

## 溶存酸素の連続観測資料を利用した河川の一次生産速度推定

村上哲生<sup>1)</sup>

### Estimation of primary production in rivers using continuously recorded data of dissolved oxygen

Tetuo MURAKAMI<sup>1)</sup>

#### Abstract

A method to estimate primary production based on diurnal oxygen change in flowing water, introduced by Odum (1956) and Bott (1996), is applied to a heavily polluted river in Nagoya City, Central Japan. Continuous oxygen concentration observed by integrated electrical recorder for water quality now allows more convenient and practical monitoring. Diurnal and seasonal fluctuations in production and respiration rates of the river are described and discussed in relation to meteorological changes such as solar radiation and water temperature. Diurnal and short-term changes in production depend on solar radiation, while no significant correlation was detected between seasonal changes in production or respiration rate and water temperature.

**Keywords:** dissolved oxygen, polluted river, primary production, running water, water quality monitoring

#### 摘 要

Odum (1956) や Bott (1996) により、河川の溶存酸素濃度の日変動に基づく一次生産速度の推定方法が提案されている。この方法により、名古屋市内の汚濁した河川で生産速度を試算した。行政が設置している連続計器による酸素濃度の測定結果を利用すれば、より簡便かつ実用的な一次生産の測定ができる。一次生産と群集呼吸の速度試算結果を紹介するとともに、光や水温などの環境要因との関連を議論する。短期間の一次生産は、光条件により制御されることが明らかになったが、生産と呼吸の季節変動については、水温との有意な関係は認められなかった。

キーワード：一次生産，河川，汚濁河川，水質監視，溶存酸素

(2008年9月20日受付；2009年1月30日受理)

#### はじめに

流水環境における一次生産速度の測定は、河川生態系の物質循環の理解に係わる基礎科学的な面からも、また水産資源や水質の保全などの実務面からも、重要な課題の一つである。湖沼等の止水環境での生産速度の測定事例に比べて、河川でのそれは非常に少ないが、我国でも、Kobayashi (1961a, 1961b) を始めとし、Tominaga & Ichimura (1966)、Kobayashi (1971)、渡辺 (1974)、Aizaki (1978)、Nakanishi and Yamamura (1984)、桜井 (1985) などの測定例がある。これらの研究は、礫に付着した付着藻類を小室に閉じ込めて測

定した光合成活性と現場の光条件や付着藻類の現存量から一次生産を推定したものである。しかし、この方法では、河川特有の流れの効果が無視されること、また河床材料の構成が不均一である河川では、平均的な単位面積当りの現存量の値を得ることが難しいことなどの問題もある。

それらの問題を重視した Odum (1956) は、河川水中の溶存酸素の日変動から一次生産を推定する方法を提案している。即ち、河川軸に沿って同様な環境が連続する河川では、溶存酸素濃度 ( $O_2$ ) は、生産 (P) と呼吸 (R)、及び大気とのガス交換 (D) で決定されるため ( $O_2 = P - R \pm D$ )、実測できる  $O_2$ 、R と、経験的な式で決まる D から、P を推定しよう

<sup>1)</sup> 〒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 (E-mail: murakami@nagoya-wu.ac.jp)

というものである ( $P=O_2 + R \pm D$ )。この方法では、流れの効果を維持しつつ、不均一な河床でも信頼性の高い推定値を得ることができる。一方、山間の溪流など酸素濃度が飽和値に近く、日較差が小さい場合には推定値を得ることができず (Tominaga and Ichimura 1966)、また D の値を決定するのに重要な再曝気係数の値の信頼性の問題も指摘されており (萱場 2005)、さらに、実務的な問題としては、溶存酸素濃度の日変動の測定にも意外に労力を要することも挙げるべきであろう。

しかし、再曝気係数の問題は、ガス交換に比べて生物学的な酸素生産と消費の規模が大きき場合は深刻なものとはならないと予想され、また溶存酸素の連続測定資料についても、水質の自動観測機器の発達により、多くの河川で利用が可能となってきた。

本研究の目的は、自治体等の行政機関が設置、観測している水温や溶存酸素の連続観測資料を用い、Odum (1956) が提案した酸素濃度の変動に基づく一次生産推定への利用の可能性を検討するものである。本方法が信頼性の高いものであるならば、将来、一次生産速度の長期にわたる連続観測や、広域的な河川ごとの比較研究にも発展するものとなる。

