

## 沖縄島北部やんばる地域の生態系における 水銀分布と他元素との関係

渡 邊 泉\*・秋 山 太 一\*・佐 野 翔 一\*

(2010年10月27日受付, 2011年1月3日受理)

### **Distribution of mercury in ecosystems of Yambaru, northern part of Okinawa Island, Japan and its relationships with other elements**

Izumi WATANABE\*, Taichi AKIYAMA\* and Syoichi SANOK\*

\* Graduate School of Agriculture, Tokyo University of Agriculture and Technology  
3-5-8 Saiwai-cho, Fuchu, Tokyo 183-8509, Japan

Relatively high levels of Hg were found in the bodies of low tropic animals inhabiting Yambaru area when compared with unpolluted ecosystems. Especially, large centipede species which are the strong carnivore of invertebrates accumulated Hg with high concentration due to their high tropic in food web. In the same way, some species of raptors and carnivorous snake inhabiting forest accumulated Hg in their bodies. These facts supported that biomagnification of Hg exists in the ecosystem of Yambaru area. Interestingly, rare animals in the Yambaru area such as Anderson's crocodile newt as amphibians, Okinawa woodpecker, Ryukyu robin, and Okinawa rail as birds accumulated Hg with higher levels when compared with other animals niching at the same tropic levels.

From analysis of inter-elemental relationships using concentration data of 25 trace elements in the animal bodies collected from Yambaru area, three toxic elements (lead, cadmium, and silver), five essential elements (selenium, chromium, vanadium, nickel, and cobalt), and one trace element (strontium) were correlated with Hg in the various animal groups such as invertebrate, amphibians, reptilian, omnivorous birds, carnivorous birds, omnivorous mammals, and carnivorous mammals.

**Key words:** mercury, Yambaru, biomagnifications, ecosystem, rare species

### 1. はじめに

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固有種を多く有する。しかし、近年、侵略的移入種ジャワマングース(2010年にフイリマングースと同定)が生息数を増やし分布域を拡大するにつれ、希少な固有種の生存が脅かされる事態が

進行している(永山ほか, 2001; 小倉ほか, 2003)。これまでの研究で、やんばる及び奄美大島に導入されたマングースは水銀(Hg)を高濃度で蓄積し、その解毒に、海生哺乳類などで知られるセレン(Se)を介したメカニズムが関与することが示唆された(Horai *et al.*, 2006; 2008)。このことは、少なくとも相当量のHg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、その動態把握は急務と考えられた。

Hg化合物は、世界規模で対策が求められる地球環境汚染物質の一群である。その毒性は古代から認知さ

\* 東京農工大学大学院農学研究科  
〒183-8509 府中市幸町3-5-8

れる一方、常温で液体であり化合物によって三態をと  
りうるユニークな性質は科学技術の発達に大きく貢献  
してきた。現在では、その環境毒性が明らかになって  
いる一方、いまだ Hg 化合物は産業に使用されてい  
る。生物圏への負荷は天然に由来するものもある一方  
で、人間活動により放出される Hg 化合物によるこ  
ろが大きい (UNEP, 2002)。人為起源の Hg 放出は、  
増加の一途を辿っており、産業に直接使用され環境に  
放出されるものと、不純物として Hg を含む物質の移  
動・変化により排出されるものがある。前者には、温  
度計や圧力計、電池、歯科用アマルガム充填剤、蛍光  
灯、防腐剤、顔料、洗剤など、後者には化石燃料の燃  
焼、セメント生産、鉄鋼などの冶金、産業廃棄物処  
理、焼却施設からの放出などに由来するものがある。  
これらの中で水銀不純物の移動、とくに化石燃料の燃  
焼からの寄与の大きいことが指摘されている  
(UNEP, 2002)。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、とりわけ  
石炭燃焼にともなう Hg の放出が懸念される。アジア  
諸国からの大気への Hg 放出は世界の42%を占めると  
され、今後は Hg 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東アジアの越境汚染  
が懸念されているが (Jaffe *et al.*, 2005; 丸本・坂田,  
2007), Hg 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、偏西風の影響を直接被ることが予想される。

本報は、沖縄県北部森林地帯 (通称やんばる) に生  
息する動物の Hg 分析を行うことで、その生態系の高  
次捕食者であるマングースが濃縮した Hg が、どのよ  
うな経路で移動しているかを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  
取し分析を行った。その際、産業で使用されたり、必  
須性など生体内での動態から Hg と関係する可能性が  
ある元素25種の分析も行い、それらの元素間関係を  
解析することにより、生態系における Hg の挙動解析  
を試みた。Hg は、その解毒において無機・有機態と  
もに必須元素 Se の関与が知られている (渡辺, 2002;  
Horai *et al.*, 2006)。また、最大の発生源とされる石  
炭など化石燃料の燃焼は Pb や As に加え Se や V な  
ど他の必須微量元素も同時に放出することが懸念され  
る。そのため、本報において Hg と関係する元素の挙  
動を併せて検討することは、より包括的な Hg 動態を  
明らかにする可能性がある。

## 2. 試料と方法

### 2.1 試料

やんばる地域より無脊椎動物10種 (ヤンバルヤマ  
ナメクジ類 *Meghimatium* sp. 4検体, ヤンバルマイ  
マイ *Satsuma mercatoria atrata* 5検体, ミミズ類10  
検体, 陸生腹足類4検体, オキナワオオサワガニ *Geo-  
thelphusa grandiovata* Naruse 2検体, オオムカデ  
類 Chilopoda 3検体, クモ類 Araneae 2検体, マダラ  
コオロギ *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。他, 未同定種を含む), 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  
キュウカジカガエル *Buergeria japonica* 1検体とイボ  
イモリ *Tylototriton andersoni* 7検体), 爬虫類7種  
(ホオグロヤモリ *Hemidactylus frenatus* 5検体, ミ  
シシippia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 ja-  
ponicus 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 phoenicu-  
rus* 2検体, バン *Gallinula chliropus* 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 lem-  
piji* 3検体, アオバズク *Ninox scutulata* 3検体, アカ  
シヨウビン *Halcyon coromanda* 2検体, カワセミ *Al-  
cedo 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 palli-  
dus* 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 *Galliral-  
lus 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6種 (オリイオオコウモリ *Pteropus dasy-  
mallus inopinatus* 4検体, オキナワコキクガシラコ  
ウモリ *Rhinolophidae pumilus* 3検体, ケナガネズミ

*Diplothrinx legatsui* 5検体, ワタセジネズミ *Crocidura horsfieldii watasei* 3検体, クマネズミ *Rattus rattus* 3検体とフイリマンゲース *Herpestes auro-punctatus* 49検体) を供試した。

また, やんばる地域との比較または試料数の補完として, 近隣の座間味島から, マンゲースと同等の高次捕食者ニホンイタチ *Mustela itatsi* 30検体を供試した。また奄美大島からは哺乳類では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, 奄美大島から鳥類のゴイサギ *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種を供試した。脊椎動物のほとんどの試料はロードキル等により死亡後発見・回収されたもので,  $-80\sim-30^{\circ}\text{C}$  の冷凍で保管された。

## 2.2 化学分析

各動物の組織はメス等を用い摘出し, 湿重量を測定した。筋肉と肝臓, 腎臓は二次汚染を避けるために, 表面周辺を取り除いた。微量元素分析は既報に従い(渡邊ほか, 2002), 各組織を $90^{\circ}\text{C}$ で16時間乾燥させ, その後, 乾重量を測定した。破碎後, 粉末試料とした。乾燥試料を約0.100 g秤量し, テフロン PFA 製バイアル内で硝酸を2.0 mL添加した。このPFAバイアルを, テフロン PTFE 製容器に密閉し, マイクロウェーブ分解を行った。分解後, 超純水を用い, 約25.00 gとなるように希釈し, 精秤後, 溶液試料とした。

