

## F-1 地理的スケールにおける生物多様性の動態と保全に関する研究

### (1) 地理的スケールにおける生物多様性の現状と歴史的变化の把握

#### ① バイオトープと野生生物の地理的分布における連関の解析

独立行政法人国立環境研究所

生物多様性研究プロジェクト 生物個体群研究チーム 永田尚志・高村健二  
辻 宣行  
上席研究官 椿 宜高  
侵入生物研究チーム 五箇公一  
(株)東和科学 森下兼年

平成11～13年度合計予算額 60,986千円  
(うち、平成13年度予算額 16,603千円)

[要旨] 茨城県南部から栃木県北部にかけての那珂川流域および利根川下流域を選び、航空写真から1960年代と1990年代の植生図を作成し、国土地理院の数値地図データを統合した地理情報システム(GIS)を構築し、環境庁の自然環境保全基礎調査およびフィールド調査による生物分布情報をGIS上に統合した。過去30年間で、農地が市街地に変化し、市街地地域の比率が拡大していた。また、同時に、植林地が伐採後、自然林へと変化していること、放棄水田が湿地植生へと変化していることが明らかになった。このGISを使ってカワトンボの好適地を推定した結果、那珂川中流域の支流に好適地が集中していることがわかった。土地の植生カバー、温量、標高などの情報によってカワトンボの生息地の好適性を評価ができた。さらに、利根川下流域の過去20年間のヨシ原の分布変化を解析したところ、霞ヶ浦湖岸や利根川河川敷のヨシ原が縮小・分断化し、農地でヨシ原の増加が認められた。オオヨシキリがヨシ原に生息する確率は、近傍の大きなヨシ原からの距離と標高によって決まった。これは、オオヨシキリが生息できるかどうか、個体の供給源からの距離が関係している、生息適地がハビタットの質だけでなく個体群構造によっても影響を受けることを意味している。このような動物の生息環境の適不適を植生カバーに置き換えて評価する手法は、生態系評価システムとして重要になると考えられる。地域的な生物多様性全体を保全するための場所を選定する指標として置換不能度の有効性を検討し、置換不能度を計算する新しいアルゴリズムを開発した。置換不能度はサイト間の相互作用によって決まるため、対象とする地域および生物分類群によって変化するが、今後、保護区設定のための有効なツールとなると考えられる。

[キーワード] 地理情報システム、植生図、ハビタット断片化、生息地評価手法、置換不能度

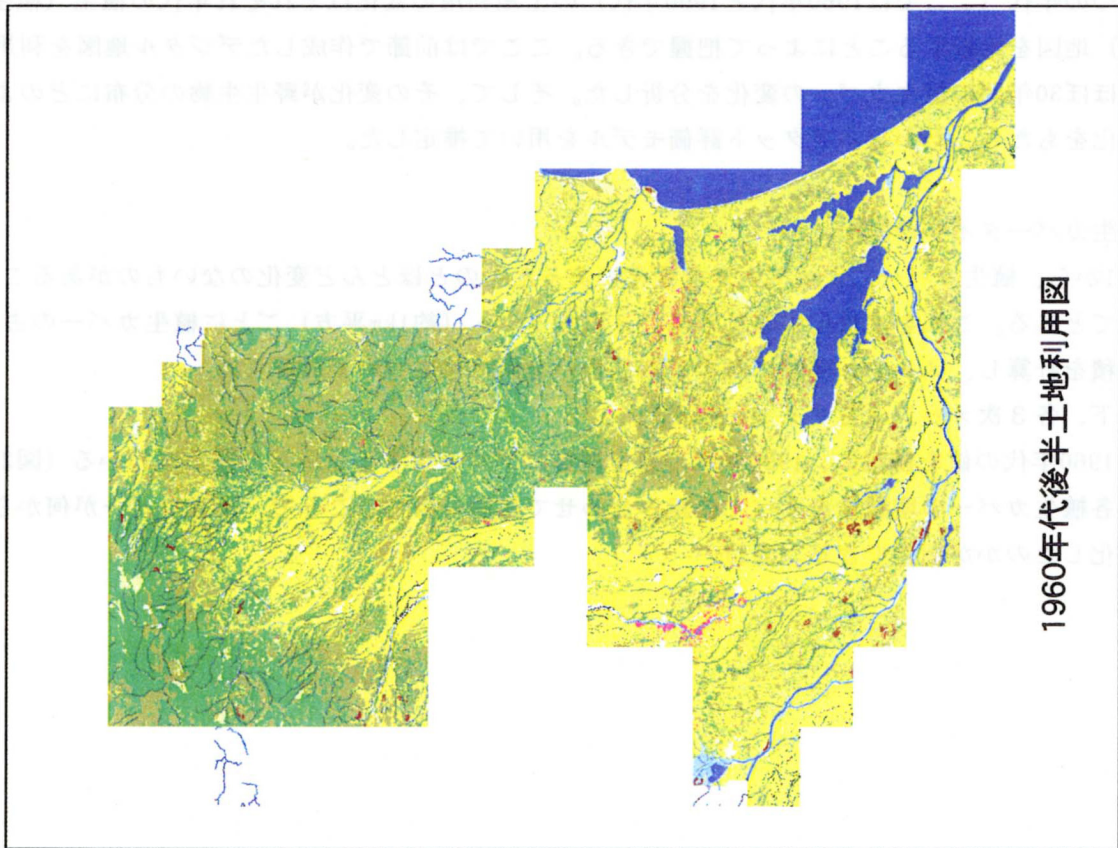
#### 1. はじめに

生物多様性は地球上のあらゆるところで減少している。地球上の生物多様性を保全し生物資源の持続可能な利用を目的として、1992年にリオデジャネイロにおいて生物の多様性に関する

