

論文内容の要旨

論文題目 マイクロテレメータによる昆虫の生体信号の計測

氏名 酒造 正樹

昆虫の行動発現メカニズムにおいて、匂い刺激のタイミングと行動発現のタイミングを比較して計測することが重要である。本研究では、自由行動中における生体信号の計測を行うため、昆虫に搭載可能な小型の送信機（マイクロテレメータ）を試作した。このテレメータを用いて、カイコガ（*Bombyx mori*）の筋電位（EMG）や触角電位（EAG）を計測し、データの解析が可能であることを示した。

本研究において試作したマイクロテレメータの特徴として、電源を外部から非接触で供給（リモートパワリング）できるシステムと活動電位の発火タイミングを記録することに特化したことがあげられる。そのため、従来の昆虫のテレメータと比べて、試作したマイクロテレメータは重量が軽くなった。また、ボタン電池を使用していないので、計測可能な持続時間が無限に長くできるというメリットがある。

試作したマイクロテレメータの電気回路図を Fig. 1 に示す。処理の流れは、次に示すように大きく4つに分けられる。

1. 触角や筋肉からの信号をインスツルメンテーションアンプにより増幅する。
2. 直流成分の緩やかな変動をローパスフィルタにより除去する。
3. 筋電位や触角電位の発火タイミングをコンパレータにより二値化する。
4. LED の点灯により電位をトランスミッションする。

この電気回路を小型化するにあたり、銅張りポリイミドと表面実装部品を用いた。銅張りポリイミドは、膜厚が 30 μm と薄く表面形状をフレキシブルに変化させることができる。表面実装部品は、実装面積が 1.0 mm \times 0.5 mm の受動部品（抵抗、コンデンサ、ダイオード、LED）と市販されている小型 IC パッケージを用いた。この部分の重量はわずか 50 mg である。

リモートパワリングシステムは、2つのコイルに働く電磁誘導を原理として試作した。送信側のコイルは、径が 2 mm のエナメル線を用いて、直径 10 cm の円形状に 20 回巻いて試作した。また、テレメータに搭載する受信側のコイルは、リソグラフィとエッチング技術を用いて微細加工した。そのサイズは、1 cm \times 1 cm の大きさと平面状に巻き線が形成した。インダクタンス値は、約 2 μH であった。また、伝送効率を高めるために、受信側のコイルには LC の共振系を利用した。リモートパワリングシステムは、次のように実行した。

1. ファンクションジェネレータ（Agilent, 33120A）により正弦波を生成。
2. 電力増幅器（YOKOGAWA, 705810）により電圧増幅。
3. 送信側のコイルに入力し磁界を発生。

4. 受信側のコイルに生じる誘導起電力を半波整流.

5. 時定数の大きなローパスフィルタにより平滑化し直流成分を得る.

これにより、得られる電圧と電力を Fig. 2 に示す. このシステムにより、最大約 100 mW の電力を供給することが可能である. この電力は、試作したマイクロテレメータを駆動し LED を点灯するのに十分な値である. また、電力の変換効率は 1 %弱であった.

試作したマイクロテレメータの有効性を確かめる実験を行った. 実験の概略図を Fig. 3 に示す. リモートパワリングによりアンプの回路を駆動しカイコガの筋電位を計測した. 電極は直径 50 μm の銀線を用いて、飛翔筋の一つである背縦走筋に 1 mm 程度刺入した. 不関電極として腹部に刺入した.

まず、アンプ直後の信号をオシロスコープにより計測した. 電池を用いて駆動した時と同じ結果を得た (Fig. 4). また、高速度ビデオカメラ (Photoron, FASTCAM-ultimal) による撮影をもとに、筋電位の発火タイミングと LED の点灯タイミングの計測を行った (Fig. 5). カイコガのはばたき周波数と LED の点灯周波数が一致していることが見られた. これらの結果から、マイクロテレメータを用いた計測が妥当なものであるとわかった.

