

環境モニタリングへの生物音響学的アプローチ

大庭 照代

千葉県立中央博物館

〒260-8682 千葉市中央区青葉町 955-2

要 旨 自然の音を扱う生物音響学は、電子工学およびコンピュータ科学の発展を基盤として、生物センサスや環境モニタリングへの貢献が期待される。本稿では、生物音響学的アプローチを、音による個体や種の識別、自然音による環境構造の把握、自然の音環境のサンプリング、音源種による音環境評価、音の自動認知システム、および双方向的モニタリングについて概観する。生物音響学的アプローチが自然保護・環境保全上注目されるのは、第1に、生物に負担をかけない自然にやさしい点である。第2に、サウンドマップと音環境調査の併用により、地域環境について人々の抱くイメージが生態学的知識へ統合されて、人にやさしい点である。第3に、人間の音環境における「自然の静けさ」の価値に対して重要な生態学的な視点を与える点である。第4に、一目では把握しがたい生物活動や環境の現象についての情報を、自然の音の構成や存在様式から抽出しようとする点である。第5に、多彩な人材による研究成果や、録音資料の膨大な蓄積、技術分野の躍進等によって、今や生物音響学の発展する素地が十分備えられている点である。今後の問題として、音源種構成の指標化ならびに音環境からの生物学的多様性評価法を確立するための研究や、生物系・工学系等の分野を越えた学際的な交流、生物音響学に必要な訓練、公的資源としての生物音響資料の収集・活用がある。

キーワード: 自然音、センサス、環境モニタリング、生物音響学、識別、音環境、サンプリング、環境評価、自動認知、サウンドスケープ、サウンドアーカイブ、サウンドマップ、自然のアメニティ。

はじめに

生物音響学という分野名が公に使用されたのは、著者が1988年東邦大学理学部において行った特別講義が最初であろう。当時、bioacoustics という英語をどう訳するか考えたものである。今もこの学問分野はよく知られていないが、イルカのソナーや鳥のさえずりの方言等の研究と言え、理解したような気がするかもしれない。しかし、実際は、生物の音を中心に自然音を対象として、多様な観点や方法論をもち、動物行動学・生態学・分類学・保全生物学・地理学・サウンドスケープ・音響学・信号処理・サウンドアーカイブ等、かなり広い領域にわたる学際的分野である。

生物音響学は、生物学の他の分野における研究に比べて、開始が遅かった。どの科学でもそれを支える技術がなければ進まない。野外生態学者や動物行動学者の要求に見合うような録音技術と解析装置が作り出されたのが、約50年前である。とくに、音の画像化は、生物の音の研究を大幅に発展させる要因となった。音は、時間・周波数・振幅（強度）という3変量からなり、その情報は3次元空間分布に表わされる。ソナグラフ（機械）による解析を採用すれば、音の構造は、横軸に時間、縦軸に周波数をとった2次元グラフ上に、濃淡または色段階によって振幅が表わされた画像、即ちソナグラム（音スペクトル）として得られる（図1）。ソナグラムは、聴覚上の印象である音の長

さ・高さ・強さに見事に合致する表現であり、音を視覚的パターンとして容易に認識できるようにした。これにより、仮名やアルファベット、五線譜と音符等による記載では不可能な詳細情報の共有化が実現し、研究者には音に関して議論を具体的に行える状況が形成された。ソナグラムを読みとる力は、生物音響学研究に不可欠なものとなった。また、生物の音声標記として図鑑等にも採用されるようになり、一般大衆へも普及し始めた。まさに、ソナグラムは環境モニタリングにおける「共通言語」として位置づけられよう。

さらに、ここ20年間の電子工学およびコンピュータ科学の加速度的進歩は、近年の生物音響学に益々の躍進をもたらしている。近い将来、私たちはドリトル先生のように生物と会話しながら、音響行動や聴覚認知機構、環境モニタリング等の研究をしていくことになるだろう。高速で明解、しかも精緻な音の自動認知システムも、個々の自然音へ適用する段階に入りつつあり、今後は自然音の総体的構造についても道が開けるだろう。生物音響学は、環境モニタリングや環境保全に貢献することが期待される一方、野外生態学者・動物行動学者・自然誌研究者・分類学者・自然音録音家・アーカイビスト（資料記録管理者）・音響エンジニア・環境エンジニア・音響デザイナー等の多彩な人々によって、その有益性が試され、改良される必要がある。

本稿では、過去10年間の千葉県立中央博物館にお

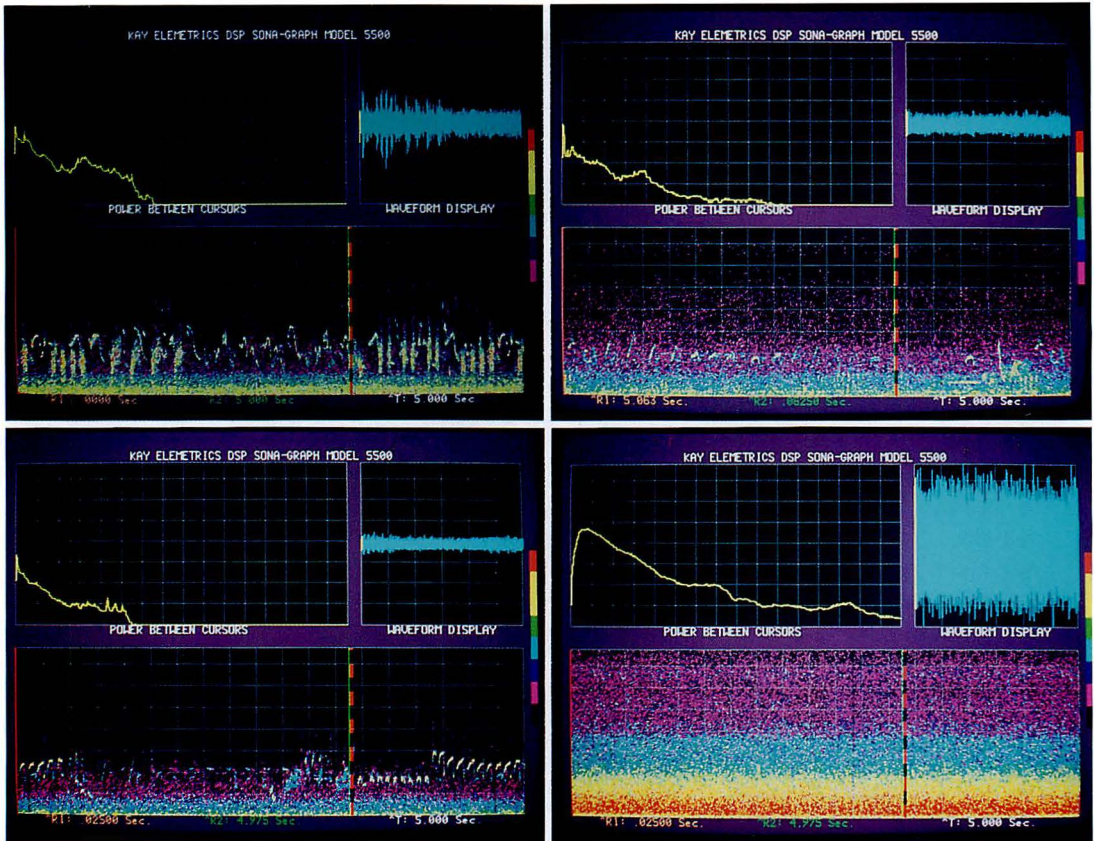


図1. 利根川沿いの音環境の解析. 各地点の音環境の物理的3変量について, Kay社 DSP Sonagraph 5500を用い, 周波数範囲 DC-16 kHz, バンド幅 117 Hz にて3通りの解析を1組として画像化した. 各画像の下半分がソナグラム (ダイナミックレンジ, 36 dB; アテニュエーション, 30 dB; 左端-中央右カーサー指定区間5秒), 左上がパワースペクトラム (ダイナミックレンジ, 72 dB; アテニュエーション, 0 dB; 前述指定区間), そして右上が波形である. これらの解析法であられる画像パターンを使って違いを視覚的に区別する: 調査地点: 左上, 利根川 (茨城県守谷町, アシ原); 右上, 利根川支川小貝川 (栃木県南那須町, 水田); 左下, 利根川支川鬼怒川 (栃木県宇都宮市, 河原); 右下, 利根川支川鬼怒川大木沢 (栃木県栗山村, 溪谷).