試料の総水銀濃度は還元気化原子吸光法(HG-300, 平沼産業)により測定した。

水銀との関係を検討するため他の元素濃度を測定した。定量にはICP-MS(4500 a, Agilent)を用いた。25元素, つまりリチウム( ${}^7\text{Li}$ ), マグネシウム( ${}^{24}\text{Mg}$ ), カルシウム( ${}^{43}\text{Ca}$ ), バナジウム( ${}^{51}\text{V}$ ), クロム( ${}^{52}\text{Cr}$ ), マンガン( ${}^{55}\text{Mn}$ ), 鉄( ${}^{57}\text{Fe}$ ), コバルト( ${}^{59}\text{Co}$ ), ニッケル( ${}^{60}\text{Ni}$ ), 銅( ${}^{63}\text{Cu}$ ), 亜鉛( ${}^{66}\text{Zn}$ ), ガリウム( ${}^{69}\text{Ga}$ ), ヒ素( ${}^{75}\text{As}$ ), セレン( ${}^{82}\text{Se}$ ), ルビジウム( ${}^{85}\text{Rb}$ ), ストロンチウム( ${}^{88}\text{Sr}$ ), モリブデン( ${}^{95}\text{Mo}$ ), 銀( ${}^{107}\text{Ag}$ ), カドミウム( ${}^{111}\text{Cd}$ ), インジウム( ${}^{115}\text{In}$ ), アンチモン( ${}^{121}\text{Sb}$ ), セシウム( ${}^{133}\text{Cs}$ ), バリウム( ${}^{137}\text{Ba}$ ), タリウム( ${}^{205}\text{Tl}$ ), および鉛( ${}^{208}\text{Pb}$ )につい

て濃度を測定した。

すべての濃度は対数変換にて標準化し, SPSS ver. 11.0 for Mac. を用い, 2変量の相関を Spearman の順位相関検定, グループ間の比較を Mann-Whitney U-test および Turkey 検定, さらに多元素間関係の解析をクラスター分析で行った。

## 3. 結果と考察

### 3.1 各生物群の水銀レベル

やんばるに生息する無脊椎動物および両生類の Hg および微量元素の平均濃度を Table 1 および 2 に示す。無脊椎動物にくらべ両生類の中で比較的高レベルの Hg が検出される種が見いだされた。両生類における Hg の最高濃度は県指定の天然記念物イボイモリの肝臓(本種における最高濃度は $22\ \mu\text{g/g}$  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(最高 $15\ \mu\text{g/g}$  DW), リュウキュウアカガエルの肝臓(最高 $3.1\ \mu\text{g/g}$  DW)という順であった。また無脊椎動物の中ではオオムカデ類の Hg 濃度が高く(最高 $1.9\ \mu\text{g/g}$  DW), ムカデ類の強い肉食により, Hg が濃縮されている可能性が考えられた。

爬虫類においては筋肉でアカマタ(平均 $1.6\ \mu\text{g/g}$  DW, 最高 $2.6\ \mu\text{g/g}$  DW), ガラスヒバア(平均 $1.7\ \mu\text{g/g}$  DW, 最高 $5.3\ \mu\text{g/g}$  DW) およびヒメハブ(平均 $3.5\ \mu\text{g/g}$  DW, 最高 $4.8\ \mu\text{g/g}$  DW)といった比較的高次の爬虫類で高いレベルがみられた(Table 3)。また, 爬虫類肝臓ではミシシippアカミミガメを除く, ヘビ類のアカマタ, ガラスヒバア, リュウキュウアオヘビ, ヒメハブも同等の高い Hg 濃度がみられた。

多くの鳥類では, 分析された筋肉, 肝臓および腎臓における Hg の組織間分布は, 肝臓で最も高く, ついで腎臓>筋肉の順になる傾向が認められた(Table 4)。筋肉でゴイサギ, ササゴイ, オオコノハズク, アカショウビン, カワセミといった魚食性, または餌に魚類を含むハシブトガラスで Hg の高濃度蓄積がみられた一方, ヤマシギや, 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, やんばる生態系においては比較的高い濃度の Hg が認められた。Hg の蓄積部位とされる肝臓ではササゴイに Hg 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 $6.2$

Table 1 Average concentrations of trace elements in whole body of invertebrate collected from Yambaru area ( $\mu\text{g/g}$  dry weight).

Species (number)	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
<i>Satsuma mercatoria atrata</i> (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
<i>Meghimatium</i> sp.(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
Terrestrial gastropod(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
<i>Geothelphusa grandiorvata</i> Naruse(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
Giant centipede(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
Spiders(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
<i>Cardiodactylus guttulus</i> (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
<i>Calliphara exellens</i> (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
Unicorn beetle(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

Table 2 Average concentrations of trace elements in the amphibia collected from Yambaru area ( $\mu\text{g/g}$  dry weight).

Species (number)	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
<b>Muscle</b>																										
<i>Rana narina</i> (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
<i>Polydectes leucomystax</i> (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
<i>Rana okinavana</i> (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
<i>Buergeria japonica</i> (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
<i>Echinotriton andersoni</i> (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
<b>Liver</b>																										
<i>Rana narina</i> (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
<i>Polydectes leucomystax</i> (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
<i>Rana okinavana</i> (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
<i>Buergeria japonica</i> (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
<i>Echinotriton andersoni</i> (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
<b>Kidney</b>																										
<i>Rana narina</i> (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
<i>Polydectes leucomystax</i> (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

\*N.D.: not detected.

Table 3 Average concentrations of trace elements in the reptilians collected from Yamaru area ( $\mu\text{g/g}$  dry weight).

Species (number)	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	
<b>Whole body</b>																											
<i>Hemidactylus frenatus</i> (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	
<b>Muscle</b>																											
<i>Trachemys scripta elegans</i> (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.	0.6	0.6	1.7	0.7	N.D.	N.D.	
<i>Dinodon semicarinatum</i> (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.	1.5	7.8	1.6	N.D.	3.5		
<i>Amphisma pryeri</i> (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	
<i>Cyclophiops semicarinatus</i> (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.	0.3	19.5	0.2	N.D.	0.2		
<i>Ovophis okinawensis</i> (3)																											
	N.D.	865	1198	0.3	2.1	1	67	N.D.	N.D.	3	76	N.D.	N.D.	3	20	2	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	0.4	3.5	N.D.	0.3		
<i>Sinomicrurus japonicus boettgeri</i> (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.	8.9	0.1	N.D.	N.D.		
<b>Liver</b>																											
<i>Trachemys scripta elegans</i> (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.	0.5	0.5	N.D.	0.4		
<i>Dinodon semicarinatum</i> (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.	0.3	0.7	3.2	N.D.	0.4		
<i>Amphisma pryeri</i> (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.	0.4	1.1	1.3	N.D.	#DIV/0!		
<i>Cyclophiops semicarinatus</i> (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.	9.7	1.7	N.D.	0.7		
<i>Ovophis okinawensis</i> (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.	0.3	3.5	N.D.	#DIV/0!		
<b>Kidney</b>																											
<i>Trachemys scripta elegans</i> (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!		
<i>Dinodon semicarinatum</i> (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	
<i>Amphisma pryeri</i> (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	
<i>Cyclophiops semicarinatus</i> (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.	9.7	2.0	N.D.	2.4		
<i>Ovophis okinawensis</i> (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.	0.3	2.1	N.D.	1.0		
<b>Viscera</b>																											
<i>Sinomicrurus japonicus boettgeri</i> (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.	21.9	N.D.	N.D.	N.D.		

