

野鳥総数推定のための統計数理的方法

統計数理研究所 青山 博次郎

志村 利雄

逆瀬川 浩孝

山階鳥類研究所 浦本 昌紀

国立科学博物館付属自然教育園 桜井 一夫

専修大学 崎野 滋樹

岡山大学 脇本 和昌

(1972年1月 受付)

On Statistical Methods for the Estimation of the Number of Woodland Small Birds

Hirojiro Aoyama, Toshio Shimura,
Hirotaka Sakasegawa (The Institute of Statistical Mathematics)
Masanori Uramoto (The Yamashina Institute for Ornithology)
Kazuo Sakurai (National Park for Nature Study)
Shigeki Sakino (Sensyu University)
Kazumasa Wakimoto (Okayama University)

Recently the ecological approach in the ornithology is actively carried out in our country, and the estimation problem of the number of wild fowls becomes also very important one. The methods used for this purpose are capture-recapture method, line transect method and direct enumeration method. However, it is well known that they have also their own defects respectively.

Our problem is to estimate the number of Japanese Great Tits in winter when they don't make their territories. In this case line transect method is applied but it gives usually underestimate. Therefore we came back to the origin of the problem, and decided to use the random walk method. Of course, this method does not directly give the solution of the problem, but it shows clearly the difference between the line transect method and the random walk method.

We made the survey at Senbonmatsu Field in Tochigi Prefecture by using the ordinary line transect method and random walk method in which taperecorder devices to catch the cry of Great Tits were disposed in the field.

The relation between the direct counting method and the recording system method was analyzed. On the other hand, the simulation methods were carried out in more actual situations and the results were compared with the above-mentioned random walk method.

1. 緒 言

動く対象物、特に動物の総数推定法は従来からも幾つかの方法が研究されてきた。統計学的には捕獲・再捕獲法が有名ではあるが、対象によって利害得失をもっていることはよく知られているところである。われわれは野鳥についてその総数推定を行うことを目的としたが、小さい野鳥に足環をつけて、また捕えるというような、面倒でもあり、かつ捕獲・再捕獲法の欠点も明らかであるので、通常は line transect 法という、野鳥の棲息地域を歩いて、鳴声や観察によって総数を数える方法がとられている。この方法については非常にバラつきが多く、総数推定誤差もしりたいというのが問題の端緒である。

浦本、桜井両氏よりのシジュウカラについてのこの問題提起をきっかけにして、統計数理研

究所が中心となり、実地調査と推定法の研究にとりくむことになった。

2. 研究問題と従来からの研究方法

浦本は多年に亘り、シジュウカラの研究に従事し、その習性について相当詳しい調査を行っていた [1].

また浦本と桜井は栃木県西那須野町千本松農場内の赤松林内でのシジュウカラ個体数推定法の検討を行っていた [2]. この方法は従来から用いられている line transect 法と称するもので、この林内の3つの小径を歩行して観測した値について報告が行われている。

われわれはこの line transect 法がどの程度信頼がおけるか、誤差はどれ位か、何回位の測定を行うのが適当かなどについて研究を進めることになった。

シジュウカラがテリトリーを作って生活する2~4月における総数推定は割合簡単で、雌雄2羽で営巣するから、テリトリーの数を数え、あぶれものを若干加えることによって総数が分る。しかし12~1月頃の群をなして行動している頃が一番総数を求めることが困難であり、われわれの問題とした総数推定法もこの頃のシジュウカラについてである。

シジュウカラは越冬昆虫類や、マツの種子なども好んで食し、樹上だけでなく地上にも群れて行動し、カラ類(シジュウカラ、ヤマガラ、ヒガラ、エナガなどを中心とする群)と混群を形成し移動している。

前述の千本松農場内の赤松林は、ほぼ450m×500mの長方形状をなし、冬期は大した降雪をみない。現在では東方に林があるが、北、西、南は道路を距てて草地になっている所である。浦本、桜井の報告書のでた当時は、北方はまだ松林であったが、昭和45~46年にかけて開墾され、ここにいたシジュウカラも若干当該赤松林に入りこんだものと考えられる。

次に従来用いられている line transect 法については、Yappの方法 [3]とよばれ、これは熱力学的な方法論の借用であった。即ち気体分子が拡散運動をしているときの分子密度を測定する方法で、鳥にあてはめれば、鳥を観測しうる距離を R 、人の鳥に対する相対速度を v 、単位時間中に観測した鳥の数を \bar{m} とおけば鳥の生棲密度を ρ (全地域面積 A 、鳥の総数 N)とすれば

$$\rho = \frac{N}{A} = \frac{\bar{m}}{2Rv} \quad (2.1)$$

与えられる。

このYappの式を更に精密化したものや、数学的基礎づけをしたものとして [4],[5] などがあり、また積分幾何学との関連を論じたものもある [6].

