

## 1. 国土の富栄養化をどう捉えるか

瀬戸内海が貧栄養化！という新聞記事に目を疑った。何故なら、戦後この方私たちの身の周りの自然環境は富栄養の方向をまっしぐらに進んできたと思えないからだ。はげ山がとても目についた近郊の山は今は鬱蒼とした森の山となった。そしてきれいに澄んでいた水辺は、水が停滞する箇所ではアオコなどの影響で透明度は極端に下がり、水の流れている箇所でも水生植物が繁茂してその様相は変わった。

富栄養で景観が変わると言えば、松林のことがある。マツは植物群落の遷移から見るとススキ等しか生えない土地に一番早く飛び込んでくる樹木のパイオニアである。殆ど栄養のないところでも生長できるのであろう。しかし、マツ林は他の種の木々が入り込んでくると途端にその勢いを失い最後には枯れてしまう。関東平野では嘗ては松林がどこでも見られたが、現在は急速に消滅している。白砂青松はわが国の風土を表す典型的な表現であったが、貧栄養をベースとした日本の国土の状況に根差していたと考えられる。

しかし、こうした状況は何時のころから一変したのであろうか。それは多分日本の高度経済成長期と言われる昭和30年代後半、1960年代あたりからなのではないかと思われる。

このようなわが国における富栄養現象の年代的推移を、実際の数値データで追いかけてみる事ができるのか。これが意外と難しいようだ。湖沼や内湾の富栄養化問題が大きく取り上げられるようになった1970年代、その中で滋賀県琵琶湖の富栄養化防止条例（1979年）が定められ、続いて湖沼、内湾に窒素、リンの項目を含む環境基準、排出基準が定められるようになり、公用水域の窒素、リンデータがこの年代から整備されるようになった。よって、わが国の水域における窒素、リンデータが集積されるのは1980年代からということになる。1980年代はどちらも窒素、リンデータのピークとなる年代であるようで、(財)河川環境管理財団によって整理された全国河川の水質データによると<sup>1)</sup>、1980年頃と1995年頃とでは窒素では若干減少するものの殆ど変わらず(平均値 1.97→1.81mg/L、中央値 1.24→1.10mg/L)、リン濃度はこれに較べ減少している(平均値 0.139→0.104mg/L、中央値 0.071→0.052mg/L)。以上の値は日本の1級河川の約450測地点での比較である。日本の湖沼における環境基準の一番緩い基準が、T-N 1mg/L、T-P 0.1mg/Lであるが、窒素については半数以上の測地点でこの水準を超えており、リンについては3割くらいの地点で超えている。因みに窒素(T-N)1mg/Lというのは農業用水基準値でもある。水稻用の用水はこれ以下が望ましいということのでつくられた基準であるが、最近ではこの基準を満足するのが難しくなっている地点が続出しているので、農業サイドにおいてもこの基準値をアンモニア性窒素 1mg/L、あるいはケルダール性窒素 1mg/Lと読み替えて対処している。

このように最近の河川水質値が示すことは、日本の水系の多くの箇所が富栄養化の影響下にあるということではないかということである。この原因は何かということでは、まず生活排水、そして畜産排水、それから農地からの面現負荷の影響ということが考えられる。これに加えて窒素については大気汚染経由の負荷も無視できず、既に雨水中の窒素濃度は 1mg/L を超えていることはそう珍しいことではないという状況にある。

それではこうした富栄養環境になる前の水質データはないのかということについて、実は1950年頃(昭和30年代以前)の日本における河川水の窒素、リン濃度の実態を示す貴重なデータとして、小林の研究成果<sup>2)</sup>が注目される。小林の採水地点と近年の1級河川での環境基準点が対比できる地

点は限定されるが、これが対比して図2，3に示される。1950年頃の栄養塩濃度は近年のものに比べて随分と低いレベルにあり、窒素では近年のもの約3分の1、リンでは約5分の1から10分の1のレベルにある。これは正に当時のわが国の水環境の栄養レベルをデータで示すものである。

