

# カエルの鳴き声の音量計測による

## カエルの個体数の推定方法

川崎医科大学 物理学教室

國末 浩・虫明 基・近藤 芳朗・高田 和郎

(昭和54年10月1日受理)

On Acoustical Methods for the Estimation  
of the Number of Frogs

**Hiroshi KUNISUE, Motoi MUSHIAKI,  
Yoshiro KONDO and Kazuo TAKATA**

*Department of Physics, Kawasaki Medical School,  
Kurashiki 701-01, Japan*

(Received on Oct. 1, 1979)

### 概 要

鳴いているカエルの音量を測定することにより、その小区域に生息するカエルの数を測定するシステムを考案した。このシステムの実用化可能性を確認するために、生物学的な因子、物理学的な因子、計測学的な因子について理論的及び実験的検討を行なった。理論的に得られたところの「音圧レベルは音源の個数の平方根に比例する」という結果は、カエルの再生音の個数と音圧レベルの関係を求める実験により正しいことが確かめられた。

これらより概数の測定に対してはこのシステムが充分実用に供し得ることを示した。

### Abstracts

A system was devised with which we may estimate the approximate number of frogs by analyzing the sound pressure level recorded at the place where frogs were croaking. In order to make this system utilizable, several factors which may give rise to any effects to the composition of the system were listed and discussed in theoretical and experimental manners. Under the assumption of the uniform distribution of frogs croaking, the fact that the sound pressure level is proportional to the square root of the density of frogs was indicated not only theoretically but also experimentally.

Our system showed its considerable reliability to the practical use.

### §1. 緒 言

自然環境の変化により、自然界に生息する生物はその盛衰を大きく左右される。すなわち、大気汚染、水質汚濁、開発による緑地の減少などにより生物の個体数は直接的に影響を受け、また間接的にもある生物の個体数が減少すればそれを食糧としている他の生物の個体数も減少するということで影響をこうむる。したがって、ある生物のある地域における総個体数がどの

程度であるかを推測することができれば、その地域の自然環境の状態を推測したり、その地域に生息する他の生物の分布を推測したりする場合の手掛りの一つにすることができる。このようなことから、種々の生物の分布の現状を大まかにでも早急に把握しておくことが強く望まれる。

生物の個体数を推定する具体的な例として、ノウサギなどのような生物については足跡の数から数密度を推定する方法<sup>1)</sup>、鳥類では計数者がある時間帯に徒歩で通過した領域で計数した値から全個体数を推定する方法<sup>2)</sup>、魚類では標識をつけて放流した尾数と漁獲された全尾数およびそれに含まれる標識個体数から全個体数を推定する法<sup>3)</sup>、などがあげられる。

カエルについては具体的な推定方法が確立されていないのが現状である。

ある小区域に生息しているカエルの個体数を測定するための方法として次の二つが考えられる。

- a. ある小区域にいる全個体を捕獲する。
- b. ある小区域にいるカエルの鳴き声の音量を測る。

a. の場合はカエルを直接捕獲するのであるから b. の場合に比べて精度の高い測定が可能である。しかし、これには多大な労力を必要とするので多数回の測定には適さない。また、地形や環境等により測定が困難な場合もある。これに対して b. の場合は a. の場合に比べて精度は劣るが、測定器さえあれば地形や環境にあまり影響されることなくカエルの鳴き声を録音して持ち帰り、音量の分析を行なうことができる。したがって、カエルの鳴く一定時期に広範囲な地域で数多くの測定記録を容易に得ることができる。

そこで我々は b. の方法によりカエルの個体数を測定する一つのシステムを考案した。

本論文においては、このシステムを構成する際に影響を与えると考えられる生物学的な因子、物理学的な因子および計測学的な因子について理論的・実験的検討を行なったので、その結果を報告する。