またYapp方式では underestimate となるので、観測数の距離による発見率を加味した Gate, E. 等の論文 [7],[8] があるが、仮定に少しおかしい点があって結果も怪しいし、シジュウカラと違って雷鳥のように動きの少ないものに適用した例である。

そこでわれわれは最初の出発点に立ち戻って、鳥が先ずその地域内に random にちらばっているとし、random walk をするとして第一近似解を求めてみることにした。もしこれがかなりよければ兎も角、そうでなければ少しずつ条件を変えて、simulation によって複雑な場合をも考察しようとしたのである。

random walk はもともと Pearson, K. が考え出し [9], Pearson, K. と Kluyver, J. C. [10] によって2次元以上の場合が論じられ、Rayleigh 卿による random flights と random vibration の関係を論じた論文 [11] があり、Chandrasekher, S. [12] や Skellam, J. G. [13] によって拡散方程式との関係も論じられている。われわれの場合は測定時間の問題があって、安定状態に達する前の過渡的状态のことが問題となると考え、random walk 法に基く研究を進めることにしたのである。

3. Random walk 法による推定

シジュウカラについては浦本によってかなり詳細な資料が得られており、1967, 1968 年には実験林中のシジュウカラの総数も数えられている。これは追出し法で鳥を追立て、途中の横断径路で総数を数えたもので、若干少な目の数字かもしれないが、これを手がかりとして総数の推定法を研究することにする。

まず仮定としてシジュウカラ（以下鳥と略稱する）は平面上を random に移動するとし（空間内を動くが射影して考える）、その平均速度は 7.4m/分とし、人の速さも 20m/分とする。イギリスの例では鳥の移動速度は広葉樹混交林で最大 3.7m/分、マツ林では最大 20m/分という報告（Hinde, R. A.）もあるが、平均値は上述の値ぐらいだろうということであった。また人の速さは、実験林を南北方向約 500m を 25 分で歩いているので、平均 20m/分ということにした。

このようにして鳥も、人も一定の速さで動くが、鳥は方向についても random に動き、人は南北方向に長方形領域内の径を歩くものとしよう。

random walk の一般論から、Kluyver によれば一定の長さ c で、任意の方向に移動するとき、始点から n 回目の端点に至るベクトルの長さ ρ が、 r 以下となる確率 $P_n(r, c)$ は

$$P_n(r, c) = r \int_0^{\infty} J_1(rx) \{J_0(cx)\}^n dx \quad (3.1)$$

ただし $J_n(z)$ は n 次の Bessel 関数

ということが知られている。

これを Rayleigh によって近似すれば

$$P_n(r \leq \rho < r + dr) = \frac{2r}{nc^2} \exp(-r^2/nc^2) dr \quad (3.2)$$

である。

そこで一般的に人の速さを u 、鳥の速さを v とし、 $\lambda = u/v$ とおき、人の歩き始める点を原点とし、図 1 の如く東西方向を x 、進行方向をこれと直角に y としてみる。そうして境界における効果はすべて無視して考えることにする。鳥が最初にいた地点を $B(x, y)$ とし、 n 分後の位置を B_n 、人の n 分後の位置を A_n としてみよう。

また人の観測可能半径を R 、相対速度（鳥の速さ v を単位として測定する）を λ とし、鳥の位置もすべてこの鳥の速さを単位として計算するとして n 分たった後の人の位置 A_n と、始めに鳥のいた点 B との距離 l は

$$l = \sqrt{x^2 + (y - \lambda n)^2} \quad (3.3)$$

となっている。そうして鳥が n 分後 $\overline{BB_n} = r$ だけ移動するとして確率密度 $f_n(r)$ は、(3.2) より

$$f_n(r) = \frac{2r}{n} \exp(-r^2/n) \quad (3.4)$$

となる。

従って A_n における観測者の可視半径 R 内に端点 B_n が含まれるときに始めて、鳥は観測されることになる。

もし $l > R$ なるときは、図 2 より B_n が観測される確率は

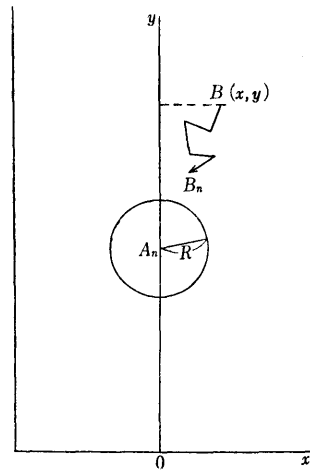


図 1

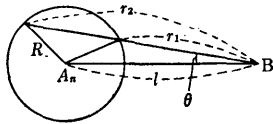


図 2

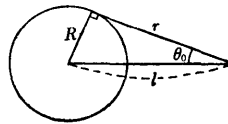


図 3

$$\begin{aligned}
 P &= \int_{-\theta_0}^{\theta_0} \frac{d\theta}{2\pi} \int_{r_1}^{r_2} \frac{2r}{n} \exp(-r^2/n) dr \\
 &= \frac{1}{\pi} \int_0^{\theta_0} \{ \exp(-r_1^2/n) - \exp(-r_2^2/n) \} d\theta \tag{3.5}
 \end{aligned}$$

