



— 原著論文 —

## カワウおよびサギ類繁殖地土壤中における無機態窒素含量と安定同位体比の時系列変動

溝田智俊<sup>1,\*</sup>・佐々木みなみ<sup>1</sup>・山中寿朗<sup>2</sup>

<sup>1</sup> 岩手大学農学部 〒020-8550 岩手県盛岡市上田三丁目18-8

<sup>2</sup> 岡山大学大学院自然科学研究科 〒700-8530 岡山市津島中三丁目1番1号

(2006年10月18日受付；2007年7月15日受理)

キーワード：魚食性鳥類，時系列変動，窒素安定同位体比分析，繁殖活動，無機態窒素動態。

日本鳥学会誌

Japanese Journal of  
Ornithology

© The Ornithological Society  
of Japan 2007

Chitoshi Mizota<sup>1</sup>, Minami Sasaki<sup>1</sup>, Toshiro Yamanaka<sup>2</sup>. 2007. Temporal variation in the concentration and nitrogen isotopic ratios of inorganic nitrogen from soils under Cormorant and Heron colonies. Jpn. J. Ornithol. 56: 115-130.

**Abstract.** Two soils (Motomiya, Fukushima Prefecture and Kurume, Fukuoka Prefecture) representing currently active colony of Great Cormorant *Phalacrocorax carbo*, Black-crowned Night Heron *Nycticorax nycticorax* and Grey Heron *Ardea cinerea* were taken and analyzed for temporal variations in the inorganic nitrogen content together with stable nitrogen isotopic signature. Unusually high concentrations of inorganic nitrogen (sum total of ammonium and nitrate-nitrogen) in surface soils (up to 8 g/kg dry soil) increased towards fledgling and tended to decrease quickly after breeding activity. An observed tendency showing the higher rate of nitrification in soils from the warmer soil temperature region (Kurume), relative to those from the slightly cooler region (Motomiya) was interpreted as an indication of the limited nitrification under prevailing lower soil temperature regime. Pronounced denitrification, coupled with nitrification, was indicated by the unique nitrogen isotopic signatures of residual soil nitrate during the later stages of breeding activity. Continued use of forest sites for breeding and subsequent roosting by Great Cormorants, facilitates mineralization of fecal nitrogen, relative to those under temporary heron colony.

**Key words:** Piscivorous avian colony, Temporal variation, Nitrogen isotope analysis, Breeding activity, Inorganic nitrogen.

<sup>1</sup> Faculty of Agriculture, Iwate University, Ueda 3-18-8, Morioka, 020-8550 Japan.

<sup>2</sup> Graduate School of Natural Science and Technology, Okayama University 1-1, Naka 3-chome, Tsushima, Okayama, 700-8530 Japan.

### はじめに

カワウ *Phalacrocorax carbo* およびサギ類 (ゴイスギ *Nycticorax nycticorax*, アオサギ *Ardea cinerea*) は大型の魚食性鳥類であり，森林の林冠に集団で繁殖する．これらの鳥類は生態系において高次捕食者であり，繁殖期あるいはねぐらとして森林を利用している期間，多量の排泄物由来の窒素が短

期間に土壌の表層にもたらされる．わが国のように湿潤で温暖もしくはやや寒冷な気候条件のもとでは，土壌は常に湿潤であるために鳥糞中の主要な成分である尿酸は，アンモニアと二酸化炭素にまで無機化される (Ligeza & Smal 2003)．さらに生成したアンモニア態窒素は，硝化菌の作用で亜硝酸，硝酸へ，ついで適当な電子供与体の存在下では，脱窒菌の作用によって窒素ガスにまで変換される．なお，これらの硝化と脱窒の過程において，一亜酸化二窒素が枝経路を通して部分的に生

\* E-mail: mizota@iwate-u.ac.jp

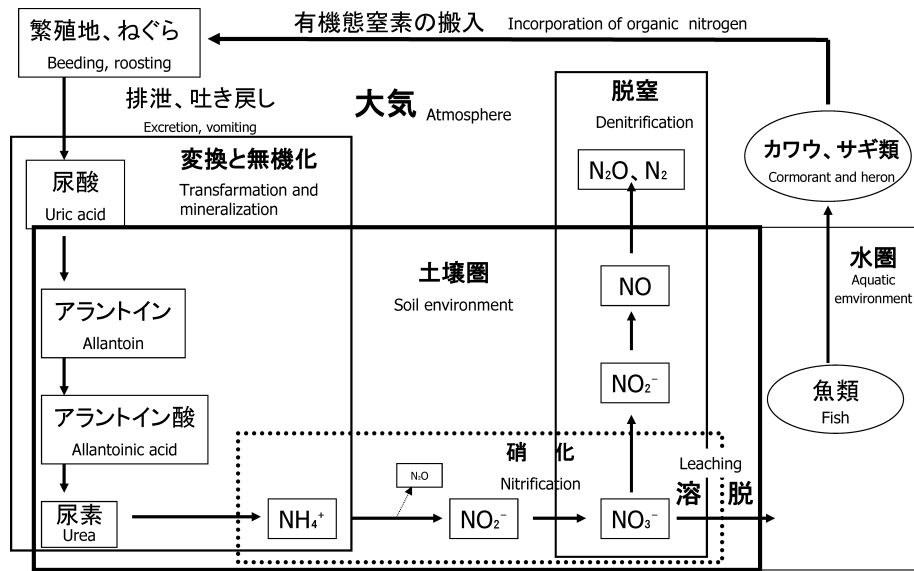


図 1. 魚食性鳥類営巣地周辺における窒素循環の模式図

Fig. 1. A schematic representation on the plausible processes of nitrogen cycle associated with the breeding activity of piscivorous birds

成される (図 1)。窒素の土壌中での変換過程において、最も重要な影響を及ぼす因子としては、地温であることが知られている。とりわけ、硝化菌の活動は土壌の環境要因に非常に敏感で、その活動は  $5^{\circ}\text{C}$  以下の低温条件下では顕著に遅延することが報告されている (Sakai 1959, Aulakh *et al.* 1992)。アンモニア態窒素の硝化は、土壌中における窒素動態を支配する重要な過程である。

ペンギン Spheniscidae、カモメ類 *Larus spp.* およびサギ類を含む数種の魚食性海鳥 (Ellis 2005) および河川や湖で餌をとるカワウの営巣地下の土壌表層 (Hobara *et al.* 2001, 2005, Ligeza & Smal 2003) には、窒素施肥が一般的な集約農業下の土壌にくらべて 2 ないし 3 桁も多い量の無機態窒素が含まれていることが多くの地域から報告されている。しかし、ここで注目しなければならないことは、これらの既往の研究を通覧すると、土壌試料の採取時期が任意であるために土壌に含まれる無機態窒素が鳥類の繁殖活動のどの時期に対応しているのか、言い換えれば鳥類の繁殖活動の進行と土壌中の無機態窒素の消長との関係が明確ではない点である。営巣地では、糞由来の窒素供給量が鳥類の繁殖活動に対応して大きく変動する。そのために、糞の供給量の違いが、生成される無機態窒素の動態に直接反映されると予測されるが、記載された内容からその関連情報を引き出すことは困難である。たとえば、孵化・雛の誕生後、水圏から巣の

周辺域に運び込まれる窒素量は、親鳥のみが居住する時期に比べて顕著に上昇するであろうし、反対に営巣活動が終了すると、窒素供給量が激減するだろう。したがって、集団で営巣する鳥類コロニー下の土壌中無機態窒素動態の解析にあたっては、巣作りの段階から巣立ちまで時系列で土壌試料を採取、分析する手法が有効である。しかし、これまでに、このような方向での解析例は知られていない。

生態系における窒素の流れを解析する手法として最近安定同位体比の利用が広く行われるようになってきた。鳥類学において、窒素の安定同位体比測定法は、これまで主として食性や渡りの経路の解析に使われてきた経緯がある (松原・南 1998)。魚食性鳥類営巣地では、しばしば非常に特異な好窒素性植物群落が優占する一方で (Ellis 2005)、増大するカワウやサギ類の形成するコロニーと植生との関係が地域の環境問題となって顕在化する例が出てきている。こうした環境における窒素の循環を解明するとともに、有効な解決策の構築の際にも、安定同位体測定法が有効な手段であることが示されている (松原・南 1998)。

Robinson (2001) の総説によれば、尿酸から尿素への変換過程においては、窒素同位体分別はわずかである。尿素の無機化によって生じる  $\text{NH}_4^+$  は、尿酸に比べて  $^{15}\text{N}$  が  $\delta^{15}\text{N}$  値表示で 0 から 5 ‰ 枯渇する。 $\text{NH}_4^+$  の硝化によって生じる  $\text{NO}_3^-$  は、無

機化過程とは明らかに異なり、基質の $\text{NH}_4^+$ に比べて $^{15}\text{N}$ が15から35%枯渇する。さらに、 $\text{NO}_3^-$ が脱窒によって窒素ガスへと変換されると、残存する $\text{NO}_3^-$ は $^{15}\text{N}$ が28から33%富化される。鳥糞尿酸の無機化、アンモニアから硝酸、さらには窒素ガスへの変換過程が同調して生じると、これらの無機態窒素は時間経過に伴って次第に同位体的に $^{15}\text{N}$ に富むようになることが予測される。

地球規模での窒素循環の過程で、アンモニアの揮散、硝化および脱窒に伴う窒素同位体分別係数は、たとえば生態系において「食うもの」と「食われるもの」との間で経験的に知られている濃縮係数(約3%)に比べると、優に1桁以上大きい。したがって、アンモニア態および共存する硝酸態窒素を化学的に単離して、それぞれについて安定同位体比を測定、同時に別途定量した無機態窒素含量の時系列変動と組み合わせると、鳥の繁殖活動の結果もたらされる窒素の土壌中での微細な動態を正確に理解することが可能となる。しかし、土壌試料に含まれる無機態窒素を化学的に抽出し、その同位体比を源試料から変化させることなく同位体比測定用試料へ変換・調整することは、技術的に容易ではないために(具体的には、Robinson, 2001が高揚しているように、試料の調整段階で蒸発、凝縮および還元のような同位体分別が著しい操作の過程が含まれるためである)、同位体地球化学専門の研究施設に身を置く限られた研究者によって解析が行われてきた経緯がある。たとえば、南極・ロス島のアデリーペンギン *Pygoscelis adeliae* および青森県八戸・蕪島のウミネコ *Larus crassirostris* 営巣地土壌について、

