

2 湖沼等の富栄養化のメカニズムと環境影響

本章では、湖沼、内海、内湾におけるアオコ、赤潮、青潮の発生による問題点、富栄養化メカニズム、負荷源等および飲料水源、農業、レクリエーション等に及ぼす影響について述べる。

2 - 1 富栄養化の引き起こす上水、景観、漁業、農業等への問題点

2 - 1 - 1 上水

(1) 凝集阻害

富栄養化した湖沼や貯水池から取水した水道原水中の懸濁物質を除去するためには、凝集操作が必要となる。凝集剤として硫酸アルミニウムなどが使用されるが懸濁物質が多い場合は注入する凝集剤の量も多くなる。藻類が増殖すると pH が上昇し凝集操作が阻害される。従って多量の凝集剤が必要となるだけでなく凝集がうまく行かなくなる場合も生ずる。また、アオコを形成する藍藻類は浮上する性質を持っているため、沈殿せずに流出する場合もある。

(2) トリハロメタンの生成

凝集およびろ過における障害を防ぎ、塩素消毒を十分に行うため前塩素処理を行うことがある。この時に次亜塩素酸と藻類由来の有機物が反応して発ガン性物質と疑われているトリハロメタンが生成する。トリハロメタンとして実際生成するのはクロロホルム、プロモジクロロメタン、ジプロモクロロメタン、プロモホルムであるが、クロロホルム、プロモジクロロメタンについては実験動物において発ガン性が明らかとなっており、人に対しても発ガン性を示す可能性が高い物質である。水道法水質基準では 4 種類それぞれに関する基準と合計値(総トリハロメタン)0.1mg・⁻¹という基準が設定されている。

(3) ろ過池やスクリーンの目詰まり

富栄養化にともなう藻類の大発生はろ過池やスクリーンの目詰まりを引き起こす。原因となる藻類はアオコを形成する藍藻類だけでなく *Synedra* 属や *Melosira* 属といった珪藻類の大発生も目詰まりを引き起こすことが知られている。

(4) 異臭味障害

富栄養化にともない藻類の大発生が起こると水に不快なおいが付くことがある。この臭気には藻類が直接放出するものと藻類の死後、放線菌や細菌によって分解されて生じるものがある。藻類が直接放出する臭気として 2-MIB (ジメチルイソボルネオール) やジェオスミンが存在する。2-MIB は *Phormidium tenue* が、ジェオスミンは *Oscillatoria* 属や *Anabaena* 属が放出することがわかっている。

(5) 鉄、マンガンによる障害

富栄養化にともない発生する多量の微細藻類が死滅し、底層に沈降していくと細菌の分解作用を受ける。その結果、底層が嫌気状態になり、底泥中の鉄やマンガンが溶出してくる。鉄やマンガンが水道水に含まれると洗濯物の変色や味の低下を引き起こす。このため、浄水処理において除鉄、除マンガン処理が必要となる。着色をもたらす金属等について水道法水質基準(日本)の快適水質項目にマンガン、アルミニウムが、WHO の飲料水水質ガイドラインにおいてはアルミニウム、銅、鉄、マンガンの性状目標値が定められている。

2 - 1 - 2 景観およびレクリエーション

富栄養化が進むと、藻類の発生量が高まるため、水の透明度が低下し、藍藻類が優占種の場合は緑色、珪藻類が優占種の場合は褐色を呈し美観を著しく損ねる。アオコが発生しスラム状の膜を形成し

ている状況下では水泳，水上スキー，ボート遊びなどには不適である。水面下が見えないので危険であるということが理由の一つであるが，藍藻類は毒素を産生するため，人が毒素の曝露を受ける可能性があるということも理由として極めて重要である。実際，イギリスではアオコが発生した水域においてカヌーを練習した兵士の体調が悪くなったことが報告されている。アオコが発生するとアオコ独特の臭気が発生するため，散策にも適さない。さらにアオコが腐敗する時にも臭いが生じ，腐敗に伴い底層の嫌気化が進むと硫化水素臭が生じるためレクリエーションのみならず近隣の住民の生活環境にも悪影響をおよぼす。

2 - 1 - 3 農林水産業

ある程度の富栄養化は，藻類の増殖が盛んになり，動物プランクトンが増加し，魚類の餌になるため漁獲高が上がるという効果がある。しかし，富栄養化にともないサケ，マスなどの高級魚が消失し，商品価値の低い魚類に代わることになるので，漁獲収益は低下することになる。

さらに，富栄養化にともない捕食者や分解者が影響を受け，富栄養状態で生息可能な生物相へと変化していく。また，内湾，湖等では従来の再生産の場が富栄養化により貧酸素化していくと，もちろん魚類についても，成魚は外的影響に対して耐性を有するが，稚魚については耐性がないため，産卵の場が失われることになる。この結果，魚が減少していくことが考えられる。

