

日本音響学会 編
The Acoustical Society of Japan

音響サイエンスシリーズ **16**

低 周 波 音

低い音の知られざる世界

土肥哲也

編著

赤松友成

新井伸夫

井上保雄

入江尚子

時田保夫

中 右介

町田信夫

山極伊知郎

共著

コロナ社

音響サイエンスシリーズ編集委員会

編集委員長

富山県立大学

工学博士 平原 達也

編集委員

熊本大学

博士(工学)

川井 敬二

九州大学

博士(芸術工学) 河原 一彦

千葉工業大学

博士(工学)

荻木 禎史

小林理学研究所

博士(工学) 土肥 哲也

神奈川工科大学

工学博士

西口 磯春

日本電信電話株式会社

博士(工学) 廣谷 定男

同志社大学

博士(工学)

松川 真美

(五十音順)

(2017年6月現在)

刊行のことば

音響サイエンスシリーズは、音響学の学際的、基盤的、先端的トピックについての知識体系と理解の現状と最近の研究動向などを解説し、音響学の面白さを幅広い読者に伝えるためのシリーズである。

音響学は音にかかわるさまざまなものごとの学際的な学問分野である。音には音波という物理的側面だけでなく、その音波を受容して音が運ぶ情報の濾過処理をする聴覚系の生理学的側面も、音の聞こえという心理学的側面もある。物理的な側面に限っても、空気中だけでなく水の中や固体の中を伝わる周波数が数ヘルツの超低周波音から数ギガヘルツの超音波までもが音響学の対象である。また、機械的な振動物体だけでなく、音を出し、音を聞いて生きている動物たちも音響学の対象である。さらに、私たちは自分の想いや考えを相手に伝えたり注意を喚起したりする手段として音を用いているし、音によって喜んだり悲しんだり悩まされたりする。すなわち、社会の中で音が果たす役割は大きく、理科系だけでなく人文系や芸術系の諸分野も音響学の対象である。

サイエンス (science) の語源であるラテン語の *scientia* は「知識」あるいは「理解」を意味したという。現在、サイエンスという言葉は、広義には学問という意味で用いられ、ものごとの本質を理解するための知識や考え方や方法論といった、学問の基盤が含まれる。そのため、できなかったことをできるようにしたり、性能や効率を向上させたりすることが主たる目的であるテクノロジーよりも、サイエンスのほうがすこし広い守備範囲を持つ。また、音響学のように対象が広範囲にわたる学問分野では、テクノロジーの側面だけでは捉えきれない事柄が多い。

最近では、何かを知ろうとしたときに、専門家の話を聞きに行ったり、図書館や本屋に足を運んだりすることは少なくなった。インターネットで検索し、リ

ii 刊行のことば

ストアップされたいくつかの記事を見てわかった気になる。映像や音などを視聴できるファンシー（fancy）な記事も多いし、的を射たことが書かれてある記事も少なくない。しかし、誰が書いたのかを明示して、適切な導入部と十分な奥深さでその分野の現状を体系的に著した記事は多くない。そして、書かれてある内容の信頼性については、いくつもの眼を通したのちに公刊される学術論文や専門書には及ばないものが多い。

音響サイエンスシリーズは、テクノロジーの側面だけでは捉えきれない音響学の多様なトピックをとりあげて、当該分野で活動する現役の研究者がそのトピックのフロンティアとバックグラウンドを体系的にまとめた専門書である。著者の思い入れのある項目については、かなり深く記述されていることもあるので、容易に読めない部分もあるかもしれない。ただ、内容の理解を助けるカラー画像や映像や音を附録 CD-ROM や DVD に収録した書籍もあるし、内容については十分に信頼性があると確信する。

一冊の本を編むには企画から一年以上の時間がかかるために、即時性という点ではインターネット記事にかなわない。しかし、本シリーズで選定したトピックは一年や二年で陳腐化するようなものではない。まだまだインターネットに公開されている記事よりも実のあるものを本として提供できると考えている。

本シリーズを通じて音響学のフロンティアに触れ、音響学の面白さを知るとともに、読者諸氏が抱いていた音についての疑問が解けたり、新たな疑問を抱いたりすることにつながれば幸いである。また、本シリーズが、音響学の世界のどこかに新しい石ころをひとつ積みきっかけになれば、なお幸いである。

