

流域バイオマス資源循環による水環境再生技術

財団法人有機質資源再生センター 資源循環システム研究所

所長 加藤 善盛（工学博士・技術士）

1. はじめに

水資源の価値は水量と水質の安定性によって規定されるものである。近年世界的にもその双方の性質の脆弱性があらわれ人為に伴い損なわれつつある。とりわけ湖沼は様々な経済活動の基盤としての水資源の安定供給や水安全性の確保など重大な環境機能、すなわち「自然の恵み」を提供してきた。しかしながら我が国の湖沼水環境は高度成長期以来急激に悪化し、特に富栄養化現象による有毒藻類「アオコ」等の藻類異常増殖により、様々な浄水障害や飲料水を通じた直接的健康被害や農業用水被害等の甚大な影響をもたらしてきた。このため我が国では、5年毎に計画見直しを行う「湖沼水質保全特別措置法」に基づく規制行政的手法

により、下水道整備や窒素・リンを削減するための高度処理の導入等、特に生活汚水等の処理を中心とする対策が講じられ早25年を経過した。この2011年には、霞ヶ浦や琵琶湖をはじめとする十大湖沼の第6次五カ年計画が策定されることとなっている。しかしながら、湖沼や閉鎖性水域の水質は多大な投資にもかかわらず一定程度の改善をみながらも依然として環境基準を大きく上回っている湖沼も多く、改善が進んでいない状態にある。このため2005年6月には「湖沼水質保全特別措置法」を改定し、長期計画を見通した五カ年計画の策定と河川および湖岸帯における重点対策事業の導入の大きく二つの柱を新たに導入した対策計画の策定を行うようにしたが、湖沼水質

保全の根本的推進とはなっていない現状であり、費用効果の不十分な政策ともなっている。本稿では、政策理念転換の必要性について、「水環境の改善」には流域を含む資源環境の修復政策こそが重要との観点から示すものである。

2. 水質保全の政策原理の転換の必要性

湖沼や閉鎖性水域の水質環境保全について、上述した状況から近年は「流域管理」の概念が導入されつつあるものの、政策原理の基本的考え方は旧来の手法そのままといつて良い。その理由は大きく次の三つに集約される。(1)技術的施策として水質保全原理を水処理等の「エンドオブパイプ技術」に重点をおいていること。(2)政策的には排出負荷削減を目指す規制行政的手法のみによつてゐること。(3)経済的には投資と回収の経済政策等との一体化がなされていないこと、である。

「水」分野に限らず、我が国の技術政策が、技術の高度化に重点がおかれ、先端技術といわれるものの大部分が、従来技術の高度化策であり、手段

である技術が目的化していることに大きな問題がある。またそのことについて十分な指摘が行われて来なかったといつてよい。水環境分野においても然りであり、水問題が「水」のみではなく「資源」管理問題と一体であることの理解が進んでいないのが実状であろう。

高度成長の経済原理は、不経済部門の外部化(生産財の一部を廃棄することによつて内部経済の最適化が行われてきた。しかし環境汚染問題は、この外部不経済部分が逆に制約となつてきたことを示しており、外部不経済の内部化もしくは経済化が物質やそのエネルギーを利用した経済活動とそれを実行する政策の基本原理となることが経済循環の基本となるべきであることは広く指摘されてきていることである。

これを水環境分野についてわかりやすくいえば、「水処理は基本的に固液分離技術であり水は清澄になるが、汚泥や副生成物は環境に廃棄するワンスルー型技術」で物質循環の場を無視することで成り立っており、特に湖沼や閉鎖性水域はその蓄

積の場となっていることに基本的問題の所在がある。

また、流域管理計画とはいえ、水資源収支のとれる流域内の経済活動を境界条件としており、境界を通じての物質移入・移出収支の境界条件の変動を考慮していないことは、環境管理の一部しか捉えていない不十分な計画とならざるを得ない。例えば、流域内の汚濁物質の削減速度より、外部資源の移入速度が上回れば、改善が進まなくなるのは当然の帰結となる。流域での畜産振興による輸入飼料の増大や、食料品の輸入拡大はこの典型といつてよく、既往の水質保全施策で水環境が改善していかない基本的原因となつていふと考える。以上の考察から、流域資源循環管理こそが基本的な水環境修復施策となることが導かれる。以下このことを具体的なデータを交えて検証し、またこの施策効果についても事例的に検討した結果を示してみたい。

