

## ナノ分解能気圧センサを用いた可搬型 インフラサウンド観測システムの開発

村山貴彦\*・今西祐一\*\*・綿田辰吾\*\*・大井拓磨\*\*\*・  
新井伸夫\*・岩國真紀子\*・野上麻美\*

### Development of a Portable Infrasound Observation System based on the Nano-Resolution Barometric Transducer

Takahiko MURAYAMA\*, Yuichi IMANISHI\*\*, Shingo WATADA\*\*, Takuma Oi\*\*\*,  
Nobuo ARAI\*, Makiko IWAKUNI\* and Mami NOGAMI\*

#### Abstract

We report on the development of a low-cost, portable observation system of infrasound. The system consists of the nano-resolution pressure transducer Model 6000-16B manufactured by Paroscientific Inc., USA and pressure hoses (flexible polyvinyl chloride product) for reducing wind noise. Field tests were made at Isumi, Japan (IS30), one of the CTBT infrasound monitoring stations. As a result, the noise level at the frequency range from 0.01 to 10 Hz was found to be on the order of  $10^{-2}$ – $10^{-3}$  Pa when the wind speed was less than  $0.2 \text{ ms}^{-1}$ . The wind noise reduction system indicated similar performance with the stainless pipe array employed in the CTBT monitoring system even in the strong winds reaching  $8.0 \text{ ms}^{-1}$ . Comparison with the microbarometer Model MB2000 manufactured by Martec Tekelec Systems, France in the frequency domain confirmed that the two sensors produce almost identical spectra above 0.02 Hz. The portable system was then installed at the Kurokami-Seto station of Japan Meteorological Agency near Mt. Sakurajima, which is now exploding frequently at the Showa crater. Comparison with the microbarograph Model MB2005 (successor of MB2000) again confirmed that our system is able to record the infrasonic signals from volcanic explosions in the wide frequency band up to 10 Hz.

*Key words : Infrasound, sensor, digital quartz resonator, CTBT, Volcanic explosion*

#### はじめに

インフラサウンドとは、通常、周波数が 20 Hz よりも低い音波のことを指す。ヒトの耳は周波数 20~20000 Hz の音（可聴音）しか感じることができないため、ヒトはこのインフラサウンドを普段実感することはない。そしてよく知られているように、空気の粘性による音波の減衰は、周波数が高くなるほどその効果が大きくなるため、可聴音の

帯域で会話をしているヒトの声は、遠くへ伝わることはない。これに対して、可聴音より低周波のインフラサウンドにおいては、伝播中の減衰が小さいことから、適切な観測装置を用いれば、数百 km から場合によっては数千 km もの遠方でも捉えることが可能である。

インフラサウンド観測が注目され始めたきっかけは、ビキニ環礁で行われたアメリカの核爆発実験によって発生した微気圧波（気圧計で観測されたことからこのように表現）を、日本の潮岬で捉えたことであろう（Yamamoto, 1954）。このとき核爆発実験によって発生したインフラサウンドが遠方でも観測できることが確認され、その後の研究によって、大気中の核爆発実験の監視にインフラサウンド観測が利用されるようになった。

その世界的な観測ネットワークが CTBT (Comprehen-

2011年8月19日受付, 2011年10月27日受理

\*一般財団法人日本気象協会,

\*\*東京大学地震研究所,

\*\*\*東邦マーカンタイル株式会社.

\* Japan Weather Association,

\*\* Earthquake Research Institute, the University of Tokyo,

\*\*\* Toho Mercantile co., ltd.

sive Nuclear Test-Ban Treaty : 包括的核実験禁止条約)によって整備されつつある。CTBTは、地下、海中および大気圏内のいかなる場所においても核爆発実験を行わないことを取り決めた国際条約であるが、条約上、それが遵守されることを実効的に検証するため、核爆発実験を監視するための観測網を整備・運営することを定めている。その検証システムを担う監視網は、主に地下核実験を監視するための地震学的監視施設、核爆発実験特有の放射性核種や放射性希ガスを検知するための放射性核種監視施設、海洋で行われる実験を監視する水中音波監視施設、および、主に大気中の核爆発実験を監視する微気圧振動監視施設(インフラサウンド観測網)により構成される。このインフラサウンド観測網は、全世界で60地点に設置される予定となっている(図1参照)。これらの施設では、超低周波音の中でも長周期(0.01~10 Hz程度)の音波を、気圧変動(0.01~数十Pa程度)として捉えることとしている。このインフラサウンドの世界的監視ネットワークを構成する観測施設の一つとして、千葉県いすみ市に約2 km四方に6点の観測点をもつアレイ観測施設(条約上の地点No.: IS30)が設置され、2004年末より観測を行っている(新井ほか, 2007)。

インフラサウンドは、核爆発実験だけではなく、地震による地面の震動や津波波源の生成、火山の爆発的噴火のような大規模なもののはか、雷や隕石の落下(火球や流星)などによっても発生する。さらに、このような自然現象ばかりではなく、ロケットの発射、航空機、工場プラントなどの人間活動によっても発生する。このようにインフラサウンドの音源は多様であるため、インフラサウンド観測施設では日々様々なシグナルを検出している。このような中、大気中の核爆発によるシグナルを的確に識別するには、普段観測される様々なシグナルの音源や特性をあらかじめ把握しておく必要がある。

日本気象協会では、観測された波形からシグナルの発生源を特定できるように、観測開始以来、日常観測されるシグナルについて解析を行い、知見を蓄積してきている。その中には、発生した時刻が明らかで規模の大きい事象、例

えば地震や火山噴火、ロケットの発射に起因する波群など、発生源を特定できたものもある。しかし、多くは到来方向がわかるだけで位置も含め発生源が充分に解明できとはいえない。それは、IS30以外のCTBT観測点で検出されることがまれであり(シグナルの発生源で励起されるインフラサウンドの振幅が小さいためと思われる)、IS30一箇所のアレイ観測データだけでは波群の到来方向を推定することはできても、発生源までの距離を推定することが難しかったのである。

発生源が多様なインフラサウンド・シグナルを精度良く解析するには、地震観測網のように観測点を国内に多数配置すればよい。しかし、IS30のようなCTBTの観測施設を多数点に展開することは、経済的な面から現実的ではない。

そこで、IS30で用いられている高感度微気圧計MB2000と同様の観測能力があり、それよりも安価なインフラサウンド・センサを使った観測システムの開発を計画した。開発に当たっては、単に安価であるだけでなく、対象とするシグナルや観測目的に応じて、一箇所数10分程度の観測を繰り返し実施するような移動観測も可能となるよう、容易に設置・移動ができるコンパクトなシステムとすることを条件に加えた。可搬型の観測システムは、すでにCTBTの暫定事務局(CTBTO/PTS)によって開発されているが(CTBTO Preparatory Commission, 2011)、センサとしてMB2000の後継機(MB2005, Ponceau and Bosca, 2010)を用いているそのシステムは、バッテリーを含めると一箇所あたりの重量は100 kg以上と、可搬型といえどもその設置・移動は容易ではない。

このような中、Paroscientific社(アメリカ)は、ナノ分解能の水晶振動式絶対圧力計(Model 6000-16B Barometer)を開発した(Paroscientific, Inc., 2009)。このセンサは、保証される測定レンジが800~1,100 hPaで、地上から大気境界層上端付近(高度1,500~2,000 m)の範囲内で安定した測定が可能である。また、測定分解能はサンプリングレートによって変化し、1 Hzサンプリングでは分解能0.0001 Pa、IS30と同様の20 Hzサンプリングでは分解能0.01 Paで計測できることが期待される。また、筐体の大きさは一辺の長さが約6 cmの立方体とコンパクトな形状をしており、小型の観測装置を製作するには適している。さらに、データはデジタル出力されるため、高価なデータロガーを用いなくても、シリアル通信でパソコンや小型のサーバーに取り込むことができることから、安価なデータ収録システムを構築するうえで有利である。このような優位性を踏まえ、ナノ分解能の水晶振動式絶対圧力計を用いて、可搬型のインフラサウンド観測システムを試作したので、その内容について報告する。