ける著者自身の研究活動を省み, 内外の事例に基づいて生物音響学の観点や方策を紹介し, その長所について検討する. また, 平成9年度には, 千葉県立中央博物館海外客員研究員として, 英国ハル大学工学部より Chesmore 博士を委嘱し, 自然音に着目した環境モニタリングへの電子工学技術の適用とその可能性について, 意見交流の場を得た. その時の公開講演内容および滞在中のプロジェクトの成果の一端は, Natural History Research Vol. 5, No. 2 (1999) に紹介されているので参照されたい.

なお, 本稿は, 著者がこれまで扱ってきた可聴域内の自然音について論説するものである. コウモリ類や昆虫類, げっ歯類, 海生哺乳類等における超音波や, 大型哺乳類等の低周波については, 可聴域に変換して聞く装置を使って可聴音と同様に環境モニタリングへ適用することができるが, 詳細は Pye and Langbauer

(1998) や Tyack (1998) 等を参照されたい.

生物音響学のアプローチ

1. 音による個体や種の識別

人間は, 生態学的調査において事物を認識するにあたって, 手に取り, 視覚により確認し, 言葉や数式にして把握することを重視してきた. しかしながら, 視覚以外の感覚によって多くの情報を得てきたことも確かである. 鳥類生息調査でラインセンサス法を行う人ならば, 出現鳥類種と個体数について, 耳で聞き分けた情報も利用することを認めるだろう. 見えなくても聞こえれば存在は分かるし, 経験ある耳には音に含まれる多様な情報 (種や個体等のアイデンティティ・性・年齢・位置・動き・行動・繁殖状況等) を聞き分けられる (Smith, 1977).

音源に関する聴覚情報は正当に評価されるべきであ

る。種や個体のアイデンティティに関する情報が音に含まれることは、鳥類など多様な生物群で知られ (Becker, 1982; Falls, 1982), 近年の保全生物学研究の事例ではこの情報が利用されている。1997 年 12 月の英国鳥学会冬季例会における Gilbert の報告、およびロンドン動物学会と動物行動学会との合同シンポジウムにおける McGregor らの報告によれば、アシ原等に生息する鳥類において、容易に捕獲できないサンカノゴイ *Botaurus stellaris* や姿を確認できないウズラクイナ *Crex crex* のような種類では、さえずりを個体ごとに録音し、ソナグラムをとって声紋を調べ、音に含まれる個体の特徴を明らかにすることにより、生存および繁殖状況等を長期にわたってモニターすることができる。

とくに鳴禽類の調査では、なわばり範囲をソングポスト (さえずりを行う場所) の位置から推定する方法が一般的である。しかし、観察者がなわばり範囲を地図上に描く際、ソングポストのうち最も外郭にある地点同士を繋いで、滑らかで明示的な輪郭にしがちである。もしこれより外側でなわばり雄がさえずったり、または内側で隣接雄がさえずったりするならば、誤認する危険性がある。個体標識を確認できればなおさらである。そこで、さえずりを同時録音し、そのソナグラムを調べて個体を確認すれば、ソングポストの位置も正確に把握できる。上述の報告によれば、ハタホオジロ *Miliaria calandra* 等の例では、ソングポストが隣接者のなわばり内に鋭く切込み、なわばり範囲の外郭が実は滑らかではないことがわかった。このように音を使ったモニタリングは、その種の生存に必要な資源や環境構造について、目視だけの観察よりも詳細な情報が得ることができ、保全生物学上重要である (Baptista and Gaunt, 1997)。

2. 自然音による環境構造の把握

林には林らしい音があり、水辺には水辺らしい音がある。著者が行った自然の音関連の講座等では、参加者にそれぞれの録音を聞き分けてもらうことを試みたが、実際に録音地点に行ったことがなくても、音だけからそれが林内か水辺かを聞き分けられることがわかった。類似した環境を過去に経験していれば、聴取者の間でその区別は共有される。音環境は音の響きとして聴覚により総合的に認識される環境であるが、音の中には環境構造に関する情報が含まれ、これを抽出して林内か水辺かを区別するのだろう。

響きの違いを生み出す要因には次の 4 点が考えられる。第 1 に、鳥類のさえずりのように長距離通信に使われる生物音響信号は、生息環境別に異なる音響学的特徴を持っている。これは、生息場所ごとに特異的な音の伝播特性や背景騒音等に適応して、通信相手まで届くように音の物理学的特徴にみられる構造、即ち

音響構造が発達した結果である (Klump, 1996)。新大陸における研究では、風の影響が少なく静かな林に生息する鳥は、周波数変調のあるゆったりしたメロディーでさえずる。他方、いつ風が吹くかもしれない草原に生息する鳥は、軽快なリズムに刻まれた繰り返しの多いさえずりを行う (Marten and Marler, 1977; Marten *et al.*, 1977)。世界の他の地域でも同様な傾向が見られ、日本でも森林性のツグミ類 *Turdus* spp. と草原性のヨシキリ類 *Acrocephalus* spp. などで対照的なさえずりが見られる。さらに、同じホオジロ属 *Emberiza* の鳥でも、密な森林に棲むクロジ *E. variabilis* は 1 音 1 音が長めにウェイチーチャーといった節回しでさえずるのに対して、アシ原に棲むコジュリン *E. yessoensis* はチップーチュリと 1 音 1 音歯切れよくさえずり、その他の種類は生息場所の開放性の度合いに従って、さえずりの特徴がこれら 2 極の間に見出される。私たちはこうした違いを経験的に聞き取って、環境を区別しているのかもしれない。

第 2 に、音が響く空間としての音響空間のありかたである。建造物内での音響、即ち音の響き具合や広がり、天井の高さや壁材、空間全体の形状等によって異なるのと同じように、屋外の自然環境においても地形の構造や植生の特徴によって独特の音響が生じる。風や温度勾配の影響も大きい (Wiley and Richards, 1982)。これは、私たちが林の閉鎖的な空間から草原等の開放的な空間へ出るときなどに、音の響きの急激な変化を体験することである。

第 3 に、音環境構造の違いである (ルロワ, 1983)。大庭 (1994) は、音環境を構成する基本単位として、音源となる生物種および非生物の種類を音源種と定義し、千葉県立中央博物館生態園 (以下、生態園) の林内と水辺で、音環境の比較研究を試みた。ここでは、地域内における各音源種の空間的配置や時間的動態等に基づいて、音源種の分類基準を導き出し、音源種の構成と動態から音環境構造を検討することにより、両者の音環境の違いが明らかにされた。音源種の構成や動態の知識は、地域生態系と音との関わりを見る上に重要であるが、野外経験と音源識別訓練を要する。