## §2. 測 定 系

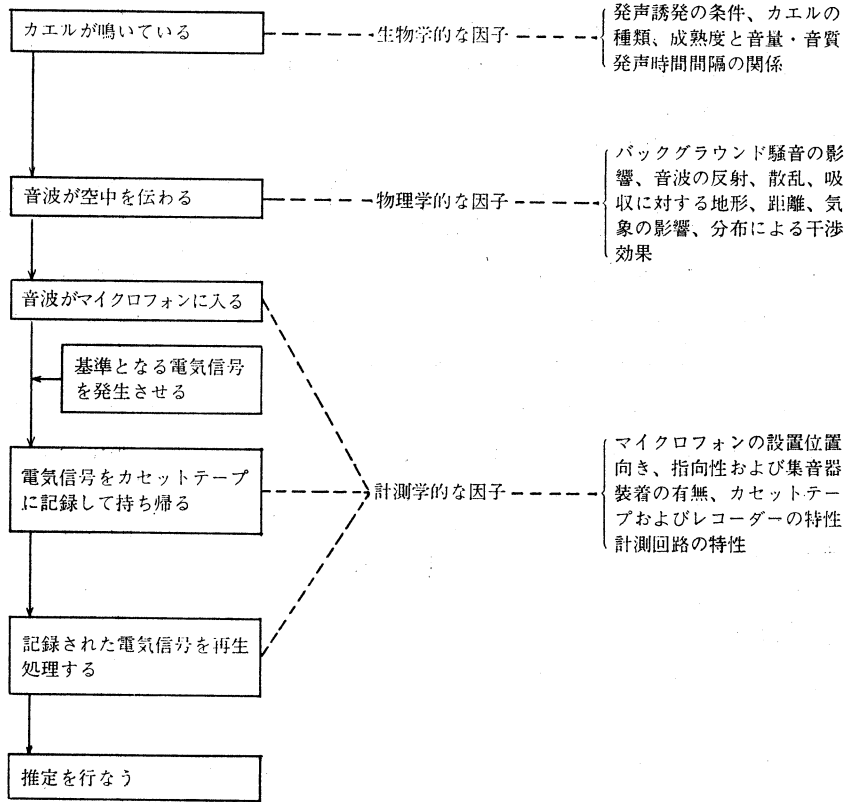
この測定系の測定原理は、カエルが一様な分布で存在する自然環境のもとで鳴いているカエルの声を音源と考え、マイクロフォンで音波が媒質である空气中を伝播してくるその強度をとらえ録音する。録音したものを再生し、電気信号に変換された強度を処理回路で時間平均する。得られた平均値を個体数の正確に知れた強度の時間平均値と比較することにより、カエルの数を推定する。これが考える測定系である。計測に影響を与えると考えられる因子をフローチャートとともに示すと表1のようになる。

## §3. 理 論 的 検 討

この節では表1に記述した因子の中で、生物学的因子については推定に必要なと考えられる解決法を検討する。物理学的な因子については、音波の媒質による吸収、環境による反射について検討し、カエルの分布による干渉効果を計測学的な因子であるマイクロフォンの指向性、設

置位置を考慮して検討する。

表1 測定系と種々の因子



## 1. 生物学的な因子

鳴いているカエルは雄であるから、小区域内にいるカエルの種類による雌雄の比率の平均値を知る必要がある。また、カエルの種類により頻繁に鳴く時期が異なるのでその時期も知ることが必要である。カエルの成熟度が原因となって鳴かないものも含まれていると考えられるので、それらの比率も知っておく必要がある。数種類のカエルが混在している場合、測定対象とすべきカエルの鳴き声を識別するためには、あらかじめカエルの種類による鳴き声の音質周波数分析を行なっておけばよい。

## 2. 物理学的な因子

(1) 音波の吸収 空気中を伝搬する音波の吸収については吸収率を  $r$  としたとき

$$r = \frac{\omega^2}{2\rho v^3} \left[ \left( \frac{4}{3}\eta + \xi \right) + n \left( \frac{1}{C_p} - \frac{1}{C_v} \right) \right] \quad (1)$$

で与えられる<sup>4)</sup>。ただし、 $\omega$  は音波の角周波数、 $\rho$  は媒質の密度、 $v$  は媒質中の音速、 $\eta$  は媒質の粘性率、 $\xi$  は第2粘性率、 $C_p$  は定圧比熱、 $C_v$  は定積比熱、 $n$  は熱伝導率である。20°Cの空気の場合  $\eta = \xi$  として、周波数を  $f$  とすれば  $r = 2 \times 10^{-13} f^2 [1/\text{cm}]$  で与えられる関係式

が得られ、 $f=10^3\text{Hz}$  のときの吸収率は  $r=2 \times 10^{-7}[1/\text{cm}]=0.02[1/\text{km}]$  程度である。したがって、近くの音源を考える場合、吸収による影響は無視できる。

(2) 音波の反射 カエルが多くいると考えられる水辺で、音波が水面に反射する場合について考えてみる。この場合は異なる媒質界面での音波のエネルギーの反射に対する関係式を用いることにする。第2媒質に対する第1媒質への音波の反射率  $t_r$  は

$$t_r = \frac{I_r}{I_i} = \left( \frac{z_1 \cos r - z_2 \cos i}{z_1 \cos r + z_2 \cos i} \right)^2 \quad (2)$$