2014年6月

音響サイエンスシリーズ編集委員会
編集委員長 平原 達也

まえがき

地球上にはいろいろな「低い音」が存在している。例えば、ゾウは人間に聞こえないくらい低い音で会話をしていたり、海中のクジラは低い音で歌っていたりする。人間は、パイプオルガンや大太鼓などによる演奏で「低い音」を楽しみ、また、「低い音」を利用して核実験や津波を監視したりしている。本書は、これらの「低い音の知られざる世界」を紹介する。

「低い音」にはいろいろな言い方がある。重低音、低音、低周波音、超低周波音、空気振動、低周波空気振動、空振、インフラサウンドなどである。いずれも「低い音」という広い意味では同じであるが、一般的には「重低音」の知名度が高いようである。重低音と低周波音の違いは2.1節で説明するが、本書は日本音響学会編であり、当学会では「低い音」のことを「低周波音」または「超低周波音（インフラサウンド）」と呼ぶことが多いため、本書ではこれらの用語を使うことに努める。

環境省をはじめとして、低周波音に関する研究発表が多い日本音響学会や日本騒音制御工学会では、100 Hz 以下の音を「低周波音」、そのうち 20 Hz 以下の音を「超低周波音（インフラサウンド：infrasound）」と呼ぶことが多い。前者の定義は、JIS などの規格で定められたものではなく、国によりその対象範囲も異なる。第4章でその歴史的な経緯を紹介する。後者の定義は、ISO 7196 にインフラサウンドとして示されており、周波数が 20 Hz よりも低くなると人間が「音」として知覚しづらくなることから一般的な音と区別して「超」や「インフラ」という接頭語がついている。20 Hz 以下の音を人間が聞くと、耳のまわりがワサワサとした感覚になったり、高音圧で数 Hz 以下の場合は耳の鼓膜が押されたり引っ張られたりする感覚になったりする（これは、高層ビルのエレベータに乗ったときの耳がツンとする感覚に近い）。いずれも

「音」を聞いている感覚というよりは、気圧変化や風（粒子速度）を感じているという表現が適切であろう。なお、2.2節で触れる水中の音に関する「低周波音」の周波数帯域に定義はないが、本書ではおよそ100 Hz以下を対象としている。

低い音のことを、日本語では母音（あいうえお）の“お”や、濁音を使って表現することが多い。例えば「ゴロゴロ、ドーン、ドン、ドカン、ドロドロ、ポーン、ポン」などである。本シリーズの「音のピッチ知覚」によれば、母音の中で最も周波数が低いのが“お”であることが起因しているようである。しかし、本書で取り上げる「低周波音」の周波数領域は、音声よりも低い100 Hz以下である。人間は、100 Hzよりも低い音声を発することは困難であるが、これらの音を耳で聞いたり、体感したりすることは可能である。例えば、雷の「ドーン、ゴロゴロ」という音や、花火の「ドーン」という音は、だれしも体験している「低周波音」といえる。特に花火の音は、耳で聞くというよりも「腹で聞く」と表現されるように、大音圧の低周波音を体感することができる。人間の腹や胸などの体の一部の固有振動数が100 Hz以下にあり、この周波数帯域で音と体が共振現象を引き起こしやすくなることが理由ではないかと考えられる。

100 Hz以下の音は、このほかにも、映画館、コンサートホール、ピアノ・大太鼓・パイプオルガンなどの一部の楽器演奏などにおいて気づかぬうちに聞いているのである。これらの「低周波音」は、迫力や荘厳な雰囲気を出すために人間が意図的に作り出したものである。人間が低い音に対してなぜこれらの印象を持つのかは明らかになっていないが、火山の噴火、雷などの人間には制御不能な自然現象や、大きな物体が動くときには「低周波音」が発生することが多く、経験的に「低周波音＝人間には制御不能な現象、大きな物体が動くときの音」という印象を持っているのかもしれない。雷は、「神鳴り」が語源ともいわれており、パイプオルガンは教会で演奏されることが多い。低周波音が荘厳な雰囲気をもたらすことを人間は古くから知っていたのかもしれない。

このように大昔から低周波音と深いつながりのある人間であるが、産業革命や、高度経済成長が進むと低周波音に悩まされるようになる。ディーゼルエンジンによる発電設備、ダムの放流、飛行機、鉄道、車などの登場により、人間の意図しない低周波音が発生するようになったためである。これらの低周波音は、周辺民家まで伝搬し、窓の固有振動数と一致する場合には窓振動が増幅して「ガタガタ」という二次音（可聴音）を発生させることがある。また、ある場合は人間に圧迫感・振動感という低周波音独特の人体感覚を引き起こすこともある。これらの物的・人的影響は、騒音・振動などの環境問題と同様に苦情を引き起こし、いわゆる低周波音問題として認識されている。第4章では、低周波音問題の歴史を丁寧にひも解き、現状を解説することを試みる。低周波音問題は、現在においても十分に解決されていない問題であり、今後も積極的な調査・研究が必要とされている。しかし、低周波音を計測する機械すらなかった1960年頃とは異なり、現在は低周波音実験室が整備されたり、屋外で20 Hz以下の超低周波音が再生可能な実験装置が開発されたりするなど、低周波音の影響把握のための調査・研究設備が急速に整いつつある状況にある。また、音源対策においても能動制御（ANC）による低周波音対策が実用化されるなど、この分野における調査研究の進展が期待される状況にある。