第 4 に、ソナグラム上における音源種の配置と相互関係である。利根川沿いの音環境を、下流から上流までのいろいろな地点のソナグラムで概観した結果、音源種の配置と相互関係には地域の自然環境や土地利用パターンによって違いがあることが示された (図 1)。こうした違いの決定的な識別には、高度な画像解析技術と大量なデータ処理による比較が必要であるが、ソナグラム上に表わされる形状や濃淡 (あるいは色段階)、また時間と周波数による 2 次元内の位置や分布様式は、視覚的存在である私たちにとって有益な音の識別認識手段である。

3. 自然の音環境のサンプリング

野外生態学者は自然を研究するにあたって、材料を適切にサンプリングして現象を把握し、比較を行ってきた。そこには、野外における経験と統計学的な考え方によるフィードバックが存在する。残念ながら、自然の音環境については、「はかなくとりとめがない」、「複雑で変動が大きい」という先入観により、サンプリング方法は試されてこなかった。

著者は、音環境を聞き分ける実体験を基に、生態学・動物行動学および関連研究領域で使われているサンプリング方法を適用して、音環境評価のための最適サンプリング時間を検討した。その結果、特定時間帯の特定地点における音環境について、連続する単位時間内に出現する音源種は、温帯の日本では85%以上が連続6分間にわたる音環境のサンプルから得られ、10分もあればほぼ100%が確認できた (Oba, 1994)。音環境の構造と動態は地域ごとに多様であるから、温帯の日本における音環境のサンプリング単位が熱帯や極地域でも使えるとは考えない。実情にあったサンプル方法が試され、適正なサンプリング方法により音環境の構造と動態は調べられなければならない (Oba, 1994)。

サンプリングにかかわる別の問題は、「音によるモニタリングで何が、どこまでわかるか」という懸念である。地域生態系では発音生物はほんの一握りの存在である。しかも、人間が生で耳で聞ける生物種はさらに少ない。そんな狭小な部分からいったい何が見えるというのか。しかし、人間の耳に聞こえる音が、環境のごく一部であるとしても、この部分とそれを支える系全体との関係を探ることをしなければ、いつまでも確信は持てないだろう。

数少ない例の中で、カエル類の鳴き声の録音から種類と活動状態をモニターする事例 (Rand and Drewry, 1994) は、特定の生物種の生息状況を把握する音響モニタリングとして、きわめて平明である。音響行動の維持には、食物や天敵として関わり合う他の生物の存在と、生息条件を満たす生息場所や多様な資源が必須である。つまり、ある鳴き声が聞こえることから、音響行動を支える地域生態系の成り立ちや状態を推し量ることができる。自然音を介した予測を行うためには、音源種が地域生態系にどう関与するか、種の生態や地域生態系における役割、食物網上の位置等から糸口を探し、音として現れる現象と関連付けなければならない。地域生態系を基盤とした音環境研究の方法論には、地域生態系のうちの聞こえる部分を基に、聞こえにくい世界や聞こえない世界、さらには見えない世界の情報を求める方向性が求められる。これは魅力的な可能性である。

6分間のサンプリングから得られる音源種の構成は、音環境の構造に関わる重要な情報を提供する。音

環境調査と従来の生息環境調査とを擦り合わせ、音源種の構成と生物相や分布様式等について関連性を調べることが急務である。生態園では、生物相や環境条件について多様な項目が調査されており、こうした取り組みにはよいフィールドである。

音のサンプリングには、技術的な難しさもある。過去100年間の信号処理法の発展は、音の録音・再生・解析・合成技術を提供してきたが、処理のあらゆる段階で入るノイズを完全にコントロールできない。現在便利に利用している種々の機械や装置により、知らない間にノイズを背負い込む危険性は否めない。エンジニアの協力が必要である。

4. 自然音による音環境の評価

サウンドスケープ論では、人間が自然音に見出す社会的・文化的コンテクストを重んじる一方で、音が密集したりマスキングしたりしない、明瞭に聞き取られるハイファイ (Hi-Fi) な状態、即ち信号と雑音の比 (SN比) がよい状態を好ましいサウンドスケープの特徴として考える傾向がある (シェーファー, 1986; 岩宮, 1993)。大橋 (1994) は、熱帯雨林の音環境の周波数分布を概観し、自然音の可聴域におけるハイファイな状態と超高周波の豊富な存在を、聞き心地のよさに関連させて指摘している。どちらも音環境の評価において、基本には感覚が重視されている。

他方、音響生態学的な見地から、Krause (1993) は音響学的ニッチ概念を提案し、自然音がその属する地域の音環境において響くときに、その物理的3変量において特定の地位 (音響学的ニッチ) を占めるとした。また、どの地域の音環境においても、すべての音響学的ニッチは多様な自然音によって満たされ、適応的な分布を呈するとした。さらに、音響学的ニッチ分布構造が、世界各地の民族音楽等の人間活動にも調和的に反映されているとし、これを維持されるべき基本的な音環境構造とする一方、人為的な騒音等は音響学的ニッチの攪乱やマスキング、不均衡化を引き起こす負の要因とした。音の物理的3変量における分布を調和的にとらえようとする姿勢の背景にはギリシャ哲学的世界観が見える。

これら2つの見解は、自然音の物理的3変量における特徴から音環境を評価しようとする点で共通している。たしかに人間はその感覚でしか音を受け止められないが、快適性のように感覚に頼った判断は、聞こえている音の持つ意義を正当に評価できるだろうか。また、調和的世界観は自然の音環境を観念の枠組み内にはめ込もうとするだけではないか。もし音の調和があるとすれば、それを作り出す音源となる生物や事象の仕組みに目を向けなければならない。そのためには、自然音の響きの明瞭さや音響学的ニッチの均衡が生態学的に何を意味しているのか、とくに地域生態系にお

ける生態学的な基盤とどのように関係するのか考察される必要がある。

著者は、自然音はそれを聞く人間にとって、自然と人間とのかかわりを確認する窓口と考えている。即ち、自然音による音環境の評価は、音響学的特徴ばかりで行うのはむずかしく、音の響きの基となる個々の音源種に立ち返って、その生態学的地位や役割、地域生態系内での相互関係から音の響きを評価することが必要であると考えた。そこで、千葉市内の3小学校区における自然の音環境の比較研究(Oba, 1995)において、音環境評価に次の3つの尺度を提案した。

1) 系統分類の尺度

音源種が属する生物群を調べ、各生物群の構成内容および比率を検討する。主な生物群には、無脊椎動物の中の甲殻類や昆虫類(半翅類・直翅類・鞘翅類・双翅類等)、脊椎動物の中の魚類、両生類、爬虫類、鳥類、哺乳類が挙げられるが、必要に応じてさらに細かな分類群に分けてもよい。系統分類の尺度によって高く評価される音環境は、多様な分類群から音源種が出現し、どれかの分類群から音源種が消失したり、分類群の比率にずれや偏りが生じたりしないものである。

2) 地域性の絆に関する尺度

「地域性の絆(locality bond)」とは、個々の音源種の地域における位置づけのことで、次の8つのカテゴリーに求められる。a) 地域に固有な固有種、b) 地域における生息状況に問題がある絶滅危惧種・希少種・危急種等、c) 地域自然環境の基盤として、固有種や絶滅危惧種・希少種・危急種等の生存を支える地域に基本的な種、d) 周辺地域から自然に流入している侵入種等、e) 都市化に積極的に適応する、あるいは比較的影響を受けない都市型野生動物および都市鳥等、f) 人為的に地域外から導入された野生生物で人間に依存しない帰化種、g) 地域性は合致するが人間に依存する野生生物、即ち合法および非合法に飼育される野生生物種、h) 地域性がなく人間に依存する家畜化された生物および愛玩用生物。

