

# A Sound Localization Model Based on the Alternate Pinna Movement of CF-FM Bats

Yuichi MORINAKA\*, Taturō HOSOKAWA\*, Tomotaka HAGINO\*, Shizuko HIRYU\*\*,  
Hiroshi RIQUIMAROUX\*\*\* and Yoshiaki WATANABE\*

(Received March 22, 2007)

In our previous study, *Hipposideros terasensis* (CF-FM bat) was observed to move its pinnae back and forth alternately when the bat paid attention to an approaching target during echolocation. Since this finding suggested that the bats might facilitate the echolocation by this pinna movement, we proposed the sound localization model based on this pinna movement. In this model, the interaural intensity differences (IID) and the sound pressure difference between two successive echoes (paired-interaural intensity differences: PIID) were used for cues to express the vertical and horizontal positions of the target respectively.

In this study, we measured the IID and PIID by using two microphones (as the bat's left and right ears) and an ultrasonic transducer (target). It was found that the measured IID and PIID well agreed with the estimated values. In addition we tried to localize a position of the target (transducer) from the measured IID and PIID while changing horizontal or vertical position of the transducer. Our results show that the direction of the target could be detected by using the proposed sound localization model based on the bat's alternate pinnae movement.

**Key Words:** CF-FM bat, alternate pinna movement, echolocation, interaural intensity differences (IID), paired-IID

**キーワード:** CF-FM コウモリ, 規則的な耳介の動き, エコーロケーション, 両耳間強度差(IID), paired-IID

## CF-FM コウモリの耳介の動きに基づいた音源定位モデル

森仲 雅一, 細川 達朗, 萩野 智生, 飛龍 志津子, 力丸 裕, 渡辺 好章

### 1. はじめに

小型コウモリの多くは、聴覚情報に頼って飛行や狩りを行う。これは、自らの鼻や口から超音波パルスを放射し、そのエコーから外界の情報をえるエコーロケーションと呼ばれる能力である。このコウモリの持つ生物ソナーシステムは大きさ、処理能力、柔軟性、エネルギー効率などの点で人工ソナーよりも格段に優れている。このため、コウモリの有する生物ソナーシ

テムの機構やその信号処理手法は、Echo-sensing 装置への幅広い応用が期待できる。このことから、コウモリのエコーロケーション機能を工学、生理学、生物行動学などの視点に立って多角的に観測し、コウモリのエコーロケーション機能から工学的に応用可能な技術シーズを発見することは非常に有意義といえる。

過去のコウモリの行動観測において、CF-FM コウモリ的一种 (キクガシラコウモリなど)が、接近する標的に対してエコーロケーションを行う際、耳介を交互に

\* Department of Electrical Engineering, Doshisha University, Kyoto

Telephone/Fax: +81-774-65-6300, E-mail: dtf0132@mail4.doshisha.ac.jp

\*\* Research Center for Intelligent Information Science, Doshisha University, Kyoto

Telephone/Fax: +81-774-65-6300, E-mail: shiryu@mail.doshisha.ac.jp

\*\*\* Department of Knowledge Engineering, Doshisha University, Kyoto

Telephone: +81-774-65-6956, Fax: +81-774-65-6791

規則的に動かすことが確認されている<sup>1)</sup>。また、この規則的な上下方向の耳介の動きは、コウモリのパルス放射のタイミングと同期していることも確認されている<sup>2) 3)</sup>。コウモリの耳介(Fig.1)はエコーの集音部としての機能を有していることから、この規則的な耳介の動きは、エコーに情報を付加するためにコウモリが意図的に行っているものと考えられる。しかしながら、現在のところ規則的な耳介の動きとエコーロケーションの関係は明らかにされていない。そこで本報告では、このコウモリの規則的な耳介の動きが標的の音源定位に深く関係しているものと考え、この耳介の動きに基づいた音源定位モデルの提案を行った。また、マイクロホンアレイを用いて実験を行い、測定結果と理論計算結果を比較することで、提案モデルの有用性を検討した。

