

都市域の河川における生物群集評価の試み —社会的・法的背景の考察を踏まえて—

牛尾 沙映

指導教員：佐土原聡 教授, 吉田聡 准教授

1. 研究の背景と目的

1. 1 研究の背景

近年、都市において生物群集保全に対する機運が高まっており、各地で市民協働の生き物調査が行われるなど、地域の生物を評価することが注目されている。また、社会的な変化に応じ、法制面も自然環境および生物に配慮した形へと変化しつつある。

しかし、市民協働の生き物調査は指標種に着目した評価が主流であり、生物群集全体に着目した市民向けの評価方法は開発途上である。さらに法制面においても、環境の改変に関わる法規であるにも関わらず、未だ環境面への配慮が不足している法規も多いという課題がある。

1. 2 研究の目的

本研究では、1) 生物多様性の評価に関する社会的・法的背景から意義や課題を整理し、課題解決に向けた方策の検討や今後の生物多様性の評価について考察を行った上で、2) 市民調査で使うことができる、都市域における河川の源流～上流部の簡易な生物群集評価手法を開発することを目的とした。

1. 3 本研究の着眼点

本研究では「生物多様性」が存在することが望ましい状態であるという前提に立ち、生物の豊かさを把握するために、個々の種に着目するだけではなく、地域の生物のつながりが健全に保たれていることが重要であるという視点で研究を行った。

1. 4 既往研究

(1) 法制面における既往研究

本研究では、河川法などの諸法律が自然に配慮して改正されてきた法制面の動向に着目し、開発法および自然保護法が環境に配慮した形に改正されると

いう現象を「諸法のグリーン化」と名づけた。

諸法のグリーン化に資する考え方としては「開発法のグリーン化¹⁾」、「環境法家族論²⁾」および「諸法の環境法化³⁾」が挙げられるが、いずれも開発法または土地の利用に関わる法律に限定しているという課題があるため、開発法以外の自然に配慮した法改正について私見を提示した。

(2) 食物連鎖に関する既往研究

既往研究では、海洋、湖沼、溪流といった環境で食物連鎖図が作成されてきた。本研究では対象である都市域の河川に応じた食物連鎖図を作成していく。

(3) 河川の水質評価に関する研究

河川の水質を測る手法である、BOD による汚濁度判定や生物学的水質判定⁴⁾はいずれも一長一短があり、近年の自治体では複合的に使用されている。

(4) 生物多様性および生物群集の多様性の評価に関する既往研究

水域の生物の豊かさを評価する手法に関する既往研究として、指標種に着目した手法や物理化学的側面に着目した手法、生態系間の炭素や窒素などの元素に着目した手法などが研究されているが、いずれも「生物群集全体を評価することができ、かつ市民調査で用いる」という面では課題がある。一方、陸域では生態系・生物群集を市民調査レベルで評価する手法として「食物連鎖箱法⁵⁾」および「生態系健全度簡易評価法⁶⁾」が開発されてきたが、河川の生物群集を対象にした手法は開発途上にある。

よって本研究では、これまで開発に至っていない、市民調査レベルで使うことができる都市域の河川(水域)の生物群集評価法の開発を試みた。

Diversity assessment of biological community of urban river

—Based on consideration of society and law—

Sae USHIO (Supervisor: Satoru SADOHARA, Satoshi YOSHIDA)

Keywords: “going green” in legal system, biodiversity, biological community assessment, civic cooperation

2. 生物群集保全および生物群集評価の社会的・法的な位置づけの変遷

2. 1 都市域の生物群集保全に関する位置づけの変遷

高度経済成長期、都市域では多くの自然が失われており、都市住民の中には生物群集保全の認識が生まれつつあった。

例えば横浜市では政策立案の端緒として、1986年から5年計画で「横浜市陸域の生物相・生態系調査」を実施したほか、市民協働に関する検討会が行われている。市民協働の仕組みづくりのポイントのひとつとしては、「生物多様性や健全な生態系を簡易的な手法により評価し、『水と緑の基本計画』における流域評価指標と連携させていること」が挙げられ、市民協働による簡易な評価手法として生態系健全度簡易評価法が提案された。ただし、当時は市民協働を前提とした水域の生物群集評価手法が開発されるには至らなかった。