10年前頃までの学会の講演発表会において、「低周波音」といえば建具振動や圧迫感などの低周波音問題を指すことがつねであった。しかし、近年では、低周波音を利用した技術について学会でセッションが組まれたり、低周波音を使った動物のコミュニケーションについての研究発表が増えたりするなど、これまでとは異なる流れがみえてきている。低周波音には「低周波音問題」という負の側面もあれば、「低周波音を利用した技術」という正の側面もある。これまでに発行された「低周波音」の書籍は、負の側面を取り上げることがつねであったが、本書は正と負の両方を取り上げ、低周波音の両面性を読者に知ってもらうことをねらっている。

これから低周波音を研究する学生や、これから低周波音に関する「業務」に携わる方々を読者として想定している。そのため、数式などはほとんど示さ

ず、図や写真を多用することで「低周波音」に興味を持ってもらうことに注力した。音とは何か？、音圧レベルや dB（デシベル）の定義、低周波音に関する数式などについては、コロナ社「音響学入門」や、教科書ともいえる中野有朋先生の書籍を参考にされたい。読者が、低周波音の世界に興味を持っていたいたり、この分野で研究を進めて本書に書かれていない「低い音の知られざる世界」を見つけていただけたりすれば、われわれ著者にとってこれ以上にありがたいことはない。

2017年9月

著者を代表して
土肥 哲也

執筆分担

第1章

- | | |
|-------|------------|
| 1.1 節 | 入江尚子, 土肥哲也 |
| 1.2 節 | 赤松友成 |
| 1.3 節 | 新井伸夫 |

第2章

- | | |
|-------|-------------|
| 2.1 節 | 土肥哲也, 井上保雄 |
| 2.2 節 | 中 右介 |
| 2.3 節 | 山極伊知郎, 井上保雄 |

第3章

- | | |
|------------|------|
| 3.1, 3.2 節 | 新井伸夫 |
| 3.3 節 | 井上保雄 |

第4章

- | | |
|------------|------------------|
| 4.1, 4.2 節 | 時田保夫, 町田信夫 |
| 4.3 節 | 土肥哲也, 町田信夫, 井上保雄 |
-

目 次

第1章 低周波音の不思議な世界

1.1	ゾウの低周波音コミュニケーション	1
1.1.1	ゾウの低周波音によるコミュニケーション	1
1.1.2	音カメラを用いた観測例	3
1.1.3	低周波音計を用いた計測例	4
1.1.4	低周波音声のモニタリング	7
1.1.5	エレファントボイスディテクターの試作	10
1.2	クジラのコミュニケーション	12
1.2.1	歌うクジラの発見	12
1.2.2	海中での低周波音の伝搬と利用	16
1.2.3	冷戦終結とクジラの音声研究	18
1.2.4	クジラの低周波音を捉える水中音響ネットワーク	19
1.2.5	クジラの低周波音の謎解き	21
1.2.6	日本でもクジラの歌の研究を開始	23
1.3	自然界の低周波音	25
1.3.1	地震の揺れがもたらす低周波音	25
1.3.2	火山噴火がもたらす低周波音	29
1.3.3	隕石の爆発による低周波音	32
1.3.4	雷に起因する低周波音	35
	引用・参考文献	36

第2章 低周波音の最新技術

2.1	低周波音発生装置	39
2.1.1	身近な低周波音源	39

2.1.2	実験装置としての低周波音源	44
2.1.3	低周波音源を利用した調査結果の例	58
2.2	ソニックブーム	65
2.2.1	ソニックブームとは	65
2.2.2	ソニックブームの特徴	69
2.2.3	ソニックブーム低減技術	71
2.2.4	ソニックブーム推算技術	74
2.2.5	ソニックブーム計測技術	78
2.2.6	ソニックブーム評価技術	80
2.2.7	飛行試験技術	83
2.2.8	超音速機とソニックブームの今後	87
2.3	低周波音の低減技術	88
2.3.1	低周波音の音源対策	89
2.3.2	低周波音の伝搬経路対策	98
	引用・参考文献	108

