

環境モニタリングの意義と問題点： 新しい環境モニタリングの方法

望月 眞理子 植田 富貴子[†]

日本獣医生命科学大学獣医学部（〒180-8602 武蔵野市境南町1-7-1）

The Significance and Problems of Environmental Monitoring: A New Method of Environmental Monitoring

Mariko MOCHIDUKI and Fukiko UEDA[†]

**Department of Preventive Veterinary Medicine, School of Veterinary Medicine, Nippon Veterinary and Life Science University, 1-7-1 Kyonancho, Musashino, 180-8602, Japan*

1 はじめに

1953～1960年にかけて熊本県水俣湾周辺で多発した水俣病は、魚介類に蓄積されたメチル水銀化合物を人が経口摂取したことにより起こった中枢神経系疾患である[1]。コメ糠油事件（1968年）では、食用油の製造過程でポリ塩化ビフェニールが油に混入し、多くの人に健康被害を招いた[2]。これらの事件では、人への被害が明らかになる前に、水俣病においてはメチル水銀を蓄積した魚介類を食べた水鳥や猫などの動物に、コメ糠油事件では汚染された油を含む飼料を食べた鶏に異変が起こっていた[3]ことがすでに明らかになっている。これらのように環境中に拡散された、あるいは食品を汚染した何らかの化学物質が、多くの人々の健康に重篤な被害を与える前に、人を取り巻く動物たちに異変を起こさせる場合があるという事実は看過することはできない。

近年、このような事態を回避するために種々の生物を監視して環境の状態を把握する「生物モニタリング」が、人の健康へのリスク評価をするうえで重要な手法と考えられるようになってきた。しかし、それは始まったばかりの手法であり、問題点や手法として改良しなければならない点が多い。本総説では、まず問題点を整理し、その後、われわれが開発した新しい手法を紹介する。

2 生物モニタリングの問題点

野生動物は環境の影響を受けやすいために、生物モニタリングの調査・研究対象として世界的に多用されている。したがってわれわれも1993年以降、種々の野鳥や哺乳動物を用いて臓器内の蓄積された金属元素量を測定してきた。われわれは、これまで留鳥と冬鳥の腎臓・肝臓中のカドミウム（Cd）[4]、バナジウム汚染の野鳥間での差違[5]、繁殖地の違いによるモリブデン[6]やタリウム（Tl）[7]含量の差違、油で汚染された水鳥の汚染状況[8]などを報告している。測定臓器として肝臓と腎臓をターゲットとしたものが多い。肝臓と腎臓をターゲットとしたのはこれらの臓器が解毒装置や蓄積装置として機能していることが毒学的にも知られているからである。

しかし、人や実験動物など生体内での代謝が良く解明されているものでは、薬物・毒物の肝臓・腎臓における蓄積状況や代謝状況などが性、種、年齢などで大きく異なっていることは周知の事実である。したがって、野生動物を使用したモニタリングにおいても対象とする動物種を揃えたうえ、なおかつ、下記①～④のようなその対象動物についての代表的な疫学的情報が得られるか否かが正確な判定を行ううえでの重要な鍵となる。

- ①性差：雌雄あるいは両性が存在、または性的変化
- ②年齢：査定可能か否か

[†] 連絡責任者：植田富貴子（日本獣医生命科学大学獣医学部）

〒180-8602 武蔵野市境南町1-7-1 ☎0422-31-4151 FAX 0422-33-2094 E-mail: fueda@nvl.ac.jp

[†] Correspondence to: Fukiko UEDA (Department of Preventive Veterinary Medicine, School of Veterinary Medicine, Nippon Veterinary and Life Science University)