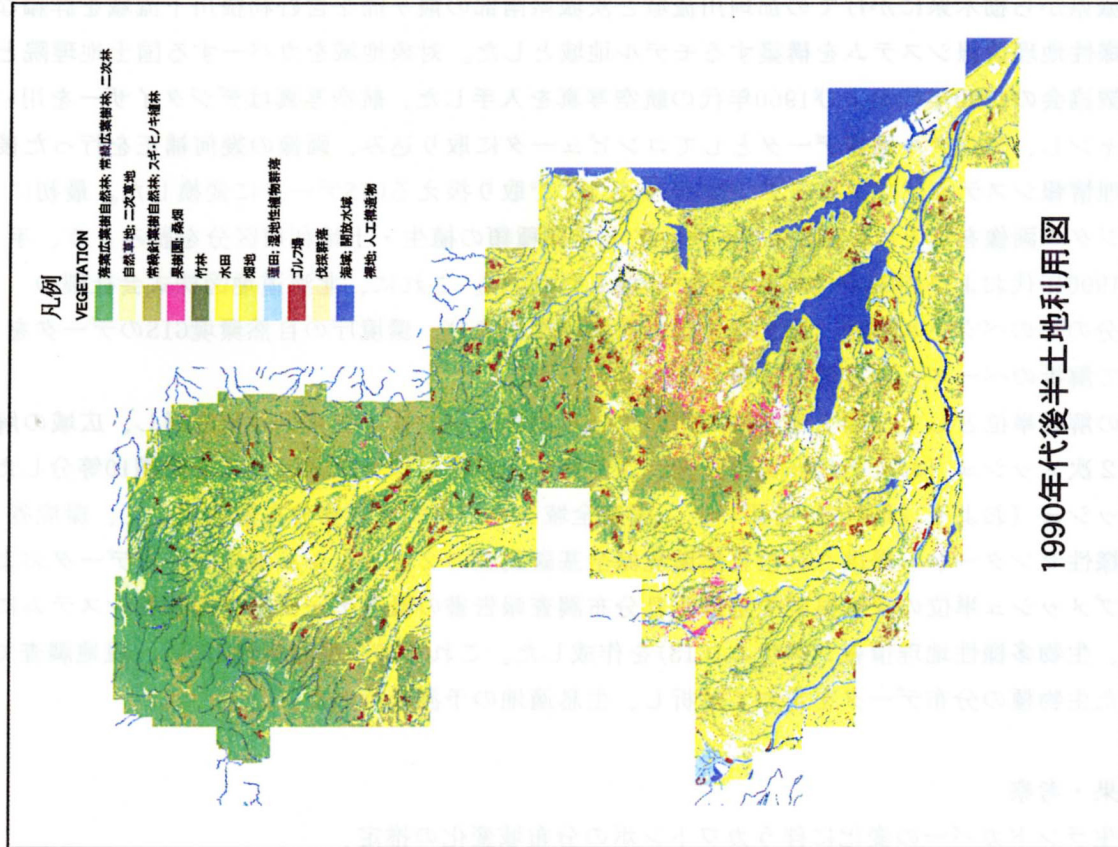
条約（生物多様性条約）が結ばれた。この条約では、種、遺伝子、生態系の3つのレベルの生物多様性を確保することが謳われている<sup>1)</sup>。生物多様性条約に基づき、野生動植物の種及び個体の適正な保護管理をはかるために、国土空間の自然的特性に応じた多様な野生生物の生息空間を保全することが、環境基本計画<sup>2)</sup>にもりこまれている。生物の多様性を保全するためには、空間スケールを考慮し、生息地を空間的に連続する面としてとらえ、複数の種を対象として保全計画をたてる必要がある。また、動物の生息環境の適不適を植生カバーに置き換えて評価し、生態系評価システムとして位置づけようという考え方は、1974年に米連邦野生生物局（USFWS）によって採用され、生息地評価手法（HEP）として開発されている<sup>3)</sup>。本来、HEPは代償ミティゲーションのプラン作成の際に利用することを目的として開発されたもので、最も優れた生態系評価手法のひとつとして頻繁に利用されている。HEPは、地域内の個々の生物種の生息ハビタットの保全には有効な手段であるが、地域スケール全体での生物多様性全般の保全には適用できない。しかし、この手法はより一般的な問題、たとえば分布情報が不足しがちな動物の潜在生息地の推定とその地図情報化などにも利用できると考えられる。地域スケールにおいて生息しているすべての生物種を保全するためには、生物多様性の高い地域とその地域に相補的な種を含む地域を選択する必要がある。そのため、生物多様性が高い地域ばかりを選んで保全すると保護の網からみれる種が出てくる可能性がある。最近、この問題を解決するため、地域的な全生物多様性を保全するための場所を選定する指標として、置換不能度(irreplaceability)という指標が考案されている<sup>5) 6)</sup>。

## 2. 研究目的

人間活動の拡大に伴って野生生物の生息地はますます縮小・分断化してきている。そのため、生物多様性を保全するためには、野生生物の種間関係や生活史全体で必要となる生息地の地理的分布まで含めて考慮する必要がある。近年のコンピュータ技術の発達にもなつて発展した地理情報システム(GIS)を用いて、空間的に分布する野生生物のデータを統合して相互関係の現状および歴史的変遷を解析することが可能になりつつある。地域スケールの生物多様性の保全戦略を立案するためには、精度の高い生物多様性情報を含んだ地理情報システムが必要となる。また、生息地評価手法は、分布情報が不足しがちな動物の潜在生息地の推定とその地図情報化などにも利用できる。生息の記録をもとに集められる動物の分布情報は、基本的に点情報であり、面的な地図情報に換算する標準的な方法がない。これが動物の分布情報を地図情報化する上での最大の問題点である。限られた生息地点情報から動物の分布を推定するためには、それぞれの動物の生息条件を明らかにし、生息に好適な地点と不適な地点を推定して地図上に表現する手法が必要である。本サブサブテーマにおいては、国土地理院の地形図、標高データ、土地利用データなどの地理情報と植生図や環境庁自然環境保全基礎調査などの生物分布資料を統合して、詳細な地域的な生物多様性地理情報データベースシステムを構築し、ビオトープの分類・分布、および縮小・分断化などの変遷を明らかにすると同時に生息地評価手法、および置換不能度を改良して、地域的な保全戦略を提案するための基礎を確立することを目的とする。



1960年代後半土地利用図



1990年代後半土地利用図

- 凡例
- VEGETATION
- 落葉広葉樹自給林; 常緑広葉樹林; 二次林
  - 自然草地; 二次草地
  - 常緑針葉樹自給林; スギ・ヒノキ純林
  - 果樹園; 桑畑
  - 竹林
  - 水田
  - 畑地
  - 蓮田; 運搬性植物群落
  - ゴルフ場
  - 伐採跡
  - 湖沼; 閉鎖水域
  - 裸地; 人工建造物

図1 調査対象区域の植生・土地利用の変化

### 3. 研究方法

茨城県から栃木県にかけての那珂川流域と茨城県南部の霞ヶ浦を含む利根川下流域を詳細な生物多様性地理情報システムを構築するモデル地域とした。対象地域をカバーする国土地理院と日本林業協会の1990年代および1960年代の航空写真を入手した。航空写真はデジタイザーを用いてスキャンし、デジタル画像データとしてコンピュータに取り込み、画像の幾何補正を行った後に、地理情報システムソフトウェア (ArcView3.x) で取り扱えるGISデータに変換した。最初に、このデジタル画像をもとに、GISソフトウェア上で18種類の植生・土地利用区分を読みとり、手作業で1990年代および1960年代の植生図を作成した(図1)。これに、北海道地図株式会社製の25,000分の1のベクトル地図、国土地理院の数値地図および、環境庁の自然環境GISのデータを統合して解析のベースとなる地理情報システムとした。

データの解析単位として、国土地理院が用いている標準メッシュ・システムを採用し、広域の解析には2次メッシュ(およそ10km四方)を、より詳細な解析には2次メッシュを縦横10等分した3次メッシュ(およそ1km四方)を用いた。関東全域をカバーする生物分布情報として、環境省生物多様性センターから提供された自然環境保全基礎調査の2次メッシュ単位の分布データおよび、サブメッシュ単位の茨城県野生鳥獣生息分布調査報告書の既存データを地理情報システムに統合し、生物多様性地理情報システム(GIS)を作成した。これらの生物多様性GISに、現地調査で得られた生物種の分布データを重ねて解析し、生息適地の予測を行った。

### 4. 結果・考察

#### (1) 植生ランドカバーの変化に伴うカワトンボの分布域変化の推定

二つの年代(ここでは1960年代と1990年代)の土地利用の変化はそれぞれ年代の植生(植生カバー)地図を比較することによって把握できる。ここでは前節で作成したデジタル地図を利用して、ほぼ30年間の植生カバーの変化を分析した。そして、その変化が野生生物の分布にどのような変化をもたらしたかをハビタット評価モデルを用いて推定した。

#### ①各植生カバータイプの変化

図1から、植生カバーによって大きな変化のあったものとほとんど変化のないものがあることが見てとれる。これを定量化するために、3次メッシュ(約1km平方)ごとに植生カバーの占める面積を計算し、メッシュ面積に対する割り合いを両年代について計算した。

以下、各3次メッシュをサイトと呼ぶ。

1960年代の値を横軸に、1990年代の値を縦軸にプロットすると増減の様子がわかる(図2)。また、各植生カバーの増減量をすべての組み合わせで相関分析することで、植生カバーが何から何へ変化したのかが把握できる(表1)。

表1. 植生ランドカバーの増減の相関係数。マイナスの相関が高い場合、一方の増加（または減少）が原因となって他方の減少（増加）が生じていると考えられる。斜体字は危険率0.1%以下、太字は絶対値0.1以上の相関係数。

