

ケニア共和国

「ナクル上下水道整備に係る合同評価」報告書 (JBIC / JICA 合同評価)

平成13年10月

国際協力事業団
企画・評価部

本報告書に掲載されている意見は、評価調査団によるものであり、JICAを代表するものではない。

はじめに

国際協力銀行（ＪＢＩＣ）及び国際協力事業団（ＪＩＣＡ）は、円借款、開発調査、無償資金協力の連携によって、ナクル市及びその周辺地域の上水道施設、並びにナクル市内の下水処理施設、水質試験所等の整備にかかわる事業を実施しました。これら事業の最大の受益地であるナクル市は、人口約36万人を抱えるケニア第4の都市であり、フラミンゴの生息地として有名なナクル湖（ラムサール条約保護対象地）を擁するケニアの代表的な観光地でもあります。ナクル湖は流出河川を持たない閉鎖湖であり、ナクル市及びその周辺地域で発生する生活排水や産業廃水は全て同湖に流入するため、湖水の汚染が懸念されています。

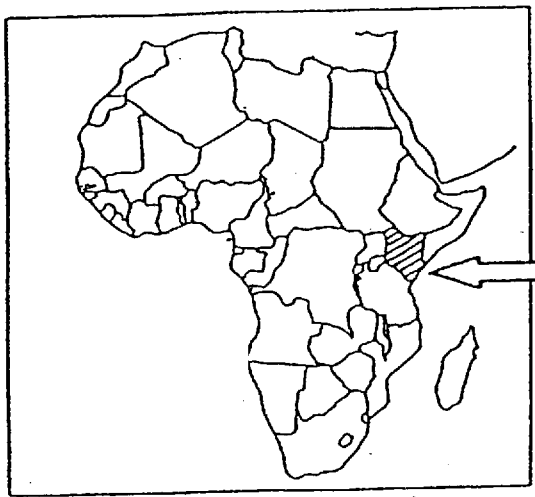
このような背景のもと、ＪＢＩＣとＪＩＣＡは合同で、上記事業により整備された上下水道施設等の運用・効果発現状況を評価することとしました。また今回の評価では、事業の実施によるナクル湖の水質や生態環境への影響についても調査することとし、湖沼生態系、鳥類等を専門とする外部専門家3名（滋賀県琵琶湖研究所 中村正久氏、同研究所 辻村茂男氏、（財）山階鳥類研究所 柿澤亮三氏）に調査団に加わっていただき、過去に一部マスコミ等で懸念された本事業実施がナクル湖のフラミンゴの生息環境に及ぼす影響についても検証を試みました。本評価調査から導き出された提言・教訓は、今後、類似案件を形成・実施する際に大いに活用していく所存です。

最後に、本評価調査の実施にあたってご協力いただいた関係各位に対して、心より感謝の意を表するとともに、今後のご支援をお願いする次第です。

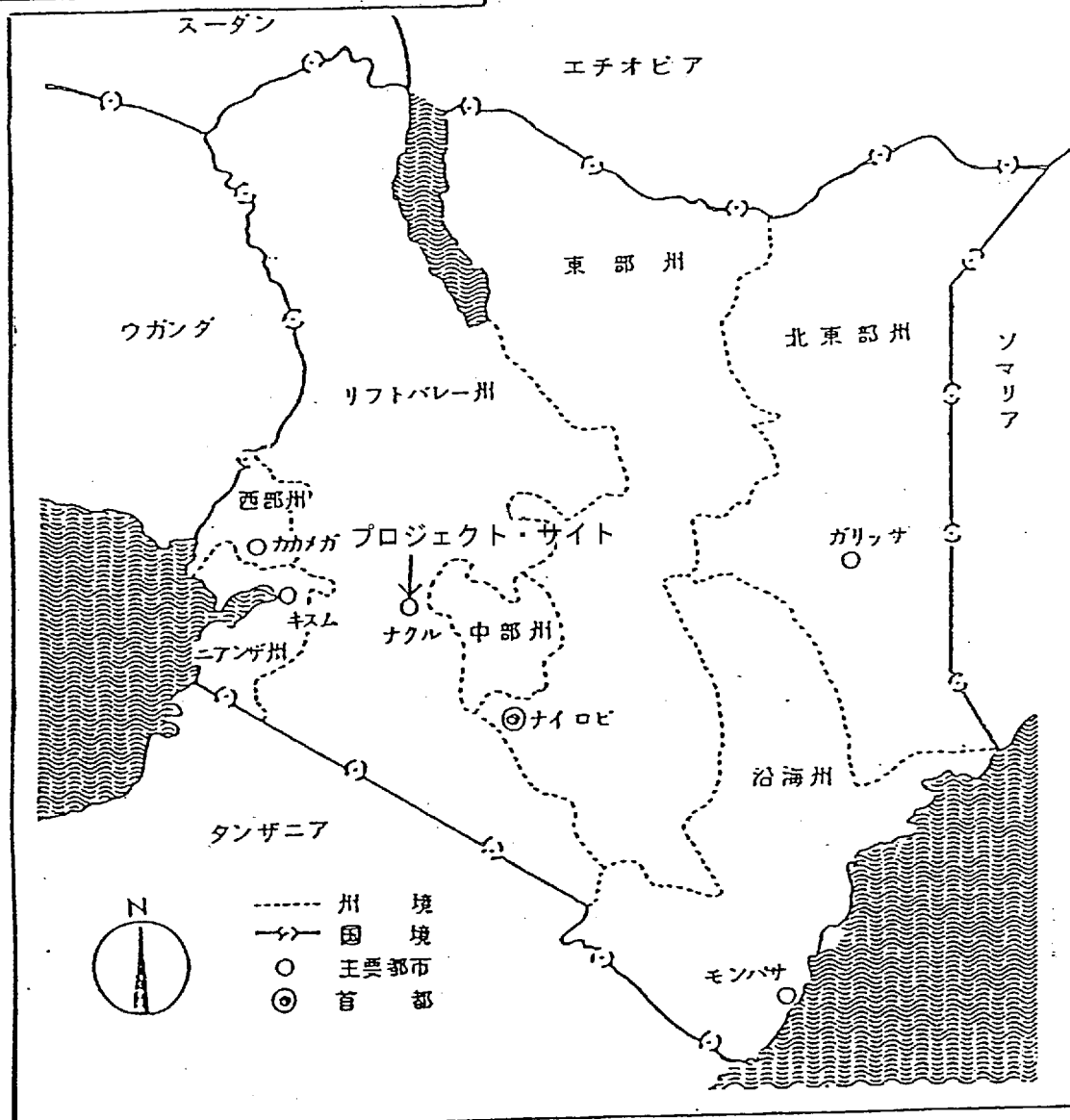
国際協力事業団

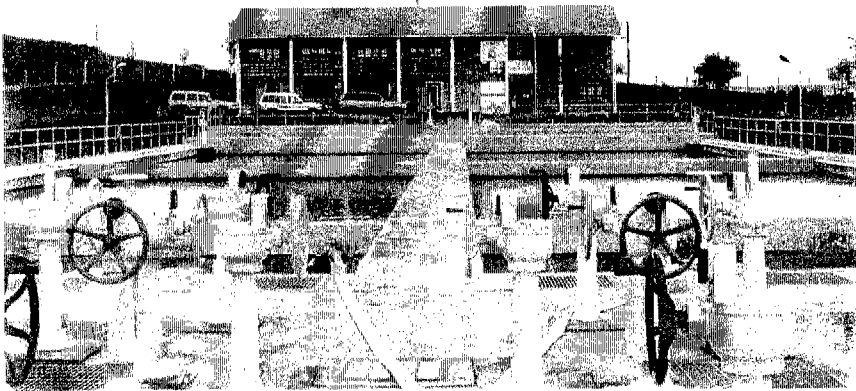
理事 高島 有終

ケニア全体図

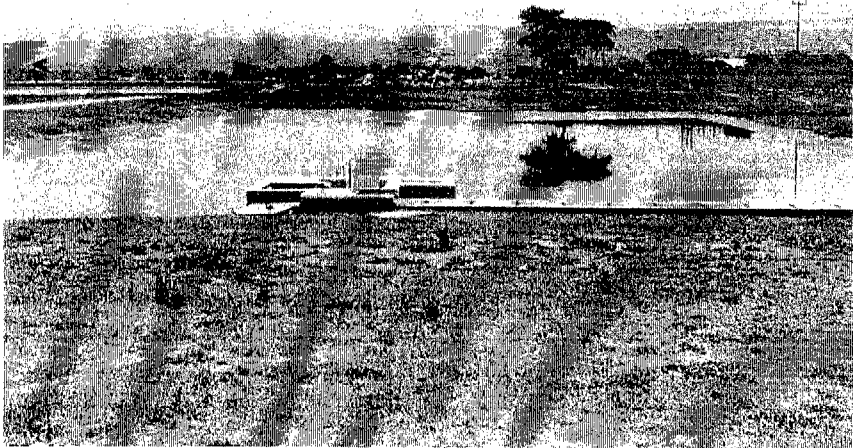


事業の位置図





浄水場



ンジョロ下水処理場



ナクル湖とフラミンゴ

目 次

はじめに

事業の位置図

写真

第1章 評価調査の概要	1
1—1 背景・目的	1
1—2 評価対象案件	1
1—3 評価の実施体制	1
1—4 現地調査日程	2
1—5 現地調査面談機関	3
1—6 評価項目概要	3
第2章 事業の背景・経緯	6
2—1 大ナクル地域の給水事情	6
2—2 ナクル市の下水道整備状況とナクル湖の水環境	7
2—3 事業の経緯	7
第3章 事業の概要	8
3—1 上水	8
3—1—1 目的	8
3—1—2 事業範囲	8
3—1—3 借入人 / 実施機関	8
3—1—4 協力概要	8
3—2 下水	8
3—2—1 目的	8
3—2—2 事業範囲	9
3—2—3 実施機関	9
3—2—4 協力概要	9

第4章 評価結果	10
4—1 上水	10
4—1—1 計画の妥当性	10
4—1—2 実施の効率性	11
4—1—3 目標達成度	12
4—1—4 インパクト	16
4—1—5 持続性・自立発展性	18
4—1—6 まとめ	21
4—2 下水	22
4—2—1 計画の妥当性	22
4—2—2 実施の効率性	23
4—2—3 目標達成度	23
4—2—4 インパクト	26
4—2—5 持続性・自立発展性	27
4—2—6 まとめ	31
4—3 評価結果総括	31
第5章 教訓及び提言	33
5—1 教訓	33
5—2 提言	33
別添図表	35
(第三者評価報告書)	
・ナクル湖とその集水域の総合的な保全について (中村 正久)	45
・ナクル湖の自然環境と近年の生態系変化について (辻村 茂男)	57
別添図表	75
・ナクル湖の水質がフラミンゴおよび数種の水鳥におよぼす影響 (柿澤 亮三)	80
別添図表	88

第 1 章 評価調査の概要

1—1 背景・目的

我が国はケニア共和国（以下ケニアと記す）への支援の一環として、有償資金協力（円借款）により大ナクル地域東部地区の上水道整備を行う「大ナクル上水事業」を実施し、引き続いて開発調査「ナクル市下水道施設修復・拡張計画調査」及び無償資金協力「ナクル市下水道施設修復・拡張計画」によって、ナクル市内の下水・排水処理施設の修復・拡張を行った。上水と下水・排水は密接不可分な関係にあり、両者が互いに効果的に整備されることにより、都市環境インフラとして最大限の効果を発揮することができる。そのため、今回、上下水事業の効果を総合的に評価するために、ＪＢＩＣとＪＩＣＡが合同で評価を実施することとした。

本評価調査では、2000 年 11 月に日本から湖沼生態系、鳥類等を専門とする外部専門家 3 名を含む調査団が派遣され、これに現地の関係機関に派遣されているＪＩＣＡ専門家 2 名が加わり、合同で関係機関からの情報収集及び施設等の視察を行った。また、現地の受益者へのインパクトを測定するために、現地コンサルタントを活用して、受益者を対象とするアンケート調査及びインタビュー調査を実施した。

1—2 評価対象案件

ケニア共和国「大ナクル上水事業」（円借款事業）

1986 年 12 月交換公文締結

1994 年 9 月貸し付け完了

ケニア共和国「ナクル市下水道施設修復・拡張計画」（無償資金協力事業）

1994 年 8 月交換公文（第一期）締結

1995 年 5 月交換公文（第二期）締結

1—3 評価の実施体制

（１）ＪＢＩＣ本部ミッション

中村 正久 滋賀県琵琶湖研究所所長（委嘱専門家）

辻村 茂男 同研究所研究員（委嘱専門家）

柿澤 亮三 山階鳥類研究所（委託専門家）

遠藤 功 プロジェクト開発部 開発企画班（外部専門家）

尾崎 ちひろ プロジェクト開発部 開発事業評価室 監理班

(2) J I C A 専 門 家

小林 仁彦 J I C A 専 門 家 (派遣先 : 国家水道パイプライン公社)

間淵 弘幸 J I C A 専 門 家 (派遣先 : 地方自治省)

1 — 4 現 地 調 査 日 程

(1) 現 地 調 査 期 間 : 平 成 12 年 11 月 12 日 (日) ~ 26 日 (日)

月/日	訪問先	宿泊地
11/12(日)	成田発	機中泊
11/13(月)	午前 : ケニア着 午後 : JICA と の ミ ー テ ィ ン グ	ナイロビ
11/14(火)	ケニア側(MENR、NWCP、MOLG、MOF、KWS) と の キ ッ ク オ フ ミ ー テ ィ ン グ NWCP、KWS、P-MAT と の 個 別 ミ ー テ ィ ン グ	"
11/15(水)	MOLG、MENR と の 個 別 ミ ー テ ィ ン グ 浄水場視察	ナクル
11/16(木)	ナクル市側(MCN、NAQWASS) と の キ ッ ク オ フ ミ ー テ ィ ン グ 下水処理場、水質検査室(ラボ) 視察 KWS Nakuru と の 個 別 ミ ー テ ィ ン グ ナクル湖調査	"
11/17(金)	WWF、NAQWASS、NWCP Nakuru と の 個 別 ミ ー テ ィ ン グ ナクル市全体の視察 Egerton 大学 Dr. Mavara を 訪 問 ナクル市 と の ラ ッ プ ア ッ プ ミ ー テ ィ ン グ ナクル湖調査	"
11/18(土)	ラボ視察 ナクル湖調査	"
11/19(日)	ボゴリア湖調査	"
11/20(月)	エレメンテータ湖調査 JICA と の ミ ー テ ィ ン グ	ナイロビ
11/21(火)	IUCN Dr. Haward を 訪 問 Nairobi 大学 Mr. Githaiga を 訪 問 マガディ湖調査	"
11/22(水)	GTZ 訪 問 ラ ッ プ ア ッ プ 用 資 料 作 成	"
11/23(木)	JICA と の ミ ー テ ィ ン グ	"
11/24(金)	ケニア側(MENR、NWCP、MOF、KWS) と の ラ ッ プ ア ッ プ ミ ー テ ィ ン グ 在ケニア日本大使館訪問 ケニア発 →	機中泊
11/25(土)	(ロンドン)	機中泊
11/26(日)	→ 成田着	

1 - 5 現地調査面談機関

I U C N: International Union for the Conservation of Nature (The World Conservation Union)

M E N R : Ministry of Environment and Natural Resources (環境天然資源省)

N W C P C : National Water Conservation and Pipeline Corporation (国家水道パイプライン公社)

M O L G : Ministry of Local Government (地方自治省)

M O F : Ministry of Finance (大蔵省)

K W S : Kenya Wildlife Service (ケニア野生動物保護公社)

P - M A T : Partnership in Management Assistance and Training (本評価に際し、社会調査を委託したケニアのローカルコンサルタント)

M C N : Municipal Council of Nakuru (ナクル市政府)

N A Q W A S S : Nakuru Quality Water & Sewarage Service Company Ltd.(ナクル上下水道会社)

K W S Nakuru : KWS ナクル支部

N W C P C Nakuru : NWCPK ナクル支部

W W F : World Wildlife Fund

1 - 6 評価項目概要

(1) 実施の効率性

事業範囲、工期、事業費などの計画・実績比較をもとに、事業実施の効率性を分析するとともに、円借款、開発調査、無償資金協力、個別専門家の各スキームの連携についても検証する。

(2) 目標達成度

【上水】

1) 上水施設の運用・稼働状況の検証

各種統計データに基づき、事業完工以降の上水施設の運用・稼働状況を確認する。

(収集するデータ・指標例)

上水供給量、無収水率、漏水率、原水取水率、有水率、水圧、水質、上水道普及率、上水の販売収入など

2) 受益者の便益

ローカルコンサルタントを活用して、地域住民等を対象とする社会調査を実施し、上水事業による直接的便益について、定量的・定性的分析を行う。

【下水・排水処理】

1) 下水処理場の運用・稼働状況の検証

各種統計データに基づき、下水処理施設の運用・稼働状況を確認する。

(収集するデータ・指標例)

下水流入量、下水処理量、下水処理人口、下水処理面積、下水処理料金、下水管総延長、入口 BOD 度、出口 BOD 度、料金回収率、汚泥の処理、下水道普及率など

2) 雨水滞水池の運用状況の検証

雨水滞水池の運用状況 (除去物質の種類・量、雨水の流入・排出量等) を確認する。

3) 水質試験所の運用状況の検証

水質試験所の運用状況 (検査項目・頻度・対象地、検査結果の活用方法等) を確認する。

4) 受益者の便益

ローカルコンサルタントを活用して、地域住民等を対象とする社会調査を実施し、下水事業による直接的便益について、定量的・定性的分析を行う。

(3) 効果

1) 環境へのインパクト (上下排水事業のナクル湖への影響)

2) 受益者への社会経済的インパクト (公衆衛生、水関連コスト削減による経済活動増加、生活向上など)

3) その他のインパクト

(4) 計画の妥当性

【上水】

1) 審査当時から現在までのケニア及びナクル市の水供給政策・状況を調査・分析し、整備された上水施設の役割 (必要性・重要性) を確認する。

2) 審査当時から現在までのナクル市の水供給システムと上水施設との関係 (どのように連結、運用されているか) を整理し、同上水施設がナクル市の水供給システム全体のなかでどのような役割を果たしているか評価する。

【下水・排水処理】

1) 計画立案当時から現在までのナクル湖の環境保全計画と各下水・排水処理施設との関係を整理し、各施設がナクル湖の環境保全計画全体のなかでどのような役割を果たしているのか評価する。

2) 計画立案当時から現在までのナクル市からナクル湖への下水・排水状況を調査・分析し、整備された各施設の役割 (必要性・重要性) を確認する。

- 3) 計画立案当時から現在までのナクル市の下水・排水システムと下水・排水施設との関係（どのように連結、運用されているか）を整理し、同施設がナクル市の下水・排水システム全体のなかでどのような役割を果たしているのか評価する。

(5) 自立発展性

【上水】

- 1) 水源の安定性
- 2) 施設の健全性（故障、スペアパーツ不足などの問題はないか）
- 3) 実施機関の人員・組織の健全性
- 4) 実施機関の財政状況の健全性
- 5) 運営・維持管理システムの健全性
- 6) ナクル市内配水機関（ナクル市政府）の公社化の影響
- 7) ケニア政府及びナクル市政府の水供給施設整備計画及び将来展望

【下水・排水処理】

- 1) 施設の健全性（故障、スペアパーツ不足などの問題はないか）
- 2) 実施機関の人員・組織の健全性
- 3) 実施機関の財政状況の健全性
- 4) 運営・維持管理システムの健全性
- 5) 下水事業運営・維持管理機関（ナクル市政府）の公社化の影響
- 6) ケニア政府及びナクル市政府の下水・排水処理施設（下水処理を含む）整備計画及び将来展望

第2章 事業の背景・経緯

2 - 1 大ナクル地域の給水事情

上水事業の対象となる大ナクル地域はケニア最大の州であるリフト・ヴァレー州に属し、その州都であるナクル市はケニアの首都ナイロビから北西約160kmに位置するケニア第4の都市である。ナクル市南部はケニアの代表的な観光地であるナクル湖国立公園^{*1}に接しており、ナクル湖及びその周辺ではフラミンゴをはじめとし400種を超える鳥類の生息が報告されている。上水事業の計画当時、ナクル市周辺地域は観光地に接しているという地理的環境に加えて、市内及びその周辺の人口増加、産業・商業活動の活発化、農業開発の著しい進展などの要因により、水需要の大幅な増加が見込まれていた（表2 - 1、表2 - 2 参照）。

表2 - 1 事業対象地域(ナクル市及びギルギル市)の将来人口予測（人）

	1979年(実績)	1985年	1990年	1995年	2000年	2005年
ナクル市	93,000	124,000	155,000	188,000	224,000	266,000
(増加率)		(5.0%)	(4.5%)	(4.0%)	(3.5%)	(3.5%)
ギルギル市	9,000	12,000	15,000	19,000	23,000	28,000
(増加率)		(5.5%)	(4.5%)	(4.5%)	(4.0%)	(4.0%)
人口計	102,000	136,000	170,000	207,000	247,000	294,000

出所：Greater Nakuru Water Supply Project Preliminary Design Study Report (May,1985)

表2 - 2 事業対象地域(ナクル市及びギルギル市)の水需要予測（日最大・m³/日）

	1980年(実績)	1985年	1990年	1995年	2000年	2005年
ナクル市	15,420	19,898	25,650	32,137	39,348	46,174
ギルギル市	1,642	4,378	5,790	7,368	9,127	9,891
計	17,062	24,276	31,440	39,505	48,475	56,065

出所：Greater Nakuru Water Supply Project Preliminary Design Study Report (May,1985)

1985年時点で、ナクル市は5カ所の水源（2カ所の浄水場と3カ所の井戸群）から給水されており、1日当たりの最大給水能力は20,660 m³、うち13,870 m³を井戸からの給水に頼っていた。一方、ナクル市南東に位置するギルギル市へは2カ所の浄水場から給水されており、1日当たり最大給水能力は2,000 m³と、1985年時点で既に水需要と供給のギャップが生じていた（表2 - 3 参照）。

* 1 面積約50km²、平均水深2.2m、河川への流出がない閉鎖湖であるため、流入河川から運ばれてくる鉱物質が堆積し、強アルカリ性のソーダ湖となっている。1961年に湖の周囲を含め国立公園に指定され、1990年からは水鳥等の生息環境としての湿地等の保全を目的とするラムサール条約の保護対象地として登録された。

表 2 - 3 水需給ギャップ (1985 年)

	ナクル市	ギルギル市	合 計
1 日当たり最大水需要 (m ³)	19,898	4,378	24,276
1 日当たり最大給水能力 (m ³)	20,660	2,000	22,660
需要供給ギャップ	+762	-2,378	-1,616

(J B I C アプレイザル時収集資料より作成)

2 - 2 ナクル市の下水道整備状況とナクル湖の水環境

下水事業の計画当時、ナクル市の下水道網は市の密集地域を中心に整備され、その整備面積は市域の約40%を占めていた。上水供給地域の約60%は下水道整備地域であった。普及区域内で収集された生活・産業廃水は、最終的には2カ所の下水処理場で2次処理を受けた後、河川を通じてナクル湖に放流されていた。また、下水道の未整備地域では、屎尿のほとんどは簡便な素掘便所や腐敗槽によって個別処理されていた。ナクル市の2カ所の下水処理場の設計能力は計7,000m³/日であるのに対し、下水流入量は約9,000m³/日と過負荷状態で運転されていたため、両処理場とも処理不十分なまま放流をしており、放流河川および最終的な流入先であるナクル湖の水質汚染の原因として懸念されていた。

2 - 3 事業の経緯

上記の背景のもと、ナクル市を含む大ナクル地域東部地区における深刻な水不足解消のため、1984年12月にケニア政府は「大ナクル上水事業」への円借款を日本政府に要請し、1986年12月の交換公文締結を経て1987年3月に同事業の借款契約が結ばれ、1992年1月に上水施設は完工した。一方、上水事業のアプレイザル当時、給水量増加に伴い発生する下水に対する措置はケニア側による対応課題とされていたが、ケニア側は独自に下水対策を実施できなかったため、給水を開始するとナクル湖へ流れ込む汚水量も必然的に増加することから、ナクル湖の水質悪化が懸念された。このため、1990年4月にケニア政府は既存下水道施設の修復・拡張に係る無償資金協力を日本政府に要請した。日本政府は上記協力を支援する前提として、ケニア政府側に適切な環境配慮の実施を求め、ナクル市における給水開始が延期されるとともに、かかる事態に対処するため、緊急的に6,000m³/日規模の下水処理施設が既往円借款資金*2を利用して整備されることとなった。引き続き1993年5月よりナクル市内の既存下水処理施設の修復・拡張計画に係るJICAの開発調査が実施され、同開発調査の結果を踏まえ、1994年8月、続いて1995年5月には「ナクル市下水道施設修復・拡張計画」の第1期及び第2期にかかわる無償資金協力の交換公文が締結され、1997年2月にすべての工事が完了した。評価対象事業の詳細な経緯は別添表1の通りである。

*2 上水事業の円借款資金及び1991年及び1993年に円借款供与された「金融セクター調整計画」及び「輸出促進計画」の見返り資金を利用したもの。

第 3 章 事業の概要

3 - 1 上水

3 - 1 - 1 目的

「大ナクル上水事業」(以下、上水事業と記す)は、ケニアリフト・ヴァレー州の州都であるナクル市を中心とする大ナクル地域東部地区(以下、事業対象地域と記す)の上水道を整備することにより、同地区の水不足事情を改善し、生活水準の向上並び経済の発展を図ろうとするものである。

3 - 1 - 2 事業範囲

事業対象地域における 1995 年までの水需要に対処すべく、円借款により 17,000 m³/ 日規模の上水道施設を整備するもの(別添図 1 参照)。

< 上水事業の計画概要 >

- 1) 取水施設の新設(施設能力 17,000 m³/ 日規模)
- 2) 導水施設の新設(導水管 約 2.7km の敷設等)
- 3) 浄水施設の新設(施設能力 17,000 m³/ 日規模)
- 4) 送水施設の新設(送水管 約 44.2km の敷設等)
- 5) 配水施設の新設(配水池、配水管網整備等)
- 6) 既存施設の修復

3 - 1 - 3 借入人 / 実施機関

借入人 : ケニア共和国政府

実施機関 : ケニア水資源開発省 (MOWD : Ministry of Water Development)

3 - 1 - 4 協力概要

円借款承諾額 / 実行額	5,017 百万円 / 4,979 百万円 (緊急下水施設拡張工事に係る実施設計・施工管理費を含む)
交換公文締結 / 借款契約調印	1986 年 12 月 / 1987 年 3 月
借款契約条件	金利 3.5%、返済 30 年(うち据置 10 年) LDC アンタイド
貸付完了	1994 年 9 月

3 - 2 下水

3 - 2 - 1 目的

「ナクル市下水道施設修復・拡張計画」(以下、下水事業と記す)は、給水量増加に伴う下水量

の増加によりナクル湖の水質悪化が懸念され、上水事業の給水が制限される状況にあったため、ナクル市市街部からの汚濁負荷を軽減しナクル湖の水質改善に資することを目的として、下水処理施設の修復・拡張、水質試験所の整備等を行うものである。

3 - 2 - 2 事業範囲

円借款及び無償資金協力により、ナクル市内2カ所の下水処理施設の修復、拡張に加え、ナクル湖の水質保全のため、雨水滞水池^{*3}、水質試験所等を整備するもの（図3 - 1参照）。

< 下水事業の計画概要 >

- 1) タウン (Town) 下水処理場の修復・拡張
- 2) ンジョロ (Njoro) 下水処理場の修復・拡張
- 3) 雨水滞水池の新設 (タウン処理場内)
- 4) ムワリキ下水ポンプ場の修復
- 5) 水質試験所の建設及び水質試験機材の調達
- 6) 維持管理用資機材 (車輛等) の調達

(a) タウン処理場

- ・ 3,400m³/日ライン：散水ろ床（修復）→通性池（拡張）→熟成池（拡張）→ロックフィルター（新設）→グラスプロッツ（新設）
- ・ 3,200m³/日ライン：嫌気性池→通性池→熟成池→ロックフィルター→グラスプロッツ（全て新設）
- ・ 汚泥乾燥床（新設）
- ・ 雨水滞水池（新設）

(b) ンジョロ処理場

- ・ 6,000m³/日ライン：嫌気性池→通性池→熟成池→ロックフィルター→グラスプロッツ（全て新設。嫌気性池、通性池、熟成池は円借款支援部分）
- ・ 3,600m³/日ライン：嫌気性池（修復）→通性池（修復）→熟成池（修復）→ロックフィルター（新設）→グラスプロッツ（新設）
- ・ 汚泥乾燥床（新設）

