

# 局所回帰による時系列の分解から明らかになった 野鳥羽数の環境要因変化との関連性<sup>†</sup>

島津 秀康 \*      柴田 里程 \*\*

## Analysis of Bird Count Series by Local Regression to Explore Environmental Changes

Hideyasu SHIMADZU \* and Ritei SHIBATA \*\*

Five bird count series observed on a monthly basis from 1967 to 1998 at Jiyu-Gakuen, Higashi-Kurume in Tokyo are simultaneously analysed. Each count series is decomposed into three components, "long trend", "short trend" and "irregular" by two step loess smoothings. This decomposition explains well the relationship between the bird count and some of environmental changes. By selecting appropriate locations and scales as well as the smoothing parameters so as to minimise the residual sum of squares, it is shown that each five long trend very similarly moves with one of environmental factors. Turtledove (*Streptopelia orientalis*), Brown-eared Bulbul (*Hypsipetes amaurotis*) and Great Tit (*Parus major*) increased its number to link with the enlargement of housing area. Tree Sparrow (*Passer montanus*) and Gray Starling (*Sturnus cineraceus*) gradually decreased its number to link with the decrease of open field. Such two bird groups are well described by the environmental preferences. Variation of each short trend can be explained by the effects of breeding season or winter wandering. The fact that each irregular series has no significant trend and very low correlation coefficients suggests a success of our decomposition.

東京都東久留米市自由学園で継続的に1967年から1998年まで毎月観察されてきた60種の野鳥羽数時系列データのうち野鳥種5種、キジバト、ヒヨドリ、シジュウカラ、スズメ、ムクドリそれぞれに対して、局所回帰による2段階平滑化を施し各種の羽数時系列を長期、短期のトレンドとイレギュラー系列へ分解した。その結果、長期トレンドは、時系列としての位置と尺度さえ調整すれば年単位での大きな環境変化、その中でも宅地面積の拡大、あるいは田畑面積の縮小と驚くほど一致し環境要因変化との密接な関連性を明らかにすることができた。宅地面積の拡大に一致する鳥種と田畑面積の縮小に一致する鳥種に明確に二分されることは、鳥の環境選択性を示している。また、短期トレンドは、繁殖期における羽数増加だけでなく、種によっては、冬期の移動性の影響があることを示している。残りの

<sup>†</sup> 本稿執筆に際し、駿河台大学内田康夫教授より鳥類に関する貴重なコメントを数多く頂いた。また、自由学園男子部山縣基氏からは貴重な情報を提供頂いた。心より感謝申し上げます。

\* 慶應義塾大学大学院理工学研究科 〒223-8522 横浜市港北区日吉 3-14-1

\*\* 慶應義塾大学理工学部数理科学科

イレギュラー系列は、ほとんど傾向の見られない互いに相関の小さな時系列になっており、分解の十分性を示している。

## 1 はじめに

鳥類と環境との関係は古くから生態学の分野で研究が進められてきた。実地調査にもとづき、自然環境条件の差異と観測された野鳥種数との関係がこれまで多く議論されている（例えば国内では内田 1979, 樋口ら 1982, 穴田・藤巻 1984, 平野ら 1985, 平野ら 1989, 村井・樋口 1988, 黒沢 1994, 大鷹・中村 1996, Maeda 1998 など）。しかしながら、実際の環境は時間と共に連続的に変化しており、その速度や内容の違いによる鳥類への影響を明らかにするには鳥類群と環境条件の「変化」を捉えた研究が必要である。それには種ごとの羽数変化の解析が必要不可欠で、これまでの種数を中心とした議論だけでは不十分である。それは種数自体が羽数を包含した数値であるため、個体レベルでの変化を見落としかねない。特に人工的に引き起こされる環境変化のように速度の速い現象を扱う場合には、羽数に関する解析が重要となる。しかし国内では 2 節で述べるような理由から、長期調査にもとづいて鳥類群と環境の変化との関係を扱った本格的な解析例（例えば黒田・米田 1983, 平野 1996, 米田・上木 2002, 内田ら 2003）は少ないのが現状である。

そのような現状を踏まえ、本研究では国内で記録、公開されている長期バードセンサデータの 1 つであり、その収集に著者の 1 人が関与した東京都東久留米市自由学園のセンサデータにもとづき、野鳥羽数と環境変化との関係を探る。観察地内で見られた野鳥の全数調査が 3.2 節で述べられている方法で毎月実施されており、その調査方法も実施当初から一貫し、非常によく管理、記録されたデータである。具体的な解析としては、野鳥種それぞれの観測羽数時系列に局所回帰による平滑化を順次 2 度施し、各時系列を「長期トレンド」「短期トレンド」「イレギュラー」の 3 成分に分解する。さらに各トレンドと環境要因との密接な関係を探索し、羽数変動の構造を明らかにする。その際、単位の異なる時系列の形状を比較するために長期トレンドについて最小二乗法を用いた時系列の位置と尺度のノンパラメトリックな変換も行う。その結果、キジバト、ヒヨドリ、シジュウカラ 3 種の長期トレンドが観察地周辺の宅地面積および東久留米市の簡易舗装道路延長の増加と極めてよく一致し、スズメ、ムクドリ 2 種は田畑面積および砂利道延長の減少と一致することが明らかになった。さらに短期トレンドに注目することで繁殖期に増加傾向を示すスズメ、ムクドリと冬期に渡りや移動の影響と考えられる増加傾向を示すキジバト、ヒヨドリ、シジュウカラの存在も明らかになった。

## 2 国内外の野鳥羽数調査

ある観察地で観測される野鳥の種類とその羽数を記録する調査をバードセンサ（Bird Census）と言うが、国内外で盛んに実施されているそれらの調査は、専門家によ

る学術的なものから，鳥愛好家，いわゆるバードウォッチャーによる趣味のものまで，その種類，調査期間，目的は多岐に及んでいる．海外では一定ルールのもと，アマチュアによるセンサスを全国規模で組織的に実施し，集められたデータをインターネット上で公開するなど，調査実施形態の整備とデータの保存，公開が進んでいる．例えば，英国鳥類保護協会(BTO; British Trust for Ornithology)が主体となって1962年から英国全土で行っているCommon Bird Census(CBC; <http://www.bto.org/index.htm>)，米国地質調査所(USGS; the U.S. Geological Survey)とカナダ野生生物局(CWS; the Canadian Wildlife Service)が1966年から米国で行っているBreeding Bird Survey(BBS; <http://www.mp2-pwrc.usgs.gov/bbs/>)などは大規模かつ歴史あるバードセンサスの代表的なものである．

しかしながら国内でのバードセンサスは，そのほとんどがアマチュア個人，あるいはグループ単位で実施されており，センサスのルールを厳密に定め，組織的にセンサスを展開しているものではない．そのため著者の知る限り，国内のセンサスデータのほとんどは，センサスを実施したアマチュア，あるいはグループ単位で保存され，結果としてデータはまとめられることなく散在しているのが現状である．このような状況の中にあって，本研究で解析に用いる自由学園の調査データは長期にわたりアマチュアが実施した調査結果でありながら，データがよく整理され，かつ，公開されているという点で貴重である．

### 3 データの概要

#### 3.1 調査環境

自由学園(図1)の所在する東京都東久留米市は，関東ローム層上にひろがる武蔵野台地の中央部，北多摩北東部の都心から20km圏に位置し，東西6.5km，南北に3.5km，約12.92km<sup>2</sup>の市域を有している．また，地形は標高70mから40mの範囲で西から東へと緩やかに傾斜し，数本の崖線から水が湧き出し，これを水源に黒目川，落合川，立野川が東流する．

その中で，自由学園は東久留米市の東南端，標高56mから47mに位置し，およそ10万m<sup>2</sup>の敷地を有す．敷地内の主な樹種構成はイロハモミジ(*Acer palmatum*)，ケヤキ(*Zelkova serrata*)，イチョウ(*Ginkgo biloba*)，イヌシデ(*Carpinus tschonoskii*)などの落葉樹をはじめ，アカマツ(*Pinus densiflora*)，シラカシ(*Quercus myrsinaefolia*)などの常緑樹も多く，林床にはアオキ(*Aucuba japonica*)，アズマネザサ(*Pleioblastus chino*)の茂みが見られる．グラウンド，畑などの裸地，芝生，小さな池が点在しているのも特徴である．敷地内の林は管理が行き届き，典型的な関東の雑木林に比べ明るい林になっている．また，敷地内の環境状態は長期にわたり比較的良好に保存されてきている．