	人工構造物	開放水域	植林地	畑地	水田	二次草地	湿地植生	裸地	果樹園	竹林
開放水域	-0.072									
植林地	<b>-0.148</b>	-0.025								
畑地	<b>-0.511</b>	-0.002	0.031							
水田	<b>-0.272</b>	<b>-0.135</b>	0.002	<b>-0.305</b>						
二次草地	-0.020	-0.053	<b>-0.188</b>	<b>-0.174</b>	-0.093					
湿地植生	-0.001	-0.051	-0.005	-0.034	<b>-0.208</b>	-0.074				
裸地	0.049	-0.016	-0.088	<b>-0.190</b>	-0.064	0.033	-0.013			
果樹園	0.076	-0.004	-0.046	<b>-0.231</b>	-0.024	-0.034	0.017	0.003		
竹林	0.007	0.012	-0.065	-0.008	-0.019	0.024	-0.003	-0.010	0.011	
ゴルフ場	-0.059	0.071	<b>-0.126</b>	0.008	-0.049	-0.056	-0.031	-0.021	-0.025	-0.001
桑畑	-0.011	0.008	-0.026	-0.067	-0.029	-0.008	-0.055	-0.003	0.060	0.011
蓮田	-0.002	0.014	-0.008	-0.021	-0.060	-0.004	-0.003	-0.004	0.022	-0.001
伐採跡地	-0.026	-0.001	<b>-0.123</b>	0.016	0.002	0.009	0.002	-0.038	-0.006	-0.014
自然草原	0.081	0.001	-0.012	-0.010	-0.006	-0.039	0.000	-0.003	0.005	0.001
自然林	-0.076	0.001	<b>-0.746</b>	0.013	-0.009	-0.084	-0.003	-0.025	-0.035	0.040

表1 (続き). 植生ランドカバーの増減の相関係数。

	ゴルフ場	桑畑	蓮田	伐採跡地	自然草原
桑畑	0.018				
蓮田	-0.005	0.009			
伐採跡地	-0.006	0.005	-0.002		
自然草原	0.000	0.001	0.002	0.001	
自然林	<b>-0.105</b>	0.002	-0.004	-0.029	-0.088

以下、おもな植生カバータイプごとに変化の特徴を説明する。

#### ア. 市街地（人工構造物）

人工構造物の中には住宅地や工場、道路などが含まれる。これらが占める面積は、ほとんどあらゆるサイトで増加している（図2）。いったん造られた人工構造物は消失することはほとんどなく、増加の一途をたどることが示された。人工構造物の増減と最も相関の高い植生カバーは畑地で、その次が水田である（図3）。つまり、多くの畑地や水田が住宅地や工場地に変換されたことを意味している。

#### イ. 二次草地

牧草地や一時的に生じた裸地などが草地化したものが含まれる。60年代と90年代でほとんど継続性が見られない事がわかる（図2）。二次草地の増減と高い相関を示す植生カバーは見当たらないが、植林地や畑地からの転換が少し目立つ（表1）。

#### ウ. 水田

全体として減少傾向にあるが、大きな変化は見られない（図2）。土地利用の継続性が高いことが特徴である。変化のうち水田から人工構造物、湿地植生、畑地への転換（畑地から水田への転換も多い）が目立つ（図3）。湿地植生への転換が大きかった理由は、放置された水田がヨシ原へと変わったためである（図3）。

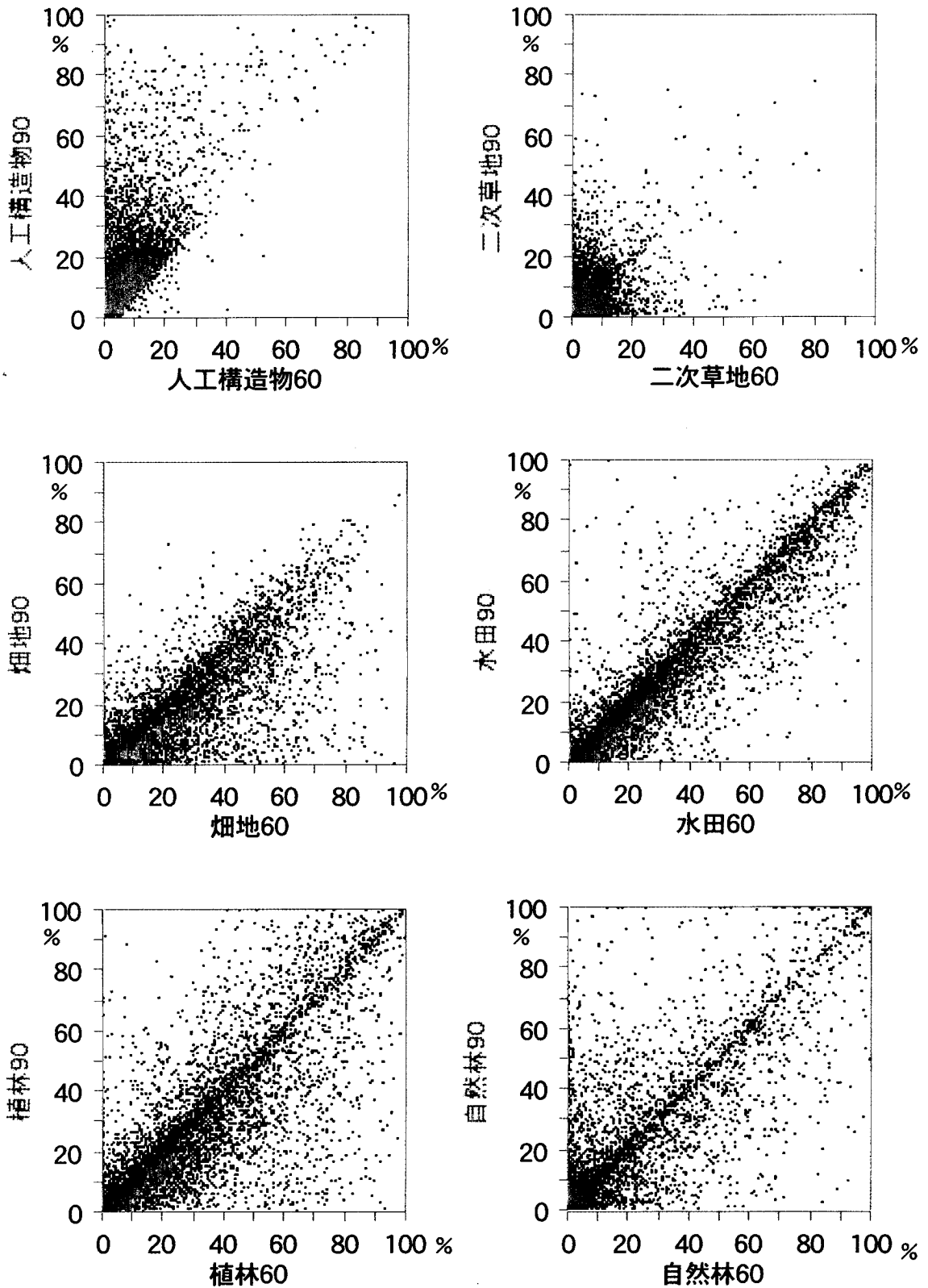


図2. 1960年代から1990年代にかけて各植生カバーの三次メッシュサイト（約1km平方）に占める割合の変化。45度の線上にある点は変化のなかったサイトを示す。また、45度の線から点が散らばるほど変化が大きかった事を意味する。詳しくは本文参照。