第3章 低周波音を利用した技術

3.1	超低周波音を用いた核実験監視網	115
3.2	超低周波音を利用した津波、雪崩の検知	119
3.2.1	津波の波源生成が励起した超長周期の気圧変動	119
3.2.2	雪崩の遠隔監視に向けて	124
3.3	低周波音を利用した発電と冷凍	128
3.3.1	熱音響現象	128
3.3.2	スタックによる音と熱エネルギーの変換	129
3.3.3	熱音響発電	130
3.3.4	熱音響冷凍	130
3.3.5	熱音響現象の歴史と研究の動向	131
	引用・参考文献	132

第4章 低周波音問題の調査・研究

4.1 低周波音問題の調査・研究（1985年以前）	133
4.1.1 初期の問題発生現場	134
4.1.2 低周波音の計測器	139
4.1.3 1975年までの研究	140
4.1.4 1975年～1985年の研究	142
4.1.5 実態調査	144
4.1.6 苦情の内容	145
4.1.7 低周波空気振動の影響	146
4.1.8 低周波空気振動の感覚	147
4.1.9 G特性	153
4.2 低周波音問題の調査・研究（1985年以降）	154
4.2.1 1985年以降の低周波音問題	154
4.2.2 低周波音の人体影響に関する研究の紹介	158
4.2.3 低周波音問題対応のための評価指針（参照値）	162
4.2.4 諸外国における低周波音の評価指針	166
4.3 低周波音問題と調査・研究の現状	167
4.3.1 近年における低周波音源と研究動向	167
4.3.2 低周波音の評価の現状	177
4.3.3 低周波音問題の課題と今後の展望	184
引用・参考文献	186

索引	192
----	-----

第1章

低周波音の不思議な世界

人間にはほとんど聞くことのできない 20Hz 以下の低い音の世界、そこではゾウが会話をして、クジラが歌っているという。また、火山の噴火、隕石の落下、雷、地震や津波で発生する音にも低い音が含まれている。

本章ではこれらの知られざる低い音の不思議な世界を紹介する。低い音の世界のキーワードは、人間よりもはるかに大きいスケールである。はじめに、1.1 節では陸上最大の動物であるゾウの発話の観測例や、超低周波音の可聴化の試みを紹介する。続いて、1.2 節では海洋で最大の生き物であるクジラの歌や、海中での音響観測網について紹介する。最後に、1.3 節では火山の噴火など大自然の現象が引き起こす音の観測例について取り上げる。

1.1 ゾウの低周波音コミュニケーション

1.1.1 ゾウの低周波音によるコミュニケーション

ゾウは、人間には聞こえないくらい低い音を使って会話をしているという。このことは、あまり知られていないが、人間よりも体が大きいゾウが、波長の長い低周波音を使っていることは理にかなっているし、また、ゾウの脳は陸上動物最大の重量であり、体重比で見ても、チンパンジーなどの大型類人猿と匹敵する大きさである^{1)†}ということからも納得ができる。

ゾウが低周波音を発していることを発見したのは、コーネル大学の動物学者キャサリン ペイン (K. Payne) である²⁾。ペインは、1984 年にアメリカ合衆

[†] 肩付きの数字は、各章末の引用・参考文献の番号を示す。

2 1. 低周波音の不思議な世界

国オレゴン州のメトロワシントンパーク動物園でゾウを観察していた際に、「雷のような」音の振動を感じたと同時に、目の間の額の部位が細かく振動していることに気が付いた。後に低周波音を記録することができる電子機器を使い、ゾウが低周波音を発していることが確かめられた。ゾウが発する低周波音は5～数十 Hz の間と考えられている。この帯域の低い音は、高い音と同様に距離により減衰するものの、空気吸収や地表面超過減衰などの影響がほとんどないために、大きな音の場合、数 km の距離を伝わるという特徴を持つ。そのため、ゾウは、遠距離にいる個体間で、音声コミュニケーションを行うことが可能であると考えられる。

