

# 中国吉林省・向海湿地における 丹頂鶴営巢の水文的条件について

STUDY ON THE HYDROLOGICAL CONDITION OF XIANGHAI WETLAND IN  
JILIN PROVINCE, CHINA FOR NESTING OF RED-CROWNED CRANE

何春光<sup>1</sup>・石川忠晴<sup>2</sup>・入江光輝<sup>3</sup>・盛連喜<sup>4</sup>・王升忠<sup>5</sup>

Chunguang HE, Tadaharu ISHIKAWA, Mitsuteru IRIE, Lianxi SHENG, Shengzhong WANG

<sup>1</sup>非会員 理修 中国東北師範大学講師 (中国吉林省長春市人民大街138号)

<sup>2</sup>フェロー 工博 東京工業大学大学院教授 総合理工学研究科 (〒226-8502横浜市緑区長津田町4259)

<sup>3</sup>正会員 博(工) 科学技術振興機構研究員 (〒226-8502横浜市緑区長津田町4259)

<sup>4</sup>非会員 理博 中国東北師範大学教授 (中国吉林省長春市人民大街138号)

<sup>5</sup>非会員 理博 中国東北師範大学副教授 (中国吉林省長春市人民大街138号)

Red-Crowned crane is an endangered species whose population in the world is 1000-1200, the 2/3 of which live in China. Xianghai wetland in Jilin Province is one of their breeding places. In this study, hydrological condition of the wetland is investigated in relation to the cranes' nesting: Twelve scenes of Landsat-TM data were analyzed to estimate the water area as well as the area of "reed colonies in the water" that is the most favorable places for the cranes' nesting. The results of analysis agreed well to the facts obtained from field observations in the past. The analysis also showed that the reed colony becomes richer as the total water area gets larger. Then, the variation of water area in Xianghai for twenty years was obtained from 145 scenes of Quick-look images by eyes. Using the data, empirical equations were constructed for predicting the variation of water area from basic hydrological factors such as rainfall and river flow rate. A critical river flow rate for the conservation of the cranes' habitat in Xianghai wetland was discussed, being based on the empirical relations as well as the facts observed at the site.

**Key Words :** Red-crowned crane, breeding, water area, satellite image analysis

## 1. はじめに

中国東北部の湿地には、各種の渡り鳥が営巢し繁殖している<sup>1)</sup>。Red Data Book<sup>2)</sup>に記載される絶滅危惧種の丹頂鶴もそのうちの一種である。世界の丹頂鶴の生息数は1000-1200で、その2/3は中国に生息しており、中国政府は一級保全生物に指定している<sup>3)</sup>。丹頂鶴は、冬には長江の河口に近い盐城湿地に滞在し、初春になると中国東北部の湿地に移動して営巢し繁殖する。

しかし最近、丹頂鶴の営巢に適した湿地が開発の進展と乾燥化のために失われるのではないかと危惧されている。吉林省西部にある向海湿地もそのひとつである。しかし、省境に近い辺鄙な土地であるため、営巢状態に関する調査は必ずしも十分でなく、また営巢の立地条件を定量的に記述するための地形データおよび基礎的水文データも完備していない。このため、野鳥生息地の保全

計画が十分立案される前に開発が進行してしまう恐れもある。

本論文の第一著者は、向海湿地における丹頂鶴の営巢状態について現地観測を実施し、その基本的性質を把握した<sup>4)</sup>。その結果を踏まえ、本研究では向海の水文特性と丹頂鶴の営巢との関係を検討した。まず向海湿地の状態変化を衛星画像解析により把握し、営巢状態との関係を調べるとともに、数少ない水文データから向海の水面積の長期変化と水文環境との関係を解析し、丹頂鶴の営巢に必要な水文条件を考察した。

## 2. 対象区域の特性と過去の営巢調査結果

向海は吉林省と内蒙古自治区の境界近くにある自然保護区域で、総面積は約100km<sup>2</sup>である(図-1参照)。図-2に年間の月平均気温、月雨量および主要な流入河川である



