

## F-4 高度情報・通信技術を用いた渡り鳥の移動経路と生息環境の解析および評価に関する研究

### (1) 衛星画像とGIS手法を用いた渡り鳥生息地の環境解析と変化予測に関する研究

独立行政法人国立環境研究所  
社会環境システム研究領域

田村正行・島崎彦人

平成13～15年度合計予算額 48,828千円  
(うち、平成15年度予算額 16,364千円)

〔要旨〕衛星追跡データに基づき、コウノトリの潜在渡り経路網を生成し、繁殖地から越冬地までの渡り経路網の接続性解析を行った。そして、中国東部の渤海湾沿岸に位置する中継地が消失した場合、渡り経路が断片化し、揚子江中下流域の越冬地が地理的に孤立するとの予測結果を得た。この結果に基づいて、渡り経路の接続性を維持するために、中国渤海湾沿岸の中継地を優先的に保全すべきであると結論した。また、中空間分解能衛星リモートセンシングデータを用いて、重要中継地におけるコウノトリと重要越冬地におけるタンチョウの環境利用を解析し、各生息地を構成する重要な環境要素を明らかにした。さらに、高時間分解能衛星リモートセンシングデータを用いて、コウノトリの潜在生息地の広域分布推定を行うとともに、渡り経路全域の環境変化を抽出する新たな手法を開発した。

〔キーワード〕リモートセンシング、衛星トラッキング、渡り鳥、湿原、東アジア

#### 1. はじめに

東アジアに生息するツル類(*Gruidae*)、コウノトリ類(*Ciconiidae*)、ガンカモ類(*Anatidae*)などの大型水辺性鳥類の多くは、数千キロメートル隔てた繁殖地と越冬地の間を季節移動する渡り鳥である。これらの渡り鳥は、食物網の高次消費者として、湿地生態系の重要な構成要素となっている。しかしながら、東アジアにおける近年の著しい人口増加と経済発展とともに急速な環境開発は、渡り鳥が利用する湿地環境の質の低下と規模の縮小をまねき、結果として、渡り鳥の個体数および種の減少をもたらした<sup>1)</sup>。渡り鳥が絶滅することになれば、それらを媒介とする生物間の相互作用が機能しなくなり、渡る先々の湿地生態系の健全性が損なわれることになる。その意味で、渡り鳥の保全は、渡り鳥によって連結されている各地の湿地環境の保全に深く関わっている。

渡り鳥とその生息環境の保全活動を進展させるためには、生息地の空間分布とその環境特性を具体的に明らかにする必要がある。また、各生息地における環境変化を定期的かつ長期的に監視し、利用個体数と環境変化との関連性を明らかにしていくことも重要である。渡り鳥の生息環境に関する調査は、これまで、主に地上における観察や航空機を利用した方法によって行われてきた。しかしながら、国境を越えて広範囲を季節移動する渡り鳥を対象とする場合、従来の方法だけでは調査範囲や調査頻度に限界がある。渡り鳥の行動範囲全域にわ

たって効果的な保全策を立案するためには、広範囲に及ぶ渡り鳥の移動経路と生息環境のデータを効率良く収集し、重要生息地の位置と環境特性を詳細に明らかにする新たな手法の開発が必要である。

## 2. 研究目的

広範囲を季節移動する渡り鳥の位置データとその周辺領域の環境データを効率良く収集するためには、人工衛星を利用した渡り鳥の移動追跡手法（以下、衛星追跡）と衛星リモートセンシングを応用した情報収集が不可欠である。衛星追跡は、遠隔地を移動する渡り鳥の位置を定期的にサンプリングすることが可能であり、移動経路のみならず、渡り途中に利用した中継地の位置や所要時間などを把握するのに有効である。また、衛星リモートセンシングは、広域性、反復性、客観性に優れた環境計測技術であり、渡り鳥の行動範囲全域の環境とその変化の監視に適している。

本研究では、これら2つの高度情報収集技術によって得られるデータに基づき、優先的に保全すべき重要生息地の位置とその環境状態を特定する手法を開発するとともに、GIS (Geographic Information System) を用いて渡り鳥の行動と環境特性との関連性を明らかにする。また、潜在生息地の空間分布を広域に推定するとともに、渡り範囲全体における環境変化を抽出するための新たな手法を開発し、今後の渡り鳥保全研究の推進に貢献することを目的とする。

## 3. 研究方法

### (1) 渡り経路網の接続性評価に基づいた重要生息地の特定

渡り鳥の生息地の重要性は、これまで渡来数を主な基準として評価されてきた<sup>1-6)</sup>。しかしながら、渡りを成功裏に行うためには、繁殖地、越冬地および中継地相互の空間的な位置関係も重要な要素となる<sup>7)</sup>。そのため、生息地の空間分布様式を考慮した重要生息地特定手法の開発が必要である。本研究では、衛星追跡データを客観的に解析することにより、繁殖地、中継地および越冬地の位置を特定するとともに、渡り鳥の連続移動可能距離を推定した。そして、この結果に基づいて繁殖地から越冬地までの潜在的渡り経路網を有向グラフとして表現し、経路網の接続性維持に大きく貢献する中継地を重要中継地として抽出した。

#### ① 研究対象種と範囲

東アジアに生息する大型水辺性鳥類の中で、特に近年、個体数の減少と生息地環境の悪化が懸念されているコウノトリ (*Ciconia boyciana*) を対象種とした。研究範囲は、コウノトリが季節移動を行う全範囲、すなわち、現存する主要な繁殖地である極東ロシアのアムール川中流域から越冬地である中国東南部の揚子江中流域までの、南北約2800kmの範囲とした(図1)。



図1 研究対象範囲

## ② 利用データと処理

1998～2000年、繁殖地から越冬地へ南下するコウノトリ13羽の移動経路を衛星追跡し、合計3542点の位置データを収集した。コウノトリの捕獲方法と移動経路については、Higuchi *et al.*<sup>8)</sup>によって既に報告されている。衛星追跡には、Argosシステム<sup>9)</sup>と呼ばれるデータ処理体系を利用した。Argosシステムによって計算された位置データは、測位精度に応じて7つのクラス（高精度順に、3, 2, 1, 0, A, BおよびZ）に分類されている。クラス*i* (= 3～0) の測位精度は、緯度および経度軸上の誤差が互いに独立に同一の正規分布 $N(0, \sigma_i^2)$ に従うと仮定され、標準偏差 $\sigma_i$ が次のように報告されている： $\sigma_3 < 150$  m,  $\sigma_2 = 150\sim350$  m,  $\sigma_1 = 350\sim1000$  m,  $\sigma_0 > 1000$  m。その他のクラスの測位精度は報告されていない。本研究では、位置誤差の影響を定量的に扱うために、測位精度の上限が特定されているクラス3～1の位置データ（1432点）のみを使用した。

### ③ 渡り状態の判別

鳥  $i$  の地点  $j$  における渡り状態  $S(i, j)$  を、式(1)に従って決定した。

$$\left. \begin{array}{ll} s(i, j) \rightarrow travel & \text{if } (v_a(i, j) > T \text{ AND } v_d(i, j) > T) \\ s(i, j) \rightarrow arrival & \text{if } (v_a(i, j) > T \text{ AND } v_d(i, j) \leq T) \\ s(i, j) \rightarrow departure & \text{if } (v_a(i, j) \leq T \text{ AND } v_d(i, j) > T) \\ s(i, j) \rightarrow stay & \text{if } (v_a(i, j) \leq T \text{ AND } v_d(i, j) \leq T) \end{array} \right\} \quad (1)$$

ここで、 $S(i, j) \rightarrow x$  は、 $S(i, j)$  を  $x$  ( $x \in C = \{stay, departure, arrival, travel\}$ ) に対応付ける処理である。また、 $stay$  とは、鳥が繁殖地、中継地あるいは越冬地などの特定の範囲内に滞在している状態を示し、 $travel$  は滞在地間を移動（長距離を特定方向に移動）している状態を示している。 $departure$  および  $arrival$  は、それぞれ  $stay$  から  $travel$ 、あるいは  $travel$  から  $stay$  への移行状態を示している。 $v_a(i, j)$  と  $v_d(i, j)$  は、それぞれ鳥  $i$  が地点  $j$  に接近する際の日移動率 (km/d) と離れる際の日移動率 (km/d) である。 $T$  は、渡り状態判別のための閾値であり、次のように定めた。

