特集Ⅲ・非特定水質汚染源の現状と対策

閉鎖性水域の非特定汚染源 (その1)

Nutrient Loadings of Lake Biwa from Non-Point Sources

岩井重久*・井上頼輝**

1. はじめに

閉鎖性水域とは、海においては湾、内陸部においては湖沼を指すと思われる。ここでは琵琶湖について行っている調査について述べる。

滋賀県は周囲を山で取り囲まれた盆地を形成し、面積4,016km²で、中心にその面積の約17%を占める水面積680 km²の琵琶湖が存在し、湖水は南部の山間いを縫って流れる瀬田川より、淀川を経て大阪湾に注いでいる。即ち、模式的に考えれば、滋賀県は一つのすり鉢形をしていて、その底に水をたたえた琵琶湖があり、鉢の南部が欠けてそこからたまった水が流出する形になっている。このため、比較的大きい集水域でありながら、水や汚染物の収支が他の水域に比して採り易い、即ち、ある期間（通常は年間）について考えれば、集水域へ持ち込まれる量+集水域で発生する量（Source）=集水域から持ち出される量+自己分解量+集水域内で沈降堆積等により水体外に除去される量（Sink）となるはずである。なお、琵琶湖集水域は図-1のように、一部安曇川流域で京都府を含み（55km²）、また南部大戸川流域は湖に流入せず、直接瀬田川に入る（193 km²）が、わずかであるので、計算に当っては滋賀県全域のデータを可能な限り修正して用いた。持ち込まれる栄養塩としては、工業原材料、食品、肥料、家畜飼料などがあり、発生源としては、NO_xの大気汚染発生源である自動車や石油、石炭の燃焼が上げられる。域外への持ち出しは工業製品、米・野菜等の食品、それに瀬田川（関西電力の宇治発電所への導水路や京都疏水を含む）からの流水がある。自己分解はBOD物質の自己分解や窒素化合物の脱窒、そして水体外へ去る部分（Sink）として、湖底等への堆積が考えられる。

湖水の富栄養化は植物プランクトンの増殖を伴うが、

その原因物質としては、肥料の三要素であるリン、窒素、カリの他に鉄、バナジウム、ビタミンB₁₂などが指摘されている。このうちでリン、窒素、カリが主要な栄養素であり、他の要素は、上記三要素が十分に存在するときに欠乏すれば、植物プランクトンの成長を支配する限定栄養素となると考えられる。三主要素のうち、カリは天然に十分存在し、リンが最も欠乏していることが多い。このため、我が国の多くの湖では、リンが富栄養化を支配する限定栄養素となる。琵琶湖においても、一部の水域を除きリンが主要な限定栄養素となっている。

他の多くの水質汚染と比較して、富栄養化は、人間活動が無くとも、どの湖にも起こる一種の老化現象と見られる。地質学的な長い目で見れば、どの湖も富栄

図-1 琵琶湖流域図

* 京都大学名誉教授

Shigehisa IWAI

** 京都大学工学部衛生工学科教授

Yoriteru INOUE

図-2 富栄養化のシステム・ダイアグラム

養化し、浅くなり、湿地から平原に移行する運命を持っている。人間活動はこの現象を加速する。このため、栄養塩の負荷を考える場合、どうしても天然の負荷との対比においてその性格を把握する必要がある。ところで、リン、窒素の栄養塩は図-2に示すように湖面降下物、農業流出水、山林流出水、地下水、工場廃水、家庭廃水、畜産廃水の7つの原因により湖に流入していると見られる。ここでは、そのうち非特定汚染源と考えられる降下物、農業流出、畜産流出、山林流出、その他の順に考察し、最後に琵琶湖集水域の物質収支について論じる。