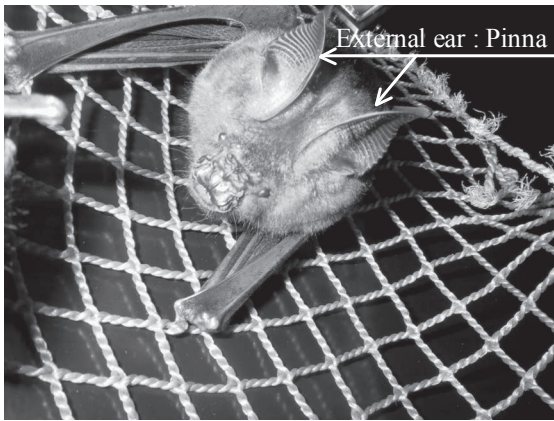


Fig. 1. External ear (pinnae) of CF-FM bat (*Hipposideros terasensis*).

## 2. 音源定位モデル

我々の過去の研究において、標的に注目したテラソカグラコウモリ(CF-FM コウモリ)が積極的に耳介を上下方向に交互に動かすことを報告している<sup>4)</sup>。このコウモリの耳介の動きは左右対称で、片方の耳介を前方に傾けているとき、もう一方の耳介は後方に傾けている(Fig.2(a))。また次のエコーを聴取する際には、左右の耳介をその対称な位置に移動させる(Fig.2(b))。さらに、この規則的な耳介の動きはコウモリのパルス放射およびエコー受波のタイミングと同期しており、両耳介の角度が最も開くときにエコーを聴取していることを確認している<sup>4)</sup>。このコウモリの規則的な耳介の動きに基づいた音源定位モデルを提案するにあたり、耳

介の垂直(仰角)方向の傾きの変化(Fig.2(a) Angle: $\beta$ )と、両耳間のエコー到達時間差(Fig.2(b)  $\Delta t$ )に着目した。

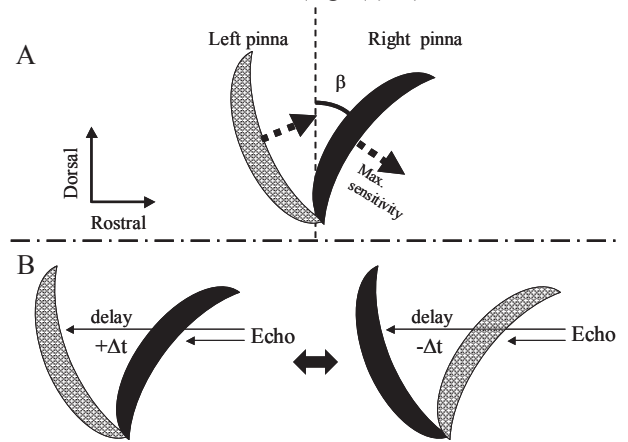


Fig. 2. Schematic side views of bat's pinnae (a) Angled pinna changes its direction of maximum sensitivity (b) Pinna movement differs the echo delay between right and left pinnae.

### 2.1 垂直方向の音源定位モデル

規則的な上下方向の耳介の動きにより、コウモリの左右の耳介には垂直(仰角)方向の傾きの差が生じる(Fig.2(a) Angle: $\beta$ )。過去の観測により、コウモリは両耳介の角度が最も開くときにエコーを聴取していることを確認している<sup>4)</sup>。したがって、標的の垂直方位に応じて両耳間で得られるエコー強度に差(interaural intensity differences: IID)が生じると考えられる。そこで、この IID を垂直方向の音源定位の手がかりとした。Fig.2(a)のように左右の耳介に垂直(仰角)方向の傾き $\beta$ が生じたとき、左右の耳介(受波器)で知覚される両耳間強度差(IID)は次式で表される。

$$IID(\varphi) = |R_s(\varphi) \cdot R_{mic}(\varphi + \beta)| - |R_s(\varphi) \cdot R_{mic}(\varphi - \beta)| \quad (1)$$