3. 湖沼水質汚染と流域経済活動の関係

3-1 日中の湖沼水環境事情

従来、湖沼水質は、流域汚濁負荷のポテンシャルによつて規定される部分と、内部生産すなわち窒素・リン等の栄養塩類による藻類、フランククトンの生産による有機物生産の二つで規定されるとされてきた。この図式自体は物質収支原理であるものの、施策を考える上でこれまで取り扱われてこなかった大きな二つの問題を含んでいる。一つは、流域外から移入してくる負荷の問題と発生汚濁負荷の流域内および湖内蓄積の問題である。これまでの水質予測技術では一般的に汚濁発生負荷は流域フレーム×発生原単位(または排出原単位)×流達率で処理されてきた。しかしながらここでは発生原単位の系外条件との関係及び流達率で示される残余部分については定数扱いであり、制御変数として取り扱っている例は殆んどない。また湖内水質予測において、複雑な生態系モデルがよく適用されるが、極めて多くのパラメータを含むモデルでありモデル同定も季節単位あるいは数年程度の年間単位の検証が主である。また長期的蓄積影

響を無視した検証となっており、制御政策の意思決定ツールとして機能しているとはいえない難い現状にある。

図1は日本と中国の代表的湖沼について、単純に流域経済活動のポテンシャルとして人口密度と湖沼水質(年平均レベル)の関係をプロットしたものである。導水を行っている児島湖及び印旛沼を除いて、CODで1mg/lを原点とする直線ではほぼ表される。児島湖と印旛沼も導水量を加味すればほぼ直線上に位置する。なおCODで1mg/lは人為汚濁のない自然の水質レベルであり、傾向直線を内捜するとこれが原点となり、人口ゼロの条件すなわち自然レベルの水質と合致する。また中国は傾きが日本の約1/2に程度で同じ直線の傾向で示される。この図は、流域特性によって経済活動の内容構成は様々であり、かつ気象条件や水理条件、湖沼形態等様々であるものの、マクロには単位面積当りの人為活動密度との関係で水質がほぼ決定付けられているという事実を示すものである。また中国と日本の湖沼の傾きの違

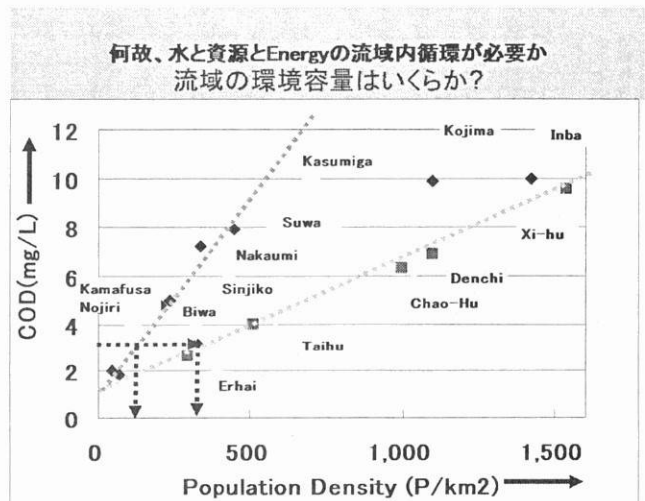


図-1 湖沼流域の人口密度と水質の関係

いは一人当りの人為活動の経済活動換算レベルが低い、もしくは流域・湖内の蓄積期間の違い、即ち経済活動の急激な立ち上がりの期間の違いのどちらかに起因しているものと考えられる。このどちらかであるかについては今後検証することにより興味ある点が見出されると考えられるが、最近の中国湖沼のデータでは、後者の可能性が高いことが考えられる。

図1から、飲料水に適したレベルの水質を維持する人口密度は日本の湖沼の場合、約150人/km²となり、中国湖沼では、約300人/km²となり一つの適正な経済活動度の管理水準、いわば環境容量とみなすことができる。またこの図から、中国湖沼の場合、一人当りの経済活動レベルの増加、もしくは蓄積期間が長くなることにより、容易に現在の水質の約2倍以上に達することになることが読み取れる。この結果は、短期間の複雑な気象要因と汚濁負荷発生源の変動要因とにかかわらず、マクロには人為活動レベルで汚染・汚濁レベルが規定されており、水環境保全の原理は流域の経済