\*N.D.: not detected.

$\mu\text{g/g}$  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 Hg 濃度が認められた。

肝臓中の Hg 解毒に関係すると考えられている Se (渡辺, 2002; Horai *et al.*, 2008) は, Hg の蓄積傾向と類似した分布を示し, オオミズナギドリやササゴイ, カワセミ, ハシブトガラスといった魚食性の種に加え, 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 (Hg) 蓄積には, とくに土壌からの Se 供給といった点でミミズ類 (種未同定で最高 $22.1 \mu\text{g/g}$  DW) を鍵種とする食物網の寄与が示唆された。

無機 Hg の標的器官である腎臓の Hg 濃度も肝臓, 筋肉と同じく, オオミズナギドリ, ゴイサギ, 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種に高濃度で, やはりヤマシギ, アマミヤマシギ, ヤンバルクイナ, アカヒゲ, シロハラといった山林生の希少種と, 爬虫類のガラスヒバア, リウキュウアオヘビ, ヒメハブにも $2 \mu\text{g/g}$  DW を超える比較的高い Hg 濃度がみられた。Se 濃度はオオミズナギドリにくわえ, 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 濃度に着目するとアマミヤマシギ, 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。また, オオミズナギドリ, カワセミといった魚食性種も高濃度であった。爬虫類では, ミシシビアカミミガメ, アカマタ, ガラスヒバアの筋肉中 Se 濃度が高かった。Se は各種製品の材料として広く使用され, 化石燃料の燃焼からの発生も指摘されるが, その年間総生産量は比較的小さい (National Research Council, 1978)。ガラス工場など局所的な汚染は知られるが, とくにやんばる地域で大規模の発生源は考えられないことから, 天然由来の供給と考えられる。つまり, 各動物はそれぞれの Hg 負荷に応じて食物から必須元素 Se を, 吸収率を変化させる等して補っていると考えられた。

Table 4 Average concentrations of trace elements in the birds collected from Yambaru area ( $\mu\text{g/g}$  dry weight).

