ヒゲナガカワトビケラ属 (*Stenopsyche*) の放射能汚染状況と生物学的半減期評価の試み

RADIOACTIVE POLLUTION AND BIOLOGICAL HALF LIFE FOR STENOPSYCHE (TRICHOPTERA: STENOPSYCHIDAE)

藤野 毅¹・ニンウィリ²・野本健志³・山田明弘⁴

Takeshi FUJINO, Hnin WITYI, Takeshi NOMOTO, and Akihiro YAMADA

¹正会員 工博 埼玉大学准教授 大学院理工学研究科 (〒338-8570 さいたま市桜区下大久保255)

²学生会員 工修 埼玉大学大学院生 大学院理工学研究科 (〒338-8570 さいたま市桜区下大久保255)

³非会員 工学士 埼玉大学大学院生 大学院理工学研究科 (〒338-8570 さいたま市桜区下大久保255)

⁴非会員 工学士 福島県庁 道路整備課 (〒960-8670 福島県福島市杉妻町2-16)

This topic presents the effect of radioactive pollution in river on *Stenopsyche* sp. (Trichoptera: Stenopsychidae) at upstream and immediately downstream of Mano dam in Fukushima Prefecture, Japan. *Stenopsyche* sp. has high productivity with bivoltine life cycle among all invertebrate species, and can be a good indicator for any kind of environmental pollutions. The total radioactive cesium is always detected from *Stenopsyche* sp. with the order of 4,000 Bq/kg. A cause of high radiation intensity is due to very high intensity from the fine particulate organic matter (FPOM). However, its biological half-life was only about 6 hours for non-winter generation. Thus, FPOM is mostly excreted without assimilation.

Key Words : *Biomonitoring, Biological half-life, Nuclear disaster, Trichoptera*

1. はじめに

環境省による水生生物放射性物質モニタリングの結果より、福島県内の河川(阿武隈川, 宇多川, 真野川, 新田川, 太田川)では、依然として基準値を大幅に上回る放射性セシウム (Cs-134, Cs-137) が検出されている¹⁾。この調査は、平成24年度夏期分(採取日: 8月7日~9月21日)までは「水生昆虫」として、様々な種を一括りにして測定されていたため、種類別に放射性物質の蓄積状況を把握できなかったが、同年秋期分(同: 9月12日~11月25日)及び冬期分(同: 12月4日~平成25年1月18日)からは、トンボ目, カワゲラ科, ヘビトンボ科, ヒゲナガカワトビケラ属に分けられ、それぞれ測定対象となった出現種も記載されている。これらの区分で、放射性セシウムが最も高く検出されたのは造網型トビケラ目のヒゲナガカワトビケラ属 (*Stenopsyche*)である。日本およびアジアの河川の上中流域に生息し、生活史として幼虫は5齢が最終齢で、本州では年二化生(非越冬世代と越冬世代)が多く、他種と比較して大型で生息密度も高いために底生生物群集の中でも極めて高い現存量を誇る^{2,3)}。ヒゲナガカワ

トビケラ属は河川中の様々な汚染物質の指標生物として適用され、これまでに重金属類やアオコに含まれるmicrocystinの生物濃縮について報告例がある^{3,4)}。

一方、放射性物質のバイオモニタリングについては2011年(平成23年)3月11日の福島第一原発事故以降様々な種を対象に測定が行われているが、それまでは底生生物に関する知見は極めて少ない。唯一、環境中のCs-137の河川底生生物への影響は、National Council on Radiation Protection and Measurementsに一部の研究例が記載されているがトビケラ目は扱われていない⁵⁾。また、生物が生息環境から化学物質を濃縮する現象は、i)吸収, ii)蓄積, iii)排泄の3要素に支配されており、特に蓄積を論ずるにあたっては排泄と関連した生物学的半減期を調べることも重要である⁶⁾。

本研究は、依然として放射能汚染が生じている福島県内の河川が、今後、いつその問題が解決されるのかを探ることと、また、特にダムが介在することでその上下流でどの程度の放射能汚染の分断が生じているのかを評価すること、さらにはヒゲナガカワトビケラ属が生息する河川を対象として、その生活史との関連を明らかにすることや、生物学的半減期を把握すること