Mizutani & Wada (1985) および Mizutani *et al.* (1986) はアンモニアの揮散に基づく顕著に重い土壌アンモニア態窒素の報告がある。魚食性鳥営巣地土壌の多くで、アンモニア態に加えて相当量の硝酸態窒素が見出されるのが一般的である (Hobara *et al.* 2001, 2005, Ligeza & Smal 2003, 溝田未発表)。アンモニア態窒素は、生成されて順次硝化、さらには脱窒されるので、土壌中無機態窒素の動態解析にはアンモニア態と共存する硝酸態窒素の含量と同時に安定同位体比情報が不可欠である。それにもかかわらず、魚食性鳥類コロニー下の土壌に含まれるアンモニア態と共存する硝酸態窒素を分別し時系列で解析した研究報告は、著者らが知り得る限り存在しない。

本研究の目的は、カワウおよび数種のサギ類の繁殖地およびねぐら下にある土壌について、アンモニア態および硝酸態窒素含量および安定同位体比の時系列変動を地温の違いと鳥類の繁殖活動に注目しながら解析し、コロニーにおける鳥糞由来の窒素の変換過程を明らかにすることである。そのために、気温条件の異なる2カ所を選んで調査と解析を行った。

## 研究方法

### 1. 営巣地の概要

魚食性鳥類の繁殖地は日本各地に点在する。糞窒素の形態変化に及ぼす土壌温度の影響を評価するためには、繁殖期の初春から初夏にかけて高緯度域と低緯度域の両方から営巣地を選択することが重要である。加えて、繁殖地の土壌が安定した地

表 1. 森林の林冠に営巣する魚食性鳥類コロニーにおける糞フラックスの測定例  
Table 1. Estimation of fecal flux from the piscivorous bird colonies formed in forest canopy

| 優占鳥類<br>Major species             | 地域名<br>Location                   | 乾燥糞換算のフラックス (kg/ha/day)<br>Fecal flux (dry matter basis) |                                |   | 文献名<br>References                           |
|-----------------------------------|-----------------------------------|--|--------------------------------|---|---|
|                                   |                                   | 測定地点数<br>No. of study site                               | 変動範囲<br>Range of variation     | 平均値と標準偏差<br>Mean and standard deviation |   |
| ヒメクロアジサシ<br><i>Anous minutus</i>  | Heron Island,<br>Australia        | 5*   | 0.7~121<br>0.1~196<br>0.07~129 | 48±18<br>50±37<br>111±7                 | Allaway & Ashford (1984)                    |
| カワウ<br><i>Phalacrocorax carbo</i> | 滋賀県伊崎<br>Isaki, Shiga, Japan      | 36   | 0~168.8                        | 72±37                                   | 亀田ら (2002a)<br>Kameda <i>et al.</i> (2002a) |
| アオサギ<br><i>Ardea cinerea</i>      | 北海道厚岸<br>Akkeshi, Hokkaido, Japan | 3  | 3.0~181.7                      | 55±33                                   | Ueno <i>et al.</i> (2006)                   |

\*1月から9月まで3回測定した。

Three repeated estimation was made during January to September.

形面上にあることが必要である。この研究では、カワウとサギ類の分布と現地の環境情報を勘案して、以下に述べる2つの営巣地を選択した。以下に記載するカワウ営巣区、アオサギ営巣区およびゴイサギ営巣区は、それぞれカワウ、アオサギおよびゴイサギが集団で優占して営巣している領域を指す。

#### 1) 福島県本宮営巣地（北緯 37°29′，東経 140°24′，標高 210 m）

この営巣地は、阿武隈川中流域の河岸段丘上に位置している。営巣地全体の地形はほぼ平坦である。この営巣地については、これまで学術的な調査と研究は行われていない。栽植後 20 ないし 45 年経過したと推定されるスギ *Cryptomeria japonica* とニセアカシア *Robinia pseudoacacia* の造林地で、林床には背丈がほぼ 1 m のメダケ *Pleioblastus simonii* がまばらに生えている。本宮営巣地に隣接する住民からの情報によれば、およそ 2001 年頃からカワウとゴイサギがほぼ毎年繁殖している。営巣地は、現河川に沿ってほぼ 10 m の幅をもって帯状に、上流側にはカワウ、約 5 m の間隔をおいて下流側にゴイサギ、さらに 10 m 下流側には以前カ

ワウの営巣に伴って枯死したスギの枯損林と林床に密生した好窒素性植物のアレチウリ (*Sicyos angulatus*) と草丈 30 cm のメダケが続く。

カワウはニセアカシアの高木層の最上部を選んで4月初めに50個くらいの巣を作って産卵・繁殖する。カワウの雛が巣立った後は、個体数は減少する。しかし、一部の個体は、その後も一年を通してねぐらとしていることを確認している。ゴイサギは4月中ないし下旬に集団で飛来し、おおよそ500個、樹上の枝分かれ部分に営巣する。しかし、7月の末、雛の巣立ちが終わるとゴイサギの成鳥および幼鳥はともに営巣地から見られなくなり、営巣地土壌には糞窒素の供給が事実上停止する。

カワウ営巣地では、餌となった魚の吐き戻しを観察することはできなかったが、ゴイサギ営巣地ではドジョウ *Cobitis biwae* とアメリカザリガニ *Procambarus clarkii* 殻から構成されるペリットが散見された。2002年から2003年にわたって、本宮営巣地の近傍で、銃器を用いて捕獲されたカワウ32個体試料の胃内容物重量組成は、コイ *Cyprinus carpio*、フナ類 *Carassius* spp. およびウグイ *Leuciscus (Tribolodon) hakonensis* が全体の71%を占めた

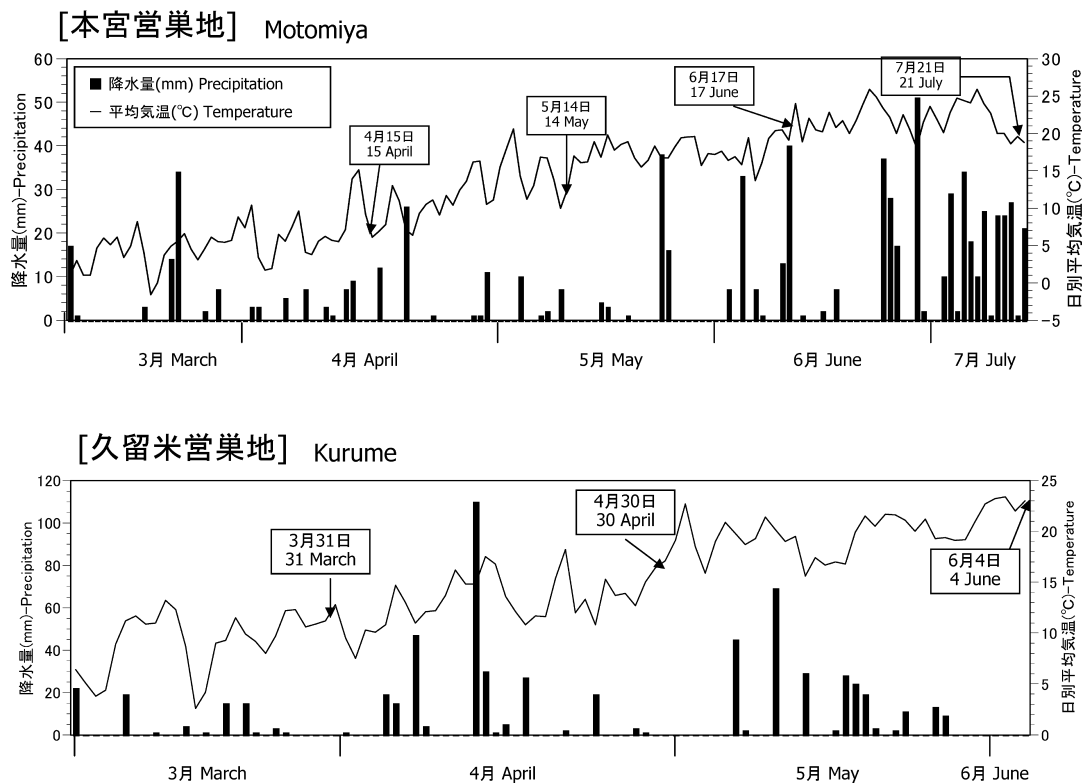


図2. 本宮および久留米営巣地の気象データ（日別平均気温と日別降水量、2006年）と土壌試料の採取日  
Fig. 2. Seasonal changes in air temperature and precipitation (2006) for two experimental sites relevant to the present study. Arrows indicate soil sampling date



(鈴木・廣瀬 2005).