いま、鳥  $i$  の位置データの集合を  $L_i$ 、鳥  $i$  が地点  $j$  に接近する際の進行方向と離れる際の進行方向との差を  $\theta(i, j)$  と表記する。また、集合  $L_i$  の要素のうち、 $\theta(i, j)$  の余弦が正となる要素数を  $m$ 、零または負となる要素数を  $n$  とする。鳥が特定の範囲内に滞在している場合、すなわち、状態が  $stay$  の場合、連日の移動方向は無方向性あるいは餌場とねぐらの間を往復する二方向性になると考えられる。一方、鳥がある滞在地から次の滞在地へと移動している場合、すなわち、状態が  $travel$  の場合、連日の移動方向はほぼ一定になるとと考えられる。したがって、集合  $L_i$  が、状態  $travel$  の点から構成されている場合は  $m \gg n$  となり、状態  $stay$  の点から構成されている場合は  $m \approx n$  となると考えられる。

この性質を利用して最適閾値  $T$  を決定するために、仮の閾値  $T'$  (= 0 ~ 300 km/d) を式(1)に適用し、逐一渡り状態の判別を行い、状態  $stay$  に分類された点の集合から  $m$  と  $n$  を算出した。そして、 $m \approx n$  という仮説への適合度を式(2)で定義されるカイ2乗値により評価し、カイ2乗値が最小となる（適合度が最大となる）ときの  $T'$  の値を、最適閾値  $T$  とした。

$$\chi^2 = \frac{(m - (m+n)/2)^2}{(m+n)/2} + \frac{(n - (m+n)/2)^2}{(m+n)/2} \quad (2)$$

### ④ 繁殖地、中継地、越冬地の位置特定

鳥の滞在地（繁殖地、中継地あるいは越冬地）の位置を特定するために、鳥の位置データの中から状態が  $stay$ 、 $departure$  あるいは  $arrival$  に分類された点のみを抽出し、階層的クラスタリング手法の1つである最短距離法<sup>10)</sup>にて、近接する点群の空間クラスタを生成した。なお、衛星追跡データの位置誤差を考慮するために、各点の近接性は、地理的距離で評価するのではなく、各点が互いに  $T$  km 以内に位置する確率  $P$  を式(3)で計算し、この確率  $P$  によって評価した。

$$P = \int_{-\infty}^T \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_d} \exp\left(-\frac{(x-d)^2}{2\sigma_d^2}\right) dx \quad (3)$$

ここで、 $d$ は2つの点の座標値から計算される距離である。 $\sigma_d$ は計算された距離の誤差の標準偏差であり、計算に用いた2つの点の位置誤差から誤差伝播理論に基づいて算出される。クラスタの併合処理は、最近接クラスタ間の確率 $P$ が95%以上である限り繰り返した。これにより得られる空間クラスタは、95%以上の確率で $T$  km以内に位置する点群から構成される。

空間クラスタの生成処理を行った後、各空間クラスタの代表位置として重心座標を計算し、代表位置の高緯度順にID番号を割り当て、これを滞在地のID番号とした。そして、各滞在地は、次のルールに基づいて、繁殖地、中継地あるいは越冬地のいずれかに対応付けられた：捕獲地点を含む滞在地は繁殖地とする；冬季の数ヶ月間あるいは北上移動を開始するまで利用した滞在地は越冬地とする；その他の滞在地は全て中継地とする。

## ⑤ 渡り経路の連続性評価と重要中継地の抽出

鳥の渡り様式を詳細に解析し、中継地に立ち寄ることなく連続移動可能な距離 $D$ を推定した。そして、互いに距離 $D$  km以内にある繁殖地、中継地、越冬地を、高緯度地点から低緯度地点に向かう一方指向性の線分で結ぶことにより、繁殖地から越冬地までの潜在的渡り経路網を生成した。次に、潜在的渡り経路網を構成する結節点のうち、中継地に対応する点を任意の組合せで消去し、繁殖地から越冬地までの経路数への影響を調べた。中継地のうち、それらが消失した場合に経路数が零となる組合せを構成するものを、渡り経路の接続性を維持するうえで重要な中継地として抽出した。

### (2) 重要中継地におけるコウノトリの環境利用解析

渡り経路網の接続性維持の観点から重要中継地として抽出された中国東部の渤海湾沿岸域には、黄河三角州自然保護区や天津古海岸湿地自然保護区などの国家級自然保護区が設置されている<sup>11)</sup>。しかしながら、急速な経済発展と人口集中に伴う開発行為により、この地域は、中国で最も深刻な環境問題を抱える地域の一つでもあり、沿岸環境が適切に制御されているとは言い難い<sup>12)</sup>。また、コウノトリの重要な南下経路を構成している中国東北部の3つの自然保護区<sup>13)</sup>、ザーロン自然保護区、莫莫格自然保護区および向海自然保護区は、1998年の洪水以降の少雨・乾燥化傾向により、中継地として利用可能な湿地面積の減少が予想される。これらの地域のように、人為あるいは自然要因による中継地環境の変化が予想される地域を対象として、コウノトリの環境利用を具体的に明らかにすることは、その保全活動を進展させるうえで急務である。

### ① 研究対象地域と現地調査

研究対象地域は、中国東部の渤海湾沿岸域 ( $39.24^\circ N, 118.55^\circ E$ ) と中国東北平原に飛び石状に位置する3つの自然保護区、ザーロン自然保護区 ( $47.13^\circ N, 124.34^\circ E$ )、莫莫格自然保護区 ( $46.02^\circ N, 123.70^\circ E$ ) および向海自然保護区 ( $45.13^\circ N, 122.38^\circ E$ ) の周辺地域とした（図1）。

現地調査は、対象地域の土地被覆/土地利用（LC/LU）状況を把握するとともに、衛星画像の精密幾何補正に必要な地上基準点（GCP）を収集する目的で、2002年9月21日～10月2日に実施した。この調査時期は、コウノトリが南下移動を行う際に当該地域に滞在する季節に相当する。そのため、コウノトリの環境利用を地上から実際に観察することも期待できた。

LC/LU状況の調査は、1998～2000年の衛星追跡個体が滞在したと考えられる地点と、それらの地点を結ぶ領域において重点的に実施した。渤海湾沿岸域の調査では、当該地のLC/LU状況に詳しい北京師範大学の陳助教授に同行いただき、113地点のLC/LU情報を得た。このうちの50地点はLC/LU解析の際の参照情報として使用し、残りの63地点はLC/LU分類図の精度評価に使用した。また、中国東北部の調査では、東北師範大学の王助教授に現地の案内をしていただき、228地点のLC/LU情報を得た。このうちの100地点はLC/LU解析の際の参照情報として使用し、残りの128地点はLC/LU分類図の精度評価に使用した。

## ② 土地被覆/土地利用解析

土地被覆/土地利用（LC/LU）解析には、現地調査時期と同期する時期にそれぞれの研究対象地域を撮影したLandsat-7 ETM+画像4シーン（表1）を使用した。

表1 使用したLandsat-7 ETM+画像と幾何補正精度

| 地域        | パス-ロウ  | 撮影年月日      | 幾何補正情報 |                  |          |          |
|-----------|--------|------------|--------|------------------|----------|----------|
|           |        |            | 地上基準点数 | 座標系（測地系）         | RMSE (m) | 画素サイズ(m) |
| 渤海湾沿岸     | 122-33 | 2002年9月29日 | 34     | UTM 50帶 (WGS-84) | 8.1      | 30.0     |
| ザーロン自然保護区 | 120-27 | 2002年9月22日 | 22     | UTM 51帶 (WGS-84) | 8.9      | 30.0     |
| 莫莫格自然保護区  | 120-28 | 2002年9月22日 | 27     | UTM 51帶 (WGS-84) | 8.2      | 30.0     |
| 向海自然保護区   | 120-29 | 2002年10月8日 | 29     | UTM 51帶 (WGS-84) | 9.1      | 30.0     |

### ア. 解析前処理

現地調査で得たGCPを用いた幾何補正を行い、最近隣内挿法<sup>14)</sup>で投影変換した（表1）。投影変換後のETM+画像から、可視から短波長赤外を観測波長帯とする6つバンド（ただし、パンクロバンドを除く）を抽出し、各バンドのDNを大気上端反射率（TOA反射率）<sup>15)</sup>に変換した。

### イ. 土地被覆/土地利用分類と精度評価

可視から短波長赤外までの6つのバンドのTOA反射率を特微量したクラスタリングを、非階層的クラスタリング手法であるISODATA法<sup>16)</sup>によって行った。生成された各クラスタには、現地調査結果に基づいて適切なLC/LUカテゴリ（1:水域、2:市街地、3:裸地、4:草地、5:森林、6:自然湿地、7:農耕地）を一意的に割り当てた。以上により、現地調査時期に同期して撮影されたETM+画像から、中国渤海湾沿岸、ザーロン自然保護区、莫莫格自然保護区および向海自然保護区周辺のLC/LU分類図を作成した。

