

## 低温環境下での空振計の性能評価 —南極観測での応用の可能性—

村松 弾<sup>1\*</sup>・市原美恵<sup>1</sup>・松島 健<sup>2</sup>・金尾政紀<sup>3</sup>・山本真行<sup>4</sup>

### Performance Test of Infrasonic Sensor in Low-temperature Environment — Potential for Application in Antarctic Observation —

Dan Muramatsu<sup>1\*</sup>, Mie Ichihara<sup>1</sup>, Takeshi Matsushima<sup>2</sup>, Masaki Kanao<sup>3</sup>, Masa-yuki Yamamoto<sup>4</sup>

(2022年12月12日受付; 2023年7月11日受理)

**Abstract:** For infrasonic monitoring in Antarctica, there is a need for infrasonic sensors with low power consumption and high resistance to low-temperature environments. A new-type infrasonic sensor (TYPE7744N/5002A) manufactured by ACO Co., Ltd. (Japan) with the cooperation of the Earthquake Research Institute, the University of Tokyo, achieves less than half the power consumption of existing models. To evaluate the applicability of the new sensor to Antarctic observation, we conducted a low-temperature ( $-30^{\circ}\text{C}$ ) test for four types of sensors, including the new one. We compared the results to those from a room temperature ( $21^{\circ}\text{C}$ ) test and examined changes in amplitude-phase characteristics based on a reference sensor (Model60Vx2, Chaparral Physics), proven in use in polar regions. There were no problems in the operation of the new sensor during the 30 days of the test. Spectral power ratio to the reference sensor changed up to 19% compared to the room temperature test, suggesting that the sensitivity fluctuates with temperature. Phase characteristics were not significantly affected by low temperatures. Future trials are desired to evaluate the long-term stability of the new sensor, e.g., by conducting experimental overwintering observations at Syowa Station.

**Keywords:** Infrasonic sensor, Antarctica, Infrasonic monitoring

**要旨:** 南極地域での空振観測を定常的に実施するためには、省電力かつ低温環境に耐えうる空振計が必要となる。株式会社アコーと東京大学地震研究所が共同開発した新型空振計 (TYPE7744N/5002A) は、既存の空振計の半分以下の消費電力を達成している。新型空振計の南極での使用について評価するため、低温環境

<sup>1</sup> 東京大学地震研究所。 Earthquake Research Institute, The University of Tokyo, 1-1-1 Yayoi, Bunkyo-ku, Tokyo 113-0032.

<sup>2</sup> 九州大学地震火山観測研究センター。 Institute of Seismology and Volcanology, Faculty of Science, Kyushu University, 2-5643-29 Shinyama, Shimabara, Nagasaki 855-0843.

<sup>3</sup> 情報・システム研究機構データサイエンス共同利用基盤施設。 Joint Support-Center for Data Science Research (ROIS-DS), Research Organization of Information and Systems, 10-3 Midori-cho, Tachikawa, Tokyo 190-8518.

<sup>4</sup> 高知工科大学。 Kochi University of Technology, 185 Miyanokuchi, Tosayamada, Kami, Kochi 782-8502.

\* Corresponding author. E-mail: dmuramatsu@eri.u-tokyo.ac.jp

下において極地で使用実績のある他機種との比較試験を実施した。4機種の空振計を $-30^{\circ}\text{C}$ の実験室内で30日間連続稼働させ、常温での試験結果と比較して振幅位相特性の変化を調べた。30日間の稼働期間で空振計の動作に問題は生じなかった。リファレンスセンサ (Model60Vx2, Chaparral Physics) に対する振幅比は常温での結果と比較して最大19%変化しており、空振計の感度は低温により変動すると思われる。位相特性については低温による影響は僅かであった。今後は昭和基地で試験的に越冬観測を行うなどして、長期間の安定性を評価する試験が望まれる。

キーワード： 空振計, 南極, インフラサウンド観測

## 1. はじめに

空振 (インフラサウンド) は人間の可聴限界 ( $\sim 20\text{ Hz}$ ) を下回る超低周波音のことを指す。空振は火山噴火、地震、気象、雷、津波、隕石落下などの自然現象や、核実験、化学爆発、宇宙探査機の大気圏突入などの人工的現象によって励起される。南極昭和基地周辺では、海洋波浪と大気のカップリングにより励起される微気圧擾乱 (microbaroms) (Yamamoto *et al.*, 2013; Ishihara *et al.*, 2015, 2017) や、氷河のカービング、海水流出、氷山の衝突などの雪氷圏特有の現象に由来すると考えられる空振が観測されている (Murayama *et al.*, 2017)。これらのシグナルを長期的に観測することは、極域における大気・海洋・雪氷・固体地球の多圏相互作用のメカニズムを理解し、地球温暖化に伴う極域表層環境の変動をモニタリングする上で重要になる (Kanao *et al.*, 2017; Kanao, 2018)。昭和基地では2008年に第49次南極地域観測隊によって最初の空振観測点が設置され、2013年からは3点のアレイ観測点として運用されている (Ishihara *et al.*, 2017)。また2013年以降はリュツォ・ホルム湾沿岸の露岩域と氷床上にも観測点が展開され (Murayama *et al.*, 2015)、ラングホブデ、スカーレン、ルンドボータスヘッタ、明るい岬の4地点で空振観測が行われている (図1a)。露岩域の観測点では、中央の保温箱にロガーと鉛蓄電池を設置してソーラーパネルによる発電・充電を行い (図1b)、空振計のセンサ部分は保温性の弱い木箱の中に設置している (図1c)。日照が得られず低温になる極夜期間も安定的に観測するためには、省電力かつ低温環境に耐えうる空振計を使用する必要がある。