ただし

$$r_i^2 = R^2 + l^2(1 - 2 \sin^2 \theta) \pm 2l \cos \theta \sqrt{R^2 - l^2 \sin^2 \theta} \tag{3.6}$$

$$\theta_0 = \sin^{-1} \frac{R}{l} \tag{3.6}'$$

また $l=R$ ならば

$$P = \frac{1}{\pi} \int_0^{\pi/2} \{ 1 - \exp(4R^2 \cos^2 \theta/n) \} d\theta, \tag{3.7}$$

$l < R$ ならば

$$P = \frac{1}{\pi} \int_0^{\pi} \{ 1 - \exp(-r_1^2/n) \} d\theta \tag{3.8}$$

となることも分る。

しかしこれらを直接計算することは楕円積分の計算となり、Simpson 法則を用いて近似計算するより方法がない。

そこで先ず P の性質を調べてみることにしよう。それには l を定めると、円周

$$l^2 = x^2 + (y - \lambda n)^2$$

上の点 (x, y) については l が一定となることより (3.5) の積分値は一定となる。従って n 分前に A_n を中心として半径 l の円周上にいた鳥はすべて同一の確率で観測者 A_n に観測される筈である。

$l > R$ のとき、 n を大きくすると、同じ l なら (3.5) より P は増大し、同一の確率 P を保つためには円の半径 l は増大する。従って同一確率をもつ P の等確率線はこれらの円の包絡線となるであろう。その形は y の増大する方向に $x=0$ を対称軸として扇形に拡大していく。

同じように $l < R$ のときは、 n を大きくすると、同じ l なら (3.6) より逆に P が減少し、同一の P を保つためには円の半径 l は増大し、同一確率 P をもつ等確率線はやはりこれらの円の包絡線となる。

これらの等確率線を近似的に得るために、鳥の位置 $B(x, y)$ について、観測者の歩く直線 $x=0$ との垂直距離を考えると、この鳥が観測される確率が最も高いときに当るので

$x \geq R$ ならば

$$P \doteq \frac{\theta_0}{\pi} \{ \exp(-(x - R)^2/n) - \exp(-(x + R)^2/n) \} \tag{3.9}$$

$x < R$ ならば

$$P \doteq \frac{\theta_0}{\pi} \{ 1 - \exp(-(R + x)^2/n) \} \tag{3.10}$$

によって計算してみよう。

この近似式を用いれば、前述の等確率線は $x < R$ のときは放物線、 $x \geq R$ のときは loop を

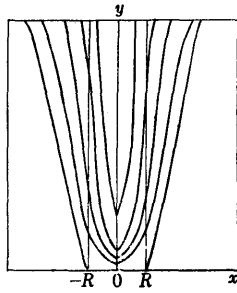


図 4

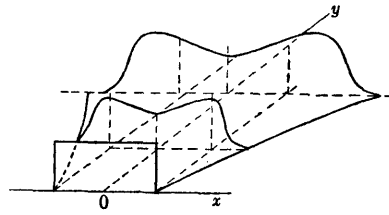


図 5

もつ曲線となる。その形の概略図は、われわれの場合図 4, 5 のようになってくる。図 4 では $x > R$ のとき loop は現われていないが、人と鳥の相対速度が 1 に近くなると現われる。

このようにして鳥の位置と、人の位置によって相対的に観察可能確率が変化してくるので、以上の近似等確率線を利用して平均遭遇率を求めてみる。これには $x \geq R$ の部分にある $P=0$ の曲線を求め、これら曲線と $y=0, y=500$ によって囲まれた地域内の平均確率を計算する。鳥の数から考えて $P=0.01$ はほぼ $P=0$ に該当するものとし、図 6 のようなほぼ台形の地域が求められる遭遇可能地域となる。

千本松農場に当てはめると $R=50, \alpha=61$ となり、幾つかの点における確率を求め、巾 $2R$ の長方形部分の平均確率は 0.956、両端の三角形部分の平均確率は 0.179 と計算され、平均遭遇率 \bar{p} は

$$\bar{p} = \frac{0.956 \times 100 \times 500 + 0.179 \times 61 \times 500}{100 \times 500 + 61 \times 500} = 0.661 \tag{3.11}$$

