

地域環境工学シリーズ 4

清らかな水のためのサイエンス

— 水質環境学 —

農業土木学会

水質環境学編集委員会著

田淵 俊雄
安楽 敏
中曽根英雄
柚山 義人



清らかな水のためのサイエンス



清らかな溪のせせらぎ…
それは豊かな森のめぐみ (田淵俊雄)

大切にしたい水と子供たち
(柚山義人)

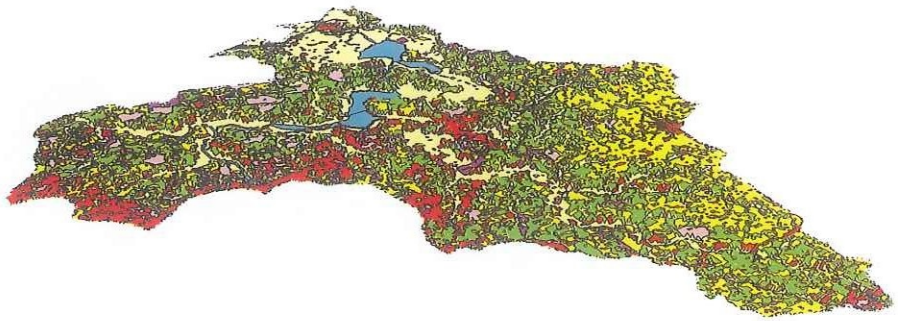


川床の石に付着した微生物が
浄化を進めている (柚山義人)

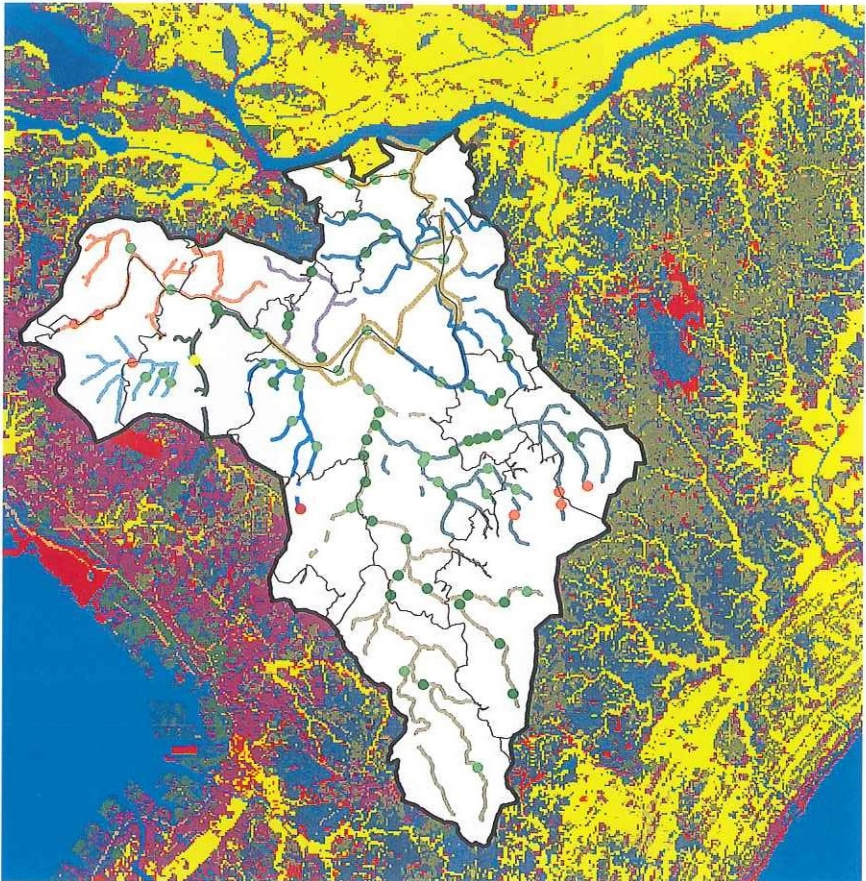


湖や池に発生するアオコ汚濁の象徴 (田淵俊雄)