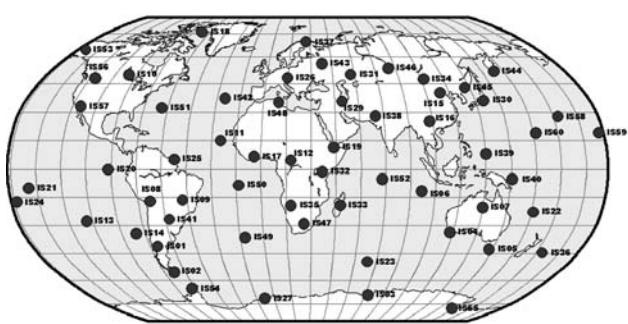


図1. CTBT infrasound monitoring Network

## ナノ分解能気圧センサ

開発した観測システムの心臓部である、米国 Paroscientific 社製のナノ分解能の水晶振動式絶対圧力計 (Model 6000-16B Barometer, 以降 6000-16B と称する) について、以下に概括する。

### 〈水晶振動式センサの基本構造〉

水晶振動子に電圧をかけると水晶が振動する。この振動する周波数を一般的に発振周波数というが、この発振周波数は水晶に加わる圧力によって変化する。水晶振動式センサは、この水晶の特性を利用したもので、荷電された水晶振動子の発振周波数を測定することによって圧力を検出している。6000-16B センサの内部構造と外観を図 2 に示す。外部からの圧力は、ベローズ機構を通じ水晶振動子 (Quartz Crystal) に伝達される。水晶振動子にはあらかじめ励磁電圧 (6~25 V) が与えられており、加えられた圧力に応じた共振周波数が output されるようになっている。水晶振動子の内部気室 (Internal Vacuum) は  $10^{-8}$  Pa の絶対真空になっており、この値が基準圧となる。また、水晶の振動周波数は温度によっても変化するため、温度補正用の水晶振動子も内蔵されている (Temperature Sensor)。センサの形状や大きさは、外観図からわかるように、一辺が約 6 cm の立方体でコンパクトなサイズとなっている。

### 〈動作原理〉

水晶振動子の発振周波数 (公称 35 kHz) は、発振周波数より高周波の基準周波数 (クロック周波数) によって測定される (周波数カウント方式)。この方法では、クロックのカウント時にクロック波形のタイミングによる最大 “1 カウント” の「カウント誤差」と、信号の立ち上がり、立ち下がり時の jitter による「タイミング誤差」の二つの誤差によって、分解能は制約される。従来方式では、発振周波数をカウントする時間を測定開始から終了までの時間 (この場合サンプリング周期) とし、その時間を基準となるクロック周期 (68 ナノ秒) で測っていた。このため、例えば、1 秒サンプリングのときの分解能は 1 ppm (百万分の 1) レベルが限界であった。

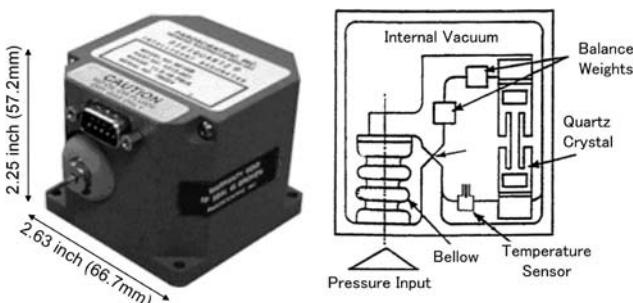


図 2. 水晶振動式絶対圧力計 (Model 6000-16B Barometer, 米国 Paroscientific 社製) の外観と基本構造

### 〈ナノ分解能の実現〉

誤差を小さくして分解能をナノレベルに高めるために、二つの方法がとられている。一つは周波数カウント方式において、カウント処理を行う時間を発振周期の 4 サイクル分 (114 マイクロ秒) とし、サンプリング周期よりも短い周期で処理 (オーバーサンプリング) することで、データの S/N 比を改善する方法である。6000-16B では、カウントに使用するクロック周期を 68 ナノ秒 (周波数 14.7 MHz) から 17 ナノ秒 (周波数 59 MHz) に変更して精度を上げている。もう一つの方法は、カウントするデータ (発振周期の 4 サイクル分) に対して、デジタルローパスフィルタ (IIR フィルタ) を適用し、高周波ノイズ (周波数 10~100 Hz もしくはそれ以上) を低減していることである (これら 2 つの方法を使って処理することをメーカーでは IIR ナノカウント法と呼んでいる)。なお、この方法では、タイムドメインの分解能はフィルタのカットオフ周波数に依存する。カットオフ周波数は、ユーザーによって設定可能 (0.023 Hz~1.4 kHz) となっている。カットオフ周波数と分解能の関係を図 3 に示す。この図から、例えばカットオフ周波数 0.7 Hz では分解能 0.0016 ppm となり、分解能は従来の 1000 倍程度向上していることがわかる。また、IS30 の観測に合わせて 20 Hz サンプリングで計測する場合、カットオフ周波数は 11 Hz もしくは 5.5 Hz の設定となり、その分解能は 0.14 ppm (0.014 Pa) または 0.045 ppm (0.0045 Pa) となることが期待される。

### システムの製作

可搬型インフラサウンド観測装置の基本的なシステム構成を図 4 に示す。システムは、大きく分けて①風ノイズ低

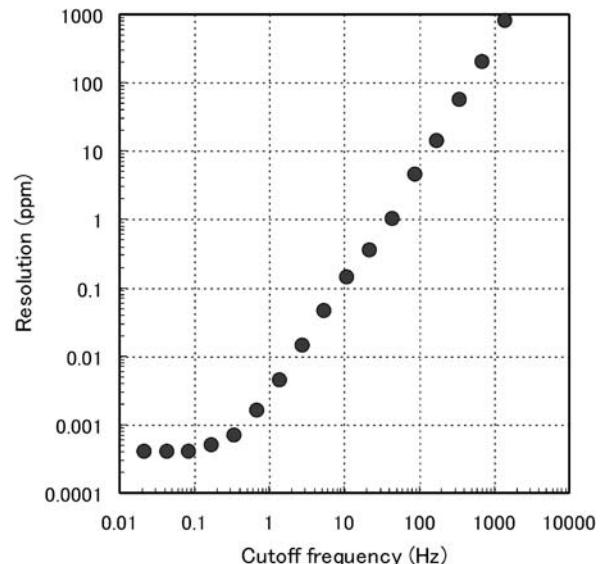
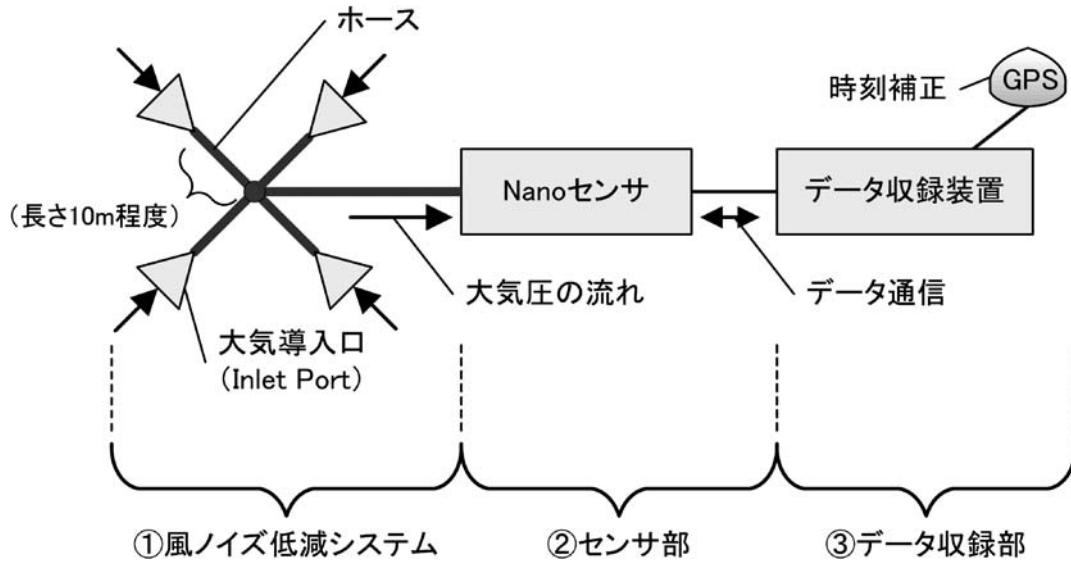


図 3. 水晶振動式絶対圧力計 (Model 6000-16B Barometer) の測定分解能



減システム、②センサ部、および③データ収録部の3つの部分から構成される。発生源から伝播した微小な気圧変動は、①の複数の大気導入口からなる風ノイズ低減システムを経て、②のセンサでその圧力変化が計測される。計測されたデータは、③のデータ収録装置で保存されるという仕組みである。

