

超低周波音計測に関する調査研究

平野琴*

(2022年1月31日受理)

A survey review on infrasound measurement

HIRANO Koto

Abstract

Infrasound, sound with its frequencies lower than 20 Hz, is generated from large-scale natural events, such as volcanic explosions and tsunamis, as well as human activities including nuclear-weapon testings and wind turbines. Recently, monitoring infrasound has attracted increasing attention as an effective way to detect, locate, and analyze natural hazards; accordingly, infrasound monitoring networks have been deployed by international organizations, governments, universities, etc. The network consists of microphones and/or micro-barometers, which show opposite frequency characteristics in infrasonic regions: microphones are highly sensitive at relatively high frequencies, whereas micro-barometers are specialized to measure static pressure. To ensure reliability of the infrasound measurement, it is essential to evaluate the characteristics of these instruments, especially the frequency response of their sensitivity. This survey reviews recent demands for infrasound measurement, instruments, and calibration techniques studied mainly by National Metrology Institutes. Finally, our preparing system to calibrate infrasound instruments is briefly introduced.

1. はじめに

音は高さ（周波数）、大きさ（音圧）といった、音源の状態を反映した情報を含む。人が聴感として知覚できる音は20 Hzから20 kHzとされ、これより低い音は超低周波音と呼ばれる。「音」としての知覚が難しいため、生活の中で意識する機会は少ないものの、超低周波音の発生源は地球上至るところに存在する。超低周波音は巨大な物体の振動から生じることが多いが、これは周波数が低くなるほど音の波長は長くなり、例えば1 Hzでは340 mにも達することからも想像できよう。火山噴火や津波などの大規模な地球物理現象、工場や風力発電施設が発生源として挙げられるほか、航空機の超音速飛行や、小型惑星探査機や隕石など宇宙からの飛来物の大気圏突入時にも生じる¹⁾。

発生源から離れるほど音は減衰するため、音響計測により得られる情報も減少するが、可聴音と比較すると超低周波音は減衰しにくい²⁾。この特性を利用して、近傍からの観測が難しい大規模自然災害等から発生する超低周波音を計測・解析し、音源に関する情報を得る研究が活発化している。国内外で超低周波音に特化した計測網の整備が精力的に行われている^{3),4)}。

一般に音の計測はマイクロホンにより行われる。マイクロホンは、圧力の大気圧からの変動分を入力として取り込み、物理信号に変換して出力する計測機器である。入力に対してどのような出力を返すかという指標を応答特性という。音響計測で一般に用いられるコンデンサマイクロホンは、低い周波数ほど出力応答が低下する。超低周波音の計測は周波数が低くなるほど静圧の計測に近づくため、マイクロホンに加えて気圧計も使用される。

* 分析計測標準研究部門 音波振動標準研究グループ

気圧計は静圧測定を目的として設計されていることもあり、高い周波数成分を含む低周波音の測定は不得手である。このように両者は対照的な特性を有するが、超低周波音の周波数域においては、機器の応答特性を評価する方法（校正法）はマイクロホン・気圧計ともに確立されていない。その結果、同一波形の計測であっても機器により計測結果が異なる事例が散見され、計測値の信頼性に疑問が持たれている。

日本の国家計量標準機関である産業技術総合研究所・計量標準総合センター（National Metrology Institute of Japan; NMIJ）の音波振動標準研究グループは、コンデンサマイクロホンの感度校正を通じて音響標準を供給し、音響計測の信頼性確保に貢献してきた。ここ20年程度を振り返ると、当初は可聴音の音響計測、特に騒音計測の信頼性確保を目的としていたこともあり、20 Hz から20 kHz までの可聴域における音響計測機器の校正や計量トレーサビリティ体系の整備が中心だった⁵⁾。その後、風力発電施設や工場、振動由来の低周波騒音が問題視されたことから、20 Hz 以下の低周波音測定が可能な音響計測機器の校正を目的として、1 Hz までの校正を行うようになった⁶⁾。そして現在は、上述のように防災などを目的とした超低周波音計測機器の信頼性評価の需要が増大しているため、1 Hz 以下を対象とした音響計測機器の校正法や音響的な特性評価法の開発が必要となっている。

本調査研究では、1 Hz 以下の超低周波音計測に関する現状と解決すべき課題を調査し、今後の対応に関する考察を含めてまとめた。構成は以下の通りである。第2章では、超低周波音の定義について整理し、特徴とそれを踏まえた計測需要についてまとめる。第3章では、超

低周波音の計測に用いられるマイクロホンと気圧計について、それぞれの計測原理と特徴を整理し、計測に関する現状の課題について述べる。続く第4章では、第3章で言及した課題—機器の校正が為されていないこと—に対する各国研究機関の取組みを整理する。第5章では、音波振動標準研究グループで開発を進めている、1 Hz 以下の周波数域を対象としたマイクロホン感度校正システムについて簡単に紹介する。最後の第6章をまとめとする。

2. 超低周波音の計測

2.1 超低周波音の定義

空気中を伝搬する音は、周波数が低い順から、超低周波音（Infrasound）または低周波音（Low frequency sound/noise）、可聴音（Audible sound）、空中超音波または高周波音（Ultrasound）と呼ばれることが多い。低周波数域に関しては、可聴音の下限周波数である20 Hz を基準として、これより低周波数の音を超低周波音とし、超低周波音と可聴音の低周波数域の音をまとめて低周波音とすることが多い。しかし、用語定義や周波数範囲について分野間の統一が為されていないため、異なる定義が混在する（図1）。以下に分野ごとの用語の使い分けを整理する。

2.1.1 騒音分野

低周波音は、風力発電用風車や工場などに設置されたモータなどの振動源から副次的に発生する。これらは不快に感じる音、すなわち騒音として認識されるため、日本では1960年代頃から評価が行われてきた⁷⁾。環境省による低周波音苦情対応マニュアルでは、低周波音をおよ

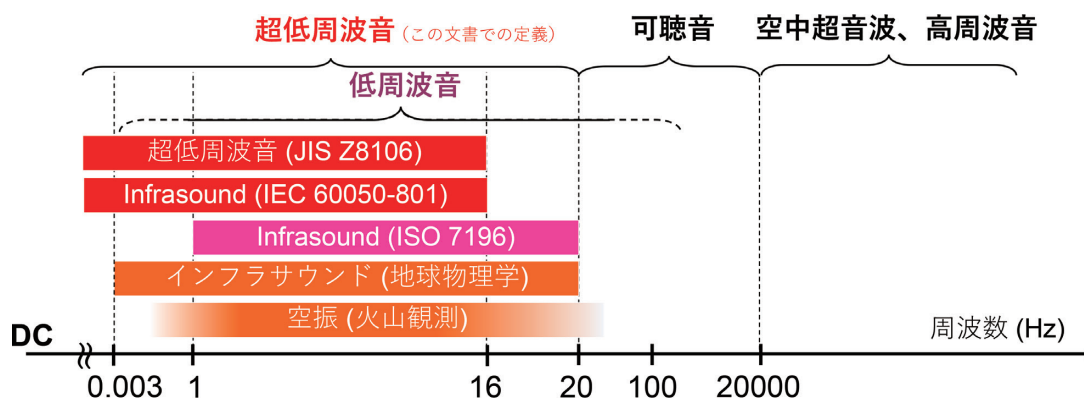


図1 周波数による音の分類

そ 100 Hz 以下の可聴音と超低周波音を含む音波として いる⁸⁾。対して、風力発電システムに関する規格の JIS C1400-0:2005 では、20 Hz から 100 Hz の音を低周波音 と定義している⁹⁾。諸外国の行政機関の指針や規制基準 でも Low frequency sound/noise の周波数範囲はばらつ いており、200 Hz 以下 (スウェーデン)、125 Hz 以下 (ベルギー)、250 Hz 以下 (ポーランド) などが上げられる¹⁰⁾⁻¹³⁾。また、1995 年に発行された ISO 7196 は、低周波 音に対する人体感覚を評価するための周波数重み付け 特性 (G 特性) を規定しているが、ここでは 1 Hz から 20 Hz の音を特に超低周波音と定義している¹⁴⁾。

2.1.2 電気音響分野

電気音響関連の用語や定義を記載している IEC 60050-801¹⁵⁾と、それに対応する JIS Z8106¹⁶⁾では、超低周波音 を可聴音の下限周波数 (およそ 16 Hz) 以下の周波数の 音響振動と定義している。

2.1.3 地球物理学分野

地球物理学分野では、3 mHz から 20 Hz の波動を超低周波音あるいはインフラサウンド、3 mHz 以下の周波数の波動を大気重力波 (浮力により一旦上昇した空気塊が重力により再降下する運動を繰り返す気圧変動) とすることが多い¹⁷⁾。この区別は、音波が大気中を伝搬するとき周波数が低くなるほど分散しやすくなり、3 mHz を下回ると鉛直方向への圧力勾配と浮力が等しくなることに由来している^{18),19)}。自然界には、大気境界波 (ラム波) と呼ばれる波動も存在する。地表面に沿って、非常に長い距離を伝搬するのが特徴であり、2011 年には東日本大震災による津波由来の大気境界波がロシアで観測された²⁰⁾。火山学では、火山噴火が引き起こした空気振動、つまり火山噴火由来の超低周波音を空振と呼ぶ²¹⁾。

2.1.4 用語定義のまとめと本調査研究での扱い

超低周波音の研究は近年盛んに行われるようになったこともあり、用語の統一を含めた他分野との融合は途上である。そのため、上述のように様々な用語や定義が混在するが、以下本稿では、20 Hz 以下の周波数の大気圧変動を超低周波音として扱う。

2.2 超低周波音の特性

音は空間的に拡散するため、音圧は音源からの距離にしたがって小さくなるが、それに加えて空気による吸収も減衰に影響する。空気吸収による音の減衰の評価指標として、ISO 9613-1 では純音の減衰係数 α を定義してい

る。 α は p_i (Pa) の音が 1 m の距離を伝搬して p_t (Pa) に減衰するときの値として、次のように与えられる^{2),22)}。

$$\alpha = 10 \log_{10} (p_t/p_i)^2 \quad (1)$$

音の空気吸収の物理的メカニズムを考慮すると、減衰係数 α は次の 4 つの項の和で表される。

$$\alpha = \alpha_{cl} + \alpha_{rot} + \alpha_{vib,O} + \alpha_{vib,N} \quad (2)$$

