

平成15年度環境省委託事業

砂漠化防止対策モデル事業

地下ダム技術報告書

2004年3月

環 境 省

社団法人 海外環境協力センター



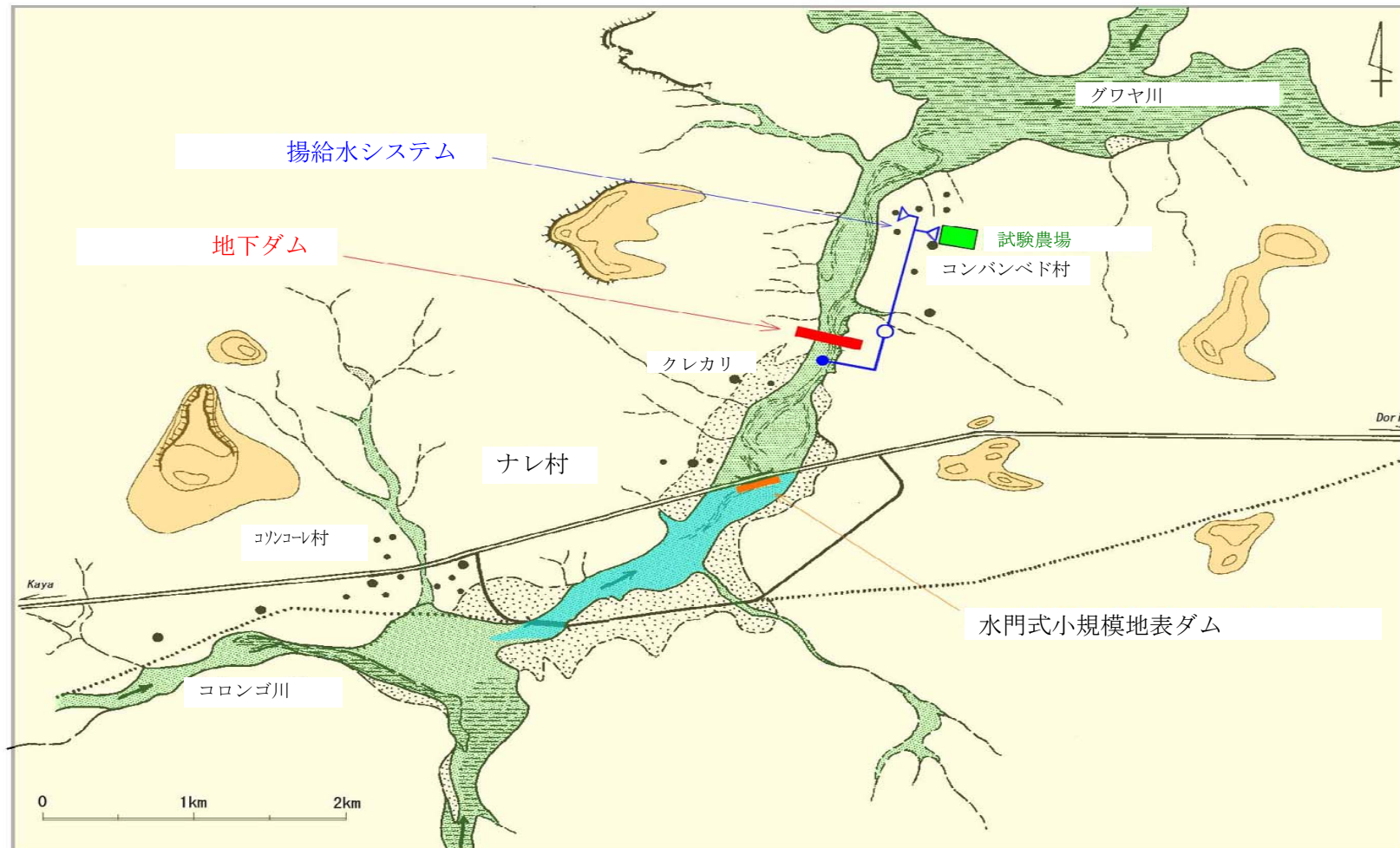
ー地下ダム建設工事の状況ー

地下ダムは、地下水流動域を基盤岩まで掘削し、掘削箇所ダム堤体を構築する工法により建設した。転圧されている部分がダム堤体である。堤体建設とともにその前後の掘削箇所も埋め戻され、最後にはダム堤体は完全に地下に隠れてしまう。



図：対象地域

ナレ村における実証試験施設配置概略図



は じ め に

地球環境問題の一つである砂漠化問題は、地球上の全陸地の 25%、世界人口の約 6 分の 1 に影響を与えていると言われている。特にアフリカを中心とする開発途上国では、砂漠化の進行が人々の生存を脅かしており、深刻な問題となっている。

このような砂漠化問題に国際社会が協同して対処していくため、平成 6 年（1994 年）の国連において砂漠化対処条約が採択され、平成 8 年（1996 年）に発効した。我が国は、平成 10 年（1998 年）に条約を受託し、締約国となった。条約では、先進国は発展途上国に対し資金協力及び技術協力を行うこととされている。また、技術協力に当たっては、現地の実情に即した技術を用いることが重要とされている。我が国に対しても、所有する諸技術をもって砂漠化対策に貢献することが期待されているが、深刻な砂漠化地域を持たない我が国においては、砂漠化地域の実情に関する情報・知見が不足しているのが実情である。

日本国環境省は、砂漠化防止条約の締約国となる以前から、砂漠化対処に取り組んできた。その一つとして、平成 7 年度（1995 年度）から平成 14 年度（2002 年度）にかけて、砂漠化が深刻である西サハラ地域のブルキナ・ファソ国において、我が国の専門家からなる検討会の指導の下、「砂漠化防止対策モデル事業調査」を実施した。このモデル事業調査は、我が国国内で実績のある地下ダム技術を用いて、乾燥地域における地下水の有効利用のためのハード面での技術を開発するとともに、地域住民による管理体制の構築等のソフト面での情報・知見を収集し、評価したものである。

モデル事業調査では、位置選定のための調査の後、平成 9 年度～10 年度（1997～1998 年度）に、ブルキナ・ファソ国ナメンテンガ県（Namentenga）ツグリ郡（Tougouri）ナレ村（Nare）に地下ダムを建設した。その後、地下ダムの貯水効果、有効利用方法、自然環境に及ぼす影響等に関する調査を経て、平成 14 年度末（2003 年 3 月）にモデル事業調査は終了した。

本報告書は、砂漠化防止対策モデル事業調査によって得られた情報・知見を、ブルキナ・ファソ国はもとより、砂漠化が進行している国々や国際社会に提供し、有効に活用してもらうことを目的として取りまとめたものである。本報告書が、砂漠化対処に役立つことを心から祈願する次第である。

平成 16 年（2004 年）3 月

環境省 環境保全対策課

社団法人 海外環境協力センター

目 次

はじめに

1.	砂漠化防止対策モデル事業調査の概要と評価	5
1-1.	砂漠化防止対策モデル事業調査の背景と目的	5
1-2.	事業の実施経緯	5
1-3.	事業実施体制	7
1-4.	実証試験施設の概要	7
1-5.	結果の評価と今後の方向	9
2.	地下ダムとは	11
2-1.	地下ダムの概念・原理	11
2-2.	地下ダムの利点	13
2-3.	地下ダムの問題点	13
2-4.	地下ダム建設適地の条件	14
2-5.	地下ダム建設適地としての「化石谷」	16
3.	地下ダム建設位置選定のための調査	17
3-1.	調査方法の概要	17
3-2.	本モデル事業の対象地域の選定	17
3-3.	西アフリカにおける「化石谷」の分布	20
3-4.	本モデル事業で実施した調査内容	22
3-4-1.	人工衛星画像・空中写真による検討	22
3-4-2.	現地踏査	26
3-4-3.	物理探査	28
3-5.	現地詳細調査（調査ボーリング、透水試験、地下水位観測等）	32
3-6.	社会経済調査	35
4.	地下ダムの建設	37
4-1.	地下ダム建設工法の種類	37
4-2.	ナレ村に建設した地下ダムの諸元	37
4-3.	地下ダム建設工事の概要	40
5.	ナレ村における「化石谷」の構造	44
6.	地下ダムにおける貯水状況の観測	47
6-1.	貯水状況観測施設（地下水観測施設）	47
6-2.	気象・河川流量観測結果	51
6-3.	貯水域における地下水位の変化	53
6-4.	貯水水位の「季節変動」についての検討	58
6-5.	地下ダム貯水状況の評価	60
7.	関連調査	63
8.	今後の地下ダム建設への提言	68
8-1.	地下ダム建設位置選定に関して	68
8-2.	調査方法に関して	69
8-3.	地下ダム建設工法に関して	70

8-4. コストに関して	70
8-5. 維持管理体制に関して	71
謝辞	72

1. 砂漠化防止対策モデル事業調査の概要と評価

1-1. 砂漠化防止対策モデル事業調査の背景と目的

1994 年（平成 6 年）に採択され、1996 年（平成 8 年）に発効した砂漠化対処条約においては、砂漠化防止対策の実施にあたって、地域の実情に即した技術を適用することが重要であると指摘されている。

日本国環境省は、砂漠化の進行する地域において貴重な水資源である地下水を有効に開発・利用する技術として、日本でも実用化されつつある「地下ダム」に着目し、この技術の現地適用性をハード・ソフト両面から検証することを目的とする「砂漠化防止対策モデル事業調査」を実施した。

砂漠化が進行している乾燥・半乾燥地域でのこれまでの水資源開発は、地表水及び深層地下水を対象とするものが中心であった。

地表水の開発は、主として「地上ダム」によって行なわれてきた。しかし、「地上ダム」は広大な水没地域を伴うため、水没地域における自然破壊や住民移転等様々な問題が指摘されている。また、平坦な準平原に造られるダムにおいては、水深に比べて貯水面積が広大となるため、乾燥・半乾燥地域においては貯水の多くが蒸発によって失われてしまう。このため、最も水を必要とする乾季に「貯水ダム」としての機能を有効に発揮できないという問題もある。

一方、深層地下水の開発は、賦存量が限られているため、持続性が問題となる。また、深層地下水の塩分濃度が高い場合には、「塩害」の問題も考慮しなければならない。さらに、その開発は点的なものとなるため、住民や家畜等の集中をもたらし、砂漠化を人為的に促進する危険もある。

このような地表水及び深層地下水の開発の問題点を回避するためには、地下の浅いところに賦存して比較的流れが速い「浅層地下水」の開発可能性を検討する必要がある。浅層地下水の開発手法として、近年、「地下ダム」が着目されている。「地下ダム」とは、地下水を堤体によって堰き止め、貯水して利用する施設である。日本国内においても、河川の発達が悪い離島等において、新たな水資源開発手法として技術開発が進められている。通常の地上ダムと比較して、土地が水没しない、土中に埋没しているため決壊の心配がない等の利点がある。また、乾燥地域においては、蒸発による貯水量の減少が少ない、寄生虫等の繁殖の怖れがない等の利点も予想される。一方、地下の水理地質条件の把握が必要であるため適地選定が難しい、地層中の空隙に貯水するため貯水効率が悪い等の問題点も挙げられる。

本事業では、乾燥・半乾燥地域における水資源開発方法として、浅層地下水を貯水する「地下ダム」に着目し、干ばつの常襲地域である西アフリカにおいて、その現地適用性を検証することとした。

1-2. 事業の実施経緯

本事業は、1995 年（平成 7 年度）から 2003 年 3 月（平成 14 年度）まで実施した。

(1) 事業実施地域（国）の選定；

砂漠化対処条約では、深刻な干ばつ及び砂漠化が特にアフリカにおいて悲惨な結果をもたらしていると指摘している。

本事業では、次の条件を満たしている国として、アフリカのサヘル地域の中からブルキナ・ファソ国を事業対象国に選定した。

- ① 砂漠化の進行が深刻な国であること

- ② 浅層地下水が比較的広い範囲に存在している国であること
- ③ 政治的に安定している国であること

(2) 事業実施箇所選定のための調査 —1995-1996 年（平成 7・8 年度）—；

ブルキナ・ファソ国内の砂漠化進行地域である中部～北部地域 35 ヶ所を対象に、人工衛星画像・空中写真の判読及び広域踏査を行い、候補地の絞り込みを行った。さらに、電気探査、試験ボーリング、地下水位観測、社会経済調査等を実施し、最終的に事業実施箇所（地下ダム建設箇所）としてナメンテンガ県（Namentenga）ツグリ郡（Tougouri）ナレ村（Nare）を選定した。

(3) 地下ダム等の実証試験施設の建設 —1997-1998 年（平成 9・10 年度）—；

1997 年 11 月～1998 年 6 月の乾季に、ナレ村のコロンゴ川（Kolongo）に地下ダムを建設した。

また、1998 年 10 月以降の乾季に、揚水・給水施設、水門式小規模ダム、地下水観測施設、試験圃場等の実証試験施設を設置した。

(4) 関連実証試験等の実施 —1999-2000 年（平成 11・12 年度）—；

地下ダムの貯水状況を観測するとともに、貯水の有効利用法の実証、地下ダムが自然環境（特に植生）に及ぼす影響の解明等を目的として、以下のような調査・観測を実施した。

- ・ 地下水位観測
- ・ 気象観測（主に降水量）
- ・ 河川流量観測
- ・ 農業実証試験
- ・ 植生調査

(5) 追加観測の実施 —2001-2003 年 3 月（平成 13・14 年度）—；

当初の事業計画では、本事業の実施予定期間は 6 年間（1995-2000 年）であったが、地下ダムの貯水速度が遅く、貯水効果を明確に実証するためには、さらなる観測が必要になった。このため、2 年間事業を延長し、地下水・降水量の観測を継続した。

(6) 事業の終了；

2003 年 3 月（平成 14 年度末）、実証試験事業として一定の成果を得て、本事業は終了した。なお、実証試験施設については、ブルキナ・ファソ国「環境と持続的開発のための国家評議会常設事務局」（S.P.CONEDD）から、ナレ村住民の生活環境の改善のため、現状のままとしてほしい旨求める要請があった。このため、引き続きナレ村及びブルキナ・ファソ国における砂漠化対処と持続可能な開発に寄与するよう、これに応ずることとした。

1-3. 事業実施体制

この砂漠化防止対策モデル事業調査は、図 1.1 のような体制によって実施した。

1-4. 実証試験施設の概要

砂漠化防止対策モデル事業において建設・設置された実証試験施設は、以下のとおりである。

(1) 地下ダム；

ナレ村クリカレ地区 (Koulikare) のコロongo川 (Kolongo) に、下記の地下ダムを建設した。

- ・ 構造 : アースダム式
- ・ 堤体の長さ : 約 210 m
- ・ 堤体の深度 : 3.0～11.4 m (最大深度)

(2) その他の実証試験施設；

- ・ 太陽光発電揚水施設 : 地下ダム貯水域の 3 基の揚水井 (深さ約 20 m) から揚水、1.76 kwp
- ・ 多目的給水施設 : 生活用水、家畜用水、農業用水を供給する水道施設
- ・ 農業実証圃場 : コンバンベド村 (Kombangbedo)、面積約 0.25 ha、穀類及び野菜の点滴灌漑等による栽培試験用
- ・ 水門式小規模ダム : 地下水涵養等のため地下ダムの約 1.2 km 上流の幹線道路橋を利用して建設、全長約 33 m、最大貯水高 1.2 m、水門数 23

(3) 地下水観測施設；

- ・ 自記地下水位観測施設 : 5 箇所 (自記水位計は老朽化のため 2001 年に撤去)
- ・ 地下水観測井 : ボーリング孔 3 孔、大口径井戸 2 基
- ・ 揚水井兼用観測井 : ボーリング孔 2 孔、大口径井戸 4 基
- ・ ピエゾメーター (水頭観測井) : 4 箇所、計 16 孔

(4) 気象 (雨量) 観測施設；

- ・ ナレ村クリカレ地区気象観測施設 : 雨量、蒸発量、気温・湿度等の観測。
- ・ コロongo川流域の雨量観測施設 : 3 箇所
ナレ村コソンコーレ地区 (Kossonkore)
ワノビアン村 (Ouanobian)
ニョカ村 (Noka)

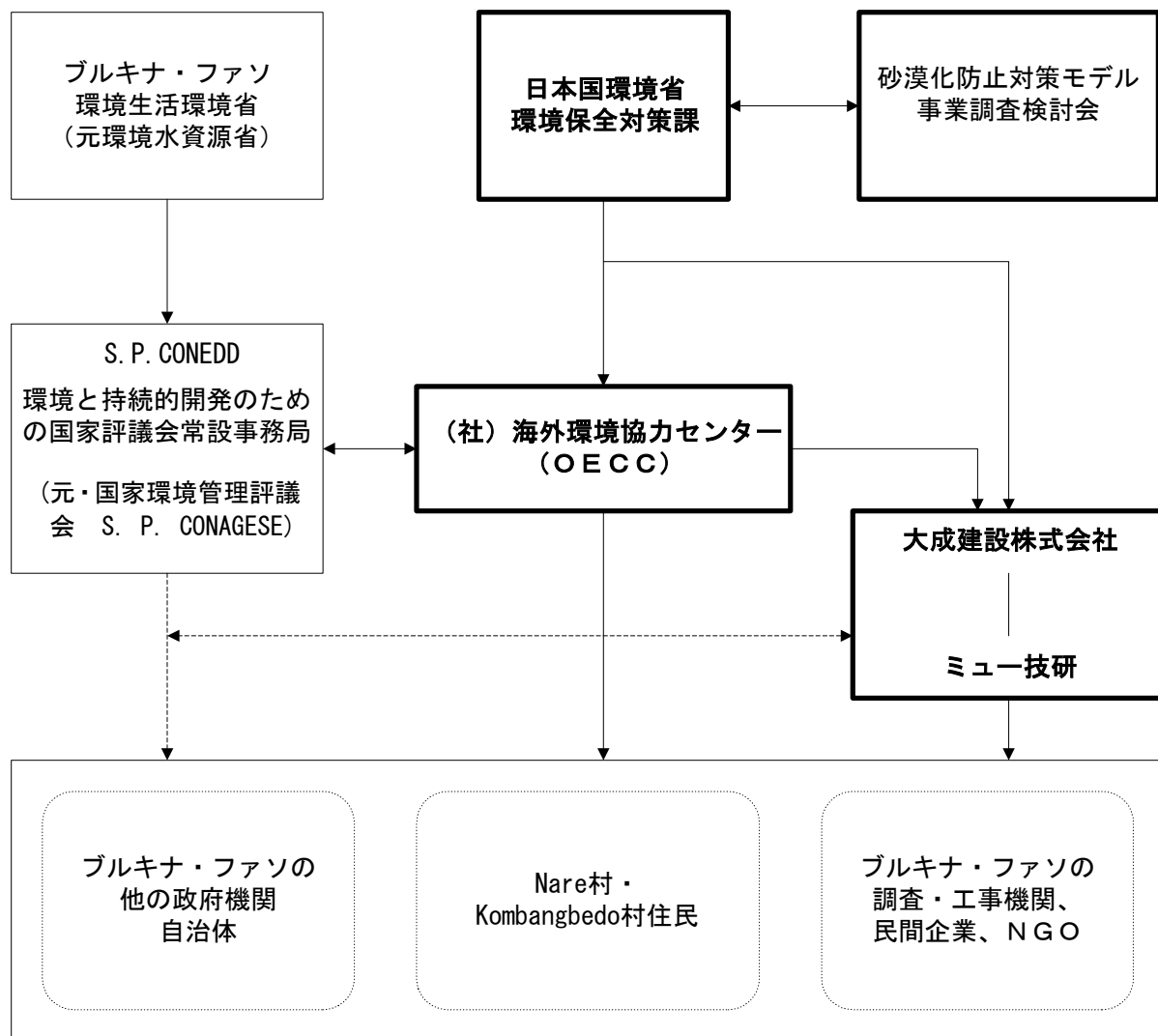


図 1.1：事業実施体制図

1-5. 結果の評価と今後の方向

(1) 貯水状況；

本事業で建設した地下ダムは、「化石谷堆積物」とその下位の基盤岩強風化部を貯水層とする。単純化した貯水域のモデル計算によれば、地下ダムが満水状態となった時の貯水域の範囲、地下水位、貯水量は、次のように見込まれる。