Species (number)	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	
<b>Muscle</b>																											
<i>Colaptes auratus</i> (1)	N.D.	1160	176	0.61	1.05	0.17	471	0.02	N.D.	25	167	N.D.	27.4	19	11	0.45	0.02	N.D.	3.0	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	1.00	N.D.	0.14	
<i>Nycticorax nycticorax</i> (1)	0.12	1170	165	0.47	0.09	2.38	356	N.D.	N.D.	23	73	N.D.	N.D.	2	15	0.76	N.D.	7.05	N.D.	N.D.							
<i>Butorides striatus</i> (1)	N.D.	1050	192	0.64	1.04	N.D.	587	0.05	N.D.	59	109	N.D.	0.9	4	24	0.28	N.D.	3.80	N.D.	0.15							
<i>Bubulcus ibis</i> (1)	N.D.	1170	96	0.86	1.02	1.46	285	N.D.	N.D.	18	53	N.D.	1.1	3	10	0.01	N.D.	N.D.	0.8	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	0.68	N.D.	N.D.	
<i>Scolopax rusticola</i> (1)	N.D.	1230	81	0.59	0.96	0.60	194	0.04	N.D.	15	31	N.D.	0.8	3	4	0.02	N.D.	N.D.	0.7	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	1.00	N.D.	0.20	
<i>Scolopax mira</i> (4)	N.D.	1238	245	0.37	0.74	1.20	187	N.D.	N.D.	13	28	N.D.	1.0	5	6	1.09	N.D.	N.D.	0.7	N.D.	N.D.	0.00	N.D.	0.94	N.D.	0.18	
<i>Gallinulus okinawae</i> (10)	N.D.	714	218	0.87	N.D.	1.62	128	N.D.	N.D.	3	33	N.D.	N.D.	5	12	1.08	N.D.	0.50	N.D.	N.D.							
<i>Porzana fusca</i> (1)	N.D.	1040	190	0.66	1.25	0.28	223	N.D.	N.D.	15	33	N.D.	0.9	4	10	0.24	0.01	N.D.	0.7	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	0.23	N.D.	0.16	
<i>Amaurornis phoeniceus</i> (2)	N.D.	1120	567	0.13	1.59	1.46	188	N.D.	0.06	24	47	N.D.	N.D.	1	13	3.07	N.D.	0.34	N.D.	N.D.							
<i>Gallinula chloropus</i> (3)	N.D.	1197	141	0.36	1.36	1.21	382	N.D.	N.D.	49	54	N.D.	1.0	2	12	0.18	N.D.	N.D.	0.6	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	0.21	N.D.	0.14	
<i>Columba janthina</i> (1)	N.D.	1100	181	0.59	1.16	0.34	665	N.D.	N.D.	15	71	N.D.	0.8	5	25	0.07	N.D.	N.D.	3.7	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	0.15	
<i>Otus elegans</i> (1)	N.D.	1100	129	0.71	0.99	0.47	212	N.D.	N.D.	11	33	N.D.	1.2	2	7	0.36	N.D.	N.D.	0.7	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	0.43	N.D.	0.15	
<i>Otus lempiji</i> (3)	N.D.	1193	148	0.34	0.88	0.91	137	N.D.	N.D.	9	38	N.D.	0.8	1	12	0.06	N.D.	N.D.	0.7	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	1.19	N.D.	0.14	
<i>Ninox scutulata</i> (3)	N.D.	1243	536	0.48	1.07	1.71	210	N.D.	N.D.	11	37	N.D.	0.8	2	13	1.74	0.25	N.D.	0.6	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	0.18	N.D.	0.15	
<i>Halkyon coromanda</i> (3)	N.D.	1330	176	0.48	1.64	1.90	279	N.D.	N.D.	19	37	N.D.	0.9	2	14	0.32	N.D.	N.D.	0.8	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	0.52	N.D.	N.D.	
<i>Alcedo atthis</i> (3)	N.D.	1287	202	0.37	0.94	2.10	295	0.07	0.17	24	32	N.D.	1.2	4	22	0.36	N.D.	N.D.	0.8	N.D.	N.D.	0.06	N.D.	0.90	N.D.	0.18	
<i>Sapheopipo noguchii</i> (6)	N.D.	824	191	0.66	N.D.	2.06	194	0.53	0.27	10	37	0.34	N.D.	4	14	0.63	N.D.	N.D.	2.6	0.59	N.D.	0.60	1.53	0.49	1.14	0.90	
<i>Dendrocygna kizuki</i> (1)	N.D.	1250	154	0.62	1.04	1.54	245	N.D.	N.D.	19	26	N.D.	0.9	3	25	0.12	N.D.	N.D.	0.7	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	0.38	N.D.	0.20	
<i>Hirundo rustica</i> (1)	N.D.	872	354	0.60	1.22	0.62	781	0.07	N.D.	29	70	N.D.	0.9	4	13	1.14	N.D.	N.D.	0.8	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	0.61	N.D.	0.21	
<i>Pycnonotus sinensis</i> (1)	N.D.	1390	225	0.91	1.10	0.53	196	N.D.	N.D.	17	34	N.D.	1.1	2	13	0.21	0.10	N.D.	0.7	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	0.61	N.D.	0.19	
<i>Hypsipetes amaurotis</i> (1)	N.D.	753	192	0.31	1.30	3.13	324	N.D.	N.D.	18	35	N.D.	N.D.	2	17	1.06	N.D.	N.D.	N.D.								
<i>Erythraea komadori</i> (10)	N.D.	823	0.81	N.D.	2.28	173	0.70	N.D.	10	26	N.D.	1.3	11	18	0.83	N.D.	N.D.	2.6	N.D.	N.D.	N.D.	1.56	0.58	N.D.	2.52		
<i>Turdus pallidus</i> (6)	N.D.	1273	151	0.32	0.86	1.62	288	N.D.	N.D.	16	29	N.D.	0.8	7	23	0.92	N.D.	N.D.	4.7	N.D.	N.D.	N.D.	2.71	0.56	N.D.	0.15	
<i>Cettia diphone</i> (2)	N.D.	1333	277	0.54	1.33	1.81	338	N.D.	N.D.	18	37	N.D.	0.9	2	18	0.54	N.D.	N.D.	0.7	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	0.25	N.D.	0.29	
<i>Zosterops japonicus</i> (2)	N.D.	1210	145	0.42	1.16	1.63	326	N.D.	N.D.	22	34	N.D.	0.9	4	15	0.09	N.D.	N.D.	0.7	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	0.09	N.D.	0.17	
<i>Corvus macrorhynchos</i> (3)	N.D.	795	218	0.46	1.20	1.54	417	N.D.	N.D.	18	84	N.D.	N.D.	2	17	1.03	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	0.14	0.08	0.77	N.D.	N.D.	
<b>Liver</b>																											
<i>Colaptes auratus</i> (1)	0.30	1890	528	1.04	1.17	17.80	7660	0.09	N.D.	29	451	N.D.	83.1	31	6	9.70	1.57	N.D.	38.1	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	7.54	N.D.	0.18	
<i>Nycticorax nycticorax</i> (1)	N.D.	887	278	1.34	0.96	14.50	5690	0.09	N.D.	148	348	N.D.	0.9	14	21	0.69	6.15	0.05	1.1	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	28.30	N.D.	0.21	
<i>Butorides striatus</i> (1)	N.D.	761	94	0.64	0.81	9.06	2190	N.D.	N.D.	17	147	N.D.	0.8	5	12	0.01	1.56	N.D.	1.1	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	2.05	N.D.	0.19	
<i>Bubulcus ibis</i> (1)	N.D.	850	170	0.85	0.98	9.93	688	0.88	N.D.	15	67	N.D.	1.1	10	4	0.15	1.60	N.D.	4.2	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	1.38	N.D.	0.54	
<i>Scolopax rusticola</i> (1)	N.D.	894	270	0.54	0.50	11.06	931	0.09	N.D.	14	81	N.D.	1.0	16	5	1.24	0.92	N.D.	5.5	N.D.	N.D.	N.D.	0.64	1.17	N.D.	1.60	
<i>Scolopax mira</i> (4)	N.D.	680	293	0.96	N.D.	11.66	2071	0.65	N.D.	22	107	0.49	N.D.	8	12	1.72	3.43	N.D.	5.0	N.D.	N.D.	N.D.	2.17	1.06	1.70	1.16	
<i>Gallinulus okinawae</i> (10)	N.D.	716	443	0.72	1.04	4.00	664	N.D.	N.D.	21	76	N.D.	0.9	6	10	0.85	2.59	N.D.	1.5	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	0.77	N.D.	0.15	
<i>Amaurornis phoeniceus</i> (2)	N.D.	854	528	0.26	N.D.	8.66	863	N.D.	N.D.	30	233	N.D.	N.D.	3	11	0.50	0.73	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	0.41	0.89	N.D.	N.D.	N.D.	
<i>Gallinula chloropus</i> (3)	N.D.	1120	528	1.00	1.13	35.40	5893	0.08	N.D.	21	155	N.D.	1.8	5	13	6.65	3.77	N.D.	0.7	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	1.05	N.D.	0.17	
<i>Columba janthina</i> (1)	N.D.	851	181	0.60	1.32	8.37	4010	0.05	N.D.	28	391	N.D.	0.9	4	22	0.21	2.21	N.D.	35.0	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	0.12	N.D.	0.24	
<i>Otus lempiji</i> (3)	N.D.	889	188	0.78	1.03	15.20	1350	0.04	N.D.	25	213	N.D.	1.1	5	9	0.20	4.22	N.D.	0.7	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	0.21	N.D.	0.22	
<i>Otus elegans</i> (1)	N.D.	949	230	0.51	1.09	18.50	970	0.06	N.D.	18	93	N.D.	1.0	4	10	0.21	1.41	N.D.	1.2	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	2.71	N.D.	0.15	
<i>Ninox scutulata</i> (2)	N.D.	927	223	0.44	1.09	14.95	1500	0.02	N.D.	20	143	N.D.	0.9	4	8	0.49	1.89	0.05	0.9	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	0.20	N.D.	0.20	
<i>Halkyon coromanda</i> (3)	N.D.	942	233	0.49	1.05	9.95	837	0.01	N.D.	18	77	N.D.	1.0	4	10	0.44	1.53	N.D.	0.7	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	1.12	N.D.	0.17	
<i>Alcedo atthis</i> (3)	N.D.	929	279	0.54	0.94	5.36	705	0.08	N.D.	25	74	N.D.	1.3	11	18	0.83	0.69	N.D.	1.0	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	1.28	N.D.	0.14	
<i>Sapheopipo noguchii</i> (6)	N.D.	588	157	1.00	N.D.	7.33	1308	N.D.	N.D.	13	79	N.D.	N.D.	4	7	0.92	N.D.	N.D.	4.7	N.D.	N.D.	N.D.	2.71	0.23	N.D.	1.33	
<i>Hirundo rustica</i> (1)	N.D.	927	363	1.19	2.43	2.83	2230	N.D.	N.D.	30	160	N.D.	1.9	7	9	0.18	2.94	N.D.	4.6	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	1.18	N.D.	0.58	
<i>Pycnonotus sinensis</i> (1)	N.D.	895	179	1.07	1.71	1.28	2610	N.D.	N.D.	21	81	N.D.	1.4	3	11	0.30	3.37	N.D.	1.3	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	0.21	N.D.	0.44	
<i>Hypsipetes amaurotis</i> (1)	N.D.	1430	482	0.27	N.D.	12.10	8750	N.D.	N.D.	47	176	N.D.	N.D.	2	18	2.33	7.78	N.D.	0.6	N.D.	N.D.	N.D.	0.30	1.16	N.D.	0.11	
<i>Erythraea komadori</i> (6)	N.D.	781	351	1.46	N.D.	7.71	3152	N.D.	0.39	28	112	N.D.	N.D.	15	12	2.74	7.08	N.D.	8.8	N.D.	N.D.	N.D.	3.68	1.69	N.D.	0.87	
<i>Turdus pallidus</i> (3)	N.D.	773	131	0.44	0.97	7.48	2730	N.D.	N.D.	26	69	N.D.	0.8	6	19	0.11	1.18	N.D.	1.7	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	1.09	N.D.	0.50	
<i>Cettia diphone</i> (2)	N.D.	768	310	0.23	N.D.	4.08	1602	N.D.	N.D.	21	66	N.D.	N.D.	3	10	2.53	1.64	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	0.61	0.59	N.D.	N.D.	
<i>Zosterops japonicus</i> (2)	N.D.	904	124	0.08	N.D.	5.22	3670	N.D.	N.D.	27	100	N.D.	N.D.	4	8	N.D.	7.59	N.D.	0.3	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	0.17	N.D.	0.93	
<i>Corvus macrorhynchos</i> (3)	N.D.	843	247	0.44	0.05	6.71	7683	N.D.	N.D.	42	170	N.D.	N.D.	8	14	0.96	2.										