ここで、 α_{cl} は空気の粘性や熱伝導に起因する古典吸収、 α_{rot} は分子の回転緩和現象による吸収、 $\alpha_{vib,O}$ と $\alpha_{vib,N}$ はそれぞれ酸素分子と窒素分子の振動緩和現象による吸収である。 α とその各項の周波数特性を図 2 に示す (計算方法は付録参照)。この計算式は 40 Hz 程度から 1000 kHz を対象としているため超低周波数域は含まれていないが、周波数が低い音ほど、空気中の減衰が小さく、遠方まで伝搬しやすいことが分かる。

また超低周波数域に限らない音全般の特性としては、視界が悪い条件でも伝播可能な点、遮蔽物の少ない均一な空気中を伝搬するため、地中を伝搬する地震波と比べて伝搬中に屈折や反射等を受けにくく、音源の情報が保持されたまま伝わりやすい点が挙げられる²⁴⁾。これらの特性を示すため、近傍からの観測が難しい現象を捉える際の有用な手段として、超低周波音が注目されている。

2.3 計測対象現象

超低周波音が計測される現象を図 3 に示す^{1),7)}。縦軸

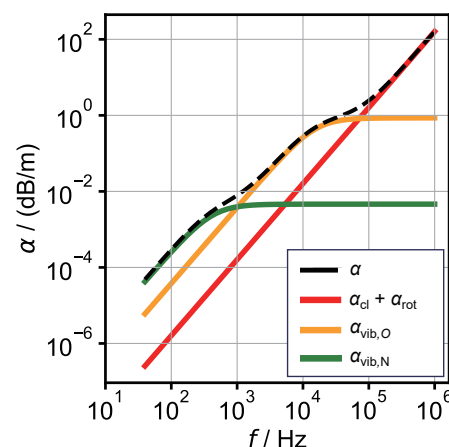


図 2 空気吸収による音の減衰係数 α と周波数 f の関係。文献²³⁾の式を元に、温度 23°C、圧力 101.325 kPa、相対湿度 50% の条件で計算。

が音圧、横軸が周波数に対応する。以下、これらの計測対象現象について、自然現象と人為活動による現象に大別して説明する。

2.3.1 大規模自然災害

超低周波音を計測することで、自然災害に関する様々な情報を取得できる。ここでは3点取り上げて説明する。1点目は、現象発生の検知である。観測波形を平時の波形と比較することで検出する。2点目は、現象の発生場所である。計測機器を複数地点に配置し、各点で観測された波形の振幅差と時間差から音源位置を推定する²⁷⁾。3点目は、現象の発生機構である。例えば火山噴火の場合、噴火の各過程（素過程）を想定し、素過程に対応する時間波形をシミュレーションで得る。シミュレーション波形と実際に計測した時間波形を照合することで、想定した素過程の妥当性を検証する。同様の方法で、噴火のエネルギーも推定可能である^{24),28)}。

1点目については波形の「変化」が分かれば良いため、原理的には一点での計測で十分である。対して、2点目と3点目の解析には複数の観測点による時間波形を用いるため、時間領域と双対の関係にある周波数域での振幅と位相の値の信頼性が要求される。以下、個々の事象における計測需要について、主に日本における観測例を紹介しつつ概説する。

火山噴火

日本における火山噴火による超低周波音観測の歴史は

古く、1950年代から気圧計を用いた観測が阿蘇山や桜島などで行われてきた。しかし、使用されていた気圧計の対象周波数は0.001 Hzから0.05 Hzであり、比較的長周期の事象観測を想定していたのに対し、実際には火山噴火由来の超低周波音は数 Hzと比較的高周波数域であるため、齟齬が生じていた²⁹⁾。そこで、1980年代から気象庁が中心となって0.1 Hzから100 Hzの周波数域に対応した低周波音用マイクロホンの配備を進めた³⁰⁾。これらの低周波音用マイクロホンがしばしば「空振計」とも呼ばれるのは、火山噴火由来の空気振動（空振）を測定対象としているためである。火山噴火だけでなく、それに伴う火砕流、地震から発生した超低周波音も観測されている³¹⁾。

現在では、空振計のほかに地震計、カメラ等の配備も進められ、それぞれの計測機器から得られるデータを統合した相補的な監視が行われている²¹⁾。例えば、空振計の記録で観察された波形変化が火山噴火由来か風ノイズ由来か判別が付かない場合、併設した地震計の振動データとの相互相関を調べることで、噴火現象に因るのか否かを判断することが出来る³²⁾。また、噴火による空気振動は水蒸気雲の形成や消滅を通じて噴火映像の輝度を変化させるため、超低周波音記録と同時に撮影された映像を比較することで、空気振動が励起されるメカニズムを推定した研究がある³³⁾。

2022年1月に、南太平洋トンガ沖で大規模な海底火山噴火が発生し、約8000 km離れた日本においても数 hPa

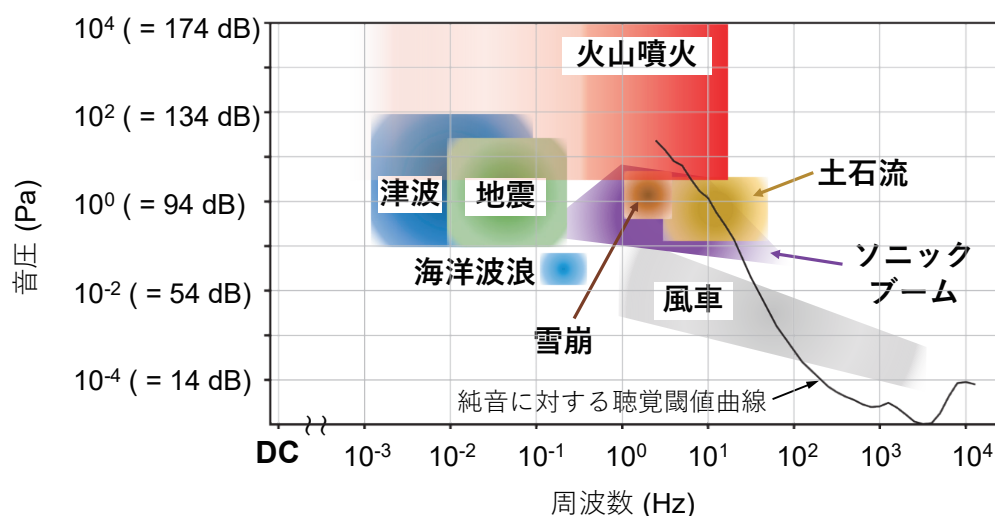


図3 計測対象現象に対応する周波数および音圧の範囲。聴覚の閾値曲線については、20 Hzより上の周波数域はISO 226:2003、20 Hz以下はEARS Projectの結果を引用した^{25),26)}。なお、音響分野では20 μ Paを0 dBとして扱う。

に及ぶ超低周波音が各地で観測された（例えば、東京大学地震研究所の速報³⁴⁾）。本調査執筆段階では、各地の観測点における超低周波音記録の統合や、日本付近での特異的な潮位変化との関連調査が進められている。

雪崩

欧州や北米の山岳地帯では、火山噴火と同様に映像機器や地震計と組み合わせた相補的な観測を実施することで、雪崩発生位置の推定や発生メカニズムの検証が行われてきた^{35),36)}。日本では新潟県十日町市において気圧計を用いた試験的な観測が行われており、崩落規模数千 m^3 程度の規模の大きな雪崩であれば、雪崩発生を検出できることが報告されている³⁷⁾。

土石流

地震計による観測が多いが、低周波音用マイクロホンの利用も進みつつある³⁸⁾。数 Hz から 20 Hz 程度と、比較的高周波数域の音が発生するようである。

津波

津波で生じる超低周波音の周期は数分に達するものも多いため³⁹⁾、超低周波音の中でも特に低周波数域側に該当する。水深によるが、津波の速度は 30 m/s 程度であり（水深 100 m の場合⁴⁰⁾、音速（温度 23°C、圧力 101.325 kPa、相対湿度 50 % の条件では 346 m/s）の方が速いため、津波が陸地へ到来するよりも前に、陸上のセンサ群で超低周波音を観測することが可能である。そこで、津波が到来する前に、「津波由来の超低周波音を観測→津波の波源や規模を推定→警報内容に反映」という一連の作業を行い、津波警報の精度向上につなげるアイデアが検討されている⁴¹⁾。現状では地震のデータと予め蓄積されたシミュレーションを元に津波の規模を推定している⁴⁰⁾、上記のアイデアが実現できれば津波そのものの情報を反映した警報を発令できると期待される。

地震

地震発生の検知は専ら地震計でなされるが、研究目的で地震由来の低周波音の観測も行われている。観測した超低周波音は、震央で励起された超低周波音が伝搬したもの、観測地での地面振動により励起されたもの、地表を伝搬するレイリー波によって励起されたものなどに分類することができ、地震由来の様々な現象の解析に用いられる³⁹⁾。

その他の自然災害

上に挙げた自然災害のほかに、竜巻、雷、台風、デブリなどから生じる超低周波音も観測されている¹⁾。

海洋波浪

自然災害ではないが、海洋表面波と大気の相互作用か

ら発生する超低周波音も知られている。周波数は 0.1 Hz から 0.3 Hz、音圧は 10^{-2} Pa から 10^{-1} Pa の範囲に位置する。低周波音用マイクロホンでは問題なく測定できる音圧であるのに対し、気圧計の多くでは測定下限に近い値であるため、海洋波浪由来の超低周波音を検出できるかで気圧計の性能を判断することがある¹⁾。