図-1 向海自然保護区の位置

霍林川の月平均流量を示す。11月から翌3月までの気温は0℃以下である。降雨の90%以上は5月から9月に集中している。また霍林川の流量は8月にピークを持ち、大部分は4月から10月に集中する。なお、霍林川は、大興安嶺山脈に水源を有する流域面積約20,000km<sup>2</sup>、流路延長590kmの河川で、向海において尻無川となる。

1997年から2003年にかけて、毎年初春に丹頂鶴の営巣調査が行なわれた<sup>3)</sup>。観測対象地域の面積は約380km<sup>2</sup>で、一定のルート上及び7箇所常設観測点において、8倍の双眼鏡と40倍の望遠鏡により巣を発見し、踏査により巣の位置と周辺状況を確認した。

確認された巣数と営巣地の分類結果を表-1に示す。1999年から2001年の3カ年に観測巣数が増加している。これは1998年8月に起きた出水による水面積の増加に関連している。また、営巣地は“水面上の葦原”が圧倒的に多いことがわかる(写真-1)。この理由として、葦を巣の材料とすること、水中から餌を容易に得られること、小哺乳類から卵や雛を守りやすいこと、などが考えられる。

### 3. ランドサット-TMデータによる営巣条件の解析

向海は省境界付近の遠隔地にあり、水文資料はもとより地形データも十分整備されておらず、現地データから定量的な水文解析を行なうのは容易でない。そこで衛星画像解析により向海の特徴を調べた。1997年から2003年の期間の夏季のLandsat-TMデータから“水面上の葦原”の分布を推定した。向海湿地の水面上にある植生は葦のみであることが現地踏査より確認されているので、水域

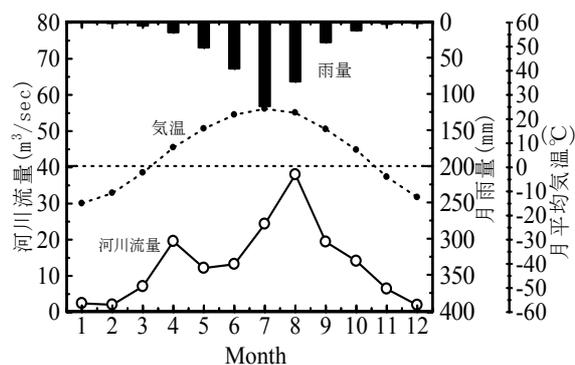


図-2 向海の年間気象変化

表-1 丹頂鶴営巣状態の観測結果<sup>3)</sup>

年	観察された総営巣数	冠水した葦原	乾陸した葦原	その他(砂地等)
1997	5	5	0	0
1998	3	2	1	0
1999	10	9	0	1
2000	13	10	0	3
2001	11	9	1	1
2002	3	3	0	0
2003	1	0	1	0
Total	46	38	3	5



写真-1 水面上の葦原での営巣

の判別と植生有無の判別の結果を重ね合わせて“水面上の葦原”を推定した。

#### (1) 判別方法

一般に水域の判別には短波長赤外のBand-7が適しているといわれており<sup>5)</sup>、本研究でもこれを用いた。ただし季節による閾値の変化を考慮し、次式のようにBand-6データにより基準化して用いた。

$$WI = (\text{Band}6 - \text{Band}7) / (\text{Band}6 + \text{Band}7) \quad (1)$$

なお、WIはWater Indexの頭文字である。

向海では1998年以降年度にわたって「水枯れ」が生じる。そこで、WIのヒストグラムにおいて、水枯れが確認されている時期のWIの上限値を求めたところ、どの場合も概ね0.72であった。そこでこの値を判別の閾値とした。

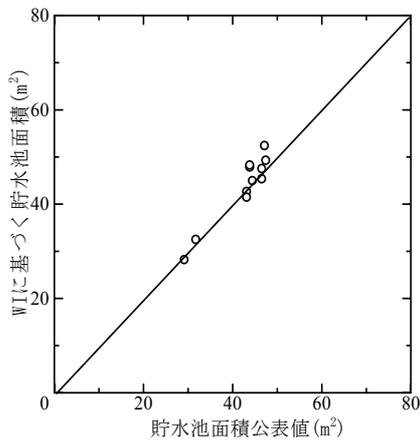


図-3 WIによる解析の検証 (向海貯水池)

