

## 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、公共用水域の窒素、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。

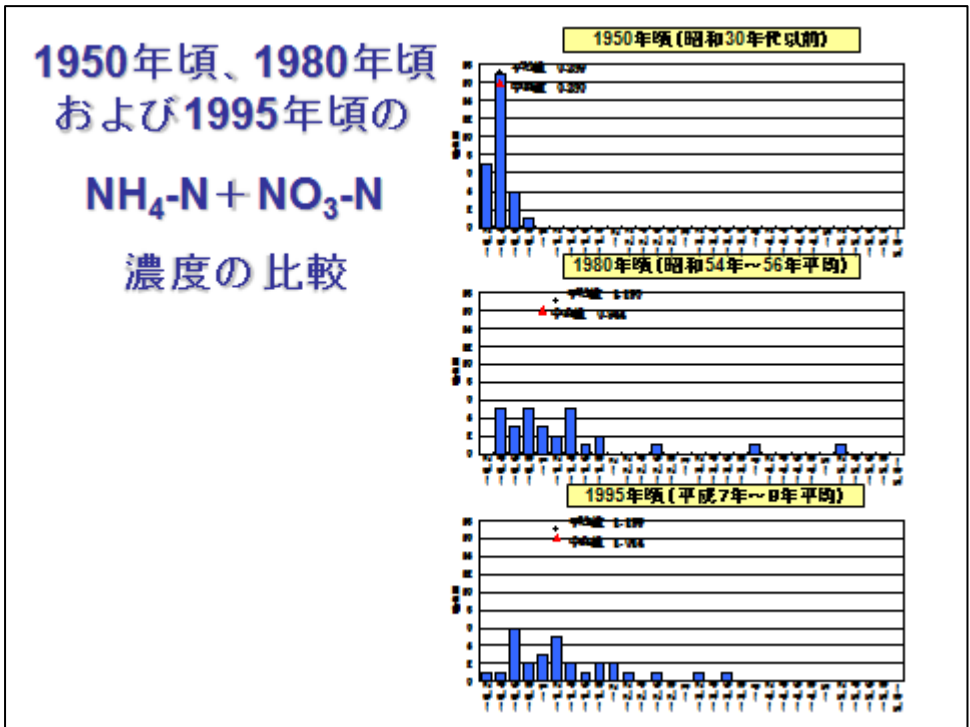


図1 河川水の窒素濃度の年代別変遷<sup>1)</sup>

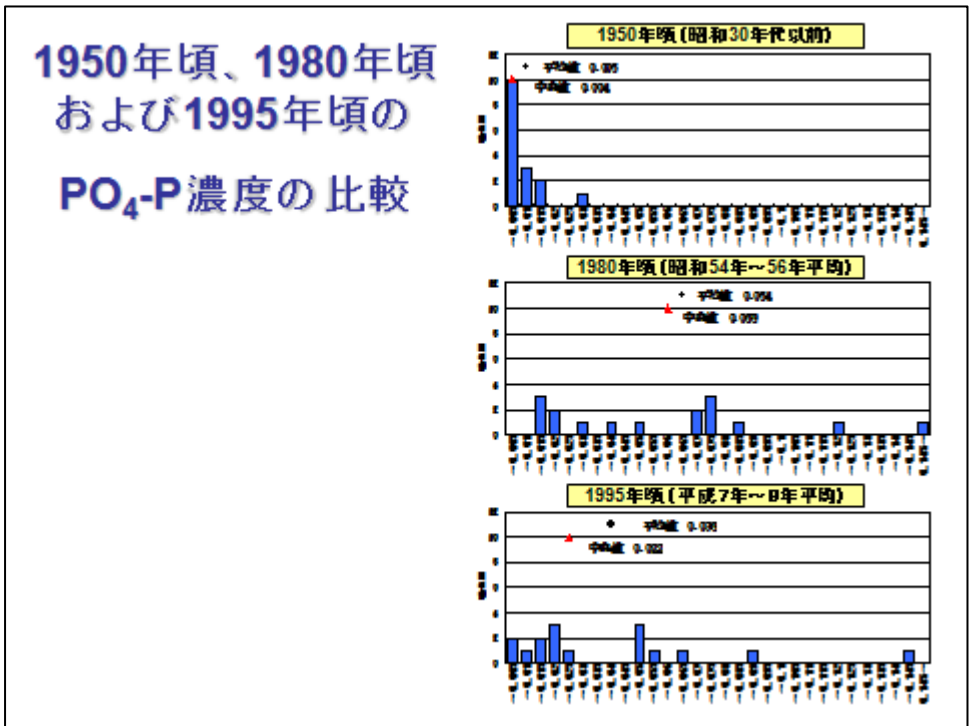


図2 河川水のリン濃度の年代別変遷<sup>1)</sup>

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く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を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>。