- ・ 貯水域の幅： 約 150 m（最も狭い幅に想定した場合）
- ・ 貯水域の長さ（上流側への貯水到達距離）： 約 13.4 km
- ・ 満水時地下水位： -3.0 m
- ・ 満水時貯水量： 約 1,800,000 m³（貯水層の有効間隙率を 20%と想定した場合）

2002 年末までの貯水水位（地下水位）は、最も低下する乾季末期で -7.0 m、最も高くなる雨季末期で -4.2 m であり、まだ満水状態には達していない。貯水域は地下ダムの上流約 5～6 km に到達していると推定され、2002 年末時点での貯水量は、約 400,000 m³と推定される。

地下ダム貯水域での水収支解析結果によると、平年並みの降水量があれば、地下水は毎年雨季に約 1,100,000 m³涵養されると推定される。しかし一方で、年間約 1,000,000 m³の漏水が発生し、貯水増加量は年 100,000 m³と推定される。

このペースで貯水が進めば、最大貯水量約 1,800,000 m³の地下ダムが満水状態になるのは 2005 年雨季であり、翌乾季末には漏水により 800,000 m³まで減少することになる。以降、雨季には 1,800,000 m³の満水状態、翌乾季には 800,000 m³まで減少のサイクルを繰り返すものと思われる。

漏水の原因は、堤体の遮水性にあるのではなく、基盤岩への浸透のためである。すなわち、漏水した地下水は、付近の基盤岩中に貯水されているものと推測される。

なお、地下ダム貯水域からは、太陽光発電を利用した 3 基の揚水・給水施設により、日平均約 7.4 m³、年間約 2,700 m³の水が村民に給水されている。

以上のように、予想外の漏水現象が生じたため予定よりも貯水速度は遅いものの、漸次、水は貯まっており、地下ダムにより乾季にも供給可能な水資源を開発できることが判明した。基盤岩への漏水（浸透）を避けるためには、地下ダムの建設位置の決定に当たり、より詳細な水理地質調査が必要であったと思われる。

(2) 費用；

地下ダム建設及び揚水・給水施設設置に要した直接経費（日本人技術者の人件費を除く。）は以下の通りである。

地下ダム建設工事	108,595 千円
揚水・給水施設設置工事	24,900 千円（一部推定）

なお、地下ダム建設工事の管理の部分は全面的に日本からの技術者に依存しているが、その人件費は上記の費用の中に含まれていない。

(3) 維持管理体制；

水資源の維持管理には、現地住民及び現地政府のオーナーシップが不可欠である。現地では、水の使用料を徴収して、軽度の施設修理等の維持管理を行うことのできる体制は作られている。しかしながら、施設の継続的な活用のためには、より長期的な維持管理体制の構築が必要であると思われる。

(4) 自然環境への影響；

地下ダム建設箇所を大きな河川への合流点近くにしたこと等により、地下ダム建設後 5 年

経った 2002 年末までの時点で、植生等の自然環境への顕著な影響は生じていない。

(5) 他地域への応用；

本モデル事業は、地下ダム技術を乾燥地域・半乾燥地域における水資源開発に適用した実証調査として、世界的にも貴重な事例と思われる。化石谷が存在する地域等において、砂漠化対処のため、今後、本モデル事業で得られた知見を活用し、地下ダムによる浅層地下水の開発を検討する意義はあるものと思われる。

2. 地下ダムとは

2-1. 地下ダムの概念・原理

「地下ダム」(sub-surface dam, underground dam)とは、地下水の流路に遮水壁(ダム堤体)を構築して、地下水を貯留するシステムである。

「水」を「堰」(ダム)によって貯留する点は通常の「地上ダム」と同じであるが、以下の点が「地上ダム」とは異なっている。

(1) 地下水を貯留するシステム；

地上ダムが地表水(河川水)を貯留するのに対し、地下ダムは**地下水**を貯留する。ただし、深層地下水を地下ダムの対象にすることは工事規模が過大になること等から困難であり、**浅層地下水**を対象とすることが一般的である。

(2) 地層中への貯水；

地下水は、自然の**地層中**に貯留される。すなわち、地下ダムとは、自然の地下水帯水層を人工的に涵養させるシステムである。

(3) 地下に構築されるダム堤体；

地下水を対象としたダムであるため、堤体は**地下に構築**される。ただし、現河床堆積物中の地下水(伏流水)のように非常に浅い地下水を貯留する場合には、堤体の一部が地表に露出することもある。

(4) 揚水施設の必要性；

地下ダムの堤体は地下に構築されるため、貯留された地下水の水位は地表面の標高よりも低い。したがって、貯水を地上で利用するために、何らかの**揚水施設**が必要となる。

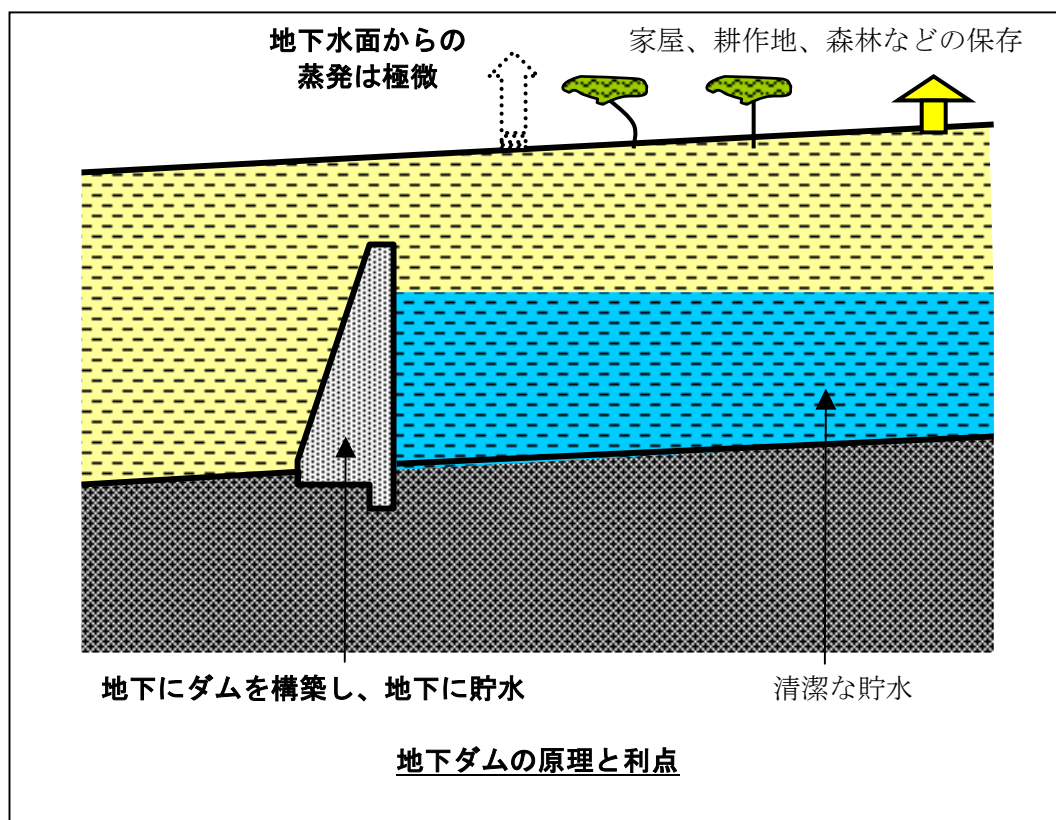
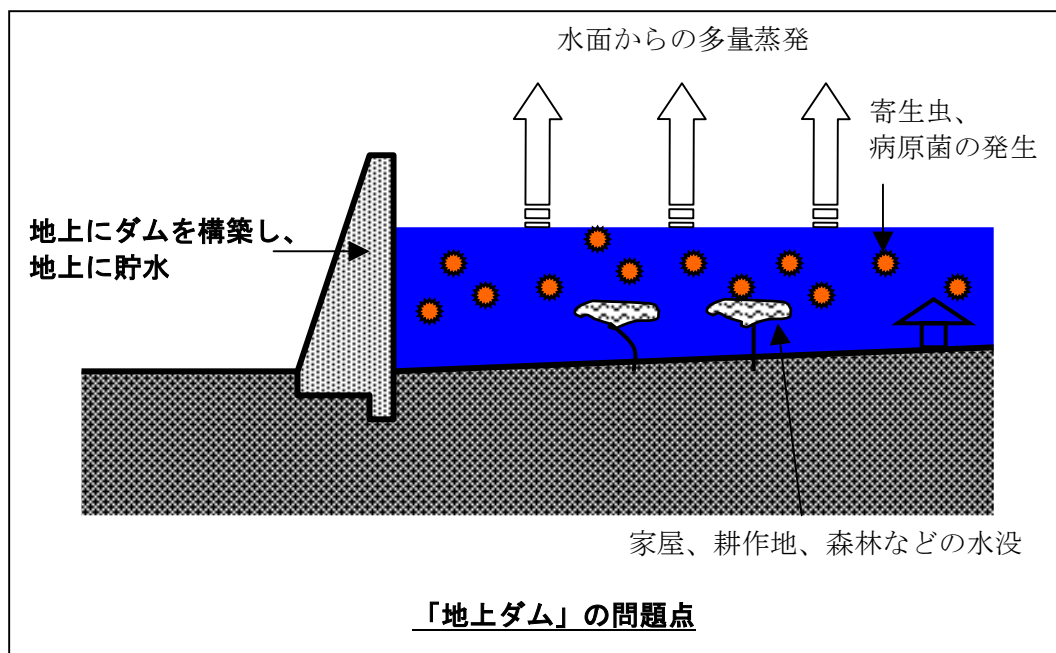


図 2.1 : 地下ダムの原理

2-2. 地下ダムの特長

地下ダムは、地表ダムと比較して、以下のような利点を持つ。

(1) 水没地域を伴わない貯水システム；

地下ダムは、地下水を地中に貯留するため、地上ダムのように水没地域を伴わない。このため、自然環境を著しく破壊することがなく、住民移転のような社会問題が生じることもない。

(2) 貯水の蒸発防止；

乾燥・半乾燥地域の地上ダムにおいては、乾季に貯水が多量に蒸発することが少なくない。これに対し、地下ダムにおいては、地下に貯水されるため、蒸発量は地上ダムに比べて非常に少なく、蒸発による利用可能貯水量の減少が生じない。

(3) 衛生的な貯水；

地上ダムは寄生虫、マラリア蚊、病原菌などが繁殖する恐れがあり、貯水を生活用水として利用するためには衛生処理が必要である。これに対し地下ダムは、地下水を地中に貯留するため、地上ダムに比べて水質が大幅に良好であり、通常の井戸水と同等に利用することができる。

(4) 安定的かつ安全なダム堤体；

一般に、地下ダムの堤体は地盤中に埋没しているため、「地上ダム」に比べて力学的に安定した状態にあり、メンテナンスを必要としない。万一、堤体に何らかの破損が生じても、地中でのことであり、下流域に被害が生じる恐れがない。

(5) 再生可能資源の利用；

地下ダムは浅層地下水の利用を目的とするが、一般に浅層地下水は現在の降雨によって涵養されているものであり、再生可能な地下水である。したがって、地下ダムは、水資源の枯渇をもたらすことがない。

2-3. 地下ダムの問題点

一方で、地下ダムには以下の問題点があることに留意する必要がある。

(1) 建設適地選定の難しさ；

「地上ダム」の場合は、建設適地の調査・選定に当たり視覚的に確認できるのに対し、地下ダムの場合は、建設適地の調査・選定や貯水可能量の見積りは、地下の地質構造等の推定に依存する部分が多い。

(2) 貯水効率の低さ；

地下ダムにおいては、水は地層の構成粒子間に貯められる。したがって、地下ダムの貯水量は、貯水域の地層の空隙率（有効空隙率）に規制され、貯水域の容積の10%～30%にしかない。

(3) 下流域への地下水流の遮断；

地下ダムの建設によって、下流側への地下水流が遮断され、下流域で地下水の枯渇が生じる可能性があり、十分に留意する必要がある。しかし、下流域での地下水が地下ダム建設地点の地下水のみにより涵養されているとは限らないこと、また、地下水の一部を下流側に流出させるような構造の地下ダムとすることは土木技術的に可能であることから、地下水

流動機構を考慮した地下ダム建設地点の選定やダム構造の工夫によって、このような問題を回避できる。

本モデル事業では、大きな河川の合流点近くを地下ダム建設地点とすることにより、この問題に対処した。

(4) 貯水域の土壌の塩類集積；

貯留された地下水の地表への浸透・蒸発によって、貯水域の土壌表面に塩類が集積する懸念もある。しかし、このような塩類集積が生じるのは、貯水最高水位が地表面近くにある場合と考えられる。地表面から貯水最高水位までの間隔を十分に取ることで、塩類集積を防ぐことは可能である。

本モデル事業では、このことを考慮し、貯水最高水位（ダムの堤頂）を深度 3 m に設定した。

2-4. 地下ダム建設適地の条件

以下、地下ダム建設適地の自然的条件（地質・水理条件）を挙げる。

(1) 流動性浅層地下水の存在；

地下ダム建設箇所には地下水が存在しなければならないが、停滞している地下水の中に遮水壁を構築しても貯水量は増加しないため、**流動性が高い地下水**である必要がある。

また、帯水層の深度が深いほど水理・地質特性の解明が困難となるとともに地下ダム建設の工法・経費面の問題が大きくなることから、**浅い深度に賦存する地下水**であることが望ましい。

(2) 空隙の多い貯水層（帯水層）の存在；

地下ダムにおいては地層中に水を貯めるため、貯水予定域の地層の**空隙率（有効間隙率）が大きい**ほど貯水効率は高くなる。また、同時に、地下水が高い流動性を持つためには、空隙率が大きい必要がある。

(3) 難透水性地盤で囲まれていること；

貯水域の側部や底部が**難透水性の地盤**で構成されていなければならない。貯水域に大きな水の逃げ道があると、有効に貯水できない。

(4) 難透水性地盤の狭搾部の存在；

効率的に地下ダムを建設するためには、地上ダムと同様に、難透水性地盤が**狭窄部**をなし、かつ、上流側に広い帯水層を有する箇所（**ボトルネック箇所**）に地下ダムを建設することが望ましい。