2. 2 都市域の河川の社会的・法的な位置づけの変遷

河川法は制定以来長らく治水・利水を目的に運用されてきたが、1997年の改正河川法では、河川管理の目的に環境に対する配慮が規定され、人間の福利だけではなく水生動植物の生息・生育も目的として加えられた。水質汚濁法については、現在までその法目的を「人間の健康」のためとしているが、河川生物による水質判定は、直接生物多様性の確保には結びつかないものの、汚濁の度合いによって生息する生物が変わることを示し、水質保全への機運を高めたといえる。

近年の河川法改正および多自然型河川普及へのきっかけとなったのは、1973年の長良川河口堰建設差止め訴訟をはじめとする長良川河口堰工事に対する住民および関係者の反対運動であった⁷⁾。

同訴訟は、市民が治水・利水のほか自然生態系への関心を強く持っていることを明らかにしたほか、釣り人やアウトドア愛好者からも河川環境・アメニティといった親水の考えが発現したといえる。

長良川河口堰問題と同時期の1989年には、スイス、ドイツで行なわれ始めていた河川環境を保護・保全・改良する建設工法が我が国に紹介された⁸⁾。そ

の後、建設省（当時）河川局は、1990年11月に「多自然型川づくり実施要領」を通達し、さらに2006年10月に要領を再検討した「多自然川作り基本指針」を示した。新たな指針となった「多自然川づくり」では、多自然工法の結果、従来河川に生息していた生物の生息に適した空間となっているよう配慮することが求められており、多自然川づくり実施後に豊かな生物群集が築かれているのか把握するために、生物群集の評価が必要となると考えられる。

2. 3 生物群集評価に関する社会的・法的な位置づけの変遷

生物群集保全を実施するために必要とされる方策は、第一に生物群集の現状を把握することであり、第二にその結果を踏まえて生物群集の評価を行うことが求められる。そこで、調査結果を踏まえた評価の社会的な試み・実践が行われている。

例えば、指標種に着目した評価としては「植生自然度による評価⁹⁾」および「土壌動物による自然の豊かさ評価¹⁰⁾」が、生物群集と食物連鎖に着目した評価としては「食物連鎖箱法」や「生態系健全度簡易評価法」が挙げられる。

法的な流れの中で大きな変化は、1997年の環境影響評価法制定である。同法の制定後、環境庁（当時）は検討委員会を設けて生態系についての評価法の検討を行った¹¹⁾。この検討では生態系評価の困難さが浮き彫りとなったが、様々な視点から評価を試み、生態系および生物群集の全体像を明らかにすることが必要だと考えられる。

2. 4 諸法のグリーン化に向けた諸法律改正の動向

先の河川法の例に見るように、近年開発に係わる法を環境に配慮した形へ改正する動きがみられる。そこで、筆者はこのような法改正を「諸法のグリーン化」と名付けた。

諸法のグリーン化の特色は、既往の論法が対象としていた開発法だけではなく、自然保護法に関してもグリーン化の対象に含めたことにある。

自然保護法については形式的には生物多様性基本法の傘下におかれているにもかかわらず、実質的に生物多様性基本法の趣旨に沿って運用されていない法も見受けられることから、これらもグリーン化の対象とすることが望ましいと考える。筆者は法を「人

間社会と自然との関係を規律する法律」と「人間社会の内部の関係を規律する法律」とで区別し、「前者に関しては、第一次的には、人間も生態学的共同体の一員にすぎないという認識をもって立法すべきである」という考え¹²⁾に基づくのが望ましいと考える。そして、「人間社会と自然との関係を規律する法律」においては「生物多様性条約—生物多様性基本法—生物多様性国家戦略—各種の自然保護・開発法」というアンブレラ型の法システムの下で生物多様性への配慮が進展すると考察した。

このような法体系の確立は自然を権利の客体ではなく人間と同じく主体とみなし、人間の権利のみを主張することのないように配慮される。結果的に土地所有者や周辺住民に不利益が生ずることが考えられるため、その土地の生態系を正しく評価し、生態系サービス¹³⁾に換算する仕組み作りが求められていると考えられることから、本研究で開発する評価法がその一助となることを期待したい。

3. 魚類・底生生物に着目した都市域の河川の生物群集の簡易な多様性評価

3.1 手法開発の意義

生物多様性保全に関する社会的・法的変遷から、生物群集評価に対するニーズが明らかとなった。

そこで、第3章ではNPO団体などの市民が自治体とともに、生物に関する評価を行なうことができるよう、市民調査レベルで使用することができ、かつ高度な理化学的知識によらない手法の開発を試みた。