活動レベルを如何に適正に制御できるかにかかっているかによることを如実に示している。

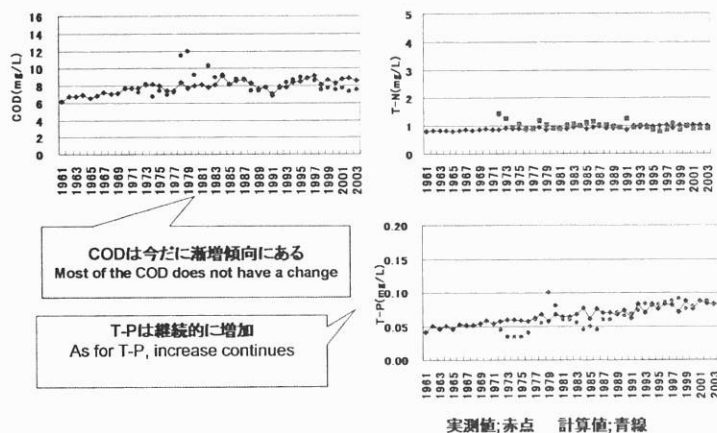


図2 霞ヶ浦の水質経年変化とM-RTMによる検証

図・2は、霞ヶ浦について、流域蓄積を考慮した、長期マクロモデルにより約45年間の水質検証を行った例であるが、下水道整備や浄化槽対策により汚水処理接続率約90%、あるいは畜産負荷削減を鋭意実施しても水質の改善が流域負荷対策と直接的に対応しないことが再現されているといつてよい。

3-2 水・資源・エネルギーの統合的管理の

原理と必要性

前章で実証的に示したように流域の水環境保全は、汚濁負荷の削減のみによって達成が困難である。ではどのような原理から施策を構築したらよいかである。図3は、湖沼水環境の破壊の現象的原理を示したものであり、人為活動レベルが自然生態循環を上回り、物質の余剰が生じたため、結果として異常な植物プランクトンの発生と同時に藻類プランクトンの過剰な競争原理から、毒性プランクトンの異常増殖が結果として現れることになっていると解釈される。この非循環系を元の循

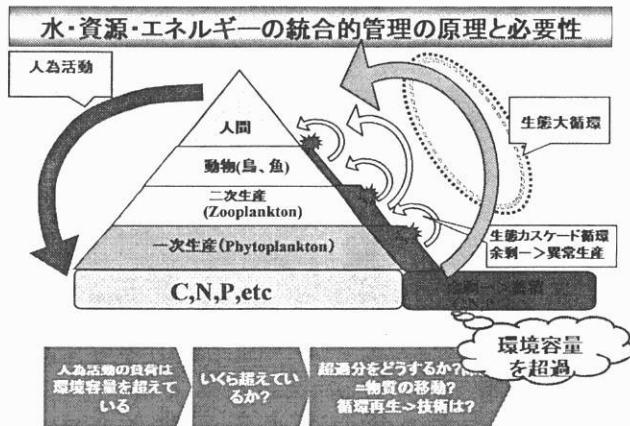


図-3 生態物質循環と富栄養化現象

環系に修復するには、大・中・小レベルの生態循環系を強化するか、系内循環を徹底することにより、外部物質投入圧力を低減させるかである。

図5は、図4の現行技術システムの結果を逆フローに転換し、これを技術政策的に達成するための技術システムの転換を示したものである。すでに、循環型社会形成基本法が2000年6月に制定され、その理念的方向性は示されているもののそれを実行に移す施策体系については制度的・技術的各執行行政セクションの管轄範囲を超えて図5に示される方向での法整備と技術システム整備にまでは至っていない。すなわち技術的側面に目を向ければ、例えばエネルギー分野とマテリアル活用分野がシステムとして整合する形での技術システムの取り組みに到達しているものは少なく、あくまで単一技術プロセスの高度化が主体となっている状況にある。