これらカテゴリーは、自然度が高いものから低いものへと並んでいる。なかでも、自然度の低いカテゴリー(e-h)については、人間活動の関与や食物等人間生活への依存度の低いものから高いものへと並ぶ。地域性の絆に関する尺度によって高く評価される音環境は、構成音源種が自然度の高いカテゴリーに多く分布し、人間活動の関与や依存度が高いカテゴリーには少なく分布するものである。

3) 栄養段階の尺度

音源種が地域生態系の栄養構造内に占める栄養段階を、第1次消費者(植物食)・第2次消費者(昆虫・小動物食)・第3次消費者(中型動物食)・高次消費者(大型捕食者)に分類し、各段階の音源種分布や比率を評価する。栄養段階の尺度によって高く評価される音

環境は、音源種に高次消費者や第3次消費者が多く含まれるものである。

上記3つの音環境尺度を用いて、自然の豊かさが異なる千葉市内の3地域、即ち昔からの農村景観を維持する純農村地域、戦後に宅地化され自然が虫食い状態に残る新興住宅地域、および東京湾埋立地に完全に人手により建設されて10数年たったニュータウン地域から小学校区を選び、音環境を比較した。ここで、自然の豊かさとは、環境内に存在する生物の生息場所の多さとその配置の複雑さ、および人手による改変なしに残っている本来の自然の広さによって定義したが、いずれの尺度でも音源種構成内容と各カテゴリー間の比率は、純農村地域から新興住宅地域、ニュータウン地域へと段階的に貧しくなった(Oba, 1995)。そこで、音源種のみでも地域の自然の豊かさや生物学的多様性の一側面を汲取れる可能性が示唆された。

もちろん、音源種の多様性がすぐに地域生態系の生物学的多様性に結びつくわけではない。しかしながら、生物学的多様性を評価する上で提唱された基本的分類基準(Jenkins, 1992)と同一の尺度を、音源種を介して音の響きにも適用する意義は大きい。概して、自然の音の響きは人の耳に聞こえる主観的感觉世界と見なされるが、この尺度により客観化することができる。

5. 音の自動認知システム

環境モニタリング上、生物音響学的アプローチの最大の壁は、音源の識別にある。種も個体も、また個体が使った数々の音のレパートリーも、その正確な識別には、野外観察と正確な知識に加え、これらを有効にする「よい耳」の養成が必須である。ところが、どんな熟練者にも完全な識別は難しい。実際には、別の熟練者に録音の同定を依頼したり、信頼できる音の標本(CD・テープ)と聞き比べたりする。また、論文や図鑑に掲載のソナグラムは、文字による記載を補い、パソコンを使った音響構造の解析に参考となる。しかし、これでは音の識別にけるマンパワーの比重が大きくなりすぎ、環境モニタリングへの実用化は難しい。

他方、遠隔地のリアルタイムモニタリングでは、音による探査はひとつの可能性である。現に、火星プロジェクトでは音のモニターが採用される(Lendroth, 1999)。音を録音し、デジタル化し、データを必要な場所まで飛ばす技術は、宇宙と言わず地球上でも当然可能である。鯨類の生態調査では、海洋に設置されたマイクロホンアーレイ(ブイに取り付けた水中マイクロホンを複数の地点に設置して、海洋内の音をモニターするシステム)により收音した音を解析して、種の識別や個体群の位置確認等を行える(Tyack, 1998)。個体のアイデンティティや個体数の解析には未だ技術

的問題が残されているが、この方法は広範囲を立体的に捉えるモニタリング方法として、地上でも応用できる。

こうした収音システムに音の自動認知機構を統合させれば、人間の聴覚によらないで、生物の種類や個体の情報を得られる。米国コーネル大学鳥類学実験所の生物音響研究プログラムでは、渡り鳥のモニタリング調査に使うために、飛翔声の自動認知ソフトウェアを開発中である。計画では、渡り鳥の通過地域にマイクロホンアレイを設置し、夜間に渡りながら発する飛翔声をこのソフトウェアにより処理することによって、アメリカ大陸を縦断するツグミ類等の種類と個体数を自動的にモニターしようとするものである (Evans, 1994; WGBH Educational Foundation, 1999)。飛翔声のように音響構造が比較的単純で短い音ならば、他の地域の生物群にも応用できるだろう。

さて、音の自動認知システムの背景には、高速フーリエ解析 (FFT 解析) や画像処理、ニューラルネットワークを用いた学習システム、ファジー理論、コンピュータ等の技術および理論が存在する (Bradbury and Varencamp, 1998)。これらはかなり汎用化が進み、初心者から専門家までユーザー層も広がっている。しかし、個々の機能や制約については、ユーザーはよく把握することが必要である。たとえば、フーリエ変換は信号処理の基本であり、ソナグラムもこれによるが、欠点は時間・周波数分解能の一定性である。これに対して、ウェーブレット変換を用いると、高周波域では時間分解能が高まり、低周波域では周波数分解能を高めることができる。この他に、線形予測法、ケプストラム解析、バイスペクトル解析などの信号処理方法がある (森下・小畑, 1992)。生物音響学の分野では、これらを採り入れた本格的な分析はこれからであるが、エンジニアの間では自動認知システムの開発に既に試行されている。

音の自動認知システムは、通信環境や騒音制御の高度化に伴い、とくに人間の音声や機械騒音等の自動識別技術分野で急速に発展してきた (北脇, 1996)。こうした信号の自動識別や認知の考え方には、大きく分けて不規則信号論的方法と波形解析的方法がある。不規則信号論的方法は、システム制御に関わる情報処理や数理統計学的立場から、各クラス (たとえば種) について、その不規則信号全体を規定する数学的統計量 (パラメータ) を推定し、識別に有用な情報を簡単なベクトルの形に圧縮することによって、未知標本の圧縮ベクトルがどのクラスに属するか、確率的に判別しようとするものである。波形解析の方法は電子工学の立場から、個々の音を確定的信号と考え、波形解析によって特徴の抽出と圧縮を行い、ニューラルネットワークのようにデータベース的な全クラス全信号の学習に基づいて、未知信号の識別を行なう詳細分析的な

方法である。ここで、確定的信号は不規則信号の特別な場合であるから、不規則信号論的方法はどちらの信号にも適用できる包括的な方法であるが、わかりやすさの点で波形解析の方法の方が音声認知システムの開発によく使われている (佐々木私信)。

波形解析の方法による具体的な研究例としては、Chesmore (1999) が英国の直翅目 Orthoptera の音響信号について、時間領域信号コード化 (time domain signal coding: TDSC 法) を適用し、ニューラルネットワークによる種の認知に成功した。たしかに、コオロギ類のように周波数変調等の音響構造が比較的単純な生物群 (昆虫や両生類等の多く) では、TDSC 法の有効性は予測できる。しかし、鳥類や哺乳類等のように、複雑な周波数構造や周波数変調のある音については、課題がたくさん残されている。それでも Chesmore (1999) の試験的解析からは、今後の改良により、鳥のさえずりについても音声の自動認知に有益な方法が得られるとの感触を得た。また、鳥類の音声にウェーブレット解析法 (近藤, 1997) を適用した試みもある。