1-7-1 Kyonancho, Musashino, 180-8602, Japan

TEL 0422-31-4151 FAX 0422-33-2094 E-mail: fueda@nvl.ac.jp

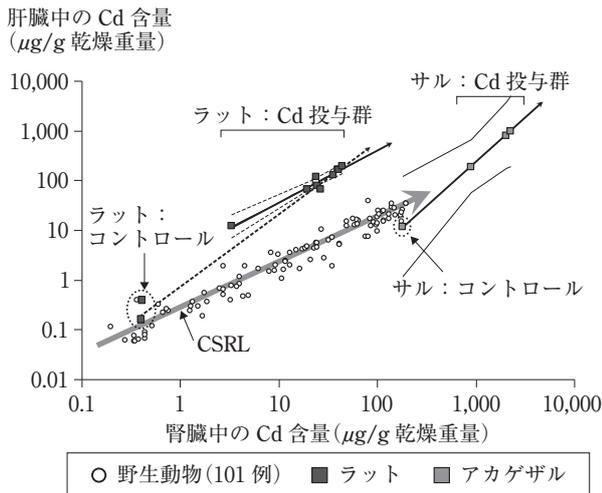


図1 野生動物の腎臓と肝臓における Cd 含量の平均値より作成された CSRL 及び Cd を投与された実験動物の成績(点線は、90%信頼限界、実線は 95%信頼限界を示している。Mochizuki ら[11]及び Ueda ら[12]を引用)

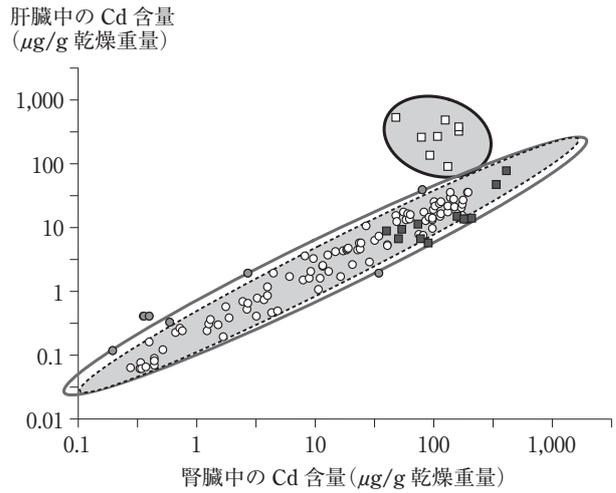


図2 野生動物の腎臓と肝臓における Cd 含量の平均値より作成された等確率楕円及びヒトの成績(点線は、90%信頼限界、実線は 95%信頼限界を示している。Mochizuki ら [11] 及び Ueda ら [12] を引用)

- ③食性：草食性，肉食性，雑食性など
- ④移動状況：定着性，移動性，移動範囲
- ⑤正常値：汚染されていない場合の値

しかしながら残念なことに、これまで行われてきた種々の生物モニタリングでは、これらのような疫学情報が対象動物に対して「すべて」揃えられていたことがきわめてまれであったと指摘せざるを得ない。

⑤の正常値は特に重要である。正常値そのものが年齢や性差などにより、大きく変動するからである。実際に、環境中の残留塩素有機化合物の動態をまとめた著作「奪われし未来」[9]は、一般の人の目を環境に向けたという点で功績が大きいと評価されているが、この著作が主として野生動物を対象として書かれたものであることから、同時に、野生動物における非汚染対象をどこに置くのかという点が問題点として指摘されている[10]。この非汚染対象が、すなわち正常値である。どのような物質であろうと、人が使用すればそれらがたちどころに環境中に拡散していくことは避けられない。したがって、野生動物である限り、胎子として存在しはじめた時点から汚染が開始していることは明らかで、まったく汚染されていない真の対象群を設定することは不可能である。これらの問題点は、野生動物で得られた成績を人のリスク評価に、直接的に結び付けることの難しさと密接に関連している。

他方、得られたデータをどのように処理して比較するかということが大きな問題となる。この点については多くの生物モニタリングにおいて、得られたデータ分布の中心的傾向を示す特性値として「平均値」を用いている。しかし、上述のごとく現在の野生動物を使用したモニタリングでは疫学情報が欠損していることが多く、成獣も