廃棄物分野では、廃棄された後の処理によるエネルギー化やマテリアル資源化技術開発が行われているが、エネルギー再生や資源化を行ってもその

地域資源・エネルギー循環構想計画策定の必要性

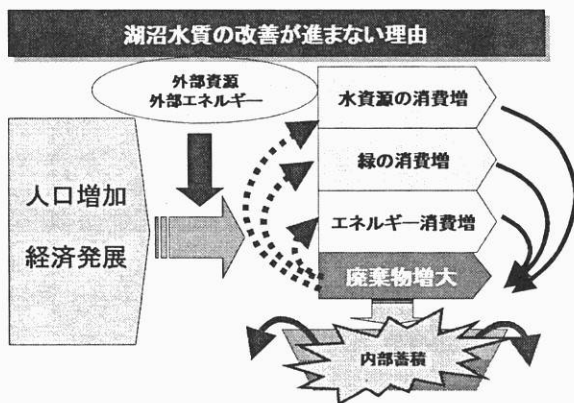


図-4 湖沼の富栄養化インパクト要因

技術システムの転換の必要性

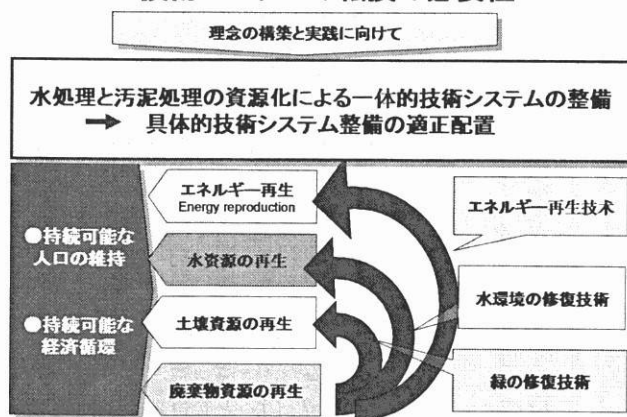


図-5 技術システムの転換

需要構造と結びついていない場合、結果としてまた廃棄物に戻らざるを得ない場合があり、かえって非効率化を助長することになり兼ねず、実際いくつもの実施事例ではこのような事態が散見される。かかる状況を起こさないためには、地域資源及びエネルギーの需要構造にマッチした地域生産システムからの転換も含めた地域政策整備が必要不可欠である。

以上を要約すれば、「流域の地域資源エネルギー再生に基づく水環境再生管理の基本原理」は「流域の資源とエネルギーの自立化」にあり、施策の柱は①外部投入資源とエネルギーの最小化、②地産・地消費の確立、④水処理や廃棄物処理の外部不経済の内部化施策⑤廃棄物ではなく資源としての取り扱いと付加価値化、⑤カスケード型の水と緑資源の循環管理となる。

4. 流域バイオマス資源循環による

水環境修復技術とは

4-1 新技術導入の基本的考え方

地域資源とエネルギーの自立化には、それを担保する技術システムの構築が重要である。従来型の技術整備は、一つ一つの製品を生産するワンフルー型の技術プロセスの組み合わせで構成されてきた。この技術体系は、各プロセスフローの最適化が目的化されるため、その経済性と効率性を追求するためには、外部不経済化が必然的となる。

これは生産財の需要構造を開放的にしておくことが前提であり、あくまで生産効率主体となり、環境部門は外部不経済の受け皿機能に陥ることになる。これを地域需要構造から出発するならば、多目的需要に合致した多目的質変換技術が不可欠である。また、将来需要構造が変化した場合であっても、これらの需要構造の変化に柔軟に対応できる技術システムを構築することが重要となってくる。筆者らはこの質変換技術システムに合致した技術の一つとして、「亜臨界水反応技術」を位置づけている。

「亜臨界水反応技術」は、圧力水蒸気を用いる滅菌器の「オートクレーブ」の延長上の技術である

が、多様な有機性廃棄物を多様な製品に質変換できる中間処理技術として活用が期待されると判断している。この質変換技術の適用フローは図6のようにまとめられる。

「亜臨界水処理技術」により直接マテリアル質変換可能な製品は、飼料や有機肥料、堆肥、生体機能性製剤等がある。また飼料や肥料において、有用微生物群である乳酸菌や枯草菌、放線菌等の微生物（この三種の微生物は人を含む自然生態環境を維持する重要な役割を担っている）による機能増強により高付加価値の製品化も可能となる。一方、エネルギー化の側面では、前処理技術として物質を保存しつつ低分子化する加水分解反応が主要反応プロセスであり、様々な発酵システムの高効率化にも導入することができるため、従来技術の増強技術としても位置づけることが可能である。発酵技術は我が国がアジアモンスーン地帯に位置し、海洋に囲まれた地理的条件の特異性から最高の質変換技術として古来より培ってきた技術であり、これらの技術との協働により、今後更に発展