を目的に種々モニタリングと実験を実施している。本研究は、開始後まだ間もないがいくつか知見が得られたため、部分的ながら報告する。

2. モニタリング調査

(1) 調査地点

河川を流下する水質、流下粒状物質、及び底生動物群集の調査は、福島県飯館村から南相馬市を流れる真野川で行った(図-1)。真野川は福島県が管理する二級河川であり、村・市の境界付近には洪水調節を目的とする人造湖(はやま湖)があり、ダム(真野ダム)が建設されている。総貯水容量/有効貯水容量は36,200 / 34,800 千 m^3 である。平成25年3月7日現在、上流の飯館村側の流域は「避難指示解除準備区域(放射線の年間積算線量が20ミリシーベルト以下となることが確実であると確認された地域)」に指定されているが、土地区分として主に森林地帯であり、点在する集落の住居以外除染は行われていない。一方、下流側の南相馬市は「避難指示区域外」であり日常生活が営まれている。

2012年(平成24年)6月2日が最初の訪問で、はやま湖の上下流においてヒゲナガカワトビケラ属の生息を確認した。河床は礫で覆われているが、上流は岩盤が向きだしで主に巨礫(boulder)で占められていた。下流の採取地点は大礫(cobble)と中礫(pebble)で占められていた。放射能モニタリングを2012年(平成24年)6月2日と11月20日、翌2013年(平成25年)からは4月以降、月1度程度の頻度で行っている。

(2) サンプルの採取と放射能強度の測定

底生動物群集の採取は、水深が30cm程度の平瀬において、口部50 cm $\times$ 50 cm、目合0.475 mmのサーバーネット(No.5514-C, 離合社)を用いて行った。放射能強度の測定に関して、一般にはサンプル重量が100 g(W.W.)あることが望ましいとされているが、水生昆虫ではそこまでの収集は困難である。しかし、Cs-134とCs-137に関してはサンプル重量が1 g(D.W.)でも十分定量限界を上回って計測されることから、5齢幼虫を中心に30個体程度をプラスチック容器に集めて、すぐに95%エタノールで固定した。実験室に持ち帰り、ヒゲナガカワトビケラ属の種の区別、各個体の頭長、体長、乾・湿潤重量を計測した。なお、上下流ともにヒゲナガカワトビケラ属の生息数は1度のサーバーネットコードラート当たりで数匹以下に留まり、30個体以上集まるまで採取を繰り返した。

粒状流下物(POM)は、口径30 cm、測長75 cm、目合0.1 mmの簡易プランクトンネット(No.5512-C, 離合社)を用いて収集した。河川中に1時間程度固定し、水中で約10分毎に、手でネットの目詰まりを解消させながら透明プラスチック製の底管に溜まった懸濁物を

図-1 真野川調査地点(福島県飯館村と南相馬市)

ポリ容器に収集し、実験室において篩にかけて粒径500, 250, 125, および64 μm 以下に分けた後、放射能測定実施まで乾燥炉中で保存した。その一部をCNコーダー(MT-3, Yanako)によって炭素と窒素含有率を測定した。

河川水は、現場において1 μm ろ紙(GF/B, Whatman)でろ過後、実験室において改めて0.7 μm ろ紙(GF/F, Whatman)でろ過を行い、無機N, Pの分析を行った。

放射性セシウムの測定は、 γ 線スペクトロメトリ法ゲルマニウム半導体検出器(EGC25-195-R, Canberra Eurisys, Meriden, USA)により行った。河川水は環境省の報告ですでに検出されていないため省略した。

(3) 真野川の流況と水温

真野ダムは1991年に竣工された重力式コンクリートダムであり、管理のために相双建設事務所による常時流量測定が行われている。図-2は、事故のあった2011年の降雨量、ダム流入量および放流量の時系列グラフである。流入量は降雨量に対応し、放流は6月の出水では流量を制限していたが10月に放流していた。2012年も同様の傾向にあり、平水時は1 m^3/s 以下であるが、30 m^3/s 以上の出水が年2回生じた。

水温は水生昆虫の生活史に大きな影響を与える。ダムによって上下流の水温が異なることを予想し、独自にロガー付き水温センサー(ティドビットV2 UTBI-001, Onset)を設置した。水温センサーによる記録間隔は1時間とし、2013年4月1日から現在まで計測中である。同事務所提供の過去のはやま湖流入地点の最低水温は約2 $^{\circ}\text{C}$ 、最高水温は約23 $^{\circ}\text{C}$ であった。冬期の4 $^{\circ}\text{C}$ 以下の期間は1月から3ヶ月間続いていた。

