

音響的手法を用いるコナジラミ類の
種およびバイオタイプ識別に関する研究

2019年 3月

中林 大樹

音響的手法を用いるコナジラミ類の
種およびバイオタイプ識別に関する研究

中林 大樹

システム情報工学研究科 知能機能システム専攻

筑波大学

2019年3月

概要

コナジラミ類は主に温室環境内で問題になる農業害虫であり，その防除は重要な課題となっている．現在は物理的防除(侵入防止)や化学的防除(化学農薬の散布)などによって防除が行われている．しかし，化学的防除に関して，コナジラミ類は種やバイオタイプによって薬剤感受性が異なるため，最適な農薬を決定するためにはこれらの識別が必要となる．これまでの識別法はDNA鑑定によるもので，時間・コストが必要である．

本稿では，短時間かつ低コストのオンシツコナジラミとタバココナジラミ・バイオタイプ B, Q1, Q2 の識別を目的とし，コナジラミ類の音響的生態を利用した種・バイオタイプ識別手法を提案した．提案手法は録音，発生音の検出，種・バイオタイプ識別の3段階からなる．録音で得られた実際のコナジラミ類の発生音から，周波数領域の特徴を利用したテンプレートとの類似度による識別と，LPC, MSLS, MFCC の3つの音声特徴量を用いる線形判別分析，および類似度と音声特徴量を組み合わせた3種類の識別手法を提案し，実験的に提案手法の性能を評価した．

結果として，オンシツコナジラミとタバココナジラミ・バイオタイプ B, Q1, Q2 の識別に関して，周波数領域の類似度を用いる手法のF値はそれぞれ86.0, 66.7, 91.8, 90.4(%), 音声特徴量と線形判別分析を用いる手法は，LPCは98.3, 96.3, 93.0, 89.9(%), MSLSは99.8, 86.1, 93.1, 84.1(%), MFCCは99.8, 87.1, 95.7, 88.6(%)となった．音声特徴量に類似度を加えた識別手法では，LPCは98.5, 97.1, 96.6, 96.3(%), MSLSは99.9, 93.4, 96.4, 93.3(%), MFCCは99.9, 93.4, 96.4, 93.3(%)となった．この結果は，本手法がDNA鑑定に変わる手法になりうることを示唆しており，コナジラミ類の防除への一助となると考えられる．

キーワード：コナジラミ 音響 バイオタイプ 識別

目次

第1章	序論	1
1.1	研究の背景	1
1.2	本論文の目的・論文構成	2
第2章	コナジラミ類の発生音長時間モニタリングシステムの構築	8
2.1	はじめに	8
2.2	コナジラミ類の発生音の予備収録	8
2.2.1	実験環境	8
2.2.2	実験結果	8
2.3	発生音長時間モニタリングシステムの構築	9
2.3.1	長時間モニタリングシステムの必要条件と構成	9
2.3.2	実験・考察	13
2.4	まとめ	13
第3章	コナジラミ類の音響的生態	15
3.1	はじめに	15
3.2	オンシツコナジラミの発生音	15
3.2.1	実験概要	15
3.2.2	実験結果と考察	15
3.3	タバココナジラミの発生音	20
3.3.1	実験概要	20
3.3.2	実験結果と考察	21
	バイオタイプBの発生音	21
	バイオタイプQ1の発生音	21
	バイオタイプQ2の発生音	21
3.4	種およびバイオタイプごとの発生音の特徴	21
3.5	まとめ	25
第4章	音響的手法によるコナジラミ類の種・バイオタイプ識別システムの構築	27
4.1	はじめに	27
4.2	コナジラミ類の発生音検出器の構築	27
4.3	発生音を用いたコナジラミ類の種・バイオタイプ識別器の作成	28

4.3.1	周波数領域の類似度を利用した識別	30
4.3.2	音声特徴量を用いた判別器による識別	31
	LPC	31
	MSLS	32
	MFCC	33
4.3.3	音声特徴量と周波数領域の類似度を併用した判別器による識別	33
4.4	実験と結果	36
4.4.1	実験環境	36
4.4.2	周波数領域の類似度を利用した識別	36
4.4.3	音声特徴量を用いた判別器による識別	39
4.4.4	音声特徴量と周波数領域の類似度を併用した判別器による識別	43
4.5	まとめ	48
第 5 章	結論	49
	謝辞	50
	参考文献	52

目次

1.1	オンシツコナジラミの外観	3
1.2	タバココナジラミ・バイオタイプ B の外観	4
1.3	タバココナジラミ・バイオタイプ Q1 の外観	5
1.4	タバココナジラミ・バイオタイプ Q2 の外観	6
1.5	本論文の構成	7
2.1	予備実験系	9
2.2	予備実験にて収録された音 (オンシツコナジラミ)	10
2.3	予備実験にて収録された音 (タバココナジラミ)	11
2.4	構築した音響モニタリングシステム	12
2.5	作製したシステムで録音したオンシツコナジラミの発生音例	14
3.1	オンシツコナジラミの発生音 : A	16
3.2	オンシツコナジラミの発生音 : B	17
3.3	オンシツコナジラミの発生音 : C	18
3.4	オンシツコナジラミの発生音 : D	19
3.5	1 秒間の最大音圧を 2 時間分プロットした時間音圧波形	20
3.6	バイオタイプ B の発生音	22
3.7	バイオタイプ Q1 の発生音	23
3.8	バイオタイプ Q2 の発生音	24
3.9	発生音の例: (a) 時間音圧波形; (b) 振幅スペクトル	26
4.1	4 章において作成するシステムの概要	27
4.2	発生音の自動検出の概念図	28
4.3	発生音の自動検出の例: (a) バンドパスフィルタを通した音; (b) しきい値処理と インデックス作成; (c) 重複インデックスを削除; (d) サンプリング	29
4.4	タバココナジラミ・バイオタイプ B および Q2 の 5 分間の録音データに対して の, 閾値と発生音・ノイズ抽出数の関係	30
4.5	周波数領域における類似度計算と, 類似度を基にした識別の概要	31
4.6	音声特徴量 (13 次元) を用いた判別器による種・バイオタイプ識別手法の概要	32
4.7	MSLS および MFCC の導出手順の概要	34
4.8	音声特徴量と類似度を用いた判別器による種・バイオタイプ識別手法の概要	35

4.9	作成したテンプレート	36
4.10	類似度の最大値を基準とした識別の混同行列	37
4.11	5分間の録音データから得られた類似度の平均値を基準とした識別の混同行列	38
4.12	実験を通して得られた正規化平均相関値の分布	39
4.13	LPC を特徴量として用いた判別機の混同行列	40
4.14	MSLS を特徴量として用いた判別機の混同行列	41
4.15	MFCC を特徴量として用いた判別機の混同行列	42
4.16	4次元の類似度を特徴量として用いた判別器の混同行列	44
4.17	LPC と4次元の類似度を特徴量として用いた判別器の混同行列	45
4.18	MSLS と4次元の類似度を特徴量として用いた判別機の混同行列	46
4.19	MFCC と4次元の類似度を特徴量として用いた判別機の混同行列	47

第1章 序論

1.1 研究の背景

農業において害虫は深刻な問題であり、その対策は重大な課題となっている。農業では単一、あるいは少数種類の作物を高密度で栽培することが一般的であるため、それらの作物を栄養源とする生物にとっては格好の餌場となり、繁殖場となっている。そして形態が小さく、移動能力、繁殖力共に優れた害虫は広く農業に悪影響を与えてきた [1]。

コナジラミ類は温室環境内で一般的に見られる、主要な農業害虫である [2, 3]。コナジラミ類は、体長が 1-3 (mm) 程度と小さく体も細いため、0.4 mm 程度の細かい目合いの防虫ネットに取り付いた後に、潜り込むように侵入することが確認されている。コナジラミが温室環境内に侵入すると、トマトやキュウリなどの作物に取り付き、強い繁殖力によって温室内に広がり、多大な被害をもたらす [4, 5]。具体的には排泄物により生じるすす病で成長が阻害され、果実表面を汚すなど品質の低下を引き起こし、さらに 100 種類以上のウィルスを媒介する [5, 6, 7]。特にタバココナジラミは、TYLCV (Tomato Yellow Leaf Curl Virus) というトマトの病害の中でも特に有害なウィルスを媒介する。そのため、国際自然保護連合 (IUCN) は「100 of the world's worst invasive alien species」の一つにタバココナジラミを挙げている [8]。その影響の大きさから、イギリスやフィンランドではタバココナジラミの侵入を厳しく制限する保護地区が制定されている [9]。コナジラミ類は、未受精卵からは全て雄が生まれる産雄性単為生殖を行うため、雌のコナジラミ類が 1 頭でも侵入してしまうと繁殖が始まるため、侵入防止による防除は困難である。以上から、コナジラミ類に対する防除は農業において重要な課題となっている。

現在まで、コナジラミ類の防除のために、物理的・化学的および生物的防除が広く提案され、これらを組み合わせて防除を行っている [3, 7, 10]。また、タバココナジラミは形態的には同一だが、遺伝子的に異なる数十種の複合体であることが知られている [11]。この種別はバイオタイプと呼ばれ、取り付く作物や媒介するウィルス、繁殖力、生息域などの生物的特性を区別するために分類されている。さらに、コナジラミ類は農業に対する感受性が種やバイオタイプによって異なることが明らかになっている [12, 13, 14]。そのため、化学農業を散布する防除を行う場合、最適な農薬を決定する上で、種やバイオタイプを識別することは重要となる。

タバココナジラミのバイオタイプには、Middle East-Asia minor 1 (バイオタイプ B) と Mediterranean (バイオタイプ Q) という特に有名で世界的に広く分布する 2 つのバイオタイプが存在する [15, 16, 17]。また、バイオタイプ Q には Q1 と Q2 というサブカテゴリが存在する [18]。本研究では、コナジラミ類の中でも世界中に広がり、多くの国で経済的損失を引き起こすオ

ンシツコナジラミと、タバココナジラミのバイオタイプ B, Q1, Q2 に着目する。ここで、オンシツコナジラミとタバココナジラミのバイオタイプ B, Q1, Q2 の外観を Fig. 1.1 - 1.4 に示す。

種・バイオタイプの識別に関して、種は目視や顕微鏡などによる外観検査で識別が可能である [19]。しかし、タバココナジラミのバイオタイプは外観では識別困難であるため、バイオタイプ識別には、PCR(polymerase chain reaction) 法や LAMP(Loop-Mediated Isothermal Amplification) 法など、遺伝子を増幅させて遺伝子型を判定する方法が用いられてきた [19, 20, 21, 22, 23, 24]。しかし、PCR 法は遺伝子増幅に恒温器などの機材及び 1 日程度の時間、煩雑な手順が必要である。識別精度に関して、LAMP 法を用いたタバココナジラミとオンシツコナジラミの識別の場合、再現率は 96.2 %、全体正解率は 96.3 %となっている [24]。LAMP 法は 1 時間程度と比較的短時間で済むものの、市販品を用いた場合、機材に加えさらに 1 検体につき 1500 円ほどのコストが必要になる [25]。判定に失敗した場合、再度遺伝子増幅をする必要があるため、さらに時間・コストが必要となり、コナジラミ類の侵入発見から迅速な散布農薬の決定が行えないという欠点がある。よって、タバココナジラミのバイオタイプと、さらにこれらと形態的に類似しているオンシツコナジラミを短時間・低コストで分類することができる手法の確立が求められている。

ここで、コナジラミ類の音響的生態に着目する。コナジラミ類の発生音は、種およびバイオタイプごとに異なると報告されており [26, 27, 28, 29]、また、この音響交信はコナジラミ類の繁殖活動において重要な役割を果たすとされている [28, 30, 31]。バイオタイプ B とバイオタイプ Q の交雑は可能で雌が生まれるが、その次の世代が生まれないことが確認されており [32, 33]、さらにバイオタイプ B 雌とバイオタイプ B, Q 雄を同時に育成したとき、繁殖行動の成立率が B 同士のほうが高いことが明らかにされている [33]。以上から、コナジラミ類の種およびバイオタイプ識別は、音響的特性によってなされていると考えられる。この音響的特性を利用してコナジラミ類の種・バイオタイプ識別が簡単かつ迅速に可能となれば、コナジラミ類の防除に関して、化学的農薬の使用量を低減させることが可能になると考えられる。

1.2 本論文の目的・論文構成

本稿では、迅速かつ低コストのコナジラミ類の種およびバイオタイプを識別するシステムの作成を目的とし、コナジラミ類の発生音を用いた音響的手法による識別手法を提案する。具体的には、コナジラミの音を自動検出し、そのバイオタイプを自動的に識別する信号処理手法を設計する。また、提案手法の性能を実験的に検討する。本論文の構成を Fig. 1.5 に示す。

1 章で本研究の背景を述べる。2 章ではコナジラミ類の発生音の録音システムおよびコナジラミ類の音響的生態に関して述べる。3 章では、コナジラミ類の音響的特徴を利用したバイオタイプ識別手法について述べる。4 章では提案手法の性能を実験的に評価する。第 5 章では結論を示す。



Fig. 1.1: オンシツコナジラミの外観



Fig. 1.2: タバココナジラミ・バイオタイプ B の外観



Fig. 1.3: タバココナジラミ・バイオタイプQ1の外観



Fig. 1.4: タバココナジラミ・バイオタイプQ2の外観

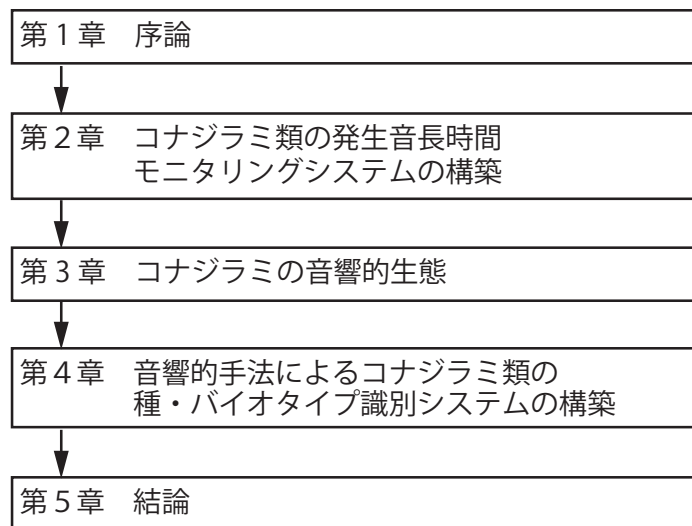


Fig. 1.5: 本論文の構成

第2章 コナジラミ類の発生音長時間モニタリングシステムの構築

2.1 はじめに

本章では、コナジラミ類が発する音を、長時間モニタリング可能なシステムについて述べる。コナジラミ類にとって、音によるコミュニケーションは、交尾をするにあたり重要な役割を持つと明らかにされている [30]。また、種によって発生音が異なることが明らかにされている [29]。これらの発生音による種・バイオタイプ識別のために、群生した際のコナジラミ類の発生音、および時間条件や明暗条件による発生音の変化などを調査する必要がある。先行研究では雌雄一対を用い、録音時にフィルム等の拡声膜を利用して実験が行われているが、群生時および長期間の観測はなされていない。また、自然に生息した状態の生態を知るためには、拡声膜を利用せずに葉裏に生息している状態での録音が必要である。そこで本章では、コナジラミ類の群生の音響測定のために必要な要素を述べ、実際に構築したシステムについて示す。2.2 節に録音に必要な条件を考察するために行った予備実験を示し、2.3 節にその条件に合うように構築したシステムを示す。

2.2 コナジラミ類の発生音の予備収録

2.2.1 実験環境

まず $120 \times 80 \times 40$ (mm) のプラスチック製の箱の中にオンシツコナジラミ、タバココナジラミを各 1 匹取り付かせた葉を接着し、マイクロフォン (Type 4955, B&K) をコナジラミから 20 mm 程度の距離に設置し、録音を実施した。マイクロフォンからの信号は、コンディショニングアンプ (Type 2690, B&K) で増幅されたあと、A-D コンバータ (USB-6221, National Instruments) を介して PC に保存される。実験系を **Fig. 2.1** に示す。

本実験系を用い、オンシツコナジラミとタバココナジラミに対して 2 時間の録音を行った。

2.2.2 実験結果

結果として得られたオンシツコナジラミとタバココナジラミの発生音の時間音圧波形とスペクトログラムを、それぞれ **Fig. 2.2**, **2.3** に示す。

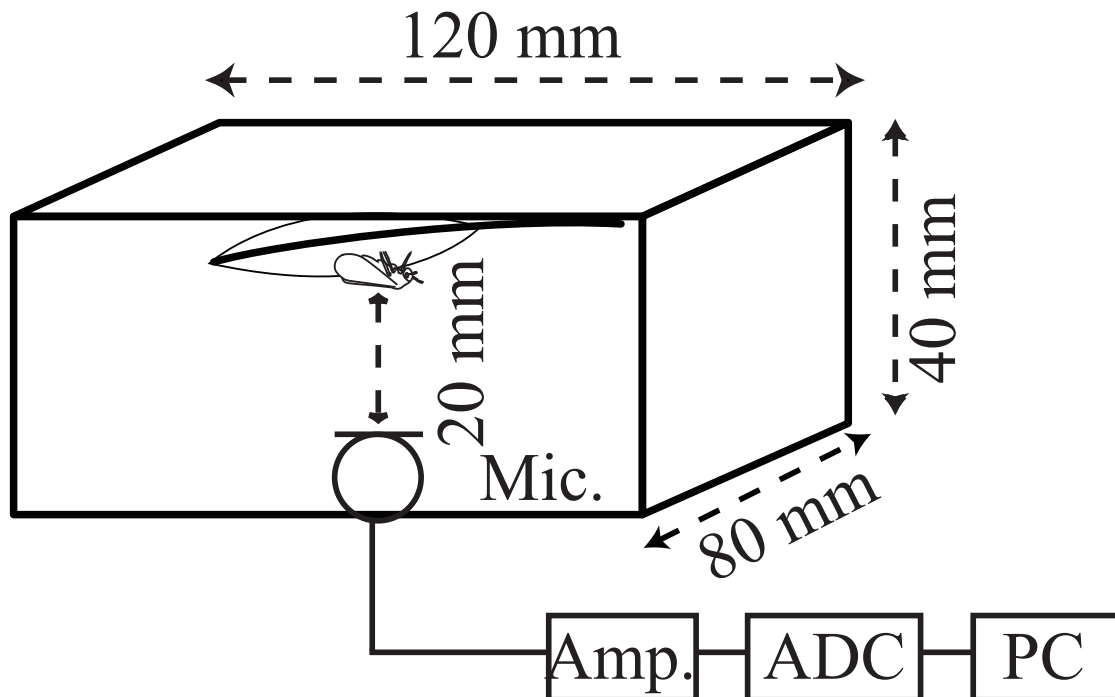


Fig. 2.1: 予備実験系

Fig. 2.2, 2.3 より, この2種のコナジラミに関しては 100-500 (Hz) が中心周波数の, 録音された音圧が 1 mPa 以下の微小音を発することがわかる. 以上から, 低周波域の暗騒音が小さく, 微小音を録音できるシステムを作成する必要がある.