本報告では、株式会社アコーが東京大学地震研究所と共同で新たに開発したマイクロフォン型空振計 (図2a; 以下、ACO 新型空振計と呼ぶ) の南極での使用可能性を評価する。旧型のアコー製空振計 (TYPE7144/3348) は気象庁の火山観測点などで運用されているが、感度の低下や振幅位相特性のずれ等が報告されている (市原, 2017; Yukutake *et al.*, 2015)。今回新たに開発された空振計 (TYPE7744N/5002A) ではこれらの問題点が改善され、感度や周波数特性も向上し (Yamakawa *et al.*, 2022, 2023)、かつ約  $35\text{ mW}$  ( $12\text{ V DC}$ , 電源装置およびセンサを含めた値) の低消費電力を実現している。本試験では低温環境下での性能評価に向けて、 $-30^{\circ}\text{C}$ で30日間の動作試験を実施した。

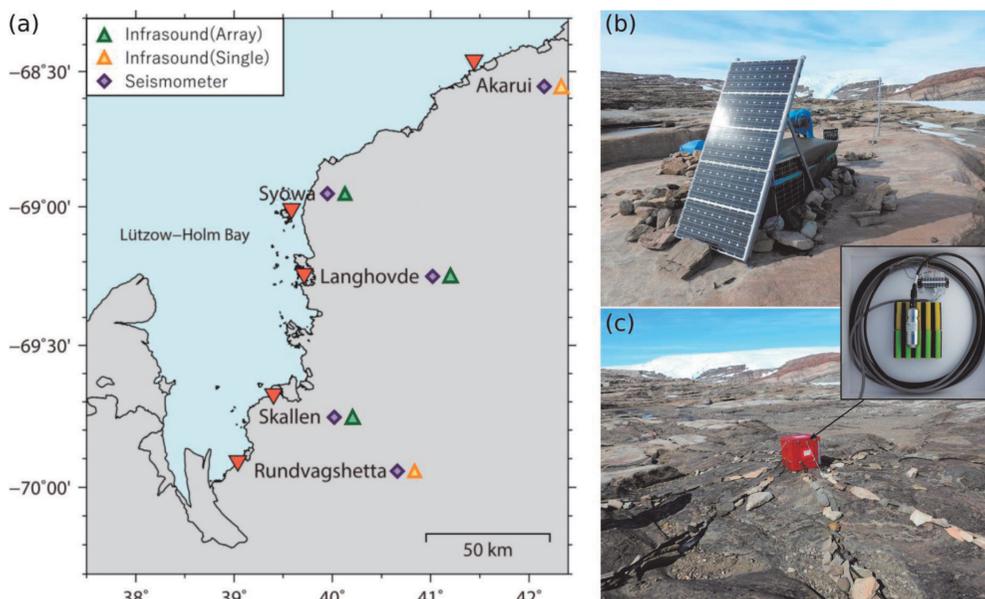


図 1 南極昭和基地周辺における空振観測. (a) リュツォ・ホルム湾沿岸の観測点分布. (b) 露岩域の観測点外観 (スカーレン). (c) 空振計センサ部分の設置外観.

Fig. 1. Infrasound monitoring network around Syowa Station. (a) Observation sites along the coast of Lützow-Holm Bay. (b) Observation site at Skallen. (c) Installation of the infrasound sensor at Skallen.

