

# トンボ類を指標生物とした都市域における ビオトープの空間的特性の評価

李 承恩<sup>1</sup>・盛岡 通<sup>2</sup>・藤田 壮<sup>3</sup>

<sup>1</sup>学生会員 学生 大阪大学大学院生 工学研究科環境工学専攻 (〒565-0871 大阪府吹田市山田丘2-1)

<sup>2</sup>正会員 工博 大阪大学教授 工学研究科環境工学専攻 (〒565-0871 大阪府吹田市山田丘2-1)

<sup>3</sup>正会員 工博 大阪大学助教授 工学研究科環境工学専攻 (〒565-0871 大阪府吹田市山田丘2-1)

本研究は都市域におけるビオトープの空間的特性が生物の生息に及ぼす影響を評価することを目指し、水域や緑地の組み合わせを生息空間とするトンボ類を指標生物としてビオトープネットワークの評価基準を設定する。大阪府枚方市を対象に約1 kmメッシュスケールにおけるトンボの生息種数とビオトープのタイプ別面積について重回帰分析をおこなう。また、7つのエリアごとに空間的孤立度や相互作用を示す指数を用いてビオトープの連結性を定量化し、トンボの生息種数に与える影響について考察する。分析結果、次の知見を得た。1) トンボ種の豊かさによって池の面積がもっとも有意な要因であり、次に樹林や畑・牧草地の面積が重要である。2) 池の空間的連結性もトンボ類の生息に有意な影響を与える。

*Key Words: biotope, area, connectivity, dragonfly, species abundance*

## 1. はじめに

生物は種ごとに、摂食、休憩、繁殖などのライフサイクル段階に応じて異なるタイプや規模の生息空間を必要とする。しかし、近年、人間活動の範囲が徐々に拡大することによって、生物の生息空間が分断、消滅、島状化されるとともに質的に悪化し、生物多様性を顕著に減少させる状況をもたらしている。多くの生物種が絶滅の危機にあり、将来的にその速度はさらに加速するとの指摘もある<sup>1)</sup>。

失われつつある生物多様性を回復・保全するための最も重要で基礎的な観点がランドスケープシステム (landscape system) からのアプローチである<sup>2), 3)</sup>。ここでのランドスケープは地形、気候などの物理的な現状に加えて、生態系及び植生や動物の群集の機能、さらに人間と自然との相互作用の関係などを含む総合的なシステムという概念である。ランドスケープで、生物は多様なタイプの生息空間で活動を行い、遺伝子、個体群、種、生態系のそれぞれの階層的レベルにおける生態的機能を果たす。池沼、湿地、草地、雑木林などのような「特定の生物群集が生存できる特定の環境条件を備えた均質なある限られた空間」<sup>4)</sup>をビオトープ (biotope) と呼ぶ。ランドスケ

ープにおけるビオトープの規模や生態的な質とともに、その空間的構造や分布パターンは生物の存続及び種の豊かさ大きく影響する。

近年、保全生態学や景観生態学など生物多様性の保全と関連した分野では、分断されたビオトープ間を有機的につなげるための「ビオトープの連結性」の概念が注目されている。例えば、生態的回廊によって連結されているビオトープが孤立したビオトープに比べて種や群集の存続確率が高いことが明らかにされている<sup>5)</sup>。他にも生物の生息にとってビオトープの連結性が持つ意味や効果を評価する先行研究があり、多くの実証的知見が体系化されつつある。一方で、これらは次のような課題を残している。①先行研究の多くは同タイプの個々ビオトープの連結性を評価したものであり、人間活動領域を含めたより広域的なスケールで複数のタイプのビオトープを評価した例はない。②主に樹林地など緑地の連結性が評価されて、水域ビオトープについては具体的に評価されてない。③ビオトープの連結性を定量的に評価する一般的な手法が確立されてない。④環境的に健全な住宅地計画やビオトープづくりなどの環境計画の立場から、都市や地域のスケールでビオトープの連結性を評価し、計画に具体的に反映する試み

表一 生物保存計画におけるビオトープの空間的概念

対象地域	計画及び事業名	ビオトープの空間的概念	参考文献
オランダ	国土生態ネットワーク計画 (NEN ; Naional Ecological Networks)	○生息地の積極的ネットワーク化 ○コアエリア・自然環境改善エリア・エコロジカルコリドー・バッファーの構築	2), 6), 7), 8)
ドイツ	景域構想 (州) 景域基本計画 (地域) 景域計画 (市町村)	○農地, 公園, クラインガルテン, 街路樹などの「緑の連絡網」の構築 ○市周囲の自然性を市の中心部まで引込む.	4), 9)
ヨーロッパ	ヨーロッパ 生態ネットワーク計画 (EECONET; European ECOlogical NETwork)	○大陸全体における重要な生息地の保護 ○生息地間の生態的相互関係やネットワークの維持 ○コアエリア・バッファー・エコロジカルコリドーの構築	2), 10)
北米	野生地保護プロジェクト (the Wildlands Project)	○地域固有の生態系タイプの保護 ○「保護区ネットワーク」の形成 ○コア保護区・バッファー・コリドーの構築	11)
チェコ	生態的な土地システム (Territorial Systems of Ecological Stability; TSES)	○生物中心域(biocentre)と生物移動路(biotic migration corridor)のネットワーク形成や空間的パラメータの設定	12)
日本	生物多様性国家戦略	○保護地域・生態系・自然生息地の設置, 管理 ○保護地域間の有機的連携を図る.	13)

は多くない。これには次の要因が考えられる。a) 生態系の複雑さや多様性、不確実性などによって定量的評価が難しい。b) 評価に用いられる十分なデータが蓄積されていない。

本研究では地域スケールで生物多様性を保全するためには、ある規模以上のビオトープを連続的に配置することが重要であるという仮説を立てる。そこで、水域や緑地の組み合わせを生息空間として必要とするトンボ類を指標生物として選定し、ビオトープの面積と連結性がトンボ類の生息に与える影響を評価する。

本研究は以下のような構成を持つ。第2章で生物保存計画の中で表れているビオトープの空間的概念について考察するとともに、ビオトープの空間的特性を評価する指数や先行研究の例をまとめる。第3章ではビオトープの評価に用いられる指標生物の選定基準及びトンボ類の指標生物としての意義や特性を述べる。また、トンボ類のライフサイクルを反映したビオトープネットワークの評価基準を設定する。第4章で大阪府枚方市を対象にビオトープの空間的特性とトンボ類の生息に関する事例分析をおこなう。まず、1 kmメッシュスケールにおけるビオトープのタイプ別の面積とトンボ種数との重回帰分析をおこなう。また、7つのエリアごとにビオトープの孤立度及び相互作用を示す指数を用いてビオトープの連結性を定量化し、トンボ類の生息に与える影響について考察する。第5章で結論と研究課題を述べる。