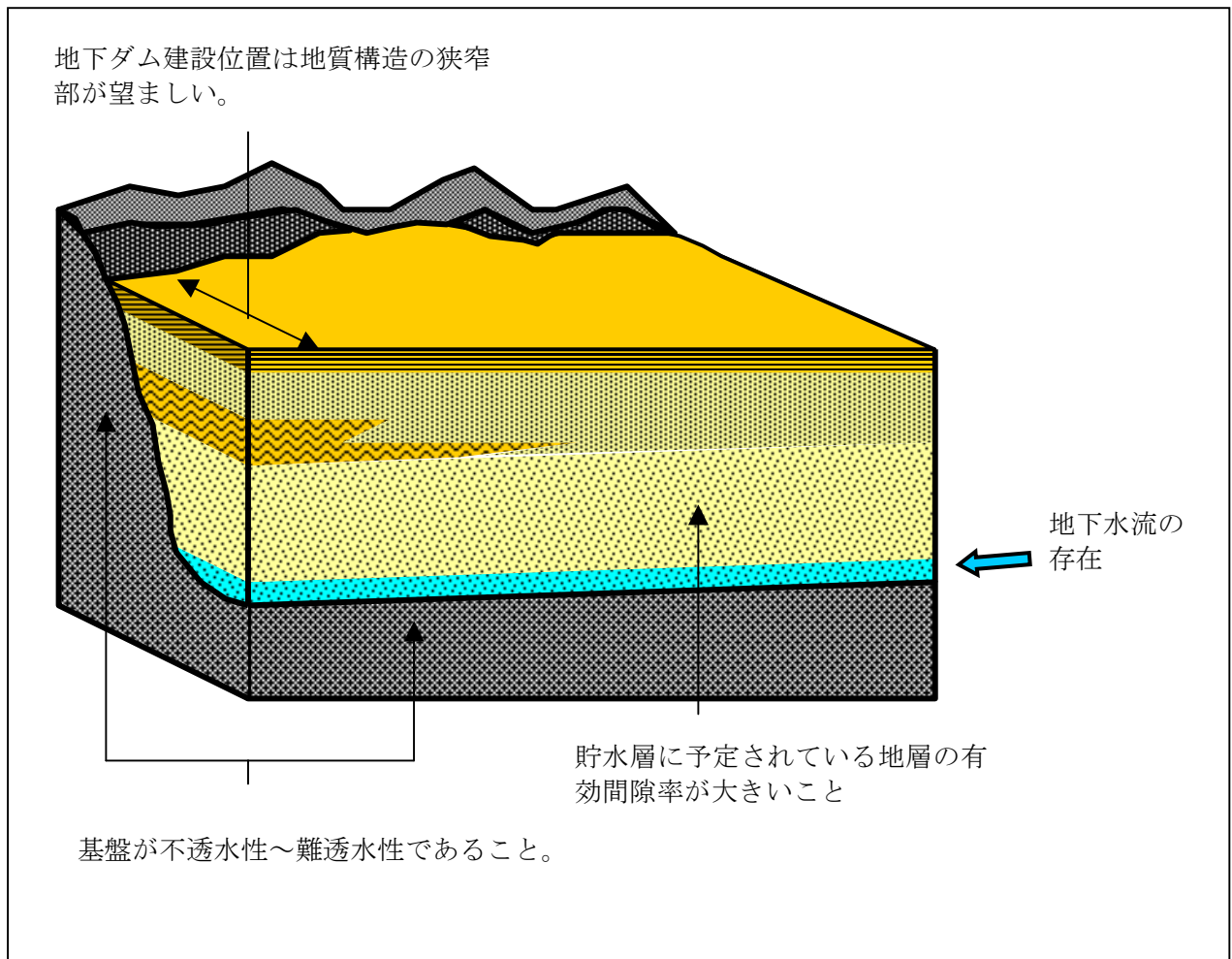


図 2.2 : 地下ダム建設適地の条件

2-5. 地下ダム建設適地としての「化石谷」

(1) 「化石谷」とは；

上記の地下ダム建設適地の条件を満たす地形・地質構造に、「化石谷」が挙げられる。

「化石谷」とは、古い河川によって侵食されて形成された谷が、その後の新しい堆積物によって埋められた構造のことであり、「埋没谷」とも呼ばれる。

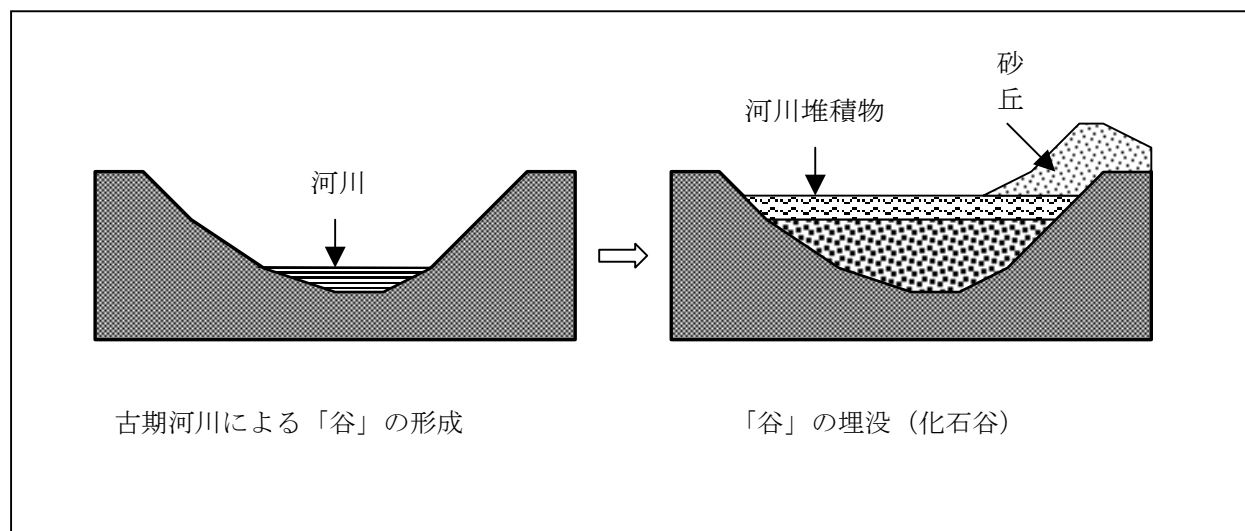


図 2.3 : 「化石谷」の概念図

(2) 「化石谷」の特性；

一般に、「化石谷」は地下ダムに適した次のような特性を持っているものと考えられる。

- ① 「化石谷」は古い河川（谷）が埋没したものであるため、新しい地質時代の地殻変動の影響を受けていない安定した地域においては、河川としての集水構造が浅層地下水の集水機構として保存されている可能性が高い。また、変則的な「水の逃げ道」が形成されている可能性が少ない。
- ② 基盤岩 (basement rocks) が侵食されてできた「化石谷」の場合、その谷壁や谷底は不透水層である基盤岩でできており、地下ダム貯水域から漏水が生じる可能性が少ない。
- ③ 「化石谷」を埋めている「化石谷堆積物」は、河川堆積物や砂丘起源の砂など新しい地質時代の堆積物であり、未固結で空隙率が高いなど、地下ダムの貯水層に適している可能性が高い。

3. 地下ダム建設位置選定のための調査

本章では、地下ダム建設位置選定のための調査方法とその結果について報告する。

3-1. 調査方法の概要

地下ダム建設地は、一般に、次の手順により、建設適地を絞り込んでいき、選定する。

- ① 人工衛星画像及び空中写真による地形判読
- ② 現地踏査による地形・地質調査
- ③ 電気探査等による地盤構造の推定
- ④ ボーリング調査、透水試験等による地盤構造の確認
- ⑤ 地下水位観測による地下水流動機構の推定

また、降水量や河川流量等の水文・気象観測データも入手し、地下ダム開発の必要性・可能性の検討材料とする。

一方、地下ダム建設後の維持管理には、現地社会の主体的関与が不可欠であり、住民参加の可能性等の把握のための社会経済調査を行う必要がある。また、建設地の選定後は、計画段階からの現地社会の関与を確保していく必要がある。

3-2. 本モデル事業の対象地域の選定

(1) 事業実施国の選定；

砂漠化対処条約では、前文において、深刻な干ばつ及び砂漠化が特にアフリカにおいて悲惨な結果をもたらしていると指摘している。また、もともと砂漠化問題が国連で取り上げられるようになったのは、1960年代末から1970年代初頭にかけてのスーダン・サヘル地域での深刻な干ばつを契機としている。これらのことから、本モデル事業では、サヘル地域から事業対象国を選定することとした。

さらに、次の条件を備えていることから、サヘル地域の中からブルキナ・ファソ国（特に、中部・北部地域）を事業実施国とした。

- ① 砂漠化の進行が深刻な国の一つであること
- ② 浅層地下水が比較的広い地域に存在している国であること
- ③ 政治的に安定している国であること

ブルキナ・ファソ国北部の気候は、次の2つの季節によって特徴付けられる。

- ・乾季（10月～5月の約8ヵ月）
- ・雨季（6月～9月の約4ヵ月）

同国では年に2回気温のピークがある。最も暑い時期は3～5月で、最高気温40度前後、最低気温25～28度となる。次の気温ピークは10～11月で、最高気温36～39度、最低気温22～23度となる。気温の低くなる時期も2回あり、12～1月の最高気温30～34度、最低気温14～16度、7～9月の最高気温30～34度、最低気温21～24度である。

降水量は北方ほど減少し、中央部の首都ワガドゥグで年753mm（1990-1994年の平均値）なのに対し、北東部のDoriという町では474mmである。降水の大部分は、雨季に集中する。

同国の8割の地域に先カンブリア紀の古い地質が分布している。

産業は、農業及び畜産業が主である。国土の11%が農地として使用されており、そのうち80%以上に、ミレット、ソルガム、メイズ、米等の穀類が栽培されている。これらの穀類生

産は、土地条件の差や気象条件の変化の影響を受けやすく、安定していない。

(2) モデル事業としての対象地域選定基準；

加えて、モデル事業実施の観点から、下記の条件を特に重視した。

- ① モデル事業に適した規模の地下ダム建設が可能であること
- ② 近くに比較的大きな村落があり、モデル事業への住民参加が可能であること
- ③ 首都ワガドゥグからのアクセスが容易であること
- ④ 結果の評価が容易なように、他のプロジェクトが行なわれていないこと

(3) 本事業における調査手順；

本事業においては、下図に示すような手順に従って地下ダム建設位置を選定した。

なお、調査にあたっては、できる限り特殊な器具・機械の使用は避け、ブルキナ・ファソ国で調達可能な器具・機械を使用するよう努めた。

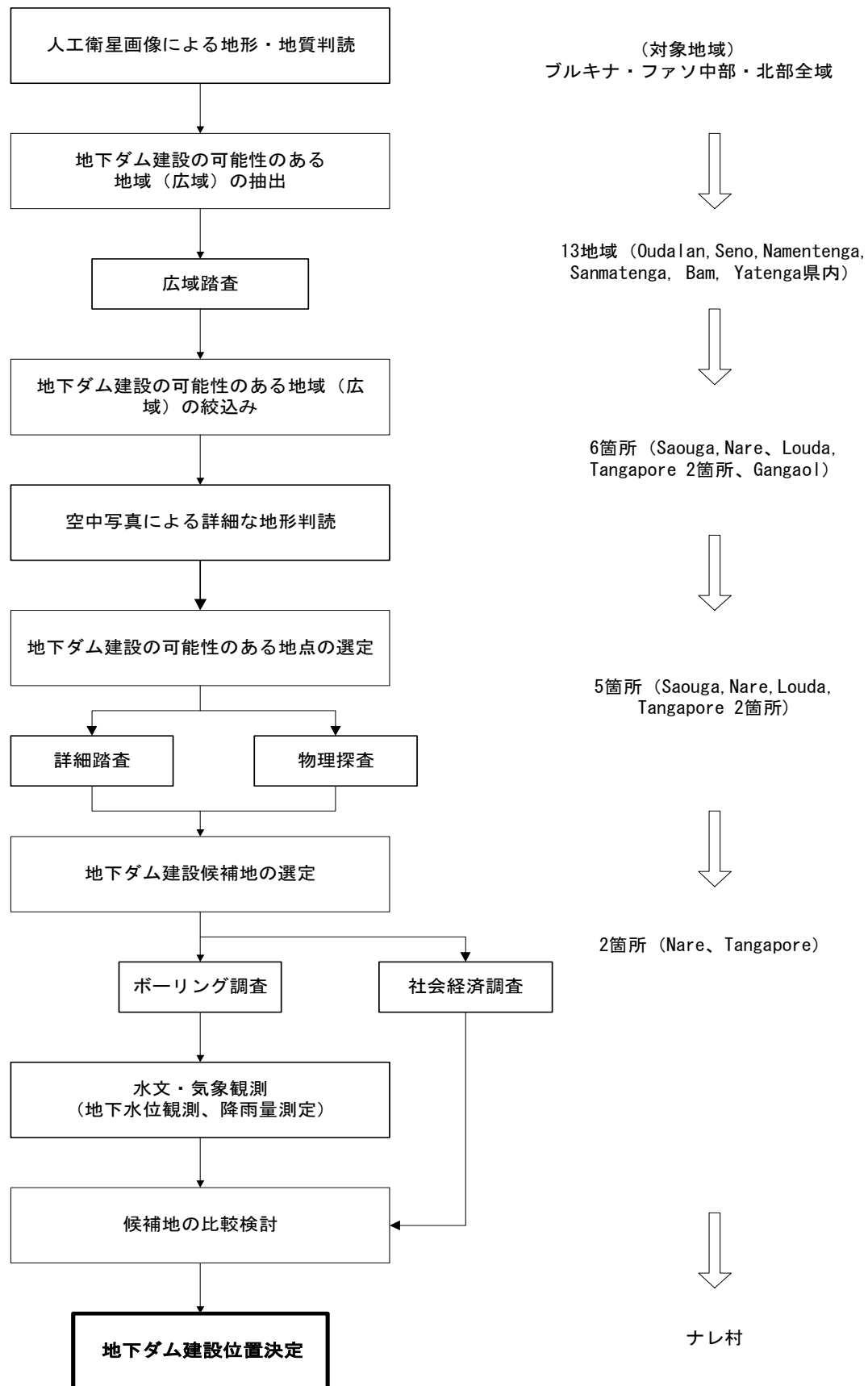


図 3.1： 地下ダム建設位置選定調査の流れ

3-3. 西アフリカにおける「化石谷」の分布

本モデル事業が開始される以前の 1989-1990 年に、複数の日本企業からなる調査団（サヘル・グリーンベルト研究会）により、サヘル地域のニジェール及びマリにおいて、地下ダム建設の可能性調査が行なわれた。これにより、ニジェール河流域に「化石谷」が顕著に発達し、地下ダム建設に適した水理地質構造を持っていることが明らかにされた。

この調査では、ニジェール河の次の支流で「化石谷」の存在が確認されている（図 3.2）。

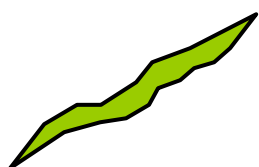
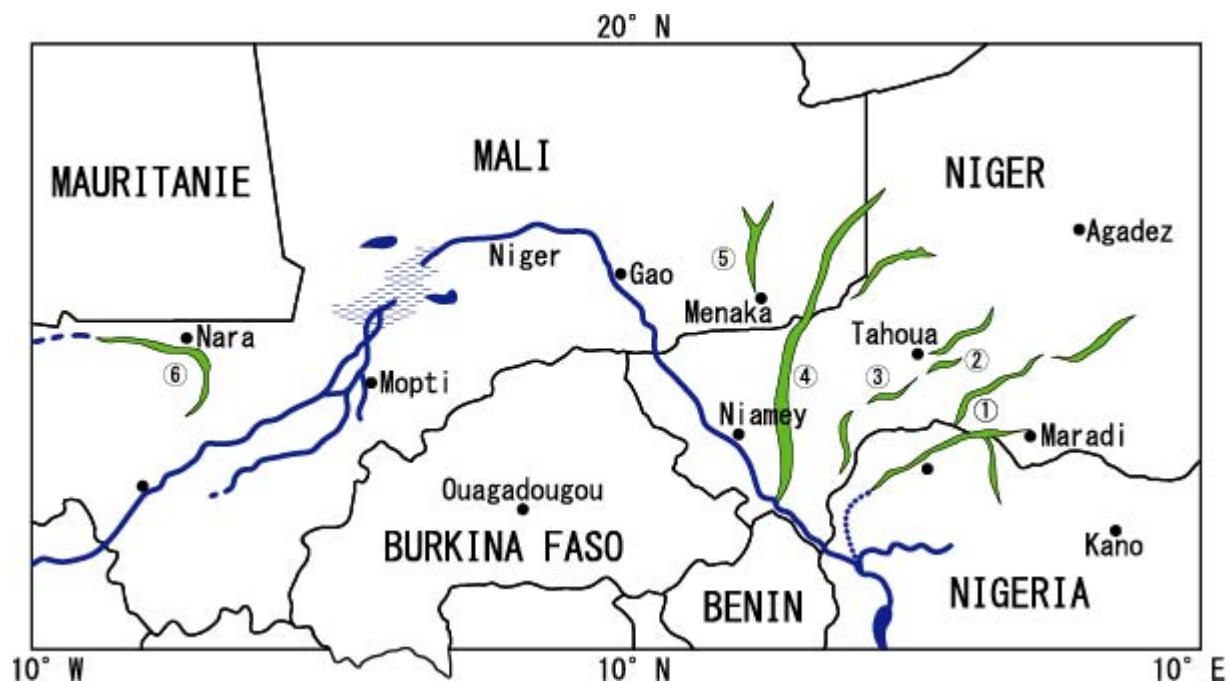
- ・ Goulbin Kaba～Tarka 溪谷（ニジェール国 Maradi～ナイジェリア国 Sokoto）
- ・ Souma 溪谷（ニジェール国 Tahoua 南東域）
- ・ Dallol Maouri（ニジェール国 Dan Doutchi、Tahoua 西方域）
- ・ Dallol Bosso（ニジェール国 Niamey 東方～北東域）
- ・ Ezgueret 川（マリ国 Menaka）

また、セネガル河においても次の支流で「化石谷」が確認されている。

- ・ Serpent 溪谷（マリ国 Nara）

これらの「化石谷」の現地表面には、季節河川（雨季にのみ現れる河川）が流れていることが一般的である。現地表面における「化石谷」の谷幅は、現在の季節河川の流量に比べて不釣り合いに大きく、数 km、大きなものでは 10 数 km に達する。このような大規模な「化石谷」に流入する「化石谷」の中に、地下ダム建設に適した中～小規模のものが見出される可能性がある。

このような既存の調査結果から見て、ニジェール河流域に属しているブルキナ・ファソ国東部～北東域においても、現在の河川の下に地下ダム建設に適した規模の「化石谷」が埋没している可能性があると思われる。本モデル事業の地下ダム建設位置選定のための調査では、ブルキナ・ファソ国中部・北部地域におけるこのような「化石谷」の存在の可能性に着眼した。



化石谷

- ① Goulbin Kaba～Tarka 溪谷
- ② Souma 溪谷
- ③ Dallol Maouri
- ④ Dallol Bosso
- ⑤ Ezgueret 川
- ⑥ Serpent 溪谷 (セネガル河の支流)

図 3.2 ニジェール、マリにおける化石谷の分布

注： この図中の「化石谷」は、日本のサヘル・グリーンベルト研究会（1989,1990）によって存在が確認されたものである。実際には、より多くの「化石谷」が分布していると思われる。

3-4. 本モデル事業で実施した調査内容

3-4-1. 人工衛星画像・空中写真による検討

広い地域の自然条件（地形・地質・地表水・植生等）を調査する場合には、人工衛星画像や空中写真を用いることが有効である。特に、アフリカのように平坦な地形が発達し、精密な地形図も少ない地域での調査には、人工衛星画像や空中写真が不可欠である。

本モデル事業においても、地下ダム適地の抽出のため、人工衛星画像と空中写真の判読を行った。

(1) 地下ダム適地として着眼した地形；

人工衛星画像及び空中写真の判読に当たり、次の地形に着眼した。

- ① 「化石谷」が埋没している可能性がある地形： 河川（多くが季節河川）の流量に比べて不釣り合いに広い規模の氾濫原が発達し、かつ氾濫原の全体的形状が河川の形状に類似している地形。（図 3.3 参照）
- ② 環状地形： 山稜が環状に連なり、その一部が削剥された形状を呈する地形。火山岩分布域に発達する地形で、内側に降った降水が地下水として削剥部に集中している可能性がある。
- ③ ボトルネック型地形： 基盤岩の狭搾部が未固結堆積物層に覆われ、伏流水が存在する可能性がある箇所。