図3 - 1 タウン及びンジョロ処理場の修復・拡張施設の概要

3 - 2 - 3 実施機関

実施機関：ケニア地方自治省（MOLG：Ministry of Local Government）

3 - 2 - 4 協力概要

無償資金協力金額	（第1期）1,421百万円、（第2期）1,383百万円
交換公文締結	（第1期）1994年8月、（第2期）1995年5月

（第1期はタウン処理場、第2期はンジョロ処理場を対象とするもの）

^{*3} ナクル市市街部から流出する雨水を一時的に貯留し、オイル、無機物、固形物等のナクル湖への流入を阻止する目的で整備するもの。

第4章 評価結果

4 - 1 上水

4 - 1 - 1 計画の妥当性

(1) 事業計画の妥当性

事業実施前(1983年時点)にケニアで公表されていた水道普及率は都市部で90%、都市部を除く地方で16%、ケニア全体で26%であった(ただし、常時大部分の地域で時間給水が行われ、乾期には広範囲にわたって断水地域が発生する等、実際の普及率は上記公表数値より低いものと考えられていた)。これに対し、同国では中長期的に2つの給水目標が設定されていた。1つは1980年11月の国連総会で提唱された「国際飲料水供給と衛生の10カ年」に対する目標値であり、1990年時点で都市部の水道普及率を100%、地方部の水道普及率を75%に設定していた。もう1つはケニア政府の国家目標である「21世紀までに全国民に水道を(2000年までに水道普及率100%)」を達成するというものであった。上記の中長期給水目標を前提に、1983年3月に発表されたケニアの第五次五カ年計画(1984～1988年)の中で、上水事業は実施すべき計画の1つとしてその必要性が認められていた。

一方、上水事業完成後(1994年時点)のケニアの水道普及率^{*4}は都市部でおよそ75%、地方部でおよそ50%であり^{*5}、同国の第八次国家開発計画(1997～2001年)では依然として都市部及び地方部における安定した水供給の必要性が言及されており、本上水事業計画の妥当性は現在も維持されている。

(2) 需要予測と施設規模の妥当性

上水事業は、当初おおむね1995年までの水需要に対応することを想定していた。上水事業の施設規模を1995年の水需要に対応するものとした理由については、計画当時、本上水事業に続いて「上水道事業(第2期)^{*6}」が検討されていたこと、利用できる水源からの取水可能量の観点から取水施設を大きくすることが困難であったこと^{*7}、ケニア側の財政的制約から事業費を抑制する必要があったこと等を総合的に判断したものと推察される。後述す

*4 出所は第8次国家開発計画。地方部の水道普及率は、水道管による供給の他、井戸、保護された泉、池等からの直接取水を含む。

*5 ただし、同国の「貧困削減戦略ペーパー(2000～2003)」では、水道アクセス率は都市部70%、地方部30%となっており、正確な数値は把握できていないのが実状である。

*6 ナクル市近郊のマレワ川にダムを建設し、新たに33,000m³/日の給水能力を拡張する計画。1989年2月～1990年12月にJICAによる開発調査が実施され、環境影響等に係る更なる調査の必要性が確認された。その後、自然生態系と環境保全の観点から、事業化は見送られた。

*7 計画当時、実施機関(MOWD)は財政的制約から需要の増大に伴い漸次事業規模を拡張していく実施計画を採択し、第1段階としてダム建設は行わず取水堰による河川からの直接取水方式を選択した。この結果、利用できる水源(マレワ川もしくはトラシャ川)からの取水可能量は17,000 m³/日に限定された。

る通り、現在のナクル市の人口及び水需要は当初予測を既に大きく上回っているが、施設規模の選定にあたっては上記のような理由が絡んでおり、計画当時の給水源開発の緊急性を勘案すれば当時の判断としては妥当であったと考えられる。

(3) 事業範囲（スコープ）の妥当性

上水事業の計画取水量は17,000m³/日であったが、実際は、既存のマレワ浄水場(1,000m³/日)の老朽化による給水量減少を補うため、取水容量を1,000m³/日増加し18,000m³/日となった。これはケニア政府の希望に沿ったものであり、容量増加による費用の増加や技術的問題も特に発生しなかったことから、変更は妥当であったといえる。また、取水方式については、当初マラウェ川からのポンプアップ方式が計画されていたが、維持管理面での負担を軽減するため、設計段階でトラシャ川からの取水による自然流下方式が採用された。これについても、ケニア側の維持管理能力を見極めた妥当な変更であったといえる。

また、下水処理場の拡張工事（ンジョロ処理場 6,000 m³/日ライン整備）に上水事業の資金の一部を利用したことについては、ナクル湖の環境保全と上水事業の効果発現のため早急に手当てが必要であったことからやむを得ない事情によるものであり、結果的に事情変更に対応した点は評価できる。しかしながら、アブレイザル時、上水事業実施に伴う排水処理についてはケニア政府の対応課題としており、その後のフォローアップが十分でなかった面は否めない。

4 - 1 - 2 実施の効率性

工期については、交換公文締結交渉の長期化により当初計画より事業開始が1年半ほど遅れたが、工期幅はほぼ計画通りであった（別添表2：主要計画／実績比較）。

事業費は、外貨分については、下水処理場拡張工事の追加に伴う費用増大があり、内貨分支出も大幅に増えたにもかかわらず、全体としてはおおむね計画通りの事業費となった。これは、ケニア・シリングの為替レートが大幅に下落したことから*8、円ベースでの事業費総額が当初見込額を大きく下回ったためである（別添表3：主要計画／実績比較）。

事業実施体制については、事業実施、運営・維持管理は水資源開発省（MOWD：Ministry of Water Development）が担当し、ナクル市内にある配水設備の運営・維持管理はナクル市水道局が担当することになっていた。ナクル市はMOWDから用水を購入し、消費者へ供給し料金徴収を行う役目を負っていた。しかしながら、1988年6月にMOWDの下部組織として国家水道パイプライン公社（NWCPCL：National Water Conservation and Pipeline Corporation）が設立され、一

* 8 アブレイザル時（1985年8月）1KSh（ケニア・シリング）=15.6円、上水事業完成時（1992年末）1KSh=3.44円。

部の都市・広域水道・用水供給事業がMOWDから移管されたことにより^{*9}、本事業の実質的な監理はNWCPCが行い、事業完成後のナクル市への水供給もNWCPCよりナクル市水道局を通じて供給された。なお、その後ナクル市内の上水供給については、2000年2月に設立されたナクル上下水道会社（NAQWASS：Nakuru Quality Water and Sewerage Service Company Ltd.）に移管され^{*10}、さらに直近では環境天然資源省（MENR：Ministry of Environment and Natural Resources）に移管されるに至っている^{*11}。

4 - 1 - 3 目標達成度

（1）給水量

本上水事業は1995年を目標年度として、給水人口20万7,000人、日最大需要量39,500 m³/日（既存の施設容量と本事業による増強分を合わせる）1人1日最大需要量190l/人・日を達成するものであり、本事業によって増加する供給量18,000 m³/日のうち、最大の受益地であるナクル市への計画給水量は13,300 m³/日^{*12}であった。別添表3をみると、1995年時におけるナクル市への実際の上水供給量は年平均10,327 m³/日であり、これは計画供給量に対しおおむね8割の達成率である。また、2000年1月から6月の同市への平均日給水量は7,911 m³/日であり、これは計画供給量に対しおおむね6～7割の達成率である。一方、既存施設も含めた同市における日平均総供給量も、1995年時点では30,010 m³/日であったが、2000年1月から6月には28,499 m³/日に減少している。この理由としては、1）既存施設の破損、維持管理不足等により既存施設からの上水供給量が減少していること、及び2）本事業に関してはナクル市が上水の元売り業者であるNWCPCへの水道料金支払いを滞納した結果、NWCPCからの用水供給量が制限されたこと、が挙げられる（ナクル市における水道事業の経営問題については後述する）。

ナクル市の人口は現在約36万人と推定されており、これは計画時の人口予測（2000年に22万4,000人）を大きく上回っている。同市における水需要は現在約60,000 m³/日と予測されており、評価時点では、本事業による上水供給量の増加をもってしても、既にナクル市の水需要を満たすことができない状況である。しかしながら、本事業による供給水量はナクル市の上水供給の3割近くを占めるものであり、同市の水不足解消に一定の効果をあげているといえる。

* 9 NWCPCは41水道事業を直轄経営する公社として1989年7月より活動を開始し、2000年現在46の水道事業を8地域事務所、43地区事務所を通して運営・維持管理している。

* 10 ナクル市水道局が上下水道事業を所管していた際のNWCPCへの料金滞納等の問題に対処するため、独GTZ（ドイツ技術協力公社）の支援により上下水道事業の民活（Commercialization）の一環としてNAQWASSが設立され、施設の維持管理や料金徴収などはすべてこの会社に移管されることとなった。

* 11 第4章4 - 1 - 5（2）ナクル市における水道事業の経営問題の項を参照。

* 12 13,300 m³/日うち1,500 m³/日はナクル市を通過しナクル西部地域への給水分。

(2) 水質

浄水場及びナクル市内の配水池を視察したところ、下記のとおり定常業務であるべき原水及び処理水水質試験は財政難及び人材不足から、水質基準項目 45 項目のうち、基本的項目である濁度、pH 及び残留塩素濃度の 3 項目は毎日の検査が励行されていたものの、他の項目については定期検査が実施されていなかった。その結果、水質基準に見合うデータが十分得られていない現状から水質基準を満たしているかの判断は難しい。

1) 浄水場

浄水場における水質試験は、原水の濁度、pH の計測及びジャーテストを 1 日 1 回、浄水後の残留塩素濃度の測定を 1 日 2 回、アルカリ度測定については毎週 1 回実施されている。また、配水管末端部では、NWCPC の水質基準（暫定）で、年に数回程度の濁度、残留塩素濃度の計測及び一般細菌検査を行っている（別添表 4 参照）。浄水場における水質検査については、ケニア共和国政府が用いている水質基準項目 45 項目のうち、基本的項目である濁度、pH 及び残留塩素濃度の 3 項目は毎日の検査が励行され、これら 3 項目の水質については特に問題は見られない。他の項目についても、毎週あるいは毎月等、項目に応じた頻度で定期検査を、また、少なくとも年 1 回は全項目の検査を実施する必要がある。

2) ナクル市内配水池

NWCPC からナクル市への上水供給は 3 カ所の配水池（R5、R6、R7）へ供給される（別添図 2 参照）。R5 の配水池ではナクル市の既存上水道施設からの浄水と混合され、配水池内で塩素の再注入が行われている。ナクル市独自の水質試験は浄水場において原水の濁度、pH 計測及び浄水後の塩素注入濃度の測定を 1 日 1 回、及びアルカリ度測定を毎週 1 回実施している。

(3) 給水システム全体のパフォーマンス

1) 料金徴収対象率、メーター設置率とその稼働率及び料金回収率

ギルギル地域における年別料金徴収対象率^{*13}、メーター設置率^{*14}とその稼働率^{*15}は表 4 - 1 の通りである。ナクル市については分析に必要なデータが収集できなかった。ギルギル地域における料金徴収対象率は 84% であるが、対象率が 100% でない原因は水

* 13 料金徴収対象率は顧客契約件数に対する料金徴収件数の割合。

* 14 メーター設置率は料金徴収件数あたりのメーター設置件数の割合。

* 15 メーター稼働率は接続メーター件数あたりの稼働メーター数の割合。

道料金未払いによる給水停止、顧客契約をしたものの現実に給水出来ない所を料金徴収対象外としているためである。メーター設置率は25%と低いうえ、さらにメーター稼働率も53%と半分が稼働していないため、メーター検針による料金回収はほとんど行われておらず、定額で料金徴収を行っている。一方、料金回収率^{*16}は表4-2の通りであり、ナクル市ではおおむね5～6割、ギルギル地域では3～4割の回収率である。大口滞納者のほとんどは政府機関である。

表4-1 年別料金徴収対象率、メーター設置率、メーター稼働率（ギルギル地域）

年	契約件数	料金徴収件数	メーター設置件数	故障メーター数	徴収対象率(%)	メーター設置率(%)	メーター稼働率(%)
1998	1,710	1,168	372	148	68.3	31.8	60.2
1999	1,935	1,360	404	188	70.3	29.7	53.5
2000	1,778	1,492	374	175	84.2	25.1	53.2

表4-2 料金回収率（ナクル市及びギルギル市）

ナクル市（NAQWASS管理）

年	請求額（千Ksh/月）	回収額（千Ksh/月）	料金回収率（%）
1998	N/A	N/A	N/A
1999	12,581	7,118	56.6
2000	13,009	6,572	50.5

ギルギル市（NWCP C管理）

年	請求額（千Ksh/月）	回収額（千Ksh/月）	料金回収率（%）
1998	2,394	611	25.5
1999	2,621	1,063	40.6
2000	4,394	1,184	26.9

（表4-1，4-2ともに、2000年11月現地調査時収集資料より作成）

2) 無収水率^{*17}とその原因

上水事業における無収水率については正確なデータが存在しないが^{*18}、ケニア側実施機関によれば6割程度に達している可能性があると言われている。無収水（漏水）の原因としては、盗水や既設の給配水管路の老朽化及び石綿管等の脆弱な材質を使用していることによる漏水が挙げられる。無収水対策については、その主たる解決策である各戸

* 16 料金回収率は水道料金請求額あたりの水道料金回収額の割合。

* 17 表4-1に示される通り、ギルギル地域においては料金徴収件数に対する水道メーター設置率が約25%（2000年度）と低いこと、正確な検針の出来るメーターが少ない（接続されたメーター総数に対する可動メーター率約53%：2000年度）ことから、給水量が正確に把握できないため無収水量及び漏水量をはっきり区分できない状況である。そのため本評価報告書においては無収水量及び漏水量をあえて区分しないものとする。

* 18 正確なデータが取れない原因としては、8箇所の水量計のうち3箇所が故障してデータが読み取れない状態にあること、また、水道メーターのプロペラ部に砂等が詰まり、プロペラの適正な回転を妨げるいわゆるメーター不感も考えられる。

水道メーターの100%普及及び定期交換が全く実施されていない。また、漏水対策においても漏水を事前に発見し修理するという予防的対策や配水管の管路更新は同様に実施されていない。その主な原因としては、維持管理に対する予算が不足しているため資機材が購入できないこと、また、職員の人数、インセンティブ不足及び移動交通手段の不足に起因し、施設の巡回が思うように実施出来ないことがあげられる。無収水及び漏水対策といった施設の適正な維持管理業務は多くの問題を抱えており、それらに対する改善策の検討及び目標設定すらされていない状況である。

なお、事業実施前(1980年時点)のナクル市及びギルギル市の無収水率は17%、15%と相当低い実績であったため、事業計画時にメーターの設置を上水事業に含むことは考慮されなかったものと推察される。

3) 配水管の水圧管理

配水管の水圧管理は日常業務として取り組まれていないようであるためデータが残されていない。現地調査時に簡易水圧計(蛇口装着型)で計測したところ、ギルギル(NWCPCギルギル管理所)で1.0気圧、ナクル市内(NWCPCリフト・ヴァレー管理所)で0.8気圧であった。水圧に関しては現在のところ特に問題は無いと考えられる。

(4) 財務的内部収益率(FIRR)

上水事業のFIRRの計算にあたっては、便益として事業実施によって増加する給水量をもとに計算した料金収入を見込み、支出としては建設費、及び運営・維持管理費を見込んで計算した。

アプレイザル時のナクル市における水道料金は1.4Ksh/m³であったが、当時検討されていた水道料金値上げ案(4.0Ksh/m³)と、同案から更に50%の値上げ(6.0Ksh/m³)の2ケースを想定し、有収水率85%(1980年の実績)として収益率を計算し、FIRRは-0.1%及び4.9%を得ていた。このように低い収益率にもかかわらず事業が実施されたのは上水供給の社会的重要性や緊急性が認められたからである。

本評価においては、ケース1(浄水供給量12,000 m³/日、有収水率4割、水道料金10Ksh/m³は今後も現状レベルと仮定)、ケース2(2002年以降、浄水供給量18,000 m³/日、有収水率6割、水道料金20Ksh/m³に改善すると仮定)の2つのケースを想定し、再度FIRRを計算したところケース1では-4.3%、ケース2では1.3%となった。アプレイザル時の想定値と比べ数値が低くなった要因としては、有収水率が落ち込んだこと、物価上昇に見合う水道料金の値上げが行われていないこと^{* 19}があげられる。

* 19 事業開始時(1988年)を基準にした現在のケニア国内の消費者物価指数は約5.5倍。

(5) 受益者調査の結果

ナクル市において、上水事業の受益者を対象に社会調査^{* 20}を実施したところ、水量、水質に関し以下のような結果を得た。

1) 水量

・ 回答者 (509 人) の 4 割近くが「本事業によって供給水量が増加した」と回答したが、同時に「断水、低水圧の問題が依然として続いている」という回答が 9 割近くある。

2) 水質

・ 回答者の半数以上 (53 %) が「本事業によって水質が改善された」と回答した一方、半数近い回答者 (42 %) が「本事業によって供給される水は他の水源から供給される水と混合して供給されているため、水質が改善されたとは考えていない」と回答した。

・ 6 割近い回答者が「水質に関し濁りや沈澱の問題が依然として続いている」と回答しており、結果的に水を使用する際には沸水している。

・ 低所得層の回答者^{* 21} (回答者全体の約半数) は水不足に悩まされていたため、水の確保が重要であり、水質については問題視していない。

4 - 1 - 4 インパクト

(1) 受益者へのインパクト

1) 健康・衛生状態の改善

ナクル市における上水事業の受益者を対象にした社会調査の結果、9 割近い回答者が「一般的な健康・衛生状態は改善された」と回答した。

2) 水くみ労働の軽減

上記調査の結果、低所得層の回答者は、上水供給によって女性や子供の水くみ労働の軽減があったと回答した (中・高所得者層は (家族を含む) 回答者自身が水くみを行わないため、上記の効果は該当しない)。

(2) 環境へのインパクト

本評価では、上下水道事業の実施によるナクル湖への環境インパクトについて、第三者評価を実施しており、その報告概要は以下の通りである。環境へのインパクトの詳細については、別添の第三者評価報告書を参照頂きたい。

* 20 現地コンサルタントを活用し、ナクル市内の本事業による受益者 509 名、及びキー・インフォーマント (代表者) 26 名を対象にアンケート方式、及びディスカッション形式によるインタビュー調査を実施したもの。

* 21 アンケート調査の対象者選定にあたり、上水事業の裨益地区を行政区毎に 3 つのグループ (主に低・中・高所得層の居住地域) に分け、各行政区より住民数比に応じ対象者をランダムに選定した結果、低所得者層が回答者の約半数となった。

< ナクル湖とその集水域の総合的な保全について：琵琶湖研究所 中村正久氏 >

日本の協力の一環として建造された浄水施設や下水処理施設はナクル市の発展にとって欠くべからざる都市インフラであり、ナクル市の都市化・産業化や人口集中を促進する重要な要素となっている。

一方、環境インフラ整備と地域全体の持続的発展との関連性に注目すると、整備対象区域外におけるベーシックサービスレベルとのギャップの拡大や、増大する人口を扶養するための周辺森林地域の急速な農地化やこれに伴う農薬使用の増大等の懸念が指摘される。すなわち、ナクル市及び周辺域を一体的に保全していく必要性が増している。

本事業によって整備された施設は、今後のナクル湖及びその集水域の一体的保全を考える上でも非常に重要であり、水質試験所の機能強化、有害化学物質対策、ナクル湖流域の一体的保全のための科学的知見の蓄積といったフォローアップ策の検討が必要である。

< ナクル湖の自然環境と近年の生態系変化について：琵琶湖研究所 辻村茂男氏 >

閉鎖湖であるナクル湖は「アルカリ・ソーダ湖」、「富栄養湖」、「水位変動の激しい湖」という3つの大きな特徴をもつ。「アルカリ・ソーダ湖」、「富栄養湖」であることは、小型フラミンゴの餌である植物プランクトン「スピルリナ」の増殖に、反対に「水位変動の激しい湖」であることは、スピルリナの減少に寄与する。水位変動によりスピルリナが減少すれば、小型フラミンゴは、より餌がある別のアルカリ・ソーダ湖に移動するため、一時的に一つの湖から小型フラミンゴがいなくなることは自然なことであり、小型フラミンゴの生態から考えた場合、リフト・ヴァレーに点在するアルカリ・ソーダ湖沼群全体として、安定した餌が供給されているかどうかの視点が大切である。

近年、水位変動の他に、有機汚濁、重金属汚染もスピルリナ減少に影響を与えるのではないかと指摘がされている。また、重金属汚染については、フラミンゴの大量死の原因とも言われている。下水事業は有機汚濁や重金属汚染の防止に貢献していると考えられるが、重金属汚染については、下水処理場がもともと重金属処理を目的としていないこと、処理場を通らない排水も多いことなどから、処理場のみでは対応が困難であり、より確実に負荷を削減するためには、工業廃水の一時処理の義務づけ、農薬の使用方法的指導など、下水事業とは別の新たな取り組みが必要である。既にナクル湖は危機的な状況に近づいていると考えられ、総合的な環境保全計画の立ち上げを早急に行う必要がある。

< ナクル湖の水環境の変化がフラミンゴおよび数種の水鳥におよぼす影響：

(財) 山階鳥類研究所 柿澤亮三氏 >

東アフリカの湖フラミンゴ個体群は、本種の世界最大の個体群であるが、個体数、生態など明らかにになっていない部分が多い。一方、ナクル湖の水位の変動は大きく、「上水道事業」実施によって予測される水位変化の幅を大きく越えるものである。ナクル湖の水位変動とフラミンゴの飛来数は、水位が上昇する時に個体数も増える傾向があるが、それとは無関係に増減することもあった。

また、フラミンゴの飛来数はナクル湖の水位だけによって制御されるものではなく、他の近隣ソーダ湖の状態や繁殖行動の影響を大きく受けている。このことから水質の変化の指標生物としてフラミンゴを用いることは適切とは言えない。水質変化の指標動物として有効なのは、魚食性鳥類であり、それらを指標に用いると、ナクル湖の水質が悪化しているおそれがあると推測された。

4 - 1 - 5 持続性・自立発展性

(1) 運営・維持管理体制と現状

上水事業により整備された施設は(ナクル市内の施設を除き) N W C P C が維持管理及び運営している。本施設はN W C P C リフト・ヴァレー地域事務所の管轄下にあり、運営及び維持管理等の実務はギルギル地区事務所の責任のもと行われている。2000年11月における職員数は、リフト・ヴァレー地域事務所275人、ギルギル地区事務所26人である。リフト・ヴァレー地域事務所はギルギル地区を含む9つの地区事務所を管轄しており、全地区のメーター検針後の水道料金請求書作成・配布、水道料金支払い状況等の顧客情報管理及び地域全体にまたがる維持管理を行っている。ギルギル地区事務所においては、本事業により整備された施設の運営維持管理及びギルギル地域の水道メーター検針、水道料金徴収等の営業業務を行っている(なお、ナクル市内の上下水事業の運営・維持管理を担うN A Q W A S S の体制については後述する)。

上水事業の運営・維持管理体制に関し、現地調査において確認された点は以下のとおりである。

1) 取・導水施設

施設の運用・稼動状況に特に問題は見られなかった。

2) 浄水施設

浄水場の人員配置

浄水場の職員数は計9人で、浄水場の運転は監督者1人、薬品注入管理者1人、場内清掃2人計4人が1組となり、1日2交替勤務で行っている。誰かが休むとその補充者は

いないため、その業務は行われないのが現状である。特に水質に関する的確な知識をもった職員はわずか1人のため、その職員が休めば水質管理業務は実施されないことになる。

現場職員の技術力

本上水事業で建設工事を担当した日本の企業は、施設・機材の維持管理マニュアルを作成するとともに、水道業務がMOWDからNWCP Cへ移管される前に関係職員に対し研修を実施し、操業・維持管理に関する技術移転を行った。

しかしながら、その後7年が経過した現在、現場には維持管理マニュアルも置かれておらず、また試験給水期間中に技術移転を受けた職員は異動している。その後任に対する適切な引継ぎも行われていなかったため、技術の持続性が保たれていない。特に水質管理においては、浄水場にて適正な凝集剤注入が行われていない等、現場職員の技術力不足により適正な作業が行われていない状況が見受けられる。

3) 送水施設

送水管施設上にある4箇所の空気弁^{*22}に対する沿線住民による破壊行為が絶えない状況にある。管路パトロール等の日常業務が十分にされていないこともあり、空気弁からの違法取水が公然と行われており、その具体的対応策もなされていないのが現状である。

4) 配水施設

配水池防護柵及びマンホールの鉄蓋は全て盗難されている。バルクメーター施設は周辺住民による破壊行為が絶えず、多くのメーターは破壊され無収水対策に必要なデータ収集が出来ない状況にある。これらを防ぐためのパトロール等の日常業務が維持管理用マニュアル通りに励行されていないことが原因となっていると思われる。日常業務がマニュアル通りに励行されていない理由としては、維持管理にかかわる予算不足、人員不足、インセンティブ不足等の要因が考えられる。

5) 機材の維持管理状況

水質試験機材については、浄水場にジャーテスター、濁度計、アルカリ度測定器、残留塩素測定器、pH測定器等が、NWCP C本社の水質試験室には水質総合試験器具一式が納入されている。このうちNWCP C本社に供与された試験器具一式については、1997年に火災のため焼失してしまい、その後補充されていないため、浄水場で補えない項目の水質検査ができない状況にある。早急に資機材の補充を行い適切な浄水管理が望まれる。

また、6台の車輛が調達されたが、調達後9年を経た現在、1台を除いては故障により

* 22 管路の凸部に設置し、空気の出入りを制御するバルブ。

処分されている。残る1台は、現地調査時にはNWCPCが管理する他の水道施設の維持管理に使用され、本来の目的である送水管延長約40kmに点在する水道施設を適正に維持管理するためには用いられていなかった。

6) 水道料金回収業務

水道料金回収業務は、水道メーター検針後の水道料金算出、請求書作成及び水道料金徴収後の収納状況管理はパソコンベースで1998年4月より電算化されている。このことにより請求書の発行が迅速かつ正確になり、顧客からの苦情が減少した。しかしながら、システムのデータ管理は人的及びプログラムのチェック機構が明確にされていないため、今後の改善が必要である。また、NWCPCにはこの電算システムその他2種類、計3種類の電算システムが混在しており今後システムの統一も必要である。

なお、ナクル市における上水事業の受益者を対象にした社会調査の結果、「メーターが設置されていない」、「(料金)請求書が来ない」と回答したのがいずれも全回答者の約6割にのぼった。

(2) ナクル市における上下水道事業の経営問題

上下水道事業は一般に、「取水 → 浄水 → 送水 → 配水 → 下水処理」の5つのプロセスから成り立っている。本事業においては、ナクル市がNWCPC(浄水場の維持管理、ナクル市への送水を担当)から水を購入し、ナクル市の住民と事業者に対し「配水」と「下水処理」サービスを提供することとなっていたが、ナクル市はNWCPCに対して支払うべき料金を滞納し、その累積額は2000年2月時点で82,952,085Ksh、日本円にして約1億円相当に達していた。

この結果、NWCPCからナクル市への送水は制限され、市内の水需要を満たすことができない状況となっていた。料金滞納の背景として、市が、消費者(住民、事業者)に対してNWCPCからの仕入れ値より安い価格で水を販売していたこと(上水1m³当たりの仕入れ値15Kshに対し、販売価格は10Kshであった)と、徴収した水料金を他の歳出に充てていたことがあげられる。

このような状況の下、ナクル市水道局の料金滞納や低い給水量といった問題を解決するために、同事業の民活が図られることになり、独GTZの支援の下、2000年2月にNAQWASSが有限会社として設立された。NAQWASSは、設立以降も、毎月開かれるUWASAM(Urban Water and Sanitation Management)プロジェクト^{*23}の会合への出席やマンスリーレ

^{*} 23 GTZは1980年代後半より、ケニア地方自治省(Ministry of Local Government: MOLG)と協力し、同国の複数の地方自治体において実施されている上下水道事業の強化を進めてきた。GTZ/MOLGのプロジェクトは、UWASAMと呼ばれ、現在、合計10ヶ所の地方自治体を対象に、それぞれが所有かつ運営する上下水道の自活(Self-sustaining)を目的としている。ナクル市UWASAMプロジェクトの対象自治体の一つであり、GTZから、NAQWASS設立に係る支援を得た。

