

ミニ特集：昆虫の音響交信とその利用

## 穿孔性甲虫類の音響交信とその防除の試み

(独)森林総合研究所 <sup>おお</sup>大 <sup>や</sup>谷 <sup>えい</sup>英 <sup>じ</sup>児

## はじめに

穿孔性甲虫には、幼虫が穿孔するカミキリムシ類を始め、幼虫成虫とも穿孔するキクイムシ類、クロツヤムシ類等がいるが、その多くは発音することが知られている。そこで一例として、私の研究材料であるカシノナガキクイムシの音響交信について概要を述べ、続いて英国で試みられているカミキリムシ類の防除例を紹介する。

カシノナガキクイムシ (*Platypus quercivorus*) はミズナラ、コナラ等ブナ科樹幹に穿孔加害する甲虫である。植物病原菌を媒介するので、集中加害を受けた樹木はほとんど枯死することで問題となっている。本種は一夫一婦制で、材内に巣をつくり、菌類を栽培して子育てをする。遺伝的形態的に異なった日本海型と太平洋型があることが知られている。成虫は雌雄とも左鞘翅の裏面正中先端部に「ヤスリ器」を、対応する腹部背板先端部に「コスリ器」(図-1)を持ち、腹部を上下に振動させ「コスリ器」で「ヤスリ器」を擦ること (stridulation) によって摩擦音を発生する。

雄成虫がまず宿主木に飛来し、材内に穿入したのち、雄のフェロモンなどに誘引されて雌成虫が飛来しこの坑道内に入る。しかし坑道の直径は成虫が一頭通れるだけの幅しかないため、雌は自分が中に入るためには、雄をいったん外に出さなければならない。そこで雌は連続的な「バズ」音を発し、これにより雄が坑道外に誘導された一瞬の隙に自らが坑道内に侵入する (OHYA and KINUURA, 2001)。この直後今度は雄が断続的な「チャープ」音を発しながら雌を坑道外に連れ出し交尾する (大谷・所, 2012)。

## I カシノナガキクイムシ求愛時の音響交信

バズはかろうじて坑道外で行われるため観察が可能であるが、雄によるチャープなどは主に坑道内のため、本

種の求愛行動を詳細に観察するにはこれらを可視化しないといけない。そこで人工的に雄を接種営巣させたコナラ丸太断面をアクリル板で覆い坑道内部が見えるようにした。この丸太を遮音したガラス容器内に入れ、ここに高感度コンデンサーマイクと小型 CCD カメラを挿入し、さらにチューブを通じて雌を穿入孔近くに導入した (図-2)。この録音システム全体も遮音室の中に設置し操作した。録音後、音声を WAV ファイルにして、パソコンで解析した (OHYA and KINUURA, 2001; 大谷ら, 2011)。

雌は始め、チチチチ…と断続的に鳴きながら (図-3 SRC) 穿入孔を探索した。雌はフラスの噴出した穿入孔を発見すると鳴き止み、頭部から穿入孔に侵入した。次に雌は、雌を排除しようとする孔道内の雄の鞘翅後部に頭頂を押し付けながら腹部末端を振動させ、ブーという 5~10 秒間のバズ (連続音) (図-3 BZ) を発生した (図-3 I)。バズは雌雄の接触が維持された状態で持続し (接触が途切れるとバズも中断)、雄は後ずさりしながら外に身を乗り出し、雌を招き入れるよう穿入孔の入り口を譲った (図-3 I)。この瞬間雌は直ちに発音を止め、素早く坑道に入っていった。

雌に続いて雄も坑道に戻ると、すぐに今度は雄が腹部末端を震わせチーチーチーという交尾前チャープ (図-3 PC) を発した (図-3 II)。この場合も雌雄の接触は保たれたまま、雄は穿入孔から後向きに体を乗り出し、次いで雌が同様に体を半分ほど表し、一瞬の短い交尾を行い (図-3 III)、雌雄とも直ちに坑道内に戻った。その後坑道内で雌雄の鳴き交わしチャープ (図-3 CT) が観察された (図-3 IV)。

バズや交尾前チャープが、それぞれ相手の次の行動を解発するために必要であるかを検証するため、鞘翅先端のファイルを切除し、音が出ないサイレント個体を作り、正常個体の行動と比べた。