(2) 判読作業の手順；

まず、ブルキナ・ファソ国中部～北部地域をカバーする人工衛星 LANDSAT の TM 画像（Thematic Mapper）データを入手し、これから縮尺 1/500,000 及び 1/200,000 のフォルスカラー写真を作成した。この衛星画像の判読により、地下ダム建設に適した地形・地質構造である可能性がある地域として、13 地域を抽出した。

次に、この 13 地域を対象に広域的な現地踏査を実施した。広域踏査の結果、次のような問題が認められた地域を除外し、6 地域に絞った。

- ・ 地下構造の推定が困難、または地下構造の規模が過大な地域
- ・ 首都ワガドゥグからのアクセスが困難な地域
- ・ 既存プロジェクトが多くある地域

さらに、広域踏査によって絞った 6 地域について、それぞれの地域をカバーする空中写真（縮尺 1/20,000～1/50,000 の白黒空中写真）を入手して、詳細な地形判読図を作成し、5 地域を抽出した。

なお、LANDSAT 画像は解像度が粗いため、これから判読・抽出される地形・地質構造は規模が過大になる傾向がある。したがって、限定された地域の判読には、空中写真を使用することが適切である。

(3) 地下ダム建設候補地選定結果；

下表に、人工衛星画像・空中写真判読及び広域踏査による地下ダム建設候補地の選定結果を示す。

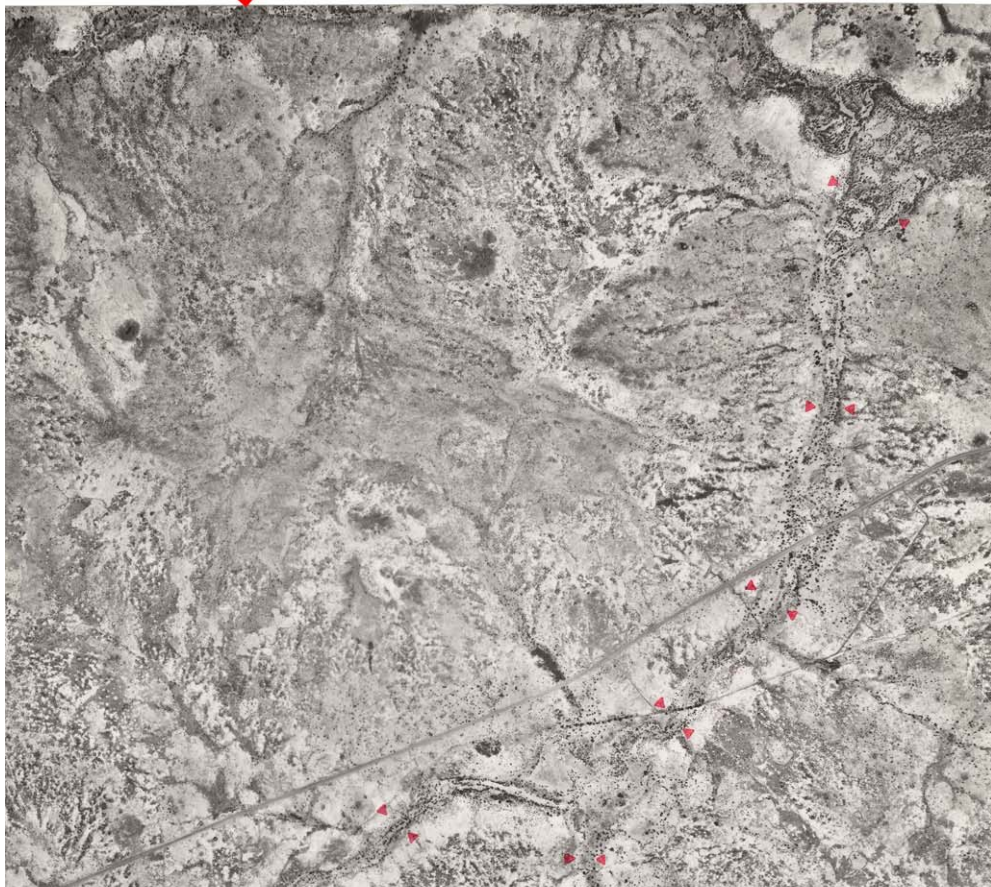
表 3.1 人工衛星画像・空中写真判読及び広域踏査による地下ダム候補地の選定結果

LANDSAT 画像判読により抽出された地域			広域踏査結果 (捨象の理由)	空中写真判読結果 (捨象の理由)
県 名	地 域 名	着眼点		
Oudalan	Saouga	化石谷	可能性あり	可能性あり
Seno	Dori 北方	化石谷	NO (領域特定不可)	—
Seno	Yakouta	化石谷	NO (構造規模過大)	—
Seno	Gangaol	化石谷～ワジ	可能性あり	NO (流域面積が小さい)
Namentenga	Nare	化石谷	可能性あり	可能性あり
Sanmatenga	Kouloga	ボトルネック型	NO (未固結堆積物層が薄い可能性大)	—
Sanmatenga	Louda	環状地形	可能性あり	可能性あり
Sanmatenga	Bassneile	環状地形	可能性あり	可能性あり
Sanmatenga	Tangapore	ボトルネック型	可能性あり	可能性あり
Sanmatenga	Balou	ボトルネック型	NO (アクセス劣悪)	—
Sanmatenga	Santabe	ボトルネック型	NO (アクセス劣悪)	—
Bam	Loga 周辺	環状地形	NO (既存プロジェクト多)	—
Yatenga	Gongoure 北方	ボトルネック型	NO (アクセス劣悪)	—
Yatenga	Ban 北方	特殊理由*	NO (アクセス劣悪)	—

注： 森林絶滅の危機に瀕しており、当地への地下ダム建設を S.P.CONAGESE に要望されたため。



ナレ村周辺の人工衛星画像



ナレ村周辺の衛星写真



図 3.3 「化石谷」の人工衛星画像と空中写真

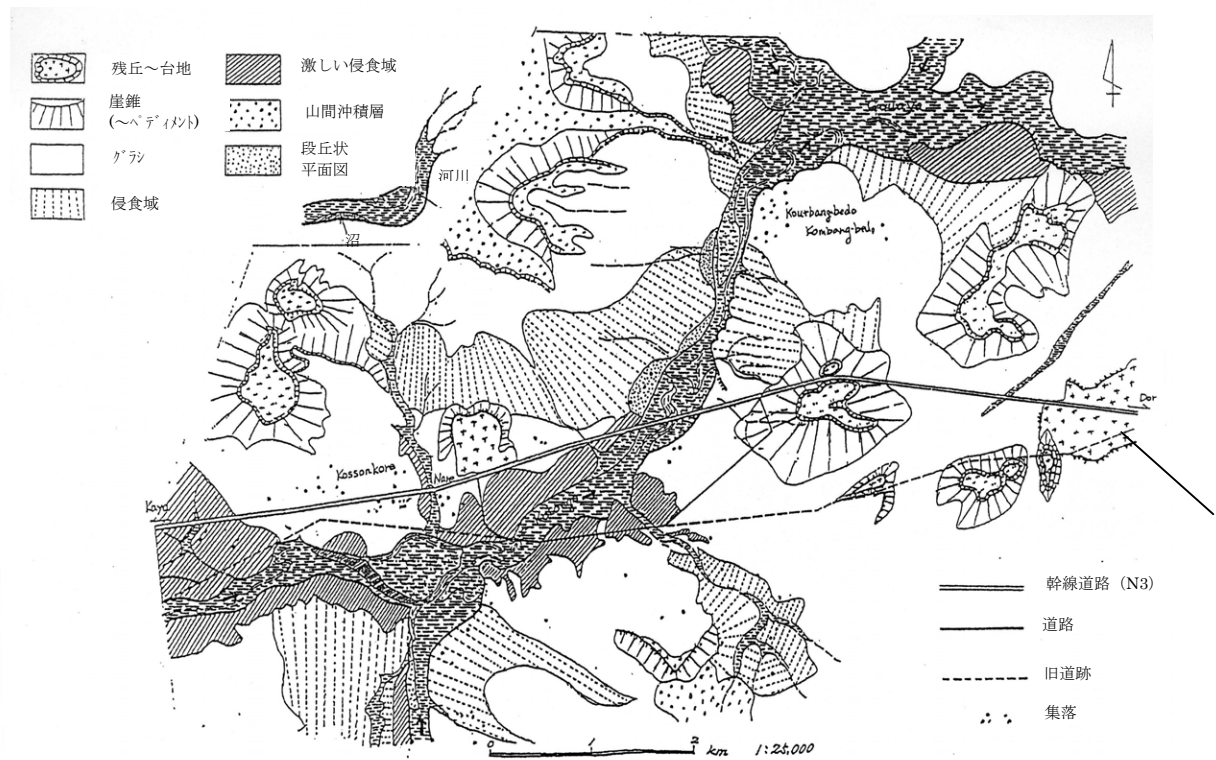


図 3.4 空中写真判読図の一例 (ナレ村周辺域)

3-4-2. 現地踏査

人工衛星画像・空中写真判読及び広域踏査によって選定された 5 地域を対象として、詳細な現地踏査を実施し、後述する電気探査の結果も参考にして（3-4-3 参照）、地下ダム建設の可能性について検討・評価した。

現地踏査においては、村落分布の把握とともに、以下のような調査を実施した。

(1) 地形・地質概況の把握；

現地の地形・地質概況を把握し、浅層地下水が賦存している可能性の高い箇所やその賦存構造等について推定した。

なお、この地形・地質調査においては、空中写真判読図が地図及び予察図として重要な役割を果たした。アフリカのように平坦な地形が発達する一方で詳細な地形図がない地域での現地調査においては、空中写真判読図または空中写真そのものの利用なしには、観察される現象の地形学的意味を理解できないばかりか、「現在地」の確認さえできないことが少なくない。

(2) 既存井戸の調査；

浅層地下水の賦存状況を把握するため、既存井戸において、下記の調査を行った。

なお、この調査においては、孔壁がコンクリート等で保護されていない「素掘り井戸」から最も多くの情報を得ることができた。

- ① 既存井戸の分布位置と地形・地質の確認
- ② 既存井戸における地下水位の測定
- ③ 住民からの聞き取りによる地下水位の季節変化の確認
- ④ 井戸内部及び掘削残土の観察や住民からの聞き取りによる帯水層及びその上位層の地質の確認

(3) 未固結堆積物分布域の確認；

浅層地下水の帯水層となる未固結堆積物の分布域の把握に努めた。なお、未固結堆積物の分布域を直接的に把握することが難しい場合には、基盤岩、特にラテライト性皮殻（lateritic crust）の露出状況を丹念に調査することにより、基盤岩の露出域を把握し、これから未固結堆積物の分布域を推定するという方法を取った。

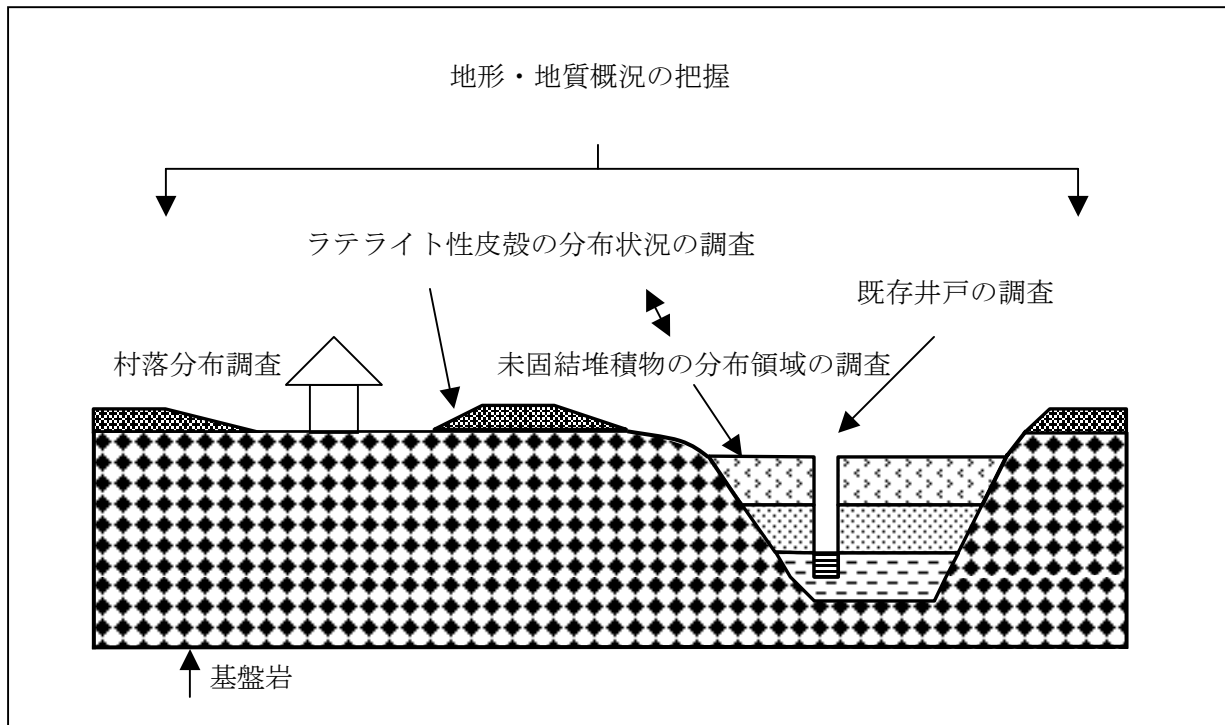


図 3.5 : 現地踏査における調査ポイント

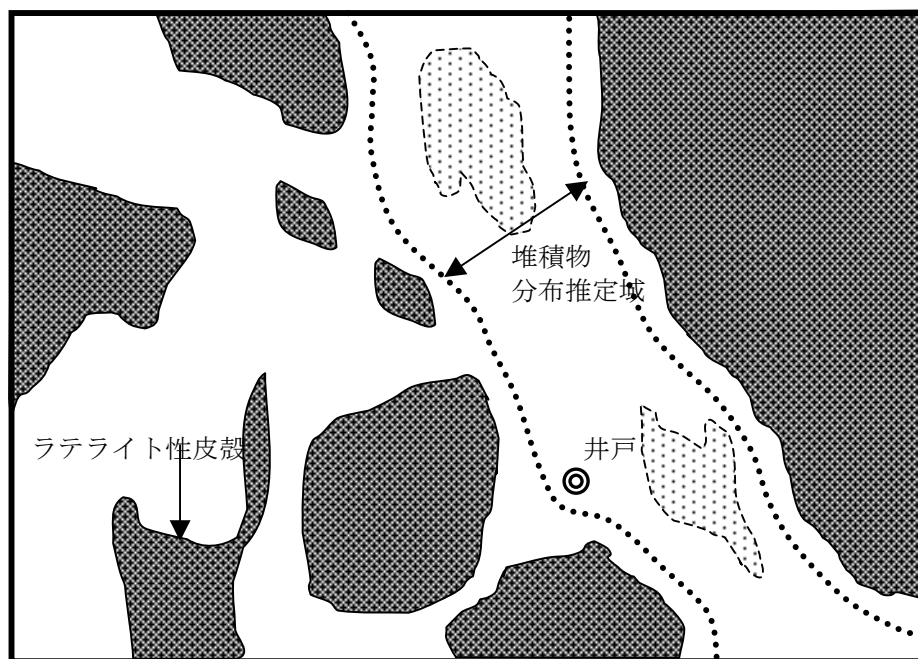


図 3.6 : ラテライト性皮殻分布域と未固結堆積物分布域の関係

3-4-3. 物理探査

人工衛星画像・空中写真の判読及び広域踏査によって選定された 5 地域において、現地踏査とともに、電気探査も実施し、地盤構造を推定した。

なお、磁気探査も行なった地域があるが（Tangapore 村、Nare 村）、結果は電気探査結果をより粗い精度で確認しただけであり、浅い深度の地下構造の解明のためには電気探査のほうが有効であった。

(1) 電気探査の方法；

電気探査はウェンナー法による垂直探査によって行ない、その解析結果から比抵抗断面図を作成し、地盤構造を検討した。本モデル事業で作成した比抵抗断面図の例を、図 3.7 に示す。

探査・解析に際しての留意点を以下に挙げる。

- ① 比抵抗断面図を作成するための調査測線（長さ約 150～500 m）を、推定される地下構造を横断する方向に設定し、約 50～100 m 間隔ごとに電気探査を実施した。すなわち、1 調査測線につき 3～10 箇所で電気探査を行なった。
- ② 各探査箇所における電気探査測線は、推定される地下構造の伸張方向に平行するように展開させた。
- ③ 調査測線（比抵抗断面図作成位置）はできる限り 2～3 測線とし、地盤構造を立体的に把握できるようにした。
- ④ 基盤岩が露出しているか、非常に浅い深度に基盤岩があることが確実な箇所まで調査測線を延ばすことにより、基盤岩（ラテライト性皮殻、強風化層、新鮮岩盤）の比抵抗値を把握した。この探査結果は、比抵抗断面図を地質学的に解釈する上で有効であった。
- ⑤ 既存井戸（特に「素掘り井戸」）があつて、地下水位の確認や地盤断面の観察が可能な場合には、井戸の近くでも電気探査を実施し、井戸の位置の地盤の比抵抗値の把握に努めた。このような比抵抗値は、比抵抗断面図の地質学的解釈の確実性を高める。

電気探査によって求められる地盤の「比抵抗」は、地盤を構成している土～岩石の電気的性質とともに、地盤内に含まれる地下水の電気的性質をも反映している。同一の土～岩石からなっている地層であっても、その含水状態が大きく異なっていれば、比抵抗値も著しく異なってくるため、比抵抗値だけによって土質～岩質を明確に特定することはできない。しかし、多くの地点での電気探査結果から作成される「比抵抗断面図」においては、ほぼ同値の比抵抗値を示すゾーンは、ほぼ同質・同含水比の地層の分布パターンとして解釈できることから、比抵抗値や比抵抗断面図は、地質構造や地下水賦存状態を推定する上で重要な手掛りとなる。