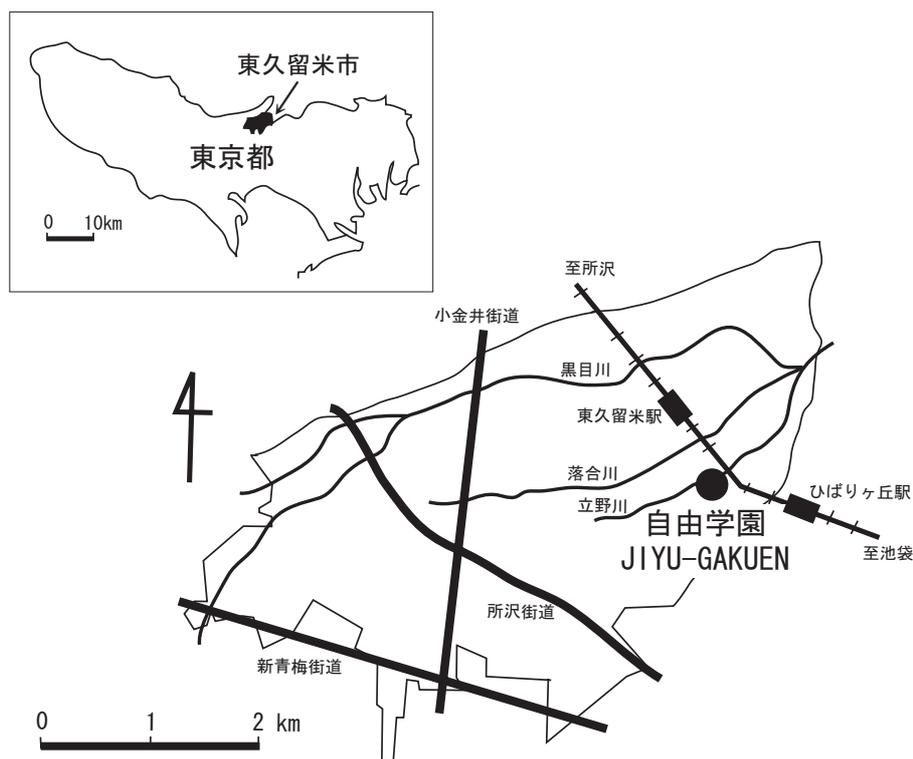


図 1: 東京都東久留米市自由学園

### 3.2 調査方法

調査には、毎月、男子部中等科3年生、約40人があたっている。敷地を7つの区域に分け、各々の班5～6人が1つの区域を受持ち、天気の良い日の午前中（ほぼ9：00～11：00の任意の約30分間）に一齐に担当区域をくまなく調査する「全センサス法」を採用している。最後は全員で同じ鳥を重複して数えていないかなどを検討しながら、その日に見られた種類、種類ごとの羽数、総羽数等をまとめている。

一般にバードセンサスの手法として、繁殖期に鳥類が一定範囲の縄張りを保持する性質を利用し、観察区域全域をくまなく調査することで鳥の行動パターンから縄張りなどを調査するテリトリーマッピング法（Territory Mapping；なわばり記図法）、設定された調査線上を一定速度で進み、一定範囲の羽数を観測するライントランセクト法（Line Transect）、ある地点で一定時間待機し、一定範囲内で観測された羽数を数えるポイントカウント法（Point Count；区画待機法）などが知られている（Bibby *et al.* 2000）。英国のCBCはテリトリーマッピング法、アメリカのBBSはポイントカウント法を用いて全国の固定調査地で羽数調査を行なっている。一方、日本では山地が多いなどの地理的理由からライントランセクト法が多く採用される。しかしながらこれらの方法は鳥種、観察環境、観察者の能力の違いにより一長一短があり、ときとして定量的な議論が困難となる場合がある。そのため、専門家ではない生徒たちが調査をするには、自由学園で実施されているような全センサス法が簡便であり、問題も少ない

(吉良 2000) . 野外生物調査にもとづいて議論する際 , その調査手法も重要な論点であるが , 本論文の目的からはそれるので , ここではこれ以上 , 触れないことにする .

### 3.3 解析の対象とした野鳥種

3.2 節で述べた方法にもとづき自由学園で記録されてきたバードセンサスのデータは吉良ら (2002) で公開されている . さらに , DandD(Data and Description) ルール (柴田 2001 , 横内・柴田 2001) にもとづき記述されたデータも , 以下の URL から自由に入手可能になっている . 詳細については付録 A を参照されたい .

<http://www.stat.math.keio.ac.jp/DandDIII/Examples/JiyuBirdCount.dad>

今回 , 解析の対象とした 1967 年から 1998 年までの 32 年間で記録された野鳥種は亜種を含め 60 種にのぼる . しかし , その内 52 種は調査を実施した全 384 回のうち , 3 分の 1 以上で観測羽数がゼロ羽であった . 表 1 で示されているように , 1 羽以上観測の月数に関する順位が 8 位まで , つまりハシブトガラスまでは , 3 分の 2 近くの月で 1 羽以上観測されたのに対して , 9 位以下は多くの月で観測羽数がゼロとなっている . そこで , 4 節で述べるような平滑化の手法を用いて環境要因との関係を探るには特殊すぎると考え , 9 位以下は以降の解析では対象外とした .

表 1: 観察野鳥と 1 羽以上観測された月数

順位	1 羽以上観測の月数	和名	学名
1	383	スズメ	<i>Passer montanus</i>
2	377	キジバト	<i>Streptopelia orientalis</i>
3	362	シジュウカラ	<i>Parus major</i>
4	354	ヒヨドリ	<i>Hypsipetes amaurotis</i>
5	344	ムクドリ	<i>Sturnus cineraceus</i>
6	328	オナガ	<i>Cyanopica cyana</i>
7	305	カワラヒワ	<i>Carduelis sinica</i>
8	236	ハシブトガラス	<i>Corvus macrorhynchos</i>
9	127	ツバメ	<i>Hirundo rustica</i>
10	118	ツグミ	<i>Turdus naumanni eunomus</i>
11	101	アオジ	<i>Emberiza spodocephala</i>
12	89	モズ	<i>Lanius bucephalus</i>
13	88	コジュケイ	<i>Bambusicola thoracica</i>
14	84	ハクセキレイ	<i>Motacilla alba</i>
15	82	コゲラ	<i>Dendrocopos kizuki</i>
16	64	ウグイス	<i>Cettia diphone</i>
17	54	カルガモ	<i>Anas poecilorhyncha</i>
18	54	シメ	<i>Coccothraustes coccothraustes</i>
19	54	メジロ	<i>Zosterops japonicus</i>
20	50	イカル	<i>Eophona personata</i>
21	50	キセキレイ	<i>Motacilla cinerea</i>
22	47	ドバト	<i>Columba livia var. domestica</i>
23	44	ハシボソガラス	<i>Corvus corone</i>
24	40	セグロセキレイ	<i>Motacilla grandis</i>
25	31	ジョウビタキ	<i>Phoenicurus aureoreus</i>
26	24	アオゲラ	<i>Picus awokera</i>
27	15	チゴモズ	<i>Lanius tigrinus</i>
28	14	ツミ	<i>Accipiter gularis</i>
29	13	コサギ	<i>Egretta garzetta</i>
30	10	ホオジロ	<i>Emberiza cioides</i>
31	10	カシラダカ	<i>Emberiza rustica</i>
32	10	ヒガラ	<i>Parus ater</i>
33	9	カッコウ	<i>Cuculus canorus</i>
34	8	イワツバメ	<i>Delichon urbica</i>
35	8	シロハラ	<i>Turdus pallidus</i>
36	7	ツツドリ	<i>Cuculus saturatus</i>
37	7	アオバズク	<i>Ninox scutulata</i>

38	6	キビタキ	<i>Ficedula narcissina</i>
39	6	カケス	<i>Garrulus glandarius</i>
40	6	センダイムシクイ	<i>Phylloscopus coronatus</i>
41	4	オオタカ	<i>Accipiter gentilis</i>
42	4	ヒバリ	<i>Alauda arvensis</i>
43	3	ワカケホンセイインコ	<i>Psittacula krameri manillensis</i>
44	2	アマツバメ	<i>Apus pacificus</i>
45	2	トビ	<i>Milvus migrans</i>
46	2	ヤマガラ	<i>Parus varius</i>
47	2	サンショウクイ	<i>Pericrocotus divaricatus</i>
48	2	ルリビタキ	<i>Tarsiger cyanurus</i>
49	2	アカハラ	<i>Turdus chrysolaus</i>
50	2	ハチジョウツグミ	<i>Turdus naumanni naumanni</i>
51	1	コガモ	<i>Anas crecca</i>
52	1	ビンズイ	<i>Anthus hodgsoni</i>
53	1	ヨタカ	<i>Caprimulgus indicus</i>
54	1	オオルリ	<i>Cyanoptila cyanomelana</i>
55	1	オジロビタキ	<i>Ficedula parva</i>
56	1	ユリカモメ	<i>Larus ridibundus</i>
57	1	エゾビタキ	<i>Muscicapa griseisticta</i>
58	1	ゴイサギ	<i>Nycticorax nycticorax</i>
59	1	ハチクマ	<i>Pernis apivorus</i>
60	1	トラツグミ	<i>Zoothera dauma</i>

また，1羽以上観測の月数が比較的多いオナガ，カワラヒワは，観測羽数が突発的に増加している（図2）．これは，両種の生態的な特性を色濃く反映した結果である．冬期に多く観測されることの多いカワラヒワは，基本的に冬期移動性の種である．しかし，その羽数は主食となる移動先の草本種子の結実具合によって大きく変動し，その結果として図2に示されたような突発的な増加が見られる．また，オナガは繁殖期以外は小群を形成し移動，行動するため，調査実施時に群れが観察地内に停留していれば十数羽の観測となるが，そうでなければ観測羽数がゼロとなり，同様に極端な羽数観測となる．このような生態的な特徴から突発的な増加を示す2種に対して平滑化の手法を用いて観測羽数変化と環境要因変化との関係を論じるのは「データの持つ滑らかな傾向を抽出する」という平滑化本来の目的からすれば不適切であり，これら2種も解析の対象から外すことにする．

このように除いた計54種については，それぞれの生態的特徴を加味した解析手法で別途，解析を行う必要があるが，それは将来の研究課題として，以降，表1で太字で示された6種，キジバト，ヒヨドリ，シジュウカラ，スズメ，ムクドリ，ハシブトガラ