この値の妥当性を以下のように検証した。向海湿地の近くにある向海貯水池では、貯水池管理所が定期的に貯水量と水面積を公表している。そこで上記の手法を向海貯水池に適用し、管理所が公表した水面積と比較した。図-3に両者の相関を示す。これからWIの閾値を0.72とすることで水域と陸域を判別できるものと考えられる。

植生の判別には次式で示されるNDVIを用いた<sup>6)</sup>。

$$NDVI = (\text{Band4} - \text{Band3}) / (\text{Band4} + \text{Band3}) \quad (2)$$

前述のように向海湿地の“水面上”に生育する植物は葦のみである。また一般に葦は群落を形成するので、水面のみの領域と葦原の領域は比較的明瞭に区分される。したがって閾値の設定はそれほど厳密でなくともよい。ここでは現地観測での結果を参考に「水面のみ」と「水面上の葦原」を区分する値を0.40とした。(ただし他の植生も存在する陸上にこの閾値を適用するには問題があるかもしれない。)

## (2) 衛星画像判別と現地観測結果の一致度

以上の結果より得られた[WI>0.72]の領域と[NDVI>0.40]の領域を重ね合わせ、水面上の葦原を判別した。一方、現地観測では巣の場所と立地条件を調べている。そこで両者の一致度を調べた結果の例を図-4に示す。青色の領域は水面、水色の部分が水面上の葦原、緑色が陸上の植生、赤丸は現地で観測された巣の位置である。また表-2は、現地で観測された巣の位置を“水面上の葦原”と“その他”に分類した際の一致度を示している。ただし1998年は大出水のために画像の得られた時期に葦原が水没していたので計算から除外している。判別の適合度は82%であった。

図-5は、夏季の画像から得られる水面積と水上の葦原面積の相関を示している。この図から、水面積の増加が水面上の葦原を増加させ、結果として丹頂鶴の営巣が活発になる、という因果関係が想定される。そこで向海湿地の水面積の長期変動を次節で考察する。

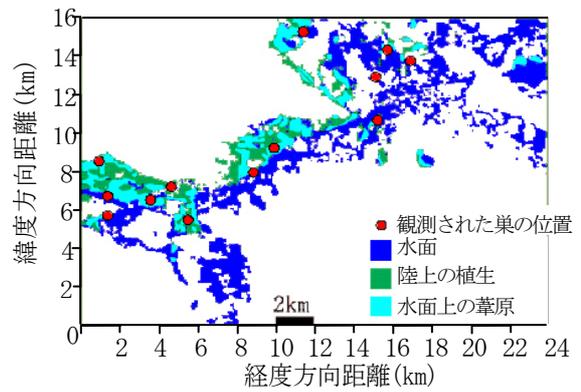


図-4 WIとNDVIによる識別結果 (1999)

表-2 衛星画像からの“水面上の葦原”の識別度

衛星画像 解析		WI>0.72 NDVI>0.4	その他
		現地 踏査	22
冠水した 葦原	21	19	2
その他	7	3	4

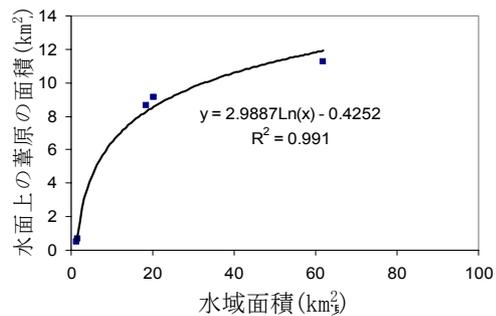


図-5 向海の水面積と水面上の葦原の面積

## 4. Quick-look imageによる長期の水域変動解析

長期の水面変動解析には多数の衛星画像データを必要とするが、Landsat-TMデータは有料であるため予算上の問題が生じる。そこでQuick-look imageの活用を図った<sup>7)</sup>。Quick-look imageはアナログ画像データであり一般に定量的解析はできないが、目視により水面と陸域の判別を行なうことは十分可能である。