数値地図を用いた土地利用状況の3次元表示（提供：藤井秀人）



複数情報（流域界，河川，水質）の重ね合せ（提供：藤井秀人）

まえがき

農業土木学会の「地域環境工学シリーズ」の出版もすでに三冊を数え、本書は四番バッターの重責を担うことになった。「大地」、「水」、「大気」、「緑」、私たちを取りまく環境要素は今や重大な危機に直面している。かつては、これらの環境要素は美しく清浄なことがごく当たり前であった。それが今、農村地域でさえその美しさを保ちえなくなってきた。

「水」は、地域環境の中の重要な構成要素である。かけがえのない「水」を地域環境の保全や地域資源の有効利用の観点から考えるとき、水質についての科学的な知見を認識しておくことは極めて重要である。このため、水質に関する基本的事項と水質保全計画の作成に至るまでの実用的事項を網羅した本書が「地域環境工学シリーズ」の中に企画された。

本書に課せられたことは二つあった。ひとつは、既刊書「農業土木技術者のための水質入門」を受け継いで、入門者にとって不可欠な基本的事項を平易に書くことである。もうひとつは、「水質環境解析」の知見を盛り込むことである。

ところで、この二つの内容を一冊の本の中で達成するのはかなり難しい。とても不可能と思ったのであるが、学会からの強い要請で編集委員長をお引き受けした。そして執筆者一同、悪戦苦闘することになったのである。

「基本的事項」の部分については既刊書「水質入門」の内容を受け継いでおり、その改訂版として入門書や教科書として使っていただけることと思う。追加改定された「環境基準」、最近の「面源や畜産関連の研究」や「水質保全行政の状況」、そして「自然との共生や住民との協力」などの環境をめぐる新しい内容を大幅に追加した。

「モデルによる水質環境解析」についても、農業土木学会誌に平成5年10月から連載された、講座「水質環境解析」の内容をベースに執筆した。

これらの内容は、湖沼や貯水池、ため池の水質保全や農村地域の環境改善に取り組んでいる方々に役立つことと思う。また、この分野は急速な勢いで研究が進んでいるため、文献をなるべく多くリストアップした。

本書が、「地域環境工学」の構築に少しでも貢献できればこれほどうれしいことはない。ただ、内容を広げすぎたために全体としてはやや統一性に欠け、読みにくい点があることをお詫びしたい。また、本シリーズのNo.2「人と自然の

水環境をめざして—水環境工学—」は本書の応用編ともいうべきものであり、合わせて読んでいただきたい。

最後に、既刊書「水質入門」の執筆者である増島 博，大井節男，戸原義男，高村義親，岡田光正，小川吉雄，斉藤 健，半田 仁，田村 肇，山本寅吉，西口 猛，田中義朗，小菅孝利，原田靖生の諸氏と，講座「水質環境解析」の執筆者である黒田久雄，武田育郎，白谷栄作，高木強治，大西亮一，河地利彦，平林詩朗，吉野邦彦，丹治 肇の諸氏に心からのお礼を申し上げたい。これらの既刊書や講座の蓄積があったからこそ本書は刊行できたのである。

また本書の刊行にあたって，図表などの掲載を快くご許可下さった著者や出版社の方々に厚く感謝の意を表し，編集にご協力いただいた農業土木学会事務局の吉武幸子さんをはじめとする皆さんに厚くお礼を申し上げる。

1998年2月

著者を代表して

田 淵 俊 雄

目 次

まえがき	i
I. 清らかな水のための序章	1
1. 水質成分と用語	2
(1) 水質成分の表し方（濃度と負荷）	2
(2) 水質成分の分類	4
2. 水質汚濁と被害	7
(1) 汚濁物質の発生源	7
(2) 水質汚濁による被害	8
3. 法規制と環境基準	9
(1) 法規制の仕組み	9
(2) 環境基準	10
(3) 排水基準	15
(4) 各種の水質基準	19
4. 水質と作物生育	19
(1) 農業用水水質基準	19
(2) 水質の農業へのいろいろな影響	20
(3) 作物被害の特徴	21
(4) 主な水質成分の作物への影響	21
5. 水質と生物	24
II. 水質環境の現状	27
1. 河川の水質	28
(1) 有害物質による汚染	28
(2) BOD	28
(3) 窒素・リン	29