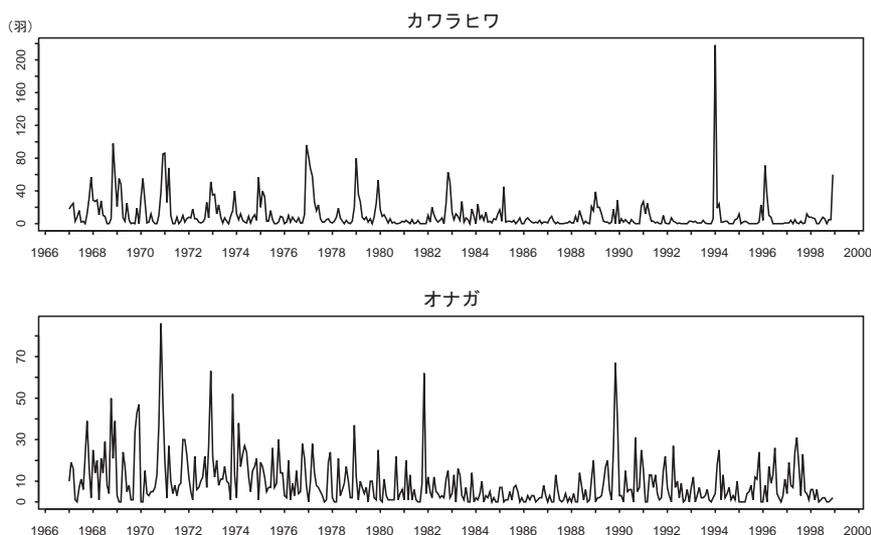


図 2: カワラヒワとオナガの観測羽数時系列

スについて議論する．結果的に残ったこれらの種は本地域で留鳥に分類される種であり，一年を通して常に観測される野鳥種である．そのため，観察地周辺の環境と密接な関わりを持つ種として取り上げるのに適切であると考えられる．

## 4 モデル

時系列データに対する有効なアプローチの1つとしてオリジナル時系列の分解が挙げられる．得られたいくつかの成分を実際の現象と照らし合わせることで，現象の背後にある構造を明らかにするのが目的である．事実，経済時系列の解析によく用いられる季節調整法は，あらかじめ季節効果，月効果など，解釈のしやすい特定のサイクルを仮定してオリジナル時系列をそれらの成分へ分解していく手法である．仮定したサイクルがデータに相当であればよいが不適当な場合，当然のことながらモデルの当てはめは不適切な結果を導くことになる．今回の場合は現象の構造が明確でないうえに解析の目的が羽数変動に注目し，その原因を探ることにあることから，あらかじめ特定のサイクルを仮定しないノンパラメトリックな平滑化を複数回適用し，オリジナル時系列をいくつかの成分に分解する方法を採用することにした．

ノンパラメトリックな平滑化は一般に

- シュプライン(区分多項式)平滑化
- 局所回帰平滑化

に大別できる．シュプライン平滑化は，あらかじめ定めた節点(ふしてん)で区分された区間それぞれに異なる多項式を当てはめ，それらの多項式を繋ぎ合わせて平滑曲線を求める．従って，定めた節点の意味，区分ごとに異なる多項式の意味を解釈する

必要がある．しかし今回の場合，節点をどのように決めるのが適当かすら不明であるので，シュプライン平滑化による時系列の分解は困難である．一方，局所回帰平滑化は，目的とする平滑曲線が局所的に多項式で近似できると想定した平滑化を行う．一般に平滑化の手法としてよく知られている核型平滑化は，局所回帰平滑化で0次多項式を想定することに相当するが，4.1節で示すように端点での扱いは必ずしも同等ではない．注目する局所におけるデータの振る舞いによっては高次の多項式を想定した方が自然であることも多いので，端点での扱いの統一性も考慮し，ここでは核型平滑化ではなく局所回帰平滑化を用いることにした．具体的には，局所回帰平滑化のアルゴリズムlowess(Cleveland 1979)の発展版であるloess(Cleveland and Devlin 1988)によって，与えられた羽数系列を分解する．局所回帰平滑化を用いたモデル構築に関してはチェンバース・ヘイステイ(1994)，Fan and Gijbels (1996)を参照されたい．

本研究同様に野鳥羽数時系列データに対して局所回帰を用いた解析を行っているJames *et al.* (1996)は，あらかじめトレンドの関数を定めることなくアプローチできる手法として局所回帰を挙げ，1966年から1992年までの26年間分BBSデータにもとづき，北アメリカ中央部から東部にかけて観察されたアメリカムシクイの仲間(American Warblers)26種の観測羽数に手法を適用している．その結果，抽出したトレンドの増減が地理的な高度の差異に強く依存している様子を示し，その原因として大気汚染による食資源劣化の可能性を指摘している．しかしその議論はモデルを通して羽数増減の具体的な要因にまで言及しているわけではない．これに対して本研究の目的は，あくまでも局所回帰を用いた平滑化による野鳥観測羽数時系列の分解から羽数変化の背後にある構造と環境要因のとの関係をモデルによって表現することにある．

#### 4.1 局所回帰平滑化

一般に局所回帰は所与のデータ  $(t_j, y_j), j = 1, \dots, n$  に対してその背後に滑らかな関数  $f(t)$  の存在を仮定し，この  $f(t)$  を  $p$  次多項式によって局所的に近似する．具体的には，以下のように重み関数  $w(\cdot)$  によって定められる近傍に重みをつけた最小二乗法によって求める．つまり，

$$\sum_{j=1}^n w\left(\frac{|t_j - t|}{d_\delta(t)}\right) \{y_j - f_t(t_j)\}^2 \rightarrow \min_{f_t} \quad (1)$$

となる  $f_t$  を求める．ただし， $d_\delta(t) = \max_{j; t_j \in U_\delta(t)} |t_j - t|$  であり， $U_\delta(t)$  は  $t$  の  $[n\delta]$  最近隣近傍， $[n\delta]$  は  $n\delta$  を越えない最大整数である． $\delta$  は平滑化パラメータ (span) と呼ばれ，最近隣近傍内のデータ数が全データ数  $n$  に対して占める割合を定めている．さらに，このとき  $f_t$  としては

$$f_t(s) = \sum_{k=0}^p \beta_k(t) (s - t)^k$$

のような  $p$  次局所多項式を想定する．今回，用いたデータ解析ソフトウェア S-PLUS の関数 `loess` では， $w$  として以下のような 3 乗 3 次の重み関数

$$w(x) = \begin{cases} (1 - x^3)^3, & 0 \leq x < 1 \\ 0, & \text{その他} \end{cases}$$

を採用しており，関数 `loess` の引数 `degree` によって多項式の次数  $p$  を指定できる．結果としての平滑曲線は各近傍ごとに当てはめられた多項式の定数項部分の係数  $\hat{\beta}_0(t)$  によって与えられる．具体的には

- $p = 0$

$$\hat{\beta}_0(t) = \sum_j \frac{1}{s_0(t)} w\left(\frac{|t_j - t|}{d_\delta(t)}\right) y_j$$

- $p = 1$

$$\hat{\beta}_0(t) = \sum_j \frac{s_2(t) - (t_j - t) s_1(t)}{s_0(t) s_2(t) - s_1(t)^2} w\left(\frac{|t_j - t|}{d_\delta(t)}\right) y_j$$

- $p = 2$

$$\begin{aligned} \hat{\beta}_0(t) = & \frac{1}{c(t)} \sum_j \left[ \{s_2(t) s_4(t) - s_3(t)^2\} - (t_j - t) \{s_1(t) s_4(t) - s_2(t) s_3(t)\} \right. \\ & \left. + (t_j - t)^2 \{s_1(t) s_3(t) - s_2(t)^2\} \right] w\left(\frac{|t_j - t|}{d_\delta(t)}\right) y_j \end{aligned}$$

となる．ただし， $s_r(t) = \sum_j (t_j - t)^r w(|t_j - t|/d_\delta(t))$ ， $c(t) = 2s_1(t) s_2(t) s_3(t) + s_0(t) \{s_2(t) s_4(t) - s_3(t)^2\} - s_1(t)^2 s_4(t) - s_2(t)^3$  である．

このように，局所回帰平滑化によって得られる平滑曲線も核型平滑化によって得られる平滑曲線と同様， $y_1, \dots, y_n$  の局所重みつき平均の形をしている点では類似している．しかし，先にも触れたように，核型平滑化は端点付近で有効データ数が次第に減少するために特異な挙動を示すことがあるのに対して，局所回帰平滑化では常に近傍内に  $[n\delta]$  個のデータが含まれるように平滑化が行われるため，端点での特異な挙動は起きにくい．なお，等間隔観測ならば  $t = t_j$  での  $p = 1$  としたときの平滑値は端点が近傍に含まれない限り，重み関数の対称性から  $p = 0$  のときの平滑値と一致する．

いずれにしても，局所回帰平滑化のよさは最近隣近傍を採用していることによる端点での挙動の自然さと，同一の重み関数と平滑化パラメータであっても， $p$  を変えることにより局所的な挙動を統一的に制御できるところにある．

## 4.2 局所回帰による時系列データの分解

ここでは，オリジナル時系列に局所回帰を一度施し，さらにその残差に対して平滑化パラメータ  $\delta$  (span) を変え，再度，局所回帰を適用することで，2本の平滑曲線(ト

