

## 科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成 24 年 5 月 31 日現在

機関番号：17501

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2009～2011

課題番号：21651036

研究課題名（和文）バイオ・アコースティクスを利用した木材建築物の長寿命化

研究課題名（英文）Bio-acoustics for long life wooden buildings

研究代表者

富来 礼次（TOMIKU REIJI）

大分大学・工学部・准教授

研究者番号：20420648

研究成果の概要（和文）：バイオ・アコースティクスを利用した木造建築物に対するシロアリ防除に関し、日本で特に被害の大きいイエシロアリ（*Coptotermes formosanus*）を対象に、木材に対する摂食活動と振動・音響信号に関する基礎的な実験を行った。まず、木材の寸法と摂食活性に関する選択実験を行い、イエシロアリが木材の内部からその寸法を判別可能であるか検証した。続いて、寸法の異なる4種の木材中で、イエシロアリの摂食活動時に生じる振動の測定を実施し、木材の寸法と時間・周波数特性との関係を示した。最後に、木材への振動・音響信号の付加と摂食活性に関する選択実験を行った。

研究成果の概要（英文）：In this study, vibration signal role in feeding activity of subterranean termites “*Coptotermes formosanus*” is investigated as follows. Firstly, vibration signals produced by four groups of workers of the termites that were placed in four types of wood were recorded and analyzed in the time and frequency domains. Next, several groups of workers and soldiers of the termites were placed between a pair of wooden blocks with a signal during two weeks, and the amounts of food ingested were measured. The amount of food ingested was estimated by measuring the total length of tunnels produced by the termites. Then, several types of signals were supplied to the wooden blocks, and relationship between the types of the signals and the amount of food ingested was observed.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2009年度	1,900,000	0	1,900,000
2010年度	600,000	0	600,000
2011年度	600,000	180,000	780,000
年度			
年度			
総計	3,100,000	180,000	3,280,000

研究分野：複合新領域

科研費の分科・細目：環境学・環境技術・環境材料

キーワード：音響・振動，地下シロアリ，環境負荷低減，木造建築物

## 1. 研究開始当初の背景

2001年に社団法人日本しろあり対策協会が行った調査によると、日本の住宅における

シロアリの平均被害率は約34%とされ、被害率は温暖な地域ほど高い傾向にあるが、北海道・東北でも25%という数値が報告されてい

る。また、「シロアリ防除処理として日本だけでも 1,000 億円規模のマーケットがある」との推定もあり、その予防・駆除には主に化学薬品が使用されている。しかし、近年、シックハウス症候群に代表される住宅内部の化学物質汚染が社会問題となっている。例えば、建築基準法の改訂により、シロアリの駆除薬の一つであったクロルピリホスの使用が、アメリカ合衆国に追従する形で 2003 年に日本でも全面的に禁止された。これらをふまえて、現在、薬剤処理に頼らないシロアリ防除システムの構築が課題となっている。

一方、バイオ・アコースティクス分野において、アリやミツバチ等の真社会性昆虫は、振動・音響信号を用い情報収集・交換を行うことが実験的検証によって明らかになっているものの、シロアリを対象とした研究は少ない。これに対し、シロアリが木材を摂食する際に発生するアコースティックエミッション (AE) により、木材の被害を早期にかつ非破壊的に検出する技術の研究が多く行われている。これらの研究では、被害部位の特定を目的としているため、減衰の大きい超音波領域を使用している。

## 2. 研究の目的

本研究では、振動・音響信号を利用したシロアリ防除システムの可能性を探るため、その生息に水が必要であるものの乾材シロアリに比べ摂食量の多い地下シロアリの一種であるイエシロアリ (*Coptotermes formosanus*) の摂食活動と振動・音響信号に関する基礎的研究を行う。