幼獣も区別なく一緒にして平均値を出している可能性を否定できない。当然のことではあるが、得られた平均値はばらつきの大きなものとなる。さらに、得られたばらつきの大きい平均値を異なる種の間で比較している場合さえ見受けられる。

以上のようなことから、野生動物を使用してモニタリングを行う場合には非常に多くの標本数を集めてそのばらつきを縮小しようという試みがなされることが多い。しかし通常の場合、先進国では野生動物保護の観点、法規制などにより自由な大量捕獲は不可能である。

3 新しい生物指標の開発

前項に挙げた問題点を解決するために、われわれは、対象とした動物の年齢や性差、食性などに左右されずに動物の汚染状況を把握することを可能とする新たな指標を作成したので紹介する。

イタイイタイ病の原因とされる Cd は、多くの研究がなされており最もデータが揃う元素の一つであった。そこでまず、100 以上の文献から特別な汚染が記載されていない 27 文献を選択し、それらから陸及び淡水鳥 12 種、海鳥 27 種、陸棲哺乳類 13 種及び海棲哺乳類 4 種からなる 101 例の野生動物の腎臓と肝臓中の Cd 含量をリストアップして検討した。その結果、野生動物においても腎臓と肝臓中の Cd 含量の間に有意な回帰が得られることを見いだした(図1)[11]。そこで、この回帰直線を Cd 標準回帰直線(Cd Standard Regression Line :

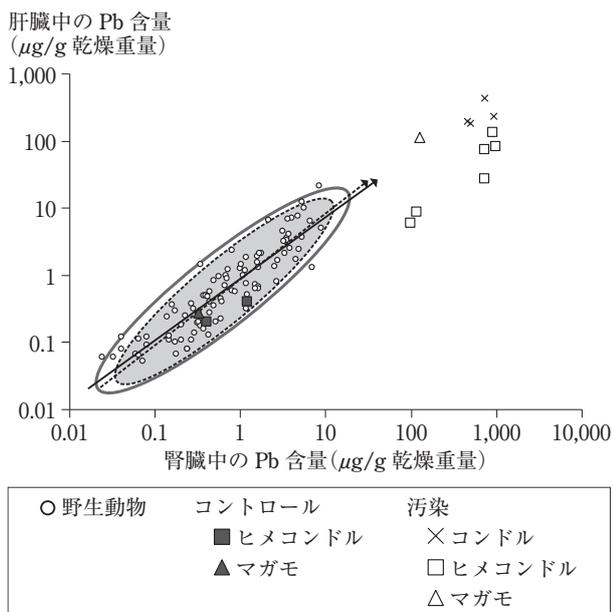


図3 野生動物の腎臓と肝臓におけるPb含量の平均値より作成された等確率楕円及び汚染された野生動物の成績(点線は、90%信頼限界、実線は95%信頼限界を示している。Mochizukiら[21]を引用)

CSRL)と名付け、これにデータの広がりを示す90%信頼限界(点線)と95%信頼限界(実線)で等確率楕円を与えた(図2)[12]。

それ以前の国内外の研究により、腎臓と肝臓中のCd含量が年齢に伴って増加する正の回帰直線を形成することが知られていた。そこでわれわれは、野生動物により作られたこの回帰直線がCd代謝の正常集団(解毒代謝が正常)であると仮定した。この仮定を検証するには、明らかにCd汚染が起こった集団との比較が必要である。そこで、30ppmのCdCl₂を5~24カ月投与されたアカゲザル[13]の成績を文献より選択し、さらにわれわれが0.1mMから2mMのCdCl₂を2時間、静脈内に連続的に減速注入法で投与したラットを作成した。また、人との比較も必要であることから、イタイイタイ病患者を含む汚染地区居住者の成績[14-16]を文献から選択した。図1に示すようにCdを投与された動物の回帰直線は、CSRLとは異なる傾きを示している。また、汚染地区に居住する人の回帰直線は明らかに異なる負の傾きを示しており、データ自体が完全に等確率楕円から逸脱する(図2)[12]。これとは対照的に、非汚染地区に居住していた人の成績[14, 15, 17-20]が、等確率楕円内に位置していることは明らかである(図2)[12]。以上のことから、等確率楕円外に位置するものは、何らかのCd曝露を受けて、Cd代謝が正常から外れつつある動物の成績を示していると考えられた。

