

RF-085 やんばる生態系をモデルとした水銀の生物蓄積に関する研究

(3) 生態系の水銀動態に関する解析

東京農工大学

大学院 共生科学技術研究院 環境毒性学研究室 渡邊 泉

〈研究協力者〉

環境省	那覇自然環境事務所	野生生物課	阿部慎太郎	
独立行政法人	国立環境研究所	生物資源研究室	桑名 貴	
琉球大学	農学部	生産環境学科	亜熱帯動物学講座	小倉 剛
琉球大学	教育学部	自然環境科学教育コース	本多正尚	

平成20年度合計予算額 3,900千円

※上記の予算額は、間接経費857千円を含む

〔要旨〕本研究で分析されたジャワマングースの肝臓の水銀最高濃度は $300 \mu\text{g/g}$ （乾重あたり：以下DW）を超えた。やんばる生態系の栄養段階が低次の生物の水銀レベルは平均で $0.66 \mu\text{g/g DW}$ 、分析された無脊椎動物の最高濃度はムカデ類の $1.9 \mu\text{g/g DW}$ であった。両生類では、とくにイボイモリで他両生類に比較して顕著に高い水銀レベルが認められた。分析された爬虫類は、栄養段階がマングースと同様に高い種が含まれたが、顕著な高値はみられなかった。鳥類においては魚食性でない山林生の希少種ノグチゲラ、ヤンバルクイナ、アマミヤマシギ、アカヒゲの筋肉や肝臓に比較的高レベルの水銀とセレンが検出された。哺乳類は、分析された希少種に、鳥類のような高濃度は確認されなかった。また、やんばる地域における沿岸生魚類イソフエフキの筋肉から $0.27\text{--}0.49 \mu\text{g/g DW}$ の濃度が検出された。以上の結果から、やんばる生態系に存在する水銀レベルは、比較的高めであることが示唆され、ジャワマングースの水銀濃縮に、イボイモリやヤンバルクイナ、ヤマシギなど山林生の希少種であり、かつ水銀濃度の高い種が寄与している可能性が示された。微量元素25種との関係で、水銀は鉛やカドミウム、銀など強毒性元素にくわえ、セレンやクロム、バナジウム、ニッケル、コバルトといった元素とも連動して動いている可能性が示唆された。水銀解毒に関与するセレンや、汚染元素カドミウム、クロムさらにストロンチウムは高次になるほど水銀と連動した蓄積がみられ、鉛、銀、コバルトそしてニッケルなどは低次の生物で水銀と連動した。バナジウムは、高次、低次通じて水銀と強い相関関係を示した。

マングースから排出される水銀の検討を行った。その結果、毛からの排出能は低いことが明らかになった。さらに、1検体のみの結果であるが、比較的高濃度の水銀を蓄積したメスの胎児において比較的高濃度の水銀が移行されていることが示された。このことから本種において水銀のハイリスク・グループである胎児期に、水銀による生体影響が発現する可能性が示唆された。

〔キーワード〕水銀、生物増幅、食物網、やんばる、元素動態

1. はじめに

2009年2月、第25回UNEP管理理事会は、法的拘束力のある水銀 (Hg) 規制条約の制定で合意した。これを受け、水銀対策はPOPsにつぐ化学物質管理の全地球的取組みとなることが期待される。水銀化合物は、いうまでもなく、世界規模で対策が求められる地球環境汚染物質の一つであり、有害化学物質の管理を行う上で噴出する「困難さ」を集約し体現した存在ともいえる。その毒性は古代から認知される一方で、ユニークな性質は科学技術の発達に大きく貢献した。現在は、その環境毒性が明らかな一方、いまだ幾つかの産業（蛍光灯など）に使用され、また天然に由来する一方（火山活動など）、人間活動で放出される（石炭燃焼など）量は膨大にのぼる¹⁾。この両義性ゆえ、日本を含め世界的にも有効な管理体制が未整備である。しかし「世界人口のほとんどが影響を受けている」とされる毒性は決して看過できるものではない。その主な放出源は、天然と人為的なものがある。天然の由来のものは火山活動、土壌・水面からの蒸発、鉱物の風化および森林火災などがあげられ、それらから金属型 (Hg^0)、硫化第2水銀 (HgS)、塩化第2水銀 (HgCl_2)、メチル水銀 (MeHg) といった各形態で放出される。これら天然に由来する水銀の排泄量評価は難しく、様々な推定の試みがなされているが、得られた情報からそれらは全排出の50%未満と考えられている¹⁾。一方で、人為起源の水銀放出は、近年増加の一途を辿っており、大きく産業に直接使用され環境に放出されるものと、水銀を不純物として含む物質の移動・変化により排出されるものがある。前者としては、温度計や圧力計、電池、歯科用アマルガム充填剤、電気器機のスィッチ、蛍光灯、塩素アルカリ生産の触媒、防腐剤、殺菌剤、顔料、洗剤などがあげられ、後者には化石燃料の燃焼、セメント生産、鉄鋼ほか各種鉱物の冶金・生産過程、産業廃棄物処理、焼却施設からの放出などがあり、この水銀不純物の移動、なかでも化石燃料の燃焼からの寄与率は大きいと指摘されている¹⁾。

化石燃料の燃焼は、二酸化炭素など温室効果ガスに加え、バナジウム (V) やヒ素 (As) といった重金属類の環境負荷をもたらすが、なかでも石炭燃焼にともなう水銀放出が懸念される。我が国を含めたアジア諸国は、水銀の大気への放出が世界の42%を占めるとされ、とくに世界の二酸化炭素の20%を放出する中華人民共和国は石炭が総エネルギー消費量の80%を占め、今後、水銀負荷も巨大になることが予想される。現在、黄砂やエアロゾルなど中国からの越境汚染が我が国に及ぼす影響が懸念されているが、水銀も要監視物質といえるだろう。我が国の南に位置する南西諸島は、とくに大陸との距離が近く、その影響を直接こうむることが予想された。

沖縄県の沖縄島北部森林地帯は、とくに「やんばる（山原）」と呼ばれ、ヤンバルクイナやオキナワトゲネズミに代表される、きわめて貴重な固有種を多く有する我が国屈指の生態系といえる。しかし、近年、侵略的移入種ジャワマングースが生息数を増やし、沖縄島北部へ分布域を拡大するにつれ、これら希少な固有種の生存が脅かされる事態が進行している²⁾。我々は、1910年に渡瀬庄三郎によって沖縄島に導入されたジャワマングースが水銀を高濃度で蓄積し、その解毒に、海生動物などで知られるセレン (Se) を介したメカニズムの存在を示唆した³⁾。このことは、少なくとも相当量の水銀がやんばる生態系に存在し循環していることを予測させ、その起源を含めた動態の把握が急務と考えられた。

2. 研究目的

本研究は、沖縄県北部森林地帯（通称やんばる）に生息する動物の水銀分析を行うことで、そ

の生態系の高次捕食者であるジャワマングースが濃縮した水銀が、どのような経路で移動しているか把握することを目的とした。そのため、やんばる地域に生息する野生動物を採取し、元素分析を行い、水銀分布の把握を行った。また、産業で使用されたり、必須性など生体内での動態から水銀と関係する可能性がある微量元素25種の分析も行い、それらの元素間関係を解析することで、生態系における水銀の挙動解析も試みた。

3. 研究方法

(1) 試料

やんばる地域より無脊椎動物を9種（未同定種を含む：オオナメクジ類4検体、ヤンバルマイマイ *Satsuma mercatoria atrata* 5検体、陸生腹足類4検体、サワガニ類 *Geothelphusa* spp. 2検体、オオムカデ類 Chilopoda 3検体、クモ類 Araneae 2検体、マダラコウロギ *Cardiodactylus novaeguineae* 5検体、ナナホシキンカメムシ *Calliphara nobilis* 5検体、カブトムシ類 *Trypoxylus* 2検体）、両生類5種（シロアゴガエル *Polypedates leucomystax* 1検体、ハナサキガエル *Rana narina* 4検体、リュウキュウアカガエル *Rana okinavana* 3検体、リュウキュウカジガエル *Buergeria japonica* 1検体とイボイモリ *Tyrototriton andersoni* 7検体）、爬虫類7種（ホオグロヤモリ *Hemidactylus frenatus* 5検体、ミシシッピアカミミガメ *Trachemys scripta elegans* 2検体、アカマタ *Dinodon semicarinatus* 3検体、ガラスヒバア *Amphiesma pryeri* 4検体、リュウキュウアオヘビ *Cyclophiops semicarinatus* 3検体、ヒメハブ *Ovophis okinavensis* 1検体とハイ *Hemibungarus japonicus boettgeri* 1検体）、鳥類23種（渡り鳥を含む：オオミズナギドリ *Calonectris leucomelas* 1検体、ササゴイ *Butorides striatus* 1検体、アマサギ *Bubulcus ibis* 1検体、ヤマシギ *Scolopax rusticola* 1検体、アマミヤマシギ *Scolopax mira* 1検体、ヒクイナ *Porzana fusca* 1検体、シロハラクイナ *Amauronis phoenicurus* 2検体、バン *Gallinula chloropus* 3検体、カラスバト *Columba janthina* 1検体、リュウキュウコノハズク *Otus elegans* 1検体、オオコノハズク *Otus lempiji* 3検体、アオバズク *Ninox scutulata* 3検体、アカショウビン *Halcyon coromanda* 2検体、カワセミ *Alcedo atthis* 2検体、コゲラ *Dendrocopos kizuki* 1検体、ツバメ *Hirundo rustica* 1検体、シロガシラ *Pycnonotus sinensis* 1検体、シロハラ *Turdus pallidus* 3検体、ウグイス *Cettia diphone* 3検体、メジロ *Zosterops japonica* 2検体、ヤンバルクイナ *Gallirallus okinawae* 10検体、ノグチゲラ *Sapheopipo noguchii* 6検体とアカヒゲ *Erithacus komadori* 10検体）、哺乳類7種（オリエントオコウモリ *Pteropus dasymallus inopinatus* 4検体、オキナワキクガシラコウモリ *Rhinolophidae pumilus* 3検体、ケナガネズミ *Diplothrix legatsu* 5検体、ワタセジネズミ *Crocidura horsfieldii watasei* 3検体、クマネズ *Rattus rattus* 3検体とジャワマングース *Herpestes javanicus* 49検体)を収集した。

また、やんばる生態系近隣より、それぞれ比較もしくは限定された試料数の補完として座間味島から、ジャワマングースと同等の高次捕食者ニホンイタチ *Mustela itatsi* 30検体、奄美大島よりアマミノクロウサギ *Pentalagus furnessi* 21検体、アマミトゲネズミ *Tokudaia osimensis osimensis* 2検体を供試した。同様に、鳥類はゴイサギ *Nycticorax nycticorax* 1検体、アマミヤマシギ *S. mira* 3検体、アカショウビン *H. coromanda* 1検体、カワセミ *A. atthis* 1検体、ヒヨドリ *Hypsipetes amaurotis* 1検体とハシブトガラス *Corvus macrorhynchos* 3検体の6種と爬虫類のヒメハブ *O. okinavensis* 2検体の1種が奄美大島から採取された。さらに、やんばる生態系からの水

銀のアウトプット先の場合として沿岸海域を設定し、魚類4種（ゴマアイゴ *Siganus guttatus* 2検体、イソフエフキ *Lethrinus atkinsoni* 6検体、ナンヨウブダイ *Chlorurus microrhinos* 1検体、マグロ類 *Thunnus* 1検体）も供試した。

（2）化学分析

1）分析前処理

各動物の組織・器官は、ステンレス製のメス、ピンセットおよびハサミを用いて、検体から摘出され、電子天秤（FX-300 AND）を用いて湿重量を測定した。筋肉と肝臓、腎臓は2次汚染を避けるために、表面周辺をメスで取り除き、その後、細かく刻まれた。切り出された各組織はシャーレを覆ったフッ素樹脂シート（TOMB09001、ニチアス）上に置き、90℃で約16時間乾燥させ、デシケーター内で放冷した。その後、乾重量を測定し、水分含量を算出した。乾燥試料はフッ素樹脂シートに包んだ上から、乳鉢と乳棒を用いて破碎され、粉末試料とした。

毛および羽は、0.3%ポリオキシエチレンモノラウリルエーテル水溶液とイオン交換水で各30分間、超音波洗浄を行った。油脂による汚れがひどいものは、さらにアセトンで濯いだ。その後、軟組織サンプルと同様の操作で、乾燥試料を作成した。