で与えられる<sup>5)</sup>。ただし、 $I_i$  は入射波の強さ、 $I_r$  は反射波の強さ、 $i$  は入射角、 $r$  は屈折角、 $z_1$  および  $z_2$  はそれぞれ第1および第2媒質の音響インピーダンスである。 $\rho_j, v_j$  ( $j=1, 2$ ) をそれぞれ媒質の密度、媒質中の音速とすれば  $z_j = \rho_j v_j$  であるから、第1媒質を空気、第2媒質を水とすれば  $z_1 = 4.3 \times 10^2 \text{N}\cdot\text{s}/\text{m}^3$ 、 $z_2 = 1.5 \times 10^6 \text{N}\cdot\text{s}/\text{m}^3$ 、一番反射しにくい垂直入射の場合で  $t_r = 0.999$  であるから、水面では完全に反射するとして扱えばよい。

(3) カエルの分布による音波の干渉効果 マイクロフォンはその指向性の違いにより、無指向性、双指向性、単一指向性の3種に分けられる。マイクロフォンの法線に対する音波の入射角を  $\theta$  とすれば指向因子  $f(\theta)$  は

$$\left. \begin{aligned} \text{無指向性} : f(\theta) &= 1 \\ \text{双指向性} : f(\theta) &= \cos \theta \\ \text{単一指向性} : f(\theta) &= (1 + \cos \theta)/2 \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

で表わされる。

ここで、2つの仮定

仮定1：カエルは点音源であって、その発声する音波は球面波である。

仮定2：カエルは反射率0（即ち吸収率100%）の平面に存在する。

にもとづいて鳴いているカエルの個体数とマイクロフォンに入る音圧の関係を求めてみる。

図1のように、無指向性のマイクロフォンを原点の真上  $h$  の場所に置き、時刻  $t$  における  $i$  番目のカエルの発声する音の音圧を  $P_i(t)$  とすれば、 $i$  番目のカエルの発声した音波のマイクロフォンに達したときの音圧  $P_i^*$  は仮定1, 2によって

$$P_i^*(t) = \frac{1}{r_i} P_i \left( t - \frac{r_i}{v} \right) \quad (4)$$

となる<sup>5)</sup>。ただし、 $r_i$  は  $i$  番目のカエルとマイクロフォンの距離、 $v$  は音速である。

したがって、圧力マイクロフォンに入るカエル全部の音圧  $P(t)$  は

$$P(t) = \sum_i P_i^*(t) = \sum_i \frac{1}{r_i} P_i \left( t - \frac{r_i}{v} \right) \quad (5)$$

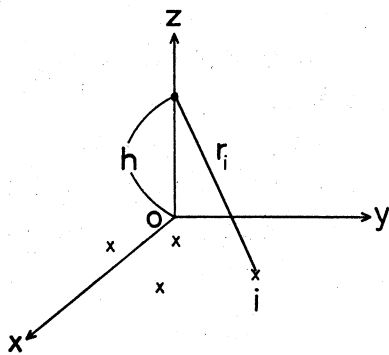


図 1

となる。カエルの種類を  $l$  の記号で表わすとすれば、種類  $l$  のカエルについてはフーリエ変換によって上記の各音圧は

$$P_{li}(t) = \int P_l(\omega) e^{j\omega t + j\alpha_i \omega} d\omega \quad (6)$$

$$\begin{aligned} P_{li}\left(t - \frac{r_i}{v}\right) &= \int P_l(\omega) e^{j\omega\left(t - \frac{r_i}{v}\right) + j\alpha_i \omega} d\omega \\ &= \int P_l(\omega) e^{j\omega t + j\alpha_i^* \omega} d\omega \end{aligned} \quad (7)$$

$$\left( \because \alpha_i^* = \alpha_i - \frac{r_i}{v} \omega \right)$$

$$P(t) = \sum_l \sum_i^{N_l} \int P_l(\omega) e^{j\omega t} \cdot \frac{e^{j\alpha_i^* \omega}}{r_i} d\omega \quad (8)$$

と表わすことができる。ここで

$$\sum_{i=1}^{N_l} \frac{e^{j\alpha_i^* \omega}}{r_i} = A_l + B_l \cdot j = \sqrt{A_l^2 + B_l^2} e^{j\beta_l} = I_l e^{j\beta_l} \quad (9)$$