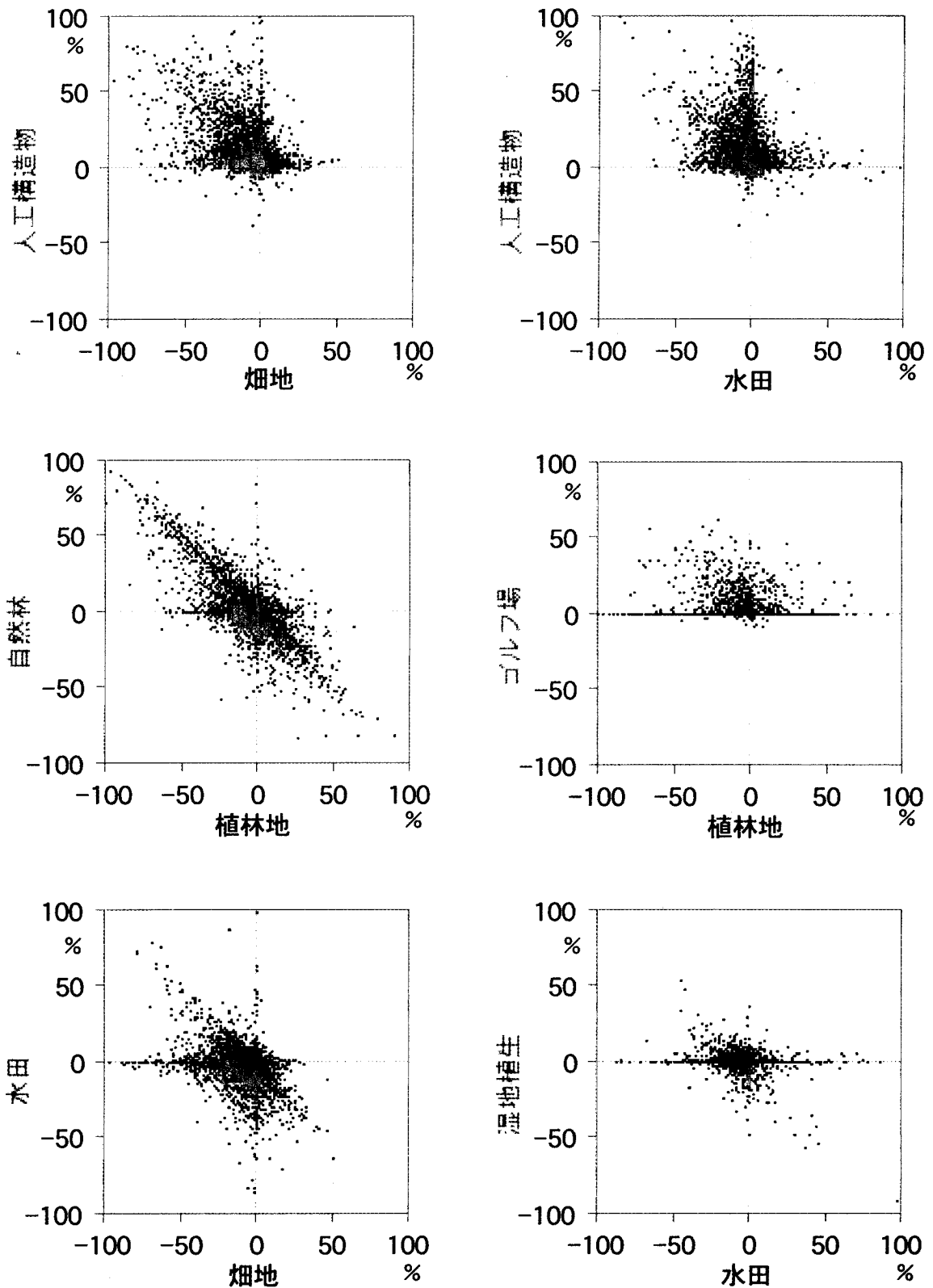


図3. 1960年代から1990年代にかけて各植生カバーの三次メッシュサイト（約1km平方）に占める割合の変化割合（-100%から+100%）の相関分析例。負の相関が見られる場合（表1参照）はどちらかの増（減）がもう一方の減（増）の原因となっている可能性が高い。

## エ. 畑地

様々な作物の耕作地をまとめて畑地とした。減少傾向が大きく、人工構造物への転換が目立つ(図 2)。そのほか、水田との相互転換、果樹園への転換も多い(表 1、図 3)。

## オ. 植林地

全体としてはやや減少傾向にあるものの、サイトごとの変化は大きい(図 2)。つまり、大きく減少したサイトと増加したサイトが多く存在する。大きく減少する場合は二次林への変化が大きく、これは伐採跡地に放置されて二次林へと遷移が進んだのではないかと考えられる。逆に二次林が植林地に転換されているメッシュも多く、両者の相互転換が変化のほとんどになっている(図 3)。そのほか、伐採跡地、二次草地、人工構造物への転換もかなり見られる(表 1)。

## カ. 自然林

自然林の変化は植林地のそれにやや似ていて、全体としては大きな変化はないが、サイトごとの増減量が大きい(図 2)。植林地との相互転換が変化の最も大きな原因である(図 3)が、ゴルフ場の増加も自然林の減少をもたらしている(表 1)。

### ③動物の生息場所への影響

上記のような植生カバーの変化が動物の生息場所にどのような変化をもたらしたのかを推測するために、カワトンボを例として 1960 年代と 1990 年代の潜在生息地の推定を行い比較した。

ここでは、流域に生息するカワトンボのフィールド調査データをもとに、生息条件(おもに植生カバー)と地図情報との関連性を解析し、那珂川流域での好適生息地を地理情報化することを行った。次のような手順で潜在生息地の推定を行った。

- 1) 生息場所条件(植生、標高(温量指数)、川幅、川岸人工化、産卵基質など)を明らかにし、それを地図上に表現しうるパラメータに単純化して類型化し面的情報に変換する根拠を得る。
- 2) 単純化された生息場所条件によって好適な生息地の条件を絞り込む、たとえば河畔林の有無と個体数、標高と個体数の関係、河岸の状況と個体数の関係など。
- 3) 好適生息地を那珂川の地図上に表現する。そのために植生地図(1960 年代と 1990 年代のもの)、地形図、温量指数を利用して条件にあう地点を拾い出す。非常に好適な地点と中程度に好適な場所を区別して、2段階の潜在生息地を地図化する。

推定されたカワトンボの好適生息場所を図 4 に示した。植生、温量、河川環境の複合として表現された好適生息地は那珂川の中流域の細流(支流)に集中することが示唆された。これをフィールド調査によって得られた分布データと比較すると、ほぼ 80%以上の正確さで生息地を推定できることがわかった。上流域に好適な場所が少ないのは温量が不足するため、下流域にほとんど生息していないのは河畔林がわずかしかないためだと考えられる。1960 年代から 1990 年代にかけての好適生息場所の総量変化は大きくないが、自然林と植林地の相互転換が大きかったことから、メッシュごとの好適性の変動はかなり大きかった。



一般に動物の分布情報は生息の記録をもとに集められるので、記録のある地点での生息は確実だとしても、記録のない地点では生息していないのか、調査が不十分であるのかの区別ができない。また、生息記録は点情報であり、面的な地図情報に換算する標準的な方法がない。これが動物の分布情報を地図情報化する上での最大の問題点である。この点を克服するために動物の生息条件を明らかにし、生息環境の好適な地点と不適な地点を推定して地図上に表現する