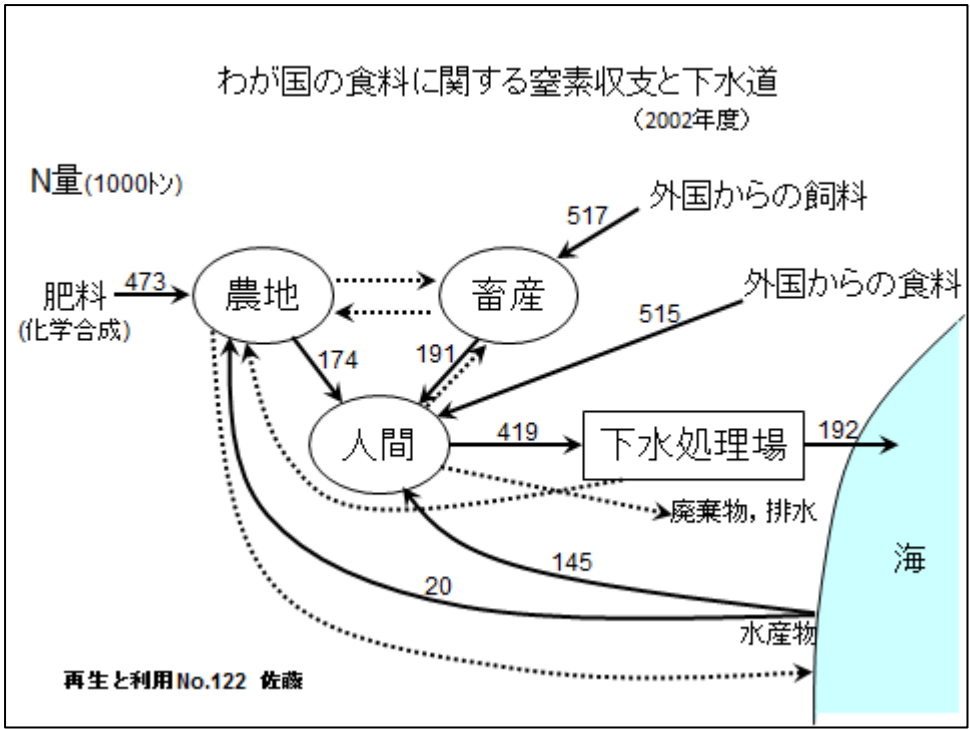


図 3 わが国の食料に関する窒素収支と下水道の関係<sup>6)</sup>

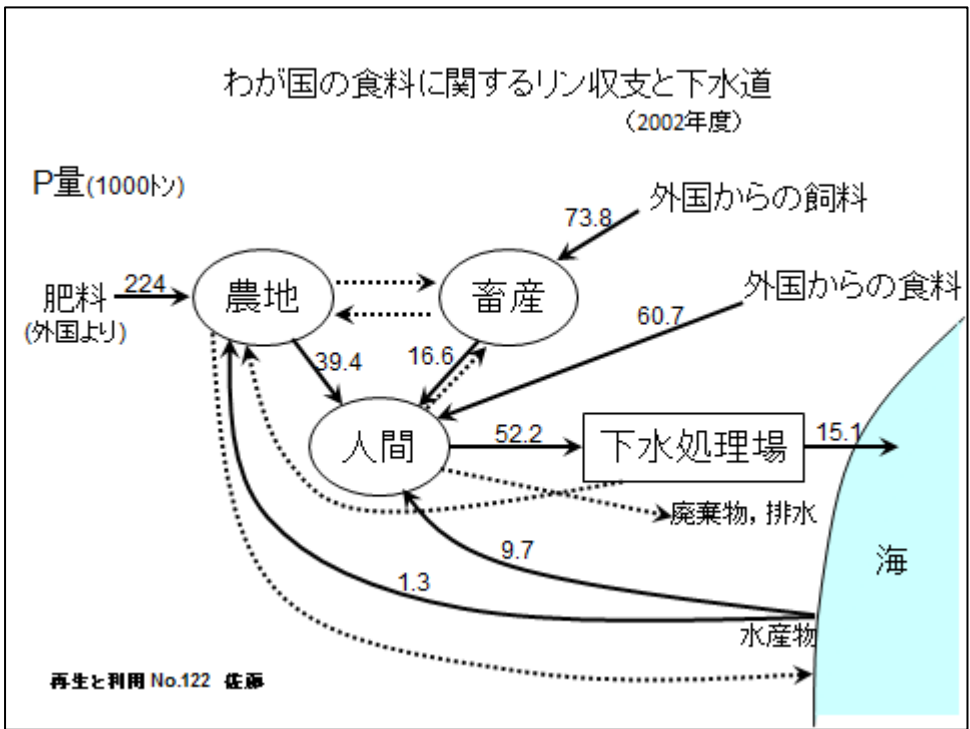


図 4 わが国の食料に関するリン収支と下水道の関係<sup>6)</sup>

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.

## 2. 下水処理とエネルギー

下水処理にはいったいどの程度のエネルギーが消費されるのであろうか。ある人は言うかもしれない。安定化池 (Waste Stabilization Pond) の技術を使えばエネルギーは要らないよ。またある人は言うかもしれない。嫌気性処理の技術を使えばエアレーションの動力を節約でき、通常の活性汚泥処理よりはよっぽど省エネルギーで下水処理することができるよ。そうかもしれないが、まず安定化池の処理場のことを考えてみよう。安定化池は図 1 に示すように最初に嫌気性池(Anaerobic pond)、次に通性池 (Facultative pond)、そして最後に熟成池 (Maturation pond) で構成されている<sup>1)</sup>。下水中の浮遊物は嫌気性池で沈殿しその有機分は底部で嫌気性分解を受ける。嫌気性池は最初沈殿池と嫌気性消化槽を兼ねているプロセスと考えられよう。そのために嫌気性池は他の池より深い水深で設計される。次の通性池ならびに熟成池で下水中の有機分は酸化分解を受ける。この時の酸素の供給は通性池では大気中の酸素の溶解、熟成池では大気からの供給に加えて藻類の光合成から生成する酸素が使われる。いわば太陽エネルギーによる酸素の供給である。このような自然エネルギーによるエアレーションを基本とする安定化池は随分と広い面積を必要とする。アフリカ諸国で用いられているマニュアルの設計諸元を基にすると下水 1 m<sup>3</sup>/日当たり 10m<sup>2</sup> と活性汚泥法の 0.5m<sup>2</sup> に比べ 20 倍ほどの面積を必要とする。一般の都市を想定すると都市面積の 5~10%もの面積を必要とする本処理法は自ずからその適用は限られてこよう。前記のマニュアルでは土地の価格が 5US\$/m<sup>2</sup> 以下の場合に他の処理法に対し優位となるとの記述がある。