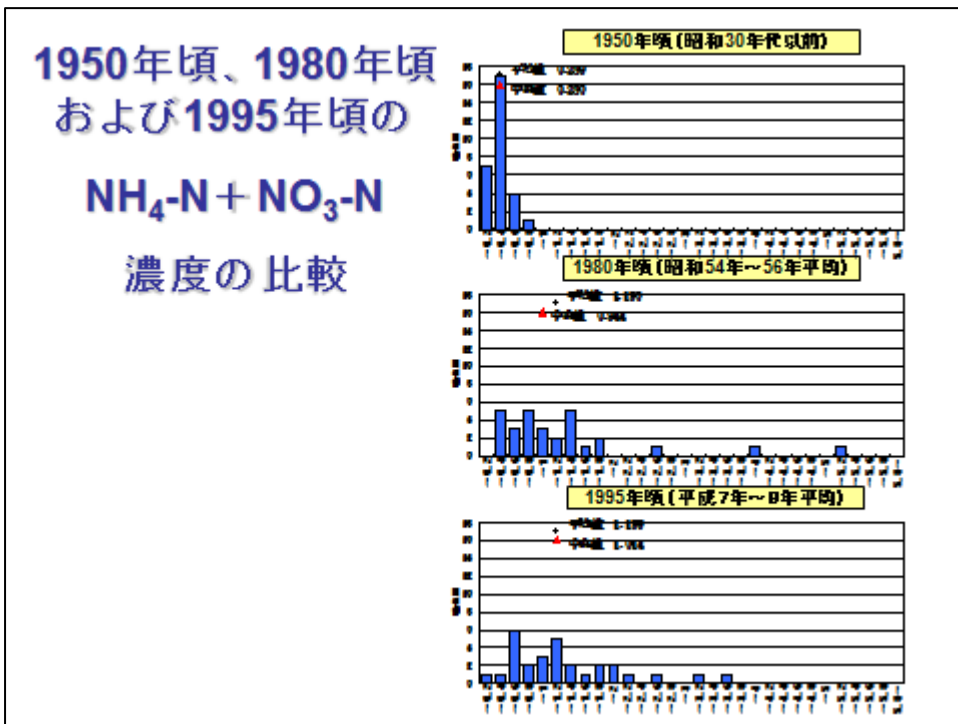


図1 河川水の窒素濃度の年代別変遷<sup>1)</sup>

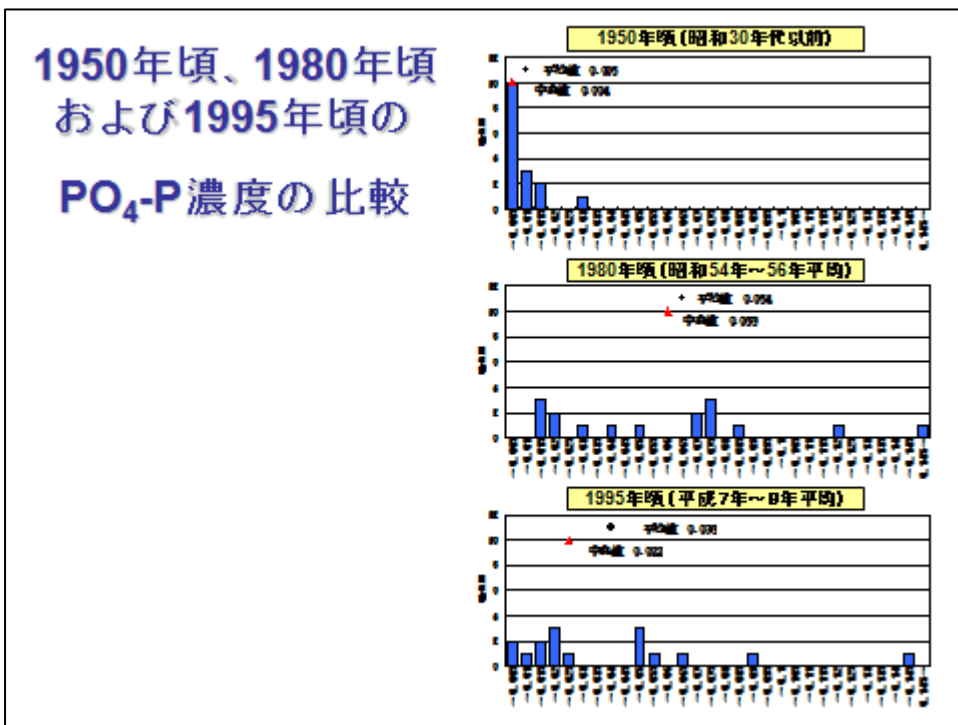


図2 河川水のリン濃度の年代別変遷<sup>1)</sup>

さて、現代ではきれいな水環境と同時に豊かな水環境を求める声が強くなっている。昭和 30 年、高度成長期に連なる公害現象が顕著になる少し前、大部分の水環境は随分ときれいであったと推察される。私の小学校時代、東京近郊の赤塚田園のため池ではメダカやドジョウが群れていた。また、多摩川では堰堤の水面下の石積み付近には魚が群れ、毛鉤でハヤやヤマベを釣っている人を多く見かけた記憶がある。当時の多摩川は清澄でしかも豊かであったと思う。

水環境をどのように回復していくのかということについては多くの議論があると思う。多摩川を例にとってみれば、近年数百万匹に上るアユの遡上が見られるようになってきている。多くの関係者がアンモニア性窒素濃度の減少との関連を指摘しており、下水処理水が平常流量の約半分を占める多摩川では、流域の下水処理場の高度処理運転との因果関係は明白である。

ここで内湾の保全に関する米国東海岸チェザピーク湾の取り組みを紹介すると、そこでは湾内の透明度を確保するために富栄養化対策ならびに微粒土砂流入対策が進められている<sup>3)</sup>。透明度を確保するのは、それにより海藻の生育面積を増やし、結果としてワタリガニ等の漁獲量を増やすという戦略が基本となっている。