図-3に、データロガーで連続的に記録した2013年の水温の変化を示す。2013年は4月設置時にすでに4 $^{\circ}\text{C}$ 以上を記録し、下旬に降雪による一時的な低下が見られたが、5月以降上昇し続けた。一方、ダムからの放流(下流)水温は5月中旬頃から14 $^{\circ}\text{C}$ あたりに留まっている。ダムの放流高さは湖水面から3 m下とされ、7月までは降雨が少なく、貯水容量が流入量と比較して大きいことから暫く一定値が維持されたと考えられる。

図-2 降雨量，ダム流入量及び放流量の経年変化（2011年）

図-3 ダム上下流観測地点における水温の経時変化（2013年）

表-1 トビケラ目の出現種(ヒゲナガカワトビケラ属以外)

family	genus	species	和名	上流	下流
Philopotamidae	<i>Dolophilodes</i>	<i>commata</i>	コンマタニガワトビケラ	2M	
	<i>Kisaura</i>	sp.	Kisaura属の未記載種	2M4F	15M15F
Hydropsychidae	<i>Hydropsyche</i>	<i>orientalis</i>			1M3F
	<i>Hydropsyche</i>	<i>setensis</i>			1M
Rhyacophilidae	<i>Rhyacophila</i>	<i>kisoensis</i>		1M	
		<i>kohnoae</i>		1M	
		<i>brevicephala</i>		1M	32M5F
		<i>kawamurae</i>		1M	3M2F
		<i>yamanakensis</i>		2M	3M4F
		<i>nipponica</i>			11M
		<i>nigrocephala</i>			14M
Glossosomatidae		<i>nipponica/nigrocephala</i>			(19F)
	<i>Glossosoma</i>	<i>altaicum</i>		3M3F	1M4F
Lepidostomatidae	<i>Lepidostoma</i>	<i>bipertitum</i>		1M1F	
Sericostomatidae	<i>Gumaga</i>	<i>orientalis</i>			2M1F

※Mは雄，Fは雌であり，その前の数値は捕獲数

(4) 他のトビケラ種の出現状況

環境省の調査結果によれば，トビケラ目はヒゲナガカワトビケラ属（ヒゲナガカワトビケラとチャバネヒゲナガカワトビケラ）のみが記載されているが，通常，様々なトビケラ目種が共存している．4月から5月上旬まで，多くの種の幼虫が成虫になる時期であることから，マレーゼトラップを河岸に設置して，出現種の同定を行った．その結果を表-1に示す．全部で6科，8属，15種が確認された．これらは全て小型のトビケラであり，幼虫の個体重量はヒゲナガカワトビケラ属の10分の1以下のものばかりである．

3. 粒状流下物とヒゲナガカワトビケラからの放射能汚染量

表-2に，採取したヒゲナガカワトビケラの幼齢，個体数，全乾燥重量及び1個体当たり重量と共に放射性セシウム（Cs-134，Cs-137）強度の測定結果を示す．原発事故以降2年が経過し，半減期30年のCs-137と比較して半減

期が2年のCs-134がほぼ理論値通りに減少している．地点間で比較すると，2012年11月20日と2013年4月23日ではダム上流で放射能強度が高く合計で3,000 Bq/kgに達した．ダム下流は上流の半分程度であった．一方，5月21日の結果はどちらも同規模の数値であった．

ヒゲナガカワトビケラ属の幼虫が蛹になり，その後羽化するためには水温が13℃以上必要と言われている⁷⁾．

図-3の水温の計測結果と同属の生活史を照らし合わせると2012年11月20日と2013年4月23日に採取したサンプルは同一の世代（越冬世代）と推定できる．5月の調査で得られた5齢幼虫も1個体当たりの重量がさらに増加していることからこれも同世代と考えられる．5月において地点間の差が小さくなった理由是不明であるが，水温の上昇に伴って代謝速度も上昇することから，採餌との関連がより強まっているのではないかと考えられる．なお，両地点において1個体当たり重量は常に下流において大きかったが，下流の水温が上流よりも低い反面，礫に繁茂する付着藻類は目視で多いことと，ダム直下であるため多量の流下するプランクトンを摂取している可能性が極めて高く，栄養条件が良いためであろう．