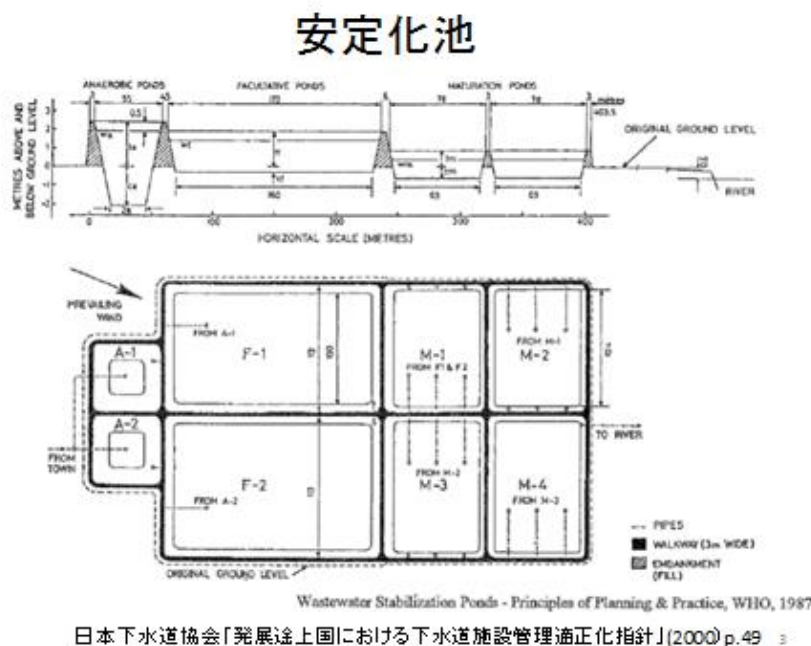


図 1 安定化池 (Waste Stabilization Pond) の構造

十分な土地があればエネルギーを使わない地球にやさしい下水処理ができる、という理解をされる方も多いのではないかとと思われるが、現在懸案となっている地球温暖化対策という観点からは必ずしもそう



とは言い切れないことを指摘しておきたい。それは、嫌気性池で発生するメタンである。メタンは温室効果を持つガスで二酸化炭素に対し 21 倍の温室効果を有すると理解されている。つまり、有機物を嫌気条件下で分解すると温室効果の高いメタンを生成してしまうということである。詳しい検討は後章に譲るが、下水を処理するときに、エアレーションをして有機物を二酸化炭素にするときの電力エネルギーに起因する温室効果ガス発生量より、その有機物の嫌気性分解の生成メタンに起因する温室効果ガス発生量の方がかなり大きいことが分かっている。

このことを少し先回りして解説すると、1m<sup>3</sup>の下水処理、通常の活性汚泥法で処理すると概ね 0.3kWh の電力が消費される。これは火力発電所の二酸化炭素発生量の原単位 0.555kgCO<sub>2</sub>/kWh を用いると 167 g CO<sub>2</sub> に相当する。一方、安定化池の場合下水中の半量の有機物が嫌気性分解されるとすると、流入水 BOD200mg/L とすると 1m<sup>3</sup> あたり 100 g の BOD が分解ガス化することになり、下水の嫌気性分解では大体等量のメタンと二酸化炭素が発生するので二酸化炭素 (分子量 44) 50g にメタン (分子量 16) 18 g が生成することとなる。地球温暖化係数 21 を用いると 18g のメタンは 378 g CO<sub>2</sub> となる。つまり地球にやさしい処理と一見考えられる安定化池では、通常の活性汚泥法の下水処理に対し 2 倍以上の温室効果ガスを発生するということになることが分かる。

以上のことは何を暗示しているのであろうか。それは下水処理の根幹は有機物を酸化して二酸化炭素にすることを基本とすべきであるということではないかと思われる。これまで下水処理の基本は下水中の有機物すなわち BOD を除去することと言われてきた。これは下水放流先の水環境の溶存酸素がゼロになるかあるいは極めて低くなれば、魚や水生生物に甚大な影響を及ぼすとともに臭気も発生するようになり、水利用、水環境の観点から望ましくない状況が生ずるためである。そして有機物汚濁がなお進行するとメタン発生を伴う嫌気性分解が始まる。わが国でも昭和 30 年代に遡れば東京の隅田川を始め至る所でメタンの発生を伴う水質汚濁は顕著であった。そして現在、発展途上国において同様の水質汚濁が進んでいる。