Cdの体外への排出は、生体内で誘導された金属結合タンパクであるメタロチオネインの亜鉛(Zn)部位が、

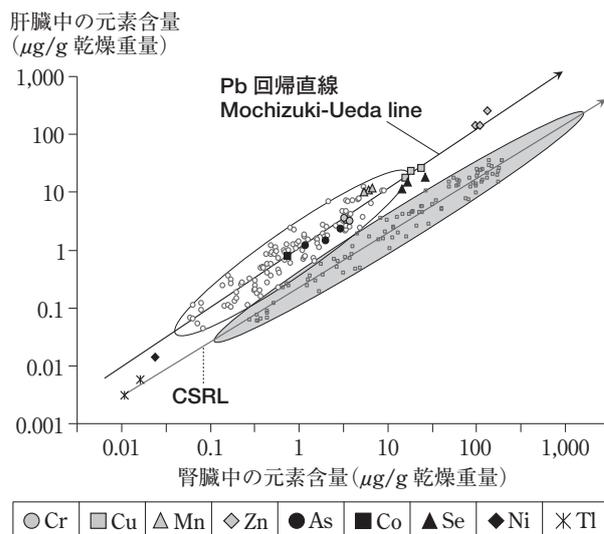


図4 CSRLとPb回帰直線(Mochizuki-Ueda line)の比較及び野生動物の肝臓と腎臓における各種元素含量(Cr:クロム, Cu:銅, Mn:マンガン, Zn:亜鉛, As:ヒ素, Co:コバルト, Se:セレン, Ni:ニッケル, Tl:タリウム。Mochizuki[25]を引用)

親和性の違いによりCdと置換することで惹起されることが知られている[21]。現在、Znと置換し得る元素種として、種々の元素が報告されているが、Pbもその一つであり、Cdよりはデータが少ないが、Pbによる中毒の多さから歴史的にも世界的にも報告の多い元素の一つとなっている。図3がCdと同様の方法で作成されたPbの指標である[22]。90%信頼限界(点線)と95%信頼限界(実線)の等確率楕円内の小丸印が非汚染の野生動物のデータで、生息域も種も異なる生物を用いたのにもかかわらず良好な相関を示している。汚染の判明している動物の成績[23-25]は、やはり、等確率楕円から明らかに逸脱する。このPb回帰直線をわれわれはMochizuki-Ueda lineとして公表している[26]。

Cd及びPb以外の9種類の元素(クロム, 銅, マンガン, Zn, ヒ素, コバルト, セレン, ニッケル, Tl)について、野生動物のデータは多くないが、文献から得られたデータをCSRLとPb回帰直線に挿入したものが図4である。この図では95%信頼限界の等確率楕円のみを示した。挿入したデータがすべて直線上にほぼ並ぶ。また、CSRLとPb回帰の傾きに有意な差はない。しかし、y切片が異なるために、今のところ、この2つの直線は完全に重なってはいない。メタロチオネインにはいくつかの型がある[21]ことが知られているので、y切片の違いの原因は各元素とメタロチオネインとの結合の違いにあるのかもしれない。

4 実際の野生動物を用いた検証

表に重油汚染で死亡した海ガモで、当初、Cdによる

表 タンカー事故により流出した重油により死亡した海ガモと重油汚染を受けていない海ガモの腎臓と肝臓におけるCd含量の比較 (Mochizukiら [4] を引用)

