

## 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。

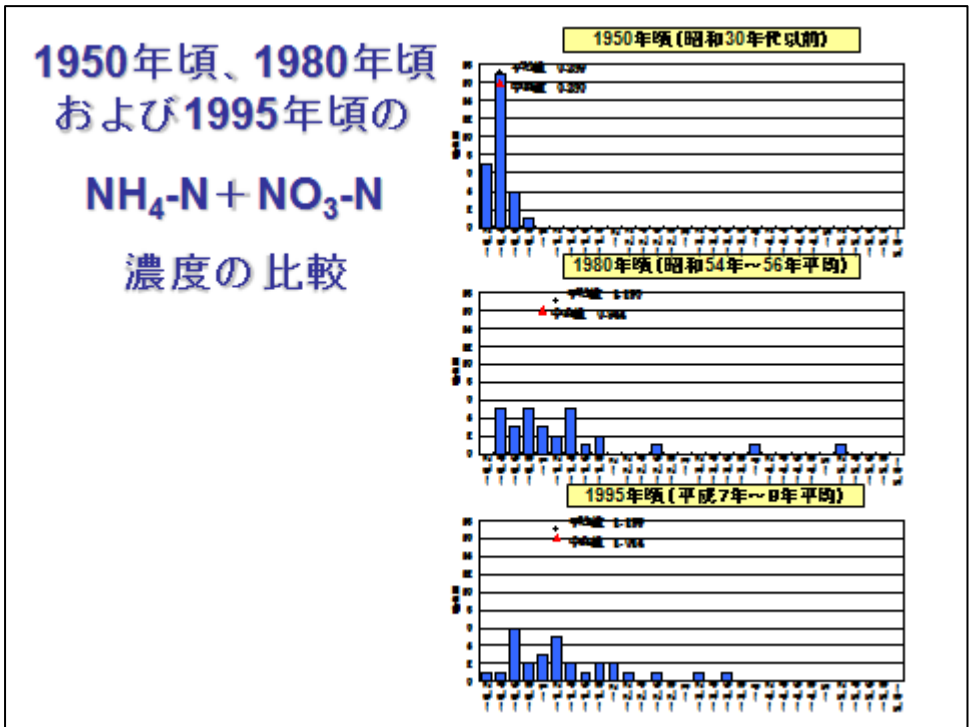


図 1 河川水の窒素濃度の年代別変遷<sup>1)</sup>

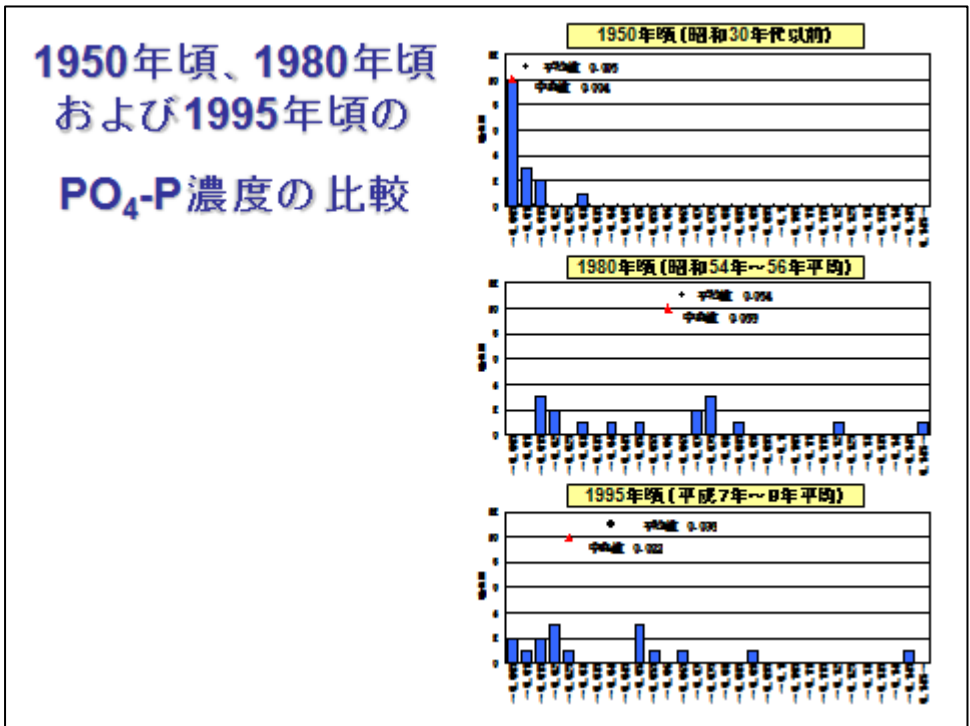


図 2 河川水のリン濃度の年代別変遷<sup>1)</sup>

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>。

