

Strix 10 : 93-106 (1991)

岩国市尾津におけるハマシギの春の渡りの 個体数曲線による解析

佐々木紘¹・弘中 毅²・中田政司³

はじめに

山口県岩国市尾津地区は錦川の河口のそばにあり、有名な岩国レンコンを産するハス田が広がっている。ここは春および秋には渡り途中のシギやチドリが羽を休めたり、採食したりする渡りの中継地として知られている。1988年10月からこのハス田の一部を埋め立て(約10ha)、卸売市場の建設工事がはじまった(完成予定1992年3月)。工事の影響は、ここを利用する野生生物にもおよぶと考えられる。市場完成後も車両の出入りや、市場に付帯する関連施設の建設のために現段階以上のハス田の埋め立てなど、環境が悪化することが予想される。このため、渡り中継地としての変化の過程を記録する目的で、1990年4月中旬からおもにシギ・チドリ類の個体数の調査をはじめた。同様な観点から、1974年5月～1983年5月まで9年間にわたり、千葉県習志野市谷津干潟においてチドリ類の個体数の調査が行なわれている。ほぼ年間を通して、平均5日間隔で調査した結果を分析している(石川・桑原 1983)。また、長崎県諫早干潟は埋め立てられることが予定されており、この干潟の変化の過程を記録するため月2回の割合でシギ・チドリ類の調査が現在も継続して行なわれている(日本野鳥の会長崎県支部 1989～1991)。

われわれの場合もまだ調査の途中であるが、渡り中継地における個体数変動に対して、理論的曲線をもちいた解析方法を提案するため報告することにした。ハマシギ *Calidris alpina* は、春には越冬地を出発していくつかの河口干潟や湿地を次々と経由して繁殖地へ向かうものと思われる。この移動の過程を、離散的な領域を一方向だけに広がってゆく、生物拡散過程の特殊な場合と考えて数理モデルを構成した。その基本方程式から、それぞれの中継地におけるハマシギの個体数の時間的変化を表わす曲線が得られた。

3月にまったく見られなかった尾津地区のハマシギは、4月には次第に数を増し、時とともに変動しながら5月末には目的地に向かってすべて飛び去ってしまう。本論文の目的は、この観察個体数の変動の過程を数理モデルから得られた個体数曲線を使って分析しようとするものである。1990年および1991年春のハマシギの観察記録を対象として、個体数曲線の未知母数を推定する非線形回帰を行なった。両年とも4月下旬～5月中旬にかけて2つの大きな群れが通過したと考えられるが、推定の結果、時間的に一部が重なり合うこ

1991年11月11日受理

1. 〒739-04 広島県佐伯郡大野町宮島口東1-1-3-14
2. 〒741 山口県岩国市錦見6丁目12-1
3. 〒730 広島市中区竹屋町1-4-302

これらの群れの成分を分離することができた。これらの群れのそれぞれの大きさや当地での最大数およびその時期、のべ滞在日数（羽・日）や平均滞在日数などの特性値が推定できた。

調査地と方法

調査対象地である山口県岩国市尾津地区は、図1に示すように錦川の支流である門前川河口干潟の一部を埋め立ててできた、ほぼ三角形の地域である。南西は工場と住宅団地に、北東は米軍岩国基地の一部に使われている。さらに工事中の岩国卸売市場予定地の部分を除いた地域が、現在もシギ・チドリ類の生息が可能な領域で、今回の調査範囲（図1、点描の部分：面積約190ha）である。埋め立てたとはいえ、そのほとんどはハス田として利用されているので、河口干潟が淡水性湿地に変わったという意味では比較的良好な自然（二次的自然）が残されているといえる。

この尾津地区と門前川河口をあわせて、これまでシギ・チドリ類は7科43種が記録されている（弘中 1991）。これらはハス田のみを利用するもの、おもに門前川およびその河口干潟を利用しハス田は待避所として利用するもの、ハス田と門前川河口干潟をともに利用するものに分かれる。3月下旬～5月にこの地を訪れる春の渡りのマハシギは、ほとんどすべてがハス田を利用し門前川に出ることはないので、ハス田を調査することにより、その個体数を比較的正確に数えることが可能であった。