ただし

$$A_l = \sum_i \frac{\cos \alpha_i^*}{r_i}, \quad B_l = \sum_i \frac{\sin \alpha_i^*}{r_i}, \quad \cos \beta_l = \frac{A_l}{\sqrt{A_l^2 + B_l^2}}, \quad \sin \beta_l = \frac{B_l}{\sqrt{A_l^2 + B_l^2}}$$

とすれば

$$I_l^2 = \sum_i \frac{1}{r_i^2} + \sum_{i \neq i'} \frac{1}{r_i r_{i'}} \cos(\alpha_i^* - \alpha_{i'}^*) \quad (10)$$

となり、マイクロフォンからの距離の大体等しいところにカエルが多数いるとすれば

$$\begin{aligned} \sum_{i \neq i'} \frac{1}{r_i r_{i'}} \cos(\alpha_i - \alpha_{i'}^*) &= \sum_r \left\{ \sum_{r' < r', r'' < r + dr} \frac{\cos(\alpha_{r'} - \alpha_{r''})}{r^2} \right\} \\ &= \sum_r \frac{1}{r^2} \sum_{\alpha \alpha'} \cos(\alpha - \alpha') \approx 0 \end{aligned}$$

であるから

$$I_l^2 \approx \sum_i \frac{1}{r_i^2} \quad (11)$$

と表わされ、この  $I_l$  を用いて(8)式は

$$P(t) = \sum_l I_l e^{j\beta_l} \int P_l(\omega) e^{j\omega t} d\omega \quad (12)$$

と書き表わされる。

いま、カエルの数密度を  $n_l$  とし、図2のように半径  $R$  の円平面内でカエルが鳴いている場合について  $I_l^2$  を評価してみると

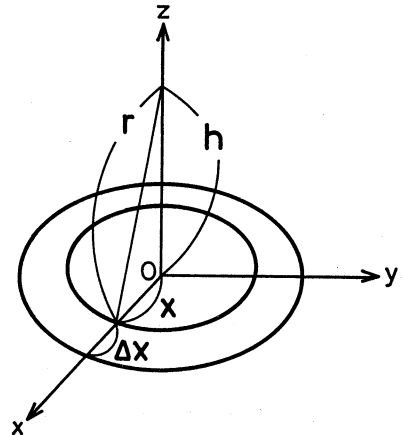


図 2

$$I_i^2 = \sum_i \frac{N_i}{r_i^2} = \sum_r \frac{1}{r^2} 2\pi x n_i dx = \int_0^R \frac{2\pi n_i x}{r^2} dx$$

$$= 2\pi n_i \log \frac{\sqrt{R^2 + h^2}}{h} \quad (13)$$

を得る。

これらのことから、半径  $R$  の円平面内に一様な数密度  $n_i$  で存在するカエルの鳴き声が円平面の中心から高さ  $h$  に置かれた無指向性マイクロフォンに入る場合の音圧  $P(t)$  は

$$P(t) = \sum_i k(R) \sqrt{n_i} \int P_i(\omega) e^{i(\omega t + \beta_i)} d\omega$$

ただし

$$k(R) = [2\pi \log \sqrt{1 + (R/h)^2}]^{1/2} \quad (14)$$

で与えられる。

指向性のあるマイクロフォンについても  $I_i^2$  が同じ条件で次のようになる。

$$\text{双指向性の場合} \quad I_i^2 = \sum_i \frac{f(\theta_i)^2}{r_i^2} = \pi n \left(1 - \frac{h^2}{R^2 + h^2}\right) \quad (15)$$

$$\text{単一指向性の場合} \quad I_i^2 = \sum_i \frac{f(\theta_i)^2}{r_i^2}$$

$$= \frac{\pi n}{2} \left\{ \log h + \frac{5}{2} - \frac{1}{2} \log(R^2 + h^2) - \frac{2h}{\sqrt{R^2 + h^2}} - \frac{1}{2} \frac{h^2}{R^2 + h^2} \right\} \quad (16)$$

したがって、いずれの場合も  $P(t) \propto \sqrt{n_i}$  が得られる。 $k(R)$  に相当する項は  $h$  と  $R$  を定めることにより決定することができる。 $R$  の値は集音器を用いれば大体決定することができる。

