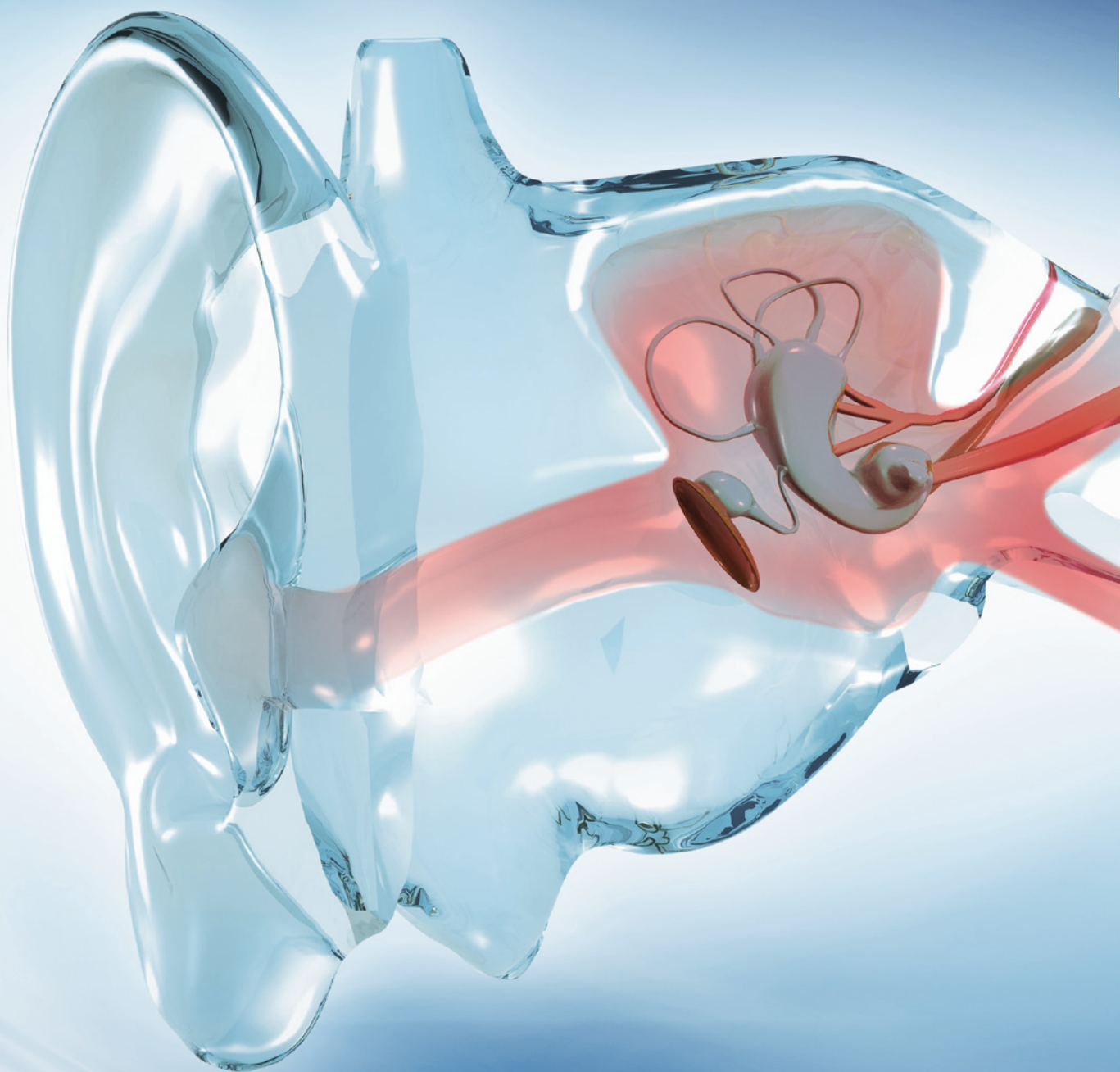


All Ears

バイオメカニクス：中耳に関する研究が新しい補聴器の開発を促進



コミュニケーションする能力は、私たちの生活にとって最も基本的な要素です。そのため、正常に聞き取ることができなければ、コミュニケーションが不可能ではないにしても、困難なものとなります。こうした理由で、研究者は聴力を向上させる人工中耳の最適化に取り組んでいます。ドイツのシュトゥットガルト大学の研究者は、現在、人工中耳の開発に向けて新しい道を切り拓きつつあります。主な研究対象としたのは、聴力に直接影響する、中耳の耳小骨連鎖の影響でした。