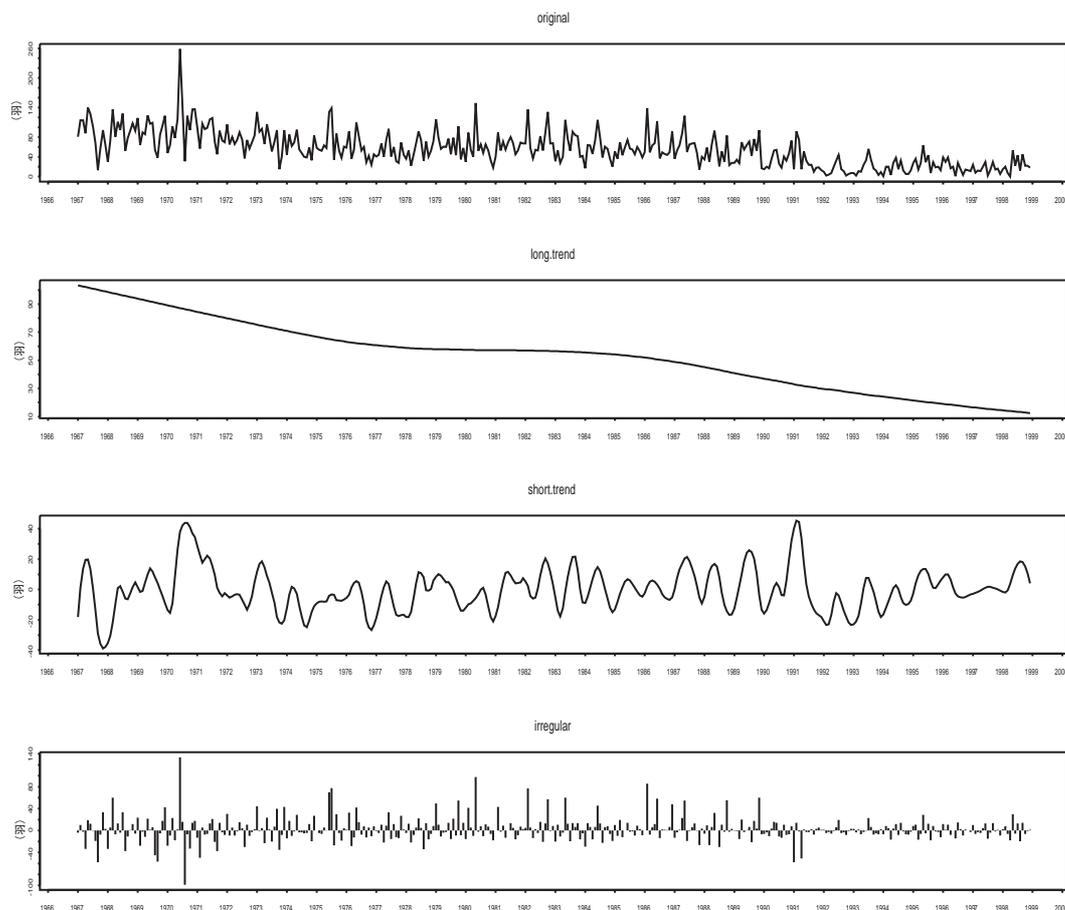


図 3: 観測羽数分解の例(スズメの場合)

レンド)と1本の残差系列(イレギュラー系列)を抽出する2段階平滑化により時系列を分解した. 分解のアルゴリズムについては付録Bを参照されたい. このように時系列データに対して局所回帰による平滑化を複数回施す手法は Shibata and Miura(1997)によって時系列データの新しい分解手法として提案され, 日本の日次金利時系列データの解析に導入された. 現在ではさまざまな金融時系列にも適用されている.

図3にはS-PLUSで観測羽数時系列データの分解を行った結果をスズメを例として示した.  $x$ 軸には1967年1月から1998年12月までの暦日が示されているが, 計算上は通算月  $t = 1, \dots, 384$  として考える. 最上段がスズメの観測羽数時系列, 2段目が緩やかな変化を見せる長期トレンド, 3段目が短期トレンド, 4段目が残りのイレギュラー系列である. 一般的には, 種  $i$  のオリジナル時系列が以下のように3本の時系列の和に分解される.

$$Z_i(t) = L_i(t) + S_i(t) + I_i(t), \quad t = 1, \dots, 384.$$

この分解は, 時系列にトレンド, 季節サイクルといった既存のモデルを仮定せず, 局所回帰による平滑化を用いて, 長期トレンド  $L_i(t)$ , 短期トレンド  $S_i(t)$  の抽出を目的

としている．ここで  $L_i(t)$  は数十年の長期的スケールで緩やかに変化するトレンドである．また， $S_i(t)$  は1年レベルの比較的短期で変化するトレンドではあるが，あらかじめサイクルの仮定された季節トレンドではない．あくまでも平滑化によりデータから自然に抽出されたトレンドである．これが特定のサイクルを仮定した時系列の分解とは大きく異なる点である． $L_i(t), S_i(t)$  がモデルの非確率的な部分であり， $I_i(t)$  が確率的に振舞うランダムな部分に相当する．

今回の分解ではオリジナル時系列を順次，長期トレンド  $L_i(t)$ ，短期トレンド  $S_i(t)$ ，イレギュラー系列  $I_i(t)$  と分解していくため，得られるトレンドは分解の手順に依存する．しかし，短期的なトレンドを抽出した上で長期的なトレンドを抽出するという逆の手順は不自然であり，ここでは考えない．もちろんこの分解系列の数は今回のように3本に限る必要はなく，必要に応じて適切に分解すればよい．このとき，各トレンドがそれぞれ意味のあるものとして解釈可能で，かつ，残りのイレギュラー系列が特徴のないランダムな時系列になっていることが重要となる．

局所回帰による平滑化は S-PLUS では関数 `loess` を用いれば容易に行えるが，その際に平滑化パラメータ  $\delta$  を引数 `span` で，多項式の次数  $p$  を引数 `degree` で指定する必要がある．平滑化パラメータおよび多項式の次数の選択については様々な議論がなされているが（Fan and Gijbels 1996），解釈可能なトレンドを得るためには，データから探索的に設定する必要がある．長期，短期トレンドの抽出に用いた平滑化パラメータおよび多項式の次数については，各トレンドの節で述べることにする．

## 5 野鳥観測羽数の環境要因変化との関連性

3.3節で挙げた6種の観測羽数  $Z_i(t)$  に対して長期的な変化傾向を探索し，比較したところスズメ，ムクドリ の2種が減少傾向，キジバト，シジュウカラ，ヒヨドリ，ハシブトガラスの4種が増加傾向を示し，二分されることが判明した．ただし，その内のハシブトガラスだけは，キジバト，ヒヨドリ，シジュウカラ同様に増加傾向を示すものの，そのトレンドが下に凸か上に凸かの明らかな違いが見られる（図4.6）．森林性の種であるハシブトガラスの増加は，近年，全国都市部で盛んに報告され社会的な問題にまで発展しており，本地域でも急激な増加傾向を示している（図4）．その原因として都市部の街路樹の生長，生ごみの集積方法など，様々な原因が考えられ，他の3種と同等に扱えないことが明らかであるので，今後の研究課題とし，残りの5種だけに注目することにする．

残りのキジバト，ヒヨドリ，シジュウカラ，スズメ，ムクドリ5種の長期的な羽数変化傾向と関連の深い要因を探るために気温や東久留米市の地目別面積などのいくつかの環境要因を調査し，長期的に増加傾向，減少傾向を示すものを探索したところ，最終的に以下4要因が参照する環境要因として残った．

- 宅地面積 ( $km^2$ ) 増加
- 田畑面積 ( $km^2$ ) 減少

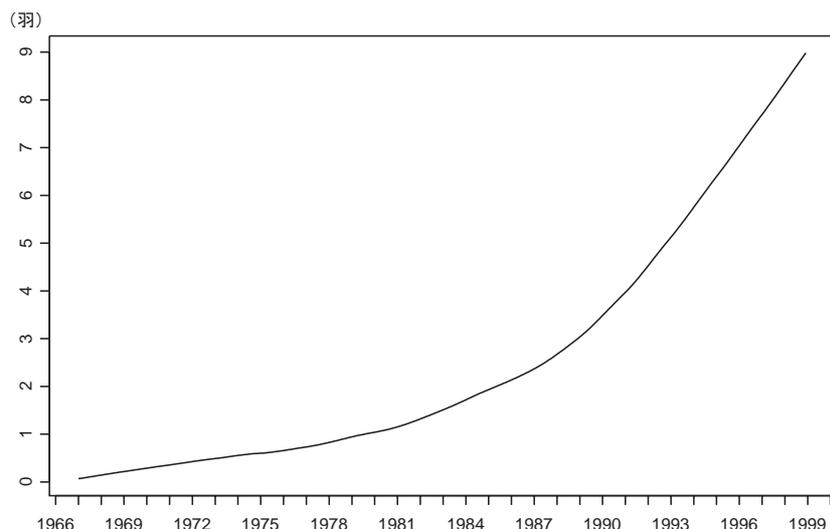


図 4: ハシプトガラスの長期トレンド

- 簡易舗装道路延長 (  $km$  ) 増加
- 砂利道延長 (  $km$  ) 減少

野鳥観測羽数と環境要因という互いに単位の異なる時系列を比較し，その関連を明らかにするには両者を重ね合わせて図示し，両者の類似あるいは相違を見るのが簡便である．しかしながら今回のように両者の単位が異なるような場合には，どちらか一方に変換を施す必要が生じる．そこで，複数種の長期トレンドと環境要因との関連を同時に見るために，各種の長期トレンドを上記 4 種類の要因  $R(t)$  に時系列としての位置  $b_i$  と尺度  $a_i$  をあわせることにし，以下のように最小二乗法を用いて  $a_i, b_i$  を定めることにした．

$$\sum_{t=1}^{384} \{R(t) - (a_i L_i(t) + b_i)\}^2 \xrightarrow{a_i, b_i} \min \quad (2)$$

なお，この時に (2) 式によって係数  $a_i, b_i$  を定めるだけでなく，適切な長期トレンド  $L_i(t)$  を決める平滑化パラメータ  $\delta$  も同時に定めることができる．つまり，さらに  $\delta$  についても (2) 式の誤差二乗和を最小にすることによって，最も適切な長期トレンドを決定する平滑化パラメータ  $\delta$  と長期トレンドに対して最も適切な変換を施す係数  $a_i, b_i$  を同時に定めることができる．実際に選択された平滑化パラメータ  $\delta$  と  $a_i, b_i$  の値の詳細は次節で述べる．