センサ以外に関する部分の製作の概要について以下に示す。

### 1. 風ノイズ低減システム

振幅が0.1~数Pa程度の微小なインフラサウンドの観測では、主に風によって引き起こされる大気中の乱流が作る微小気圧変動が観測される。この風によるノイズは、対象とする周波数帯域の全域にみられるため、周波数フィルタ処理による除去は困難である。ノイズ低減方法については、1950年代から盛んに研究されてきており(Hedlin et al., 2003)、IS30に代表されるCTBTの観測点では、装置を林の中に設置して風の影響を少なくするとともにセンサの通気口(Inlet)を工夫することで、風によるノイズの低減に取り組んでいる。

IS30で展開されている風ノイズ低減システム(WNRS: Wind Noise Reduction System)の模式図を図5に示す。このシステムでは、インフラサウンド・センサ(MB2000)を中心に、直径約18mの範囲にステンレス・パイプを円形放射状に配置している。パイプの先端は通気口(合計96個)となっており、これにより18mよりも小さく局所的な乱流ノイズを低減することが可能となっている。なお、パイプの中間4箇所にマニホールド(Secondary summing manifold)を設けており、中にはピンホール状の共鳴抑制装置を配置して、パイプによる共鳴を抑制している。また、各通気口には害虫や埃の侵入を防ぐためのプラスチック製

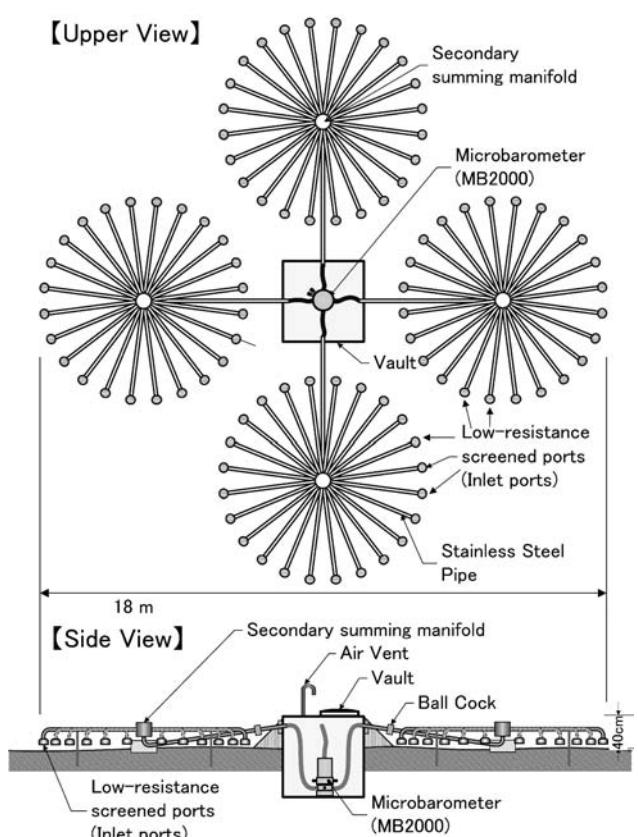


図 5. IS30で展開されている風ノイズ低減システム

のフィルタ(Inlet Ports)が取り付けられた上に、防汚、ノイズ低減の効果を高めるため、通気口の周辺を砂利で覆っている。

このようなステンレス・パイプで構成された低減システムは、温度や圧力によるパイプ自体の変形がなく、また耐

久性が高いことで、長期間安定してノイズを低減できる利点がある。しかし、可搬型を目的とした観測装置ではこのような大がかりな装置は適さない。

CTBTOでは、臨時観測用にポータブルな観測装置を開発しているが、この装置では、ステンレス製のパイプの代わりに多孔性のホースが用いられている。その形状は、気圧計の先にマニホールドを介して15mの長さの多孔性ホース6本を放射状に伸ばしたものである(図6)。ホースを拡大した写真を図7に示す。このホースは、外径15mm(内径10mm)程度の多孔質ゴムでできており、表面には無数の微細な穴が空けられていることから、線上に数多くのセンサを並べたのと同様の効果が期待できる。また、材質の特性から自由に曲げることが可能で、展開や移動が容易である。通常このようなホースは、灌水・施肥・空気配給等の農業用地中埋設システムに利用されている(新井ほか, 2010)。

この多孔性ホースをここで開発したシステムに利用することも検討したが、火山噴火の観測などで火口付近に設置する場合には、火山灰などの微粒子がホースの目詰まりを引き起こすことが懸念されることから、本システムでは、微粒子や圧力変化に強く、移動や展開が容易な耐圧ホース

(散水用、内径10mm)を利用することにした。この耐圧ホースは、ホームセンターなどで一般的に入手可能なものである。ノイズ低減システム(ホースアレイ)として組み上げる際には、ホース間やホースとセンサとの接続には、耐圧性を考慮しスウェジロック社製のステンレス継ぎ手を用いた。また、ホースアレイの先端(Inlet)には、ホース内に害虫や埃の侵入を防ぐためのフィルタを取り付けることがよいと考え、IS30で使われているものと同様のフィルタを用いることとした。なお、ホースアレイの形状(大気の導入口の数とホースの長さ)は、観測場所の状況に応じて変更することとした。野外に展開する際の注意点としては、ホースアレイが爆発などの衝撃波や風によって揺らされると、それ自身が振動ノイズの発生源になる可能性があるため、ホースの固定はしっかり行うことが必要である。しかし、ホースが圧迫されて変形するとホース内の体積に変化が生じ、正確な測定ができなくなる場合もあるため、固定には注意が必要である。

このように組み上げられた耐圧ホースによる風ノイズ低減システムは、多孔性ホースのように無数のInletはないが、展開したホースアレイの口径よりも小さなサイズの風ノイズを低減することが期待される。

## 2. 収録装置と時刻補正

6000-16Bセンサからは、RS-232CまたはRS-422を介して気圧値がデジタルで出力される。データ収録は、この出力をパソコン(または同様の機能を持ったサーバなど)で受け取り、ディスクに記録している。なお、高い時刻精度かつ高速でのサンプリングが必要とされるようなときは、以下に述べるように、データを受け取るパソコンの側において、ハードウェア/ソフトウェアの両面で工夫を行っている。

6000-16Bにて気圧データを得るためにには、パソコンからセンサに対し“P3”または“P4”的コマンドを、一定の書式に従って送らなければならない。センサは、P3コマンドが送られた場合は、コマンド受信時刻の測定値を返し、P4コマンドが送られた場合は、そのコマンドを受信した後、指定された時間間隔で連続的にデータを出力する。P4コマンドを使った場合、データが出力されるタイミングや間隔はセンサ側の都合で決まり、ユーザーがコントロールすることはできない。したがって、外部クロックに同期してサンプリングを行うためには、P4ではなくP3コマンドを用い、それをセンサに送る(トリガーをかける)タイミングをコントロールする必要がある。この場合、各サンプルにタイムスタンプをつけることはパソコン側で行うため、パソコンのOSの時計を外部クロックに正確に同期させ、そのうえで一定のレートでサンプリング動作を繰り返すようになければならない。

パソコンのOSクロックを正確に保つ方法はいろいろあ

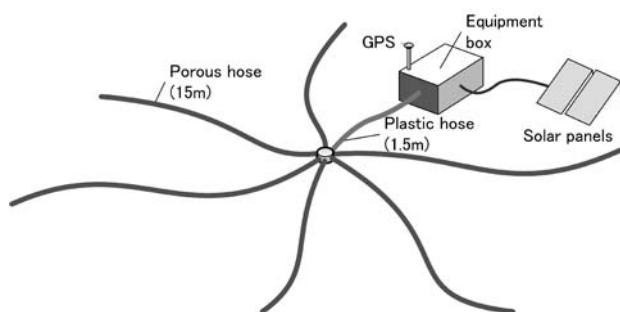


図6. CTBTが所有するポータブル・インフラサウンド観測システム



図7. 多孔性ホースの外観

るが、野外での観測を前提とすると、もっとも使いやすい時刻ソースは GPS であろう。GPS から得られる時刻情報をパソコンに取り込んで同期させる方法にもいろいろあるが、ここでは GPS センサとして Garmin 15L を使用し、Linux 上の ntpd と組み合わせることにした。Garmin 15L はハンディ GPS などに使用されているパーツであり、日本ではマーズ 15 という名称でネットショップなどで売られている。特長として、RS-232C インターフェースを備えており、それを通してパソコンと直接接続することができる。単に NMEA データが出力されるだけでなく、時刻に同期した 1PPS 信号 (TTL レベル) が出力されるので、パソコン側にそれを受け取るハードウェア/ソフトウェアがあれば、マイクロ秒オーダーの時刻精度を実現することができる。1PPS 信号を受け取るには、パソコンに内蔵されたシリアルポートが必要で、USB シリアル変換器は使えない。筆者らが知る限り、Windows OS には 1PPS 信号を受け取る機能はない。そこで FreeBSD または Linux を使用することが必要となるが、これらも一長一短である。FreeBSD の場合にはカーネルレベルで PPS との親和性が比較的高いが、高速でのサンプリング動作（ディスクのアクセス）に問題が生じる場合がある。一方 Linux の場合は、PPS を使用するにはカーネルにパッチをあてる必要があり、実績が不十分なのに加えてドキュメントが非常に混乱している（註：バージョン 2.6.34 以降のカーネルでは PPS 機能が実装されるようになった）。このような事情により、筆者らは当初は FreeBSD を採用して比較的低いサンプリングレート (20 Hz) の観測を実現した。その後、サンプリングレートを 100 Hz に上げる必要が生じるにあたって、OS を Linux にスイッチすることとした。Linux に PPS 機能を附加したものは LinuxPPS と呼ばれる。その際 LinuxPPS 上で Garmin 15L をリファレンスクロックとして ntpd を動作させた。