## 3. 研究の方法

近年、Evans らは乾材シロアリを対象に、木材に付加した振動・音響信号と摂食活性との関係について研究成果を発表している。これは、上記 AE に関する研究とは異なり、可聴域の振動・音響振動を対象としている。まず、木材の寸法と摂食活性に関する選択実験を行い、乾材シロアリが材の内部から寸法を判別している可能性を示した。続いて、この判別に振動・音響信号を利用していると仮定し、寸法の異なる数種の木材を摂食する際に発生する振動の測定・分析を行った後、測定された信号や人工的に作成した信号の木材への付加と摂食活性に関する選択実験を行っている。その結果、測定された振動・音響信号で、地下シロアリの摂食活性をコントロールできる可能性を示している。しかし、ダイコクシロアリ (*Cryptotermes domesticus*) と同じ *Cryptotermes* 属である、*Cryptotermes secundus* との間でも、木材の寸法や付加する振動・音響信号の嗜好が異なっている。

そこで、イエシロアリを対象に、木材に付加する振動・音響信号による摂食活性コント

ロールの可能性を探る。まず、Evans らと同様木材の寸法と摂食活性に関する選択実験を行い、イエシロアリが木材の内部からその寸法を判別可能であるか検証する。続いて、寸法の異なる 4 種の材それぞれをイエシロアリに摂食させた際に発生する振動を測定し、材の寸法と周波数特性との関係を示すとともに、Evans らが行ったダイコクシロアリの結果とも比較する。これらの結果をふまえて、最後に、材へ付加する信号の有無およびその周波数特性・振幅の変化に対する摂食活性の変化について実験を行う。

## 4. 研究成果

### (1) 木材の長さと摂食活性との関係

シロアリの摂食活性は、温度や湿度により大きく変わることが広く知られている。そこで本研究では、実験中の温湿度を管理するため、Fig. 1 に示す実験箱 (900×1400×400 mm<sup>3</sup>) を作成した。実験箱内は、温度 28±2 °C、相対湿度 80±10% で管理されている。

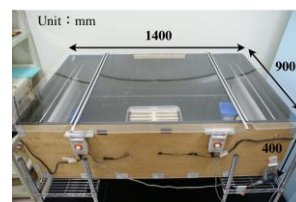


Fig.1 Experimental box (constant temperature and humidity chamber)

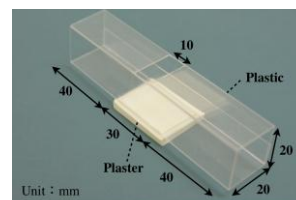


Fig.2 Termite cell.

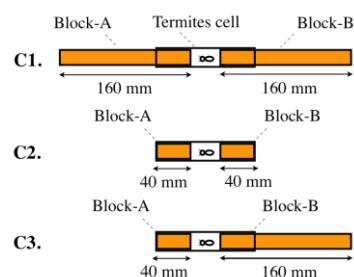


Fig.3 Schematic of all experimental treatments

同一材から切り出した 2 つの材 (スギ辺材、長さ  $L$ 、断面積  $A=20 \times 20 \text{ mm}^2$ ) を、切断面を向かい合わせて互いに 30 mm 離し、Fig. 2 に示すプラスチックと水分補給用の石膏で作成されたケース (以下、Termites cell) で固定する。ここでは、2 つの材の  $L$  として 40 および 160 mm の材を用い、Fig. 3 に示す C1 ~ C3 の 3 種の試験体で実験を行った。Fig. 3

左側の材を A 材, 右側の材を B 材とする。

職蟻 30 頭および兵蟻 3 頭を上記 Termites cell 内に 2 週間閉じ込め, 材を摂食させる。実験結果の普遍性を確保するため, Evans らの実験, 研究室で行った予備実験の結果をふまえ, それぞれの試験体の繰り返し回数を各 18 回とした。実験後に各材に生じたトンネルの長さの和 (以下, 摂食量) を測定し, 繰り返しに対する平均摂食量  $F_{ave}$  を算出し摂食活性の評価に用いた。