富栄養化した湖水，または河川水を灌漑用水として用いると，農作物にも悪影響を与える。これは特に窒素の場合に被害が大きく，稲の過繁茂，倒伏，登熟不良，病虫害多発などにより収量が激減する。通常窒素 $1\text{mg} \cdot \text{l}^{-1}$ 以下ならば障害がなく， $5\text{mg} \cdot \text{l}^{-1}$ 以上では重大な障害を生ずるとされている。藍藻類の多くの種類は毒素を産生するため，家畜を放牧している地域の水源において藍藻類が発生した場合，家畜が水を飲んで健康障害を引き起こされる可能性がある。これまでオーストラリアやアメリカにおいてウシ，ヒツジ，ブタ，ニワトリなどが藍藻類が産生する毒素を摂取して死亡した例が報告されている。

2 - 2 富栄養化にともない発生する藻類の特徴

(1) *Microcystis* 属

水道用原水を取水する湖沼や貯水池では *Microcystis* 属として *M. aeruginosa*, *M. flos-aquae*, *M. viridis*, *M. wesenbergii* などが出現する。その中でも *M. aeruginosa*, *M. flos-aquae* は水質汚濁が著しく進行した水域に多く出現する。

Microcystis 属の中でも代表的な *M. aeruginosa* (写真 2-2-1) は細胞の大きさは直径 $3 \sim 7 \mu\text{m}$ であり，細胞中にガス胞を有し，浮上する性質を持っている。多数の細胞が寒天質で覆われて不定形の群体を形成しているのが特徴である。本属は浮遊性の藍藻類で世界各国の富栄養化の著しい湖沼に出現する。有機汚濁に対して耐性を有するので酸化池での出現頻度も高い。夏期に異常に増殖し，水面にマット状の水の華を



写真 2-2-1 *Microcystis aeruginosa* の顕微鏡写真

形成する。浄水処理過程においては *Microcystis* 属が塩素と反応し細胞が分散し凝集効果が低減することおよび異臭味を発生することなどにより、大きな障害を引き起こし問題となっている。さらに、人や動物の肝臓障害を引き起こす microcystin を産生することから、飲料水の水源に発生した場合、浄水処理過程における microcystin の消長に注意を払う必要がある。

(2) *Anabaena* 属

水道用原水を取水している湖沼や貯水池では *Anabaena* 属として *A. spiroides*, *A. macrospora*, *A. circinalis*, *A. flos-aquae* などが出現する。代表種である *A. spiroides* (写真 2-2-2) は細胞の大きさは直径 4.5 ~ 10 μm であり、栄養細胞が連鎖状に連結した形状をしている。本種は細胞中に球形の直径 5 ~ 7 μm の異形細胞を有すること、および細胞がガス胞を有し規則的ならせん形をなすのが特徴である。本種はジュズモともいわれ、全国各地の汚濁した湖沼に普通に出現する



写真 2-2-2 *Anabaena spiroides* の顕微鏡写真

浮遊性藍藻類であり、しばしば水の華を形成する。本属は浄水処理過程において塩素処理により細胞が分散し、ろ過池を通過しやすくなるため障害を引き起こす。また、本属にはカビ臭を発生したり、有毒物質のなかでも肝臓毒 microcystin や神経毒 anatoxin を産生するものも存在する。本属は窒素を固定する藍藻類としても知られている。

(3) *Oscillatoria* 属

水道用原水を取水している湖沼や貯水池では *Oscillatoria* 属 (写真 2-2-3) として *O. tenuis*, *O. agardhii* などが出現する。代表種である *O. tenuis* は細胞の大きさは長さ 2 ~ 5 μm , 幅 2.5 ~ 3 μm であり、細胞の長さは幅の約 2 倍ある。*Oscillatoria* 属は代表的な糸状性藍藻類であり単独のトリコームとして存在するか、トリコームが集積して群体を形成して存在する。霞ヶ浦では従来夏の優占種が *Microcystis* 属であったが 1987 年を境に *Oscillatoria* 属に変遷し、*Oscillatoria* 属は低温で

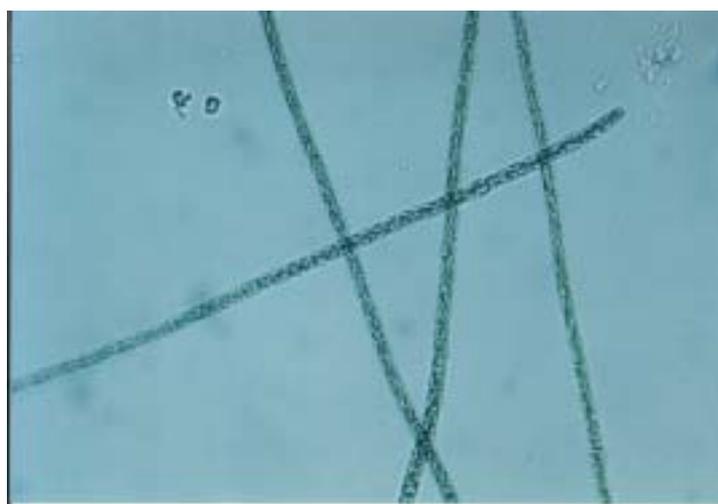


写真 2-2-3 *Oscillatoria* sp. の顕微鏡写真

も増殖することが出来るため冬期においても発生し、冬期の水質の悪化が見られている。本属が多量に出現すると浄水処理過程で凝集効果を低下させ、ろ過池を通過するため障害を引き起こす。また、本属の多くはカビ臭を発生する。また、肝臓毒 microcystin を産生するタイプも存在する。