本宮営巣地の土壌は、河川堆積物由来の弱湿性の褐色森林土である。土壌の容積重が0.85付近にあるために、母材に火山灰の混入が推定される。

## 2) 福岡県久留米市上津町営巣地 (北緯 33°17', 東経 130°32', 標高 30 m)

本営巣地は、高良台・更新世高位段丘の縁辺部に位置しクヌギ *Quercus acutissima* が優占し、これにアカマツ *Pinus densiflora* およびメダケ、一部にヒサカキ *Eurya japonica* などの照葉樹低木を交えている。付近の住民からの情報によれば、最初の営巣活動は2001年に始まったと推定される。久留米営巣地は、サギ類の個体数がかなり多く北九州地域で知られている最大規模の営巣地である。付近の森林内にカワウの営巣は認められない。先の本宮営巣地と同様に、これまでこの鳥集団の生態学的な調査研究は行われていない。

2月の終わり、クヌギの新葉が展開する前に、アオサギが飛来、150個体程のつがいが枯損状態の孤立木を選んで集団で巣作りと産卵を始める。クヌギの新葉の展開が終わった4月の末頃、ここにゴイサギの集団(200個体程)があらたに飛来して、先のアオサギの営巣地域と隣接するクヌギ純林で巣作りと産卵を始める。この営巣地では6月初めには少数のアマサギ *Bubulcus ibis* がゴイサギ営巣地内で混合して巣作りと産卵を行う。この頃になると、営巣地内林床の日当たりがよい場所では、好窒素植物であるヨウシュヤマゴボウ *Phytolacca americana* が新芽を出して旺盛に生長するのが観察される。アオサギ営巣区では、幼鳥および成鳥ともに7月初めに巣を離れ営巣地から見られなくなる。しかし少数は8月初旬まで夜間ねぐらとして利用した。ゴイサギ区では5月の終わりから6月の初め頃にかけて孵化、7月の終わりにはほとんどの個体が営巣地から見られなくなる。

2006年5月の初めの観察によれば、アオサギの雛が吐き戻したウグイ、ナマズ *Silurus asotus* およびフナ類(全長25cm内外)が林床に散見された。

調査域の基盤は、変成岩を多く含む分級の悪い腐朽円礫から構成されている。土壌は乾性の重粘な赤黄色土である。

## 2. 土壌の分析結果の表示方法

表1は、森林の林冠に営巣する数種の魚食性鳥類コロニーにおける糞フラックス(単位時間および単位面積当りの物質の供給量を指す)の測定結

果をまとめたものである。ゴイサギ営巣地についての測定報告はこれまで知られていない。カワウおよびサギ類の糞は、ペースト状を呈し付着性が強いために、乾燥した状態で糞トラップから定量的に分離して秤量することが困難である。そのために、既往においてこの種の鳥類糞フラックスの測定例は限られている。これらのデータから、コロニー内の採取地点間で糞供給量に著しい変動があることは明瞭である。したがって、糞の微生物分解に伴って生成する無機態窒素の含量も、コロニー内で変動することが予測される。このような場合の土壌試料の採取の際は、以下のような方法が一般的に行われる。①1つのコロニー内で、数カ所の表土を採取、混和して平均的な土壌試料1点について分析する手法。この方法によれば、試料の測定数は少ない反面、無機態窒素含量の水平分布について微細な変動状況が把握できない欠点がある。②数多くの土壌試料採取地点を設け分析、統計的な処理方法を併用して評価する。この方法は、それぞれの営巣地間の優位性と変動幅の評価に対しては有効である。しかし、限られた時間内に土壌に含まれる無機態窒素含量の測定と安定同位体比測定用の試料を調整するのに多大な時間、労力と経費を要する。加えて、土壌採取によって地表が攪乱される範囲が広くなり、時系列での解析が困難となる欠点がある。樹上に営巣する鳥の営巣地では本来、土壌への窒素付加量が時空分布的に均一ではないから(表1)、多くの繰り返し試料を採取して分析することは実際的には意義が少ない。この研究では、これらの方法の長所と短所を勘案して、許容しうる最大数の営巣地土壌を採取して化学分析と安定同位体比の分析を行わざるを得なかった。実際には以下に述べるように、異なる営巣区域内から数点、放棄区および非営巣区から各1試料を採取・分析し、結果を評価することにした。複数の反復採取を行った営巣区については、平均値と標準偏差を求めた。

## 3. 2006年における鳥類の繁殖活動と試料の採取時期の選定

土壌の表層に供給される糞窒素量は、鳥の営巣活動と密接に関係することはすでに述べた。ここでは、目視による鳥類の営巣活動および平均気温の推移を勘案しながら、土壌と糞試料の採取日を設定した。図2は、2つの営巣地における平均気温と日別降水量の推移を、最寄りの観測地点(本宮営巣地では三本木観測所、久留米営巣地では久

留米観測所)からの情報に基づいて作成し、これに試料の採取日を記入したものである。やや寒冷的な南東北地域に位置する本宮営巣地では、2006年4月15日に最初の採取、以後7月21日まで合計4回の採取を行った。5月14日と6月17日の採取日にはカワウおよびゴイサギ営巣区ともに林床植物の表面に顕著な量の糞が観察された。7月21日の採取日には、ゴイサギの繁殖活動はほぼ終了し、成鳥および幼鳥の数はわずかに10個体程度であった。通常、土壌の採取は、採取予定日までに7日間連続して、降水がない日を選択した。しかし、7月は降水日が多かったため、小雨の中で採取した。第1回目の試料を採取した4月15日頃は、平均気温が5°C前後であった。以降7月に向かって漸次上昇し、7月21日の段階では25°Cに近かった。

温暖な西南暖地に位置する久留米営巣地では、先の本宮営巣地に先行してアオサギの巣作りと産卵が2月下旬から始まり、個体数が順次増大した。第1回目の土壌試料採取は、アオサギの営巣が点的に行われている3月31日、ゴイサギの飛来と引き続いての巣作りと産卵が始まる4月30日、アオサギの雛が巣立ち始める6月4日の合計3回の採取を行った。温暖な気象環境を反映して、3月31日前後の平均気温は高く(10°C位)、以降漸次上昇して、6月4日には23°Cとなった。

営巣地でこれらの鳥類は特定の営巣木を選んで樹上に密接して巣を作る。その結果、糞窒素の供給は営巣木の周辺に局在すると推察される。加えて林木の空間配置が不均一であること、新しい葉や枝の展開によって地上の被覆状態が変化すること、およびつる性植物の繁茂の影響のために地上に落下する糞の供給・堆積は部分的に不均一になる。カワウは巣材として巣の周りの樹木の枝や葉を切り取るので、部分的に林冠が欠落している領域がある。林冠で覆われた土壌域と林冠が欠落して太陽光が林床に直接差し込む地点では表層土壌の温度条件に相違があると予測されるので、両方の地点を含むように採取地点を選定した。ここで、カワウ営巣区からは3ヶ所、サギ類の営巣区からは適宜2ないし6ヶ所、枯損木が広がる放棄区(本宮営巣地に限る)から1ヶ所、鳥営巣の来歴が全くない対照区として同じ段丘上のスギ造林地(本宮営巣地)、あるいは照葉樹群落(久留米営巣地)から選択した。採土地点の中心には白の防水ペンキを塗った標識板を設置し、時系列で土壌を採取する際に土壌の攪乱に加え、前回の採取地点

と重複しないようにとくに注意して識別した。土壌は、新鮮な落葉と落枝を取り除いた無機質土壌の表層部分について深さ10cmまでを採取した。土壌の試料採取と平行して、カワウとサギ類営巣区からそれぞれ林床植生の葉面に沈積した糞を葉とともに採取した。試料は実験室に持ち帰り、室内で十分に風乾した後葉の表面から脱離させ、メノウ製乳鉢中でよく磨砕して分析に供した。

#### 4. 窒素含量および安定同位体比の測定方法

本宮営巣地で採取した土壌試料は、化学実験室のある盛岡までできるかぎり迅速に運んだ後ステンレス製の方形容器中で腐朽した枝や葉、礫を取り除きよく反転混和し、指間で集合体を細かく粉砕した。土壌に含まれる無機態窒素は以下のような操作にしたがって抽出した。湿潤な生土試料40.0gを250ml容のプラスチック製広口瓶に秤取りし、2mol/l塩化カリウム溶液120mlを加え、15°Cの恒温条件下で1時間往復振とう、その後容器を5°Cの冷蔵庫中に1夜放置、上澄み液を分離した。清澄な抽出液を得るために、この上澄み液を回転数、毎分4000回の速さで30分間遠心分離した。久留米営巣区の土壌については、盛岡までの搬送中に土壌窒素の変質が懸念された。そこで土壌採取後ただちにプラスチック製皿の上に極薄く広げ、天日下で繰り返し反転、急速に脱水し、続いて2週間室内で風乾した。この土壌試料を盛岡に搬送した。その後、磁製乳鉢中で粉砕、孔径2mmの篩を通過させた。なお、結果の項に記載したように、この脱水処理中の窒素化合物の化学的な変質は無視しうるほど小さいことを予備実験によって確認した(結果の項に記載)。風乾細土10.0gの試料に2mol/l塩化カリウム溶液60mlを加え、先の本宮土壌と同様に無機態窒素を抽出した。別途、試料の一定量を磁製蒸発皿に秤取りし、105°Cの恒温乾燥器中で1昼夜放置した後、水分含量を求めた。

環境試料に含まれる無機態窒素の分別定量法および安定同位体比測定のための試料調整法は数多く報告されている。いずれの方法も長所と同時に短所も備えている。本研究では実験設備、労力および経費を勘案して以下のような方法を採用した。土壌試料の抽出液に含まれる無機態窒素の分別定量は、水蒸気蒸留(Kjeldhal distillation)、溜出アンモニア態窒素を混合指示薬(メチルレッドおよびプロモクレゾールグリーン)入り2%ホウ酸—水—エタノール混合液10mlで捕捉し、2.5mmol/l