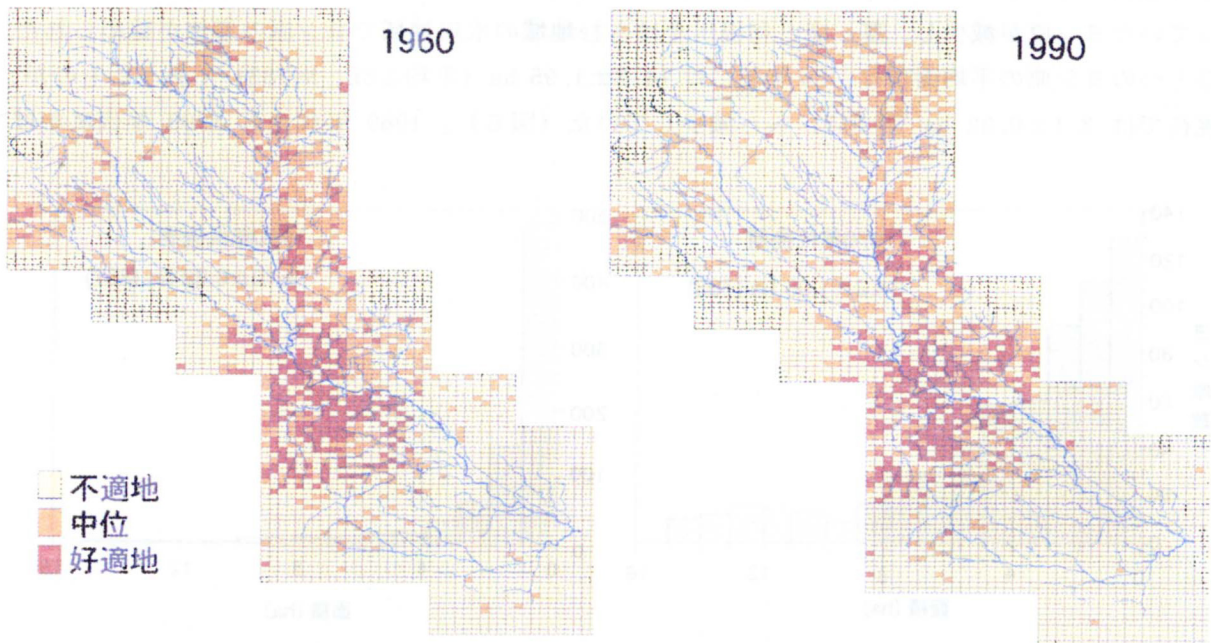


図4. 推定された那珂川流域におけるカワトンボの好適生息地（1960年代と1990年代）。山地での植林地の二次林化を反映して中くらいの生息地が増加している。平野部では河畔林の欠如を反映して生息場所がほとんどない

手法が必要である。

このような、動物の生息環境の適不適を植生カバーに置き換えて評価し、生態系評価システムとして位置づけようという考え方は、1974年に米連邦野生生物局（USFWS）によって採用され、HEP（Habitat Evaluation Procedure）として開発されている<sup>3)</sup>。本来、HEPは代償ミティゲーションのプラン作成の際に利用することを目的として開発されたもので、最も優れた生態系評価手法のひとつとして頻繁に利用されている。しかし、この手法はより一般的な問題、たとえば分布情報が不足しがちな動物の潜在生息地の推定とその地図情報化などにも利用できると考えられる。

## (2) 利根川下流域のヨシ原の分布とオオヨシキリの分布

### ① ヨシ原の分布の変化

1990年代の植生図と1970年代後半の環境庁の自然環境GISの植生図を比較して、霞ヶ浦周辺のおよそ2,000km<sup>2</sup>の地域のヨシ原の分布・構造の変化を解析した。霞ヶ浦周辺におけるヨシ原の面積は27.5~30.1km<sup>2</sup>であり、この地域の総面積の1.4~1.3%を占めるにすぎない。この20年間で、この地域のヨシ原の総面積は7%程度減少しているが、ほとんど変化がない。しかし、ヨシ原の分布を細かく見てみると、霞ヶ浦湖岸や利根川河川敷に広がっていたヨシ原が減少し、霞ヶ浦と利根川をはさむ地域の水田地域でヨシ原の増加が認められた。ひとつのヨシ原の平均面積は、20年前には14.2±1.95 ha (平均±SE, N=783)であったものが、現在では3.1±0.32 ha (N=857)へと減少していた(図5)。1960年代から1990年代にかけて

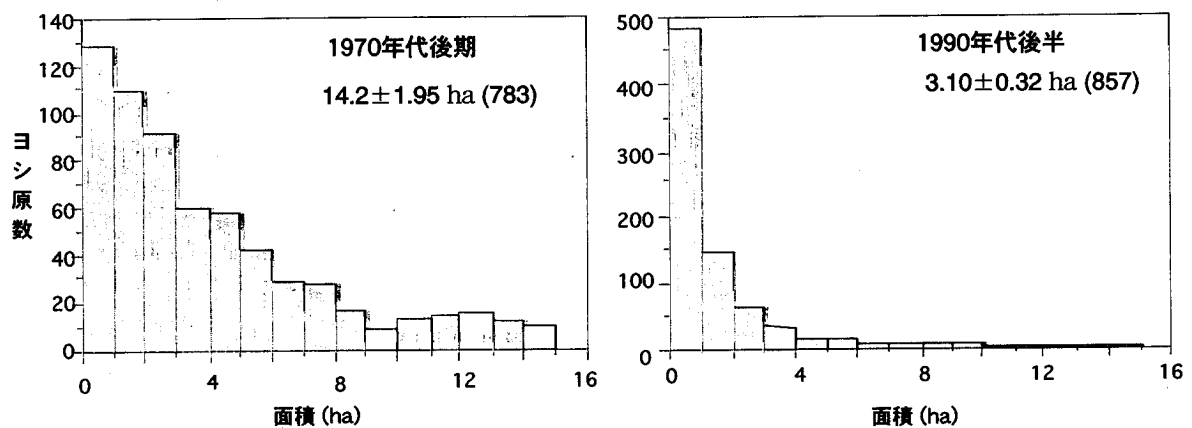


図5. 霞ヶ浦周辺のヨシ原サイズの分布の変化。1990年代のヨシ原は小さくなっている。  
(Kolmogorov-Smirnov test  $\chi^2_2=314, P<0.0001$ )

の水田面積の増減と湿地植生の増減の間に負の相関がみられることから、水田から湿地植生へと変化していることがみてとれる(表1、図3)。このことは、霞ヶ浦湖岸や利根川河川敷に広がっていたまとまった面積の大きいヨシ原が縮小、消滅したのに対して、放棄水田が変化したヨシ原が増加したため、個々のヨシ原サイズが小さくなり、断片化が進んでいることを示している。

### ② オオヨシキリの分布を決める要因

オオヨシキリにとって必須の生息地はヨシ原であるため、植生図から生息地を抽出することは比較的簡単である。オオヨシキリの生息に適しているヨシ原の特性を明らかにするために、1990年代植生図から湿地植生を抽出して霞ヶ浦周辺の2次メッシュ10個(およそ1,000km<sup>2</sup>)の地域のヨシ原を踏査して、オオヨシキリの生息状況を調べた。オオヨシキリが実際に生息していたヨシ原は全体の4割に過ぎなかった。構築した地理情報システムを用いて、ヨシ原の形状、ヨシ原の周囲の植生カバー面積、地形、ヨシ原間の距離などを解析した。その結果、オオヨシキリは水辺に近い標高20m以下にあるヨシ原に生息している傾向があった。ロジスティック回帰モデルを使って、オオヨシキリの生息に影響を及ぼしている変数を求めたところ、ヨシ原の標高と大きいヨシ原からの距離の2つのみであった。ヨシ原にオオヨシキリが生息する確率は、図6の面グラフで表される。オオヨシキリの生息確率は、ヨシ原の標高が低いほど高くなるが、面積が0.5 ha