## 2. 手 法

### 2.1. 使用機器

本試験では、振幅位相特性の比較のため南極観測で使用実績のある他機種と ACO 新型空振計を並行で稼働させた。極地での使用実績の豊富な Chaparral Physics 製空振計（本試験では Model60Vx2 を使用、性能下限  $-40^{\circ}\text{C}$ ）をリファレンスセンサとして使用し、SH104（白山工業、ハイパスフィルタ OFF）、INF03（SAYA）、および ACO 新型空振計の 4 機種を比較した（表 1）。ACO 新型空振計と INF03 はシングルエンド出力であり（INF03 は  $1.65\text{V}$  を中心とした  $0\text{--}3.3\text{V}$  出力）、その他は差動出力に対応している。ACO 新型空振計は個体差を見るために 2 本同時接続して稼働させた。データロガーは LT-7700（白山工業、入力電圧レンジ  $\pm 20\text{V}$ ）を使用し、サンプリング周波数  $200\text{Hz}$  で収録した。ACO 新型空振計は専用の電源装置（TYPE5002A、1 チャンネル入力）を使用する必要があるが、本試験では最大 4 チャンネル入力対応の試作機（図 2a）を使用した。機材はプラスチック製のコンテナボックスに設置し（図 2b）、低温試験中はロガー・電源装置を発泡スチロール製の箱に入れて保温した（図 2c）。室内では GPS 信号を受信できないため、データロガーの自動時刻校正は OFF で収録し、電源はコンセントから AC で給電した。

表 1 本試験で比較した空振計の性能仕様. 動作温度の \* 印は動作実績値を示す.

Table 1. Specifications of infrasound sensors used in the test. The mark \* in working temperature denotes actual operating limits.

Sensor model (manufacturer)	Sensor serial number (SN)	Frequency range	Nominal sensitivity	Adjusted sensitivity	Power consumption (@12 V DC)	Pressure range	Working temperature
Model60Vx2 (Chaparral physics)	674	0.02–200 Hz	27.6 mV/Pa @1 Hz	NA (reference)	~150 mW	±360 Pa	-40~+60 °C
SI104 (Hakusan)	0007	0.1/0.05–1500 Hz (HPF ON/OFF)	1.02 mV/Pa (HPF OFF)	1.05 mV/Pa (HPF OFF)	~72 mW	±2000 Pa	-30*~+50 °C
INF03 (SAYA)	004	0.1–1000 Hz	20.0 mV/Pa	21.0 mV/Pa	~60 mW	±60 Pa	-90*~+50 °C
TYPE7744N/5002A (ACO)	11514		25.7 mV/Pa (ATT 0 dB) 8.1 mV/Pa (ATT -10 dB)	9.3 mV/Pa (ATT -10 dB)			
	11525	0.1–1000 Hz	23.4 mV/Pa (ATT 0 dB)	8.7 mV/Pa	~35 mW	±400 Pa	-20~+50 °C
			7.4 mV/Pa (ATT -10 dB)	(ATT -10 dB)			

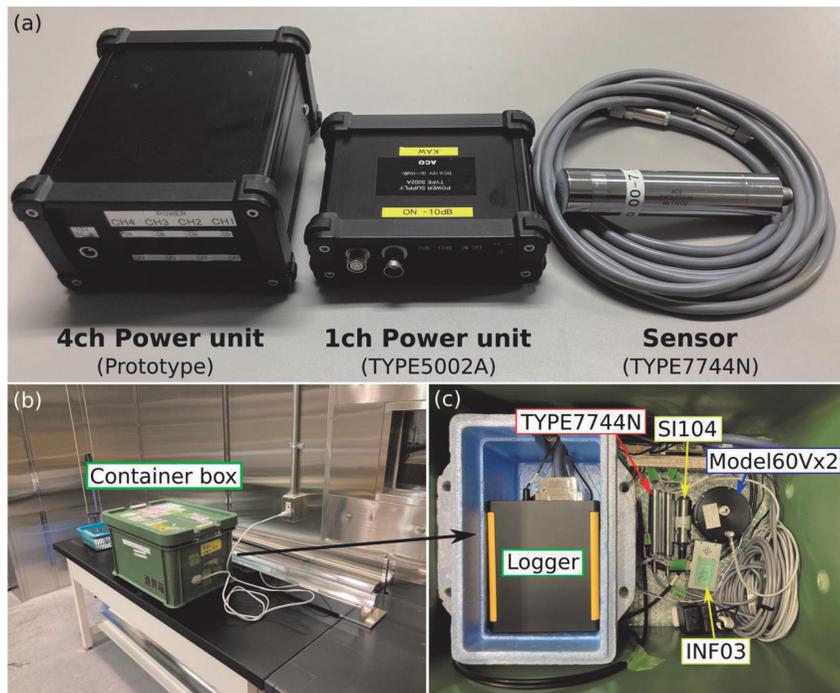


図 2 試験に用いた機材. (a) アコー製新型空振計の外観. 左から 4 チャンネル電源装置 (試作機), 1 チャンネル電源装置 (TYPE5002A), センサ (TYPE7744N). (b) 低温試験を実施した極地研低温環境実験室. (c) 低温試験に用いた機材.

Fig. 2. Equipment used for the test. (a) New type infrasound sensor manufactured by ACO. The photo shows a 4-channel type power unit (prototype), a 1-channel type power unit (TYPE5002A), and a sensor (TYPE7744N). (b) Low-temperature experimental laboratory at the National Institute of Polar Research (NIPR). (c) Equipment used for the low-temperature test.