粉化された乾燥試料は、約0.100 gを秤量し、テフロンPFA製バイアル内で硝酸（EL）を2.0 mL添加した。このPFAバイアルは、蒸留水を少量加えたテフロンPTFE製容器に密閉され、マイクロウェーブ分解を行った。分解は電子レンジを用い、PTFE製容器3個につき約15分間行った。分解後、充分に放冷し、Milli-Q水を用い、ねじ口PPチューブ内に約25gとなるように希釈し、精秤し、溶液試料とした。

2）元素分析

a. 総水銀分析

還元剤として、塩化第二スズ（試薬特級、Wako）を用い、溶液を酸性にするため硫酸（有害金属分析用、Wako）を用いた。測定は還元気化原子吸光法（CV-AAS）により、水銀用原子吸光光度計（HG-300、平沼産業）を使用し行った。濃度の算出は絶対検量線法で行った。

b. 有機水銀分析

毛および羽試料は約5.0 mg遠心管に分取し、0.1%システイン溶液を約2 mL、5N-NaOH溶液を約2 mLそれぞれ加え、70℃の恒温水槽で試料が溶解するまで加熱した。つぎにMilli-Q水を約6 mL添加し、約10 mLまで定容した。この溶液は総水銀分析用へ用いた。その約2 mLは有機水銀分析用として別の遠心チューブに分取し、5N-HBrを約1.5 mL、1M-CuCl₂を約0.5 mL、トルエンを約6.0 mL添加し、10分間震盪した。その後、2000 rpmで10分間遠心分離した後、トルエン層を別の遠心チューブに分取した。トルエン層の入った遠心チューブに、システイン-アセテート溶液を約1.0 mL添加し、10分間振盪後、2,000 rpmで10分間遠心分離した。その後、トルエン層を除去し下層を分析に用いた。

筋肉、肝臓および腎臓試料は約0.500 gを秤取し、遠心管に試料及び0.1%システイン溶液約2 mL、5N-NaOH溶液約2 mLをそれぞれ加え、70℃の恒温水槽で試料が溶解するまで加熱した。つぎに、Milli-Q水を約5 mL添加し、ついで脂肪を除去するために、クロロホルムを約5.0 mL添加し、10分

間震盪した後、10分間遠心分離した。その後、下層のクロロホルムをパスツールピペットで取り除き、クロロホルムと同様の操作をヘキサンでも繰り返した。この溶液は総水銀分析へ用いた。また、有機水銀分析用の溶液作成は、毛や羽と同様の方法で行った。

分析には加熱気化全自動水銀測定装置(MA-200、日本インスツルメンツ)を用い、金アマルガム捕集-加熱気化原子吸光法で測定した。

c. 微量元素分析

各元素濃度の測定にはICP-MS(4500a、Agilent)を用いた。25元素(リチウム⁷Li、マグネシウム²⁴Mg、カルシウム⁴³Ca、⁵¹V、クロム⁵²Cr、マンガン⁵⁵Mn、鉄⁵⁷Fe、コバルト⁵⁹Co、ニッケル⁶⁰Ni、銅⁶³Cu、亜鉛⁶⁶Zn、ガリウム⁶⁹Ga、⁷⁵As、⁸²Se、ルビジウム⁸⁵Rb、ストロンチウム⁸⁸Sr、モリブデン⁹⁵Mo、銀¹⁰⁷Ag、カドミウム¹¹¹Cd、インジウム¹¹⁵In、アンチモン¹²¹Sb、セシウム¹³³Cs、バリウム¹³⁷Ba、タリウム²⁰⁵Tl、および鉛²⁰⁸Pb)濃度について測定した。また、ロジウム¹⁰³Rhを内部標準元素とすることにより、測定カウントを補正した。検出限界はブランク試料の標準偏差(SD)の3倍に対応する値とし、絶対検量線法で各元素濃度を算出した。

3) 統計解析

すべての濃度は対数変換にて標準化した後、SPSS ver. 11.0 for Mac.を用い、2変量の相関はSpearmanの順位相関検定で、グループ間の比較はMann-Whitney U-testおよびTukey検定、さらに多元素間関係の解析はクラスター分析、および主成分分析を行った。有意水準は0.05以下を採用した。

4. 結果・考察

(1) 無脊椎動物・両生類

やんばる生態系の低次生物群である無脊椎動物と両生類の水銀および微量元素濃度を表1および2に示す。無脊椎動物にくらべ、両生類に比較的高レベルの水銀が検出された。本グループにおける水銀の最高濃度は県指定の天然記念物イボイモリの肝臓(22 μg/g乾重あたり。以下DW)において認められ、ついでイボイモリの筋肉(15 μg/g DW)、リュウキュウアカガエルの肝臓(3.1 μg/g DW)という順であった。また昆虫類ではムカデ類の水銀濃度が高く(1.9 μg/g DW)、本グループの強い肉食により、水銀が生物増幅している可能性が考えられた。

表1 やんばるで採取された無脊椎動物のHgおよび微量元素の個体平均濃度(on μg/g DW)

試料(検体数)	Li	Mg	Ca	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	As	Se	Rb	Sr	Mo	Ag	Cd	In	Sb	Cs	Ba	Hg	Tl	Pb
ヤンバルマイマイ(5)	0.15	4030	9738	0.16	1.3	411	317	5.2	1.4	584	346	12.7	N.D.	1	5	131	0.8	15.4	7.3	0.00	N.D.	0.07	188	0.19	0.02	0.6
オオナメクジ類(4)	0.04	3643	9568	0.10	2.0	3183	243	0.7	0.6	85	407	7.0	N.D.	9	17	60	0.6	3.2	8.5	0.00	N.D.	0.48	119	0.71	0.03	1.8
陸生腹足類(4)	0.45	5740	38525	0.44	3.8	153	806	1.0	3.9	139	540	2.7	N.D.	1	7	242	1.5	1.1	2.6	0.02	1.3	0.29	70	N.D.	0.07	77.9
サワガニ類(2)	0.66	6780	79750	2.23	4.9	65	1725	1.1	3.0	155	70	5.0	N.D.	4	6	709	0.2	3.0	0.7	0.00	N.D.	0.12	106	0.73	0.01	0.3
オオムカデ類(3)	0.27	1084	575	0.46	3.2	18	585	0.4	0.8	51	771	0.2	N.D.	12	5	7	0.3	0.4	0.2	0.00	N.D.	0.08	3	1.74	0.01	0.6
クモ類(2)	0.11	1575	799	0.14	2.1	16	113	0.1	0.2	149	464	0.1	N.D.	3	9	3	0.2	1.4	2.0	0.05	N.D.	0.12	0	0.13	0.06	0.1
マダラコオロギ(5)	0.48	944	714	0.10	1.9	24	61	0.4	0.4	14	159	0.0	N.D.	1	8	6	0.3	0.7	0.1	0.03	N.D.	0.08	1	N.D.	0.03	0.3
ナナホシキンカメムシ(5)	0.01	1516	631	0.01	2.3	216	137	0.1	0.0	54	78	0.1	N.D.	0	7	5	0.4	0.4	0.1	0.00	N.D.	0.01	1	N.D.	0.00	0.0
カブトムシ類(2)	0.04	1126	168	0.09	2.4	17	93	0.1	0.0	16	193	0.0	24	2	0	0	0.2	0.3	0.0	0.01	N.D.	0.03	0	0.34	0.01	0.1

表2 やんばんで採取された両生類のHgおよび微量元素の平均濃度 (on $\mu\text{g/g DW}$)

種名(検体数)	Li	Mg	Ca	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	As	Se	Rb	Sr	Mo	Ag	Cd	In	Sb	Cs	Ba	Hg	Tl	Pb	
筋肉																											
ハナサキガエル(4)	0.01	1243	394	0.03	2.6	1.0	26	0.09	0.07	1	20	0.1	N.D.	1.4	12	1	0.03	N.D.	0.02	0.00	N.D.	0.07	0.8	0.61	0.006	0.02	
シロアゴガエル(1)	0.03	1160	433	0.06	3.0	1.5	41	0.03	0.07	2	55	0.1	N.D.	1.0	8	2	0.02	0.25	0.02	0.01	N.D.	0.05	1.1	0.30	0.014	0.02	
リュウキュウアカガエル(3)	0.04	1313	340	0.10	2.8	3.6	92	0.04	0.14	2	20	0.2	N.D.	2.4	24	1	N.D.	N.D.	0.02	0.00	N.D.	0.13	3.1	0.95	0.014	0.04	
リュウキュウカジガエル(1)	0.01	1150	331	0.02	2.4	1.9	27	0.08	0.12	2	22	0.0	N.D.	1.3	11	1	N.D.	N.D.	0.02	0.00	N.D.	0.06	0.6	0.36	0.004	0.93	
イボイモリ(6)	0.21	2151	4198	0.79	10.5	57.9	975	3.07	2.08	98	389	10.5	16	13.2	14	50	1.64	0.48	2.89	0.02	0.99	0.13	231.0	3.58	0.098	1.67	
肝臓																											
ハナサキガエル(4)	0.01	675	368	0.11	2.0	7.5	258	0.47	11.92	76	61	0.1	N.D.	2.3	6	1	0.46	0.78	0.45	0.00	N.D.	0.03	1.8	0.54	0.016	0.29	
シロアゴガエル(1)	0.03	1430	687	0.14	3.4	24.8	1010	0.38	0.35	15	135	0.2	N.D.	2.1	6	7	0.90	0.23	0.82	0.01	N.D.	0.05	4.5	0.73	0.020	0.16	
リュウキュウアカガエル(3)	0.06	957	484	0.67	2.4	15.0	1051	0.38	0.40	412	71	0.6	N.D.	13.6	16	2	1.71	3.06	1.80	0.00	N.D.	0.07	8.8	1.83	0.026	0.75	
リュウキュウカジガエル(1)	0.01	739	191	0.49	1.9	10.1	374	0.52	0.20	121	58	0.06	N.D.	2.3	7	1.0	0.66	0.53	0.21	0.00	N.D.	0.02	0.82	0.7	0.01	0.04	
イボイモリ(6)	0.03	828	1513	0.61	1.9	11.9	875	0.21	0.35	108	96	9.7	N.D.	12.0	4	23	1.32	2.12	0.67	0.00	3.66	0.03	164.5	6.10	0.011	0.81	
腎臓																											
ハナサキガエル(1)	0.05	657	2300	0.15	3.6	5.3	158	0.28	0.20	14	80	0.1	N.D.	1.8	9	7	0.42	N.D.	1.75	0.03	N.D.	0.12	1.2	0.17	0.045	0.14	
シロアゴガエル(1)	0.06	482	375	0.12	2.6	5.9	435	0.15	0.10	11	58	0.1	N.D.	0.9	4	2	0.51	0.21	1.43	0.03	N.D.	0.05	0.5	N.D.	0.043	0.11	

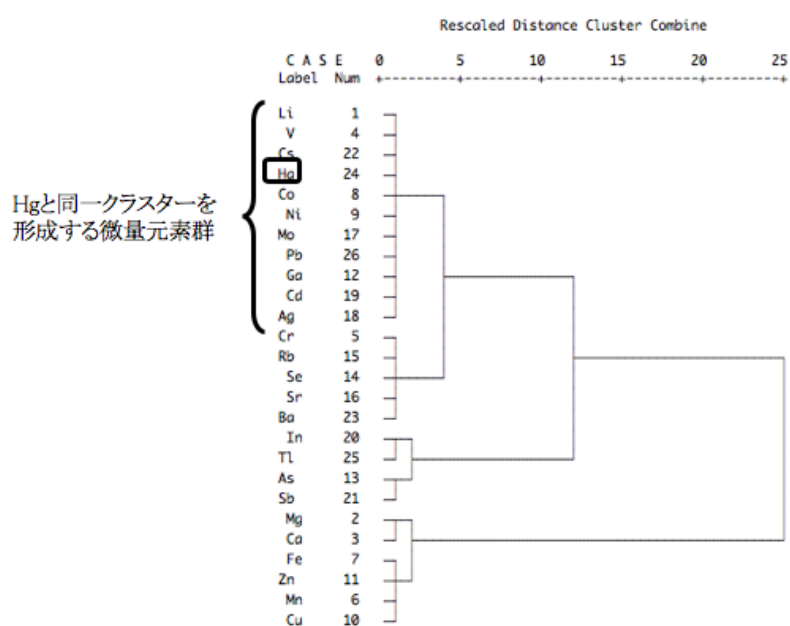
その他の毒性元素としてヒ素 (As) はカブトムシ類において最も高い濃度がみられた ($40 \mu\text{g/gDW}$)。ついで、イボイモリの筋肉 ($15 \mu\text{g/gDW}$) >カブトムシ類 ($7.6 \mu\text{g/gDW}$) の順にAs濃度は高かった。それ以外の種のAs濃度は全て検出限界以下であった。カドミウム (Cd) は大型ナメクジ類において最も平均値が高濃度であった (平均 $8.5 \mu\text{g/gDW}$ 、最高 $11 \mu\text{g/gDW}$)。ついで、ヤンバルマイマイが高く (平均 $7.3 \mu\text{g/gDW}$ 、最高 $14 \mu\text{g/gDW}$)、腹足類でCd濃度が高くなる傾向がみられた。軟体動物は海洋生態系でも比較的高いCdレベルを示すことが知られ、やんばんの生態系においても高次生物の供給源として機能している可能性が考えられた。タリウム (Tl) はイボイモリの筋肉において最も高い濃度がみられた (平均 $0.10 \mu\text{g/gDW}$ 、最高 $0.33 \mu\text{g/gDW}$)。ついで、腹足類 (平均 $0.07 \mu\text{g/gDW}$ 、最高 $0.11 \mu\text{g/gDW}$) >クモ類 (平均 $0.06 \mu\text{g/gDW}$ 、最高 $0.06 \mu\text{g/gDW}$) という順であった。鉛 (Pb) は巻貝類で最も高濃度であった (平均 $78 \mu\text{g/gDW}$ 、最高 $290 \mu\text{g/gDW}$)。ついで、オオナメクジ類 (平均 $1.8 \mu\text{g/gDW}$ 、最高 $2.4 \mu\text{g/gDW}$)、イボイモリの筋肉 (平均 $1.7 \mu\text{g/gDW}$ 、最高 $9.3 \mu\text{g/gDW}$) においてもPbの高濃度が検出されたが、陸生腹足類の濃度は突出しており、特殊なPb動態が示唆された。