ゾウがこの低周波音を使って、どのような情報をやりとりしているのかについては、まだ研究途上ではあるが、低周波音声（ゾウが発した音のうち、低周波成分を含む音声）によって個体の識別が可能であることはわかっている。カレン マッコーム (K. McComb) らは、ゾウは、コンタクト音声（ゾウが相手とコミュニケーションをとるために発する音声）という 21 Hz 程度の低周波音声を使って、視覚的に遮られた仲間どうしの居場所を確認し合う。また、アンボセリ国立公園に生息するサバンナゾウの雌は、家族以外の 100 頭以上の個体のコンタクト音声を識別していることを報告している³⁾。ゾウは、出会う頻度の高い群れに属するメンバーと、出会う頻度の低い群れに属するメンバーの音声を弁別しており、出会う頻度の低い群れのメンバーの音声が聞こえると、群れの仲間が空間的に凝集する警戒態勢を取った。マッコームらは、このほかに野外で観察された事例を報告している。調査中に偶然死亡した雌の音を録音していたものを、死後3か月後および23か月後にその個体の家族に聞かせたところ、やはりその音声を識別していることが確認された。このことから、ゾウは個体のコンタクト音声を、長期間聞く機会がなくても記憶していることが示された。のちにコンタクト音声は、およそ 2.5 km 離れた位置で受信されても、発声個体の社会的アイデンティティについて、受信者は識別可能なことが示された⁴⁾。

1.1.2 音カメラを用いた観測例

ゾウの音声コミュニケーションに関する先行研究は、アフリカゾウを対象としたものが多かったが、アジアゾウも低周波音声を発することは知られていた。入江尚子は、2004年にスリランカのウダワラウエ国立公園において、長谷川壽一、齋藤慈子、末續野百合とともに、野生個体の低周波音声の録音に成功している。

さらに、入江尚子は、熊谷組の大脇雅直、財満健史らとともに、アジアゾウの飼育数が国内最多である市原ぞうの国（図1.1）において、2008年に低周波音の録音を試みている^{5),6)}。このとき、熊谷組、信州大学、中部電力が共同開発した音カメラを録音に用いた（図1.2）。



図1.1 市原ぞうの国



図1.2 低周波音の音源を
同定する音カメラ（画
像提供：熊谷組）

音カメラは、カメラから取り込んだ動画上に、音源の位置、音圧、周波数が円の位置、大きさ、色で表示される（図1.3の上側のグラフ）。そのため、実験者の耳には聞こえない低周波音も、リアルタイムに観察することが可能であった。その結果、計15シーンにおいて3頭のゾウの低周波音が録音された。

中でも特筆すべき状況が観察された3シーンについてここで紹介する。シーン1では放飼場内で、すぐ隣に立っていた個体（ゾウ）間で頻繁に低周波音声が繰り返し発せられた。シーン2では、エレファントショーに出演するために

4 1. 低周波音の不思議な世界

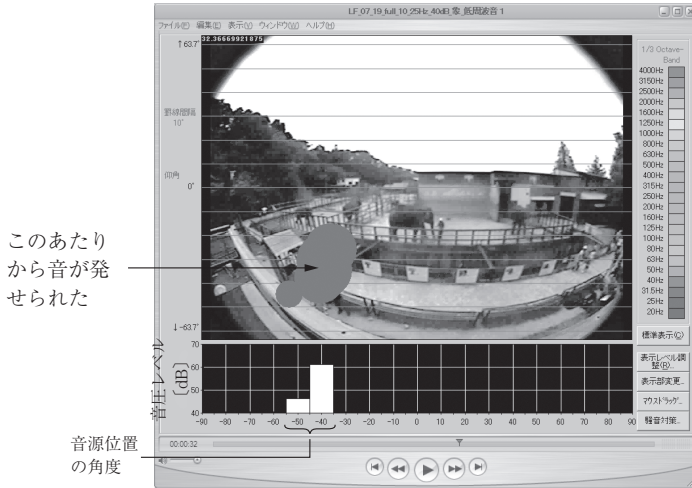


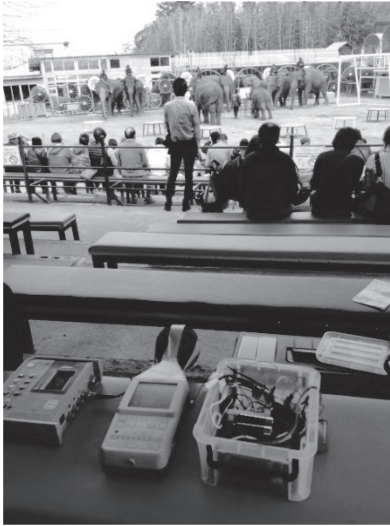
図 1.3 音カメラで可視化したゾウの低周波音声
(上側のグラフ)