私たちが音を聞くしくみ

聴覚器官は、空気圧の変動を神経インパルスに変換して、脳に伝達できるようにしなければなりません。これは、種々の機能が重なり合ったさまざまな要素の複雑な連鎖を経由して行われます。簡単に言うと、音波が、空気圧の変動として耳道に入り、耳小骨（つち骨、きぬた骨、あぶみ骨）を動かします。あぶみ骨の底板は、内耳の上にあります。その後方に内耳リンパ液があり、リンパ液で前庭系と蝸牛が満たされています。あぶみ骨の底板の動きが、内耳のリンパ液を動かし、感覚有毛細胞を刺激します。これらの細胞の変形によって発生した電気信号が、聴覚神経を経て脳に送られ、実際の音の知覚を引き起こします。

聴力に対するロッキング運動の影響

人工中耳の性能を向上させるために、シュトゥットガルト大学の研究チームは、人間の耳がよく聞こえるようになるには、どのように耳小骨連鎖を刺激すればよいかを確かめたいと考えています。

あぶみ骨は、周波数に応じて、ピストン運動とロッキング運動の両方を実行します。

- 低周波数では、主にピストン運動になります。

- 高周波数では、これにロッキング運動も加わります。

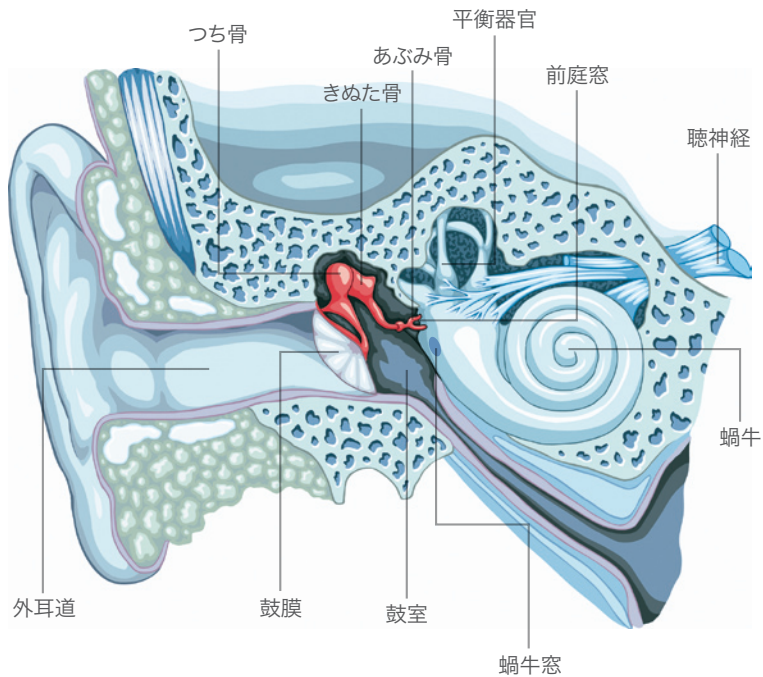
ロッキング運動の影響の研究

聴覚に関する従来の理論では、聴覚に直接影響を与えているのは、あぶみ骨底板のピストン運動のみであって、ロッキング運動は影響していないと言われています。シュトゥットガルト大学とスイスのチューリッヒ大学病院の研究チームの目標は、有毛細胞を刺激して脳への信号を誘発し聴覚を引き起こす際に、ロッキング運動が関わっているかどうか、関わっているとすればどの程度まで関わっているのかを突き止めることにあります。このため、モルモットで生体内実験が行われました。