Table 5 Average concentrations of trace elements in the mammals collected from Yambaru area ( $\mu\text{g/g}$  dry weight).

Species (number)	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
<i>Crocidura watasei</i> (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
<i>Diploptrix legatus</i> (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.
<i>Tokudaia osimensis</i> (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.
<i>Rattus rattus</i> (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.
<i>Pteropus dasymallus inopinatus</i> (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.
<i>Rhinolophus punilus punilus</i> (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
<i>Pentalagus furnessi</i> (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.
<i>Mustela itatsi</i> (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
<i>Herpestes auropunctatus</i> (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
<u>Liver</u>																										
<i>Crocidura watasei</i> (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
<i>Diploptrix legatus</i> (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	0.12	N.D.
<i>Tokudaia osimensis</i> (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
<i>Rattus rattus</i> (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.
<i>Pteropus dasymallus inopinatus</i> (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
<i>Rhinolophus punilus punilus</i> (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.	N.D.	0.32	0.64	N.D.	0.04
<i>Pentalagus furnessi</i> (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.	3.91	0.31	1.03	0.14	N.D.	0.23
<i>Mustela itatsi</i> (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
<i>Herpestes auropunctatus</i> (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
<u>Kidney</u>																										
<i>Crocidura watasei</i> (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.
<i>Diploptrix legatus</i> (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
<i>Tokudaia osimensis</i> (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
<i>Rattus rattus</i> (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
<i>Pteropus dasymallus inopinatus</i> (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
<i>Rhinolophus punilus punilus</i> (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.
<i>Pentalagus furnessi</i> (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
<i>Mustela itatsi</i> (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
<i>Herpestes auropunctatus</i> (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

\*N.D.: not detected.

る。本報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が分析された。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。コウモリ類の Hg は分析された組織でオキナワコキクガシラコウモリがオリオオコウモリと比較して一桁高い値を示した。体サイズは後者がはるかに大きいのに、Hg レベルが低いことは両種の食性に由来すると考えられる。つまり、オリ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。コウモリ類の汚染元素のレベルを評価するため、オキナワコキクガシラコウモリと生態が類似する同サイズの洞窟性コウモリとの比較を行った。ホオヒゲコウモリ *Myotis mystacinus* およびタイクノレンコウモリ *Myotis nattereri* の2種について、腎臓における Hg と Cd, Pb 濃度が報告され、中央値でそれぞれ Hg が  $3.0 \mu\text{g/g DW}$  (*Myotis mystacinus*), Cd が  $6.27 \mu\text{g/g DW}$  (*Myotis nattereri*), Pb が  $4.05 \mu\text{g/g DW}$  (*Myotis mystacinus*) であった (Walker *et al.*, 2007)。このレベルと比較すると、オキナワコキクガシラコウモリは、他種よりも Hg や Cd, Pb といった汚染元素の濃度は低かった。このことは、やんばる地域の環境中 Hg レベルが、必ずしも突出した高さでないことを示唆しており、本地域のマングースでみられる高蓄積を生物増幅の過程、つまり食物網の長さ由来とした先行研究と一致するものであった (渡邊ほか, 2010)。

### 3.2 やんばる生態系における水銀分布

本研究で分析されたマングースの肝臓から得られた Hg の最高濃度は  $300 \mu\text{g/g DW}$  を超えた。捕獲個体の年齢が約2年とされる野生のマングース成体における肝臓の乾燥重量は約6 g 程度であり、これらのことから、やんばる生態系 (野生下) では約2年で1.8 mg もの Hg が濃縮されると試算された。やんばる生態系における栄養段階が低次生物 (無脊椎動物) の Hg レベルは平均で  $0.66 \mu\text{g/g DW}$  であり、最高濃度はオオムカデ類の  $1.9 \mu\text{g/g DW}$  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 (Cristol *et al.*, 2008: 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。哺乳類の結果と併せ、やんばる地域の環境中 Hg レベルは突出した汚染地ではないが、非汚染地ほどの低さではないと推察された。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 Hg レベルが認められた (筋肉で最高  $25 \mu\text{g/g DW}$ )。鳥類では魚食性の種に比較的高濃度の Hg が認められ、この傾向はこれまでの報告と一致するものであった (Conover and Vest, 2009)。また、魚食性の種で Se が蓄積する傾向も認められた。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も比較的高レベルの Hg と Se が検出された。これらの結果から、やんばるのファウナに存在する Hg レベルは、比較的高めであることが示唆され、マングースの Hg 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 Hg 濃度の高い種が寄与している可能性が示された。

やんばる生態系においてマングースが Hg の特異蓄積種であり、最高次捕食者であることが Hg 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の猛禽類, ハシブトガラスといった肉食性の鳥類も、その高い栄養段階が Hg 蓄積に寄与していると考えられた。一方で、これら捕食者へ効率的に Hg を供給する可能性が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, ハナサキガエル, 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 Hg 濃度が低く、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た。

以上の Hg 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, 4) は1) および3) へ収斂される可能性が考えられた (Fig. 1)。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考えられた。5) 6) および7) は、より高位の3) および4) へ収斂されるが、ここでやんばる生態系の大きな特徴が