なお、 $R_{mic}$ は受波器の指向性、 $R_s$ は送波器の指向性、 $\varphi$ は垂直方位角である。本報告では、 $R_{mic}$ 、 $R_s$ を1次ベッセル関数で近似した<sup>5)</sup>。

### 2.2 水平方向の音源定位モデル

一方、耳介の動きにより Fig.2(b)のように左右の耳介に到達するエコーに時間差 $\Delta t$ (または位相差 $\phi$ )が生じると考えられる。また、コウモリはパルスごとに耳介の前後運動を交互に行う(Fig.2(b))ことで、両耳間で知覚するエコーに $+\phi$ 、 $-\phi$ の2つの異なる位相差を交互に与えると考えられる。

ここで、左右の耳介を2つの受波器と考え、水平軸

上に間隔  $d$  で配置された 2 素子のマイクロホンアレイを仮定する. マイクロホン動かさずにコウモリの耳介の動きを再現するために, マイクロホンアレイにおいてその一方の出力に位相差  $+\phi$ ,  $-\phi$  を繰り返し交互に与えた. このとき, 2 つの受波器の合成指向性  $IID_{\pm\phi}(\theta)$  は次式で与えられる.

$$IID_{\pm\phi}(\theta) = R_s(\theta) \times R_{mic}(\theta) \times \left\{ \exp\left[j\left(\frac{kd}{2}\sin\theta\right)\right] - \exp\left[j\left(-\frac{kd}{2}\sin\theta \pm \phi\right)\right] \right\} \quad (2)$$

なお,  $k=2\pi/\lambda$ ,  $\theta$  は水平方位角である.

耳介の交互の動きによって, コウモリは 2 種類の異なるエコーを繰り返し聞き, 連続する 2 つのエコーが持つ情報の差を積極的に音源定位に利用していると考えられる. これは,  $IID_{+\phi}$  と  $IID_{-\phi}$  を聞き比べていることに相当する. そこで  $IID_{+\phi}$  と  $IID_{-\phi}$  の音圧差を Paired-IID (PIID) と定義し, 次式で定義する.

$$PIID = |IID_{+\phi}(\theta)| - |IID_{-\phi}(\theta)| \quad (3)$$

この PIID は標的の水平方位に応じて変化することから, 水平方向の音源定位の手がかりとした.

一般に音源定位を行うためには水平, 垂直方向の手がかりを分離する必要がある. IID は左右の耳介(受波器)における音圧差, PIID は連続する 2 つのエコーの音圧差であることから, これらの独立な音圧パラメータを用いて水平, 垂直方向の音源定位が可能であると考えられる.

### 3. 実験 1

実験 1 では, マイクロホンアレイを用いて, IID および PIID の測定を行った. 測定結果と理論計算結果を比較することで, 提案した音源定位モデルの有用性を検討した.

#### 3.1 実験方法

実験系を Fig.3 に示す. 受波器には, 2 つのマイクロホン(B&K Type:4939)を間隔  $d$  [mm] で水平に配置したマイクロホンアレイを用いた. それぞれのマイクロホンには上下に傾き  $\beta$  [deg] を設けた. 送波器には振動子

(村田製作所 MA40E7S)を用い, マイクロホンアレイの正面 500 mm に対向させ, 円弧状に  $5^\circ$  ずつ  $80^\circ$  から  $80^\circ$  まで水平軸上に 17 点, 垂直軸上に 17 点の位置に移動させた. ただし, マイクロホンアレイに向かって右上方を正方向とした.

発振器(NF MULTI FUNCTION SYNTHESIZER: 1940)から周波数 35 kHz, パルス長 5.7 ms, パルス間隔 570 ms のバースト波を送波器に印加し, 各位置における受波器の出力をオシロスコープ(Tektronix TDS520D)を通して記録し, 測定値から計測制御用ソフトウェア(LabVIEW7.0)を用いて, IID および PIID を算出した. なお, PIID の算出には, エコー到達時間差(位相差)を再現するために, 一方のマイクロホンの出力に位相差  $\pm\phi$  を Lab VIEW 上で付加した(Fig.4). また, 実験と同じ条件で式(1), (3)から IID, PIID の理論計算を行った.