本手法は「食物連鎖箱法」の考えを本研究に取り込み、同一の食物要求を持つ種をギルド¹⁴⁾にまとめ、ギルド間の食物連鎖関係の複雑さを生物群集の複雑さと捉えることで、生物群集の豊かさを評価することを試みた。

3.2 研究の方法および研究対象地

本研究はケーススタディとして横浜市を対象としており、生物相のデータは横浜市の生物相調査報告書『横浜の川と海の生物』の5報(1989年)～10報(2003年)および13報(2012年)を用いている。

本研究の評価手法は都市域の河川の源流域から上流域を対象とした。そこで、横浜市の主要河川のうち、鶴見川、帷子川、大岡川、境川の源流～上流域の12地点でケーススタディを行っている(図1)。



図1 調査地点図

3.3 対象生物

食物連鎖とは本来、陸域から水域まで多種多様な生物が織りなす関係である。しかし、その全体像の評価は困難であることから、本研究では水域のうち水中の魚類と底生生物に絞って評価法を開発した。

また、本研究は都市域の河川の源流から上流域を対象としているため、横浜市内に出現する魚類・底生生物のうち純淡水に生息する種とした。

3.4 ギルドの分類

本研究では食物連鎖に着目しているため、まず魚類と底生生物を食性ごとにギルドに分類した。

魚類の食性は研究者や研究対象地により分類が異なるため、モデルとした横浜市内河川の生物の食性に合わせ、表1「本研究」欄のように再分類を行った¹⁵⁾。また、底生生物についても摂食する餌ごとに分け、表2の通り再分類を行った¹⁶⁾。

3.5 ギルド内の生物の分類

次に、研究対象地である横浜市内の河川の生物を表1・表2のギルドの中に分類し、さらに魚類、底生生物ともに目分類で分けた(表3)。

ギルド内の目ごとの分類を、本研究では「小ギルド」と呼ぶこととする。

3.6 ギルド間の食物連鎖図作成

表1・表2のギルドがそれぞれどのような食物連鎖関係になっているかを模式図化し、階層分けした

のが図2である。図は魚類の捕食関係が多いため、結果的に魚類の階層は矢印が多くなるという構造的な仕組みとなっている。

表1 魚類の食性分類

捕食対象	井上 (2013)	Brönmark・Hansson (2007)	本研究
魚類	魚食者	魚食性	A魚食魚
底生生物など動物性	無脊椎動物食者	動物食性 (ベントス食性)	Bベントス食・雑食魚
動物性と植物性の双方	雑食者		
デトリタス	デトリタス食者	デトリタス食性	Cデトリタス食性
植物性	藻類食者	植食性 (藻食性)	D藻類・水草食性
プランクトン	プランクトン食者	プランクトン食性	

※表1と表2のA-a, C-c, D-dは対応している。

表2 底生生物の食性分類

捕食対象	摂食方法	加賀谷 (2013)	横浜市報告書	本研究
生きた動物	飲み込む 吸汁する	プレデター (捕食者)	捕食者	a肉食性 底生生物
	寄生する	パラサイト (寄生者)		
デトリタス	水中や河床の微生物を収集する	コレクター (収集食者)	拾集採集食者・ろ過採集食者	cデトリタス食性底生生物
死んだ植物	噛み砕いて食す	シュレッダー (破碎食者)	破碎食者	b落葉食性 底生生物
生きた植物	噛み砕いて食す			
	細胞液を吸う	ピアサー (吸汁食者)	刈取食者	d藻類・水草食性底生生物
	付着藻類などを摘み取る	グレイザー (剥取食者)		

表3 魚類・底生生物のギルドごとの目分類

A: 魚食魚	B: ベントス食・雑食魚	C: デトリタス食性魚	D: 藻類・水草食性魚
①ナマズ目 ギバチ ナマズ	①コイ目 アブラハヤ ウグイ オイカワ カマツカ コイ属 タモロコ フナ属 モツゴ ドジョウ シマドジョウ ホトケドジョウなど	①ヤツメウナギ目 スナヤツメ	①サケ目 アユ
	②ダツ目 メダカ		
	③スズキ目 ヨシノボリ属 スミウギ科など		

