

天竜川下流（静岡県）の透視度と栄養塩負荷の変動

井口明¹⁾・谷高弘記¹⁾・服部典子²⁾・村上哲生²⁾

Fluctuations in transparency and nutrient loadings of the Lower Tenryu River, Shizuoka Prefecture, central Japan

Akira IGUCHI¹⁾, Hiroki YATAKA¹⁾, Noriko HATTORI²⁾ and Tetuo MURAKAMI²⁾

Abstract

Annual fluctuations in the transparency and nutrient loadings of the Lower Tenryu River which have 5 dams in the upper main stream are described based on the investigations since 2001 by the Tenryu-gawa Fishermen's Union. Daily observation of the transparency showed a constant turbid condition; over 85 % of the transparency values were under 80 cm during the 7 years study period. Nitrogen (N) and phosphorous (P) loadings were estimated to be 1,000 ~ 1,800 g day⁻¹ and 30 ~ 50 g day⁻¹ respectively, and N/P ratio was around 35. The high N/P ratio in comparison with past observations before Sakuma Dam construction may account for selective elimination of phosphorous by dam impoundment.

Key words: dammed river, long-term monitoring, nutrient loadings, Tenryu River, turbid water

摘 要

天竜川では、本川に設置された5つのダムにより、濁りの長期化や栄養塩負荷の変化が懸念されている。本報告は、天竜川漁業協同組合が、2001年から実施している透視度及び窒素・リン濃度の観測結果についてまとめたものである。7年間にわたる透視度の毎日観測で、80 cm以上の値が観測されたのは、全測定日中、僅か15%に過ぎず、ダムからの濁りの流出が常習化していることが明らかにされた。下流への窒素(N)、リン(P)負荷は、それぞれ1,000 ~ 1,800 g day⁻¹、30 ~ 50 g day⁻¹と試算された。N/P比は、およそ35であり、流域で最大規模の佐久間ダム運用以前の観測資料に比べ高い値であった。ダム貯水によってリンが選択的に除去された可能性がある。

キーワード：長期水質観測、ダム貯水、栄養塩負荷、濁り、天竜川

(2008年9月20日受付；2008年11月20日受理)

はじめに

大規模貯水池の水温成層形成と底層水放流に伴う冷濁水の流出は、ダム下流域のアユ等を対象とする内水面漁業や、水稲栽培に負の影響を及ぼす。我国では1950年代以降、冷濁水障害被害件数が増加した。その背景には1952年の電源開発促進法や1960年の特定多目的ダム法の制定により大規模ダムの建設件数が増えたことがあることは言うまでもない(森田, 1968)。

冷水問題については、既に1950年代に、河川水温調査会

が設立され(三谷, 1957)、同会の発行する「水温の研究」誌において、河川水温構造の形成やそれに及ぼすダム貯水の影響が検討されてきた。一方、濁りについても、1970年代に、安芸(1971)がダム下流での「濁水長期化現象」に着目し濁りの発生機構を説明しており、野口(1979)も濁りの発生予測法についての数値シミュレーションを試みている。これらの研究により、ダム湖から濁水が長期間放流される原因の一つは、底層放流型のダム湖において粒子の沈降速度が水温躍層により低下するためであり、もう一つは秋季に始まる全層循環による底泥の巻上げであることが明らかにされた(九州

¹⁾ 〒431-3422 浜松市天竜区米沢 273-1 天竜川漁業協同組合 Tenryu River Fishermen's Union, 273-1, Minasawa, Tenryu-ku, Hamamatsu, 431-3422, Japan

²⁾ 〒467-8610 名古屋市瑞穂区汐路町 3-40 名古屋女子大学 Nagoya Women's University, 3-40, Shioji-cho, Mizuho-ku, Nagoya, 467-8610, Japan (連絡著者 村上哲生 E-mail: murakami@nagoya-wu.ac.jp)

電力株式会社土木部，1974）。

ダムが冷濁水を放流する機構は明らかになりつつあるものの、河川への流出実態とその環境影響については、未だ情報が乏しい。渡辺（1974）は、九頭竜川水系のダム群下流の付着藻類の種類組成と濁水の影響を調査しているが、一時期の観測であり、濁水の長期化による影響を把握するには至っていない。また、香川（1999）は、ダム貯水による水質変化を網羅した総説を著しているが、残念ながら我国の河川の実態については、全くその例が挙げられていない。