2. 降下物

閉鎖性水域が富栄養化する限界のリン及び窒素の濃度は、古典的にはSawyer¹⁾の示した湖水の春期循環期における無機窒素0.3mg/ℓ、リン0.01mg/ℓがよく使われる。この値はその後、湖の水深、滞留時間、水温、他の溶存塩等で変化することが知られ、多くの改良された指標が提案されているが、Sawyerの値は富栄養化の大よその目安として便利である。ところが降雨中の栄養塩濃度は表1に示すように、リン、窒素ともこの数値を超えており、ことに窒素が指標を大きく上廻

表1 降雨中窒素、リン濃度〔mg/ℓ〕

測定場所	期間	降雨量 〔mm/年〕	有機-N	NH ₄ -N	NO ₃ -N	全-N	全リン	備考
滋賀・桐生	68.5~69.4	1931		0.21	0.07		0.032	堤 ²⁾
"	70.10~71.9	1968					0.029	
"	72.4~73.3	1811					0.051	
滋賀・比叡山	75.10~76.9	2595	0.30	0.08	0.09	0.47	0.073	
京都・上賀茂	61.6~62.5	1408		0.25	0.09		0.02	
"	62.6~63.5	1693		0.22	0.14		0.03	
"	63.6~64.5	1693		0.09	0.09		0.014	
滋賀・田上山	76.5~77.4	1867	0.29	0.05	0.05	0.39	0.029	堤・平林・岩坪 ³⁾
"	77.5~78.4	1019	0.32	0.15	0.08	0.54	0.065	
"	78.5~79.4	1301	0.21	0.09	0.21	0.52	0.029	
"	79.5~80.4	1457	0.16	0.11	0.24	0.51	0.042	
滋賀・草津	74.10~76.9		0.33	0.278	0.27	0.88	0.026	國松 ⁴⁾
霞ヶ浦			0.72	0.61	0.17	1.40	0.013	田淵等
OHIO州(米国)				1.1	1.15		0.02	

表2 降下物中窒素, リンの量

調 査 地	降下物量 [t/㎢・年]		備 考
	N	P	
京都・上賀茂	0.611	0.073	堤, 岩坪 ²⁾
滋賀・大石川	0.672	0.044	堤, 平林, 岩坪 ³⁾
滋賀・草津	1.57	0.052	國松 ¹⁹⁾
茨城・阿貝町	1.28	0.009	高村
英 国 北 部	1.40	0.08	文献5)

り, 雨水そのものが富栄養化の potential を持っていることがわかる。

栄養塩の降下量は, 降雨ばかりでなく降塵によってもたらされる。降下物の全量をデポジットゲージ等で測定した結果を表2に示す。強雨の後半で降下量が減少すること, および海上では降下量が少いことから, リンは陸地からまき上げられるダストに起因しているものと思われる⁵⁾。この他に都市, 工場もリンの降下量を増大させ, 中西等は宇部市において, 肥料工場の周囲に降下量の増大することを報じている⁶⁾。一方窒素は, 都市, 工業 (特に肥料工場, 発電所), 降雨強度などが関係するが, 大気汚染物質である NO_x が雨水中に入って降下する部分が大きいと見られる。図-3は北米での $(\text{NH}_4-\text{N}) + (\text{NO}_3-\text{N})$ の降下量を示したものであるが, 西部ほど降下量の少ないのは栄養塩の少ない海からの風が影響しており, またシカゴ, デ

表3 流域の土地利用と降下物量

地 目	面積 (㎢)	降下物量(t/年)		備 考
		N	P	
耕 地	650	1,021	33.8	道路・鉄道を含む ゴルフ場, 公園を含む 琵琶湖降下物量 1068tonN/年, 35.4tonP/年 従業員30人以上
うち水田	588			
畑	62			
宅 地	149	234	7.7	
山林・原野	2,298	3,608	119.5	
湖 面	688	1,080	35.8	
工場用地	23	36	1.2	
そ の 他	40	63	2.1	
合 計	3,848	6,042	200.1	