### 3. 計測学的な因子

マイクロフォンに入った音圧を電気信号に変換してカセットテープレコーダーを用いてカセットテープに記録し、記録したデータを再生し、それをもとにして解析を行なう。したがって、このシステムの中で、カセットテープレコーダーによる因子の占める割合は大である。使用するカセットテープレコーダーの入出力特性および周波数特性などの性能を充分考慮しなければならない。また、目的とする計測に対して誤差をなるべく少なくするように信号増幅器、積分回路、比較回路および計数器回路部分の定数および可変範囲を定める必要がある。

## §4. 実験的検討

前項の理論的検討の中で述べた因子のうち実験的にチェックできる因子として、カエルの鳴き声の周波数分析、マイクロフォンの指向性の測定、カセットテープレコーダーの特性の測定、計数回路の構成と回路定数の設定および音源の個数と音圧レベルの関係について実験的検討を行なった。

### 1. カエルの鳴き声の周波数分析

数種類のカエルの鳴き声について、可聴周波数帯での周波数分布を知るために測定を行なっ

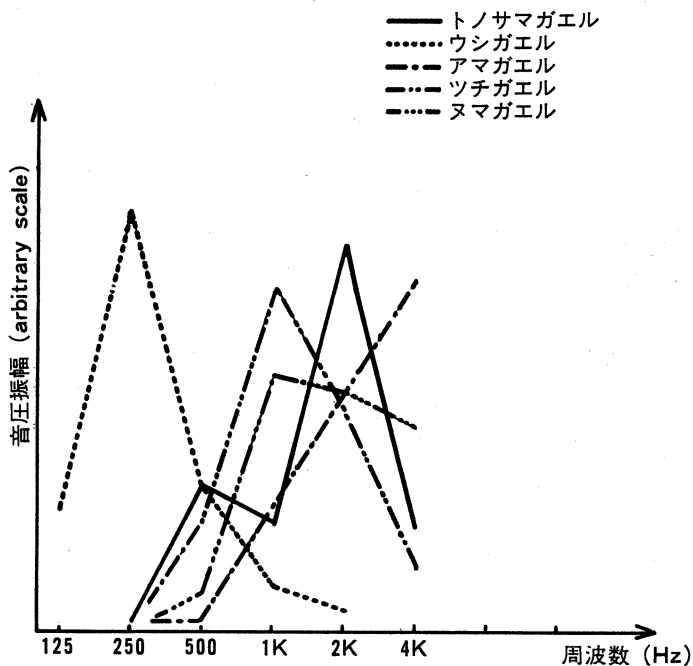


図 3

音源周波数 500Hz

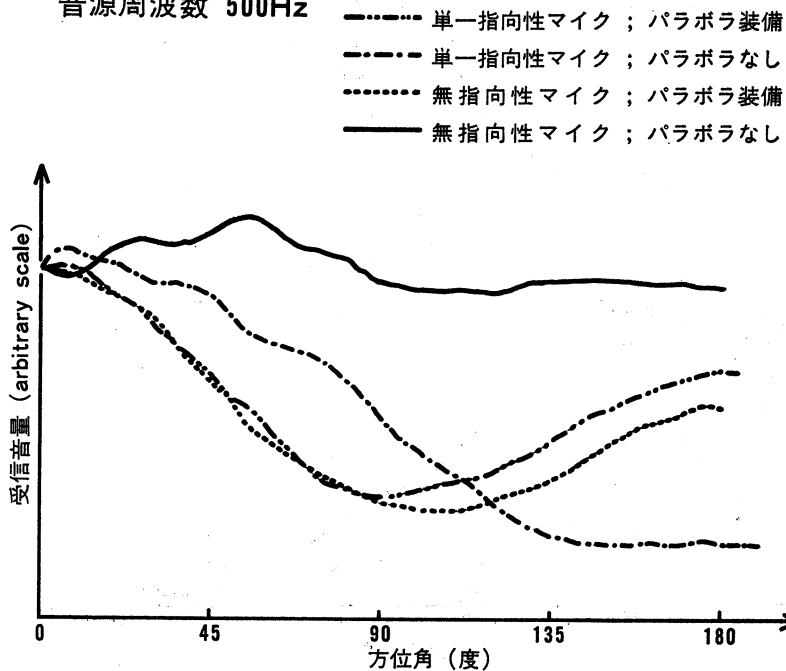


図 4

音源周波数 1KHz

- 単一指向性マイク ; パラボラ装備
- - - - 単一指向性マイク ; パラボラなし
- ..... 無指向性マイク ; パラボラ装備
- 無指向性マイク ; パラボラなし