的な資源循環システムを具体的に構築できるもの
と考えている。

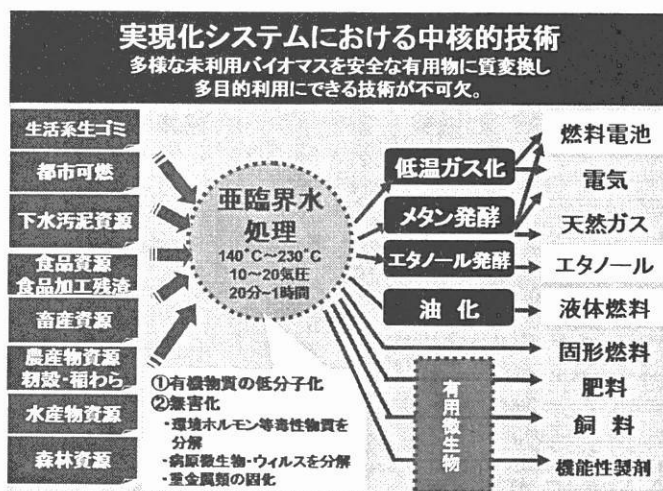


図-6 亜臨界水処理を中核技術とする資源循環システム

4-2 「亜臨界水処理技術」とは

「亜臨界水処理技術」は古くより林業分野や抽出化学分野では導入活用されてきた技術で目新しい技術原理ではない。廃棄物処理分野に導入されたのは2000年頃からであり、最近では医薬品や機能性飲料水等の製造にも適用されるようになってきている。反応原理は、飽和水蒸気の圧力と温度条件下で起きる水分子の電離に基づく有機物の還元反応であり、図・7に示されるように①熱水抽出、②加水分解、③油化、④炭化、⑤ガス化領域までの反応領域の広がりがある。現在ではこのうち有機物の加水分解による低分子化反応で200℃前後で20気圧(2MPa)の反応領域が多用されるようになってきた。反応時間は原料の性状によって異なるが、約1時間以内が一般的である。この条件下では、草木等のセルロース系はオリゴ糖類やグルコース等に、肉類などの蛋白質はアミノ酸類へ、油類は有機酸へと分解低分子化され、その後の質変換の原料となっていく。図・8は多様な有機性廃棄物を亜臨界水処理した事例で、下水

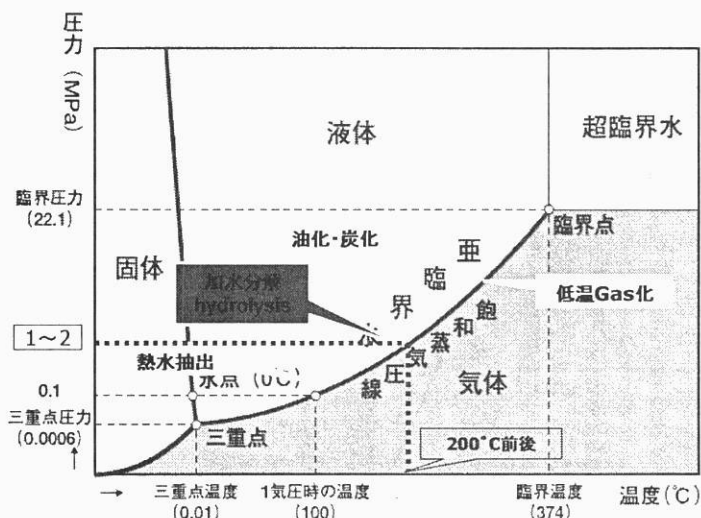


図-7 亜臨界水反応領域と反応様式

汚泥等の高含水率のものも2、3日で自然乾燥ができ、また処理後の乾燥化が速いため原料の水分



図-8 亜臨界水処理による処理物状態

調整によっては、顆粒状あるいは粉末状の製品をつくることも可能である。

4-3 亜臨界水処理の資源化事例

(1) 高機能堆肥化技術

バーク堆肥とは、針葉樹等の樹皮を堆肥化したもので、土壌微生物に対する多様な有用成分が多く含まれており、その効果が長期にわたり持続的に発揮されるため機能性の高い堆肥の一種である。