(2) 電気探査結果による地下ダム建設候補地の選別；

5 地域で実施した現地踏査及び電気探査の結果に基づき、各候補地域の地盤構造を検討した結果は以下のとおりである。

a. Saouga（Oudalan 県、Gorom Gorom 南方）；

浅層地下水の帯水層となっている「化石谷」が埋没している可能性が高い。しかしながら、実証試験実施箇所としては、工事規模が過大になる可能性がある。

b. Nare（Namentenga 県、Tougouri 南方）；

浅層地下水の帯水層となっている「化石谷」が埋没している可能性が高い。実証試験の規模としてはやや過大ではあるが、地下ダムの適地が見出された。

- c. Louda (Sanmatenga 県 Kaya 南方) ;
環状地形が形成されているが、有望な地下水帯水層は見出されなかった。
- d. Bassneil (Sanmatenga 県 Korsimoro 北方) ;
環状地形が形成されているが、地下ダム貯水層となる未固結堆積物層が非常に薄い可能性が高い。
- e. Tangapore/Kossoden (Sanmatenga 県 Korsimoro 北方) ;
環状構造の下流に位置する狭搾部であり、また、既存井戸の調査結果から浅層地下水の賦存が推定される。電気探査結果による比抵抗断面からも、実証試験の規模に適した「化石谷」が埋没していると推測され、地下ダム適地である可能性が高い。

以上の調査結果から、本事業の地下ダム建設候補地としてサンマテンガ県 (Sanmatenga) コルシモロ郡 (Korsimoro) タンガポーレ村 (Tangapore) とナメンテンガ県 (Namentenga) ツグリ郡 (Tougouri) ナレ村 (Nare) の 2 箇所が選定された。

なお、両地点について行った電気探査の数量は以下のとおりである。

- ・タンガポーレ： 4 調査測線、計 58 箇所
- ・ナレ： 6 調査測線、計 95 箇所

電気探査結果及び
近隣の井戸水位から推定される地下水位

OUGADOUGOU-KAYA 間の幹線道路

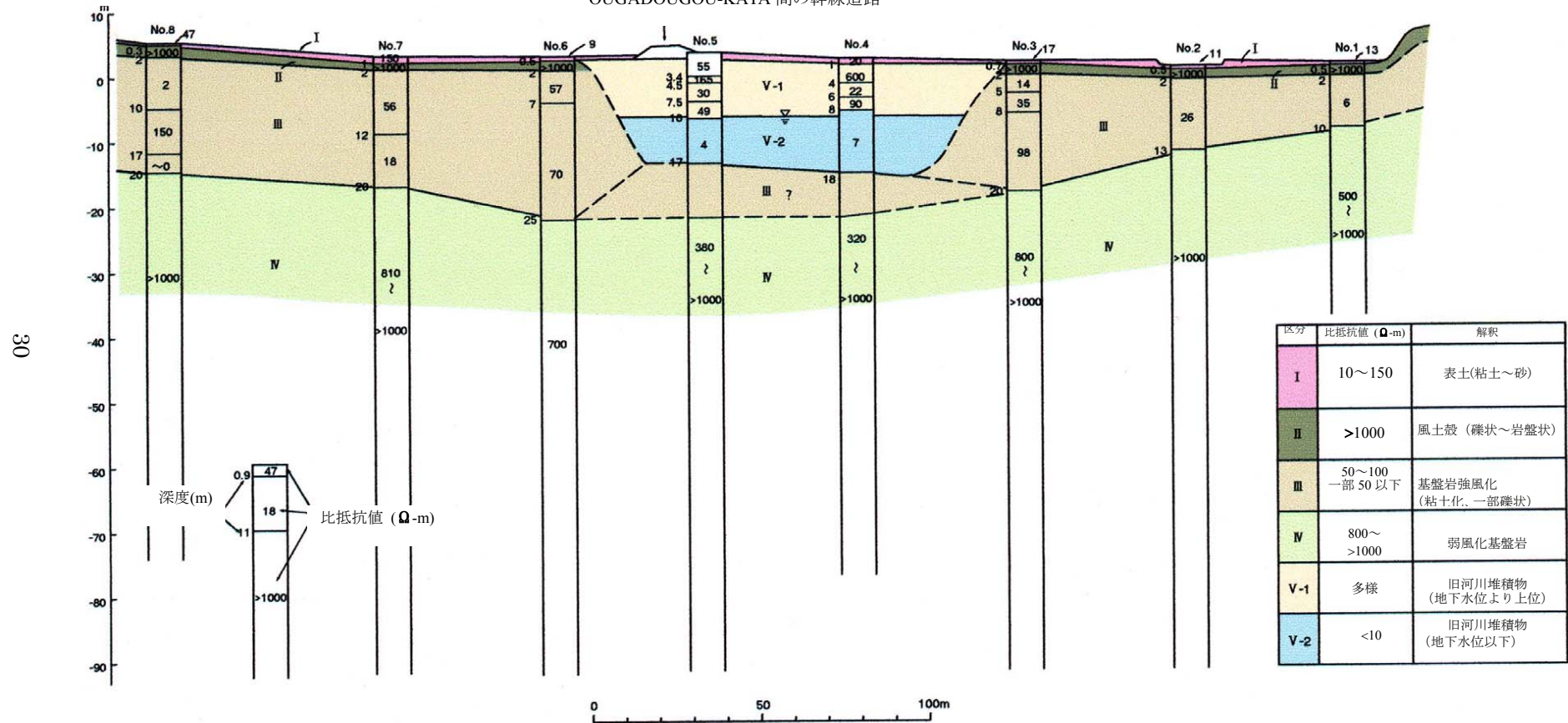


図 3.7-1: Korsimoro 北方-C 地点 (Tangapore)の電気探査結果

図 3.7 電気探査結果から作成した比抵抗断面

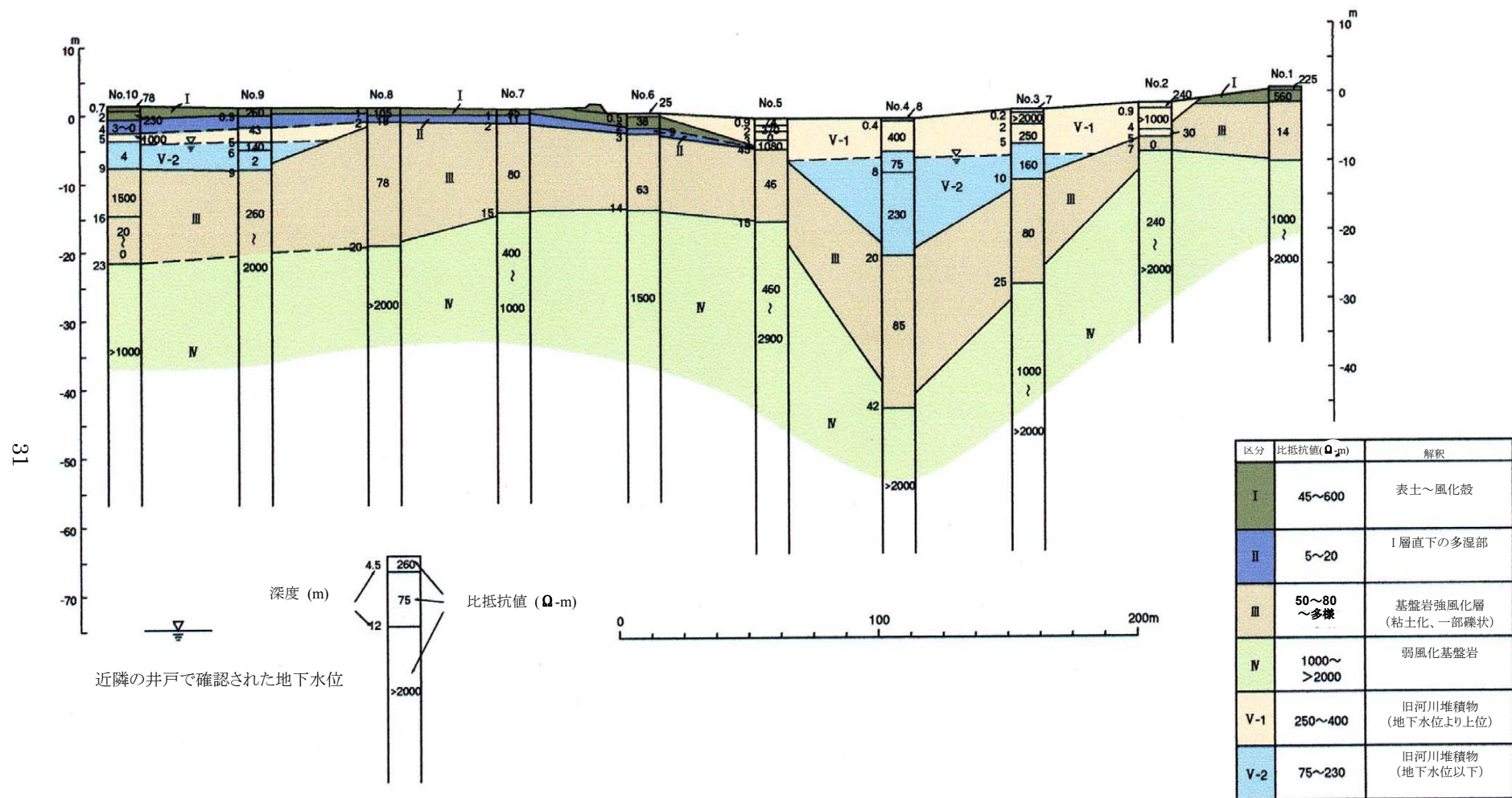


図. 3.7-2: Koulikare (Nare) 地点の電気探査結果

3-5. 現地詳細調査（調査ボーリング、透水試験、地下水位観測等）

現地踏査及び電気探査の結果に基づいて選定したタンガポーレ(Tangapore)とナレ(Nare)の2村落において、地盤構造の確認、水理特性の解明及び流域降水量の推定のため、以下の現地詳細調査を実施した。

- ・ 調査ボーリング
- ・ ボーリング孔における透水試験
- ・ ボーリング孔における地下水位観測

また、併せて、気象観測を開始するとともに（6-2 参照）、社会経済調査も実施した（3-6 参照）。

(1) 調査ボーリング；

電気探査結果から推定した地盤構造を確認するため、電気探査を行なった調査測線に沿って調査ボーリングを実施した。

本事業では深井戸掘削用の機械によってボーリング掘削を行い、掘削の過程で採取した掘削屑（スライム）から地質構造を判定した。しかしながら、これは容易ではなく、特に基盤岩の強風化部（粘土化部）と河川堆積物の粘土～シルト質層の識別が困難であった。調査ボーリングの半数程度は攪乱されていない試料を採取できる地質調査用試錐機を使用して地質構造を確認することが望ましい。

調査ボーリングの数量は以下のとおりである。

- ・ タンガポーレ： 深度 60 m×3 孔、深度 20 m× 3 孔
- ・ ナレ： 深度 60 m×2 孔、深度 20 m×19 孔

(2) ボーリング孔における透水試験；

地盤の透水性を調査するために、調査ボーリング孔において透水試験を実施した。

透水試験では、ボーリング孔に給水車またはポリタンクから水を注入して水位の低下速度を測定し、深度に応じた地盤の透水係数を求めた。

透水試験の数量は以下のとおりである。

- ・ タンガポーレ： 3 孔
- ・ ナレ： 12 孔

(3) ボーリング孔における地下水位観測；

地下水位の季節変化を把握するために、調査ボーリング孔を観測井として、地下水位観測を行った（タンガポーレ：3 孔、ナレ：5 孔）。

タンガポーレでは不定期的にマニュアル式水位計によって測定したが、ナレでは自記水位計により継続的に測定した。

地下水位観測を行ったのは地下ダム建設位置を決定するまでの約半年間（雨季最盛期～乾季前半）であったが、浅層地下水の水位は季節変化のみならず年変化も激しいため、より長期間にわたる観測が望ましい。また、6-4 で後述するように、「宙水」の水位を地下水位と誤認する可能性もあり、地下水位の観測方法には十分注意する必要がある。

これらの調査ボーリング、透水試験及び地下水位観測の結果から、タンガポーレ及びナレの地下ダム建設候補地の水理地質特性は以下のように判断された。（図 3.8、図 3.9 参照）

タンガポーレ地点（Tangapore）；

電気探査結果からは埋没した「化石谷」の存在が推定されたが、調査ボーリングの結果、「化石谷堆積物」（河川堆積物）は確認できなかった。推定された「化石谷」の内部と外部とで、地質の差異は認められず、また、地下水位はほぼ同じレベルにあり、水位の季節変化も

ほぼ同時期に生じている。すなわち、電気探査結果から推定された「化石谷」の内部と外部は、地質的に明瞭な差異がなく、水理的にもほぼ連続している。よって、「化石谷」は存在しないと判断された。

「化石谷」が埋没しているような電気探査結果となったのは、基盤岩中に大規模な破碎帯が存在しているためと思われる。

ナレ地点 (Nare) ;

既存井戸の掘削残土の観察、電気探査、調査ボーリングのいずれの結果からも、当地域のコロンゴ川 (Kolongo) の地下に「化石谷」が埋没していることが確認できた。透水試験結果でも、「化石谷」内部の透水係数が $10^{-3} \sim 10^{-4}$ cm/sec であるのに対し、「化石谷」谷壁部の透水係数は $10^{-5} \sim 10^{-6}$ cm/sec となっており、透水性のよい「化石谷堆積物」が難透水性の基盤岩に囲まれた地質構造となっていることが明らかとなった。また、「化石谷」が埋没する箇所では地下水が確認されたが、「化石谷」の外部では地下水が認められず、「化石谷」が地下水の流路となっていると推定された。

さらに、「化石谷」内部における地下水位の観測結果によれば、雨季と乾季とで地下水位の季節変化が認められ、地下水の流動性も高いと推測された。

現地詳細調査の結果を模式的に表した図が、図 3.8 及び図 3.9 である。

なお、「化石谷」が狭くなり地下ダム建設適地と推定される箇所は、コロンゴ川 (Kolongo) が本流のグワヤ川 (Gouaya) に流入するすぐ手前であることから、地下ダムを建設しても、「下流域での地下水の枯渇」という問題が生じる可能性は小さいと考えられた。

以上の調査結果により、水理地質的に地下ダム建設の適地であるのはナレ村と評価された。

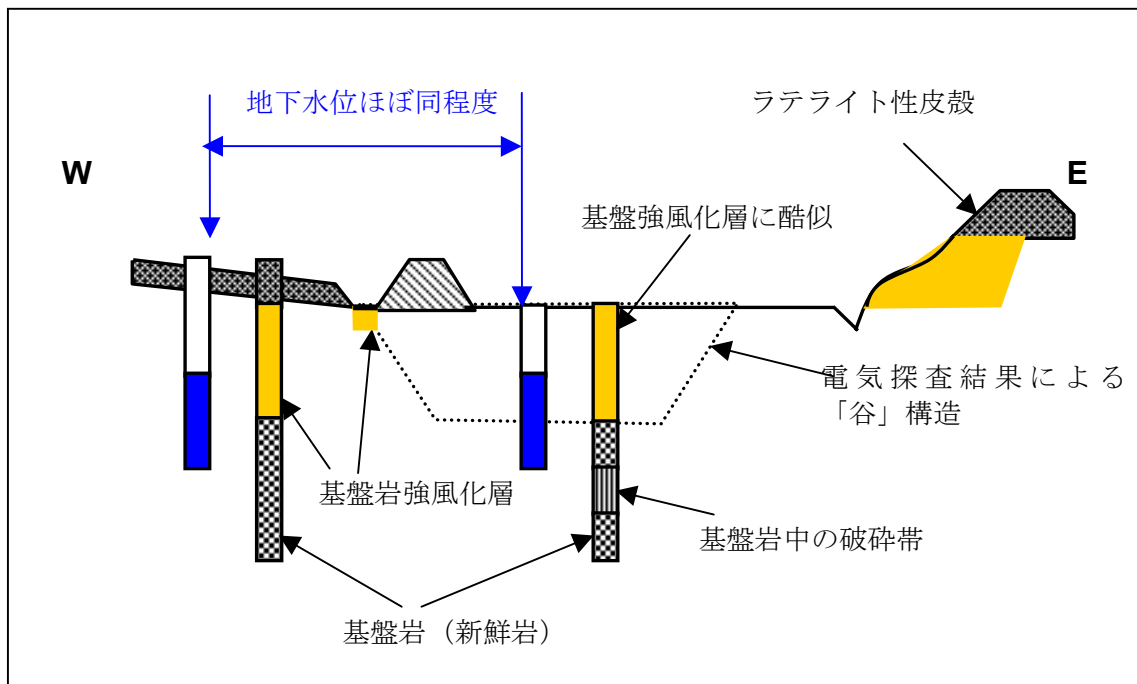


図 3.8 タンガポーレ村における現地詳細調査結果の模式図

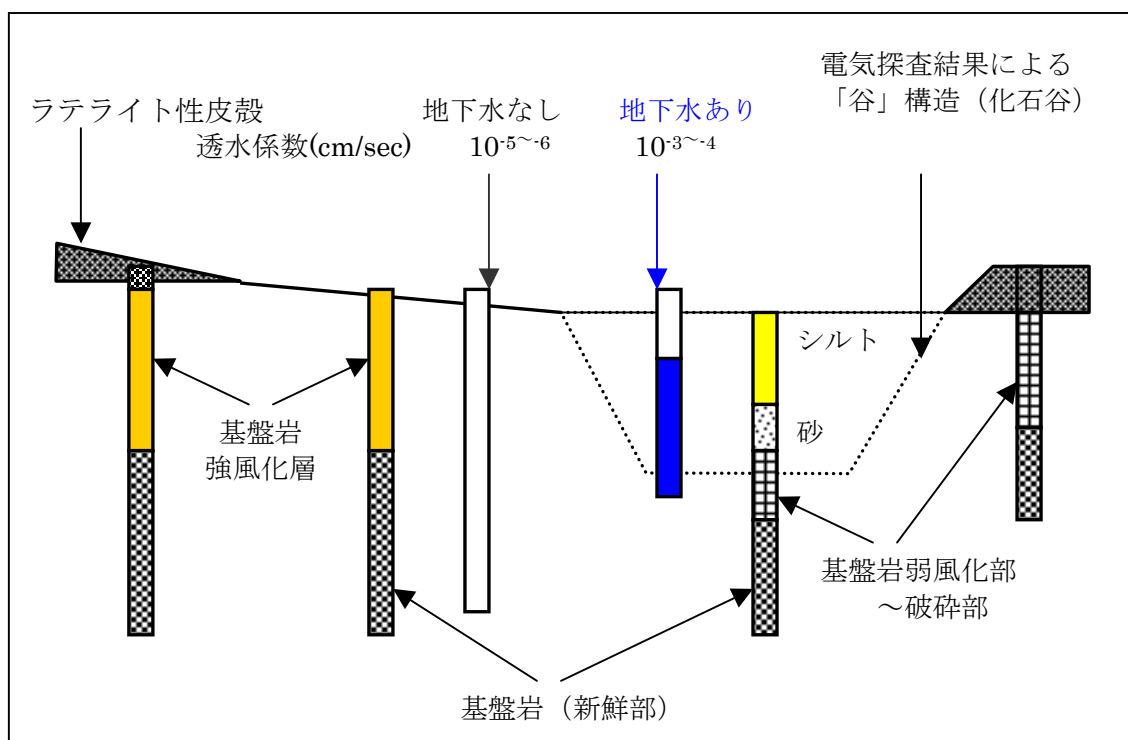


図 3.9 ナレ村における現地詳細調査結果の模式図

3-6. 社会経済調査

地下ダム建設位置選定のための現地調査において、タンガポーレ村（Tangapore）とナレ村（Nare）にて社会経済調査も実施した。

以下、両村落における社会経済調査の結果概要を示す。

タンガポーレ村（Tangapore）；

- ・ 人口 2,079 人、全住民がモシ族である。
- ・ 村内に小学校 1 校（1995 年開校）。診療所はない。
- ・ 村内の産業は主として農業、副次的に牧畜。市場（Korsimoro）での商活動も盛んである。
- ・ 主な疾病は髄膜炎、眼病、頭痛、腫瘍、下痢など。
- ・ 1995 年までの平均年降水量は約 660 mm。