サイレント雌は正常雌同様に穿入孔に侵入し、中の雄と押し合いながら腹部先端を振動させたが、バズ音は全く発生しなかった。この結果、雄はサイレント雌を撥ね付けようとするのみで坑道外に出ることはなかった。しかし、サイレント雌は、諦めようとせず、その場でかなりの間 (30 秒~5 分以上) 腹部の振動を継続した後ようやく立ち去った。この後正常雌を配し、正常な求愛行

Sound and Vibrational Communication in the Wood-Boring Beetles and the Acoustic Detection of the Pest Larvae in Hardwood Material. By Eiji OHYA

(キーワード：穿孔性甲虫, カシノナガキクイムシ, ツヤハダゴマダラカミキリ, オウシュウイエカミキリ, アオナガタムシ, 盆栽, 植物検疫, 咀嚼音, 同定)

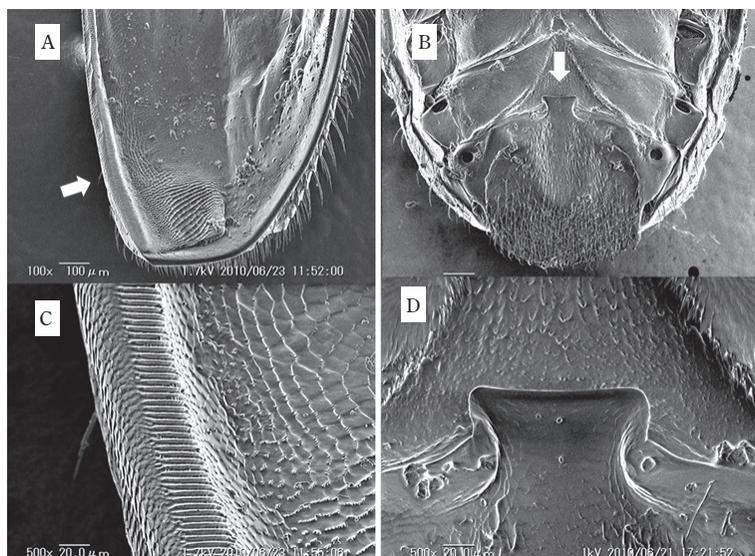


図-1 カシノナガキイムシ成虫の発音器官

A: 太平洋型メス左鞘翅裏面後部 (矢印: ヤスリ器). B: 日本海型メス腹部背板後部 (矢印: コスリ器). C: Aのヤスリ器のクローズアップ. D: Bのコスリ器のクローズアップ. スケールはA, Bが100 $\mu$ m, C, Dが20 $\mu$ m.

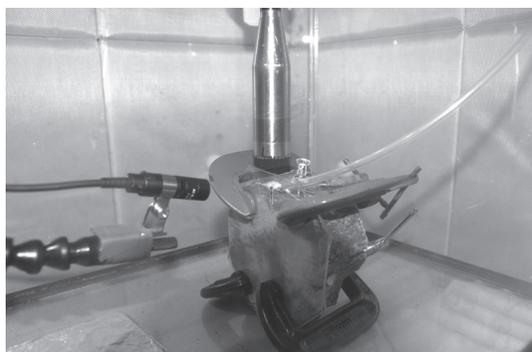


図-2 ガラス水槽内のカシノナガキイムシ求愛行動観察録音装置

左から小型 CCD カメラ, 高感度マイク, 雌成虫導入チューブ. マイクの直下チューブの先に雄成虫が掘った坑道が見える (フラスが出ているところ).

動を確認した。このように、雄は、バズを発する正常雌のみを受け入れたことから、彼らはこの音（あるいはその際の体の接触による振動）によって、雌が穿入孔に進入しようとしていることを察知し、雌を坑道内に導入したことは明らかであった。

一方サイレント雄は、鞘翅先端切除後、材内穿孔という大仕事があるため、その途中で死ぬ個体が多く、十分な実験が行われていない。しかし、成功した3例では、

いずれも正常に交尾したものの、バズ終了から交尾に至るまでの時間が正常に比べ長い傾向にあった(大谷・所, 2012)。これを解釈するにはさらにサンプルが必要である。

このような求愛行動に伴うチャープのほか、雌雄とも単独で頻繁にチィチィと鳴き、指でつまむとそのテンポが早くなる。これらの機能についてはいまだ不明である。

## II 英国における穿孔性甲虫類幼虫の材内咀嚼音による輸入木材検査

ここからは、音(振動)を利用した害虫防除例として、英国の木材輸入現場における穿孔性甲虫類幼虫の咀嚼音による検査発見方法について、私もかかわった TDSC (時間ドメイン信号コード法) を利用した事例を紹介する。