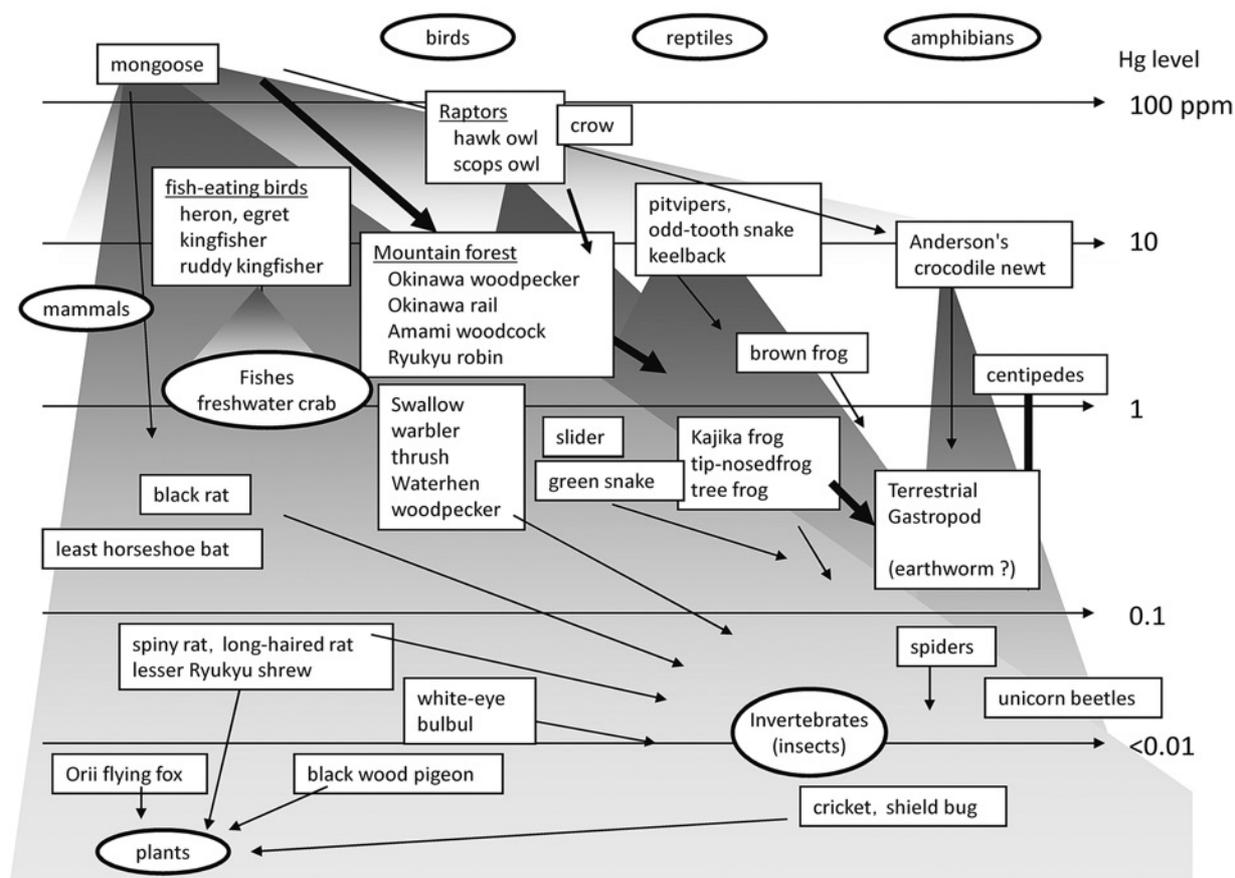


Fig. 1 Schematic model of Hg dynamics (biomagnification) in the ecosystem of Yambaru area, Okinawa, Japan. Arrows indicate prey-predator relationships.

推察された。つまり「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 Hg レベルの高い場所」という側面である。本研究の更に基部には、土壌—植物、植物—無脊椎動物の系があり、どの無脊椎動物グループが Hg を高レベルで吸収し始めるか、種の特特定など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の腹足類中で Hg が比較的高いものが見出されたが、鳥類や爬虫類、両生類が嗜好するミミズなどの詳細なレベル把握が待たれる。

### 3.3 水銀の組織・器官分布からみた蓄積特性

動物は Hg を高濃度で蓄積する場合、多くの種は肝臓で最も高く、ついで腎臓、筋肉の順になることが多い(渡邊, 2004)。やんばる生態系においては最高蓄積種のマンガースが、この濃度順位である。しかし、蓄積レベルが低い場合、腎臓や、ときに筋肉で肝臓よりも高い濃度となる現象がみられる(Watanabe *et al.*, 1996)。やんばる生態系でみられた、組織の濃度

順位を以下にまとめる。

#### 肝臓>腎臓>筋肉

マンガース, 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: 肝臓なし), リュウ  
キュウコノハズク

筋肉>肝臓>腎臓

ガラスヒバエ, (ハイ: 筋肉>内臓), ハナサキガ  
エル

筋肉>腎臓>肝臓

ワタセジネズミ, ミシシippアカミミガメ

野生動物における Hg 蓄積のリスク評価法の開発は今後の課題であるが, 個体として, Hg の高蓄積が肝臓への蓄積を促すとすれば, たとえば  $1 \mu\text{g/g DW}$  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可能性が推察され, 毒性に対する注意が必要な種といえるかもしれない。一方で, 毛からの Hg 排泄効率が高い (佐野ほか, 2009) ニホンイタチのパターン, 腎臓>肝臓の種は, これらが Hg 耐性を有するとすれば, クマネズミ, ケナガネズミ, アマミノクロウサギ, リュウキュウコノハズクと

いった動物が類似の Hg 代謝機構をもっていると推察された。これらの詳細は今後の重要な検討課題となる。

**3.4 水銀と他の微量元素レベルの関係**

無脊椎動物および両生類の体内から検出された Hg はクラスター分析の結果, Li, V, Cs, Co, Ni, Mo, Pb, Ga, Cd および Ag の10元素と同一クラスターを形成し (Fig. 2および Table 6), 両生類では筋肉で Mn, Cu, Se, Sr, Ba および 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, やんばる生態系における低次生物の中でも Hg 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 Hg は Cr, 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 Hg 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, Hg 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

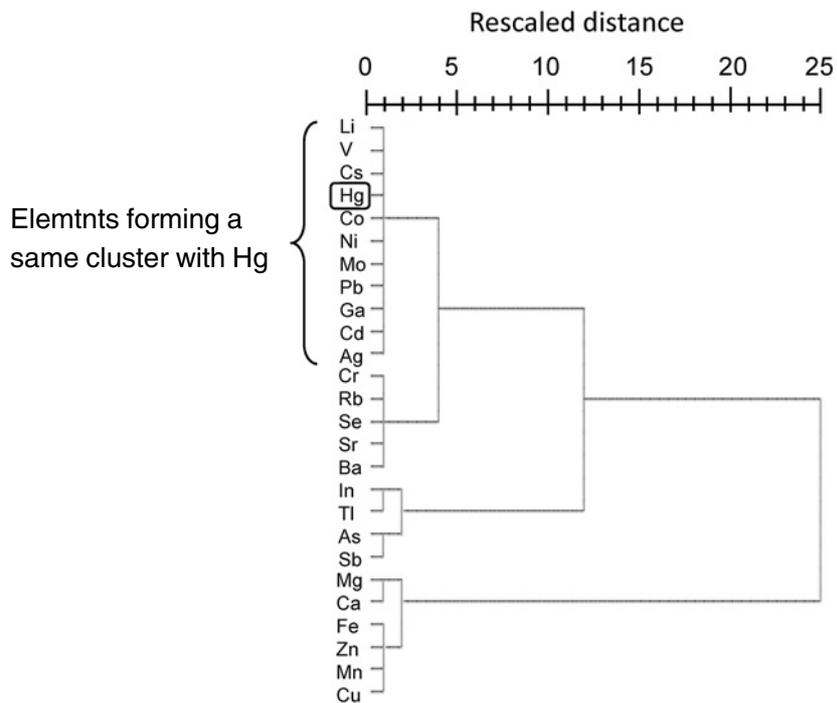


Fig. 2 Dendrogram for trace elements concentrations in the bodies of invertebrates collected from Yambaru area, Okinawa, Japan by a result of cluster analysis.

Table 6 The list of elements forming same clusters with Hg using 26 analyzed element data

	Li	Ni	Co	Ag	Ba	Pb	V	Cu	Rb	Mo	Mn	Sr	Cr	Cd	Se
Invertebrate (whole body)	○	○	○	○		○	○			○					○
Amphibia (Muscle)					○			○			○	○	○		○
Amphibia (Liver)		○	○	○		○	○			○					○
<i>Echinotriton andersoni</i> (Muscle)	○		○	○		○	○			○					
<i>Echinotriton andersoni</i> (Liver)		○	○	○		○	○		○	○			○	○	
Reptilian (Muscle)					○		○	○	○		○	○	○		○
Reptilian (Liver)					○		○					○			
Omnivorous bird (Muscle)							○				○	○	○		○
Omnivorous bird (Liver)							○			○		○	○	○	
Carnivorous bird (Muscle)							○				○	○	○		○
Carnivorous bird (Liver)							○					○	○	○	
Carnivorous mammal (Muscle)								◎	○		◎	◎	◎		◎
Carnivorous mammal (Liver)						○		◎	◎	○	◎	○	○	○	◎

◎ in carnivorous mammal indicates results from both species (mongoose and Japanese weasel)  
○ in carnivorous mammal indicates results from only one species.