村落は低い山地と準平原の移行部にあり、準平原部はもとより、山地の緩斜面まで耕地化されていて、農地は限界近くまで開発されている。化学肥料が一部で用いられていることもあり、食糧自給率は 90%以上と推測される。しかし、新たな農地開発の余地がなく、土地劣化が進行しているため、近い将来、人口増加に伴って深刻な食糧不足が生じる可能性がある。このため、土地生産性を高めることが重要であり、そのためには新たな水資源の開発が重要な「鍵」になると評価された。

副次的に行なわれている牧畜は、干ばつ等非常時用の「貯蓄」としての役割を担っているが、牧草地が少ないことと及び乾季に家畜用の水が不足することが問題となっている。

村内にはハンドポンプが 3 基、掘抜き井戸が 6 基、小規模ダムが 1 箇所、溜池が 6 箇所あるが、生活用水は需要量（1 人当り約 20 リットル）の約 70%しか給水されていないと推定された。また、家畜が使用する小規模ダムや溜池の水が生活用水としても利用されているため、水因性の疾病が少なくない。このように、生活用水を改善する上でも、新たな水資源開発が必要とされている。

タンガポーレ村の若者の中には農業の近代化を試みているグループがあり、堆肥製造や野菜栽培を手がけている。また、小学校では植樹教育が行われている。「水不足」がこれらの活動を妨げているが、このように住民の間に意欲・経験・認識があることは、地下水資源の有効利用を柱とする本事業への住民参加を促進する上で、有利な条件になると思われた。

ナレ村（Nare）；

- ・ 人口 2,896 人、住民の多くがモシ族であるが、フラニ族も居住。
- ・ 村内に小学校 1 校（1996 年開校）。診療所はない。
- ・ 村内の産業は主として農業、副次的に牧畜（フラニ族の場合は牧畜が主）。
- ・ 主な疾病はギニアウォーム、眼病、赤痢、髄膜炎など。
- ・ 1995 年までの平均年降水量は約 590 mm。

一部に小規模な「残丘」があるが、全体的に準平原が発達しており、村内をニジェール河水系グワヤ川（Gouaya）の支流コロongo川（Kolongo）が流れている。ただし、この河川は雨季にしか流水のない「季節河川」である。

準平原やコロongo川沿いの低地（一部氾濫原）は農地として開発されているが、農地面積は当地域の約 12%に過ぎず、農地開発の余地は残されている。森林面積は約 2%しかない。また、当地の約 20%を占める裸地の多くはかつての耕作地であったとのことであり、ブッシュ～森林の伐開・農地化による土地劣化が進行しつつあると推察される。

農地は全般にやせており、化学肥料や堆肥はほとんど使用されていないこともあって、ナレ村における食糧自給率は 60%程度（あるいはそれ以下）と推察され、ブルキナ・ファソ国の中でも最も貧しい村落の一つとなっている。家畜（特に牛）が多数見られるが、その多く

は牧畜民であるフラニ族が飼育しているものであり、干ばつ等非常時用の「貯蓄」となるだけの家畜を飼育しているモシ族は少ない。

ナレ村（コンバンベド村（Kombangbedo）を含む）に近代的給水施設は少なく、ハンドポンプが 1 基、コンクリート枠付き掘抜き井戸が 5 基のみである。これらによる給水量は需要量の 60%以下と推測された。多くの住民が、雨季には河川水から、乾季には氾濫原に掘削した素掘り井戸から生活用水を得ている。そのため、ギニアウォーム等の水因性疾病が多く生じていた。食糧不足への対処と現金収入を得るために野菜栽培を希望する住民が多いが、生活用水さえ満足に得られない状態にあるため、実際に野菜栽培を行っていたのは 1 家族のみであった。

このような背景から、ナレ村住民は新たな水資源開発を強く希望していた。しかしながら、生活改善や村落開発に必要な情報を持っておらず、本モデル事業への住民参加には困難が予想された。

以上のような両村の社会経済調査の結果からは、タンガポーレ村のほうが本モデル事業の受け入れ素地は整っていると思われた。

しかし、3・5 で述べたように、地下ダム建設に適した水理地質構造を有するのはナレ村であった。本事業ではモデル事業として地下ダム建設の可能性を重視する必要があるため、ナレ村を事業実施箇所とすることに決定した。

4. 地下ダムの建設

4-1. 地下ダム建設工法の種類

表 4.1 に、地下ダム建設工法を列挙する。

日本等では既にいくつかの地下ダムが建設されてきているが、多く用いられているのは「地中連続壁工法（例えば原位置混合攪拌工法）による止水壁工法」である。原理的に「地下ダム」は「止水壁」を地下水の貯留に利用したものであり、現地に適応した止水壁工法によって地下ダムを建設することができる。

表 4.1： 地下ダム建設工法の種類

大区分	建設工法の種類	工法・構造	特 徴
地中止水壁工法の転用	鋼矢板壁	鋼矢板の連続打設	軟弱地盤に適しているが、礫質層や基盤岩への打設は困難。
	鋼管矢板壁	鋼管矢板の連続打設	
	地下連続壁	場所打ちの鉄筋コンクリート壁	地盤条件に応じて多様な工法があるが、いずれも高度な施工機器を必要とする。
	柱列式地下連続壁	場所打ちモルタル杭を連続させた壁	日本の宮古島の地下ダム建設で採用された工法。高度な施工機器を必要とする。
地盤改良工法の転用	グラウティング工法	断続的に掘削したボーリング孔から地盤中にモルタルを注入	宮古島の地下ダム建設でも併用された。中～小型機器を使え、適用性は広いが、遮水効果の確認がやや困難。
一般のダム建設工法の転用	コンクリートダム式工法	コンクリート製ダムを地下～半地下に構築する構造（掘削→堤体構築→埋め戻し）	堤体上部が地上に露出するような「砂防ダム式地下ダム」に適している（Kenya などに実例あり）。工事費は「アースダム式地下ダム」よりも高価となる。ただし、漏水対策が必要。また、深い掘削は工事費が過大になる。
	アースダム式工法	土製ダム（土堰堤）を地下に構築する構造	本事業で採用した工法。一般の土木工事用機器によって建設でき、施工管理も容易。ただし、漏水対策が必要。また、深い掘削は工事費が過大になる。

本事業によるナレ村での地下ダム建設は、以下の理由から、表 4.1 最下段の「アースダム式工法」を採用した。

- ① 「化石谷」の埋没深度が浅く（約 8 m）、乾季には地下水流がほとんどないことから、この工法の適用が可能と判断されたこと
- ② 高度な土木工事機器を必要とせず、ブルキナ・ファソで入手可能な機材によって建設できること
- ③ 施工機器の輸送料・使用料を含めた工事経費が最も安価であること

4-2. ナレ村に建設した地下ダムの諸元

以下、本モデル事業によってナレ村に建設した地下ダムの諸元を示す。

(1) 地下ダムの建設場所；

ブルキナ・ファソ国ナメンテンガ県ツグリ郡ナレ村クリカレ地区の「化石谷」内
 (Quartier de Kourkare, Village de Nare, Arrondissement de Tougouri,
 Province de Namentenga, Burkina Fao.)

(2) 地下ダム堤体の構造；

「アースダム式地下ダム」(図 4.1 参照)

- ・ 堤体構築深度： 深度 3.0 m～最深 11.4 m (最大堤高、8.4 m)
- ・ 堤体 (堤頂) の長さ： 216.3 m
- ・ 堤体の幅 (厚さ)： 堤体底部での幅 8.6 m、堤頂の幅 3.0 m
- ・ 堤体の体積： 7,144 m³
- ・ 堤体材料： 粘土質シルト (基盤岩強風化層)
- ・ 堤体の透水係数： $10^{-7} \sim 10^{-8}$ cm/sec (ごく一部で 10^{-6} cm/sec)。

堤体底部の上流側には、堤体底部を保護するために、幅約 3～4 m、深さ約 1.5 m の「キー」 (基盤岩中に食込ませる突起状の盛土) を設けた。また、堤体頂部の直上の水準線には、透水性を良くするために、粒径がほぼ同じ大きさの礫を約 1 m の厚さで敷いた。

(3) 地下ダムの水源；

ニジェール河水系グアヤ川 (Gouaya) 支流のコロンゴ川 (Kolongo) 流域に埋没する「化石谷」内の浅層地下水

(4) 貯水規模；

- ・ 最大貯水領域： 長さ約 13.4 km、平均幅約 150 m (最小推定値)、面積約 2 km²
- ・ 貯水層の容積： 約 9,000,000 m³ (推定値)
- ・ 最大貯水量： 約 1,800,000 m³ (推定値)

(5) 工事量；

- ・ 掘削量： 土砂掘削 51,213 m³、岩盤掘削 4,377 m³、計 55,590 m³
- ・ 高密度盛土 (ダム堤体)： 7,144 m³
- ・ 中密度盛土 (堤体の前後の埋戻し)： 26,662 m³
- ・ 低密度盛土 (堤体上方の埋戻し)： 21,814 m³

(6) 使用機器；

- ・ ブルドーザー： 2～3 台
- ・ バックホー： 1～2 台 (パワーシャベル)
- ・ トラック： 2～3 台 (ダンプカー)
- ・ 転圧機： 1～2 台 (コマツ JV100)

(7) 施工期間；

1997 年 11 月 15 日～1998 年 6 月末

ただし、上記の施工期間中に他の実証試験施設も建設しており、地下ダム建設自体に要した期間は約 4.5 ヶ月であった。

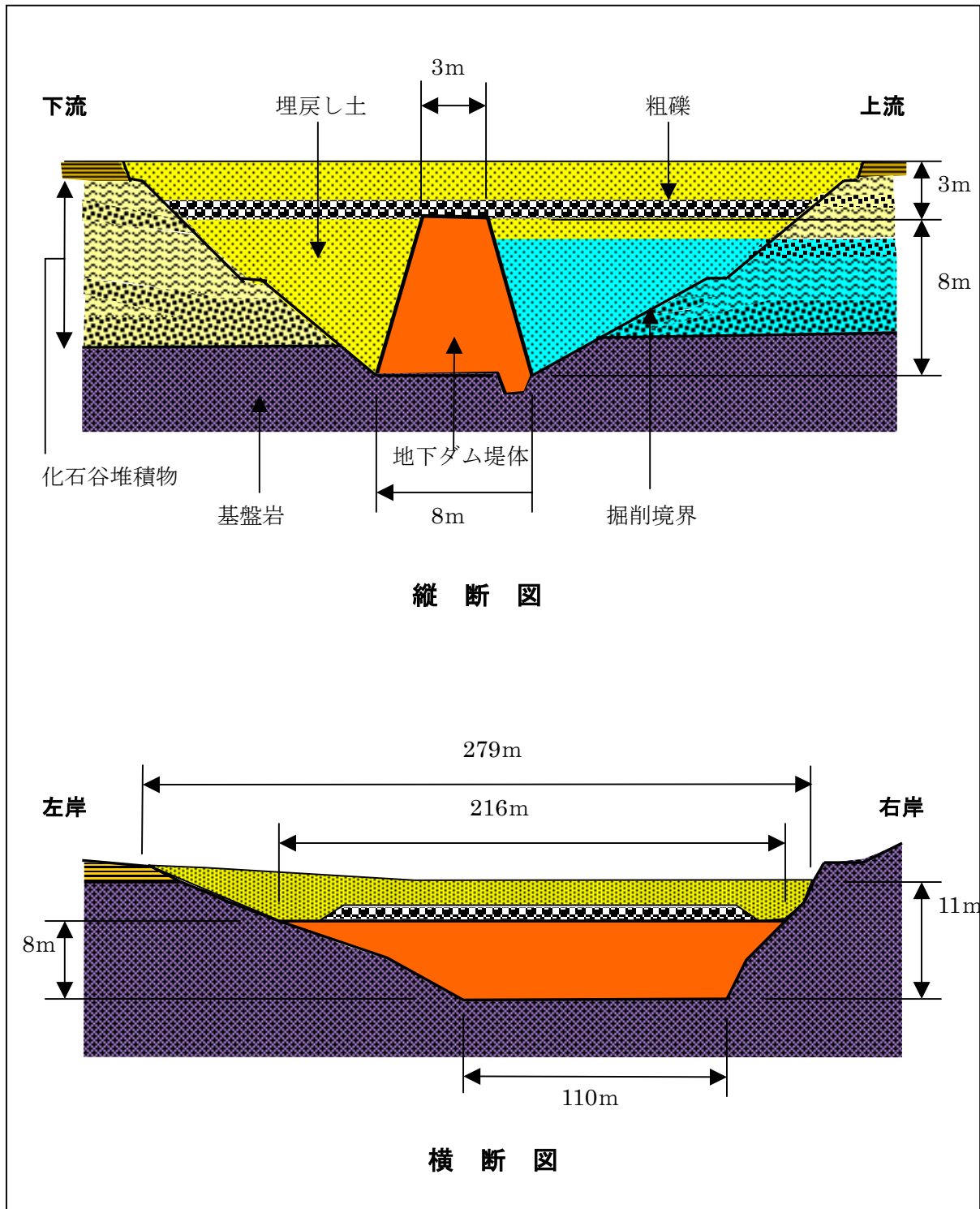


図 4.1 : 地下ダムの構造概略図

4-3 地下ダム建設工事の概要

(1) 掘削工事；

地下ダム堤体の規模（長さ、幅、深度）よりも大幅に領域を拡げて掘削する必要がある。
また、工事中道路のための掘削も必要である。

ナレ村の地下ダムの場合、次の掘削規模になった。

- ・ 掘削領域の長さ： 307.1 m（工事中道路のための掘削部分を含む）
- ・ 掘削領域の幅： 最大 50 m
- ・ 掘削深度： 最大 12.9 m
- ・ 掘削総量： 55,590 m³

掘削総量は、地下ダム堤体の体積の 7.8 倍であった。

この掘削工事においては、次のような問題に対処しなければならなかった。

- ① 掘削工事は「化石谷」内の地下水が減少する乾季に行ったが、「化石谷堆積物」の中位の砂質層や基盤岩との境界部から湧水が生じ、対処に苦慮した。地下ダム建設は浅層地下水の流路に建設されるため、工事中にこのような湧水が生じる可能性は高く、施工時期、施工方法に十分配慮する必要がある。
- ② 「化石谷」の埋没構造は、掘削工事の結果、右岸側は事前調査の推定どおりであったが、左岸側は事前調査で推定していた位置よりも外側まで「化石谷」が広がっていることが明らかとなった。一般に、必ずしも事前調査は完全とは限らないため、施工管理に経験豊富な地質技術者が加わることが重要である。

(2) 堤体の構築；

地下ダムの堤体材料には、建設位置から約 300 m 離れた箇所の基盤岩風化層（粘土質シルト）を使用した。

堤体構築工事に先立ち、堤体材料を用いて盛土・転圧方法の試験を行い、以下の盛土の品質管理基準を作成した。

- ・ 1 回の盛土巻き出し厚： 30 cm
- ・ 1 回の盛土仕上がり厚： 25 cm
- ・ 盛土転圧回数： コマツ JV100 転圧機を使用して 6 往復
- ・ 盛土前含水比： 最適含水比 $\pm 1\%$
- ・ 施工後の盛土の乾燥密度： 最大乾燥密度の 90% 以上
- ・ 盛土後の盛土の透水係数： 10^{-5} cm/sec 以下

「化石谷」の基盤岩まで掘削した後、上記の品質管理基準に基づいて堤体の盛土工事を行った。この盛土工事の過程で以下の品質試験を実施した。

- ・ 盛土材料の含水比試験： 52 層、計 130 点
- ・ 盛土の乾燥密度試験： 52 層、計 130 点
- ・ 盛土の透水係数測定： 12 層、計 38 点

盛土の品質試験結果は良好であり、全て管理基準に合格した。盛土の透水係数は、基準値を十分に満足する $10^{-7} \sim 10^{-8}$ cm/sec（38 試験中 2 点のみ 10^{-6} cm/sec）のオーダーとなった。

なお、漏水を防ぐため、地下ダムの堤体の裾や底部は、「化石谷」の基盤岩に食込ませて構築する必要がある。

ところで、上述のように、堤体材料には地下ダム建設位置から約 300 m 離れた場所の基盤岩風化層（粘土質シルト）を用いた。しかし、建設位置の掘削土（化石谷堆積物）も、堤体材料として使用できた可能性がある。地下ダム建設位置の掘削土を堤体材料として使用すれば、地下ダム建設によって「荒らされる土地」を減らすことができる。今後の「アースダム式地下ダム」の建設に際しては、このような観点からも、地下ダム建設位置の地盤性状を詳