一般的には樹皮の微生物分解速度が遅いため1年から数年かけて堆肥化される。しかしながら、「亜臨界水処理」ではこの反応が約1時間で達成でき、かつ均一な品質を確保できるため商品化が行われた例がある。図9は、我が国で最初に亜臨界水処理により商品化された「バーク堆肥」の例を示した。

(2) 「亜臨界水処理」による

メタン発酵の効率化

メタン発酵は、有機物の嫌気分解により低分子化されたのちメタン産生細菌によりガス生成が行われる。この場合、有機物中生物細胞はその細胞壁部分の分解まで短時間では出来ないため、通常の発酵条件では約50%が分解ガス化される。残り

50%残渣として残ることになり、これを更に発酵液と合わせて処理する必要がある。一方「亜臨界水反応」処理したものは有機物の全体が加水分解されているため、一次発酵が終わった状態と同じであり、有機質部分はほぼ全部がメタンガス化し、結果として図10に示されるように、適切な温度・圧力条件のもとでは約2倍に近いガス発生量を得ることができる。従来の下水汚泥のメタン発酵は、汚泥中に難分解有機物が約1/2に含まれており微生物分解を受けにくいことから約半分しかメタンガス化できず、残渣と発酵液は付加的処理が必要であった。また通常のメタン発酵は、中温(37℃前後)もしくは高温(55℃前後)の温度に加熱するため発生したガスの約30%を燃料として自己消費する。しかしながら下水汚泥を水熱処理すると難分解性有機物が低分子化されるため、有機物の大部分をガス化することができる。また発酵速度も速くなるため発酵時間を短縮でき、ガス発生量が約2倍と多くなることから、有効ガス量の倍率は更に高くなる。またこのことにより

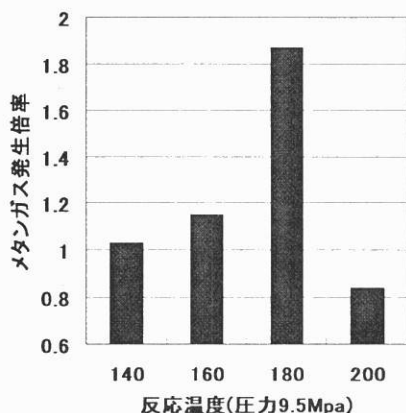


図-10 下水汚泥の水熱処理メタンガス発生倍率



図-9 亜臨界水処理によるバーク堆肥製造

残渣処理は最小限に抑えることができるため、経済経済性の高いシステムとすることが可能である。現在、「水熱処理技術」にはバッチ式と連続式があるが、近年連続式による下水汚泥の亜臨界水処理メタン発酵は商用ベースで運転されはじめた。連続式が濃縮汚泥程度の濃度の低い領域でしか処理できないのに対し、バッチ方式では脱水汚泥濃度レベルでも対象にできるため、いろいろな都市で導入が計画されるようになっていく。

[illegible]

5. 流域資源・エネルギー循環システムによる

水質保全および経済効果

5-1 霞ヶ浦流域の汚濁負荷発生状況

湖沼水質保全に対する地域資源循環効果を把握するため、霞ヶ浦を事例として、下水道事業等の水処理対策効果のみならず資源循環施策効果について検討した。流域汚濁負荷源フレームはデータのそろっている2006年を例に対象とした。霞ヶ浦流域は流域面積2157km²、人口97万41千人、下水道処理人口普及率54%で、霞ヶ浦は湖面積220km²、湖容積約8億m³、平均滞留日数約200日の淡水湖沼である。霞ヶ浦流域は農業県であり畜産が盛んであることから、資源循環効果の指標として窒素を例示することとする。流域の年間汚濁排出負荷量は図11(上)に示す通りで、窒素で4300tであり、下水が29%、畜産23%、田畑21%でこの三つで全体負荷の2/3を占めている。一方、廃棄物の発生量を窒素ベースでみると全体で13500tとなっており、これは水環境系で計算されている汚濁負荷の3倍強