そこで、Quick-look imageをInternet上からダウンロードし、画像処理ソフトで縮尺と方位を合わせて出力した後、一定の大きさの格子を配置した透明シートを重ね合わせて水面積を計測した。図-6に解析例を示す。(a)の黒い四角が水面と判読された格子で、この合計面積を求めた。一方、(b)はTMデータからWIを用いて求められた水面である。(a)の一つの格子内に水域と陸域が入り組んで存在するから、両者の厳密な一致はもとより望めない。しかし、人間の目は、複雑なパターンを平均

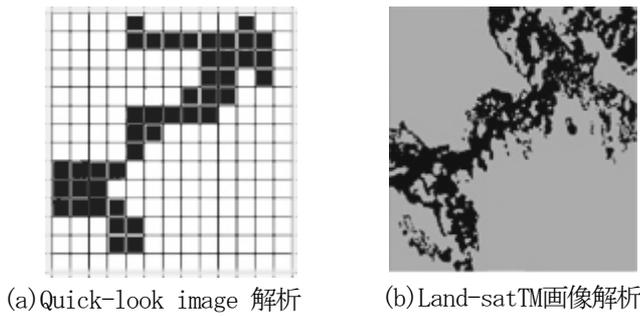


図-6 水面の判読の例 (1998年9月26日)

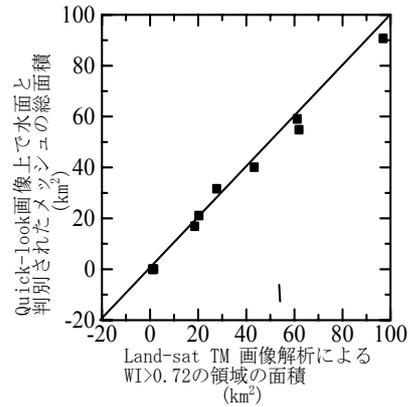


図-7 Quick-look imageによる水面判読の精度

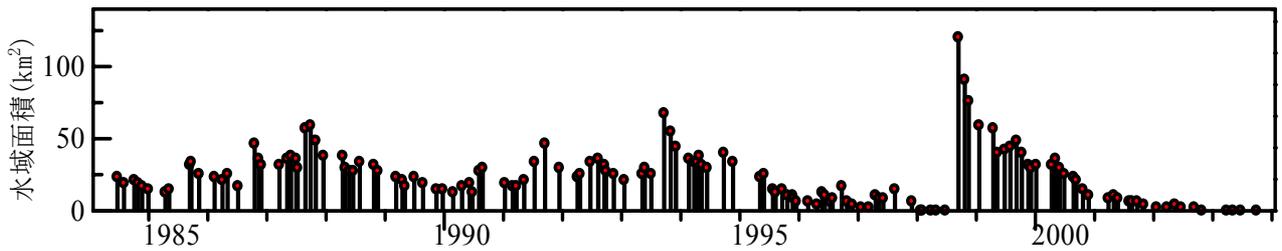


図-8 向海水面積の長期間変動

化して出入りを“相殺する”能力がある。その結果、図-7に示すように両者の相関は高く、目視によるQuick-look imageの解析もある程度の精度を有していることがわかる。

1984年以降20年間のLandsat 画像データを検索し、向海地域が明瞭に写っている145シーンについて解析を行い、図-8に示す結果を得た。この図から次のことがわかる：① 向海湿地の水面積には大きな季節性があり、初春に最小、晩夏に最大となることが多い。② 1995年以前は、水面積は20km<sup>2</sup>から70km<sup>2</sup>の間で比較的安定に推移していた。しかし1996年以降は変動が増加し、水面積がゼロとなることもある。1998年のピークは比較的大きな出水によって生じたものであり、回帰年は100年以上と推定されている。なお1996年以降の特性の変化は、霍林河流域(内蒙古自治区)の乾燥化及び灌漑用取水量の増加によるのではないかとと思われるが、明確な資料は無い。