2. 湖沼の水質	30
(1) COD, 窒素, リン	30
(2) 湖沼の富栄養化と窒素・リン	32
(3) 季節変動とプランクトン	34
(4) 深さ方向の水質変化	35
3. 農業用排水とため池の水質環境	35
(1) 農業用水路の水質環境	36
(2) 農業用ため池の水質環境	39
(3) 農業用ダムの水質環境	42
4. 地下水の水質	43
(1) トリクロロエチレン等による汚染	43
(2) 硝酸による汚染	43
5. 降水の水質	44
(1) 酸性雨	44
(2) 降水の窒素負荷	45
III. 水質の変動現象	49
1. 水質変動を引き起こす要因	50
(1) 水温	50
(2) 光	51
(3) 降水	52
(4) 人為的要因	53
2. 自浄作用と自濁作用	54
(1) 自浄作用	54
(2) 自濁作用	57
3. 河川における水質変動特性	58
(1) 季節変動	59
(2) 日変動	60
(3) 降雨時の水質変動	61

4. 閉鎖性水域における富栄養化と水質変動特性	63
(1) 富栄養化	63
(2) 水質変動特性	64
IV. 水質調査および水質分析	67
1. 調査計画の立て方	68
(1) 河川の汚濁状況調査	69
(2) 湖沼の汚濁状況調査	70
(3) 農業用水の水質汚濁調査	71
(4) 農業集落排水処理施設の点検調査	72
(5) 集水域からの流出負荷量調査	72
2. 現地測定と採水	74
(1) 現地での水質測定	74
(2) 人手による採水	76
(3) 自動採水器による採水	77
(4) 流量測定	79
3. 水質分析法	80
(1) 試料水の前処理と保存	80
(2) 室内における水質分析	80
4. 測定結果の解析	84
(1) 測定結果の整理	84
(2) 測定結果の評価	87
V. 集水域の水質環境—栄養塩類の挙動—	91
1. 発生源	92
2. 点源	94
(1) 生活系の発生源	94
(2) 工場・事業所排水	95
3. 面源	96
(1) 畑地	96

(2) 水田	100
(3) 林地	107
(4) 畜産の影響	109
4. 自然浄化	113
(1) 河川・水路	114
(2) 池・湖沼	114
(3) 水田・湿地における窒素除去	115
5. 集水域における窒素・リンの流れ	118
(1) フローダイヤグラム	119
(2) 林地と畑地の集水域の場合	120
(3) 林地、畑地と水田の集水域の場合	121
(4) 集水域流出負荷量の実測	122
VI. 水質環境の解析とモデル	127
1. 汚濁物質の流れとモデルの構成	128
2. モデルの種類と特徴	130
(1) 集水域モデル	130
(2) 水域モデル	133
3. モデル作成の手順と留意点	138
4. 各種モデルによる解析例	143
5. 水質環境情報の利用と解析システム	147
VII. 生態系モデルによる水質環境解析	153
1. 湖沼や貯水池の水質特性	154
2. 生態系モデルの構成と定式化	155
(1) 植物プランクトンの増殖	158
(2) 植物プランクトンの死滅	160
(3) 植物プランクトンの沈降	161
(4) デトリタスの分解・無機化	161
(5) 底泥からの栄養塩の溶出	161

(6) 負荷の流入	161
3. 実用レベルの湖沼生態系モデル	163
(1) 水域生態系構成要素	163
(2) 水質項目	169
(3) 入力条件および反応係数・定数	169
4. 指定湖沼における解析モデル	170
VIII. 広域水質環境をめぐる課題	175
1. 農業農村整備事業と水質環境	176
(1) 水質保全対策事業	176
(2) 農業集落排水事業	178
(3) 農業用水の汚濁対策	179
2. 湖沼水質保全計画の作成手法	180
(1) 計画の手順	180
(2) 霞ヶ浦のフレーム値と排出負荷量	181
(3) 水質保全対策	184
(4) 水質目標とその結果	184
(5) 農村水質保全計画との関連	186
3. 流域管理と土地利用	187
(1) 流域管理の必要性	187
(2) 流域管理の具体的な対策	188
(3) 土地利用と流域管理	190
(4) 霞ヶ浦宣言	190
4. 地球環境と農村環境	193
(1) 地球サミットとアジェンダ 21 の潮流	193
(2) 日本での動向	193
(3) 地域環境から、国土環境、地球環境へ	194
(4) 食料と環境問題	196
(5) 農村の役割と地域環境工学	196