2.3.2 人為活動

風力発電用風車

再生可能エネルギーの世界的な導入を受けて、日本でも 1990 年頃から風力発電施設の建設が進んだ。風力発電用風車の騒音（風車騒音）への苦情や健康上の不安を感じるという訴えが度々寄せられたことから、風車騒音の評価と人間に対する影響の調査が国内外で行われた^{42),43)}。2010 年から 2012 年にかけて行われた、日本における風車騒音の実測調査では、図 3 に示すように 30 Hz 以下では風車騒音は聴覚閾値曲線を下回る、すなわち聴感的に知覚できていないことが分かった⁴⁴⁾。また、2012 年から 2018 年にかけて欧州地域で行われた「Metrology for a Universal Ear Simulator and the Perception of Non-audible Sound (EARS プロジェクト)」は、聴覚閾値を下回る音圧レベルの音響刺激に対しては脳波応答が見られないことを報告している²⁶⁾。環境省の検討会は、調査の結果を踏まえて風車騒音は可聴域、あえて言うならば低周波数域での騒音として議論すべきとの見解を示している⁴²⁾。

大気中核爆発実験

部分的核実験禁止条約（Partial Test Ban Treaty; PTBT）締結後、地下を含むあらゆる空間における核実験を禁止することを目指して、1996 年に包括的核実験禁止条約（Comprehensive Nuclear Test-Ban-Treaty; CTBT）が国連総会で採択された^{4),45)}。CTBT 自体はアメリカなど一部の発効要件国の批准の見通しがたたないため未発効であるが、条約の遵守状況を検証する国際監視制度（International Monitoring system; IMS）の整備は進められている。IMS は、全世界に多数設置された地震学的監視観測所、放射性核種監視観測所、水中音波監視観測所、および超低周波音監視観測所で構成される。このうち超低周波音観測所では、微気圧計を世界全 60 地点で配備する。これらの観測点では超低周波音を常時モニタリングしているため、核実験に由来しない超低周波音も多数観測されている。

ソニックブーム

ソニックブームとは大気中を超音速で飛行する物体が発する衝撃波が伝搬したものであり、超音速機以外にも

スペースシャトルや小惑星探査機はやぶさ、隕石、火球由来のソニックブームが報告されている^{7),46),47)}。周波数成分としては数 Hz でピークを持つ。飛行条件によるが、超音速機が発するソニックブームの到達範囲は 100 km 以上、瞬時音圧は 100 Pa を超える。過去に超音速機が広い範囲で大きな騒音や振動を引き起こしたことから、現在は陸地上空での超音速飛行は制限されている。移動の高速化を目的としてソニックブームを低減した超音速機の開発が進められており、その開発過程において低周波音用マイクロホンを用いた評価が行われている⁴⁸⁾。

3. 計測に用いられる機器

超低周波音の周波数域は、騒音など音響測定に用いられるマイクロホンの周波数下限と静圧の測定に用いられる気圧計の周波数上限が重なる周波数域であり、両方の計測機器が用いられている。図 4 に一般的なマイクロホンおよび気圧計が測定対象としている周波数範囲および圧力範囲をまとめた。ただし、一口にマイクロホンや気圧計と言っても様々な種類の機器があるため、図 4 では、Brüel&Kjær 社コンデンサマイクロホンの中でも低周波数域に特化した BK4193 と、フランス原子力・代替エネルギー庁 (Commissariat à l'énergie atomique et aux énergies alternatives; CEA) 製の絶対圧力計 (MB3) を、代表例として示した^{49),50)}。これらの機器を選んだ理由は、マイクロホンによる低周波音の測定に関しては、世界的

に BK 4193 が広く用いられているからである。気圧計による測定に関しては、CEA 製の絶対圧力計 (MB3, 前世代機の MB2005, MB2000) が包括的核実験禁止条約機関準備委員会 (Preparatory Commission for the Comprehensive Nuclear-Test-Ban Treaty Organization; CTBTO) の監視網で使われる機器の 80 % を占めるためである。

図 4 に、音響標準として整備されている周波数範囲、および圧力標準として整備されている圧力範囲も示した。圧力標準は、静圧においては校正可能な圧力範囲は同図の表示範囲を超えており、絶対圧力の場合 10^{-9} Pa から 10^9 Pa, ゲージ圧力の場合 10^0 Pa から 10^9 Pa に対応しているものの、変動圧力には対応していない。1 Hz 以下の周波数域はどちらの標準においても研究開発は行われているものの、標準は確立されていない。

3.1 マイクロホン

マイクロホンは、静圧からの圧力変化分である音圧を電気信号に変換する機器である。様々な動作原理に基づいたマイクロホンが存在するが、ここでは計測目的で広く使用されているコンデンサマイクロホンの概略を図 5 (a) に示す^{51),52)}。薄い金属膜を張った振動膜と後ろの電極 (背極) が平行に配置され、コンデンサを形成している。また、背極側には、背面側の圧力を静圧と平衡させるための細孔 (通気孔) が設けられている。音波によって振動膜が振動すると、振動膜と背極との距離が変化する。

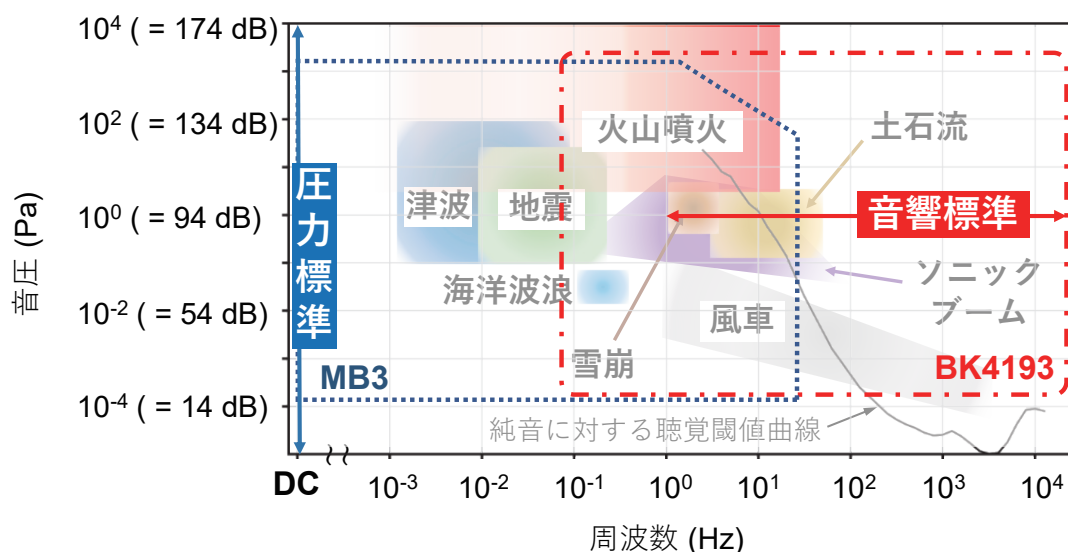


図 4 周波数および音圧の対応関係図。各種現象によって生じる超低周波音、一般的な超低周波音計測機器が対象としている範囲、計量標準として整備されている範囲を重ねて示した。

振動膜と背極間にバイアス電圧を印加しておき、音波振動による距離変化を電圧変動として取り出すのが、コンデンサマイクロホンの動作原理である。

マイクロホン感度は、音圧に対するマイクロホン開放出力電圧の比と定義される。マイクロホン感度には音圧感度、自由音場感度、拡散音場感度の3種類があり、マイクロホンが配置された音響的な環境の定義の違いにより定義される。ここでは前者2つについて、定義と説明を以下に示す。

- 音圧感度：マイクロホンの振動膜前面に加わる音圧をマイクロホンの開放出力電圧で除した値で定義される(図5 (b) 左)。マイクロホンを測定面に埋め込んだ状態、言い換えれば通気孔が音場の外に出た状態で測定した音圧に相当する。壁やヘッドホン、イヤホンにかかる音圧の測定で利用される。
- 自由音場感度：マイクロホンが置かれる前の音圧をマイクロホンの開放出力電圧で除した値で定義される(図5 (b) 右)、音波の入射角によって変化する。入射角は、特に記載がなければマイクロホン膜面に対して正面から入射する角度とすることが多い。無響

室など音波の反射が無い環境において、通気孔を音場に曝した状態で測定した音圧に相当する。騒音測定など計測の現場で必要とされる。

図5 (c) に一般的なコンデンサマイクロホンの、低周波数域における感度を示す⁵¹⁾。通気孔を音場に曝した場合、低周波数域ほど空気粘性の影響が小さくなるため通気孔から音波が侵入しやすくなる。振動膜前面と背面の圧力差が小さくなるため、結果として振動膜は振動しにくくなり、自由音場感度は低下する^{6),53)}。自由音場感度が250 Hzにおける値から3 dB (reference: 1 V/Pa) 低下する周波数(図5の f_c)を下限周波数と公称することが多い。下限周波数は一般的なマイクロホンでは数Hz程度、超低周波用に作られたBK4193では0.07 Hzである。一方音圧感度は、低周波数域ではわずかに上昇する。周波数が低下するとともに通気孔から空気が抜けやすくなる点は自由音場感度と同じであるが、音圧感度の場合は振動膜前面と背面は完全に分離されているため、振動膜前面の音波の影響が背面には及ばない。そのため背面側の体積変化への抵抗が小さくなり、膜面が振動しやすくなる。

また、気象庁等の火山観測網では、圧電型の低周波音用マイクロホンも用いられる⁵⁴⁾。セラミックのピエゾ素子を用い、圧力変化に比例して生じる電荷を検出する。

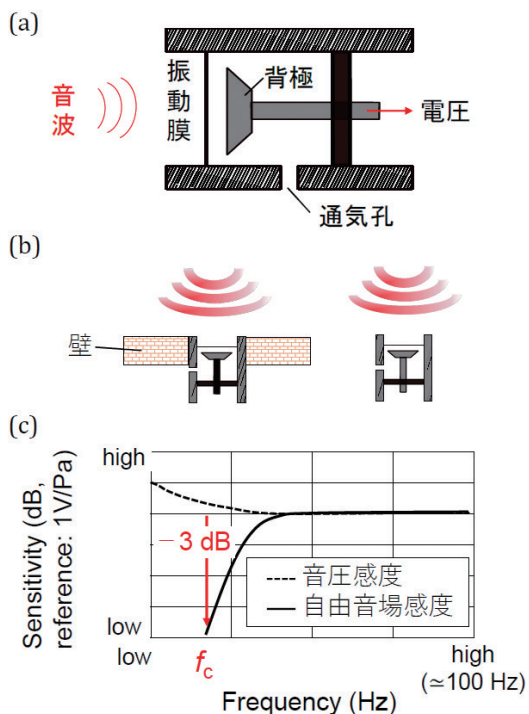


図5 (a) コンデンサマイクロホンの概略, (b) 音圧感度(左)と自由音場感度(右)の違い, (c) 感度の低周波数域における周波数振幅特性

3.2 気圧計

気圧計を含む圧力計は、基準圧の取り方により2種類に分けられる。絶対真空を基準圧とするタイプを絶対圧計、大気圧を基準圧とするタイプを差圧計あるいはゲージ圧計という。超低周波音測定を目的とした気圧計の動作原理は様々であり、以下に簡単に紹介する。