## 5.1 長期トレンド

野鳥種 5 種と 4 種類の環境要因それぞれの組み合わせについて，(2) 式の誤差二乗和を最小にするような平滑化パラメータ  $\delta$  と係数  $a_i, b_i$  を求めた．まず，局所的に当ては

表 2: 平滑化パラメータ (span)

	宅地	田畑	簡易舗装道路	砂利道
スズメ	-	15年	-	14年
ムクドリ	-	29年	-	27年
キジバト	32年	-	32年	-
ヒヨドリ	16年	-	25年	-
シジュウカラ	19年	-	29年	-

める多項式の次数は  $p = 1$  とした。表 2 には求めた平滑化幅  $n\delta$  を年表示で、表??には係数  $a_i, b_i$  を示してある。ただし、各種の長期トレンド、各環境要因の推移状況を見れば、どの種をどの要因に重ね合わせるのが適当か容易に判断できる。そこで増加傾向を示したキジバト、シジュウカラ、ヒヨドリ 3 種の長期トレンドを同じく増加傾向を示す宅地面積と簡易舗装道路延長に時系列の位置と尺度を合わせ、減少傾向を示したスズメ、ムクドリ 2 種を同様に減少傾向を示す田畑面積と砂利道延長に合わせた。したがって、該当しない箇所は「-」で示してある。

表??で示した係数  $a_i, b_i$  を用いて変換を施した 5 種の長期トレンドに対して図 6 には砂利道、簡易舗装道路延長の推移、図 5 には参照要因として田畑、宅地面積との重ね合わせを示してある。これら図 6,5 では、いずれも各種の長期トレンドと参照している各要因の推移は極めてよく一致しており、(2) 式によって定めた  $\delta$  と  $a_i, b_i$  が有意であることを示している。また、このことは  $p = 1$  で満足な結果が得られたことも示している。

キジバト、ヒヨドリ、シジュウカラについて、簡易舗装道路延長を参照した場合、表 2 の平滑化幅が宅地面積を参照した場合に比べて大きな値になっているのは、簡易舗装道路延長が極めて不連続な動きを示しているのが原因である。しかしながら、図 6,5 に示されているように宅地、田畑面積、簡易舗装道路、砂利道延長という一見まったく異なった要因に各種の長期トレンドが極めてよく一致している背景には、住宅地の整備にあわせ砂利道の舗装を行った東久留米市の開発、発展のシナリオが挙げられる。事実、図 5 に示されるような 1960 年代後半から 1970 年代末にかけての宅地面積の増加と田畑面積の減少は、明らかに 1960 年代の高度経済成長に伴う東京圏拡大の波及的な影響である。結果的に 1974 年には田畑面積と宅地面積とが完全に逆転している。

そのように考えれば、鳥類にとって本質的な環境の変化とは宅地面積の増加と田畑面積の減少にあり、道路の舗装状況との関連は東久留米市の開発のシナリオと偶然に一致したためだと判断できる。これが他市での観察であった場合、道路の舗装状況とここまで高い関連性が認められるかは定かではない。いずれにせよ、このような急激な環境変化に対して鳥類の羽数変化が遅れることなく、ほぼ同時に表れている事実は、鳥類の環境変化への高い反応能力を示している。

さらに図 5 で示した、2 つのタイプの長期トレンドは、生態学的な立場から各種の環境選択の違いとして十分に説明が可能である。表 3 に各種の簡単な特性を示した。2 種

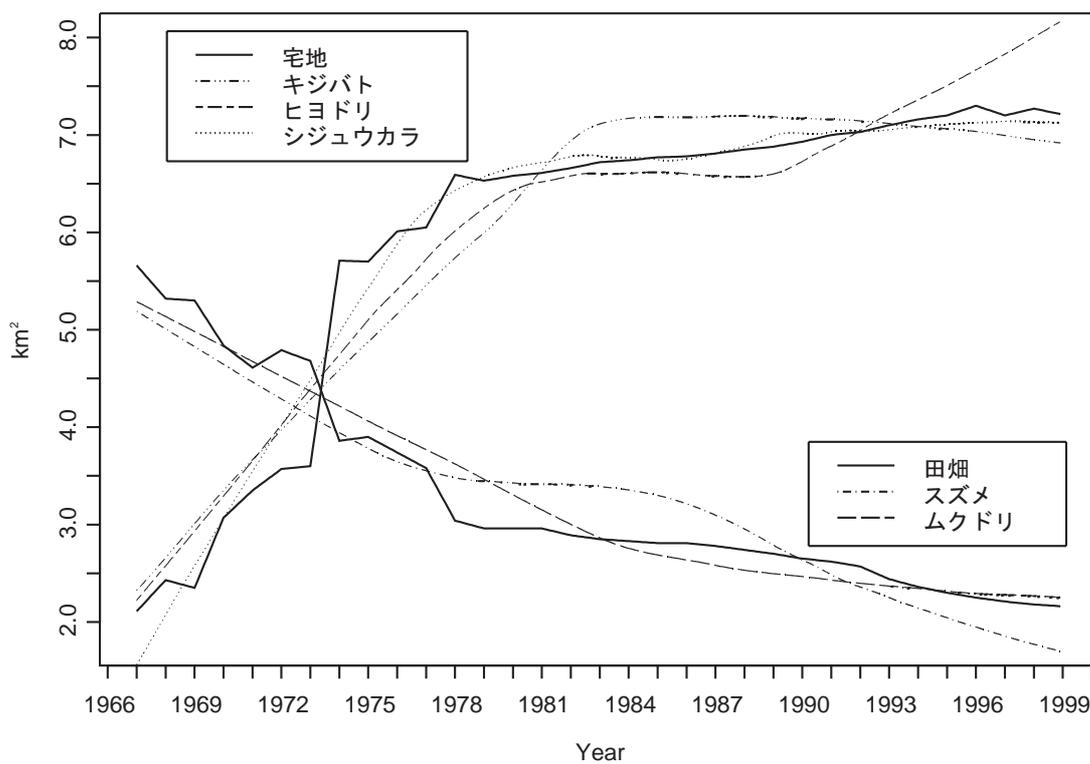


図 5: 5種の長期トレンドと宅地，田畑面積の推移

表 3: 各種の環境選択

	採餌環境	営巣環境
スズメ	開豁地	疎林
ムクドリ	開豁地	疎林
キジバト	疎林	森林
ヒヨドリ	森林	森林
シジュウカラ	森林	森林

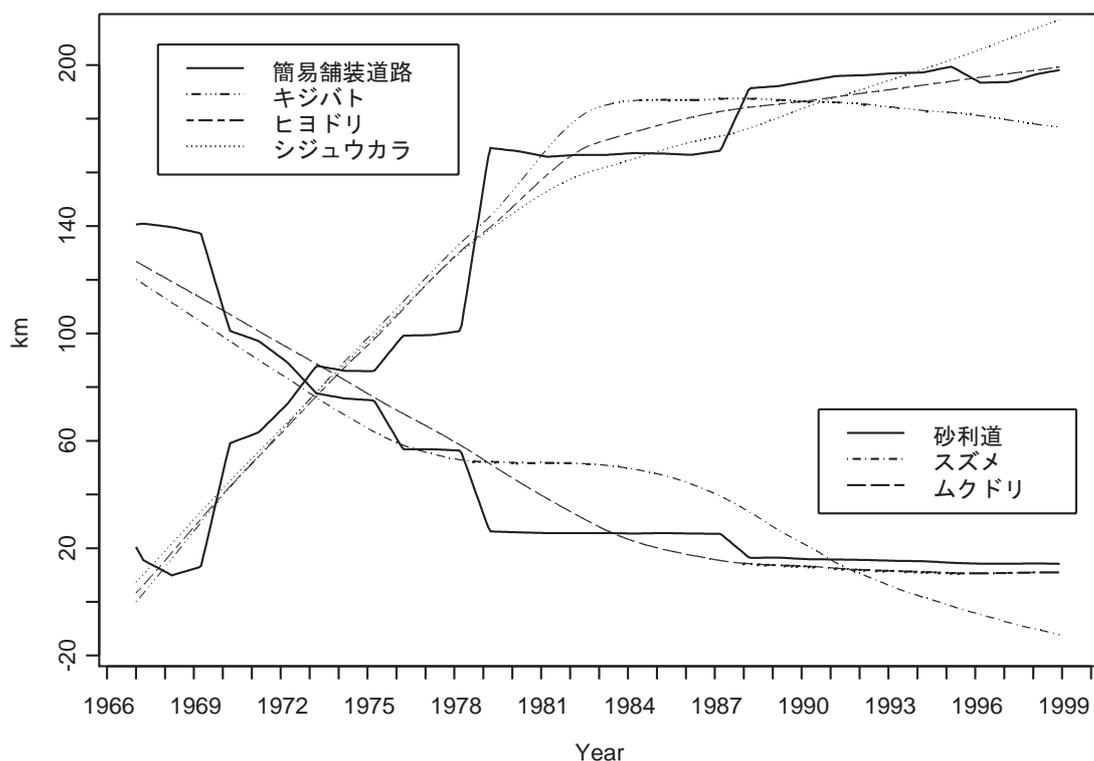


図 6: 5種の長期トレンドと簡易舗装道路延長，砂利道延長の推移

ループ間には環境選択において明らかな違いが認められる．東久留米市の宅地増加に伴い，実は庭木や街路樹も増加し，小さな緑地が市内のいたるところに出現した．しかし，その一方で田畑が減少した．この結果，本来，草本種子が主食であったスズメ，畑などで昆虫や種子を食べていたムクドリはその地を失い，羽数を減少させたが，その一方で，小面積の緑地でも採餌，営巣環境として十分に適応可能な樹林性の種，キジバト，ヒヨドリ，シジュウカラが進出したと考えられる．つまり，スズメ，ムクドリの羽数減少には生息環境の中でも採餌環境の変化が強く影響を与えていると言える．