分類精度は、現地調査で得たLC/LU情報を基準として、Kappa係数<sup>17)</sup>を用いて評価した。

### ③ 環境利用解析

LC/LU分類図と衛星追跡データを、GISを用いてオーバーレイし、各点と重なるLC/LUカテゴリを研究対象地域毎に集計した。また、出現位置と水域との関係を、衛星追跡データの位置誤差を考慮して評価するために、各点の位置誤差に応じた95%信頼円を生成し、その範囲内に水域が存在するか否かを調べた。

#### (3) 重要越冬地におけるタンチョウの環境利用解析

1990年代初頭以来、衛星追跡により、日本の鹿児島県出水から北上するツル類や、ロシア中南部から南下するツル類の渡り経路が調査されてきた。その結果、朝鮮半島中央部の非武装地帯とそれに隣接する韓国（大韓民国）の鉄原は、これらツル類の渡り経路全体の中で高頻度に利用される重要な生息地であることが明らかになった<sup>18-19)</sup>。しかしながら、これらの地域では、今後、南北朝鮮の融和が進展する中で、急速に環境開発が行われる可能性がある。したがって、これらの地域におけるツル類の環境利用を広範囲に調査し、その成果を保全計画の策定に役立てることは緊急の課題となっている。本研究では、鉄原に生息するツル類の希少種、タンチョウ (*Grus japonensis*) の越冬期における環境利用について、衛星追跡データと多時期衛星観測画像を用いて調査した。

#### ① 研究対象地域と現地調査

研究対象地域は、タンチョウが越冬地として利用する韓国の鉄原 (38.270° N, 127.158° E) を含む30×40kmの範囲とした（図1）。研究対象地域の中央部には、幅4kmの非武装地帯 (Demilitarized Zone, DMZ) が東西にのびる。この地域は、立ち入りを含めて、通常の人間活動はすべて禁止されている。また、非武装地帯の南側数kmの範囲は人民統制区域 (Civilian Control Zone, CCZ) に指定され、農業目的以外での立ち入りやその他の開発行為は厳しく規制されている<sup>18)</sup>。

現地調査は、研究対象地域の土地被覆/土地利用 (LC/LU) 状況を把握するとともに、衛星画像の精密幾何補正に必要な地上基準点 (GCP) の収集を目的として、2001年12月19～23日および2002年12月20～24日の2回にわたり実施した。調査範囲は緩衝地帯以南の地域であり、144地点のLC/LU情報を得た。このうちの60地点はLC/LU解析の際の参照情報として使用し、残りの84地点は解析結果 (LC/LU分類図) の精度評価に使用した。

#### ② 土地被覆/土地利用解析

研究対象地域を、夏季（2001年6月3日）および冬季（2002年2月14日）に撮影した、被雲率0%のLandsat-7 ETM+画像（パス-ロウ=116-33）を使用した。LC/LU解析は、地表面の主要な構成要素である水、植生および土壤の存在量の季節変化特性に基づいて行った。

#### ア. 解析前処理

夏季および冬季のETM+画像のうち、バンド3（赤）、4（近赤外）および5（短波長赤外）に対応する画像から、研究対象地域に相当する範囲を切り出した。切り出した夏季ETM+画像について、現地調査で得た12点のGCPを用いた精密幾何補正を行い、最近隣内挿法<sup>14)</sup>によりUTM

座標系（52帯、WGS-84測地系）へ投影変換した（RMSE=8.6m、画素サイズ=30m）。冬季ETM+画像については、精密幾何補正済みの夏季ETM+画像を参照とした画像間位置合わせを行い、夏季ETM+画像と同様に、最近隣内挿法<sup>14)</sup>により、UTM座標系（52帯、WGS-84測地系）へ投影変換した（RMSE=9.3m、画素サイズ=30m）。

異なる時点で撮影された衛星観測画像を統合してLC/LU解析を行う場合、観測時の太陽-地表面-センサの幾何学的な位置関係および大気状態の違いに起因する衛星観測放射輝度の変動を補正（標準化）することが望ましい<sup>20)</sup>。幾何学的な位置関係の違いに由来する衛星観測放射輝度の変動は、DNを大気上端反射率（TOA反射率）に変換することにより補正した<sup>15)</sup>。また、大気状態の違いによる観測放射輝度の変動は、夏季および冬季TOA反射率画像から抽出したPIF（Pseudo Invariant Features）の線形回帰モデルに基づいた、相対放射量補正を行うことにより抑制した<sup>21)</sup>。

#### イ. 水・植生・土壤の正規化指標の算出

米国Maryland大学らの研究グループは、1993～1998年に実施されたCoastal Marsh Projectにおいて、地表面の水、植生および土壤の存在量に関連する特徴量として、式(4)～(6)で定義される3種類の正規化指標を用いた。

$$\text{水: } \text{NDWI} = (\rho_{\text{Red}} - \rho_{\text{SWIR}}) / (\rho_{\text{Red}} + \rho_{\text{SWIR}}) \quad (4)$$

$$\text{植生: } \text{NDVI} = (\rho_{\text{NIR}} - \rho_{\text{Red}}) / (\rho_{\text{NIR}} + \rho_{\text{Red}}) \quad (5)$$

$$\text{土壤: } \text{NDSI} = (\rho_{\text{SWIR}} - \rho_{\text{NIR}}) / (\rho_{\text{SWIR}} + \rho_{\text{NIR}}) \quad (6)$$

ここで、 $\rho$ は反射率を表す。 $\rho$ の添え字は観測波長帯を表し、それぞれ、赤、近赤外、短波長赤外に対応する。これら3種類の正規化指標は、まとめてNDXIと呼ばれ、任意の1つの指標は、残りの2つの指標に対して従属する構造となっている。本研究では、相対放射量補正済みのTOA反射率を、式(4)～(6)に代入することにより、夏季および冬季のNDXIを計算した。

#### ウ. 土地被覆/土地利用分類と精度評価

ISODATA法<sup>16)</sup>により、夏季および冬季のNDXIを特徴量とし、処理対象画像の全画素をサンプルとしたクラスタリングを行い、50クラスタを生成した。次に、NDXI特徴空間における各クラスタ位置の季節変化特性、クラスタを構成するサンプルの画像上の位置および現地調査結果に基づいて、各クラスタに適切なLC/LUカテゴリ（1:水域、2:水田、3:雪氷、4:常緑針葉樹林、5:落葉樹林、6:低灌木林、7:草地、8:湿潤な裸地・市街地、9:乾燥した裸地・市街地）を割り当てる。

分類精度は、現地調査で得た84地点のLC/LU情報を基準として、Overall AccuracyおよびKappa係数を計算することによって評価した<sup>17)</sup>。

### ③ 環境利用解析

研究対象地域におけるタンチョウの出現位置データとして、Higuchi et al.<sup>19)</sup>によって得られた、6個体の衛星追跡データ（合計216ポイント）を使用した。LC/LU分類画像の画素*i*に対

応する地点に鳥が出現した確率 $f(i)$ は、式(7)により推定した。

$$f(i) = \sum_{j=1}^N \left\{ \frac{1}{2\pi\sigma_j^2} \exp\left(-\frac{d_{i,j}^2}{2\sigma_j^2}\right) \right\} / N \quad (7)$$

ここで、 $d_{i,j}$ は画素*i*と衛星追跡データの点*j*との距離、 $\sigma_j$ は点*j*の位置誤差の標準偏差、*N*は計算に用いる点の総数である。また、鳥が、特定のLC/LUカテゴリ*K*上に出現した確率 $g(K)$ は、式(8)により推定した。

$$g(K) = \sum_{i=1}^M \{f(i)\delta(i)\}, \quad \delta(i) = \begin{cases} 1, & \text{if } k(i) = K \\ 0, & \text{if } k(i) \neq K \end{cases} \quad (8)$$

ここで、 $k(i)$ は画素*i*のLC/LUカテゴリ、*M*は処理対象画像の画素数である。

#### (4) 潜在生息地の分布推定

中国東部の渤海湾沿岸域は、東アジアに生息する多くの水辺性鳥類の重要生息地となっている<sup>22-24)</sup>。しかしながら、この地域は、自然保護区内でさえも大規模な油田開発が行われ、人為搅乱と重油汚染の危険性から必ずしも適切な環境管理が行われているとは言い難い<sup>25-26)</sup>。急速な経済開発が進行する沿岸域において、現在利用可能な生息地と類似した環境特性を持つ地点の空間分布を明らかにすることは、生息地の希少性を再認識し、適切な生息地管理を促進することにつながる。また、不測の事態に備えた代替地確保のための基礎資料にもなりうる。本研究では、多時期衛星リモートセンシングデータにConstrained Energy Minimization (CEM) 演算子を適用することにより、コウノトリの重要な中継地と類似した環境特性を持つ地点の空間分布を広域に推定した。