調査は、1990年の4月18日～6月2日、および7月16日までに15回、1991年は4月1日

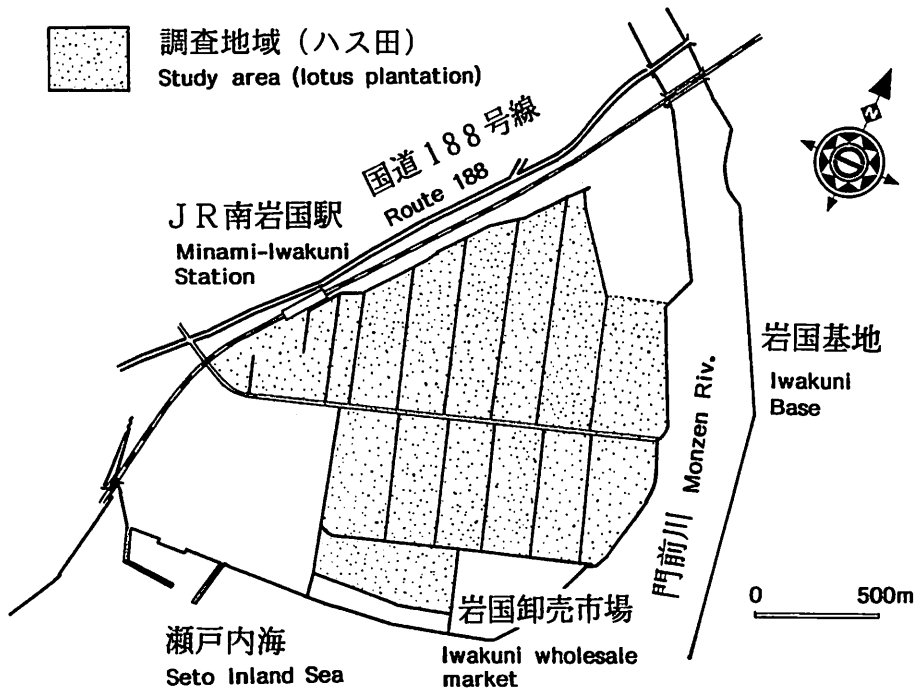


図1. 調査地（山口県岩国市尾津）の地図。

Fig. 1. Map of the study area (Ozu, Iwakuni city, Yamaguchi Pref.). Dotted area is a lotus-field where Dunlins were counted in the spring of 1990 and 1991.

～5月26日まで19回、3～4日間隔で行なった。図1からわかるように、調査地は南北に農道が走っており、その間隔は約200mである。これを自動車ですり進みながら、8倍の双眼鏡と20倍の望遠鏡により、道の両側にいるハマシギの数を記録するラインセンサスを行なった。自動車を使ったのは、鳥に対するブラインドとしての効果を考慮したためであり、事実車の中にいる限り近よっても逃げることがなかった。この時期は作物（ハス）はまだ茂っていないので、道の片側について100m近くまで見通すことができた。したがって、通常ラインセンサスが標本抽出調査であるのと異なり、この場合は農道の間隔を考慮すると尾津地区のほぼ全域に対してハマシギの数を把握したことになる。

渡りの数理モデル

日本を通過する渡り鳥は春は越冬地から繁殖地へ、秋は逆に繁殖地から越冬地に向けて移動する。出発地から目的地へ向かう間、どこにも立ち寄らず、一気に渡りきる種もいるが、今回対象にしたハマシギは、いくつかの中継地で羽を休め、そこで採食しながら渡る。

ハマシギの渡り中継地として適している場所は、河口干潟や湿地帯のように互いに離れていて、しかも有限個だと考えられる。図2に示すように、ハマシギの群れは出発地から中継地を順にたどりながら目的地へ向かうと仮定する。このような状況での群れの移動の過程は、現象的には生物拡散の過程と類似点が多い（巖佐 1990）。そのモデル設定を見習って中継地へ“流れこむ”ハマシギの数と、次の中継地へ“流れ出す”数の差を考慮した基本方程式を導くことができる。 $x_i = x_i(t)$ を時刻 t で地域 i にいるハマシギの数とし、 \dot{x}_i を x_i の t による微分とする。 λ_i を次の地域への移動率とすると、基本方程式は、

$$\begin{aligned} \dot{x}_0 &= -\lambda_0 x_0 \\ \dot{x}_1 &= \lambda_0 x_0 - \lambda_1 x_1 \\ &\vdots \\ \dot{x}_n &= \lambda_{n-1} x_{n-1} - \lambda_n x_n \\ \dot{x}_{n+1} &= \lambda_n x_n \end{aligned} \tag{1}$$

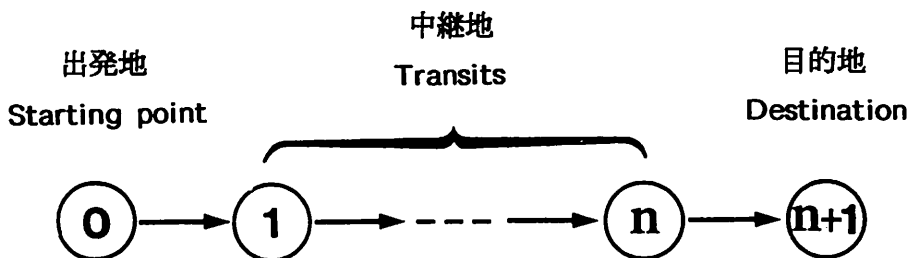


図2. 渡りの模式図. この過程は出発地(0)から中継地(1～n)を経由して目的地(n+1)に至る「生物拡散」の一種と考えることができる。

Fig. 2. Diagram of a migration process. The process is considered to be a kind of “diffusion” which goes from the starting point (0) to the destination (n+1) via transits (1～n).