細に調査することが望ましい。

(3) 掘削土の埋戻し；

地下ダム堤体の構築と並行して、堤体の前後へ掘削土の埋戻しを行なった。埋戻し部分もコマツ JV100 転圧機で転圧を行なったが、転圧回数は 3 往復とした。

堤体頂部の水準まで埋戻した後、透水性を良くするため、粒径がほぼ同じ大きさの礫を約 1 m の厚さで敷いた。その後、再び掘削土の埋戻しを行った（転圧回数は 3 往復）。

堤体材料を他の場所から採取したため、埋戻し後、堤体の体積にほぼ等しい掘削土が残ったが、この残土は堤体材料採取場所の埋戻しに使用した。

(4) 施工後の処理；

埋戻し工事の完了後、工事跡の地形はほぼ工事前の状態に復旧されたが、自然植生の復旧が遅く、工事後約 2 年間は裸地状態となっていた。家畜による食害の可能性があったため、2001 年（平成 13 年度）、工事跡地に金網フェンスを設置し、この中にアカシア・セネガルを植樹した。活着率は約 60%であったが（2002 年 1 月時点）、自然植生も多数生育し、工事跡地は低木林の状況を呈している。

写真 4.1 : 地下ダム建設工事 (1)



写真 4.2 : 地下ダム建設工事 (2)



写真 4.3 : 地下ダム建設工事 (3)



写真 4.4 : 地下ダム建設工事 (4)



5. ナレ村における「化石谷」の構造

ナレ村の地下ダム建設のための掘削工事によって「化石谷」の全断面が露出し、その詳細構造を観察することができた。「化石谷」は、西アフリカ、特にニジェール河流域に多く分布していることが知られている。その一部では調査ボーリングが行なわれたこともあるが、全面的な掘削により「化石谷」の構造が直接的に解明されたのは、本事業が最初と思われる。

以下、地下ダム建設箇所の「化石谷」の構造について、概要を報告する。また、図 5.1 に、この「化石谷」の地質断面図を示す。

(1) 「化石谷」の形状；

確認された「化石谷」の幅は、底部で約 130 m、兩岸の「谷壁」の肩部で約 180 m である。その谷底は平坦ではなく、緩やかな「W字」状に波打っている。最も深い箇所の深度は約 8.3 ~ 8.5 m、中央付近の浅い箇所の深度は約 5.9 m である。

右岸側の「谷壁」の勾配は約 30 度と比較的急であるのに対し、左岸側の「谷壁」の勾配は約 9 ~ 10 度であった。

この「化石谷」は、現在のコロongo川 (Kolongo) に沿って埋没しているものと推察される。

(2) 「化石谷堆積物」の特徴；

「化石谷」の内部を埋める堆積物（化石谷堆積物）は、おおむね以下のように区分される。

① 現在の氾濫原堆積物；

最上部の地層で、現在の河川が氾濫した際の堆積物と考えられる。粘土・砂・有機質土などから成り、層厚は全般に約 0.3 ~ 0.7 m である。場所によっては下位の「化石谷堆積物」が地表に露出していることもある。

② 化石谷堆積物上部層；

氾濫原堆積物の下位、深度約 4 ~ 5.5 m までの粘土 ~ シルト質の堆積物群を指す。この中に層厚約 0.5 ~ 1 m の帯状 ~ レンズ状の砂質層を挟んでいる。地下ダム建設工事の際にはこの砂質層から多量の湧水があり、一時的に掘削工事に支障をもたらした。

③ 化石谷堆積物下部層；

深度約 4 ~ 5.5 m から「化石谷」の底面（一部を除く）までの堆積物群で、砂層・細礫層・シルト層・亜炭層などから成る。これらの層の境界は比較的明瞭であるが、それぞれが指交状 ~ 塊状の構造を呈している。砂層には偽層（斜交層理）が発達する部分も見られる。細礫 ~ 粗砂の大部分は、ラテライト性皮殻の魚卵状結核の起源であると推測される。

この「化石谷堆積物下部層」の中に、「上部層」に区分されるシルト質層や砂質層が指交状に入り込んでいる箇所があり、「上部層」と「下部層」の区分は厳密なものではない。

④ 化石谷堆積物基底層；

「化石谷堆積物下部層」と基盤岩との間に硬質のシルト岩層が挟まれている箇所がある。このシルト岩層は、「化石谷堆積物下部層」とは明瞭な不整合関係にあること、化石谷堆積物が未固結 ~ 半固結状であるのに対して「岩石化」が進んでいることなどから、「化石谷堆積物下部層」よりも明らかに古い時期に形成された「化石谷堆積物」と判断される。

さらに、1 個のみであるが、この「化石谷堆積物基底層」（シルト岩層）の底部に亜角礫が見出された。これは、旧河川の激しい侵食活動により「化石谷」が形成された時期の河床堆積物の残滓である可能性が高い。

⑤ 基盤岩；

「化石谷」の底部や側壁は、花崗岩、閃緑岩、角閃岩、弱変成堆積岩などが混在し

た混成岩状を呈する基盤岩（古期岩石）から成っている。「化石谷」の右岸側の基盤岩の上部には、硬質のラテライト性皮殻が約 3 m の厚さで発達している。

「化石谷」底部の基盤岩には、「化石谷」の伸張方向と緩やかに斜交した走向をもつ断層（幅約 0.5 m の粘土化帯）が見出された。この周囲の基盤岩にも、破碎された部分や、粘土化が進んだ部分が認められた。

(3) 「化石谷堆積物」構成層における水理特性の差異；

上述した「化石谷堆積物上部層」に含まれる砂質層や、「化石谷堆積物下部層」を構成する砂質層は、透水係数が $10^{-2} \sim 10^{-4}$ cm/sec と推定される。一方、シルト質層、膠結した砂層、亜炭層などの透水性は低く、透水係数が $10^{-6} \sim 10^{-7}$ cm/sec と推定される。

地下ダム建設のための掘削工事の際、「化石谷堆積物」中に「宙水」（地下水「本体」より上部にレンズ状に溜まっている地下水）が見出され、ここから多量の湧水が生じた。このような「宙水」が形成されているのは、「化石谷堆積物」を構成している層の透水係数が上述のように著しく異なっているためと思われる。

また、「化石谷堆積物上部層」（シルト質層）と「下部層」（砂質層）の境界が明瞭な部分では、この境界面に幅が約 0.5～3 cm の「空隙」が形成されていた。「空隙」の上面には「水あか」が厚く付着しており、この「空隙」が長期間にわたって地下水の流路になっていたことが推測される。

図 5.1： 地下ダム建設位置の「化石谷」の地質断面図

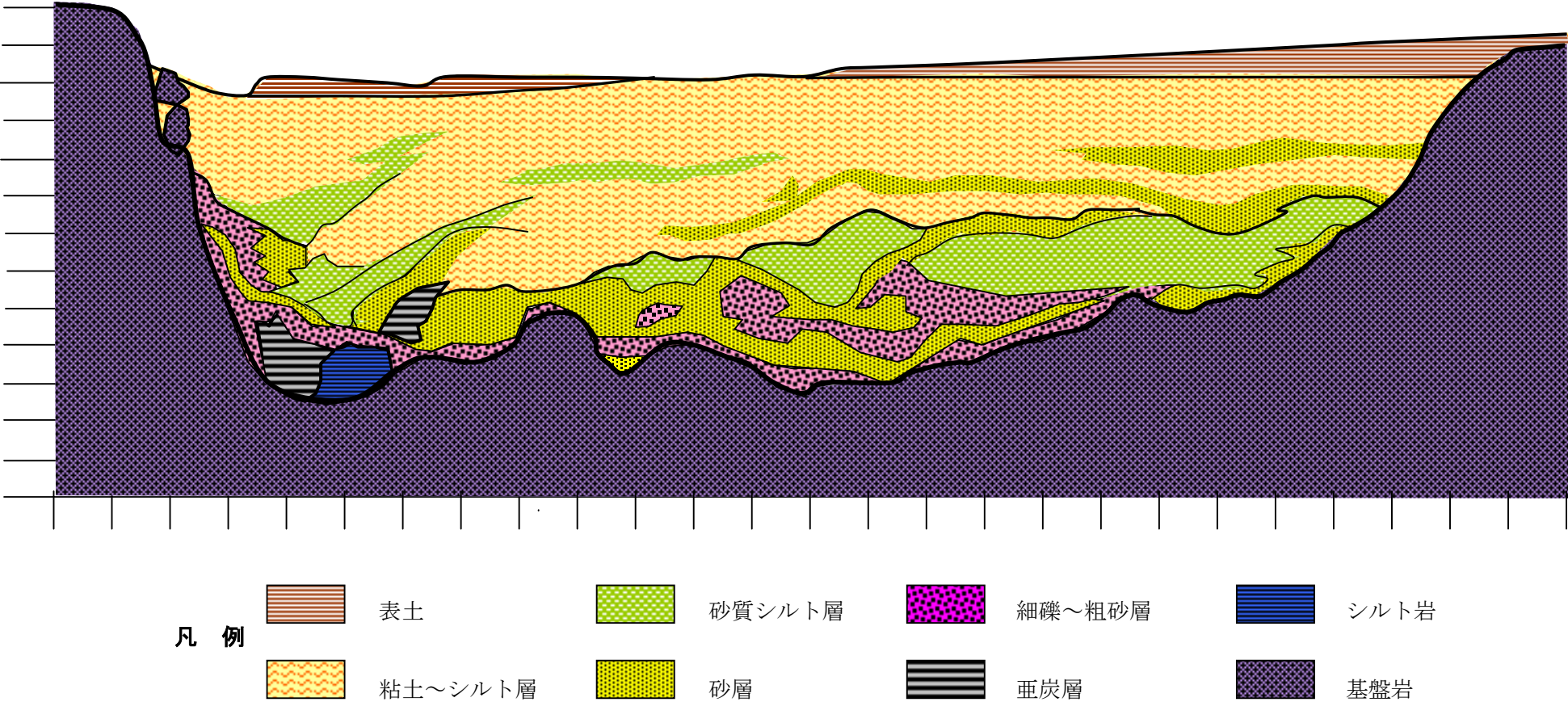


図 5.1 地下ダム建設位置の「化石谷」の地質断面図（上流側の掘削断面）
（注：断面図のスケールは垂直方向と水平方向とで異なっている。）

6. 地下ダムにおける貯水状況の観測

地下ダムの貯水状況は、地上ダムの場合と異なり、直接肉眼で観察できず、地下水観測施設によって地下水位を調査することにより推定するしかない。

以下、本事業で実施した地下水位等の観測の内容と、それらの観測結果から推定される貯水状況について報告する。

6-1. 貯水状況観測施設（地下水観測施設）

表 6.1 に、本事業で設置した地下ダム貯水状況観測施設（地下水観測施設）の諸元を示す。また、図 6.1 に、それらの観測施設の配置を示す。

なお、これらの地下水観測施設のうち 5 基には、住民への給水を目的として、ハンドポンプを設置した（2003 年 3 月時点では 3 基のハンドポンプが稼働中）。

(1) オールストレーナー型地下水観測井；

深度約 0.5 m 以深の全区間にストレーナー（地下水が流入する穴）を開けたプラスチック・パイプを、ボーリング孔に設置した構造の地下水観測井である（図 6.2 の A）。

地下ダム建設の前に、地下ダム建設予定地とその延長線上にこのタイプの観測井を 5 孔設け、自記水位計により地下水位の継続観測を行った。これらの観測井は地下ダム建設に伴って撤去したため、地下ダム建設の後には、このタイプの観測井を、地下ダムの上流側約 200 m の箇所に「化石谷」横断方向に 4 孔（P-3～6）、ほかの場所に 5 孔、計 9 孔設け、うち 5 孔に自記水位計を設置した。

(2) 大口径井戸；

ブルキナ・ファソ国において給水施設として普及しているものと同様の構造の大口径の掘抜き井戸（内径約 1.8 m）である。本事業では、河川の洪水から井戸を保護するために、井戸の上端を地表面から約 2 m の高さにし、その周囲をコンクリート壁で囲った。

地下ダムの上流側約 100 m と下流側約 50 m の位置に、地下ダムの貯水効果を視覚的に比較・観察できるように、このタイプの大口径井戸を 1 基ずつ設置した（OW-1, 2）。また、上流側の水門式小規模ダム（7. (3) 参照）貯水域にも、4 基の「観測用大口径井戸」を設置した（NP-1～4）。このほか、太陽光発電給水施設（7. (1) 参照）の一部として設けた揚水井も、このタイプの大口径井戸である。

(3) 層内水位観測井（ピエゾメーター）；

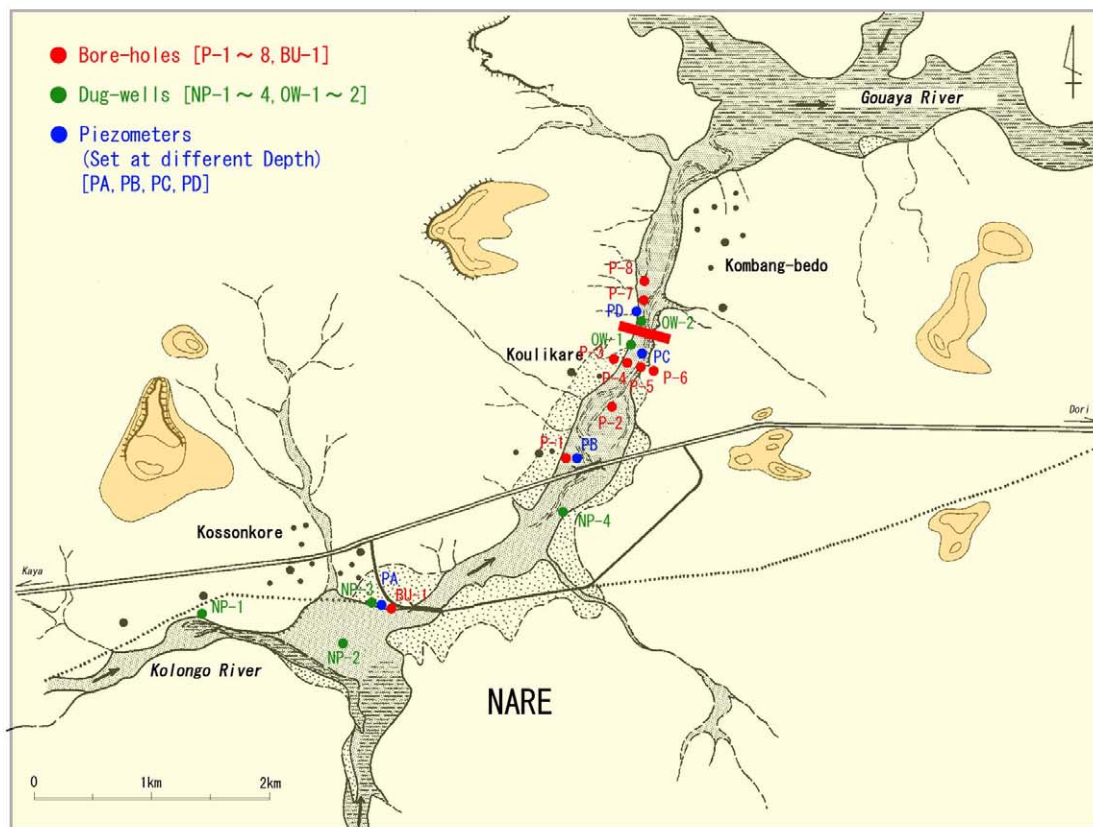
上述の「オールストレーナー型地下水観測井」では、地下水「本体」の上部に「宙水」が存在していると、その影響を強く受けてしまい、地下水「本体」の水位を観測できない。本事業の地下ダム建設位置では、掘削時の観察や、その後の「オールストレーナー型地下水観測井」による地下水観測結果から、そのような「宙水」の存在が推測された。このため、「宙水」の存在の確認と地下水「本体」の水位観測のために、図 6.2 の B) に示すような「層内水位観測井」（ピエゾメーター）を 4 箇所に設置した（PA～PD）。

「層内地下水観測井」は、末端にのみストレーナーを開けたプラスチックパイプを 4 本、埋設深度を変えて設置した地下水観測井である。各パイプ内の地下水の水位は、それぞれのパイプ末端の位置に存在する地下水の水位（及び圧力）を反映したものになる。

表 6.1 本事業で設置した地下水観測井の諸元

種類	観測井 番 号		孔底深度	地下ダム からの距離	観測方法	観測期間 (年) *	備 考
オ ー ル ス ト レ ー ナ ー 型 観 測 井	B-2-3		15 m	地下ダム 位置	自記水位計 による継続 観測	1996, 10 月 ～ 1997, 11 月	地下ダム建設の開始に ともなって撤去。
	B-2-4		15 m				
	B-2-5		30 m				
	B-2-6		15 m				
	B-2-7		20 m				
	B-U-1		20 m	上流約 3.5km	自記水位計	1997-2003	水位計は 2002 年に撤去。
	P-1		20 m	上流約 1.2km	自記水位計	1998-2003	水位計は 2002 年に撤去。
	P-2		20 m	上流約 650m	手動水位計	2001-2003	
	P-3		20 m	上流約 200m	手動水位計	1997-2003	
	P-4		20 m	上流約 200m	自記水位計	1998-2003	水位計は 2002 年に撤去。
	P-5		20 m	上流約 200m	自記水位計	1998-2003	水位計は 2002 年に撤去。
	P-6		20 m	上流約 200m	手動水位計	1997-2003	
	P-7		60 m	下流約 200m	手動水位計	1998-2003	ハンドポンプを設置。
P-8		20 m	下流約 400m	自記水位計	1998-2003	水位計は 2002 年に撤去。	
大 口 径 井 戸	NP-1		8 m	上流約 5 km	手動水位計	2000-2003	ハンドポンプを設置。
	NP-2		8 m	上流約 4 km	手動水位計	2000-2003	ハンドポンプを設置。
	NP-3		10 m	上流約 3.5km	手動水位計	2000-2003	ハンドポンプを設置。
	NP-4		10 m	上流約 2.5km	手動水位計	2000-2003	ハンドポンプを設置。
	OW-1		10 m	上流約 100m	手動水位計	1998-2003	
	OW-2		9 m	下流約 50m	手動水位計	1998-2003	
	KP-1		20 m	上流約 150m	手動水位計	1998-2003	太陽光発電給水施設の 揚水井。したがって、観測 水位の多くが動水位。
	KP-2		18 m	上流約 100m	手動水位計	1998-2003	
	KP-3		20 m	上流約 50m	手動水位計	1998-2003	
層 内 水 位 観 測 井 ／ ピ エ ゾ メ ー タ ー	PA	1	7.0 m	上流約 3.5km	手動水位計	2000-2003	B-U-1 の近くに設置。
		2	4.7 m				
		3	3.0 m				
		4	0.6 m				
	PB	1	5.2 m	上流約 1.2km	手動水位計	2000-2003	P-1 の近くに設置。
		2	3.9 m				
		3	2.5 m				
		4	1.0 m				
	PC	1	6.6 m	上流約 125m	手動水位計	2000-2003	KP-1 と OW-1 の間に 設置。
		2	4.5 m				
		3	3.1 m				
		4	1.5 m				
	PD	1	6.4 m	下流約 50m	手動水位計	2000-2003	OW-2 の近くに設置。
		2	4.8 m				
		3	3.4 m				
		4	0.9 m				