##### ① 研究対象範囲と使用データ

研究対象範囲は、コウノトリが季節移動を行う東アジア全域（55.0°N–25.5°N, 110.0°E–147.0°E）とした（図1）。使用データは、1998～2000年に衛星追跡によって明らかとなった、コウノトリの重要な中継地（Jiantuzhi Gley Mire）の範囲を表すポリゴンデータと、1998～2000年に撮影したSPOT-4 VEGETATION S10プロダクト（以降、VGT-S10）である。VGT-S10は、空間分解能1kmで同一地点を毎日観測したSPOT-4 VEGETATION反射率データから、雲や大気の影響を抑制するために10日間毎に合成して作成した、時系列データセット（空間分解能1km、時間分解能10日間）である。

##### ② 解析方法

1998～2000年のVGT-S10データから、正規化植生指標NDVIおよび正規化水指標NDWIを、式(4)～(5)によって計算した。得られたNDWI時系列データから雲の影響を除去するために、NDVI時系列データにBest Index Slope Extraction (BISE) 法<sup>27)</sup>を適用し、雲の影響が残る画素を特定した。雲画素のNDWI値を欠測値と見なし、時間方向の内挿補間を行うことにより、雲除去済みNDWI時系列データを生成した。

雲除去済みNDWI時系列データと重要な中継地ポリゴンをオーバーレイし、重要な中継地のNDWI

時系列変化特性を把握した。重要中継地と類似した環境特性を持つ地点の分布は、雲除去済みNDWI時系列データの各画素に、Constrained Energy Minimization (CEM) 演算子<sup>28)</sup>を適用することにより推定した。CEM演算子は、各画素値のベクトルが、検出対象カテゴリのベクトルとその他不特定多数のカテゴリのベクトルとの線形結合であることを仮定し、不特定多数のカテゴリのベクトルを未知としたまま、各画素内における検出対象カテゴリの存在率を推定するものである。CEM演算子による計算値cは式(9)で表現され、その値は検出対象カテゴリのベクトルと完全に一致した場合に1となり、一致度の低下とともに減少する。

$$c = \mathbf{r} \cdot \frac{\mathbf{R}^{-1} \cdot \mathbf{d}}{\mathbf{d}^T \cdot \mathbf{R}^{-1} \cdot \mathbf{d}} \quad (9)$$

ここで、 $\mathbf{r}$ は、処置対象画素のベクトルであり、 $\mathbf{d}$ は検出対象カテゴリのベクトルである。本研究では、重要中継地のNDWI時系列変化特性を、検出対象カテゴリのベクトル $\mathbf{d}$ とした。また、 $\mathbf{R}^{-1}$ は、処理対象画素の総数をqとして、式(10)で与えられる。

$$\mathbf{R} = \frac{1}{q} \sum_{i=1}^q \mathbf{r}_i \cdot \mathbf{r}_i^T \quad (10)$$

## (5) 環境変化抽出手法の開発

広範囲の土地被覆状況とその変化を把握するためには、NOAA/AVHRR, SPOT VEGETATION, TERRA MODISなど、広い観測幅と高い時間分解能を有する衛星搭載センサから得られるNDVI時系列データの活用が有効である。これまで、NDVI時系列データを利用した土地被覆変化抽出手法としては、Standardized Principal Component Analysis (SPCA) とChange Vector Analysis (CVA) が一般的に用いられてきた。SPCAは、複数年のNDVI時系列データの主成分分析を行い、土地被覆変化に対応する主成分を特定することによって変化個所を検出する手法である<sup>29)</sup>。この方法は、処理対象データによって土地被覆変化に対応する主成分が異なるため、変化を特定するための明確な基準設定が困難である。CVAは、比較対象年毎のNDVI時間積分値の差に基づいて、土地被覆変化の強度を評価する<sup>30)</sup>。そのため、変化の有無を判別する閾値は、各バイオームによって個別に設定する必要があり、バイオームの遷移領域を含む広域を解析対象とする場合には適用性が低下する。

渡り鳥の生息範囲全体のような広域を対象とした土地被覆変化抽出をオペレーションalに行うためには、処理対象データやバイオームの違いに対して、より頑健な手法を開発する必要がある。本研究では、比較対象年のNDVI時系列変化特性の類似度を、コレログラムを用いて評価し、類似度が一定の基準に満たない場合に、変化として抽出する新たな手法を開発した。

### ① 研究対象範囲と使用データ

研究対象範囲は、詳細な現地調査データの整備されている向海自然保護区(45.13° N, 122.38° E)の周辺地域とした(図1)。この地域は、灌木林、草地、農耕地、湖沼、自然湿地などの多様な土地被覆が見られる。

変化抽出には、潜在生息地の分布推定の際に作成した1998年と2002年のNDVI時系列データ

から、各年の積雪状況の違いに起因する変化の誤検出を避けるため、各年の5~10月のデータのみを抽出して使用した。また、NDVI時系列データによる変化抽出の最適閾値の設定と精度評価のために、当該地域を1998年10月5日に撮影したLandsat-5 TM画像と、2002年10月8日に撮影したLandsat-7 ETM+画像を使用した。

## ② 参照データ作成

NDVI時系列データによる変化抽出の最適閾値の設定と精度評価のために、TM画像（1998年）とETM+画像（2002年）から、次の手順で土地被覆変化図を作成した。

TM画像とETM+画像の位置ズレを補正するため、目視判読によって得た47ヶ所のタイピントを用いて、精密幾何補正済みのETM+画像を参照とした位置合わせを行った（RMSE = 0.32画素、画素サイズ=30m）。位置合わせ済みの両画像から、可視から短波長赤外を観測波長帯とする6つバンド（1, 2, 3, 4, 5および7）を抽出し、観測時の太陽-地表面-センサの幾何学的な位置関係の違いに由来する衛星観測放射輝度の変動を取り除くために、DNを大気上端反射率（TOA反射率）に変換した<sup>15)</sup>。また、大気状態の違いによる観測放射輝度の変動とセンサの応答特性の違いによる変動の影響を抑制するために、PIF（Pseudo Invariant Features）の線形回帰モデル<sup>21)</sup>に基づいて、相対放射量補正を行った。幾何補正および相対放射量補正済みのTOA反射率画像にCVAを適用し、変化強度画像（画素サイズ=30m）を生成した。現地調査に基づいて設定した閾値により、CVA変化強度画像を、変化有りと変化無しの2クラスから構成される2値画像（画素サイズ=30m）に変換した（図9）。この2値画像を、NDVI時系列データの1画素に相当する1km四方のグリッドで集計し、変化有りの画素の占める割合が30%以上のグリッドを変化有りグリッドとし、画素サイズ=1kmの参照データを作成した。

## ③ NDVI時系列データによる変化抽出

基準年（1998年）と比較年（2002年）それぞれにおけるT個の離散的な時系列NDVI値を $x_t$ ,  $y_t$  ( $t=1, 2, \dots, T$ )とおくと、コレログラムは、式(11)で計算される自己相関係数 $r_{xx}$ をラグ $h$ に対してプロットしたものと、式(12)で計算される相互相関係数 $r_{xy}$ をラグ $h$ に対してプロットしたもののが得られる。本研究では、これら2つのコレログラムのRMSEを、基準年と比較年のNDVI時系列特性の変化強度の指標とした。変化地点を抽出するための最適閾値は、TM/ETM+画像を基に作成した参照データ（画素サイズ=1km）との一致度が最大となるように設定した。なお、参照データとの一致度は、Kappa係数<sup>17)</sup>を用いて評価した。また、変化抽出手法の性能比較のために、CVAによる変化抽出も行った。

$$r_{xx} = \frac{\sum_{t=1}^{T-h} (x_t - \bar{x}_1)(x_{t+h} - \bar{x}_2)}{\sqrt{\sum_{t=1}^{T-h} (x_t - \bar{x}_1)^2} \sqrt{\sum_{t=1}^{T-h} (x_{t+h} - \bar{x}_2)^2}} \quad \left. \begin{array}{l} \\ \end{array} \right\} (11)$$

$$\text{ただし, } \bar{x}_1 = \sum_{t=1}^{T-h} x_t / (T-h)$$

$$r_{xy} = \frac{\sum_{t=1}^{T-h} (x_t - \bar{x})(y_{t+h} - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{t=1}^{T-h} (x_t - \bar{x})^2} \sqrt{\sum_{t=1}^{T-h} (y_{t+h} - \bar{y})^2}} \quad \left. \begin{array}{l} \\ \end{array} \right\} (12)$$

$$\text{ただし, } \bar{x} = \sum_{t=1}^{T-h} x_t / (T-h)$$

$$\bar{x}_2 = \sum_{t=1}^{T-h} x_{t+h} / (T - h)$$

$$\bar{y} = \sum_{t=1}^{T-h} y_{t+h} / (T - h)$$

#### ④ 精度評価および性能比較

NDVI時系列データを用いた2つ変化抽出手法（コレログラム法とCVA法）の精度は、TM/ETM+画像から作成した参照データを用いて、Overall AccuracyおよびKappa係数を計算することによって評価した<sup>17)</sup>。また、両手法の性能は、式(13)で定義される検定統計量Zによって比較した。

$$Z = \frac{\hat{\kappa}_1 - \hat{\kappa}_2}{\sqrt{\hat{\sigma}^2[\hat{\kappa}_1] + \hat{\sigma}^2[\hat{\kappa}_2]}} \quad (13)$$