表-2 ヒゲナガカワトビケラからのセシウム放射能強度測定結果

日付	地点	齢期	個体数	乾燥重量 1 個体あた		放射性核種		Cs-137	
				(g)	り (g)	Cs-134 (Bq/kg)	±誤差	(Bq/kg)	±誤差
11月20日	はやま湖上流	5 齢中心	123	2.83	0.023	1.58E+00	6.17E-02	2.40E+00	6.86E-02
	はやま湖下流	5 齢中心	113	10.76	0.095	6.04E-01	2.07E-02	8.65E-01	2.31E-02
4月23日	はやま湖上流	5 齢	41	1.54	0.038	1.25E+00	9.75E-02	2.38E+00	1.32E-01
		5 齢以外	28	0.33	0.012				
	はやま湖下流	5 齢	22	2.50	0.114	4.63E-01	4.84E-02	8.04E-01	6.29E-02
		5 齢以外	3	0.04	0.015				
5月21日	はやま湖上流	5 齢	69	5.18	0.075	5.11E-01	3.52E-02	9.56E-01	4.68E-02
		5 齢以外	1	0.00	0.000				
	はやま湖下流	5 齢	11	1.13	0.103	3.96E-01	7.17E-02	9.60E-01	9.51E-02
		5 齢以外	0	0.00					

図-4 流下物粒径別放射性セシウム強度（はやま湖上流）

図-5 流下物粒径別放射性セシウム強度（はやま湖下流）

図-4と図-5に、はやま湖上流と下流における流下物の放射能強度測定結果をそれぞれ示す（一部は未計測）。ここで、2012年6月に採取した流下物の放射能測定を2013年12月に実施したためCs-134の値は低く見積られる。他、2013年に採取した流下物のCs-134の値もCs-137と比較して半分程度となった。採取地点間を比較すると、放射能は多くが上流側でより強く、合計28,000 Bg/kg程度に達した。粒径別に見ると、採取日によって小さいものほど高い数値になる場合（2013年4月23日）もあれば、変化がない場合（2013年5月21日）もあった。

プランクトンネットで採取した流下物はプラスチック容器に収集すると10分程度でほぼ全て沈降したことから、流下物の輸送ははやま湖内で分断されている。発生場所が異なる流下物の汚染に関して、現時点で地点間に関する統計的な有意差は得られていない。

ここまです総括すると、流下物（63 μmと125 μmを採餌の中心サイズと仮定）とヒゲナガカワトビケラ属両方を収集した2013年4月及び5月から放射能強度の比はおおよそ10 対1 の規模と見積られる。しかし、ヒゲナガカワトビケラ属の放射能強度は安定しない。

4. ヒゲナガカワトビケラの生物学的半減期の評価実験

(1) 体内蓄積機構について

水生生物体内の汚染物質の蓄積特性を理解する上で、環境中の対象物質の濃度(C_F)と生体中の濃度(C_B)の比であるbioaccumulation factor ($BAF=C_B / C_F$)値から評価される場合があり、多くの研究から微量物質について 10^2 から 10^8 のオーダーとされている⁸⁾。

今回の場合は、水からの放射性セシウムの摂取は無く、流下物を餌資源として採餌による摂取と考えるのが妥当である。流下物の放射能強度は数万ベクレルの規模であり、ヒゲナガカワトビケラ属はその10分の1程度であることから、既往研究の重金属イオンの体内濃縮という観点とは異なることに注意しなければならない。次に、放射性セシウムの問題は土壌への吸着であり、河川の流下物中に多く含まれると予想される。ヒゲナガカワトビケラ属に同化されるものは主に植物プランクトン（デトリタスを含む）であるため、放射性セシウムを含んだ細粒土壌が同化されることは考えにくい。そこで、現地調査とは別に、ヒゲナガカワトビケラ属を汚染の無い環境に移して放射性物質の消長過程を調べた。