降下物量 1.57 tonN/㎢・年
0.052 tonP/㎢・年

トロイト付近の人口稠密で, 工業の発達した地帯では降下量が著しく多くなっている。ここでは表2中滋賀県につき國松の与えた数値を採用する。この数値は, 窒素については次項で述べる施肥量の約1割に相当する。流域の土地利用状況より, 耕地・宅地・山林・工場用地・湖面等への降下物の量を推定すると, 表3のようになる。

窒素降下物の主要原因は大気汚染の NO_x であるが, 大気中に汚染物が放出されると, わが国においては1日1,000~2,000 kmの速度で西から東に移動し, 約2週

図-3 米国の窒素降下物量 ($\text{NH}_4-\text{N} + \text{NO}_3-\text{N}$) (数値はt/㎢・年) Uttomork⁵⁾より

間で地球を一周することが、核爆発に伴う放射性降下物の降下量の測定によりわかっている。また、一度空气中に放出された量の $\frac{1}{2}$ が地表に降下するに要する時間は、平均で約2週間と見られているので、滋賀県で発生した NO_x が県内に降下するばかりでなく、主として西方の県、あるいは国外における大気汚染も、滋賀県の降下量に関係しているものと思われる。県境において大気汚染の鉛直分布を通年にわたって観測し、また県内の NO_x 発生量を推定すれば、降下物の収支をとることができる。湖の蒸発水量を求めるために、このように大規模な実測が行われた例はあるが、莫大な経費と労力を要するので、その実施は困難であると思われる。

3. 農業流出

わが国では平均して1年間に1 km^2 当り、窒素では12.6 ton, リンでは63tonの肥料を使用している。これは米国の5.6 ton N/ $\text{km}^2 \cdot \text{年}$, 1.2 ton P/ $\text{km}^2 \cdot \text{年}$ や、タイの0.9 ton N/ $\text{km}^2 \cdot \text{年}$, 0.3 ton P/ $\text{km}^2 \cdot \text{年}$ に比してかなり多い数値である。収穫量は表4に示す国々の中では、わが国が最大であるが、しかしこれは必ずしも施肥量に比例しているわけではない。

有機質肥料のうち、落葉やワラ、枯草等に含まれるセルロースは分解して酢酸、乳酸、酪酸、コハク酸などの有機酸を生じ、さらに分解されて炭酸ガスと水となる。

蛋白質は好氣的に分解されて、アンモニアと炭酸ガスとなる。化学肥料として使われる尿素は炭酸アンモニウムを作る。

同じように、石灰窒素も炭酸アンモニウムを作り植物に利用される。

余ったアンモニウムイオンは、滲透水として地下に入り

り、土と吸・脱着を繰り返しながら深部に移行して、硝化菌により硝酸に酸化される。窒素化合物の通気層および地下水中での移動は、化学反応と吸・脱着反応が共存しているので解明が困難であるが、移動速度はきわめて遅く、数米を移動するのに数年のオーダーの時間を要するものと思われる。このため、ライシメーター (Lysimeter) と呼ばれる一辺1~2 mの直方体の槽に土を詰め、作物を植えて栄養塩の挙動を求める装置を用いた実験では、多くの場合栄養塩の収支が取れないようである。生物による窒素固定および脱窒という、実測困難な現象が介在することも、収支を取る上で大きな障害になっている。

窒素は滲透水と共に地下に入り、地下水中の窒素濃度を増加させるのに対し、リンはカルシウムや鉄と難溶性の化合物を作り、土に固定される。即ち、カルシウムと反応して

鉄と反応して、

となるので、リンは農地より滲透水としてではなく、主として表面流出、あるいは作物として失われる。

圃場よりの栄養塩の流出量に関しては、数十年の研究の歴史があるが、土壌の種類、pH、土地勾配、降雨量と降雨強度、水温、作物の種類、施肥法、耕作法などが関係し、かつ栄養塩の移動がきわめて遅いために、まだこれと言った決定的な数値は得られていない。農業の形態から、わが国において水田に対するデータが多く、外国は畑や牧草地の資料を主体とする。