となる。初期条件として、渡りがはじまるまでは群れの全個体 U が出発地において、ほかの中継地や目的地には1羽もいないと仮定しても不自然ではないと思われるから、

$$x_0 = U, x_1 = \cdots = x_{n+1} = 0 \quad (t \leq 0) \quad (2)$$

とする。移動率 λ_i にいろいろな条件を仮定することで、各地域での個体数曲線を求めてみた。

1. タイプA (指数型: Exponential type)

各地域での移動率 λ_i が、一定の値 b をとる、すなわち

$$\lambda_0 = \lambda_1 = \cdots = \lambda_n = b \quad (3)$$

と仮定する。(1) 式と初期条件から、 $t \geq 0$ では

$$\begin{aligned} x_0(t) &= U \cdot e^{-bt} \\ x_1(t) &= U \cdot bt \cdot e^{-bt} \\ &\vdots \\ x_n(t) &= U \cdot \frac{(bt)^n}{n!} \cdot e^{-bt} \\ x_{n+1}(t) &= U - \sum_{i=0}^n x_i(t) \end{aligned} \quad (4)$$

となる。中継地 i でその数が最大に達する時刻 t_p とその時の数は

$$t_p = i/b, x_i(t_p) = U \cdot \frac{i^i}{i!} \cdot e^{-i} \quad (i = 1, \dots, n) \quad (5)$$

である。出発地における個体数 x_0 は指数的に減少しているので、これらの曲線を指数型 Exponential type 個体数曲線と呼ぶことにする。

2. タイプB (正規分布型: Normal distribution type)

各地域での移動率 λ_i が、時間に比例して大きくなる、すなわち

$$\lambda_0 = \lambda_1 = \cdots = \lambda_n = 2bt \quad (6)$$

と仮定する。(1) の解は、初期条件を考慮すると、 $t \geq 0$ では

$$\begin{aligned} x_0(t) &= U \cdot e^{-bt^2} \\ x_1(t) &= U \cdot bt^2 \cdot e^{-bt^2} \\ &\vdots \\ x_n(t) &= U \cdot \frac{(bt^2)^n}{n!} \cdot e^{-bt^2} \\ x_{n+1}(t) &= U - \sum_{i=0}^n x_i(t) \end{aligned} \quad (7)$$

となり、中継地 i で個体数が最大に達する時刻とその数は

$$t_p = \sqrt{\frac{i}{b}}, x_i(t_p) = U \cdot \frac{i^i}{i!} \cdot e^{-i} \quad (i = 1, \dots, n) \quad (8)$$

である。

出発地における個体数の減少はちょうど正規分布 $N(0, 1/\sqrt{2b})$ の密度関数の正の部分にあたるので、はじめはつり鐘形の上の部分をつっくり減少し、標準偏差 $1/\sqrt{2b}$ の時点で減少速度が最大になり、その後は次第につっくり0に近づいていく。中継地ではタイプAと同じく単峰性曲線になる。これらの曲線は x_0 の形から正規分布型 Normal distribution type 個体数曲線と呼ぶ。

3. タイプC (ゴンパーツ型: Gompertz type)

各地域での移動率 λ_i が、時間とともに幾何級数的に大きくなる、すなわち

$$\lambda_0 = \lambda_1 = \dots = \lambda_n = be^{bt} \quad (9)$$

と仮定する。基本方程式 (1) の解は、積分定数を V とすると、 $t \geq 0$ で

$$\begin{aligned} x_0(t) &= V \cdot e^{-e^{bt}} \\ x_1(t) &= V \cdot (e^{bt} - 1) \cdot e^{-e^{bt}} \\ &\vdots \\ x_n(t) &= V \cdot \frac{(e^{bt} - 1)^n}{n!} \cdot e^{-e^{bt}} \\ x_{n+1}(t) &= U - \sum_{i=0}^n x_i(t) \end{aligned} \quad (10)$$

となり、中継地 i で個体数が最大になる時刻とその数は

$$t_p = \frac{1}{b} \log(i+1), \quad x_i(t_p) = V \cdot \frac{i^i}{i!} \cdot e^{-i-1} \quad (i = 1, \dots, n) \quad (11)$$

である。定数 V と全個体数 U の関係は

$$U = V \cdot e^{-1} \quad (12)$$

である。

出発地での曲線は V の係数を除けばゴンパーツ Gompertz 曲線として知られているものである。ゴンパーツ曲線そのものは $t < 0$ でも定義されており、その形は1からなめらかに逆S字状カーブを描きながら0に近づく。 $t = 0$ が変曲点で、下に向かって凹であったのがこの点を境に凸に変わる。中継地ではほかの2つと同じく単峰性曲線である。これらの曲線をゴンパーツ型 Gompertz type 個体数曲線と呼ぶ。