種	例数	腎臓中のCd含量	肝臓中のCd含量
海ガモ			
スズガモ	6	13.56±3.82	2.04±0.52
キンクロハジロ	6	1.92±0.95	2.18±1.28
ホシハジロ	3	4.90±0.40	1.09±0.28
クロガモ	1	67.44	2.34
	16	12.92±5.81	1.95±0.45
重油汚染を受けた海鳥			
クロガモ	5	38.62±15.46	11.41±2.84
ビロードキンクロ	5	27.23±7.50	8.42±2.50
コオリガモ	1	174.38	6.53
	11	45.79±14.90	9.61±1.71

($\mu\text{g/g}$ 乾燥重量)

急性中毒が疑われ、われわれにCd含量の測定が依頼されたものと、別の調査捕獲等で得られた海ガモと、苫小牧沖のタンカーの座礁事故により重油汚染で死亡した海ガモの臓器中のCd含量を示す。確かに、重油汚染で死亡した鳥から得られたデータはそうではない鳥の臓器中のCd含量よりも明らかに高かった。しかし、わが国の海鳥における各種有害元素含量は、他の野生動物よりも一般に高い傾向にあることがわれわれの過去の研究で明らかになっており、他の研究者たちも海鳥の場合には、この重油汚染された鳥よりはるかに高い含量を多数報告している。たとえば、コウテイペンギン [27] やケワタガモ [28] の腎臓では、 $100\mu\text{g/g}$ 乾燥重量を超えるCd含量となっている。それらと比較した場合には、この重油で汚染された海ガモの成績が特に高いとは言えなくなるのである。しかし、前述したように、重油汚染した鳥と同じ種、同じ性別、同じ年齢の鳥をすぐに入手することは困難である。そこで、CSRLと等確率楕円に汚染された海ガモのデータを挿入した(図5)。汚染された鳥はすべて等確率楕円の中に収容されることとなった [12]。したがって、これらの鳥たちが重篤なCd汚染により死亡したとは考えられない。

さらに、図5では図1のCd投与ラットの成績も重ねて示している。われわれは今のところ、回帰直線が等確率楕円を逸脱した場合、その傾きがCSRLと平行であれば急性中毒状態、図1のCd投与ザルや図2のイタイタイ病患者のように傾きが異なる場合には慢性中毒状態にあると考えている。ラットへの投与が2時間程度、サルへの投与が半年程度、そしてイタイタイ病患者でのCd曝露は年単位であることを考え合わせるならば、傾きが正から負に変わったイタイタイ病患者の方がCd投与ザルよりも重篤な汚染を受けたと考えても矛盾はない。このように考えると、油汚染で死亡した鳥たちはCd

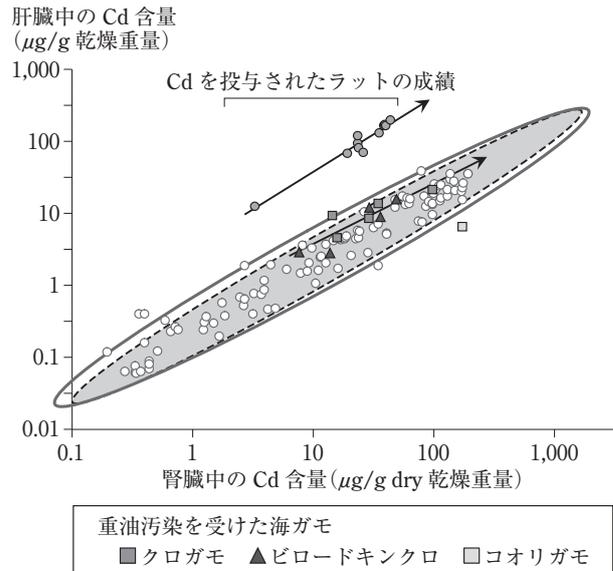


図5 重油汚染を受けた海ガモの成績とCSRL及びラットの成績との比較 (点線は、90%信頼限界、実線は95%信頼限界を示している。Uedaら [12] を引用)