2.3 発生音長時間モニタリングシステムの構築

2.3.1 長時間モニタリングシステムの必要条件と構成

本項では, 2.2 節にて示した条件を満たす環境を構築する. さらに, コナジラミ類は餌となる植物が無いと数時間で弱ってしまうため, 実験環境には植物が必須となる. また, 群生させる場合葉 1 枚では定着させることが難しいため, 植物の苗などの生息環境の状態に群生させて録音をする必要がある.

この条件を満たすため, コナジラミを飼育する層と防音のための層の二層構造を持つ実験環境を構築し, これを無響室内に設置することで, できる限り雑音の少ない環境を実現した. 本システムの概要を Fig. 2.4 に示す.

コナジラミ飼育層は 65 × 65 × 195 (mm) の昆虫飼育箱 (SPL-310077, SPL Life Sciences) である. この飼育箱は水耕栽培が可能となっており, ここでコナジラミの餌となる植物の苗を育成し, コナジラミに取り付かせる. この飼育箱にマイクロフォン (Type 4955, B&K) が通る穴を開け, コナジラミが群集した葉の近くにマイクロフォンを設置することで録音環境と

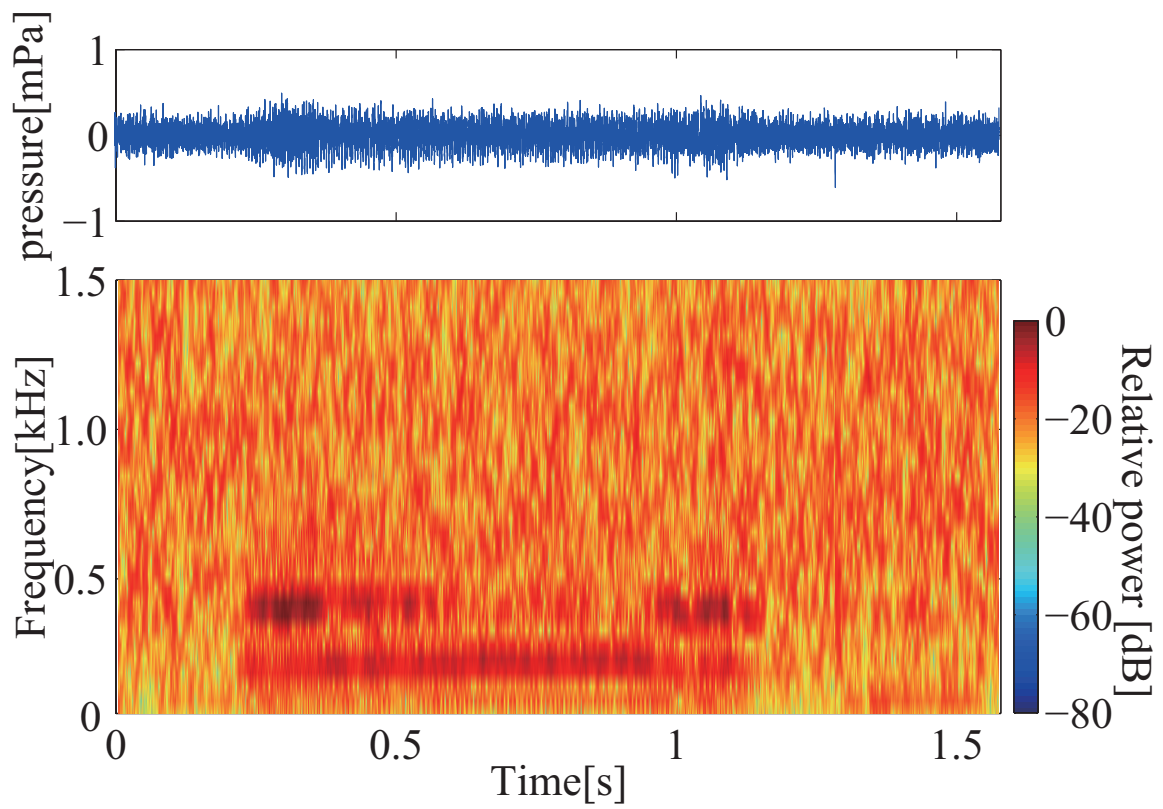


Fig. 2.2: 予備実験にて収録された音 (オンシツコナジラミ)

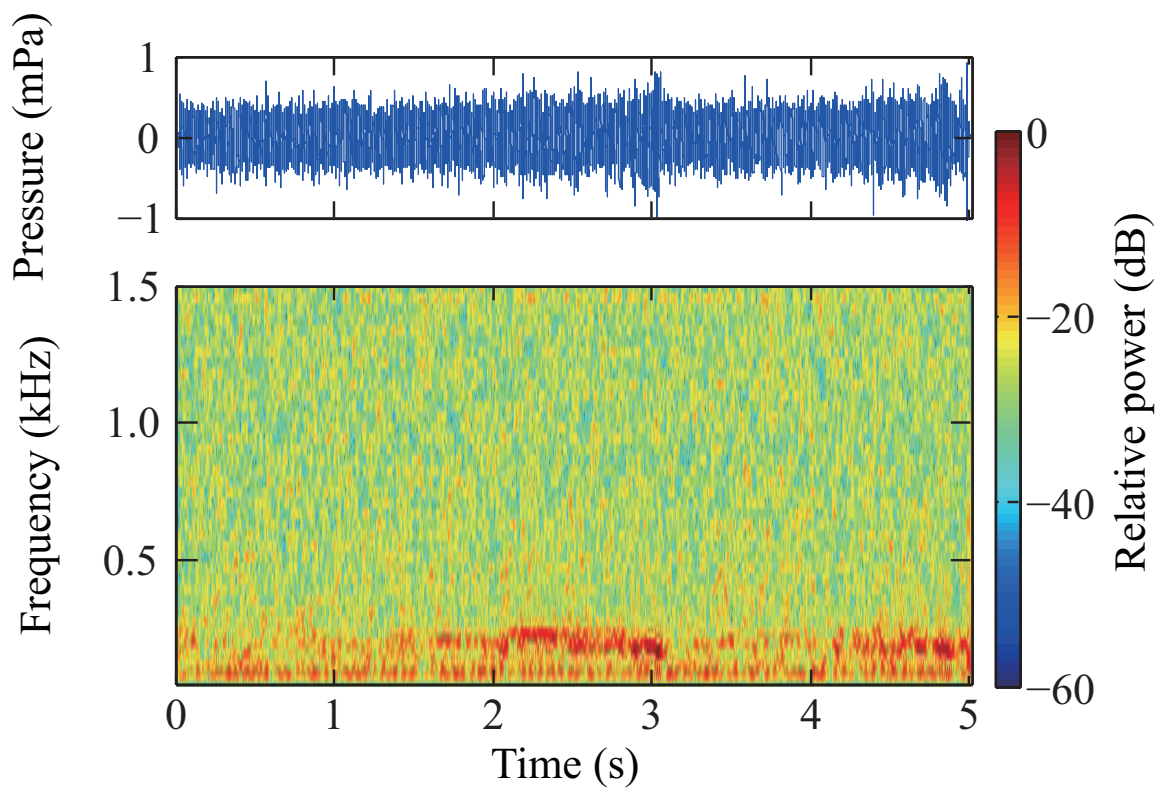


Fig. 2.3: 予備実験にて収録された音 (タバココナジラミ)

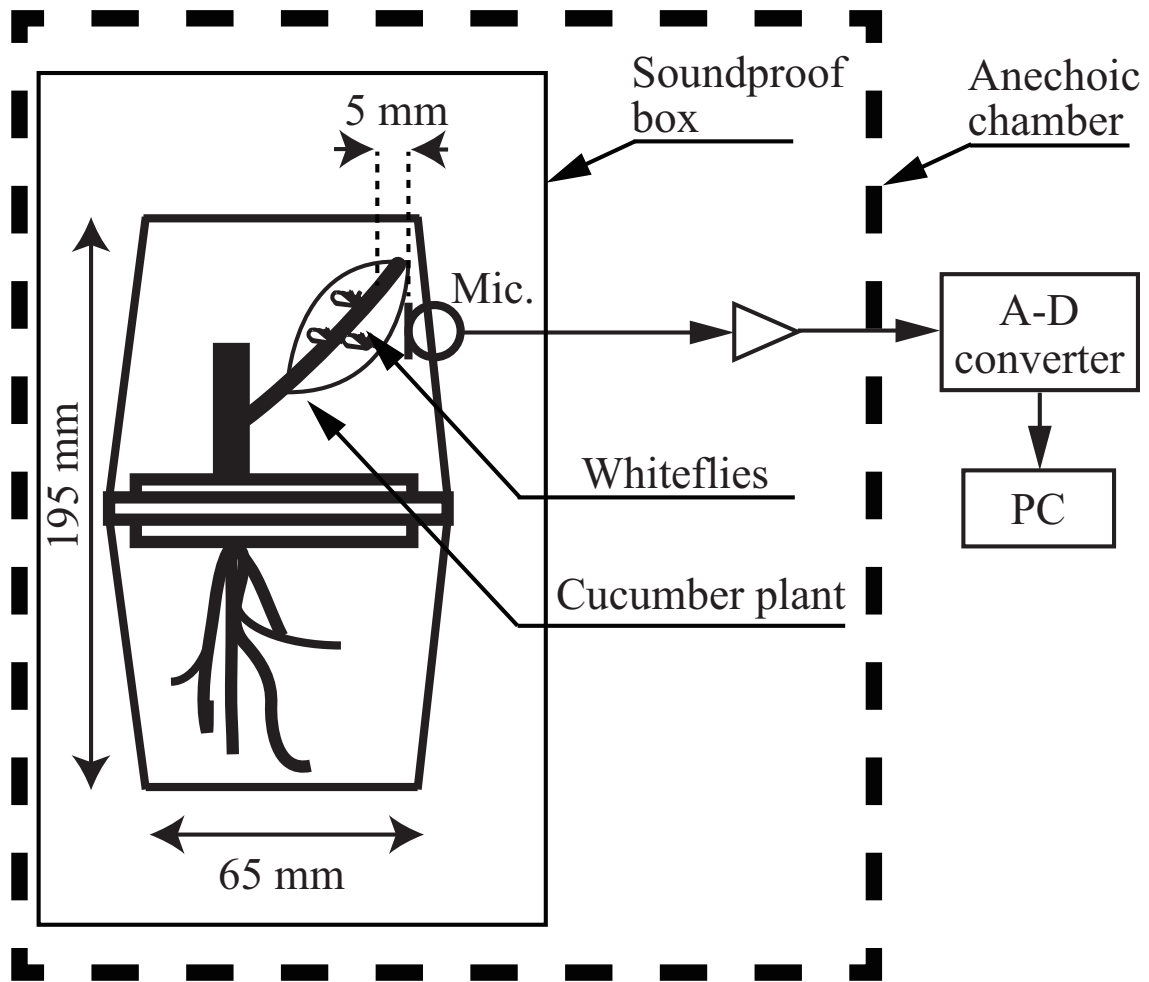


Fig. 2.4: 構築した音響モニタリングシステム

して用いることができる。穴を複数開け、複数チャンネルで録音することも可能である。また、コナジラミに対してマイクロフォンを 5 mm 程度の距離まで近づけることが可能である。これにより、群生したコナジラミの微小音の長時間モニタリングが可能となる。この音は、コンディショニングアンプ (Type 2690, B&K) で増幅されたあと、A-D コンバータ (USB-6221, National Instruments) を介して PC に保存される。防音層は 10 mm の石膏ボードと 40 mm の PET ファイバーによる合計 50 mm の防音壁を持つ箱である。この箱の中に録音環境を構築することで、構造上無響室の外に出すことができないアンプ部や電源アダプタ等の雑音源を排除することが可能となる。

2.3.2 実験・考察

本項では、2.3.1 で作製したシステムを用いてオンシツコナジラミの発生音を録音する。飼育環境内でキュウリの苗を栽培し、オンシツコナジラミを 30 頭以上入れ、6 時間の録音を実施した。

結果として得られた、Fig. 2.2 と同じ周波数、発生時間の特徴を持った発生音の時間音圧波形とスペクトログラムを Fig. 2.5 に示す。Fig. 2.2 と Fig. 2.5 を比較して、同様の特徴を持った音が 8 mPa 程度の最大音圧で録音できていることがわかる。また、6 時間の録音を実施したが、コナジラミが弱っている様子は確認されなかった。

以上から、本システムはコナジラミの微小音を長時間録音することが可能であるとわかる。

2.4 まとめ

本章では、コナジラミ類が発する音を長時間モニタリング可能なシステムを構築するために、実際にコナジラミ類の微小音の特徴を録音し、その発生音の特徴を述べた。その結果とコナジラミの生態を基に、長時間モニタリングシステムに必要な条件を考え、条件を満たすモニタリングシステムを作成した。その結果、予備実験よりも録音音圧の向上した、かつ長時間のモニタリングが可能なシステムが構築された。

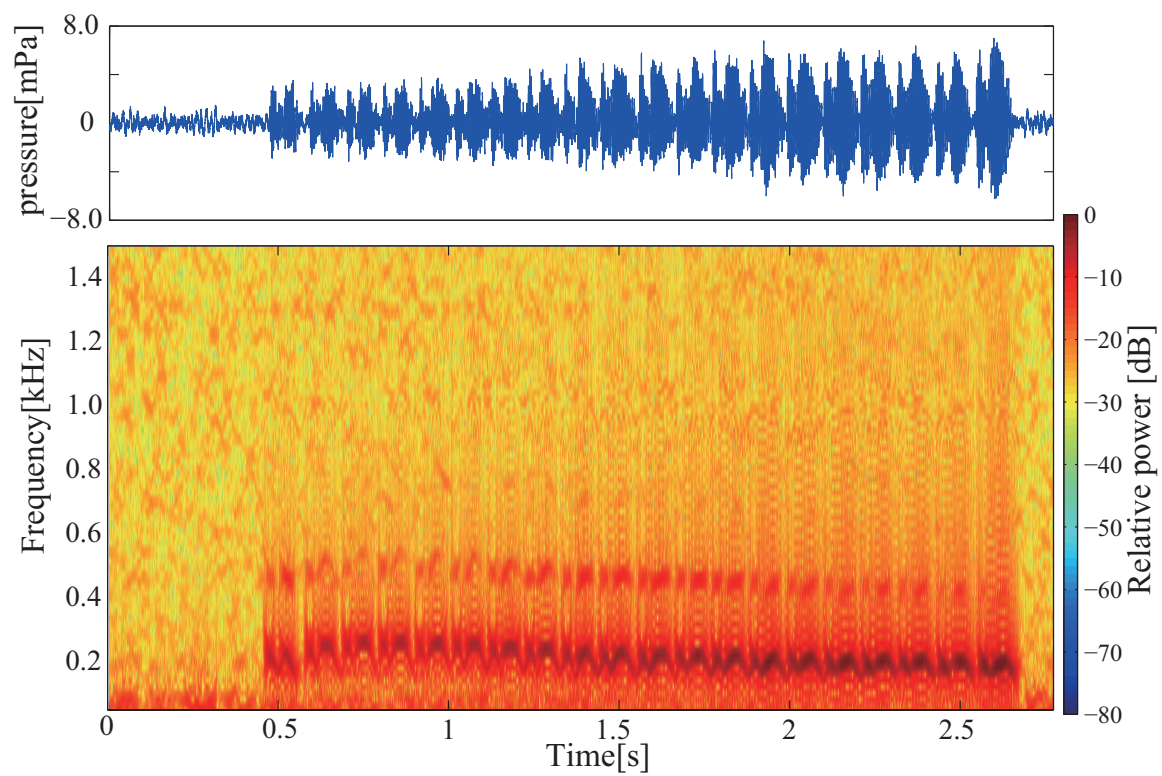


Fig. 2.5: 作製したシステムで録音したオンシツコナジラミの発生音例

第3章 コナジラミ類の音響的生態

3.1 はじめに

本章では、2章にて作成したシステムを用い、実際に録音したオンシツコナジラミおよびタバココナジラミバイオタイプ B,Q1,Q2 の発声音、および明らかにしたコナジラミ類の音響的生態に関して詳細に述べる。3.2 にオンシツコナジラミの発声音の特徴・音響的生態を述べ、3.3 にタバココナジラミの各バイオタイプの発声音の特徴を述べる。3.4 に種およびバイオタイプによる発声音の共通点と相違点について述べ、3.5 にまとめを述べる。