地球環境時代において、下水処理は水環境に溶存酸素を確保するため下水中から BOD を除去するというだけでなく、水環境における有機物分解に関しメタン発生を伴う嫌気性分解が卓越することがないようにするといった点が付加されることになるとと思われる。この観点から同様に、下水処理における処理生成物は二酸化炭素を基本にし、メタンが放出されないようなプロセス構成を考慮することが必要である。誤解のないようにはあるが、これは嫌気性処理が全てダメだと言っている訳ではなく、メタンは必ず捕集して燃焼 (酸化) し、二酸化炭素として排出することが必須であるということである。下水のような BOD が比較的低い排水の嫌気性処理では生成したメタンのかなりの部分が処理水中に溶解して残存するので課題が残る。また嫌気性処理排水はその他種々の還元性物質が存在し、これを後段で酸化処理しようとするとかかなりのエアレーションが必要となる。このようなことから嫌気性処理は濃度の高い一部の排水を除いて一般の都市下水への適合性は低いと考えられる。都市下水への嫌気性処理の適用は、有機物濃度の高い汚泥に対してむしろ適合すると思われる。汚泥の嫌気性消化 (メタン発酵) に伴う消化ガス発電の場合、メタンが熱源として回収利用され化石燃料消費に置き換えられるので、この場合はむしろ温室効果ガスの観点からプラス評価となる。

さて、下水処理でどの程度の電力を消費するのかについて、米国 WEF の上下水道処理施設の省エネルギーマニュアル<sup>2)</sup> ではその Appendix C に下水処理に使用される電力量見積りとして、処理プロセス (散水ろ床法、活性汚泥法、高度処理法 (硝化運転なし)、高度処理 (硝化運転あり)、処理規模別に、各ユ

ニット処理プロセス毎の消費電力量の見積値を示している。表 1、表 2 は、二次処理法（活性汚泥法）、と窒素リン除去高度処理法（生物学的硝化脱窒法に凝集剤添加プラス砂ろ過法）に対する単位消費電力量の内訳を示している。この中には消化ガス発電による電力回収量も示され、この回収量を差し引いた単位消費電力量も示されている。米国の水量単位ガロン当たりで表記されているので m<sup>3</sup> で計算し直した数値を示した。

表 1 二次処理法（活性汚泥法）に係る処理ユニット別消費電力量の内訳<sup>2)</sup>

	消費電力量 kWh/d					
	4,000m <sup>3</sup> /d 1 mgd	20,000m <sup>3</sup> / 5 mgd	40,000m <sup>3</sup> / 10 mgd	80,000m <sup>3</sup> / 20 mgd	190,000m <sup>3</sup> / 50 mgd	380,000m <sup>3</sup> / 100 mgd
主ポンプ	171	716	1402	2559	6030	11818
スクリーン	2	2	2	3	6	11
曝気沈砂池	49	87	134	250	600	1200
最初沈殿池	15	78	155	310	776	1551
散気エアレーション	532	2660	5320	10640	26600	53200
返送汚泥ポンプ	45	213	423	724	1627	3131
第二沈殿池	15	78	155	310	776	1551
重力濃縮タンク	6	15	25	37	75	138
浮上濃縮	na	na	1805	2918	6257	11819
好気性消化	1200	2400	na	na	na	na
嫌気性消化	na	na	1400	2700	6500	13000
ベルトフィルタープレス	na	192	384	579	1164	2139
塩素消毒	1	5	27	53	133	266
照明、空調	200	400	800	1200	2000	3000
計	2236	6846	12032	22283	52544	102824
単位消費電力量 kWh/m <sup>3</sup>	0.591	0.362	0.318	0.294	0.278	0.272
消化ガス発電回収量	na	na	3500	7000	17500	35000
正味消費電力量 換算単位消費電力量 kWh/m <sup>3</sup>	2236	6848	8532	15283	35044	67824
	0.591	0.362	0.225	0.202	0.185	0.179
	na:不適					