## 5. 向海湿地の水面積と水文諸量との関係

向海湿地は省の境界付近の僻地にあり、利用可能な水文データは少ない。本研究では次の3つのデータを入手し解析した。

- ①. 吐列毛都における霍林川流量 (1984~2000)
- ②. 向海貯水池の月別降雨量 (1984~2003)
- ③. 通榆氣象局の月別蒸発量 (1984~2003)

吉林省内には霍林川の流量観測所が無いため、向海から130km上流の吐列毛都観測所(内蒙古自治区)のデータを用いる。ただし行政組織間の水文データの融通は中国

においては必ずしも円滑でなく、今回提供されたデータは2000年までであった。また通榆における蒸発量は蒸発パンによる計測であり、向海での実際の蒸発量とはかなり異なる恐れがある。

これらの水文データは、向海湿地の水量を連続的且つ定量的に記述するには不十分なものである。一方、向海の水面積は図-8に示したように季節性を持ち、9月頃に最大となり3月頃に最小となる。これは図-2に示した雨量及び河川流量の季節性に規定されているためと考えられる。そこで本研究では、10月から3月までの水面変化と、4月から9月までの水面変化をそれぞれ解析して、向海湿地の変動特性を把握することとした。

### (1) 3月末の水面積

Quick-look imageの解析結果(図-8)は時間間隔が不均一で、3月末の水面積が求められていないことがあるが、その場合は前後のデータから線形内挿した。その上で、3月の水面積( $A_3$ )が以下の4つの変数に依存するものとして解析を行なった。

- ①. 前年の9月末における向海の水面積  $A_9(\text{km}^2)$
- ②. 10月から3月までの霍林川平均流量  $Q_p(\text{m}^3/\text{s})$
- ③. 10月から3月までの向海累積雨量  $R_p(\text{mm})$
- ④. 10月から3月までの通榆累積蒸発量  $E_p(\text{mm})$

まず変数間の単相関を調べたところ、表-3の結果を得た。すなわち $A_3$ に対して最も影響度の高い変数は前年9月の水面積 $A_9$ である。冬季には降雨量および河川流量ともに非常に小さく、また気温も氷点下であるため蒸発が少ないことから、 $A_3$ が主に $A_9$ のみによって決まることは十分考えられる。第二の影響因子は $Q_p$ だが、 $Q_p$ は $A_9$ とも

表-3 変量間の相関（3月の水面積の解析）

Factors	$A_3$	$A_9$	$R_w$	$Q_w$	$E_w$
$A_3$	1.000	0.953	-0.114	0.833	0.082
$A_9$		1.000	-0.050	0.892	0.078
$R_w$			1.000	-0.009	0.049
$Q_w$				1.000	0.156
$E_w$					1.000

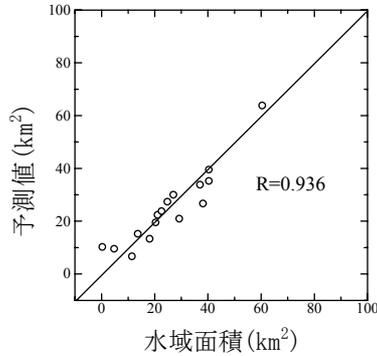


図-9 9月の水面積の予測精度（式(3)）

表-4 変量間の相関（9月の水面積の解析）

Factors	$A_9$	$A_3$	$R_s$	$Q_s$	$E_s$
$A_9$	1.000	-0.029	0.525	0.868	0.073
$A_3$		1.000	0.107	-0.097	-0.392
$R_s$			1.000	0.202	-0.105
$Q_s$				1.000	0.282
$E_s$					1.000