3.2 オンシツコナジラミの発声音

本節では、オンシツコナジラミの発声音の特徴、および音響的生態について述べる。音響的生態は、明暗条件による発声音の変化と、録音時間による発声音の変化について検討する。

3.2.1 実験概要

本実験では、明暗の変化によるオンシツコナジラミの鳴活動の変化を観測する。この時の箱内部のオンシツコナジラミの生息数は30頭以上であり、明時180分、暗時180分の合計360分にわたり計測を実施した。

3.2.2 実験結果と考察

結果として、4種類の特徴的な音が録音された。以下、発声音 A, B, C, D と呼ぶ。それぞれの時間音圧波形およびスペクトログラムを **Figs. 3.1, 3.2, 3.3, 3.4** に示す。さらに、それぞれの音の特徴をと明時、暗時の発音数を **Table 3.1** に示す。

発音数の指標として、発声音 B, D は回数を計測した。発声音 A, C は、0.1 秒程度のパルス状の音で断続的に発生し、回数で計測することが困難であったため、この音が観測されてから2秒以上観測されなくなるまでの時間をこの音の発生時間として、総発生時間を計測した。

Table 3.1 より、すべての発声音について明時の方が発生数が多く、特に発声音 D に関して発生数の差が顕著であることがわかる。ここで発声音 D について、2本のマイクロフォンを設置して録音を実施したところ、移動している物体が発する音の特徴が示された。よって発声音 D をコナジラミ類の飛翔音であるとして、以降は運動の指標として用いる。また今後、発

Table 3.1: Characteristics of observed sounds

Sound	A	B	C	D
中心周波数 (Hz)	250	250	250	150
発生時間 (s)	20-120	0.7-2	5-10	0.4-5
ピーク音圧 (mPa)	3	3-6	0.5	1-10
明時発音数 (回)	-	636	-	4154
明時発音時間 (s)	580	-	402	-
暗時発音数 (回)	-	402	-	3
暗時発音時間 (s)	269	-	369	-

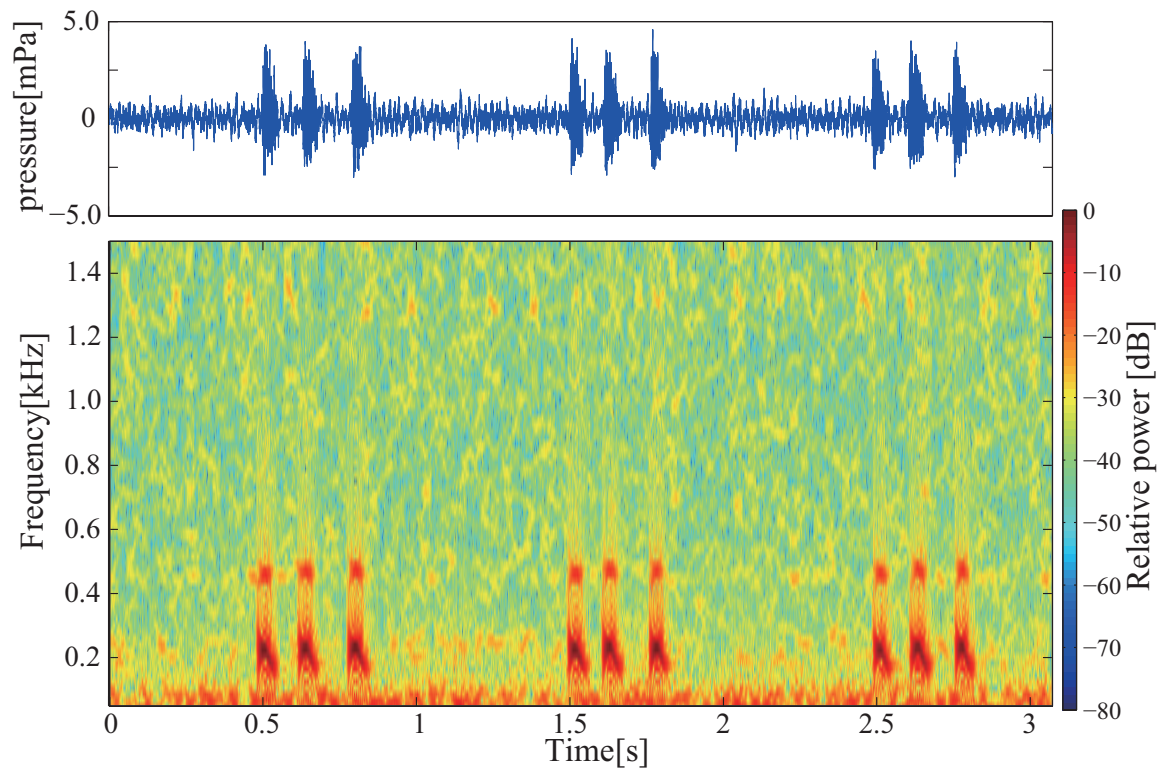


Fig. 3.1: オンシツコナジラミの発生音 : A

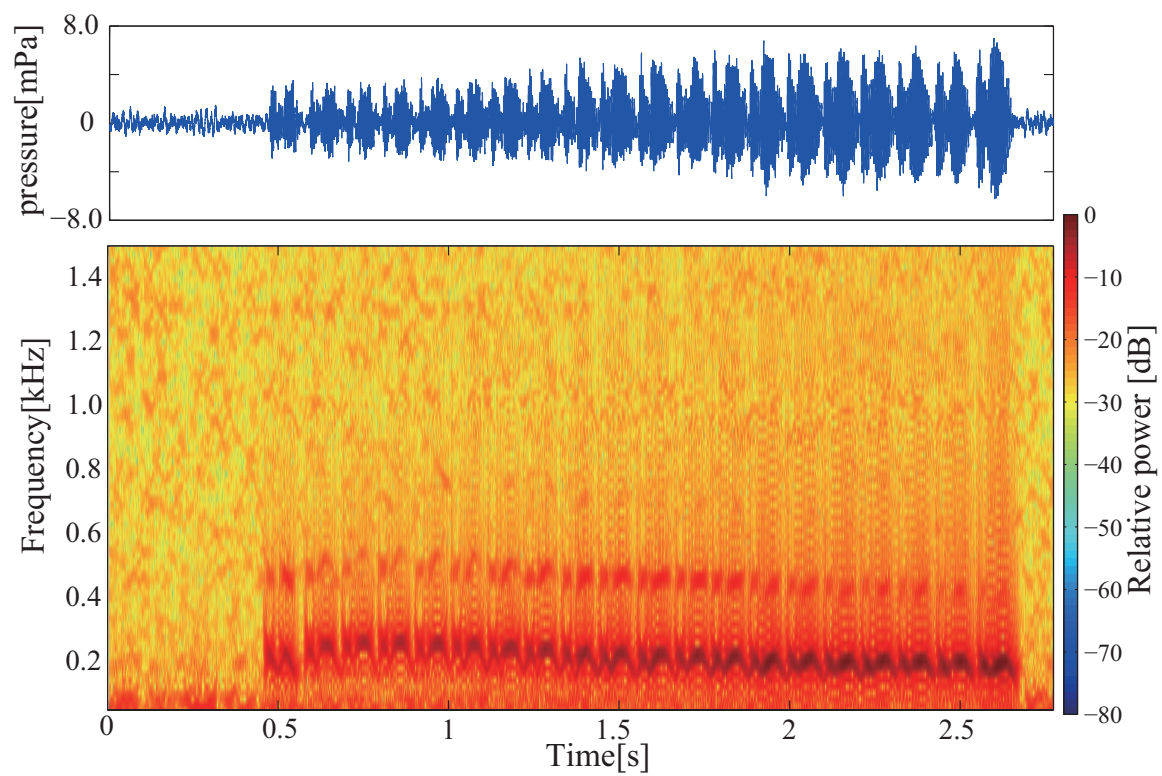


Fig. 3.2: オンシツコナジラミの発生音 : B

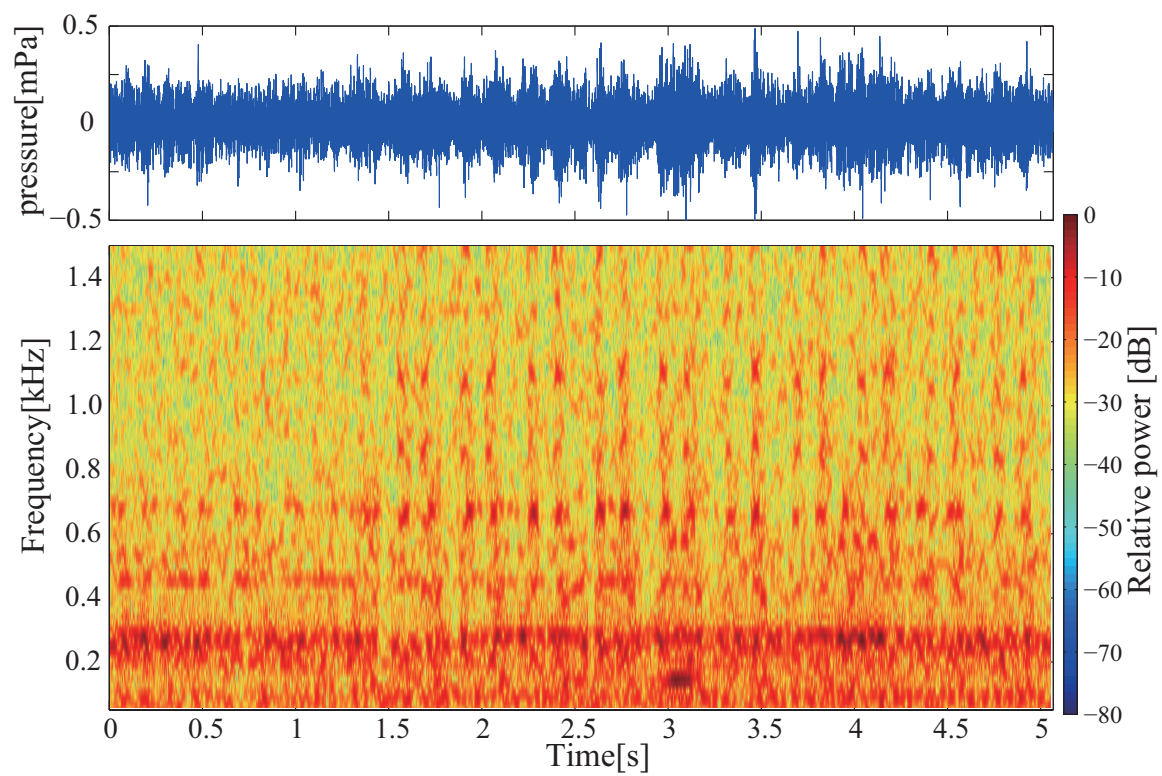


Fig. 3.3: オンシツコナジラミの発生音 : C

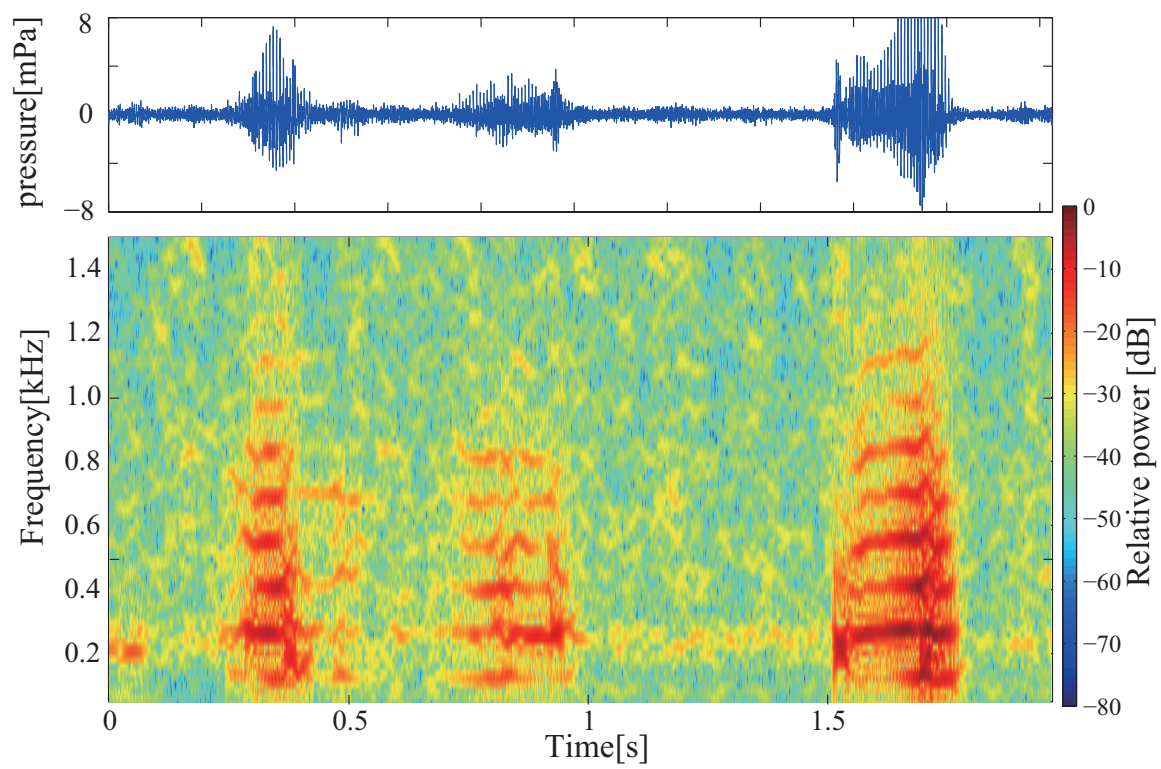


Fig. 3.4: オンシツコナジラミの発生音 : D

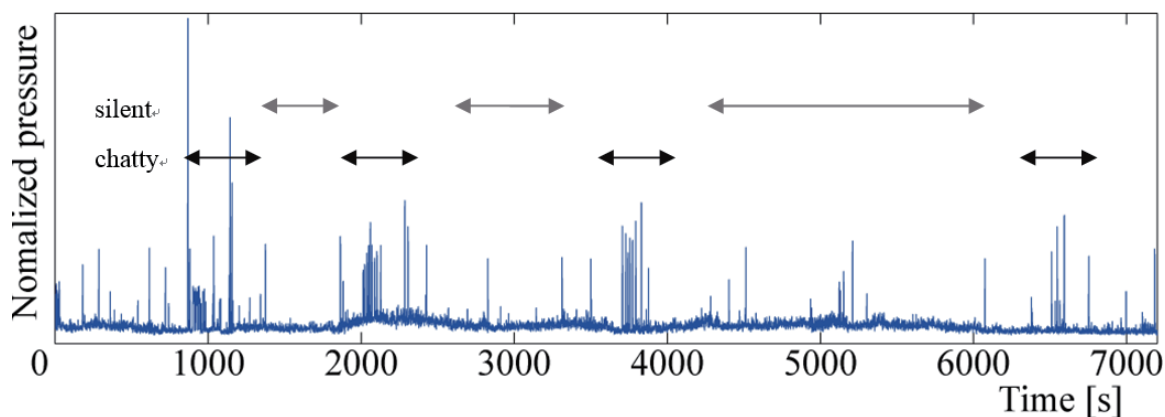


Fig. 3.5: 1秒間の最大音圧を2時間分プロットした時間音圧波形

生音 A, B, C は鳴行動によるものとして扱う。これらの音の全体的な特徴として、ピーク周波数が 200-1500 (Hz) の間に収まり、音圧は mPa のオーダーであることが上げられる。これらの音は暗時でも発生することから、コナジラミの交配活動は明時の方が活発であるが、明暗関係なく行われるとわかる [34]。