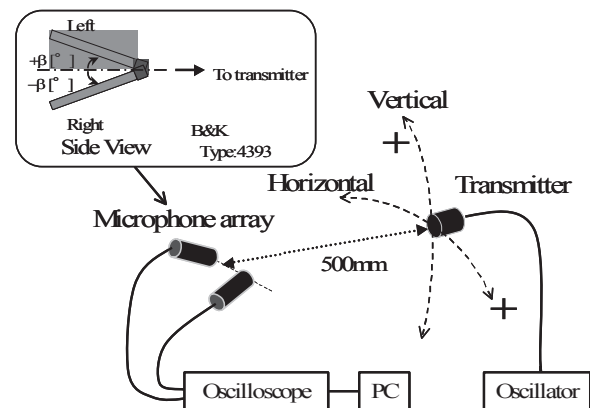


Fig. 3. Schematic diagram of measurement system for IID and PIID.

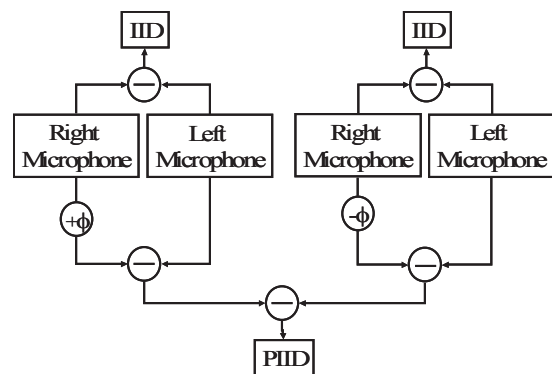


Fig. 4. Schematic diagram of proposed sound localization model.

#### 3.2 結果と考察

受波器の傾き  $\beta$  を  $30^\circ$  としたときの IID の測定結果と理論計算結果を Fig.5(a)に示す. また, 受波器の間隔  $d$  を 10mm ( $d/\lambda=1.0$ ), 位相差  $\phi$  を  $\pi/2$  としたときの PIID の測定結果と理論計算結果を Fig.5(b)に示す.

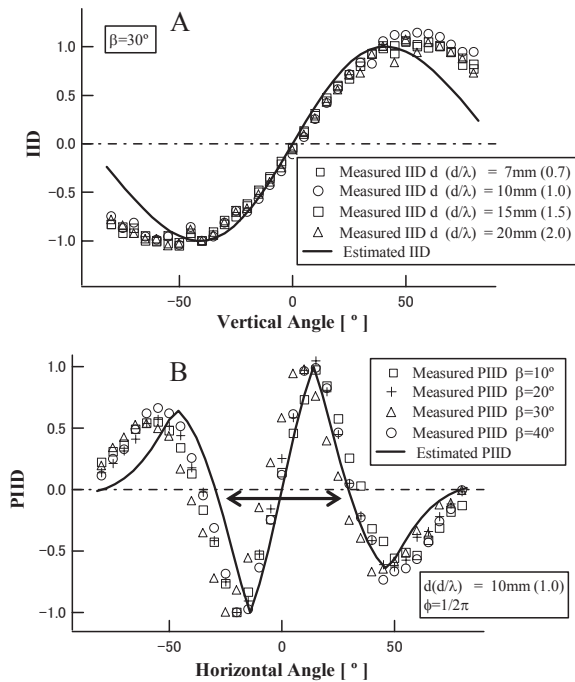


Fig. 5. Changes in IID (a) and PIID (b) as a function of the target (transducer) angle.