## 2.2. 試験方法

試験方法については、観測機器を入れたコンテナボックス（図 2b）の蓋を閉じ、十分に気密した状態で蓋を手で押し込んで圧力変動を生じさせた。蓋を押すとボックス内の空気が圧縮されて圧力が上がり、戻すと逆に圧力が下がる。この方法により数～10 Pa 程度のシグナルを人工的に作ることができる。計測された信号からパワースペクトルとクロススペクトルを推定し、各空振計の周波数応答およびリファレンス（Model60Vx2）とのスペクトル比・位相差を計算した。また、2つの空振計出力間の相関を見るために、以下の式（1）で示す振幅二乗コヒーレンスを計算した：

$$\gamma_{xy}^2(f) = \frac{|S_{xy}|^2}{S_{xx}S_{yy}} \quad (1)$$

ここで、 $S_{xx}$ 、 $S_{yy}$  は各空振計出力のパワースペクトル、 $S_{xy}$  はクロススペクトルである。試験は 10 分間（600 秒）連続で実施し、それを入力データとして Welch 法（Welch, 1967）により平滑化スペクトルを推定した。Welch 法における計算窓（フレーム）の長さは 100 秒、窓関数は Tukey 窓（コサインテーパー）、オーバーラップは 90% に設定し、計 51 フレームのスペクトルのアンサンブル平均を計算している。なお本試験では 0.02 Hz（Model60Vx2 の flat response の下限周波数）から 20 Hz（インフラサウンドの上限周波数）までの周波数帯域で結果を比較する。

## 2.3. 試験内容

低温試験実施前に常温（室温）で稼働させ、各センサの振幅位相特性の比較および感度調整を行った（Test 1）。東京大学地震研究所の実験室（試験時の室温 21℃）にて 2023 年 4 月 9 日に実施し、2.2. で述べた方法で 10 分間の人工シグナルを入力した。本試験では Model60Vx2 の 1 Hz における出力値（感度 27.6 mV/Pa）をリファレンスとし、1 Hz における出力値が一致するように ACO 新型空振計・SI104・INF03 の感度を調整した（表 1）。

低温試験は国立極地研究所の低温環境実験室（図 2b、室温 -30℃）にて 2023 年 4 月 12 日から 5 月 12 日にかけて実施した（Test 2）。Test 1 と同じ機器セットアップで、30 日間連続で稼働させた。試験最終日（30 日目）に 2.2. で述べた方法で 10 分間の人工シグナルを入力し、低温による振幅位相特性の変化の有無を調べた。

# 3. 結 果

## 3.1. 常温試験（Test 1）の結果

Test 1 の結果を図 3 に示す。ボックスの押し引きによって両振幅（P-P 値）が 5-10 Pa 程度の信号が記録されている（図 3a, 3a'）。パワースペクトルを比較すると、INF03 は 0.4 Hz、SI104 は 0.1 Hz、ACO 新型空振計は 0.06 Hz 付近より低周波数で Model60Vx2（リファレンス）

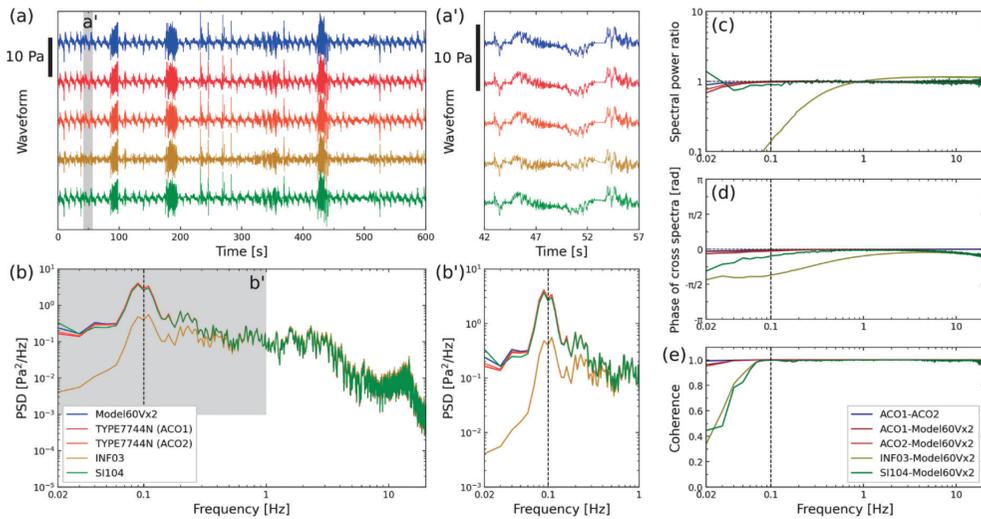


図 3 Test 1 の結果。10 分間の人工シグナルから Welch 法（時間窓 100 秒，オーバーラップ 90%）にてパワースペクトル，クロススペクトルおよびコヒーレンスを計算。(a) 生波形の比較。(a') 生波形の拡大。(b) パワースペクトルの比較。(b') パワースペクトルの拡大。(c) パワースペクトル比。(d) 各波形間の位相差。(e) 各波形間のコヒーレンス。