## 2. ビオトープの空間的特性の評価及び計画例

### (1) 生物保全計画におけるビオトープの空間的概念

生物多様性を回復・保全するために世界各国で行われている環境計画や政策、戦略を表一に示す。

オランダ、ドイツなどのヨーロッパや米国では重要な生息地を保護し、さらに、つなげるための生態ネットワーク(Ecological Network)計画が国土、大陸スケールで進められている。特にドイツでは州、地域、市町村のそれぞれの空間的レベルで野生生物を考慮した景域計画を整備するとともに土地利用計画との一体化によってその実現を政策化している。

アメリカでは地域スケールの生息地ネットワークの概念を大陸スケールまで拡大する動きが活発であり、開発や土地所有者との妥協・調整のための社会的、経済的手段の開発が進められている。

チェコなどの東ヨーロッパでも生物と人間の共存可能な景域計画を目指した土地システム(TSES)の概念が1990年代以来社会的に注目されており、生息地のネットワーク概念やそれを発展する上で必要な空間的パラメータの設定が進められている。

日本においても1996年の生物多様性国家戦略の中で「都市地域における生物多様性を保存するために、生物の生息・生育にとって十分な面的な広がり確保されるように、残された自然の保全を進めるとともに、都市公園、公共施設と民有地、神社林、河川と池などでの空間を積極的に活用し、生物の生息・生育空間(ビオトープ)を創出する」<sup>11)</sup>とされ

ており、生息地の保存や生物間及び生息地間での有機的連携の概念が明示されている。

生物との共生を目指した環境計画は、既存のアメニティや美観に重点をおいた緑地整備計画と異なり、具体的な指標生物ないし生態的ガイド種を取り組みながら自然環境を生物の生息空間として評価、計画する。

地域固有種や絶滅危機種を含めた生物多様性を保全するための以上の計画で共通的に認められるビオトープの空間的概念は、①地域生態系において重要なビオトープを一定面積の以上に保護すること、②その間の連結性を高めてネットワークを形成することである。本研究ではこの二つのビオトープの空間的屬性に注目する。

## (2) ビオトープの定量的評価指数

ランドスケープの中でビオトープはさまざまなタイプや規模、空間的パターンとして存在し、それを定量化する多様な手法が試みられてきた。表-2にビオトープの空間的構造やパターンを定量化するために用いられる指数を整理する。指数は大きく、①個々のビオトープの特性を示すもの、②周辺ビオトープとの関係を示すもの、③ランドスケープにおけるビオトープの空間的パターンを示すものの三つに分類できる。

ビオトープ個々の特性を示す代表的な指数がビオトープの面積や形態である。これらはビオトープの最も基本的な要因として、例えば、鳥類の場合、生息地の面積や形態は種の豊かさに決定的な影響を与える。

周辺ビオトープとの空間的関係を示す指数の中で、 $\gamma$ 、 $\alpha$  指数はランドスケープを構成する要素(element)のネットワークの複雑さ(network complexity)を示す。この指数はランドスケープ中のノード(node)やリンク(link)の数から算出される。主に、物理的・地形的なネットワークを評価することに用いられ、生態的な流れや相互関係は反映しがたい<sup>15)</sup>。一方、孤立度、接近度、相互作用、分散度、隣接度指数はビオトープの面積、数、隣接ビオトープ間の距離を尺度として周辺のビオトープとの空間的関係や相互作用を定量化する。ビオトープ間の距離、ある面積のビオトープまでの距離などがビオトープの孤立度及び連結性を評価するために、応用されている。

多様度、優占度、豊富指数はランドスケープにおけるビオトープのタイプや数、比率からビオトープの全体的な空間パターンを示す。人間活動がランドスケープパターンの時間的、空間的変化及び生物

表-2 ビオトープの定量的評価指数

(文献 14), 15), 16) から引用・再整理)

カテゴリ	指数
個々のビオトープの特性	○面積 ○形態 $D_i = P / (2(A\pi)^{1/2})$ A: ビオトープの面積 P: ビオトープの周長
周辺ビオトープとの関係	ネットワーク ○連結性 $\gamma = L / L_{max} = L / 3(V-2)$ ○回路性 $\alpha = (L-V+1) / (2V-5)$ L: リンクの数 $L_{max}$ : リンクの最大可能数 V: ノードの数
	孤立度 ○個々ビオトープの孤立性 $r_i = 1/n * \sum d_{ij}$ n: 隣接ビオトープの数 $d_{ij}$ : ビオトープ i とビオトープ j 間の距離 ○全ビオトープの孤立性 $D = \sum (\sigma_x^2 + \sigma_y^2)$ $\sigma_x^2, \sigma_y^2$ : x, y 座標系における分散
	接近度 $a_j = \sum d_{ij}$ $d_{ij}$ : ビオトープ i と j 間のリンク上の距離
	相互作用 $I_j = \sum (A_j / d_{ij}^2)$ $A_j$ : 隣接ビオトープ j の面積 $d_{ij}$ : ビオトープ i とビオトープ j 間の距離
	分散度 $R_c = 2D_c(\lambda / \pi)$ $D_c$ : 隣接ビオトープ間の最短距離の平均 $\lambda$ : ビオトープの平均密度
	隣接度 $C = 2s * \log s + \sum \sum q_{ij} * \log q_{ij}$ $q_{ij}$ : ビオトープ i とビオトープ j が隣接している周長の比率 s: ビオトープの総数
空間的パターンの	相対的豊かさ $R = n/n_{max} * 100$ N: 対象地域内でのビオトープのタイプの数 $n_{max}$ : ビオトープタイプの最大数
	多様度 $H = - \sum (p * \ln(p))$ p: 各ビオトープタイプの比率
	優占度 $D = H_{max} - H$ H: 多様度指数 $H_{max}$ : 多様度指数の最大値

種の豊かさに及ぼす影響に関する研究例がある<sup>14)</sup>。

## (3) ビオトープの面積や連結性に関する先行研究

ビオトープの面積の評価に関しては、Freemark and Merriam(1986)<sup>17)</sup>が森林性鳥類の種多様性が生息地の面積や構造の多様性が増えるほど増加することを確認した例がある。