### 3.2.1 IID, PIID を用いた定位手法の提案

Fig.5 から IID, PIID とともに理論計算値と実測値が、ほぼ一致することがわかる。このことから、受波器の傾き $\beta$ , 受波器の間隔  $d(d/\lambda)$ , 位相差  $\phi$  を変化させることで、任意の IID, PIID を得ることができると考えられる。また Fig.5(a)では、IID の正負から標的の垂直方向の位置(水平面より上または下)が決定できることがわかる。ここで、Fig.5(b)において PIID は値が 0 となる点(零点)が複数存在することから、図中の矢印で示す有効範囲内に標的が存在する場合にのみ、正負の判別による音源定位を行うことができる。このように有効範囲を決めることで、PIID も正負から標的の水平方向の位置(正中面より左または右)が決定できることがわかる。さらに有効範囲内では、標的が正面に存在する場合にのみ IID = PIID = 0 が成立することがわかる。このことから、IID 並びに PIID の値を常に 0 となるように受波器の向きを制御することで、常に標的を正面に捉えることが可能であると考えられる。以上のことから有効範囲を決めることで、IID, PIID とともに値の正負判別で標的方向を判定することができると考えられる。

### 3.2.2 音源定位実験

つぎに、受波器の前方空間における標的の定位実験を行い、正負の判定により標的の方向判別が可能な領

域(有効範囲)を確認した。

実験では、Fig.3 において耳介の動きを模擬するにあたり、受波器の傾き $\beta$ を  $30^\circ$  とした。また、耳介の移動量がコウモリの発する超音波パルスの波長よりも小さい<sup>4)</sup>ことから位相差 $\phi$ を  $1/2\pi$  とした。さらに、耳介の交互の動きを行う際、コウモリは両耳介を中央に寄せる。この動作によって、両耳間の距離は 1~2 波長程度になると考えられる。そこで、受波器の間隔  $d(d/\lambda)$  を 10mm (1.0) とした。送波器はマイクロホンアレイの正面 500 mm の位置に対向させ、格子状に  $10^\circ$  ずつ  $-80^\circ$  から  $80^\circ$  まで水平、垂直に移動させた。水平 17 点×垂直 17 点の全 289 点の標的(送波器)位置で IID, PIID を測定し、その値の正負から標的(送波器)の左右または上下の判別が可能な領域(有効範囲)を確認した。

IID および PIID の測定結果を Fig.6 に示す。Fig.6(a) から、IID のピーク値は標的の水平方位が  $80^\circ$  に近づくにつれて減少することがわかる。このことから、標的の水平方位が増加すると IID を使用した標的の垂直方位の定位が難しくなると考えられる。また、Fig.6(b) から、PIID のピーク値は標的の垂直方位が変化しても大きく変化しないことがわかる。このことから、PIID を使用することで標的の垂直方位に依存することなく標的の水平方位を定位することができると考えられる。しかし、PIID には有効範囲(水平方位角が  $\pm 30^\circ$ )があるため、標的の水平方位が大きくなると標的の定位が難しくなる。また、IID, PIID の測定結果から正負判別を行い、標的の方位が判定可能であった範囲を Fig.7 の斜線部で示す。Fig.7(a)から、IID を使用することで、ほとんどの標的位置で標的の垂直方位を判別することができた。しかし、標的の水平方位が大きくなると標的の垂直方位を判別することが難しくなることがわかる(図中の斜線部以外)。また、Fig.7(b)から PIID を使用した場合には、標的の垂直方位に依存することなく水平方位が  $\pm 30^\circ$  の有効範囲内で標的の水平方位を判別することができた。以上のことから、実際に IID, PIID を使用して標的を正面に捉えるためには、IID, PIID による定位が有効な範囲をうまく利用した音源定位手順が必要であると考えられる。