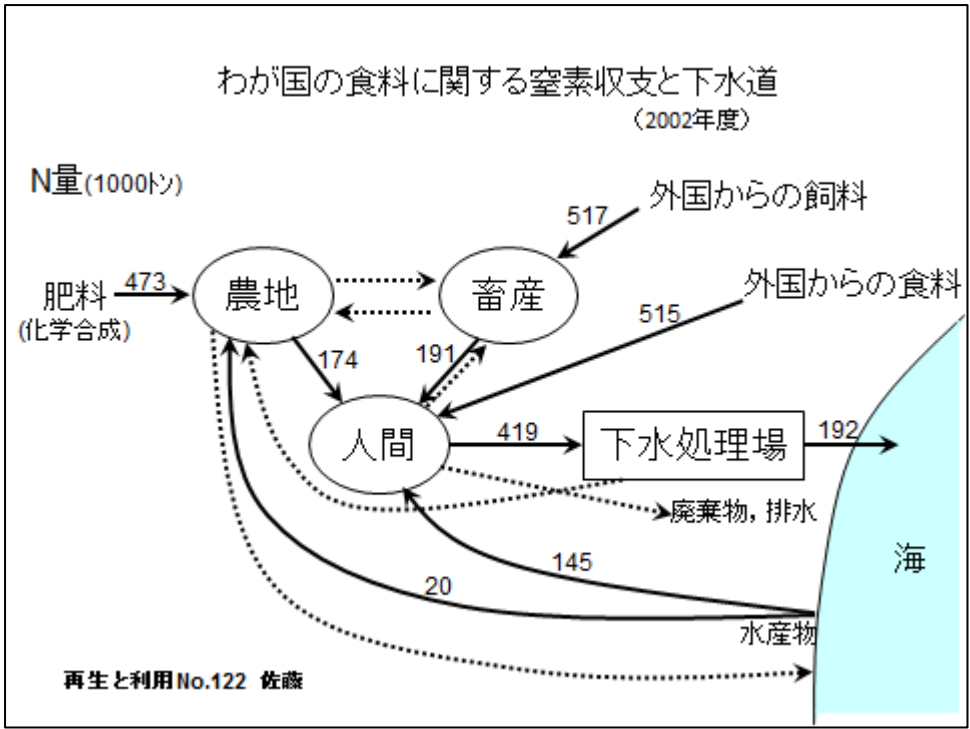


図 3 わが国の食料に関する窒素収支と下水道の関係<sup>6)</sup>

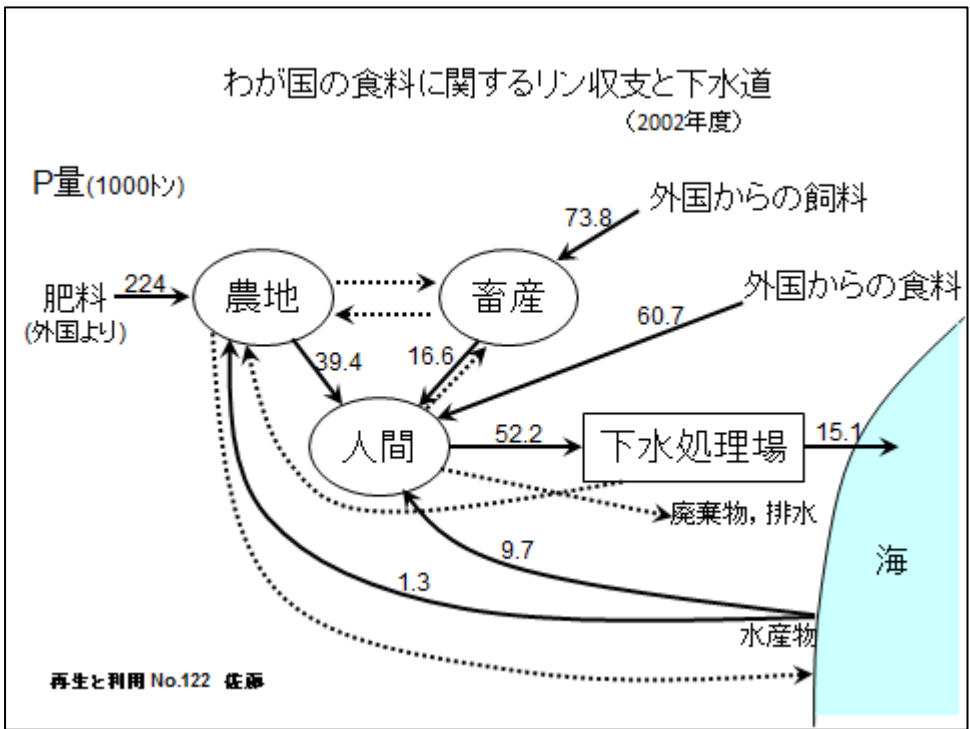


図 4 わが国の食料に関するリン収支と下水道の関係<sup>6)</sup>

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のが、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。