本報告が、対象とする天竜川において、ダムによる最も顕著な環境影響は、泰阜ダム問題で良く知られているような堆砂によるダム上流の河床上昇と、その下流部での河床低下である（例えば、高杉，1980）。近年、地元からは、内水

面漁業や景観面に対する、ダムからの濁水の影響も懸念されている（図1）。アユ魚を例に取れば、実際の釣果の減少と景観の悪化等により、天竜川の遊漁者数の減少傾向は止まらず、天竜漁業協同組合管内の遊漁券販売数は、1979年度の27,000枚をピークに、2005年度には4,000枚弱まで落ち込んでいる。濁りと魚類の生存に関して既存の知見をまとめたNewcombe and MacDonald（1991）を参考にすれば、アユ魚の不振の原因として、濁りが鰓閉塞などを引き起こしアユの斃死を招くなどの直接的な影響と、濁水の遮光により餌である付着藻類の増殖が阻害され、餌不足によって、成長が妨げられるなどの間接的な影響が考えられるが、現在のところ、いずれの可能性についても、それを否定する調査は見受けられない。

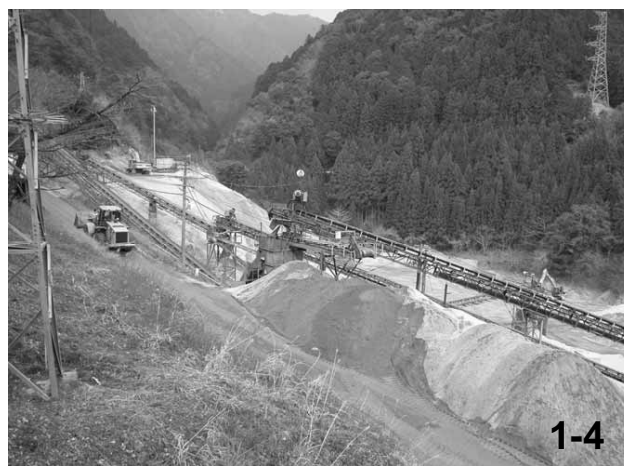
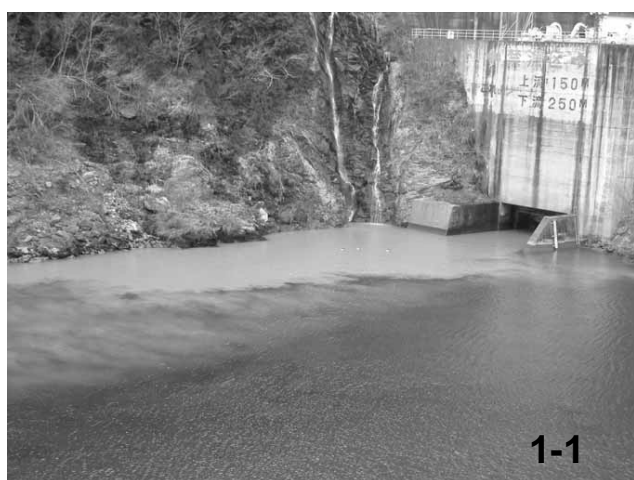


図1. 天竜川の河川水の濁りとダム湖の堆砂（2008年度の流水掃砂時に撮影）。

1-1. 佐久間発電所からの濁水放流，1-2. 佐久間ダム背水域の堆砂（愛知県・富山村），1-3. 佐久間ダム湖の流水掃砂（湖底の溝は堆積物の移動を促進するために掘削されたもの，丸い穴は浚渫の跡），1-4. 堆積砂の湖外搬出。

Fig. 1. The turbid Tenryu River and the Sakuma Dam Impoundment when the water level was reduced to exhaust the sediment in February, 2008.

1-1. Release of turbid water from the outlet of the Sakuma Hydroelectric Power Plant, 1-2. Sediment deposition at the backwater of the Sakuma Dam, Tomiyama Village, Aichi Prefecture, 1-3. The impoundment basin of the Sakuma Dam at low water level; ditches were excavated to enhance sediment exhaust, and dredging had left crater-like hollows, 1-4. Transporting sediment out from the impoundment.