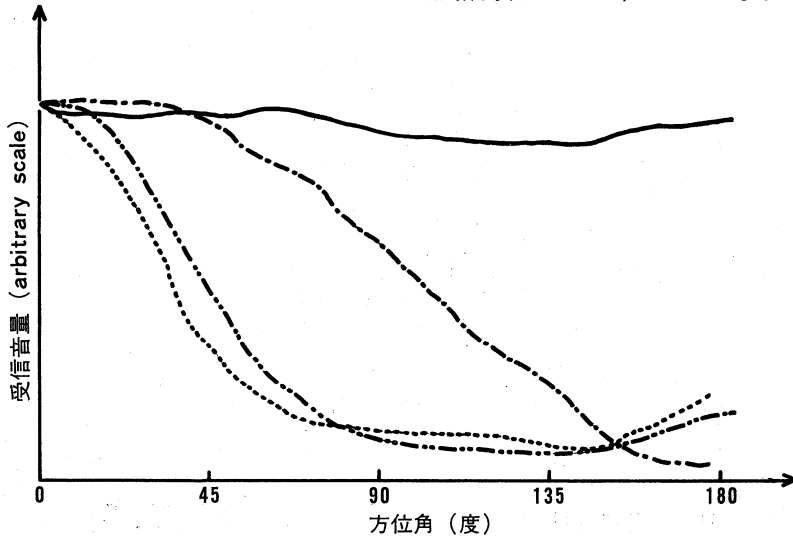


図 5

音源周波数 2KHz

- 単一指向性 ; パラボラ装備
- - - - 単一指向性 ; パラボラなし
- ..... 無指向性 ; パラボラ装備
- 無指向性 ; パラボラなし

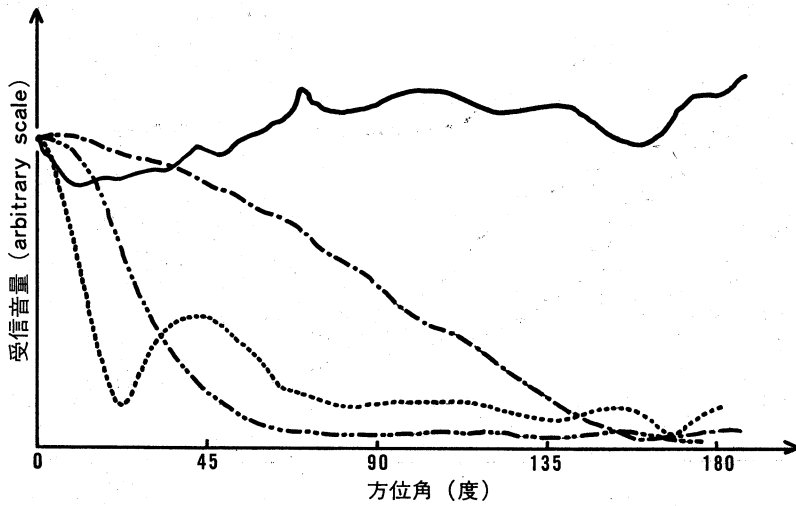


図 6



た。音源としては録音されたカエルの鳴き声<sup>6)</sup>を用い、再生された電気波形出力の周波数分析を行なった。得られた各周波数帯域における分布を図3に示した。

## 2. マイクロフォンの指向性の測定

集音範囲を定める目安として 500Hz～2 KHz の帯域でマイクロフォンの指向特性を測定した。音源とマイクロフォンの距離は 5 m に保ち、単一指向性と無指向性のマイクロフォンの特性をパラボラ集音器を装着した場合と装着しない場合について測定した。測定を行なった周囲環境は戸外の芝生上斜面で、測定時、測定場所での暗騒音は 61 ホンであった。音源としては周波数 500Hz, 1 KHz, 2 KHz の正弦波状のものを用い、音源の強さは 5 m の距離で、それぞれの周波数について 67.0 ホン, 77.0 ホン, 74.5 ホンであり、これらは測定中一定の値に保たれた。測定結果を図4, 図5, 図6に示した。

## 3. カセットテープレコーダーの特性の測定

カエルの鳴き声を録音または再生する場合、分析に必要と考えられる周波数範囲 (500Hz～3 KHz) でマイク入力端子、ライン出力端子系の周波数特性は平坦であった。また、入力が 50  $\mu\text{V}$ ～0.7mV の範囲では入出力間の直線性も保たれており、入力電圧を一定にしたとき出力電圧はほぼ一定であり、その変動は 3% 以下であった。