以上の考察から，田畑面積または宅地面積に対して重ね合わせた長期トレンド（図5）を各種の長期トレンド  $L_i(t)$  として，以降，議論を進めることにする．

## 5.2 短期トレンド

分解の当初は長期トレンドよりも平滑幅のわずかに狭い「中期トレンド」のようなものも考えたが，トレンドのレベルからほとんど考慮する必要のないことが判明し，最終的に観測羽数オリジナル系列の  $Z_i(t)$  から長期トレンド  $L_i(t)$  を引き去った  $Z_i(t) - L_i(t)$  に対して， $p = 1$  ではなく  $p = 2$  の平滑化を行った．これに関しては図7の  $p = 1$  と  $p = 2$  の例を用いて説明する．図7の上段にはスズメを例に1次多項式を用いた場合，下段には2次多項式を用いた場合の短期トレンドを示している．上段の1次多項式を

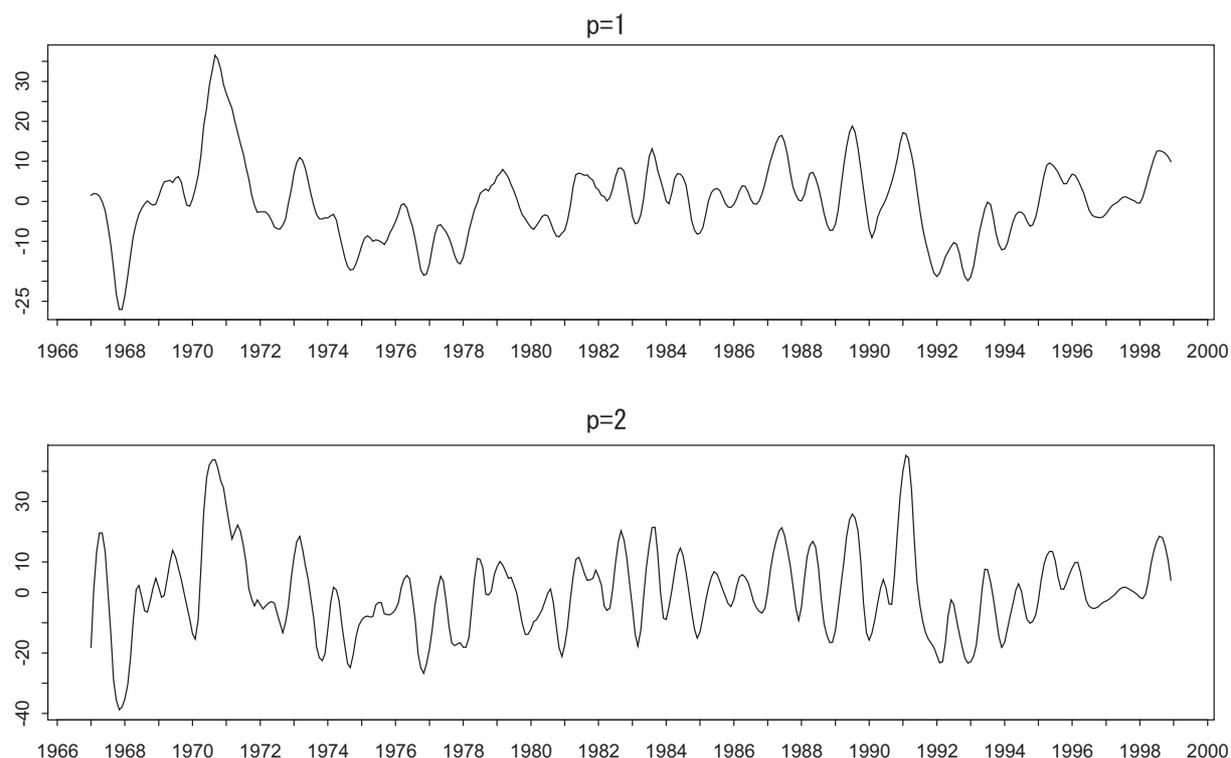


図 7: 多項式の次数による短期トレンドの違い(スズメの場合)

用いた短期トレンドは、データの持つ細かな起伏に追従できずに、角張った明らかに不自然な動きが見られる。これに対して、2次多項式を用いた短期トレンドは比較的よく追従している。

平滑化幅はスズメ、ムクドリ、キジバト、シジュウカラの4種は1年、ヒヨドリは6ヶ月として平滑化を行った。ここでヒヨドリだけ6ヶ月の短い平滑幅を与えたのは、後に述べるように年に2度のピークが確認されたためである。

各種ごとの短期トレンドを図8に、各種ごと各月の様子を箱型図で図9に示した。その短期トレンドの形状などからヒヨドリ、キジバトとシジュウカラ、スズメとムクドリの3グループに分類される。特に図9においては、その傾向が顕著である。この短期トレンドには各種ごとの通年の平均的な生活パターンが表れ、さらにそのパターンから3グループの説明がつく。

ヒヨドリの場合、他の4種に比べ明らかにパターンが異なっている。これは、かつて、ヒヨドリが冬期の渡り性の鳥であったためと考えられる。1973年以降、特に都市部で一部のヒヨドリが留鳥化したことが知られており、この留鳥化の現象は自由学園周辺に限ったことではなく、全国的に確認されている現象である。しかし、ヒヨドリの多くは依然として渡り続けており、冬期に羽数が増加、さらに渡去前の4月頃に再び増加するトレンドになっている。キジバト、シジュウカラの2種についても冬期に羽数が多く観察される傾向を示し、11月から2月にかけてピークが見られる。これは、この2種も留鳥ではあるが、その一部が冬期に平野部へ移動してくる移動性を持