ただし、本論文では以上3つの曲線を順に、単にタイプA、タイプB、タイプCの曲線と呼ぶことにした。

個体数曲線のあてはめ

前節で求めた3つの個体数曲線を、岩国市尾津で観察したハマシギの個体数にあてはめる計算を試みた。このような計算を行なう目的は2つある。ひとつは、数理モデルが中継地における個体数の増減の現象をどの程度説明しているか、モデルの仮定が妥当であるかを評価する手がかりを得ることである。もうひとつは、観察記録がもつ情報を、あてはめた曲線に集約し、この曲線の特性値を使って群れを特徴づけようとするものである。前年との比較や、ほかの地域を通過する群れを比較するときに、観察した時間間隔や回数、時

期などが異なることのほうが多い。そのような場合、もとの観察記録そのものを比較するよりも、あてはめた曲線やその特性値などを比較するほうがより客観的になる。

実際のあてはめ計算を行なうにあたって、尾津が何番目の中継地であるかわからないので、便宜上第1中継地であると仮定した。また、時間軸の原点である渡りがはじまる時刻は不明であるから、これも未知母数として推定すべきである。したがって、前節で展開したモデルの時間軸をずらすため t のかわりに $t - a$ を使い、 a を渡りのはじまる時刻を表わす未知母数とした。 $x(t)$ を時刻 t におけるハマシギの数とすると、

$$\begin{aligned} \text{タイプA: } x(t) &= \begin{cases} 0 & (t < a) \\ U \cdot b(t-a) \cdot e^{-b(t-a)} & (a \leq t) \end{cases} \\ \text{タイプB: } x(t) &= \begin{cases} 0 & (t < a) \\ U \cdot b(t-a)^2 \cdot e^{-b(t-a)^2} & (a \leq t) \end{cases} \\ \text{タイプC: } x(t) &= \begin{cases} 0 & (t < a) \\ V \cdot (e^{b(t-a)} - 1) \cdot e^{-e^b(t-a)} & (a \leq t) \end{cases} \end{aligned} \quad (13)$$

のようになる。ここで、 U (V)、 a 、 b は曲線の形を定める (未知) 母数である。第1中継地で最大数に達する時刻 t_p およびその大きさ x_{max} は、

$$\begin{aligned} \text{タイプA: } t_p &= a + 1/b, \quad x_{max} = U \cdot e^{-1} \\ \text{タイプB: } t_p &= a + 1/\sqrt{b}, \quad x_{max} = U \cdot e^{-1} \\ \text{タイプC: } t_p &= a + \frac{1}{b} \log 2, \quad x_{max} = V \cdot e^{-2} \end{aligned} \quad (14)$$

となる。

実際の観察個体数にこれらの曲線をあてはめ、未知母数を求めるのであるが、観察結果を図示してみると次のことがわかった (図3に1990年の、図4に1991年の観察個体数が×印または○印で示してある)。4月下旬と5月中旬に山をもつ、2つのあい異なる大きな群れが尾津を通過していったと考えられる。われわれの曲線(13)は、山ひとつ (単峰性) の場合の個体数の増減を説明するものである。そのため、2つの群れは片方が他方を追い出したり、片方の群れに吸収されるといった干渉はなかったものとして、単純に2つの曲線の和で、2つの群れの増減を表わすことができると仮定した。たとえば、 $a_1 \leq a_2$ としてタイプBをもとにすると、

$$\begin{aligned} \text{タイプBB: } x(t) &= x^1(t) + x^2(t) \\ &= \begin{cases} 0 & (t < a_1) \\ U_1 \cdot b_1(t-a_1)^2 \cdot e^{-b_1(t-a_1)^2} & (a_1 \leq t \leq a_2) \\ U_1 \cdot b_1(t-a_1)^2 \cdot e^{-b_1(t-a_1)^2} \\ + U_2 \cdot b_2(t-a_2)^2 \cdot e^{-b_2(t-a_2)^2} & (a_2 < t) \end{cases} \end{aligned}$$

という曲線を使った。この曲線をタイプBの曲線の和という意味で、「タイプBB」と呼ぶことにする。同様に、「タイプAA」は2つのタイプAの、「タイプCC」は2つのタイプCの曲線の和で表わされる曲線を示す。

あてはめ計算に使ったハマシギの観察個体数は1990年春と1991年春に調査したものであ

る。1990年4月29日は全域調査ができなかったので、この日の記録を使った場合と除外した場合のふたとおりで計算を行なった。この年のすべての記録を「90A」、4月29日の記録を除外した場合を「90B」と呼ぶ。

1991年は前の年と比較する意味もあり、4月下旬と5月中旬に通過したふたつの大きな群れを対象にした。4月下旬に通過した群れの記録として、4月22日からの記録を使う方がよいのか、4月25日からの記録を使う方がよいのか不明である。このため、あてはめ計算の結果から判断することにして、ふたとおりの計算を行なった。4月22日からの記録を「91A」、4月25日からの記録を「91B」と呼ぶ。

タイプAA, BB, CCの3種の曲線を使い、4とおりの記録にあてはめる。合計12の非線形回帰の問題として未知母数を推定した。そのためのくり返し計算には得点による方法(Scoring Method, Rao 1973)を使い、すべての未知母数の相対誤差が続いて4回、10,000分の1以下になったとき収束したと判定した。また計算のための初期値は、もとの観察個体数と(14)式を使い、試行錯誤的に求めた。