高速度カメラではメモリ制限から短時間しか記録できないが、マルチチャンネルでかつ長期記録可能な計測の可能性を示した. テレメータの信号として異なる色の LED を使い、光センサとして光電子増倍管と色フィルタを用い、その電圧出力を得ることでマルチチャンネルからの記録が可能になる. 触角電位と筋電位、あるいは左右の触角電位どうしの信号を同時に計測することにより、行動解析に結び付けられる.

LED の点灯の画像解析から求まる筋電位の発火周期とスパイクの数の結果を、それぞれ Fig. 6 と Fig. 7 に示す. Table 1 にまとめたように、発火周期は 43 Hz, スパイクの数は 1.3 であるとわかった.

本論文の結論を示す. 自由行動下で計測可能なマイクロテレメータを試作した. 電池を内蔵せずに外部から非接触でエネルギーを供給するリモートパワリングシステムを採用し、電気回路をシンプルなものにすることにより約 100 mg の軽量デバイスを試作することができた. 試作したマイクロテレメータを用いて、光による信号のトランスミッションを行い、筋電位や触角電位の発火タイミングを計測することに成功した.

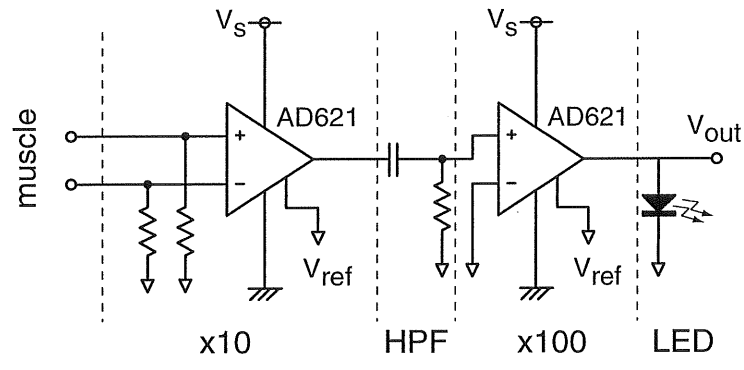


Fig. 1 テレメータの電気回路図

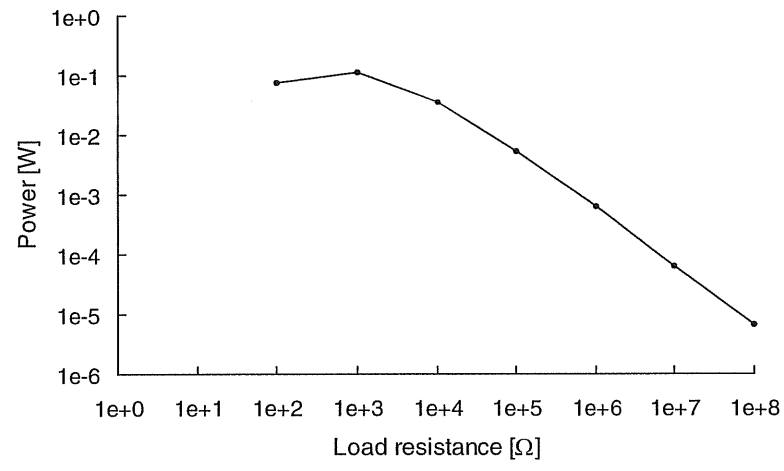
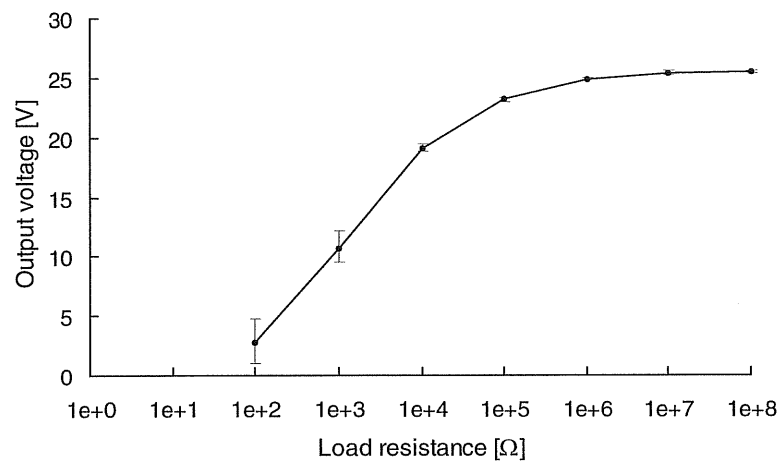