アネロイド型

気圧の変動により変形する金属ベローズの変位を計測する。CTBTO による核実験監視網の80%を占めるMB3, MB2005 (CEA製)等が該当する⁵⁰⁾。

周波数変化型

荷電された水晶振動子の発振周波数が圧力により変化する特性を用い、周波数を計測して圧力に変換する。主に日本で導入されているナノ・バロメーター (Paroscientific社製) という絶対圧測定機器が該当する⁵⁵⁾。

ピエゾ抵抗型

ピエゾ抵抗素子を用い、圧力変化に応じて変化する電気抵抗値を検出する。小型かつ安価という利点を持つことから近年開発が精力的に進められているMEMS

(Micro Electro Mechanical System) センサの多くが、ピエゾ抵抗型の原理を用いる^{56),57)}。

静電型

振動膜変位による静電容量の変化から圧力を求める。CTBTO による核実験監視網の 15 % を占める Model 50A, Model 25A (Chaparral Physics 社製) が該当する。圧力計と銘打たれているものの、静電型かつ差圧式であることを考慮すると、実態はコンデンサマイクロホンに近いと言える⁵⁸⁾。静電型の原理を用いた MEMS センサも存在する。

3.3 マイクロホンと気圧計の比較

これら測定機器の特性と長短について表1にまとめた。図4と同様、マイクロホンはBK4193、気圧計はMB3を代表例として比較した。周波数範囲については、マイクロホンは超低周波音の高周波数域側、気圧計は低周波数域側の計測を得意とする傾向がある。大きさ、値段を見ると、マイクロホンは比較的安価で小型である一方、MEMS センサを除く気圧計は大型かつ高価な機器が多い。これらの特徴を踏まえると、次のようなすみ分けが可能と言えよう。

- マイクロホン：火山噴火など、可聴域よりの超低周波音を発生する事象の計測。機器の持ち運びが必要な計測。
- 気圧計：津波・地震など、静圧よりの超低周波音を発生させる事象の計測。定点観測が望ましい事象。

計測現場でどちらの機器が用いられているかは3.4節にまとめたが、概ね上記に沿った使い分けがなされているようである。

3.4 日本および世界各地の超低周波音計測網

国内外の様々な機関が、超低周波音計測網を運用または整備中である。やや2章の内容と被るが、ここではいくつかの例を紹介する。データをインターネットで逐次

公開している計測網も多い。

気象庁による火山観測網³⁾

常時観測火山に指定された50の活火山において、圧電型あるいは静電型の低周波音用マイクロホンを配備して24時間体制で観測を行っている。2019年からインターネットでのデータ公開を始めた。

インフラサウンド・モニタリング・ネットワーク⁴⁾

東北、中部、近畿地方の全15地点(2022年1月時点)に置かれた微気圧計で記録した超低周波音データを公開している。日本気象協会が管理している。

高知工科大学インフラサウンド観測ネットワークシステム⁵⁹⁾

津波警報の精度向上を目的として、津波から発生した超低周波音を計測するための差圧計と、地面振動を記録するための地震計の両方を搭載した機器を配備している。高知県を中心とした約30地点(2020年時点)で展開中であり、超低周波音データの一部は逐次公開されている。

昭和基地とその周辺のインフラサウンドデータアーカイブ⁶⁰⁾

南極にある昭和基地にChaparral Physics社製の気圧計を配備し、記録したデータを準リアルタイム公開している。対流圏から成層圏大気まで、オーロラや隕石落下、温暖化に伴う氷震など幅広い現象由来の超低周波音検出を狙っている。

CTBTO による国際監視制度⁴⁾

大気中核爆発実験を監視するため、CEA 製やChaparral Physics社製の高感度かつ低ノイズな気圧計を世界全60地点に設置している。日本は千葉県いすみ市に観測点がおかれており、日本気象協会が維持管理を担当している。データは機密情報にあたるため、利用は申請許可制となっている。

IRIS (Incorporated Research Institution for Seismology)⁶¹⁾

マイクロホンや静電容量式の気圧計が、アメリカの400を超える観測点に配備されている。データは逐次公開されている。

表1 マイクロホンと気圧計の比較

機器	周波数範囲	感度の周波数特性	圧力範囲	大きさ (本体)	値段 (本体)
マイクロホン (BK4193)	0.07 Hz から 20 kHz	低周波数域で感度低下	10^{-4} Pa から 2.5 kPa	直径 13 mm 高さ 13 mm	数十万円
気圧計 (MB3)	DC (静圧) から 28 Hz	高周波数域は対象外	10^{-4} Pa から 1.2 kPa (@ 1 Hz)	直径 110 mm 高さ 140 mm	数百万円

3.5 計測機器に関する現状の課題

噴火口の位置推定など複数の測定点でのデータを解析処理する際に前提となるのが、同一の測定点では計測機器が異なっても同一波形が計測されることである。しかし実際は、機器の種類や型式が異なると計測される音圧波形に違いが生じる例が複数報告されている^{62),63)}。マイクロホンと気圧計の典型的な時間応答波形の例を図6に示す。気圧計では幅2秒程度のパルスが計測されるような圧力変動は、マイクロホンでは異なる波形として計測される。

この問題の理由を考えるために、計測機器の周波数特性が出力波形に与える影響を、簡単なモデルで検討した。一般に、計測機器への入力信号 $x(t)$ と出力信号 $y(t)$ の関係は図7(a)のように表すことができる。マイクロホンは低周波数域で、気圧計では高周波数域で感度が低下することを考慮し、マイクロホンの伝達特性 H_{mic} は0.07 Hzから20 kHz、気圧計の伝達特性 H_{baro} はDCから28 Hzを通過域とする図7(b)のような2次バターワースフィルタを仮定した。なお、実際のコンデンサマイクロホンは、型式により違いがあるものの高周波数域側で共振による感度変化があるが、ここで検討しているのはマイクロホンの共振周波数よりもずっと低い周波数なので無視している。図7(c)の左図は幅0.05秒、右図は幅1秒のパルス波形を入力 $x(t)$ としたときの出力 $y(t)$ を示したものである。パルス幅が0.05秒の場合、 H_{mic} を通した後の波形は黒色の原波形とほぼ重なっているのに対して、 H_{baro} を通した後の波形は時間遅れと出力の低下が見られ、マイクロホンの方が測定に適していると考えられる。一方、パルス幅が1秒の場合は図6と同様アンダーシュートの傾向が見られ、気圧計での測定が適していると言える。つまり、機器が違うと計測結果が異なるのは、機器固有の周波数特性の影響であって、その周波数特性を考慮して測定結果を補正する、または測定

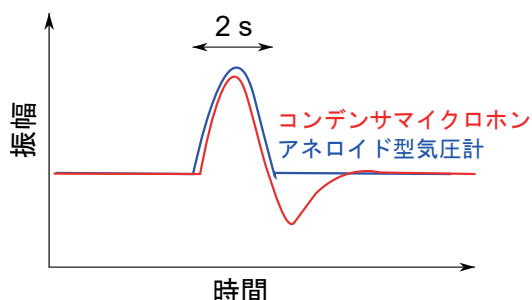


図6 マイクロホンと気圧計の時間応答波形の比較

機器を調整したり、対象周波数での測定に適した機器を選定したりすることで、問題を解消できる場合が多いと考えられる。なお、第2章で述べたように超低周波音計測では時間波形を解析することが多いので、計測機器を周波数域で評価する際には、周波数特性の振幅と位相の両方が必要不可欠である。

4. 超低周波数域におけるマイクロホン感度校正

1 Hz以下の周波数域における機器特性評価に対する需要は高まりつつあるが、現状では音響標準・圧力標準ともに標準は整備されていない。超低周波数域での機器評価が難しい理由について考えるために、現在標準マイクロホンの音圧感度の絶対校正法として用いられている方法を紹介し、これを1 Hz以下の超低周波数域に適用した場合の問題点を述べる。

音圧の標準は、コンデンサマイクロホン感度により供給される。一定した音圧を広い周波数域にわたって長・短期的に安定して発生できるような音源の実現が難しい一方、コンデンサマイクロホンの感度は十分安定であり、かつ後述するカプラ校正法により可聴域では精度良く求められるからである。

計測用途で使用されるコンデンサマイクロホンは計測

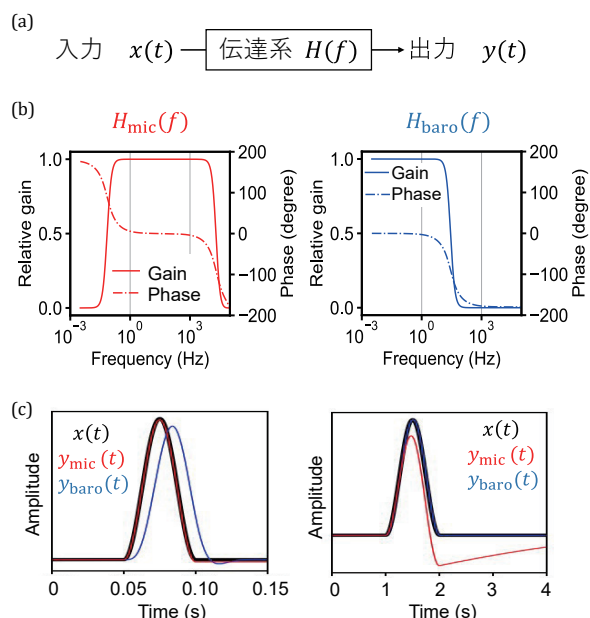


図7 (a) 超低周波音計測機器を模擬した簡単なブロック図、(b) 2次バターワースを仮定したマイクロホン(赤)と気圧計(青)の周波数特性、(c) 0.05秒と1秒の幅のパルスを H_{mic} あるいは H_{baro} に通した時の出力信号の比較