ポートの提出等を通じて、会社経営に関するG T Zの支援を受けており、民間からの人材登用や経営計画の策定等による経営の効率化にも着手している。

現在、N A Q W A S Sが直面している経営上の問題として、低い収益性、高い無収水率、低い下水道普及率の3点が挙げられ、不適切な上水道料金の設定がこれらの根本的な原因と考えられる。収益性については上述の通り、N A Q W A S SがN W C P Cから購入する用水料金とナクル市における販売価格が逆鞘になっており、この損失を補うための施策、例えば補助金の交付も行われていないため、販売価格を上げない限り、上水を売れば売れば損失が増える構造になっている^{* 24}。

また、N A Q W A S Sの職員によれば、高い無収水率の原因は、水道メーターの未整備やコンピューターによる料金徴収システムの未構築にあるとしており、これら新規設備投資が遅れているのは損失が続いている財務状況に原因がある。また、下水道普及率が低い理由もこれと同じで、不適切な料金設定が損失をもたらし、新規設備投資のための予算を確保できないことにあるといえる。上記の収益性や無収水率、下水道普及率への対策として、その原因となる上水道料金の適正化に早急に取り組む必要がある。

(なお、現地調査実施後、ナクル市への十分な給水量が確保できなかったこと、料金収入が計画通りに得られなかったこと等を理由に、中央政府の決定により2001年2月にナクル市の水道関連事業の運営はN A Q W A S SからM E N Rに移管された。M E N Rへ移管後の長期的な運営計画や具体的な実施体制は明らかになっていないが、中央政府の介入により水道料金は値上がり、N W C P Cからナクル市への給水量は10,000 m³/日近くまで回復している模様である。)

4 - 1 - 6 まとめ

上水事業の施設は計画通りに完成しており、その機能に特段の問題はない。また、社会調査の結果、受益者は総じて健康・衛生状態等において便益を得ている。しかしながらナクル市では水道事業体であるN A Q W A S Sの経営状況が悪いため用水購入先であるN W C P Cから十分な給水が受けられず、評価時点において計画供給量の6割しか供給できていない。これは不適切な料金設定により、N A Q W A S SがN W C P Cから購入する用水料金とナクル市における販売価格が逆鞘になっていることが原因である。一方、供給水質については、これまで特に問題は発生していないが、水質検査・管理体制等に改善の必要性が見られる。無収水率につい

* 24 ただし、このような構造に陥った経緯・理由について、今回の現地調査では情報を入手することが出来なかった。

ては、正確なデータが存在しないものの盗水や漏水による無収水量はかなり大きいと見込まれている。

本事業の持続的・自立的な効果発現のためには、ナクル市における水道事業体の経営改善（メーター設置、料金回収システムの改善等による無収水率の改善、水道料金の値上げ等）による本上水事業からの供給水量の増加（計画供給量の達成）が必要である。

4 - 2 下水

4 - 2 - 1 計画の妥当性

（１）事業計画の妥当性

事業実施前、ケニア政府は第７次国家開発計画（１９９４～１９９８年）の中で環境を重視した資源活用型の成長を図ること、また都市部の上水道開発は下水処理開発と一体で行うことを明示しており、下水事業は同国の開発計画に合致したものであった。

さらに、同国の第八次国家開発計画（１９９７～２００１年）においても、上水供給にあわせ、効率的な下水処理施設整備の必要性について触れられており、本下水事業計画の妥当性は現在も維持されている。

（２）事業規模の妥当性

計画当時、上水事業の完成によってナクル市に新規給水 13,300 m³/日が増えることに伴い、既存公共下水道完備地区から 16,200 m³/日の下水が発生すると予測された。当時の既存下水処理施設の総処理能力は 7,000 m³/日（タウン処理場 3,400m³/日、ンジョロ処理場 3,600m³/日）であったため、処理施設はこれに見合う処理能力を持ったものとして、新たに 6,000 m³/日、及び 3,200 m³/日の処理能力をもつ施設が建設された。

しかしながら、計画時に使用した下水接続戸数、下水管網の能力、処理場への流入量などのデータは、必ずしも信頼性の高いものではなかったと考えられる。下水接続戸数としてコンピューターに登録されていた数値が使用されたが、実際の接続戸数はその半数程度ではないかと推測しているケニア側関係者もいる。

下水管網についても、破損などにより、現在ナクル市内の各所でマンホールから下水が漏水している状況にあるが、計画時にはそのような下水管からの漏水があまり問題にされておらず、既存の下水管網が流入したすべての下水を下水処理場に送ることが前提とされた。

また、計画当時の下水処理場への流入量のデータも、水路に堆積した土砂によって嵩上げされた数値であった可能性がある。これらに加え、上水供給量が計画時に見込んだとおり増加しなかった結果として、下水処理場では、設計水量に対し流入水の不足が生じている。

(3) 事業範囲(スコープ)の妥当性

下水事業については、土工量の一部変更や調達機材の一部追加等の点を除き、おおむね基本設計通りに実施された。なお、本事業では、下水処理方法として広大な敷地を利用したポンド処理方式^{* 25}を採用されたが、これは維持管理に係る技術、コストの面で、実施機関側の負担を最小限度に止めることを念頭に置いたものであり、適切であったと判断できる。

4 - 2 - 2 実施の効率性

事業費、工期ともに基本設計通りに実施された。事業実施体制については、実施機関は地方自治省(MOLG: Ministry of Local Government)、施設完成後の維持管理は、ナクル市水道局が担当することになっていたが、前述の通り、評価時点ではナクル市の下水処理施設の維持管理、料金徴収等の業務はNAQWASSに移管されている。また、水質試験所は、基本設計によれば、水資源省(MOWR: Ministry of Water Resources)直轄の試験所とし、MOLG、ナクル市、及びケニア野生動物保護公社(KWS: Kenya Wildlife Services)がその運営に協力することになっていたが、実際はほぼナクル市が運営する状況である。また、基本設計調査において提言された水質検査にかかわる技術協力については、青年海外協力隊員1名が施設完成後の1997年12月から1999年12月まで2年間にわたり派遣され、水質検査計画、手法等に関し技術指導を行っており、技術協力と無償資金協力の連携のもと、ケニア側の技術力向上が効果的に図られた。

4 - 2 - 3 目標達成度

(1) 下水処理場の稼働状況

各処理場の事業前後の計画処理能力を図4-1に、各処理場への下水流入量(処理量)の実績を表4-3に示す。

タウン処理場	3,400 m ³ /日 → 6,600 m ³ /日 (1995年3月完工)
ンジョロ処理場	3,600 m ³ /日 → 9,600 m ³ /日 (1997年2月完工)
合 計	7,000 m ³ /日 → 16,200 m ³ /日

図4-1 計画処理能力の変化

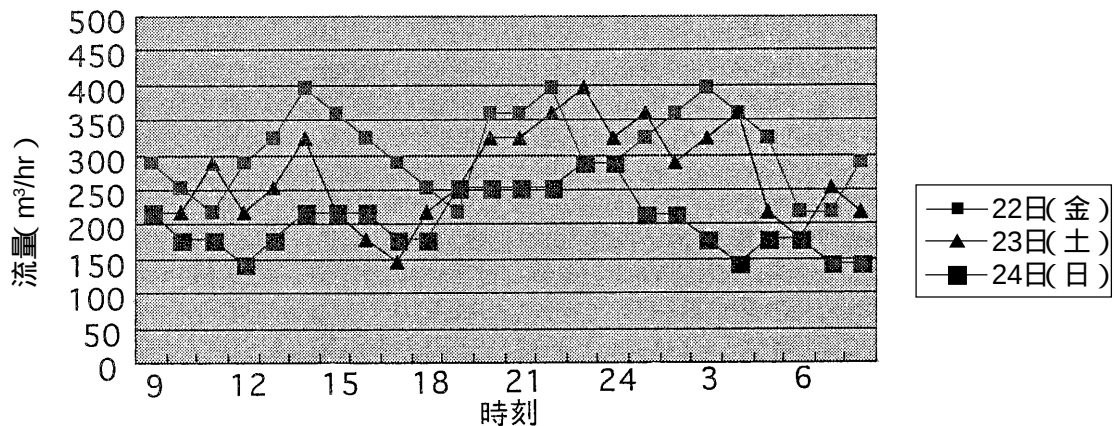
* 25 ポンドによる処理方式とは、廃水を池内に滞留させ、沈殿と生物化学的酸化によって浄化する処理法の総称(安定化池法とも言う)。日本では土地の制約などから採用されている例はないが、ケニアでは土地が比較的安価に入手でき、処理場を建設した後は維持管理に多大なコストや労働力を必要としないことから、途上国では一般的に採用されている方式である。適正な維持管理を行えば基準水質を満足でき、特に今回建設した処理場では、他の都市ではあまりみられない後処理(ロックフィルター及びグラスブロッツ)が採用されており、全体としての完成度が高く、ケニアの下水処理場におけるモデル的なものといえる。

表 4 - 3 処理場への下水流入量（平均値）

年	タウン処理場 流入量(m ³ / 日)	ンジョロ処理場 流入量(m ³ / 日)	流入量合計 (m ³ / 日)
1994	4,400	5,500	9,900
1995	3,900	6,600	10,500
1996	5,300	4,600	9,900
1997	4,300	6,900	11,200
1998	4,400	7,800	12,200
1999	3,800	7,300	11,100

（ナクル市提供データにより作成）

ンジョロ処理場では 1997 年の施設拡張工事終了以降、流入量が若干増加しているが、タウン処理場では 1995 年の工事終了以降もほとんど増えておらず、拡張された処理能力の半分程度しか流入していない。このようにどちらの処理場においても、処理能力は向上したものの、それに応じた下水流入量は得られていない状態である^{*26}。この主な理由は、ナクル市における上水供給量が計画に比べ少ないこと、ナクル市内の下水接続率が低いこと、下水管網からの漏水などが要因として推定される。



（ナクル市提供データにより作成）

図 4 - 2 流入量時間変動（ンジョロ処理場 2000 年 9 月）

図 4 - 2 は、流入量の日変動、時間変動のデータの一例をグラフに示したものである^{*27}。データは降雨の無い平日と週末のものを用いた。グラフは時間別の流入量の傾向を示しており、市民の活動に併せて水量が変化していることが見て取れる。早朝に市民や工場の活動が始まるとともに流入水量が増え、14 時頃に一旦ピークに達した後、徐々に減少し、再度夕方から

* 26 2001 年 2 月に現地の関係機関に派遣されている JICA 専門家がンジョロ処理場への流入量を実測調査した結果、晴天時の平均で約 1,400 m³/日であったと報告されている。表 4 - 3 のナクル市データとの大幅な差異の理由は、ナクル市の日常測定において水位ゲージの取り付けられている水路の清掃が行われていないため、水路に多くの土砂が堆積した状態で測定が行われた結果、実際より嵩上げされたものと考えられる。

* 27 処理場流入量の測定については、流入部で 1 時間毎に測定されており、その一部のデータについての経時変化を前述のグラフに示した。測定方法は流入部に設置されているゲージにより水面の高さを測定することによるものであるが、水路には約 4cm の土砂がたまっており、この分が測定値に上乗せされているため、流入量測定の精度には問題が残る。したがって前述の処理量実績についても実際の値はさらに低いものと考えられる。

夜半にかけてピークが生じている。ピークが生じるのが都市部と処理場の距離を考えると若干遅いように思われるが、下水管の傾斜があまり大きくなく排水が処理場へ到達するのに時間がかかっていることが考えられる。また、休日は工場の活動がないためか、平日に比べそれほど明確なピークは認められない。このように流入水量の変動はあるものの、時間最大流入量は時間最小流入量の2倍程度であり、処理場の運転に支障をきたすほどの変動ではなく、処理場の運転管理には特に問題を生じさせないと考えられる。

もう一つの問題としてはンジョロ処理場内での下水の逸水である。処理場拡充後の当初から放流水が見られなかったとのことである。現地調査時も嫌気性池^{*28}、通成池^{*29}までは水が溜まっているものの水位が低く、後段の熟成池^{*30}、ロック・フィルター^{*31}、グラス・プロット^{*32}へ水が入っていない状態であった。この原因としては、処理場への流入水が計画値に比べ大幅に少ないことに加え、処理過程で下水が地下に浸透していること、また蒸発していることがあげられる。

(2) 処理水質

タウン処理場及びンジョロ処理場の事業実施前後の主な項目における水質検査結果を表4-4に示す。

表4-4 処理場における事業実施前後の水質検査結果 ()内の数値はろ過試料の値を示す
タウン処理場

1993年(事業前)		2000年(事業後)		計画水質	排水基準 (ナクル湖)	日本の排水基準	
流入水	放流水	流入水	放流水			活性汚泥法	高速散水床法
pH	7.1	7.6	7.3	8.0	—	7.0—9.0	5.8—8.6
BOD(mg/l)	880	100	570	36(17)	15	(10)	20
SS(mg/l)	320	56	200	26	15	15	70

ンジョロ処理場

1993年(事業前)		2000年(事業後)		計画水質	排水基準 (ナクル湖)	ケニアの一般的な排水基準	
流入水	放流水	流入水	放流水			(WHO準拠)	
pH	7.3	8.2	7.6	8.0	—	7.0—9.0	6.0—9.0
BOD(mg/l)	660	240	710	—	15	(10)	(20)
SS(mg/l)	570	94	1500	—	15	15	30

(1993年のデータは開発調査報告書、2000年のデータはナクル市水質試験室の提供による。ただし、ナクル湖への排出基準は排出基準案である)

*28 ラグーン(数日から数十日といった長時間廃水を滞留させる池)の一形態。廃水または汚泥の処理を嫌気的環境下(生物による利用可能な遊離な酸素分子が水中内に存在しない状態)において行うもの。

*29 ラグーンの一形態。水面に近い表層部では好気的環境(遊離な酸素分子が水中内に存在する状態)、底層部では嫌気的環境のもの。

*30 ラグーンの一形態。通常2次処理後に設ける水深1~2mの浅い池で、処理水を数日間滞留させることにより処理水質の向上・均等化や、処理施設の故障等に対する安全弁的役割を有する。

*31 処理水中に多量に含まれる植物プランクトンの除去を目的とした施設。高さ1.5~2.0m位に積み上げられた砕石の隙間を処理水が流れる過程で植物プランクトンが除去される。

*32 一定の処理を行った汚水をグラス(草)の生えた広大な土地に散布し、自然の浄化機能を用いた処理を行うもの。植物プランクトン等の浮遊物質、窒素、リン等の除去が期待される。

上記のデータから判断すると、タウン処理場ではある程度処理されているようである。ただし BOD^{*33}、SS（浮遊物質）^{*34} については計画水質、ナクル湖の排水基準（案）を満たすまでには至っていない。しかしながらまず論じなければならないことは、ナクル湖への排水基準の設定値が厳しすぎるのではないかという点である。BOD については、ナクル湖を含むケニアにおける排水基準（案）となる指標は溶解性 BOD（ろ過試料についての BOD）である。これは処理水に藻類が含まれるため、BOD 測定の際にこの影響をなくす目的でろ過するものである。

しかしながら流入水の BOD 濃度が高い場合、気候、気温の変化に伴う藻類の繁殖状況に処理が影響を受けやすいポンド方式では、処理水の溶解性 BOD を 10mg/l 以下に安定的に保つことは、非常に困難であると考えられる。さらに SS の基準は 15mg/l と一般的な排水基準よりも低く設定されており、藻類の流出も最小限にすることが求められている。

このようにナクル市の排水基準（案）はケニアの他の都市で採用されている一般的な排水基準に比べかなり厳しいものになっており、日本の活性汚泥法^{*35}の排水基準と比較しても BOD については同レベルの水質が求められている。一般的に、活性汚泥法と同程度の基準を、ポンド式の処理場で達成することには少し無理がある。よって基準値については、今後現実的な値である一般的な排水基準値に修正することが必要であると考えられる。開発調査において BOD の目標水質は上記を考慮して 15mg/l に設定されているが、SS についてはナクル湖の基準値と同じになっている。しかしこれらの値についても報告書の中で適正な施設の維持管理と工場排水規制の徹底が条件であると記されている。ただ、ナクル湖水質保全の観点からどうしても溶解性 BOD を常に 10mg/l 以下にすることを重視するのであれば、処理水の水質について、ポンド方式よりは他のより高度で安定した処理が可能な方式を採用すべきであった。

上記のように、タウン処理場では事業前に比べて放流水質は改善されており、ケニアの一般的な排水基準は満たしている。今後はナクル湖の排水基準（案）を再検討し、実現可能なものにすることが望まれる。

4 - 2 - 4 インパクト

（１）受益者へのインパクト

ナクル市において、上水事業の受益者を対象に社会調査を実施した結果、回答者の半数近く（55.6%）が下水道にも接続しており、回答者の 3 割近くが「健康・衛生状態の向上に下水道が貢献している」と回答している。

* 33 生物化学的酸素要求量。水中に溶解している酸素のもとで有機物が生物学的に分解され安定化するために必要な酸素量をいい、水の汚濁状態を表す指標の一つ。

* 34 水中に懸濁している物質をいい、汚濁の有力な指標の一つ。

* 35 活性汚泥と呼ばれる微生物の集合体を用いた下水の生物学的処理法。活性汚泥法は他の処理法に比べ操作が難しく、建設や維持・管理の費用も高くなるが、高級処理法として確実な方法であるため、日本では広く採用されている。

(2) 環境へのインパクト

本評価では、上下水道事業の実施によるナクル湖への環境インパクトについて、第三者評価を実施しており、その報告概要は上水事業の項に記載している。詳細については、別添の第三者評価報告書を参照頂きたい。

4 - 2 - 5 持続性・自立発展性

(1) 運営・維持管理体制と現状

評価時にはナクル市の下水施設の維持管理、料金徴収等の業務はナクル市水道局より N A Q W A S S に移管されている。N A Q W A S S の体制(予算、人数) を移管前のナクル市と比較すると以下のとおりである。

ナクル市上下水道部門	1997/1998	予算(4.7million Ksh)	スタッフ(約300人)
N A Q W A S S	2000/2001	予算(15.7million Ksh、estimate)	スタッフ(約300人)

N A Q W A S S の説明によると、N A Q W A S S のスタッフは現在約 300 人であるが、適正人数は190人程度とのことである。ナクル市の上下水部門が民間会社であるN A Q W A S S に移行する際にナクル市よりすべてのスタッフを引き継がなければならなかったため、現時点では300人いるが、今後は適正人数まで減らしていく予定とのことである。また料金徴収については以前より、上下水料金^{* 36}とごみ回収の料金が併せて徴収されているが、今後はごみ回収事業そのものについてもN A Q W A S S に委託してはどうかという意見もあり、様々な分野における民営化への期待は大きい。他方、利潤の追求が業務の偏りを生む可能性があるという懸念もある。特に水質モニタリングといった試験室の業務は、コストはかかるが経済的な利益はないため、業務の優先順位が低く扱われるおそれがある。水質試験室についてはN A Q W A S S へ移管後スタッフ数が減少しているようであるが、データは収集できなかった。また試験室の運営予算は、設立当初、日本政府とケニア政府の合意事項として、M O L G、M O W R、K W S の共同出資となっていたが、実際はナクル市(現在はN A Q W A S S) のみの予算で運営されており、予算の制約上、薬品の補充、機器の修繕の困難が見られ、今後改善が求められる。上下水、環境保全といった業務は公共性が高い業務が多いため、今後は試験室のあり方についても適切な検討が必要である。

^{* 36} 下水道料金徴収は水道の料金徴収と同時に行われており、企業からは水道料金の100%、住民からは75%を下水料金として徴収している。N A Q W A S S はナクル市に総収入の10%を支払っている以外は独立採算である。

下水処理施設の維持管理については以下のスタッフ構成で行われている（表４－５参照）。現場では３交代制で２４時間体制であるが夜間は１人で流入スクリーンの清掃と流量計の測定を行っている。夜間は安全上の問題もあり、見回りは実施していない。

表４－５ 下水処理施設維持管理スタッフ数

	タウン処理場	ンジョロ処理場	ムワリキポンプ場	下水管維持	合計
一般作業員	21	11	4	16	52
熟練工	3		-	4	7
テクニシャン	1		-	1	2
エンジニア		1			1
					62

（２０００年１１月現地調査時収集資料より作成）

（２）施設・機材の維持管理状況

１）施設の維持管理状況

タウン下水処理場

放流水の水質はまずまずであるが、嫌気性池の定期的なスカム^{*37}の除去、ポンドにおける堤の脱落の修繕、流入量測定ゲージ目盛りの清掃、といった点については不十分な点がみられ、改善の余地があると考えられる。また現在の大きな問題点のひとつは、処理場に隣接する国立公園から、フェンスを破り多くの動物が処理場内に入り、最終処理施設であるグラス・プロッツの草を食べて糞をするため、放流水質が若干悪化してしまうことである。

また、カバなどの大型動物の侵入によって、ポンドの底面が傷つけられるおそれもある。現在、フェンスの内側に溝を掘り、掘った土でさらに塀を作り対応しているところである。動物の施設への侵入は、処理施設にダメージを与えると共に、維持管理作業者の安全の面からも防止すべきことであり、今後はKWSと協力の上フェンスを修繕する必要がある、将来的には電気フェンスの設置が望ましい。

ンジョロ下水処理場

ンジョロ処理場では前述のとおり放流水が無い放流水の分析データもなく、現時点では処理が適正に行われているかどうか判断が困難である。放流水がない原因としては、下水接続率の低さ、上水供給量の不足、下水管網からの漏水などにより処理場への

*37 水面に発生する、油脂、繊維、固形物などが集まったもの。

流入量が少ないことに加え、pondでの蒸発と地中への浸透がある。流入部ではスクリーンの清掃と流入量の測定が定期的に行なわれている。嫌気性pondでは多くのスラムが滞留しており、これらを定期的に除去する必要がある。また、KWSからは、以前グラス・プロットでは短絡流^{*38}が起っていたことが指摘されている。グラス・プロットの短絡流は水量が少ない時には起こり得ることであるが、グラス・プロットの傾斜を均一に改善することが望ましい。現地調査時、家畜が処理場内に進入しグラス・プロットの草を食べている状況が見受けられたが、これを防止しない限りグラス・プロットはダメージを受けるため、この問題は解決されないと思われる。またマンホールやステップの金属が盗まれており、家畜や部外者の立入りができないように対策を講ずる必要がある。また、この処理場は工場排水の流入割合がタウン処理場よりも高く、処理が安定しない場合があるとのことであり、今後工場排水規制の強化についても力を入れる必要がある。

雨水滞水池（タウン処理場内）

雨水滞水池については、降雨後にかなりごみや汚泥が堆積しており、ナクル湖への流入防止に極めて有効であると考えられる。ただし、基本設計では1年に1回の堆積物の浚渫となっているが、実際は一旦大雨が降ると滞水池は土砂でいっぱいになってしまうとのことであり、大降雨の都度に浚渫が必要であると考えられる。滞水池の容量は約14,000m³であり、ナクル市によれば1回の堆積汚泥は概算値としてその半分の7,000 m³程度とのことである。発生した汚泥の処理については乾燥のため敷地内に長期間放置されているが、その間、新たな風雨による2次汚染の可能性が否定できないことから何らかの対策が望まれる。また、この施設は、既存の排水路からの雨水を処理するためのもので、排水路が整備されていない地域からの雨水は都市部の多くのごみと共にンジョロ川などを通じて直接ナクル湖に流れ込んでおり、これによるナクル湖への負荷はかなり大きいと考えられる。包括的な雨水による汚濁負荷対策には、今後の排水路の整備および新たな滞水池の建設とあわせて、ごみ処理の問題を考慮する必要がある。

雨水滞水池の維持管理についてはNAQWASSの業務であるが、都市部の雨水排水路整備、維持管理については、ナクル市の別セクション（Town Engineer 部 - 道路部門）の中にあるセクション）の担当である。特に排水路にある多量のごみが滞水池に流入する問題については、関連するセクションが連携し対処する必要がある。

* 38 タンクや水路の中で通過時間が異常に短く水が流出してしまう状態。

ムワリキポンプ場

現地調査時ポンプは全て稼働していた。過去に故障したこともあるが、修理済とのことで現在は良好な状態である。

水質試験場

処理場の各処理段階の水質検査や、ナクル湖、エレメンテータ湖、バリngo湖の水質、さらには工場排水についての水質検査が定期的に行われているが(表4-6参照)試験室スタッフも少なく実際の分析業務ができるスタッフは2名だけであり、全体として活動はあまり活発でないように思われる。またコンピューターが導入されていないことから、収集されたデータは手作業で整理されており、また月報などの書類もタイプで作成されており、非効率的である。予算的にも頻繁に使用する薬品や機材のスペアパーツの補充にも困難をきたしている状態であり、今後予算の確保を行うとともに、外部からの検査委託業務を積極的に受託し、保有する機材能力に見合った業務を質・量ともに確保し、ケニア西地区での環境保全の拠点となるような活動を展開することが望まれる。そのためには、水質データを迅速に整理し、年報などの発行などを行い、積極的に外部に対して活動をアピールしていく必要があると思われる。また前述の通り、試験室の運営予算は、設立当初、日本政府とケニア政府の合意の中で、MOLG、MOWR、KWSの共同出資ということになっていたが、実際はナクル市のみの予算で運営されており、予算の制約上、薬品の補充、機器の修繕の困難が見られる。運営についての財政的な問題については、関連省庁の連携が望まれる。

表4-6 水質試験室分析サンプル数及び頻度について

サンプル名	サンプル数	頻 度	備 考
タウン処理場	10	1回/月	5カ所×2ライン
ンジョロ処理場	10	"	"
ナクル湖	12	1回/1～3カ月	KWS、WWFよりの依頼
バリngo湖	5	"	"
エレメンテータ湖	5	"	"
ソライ湖	2	"	"
工場排水	16	1回/月	
上水	17	"	
外部からの委託	5	"	工場などより

(2000年11月現地調査時収集資料より作成)

2) 機材の維持管理状況

下水事業により10台の車輛が調達されたが、調査時には5台が修理待ちという状態であっ

た。修理用のスペアパーツについては車輛と同時に調達されたものがまだ残っているため、当面はそれを用いて修理が可能とのことである。また、以前青年海外協力隊員が派遣されていた時期、サンプリング用の常用車輛がサンプリング以外の業務に使用され本来業務に支障をきたしたことがあり、JICA事務所から改善の申し入れをしたことがあった。その後は若干改善されたようであるが、運営がNAQWASSに移管されてから、車輛が主に上水の業務に使用されており、下水及び試験室の業務についての使用がかなり制限されている。また、NAQWASSが保有するピックアップ用車輛は、この下水事業によって調達された2台だけであるため、水道の業務の方に優先されて使用されている。高圧洗淨車や、バキュームカーには下水管の詰まりの除去において極めて有用とことで、依頼があれば他の周辺都市にも有料で貸し出している。

3) 受益者調査の結果

ナクル市において、上水事業の受益者を対象に社会調査を実施した結果、回答者の半数近く(55.6%)が下水道にも接続していた。同回答者からは水不足や維持管理不足による汚水漏れや詰まり、オーバーフロー等の問題が指摘されている。

4-2-6 まとめ

下水事業の施設は基本設計通りに完成しており、その機能に特段の問題はない。しかしながら、下水接続率の低さ、下水管網からの漏水に加え、ナクル市における給水量が計画当初の見込みを下回っているため下水処理場への流入水が少なく、処理場は拡張された機能を十分に生かされていない。処理水の水質には特段の問題はなく、本下水処理事業はナクル湖の水環境への負荷の低減に貢献しているといえる。

下水事業そのものは直接的に経済的な利益を生むものではないため、一般に優先順位が低く扱われる可能性があり、そのような中で、施設・機材を適正に維持管理しつつ、持続的・自立的な効果発現を実現していかなければならない点に本分野の事業の難しさがある。まずは、現在必ずしも活動が活発でない水質試験所について、ケニア側に運用計画の策定とそのための体制の整備を促し、早急に活性化を図る必要がある。また、処理水質維持のためには、施設・機材の有効活用・維持管理の他に、処理場に流入してくる工場排水の規制にも力を入れる必要があり、下水・廃水処理に関する総合的な取り組みが望まれる。

4-3 評価結果総括

本事業によって整備された上下水道施設はすべて計画通り完成しており、その機能に特段の問題はない。上下水道施設いずれも一定の効果をあげているものの、両施設とも、現状ではその機