Fig. 2 リモートパワリングによる電圧出力（上）と電力（下）

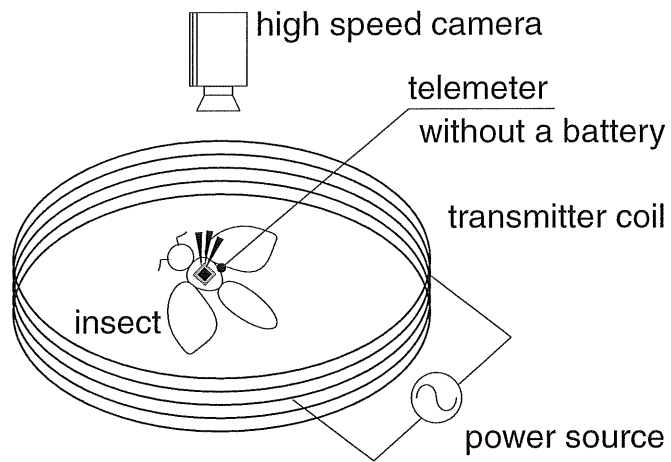


Fig. 3 リモートパワリングによる筋電位計測のコンセプト図

EMG

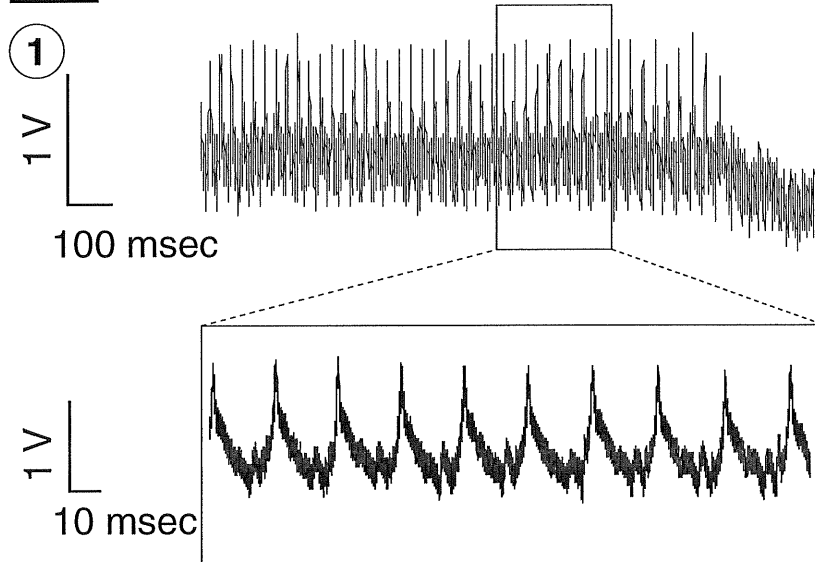


Fig. 4 インストルメンテーションアンプ後の筋電位の波形

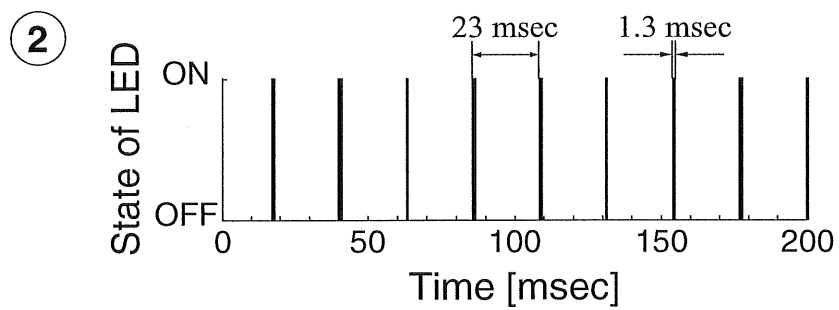