硫酸溶液で滴定することによって求めた（土壌養分測定法委員会 1976）．硝酸態窒素は、アンモニア態窒素を完全に駆逐した蒸留器内の残液にデバルダー合金微細粉末（メルク社製，金属 Al-Cu-Zn の混合物で，アルカリ環境下において発生期の水素を発生する），50 mg を添加してアンモニアに還元した後，先と同様に蒸留と定量操作を継続して行った．無機態窒素の抽出から定量と同位体比測定用の試料調整までの間に予測される二次的な変質を考慮して，化学操作が2日以内に終了するように配慮した．Robinson (2001) の総説によれば，水蒸気蒸留法を使って，2 mol/l 塩化カリウム溶液のような高濃度塩類抽出液に含まれるアンモニアおよび硝酸態窒素の蒸留分離の過程においては，イオンや分子の揮散，凝縮および還元の化学操作過程を含むために，それぞれの過程でかなり大きな窒素同位体分別を伴うことが予測される．言い換えれば，抽出液からの無機態の回収が完全でないと大きな測定誤差を伴う．本研究では，試料に含まれるアンモニアおよび硝酸態窒素の回収率は，標準試薬を一定量溶解させた実験室標準液について，頻繁に定量操作を行い実験の精度を確認した．窒素として 1 mg までのアンモニア態および硝酸態窒素の回収率は，ここで開発した全実験過程において 99±1% であり，以下の同位体比測定のための試料調整に際して誤差が許容しうる範囲内にあることを確認している．さらに，同位体比測定で取り扱う試料窒素量が微量であるために，土壌の化学抽出に用いる試薬類（窒素を含まない高純度試薬を使用）およびガラス製蒸留装置

の接合材料由来（シリコンゴムを使用）のブランク窒素が極力ゼロに近づくよう配慮した．

窒素安定同位体比の測定は，Continuous flow type, isotope ratio mass spectrometer（略称 CF-IRMS），DELTA plus（Thermo Electron 社製）を用いて行った．アンモニア態および硝酸態窒素は，先の定量法に準じて得た溜出液 100 ml を 25 mmol/l 硫酸溶液 5 ml で捕捉した後，溜出液を電熱板上で濃縮，最終的に GF/F ガラス製濾紙とともに 50°C 恒温の乾燥器中で 1 昼夜乾燥後，硫酸アンモニウムとして回収し安定同位体比を測定した．測定に用いる窒素の量は，あらかじめ計算によって求め，適切なガラス繊維濾紙片試料量（窒素として 25 μg）を錫製試料容器に秤取った．同位体比の測定精度は，±0.2‰ である．測定試料について得られた窒素同位体比 ( $^{15}\text{N}/^{14}\text{N}$ ) は，一般に行なわれているように大気窒素 (=0‰) からの千分率偏差， $\delta^{15}\text{N}$  (‰) 値として表示した．

乾燥・調整が終了した排泄物試料中の窒素含量を求めるために，その一定量を秤取って，まず濃硫酸，ついで過酸化水素水 (35%) を用い，窒素化合物を硫酸アンモニウムに変換した．その後の窒素の定量分析操作は，先に述べた方法に準じた．なお，この方法では硝酸態窒素は評価されない．

### 分析結果および考察

#### 1. 土壌の脱水処理が無機態窒素含量および安定同位体比に与える影響

表 2 は，青森県八戸市蕪島のウミネコ営巣地の

表 2. 急速な脱水処理が営巣地土壌の無機態窒素含量および窒素安定同位体比に及ぼす影響

Table 2. Effects of quick dehydration on the content and the nitrogen isotope composition of inorganic nitrogen in colony soils

| 試料番号 | 試料の状態 Status of soil sample |                 |                                   |                 |
|------|-----------------------------|-----------------|-----------------------------------|-----------------|
|      | 現場新鮮土壌 Fresh soil           |                 | 急速に脱水後の試料 After quick dehydration |                 |
|      | $\text{NH}_4^+$             | $\text{NO}_3^-$ | $\text{NH}_4^+$                   | $\text{NO}_3^-$ |
| 1    | 470 (+42.7)                 | 10 (+3.5)       | 470 (+41.6)                       | 10 (+4.2)       |
| 2    | 520 (+29.9)                 | 20 (-0.7)       | 500 (+31.0)                       | 30 (-0.8)       |
| 3    | 540 (未測定 ND)                | 32 (未測定 ND)     | 530 (未測定 ND)                      | 30 (未測定 ND)     |
| 4    | 630 (+16.2)                 | 50 (+9.0)       | 620 (+17.5)                       | 50 (+8.8)       |

土壌試料は 2005 年 4 月 8 日に青森県八戸市の蕪島ウミネコ営巣地の表層（0~10 cm 深）から採取した．数値は各無機態窒素の含量（mg-N/kg 105°C 乾燥土壌換算値），およびカッコ内は安定同位体比（千分率表示）を示す．

Soil samples were collected from the Kabushima (0 to 10 cm deep) under Black-tailed Gull (*Larus crassirostris*) colony on 8 April, 2005. Numbers indicate the amounts of inorganic nitrogen (mg-N/kg dry soil) and nitrogen isotopic signature (in parenthesis, per mil notation). ND: not determined.



表 3. 糞試料の窒素含量および窒素安定同位体比

Table 3. Nitrogen content and stable isotopic composition of feces samples

| 営巣地名<br>Colony | 採取日 (2006 年)<br>Date of sampling | 主要な鳥類<br>Breeding species                | 窒素含量(%)<br>Nitrogen content | 安定同位体比<br>$\delta^{15}\text{N}$ (‰) |
|----------------|----------------------------------|--|-----------------------------|-------------------------------------|
| 本宮<br>Motomiya | 4 月 15 日 15 April                | カワウ <i>Pharacrocorax carbo</i>           | 14.0                        | +12.3                               |
|                |                                  | ゴイサギ <i>Nycticorax nycticorax hoacth</i> | 19.9                        | +9.9                                |
|                | 5 月 14 日 14 May                  | カワウ <i>Pharacrocorax carbo</i>           | 19.0                        | +8.1                                |
|                |                                  | ゴイサギ <i>Nycticorax nycticorax hoacth</i> | 23.7                        | +8.1                                |
|                | 6 月 17 日 17 June                 | カワウ <i>Pharacrocorax carbo</i>           | 14.0                        | +11.3                               |
|                |                                  | ゴイサギ <i>Nycticorax nycticorax hoacth</i> | 3.5                         | +9.5                                |
|                | 7 月 23 日 23 July                 | カワウ <i>Pharacrocorax carbo</i>           | 19.1                        | +6.9                                |
|                |                                  | ゴイサギ <i>Nycticorax nycticorax hoacth</i> | 1.7                         | +11.8                               |
| 久留米<br>Kurume  | 3 月 31 日 31 March                | アオサギ <i>Ardea cinerea</i>                | 14.0                        | +12.7                               |
|                | 4 月 30 日 30 April                | アオサギ <i>Ardea cinerea</i>                | 20.2                        | +13.2                               |
|                |                                  | ゴイサギ <i>Nycticorax nycticorax hoacth</i> | 18.6                        | +12.5                               |
|                | 6 月 4 日 4 June                   | アオサギ <i>Nycticorax nycticorax hoacth</i> | 14.0                        | +8.2                                |
|                |                                  | ゴイサギ <i>Nycticorax nycticorax hoacth</i> | 14.0                        | +7.8                                |

新鮮土壌と急速な脱水処理を行った試料について、無機態窒素含量および安定同位体比を測定、比較したものである。ここで新鮮土壌と脱水処理土壌試料間の測定値の差異は、測定誤差を考慮すれば無視しうるほど小さい。多様な土壌試料から得られたデータの総括結果 (Aulakh *et al.* 1992) によれば、現場土壌の水分含量を最大容水量の 30% 以下にまで減少させると、アンモニア化および硝化は最適な条件に比べて 30% 以下にまで低下する。加えて Mizutani *et al.* (1986) によれば、日本の魚食性鳥類営巣地土壌の風乾処理はアンモニア態窒素の含量と同位体比にほとんど影響しない。本研究で得られた結果は、これら既往の成果と調和的である。

## 2. カワウおよびサギ類糞の窒素含量と安定同位体比

本宮および久留米営巣地において時系列で採取した糞試料 (数ヶ所の地点から採取した糞の混合試料) の窒素含量および安定同位体比を表 3 に示した。

試料の採取地点が内陸にあるために、これらの営巣地の鳥類は、海産魚類をほとんど摂食していないものと思われる。ここで分析された 13 点の糞試料の窒素含量は、2 点を除いて 14 から 24% の範囲にあって窒素に富むと評価される。しかし、6 月 17 日と 7 月 23 日、本宮営巣地で採取されたゴイサギの糞窒素はこれらに比べると明瞭に低かった (3.5% および 1.7%)。これらの 2 試料の糞は全

体的に暗灰色であることに加えて、窒素分析の際の硫酸分解液が赤褐色に着色する事実 (多量の鉄の存在) に基づいて、糞に土壌や泥質堆積物が混入していると推定された。この時期、ゴイサギが餌動物とともに泥質の土壌や堆積物を一緒に飲み込むためと推定される。ゴイサギは夜間に摂食行動をすることが多い (Endo *et al.* 2006) ために、本宮営巣地の 6 月から 7 月頃の実際の餌資源について採食現場の情報を得ることはできなかった。

2 地域の営巣地で採取した糞試料の  $\delta^{15}\text{N}$  値は高かった (本宮営巣地: +7 から +12‰, 久留米営巣地: +8 から +13‰ の変動範囲)。この分析結果は、魚食性鳥類が食物連鎖の上位にあることを反映している (Koch *et al.* 1994)。久留米営巣地で採取したサギ類の糞窒素含量と安定同位体比は、優占する鳥の種に関係なく相互に類似していた。久留米営巣地では、繁殖期間中のアオサギとゴイサギの餌動物が類似しているものと推察した。これらの両種は、営巣地の北部を東から西方向へと流れる上津荒木川の浅瀬で摂食していることが確認できた。本宮営巣地の糞の  $\delta^{15}\text{N}$  値は、一定の時系列変動は認められないが、久留米の試料については 3 月から 6 月初めに向かって  $\delta^{15}\text{N}$  値がやや低下する傾向が認められた。この傾向は、餌となった魚種を反映すると推察されるが、吐き戻し魚に基づく摂食魚種の同位体情報は得ることはできなかった。