結果と分析

あてはめ計算の結果を表1に示す。タイプAAの曲線は、90A, 90Bおよび91A, 91Bの観察結果のどれに対しても収束しなかった。これは、移動率 λ を時間にかかわらず一定と仮定したことに無理があったのではないかと考えられる(尾津を第4中継地と仮定して計算した場合は収束したが、残差平方和が示すあてはまりは、ほかの2つのタイプの曲線より悪かった)。

次に1990年の90A, 90Bと1991年の91A, 91Bの、それぞれ2つの観察記録のどちらを使うのがよいか検討する。1990年は、タイプBBもタイプCCもどちらの曲線を使っても、90Bの方が平均残差平方和が小さかった。4月29日が全域調査でなかったことを考慮すると、この日の記録は異常値として除いた方がよいと思われる。1991年も、タイプBBおよびタイプCCのどちらの曲線を使っても、91Bの方が平均残差平方和が小さかった。したがって、このあとの比較や分析にはおもに91Bを使った。

2つの曲線のどちらを採用する方がよいかの判定基準には、AIC(Akaike 1972)が応用できる。ところが本論文の場合は、タイプBBもタイプCCも未知母数の数は同じであるから、AICを計算するまでもなく、平均残差平方和をそのまま選択の尺度とすることができる。よって1990年も1991年も、ともにタイプCCの方がよいと判断し、分析には優先的に使用することにした。図3と図4にその曲線を示す。1990年は、1日あたり最大500羽、のべ3,000羽近くを観察したが、この曲線に対する平均残差平方和は非常に小さく(2.0)、とくにあてはまりがよかった。タイプBBの曲線をあてはめた結果も図5, 図6に示した。図3と図5, 図4と図6を比べると、タイプCCの曲線の方がタイプBBより立ち上がり早く、急激な数の増加をよく表わしていること、極大値の点をすぎてもしばらくはゆっくり減少すること、しかしそのあとは急激に減少して早く0に近づくこと、などがわかる。

曲線のおもな特性値を表2にまとめた。ただし、これらの特性値はモデルの仮定が完全に満たされているときのみ、本来の意味をもつ。今回のように、必ずしもそのことが検証できない場合は、相対的なものとしてとりあつかうほうがよい。たとえば、群れの全個体

表1. 推定結果.

Table 1. Results of estimation.

年次 Year		1990		1991		
使用データ Used data		90A ¹⁾	90B ²⁾	91A ³⁾	91B ⁴⁾	
データ個数 Sample size		15	14	13	12	
平均残差平方和 Mean sum of squares of residuals	Type AA	— ⁵⁾	—	—	—	
	Type BB	535.43	29.93	1654.33	1082.21	
	Type CC	457.52	2.00	3746.36	720.08	
残差絶対値和 Sum of absolute values of residuals	Type AA	—	—	—	—	
	Type BB	168.50	46.44	339.92	232.23	
	Type CC	134.71	10.92	326.52	178.52	
	Type AA	—	—	—	—	
未知母数の推定値 Estimates of unknown parameters	Type BB	U_1	1307.71	1399.82	1179.51	1272.17
		a_1	10.03	11.03	18.78	20.76
		b_1	0.0036	0.0040	0.0101	0.0151
		U_2	1349.63	1361.60	944.96	976.65
		a_2	38.66	38.57	35.19	34.52
		b_2	0.0430	0.0414	0.0148	0.0137
	Type CC	V_1	3532.25	3748.69	3399.87	3399.87
		a_1	14.47	15.02	22.81	22.81
		b_1	0.0567	0.0591	0.1132	0.1132
		V_2	3341.93	3394.28	2641.41	2641.41
		a_2	38.97	38.95	36.39	36.39
		b_2	0.1598	0.1590	0.1062	0.1062

- 1) 全観察記録を使用. All data.
- 2) 4月29日の記録を除外. Except observation of April 29.
- 3) 4月22日～5月26日までの記録を使用. Observations from April 22 to May 26.
- 4) 4月25日～5月26日までの記録を使用. Observations from April 25 to May 26.
- 5) 発散. Diverged.

数 U を1,400羽と推定しても、これは尾津が第1中継地と仮定したときの値であって、第4中継地と仮定すれば、また別の値となることに注意しなければならない。群れの全個体数 U は1990年の第1群が約1,380羽、第2群が約1,250羽であったのに、1991年の第1群は約1,250羽、第2群は約970羽に減少している。とくに第2群が少なかった。

渡りの開始を示す母数 a は、尾津へ向けて群れの1羽が動き出した時刻であるが、細かい時間的差異を無視すれば先頭の1羽が到着した日とみなしてよい。しかし第1群についてのこの推定値は、どちらの年も計算に使用した記録の観察時刻よりも早い時刻であるから、外挿となるので参考程度にした方がよい。これも両年で比べてみると1991年の第1群

表2. ハマシギの群れごとの特性値.