まず, それぞれの試験体の生存率を調べた結果, 各試験体の生存率の平均値と標準偏差は, C1 : 77%, 15%, C2 : 82%, 7.6%, C3 : 83%, 6.6% であり, 実験環境として適切であると判断した。Fig. 4 に, C1~C3 それぞれの  $F_{ave}$  を示す。なお, 各試験体における 2 材の  $F_{ave}$  の差に関して, 対応のある t 検定を用いた。全ての試験体で A 材と B 材の摂食量の間に有意差は認められなかった。Evans らが乾材シロアリに対し行った同様の実験では木材の長さで摂食活性の差異が生じているが, イエシロアリは摂食する木材の内部からその寸法を判断しない可能性がある。

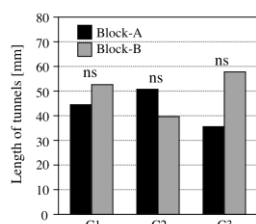


Fig. 4 Averaged total length of tunnels in each wooden block. ns, Not significant.

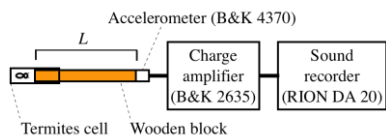


Fig. 5 Measurement setup.

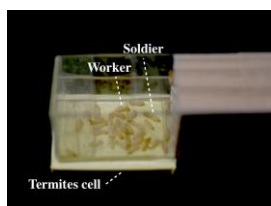


Fig. 6 Termite cell for recording.

## (2) 摂食振動の測定・分析

Fig. 5 に, イエシロアリが木材を摂食する際に発生する振動 (摂食振動) の測定の概略図を示す。材 (スギ辺材, 長さ  $L$ , 断面積  $A=20 \times 20 \text{ mm}^2$ ) の一方の材端に摂食振動測定用の Termites cell (Fig. 6) を設置し, 他方の材端に加速度ピックアップを設置する。職蟻 30 頭を Termites cell 内に閉じ込め, 材を摂食

させる。 $L=40, 80, 160$  および  $320 \text{ mm}$  の 4 種の材に対し, 大分大学無響室内でそれぞれ 30 分間測定を行った。

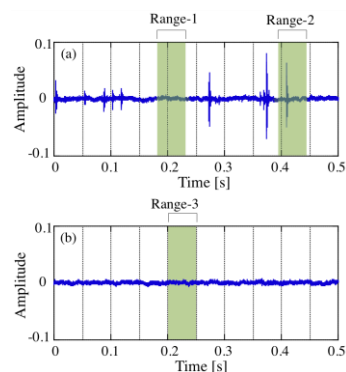


Fig. 7 Samples of measurement results for the condition  $L=40 \text{ mm}$ ; (a) with feeding signals and (b) without feeding signal.

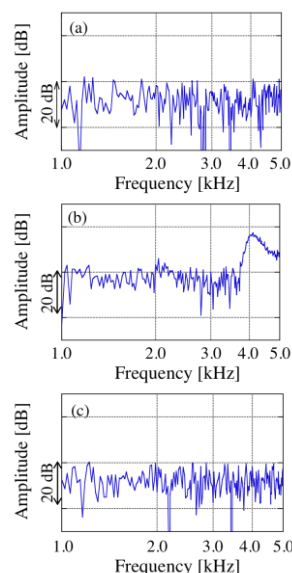


Fig. 8 Frequency characteristics of measurement results for the condition  $L=40 \text{ mm}$ ; (a) range-1 in Fig. 8(a), (b) range-2 in Fig. 8(a), and (c) range-3 in Fig. 8(b).

測定結果の一例として,  $L=40 \text{ mm}$  の材で得られた結果のうち, 摂食振動を含む 0.5 秒間を抽出した結果を Fig. 7 (a) に, 摂食振動を含まない 0.5 秒間を抽出した結果を Fig. 7 (b) にそれぞれ示す。さらに, Range-1, Range-2, Range-3 の信号を取り出し, それぞれに FFT を行った結果を Fig. 8 (a), (b), (c) に示す。なお, FFT には矩形窓を用い, サンプリング周波数は  $12.8 \text{ kHz}$  とした。摂食振動を含まないと考える Range-1, Range-3 に対し, 摂食振動を含むと考える Range-2 では  $4.1 \text{ kHz}$  付近にピークが確認される。