用マイクロホンと呼ばれ、その機械的・電氣的な特性は IEC 61094-4 で規格化されている⁶⁴⁾。計測用マイクロホンの中でも、標準供給を目的として特に安定かつ精度良く作られたマイクロホンは、標準マイクロホンと呼ばれ、IEC 61094-1 で構造や電気音響的特性が定められている⁶⁵⁾。標準マイクロホン (Laboratory Standard Microphone) は外径 23.8 mm の LS1 マイクロホンと、より小型で外径 12.7 mm の LS2 マイクロホンの 2 タイプがある。

4.1 カプラを用いた相互校正法

可聴域で確立された標準マイクロホンの音圧感度校正法が、カプラを用いた相互校正法 (カプラ校正法) である。その校正方法は IEC 61094-2 で規格化されている⁶⁶⁾。図 8 に示すように、同一型式の標準マイクロホンを 2 つ用意し、音響カプラと呼ばれる音響結合器に向かい合わせに取り付ける。カプラ校正で使用する音響カプラには、Large volume カプラと Plane wave カプラの 2 種類がある。Plane wave カプラは直円筒形状であるため、カプラ内における熱伝導 (後述) や波動などの補正量を Large volume カプラよりも厳密に解析できるという利点があり、現在では Plane wave カプラが主流である。

標準マイクロホンは可逆電気音響変換器であり、音信号を入力すれば電気信号を出力し、電気信号を入力すれば音信号を出力する。この性質を利用して、一方のマイクロホン x を音源として用いて音響カプラ内に音を発生させ、他方のマイクロホン y を受音として用いる。このとき、出力電圧 (e_y) に対する入力電圧 (e_x) の比 (H_{xy}) と両マイクロホンの音圧感度の関係は以下の式で表すことができる。

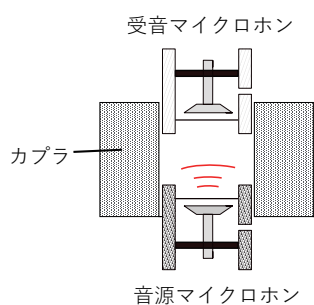


図 8 カプラ校正法の概略

$$H_{xy} = \frac{e_y}{e_x} = M_x \cdot Z_{a,xy} \cdot M_y \cdot \frac{1}{Z_{e,x}} \quad (3)$$

ここで、 M_x : 音源マイクロホンの音圧感度、 M_y : 受音マイクロホンの音圧感度、 $Z_{a,xy}$: マイク間の伝達音響インピーダンス、 $Z_{e,x}$: 音源マイクロホンの電気インピーダンスである。 $Z_{a,xy}$ は以下の式で表せる。

$$Z_{a,xy} = \frac{\gamma P}{j\omega V_{xy}} (1 + C_{xy}) \quad (4)$$

ここで、 P : 大気圧、 γ : 比熱比、 j : 虚数単位、 ω : 角周波数、 V_{xy} : カプラ容積、 C_{xy} : 補正項である。

式 (3) のみでは音圧感度 2 つが未知数であるため解くことができない。そこで同一型式のマイクロホンをもう 1 つ用意し、計 3 個の標準マイクロホン (1, 2, 3 とする) について 3 通りの音源・受音マイクロホンの組み合わせで電圧比を測定する。具体的には、(1, 2), (1, 3), (2, 3) の組み合わせで電圧比を測定した場合、

$$\begin{cases} H_{12} = M_1 \cdot Z_{a,12} \cdot M_2 \cdot \frac{1}{Z_{e,1}} \\ H_{13} = M_1 \cdot Z_{a,13} \cdot M_3 \cdot \frac{1}{Z_{e,1}} \\ H_{23} = M_2 \cdot Z_{a,23} \cdot M_3 \cdot \frac{1}{Z_{e,2}} \end{cases} \quad (5)$$

となり、これを解けば各マイクロホンの音圧感度が得られる。例えば、マイクロホン「3」の音圧感度は、以下の式で表せる。

$$(M_3)^2 = Z_{e,2} \cdot \frac{H_{23} \cdot H_{13}}{H_{12}} \cdot \frac{Z_{a,12}}{Z_{a,23} \cdot Z_{a,13}} \quad (6)$$

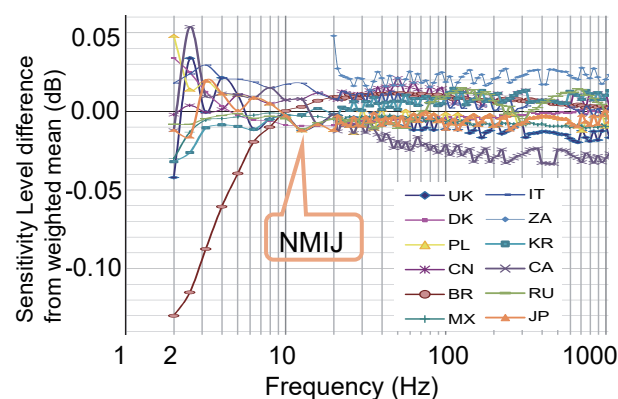


図 9 国際基幹比較 CCAUV.A-K5 の結果⁶⁷⁾。

カプラ校正法は確立された校正法であり、複数回の国際基幹比較が実施されている。図9にカプラ校正法によりLS1マイクロホンの音圧感度校正を下限2 Hzまで行った国際基幹比較の結果を、表2に標準マイクロホンの音圧感度の国際基幹比較CCAUV.A- K5の実施状況を示す。国により程度の差はあるが、図9に示している10 Hzから1 kHzでは ± 0.04 dB以内で一致していることがわかる。また表2に示した通り、2 Hz以上の周波数域では国際基幹比較が複数回行われているものの、1 Hzより下の周波数域については、2021年現在まで国際基幹比較は実施されていない。カプラ校正法を超低周波数域に適用するのが難しいのは、以下に挙げるような問題点が顕在化するためである⁶⁾。

- (1) 低周波数域では外来ノイズが増幅するのに対し、音源マイクロホンの発生音圧を上げるのは限界があるため、S/N（信号対雑音比）が低下する。ノイズが増加するのは、地面振動や外部の音響ノイズの遮断が低周波数域では難しいためである。例えば、地面振動を低減するためには空気ばねあるいはゴムばね式の受動防振台が多く用いられるが、これらの防振台は数 Hz に固有振動数を持つため、それより低周波数の振動は低減できない。また、外部の音響ノイズを遮断するためには装置の周りを防音材などで遮音すればよいが、壁体の遮音性能は一般に低周波数域ほど低下する⁶⁸⁾。
- (2) 式(4)は断熱圧縮過程で成立するが、低周波数域では1周期の間にカプラの内壁を通じて熱が逃げるため等温過程に近づき、補正が必要となる。この補正は熱伝導補正と呼ばれ、IEC61094-2:2009では、2つの方法：Low frequency solution と Broad-

band solution が示されていた。しかし、2014年にイギリスNPLが、Plane wave カプラを使って標準マイクロホンを校正した際、熱伝導補正として上記の2つを適用したところ、音圧感度が一致しないことを指摘した⁶⁹⁾。以降この不一致は、低周波数域におけるカプラ校正法の主要な問題点となっていた。2019年にフランスLNE (Laboratoire National de métrologie et d'Essais) が、Plane wave カプラを用いる場合においてLow frequency solution を改良した補正法を提案し⁷⁰⁾、翌年デンマークDPLA (Danish Primary Laboratory of Acoustics) が改良補正法が妥当との見解を示した⁷¹⁾。改良補正法による補正量は1 Hzで振幅が1 dB程度、位相が3°程度であるが、周波数の低下とともに補正量が大きくなり、それにつれて不確かさも大きくなる。

- (3) カプラ校正法では、図8に示すカプラの気室が気密である必要がある。しかし、カプラおよびマイクロホンが密着する面のざらつきにより、気密性を厳密に保つことは難しく、微小な隙間が存在する。特に周波数が低くなるにつれて空気粘性の影響が弱まるため、この隙間からの空気漏れが増大し、これが誤差要因となる。

4.2 レーザーピストンホン法

カプラ校正法に代わる20 Hz以下の超低周波数域の主要な校正法として研究が進められてきたのが、レーザーピストンホン法である。イギリスNPLの提案を皮切りに^{72),73)}、中国NIMC (National Institute of Metrology of China)⁷⁴⁾⁻⁷⁷⁾、トルコUME (TÜBİTAK Ulusal Metroloji Enstitüsü)^{78),79)}、韓国KRISS (Korea Research Institute of Standards and Science)⁸⁰⁾、日本NMIJ⁶⁾等の研究開発が報告されている。

NMIJが保有する装置の概略を図10に示す。加振器に取り付けたピストンと被校正マイクロホンがカプラに装

表2 音圧感度に関する国際基幹比較の実施状況

標準マイクロホン 周波数範囲		
CCAUV.A-K1 (1999-2001)	LS1	125 Hz から 8 kHz
CCAUV.A-K2 (2005-2006)	LS1	1 Hz から 250 kHz
CCAUV.A-K3 (2003)	LS2	31.5 Hz から 31.5 kHz
CCAUV.A-K5 (2011-2012)	LS1	2 Hz から 10 kHz
CCAUV.A-K6 (実施中)	LS2	2 Hz から 25 kHz