Table 2. Characteristics of migrating flocks of Dunlins *Calidris alpina*.

		年次 Year	1990		1991	
		群れ Flock	1 st	2 nd	1 st	2 nd
群れの全個体数		Type BB	1399.82	1361.60	1272.17	976.65
Estimated flock size		Type CC	1379.07	1248.69	1250.74	971.72
先頭個体の到着時刻 ¹⁾ (days)						
Time of arrival of		Type BB	11.03	38.57	20.76	34.52
the 1st individual ¹⁾		Type CC	15.02	38.95	22.81	36.39
個体数曲線の最大値						
Maximum		Type BB	26.84	43.48	28.90	43.07
no. of		Type CC	26.76	43.31	28.93	42.92
the curve		Type BB	514.96	500.90	468.01	359.29
		Type CC	507.33	459.37	460.12	357.48
群れの総滞在日数						
Total length of flock's stay		Type BB	9801.82	2964.61	4584.60	3699.91
		Type CC	9422.88	3170.16	4459.35	3694.62
個体の平均滞在日数						
Mean length of individual's stay		Type BB	7.00	2.18	3.60	3.79
		Type CC	6.83	2.54	3.57	3.80

1) 原点(時刻0)は3月31日. The origin is March 31.

は前年より到着が6~8日遅れ, 第2群は3~4日早く到着したと思われる.

群れの数が当地で最大数に達した時刻 t_p は, 1990年の第1群が4月26~27日, 第2群が5月13日ごろであった. 1991年は第1群が4月29日, 第2群が5月13日ごろで, タイプBBでもタイプCCでも大きく異なることはなかった. 第1群に関して1990年より1991年の方が2~3日遅れたが, 第2群は両年ともほぼ同時期であった. その最大数は1990年第1群で約500羽, 第2群で約460羽であった. 1991年はそれぞれ, 約460羽と約360羽で, 前年と比べ減少している.

次に, 個体数曲線 $x(t)$ と時間軸(t 軸)に囲まれた部分の面積は, 群れの総滞在日数(単位は羽・日)を表わし, その群れが当地をどの程度利用したのかを示すひとつの尺度になる. 1990年第1群が約9,500羽・日であったのに対し, 第2群は約3,000羽・日と3分の1くらいであった. ところが1991年第1群が約4,500羽・日, 第2群が約3,700羽・日と差が小さくなった. また第1群の総滞在日数は前年の約半分であった.

この総滞在日数を群れの全個体数 U で割ると, 1羽あたりの平均滞在日数が得られる. 1990年第1群が約7日と長く滞在したのに, 第2群は約2.5日と短かった. 1991年第1群が約3.6日, 第2群が約3.8日とほぼ同じくらいの平均滞在日数であって, 1990年との違いがきわだった.

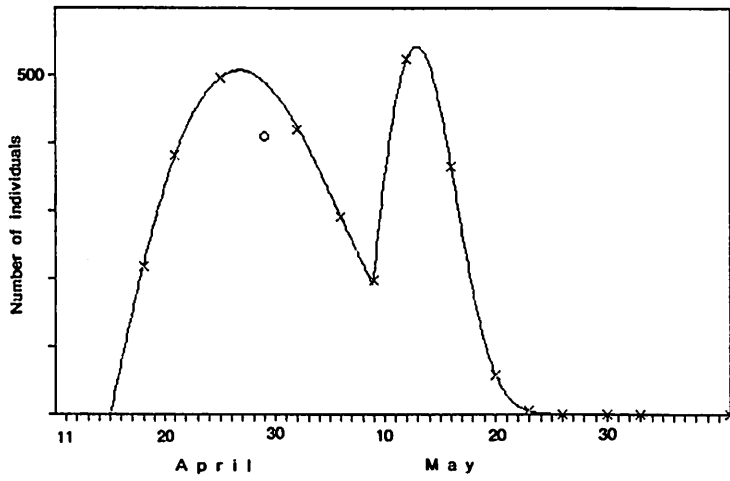


図3. 尾津における1990年春のハマシギ個体数（×印と○印）の変動と、ゴンバーツ型個体数曲線（タイプCC曲線：本文参照，○印は未知母数の推定に使わなかった記録を示す）。

Fig. 3. The fluctuation in the number of Dunlins at Ozu in the spring of 1990, and the curve of Gompertz type (the type CC, ○ : unused for estimation).