ここで、 $\hat{\kappa}_1$ および $\hat{\kappa}_2$ は、コレログラム法およびCVA法による変化抽出結果についてのKappa係数であり、 $\hat{\sigma}^2[\hat{\kappa}_1]$ および $\hat{\sigma}^2[\hat{\kappa}_2]$ は、それぞれのKappa係数の分散である。Z値が1.96を超えた場合、95%の信頼度で、2つのKappa係数に有意差があると判断できる<sup>31)</sup>。

## 4. 結果・考察

### (1) 渡り経路網の接続性評価に基づいた重要生息地の特定

コウノトリの南下移動の追跡データから、繁殖地（7地点）、中継地（40地点）および越冬地（11地点）の位置が特定された（図2）。潜在渡り経路網の接続性解析の結果、中国東部の渤海湾沿岸に位置する中継地が利用不可能になった場合、渡り経路が南北に分断され、中国南部の揚子江流域に位置する越冬地が地理的に孤立することが示された（図3）。このことから、渤海湾沿岸に位置する中継地は、渡り経路の接続性を維持するうえで重要な役割を果たしていると考えられる。特に、渤海湾北岸に位置するJiantuzhi Gley Mire（39.19° N, 118.63° E）は、3年間の衛星追跡の期間、毎年共通的に利用された中継地であった。このことは、Jiantuzhi Gley Mireが、南下移動するコウノトリにとって極めて重要な中継地であることを示唆している。

コウノトリの個体数のさらなる減少を防ぐためには、繁殖地や越冬地だけでなく、渤海湾沿岸の中継地環境を保全し、渡り経路の接続性を維持することが重要であると考えられる。しかしながら、現在、これらの中継地の環境を保全するための自然保護区は設置されていない。渤海湾沿岸には、黄河三角州自然保護区や天津古海岸湿地自然保護区などの國家級自然保護区が設置されている地点もあるが<sup>11)</sup>、急速な開発行為に起因する環境汚染により、沿岸環境が適切に制御されているとは言い難い<sup>12)</sup>。もしも、渤海湾沿岸の中継地が利用不可能になれば、渡り経路が断片化し、繁殖地および越冬地における保全努力が損なわれる可能性がある。この地域の中継地環境の保全を進めるために、今後、より詳細な空間スケールで、コウノトリの環境利用を明らかにする必要がある。



図2 繁殖地、中継地および越冬地の位置

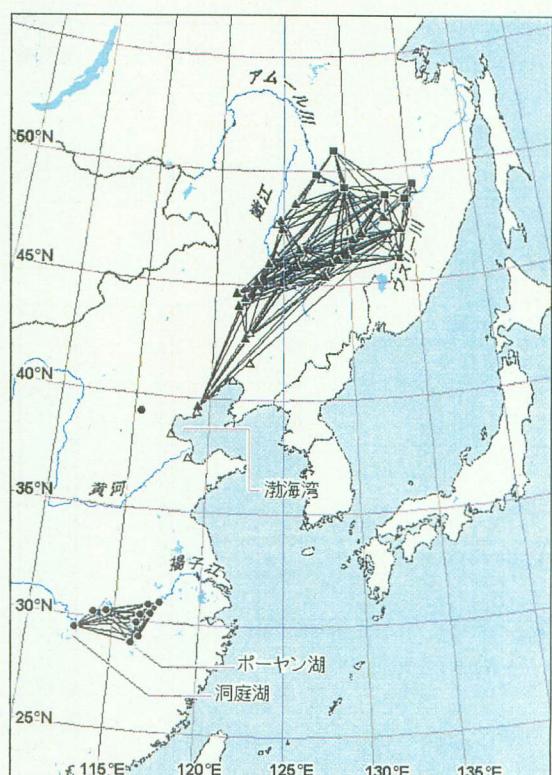


図3 潜在渡り経路網の接続性解析

## (2) 重要中継地におけるコウノトリの環境利用解析

渤海湾沿岸、ザーロン自然保護区、莫莫格自然保護区および向海自然保護区の土地被覆/土地利用分類の精度 (Kappa係数) は、それぞれ0.741, 0.667, 0.709, 0.780であり、ほぼ妥当な精度のLC/LU分類図を得た。中継地内のコウノトリの位置データとLC/LU分類図を重ね合せ、出現位置とLC/LUカテゴリの対応関係を集計した結果、ザーロン自然保護区および莫莫格自然保護区の周辺では、自然湿地における出現頻度が高く、向海自然保護区周辺では裸地および草地、渤海湾沿岸では水域における出現頻度がそれぞれ高かった（図4）。また、95%信頼円内における水域カテゴリの有無を集計した結果、ザーロン自然保護区では約60%，莫莫格自然保護区では80%，向海自然保護区および渤海湾沿岸では約90%の割合で、95%信頼円内に水域が存在することが示された（図5）。水域と出現位置との関連の強さを示すこの結果は、水域が、コウノトリの生息地の重要な構成要素であることを支持するものと考えられる。

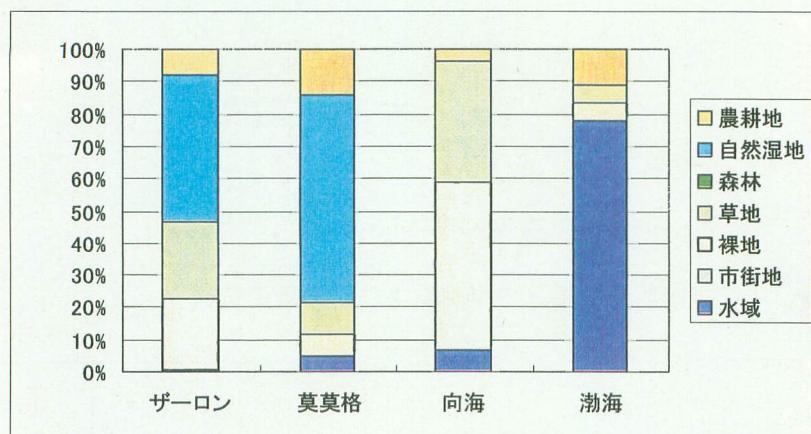


図4 コウノトリの出現位置と土地被覆/土地利用カテゴリの関係.