わが国でもアマモの生育地確保による海域環境の保全の取り組みがあり、これに少し共通するところがあるが、透明度の確保という基本戦略は明確でないように思える。

ここで、水域の富栄養化と生物生産ということを変えて考えてみたいが、生物生産が多い水域に共通することはいずれも水深がそれほど深くない場所であるということだ。水深が浅いということに因って、一度沈殿した栄養塩が再び上層の水塊に戻ってきやすい、即ち栄養塩の循環が起こりやすいという場が提供されることになる。このあたりのメカニズムについては種々議論のあるところかもしれないが、OECD 関連諸国の多くの湖沼の富栄養化データを基として、Vollenweider による湖沼の富栄養化評価指標は著名である<sup>4)</sup>。下記の式は湖沼の富栄養化程度は湖沼の面積当たりのリン負荷によるが、その程度は湖沼の水の回転率と水深で補正されるとしている。端的に言えば滞留時間が長く浅い湖沼ほど富栄養化現象が著しいとうことを表している。

#### Vollenweider モデル式

$$p = 0.368 \times L / (z \cdot P) \times 1 / (1 + 1/\sqrt{P})$$

ここに

p : 湖沼の平均 T-P 濃度 (mg/L)

L : 湖沼面積当たりの年間リン負荷 (lbs/ac/yr)

z : 平均水深 (feet)

P : 湖沼の水の回転率 (1/yr)