## 方法

### 溶存酸素等の連続水質観測記録と背景情報の収集

河川の溶存酸素濃度の観測資料としては、名古屋市環境保全局の河川水質連続監視測定結果を使用した (名古屋市環境保全局, 1995, 1996, 1997, 1998)。印刷物となっている公表資料は、日平均の値であるが、名古屋市環境保全局より、時間ごとの測定資料の提供を受けた。

連続観測は、市内 10 地点で継続されているが、流れが維持されている順流域であり、ある程度の区間、同じ河床条件が連続する地点として、天白川 (名古屋市緑区) での観測資料を解析に用いた。連続測器の溶存酸素の測定原理は、隔膜型ポーラログラフ法である。溶存酸素の飽和度に関する水温、塩素イオン濃度も同時に測定された値を用いた。それぞれ、白金抵抗法、塩素イオン電極法で観測されている。

再曝気係数を推定するための地形的、水文的情報は、同じく名古屋市の刊行する諸資料によった (名古屋市, 1989; 名古屋市土木局河川部計画課・名古屋市環境保全局環境科学研究, 1993; 名古屋市環境保全局, 1997b)。

一次生産に影響を及ぼす日照量等の気象情報は、名古屋地方気象台のホームページから検索した (<http://www.tokyo-jma.go.jp/home/nagoya/>, 2008 年 8 月 10 日閲覧)。

### 対象河川の概要

解析の対象とした天白川は、愛知県日進市三峰峠を源とする、全長 23 km、流域面積 120 km<sup>2</sup> の二級河川である。水質

連続測器は、河口から約 6 km 上流の天白橋左岸に設置されている。天白川の感潮域は、同地点の約 1.5 km 下流までであり、極端な渇水期以外は、常時水の流れが停滞することはない (名古屋市環境保全局, 1997b)。河床は砂・小礫から成り、大型の礫は少ない。

流域に西山、植田、鳴海の三下水処理場を持つため、1990 年代初期の生物化学的酸素要求量 (BOD) は、13 ~ 14 mg L<sup>-1</sup> と高い値が記録されている (名古屋市土木局河川部計画課・名古屋市環境保全局環境科学研究, 1993)。生物学的汚濁階級は、珪藻の種類組成やベントス相から  $\alpha$  中腐水性ないしは強腐水性と推定されている (村上, 1983; 村上ほか, 1986)。

### 一次生産速度推定の手順

一次生産速度の推定の手順は、Bott (1996) の一点法に準じた。再曝気係数 ( $K_2$ ) は、APHA et al. (1992) の  $K'$  値に、流速と河川勾配を乗じたものとした。APHA et al. (1992) の  $K'$  値は河川規模 (流量) により一意的に定まると仮定したものであり、対象地点の平均流量 (名古屋市環境保全局, 1997b) から、 $28.3 \times 10^3 \text{ m}^3 \text{ day}^{-1}$  を  $K'$  値として採用した。流速は、対象地点の平均流量を平水量時の河川断面積で除した値を用いて試算し、 $12 \text{ cm sec}^{-1}$  とした。河川勾配は、名古屋市環境保全局 (1997b) に記載してある 1/1,000 とした。流量や流速を一定値とみなしたため、それらの値が著しく変化する豊水時、渇水時の測定値は除外し、平水流量時の水深の 50 ~ 60 cm の観測値のみを一次生産と呼吸の推定に用いた。

推定された  $K_2$  値は、水温変化に基づき、時間毎に補正し、観測された酸素濃度と飽和酸素濃度の差を乗じて D の値を推定した。

呼吸速度は、日没から酸素極小値に達するまでの時間当たりの減少速度とした。減少速度は一定ではなく、極小値及び極小値に達するまでの時間には、それぞれ日毎に変動がみられたが、生産と呼吸の推定に用いた減少速度は概ね、 $0.3 \sim 1.0 \text{ mg L}^{-1} \text{ h}^{-1}$  程度の値となった。

### 一次生産及び呼吸速度の推定値の安定性

Bott (1996) の方法では、再曝気係数は、 $K'$  と流速、河川勾配の積により与えられる。本研究では、流速は年間の平均流速とし、固定値として扱ったが、測定場所や水位により大きく変動する。一方、河床勾配も河川区間により多少の変化を示す。また、呼吸速度は一日を通じて一定ではなく、水温変化により変動するものと考えられる。従って、これらの要因が、積算された一次生産速度にどの程度影響を及ぼすか確かめておく必要がある。

