

第1節 自然科学的立場からのモニタリング

5. 琵琶湖-淀川水系に与える影響

5.8 都市化がミツバチの窒素安定同位体比に与える影響

兵藤不二夫¹⁾、清水良訓²⁾、菅原道夫、源利文²⁾、
丑丸敦史³⁾、井桁明丈¹⁾、和田英太郎¹⁾*、清水勇²⁾

1) 総合地球環境学研究所、2) 京大大学生態学研究センター、3) 神戸大学発達科学部
* (現所属) 海洋研究開発機構地球環境フロンティア研究センター

1. はじめに

近年の人間活動の増加に伴う、生態系の物質循環に対する攪乱は現在大きな問題となっている。人口増加に伴う生活排水や、近代化された農業における大量の施肥などによる水系の富栄養化は世界各地で報告されている。特に窒素負荷の場合、生態系への影響は単に生物多様性やその場の物質循環の攪乱だけではなく、飲料水中の硝酸濃度の増加によるメトヘモグロビン血症 (blue baby syndrome) という人への直接的な影響ももたらす¹⁾。

このような攪乱を受けた水循環において、窒素源の同定に窒素安定同位体比が用いられている^{1, 2)}。これは人間活動由来の窒素の窒素同位体比が自然由来のそれよりも高い値を持つことが多い(表1)ことから、環境中の硝酸態窒素や生物体を測定することで、どれほど人間活動由来の窒素の寄与があるのかを定量的に評価できるからである¹⁾。

本研究プロジェクトの対象調査地である琵琶湖においても、流域人口密度が増加し、富栄養化が進行した1960年代にその窒素同位体比が急激に上昇したことが明らかとなっている³⁾ (兵藤ら本報告書)。また高津ら (本報告書) は、琵琶湖に流れ込む河川ごとについてみても、流域人口密度が

高い河川ほど硝酸態窒素、河川堆積物や生物の窒素同位体比が高くなる傾向があることを明らかにしている。

しかしながら、従来の窒素同位体比を用いた人間活動の影響評価は水域生態系に限定されており、陸域生態系では適応例がほとんどない。我々は琵琶湖-淀川水系において、陸上生態系における人間活動の影響と窒素同位体比の関係を明らかにするために、ニホンミツバチの体の窒素同位体比と、その採集地点の土地利用及び人口密度と窒素同位体比との関係を調べた。ニホンミツバチは巣から半径約2kmの範囲にある植物に訪花し、集めた蜜や花粉は同じ巣の幼虫を育てるのに用いられる⁴⁾。よって、ミツバチは巣の半径2kmの無機態窒素及び植物体窒素の同位体比の変動を平均化した値を示すと考えられる。

2. 材料と方法

琵琶湖-淀川水系において、2003年11月及び2005年11月にセイタカアワダチソウに訪花するニホンミツバチ (*Apis cerana*) を採集した。本調査では合計51地点でミツバチが採集された。採集した個体は冷凍庫に入れて保存した。60℃にて一晚以上乾燥した後、各個体の後脚一本を窒素安定同位体の分析に用いた。各地点において3匹を採集し、その平均値を解析に用いた。国土交通省の国土数値情報をもとにミツバチ採集地点の周辺半径2km (ミツバチ採餌距離の平均値)⁴⁾ 以内の建物用地割合をGISを用いて算出した。同様に、地域メッシュ統計 第1次地域区画別 平成12年国勢調査を元に採集地点周辺の人口密度を算出した。これら建物用地割合及び人口密度を人間活動の強さの指標として用いた。

窒素安定同位体比は元素分析計 (FlashEA 1112) に接続した質量分析計 (Delta plus XP, Germany)

表1 様々な供給源や形態における窒素同位体比のばらつき

		最頻値	範囲
降水	NH ₄ ⁺	-2	-10~4
	NO ₃ ⁻	2	-6~10
下水		16	-10~32
施肥した土壌		4	-2~24
自然の土壌		4	-8~24
肥料	NH ₄ ⁺	0	-4~4
		2	0~6

Kendall¹⁾ を改変

を用いて分析を行い、その測定時の標準偏差は±0.2%であった。¹⁵N同位体の自然存在比は標準物質からのズレとして次のように表される。 $\delta^{15}\text{N} = (\text{R}_{\text{sample}}/\text{R}_{\text{standard}} - 1) \times 1000$, ここでRは¹⁵N/¹⁴Nを表す。大気中窒素が窒素の国際的標準物質である。