a: 肉食性底生生物	b: 落葉食性底生生物	c: デトリタス食性底生生物	d: 藻類・水草食性底生生物
①エビ目 (サワガニ科・テナガエビ科・アメリカザリガニ科等)	①カワゲラ目 (オナシカワゲラ科等)	①エビ目 (スカエビ科等)	①カゲロウ目 (コカゲロウ科等)
②トンボ目	②トビケラ目 (カクツトビケラ科等)	②カゲロウ目 (マダラカゲロウ科等)	②トビケラ目 (コエグルトビケラ科等)
③コウチュウ目 (ゲンゴロウ科・ガムシ科・ホタル科)	③ワラジムシ目 (ミズムシ科等)	③トビケラ目 (シマトビケラ科等)	③原始紐舌目 (タニシ科等)
④吻蛭目 (ハバヒロビル・ヌマビル等)		④ハエ目 (ユスリカ科等)	④盤足目 (カワナナ科等)
⑤無吻蛭目 (イシビル等)		⑤イトミミズ目	⑤基眼目 (カワゴザラガイ科・モノアラガイ科等)
⑥カメムシ目		⑥ヨコエビ目	⑥コウチュウ目 (ヒラタドROMシ科・ヒメドROMシ科等)
⑦カワゲラ目 (カワゲラ科等)		⑦マルスダレガイ目 (マメシジミ科等)	
⑧ヘビトンボ目			
⑨アミメカゲロウ目			
⑩三岐腸目 (ウズムシ等)			
⑪トビケラ目 (ナガレトビケラ科等)			

3.7 食物連鎖数算出方法

評価方法については、食物連鎖指標¹⁷⁾の考え方を参考にしている。

本研究では食物連鎖指標の「矢印の数を加算する」という考えを基に、研究対象とした魚類と底生生物のギルド間の捕食関係を矢印で表し、本数を加算する手法をケーススタディとして試みた。本数が多いほど、食物連鎖が複雑、つまり豊かな生物群集であるといえる。これらを地点ごと、調査年度ごとに比較し、相対評価を行う。

上記の手法にて、ケーススタディ地点12か所の5~10報のいずれも夏の観測結果から食物連鎖数を算出した(表4)。

3.8 ケーススタディでの評価結果と考察

(1) 河川ごとの食物連鎖数の結果と考察

① 鶴見川 (T6, T9)

T6はアメニティ保全がなされる一方、川岸・水際の草本類が少なく、陸上からの食物供給が不足しているのではないかと考えられる。また、T9については、河川改修による環境の変化が生物群集および食物連鎖数に影響を及ぼしたと推察される。

② 帷子川 (K1, K2)

K1とK2を比較するとK1地点の方が食物連鎖数が多い傾向にある。これについて、K1では瀬・淵・洲が確認され、一方K2は瀬のみで洲は確認されてい

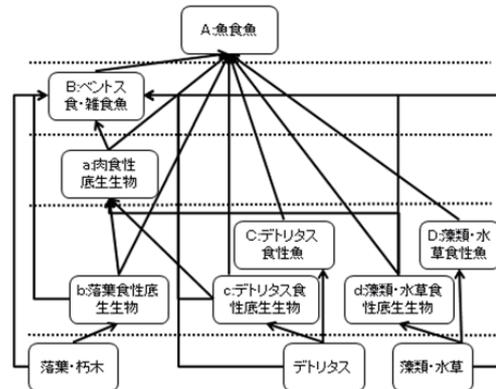


図2 食物連鎖模式図

表4 調査地点の食物連鎖数

	T6	T9	K1	K2	O1	O1-1	O2	O5	S5	S7	S11	S11-1
5報(1989年)	13	11	16	19	72		18	6	45	35	41	48
6報(1992年)	20	29	30	16	80	36	19	21	35	31	56	43
7報(1995年)	70	25	18	31	33	79	29	30	16	51	71	28
8報(1998年)	33	40	35	13	70	43	54	19	15	51	89	54
9報(2001年)	60	40	40	36	112	55	29	35	24	66	57	70
10報(2003年)	44	24	60	24	110	73	80	40	15	70	85	85

ないことから河川形態が食物連鎖の豊かさに影響を与えていると示唆された。

③大岡川 (01、01-1、02、05)

01 と 01-1 は落葉など森林からの食料資源や生息場所の供給が豊富であり、河川も自然状態に近いことから食物連鎖の数が多いと考えられる。02 と 05 については周囲には小規模の竹林や木立も隣接しており、人の生活圏にありながら食料供給が比較的豊かといえる。

④境川 (S5、S7、S11、S11-1)

