

—第2回 音響の基礎：音の発生と伝搬—

財団法人 小林理学研究所 加来 治郎

1 はじめに

「音は何か」と聞かれて、明確に答えられる人は少ないかもしれません。「空気の振動です」という説明は、ゴムやバネのような振動するものが見えないため、実感として分かりにくいところがあります。

今回は、音の本質、すなわち音の基本的な性質に主眼を置き、音が発生して周囲へ伝搬していく過程で起こる様々な物理現象や、音を物理量として表示する際の約束事などについて解説します。

なお、現象をもっと詳しく知りたいという方のために、検索のためのキーワードを挙げていきますので、インターネット上の百科事典等を参照して下さい[☞“キーワード”]。

2 音の発生と物理的表示

(1) 音の発生

「空気に重さがある」と言えば不思議に思われるかもしれませんが、 1 m^3 (立方メートル)の空気の重さを真空中で測れば 1.3 kg になります。また、注射器の筒の先を塞いでピストンを押し、バネのように押し戻されたことを小中学校の理科の実験で経験された人も多いはずで

す。空気は、窒素や酸素などの質量を持った気体分子から成り、しかも圧縮されると元に戻ろうとするバネ的な性質を持った「弾性体」です。空気が質量を有する弾性体であることによって、音を生み、音を伝えることができます。それでは、簡単なモデルでその様子を眺めてみましょう。

いま、空気中にピンポン玉のような小さな球があつて、それが心臓のように膨張・収縮を繰り返しているとします。球が静止しているときの空気の圧力(大気圧)を基準とすれば、球が膨張すると周りの空気は圧縮されてその圧力はプラスになります。逆に球が収縮すると周りの空気は膨張して圧力はマイナスになります。

このように、球の膨張・収縮に伴って周りの空気が圧縮・膨張するために空気自身に正・負の「圧力変化」が生まれます。小球の周りの空気の圧力変化は、さらに外側の空気の圧力変化を生むというふうに、この圧力変化は連鎖反応的に外側の空気へと伝わっていきます。この空

気の圧力変化が「音」で、最初に変化を生み出した小球が「音源」です。

音が生まれる現象としては、このような物体の振動の他に、空気の乱れや空気の瞬間的な膨張・収縮などが挙げられます。

空気の乱れによる音は「風切音」などと呼ばれますが、物体が高速で移動した際に(風が物に当たっても同じです)、物体の周りに生じる渦が原因です[☞“カルマン渦”]。中心にいくほど圧力の低い渦が つぎつぎと発生することにより、空気中に圧力変化を生じます。

空気の瞬間的な膨張・収縮に伴う音としては、風船の破裂やワインの栓抜が分かりやすいかもしれません。前者は、圧縮された空気の一瞬の膨張によるもので、周囲にプラスの圧力変化を生じます。一方、ワインのコルク栓を勢いよく抜いた時に出る音は、これとは逆に空気の一瞬の収縮によるもので、マイナスの圧力変化を生じます。

(2) 音のデシベル表示

音が空気の圧力変化であることは上に述べたとおりですが、大気圧からの圧力の変化分を「音圧」といいます。人が聴くことのできる音の範囲(可聴範囲)は、音圧でおおむね 0.00002 Pa から数百 Pa です。ここで、 Pa (パスカル)は圧力の単位です。標準の大気圧(1気圧)が $1,013 \text{ hPa}$ (ヘクト Pa) = $101,013 \text{ Pa} \approx 10 \text{ 万 Pa}$ ですから、可聴範囲の音圧がいかに微小であるかが分かります。

仮に、最大の可聴音圧の数百 Pa を 200 Pa とすれば、音の可聴範囲は $2 \times 10^{-5} \text{ Pa} \sim 2 \times 10^2 \text{ Pa}$ と表されるように7桁に及びます。物理量としての音を音圧で表示することは、あまりにも範囲が広すぎるだけでなく、音の大きさに対する人の印象との対応付けが困難です。そこで考え出されたのが「デシベル表示」といわれる音の表示方法で、音の強弱を式(1)で与えられる音圧レベル(SPL)で表示することが国際的に決められました。

$$SPL = 10 \times \log_{10} (p^2/p_0^2) \quad (1)$$

ここで、式中の音圧 p_0 は、最小の可聴音圧値の $2 \times 10^{-5} \text{ Pa}$ です。

式(1)は、音圧を二乗して「音の強さ*」に対応した量とし、最小可聴値で基準化して常用対数(\log_{10})をとり、それを10倍したものです。これによって、 $2 \times 10^{-5} \text{ Pa}$ から $2 \times 10^2 \text{ Pa}$ までの7桁にわたる音圧を、0~140の数値で表すことができます。