無脊椎動物および両生類の体内から検出された水銀はバナジウム (V)、ガリウム (Ga)、セレン (Se)、インジウム (In)、バリウム (Ba) 濃度との間で相関がみられた ($p < 0.05$ by Spearmanの順位相関検定)。クラスター分析の結果では、無脊椎動物において水銀はリチウム (Li)、V、セシウム (Cs)、コバルト (Co)、ニッケル (Ni)、モリブデン (Mo)、Pb、Ga、Cdおよび銀 (Ag) の10元素と同一クラスターを形成し (図1: 以下、クラスター分析の結果解析は同様の樹状図による)、両生類では筋肉でマンガン (Mn)、銅 (Cu)、Se、ストロンチウム (Sr)、Baおよびクロム (Cr) の6元素、肝臓ではMo、Cd、Ag、V、Ga、Co、PbおよびNiの8元素、腎臓ではV、Pb、Ni、Co、Ga、Cs、Li、Tl、InおよびAgの10元素と同一クラスターを形成した。また、やんばんの生態系における低次生物の中でも水銀およびSeの高濃度蓄積が顕著であった希少種イボイモリのクラスター分析の結果、肝臓で水銀はCr、ルビジウム (Rb)、Ga、Co、Ni、V、Mo、Pb、CdおよびAgの計10元素と、筋肉でLi、Ag、Co、Mo、VおよびPbの6元素と同一クラスターを形成した。これら水銀と関係した蓄積を示した元素のうち、無脊椎動物、両生類の両グループに共通し、水銀と関連を示しながら挙動すると考えられた元素のなかで、V、Se、NiおよびCoなどの必須元素、CdやPb、Agなど強毒性元素、さらにGaやBaなど必須性が確認されていない微量元素がグルーピングされた。Seは、水銀を高濃度で蓄積する海鳥類や海生哺乳類、そしてジャワマングースの体内で、水銀解毒と関係した蓄積を示すことが知られている⁴⁾。このとき、Seは水銀濃度が約 $60 \mu\text{g/g DW}$ 以上でモ

ル比1:1 (Se濃度は $24 \mu\text{g/gDW}$ 以上) で正の相関を示す。やんばる生態系の低次生物でみられた水銀およびSe濃度は、イボイモリを除いて、高いとはいえ、これら生物群でSeが水銀の解毒と関連した蓄積がなされているとは考えにくい。しかし、やんばる生態系の結果は、低次の生物であってもSeは水銀と関連した蓄積動態を有する可能性が示唆され、とくにSeを高次生物に供給する起源となっている可能性が考えられた。

水銀は食物連鎖によって濃縮する、いわゆる生物増幅を示す特徴がある。このことを利用すれば、本研究で水銀と相関がみられたV、Ga、InおよびBaは、栄養段階に伴って濃縮される、生物増幅の可能性があると捉えることも可能であり、今後の調査がまたれよう。

図1 クラスタ分析によるやんばるの無脊椎動物体内の微量元素濃度の関係



(2) 爬虫類・鳥類

やんばる地域および奄美大島から採取された爬虫類および鳥類の水銀および微量元素濃度を表3および4に示す。

分析された筋肉、肝臓および腎臓における水銀の組織間分布は、爬虫類・鳥類とも肝臓で最も高く、ついで腎臓>筋肉の順であった(表4)。また、爬虫類と両生類の微量元素レベルは、カルシウム(Ca)、SrおよびBaといったアルカリ土類金属に加えCr、Co、Niおよび亜鉛(Zn)など必須元素、さらにGaやCsなど多くの元素で爬虫類の方が高値を示した一方で、CdやAsといった強毒性元素やMoは鳥類で高くなる傾向がみられた。水銀は分析された両グループを平均すると肝臓と腎臓でほぼ同程度の濃度がみられたが、筋肉では爬虫類の方が高かった。とくに、筋肉でアカマタ(平均 $1.6 \mu\text{g/gDW}$ 、最高 $2.6 \mu\text{g/gDW}$)、ガラスヒバア(平均 $1.7 \mu\text{g/gDW}$ 、最高 $5.3 \mu\text{g/gDW}$)およびヒメハブ(平均 $3.5 \mu\text{g/gDW}$ 、最高 $4.8 \mu\text{g/gDW}$)といった比較的高次の爬虫類で、高い水銀レベルがみられた。

表3 やんばるで採取された爬虫類のHgおよび微量元素の平均濃度 (on $\mu\text{g/g DW}$)

種名(検体数)	Li	Mg	Ca	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	As	Se	Rb	Sr	Mo	Ag	Cd	In	Sb	Cs	Ba	Hg	Tl	Pb		
個体																												
ホオグロヤモリ(5)	0.03	1398	20860	0.1	2.2	5	298	0.13	0.62	7	103	0.1	N.D.	1	7	46	0.1	N.D.	0.1	0.0	N.D.	0.0	1.1	N.D.	0.0	0.4		
筋肉																												
ミシシippアカミミガメ(2)	N.D.	1850	1366	1.3	3.9	3	242	N.D.	N.D.	8	277	N.D.	N.D.	8	29	5	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	0.6	1.7	0.7	N.D.	N.D.		
アカマタ(3)	N.D.	4370	106093	2.0	9.0	11	571	1.11	1.92	4	524	0.9	N.D.	10	31	80	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	1.5	7.8	1.6	N.D.	3.5		
ガラスヒバア(4)	N.D.	1269	14803	0.8	2.2	10	526	0.38	0.31	2	108	0.4	N.D.	4	14	37	N.D.	N.D.	2.0	0.4	N.D.	0.6	4.6	1.7	0.9	1.0		
リュウキュウアオヘビ(3)	N.D.	799	486	0.5	0.9	1	89	0.17	N.D.	2	154	0.9	N.D.	2	5	3	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	0.3	19.5	0.2	N.D.	0.2		
ヒメハブ(3)	N.D.	865	1198	0.3	2.1	1	67	N.D.	N.D.	3	76	#DIV/0!	N.D.	3	20	2	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	0.4	3.5	N.D.	0.3		
ハイ(1)	N.D.	2020	44400	0.6	2.7	5	203	N.D.	0.39	2	142	0.4	N.D.	3	14	79	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	8.9	0.1	N.D.	N.D.		
肝臓																												
ミシシippアカミミガメ(2)	N.D.	337	294	1.0	0.9	5	1835	0.15	0.07	10	30	N.D.	1.5	3	5	2	N.D.	N.D.	0.9	N.D.	N.D.	N.D.	0.5	0.5	N.D.	0.4		
アカマタ(3)	N.D.	577	1010	1.3	1.2	3	2791	0.78	0.16	15	85	N.D.	N.D.	5	10	1	N.D.	N.D.	1.1	N.D.	N.D.	0.3	0.7	3.2	N.D.	0.4		
ガラスヒバア(3)	N.D.	624	713	0.7	2.1	6	382	0.45	0.11	6	82	N.D.	N.D.	4	8	1	N.D.	N.D.	1.3	N.D.	N.D.	0.4	1.1	1.3	N.D.	#DIV/0!		
リュウキュウアオヘビ(3)	N.D.	890	759	1.2	1.4	7	4193	0.65	0.16	19	140	0.7	3.5	12	6	6	16.8	N.D.	2.3	N.D.	N.D.	N.D.	9.7	1.7	N.D.	0.7		
ヒメハブ(3)	N.D.	728	1545	0.3	1.3	6	1047	N.D.	N.D.	20	205	N.D.	N.D.	7	17	1	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	0.3	3.5	N.D.	#DIV/0!		
腎臓																												
ミシシippアカミミガメ(2)	N.D.	725	726	1.2	1.9	4	338	0.54	0.22	14	75	N.D.	2.4	7	13	3	N.D.	N.D.	2.8	N.D.	N.D.	1.3	0.6	N.D.	#DIV/0!			
アカマタ(2)	N.D.	1166	2675	2.0	2.6	5	153	1.31	0.25	8	178	N.D.	N.D.	11	19	3	N.D.	N.D.	6.9	N.D.	N.D.	0.8	3.9	0.9	N.D.	2.6		
ガラスヒバア(3)	N.D.	1354	1860	2.3	5.9	7	280	1.41	0.69	10	203	0.9	N.D.	13	22	4	N.D.	N.D.	7.4	2.9	N.D.	1.8	4.1	1.1	5.7	2.9		
リュウキュウアオヘビ(3)	N.D.	754	522	0.6	1.0	5	265	0.52	0.11	251	146	0.4	6.0	12	5	4	N.D.	2.0	1.8	N.D.	N.D.	N.D.	9.7	2.0	N.D.	2.4		
ヒメハブ(3)	N.D.	703	843	0.5	0.3	5	121	N.D.	N.D.	11	106	N.D.	N.D.	4	19	0	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	0.3	2.1	N.D.	1.0		
内臓																												
ハイ(1)	N.D.	4770	9330	11.6	37.1	19	1370	N.D.	3.17	31	689	N.D.	N.D.	50	104	25	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	21.9	N.D.	N.D.	N.D.		

鳥類では筋肉でゴイスギ、ササゴイ、オオコノハズク、アカショウビン、カワセミ、ハシブトガラスといった魚食性、またはその餌に魚類を含む種で高濃度がみられた一方、アマミヤマシギ（最高 $1.2\mu\text{g/g DW}$ ：県指定天然記念物および国内希少野生動植物種）、ヤンバルクイナ（最高 $0.99\mu\text{g/g DW}$ ：国指定天然記念物および国内希少野生動植物種）、アカヒゲ（最高 $1.2\mu\text{g/g DW}$ ：国指定天然記念物）など山林生の希少種にも $1.0\mu\text{g/g DW}$ に近い比較的高い水銀濃度が認められた。水銀の蓄積部位とされる肝臓ではササゴイに水銀の最高濃度が検出され（ $28\mu\text{g/g DW}$ ）、オオコノハズク（最高 $6.2\mu\text{g/g DW}$ ）、ハシブトガラス（最高 $5.5\mu\text{g/g DW}$ ）といった肉食性の種に加え、ノグチゲラ（最高 $7.6\mu\text{g/g DW}$ ：国指定特別天然記念物および国内希少野生動植物種）、アカヒゲで最高 $3.7\mu\text{g/g DW}$ という、比較的高い水銀濃度が認められた。爬虫類においてもミシシippアカミミガメを除くヘビ類、アカマタ、ガラスヒバア、リュウキュウアオヘビ、ヒメハブも同等の比較的高い水銀濃度がみられた。肝臓中の水銀解毒に関係すると考えられているSeは、水銀の蓄積傾向と類似した分布を示し、ササゴイ、カワセミ、ハシブトガラスといった魚食性を有する種に加え、ヤマシギ、アマミヤマシギ、ヤンバルクイナ、アカヒゲといった山林生の希少種に $10\mu\text{g/g DW}$ を超える高濃度がみられた。ここで、爬虫類ではミミズ食のリュウキュウアオヘビに最高濃度が検出されており（最高 $23\mu\text{g/g DW}$ ）、山林生の鳥類でみられたSe（または水銀の）蓄積には、とくにSeの供給といった点でミミズを鍵種とする食物網の寄与が示唆された。無機水銀の標的器官である腎臓の水銀濃度も肝臓、筋肉と同じく、オオミズナギドリ、ゴイスギ、ササゴイ、オオコノハズク、アカショウビン、カワセミ、ハシブトガラスといった魚食性の鳥種で高濃度で、やはりヤマシギ、ヤンバルクイナ、アカヒゲ、シロハラといった山林生の希少種と、ガラスヒバア、リュウキュウアオヘビ、ヒメハブにも $2\mu\text{g/g DW}$ を超える、比較的高い水銀濃度がみられ、Se濃度ではアマミヤマシギ、アカヒゲといった山林生の希少種に $30\mu\text{g/g DW}$ を超えるレベルがみられた。高次生物へのSeの供給という視点から筋肉のSe濃度に注目すると、オオミズナギドリ、カワセミといった魚食性種に加え、アマミヤマシギ、ヤンバルクイナ、カラスバト、ノグチゲラ、アカヒゲ、シロハラといった希少種を含むグループが $5\mu\text{g/g DW}$ を超える高濃度を示した。爬虫類では、ミシシippアカミミガメ、アカマタ、ガラスヒバアの筋肉中Se濃度が高かった。