(4) *Phormidium* 属

水道用原水を取水している湖沼や貯水池で出現する *Phormidium* 属としては *P. tenue*, *P. mucicola* が存在する。代表種である *P. tenue*(写真 2-2-4)は細胞の大きさは長さ 2.5~5 μm , 幅 1~2 μm である。本種の細胞は鞘に被われ, 接続部にくびれがなく細胞の長さが幅の 3~4 倍あり, 細胞の色調が青藍色を呈しているのが特徴である。*Oscillatoria* 属と類似しているが粘液性の鞘を有していることから識別することが出来る。本種は汚水性の藍藻類であり湖沼などに普通に出現し, 水域の礫に付着したり水中に浮遊して存在する。本属はカビ臭を生産し飲料水のカビ臭の原因藻類であるため, 浄水処理過程で問題となる。



写真 2-2-4 *Phormidium* sp. の顕微鏡写真(中央)

2 - 3 富栄養化のメカニズム

窒素, リンは水界生態系を構成する藻類, 細菌, 原生動物, 後生動物, 魚類にとって必須な元素であるが, 過剰に湖沼や海域に負荷されると富栄養化を引き起こす。我国では水域の有機汚濁を改善するため, 従来より生活排水, 産業排水中の BOD を低下させることに主たる目標が置かれてきた。その結果, 確実に有機汚濁の削減効果は認められるようになった。しかし公共用水域では, 排水処理過程で除去されない窒素, リンの流入により窒素, リン濃度が高まり, アオコや赤潮の発生が頻発するようになった(図 2-3-1)。アオコは日本では霞ヶ浦, 手賀沼, 印旛沼, 諏訪湖といった富栄養化の進ん