このようにカスタマイズされた OS を実際に野外において試した結果、GPS 衛星からの電波が受かっているときは、ntp の jitter は 10 マイクロ秒以下になることが確認された。問題点としては、Garmin 15L の受信している衛星数が 3 つ以下になると 1PPS 信号が出力されないため、時刻精度が低下することがあげられる。

パソコンの OS クロックを外部クロックに正確に同期させることができたら、次の課題は、一定の間隔でサンプリングを行うためのデータ収録ソフトウェアを作成することである。他のプロセスの実行に妨害されずに外部デバイスとの通信を規則的に行うという動作は、Windows や Linux などの汎用マルチタスク OS では実現が難しいものであり、そうした場合にはリアルタイム OS を使用するのがよい解決法である（たとえば Imanishi, 2001）。しかし、ここでは上述のようにカスタマイズされた Linux を使用

する必要があったため、非リアルタイム OS 上でユーザー プロセスとして実現できる範囲で開発を行った。

データ収録ソフトウェアは C 言語で作成した。シグナルとタイマーの組み合わせにより、一定の時間間隔ごとに、サンプリング動作を行う関数が呼び出される。この関数内では、P3 コマンドをセンサに送り、センサからの応答を受け取って、現在時刻とともに画面およびディスクに出力する。この動作は 10 ms 以内に完了するので、100 Hz のサンプリングレートも可能である。

### 3. 装置のアセンブル

#### 〈センサの据え付け〉

センサを不安定な場所や未固定なまま地面の上に置いていると、付近を通過する自動車（時には火山噴火などの爆発による衝撃波）などによって、センサがカタカタと振動してしまいノイズの原因となることがある。このため、センサは安定した地面に固定する必要がある。

開発したシステムでは、センサの設置用に、厚さ 10 mm の真鍮製の板を使った専用の三脚台座を製作し、その台座の上にセンサを置くことにより、センサの振動ノイズを防いだ。

#### 〈電源〉

本システムでは、6000-16B センサの出力がデジタルであることから、データ収録用にラップトップ・パソコンを用いている。ラップトップ・パソコンは、消費電力が大きくバッテリーで電源供給することは現実的ではないことから、AC 電源を用いることにした。なお、安定した電力を供給するため、無停電電源装置 (UPS) を介している。

#### 〈観測用パソコンと電源装置の収納〉

データ収録用パソコンおよび UPS をポリプロピレン製の収納ケースに収めた。パソコンは廃熱量が大きいため、密閉された収納ケースでは、外気温が高い季節にその内部の温度が上昇し、パソコンが熱暴走する可能性がある。これを防ぐために、収納ケースの側面に通気口を設けた。また、通気口には 1 mm メッシュの網と不織布を貼り、害虫や火山灰などの微粒子がケース内に侵入することを防いだ。

### フィールド・テスト

本システムに採用したセンサの観測能力や試作した観測装置の動作安定性を確認し、課題点を抽出するために、フィールド・テストを実施した。その概要を以下に示す。

#### 1. IS30 との比較観測

6000-16B センサの観測能力（分解能）や動作の安定性を調べるために、簡易的な観測装置を試作し、IS30 において MB2000 との比較観測を行った。また、あわせてホースアレイによる風ノイズの低減効果を調べる観測も行った。比較観測の内容を以下に示す。

## (1) 実施期間

- ・2009年9月29日～2009年11月17日（50日間）

## (2) 実施場所

- ・CTBT 微気圧振動監視施設 IS30（地点：IS30H1, 配置図は図8を参照）

(35°18'27.92"N, 140°18'49.54"E, ELEV=20 m)

## (3) 観測の方法

6000-16B センサの動作安定性と風ノイズ低減システムの効果を確認する目的で、6000-16B センサを3台用いて同時観測を行った。比較観測の機器構成を図9に示す。風ノイズ低減システムは、IS30 の低減システム（パイプアレイ）の形状に合わせて、4ポートの十字型ホースアレイとした（一つの耐圧ホースの長さは10m）。センサは、低減効果を比較しやすいように、ホースに接続するものと、しないものの2種類の構成とした。なお、ホース間およびホース－センサ間の接続にはステンレス製の継ぎ手（スウェジロック社製）を利用した。

データ収録には Linux パソコンを用いた。ここでは3台のセンサそれぞれに収録用パソコンを接続したが、それぞれの観測データを比較するためには、3台すべてのパソコンの時刻が一致している必要がある。そこで、パソコンの時刻同期をさせるために、タイムサーバーを設けた。なお、タイムサーバーには、ntp で GPS の PPS (Pulse Per Second) 信号に同期させている FreeBSD のパソコンを用いた。

観測条件として、6000-16B センサの仕様ではカットオフ周波数を設定することとなっており、ここではセンサの測定分解能を考慮し 5.5 Hz に設定した。また、サンプリング周波数は、MB2000 と同様に 20 Hz とした。

## (4) 観測結果

比較観測結果から明らかとなったことについて、以下に示す。

## ■6000-16B および観測装置の動作安定性について

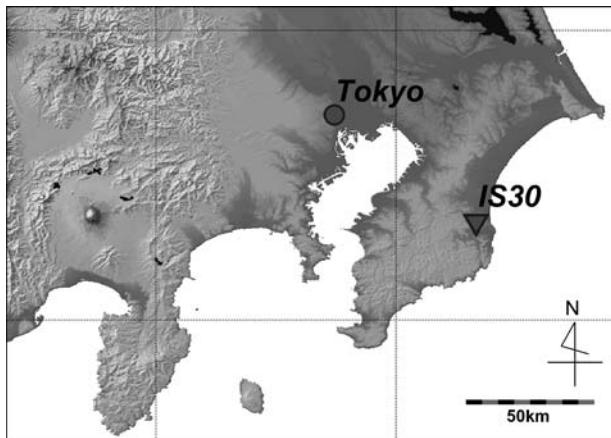


図8. IS30 の位置図

IS30 との比較観測を行った約 50 日間でのデータ取得率はほぼ 100% であり、非常に安定して動作することが確認された。

## ■6000-16B の観測ノイズの推定

観測条件を同一にした 2 台の 6000-16B (SN111244, SN115129) を用い、両者の差を時系列上で求め、その差のパワースペクトルを得ることでセンサの観測ノイズ・レベルを推定した。ただし、ランダムノイズが混入している場合、時系列上での減算ではその和を得ることになってしまうことから、時系列データの差のスペクトルを 2 で割ったものをここでの評価に用いた。得られたパワースペクトルを図 10 に示す。

この図から、観測ノイズ・レベルは、0.03～0.2 Hz で  $10^{-7} \text{Pa}^2/\text{Hz}$  程度であること、それよりも周波数が高い領域 (3 Hz 付近まで) では増加する傾向のあることがみてとれる。なお、3 Hz より高周波側でパワーが減少しているのは、デジタルフィルタのカットオフ周波数の影響である。このように観測ノイズのレベルが 0.2 Hz 付近よりも高い周波数で増加する傾向を示す原因については今後精査が必要であるが、いずれにしても今回評価した帯域での観測ノイズのレベルは、 $10^{-2} \sim 10^{-3} \text{ Pa}$  程度であることが推察される。

## ■ホースアレイ (WNRS) の効果について

6000-16B にホースアレイを接続したもの (SN115129) と接続しないもの (SN115120) について、それぞれのパワースペクトルを比較した。強風時 (平均風速 5.0 m/秒、最大風速 8.0 m/秒の場合) の比較を図 11 に示す。