最新のマイクロシステム技術を使用したテストセットアップ

テストセットアップの構成は次の通りです。

- 被験体用の麻酔薬と監視機器
- 音響的背景ノイズと電磁放射から絶縁されたブース内の振動減衰テスト装置
- 圧電アクチュエータを使用してあぶみ骨を機械的に刺激する装置
- あぶみ骨の動きと神経電位のデータ収集



ヒトの聴覚器官解剖図

聴覚の機械的な刺激

スピーカを介した音響的な刺激に比べると、分離されたあぶみ骨頭での機械的な刺激の場合は、底板の動きの形態を指定することが可能です。アクチュエータは、3つの独立した圧電アクチュエータを備えており、どのような複雑な空間的な動きでも実行可能です。特に、あぶみ骨のピストン運動だけでなく、純粋なロッキング運動も作り出すことができます。音響的な刺激と比較すると、あぶみ骨のロッキング運動とピストン運動間の関係は、固定した周波数依存の関係であり、これは連鎖のダイナミクスによって決まります。音響的な刺激に相当する動きを、あぶみ骨頭

「あぶみ骨底板のロッキング運動が聴覚事象を引き起こさないと推測していた理由は、不十分な計測方法にありました。最新のマイクロシステム技術のおかげで、ようやく、高周波帯域において聴覚器官にロッキング運動を重ね合わせることで、それらを測定できるようになりました」

工学博士 Albrecht Eiber, Institute of Engineering and Computational Mechanics, シュトゥットガルト大学、ドイツ

「あぶみ骨底板のロッキング運動が神経の刺激を引き起こさないと推測していた理由は、不十分な計測方法にありました」と、シュトゥットガルト大学 Institute of Engineering and Computational Mechanics の Albrecht Eiber 博士は説明しています。「最新のマイクロシステム技術のおかげで、ようやく、ロッキング運動とその高周波帯域における影響を測定できるようになりました」

ナノメータ範囲の耳小骨の振動を調べる際には、一般的にレーザードップラー振動計が使用されます。この実験では、3次元レーザーが、あぶみ骨頭を速度を全空間方向で同時に取得し、非常に抵抗が

高い生体信号増幅器を経由して被験体の聴覚神経による電気生理学的反応の電圧を増幅します。

中耳の外科的介入

モルモットのあぶみ骨は、内耳の機能を維持したまま外科的に切開されます。これにより、アクチュエータとレーザービームが、あぶみ骨頭に直接アクセスできるようになります。特別に設計された手術用針と眼科手術用糸で、圧電アクチュエータとあぶみ骨頭が結合されます。これらの細心の注意を要する手術作業と、被験体の麻酔状態の監視は、チューリッヒ大学病院の PD 医学博士 Alexander Huber によって行われました。

で重ね合わせることもできます。これにより、測定された神経電位を、他の研究グループの結果と比較することができるようになります。

アクチュエータの駆動コンセプト

あぶみ骨の動きの時間的経過に基づいて、信号の周波数成分が決定され、これによって基底膜の周波数固有の位置における内外有毛細胞の刺激も決定されます。蝸電図法で一般的に使用されている音響クリック刺激は、広帯域の周波数スペクトルを持っています。

音響刺激に対する振動システムのダイナミクスが、スピーカ、伝達管、耳道、および中耳から成るということは、内耳での一

「DS1005 PPC Board がアクチュエータを駆動します。3つの独立した圧電アクチュエータを使用することで、あぶみ骨の基本的なピストン運動とロッキング運動を正確に定義し、非常にダイナミックに刺激することができます」

工学博士 Michael Lauxmann, Institute of Engineering and Computational Mechanics, シュトゥットガルト大学、ドイツ