Fig. 5 LED の点灯タイミングの結果

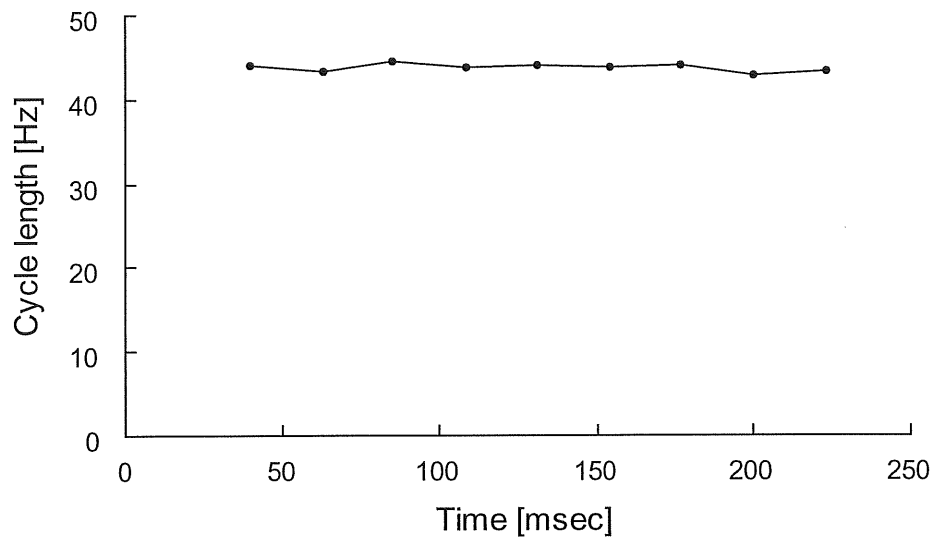


Fig. 6 筋電位のはばたき周波数

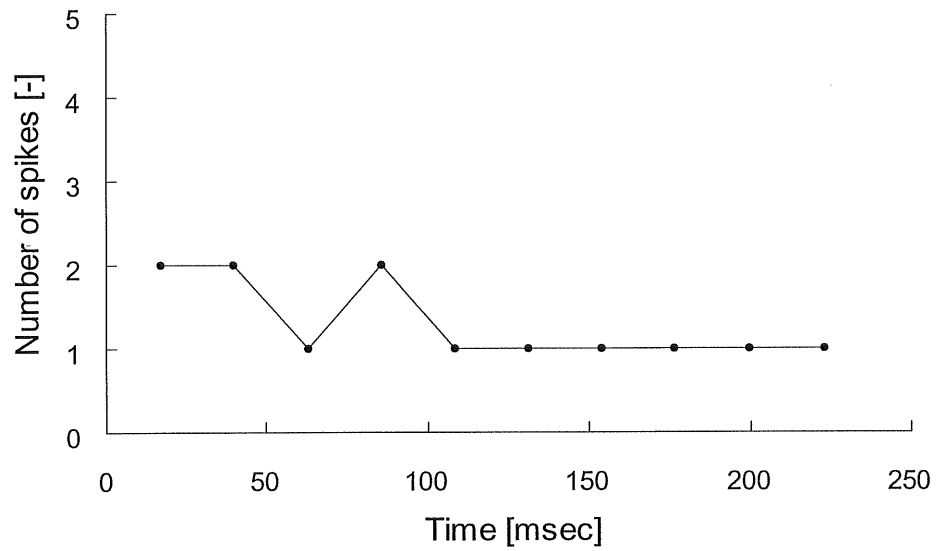


Fig. 7 筋電位のスパイクの数

Table 1 画像解析の結果

発火回数	10 回
平均発火間隔	22.9 msec
平均 ON 時間	1.27 msec
発火周期	43.7 Hz