わが国においてはこうした下水処理に関する電力消費量の標準見積り値はこれまで示されてこなかったように思える。上記に見てきたように下水道統計等で公表されている実績値を基にその平均値等が専ら議論されてきた。しかしながら実績値の中には往々にして正当な値とは思われない値があるのが常で、これらを含めて平均値を求めてもそれにどのくらいの意味があるのか議論のあるところである。WEFのマニュアルに示されている各ユニットプロセスの消費電力量の数値は、各ユニットプロセスに装備されているポンプやブローアの機械類の定格出力 (kW)、負荷率、稼働時間を積算して求めたものと考えられる。このようにして求められた見積値が実際の消費電力値と比較されることにより、より確からしい消費電力量が定まってくるものと考えられる。

表2 窒素・リン除去高度処理法に係る処理ユニット別消費電力量の内訳<sup>2)</sup>

	消費電力量 kWh/d					
	4,000m <sup>3</sup> /d	20,000m <sup>3</sup> /	40,000m <sup>3</sup> /	80,000m <sup>3</sup> /	190,000m <sup>3</sup>	380,000m <sup>3</sup>
	1 mgd	5 mgd	10 mgd	20 mgd	50 mgd	100 mgd
主ポンプ	171	716	1402	2559	6030	11818
スクリーン	2	2	2	3	6	11
曝気沈砂池	49	87	134	250	600	1200
最初沈殿池	15	78	155	310	776	1551
散気エアレーション	532	2660	5320	10640	26600	53200
硝化	346	1724	3446	6818	16936	33800
返送汚泥ポンプ	54	256	508	869	1952	3757
第二沈殿池	15	78	155	310	776	1551
凝集剤添加	80	290	552	954	2187	4159
砂ろ過用ポンプ	143	445	822	1645	3440	6712
砂ろ過	137	247	385	709	1679	3295
重力濃縮タンク	6	15	25	37	75	138
浮上濃縮	na	na	2022	3268	7008	13237
好気性消化	1200	2400	na	na	na	na
嫌気性消化	na	na	1700	3200	7800	15600
ベルトフィルタープレス	na	228	457	689	1385	2545
塩素消毒	1	5	27	53	133	266
照明、空調	200	400	800	1200	2000	3000
計	2951	9631	17912	33514	79383	155540
単位消費電力量						
kWh/m <sup>3</sup>	0.78	0.509	0.473	0.443	0.419	0.411
消化ガス発電回収量	na	na	3500	7000	17500	35000
正味消費電力量	2951	9631	14412	26514	61883	120840
換算単位消費電力量						
kWh/m <sup>3</sup>	0.78	0.509	0.381	0.35	0.327	0.319
	na:不適					

WEF マニュアルによる二次処理（活性汚泥法）と高度処理（窒素・リン除去）に対する処理規模別の単位消費電力量をグラフとして示すと、図2 のとおりである。電力消費量に対する処理規模のメリットということでは、WEF マニュアルでは20,000m<sup>3</sup>/日以下の規模で規模のメリットが顕著に出ているが、20,000m<sup>3</sup>/日以上では特に二次処理で殆ど規模のメリットが出ないような関係となっている。

ここに茨城県下の下水処理場の単位消費電力量（2009年度下水道統計より）をプロットしてみた。WEFの単位消費電力グラフと、二次処理、高度処理ともかなり近い関係にある箇所もあるが、箇所によっては2倍の数値の差がでていいる。これは先に考察したような要因に起因するのであろうが、こうした処理場間のデータのばらつきは他の下水処理場の実測値の統計でも一般的に見られるものである。