なお、2つの量の比の対数はベル(Bel)と称されますが、式(1)の単位はベルの1/10(decibel: デシ)であることから「デシベル(単位: dB)」と定義されています。

* 音の強さは、音の進行方向に垂直な単位面積を単位時間に通過する音のエネルギーとして定義されます。

デシベルで表される音圧レベルは、数値の単純な加減算ができないなど馴染みにくいところがあります。ただし、対数計算の利点で、音源の数が n 倍になったときの音圧レベルの増加量は $10 \times \log_{10}(n)$ で求めることができます。表 1 は、 n に対する増加量の一例です。

表 1 音の強さの変化(n 倍)に対する音圧レベルの増加量 [$10 \times \log_{10}(n)$]

n	2	3	5	10	100	1000
増加量 (dB)	3	5	7	10	20	30

カエル 1 匹の鳴き声の音圧レベルが 50 dB のとき、2 匹の鳴き声は 100 dB ではなく 53 dB、3 匹の場合は 55 dB になります。

また、強さの n 倍と $1/n$ はデシベル値でプラスマイナスの関係にあり、表 1 の n を $1/n$ とすれば、表中の増加量はそのまま減少量として扱うことができます。例えば、道路の車の数を半分にすれば 3 dB、 $1/10$ にすれば 10 dB、それぞれ騒音レベルは下がります。

ところで、2 つの音を交互に聴き比べた場合は 1 dB の違いを容易に区別できますが、2 つの音の間にある程度時間を置くとそれが難しくなります。一般的には、3 dB のレベル差は「辛うじて」区別できる違い、5 dB は「おおむね」区別できる違い、10 dB は「明確に」区別できる違いといえます。

3 音の伝わり方

(1) 距離による減衰

膨張・収縮を繰り返す小さな球の周りの空気の圧力変化である音は、次々とその周りの空気に伝わり、花火のように「球面状」に広がっていきます。太鼓や自動車なども少し離れて見れば小さな点のようなものであり、その意味でこれらは「点音源」と称されますが、それらが発した音も音源のごく近傍を除けば球面状に広がっていきます。

一方、複数の車両が連結された電車の音や多数の自動車が多なった直線道路などからの音は、パイプの径が太くなるように「円筒状」に広がっていきます。また、大きな建物の壁面が一樣に振動して発生した音は、壁面から一定の距離までは「平面状」のまま壁から平行移動するように伝わります。音の発生源として、前者は「線音源」、後者は「面音源」と称されます。

このように、音の拡がりや球面状、円筒状、平面状と音源によって異なりますが、ある時刻に音が到達した面を「波面」といいます。音は、波面と垂直な方向に進みます。

それでは、点音源について、音が球面状に拡がることによって音の強さがどのように減衰す

るかを考えてみましょう。

空気の圧力変化を引き起こすために小さな球が膨張・収縮に費やした「エネルギー」の一部は、音へ受け継がれます。音は球面状に広がっていきませんが、ある時刻に音が受け取ったエネルギーは、音が広がっていくいずれの時点においても基本的に不変です。

音のエネルギーは変わらずに球が大きくなるということは、ゴム風船が膨らむにつれてゴムが薄くなるように、球の表面における音の強さが減少することを意味します。

ゴムの厚さは膨らんでいく風船の表面積に反比例するように、音の強さも広がっていく球の表面積($4\pi r^2$ 、 r :半径)に反比例します。距離 r_1 における音の強さを I_1 、距離 r_2 における音の強さ I_2 とすれば、両者の関係は以下のように表すことができます。

$$I_1/I_2 = 4\pi r_2^2 / 4\pi r_1^2 = r_2^2 / r_1^2$$
$$\therefore I_2 = I_1 \times r_1^2 / r_2^2 \quad (2)$$

音の強さの変化分(r_1^2/r_2^2)を $10 \times \log_{10}(n)$ の n に代入すれば、 r_1 地点に対する r_2 地点の減衰量が求まります。音源からの距離が 2 倍のとき ($r_2=2 \times r_1$) の減衰量は 6 dB で、いわゆる「倍距離当たり 6 dB の減衰」となります。