巻末資料	199
さくいん	203

(章扉カット：(有) ピーマンアンドカンパニー)

水質環境学執筆者名簿

(五十音順, 1998年2月現在)

田淵 俊雄 (日本学会議会員) (I, II, V, VIII)

安楽 敏 (農林水産省構造改善局建設部設計課) (II, VIII)

中曾根英雄 (茨城大学農学部) (III, IV)

柚山 義人 (農業工学研究所農村整備部) (VI, VII)

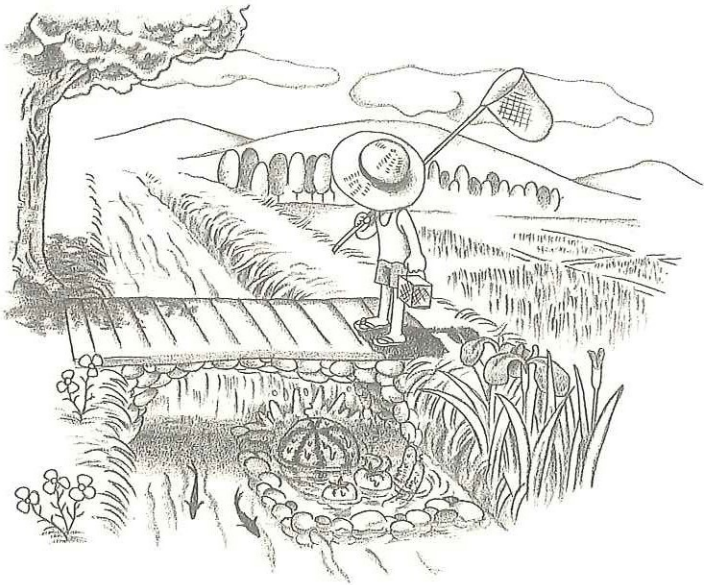
I. 清らかな水のための序章

水.

私たち人間、そしてすべての生物にとって不可欠な物質。
清らかで美しく、美味しい水。

その水が、いま失われようとしている。

水ではあっても、清らかでなく、美味しくない水。
私たちは否応なしに、水質に関心をもつことになる。



1. 水質成分と用語

(1) 水質成分の表し方（濃度と負荷）

私たちが日常接する水は、純粋な水 H_2O ではない。必ず何らかの成分が溶け込んでいる。このような水の中に含まれている理化学的成分並びに生物学的成分と、さらにそれによって変化する属性、すなわち、水の密度、粘性、pH、アルカリ度、電気伝導度、水温、色度、透明度なども含めて水質といっている。したがって、含有成分以外の性質を表す時にはそれぞれ異なった表示法が用いられているが、含有成分を表す基本的な方法は「濃度」である。

$$\text{濃度 [mg/l]} = \text{物質質量 [mg]} / \text{水量 [l]} \quad (1)$$

濃度の単位には、いろいろのものがあるが、よく使われているのは $[mg/l]$ と $[ppm]$ である。 mg/l は $1l$ (リットル) の水の中に存在する物質の量を mg (ミリグラム) で示したものである。したがって、 $1mg/l$ は $1l$ 中に $1mg$ の物質があることになる。これは $1m^3$ 中では $1mg$ の $1,000$ 倍の $1g$ の物質があることになる。したがって、 $[mg/l]$ と $[g/m^3]$ は数値としては同じになる。