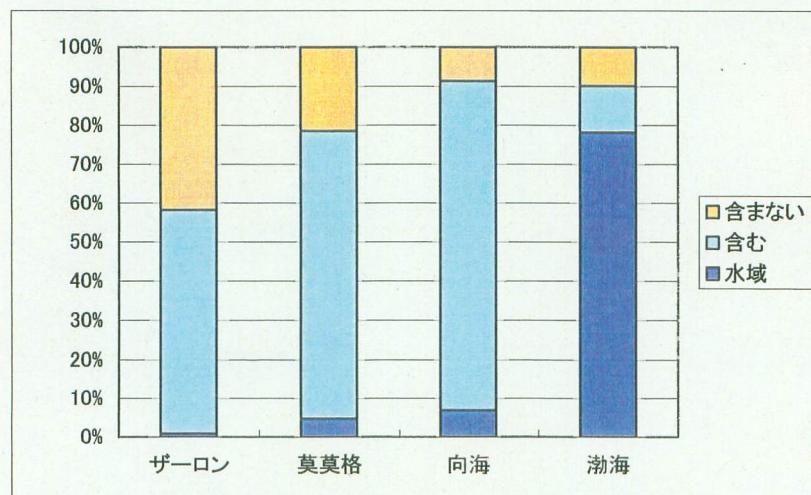


図5 コウノトリの出現位置と水域との位置関係

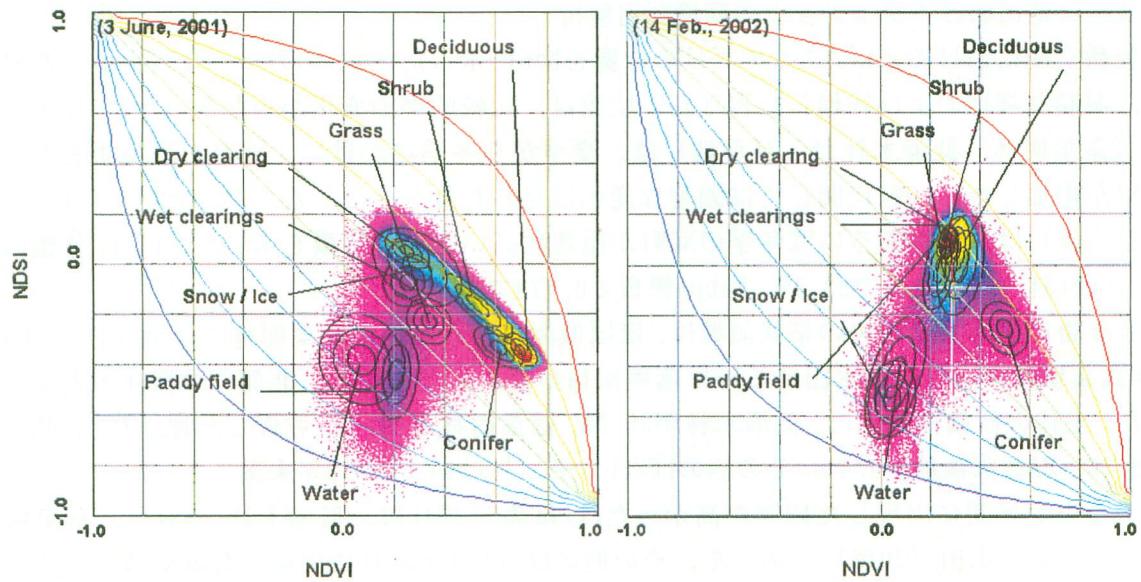


図6 NDSI-NDVI空間における土地被覆/土地利用カテゴリの位置.

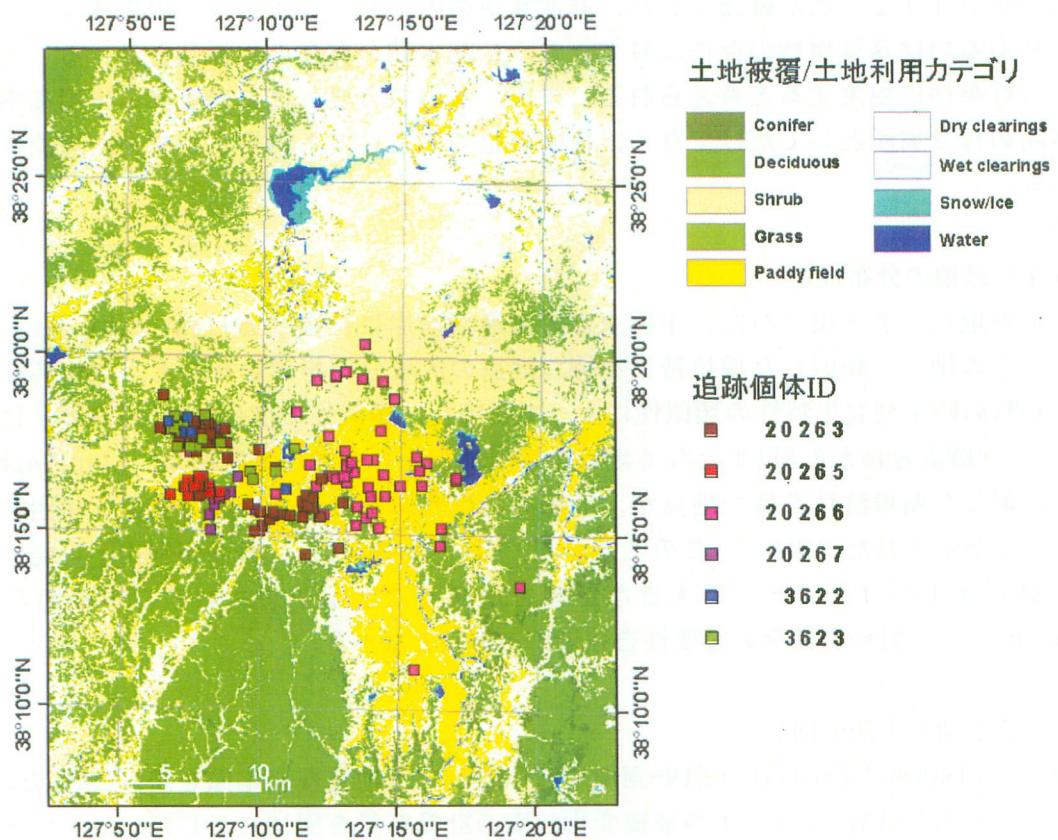


図7 土地被覆/土地利用分類図およびタンチョウ出現位置.

### (3) 重要越冬地におけるタンチョウの環境利用解析

NDXI特徴空間における各LC/LUカテゴリの位置を図6に示した。4つのカテゴリ（水域、常緑針葉樹、湿潤な裸地および乾燥した裸地）の位置は、比較的季節変化が少なかった。3つのカテゴリ（落葉樹林、低灌木林および草地）は、夏季から冬季にかけて、NDVIが減少するとともにNDSIが増加した。NDWIに関しては顕著な変化は見られなかった。残り2つのカテゴリ（水田および雪氷）は、夏季あるいは冬季のNDWIが極端に高いという特徴を示した。LC/LU分類の精度は、Overall Accuracyで83.3%，Kappa係数で0.779であった。

非武装地帯に対応する中央の帶状領域は、ほぼ低灌木林あるいは落葉樹林に分類された（図7）。非武装地帯の南側は、水田あるいは落葉樹林が優占した。一方、北側では裸地が大部分を占めた。全体の面積構成比は、低灌木林が35.0%，落葉樹林が29.8%，乾燥した裸地が15.6%，水田が9.2%，湿潤な裸地が4.4%，その他のLC/LUカテゴリはいずれも3%未満であった。

タンチョウが昼間に出現した確率が高かったLC/LUカテゴリは、低灌木林（38%），落葉樹林（34%）および水田（20%）であった。その他のLC/LUカテゴリに出現した確率は、いずれも2%未満であった。夜間の場合も同様に、低灌木林（32%），水田（30%）および落葉樹林（28%）に出現した確率が高かった。低灌木林および落葉樹林における高い出現確率は、非武装地帯でのタンチョウの高い出現確率を反映している。非武装地帯の地形は、起伏に富んだ山間部と平野部に大別できる。LC/LU解析の結果、谷間には細い河川がいく筋も流れ、平野部には小さな沼沢が点在することが確認された。非武装地帯内でのタンチョウの出現確率の高さは、低灌木林あるいは落葉樹林の存在よりも、こうした水域の存在と、搅乱を受けることが少ないという好条件に由来すると考えられる。また、水田での昼夜における高い出現確率は、水田が昼間の採食場所としてだけでなく、夜間のねぐらとしても利用されていた可能性を示唆している。

### (4) 潜在生息地の分布推定

重要中継地として抽出された、中国東部の渤海湾沿岸に位置するJiantuzhi Gley Mireに着目し、この地点と類似した環境特性を持つ地点の広域分布推定を行った。環境特性の類似性は、NDWIの時系列変化特性の類似性によって評価し、類似性の度合いはCEM演算子によって計算した。CEM計算値が0.8以上となる地点を類似地点として抽出した結果、Jiantuzhi Gley Mireと類似した環境特性を持つ地点が、渤海湾沿岸北岸を中心としたに僅かな範囲にのみ分布することが示された（図8）。このことから、Jiantuzhi Gley Mireが利用不可能になった場合、渡り途中のコウノトリに大きな影響を及ぼすことが予想される。中継地としてのJiantuzhi Gley Mireの保全の必要性を強調する結果となった。

### (5) 環境変化抽出手法の開発

Landsat-5 TM画像とLandsat-7 ETM+画像から作成した土地被覆変化図を図9に示した。また、コレログラム法とCVA法による土地被覆変化強度の計算結果を図10に示した。コレログラム法のOverall accuracyは87.7%，Kappa係数は0.343であった。一方、CVA法のOverall accuracyは84.3%，Kappa係数は0.132であった。式(13)により、Kappa係数の有意差検定を行ったところ、コレログラム法のKappa係数のほうがCVA法のそれよりも有意に高かった（Z=22.271）。

つまり、CVA法よりも、コレログラム法の変化抽出精度のほうが有意に優れていることが確認された。



図8 潜在中継地の広域分布推定図。重要中継地として抽出されたJiantuzhi Gley Mireと類似した環境特性を持つ地点を赤で表示した。渤海湾北岸を中心とした一部の範囲にのみ、類似地点が分布している。