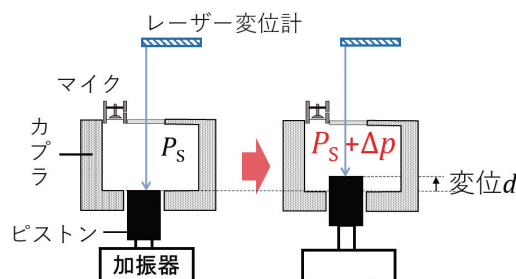


図10 レーザーピストンホン法の概略

着されており、ピストンを正弦駆動してカプラ内空洞に音圧を発生させる。ピストンの変位をレーザー干渉計で測定して音圧を算出するため、レーザーピストンホン法と呼称される。カプラ内の音圧分布が一様であると仮定すると、発生音圧 Δp とピストン変位 d の関係は以下の式で表される。

$$\Delta p = \frac{\gamma P A d}{V_0} \quad (7)$$

ここで、 P ：静圧（大気圧）、 V_0 ：カプラ容積、 A ：ピストン断面積である。ピストン変位の計測と同時に被校正マイクロホンの開放出力電圧を測定し、音圧に対する開放出力電圧の比を計算することでマイクロホンの感度が求められる。

この方法の利点として、出力音圧はピストン変位に比例するため、ピストン変位を大きくすることにより、カプラ内の音圧を大きくできることが挙げられる。NMIJでは、124 dB程度（約 31.7 Pa）の音圧をカプラ内に発生させて校正を実施している。その結果、カプラ校正法よりも良好な S/N のもとでマイクロホンの感度校正ができる。

しかし、カプラ校正法で述べた問題点のうち、(2) 超低周波数域ではカプラの内壁を通じて熱が逃げるため熱伝導補正が必要；(3) ピストンとカプラの間から漏れる音圧が増大すること；は解消されていない。(2) に関しては、Low frequency solution による熱伝導補正量を採用しているが、その補正量の計算は前提条件や近似を必要とする複雑なものである。そのため、熱伝導の補正が不要な校正法の実現が望ましい。(3) については、NPL や NIMC が計算による補正を提案しているほか^{73),75)}、ピストンとカプラの接触部にエアベアリングを導入することで摩擦抵抗を防ぎつつ隙間が小さくするといった改善策が報告されている⁷⁷⁾。

4.3 気圧計による比較校正

超低周波音の計測は気圧計でも行われていることから、気圧計との比較によりマイクロホンの感度を校正する試みも行われている^{81),82)}。具体的には、カプラ校正法やレーザーピストンホン法などによる感度校正を実施したうえで、これらの方法では校正不可能な低周波数域（例えば、0.1 Hz 以下）は、静圧でトレーサビリティが確保されている気圧計を参照標準として比較校正する。ただし、動圧に対する気圧計の校正法は確立されていないため、あくまで参考にとどまるのが現状である。

4.4 校正法開発に関する国際的な動向

超低周波音計測需要の国際的な高まりを反映して、各国の国家計量標準機関などが機器校正に関する研究を活発に行っている。カプラ校正法、レーザーピストンホン法を低周波数域へと拡大するアプローチが主流であり、多くの NMI が研究開発状況を報告している。また、現時点での論文報告はされていないものの、上記 2 つの絶対校正法以外のアプローチも Infra-AUV（後述）などにより検討されているので、いくつか紹介する。

- 可聴域におけるマイクロホン感度の簡易校正技術である、静電アクチュエータを用いた校正法を低周波数域に拡大する試み⁸³⁾。静電アクチュエータを用いて、音圧と等価な静電力をマイクロホン振動膜に加えることで、マイクロホンの周波数特性を求める方式を採用。
- 音圧に応じて変化する液面の高さを計測して音圧に変換する試み⁸⁴⁾。液体を入れた U 字管を用意し、一方の管口を大気圧側に、もう一方をカプラに接続して、カプラ空洞内に音圧を発生させる。カプラ空洞内の圧力と大気圧の差に応じて発生する液面変位を計測して音圧に換算する。
- 媒質の屈折率から音圧を求めるアプローチ。媒質の屈折率と圧力の関係は理論計算で求められるため、媒質の屈折率を光学的に計測することで音圧を求める。フランス CNAM (Conservatoire National des Arts et Métiers) が 0.1 Hz から 2 Hz の周波数範囲で気圧計とマイクロホンの校正を行ったと報告している⁸⁴⁾。また、マイクロホンの校正ではないが、NMIJ の圧力真空標準グループも本アプローチにより大気圧変動を評価した旨を発表している⁸⁵⁾。

校正法の開発および超低周波数域の計量トレーサビリティ整備を進めるための、国際的な協力体制も構築されている。ここでは代表的な 2 つを紹介する。

BIPM-CTBTO Practical Arrangement

2021 年に CTBTO と国際度量衡局 (Bureau International des Poids et Mesures; BIPM) 間で結ばれた連携協定である⁸⁶⁾。CTBTO の核実験監視網で使用されている観測機器のトレーサビリティ確保などを目的としている。BIPM はデータの信頼性の担保に協力する予定である。

Infra-AUV project

2020 年からヨーロッパの国家計量標準機関により実施中である⁸⁴⁾。空中および水中を伝搬する音・振動の標

正確立とトレーサビリティの普及を目指したプログラムである。空中を伝搬する音については、現段階では 0.04 Hz までの周波数域におけるマイクロホン感度の絶対校正法が複数研究・提案されている。将来的には各地の測定機器のオンサイト校正も含めた比較校正の実施を目指している。

5. 音波振動標準研究グループにおける対応方針

現在、音波振動標準研究グループでは、可聴域はカプラ校正法、1 Hz から 20 Hz はレーザーピストンホン法により標準マイクロホンの音圧感度校正を実施している。LS1 マイクロホンの校正について、提供している校正範囲と拡張不確かさを表 3 に示した。超低周波数域では従来法（カプラ校正法およびレーザーピストンホン法）を拡張しようとする第 4 章で述べた問題点が浮上することから、異なる原理を用いた校正システム—液柱型音圧発生装置を用いた校正システム—の構築を計画中である。第 5.1 節で液柱型音圧発生装置の原理と概略を説明し、続く第 5.2 節で各地の計測機器をどのように校正し

表 3 NMIJ による LS1 マイクロホン音圧感度校正の提供状況⁸⁷⁾

周波数 (f) 範囲	校正法	拡張不確かさ (k=2) (dB)
1 Hz ≤ f ≤ 2 Hz	レーザーピストンホン法	0.2
2 Hz < f ≤ 20 Hz	レーザーピストンホン法	0.1
20 Hz ≤ f ≤ 4 kHz	カプラ校正法	0.04
4 kHz < f ≤ 8 kHz	カプラ校正法	0.05
8 kHz < f ≤ 10 kHz	カプラ校正法	0.15
10 kHz < f ≤ 12.5 kHz	カプラ校正法	0.17

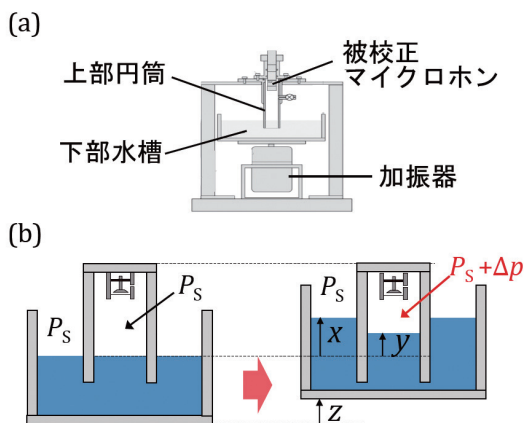


図 11 液柱型音圧発生装置の (a) 概略と (b) 音圧発生原理

ていくかなどの今後の計画を述べる。

5.1 液柱型音圧発生装置を用いた計測用マイクロホンの絶対校正

開発中の液柱型音圧発生装置の概略を図 11 に示す。マイクロホンを装着した上部円筒と加振器が取り付けられた下部水槽から構成される。上部円筒は固定されており、下側は水面より下に位置している。加振器の運動（正弦駆動）により下部水槽が上下動すると円筒内外で水変位の差が生じ、円筒内に圧力変動（音圧）が発生する。

圧力と水変位の関係は、液柱型圧力計と同様の原理を用いて、次のつり合いの式で表せる。

$$P_s + \rho g x = (P_s + \Delta p) + \rho g y \tag{8}$$

ここで、 ρ ：水密度、 g ：重力加速度、 x ：上部円筒外の水変位、 y ：上部円筒内の水変位、 Δp ：音圧である。

式 (8) は等温過程、断熱圧縮過程に関係なく成立するため、水変位 x 、 y を直接測定できれば断熱圧縮過程から等温過程への移行に対する補正、すなわち熱伝導補正が不要となる。しかし、レーザー干渉計を用いて水変位を数 μm の精度で直接計測するのは現状難しい。理由としては、金属等と比較して水の反射率が低いため、そもそも光信号の検出自体が難しい点や、レーザー干渉計では測定光と参照光を同軸上で干渉させる必要があるが、微小な水面の揺れでも測定光の光軸がぶれるため、S/N が悪くなる点が挙げられる。そのため、水変位ではなく下部水槽の変位 z を計測し、水槽変位と水変位が同期していると仮定した上で、水体积のつり合いの式と上部円筒内の圧力と体積の関係式を用いて音圧を求めている。水槽変位を計測して音圧を計算する場合、上部円筒内の圧力変動過程を断熱圧縮過程とするか等温過程とするかで計算音圧に違いが生じるが、上部円筒の内部圧力の変化は水槽の水変位と円筒内の水変位の差によって補填される形となる。したがって、水槽の断面積を円筒の断面積と比べて十分大きくとるか、上部円筒の空气体積を小さくすれば、圧力変動過程の違いによる音圧への変化分は無視できる程度に小さくすることが可能である。

開発中のプロトタイプを用いた場合、従来法の問題点は以下のように対応されると考えられる。(1) 水槽の変位を大きくすることで S/N を改善；(2) 前段落で述べた事情から熱伝導補正が不要となる；(3) この装置では上部円筒の内部は水により外気と遮断されているため、空気漏れ（圧力漏れ）は起こらない。また、本装置の長所として、マイクロホンの通気孔を内部円筒内の音場に