放飼場を離れていた個体が、放飼場に戻ってきたあとに、多くの低周波音声が記録された。このとき、音源の位置から推測される発声個体の数が多かったことなどから、個体の特定はできなかった。シーン3では、来園者から餌をもらった個体が低周波音声を発したのち、10 mほど離れた位置にいた個体が振り返り、近寄ってきた。いずれの低周波音声も、社会的アイデンティティや個人の発情状態以外の情報を含む音声だった可能性は高いと考えられる。アジアゾウの低周波音声が、さまざまな情報のやりとりに使用されていることを示唆する結果となった。

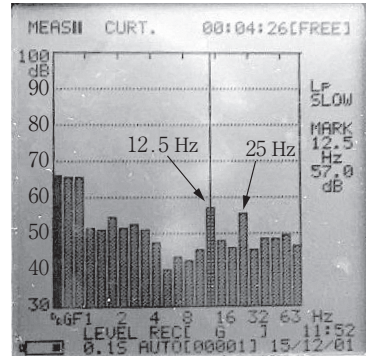
1.1.3 低周波音計を用いた計測例

土肥哲也らは2015年に市原ぞうの国を訪れた。このときは、音カメラではなく1～80 Hzの1/3オクターブバンド音圧レベルがリアルタイムに表示できる低周波音計（RION NA-18、図1.4）を用いて低周波音の計測を試みた。

市原ぞうの国では、エレファントショーが1日に2回行われ、ショーのあとにゾウの背中にお客を乗せた状態で歩くイベントが行われる。ゾウに乗った人



(a) 客席から見た低周波音計とゾウ



(b) 低周波音計 (RION NA-18) の画面, 12.5 Hz と 25 Hz の低周波音が計測されている。

図 1.4 市原ぞうの国と低周波音計

を写真撮影するとき、「ハイチーズ」と係員が日本語でしゃべると、そのあとに数秒間にわたり 12.5 Hz の音が計測された。このときの計測位置は、ゾウから数十 m 離れた客席であり、音圧レベルは 50 ~ 60 dB であった。ゾウが発したと思われるこの音は、観客にはおそらく聞こえないが、低周波音計の表示を見る限り、この「ハイチーズ」の声と、ゾウの 12.5 Hz の音声は、ある個体の場合にほぼ毎回対応が見られた。この計測結果から、ゾウの中には、「ハイチーズ」の際に動きを止めてカメラに向き、低周波音を発する場合があることがわかった。一方、エレファントショーの最中は、数回、低周波音声が計測された程度で、ゾウの動きが多い割には“静か”であった。ゾウが長い鼻を使って、観客の子供にぬいぐるみを渡したあとに、「パオー」という人間が聞こえる音を発したが、このときの周波数成分は 80 Hz 以上が主成分であり、数十 Hz 以下の成分は計測されなかった。なお、ゾウは低域だけでなく 1 kHz などの周波数帯域の音声も発し、人間の声を模倣するという報告がある⁷⁾。

索引

<hr/>					
あ					
亜音速	66	音響暴露試験	50	空気ばね	9
アクチュエータ	56	音響変換器	50	空振	29
アクティブ消音	98	音高	40	<hr/>	
アクティブ騒音制御	89	音速	25	け	
圧迫感	67	<hr/>		減衰	
圧迫感・振動感		か		16	
43, 49, 133, 149, 180, 181		快音化	172	<hr/>	
圧迫感と振動感	148	回折減衰	88	公害等調整委員会	
圧迫感や振動感	160	ガスオルガン	128	剛性則	
アレイ	21	風雑音	11, 176	60, 102, 103	
アレイ観測	31, 117, 119	風によるノイズ	117	高層気象観測データ	
<hr/>		がたつき	53, 138, 141, 145, 163, 181, 182	34	
い		可聴化	12	公調委	
隕石	32	雷	25, 35, 41	182	
インパルス	55	感覚閾値	160, 183	国際騒音制御工学会議	
インピーダンス	13	環境	184	141	
<hr/>		環境アセスメント	166, 179, 181	骨導聴力	
う		環境影響評価	166, 179, 184, 185	13	
ウインドスクリーン	11, 176	環境基準	177, 184	固有振動	
ウーハ	45	観測網	124	60	
<hr/>		<hr/>		固有振動数	
え		き		60, 94	
エイトック	18	気圧計	26, 117, 119	コンコルド	
エレファントボイス		気にならない	181, 183	67	
ディテクター	10	気になるレベル	163	コンタクト音声	
遠隔監視	128	逆位相	53, 101, 174	2	
<hr/>		吸音	88, 89, 104	<hr/>	
お		吸収	16	さ	
大太鼓	42	共振	60	サイドブランチ	
オクターブ類似性	41	共鳴	9, 100, 104	98, 99	
音カメラ	3	キールダンパ	95	サウンドスペクトログラム	
音圧依存性	108	<hr/>		8	
音響管	101	く		サウンドチャンネル	
音響観測ネットワーク	19	空気吸収	2, 44	14, 16	
音響伝搬層	16	空気振動	133	サブウーハ	
音響透過損失	102			43, 45	
				サーボアクチュエータ	
				53	
				参照値	
				54, 162, 164, 165, 166, 178, 181, 183	
				1/3 オクターブバンド	
				4, 168	
				<hr/>	
				し	
				地震	
				25	
				地震観測網	
				115	
				地震動の伝搬速度	
				28	
				室内音響理論	
				62, 65	
				質量則	
				60, 102	
				地鳴り	
				29	
				遮音	
				88, 98, 102, 103, 147, 186	
				遮音性能	
				55, 176	