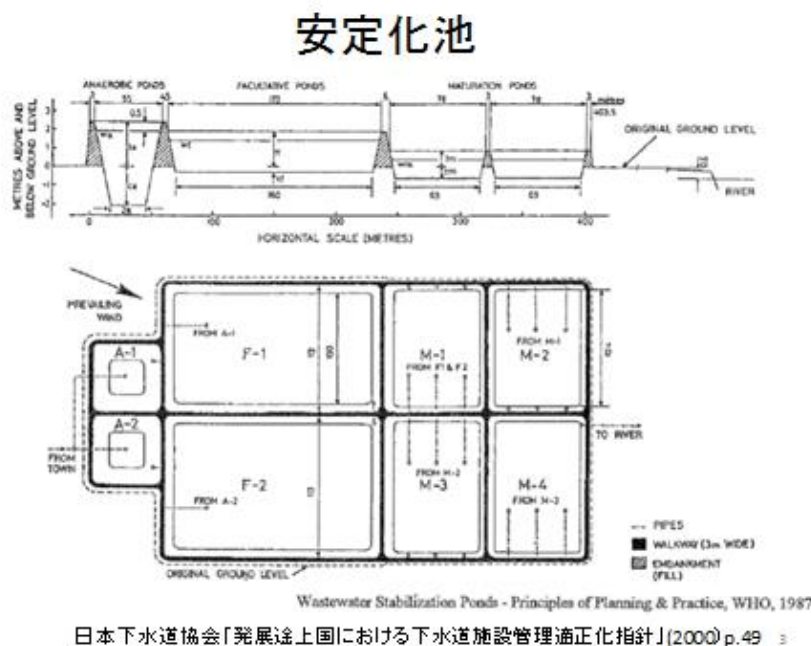


図 1 安定化池 (Waste Stabilization Pond) の構造

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 BOD<sub>200</sub>mg/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<br>1 mgd | 20,000m <sup>3</sup> /<br>5 mgd | 40,000m <sup>3</sup> /<br>10 mgd | 80,000m <sup>3</sup> /<br>20 mgd | 190,000m <sup>3</sup> /<br>50 mgd | 380,000m <sup>3</sup> /<br>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<br>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<br>換算単位消費電力量<br>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、高度処理ともに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。

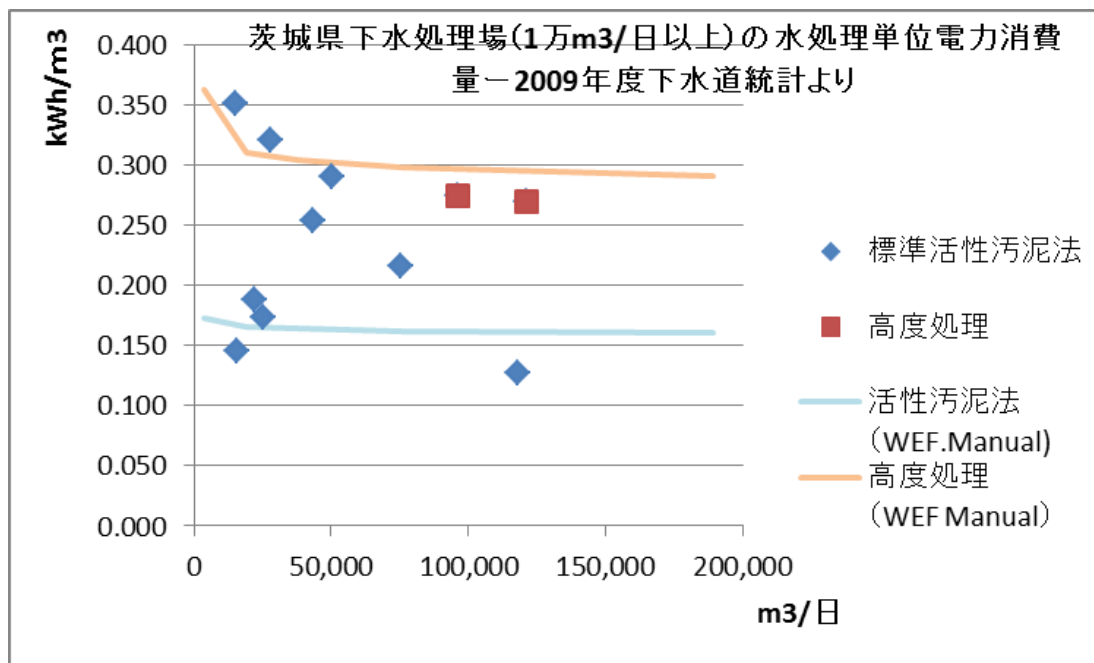


図2 茨城県下の下水処理場の水処理単位電力消費量とWEFマニュアルに示される単位電力消費量の関係

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.

### 3. リン・窒素のリサイクル

下水の主成分は有機物（BOD）と窒素・リンの栄養塩で代表される。BODは放流先水域の溶存酸素（DO）低下を防止するため、栄養塩は水系の富栄養化を防止するため、下水処理場で処理される。通常の活性汚泥処理による二次処理では、BODは90%以上除去されるが、窒素、リンについては30%程度しか除去されないとされてきた。そこで窒素、リンを除去するために活性汚泥処理に窒素・リンの除去機能を付加した生物学的窒素・リン除去の高度処理法が開発され、わが国でも順次適用されてきている。リン除去法である嫌気好気活性汚泥法は、活性汚泥法の前段に嫌気槽を設けることによりリン含有量の高い活性汚泥を馴養し、余剰汚泥としてリンを除去するものである。この前段に嫌気部分を設ける方法は活性汚泥のバルキング対策としても一般に適用されてきた運転方法であった。このような関係もあって、洗剤の無リン化が進み流入下水のリン濃度が低下した1980年代では、標準活性汚泥法の処理場でもリン除去率が70~80%に上るケースが多く出て来た。一方、窒素の除去については、エアレーション時間を十分確保して所定の汚泥滞留時間で運転することにより始めて窒素除去率を上げることができる。1980年代標準活性汚泥法107箇所を対象にして窒素、リン除去率を調べた資料<sup>1)</sup>によると、平均的な窒素及びリン除去率はそれぞれ45%ならびに61%であった。筆者は2002年度の下水道統計に示されている全国1810箇所の下水処理場の流量および水質データを基に窒素、リンの流入負荷量、流出負荷量を求めた結果、表1に示される関係を得た<sup>2)</sup>。このとき都道府県別データをみると、高度処理の普及率の高い滋賀県では窒素、リンの除去率はそれぞれ79%、97%であった。窒素、リンの削減率は当然、高度処理普及率に影響されるが、国交省がまとめている高度処理普及率の状況は図1のとおりである。表1に示された全国の下水処理場の平均的な除去率は、窒素54%、リン71%であるが、当時の10%強の高度処理普及率の関与もあることを理解しておく必要がある。