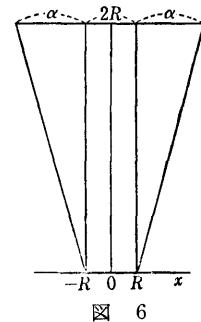


図 6

と計算される。

従来の経験より鳴声や、観察数以外の洩れを考えると、発見率は 0.6 といわれているので、全地域内の鳥の数 N の推定数 \hat{N} は、面積率 K (台形部分の面積と全面積との比)、観測数 \bar{m} (従来の 3 コースで平均値 5.1 羽が得られている) を用いて

$$\hat{N} = \frac{\bar{m}}{\bar{p} \cdot K \cdot 0.6} \tag{3.12}$$

によって推定できる。

これは尤度から容易に求められる式である。

ここで

$$K = \frac{100 \times 500 + 61 \times 500}{450 \times 500} = 0.358$$

と、(3.11) の値、 $\bar{m}=5.1$ を用いて

$$\hat{N} = \frac{5.1}{0.661 \times 0.358 \times 0.6} = 35.8 \tag{3.13}$$

という推定値が得られる。

\hat{N} の推定誤差 $D(\hat{N})$ は、 \bar{m} の測定回数を t とするとき容易に

$$D(\hat{N}) = \sqrt{\frac{N(1-\bar{p})}{\bar{p}t}} \tag{3.14}$$

なることが分るので、3 コースの平均値が \bar{m} と考えると $t=3$ となるので $D(\hat{N})=2.47$ となり、

$$\hat{N} = 35.8 \pm 2.47 \times 2 (\text{or } 3)$$

が得られる。

この値は全数調査したときの鳥の数 36 にはほぼ等しくなっている。

\bar{m} として過去の平均値を用いなくて、毎回調査したときの結果を用いても表 1 のようになっている。

表 1

| 年月日 | 径路 | | | \bar{m} | $N \pm D(N)$ |
|-------------|----|----|-----|-----------|--------------|
| | I | II | III | | |
| 1967. 12. 4 | 8 | 5 | 3 | 5.3 | 37.4 ± 2.52 |
| " 12. 15 | 6 | 4 | 7 | 5.7 | 40.1 ± 2.62 |
| " 12. 16 | 1 | 8 | 13 | 7.3 | 51.5 ± 2.96 |

ここでもしも鳥の速さを 2 倍の 14.8 m/分とするとどうなるかというところ、

$$\bar{p} = 0.421, \quad K = 0.504, \quad \bar{p}K = 0.2124$$

となり、7.4 m/分のときの

$$\bar{p} = 0.661, \quad K = 0.358, \quad \bar{p}K = 0.2366$$

と比較すると、平均遭遇率と面積率は変化するが、積 $\bar{p}K$ は殆んど変わらず、 N の推定値に対する影響は少いことが分る。

また一方 line transect 法との関係をみると、random walk 法によるときは面積率 K を書き直すと、発見率 1 のとき鳥の密度は

$$\frac{\bar{m}}{\bar{p}(2R + \alpha)v} \quad (3.15)$$

となることは容易に分るので、line transect 法の (2.1) と比較して、 \bar{p} が分母にあり、 $2R$ が $2R + \alpha$ となることが相違点であることが分る。

ここで鳥が静止するか、または鳥に対して人の速さが大きくなり、 λ を大きくすると、 n は小となり、random walk 法で考察した台形部分が、line transect による長方形部分のみに変化していくことが了解されるのである。

4. 鳴声利用の推定法

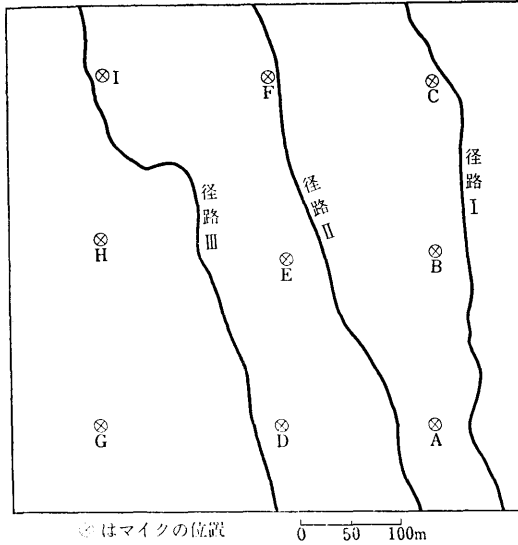
われわれはシジュウカラの総数を 36 羽として前節で考察したが、実際に算え洩れもあるし、日によってもその総数は違うことであろう。また調査を行った昭和 45 年～46 年にかけては実験林の北方の開墾も殆んど完了しており、総数について確かめることも必要があった。そこで図 7 のように 9 ケ所にマイクを設置し、リモートコントロールで鳥の鳴声を同時録音するように計画をたてた。各箇所に設置したマイクの見取図は図 8 に示すようなものである。