この図によると、周波数 0.3 Hz 以上の高周波帯域では、ホースアレイに接続したものの方が接続していないものに比べてパワースペクトルのレベルが小さくなっていることがわかる。ホースアレイは、10 m のホースを四方に伸ばし、その先端から空気を取り入れていることから、センサを 4箇所に配置し、その平均気圧を計測することと同等の効果が得られているものと考えられる。センサの間隔は最長で約 20 m となり、風速は平均 5 m/秒だったことから、周期 4 秒よりも短周期側 (0.25 Hz より高周波数側) で風によるノイズの低減が期待され、得られた結果はこの推論と調和的である。

以上のことから、耐圧ホースを用いたホースアレイは、理論通りの風ノイズ低減効果を得られることが確認された。

## ■6000-16B と MB2000 との比較について

静穏時 (平均風速 0.2 m/秒以下) における、6000-16B と MB2000 のパワースペクトルを比較した。なお、6000-16B はホースアレイに接続したもののパワースペクトルである。また、比較に際し、両センサのフィルタの周波数応答特性を考慮に入れた。図 12 に両センサで 10 分間に観測さ

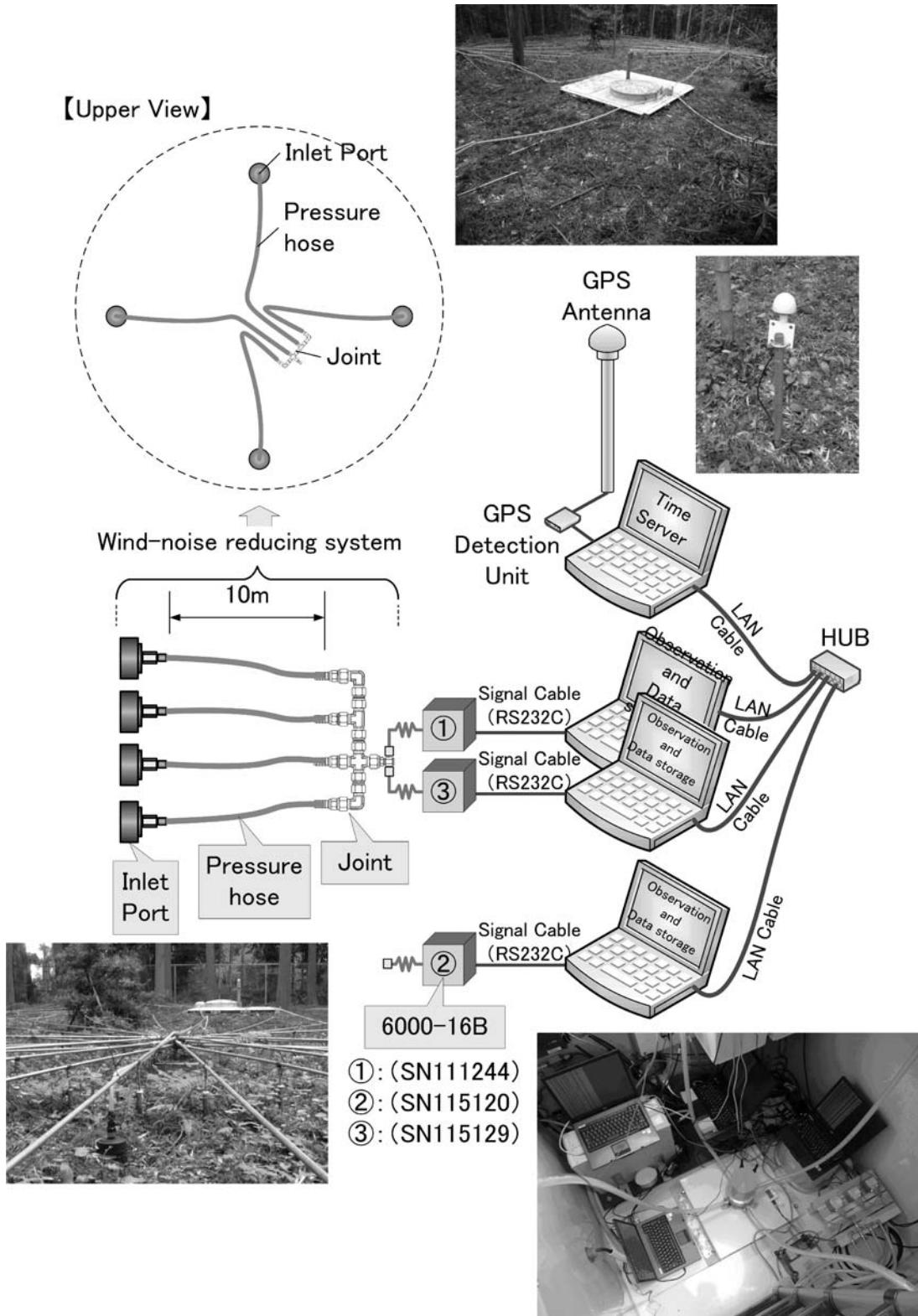


図 9. IS30 との比較観測に用いたインフラサウンド観測システムの構成と観測風景

れたデータのパワースペクトルを示す。この図から、全周波数帯域(0.01~10 Hz)で、MB2000 とほぼ同じパワースペクトルを示していることがわかる。

## 2. 桜島における臨時観測

6000-16B センサの観測特性を確認するために、発生源が明瞭で、かつ発生頻度の多い桜島昭和火口の爆発的噴火を対象として、桜島島内で臨時観測を行った。また、同時に、

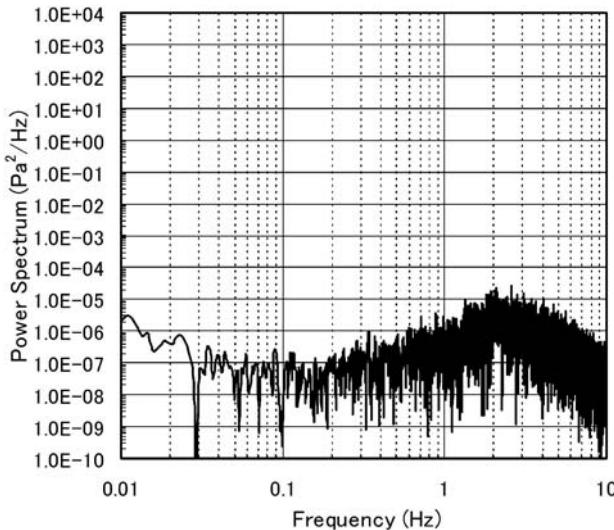


図 10. 風の静穏時における観測ノイズのパワースペクトル

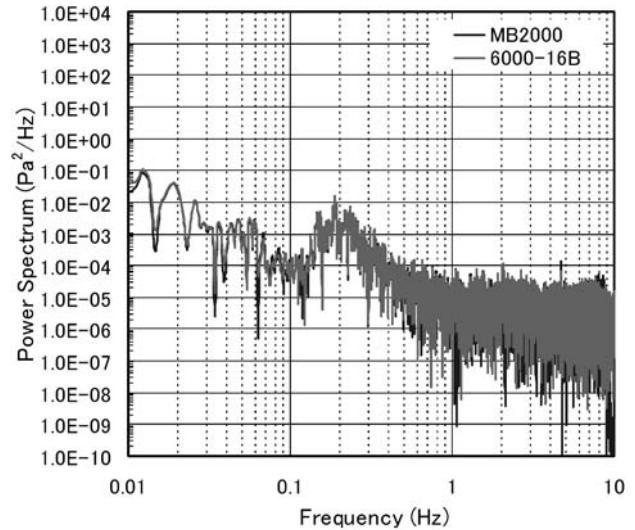


図 12. 風の静穏時における、6000-16B と MB2000 のパワースペクトルの比較（両センサとも風ノイズ低減システムあり）

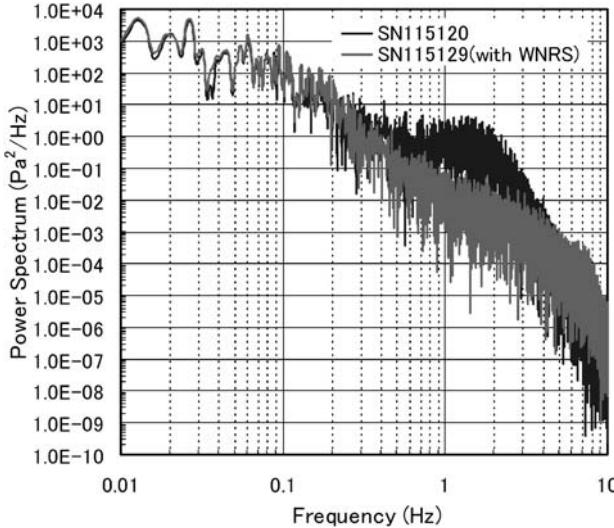


図 11. 強風時（平均風速 5.0 m/秒、最大風速 8.0 m/秒）における、ホースアレイ（WNRS）を接続した場合と接続していない場合のパワースペクトルの比較