また、本実験で得られた明時の録音データに対して、一秒間での最大音圧を2時間分プロットした時間音圧波形を Fig. 3.5 に示す。最大音圧を鳴活動により変化させるため、150-1000 (Hz) のバンドパスフィルタを適用している。Fig. 3.5 から、環境を変化させなくても鳴きやすい期間とほとんど鳴かない期間があると読み取れる。このことから、コナジラミには鳴き出すトリガーとなるものが存在している、または鳴き出す周期のようなものが存在しているのではないかと考えられる。

3.3 タバココナジラミの発生音

本節では、タバココナジラミの各バイオタイプの発生音に関して述べる。

3.3.1 実験概要

本実験では、タバココナジラミのバイオタイプ B, Q1, Q2 を用い、各バイオタイプの音の違いを検証する。前節と同様の実験系を用い、各種および各バイオタイプにおいて明時6時間の録音を実施した。この時の箱内部のタバココナジラミ・バイオタイプ B, Q1, Q2 の生息数は、それぞれ 40, 30, 20 頭以上であった。

3.3.2 実験結果と考察

結果として、各バイオタイプについて特徴が共通する A:周波数変化がない音、B:周波数が増える音の2種類の発生音が観測された。

バイオタイプ B の発生音

バイオタイプ B の発生音に関して、時間音圧波形およびスペクトログラムを Fig. 3.6A, B に示す。どちらの音も最大で 4 mPa 程度で、継続時間は 0.5 s 程度である。周波数変化のない音は 200 - 250 (Hz) 程度であり、周波数が増える音は 200 から 1000 (Hz) 程度まで上昇することが確認できる。

バイオタイプ Q1 の発生音

バイオタイプ Q1 の発生音に関して、時間音圧波形およびスペクトログラムを Fig. 3.7A, B に示す。どちらの音も 3 - 4 (mPa) 程度で、継続時間は 0.5 s 程度である。周波数変化のない音は 200 - 250 (Hz) 程度であり、周波数が増える音は 200 から 450 (Hz) 程度まで上昇していることがわかる。

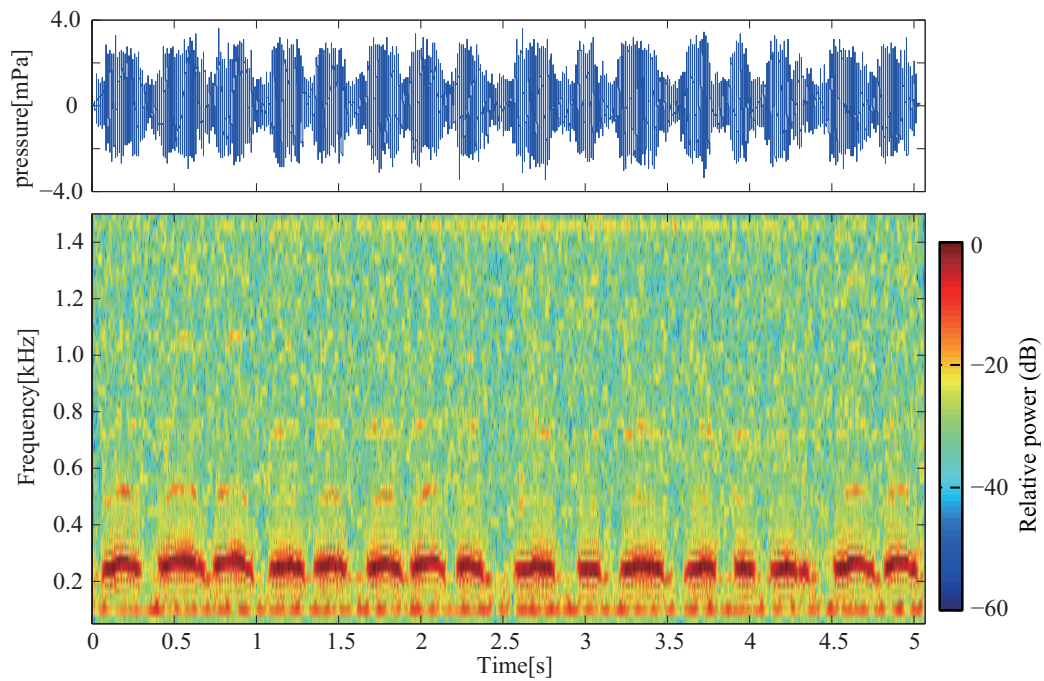
バイオタイプ Q2 の発生音

バイオタイプ Q2 の発生音に関して、時間音圧波形およびスペクトログラムを Fig. 3.7A, B に示す。どちらの音も 2 mPa 程度で、継続時間は 0.5 s 程度である。周波数変化のない音は 200 - 250 (Hz) 程度であり、周波数が増える音は 200 から 350 (Hz) 程度まで上昇していることがわかる。

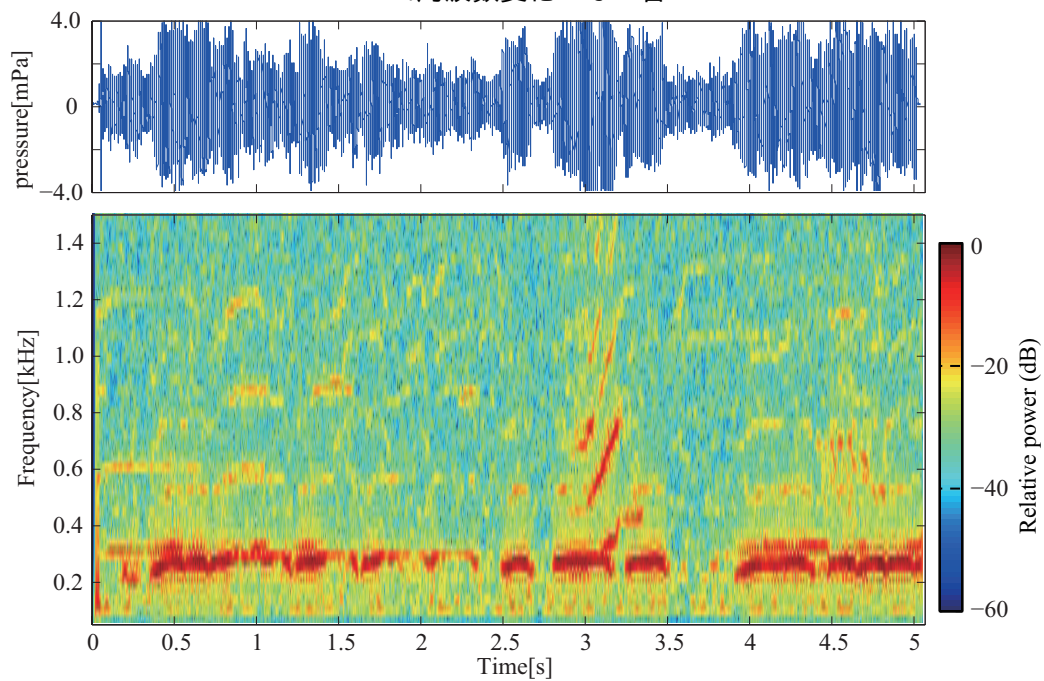
3.4 種およびバイオタイプごとの発生音の特徴

オンシツコナジラミの発生音である第 3.2 節における発生音 A, B と、タバココナジラミの発生音である Figs. 3.6, 3.7, 3.8 を比較する。オンシツコナジラミとタバココナジラミを比較すると、音の継続時間に差異が見られる。オンシツコナジラミは発生音 A のように 0.1 秒程度の短い、あるいは発生音 B のように 1 秒以上の長い音を発する。タバココナジラミは全バイオタイプ共通して 0.5 秒程度継続する音となっている。また、タバココナジラミの各バイオタイプの発生音は、どちらも音の継続時間が全て 0.5 秒程度であること、中心周波数が 250-300 (Hz) であること、最大音圧が 2-4 (mPa) であることが共通している。

ここで、各種・バイオタイプの発生音を、分類に利用できる特徴に関して考察する。Fig. 3.9(a)(b) に発生音の時間音圧波形、振幅スペクトルをそれぞれ例示する。Fig. 3.9(a) から、オンシツコナジラミの発生音は 0.1 s 程度の短い音と、1 s 以上の長い音の二種類、タバココナジラミはバイオタイプによらず 0.5 s 程度の音を発生させることがわかる。Fig. 3.9(b) から、い

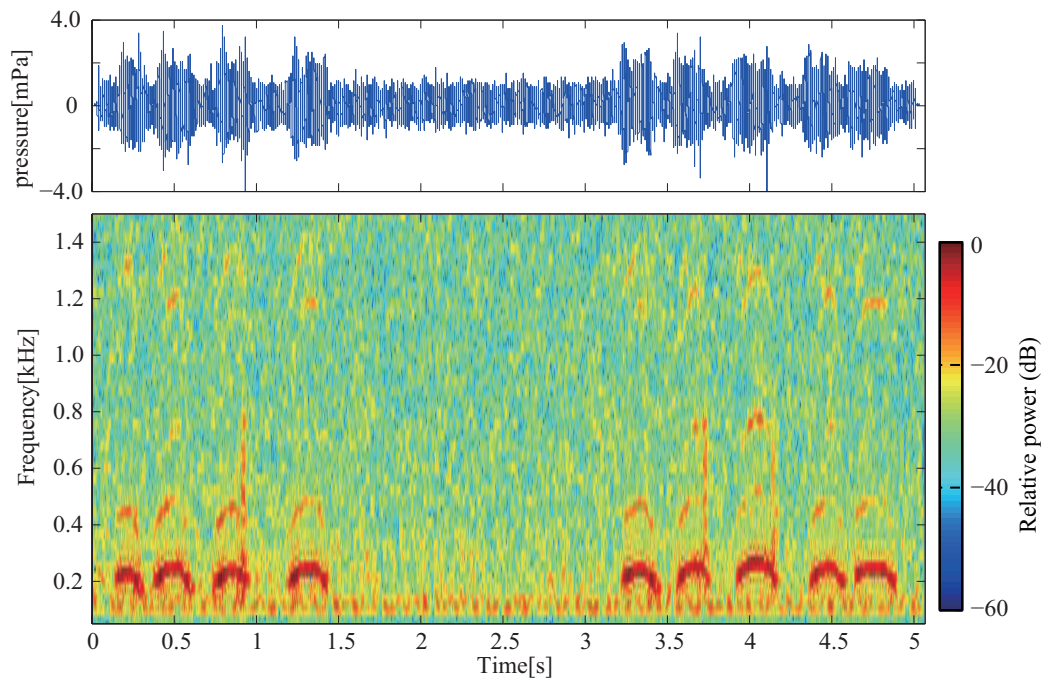


A:周波数変化のない音

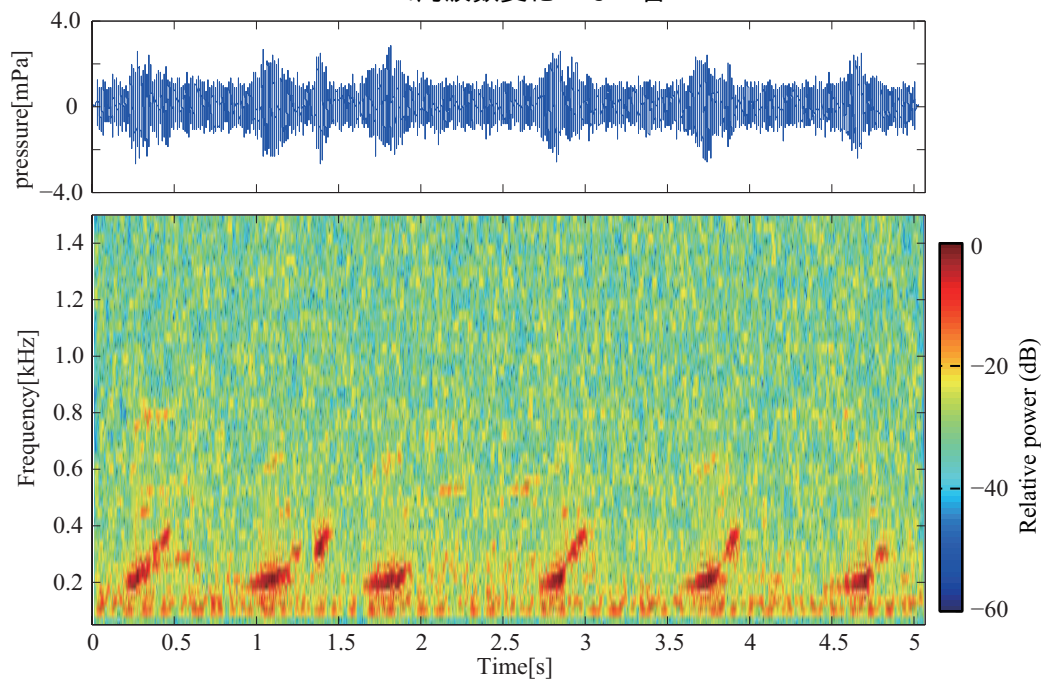


B:周波数上がる音

Fig. 3.6: バイオタイプ B の発生音

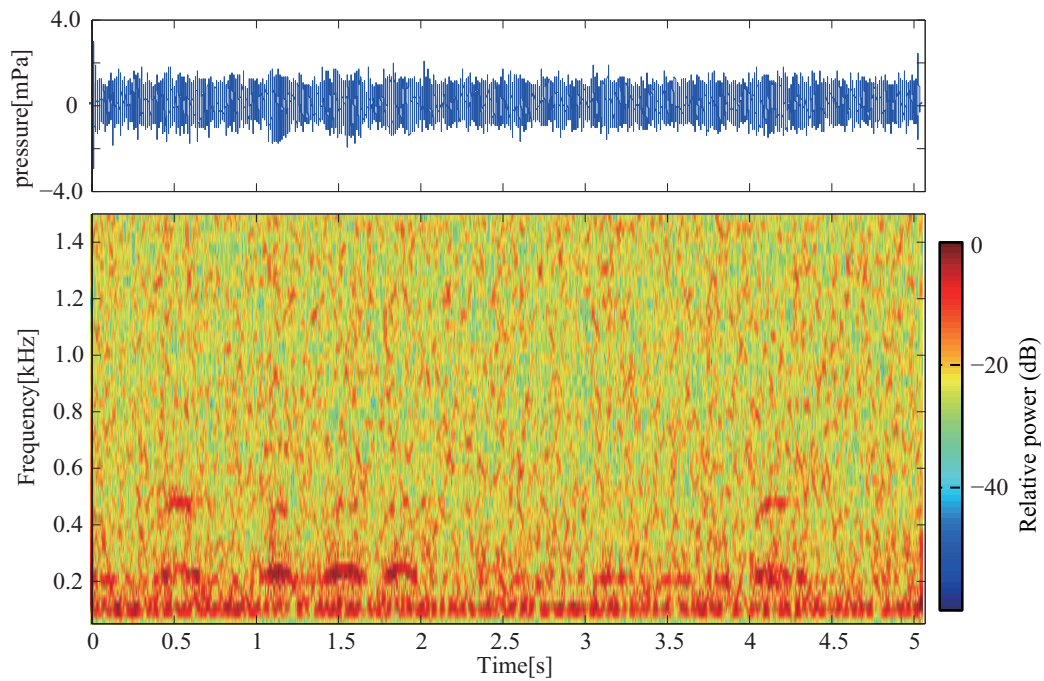


A:周波数変化のない音

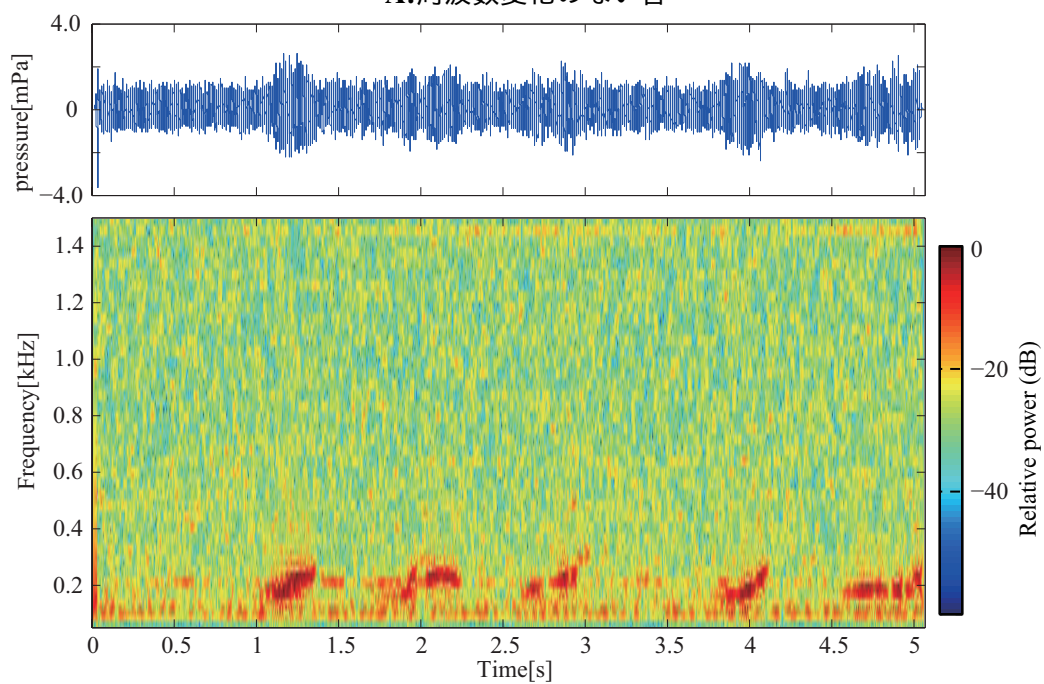


B:周波数上がる音

Fig. 3.7: バイオタイプQ1の発生音



A:周波数変化のない音



B:周波数上がる音

Fig. 3.8: バイオタイプ Q2 の発生音

ずれの種・バイオタイプも基本周波数は 100-500 (Hz) に収まり，ピーク周波数はオンシツコナジラミは 220, 450 (Hz), タバココナジラミ・バイオタイプ B は 200, 300 (Hz), バイオタイプ Q1 は 200, 400 (Hz), バイオタイプ Q2 は 250 Hz 付近に存在することがわかる．以上から，コナジラミ類の種・バイオタイプの音は周波数領域にそれぞれ固有の特徴が存在することがわかる．