流速と河川勾配については、その値を 1/2, 2 倍に設定し、 $K_2$  値を変化させ、初期の設定値で試算した一次生産速度と比較した。

呼吸速度は、水温の上昇とともに増加し、次の式により決

まると仮定した。

$$Rt = R_0 \theta^{t-t_0}$$

ここで、 $R_t$ : 水温  $t$  の時の呼吸速度,  $R_0$ : 設定した呼吸速度,  $t$ ,  $t_0$  はそれぞれ,  $t$  時の水温, 呼吸速度計算時の平均水温である。 $\theta$  は, 1.05 とした。水温の変動による呼吸速度の日変動を考慮した試算結果と初期設定値のそれとを比較した。

## 結果および考察

一次生産速度, 群集呼吸速度, 及びガス交換速度の推定

図 1 に, 1997 年 3 月 14 日の観測資料を基に天白川で試算された一次生産速度, 群集呼吸速度, 及びガス交換速度の日変動を示す。測定日以前 2 週間の積算降水量は 6.5 mm で, 極端な増水はなく, 付着藻類皮膜は十分に発達していると考えられる。また当日の全天日射量の日合計は 14.8 MJm<sup>2</sup> で, 光合成生産には支障のない光条件であった。20°Cでの再曝気係数は, 河川勾配 1/1,000, 流速 0.12 m sec<sup>-1</sup> の条件下で, 0.76 h<sup>-1</sup> であった。

日中の酸素の総生産は 24.6 mgO<sub>2</sub> L<sup>-1</sup> day<sup>-1</sup>, 群集呼吸は 19.7 mgO<sub>2</sub> L<sup>-1</sup> day<sup>-1</sup>, 河床面積当たりでは, それぞれ 4.9 gO<sub>2</sub> m<sup>-2</sup> day<sup>-1</sup>, 3.9 gO<sub>2</sub> m<sup>-2</sup> day<sup>-1</sup> と試算された。一次生産/呼吸比 (P/R 比) は, 1.2 となる。夜間の水温低下に伴い, 酸素濃度が増加し, 見かけ上生産が正の値となることもあるが, 1 mgO<sub>2</sub>

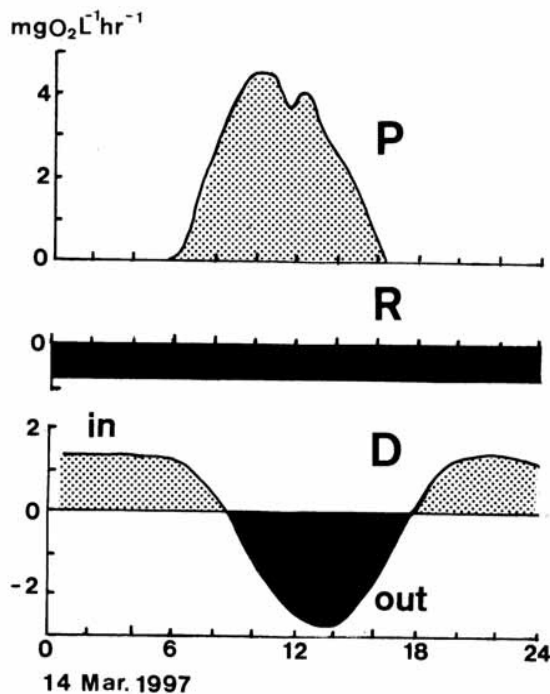


図 1. 一次生産速度, 群集呼吸速度, 及び拡散速度の日変動 (天白川, 1997 年 3 月 14 日)。

Fig. 1. Diurnal fluctuations in primary production rate (P), community respiration rate (R) and diffusion rate (D) (Tenpaku River, 14 Mar. 1997).

L<sup>-1</sup> h<sup>-1</sup> を越えることはなく, 日没から未明までの値は生産速度の積算では無視した。また日没時に急激な酸素濃度の減少が生じる場合, 生産が負の値になるが, これも 0 mgO<sub>2</sub> L<sup>-1</sup> day<sup>-1</sup> として処理した。

比較的栄養塩濃度が高く, 日照条件が良い中流域での測定事例としては, Aizaki (1978) が, 総生産速度 0.53 ~ 19.24 gO<sub>2</sub> m<sup>-2</sup> day<sup>-1</sup>, 呼吸速度 1.4 ~ 7.3 gO<sub>2</sub> m<sup>-2</sup> day<sup>-1</sup> を見積もっている。また, 萱場 (2005) の富栄養化した池を水源とする人工河川でも, 総生産速度 10.4 gO<sub>2</sub> m<sup>-2</sup> day<sup>-1</sup>, 呼吸速度 11.7 gO<sub>2</sub> m<sup>-2</sup> day<sup>-1</sup> の値を報告している。これらの測定値と比べれば本研究で試算した値も妥当な範囲に入っていると判断できる。