これまでに発表された数値を表5に示す。きわめて大きな変動を示すが、田より畑の方が見かけの流出率が大きい。水田の場合 (雨水+用水) による窒素の流入量と、表面流出および浸透流出とを比較した例として、高村⁸⁾は図-4を示した。これによると、わが国の水田の約半数は施肥しているにもかかわらず、栄養塩流入量より流出量の方が少なくなっている。そこで、

表4 施肥量と収穫量

国名	施肥量 [t/ $\text{km}^2 \cdot \text{年}$]			収穫量 [t/ $\text{km}^2 \cdot \text{年}$]
	N	P	K_2O	
日本	12.6	6.3	10.5	570
北米	5.6	1.2	3.0	452
フィリピン	2.3	0.2	0.6	247
インド	2.1	0.3	0.4	213
タイ	0.9	0.3	0.2	197

日本農業年鑑⁷⁾

$$\text{見かけの流出率} = \frac{\text{施肥区流出負荷}}{\text{施肥量}}$$

$$\text{正味流出率} = \frac{\text{施肥区流出負荷} - \text{雨, 用水による持ち込み負荷}}{\text{施肥量}}$$

と定義する。

水田における物質収支について、最近いくつかの例が発表された。これを参考にし、滋賀県農業試験場の

表 5 農地からの栄養塩の見かけの流出率

		施肥〔t/㎢・年〕		表面流出〔t/㎢・年〕		地下浸透〔t/㎢・年〕		備 考
		N	P	N	P	N	P	
滋賀県竜王町	水田	11.7	5.4	2.56	0.076	0.80	0.035	中田：水田からの肥料成分の流出について、関西土壌肥料協議会講演集No.59
滋賀県彦根市	水田・湛水	13.47	4.0	3.79	0.064	0.47	0.024	
同	水田掛流し	13.33	5.02	5.39	0.119	0.65	0.024	
茨城県阿貝町	水田	6.89	9.6	1.66	0.18	0.47	0.005	高村，田淵他：水田の物質収支に関する研究（第1，2報） 日本土壌肥料科学会誌47,48 文献5)
〃	新利根村 水田	14.1	0.675	1.31	0.067	0.49	0.016	
米国Idaho	畑，大豆 トウモロコシ	6.0	3.0	0.035	0.017	3.5	0.013	

データより推定すると、図-5のような水田における栄養塩収支が得られる。

これより、窒素については雨水1.36 ton/㎢・年、肥

料13.8 ton/㎢・年、用水1.67 ton/㎢・年が流入するにもかかわらず、表面流出水は4.0 ton/㎢・年なので、水質の面から見れば、（流出）－（流入）＝（4.0 ton/㎢・年）－（1.67 ton/㎢・年）＝2.33 ton N/㎢・年が表面流

図-4 窒素(T-N)の排出量と流入量の関係

図-5 農地における栄養塩収支(数値はt/㎢・年)

出の負荷として水系に加わることになる。この他に2.1 ton N/㎤・年の地下への負荷がある。リンは用水の0.07 ton P/㎤・年に対して、表面流出0.07 ton/㎤・年であるので表面流出負荷はなく、地下に対して0.08 ton/㎤・年の負荷が加わる。

肥料要覧⁹⁾によれば、昭和55年の肥料消費量より求めた栄養塩の量は、窒素として8400ton、リンとして12820 tonである(表6)、流域の土地利用が表3のよう

表6 滋賀県の肥料消費量(昭和55年)

肥 料	消費量 (t/年)	栄養塩含有量		栄養塩量	
		N(%)	P(%)	N(t/年)	P(t/年)
硫 安	2,452	21		515	
尿 素	874	46		402	
硝 安	25	17.2		4	
塩 安	400	25		100	
石 灰 窒 素	1,416	20.9		296	
過リン酸石灰	523		17.5		92
よう成リン肥	16,535		20.2		3,340
化 学 肥 料	56,218	12.6	16.7	7,083	9,388
合 計				8,400	12,820