必須性が確認されていない微量元素が同一グループに分類された。Se は、Hg を高濃度で蓄積する海鳥類や海生哺乳類、そしてマングースの体内で、Hg 解毒と関係した蓄積を示すことが知られている (Horai *et al.*, 2006)。このとき、Se は Hg 濃度が約60  $\mu\text{g/g DW}$  以上でモル比1:1 (Se 濃度は24  $\mu\text{g/g DW}$  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 Hg および Se 濃度は、イボイモリを除いて、高いとはいえない。我が国最大の体サイズであるイボイモリの Hg レベルが高い原因としては餌からの取込み率が高い、蓄積性があり排泄割合が低い、寿命が比較的長いなどが考えられる。高蓄積能を有する可能性の検討は今後の課題であるが、主要な餌とされるミミズ類の Hg 濃度は最高で0.58  $\mu\text{g/g DW}$  であった。今後は土壌動物の Hg レベルの解明が待たれる。このように、やんばる生態系の結果は、低次の生物であっても Se は Hg と関連した蓄積動態を有する可能性が示され (Fig. 2, Table 1および2)、とくに Se を高次生物へ供給する起源となっていると考えられた。

Hg は食物連鎖によって濃縮される、いわゆる生物増幅をしめす。この現象を利用すれば、Hg と正の相関を示す元素は、栄養段階に伴って濃縮される、つまり生物増幅の可能性を留意すべき元素といえる。本研究で供試した全動物間では、V, Ga, In および Ba が Hg と有意な正の相関を示した ( $p < 0.05$  以下いずれも Spearman の順位相関検定)。各生物群別に検討すると、爬虫類全体の筋肉で Hg と有意な相関を示した元素は Ga と Ba、肝臓では Cu と Zn、腎臓では Co

と Ni ( $p < 0.05$ ) であった。鳥類では筋肉で全種を通じ Co とのみ ( $p < 0.05$ )、肝臓では Se とのみ ( $p < 0.01$ )、腎臓では Mo ( $p < 0.05$ )、V, Co および Se ( $p < 0.01$ ) で有意な相関がみられた。

クラスター分析の結果、Hg 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 (Table 6)。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 (魚食種も含む。つまり、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) は肝臓で 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、Hg は必須元素 Se に加え、V, Cr, Mn といった元素と関係し、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土類金属の Sr が生態系内で類似した挙動を示すと考えられた (Table 6)。ここで、アマミヤマシギやヤンバルクイナ、アカヒゲといった山林生の希少種における腎臓の Cd レベルは10  $\mu\text{g/g DW}$  を越え比較的高く、アルカリ土類金属の Sr と併せて、Hg と類似の生物増幅を示す可能性が推察された。

Hg や Se で比較的高いレベルがみられた希少鳥類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 Hg は、V, Sr および Co の3元素と同一クラスターを形成し、Cd はつぎに近いクラスターに属していた。ノグチゲラは肝臓では単独で、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 (Fig. 3)。このことは、希少種3種でも Hg を中心とした元素環境に差異があり、アカヒゲやヤンバルクイナは Cd や Pb といった生物蓄積性の強毒性元素に曝露され、無脊椎動物ではヤンバルマイマイ等、陸生の腹足類の Cd や Pb などのレベルも比較的高かったことから、これらの生物を起源にしている可能性が推察された。一方で、ノグチゲラは Hg が単独で取込まれる食物網に所属していると考えられた。

本研究で分析された哺乳類は、種ごとに Hg を含む微量元素の蓄積傾向が異なっていた。また、ネズミ目は同じ生態系に属し、同じニッチであっても種によって汚染元素を蓄積しやすい種がいると考えられた。つまり、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イオコウモリの4種は類似の元素蓄積パターンを有すると考えられ、これら沖縄島に生息する希少種は、他3種と蓄積傾向が異な

ると考えられた。ここで、アマミノクロウサギはいくつかの検体で、昆虫食の強い雑食性のクマネズミに匹敵する Hg 濃度が検出された。Hg 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、植物食性のアマミノクロウサギで、クマネズミに匹敵する Hg 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 Hg の排泄能力に乏しい可能性、Hg 高蓄積植物の存在などが示唆されるだろう。

やんばる生態系および、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 Hg と同一クラスターを形成する元素を以下にまとめる (肝臓は Fig. 4)。

ネズミ類4種とコウモリ類2種 (やんばる地域他)

肝臓：Sr, Ba, Cd, Co, Pb

筋肉：Mo, Co, V, Ni, Ba, As

腎臓：Ni, Cs, Pb

マングース (やんばる地域)

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

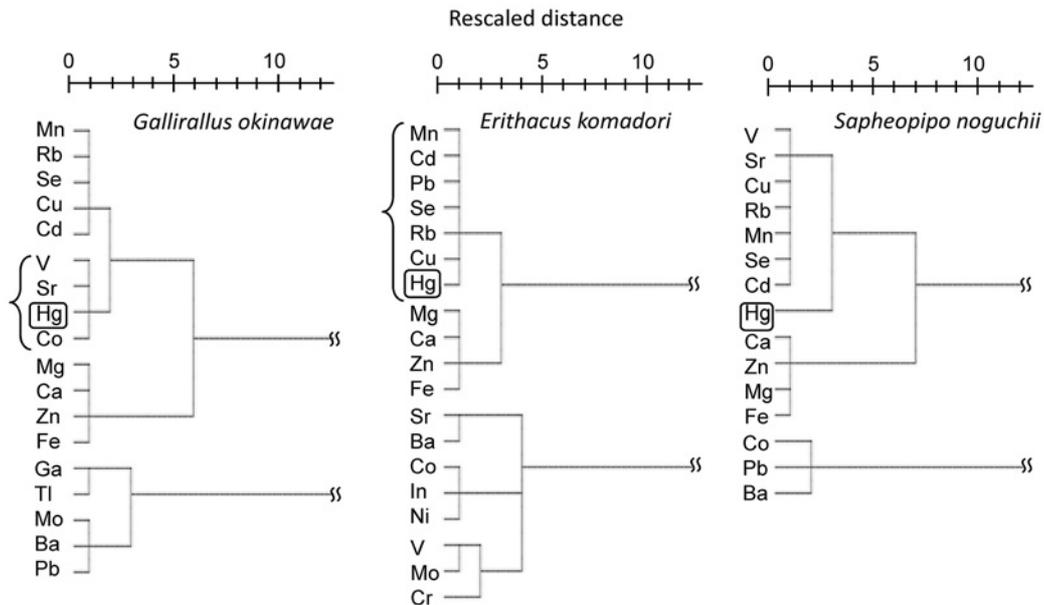


Fig. 3 Dendrograms indicate relationships among trace element concentrations in liver of three rare birds species from Yambaru area, Okinawa, Japan by results of cluster analysis.