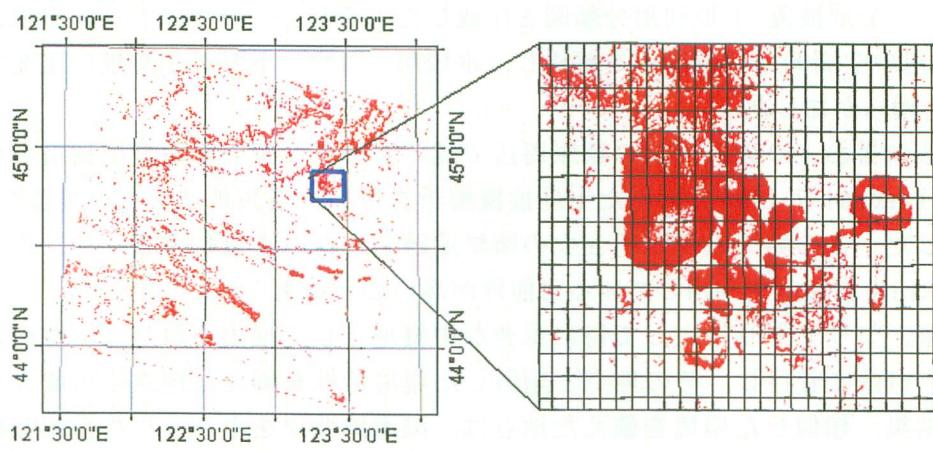


図9 Landsat-5 TM画像とLandsat-7 ETM+画像から作成した土地被覆変化図(左)とその拡大図(右)。変化地点(画素サイズ=30m)を赤で示した。拡大図のグリッドサイズは、NDVI時系列データの1画素に相当する1km四方である。

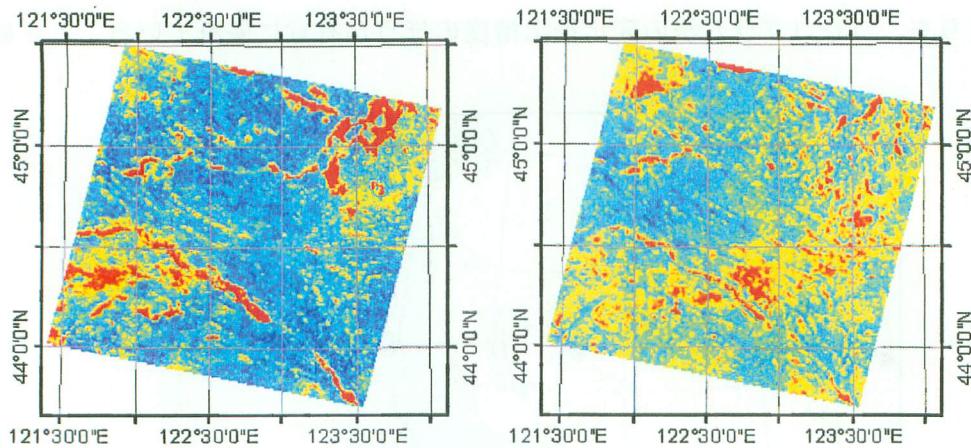


図10 NDVI時系列データ（画素サイズ=1km）から計算した土地被覆変化強度（左：コレログラム法、右：CVA法）

## 5. 本研究により得られた成果

衛星追跡データの位置誤差を考慮した客観的な解析方法により、渡り鳥の潜在的渡り経路網を生成し、その接続性維持への貢献度に基づいて、重要中継地を特定する手法を開発した。この方法は、衛星追跡を行う鳥の種類に関わらず適用可能であり、高い汎用性を持つ。本研究では、この手法を、コウノトリの衛星追跡データに適用し、コウノトリの渡り経路の接続性を維持するうえで、渤海湾沿岸に位置する中継地が重要な役割を果たしていることを明らかにした。

衛星追跡の結果明らかとなった中継地（渤海湾沿岸、ザーロン自然保護区周辺、莫莫格自然保護区周辺、向海自然保護区周辺）について、Landsat-7 ETM+画像を用いた土地被覆/土地利用解析を行い、土地被覆/土地利用分類図を作成した。そして、コウノトリの出現位置と土地被覆/土地利用の空間的な位置関係を解析し、水域が、コウノトリの生息地の重要な構成要素であることを明らかにした。

朝鮮半島非武装地帯および大韓民国の鉄原周辺で越冬するタンチョウの環境利用を解析するため、2時期のLandsat-7 ETM+を用いた土地被覆解析を行い、当該地域の土地被覆/土地利用分類図を作成した。この結果とタンチョウの衛星追跡データとを重ね合せ、タンチョウが昼夜を問わず、水田を高頻度で利用している可能性が高いことを明らかにした。

衛星追跡の結果、コウノトリにとって特に重要な中継地として抽出された、渤海湾北岸のJiantuzhi Gley Mireに着目し、その地点と類似した環境特性を備えた地点の広域分布推定を行った。その結果、類似した環境を備えた地点は、渤海湾北岸を中心とした僅かな範囲にのみ分布することがわかった。これにより、Jiantuzhi Gley Mireの中継地環境の希少性が確認され、環境悪化の懸念される当該地域において、積極的な保全対策を推進する必要性を裏付けた。

渡り鳥の行動範囲全域を対象とし、環境変化を抽出するための新たな手法を開発した。開

発した手法は、これまで一般的に用いられてきた広域変化抽出手法よりも、変化抽出精度が有意に優れていることが確認された。

## 6. 引用文献

- 1) Asia-Pacific Migratory Waterbird Conservation Committee (2001) Asia-Pacific Migratory Waterbird Conservation Strategy, pp. 2001–2005. Wetlands International – Asia Pacific, Kuala Lumpur.
- 2) U.S. Fish and Wildlife Service (1986) North American waterfowl management plan: a strategy for cooperation. U.S. Fish and Wildlife Service, Washington, DC.
- 3) U.S. Fish and Wildlife Service (1994) 1994 update to the North American waterfowl management plan: expanding the commitment. U.S. Fish and Wildlife Service, Washington, D. C.
- 4) Myers, J. P., Morrison, R. I. G., Antas, P. Z., Harrington, B. A., Lovejoy, T. E., Sallaberry, M., Senner, S. E. & Tarak, A. (1987) Conservation strategy for migratory species. American Scientist, vol. 75, pp. 19– 26.
- 5) Harrington, B. & Perry, E. (1995) Important shorebird staging sites meeting Western Hemisphere Shorebird Reserve Network criteria in the United States. U.S. Dept. Inter., Fish and Wildl. Serv., Washington, DC.
- 6) Scott, D. A. & Rose, P. M. (1996) Atlas of Anatidae Populations in Africa and Western Eurasia. Wetlands International Publication No. 41. Wetlands International, Wageningen.
- 7) Farmer, A. H. & Wiens, J. A. (1999) Models and reality: Time-energy trade-offs in pectoral sandpiper (*Calidris melanotos*) migration. Ecology, vol. 80, pp. 2566– 2580.
- 8) Higuchi, H., Nagendran, N., Darman, Y., Masayuki, T., Andronov, V., Parilov, M., Shimazaki, H. & Morishita, E. (2000) Migration and habitat use of Oriental White Storks from satellite tracking studies. Global Environmental Research vol. 4, pp. 169– 182.
- 9) ARGOS Inc., (1996) User Manual, Service Argos, Toulouse.
- 10) Gower, J. C. & Ross, G. J. S. (1969) Minimum spanning trees and single-linkage cluster analysis. Applied Statistics, vol. 18, pp. 54–64.
- 11) China Population and Environment Society (2000) The Atlas of Population Environment & Sustainable Development of China. Science Press, Beijing and New York.
- 12) National Wetland Conservation Action Plan for China (2000) National Wetland Conservation Action Plan for China. State Forestry Administration, Beijing.
- 13) Shimazaki, H., Tamura, M. and Higuchi, H. (2004) Migration routes and important stopover sites of endangered oriental white storks (*Ciconia boyciana*), as revealed by satellite tracking. Memoirs of the NIPR, vol. 58, pp. 162–178.
- 14) Jia, X., Richards, J.A., and Ricken, D.E. (1999) Remote Sensing Digital Image Analysis: An Introduction, Springer Verlag, pp. 384.