国際貿易において、輸出入品内などに潜む木材穿孔性害虫を検知する能力は、経済的被害の軽減のみならず、外来種による環境破壊を未然に防ぐ意味からも必須である。英国では2002～06年の間に1,300万立方mの木材が輸入された (Forestry Commission, 2007)。ほかに木材を使った箱など梱包用資材や盆栽等生木もこれらの害虫の隠れ家となりうる。いったん侵入大発生してからの防除に要する費用は、侵入を防ぐ予防の費用を大きく上回る (MacLeod et al., 2002)。そこで輸入の水際の害虫の初期発見は非常に重要である。

アメリカでは東南アジア原産のツヤハダゴマダラカミ

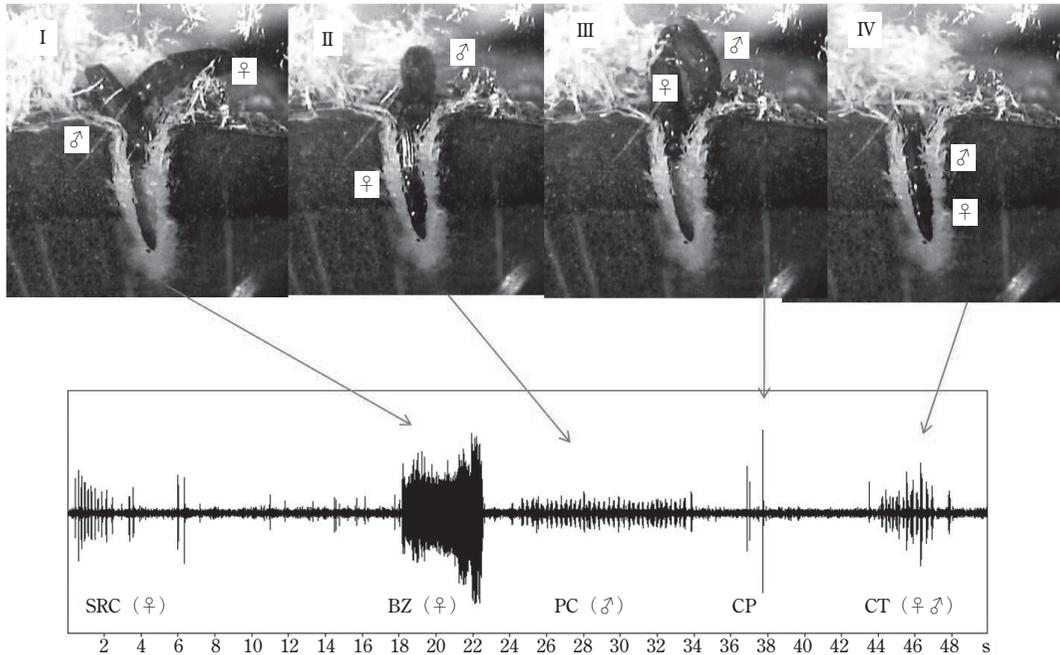


図-3 カシノナガキクイムシの一連の求愛行動

I: メスのバズ (BZ) によって坑道外に誘導されるオス。II: オスのチャープ (PC) によって坑道外に誘導されるメス。III: 交尾 (CP)。IV: メス続いてオスと坑道内に戻り、チャープ (CT) を鳴き交わす雌雄。下: 一連のチャープ・バズの波形 (50 秒間)。SRC: メスによるオス探索チャープ, BZ: メスによるオス誘導バズ, PC: オスによる交尾前チャープ, CT: 雌雄の鳴き交わしチャープ。

キリ (*Anoplophora glabripennis*) による被害総額が 6,690 億ドルにもなると試算されている。このカミキリは 1996 年にニューヨークのブルックリンで初めて発見されたが、少なくともその 2 年前からすでに侵入していたらしい (Nowak et al., 2001)。大発生は他の EU 諸国 (オーストリア・ベルギー・フランス・ドイツ・イタリア) で見られ、現在根絶事業が進行している (EPPO, 2008; 2009)。近縁種の *A. chinensis* も英国・フランス・イタリア等で発見されている。