続いて, Hanning 窓, サンプリング周波数  $12.8 \text{ kHz}$ , フレーム長  $640$ , オーバーラップ  $50\%$  で STFT を行った。結果の一例として,  $L=40$

および 320 mm の材で得られた各 10 分間の 3 次元のスペクトログラムを Fig. 9(a), (b) にそれぞれ示す。L=40 mm に比べ、L=320 mm の材では複雑な周波数特性となっており、各フレーム毎に複数のピークが観測される。Evans らは FFT から得られる周波数特性で最大値となる周波数を優位周波数 (dominant frequency) と呼び、材の長さ毎に 1 つを定めている。ここでは、L=320 mm のような結果の場合、優位周波数が複数存在すると考える。L=80 および 160 mm の材でも同様に複数の優位周波数が確認された。

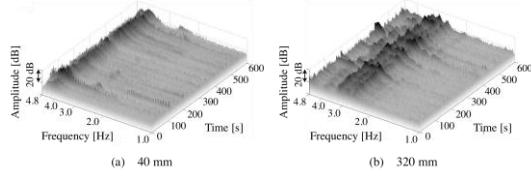


Fig. 9 3D spectrograms of feeding signal for wooden blocks (a) L=40 mm and (b) L=320 mm.

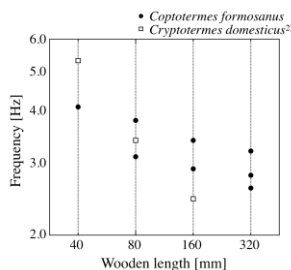


Fig. 10 Comparison of dominant frequency of wooden blocks excited by *C. Formosanus* and *C. domesticus*.

以上の手順で得られた摂食振動の優位周波数と材の長さとの関係を Fig. 10 に示す。また、比較のため、Evans らがダイコクシロアリ (*Cryptotermes domesticus*) に対し行った同様の実験結果を併せて示す。上記のように複数の優位周波数を考慮したにも関わらず、イエシロアリで得られた優位周波数の材の長さに対する変化の割合は、ダイコクシロアリで得られる同割合に比べ小さい。

(3) 木材への振動・音響信号の付加と摂食活性との関係

#### ①音源の種類・量に関する検討

最後に、木材への振動・音響信号の付加とイエシロアリの摂食活性との関係について実験を行う。前章までをふまえ、実験系を Fig. 11 とし、以下に示す音源を付加した試験体 T0~T4 の 5 種の摂食量を比較した。なお、3 章同様、職蟻 30 頭および兵蟻 3 頭を Termites cell に 2 週間閉じ込め、材 (スギ辺材、長さ L=160 mm、断面積 A=20×20 mm<sup>2</sup>) を摂食させる。

T0 : 無信号

T1 : L=40 mm の材で得られた摂食信号 (信号 1)

T2 : ピンクノイズ (信号 2)

T3 : 信号 1 を増幅した信号 (信号 3)

T4 : 信号 2 を増幅した信号 (信号 4)

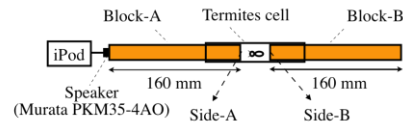


Fig. 11 Schematic of an experimental treatment.

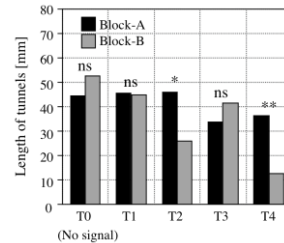


Fig. 12 Averaged total length of tunnels in each wooden block of T0, T1, T2, T3 and T4. ns, Not significant. \*, P< 0.05. \*\*, P< 0.01.

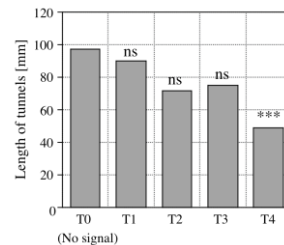


Fig. 13 Averaged total length of tunnels in each treatment of T0, T1, T2, T3 and T4. ns, Not significant. \*\*\*, P< 0.001.