Wu and Vankat(1991)<sup>18)</sup>は「樹林面積一種数」のシミュレーションによって、ある基準値(critical size, or threshold)以下の面積変化に対して種数が敏感に変化し、その基準値は樹林の内部とエッジ(edge)によって異なることを報告した。面積に関する大半の研究は生息地の面積の増大にともない、種数や個体群数も増加するという共通の結果を示唆している<sup>19)</sup>。

一方、加藤ほか(1993)<sup>19)</sup>は地域スケールの生物群集の保全において、個々の生息地の面積や形状の他に、生息地間の連結性が生物群集に影響を及ぼすと

表—3 ビオトープの連結性評価に関する研究例

研究者	対象生物	ビオトープタイプ	評価指数
Clergeau and Burel (1997)	キバシリ	ヘッジロー	・ビオトープ間距離 ・種供給原までの距離
Lamberson (1994)	フクロウ	針葉樹林	ビオトープ間の距離
Opdam (1991)	樹林性鳥類	樹林	・大面積の生息地までの最短距離 ・周辺の生息地面積 ・コリドーの密度
Shreeve (1992)	チョウ類	ヘッジロー線型樹林帯	ビオトープ間の距離
Dmowski and Kozakiewicz (1990)	鳥類	灌木のコリドー	ビオトープ間の距離

述べ、配置問題の重要性を指摘した。また、生物多様性の保全には生物が生活・成長過程において要求するタイプのビオトープが十分な広さを持ちながら、生物の移動能力の範囲内に複数配置されていることが不可欠な要素であるとの指摘もある<sup>4)</sup>。

ビオトープの連結性概念はメタ個体群理論とともにビオトープネットワークの計画において定量的な根拠を得るための有用な理論的基礎を与えている。Forman and Godron (1986)は<sup>15)</sup>、ランドスケープにおけるビオトープネットワークの栄養物質、水、エネルギー及び生物の移動のための効率的なルートとしての機能に注目した。Merriam and Baudr は連結性というのは「メタ個体群を構成する局所個体群間の相互作用や移動を促進するランドスケープの特性」と定義した<sup>6)</sup>。また、連結性について Clergeau and Burel (1997)<sup>20)</sup>は「ビオトープ間の生物の移動・分散を促進、あるいは妨げる程度」であると、加藤(1995)<sup>21)</sup>は「異なる生息地の間が生物の移動を通して機能的に結びつけられている状況」であると述べた。

哺乳類の個体群レベルにおける連結性の効果に関する評価として、Fahrig and Merriam (1985)<sup>22)</sup>はネズミを対象にしたパッチダイナミックモデルを用い、連結された樹林地での個体群の成長率が孤立した樹林地より高いことを報告した。Henein and Merriam (1990)<sup>6)</sup>はパッチサイズが一定な場合、環境質が良い生態的回廊によって連結されたパッチほどメタ個体群サイズが大きいくことを確認した。

飛翔生物におけるビオトープの連結性評価に関する研究例を表—3に整理する。Clergeau and Burel (1997)<sup>20)</sup>はキバシリ(the short-toed Tree Creeper)の移動に対してパッチの面積、パッチ間距離と種供給原からの距離の効果を定量化した。Lamberson et al (1994)<sup>23)</sup>はフクロウ(the Northern Spotted Owls)の

表—4 ビオトープの評価に用いる指標生物

空間スケール	マクロ	メソ	ミクロ	
	1/20 万以上	1/2.5 万～1/20 万	1/250 万～1/2.5 万	
計画レベル	国土・広域圏	都市・広域圏	地区・都市	
ビオトープタイプ	緑地	大型哺乳類 大型猛禽類	中型哺乳類 鳥類	小型哺乳類 鳥類 昆虫類
	水域		水生鳥類 淡水魚類	水生鳥類 淡水魚類 貝類
	緑地 + 水域		トンボ類 ホタル 両生・爬虫類	トンボ類 ホタル 両生・爬虫類
	生態系レベル	高次消費者 ←————→ 低次消費者		

分散における生息地間の距離の影響をモデル化している。Opdam (1991)<sup>24)</sup>は樹林性鳥類の移動・分散における生息地の面積と孤立性(大面積の生息地までの最短距離、周辺の生息地面積、回廊の密度)の重要性を評価した。

以上に述べたような先行研究からビオトープの面積とともに連結性は生物の生息や生存率を高めるランドスケープの空間的要因であることが考えられる。

### 3. 指標生物の選定や評価基準

#### (1) 指標生物の選定

ランドスケープパターンの認識及びビオトープの分断に対する感度は生物種によってかなり異なり、ビオトープの評価や計画において相応しい指標生物を選定することは決定的に重要な問題である<sup>6)</sup>。ビオトープの評価に用いられる指標生物は評価目標や対象地域の空間的スケール、計画レベル、ビオトープのタイプなどによって異なり、表—4にそれをまとめる。国土や広域圏のマクロスケールではクマ、フクロウなどの大型哺乳類や大型猛禽類が相応しい。これらは地域生態系の頂点を占める高次消費者の種として生態系の完成度を示す。また、都市及び広域圏レベルではタヌキ、キツネのような中型哺乳類が、地区や都市スケールでは小型哺乳類、鳥類、昆虫類、両生・爬虫類が望ましい。また、ビオトープのタイプをみると哺乳類、鳥類、昆虫類などが緑地の評価に、魚類や水生鳥類、貝類などが水域の評価に用いられる。両生・爬虫類、トンボ類、ホタル類は緑地と水域の組み合わせを評価することができる。

本研究は、緑地と水域の組み合わせの評価に注目

表—5 トンボ類のライフサイクル別生息環境要因  
(文献 28),29)から引用・再整理)

		幼虫	羽化	未熟成虫	成熟成虫	産卵
水域	植物の根	●				
	水中堆積物	●				
	砂泥底	●				
	水生植物	●	●		●	●
	朽ち木・杭		●		●	●
	開放水面				●	●
	岩石		●		●	
	湿土・コケ					●
緑地	草地			●	●	
	樹林			●	●	