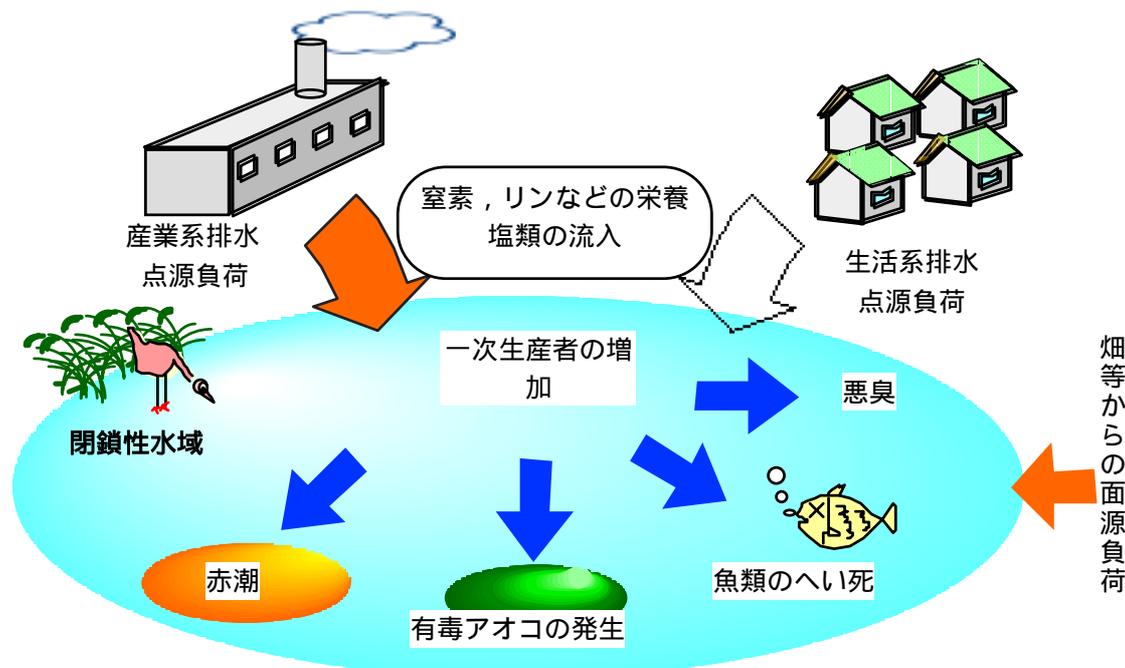


図2-3-1 閉鎖性水域における富栄養化

だ湖沼や貯水池に夏を中心に発生する。アオコの原因生物は主として藍藻類であり，その中でも *Microcystis* 属，*Anabaena* 属，*Oscillatoria* 属等が代表種である。藻類は適切な光条件下，温度条件下，窒素源として硝酸イオンやアンモニウムイオン，リンとしてリン酸イオンを吸収して増殖する。藻類に対する栄養塩類の供給には，流入河川中の栄養塩類，動物プランクトンの排泄，死骸等の細菌による分解に伴う底層からの回帰，底泥からの溶出，降雨等が挙げられる。その増殖速度は光強度，水温，窒素・リン濃度の影響を大きく受ける。富栄養化の進んだ湖沼や貯水池では藍藻類以外にも緑藻類や珪藻類等が出現し，季節によって優占種の交代が起こる。これはそれぞれの藻類間で，栄養塩類濃度に対する増殖特性，照度に対する増殖特性，温度に対する増殖特性等が異なり，水域における環境条件の変化に対して最も適した藻類が優占するためである。藍藻類は一般的に貧栄養の条件では優占しないことがわかっている。これは貧栄養の条件では増殖速度が低い，もしくは増殖できないためである。藍藻類の中でも代表的な *Microcystis* 属が優占する湖沼の全窒素濃度，全リン濃度がそれぞれ $0.5\text{mg} \cdot \text{l}^{-1}$ 以上， $0.08\text{mg} \cdot \text{l}^{-1}$ 以上であることが報告されている。また，わが国の 211 の湖沼を対象として，窒素濃度，リン濃度をパラメータとして藍藻類の優占化がいかなる要因によって支配されるかを明らかにすることを目的として検討をおこない，全窒素 $0.39\text{mg} \cdot \text{l}^{-1}$ 以上，全リン $0.035 \text{mg} \cdot \text{l}^{-1}$ 以上の湖沼において藍藻類の優占する湖沼の割合が高まることが報告されている。温度も藍藻類の増殖にとって重要な環境因子でありアオコを形成する藍藻類として代表的な *Microcystis* 属は夏を中心に優占する。

Microcystis 属のように細胞が集合し，コロニーを形成したり，*Oscillatoria* 属のように糸状性の形状を示すため，動物プランクトンの捕食を受けにくく，これもアオコの優占化を促進する要因であると考えられている。さらに藍藻類はガス胞を有し，浮上する特徴を有しているため，藍藻類が優占すると表面に集積し，水中で光が急激に減衰し，他の藻類は光を受けにくくなる。このため，風などによる混合が起こらない場合は浮上性を有する藍藻類が優占しやすくなる。

2 - 4 富栄養化を引き起こす発生源(点源，面源)と対策の意義

2 - 4 - 1 点源負荷および面源負荷

湖沼，海域，河川といった公共用水域に対する窒素，リンの供給源としてまず挙げられるのは，工場排水，生活排水，事業場排水，畜舎排水といった各種排水とその処理水，魚の養殖場といった汚染源を特定可能なものである。さらに，市街地からの流出，産業廃棄物処分場からの漏出，不法投棄さ

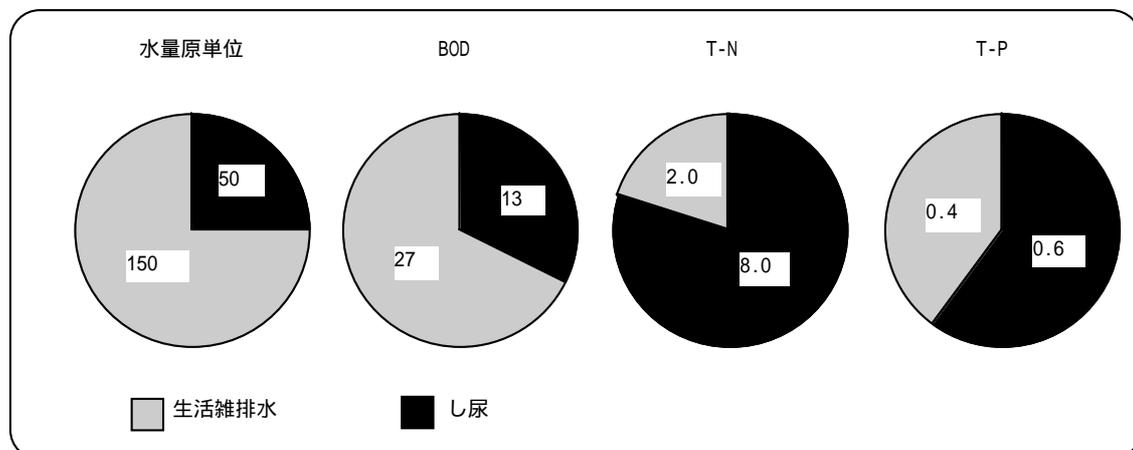


図2-4-1 生活排水の原単位からみたし尿と生活雑排水の比率
 注) 水量原単位 ($\text{l} \cdot \text{人}^{-1} \cdot \text{日}^{-1}$) その他 ($\text{g} \cdot \text{人}^{-1} \cdot \text{日}^{-1}$)

れた廃棄物からの漏出，放牧にともない生じる糞尿，山林，農地，ゴルフ場からの流出といった汚染源を特定できないものがある。これらの多くの汚染源に共通する汚染物質は有機物，窒素，リンである。前者を点源負荷，後者を面源負荷という。

2-4-2 点源負荷の種類と対策

点源負荷とは特定の汚染源から排出される汚染物質のことである。点源負荷はその発生源を容易に特定することができるので，汚濁負荷を制御することが可能である。点源負荷には下水処理水や工場排水の処理水，生活排水や畜舎排水，魚の養殖などが含まれる。下水処理水や工場排水といった点源負荷からの排水については，排出に関する基準が各国において定められている。