感染初期のころはまだ幼虫が材内深くにいて、フラスなど外傷も不明瞭なため、検知が難しい。目視による検査、また破壊による検査は、特に盆栽において、とても時間がかかりかつ高価な作業となる。そこで、植物防疫の担当者などが現場で音響によって材内幼虫を発見する方法が期待される。

開発中の装置は二つの部分からなる。小型コンピュータを用いた携帯型検知装置と、現場に据え置いて長時間記録できる装置である。前者は検査対象の迅速な検査が可能で、後者は大発生場所、保護木等の長期モニタリングに使える。現在のところ、2 m 離れたマツ材 (梱包資

材) 内の 20 mg のオウシュウイエカミキリ (*Hylotrupes bajulus*) の幼虫を発見できた (FARR and CHESMORE, 2007)。

### III 材内昆虫の音

材内穿孔性昆虫の音は大きく二つに分けられる。摂食や身動きによって発生する受動的な音と、交信のための能動的な音である。能動的な音は甲虫の成虫ではよく知られているが、幼虫ではまれである。能動的の場合、オオキノコムシ成虫やカシノナガキクイムシ成虫のように摩擦音 (stridulation) を用いるが、対象害虫の幼虫期がこのような能動的発音をすることは知られていない。そこで今回用いたのは、咀嚼音であり、これは図-4 に示したように、瞬間的なパルス様の信号である。この音は大顎で木材繊維を裁断する際に生じる。図-4 に明らかなように、この音は種によって異なる。例えば、アオナガタマムシ (*Agrilus planipennis*) はオウシュウイエカミキリよりもずっと短時間の音である。時間的なパターンも種によって特徴がある。