不規則信号論的方法による具体的な研究例としては、パワースペクトルの高精度自動抽出法 (佐々木, 1989, 1993a)、また線形予測法、とくに高精度線形予測法 (佐々木・加地, 1993; 山崎, 1999) を利用した野鳥の音声の自動識別などがある。これらは、いずれも信号の 2 次スペクトルの情報に着目したものであるが、非正規性不規則信号の非正規性を扱うバイスペクトル解析法 (佐藤・佐々木, 1979ab) やそれを応用した野鳥の音声の解析 (佐々木, 1993b) とその圧縮・識別 (佐々木, 1993a) などの試みも始まっている。

ところで、工学には工学の、また生物学には生物学の視点や精度の違いがある。生物学者は地域生態系という限定された範囲について、環境モニタリングに有力な音の自動認知システムを考えるが、工学者は一般的な音の自動認知システムを追究し、その先にはより高度なシステムをめぐる発展がある。また、標本に関する発想のギャップもある。エンジニアはノイズがない純粋な音響信号でまず自動認知システムモデルを組み、実用化を目指し試行する。野外生態学者や行動学者には、種・個体・音のレパートリーのどれをとっても、録音条件、生物の内的状態、生物の外部環境等々を考えると、純粋唯一な音響信号はありえない。しかし、こうした違いについて意見交流し、共同研究を進めていかなければ、なかなか目的は達せられない。

音の自動認知システムおよび関連技術の進歩は、生物センサスや環境モニタリングの質を向上させると期待される。当面は、音源種や個体のアイデンティティや音のレパートリーの特定が課題であるが、音に含まれる情報を解析し、音から個体数を概算したり、繁殖状況や栄養状態等について検知したりすることも、決

して夢とはいえない。

6. 双方向的モニタリング

以上述べてきた生物音響学的アプローチはすべて、環境に関する情報を音から一方向的に抽出するものである。しかし、音による環境のモニタリングでは、音を使って動物との間に対話形式で環境の情報を得る双方向的なアプローチも可能である。動物の音響コミュニケーション研究では、1950年代以降、野外における録音再生実験が、音に含まれる情報や機能を検証する常套手段となった。基本は、録音を再生し聞くものの反応を解析するのだが、録音物、再生装置および装置の位置等に関して、適切な対照（コントロール）をとるようにきめ細かな配慮が要求される高度な手法である。

技術の進歩はこの手法にも大きな変革をもたらした。第1に、録音技術の高度化と安定化、録音装置の小型化および媒体の進化により、野外録音は軽量の装備で容易に確実に行えるようになった。第2に、録音を正確に再現する再生技術が野外でも適用できるようになりつつある。第3に、手先と勘の職人芸は伝説化し、人工聴覚認知システムとコンピュータ制御による双方向な再生システムも可能となってきた。大容量なメモリと超高速なデータ処理能力をもったパソコンが手ごろになり、音響データの解析および編集・合成を行うソフトウェアも選べるし、高機能のノートパソコンにより現場での自動処理も可能になった。

双方向的な再生システムは、相手の反応を見ながら音のサンプルの提示を行えるので、音に含まれる情報や機能の詳細を探る上で有益である (Smith, 1996; Dabelsteen and McGregor, 1996)。まだ萌芽的であるが、さえずり等の主要な音声の他に、レパトリー全体へ広げられれば、個体群の動態や活動状況について、より具体的な情報が得られるだろう。

生物音響学的アプローチのメリット

1. 自然にやさしい

従来の生物生息調査では、生物標本採集や捕獲、標識の取り付け、測定や組織の採取等を行う。実物標本の存在は正しい同定を行う前提であり、地域の自然環境を長期的にモニターしていく上でも証拠標本として適切な保存が必要である。環境評価のために生物の採取を完全に省くことはできない。

しかし、一方、このような環境調査は採集する対象の生物の命を奪い、ストレスを与える。調査者が地域内に入ることで自らが負荷を与えるようなデリケートな生息場所においては、調査自体が環境を脅かすこともありえる。特に、貴重な生物種として指摘される絶滅危惧種や希少種等が関係する場合、細心のケアが必要である。

必要性和危険性の狭間で、私たちはできる限り自然に配慮した負荷の少ない調査方法を開発する必要がある。もちろん、調査精度が落ちるのは困る。そこで、調査目的に鑑み、負荷の大きな調査項目は必要最低限に絞り、一方、不足部分を負荷の少ない代替方法により補足すればよい。そういう意味で、生物音響学的アプローチは、生物の音や音響行動、自然の音環境の構造およびその動態から、環境に関する重要な情報へとアクセスするので、自然にやさしい調査方法として提案できる。

2. 人にもやさしい

自然環境調査およびその結果に基づく評価は、知識や経験を持つ専門家によって行われ、地域利用計画事業等に利用される。調査結果は、平均的な市民でも理解でき、独自に判断できることが望ましいが、実際のデータは地域に暮らす市民の環境イメージとはなかなか重ならないから、不透明で縁遠い印象をもたらす。一般の生態学的方法論では、心まで含めた人間の自然界における存在を扱わないが、ディープエコロジー（深生態学）では環境に関する知識と心の結びつきの重要性を説いている。環境調査結果を心に描く環境イメージに関連付けて読み取ることは、環境評価やその後の行動決定に重要ではないか。

日本では1970年代より環境への関心を高める教育として、自然のしくみをテーマに自然体験をする自然教育（小川，1992）、自然観察から自然の事実や法則性を学ぶ自然誌教育、自然と自然資源の保全を学ぶ自然保護教育、公害教育を含む環境保全教育、さらに人間にとっての環境を学ぶ環境科学教育（沼田，1982）など色々行われてきた。しかし、1990年代になって、ネイチャーゲームなどを取り入れて、五感による身近な「環境への気づき」を尊重する傾向に拍車がかかった（コーネル，1986, 1990）。自らの感覚から得られるイメージで環境を再確認し、他者とイメージを共有する試みとして評価される。

聴覚については、聴覚的世界観としてサウンドスケープ論（シェーファー，1986）が紹介されて以来、日本人の音をめぐる伝統や嗜好や、メディアとしてある音の社会性により、学問・芸術・教育・産業・医療等きわめて広範囲にわたる学際的活動と社会的運動が起き、1993年には日本サウンドスケープ協会が発足した（鳥越，1997）。音による教育（シェーファー，1992；長谷川，1996）や音風景体験として街中のブラインドウォークなどが盛んに行われるようになり、いよいよ1996年には環境庁が『心に残る音風景百選事業』として、国民の心に響く環境の聴覚的イメージを喚起した（山下，1996）。各地の地方自治体でも、騒音対策を担当する部署を中心に、音環境事業が展開するようになった。

その中で、音環境についての意識を掘り起こすためにサウンドマップを活用した東京都練馬区や千葉県内での環境学習活動が注目される(大野, 1992; 石井, 1996)。サウンドマップは、そもそも地理学において音環境の客観的記載法として工夫され、サウンドスケープ論展開において、世界各地の都市や田園の音環境が記載される中、多様な記載法が提示された(鳥越, 1997)。しかし、環境学習のサウンドマップは、音風景案内や音名所地図を作成するのではなく、耳による「環境への気づき」を喚起することが目的である。まず地域の音環境に耳を傾け、聞き取ったものを個人の自由な表現方法で紙の上に描く。サウンドマップは、フィーリングに直結した音環境イメージ図として個人的・主観的表現ではあるが、作品を相互に見比べることで非言語的な共感をもたらし、互いに作品を語ることで言葉としてイメージを共有する利点がある(図2)。