3.5 まとめ

本章では，オンシツコナジラミおよびタバココナジラミバイオタイプ B, Q1, Q2 の発生音を長時間録音し，コナジラミ類の音響的生態に関して詳細に述べた．結果として，各種・各バイオタイプの周波数領域には固有の特徴があり，その特徴を利用することで，種・バイオタイプの識別の可能性があると示唆された．

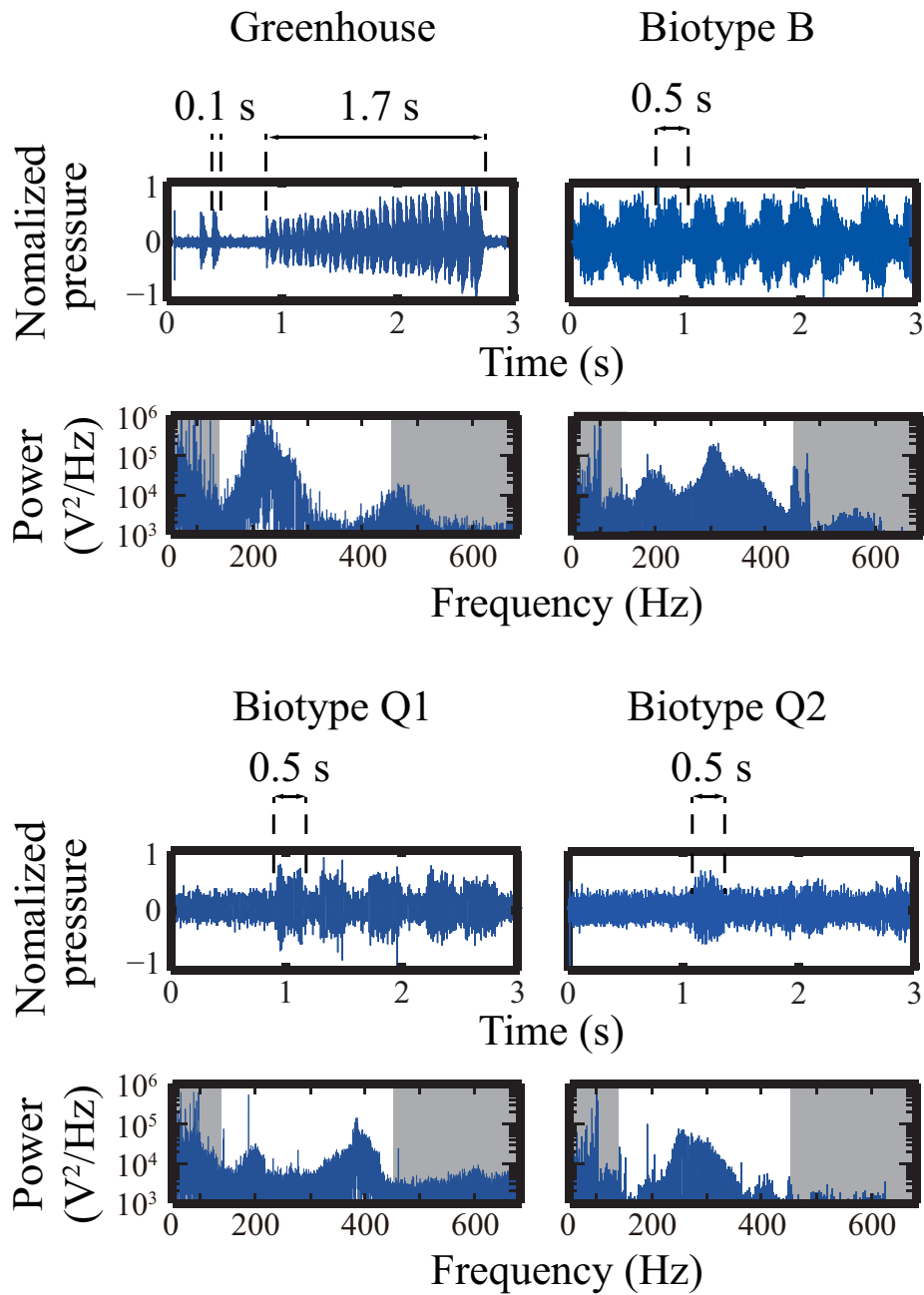


Fig. 3.9: 発生音の例: (a) 時間音圧波形; (b) 振幅スペクトル

第4章 音響的手法によるコナジラミ類の種・バイオタイプ識別システムの構築

4.1 はじめに

本章では、3章にて述べたコナジラミ類の音響的生態を基に、コナジラミ類の種・バイオタイプ識別をするための音響信号の処理手法に関して述べる。

コナジラミ類は種およびバイオタイプによって発生音が異なり、特に周波数領域に固有の特徴があることが前章から明らかになった。この周波数領域の特徴を利用し、自動的に種およびバイオタイプの識別が可能なシステムを作成する。本章で作成するシステムの概要を **Fig. 4.1** に示す。

コナジラミ類の発生音の録音は、2.3節のものを用いる。録音されたデータから発生音を検出するシステムを4.2節に示す。次に、検出された音を基に種・バイオタイプを識別する識別器の構築方法について4.3節にて述べる。そして、4.4節にてこれらの識別器の性能を実験的に評価する。最後に4.5節でまとめる。

4.2 コナジラミ類の発生音検出器の構築

本節では、コナジラミ類の発生音を自動検出する方法に関して述べる [35, 36]。

コナジラミ類の発生音の中心周波数は100 - 500 (Hz) の範囲に納まっており、この周波数帯の音圧が、ある閾値を超えたときに録音データを切り出すことで、発生音が含まれる音を抽出できると考えられる。**Fig. 4.2** に発生音の自動検出システムの信号処理手順を示す。また、**Fig. 4.3** に信号処理の例を示す。

まず、録音されたタバココナジラミの発生音に対し、100-500 (Hz) のバンドパスフィルタを適用する (4.3-(a))。次に、このフィルタリングされた信号のパワーに関して、ある閾値を超え

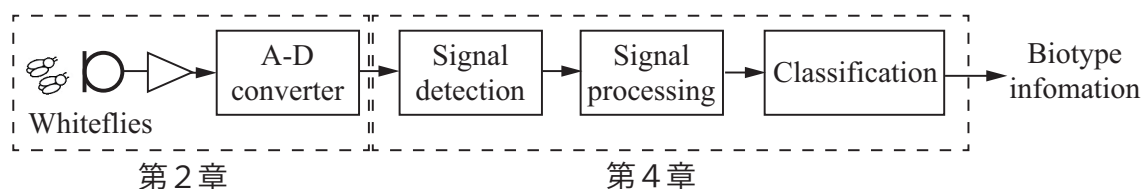


Fig. 4.1: 4章において作成するシステムの概要

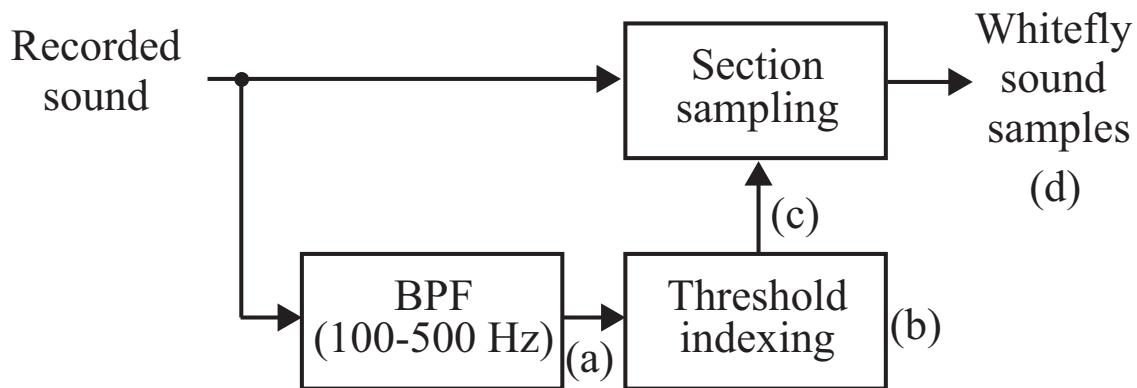


Fig. 4.2: 発生音の自動検出の概念図

た位置にインデックスを作成する (4.3-(b)). このとき, 1つの発生音に対して多数のインデックスが作成されている状態であるため, インデックスと発生音を1対1対応させるために, 時間的に近いインデックスを重複したインデックスとして削除する (4.3-(c)). 残ったインデックスを基に, フィルタリング前の発生音に対応する0.5 sをサンプリングし, コナジラミの発生音として出力する (4.3-(d)). 本稿では, インデックス間が0.5 s未満のものを重複インデックスとして削除した. また, 残ったインデックスから, 音の立ち上がりを考慮して前0.1 s, 後0.4 sの計0.5 sを発生音として切り出した.

ここで, 本システムは音圧のみを基準に切り出しを行っているため, 切り出された音は目的の発生音のほかにノイズも含まれる. さらに, 閾値によって切り出される発生音・ノイズの数が変わるため, 発生音が多くノイズが少ない閾値を設定する必要がある. 適切な閾値を検討するため, タバココナジラミ・バイオタイプBおよびQ2の5分間の発生音に対し, 本システムを適用したときの閾値と切り出された発生音・ノイズ数の関係を **Fig. 4.4** に示す.

このデータでは, +20 dBのときに最も発生音とノイズの数の比率が良くなっている. 閾値を下げたときに切り出される発生音の数が減少するが, これは重複インデックスを削除する必要がある関係上, インデックスが密になりすぎると削除されてしまうためだと考えられる. 以上から本稿では, 閾値を暗騒音に対して+20 dBと設定し, この自動検出システムを録音された音に適用した. また, この自動検出器は5分間の音声データを10秒程度で処理が可能である.

4.3 発生音を用いたコナジラミ類の種・バイオタイプ識別器の作成

本節では, 4.2節で述べた自動検出器により抽出された音を用い, コナジラミ類の種・バイオタイプ識別をするための音響信号の処理手法に関して述べる. 4.3.1節では周波数領域の特徴を利用し, 相互相関法による類似度を基準とした識別法を説明し [35, 36], 4.3.2節では線形予測分析 (LPC; Linear Prediction Coding) に基づく線形予測係数, メルスケールログスペクトラム (MSLS; Mel-Scale Log Spectrum) の係数, メル周波数ケプストラム係数 (MFCC; Mel

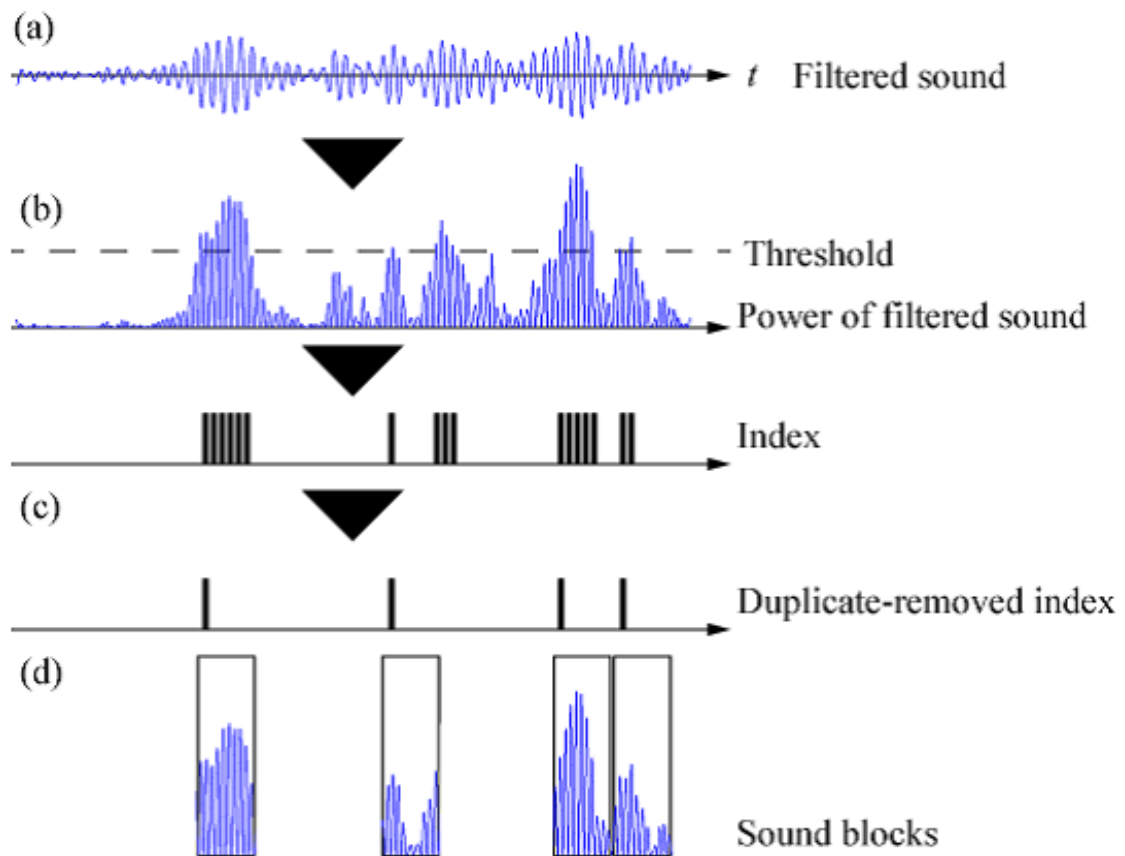


Fig. 4.3: 発生音の自動検出の例: (a) バンドパスフィルタを通した音; (b) しきい値処理とインデックス作成; (c) 重複インデックスを削除; (d) サンプルング

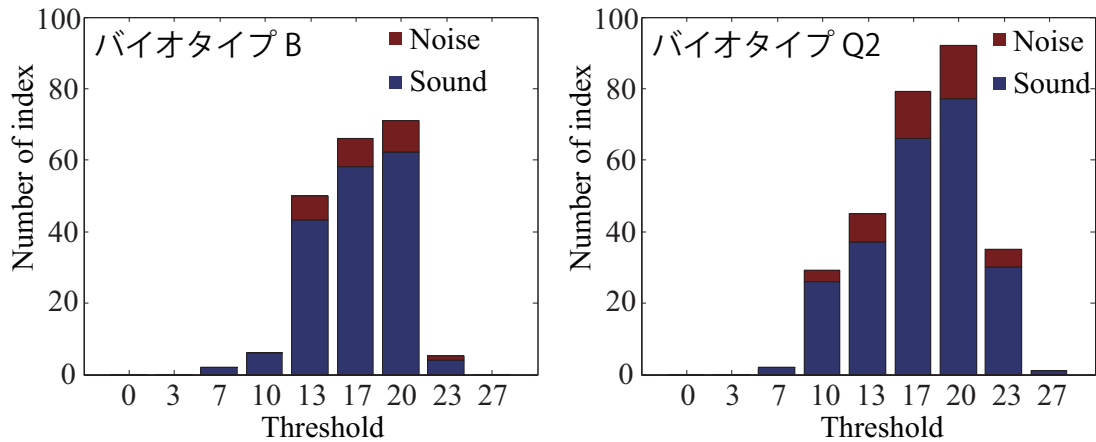


Fig. 4.4: タバココナジラミ・バイオタイプ B および Q2 の 5 分間の録音データに対しての、閾値と発生音・ノイズ抽出数の関係

Frequency Cepstrum Coefficient) の 3 種類の係数を音声特徴量として用いた識別法に関して説明する。4.3.3 節では、類似度を特徴量として用い、各音声特徴量と組み合わせた識別法を提案し、説明する。