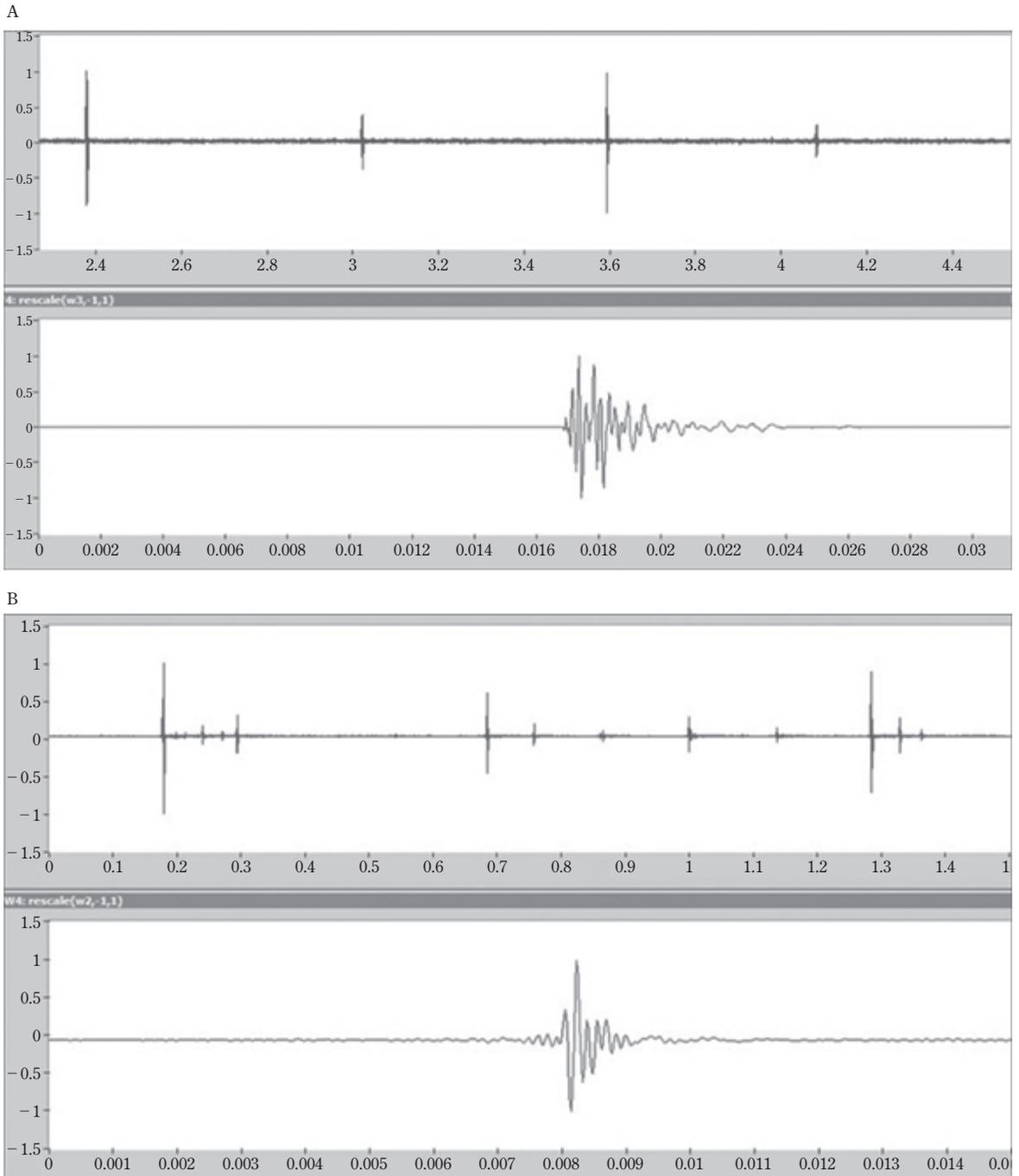


図-4 甲虫幼虫2種の咀嚼パターンの比較

全体像（上段）と単独の咀嚼音（下段）。横軸は時間で縦軸は相対振幅。A：オウシュウイエコミキリ，上段は4.5秒間，下段は0.03秒。B：アオナガタムシ，上段は1.5秒，下段は0.015秒。

## IV センサー

音は木や材の表面に取り付けられた振動センサーによって検知される。様々なタイプのセンサーが試験されたが、ほかの多くの検知に用いられている加速度センサーよりもピエゾセンサーがコストの面から選ばれた。さらにピエゾセンサーは、材への取り付けに金具を要しないことで、材に負担が少ない。このことは、盆栽など高価な検査物に有益である。また、ピエゾセンサーの出力は直接録音機器やパソコンのマイク入力に接続できる利点もある。

## V 咀嚼音の検知

図-5は「大まかな咀嚼音検知」と「種同定」を主な柱とする同定システムの流れである。「大まかな咀嚼音検知」のためには、信頼できる「咀嚼音」の検知と、センサーに引っかかる可能性のあるすべての「雑音」の除去が重要となる。

瞬間的な音をとらえるには様々な方法があるが、今回は時間の関数としての信号の複雑さの量であるFD（フラクタル次元）と呼ばれるパラメータを用いた。ここで

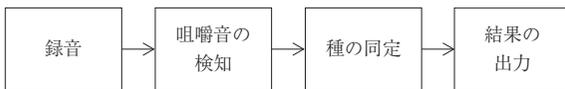


図-5 咀嚼音検知同定システムの流れ

用いられる仮説は、咀嚼音の時間的複雑さは、バックグラウンドの音とは異なるだろうということである。HIGUCHI (1988) や SEVCIK (1998) 等様々な計算方法があるが、ここではおよそ50倍の計算速度を持つ後者を採用した。このことは実際の現場での応用には重要な特徴である (SCHOFIELD and CHESMORE, 2008)。FDが振幅に依存しないことも有利である。咀嚼音の振幅は大いに変化することが想像されるからである。

図-6はオウシュウイエカミキリによる二つの咀嚼音の波形の時間的経過とそのFD（下段）であり、咀嚼音が検知された例である。下段の横線は検知の閾値である。図-7は極めてSN比（雑音に対する信号の比）が小さい場合であるが、FDにより3個の咀嚼音が検知された。

## VI 種の同定

咀嚼音の検知に続き、その信号から適切な特徴を抽出して種を同定する段階に入る。適切な特徴の抽出は、自動同定システムにおいて最重要ステップである。抽出される特徴は多様で、相互相関・高速フーリエ変換・線形予測符号化・統計的パラメータ・TDSC（時間ドメイン信号コード）等である。この分野でのほかの研究事例では、咀嚼パターンの時間的要素も含めてはいるが主に周波数ドメインであり (MANKIN et al., 2008)、これでは、システムに過剰な負荷がかかり、リアルタイムかつ低電力の装置に実装するには適さない。この研究ではTDSC