定時間にわたる刺激動作に、顕著にローパスフィルタがかかるということを意味します。音響コンバータに対する、時間が短い高周波のクリックは、非常に制限された帯域幅を持ち、信号の実行時間が原因で遅延が発生します。これにより、比較的速度の遅い機械的な駆動システムを使用して、あぶみ骨頭での直接的な刺激による音響クリックを再現することが可能になります。

dSPACE 製のモジュール型ハードウェアにより、実験に必要な刺激の形態が最適な形で生成されます。「dSPACE DS1005 PPC Board を使用すれば、アクチュエータを駆動できます」とシュトゥットガルト大学 Institute of Engineering and Computational Mechanics の工学修士 Michael Lauxmann は説明しています。「私たちは、あぶみ骨頭に対して目的とする刺激を実現するために、耳小骨連鎖とアクチュエータのダイナミクスを基準にして、どのようにアクチュエータを操作すればよいかをあらかじめ計算します。システムのダイナミクスを識別するには、多重正弦波信号を使用します」

神経電位の記録

計測は、入力抵抗と増幅率が高い増幅器を使用して行われます。ただし、刺激応答の信号には、実験環境および基本的な神経活動が原因で発生する高レベルの外乱が含まれます。このため、多数の刺激応答が記録され、相関の無い外乱が平均化によって低減されます。これを実行するために、クリックがたとえば 50 ms 間隔

で出力されます。一貫性のある計測データを取得するには、実際の外科手術の場合と同様に、被験体の物理的な状態と電極の位置を監視して、それらを一定の状態に保つ必要があります。

あぶみ骨底板のロッキング運動の影響

基本的なピストン運動とロッキング運動の両方を記録することにより、蝸電図法から得られた神経電位が検証されます。最初の実験でわかったことは、以前考えていたこととは異なり、ロッキング運動は実際には神経の刺激を誘発しているということでした。ロッキング運動に対する感覚細胞の応答の形態とレイテンシは、刺激の強さによって変わり、以前ピストン運動の場合にのみ観測された神経応答に対応しています。

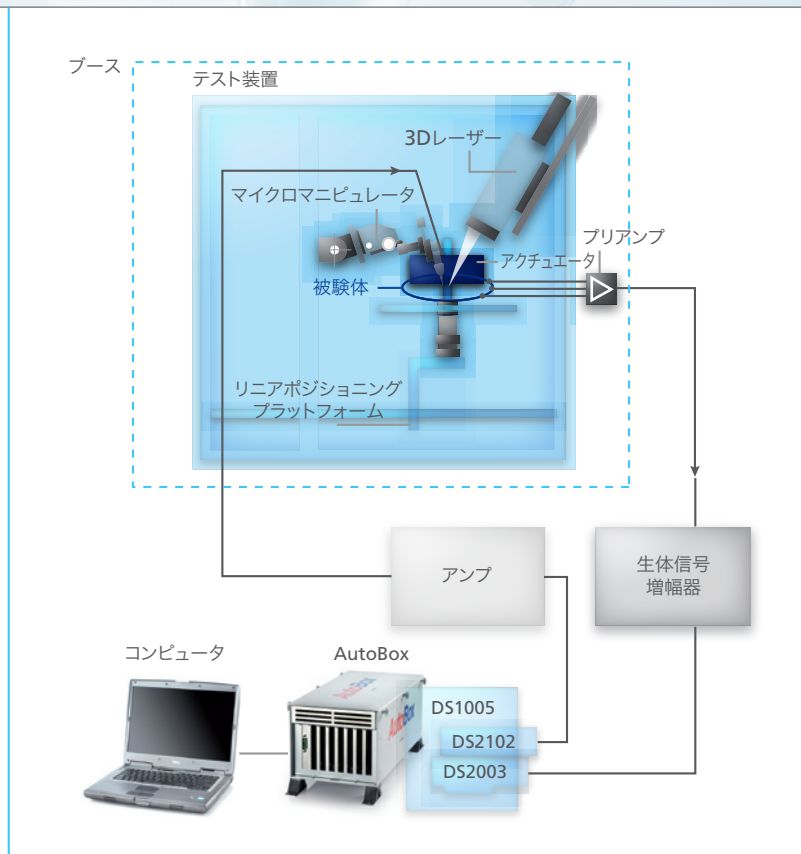
工学博士 Albrecht Eiber (右) と工学修士 Michael Lauxmann (左)、Institute of Engineering and Computational Mechanics, シュトゥットガルト大学、ドイツ