表 4. 土壤に含まれるアンモニア態および硝酸態窒素の時系列変動  
Table 4. Temporal changes in the concentration of inorganic nitrogen in soils

| 営巣地名<br>Colony  | 地点・区名<br>Location・site                         | 土壤試料<br>採取日<br>Date of sampling |                      | 試料数<br>No. of<br>sample | 無機態窒素含量 (mg-N/kg 乾土)<br>Content of inorganic nitrogen<br>(mg-N/kg dry soil) |              |                              |              | 硝化率 <sup>1)</sup><br>Rate of<br>nitrification (%) |
|-----------------|--|---------------------------------|----------------------|-------------------------|---|--------------|------------------------------|--------------|---|
|                 |  |                                 |                      |                         | NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>  |              | NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> |              |   |
|                 |  |                                 |                      |                         | 平均値<br>Mean   | 標準偏差<br>S.D. | 平均値<br>Mean                  | 標準偏差<br>S.D. |   |
| 本宮<br>Motomiya  | カワウ営巣区<br>Cormorant colony                     | 4月15日<br>15 April               | 3                    | 1030                    | 180   | 130          | 50                           | 11           |   |
|                 |  | 5月14日<br>14 May                 | 3                    | 3590                    | 2820  | 1590         | 890                          | 31           |   |
|                 |  | 6月17日<br>17 June                | 3                    | 1800                    | 930   | 580          | 610                          | 24           |   |
|                 |  | 7月23日<br>23 July                | 3                    | 230                     | 170   | 110          | 60                           | 32           |   |
|                 | ゴイサギ営巣区<br>Black-crowned<br>Night Heron colony | 4月15日<br>15 April               | 3                    | 260                     | 220   | 80           | 60                           | 24           |   |
|                 |  | 5月14日<br>14 May                 | 4                    | 420                     | 30  | 530          | 470                          | 56           |   |
|                 |  | 6月17日<br>17 June                | 4                    | 1290                    | 630   | 400          | 190                          | 24           |   |
|                 |  | 7月23日<br>23 July                | 4                    | 80                      | 70  | 110          | 40                           | 58           |   |
|                 | 放棄区<br>Abandoned                               | 4月15日<br>15 April               | 未採取<br>Not collected |                         |   |              |                              |              |   |
|                 |  | 5月14日<br>14 May                 | 1                    | 70                      |   | 110          |                              | 59           |   |
|                 |  | 6月17日<br>17 June                | 1                    | 110                     |   | 100          |                              | 48           |   |
|                 |  | 7月23日<br>23 July                | 1                    | 30                      |   | 80           |                              | 75           |   |
| 非営巣区<br>Control | 4月15日<br>15 April                              | 1                               | 30                   |                         | 30  |              | 52                           |              |   |
|                 | 5月14日<br>14 May                                | 1                               | 40                   |                         | 30  |              | 45                           |              |   |
|                 | 6月17日<br>17 June                               | 1                               | 90                   |                         | 70  |              | 44                           |              |   |
|                 | 7月23日<br>23 July                               | 1                               | 10                   |                         | 20  |              | 58                           |              |   |
| 久留米<br>Kurume   | アオサギ営巣区<br>Grey Heron colony                   | 3月31日<br>31 March               | 5                    | 340                     | 170   | 490          | 290                          | 59           |   |
|                 |  | 4月30日<br>30 April               | 6                    | 710                     | 570   | 1450         | 280                          | 67           |   |
|                 |  | 6月4日<br>4 June                  | 6                    | 760                     | 670   | 1450         | 880                          | 66           |   |
|                 | ゴイサギ営巣区<br>Black-crowned<br>Night Heron colony | 3月31日<br>31 March               | 未営巣<br>Not collected |                         |   |              |                              |              |   |
|                 |  | 4月30日<br>30 April               | 2                    | 190                     |   | 250          |                              | 56           |   |
|                 |  | 6月4日<br>4 June                  | 2                    | 420                     |   | 600          |                              | 59           |   |
| 非営巣区<br>Control | 3月31日<br>31 March                              | 1                               | 20                   |                         | 未検出<br>ND   |              | 100                          |              |   |
|                 | 4月30日<br>30 April                              | 1                               | 20                   |                         | 30  |              | 62                           |              |   |
|                 | 6月4日<br>4 June                                 | 1                               | 30                   |                         | 30  |              | 46                           |              |   |

1). 全無機態窒素含量 (平均値) に占める硝酸態窒素の百分率  
Percentage of nitrate-nitrogen relative to whole inorganic nitrogen content

### 3. 営巣地土壤中の無機態窒素含量

2 地点の営巣地土壤に含まれる平均無機態窒素の含量は、先に述べた糞フラックスの空間的および時期的な変動を反映して顕著に変動した (表 4)。いずれの採取時期においても、放棄区および非営巣区土壤に含まれる無機態窒素の含量は、対応する営巣区土壤に比較して顕著に低かった。まず、本宮営巣地のカワウ営巣区では、アンモニア

態窒素の含量 (以下に記載する無機態窒素含量の表示はすべて 105°C 乾燥土壤基準) は、230 mg/kg から 3590 mg/kg、共存する硝酸態窒素の含量は、110 mg/kg から 1590 mg/kg の範囲にあった。隣接するゴイサギ営巣区に含まれる無機態窒素の含量は、カワウ営巣区に比較してやや低かった (アンモニア態および硝酸態窒素がそれぞれ、80 mg/kg から 1290 mg/kg と 80 mg/kg から 400 mg/kg)。

久留米営巣地のアオサギ営巣区土壤中のアンモ

ニア態窒素と共存する硝酸態窒素の含量は、それぞれ 340 mg/kg から 760 mg/kg と 280 mg/kg から 880 mg/kg の範囲で変動した。アオサギより 1 月遅れて営巣活動を開始したゴイサギ区では、アンモニア態および硝酸態窒素の含量は、それぞれ 190 mg/kg から 420 mg/kg および 250 mg/kg から 600 mg/kg の範囲で変動した。

#### 4. 無機態窒素の安定同位体比

カワウとサギ類営巣地土壤に含まれるアンモニ

ア態および硝酸態窒素の窒素安定同位体比は、隣接する営巣放棄区および非営巣区に比較して特異な値を示すものが多かった (表 5)。本宮営巣地のカワウ営巣区土壤に含まれるアンモニア態窒素の同位体比は +30 から +48%，共存する硝酸態窒素は +14 から +24% の範囲で変動した。本宮・ゴイサギ営巣区土壤に含まれるアンモニア態と共存する硝酸態窒素の窒素安定同位体比は、それぞれ +19 から +27% と -2 から +19% の範囲にあった。さらに、久留米営巣地のアオサギ営巣区

表 5. 土壤に含まれるアンモニア態および硝酸態窒素の安定同位体比の時系列変動  
Table 5. Temporal changes in the nitrogen isotopic signature of inorganic nitrogen in soils

| 営巣地名<br>Colony                                 | 地点・区名<br>Location・site                         | 採取日 (2006)<br>Date of sampling |          | 試料数<br>No. of sample | 安定同位体比 ( $\delta^{15}\text{N}$ , ‰)<br>Nitrogen isotope ratio |             |                        |      |
|--|--|--------------------------------|----------|----------------------|---|-------------|------------------------|------|
|  |  |                                |          |                      | $\text{NH}_4^+$   |             | $\text{NO}_3^-$        |      |
|  |  |                                |          | 平均値<br>Mean          | 標準偏差<br>S.D.  | 平均値<br>Mean | 標準偏差<br>S.D.           |      |
| 本宮<br>Motomiya                                 | カワウ営巣区<br>Cormorant colony                     | 4月15日                          | 15 April | 3                    | +31.4   | 1.8         | +13.5                  | 2.0  |
|  |  | 5月14日                          | 14 May   | 3                    | +29.6   | 5.1         | +13.7                  | 2.6  |
|  |  | 6月17日                          | 17 June  | 3                    | +41.3   | 1.4         | +21.6                  | 6.5  |
|  |  | 7月23日                          | 23 July  | 3                    | +48.0   | 8.0         | +23.7                  | 9.1  |
| ゴイサギ営巣区<br>Black-crowned<br>Night Heron colony | ゴイサギ営巣区<br>Black-crowned<br>Night Heron colony | 4月15日                          | 15 April | 3                    | +19.0   | 3.1         | -2.1                   | 2.4  |
|  |  | 5月14日                          | 14 May   | 4                    | +25.3   | 3.7         | +4.0                   | 4.5  |
|  |  | 6月17日                          | 17 June  | 4                    | +26.9   | 3.8         | +11.0                  | 6.2  |
|  |  | 7月23日                          | 23 July  | 4                    | +27.8   | 8.0         | +19.1                  | 8.2  |
| 放棄区<br>Abandoned                               | 放棄区<br>Abandoned                               | 4月15日                          | 15 April | 未採取                  | Not collected   |             |                        |      |
|  |  | 5月14日                          | 14 May   | 1                    | +2.0  |             | +3.1                   |      |
|  |  | 6月17日                          | 17 June  | 1                    | +6.9  |             | +4.8                   |      |
|  |  | 7月23日                          | 23 July  | 1                    | +9.7  |             | +6.4                   |      |
| 非営巣区<br>Control                                | 非営巣区<br>Control                                | 4月15日                          | 15 April | 1                    | +0.8  |             | -3.7                   |      |
|  |  | 5月14日                          | 14 May   | 1                    | +8.3  |             | -3.2                   |      |
|  |  | 6月17日                          | 17 June  | 1                    | +9.6  |             | -2.5                   |      |
|  |  | 7月23日                          | 23 July  | 1                    | +3.0  |             | -3.1                   |      |
| 久留米<br>Kurume                                  | アオサギ営巣区<br>Grey Heron colony                   | 3月31日                          | 31 March | 5                    | +26.3   | 3.4         | +3.8                   | 4.0  |
|  |  | 4月30日                          | 30 April | 6                    | +29.9   | 7.2         | +26.1                  | 10.0 |
|  |  | 6月4日                           | 4 June   | 6                    | +30.8   | 8.7         | +31.4                  | 8.3  |
| ゴイサギ営巣区<br>Black-crowned<br>Night Heron colony | ゴイサギ営巣区<br>Black-crowned<br>Night Heron colony | 3月31日                          | 31 March | 未営巣                  | Not arrived   |             |                        |      |
|  |  | 4月30日                          | 30 April | 2                    | +19.5   |             | +4.5                   |      |
|  |  | 6月4日                           | 4 June   | 2                    | +24.8   |             | +23.1                  |      |
| 非営巣区<br>Control                                | 非営巣区<br>Control                                | 3月31日                          | 31 March | 1                    | +0.3  |             | 未測定 <sup>1)</sup> N.D. |      |
|  |  | 4月30日                          | 30 April | 1                    | -2.4  |             | -0.6                   |      |
|  |  | 6月4日                           | 4 June   | 1                    | +1.9  |             | -3.2                   |      |

1). 土壤に硝酸態窒素が含まれていないために、測定ができなかった。  
Isotopic measurement could not run due to absence of nitrate-nitrogen in the soil.