肥料要覧⁹⁾

あるので、施肥量は窒素12.9ton/㎤・年、リン19.7ton/㎤・年となっている。水田については、図-5の数値を用い、また、畑地については窒素につき茨城県の値を、リンについては適当な原単位が見当たらないので米国の値を用いると、農地よりの栄養塩の流出は表7のような負荷となる。窒素の地下浸透量が年間、約2,000tonあるものと推定される。リンはほとんど土に固定されて流出せず、地下水に約50ton 入る程度と思われる。

次に食品について栄養塩の収支を考えてみよう。

農業基礎統計¹⁰⁾および、滋賀県農林水産統計¹¹⁾によれば、昭和55年度の米生産量は217,000 tonであり、

表7 農地よりの栄養塩流出

窒素	流 出 先	水 田		畑		合計
		原単位 (t/㎤・年)	負荷 (t/年)	原単位 (t/㎤・年)	負荷 (t/年)	
	表面流出	2.33	1,370	0.01	1	1,371
	地下浸透	2.1	1,235	7.91	492	1,727
	合 計		2,605		493	3,098

リン	流 出 先	水 田		畑		合計
		原単位 (t/㎤・年)	負荷 (t/年)	原単位 (t/㎤・年)	負荷 (t/年)	
	表面流出	0	0	0.01	0.6	0.6
	地下浸透	0.08	47.0	0	0	47.0
	合 計		47.0		0.6	47.6

このうち85,200 ton が県内で消費され、残り131,000 ton が県外に持出される。米は窒素1.35%, リン0.20%を含有するので、県内で食品として使用される米の窒素は1,150ton、リン170ton、また、米の形で窒素1,780 ton、リン264ton が流通経路に乗って県外に持ち出される。同様な推定を、麦、野菜、豆、果実、および水産物について計算した。なお、生産量が消費量以下の場合には、生産されたものはすべて流域内で消費されるとした。これらの結果を表8にまとめる。食品(除畜産品)として消費されるのは、窒素4,197 ton、リン5,167 tonであり、それぞれ施肥量のNの50% Pの4%に相当する。県外より入ってくるのは、輸入品が多い。県外へ持ち出されるのは米、野菜の農業一次産品であり、県外へ持ち出されるものが、窒素1,933ton、リン284ton、県外から持ち込まれるものが、窒素2,312 ton、リン266 tonで、米、野菜として持出される栄養塩と、その他食品として持込まれる量とがほぼ等しい。

(以下次号)

表8 栄養塩の食品としての移動(昭和55年度) 負号は県内から県外への移出を示す

食 品	県内消費量 (t/年)	県外移入量	栄養塩含有率 (%)		栄 養 塩 量 (t/年)			
			N	P	N		P	
					県内消費	県外より移入	県内消費	県外より移入
米	85,200	-131,900	1.35	0.20	1,150	-1,780	170.3	-263.7
小 麦	38,400	35,600	2.08	0.35	799	740	134.5	124.6
さつまいも	13,800	10,500	0.3	0.039	41	32	5.4	4.1
じゃがいも	8,500	3,000	0.34	0.070	29	10	5.9	2.1
豆 類	19,300	16,300	4.3	0.40	829	703	77.1	65.4
野 菜	91,600	-61,300	0.25	0.034	229	-153	31.1	-20.8
果 物	59,400	13,600	0.12	0.015	71	16	8.9	2.0
水 産 物	35,400	28,800	2.82	0.235	999	811	83.5	67.6
	351,600	-85,400			4,197	379	516.7	-18.9

県外へ193,200 県外から107,800 ,

県外へ1,933 県外から2,312 , 県外へ284.5 県外から265.6