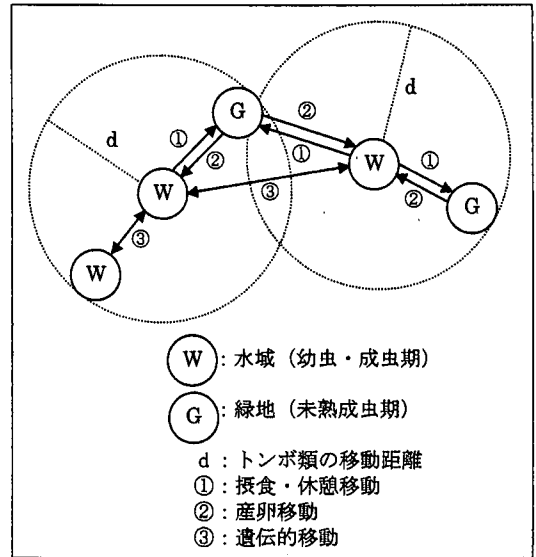
しており、以下の理由によってトンボ類を指標生物として選定する。①種別分布や密度が水辺と緑地の多様な空間構造を反映するとともに<sup>25), 26)</sup>、身近な自然環境の豊かさの指標となる。②伝統的農村環境や里山環境と融合している昆虫として日本人との深い馴染みがあり、認知度が高い<sup>27)</sup>。③生息に関する情報やデータがある程度蓄積されている。

## (2) トンボ類を指標としたビオトープネットワークの評価基準

ビオトープネットワークの評価には種のライフサイクルや行動特性を考慮した基準の設定が必要である。例えば、ほ乳類などの陸上動物には環境質の高いコリドーによる連結が、鳥類のような飛翔動物には移動距離内でのビオトープの分布がネットワークの主要素となると考えられる。

トンボ類では、全ライフサイクルを通して必要なビオトープが移動距離内に配置されることがネットワークの条件となる。トンボ類がライフサイクルの各段階で必要とする生息環境要因を表—5に示す。トンボ類は幼虫時期を水域の砂泥中に潜るか植物や岩などにつかまって過ごし、水生植物や水面などで羽化する。羽化した直後の未熟成虫は水域を離れて草地や樹林地で摂食及び休憩活動を行い、次第に成熟する。成虫になってからは再び水辺に戻って産卵活動を行う。

ライフサイクル間のトンボ類の移動は次の3種類に整理できる。①羽化直後水域より離れ、未熟成虫期を過ごすための緑地までの移動(水域→緑地)、②成熟成虫が繁殖場である水域を探すための移動(緑地→水域)、③遺伝子交換や種供給などの遺伝的移動(水域⇄水域)である。この三つの移動を考慮し、本研究では、「水域からトンボ類の移動距離内にある水域や緑地(移動①、③)」と「緑地からトンボ類の移動距離内にある水域(移動②)」を生態的にネ



図—1 トンボ類におけるビオトープネットワークの評価基準

ットワークされていると定義する。図—1にトンボ類の生息特性を反映した水域や緑地ビオトープのネットワークの概念を示す。以下のネットワークの評価にあたり図—1のような判断基準を適用する。

## 4. ビオトープの空間的特性の分析・評価

### (1) 分析対象地及び分析データ

本研究では大阪府枚方市を対象にビオトープの空間的特性とトンボの生息に関する事例分析をおこなう。枚方市は大阪府の東北部、淀川沿いに位置している総面積約 65km<sup>2</sup>の都市であり、市街地から農村的環境、山村の環境、山地、河川など多様な環境が存在する。東南部は生駒山の延長部として急傾斜が多く、東部は丘陵地として比較的大面積の池や緑地が残されている。また、市中央部は市街地で、西部は淀川低地の沖積平野である。市全域に水田と樹林や草地が豊富な池沼、ため池が比較的多く残されている<sup>30)</sup>。

分析は表—6に示したデータを用いて地理情報システム(MapInfo)上でおこなう。水域の分布データとしては地理情報システム基盤の空間数値地図を用いる。緑地については1万分の1の地形図を読み込んで地理情報システム用のポリゴンデータを作成した。緑地は樹林、水田、畑・牧草地の三つのカテゴリに区分しており、樹林は広葉樹林、針葉樹林、竹林、果樹園などを含む。

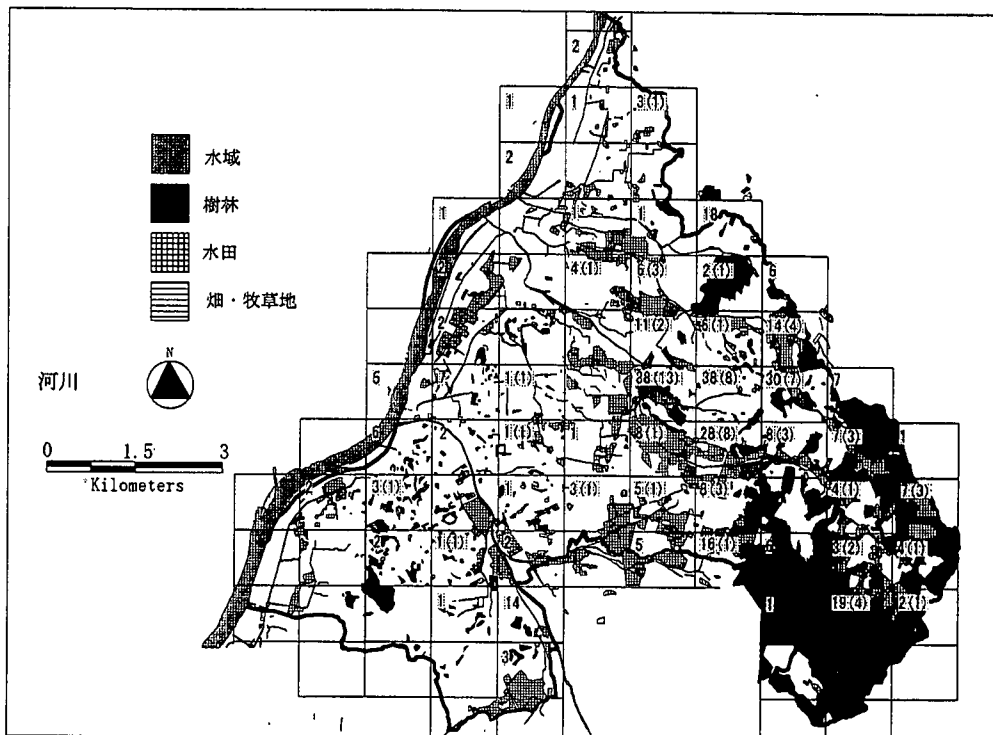


図-2 枚方市の自然環境及びトンボ類の生息現況  
(メッシュごとの数字は総種数, ( ) は貴重種数を示す.)