4.3.1 周波数領域の類似度を利用した識別

本節では周波数領域の特徴を利用し、相互相関法によって種・バイオタイプが既知の発生音との類似度を計算し、その類似度を基準とした種・バイオタイプ識別手法について述べる。Fig. 4.5 に信号処理の詳細のブロック図を示す。

相互相関法を用いることで、2つの信号の類似度を測ることができる。相互相関関数 $R(\tau)$ を式 4.1 に表す。

$$R(\tau) = \int_{-\infty}^{\infty} h(t)x(t+\tau)dt \quad (4.1)$$

ここで、 $h(t)$ は特定のコナジラミ類の発生音、 $x(t)$ を録音された音とすると、双方の類似度が大きくなるにつれて $R(\tau)$ が大きくなる。よって、同じ種、バイオタイプの発生音が含まれるとより大きい $R(\tau)$ が検出できると考えられる。本節では、パワースペクトルの相関値を類似度として用い、種およびバイオタイプの識別を試みる。

まず、入力されたコナジラミ発生音を高速フーリエ変換し、周波数領域に変換する (Fig. 4.5-(a))。次に、種・バイオタイプが既知の発生音のパワースペクトル (テンプレート) との相互相関を計算することで、相関値を得る (Fig. 4.5-(b))。これをすべての検出されたコナジラミ発生音に対して実行し、相関値群を得る (Fig. 4.5-(c))。最後に、相関値群から種・バイオタイプの識別処理を行う (Fig. 4.5-(d))。

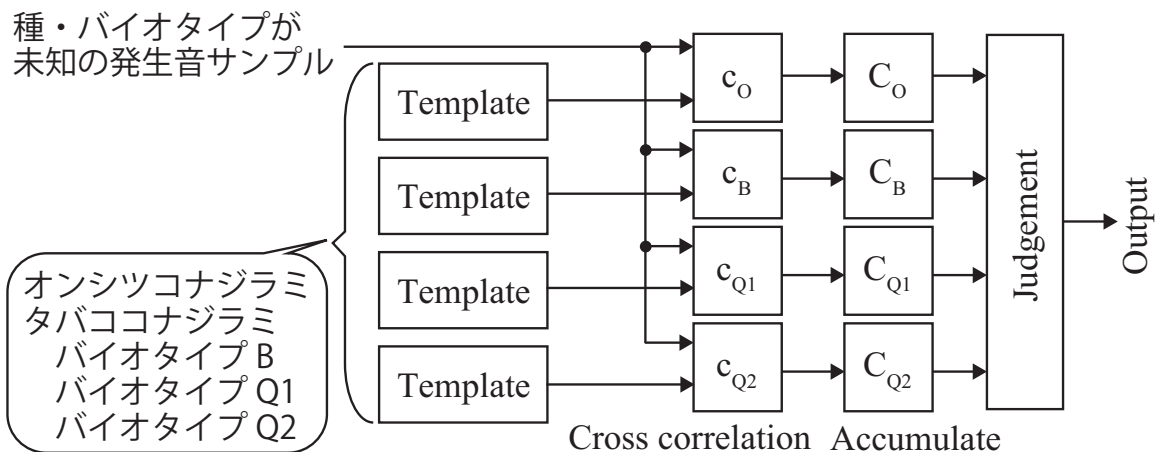


Fig. 4.5: 周波数領域における類似度計算と、類似度を基にした識別の概要

識別に用いるテンプレートは、既知の発生音の複数個を周波数領域に変換し、平均をとって作成する。このうち、コナジラミの発生音で特徴的な 100-500 (Hz) の領域において、検出された発生音との相互相関を計算する。したがって、このシステムは 1 つの検出音に対して、各種・バイオタイプのテンプレートとの 4 つの相関値 c_O , c_B , c_{Q1} , c_{Q2} をそれぞれ出力する。これを集めたものがそれぞれ C_O , C_B , C_{Q1} , C_{Q2} である。最後に C_O , C_B , C_{Q1} , C_{Q2} の平均値を比較し、平均値が最大値をとったテンプレートを、録音したコナジラミの種・バイオタイプと判定する。

本稿では、この提案手法と c_O , c_B , c_{Q1} , c_{Q2} の最大値をそのままコナジラミの種・バイオタイプと判定する 2 つの方法を比較し、提案手法の有効性を確かめる。

4.3.2 音声特徴量を用いた判別器による識別

本節では音声認識などで用いられる音声特徴量を基準とした種・バイオタイプ識別手法について述べる。Fig. 4.6 に信号処理の詳細のブロック図を示す。

本稿では、周波数領域の特徴が利用しやすく、音声認識分野で一般的に用いられる LPC, MSLS, MFCC の 3 種類の特徴量に関して検討する。

LPC

LPC(線形予測分析)は、過去のサンプルの線形結合によって現在のサンプルを予測する手法である。本手法を用いた場合、音声のスペクトルの概形を少ない係数で表すことが可能である。また、一般に後述の MFCC と似ているが、よりスペクトルのピークを重視した解析方法であることが知られている [37, 38]。これまでは、音楽から歌手の推定をする時などに用いられてきた [39]。

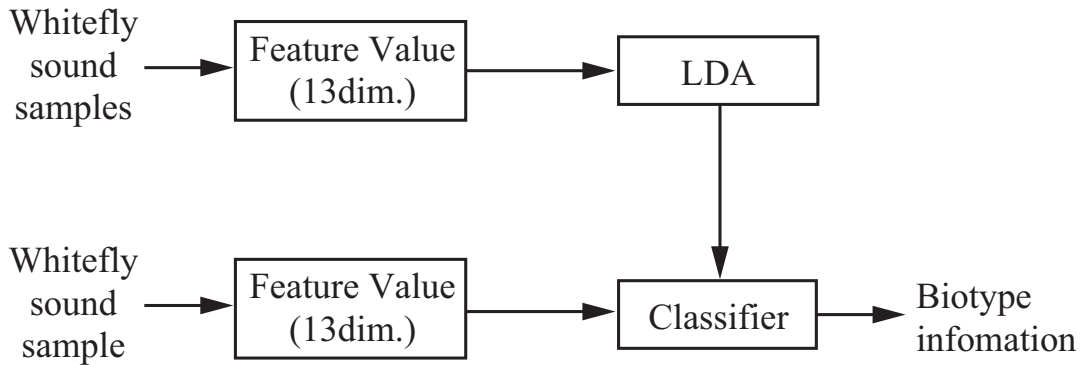


Fig. 4.6: 音声特徴量 (13次元) を用いた判別器による種・バイオタイプ識別手法の概要

以下に, LPC の概要を述べる. 定常信号の現在の標本値 x_t と, これに隣接する過去 p 個の標本値の間に, 線形一次結合である式 4.2 が成り立つと仮定する.

$$\begin{aligned}
 x_t &= -a_1x_{t-1} - a_2x_{t-2} \cdots - a_px_{t-p} \\
 &= -\sum_{i=1}^p a_ix_{t-i}
 \end{aligned} \tag{4.2}$$

式 4.2 より, 予測値 \hat{x}_t は

$$\hat{x}_t = -\sum_{i=1}^p a_ix_{t-i} \tag{4.3}$$

と表される. 式 4.3 を, a_i を線形予測係数とする線形予測モデルと呼ぶ. また, 標本値 x_t と予測値 \hat{x}_t の差分を線形予測誤差といい, 式 4.4 で与えられる.

$$x_t - \hat{x}_t = \epsilon_t \tag{4.4}$$

この線形予測誤差 ϵ_t が最小になるように線形予測係数 a_i を調整し, 音声波に線形予測モデルを適用することを, 線形予測分析と呼ぶ [38]. 本稿では, 13次元の線形予測係数, すなわち $a_1 - a_{13}$ を特徴量とし, これを基準にした識別器を作成する.

MSLS

MSLS(メルスケールログスペクトラム)は, 信号のスペクトラムをメル尺度に基づいて作成したメルフィルタバンクでフィルタリングしたときのログスペクトラムである.

メル尺度とは, 対数に近い非線形の特性であり, 人間の聴覚特性に近似した尺度である. これは低い周波数は細かく, 高周波では荒い周波数分解能を持つ [38]. メル尺度 m は以下の式 4.5, 4.6 により周波数から変換される. このとき, 式 4.6 の f_0 は自由パラメータである.

$$m = m_0 \ln \left(\frac{f}{f_0} + 1 \right) \quad (4.5)$$

$$m_0 = \frac{1000}{\ln \left(\frac{1000}{f_0} + 1 \right)} \quad (4.6)$$

メルフィルタバンクはバンドパスフィルタ群であり，その中心周波数がメル尺度上で等間隔に並ぶように配置されたフィルタ群である．音声のスペクトルにこのメルフィルタバンクをかけ，その出力の対数をとったものがMSLSである．本稿では，40次元のメルフィルタバンクを用い，その低次から13次元分を特徴量として扱う．

MFCC

MFCC(メル周波数ケプストラム係数)は，上記のMSLSを離散コサイン変換(DFT)し，ケプストラム領域に変換した際の低次の係数のことである．本稿では，低次から13次元分を特徴量として扱う．本手法は幼児の泣き声の分類や，鳥類の泣き声の分類などに用いられてきた[40, 41]．MSLSおよびMFCCの導出手順の概要をFig. 4.7に示す．

これらの音声特徴量を用い，MATLAB 2018a Statistics and Machine Learning Toolboxの分類学習器アプリケーションを使用し，判別器を作成する．判別器作成のアルゴリズムには線形判別分析(Linear Discriminant Analysis, LDA)を用いる．本稿では，13次元の各手法を特徴量として用い，学習を行って判別器を作成し，その有効性を検討する．

4.3.3 音声特徴量と周波数領域の類似度を併用した判別器による識別

本節では，4.3.1節の類似度と4.3.2節の特徴量を用いた識別を組み合わせた識別器について説明する．4.3.1節の手法は，100-500(Hz)の類似度のみを使用したコナジラミの発生音に特化したものであるが，他の範囲の特徴を考慮に入れていない．4.3.2節の手法は発生音の特徴を効率よく低次元に圧縮しているが，コナジラミの発生音に特化したものではない．そこで，4.3.2節の13次元の特徴量に周波数テンプレートとの類似度 c_0 ， c_B ， c_{Q1} ， c_{Q2} の4次元を特徴量として加え，計17次元の特徴量を基準とした識別を行う．

判別機は4.3.2節と同様LDAを用いて作成し，有効性を検討する．Fig. 4.8に信号処理の詳細のブロック図を示す．本稿では，13次元の各音声特徴量に，各類似度を4次元の特徴量を付加し，合計17次元の特徴量として用いる．この17次元の特徴量を用いて学習を行い，判別器を作成し，その有効性を評価する．また，比較用として4次元の類似度のみを特徴量として用いて判別器を作成する．

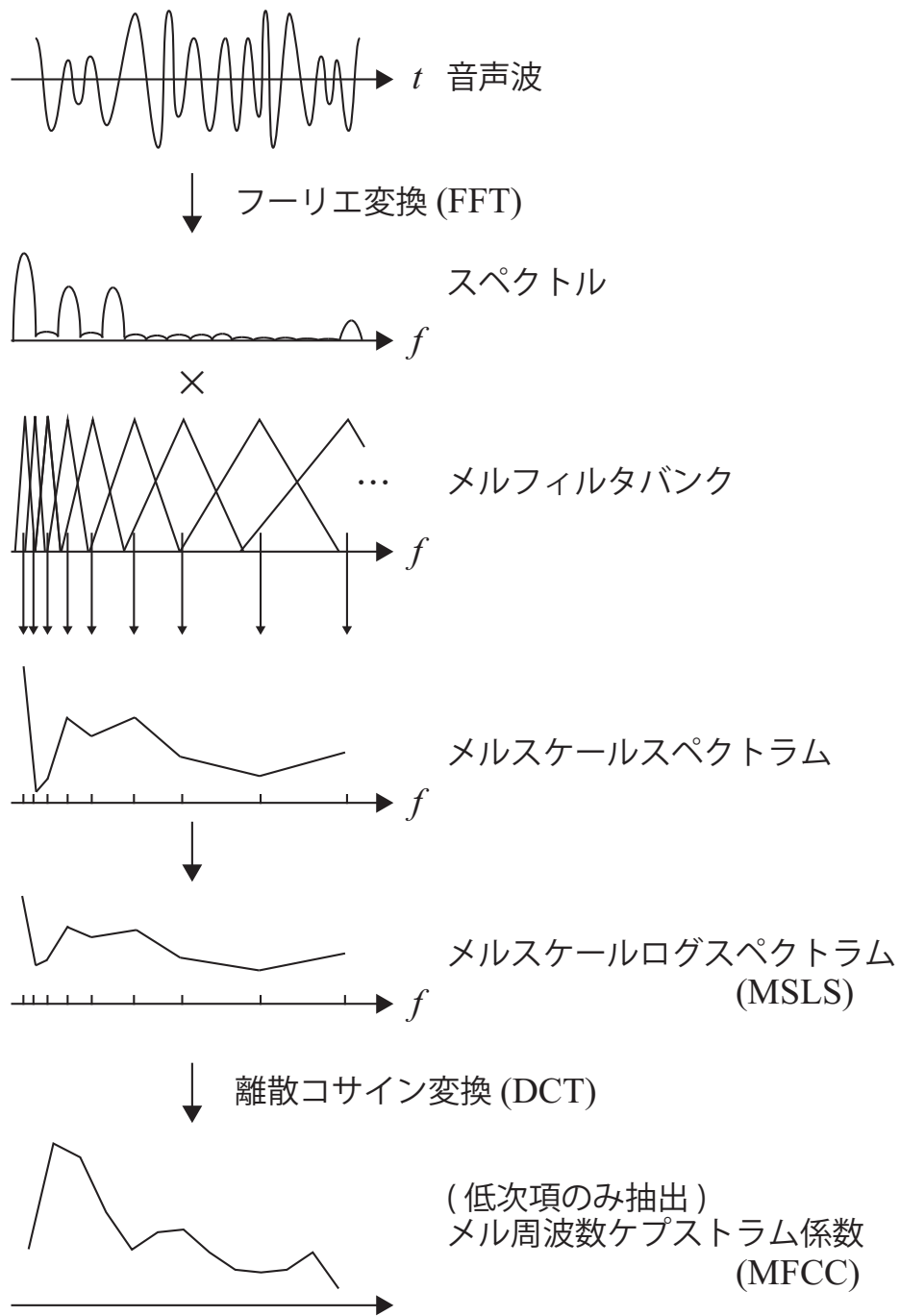


Fig. 4.7: MSLS および MFCC の導出手順の概要

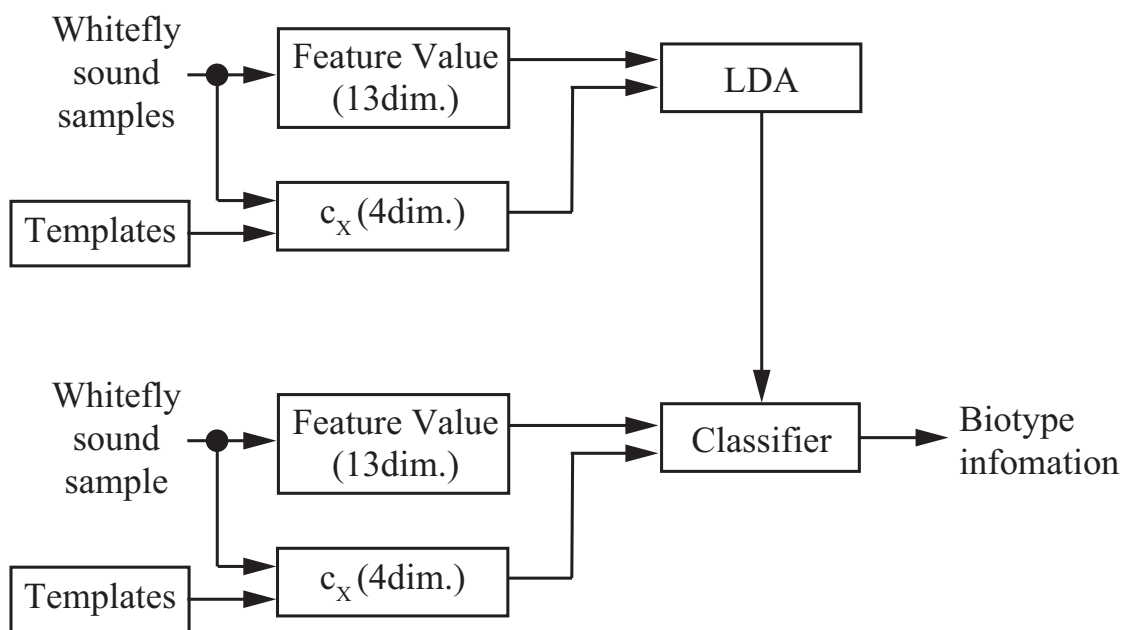


Fig. 4.8: 音声特徴量と類似度を用いた判別器による種・バイオタイプ識別手法の概要

4.4 実験と結果

4.4.1 実験環境

オンシツコナジラミは260分，タバココナジラミ・バイオタイプB，Q2は280分，バイオタイプQ1は470分の録音データを用いた．4節の手法にて音声の切り出しをした結果，オンシツコナジラミは1677個，タバココナジラミ・バイオタイプBは4458個，同Q1は9045個，同Q2は5659個のサンプルが抽出された．