表1 下水処理場によるN, P負荷の削減 (2002年度)

|     | 流入負荷<br>t/年 | 流出負荷<br>t/年 | 削減率<br>% |
|-----|-------------|-------------|----------|
| T-N | 418,622     | 192,121     | 54.1     |
| T-P | 52,220      | 15,072      | 71.1     |

リン負荷については最近のデータを用いて同様な集計を行った結果があるので表2に示す<sup>3)</sup>。この表には表1に示した2002年度の数値も入れているが、近年のデータは特に流入水の水質データの欠損が多いのでこれを補正している。2002年度のデータも同様に欠損値の補正をした結果、少し数値が動いている。これからみて分かるように、リン負荷については下水処理場で既に平均して77%の負荷の除去が行われている。リンは処理をしても無くなるわけではないので、除去された量は全て汚泥に移行することになる。リンの回収利用については、一部吸着法や晶析法を除いて汚泥部分に移行したリンが対象となる。

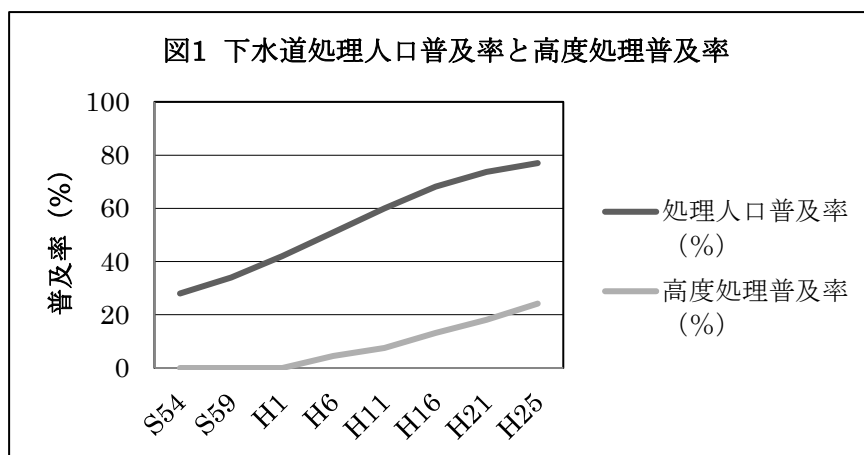


表2 下水処理場におけるリン負荷量の削減率の経年変化

|      | 流入負荷<br>t-P/年 | 流出負荷<br>t-P/年 | 削減率<br>% |
|------|---------------|---------------|----------|
| 2002 | 53,581        | 15,211        | 71.6     |
| 2005 | 55,845        | 12,993        | 76.7     |
| 2006 | 56,157        | 13,024        | 76.8     |
| 2007 | 54,977        | 12,822        | 76.7     |
| 2008 | 53,564        | 12,586        | 76.5     |
| 2009 | 54,097        | 12,207        | 77.4     |
| 2010 | 54,686        | 12,444        | 77.2     |
| 2011 | 55,670        | 12,569        | 77.4     |
| 2012 | 54,083        | 12,322        | 77.2     |

では窒素はどうかというと、流入下水の浮遊性物質に含まれていたものがそのまま汚泥部分に移行するものがあるが、溶解性の形態で流入してくる窒素成分の方が断然多く、一部活性汚泥の増殖に利用される外は、通常の二次処理ではそのまま流出してしまう。それなので下水中の窒素成分が汚泥に移行する割合は恐らく3割以下になっているのではないかと考えられる。汚泥にトラップされた窒素成分は、嫌気性消化処理の分解過程でかなりの部分アンモニア性窒素となり溶解してくる。この脱離液は汚泥返流水として水処理系に戻され再度処理されることになるが、一部の汚泥集約処理場ではこの脱離液にアルカリ剤を添加しpHを上げアンモニアガスとして気相に飛ばし（アンモニアストリッピング）これを硫酸などの酸で固定回収するプロセスを適用している。しかしこれは積極的な窒素回収というより除去プロセスの構成上の要請によるものである。汚泥を焼却すれば、リンは焼却灰中に残存するが、窒素は無くなる。排ガス中に移行した窒素分は完全燃焼で窒素ガス（ $N_2$ ）となるが、通常一部 $NO_x$ や温室効果ガスの $N_2O$ となるので、前者は排ガス処理で、後者は燃焼温度調節により濃度低減を図っている。このように、窒素成分については、汚泥コンポスト利用として有機物、リンの成分と一緒に肥料成分として利用していく方法はあるものの、窒素成分そのものを下水あるいは汚泥から回収していく方策については現実の取組みとして行われていない。MAP法によるリン回収では窒