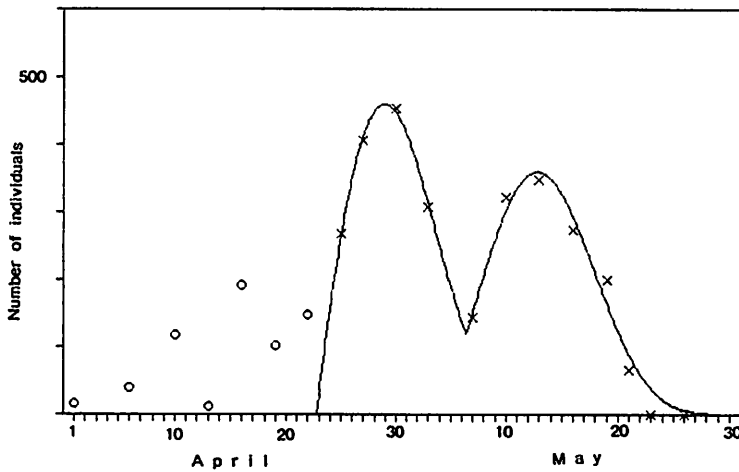


図4. 尾津における1991年春のハマシギ個体数（×印と○印）の変動と、ゴンバーツ型個体数曲線（タイプCC曲線，○印は未知母数の推定に使わなかった記録を示す）。

Fig. 4. The fluctuation in the number of Dunlins at Ozu in the spring of 1991, and the curve of Gompertz type (the type CC, ○ : unused for estimation).

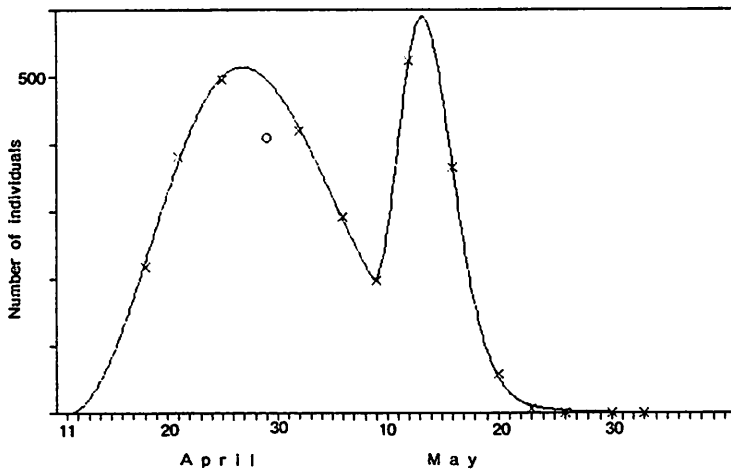


図5. 尾津における1990年春のハマシギ個体数の変動と、正規分布型個体数曲線（タイプBB 曲線：本文参照）。あてはまりはゴンパーツ型個体数曲線ほどよくない。
 Fig. 5. The fluctuation in the number of Dunlins at Ozu in the spring of 1990, and a theoretical curve of the Normal distribution type (the type BB) which was not fitted so well as the Gompertz type curve.

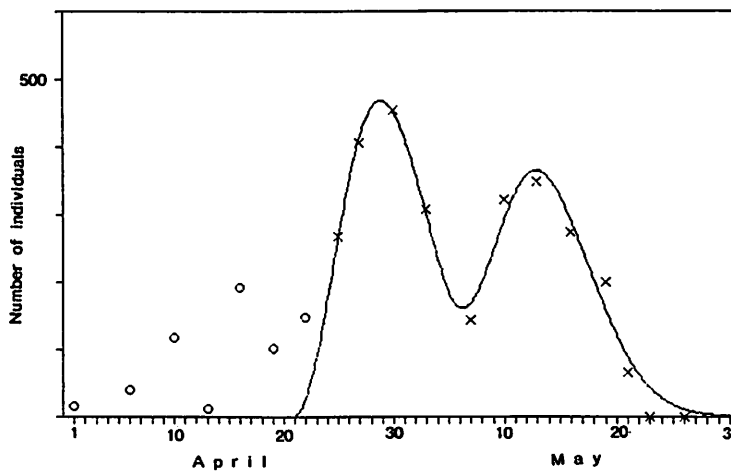


図6. 尾津における1991年春のハマシギ個体数の変動と、正規分布型個体数曲線（タイプBB 曲線）。あてはまりはゴンパーツ型個体数曲線ほどよくない。
 Fig. 6. The fluctuation in the number of Dunlins at Ozu in the spring of 1991, and a theoretical curve of the Normal distribution type (the type BB) which was not fitted so well as the Gompertz type curve.

おわりに

あてはめ計算の目的のひとつであった、数理モデルの妥当性を検討し、あわせて残された問題点を指摘しておきたい。

計算の結果からみると、1990年の記録にはタイプCCの曲線がたいへんよく適合した。しかし、1991年の記録に対しては、前年ほどのあてはまりを示さなかった。図4を見ると、5月中旬に通過した第2群に対するあてはまりがよくないようである。今回考えたモデルでは、移動率 λ_i が時間にのみ依存していると仮定したが、それ以外の要因が働いたのかもしれない。たとえば、人や外敵に追われて強制的に移動したり、次の中継地へ向かう大きな集団につられて移動する個体が多かったことも考えられる。