図 1 に示した事例での試算では, 温度による呼吸速度の補正を加えたとしても, 一日当り積算した総生産速度の 1.9 % の変化しか見られなかった。また, 再曝気係数を, 初期設定値の 1/2, 2 倍に変更しても, 一日当りの生産は, それぞれ 3.9 %, 7.8 % の変化しか認められなかった。

天白川における一次生産速度の短期的な変動と長期的な変動

河川の一次生産速度は, 一次生産者の量と日照条件により大きく変動する。既存の研究では, 測定事例も少なく, 生産に影響するこの二つの要因を分離して解析することが困難であった。本研究の方法による一次生産の推定法がある程度信頼がおけるものであれば, 大量の, 日毎, 時間毎の生産速度の推定値が得られるために, 様々な条件下での生産速度を比較することが容易となる。即ち, 1, 2 週間の短期間の日積算生産速度を比較すれば, 極端な増水による藻類被膜の大規模な剥離・更新の無い定常的な条件下では, 一次生産者の量の変動の効果は比較的小さいものと考えられ, 光条件と一次生産の関係を明らかにすることができる。また, 同じく, ある程度以上の日射量の日を生産を比較すれば, 季節毎に異なる現存量の変動を知ることができる。本研究では, 流速と流量により決まる再曝気係数を一定であると仮定できる平水時のみの資料を用い解析を行った。

図 2 は, 1997 年 3 月 1 日から 15 日までの間の全天日射量と一日当たりの積算総生産速度の変動を示す。日射量が少ない場合, 日射量と生産には良い相関関係が認められるが, 15 ~ 20 MJ m<sup>2</sup> day<sup>-1</sup> 程度まで日射が増加すると, 生産速度の低下が目立つようになる。この原因の一つとして, 強光阻害の影響の可能性を挙げることができる。図 3 は, 積算日射量が大きい 3 月 13 日の時間毎の日射量と生産速度の変化を示したものである。正午頃に, 生産速度が一時的に低下する現象が認められる。図 2 において, 日射量が 20 MJ m<sup>2</sup> day<sup>-1</sup> に達する 2 例では, いずれの日においても, 図 3 に示すような日中の一時的な生産速度低下が見られた。

天白川における一次生産速度の季節変動を知るために, 測定日の積算日射量 10 MJ m<sup>2</sup> day<sup>-1</sup> 以上で, 測定日 1 週間前に

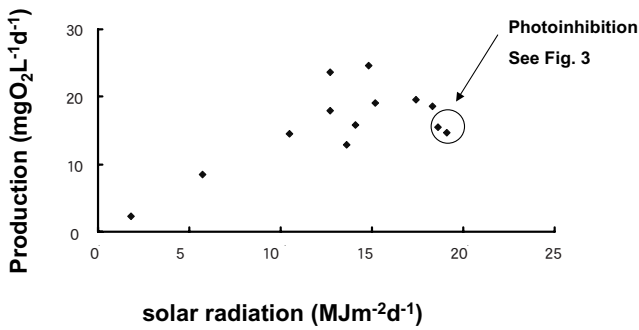


図2. 全天日射量（名古屋気象台）と試算された天白川の一次生産速度の関係（1997年3月1日～15日）。  
 図中で異例に低い二つの測定値は、強光阻害のため、  
 図3も参照のこと。

Fig. 2. Relationship between cumulative daily solar radiation at the Nagoya Meteorological Observatory and estimated primary production in the Tempaku River from 1 to 15 March 1997. Two exceptional low production rates in the figure account for photoinhibition. See also Figure 3 for detail.