土壌に含まれるアンモニア態と硝酸態窒素の窒素安定同位体比は、それぞれ +26 から +31%、および +4 から +31% の範囲で変動した。ゴイサギ営巣地土壌に含まれるアンモニア態と硝酸態窒素は、隣接するアオサギ区の無機態窒素とほぼ比較しうる変動の範囲にあった（それぞれ +20 から +25% および +5 から +23%）。

### 総合考察

#### 1. 土壌温度の上昇と鳥類の繁殖活動に伴う土壌無機態窒素含量の時系列変動

##### 1) 本宮営巣地

まず、本宮営巣地土壌に含まれる無機態窒素の時系列変動について、カワウ営巣区、ゴイサギ営巣区、放棄区および非営巣区に区分して分析結果の考察を進める。この研究で取り扱った魚食性鳥類の営巣地土壌に含まれる顕著に高い無機態窒素含量は、鳥類の営巣活動に伴って水圏から森林生態系に搬入される窒素量が多いためと解釈される。これと類似の高いアンモニア態と硝酸態窒素含量は、青森県八戸市蕪島のウミネコ営巣地土壌についても確認されている（溝田 未発表）。

表4に示された大きな標準偏差から、1つの営巣区内で形態別無機態窒素の含量は著しく変動することが明らかである。4月15日に採取されたカワウ営巣区土壌中の平均アンモニア態窒素は、1030 mg/kg であったが、共存する硝酸態窒素はこれより1桁程低かった（130 mg/kg）。同じ日に採取したゴイサギ区土壌は、カワウ区土壌に比べて明らかにアンモニア態窒素が少なかった（260 mg/kg）。両土壌ともにアンモニア態窒素の含量は、共存する硝酸態窒素の含量（それぞれ 130 mg/kg と 80 mg/kg）より高かった。

5月初旬は、カワウの雛の成長期に相当する。この時期は、雛の誕生に伴ってカワウの個体数が増大する（1巣あたりの平均的な雛数は3ないし4個体）ことに加えて、雛が成長するに要する栄養が短期間に巣に運び込まれる結果、巣の周辺土壌に搬入される糞窒素が増大する。5月14日に採取されたカワウ営巣区土壌に含まれるアンモニア態窒素の含量（3600 mg/kg）は、そのことを反映して、先行する4月15日採取の土壌に比較して4倍程高かった。4月15日に比べて、カワウ営巣区土壌中の硝酸態窒素含量（1590 mg/kg）が、明瞭に増大する傾向がみられた。カワウより遅れて営巣活動を展開したゴイサギ営巣区土壌についても、カワ

ウ営巣区と同様に4月の採土期に比較してアンモニア態（420 mg/kg）および硝酸態窒素（530 mg/kg）ともに増大した。5月の初旬は、それまで低い土壌温度条件によって抑制されていた硝化活性（臨界点温度 5°C）が活発な硝化温度域（15°C）（Sakai 1959）に移行する段階に相当する。

6月17日に採取されたカワウ営巣区土壌中のアンモニア態窒素含量（1800 mg/kg）と硝酸態窒素含量（580 mg/kg）は、雛の1部が巣立つたことに連動して、先行する5月14日より明瞭に減少する傾向がみられた。これに対してゴイサギ営巣区土壌は、雛の誕生と成長期に相当するために、アンモニア態窒素の含量（1290 mg/kg）は同じ採取日のカワウ営巣区の値と比較しうる程高い値まで上昇した。6月17日に採取された両営巣区土壌のアンモニア態窒素含量は、共存する硝酸態窒素（580 mg/kg と 400 mg/kg）より明瞭に高かった。

7月23日土壌を採取した当日は、わずかな数のカワウとゴイサギ（20個体程度）が営巣地で観察された。土壌中の無機態窒素含量（カワウ営巣区のアンモニア態窒素；230 mg/kg、硝酸態窒素；110 mg/kg、ゴイサギ営巣区土壌中のアンモニア態窒素；80 mg/kg、硝酸態窒素；110 mg/kg）は、先行する数カ月間に採取されたものに比較して顕著に低かった。この減少した無機態窒素含量は、カワウおよびゴイサギの雛が巣立ち、親鳥の一部も営巣地から見られなくなったため糞として供給される窒素の絶対量が低下したことに起因すると解釈される。加えて、土壌に含まれる無機態窒素のうち、とくに土壌吸着がほとんど起こらない硝酸態窒素のかなりの部分は、7月初めから継続した降水（図2）による洗脱によって土壌系外に流出したものと推定される。

2006年、本宮営巣地で観察された無機態窒素の含量は、既往に各地で報告されているカワウおよびサギ類の営巣地土壌の結果に比較してどのような意味をもっているのか考察した。1999年8月、滋賀県琵琶湖・伊崎半島のカワウ営巣地の表層土壌では、アンモニア態および硝酸態窒素がそれぞれ  $480 \pm 290$  mg/kg、 $170 \pm 50$  mg/kg であった（Hobara *et al.* 2001）。同じ地域について2000年6月採取の試料では、それぞれ  $670 \pm 200$  mg/kg、 $280 \pm 60$  mg/kg であった。加えて2000年5月、琵琶湖・竹生島のカワウ営巣地下土壌ではそれぞれ  $440 \pm 40$  mg/kg と  $30 \pm 70$  mg/kg であった（Hobara *et al.* 2005）。さらに、冷涼な気温条件下のポーランド北部のカワウ営巣区では、アンモニア態および硝酸態窒素



含量（土壌の採取時期が原著に記載されていない）が、それぞれ 150 mg/kg と 350 mg/kg、一方アオサギ営巣区ではそれぞれ 50 mg/kg と 40 mg/kg であった (Ligeza & Smal 2003)。これらの報告された値に比較すると、本宮営巣地土壌に含まれる無機態窒素の含量は明瞭に高いと評価される。

硝化に及ぼすいくつかの重要な環境要因のうち、土壌温度の時系列変動の影響はすでに考察した。アンモニア態窒素の濃度は、硝化を規制するもうひとつの重要な要因である。異なる濃度のアンモニア態窒素を含む液体培地中でアンモニア酸化菌を生育させた室内実験の結果によれば、500 mg-N/l より高濃度のアンモニア態窒素は顕著に硝化を抑制する (Harada & Kai 1968)。ここで表 4 の右端カラムに硝化率（全無機態窒素に占める硝酸態窒素の割合）の時系列変動を示した。カワウ営巣区は全観測期間を通して 11 から 32% と硝化率が低かった。これに対してゴイサギ営巣区では 6 月 17 日の 24% を除くと土壌温度の低い 4 月 15 日 (24%) から高温期に移行した 7 月 23 日 (58%) にかけて硝化の段階的な進行が認められた。カワウ営巣区の低い硝化率（11 から 31%）および 6 月 17 日採取のゴイサギ営巣区で観察された低い硝化率 (24%) は、土壌に含まれる高いアンモニア態窒素（カワウ営巣区：1030 mg/kg から 3590 mg/kg、ゴイサギ営巣区：1290 mg/kg）による硝化抑制効果と解釈される。

鳥糞由来の窒素は繁殖行動に伴って短い期間中に大量に土壌に供給される。この過程には、他の環境とは異なる特異な土壌微生物が関与している（たとえば、Osono *et al.* 2002, 2006）と推察されるが系統的な解析はほとんど行われていない。とくに糞の主要な窒素成分である尿酸の無機化および硝化と脱窒を主導する微生物群の生理的な特性と分子系統解析は今後の進展が要求される研究課題の 1 つである。

## 2) 久留米営巣地

表 4 に久留米営巣地土壌に含まれる無機態窒素含量の時系列変動を示す。さきに述べた本宮営巣地と類似して、久留米営巣地のサギ類営巣区土壌には、非営巣区土壌に比較して顕著に高い無機態窒素が見出された。久留米営巣地土壌中の無機態窒素の含量については、先の本宮営巣地・カワウ営巣区のような顕著に高いアンモニア態窒素が、全観測期間にわたって認められなかった。カワウは、1 日当たりおおよそ 500 g の餌を摂食する（亀

田ら 2002b）。堀・長谷川 (2005) によれば、アオサギの 1 日当たりの摂食量は、カワウよりやや少なく 470 g と報告されている。営巣期に巣の周辺に集中して排泄される糞の量がカワウで多いことおよび 1 本の営巣木に数個の巣が形成されていることが、カワウ営巣地土壌中の顕著な無機態窒素含量に反映されていると推察される。

久留米営巣地土壌が、先に述べた本宮営巣地土壌と異なる際立った特徴として、全採取期を通して硝酸態窒素量が共存するアンモニア態窒素含量を凌駕するか、あるいは同程度であることである。言い換えれば、この 2 つの営巣地間に認められる無機態窒素動態の相違は、高い土壌温度が 3 月末から経過した久留米営巣地では、やや涼しい気象条件にある本宮営巣地に比べて硝化活性が高いことに起因していると解釈される。