重低音 42, 43
 消音器 99
 衝撃音 70, 137
 衝撃音源 55
 衝撃性 160, 172, 175, 186
 衝撃波 29, 35, 67, 68, 71
 寝室の許容値 163, 164, 178
 振動ふるい機 93
 振動レベル計 139

す

水中音波観測網 115
 水中スピーカ 16
 水中生物音 24
 睡眠影響 150, 158, 169, 181
 スピーカボックス 46

せ

制振 95

そ

相互相関解析 32
 測定方法に関する
 マニュアル 156, 157, 162
 ソーサス 18
 ソナグラム 14
 ソニックブーム 65, 67
 ソニックブーム
 シミュレータ 81
 ソファークチャネル 17

た

太鼓 42
 大気境界波 124
 多孔質 104
 多孔質吸音材 98
 建具振動 51
 建具のがたつき 65, 146
 単発音圧暴露レベル 175
 単発騒音暴露レベル 83

ち

超音速 66
 超音波 10, 43
 聴覚閾値
 6, 45, 46, 163, 169, 183

超過減衰 2, 44
 聴感閾値 147, 158
 聴感実験 45, 46, 49, 178,
 180, 181, 183

て

定在波 60, 62, 64
 低周波音計 4
 低周波音源 16
 低周波音実験室 45, 46, 144
 低周波音の測定方法に関する
 マニュアル 180, 184
 低周波音分科会 185
 低周波音問題対応の手引書
 157, 162, 178, 180, 184
 低周波空気振動
 133, 143, 144, 161, 163
 電磁空気圧発生装置 50
 伝搬速度 71, 74, 124

と

透過損失 88, 98, 102
 動吸振器 94
 ドップラー効果 66
 トンネル発破 137

な

雪崩 115, 125

に

日本騒音制御工学会 185

ね

熱音響 128

は

ハイドロホン 20
 バイプオルガン 39, 40
 爆音器 45
 バットディテクター 10
 発破音 100, 160, 172
 花火 44

ひ

微気圧振動 116
 微気圧振動観測網 121

微細多孔板 89, 98, 104
 非線形 71, 74, 75, 76

ふ

風防 11, 176
 フォーカスブーム 79
 ブームカーペット 68
 フラットトップ 83
 ブレードスラップ 173
 噴火 25

へ

ヘリコプター 6
 ヘルムホルツ共鳴器
 100, 104

ほ

砲撃音 137, 175

ま

マッハ数 65
 マッハ波 66

も

モニタリング 7, 186

ゆ

優位感覚 49
 優先感覚 180
 優先感覚試験 148
 優先感覚聴感実験 181

ら

落雷 25

り

リド 21

れ

レイケ管 128

ろ

ローパスフィルタ 10

A		H		N	
AB コール	21	H. G. Leventhall	140	NTP サーバー	126
ANC	89, 91, 93, 172, 174			N 波	69, 71
ATOC	18	I			
A 特性	149, 153, 175, 183	ICAO	80	Q	
C		Infrasound	141	QueSST	87
CFD	74	Inter Noise	141	S	
CTBT	115, 121	ISO	180	SOFAR	17
C 特性	175	L		SOSUS	18
D		Lamb 波	124	T	
D-SEND	84	LSL 特性	149	TMD	95
G		LIDO	21	W	
G 特性	143, 153, 154, 165, 180, 181, 183	M		W. Tempest	140
		MPP	98, 104		

— 編著者・著者略歴 —

土肥 哲也 (どい てつや)

1995年 学習院大学理学部物理学科卒業
1997年 学習院大学大学院自然科学研究科
修士課程修了(物理学専攻)
1997年 小林理学研究所勤務
2009年 博士(工学)(成蹊大学)
現在に至る