一方われわれの仮定する個体数曲線を複数の群れに対して適用するには、本調査の観察記録のように2つの群れが明確に分離できる場合には有効であるが、時間的に重なり合う群れに対して適用するのはたいへんむずかしい。そのような場合には精度の高い記録が数多く必要である。タイプAA、タイプBB、タイプCCの曲線はどれも母数が6であるから、意味のある推定を行なうためには7個以上の記録が必要である。したがって、3日ごとの調査では時間的に重なりながら20日以内に通過していく2つの群れに対して、これらを分離する母数を有効に推定することはできない。1991年の第2群は5月13日をすぎたころに小さな群れが合流したとも考えられる。このことがあてはまりが悪くなった理由であるとすれば、観察の時間間隔を考え直す必要がある。

しかし、2つの群れが時間的にほとんど重なって通過したときは、観察した個体のうち、どれくらいの数かどちらの群れに属するかが微妙になる。曲線あてはめのくり返し計算もこれに対して非常に敏感になり、収束しにくくなる。この解析方法にも限界があり、観察時間間隔を細かくとって、計算からは2つの群れを分離できない場合もある。

1991年4月1～22日にかけて、小さな群れが2つくらいこの期間に通過したと思われる(図4)。この群れに対するあてはめ計算は、観察回数が少なく有効な推定はできなかった。この場合も観察間隔を短くとの必要があると思われる。

今回は尾津を第1中継地と考えたが、ここでの個体数の変化は実際にはこれより前の中継地の影響を大きく受けると考えられるし、また年による変動もほかの中継地と比較して判断しなければならない。この観点から調査地点をふやし、得られた観察記録を相互に利用できる体制のもとでの分析が必要であろう。

謝 辞

鳥取市在住の日本野鳥の会会員、鶴崎展巨氏に原稿全般にわたって有益な助言をいただいた。深く感謝申し上げる。

要 約

ハマシギのように中継地を順に移動していく渡りは、生物拡散過程の特別な場合として定式化できる。その基本方程式をある条件の下で解いて得られる個体数曲線を、実際の観察記録にあてはめた。標本は、1990年4月と5月および1991年4月と5月に3～4日間隔で、岩国市尾津のほぼ全域で調査したハマシギの個体数である。あてはめ計算の結果はほぼ満足できるものであり、とくに1990年の観察結果に対してはあてはまりがよかった。観察結果は、1990年も1991年もともに2つの大きな群れが

通過したことを示していたので、個体数曲線も2つの曲線の和をもちいた。これによりそれぞれの群れの成分を分離することができ、ひとつひとつの群れの総個体数や通過時期、当地での滞在日数などの特性値が得られた。

引用文献

- Akaike, H. 1972. Automatic data structure search by the maximum likelihood. *Computer in Biomedicine*. Suppl. Proc. 5 th Hawaii International Conference on System Sciences : 99-101.
- 弘中毅. 1991. 岩国市の鳥類 岩国の自然 No. 1. 岩国自然研究会, 岩国.
- 石川勉・桑原和之. 1983. 谷津干潟におけるチドリ類の個体数の変化. *Strix* 2 : 19-32.
- 巖佐庸. 1990. 数理生物学入門. H B J 出版局, 東京.
- 日本野鳥の会長岐阜支部. 1989-1991. 研究部カウント報告. つばさ (49)-(80).
- Rao, C. R. 1973. *Linear Statistical Inference and Its Applications*. John Wiley & Sons, New York.

Changes of flock size of migrating Dunlins *Calidris alpina* during spring at Ozu, Iwakuni city : A mathematical approach

Hiroshi Sasaki¹, Takeshi Hironaka² and Masashi Nakata³

1. We attempted to apply a mathematical approach for analyzing a migration of Dunlins.
2. We considered a migration of Dunlins to be a kind of diffusion process which goes from the starting point to the destination via transits. From this point of view, we introduced a mathematical model to the process.
3. From diffusion equations, we obtained three types of curves ; 1) the exponential type, 2) the normal-distribution type, 3) the Gompertz type, representing the number of migrating Dunlins.
4. The sample used here was the number of Dunlins observed at Ozu, Iwakuni city, Yamaguchi Pref. in the spring of 1990 and 1991 at intervals of three or four days.
5. By estimating unknown parameters of population curves based upon our mathematical model, we could characterize the migration in a transit station such as Ozu. The dual Gompertz type curve,

$$x = x^1 + x^2,$$

$$\text{where } x^i = V_i \cdot (e^{b_i(t-a)} - 1) \cdot e^{-e^{b_i(t-a)}} \quad (i = 1, 2),$$

was fitted well to the sample data in 1990.

6. We explained the change of the numbers of Dunlins at Ozu by characteristics of theoretical curves. The flock size, the time of arrival of the first individual, the maximum number of Dunlins at Ozu, the total length of flock's stay, the mean length of individual's stay, etc. were discussed.

1. Miyajimaguchi-higashi 1-1-3-14, Ohno-cho, Saeki-gun, Hiroshima 739-04
2. Nishikimi 6-12-1, Iwakuni-shi, Yamaguchi 741
3. Takeya-cho 1-4-302, Naka-ku, Hiroshima-shi 730