

# アフリカにおける水資源管理と水質モニタリング



Prof. Chris H.D. Magadza

University of Zimbabwe

## 要旨

アフリカでは、水質モニタリングデータが少なく、水資源を管理するという認識が不足している。しかし、大湖沼の富栄養化の問題が進行しており、今やそれによる環境破壊が広範囲に及んでいるという証拠が存在する。アフリカ大陸における水の汚染は、食料増産のために農薬や化学肥料が使用され、都市ごみが増大し、産業廃棄物が河川や湖沼に投棄されたことの結果である。PCB、DDT、2,4-Dなどによる汚染が大陸全体に及んでいる可能性があり、これは現実的な脅威となっている。本稿では、こうしたアフリカの現状と今後の課題について論じる。

## 1

### はじめに

人類は何千年も前から、水環境から生きるための資源を収穫してきた。食料としての魚や狩猟対象としての鳥、植物などである。しかし、水の最も重要な特性の一つは、おそらく浄化作用という点であり、それが人口増加に大きな役割を果たしてきたといえる。水は人間が出すごみを流し去る、あるいは生物学的機能で処理するという方法で取り除いてくれるのである。これまでは河川や湖沼から生活用水を取水し、その同じ水系に排水を戻すことも可能であった。

しかし、技術の進歩に伴い、新種の廃棄物が登場してきた。例えば農薬のように、生態系にとって全く異質なもので、自然界が迅速に処理できないもの、もしくは化学肥料や下水などのように、あまりに多量で分解しきれないものなどである。

陸水学者たちはようやく、河川や湖沼の水質状態を決定づける化学的、物理的、生物学的作用について総合的に考え始め、自然の水環境は物理と化学の法則が適用される反応装置にすぎないこと、そして人間の出すごみを処理する河川・湖沼の能力が無限ではないことを明らかにした。

20世紀後半になると、北アメリカの五大湖や経済の要であるヨーロッパの運河や湖といった重要な地域で、淡水資源崩壊の兆しが明らかになり始めた。魚や魚加工品は安全な食品ではなくなり、男性の精子数が減少するといった新たな問題も明らかになり、それは水質に起因すると言われている。技術者や学者だけが関心を持っていた水と水質に関する議論が、突然世間一般に広まったのである。

第3回世界水フォーラムには、20,000人を超える参加者があった。琵琶湖での長期間の調査に基づいて作成された世界湖沼ビジョンの発表は、その最も輝かしい成果の一つである。琵琶湖については、開発地域社会、湖沼環境の相互関係がきちんと記録されてきた。そして、琵琶湖の価値が低下してしまうことを危惧した住民の間に大きな関心が生まれ、湖を更なる汚染進行から救おうという市民運動へとつながったのである。琵琶湖調査チームは、琵琶湖の管理には住民参加が必要不可欠であると認識し、更に、この考えを世界レベルにまで広げ、湖沼環境委員会を結成した。この委員会は発展途上国における湖沼管理に関する知識の普及に大きな役割を果たしている。

## 2

## アフリカの湖沼の現状

初期にアフリカの湖沼を調査した陸水学者たちは、魚類の高い生物多様性に強い印象を受けた。アフリカの湖沼における水質測定では、主として魚類の分布と生態系の解明を支援するために、無機成分の基本的化学組成(ナトリウム、カリウム、アルカリ度、硫酸塩、pH、溶存酸素)及び、物理的特性である導電率や水温と濁度が主な調査項目とされてきた。

人間の土地利用の仕方が水質に深く関連するという懸念は、プレトリア近郊のハートビースプールト・ダム、ハラレ近郊のチベロ湖、ザンビアのカフ湖といった、主に都市の水源貯水池から生じてきた。この調査は、淡水中の微量元素測定技術の進歩と、溶存酸素、pH、導電率、透明度を即座に測定することを可能にしたフィールド測定技術の少なからぬ進歩により大いに助けられた。