新井 伸夫 (あらい のぶお)

1982年 神戸大学理学部地球科学科卒業
1984年 神戸大学大学院理学研究科
修士課程修了(地球科学専攻)
1984年 株式会社間組勤務
1992年 株式会社三菱総合研究所勤務
2001年 日本気象協会勤務
2005年 博士(環境学)(名古屋大学)
2014年 名古屋大学減災連携研究センター
特任教授
現在に至る

入江 尚子 (いりえ なおこ)

2005年 東京大学文学部行動文化学科卒業
2007年 東京大学大学院人文社会系研究科
修士課程修了(心理学専攻)
2007年 東京大学大学院総合文化研究科所属
日本学術振興会特別研究員
2010年 東京大学大学院総合文化研究科
博士課程修了(学術博士)
2010年 総合研究大学院大学所属日本学術振
興会特別研究員
2010年 駒澤大学非常勤講師
2011年 立教大学非常勤講師
現在に至る

赤松 友成 (あかまつ ともなり)

1987年 東北大学理学部物理学科卒業
1989年 東北大学大学院理学研究科修士課程
修了(物理学専攻)
1989年 水産工学研究所勤務
1996年 博士(農学)(日本大学)
1997年 国立極地研究所客員研究員
1999年 ケンタッキー大学生物科学科
客員研究員
2015年 水産研究・教育機構中央水産研究所
勤務
現在に至る

井上 保雄 (いのうえ やすお)

1976年 日本大学工学部電気工学科卒業
1978年 日本大学大学院理工学研究科
修士課程修了(電気工学専攻)
1978年 株式会社アイ・エヌ・シー・エンジ
ニアリング勤務
現在に至る
2012年 法政大学兼任講師
2015年 内閣府消費者安全調査委員会
専門委員
2016年 日本騒音制御工学会会長

時田 保夫 (ときた やすお)

1949年 北海道大学理学部物理学科卒業
1950年 小林理学研究所勤務
1962年 理学博士(北海道大学)
1981年 小林理学研究所所長
1986年 日本騒音制御工学会会長
1988年 航空公害防止協会航空公害研究セン
ター所長
1989年 米国音響学会フェロー
1995年 公害等調整委員会専門委員
1996年 低周波音影響評価検討調査委員会
委員長
2013年 小林理学研究所名誉研究員

中 右介 (なか ゆうすけ)

1999年 上智大学理工学部機械工学科卒業
 2001年 上智大学大学院理工学研究科
 博士前期課程修了(機械工学専攻)
 2006年 小林理学研究所勤務
 2007年 ボストン大学工学部航空宇宙・機械
 工学科博士課程修了(機械工学専
 攻) Ph.D. (機械工学)
 2007年 宇宙航空研究開発機構勤務
 現在に至る

町田 信夫 (まちだ のぶお)

1970年 日本大学理工学部精密機械工学科
 卒業
 1973年 日本大学大学院理工学研究科
 修士課程修了(機械工学専攻)
 1973年 日本大学助手
 1985年 日本大学専任講師
 1998年 博士(工学)(日本大学)
 1999年 日本大学助教授
 2003年 日本大学教授
 2016年 日本大学特任教授
 2017年 日本大学名誉教授

山極 伊知郎 (やまぎわ いちろう)

1990年 東京大学工学部舶用機械工学科卒業
 1992年 東京大学大学院工学系研究科
 修士課程修了(機械工学専攻)
 1992年 株式会社神戸製鋼所勤務
 現在に至る

低周波音 ——低い音の知られざる世界——

Low frequency sound—The unknown world of low frequency sound—

© 一般社団法人 日本音響学会 2017

2017年11月2日 初版第1刷発行

検印省略

編 者 一般社団法人 日本音響学会
 発 行 者 株式会社 コロナ社
 代 表 者 牛来真也
 印刷所 萩原印刷株式会社
 製本所 有限会社愛千製本所

112-0011 東京都文京区千石 4-46-10

発行所 株式会社 コロナ社

CORONA PUBLISHING CO., LTD.

Tokyo Japan

振替 00140-8-14844・電話(03)3941-3131(代)

ホームページ <http://www.coronasha.co.jp>

ISBN 978-4-339-01336-8 C3355 Printed in Japan

(新宅)



本書のコピー、スキャン、デジタル化等の無断複製・転載は著作権法上での例外を除き禁じられています。
 購入者以外の第三者による本書の電子データ化及び電子書籍化は、いかなる場合も認めていません。
 落丁・乱丁はお取替えいたします。