能が十分に発揮されていない。

上水事業では、ナクル市のN A Q W A S Sの経営上の問題による料金滞納が原因で、ナクル市はN W C P Cから用水供給量を制限されており、結果として円借款で建設された上水施設からナクル市への給水量は計画量の6、7割にとどまっている。下水事業の計画時、上水事業による給水量増加に伴い発生する下水量の増加によってナクル湖の水質悪化が懸念されたことから、上水施設からの給水量は制限されていた。このため、下水処理場の処理能力向上によって、上水の全量給水が可能になることが下水事業の間接的な効果として期待されていたが、本評価時点では、料金設定を含む経営面の問題が、上水施設の稼働率向上を妨げる要因となっている。一方、下水接続率の低さ、下水管網からの漏水に加え、給水量が増加しない結果、下水処理場への下水流入量も増加しないため、下水処理施設は、修復・拡張によってかつての過負荷状態は解消されたものの、稼働率は処理容量の7割程度にとどまっている。

ナクル湖の環境保全の観点からは、本事業により整備された下水処理施設がナクル湖の汚染防止に貢献していることが認められるが、ナクル市の急激な都市化・工業化、農業活動の促進により増加した農業排水、工業排水、都市ゴミ、産業廃棄物等の影響など、下水処理施設の処理対象を越えた要因によってナクル湖の汚染が進んでいることが懸念される。本事業により整備された水質試験所の有効活用による水質モニタリング等の対策が求められるとともに、ナクル市及びその周辺域を一体的に保全していくという視点に基づいた、総合的な環境保全計画の策定・推進が必要となっている。

第5章 教訓及び提言

5 - 1 教訓

- (1) あらかじめ事業運営に関し困難な状況が予想される場合には、実施機関の運営（経営）強化のための支援（マネジメント・コンサルティング・サービスの実施等）も含めてアプレイザル時に検討することが望ましい。

本事業はナクル市における水道事業体の財務状況の問題から、同市への上水供給量が計画どおり達成されていない。これについては、アプレイザル時から財務内容向上の必要性が認められており、ケニア政府も上下水道事業の民営化による経営改善努力を試みたものの、結果的には十分な改善が図れなかった。水道料金の値上げは多分に政治的要素が強く実現が難しい分野ではあるが、一方で効率的な料金徴収システムの確立やメーター設置、違法取水の取締強化による無収水率の削減等、現場レベルでの経営努力によって改善可能な点も多くあることから、これらの改善を図るために、案件形成、アプレイザルの段階から水道事業の経営強化のための施策（マネジメント・コンサルティング・サービスの実施やJICA専門家によるフォローアップ等）を検討しておく必要があったと考えられる。

5 - 2 提言

- (1) 運営・維持管理における改善事項

本評価の結果、上下水道の運営・維持管理面で以下の改善すべき点が確認された。事業効果の持続的発現のため、ケニア側関係機関の早急な対応が望まれる。

無収水・漏水の削減、水道料金の適正化等の実施によるナクル市への給水量確保

浄水場等における水質管理体制の改善

下水処理施設及び雨水滞留池における適切な維持管理業務の実施

水質試験場の有効活用（運営・活動内容等の改善による水質モニタリング機能の強化）

- (2) ナクル湖集水域の総合的な環境保全計画の策定

ナクル湖の環境保全の観点では、本事業により整備された下水処理施設がナクル湖の汚染防止に貢献していることが認められたが、ナクル市及びその周辺域から発生する農業排水、工業排水、都市ゴミ、産業廃棄物等の影響など、下水処理施設の処理対象を越えた要因によってナクル湖の汚染が進んでいることが懸念される。ナクル湖への負荷を削減するためには、産業廃水の一次処理の義務づけ、農薬の使用法の指導等、本事業とは別の新たな取り組みが必要で

あり、ナクル市及びその周辺域を一体的に保全していくという視点に基づいた総合的な環境保全計画の策定が求められる。その際、ナクル湖周辺の人為活動と、ナクル湖及びその周辺の自然環境とを結び付けるキーワードは「水」であるという認識から、「水の管理」を切り口として計画の策定にあたることが望ましい。

表 1 事業の経緯

1980 年 3 月	： ケニア共和国水資源開発省（MOWD：Ministry of Water Development）は、急増する大ナクル圏の水需要に対処すべく「大ナクル水資源開発計画（1980-2000 年）」を作成。
1982 年 5 月	： MOWD は上記開発計画に基づき「大ナクル上水道計画に係る予備設計調査報告書」を作成。
1984 年 6 月	： MOWD はナクル市を中心とする大ナクル圏東部地区の段階的な給水源開発に焦点を当てた「予備設計調査追加報告書」を作成。
1984 年11 月	： MOWD は上記報告書に基づき実施計画書（I/P）を作成。
1984 年12 月	： ケニア政府は日本政府に対し「大ナクル上水事業」への円借款を要請。
1985 年 8 月	： J B I C は「大ナクル上水事業」に係るアプレイザルを実施。
1986 年12 月	： 「大ナクル上水事業」に係る交換公文締結。
1987 年 3 月	： 「大ナクル上水事業」に係る借款契約締結（承諾額 5,017 百万円）。
1989 年10 月	： 「大ナクル上水事業」に係る土木工事開始。
1990 年 3 月	： （社）国際建設技術協会が「ナクル湖下水道計画調査報告書」を作成。同報告書において、ナクル湖の水質保全のため下水処理施設増強等の必要性が指摘される。
1990 年 4 月	： ケニア政府は日本政府に対し下水事業への無償資金協力を要請。
1990 年11 月	： J I C A は下水事業に係るプロジェクト形成ミッションを派遣。
1992 年 1 月	： 上水事業、完成。
1992 年 3 月	： 緊急下水施設拡張工事のため、「大ナクル上水事業」に係る貸付実行期限延長（2 年）。
1993 年 5 月～ 1994 年 3 月	： 「ナクル市下水道施設修復・拡張計画」に係る開発調査の実施。
1994 年 5 月	： 「ナクル市下水道施設修復・拡張計画」に係る基本設計調査の実施。
1994 年 8 月	： 無償資金協力「ナクル市下水道施設修復・拡張計画」（第 1 期）に係る交換公文締結。
1994 年 9 月	： 緊急下水施設拡張、工事完了（円借款支援部分）。
1995 年 3 月	： 「ナクル市下水道施設修復・拡張計画」（第 1 期）完成。
1995 年 5 月	： 無償資金協力「ナクル市下水道施設修復・拡張計画」（第 2 期）に係る交換公文締結。
1997 年 2 月	： 「ナクル市下水道施設修復・拡張計画」（第 2 期）完成。

表2 主要計画／実績比較（大ナクル上水事業）

項 目	計 画	実 績
1 事業範囲		
取水施設の新設 導水施設の新設 浄水施設の新設 送水施設の新設 配水施設の新設 既存施設の修復	施設容量 17,000 m ³ /日 導水管 約 2.7km の敷設等 (ポンプアップ方式) 施設能力 17,000m ³ /日 送水管 約 44.2km の敷設等 配水池、配水管網整備等 取水・浄水・配水施設	施設容量 18,000m ³ /日 導水管 約 9.5km の敷設等 (自然流下方式) 施設容量 18,000m ³ /日 送水管 約 49km の敷設等 配水池、配水管網整備等 浄水・配水施設
2 工期		
・コンサルティングサービス ・本体工事（上水） ・本体工事 （緊急下水施設拡張工事）	1986 年11 月 ～ 1990 年 6 月 1988 年 7 月 ～ 1990 年 6 月 当初計画なし	1987 年10 月 ～ 1994 年 10 月 1990 年 1 月 ～ 1992 年 1 月 1994 年 1 月 ～ 1994 年 9 月
3 事業費		
外貨 内貨 合計 うちJBIC 分 換算レート	3,512 百万円 127 百万 Ksh 5,481 百万円 5,017 百万円 1KSh=15.6 円（1985 年 8 月）	3,540 百万円 446 百万 Ksh 5,092 百万円* ¹ 4,979 百万円 1KSh=3.48 円（1992 年末）* ²

* 1 事業費には緊急下水施設拡張工事（ンジョロ下水処理場 6,000m³/日ライン整備）にかかわる実施設計・施工管理費が含まれる。

* 2 換算レートは実施機関からの報告書に記載されたものを使用。

表 3 (1) 月別処理水量と各地域への供給量 (1992 ～ 2000 年)

大ナクル上水事業(NWCPD)									ナクル上水事業(NAQSS)		備考
年 月	原水流入量 (m3/日)	浄水供給量 (m3/日)	設計浄水量(m3/日)	稼働率(%)	ギルギル (m3/日)	ナクル (m3/日)	ナクル西 (m3/日)	総給水量 (m3/日)	ナクル供給量 (m3/日)	公社比率 (%)	
1992.8	3,610	1,972	18,000	11.0		0			18,081	0.0	浄水メータ故障、10日間停止 (薬品不足)
1992.9	4,693	2,870	18,000	15.9		0			19,428	0.0	
1992.10	4,442	2,521	18,000	14.0		0			16,550	0.0	
1992.11	4,693	3,818	18,000	21.2		0			17,830	0.0	
1992.12	3,612	2,111	18,000	11.7		0			21,185	0.0	7日間停止 (薬品不足)
年度平均	4,210	2,658	18,000	14.8					18,615	0.0	
1993.1	5,642	4,773	18,000	26.5		0			19,763	0.0	停電より浄水場メータ稼働せず(1日)
1993.2	4,026	3,157	18,000	17.5		0			21,068	0.0	
1993.3	5,311	4,390	18,000	24.4		0			19,627	0.0	
1993.4						6,556			27,358	24.0	
1993.5	6,366	6,175	18,000	34.3		4,065			25,462	16.0	浄水供給量 (M2)メータ故障
1993.6	7,485	7,260	18,000	40.3		2,036			22,249	9.2	
1993.7	11,351	11,010	18,000	61.2	1,589	9,761			29,201	33.4	
1993.8	10,545	10,229	18,000	56.8	2,492	9,133			24,535	37.2	
1993.9	11,645	11,296	18,000	62.8		9,042	652		29,452	30.7	停電により浄水場メータ稼働せず (3日)
1993.10	12,666	12,286	18,000	68.3	811	11,775	669	13,255	31,940	36.9	
1993.11	12,088	11,725	18,000	65.1	2,707	9,323	688	12,718	30,587	30.5	停電により浄水場メータ稼働せず (2日)
1993.12	11,282	10,944	18,000	60.8	2,016	9,195	533	11,744	29,855	30.8	
年度平均	8,946	8,477	18,000	47.1	1,923	7,876	636	10,435	25,925	30.4	1日間停止 (薬品不足)
1994.1	13,141	12,747	18,000	70.8		3,172	134		22,446	14.1	停電により浄水場メータ稼働せず (3日)
1994.2	17,537	17,011	18,000	94.5		10,550	1,963		30,315	34.8	
1994.3	14,307	13,878	18,000	77.1		9,033	129		26,468	34.1	
1994.4	16,258	15,770	18,000	87.6		11,478	143		28,832	39.8	
1994.5						7,945	599		27,397	29.0	沈殿施設清掃に付き2日間停止 浄水メータ故障
1994.6						6,686	614		26,458	25.3	
1994.7	11,083	10,751	18,000	59.7		8,357	434		28,105	29.7	
1994.8	8,861	8,595	18,000	47.8					18,507	0.0	
1994.9	14,011	13,591	18,000	75.5		12,265	1,005		31,245	39.3	停電より浄水場メータ稼働せず(1日)
1994.10	11,711	11,360	18,000	63.1		9,780	1,348		28,707	34.1	
1994.11	11,416	11,074	18,000	61.5		8,789	1,009		28,312	31.0	
1994.12	11,737	11,385	18,000	63.3		9,777			28,407	34.4	
年度平均	13,006	12,616	18,000	70.1		8,894	738		27,100	32.8	停電により浄水場メータ稼働せず (3日)
1995.1	13,090	12,697	18,000	70.5		10,397	1,605		27,303	38.1	
1995.2	15,126	14,672	18,000	81.5		11,692	1,720		29,268	39.9	
1995.3	11,823	11,468	18,000	63.7		8,689	1,212		26,798	32.4	
1995.4	13,344	12,944	18,000	71.9		11,168	828		28,584	39.1	停電により浄水場メータ稼働せず (3日)
1995.5						8,978	823		27,673	32.4	
1995.6						9,829	1,280		32,950	29.8	
1995.7	11,439	11,096	18,000	61.6		9,222	707		31,871	28.9	
1995.8	12,110	11,747	18,000	65.3		9,851	299		33,218	29.7	停電により浄水場メータ稼働せず (3日)
1995.9	12,660	12,280	18,000	68.2		8,311	585		32,563	25.5	
1995.10	13,107	12,714	18,000	70.6		7,050	1,011		29,465	23.9	
1995.11	12,631	12,252	18,000	68.1		8,928	412		30,677	29.1	
1995.12	12,250	11,883	18,000	66.0		8,323	997		29,748	28.0	停電により浄水場メータ稼働せず (2日)
年度平均	12,758	12,375	18,000	68.8		9,370	957		30,010	31.2	
1996.1	13,643	13,234	18,000	73.5		9,630	997		27,604	34.9	
1996.2	13,360	12,959	18,000	72.0	2,011	10,270	1,065	13,346	31,224	32.9	

ナクルへの給水データ 1993年9月以降NWCPDデータ採用 (それ以前はナクルのものを使用)。浄水供給量の網掛け部は推定値 (原水流入量の97%) 使用

表 3 (2) 月別処理水量と各地域への供給量 (1992 ～ 2000 年)

1996.3	12,045	11,684	18,000	64.9	3,151	7,872	997	12,020	30,814	25.5	停電により浄水場メータ稼働せず (2日)
1996.4	13,562	13,155	18,000	73.1		7,487	1,570		29,079	25.7	停電により浄水場メータ稼働せず (1日)
1996.5	11,915	11,558	18,000	64.2	3,229	8,980			32,421	27.7	停電により浄水場メータ稼働せず (1日)
1996.6	13,078	12,686	18,000	70.5	2,554	7,257	1,586	11,397	30,670	23.7	停電により浄水場メータ稼働せず (2日)
1996.7	12,249	11,882	18,000	66.0	2,814	9,568	144	12,526	32,396	29.5	停電により浄水場メータ稼働せず (2日)
1996.8	13,040	12,649	18,000	70.3	3,091	9,922	139	13,152	33,016	30.1	停電により浄水場メータ稼働せず (1日)
1996.9	13,015	12,625	18,000	70.1		10,126	169		35,174	28.8	1日間停止 (薬品不足)
1996.10	11,602	11,254	18,000	62.5	2,536	9,160	155	11,851	32,689	28.0	停電により浄水場メータ稼働せず (3日)
1996.11	15,206	14,750	18,000	81.9		10,450	153		33,745	31.0	
1996.12	12,493	12,118	18,000	67.3	2,879	9,705	146	12,730	32,824	29.6	
年度平均	12,934	12,546	18,000	69.7	2,783	9,202	647	12,632	31,805	28.9	

表3(3)月別処理水量と各地域への供給量(1992～2000年)

年 月	大ナクル上水事業(NWCPC)								ナクル上水事業(NAQASS)		備考
	原水流入量 (m3/日)	浄水供給量 (m3/日)	設計浄水量(m3/日)	稼働率(%)	ギルギル (m3/日)	ナクル (m3/日)	ナクル西 (m3/日)	総給水量 (m3/日)	ナクル供給量 (m3/日)	公社比率 (%)	
1997.1	15,237	14,780	18,000	82.1	3,108	10,576	1,590	15,274	33,302	31.8	
1997.2	15,172	14,717	18,000	81.8	1,725	11,837	1,772	15,334	33,245	35.6	
1997.3	15,047	14,596	18,000	81.1		8,394	1,405		30,550	27.5	
1997.4	13,267	12,869	18,000	71.5	1,437	10,532	1,583	13,552	33,604	31.3	
1997.5	13,255	12,857	18,000	71.4	1,707	10,092	1,532	13,331	33,572	30.1	停電により浄水場メータ移動せず(1日)
1997.6	12,898	12,511	18,000	69.5	1,953	10,069	1,583	13,605	32,800	30.7	沈殿施設清掃
1997.7	12,902	12,515	18,000	69.5	1,890	9,933	1,319	13,142	33,336	29.8	停電により浄水場メータ移動せず(2日)
1997.8	13,352	12,951	18,000	72.0	2,202	9,736	1,650	13,588	32,778	29.7	沈殿施設清掃
1997.9	12,844	12,459	18,000	69.2	2,218	8,901	1,475	12,594	31,148	28.6	沈殿施設清掃
1997.10	14,228	13,801	18,000	76.7	2,892	9,443	1,612	13,947	32,105	29.4	1日間停止(薬品不足)
1997.11	12,567	12,190	18,000	67.7		9,110	151		30,734	29.6	
1997.12	8,089	7,846	18,000	43.6		6,004	101		27,443	21.9	
年度平均	13,238	12,841	18,000	71.3	2,126	9,552	1,314	12,992	32,051	29.8	
1998.1	11,581	11,234	18,000	62.4	2,879	7,220	1,275	11,374	26,744	27.0	導水管洪水により閉塞
1998.2	14,427	13,994	18,000	77.7	2,234	10,820	1,625	14,679	28,921	37.4	
1998.3	12,823	12,438	18,000	69.1	2,727	8,806	1,357	12,890	33,053	26.6	
1998.4	13,933	13,515	18,000	75.1	3,279	10,171	1,602	15,052	32,561	31.2	
1998.5	6,942	6,734	18,000	37.4	2,614	2,998	1,370	6,982	25,938	11.6	
1998.6	9,356	9,075	18,000	50.4	2,536	4,834	1,566	8,936	26,970	17.9	
1998.7	11,572	11,225	18,000	62.4	1,873	9,027	1,539	12,439	37,489	24.1	
1998.8	10,938	10,610	18,000	58.9	1,958	6,651	1,185	9,794	34,835	19.1	
1998.9	7,206	6,990	18,000	38.8	1,938	2,361	1,766	6,065	32,078	7.4	
1998.10	9,495	9,210	18,000	51.2	1,989	5,623	1,483	9,095	35,304	15.9	
1998.11	9,817	9,522	18,000	52.9	2,262	4,882	1,488	8,632	34,743	14.1	
1998.12	8,622	8,363	18,000	46.5	2,158	2,357	2,203	6,718	26,339	8.9	
年度平均	10,559	10,243	18,000	56.9	2,371	6,313	1,538	10,222	31,248	20.2	
1999.1	5,571	5,404	18,000	30.0	2,133	4,705	885	7,723	29,109	16.2	15日間メータ読まず
1999.2	9,579	9,292	18,000	51.6	2,656	5,345	1,723	9,724	30,489	17.5	
1999.3	7,887	7,650	18,000	42.5	2,234	3,199	1,340	6,773	29,147	11.0	
1999.4	9,150	8,876	18,000	49.3	2,468	4,499	1,621	8,588	34,362	13.1	
1999.5	6,840	6,635	18,000	36.9	2,371	2,553	829	5,753	26,106	9.8	
1999.6	12,798	12,414	18,000	69.0	2,511	6,953	648	10,112	31,518	22.1	
1999.7	12,607	12,229	18,000	67.9	2,532	10,313	1,008	13,853	36,649	28.1	ナクル西メータ故障
1999.8	11,813	11,459	18,000	63.7	2,442	9,520	1,661	13,623	35,620	26.7	
1999.9	8,879	8,613	18,000	47.9	2,575	3,620	1,288	7,483	28,765	12.6	
1999.10	9,973	9,674	18,000	53.7	2,715	6,213	974	9,902	26,660	23.3	
1999.11	8,484	8,229	18,000	45.7	2,708	8,068	447	11,223	31,837	25.3	
1999.12	8,428	8,175	18,000	45.4	2,513	6,852	1,544	10,909	29,471	23.2	
年度平均	9,334	9,054	18,000	50.3	2,488	5,987	1,164	9,639	30,811	19.4	
2000.1	9,879	9,583	18,000	53.2	5,175	6,111	1,322	12,608	31,297	19.5	
2000.2	5,825	5,650	18,000	31.4	3,085	1,290	1,413	5,788	24,712	5.2	
2000.3	9,967	9,668	18,000	53.7	2,349	5,833	1,322	9,504	29,958	19.5	
2000.4	13,861	13,445	18,000	74.7	3,436	8,904	1,584	13,924	30,275	29.4	ナクル西メータ修復
2000.5	12,608	12,230	18,000	67.9	3,052	8,701	1,358	13,111	27,912	31.2	
2000.6	11,993	11,633	18,000	64.6	3,185	8,260	1,366	12,811	26,840	30.8	
年度平均	10,689	10,368	18,000	57.6	3,380	6,517	1,394	11,291	28,499	22.9	
総平均	10,630	10,131	18,000	56.3	2,512	7,964	1,049	11,525	28,452	28.0	

ナクルへの給水データ1993年9月以降NWPCデータ採用(それ以前はナクルのものを使用)。浄水供給量の網掛け部は推定値(原水流入量の97%)使用

表4 WATER QUALITY DATA-GREATER NAKURU EAST

Sampling point	Year	Date	PARAMETERS TESTED																	
			Temp. °C	pH	Colour TCU	Turbidity NT _μ	Conductivity μs/cm	Fe mg/L	Mn mg/L	Ca mg/L	Mg mg/L	Na mg/L	CaCo3 mg/L	Alkalinity mg/L	Cl- mg/L	F mg/L	Free Co2 mg/L	Residual Chlorine mg/L	Total Coliforms mpn/100ml	Fecal Coliforms mpn/100ml
Turasha (Raw)	1993	23.8		7.1		7.1	242						48	38						
	1993	22.9		7.9		2.4	226						52	56						
Turasha (Treated)	1993	23.8		7.6		0.7	274						48	34						
	1993	22.9		7.4		4.8	253						55	56				0.4	0	0
	1993	19.11																0.6	0	0
	1994	16.2		7.5		2.8	211						60	66				0.6	0	0
	1994	16.7		5.1		3.5	141			6.4	3.36		30	20	90		2		0	0
	1995	4																0.6	0	0
	1998	2.9	22.3	7.3		1.0	177			14.4	2.3		24	32	15	0.03	6			
	2000	6.4		7.0		2.5												1.3	0	0
	2000	28.4		6.6		<5								46				2	0	0
Reservor Gil Gil	1993	23.8																0.2	0	0
	1993	22.9																0.2	0	0
	1993	19.11																0.2	0	0
	1994	16.2																0.2	0	0
	1994	16.7																	0	0
	1995	4																0.3	0	0
	1996	13.3		7.4		2.3							36	50					0	0
Reservoir Nakuru East R6	1993	23.8																0.1	0	0
	1993	22.9																0.1	0	0
	1994	16.2																0.1	0	0
	1994	16.7																	0	0
	1995	4																<0.1	0	0
Gil Gil Tap Water	2000	28.4				<5												0.2	0	0
Nakuru West Tap Water	1996	1.3				<5												0.1	0	0

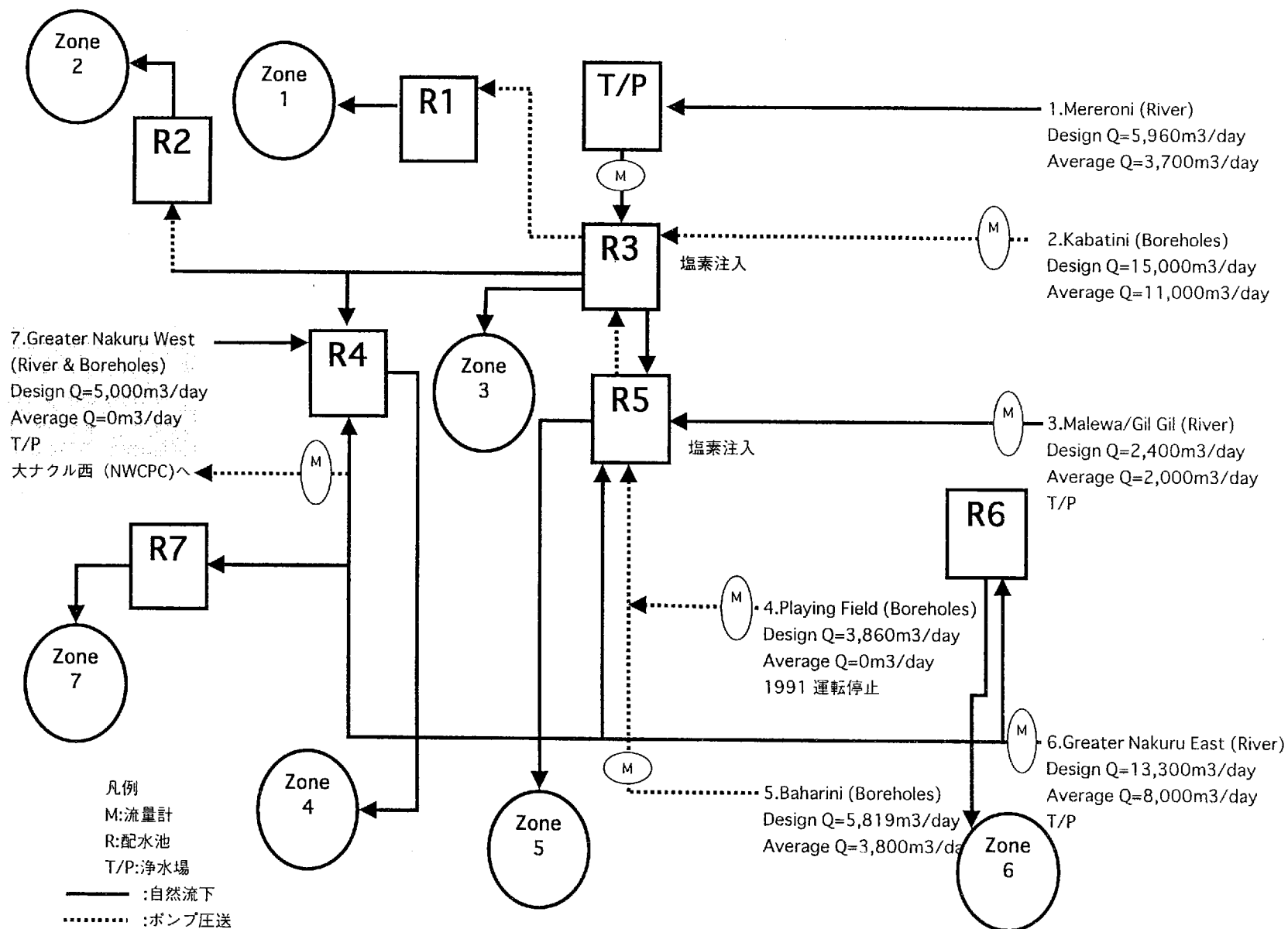


図1 ナクル市上水道施設概要図

図2 大ナクル東部上水道施設概要図

第三者評価報告書

1 はじめに

今回のミッションの主たる目的は、ナクル市の浄水施設、下水処理施設、および水質試験所の建造・建設あるいは改修をめぐる円借款、開発調査、無償資金協力による協力事業の成果の評価であり、とくにこれらの施設の運転、維持管理等の実態とその結果として及ぼされるナクル湖の水質や生態環境への影響の実態把握であった。我が国による一連の協力が対象とした市中心部の環境インフラ整備という意味では、施設の維持管理上の課題は残るものの、当初の目的に沿ってこれらの施設の機能が発揮されていることは別項で述べられているとおりである。

しかし、この協力の一環として建造された浄水施設や下水処理施設はナクル市の発展にとって欠くべからざる都市インフラであるがゆえに、その当然の帰結としてナクル市の都市化・産業化や人口集中を促進する重要なファクターになっている。

また、下水道の整備が市域の一部に限られているため、事業所廃水の規制がほとんど行われていない現状では未処理のまま水路^{*2}に排出される工場廃水量が増加するし、たとえ下水道に取り込まれても前処理がほとんどなされていない(排水管が下水道に直接接続されるため、未処理で排出しても分からない)ため、生物処理プロセスの効率低下が懸念される。今回の評価ミッションにおいてもこういった状況はある程度確認されている。

他方、こういった環境インフラ整備と地域全体の持続的発展との関連性にも注目する必要がある。たとえば協力事業による施設整備は市中心部に限られているから、整備対象区域外、特に貧困層居住域におけるベーシックサービスレベルとのギャップは拡大している。さらに、ナクル湖およびその集水域の一体的保全という意味で考えれば、増大するナクル市人口の食料需要を満たすために森林地域が急速に農地化されていること、および農薬の使用量も急速に増大していることがケニア野生動物保護公社(KWS: Kenya Wildlife Service)やWWF(World Wildlife Fund)によって指摘されている。すなわちナクル地域の環境が持続的に改善されていくためには上記の環境インフラ整備が契機となってナクル市及び周辺域を一体的に保全していく必要性が以前に増して大きくなっている。以上を踏まえれば、今後フォローアップ事業などを検討する上で重要な