素成分が同時に回収されるが、対象となる消化汚泥脱離液中の窒素濃度はリン濃度より数倍高いため、リン成分が90%近くで回収されるのに対して窒素成分は10~20%のオーダーに留まる。このように窒素に関して、現下の下水処理の取組みとしては、水処理における生物学的な脱窒法、もしくは汚泥焼却による窒素ガスへの変換、いずれも回収除去ではなく分解処理による対応が主流となっていると理解される。

下水道におけるリン、窒素のリサイクルを考えるにあたって、その成分の出自を見ても必要がある。下水道への栄養塩の負荷量の第一は家庭排水で次に工場排水等産業系の排水由来である。わが国における家庭排水の負荷量原単位の数値は、下水道の基本計画、流域別下水道整備総合計画（流総計画）の策定指針に示されてきた。1975年（昭和50年）の最初の流総指針の数値から近年の2015年（平成27年）のものまでのBOD,T-N,T-Pの負荷量原単位の数値の推移を図2に示す。これを見ると栄養塩負荷に関しては、2003年（平成15年）の第7版の流総指針で、リンの原単位が大幅に見直されており、それまでの1.8g/人・日の値から1.2g/人・日となった。これはそれまで用いられてきたリン酸をビルダーとするリン含有合成洗剤の無リン化が徹底したことによってである。また、この第7版より、家庭排水の汚濁負荷量原単位の算定に当たって、家庭系排水が主と考えられる10箇所の処理場の流入負荷量をベースとしていることが説明され、そのデータの平均値、標準偏差が示されるようになった。表3にこの第7版の家庭排水負荷量原単位の表を示す。ここで注意をしたいのは、各汚濁負荷量のし尿と雑排水の内訳である。し尿に関する数値は1980年の第3版で改訂されたが、その後の版ではその数値を踏襲してきている。BOD負荷についてはし尿に対し雑排水の負荷が2倍程度になっているが、窒素、リンについてはし尿起因の負荷が断然大きくなっている。つまり私達の食生活の結果として排出されるし尿、即ち下水道ではトイレ排水が窒素、リン負荷の大半を占めるというものである。

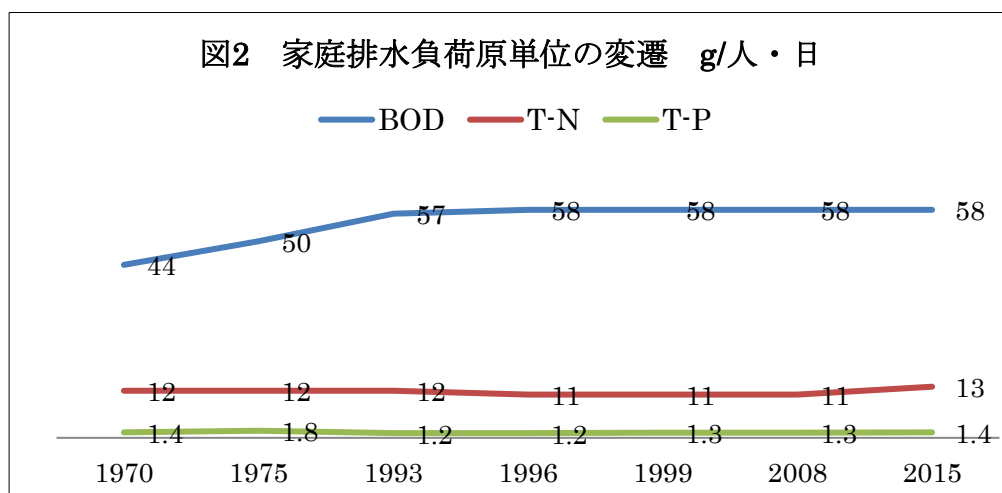


表3 1人1日当たり汚濁負荷量の参考値（流総指針 H5）



|                   | 全量<br>(平均値) | (標準<br>偏差) | データ数 | 内訳       |     |
|-------------------|-------------|------------|------|----------|-----|
|                   |             |            |      | し尿       | 雑用  |
| BOD <sub>5</sub>  | 57          | 13         | 43   | 18       | 39  |
| COD <sub>MN</sub> | 28          | 6          | 29   | 10       | 18  |
| SS                | 43          | 15         | 31   | 20       | 23  |
| T-N               | 12          | 2          | 7    | 9        | 3   |
| T-P               | 1.2         | 0.3        | 8    | 0.9      | 0.3 |
|                   |             |            |      | 単位：g/人・日 |     |