## 4. 計数回路の構成と回路変数

作製した計数回路は図7のような構成であり、各部分の回路定数および特徴は次のようである。

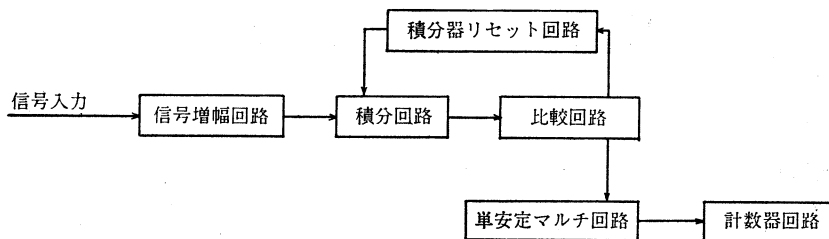


図7 計数回路図

(1) 信号増幅回路 リニア集積回路  $\mu\text{PC} 156\text{A}$  を使用し、零点調節可変範囲は大体  $\pm 40\text{mV}$  で、増幅度は 104 倍である。

(2) 積分回路 リニア集積回路  $\mu\text{PC} 156\text{A}$  を用い、零点調節可変範囲は大体  $\pm 80\text{mV}$  であり、信号増幅回路の入力をアースした時の積分回路での出力変動  $|dV/dt|$  は  $3.7\text{mV/s}$  であった。

(3) 比較回路 リニア集積回路  $\mu\text{PC} 379\text{A}$  を用いた。出力電圧は  $\pm 14.0\text{V}$  で、パルス幅が  $17\text{ms}$  の矩形パルスである。

(4) 計数器回路 計数器の不感時間は  $200\text{ms}$  であるので、誤動作を避けるために最小計数周期を  $2.0\text{s}$  に設定した。このときの信号入力電圧は  $100\text{mV}$  であった。

### 5. 音源の個数と音圧レベルの関係

2個の等しい音源の一方の位相をずらせて和をとることにより合成した電気信号と、もとの1個の音源による電気信号とについて両者の信号レベルを比較するために計数測定を行なった。そのために、トノサマガエルの鳴き声のテープ信号を種類が同じ2個のカセットテープに録音し、これらを音源(信号源)とした。カセットテープレコーダーのライン出力信号は加算

#### 音源の個数による音圧レベルの波形の変動

##### (a) 音源が1個の場合

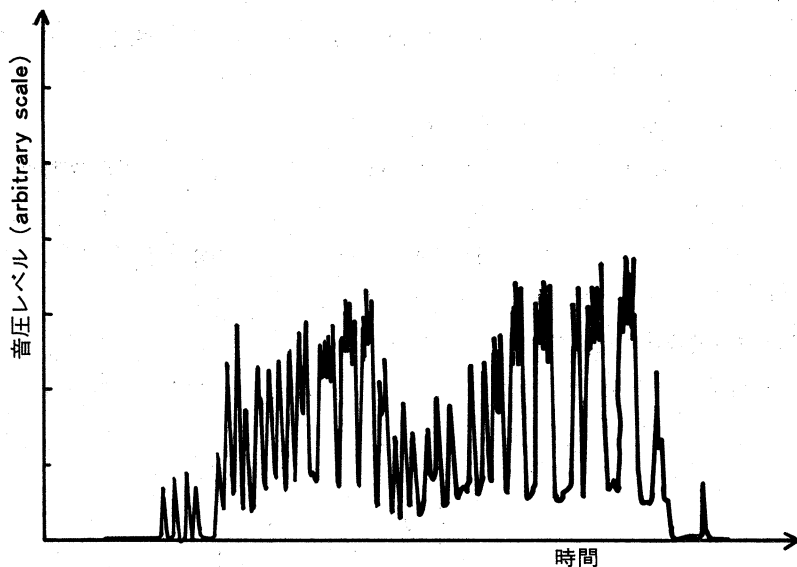


図8 (a)

器を経て周波数分析計に通し、それからの出力信号はACミリボルト計に入れられた。ACミリボルト計のDC出力信号はX-Yレコーダーにより波形が記録され、計数回路により計数値が測定された。得られた波形のグラフの一部と計数値をそれぞれ図8と表2に示した。

### §5. 結 論

カエルの鳴き声の音量の測定値からカエルの個体数の概数を推定するために影響を与えると考えられる因子について理論的、実験的検討を行なった結果、主要要因となるものについて総括する。