Fig. 3. Result for Test 1. The power spectrum, cross-spectrum, and coherence were calculated by Welch's method with 100 s sliding time windows and 90% overlap from 10 min-long data. (a) Comparison of waveforms. (a') Enlargement of waveforms. (b) Comparison of power spectra. (b') Enlargement of power spectra. (c) Power spectral ratio. (d) Phase difference between the waveforms. (e) Coherence between the waveforms.

と差が生じている（図 3b, 3b', 3c）。また，位相差を見ると SI104 は 0.5 Hz 付近から，INF03 は全帯域でずれが見られるが，ACO 新型空振計は 0.1 Hz 以上の帯域でよく一致しており，0.1 Hz 以下の低周波数でも僅かなずれに留まっている（図 3d）。コヒーレンスを見ると，いずれのセンサも 0.1 Hz 以上の帯域で高い相関を保っている（図 3e）。これらの結果はおおむね各センサの性能仕様と一致している（表 1）。また，ACO 新型空振計は低周波数で Model60Vx2 に次いで良好な感度・位相特性を示している。

ACO 新型空振計の応答は 0.1 Hz 以下の帯域（周波数特性の保証範囲外；表 1）でも Model60Vx2 の応答に比較的良く似ており（図 3b, 3b', 3c），位相のずれは小さく（図 3d），コヒーレンスも 1 に近い値を保っている（図 3e）。ただし，2 本の ACO 新型空振計のスペクトル比（図 3c 中の紺色線）には僅かなずれが生じており，0.1 Hz 以下の帯域ではセンサに僅かな個体差が生じている可能性がある。

### 3.2. 低温試験（Test 2）の結果

Test 2 の結果を図 4 に示す。Test 1 と同様，ボックスの押し引きによって両振幅が 5–10 Pa 程度の信号が記録されている（図 4a, 4a'）。パワースペクトルおよびスペクトル比を比較す

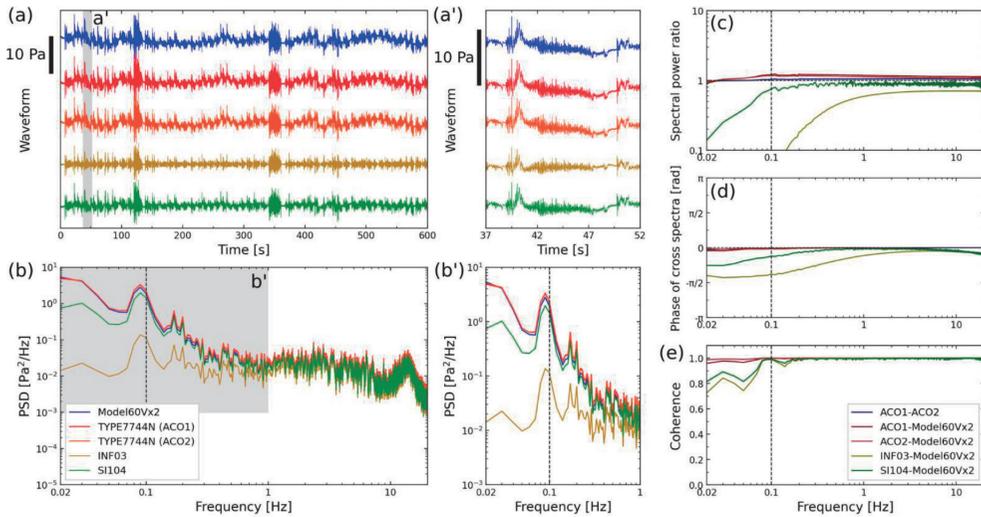


図 4 Test 2 の結果. 10 分間の人工シグナルから Welch 法 (時間窓 100 秒, オーバーラップ 90%) にてパワースペクトル, クロススペクトルおよびコヒーレンスを計算. (a) 生波形の比較. (a') 生波形の拡大. (b) パワースペクトルの比較. (b') パワースペクトルの拡大. (c) パワースペクトル比. (d) 各波形間の位相差. (e) 各波形間のコヒーレンス.

Fig. 4. Result for Test 2. The power spectrum, cross-spectrum, and coherence were calculated by Welch's method with 100 s sliding time windows and 90% overlap from 10 min-long data. (a) Comparison of waveforms. (a') Enlargement of waveforms. (b) Comparison of power spectra. (b') Enlargement of power spectra. (c) Power spectral ratio. (d) Phase difference between the waveforms. (e) Coherence between the waveforms.