濁りの流出機構や、季節変動の様相、または濁りの原因となる懸濁粒子に付着・吸着されて下流に供給される磷等の栄養塩の挙動は、ダムの運用、形態や規模、河川の形状、年毎に変化する集水域での降水量等に影響され、一様ではないと考えられる。従って、多くの河川から事例を集め、解析する必要があるが、我国における観測例は極めて乏しく、天竜川でもまた同様な事情である。本報告は、ダムが連続する天竜川（長野県・静岡県）の下流部における、長期間の濁度観測と栄養塩濃度調査の資料に基づき、ダム下流での水質の現状を記載するとともに、ダムが運用されている河川の窒素・磷負荷の特徴について述べるものである。

調査方法

天竜川と調査地点の概要

調査の対象とした天竜川は、諏訪湖（長野県）を源とし、磐田市・浜松市境（静岡県）から遠州灘に注ぎ込む全長 213 km、流域面積 5,590 km² の河川である（国立天文台, 2004）。天竜川は、長野県と静岡県の境付近から深い渓谷となり、ダムを建設するのに適した地形となっている。その結果、現在では、南信地方の泰阜、平岡、静岡県の佐久間、秋葉、船明の 5 ダムが電源開発及び中部電力により運用されている（図 2）。佐久間ダムは、総貯水量 3 億 2 千万 m³ に達する大型ダムであるが、他の 4 ダムは総貯水量 1～4 千万 m³ 級である（日本ダム協会 2002）。調査は、ダム群の最下流に位置する船明ダムの下流で行った。同ダムは、貯水量は 1 千万 m³、平水時の平均滞留日数は 1 日に満たない所謂「流れダム」である。観測地点直上流の秋葉、船明の両ダムとも流れダムであるため、天竜川下流の水質は、主として、佐久間ダムの貯水により、大きな影響を受けるものと考えられる。

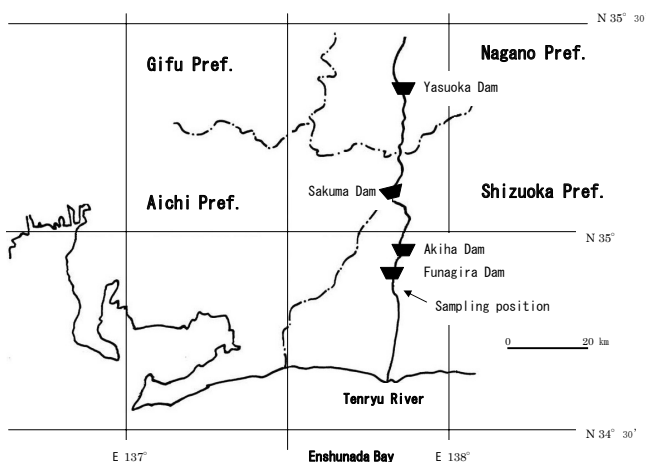


図 2. 調査地点図。

Fig. 2. Sketch map of the Lower Tenryu River.

濁りと水温の連続観測

濁りは、船明ダムの放流口付近の天竜川右岸で、原則として毎日定時（9:00）に、100 cm の透視度計を用い透視度として測定した。本研究では、2001 年 1 月 1 日から 2007 年 12 月 31 日までの 7 年間、延べ 2,534 日の観測値を解析の対象とした。

窒素・磷濃度の分析

2001 年 1 月から 2005 年 12 月の期間、毎月、ダム下流 1.5 km に位置する塩見渡橋中央部で河川表層水の採水を行った。試水は直ちにガラスフィルター（Whatman, G F /C）でろ過し、ろ水と未ろ水を栄養塩分析に供した。溶存態及び総窒素、磷の分析は、ろ水と未ろ水をペルオキシニ硫酸カリウムで分解した後、それぞれ紫外吸光法、モリブデン・ブルー法で定量した（日本規格協会 1986）。

集水域の降水量及び船明ダムの放水量資料の引用

集水域の降水量、及び船明ダムの放水量は、それぞれ、気象庁公開の佐久間観測所の観測値（<http://www.data.jma.go.jp>, 2008 年 8 月 7 日閲覧）、電源開発・船明ダム管理事務所から天竜川漁業組合に報告された値を引用した。

