HOKKAIDO UNIVERSITY

Title	コオロギ気流感覚毛の機械特性の測定
Author(s)	熊谷, 恒子; 馬場, 欣哉; 下澤, 楯夫
Citation	電子科学研究, 4, 119-121
Issue Date	1997-02
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/24394
Type	departmental bulletin paper
File Information	4_P119-121.pdf

Hokkaido University Collection of Scholarly and Academic Papers : HUSCAP

コオロギ気流感覚毛の機械特性の測定

神経情報研究分野　熊　谷　恒　子，馬　場　欣　哉，下　澤　楯　夫

レーザドップラ速度計を用いて，コオロギの気流感覚毛の運動と気流速度の両方を測定し，気流速度から感覚毛の角変位までの機械変換感度を調べた。この測定をもとに感覚毛の運動を特徴づける運動方程式の係数を決定し，一桁以上に渡る広い周波数帯域幅を持った気流感覚を実現させている感覚子アレイの形状と機械的パラメータとの関係など，気流感覚毛の力学設計を明らかにした。

1　はじめに

コオロギをはじめとする直翅目，コキブリ目の昆虫は，腹部末端に尾葉と呼ばれる一対の突起を持っている。尾葉上には数百本の気流感覚毛と呼ばれる糸状の感覚子があり，周囲の空気の動きを検出している。気流感覚毛の根元には感覚細胞があり，感覚毛が気流からの粘性力を受けて傾くと感覚細胞が機械的歪みを受けて，活動電位を発生し中枢へ伝える。これらの動物は気流感覚によって捕食者や配偶相手の接近を視覚に頼らずに検出し，逃避行動などの発現を制御している[1-2]。

コオロギの気流感覚毛には，長さで2桁（30-1,500 μm），直径で1桁（1-9 μm）にわたる大小様々なものがある。力学的見地から見ても長さによって大きな違いを持つはずである[3-4]。

本研究ではこれら長さの異なる気流感覚毛の，1）気流に対する感覚毛の角変位振幅及び位相の周波数特性，2）気流感覚毛の動きを支配する運動方程式の中の3つの機械定数，すなわち，慣性モーメント，毛を支えるバネのかたさ，支えるバネの内部摩擦抵抗，を測定・算出し，気流感覚毛の力学設計を明らかにする。

2　実験方法及び手順

(1)　測定：実験動物は成虫クロコオロギ *Gryllus bimaculatus* を用いた。直径3 cmのアクリル管の両端にスピーカを取り付け，プッシュプルで駆動して小型風洞とした。風洞中央で感覚毛に気流が垂直にあたるようにコオロギ腹部を固定し，感覚毛の揺れの接線速度をレーザドップラ流速計（LDV）で測った（図1）。LDVは直径60 μm，長さ600 μmの測定領域内に87 m/secで移動する干渉縞を作り，それを横切る散乱体からの散乱光の強度変化の周波数から散乱体の速度を測定する。刺激信号として帯域幅500 Hzの白色ガウス雑音を用い，5分間のLDV出力と刺激波形の相互相関から伝達関数を求めた。実体顕微鏡で感覚毛の長さと測定点の基部からの高さを測り，揺れ接線速度を角速度へ，さらに積分操作により角変位へ換算した。風洞内の気流速度までの伝達関数の較正は，散乱粒子として線香の煙を満たして測定した。気流速度から角変位までの感覚毛の感度特性は，これら2つの伝達関数の差から周波数領域で求めた。

(2)　力学的パラメータの推定：実測された角変位を，慣性モーメント I を持ち基部を硬さ S のバネで支えられた倒立振子の次の運動方程式へ代入する。

$$I\ddot{\theta}+R\dot{\theta}+S\theta=N(t)$$

ここに θ は感覚毛の角変位，$N(t)$ は感覚毛の各部に働く粘性力による回転トルクである。1-500 Hzの幾つかの周波数について代入した連立方程式から，最小自乗法で I，R，S，を求めた。感覚毛のレイノルズ数はたかだか 10^{-2} と小さいので，トルクの推定には感覚毛各部を微小長さの円柱とみなし，円柱を横切る流れが及ぼす粘性力に関するOseenの近似理論を用いた。感覚毛の各部にあたる気流の相対速度には，尾葉表面へ空気が粘りついて形成される境界層内の流速について