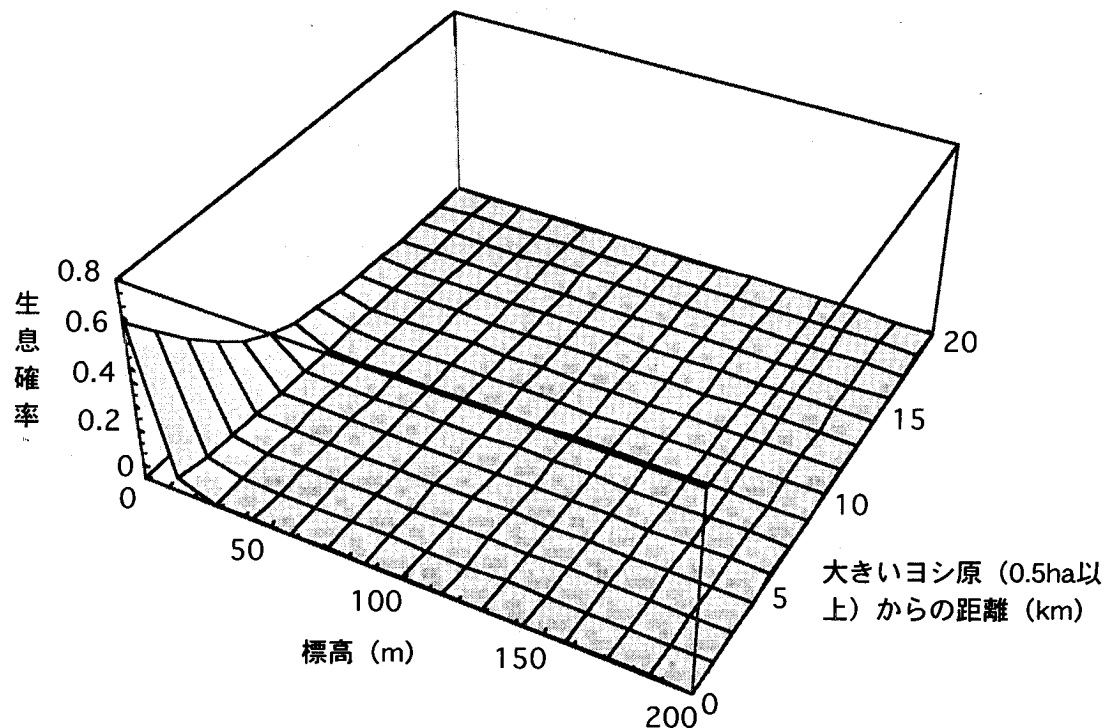


図6. オオヨシキリのヨシ原への生息確率

以上ある大きいヨシ原から距離が離れるにつれて低くなることが明らかになった(図6)。霞ヶ浦では、オオヨシキリの繁殖成功度はヨシ原の大きさに依存し、0.5 ha 以下の小さいヨシ原では繁殖成功度が低いことがわかっている。そのため、面積の大きいヨシ原が次世代個体の供給源ハビタットとなっていて、周囲のヨシ原に個体を供給する、いわゆるソース・シンク(source-sink)型の個体群構造をしていると考えると、大きいヨシ原から離れるにしたがって生息確率が減少するという現象をうまく説明できる。オオヨシキリの生息を予測する生息確率モデルを用いて、霞ヶ浦周辺のオオヨシキリの分布を予測したところ、生息確率モデルは70%の正確さでオオヨシキリの分布を再現することができた。航空写真の撮影された年と現地調査を行った年の間に少なくとも4年の時間差があること、航空写真からはヨシ原の細かい質まで読みとれないこと、および、オオヨシキリが好適と考えられるヨシ原を完全に利用できないことが生息確率モデルの精度を低下させていると考えられる。また、ヨシ原ごとのオオヨシキリの生息個体数は、ヨシ原の大きさに比例するが、前述の標高およびソースハビタットからの距離とは負の相関が認められた。オオヨシキリの生息個体数を予測する重回帰モデルを作成し、霞ヶ浦周辺のオオヨシキリの生息個体数を推定し、実際のセンサス結果と比較したところ、推定値は実測値の5%の誤差範囲内であった。さらに、1960年代の植生図(図1)から30年前の霞ヶ浦周辺のオオヨシキリの分布と生息数を予測した。その結果、30年前には、霞ヶ浦湖岸にサイズの大きいヨシ原がつながって分布していたため、9割のヨシ原にオオヨシキリが生息し、生息個体数は現在より45%程度も多かったと予測された。

オオヨシキリのメタ個体群構造<sup>4)</sup>をソフトウェアRAMAS/GISを用いて解析したところ、生息地であるヨシ原の断片化にともなってメタ個体群の数が47から91へと約2倍へ増加していた。1990

年代のヨシ原の分布地図上で、200年間のメタ個体群動態シミュレーションを1,000回行ってパッチの占有状態を評価した。その結果、一時的に最大15個の下位個体群でオオヨシキリの絶滅が生じていて、平均して約5%のパッチでオオヨシキリの生息が認められなかった。ヨシ原の縮小分断化が、これ以上進行しないで現状が維持されるとすれば200年後にオオヨシキリが絶滅しないと予測された。オオヨシキリは好適なヨシ原の近くにある放棄水田がヨシ原に変わると、すぐに定着し繁殖を開始できるため、適切な距離をおいてヨシ原が配置されれば不連続なヨシ原でも連続した個体群を形成できる。しかし、ヨシ原の極端な断片化には大きな影響を受けていることが示唆された。

### (3) 置換不能度の新しい計算アルゴリズムとその応用

生物多様性は、遺伝子から生態系までいろんなレベルで定義される<sup>1)</sup>。生物種の多様性を評価する指標として様々な多様度指数が考案されている。しかし、ある地域に保護区を設定する場合、生態系の多様性を評価するための指標が必要となる。例えば、ある地域をいくつかに分けて、その中の1カ所を保護区と設定する場合は、生物種の多様性が一番高い地域、すなわち $\alpha$ 多様度が高い地域を選べばよい。しかし、ある地域に複数の保護区を設定する場合、既に設定されている保護区に含まれていない種セットあるいは群集が含まれるように保護区を設定する必要がある。つまり、保護区間の生物多様性の相補性 (complimentarity) を考慮する必要が出てくる。このプロセスでは、ひとつの地域の種組成で決まる $\alpha$ 多様度よりも、2つ以上の地域全体で決まる $\beta$ 多様度の方が重要になってくる。

保護区を設定する場合の生態系の多様性を評価するために、Pressey や Ferrier らは置換不能度 (irreplaceability) という指標を提案した<sup>5), 6)</sup>。置換不能度は1~0のあいだの値を示し、置換不能度1の地域は他の地域で代替できないので保護区として必ず含める必要がある。置換不能度は、ある地域を複数のサイトに分割し、その地域全体に生息しているすべての種が含まれるようにサイトを選択する組み合わせ (全種表現組み合わせ: representative combination) を実現するという考えで計算される。そのため、対象となるサイト数が増えるにしたがって、組み合わせを求める計算時間が指数的に増加することが知られている<sup>6)</sup>。Ferrier らは、計算時間短縮のために中心極限定理に基づく近似アルゴリズムを発表した<sup>6)</sup>。今回は、Ferrier らのアルゴリズムよりも、直感的でわかりやすい新しい計算アルゴリズム (基本アルゴリズム) を開発した。

#### ①基本アルゴリズム

生物種の分布情報がある地域を細かいサイトに分割し、サイト毎に各種の生息データを作成する。このデータより、なるべく多くの全種表現組み合わせと、全種表現のための最少のサイト数 ( $n_{\min}$ ) を求める。希少種にはさまざまな定義がありうるが、ここでは分布域の狭い種を希少種とする。その中でも1つのサイトにしか分布しない種を第1希少種と定義する。全種表現組み合わせを考える際には、必ず第1希少種を含むサイトが選ばれるので、このサイトが含む他の種も同時に選ばれる。したがって、第1希少種を含むサイトとこのサイトに生息している種を計算の対象から外すことができる。また、種構成が同じサイトを一つにまとめることによって、計算すべきサイト数を減らすことができる。