実験は観測者が 3 つのコースを歩いて従来の観測をつづけ、同時にテープレコーダーを携帯して鳴声を録音する方法と、9 ケ所においたマイクを通じてテープレコーダーに鳴声を録音する方法を併用した。1 回の実験時間は 55 分前後とし、観測者がコースを往復して（往路と帰路は別コース）帰れるように配慮した。

まずマイク 1 つについて考えてみると、1 分間内にすべて可聴距離 R 内の鳥が 1 回ずつ鳴いてくれればよいが、そうはいかない。1 分間内に可聴距離 R 以内に入ってくる鳥の数を求めるには、前の random walk 法によって、マイクのある位置から半径 l だけ離れた点にいた鳥が、可聴半径内に入る確率 $P(l)$ は、 $l > R$ になるとき近似的に

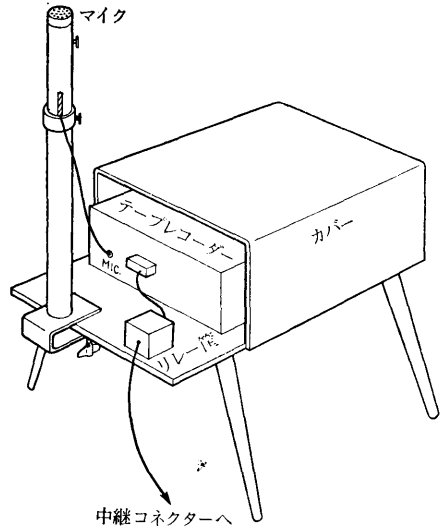
$$P(l) = [\exp\{-(l - R)^2\} - \exp\{-(l + R)^2\}] \frac{\theta_0}{\pi} \quad (4.1)$$

となる。しかも半径 R 内のものはすべて観測され得る筈だから平均遭遇率 \bar{p} は最大観測可能



○はマイクの位置 0 50 100m

図 7



マイクrohホン：ソニー ECM-15 P
無指向性
出力インピーダンス 1000Ω(1000Hz)
感度 -57 dB
S/N 46 dB 以上
テープレコーダー：ソニーマガジンマチック EMP10
図 8

距離を l_0 とするとき

$$\bar{p} = \frac{\theta_0 \int_R^{l_0} P(l) 2\pi l dl + \pi R^2}{\pi l_0^2}$$

$$= \frac{R^2}{l_0^2} + \left[1 - \exp\{-(l_0 - R)^2\} - \exp(-4R^2) + \exp\{-(l_0 + R)^2\} \right]$$

$$+ 2R \int_0^{l_0 - R} \exp(-u^2) du + 2R \int_{2R}^{l_0 + R} \exp(-u^2) du \Big] \frac{\theta_0}{\pi l_0^2} \quad (4.2)$$

で求められる。

$P(l_0) = 0$ とおくと $l_0 \approx 9$ であり、 $R = 6.77$ (50m) を代入すると $\bar{p} = 0.639$ が得られ、面積率 K は

$$K = \frac{\pi(9 \times 7.4)^2}{450 \times 500} = 0.0623$$

従って鳴声録音率 ρ を用いると、鳥の推定数 \hat{N} は、鳴声を 1 分間に m 声聞いたとき

$$\hat{N} = \frac{m}{\bar{p} \rho K} \quad (4.3)$$

で求められる。

もし 1 分間に平均 0.9 声録音され、 $\rho = 1$ ならば

$$\hat{N} = \frac{0.9}{0.639 \times 0.0623} = 37.8$$

となる。

ここで先ず第一に問題なのは鳴声のことである。1羽のシジュウカラが2声聞いたのか、2羽のシジュウカラが1声づつ鳴いたかの区別は録音機ではつかない。

シジュウカラの鳴声について、1句は2音(ツビー、ツッピー)、3音(ツツビー、シチビー)、4音(ツツビービー)などがあり、鳴く1節には5~8句(2~3秒)が普通といわれている。そうして20節位轉るのも稀ではないといわれ、全体として1分位はかかるものである。節と節の間の小休止は1~2秒位であるから、録音で小休止があっても同じ鳥であることも、また別の鳥が鳴いたともとれるのである。しかもこのような轉りの季節(テリトリーを作る

頃)と違い、12月や1月では囀りが少く、地鳴きが殆んどであるという録音判定の困難性がある。

また一般に日周変化もあり、早朝や、午前に多く鳴き、午後は急速に鳴声がへり、夕方にもう一度盛んになるといわれ、寒い日には囀りの量は少いし、日が照ると囀り、聚雨では囀りは止まるという。

そこで問題になるのは鳴声録音率 ρ であるが、観測者が歩き乍ら聞いた鳴声や、観測して数えた鳥の数と、携帯録音テープに記録された結果をみると表2のようになっていた。ここでテープに1分間に録音されている鳴声に途中断絶があっても1回と計算したものが一ぱん現象説明に好都合なのでその値をとった。