点源負荷においてもっともその負荷量が多いのは生活排水である。し尿を生活排水から除いた生活雑排水由来の有機物，窒素，リンの原単位は BOD $27\text{g}\cdot\text{人}^{-1}\cdot\text{日}^{-1}$ ，全窒素 $2\text{g}\cdot\text{人}^{-1}\cdot\text{日}^{-1}$ ，全リン $0.4\text{g}\cdot\text{人}^{-1}\cdot\text{日}^{-1}$ である(図 2-4-1)。一方し尿由来の有機物，窒素，リンの原単位は BOD $13\text{g}\cdot\text{人}^{-1}\cdot\text{日}^{-1}$ ，全窒素 $8\text{g}\cdot\text{人}^{-1}\cdot\text{日}^{-1}$ ，全リン $0.6\text{g}\cdot\text{人}^{-1}\cdot\text{日}^{-1}$ である。し尿由来の窒素，リン負荷が大きいことがわかる。下水道や浄化槽が普及していない地域において生活排水が処理されずに放流された場合，このような点源負荷が生じることになる。畜舎からの家畜由来の糞尿や畜舎内の洗浄水が適切に処理されずに水路や河川に流入した場合，極めて深刻な汚染源となる。畜舎から排出される環境汚染物質は有機物，窒素，リンである。成畜 1 頭当たりの負荷原単位は表 2-4-1 に示すとおりである。1 日当たりの糞尿排出量は 1 頭当たり豚 5.4kg，牛 50kg で人間の 1.5kg に比較してかなり大きいことが

表 2-4-1 家畜の汚濁負荷原単位

家畜	BOD ($\text{g}\cdot\text{d}^{-1}$)	窒素 ($\text{g}\cdot\text{d}^{-1}$)	リン ($\text{g}\cdot\text{d}^{-1}$)
豚	130	37	14.7
牛	800	290	54

わかる。畜舎排水は，汚濁負荷量が高い，汚濁成分は糞中に多い，汚濁成分濃度が高い，生物処理が可能，窒素濃度が高い，臭気が強といった特徴を有す

る。畜舎において糞をあらかじめ除去することにより，畜舎排水の汚濁物質濃度を大幅に減らすことが可能である。養殖といった水産由来の汚濁負荷が大きい水域も存在する。生け簀による魚の養殖からの汚濁負荷は，養殖のための魚の餌に含まれる有機物，窒素，リンである。霞ヶ浦では鯉の養殖に起因する汚濁負荷が COD 負荷の 7.4%，窒素負荷の 8.3%，リン負荷の 20.3% を占め，リンにおいて汚濁

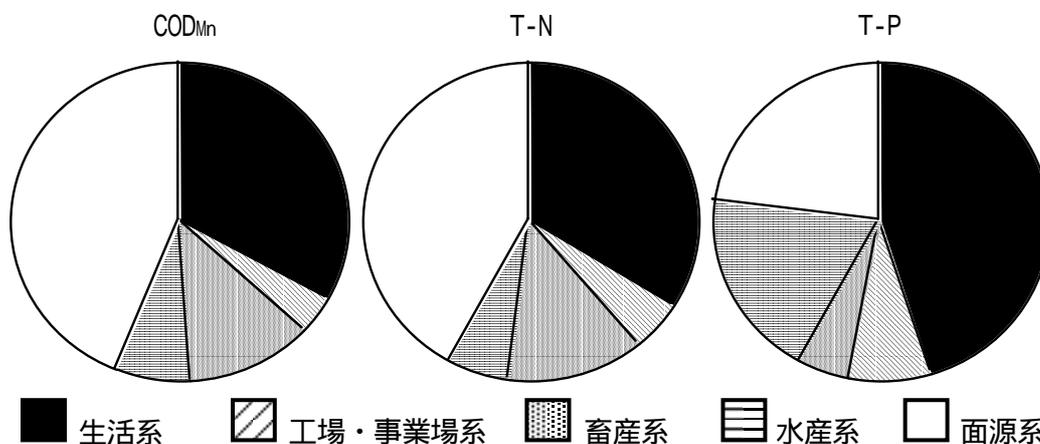


図2-4-2 霞ヶ浦の汚濁負

負荷が高いことがわかっている。有機物，窒素，リンに関する日本の霞ヶ浦に対する汚濁負荷に占める点源負荷の割合は有機物(COD)55%，窒素 58%，リン 77%であり，リン負荷に占める点源負荷の割合が大きい(図 2-4-2)。点源負荷の内訳としては，生活系が最も多く，リンについては 45%を占める。有機物と窒素に関しては畜産系が生活系に次いで多く約 10%を占める。リンについては生活系に次いで水産系が多く約 20%を占める。琵琶湖に対する汚濁負荷に占める点源負荷の割合は，有機物(COD)53.1%，窒素 45.3%，リン 68.4%であり，霞ヶ浦と同様にリン負荷に占める点源負荷の割合が大きい。

点源負荷対策としてはいうまでもなく，排水の排出源における処理が最も重要であり，下水道の整備，下水道の整備が困難な地域は浄化槽の整備，この他にも各種産業排水の浄化施設の整備などがある。世界各国において点源負荷対策として排水基準の設定がなされているが，日本における排水基準は，富栄養化の原因物質である窒素とリンについてみると，それぞれ $120\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ， $16 \text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ と水域の窒素，リン濃度に比較して著しく高く，この基準値では富栄養化の防止を図ることが極めて難しい。このように全国一律基準によって環境基準の達成が困難な場合は，都道府県が上乘せ基準を条例によって作ることが出来る。霞ヶ浦富栄養化防止条例に定められた窒素，リンに関する上乘せ基準は表 2-4-2 に示すとおりである。窒素およびリンについては業種や規模，新設か既設かによって基準値が