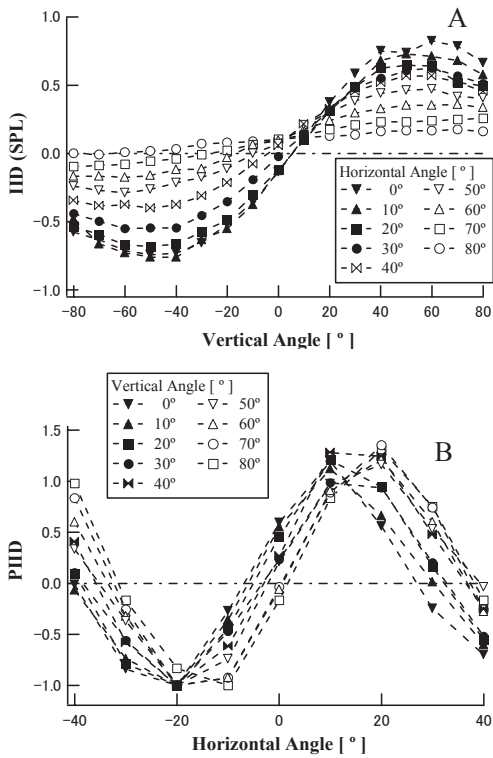


Fig. 6. Measured IID (a) and PIID (b).

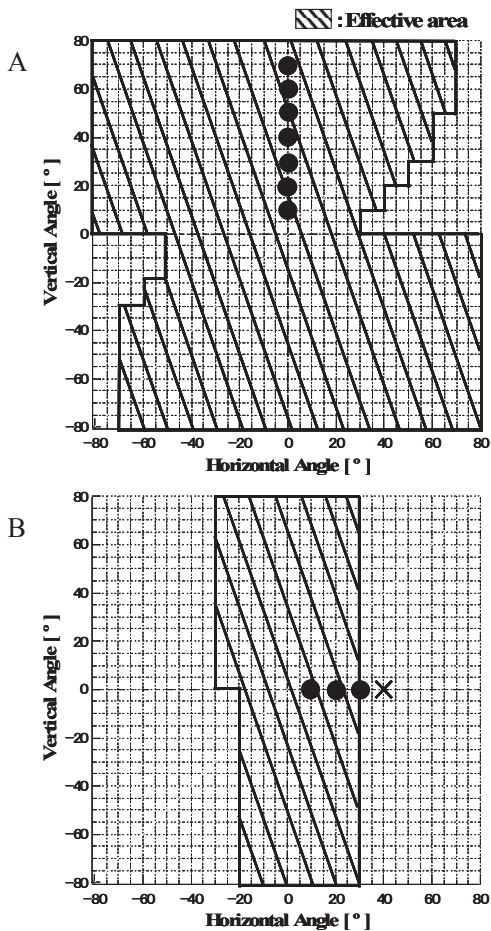


Fig. 7. Effective areas of sound localization by using IID (a) and PIID (b).

## 4. 実験2

実験1において、音源定位の手がかりとして提案した IID, PIID の正負判別により標的の方向が判定可能であることがわかった。また, IID, PIID の値を 0 となるように受波器の向きを制御することで, 常に標的を正面に捉えることが可能であると考えられる。そこで本実験では, ステッピングモータを使用し, マイクロホンアレイ(受波器)を標的方向に向ける実験を行い, 提案した音源定位手法による標的の追尾が可能であるかどうかを検討した。

### 4.1 実験方法

実験系を Fig.8 に示す。実験では 2 つのマイクロホン (B&K Type:4939) を間隔  $d = 10\text{mm}$  ( $d/\lambda = 1.0$ ) で水平に配置したマイクロホンアレイを用いた。それぞれのマイクロホンには上下方向に傾き  $\beta = 30^\circ$  を設けた。また, 付加する位相差を  $\pi/2$  とした。マイクロホンアレイはステッピングモータに固定し, 水平方向に回転させた。本実験では一回の回転量を  $10^\circ$  (モータの最小回転量が  $0.9^\circ$  のため実際には  $9^\circ$ ) とした。また, ステッピングモータは回転軸が一軸のため, マイクロホンアレイの固定方法を変化させ IID, PIID を個別に測定した。送波器はマイクロホンアレイの正面 500 mm の位置に対向させ, IID では  $10^\circ$  から  $70^\circ$  までの 7 点, PIID では  $10^\circ$  から  $40^\circ$  までの 4 点の標的(送波器)位置に移動させた。各々の標的位置で, 標的方向に受波器(マイクロホンアレイ)を向ける標的の定位を 5 回ずつ行った。なお, 標的の定位に成功したかどうかは標的の方位と受波器の総回転量の誤差が  $\pm 9^\circ$  の範囲に収まっているかどうかで判断した。