サウンドマップは、生態学的調査と心に描く環境イメージとを結びよい架け橋となるだろう。音環境の表現法としてサウンドマップを完成させる一方で、客観的評価方法を導入できるように、3段階の調査を実施する必要がある。第1に、サウンドマップ調査では、比較対照地点等を設け、個々の試験者がサウンドマップを対で描き、複数の試験者間でこれらの対を比較検討するもので、心理テストや行動学の手法に倣って評価を行う。第2に、音環境調査により音源種に基づいた評価等を行う。第3に、通常の生態学的手法による環境調査から評価を行う。3つの調査結果および評価の相関から、聴覚のふるいにかけられた環境イメージと併せて問題を扱うことができるのではないか。目下、財団法人日本自然保護協会の援助の下、愛知県瀬

戸市市民により、サウンドマップ手法が身近な自然環境調査として試されており、今後、知識と心とを結び付ける手法へと発展することを期待したい。

3. 「自然の静けさ」の尺度

自然環境における騒音は、従来は動物の健康や繁殖、近年では福祉の問題とされている。多くは畜産や養鶏等の食物生産にかかわる飼育生物が対象だが、最近では野生生物も取り上げられる。絶滅が危惧される生物等の生息地周辺での地域開発工事騒音による妨害、海峡運航船のエンジン音による鯨類の水中音響コミュニケーション妨害、ウォーターバイクや超音速飛行機の騒音による野生動物の繁殖障害等である(Radle, 1998)。鳥類の中でも近所の成鳥のさえずりを聞いて学習する種類は、交通量の多い道路沿いの生息環境ではさえずりの正常な発達が阻害される可能性も懸念されている(Earth Environment Service, 1999)。

しかし、1998年11月ニュージーランドで行われたINTERNOISE 98会議では、国立公園等の豊かな自然環境内におけるレクリエーション騒音の問題が、「NATURE QUIET」の価値をめぐって議論された。日本のサウンドスケープ界等でも「NATURE QUIET」は、生活環境騒音対策や好ましいサウンドスケープデザインと並んで、人間社会における自然の音環境の意義を問う実用的な問題である。

ところで、「NATURE QUIET」は新しい術語のように取り上げられるが、日本語では「自然の静けさ」という立派な表現で、自然音のあるがままの状態を指す。自然界で静けさは決して沈黙でなく、生命活動や物理的現象による多様な音が、おとなしい音から賑やかな、いや騒々しい音まで、ありのままにはっきり聞

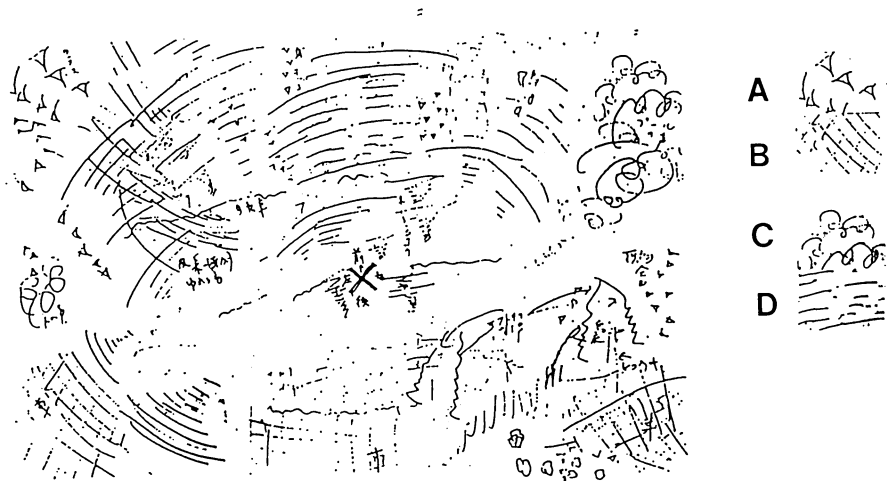


図2. サウンドマップの例(石井皓氏提供)。観察者は図の中央(X)で周囲の音の観察をした。A, 鳥の鳴き声; B, 自動車交通騒音; C, 子供の声; D, 木の葉の音(千葉市千葉公園)。

こえる状態である。「自然の静けさ」は、人間活動による機械音や交通音等の騒音を制御する観点からではなく、人間社会における音環境の基盤として評価されるべきである。著者は、地域の自然が人間にその生存と安全をもたらすものを自然のアメニティと提唱し、生物学的多様性と地域性をその二大柱とした (Oba, 1995)。地域の自然の音は、聴覚面で地域の生態学的基盤を反映した自然のアメニティとして位置づけられる。その意味で、「自然の静けさ」の有益な尺度として、音源種による音環境評価を提案するものである。

4. 「見えざるもの」への手がかり

私たちが見たり聞いたりすることによって捉えている環境は、実際そこに存在する世界の一部にすぎない。感覚の制約によって生じる見えない背景について、推察は過大にも過小にもならないように注意しなければならない。生物音響学的アプローチの利点は、私たちに聞こえる音信号から、目視だけでは見落としてしまう情報を探究することにある。しかし、もっと重要な点は、音があるゆえにわかる事象や音でなければわからない事象に着目して、これを積極的に活用し、背景にある現象について情報を得る可能性である。特定の地域における生物の活動状況や環境の状態を、音の時系列的現象として可変的に捉えることや、音の物理的3変量の分布様式に関連付けることは、音を使ったモニタリングに有益な方法を提供すると思われる。また、前節「自然の音環境のサンプリング」に述べたように、音源種構成も、音の響きの背後にある見えない仕組みへの手がかりとして、適切な処理が求められている。さらに、音環境の構造や動態は、景観構造のようなきわめて多くの要因から作られる複雑なシステムの解明にも興味深い切り口を提供するだろう。たとえば、利根川沿いに展開する人間の諸活動 (Oba, 1998) や谷津田の自然に対する都市化と農業の近代化 (大庭, 1996) の影響は、自然の音環境構造の特徴に明らかな違いをもたらしている。

5. 人と物と技術の交流

生物音響学は大学や研究機関に専門家が少なく、相互交流も少ない。人により研究対象が特定の動物群 (たとえば、鳥類・セミ類等) に固定しがちで、学会活動も素材ごとに分かれている。教育カリキュラムも、生物音響学が正式科目として公式に扱われたことは、先述の例以降不明である。研究分野も分散し、音の生態学的・進化学的意義は動物行動学や生態学に、魚類や鯨類等の水中音響探知 (ソナー) は水産学に、音の聴覚認知機構は心理学・生理学の分野にという具合である。ところが、音環境の研究は、音響学・生態学・景観生態学・植生学・地理学・サウンドスケープ・騒音等の複数の領域が重なる。また、音の自動認知では、

生物工学や音声信号処理技術等が重要な関連領域である。生物音響学に必要な学問的背景や訓練は実に多様化し、急速に進んでいる。人材・素材・技術それぞれの状況は、今後交流を図ることにより、生物音響学的アプローチを充分支援することになるだろう。