有機水銀分析を、アマサギ、アマミヤマシギ、バン、カラスバトおよびハシブトガラスの計5種の筋肉、アマミヤマシギ、バン、カラスバト、アオバズク、アカショウビンおよびハシブトガラスの計6種の肝臓、オオミズナギドリ、ゴイサギ、アマサギ、アマミヤマシギ、バン、カラスバト、ハシブトガラスの計7種の腎臓で行った。分析された有機水銀濃度と総水銀濃度は良好な相関を示した（いずれも $p < 0.05$ by Spearmanの順位相関検定）。また、筋肉、肝臓および腎臓に蓄積された水銀の存在形態は各組織において異なり、腎臓ではほぼ100%が有機水銀であるのに対し、肝臓・筋肉ともに総水銀が高濃度になるにつれ、有機水銀の割合は低下した（図2）。このことは、海生動物で指摘されている水銀の脱メチル化を伴う解毒機構の関与と考えられた。

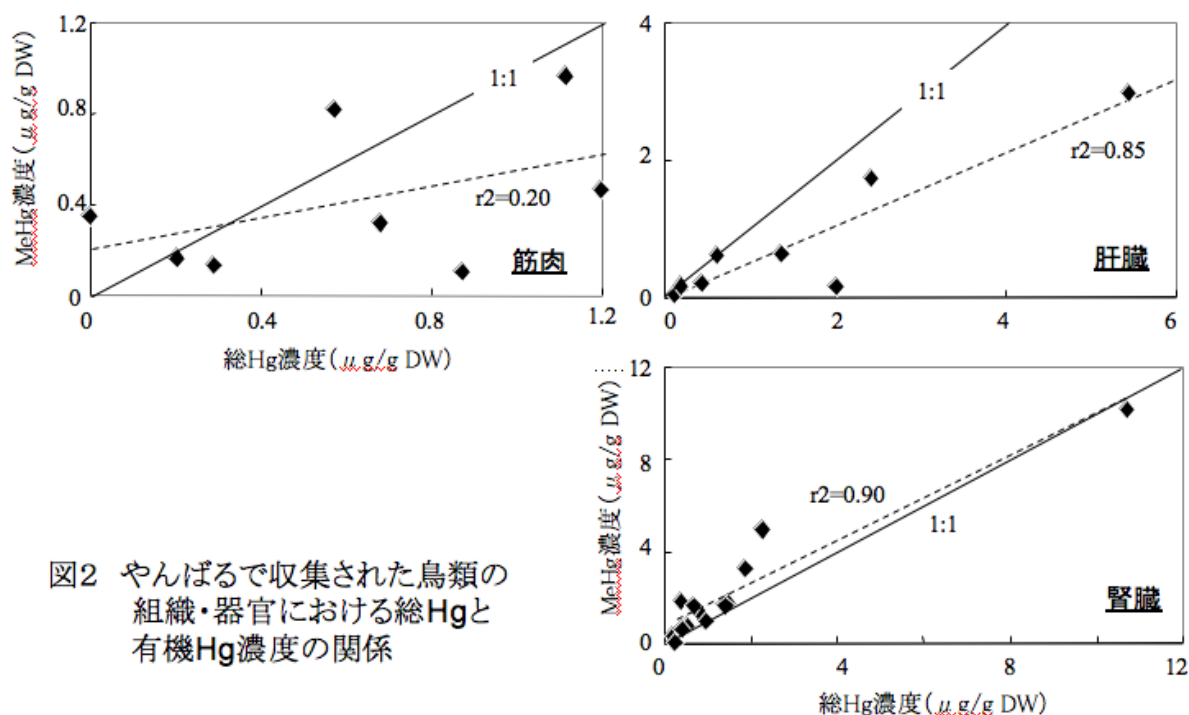


図2 やんばるで収集された鳥類の組織・器官における総Hgと有機Hg濃度の関係

やんばる地域で捕獲された爬虫類および鳥類の全体で種間により、水銀と有意な相関を示した元素は、爬虫類の筋肉ではGaとBa、肝臓ではCuとZn、腎臓ではCoとNi（いずれも $p < 0.05$ by Spearmanの順位相関検定）であった。鳥類では筋肉でCoのみ（ $p < 0.05$ by Spearmanの順位相関検定）、肝臓ではSeとのみ有意水準0.01以下の強い相関が、腎臓ではMoのみと有意水準0.05以下の、V、CoおよびSeで有意水準0.01以下の強い相関がみられた（いずれもSpearmanの順位相関検定による）。

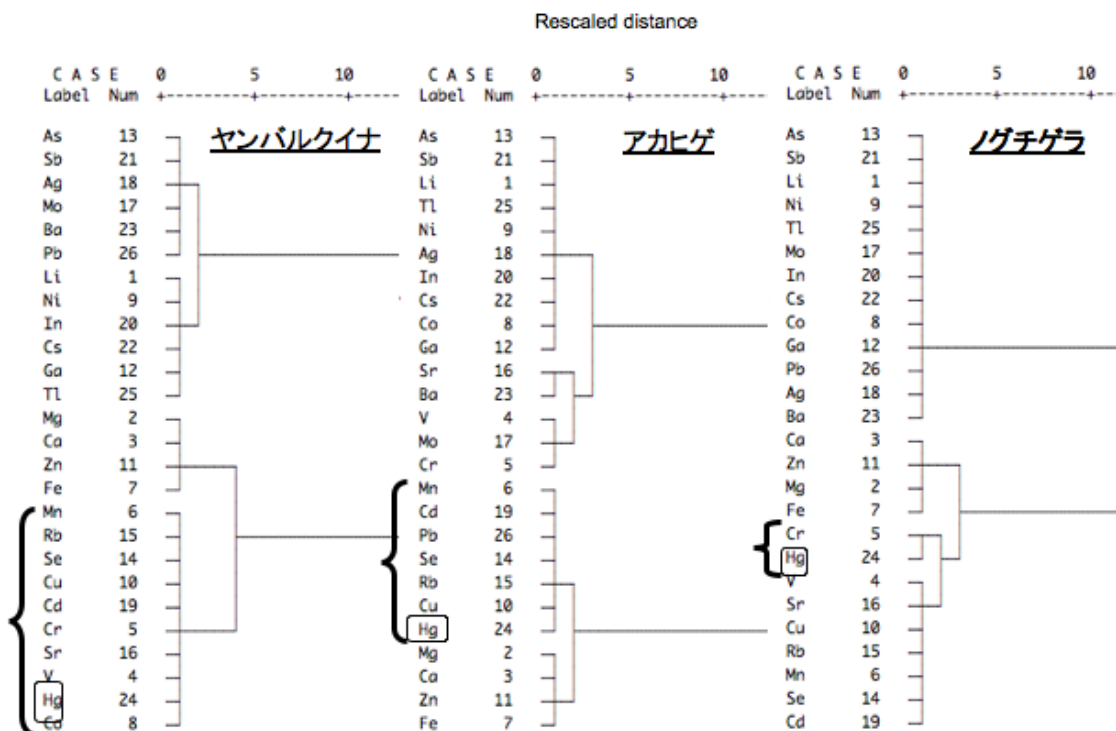
クラスター分析の結果、水銀は爬虫類の肝臓ではSr、BaおよびVの3元素と、筋肉ではCr、Cu、Rb、Sr、Mn、Se、VおよびBaの8元素と同一クラスターを形成した。鳥類では雑食性種（ヤマシギ、ヒクイナ、シロハラクイナ、ノグチゲラ、コゲラ、シロガシラ、ヒヨドリ、シロハラ、ウグイス、メジロ、バン、ハシブトガラスの12種）の肝臓でCr、V、Sr、CdおよびMoの5元素と、筋肉でCr、Se、Mn、VおよびSrの5元素と同一クラスターを形成し、肉食性種（ヤンバルクイナ、ツバメ、アカヒゲ、アマサギ、アマミヤマシギ、リュウキュウコノハズク、オオコノハズク、アオバズクお

よびアカショウビンの9種)になると肝臓でV、Cr、CdおよびSrの4元素と、筋肉ではMn、Se、V、CrおよびSrの5元素と同一クラスターを形成した。

以上の元素間関係では、水銀は必須元素Seに加え、V、Cr、Cu、Mnといった元素が関係し、また毒性元素として、生物蓄積性が高いCd、さらに微量元素としてアルカリ金属、アルカリ土類金属のRb、SrおよびBaが生態系内で類似した挙動を示す可能性が考えられた。とくに、アルカリ金属、アルカリ土類金属のRb、SrおよびBaは、水銀と類似の生物増幅する可能性が推察された。

とくに水銀やSeに比較的高いレベルがみられた希少種についてクラスター分析を行った結果、ヤンバルクイナの肝臓で水銀は、Mn、Rb、Se、Cu、Cd、Cr、Sr、VおよびCoの9元素と、筋肉ではCu、Se、Cr、Mn、V、SrおよびAgの7元素と同一クラスターを形成し、ノグチゲラでは肝臓でCrのみと、筋肉では単独で、アカヒゲでは肝臓でMn、Cd、Pb、Se、RbおよびCuの6元素と、筋肉でCu、Rb、Sr、ZnおよびMnの5元素と同一クラスターを形成した(図3)。このことは、希少種3種でも水銀を中心とした元素環境に差異があり、ヤンバルクイナとアカヒゲは比較的類似しCdやPbといった生物蓄積性の強毒性元素にも曝露されるのに対し、ノグチゲラは異なった食物網に所属している可能性が考えられた。

図3 クラスター分析による、やんばるに生息する希少鳥類の肝臓における微量元素の関係



(3) 魚類

やんばる地域および沖縄県沿岸で捕獲された海生魚類4種(イソフエフキ、ゴマアイゴ、ナンヨウブダイおよびマグロ類)の筋肉から、水銀はイソフエフキのみが分析されたが、その濃度は0.27~0.49 μg/gDWであった。我が国は南北に長い島国であるという地理的条件に起因して、古くから

文化としても魚食傾向が強い。日本人の魚介類の摂食は、食生活の変化にも関わらず約半世紀に渡りほぼ横ばいで、約100g/日とされている。しかし、我が国における水銀摂取の経路は著しく変化し、有機水銀化合物を水田への農薬として使用していた戦後と異なり（おもにコメから）、現在は食品由来の約90%が魚介類からの摂取となっている⁵⁾。一部の魚介類が水銀を濃縮し、体内に高濃度で蓄積することは、水俣病の発現メカニズム解明以来、極めて有名な現象である。そのレベルには産地の海域差にくわえ種差が存在し、生態系の高次捕食者であり長寿命（一般に体サイズが大）の種ほど高い水銀濃度となる。平均して魚類の水銀濃度は0.08ppm（湿重あたり）とされるが、カジキ・マグロ類、タイ類、底生魚類、ウナギなどは総水銀で10倍以上の蓄積が確認されている⁶⁾。現在、我が国において食品の水銀レベルに関するリスク管理は以下の2つによって行われている。一つは1973年の厚生省「魚介類の水銀に関する専門家会議」から出された「魚介類の水銀の暫定的基準についての意見」に基づく暫定的規制値（以下'73暫定値）で、もう一つは2003年に公表され、その後2005年に見直しが行われた（「妊婦への魚介類の摂食と水銀に関する注意事項」）、「水銀を含有する魚介類等の摂食に関する注意事項（以下'03注意事項）」である。前者は魚類の濃度で示したもので、総水銀で0.4、メチル水銀で0.3ppm（湿重あたり）、後者は耐用週間摂取量PTWIで示したものでハイリスク・グループに2.0 μ gメチル水銀/kg体重/週である（'73暫定値をPTWI換算すると3.4 μ g/kg/週）。沖縄のイソフエフキの水銀濃度はこれら暫定規制値を大きく下回り、顕著な水銀汚染はないことが考えられた。一方で、沖縄産魚類におけるAsの濃度は平均22.7（最高54.8：イソフエフキの筋肉より検出） μ g/gDWで、比較的高いAs蓄積が起きていることが示唆された。