実験ではそれぞれ 5 秒間の信号を繰り返し再生した。信号 1 と信号 2 は振幅の最大値が等しく、信号 2 と信号 3 は 5 秒間の音のエネルギーが等しい。また、信号 1 から信号 3 の増幅率と信号 2 から信号 4 の増幅率は同じである。なお、T0 と 3 章の C1 は同一である。繰り返し回数はそれぞれ T0 : 18 回, T1 : 20 回, T2 : 20 回, T3 : 23 回, T4 : 18 回とし、全て 3 章で用いた実験箱で実施する。実験後に摂食量を測定、繰り返しに対する平均摂食量  $F_{ave}$  を算出し、さらに、各試験体毎の総摂食量  $F_{sum}$  として 2 材の  $F_{ave}$  の和を求め比較する。

Fig. 12 に、T0~T4 それぞれの  $F_{ave}$  の結果を示す。各試験体の生存率の平均値は、T0 : 77%, T1 : 84%, T2 : 85%, T3 : 82%, T4 : 80% であった。なお、各試験体における 2 材の  $F_{ave}$  の差に関して、対応のある t 検定を用いた。試験体 T2 および T4 で、スピーカを設置した A 材の  $F_{ave}$  と設置していない B 材の  $F_{ave}$  の間に有意差が認められ、A 材に比べ B 材の摂食活性が低下した。Fig. 13 に、T0~T4 それぞれの  $F_{sum}$  の結果を示す。なお、T0 の  $F_{sum}$  と T1~4 それぞれの  $F_{sum}$  の差に関し、対応のない t 検定を用いた。T0 と T4 の  $F_{sum}$  には有意差が認められ、T0 に比べ T4 の摂食活性が低下し



た。また、有意差は認められなかったものの、 $F_{sum}$  は音源信号のエネルギーに応じて減少している。

## ②摂食活性を変化させる振動・音響信号に関する検討

T2, T4 で B 材でイエシロアリの摂食活性が低下した原因を探るため、A 材および B 材の摂食面をそれぞれ A 面、B 面とし、それぞれの試験体の A、B 面で生じている振動を 4 章と同様の設定・器材で測定した。Fig. 14 (a)~(d) に、試験体 T1~T4 それぞれの A 面、B 面で測定された振動の周波数特性を示す。T2, T4 とともに 0.5~1.25 kHz の帯域で B 面の方が振動レベルが大きい。これは今回用いた実験系のモードの影響と考える。

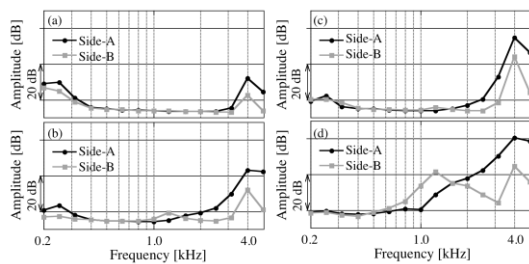


Fig. 14 Comparisons of frequency level of Side-A and Side-B at 1/3 octave band center frequency in (a) T1, (b) T2, (c) T3 and (d) T4.

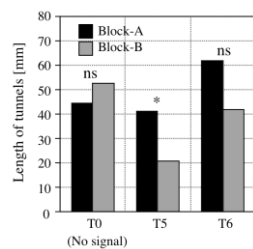


Fig. 15 Averaged total length of tunnels in each wooden block of T0, T5 and T6. ns, Not significant. \*,  $P < 0.05$ .

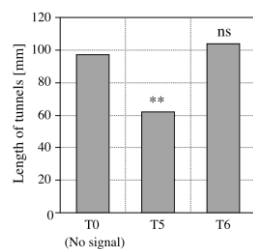


Fig. 16 Averaged total length of tunnels in each treatment of T0, T5 and T6. ns, Not significant. \*\*,  $P < 0.01$ .