一方、 ppm は 100 万分の 1 という単位のことである。したがって、 $1ppm$ は 100 万 g の水の中に $1g$ の物質が存在することである。 100 万 g は 1 ton で、水は 1 ton でほぼ $1m^3$ なので、 $1m^3$ の水の中に $1g$ の物質が含まれている時、その濃度は $1ppm$ である。したがって、

$$1ppm = 1/1,000,000 = 1g/1ton \rightarrow 1g/m^3 = 1mg/l \quad (2)$$

結局、 $1[ppm]$ と $1[mg/l]$ は、水の場合には数値的に同じである。

〔負荷〕は水中に存在する物質の量を表す。したがって、負荷を求める時には、濃度に水量を乗じて求める。

$$\text{負荷 [mg]} = \text{濃度 [mg/l]} \times \text{水量 [l]} \quad (3)$$

$$\text{または、負荷 [g]} = \text{濃度 [mg/l]} \times \text{水量 [m}^3] \quad (4)$$

たとえば、 $2mg/l$ の濃度の水が $5m^3$ あれば

$$\text{負荷} = 2 [mg/l] \times 5 [m^3] \quad (5)$$

$$= 2 [g/m^3] \times 5 [m^3] = 10 [g]$$

したがって、 $2mg/l$ の濃度の水 $5m^3$ 中には $10g$ の物質が含まれていることになる。

〈100万分の1の恐ろしさ, 1 mg/l〉

1 mg/l は, 1 l の水の中に 1 mg の成分が含まれていることである。水 1 l は 1 kg であるから, 重量の比では 1 mg と 1 kg で, 100 万分の 1 というわずかな量で, この程度の濃度はまったく問題にならないように思える。

しかし, 重金属などでは「生物濃縮」という現象があり, プランクトンから魚, 魚から水鳥, といった生物の「食物連鎖」の過程で濃度は増大していくので安心してはられない。水銀では, 魚で 1,000~5,000 倍への濃縮がみられ, 貝類では 5,000~10,000 倍もの濃縮があるという。

さらに河川での流下負荷については, 大量の水による時間的蓄積がある。たとえば, 10 m³/s の流量では, 1 mg/l の成分は 10 m³/s × 1 mg/l = 10 g/s の負荷量になり, 毎秒 10 g の流下負荷になる。これは 1 日当たりで 864,000 g となり, 1 年で 315 ton にも達する。これが下流の湖沼などに蓄積する量であるとすれば, その除去は容易なことではない。

(田淵俊雄)

「流下負荷」は, ある時間内に河川を流下する物質質量である。流下負荷を求めるには, 濃度に流量を乗じればよい。

$$\text{流下負荷 } L \text{ [g/s]} = \text{濃度 } C \text{ [mg/l]} \times \text{流量 } Q \text{ [m}^3\text{/s]} \quad (6)$$

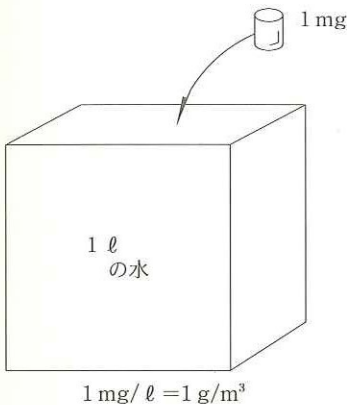
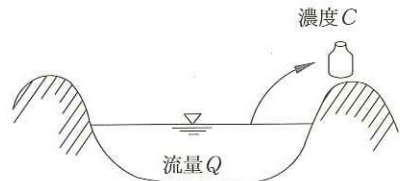


図 I-1 濃度 1 mg/l とは



$$\text{河川流下負荷量 } L = C \times Q$$

図 I-2 河川流下負荷量とは

I. 清らかな水のための序章

たとえば、濃度 $2 \text{ mg}/\ell$ の物質が流量 $10 \text{ m}^3/\text{s}$ の河川を流下する量は、 $2 \text{ mg}/\ell$ は $2 \text{ g}/\text{m}^3$ だから、

$$L = 2 \text{ [g/m}^3] \times 10 \text{ [m}^3/\text{s}] = 20 \text{ [g/s]} \quad (7)$$

1日当たりでは、 $20 \text{ g/s} \times 86,400 \text{ s} = 1,728,000 \text{ g} = 1.7 \text{ ton}$ になる。