3 月 31 日採取のアオサギ営巣区土壌に含まれるアンモニア態窒素の含量は、340 mg/kg、共存する硝酸態窒素の含量は 490 mg/kg であった。ついで 4 月 30 日に採取されたアオサギ営巣地土壌に含まれるアンモニア態窒素の含量は、710 mg/kg であり、共存する硝酸態窒素は、1450 mg/kg であった。これらの含量は、先行する 3 月 28 日採取の土壌に比べて明らかに高い傾向にある。この高い無機態窒素含量は、アオサギ雛の誕生と成長期に対応しているために糞窒素の供給量が増大したためと考えられる。4 月の後半に飛来・産卵するゴイサギ営巣区土壌に含まれるアンモニア態窒素および硝酸態窒素の含量は、それより以前から営巣活動を継続しているアオサギ区に比較していずれも低かった（それぞれ 190 mg/kg と 250 mg/kg）。

6 月 4 日に採取されたアオサギ営巣区土壌試料中の無機態窒素の含量は、先行する 4 月 30 日とほぼ比較しうる値を示した（アンモニア態窒素含量；760 mg/kg、共存する硝酸態窒素含量；1540 mg/kg）。同じ採取日のゴイサギ営巣区土壌についてのアンモニア態と硝酸態窒素含量は、それぞれ 420 mg/kg と 600 mg/kg であった。ゴイサギ雛の成長期であることを反映して、先行する 4 月 30 日採取土壌に比べて、この時期に窒素含量が増大する傾向がみられた。

## 2. 土壌温度の上昇と鳥類の繁殖活動に伴う無機態窒素 $\delta^{15}\text{N}$ 値の時系列変動

いずれの営巣地についても営巣放棄区と非営巣区土壌に含まれるアンモニアおよび硝酸態窒素の  $\delta^{15}\text{N}$  は、0‰ 付近に集中し営巣活動が顕著な区域

の値とは明瞭に異なっていた。

### 1) 本宮営巣地

カワウ営巣区土壌に含まれるアンモニア態窒素の安定同位体比（以下、平均の  $\delta^{15}\text{N}$  値で示す）は、+30 から +48‰ の範囲で変動し、6月中旬から7月下旬の土壌温度の上昇に対応して上昇する傾向が認められた。カワウ糞の  $\delta^{15}\text{N}$  値は +7 から +12‰ であることから（表3）、糞窒素のアンモニア化に伴って明瞭な同位体分別が起こったことが推察される。ここで、営巣区土壌で観察される高い  $\delta^{15}\text{N}$  値は、尿素（尿酸の中途分解産物、図1）の分解によって土壌の表面で生じるアンモニアの一部が、 $^{14}\text{NH}_3$  分子として選択的に揮散し、反対に残留するアンモニア態窒素が  $^{15}\text{N}$  に富化される結果と解釈される。Robinson (2001) が取りまとめた資料（統計熱力学的理論計算、実測値および経験値）によれば、アンモニアの揮散に伴う動力学的窒素同位体分別は、40 ないし 60‰ にも及ぶ。

食性を異にする数種の鳥の新鮮な糞は、尿素や尿酸態窒素に比較しうほどのアンモニア態窒素を含むことが報告されている (Prest & Beuchat 1997, Schmit *et al.* 2004)。ここで取り扱ったカワウやサギ類の新鮮糞にアンモニア態窒素がどれほど含まれているのか測定を行っていないので、その含量の評価はできない。しかし、カワウとサギ類の糞窒素の含量が植物食鳥類に比べて一般的に高いことから、この研究で取り扱った鳥糞においてもアンモニア態窒素優占の可能性は無視できない。したがって、ここで観察された高い土壌アンモニア態窒素の同位体比は、糞に本来含まれていたアンモニア態窒素に加えて、有機態窒素の無機化に伴って生成したアンモニア態窒素が揮散された結果に基づくものと推察される。

カワウ営巣区土壌中のアンモニア態窒素と共存する硝酸態窒素の  $\delta^{15}\text{N}$  値は、+14 から +24‰ の範囲にあり、アンモニア態窒素と同様な時系列上昇傾向を示した。これらの高い無機態窒素の  $\delta^{15}\text{N}$  値は、一般的な森林生態系 (Nadelhoffer & Fry 1994) ではほとんど観察されない。この特異な動力学的窒素の同位体分別現象は、魚食性鳥類の糞が一般的に窒素に富んでいることに加えて、繁殖期に糞窒素の供給が狭い空間領域に集中するためと推察される。

ゴイサギ営巣区土壌に含まれるアンモニア態窒素の  $\delta^{15}\text{N}$  値は +19 から +28‰ の範囲にあり、隣接するカワウ営巣区と比較するとやや低い傾向が

見られた。ゴイサギの糞  $\delta^{15}\text{N}$  値は、+8 から +12‰ の範囲であるから、先に記載したカワウ営巣区土壌と同様に糞窒素のアンモニア化に伴って動力学的な同位体分別が起きたと解釈される。6月17日および7月23日に採取された土壌中アンモニア態窒素の  $\delta^{15}\text{N}$  値 (+27 と +28‰) は、カワウ営巣区のような顕著な上昇傾向とは異なりわずかな上昇にとどまった。同じ日に採取されたゴイサギ糞の窒素含量は顕著に低かった (1.7 と 3.5%, 表3) ので、これらのやや低いアンモニア態窒素の  $\delta^{15}\text{N}$  比は、ゴイサギ糞窒素のフラックスが6から7月にかけて低下したことに起因すると解釈した。

ゴイサギ営巣区土壌に含まれる硝酸態窒素の  $\delta^{15}\text{N}$  値は、4月15日の -2‰ から7月23日の +19‰ に向けて急速に上昇した。

アンモニア態と共存する硝酸態窒素の安定同位体比を相互に比較することによって、土壌中で進行している無機態窒素の動態を評価することが可能である（計算値は表示していない）。7月23日ゴイサギ営巣区の土壌試料 (9‰) を除けば、全観測期間中の営巣区土壌に含まれるアンモニア態と硝酸態窒素のみかけの分別値（アンモニア態窒素の平均  $\delta^{15}\text{N}$  値から共存する硝酸態窒素の平均  $\delta^{15}\text{N}$  値を差し引いた値）は、16 から 24‰ の範囲にあった。これらの値は、既往において硝化の際に観察される窒素同位体分別値（15 から 35‰ の範囲；Robinson 2001）に一致する。したがって、本宮営巣区では無機化に伴う一部のアンモニアの揮散および生成したアンモニア態窒素の硝化過程が定常的に進行していることが推察される。しかし、7月23日ゴイサギ区から採取された土壌中のアンモニア態と共存する硝酸態窒素のみかけの同位体分別値は9‰であり、ほかの観察期間と比較して明瞭に低い。このやや低いみかけの窒素同位体分別値は、7月下旬ゴイサギが営巣地から見られなくなることに伴い土壌に供給される糞窒素の減少およびゴイサギ糞に含まれる窒素量が顕著に低い（表3）ために、アンモニア化にくらべて硝酸態窒素の脱窒が進行し、土壌に残存する硝酸態窒素が  $^{15}\text{N}$  に富化されたと解釈される。脱窒に伴う窒素同位体分別は、28 から 33‰ と報告されている (Robinson 2001)。

### 2) 久留米営巣地

久留米サギ類営巣地土壌中のアンモニア態窒素の  $\delta^{15}\text{N}$  値は、+20 から +31‰ の範囲にあり、先に記載した本宮営巣地のゴイサギ営巣区土壌のA

ンモニア態窒素  $\delta^{15}\text{N}$  値に比較しうる範囲であった。これらの  $\delta^{15}\text{N}$  値は、3月下旬から6月はじめに向かったの土壤温度の上昇に対応してわずかではあるが、上昇する傾向を示した。ここでアオサギ営巣区とゴイサギ営巣区間には  $\delta^{15}\text{N}$  値に顕著な相違は認められなかった。久留米営巣地のサギ類糞の  $\delta^{15}\text{N}$  値は、+8 から +13% の範囲にあるから (表3)、糞窒素のアンモニア化に伴ってアンモニアの揮散が推察される。

アンモニア態窒素と共存する硝酸態窒素の  $\delta^{15}\text{N}$  値は、明瞭な時系列変動が認められた。営巣の初期 (アオサギ営巣区では3月31日, ゴイサギ営巣区では4月30日) の土壤に含まれる硝酸態窒素  $\delta^{15}\text{N}$  値は低く (+4%), 孵化と雛の成長に伴う搬入窒素量の増大期 (アオサギ営巣区では4月下旬以降, ゴイサギ営巣区では6月初旬) に対応して顕著に上昇した (+23 から +31%)。この顕著な上昇は、この時期に脱窒過程が顕著に進行している

ことを示唆する。アンモニア態窒素と共存する硝酸態窒素間のみかけの同位体分別 (測定値は表示していない) は、営巣活動の初期に高く (+15 と +22%), 孵化と雛の成長期に顕著に減少した (0 から 4%)。これらの硝酸態窒素の  $\delta^{15}\text{N}$  値と共存する無機態窒素間のみかけの同位体分別の評価から、久留米サギ類営巣地土壤では孵化と雛の成長期に硝化と脱窒が同調して進行していることが推察される。

### 3. 無機態窒素含量と安定同位体比の時系列変動から推定される糞窒素の変換過程

表6は、2つの営巣地土壤中で進行する窒素の動態を無機態窒素含量と安定同位体比に基づいて総括したものである。営巣の初期に糞窒素の無機化、アンモニアの揮散と硝化が、その後は無機化—硝化と同調して脱窒過程が駆動することが明らかになった。硝化が土壤中無機態窒素の変換過程