表-6 分析データ

カテゴリー	データ名	特性
水域	MapInfo 空間データ 基盤数値地図	国土地理院の地理情報システム基礎データ
緑地	作成	1万分の1地形図から読み込んだMapInfo用ポリゴンデータ
トンボ生息現況	枚方市自然環境調査報告書 <sup>30)</sup>	約1kmメッシュごとの種別の生息状況

トンボ類の生息現況に関しては「1990年枚方市自然環境調査報告書」のデータを用いる。ここではトンボ類の種別生息現況について当時の調査結果と1974年以来の観察・文献データをあわせて約1km四方のメッシュごとに記録している。

## (2) 枚方市におけるトンボ類の生息状況

枚方市では1974年以来1989年まで約62種類のトンボの生息が確認されている。図-2に枚方市の水域や緑地の分布現況と合わせて1kmメッシュごとのトンボの生息種数を示す。東部の池付近でトンボの種数が最も多く、中央の市街地には少な

いことが観察できる。

トンボ科別の生息現況としては、イトトンボ科10種、アオイトトンボ科5種、カワトンボ科4種、サナエトンボ科11種、ヤンマ科9種、ヤマトンボ科3種、エゾトンボ科2種、トンボ科21種が生息している。

枚方市ではモートンイトトンボ、オソミイトトンボ、ベニイトトンボ、オツネイトトンボなどの23種の生息数が減少している。そのうち、オオイトトンボ、アオハダトンボ、アオサナエ、サラサヤンマ、アオヤンマ、オオエゾトンボ、キイロヤマトンボ、ヨツボシトンボの8種は大阪府スケールでも貴重種と指摘されている<sup>30)</sup>。

## (3) 分析の前提条件

データの分析において次の前提条件を設定する。

- ① トンボ類の移動距離は種ごとに異なり、まだ十分なデータが蓄積されていないが、既存研究の結果<sup>31), 32)</sup>などを参考に平均移動距離を1kmと仮定する。
- ② ビオトープのタイプ、面積、連結性だけを分析対象にして、個々のビオトープの内部環境質は均一であると仮定する。

表—7 変数の一覧

変数名	平均	分散	最大	最小
<被説明変数>				
トンボ種数	7.94	113.29	38	1
貴重種数	2.16	8.78	13	0
<説明変数>				
池面積	0.02	6.E-04	0.10	0
樹林面積	0.14	0.04	0.88	0
畑・牧草地面積	0.01	3.E-05	0.02	0
河川面積	0.01	6.E-05	0.03	0
水田面積	0.13	0.01	0.56	1.E-03
周辺池面積	0.11	0.01	0.35	0.01
周辺樹林面積	0.82	0.86	3.55	0.08
周辺畑・牧草地面積	0.03	2.E-04	0.06	1.E-03

注：1. 周辺は当該メッシュを囲む8個のメッシュを示す。

2. 面積の単位は $\text{km}^2$ である。

#### (4)重回帰分析

##### a)分析方法

李ほか(1998)<sup>33)</sup>は1 kmメッシュにおける池、河川、樹林、水田、畑・牧草地の5タイプのピオトープの面積とトンボの総生息種数に関する重回帰分析をおこない、池の面積が1%の水準で有意であり、樹林や畑・牧草地の面積が5%水準で有意である結果を得た。

本研究では総種数に加えて貴重種数をとりあげて、それぞれを被説明変数として分析した。貴重種数としては生息が不安定で生息数が減少しているため、枚方市と大阪府で貴重と認定している23種類を対象にした。「種数」、すなわち、「種の豊かさ」というのは、地域の生態的質を具体的に表現するもので<sup>19)</sup>種多様性を示すもっとも簡単に明確な指標<sup>34)</sup>という意義がある。

一方、説明変数には1 kmメッシュ内における五つのピオトープのタイプごとの面積とともに、当該メッシュを囲む周辺8個のメッシュにおける池面積、樹林面積、畑・牧草地の面積を加える。変数の一覧を表—7に示す。

分析は変数選択法重回帰分析をおこなう。変数選択法は説明変数の候補の中から、最良な変数を選択して重回帰分析をおこなう一つの方法として、ある基準をもうけて、それとの大小関係から変数を選択する。通常的に $F=2.0$ を基準値として用いることが多いので、本研究でも $F$ 値が2.0以上の変数だけを選択し、分析をおこなう。

##### b)分析結果及び考察

重回帰分析の結果を表—8に示す。分析の精度は0.69, 0.78と高い決定係数を得た。総種数、貴重種数のいずれでも1 kmメッシュ内の池、樹林、畑・牧草地の面積が有意であったことに加えて、周辺

表—8 重回帰分析の結果(変数選択： $F>2.0$ )

総種数			
変数名	偏回帰係数	t 値	判定
池面積	235.86	4.66	**
樹林面積	18.47	3.00	**
畑・牧草地面積	625.49	2.58	*
河川面積	270.22	1.67	
周辺池面積	37.78	2.83	**
定数項	-8.47	2.76	*
決定係数	0.69		
標本数	32		

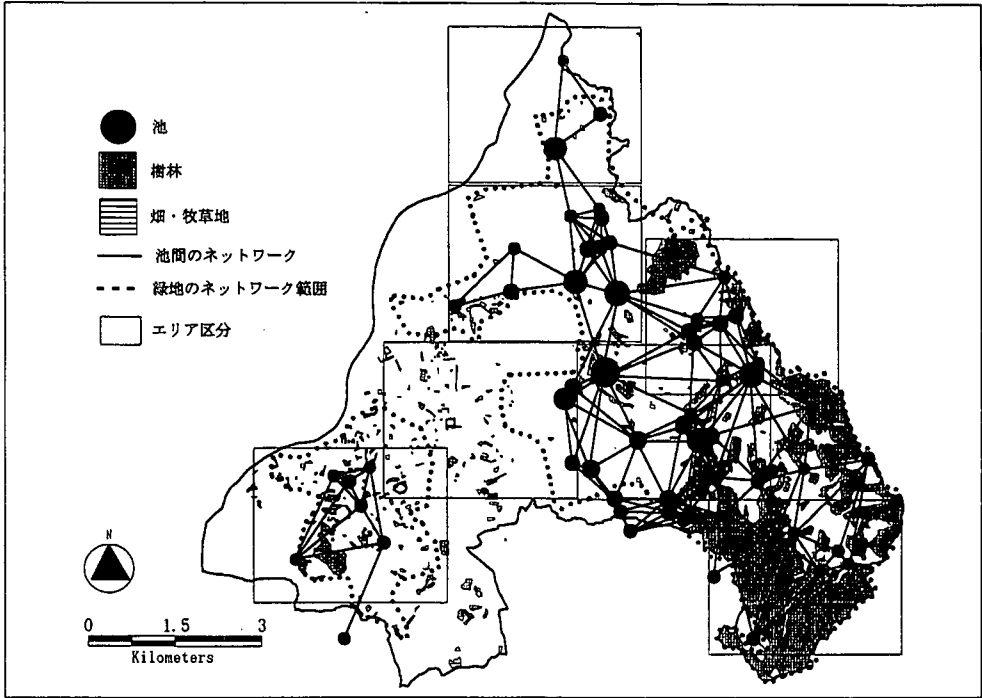
貴重種数			
変数名	偏回帰係数	t 値	判定
池面積	81.64	6.63	**
樹林面積	5.71	3.81	**
畑・牧草地面積	177.65	3.01	**
河川面積	57.92	1.47	
周辺池面積	6.82	2.10	*
定数項	-2.20	3.19	**
決定係数	0.78		
標本数	32		