の急性中毒により死亡したものではないであろう。

5 最後 に

われわれが開発した動物の汚染状況を把握するための新たな指標には、y切片の問題やどれぐらいの元素数までこの指標が適用可能なのかなど、検討し改良すべき点はまだ多い。しかし、最初に挙げた「①から⑤までの問題点」と「ばらつきを縮小しようとして非常に多くの標本数を集める」という問題点のすべてはクリアすることができたのではないだろうか。われわれは、この指標により急性、慢性などの中毒段階の比較まで可能であると考えている。

生物を監視、測定する生物モニタリングの最終目標は、人へのリスク評価を行うことにある。水俣病やコメ糠油事件では、人への重篤な健康被害が出る前に動物への被害が確認されているにもかかわらず、当時の獣医学では、動物における異常が意味するところを把握できなかった [29]。

この指標はまだ仮説段階にあるが、完成することができたならば、研究に費やす時間や手間が大幅に削減され、野生動物に対しても実験動物で求められている3R (Replacement: 代替, Reduction: 削減, Refinement: 改善) のうちReduction (削減) の要求が満たされ、そして汚染の時期と段階までもが推測できるようになるとわれわれは信じている。

引用文献

[1] 落合由嗣: 第8章水質汚濁, 獣医公衆衛生学II, 獣医公衆衛生学教育研修協議会編, 第1版, 268-278, 文永堂,

- 東京 (2014)
- [2] 諏佐信行：水質汚濁，獣医公衆衛生学，高島郁夫，熊谷進編，第3版，400-401，文永堂，東京 (2007)
- [3] 植田富貴子，望月真理子：野生動物と人の関わり，人間動物関係論，松木洋一監修，第1版，11-20，養賢堂，東京 (2012)
- [4] Mochizuki M, Hondo R, Kumon K, Sasaki R, Matsuba H, Ueda F : Cadmium contamination in wild birds as an indicator of environmental pollution, *Environ Monit Assess*, 73, 229-235 (2002)
- [5] Mochizuki M, Ueda F, Sasaki S, Hondo R : Vanadium contamination and the relation between vanadium and other elements in wild birds, *Environ Pollut*, 106, 249-251 (1999)
- [6] Mochizuki M, Sasaki R, Yamashita Y, Akinaga M, Anan N, Sasaki S, Hondo R, Ueda F : The distribution of molybdenum in the tissues of wild ducks, *Environ Monit Assess*, 77, 155-161 (2002)
- [7] Mochizuki M, Mori M, Akinaga M, Yugami K, Oya C, Hondo R, Ueda F : Thallium contamination in wild ducks in Japan, *J Wildl Dis*, 41, 664-668 (2005)
- [8] Mochizuki M, Yamamoto H, Yamamura R, Suzuki T, Ochiai Y, Kobayashi J, Kawasumi K, Arai T, Kajigaya H, Ueda F : Contents of various elements in the organs of seabirds killed by an oil spill around Tsushima Island, Japan, *J Vet Med Sci*, 75, 667-670 (2013)
- [9] Colborn T, Dumanoski D, Myers JP : 奪われし未来，長尾 力訳，3-364，翔泳社，東京 (1997)
- [10] Krinsky S : ホルモン・カオス，松原早苗他訳，185-269，藤原書店，東京 (2001)
- [11] Mochizuki M, Mori M, Hondo R, Ueda F : A new index for evaluation of cadmium pollution in birds and mammals, *Environ Monit Assess*, 137, 35-49 (2008)
- [12] Ueda F, Mochizuki M, Mori M, Hondo R : A new technique for biological monitoring, *Proceedings of 5th international conference on energy, environment, ecosystem and sustainable development, Energy, environment, ecosystems, development and landscape architecture, Energy and environmental engineering series, Mastorakis N, et al eds*, 176-184, World scientific and engineering academy and society press, Athena (2009)
- [13] 小滝規子，木村正己：カドミウムの慢性影響に関する実験的研究 (1991年度報告) 5. 重金属分析および特殊タンパク質分析，イタイイタイ病およびカドミウム中毒 (上巻) 環境保健レポート No. 59, 日本公衆衛生協会編，34-42, 日本公衆衛生協会，東京 (1992)
- [14] Friberg L, Piscator M, Nordberg GF, Kjellström T : 環境中のカドミウム その汚染と生体影響，木村正己訳，第二版，1-400，医歯薬出版，東京 (1974)