に達する。このうち畜産系が80%を占め10620tが発生している。このため霞ヶ浦に排出するとされる負荷量の約2.5倍にも及ぶ量である。畜産排泄物は、流域内ではほぼ全量が農地還元利用されていることになっているが、化学肥料のみでほぼ農地の適正施肥基準レベルが投入されていることから、実態としては何らかの形で流域に蓄積されていることになる。霞ヶ浦の流入河川の窒素濃度が経年的に増加していることがわかっており、特に西浦流入河川の窒素濃度は図12に示したように、昭和40年代後半からほぼ直線的に増加していることから、確実に流域蓄積が進んでい

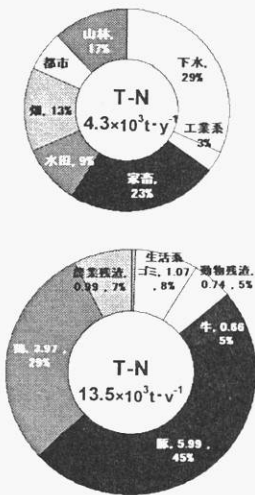


図-11 霞ヶ浦流域の
排出負荷量と廃棄物量

ることが裏づけられる。

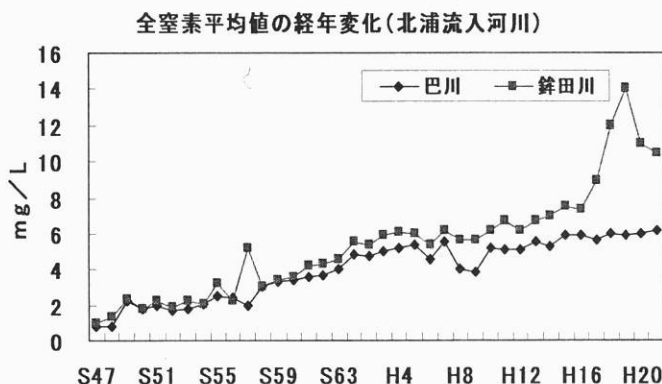


図-12 霞ヶ浦の流入河川水の窒素濃度の変遷(北浦)

5.2 霞ヶ浦流域の資源循環施策とその効果

霞ヶ浦流域の資源循環施策のシナリオは、基本的に畜産系の資源循環であり、飼料の自給化と家畜排泄物の資源回収である。家畜排泄物の資源回収は、①肥料・堆肥の自給化、②エネルギー回収(メタン発酵発電)が考えられる。このことより、廃棄物資源のうち、下水汚泥、生活系生ごみ、農業残渣は100%、畜産排泄物は50%をメタン発酵に廻し、飼料自給率は80%に拡大現況では約20%、化学肥料の代替率を50%として、流出率を加味した霞ヶ浦への流出負荷量の削減量を算定した。結果を図13に示した。TN(全窒素)については2900t、の削減となり全排出負荷量の64%に及ぶ負荷量が削減される。またその内の1/2以上がエネルギー回収(メタン発酵発電)による削減寄与分となっている。ところで、牛及び豚の年間窒素排出負荷量は6,600tであり、霞ヶ浦の年間化学肥料窒素投入量は約1400tで肥料自給は可能であるばかりでなく、流域系外への販売も可能な量にあたる。化学肥料の窒素価

格を2000円/kg程度とするとこの1/2を販売に廻すとしても末端価格で66億円相当となる。更に家畜排泄物からのメタンガス発電による電力は130Mwh/年と計算されており、電力価格を15円/kwhとすると、約20億円相当の経済利得となり、汚濁負荷効果のみならず地域経済

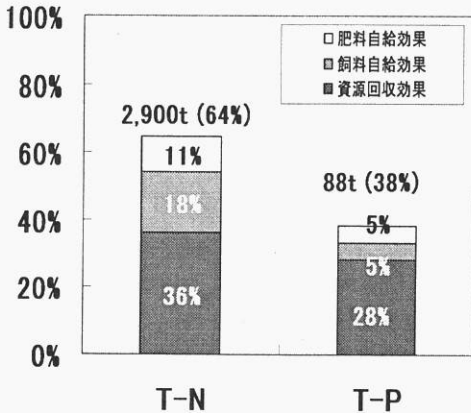


図-13 霞ヶ浦流域の資源循環による汚濁負荷削減効果

へ貢献は極めて大きいものになる。
なお、未整備の下水負荷は窒素で310t/年でありこれは全排出負荷量の7%程度である。したがって下水道を完備し、かつ100%の窒素除去を行ったとしても、上述した資源循環型施策による汚濁負荷削減効果にははるかに及ばないことになる。