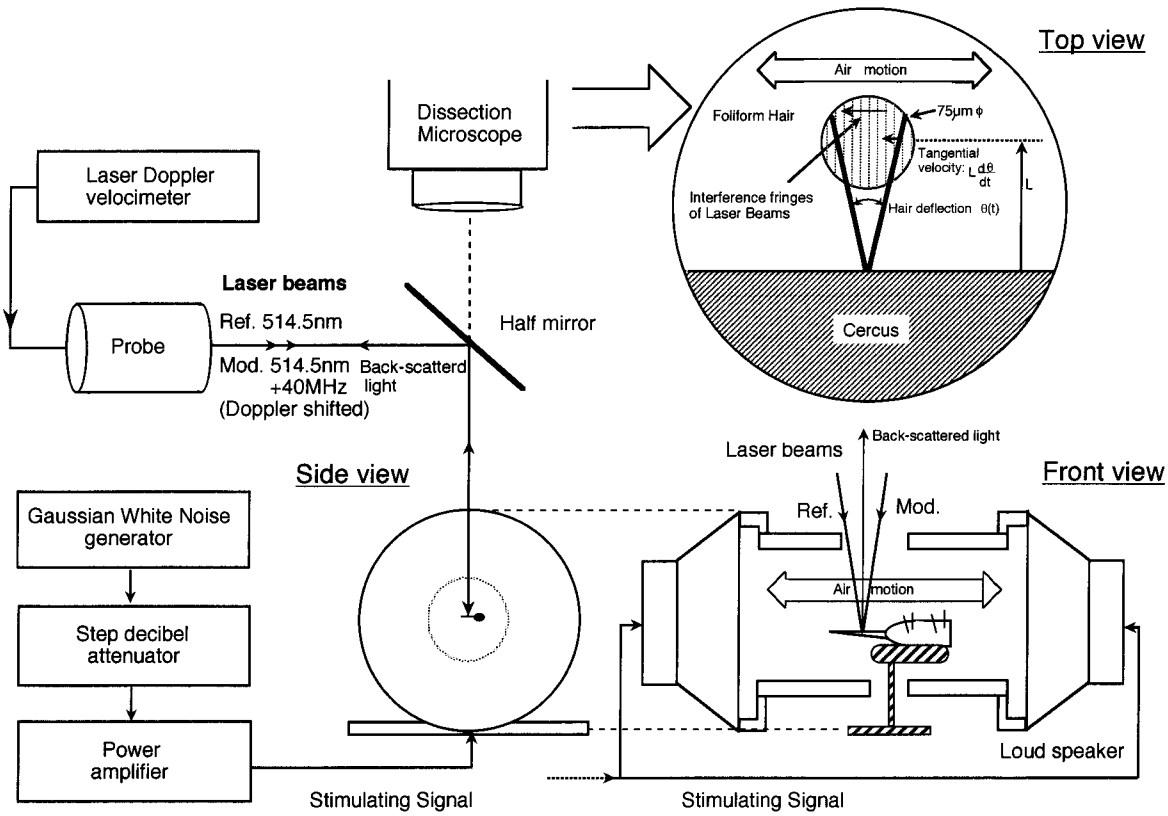

図1　実験装置

の Stokes の第2問題の解[4]を考慮にいれた。

3　結　　果

測定と解析を27本の160-1,500 μm にわたる様々な長さの感覚毛について行った。気流感覚毛はすべてバンドパスフィルタの特性を示し，気流の周波数と共に，角変位振幅は10～20 dB/decade で増加し，最適周波数を越えると－20～－10 dB/decade で減少する(図2 a)。最適周波数は感覚毛が長いほど低く，その感度は長いほど高い。最適周波数は気流速度に対する角変位の位相遅れが0になる周波数とほぼ一致した。すべての感覚毛の角変位振幅の周波数特性に鋭いピークはなく，この機械系は強い制動を受けている事を示唆している。また，位相遅れの周波数特性の傾斜は π/2/decade で，これも系が最適制動の2倍程度の強い制動を受けている事を示している。