調査結果及び考察

透視度の変動

1. 天竜川での濁りの長期化の実態とその機構

表 1 に年度毎の透視度頻度分布を示す。透視度が 80 cm を越える日数は、7 年間で僅か 364 日（全測定日の 14.4 %）に過ぎず、ほとんどの観測日は、肉眼でも感知できる程度の濁りが見られることがわかる。透視度の頻度分布は年により異なり、80 cm 以上の透視度の頻度が最も高い年は、2005 年（22.5 %）、最も低い年は 2004 年（6.6 %）であった。尚、天竜川の懸濁物濃度（SS）と透視度の関係は、 $y=340x^{-1.01}$ （ $r^2=0.94$, x: 透視度 (cm), y: SS (mgL⁻¹））の指数関数で近似でき、透視度 100, 30, 10 cm は、それぞれ SS 3.2, 10.8, 32 mgL⁻¹ に相当する（天竜川漁業協同組合 2002）。

透視度の低下は、季節を問わず、集水域の佐久間観測所での激しい降水の直後に見られる（図 3）。これは、天竜川の濁りが、冬季の減水期の底泥の巻き上げや、主として春から秋に頻発する浮遊藻類の発生に伴うものではなく、降水による集水域からの土砂の流入が原因であることを示している。同一の水系であっても、大規模なダムが運用されている河川では、ダムのない河川に比べ、濁りの回復が遅れることが観測され、「濁水長期化現象」として知られているが（例えば、村上, 2005）、天竜川でも、濁りの回復は著しく遅く、図 3 に示す 2004 年 7 月の無降水期では、透視度 10 cm から 80 cm まで回復するのに約 1 ヶ月を要している。天竜川での濁

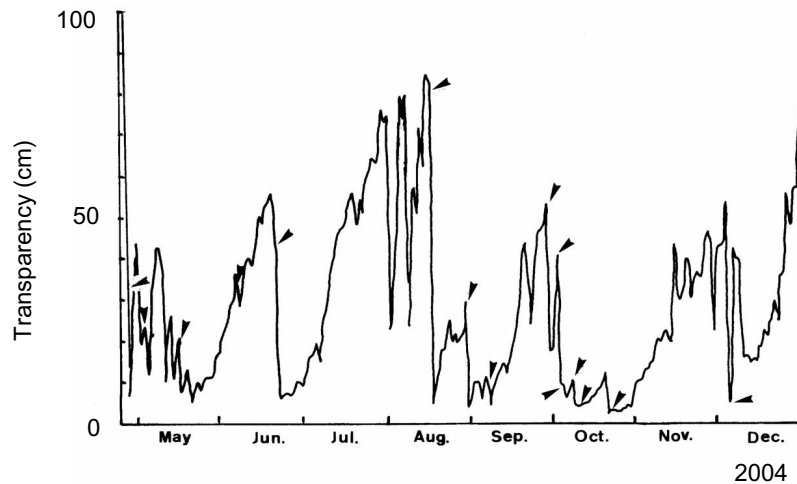


図 3. 2004 年 3 月から 12 月にかけての透視度の変動。

図中の矢印は、佐久間地点で 10 mm day-1 の降水が記録された日を示す。

Fig. 3. Fluctuation in the transparency downstream of the Funagira Dam from March to December, 2004.

Arrows show heavy precipitation over 10 mm day-1 at the Sakuma Observatory in the catchment.

表 1. 天竜川（船明ダム下流右岸）の透視度の経年変化。

Table 1. Annual fluctuations in relative frequency of the transparency observed downstream of Funagira Dam Impoundment.

year	frequency of the transparency					mean (cm)	n (days)
	0-19 cm (%)	20-39 cm (%)	40-59 cm (%)	60-79 cm (%)	80 cm- (%)		
2001	24.4	24.7	15.9	15.9	19.0	46	352
2002	14.2	16.7	34.0	22.8	12.2	50	359
2003	21.3	25.4	37.8	8.0	7.4	41	362
2004	29.2	24.6	26.8	12.8	6.6	39	366
2005	3.8	10.4	29.3	34.0	22.5	62	365
2006	13.1	21.4	22.5	21.6	21.4	53	365
2007	16.2	33.7	26.8	11.8	11.5	44	365
2001-2007	17.4	22.4	27.6	18.2	14.5	48	2,534