（4）哺乳類

1）ネズミ目

ネズミ類は哺乳類の中でもっとも種が多く、世界中に生息している。生息場所も多岐にわたるため、環境中の汚染状況を把握する指標種として用いられることも多い。一方で、ネズミ目には絶滅の危機に瀕している種が多く存在し、やんばる地域に生息する種では、ケナガネズミやオキナワトゲネズミなどが概当する。本研究では、これらやんばる地域に生息する希少種を含めたネズミ目の微量元素濃度を把握することで、希少種の水銀汚染を評価することを目的とした。

ネズミ目の4種の各組織における元素濃度を表5に示す。なお、ケナガネズミ、アマミトゲネズミ、そしてワタセジネズミは希少種であり、クマネズミは全国的に数多くみられる種である。クマネズミは希少種との比較対象として元素濃度を測定した。

全元素について、他種との濃度差があるか、Turkey法で多重比較を行った。水銀は、筋肉と腎臓でクマネズミがケナガネズミに対して有意に高い濃度を示した（ $p < 0.05$ ）。しかし、他種では有意な濃度差はみられなかった。

また、水銀以外の汚染元素でAsは、肝臓でクマネズミがケナガネズミ、アマミトゲネズミ、ワタセジネズミに対し、有意な高濃度を示した。Pbは、クマネズミ、ケナガネズミ、そしてアマミトゲネズミがワタセジネズミに対して有意に高濃度を示した。

クマネズミ、アマミトゲネズミおよびワタセジネズミといった昆虫食を主とする雑食性種で水銀など強毒性元素が比較的高い濃度を示した。WHO（1991）の報告では、マウスおよびウサギを用いた実験で、体重当たり1 mg/kgあるいは2 mg/kgの水銀を注射することで、全身性の自己免疫疾患

が起きる。本研究で測定した検体で、クマネズミの腎臓はこれらの投与濃度に近い値を示したが、希少種に概当する検体はなかった。

2) 翼手目

翼手目には、大翼手亜目と小翼手亜目があり、オオコウモリ科と他の科に分類される。コウモリ類はネズミ類について2番目に種類が多い哺乳類であるが、森林伐採により樹木や餌が失われ、多くの種が絶滅の危機に瀕している。やんばる地域にも様々なコウモリ類が生息し、個体数の減少が懸念されている。本研究ではオオコウモリ科のクビワオオコウモリと、キクガシラコウモリ科のオキナワコキクガシラコウモリの微量元素濃度の測定を行った。両種はそれぞれ、準絶滅危惧種と絶滅危惧IB類に属している。

オリイオオコウモリとオキナワコキクガシラコウモリの各組織中元素濃度を表5に示す。なお、オリイオオコウモリは頸部の毛が鮮やかな黄色をしており、腹部などと違う毛色のため、腹部と頸部の毛もそれぞれ測定した。コウモリ類の水銀は、両種で検出されたが、オキナワコキクガシラコウモリでオリイオオコウモリと比較して一桁高い値を示した。

他の汚染元素に着目すると、Asは、オリイオオコウモリで全組織から検出されたが、オキナワコキクガシラコウモリでは全組織で検出されなかった。Cdは、両種で検出されたがオリイオオコウモリの方が高濃度で検出された。Pbはオリイオオコウモリでは筋肉以外の組織で検出され、毛が最も高濃度を示した。一方、オキナワコキクガシラコウモリでPbは、筋肉と肝臓で検出されたが、オリイオオコウモリより低い値を示した。

これら汚染元素の濃度レベルを評価する為に、文献値との比較を行った。*Myotis mystacinus*、*Myotis nattereri*の2種について、腎臓における水銀とCd、Pb濃度が報告され、中央値でそれぞれ水銀が $3.00 \mu\text{g/g dry wt.}$ (*Myotis mystacinus*)、Cdが $6.27 \mu\text{g/g dry wt.}$ (*Myotis nattereri*)、Pbが $4.05 \mu\text{g/g dry wt.}$ (*Myotis mystacinus*)であった⁷⁾。この報告と比較すると、オキナワコキクガシラコウモリは、他種よりも水銀やCd、Pbといった汚染元素の濃度は低いと結論された。また、オリイオオコウモリも報告された他種より、水銀を含めた全ての汚染元素濃度で低かった。

また、オリイオオコウモリとオキナワコキクガシラコウモリを比較すると、オリイオオコウモリは体長がオキナワコキクガシラコウモリより大きいにも関わらず、水銀濃度はオキナワコキクガシラコウモリより低い値を示した。これには2種の食性の関与が考えられた。オリイオオコウモリは主に、果実を餌として摂取する。一方でオキナワコキクガシラコウモリは昆虫を主な餌としている。そのため、オキナワコキクガシラコウモリの方が食物連鎖を介した水銀の生物濃縮を受け、水銀が高濃度になったと考えられる。また、オリイオオコウモリとオキナワコキクガシラコウモリのように同じ生態系に属していても、異なる食物連鎖に属することにより汚染物質の影響を受けやすい種と受けにくい種がいると考えられた。

表5 やんばんるで採取された哺乳類のHgおよび微量元素の平均濃度 (on $\mu\text{g/g DW}$)

種名(検体数)	Li	Mg	Ca	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	As	Se	Rb	Sr	Mo	Ag	Cd	In	Sb	Cs	Ba	Hg	Tl	Pb	
筋肉																											
ワタセジネズミ(3)	N.D.	668	1929	0.05	1.8	1.6	125	0.15	0.23	10	52	0.05	N.D.	3	17	2.7	0.09	N.D.	0.05	N.D.	N.D.	0.11	0.35	0.38	0.01	0.29	
ケナガネズミ(4)	N.D.	989	229	0.08	6.5	1.8	148	0.05	0.28	8	170	N.D.	N.D.	1	44	0.6	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	0.23	0.12	0.06	N.D.	N.D.	
トゲネズミ(2)	0.08	1388	227	0.06	8.0	3.4	158	0.09	0.15	7	70	N.D.	N.D.	1	74	0.4	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	0.31	0.09	0.12	N.D.	N.D.	
クマネズミ(6)	N.D.	1129	276	0.06	9.2	1.2	135	0.05	0.18	6	74	N.D.	0.7	2	37	0.4	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	0.83	0.07	0.14	N.D.	N.D.	
オリオオコウモリ(4)	N.D.	1022	130	N.D.	6.4	2.4	251	N.D.	N.D.	16	56	N.D.	0.4	1	27	0.2	N.D.	N.D.	0.18	N.D.	N.D.	3.02	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	
キクガシラコウモリ(3)	N.D.	894	186	0.02	2.1	2.5	181	0.09	0.05	20	55	0.01	N.D.	2	9	0.4	0.05	N.D.	0.07	N.D.	N.D.	0.02	0.13	0.59	N.D.	0.90	
アマミノクロウサギ(20)	0.07	1111	131	0.05	5.5	1.3	134	0.06	0.10	6	94	N.D.	0.3	0	35	0.4	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	0.51	0.10	0.37	N.D.	N.D.	
ニホンイタチ(30)	0.04	997	234	0.06	7.1	1.1	211	0.03	0.15	8	115	0.02	2.1	1	15	1.3	0.08	N.D.	0.09	N.D.	0.05	0.06	0.05	3.09	0.01	0.04	
ジャワマングース(49)	0.12	994	244	0.08	3.1	0.8	82	0.05	0.11	6	94	0.01	0.5	2	21	0.4	0.19	0.05	0.05	0.01	N.D.	0.13	0.04	4.49	0.01	0.05	
肝臓																											
ワタセジネズミ(3)	N.D.	657	841	0.02	1.4	6.2	397	0.17	0.05	35	82	N.D.	N.D.	5	13	1.2	1.44	N.D.	0.35	N.D.	N.D.	0.08	0.14	0.20	0.01	0.47	
ケナガネズミ(4)	N.D.	679	242	0.02	1.6	16.2	815	0.07	0.15	10	100	0.09	N.D.	5	19	1.5	1.21	N.D.	0.36	N.D.	N.D.	0.05	1.27	0.04	N.D.	0.12	
トゲネズミ(2)	0.07	840	112	0.04	4.8	6.8	1025	0.31	0.08	22	153	N.D.	N.D.	3	50	0.2	1.80	N.D.	0.24	N.D.	N.D.	0.15	0.06	0.21	N.D.	0.52	
クマネズミ(3)	N.D.	785	301	0.04	3.8	6.4	613	0.15	0.15	12	194	N.D.	2.6	4	24	1.6	2.41	N.D.	0.26	N.D.	N.D.	0.35	0.17	0.07	N.D.	N.D.	
オリオオコウモリ(4)	0.33	665	349	0.72	2.5	7.9	401	0.59	0.32	19	74	N.D.	0.4	2	18	2.3	1.03	N.D.	2.78	N.D.	N.D.	1.73	0.48	0.03	N.D.	0.40	
キクガシラコウモリ(3)	N.D.	733	175	0.01	1.2	13.6	409	0.10	0.16	14	80	N.D.	N.D.	4	7	1.3	0.86	N.D.	0.47	N.D.	N.D.	0.32	0.64	N.D.	0.04		
アマミノクロウサギ(13)	0.10	761	282	0.07	2.3	17.1	769	0.23	1.08	14	127	0.14	0.2	1	28	1.9	2.41	N.D.	0.55	N.D.	N.D.	3.91	0.31	1.03	0.14	0.23	
ニホンイタチ(30)	0.03	727	236	0.04	3.0	8.1	1212	0.06	0.05	18	134	0.01	2.1	3	11	0.8	2.36	0.39	1.74	N.D.	0.02	0.05	0.06	2.09	0.02	0.89	
ジャワマングース(49)	0.03	615	174	0.11	3.0	10.1	663	0.17	0.04	29	198	0.00	N.D.	22	16	0.4	1.17	0.43	0.82	0.00	N.D.	0.06	0.03	43.46	0.01	0.85	
腎臓																											
ワタセジネズミ(3)	N.D.	690	748	0.04	1.9	3.9	281	0.45	0.09	28	76	0.01	N.D.	6	14	2.1	0.71	N.D.	0.46	N.D.	N.D.	0.08	0.13	0.30	0.01	N.D.	
ケナガネズミ(4)	N.D.	950	292	0.04	3.3	11.9	357	0.20	0.30	15	91	N.D.	N.D.	9	23	1.9	0.47	N.D.	3.93	N.D.	N.D.	0.10	0.39	0.39	0.07	0.18	
トゲネズミ(2)	N.D.	859	322	0.08	9.6	8.8	357	0.49	0.29	17	116	N.D.	N.D.	6	47	1.1	0.42	N.D.	2.00	N.D.	N.D.	0.18	0.97	0.88	N.D.	2.16	
クマネズミ(6)	N.D.	882	342	0.06	6.3	3.6	350	0.29	0.16	17	135	N.D.	1.7	11	33	0.9	1.73	N.D.	7.29	N.D.	N.D.	0.59	0.23	1.30	0.04	1.33	
オリオオコウモリ(3)	N.D.	700	148	N.D.	2.2	5.9	262	0.57	0.18	20	82	N.D.	0.6	4	27	N.D.	N.D.	N.D.	11.89	N.D.	N.D.	2.11	N.D.	0.06	N.D.	0.50	
キクガシラコウモリ(3)	N.D.	720	186	0.02	1.8	7.4	309	0.11	0.05	17	84	N.D.	N.D.	4	8	1.5	0.62	N.D.	1.26	N.D.	N.D.	N.D.	0.25	0.49	N.D.	N.D.	
アマミノクロウサギ(17)	0.26	947	428	0.07	2.4	19.1	392	0.47	0.69	17	118	0.13	0.5	6	35	2.8	0.82	N.D.	5.32	N.D.	N.D.	0.58	1.45	0.60	N.D.	0.23	
ニホンイタチ(30)	0.04	783	249	0.05	5.3	3.8	623	0.10	0.08	20	132	0.02	2.4	6	13	1.5	1.17	N.D.	5.15	N.D.	N.D.	0.05	0.08	6.40	0.02	1.30	
ジャワマングース(10)	0.06	694	254	0.18	6.2	3.8	276	0.05	0.57	23	259	N.D.	N.D.	7	21	0.5	0.42	N.D.	1.40	N.D.	N.D.	0.06	0.03	14.13	N.D.	1.83	