音が円筒状に広がる線音源では、音の強さは円周 ($2\pi r$) に反比例するため、伝搬距離が 2 倍になれば音の強さは 1/2 になり 3 dB の減衰となります。面音源については、平面状に伝わる音の形が崩れない範囲内では音は減衰しません。

(2) 音の伝わる速さ

音が 1 秒間に進む距離を「音速」といいます。大気の温度を t °C とすれば、音速 c (m/s) は近似的に次式で与えられます。

$$c = 331.45 + 0.6t \quad (3)$$

一般に、音速として、大気の温度が 15 °C のときの 340 m/s を用いますが、式(3)から明らかのように、音速は大気の温度によって変化します。また、風は音を伝える空気の動きですが、風速に応じて音速は変化します。

先に、点音源からの音は球面状に、線音源からの音は円筒状に広がると話しましたが、これは風がなく大気の温度が一樣な場合の現象です。地上付近と上空で風速や大気の温度が異なるときは、音の広がりを示す球や円筒の形が崩れ、音の伝わり方が変わります。それによって生じる特異な現象については 5 章で解説をします。

ところで、圧力変化としての音は、空気のような気体だけでなく、液体や固体の中でも伝わ

ります。いずれの物質においても、音は圧力変化の生じる方向、すなわち振動する方向に進むために「縦波」とも呼ばれます。ただし、音速は三態の間で大きく異なり、水中では 1,500 m/s、ガラスや鉄などの固体では 5,000 m/s を超える値になります。

なお、固体については、縦波の他に「横波」と呼ばれる波があります[☞“縦波と横波”]。これは固体中に生じた「ずれ」に伴うもので、ずれの振動方向と垂直な方向に波は進行します。地震の P 波と S 波は、おおむね縦波と横波に相当しますが、その速度はそれぞれ 5~7 km/s と 3~4 km/s です。

(3) 音の反射、透過、吸音

音が伝搬していく過程で、空気中に空気とは異質の物があるとき、それによって音の伝わり方が変化します。

まず、図 1 に示すように、1 枚の硬い板に音が入射した場合を考えます。音は、板に対しても圧力変化を起こそうと作用しますが、あまりにも音の力が微弱なためにほとんどの音のエネルギーははね返されてしまいます。これが音の「反射」です。

一方、音の作用によって、ごくわずかですが板自身も振動します。この振動が入射面と反対側の面の空気に圧力変化を生じることで、音の再放射が行われます。これが音の「透過」です。

仮に、入射音に対する透過音の透過率が音のエネルギーで 1 % のとき、入射音と透過音の音圧レベル差は、表 1 の n を 1/100 として考えれば 20 dB となります。透過率が 0.1 % では 30 dB、0.01 % では 40 dB です。これらの値は、「透過損失†」と呼ばれる量で、壁や窓などの音を遮る能力、すなわち「遮音性能」を示しています。

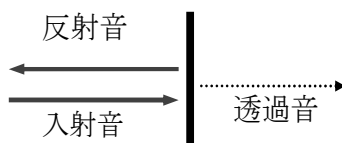


図 1 平板への音の入射

透過損失は、音の作用を受けにくい重い材料ほど、また、周波数が増すほど大きくなります。一般に、材料の厚さ、もしくは周波数が 2 倍になれば、透過損失は 5~6 dB 増加します。「倍距離 6 dB」の距離による減衰とほぼ同じですが、どちらも、ある程度重さや距離が既にある状態からさらに減音量を上積みすることは大変です。

次に、板よりも柔らかく隙間の多い材料について考えてみましょう。ここでのターゲットは反射音です。

† 入射音と透過音の強さを I_i , I_t とすれば、透過率 τ は $\tau = I_t / I_i$ 、透過損失は $10 \times \log_{10}(1/\tau)$ で定義されます。

図2に示すように、コンクリート壁などの剛体の前に置かれた多孔質材料[‡]に音が入射した場合、板のときとは違って材料表面での反射はごくわずかで、ほとんどの音のエネルギーは材料の中に入っていきます。材料内を伝搬する音は剛体で反射して元の方向に戻って材料から抜け出し、表面で反射した音と一緒に反射音となります。