表 2

| 月 日 | 12月12日 | | | | | | 1月9日 | | | | | | 1月10日 | | | | | | 計 |
|-----|--------|-----|----|-----|---|-----|------|-----|---|-----|---|-----|-------|-----|---|-----|---|---|-----|
| | I | III | I | III | I | III | I | III | I | III | I | III | I | III | I | III | | | |
| 観測数 | 15 | 8 | 13 | 2 | 0 | 7 | 3 | 10 | 3 | 12 | 5 | 7 | 9 | 3 | 4 | 17 | 7 | 5 | 130 |
| 録音数 | 9 | 1 | 9 | 0 | 0 | 5 | 1 | 1* | 1 | 9 | 9 | 3 | 10 | 1 | 1 | 10 | 6 | 3 | 79 |

(注) III はすべて逆コース, *印は録音記録洩れ

*印の録音記録洩れを除くと、平均単位時間(必ずしも1分とは限らぬ、歩行中のため固定した時と若干の差がある)に鳴く数は、発見率 0.6 を用いて観測数を修正し、

$$m = \frac{78}{120/0.6} = 0.390$$

となる。発見率 0.6 を除いたときは

$$a = \frac{78}{120} = 0.65$$

である。

表 3

| X | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 |
|---|------|------|------|------|------|
| P | .677 | .264 | .051 | .007 | .001 |

いま鳥の鳴く回数が単位時間に平均 m の Poisson 分布に従うものとする、鳴き声の数 x と、その確率 P は表3のようになる。この表にみられるように、単位時間に3回以上鳴く確率は少く、単位時間を2分としてみると、鳴声の総数も、鳴かない鳥の数(観測したもの)も、ともかなりよい一致をみるので、Poisson 分布を仮定すると、鳥の数 N 、推定鳴声数、実際の鳴声数の間には表4のような関係がみられた。

表 4

| N | 28 | 25 | 22 | 20 | 15 | 13 | 12 | 8 | 7 | 5 | 3 |
|--------|------|-----|-----|-----|-----|-----|-------|-----|-----|-------|-----|
| 推定鳴声数 | 10.8 | 9.8 | 8.6 | 7.6 | 5.9 | 5.1 | 4.7 | 3.2 | 2.6 | 1.9 | 1.2 |
| 実際の鳴声数 | 10 | 9 | 9 | 9 | 10 | 1 | 6,5,3 | 9,3 | 1 | 1,1,1 | 0 |

推定鳴声数と実際の鳴声数の一致度もかなり良好で、2, 3一致しない点は観測者の見逃がしがあった点もあろう。しかも鳴かないで観測された数は $x=0$ の場合に当るが、これもかなり

表 5

| 回次 | マイク | A | B | C | D | E | F | G | H | I | 計 | 平均(1分間 1マイク当り) X |
|-------|-----|--------|----|----|---|----|----|----|----|----|-----|---------------------|
| | | 12月12日 | 1 | 9 | 5 | — | 3 | — | 7 | 1 | | |
| | 2 | 14 | 0 | — | 0 | 9 | 1 | 4 | 0 | — | 28 | 0.075 |
| | 3 | 13 | — | — | 0 | 3 | 6 | 20 | 13 | — | 55 | 0.167 |
| | 4 | 5 | 2 | — | 0 | 11 | 9 | 9 | 20 | 0 | 56 | 0.140 |
| 1月9日 | 1 | 36 | 3 | 0 | 9 | 5 | 10 | 18 | 5 | 6 | 92 | 0.183 |
| | 2 | 9 | 9 | 0 | 0 | 8 | 25 | 10 | 13 | 7 | 81 | 0.167 |
| | 3 | 1 | 23 | 9 | 0 | — | 8 | 7 | 0 | 15 | 63 | 0.143 |
| | 4 | 7 | 1 | 7 | — | — | 2 | 6 | 0 | 1 | 24 | 0.069 |
| 1月10日 | 2 | 12 | 3 | 1 | 0 | — | 19 | 3 | 12 | — | 50 | 0.130 |
| | 3 | 19 | 17 | 14 | 0 | — | 16 | 11 | 11 | 26 | 114 | 0.259 |

(注) —はマイク故障のため欠測

良く一致していた。

この結果を一応採用することとし、実際に9つのマイクで録音した鳴声数を調べると、表5のようになった。

これを用いて N の推定を行うに当り、マイクの可聴半径 R が次の問題となる。囀りの頃の高い大きい鳴声ならば 50m 位は楽に録音可能であるが、何しろ地鳴きの声で小さいので、上述の α を用いて $R=20, 30, 50$ (m) の各々の場合について推定値を求め、random walk 法に基く歩行法との関係から妥当な R の値を求めることにした。