3) やんばんる生態系の哺乳類体内で水銀と関係する微量元素

やんばんる生態系および、比較となる沖縄島南部付近の座間味島および北部にあたる奄美大島から採取された哺乳類体内で水銀と同一クラスターを形成する元素を以下に示す。

ネズミ目4種と翼手目2種 (やんばんる地域他)

肝臓 : Sr, Ba, Cd, Co, Pb

筋肉 : Mo, Ag, Co, V, Ni, Ba, As

腎臓 : Ni, Cs, Pb

ジャワマングース (やんばんる地域)

肝臓 : Mn, Rb, Cu, Se

筋肉 : Mn, Se, Sr, Cr, Cu

腎臓 : Cr, Mn, Se, Cu, Rb

ニホンイタチ (座間味産)

肝臓 : Mn, Rb, Cu, Sr, Pb, Cd, Cr, Se, Mo

筋肉 : Cr, Cu, Rb, Mn, Se, Sr

腎臓 : Cu, Rb, Se, Cr, Mn, Cd, Sr, Mo, Pb, Co

アマミノクロウサギ (奄美大島)

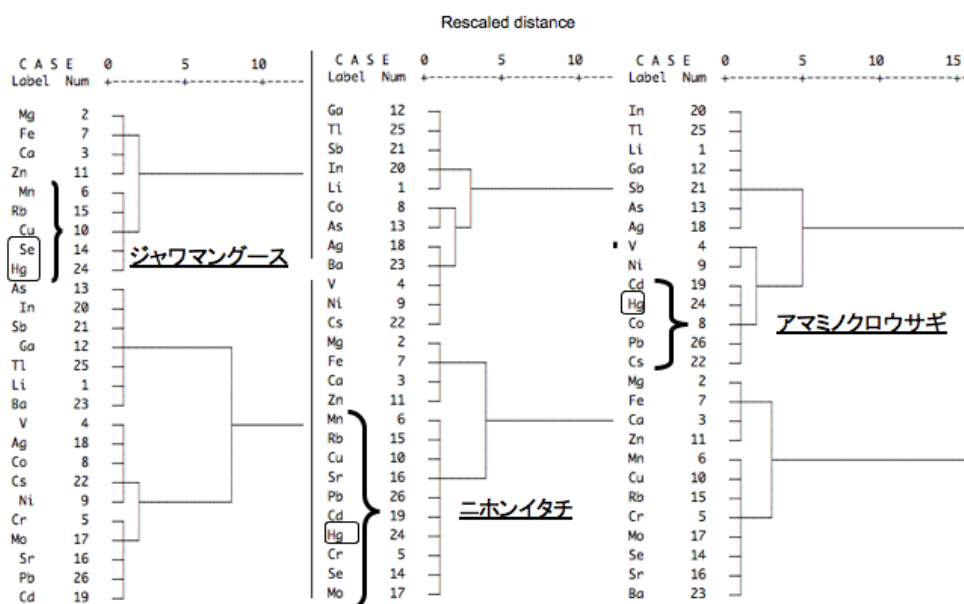
肝臓 : Cd, Co, Pb, Cs

筋肉 : Mo, Ag, As, V, Ni, Co, Ba

腎臓 : Mn, Cu, Rb, Ba, Cr, Sr, Se, Cd

これら、南西諸島に生息する哺乳類において水銀と関係して蓄積する微量元素には幾つかの特徴がみられた（図4）。水銀を高濃度で蓄積しながらSeを介した解毒メカニズムの存在が示唆される、かつ生態系の最高次捕食者（元素動態のターミナル種である）ジャワマンゲースは、Seに加え必須元素のCuおよびMnが関係した蓄積が顕著であった。くわえて、必須元素Crと、これまで低次生物や鳥類でも関係が示唆されたアルカリ金属Rbやアルカリ土類金属Srがみとめられた。同様の、地域生態系の最高次捕食者である座間味島のニホンイタチはこれら元素に加え、汚染元素であるPbやCdが加わり、対照的な低次生物である草食性のアマミノクロウサギにはAgやAsとの関係もうかがえた。この低次哺乳類が、水銀とともに強毒性の汚染元素PbやCd、Asと連動して挙動する傾向はネズミ目と翼手目を併せた解析でも認められ、これら元素の南西諸島における生物蓄積性が示唆された。

図4 クラスター分析による、南西諸島に分布する哺乳類の肝臓における微量元素の関係

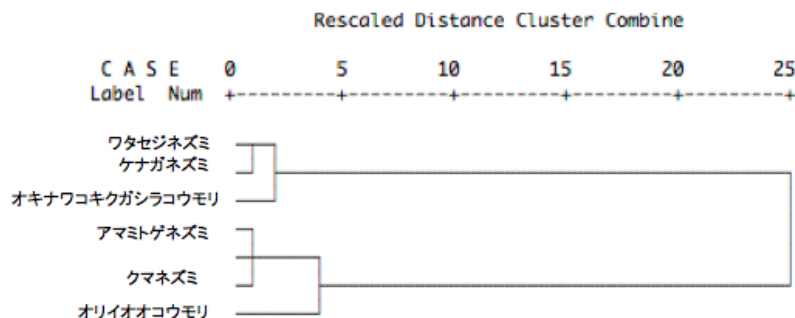


4) 哺乳類の蓄積傾向

本研究で測定したやんばるなど南西諸島の哺乳類は、種ごとに水銀を含む微量元素の蓄積傾向が異なっていた。また、ネズミ目では同じ生態系に属し、同じニッチに属していても種によって汚染元素を蓄積しやすい状況にある種がいたと考えられた。そのため、分析された水銀濃度を用いてクラスター分析を行い、種間の蓄積傾向の類似性を検討した。なお、対象組織は水銀が比較的多く検出された腎臓で行った。水銀濃度を用いた分析の結果、ワタセジネズミ、ケナガネズミ、オキナワコキクガシラコウモリそしてオリオオコウモリの4種が同一クラスターを形成した（図5）。これらは沖縄島に生息する希少種であり、他種と水銀蓄積傾向が異なると考えられた。同じ沖縄島に生息するクマネズミは比較的、水銀濃度が高い（表5）。オリオオコウモリやケナガネズミなどの果実を食する種では濃度が低く、属する食物連鎖に依存して濃度が変動すると考えられた。また、アマミノクロウサギのいくつかの検体では、昆虫食の強い雑食性のクマネズミに

匹敵する水銀濃度が検出された。水銀は食物連鎖の上位に属する生物で高濃度に蓄積するため、植食性のアマミノクロウサギで、クマネズミに匹敵する水銀濃度が検出されたことは興味深い。原始的な哺乳類であるアマミノクロウサギが水銀の排泄能力に乏しい可能性、水銀高蓄積植物の存在などが示唆されるだろう。

図5 腎臓のHg濃度を用いたクラスター分析による南西諸島に分布する哺乳類の関係



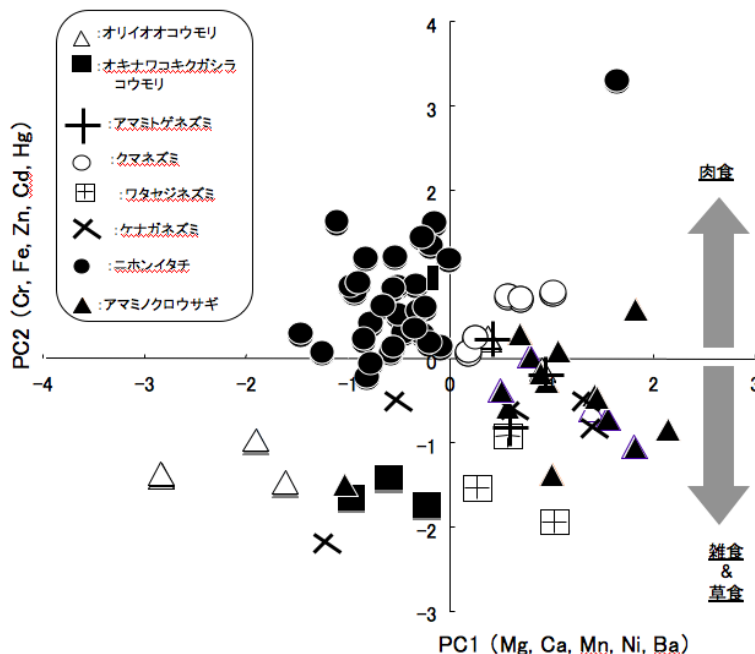
5) 哺乳類の微量元素濃度を用いた主成分分析

やんばる生態系を含む、南西諸島に生息する哺乳類における微量元素の蓄積傾向と、そこから得られる特徴をさらに詳しく解析するため、水銀を含めた26元素濃度を用い、主成分分析を行った。図6に本研究に供試した哺乳類の腎臓における元素濃度を用いた主成分分析の結果を示す。なお、食性によってプロットの形状を変え、丸で肉食、四角で雑食、そして三角で草食の種を表した。

抽出された第一主成分(PC1)はMg、Ca、Mn、NiおよびBaの寄与率が大きく、第二主成分(PC2)ではCr、Fe、Zn、Cd、および水銀の寄与率がそれぞれ大きかった。PC1で正の値を示した種は、主にニホンイタチ、アカネズおよびクマネズミであり、肉食傾向の強い種であった。そのため、PC1は食性を反映する成分だと考えられた。一方でPC2は水銀およびCdが寄与率の大きい元素であったため、汚染元素を反映する成分だと考えられた。しかしCdが比較的高濃度で検出されたオリイオオコウモリとアマミノクロウサギがPC2の正の値と負の値に分かれた事から、PC2の正の値と負の値を分ける要因に水銀およびCd濃度のみが関与しているとは考えにくかった。種ごとにPC2をみると、オリイオオコウモリおよびオキナワコキクガシラコウモリの翼手目がPC2で負の値に、ネズミ目の種が正の値に主に位置していたことより、PC2には種によってことなる汚染物質の代謝機構の関与が考えられた。

主成分分析により、南西諸島に生息する種の元素による分類を特徴づける要因として、食性および汚染元素が重要であると考えられた。また、汚染元素は濃度だけでなく、種特異の代謝能力の関与が示唆された。

図6 南西諸島に分布する哺乳類体内の26元素濃度を用いた主成分分析の結果



(5) やんばる生態系における水銀の分布および動態

本研究で分析されたジャワマングースの肝臓から得られた水銀の最高濃度は $300 \mu\text{g/g DW}$ を超えた。マングース成体における肝臓の乾燥重量は約 6g 程度であり、やんばる生態系（野生下）では、約2年で 1.8mg もの水銀が濃縮されると試算された。やんばる生態系の栄養段階が低次の生物（無脊椎動物）の水銀レベルは平均で $0.66 \mu\text{g/g DW}$ 、分析された試料の中で最高濃度はムカデ類の $1.9 \mu\text{g/g DW}$ であった。このレベルは、報告された北米大陸における非汚染陸上生態系の参考値⁸⁾（約 $0.05 \mu\text{g/g DW}$ ：クモ類、鱗翅目、直翅目など）より高く、汚染地のレベル（クモ類 1.2 、その他は約 $0.3 \mu\text{g/g DW}$ ）と同程度であった。両生類では、とくにイボイモリで他種（カエル類4種）に比較して顕著に高い水銀レベルが認められた（筋肉で最高 $25 \mu\text{g/g DW}$ ）。分析された爬虫類は、栄養段階がマングースと同様に高い種が含まれたが、顕著な高値はみられなかった。鳥類においては魚食性のサギ類などに比較的高濃度の水銀が認められたが、この傾向は、これまでの多くの報告と一致するものであった。しかし、魚食性でない山林生の希少種ノグチゲラ、ヤンバルクイナ、アマミヤマシギ、アカヒゲの筋肉や肝臓に比較的高レベルの水銀とSeが検出された。哺乳類は、分析された希少種に、鳥類のような高濃度は確認されなかった。また、やんばる地域における沿岸生魚類イソフエフキの筋肉から $0.27\text{--}0.49 \mu\text{g/g DW}$ の濃度が検出された。

以上の結果から、やんばる生態系に存在する水銀レベルは、比較的高めであることが示唆され、ジャワマングースの水銀濃縮に、イボイモリやヤンバルクイナ、ヤマシギなど山林生の希少種であり、かつ水銀濃度の高い種が寄与している可能性が示された。

以下、分析された各試料を水銀濃度の高い順に列記する。このとき、たとえばジャワマングースは分析された肝臓、腎臓、筋肉の平均値をそれぞれ、別個にリスト・アップし、概要の把握を試みた。