\*\*：1%有意 \*：5%有意

8個のメッシュ内での池の面積が有意であると判定された。一方で、河川の存在は説明変数として有意とはならなかった。また、水田と周辺の樹林、畑・牧草地については変数の選択過程で有意とならなかった。

総種数を被説明変数とする分析では、1 km内の池と樹林の面積、周辺の池の面積が1%水準で有意であり、1 km内の畑・牧草地の面積も5%水準で有意であった。貴重種数に関する分析では、1 km内の池や樹林、畑・牧草地の面積が1%水準で、周辺の池が5%水準で有意となった。二つの分析結果を比較すると畑・牧草地の面積と周辺池の面積の説明力が総種数による分析と貴重種数による分析の間で逆転している。すなわち、総種数の場合は畑・牧草地の面積より周辺池面積の説明力がより大きい反面、貴重種数では反対の傾向がみられた。これは貴重種の生息にとって畑・牧草地の存在が相対的に重要な要因であることを示唆していると考えられる。

分析の結果から池の面積がトンボの生息にもっとも大きな影響を与える要因であり、つぎに樹林地や畑・牧草地の面積、周辺池の面積が重要であることが明らかになった。周辺8個のメッシュでの池面積が有意であったことからトンボの生息にとって池の連続的な配置が重要な要因であることが指摘できる。一方で、周辺メッシュでの緑地の面積は変数選択過程で除外されたが、これから緑地は連結性よりも池と隣接して分布することがより重要であると考えら



図—3 枚方市におけるビオトープネットワークの現況

れる。

### (5) 連結性の定量的評価・分析

#### a) 分析方法

前節の重回帰分析の結果からトンボの生息種数にとって池の連結性が有意な環境要因であることを確認した。本節では、連結性の評価指数を用いて具体的に定量化する。評価は図—3に示したような七つのエリアを設定し、各エリアごとに池と緑地の連結性とトンボの生息種数を求める。エリアは空間的隣接性とサイズを考慮しながらある程度池と緑地のまとまりがみられるところを設定した。

連結性の定量的評価を以下の手順でおこなう。第一に、重回帰分析から有意な変数として判定された池、樹林、畑・牧草地間のネットワークを評価する。評価にあたり図—1に示した判断基準を適用する。第二に、グラフ理論(graph theory)を適用し、ネットワークの現況を示す。グラフ理論ではランドスケープの構成要素をノード、リンク、マトリックスとして示し、要素間の流れや相互関係などをモデル化する<sup>36)</sup>。本研究ではビオトープをノードとして、ネットワークをリンクとして表す。

第三に、評価指数を用いてネットワークされているビオトープ間の連結性を定量化する。飛翔生物を対象にしたビオトープの連結性評価では大部分「距

離」を評価指数として扱っている(表—2)。本研究では次の二つの指数を用いる。

#### ① 孤立度指数(Isolation Index)

本研究ではネットワークされている池との最短距離を各々池の空間的孤立度と定義し、エリアごとにその平均値を算出する。

#### ② 相互作用指数(Interaction Index)

本研究では相互作用というものをビオトープ間に生じる生物移動のポテンシャルとして定義する。ネットワークされているビオトープとの相互作用の大きさは次のようにビオトープの面積や距離からもめられる。

$$I_i = \sum (A_j/d_{ij}^2)$$

$I_i$ : ビオトープ  $i$  の総相互作用

$A_j$ : ネットワークビオトープ  $j$  の面積

$d_{ij}$ : ビオトープ  $i$  とビオトープ  $j$  間の距離

上の式を用いて池ごとに次の二つをそれぞれ評価する。a) 池と池間の相互作用 ( $i, j$  = 池); ネットワークされている池の間の相互作用として、トンボ類の産卵移動や遺伝的移動のポテンシャルを示す。b) 池と緑地との相互作用 ( $i$  = 池,  $j$  = 緑地); 池とネットワー



表—9 エリアごとのピオトープの空間特性と  
トンボ種数との相関分析の結果整理

	総種数	貴重種数
池の面積	増加傾向(0.84*)	増加傾向(0.86*)
池の孤立度	減少傾向(-0.56)	減少傾向(-0.52)
池-池の相互作用	増加傾向(0.75*)	増加傾向(0.84*)
池-緑地の相互作用	やや増加傾向 (0.42)	やや増加傾向 (0.26)

カッコの中は単相関係数を示す。( \*:5%有意)

クされている緑地との間に生じる相互作用として、トンボ類の摂食・休憩移動や産卵移動のポテンシャルを示す。各エリアごとに相互作用の総合値を算出する。

### b)分析結果及び考察

枚方市に分布する池や樹林、畑・牧草地のネットワークの評価結果を図—3に示す。図中の「●」は池の存在を、実線は池のネットワークを示す。点線は緑地のネットワーク、すなわち、池から1.k m以内に存在する樹林、畑・牧草地の範囲を表す。枚方市の東部では比較的大きな面積の池が密接にネットワークされている一方で、西部ではネットワークの密度が小さく、中央部ではほとんど池が存在しなくてネットワークが分断されていることがわかる。

一方、エリアごとの池の総面積及び連結性とトンボ種数との相関分析の結果を表—9に整理した。また、図—4、図—5、図—6に池の空間要因とトンボ種数との関係をグラフとして示した。