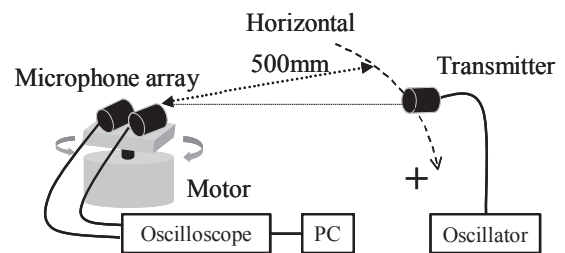


Fig. 8. Schematic diagram of measurement system for sound localization.

## 4.2 結果と考察

IID および PIID を使用して標的(送波器)の定位に成功した確率を Fig.9 に示す. また, Fig.7 に標的の定位が可能であった方位を●で, 標的の定位ができなかった方位を×で示す. Fig.7(a), 9(a)から, IID を使用することで, 簡単に標的の方向に受波器を向けることができた. また, Fig.7(b), 9(b)から有効範囲(水平方位角が $\pm 30^\circ$ )で PIID を使用して簡単に標的の方向に受波器を向けることができた. 以上のことから, 本実験のような簡単なシステムでも IID, PIID を使用することで有効範囲内の標的の追尾を簡単に行うことができることがわかった.

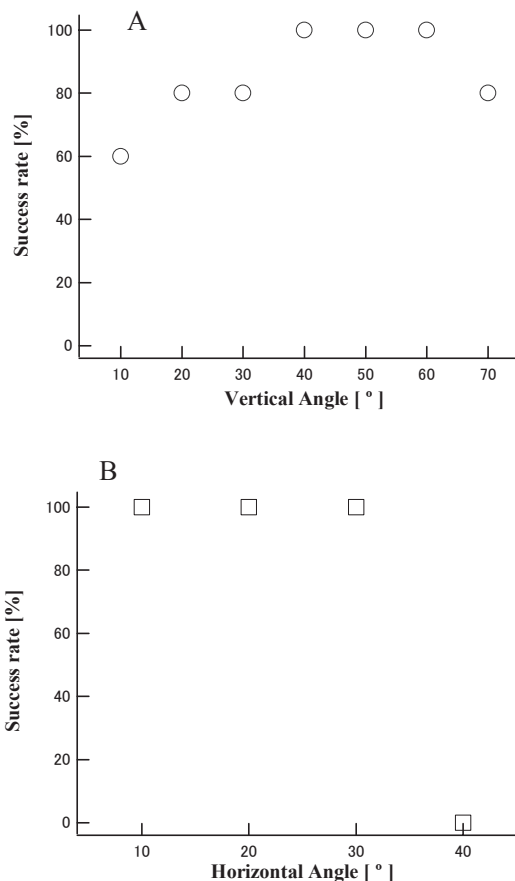


Fig. 9. Success rate of sound localization by using IID (a) and PIID (b).

## 5. コウモリの行動と定位手法

静止した CF-FM コウモリ(テラソカグラコウモリ)に振り子(標的)を接近させた<sup>4)</sup>とき, コウモリは耳介を規則的に動かす. そこで, このコウモリの耳介の動きを

詳しく観察した. 観察の結果, 以下の2つの動作をコウモリが繰り返し行っていることが確認できた.

- ① 標的(振り子)を発見(注目)するまでは, 左右の耳介を独立に水平方向に動かす. また, この水平方向の耳介の動きによって標的を発見すると, 標的の方向に顔を向ける動作を行う.
- ② ①の動作ののち, コウモリは上下方向の規則的な耳介の動きを開始する. このときも水平方向の耳介の動きと同様に標的の方向に顔を向ける動作を行う. さらに, 上下方向の規則的な耳介の動きを行っているときに, 標的(振り子)が自分を通過する(標的を見失う)と①の動作を再開する.