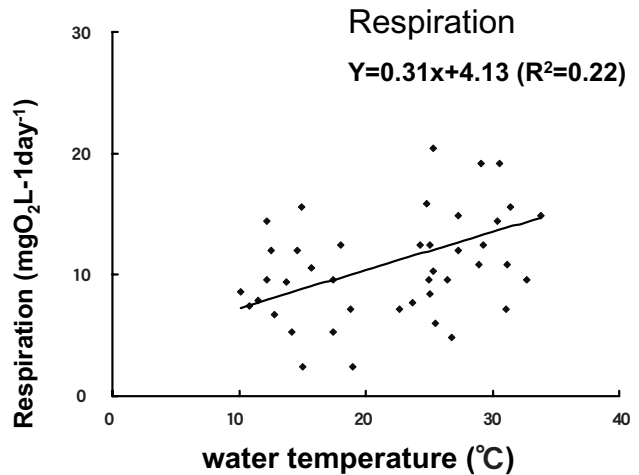
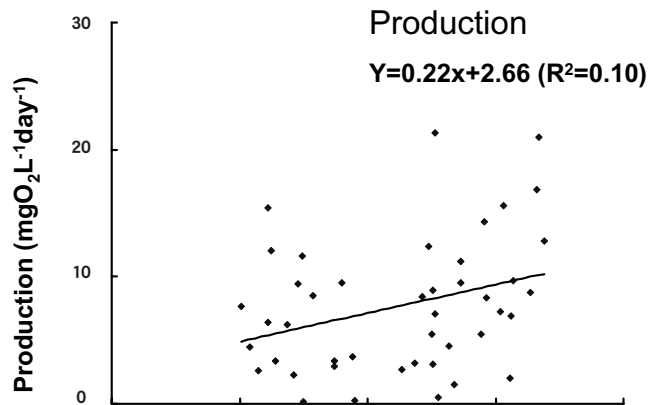


図4. 日最高気温と生産（上段）及び呼吸（下段）の関係（1995年～1997年）。

一週間の間激しい降水が無く、観測日の全天日射量が  $10 \text{ MJ m}^{-1} \text{ day}^{-1}$  の日の観測値に限定して比較した。

Fig. 4. Relationship between daily maximal water temperature and production rates (upper) and respiration rates (lower) from 1995 to 1997, concerning days without heavy precipitation in the previous week, and cumulative daily solar radiation over  $10 \text{ MJ m}^{-1} \text{ day}^{-1}$ .

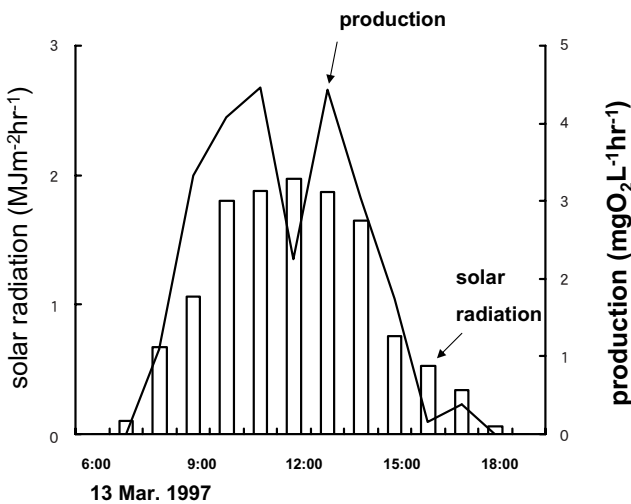


図3. 全天日射量と生産速度の日変化（1997年3月13日）。

Fig. 3. Diurnal fluctuations in solar radiation and primary production on 13 March 1997.

観測地点に直近の名古屋気象台で  $10 \text{ mm}$  以上の降水が見られない日を選び、日毎の生産と呼吸を推定した。条件を満たす日数は、1995年から1997年の3年間で45日であった。各年の日平均生産速度 (P), 呼吸速度 (R), P/R比はそれぞれ、 $P=9.2 \text{ mgO}_2 \text{ L}^{-1} \text{ h}^{-1}$ ,  $R=12.8 \text{ mgO}_2 \text{ L}^{-1} \text{ h}^{-1}$ ,  $P/R=0.66$  (1995,  $n=13$ ),  $P=7.6 \text{ mgO}_2 \text{ L}^{-1} \text{ h}^{-1}$ ,  $R=10.4 \text{ mgO}_2 \text{ L}^{-1} \text{ h}^{-1}$ ,  $P/R=0.67$  (1996,  $n=15$ ),  $P=6.5 \text{ mgO}_2 \text{ L}^{-1} \text{ h}^{-1}$ ,  $R=10.4 \text{ mgO}_2 \text{ L}^{-1} \text{ h}^{-1}$ ,  $P/R=0.53$  (1997,  $n=17$ ) であった。P/R比が1以下であるのは、有機物の生産よりも分解が卓越する強腐水性水域としては、当然の結果だと考えられる。図1に示すようなP/R比が1を越えるのは、45例中3例に過ぎなかった。