この河川流下負荷量をその河川の集水面積で除したものを、「比負荷」という。

$$\text{比負荷 [g/s, km}^2] = \text{流下負荷量 [g/s]} / \text{集水面積 [km}^2] \quad (8)$$

比負荷は、単位集水面積当たりの、ある物質の流出負荷量を表し、集水域の特徴を反映する値である。

(2) 水質成分の分類

水の中に含まれている成分は無数にある。その中で水質汚濁として問題になる成分は、表 I-1 のように四大別される。

第1は、重金属などの有害有毒物質で、人の健康を害する成分として規制の最重点項目となっており、健康項目という。この中には水俣病やイタイイタイ病の原因になった水銀、カドミウムなどの重金属やシアン、PCBなどが含まれる。

表 I-1 水質汚濁成分の分類

1 有害有毒物質 (健康項目)	重 金 属 有 毒 物	水銀、カドミウムなど シアン、PCB など
2 有機物など (生活項目)	有 機 物 酸 素 浮 遊 物 質 細 菌 水素イオン濃度 電 気 伝 導 度 水 温	BOD, COD, TOC で表示 DO SS 濁度, 透明度 大腸菌, 一般細菌 pH EC T
3 栄養塩類	窒 素 リ ン	T-N, $\text{NH}_4\text{-N}$, $\text{NO}_3\text{-N}$, $\text{NO}_2\text{-N}$ T-P, $\text{PO}_4\text{-P}$
4 その他	塩 分 放 射 性 物 質 油	

第2は、有機物など生活項目と呼ばれる成分である。有機物は汚濁成分の中で代表的な項目である。水中の有機物の量を、BOD（生物化学的酸素要求量）やCOD（化学的酸素要求量）で表すが、これは水中の有機物を分解するために必要な酸素量で示している。BODは有機物を微生物で分解して測定し、CODは化学的方法で有機物を分解して測定する。BODやCODが1mg/lということは、1lの水の中に1mgの酸素を消費するだけの有機物が存在することを意味している。したがって、この値が大きいことは水中に有機物が多く存在していることである。TOCは、水中の全有機炭素量を示す。

水中の酸素量はDO（溶存酸素量）で表す。DOが少なくなると、魚類の生育に支障が生じる。また、DOは有機物が水中に多く含まれると少なくなり、いわゆる酸素欠乏状態になる。また、水中に懸濁している物質をSS（浮遊物質）という。SSが多いと水が濁るが、この濁り具合を濁度といい、その逆に水の澄み具合の程度を透明度という。また、大腸菌や一般細菌の量も測定対象となっている。

ほかに、pH（水素イオン濃度）やEC（電気伝導度）、水温（T）がある。pHは水中の水素イオン濃度の逆数の常用対数で表され、7を中性とし、7よりも大きいものをアルカリ性、小さいものを酸性という。電気伝導度は水中を電気が伝わる割合を表し、水の中に含まれているイオンの量を反映している。単位は濃度でなく、 $[\mu\text{S}/\text{cm}]$ か $[\text{mS}/\text{cm}]$ が使われている。1,000 $\mu\text{S}/\text{cm}$ = 1 mS/cm である。

第3は、窒素（N）やリン（P）などの栄養塩類である。これらが水中に多く含まれていると、プランクトンの増殖が促進され、いわゆる過栄養化現象を引き起こす。

窒素は水中にいろいろな形態で存在している。すなわち、有機態、アンモニア、硝酸、亜硝酸であり、それらが水中で変化するので、取扱いが厄介である。自然界では有機物質の分解により有機態からアンモニアへ、そして亜硝酸、硝酸へと変わり、植生の吸収により再び有機態に戻る。

これらのいろいろな形態の窒素の合計を全窒素（T-N）という。

$$\begin{aligned} \text{無機態窒素} = & \text{アンモニア態窒素} + \text{硝酸態窒素} + \text{亜硝酸態窒素} & (9) \\ (\text{Inorg.-N} = & \text{NH}_4\text{-N} \quad + \quad \text{NO}_3\text{-N} \quad + \quad \text{NO}_2\text{-N}) \end{aligned}$$