劣悪な環境下における可搬型観測システムの動作安定性についても確認をおこなった。以下に、その概要を示す。

#### (1) 実施期間

- ・2010 年 3 月 29 日～2011 年 2 月 2 日（約 10 ヶ月）

#### (2) 実施場所

- ・気象庁黒神瀬戸空振観測点（旧名：桜島 D 点送信局、図 13 参照）  
(31°34'25"N, 130°42'44"E, ELEV=92.8 m)

#### (3) 観測の方法

桜島の臨時観測用に構築した観測装置の機器構成を図 14 に示す。それぞれの装置の概要是 3 章で示した通りであるが、風ノイズ低減用ホースアレイは、観測点周辺が観測局舎や複雑な地形の影響を受けやすいうことから、大気の導

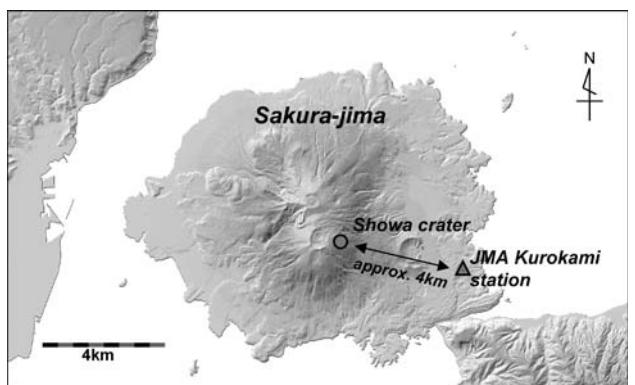


図 13. 気象庁黒神瀬戸空振観測点の位置図

入口は 6 個とし、耐圧ホースの長さ（センサから大気導入口まで）を 6 箇所すべて 20 m となるように設定した。

観測では、観測目的毎に 3 台の 6000-16B センサを整備し、気象庁黒神瀬戸空振観測点の観測局舎の室内およびその周辺に展開した。また、観測データのリファレンスとして、アネロイド式微気圧センサ（MB2005、東京大学地震研究所所有）を用いた。このセンサはいすみの IS30 で利用されているセンサ（MB2000）の後継機にあたり、CTBT の観測網をはじめ世界的に広く利用されているものである。観測場所および観測装置の展開の状況について、それぞれ図 15、図 16 に示す。図 16 からわかるように、風ノイズ低減用のホースアレイは 1 式とし、ホースの分岐継ぎ手（ステンレス製）を用いて 6000-16B (SN115120) と MB2005 で共有した。なお、図中には、気象庁の他に気象研究所や東北大が設置したマイクロフォン式の空振計が示されているが、当時、同観測点では、各種センサの比較試験が行われていた。これらのセンサの比較結果については、別途報告

する予定である。

ここで、観測の設定条件は、6000-16B のカットオフ周波数を 22 Hz, サンプリング周波数を 100 Hz とした。これによって、MB2000 との比較は、カットオフの影響を考慮に

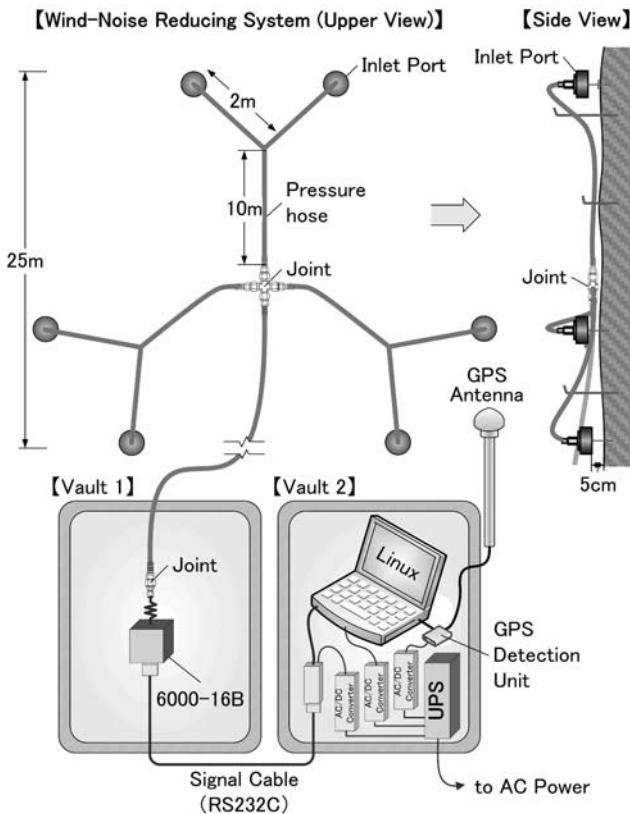


図 14. 臨時観測用に試作した可搬型微気圧振動観測システムの構成図

入れ、10 Hz より低周波数側について行うものとした。

#### (4) 観測結果

■6000-16B センサおよび観測装置の動作安定性について  
桜島における臨時観測では、火山灰による多量の微粒子が舞う状況や夏季の高温下（筆者らが測定した装置収納ケース内の温度は、最大 38°C を記録した）の劣悪な環境にもかかわらず、欠測無く安定して動作することが確認された。

時刻補正について、GPS 衛星が 4 つ以上捕捉されているときには、データの取得率はほぼ 100% で、実際上充分なパフォーマンスを得ることができた。明瞭ではない原因でデータ収録が停止することもあったが、おそらくその大半は気圧センサとの間のシリアル通信でエラーが発生したためだと思われる。

#### ■局舎の影響

局舎の影響を調べるために、局舎の内外で同時観測を実施した。観測中は、風ノイズ低減用ホースアレイの有無による影響をさけるために、局舎内のセンサもホースアレイを接続しない状態とし、両方の観測装置は、局舎の内と外という違いの他は同じ条件になるように設定した。検証方法は、時系列波形と周波数応答特性（振幅、位相）について、それぞれの場所で観測されたデータどうしを比較した。図 17 に観測結果を示す。図中の (a) は局舎の内外で観測された波形の時系列図、(b) はそれぞれのスペクトル図、および (c) は両者のスペクトル比（局舎内/屋外）を表す。観測波形の比較図 (a) によると、両者の波形はよく一致しているが、スペクトル図 {(b), (c)} をみると、周波数 3~6 Hz の帯域で、局舎内のパワーが屋外に比べて減少していることが確認できる。その他の事例においてもほ



図 15. 気象庁黒神瀬戸地点の局舎と観測装置の配置状況写真

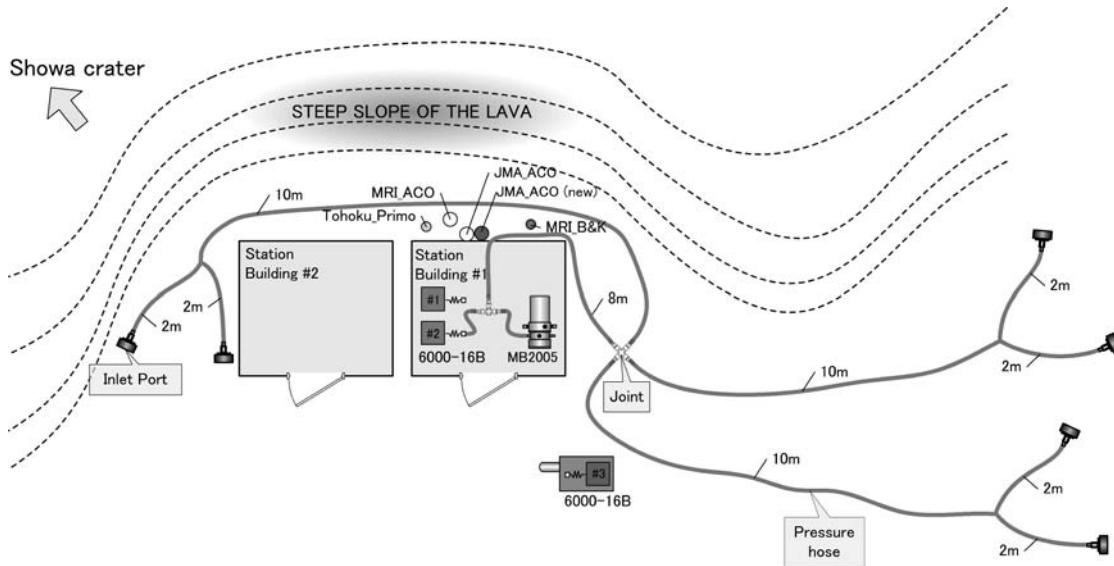


図 16. 気象庁黒神瀬戸地点の局舎と観測装置の配置図

ほぼ同様の傾向がみられるところから、この周波数帯で局舎の影響を受けると思われるが、その詳細なメカニズムは不明で今後の検討課題である。

#### ■水晶発振式センサ(6000-16B)の観測能力(MB2005との比較)

水晶発振式センサ(6000-16B)の観測能力を検証するために、MB2005の観測データと比較した。具体的には、波形の時系列と周波数応答特性(振幅、位相)について両センサのデータを比較した。なお、比較に際して次の要件を考慮した。