ると, 全周波数帯域でずれが生じていることが分かる (図 4b, 4b', 4c). 1 Hz における Model60Vx2 の応答に対するパーセント誤差は, ACO 新型空振計で 19% (SN11514) および 14% (SN11525), SI104 で 15%, INF03 で 41% であった. 一方で位相差は常温試験と同様の結果となり (図 4d), 1 Hz における位相差の変化は ACO 新型空振計と SI104 は 0.01 rad 以下, INF03 は 0.05 rad 程度であった. コヒーレンスも常温試験と同様に 0.1 Hz 以上の帯域で高い相関を保っている (図 4e). また, 2 本の ACO 新型空振計間のパワースペクトル比 (図 4c 中の紺色線) の変化は 5% 程度であった. スペクトル比のずれは Test 1 の結果を上下に平行移動させたような様相を呈しているため, 計算に用いた常温での感度 (表 1) と低温下での実際の感度のずれに起因するものと考えられる.

低温下での感度の変化について検討するため, 以下の追加解析を実施した. 低温試験中は, 実験室内の空調で生じた長周期の圧力変動によって低周波数にパワーをもつ信号が常時記録されている (図 5). これを利用して 0.02 Hz, 0.1 Hz, 1 Hz におけるスペクトル比の時間変化を調べた. 結果を図 6 に示す. Welch 法にて時間窓 600 秒 (10 分), オーバーラップ 90% で 1 時間の平均スペクトルを計算し (フレーム数 51), 1 時間毎のスペクトル比を時間軸に沿ってプロットした. 解析の結果, いずれの周波数帯域においてもスペクトル比の顕著な時間変

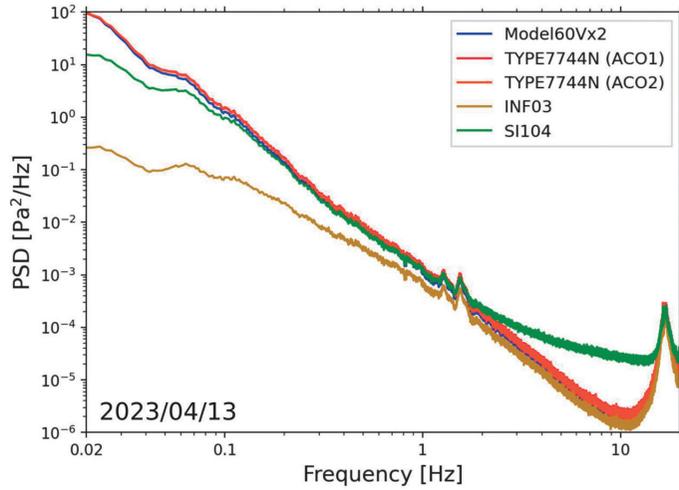


図 5 空調による長周期シグナルのスペクトル. Welch 法 (時間窓 600 秒, オーバーラップ 90%) にて 2023 年 4 月 13 日の平均スペクトルを計算した.

Fig. 5. Power spectrum of the low-frequency signal induced by an air conditioner. The spectrum was calculated by Welch's method with 600 s sliding time windows and 90% overlap from 1 day-long data on 13 April 2023.

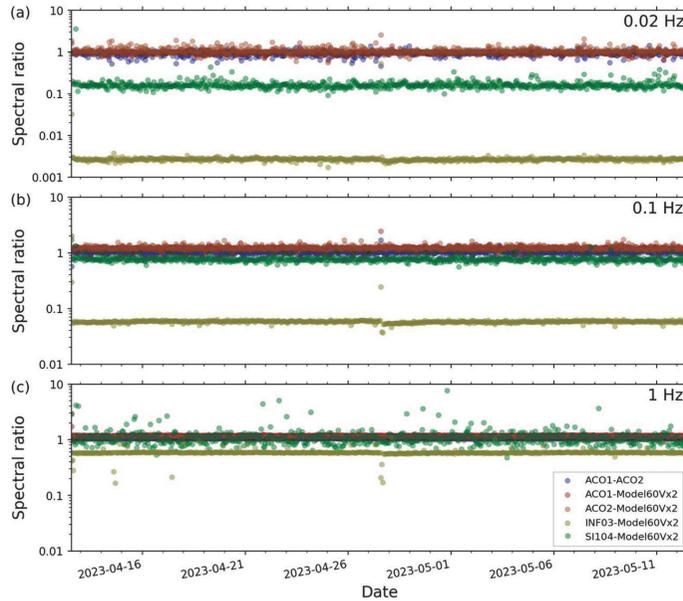


図 6 スペクトル比の時間変化. 全期間のデータ (30 日間) から Welch 法 (時間窓 600 秒, オーバーラップ 90%) にて 1 時間毎のパワースペクトルを推定し, 0.02 Hz (a), 0.1 Hz (b), および 1 Hz (c) におけるスペクトル比を計算した.