- 15) Huang, C., Zhang, Z., Yang, L., Wylie, B., and Homer, C. (2000) MRLC 2000 Image Preprocessing Procedure, USGS White Paper..
- 16) Ball, G.H. and Hall, D.J. (1965) A novel method of data analysis and pattern classification. Stanford Research Institute, Menlo Park, California.
- 17) Congalton, R.G. (1991) A review of assessing the accuracy of classifications of remotely sensed data, *Remote Sensing of Environment*, vol.37, pp.35-46.
- 18) Higuchi, H., Ozaki, K., Fujita, G., Minton, J., Ueta, M., Soma,M., and Mita, N. (1996) Satellite tracking of White-naped crane migration and the importance of the Korean Demilitarized Zone, *Conservation Biology*, vol.10, pp.806-812.
- 19) Higuchi, H., Shibaev, Y., Minton, J., Ozaki, K., Surmach, S., Fujita, G., Momose, K., Momose, Y., Ueta, M., Andronov, V., Mita, N., and Kanai, Y. (1998) Satellite tracking of the migration of the red-crowned crane *Grus japonensis*, *Ecological Research* vol.13, pp.273-282.
- 20) Song, C., Woodcock, C.E., Seto, K.C., Lenney, M.P., Macomber, S.A. (2001) Classification and change detection using Landsat TM data: When and how to correct atmospheric effects?, *Remote Sensing of Environment*, vol.75, pp.230-244.
- 21) Jensen, J.R., Rutcher, K., Koch, M.S., Narumalani S. (1995) Inland wetland change detection in the everglades water conservation area 2A using a time-series of normalized remotely-sensed data, *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, vol. 61, pp.199-209.
- 22) Zhao, Y., Song, C. (Eds.), 1995. Scientific Survey of the Yellow River Delta Nature Reserve. Silviculture Publishing, Beijing.
- 23) Harris, J., Liying, S., Higuchi, H., Ueta, M., Zhengwang, Z., Yanyun, Z., and Xijun, N. (2000). Migratory stopover and wintering locations in eastern China used by White-naped and Hooded Cranes as determined by satellite tracking. *Forktail*, vol.16, pp.93-99.
- 24) Kanai Y, Ueta M, Germogenov N, Nagendran M, Mita N, Higuchi H. (2002) Migration routes and important resting areas of Siberian cranes (*Grus leucogeranus*) between northeastern Siberia and China as revealed by satellite tracking. *Biological Conservation*, vol.106, pp.339-346.
- 25) Scott, D.A. (1989) A Directory of Asian Wetlands. World Conservation Union, Cambridge.
- 26) Kanai, Y., Jin, L., Hayashi, H., Katsura, C., Liang, Y., Zhhang, Y., Wei, H., Sui, F., Li, Y., Qiu, Y., Morishita, T., Urahashi, H., Takeshita, M., Takeishi, M., Kunihiro, M., Shinkai, K., Tsuchiya, M., Shuetake, M. (1993) Avifauna and conservation of Liaoning Shuangtai Hekou Nature Reserve. *Strix* 12, 145- 160. (in Japanese with English summary).
- 27) Viovy N., Arino, O., Belward, A.S. (1992) The Best Index Slope Extraction (BISE) - a method for reducing noise in ndvi time-series. *International Journal of Remote*

- Sensing, vol.13, pp.1585–1590.
- 28) Resmini, R.G., Kappus, M.E., Aldrich, W.S., Harsanyi, J.C., Anderson, M. (1997) Mineral mapping with HYperspectral Digital Imagery Collection Experiment (HYDICE) sensor-data at Cuprite, Nevada, USA. International Journal of Remote Sensing. vol.18, pp. 1553–1570.
- 29) Eastman, J.R. and Fulk, M. (1993) Long Sequence Time-Series Evaluation Using Standardized Principal Components. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, vol.59, pp. 991–996.
- 30) Lambin, E.F. and Strahler, A.H. (1994) Change vector analysis in multitemporal space: A tool to detect and categorize land-cover change processes using high temporal-resolution satellite data. Remote Sensing of Environment, vol.48, pp. 231–244.
- 31) Rosenfield, G.H. & Fitzpatrick-Lins, K. (1986) A coefficient of agreement as a measure of thematic classification accuracy. PE&RS, vol.52, no.2, pp.223–227.
- 32) Hudson, W.D. & Ramm, C.W. (1987) Correct formulation of the kappa-coefficient of agreement. PE&RS, vol.53, no.4, pp.421–422.

## 7. 国際共同研究等の状況

国際ツル財団による「Conservation of the globally significant wetlands and migration corridors required by Siberian Cranes and other globally significant migratory water-birds in Asia」プロジェクトと情報交換を行うことに同意している。また、現地調査はロシアのWWFロシア極東支部、ヒンガンスキー自然保護区、中国の長春地理研究所と共同で実施している

## 8. 研究成果の発表状況

### (1) 誌上発表（学術誌・書籍）

〈学術誌（査読あり）〉

- ① Matsushita, B., & Tamura, M. (2002) Integrating remotely sensed data with an ecosystem model to estimate net primary productivity in East Asia, Remote Sensing of Environment, vol.81, pp.58–66.
- ② Chen, J., Gong, P., He, C., Luo, W., Tamura, M., & Shi, P. (2002) Assessment of the urban development plan of Beijing by using a CA-based urban growth model, Photogrammetric Engineering & Remote Sensing, vol.68, pp.1063–1071.
- ③ 小熊宏之, 島崎彦人, 山形与志樹 (2002) 森林樹冠率の推定におけるミクセル分類手法の有効性に関する研究, 写真測量とリモートセンシング, Vol.41, No.2, pp.4–14.
- ④ Chen, Z., Chen, J., Shi, P., & Tamura, M. (2003) An IHS-based change detection approach for assessment of urban expansion impact on arable land loss in China, International Journal of Remote Sensing, vol.24, pp.1353–1360.

- ⑤ Takeuchi, W., Tamura, M., & Yasuoka, Y. (2003) Estimation of methane emission from West Siberian wetland by scaling technique between NOAA AVHRR and SPOT HRV, *Remote Sensing of Environment*, vol.85, pp. 21-29.
- ⑥ Shimazaki H., Tamura M., & Higuchi H. (2004) Migration routes and important stopover sites of endangered oriental white storks (*Ciconia boyciana*), as revealed by satellite tracking, *Memoirs of NIPR*, vol. 58, pp. 162-178.
- ⑦ Tamura, M., Higuchi, H., Shimazaki, H., Darman, Y. A., Andronov, V. A., Nagendran, M., & Parilov, M. (in press) Satellite observation of migration routes and habitats of wetland migratory birds in East Asia, *Asian Journal of Geoinformatics*.

<学術誌（査読なし）>

- ① 島崎彦人 (in press) リモートセンシングと衛星追跡手法を用いた渡り鳥の生息環境解析, *Med. Entomol. Zool.*

#### (2) 口頭発表

- ① 島崎彦人, 田村正行, 樋口広芳 (2001) 渡り鳥保全研究への人工衛星追跡とリモートセンシングの応用, 日本リモートセンシング学会 第33回学術講演会
- ② 島崎彦人, 田村正行, 森下英美子, 樋口広芳 (2003) 高空間分解能衛星画像を利用した湿地性鳥類の個体検出可能性の検討, 第12回生研フォーラム, 宇宙からの地球環境モニタリング.
- ③ Shimazaki H., Tamura M., Higuchi H. (2003) Continuity assessment of migration route network of endangered Oriental White Storks (*Ciconia boyciana*) based on analyses of satellite telemetry data, *Int. Symp. Bio-logging Sci.*
- ④ 島崎彦人, 田村正行, 樋口広芳 (2003) 東アジアに生息するコウノトリ (*Ciconia boyciana*) の渡り経路とその連続性評価, 第50回日本生態学会大会.
- ⑤ Tamura, M., Chen, J., & Shimazaki, H. (2003) Cross correlogram spectral matching in multitemporal space: a new method for land cover change detection using high temporal-resolution satellite data, ISPRS Commission VII WG6, International Workshop on Monitoring/Modeling Global Environmental Change, Kyoto, Japan.
- ⑥ 島崎彦人, 田村正行, 樋口広芳 (2003) 朝鮮半島の非武装地帯周辺で越冬するタンチョウの環境利用解析, 日本リモートセンシング学会第35回学術講演会.
- ⑦ 島崎彦人 (2004) リモートセンシングと衛星追跡手法を用いた渡り鳥の生息環境解析, 日本衛生動物学会 第42回東日本支部例

#### (3) 出願特許

なし

#### (4) 受賞等

なし

### (5) 一般への公表・報道等

- ① 環境省広報誌「かんきょう」平成15年6月号（田村正行、人工衛星による渡り鳥の移動経路と生息環境の観測）
- ② NHKハイビジョン放送番組「衛星からのメッセージ」（2002年11月）コウノトリに関する調査の内容を放映
- ③ 国立環境研究所ホームページに成果を公開（2002年4月）「渡り鳥の飛翔ルートと生息環境を衛星で見る」

## 9. 成果の政策的な寄与・貢献について

今後も、マスコミ、国立環境研究所環境情報センター等を通じ、さらに成果の広報・普及に努める予定である。