- ・6000-16Bのサンプリング周波数は100 Hzであるが、MB2005とマイクロフォンのそれは200 Hzであるため、MB2005とマイクロフォンのデータを100 Hz間隔となるように間引いた。
- ・短周期から周期10秒程度の長周期成分までを比較できるように、爆発的噴火のシグナルの最大振幅の約3秒前から20秒程度のデータについて解析した(具体的には、スペクトル解析で使用したデータ数は $2^{11}=2048$ 個とした)。
- ・MB2005は、絶対圧と相対圧の2種類の値が出力されるが、比較では相対圧を用いた。
- ・周波数応答特性の検証では、センサ自身のフィルタ特性による位相遅れやゲインの低下、および観測時刻差(15 msec)を考慮(補正)した。

比較結果事例を図18に示す。図中の(a)は観測された波形の時系列図で、比較事例の波形の特徴がみてとれる。ここでは、周波数10 Hzまで比較できるように、観測波形に高周波成分が比較的多くみられる事例を示した。(b)および(c)は周波数応答特性を比較したもので、(b)は振幅特性(MB2005/6000-16B)、(c)は位相特性(MB2005-6000-

16B)を表している。

(b)から、周波数0.1~10 Hzの帯域で、両者の振幅比はほぼ1を示しており、6000-16Bはこの帯域でMB2005と同等の振幅値を得られることがわかる。また、(c)から、周波数0.1~10 Hzの帯域で、両者の位相差はほぼ0度を示しており、両者の位相差はほとんど無いことがわかる。

以上のように、フィルタ特性を考慮に入れてデータを補正することで、周波数0.1~10 Hzの帯域で6000-16BはMB2005と同等の観測結果が得られることがわかった。

#### ■気象庁空振計との比較

同地点に設置されている気象庁の現業用空振計(ACO社製超低周波マイクロフォン)との比較を行った。なお、両センサの比較は、すでに新井ら(2011)によって周波数特性(特に位相特性)に有意な違いのあることが確認されており、気象庁空振計は大規模な爆発噴火のような長周期成分を多く含む音波の場合、その応答特性から得られる時系列波形は、現象規模を過小評価する可能性のあることが示唆されている。ここでは、両センサの最大振幅値にどの程度違いがみられるかについて検証した。

昭和火口の爆発的噴火のうち爆発規模の異なる20事例について、空振計と6000-16Bセンサそれぞれが捉えたシグナルの最大振幅値 $\{(最大値-最小値)/2\}$ をプロットしたもの(図19)を示す。この図の相関解析結果は、回帰直線の傾きが0.53であることを示していることから、気象庁空振計は6000-16Bセンサの半分程度の最大値を与えることがわかる。この値は、センサの周波数応答特性から、シグナルの卓越周波数によって異なるものと考えられるため、気象庁空振計のデータから実際の最大振幅を推定する場合には適切な補正が求められる。

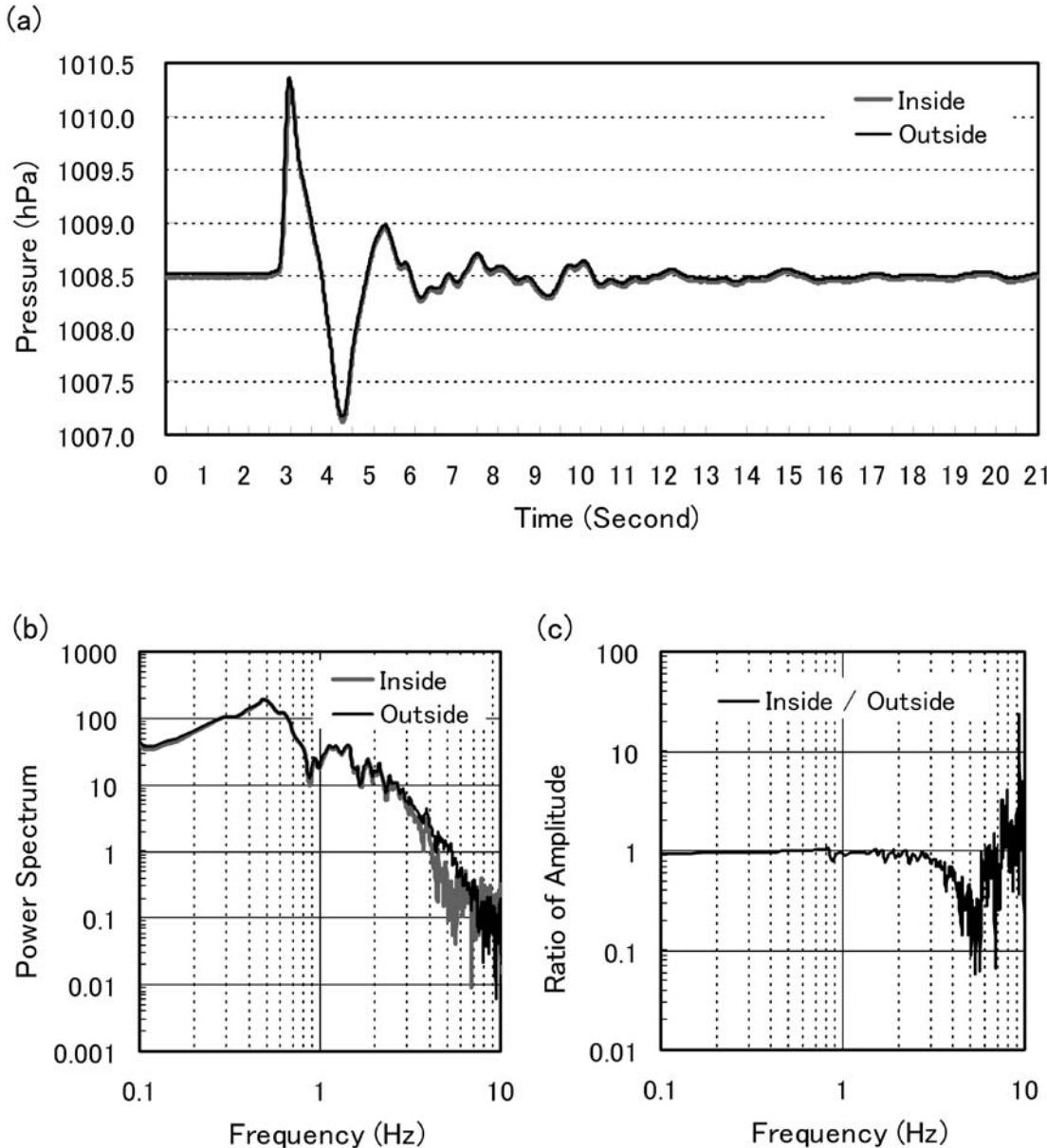


図 17. 局舎の内外の違いによる観測波形の比較

### おわりに

本研究では、低コストでコンパクトなインフラサウンド観測システムを開発することを目的に、米国 Paroscientific 社のナノレベルの分解能をもつ水晶振動式絶対圧力計 (Model 6000-16B Barometer) を利用した可搬型のインフラサウンド観測システムを試作し、フィールド・テストを行った。テストではナノ分解能の水晶振動式センサ (6000-16B) の観測能力を確認するために、CTBT のインフラサウンド観測網にも採用されて世界的に観測実績のあるアネロイド式微気圧計 (MB2000/MB2005) と比較した。