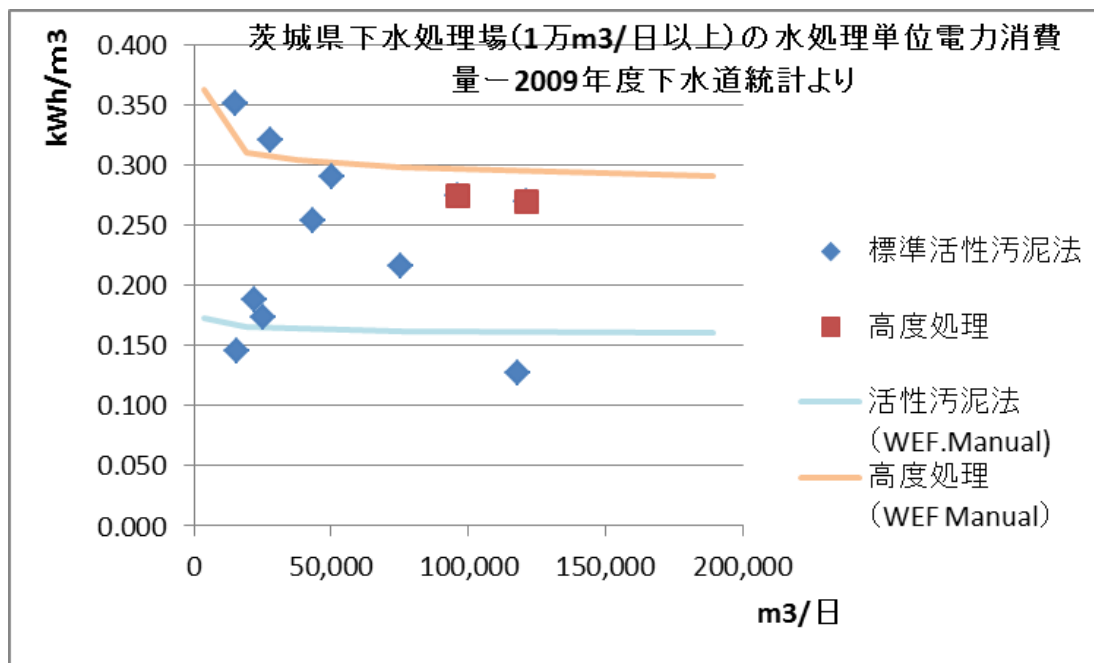


図2 茨城県下の下水処理場の水処理単位電力消費量とWEFマニュアルに示される単位電力消費量の関係

ここで一番着目したい点は、二次処理と高度処理の電力消費量の差である。例えば、200,000m<sup>3</sup>/日の規模の処理場では、二次処理の水処理の単位消費電力量0.161 kWh/m<sup>3</sup>に対し高度処理では0.291 kWh/m<sup>3</sup>の単位消費電力量となっている。その差は0.130 kWh/m<sup>3</sup>であるが、この内訳として窒素除去関係（硝化のためのエアレーションと返送汚泥量の増加）0.091 kWh/m<sup>3</sup>とリン除去関係（凝集剤添加、砂ろ過ポンプ、ろ過操作）0.039 kWh/m<sup>3</sup>に分けることができる。

筆者は、わが国の下水道統計データ（1996年度）を基に流入水量が設計施設能力の半量以上となっている箇所289処理場を対象に、標準活性汚泥法の平均的な単位消費電力量0.401 kWh/m<sup>3</sup>、この内、水処理施設については0.194 kWh/m<sup>3</sup>であることを示し、また、当時の窒素・リン除去の高度処理導入処理場5箇所を対象にして、その平均的な単位消費電力量は0.684 kWh/m<sup>3</sup>、水処理施設については0.362 kWh/m<sup>3</sup>であることを示し高度処理導入処理場の電力消費の内訳についてその調査結果を示した<sup>3)</sup>。これから類推できることは、窒素・リン除去の高度処理を適用すると、水処理施設に関してエアレーション量の増加と硝化液の循環ポンプ動力、嫌気槽、無酸素槽の攪拌動力の加算で、約0.17 kWh/m<sup>3</sup>の単位消費電力量の増加となるということである。しかし、こうした統計数値を使って論を進めていくことの危うさについては前項に指摘したとおりである。