湖沼や内湾の水質保全即ち富栄養化コントロールを議論するとき、流域からの負荷量の低減に加えて内部生産量の評価が課題となる。流域負荷量を低減していても内部生産量がそのままであったりすると負荷量低減の努力が半減するからである。よって流域からの流入負荷を減殺すると同時に、底質から回帰してくる栄養塩を減少することが必要である。嘗て 1970 年代スウェーデン南部に位置する Trummen 湖 (100ha) で実施された底質の浚渫は、湖沼保全に対して底質の浚渫が有効な一方法であることを示した最初の事例として紹介されてきた<sup>5)</sup>。わが国においても諏訪湖における 1990 年代の水質回復が随分と顕著で、下水道整備による流域汚濁負荷の削減が功を奏した例として、

当水倶楽部の研究集会(「湖沼水質の保全と下水道」H21.10.20 <http://www.2lwater.jp/k1/2009au2/>)でも取り上げたが、この諏訪湖においてもかなり広範囲に浚渫が行われてきた経緯があり、水質改善に有効な対策であったことが想定される。

この諏訪湖において水質改善によりアオコの問題などが解決され水泳大会が復活するなど地元住民や観光客には好評であるが、湖のワカサギの漁獲量という点ではかなりマイナスの影響が出ているということである。ワカサギは水面を泳ぐ浮魚であるので、アオコが出て湖内の溶存酸素等の状況が少し悪くなってもむしろアオコという餌が増えた分だけ生長するように思える。

本論で私は水環境がきれいであることと豊かであることは相反しないのではないかとことを主張したいのであるが、これはその反証の事例である。しかし、ここで立ち止まって考えていただきたいのは、嘗ての諏訪湖の漁業生産の実態である。聞き及んだ話で定量的な議論を準備するには至っていないが、諏訪湖は嘗ては琵琶湖からセタシジミを持ちこんでかなりのシジミ生産量があったようである。加えてテナガエビなどの生産量もかなりあったようで、ワカサギなどの魚種に加えてシジミ、エビの漁獲も加えた漁業が行われていたようである。こうした良好な底質あるいは沈水植物の繁茂を基礎とした漁業生産、透明度が確保されたきれいな水環境での生産性がどのようであるかの検討が必要であるが、恐らくワカサギを主とした生産性と比肩できるのではないかと類推される。

振り返って、最初の瀬戸内海の貧栄養化の問題に戻ろう。

環境省は平成 17 年 5 月 16 日、中央環境審議会第 14 回水質環境部会に「第 6 次水質総量規制の在り方について」諮問し、これを基に専門委員会が設置され、約 1 年間の検討の結果が、平成 18 年 7 月 6 日に報告され、第 6 次総量規制に対する基本的方向が了承された。これらの部会、専門委員会の議論の概要は環境省のホームページに掲載されている

(<http://www.env.go.jp/council/09water/yoshi09.html>)。

平成 12 年 2 月、中央環境審議会より答申がなされた「第 5 次水質総量規制の在り方について」を踏まえ、平成 16 年度を目標年度とする第 5 次水質総量規制制度が発効したが、これまで COD 項目のみの総量規制に始めて窒素、リンの項目が加えられ、第 6 次総量規制はこれを継ぐものであった。

しかし、第 6 次の基本的なスタンスは、これまで東京湾、伊勢湾、瀬戸内海と 3 海域に分けて総量規制の施策を講じていたが、瀬戸内海の主要部分では既に環境基準が達成されているので、まだ達成されていない大阪湾の部分の切り離すことにより、瀬戸内海についてはこれまで以上の総量規制の強化はせず暫く様子を見るというものである。確かに環境基準が達成されているのであればそうした判断になるのかもしれないが、窒素、リンの総量削減にとりかかったばかりの時点で、随分と性急な基本政策の転換が行われたのは、漁業団体からの陳情によることが大きかったようである。漁業団体とりわけノリ漁業者は総量規制が進展すると海域の環境が貧栄養になり、漁獲量に甚大な被害を及ぼすということで第 5 次総量規制の始動当時から反対の動きを示していた。