- [15] 葛原由章，住野公昭，林 千代，北村正次：剖検試料中の重金属濃度，カドミウム汚染地区，非汚染地区居住者，イタイイタイ病およびカドミウム中毒 (上巻) 環境保健レポート No. 59, 日本公衆衛生協会編，154-174, 日本公衆衛生協会，東京 (1992)
- [16] 山田裕一，本多隆文，釣谷伊希子，石崎昌夫，城戸照彦，能川浩二：環境カドミウム曝露と臓器中カルシウム濃度，イタイイタイ病およびカドミウム中毒 (上巻) 環境保健レポート No. 59, 日本公衆衛生協会編，127-130, 日本公衆衛生協会，東京 (1992)
- [17] Takács S, Tatár A : Trace elements in the environment and in human organs, *Environ Res*, 42, 312-320 (1987)
- [18] Teranishi A, Ninomiya R, Koizumi N : Relationship of metallothionein to cadmium and to zinc in human liver and kidney, Klaassen CD eds, *Metallothionein IV*, 485-488, Birkhäuser Verlag, Basel (1999)
- [19] Bem EM, Kaszper BW, Orłowski C, Piotrowski JK, Wojcik G, Zolnowska E : Cadmium, zinc, copper and metallothionein levels in the kidney and liver of humans from central Poland, *Environ Monitor Assess*, 25, 1-13 (1993)
- [20] Piotrowski JK, Orłowski C, Bem EM, Brys M, Baran E : The monitoring of cadmium, zinc and copper in the kidneys and liver of humans deceased in the region of Cracow (Poland), *Environ Monitor Assess* 43, 227-236 (1996)
- [21] 鈴木和夫：メタロチオネインが関与する微量元素の毒性と疾患，微量金属の生体作用，日本化学会編，153-165, 学会出版センター，東京 (1995)
- [22] Mochizuki M, Okutomi Y, Takano T, Hondo R, Yumoto N, Kajigaya H, Ueda F : A modified index for lead in biological monitoring, *Rev Agri Sci*, 1, 65-67 (2013)
- [23] Pattee OH, Carpenter JW, Fritts SH, Rattner BA, Wiemeyer SN, Royle JA, Smith MR : Lead poisoning in captive Andean condors (*Vultur gryphus*), *J Wildlife Dis*, 42, 772-779 (2006)
- [24] Carpenter JW, Pattee OH, Fritts SH, Rattner BA, Wiemeyer SN, Royle JA, Smith MR : Experimental lead poisoning in Turkey vultures (*Cathartes aura*), *J Wildlife Dis*, 39, 96-104 (2003)
- [25] Heinz GH, Hoffman DJ, Sileo L, Audet DJ, LeCaptain LJ : Toxicity of lead-contaminated sediment to mallards, *Arch Environ Contam Toxicol*, 36, 323-333 (1999)
- [26] Mochizuki M, Mori M, Hondo R, Ueda F : A new index for heavy metals in biological monitoring. In: *Proceedings of 5th international conference on energy, environment, ecosystem and sustainable development, Energy, environment, ecosystems, development and landscape architecture, Energy and environmental engineering series, Mastorakis N et al, eds*, 185-191, World scientific and engineering academy and society press, Athena (2009)
- [27] G. Steinhagen-Schneider : Cadmium and copper levels in seals, penguins and skuas from Weddell Sea in 1982/1983, *Polar Biol*, 5, 139-143 (1986)
- [28] Frank A : In search of biomonitors for cadmium: cadmium content of wild Swedish fauna during 1973-1976, *Sci Total Environ*, 57, 57-65 (1986)
- [29] 小川益男：公衆衛生の考え方と国民衛生の動向，獣医公衆衛生学，高島郁夫，熊谷 進編，第3版，1-35，文永堂，東京 (2007)