3. 結果

図1に琵琶湖-淀川水系の土地利用を、また図2に人口密度を示す。ミツバチ採集地点の周辺半径2kmでは、建物用地面積割合は0.02から0.75まで、人口密度では32人/km²から13500人/km²まで変動していた。これらの図にはミツバチの窒素安定同位体比の平均値も併せて示している。大阪、京都の都市部のミツバチが高い窒素同位体比をもつ傾向が見られる。そこで、建物用地面積割合及び人口密度がミツバチの窒素同位体比に及ぼす影響を明らかにするために、単回帰分析を行った。その結果、建物用地面積割合及び人口密度共にミツバチの窒素同位体比との間に有意な正の相関関係(それぞれ、 $r=0.537$, $p<0.0001$, $r=0.534$, $p<0.0001$)が見られた(図3a, b)。

4. 考察

我々は琵琶湖-淀川水系において、ニホンミツバチの体の窒素同位体比が-1.5から5.7‰まで大きく変動することを示した。生態系の窒素同位体比の変動要因の一つとして、食物網内で一栄養段階上がるごとに窒素同位体比が3.4‰上昇することが知られている⁵⁾。雑食性の動物では土地利用の変化に伴い、その栄養段階が変化することがあるが(Nakagawa et al. in prep.)、ミツバチの場合、その食物源はハチミツと花粉に限られる。よって、この約6‰の変動はその食物源の窒素同位体比、すなわち植物によって利用される無機態窒素の窒素同位体比の変動によるものと考えられる。我々は水域生態系と同様に、陸域生態系でも人間活動の影響によって窒素同位体比が変化することを初めて明らかにした。

これまで水域生態系において、湖沼の流域人口密度が増加すれば、その湖に生息する生物の窒素同位体比も同様に増加することが明らかとなっている。その要因としては、人間由来の窒素同位体比が高い窒素の負荷が考えられている⁶⁾。同様に琵琶湖-淀川水系においても、建物用地割合と人口密度の高い流域の河川堆積物や無機態窒素の窒

素同位体比が増加することが明らかとなっている(高津ら本報告書)。

高津らは琵琶湖-淀川水系の3河川で上流から下流に行くに従って、窒素同位体比が高くなっていくことを明らかにしている(高津ら本報告書)。これは人為由来の高い窒素同位体をもつ生活排水や下水処理場からの排水が、窒素同位体比の低い上流の自然生態系由来の窒素に混合することで増加していくことを意味している。今回我々が示したミツバチの陸域生態系においても、同様の説明ができるかもしれない。

しかしながら、ミツバチの採集地点は必ずしも河川沿いではなく、市街地の中心部なども多く含まれていた。市街地の植物が利用する土壤水に生活排水や下水処理場の排水を直接流れ込んでいるとは考えにくい。他の理由も考慮に入れなければいけないであろう。その一つに、都市部における自動車からの窒素降下物の影響が挙げられる。Elliotら(in prep.)はアメリカ合衆国で湿性大気降下物中の硝酸の窒素同位体比と郡レベルでの発電所及び自動車からのNO_xガスの排出量との関係を調べ、NO_xガス量と窒素同位体比の間には有意な正の相関関係があることを明らかにしている。よって、本研究で得られた都市部のミツバチは自動車の排気ガスのNO_x由来の高い窒素同位体比をもつ無機態窒素を利用している植物を利用している可能性も考えることができる。

またミツバチの窒素同位体比の変動理由としては、都市部と森林部での植物の分布も上げられるかもしれない。なぜなら都市部においては、ミツバチが利用する植物は、その分布の多くが河川敷などに限られるのに対し、森林部においては、河川沿いに限らず河川の影響を受けない森林内部などにも分布している。よって、都市部のほうが高い窒素同位体比をもつ無機態窒素を含む河川水を利用する植物が結果的に多くなる傾向があるであろう。

陸域生態系の窒素同位体比の変動に関して、Amundson et al.⁷⁾は土壌と植物の窒素同位体比の地球上での分布を調べ、年平均気温が減少し、降水量が増えると共にその値が減少することを明らかにしている。実際、ヨーロッパにおいて、生息地の地形が異なる5つのシカの個体群について調べた結果では、窒素同位体比は気温と負の相関を持つ⁸⁾。我々の調査地である琵琶湖-淀川水系においても、例えば大阪と彦根の年平均気温と年平均