瀬戸内海でのノリ養殖は戦後ノリ養殖技術の進展に伴って普及したらしい。例えば播磨灘においては昭和 40 年代は限られた生産量であったが昭和 50 年代はこの生産量が大きく上がった。当時、九州への出張の航空路線で、瀬戸内海の真ん中でもノリ棚らしきものが並んでいるのを機内から見て驚いたことがある。しかし、この地域のノリ養殖は平成年間に入ると色落ちなどの現象が起き生産が不安定になった。この時期、瀬戸内海流域では下水道が整備され生活雑排水の負荷が減少する

と同時に、水質総量規制の影響により窒素、リン負荷量は昭和 50 年代に較べると減少してきたのではないかと推察される。ノリの生産は栄養塩濃度に強く影響され、栄養塩があればあるほど品質の良いノリが多く生産されることになる。よってノリ漁業者にとって栄養塩の減少は死活問題である。

瀬戸内海の栄養塩のレベルは、貧栄養という用語を当てはめるのには相応しくない。瀬戸内海の大部分の海域に当てはめられている海域の窒素、リンの環境基準のⅡ (TN 0.3mg/L, TP 0.03mg/L) を辛うじてクリアーしているレベルであり、最近の水質動向を国土交通省の瀬戸内海総合水質調査のホームページ (<http://www.pa.cgr.mlit.go.jp/chiki/suishitu/index.html>) でみると、そうした状況が確認でき、海域によっては窒素、リン濃度が最近増加していることが伺える。

瀬戸内海は恐らく明治、大正、昭和前期の時代から豊かな海で、種々の海産物の漁獲量は多かったものと思える。その時代の栄養塩のレベルは現在よりずっと低かったのではないかと推察される。これは昭和 30 年当時の日本の河川水質の栄養塩レベルが前に述べたようにずっと低かったことから類推できる。陸地から供給される栄養塩が低レベルであるのにどうして豊かな海が生まれるのであろうか。それはまさに閉鎖性海域で水深が大きいという特性により、一度負荷された栄養塩がプランクトンとなり沈降し、それが底質を介してまた循環することにより、何度も何度も生物生産に寄与することによるのではないかと考えられる。

諏訪湖のワカサギ生産とのアナロジーで言うならば、瀬戸内海では十分な透明度を確保して海藻の生育条件を整え、底質も良好な状況を確保することにより、多様な海産資源を求めることを基本とすることがよいのではと思われる。ノリ産業ということのみに目を奪われ、場にそぐわない栄養レベルの追求をし、海域の透明度を犠牲にするようなことがあってはならないと思う。

わが国の人口は現在 1 億 2,700 万人と言われている。江戸時代の人口はそれに較べ約 3 千万人、し尿の農地還元など徹底した栄養塩のリサイクルで、辛うじて食料等の自給自足が成立していたとされている。現在、わが国では多量の窒素、リンの化学肥料を使って農業生産がなされているが、その食料自給率は 40% 程度であとは輸入に頼っている。原料の殆どを海外に頼っているリン肥料についてと同様、食料輸入に伴って供給される窒素、リンも多量にわが国に集積している。こうした栄養塩は畑土壌に蓄積したり、畜産の廃棄物負荷となったり、近年普及率の高まった下水道に集まってくる。こうした、わが国の食料生産、貿易量の窒素・リンの収支と下水道の関係を図 3、4 に整理してみた。この図から日本で生産あるいは輸入される食料に含まれる窒素・リン量の 40% 強が、下水道に集約されていることがわかる。この図は 2002 年度、下水道接続人口が 7,547 万人の時点のものであるので、この集約量は現在もう少し伸びている。

このような状況からも明らかなように、わが国にはかつてないほど栄養塩が集積している。窒素についてはこうした食料起源のものに加えて、工場や自動車の燃焼排ガスからの負荷も大きいというのでなお問題だ<sup>7)</sup>。