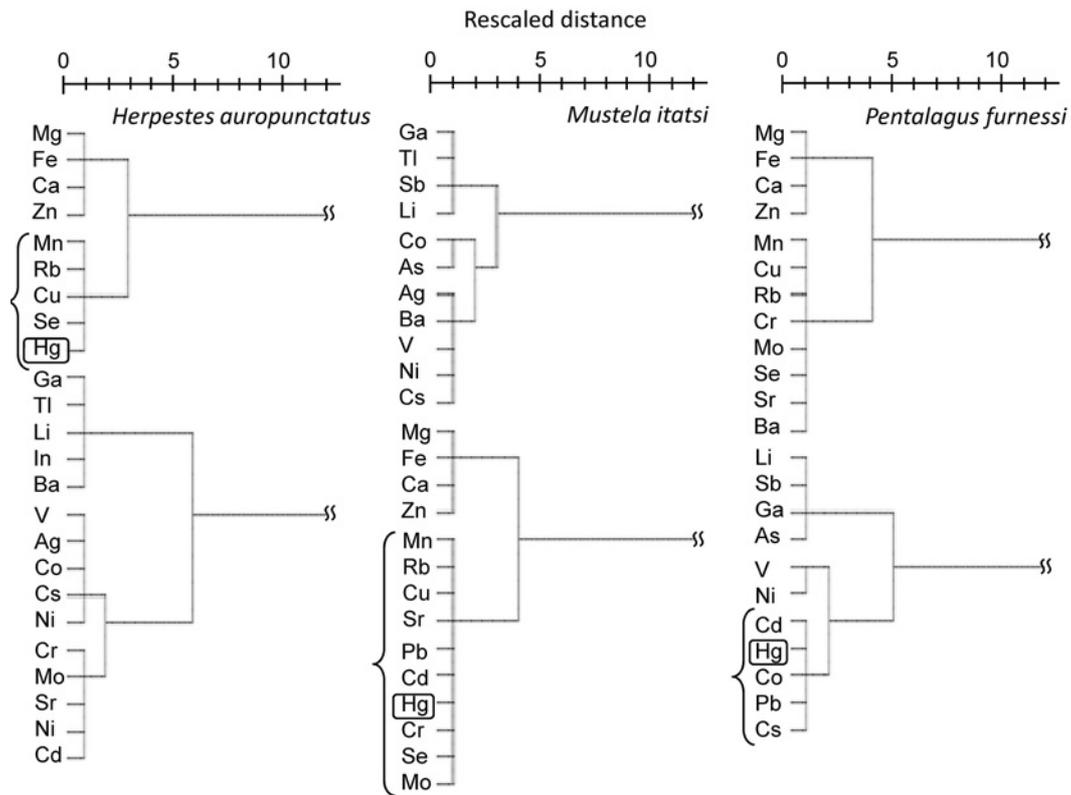


Fig. 4 Dendrograms indicate relationships among trace element concentrations in liver of three mammal species from Nansei Islands, Japan by results of cluster analysis.

- 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：As, V, Ni, Co, Ba
- 腎臓：Mn, Cu, Rb, Ba, Cr, Sr, Se, Cd

南西諸島に生息する哺乳類においてHgと関係して蓄積する微量元素には幾つの特徴がみられた。つまり、Hg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、かつ生態系の最高次捕食者であるマングースは、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 (Fig. 4)。くわえて、臓器依存的に、必須元素Crと、これまで低次動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との関係がみとめられた。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おいては筋肉に対してはAgやAsとの関係もうかがえた。低次哺乳類が、Hgと

ともに強毒性の汚染元素PbやCd, Asを連動させ蓄積する傾向は、ネズミ類とコウモリ類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。

やんばる生態系全体で、産業での使用や環境汚染が懸念される微量元素25種とHg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挙動している可能性が示唆された (Table 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 (吉田ほか, 2007), アマミノクロウサギではHgと有意な相関がみられた)。つまり、Hg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Hg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Hgと連動した蓄積を示した。Vは、高次、低次通じてHg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)。

#### 4. おわりに

やんばる地域という特定の生態系における Hg 分布の把握を行った。その結果、我が国においても有数の希少な固有種を有するこの生態系において、とくにその最高次捕食者であるマングースに濃縮される Hg 動態の一端を明らかにできた。その中で、とくに山林生の希少な両生類であるイボイモリや鳥類のノグチゲラ、ヤンバルクイナ、アカヒゲなどがマングースに至る Hg の供給源として機能している可能性が示唆された。本地域における至急のマングース対策が望まれる。

今後は、これらの知見がやんばる生態系の保全への基礎的データとして活用されることが望まれる。たとえば、希少な山林生鳥類に比較的高い Hg や、その他 Cd など有害微量元素蓄積が確認されたことから、希少種の保護・管理においては有害金属を含まない餌の選択などが重要となろう。

#### 謝 辞

本研究における試料採取にあたって、やんばる野生動物保護センターの中田勝士氏、三宅雄士氏、福地壮太氏、加藤麻理子氏、奄美野生生物保護センターの鎌雅哉氏、水谷拓氏、永井弓子氏、国立科学博物館の西海功氏、岩見恭子氏、国立環境研究所の桑名貴氏、大沼学氏、琉球大学の小倉剛氏、戸田守氏、富永篤氏、筑波大学大学院の本多正尚氏、京都大学の角田羊平氏、環境省那覇自然環境事務所の阿部慎太郎氏らのご協力を賜りました。心からの感謝を申し上げます。また、本稿の改訂にあたり、たいへん貴重なご意見を賜りました査読者の方々に御礼申し上げます。

なお、この研究は、環境省地球環境研究総合推進費 (RF-085および RF-0908) によって遂行されました。

#### 参 考 文 献

- Conover, M. R. and Vest, J. L. (2009) Selenium and mercury concentrations in California gulls breeding on the Great Salt Lake, Utah, USA. *Environmental Toxicology and Chemistry*, **28**, 324-329.
- 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.
- 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.
- 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**, 1354-1360.
- Jaffe, D., Prestbo, E., Swartzendruber, P., Weiss-Penzias, P., Kato, S., Takami, A., Hatakeyama, S. and Kajii, Y. (2005) Export of atmospheric mercury from Asia. *Atmospheric Environment*, **39**, 3029-3038.
- 丸山幸治・坂田昌弘 (2007) 日本海側における水銀等化学成分の大気中濃度と湿性沈着量の季節変動. *環境科学会誌*, **20**, 47-60.
- 永山泰彦・小倉剛・川島由次 (2001) 沖縄島と奄美大島に棲息するジャワマングース (*Herpestes javanicus*) の頭骨計量計測に基づいた種の統計学的検証. *哺乳類科学*, **41**, 159-169.
- National Research Council (1978) セレン. 桜井治彦・土屋健三郎訳 環境汚染物質の生体への影響4. (株)東京化学同人, pp. 199.
- 小倉剛・川島由次・織田銃一 (2003) 外来動物ジャワマング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**, 295-301.
- 佐野翔一・渡邊泉・小倉剛・須藤健二・宮里芳和 (2009) 座間味島のニホンイタチの微量元素蓄積. 第18回環境化学討論会講演要旨集, 340-341.
- United Nations Environment Programme (UNEP) (2002) UNEP Global Mercury Assessment Summary of the Report.
- Walker, L. A., Simpson, V. R., Rockett, L., Wienburg, C. L. and Shore, R. F. (2007) Heavy metal contamination in bats in Britain. *Environmental Pollution*, **148**, 483-490.
- 渡辺知保 (2002) セレンによる水銀毒性の修飾. *医学のあゆみ*, **202**, 899-902.
- 渡邊泉 (2004) 海獣類の微量元素蓄積—その状況および蓄積レベルを決定する要因は何か—. *勇魚*, **40**, 21-31.
- 渡邊泉・宝来佐和子・小川大輔・中島周三・船越公威・平野昂規・小倉剛 (2010) 沖縄県恩納村南部、鹿児島市喜入およびやんばるで捕獲されたマングース *Herpestes auro-punctatus* の微量元素蓄積. *人間と環境*, **36**, 208-220.
- Watanabe, I., Ichihashi, H., Tanabe, S., Amano, M., Miyazaki, N., Petrov, E. A. and Tatsukawa, R. (1996) Trace element accumulation in Baikal seal (*Phoca sibirica*) from the Lake Baikal. *Environmental Pollution*, **94**, 169-179.
- 渡邊泉・四宮基彦・國頭恭・田辺信介・窪寺恒己 (2002) 駿河湾および東北沖で採取された深海生魚介類の微量元素蓄積. *地球化学*, **36**, 179-189.
- 吉田直史・玉城不二美・渡口輝・大城洋平・佐々木壮・宮城俊彦 (2007) 沖縄県牧港、嘉手納海域における魚類中の重金属類及び有機塩素系化合物含有量について. *沖縄県衛生環境研究所報*, **41**, 199-207.