わが国では下水道の整備が随分と遅れたこともあり、し尿処理システムがこれを補うものとして発展してきており、し尿処理場はBODや衛生学的指標の大腸菌を高率的に除去するのみならず、窒素、リンについても90%除去レベルの技術が適用されている場合が多い。そのような状況から、窒素、リンの観点でみるとし尿処理場で対応した方が有利ではないかといった議論が出たこともあったが、住民が水洗トイレを渴望し不完全なし尿浄化槽（単独浄化槽）が急速に普及し、家庭排水による汚濁の問題がなお大きくなったのが現実であった。こうした状況を踏まえ、下水道が無理なく整備できる場所は下水道で、その他の区域は雑排水も処理できる合併式浄化槽で対応していくことが、国の基本方針となった。しかしこのし尿に関する問題は環境を重んじるグループの間では依然燻っている課題である。世界へ目を転ずれば、排水処理システムの分散化を基本として、省エネルギー的な処理システムと処理水の利用および有価物の回収を目指すDESAR（Decentralized Sanitation and Reuse）が近代上下水道システムにとって代わるべきであるとする論調は根強い。確かに近代上下水道システムを開発途上国に適用していくには大きな困難が伴うが、都市域における問題の大きさは先進国と同じである。分散化したシステムが本当にうまく適用できるのか、実証を伴った十分な検討が必要である。このDESARについては、その概念、システムそしてその実施事例を紹介する本が出版され、その翻訳本<sup>4)</sup>が出ている。この本の中では、家庭排水の起源としてトイレ排水をし（尿）と尿に分別し、また雑排水を風呂、台所、洗濯にそれぞれ分けて汚濁負荷量の内訳を示した表が掲載されている。元の表は一人年間当たりの負荷量で示してあるが、わが国とも比較しやすいように1人1日当たりの負荷量に計算しなおして表4に示す。この表からも家庭排水中の窒素、リン負荷はし尿に大部分起因すること、それもイエローウォーターと分類される尿に多いことが示されている。ここからし（尿）と尿を分離してその有効利用を図る尿分離式トイレの概念が作り出される。本の中では、そのシステム構成と実践的経験について記述されている。住民にし（尿）と尿を分離できる便器を使用してもらおうケーススタディが出てくるが、尿を貯留しこれを収集するというシステムは簡単に普及できるものではないようだ。し尿という廃物を早く水に流して自由になりたいという人間の基本的要求と相容れないように思えるからだ。

表 4 家庭排水の典型的な汚濁負荷の内訳 [g/ (人・日)]

| 種別  | 内容           | BOD | T-N | T-P |
|---|--------------|-----|-----|-----|
| クラシック   | トイレ,風呂,台所,洗濯 | 60  | 14  | 2.5 |
| ブラック  | トイレ          | 25  | 12  | 1.9 |
| グレイ   | 風呂,台所,洗濯     | 35  | 2   | 0.5 |
| ライトグレイ  | 風呂,洗濯        | 1.8 | 1   | 0.3 |
| イエロー  | 尿            | 5   | 11  | 1.4 |
| ブラウン  | 糞便           | 20  | 1   | 0.5 |
| 出典：Decentralized Sanitation and Reuse Table 4-13 より計算 |              |     |     |     |

わが国では、他国に類を見ないほど、し尿の農地還元が広く行われてきた歴史がある。仏教の関係かあるいは米食の関係か、畜産というものがあまり発達してこなかったことにも関係していると思われる。し尿の農地還元の起源は明らかではないが、12世紀後半頃には既に全国的に普及し、江戸時代（1603～1868）にはさらに拡充し、し尿は非常に価値のあるものとして扱われ、し尿を媒体とした都市と農村の独特な関係が生まれた。そしてし尿の農地還元システムは、日本独特の文化を形作ってきたとしている<sup>5)</sup>。このように千年に近いし尿リサイクルの歴史を持つ日本民族の末裔である我々であるが、循環型社会への貢献のためし尿タンクを再び各戸に付けてくださいといわれても今は誰も相手にしてくれないであろう。古代ローマの時代に遡って発達してきた上水道、下水道は現代都市において必須のインフラである。私たちはこの下水道インフラを基本として循環型社会を構成し環境保全に貢献していかなければならないと思う。

下水道からのリン資源回収に関しては、少し前に「下水道におけるリン資源化の手引き」<sup>6)</sup>が国交省から出ているので、これが大いに参考になると思う。この手引きにはまだ紹介されていない事例として、日本磷酸（株）による磷酸製造原料としての下水道焼却灰のリン鉱石一部代替え使用がある<sup>9)</sup>。当社では愛知水と緑の公社と焼却灰利用の契約を締結し、焼却灰貯蔵設備を工場内に建設後、平成25年度より流域下水道の矢作川浄化センターの焼却灰を対象に実用運転に入った。焼却灰受け入れに当たっては現行のリン酸製造工程の製品（リン酸液と石膏）の品質を確保するため、焼却灰の要求品質をP<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 30%以上、Pb 60mg/kg以下と定めている。受け入れ焼却灰の性状としては乾灰（ジェットパック車運搬）、受入量としてはリン鉱石比2～3%を考慮して3000t/年、引取条件は有償（輸送費は公社持ち）としている。これまで約100t/月で安定的に使用している。もう一つリン資源回収に係る新しい動きとして、東京都下水道局が打ち出している分離焼却の導入実施がある<sup>10)</sup>。下水汚泥焼却灰をセメント原料とする場合はリン成分がセメント性状に悪影響を及ぼすことが知られている。初沈汚泥と余剰汚泥ではリン含有量として2倍以上の差があるので、初沈汚泥の焼却灰をセメント原料、余剰汚泥の焼却灰をリン原料と分別することができれば、資源の有効利用という観点から極めて合理的である。この例に限らず、下水汚泥の資源利用という観点からは、初沈汚泥と余剰汚泥の性状、成分の差に着目していくことでよりよい結果に結びつくことがある。