現在、霞ヶ浦流域の環境保全対策費は、下水道整備などの諸施策全体で年間約400億円の投資が行われているとされる。投資効果を考えるならば、おのずと資源循環型の政策転換の重要性が理解される。さらにはエネルギーや飼料・肥料の費用代替効果により返って経済効果をもたらすことになり、その効果は極めて大きいと考えることができる。

5-3 地球温暖化対策効果

以上に示した地域資源循環施策が水環境の改善と同時に経済的メリットを生み出すが、さらに地球温暖化対策への貢献ではどの程度にみられるか概観してみる。霞ヶ浦流域で資源循環の主要なタ

ーゲットは家畜排泄物(牛、豚である。この50%をメタン発酵発電(水熱反応による高度メタン発酵法で回収される電力は約130Mwh/年である。温室効果ガスの電力排出係数を0.332kg/kwh(東京電力)とすると、約43000tのCO₂削減が期待されることになる。

6. おわりに

これまで、環境対策分野は、個別管理部門毎に管理されてきた。例えば水分野はさらに上・下水・河川・水資源の各行政機関により、廃棄物分野は環境行政の一分野としての廃棄物行政により管轄されてきた。結果として本稿で指摘したとおり各分野の最適管理は必ずしも全体最適とはならないだけでなく、逆にシステム総体として極めて非効率的な投資と環境汚染を助長しているかが理解される。今やこれを転換する時期にきており、この転換により逆に地域経済の発展のみならず、地球温暖化対策の貢献にも寄与できるものとなる。さら本稿には示さなかったが、経済活動の源泉であ

る健全な植物生産(食の生産は、健全な農耕地土壌生態環境の上に成り立つものであり、土壌が元来有する「自然免疫力」は植物の免疫力を、植物の免疫力は動物・人の免疫力、動物・人の免疫力は土壌免疫力をもたらししているという循環であり、「医食同源の範疇を拡大し」「医食農同源の循環原理」によつて、農業や医薬などによる治療的措置による循環不全型消費経済から脱却し、自然の摂理機構の修復が達成できる予防的安全・健康社会の維持による生産的経済社会を実現していくことが重要と考える。資源循環とは、物の「勿体無さ」のみではなく、「物の持つ価値」を自覚しそれを維持再生する経済的営みに他ならならず、これを達成する技術システムの再整備の知恵こそ必要な時がきたといつてよい。

【主な参考文献】

- 1 国立環境研究所「環境低負荷・資源循環型の水環境改善システムに関する調査研究」国立環境研究所特別研究報告」,30(2002)

2 Yoshimori Kato・Watershed and Lake

Restoration Policy Change in Japan and Future of Technological Strategy・中国水環境汚染控制与生态修・技术国际高级研讨会论文集・中国环境科学学云・水環境分云・2005

3 霞ヶ浦に係る湖沼水質保全計画(第5期)茨城県、栃木県、千葉県 平成19年3月

4 「茨城県の施肥量」関東農政局農業水利事務所
www.maff.go.jp/kanto/nouson/sekkei

5 加藤善盛「加圧水熱反応によるバイオマス資源循環と流域水環境再生技術」日本水環境学会第10回シンポジウム講演論文集・2007

6 加藤善盛「亜臨界水反応技術による統合的流域環境修復と効果」第5回 資源循環工学国際会議講演論文集 2010.3

7 Yoshimori KATO, Tomonao MIYASHIRO, Saburo MATSUI 「A Strategy for Lake Environmental Restoration and Global Warming Measures in Lake Basins by Integrated Resources Circulation Technologies,

第13回世界湖沼会議論文集 2009.11

8 加藤善盛「亜臨界水反応(水熱反応)技術による都市汚泥等の資源化」汚泥資源化技術ワークショップ 独立行政法人国際協力機構(JICA)・財団法人日中経済協会 2010.12

2010年3月1日(月曜日)

TOTO スーパースペース・プレゼンテーションルームにて開催(東京・新宿)