表6. 無機態窒素含量と窒素安定同位体比の時系列変動から推定される営巣地内土壤中の窒素動態  
Table 6. Status of nitrogen in colony soils as inferred from the content and nitrogen isotope composition of inorganic nitrogen

| 営巣地名<br>Colony | 土壤試料の採取日<br>(2006年)<br>Date of sampling | カワウ営巣区<br>Cormorant colony             |                     |                       | ゴイサギ営巣区<br>Black-crowned Night Heron colony |                     |                       |
|----------------|---|--|---------------------|-----------------------|---|---------------------|-----------------------|
|                |   | アンモニアの<br>揮散<br>Emission of<br>ammonia | 硝化<br>Nitrification | 脱窒<br>Denitrification | アンモニアの<br>揮散<br>Emission of<br>ammonia      | 硝化<br>Nitrification | 脱窒<br>Denitrification |
| 本宮<br>Motomiya | 4月15日 15April                           | ++                                     | +                   | -                     | ++  | +                   | -                     |
|                | 5月14日 14May                             | ++                                     | ++                  | ±                     | ++  | ++                  | ±                     |
|                | 6月17日 17June                            | +++                                    | +++                 | ++                    | ++  | +                   | ++                    |
|                | 7月23日 23July                            | +++                                    | +++                 | +++                   | +++   | ++                  | ++                    |
|                |   | アオサギ営巣区<br>Grey Heron colony           |                     |                       | ゴイサギ営巣区<br>Black-crowned Night Heron colony |                     |                       |
|                |   | アンモニアの<br>揮散<br>Emission of<br>ammonia | 硝化<br>Nitrification | 脱窒<br>Denitrification | アンモニアの<br>揮散<br>Emission of<br>ammonia      | 硝化<br>Nitrification | 脱窒<br>Denitrification |
| 久留米<br>Kurume  | 3月31日 31March                           | ++                                     | ++                  | -                     | ND  | ND                  | ND                    |
|                | 4月30日 30April                           | ++                                     | +++                 | +++                   | ±   | ++                  | -                     |
|                | 6月4日 4June                              | ++                                     | +++                 | +++                   | +   | +++                 | +++                   |

#### 凡例 Legends

- : なし No
- + : 痕跡程度 Trace
- + : わずか Slightly
- ++ : 進行中 Moderate
- +++ : 活発に進行中 Very active
- ND : 測定されていない Not determined



で律速段階となるために、営巣初期に脱窒過程はほとんど進行しなかった。糞由来窒素の土壌中での変換に及ぼす土壌温度の影響は、気温条件の異なる2ヶ所の調査地を比較することによって明確になった。本宮営巣区だけの時系列変動の結果だけでは、温度の影響が鳥類の繁殖活動の進展（雛の成長に伴う排泄物窒素の増加）の影響なのか明瞭にはできない。2ヶ所の調査地を相互に比較することによって土壌温度の効果が明瞭にされた。言い換えれば、土壌温度が低い本宮土壌では、硝化が遅延する傾向から硝化菌の活性が久留米土壌に比べて低かったと推察した。魚食性鳥営巣地下の土壌中では、窒素の付加に対応して大きな動力学的窒素同位体分別が起こるために、一般の土壌生態系ではほとんど観察されないような顕著に重い窒素同位体比が出現する。

本宮営巣地ではカワウは繁殖活動が終了した後、一部の個体は継続してねぐらとして利用する。そのためにカワウ営巣区土壌には1年を通して糞窒素の供給が行われる。この営巣地では営巣初期から雛の巣立ちまでの期間、顕著に高いアンモニア態窒素の $\delta^{15}\text{N}$ 値が観察される。この高い値は窒素の無機化に関与する微生物群の活性が1年を通じて維持されている結果によるものと解釈される。

本宮営巣地土壌の採取に際して現地で鎌田光仁氏（福島県・県北農林事務所）ご協力いただきました。堤裕昭氏（熊本県立大学環境共生学部）および伊藤絹子氏（東北大学農学部）には質量分析計を使用させていただいた。嶋田哲郎氏（伊豆沼・内沼環境保全財団）には、投稿前の原稿を査読いただき、不備な点を指摘いただきました。2名の匿名査読者からのご意見は原稿を改訂する際に有用であった。記してこれらの方々に感謝申し上げます。

### 摘 要

カワウ、アオサギおよびゴイサギの営巣地下にある2地域の土壌（福島県本宮および福岡県久留米）について、窒素動態を無機態窒素含量と安定同位体比の時系列変動を指標として解析した。顕著に高い無機態窒素含量（8 g/kg 乾土）が孵化と雛の成長期に見出された。巣立ちと営巣地から見られなくなった後、無機態窒素含量は急速に低下した。土壌の硝化活性は、やや冷涼な本宮営巣区にくらべて温暖な久留米営巣区で高かった。硝化と連動した脱窒過程が繁殖期後期に顕著であるこ

とが特異的に高い硝酸態窒素の同位体比から推察された。カワウは繁殖およびねぐらとして1年を通じて森林を利用するために、土壌に連続的に糞窒素が搬入される。その結果、一時的に利用するサギ類に比較してカワウ営巣区ではアンモニア生成速度が高く維持されると推定された。

### 引用文献

- Allaway WG & Ashford AE (1984) Nutrient input by seabirds to the forest on a coral island of the Great Barrier Reef. *Marine Ecology Progress Series* **19**: 297–298.
- Aulakh MS, Doran JW & Mosier AR (1992) Soil denitrification: significance, measurement, and effects on management. *Adv. Soil Sci.* **18**: 1–57.
- 土壌養分測定法委員会 (1976) 土壌養分分析法. 養賢堂, 東京.
- Ellis JC (2005) Marine birds on land: a review of plant biomass, species richness, and community composition in seabird colonies. *Plant Ecology* **181**: 227–241.
- Endo N, Sawara Y, Komatsu R & Ohtsubo M (2006) Diel activity patterns of presence and absence from a heron and post-breeding roosts observed in radio-tagged Black-crowned Night Herons *Nycticorax nycticorax*. *Ornithol. Sci.* **5**: 113–119.
- Harada T & Kai H (1968) Studies on the environmental conditions controlling nitrification in soil. I. Effects of ammonium and total salts in media on the rate of nitrification. *Soil Sci. Plant Nutr.* **14**: 20–26.
- Hobara S, Osono T, Koba K, Tokuchi N, Fujiwara S & Kameda K (2001) Forest floor quality and N transformations in a temperate forest affected by avian-derived N deposition. *Water, Air, and Soil Pollution* **130**: 679–684.
- Hobara S, Koba K, Osono T, Tokuchi N, Ishida A & Kameda K (2005) Nitrogen and phosphorus enrichment and balance in forests colonized by cormorants: Implications of the influence of soil adsorption. *Plant & Soil* **268**: 89–101.
- 堀 正和・長谷川夏樹 (2005) 沿岸域における水鳥類のベントス採餌量推定. *日本ベントス学会誌* **60**: 12–22.
- 亀田佳代子・保原 達・大園亨司・木庭啓介 (2002a) カワウによる水域から陸域への物質輸送とその影響. *月刊 海洋* **34**: 442–448.
- 亀田佳代子・松原健司・水谷 広・山田佳裕 (2002b) 日本におけるカワウの食性と採食場所選択. *日鳥学誌* **51**: 12–28.
- Koch PL, Fogel ML & Tuross N (1994) Tracing the diets of fossil animals using stable isotopes. In: Lajtha K & Michener RH (eds.) *Stable Isotopes in Ecology and Environmental Science*: 63–92. Blackwell Scientific Pub., London.
- Ligeza S & Smal H (2003) Accumulation of nutrients in soils affected by perennial colonies of piscivorous birds with reference to biogeochemical cycles of elements. *Chemosphere* **52**: 595–602.
- 松原健司・南 浩史 (1998) 鳥類生態学における安定同位体測定法の応用—その現状と課題. *山階鳥研報*

- 30**: 59–82.
- Mizutani H, Kabaya Y & Wada E (1985) Ammonia volatilization and high  $^{15}\text{N}/^{14}\text{N}$  ratio in a penguin rookery in Antarctica. *Geochem. J.* **19**: 323–322.
- Mizutani H, Hasegawa H & Wada E (1986) High nitrogen isotope ratio for soils of seabird rookeries. *Biogeochem.* **2**: 221–247.
- Nadelhoffer KJ & Fry B (1994) Nitrogen isotope studies in forest ecosystems. In: Lajtha K & Michener RH (eds.): *Stable Isotopes in Ecology and Environmental Science*: 22–44. Blackwell Scientific Pub., London.
- Osono T, Hobara S, Fujiwara S, Koba K, & Kameda K (2002) Abundance, diversity, and species composition of fungal communities in a temperate forest affected by excreta of the Great Cormorant *Phalacrocorax carbo*. *Soil Biol. Biochem.* **34**: 1537–1547.
- Osono T, Hobara S, Koba K, & Kameda K (2006) Reduction of fungal growth and lignin decomposition in needle litter by avian excreta. *Soil Biol. Biochem.* **38**: 1623–1630.
- Preest MR & Beuchat CA (1997) Ammonia excretion by hummingbirds. *Nature* **386**: 561–562.
- Robinson D (2001)  $\delta^{15}\text{N}$  as an integrator of the nitrogen cycle. *Trends Ecol. Evol.* **16**: 153–162.
- Sakai H (1959) Effect of temperature on nitrification in soils. *Soil Sci. Plant Food* **4**: 159–162.
- Schmidt S, Dennison WC, Moss GJ & Stewart GR (2004) Nitrogen ecophysiology of Heron Island, a subtropical coral cay of the Great Barrier Reef, Australia. *Functional Plant Biol.* **31**: 527–528.
- 鈴木 信・廣瀬 充 (2005) 阿武隈川, 阿賀川水系におけるカワウの捕獲魚種と漁業被害金額. 福島内水試研報 **6**: 69–76.
- Ueno Y, Hori cM, Noda T & Mukai H (2006) Effects of material inputs by the Grey Heron *Ardea cinerea* on forest-floor necrophagous insects and understory plants in the breeding colony. *Ornithol. Sci.* **5**: 199–209.