リンについては2008年の世界的な価格の高騰（リンショック）の影響を受けて、その状況が大きく変わってきたと言われている。2015年に設立された早稲田大学リンアトラス研究所では近年のリンに係るわが国のマテリアルフローならびに経済フローを描き直す作業を始めており、その一端が「再生と利用」誌に紹介された<sup>6)</sup>。この中で紹介されるマテリアルフロー図は、数値はまだ確定値ではないという注書きがついているが、下水汚泥の42,000t-P/年に対し、家畜糞尿94,000t-P/年、食品廃棄物32,000t-P/年、製鉄スラグ114,000t-P/年の数値が出ている。下水汚泥のリン資源としての数値はそれなりに大きい（硫酸、肥料、リン鉱石で計16万t-P/年）、他にもリサイクル資源があり、それが競合するということは常に頭に入れておかなければならない。また同報文ではリン資源に関する世界の動向も解説されている。USGS（米国地質調査所）のデータに基づいて、リン鉱石の耐用年数（経済埋蔵量÷年間採掘量）を計算すると260年となり、とりあえず今世紀中の枯渇はないようだ。しかし、リン鉱石の埋蔵はモロッコなど地政学的に問題の多い個所に集中すること、また品質の良いものは既に採掘され、リン鉱石の品質の低下が顕著であるようだ。現在、多くのリン鉱石にはカドミウムやヒ素などの有害重金属類やウランなどの天然放射性物質が含まれている。そして厄介なことに世界最大の経済埋蔵量を誇るモロッコのリン鉱石が、カドミウムと天然放射性物質を多く含んでいるという。

リンアトラス研究所の大竹客員教授は、欧州で起きている新しい循環型経済（Circular Economy）への動きと、2016年の欧州肥料法の改正をめぐる動きを以下のように解説している<sup>8)</sup>。

「2014年以降、欧州ではEU全体の経済改革として直線型経済から循環型経済への移行が頻繁に叫ばれるようになる。循環型経済では、生産物、原料および資源を可能な限り長期に使用し、廃棄物の排出量を最小化することにより、持続可能性、低炭素化および資源利用効率において競争力のある経済を発展させる。廃棄物発生量の最小化では、これまでの廃棄物を二次資源として循環再利用を可能にすることを長期的なターゲットとする。二次資源を経済にフィードバックすることで経済成長を資源、エネルギーおよび環境の制約を受けない産業の育成に寄与することが期待された。そしてこの循環型経済への関心の高まりの中で、欧州委員会は2014年5月にリン鉱石を20の戦略物質（critical materials）の一つに加えることを決定する。

2016年3月に欧州委員会より発表された欧州肥料法改正案は、2016年5月12日まで意見公募が行われ、2017年1月現在欧州議会において審議中である。今回の肥料法の改正は、これまでの天然資源に依存した化学肥料を直線型経済の産物として、循環型経済の新時代に適合する未利用資源を有効活用したイノベーション肥料（Innovative fertilizer）のための市場を開設するねらいがある。改正案のポイントは以下の通り。

有機肥料および二次資源を利用したイノベーション肥料が、既存の化学肥料と対等に戦える市場を構築する。改正法の規格を満たす肥料にCE（Circular Economy）マークを与える。最大のねらいは、家畜糞尿や食品廃棄物などのbiowaste（下水汚泥は含まない）を活用した肥料の欧州共同市場を開設することであるが、EU加盟各国の国内のみで流通させる肥料は、各国の肥料法の規定を満たせばこれまで通り販売できる。したがって、下水汚泥の肥料利用を認めている国では、汚泥肥料等も引き続き国内で流通することになる。リンのリサイクルへの関心が高まっている今が、biowasteの肥料化を推進する好機と判断できる。有機肥料にも化学肥料

と同様に品質等の規格を定め、より安全で安価な肥料を提供する。例えば、有機肥料のカドミウム規制値は 1.5 mg/kg 乾重量とし、5%以上の P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> を含む場合無機肥料（リン酸肥料）は 60 mg/kg P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> であるが、12 年後には 20 mg/kg P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> まで引き下げる。コンポストに使用できる biowaste の中に下水汚泥や産業汚泥は含めない。肥料登録等の事務作業の簡素化も図る。」

以上の法改正が通れば、モロッコ産のリン鉱石は実質市場から締め出されることになる。ある意味ではこれがこの法改正の意図で、それだけモロッコ起源の化学肥料に対する危機感が一般にあると考えられる。大竹教授は、こうした循環型経済への指向と欧州肥料法改正へのロジックをまとめた報告書の代表的なものとして、以下の二つを挙げている。一つは The Global Partnership on Nutrient Management(GPNM)が 2013 年に発表した報告書「Our Nutrient World-The challenge to produce more food and energy with less pollution」<sup>11)</sup> および 2016 年 3 月に RISE Foundation が出版した解説書「Nutrient Recovery and Reuse (NRR) in European Agriculture」<sup>12)</sup> である。これらのレポートを一読して感じることは、食料増産のために施用された窒素肥料、リン肥料が原因で窒素、リンの環境への漏出が生じ、地球上至る所で富栄養に関する環境問題が生じ、人への健康障害を引き起こすと共に、地球温暖化の原因物質となり、生物の多様性にとって重大な危機を与えているという認識が重ねて書かれているということである。前者のレポートでは本論の序で紹介した Rockström らによる地球システムの限界 (Planetary boundaries) の論も丁寧に紹介されている。