dSPACE AutoBox を使用した刺激およびデータ記録

dSPACE AutoBox を使用すると、テスト装置を操作して、データを記録することができます。「メカトロニクス分野でテストベンチを実行した際の dSPACE の実績を買って、この生体力学実験には dSPACE を選択することにしました」と委託研究者の Albrecht Eiber 博士は報告しています。システムの一部は DS1005 PPC Board であり、ここで計測プログラムがリアルタイムで実行されます。DS2102 High-Resolution D/A Board のような、追加のモジュール型ハードウェアコンポーネントで計測プログラムの値のアナログ出力を実行し、DS2003 Multi-Channel A/D Board でアナログ信号の



入力を読み込みます。
dSPACE システムのモジュール型セットアップとその高い柔軟性により、生体力学分野におけるどのような問題に対しても、迅速かつ最適に計測環境への適合を行うことができます」と Eiber 博士は述べています。リアルタイムプロセッサ上の計測プログラムの制御は、dSPACE 試験ソフトウェア ControlDesk によって行われます。実験の実行は、MATLAB 2008a によって自動化され高速化されます。さらに dSPACE では、計測プロセッサと



実験装置のコンポーネントと信号の流れ

「メカトロニクス分野でテストベンチを実行した際の dSPACE の実績を買って、この生体力学実験には、dSPACE を選択することにしました」

工学博士 Albrecht Eiber, Institute of Engineering and Computational Mechanics, シュトゥットガルト大学

- ControlDesk を介した刺激の入力
- MATLAB のコマンドラインを介した計測手順の開始
- MATLAB を介した計測データの保存と計測の制御

有意な計測結果とさらなる研究の必要性

収集されたデータは、聴覚を引き起こすのはあぶみ骨のピストン運動のみであって、ロッキング運動ではない、という理論が正しいかどうかを確かめるために使用されます。今回の結果から、複雑なあぶみ骨底板の運動、ピストン運動、およびロッキング運動のすべてが内耳を動かし、これによって、聴覚事象が引き起こされていることがわかりました。実験の統計的な評価には、さらに多くの被験体を調べる必要があります。

さらに詳細な実験を通して、あぶみ骨のロッキング運動が聴覚刺激も誘発していることが明らかにされれば、長期的に、

MATLAB の RAM 間におけるデータ転送用の MLib 関数のライブラリも用意しています。

実験を実行した後、データを MATLAB に転送します。これにより、2つの計測サイクル間の時間が最小限に抑えられます。これは、手動による手順がほとんどないことと、実験のセットアップパラメータを手動でドキュメント化する必要がないからです。自動化されるテストシーケンスは、次の通りです。