そこで、今回最もイエシロアリの摂食活性が低下した T4 の B 面で生じる振動を A 面で生じさせる音源を作成し、信号 5 とした。さらに、T2, T4 で B 面に生じる振動レベルが A 面より大きい範囲に着目し、T4 の B 面で生じる 1.6 kHz 以下の振動を A 面に生じさせる音

源を作成し、信号 6 とした。なお、信号 5 および信号 6 は 5 秒間のエネルギーレベルが信号 4 と同等となるように設定し、信号 5 を付加した試験体を T5、信号 6 を付加した試験体を T6 とする。

繰り返し回数はそれぞれ、T5 : 23 回、T6 : 18 回とし、その他の実験条件は前節と同様である。実験後に摂食量を測定、平均摂食量  $F_{ave}$  および総摂食量  $F_{sum}$  を算出する。

Fig. 15 に、T5, T6 それぞれの  $F_{ave}$  の結果を示す。比較のため、T0 の結果も合わせて示している。各試験体の生存率の平均値は、T5 : 85%、T6 : 83%であった。なお、各試験体における 2 材の  $F_{ave}$  の差に関して、対応のある t 検定を用いた。T5 ではスピーカを設置した A 材の  $F_{ave}$  と設置していない B 材の  $F_{ave}$  の間に有意差が認められ、A 材に比べ B 材の摂食活性が低下したが、T6 では A 材の  $F_{ave}$  と B 材の  $F_{ave}$  との間に有意差は認められなかった。続いて、Fig. 16 に、T5, T6 それぞれの  $F_{sum}$  の結果を示す。比較のため、T0 の結果も合わせて示している。なお、T0 の  $F_{sum}$  と T5, T6 それぞれの  $F_{sum}$  の差に関して、対応のない t 検定を用いた。T0 と T5 の  $F_{sum}$  には有意差が認められたが、T0 と T6 の  $F_{sum}$  には有意差は認められなかった。

以上より、木材への振動・音響信号の付加によりイエシロアリの摂食活性が低下する可能性はあるものの、付加する信号のエネルギーの単純な増加によるものではなく、付加する信号の周波数特性についてはさらなる検討が必要であると考えられる。

以上、日本における代表的な木材害虫であるイエシロアリの摂食活動と振動・音響信号に関する基礎的検討を行った。その結果、木材への振動・音響信号の付加により、イエシロアリの摂食活性が低下する可能性を示した。今後は信号を付加する手法も含めた実験環境の検討と普遍性の確認を行うとともに、シロアリの摂食活性が低下する条件についてさらなる研究を行う予定である。

## 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 7 件)

- ① 富来礼次, 大鶴徹, 岡本則子, 深田益央, 井上正文, 田中圭, 吉村剛, バイオ・アコースティクスを利用した木造建築物の長寿命化に関する基礎的研究, 日本音響学会建築音響研究会資料, 査読無, AA2012-7, 2012, 1-8
- ② 大鶴徹, 井上正文, 富来礼次, 田中圭, 岡本則子, 深田益央, 吉村剛, 振動・音響的アプローチによるシロアリの嗜好・

忌避挙動の解明, 振動・音響的アプローチによるシロアリの嗜好・忌避挙動の解明, 第195回生存圏シンポジウム DOL/LSF に関する全国・国際共同研究成果発表会資料, 査読無, 2012, 19-20