材料が綿のような繊維質のとき、音は材料の中を伝搬する過程で繊維を振動させます。繊維が音から受け取った運動エネルギーは、やがて熱となって消滅します。ウレタンフォームや軽石のような連続した空隙を内部に持つ材料では、振動する空気と空隙を形作る材料との間の摩擦によって、ここでも熱が発生します。

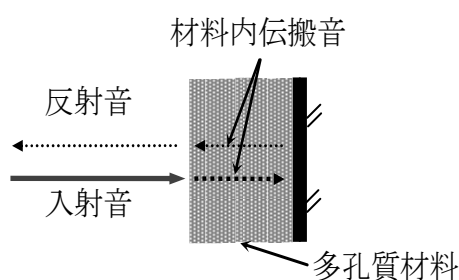


図2 剛体の前に置かれた多孔質材料への音の入射

このように、多孔質材料の中を音が伝搬した場合、音のエネルギーは熱エネルギーに変換され、その分だけ音のエネルギーは減少します。この現象が「吸音」で、失われたエネルギーと入射音のエネルギーとの比を「吸音率[§]」として表示します。吸音率が1のときは反射音がゼロ、すなわち音はすべて材料内に入ってそこで吸収されてしまったことを意味します。

「遮音」は壁などを透過する音を、「吸音」は壁などから反射する音をそれぞれ対象とし、どちらも音を減らすことを意図しています。遮音・吸音は騒音対策における基本的な手法であり、本シリーズの#4で対策の効果や設計上の留意点などを解説します。

4 音の周波数、周期、波長

音の「周波数」は、1秒間に繰り返される圧縮・膨張(振動)の回数で、振動数ともいわれます。人が音として知覚できる周波数の範囲はおおむね20~20,000 Hzですが、イヌやネコは50,000 Hz以上の音を、ゾウは10 Hz以下の音を知覚できます。動物が聴くことのできる周波数の範囲は、身体の大きさに関係がありそうです。

周波数と一義的に対応し、音の物理的な現象を理解する上で重要な量として周期と波長があります。図3は、空気の圧縮・膨張に伴って生じる音圧の変化を、時間もしくは距離を横軸に

[‡] 綿状の材料や連続した空隙を有するウレタンフォームなどの材料が該当します。

[§] 入射音と反射音の強さを I_i , I_r とすれば、吸音率は $(I_i - I_r) / I_i$ で定義されます。

とって示したものです。

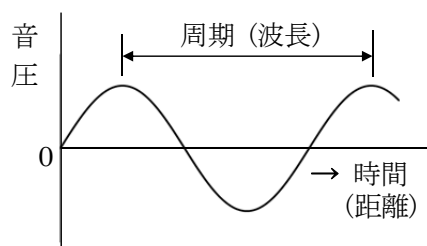


図3 圧力変化

まず、図の横軸を時間にとれば、図中の矢印の長さは1回の振動に要する時間で、これを「周期」といいます。周期は、1秒を周波数で割った値として与えられ、例えば、1,000 Hzの音の周期は $1/1,000 = 0.001$ (秒)になります。

次に、横軸を距離として考えてみます。音が1秒間に進む距離は340 mですが、その長さの範囲内に、1秒前に出た振動から直前の振動まで音の周波数と同じ数だけの振動が存在することになります。図の矢印は1回の振動が占める距離に相当する長さで、これを「波長」といいます。波長は、1秒間に音が進んだ距離(音速)を周波数で割った値として与えられ、1,000 Hzの音の波長は $340/1,000 = 0.34$ (m)になります。

5 音にかかわる特異現象

「山彦」や「鳴き竜」などの名称は、通常とは異なる不思議な音の現象に対して付けられたものです。この二つは、特定の場所に行かなければ体験できませんが、日常生活においても音に関する特異な現象を経験することがあります。ここでは、それらをいくつか取り上げ、その実態を説明します。

(1) ドップラー効果

救急車のサイレンの音は、車が近づく時は高く、遠ざかる時は低く聞こえます。このような現象を「ドップラー効果」といいます。

救急車と観測者の両方が停まった状態では、サイレンの音の周波数(f [Hz]とします)は一定です。救急車がサイレンを鳴らしながら観測者のほうへ近づいてくる場合を考えます。