比較検証した結果、次のことが確認された。

- 6000-16B は、気象擾乱による大きな気圧変動から爆発

的な現象によって発生する微小な気圧変動（インフラサウンド）までも観測が可能で、インフラサウンドの観測能力は、周波数 0.01~10 Hz の帯域で MB2000/MB2005 と同等である。

- 6000-16B の観測ノイズ・レベルは、0.03~0.2 Hz で  $10^{-7} \text{ Pa}^2/\text{Hz}$  程度で、それよりも周波数が高い領域では増加する傾向がある。
  - 耐圧ホースを利用した複数ポートのホースアレイの風ノイズ低減能力は、CTBT が固定点で広く展開しているステンレス・パイプアレイの能力と同等である。
- 6000-16B は、MB2000/MB2005 とは異なり、測定レンジが広く、検定で保証されている 800~1,100 hPa の範囲で絶対圧を安定して測定できることから、MB2000/MB2005 より

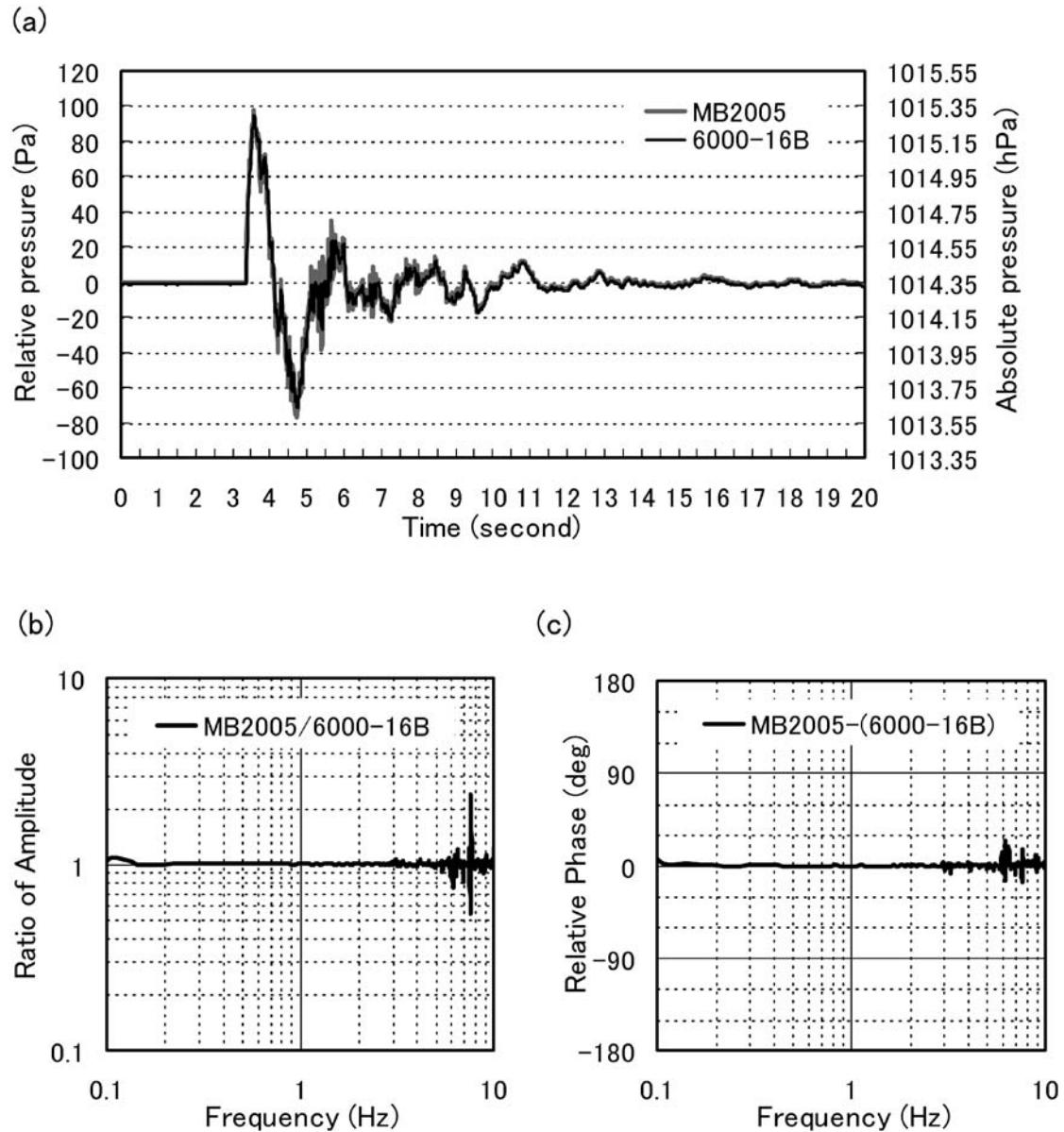


図 18. 水晶振動式センサ (6000-16B) とアネロイド式微気圧計 (MB2005) との比較

り有利であるといえよう。

一方、今回のフィールド・テストでは、正確な時計の保持に苦慮したが、ここでの経験がメーカーにフィードバックされ、現在はオプションで GPS によるタイムスタンプが付加されるタイプの 6000-16B が販売されている。また、専用のロガーが開発されつつあることから、今後は 6000-16B センサを用いた観測システムの構築が格段に容易にな

るであろう。

**謝 辞：**比較観測を実施するにあたり、気象庁本庁および鹿児島地方気象台に観測場所の提供など便宜を図っていただきました。また、気象研究所にはデータロガーの提供や観測データの収集にご協力頂きました。関係者のご配慮に感謝の意を表します。

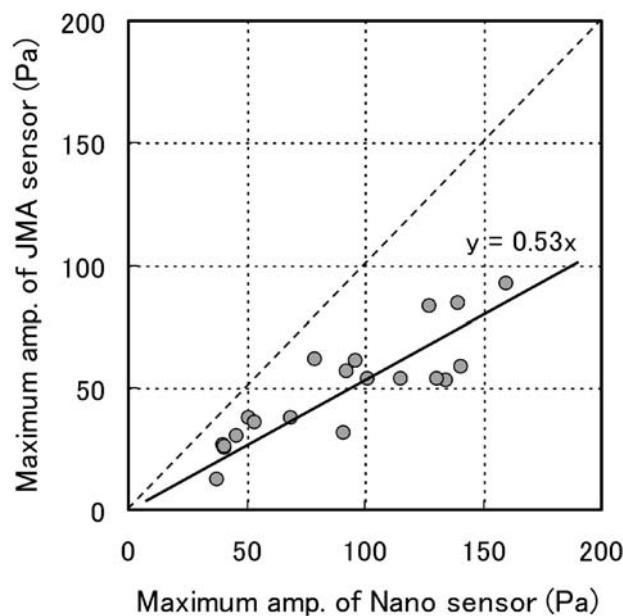


図 19. 水晶振動式センサ（6000-16B）と気象庁空振計との相関関係

## 文 献

新井伸夫・村山貴彦・野上麻美, 2007, インフラサウンドの観測

—観測施設の概要—, 日本音響学会秋季大会講演論文集, 899-902.

新井伸夫・村山貴彦・村田和則・岩國真紀子・野上麻美, 2010, インフラサウンドの観測—CTBTO 所有の簡易観測装置を用いた臨時観測—, 日本音響学会秋季大会講演論文集, 947-950.

新井伸夫・今西祐一・綿田辰吾・大井拓磨・村山貴彦・岩國真紀子・野上麻美・山里平・上田義浩・藤原善明・新堀敏基, 2011, インフラサウンドの観測—センサ（絶対圧型とマイクロフォン式）の比較—, 日本音響学会秋季大会講演論文集, 1191-1194.

CTBTO Preparatory Commission, <http://tfcs.ctbto.org/download/attachments/4849733/Portable+array.pdf?version=2&modificationDate=1304593136000>, 2011.

Hedlin, M.A.H., Alcoverro, B. and D'Spain, G., 2003, Evaluation of rosette infrasonic noise reducing spatial filters, *J. Acoust. Soc. Am* 114, 1807-1820.

Imanishi, Y., 2001, Development of a high-rate and high-resolution data acquisition system based on a real-time operating system, *J. Geod. Soc. Japan*, 47, 52-57.

Paroscientific Inc., <http://www.paroscientific.com/Nano-Resolution.pdf>, 2009.

Ponceau, D., Bosca, L., 2010, Infrasound Monitoring for Atmospheric Studies, Springer, 119-131.

Yamamoto, R., 1954, Bulletin of the Institute for Chemical Research, Kyoto University, Supplementary Issue November 1954, 120-33.