表5より単位時間内の平均鳴数 $X' (=2X)$ を α で割れば発見率 0.6 のときの N' が求められるが、 α の値そのものがこれまた時間によって変化しているのである (図9)。各観測時の α_i と、平均の $\bar{\alpha}$ とを用いた場合について計算したものが

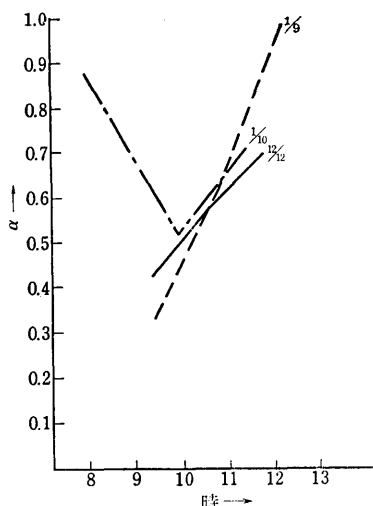


図 9

表 6

| | 回次 | X'_i | α_i | N'_i | \bar{X}' | $\bar{\alpha}$ | \bar{N}' | N | | |
|--------|----|--------|------------|--------|------------|----------------|------------|-------|------|------|
| | | | | | | | | R=20 | R=30 | R=50 |
| 12月12日 | 1 | .154 | .435 | .354 | .230 | .583 | .395 | 92.7 | 44.5 | 16.5 |
| | 2 | .150 | .600 | .250 | | | | | | |
| | 3 | .334 | .714 | .468 | | | | | | |
| | 4 | .280 | (.714) | .392 | | | | | | |
| 1月9日 | 1 | .366 | .333 | 1.099 | .281 | .667 | .421 | 98.8 | 47.4 | 17.6 |
| | 2 | .334 | .667 | .501 | | | | | | |
| | 3 | .286 | 1 | .286 | | | | | | |
| | 4 | .138 | (1) | .138 | | | | | | |
| 1月10日 | 2 | .260 | .523 | .497 | .389 | .637 | .611 | 143.4 | 68.8 | 25.6 |
| | 3 | .518 | .750 | .691 | | | | | | |

(注) () 内は欠測のための前回と同じとした X' は単位時間を2分間としたもの

表 7

| | \bar{X}' | \bar{N}' | N | | | 歩行法による N (3.13) 式 | R=32のとき の N |
|--------|------------|------------|-------|------|------|-------------------------|----------------|
| | | | R=20 | R=30 | R=50 | | |
| 12月12日 | .230 | .354 | 83.1 | 39.9 | 14.8 | 52.8 | 36 |
| 1月9日 | .281 | .432 | 101.4 | 48.6 | 18.1 | 47.2 | 45 |
| 1月10日 | .389 | .598 | 140.4 | 67.3 | 25.0 | 52.8 | 63 |

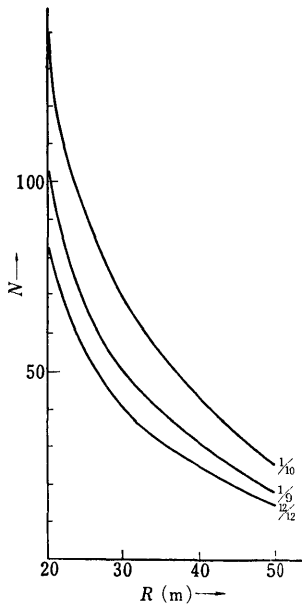


図 10

表6である。

全体の α の平均値 0.65 を用いるときは表7が得られる。マイクの可聴半径 R が地鳴きに対して不明なので、20, 30, 50m の各々の場合について求めたが、random walk 法を用いた歩行法の (3.13) 式による場合と比較して可聴半径は 30~35m の中間にあるものと推定される。12月12日は30mに近いが、天候にもよるらしい。因みにこの時は晴で雪は全然なかったが、1月は晴で地面には残雪があった。

図10は表7に対応した可聴半径と、推定数 \hat{N} との関係グラフである。R=32位が妥当な可聴半径と推定される。

1月10日のデータは少し他のものと離れているが、第3回目のデータが異常に鳴き声が多く録音されていたためである。何れにしても1967~68年のときの総数36よりは多いが、これは北方の林が開墾され、周囲より鳥が多数対象地域内に入りこんできているためであろう。

以上は鳥の速さを7.4m/分とした場合の推定値であるが、2倍の14.8m/分のときも、random walk 法の場

合と同様にして表8が得られる。

この場合も同一の R に対して積 $\bar{p}K$ の値の変化は少く、 $R=32$ とすれば、12月12日は35, 1月9日は45, 1月10日は56となり鳥の速さ7.4m/分のときと殆んど変らない値が得られる。