標準活性汚泥法と高度処理法の電力消費量の比較ということでは、IWAタスクグループによって提示されている活性汚泥モデルを用いてそれぞれのエアレーション量を計算比較することができる。著者らはこの方法を用いて、わが国の標準的な下水水質、水温を前提として標準活性汚泥法と循環式硝化脱窒法の春夏秋冬それぞれの季節のエアレーション量を比較した<sup>4)</sup>。この比較により、循環式硝化脱窒法は標準活性汚泥法に対し、年間平均で1.25倍量のエアレーション量になり、標準活性汚泥法のエアレーション単位消費電力量0.20 kWh/m<sup>3</sup>に対し0.25 kWh/m<sup>3</sup>となった。循環式硝化脱窒法では、無酸素槽の

攪拌動力ならびに硝化混合液の循環ポンプについて上記に示した高度処理の実態調査結果を勘案して 0.08kWh/m<sup>3</sup> の数値を加えて 0.33kWh/m<sup>3</sup> の単位消費電力量になると評価された。前掲の WEF マニュアルの二次処理と高度処理の単位消費電力量、0.161kWh/m<sup>3</sup> と 0.291kWh/m<sup>3</sup> の値と微妙な差があるが、わが国では水温が比較的高いため標準活性汚泥法でも夏季等で部分的な硝化が生じ、それに起因するエアレーション量が生ずるということにも留意する必要がある。また高度処理でわが国の単位消費電力量が少し高く出ているがこれは循環ポンプ等の適切な設計でもう少し低く設定できる可能性がある。

以上の消費電力量のモデル計算や実態調査結果に基づいて考察してみると、標準活性汚泥法の水処理に対する単位消費電力量の実勢値 0.20kWh/m<sup>3</sup> に対し、硝化脱窒の窒素除去運転ではこれに 0.10kWh/m<sup>3</sup> の電力消費が加わり、0.30kWh/m<sup>3</sup> の単位電力消費量となるという関係を一般的な理解とすることができるといえよう。即ち下水処理において、BOD 除去に加えて窒素除去を達成する場合、0.10kWh/m<sup>3</sup> の単位消費電力量が嵩むこととなるが、こうした水処理に対するエネルギー消費を、水環境の改善あるいは温室効果ガスの観点も含めてどのように理解し評価していくのかは、現代の下水道技術者に投げかけられている重要な課題であると考えられる。

高度処理に必要なエネルギーを下水道自体の資源から回収していくというのは一つの解法であると考えられる。WEF の省エネルギーマニュアルの付表に示されるように、消化ガス発電による回収電力量は処理水量 1 m<sup>3</sup> 当たり概ね 0.1 kWh となっており、高度処理により嵩む電力量にほぼ匹敵している。わが国の状況を基にしたガス発電シミュレーションモデル計算でも、回収電力量は処理水量 1m<sup>3</sup> 当たり 0.096 kWh と試算されており<sup>5)</sup>、同様な結果を示している。

参考文献：

- 1) Mara D.D. et al. Waste Stabilisation Ponds – A Design Manual for Eastern Africa, ODA(UK) 1992.
- 2) WEF Manual of Practice No.32, Energy Conservation in Water and Wastewater Treatment Facilities, WEF Press 2009 pp. 400.
- 3) 佐藤和明：下水の高度処理と国土保全、土木研究所講演会講演集、土木研究所資料第 37271 号 pp.13-26. 2000.
- 4) Sato K., Goto M. and Gan C., Study of power consumption and GHG generation to control nitrogen in advanced wastewater treatment, presented to the IWA-ASPIRE Conference, Tokyo, Japan. 2011.
- 5) 佐藤和明：下水汚泥の嫌気消化法の機能改善に関する研究、土木研究所報告 172 pp.43-55. 1987.