また、録音資料は音源種の同定や音環境の比較研究等に役立つ基礎的資料として、音による環境モニタリングには不可欠である。しかも、音の記録は二度と同じ物を採録できない貴重な資料である。しかし、その利用には、録音者や製作者の著作権保護や、媒体の劣化等に備えて専門的管理が前提である。その点、博物館やサウンドアーカイブ等の役割は重大である。たとえば、英国図書館附属国立サウンドアーカイブ野生生物部門は、録音家や理解ある研究者によって、世界中の自然音を体系的に収集保存し、利用を促進している。米国のコーネル大学等欧米の大学でも、著名な音のコレクションを蓄積し、公的な資源として活用することが使命になりつつある。自然誌系博物館の中には、剥製や液浸標本等の実物標本を補う二次的な資料として、音の標本を大切に保管するところもある。国内では、「蒲谷サウンドアーカイブ」「松浦生物音声コレクション (千葉県立中央博物館蔵)」等が注目されるが、多くは個人の偉業による蓄積である。千葉県立中央博物館でも、「自然と人との関わり」を示す録音資料として、音環境録音およびサウンドスケープに関する録音資料を中心に、生物音響資料が収集されている。こうした状況は、生物音響資源の面でも素地が固まりつつあることを示すものである。

今後の展望

生物音響学的アプローチが、地域の生態系の状態を知るモニタリングの手法として評価されるためには、音源種構成の指標化や、音環境から地域生態系における生物学的多様性の評価法確立等、多くの課題が残されている。既存の研究成果に音環境研究事例を参照させ、音環境を含めた総合的な環境調査を試行して、事例を重ね検証を行うことが何よりも不可欠である。

生物音響学は「生物」とつづが、学際的な分野である。音の自動認知システムや双方向的な環境モニタリング等、高度な科学技術に基づいた新分野を開拓する土台は、基礎学力と自然科学・工学両域における基礎的な知識、技能およびノウハウ、その他多様な関連領域への関心と適応力にある (風間, 1998)。分野間のコミュニケーションは殊に重要である。エンジニアと野外生物学者の間を例にとると、前者から提供される新技術を後者が理解し環境モニタリングのために適確に採用する場面と、後者が自然における実物や実体験をもとに前者が抱える技術的課題を支援する場面の両方において、かなりの努力が必要である。また、生物音響学において既にスタンダード化し、知的資産と

して蓄積されつつあるソナグラム等資料のフォーマットが、次々と導入される新技術により脈絡なく改変されて陳腐にならないよう、技術開発者側の配慮が期待される。他方、野外生物学者も自然音の多様性と複雑さの意義、重要性を相手に理解される言葉で伝えられるよう肝に命じたい。

21世紀を目前にして、生物音響学という複合的な分野の人材・素材・技術のネットワークを促進することは重要である。千葉県立中央博物館では、平成10年3月に英国ハル大学からChesmore博士を客員研究員として迎え、講演会「音と光を手がかりに環境を探索する！電子工学と博物学と環境保全」を行ったが、参加者は40名を超え、関心の高さを示した。また、「アジア生物音響研究会」という名称で随時研究交流を行ってきたが、今後は長期的展望をもつ会の成立が願わしい。

録音・音の分析・データ処理等の学習の機会については、日本では千葉県立中央博物館の教育普及事業「自然の音講座」以外にはない。地域の自然音の記録は、地域博物館等が自前で収集拡充するしかないの、録音収集活動の啓蒙と録音に取組む人材の開発を目指した教育プログラムをもつ必要があろう。

生物音響資料の蓄積と活用について、日本は極めて遅れている。自然音録音はマルチメディア界や放送界等で貢献が大であるが、環境モニタリング等学術的利用に堪える体系的収集と恒久的保存・活用は皆無である。著作権に対する誤解や、著作権者（録音者等）と利用者（研究者等）の間にありがちな不適切なコミュニケーションも問題である。環境モニタリングにおける生物音響学の適用には、これら当事者が互いの役割を尊重しながら、録音資料を生かした相互協力が肝要である。既に公的資源としてある生物音響資料について、よい利用方法を検討することも今後の課題である。

謝 辞

千葉県立中央博物館開館以来10年、資料収集保存・調査研究・教育普及・展示の各機能において、自然の音に取り組む機会を与えられたことを感謝する。内外の協力者はもとより、科学研究費(05680455)・サウンド技術振興財団・双葉電子記念財団による助成に感謝し、今後更にこれに応えていくよう努力したい。石井皓(図の提供も)・大庭滋子・大谷英児・尾崎煙雄・桑原和之・佐々木公男・原正利・林浩二諸氏のコメントに深く感謝する。

引用文献

Baptista, L. F. and S. L. L. Gaunt. 1997. Bioacoustics as a tool in conservation studies. In Clemmons, J. R. and R. Buchholz (eds.), *Behavioral Approaches to*

- Conservation in the Wild*, pp. 212-242. Cambridge Univ. Press, Cambridge.
- Becker, P. H. 1982. The coding of species-specific characteristics in bird sounds. In Kroodsma, D. E. and E. H. Miller (eds.), *Acoustic Communication in Birds*. Vol. 1, pp. 214-252. Academic Press, London.
- Bradbury, J. W. and S. L. Varenkamp. 1998. *Animal Communication*. 882 pp. Cornell Univ. Press, New York.
- Chesmore, D. 1999. Technology Transfer: Applications of Electronic Technology in Ecology and Entomology for Species Identification. *Nat. Hist. Res.* 5 (2): 111-126.
- Dabelsteen, T. and P. K. McGregor. 1996. Dynamic Acoustic Communication and interactive playback. In Kroodsma, D. E. and E. H. Miller (eds.), *Ecology and Evolution of Acoustic Communication in Birds*, pp. 398-408. Cornell Univ. Press, New York.
- Earth Environment Service. 1999. Silent Spring. *Earthweek: a diary of the Planet* January 29.
- Evans, W. R. 1994. Nocturnal flight call of Bicknell's thrush. *Wilson Bulletin* 106: 55-61.
- Falls, J. B. 1982. Individual recognition by sound in birds. In Kroodsma, D. E. and E. H. Miller (eds.), *Acoustic Communication in Birds*. Vol. 2, pp. 237-278. Academic Press, London.
- 長谷川有機子. 1996. イヤーゲーム 心の耳を育てる. 146 pp. 紀書房, 京都.
- 石井 皓. 1996. サウンドスケープと環境教育. *日本音響学会誌* 52: 800-804.
- 岩宮眞一郎. 1993. 快適な音環境—サウンドスケープの「聴」点から. *アメニティの科学. 現代のエスプリ* 315: 88-95.
- Jenkins, M. 1992. Species diversity: an introduction. In Groombridge, B. (ed.), *Global Diversity Status of the Earth's Living Resources*, pp. 40-46. Chapman and Hall, London.
- 風間晴子. 1998. 国際比較から見た日本の「知の営み」の危機. *大学の物理教育* (2): 4-16.
- 北脇信彦. 1996. マルチメディア符号化技術. In 北脇信彦(編), *音のコミュニケーション工学*, pp. 17-49. コロナ社, 東京.
- Klump, G. M. 1996. Bird communications in the noisy world. In Kroodsma, D. E. and E. H. Miller (eds.), *Ecology and Evolution of Acoustic Communication in Birds*, pp. 321-338. Cornell Univ. Press, New York.
- コーネル, J. B. 1986. *ネイチャーゲーム* 1. 146 pp. 柏書房, 東京.
- コーネル, J. B. 1990. *ネイチャーゲーム* 2. 180 pp. 柏書房, 東京.
- 近藤智大. 1997. ウェーブレット変換を用いた野鳥鳴声信号の時間周波数解析. 筑波大学第3学群工学システム学類卒業論文.
- Krause, B. 1993. The Niche Hypothesis: a virtual symphony of animal sounds, the origins of musical expression and the health of habitats. *Soundscape Newsletter*, World Forum for Acoustic Ecology, Simon Fraser Univ., June, 1993.
- Lendroth, S. 1999. Mars Microphone, built at UC Berkeley and funded by the Planetary Society, Launched Jan. 3. University of California-Berkeley