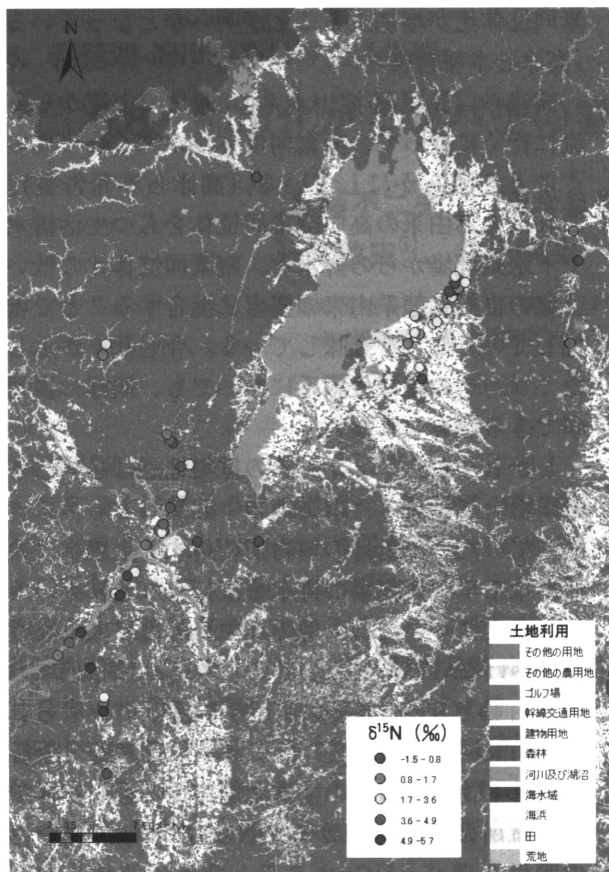


図1 琵琶湖-淀川水系における土地利用とニホンミツバチの窒素安定同位体比の関係（本報告書のカラーセクションを参照）

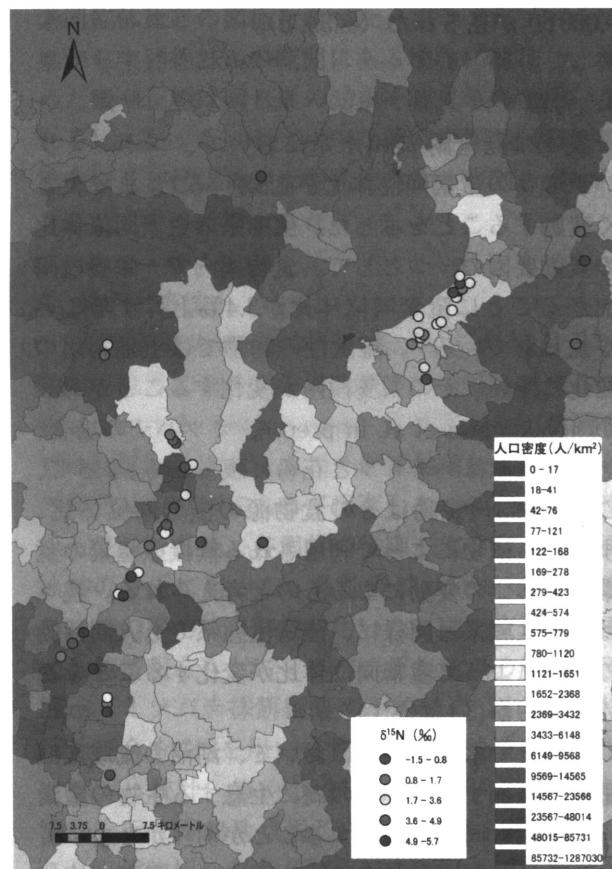


図2 琵琶湖-淀川水系における人口密度とニホンミツバチの窒素安定同位体比の関係（本報告書のカラーセクションを参照）

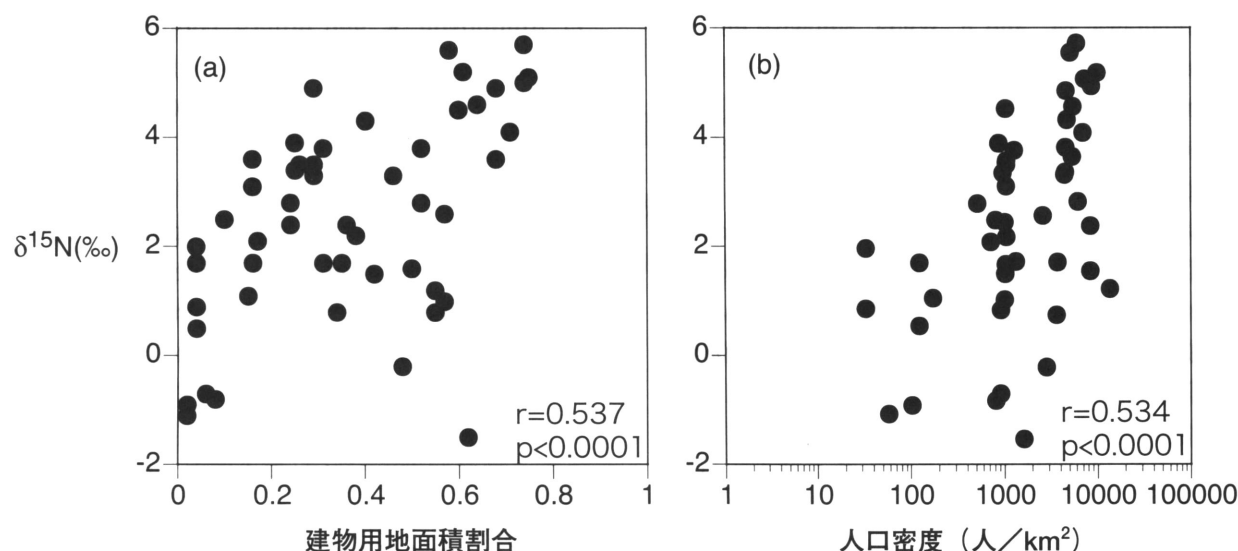


図3 琵琶湖-淀川水系における建物用地面積割合とニホンミツバチの窒素安定同位体比の関係 (a) 及び人口密度とニホンミツバチの窒素安定同位体比の関係 (b)

降水量を比較すると、大阪のほうが気温で2度高く、降水量で300mm低い（理科年表 平成18年度）。よって、多かれ少なかれミツバチの窒素同位体比の変動要因として気候が影響を与えている可能性がある。しかし、Amundson et al.らの回帰分析結果に基づけば、琵琶湖-淀川水系における大阪と彦根の気候の変化は1%以下の窒素同位体比の減少を引き起こすにすぎない。

今回の都市部のミツバチの窒素同位体比の上昇のメカニズムについては未知の部分が多く、今後上記仮説の検証を重ねていく必要がある。しかしながら、本研究結果は生態学的にはミツバチの個体の移動分散の研究に窒素同位体比を用いることができることを示唆している。また応用的な意味合いでは、ミツバチがもつ広範囲の行動圏と営巣を行うという真社会性の性質を利用することで、ミツバチを人間活動の影響の評価に用いることができる可能性を示している。さらには、ハチの種類による行動範囲の違いを利用して、目的に応じた空間スケールの環境情報を昆虫から得られる可能性も示している。

結論として、我々は琵琶湖-淀川水系において、ミツバチの体の窒素同位体比が都市化という人間活動によって上昇することを明らかにした。このような人間活動と窒素同位体比の関係は水域生態系では知られていたが、陸域生態系では初めての報告である。今後、窒素同位体比の変動理由に関してさらなる研究を行う必要があるが、本研究は

社会性昆虫を環境診断に使える可能性があることを示した。

謝辞

GISによる土地利用解析及び人口密度の算出は上田篤史氏と彦田祥子氏に行っていただいた。ここに深謝いたします。

引用文献

- 1) Kendall, C., Tracing nitrogen sources and cycling in Catchments. In: C. Kendall and J. J. McDonnell [eds.], *Isotope Tracers in Catchment Hydrology*. (1998) pp.519-576. Elsevier Science.