S5 については両岸コンクリート作りであり、周辺に自然環境が少ないため生物の生息環境としては不十分と考えられる。一方食物連鎖の関係が多い結果となった他の3地点では小川アメニティなどの取り組みがなされており、護岸形態や底質において自然に配慮された形となっている。前述のことから、生物群集の多様性には河川の状態に加え、周辺環境の良好さも大きく影響していると考えられる。

(2) 周辺環境と食物連鎖数の比較と考察

筆者が現地調査をして得た周辺環境の情報(表5)と、最新の13報の結果から食物連鎖の豊かさと周辺環境の特色に関する比較考察を行なう。

表の通り、地点別にみると T9、01、S7 で 100 以上の高い数値となった。これらの地点は河川のアメニティ整備がなされている、または周囲に森や林があるなど周辺環境が良好であるという傾向が見られた。それ以外では河川周囲に水生植物などが少ない地点やゴミが落ちているなど人間活動の影響が見られる地点、陸上からの落葉の供給などが少ない地点で比較の数値が低くなっている。

(3) 護岸と食物連鎖数の比較と考察

算出した食物連鎖の多さと、河川の護岸形態や底質についての関係を S11-1 地点の経年変化で比較し

た。その結果、水質が安定して良好であるにも関わらず、底質や護岸の変化により食物連鎖数が変わることが明らかとなった(表6)。

S11-1 地点では護岸形態が岩盤に変化することによって起こる事象(藻類は比較的安定的に繁茂する)が本評価の結果と一致しており、本評価手法はある程度の妥当性を有すると考察される。

(4) 各地点の BOD と食物連鎖数の比較と考察

さらに、各地点の5報~10報の食物連鎖数と同報告書のBODの値を比較したところ、表7のとおり3地点(02、S5、S7)で負の相関が認められたが、残り9地点では正の相関または相関なしという結果となった。

この結果からBODの算出のみでは生物群集の豊かさを量ることが困難であることが示唆される。しかし良好な水質の回復・維持という視点からは水質評価は重要であり、従来のBODや生物指標による水質評価に加えて生物群集の豊かさを評価していく余地があると考えられる。

3. 9 本評価手法の活用に関するヒアリング結果と今後の課題

本研究を市民調査に役立てるため、2016年3月20日、栃木県佐野市秋山川での底生生物の生物相調査の際に、調査者1名に本研究の評価手法を使用していただき、結果についてヒアリングを行った。

その結果、おおむね使いやすいと回答を得られたが、今後は小ギルドへ分類を改良することや、使用者のレベルに応じたシート作成が必要であることが明らかとなった。同時にヒアリングする対象者を広げ、サンプル数を増やすことも必要である。また、今回は調査地1ヶ所のみでの評価であり、本来の相対評価とは異なるため、今後地点ごと、調査年度ごとの相対評価を行うことも課題である。

表5 河川環境調査概要

水系	鶴見川			帷子川		大岡川			境川			
	T6	T9	K1	K2	O1	O1-1	O2	O5	S5	S7	S11	S11-1
調査日	2012/12/5	2013/11/24	2015/3/8	2015/3/8	2015/3/6	2015/3/6	2015/3/6	2015/3/6	2015/3/4	2015/3/6	2015/3/4	2015/3/4
人の立ち入り	少ない	少ない	不可	不可	少ない	少ない	不可	不可	不可	不可	少ない	少ない
周辺環境(住宅)	なし	少ない	少ないがあり	墓地関連の施設が隣接	なし	なし	あり	あり(大きな道路もあり)	あり	あり(隣接・密集していない)	裏手に数軒あり	なし
周辺環境(自然)	水田(乾田)	新治市民の森	マテバシイ、トウネズミモチの巨木	畑	ヒノキ植林・雑木林・リョウメンシダ・イノテ	スギ植林・雑木林・リョウメンシダ・イノテ	小規模な竹林、木立あり	小さな竹林と樹木	少ない	近くに竹林と雑木林あり	木立(12mくらいの杉植林)、ジャコケ、マツブサ	瀬上市民の森
その他	山田谷戸の一部であり、寺家ふるさと村として保全	梅田川小川アメニティとして整備されている			近郊緑地特別保全地区	近郊緑地特別保全地区		ゴミが落ちている		ヤブツツ・イノモトソウが着生	ゴミが落ちている	
食物連鎖数(13報)	60	104	81	48	109	84	81	70	42	117	71	81