- NEWS RELEASE, 1/5/99.
- ルロウ, Y. 1983. 動物の音声の世界. 370 pp. 共立出版, 東京.
- Marten, K. and P. Marler. 1977. Sound transmission and its significance for animal vocalization. I. Temperate habitats. *Behav. Ecol. Sociobiol.* 2: 271-290.
- Marten, K., D. Quine and P. Marler. 1977. Sound transmission and its significance for animal vocalization. II. Tropical forest habitats. *Behav. Ecol. Sociobiol.* 2: 291-302.
- 森下 巖・小畑秀文. 1992. 信号処理. コロナ社, 東京.
- 沼田 真. 1982. 環境教育論 人間と自然とのかかわり. 212 pp. 東海大学出版会, 東京.
- 大庭照代. 1994. 生態園における池岸と照葉樹林内の音環境 (1991. 4-1993. 3): 自然の音源の構成の研究およびその方法の検討. 中央博物館自然誌研究報告特別号 (1): 277-332.
- Oba, T. 1994. Sampling methods for the study of the natural sound environment in Japan: Consideration of the sample time unit. *Nat. Hist. Res.* 3: 27-32.
- Oba, T. 1995. What is the natural sound diversity? A consideration for the local natural amenity. *Nat. Hist. Res.* 3: 173-185.
- 大庭照代. 1996. 都市化に伴う自然の音環境の解析. サウンド 11: 18-21.
- Oba, T. 1998. A preliminary analysis of riverain sound environment based upon sound source species and their acoustic features. *Bioacoustics* 9: 259.
- 大野嘉章. 1992. 「人・音・くらし」の環境学習. In 沼田真 (監修), 地球化時代の環境教育 3. 生涯学習としての環境教育, pp. 92-99. 国土社, 東京.
- 小川 潔. 1992. 自然教育. In 環境教育辞典編集委員会 (編), 環境教育事典, p. 143. 労働旬報社, 東京.
- 大橋 力. 1994. 脳にやさしい音環境を作る. 都市緑化技術 (12): 8-11.
- Pye, J. D. and W. R. Langbauer, Jr. 1998. Ultrasound and infrasound. In Hopp, S. L., M. J. Owren and C. S. Evans (eds.), *Animal Acoustic Communication Sound Analysis and Research Methods*, pp. 221-250. Springer, Berlin.
- Radle, A. L. 1998. The Effect Of Noise On Wildlife: A Literature Review, The World Forum for Acoustic Ecology, Article Index: Acoustic Ecology, <http://interact.uoregon.edu/MediaLit/FC/readings/radle.html>.
- Rand, A. S. and G. E. Drewry. 1994. Acoustic monitoring at fixed sites. In Heyer, W. R., M. A. Donnelly, R. W. McDiarmid, L.-A. C. Hake and M. S. Foster (eds.), *Measuring and Monitoring Biological Diversity Standard Methods for Amphibians*, pp. 150-152. Smithsonian Inst. Press, Washington.
- 佐々木公男. 1989. パワースペクトル推定における平滑化帯域幅の自動決定法. システム制御情報学会論文誌 2-3: 97-107.
- 佐々木公男. 1993a. 2次, 3次スペクトルによる野鳥鳴声音の情報圧縮とその識別への応用. 第32回計測自動制御学会学術講演会予稿集, pp. 261-262.
- 佐々木公男. 1993b. 水辺の野鳥鳴声音の2次, 3次スペクトル特性とその分類. 日本音響学会誌 49: 477-486.
- 佐々木公男・加地裕二郎. 1993. ARモデルの多段当てはめによる定常パワースペクトルの高精度・自動推定. システム制御情報学会論文誌 6-7: 328-339.
- 佐藤拓実・佐々木公男. 1979a. バイスペクトル解析とその応用 (1). 機械の研究 31: 721-728.
- 佐藤拓実・佐々木公男. 1979b. バイスペクトル解析とその応用 (2). 機械の研究 31: 831-837.
- シェーファー, R. M. 1986. 世界の調律. 418 pp. 平凡社, 東京.
- シェーファー, R. M. 1992. サウンド・エデュケーション. 166 pp. 春秋社, 東京.
- Smith, W. J. 1977. *The Behavior of Communicating, an Ethological Approach*. 545 pp. Cambridge (Massachusetts), Harvard Univ. Press.
- Smith, W. J. 1996. Using interactive playback to study how songs and singing contribute to communication about behaviour. In Kroodsma, D. E. and E. H. Miller (eds.), *Ecology and Evolution of Acoustic Communication in Birds*, pp. 377-397. Cornell Univ. Press, New York.
- 鳥越けい子. 1997. サウンドスケープ その思想と実践. 212 pp. 鹿島出版会, 東京.
- Tyack, P. L. 1998. Acoustic communication under the sea. In Hopp, S. L., M. J. Owren and C. S. Evans (eds.), *Animal Acoustic Communication Sound Analysis and Research Methods*, pp. 163-220. Springer, Berlin.
- WGBH Educational Foundation. 1999. *Migrating Birds*—Bill Evans, <http://www.pbs.org/wgbh/nova/kalahari/migrating.html>.
- Wiley, R. H. and D. G. Richards. 1982. Adaptations for acoustic communication in birds: sound transmission and signal detection. In Kroodsma, D. E. and E. H. Miller (eds.), *Acoustic Communication in Birds*, Vol. 1, pp. 131-181. Academic Press, New York.
- 山下充康. 1996. 環境庁 残したい「日本の音風景100選」. 日本音響学会誌 52: 805-811.
- 山崎 真. 1999. 線形予測法を用いた野鳥鳴声スペクトルの圧縮とその識別への応用. 筑波大学大学院理工学研究科修士論文.

(1999年3月9日受理)

Bioacoustic Approach in Environmental Monitoring

Teruyo Oba

Natural History Museum and Institute, Chiba
955-2 Aoba-cho, Chuo-ku, Chiba-shi, Chiba,
260-8682 Japan

Bioacoustics is the subject to deal with natural sounds and is expected to make some contribution to biological census and environmental monitoring based upon the development in electronics and computer sciences. In the present paper, bioacoustic approach is overviewed in the following aspects: recognition of individuals and species by their sounds, comprehension of the environmental structure using natural sounds, sampling of natural sound environment, evaluation of sound environment based upon sound source species, auto-

mated recognition system of natural sound, and interactive monitoring. Bioacoustic approach offers noticeable perspectives on nature protection and conservation. Firstly, it is kind to nature by imposing the least cost and damage upon living organisms in the processes of monitoring. Secondly, it is kind to people in that their image of local environment is integrated into the ecological knowledge by adopting both sound maps and sound environment study. Thirdly, it offers an important ecological viewpoint in the evaluation of 'NATURE QUIET' for the human environment. Fourthly, it attempts at extracting the information about complex biological activities and different environmental phenomenon from the composition

and delivery pattern of natural sounds. Fifthly, the groundwork for further development in bioacoustics has already been laid in view of the research outcome led by people working in various fields, huge accumulation of bioacoustic materials, and great advances in technology. Further research is needed to establish environmental indices based upon sound source species and develop methods for the evaluation of biological diversity of the local ecosystem from its sound environment. Also, we ought to promote interdisciplinary exchanges of knowledge and opinions, training essential for bioacoustic skills, and collection and utilisation of bioacoustic materials as public resources.