りが長期化するのは、佐久間ダムに貯蔵された濁水が完全に排出されるまで長時間を要するために、その回復過程で、降水があると、土砂が流入し、再びダム湖が濁るためであると考えられる。表 1 に示した低い透視度が観測される年毎の頻度が、集水域の年間降水量と関連しているのも、それを裏付けている（図 4）。つまり天竜川の濁りの長期化は、ダム貯水という人為的な要因に帰することができるが、濁りの継続期間は、それぞれの年における大規模な降水の頻度に支配されるのである。

2. 流水掃砂事業、土砂供給試験事業の影響

天竜川への人為的な干渉による濁りの発生原因は、ダム貯水ばかりではない。2000 年以降、ダム湖堆積物の下流への排出のために、佐久間、秋葉の両ダムで、それぞれ「流水掃砂事業」、「土砂供給試験事業」が実施されている。流水掃砂事業は、ダムを管理する電源開発による事業である。毎年 2 月 14 日から 3 月 20 日の間、ダム湖の水位を低下させることにより、水の流れを発生させ、堆積物を下流に流すことを目的としている（図 1-3）。土砂供給試験事業は、5 月から 10 月の増水期に、佐久間ダム湖で浚渫した堆積物を（図 1-4）、ダム下流の河川敷に蓄えておき、増水時期に排出しようとするものである。いずれの事業も、土砂移動を促進させる好ましい効果と共に、事業期間中、さらに天竜川の濁りを増加させる懸念は否めない。

秋葉ダム下流の土砂供給事業に伴う濁りの増加については、通常増水期の濁りと同時期に発生するため、定点の透視度観測の資料だけでは、事業による影響のみを分別できず、本論文では扱わない。

一方、佐久間ダムでの流水掃砂の影響は、通常は透視度が

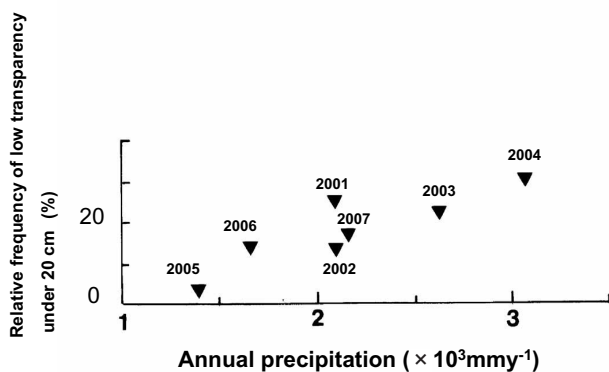


図 4. 佐久間地点の年間降水量と透視度 20 cm 以下の観測頻度との相関。

Fig. 4. Relationship between the annual precipitation at the Sakuma Observatory and the frequency of day with low transparency under 20 cm.

徐々に上昇する降水の無い時期にも透視度の低下として現れるはずである。図5は、流水掃砂初期、公表された掃砂開始日（毎年2月14日）前後2週間の透視度の変化を示す。2007年度は掃砂開始日に大規模な降水があり、そのため透視度が大幅に変化したため、考察から除外した。掃砂前1週間に降水が観測されなかったにも関わらず2004年を除く各年には、掃砂開始日前又は直後に透視度の低下が認められた。これは、掃砂初期にダム湖水位を低下させるために放水する必要があり、佐久間ダム貯水池からの濁水の流出、及び下流の流量が増加したことによる河床堆積物の巻き上げと下流への移動の促進のためであると考えられる。2001年、2005年に顕著に見られる2月14日以前からの透視度の低下は、放水が開始日前から始まっていることを示している。

流水掃砂期間（2月14日～3月20日）の平均透視度（cm）/年平均透視度（cm）比は、各観測年で次の通りである。27/46（2001）、18/50（2002）、24/41（2003）、35/39（2004）、48/62（2005）、31/53（2006）。いずれの年度も、流水掃砂期間の透視度は、年間平均値に比べ、低下している。調査期間中、集水域の佐久間での降水量は、2月から3月にかけて特異的に多くなる傾向は認められず、透視度の低下は、人為的な流水掃砂によるものである可能性が大きい。