表6 S11-1 地点の環境要素

	BOD	食物連鎖	護岸形態	底質
7報(1995年)	0.4	28	土	砂・レキ・岩盤
8報(1998年)	0.8	54	土・コンクリ	砂・レキ・岩盤
9報(2001年)	0.3	63	石積・土	砂・岩盤
10報(2003年)	0.3	85	石積・岩盤	レキ・岩盤

表7 各地点の食物連鎖数とBODの相関係数

地点No	相関係数
T6	0.40
T9	0.51
K1	-0.27
K2	0.20
O1	0.74
O1-1	-0.45
O2	-0.96
O5	0.24
S5	-0.54
S7	-0.52
S11	-0.21
S11-1	-0.33

4. 総括

本研究を通して、生態系および生物群集の評価法は様々な視点から研究されてきたが、市民調査向けとしての生物群集評価法の確立には至っていないということが明らかとなった。また、かつては人間の健康を中心に考えられてきた環境が、人間の健康に加えて生物群集保全のためという流れにもシフトしていることから、社会的・法的にも生物多様性保全の位置づけが変遷しており、生物多様性および生物群集の評価法が求められているといえる。

本研究の活用の想定としては、河川改修を行った現場で継続的な評価を行い、河川施策の策定や見直しを行うほか、市民が理想の河川を話し合う際の共通のものさしとして利用することが考えられる。一方で、今後は水鳥や陸域の生物も含めた評価法の開発等が課題である。また、使用者へのヒアリングを重ね、改良を続けていくことも必要である。

本研究を通して、生物多様性は様々な面から評価することが重要であると示唆された。よって本手法は数多くある生物に関する評価手法のひとつの試みと考える。

参考文献

1. 北村喜宣 (2009) 現代環境法の諸相. 放送大学教育振興会, 東京, 223pp.
2. 交告尚史 (2009) 国内環境法研究者の視点から. 『生

物多様性の保護 (環境法政策学会編), pp. 42~55, 商事法務, 東京.

3. 及川敬貴 (2010) 生物多様性というロジック. 勁草書房, 東京, 186pp.
4. 森下郁子 (1977) 川の健康診断—清冽な流れを求めて—. 日本放送出版協会, 東京, 210pp.
5. 川瀬博 (2000) 食物連鎖鎖による地域環境の評価に関する研究. 環境情報科学, No. 29(1), 83~91.
6. 西高幸作・市川治道 (2007) 都市部における生態系健全度簡易評価法—市民協働生物調査の仕組みづくりにおける検討から—. 春夏秋冬, No. 36, 1~14.
7. 伊藤達也 (2003) 長良川河口堰問題とは何か「水資源政策の失敗」, pp1~13, 成文堂, 東京.
8. 財団法人河川環境管理財団・河川環境総合研究所 (2009) 河川環境管理計画に関する研究ノート [II]. 河川環境総合研究所資料, No. 28, pp. 1~216.
9. Miyawaki A und Fujiwara K (1975) Ein Versuch zur Kartierung des Natuerlichkeitsgrades der Vegetation und Anwendungsmoeglichkeit dieser Karte fuer den Umwelt-und Naturschutz am Beispiel der Stadt Fujisawa. Phytocoenologia, No. 2(3/4), pp. 430~437.
10. 青木淳一 (1985) 土壤動物. 『指標生物—自然をみるものさし—』 (日本自然保護協会編), pp. 252~257, 思索社, 東京.
11. 生物の多様性分野の環境影響評価技術検討会 (2000) 生物多様性分野の環境影響評価技術 (II). 環境庁, 東京, 289pp.
12. 参考文献2に同じ
13. Millennium Ecosystem Assessment (2007) 生態系サービスと人類の将来. オーム社, 東京, 241pp.
14. Christer Brönmark・Lars-Anders Hansson (2007) 湖と池の生態学. 共立出版, 東京, 339pp.
15. 井上幹生 (2013) 魚類. 『河川生態学』 (川那部浩哉・水野信彦監修, 中村太士編), pp. 123~144, 講談社, 東京.
16. 加賀谷隆 (2013) 底生無脊椎動物. 『河川生態学』 (川那部浩哉・水野信彦監修, 中村太士編), pp. 88~116, 講談社, 東京.
17. 芦田広・川崎広吉・丹須紀六迷 (1975) 生態系の構造, 安定性, 効率. 生物物理, 15(1), 1~12.