表 2-4-2 霞ヶ浦富栄養化防止条例による窒素・リンの上乗せ排水基準

区分	平均的な 1 日あたりの排水量(m ³)	新 設		既 設	
		N	P	N	P
食料品製造業	20 < V < 50	20	2	25	4
	50 < V < 500	15	1.5	20	3
	500 < V	10	1	15	2
金属製品製造業	20 < V < 50	20	2	30	3
	50 < V < 500	15	1	20	2
	500 < V	10	0.5	15	1
上記以外の製造業	20 < V < 50	12	1	15	1.5
	50 < V < 500	10	0.5	12	1.2
	500 < V	8	0.5	10	1
畜産農業	20 < V < 50	25	3	50	5
	50 < V < 500	15	2	40	5
	500 < V	10	1	30	3
下水道終末処理施設	20 < V < 100000	20	1	20	1
	100000 < V	15	0.5	15	0.5
し尿処理施設	20 < V	10	1	20	2
し尿浄化槽	20 < V	15	2	20	4
上記以外の事業場	20 < V < 50	20	3	30	4
	50 < V < 500	15	2	25	4
	500 < V	10	1	20	3

異なってくる。大規模の下水道終末処理施設の窒素，リンの上乗せ基準はそれぞれ $15 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ， $0.5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ であり，全国一律基準の $120 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ， $16 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ に比較してかなり低い値となっている。

台所排水は生活排水中に占める汚れの割合が高く，有機物，浮遊物質を多量に含むため，水環境の保全を図る上では生活排水，特に台所排水対策を講じることが必要不可欠である。この点をふまえ，1990年には水質汚濁防止法が改正され，生活系排水に関する強化対策が組み込まれ，生活排水対策に係わる行政および国民の責務が明確化された。生活排水は人間の日常生活に密接にかかわっていることから，各家庭の台所で実践すべき対策として，廃油は直接流さず紙等に染み込ませたり，市販の凝固剤を用いて固形化しゴミとして出す，三角コーナーや流しの排水口に水切り袋等を使用し，調理くずや生ごみを直接流さない，洗剤等は適正量使用するなどの台所対策が示された。なお，台所対策は市民参画型の環境保全対策であり，実施することにより汚濁負荷量を 30%-50%程度削減することが可能であるといわれている。日本では行政の責務として生活排水対策重点地域の指定および生活排水対策推進計画の策定が位置づけられている。生活排水対策重点地域とは，生活排水対策の実施を推進することが特に必要であると認められる地域として，都道府県の知事が指定する地域である。生活排水対策重点地域に属する市町村においては，生活排水対策推進計画を作成しなければならない。

広域的な閉鎖性水域の水質改善を図るためには濃度規制のみでは不十分であり，汚濁負荷量全体を削減することが必要である。このことを踏まえ，水質総量規制制度はこのような水域への汚濁負荷量を全体的に削減するための施策として昭和 53 年から「水質汚濁防止法」，「瀬戸内海環境保全特別措置法」の改正によって制度化された。水質総量規制制度は東京湾，伊勢湾，瀬戸内海を指定水域として，その汚濁総量を一定量以下に抑えるため，統一的，かつ効果的な負荷削減措置を講じようとするものである。本制度はこれまで1~4次にわたり実施してきたが，その対象はCODのみであったため窒素，リンに起因する内部生産由来のCODについては効果的に抑制することが出来なかった。その点を踏まえ第5次水質総量規制制度では新たに窒素，リンを対象項目としている。

工場排水や事業場排水の有機物，窒素，リン濃度といった組成は業種によって大きく異なる。有機性排水については一般的に活性汚泥法により処理がなされる。有機性で有害物質を含む排水は，凝集沈殿法，中和処理等を行い有害物質を除去した後，活性汚泥といった生物処理がなされる。無機性で有害物質を含む排水は，凝集沈殿法や化学処理等によって処理がなされる。日本においては個別の家庭に設置する浄化槽についても規制が厳しくなりつつあり，茨城県の土浦市では $\text{BOD } 10 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 以下， $\text{T-N } 10 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 以下， $\text{T-P } 1 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 以下の規制が戸建住宅に対して適用されている。

2 - 4 - 3 面源負荷の種類と対策

面源負荷とは点源負荷以外の負荷のことをさし，面源としては農地，山林，市街地などが存在する(図 2-4-3)。農地の肥料および農薬の流出，大気中の汚濁物を取り込んだ降雨，市街地から発生する屋根・道路・地表面等に堆積した排気ガス・粉塵・工場煤塵等の汚染物質，動物の排泄物，小動物の死骸，落ち葉などの流出，鉱業地帯からの重金属類の流出，山林からの汚濁物の流出等により排出源が面的に広がっている負荷である。面源負荷の汚染源はその地点を特定することが出来ず，集水域のあちこちに散在する。これらは，流域の下水道などに取り入れられず，流出によって水路，もしくは地下水を経由して流入河川，もしくは直接湖沼に流入する。その排出位置は明確でないため，その制御は一般的に困難である。面源負荷として水域に負荷される汚染物質の中で問題となるのはおもに有機物，窒素，リン，農薬等である。例えば集水域の土壌から溶脱してくる天然のリン，畑地に肥料として散布された窒素，リンが水域に流入してくるものは面源負荷として重要である。面源負荷を発生さ