栄養塩負荷

1. ダムの栄養塩補足効果

塩見渡橋における調査期間中の平均溶存態窒素及び総窒素濃度は（ $n=53$ ）、それぞれ 0.80 mg L^{-1} 、 0.95 mg L^{-1} であった。つまり、85%の窒素が船明ダムより溶存態で流出していることになる。一方、平均溶存態リン及び総リン濃度は、それぞれ 0.013 mg L^{-1} 、 0.026 mg L^{-1} であり、窒素と異なり溶存態での流出は50%に留まった。総窒素/総リン比は36であり、溶存態のそれは62と更に高い。

佐久間ダムが完成した1956年以前の水質調査資料は乏しいが、小林（1960）は、本研究の対象とした地点とほぼ同じ場所で、無機態の窒素（硝酸態窒素+アンモニア態窒素）とリン（磷酸態リン）濃度を複数回測定し、それぞれ 0.28 mg L^{-1} 、 0.01 mg L^{-1} の値を出している。本研究の溶存態窒素、リンの測定値と直接比較するには問題があるが、佐久間ダムの運用後、リンに比べ、見かけ上、窒素の流出が著しく大きくなっていることがわかる。現在の天竜川の高い溶存態窒素/溶存態リン比は、茶樹栽培等に見られる過剰な窒素肥料施肥などの集水域の変化に帰すこともできるが、ダム運用による生物学的、非生物的な過程、例えば植物プランクトンによる取り込みや、止水環境での沈降の促進により、リンが選択的に除去されている可能性も否定できない。

2. 下流や海への栄養塩負荷

船明ダムの放水量を、塩見渡橋の流量と同量とみなし、日

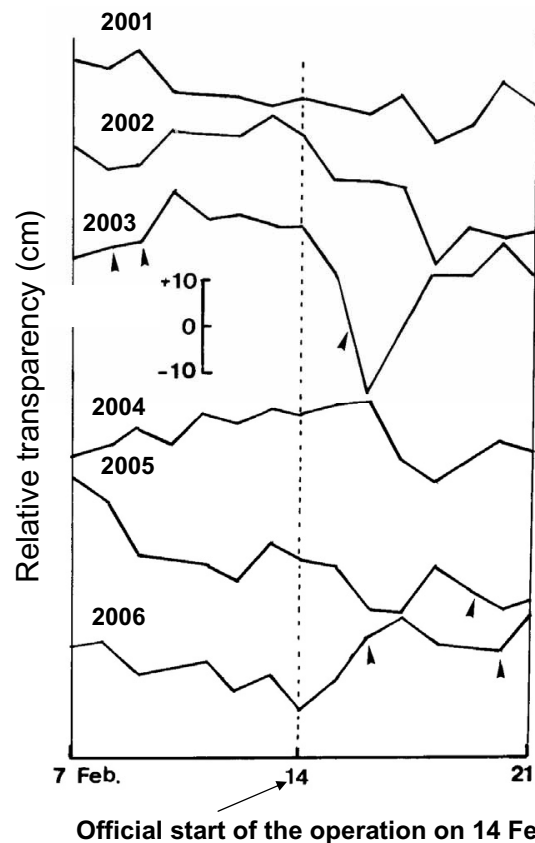


図5. 毎年の流水掃砂事業時の透視度の相対的な変化（2001～2006年）。

図中の矢印は、佐久間地点で 10 mm day^{-1} の降水が記録された日を示す。流水掃砂は毎年2月14日に開始される取り決めであるが、事前放水はそれ以前から行われている。2007年は2月14日に激しい降雨があったため、考察から除外した。流水掃砂の期間は降水が無くても透視度が徐々に低下している。

Fig. 5. Relative fluctuations in the transparency during the period when the water level was reduced for sediment exhaust from 2001 to 2006.

Arrows show heavy precipitation over 10 mm day^{-1} at the Sakuma Observatory located in the catchment. Although the dam operation officially starts on 14 February, actual water level lowers before the date. Because an exceptionally heavy precipitation was observed during the operation period in 2007, the data of this year are eliminated from the discussion. Notice that gradual decreasing of the transparency is caused without heavy precipitation during the operation at each year.