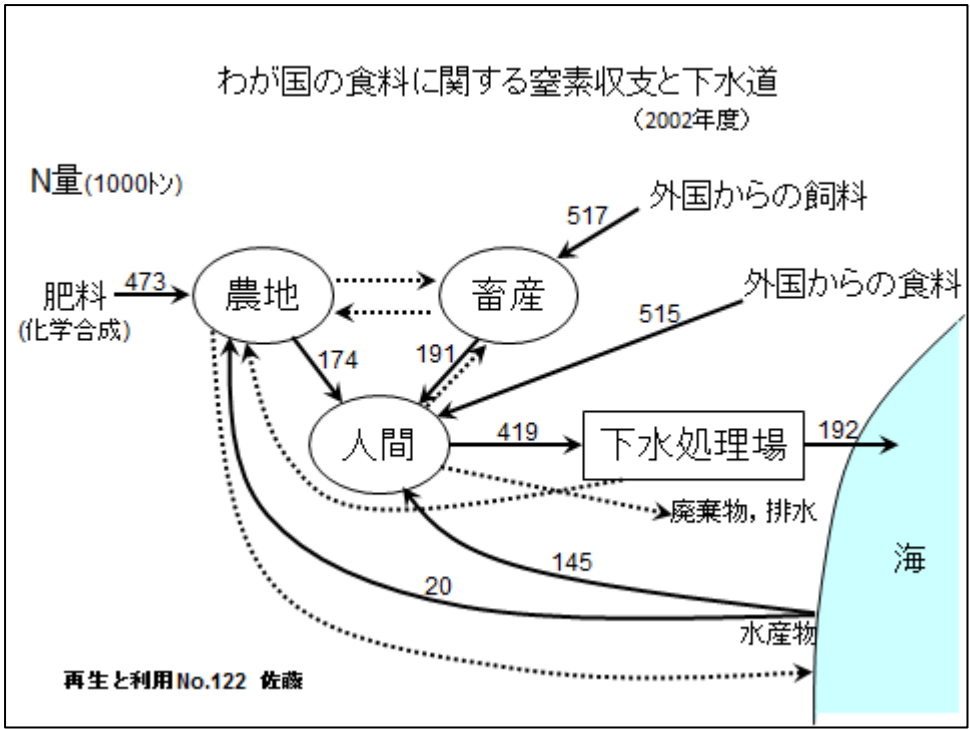


図 3 わが国の食料に関する窒素収支と下水道の関係<sup>6)</sup>

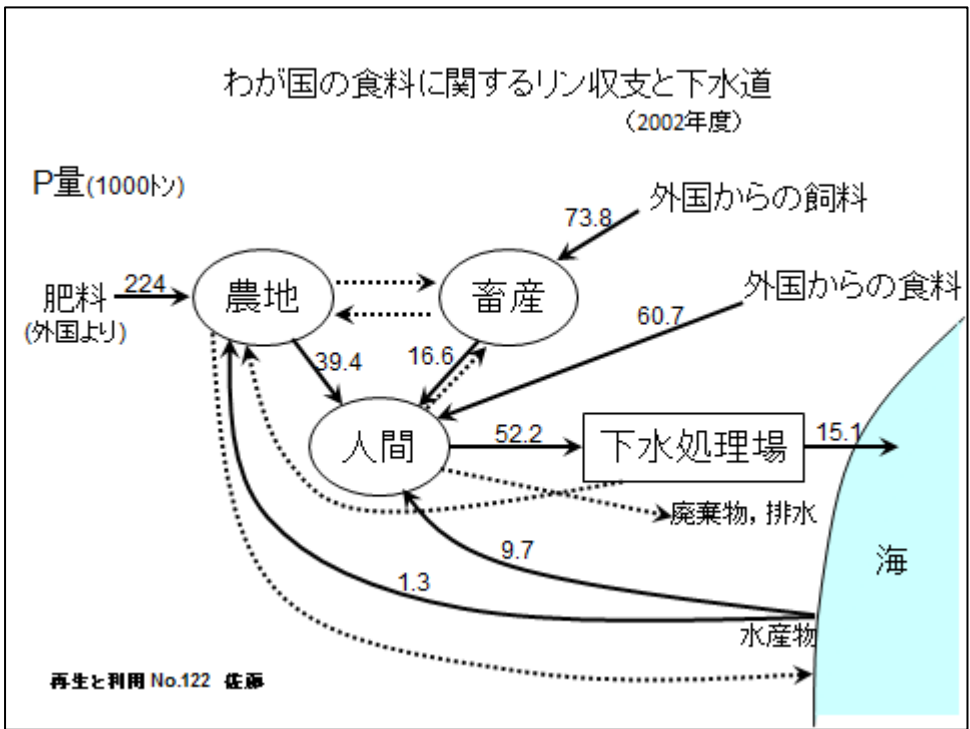


図 4 わが国の食料に関するリン収支と下水道の関係<sup>6)</sup>

以上のことを俯瞰して言えることは明白だ。こうした栄養塩の問題を解決するために、下水道の役割は見過ごすことができない。肥料や畜産廃棄物という農業分野に係る栄養塩問題は確かに比較するとより大きいだが、栄養塩の問題をできるだけ早く且つ確実に対策が取れるという観点からは、多分下水道システムの能力はより高いのではないかと思われる。下水処理の分野では富栄養化防止のための窒素・リン除去技術の開発は1960年代からかなり広範に取り組み、当初の物理化学処理の開発に続いて、活性汚泥処理を基盤とした生物学的窒素・リン除去技術が開発され、1970年代これが順次実規模の下水処理場に適用されてきたという歴史があるからだ。そして現在では、生物学的窒素除去プロセスにおける温室効果ガスとなる一酸化二窒素 N<sub>2</sub>O の挙動が研究され、その発生量を極力抑える運転方法も提示されている。

10年ほど前の当水倶楽部の研究集会「閉鎖性海域と下水高度処理—どこまでやるのか！」

(<http://www.21water.jp/k1/2007au/>) は以上に議論してきたことの端緒であった。今再びこれを問われれば、私はできるだけ下水高度処理を進めることが肝要であると答えたい。それには高度処理とエネルギーの課題、リン・窒素のリサイクルの課題、そして窒素処理と地球環境問題についてなお説明が求められるだろう。次回以降これらの問題を順次考察していきたい。

参考文献：

- 1) 大垣眞一郎監修、財団法人河川環境仮財団編：河川と栄養塩類—管理に向けての提言、技報堂出版 2005, pp179.
- 2) 小林 純：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、第48巻、第2号、pp.63-106, 1960.
- 3) 佐藤和明：栄養塩類等の流域マネジメントに関する米国事情調査、河川 2004-11月号、pp.89-92.
- 4) Vollenweider, R. A. : Scientific Fundamentals of the Eutrophication of Lakes and Flowing Waters with Particular Reference to Nitrogen and Phosphorus as Factors in Eutrophication, OECD, DAS,CSI 168, 27, Sept, 1968 (邦訳. 湖水および流水の富栄養化, 資源調査所資料第15号, 科学技術庁資源調査所, 昭.46.5)
- 5) Cook G.D., Welch E.B., Peterson S.A., Nichols S.A.(2005): Restoration and Management of Lakes and Reservoirs, third edition Taylor & Francis 591pp.  
20.8.1 Lake Trummen, Sweden pp.544-548.
- 6) 佐藤和明：わが国の食料生産、貿易量の窒素・リン収支と下水道の関係、再生と利用、Vol.33, No.122, pp.82-88, 2009/1.
- 7) Galloway J. N. et al. : Transformation of the Nitrogen Cycle: Recent Trends, Questions, and Potential Solutions, SCIENCE Vol 320 16 May 2008. pp.889-892.