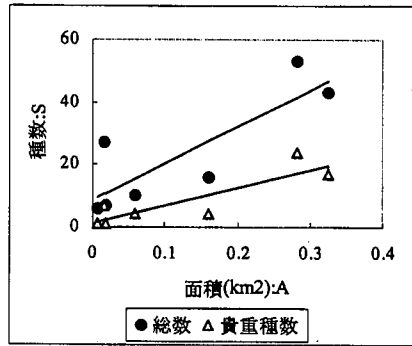
エリアごとの池の面積とトンボ種数との間にはプラス0.8以上の高い相関関係があり、5%水準で有意であった。図—4に池面積と種数との関係をグラフとして示した。

池間の相互作用はトンボの生息種数とプラスの相関係数が高く、5%水準で有意であった。図—5のグラフにその傾向を示す。池間の相互作用指数が増加するほどトンボ種数も増えている。

池の孤立度の場合には有意とはならなかったが、相関係数が-0.5程度の減少傾向が見られた。図—6をみると池の孤立度が増加するほどトンボの種数は減少している。

池と緑地との相互作用では、トンボ種数との相関関係が弱い、やや増加する傾向が見られた。

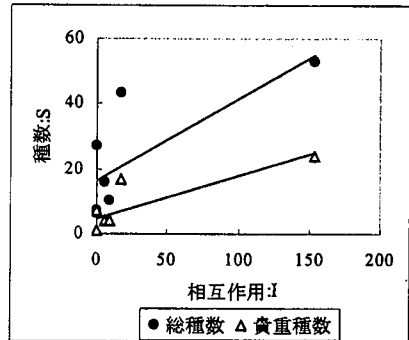
以上のエリアごとのピオトープの評価では前節の重回帰分析の結果でも見られたように、池面積と池の連結性がトンボ種数にとって有意な要因であることが確認された。ちなみに、空間的孤立度や相互作用指数によって定量化された池の連結性が増えるほ



$$\text{総種数} : S = 117.41 \cdot A + 8.57$$

$$\text{貴重種数} : S = 57.02 \cdot A + 1.21$$

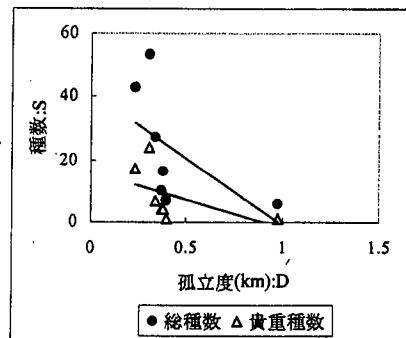
図—4 池面積とトンボ種数



$$\text{総種数} : S = 0.25 \cdot I + 16.49$$

$$\text{貴重種数} : S = 0.13 \cdot I + 4.79$$

図—5 池間の相互作用とトンボ種数



$$\text{総種数} : S = -42.20 \cdot D + 41.29$$

$$\text{貴重種数} : S = -18.36 \cdot D + 16.18$$

図—6 池の孤立度とトンボ種数

ど種数も増加する傾向も見られた。

一方、連結性の定量化において相互作用指数が孤立度指数よりトンボ種数に対する説明力が高かった。これは孤立度指数がネットワークされているもっとも近いピオトープまでの距離だけを考慮している反面、相互作用指数はネットワークされているすべてのピオトープまでの距離と面積を反映するためと考

えられる。評価対象サンプルを増やして以上のような傾向を検証することは今後の研究課題としたい。

## 5. 結論と研究課題

本研究ではトンボ類を指標生物として扱い、その生息特性を考慮した上で都市域における水域や緑地ビオトープの空間的特性を分析・考察した。大阪府枚方市におけるトンボ類の生息データを用い、1 kmメッシュスケールで重回帰分析を行うとともに七つのエリアごとにビオトープの連結性を評価し、トンボ生息種数との関係について考察した。連結性の定量化においては孤立度指数や相互作用指数の算出を試み、その有用性を確かめた。

本研究から得られた知見として次の点が上げられる。第一に、トンボ種の豊かさの保全において池がもっとも重要なビオトープであり、次に樹林、畑・牧草地があげられる。第二に、池の面積とともに空間的連結性もトンボ類の生息にとって重要な要因であることを認めた。重回帰分析と指数を用いた連結性の評価結果と同じく池の連結性が有意な変数であった。従って、生物保全計画において緑地とともに水辺のエコロジカルネットワークの形成も同時に考慮すべきである。第三に、ネットワークされているビオトープまでの距離と面積を反映した相互作用指数はビオトープの空間的連結性の定量化に有用である。

今後の研究課題として以下を挙げる。第一に、ビオトープの面積や連結性とともに、個々のビオトープの環境構造や多様性などの質の影響を評価する。第二に、トンボ類の種別の生息特性や移動距離の差異を考慮し、それらが類似なグループごとに、あるいは種ごとに分析をおこなう。第三に、連結性の定量的評価についてより多くのサンプルで分析し、今回の分析結果からみられた傾向を検証する。第四に、下水処理場や学校など公共施設用地でのビオトープづくりの生物生息ポテンシャルの向上の効果を定量化する。

謝辞：本研究を行うにあたり、トンボ生息に関するデータや情報収集について協力を頂いた関西トンボ談話会の会員の皆様に感謝いたします。

## 参考文献

1) リチャード B. プリマック, 小堀洋美: 保全生物学のすすめ, 株) 文一総合出版, pp. 88-105, 1997.