1960年代は独立の時代であった。多くの新興国が経済発展計画に着手し、それに伴って、エネルギー、灌漑、上水道のための水源開発が必要となった。そこで重要な検討項目はもっぱら河川流域の水循環能力という点であり、将来の貯水池と流域環境を関連づけた環境影響調査などは、有名なザンビアのカフ水力発電所の例を除けば、ほとんどなされなかった。一方、漁業、その他の産業の発展により、多くの人々がビクトリア湖、タンガニーカ湖、マラウィ湖といった大湖沼の周辺に定住し始めた。人口増加に伴い、穀物生産のために森林は切り開かれ、人々が田舎から都市へ流入し、それに伴って都市部のごみ処理施設に処理能力以上のごみが集まった。

1994年、国連食糧農業機関(FAO)の委員会の一つであるアフリカ内陸漁業委員会(CIFA)がアフリカ大陸の水環境汚染のレビューに着手し、有機性汚染、重金属汚染、塩素化炭化水素に関するデータを見直した。このレビューでは、南アフリカのハートビースプールト・ダム、エジプトのマリウト湖、南アフリカのパーペンクリス川のような汚染が深刻な場所を除けば、水、堆積物、植物、動物にみられる汚染物質のレベルは、ヨーロッパや北アメリカの水環境のレベルよりも低いことが示された。しかし、レビューは、このデータが質・量両面で変動しやすいものであることを強調している。大部分のデータは小規模なプロジェクト形態の研究によるものであったからである。

このレビューはモニタリング・ネットワークの確立と制度上の権限構築が必要であることを進言している。例えば、ナクルで激しく工業化が進んだ1975年以降、ナクル湖には、ヒ素、カドミウム、銅、水銀、鉛、クロム、DDT、DDD、その他いくつかの有毒物質が蓄積している。モニタリング活動が散発的にしか行われないために、ナクル湖でみられたような水質変化が、誰にも気づかれずにアフリカの他の湖でも起こっているのである。

## 3

## 富栄養化問題

アフリカではモニタリングデータが充分でないため、水質管理についての認識が概して欠如している。特に、都市化が進んだ地域の状況を見ればさまざまな問題が切迫していることがわかる。アフリカ南部地域は水が乏しいため、貯水とその再利用が、サブ・サハラ・アフリカの他の低開発地域よりも盛んに行われている。

図1は、ハラレ市の水源貯水池であるチベロ湖の処理済排水の還流率を示している。河川から湖への水の流入量は季節によって異なるため、市街地から戻ってくる排水が水供給に大きく貢献している。同様の状況が、南アフリカ共和国のクロコダイル川で見られる。この川は南アフリカで唯一、年間平均流量が増加している川であるが、これはヨハネスブルグからの排水に起因している。

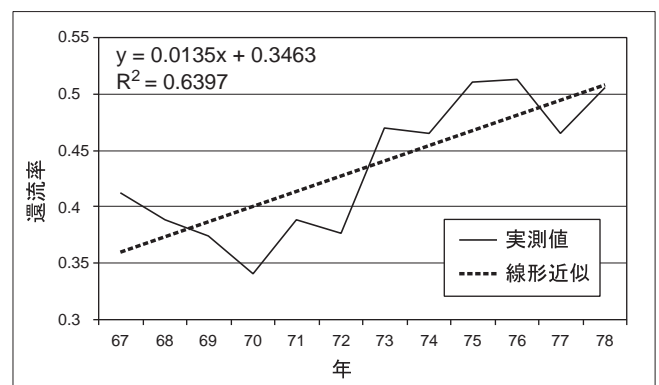


図1 チベロ湖における処理済排水の還流率

図2はチベロ湖の溶存リン酸塩濃度の年代別記録である。また、図3はチベロ湖の2地点(上流地点とダム付近)におけるリン酸塩の深度別濃度を示している。富栄養化モニタリングプログラムの調査によれば、南アフリカ共和国のダム湖における全リン濃度は0.012 mg/Lから0.545 mg/Lの間である(表1)。つまり、チベロ湖が非常に富栄養化していたことをデータは表している。