- ③ 深田益央, 大鶴徹, 富来礼次, 岡本則子, 振動・音響信号を利用した建築物のシロアリ防除に関する基礎的研究-振動・音響信号の周波数特性とイエシロアリの摂食活性との関係-, 日本音響学会九州支部学生のための研究発表会, 査読無, 2011, 21-24
- ④ M. Fukada, T. Otsuru, R. Tomiku, N. Okamoto, Basic study on vibration signal role in feeding activity on subterranean termites *Coptotermes formosanus* -Relationship between vibration signals and feeding activity -, Proc. Inter-Noise2011, 概要査読有, Published by CD-ROM, 2011, 6p
- ⑤ 大鶴徹, 井上正文, 富来礼次, 田中圭, 岡本則子, 吉村剛, 振動・音響的アプローチによるシロアリの嗜好・忌避挙動の解明, 第166回生存圏シンポジウム DOL/LSF に関する全国・国際共同研究成果発表会資料, 査読無, 2011, 29-30
- ⑥ M. Fukada, T. Otsuru, R. Tomiku, N. Okamoto, Basic study on vibration signal role in foraging activity on subterranean termites *Coptotermes formosanus*, Proc. Kyushu Youngnam Joint Conference on Acoustics 2011, 概要査読有, 2011, 189-192
- ⑦ 大鶴徹, 井上正文, 富来礼次, 田中圭, 吉村剛, 振動・音響的アプローチによるシロアリの嗜好・忌避挙動の解明, 第138回生存圏シンポジウム DOL/LSF に関する全国・国際共同研究成果発表会資料, 査読無, 2010, 27-28

[学会発表] (計7件)

- ① 富来礼次, 大鶴徹, 岡本則子, 深田益央, 井上正文, 田中圭, 吉村剛, バイオ・アコースティクスを利用した木造建築物の長寿命化に関する基礎的研究, 日本音響学会建築音響研究会, 2012年3月21日, キャンパスポート大阪, 大阪府
- ② 大鶴徹, 井上正文, 富来礼次, 田中圭, 岡本則子, 深田益央, 吉村剛, 振動・音響的アプローチによるシロアリの嗜好・忌避挙動の解明, 振動・音響的アプローチによるシロアリの嗜好・忌避挙動の解明, 第195回生存圏シンポジウム DOL/LSF に関する全国・国際共同研究成果発表会, 2012年2月20日, 京都大学生存圏研究所, 京都府
- ③ 深田益央, 大鶴徹, 富来礼次, 岡本則子, 振動・音響信号を利用した建築物のシロア

リ防除に関する基礎的研究-振動・音響信号の周波数特性とイエシロアリの摂食活性との関係-, 日本音響学会九州支部学生のための研究発表会, 2011年11月26日, 大分大学, 大分県

- ④ M. Fukada, T. Otsuru, R. Tomiku, N. Okamoto, Basic study on vibration signal role in feeding activity on subterranean termites *Coptotermes formosanus* -Relationship between vibration signals and feeding activity-, Proc. Inter-Noise2011, 2011年9月6日, 大阪国際会議場, 大阪府
- ⑤ 大鶴徹, 井上正文, 富来礼次, 田中圭, 岡本則子, 吉村剛, 振動・音響的アプローチによるシロアリの嗜好・忌避挙動の解明, 第166回生存圏シンポジウム DOL/LSF に関する全国・国際共同研究成果発表会, 2011年2月21日, 京都大学生存圏研究所, 京都府
- ⑥ M. Fukada, T. Otsuru, R. Tomiku, N. Okamoto, Basic study on vibration signal role in foraging activity on subterranean termites *Coptotermes formosanus*, Proc. Kyushu Youngnam Joint Conference on Acoustics 2011, 2011年1月22日, 熊本大学, 熊本県
- ⑦ 大鶴徹, 井上正文, 富来礼次, 田中圭, 吉村剛, 振動・音響的アプローチによるシロアリの嗜好・忌避挙動の解明, 第138回生存圏シンポジウム DOL/LSF に関する全国・国際共同研究成果発表会, 2010年2月25日, 京都大学生存圏研究所, 京都府

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

富来 礼次 (TOMIKU REIJI)  
大分大学・工学部・准教授  
研究者番号: 20420648

### (2) 研究分担者

大鶴 徹 (OTSURU TORU)  
大分大学・工学部・教授  
研究者番号: 30152193  
岡本 則子 (OKAMOTO NORIKO)  
大分大学・工学部・博士研究員  
研究者番号: 00452912

### (3) 連携研究者

井上 正文 (INOUE MASAFUMI)  
大分大学・工学部・教授  
研究者番号: 60128337  
田中 圭 (TANAKA KEI)  
大分大学・工学部・助教  
研究者番号: 00325698