- 2) 財) 日本生態系協会訳: エコロジカル・ネットワーク, 日本生態系協会, pp. 25-26, 1995.
- 3) Franklin, J.F.: Preserving Biodiversity; Species Ecosystems, or Landscapes, *Ecological Applications*, Vol. 3, No. 2, pp. 202-205, 1993.
- 4) 財) 日本生態系協会: ビオトープネットワーク 一都市・農村・自然の新秩序, ぎょうせい, 1997.
- 5) Henein, K. and Merriam, G.: The Elements of Connectivity where Corridor Quality is Variable, *Landscape Ecology*, Vol. 4, Nos. 2/3, pp. 157-170, 1990.
- 6) Langevelde, F.V.: Conceptual Integration of Landscape Planning and Landscape Ecology, with a focus on the Netherlands, *Landscape Planning and Ecological Networks*, pp. 27-69, 1994.
- 7) Lammers, W.: A New Strategy in Nature Policy: towards a National Ecological Network in the Netherland, *Landscape Planning and Ecological Networks*, pp. 283-307, 1994.
- 8) 日置佳之: オランダにおける国土生態ネットワーク計画とその実践戦略に関する研究, ランドスケープ研究, Vol. 59, No. 5, pp. 205-208, 1996.
- 9) 財) 日本生態系協会: ビオトープネットワーク II 一環境の世紀を担う農業への挑戦一, ぎょうせい, pp. 46-91, 1997.
- 10) 財) 日本生態系協会: 環境を守る最新知識. ビオトープネットワークー自然生態系のしくみとその守り方一, 信山社サイテック, pp. 154-155, 1998.
- 11) Crumpacker, D.W.: Prospects for sustainability of biodiversity based on conservation biology and US Forest Service approaches to ecosystem management, *Landscape and Urban Planning*, Vol. 40, pp. 47-71, 1998.
- 12) Kubes, J.: Biocentric and corridors in a cultural landscape. A critical assessment of the 'territorial system of ecological stability', *Landscape and Urban Planning*, Vol. 35, pp. 231-240, 1996.
- 13) 環境庁編: 多様な生物との共生をめざして 一生物多様性国家戦略一, 1996.
- 14) Turner, M.G.: Landscape Ecology; The Effect of Pattern on Process, *Annu. Rev. Ecol. Syst.*, vol. 20, pp. 171-97, 1989.
- 15) Forman, R.T.T. and Godron, M.: *Landscape Ecology*, John Wiley & Sons, 1986.
- 16) Turner, M.G.: Spatial and temporal analysis of landscape pattern, *Landscape ecology*, vol. 4, no. 1, pp. 21-30, 1990.
- 17) Freemark, K.E. and Merriam, H.G.: Importance of Area and Habitat Heterogeneity to Bird Assemblages in Temperate Forest Fragments, *Biological Conservation*, vol. 36, pp. 115-141, 1986.
- 18) Wu, J. and Vankat, J.L.: An area-based model of species richness dynamics of forest islands, *Ecological Modelling*, vol. 58, pp. 249-271, 1991.
- 19) 加藤和弘, 一ノ瀬友博: 動物群集保全を意図した環境評価のための視点, 環境情報科学, Vol. 22, No. 4, pp. 62-71, 1993.
- 20) Clergeau, P. and Burel, F.: The role of Spatio-Temporal Patch Connectivity at the Landscape level: an example in a bird distribution, *Landscape and Urban Planning*, vol. 38,

- pp.37-43, 1997.
- 21) 加藤和弘: 生態学の視点で見た都市・農村計画—特に「生態的回廊」について—, 環境研究, No. 98, pp. 125-132, 1995.
  - 22) Fahrig, L. and Merriam, G.: Habitat patch connectivity and population survival, *Ecology*, vol.66, no.6, pp.1762-1768, 1985.
  - 23) Lamberson, R.H., Noon, B.R., Voss, C. and Mckelvey, K.S.: Reserve design for territorial species; the effects of patch size and spacing on the viability of the Northern Spotted Owl, *Conservation Biology*, vol.8, no.1, pp.185-195, 1994.
  - 24) Opdam, P.: Metapopulation theory and habitat fragmentation: a review of holarctic breeding bird studies, *Landscape Ecology*, vol.5, no.2, pp.93-106, 1991.
  - 25) 長田光世: トンボを指標種にした水辺緑地計画, 現代生態学とその周辺, 東海大学出版会, pp. 328-341, 1996.
  - 26) 長田光世, 森 清和, 田畑貞寿: トンボの種類からみた水辺緑地計画の指標に関する予備的考察, 造園雑誌, vol. 56, no. 5, pp. 151-156, 1993.
  - 27) 井上清: 日本のトンボの生態と文化, 緑の読本, シリーズ 43, pp. 786-791, 1997.
  - 28) 石田昇三, 石田勝義, 小島圭三, 杉村光俊: 日本産トンボ幼虫・成虫検索図説, 東海大学出版会, 1988.
  - 29) 養父志及夫: 生きもののすむ環境づくり (トンボ編), 環境緑化新聞社, pp. 3-22, 1996.
  - 30) 枚方市: 枚方市自然環境調査報告書, 1990.
  - 31) 守山 弘, 飯島博: 人為環境下における生物相の安定性—都市化の各段階におけるトンボの種供給ポテンシャル, 多摩川の流れ, pp.100-105, 1989.
  - 32) 守山 弘, 飯島 博, 原田直国: トンボの移動距離をとおしてみた湿地生態系のありかた, *Man&Environ.*, vol. 15, no. 3, pp. 2-15, 1990.
  - 33) 李承恩, 盛岡通, 藤田壮: 都市域におけるトンボを指標種としたビオトープネットワーク形成に関する予備的考察, 環境システム研究, Vol. 26, pp. 617-622, 1998.
  - 34) 鷺谷いづみ, 矢原徹一: 保全生態学入門 一遺伝子から景観まで—, 文一総合出版, pp. 68-69, 1997.
  - 35) Cantwell, M.D. and Forman, R.T.T.: Landscape graphs; Ecological modeling with graph theory to detect configurations common to diverse landscapes, *Landscape Ecology*, vol.8, no.4, pp.239-255, 1993.
  - 36) Shreeve, T.G.: Monitoring butterfly movements, In: Dennis, R.L.H., *The Ecology Of Butterflies In Britain*, Oxford Science Publication, pp.120-138, 1992.
  - 37) Dmowski, K. and Kozakiewicz, M.: Influence of a shrub corridor on movements of passerine birds to a lake littoral zone, *Landscape Ecology*, vol.4, pp.99-108, 1990.
  - 38) Fahrig, L.: A General Model of Populations in Patchy Habitats, *Applied Mathematics and Computation*, vol.27, pp.53-66, 1988.

(1999.2.26 受付)

## ESTIMATION OF SPATIAL CHARACTERISTICS OF BIOTOPE ADOPTING DRAGONFLIES AS INDICATOR IN URBAN LANDSCAPE

Seung-Eun LEE, Tohru MORIOKA and Tsuyoshi FUJITA

This paper is to assess the impact of the spatial characteristics such as area and connectivity of biotope on species abundance in urban landscape. Dragonfly communities are chosen as biological indicator and evaluation criteria is established based on their lifecycle and habitat. Stepwise multiple regression analysis is performed between species number and area of several biotope types. Also, to quantify biotope connectivity, two indexes indicating isolation degree and interaction between biotopes is calculated. As a result, the following are found; first, area of pond are significant for the species abundance of dragonfly as well as area of wood and grass. Second, both isolation degree and interaction degree of pond are influential factor to determine species abundance.