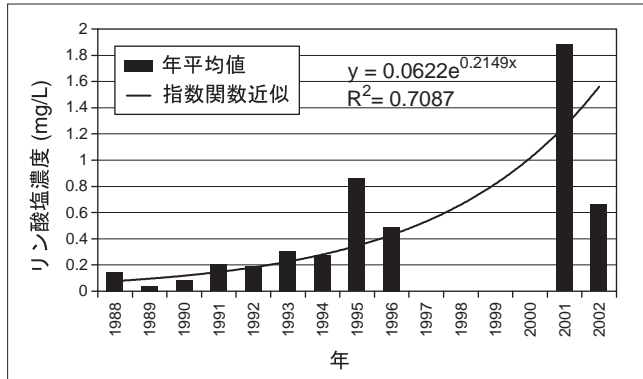


図2 チベロ湖におけるリン酸塩濃度の経年変化

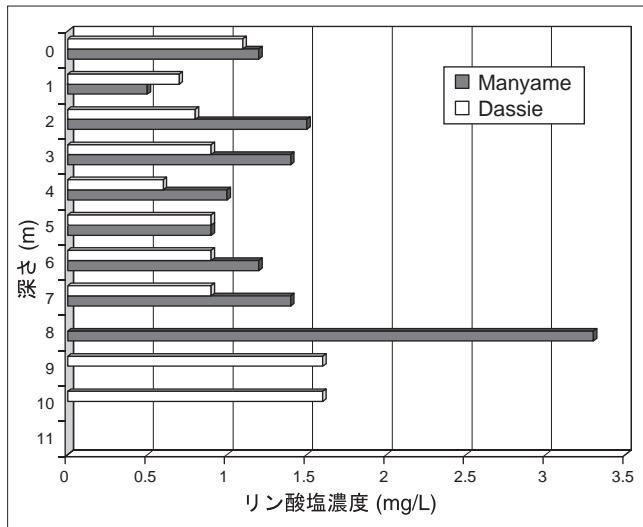


図3 チベロ湖の上流 (Manyame) とダムの近く (Dassic) におけるリンの深度別濃度 (2000年9月)

表1 南アフリカにおける貯水池の栄養状態 (Department of water Affairs, 2001, Carin van Ginkel (2002))

栄養状態	全リン		ダムの数
	最小濃度 (mg/L)	最大濃度 (mg/L)	
超富栄養型	0.145	0.545	9
富栄養型	0.084	0.221	11
中栄養型	0.034	0.115	10
貧栄養型	0.012	0.047	10

アフリカの主要都市部は海拔900 m以上の高地に位置している。都市部が拡大するにつれ、より信頼できる確実な水供給が必要となるため、都市の排水が水源に流れ込む可能性を抱えながらも、居住地域よりも下流に位置する貯水池からの取水を行うことになる。こうした状況下では、排水を元の水路に戻すための高度な処理が要求されるわけであるが、多くの都市当局は排水をそのような高水準にまで処理することができない。まさに、これがアフリカの環境管理上の問題である。

ビクトリア湖は、富栄養化が拡大している具体例である。この湖は手つかずで自然のままの状態であるとみなされていたが、ここ20年間で、突然ホテイアオイの繁茂と水の華の発生という深刻な富栄養化の兆候を見せた。

1961年から1990年にかけて、ビクトリア湖の水の化学組成は著しく変化した。1961年のデータでは、アンモニアと硝酸性窒素はかろうじて検出できる程度であったが、1990年にはアンモニアと硝酸性窒素は表水層でそれぞれ0.5 mmol/m<sup>3</sup>、2 mmol/m<sup>3</sup>、躍層以下では5 mmol/m<sup>3</sup>を超えるほどに増加している。流域土壌が火山性であるため、1960年のデータでも自然含有として1 mmol/m<sup>3</sup>ほどのリンが認められたが、1990年のデータでは深水層でのリン含有量は4 mmol/m<sup>3</sup>まで上昇している。無酸素層は1960年では水面下60 mにあったが、1990年には40 mに上昇した。1961年にはクロロフィルaは平均2 mg/m<sup>3</sup>、水面下20 mで最大値を記録していたが、1990年には表水層のクロロフィルaは14 mg/m<sup>3</sup>~24 mg/m<sup>3</sup>となり、水面下10 mで最大値を記録した。これらの変化に伴い、表水層でのケイ酸は7 mmol/m<sup>3</sup>から1 mmol/m<sup>3</sup>以下へと劇的な減少を示している。