Fig. 6. Temporal change in the power spectral ratio. Hourly spectra and their ratio were calculated at 0.02 Hz (a), 0.1 Hz (b), and 1 Hz (c) by Welch's method with 600 s sliding time windows and 90% overlap from all time-series data (30 days).

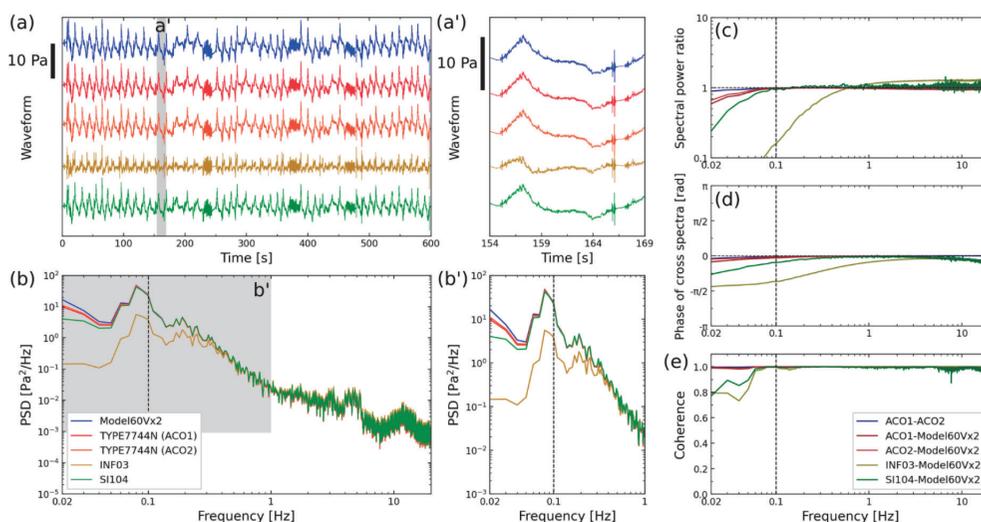


図 7 低温試験後（2023 年 5 月 30 日）に再度実施した常温試験の結果。10 分間の人工シグナルから Welch 法（時間窓 100 秒，オーバーラップ 90%）にてパワースペクトル，クロススペクトルおよびコヒーレンスを計算。(a) 生波形の比較。(a') 生波形の拡大。(b) パワースペクトルの比較。(b') パワースペクトルの拡大。(c) パワースペクトル比。(d) 各波形間の位相差。(e) 各波形間のコヒーレンス。

Fig. 7. Result for the test under room temperature, carried out after the low-temperature test (30 May 2023). The power spectrum, cross-spectrum, and coherence were calculated by Welch's method with 100 s sliding time windows and 90% overlap from 10 min-long data. (a) Comparison of waveforms. (a') Enlargement of waveforms. (b) Comparison of power spectra. (b') Enlargement of power spectra. (c) Power spectral ratio. (d) Phase difference between the waveforms. (e) Coherence between the waveforms.

化は見られず，期間を通してほぼ一定であった。SI104 は 1 Hz においてスペクトル比のばらつきが大きい（図 6c 中の緑シンボル），これは SI104 の自己雑音が比較的大きく（約 0.02 Pa; Yamakawa *et al.*, 2023），かつ空調による信号は高周波数側で十分なパワーが無いため，自己雑音の影響を受けて値がばらついた可能性がある。また，低温試験終了後に再び常温にて Test 1 と同じ試験を実施し（2023 年 5 月 30 日，室温 24℃），0.1 Hz 以上の帯域における振幅位相特性およびコヒーレンスはほぼ同じ結果が得られたため（図 7），低温により空振計の性能が変化した可能性は低い。Test 2 で見られた感度の変化は -30℃ における各空振計の特性を反映したものであり，各空振計の感度は温度によって変動すると考えられる。

#### 4. まとめ

南極観測での使用について評価する目的で，アコー製新型空振計（TYPE7744N/5002A）の低温環境下（-30℃）での挙動を調べた結果，30 日間の稼働期間で問題無く動作することが確認された。常温試験の結果と比較したところ，リファレンスセンサ（Model60Vx2,