毎の栄養塩濃度との積を負荷量として推定すれば、平均的な総窒素負荷量は $1,000 \sim 1,800 \text{ g day}^{-1}$ 、総リン負荷量は $30 \sim 50 \text{ g day}^{-1}$ と推定される。総窒素負荷量/総リン負荷量比は、 $30 \sim 40$ となる（表2）。村上（2002）は、秋葉ダム下流から河口まで10地点の栄養塩濃度を、本研究と同じ分析法で測定し、2001年1月から12月の平水時の観測結果に基づき、室

表 2. 船明ダム放水量と塩見渡付近の窒素、リン濃度より試算した日平均負荷量

Table 2. Nitrogen and phosphorous loadings from 2001 to 2005, calculated from annual mean concentrations at Shiomido-hashi bridge and the discharge from Fnagira Dam

	Nitrogen		Phosphorous		n
	dissolved (gday ⁻¹)	total (gday ⁻¹)	dissolved (gday ⁻¹)	total (gday ⁻¹)	
2001	1,160	1,330	25	48	12
2002	960	1,120	15	40	12
2003	1,470	1,870	19	46	11
2004	1,130	1,350	23	40	8
2005	830	1,020	14	28	10

素、リンの総濃度及び溶存態の比率がほぼ変化しないことを報告している。また、同区間には本川の流量を著しく変更させる大規模な支川もないため、塩見渡橋地点での負荷は、そのまま海への負荷となると考えることができる。しかし、本研究で示した日負荷の和が年間の、また長期間の負荷となるわけではなく、恐らく、ダム堆積物が移動する増水時には、著しく高い負荷と平時とは異なった窒素/リン比となるに違いない。前節で述べた高い窒素/リン比が、ダムによるリンの捕捉によるものであるかどうかは、増水時のダム湖堆積物の観測が明らかにするであろう。

謝 辞

2000 年秋から開始した著者等の共同観測は、天竜川漁業協同組合の当時の事務局長・鈴木富士子氏、理事・秋山雄司氏（現組合長）、理事・岩野大作氏らの尽力により実現したものである。深く感謝の意を表する。本研究は、第 11 期プロ・ナトゥーラ・ファンド（自然保護基金）、平成 15 年度～平成 16 年度科研費研究補助金（基盤研究（C）（2）課題番号：15510033）の助成を受けた。

文 献

- 安芸周一（1971）：貯水池の流動形態と水質．大ダム，(71)：1-13.
- 香川尚徳（1999）：河川連続体で不連続の原因となるダム貯水による水質変化．応用生態工学，2: 141-151.
- 小林純（1960）：日本の河川の平均水質とその特徴に関する研究．農学研究，48: 63-106.
- 国立天文台（2003）：理科年表 平成 16 年版．丸善，東京．
- 九州電力株式会社（1974）：一ツ瀬貯水池における濁水長期化現象とその対策について．大ダム，(70)：32-34.
- 三谷憲二（1957）：河川水温調査会の設立総会までの経緯．水温の研究，（創刊号別冊）：2-7.
- 森田浩（1968）：日本における河川水温の科学的背景と特

徴．水温の研究，11: 1343-1351.

村上哲生（2002）：ダム堆砂排出が河川の一次生産者に及ぼす影響．第 11 期プロ・ナトゥーラ・ファンド助成成果報告書，pp. 17-20. 自然保護助成基金．

村上哲生（2005）：ダム建設と運用による河川の水溫異常とその生物影響．平成 15 年度～平成 16 年度科研費研究補助金報告書（基盤研究（C）（2）課題番号：15510033）.

Newcombe, C. P. and MacDonald, DD. (1991): Effects of suspended sediments on aquatic ecosystem. North American Journal of Fisheries Management, 11: 72-82.

日本ダム協会（2002）：ダム年鑑 2002. 日本ダム協会，東京．

日本規格協会（1986）：工場排水試験法．日本規格協会，東京．

野口正人（1979）：ダム貯水池における水温・濁度の予測法．水温の研究，22: 4650-4661.

高杉晋吾（1980）：日本のダム．三省堂，東京．

天竜川漁業協同組合（2002）：天竜川の水質（2002. 3. 21. 総会資料，浜松）.

渡辺仁治（1974）：九頭竜川水系の付着生物におよぼす濁りの影響．陸水学雑誌，35: 73-81.

（担当編集委員：野崎健太郎，梶山女学園大学教育学部）