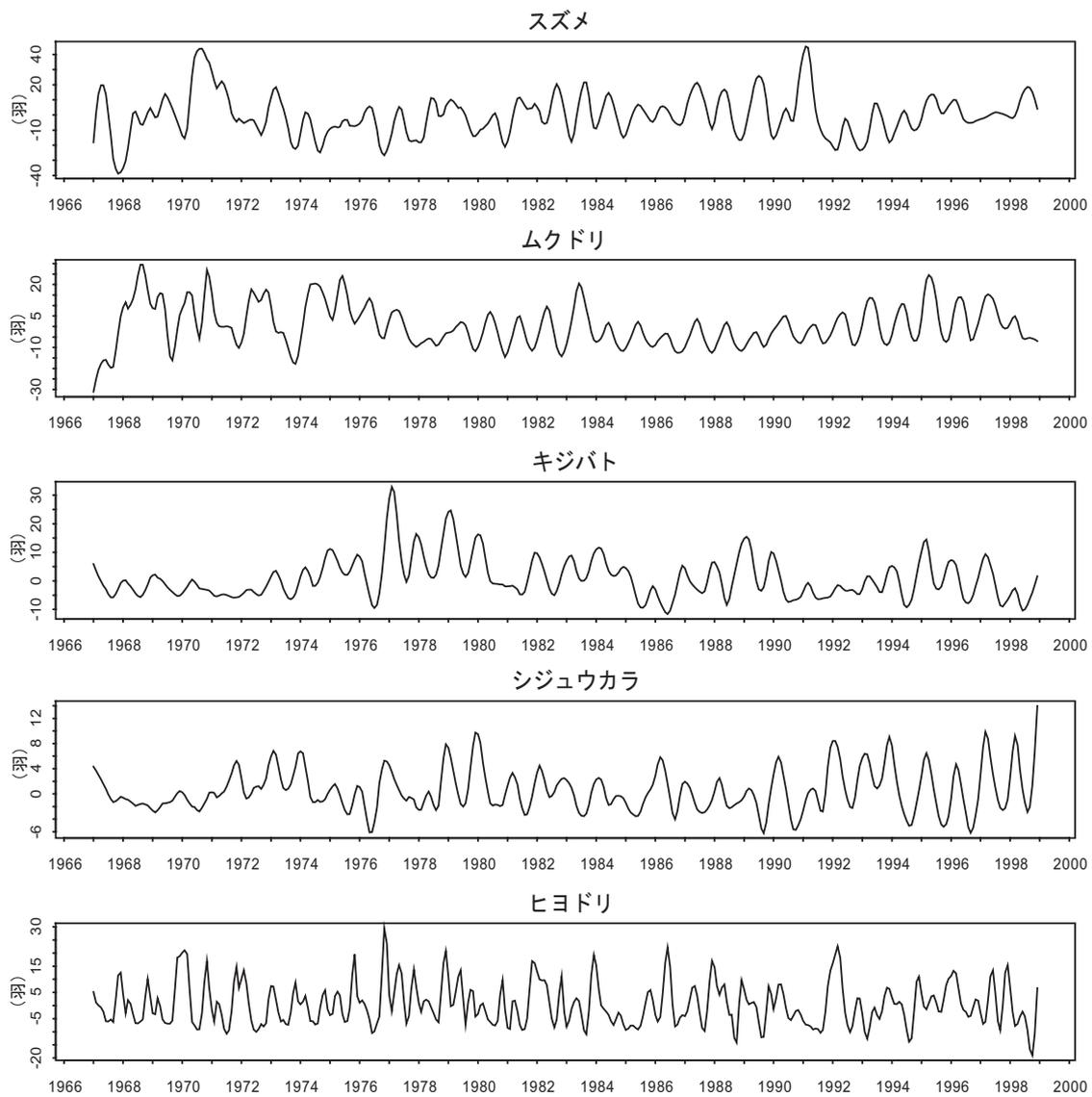


図 8: 各種短期トレンド

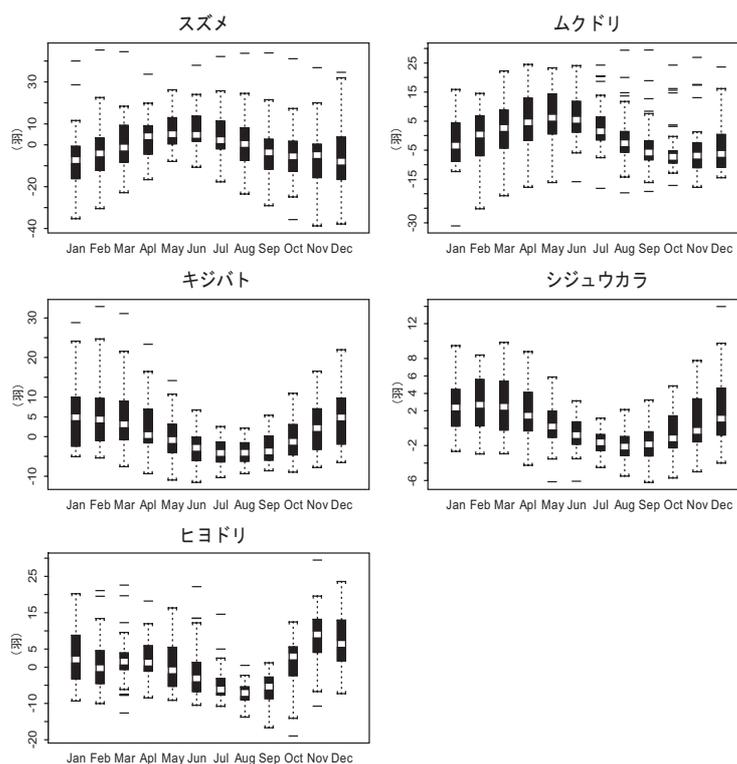


図 9: 短期トレンド箱型図

ち、小群による採餌行動がよく見かけられるため、その結果、11月から2月にかけてピークが見られる。特にシジュウカラは先述のヒヨドリ同様に、かつては関東地方の平野部では冬期に見られる移動性の種であったことが知られている。このような冬期にピークを持つトレンドは、観察地での繁殖が確認されていても、冬期の移動の影響の方が優越していることを示している。一方、スズメ、ムクドリの2種は4月から6月にかけてピークを持つ。これは繁殖期の影響によるものであり、この2種は観察地およびその周辺で繁殖している可能性が極めて高い。繁殖期の一時的な増加後、次第に羽数が減少するのは巣立った雛が別の地へ移動（分散）していくため、一般に巣立ち雛はその地に留まらない。

ここで興味深い点は、短期トレンドで分けられたグループが前節の長期トレンドのグループと一致することにある。つまり、長期的に見れば短期トレンドに繁殖期の影響が強くと見られるスズメ、ムクドリが減少し、冬期の移動の影響が強くと見られるヒヨドリ、キジバト、シジュウカラが増加しているというように、その分類はまったく一致している。

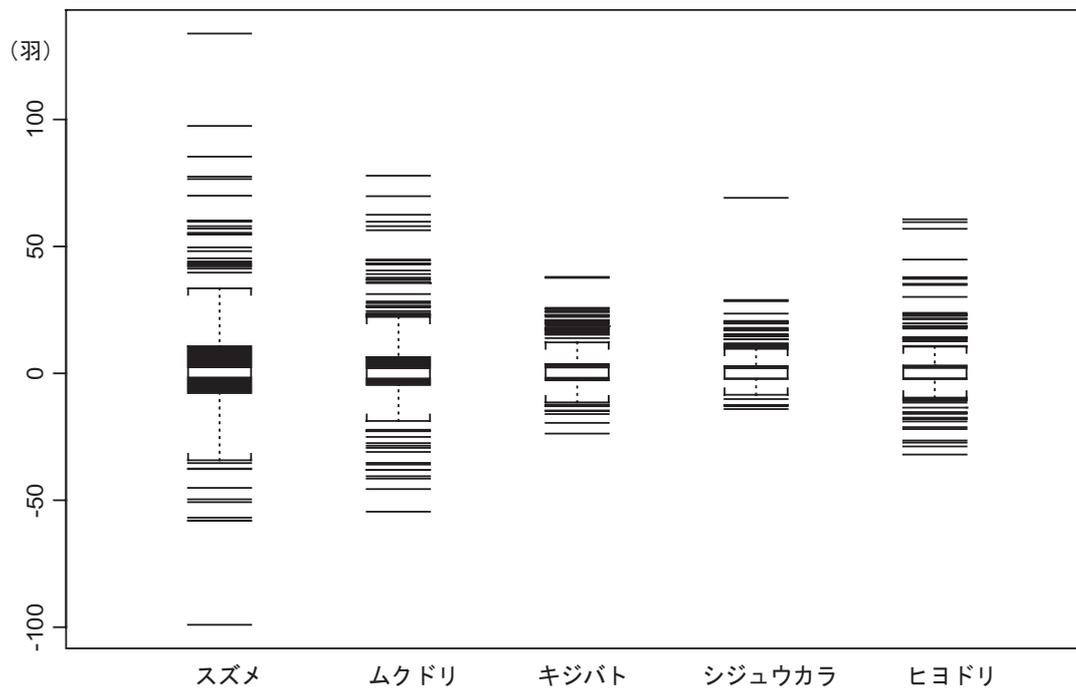


図 10: 各種イレギュラー系列の箱型図

表 4: イレギュラー系列の相関係数

スズメ	ムクドリ	ヒヨドリ	キジバト	シジュウカラ
1	0.144	0.075	0.212	0.119
0.144	1	0.028	0.13	0.101
0.075	0.028	1	0.236	0.06
0.212	0.13	0.236	1	0.127
0.119	0.101	0.06	0.127	1

### 5.3 イレギュラー系列

図10には各種の観測総羽数を長期トレンドと短期トレンドへ分解した残り，イレギュラー系列  $I_i(t)$  の箱型図を示した．いずれも正規分布よりも裾の重い，ほぼ対称性の分布を示している．実際に各種のイレギュラー系列の様子を図11に示すと，その振る舞いには規則的な動きは認められない．また，各種のイレギュラー系列の相関係数は低く（表4），互いに独立なイレギュラー系列になっていると考えられる．

この結果も極めて自然で，観測羽数に含まれる環境要因および各種の生活パターンによるトレンドが除かれているとすれば，その残りに考えられるものは種間の相互作用である．しかしながら，今回注目した留鳥はいずれも草本種子，果実や昆虫といったものを主食とするものばかりで，互いの食性にも若干の相違が認められる．つまり，生態的には食物連鎖的上下関係および競合関係が存在せず，ほぼ同等の関係にあるため，それほど強い相互作用は期待されない．解析結果もそれを見事に物語っている．これらのことから，今回試みた局所回帰を用いた2段階平滑化によって，各野鳥種の観測羽数時系列は「長期トレンド」「短期トレンド」「イレギュラー系列」の3成分にうまく分解されたと言える．

## 6 おわりに

本研究では野鳥種5種のキジバト，ヒヨドリ，シジュウカラ，スズメ，ムクドリについて局所回帰を2回用いた2段階平滑化による解析から，羽数変動の構造を明らかにし，その羽数と環境要因との関係を示した．解析の結果，羽数変動の構造は，周辺環境変動の影響を各種の環境選択という形で反映する長期トレンド，各種の通年の傾向を反映する短期トレンド，ランダムに振舞うイレギュラーで構成される様子が明らかになった．これは数理モデルを導入し，時系列的視点からデータを扱い，適切な解析を施したことで，具体的に把握できた結果である．また，明らかになった長期トレンドと短期トレンドとの関係も，モデルを導入した効果と言えよう．今回の結果は野鳥各種の生態的特性，あるいは単に結果を聞けば，ごく当たり前のように思える自然なものである．しかし，このような極めて自然な結果は，それだけ明確な構造が羽数時系列の背後にあったことを物語っており，今回，鳥の羽数変動に対して時系列特有のトレンドの概念を導入したことで，それが明白な形で表現されたと言える．

一方で今回導入した多段階平滑化による解析方法は，1年を通してある程度の羽数を観測するような留鳥種についてはかなり強力な手法となり得るが，小群を形成して移動する種や観測羽数および観測回数が絶対的に少ない種については，より適切な解析方法を考案する必要がある．つまり，解析対象とする種の生態的特性までを加味した上で適切な解析方法を選択することが重要であり，これは今後の課題である．

最後に，今回のような研究が可能となった背景として，長年，自由学園において一貫した方法で調査が続けられている事実，また，またその貴重な調査記録が誰にでも利用可能な形で公開されている事実を強調し，敬意を表したい．今回の場合はあくま