表2 計数値の音源の個数による比較

測定回数	カエル一匹の場合の計数値 (カウント/20分)	カエル二匹の場合の計数値 (カウント/20分)
1	499	832
2	493	686
3	489	778
4	494	780
5	491	783
6	454	760
7	444	749
8	442	761
9	445	746
10	446	737
平均値	470	761

音源の個数による音圧レベル波形の変動  
(b) 音源が2個の場合

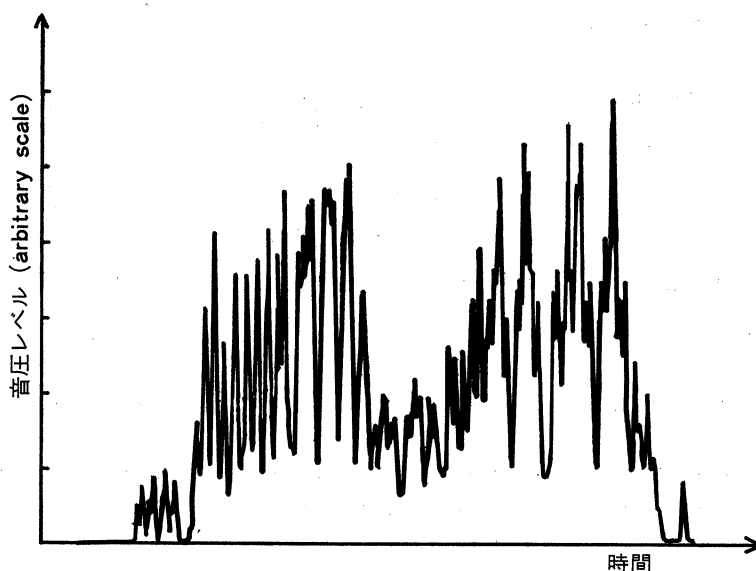


図8 (b)

<生物学的な因子>

カエルの鳴き声の周波数分析の結果、カエルの種類を特徴づける周波数分布が得られた。トノサマガエルについては2KHzあたりに山があり、ウシガエルについては250Hzあたりに山がある。アマガエルについては2KHz～4KHzにわたって山があり、ヌマガエルについては1KHz～4KHzにわたって山がある。

したがって、トノサマガエルとウシガエルが共に鳴いている場合、山が離れているので狭帯域の共振回路を用いることにより鳴き声を分離することができる。また、トノサマガエルとアマガエルが共に鳴いている場合は、山が重なっているため、数種の狭帯域共振回路を用いた測定が必要となる。

<物理学的な因子>

バックグラウンド騒音はその周波数分布がどのカエルの鳴き声の周波数分布とも異なっているので、共振回路により騒音の影響を取り除くことができる。複雑な地形では、音波の反射、散乱、吸収を考慮しなければならなくなるのでこのような地形を避けることが望ましい。

カエルの数が多く、分布が一様であると仮定した場合、音圧はカエルの匹数の平方根に比例することがわかった。

<計測学的な因子>

単一指向性マイクロフォンにパラボラ集音器を装着した場合には、指向性が周波数によらないので、集音範囲を定めるには最も都合が良いことがわかった。

カセットテープレコーダー及びカセットテープについては、140Hz から 4 KHz までの周波数帯域においては周波数特性および入出力間の直線性に信頼がおけることが確められた。

「音圧はカエルの匹数の平方根に比例する」とした理論的な結果は、音源の個数と音圧レベルの関係を求める実験により正しいことが確められた。

以上のように、音量計測によりカエルの群の個体数を推定するという我々のシステムの実用化可能性について種々の方面にわたって検討を加えた。この結果、我々のシステムはいまだ若干の検討事項を残してはいるが、概数の測定に対しては充分実用に供し得ることが示された。今後には、(a) カエルの成熟度、(b) カエルの発声時間間隔、(c) カエルの分布が一様でない、ことなどが音量にどのような影響を及ぼすかを検討することが残されている。

#### 文 献

- 1) 林ほか；動く調査対象集団に対する標本調査について—I，統計数理研究所彙報 第14巻，第2号，63 (1966)
- 2) 青山ほか；野鳥総数推定のための統計数理的方法，統計数理研究所彙報 第19巻，第2号 109 (1972)
- 3) 宮地，川那部，水野；原色日本淡水魚類図鑑，保育社 (1976)
- 4) ランダウーリフシツ；流体力学2 (竹内均訳)，東京図書 (1971)
- 5) 八木秀次編；音響科学，オーム社 (1948)
- 6) 中坪礼治；NHK録音集「四季に鳴く」NHKサービスセンター (1974)