* 1 集水域

湖が湖に流入する河川の分水嶺で取り囲まれる部分

* 2 水路

ここでいう水路は、側溝がつながっている自然水路の意。ナクル市では市域の一部に雨水排水路が建造されているが、域外では側溝を通して自然水路に流れ出す。

課題として、ナクル湖集水域における様々な人為活動が湖を含む地域一体の環境にどのような影響を及ぼしつつあるのか、あるいは逆にナクル湖とその集水域を一体的に保全するためにはどのようなアプローチが有効かといった問題が持ちあがってくる。

2 既存調査の概要

上記の視点の重要性は既にケニア政府や国際機関によっても指摘され、既に若干の解析がなされている。今回の調査で入手した資料の中で、ナクル湖とその集水域の総合的な保全についてまとめられたものは、"Strategic Nakuru Structure Plan 報告書（以下、SNSPと記す）"、"Kenya Wildlife Service Lake Nakuru National Park Integrated Management Plan-Second Draft 報告書（以下、IMPと記す）"、およびWWFによるナクル湖環境に関する年次報告"Environmental Assessment Programm (Annual Reports)"である。

< SNSP >

SNSPはナクル市の都市計画について市政府およびケニア国政府が、国連人間居住センター（UNCHS：United Nations Centre for Human Settlements/通称Habitat）とBelgian Administration for Development Co-operation（以下、BADCOと記す）の協力で策定した一つの長期発展計画であるが、計画手法として戦略的都市基盤計画（SSP：Strategic Structural Plan。都市開発とローカルアジェンダ21計画^{*3}を融合させる目的で考案された計画手法）とよばれる参加型ボトムアップ手法を適用していることが特徴となっている。具体的には政府、市・郡等の自治体、大学などの研究機関、NGOや一般市民の参加により、1年半の年月をかけて作成された。とくにワークショップを通して、都市計画と行政システムのレビューや計画の立案、合意形成、あるいはアジェンダ21策定チームの編成などについて検討を進めるなど、地域密着型で作業を進めたことが今後の同様なとりくみの布石となる点が重要である。

< IMP >

IMPはKWSが中心となりWWF、ナイロビ大学研究者、地域活動に従事するNGOなどとともに国立公園の管理という視点から統合的な自然保護と資源管理について検討したものである。とくに、草食動物管理については動物種別にその方法について、生息数の管理手法としては自然的、人工的、さらには遺伝子学的手法、移入種問題などについて記述している。また、レッサーフラミンゴの生息数管理については入園者の制限、水位維持などについて記述し、フラミンゴ大量死に関する調査研究の現状についても詳述している。なお、入手した報告書はセカンドドラフトで、最終報告書作成の作業は現在継続中である。

^{*} 3 ローカルアジェンダ21

持続可能な開発に向けた地方公共団体の行動計画のこと。1992年の地球サミットで採択されたアジェンダ21において、地方公共団体が地球環境問題の解決に密接にかかわっていることから、1996年までに各国の地方自治体の大半が「ローカルアジェンダ21」について合意を形成すべきであるとしている。

< W W F Annual Reports >

W W F の年次レポートはWeb 上でも入手可能で1994-95、1995-96、1996-97、1998-99、1999-2000 が公開されている。これらの年次報告にはナクル湖のDO、透明度、電気伝導度、塩分濃度、pH、水温、およびフラミンゴ頭数、水位について経年変動が示されており、また湖の水質調査体制についても述べられている。また、レッサーフラミンゴ数の変動や大量死の原因について、国際協力による調査結果に基づいた知見を紹介している。

(各報告書の詳細については別添資料を参照。)

3 フォローアップ事業検討における既存調査の意味

今回のミッションで入手した報告書のうち、ナクル湖とその集水域の一体的な保全という視点が多少なりとも反映されているものは上記の3点である。いずれもナクル市、ナクル湖およびその集水域の保全に関し貴重な示唆を与えるものである。しかし、今後のフォローアップ事業の検討に際してはそれぞれの報告書が作成された背景について十分な考察が必要である。

まず、S N S P はあくまでもナクル市の都市施設整備の長期基本計画であり、その意味では市の都市化・工業化や人口増が及ぼすナクル湖への影響やナクル湖の保全を目的とした都市施設計画のあり方を検討したものではない。ローカルアジェンダ 21 策定プロセスや SPP 手法の重要性が強調されているのは、従来型のトップダウン意思決定に基づく政治システムや行政サービスの提供ではナクル市の社会システムを機能させていくことができなくなっているという理由からである。他方、I M P は K W S の野生生物保護政策を前面に出した計画であり、ナクル湖の保全はその意味で検討の対象に含まれている。W W F の年次報告書は主としてナクル湖に影響を及ぼす陸域の人為活動に対する調査研究を含む生態系全般にわたる調査報告であり、ナクル市あるいはナクル湖集水域全体の保全のあり方について言及したものではない。W W F の年次報告書はナクル湖および流入河川に関する詳細かつ長期にわたる科学的なデータを示しているが、集水域の保全政策について具体的な提言は行っていない。

しかし、これらの既存調査に含まれる以下の点はナクル湖および集水域の一体的保全に係る今後のフォローアップ事業の可能性を検討する上で重要である。

- * S N S P、I M P のいずれもケニア関連省庁、国際機関、二国間協力、ナクル市域組織の多様な係りの下で策定されたもので、その意味では参加型の計画策定プロセスを導入し、かつ一定の成果を生み出す経験を有していること。
- * とくに、S N S P については、ナクル市の環境インフラの現状や将来のニーズについて一定の情報収集や集約プロセスが存在し、報告書以外に集約された情報そのものが存在すること。
- * 一方で S N S P の試みに対して一定の評価がなされた反面、このプロセスのアウトプットとして期待された長期計画が承認されたものでもなければ実効性が担保されたものでもない。(こ

の点に関しては、Samson Wokabi Mwangi による "Partnerships in urban environmental management: an approach to solving environmental problems in Nakuru, Kenya", Environment&Urbanization Vol.12, No.2, October 2000 に詳しい。))

- * I M P は K W S のナクル湖国立公園の運営と野生動物管理という側面が重視され、ナクル湖と集水域の自然システムの一体的管理に関する基本的考えが示されていない。
- * W W F の年次報告書は、ナクル湖及び流入河川の長期にわたる科学調査の重要性を示し、保全政策立案と遂行のうえで鍵を握ることを示している。

4 ナクル湖の一体的保全に関するフォローアップ事業の可能性について

円借款、開発調査、無償資金協力によって整備された浄水施設や下水処理施設および水質試験所はナクル市の環境基盤インフラの一環として大きな貢献をしているだけでなく、今後、ナクル湖及びその集水域の一体的保全を考えるうえでも非常に重要である。ここでは水質試験所の機能強化、有害物質（ホットスポット）対策、雨天時流出負荷削減対策、および流域の一体的保全のための科学的知見の蓄積について述べる。

水質試験所（Environmental Quality Monitoring Laboratory）の機能強化

水質試験所が果たすべき役割は非常に大きいにもかかわらず、その運営に関する基本的合意と管理体制の不備によりその機能が十分発揮されていない。この状態を改善するには専門家が一定期間滞在し、中立的な立場で分析システムの構築と組織体制のありかたについてアドバイスすることが必要である。とくに水質モニタリングが必要な以下の4分野について水質試験所の果たす役割と機能分担、調査分析の詳細計画、機器や装備の拡充、薬品ストックのニーズなどを明確にする必要がある。

- * 飲料水水質のモニタリング（Drinking Water Quality Surveillance）
- * 下水道水質のモニタリング（Sewage Treatment Effluent Quality Monitoring）
- * 工場廃水前処理水質基準監視のためのモニタリング（Industrial Pretreatment and Effluent Quality Monitoring）
- * ナクル湖及び流入河川水質モニタリング（Water Quality Monitoring of Lake Nakuru and the Entering Rivers）

しかし、これらのモニタリング分析をすべてこの水質試験所が受け持つことは施設容量や体制上不可能である。従って、一部の分析についてはそれぞれのサンプリング現場で簡易試験を行い、そのデータを経常的に集約するシステムを構築するなどの工夫が必要となる。

また、地域住民参加の簡易水質調査プログラムを実施することによって多数のサンプル地点について監視することができるのみならず、分析精度は低くても地域全体のプロファイルが明らかになれば参加住民の達成感も得られ、一体的な環境改善の原動力とすることができる。

有害化学物質（ホットスポット）対策

フラミンゴの大量死と湖底泥中あるいは湖水中の重金属や微量有機化学物質との因果関係については依然として明確な見解が存在しない。しかし、WWFの長期モニタリングによればここ1975年から1995年の20年間に湖に流入する化学物質のプロファイルは一変し、銅、水銀、クロムなどの重金属や有機塩素系農薬の湖底泥への蓄積は明白である。これらの有害化学物質の発生源としては工場廃水、産業廃棄物、農薬、および過去の不法投棄場などが考えられる。

工場廃水については、本来、廃水中の有害化学物質は下水道に接続している事業所の場合は前処理施設で、接続していない事業所の場合は敷地内処理施設で、それぞれ下水道基準あるいは公共水域の水質基準を満たさなければ排出を規制する仕組みが必要である。しかしケニアの場合、法制度の整備は進行中であるが、監視を含む規制業務の執行体制はほとんど存在しないに等しい。上記のモニタリングシステムの確立とあわせて規制業務の執行体制について現状の分析と体制の整備について早急の検討が望まれる。

下水道整備区域外で工場廃水が直接近隣の水路へ排出される場合、重金属などの化学物質は晴天時に水路に蓄積し、降雨時には雨水と一緒に一気に湖に流れ込む。無償資金協力事業の一環として、下水処理場内には雨水滞留池が設置され一定の効果を発揮しているが、市域全体について雨天時に水路経由で湖に流入する有害化学物質対策については根本的な検討が必要である。

ナクル市には産業廃棄物処分施設は存在しない。一般廃棄物投棄場は市北側の丘陵地の一角にあるが、基本的にオープンダンプング地で産業廃棄物・一般廃棄物の区別なく、また衛生埋め立て^{*4}などの処分施設管理は一切行われていない。ナクル市担当者からはこの廃棄物投棄場の地層は石灰質の砂層という説明があったが、汚染された雨水浸透水が地下水脈経由でナクル湖に到達していることは十分考えられる。この廃棄物処分場の汚染状況と浸出水対策などについて十分な調査・検討が必要で、また処分場管理についても根本的な対策が必要である。

農薬の流出についても実態の把握が不可欠であるが、それには次に述べる の流域の一体的保全のための調査研究の一環として取り組む必要がある。

流域の一体的保全のための科学的知見の蓄積

ナクル湖の水質や生物生息環境は、ナクル市域の急速な都市化・工業化と人口の増加、ンジョロ川などの流入河川上流部における農地の拡大と肥料や農薬の投入量の増大、さらには国立公園内での野生動物の増加、などによってここ10数年の間に急速に悪化してきた。汚

* 4 衛生埋め立て（sanitary landfill）

一定の手順で埋め立てて生物学的に分解する処理法

濁物質の湖への流入は、従来の規模あるいはそれ以上で進んでいくことが予測され、フラミンゴの体内への有害物質の蓄積も進んでいくと思われる。ナクル湖の水質や生物生息環境の改善にはこういった陸上での人為活動のあり方自体を見直すと共に、流入汚濁負荷量の削減に向かって具体的な活動を展開する必要がある。

この流入汚濁負荷量の削減を実現するための計画作りについては、従来の我が国による協力事業では、我が国の流域下水道整備推進を目的とした流域総合計画のフレームワークをそのまま適用するケースが多かった。しかし、現状のナクル湖流域の一体的な保全にこの種のフレームワークを適用することは財政的にも体制的にも問題が多い。むしろSSNPやIMP、さらにはWWFの年次報告書など流域の一体的保全を視野に入れた既存の検討成果をベースに、その過程で指摘されている課題を具体的に掘り下げ、実効性を伴うプロジェクト形成に仕立て上げていくことが重要であろう。

< 別添資料 >

1 SNSP

ナクル市 SNSP 策定に至る経緯

- * ナクル市は、モロッコのエッサオウイラ (Essaouira) 市、ヴェトナムのヴィン (Vinh) 市と共に UNCHS (Habitat) の SNSP ケーススタディ都市として選ばれ、その結果この計画が策定された。
- * SNSP はナクル市の戦略的都市基盤計画 (SSP : Strategic Structural Plan、都市開発とローカルアジェンダ 21 計画を融合させる目的で考案された計画手法) として 1 年半の年月をかけて作成された。
- * SSP は伝統的なトップダウンの都市計画手法の欠点を補うために、達成すべき具体的成果から計画の枠組みとプロセスを明らかにする手法で、1) 展望 (Vision)、2) 行動 (Action)、3) 意思疎通 (Communication) の 3 つの要素からなるとしている。
1) については長期的なビジョンとその実現のために望ましい都市基盤施設の空間レイアウト (spatial structure) の策定を、2) については優先的な行動とボトルネックの除去を、さらに、3) については利害関係者の参加と相互対立の解決を、主たる目的としている。
- * 報告書には作成にあたったプランニングチームメンバーが所属する機関として土地及び居住省 (Ministry of Lands and Settlement)、リフト・ヴァレー郡、ナクル市、市ローカルアジェンダ 21 事務局、ナクル市行政区が記されている。
- * さらに、SNSP 策定協力者として、ナイロビ大学都市・地域計画学科、同大学住宅研究所、同大学建築学科、適正技術開発グループ (ITDG : Intermediate Technology Development Group)、WWF ナクル支部などの機関の職員名が記されている。
- * また、報告書は地区組織 (CBO : Community-Based Organization) および NGO、民間セクター、一般市民の参加があったとしている。
- * 報告書は Acknowledgements の中で特に土地及び居住省に対して謝意を表しており、この計画がナクル市の長期発展計画の一端をなすであろうことが暗に示されている。

ナクル市 SNSP のプロセス

- * ナクル市のローカルアジェンダ 21 策定は 1995 年に協議ワークショップ (Consultative Workshop) の開催という形で開始され、市議会議員、議会当局、区・県の行政府、研究・研修機関、準行政機関、NGO、CBO、民間事業者、他が参加した。
ワークショップの目的は、
 - 1) ナクル市の都市計画と行政システムのレビュー
 - 2) ナクル市の統合的都市計画の立案
 - 3) 都市計画に直接間接影響を受ける構成員の合意形成

4) アジェンダ 21 ローカルチームの組織の改善

であった。

* また、ワークショップではナクル市の持続的都市開発を実現するため、以下の項目を含む諸活動を遂行することを決定。

- 1) タウンプランニングユニットの設置
- 2) ナクル市の長期ビジョン実現のための S S P の策定
- 3) 改善事業を優先的に行う地域の決定
- 4) 都市開発及び都市自然環境の改善に必要な事業や活動を整合させる
- 5) 地域の組織機関の能力強化に必要な手立てを明らかにする

ナクル市の SSP の概要

* ナクル市の将来ビジョンは、一言でいえば「市民のグリーンシティ」であるとし、ビジョンの具体的目標として掲げるのは、

- 1) 環境都市 (eco-town)
- 2) 鉄道都市
- 3) 国際エコツーリズム都市
- 4) 地域の中核都市
- 5) 地域サービスセンター

である。

* 上記の性格を発揮すべく空間レイアウトが S S P の成果として報告書に示されている。

2 I M P

第1章 I M P の導入部、統合的計画立案の経緯と概要

* 本報告書はナクル国立公園の自然環境保全を達成する統合的な地域管理計画として策定された。

* 報告書の第1章では、まずナクル湖およびそれを取り巻く自然環境とナクル市を含む人為環境（社会、経済、文化的背景）を概観している。前者については地質、土壌、地形、水文、植生、気候（降雨、蒸発散、日射、気温）などについて、後者についてはナクル湖集水域の歴史的変遷、土地利用、都市化・工業化、環境保全、農業などについてそれぞれ概説している。

* ナクル湖国立公園については、場所、アクセス、法的位置づけ、動植物群集、公園整備の歴史的経緯、訪問者数など、公園インフラの概要、スタッフ、装備などについて概説している。

* 1993-1994 年にかけて K W S が策定した公園管理計画は公園内の管理課題に焦点を合わせたもので、公園周辺環境を含む包括的な管理計画ではなかった。

- * 今回の統合的計画は集水域、都市環境、保全区域および利害関係機関を包括するもので、その計画立案にはエコシステムアプローチが必要、としている。
- * 統合的管理計画については、ナクル湖ウエットランドおよび周辺域を包括する地域を対象とする広範な参加型計画プロセスで、集中的かつインタラクティブに対象地域の物理環境と人為環境に関する実質的意味をもつデータを短期間に収集・集約、学際的専門家チームによる特定の課題の調査や分析手法を適用する、としている。

第2章 統合的計画の目標

- * 報告書の第2章では、IMPの長期的目標は、ナクル湖国立公園における生物多様性と環境の維持、公園の持続的発展と安定した生態系の維持であるとしている。
- * IMPの具体的目標としては、公園内の生物多様性の維持、利害関係者の参加によるツーリズムの多様化の実現、環境保全に関する関心の向上と環境教育の推進、ナクル湖国立公園とその集水域の保全のための地域レベル、国レベル、国際レベルの関係機関の協力、ナクル湖エコシステムについて科学的研究とモニタリングを推進すること、持続的土地利用と環境保全の推進によって集水域における貧困の解消、人間と野生動物のコンフリクトを最小限にする、などとなっている。

第3章 管理处方箋、プログラム、行動計画

- * 第3章は公園を取り巻く環境の悪化に対処するための処方箋、プログラム、行動計画について記述している。
- * 記述の項目として、環境教育、環境保全、環境モニタリング、環境計画、啓発、および具体的提言が掲げられている。
- * 野生動物と人間とのコンフリクトについて、その内容を具体的に述べ、対策を詳述している。
- * 集水域の開発による環境悪化については土地保有制度(land tenure)を含めて詳述している。
- * 公園とナクル市の関係については上水道、下水道・衛生施設、雨水排除施設、ごみ処理、電気供給、電話・郵便制度などについて分析している。
- * ツーリズムについてはその現状と課題、管理計画などについて記述している。
- * 草食動物管理については動物種別にその方法について記述している。生息数の管理手法としては自然的、人工的、さらには遺伝子学的手法について記述している。
- * 生息環境管理については移入種問題を中心に記述している。
- * とくにレッサーフラミンゴの生息数管理については入園者の制限、水位維持などについて記述している。
- * また、フラミンゴの大量死に関する調査研究の現状について詳述している。

第4章 ゾーニング

- * 公園の内部、公園の外部についてゾーニングのあり方を記述している。
- * 「環境と開発に関するケニア政府の政策の枠組み」については、法的、行政的枠組み（水法、農業法、森林法、漁業法、土地計画法、施設計画法、土地管理法、地方行政法、ケニア・ツーリスト開発公社法、ツーリスト業免許法等）に関して記述している。
- * 関連機関の協力の枠組みについて記述している。

3 WWF Annual Reports

- * 各年次のレポートについて特筆される部分は以下のとおりである。

1999-2000

- * WWF では1993年より湖内8箇所と流入河川10地点において、DO、電動度、塩分濃度、pH、水温、酸化還元電位、アルカリ度、TDS、TSS、総リン、無機リン、総ケルダール窒素、総硝酸性窒素の測定を継続して行ってきたが、この年次報告にはナクル湖のDO、透明度、電気伝導度、塩分濃度、pH、水温、およびフラミンゴ頭数、水位について経年変動をグラフ表示している。
- * DOは6.7から18mg/lで時期によっては過飽和であること、電動度、塩分濃度は増加傾向にあるがスピルリナ（*Spirulina*）の生育には問題ないこと。
- * 乾季における湖水の蒸発により電動度が1カ月あたり4-7 mS/cmの割合で増加する。同時に塩分濃度、TDS、アルカリ度も増加するがスピルリナの生育に影響を及ぼすものではない。
- * 1997-1998年のエルニーニョ以降、藍藻類（*Anabaenopsis arnoldii*）とある種の珪藻類が優先種となった。
- * Egerton大学の協力によって河川の底生動物調査が行われ、ンジョロ川、Makalia川の汚染実態が把握された。

などと記されている。（ナクル湖の水質の現状に関しては辻村氏報告書参照）

- * 1999年7月から2000年3月にかけて植物プランクトン（スピルリナ）の発生が抑制され、ナクル湖のレッサーフラミンゴ数が3,000から20,000の間で変動した。また、同じ時期にボゴリア湖において50,000羽というフラミンゴの大量死が報告された。この2つの現象は国内外で問題視されるに至った。（水質および水位の経年変動とフラミンゴ生息数に関しては柿澤氏報告書参照）

1998-1999

- * この年次報告の中で注目すべきは、表3に示されたナクル湖底泥中の有害化学物質濃度の比較（1975年と1995年）である。

表 3

化学物質	1975	1995
砒素 (ppm)	35.0	1.5
カドミウム (ppm)	0.27	分析値なし
銅 (ppm)	6.2	21.4
水銀 (ppm)	<0.05	1.5
鉛 (ppm)	34	21.1
クロム (ppm)	ND	49.8
DDT (ppb)	ND	4.26
DDD (ppb)	ND	1.5
DDE (ppb)	ND	1.64
ガンマ BHC (ppb)	ND	706
ディエルドリン (ppb)	ND	8.6

上表より明らかなように重金属類のうち工場廃水に含まれる銅、水銀、クロムなどは増加傾向を示し、1975年時点では検出されなかった有機塩素系農薬類が1995年にはかなりの濃度で底泥に蓄積されている。

* レポートはWWFが行ってきたナクル湖水質調査体制について以下の様に述べている。

- 1) WWFが行ってきたナクル湖水質調査 (Water Quality Surveillance) は単位費用あたりの効果は高く、生物分野の専門家2名とローカルサポートによって遂行することができる。業務はKWSによって引き継ぐことができる。
- 2) 集水域の水質調査には地域住民の参加が可能かつ望ましい。集落環境委員会 (Village Environment Committees) は記録及び情報公開に重要な役割を果たす。
- 3) ボゴリア湖、ナイバシャ湖における水質調査計画が開始されるため、統一的な調査方法を確立することが必要である。
- 4) フィールド調査メンバーに対し、塩水湖生態学、水生毒性学、水文学の専門トレーニングが必要である。

* 1992年のナクル湖での魚の大量死、1993年及び1995年のナクル湖及びボゴリア湖におけるレッサーフラミンゴの大量死の原因として有毒物質の可能性が浮かび上がった。いずれのケースも感染症は二次的なものであった。魚の組織検体分析では鉛の濃度が高く、農薬マラチオンが検出された。フラミンゴの大量死についても病原性の組織変異は見られず、毒性物質に関する調査分析が、Egerton大学のDr. G. Motelinおよびアメリカ合衆国イリノイ大学のDr. Beasleyによって行われることになった。

* 1997年4月より1998年6月にかけてボゴリア湖、エレメンテータ湖、ナクル湖から総数60羽のレッサーフラミンゴを捕獲し、Egerton大学とイリノイ大学の協力でそれぞれの検体について病原性と毒性の両面からの分析が行われた。確定的な結論は出されていないが、毒性物質の蓄積とフラミンゴの大量死との因果関係を疑うにたる結果が得ら

れたとされている。

* 1997 - 1998 省略、1996 - 1997 省略、1995 - 1996 省略、1994 - 1995 省略

1 はじめに

ナクル湖は100万羽を上回るコフラミンゴの飛来地として有名であり、1968年にはケニアで最初の国立公園に指定された。また、1990年にはラムサール条約登録湿地に指定されるなど、同国の重要な自然保護区域となっている。本報告では、まず、ナクル湖が本来的にどのような湖かを、その自然環境に着目して生態系の特徴を概説する(2章)。次に、今回行った現地調査の結果ならびにこれまで報告されているデータから、最近のナクル湖の水質、特に栄養レベルの現状に触れ、過去との比較を行う(3章)。さらに、今回の調査では分析しなかった毒性物質によるナクル湖集水域での汚染に関する知見をレビューする。そこでは、最近この地域で問題になっているコフラミンゴの大量死との関連についても触れる(4章)。本プロジェクトによるナクル湖の生態系変化の影響に関しては、これら3つの章の中で、それぞれ関連する項目を論じることとする。

2 ナクル湖の生態的特徴

リフト・ヴァレーの湖沼群における最初の学術調査は1929年に遡る(Jenkin 1929)。この調査のレポートにおいて、ナクル湖を含むリフト・ヴァレーのソーダ湖では、ラン藻類のスピルリナによる水の華と、それを専門に捕食するコフラミンゴが生態系の重要な位置を占めることが指摘されている。すなわち、リフト・ヴァレーに点在するソーダ湖という特殊な環境に適応して圧倒的に優占することに成功したスピルリナが存在することによって、コフラミンゴは共進化してきたと考えることができる。フラミンゴの嘴は水中の藻類や水生昆虫を濾し分けて採食するのに適したフィルター構造となっており、コフラミンゴのそれは、螺旋状のトリコーム(細胞が連なった糸状体)を形成するスピルリナを濾し捕るのに適したサイズとなっている(Vareschi 1982)。スピルリナは高タンパク質の良好な餌であり、メキシコやチャド湖周辺などでは古くから人間の食用にも利用されているほか、アメリカ、中国などでは専用の培養池を設けて大量培養が行われており健康食品として売り出されている。なお、コフラミンゴの赤い体色はスピルリナのカロチノイドに由来するものである。

ナクル湖を含めリフト・ヴァレーにあるソーダ湖は、カチオン^{*1}としてナトリウムイオン、ア

^{*1} カチオン 陽イオンのことで、Na⁺、K⁺、Ca²⁺、Mg²⁺ などがある。

ニオン^{*2}として重炭酸イオンが卓越する pH 9-11 程度のアルカリ湖である。リフト・ヴァレーにはナイバシャ湖やバリンゴ湖のような淡水湖も存在している。地質学的な記録によると、約 1 万年前にはナクル湖周辺には、現在のエルメンテータ湖、ナイバシャ湖も含む水深 130-200 m に達する巨大な淡水湖が存在していた。約 3000 年前に乾燥した気候が続き、現在のような浅い 3 つの湖に分かれたと考えられている。その後、ナクル湖とエルメンテータ湖では流域が閉鎖系であるため塩湖化していった。ナイバシャ湖が淡水であるのは地下水として浸出しているためと考えられている(Motelin et al. 1995)。

これらのソーダ湖には、一般の湖では植物プランクトン^{*3}の増殖を制限する窒素・リンが十分に含まれているので、アルカリ性の高塩分濃度という特殊な水環境に適応できる植物プランクトンにとっては、栄養面での制限をほとんど受けない恵まれた環境となった。スピルリナはこのような環境に上手く適応していったラン藻類である。ちなみに、スピルリナは中南米、インドなど世界中に存在する同様のソーダ湖に広く分布しており、最近の研究からはどの大陸に生息するスピルリナも遺伝的にほぼ同一であることが明らかにされている(Scheldeman et al. 1999)。なお、本報告で用いている“スピルリナ”は、*Arthrospira* 属に含まれるラン藻 *A. fusiformis* に対しての名称であり、*Spirulina* 属とは別属であることが明らかとなっている。しかし、“スピルリナ (*Spirulina*)”という名称が、和名としても英名としても一般に通用しているので、ラテンネームとは違うことになるが、そのまま用いていることをお断りしておく。

Melack & Kilham (1974)は、ナクル湖を含む東アフリカの 6 つのアルカリ湖沼において植物プランクトンの一次生産^{*4}量を調べ、極めて高い値を記録している。植物プランクトンが大量に増殖した場合、自身が光を遮蔽するようになり下層に光が届かなくなる。そのため下層においては栄養塩^{*5}が十分あっても光合成ができなくなるので、単位面積あたりの最大一次生産量には上限がある。ナクル湖で得られた一次生産量は、理論的に計算されたこの最大値に匹敵するものであり、世界中のどの湖沼と比較しても極めて高い一次生産量を誇る湖であることが示された。また、ナクル湖のクロロフィル a 量^{*6}としては、1,000 $\mu\text{g/l}$ 以上になることが報告されており、植物プランクトンが大繁殖した湖水は“緑のスープ”といった言葉で表現されている。このように、ナクル湖は人為的な影響とは関係なく昔から富栄養であることを特徴としており、アルカリ湖かつ富栄養湖であるといった特殊な水環境が、スピルリナの高い一次生産力、さらにはスピルリナを餌とする大量のコフラミンゴの成長を支えているといえる。