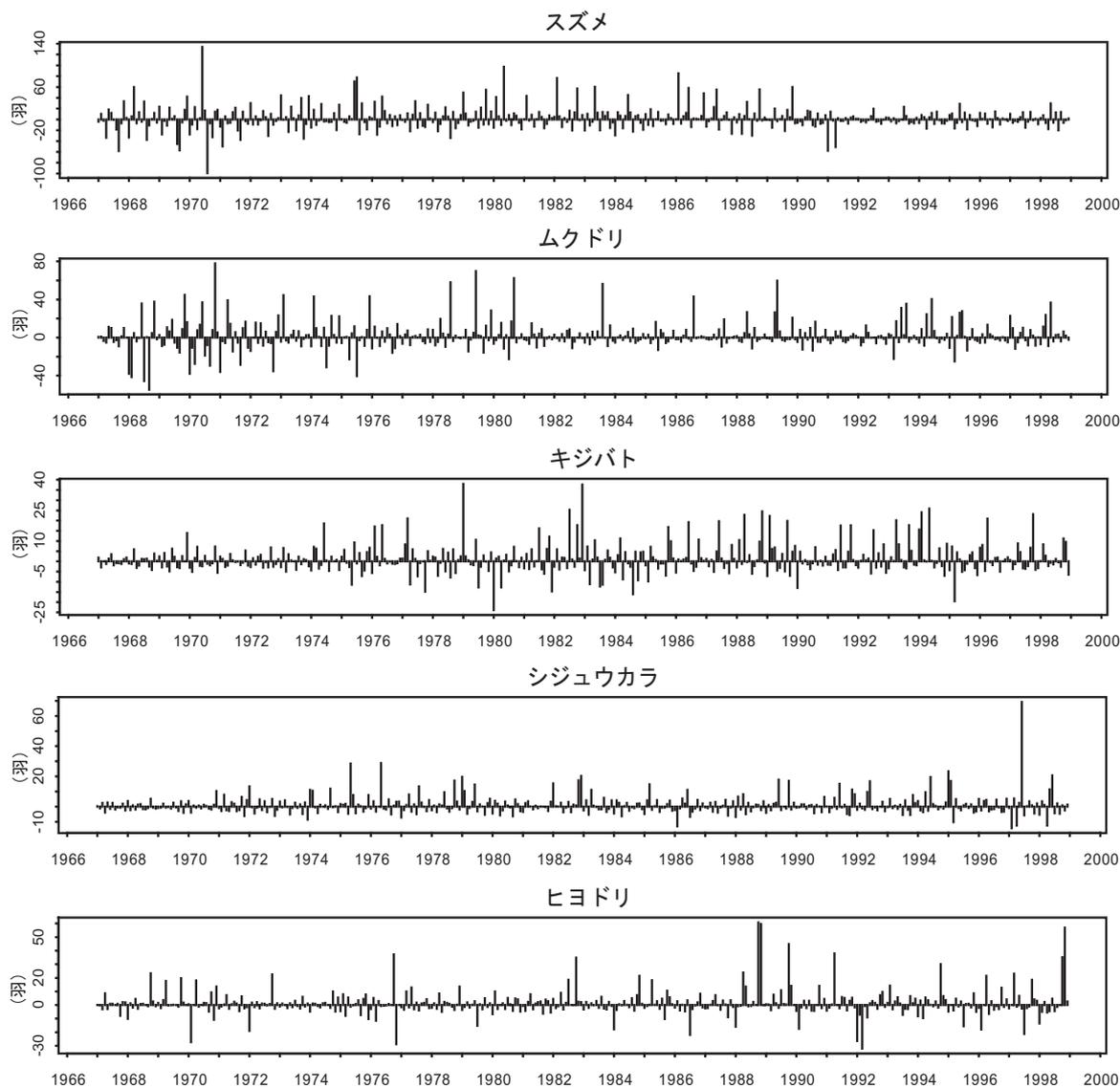


図 11: 各種イレギュラー系列

でも東京都東久留米市自由学園，一ヶ所での観察に基づく結論であるが，他の場所での観察データを用いた同様な研究の積み重ねが多くなされることで，さらに多くの事実が明らかになると期待される．

## A DandD によるデータの記述

自由学園で記録されてきたバードセンサスのデータ，1964年～1998年分については吉良ら（2002）で公開されている．また，環境指標データとして使用した東久留米市地目別面積は昭和47年度版から平成11年度版の官庁統計資料『統計東久留米』に掲載されている．さらに，今回，解析で使用したデータは DandD(Data and Description) ルール（柴田 2001，横内・柴田 2001）にもとづき記述され，3.3で示した URL から自由に入手可能である．

サポートシステムである DandD ブラウザ，DandDR(R インターフェイス)とともに入手すれば，データの概要を眺めることから，解析ソフト R 上での解析まで直ちに実行することが可能である．詳細については <http://www.stat.math.keio.ac.jp/DandDIII/> を参照いただきたい．

具体的には R インターフェイスインストール後，

```
> library(dad)
```

として dad ライブラリを読み込んでおく．その後，

```
> bird <- DandD("JiyuBirdCount.dad")
```

とすれば，DandD インスタンスが読み込まれ，自由学園で観察された羽数時系列が簡単に使用できるようになる．例えば

```
> plot(suzume)
```

とすれば，スズメの羽数時系列プロットが表示される．

## B 解析に使用した関数

時系列データの局所回帰による 2 段階平滑化には以下の関数を用いた．解析には S-PLUS を使用したため，S の関数になっている．しかし，R でも以下の記述には一切手を加えずにそのまま使用できる．ただし，Ver.1.9.0 より以前の R を使用している場合は，あらかじめ

```
> library(modreg)
```

としてライブラリを読み込む必要がある．

```
decomp <- function(original, span1, span2, plot = F)
{
#
# original: original time series
# span1: long span (year)
# span2: short span (year)
# plot: graph plot
#
loess1 <- loess(original ~ c(1:length(original)),
  span = (span1 * 12)/length(original), degree = 1, family = "symmetric")
long.trend <- loess1$fit
tsp(long.trend) <- tsp(original)
long.irregular <- loess1$residuals
loess2 <- loess(long.irregular ~ c(1:length(original)),
  span = (span2 * 12)/length(original), degree = 2, family = "symmetric")
short.trend <- loess2$fit
tsp(short.trend) <- tsp(original)
irregular <- loess2$residuals
tsp(irregular) <- tsp(original)
decomp <- list(original = original, long.trend = long.trend,
  short.trend = short.trend, irregular = irregular)
if(plot == T) {
  par(mfrow = c(4, 1), lab = c(38, 10, 7))
  plot(decomp$original, type = "l", ylab = "", xlab = "")
  title("Original")
  plot(decomp$long.trend, type = "l", ylab = "", xlab = "")
  title("Long.Trend")
  plot(decomp$short.trend, type = "l", ylab = "", xlab = "")
  title("Short.Trend")
  plot(decomp$irregular, type = "h", ylab = "", xlab = "")
  title("Irregular")
}
return(decomp)
}
```

## 参考文献

- [1] 穴田哲・藤巻裕蔵．1984．帯広市における農耕地と住宅地の繁殖期の鳥相．*Strix* 3:19-27.

- [2] Colin J. Bibby, Neil D. Burgess, David A. Hill and Simon H. Mustoe. 2000. *Bird Census Techniques 2nd. ed.* Academic Press, London.
- [3] William S. Cleveland. 1979. Robust Locally Weighted Regression and Smoothing Scatterplots. *Journal of the American Statistical Association* 74(368):829-836.
- [4] William S. Cleveland and Susan J. Devlin. 1988. Locally Weighted Regression: An Approach to Regression Analysis by Local Fitting. *Journal of the American Statistical Association* 83(403):596-610.
- [5] チェンバース・ヘイスティ編，柴田里程訳．1994 『Sと統計モデル』 共立出版，東京．
- [6] J. Fan and I. Gijbels. 1996. *Local Polynomial Regression and Its Applications.* Chapman&Hall, London.
- [7] 樋口広芳・塚本洋三・花輪伸一・武田宗也．1982．森林面積と鳥の種数との関係．*Strix* 1:70-78.
- [8] 平野敏明・遠藤孝一・仁平康介・金原啓一・樋口広芳．1985．宇都宮市における樹木率と鳥の種数との関係．*Strix* 4:33-42
- [9] 平野敏明・石田博之・国友妙子．1989．冬期における森林面積と鳥の種数との関係．*Strix* 8:173-178.
- [10] 平野敏明．1996．宇都宮市戸祭山における繁殖期の鳥類相． - 最近 25 年間の変化 - *Strix* 14:25-31.
- [11] Frances C. James, Charles E. McCulloch and David A. Wiedenfeld. 1996. New Approaches to The Analysis of Population Trends in Land Birds. *Ecology* 77(1):13-27.
- [12] 吉良幸世．2000 『自然はともだち』 自由学園出版局，東京．
- [13] 吉良幸世・島津秀康・山縣基．2002. バードセンサスの記録．自由学園年報 6:161-180.
- [14] 米田重玄・上木泰男．2002．環境庁織田山一級ステーションにおける標識調査 - 1973 年から 1996 年における定量的モニタリング結果 - 山階鳥類研究所研究報告 34:96-111.
- [15] 黒田長久・米田重玄．1983．皇居内の鳥類 10 年間の調査．山階鳥類研究所研究報告 15:177-333.
- [16] 黒沢令子．1994．東京における鳥類相と環境要因としての舗装率．*Strix* 13:155-164.

- [17] Taku Maeda. 1998. Bird Communities and Habitat Relationships in a Residential Area of Tokyo. *Journal of the Yamashina Institute for Ornithology* 30:83-100.
- [18] 村井英紀・樋口広芳 . 1988 . 森林性鳥類の多様性に影響する諸要因 . *Strix* 7:83-100.
- [19] 大鷹宏彰・中村雅彦 . 1996 . 上越教育大学構内における繁殖期の鳥類相 . *Strix* 14:113-124.
- [20] Ritei Shibata and Ryozo Miura. 1997. Decomposition of Japanese Yen Interest Rate Data Through Local Regression. *Financial Engineering and the Japanese Markets* 4:125-146.
- [21] 柴田里程 . 2001 . 『データリテラシー』 共立出版 , 東京 .
- [22] 統計東久留米 昭和 47 年度版 ~ 平成 11 年度版 . 東久留米市 .
- [23] 内田康夫 . 1979 . 人工化する環境のなかの鳥 . 科学 49:635-641.
- [24] 内田康夫・島津秀康・関本兼曜 . 2003 . 都下自由学園周辺の鳥相変化と環境変動 . - 長期羽数調査の統計分析から - *Strix* 21:53-70.
- [25] 横内大介・柴田里程 . 2001 . インターデータベース - DandD インスタンスのエージェント化 - 統計数理 49:317-331.