識別器の評価は全体正解率，各種・バイオタイプにおける適合率，再現率，F値とマクロ平均，計算時間で行う．全体正解率は入力した全サンプル数に対する正答の率，適合率はある種と判定されたサンプルのうち実際にある種であった率，再現率は入力した種に対し正しくその種であると判別された割合，F値は適合率と再現率の調和平均，マクロ平均は全種・バイオタイプの適合率，再現率，F値の平均を表す．

4.4.2 周波数領域の類似度を利用した識別

Fig. 4.9に各種・バイオタイプの発生音テンプレートを示す．このテンプレートは各種・バイオタイプの発生音の，それぞれ50個の平均振幅スペクトルである．

計算時間は5分のデータにつき10秒程度であった．類似度 c_O ， c_B ， c_{Q1} ， c_{Q2} の最大値を基準とした識別手法に関して，**Fig. 4.10**に混同行列を，**Table 4.1**に各評価値を示す．全体正解率は68.8%となった．

本手法では，オンシツコナジラミの識別が困難という結果となっている．オンシツコナジラミの適合率が特に低いため，オンシツコナジラミのテンプレートは他のバイオタイプの発生音でも強い相関を出している可能性が考えられる．

次に，5分間の録音データから得られた類似度の平均値を基準とした判別に関して述べる．5分間の録音データから得られた発生音を基準としているため，その5分間で発生音を検出できなかった場合，判定値をNanとして扱った．**Fig. 4.11**に混同行列を，**Table 4.2**に各評価値を示す．

全体正解率は83.2%となった．単純に最大値を基準にした場合よりも大幅な改善がなされていることがわかる．こちらもオンシツコナジラミの適合率はやや低く，テンプレートに問

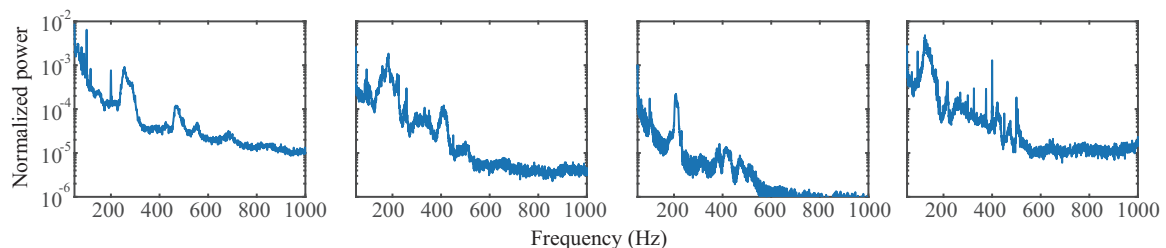


Fig. 4.9: 作成したテンプレート

Confusion Matrix

Actual category	Greenhouse	566	10	418	683
	biotype B	1282	1679	926	571
	biotype Q1	1185	342	7381	137
	biotype Q2	618	44	268	4729
		Greenhouse	biotype B	biotype Q1	biotype Q2
		Predict category			

Fig. 4.10: 類似度の最大値を基準とした識別の混同行列

Table 4.1: 類似度の最大値による識別の評価値

種・バイオタイプ	適合率	再現率	F 値
オンシツコナジラミ	15.50	33.75	21.25
バイオタイプ B	80.92	37.66	51.40
バイオタイプ Q1	82.07	81.60	81.84
バイオタイプ Q2	77.27	83.57	80.30
マクロ平均	63.94	59.15	58.70

Confusion Matrix

Actual category	Greenhouse	52	0	0	0	0
	biotype B	14	28	10	1	3
	biotype Q1	0	0	56	0	0
	biotype Q2	3	0	0	47	6
		Greenhouse	biotype B	biotype Q1	biotype Q2	Nan
		Predict category				

Fig. 4.11: 5 分間の録音データから得られた類似度の平均値を基準とした識別の混同行列

Table 4.2: 5 分間の録音データから得られた類似度の平均値を基準とした識別の評価値

種・バイオタイプ	適合率	再現率	F 値
オンシツコナジラミ	75.36	100	85.95
バイオタイプ B	100	50.00	66.67
バイオタイプ Q1	84.85	100	91.80
バイオタイプ Q2	97.92	83.93	90.38
マクロ平均	89.53	83.48	83.70

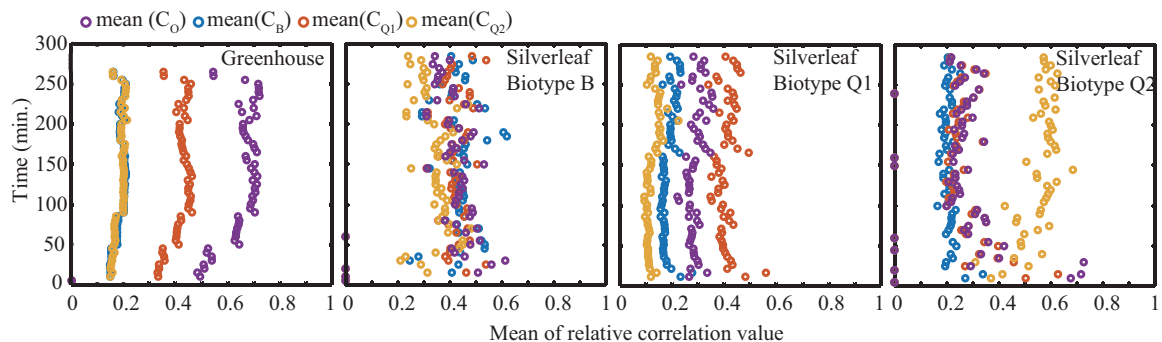


Fig. 4.12: 実験を通して得られた正規化平均相関値の分布

題がある可能性が考えられる。また、タバココナジラミ・バイオタイプ B の再現率が 50% と低く、適合率は 100% と高い。

以上のことを考察するため、Fig. 4.12 に 5 分毎に出力された正規化平均相関値の分布を示す。軸は正規化された相関値 (相関値を C_O , C_B , C_{Q1} , C_{Q2} の最大値で割った値) の平均値であり、縦軸は録音開始からの時間である。この図から、オンシツコナジラミのテンプレートは全ての発生音に対しやや強く相関値が出ていることがわかる。バイオタイプ B の発生音は全テンプレートとの相関値が高いため、録音データが全てのテンプレートと似てしまっている、あるいは雑音とテンプレートとの相関が強くなってしまっている可能性がある。他の発生音とバイオタイプ B のテンプレートとの相関値は全て低いため、テンプレートに問題はないと考えられる。

4.4.3 音声特徴量を用いた判別器による識別

本節では音声特徴量を用いて判別器を作成し、その判別器の性能を評価する。本稿では、切り出された発生音を 10 分割し、そのうちの 9 割で学習を行い、残りの 1 割で判別機の性能を検証する 10 分割交差検証という手法を用いる。各音声特徴量の計算時間は、どれも判別器を作成するためには 1 分程度必要だったが、一度判別機を作成した後は、5 分間の未知の発生音データに対し 5 秒以内に識別が可能であった。LPC, MSLS, MFCC を用いた場合の混同行列をそれぞれ Fig. 4.13, 4.14, 4.15, 各評価値をそれぞれ Table 4.3, 4.4, 4.5 に示す。全体正解率はそれぞれ, 93.4, 90.0, 93.4 (%) となった。各混同行列から, LPC は Q1 と B, MFCC, MSLS はバイオタイプ B とバイオタイプ Q1, Q2 の識別がそれぞれ比較的不得意であることがわかる。バイオタイプ Q1 と Q2 は周波数領域の類似度による手法の得意とするところであり、特に LPC は前節で弱点だった B の再現率が強いので、組み合わせに期待ができる。

Confusion Matrix

Actual category	Greenhouse	1656	17	1	3
	biotype B	5	4452	1	0
	biotype Q1	31	240	8481	293
	biotype Q2	0	83	710	4866
		Greenhouse	biotype B	biotype Q1	biotype Q2
		Predict category			

Fig. 4.13: LPC を特徴量として用いた判別機の混同行列

Table 4.3: LPC による判別器の評価値

種・バイオタイプ	適合率	再現率	F 値
オンシツコナジラミ	97.87	98.75	98.31
バイオタイプ B	92.90	99.87	96.26
バイオタイプ Q1	92.25	93.76	93.00
バイオタイプ Q2	94.27	85.99	89.94
マクロ平均	94.32	94.59	94.38

Confusion Matrix

Actual category	Greenhouse	1670	1	5	1
	biotype B	0	3687	293	487
	biotype Q1	0	53	8661	331
	biotype Q2	0	356	601	4702
		Greenhouse	biotype B	biotype Q1	biotype Q2
		Predict category			

Fig. 4.14: MSLS を特徴量として用いた判別機の混同行列

Table 4.4: MSLS による判別機の評価値

種・バイオタイプ	適合率	再現率	F 値
オンシツコナジラミ	100	99.58	99.79
バイオタイプ B	89.97	82.50	86.08
バイオタイプ Q1	90.60	95.75	93.10
バイオタイプ Q2	85.17	83.09	84.11
マクロ平均	91.43	90.23	90.77

Confusion Matrix

Actual category	Greenhouse	1671	1	5	0
	biotype B	0	3713	250	495
	biotype Q1	0	41	8769	235
	biotype Q2	0	319	256	5084
		Greenhouse	biotype B	biotype Q1	biotype Q2
		Predict category			

Fig. 4.15: MFCC を特徴量として用いた判別機の混同行列

Table 4.5: MFCC による判別機の評価値

種・バイオタイプ	適合率	再現率	F 値
オンシツコナジラミ	100	99.64	99.82
バイオタイプ B	91.14	83.29	87.04
バイオタイプ Q1	94.49	96.95	95.71
バイオタイプ Q2	87.44	89.84	88.63
マクロ平均	93.27	92.43	92.80

4.4.4 音声特徴量と周波数領域の類似度を併用した判別器による識別

本節では、13次元の音声特徴量と、4次元の周波数領域の類似度を用いて判別器を作成し、その判別器の性能を実験的に評価する。

本節においても10分割交差検証を用い、性能を評価した。本手法による計算時間は学習に1分程度であり、学習済みの識別器があれば、5分の未知の発生音データに対し15秒程度で計算が可能である。

まず、類似度のみで作成した判別器の混同行列と各評価値をそれぞれ **Fig. 4.16**, **Table 4.6** に示す。全体正解率は79.7%となった。Fig. 4.13と比較して、バイオタイプQ1とQ2を間違えることが少ないため、組み合わせたときの改善が期待できる。また、Fig. 4.14, 4.15と比較して、真値がバイオタイプBまたはQ1のときにバイオタイプQ2と間違えることが少ないため、組み合わせたときに改善が期待できる。

類似度に加え、LPC, MSLS, MFCCを用いた場合の混同行列をそれぞれ **Fig. 4.17**, **4.18**, **4.19**, 各評価値をそれぞれ **Table 4.7**, **4.8**, **4.9** に示す。全体正解率はそれぞれ、96.8, 95.2, 95.2(%)となった。周波数領域の類似度を付加しない場合と比較して、全体的に3%程度の精度の向上が見られた。また、期待した通りの組み合わせによる改善が発生した。全ての手法で全体正解率が95%を超え、全て優秀な判別器と言える。MSLSとMFCCに関して、共にメル周波数を基にしている特徴量であるためか、混同行列が非常に似通っている。LPCが最も優秀な結果となり、全種・バイオタイプのF値96%を超えた。

最後に、各手法の適合率、再現率、F値のマクロ平均を **Table 4.10** に示す。この表から、各音声特徴量に類似度を付加することで、およそ3%程度の識別率改善効果があることがわかる。また、最も性能が良いLPCと類似度の組み合わせは、全評価値のマクロ平均がおよそ97%となり、迅速なバイオタイプ識別手法として、LAMP法に匹敵する強力な識別が可能となったといえる。

Confusion Matrix

Actual category	Greenhouse	536	106	235	800
	biotype B	60	3630	578	190
	biotype Q1	86	978	7827	154
	biotype Q2	364	498	185	4612
		Greenhouse	biotype B	biotype Q1	biotype Q2
		Predict category			

Fig. 4.16: 4次元の類似度を特徴量として用いた判別器の混同行列

Table 4.6: 類似度による判別器の評価値

種・バイオタイプ	適合率	再現率	F 値
オンシツコナジラミ	51.24	31.96	39.37
バイオタイプ B	69.65	81.43	75.08
バイオタイプ Q1	88.69	86.53	87.60
バイオタイプ Q2	80.13	81.50	80.81
マクロ平均	72.43	70.36	70.71

Confusion Matrix

Actual category	Greenhouse	1657	16	1	3
	biotype B	3	4454	1	0
	biotype Q1	29	202	8673	141
	biotype Q2	0	47	228	5384
		Greenhouse	biotype B	biotype Q1	biotype Q2
		Predict category			

Fig. 4.17: LPC と 4 次元の類似度を特徴量として用いた判別器の混同行列

Table 4.7: LPC と類似度による判別器の評価値

種・バイオタイプ	適合率	再現率	F 値
オンシツコナジラミ	98.11	98.81	98.46
バイオタイプ B	94.38	99.91	97.07
バイオタイプ Q1	97.42	95.89	96.65
バイオタイプ Q2	97.40	95.14	96.25
マクロ平均	96.83	97.44	97.11

Confusion Matrix

Actual category	Greenhouse	1673	1	3	0
	biotype B	0	4192	204	62
	biotype Q1	0	52	8833	160
	biotype Q2	0	271	249	5139
		Greenhouse	biotype B	biotype Q1	biotype Q2
		Predict category			

Fig. 4.18: MSLS と 4 次元の類似度を特徴量として用いた判別機の混同行列

Table 4.8: MSLS と類似度による判別器の評価値

種・バイオタイプ	適合率	再現率	F 値
オンシツコナジラミ	100	99.76	99.88
バイオタイプ B	92.83	94.03	93.43
バイオタイプ Q1	95.09	97.66	96.36
バイオタイプ Q2	95.86	90.81	93.27
マクロ平均	95.94	95.57	95.73

Confusion Matrix

Actual category	Greenhouse	1673	1	3	0
	biotype B	0	4192	205	61
	biotype Q1	0	53	8833	159
	biotype Q2	0	273	243	5143
		Greenhouse	biotype B	biotype Q1	biotype Q2
		Predict category			

Fig. 4.19: MFCC と 4 次元の類似度を特徴量として用いた判別機の混同行列

Table 4.9: MFCC と類似度による判別器の評価値

種・バイオタイプ	適合率	再現率	F 値
オンシツコナジラミ	100	99.76	99.88
バイオタイプ B	92.76	94.03	93.39
バイオタイプ Q1	95.14	97.66	96.38
バイオタイプ Q2	95.90	90.88	93.32
マクロ平均	95.95	95.58	95.75

Table 4.10: 各種法の評価値のマクロ平均
各手法とマクロ平均

各手法とマクロ平均	適合率	再現率	F 値
類似度の最大値	63.94	59.15	58.70
5 分間の類似度の平均値	89.53	83.48	83.70
類似度を特徴量とした LDA (4dim.)	72.43	70.36	70.71
LPC (13dim.)	94.32	94.59	94.38
MSLS (13dim.)	91.43	90.23	90.77
MFCC (13dim.)	93.27	92.43	92.80
LPC+類似度 (17dim.)	96.83	97.44	97.11
MSLS+類似度 (17dim.)	95.94	95.57	95.73
MFCC+類似度 (17dim.)	95.95	95.58	95.75

4.5 まとめ

本章では，コナジラミ類の音響的生態と発生音の特徴を基に，コナジラミ類の種・バイオタイプ識別をするための音響信号の処理手法に関して述べた．まず，録音データから発生音を抽出するシステムを構築した．抽出された音を基に，類似度による識別手法，音声特徴量を用いた識別手法，類似度と音声特徴量を組み合わせた識別手法を提案した．そして，実際にそれらの識別器を作成し，実験的に識別器の性能を評価した．結果として，最も性能の良いもので全評価値のマクロ平均がおよそ 97% となり，LAMP 法と比較して，同等の性能を持った識別手法と言える．また識別時間も 5 分の録音データにつき 15 秒程度となったため，迅速であると言える．