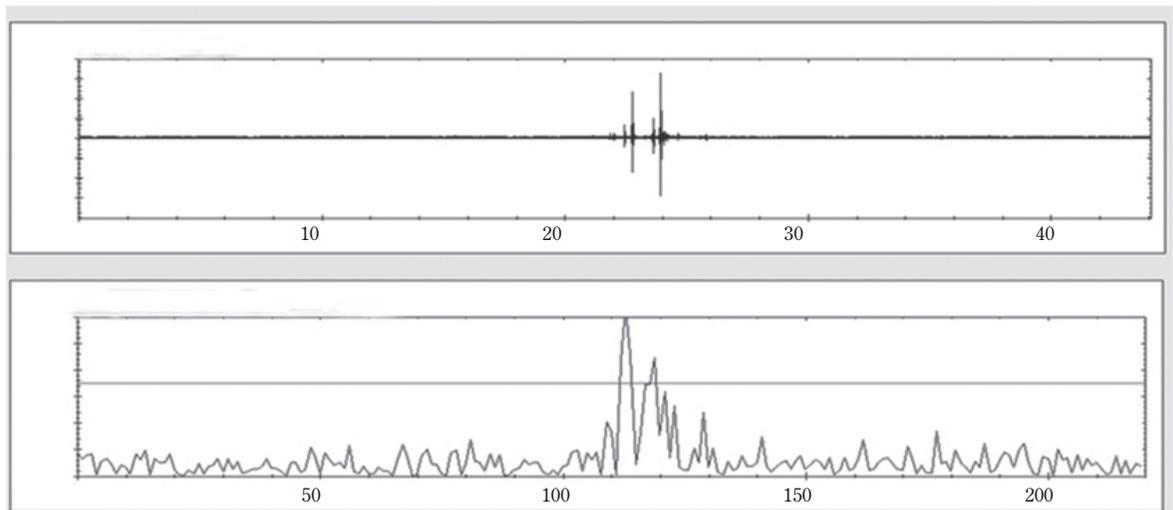


図-6 オウシュウイエカミキリのフラクタル次元 (FD)

上段：通常の波形図。横軸は時間で縦軸は相対振幅。二つの咀嚼音が見える。下段：そのFD。横軸は波形図に対応したフレーム数 (5 フレーム/秒)。縦軸は相対FD値。咀嚼音に対応する二つのピークが閾値 (横線) を超えている。

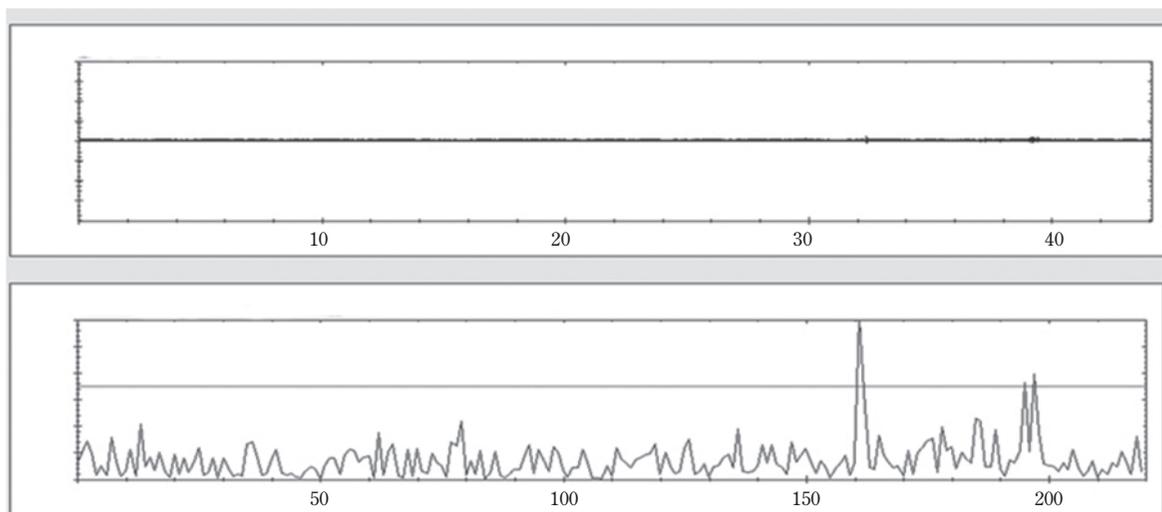


図-7 オウシュウイエカミキリの極めて低いシグナルレベルでの検知例

上段：通常の波形図。横軸は時間で縦軸は相対振幅。かろうじて見えるほどの三つの小さな咀嚼音。下段：そのFD。横軸は波形図に対応したフレーム数（5フレーム/秒）。縦軸は相対FD値。咀嚼音に対応する三つのピークが閾値（横線）を超えている。