ビクトリア湖の例は、長年に渡り、アフリカ大陸の天然大湖沼で、どのように富栄養化が起きてきたかを示している。こうした懸念は、今やマラウィ湖、タンガニーカ湖、その他ジョージ湖やエドワード湖といった東アフリカの湖にも広がっている。



## 4

## 殺虫剤の影響

アフリカには生物媒介による風土病がいくつか存在する。マラリアや住血吸虫症、回旋糸状虫症(河川盲目症)のように、淡水の水辺で生育する生物によって媒介されるものもあれば、ツェツェ蠅によって感染するトリパノソーマ症のように、陸上だけで生活する寄生虫によって媒介されるものもある。いずれの場合も、これら媒介生物を駆除するために殺虫剤が使用されている。表2は、母乳に含まれるPCBの量とDDT及びその誘導体の量を、ジンバブエで調査したものである。

表2 母乳に含まれるDDT、DDT誘導体、PCB量の比較  
(乳脂肪中の濃度 ng/g)

地域	土地の利用形態	母親の平均年齢	総PCB	pp-DDE	pp-DDT	総DDT	DDT/DDE比
Kariba	害虫駆除	23	2.78	13606	9080	25259	0.6
	綿花栽培	22	59.55	5049	1254	7047	0.2
Esigodini	自営農業	25	13.27	1176	250	1607	0.2

DDTは、ツェツェ蠅とハマダラ蚊の駆除に広く使用されてきた。アフリカ南部では数十年前から農薬としての使用は禁止されているが、西洋の有害生物管理を行う人々の中には、DDTは熱帯環境では急速に消滅するとの主張から、自然や人体へ及ぼす影響よりも使用した場合の利益の方が大きいという意見もある。世界保健機構(WHO)は、DDTの使用は排除する必要があるという統一見解に至っている。

## 5

## PCBの流出

PCBの流出源は、金属スクラップ業者に売り払われた不要の変圧器である。金属を取り出すために、PCBオイルが下水や土壤に流される(図4)。当局は健康や環境への危険性を警告していたが、公式には何の対策も取っておらず、母乳の調査結果によって初めて汚染の程度が明らかになった。モニタリング調査と改善策には大変な規模を要するため、一国の手に余るものである。産業界で使われている種々の原料が環境や人体に及ぼす影響をしっかりと認識し、産業廃棄物の管理を充分に行わなければ、大規模な汚染問題が密かに進行することになるのである。



図4 ハララ郊外でのPCBによる土壤汚染

## 6

## 水生雑草の除去 2,4-D

チベロ湖では、富栄養化によりエイクホルニアやツボクサ、その他ミリオフィラムのような水生雑草が恒常的に発生している(図5)。1970年代中後期には、生態環境管理を行うことで水生雑草を除去していたが、現在では除草剤、特に2,4-D(2,4-ジクロロフェノキシ酢酸)が標準的に使われている。この除草剤を常用すると、人体及び環境にどんな影響を及ぼすかという点については評価されたことがない。



図5 チベロ湖に群生した水生雑草

ホテイアオイは、今やアフリカの内陸水では広く発生している。最も驚かされた事例はビクトリア湖への侵入である。ホテイアオイ自体は1800年代にエジプトで確認されているように、古くからアフリカ大陸に存在していたが、爆発的な繁茂は1980年代に起こった。これは、食料増産のために農薬が使用され、増大する都市ごみや産業廃棄物が河川や湖沼に投棄された時期と一致している。そして現在、アフリカ大陸の主要水系で水生雑草の発生が報告されている。2,4-Dによる汚染が大陸全土に広まっている可能性が現実的な脅威となっている。

## 7 塩分 重金属含有量の増加

図6は、2000年9月にHORIBAのマルチ水質モニタリングシステムU-23を使用して行った、チベロ湖における深度別の塩化物濃度の測定結果である。この湖の集水域の地層は花崗岩であるため、自然流水中に塩化物は検出されない。この湖の導電率は、季節的な増水の程度にもよるが、ここ何年かの間に、50  $\mu\text{S}/\text{cm}$ から現在の1000  $\mu\text{S}/\text{cm}$ を超える値にまで上昇している。