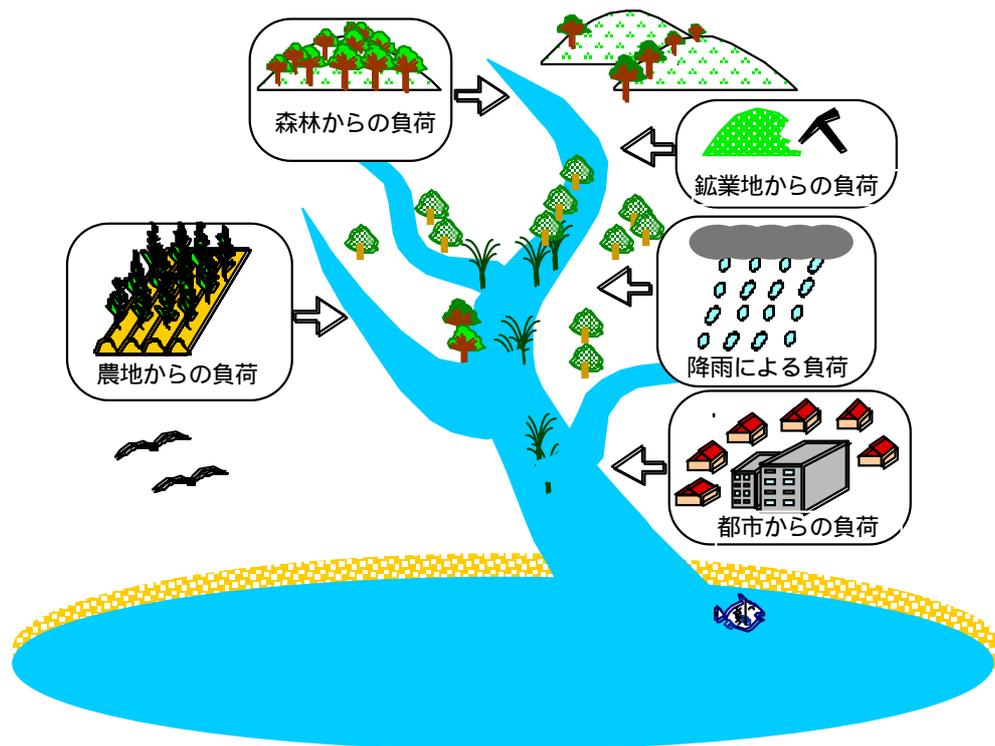


図 2-4-3 面源負荷の種類

せる土地利用形態としては牧畜，林業，農業などがある。また，土壌の浸食，表土流出にともなう窒素，リンの流入負荷も大きい。点源負荷対策のほうが推進しやすいため，点源負荷対策が進むと相対的に面源負荷の割合が高くなり，面源負荷対策が重要となる。しかしながら面源負荷は無数の地点から河川や湖沼に流入するため対策が極めて困難である。安全な水利用と持続可能な水環境を創造していくためには汚濁物質，汚濁負荷量，水量，降雨量，地理条件など水の質，量，場の実態を水文学的観点から把握し整理した上で水域の保全，改善の目標を立て水域に流入する手前で汚濁負荷の削減を図るための施策を立案し，実行するというプロセスが必要となる。

水域に対する汚濁負荷を減少させる上で森林保全は極めて重要である。森林は洪水調節，渇水緩和，気候・湿度の調節，水の浄化，CO₂の取り込みによる温暖化対策機能等の働きをもつ。しかし，森林は特に熱帯地域の開発途上国の森林を中心として減少，劣化を続けている。森林の減少の原因は人口問題，経済問題，土地利用等，地域の社会的，経済的な問題と結びついている場合が多く，減少を防ぐことが困難となっている。なお，面源負荷は現在 20%程度といわれているが，インベントリーの精度を高めるとより高い負荷量ポテンシャルを有している可能性があることから，今後効率的な面源負荷対策を強化することが重要と考えられている。

表 2-4-3 霞ヶ浦の面源汚濁負荷の算定に用いられている原単位

項目	水田	畑地	山林地	ゴルフ場	降雨(湖面)	市街地
COD	7.19	2.45	3.83	3.83	6.95	15.3
全窒素	2.4	2.34	1.56	1.56	3.08	2.4
全リン	0.095	0.116	0.054	0.0	0.13	0.18