このことから, CF-FM コウモリは耳介の水平方向の動き(①の動作)によって標的を発見し, 標的を大まかに正中面に捉え, その後, 上下方向の規則的な耳介の動き(②の動作)によって標的を正面に捉えているものと考えられる. CF-FM コウモリも他の哺乳類同様に①のような水平方向の耳介の動きによって, IID を水平方向に使用しているものと考えられる. さらに, ②のような上下方向の規則的な耳介の動きによって, IID を垂直方向にも使用し, 標的を正面に捉えていると考えられる. また, このときコウモリはPIIDを用いて, 標的を正中面に維持していると考えられる. このようにCF-FM コウモリは柔軟に耳介の動きを変化させ, 標的の定位手法を切り替えていると考えられる.

以上のことから, 提案した音源定位モデルを有効に利用するためには, 今後CF-FM コウモリが行っているような定位手法の工夫(情報の切り替え方)が重要になると考えられる. また, CF-FM コウモリ(テラソカグラコウモリ)の使用する超音波パルスはパルス長が4~10msと長いため, 規則的な耳介の動きによってエコーには音圧の変化以外にも多くの複雑な変化(たとえば周波数のドップラーシフトなど)が起こると考えられる. 今後は, これらの変化や定位手法の工夫をモデルに加えていきたい.

## 6. まとめ

本報告では, テラソカグラコウモリ(CF-FM コウモリ)の耳介の動きに基づいた音源定位モデルの提案を行った. 提案した音源定位モデルでは, 垂直方向の手

がかりとして IID を、また、水平方向の手がかりとして PIID を使用した。

2 素子のマイクロホンアレイ(受波器)を用いて IID, PIID を測定し、標的の定位実験を行った。結果、IID および PIID の測定値のプロファイルは、理論計算値とほぼ一致し、測定値の正負判別から標的の方向(上下または左右)の判定が可能であった。また、IID, PIID を使用して標的(送波器)の追尾実験を行った結果、有効範囲内の標的の追尾が可能であった。以上のことから、提案した音源定位モデルは標的の音源定位に利用できる。

本研究の一部は文部科学省知的クラスター創成事業、新技術開発ならびに学術フロンティアの一環として行った。ここに記して謝意を表する。

### 参考文献

- 1) H. Schneider, and F. P. Möhres, "Die ohrbewegungen der hufeisenfledermause (Chiroptera, Rhinolophidae) und ear mechanismues des bildhorens," Z. vergl. Physiol., **44**, 1-40 (1960).
- 2) D. R. Griffin, D. C. Dunning, D. A. Cahlander, and R. A. Webster, "Correlated orientation sounds and ear movements of horseshoe bats," Nature, **196**, 1185-1186 (1962).
- 3) J. D. Pye, and L. H. Roberts, "Ear movements in a hipposiderid bat," Nature, **225**, 285-286 (1970).
- 4) 萩野智生, 飛龍志津子, 桂幸司, 津田守, 力丸裕, 渡辺好章 "生体超音波による環境把握(2)—耳介の動きとパルス放射タイミングの関係—," 日本音学会春季研究発表大会講演論文集, 505-506 (2005).
- 5) K. Roman, "Sensorimotor model of bat ecolocation and prey capture," J. Acoust. Soc. Am., **96**, 1965-1978 (1994).
- 6) 飛龍志津子, 森仲雅一, 萩野智生, 力丸裕, 渡辺好章 "耳介の積極的な動きによるエコーロケーション(1)" 日本音響学会春季研究発表大会講演論文集, 457-458 (2006).
- 7) 森仲雅一, 飛龍志津子, 萩野智生, 力丸裕, 渡辺好章 "耳介の積極的な動きによるエコーロケーション(2)—マイクロホンを用いた模擬実験—," 日本音響学会春季研究発表大会講演論文集, 459-450 (2006).
- 8) 森仲雅一, 飛龍志津子, 萩野智生, 力丸裕, 渡辺好章 "耳介の積極的な動きによる CF-FM コウモリのエコーロケーション—マイクロホンを用いた模擬実験—," 海洋音響学会研究発表大会講演論文集, 51-52 (2006).