用語解説

基底膜 -

蝸牛内の膜。この膜の動きが有毛細胞を介して神経インパルスに変換されます。このインパルスが聴神経によって脳に伝わり、実際の音の知覚が生成されます。

蝸電図法 -

耳鼻咽喉医学で使用される検査法。蝸牛内部の音響刺激に反応して生成される電位を計測します。

短軸と長軸 -

あぶみ骨には、底板から始まり、骨の頭で接触する、2つの特徴的なあぶみ骨があります。この底板の形状は楕円形をしているので、1つの短軸と1つの長軸があります。

手術糸を使用して、アクチュエータの針とあぶみ骨を接続します。



人工中耳の改善に向けた目標にも影響を及ぼすことになるでしょう。その場合、生成されるあぶみ骨のピストン運動のみを基準にした人工中耳（埋め込み型補聴

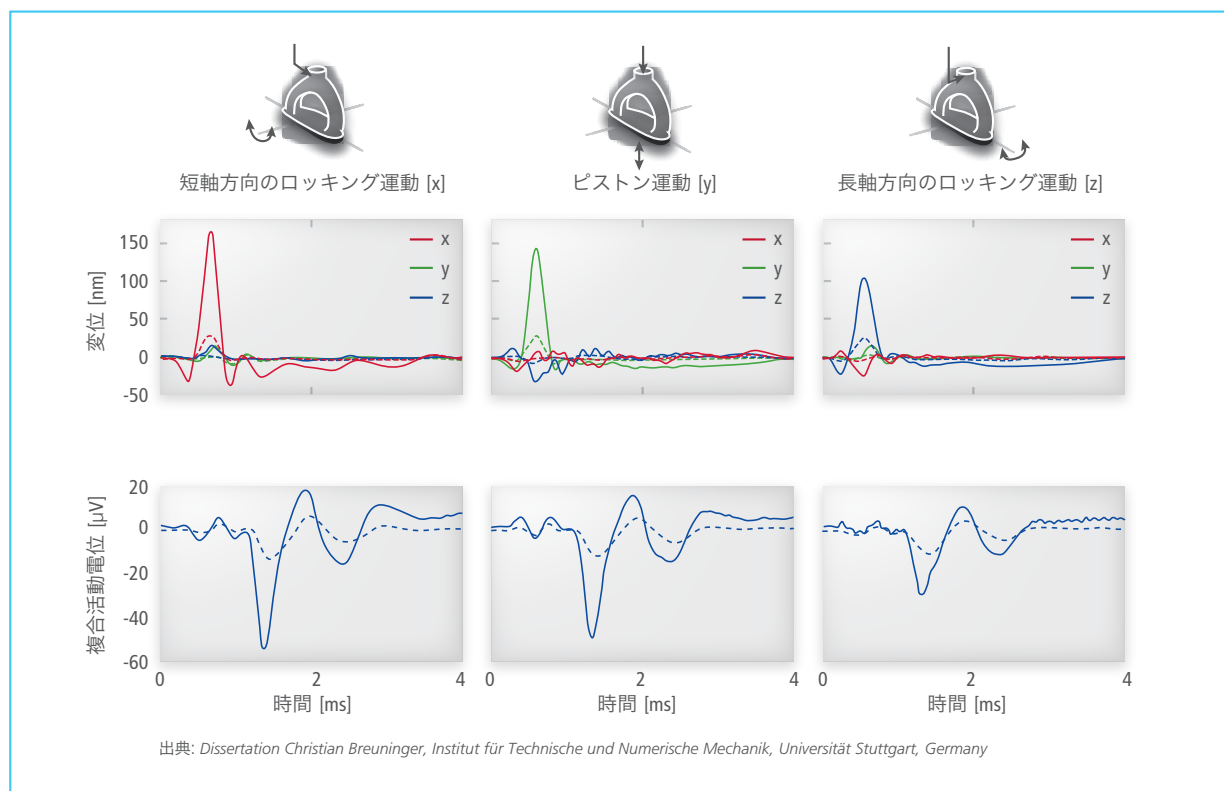
器）の評価はできなくなり、あぶみ骨の複雑な空間的運動が、人工中耳の性能を評価する新しい基準となるでしょう。■

「dSPACE システムのモジュール型のセットアップとその高い柔軟性により、生体力学分野におけるどのような問題に対しても、迅速かつ最適に計測環境への適合を行うことができます」

工学博士 Albrecht Eiber, Institute of Engineering and Computational Mechanics, シュトゥットガルト大学

まとめ

- シュトゥットガルト大学の研究チームは、聴覚を改善する新型の人工中耳の開発に必要な知識を提供しています。
- さまざまな実験を通して、あぶみ骨のロッキング運動が中耳の聴覚刺激を引き起こしているかどうか調べられています。
- dSPACE 製品は、生体力学分野における複雑な問題に答えるのに役立っています。
- dSPACE のモジュール型のセットアップを柔軟に利用することで、研究を行うのに理想的な環境が得られました。



あぶみ骨底板のピストン運動とロッキング運動の複合活動電位 (Compound Action Potential : CAP)。実線は強い刺激を示し、点線は弱い刺激を示しています。