Chaparral Physics) に対する振幅比は低温下で最大 19% 変化していたため、今回調査した空振計の感度は低温の影響で変動する可能性がある。位相特性については低温による影響は僅かであった。低周波数の特性としては南極観測において実績のある Chaparral Physics 製空振計にやや劣るものの、消費電力はその約 5 分の 1 (約 35 mW) を達成しているため、ソーラーパネルと鉛蓄電池による給電システムで稼働している露岩域の観測点にも適した空振計であると考えられる。今回の試験により低温下での性能評価のための基礎的なデータが得られた。今後は、例えば昭和基地の地震計室等で試験的な越冬観測を行って、長期間の安定性を評価する試験の実施が望まれる。また、国内では東京大学地震研究所が浅間山山頂観測点で同型センサを運用中である。これらのデータをもとに南極地域（露岩域）での使用に対する可否を判断する予定である。

## 謝 辞

新型空振計の試験機借用、および仕様に関する情報提供で株式会社アコーの協力を受けた。低温試験のデザインについて東京大学地震研究所の渡邊篤志氏から助言を受けた。Chaparral Physics 製空振計の仕様について株式会社クローネの大井拓磨氏から情報提供を受けた。低温環境実験室での機材設置の際に、国立極地研究所の藤田秀二氏、猿谷友孝氏、地震研究所の Claudia Sánchez 氏の協力を受けた。この場をお借りして感謝申し上げます。

## 文 献

- Ishihara, Y., Kanao, M., Yamamoto, M.-Y., Toda, S., Matsushima, T., and Murayama, T. (2015): Infrasonic observations at Syowa Station, East Antarctica: Implications for detecting the surface environmental variations in the polar regions. *Geoscience Frontiers*. **6** (2), 285–296, doi: 10.1016/j.gsf.2013.12.012.
- Ishihara, Y., Yamamoto, M.-Y., Murayama, T., Matsushima, T., and Kanao, M. (2017): Long-Term Variations in Infrasonic Signals Observed at Syowa Station, Antarctica: 2008–2014. *InfraMatics*. **3** (1), 1–10, doi: 10.4236/infomatics.2017.31001.
- 市原美恵 (2017): 地震研究所共同利用実施報告書 (課題名「火山の空振モニタリング技術の確立」), 課題番号 2016-B-03.
- Kanao, M., Park, Y., Murayama, T., Lee, W. S., Yamamoto, M.-Y., Yoo, H. J., Ishihara, Y., Kim, J., Oi, T., and Jung, J. H. (2017): Characteristic atmosphere and ocean interaction in the coastal and marine environment inferred from infrasonic at Terra Nova Bay, Antarctica -observation and initial data-. *Annals of Geophysics*. **60** (5), A0554, doi: 10.4401/ag-7364.
- Kanao, M. (2018): Interactions among Multispheres of the Earth's System and Polar Regions. *Polar Seismology-Advances and Impact*. InTech. 87–97, doi: 10.5772/intechopen.78558.
- Murayama, T., Kanao, M., Yamamoto, M.-Y., Ishihara, Y., Matsushima, T., and Kakinami, Y. (2015): Infrasonic array observations in the Lützow-Holm Bay region, East Antarctica. *Polar Science*. **9** (1), 35–50, doi: 10.1016/j.polar.2014.07.005.
- Murayama, T., Kanao, M., Yamamoto, M.-Y., Ishihara, Y., Matsushima, T., Kakinami, Y., Okada, K., Miyamachi, H., Nakamoto, M., Takeuchi, Y., and Toda, S. (2017): Time-space variations in infrasonic sources related to environmental dynamics around Lützow-Holm Bay, east Antarctica. *Polar Science*. **14**, 39–48, doi: 10.1016/j.polar.2017.10.001.
- Welch, P. (1967): The use of fast Fourier transform for the estimation of power spectra: A method based on time averaging over short, modified periodograms. *IEEE Transactions on Audio and Electroacoustics*. **15** (2), 70–

- 73, doi: 10.1109/TAU.1967.1161901.
- Yamakawa, K., Ichihara, M., Lacanna, G., Sánchez, C., and Ripepe, M. (2022): Very-small-aperture 3-D infrasonic array for volcanic jet observation at Stromboli Volcano. *Geophysical Journal International*. **229** (1), 459–471, doi: 10.1093/gji/ggab487.
- Yamakawa, K., Ichihara, M., Muramatsu, D., Matsushima, T., Takahashi, H., Wada, R., and Shimoyama, I. (2023): Experiment to distinguish two fumaroles consistently emanating infrasound at Kirishima Iwo-Yama. *Earth, Planets and Space*. **75**, 26, doi: 10.1186/s40623-023-01777-9.
- Yamamoto, M.-Y., Ishihara, Y., and Kanao, M. (2013): Infrasonic Waves in Antarctica: A New Proxy for Monitoring Polar Environment. *International Journal of Geosciences*. **4**, 797–802, doi: 10.4236/ijg.2013.44074.
- Yukutake, Y., Ichihara, M., and Honda, R. (2018): Infrasonic wave accompanying a crack opening during the 2015 Hakone eruption. *Earth, Planets and Space*. **70**, 53, doi: 10.1186/s40623-018-0820-x.