相関が高く、両者は独立とはみなせない。データを精査したところ、9月の水面積 $A_9$ が大きい多雨年には霍林川の洪水期間もやや長く10月に及んでいた。このため10月から3月までの平均流量 $Q_w$ との間に相関が生じたものと考えられる。そこで $A_9$ のみを用いて $A_3$ の回帰式を作成したところ次式を得た。

$$A_3 = -9.39 + 0.302A_9 + 4.28A_9^{1/2} \quad (3)$$

式(3)の算定結果と計測結果の相関を図-9に示す。

## (2) 9月末の水面積

同様に、9月の水面積( $A_9$ )が以下の4つの変数に依存するものとして解析を行なった。

- ①. 当年の3月末における向海の水面積  $A_3$ ( $\text{km}^2$ )
- ②. 4月から9月までの霍林川平均流量  $Q_s$ ( $\text{m}^3/\text{s}$ )
- ③. 4月から9月までの向海累積雨量  $R_s$ (mm)
- ④. 4月から9月までの通楡累積蒸発量  $E_s$ (mm)

変数間の単相関を表-4に示す。 $A_9$ に対して最も影響度の高い変数は霍林川流量 $Q_s$ 、次に影響を及ぼすのは向海の累積雨量 $R_s$ である。また $Q_s$ と $R_s$ の相関は比較的小さく、ほぼ独立とみなせる。霍林川の水源である大興安嶺山脈と向海はかなり離れているので、この結果は妥当であると思われる。そこで $Q_s$ と $R_s$ を用いて $A_9$ の回帰式を作成し

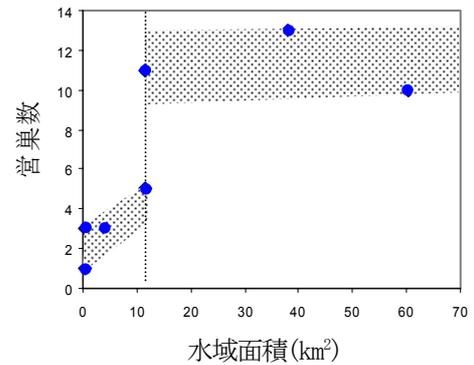


図-10 向海の水面積と丹頂鶴営巣数

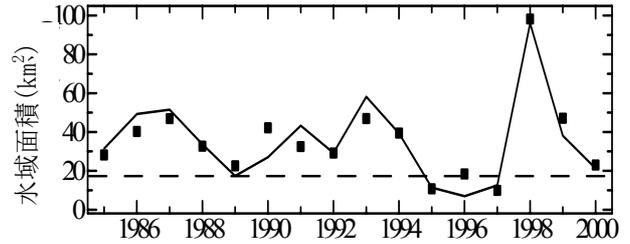


図-11 9月の水面積の経年変化と限界値

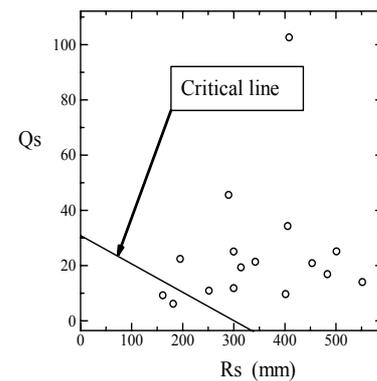


図-12 丹頂鶴保全のための限界流量

たところ次式を得た。相関係数は0.927であった。

$$A_9 = -7.64 + 0.75Q_s + 0.071R_s \quad (4)$$

## (3) 丹頂鶴の生息保全のための環境維持流量

丹頂鶴が飛来する3月末の向海の水面積と、現地で観測された巣数の関係を図-10に示す。データ数が小さいので確定的なことはいえないが、横軸の11 $\text{km}^2$ 付近を境に特性が変化するように見える。すなわち水面積がこれ以下では巣数は著しく減少し、これ以上では安定するように見える。そこで次のような仮説のもとに向海の環境維持流量を考察した。

“丹頂鶴が3月末に飛来して比較的大きな水面を見た場合には、繁殖に適した葦原が形成される可能性が高いと考え着地する。水面積が十分でないとは判断した場合には、

さらに北方の湿地を目指して飛び去る。その判断の限界が11km<sup>2</sup>付近にある”と仮定する。

式(3)の左辺に11km<sup>2</sup>を代入して前年9月末の面積A<sub>9</sub>を逆算すると16.2km<sup>2</sup>という結果を得る。図-11の実線は、Quick-look imageから得られた過去20年間のA<sub>9</sub>の時系列であり、■は式(4)から求められるものである。また水平の破線は限界状態 (A<sub>9</sub>=16.2km<sup>2</sup>) を表している。すなわちこのライン以下になると翌年の丹頂鶴の営巣が難しくなる恐れがある。