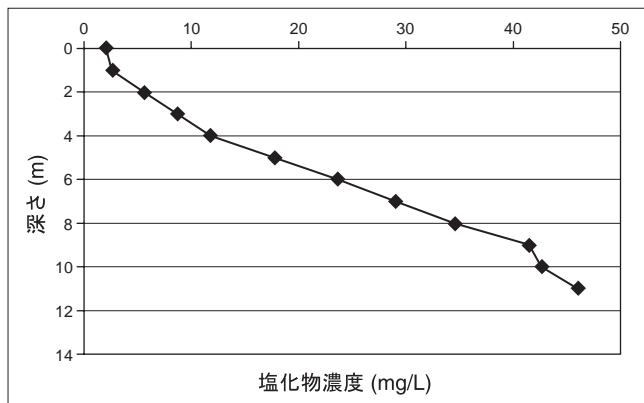


図6 チベロ湖における塩化物濃度の深度別濃度 (HORIBAのマルチ水質モニタリングシステムU-23で測定)

内陸水での塩分増加の主な原因は、以下のようなものである。

- ・ ガンビア川で見られるような、河川流量の減少による海水の流入
- ・ 河川流量の減少による地下水面の低下など、さまざまな要因による海岸地域の地盤沈下
- ・ 灌漑による長期的変動

筆者は、チベロ湖で塩分が増加したのは、ハラレ、チトウングザ両市からの排水が増加したことが原因だと見ている。

アフリカ南部は2025年までには、水欠乏地域になると見られている。水需要を満たすためには、排水の再利用という手段を取ることが現実的な選択となるだろう。従って、安全な再利用水を供給できるような排水処理技術の向上こそが今求められているのである。

ジンバブエで行われた2つの研究は、人間がその土地に定住し生活することが、重金属について水環境の変化をもたらしてしまう原因であることを明らかにした。その一つは、チベロ湖のアオコが、乾燥質量にして最も多量の亜鉛(190  $\mu\text{g}/\text{g}$ )、鉛(78  $\mu\text{g}/\text{g}$ )、カドミウム(1.5  $\mu\text{g}/\text{g}$ )を含有し、ヒ素(2.9  $\mu\text{g}/\text{g}$ )は2番目に多い含有量であることを示した。また、チベロ湖の集水域での調査により、人口が集中する地域を通過している人造水路の堆積物は、同じ地域を通過している天然河川の堆積物よりも異常に高い重金属濃度を示すことが明らかになった。

同様に、カリバ湖では、都市の影響を受けない河口域では堆積物中の重金属蓄積は少ない。植物が含む重金属量はそれほどではないが、鉛とカドミウム量は相当多く、WHOの基準を超えているケースも見られる。アフリカではこの種の環境研究が、人体への影響に対してまで拡大されることはめったにない。しかし、カリバのある住民は、水銀及びDDT中毒であると医学的に診断されたことを相談してきた。

## おわりに

---

本稿は、アフリカの、特に南部では都市人口が増大しているにもかかわらず、継続的に水質動向をモニタリングする具体的な計画がないといった、水質管理に関する懸念を明らかにすることを目的としたものである。

こうした懸念は天然の大湖沼、人造貯水池、河川に等しく向けられるものである。資源不足であること、及び、制度的・行政的に問題があることが水質管理面の重要な課題である。水質の悪化がもたらす経済的、社会的、生態学的影響に関する問題意識の高まりが広く拡大しなければ、水質管理への市民参加にも勢いはつかないと考えている。

---

本稿は、ジンバブエ大学のChris. H. D. Magadza教授に寄稿いただいた“Water resources management and water quality monitoring in an African setting”を抄訳したものです。参考文献一覧を含めた全文(英語)は、Web([http://global.horiba.com/support\\_e/tech\\_info/index.html](http://global.horiba.com/support_e/tech_info/index.html))から、ダウンロード可能です。