上記の処理の後には、2つのサイトに含まれる種（第2希少種）が一般に複数個残っている。この第2希少種を全種表現組み合わせに入れ込むには、この種を含むどれか一つのサイトを選ばなければならない（分岐）。そのうちの1つを選び、最初と同様に計算する。このことをすべての分岐で行う。ここで、もし、あるサイトが残りの全ての種を含む、もしくは種数が1になれば、このサイトを選んだ場合の計算は終了する。この計算の途中で  $n_{\min}$  が分かるので、これよりも大きい全種表現は考えなくて良い。

さらに、基本アルゴリズムで置換不能度が計算できない場合に備えて、次の2通りの改良型近似アルゴリズムを開発した。

## ②近似アルゴリズム1

基本アルゴリズムにおいて十分な時間の経過後、計算を途中で止め、それまでに得られた全種表現組み合わせを、組み合わせ A とする。一般に全種表現組み合わせはサイトの順序に依存しないので、サイトの順番をランダムに入れ替えて、再び組み合わせ B を求める。基本アルゴリズムでは、サイトの処理の順序が一定なので、組み合わせ A と B では一部は重なるかも知れないが、異なることが期待される。更に、サイトの順序を変え、組み合わせ C、D、・・・を求め、これらの組み合わせより、なるべく多くの全種表現組み合わせを計算する。

## ③近似アルゴリズム2

さらに、近似アルゴリズム1とは別の近似アルゴリズムを考案した。第2希少種をもとにして全種表現組み合わせを求めるのは、サイト選択アルゴリズム<sup>7)</sup>で提案されている、希少種に基づくアルゴリズム(rarity based algorithm)に相当する。生息種数や、サイト数が増大するにつれ、第2希少種で分岐する場合の数が増大し、基本アルゴリズムでも計算時間が大変長くなることが予想される。これを防ぐために、第2希少種に注目するのではなく、種数をもっとも多く残っているサイトに注目する。これにより、分岐する場合の数は減少し計算時間が短縮されるが、一般に全種表現組み合わせの数が基本アルゴリズムよりも減少することが直感的に理解できる。この考えはサイト選択の、種数に基づくアルゴリズム(species rich based algorithm)<sup>8)</sup>に相当する。

## ④関東地方の置換不能度の解析例

関東地方は322個の2次メッシュで区切られる(図7a)。環境省の自然環境基礎調査の植生データを基に、各2次メッシュ内の自然植生、農地、市街地の割合を計算した。落葉樹、常緑樹などをまとめて自然植生、水田、畑などをまとめて農地、人工構造物などをまとめて市街地とした。三つの土地利用形態の面積比率は、次の三角グラフで表せる(図7b)。置換不能度は希少種の分布に大きく左右されるので、あらかじめ計算処理の前に偶発的に記録された迷行種を取り除いた。その結果、自然環境基礎調査において関東地方で記録された陸生繁殖鳥類は125種、チョウ類は101種、トンボ類は95種であった。今回、開発したアルゴリズムを使い、陸生鳥類、チョウ類、トンボ類の3つの生物群を解析し、各2次メッシュの置換不能度を計算した。各メッシュの置換不能度は、鳥類では基本アルゴリズムで、チョウ類は近似アルゴリズム1で、トンボ類は近似アルゴリズム2を用いて計算できた。いずれの結果も置換不能度の高いサイト

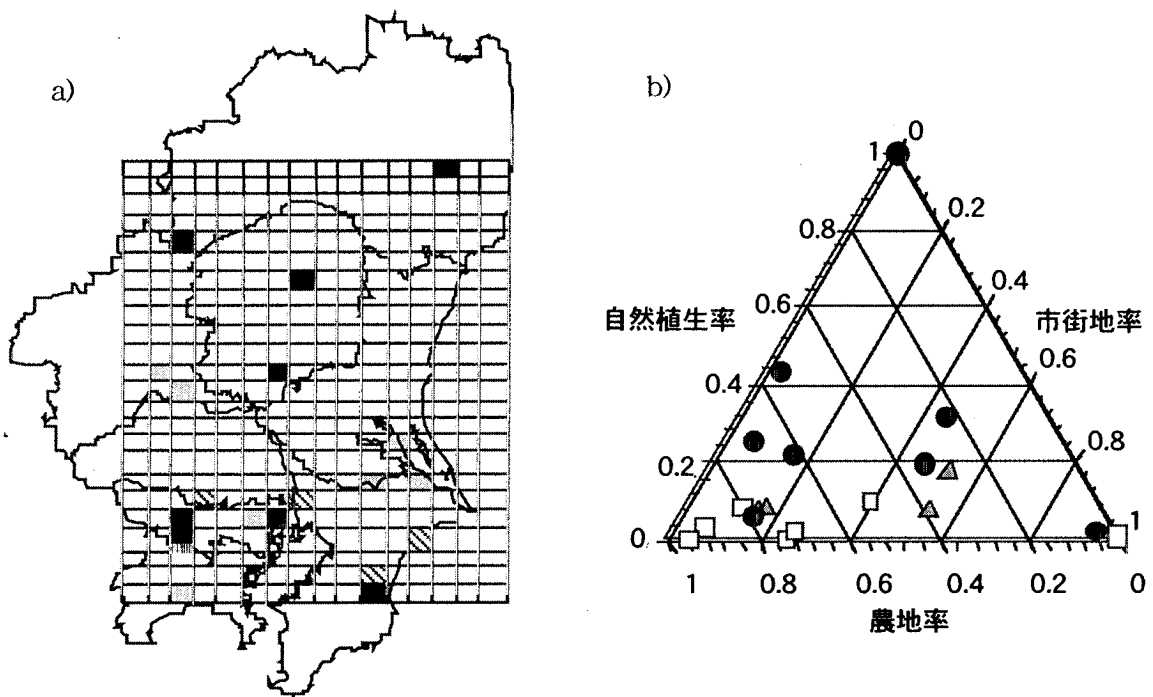


図7. トンボ類の置換不能度。a)サイトの地理的分布：濃い程、置換不能度は高くなる。置換不能度=1のサイトは保護区として必ず選ぶ必要がある。黒は1.0、斜線部は0.5-0.6、グレー部は0.2-0.3、これ以外は0となる。b)サイトの植生カバー特性と置換不能度の関係。●は1.0、▲は0.5-0.6、□は0.2-0.3を表している。

は自然林から農地までのみならず、市街地近くにも分布した。図7にトンボ類で計算された各サイトの置換不能度と植生カバーの特性を示してある。

トンボ類では鳥類およびチョウ類と異なり、置換不能度の高いサイトが市街地近くに見られる傾向があり、都心に置換不能度が最大となるサイトが見られた(図7a)。自然と農地の混在する地域(三角グラフで市街地率が低く農地率軸に近いところ)は里山的環境と考えられる。置換不能度の高いサイトの一部は里山にも分布しているが、里山的環境に集中しているとは限らなかった(図7b)。近年、里山の重要性が叫ばれているが、里山の保全だけでは重要な生物多様性の保全はできないことを意味している。また、第1希少種が存在しないサイトでも置換不能度が最大の1となる場合もあった。このことは、地域的な生物多様性の保全を考慮する場合、希少種が生息していないサイトも重要となりうることを意味している。置換不能度は、サイト間の相互作用によって決まるため、対象とする地域および生物分類群によって変化することに留意する必要がある。しかし、今後、保護区設定のためのツールとして有効なものとなると考えられる。

## 5. 本研究により得られた成果

航空写真をもとに1960年代と1990年代の植生図を作成し、国土地理院の数値地図データ、環境庁の自然環境保全基礎調査およびフィールド調査による生物分布情報を統合した那珂川流域および利根川下流域の生物多様性地理情報システムを構築した。過去30年間で、水田や畑地が市街地