有機物，窒素，リンに関する日本の霞ヶ浦に対する汚濁負荷に占める面源負荷の割合は有機物 (COD)44%，窒素 42%，リン 23%であり有機物と窒素においてその占める割合が大きい (図 2-4-2)。リンの占める割合が小さいのは，土壌を浸透する際吸着作用を受けるためである。水質汚濁防止対策を立てる上で，汚濁物がどこからどれだけの量流入するのかを把握することが極めて重要であるため，有機物，窒素，リンに関する各面源負荷について，面積あたりの負荷量が算定されている(表 2-4-3)。水田，畑地，山林地，ゴルフ場，市街地からの汚濁負荷量を比較すると市街地からの負荷が大きいことがわかる。このことから流域において市街地化が進むにつれて，面源負荷量が高まっていくことが予想される。すなわち市街地化が進むことにより富栄養化が進むことになる。水田においては，夏期の施肥時期にあわせて水田近辺の地下水中の硝酸性窒素濃度は増加する。水田付近の地下水の1月の硝酸性窒素濃度は $2\text{mg} \cdot \text{l}^{-1}$ 以下であるが，6月には最大 $13\text{mg} \cdot \text{l}^{-1}$ にまで増大する。水稻の場合は施肥量が少ない上に，田に水を張るため，嫌気層が形成され，硝酸性窒素の脱窒がある程度期待できる。畑は施肥量が多く，嫌気層が形成されないため脱窒が期待できないため，大きな面源負荷源となる。また，生育が止まってから収穫する米と生育途中で収穫する野菜とでは，野菜のほうが土壌に残存する窒素量が多くなり負荷量が大きい。窒素肥料，畜産廃棄物，生活排水が地下に浸透した場合の負荷量を算定した例を表 2-4-4 に示す。

表2-4-4 地下水に対する主な窒素負荷源とその量

	農地における施肥	畜産から生じるふん尿		単独処理浄化槽の処理水を地下浸透している住居
		豚	牛	
原単位	$135 \text{ kg} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{年}^{-1}$	$37 \text{ g} \cdot \text{頭}^{-1} \cdot \text{日}^{-1}$	$290 \text{ g} \cdot \text{頭}^{-1} \cdot \text{日}^{-1}$	$6 \text{ g} \cdot \text{人}^{-1} \cdot \text{日}^{-1}$
地下水に対する負荷量	$34 \text{ kg} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{年}^{-1}$	$3.4 \text{ kg} \cdot \text{頭}^{-1} \cdot \text{年}^{-1}$	$26 \text{ kg} \cdot \text{頭}^{-1} \cdot \text{年}^{-1}$	$1.6 \text{ kg} \cdot \text{人}^{-1} \cdot \text{年}^{-1}$

農地における窒素施肥量は日本の畑地の平均窒素施肥量とした。農地における施肥、畜産から生じるふん尿による地下水への窒素負荷量は溶脱率を 25%として計算した。畜産から生じるふん尿による地下水への窒素負荷量はふん尿が全く処理されないものとして計算をおこなった。単独処理浄化槽の処理水の地下浸透による地下水への窒素負荷量はライシメーター内に設置したトレンチに単独処理浄化槽放流水を $50 \text{ L} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{日}^{-1}$ 負荷したときの水質調査結果によった。

日本の霞ヶ浦に係わる湖沼水質保全計画の中で，面源負荷対策として「環境にやさしい農業の推進」，「都市地域における流出負荷抑制」，「森林等の適正管理」の3つを挙げている。環境にやさしい農業の推進とは広報活動を通じて農業者に対して霞ヶ浦の現状と水質浄化への広報および啓発をはかり，農業者と協力して削減対策を実施することである。また，生産性との調和に留意しつつ土づくりや合理的な輪作等を通じ，化学肥料や農薬の使用による環境負荷の軽減に配慮した低投入型農業を推進する。削減対策の具体的な手法は土壌診断に基づく施肥量の適正化，緩効性肥料の使用推進，溶出抑制肥料の使用推進などであり適正な施肥が重要である。都市地域における流出負荷抑制としては 広報，啓蒙活動を通じて，小水路，宅地等の清掃を住民と協力して行い，市街地から降雨により流出する汚濁負荷量を削減する。また，雨水調整池等の適正管理を行うことである。さらに新規開発地域においては可能な限り緑地面積を確保することが重要である。森林等の適正管理とは，荒廃した森林(里山および平野林)における土壌浸食や崩壊により降雨に伴い流出する汚濁負荷量の削減をはかることである。森林管理が適正に行われれば，森林は降雨負荷削減および水源涵養機能に大きく貢献することか

らも、霞ヶ浦流域における森林の管理および森林面積の拡大は面源負荷削減対策として重要な位置づけにある。土壌の浸食や降雨にともなう肥料の流亡を最小限に抑えるような土地利用は農地、林業地からの窒素，リンを低減させるのに有効である。

<参考文献>

- 1) 須藤隆一編：環境浄化のための微生物学，講談社サイエンティフィック(1983)
- 2) 渡辺真利代，原田健一，藤木博太編：アオコ-その出現と毒素-，東京大学出版会（1994）
- 3) 須藤隆一，稲森悠平：図説生物相から見た処理機能の診断，産業用水調査会（1983）
- 4) 高村典子：ラン藻による水の華，特に *Microcystis* 属の生態学的研究の現状，藻類，36，65-79(1988)
- 5) 藤本尚志，福島武彦，稲森悠平，須藤隆一：全国湖沼データの解析による藍藻類の優占化と環境因子との関係，水環境学会誌，18，901-908(1995)．
- 6) 須藤隆一，小沼和博：霞ヶ浦の水質と面源負荷，環境技術，29，509-515(2000)

（東京農業大学：藤本尚志）