30 μ g/gDW以上

ジャワマングース肝臓

20 μ g/gDW以上

ササゴイ肝臓

10 μ g/gDW以上

ジャワマングース腎臓>ゴイサギ腎臓

5~10 μ g/gDW

オオミズナギドリ肝臓>ゴイサギ筋肉>ササゴイ腎臓>ニホンイタチ腎臓>イボイモリ肝臓

3~5 μ g/gDW

ジャワマングース筋肉>ササゴイ筋肉>イボイモリ筋肉>ヒメハブ肝臓>ヒメハブ筋肉
>オオミズナギドリ腎臓>アカマタ肝臓>ニホンイタチ筋肉

1~3 μ g/gDW

ノグチゲラ肝臓>オオコノハズク肝臓>ハシブトガラス肝臓>ハシブトガラス腎臓>オオコノハズク腎臓>ヤマシギ腎臓>ニホンイタチ肝臓>カワセミ腎臓>ヒメハブ腎臓>アマサギ肝臓>リュウキュウアオヘビ腎臓>ツバメ腎臓>リュウキュウアカガエル肝臓>リュウキュウコノハズク腎臓>ムカデ類>アカヒゲ肝臓>ガラスヒバァ筋肉>リュウキュウアオヘビ肝臓>アカマタ筋肉>アマミヤマシギ腎臓>ヤンバルクイナ腎臓>シロハラ腎臓>アマサギ腎臓>ヤマシギ肝臓>アカショウビン腎臓>クマネズミ腎臓>カワセミ肝臓>ガラスヒバァ肝臓>リュウキュウアカガエル筋肉>アカヒゲ腎臓>オオコノハズク筋肉>ツバメ肝臓>アマミヤマシギ肝臓>ウグイス腎臓>アカショウビン肝臓>シロハラ肝臓>ガラスヒバァ腎臓>ヤンバルクイナ肝臓>バン肝臓>オオミズナギドリ筋肉>ヤマシギ筋肉

0.5~1.0 μ g/gDW以上

アマミヤマシギ筋肉>アカマタ腎臓>カワセミ筋肉>ノグチゲラ腎臓>シロハラクイナ肝臓>アマミトゲネズミ腎臓>ヒクイナ肝臓>ハシブトガラス筋肉>シロアゴガエル肝臓>サワガニ類>オオナメクジ類>リュウキュウカジカガエル肝臓>アマサギ筋肉>ミシシッピアカミミガメ筋肉>キクガシラコウモリ肝臓>シロハラクイナ腎臓>ハナサキガエル筋肉>ツバメ筋肉>アマミノクロウサギ腎臓>ウグイス肝臓>キクガシラコウモリ筋肉>アカヒゲ筋肉>ミシシッピアカミミガメ腎臓>シロハラ筋肉>ハナサキガエル肝臓>ヒクイナ腎臓>ミシシッピアカミミガメ肝臓>アカショウビン筋肉>ヤンバルクイナ筋肉

0.1~0.5 μ g/gDW

ノグチゲラ筋肉>キクガシラコウモリ腎臓>メジロ腎臓>コゲラ腎臓>リュウキュウコノハズク筋肉>バン腎臓>ケナガネズミ腎臓>カブトムシ類>ワタセジネズミ筋肉>コゲラ筋肉>アオバズク腎臓>アマミノクロウサギ筋肉>リュウキュウカジカガエル筋肉>シロハラクイナ筋肉>カブトムシ類>ワタセジネズミ腎臓>シロアゴガエル筋肉>ウグイス筋肉>ヒクイナ筋肉>リュウキュウアオヘビ筋肉>バン筋肉>シロガシラ肝臓>リュウキュウコノハズク肝臓>アマミトゲネズミ肝臓>ワタセジネズミ肝臓>アオバズク肝臓>ヤンバルマイマイ>ヒヨドリ腎臓>アオバズク筋肉>メジロ肝臓>ハナサキガエル腎臓>ヒヨドリ肝臓>クマネズミ筋肉>アマミノクロウ

サギ肝臓>クモ類>アマミトゲネズミ筋肉>カラスバト肝臓

0.01~0.1 $\mu\text{g/gDW}$ 以上

メジロ筋肉>ハイ筋肉>クマネズミ肝臓>ケナガネズミ肝臓>オリオオコウモリ腎臓
>ケナガネズミ筋肉>ケナガネズミ肝臓>オリオオコウモリ肝臓

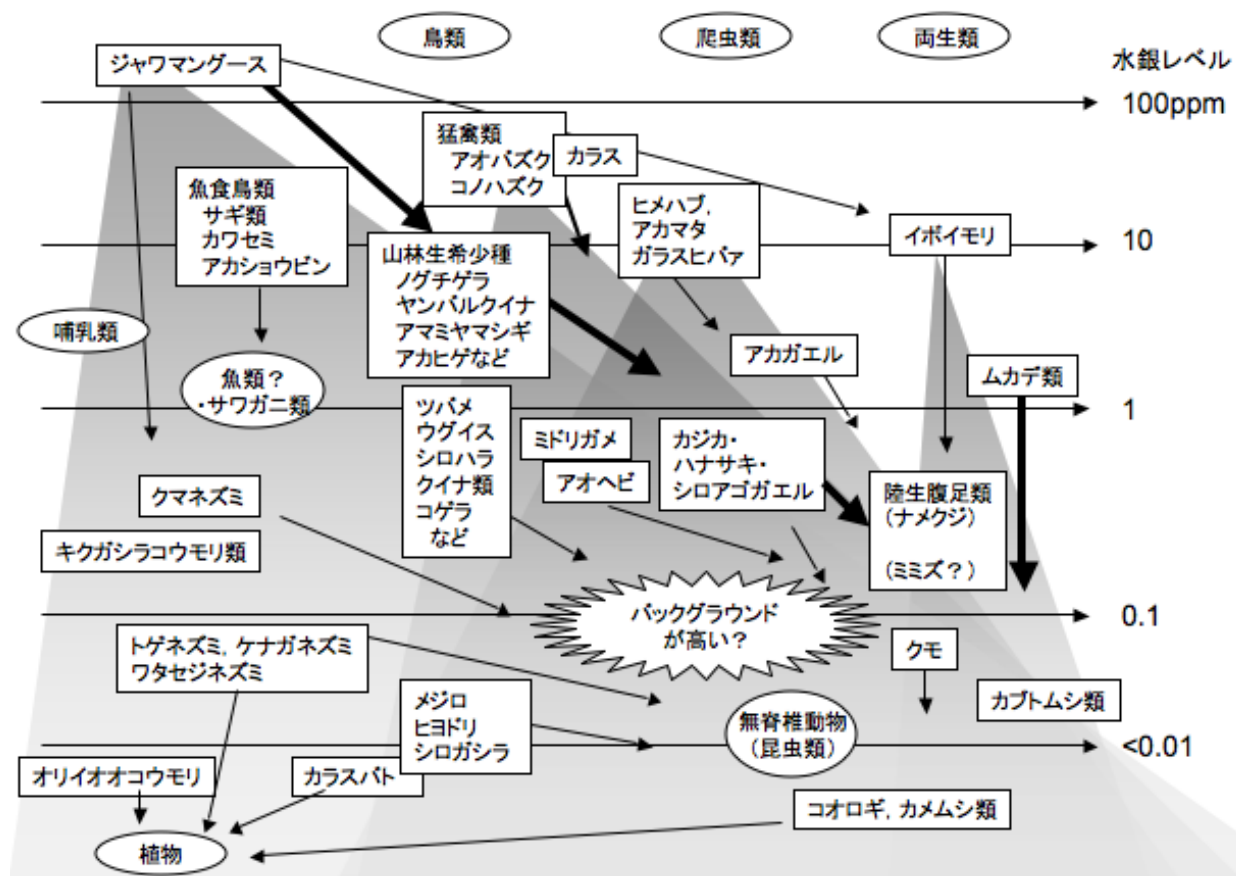
0.01 $\mu\text{g/gDW}$ 以下

ケナガネズミ筋肉>マダラコオロギ, ナナホシキンカメムシ, ホオグロヤモリ, オリオオコウモリ筋肉, ハイ内臓, カラスバト腎臓・筋肉, シロガシラ腎臓・筋肉, ヒヨドリ筋肉, シロアゴガエル腎臓

やんばる生態系においてジャワマングースが水銀の特異蓄積種であり、最高次捕食者であることが水銀濃度からも支持されたが、ヒメハブ、アカマタ、ガラスヒバアといった肉食性のヘビ類、オオコノハズク、リュウキュウコノハズクなど猛禽類、ハシブトガラスといった肉食性の鳥類も、その高次栄養段階が水銀濃度によって支持されると考えられた。一方で、これら捕食者に効率的に水銀を供給する可能性のある動物として無脊椎動物のムカデ類、両生類のイボイモリ、リュウキュウアカガエル、シロアゴガエル、鳥類のノグチゲラ、ヤマシギ、アマミヤマシギ、ヤンバルクイナ、アカヒゲ、シロハラ、ツバメ、哺乳類のクマネズミが考えられた。一方で、両生類でもハナサキガエルやリュウキュウカジガエル、鳥類でもメジロやヒヨドリ、シロガシラなど、哺乳類でもケナガネズミ、ワタセジネズミ、コウモリ類は水銀濃度が低く、ジャワマングースの嗜好生物になっていない可能性が推察され、また、低栄養の種と考えられた。

以上の水銀濃度と、得られた生態情報を考えあわせると、やんばる生態系には①大きくジャワマングースをトップにした食物網、②魚食性鳥類をトップにした水界生態系をベースとした食物網、③猛禽類など肉食性鳥類をトップとする食物網、④ハブやアカマタなど肉食性爬虫類をトップとした食物網が考えられ、①は全てを包括する可能性があり、④は①および③へ収斂される可能性が考えられた(図7)。また、これらより低位に⑤ヤンバルクイナなど無脊椎動物食の鳥類まで、⑥イボイモリまで、⑦ムカデ類など強肉食性無脊椎動物をトップとした食物網の存在も支持されよう。これら、⑤⑥および⑦は、当然、より高位の③、④および①へ収斂されるが、ここでやんばる生態系の大きな特徴が明らかになる。それは、「山林の、とくに無脊椎動物に依存した森林生態系で、やんばる地域は極めて水銀レベルの高い特異な場所である」という側面である。つまり、ヤンバルクイナやイボイモリ、ムカデ類が比較的高い水銀を有する、水銀レベルがボトムアップした生態系と考えられる。その更に基部には、土壌-植物、植物-無脊椎動物があり、とくにどのグループの無脊椎動物が水銀を高レベルで蓄積し始めるのか、種の特異など詳細究明は今後の課題であろう。本研究ではカタツムリ類やナメクジ類など腹足類の水銀レベルが比較的高かったが、鳥類や爬虫類、両生類が嗜好するミミズなど環形動物等の水銀レベルの把握なども、今後の課題と言えよう。

図7 やんばる生態系におけるHg分布と生物増幅の概念図



動物は水銀を高濃度で蓄積する場合、多くの種で肝臓が最も高く、ついで腎臓、筋肉の順になることが多い。やんばる生態系においては最高蓄積種のジャワマンゲースが、このパターンである。しかし、比較的低い場合は腎臓や、ときに筋肉で肝臓よりも高い濃度となることがある。やんばる生態系でみられた、それらのパターンを以下にまとめる。

肝臓>腎臓>筋肉

ジャワマンゲース,

ササゴイ, オオミズナギドリ, ノグチゲラ, オオコノハズク, ハシブトガラス, アマサギ,
アカヒゲ, バン, シロハラクイナ, ヒクイナ, シロガシラ, カラスバト

(イボイモリ: 腎臓なし), (リュウキュウアカガエル: 腎臓なし),

(リュウキュウカジカガエル: 腎臓なし)

肝臓>筋肉>腎臓

キクガシラコウモリ,

ヒメハブ, アカマタ, シロアゴガエル

腎臓>肝臓>筋肉

アマミトゲネズミ，オリイオオコウモリ，
 ヤマシギ，カワセミ，ツバメ，アマミヤマシギ，ヤンバルクイナ，シロハラ，
 アカショウビン，ウグイス，メジロ，（コゲラ：肝臓なし），アオバズク，ヒヨドリ，
 リュウキュウアオヘビ，