に、植林地が自然林に、水田が湿地植生へと変化していることが明らかになった。生物多様性GISを用いて、動物の生息環境の適不適を植生カバーに置き換えて評価する手法を確立した。しかし、場合によっては生息適地がハビタットの質だけでなく個体群構造によっても影響を受けることも明らかになった。地域的な全生物多様性を保全するための場所を選定する指標として置換不能度が有効であることが明らかになった。置換不能度を簡単に計算する新しいアルゴリズムを開発した。「里山」の保全だけでは地域的な生物多様性を保護できないことも明らかになった。

## 6. 引用文献

- 1) 環境庁・外務省(1997) アジェンダ 21 実施計画 ('97) エネルギージャーナル社, 東京, pp. 525.
- 2) 環境庁 (1994) 環境基本計画, 環境庁, 東京, pp. 160
- 3) USFWS(1980) Standards for the Development of Habitat Suitability Index Models, 103  
ESM, U. S. Fish and Wildlife Service, Division of Ecological Services, Washington, D. C.
- 4) Hanski, I. A. and M. E. Gilpin (1997) Metapopulation Biology Ecology, Genetics and  
Evolution. Academic Press, San Diego, USA.
- 5) Pressey, R. L., C. J. Humphries, C. R. Margules, R. I. Vane-Wright, and P. H. Williams  
(1993) Beyond opportunism: key principles for systematic reserve selection.  
Trend. Ecol. Evol., 8, 124-128.
- 6) Ferrier, S., R. L. Pressey, and T. W. Barrett (2000) A new predictor of the  
irreplaceability of areas for achieving a conservation goal, its application to  
real-world planning, and a research agenda for further refinement. Biol. Conserv.,  
93, 303-325.
- 7) Margules, C. R., A. O. Nicholls, and R. L. Pressey (1988) Selecting networks of  
reserves to maximize biological diversity. Biol. Conserv., 43, 63-76.
- 8) Pressey, R. L., H. P. Possingham, and J. R. Day (1996) Effectiveness of alternative  
heuristic algorithms for identifying indicative minimum requirements for  
conservation reserves. Biol. Conserv., 80, 207-219.

### [国際共同研究等の状況]

なし

### [研究成果の発表状況]

#### (1) 誌上発表 (学術誌・書籍)

- ① R. Hooper, Y. Tsubaki, and M. T. Siva-Jothy: Physiological Entomology 24, 364-369  
(1999)  
“Expression of a costly, plastic secondary sexual trait is correlated with age and  
condition in a damselfly with two male morphs”
- ② 椿 宜高: インセクタリアム、36, 96-102 (1999)  
「翅の色は何を語るか: カワトンボが色づくとき」
- ③ 椿 宜高: 環境研究、114, 37-44 (1999)

「保全生物学とは何か」

- ④ 永田尚志：関西自然保護機構会報，21，2，167-177（1999）  
「霞ヶ浦におけるオオヨシキリの個体群構造」
  - ⑤ S. Plaistow and Y. Tsubaki: Proc. R. Soc. Lond. B, 267, 969-975 (2000)  
“A selective trade-off or territoriality and non-territoriality in the polymorphic damselfly *Mnais costalis*”
  - ⑥ 椿 宜高：遺伝 54, 58-64 (2000)  
「生物多様性の危機と遺伝学」
  - ⑦ M. T. Siva-Jothy, Y. Tsubaki, R. Hooper, and S. Plaistow: Physiological Entomology 26, 1-5 (2001)  
“Investment in immune function under chronic and acute immune challenge in an insect.”
  - ⑧ 椿 宜高：日本動物行動学会ニュースレター、39, 17-21 (2001)  
「行動生態学・進化生態学の小道具としてみた対称性のゆらぎ (FA) : FAはオネストシグナルか」
  - ⑨ Y. Takaki, K. Eguchi, and H. Nagata: J. Avian Biol. 32, 319-325 (2001)  
“The growth bars on tail feathers in the male Styan’s grasshopper warbler may indicate quality.”
  - ⑩ 永田尚志：Birder 16, 4, 79-81 (2002)  
「今なぜ保全生物学か？」
  - ⑪ A. Dyrce and H. Nagata: Bird Study. (in press)  
“Breeding Ecology and Effects of Human Activities on Breeding Success of the Eastern Great Reed Warbler *Acrocephalus arundinaceus orientalis* at Lake Kasumigaura, Central Japan.”
- (2) 口頭発表
- ① 永田尚志：日本鳥学会1999年度大会（1999）  
「マイクロサテライト遺伝子座からみた霞ヶ浦のオオヨシキリの個体群構造」
  - ② 椿 宜高：第26回環境保全・公害防止研究発表会（1999）  
「種の多様性と種内の多様性：保全のスケールをどう考えるか」
  - ③ 石谷正宇、森下兼年：第60回日本昆虫学会大会（2000）  
「環境指標としてのゴミムシ類に関する生態学的研究（6）. 一河川敷環境の植生維持管理の違いをGISでいかに反映させるか！」
  - ④ 森下兼年、石谷正宇、鷹村憲司：GIS研究会（2000）  
「生物多様性の動態解析を目的とした地理情報システムの構築」
  - ⑤ 永田尚志：第47回日本生態学会大会（2000）  
「霞ヶ浦周辺のオオヨシキリの個体群構造」
  - ⑥ 椿 宜高：日本学術会議シンポジウム「生物多様性科学の現状と展望」（2000）  
「地球環境問題としての生物多様性」
  - ⑦ Y. Tsubaki: International Symposium on the Evolution of Sex, Fukuoka. (2000)



“Parasitism and alternative mating strategies”

- ⑧ 石谷正宇、森下兼年：第45回日本応用動物昆虫学会(2001)  
「GISを利用した河川敷環境の昆虫類と植生多様度の分析について(1)」
  - ⑨ 永田尚志：第48回日本生態学会大会(2001)  
「オオヨシキリの個体群構造とヨシ原の分布」
  - ⑩ 永田尚志：日本鳥学会2001年度大会(2001)  
「霞ヶ浦周辺のオオヨシキリのメタ個体群シミュレーション」
  - ⑪ 永田尚志：第20回個体群生態学会シンポジウム(2001)  
「霞ヶ浦周辺における生息地の分断化がオオヨシキリの個体群構造にあたる影響」
  - ⑫ Y. Tsubaki: 27<sup>th</sup> International Ethological Conference, Tuebingen, German (2001)  
“A condition dependent signal and a status dependent response”
  - ⑬ 永田尚志：第49回日本生態学会大会(2002)  
「周辺環境およびヨシ原の分布がオオヨシキリのヨシ原選択に及ぼす影響」
  - ⑭ 椿 宜高：第49回日本生態学会大会(2002)  
「野生生物の生息地の好適性評価と大スケール分布の地図化の試み：カワトンボを例に」
  - ⑮ 辻 宣行、椿 宜高：第49回日本生態学会大会(2002)  
「Irreplaceabilityを用いた評価：“里山”の生物多様性」
  - ⑯ H. Nagata: 23<sup>rd</sup> International Ornithological Congress, Beijing, 2002.  
“The Effect of Habitat Fragmentation on Metapopulation Structure of Oriental Great Reed Warbler around Lake Kasumigaura in Central Japan.” (アブストラクト提出済み)
- (3) 出願特許  
なし
- (4) 受賞等  
なし
- (5) 一般への公表・報道等
- ① 椿 宜高(1999) 遺伝的変異の減少は種の絶滅を招くか。遺伝子驚異の小宇宙・人体Ⅲ 遺伝子・DNA (6) 90-91.
  - ② 読売新聞(2001年7月5日、全国版、夕刊)
  - ③ 椿 宜高(2001) 生物多様性はなぜ必要か：文明による大絶滅時代が始まっている(上、中、下) ぬれきてる、環境科学入門 <http://elekitel.jp/elekitel/index.htm>
- (6) その他成果の普及、政策的な寄与・貢献について  
なし