* 2 アニオン 陰イオンのことで、 Cl^- 、 HCO_3^- 、 SO_4^{2-} などがある。

* 3 植物プランクトン 浮遊生物 (= プランクトン) のうち、光合成を行う生物のこと。

* 4 一次生産者 (一次生産量) 独立栄養生物による有機物生産を一次生産と呼ぶ。これに関与する生物を一次生産者と呼ぶ。一般には光合成による有機物生産になる。

* 5 栄養塩 生物が正常の生活を営むのに必要な塩類のこと。

* 6 クロロフィル a 量 クロロフィルは葉緑素のことで光合成色素の 1 種。クロロフィル a は光合成細菌以外の酸素発生型の全ての光合成生物に含まれているので、水中に含まれるクロロフィル a 量は植物プランクトン量の指標になる。

Vareschi (1978)は、約 100 万羽のコフラミンゴがいた 1972-1973 年のナクル湖のスピルリナによる一次生産量とコフラミンゴの摂食量を試算している。それによると、実験的に求めたコフラミンゴの湖水濾過速度は 31.8 l/h であり、平均摂食時間は 12.5 h/d であった。この時のスピルリナ現存量が 180mg DW/l *⁷ であったので、1 羽のフラミンゴは 72 g DW/day (若鳥では 66 g DW/day) のスピルリナを摂食すると見積もった。1972-1973 年にはコフラミンゴが平均で 915,000 羽いたので、~ 60 t DW/d のスピルリナを摂食していると試算した。この量はスピルリナによる一次生産量の 60 % あるいは現存量の 0.4 % に相当していた。このように高濃度にスピルリナが現存し、それらが活発に増殖しているときには 100 万羽のコフラミンゴを養えるだけの餌の供給が期待できることが示されている。逆にいえば、何かしらの要因でスピルリナの現存量が減少したり、増殖速度が低下したりした場合には、コフラミンゴの摂食圧によってもスピルリナ現存量が減少しうることを示している。

既に述べたように、ナクル湖は閉鎖湖である。すなわち、流入する河川水・地下水と湖面からの蒸発のバランスによって水量が決まる湖であり、流出する河川を持たない。そのため、降雨量の多少に伴う河川流入量の変化や、日照・風などによって影響を受ける蒸発量の変化など様々な気象変動に影響を受けやすく、大きな水位変動を持つことを特徴とする。実際ナクル湖では、1933、1939、1947、1953、1961、1987、1993、1996 年に干上がった、あるいは水位が水位測定用ゲージ以下になったことが報告されている。一方、1998 年にはエルニーニョの影響とされる水位上昇が起こり 4m を超す水位を記録している。また、同レベルの水位上昇は 1979 年にも記録されている。

これらの現象は、水中の化学成分の濃縮と希釈を引き起こす。典型的には電気伝導度*⁸の変化として現れ、当然、スピルリナを含めそこに生息するすべての生物に影響を及ぼす。

ナクル湖に生息する生物は、このような大きな変動が起きやすい環境に適応することによって生存しており、特に塩分濃度の変化には幅広い耐性を持たなければ生き残れない。スピルリナも幅広い塩分濃度に適応できることはよく知られている。この事実から、多少の水位変動に伴う電気伝導度の変化にも影響を受けないと考えられることが多い。しかし、実際の野外調査からは、適応範囲の環境下であっても増殖しない場合があることが示されている。Melack (1988)は、1973 年 2 月から 1974 年 8 月にかけて、エルメンテータ湖で平均水深が 1.1 m から 0.65 m に低下した期間の植物プランクトン現存量・組成変化を調べた。この間、電気伝導度は 19.1 mS/cm *⁹ から

* 7 mg DW/l mg dry weight / l のこと。dry weight は乾重量。湿重量が水分を含んだ重量であるのに対し、乾重量は乾燥させて水分を取り除いた時の重量。

* 8 電気伝導度 電気の通しやすさを表す。水中では溶け込んでいるイオン量の指標になる。

* 9 mS/cm S はジーメンスのことで、電気のコンダクタンスの単位。コンダクタンスは電流の通しやすさを表す量で、電気抵抗 (Ω) の逆数。すなわち、電流を電圧で割った値。湖水ではイオンが多ければ多いほど電気が通りやすくなるので値が大きくなり、逆に純水は 0 になる。

27.0 mS/cmに上昇した。この電気伝導度の範囲はスピルリナの増殖から見れば、あまり影響を与えない範囲であるが(Vareschi 1982)、この上昇期間にスピルリナは急激に減少した。この減少の要因として、急激な塩分濃度の変化の可能性が指摘されている。その他の要因として、水深低下と透明度の上昇により底生藻類が活発に増殖し、底泥の貧酸素状態が緩和することによってリンの溶出が抑制されたため、水中への栄養塩供給パターンが変化し、その結果として緑藻などの小型の植物プランクトンがスピルリナなどのラン藻類との種間競争に勝ったことなどが考えられた。このように、優占していた種にとって適応範囲内での環境変化が生じた場合でも、その種が絶滅することはないとしても、優占種がほかの種に替わることは普通に起こり得ることである。ナクル湖においても、この時期エルメンテータ湖と同様に水位低下とスピルリナの減少がみられた。その結果、1972-1973年平均で915,000羽いたコフラミンゴが、1974年には113,000羽と急激に減少した(Vareschi 1978)。スピルリナの代わりに優占した小型の植物プランクトンをコフラミンゴは上手く濾し捕ることができないので餌不足となったためである。

興味深いことに、この時ジャーナリズムは、汚染によってナクル湖にはコフラミンゴが住めなくなったと盛んに報道したらしい。しかし、ナクル国立公園のMburugu (1974)は、"Disappearance of flamingos and blue green algae from Lake Nakuru National Park in 1974"と題するレポートの中で、水位低下に伴い餌のスピルリナ現存量が激減し、その結果コフラミンゴがほかの湖に移ったとする見解を発表し、科学的根拠に基づかない報道を非難した。Tuite (1979)の航空写真による個体数計数結果からも、この時期ナクル湖、ボゴリア湖から姿を消したコフラミンゴは、ほかの東リフト・ヴァレーのソーダ湖沼に散らばって生息していたことが示されている。

これまで述べてきたことを整理すると、閉鎖湖であるナクル湖は、「アルカリ・ソーダ湖」、「富栄養湖」、「水位変動の激しい湖」という3つの大きな特徴を持つ。そのような特殊な水環境に適応したスピルリナは、ときに極めて高い生産量になり、一次生産者として圧倒的に優占するが、水位変動などの環境変化次第で激減する場合がある。このようにコフラミンゴに必要な餌(スピルリナ)を永続的に供給できる湖はもともと存在していないことを理解しておく必要がある。スピルリナを専門に餌とするように共進化してきたコフラミンゴは餌(スピルリナ)が足りなければ、その湖を離れ、より餌が存在する別の湖に移るので、一時的に1つの湖(例えばナクル湖)からコフラミンゴがいなくなる現象は自然なことである。コフラミンゴの生態から考えた場合、リフト・ヴァレーに点在するソーダ湖沼群全体として、安定した餌が供給されているかどうかの視点が必要であるだろう。

1995年にナクル湖からコフラミンゴが消えた時には、下水場整備による栄養塩除去がスピルリナの増殖を抑えたためとナイロビ大学のKaranjaが新聞紙上などで主張し、本プロジェクトを強く批判した。その後、1996年後半になってコフラミンゴが戻ってきたことにより、そのような主張は話題とならなくなった。Githaiga et al. (in press)によると、この時期は水位の急激な減少

(1995年7月から1996年4月にかけて水位0cmとなる)電気伝導度の急激な上昇時期に一致している。スピルリナ現存量に関するデータがないため餌量に関してはよくわからないが、溶存酸素量が低下していることからスピルリナの活発な増殖はなかったと考えられ、このときも、餌不足によってコフラミンゴが移動していったと推定できる。スピルリナが大量に増えていても、コフラミンゴがあまり飛来していないといった事例も報告されているので(Vareschi 1978)、コフラミンゴの移動には他の要因も考慮する必要はあるだろうが、スピルリナの現存量がコフラミンゴの生息数と密接に関連していることは多くの研究者によって認められている。

円借款事業「大ナクル上水道事業」を実施するにあたって、ナイバシャ湖集水域にあるトラシャ川にその水源を求めたため、この流路変更によりナクル湖に流入する水量が増加することになり、このことがナクル湖の水位、さらには生態系にどのような影響を与えるかが問題となった。1991年にJ B I Cが派遣した調査団(J B I C 中間管理調査)は、水位として最大70 cm上昇する他、塩分濃度の低下などの可能性を論じている。本報告書作成に当たり、多くの文献・資料に目を通したが、本プロジェクト実施後、流路変更に関連する議論は一度も出てきておらず、全く話題になっていないようである。

この背景には、ナクル湖自体の特徴の1つとしてあげたように、自然現象としての水位変動があまりに大きいため、流路変更によるナクル湖の水位変動は察知できていないことがある。塩分濃度の変化は水位変動に伴って生じるので、この面に関する流路変更の影響も明らかでない。温暖化や異常気象など地球規模で起こっている現象に対しても、ナクル湖のような湖は強い影響を受けやすいと考えられ、1998年の水位上昇はエルニーニョ現象と絡めて理解されている。したがって、流路変更のような地域レベルでの影響を、気象など様々な要因と切り離して正しく評価するためには、長期的にナクル湖、ナイバシャ湖の水位ならびに流入河川水量のモニタリングを継続していく必要がある。

近年のナクル湖の生態系の大きな変化としては、1961年のティラピア(*Sarotherodon (=Tilapia) alcalicus grahami*)の導入がある。マラリアを媒介する蚊対策のため、マガディ湖から導入された。この魚はナクル湖に定着・繁殖し、その結果、ペリカン、ウなど多くの魚食性の鳥類が生息するようになり、これら魚食性鳥類によって1日に約5tの魚が取り除かれていると推定されている(Vareschi 1979)。また、J B I C 中間管理調査は、調査時に記録したペリカン、ウ、カイツブリの3種の個体数から約14.5tの魚が消費されると見積もり、ケニア側の鳥類カウントデータに基づいた場合には約25.4tに達することを報告している。

一方、ナクル湖の近くに位置するアルカリ湖のエレメンテータ湖では、この湖自体には魚が生息していないが、ナクル湖でティラピアが繁殖するようになって以来ペリカンの営巣地となったため、ナクル湖から栄養が運ばれる結果となった。Vareschi (1979)によると、1日あたりPO₄-Pが72 kg、窒素が486 kg ナクル湖から取り除かれ、その約半分がエレメンテータ湖へ運ばれてい

ると推定されている。

このように、ナクル湖への魚一種の導入は、両アルカリ湖沼の生態系バランスに大きな影響を与えたと考えられている。また、ティラピアはスピルリナを捕食するので、餌に関してコフラミンゴと競合しており、ティラピア現存量の変動はコフラミンゴの生息にも影響があるものと思われる。限られた餌資源を取り合うことを考えれば明らかなように、ティラピアの繁殖は、生息できるコフラミンゴの数的減少を引き起こすことになる。ナクル湖での詳細な学術調査が実施され始めたのが、ティラピアが既に定着した 1970 年代になってからのため、導入前の生態系についての知見は限られており、導入前後の生態系の変化に関してはよくわからない。

3 ナクル湖の水質と植物プランクトン

3 - 1 はじめに

本調査では、J B I C 中間管理調査との比較を行う目的も含めて、タウン、ンジョロ両下水処理場内とナクル湖流入河川であるンジョロ川の水質調査、ならびに、ナクル湖、ボゴリア湖の水質、植物プランクトン調査を実施した。しかし、水質、植物プランクトンともに経時的に大きく変化するため、一度行っただけの調査でわかることは極めて限られている。そこで、これまでに報告されてきた文献に加えて、WWF レポートや現地で入手した最近のデータも利用して、現状のナクル湖の状況を考察する。

3 - 2 方法

調査地点を図 1 に示す。pH、電気伝導度、濁度、溶存酸素、水温、酸化還元電位の各項目は野外用多項目水質計(堀場製作所製 U-23)を用いて現場にて測定した。栄養塩ならびに COD^{*10} は簡易水質検査用パックテスト(共立化学研究所製パックテスト WAK 型式)を用いて、採水日に宿泊ホテルにて測定した。植物プランクトン用試水は現場にてホルマリン固定し、日本に持ち帰った後、光学顕微鏡下で計数した。

3 - 3 結果と考察

(1) 下水処理場と流入河川の水質

水質調査結果を表 1 に示す。ンジョロ処理場では、蒸発によるのか地下への漏出によるのか明らかでないが、処理途中において下水が消失していたため、処理終了後の放流水の水質を確認することはできなかった。タウン処理場では、放流水の COD が 30 mg/l であり流入する原水からほぼ一桁減少していた。この結果は、J B I C 中間管理調査時のンジョロ処理場

* 10 COD (Chemical Oxygen Demand) 日本語で化学的酸素要求量。水中の物質(主に有機物)が化学的に酸化分解されるとき必要とする酸素の量をいい、水の有機物汚染の指標となる。

での調査結果とほぼ一致する。また、ナクル市水質試験所から提供された資料でも BOD^{* 11} の減少が示されており、通常に機能している時には順調に処理されているようである。栄養塩濃度も処理過程において減少していたが、ンジョロ川と濃度を比較すると一桁ほど高い値であった。ンジョロ川ではナクル市からの排水の影響を受けない上流部に比べ、下流部において COD とリン酸塩濃度が明らかに上昇しており、ナクル市からの都市排水がかなり流れ込んでいることを示した。

両下水処理場の熟成池ではミクロシスチンと呼ばれる肝臓毒を生産する可能性を持つラン藻類のミクロキスティス(*Microcystis ichthyoblabe*)がアオコを形成していた。Raini & Thampy (1999)もこの熟成池にてミクロキスティスとアナベナを報告している。近年のコフラミンゴの大量死の原因として、現状ではまだ特定されていないが、ナクル湖の生物相の変化、重金属や農薬などの化学物質の体内蓄積などいろいろな原因が推測されており、後述するように、かつてアオコ毒もひとつの可能性として指摘されたことがある。両下水処理場は、最終処理に生物膜処理としてロックフィルターを採用しているため藻類が流出することはほとんどなく、加えて毒素の土壌への吸着性や細菌による分解を考えれば、仮に熟成池内のアオコが毒素を出していたとしても、増殖したアオコとその毒素がナクル湖に流入することはまずないであろう。ただ、コフラミンゴは、餌はナクル湖で摂食しているが飲み水は熟成池に来て摂取する可能性があるため、熟成池内のアオコが毒素を出しているかどうか念のため確認しておくことが望ましい。

J B I C 中間管理調査では、ナクル湖に流入する下水量の増加に伴い、湖水の富栄養化が進行し湖沼環境が悪化する可能性が指摘されている。ナクル湖は集水域の一番低い箇所にあるため、完全に別の集水域に排水を移すか、途中で蒸発させなければ、最終的にはナクル湖に流れ込むことになるので、下水量の増加は確実にナクル湖への汚濁負荷を高める。処理場を通過する下水がごく一部である現状を考えれば、今後、下水処理を全く受けずに河川などを通じてナクル湖に流れ込んでいる部分をいかに減らしていけるかがナクル湖保全のための大きな課題であろう。下水処理施設が機能を発揮すればするほど、ナクル湖へのトータルの汚濁負荷は軽減されることになる。また、下水処理施設のラグーンでの蒸発量はかなり大きい可能性があり、将来的にはナクル湖に流入する排水の絶対量を減らすための手段としてのラグーンを検討する必要もある。

* 11 BOD (Biochemical Oxygen Demand) 日本語で生物化学的酸素要求量。水中の物質 (主に有機物) が微生物によって酸化分解されるとき必要とする酸素の量をいい、水の有機物汚染の指標となる。

(2) ナクル湖の水質と植物プランクトン

ナクル湖内 12 地点の水質測定結果をボゴリア湖 4 地点のデータと併せて表 2 に、これまでに報告されているナクル湖の栄養塩データを表 3 に示す。また、植物プランクトンの計数結果をクロロフィル量データと併せて表 4 に示す。琵琶湖南湖(COD=3.2 mg/l 1999 年)ならびに日本湖沼で COD ワースト 1(24 mg/l 1997 年)である手賀沼の全リン、全窒素濃度はそれぞれ、0.018 mg P/l, 0.39 mg N/l (1999 年)と 0.5 mg P/l, 4.9 mg N/l (1998 年)であり、ナクル湖の栄養レベルは非常に高いことがよくわかる。

ナクル湖を含めこの地域の湖沼では、リン酸塩がかなり高濃度であることからリン制限^{* 12}が生じることは少ないと一般に考えられる (Milbrink 1977)。ただ、リン酸塩の供給は底泥の溶存酸素量に大きく依存している上に、多量の植物プランクトンの生産に常に利用されているため、リン酸塩濃度は短期間に大きく変動することが知られている(Vareschi 1982)。また、Melack et al. (1982)は、ナイバシャ湖に近接する噴火口にあるソナチ湖における植物プランクトン群集へのリン酸態リンとアンモニア態窒素の添加実験から、この地域のソーダ湖においてもリン制限になる場合があることを報告している。

今回の調査では、簡易パックテストによる無機態窒素濃度^{* 13}を試みたが正確に測定できなかった。ソーダ湖ではアルカリ度が高く他のイオンによる干渉作用が大きく分析が困難なためデータがほとんどない。最近では、WWF、KWS によって定期的に測定された値が報告されているが、学術雑誌に報告されたナクル湖の硝酸態窒素量としては Milbrink (1977)による報告が見つけることができた唯一の数値であり、WWF、KWS の報告値とは濃度が著しく違うため、正確に計れているか一度検証する必要があると思われる。窒素固定能力^{* 14}を持たないスピルリナが優占すること、多量の窒素がフラミンゴの糞尿によって回帰することなどから、リン同様窒素も制限になっていないのではないかと推論されている(Talling & Talling 1965)。WWF のレポートによると、ナクル湖、ボゴリア湖では窒素固定能力のあるラン藻アナベナがスピルリナにかわって優占することが報告されている。アナベナの優占には、湖水中の無機態窒素濃度が関連していると思われるが、そのような観点からの研究はまだ行われていない。

ナクル湖はもともとかなりの富栄養湖であるので、リンと窒素などの無機栄養塩^{* 15}だけ

* 12 リン制限 植物の増殖や収量は必要とする元素のうち最も少量の元素によって支配される。リン制限は、他の元素は存在するのにリンが不足するため成長が抑制される状態を言う。

* 13 無機態窒素濃度 水中の無機態の窒素の濃度。無機態窒素は硝酸態窒素、亜硝酸態窒素、アンモニア態窒素に分けられる。有機体窒素は尿素やアミノ酸など。

* 14 窒素固定能力 ある種の生物が持つ、分子状の窒素(N_2 : 大気の約 80%)を直接取り込み同化する能力のこと。多くの植物プランクトンはこの能力を持たないので、水中の無機態窒素(アンモニア態窒素や硝酸態窒素など)を利用するが、ラン藻類の一部は窒素固定能力を持つので、水中の無機態窒素が不足しているとき(窒素制限と言う)有利となる。

* 15 無機栄養塩 植物がその増殖に必要とする無機態と栄養塩のこと。水圏では特に不足になりやすい、無機態窒素(硝酸態窒素、亜硝酸態窒素、アンモニア態窒素)とオルトリン酸が重要。

に関して言えば、下水量増加による影響は少ないのかもしれない。ナクル湖に関する栄養データが少ないうえに栄養塩濃度は大きく変動するので、はっきりしたことは分らないが、栄養レベルがそれほど変化したようには思われない。

今回ナクル湖内で調査した 12 地点におけるスピルリナのトリコーム数は平均で 348 trichomes/ml であり、これまでに報告されている Melack & Kilham (1974) の 13×10^3 (3 巻きを 1 系状体として計数しているのでトリコーム数としては 3 分の 1 くらいになる) や Milbrink (1977) の 40×10^3 に比べると 1 ~ 2 桁低い現存量であった。一方、1991 年 2 月に行われた J B I C 中間管理調査では、コフラミンゴが群生していた風下の水溜まりでスピルリナが観察されたものの、湖水中ではほぼ見られなかったことが報告されているので、その時期よりは、はるかに増加していることになる。

Vareschi (1982) に示されているクロロフィル a 量とバイオマス^{*16}の関係に基づき、今回のナクル湖におけるクロロフィル a 量の平均値 316 μ g/l から植物プランクトンバイオマスを算出すると、少し乱暴な計算ではあるが、84 mg DW/l となる。表層水の溶存酸素が計測器の上限である 20 mg/l を越しており過飽和状態であったことから、調査時には植物プランクトンの活性はかなり高かったことは確かだと思われるが、このバイオマスで、この時ナクル湖にいたコフラミンゴ(調査に同行して頂いた K W S 職員の感覚では 80 万羽程度)を支えられているのであろうか？

調査時、いたる所でティラピアが水面に波紋を立てているのを観察したので、コフラミンゴと餌が競合する魚の現存量も相当なものだったと思われる。前章で示した Vareschi (1978) の試算から見ると、数十万羽程度は可能なようにも思われるが、今回得られたデータだけでははっきりしたことはわからない。いずれにせよ、Milbrink (1977) と Vareschi (1978) で試みられたようなエネルギー計算は 1972-1974 年の調査以来行われておらず、今後、コフラミンゴのための水環境保全を考えていくうえではしっかりしたデータの蓄積が欠かせない。

スピルリナ以外の植物プランクトンとしては、アナベノブシス(WWF レポートでアナベナとして報告されている種と同一と思われる)、クリプトモナスなどが多くみられた。ボゴリア湖の調査では、同行して頂いた WWF 職員がアナベナのアオコが発生していると現地で述べていたが、試水からはスピルリナしか観察できず、今回の調査からはボゴリア湖でのアナベナの発生に関しては確認できなかった。また、ミクロキスティスに関しては、下水処理施設の熟成池においてアオコを形成していたことは既に触れたが、湖水中からは一度も検出されなかった。ミクロキスティスがボゴリア湖やナクル湖において出現するとしての記述がいくつかの報告にあるが、日本の汽水湖沼^{*17}では塩分濃度の高いときにミクロキスティスの

* 16 バイオマス 生物体量のこと。ある時点に任意の空間内に存在する生物体の量を重量ないしエネルギー量で示した指標。

* 17 汽水湖沼 海水と淡水が混じり合った低塩分の湖沼のこと。

増殖が抑制されることが知られているので、本当にこれらソーダ湖で増殖しているかに関しては疑問が残った。ミクロキスティス培養株を用いた実験では 0.7 % 以上の NaCl 濃度ではほとんど増殖がみられないことが示されている(Otsuka et al. 1999)。

一方、南條ら(1998)は高塩分濃度でのミクロキスティスの増殖抑制は塩素イオン害によるものと考えており、1.5 g Cl/l で増殖量が半分、2.3 g Cl/l 以上では増殖がみられないことを報告している。

前章で記述したように、リフト・ヴァレーのソーダ湖はアニオンとして重炭酸イオンが卓越しているが、塩素イオンは意外なほど少なく、電気伝導度が 10.01 mS/cm の時のナクル湖における塩素イオン濃度として 1.02 g Cl/l が測定されている(Hecky & Kilham 1973)。ミクロキスティスが浸透圧ストレスに対して上手く適応できるのかどうかはわからないが、もしミクロキスティスの耐塩性が塩素イオン害によって決められているのであれば、電気伝導度が比較的低い時にはナクル湖で出現することがあるのかもしれない。今回の調査時のナクル湖の電気伝導度は 31-39 mS/cm であり、3 g Cl/l 以上の塩素イオンが含まれると考えられるので、ミクロキスティスを観察できなかったのは不思議でないと考えられた。

J B I C 中間管理調査において指摘されているように、下水処理水に含まれる溶存有機物の多量の流入は植物プランクトン種組成に影響を及ぼしているかもしれない。今回の調査では、タウン処理場からの排水ならびにンジョロ川からの河川水の影響を強く受けていると思われるナクル湖北部の 2 地点にてクリプトモナスの現存量が多くなっていた。残念なことに、WWF のレポートを含め、最近の植物プランクトンの現存量・種組成に関するデータはほとんどみあたらず、今回のような地点間の種組成の違いがいつも起こっている現象なのかどうか確認できなかった。COD はナクル湖のどの地点においても 100 mg/l 程度であったのに対し、ボゴリア湖のそれは 10-15 mg/l であったので人為的負荷量の差が現れているのかもしれない。

湖水中の溶存有機物の量や形態が植物プランクトンや細菌など微生物群集の構造に大きな影響を及ぼすことが明らかになってきたのは、研究の進んでいる温帯域の一般湖沼においても最近のことである。ナクル湖の過去の COD など有機物濃度に関するデータが見あたらないため検証することはできないが、既に 1970 年代にはスピルリナ以外の植物プランクトンの増殖が目立つようになってきたことが指摘されており、ボゴリア湖に比べナクル湖では有機物負荷の増大によりスピルリナが他の植物プランクトンに取って替わられやすい状況になっているのかもしれない。ナクル湖の生態系の変化をとらえるうえでも植物プランクトンのモニタリングは非常に重要であり、今後定期的な調査の実施が望まれる。

4 毒性物質

1993年8～11月、1995年の8～9月に40,000羽のコフラミンゴがナクル湖とボゴリア湖で死亡するといった現象が起きている。この時、ペリカンをはじめとする他の鳥類の死亡は確認されていない。また、2000年前半には50,000羽に達するコフラミンゴがボゴリア湖中心に死んだことが新聞で報じられた。最近の報告では、これら大量死と毒性物質の関連が指摘されている。今回の現地調査では、栄養レベルならびに植物プランクトン種組成・現存量を主に調べており、毒性物質については分析をしていないが、これまで明らかにされてきた調査報告を以下にまとめ、この現象に対する下水処理施設のかかわりについて言及する。

ナクル湖はすべての排水が最終的に湖に流れ込む閉鎖湖であることから、この地域の調査研究が開始された当初から農薬、重金属汚染の危険性が指摘されてきた。1970年に Koeman et al. (1972)によってコフラミンゴ、ウ、ティラピアなどの体内（主に肝臓、腎臓）に含まれる有機塩素系農薬(DDT、DDE、DDD、dieldrin、endrin)と金属類(As、Sb、Cu、Zn、Cd、Hg)含量が調べられた。その結果、他地域の報告値と比べて汚染が進行している傾向は見出せなかった。一方、病理学的検査では、調べたすべての鳥類が回虫、条虫によって寄生を受けており、小腸に炎症がみられるなど寄生虫や何らかの感染性の病気が健康状態に影響を与えていることが示唆された。1972年に行われた Lincer et al. (1981)の調査においては、ダニ駆除剤として有機塩素系の toxapheneをはじめとして DDT、dieldrinなどがナクル湖集水域で多用されていることが聞き取り調査などから明らかにされたが、DDEの残留レベルは非常に低いことが示された。その後、Greichus et al. (1978)が1975年にナクル湖から採取した湖水、底泥、藻類、水生昆虫、ティラピアに含まれる様々な農薬、PCBおよび金属類(As、Cd、Cu、Mn、Pb、Zn、Hg)について調査を行い、金属類に関しては自然起源の濃度（バックグラウンド値）がわからないとしたものの、化学物質による汚染は進行していないとする同様の結果を報告した。

Sleicher & Hopcraft (1984)は、何故ナクル湖集水域のような閉鎖系の環境下で有機塩素系化学物質による汚染が心配されているほど進行していないかということを説明するため、ナクル湖周辺の土壌を用いて DDT の分解実験を行った。その結果、温帯域より半減期^{*18}がかなり短く（110日）、DDE、DDDなどの代謝産物を生じないで、直接昇華していくことが明らかとなった。このことは、地形的に集水域の底に位置するナクル湖は様々な物質が流れ込み汚染されやすい環境下にある一方、有機塩素系化学物質が蓄積しにくい点では恵まれた条件にあることを示している。母岩に由来する金属類のバックグラウンド値に関する知見は限られているが、リフト・ヴァレー一帯の火山灰由来の土壌では、“ナクル症（Nakuru-itis）”と呼ばれるコバルト不足による家畜の消耗性疾患が知られるなど生物にとって必要な微量金属が低含有率であることが多い。このこと