(2) 放射性物質消長実験

下流調査地点において、2013年8月5日に5齢幼虫（非越冬世代）と流下物を集め、それぞれ放射能が依然として顕著に現れていることを確認後、8月9日に改めて約200個体を捕獲して、水槽の中に汚染の無い礫を敷いて固着させ、河川水温をクーラーで保持したまま実験室に持ち帰った。現地の水温は20℃付近であった。持ち帰ったヒゲナガカワトビケラ属群を写真-1に示す直径30 cmの円形実験水槽に移して数日間飼育をした。水槽を磁気スターラー上に設置して一定の水流を維持し、金魚の餌を粉にして与えた。既往の研究より水温条件によって代謝速度は大きく異なることから水槽内の温度を12℃と22℃の2種類を用意した⁹⁾。飼育開始から3日後と6日後に、それぞれの水槽から分取して放射能強度を測定した。表-3に一連の測定結果を示す。これより、どちらの温度条件下でも飼育後3日間で放射性セシウム強度は10分の1程度まで低下し、6日間では検出限界以下となった。但し長期間の飼育はヒゲナガカワトビケラ属にとって大きなストレスが生じ、半数は死亡した。

写真-1 消長実験に用いた水槽

表-3 8月5日のはやま湖下流地点の放射性セシウム強度測定結果および放射性物質消長実験結果

採集日	場所	種類	サンプル重量	Cs-134	Cs-137	1個体の重量
			g	Bq/kg	Bq/kg	mg
2013.8.5	ダム下流	ヒゲナガカワトビケラ	2.27	1,370	2,690	28
	ダム下流	FPOM> 125μm	約1	10,700	22,200	
	ダム下流	FPOM> 64μm	約1	11,500	23,500	
2013.8.12 8.15 (3日後)	ダム下流	ヒゲナガカワトビケラ (12℃)	1.03	検出せず	226	40
8.15 (3日後)	ダム下流	ヒゲナガカワトビケラ (22℃)	1.11	検出せず	306	46
8.18 (6日後)	ダム下流	ヒゲナガカワトビケラ (12℃)	0.87	検出せず	検出せず	51
8.18 (6日後)	ダム下流	ヒゲナガカワトビケラ (22℃)	1.14	検出せず	検出せず	63

しかしながら、本実験によって短期間で大幅に減少することが確認できたため、分取間隔を短くして再実験を試みた。8月26日に同じくはやま湖下流調査地点において、再び約200個体のヒゲナガカワトビケラを採取した。まず、採取直後の状態としてそのままエタノールで固定し、それ以外を大きな水槽に移し、3時間後、6時間後、12時間後、24時間後、および48時間後に30個体程度ずつ分取した。河川での約200個体の採取には2時間近くを要したため、1時間ごと2つの水槽に分けた。クーラーで水温を保持したまま福島から埼玉まで車で輸送し、帰路に着く途中の3時間と6時間後に駐車場で車を停車して分取した幼虫を固定した。12時間経過後以降は実験室内の水槽で飼育した。一連の時系列結果を図-6に示す。

これよりヒゲナガカワトビケラ属群からの放射性セシウム強度は3時間から6時間の間に大きく減少した。12時間経過後以降は数値がほぼ一定となったが、ゼロにはなっていない。すでに強度が低下しているCs-134は24時間経過後検出されなかった、但し、これは生存個体数が減少したために測定重量が減少したため定量限界以下となったが、実際に消滅したかどうかは不明である。以上の2度の実験によって、放射性セシウムは短時間のうちに排泄によって体外に放出されることが確認できた。

(3) 考察

ヒゲナガカワトビケラ属の排泄実験は過去にも行われている。片上ら(2004)によれば、実験個体の採集時の水温は6.1℃であり、絶食飼育した15個体のヒゲナガカワトビケラ5齢幼虫から、0～24時間までに4.66 mg、24～48時間の間に0.95mgの排泄物が得られ、それ以降、排泄物は観察されなかった。さらなる過去の研究例でも、ヒゲナガカワトビケラ幼虫が空胃になる時間は約5～7時間であり、低水温(5～9℃)では29～45時間と報告されている⁹⁾。続いて、前出のmicrocystin排出実験では、実験開始0日目の5齢幼虫の含有量は4.5 μg/g dwであったが、1日後には

図-6 消化管内容物排泄再実験結果
(Cs-134の24時間後と48時間後は検出されず)

半減し、3日で90.2%のmicrocystinが排出され、実験開始後5日目まで検出されている。Tochimoto et al.(2004)による30日間の重金属類を対象にした実験では、ニッケルの含有量が3日以内に急激に減少することを示し、その後は緩やかに減少していった。これより消長には直接的な排泄によるものと、それ以外に徐々に減少する2成分があることが示された。本実験結果も同様な傾向にあり、急激に減少した成分に対する生物学的半減期は半日である。これより、ヒゲナガカワトビケラ属から放射性セシウムが常に検出される理由としては、常時採餌活動をしており、消化管には同化される有機物と共に汚染された細粒土が混ざっていることが考えられ、それが常時通過しているに過ぎないとの見方ができる。なお、水温による代謝速度の影響は今回の実験では結果が得られず、河川水温が低温時に再検討する必要がある。