- 2) Macko, S. A., and N. E. Ostrom, Pollution studies using stable isotopes, In: L. K. and R. H. Michener [eds.], *Stable Isotopes in Ecology and Environmental Sciences*. (1994) pp.45-62. Blackwell Scientific Publications.
- 3) Ogawa, N. O., T. Koitabashi, H. Oda, T. Nakamura, N. Ohkouchi, and E. Wada, Fluctuations of nitrogen isotope ratio of gobiid fish (*Isaza*) specimens and sediments in Lake Biwa, Japan, during the 20th century. *Limnology and Oceanography*. 46 (2001) pp.1228-1236.
- 4) 佐々木正己『ニホンミツバチ—北限の*Apis cerana*—』海游舎 (1999)。

- 5) Minagawa, M., and E. Wada, Stepwise enrichment of ^{15}N along food chains: further evidence and the relation between $\delta^{15}\text{N}$ and animal age. *Geochimica et Cosmochimica Acta*. 48 (1984) pp.1135-1140.
- 6) Cabana, G., and J. B. Rasmussen, Comparison of aquatic food chains using nitrogen isotopes. *Proceedings of National Academy of Science of United States of America*. 93 (1996) pp.10844-10847.
- 7) Amundson, R. and others, Global patterns of the isotopic composition of soil and plant nitrogen. *Global Biogeochemical Cycles*. 17 (1) (2003) 1031.
- 8) Stevens, R. E., A. M. Lister, and R. E. M. Hedges, Predicting diet, trophic level and palaeoecology from bone stable isotope analysis: a comparative study of five red deer populations. *Oecologia*. 149 (2006) pp.12-21.