。

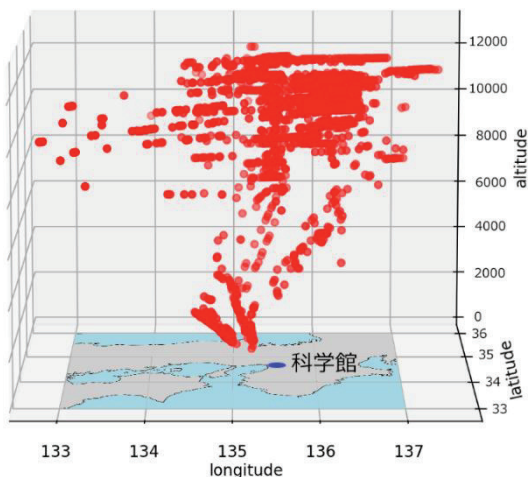


図7 科学館周辺の3次元的な航空機受信データの分布

この原因を調べるため、今回受信したデータの立体的な分布をプロットしてみると、図7のように低高度から

の受信データは、関西国際空港へ進入する航空機からのデータに集中していた。

航空路の関係上、科学館の近辺では DF21 信号の受信がしにくくなっている可能性が考えられる。そのため、低高度からの上空の気象データを得るには、ある程度広範囲のデータを受信する必要があることが分かった。

6. おわりに

上空を飛行する民間航空機から発せられる ModeS 信号を受信して、高層の気象観測データを得ることを試みた。信号の受信システムは、ソフトウェア無線用の USB ドングルをシングルボードコンピュータである Raspberry Pi に接続することで、容易に構築できた。

このシステムで、上空を飛行する航空機からの信号を受信し、気象データに変換できることが確かめられた。ただし受信データの妥当性を判定するには、さらに多くのデータを受信して確認する必要がある。

しかしこの方法を用いれば、ラジオゾンデによる観測よりも簡易に、より細かい時間範囲で、高層気象データを得ることができる。さらにデータの活用方法を精査することで、集中豪雨など都市部で特有の気象現象解明にも活かせると考えている。

気象現象の普及となる科学館における気象の展示は、一部の気象科学館を除くと意外に少ない。特に、上空の気象観測データを活用しているところはほとんどない。科学館上空の気象の高層断面図をリアルタイムで表示すれば、全く新しい展示手法を提供できると考えられる。

謝辞

本研究は JSPS 科研費 JP22K02976 の助成を受けたものです。

参考文献

- [1] 橋本大志, 森修一, 航空交通管制用信号を用いた二次レーダー気象観測システムの観測点拡充、精度評価、および公開用データの作成, 日本気象学会 2023 年度秋季大会講演予稿集, 171, B205
- [2] The 1090 Megahertz Riddle, <https://mode-s.org/1090mhz/>
- [3] ナチュラル研究所 RaspberryPi ModeS による高層気象観測, https://www.ishikawa-lab.com/RasPi_ModeS.html
- [4] atc2met Data Publication Web Site, <https://atc2met.nipr.ac.jp/data/about/index.html>