第5章 結論

本論文では、迅速かつ信頼性が高いコナジラミ類の種およびバイオタイプを識別するシステムの作成を目的とし、コナジラミ類の発生音を用いた音響的手法による識別手法を提案した。

第2章では、コナジラミ類の発生音を長時間モニタリング可能なシステムを作成するために、コナジラミ類の微小音を録音し、コナジラミ類の発生音の特徴を確かめた。この特徴を基に、長時間モニタリングに必要な条件を整理し、条件を満たすモニタリングシステムを構築した。本システムは、コナジラミ類の群生時の発生音を自然環境に近い状態で長時間モニタリング可能なシステムであることを実験的に明らかにした。第3章では、第2章で作成したシステムを用い、オンシツコナジラミとタバココナジラミ・バイオタイプ B, Q1, Q2 の発生音をそれぞれ長時間録音し、音響的生態について調査した。結果として、コナジラミ類は種・バイオタイプによって周波数領域に固有の特徴があることが明らかになった。第4章では、第3章で明らかにした発生音の特徴を基に、コナジラミ類の種・バイオタイプ識別を行う手法について提案した。具体的には、録音データからコナジラミ類の発生音を自動的に検出するシステムを作成した。さらに、検出された発生音から周波数領域の特徴を利用した識別手法と、音声特徴量と線形判別分析を利用した識別手法、さらにその組み合わせの3種類の手法を提案し、実験的にその性能を評価した。

結果として、オンシツコナジラミとタバココナジラミバイオタイプ B, Q1, Q2 の識別に関して、周波数領域の特徴を利用したテンプレートとの類似度を用いる手法は、F 値がそれぞれ 86.0, 66.7, 91.8, 90.4 (%) となった。音声特徴量と線形判別分析を用いる手法は、LPC は 98.3, 96.3, 93.0, 89.9 (%), MSLS は 99.8, 86.1, 93.1, 84.1 (%), MFCC は 99.8, 87.1, 95.7, 88.6 (%) となった。音声特徴量に類似度を加えた識別手法では、LPC は 98.5, 97.1, 96.6, 96.3 (%), MSLS は 99.9, 93.4, 96.4, 93.3 (%), MFCC は 99.9, 93.4, 96.4, 93.3 (%) となった。以上から識別精度に関して、LAMP 法と同等の性能を持った識別手法と言える。また、どの手法も、録音時間を除くと処理時間は数十秒程度であるため、迅速性は十分であると考えられる。よってこれらの提案手法はどれも有効であり、種・バイオタイプ識別の新たな手法として提案できると考えられる。

謝辞

本論文は、筆者が筑波大学大学院 システム情報工学研究科 知能機能システム専攻 在学中に、音響システム研究室にて実施した研究成果をまとめたものです。

筑波大学大学院システム情報系知能機能工学域 水谷孝一教授には研究計画についてのコメントやアイデアなどを頂き、修士時代から5年に渡るご助言を賜りました。さらに共同研究先の幹旋などの自分一人では大変困難なことをしていただき、工学だけでなく農学や生物学などの知見を大きく広げることができました。工学的な視点から生物を対象に研究を行うという貴重な機会を頂き、多大な感謝をしております。

筑波大学大学院システム情報系知能機能工学域 若槻尚斗准教授には、計画書から発表資料などの原稿の添削や、管理の難しい音響装置の取り扱い方など、あらゆる点で研究の手助けを頂きました。また、先生との議論により、自らの研究を見つめなおす機会を多々頂きました。ここに深く感謝致します。

筑波大学大学院システム情報系知能機能工学域 海老原格准教授には、実際の実験をするにあたってのアイデアや、研究としてまとめる方向性などにおいて多大なるご助言を頂き、問題に対する取り組み方を深く学びました。ご多忙の中本当に感謝しております。

筑波大学大学院システム情報系知能機能工学域 善甫啓一助教には、原稿の添削から研究指導など、大変参考になりました。研究室での生活においても多くのことをご助力頂きました。ここに深く感謝致します。

筑波大学大学院システム情報系知能機能工学域 前田祐佳助教には、原稿作成時に専門的な見地から大変参考になるご指導を賜りました。ここに深く感謝致します。

埼玉県農林技術研究センター 宇賀博之様には、種・バイオタイプの確定したコナジラミの提供や、コナジラミの安定飼育を可能にする飼育ケースなど、大変貴重な研究資料を頂きました。これらが無ければここまでのデータを取ることは到底不可能でした。心より深く感謝申し上げます。

農研機構中央農業総合研究センター 久保田健嗣様には、コナジラミの生態やその餌となる植物の生態まで、大変有効な知識を頂きました。また、九州の植物工場および生物音響ラボ見学の出張への同行を快諾していただき、知見を大きく広げることができました。心より深く感謝申し上げます。

本研究の一部は戦略的イノベーション創造プログラム（SIP）の助成を受けて行われました。ありがとうございました。

音響システム研究室、通信システム研究室、生体計測システム研究室、知覚拡張システム研究室の皆様には、研究室の生活の様々な場面で大変お世話になりました。本研究室の卒業

生である川岸卓司博士，青柳将史博士，千葉裕介博士を始めとする皆様方，ならびに博士後期課程在学中の安立隆陽氏，小林彰人氏，宮本隆典氏，小木曾里樹氏，糸井川椋氏，佐野祐士氏，味藤未冴来氏，博士前期課程在学中の西島也寸彦氏，遠藤渉太氏，於保拓高氏，学類生の佐藤広隆氏には，研究に関する相談だけでなく，日頃より食事やイベント等で楽しい時間を過ごさせて頂きました．他の音響システム研究室グループの皆様も，大いに精神的な支えとなりました．皆様のおかげで，私は挫折しても立ちなおし，本博士論文を執筆完了まで持ち込めたと感じております．心から感謝を申し上げます．

そして，本研究のために命を捧げてくださったコナジラミ類は，根気強く本実験に付き合っ
て頂きました．特別な感謝を捧げます．

最後に，多大な心配をかけてしまった家族に，感謝を申し上げます．

参考文献

- [1] 深海浩, “ 変わりゆく農薬環境ルネッサンスで開かれる扉,” 化学同人,1998
- [2] Brown, JK, Frohlich, DR, Rosell RC, 1995. ‘The sweetpotato or silverleaf whiteflies: biotypes of *Bemisia tabaci* or a species complex?’ *Annu Rev Entomol*, 40, pp. 511-534.
- [3] Denholm, I, Cahill, M, Dennehy, TJ, Horowitz, AR, 1998. ‘Challenges with managing insecticide resistance in agricultural pests, exemplified by the whitefly *Bemisia tabaci*’, *Philos Trans R Soc Lond B Biol Sci*, 353, pp. 1757-1767.
- [4] 平野千里, “ 原点からの農薬論 生きた動物たちの視点から,” 社団法人農山漁村文化協会,1998
- [5] D.R. Jones, 2003. Plant viruses transmitted by whiteflies. *Eur J Plant Pathol*, 109(3), 195-219.
- [6] Czosnek, H, Ghanim, M, Morin, S, Rubenstein, G, Friedman, V, Zeidan, M, 2001 ‘Whiteflies: Vectors, and victims (?), of geminiviruses’. *Advances in virus research*, vol. 57, pp. 291-322;
- [7] UC IPM 2016, ‘Tomato: PEST MANAGEMENT GUIDELINES FOR AGRICULTURE’, Available from: <http://ipm.ucanr.edu/PMG/r783103311.html> pp. 106-107. [26 May 2017]
- [8] Lowe, S., Browne, M., Boudjelas, S., & De Poorter, M. 2000. 100 of the world’s worst invasive alien species: a selection from the global invasive species database (Vol. 12). Auckland: Invasive Species Specialist Group.
- [9] Cuthbertson, A. G., & Vnninen, I. 2015. The importance of maintaining Protected Zone status against *Bemisia tabaci*. *Insects*, 6(2), 432-441.
- [10] Chu, C. C., Jackson, C. G., Alexander, P. J., Karut, K., & Henneberry, T. J. (2003). Plastic cup traps equipped with light-emitting diodes for monitoring adult *Bemisia tabaci* (Homoptera: Aleyrodidae). *Journal of economic entomology*, 96(3), 543-546.
- [11] Boykin, L. M., & De Barro, P. J. (2014). A practical guide to identifying members of the *Bemisia tabaci* species complex: and other morphologically identical species. *Frontiers in Ecology and Evolution*, 2, 45.
- [12] T.M. Perring, 2001. The *Bemisia tabaci* species complex, *Crop Prot*, 20(9), 725-737.

- [13] Horowitz AR, Kontsedalov S, Khasdan V, Ishaaya I, “ Biotypes B and Q of *Bemisia tabaci* and their relevance to neonicotinoid and pyriproxyfen resistance, ” Arch. InsectBiochem. Physiol. 58, pp.216-225,2005.
- [14] Prabhaker, N, Castle, S, Henneberry TJ and Toscano, NC, 2005 ‘ Assessment of cross-resistance potential to neonicotinoid insecticides in *Bemisia tabaci* (Hemiptera: Aleyrodidae)’ . Bull. Entomol. Res. Vol. 95, no. 6, pp. 535-543
- [15] S. Ueda, J.K. Broun, 2006. First report of the Q biotype of *Bemisia tabaci* in Japan by mitochondrial cytochrome oxidase I sequence analysis, *Phytoparasitica*, 34(4), 405-411.
- [16] J.H. Martin, D. Mifsud, C. Rapisarda, 2000. The whiteflies (Hemiptera: Aleyrodidae) of Europe and the *Mediterranean* Basin, *Bull Entomol Res*, 90(5), 407-448.
- [17] Bethke, J. A., Byrne, F. J., Hodges, G. S., McKenzie, C. L., & Shatters Jr, R. G. (2009). First record of the Q biotype of the sweetpotato whitefly, *Bemisia tabaci*, in Guatemala. *Phytoparasitica*, 37(1), 61-64.
- [18] Tsagkarakou, A., Tsigenopoulos, C. S., Gorman, K., Lagnel, J., & Bedford, I. D. (2007). Biotype status and genetic polymorphism of the whitefly *Bemisia tabaci* (Hemiptera: Aleyrodidae) in Greece: mitochondrial DNA and microsatellites. *Bulletin of Entomological Research*, 97(1), 29-40.
- [19] Ma, D, Gormanc, K, Devine, G, Luo, W, and Denholm, I 2007. ‘ The biotype and insecticide-resistance status of whiteflies, *Bemisia tabaci* (Hemiptera: Aleyrodidae), invading cropping systems in Xinjiang Uygur autonomous region, northwestern China ’ , *Crop Protection*, vol. 26, no. 4, pp. 612-617. DOI: 10.1016/j.cropro.2006.04.027
- [20] 三浦 一芸 ”タバココナジラミバイオタイプ Q の簡易識別法-マルチプレックス PCR 法の利点”, *植物防疫* 61: pp.315-318, 2007
- [21] Notomi, T., Okayama, H., Masubuchi, H., Yonekawa, T., Watanabe, K., Amino, N., & Hase, T. 2000. Loop-mediated isothermal amplification of DNA. *Nucleic acids research*, 28(12), e63-e63.
- [22] 竹内 良彦, 吉村 幸江, 福田 至朗, 大矢 俊夫, ”LAMP 法によるタバココナジラミバイオタイプ B と Q 識別技術の開発”, *関西病虫害研究会報* Vol. 52, pp.143-145, 2010
- [23] Hsieh, C. H., Wang, H. Y., Chen, Y. F., & Ko, C. C. (2012). Loop - mediated isothermal amplification for rapid identification of biotypes B and Q of the globally invasive pest *Bemisia tabaci*, and studying population dynamics. *Pest management science*, 68(8), 1206-1213.
- [24] Blaser, S., Diem, H., von Felten, A., Gueuning, M., Andreou, M., Boonham, N., Tomlinson, J., Miller, P., Utzinger, J., Frey, B., Frey, J. E., Bhlmann, A. A Loop-mediated Isothermal

- Amplification (LAMP) Assay for Rapid Identification of *Bemisia tabaci*. J. Vis. Exp. (140), e58502, doi:10.3791/58502 (2018).
- [25] 愛知県, ”DNA鑑定によるタバココナジラミバイオタイプQの識別”, (2018/10/22 アクセス), <http://www.pref.aichi.jp/nososi/seika/singijutu/singijiyutu93.pdf>
- [26] Nakabayashi, H, Kawagishi, T, Koichi, M, Ebihara, T, Naoto, W, Hiroyuki, U & Kenji, K 2016. ‘Observation of acoustical behavior of some biotypes of *Bemisia tabaci*’, International Conference on Agricultural Engineering (CIGR), ID. 486, Available from: CIGR-2016 Full Papers, [26 May 2017]
- [27] Kashima, T, Kanmiya, K, Yoshida, K & Arimoto, Y, 2016, ‘Effect of a novel repellent, acetylated glyceride, on courtship behaviours and acoustic signals of *Bemisia tabaci*’. Journal of Applied Entomology, vol. 140, no. 1-2, pp. 1118. doi:10.1111/jen.12245
- [28] Kanmiya, K., & Sonobe, R. (2002). Records of two citrus pest whiteflies in Japan with special reference to their mating sounds (Homoptera: Aleyrodidae). Applied Entomology and Zoology, 37(3), 487-495.
- [29] Kanmiya, K, Ueda, S, Kasai, A, Yamashita, K, Sato, Y & Yoshiyasu, Y 2011. ‘Proposal of new specific status for tea-infesting populations of the nominal citrus spiny whitefly *Aleurocanthus spiniferus* (Homoptera: Aleyrodidae)’, Zootaxa, vol. 2797, pp. 25-44.
- [30] Kanmiya, K, “Discovery of Male Acoustic Signals in the Greenhouse Whitefly, *Trialeurodes vaporariorum* (WESTWOOD) (Homoptera: Aleyrodidae)”, Appl. Entomol. Zool, 31. (2), 1996
- [31] Kenkichi, K. (2005). Mating Behaviour and Vibratory Signals in Whiteflies (Homoptera) (pp. 365-379). <https://doi.org/10.1201/9781420039337.ch28>
- [32] 松浦 明, ”タバココナジラミバイオタイプQとBにおける交雑の可能性およびカボチャ白化症の発現能力の差”,九州病害虫研究会報, Vol. 56, pp. 7276, 2010 DOI: 10.4241/kyubyochu.56.72
- [33] Elbaz, M., Lahav, N., & Morin, S. (2010). Evidence for pre-zygotic reproductive barrier between the B and Q biotypes of *Bemisia tabaci* (Homoptera: Aleyrodidae). Bulletin of entomological research, 100(5), 581-590.
- [34] Nakabayashi, H., Kawagishi, T., Koichi, M., Ebihara, T., Naoto, W., Hiroyuki, U. & Kenji, K. 2015. ‘Observation of Acoustical Behavior of Whitefly Colony’, 7th International Conference on Sustainable Agriculture for Food, Energy and Industry in Regional and Global Context (ICSAFEI2015), Kuala Lumpur, Malaysia, CD-ROM, ICSAFEI-132.

- [35] Nakabayashi, H., Mizutani, K., Ebihara, T., Wakatsuki, N., Uga, H., Kubota, K., & Ishii, M. 2017. "Biotype identification of Bemisia tabaci by acoustical method." *Journal of Agricultural Informatics*, 8(3), 1122. <https://doi.org/10.17700/jai.2017.8.3.391>
- [36] Nakabayashi, H., Mizutani, K., Ebihara, T., Wakatsuki, N., Uga, H., Kubota, K., & Ishii, M.: "Biotype identification of Bemisia tabaci by acoustical method," : Conference Proceedings of the 2017 EFITA WCCA Congress, Paper 85,
- [37] Marco Crocco, Marco Cristani, Andrea Trucco, and Vittorio Murino. 2016. Audio Surveillance: A Systematic Review. *ACM Comput. Surv.* 48, 4, Article 52 (February 2016), 46 pages. DOI: <https://doi.org/10.1145/2871183>
- [38] 古井 貞熙, "音声情報処理", 森北出版株式会社, 1998
- [39] Kim, Y. E., & Whitman, B. (2002, October). Singer identification in popular music recordings using voice coding features. In *Proceedings of the 3rd International Conference on Music Information Retrieval* (Vol. 13, p. 17).
- [40] Garcia, J. O., & Garcia, C. R. (2003, July). Mel-frequency cepstrum coefficients extraction from infant cry for classification of normal and pathological cry with feed-forward neural networks. In *Neural Networks, 2003. Proceedings of the International Joint Conference on* (Vol. 4, pp. 3140-3145). IEEE.
- [41] Lee, C. H., Han, C. C., & Chuang, C. C. (2008). Automatic classification of bird species from their sounds using two-dimensional cepstral coefficients. *IEEE Transactions on Audio, Speech, and Language Processing*, 16(8), 1541-1550.