* 18 半減期 放射性元素や素粒子が崩壊して、その数が最初の半分に減るまでに要する時間のこと。

から、重金属汚染の問題とは別に、野生動物への微量金属不足による健康障害の影響を調べるための調査が行われている。Maskall & Thornton (1989, 1991)は 1986 年にナクル湖集水域 1km² 毎に 133 地点から土壌サンプルを採取し、銅、コバルトなどの微量金属含有量の分析を行った。

その結果、この地域においても、他のリフト・ヴァレー帯同様に Cu、Co、Se などの濃度が低いことが明らかとなった。また、インパラの血清中の銅濃度も一般に家畜で知られる濃度に比べて低く不足気味であることが示された。Kock et al. (1995)は、1991-1992 年にナクル湖国立公園内、特にその北東部においてウォーターバックの健康障害や高死亡率が目立ったことから、ナイバシャ湖やエルメンテータ湖からの個体との比較を含めて、体内ならびに血清中の重金属濃度を調べた。その結果、ナクル湖に生息するウォーターバック体内の銅やコバルトは、他地域に比べて高い濃度である傾向がみられたが、家畜で知られる濃度から判断すると、むしろ適切なレベルであった。

一方、同時に分析された体内の鉛、カドミウム濃度は、特にナクル湖北東岸に生息するウォーターバック体内で高くなっていた。また、いくつかの個体でみられた鉛濃度は、家畜では慢性の鉛中毒が生じることが報告されているレベルであり、健康障害の原因として重金属汚染の可能性が指摘された。

1980 年代ナクル湖集水域においての残留農薬に関する調査はみあたらないが、Kairu (1993)によって、1990年にナクル湖から採取した鳥類の有機塩素系殺虫剤の残留量が分析されている。その結果では鳥類に有害な影響を与えると推定できるほどの残留レベルは検出されなかったが、1970 年の Koehman et al. (1972)の結果と比較すると、明らかに体内に蓄積している DDE 濃度が増加していることが示された。

一方、同じ鳥類試料を用いた水銀、ヒ素、カドミウム含有量の分析では、20 年前の Koehman et al. (1972)とほぼ同レベルの重金属類が検出され、重金属汚染の進行はみられなかった(Kairu 1996)。また、同時期に行われたティラピア体内の残留農薬含量ならびに重金属含量においても 1970 年とほぼ同レベルであった(Kairu 1999)。ただ、これらの調査で、魚食性のペリカンと藻食性のコフラミンゴに含まれる重金属量を比較した場合、コフラミンゴの方が水銀とカドミウムにおいて高い含有量であったことは注目に値する。

一般的には食物連鎖を通じて高次の生物で有毒物質濃度が増大する生物濃縮と呼ばれる現象が起こることが知られている。コフラミンゴは藻食性の一次消費者であるが、スピルリナを採食するために発達した濾過式採餌により、重金属類を吸着した浮遊粒子物質をも効率良く採食していることにより重金属類を蓄積しやすいと考えられた。このことは、コフラミンゴのような摂食様式の場合、ナクル湖のようなアルカリ性の湖水で重金属類が溶出しにくいとしても、影響を受けやすい可能性を示している。

ケニア政府が 1986 年から農業での DDT 使用を禁止したにもかかわらず、1990 年の調査におい

てティラピア体内から分解を受けていないDDTが検出されるなど(Kairu 1999)、ナクル周辺の農地においては継続的に使用されているようである。

1993年にボゴリア湖とナクル湖でコフラミンゴの大量死が起きた時期、ボゴリア湖においてアオコが大発生していたことから、ミクロシスチンなどラン藻類が生産する肝臓毒がその原因として推定された。しかし、その時アオコを形成していたラン藻を正確に同定した記録はみつからず、また、死んだコフラミンゴの脾臓や肝臓からはミクロシスチンは検出されなかった。Kock et al. (1999)はこの時期に死亡したコフラミンゴの脾臓や肝臓で多くの壊死や肉芽腫による損傷を観察しており、結核の原因となるマイコバクテリウムなど数種の細菌を分離している。このことから衰弱したコフラミンゴが感染症によって大量死に至ったことが強く示唆されたが、何故コフラミンゴが衰弱したかについては結論づけられていない。

WWFとKWSのメンバーが中心となって、1993年頃から本格的にナクル湖のモニタリング調査を行っている。1995年に行われたナクル湖水と底泥ならびに流入河川の底泥の重金属、農薬調査では、1970年代の結果に比べて、銅、マンガン、水銀などの蓄積が著しく進行しているほか、以前は検出されなかった様々な農薬がナクル湖底泥で見つかった(Thampy & Raini 1995)。またタウン処理場からの排水路を含め、流入河川の底泥にも様々な重金属、化学物質が蓄積しており、集水域からの流入が汚染源であることが明らかとなった。

その後、コフラミンゴ大量死の原因究明の一環として1996年には、湖底泥、浮遊粒子物質中のクロム、銅、鉛、亜鉛濃度の測定と、これら重金属の浮遊粒子物質ならびにスピルリナへの吸着性が調べられた(Nelson et al. 1998)。得られた結果と、コフラミンゴの採食速度やスピルリナ現存量などから、銅以外の重金属は、鳥類に毒性を与えるレベル以上に体内に摂取される可能性が示され、特に、クロムによる汚染の危険性が指摘された。また、水中のスピルリナ現存量が減少した時には、コフラミンゴの摂食時の湖水濾過量が増加するため、結果的に浮遊粒子物質をより多く摂取することになり、より強く重金属に暴露されることが示された。

Thampy & Raini (1995)によると、自然起源としては低濃度であるはずの銅も1995年のナクル湖水中では平均で0.3 mg/l とかなり高濃度で含まれていることが示されている。Kallqvist & Meadows(1978)はナクル湖のスピルリナの光合成活性と増殖速度に及ぼす銅イオンの影響を調べ、0.15-0.20 mg/l で光合成活性が50%になることを示した。また、増殖速度はそれより低濃度でも影響を受け、0.02 mg/l で63%となった。Greichus et al. (1978)によると1975年のナクル湖水中の銅イオン濃度は0.002 mg/l であるので、その当時は影響の現れる濃度でないと考えられていたが、1990代になってから検出されている濃度では、一次生産者のスピルリナに影響が現れてもおかしくない濃度にまで上昇したことになる。これまでのところ、植物プランクトンに対する重金属類の直接的な影響を示した証拠は出されていないが、今後注意が必要である。また、重金属に対する耐性は種ごとによって違うので、その耐性の強弱が植物プランクトン種組成に影響を与え

る可能性も考えられるので、この方面での研究も進めていくことが望まれる。

以上、これまでのナクル湖での毒性物質に関する調査報告を振りかえると、集水域での農薬使用などにもかかわらず 1970 年代にはほとんど汚染が検出できないレベルであり、Kairu による 1990 年の調査においてもティラピアには生物濃縮の傾向がみられなかったようである。

しかし、1990 年の鳥類の DDE 濃度は、まだ悪影響を与える濃度ではないとはいえ、1970 年代より高くなっており、1991 年にはティラピアの大量死が確認されたほか(KWS からの情報)、1991-1992 年にはウォーターバックの健康障害、1993 年にはフラミンゴの大量死が発生し、1995 年以後の調査では明らかにナクル湖において重金属・農薬ともに蓄積していることが示されている。1980 年代に調査が行われていないためしっかりとした検証は難しいが、1990 年前後には様々な毒性物質のナクル湖への負荷量は生物に影響を与えるレベルに達してしまったように思われる。この背景には、この時期の人口の急速な増加に伴うナクル市の拡大、周辺地域の農業開発などが進行したほか、ゴミ排出量の増加や下水処理施設の過負荷状態での運転により排水処理が不十分になっていたことが挙げられる(Ndeti 1995)。農地開発に伴う森林伐採は降雨時の土砂流出量を著しく高めたと思われる。

また、当時、雨水排水路から全く処理されないまま高濃度の重金属や廃油を含む汚濁物質が降雨の度にナクル湖に流れ込んでいることが極めて問題であると指摘されている(Raini 1995; Ndeti 1995)。この雨水排水路からのナクル湖への汚濁負荷も、人口増加に伴い、年ごとに著しく高まっていたと考えられる。

このようにナクル湖への毒性物質負荷量の増大が明らかとなってきた中で、本プロジェクトで行われた下水施設の修復・拡張ならびに雨水滞水池の設置は、ナクル湖の生態系保全に大きく貢献するものである。これら施設での排水処理過程において、重金属を吸着した浮遊物質の削除や有機物の処理によって有害物質はかなり削減されることが期待できる。しかし、より確実な負荷削減のためには、各工場での一次処理が欠かせないであろう。そのためには、現在の各工場による PRTR^{*19}では不十分と思われる、より厳しい環境基準の設定へ向けた法整備も必要だと思われる。

2 つの下水処理施設での処理を受ける排水はナクル市から出てくる排水の一部に過ぎず、現在も、ンジョロ川などを通して未処理のままナクル湖に流入している排水がかなりある。本調査時には、ンジョロ下水処理施設を通った排水は途中で消失していた。今後、原因究明が欠かせないが、設計時に考えられていたよりも高い処理容量を持っているのかもしれない。その場合、最大限有効に利用できるように下水網の拡張整備を進めていくことが望まれる。

* 19 PRTR (Pollutant Release and Transfer Register) 日本語で環境汚染物質排出・移動登録。「有害性のある化学物質の環境への排出量及び廃棄物に含まれての移動量を登録して公表する仕組み」であり、行政庁が事業者の報告や推計に基づき、対象化学物質の大気、水、土壌への排出量や、廃棄物に含まれての移動量を把握し、集計し、公表するもの。

今回の調査において、ナクル湖岸全域にビニール袋などのゴミが散在していたことが目についた。これらのゴミは、流入河川から運ばれるだけでなく、タウン下水処理施設における雨水滞留池の不適切な管理または容量不足により、タウン排水路を通じて大量にゴミが運ばれている可能性を示しており、KWSやWWFのメンバーからもそのことが指摘されている。今後、適切な管理方法を追求する必要がある。また、排水路のない地域では降雨の度に多量のゴミが汚れた雨水とともにナクル湖に流れ込むことになっており、雨水排水路の整備も重要な課題である。

コフラミンゴの大量死は2000年にも起きており、最近になって急増している感がある。これまでみてきたように重金属・農薬といった毒性物質によるナクル湖生態系への直接的な影響が1990年代になって顕在化してきた可能性が強く示唆されている。しかし、1971年にもティラピアの大量死は報告されているし(Vareschi 1979)、1974年の水位減少期に餌不足を起因として最終的には結核が原因と推定されるコフラミンゴの死亡が生じたりするなど、近年の人口増加に伴うナクル湖への汚濁負荷が急増する以前にも死因のはっきりしない現象が生じていた。

また、コフラミンゴの平均寿命は数十年と長く、毎年数十万羽のヒナがかえるので、数万羽単位の死亡が観察されても不思議でないとする見解もある。従って、大量死の原因を決定づけるためには、さらに詳細な研究とともに、ナクル湖生態系に起きた異変を素早く検出するための継続的な調査活動が欠かせない。その意味において、本プロジェクトで建設されたナクル公園内にある水質試験所はもっと大いに利用されるべきであり、ナクル市、KWS、WWF、周辺大学が相互に有効利用できるシステム作りが課題である。

5 おわりに

本報告のおわりにあたって指摘しておきたいことは、コフラミンゴは、ナクル湖に毒性物質が蓄積してきたからといって、生命の危険を察知して、湖に寄りつかなくなることはないだろうということである。以前コフラミンゴが突然ナクル湖からいなくなった時に誤解されたように、「ナクル湖が汚染されたためにフラミンゴが離れてしまう」ことが、汚染のあまり進行していないうちに起こってくれた方が良くのかもしれない。しかし、現実にはそうなるとは思えない。餌のスピルリナも生息できない状況にまで環境が悪化すれば話は別であるが、スピルリナの増殖が多少毒性物質によって抑制されようと、あるいは、細胞内にそのような物質を蓄積するようなことがあっても、スピルリナが存在する限り、コフラミンゴはスピルリナを求めてナクル湖に飛来し、毒性物質を体内に蓄積し弱っていくことになるだろう。今回のナクル湖における調査では、コフラミンゴをボートで轢くという、常識では考えられないことが、一度でなく数度起こった。ボートが近づいても避けることもできないコフラミンゴである。上手く水面を飛び立てないコフラミンゴもよくみかけた。既にナクル湖の生態はかなり危機的な状況に近づいていると思えてならない。状況を楽観している人達もいるし、それが正しい可能性ももちろんある。しかし、そうであ

れば杞憂に終わったと喜ばば良いわけで、健康なコフラミンゴが生息できるナクル湖を将来に残すためには、総合的な環境保全計画の立ち上げを早急に行う必要性を強く感じる。

本プロジェクトによる下水処理施設の修復・拡張は、最大限の有効活用に向けて改善する余地はあるものの、ナクル湖への汚濁負荷削減において一定の役割を果たしていると評価できる。しかし、本報告でみてきたように、すでに 1990 年頃にはナクル湖への有毒物質の蓄積が進行してきており、ナクル市から排出される下水の一部しか処理できていない現状では、ナクル湖の生態系保全の観点からは本プロジェクトでの対応だけでは不十分であるといわざるを得ない。

ナクル湖の環境を守っていくためには、今後のナクル市の下水網整備や工場での排出規制に加えて、ナクル湖南西部に広がる農耕地からの農薬流入をどのように抑えていくか、農民に対して農薬の効率的な使い方をいかに指導していくかなど多くの課題があり、本プロジェクトとは別に新たな取り組みが要求されている。急速に人口が増えた結果多くのスラム街を抱えるナクル市と、外国人観光客でにぎわうナクル国立公園はあまりに別世界であり、隣接しているとは思えないほどの距離感がある。ビニール袋などのゴミを道に捨てないといった基本的なことも含めた環境教育の推進は今後極めて重要になっていくが、何よりもまずナクル市民がナクル湖を身近に感じ、大切に思うような意識改革を起こすことが必要と思われる。

引用文献

- Githaiga, J. M., Mavuti, K. M., Karanja, W. K. (in press) Effects of hydrological processes on the ecology of the lesser flamingo (*Phoeniconaias minor*) in the alkaline Lake Nakuru, Kenya. *Hydrobiologia*.
- Greichus, Y. A., Greichus, A., Ammann, B. D. & Hopcraft, J. (1978) Insecticides, polychlorinated biphenyls and metals in African lake ecosystems. III. Lake Nakuru, Kenya. *Bull. Environm. Contam. Toxicol.* **19**, 454-461.
- Hecky, R. E. & Kilham, P. (1973) Diatoms in alkaline, saline lakes: ecology and geochemical implications. *Limnol. Oceanogr.* **18**, 53-71.
- Jenkin, P. M. (1929) Biology of lakes in Kenya. *Nature* **124**, 574.
- Kairu, J. K. (1993) Aquatic birds as indicators of environmental pollution: a case study of Lake Nakuru, Kenya. In Giussani, G. & Callieri, C (eds.) Strategies for lake ecosystems beyond 2000, Proc. 5th Int. Conf. Conserv. & Manag. of Lakes, Stressa, Italy , pp. 333-336.
- Kairu, J. K. (1996) Heavy metal residues in birds of Lake Nakuru, Kenya. *Afr. J. Ecol.* **34**, pp.397-400.
- Kairu, J. K. (1999) Organochlorine pesticide and metal residues in a cichlid fish, Tilapia, *Sarotherodon* (= *Thilapia*) *alcalicus grahami* Boulenger from Lake Nakuru, Kenya. *Internat. J. Salt Lake Res.* **8**, pp.253-266.
- Kallqvist, T. & Meadows, B. S. (1978) The toxic effect of copper on algae and rotifers from a soda lake

- (Lake Nakuru, East Africa). *Wat. Res.* **12**, 771-775.
- Kock, R. A., Jumba, I. O., Wambua, J., Mwanzia, J., Siagi, A. & Kisia, S. M. (1995) Status of some trace elements in waterbuck (*Kobus ellipsiprymnus defassa*) in relation to soil and forage composition, and implications for animal health in the Lake Nakuru National Park. *In* Proceedings of the workshop on "use of research findings in the management and conservation of biodiversity, Kenya Wildlife Service, pp. 90-92.
- Kock, N. D., Kock, R. A., Wambua, J., Kamau, G. J. & Mohan, K. (1999) Mycobacterium avium-related epizootic in free-ranging lesser flamingos in Kenya. *J. Wildlife Diseases* **35**, 297-300.
- Koeman, J. H., Pennings, J. H., de Goeij, J. J. M., Tjioe, P. S., Olindo, P. M. & Hopcraft, J. (1972) A preliminary survey of the possible contamination of Lake Nakuru in Kenya with some metals and chlorinated hydrocarbon pesticides. *J. Appl. Ecol.* **9**, 411-416.
- Lincer, J. L., Zalkind, D., Brown, L. H. & Hopcraft, J. (1981) Organochlorine residues in Kenya's Rift Valley lakes. *J. Appl. Ecol.* **18**, 157-171.
- Maskall, J. E. & Thornton, I. (1989) The mineral status of Lake Nakuru National Park, Kenya: a reconnaissance survey. *Afr. J. Ecol.* **27**, 191-200.
- Maskall, J. & Thornton, I. (1991) Trace element geochemistry of soils and plants in Kenyan conservation areas and implications for wildlife nutrition. *Environ. Geochem. Health* **13**, 93-107.
- Mburugu, J. M. (1974) Disappearance of flamingos and blue green algae from lake Nakuru National Park in 1974. 7 pp.
- Melack, J. M. (1988) Primary producer dynamics associated with evaporative concentration in a shallow, equatorial soda lake (Lake Elmenteita, Kenya). *Hydrobiologia* **158**, 1-14.
- Melack, J. M. & Kilham, P. (1974) Photosynthetic rates of phytoplankton in East African alkaline, saline lakes. *Limnol. Oceanogr.* **19**, 743-755.
- Melack, J. M., Kilham, P. & Fisher, T. R. (1982) Responses of phytoplankton to experimental fertilization with ammonium and phosphate in an African soda lake. *Oecologia* **52**, 321-326.
- Milbrink, G. (1977) On the limnology of two alkaline lakes (Nakuru and Naivasha) in the east rift valley system in Kenya. *Int. Revue. ges. Hydrobiol.* **62**, 1-17.
- Motelin, G., Ayiek, J. & Ndeti, R. (1995) Mysterious lesser flamingo deaths in Lakes Bogoria and Nakuru: a preliminary report. *In* Proceedings of the workshop on "use of research findings in the management and conservation of biodiversity, Kenya Wildlife Service, pp. 93-96.
- 南條吉之，福田明彦，矢木修身，細井由彦 (1998) 汽水湖沼におけるアオコおよび赤潮発生の制御に関する基礎的研究．水環境学会誌，**21**, 530-535.
- Ndeti, R. (1995) Impact of urban development on biodiversity conservation: a case for Nakuru National

- Park. *In* Proceedings of the workshop on "use of research findings in the management and conservation of biodiversity, Kenya Wildlife Service, pp. 63-71.
- Nelson, Y. M., Thampy, R. J., Motelin, G. K. & Raini, J. A., DiSante, C. J. & Lion, L. W. (1998) Model for trace metal exposure in filter-feeding flamingos at alkaline Rift Valley lake, Kenya. *Environ. Toxicol. Chem.* **17**, 2302-2309.
- Otsuka, S., Suda, S., Li, R., Watanabe, M., Oyaizu, H., Matsumoto, S. & Watanabe, M. M. (1999) Characterization of morphospecies and strains of the genus *Microcystis* (Cyanobacteria) for a reconsideration of species classification. *Phycol. Res.* **47**, 189-197.
- Raini, A. J. (1995) Water quality monitoring in Lake Nakuru. *In* Proceedings of the workshop on "use of research findings in the management and conservation of biodiversity, Kenya Wildlife Service, pp. 58-62.
- Raini, J. & Thampy, R. (1999) Environmental assessment programme. WWF Annual Report, pp. 42-63.
- Scheldeman, P., Baurain, D., Bouhy, R., Scott, M., Muhling, M., Whitton, B. A., Belay, A. & Wilmotte, A. (1999) *Arthrospira* ('Spirulina') strains from four continents are resolved into only two clusters, based on amplified ribosomal DNA restriction analysis of the internally transcribed spacer. *FEMS Microbiol. Lett.* **172**, 213-222.
- Selcher, C. A. & Hopcraft, J. (1984) Persistence of pesticides in surface soil and relation to sublimation. *Environ. Sci. Technol.* **18**, 514-518.
- Talling, J. F. & Talling, I. B. (1965) The chemical composition of African lake waters. *Int. Revue ges. Hydrobiol.* **50**, 421-463.
- Thampy, R. J. & Raini, J. A. (1995) Environmental assessment programme. WWF Annual Report, pp. 32-56.
- Tuite, C. H. (1979) Population size, distribution and biomass density of the lesser flamingo in the Eastern Rift Valley. *J. Appl. Ecol.* **16**, 765-775.
- Vareschi, E. (1978) The ecology of Lake Nakuru (Kenya). I. Abundance and feeding of the lesser flamingo. *Oecologia* **32**, 11-35.
- Vareschi, E. (1979) The ecology of Lake Nakuru (Kenya). II. Biomass and spatial distribution of fish (*Tilapia grahami* Boulenger = *Sarotherodon alcalicum grahami* Boulenger). *Oecologia* **37**, 321-335.
- Vareschi, E. (1982) The ecology of Lake Nakuru (Kenya). III. Abiotic factors and primary production. *Oecologia* **55**, 81-101.

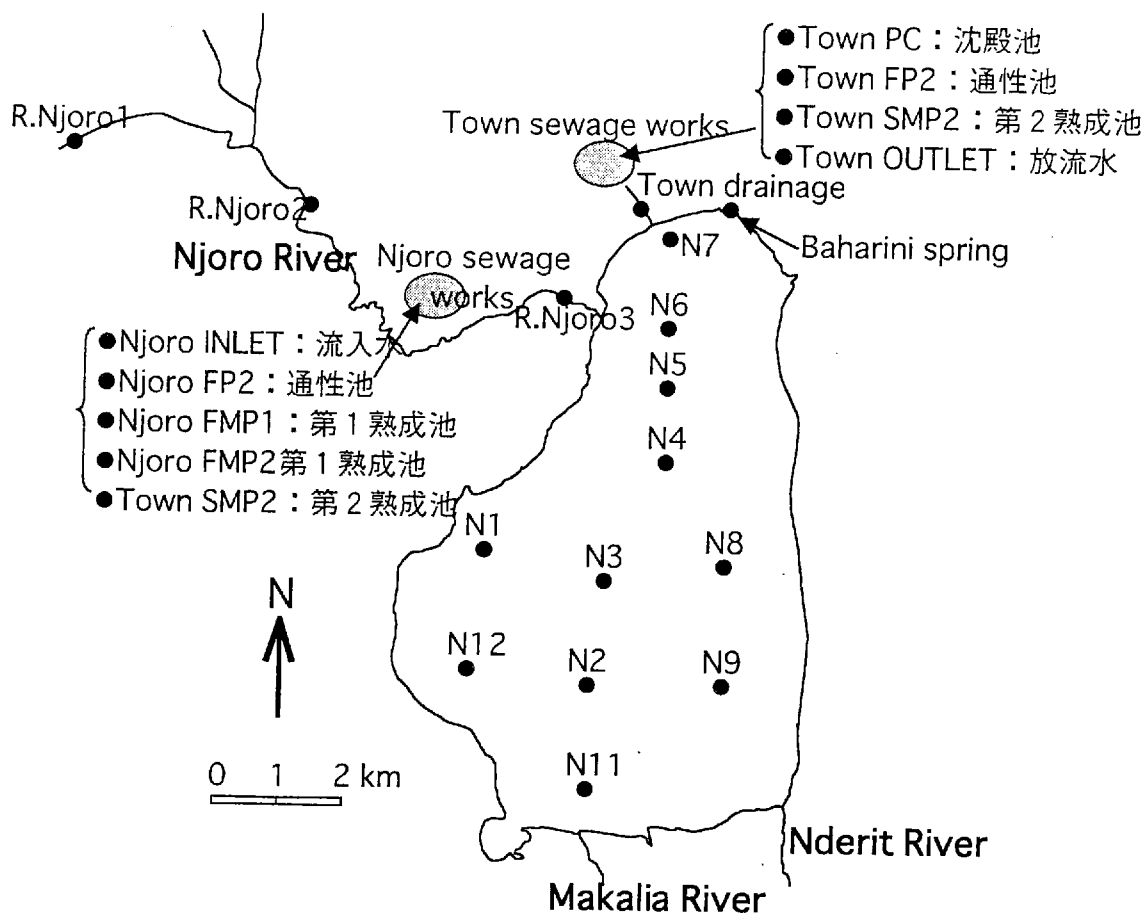


図1 ナクル湖とその周辺地域でのサンプリング地点。

図に示した地点以外に、ボゴリア湖湖岸より4地点（B1-B4）でサンプルを採取した。

表1 下水処理場の各処理段階における水質とナクル湖流入河川の水質

Site	pH	Cond. (mS/cm)	Turb. (NTU)	D.O. (mg/l)	Temp. (°C)	ORP (mV)	COD (mg/l)	PO ₄ -P (mg/l)	NO ₂ -N (mg/l)	NO ₃ -N (mg/l)	NH ₄ -N (mg/l)
Njoro INLET	7.47	2.1	>990	3.2	24.5	-229	300	6	0	0	60
Njoro FP2	8.65	2.0	160	9.8	23.3	-21	-	-	-	-	-
Njoro FMP1	10.50	1.7	350	8.7	21.1	-103	-	-	-	-	-
Njoro FMP2	10.33	2.0	470	12.4	26.1	-46	-	-	-	-	-
Njoro SMP2	10.33	2.3	310	13.1	26.7	-34	40	1.5	0	0	0
Town PC	6.97	1.2	460	5.0	24.4	-178	120	6	0	0	70
Town FP2	8.17	1.0	69	15.3	27.0	-1	-	-	-	-	-
Town SMP2	9.30	0.8	160	>20	26.0	-16	-	-	-	-	-
Town OUTLET	8.06	0.87	30	13.2	24.7	29	30	1.65	0.25	ND	6
Town drainage	7.31	0.88	23	8.1	23.5	94	30	3.4	0.3	ND	4
R. Njoro1	7.92	0.17	270	9.7	20.2	140	10	0.05	0	0.5	0
R. Njoro2	7.42	0.14	200	9.9	19.3	200	40	0.1	0.02	0.4	0
R. Njoro3	7.82	0.15	170	9.5	21.0	109	50	0.1	0.03	0.3	0
Baharini spring	8.29	0.61	12	8.2	27.1	121	1	0.08	0.02	1.8	0

表2 ナクル湖12地点とボゴリア湖4地点の水質データ

採水地点	水深 (cm)	採水深度	pH	Cond. (mS/cm)	Turb. (NTU)	D.O. (mg/l)	Temp. (℃)	ORP (mV)	COD (mg/l)	PO ₄ -P (mg/l)
N1	50	Surface	10.65	39	120	18.9	25.5	53	100	1.5
N2	90	Surface	10.61	39	100	>20	26.5	46	100	1.2
		Bottom	10.60	37		>20	22.5	-237		
N3	80	Surface	10.60	39	260	>20	25.4	41	100	1
		Bottom	10.61	38		13.2	21.0	-173		
N4	90	Surface	10.58	38	130	18.2	27.0	34	100	1.2
		Bottom	10.61	39		15.4	22.0	-150		
N5	80	Surface	10.58	38	180	>20	29.4	58	100	1.2
		Bottom	10.61	31		12.5	22.3	-263		
N6	70	Surface	10.60	36	210	>20	25.0	9	100	1.2
		Bottom	10.58	37		>20	22.3	-188		
N7	35	Surface	10.58	35	650	>20	27.9	83	100	1.2
		Bottom	10.54	32		>20	23.3	-251		
N8	70	Surface	10.59	38	130	>20	25.2	57		
		Bottom	10.57	36		19.2	22.0	-306		
N9	65	Surface	10.56	38	190	>20	27.2	63		
		Bottom	10.54	34		>20	23.3	-240		
N10	65	Surface	10.55	38	140	>20	27.7	56		
		Bottom	10.56	38		18.6	23.2	-145		
N11	30	Surface	10.57	39	590	>20	28.3	62	100	1.2
		Bottom	10.54	39		>20	27.4	-226		
N12	105	Surface	10.57	39	520	>20	27.9	51		
		Bottom	10.54	33		16.7	24.6	-200		
B1		Surface	10.82	54	>990	2.6	24.7	-303	15	
B2		Surface	10.74	68	250	17.4	27.1	36		
B3		Surface	10.72	71	670	13.3	33.2	21	10	
B4		Surface	10.65	71	220	14.9	31.1	46	15	