これらの実測値から慣性モーメント I を推定したところ，すべての長さの感覚毛で感覚毛の形状(長さ，太さ，密度）から幾何学的に求めた値とよく一致した(図2 b)。また感覚毛を支えるばねの硬さ S も，以前静的な条件下で求めた値ととよく一致した。しかし内部抵抗 R は，系全体の位相遅れの周波数特性の傾斜より予想される値に比べ，かなり小さく推定された。従ってこの系は空気の粘性による自己制動効果が積極的に利用されていることがわかる。

4　考　　察

長さの異なる感覚毛は，それぞれの長さに対応した機械的な性質を持ち，異なる best frequency を持ったバンドパスフィルタの配列となっており，系全体として2桁以上の広い周波数帯域に感度を持つ仕組みを実現している。長さが1桁大きい感覚毛の太さは約1/2桁大きく，したがって慣性モーメントは4桁も大きくなる。しかし，それを支えるばねの硬さを2桁大きくしてバンドパスフィルタとしての最適周波数を1桁変えている。また，自己制動抵抗を3桁大きくして振動系として鋭いピークの現れるのを防いでいる。

動物が外の世界の出来事に適切に対応出来るのは，

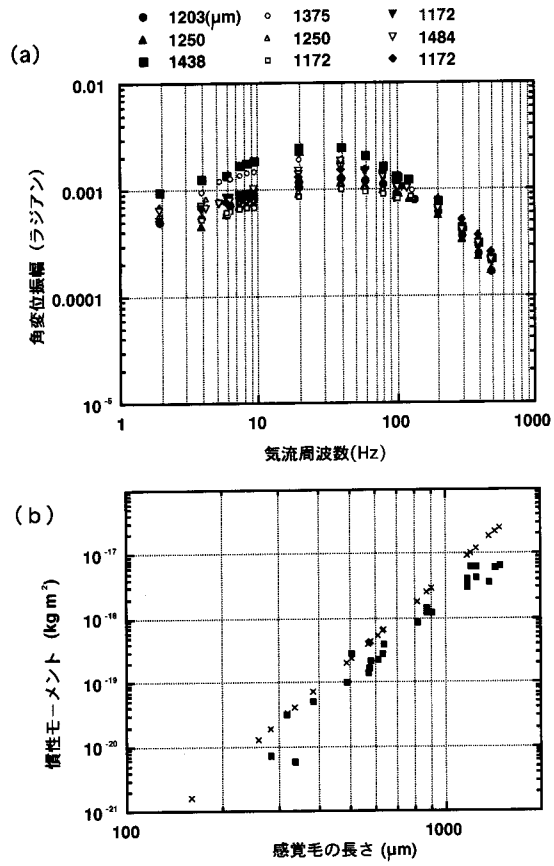

図2 (a)気流（1 mm/sec peak-to-peak）に対する感覚毛の角変位振幅の実測例。上の数字は毛の長さ（μm）。(b)感覚毛の慣性モーメント。黒ドット：実測値より求めた値，クロスは感覚毛の形状から幾何学的に算出した値（詳しくは本文）。

感覚情報を処理して，外の世界に対応した神経活動を中枢内のどこかに作り出すからである。識別されるべき外の世界の出来事は感覚器を通して神経情報に変換され，中枢で信号処理される。つまり神経系は広い意味での Matched Filter となっており，感覚器の性能と中枢における信号処理は互いに裏表の関係になっているはずである。神経系の設計原理を明らかにする作業はこの裏表の関係を示すことでもある。本研究における感覚器の特性の物理的計測は，中枢での信号処理の意味を議論する上で極めて重要な基盤となる。

【参考文献】

[1] Camhi J. M., Tom W., Volman S. (1978) The escape behaviour of cockroach Periplaneta americana. II. Detection of natural predetors by air displacement J. Comp. Physiol. 128: 203-212

[2] Gnatzy W. and Hustert R. (1989) Cricket behaviour and neurobiology. Huber F., Moore TE, Loher W.(eds) Mechanoreceptors in behaviour. Cornell university Press, Ithaca, NY, pp 198-226

[3] Shimozawa T. and Kanou M. (1984) Varieties of filiform hairs: range fractionation of sensory afferents and cercal interneurons of a cricket. J. Comp. Physiol A 155: 485-493

[4] Shimozawa T. and Kanou M. (1984) The aerodynamics and sensory physiology of range fractionation in the filiform sensilla of the cricket *Gryllus bimaculatus*. J. Comp. Physiol A 155: 495-505