を利用しているが、これは時間軸上の波形の微細形状の違いで同定するため、純粋に時間ドメインであり、バッタの鳴き声による自動同定（CHESMORE and OHYA, 2004）、異常心音（SWARBRICK and CHESMORE, 1998）、車両の音（EVANS and CHESMORE, 2008）等の先事例ですすでに成果を取めている。

種の特徴が抽出されたら、最終段階として、分類同定を行う。これには、まず人工ニューラルネットワーク（人工知能の一種）を既知の信号（咀嚼音）で訓練させる。いちど学習すると、人工ニューラルネットワークは検査対象となる後続の咀嚼音を自ら同定できるようになる。

## おわりに

カシノナガキクイムシの音響交信については、空気伝播でなく基質伝播の振動交信の可能性も含め、新たな事実が次々と発見されつつある。理論的にはこれらの交信を妨害することで、正常な行動、特に求愛行動が阻害され、個体数の減少が期待できる。しかし、広大な野外の森林では、大量の装置の設置の問題、電源供給の問題等、解決すべき問題が山積しており、現実的な利用は難しい。その点、苗木や材木内の害虫の発音の検知は技術的に格段に容易である。現在英国のプロジェクトでは、最終目的である携帯検査装置と長期モニタリング装置の完成に向けて、ハード・ソフト両面からブラッシュアップが進行している。この技術の確立が待ち遠しい。

## 引用文献

- 1) CHESMORE, E. D. and E. OHYA (2004): *Bulletin of Entomological Research* **94**: 319 ~ 330.
- 2) EPPO (2008): EPPO Reporting Service 2008/095. [http://www.eppo.org/PUBLICATIONS/reporting/reporting\\_service.htm](http://www.eppo.org/PUBLICATIONS/reporting/reporting_service.htm), [Accessed on 1 November 2009].
- 3) EPPO (2009): EPPO Reporting Service 2009/015, 2009/044, 2009/043, 2009/046. [http://www.eppo.org/PUBLICATIONS/reporting/reporting\\_service.htm](http://www.eppo.org/PUBLICATIONS/reporting/reporting_service.htm), [Accessed on 1 November 2009].
- 4) EVANS, N. and D. CHESMORE (2008): *Automated Identification of Vehicles using Acoustic Signal Processing*, Proceedings of Acoustics 2008, Paris (FR), June 2008.
- 5) FARR, I. and D. CHESMORE (2007): *Proceedings of the 4th International Conference on Bioacoustics* **29**(3): 201 ~ 208.
- 6) Forestry Commission (2007): *Forestry Facts & Figures* 2007.
- 7) HIGUCHI, T. (1988): *Physica D: Nonlinear Phenomena* **31**: 277 ~ 283.
- 8) MACLEOD A. et al. (2002): *Crop Protection* **21**: 635 ~ 645.
- 9) MANKIN, R. W. et al. (2008): *Journal of Economic Entomology* **101**: 838 ~ 849.
- 10) NOWAK D. J. et al. (2001): *ibid.* **94**: 116 ~ 122.
- 11) OHYA, E. and H. KINUURA (2001): *Applied Entomology and Zoology* **36**: 317 ~ 321.
- 12) 大谷英児ら (2011): 第55回日本応用動物昆虫学会大会講演要旨, p. 169.
- 13) ———・所 雅彦 (2012): 第56回日本応用動物昆虫学会大会講演要旨, p. 186.
- 14) SCHOFIELD, J. and D. CHESMORE (2008): *Proceedings of Acoustics 2008, Paris (FR)*, June 2008, p. 5929 ~ 5934.
- 15) SEVCIK, C. (1998): *Complexity International* [online] 5. <http://journal-ci.csse.monash.edu.au/ci/vol05/sevcik/sevcik.html>.
- 16) SWARBRICK, M. D. and E. D. CHESMORE (1998): *Proceedings of the Conference on Recent Advances in Soft Computing* 98, DeMontfort University, July 1998, p. 37 ~ 46.