表 8

| 鳥の速さ | R | 平均遭遇率 \bar{p} | 面積率 K | $\bar{p}K$ |
|------|----|-----------------|--------|------------|
| 7.4 | 20 | 0.380 | 0.0187 | 0.0071 |
| | 30 | 0.489 | 0.0302 | 0.0148 |
| | 50 | 0.639 | 0.0623 | 0.0398 |
| 14.8 | 20 | 0.221 | 0.0392 | 0.0087 |
| | 50 | 0.437 | 0.0959 | 0.0419 |

5. シミュレーションによる検証

前節までの仮定では、この地域の境界に於て鳥がどう行動するかを考慮せず、恰かも境界がない如き推定法をとった。実際には鳥の速さも一定ではないし、境界に鳥が達すると境界に沿って移動するという。そこで次のような条件で $N=30$ のときのシミュレーションを行ってみた。

- (1) 鳥の速さは7.4m/分とし、方向はランダムの方に移動するが、境界点を越えるとき

表 9

| コ ー ス | I | II | III | 平 均 |
|-------|------|------|------|------|
| 平均観測数 | 5.84 | 9.69 | 7.82 | 7.78 |

はそこで内部の方向が現われるまで停止するとした場合を考え、100回各コースを歩いたときの結果は表9の通りであった。

この場合の発見率は1で地域としては図面に従い487.5×512.5mを用いたので面積率が変わるが

$$\hat{N} = \frac{7.78}{0.2132} = 36.5$$

$$D(\hat{N}) = \sqrt{36.5 \times \frac{0.339}{0.661 \times 3}} = 2.5$$

となり

$$\hat{N} = 36.5 \pm 2.5 \times 2 (\text{or } 3)$$

一応は $N=30$ はこの推定値の区間に含まれる。 \hat{N} が少し大きく出るのは境界線から鳥が出ないとしたため平均遭遇率が大きくなるためであろう。

(2) マイク1つ当りの平均値（このときは鳴声は用いないで発見率1とした時）を用いるときは、マイクの可聴半径 $R=50\text{m}$ として1マイク1分当り0.9602羽となり

$$\hat{N} = \frac{0.9602}{0.639 \times 0.0623} = 30.7$$

となるが、シミュレーションでは1分毎の結果しか分らぬので分子の0.9602はもう少し大きくなる筈である。

この他種々のシミュレーションを行ったが詳細は稿を改めてのべることにする。

6. お わ り に

このシジュウカラの実地調査に当っては、宇都宮大学 樋口広芳、日本鳥学会 安部直哉、統計数理研究所の中村恵子、葦輪三郎、十倉淳子（現在社会調査研究所）の諸氏及び東京理科大学、慶応大学の学生諸君の援助をうけた。また録音判読の厄介な仕事では前記樋口広芳、安部直哉、日本鳥学会 千羽完示、東京教育大学 荻野 豊の各氏にも御世話になった。

集計に当っては研究所の林清子さんに手伝ってもらった。以上いろいろ御世話になった方々には衷心より謝意を表します。

参 考 文 献

- [1] 浦本昌紀：鳥類の生活，紀伊国屋。
- [2] 浦本昌紀，桜井一夫：森林棲小鳥類の秋冬の個体数推定法の検討，陸上動物の個体数現存量調査法の研究，昭和42年度報告書。
- [3] Yapp, W.B.: The theory of line transects, 1955 Bird Study vol. 3.
- [4] Royama, T.: The Theory and Practice of Line Transects in Animal Ecology by means of Visual and Auditory Recognition, 1960, 山階鳥研報 vol. 2, No. 14.
- [5] Skellam, J.G.: The Mathematical Foundations underlying the Use of Line Transects in Animal Ecology, Biometrics, 1958.
- [6] Masuyama, M.: An Ornithological Application of Line-Grid Sampling, Rep. Stat. Appl. Res., JUSE, vol. 5, No. 1, 1957.
- [7] Gate, C.E., Marshall, W.H. and Olson, D.P.: Line Transect Method of Estimating Grouse Population Densities, Biometrics, 1968.
- [8] Gate, C.E.: Simulation Study of Estimators for the Line Transect Sampling Method, Biometrics, 1969.

- [9] Pearson, K.: Problem of the Random Walk, *Nature*, 72, 1905.
- [10] Kluyver, J.C.: A local probability problem, *Proc. K. Akad. Vet. Amst.* 25, 1905.
- [11] Rayleigh, Lord: On the problem of Random Vibrations, and of Random Flights in One, Two or Three Dimensions, *Phil. Mag.* 37, 1919.
- [12] Chandrasekher, S.: Stochastic problems in physics and astronomy, *Rev. Modern Phys.*, 15, 1943.
- [13] Skellam, J.G.: Random Dispersal in Theoretical Populations, *Biometrika*, 38, 1951.