曝して測定することで、自由音場感度も簡便に求めることができる点が挙げられる。

しかし、本装置の開発について、いくつか技術的な問題点も予想される。代表的なものを以下に挙げる。

- この装置特有の問題点として水面の波打ちが考えられる。ただし波打ちは高周波数域ほど大きくなるため、今回校正対象としている 1 Hz 以下では問題にならないと考えられる。
- カプラ校正法の節で述べたように、超低周波数域では外部ノイズの影響が増大する。水槽の変位を大きくすることで S/N の改善は可能ではあるものの、校正装置を静寂で振動の少ない環境に設置するなど、外部ノイズをできるだけ低減する必要がある。
- 現時点では水槽変位を計測し、水槽変位と水変位が同期すると仮定した上で計算により音圧を求めているが、この仮定が妥当かどうか確かめる必要がある。

上記で挙げた問題点を解消した上で、従来法（カプラ校正法やレーザーピストンホン法）で校正可能な周波数域において、従来法による校正値との整合を確認した後、0.01 Hz までの感度校正を可能としたいと考えている。不確かさについては、技術的な目標値として 1 Hz におけるレーザーピストンホン法での拡張不確かさ (0.2 dB) よりも小さな値を考えている。

なお、音波振動標準研究グループはマイクロホン音圧感度のうち振幅を提供しているが、位相についても校正自体は可能である。位相校正を提供してこなかったのは、これまでの音響計測では音の大きさ（振幅）が評価できれば十分であったことが背景にある。しかし、第 3 章で述べたように、防災や地球物理学を目的とした超低周波音の解析は時間領域で行われることが多く、使用される測定機器の校正は振幅と位相の両方が必要である。そのため、1 Hz 以下の周波数域を含む超低周波数域についても、マイクロホン感度の位相校正を可能とする計画である。

国際的にも超低周波数域での校正法は確立されておらず、現在は複数候補の検討が行われている段階である。本方法で得られた感度と他の校正法により得られた感度を比較することで、それぞれの方法の妥当性を検証可能と考えられる。

5.2 計測用マイクロホン以外の超低周波音計測機器の校正

超低周波音の測定は、計測用マイクロホンの他にも気

圧計など様々な機器が使用されている。計測用マイクロホン以外の全国各地の機器校正をどのように進めていくかを述べる。基本的に可聴域における校正の連鎖（トレーサビリティ）を踏襲することを考えている。具体的には、液柱型音圧発生装置で校正が可能なマイクロホンは直接感度校正を行い、校正が不可能な超低周波音計測機器は、当該装置によって校正済のマイクロホンを参照標準として同一音場に晒して比較校正を行うことによって校正する。このような方法により、まずは空振計などの低周波音用マイクロホン、次に気圧計も含めた低周波音計測機器の校正を進めていく。計測機器の校正結果を踏まえ、各ユーザーが計測機器の調整あるいは測定結果を補正することにより、測定値が機器によって異なる問題の大部分を解消できるのではないかと考えている。

6. まとめ

20 Hz 以下の周波数の音である超低周波音は、可聴音と比較して減衰しにくく、遠方まで音源の情報が伝達されるという特性を有する。この特性を生かし、火山噴火など大規模自然災害由来の超低周波音を遠隔観測することで、防災・減災に役立てるニーズが強まりつつある。このような現状を鑑み、本調査研究では超低周波音計測の現状と課題について調査し、今後の対応について考察した。

超低周波音はマイクロホンで測定可能な周波数下限と気圧計で測定可能な周波数上限が重なる周波数域であり、両方の機器を用いた計測が行われている。しかし、1 Hz 以下については、音響標準・圧力標準ともに標準が整備されておらず、計測機器の校正法も未確立である。低周波音計測機器の校正ができないため、観測に用いる機器によって計測結果に違いが生じることが問題となっている。

従来の音響標準は 20 Hz 以上 20 kHz 以下の可聴域を中心に整備されてきた。近年、校正周波数範囲の拡張が行われているものの、その下限は 1 Hz 程度であり、各国 NMI は周波数下限のさらなる低域化に取り組んでいる。しかし、既存のカプラ校正法やレーザーピストンホン法を 1 Hz 以下に適用した場合、様々な問題点が顕在化することが分かってきた。そのため、NMIJ の音波振動標準研究グループでは、液柱型圧力計の原理を用いた音圧発生装置を開発中である。まずは当該装置によりマイクロホンの感度校正を行い、当該装置では校正できないような気圧計などは当該装置で校正したマイクロホンを参照標準とした比較校正により、各機器の振幅・位相

の校正を可能とする計画である。校正値を踏まえてユーザーが計測機器の調整あるいは測定値の補正を行うことで、機器により測定結果に違いが生じる問題の多くが解決し、超低周波音計測を通じてより信頼性の高い情報を得られるようになると期待される。

謝辞

本調査研究を行うにあたり、分析計測標準研究部門の音波振動標準研究グループの高橋弘宜主任研究員、山田桂輔主任研究員、野里英明研究グループ長に数々のご指導を頂きました。また、超低周波音計測を行っている研究者やメーカーの方々との意見交換を行う機会があり、貴重な情報を得ることができました。穀山渉主任研究員、下田智文研究員をはじめとする同グループの皆様から、ミーティング等でアドバイスを頂きました。ここに、厚く御礼申し上げます。

付録

図2について、IEC 61094-1 に準拠した純音の減衰係数の周波数特性の計算方法を述べる。これは、ISO 9613-1 で規定した算出式を IEC 61094-1 の内容に合わせて修正したものである。

まず、測定時の温度 t (K) における飽和水蒸気圧 P_{sv} (Pa) を求める。

$$P_{sv} = \exp(1.238 \times 10^{-5} \cdot t^2 - 1.912 \times 10^{-2} \cdot t + 3.394 \times 10^1 - 6.334 \times 10^3 \cdot t^{-1}) \quad (9)$$

次に、水蒸気の実分率 χ_w を求める。

$$\chi_w = \frac{H}{100} \cdot \frac{P_{sv}}{p} \cdot (1.001 + 3.14 \times 10^{-8} \cdot p + 5.6 \times 10^{-7} \cdot t^2) \quad (10)$$

ここで、 H : 相対湿度 (%), p : 静圧 (Pa) である。求めた χ_w を用い、酸素と窒素の振動緩和周波数 (それぞれ $f_{r,O}$ (Hz) と $f_{r,N}$ (Hz)) を求める。

$$f_{r,O} = \frac{p}{101325} \cdot (24 + 4.04 \times 10^6 \cdot \chi_w \cdot \frac{0.2 + 10^3 \chi_w}{3.91 + 10^3 \chi_w}) \quad (11)$$

$$f_{r,N} = \frac{p}{101325} \cdot \frac{t}{293.15} \cdot (9 + 2.8 \times 10^3 \cdot \exp(-4.170 \cdot ((\frac{t}{293.15})^{-\frac{1}{3}} - 1))) \quad (12)$$

以上より、 α 各項の周波数特性は以下の式で表される。ここで、 c (m/s) は音速である。

$$\begin{aligned} \alpha_{cl} + \alpha_{rot} &= 1.842 \times 10^{-11} \cdot f^2 \cdot (p/101325)^{-1} \\ &\cdot (t/293.15)^{1/2} \end{aligned} \quad (13)$$

$$\begin{aligned} \alpha_{vib,O} &= 4.378 \cdot c^{-1} \cdot f^2 \cdot (f_{r,O} + f^2/f_{r,O})^{-1} \\ &\cdot (t/293.15)^{-2} \cdot \exp(-2239.1/t) \end{aligned} \quad (14)$$

$$\begin{aligned} \alpha_{vib,N} &= 3.666 \times 10^1 \cdot c^{-1} \cdot f^2 \cdot (f_{r,N} + f^2/f_{r,N})^{-1} \\ &\cdot (t/293.15)^{-2} \cdot \exp(-3352.0/t) \end{aligned} \quad (15)$$

図2では、温度 23°C, 圧力 101.325 kPa, 相対湿度 50 % の条件で計算した周波数特性を示した。なお、この計算方法は下記の条件を満たす場合に適用可能である。

$$\begin{aligned} 253.15 \text{ K} &\leq t \leq 323.15 \text{ K} \\ p &< 200 \text{ kPa} \\ 0.005 &\leq \chi_w \leq 0.050 \\ 4 \times 10^{-4} \text{ Hz/Pa} &\leq f/p \leq 10 \text{ Hz/Pa} \end{aligned}$$

参考文献

- 1) A. L. Pichon, E. Blanc, and A. Hauchecorne, editors. *Infrasound Monitoring for Atmospheric Studies Challenges in Middle Atmosphere Dynamics and Societal Benefits (Second edition)*. Springer, Cham (2019)
- 2) ISO 9613-1:1993. *Acoustics-Attenuation of Sound during Propagation Outdoors-Part 1: Calculation of the Absorption of Sound by the Atmosphere*.
- 3) 防災科学技術研究所など. Japan Volcanological Data Network (参照 2022-01-18). <https://jvdm.bosai.go.jp/app/pages/index.html?root=dataView&lang=ja>.
- 4) Comprehensive Nuclear Test Ban Treaty Organization (CTBTO). Homepage Top (参照 2021-12-13). <https://www.ctbto.org>.
- 5) 堀内竜三. *Synthesiology*, 2, 288 (2009)