6. まとめと今後の課題

生物濃縮で問題になるのは、化学的に安定で環境中や生物体内において分解されにくく、水よりも油脂に溶けやすい性質を持つ物質群とされている⁹⁾。そのような場合は一度取り込まれると分解・排泄されにくく、長期にわたって生物に残留・蓄積する。今回の二度の排泄実験では、共に数日間でセシウム放射能は大幅に減少しており、採餌による消化管経由での濃縮であるものと予想される。しかし、二度目の実験では完全にセシウムが取り除かれておらず、そのことをより明確にするためには、今後消化管を取り除いたサンプルのセシウム放射能を測定することが必要である。また、細粒状流下物の特性をより詳細に明らかにする必要がある。これらがどの程度の脂溶性を持つものかなどの検討が必要である。

原発事故から二年半以上が経過してもなお流下物からのセシウム放射能は高いことから、今後も定期的なモニタリングは不可欠である。多様な河川底生生物群におい

て、ヒゲナガカワトビケラを用いたバイオモニタリングは汚染の現状を把握する上で有効な手段であり、同種は日本全国の河川に生息していることから他の河川における汚染度を知ることに用いられる。

謝辞：ダム流入量および放流量のデータは福島県相双建設事務所より御提供頂きました。ゲルマニウム半導体検出器による放射性物質の計測の一部は東京農工大学・五味高志研究室にご協力頂きました。トビケラ成虫種の同定は陸水生物研究会の野崎隆夫博士ご確認頂きました。

本研究は、水工学委員会環境水理部会・平成24年度震災対応WG「流域圏における放射性物質・化学物質の動態が生物環境に及ぼす影響(代表：横山勝英)」の一部として、また、文部科学省科学研究費(基盤(B)) No. 24402004の一部として行われた。

参考文献

- 1) 環境省、報道発表資料、平成24年度水生生物放射性物質モニタリング調査結果(平成25年7月12日)
<http://www.env.go.jp/press/press.php?serial=16896>
- 2) Tanida K., *Stenopsyche* (Trichoptera: Stenopsychidae): ecology and biology of a prominent Asian caddis genus. Proc. 10th Int. Sym. Trichoptera- Nov Supple. Ent., Keltern, 15, 595-606, 2002.
- 3) Tsuda S., et al.: Productivity of Yoshino River, Nara. JIBP Synthesis 10, pp. 339-377 (Productivity of communities in Japanese inland waters), 1977.
- 4) Tochimoto, H. et al: Accumulation of trace metals in aquatic insect *Stenopsyche marmorata* Navast transferred in streams, Ecotoxicology and Environmental Safety, 56, pp. 256-264, 2003.
- 5) 片上幸美他: ヒゲナガカワトビケラにおける藍藻毒素 microcystinの蓄積とその毒素が天竜川生態系に及ぼす影響, 陸水学会誌, 65, 9-19, 2004.
- 6) National Council on Radiation Protection and Measurements: Cesium-137 in the Environment: Radioecology and Approaches to Assessment and Management, NCRP Report, No. 154, 2007.
- 7) 藤野 毅他: ダム直下におけるヒゲナガカワトビケラの生産量と試験湛水の影響, 土木学会論文集B1(水工学), 68(4), pp. I_775-I_780, 2012.
- 8) He Q., and Walling D.E.: Interpreting Particle Size Effects in the Adsorption of ^{137}Cs and Unsupported ^{210}Pb by Mineral Soils and Sediments, *J. Environ. Radioactivity*, 30(2), pp. 117-137, 1996.
- 9) 伊藤春子: ヒゲナガカワトビケラ幼虫の消化管内容量の日周変化と消化管内容量減少速度の考察, 奈良陸水生物學報 3, 20-21, 1970.
- 10) 渡邊 泉, 久野勝治編 環境毒性学: 野生動物の生物濃縮, バイオモニタリング, 朝倉書店, 53-56, 2011.

(2013. 9. 30受付)