水温と、生産速度及び呼吸速度とは弱い正の相関関係が

あるものの、 $r^2$ はそれぞれ0.10, 0.22と低い値であり、明確な関連は認められなかった(図4)。付着藻類の現存量や生産速度が季節的に変動する現象はしばしば紹介されるが(例えば、小林, 1986)、本報告で示された水温との弱い相関は、生産が、季節により一意的に決定される水温に直接依存するのではなく、河畔植生の繁茂や落葉による光条件の変化や、付着藻類消費者密度の変動などの複数の間接的な季節要因の変化により決定されるものであることを示唆している。



## 謝 辞

本研究に使用した溶存酸素の観測資料は、名古屋市環境局より提供されたものである。資料の開示と利用の許可に対して深く謝意を表す。

## 文 献

- Aizaki, M. (1978): Seasonal changes in standing crop and production of periphyton in the Tamagawa River. *Japanese Journal of Ecology*, 28: 123-134.
- APHA, AWWA and WEF (1992): Standard methods for the examination of water and wastewater. 18th ed. American Public Health Association. Washington, DC.
- Bott, T. L. (1996): Primary production and community respiration. In *Methods in stream ecology*, Hauer, F. R. and Lamberti, G. A. (eds.): 533-556. Academic Press, San Diego.
- 萱場祐一 (2005): 溶存酸素濃度の連続観測を用いた実験河川における再曝気係数、一次生産速度及び呼吸速度の推定. *陸水学雑誌*, 66: 93-105.
- Kobayashi, H. (1961a): Chlorophyll content in sessile algal community of Japanese mountain river. *Botanical Magazine Tokyo*, 74: 228-235.
- Kobayashi, H. (1961b): Productivity in sessile algal community in Japanese mountain river. *Botanical Magazine Tokyo*, 74: 331-341.
- Kobayashi, H. (1971): Chlorophyll content and primary production of the sessile algal community in the mountain stream Chigonozawa running close to the Kiso Biological Station of the Kyoto University. *Memoirs of the Faculty of Science, Kyoto University, Series of Biology* 5: 89-107.
- 小林弘 (1986): 河川底生藻類の生態. 藻類の生態, 秋山優・有賀祐勝・坂本充・横浜康継 (編): 309-346. 内田老鶴圃, 東京.
- 村上哲生 (1983): 名古屋市内の汚濁河川に優占的な珪藻類. *名古屋市公害研究所報*, (18): 121-131.
- 村上哲生・近藤盛英・榊原薫・鈴木裕・鎌田敏幸・榊原靖 (1986): 名古屋市内の淡水生物 (魚類と底生生物). *名古屋市公害研究所報*, (18): 63-76.
- 名古屋市 (1989): 名古屋市河川等環境整備基本計画. 名古屋市.
- 名古屋市環境保全局 (1995): みずべ (水質自動監視システムによる測定結果) No. 11. 名古屋市.
- 名古屋市環境保全局 (1996): みずべ (水質自動監視システムによる測定結果) No. 12. 名古屋市.
- 名古屋市環境保全局 (1997a): みずべ (水質自動監視システムによる測定結果) No. 13. 名古屋市.
- 名古屋市環境保全局 (1997b): 河川概要. 名古屋市.
- 名古屋市環境保全局 (1998): みずべ (水質自動監視システムによる測定結果) No. 14. 名古屋市.
- 名古屋市土木局河川部計画課・名古屋市環境保全局環境科学研究所 (1993): 市内河川・ため池等の水質の変遷. 名古屋市.
- Nakanishi, M. and Yamamura, N. (1984): Seasonal changes in the primary production and chlorophyll *a* amount of sessile algal community in a small mountain stream, Chigonosawa. *Memoirs of the Faculty of Science, Kyoto University, Series of Biology* 9: 41-55.
- Odum, H. T. (1956): Primary production in flowing waters. *Limnology and Oceanography*, 1: 102-117.
- 桜井善雄 (1985): 千曲川中流域における periphyton による有機物生産とその河川水質への寄与. *環境科学研究報告集「河川における物質循環」* 35-48.
- Tominaga, H. and Ichimura, S. (1966): Ecological studies on the organic matter production in a mountain river ecosystem. *Botanical Magazine Tokyo*, 79: 815-829.
- 渡辺仁治 (1974): 奈良県吉野川の瀬における付着藻類の生産と植生. *金沢大学教養部論集*, 11: 107-120.
- (担当編集委員: 田代 喬, 名古屋大学工学研究科)