腎臓>筋肉>肝臓

ニホンイタチ，クマネズミ，ケナガネズミ，アマミノクロウサギ，
 ゴイサギ，リュウキュウコノハズク

筋肉>肝臓>腎臓

ガラスヒバア，ハナサキガエル，（ハイ：筋肉>内臓）

筋肉>腎臓>肝臓

ワタセジネズミ，ミシシッピアカミミガメ

野生動物における水銀蓄積のリスク評価手法の開発は今後の課題であるが、個体として、水銀の高蓄積が肝臓への蓄積を促すとすれば、たとえば $1\mu\text{g/gDW}$ 以下であっても哺乳類のキクガシラコウモリ、鳥類のシロハラクイナやヒクイナ、シロガシラ、カラスバト、両生類のシロアゴガエルは、すでに種として「高蓄積」のレベルに達していると推察され、とくに水銀毒性に対する注意が必要な種と言えるかもしれない。一方で、毛からの水銀排泄効率が高いと結論されたニホンイタチのパターン、腎臓>肝臓の種は、比較的水銀耐性があると仮定すれば、クマネズミ、ケナガネズミ、アマミノクロウサギ、ゴイサギ、リュウキュウコノハズクといった動物は類似の水銀代謝機構をもっていると推察される。これらの詳細は今後の検討課題であろう。

産業での使用や環境汚染が懸念される微量元素25種との関係を検討した結果、PbやCd、Agといった強毒性元素に加え、Seや、Cr、V、Ni、Coといった、必須元素であるが産業活動で多用されている元素とも連動して動いている可能性が示唆された（表6：同様に石炭燃焼に伴う排出が考えられているAsは、沿岸生魚類で高濃度が認められ、アマミノクロウサギでは水銀と有意な相関がみられた）。詳しくみれば、水銀の解毒に関与するとされるSeや、汚染元素Cd、CrさらにSrは高次になるほど水銀と連動した蓄積がみられ、反対にPb、Ag、CoそしてNiなどは低次の生物で水銀と連動した蓄積を示した。Vは、高次、低次通じて水銀と強い相関関係を示した（いずれもSpearmanの順位相関検定およびクラスター分析による）。今後は、低次生物までつながる土壌や大気など無機環境の分析が急務と考えられ、また、種数と個体数を増やし解析の精度を向上させる必要がある。

表6 やんばんる生態系においてHgと同一クラスターを形成した元素（分析された26元素中）

	Li	Ni	Co	Ag	Ba	Pb	V	Cu	Rb	Mo	Mn	Sr	Cr	Cd	Se
無脊椎_個体	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
両生類_筋肉					○			○			○				○
両生類_肝臓		○	○	○		○	○			○					○
イモリ_筋肉	○		○	○		○	○			○					
イモリ_肝臓		○	○	○		○	○		○	○			○	○	
爬虫類_筋肉					○		○	○	○		○	○	○	○	○
爬虫類_肝臓					○		○					○			
鳥類(雑食)_筋肉							○				○	○	○		○
鳥類(雑食)_肝臓							○			○		○	○	○	
鳥類(肉食)_筋肉							○				○	○	○		○
鳥類(肉食)_肝臓							○					○	○	○	
哺乳類(肉食)_筋肉								◎	○		◎	◎	◎		◎
哺乳類(肉食)_肝臓						○		◎	◎	○	◎	○	○	○	◎
(みられた個数)	2	3	4	4	3	5	10	4	4	6	6	9	9	6	6

肉食哺乳類の◎はジャワマングースとニホンイタチ両種で、○は一種のみにみられた場合

(6) ジャワマングースの水銀排泄経路

1) 出産による排泄

本研究で供試したジャワマングースの母子1ペア間における筋肉、肝臓、腎臓の水銀およびSe濃度を表7に示す。胎児の水銀およびSe濃度はいずれの組織器官においても母体濃度の方が高かった。しかし、胎児の水銀濃度は、筋肉で $6 \mu\text{g/gDW}$ 、肝臓で $11 \mu\text{g/gDW}$ と、やんばんる地域で捕獲されるメスの中には、この濃度よりも低い水銀濃度の検体も存在する。つまり、高濃度に水銀を蓄積したメスの胎児の水銀は比較的高濃度といえるレベルにまで達する可能性が示唆された。神経細胞の形成期間である胎児期は、哺乳類における水銀のハイリスク期間である。ジャワマングースはこのハイ・リスク期間に相当量の水銀を蓄積した胎児が存在する可能性が示唆された。今後は、同様に移行するSeのレベルが、解毒に充分か、そもそも関与するのか、など母子間移行に伴う水銀毒性の詳細を把握する必要がある。

表7 ジャワマングースの母子間にみられたHgおよびSe濃度 ($\mu\text{g/g}$ 湿重あたり)

	筋肉	肝臓	腎臓
Hg			
母	13.7	135	24.3
胎児	5.7	10.5	6.5
仔/母	0.42	0.08	0.27
Se			
母	1.7	64.8	9.2
胎児	1.4	4.4	3
仔/母	0.82	0.07	0.33

ジャワマングースのメスにおける出産経験の有無と肝臓中の水銀蓄積量との関係を図8に示す。肝臓で 280 、 $351 \mu\text{g/g DW}$ と最高濃度の水銀蓄積がみられた2個体は出産経験のない個体であり、それ以外の $80 \sim 270 \mu\text{g/g DW}$ 程度の高濃度の水銀蓄積がみられた計6個体は出産経験のある個体であった。また、平均値でも出産経験のないメスの方が水銀濃度は低かったことから、出産経験の豊富な個体は、高齢もしくは採餌能力にすぐれ、餌からの水銀取込みが、出産にともなう水銀排出

を凌駕することが考えられた。

2) 換毛による排泄

水銀はケラチンなど硬組織のSH基と強く結合するため、頭髮や羽毛は、高濃度で水銀を保持することから、有効な生体指標として使用されている。このことは、体外へ伸び続ける爪や羽毛など硬組織が、有効な水銀の排泄器官として機能することをあらわしている。水銀を高濃度で、とくに肝臓に蓄積するジャワマングースは、その毛における水銀レベルが、同様のニッチに生息する座間味島のニホンイタチにくらべて低く、低くわめて低いことが明らかとなった（表8）。座間味島のニホンイタチは、上述したように、やんばる地域とほぼ類似した地理的状況と考えられ、たとえば越境大気汚染の状況も類似していると考えられた。しかし、同様の生態系における最高次捕食者であるニホンイタチとジャワマングースは水銀蓄積において著しく異なる傾向が明らかとなった。まず、その水銀の体内分布が、ジャワマングースは肝臓で最も高く、ついで毛>腎臓>筋肉の順であるのに対し座間味島のニホンイタチは毛>腎臓>筋肉>肝臓である。ニホンイタチにおける水銀の体内分布の検討は、本種が換毛を通じて肝臓から積極的に水銀を排泄しているメカニズムを示唆した。一方で、水銀の高蓄積種であるジャワマングースは肝臓に水銀を大量に溜めながら、毛の水銀濃度はニホンイタチの1/2〜3程度と低く、毛からの排泄がほとんど作動していないことが明らかとなった。しかし、その存在形態は多くが有機水銀であり、餌から取込み、無機化機構が働く前の有機態水銀を毛で排泄していると考えられた。

図8 ジャワマングース・メスの肝臓中Hg濃度の出産の有無による比較

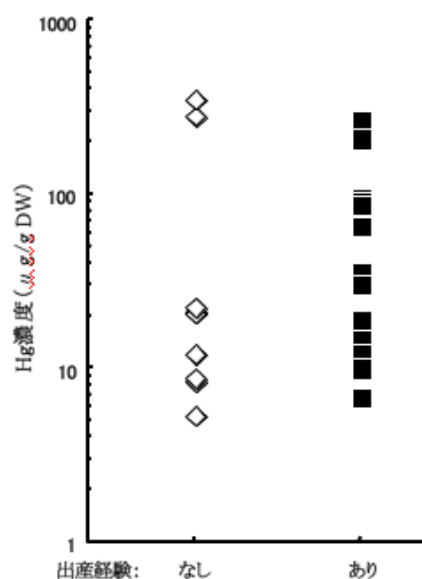


表8 ジャワマングースおよびニホンイタチの毛におけるHgおよび有機Hg濃度(μg/g DW)

	ジャワマングース		ニホンイタチ	
	総Hg	有機Hg	総Hg	有機Hg
平均値	5.68	4.44	16.5	12.5
最小値	1.25	1.07	5.61	3.13
最大値	13.7	10.7	32.3	19.6
個体数	6	6	30	11

5. 本研究により得られた成果

(1) 科学的意義

特定の生態系における水銀分布の把握が行われた。とくに、“やんばる（沖縄島北部森林地帯の通称）”地域という、我が国においても有数の希少な固有種を有する生態系において、その最高次捕食者であるジャワマングースに濃縮される水銀動態の一端を明らかにできた。その結果、とくに希少な山林生両生類イボイモリや鳥類ノグチゲラ、ヤンバルクイナ、アカヒゲなどがジャ

ワマンガースに至る水銀の供給源として機能している可能性を示唆した。

(2) 地球環境政策への貢献

現時点で、各種答申に貢献したり、実際の政策に寄与するなど具体的な成果はないが、今後は、データの公表を通じ、成果をやんばる生態系の保全へ応用するよう提言する予定である。とくに、希少な山林生鳥類に比較的高濃度の水銀や、その他の有害微量元素蓄積が確認された、本研究の知見は、それら希少種の保護において、有害金属を含まない餌の選択などに有効な示唆が可能であると考えている。

6. 引用文献

- 1) United Nations Environmental Program Chemicals (2002), UNEP Global Mercury Assessment Summary of the Report.
- 2) 小倉 剛, 川島由次, 織田銑一 (2003), 外来動物ジャワマンガースの捕獲個体分析および対策の現状と課題. 獣医畜産新報, 56(4), 295-301.
- 3) Horai, S., Minagawa, M., Ozaki, H., Watanabe, I., Takeda, Y., Yamada, K., Ando, T., Akiba, S., Abe, S. and Kuno, K. (2006), Accumulation of Hg and other heavy metals in the Javan mongoose (*Herpestes javanicus*) captured on Amamioshima Island, Japan, Chemosphere, 65, 657-665.
- 4) Horai, S., Furukawa, T., Ando, T., Akiba, S., Takeda, Y., Yamada, K., Kuno, K., Abe, S. and Watanabe, I. (2008), Subcellular distribution and potential detoxification mechanisms of mercury in the liver of the Javan mongoose (*Herpestes javanicus*) in Amamioshima Island, Japan. Environmental Toxicology and Chemistry, 27(6), 1354-1360.
- 5) 小野塚春吉 (2007), 環境汚染物質による魚介類汚染問題を考える. 環境展望, 5, 87-120
- 6) 小野塚春吉 (2005), 環境化学物質による食品汚染. 環境展望, 4, 149-184.
- 7) Walker, L. A., Simpson, V. R., Wienburg, C.L. and Shore, R. F. (2007), Heavy metal contamination in bats in Britain. Environmental Pollution, 148, 483-490.
- 8) Cristol, D. A., Brasso, R. L., Condon, A. M., Fovargue, R. E., Friedman, S. L., Hallinger, K. K., Monroe, A. P. and White, A. E (2008), The movement of aquatic mercury through terrestrial food webs. Science, 320, 335.

7. 国際共同研究等の状況

特に記載すべき事項はない

8. 研究成果の発表状況

(1) 誌上発表

<論文 (査読あり)>

なし

<その他誌上発表（査読なし）>

なし

(2) 口頭発表（学会）

- 1) S. Horai, T. Furukawa, T. Kaname, K. Yanagi, M. Yamamoto, G. Ogura, I. Watanabe, S. Abe and S. Tanabe: CSIAM 2008 International Symposium on Control Strategy of Invasive Alien Mammals, Okinawa, Japan, 2008, “Is specific mercury accumulation features useful to fine a measure for controlling the population of Javan mongoose?”
- 2) I. Watanabe, Y. Suzuki, S. Horai, H. Ozaki, K. Kuno: Interdisciplinary Symposium on Environmental Sciences, Ehime. Japan, 2008
“Heavy metal concentrations in Japanese wildlife”
- 3) 渡邊 泉, 秋山太一, 佐野翔一, 中島周三, 平岡香保利, 大沼 学, 桑名 貴, 富永 篤, 本多正尚, 小倉 剛: 第18回環境化学討論会 (2009)
「やんばる生態系におけるHg動態」
- 4) 佐野翔一, 渡邊 泉, 小倉 剛, 須藤健二, 宮里芳和: 第18回環境化学討論会 (2009)
「座間味島のニホンイタチの微量元素蓄積」
- 5) 佐野翔一, 渡邊 泉, 大沼 学, 桑名 貴: 第18回環境化学討論会 (2009)
「南西諸島に生息する哺乳類の微量元素蓄積」
- 6) 秋山太一, 渡邊 泉, 大沼 学, 桑名 貴: 第18回環境化学討論会 (2009)
「やんばる及び奄美大島の野生鳥類における微量元素蓄積」

(3) 出願特許

なし

(4) シンポジウム, セミナーの開催（主催のもの）

なし

(5) マスコミ等への公表・報道等

なし

(6) その他

なし