一方、式(4)においてA<sub>9</sub>=16.2km<sup>2</sup>を代入すると次の関係を得る。

$$0.75Q_s + 0.071R_s = 23.84 \quad (5)$$

式(5)をデータとともにプロットすると図-12を得る。R<sub>s</sub>とQ<sub>s</sub>の組み合わせが図中の実線より下に来ると、翌年の丹頂鶴の営巣が難しくなることになる。

ところで表-4によればR<sub>s</sub>とQ<sub>s</sub>はほぼ独立とみなせる。これは霍林川の水源地帯と向海が離れているからである。そこで霍林川における今後の水利用計画において、向海の水環境維持のための水量を担保することを考え、その水量を考察する。向海地区の小降雨年の基準を“10年に1回の事象”とすると、図-11のデータ数が20であることから、R<sub>s</sub>の基準値は約200mmとなる。これに対応するQ<sub>s</sub>の限界値は式(5)より約13m<sup>3</sup>/secとなる。すなわち、毎年4月から9月の吐列毛都における霍林川の平均流量を13m<sup>3</sup>/sec以上になるように水利用のレベルを設定すれば、翌年初春の向海における丹頂鶴の営巣は9/10の割合で保全されると考えられる。

## 6. おわりに

本研究では、中国吉林省向海湿地における丹頂鶴の営巣が主に水面上の葦原でなされることに注目し、衛星画像解析により、向海の水文特性を検討した。主要な結論を以下にまとめる。

1) 丹頂鶴が営巣地として好む“水面上の葦原”は全水面積の変動に規定されており、丹頂鶴の営巣には彼らが飛来する3月末の向海の水面積の確保が重要である。

- 2) 向海湿地の水面積は、9月頃に最大、3月頃に最小になるという季節性を示す。また1995年以前には水面積は安定していたが、それ以降は変動が増大しているようである。
- 3) 向海湿地の水面積と水文データとの相関を季節別に調べたところ、3月末の水面積は前年の9月末の水面積に概ね規定され、9月末の水面積は4月から9月の霍林川平均流量および向海累積降雨量に規定される。
- 4) 以上の結果をもとに、丹頂鶴の生息環境維持のための霍林川必要流量を検討したところ、吐列毛都における4月～9月の平均で13m<sup>3</sup>/secという値を得た。

謝辞：文部科学省によるUNESCO Japan Program for Development of Human Resources and Research Network in Natural Science and Technology, Tokyo Tech UNESCO International Research Course for Environmentの助成を受けた。記して謝意を表す。

## 参考文献

- 1) Li Feng, Lu Changhu: Waterfowl diversity and conservation of the wetland in the northeast of China., *The office of Wetland International-China Program. Conservation of the wetland and waterfowl. Beijing: Forestry press of China*, pp.60-62, 1998 (in Chinese)
- 2) 2004 IUCN Red List of threatened species ホームページ：<http://www.iucnredlist.org/search/details.php?species=9520>
- 3) Secretariat of China: Wildlife Conservation Association. Illustrated handbook of the key protected wildlife of China. Ha'erbin, *The press of Northeast Forestry University*, pp.175, 1990.(in Chinese)
- 4) He C.hunguang: The research progress of Conservation Biology of Red-Crane, *Journal of Northeast Normal Univ.*, vol34, pp.117, 2002 (in Chinese)
- 5) 大林成行, 小島尚人編：実務者のためのリモートセンシング, フジテクノシステム社, pp. 100, 2002
- 6) 竹内均監：地球環境調査計測事典 第3巻 沿岸域編, フジテクノシステム社, pp. 1131, 2003
- 7) 日本リモートセンシング技術センター・ホームページ：<http://www.restec.or.jp>

(2005. 9. 30受付)