- 6) 堀内竜三, 藤森威, 佐藤宗純. 日本音響学会誌, 62, 338 (2006)
- 7) 日本音響学会. 低周波音 – 低い音の知られざる世界 –. コロナ社 (2016)
- 8) 環境庁大気保全局 (当時). 低周波音の測定方法に関するマニュアル, (2000)
- 9) JIS C1400-0:2005. 風力発電システム - 第0部: 風力発電用語.
- 10) 町田信夫. 騒音制御, 30, 36 (2006)
- 11) Swedish National Board of Health and Welfare. SOSFS 1996: 7E.
- 12) Belgium Federal Public Service. Infrasound and Low Frequency Sound (参照 2021-12-03). <https://www.health.belgium.be/en/infrasound-and-low-frequency-sound>
- 13) M. Mirowska. *Journal of Low Frequency Noise, Vibration and Active Control*, 20, 67 (2001)
- 14) ISO 7196:1995. *Acoustics – Frequency-weighting Characteristic for Infrasound Measurements –*.
- 15) IEC 60050-801:1994. *International Electrotechnical Vocabulary – Chapter 801: Acoustics and Electroacoustics*.
- 16) JIS Z8106:2000. 音響用語.
- 17) 田平誠. 日本音響学会誌, 63, 428 (2007)
- 18) T. Feder. *Physics Today*, 71, 22 (2018)
- 19) 山本真行. 月刊地球, 34, 554 (2012)
- 20) 新井信夫, 岩国真紀子, 綿田辰吾, 今西祐一, 村山貴彦, 野上麻美. 日本音響学会騒音・振動研究会資料, N01 (2012)
- 21) 気象庁. 各種の火山観測 (常時観測・機動観測) (参照 2021-12-02). <https://www.data.jma.go.jp/svd/vois/data/tokyo/STOCK/kaisetsu/volmonita/volmonita.html>.
- 22) 吉久光一. 騒音制御, 21, 130 (1997)
- 23) IEC 61094-3:2016. *Electroacoustics – Measurement Microphones Part 3: Primary Method for Free-field Calibration of Laboratory Standard Microphones by the Reciprocity Technique*.
- 24) J. B. Johnson. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 121, 1 (2003)
- 25) ISO 226:2003. *Acoustics Normal Equal-loudness-level Contours*.
- 26) European Metrology Research Programme. Metrology for a Universal Ear Simulator and the Perception of Non-audible Sound (参照 2022-01-27). <https://www.ptb.de/emrp/ears-home.html>.
- 27) M. Ripepe and E. Marchetti. *Geophysical Research Letters*, 29, 331 (2002)
- 28) J. B. Johnson and M. Ripepe. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 206, 61 (2011)
- 29) 坂井孝行, 山里平, 宇平幸一. 験震時報, 63, 1 (2000)
- 30) 山里平. 火山, 50, S7 (2005)
- 31) 山里平, 福井敬一, 宇平幸一, 橋本徹夫, 森博一. 火山, 38, 79 (1993)
- 32) Y. Yukutake, M. Ichihara, and R. Honda. *Earth, Planets and Space*, 70, 53 (2018)
- 33) 横尾亮彦. 火山, 54, 43 (2009)
- 34) 東京大学地震研究所. 【研究速報】2022年1月15日13時頃 (日本時間) のフンガ・トンガ・フンガ・ハアパイ火山の噴火 (参照 2022-01-19). <https://www.eri.u-tokyo.ac.jp/topics/>.
- 35) A. Kogelnig, E. Surinach, I. Vilajosana, J. Hübl, B. Sovilla, M. Hiller, and F. Dufour. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 11, 2355 (2011)
- 36) J. B. Johnson, J. F. Anderson, H. P. Marshall, S. Havens, and L. M. Watson. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, 126, e2020JF005741 (2021)
- 37) 新井伸夫. 日本音響学会誌, 70, 605 (2014)
- 38) A. Kogelnig, J. Hübl, E. Surinach, I. Vilajosana, and B. W. McArdell. *Natural Hazards*, 70, 1713 (2014)
- 39) 三雲健. 京大地球物理学研究の百年, 45 (2010)
- 40) 気象庁ホームページ. 知識・解説 (津波発生と伝播のしくみ, 津波を予測するしくみ) (参照 2021-01-27). <https://www.jma.go.jp/jma/menu/menuknowledge.html>.
- 41) 日本気象協会. インフラサウンド・モニタリング・ネットワーク (参照 2021-12-21). <http://micos-sc.jwa.or.jp/infrasound-net/observed/>.
- 42) 風力発電施設から発生する騒音等の評価手法に関する検討会. 風力発電施設から発生する騒音等への対応について【報告書】(2016)
- 43) T. Merlin, S. Newton, B. Ellery, J. Milverton, and C. Farah. *Systematic Review of the Human Health Effects of Wind Farms by National Health and Medical Research Council* (2015)
- 44) 橘秀樹ほか. S2-11 風力発電等による低周波音の人への影響評価に関する研究【報告書】(2012)
- 45) 外務省. 包括的核実験禁止条約 (CTBT) (参照 2021-12-10). <https://www.mofa.go.jp/mofaj/gaiko/kaku/ctbt/index.html>.

- 46) Y. Ishihara, Y. Hiramatsu, M.-Y. Yamamoto, M. Furumoto, and K. Fujita. *Earth Planets Space*, 64, 655 (2012)
- 47) M. Yamada. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 126, e2021JB023076 (2021)
- 48) 中右介. 日本音響学会誌, 72, 422 (2016)
- 49) Brüel & Kjær. BK Type4193 1/2 Low Frequency Pressure Field Microphone (参照 2021-12-16). <https://www.bksv.com/en/transducers/acoustic/microphones/microphone-cartridges/4193>.
- 50) Commissariat à l'énergie atomique et aux énergies alternatives. MB3: a New Infrasound Sensor with Remote Calibration Capability (参照 2021-12-16). http://www-dase.cea.fr/actu/dossiers_scientifiques/2014-02-28/index_en.html#References.
- 51) Brüel & Kjær. Technical Documentation: Microphone Handbook (2019)
- 52) 佐藤宗純, 高橋弘宜, 堀内竜三. 日本音響学会誌, 64, 673 (2008)
- 53) F. Zhang, D. Liu, A. Liu, X. Gang, and L. Li. *Measurement*, 162, 107905 (2020)
- 54) 株式会社アコー. 空振計 TYPE 7144/3348 (参照 2021-12-21). <https://www.aco-japan.co.jp/product/id4286.html>.
- 55) 東邦マーカントイル株式会社. ナノバロメーター Model 6000 16B (参照 2021-12-16). <http://www.mercan.co.jp/product-paroscientific-nanobaro.html>.
- 56) 大井拓磨. 月刊地球, 40, 515 (2018)
- 57) 市原美恵. MEMS 空振センサを用いた火山観測 (東京大学地震研究所 共同利用実施報告書) (2019)
- 58) Chaparral Physics. Infrasound Sensors (参照 2021-12-16). <http://chaparralphysics.com/sensors.html>.
- 59) 高知工科大学. 高知工科大学インフラサウンド観測ネットワークシステム (参照 2022-01-18). <http://infrasound.kochi-tech.ac.jp/infrasound/index.php>.
- 60) National Institute of Polar Research. — § 極地研究所 昭和基地・周辺 インフラサウンドデータアーカイブ (参照 2022-01-18). https://scidbase.nipr.ac.jp/modules/metadata/index.php?content_id=322.
- 61) Incorporated Research Institutions for Seismology. Data Services Products: Infrasound (参照 2022-01-18). <https://ds.iris.edu/ds/products/infrasound/>.
- 62) 綿田辰吾. 低周波マイクロフォン比較実験. 日本地球惑星科学連合大会 (2010)
- 63) 市原美恵. 火山の空振モニタリング技術の確立 (東京大学地震研究所 共同利用実施報告書) (2016)
- 64) IEC 61094-4:1995. *Electroacoustics – Measurement Microphones Part 4: Specifications for Working Standard Microphones*.
- 65) IEC 61094-1:2000. *Measurement Microphones Part 1: Specifications for Laboratory Standard Microphones*.
- 66) IEC 61094-2:2009. *Electroacoustics – Measurement Microphones-Part 2: Primary Method for Pressure Calibration of Laboratory Standard Microphones by the Reciprocity Technique*.
- 67) J. Avison and R. Barham. *Metrologia*, 51, 09007 (2014)
- 68) 坂本慎一. 日本音響学会誌, 66, 466 (2010)
- 69) R. J. Jackett. *Metrologia*, 51, 423 (2014)
- 70) P. Vincent, D. Rodrigues, F. Larsonnier, C. Guianvarc'h, and S. Durand. *Metrologia*, 56, 015003 (2019)
- 71) E. S. Olsen. *Forum Acusticum*, 2233 (2020)
- 72) R. Barham. *Journal of Low Frequency Noise and Vibration*, 12, 36 (1994)
- 73) R. Barham and M. Goldsmith. *Metrologia*, 44, 210 (2014)
- 74) L. B. He, W. He, J. H. Qin, P. Yang, B. Zhong, and F. Niu. *MA PAN-Journal of Metrology Society of India*, 27, 213 (2012)
- 75) W. He, F. Zhang, L. He, and Z. Rong. *Journal of Sound and Vibration*, 335, 105 (2015)
- 76) F. Zhang, W. He, L. He, and Z. Rong. *Journal of Sound and Vibration*, 358, 324 (2015)
- 77) W. He, L. He, F. Zhang, Z. Rong, and S. Jia. *Measurement Science and Technology*, 27, 025018 (2016)
- 78) E. Bilgic, E. Sadikoglu, and B. Karaboece. *Proc. SPIE 4827, Fifth International Conference on Vibration Measurements by Laser Techniques: Advances and Applications*, 74 (2002)
- 79) E. Sadikoglu, E. Bilgic, and B. Karaboece. *Applied Acoustics*, 65, 833 (2004)
- 80) J. G. Suh, W. H. Cho, T. Koukoulas, H.-Y. Kim, Z. Cui, and Y. Suzuki. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, 21, 1279 (2020)
- 81) F. Larsonner, H.-S. Uszakiewicz, and M. Mende. *Proceedings of the INTER-NOISE and NOISE- CON Congress and Conference Proceedings, InterNoise14*, 1127 (2014)
- 82) D. A. Scott, L. P. Dickinson, and M. J. Ballio. *Measurement Science and Technology*, 30, 3 (2019)
- 83) 高橋弘宜, 藤森威, 堀内竜三, 佐藤宗純. 音講論 (2005)

- 84) EMPIR. Metrology for Low-frequency Sound and Vibration 19env03 Infra-AUV (参照 2021-12-21).
<https://www.ptb.de/empir2020/infra-auv/home/>.
- 85) M. Iizumi and H. Kajikawa. *Measurement: Sensors*, 18, 100184 (2021)
- 86) Bureau International des Poids et Mesures. BIPM-CTBTO Practical Arrangement (参照 2021-12-10).
<https://www.bipm.org/en/liaison-partners/ctbto>.
- 87) ASNITE 認定事業者一覧 (参照 2022-01-28).
<https://www.nite.go.jp/data/000056651.pdf>.