ある時刻にサイレンが出した一番目の振動は、救急車と観測者の間の距離を伝搬して観測者に到達します。1秒後に出る f 番目の振動は、1秒の間に車は観測者に近づいているために、1番目の振動がかかった時間よりも短い時間で観測者に到達します。その結果、観測者は1秒よ

りも短い時間内で f 番目の振動を耳にすることになります。これは、元の音よりも周期が短くなり、それだけ高い音として聞こえることを意味します。

救急車が遠ざかる時はこれとは逆の現象が起こり、低い音として聞こえます。

救急車が目の前を通過した際は、このような音の高低が瞬時に切り替わるため、観測者はその違いをはっきりと認識することができます。

ところで、救急車のサイレンには 770 Hz と 960 Hz の 2 種類の音が使われています。また、一般にサイレンの音には「ピー」「ポー」という擬声語を用いますが、人によって周波数のとらえ方(上昇もしくは下降)が異なるというのも面白い現象です。

(2) 音の屈折

冬は遠くの夜汽車の音がよく聞こえると言われてきたように、季節や日時によって耳慣れた音の聞こえ方がまるで違うことがあります。その原因として、温度と風による音速の変化を挙げることができます。

それでは、音速の変化によってどのような現象が生じるか考えてみましょう。例として、風のない晴れた冬の夜に放射冷却で地上付近が冷え、その結果、地上付近よりも温かい空気が上空に溜まっているとします。

上空ほど音速が増すことによって、図 4 に示すように球面状の波面の形が崩れ、地上付近では、距離とともに波面が次第に地面に垂直になり、ついには前のめりになります。音は波面と垂直な方向に進むため、斜め上方に出た音は図中の青い矢印に示すような上向きに湾曲した経路をたどります。このような現象を「音の屈折」といいます。一般に、地上には建物などがあって音は伝わりにくいものですが、このような屈折現象によって遠くの音がよく聞こえることがあります。

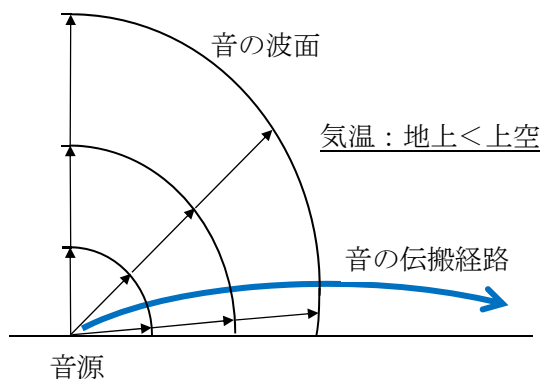


図 4 温度分布による波面の変化

上とは逆に、夏の日中のように地上が太陽に熱せられて気温が上空よりも高い場合は、音は下向きに湾曲した経路をたどり、遠方へは届きにくくなります。キリスト教に比べてイスラム教の教会では鐘をあまり見かけませんが、砂漠の多い土地柄がその一因かもしれません。

なお、音の屈折は、地上と上空で風速が異なる場合にも起こります。屈折が生まれるメカニズムは温度の場合と同じです。一般に、風速は地上よりも上空のほうが大きく、このような条件下では、追い風方向には音がよく伝わり、逆に向い風方向には伝わりにくくなります。

3) 山彦

「山彦」は、自分の発した音が周囲の山で反射し、少し遅れて聞こえる現象です。反響またはエコーとも呼ばれます。山彦が聞こえるためには、周囲の山の位置とその地点の静けさが鍵になります。

仮に、山彦の合図としてよく使われる「ヤッホー」の継続時間を 2 秒、「少しの間」を 1 秒とすれば、音が行って帰ってくるまでに 3 秒以上の遅れ時間が必要です。音が 3 秒間に進む距離は 1,000 m あまりで、山彦は同じ経路を往復するため、図 5 に示すように登山者から反射物までの距離は 500 m 以上あればよいことになります。

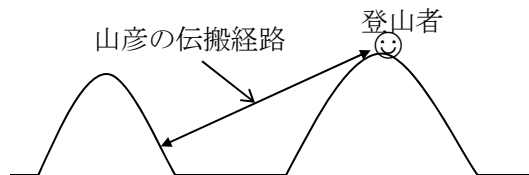


図 5 山彦

一方、音が 1,000 m の距離を伝搬すれば、1 m 点の音圧レベルから 60 dB 減衰します^{**}。1 m 点で 100 dB の大声を発しても、戻ってくるときには 40 dB と小さくなり、それなりの静けさが必要です。