表3 ナクル湖水中の栄養塩レベルの報告値

採水年	Conductivity (mS/cm)	NO ₃ -N (μg/l)	NO ₂ -N (μg/l)	NH ₄ -N (μg/l)	Total-N (mg/l)	PO ₄ -P (μg/l)	Total-P (mg/l)	SiO ₂ (mg/l)	Chl. a (μg/l)	出典
Apr. 1929	-	-	-	-	-	40	-	21.5	-	Jenkin (1936)
Jul. 1969	10	-	-	-	-	4400	-	97	-	Hecky & Kilham (1973)
Jan. 1973	14.6	4	5	5	16.91	228	0.308	118	1233	Milbrink (1977)
Dec. 1973	19.4	-	-	-	25.2	-	1.43	409	-	Milbrink (1977)
Jan. 1976	19.5	-	-	2.8	11.36	51	0.928	224	-	Milbrink (1977)
1983	-	-	-	-	3.2	-	0.711	-	134	Kalff (1983)
Jan. 1999	-	-	-	-	7.8	-	1.09	-	-	WWFの報告値 (平均値)
Feb. 1999	-	-	-	-	6	-	0.78	-	-	WWFの報告値 (平均値)
Mar. 1999	-	-	-	-	6	-	1.11	-	-	WWFの報告値 (平均値)
Apr. 1999	-	-	-	-	8.5	-	1.03	-	-	WWFの報告値 (平均値)
May 1999	-	-	-	-	9.25	-	1.21	-	-	WWFの報告値 (平均値)
Jun. 1999	-	-	-	-	0.15	-	0.81	-	-	WWFの報告値 (平均値)
Jul. 1999	-	830	-	-	0.49	-	0.77	-	-	WWFの報告値 (平均値)
Aug. 1999	-	540	-	-	0.36	-	3.03	-	-	WWFの報告値 (平均値)
Sep. 1999	-	580	-	-	0.33	-	2.89	-	-	WWFの報告値 (平均値)
Oct. 1999	-	-	-	-	20.4	-	0.81	-	-	WWFの報告値 (平均値)
Nov. 1999	-	-	-	-	18.7	-	1.11	-	-	WWFの報告値 (平均値)
Dec. 1999	-	-	-	-	10.2	-	1.39	-	-	WWFの報告値 (平均値)
Jan. 2000	-	-	-	-	15.3	-	0.89	-	-	WWFの報告値 (平均値)
Mar. 2000	-	1397	195	3850	348	760	2.45	-	-	WWFの報告値 (平均値)
Apr. 2000	-	1300	-	-	16.7	521	2.21	-	-	WWFの報告値 (平均値)
May 2000	-	1390	-	-	16	510	2.29	-	-	WWFの報告値 (平均値)
Jan.-Apr. 2000	23.1	1344	18.3	12.6	-	2523	-	-	-	KWSの報告値 (3地点の平均値)
May 2000	23.48	1446	24.6	-	11.23	-	2.86	-	-	KWSの報告値 (平均値)
Nov. 2000	37	-	-	-	-	1200	-	-	316	今回の調査 (平均値)

表4 ナクル湖12地点とボゴリア湖4地点のクロロフィルa濃度、フェオ色素濃度及び植物プランクトン現存量

種名	N1	N2	N3	N4	N5	N6	N7	N8	N9	N10	N11	N12	B1	B2	B3	B4
Arthrospira fusiformis (スピルリナ) *	560	440	420	580	540	120	200	360	280	160	140	380	120	2100	11667	1220
Anabaenopsis arnoldii (アナベノプシスの1種) *	240	160	140	180	700	1800	2440	440	360	420	1500	1180	0	0	0	0
Anabaenopsis abijatae (アナベノプシスの1種) *	100	160	80	60	220	100	60	60	100	0	1120	580	0	0	0	0
Pennales (羽状目珪藻) **	580	320	80	240	100	40	220	160	540	200	900	160	0	0	0	0
Cryptomonas sp.1 ($\times 10^4$) (クリプトモナス) **	17.6	1.8	2.0	3.0	4.7	50.0	55.1	1.0	9.3	4.9	20.8	4.4	0	0	0	0
Cryptomonas sp.2 ($\times 10^4$) (クリプトモナス) **	4.9	0.4	0.8	2.3	2.6	11.3	8.9	0.1	2.0	2.4	10.7	3.0	0	0	0	0
クロロフィルa濃度 ($\mu\text{g/l}$)	320	280	274	285	427	326	490	213	94	127	473	481	22	317	-	129
フェオ色素濃度 ($\mu\text{g/l}$)	13.7	8.4	7.9	11.4	14.0	16.7	34.5	12.3	5.2	5.3	37.0	24.4	1.2	10.7	-	4.9

*試水1mlあたりのトリコーム数、***試水1mlあたりの細胞数

ナクル湖の水環境の変化がフラミンゴおよび数種の水鳥におよぼす影響

(財)山階鳥類研究所 柿澤 亮三

目次

はじめに

- 1 ナクル湖のフラミンゴの位置づけ
- 2 ナクル湖の水位、水質とフラミンゴの飛来数
- 3 環境指標生物としての魚食性鳥類
- 4 結論

はじめに

フラミンゴの湖として世界的にも有名なナクル湖は、ケニアのリフト・ヴァレー州に位置する面積3,300haのソーダ湖である。標高は海拔1,750mであり、とても浅くアルカリ性の強い湖で、周囲は林と草原に囲まれている。湖を含む周りの地域は国立公園に指定されており、公園の総面積は18,800haある。公園は一部ナクル市の市街地と接しているため、公園の周囲は全てフェンスで囲われている。ナクル湖はまたフラミンゴをはじめとする水鳥の保護地として、ラムサール条約の指定湖として登録されている。

本報告は、J B I C と J I C A が合同で行った「大ナクル上下水道事業の事後評価」の調査団に鳥類の専門家として加わり、フラミンゴをはじめとする鳥類に上記事業がどのような影響をおよぼしたかを調査したものである。現地調査期間は、2000年11月13日から24日までの12日間で、野外調査を行ったのはナクル湖(16日～18日の3日間)、ボゴリア湖(19日)、エレメンテータ湖(20日)、マガディ湖(21日)であった。現地調査は、双眼鏡・望遠鏡を用いてフラミンゴをはじめとする水鳥類の個体数をカウントし、得られた結果を前回(1991年2月)の調査^{*1}と比較し、この10年間にナクル湖の自然がどのように変化したのかを推察した。

*1「大ナクル上水事業」の中間管理ミッションの一員として現地調査に参加したもの。

1. ナクル湖のフラミンゴの位置づけ

世界には5種類のフラミンゴが生息している。それらはオオフラミンゴ (*Greater Flamingo*)、チリフラミンゴ (*Chilean Flamingo*)、コフラミンゴ (*Lesser Flamingo*)、アンデスフラミンゴ (*Andean Flamingo*)、コバシフラミンゴ (*Puna Flamingo*) の5種類である。この中では南アメリカに分布するコバシフラミンゴの総個体数が5万羽と少ないが、どの種も絶滅が心配されるという状態にはない。東アフリカには、オオフラミンゴとコフラミンゴの2種類が生息する。

コフラミンゴはアフリカ大陸にそのほとんどが生息し、インド、パキスタンにも少数が分布している。コフラミンゴはアフリカの中では、東アフリカの Rift Valley 地域、南アフリカ地域、モーリタニアとセネガルの海岸線に沿った地域に生息するが、最も個体数の多いのが東アフリカである。約40年前の1962年にケニアのマガディ湖で約125万ペアのコフラミンゴの繁殖が記録されたことがあり、その時に推定された東アフリカのコフラミンゴの個体数は、繁殖個体に、幼鳥、亜成鳥^{*2}、繁殖に参加しない成鳥を加えて約400万羽であった。またその時の世界の総個体数は、南アフリカ (200万羽)、インドなどを加えて約600万羽と推定された。現在では個体数は減少し、世界の推定個体数は250万羽～400万羽と考えられている。そのほとんどが東アフリカと南アフリカに生息している。オオフラミンゴは東アフリカではコフラミンゴと比べるとごく少数で、かつては (1970年代) 世界に100万羽、東アフリカに5万羽生息するだろうと推定されていたが、本種は世界的にも減少傾向が続いているので、東アフリカの個体数もよく分かっていないという状況である。

東アフリカのフラミンゴの移動については、まだはっきり分かっていないという現状である。これを明らかにするには、フラミンゴを捕獲し足にナンバーの入った金属の足環をはめ、長期間にわたる再捕獲調査を行わなければならないが、このような調査はほとんど行われていない。フラミンゴがタンザニア、ケニア、エチオピアに至る東アフリカの大地溝帯のソーダ湖間を移動していることは確かだが、その移動の時期や規模については不明である。目視による観察例もほとんどないが、これはフラミンゴの習性として、日中に乾燥地の上空を飛行するのをきらうこと、そして移動はワシなど外敵のおそれの少ない夜間にもっぱら行われることから、観察例がほとんどないのであろう。フラミンゴの飛行速度は時速55kmほどであるので、夜間のうちに移動できる距離は500kmから600kmとなる。このことから考えると東アフリカから南アフリカへの移動は充分可能であり、学者によっては両地域間には群の交流があると考えている。フラミンゴが両地域間をも移動しているとなると、ナクル湖を含む東アフリカのソーダ湖でのフラミンゴの個

* 2 繁殖年齢に達していない鳥で幼鳥 (生後1年未満) ではないもの。

体数増減の仕組みがさらに複雑化してくるものと考えられる。

コフラミンゴの繁殖は不定期に行われる。繁殖が毎年行われるということではなく、同じ地域でも季節を変えて繁殖することもある。東アフリカでは主に乾季の終り頃から短い雨期の間に繁殖する。繁殖は大きなコロニー^{*3}を形成して行うが、時にはコロニーは100万ペアにもなることがある。巣はごく浅い水辺に泥のマウンドを築き、そこに1卵を産む。東アフリカのフラミンゴはタンザニアのナルトン湖で繁殖することが知られているが、ケニアのマガディ湖で繁殖することもある。今回の調査ではナクル湖でも巣を作っており、小規模ではあるが繁殖コロニーが形成されていたので繁殖が行われたかもしれない。今回ナクル湖で小規模な繁殖コロニーが作られたとしても、ナクル湖は東アフリカのコフラミンゴにとっては、集合して求愛行動をするための役割を担った地点であるという従来の解釈はそのままよいと考える。

ナクル湖に生息するコフラミンゴとオオフラミンゴはほぼ同じ場所で泥をこしとって採餌を行っているが、両者の食性には大きな違いがある。すなわちコフラミンゴは植物プランクトンのラン藻類を主に採餌しているが、オオフラミンゴはラン藻類も食べるが動物プランクトンや底生小動物がその主な餌である。したがって同所で両種が採餌していても、少し水深のあるところでオオフラミンゴが採餌し、ごく浅い地点でコフラミンゴが採餌している。また場所によってはオオフラミンゴだけが小群で採餌し、コフラミンゴの姿の見られない地点もナクル湖で観察された。

繁殖地の周辺におけるフラミンゴの外敵は、アフリカハゲコウだと言われている。この鳥は主に腐肉を食べる鳥類であり、魚の死骸や水鳥の死骸を食べて生活している。繁殖地周辺では巣中の卵やヒナを捕食して生活している。数種のワシ類や小型の肉食哺乳類も繁殖コロニーで卵やヒナを捕食する。

2．ナクル湖の水位、水質の変化とフラミンゴ飛来数との関係

1994年1月から2000年7月までのナクル湖の水位変動を示した図があるが(図1)、この図を見ると明らかなように、1994年1月、10月、95年7月～96年4月、97年1月～4月までの水位0cmから、98年10月の約450cmまでナクル湖の水位変動には著しい変化が見られる。この水位の変動は、大ナクル上水道事業によってもたらされると予測される水位の変動幅(最大70cm)を大きく越えるものであり、ナクル湖の水位変動はナクル湖に流入する河川の流域の気候の条件

* 3 集団営巣地(集まって繁殖する場所、もしくはその状態)を指す。

に大きく左右される可能性を強く示唆している。

また同じ期間（1994 年 1 月～2000 年 7 月）のナクル湖へのフラミンゴの飛来数変動を示した図（図 2）を見ると、フラミンゴの数は年により大きく変動していることが分かる。すなわち、この期間中ナクル湖に飛来したフラミンゴは、95 年 10 月、97 年 4 月、98 年 7 月、99 年 7 月、2000 年 1 月とほぼ 0 羽の時から 95 年 1 月の約 60 万羽、96 年 10 月と 2000 年 4 月の約 100 万羽まで実に大きな差があることを示している。ナクル湖の水位とその時のフラミンゴの個体数を見るには、図 1 と図 2 を重ねることにより容易に理解できる。このことからナクル湖の水位と飛来個体数との間には、以下のような傾向が見られる。

ナクル湖の水位が極端に低い時（干上がった時には顕著）、水位があまりにも高かった時には、フラミンゴは飛来しない。

ナクル湖の水位が上昇した時、フラミンゴの飛来数が急激に増加する。

上記の 2 つにあてはまらず飛来数が増加したり減少する場合。

の 3 点である。

の場合は理解し易い。1996 年の湖の干上がった時と、1998 年 4 月から 99 年 7 月の水位の極端な上昇時である。水面が無くなればフラミンゴは採餌することができないし、水位の極端な上昇は湖の汀線が陸地側に押しやられ、フラミンゴの採餌に適した場所が減少するからである。

の傾向は 1994 年 10 月から 95 年 1 月にかけて、1996 年 7 月、1997 年 10 月に見られた。この事は水位上昇に伴って湖の植物プランクトンの増殖が活発となり、フラミンゴの利用できる餌が豊富になるためと考えられる。

の場合は、1997 年の 4 月から 7 月にかけて水位は 0cm から 70cm と上昇したにもかかわらず、フラミンゴの飛来数が増加しなかった事。1999 年 10 月に水位が約 350cm と高かったにもかかわらず、フラミンゴの飛来数が 0 羽から 40 万羽近くまで増加した事。また、2000 年 4 月のように水位が急激に減少する中で個体数が 0 から 100 万羽に増加した事。これらの 3 点の原因は、フラミンゴをめぐるナクル湖外の環境要因（他のソーダ湖の状態等）によって引き起こされた現象であると考えられる。

最後の例としてあげた 2000 年の 100 万羽を越すと言われている個体数の増加について、1991 年に調査したナクル湖を含む他の湖との個体数のデータと今回の調査結果とを比較することにより、その原因の推測を試みる。表 1 は 1991 年と今回の調査のコフラミンゴの個体数を 4 ヶ所の湖で比較したものである。1991 年の調査では、ボゴリア湖のコフラミンゴの個体数が他の 3 ヶ所の湖の個体数に比べて圧倒的に多く、100 万羽を越すと思われるカウント不能のコフラミンゴが

生息していた。これに対し、ナクル湖、エレメンテータ湖、マガディ湖のコフラミンゴの個体数は、どこも1万羽以下で少なかった。今回の調査では各湖のコフラミンゴの個体数は前回と大きく様変わりして、最も個体数の多いと考えられるナクル湖で数十万羽、エレメンテータ湖で10万羽以下、マガディ湖で1万羽以下と考えられるコフラミンゴが生息していた。前回、膨大な数が生息していたボゴリア湖には5万羽以下のコフラミンゴが生息していた。ここでは個体数をごく大雑把にしか表していないが、これは正確な個体数をカウントすることができなかったためである。今回の調査での個体数は、ケニア側の見積もっている個体数よりもかなり低く見積もっているかもしれない。ここでコフラミンゴがケニア国内のソーダ湖だけを行き来しているものと解釈すると、1991年当時はボゴリア湖に大多数が生息していたが、今回の調査時にはナクル湖にかなり高い割合で生息し、比較的多数がエレメンテータ湖に生息しているということになる。

同様にオオフラミンゴの湖ごとの個体数を1991年と2000年の結果を示したのが表2である。オオフラミンゴの個体数はコフラミンゴと比べてはるかに少ないため、カウントが可能であるが、後述の理由により推計することとなった。オオフラミンゴの個体数は、ナクル湖では1991年は約2,700羽をカウントしたが、現在も前回と同じ位の個体数は生息しているように思われる。前回の調査時には、ナクル湖国立公園内にライオンは生息していなかったため、調査時には湖岸を歩いてカウントしたり、林の中を横切って湖面に出たりして水鳥をカウントすることが可能であったが、現在では十数頭のライオンが公園内に放されたため、水鳥のカウントには制約を受けた。エレメンテータ湖については、前は観察時間が短かったためオオフラミンゴのカウントは行わなかった。今回の調査では約2,000羽のオオフラミンゴがカウントされた。ボゴリア湖には前回オオフラミンゴは少数(数百羽)が生息していたが、今回は個体数が増加していて、1,000羽ぐらいの単位でカウントされた。マガディ湖のオオフラミンゴのカウントも前は時間不足でできなかったが、今回は数百羽がカウントされた。

オオフラミンゴとコフラミンゴの食性の違いはすでに述べたが、この食性の違いから動物性プランクトンや底生動物を食べるオオフラミンゴの採餌可能な地域は、コフラミンゴだけが生息できる地域よりも富栄養化のすすんでいる場所であると言えることができる。すなわち、オオフラミンゴの数の増減は、その環境の富栄養化の指標として用いることができるのである。

ナクル湖の水質の変化がフラミンゴにおよぼす影響については、フラミンゴの餌としての植物プランクトンを通して、フラミンゴに間接的に影響を与えるが、この問題については、本報告書の辻村氏の論文に詳しいのでここでは触れない。ナクル湖に河川から流入する農薬、肥料、家畜の糞などによる湖の富栄養化と工場排水の垂れ流しによる湖の重金属汚染などによる水質の悪化を、フラミンゴ自身は理解することができないので、その影響は徐々に東アフリカのフラミンゴ

個体群を蝕んでいくことになる。

私はこの章の冒頭で、ナクル湖のフラミンゴ飛来数変動の最も大きな要因は、ナクル湖の水位の変化にあることを示した。しかしこのナクル湖の水位変動は、流入河川の流域の降雨量に支配されているため個体数変化を予測することが難しい。またナクル湖の水位だけではなく、フラミンゴの飛来数に影響を与えているのは、ナクル湖の周辺にある他のソーダ湖の状態によるところも大きい。さらには、不定期に行われるタンザニアのナトロン湖での大規模な繁殖といった生態学的な要因もあり、問題を複雑化している。従ってナクル湖の環境指標としてフラミンゴの飛来数を用いることは適当ではないと考える。

3．ナクル湖の環境指標生物としての魚食性鳥類

ナクル湖の環境をモニタリングする指標生物としてフラミンゴは適していないことを前章で示した。フラミンゴよりも水質の悪化などにより顕著な影響を受けやすい鳥類として魚食性鳥類をあげることができる。重金属など高等動物に悪影響を与える物質は、動物が直接的に体内に取り込む場合もあるが、植物を通して体内に入ってくることも多い。有害物質がまず植物プランクトンに取り込まれ、次にその植物プランクトンを動物プランクトンが食べる。その動物プランクトンを魚類が食べて、その魚類をペリカンやウなどの魚食性鳥類が食べる。このように生物の食う食われるという関係を通して有害物質が移動していく。植物プランクトンから動物プランクトンそして更に魚類へと一段階上がるごとに、有害物質は数倍の濃度に濃縮されていく。食う食われるの食物連鎖の上位に位置すればそれだけ高濃度の有害物質を体内に取り込む結果となる。このような理由で、魚食性鳥類は有害物質の影響を大きく受けることになる。

ナクル湖に留鳥^{*4}として生息する魚食性鳥類のうちアフリカシロペリカン (*Greater White Pelican*)、カワウ (*Greater Cormorant*)、カイツブリ (*Little Grebe*)、アフリカハゲコウ (*Marabou Stork*) の4種について1991年と今回の個体数を比較してみた(表3)。アフリカハゲコウは魚を捕って食べる鳥ではなく、魚や鳥類の死骸を食べる鳥であるが、この食性により魚食性鳥類よりも有害物質の影響を受けやすい鳥として調査の対象とした。表からも明らかなように、4種とも前回の調査より個体数を減じている。前回の調査と今回とでは、調査時期の違いや、ナクル湖の水位の違いもあるので、個体数の違いがそのまま水質の悪化や環境の悪化の程度を表すものとは考えられないが、どの種も大きく個体数を減じていることは無視できない事実である。

1991年の調査時にカウントしたカワウの個体数は、水面部分と汀線にいたカワウの総数であ

* 4 1年中同じ場所に住んでいる鳥。

り、水面の背後の高木の林には繁殖コロニーがあった。繁殖中のコロニーには約 3,000 個の巣が作られていたから、カワウの総数はゆうに 1 万羽を越していたと考えられる。今回の調査では、カワウのコロニーは跡形もなく、個体数はわずか 400 羽であった。腐肉を食べるアフリカハゲコウは、1991 年には 400 羽を数えたが、今回はわずかに 10 羽しか生息していなかった。ここにあげた 4 種のほかにもカギ類、コウノトリ類、ヘラサギすべての魚食性鳥類は非常に減少した。ケニア国立博物館が毎年行っている 1 月の水鳥類のカウント結果もばらつきはあるが、この 10 年間で上にあげた 4 種の魚食性鳥類の個体数の著しい減少傾向を示している。これらの結果からこの 10 年の間にナクル湖の水質が急速に悪化しつつあると推測される。従ってナクル湖の水質をモニタリングするために魚食性鳥類のカウントは有効であり、今後も継続することが望まれる。

4 . 結 論

東アフリカのコフラミンゴ個体群は、本種の世界最大の個体群であるが、個体数、生態など明らかにになっていない部分が多い。

ナクル湖の水位の変動は大きく、「大ナクル上水道事業」によって予測される水位変化の幅を大きく越えるものである。

ナクル湖の水位変動とフラミンゴの飛来数は、水位が上昇する時に個体数も増える傾向があるが、それとは無関係に増減することもあった。

フラミンゴの飛来数はナクル湖の水位だけによって制御されるものではなく、他の近隣ソーダ湖の状態や繁殖行動の影響を大きく受けている。

このことから水質の変化の指標生物としてフラミンゴを用いることは適切とは言えない。

水質変化の指標動物として有効なのは、魚食性鳥類であり、それらを指標に用いると、ナクル湖の水質が悪化しているおそれがあると推測される。

以 上

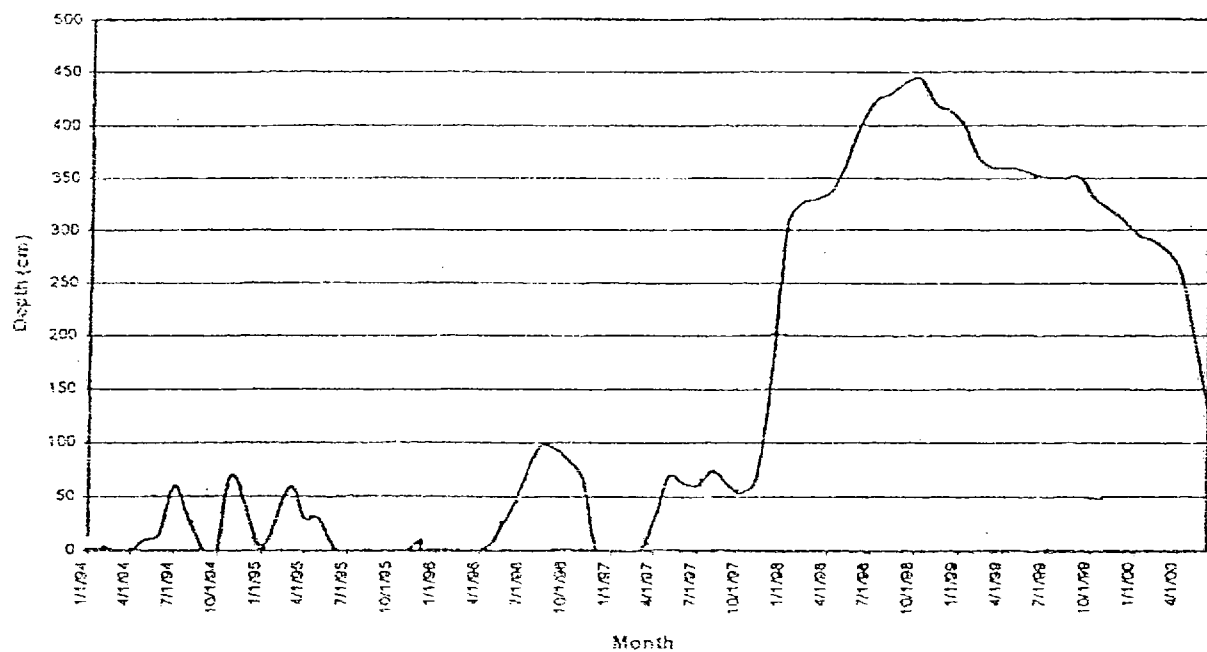


図1 ナクル湖の水位変化

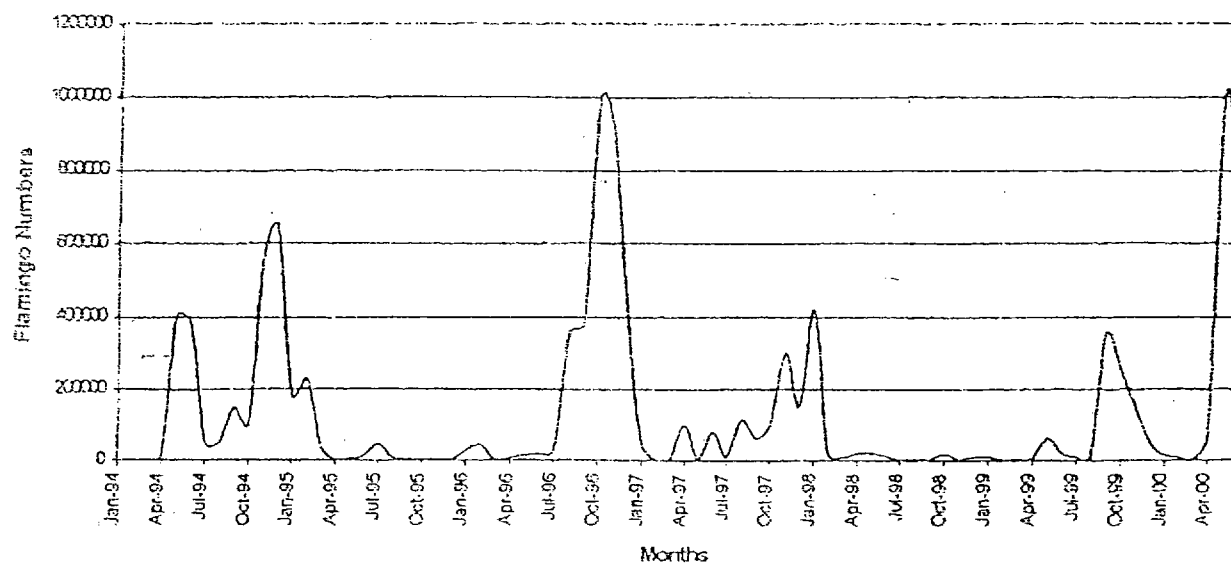


図2 ナクル湖に飛来したフラミンゴの個体数

出所：図1，2ともにWWF（World Wide Fund）年次報告書1999年。

表1 ケニアのソーダ湖におけるコフラミンゴの推定個体数

	1991 年 2 月	2000 年 11 月
ナクル湖	+ <10,000 羽	+++ 数十万羽
エレメンテータ湖	+ <10,000 羽	++ 10 万羽
ボゴリア湖	+++ 100 万羽	+ <5 万羽
マガディ湖	+ <10,000 羽	+ <10,000 羽

表2 ケニアのソーダ湖におけるオオフラミンゴの推定個体数

	1991 年 2 月	2000 年 11 月
ナクル湖	+ <3,000 羽	+ <3,000 羽
エレメンテータ湖	—	+ <2,000 羽
ボゴリア湖	+ <300 羽	++ <1,000 羽
マガディ湖	—	+ < 500 羽

—はカウント記録なし

表3 ナクル湖に生息する魚食性鳥類の個体数

	1991 年 2 月	2000 年 11 月
アフリカシロペリカン	13,000 羽	5,800 羽
カワウ	4,000 羽	400 羽*
カイツブリ	1,300 羽	50 羽
アフリカハゲコウ	400 羽	10 羽

*繁殖コロニーの消滅