翻ってわが国の場合、この窒素、リン過多の問題がどの程度の危機感をもって語られてきたのであろうか。一時は湖沼、ダム湖の富栄養化による利水障害が大きな問題であった時期があったが流域負荷への下水道等の対策やダム湖内の植物プランクトンの増殖抑止対策あるいは高度浄水処理を適用するなどにより、かなりの部分問題の解決がなされて来たように考えられる。また、窒素に起因する大気汚染については窒素酸化物 (NO<sub>x</sub>) や光化学スモッグの問題は依然として存在していると思われるが PM 問題などに隠れてしまっている感が強い。しかし、そういう中で窒素に関する流域管理という観点から現代に生じている問題とその対策まで論じた研究成果が古米ら<sup>13)</sup> により著書としてまとめられている。これまで河川流域の栄養塩管理については下水処理場等事業所からの点源発生源や田畑等からの面源発生源の負荷を対象にしていたが、大気経由で負荷される窒素負荷が無視できないほど高く、家畜排せつ物、自動車排ガスの管理まで視点に加える必要性を説いている。また同時に河川上流域でも大気降下物の影響で森林の窒素飽和現象が生じ上流域の河川水質が富栄養化の目安となる濃度を超えるケースが出ることなどを紹介している。

わが国は海域に囲まれた島国であるので、上掲のレポートに示される広域的な窒素汚染問題は出にくい環境にあるかと思われるが、それでも降雨中の窒素濃度の増加や硝酸濃度の高い地下水問題など随所にその影響は確実に出ています。欧州では以前は大気汚染に関係する酸性雨問題が大きく取り上げられていたが、現在は窒素、リンの栄養塩に起因する水域の富栄養化あるいは地下水の窒素汚染を含めた広域的な窒素汚染がより深刻な問題となっているように思える。そしてこの問題は農地における肥料のマネジメントとも密接に関係して議論されている。またこの栄養塩過剰の問題は二酸化炭素と同じく地球環境に繋がる問題として理解されている。栄養塩の管理はグローバルな問題であり、この問題の解決にはこれまでの廃棄物を二次資源とし

てリサイクルしていく取り組みが欠かせない。栄養塩のマテリアルフローで重要な位置を占める下水道システムは、この問題解決のキープポイントとなるものと思われる。

#### 参考文献

- 1) 佐藤和明, 谷戸善彦 (1988) : 下水道高度処理計画及び高度処理土入プログラムに関する研究報告書、土木研究所資料第 2633 号
- 2) 佐藤和明 (2008) : 下水道を介する窒素・リン負荷量の集計—平成 14 年度下水道統計より—、下水道協会誌 Vol.45 No.550, pp.78-85.
- 3) 佐藤和明、南山瑞彦、大竹久夫、常田聡 (2016) : 下水道に集約されるリン資源量の最近の動向、再生と利用 Vol.40 No.152 pp.70-73.
- 4) 虫明功臣監修、船水尚行/橋本健監訳 (2005) : 分散型サニテーションと資源循環—概念、システムそして実践—、技報堂出版 pp.653.
- 5) 東京大学工学部都市工学科国際環境計画 (クボタ) 講座 (1994) : 日本のし尿・雑排水処理 第 1 編 歴史 pp.72.
- 6) 国土交通省都市・地域整備局下水道部 (2010) : 下水道におけるリン資源化の手引き、平成 22 年 3 月 pp.106.
- 7) 大竹久夫、常田聡 (2017) : リン最前線—リサイクルはどこへ—、再生と利用 Vol.42 No.156 pp.6-12.
- 8) 大竹久夫 (2017) : 持続的リン利用への取り組みをめぐる海外の動向、平成 28 年度リンアトラス研究所研究報告書 第 1 章 pp. I -1-26.
- 9) 用山徳美 (2014) : 燐酸製造原料としての焼却灰利用の取り組み、再生と利用 Vol.38 No.142, pp.25-28.
- 10) 冠城敏之、曾根啓一 (2017) : 「分離処理システム」による焼却灰の資源化技術の開発、再生と利用 Vol.41 No.154 pp.64-69.
- 11) Sutton, M.A.et al.(2013) : Our Nutrient World-The challenge to produce more food and energy with less pollution  
<http://nora.nerc.ac.uk/id/eprint/500700/1/N500700BK.pdf>
- 12) RISE Foundation : Nutrient Recovery and Reuse(NRR) in European agriculture  
[http://www.risefoundation.eu/images/files/2016/2016\\_RISE\\_NRR\\_Full\\_EN.pdf](http://www.risefoundation.eu/images/files/2016/2016_RISE_NRR_Full_EN.pdf)
- 13) 古米弘明、川上智規、酒井憲司 (2012) : 森林の窒素飽和と流域管理、技報堂出版 pp.144.