都市内においても、高層ビルなどと発声者との位置関係の条件が満たされれば、山彦を聞くことは可能です。一番のネックは静けさの条件かもしれません。

4) 鳴き竜

日光の東照宮・薬師堂で有名な「鳴き竜」は、手をたたいた音が反響(エコー)として連続して聞こえる現象です。鳴き竜が聞こえるためには、天井の高さ、形状、及び人の立つ位置が鍵

^{**} 計算式は、 $10 \times \log_{10}(1/1,000^2)$ です。

になります。

手をたたいた音と、その音が天井で反射して戻ってきた音が別々に聞こえるためには、人の聴覚特性の上から 2 つの音の間に 0.005 秒の時間差が必要です。0.005 秒の間に音が進む距離は 17m ですから、反射音の伝搬距離は 17m 以上あればよいことになります。言い換えれば、8.5m 以上の天井の高さが必要です。

また、大きな寺院などの天井は、わずかながら上に湾曲した形状をしています。これは、水平な天井は下に垂れ下がったように見えるという視覚上の錯覚を補正するために、昔の人が考え出した手法です。

図 6(a)に示すように、床と天井が平行なときは、人が立つ位置を通る垂直な方向だけに繰り返される反射音しか聞くことができません。これに対して天井がわずかに湾曲しているときは、図 6(b)に示すように湾曲の中心の直下の位置では、少し広い範囲の天井部分と床との間で繰り返される反射音を聞くことができます。これによって反射音の音量が増し、より長い時間エコーが持続することで鳴き竜が生まれます。

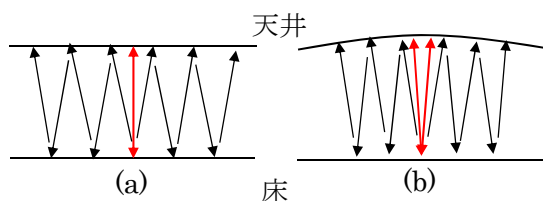


図 6 鳴き竜

寺院などで耳にする鳴き竜は好意的に迎えられますが、コンサートホールでこのような現象が起これば音楽ホールとしては失格です。直接音と反射音との経路差を 17m 以下にする、あるいは 0.005 秒間に別の反射音を入れてエコーを目立たなくする、といったような対策が講じられていますが、設計者の頭を悩ますところです。

【参考文献】

本シリーズにおいては、音響用語辞典(日本音響学会編、コロナ社)と理科年表(国立天文台編、丸善株式会社)を適宜使用しました。

【番外編 2 : 異常診断】

音が言葉としての情報伝達手段となって、人類の進化に大きく貢献したことは先にお話したとおりですが、情報のやりとりだけでなく、音そのものから何らかの情報を入手することも多々あります。例えば、雨音や風のざわめきから雨量や風速を判断したり、エンジンの音で回

転数の高低を推測したりすることは、誰もが行っていきます。

ところが、エンジンの音でその調子や異常の有無を判断するには、ある程度の熟練さが必要になります。世の中には熟練度が向上して「達人」と呼べるような能力を持った人がいます。よろしければ、拙文[☞“異常診断、音の達人たち”]をご覧ください。

最近問題となったコンクリート表面の剥離の検出では、そこまでの能力を要求されることはないかもしれません。しかし、人に代わって工学的に判定しようとする和一筋縄ではいかず、かなり症状の進んだ剥離であれば何とか検知できる、というのが目下の正直なところでは。

人は、コンクリートをハンマーで叩いてその打音や打感から異常の有無を瞬時に判断しますが、機械からすれば、人の感覚、特に聴覚はまさに神の領域といえます。

加来 治郎氏のプロフィール

専門分野は、環境影響評価・環境政策（騒音制御手法の開発、複合騒音の評価方法に関する研究）です。特に、鉄道騒音に関する分野を専門とされています。

これまで、日本音響学会の理事、日本騒音制御工学会の副会長や環境省中央環境審議会騒音評価手法等専門委員会専門委員などを歴任されています。

公害等調整委員会においては、「足立区における鉄道騒音被害責任裁定申請事件」（平成 20 年（セ）第 3 号事件）の専門委員を務められました。