* 2003 年の観測終了時期は 2 月～3 月。



Bore-holes : オールストレーナー型地下水観測井
Dug-wells : 大口径井戸
Piezometers : 層内水位観測井

図 6.1 : 地下水観測施設の配置概略図

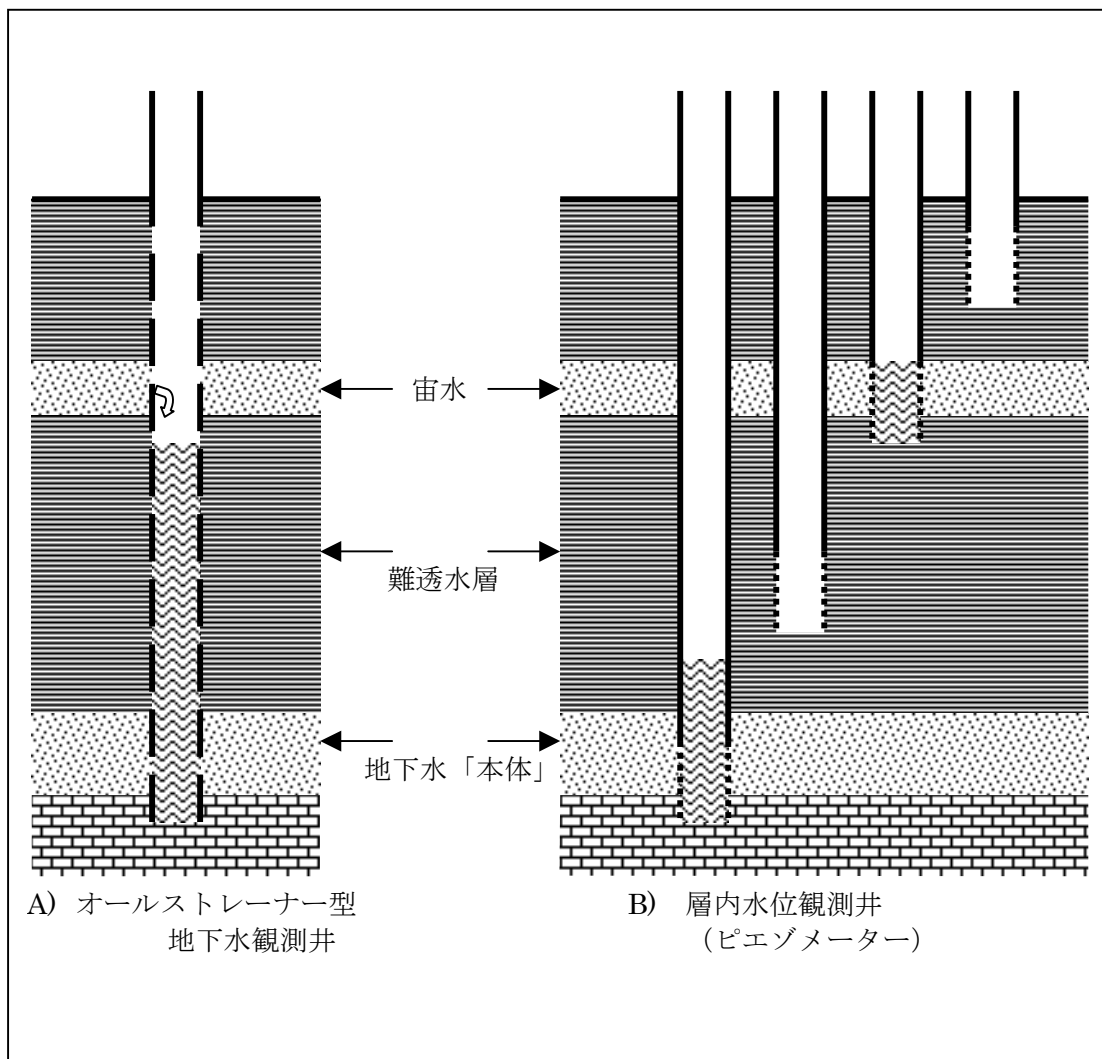


図 6.2 : 2 種類の地下水観測井の構造

6-2. 気象・河川流量観測結果

地下ダムを建設した「化石谷」は、コロongo川（Kolongo）に沿って埋没している可能性が高い。このため、地下ダムに貯留される地下水の涵養には、コロongo川流域での降雨が強く関係していると思われる。また、この地域は半乾燥地域であるため、降雨によってもたらされる水の多くが蒸発散によって失われていると思われる。

したがって、地下ダムによる貯水効果を定量的に検討するには、地下水位だけでなく、コロongo川流域の降水量、蒸発散量、コロongo川の河川流量が重要である。しかし、これらの観測は現地機関によってはほとんど行なわれていない。そこで、本事業の一環として、これらについての観測も実施した。

(1) 日降水量観測；

日降水量観測は、地下ダム建設地点であるナレ村クリカレ地区（Koulikare）と同村コソコーレ地区（Kossonkore）の2箇所で1997年に開始し、さらに、コロongo川上流域のワノビアン村（Ouanobian）及びニョカ村（Noka）でも1998年に開始した。表6.2に、ナレ村クリカレ地区での降水量観測結果を示す。

表 6.2 ナレ村クリカレ地区における 1997～2002 年の降水量

観測年	月降水量 (mm)									年降水量 (mm)	穀類収穫状況
	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	N-F**		
1997*	0.5	19.9	31.9	73.9	123.9	81.0	102.0	35.0	0	468.1	不作
1998*	0	1.3	55.2	90.8	139.5	157.4	138.9	28.6	0	611.7	豊作
1999	0	0.7	13.1	26.8	166.0	189.4	178.2	0	0	574.2	並み
2000	0	8.3	0.9	56.1	112.6	43.5	74.8	20.7	0	316.9	大凶作
2001	0	0.1	20.3	52.0	113.1	169.6	43.5	6.7	0	405.3	並み
2002	0	3.0	75.6	80.2	131.0	166.1	77.8	67.8	0	601.5	豊作

* 1997 年と 1998 年のデータはナレ村コソコーレ地区のものであるが、これらはクリカレ地区の降水量とほぼ同様とみなすことができる。

** 月降水量の最後の欄の「N-F」は、11 月から翌年の 2 月までの合計雨量を表している。

表 6.2 に示されているように、2000 年の年降水量は 316.9 mm しかなく、住民によれば「前代未聞の干ばつ年」であった。2000 年の雨季直後から 2001 年の雨季直前にかけて、地下ダム貯水域の地下水位は著しく低下したが、この地下水位の異常低下は 2000 年の異常渇水によってもたらされたものと推察される。

コロongo川流域での年降水量を表 6.3 に示す。上流域（流域の西南西方向）ほど降水量が多くなる傾向にある。

表 6.3 コロンゴ川流域とその周辺における年降水量

(単位：mm)

	コロンゴ川流域での年降水量 (* 1)			流域外 (* 2)
	Koulikare	Ouanobian	Noka	Kaya
地下ダムからの距離	地下ダム位置	約 15 km 上流	約 35 km 上流	約 50 km 上流
1998 年	611.7	601.2	616.8	709.6
1999 年	574.2	718.2	696.1	900.8
2000 年	316.9	— (* 3)	642.1	639.4
2001 年	405.3	460.4	570.1	504.3
2002 年	601.5	488.8	791.5	— (* 4)
平 均	501.9	567.2	663.3	688.5

* 1 : 本事業による観測。 * 2 : ブルキナ・ファソ気象局による観測。

* 3 : 欠測が多いため記載せず。 * 4 : データ未入手。

(2) 蒸発量観測 ;

地下ダム建設地点のナレ村クリカレ地区において、2000 年 8 月から、蒸発皿に入れた水の蒸発量を計測する方法で、可能蒸発量を観測した。

表 6.4 に、2000 年 8 月から 2002 年 12 月までの観測結果を示す。なお、これらの数値は、強風によって蒸発皿から吹き飛ばされたことによる水損失量を補正してある。

年可能蒸発量は 3,700 mm に達している。可能蒸発量は 4 月が最も多く、8 月が最も少ない。

表 6.4 ナレ村クリカレ地区における可能蒸発量

(2000 年 8 月～2002 年 12 月の平均値)

	1 月	2 月	3 月	4 月	5 月	6 月	7 月	8 月	9 月	10 月	11 月	12 月	年間
月間蒸発量 (mm)	306	327	424	476	413	310	281	183	197	259	246	255	3,703
日平均蒸発量 (mm)	9.9	11.7	13.7	15.9	13.3	10.3	9.0	5.9	6.6	8.4	8.2	8.3	10.1

(3) 河川流量観測；

地下ダムへの地下水涵養源となっていると思われるコロongo川の河川流量を推定するため、同河川の断面形状が簡単に計測できる箇所において、河川流速と河川水位を観測した。観測箇所は、旧幹線道路がコロongo川を横断する箇所と、現在の幹線道路が同河川を横断する箇所の2地点である。

コロongo川での観測は、1998年から2002年までの5年間行なったが、信頼性の高い観測結果は2000年と2001年の2年間しか得られなかった。この観測結果から算出すると、旧幹線道路上の観測箇所における河川流量は次のようになる。

- ・ 2000年の河川流量： 約 6,000,000 m³/年 （異常渇水年）
- ・ 2001年の河川流量： 約 11,000,000 m³/年

6-3. 貯水域における地下水位の変化

(1) 地下ダム貯水効果の検証；

図 6.3 に、地下ダム建設後の1998年10月2日（乾季初期）と、1999年2月19～24日（乾季中期）の2時期における地下ダムの貯水状況を示す。

この2時期とも、地下ダムの貯水水位は、地下ダムの下流側の地下水位よりも4.5～6.5 m高い。また、これらの貯水水位は、地下ダム建設前の同じ季節の地下水位よりも約2.5～5 m高くなっている。このような地下水位観測結果から、地下ダムにより貯水効果が生じていることが検証できた。

(2) 地下ダム貯水水位の「季節変動」；

しかし、図 6.3 の2時期の観測結果の比較から明らかなように、乾季に入るにしたがって貯水水位は低下していく。地下ダム貯水域から揚水が行なわれているが、その揚水量は貯水量からすれば微々たるものであり（2002年乾季末の貯水量が約400,000 m³と推定されるのに対し（6-5 参照）、揚水量は年間約3,000 m³（7. (1) 参照）、揚水によって貯水水位の低下が生じているとは考えられない。

地下ダム貯水水位のこのような「季節変動」は、毎年繰返されている。これを示す一例として、地下ダムの上流約200 mに設置した地下水観測井 P-4（オールストレーナー型観測井）での1998年6月から2003年2月までの地下水位の継続観測結果を図 6.4 に示す。同図には、地下ダム建設前の地下水位と比較するために、地下ダム建設地点に設置されていた B-2-4 観測井での1996年11月から1997年11月までの地下水位も示した。

(3) 地下ダム貯水水位の経年変化；

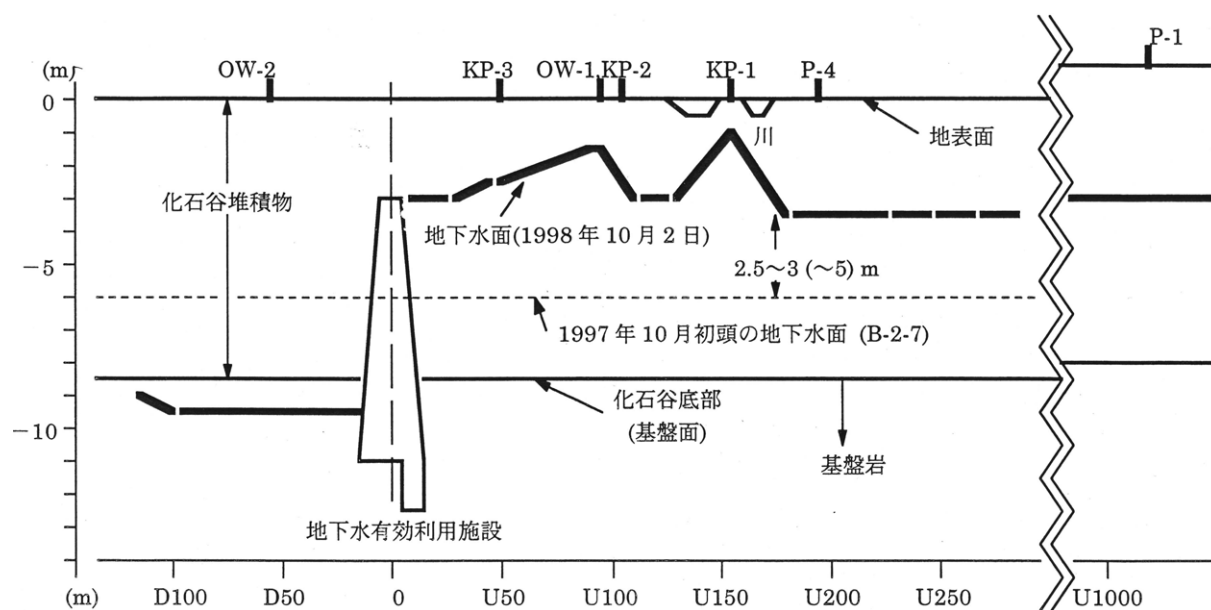
図 6.4 に示した貯水水位の観測結果から、以下のような地下ダム貯水水位の経年変化の特徴を読み取れる。

- ① 毎年、雨季に上昇した貯水水位が、乾季末～雨季初頭の5～6月までに約2.5～4.5 m低下することを繰り返している。
- ② 2001年の乾季末～雨季初頭を例外とすれば、乾季末～雨季初頭の「最低水位」は年とともに徐々に上昇している。
- ③ 2000年の雨季の貯水水位は前年までと比べて非常に低く、乾季末～雨季初頭の「最低水位」も2001年には低下した。これは、2000年にナレ村周辺が異常渇水に襲われたことが影響していると推測される。また、2001年雨季の貯水水位も低いが、コロongo川上流域でのこの年の雨量が2000年より少なかったことを反映している可能性がある（表 6.3 参照）。このように、地下ダムの貯水水位は、流域の降水量と密接な関係があると推測される。

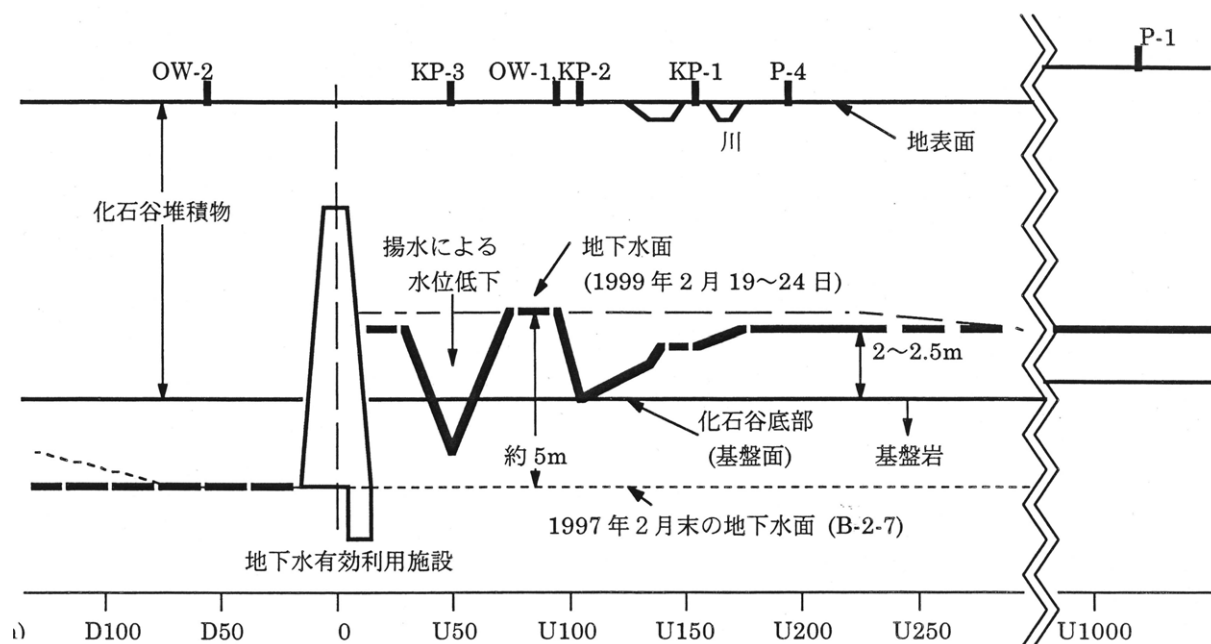
以上のように、地下ダム貯水には顕著な「季節変動」が認められるとともに、異常渇水年

には貯水水位は低下するものの、経年的に水位は上昇していると言える。

また、図 6.5 に、地下ダムの上流 5 km 地点の NP・1 観測井での地下水位の経年変化を示す。この図でも、「季節変動」を繰り返しながら全体として上昇しつつあることを示している。このような経年的な水位上昇は上流側の他の観測井でも認められ、地下ダムの貯水水位が全般的に上昇しつつあり、貯水領域も上流側に拡大しつつあると判断される。2002 年時点で、貯水領域は地下ダムの上流約 5～6 km 以上に達していると推測される。



A: 地下水有効利用施設の上下流における地下水位 (1998年10月2日)



B: 地下水有効利用施設の上下流における地下水位 (1999年2月19~24日)

図 6.3 地下ダムの貯水状況の推移

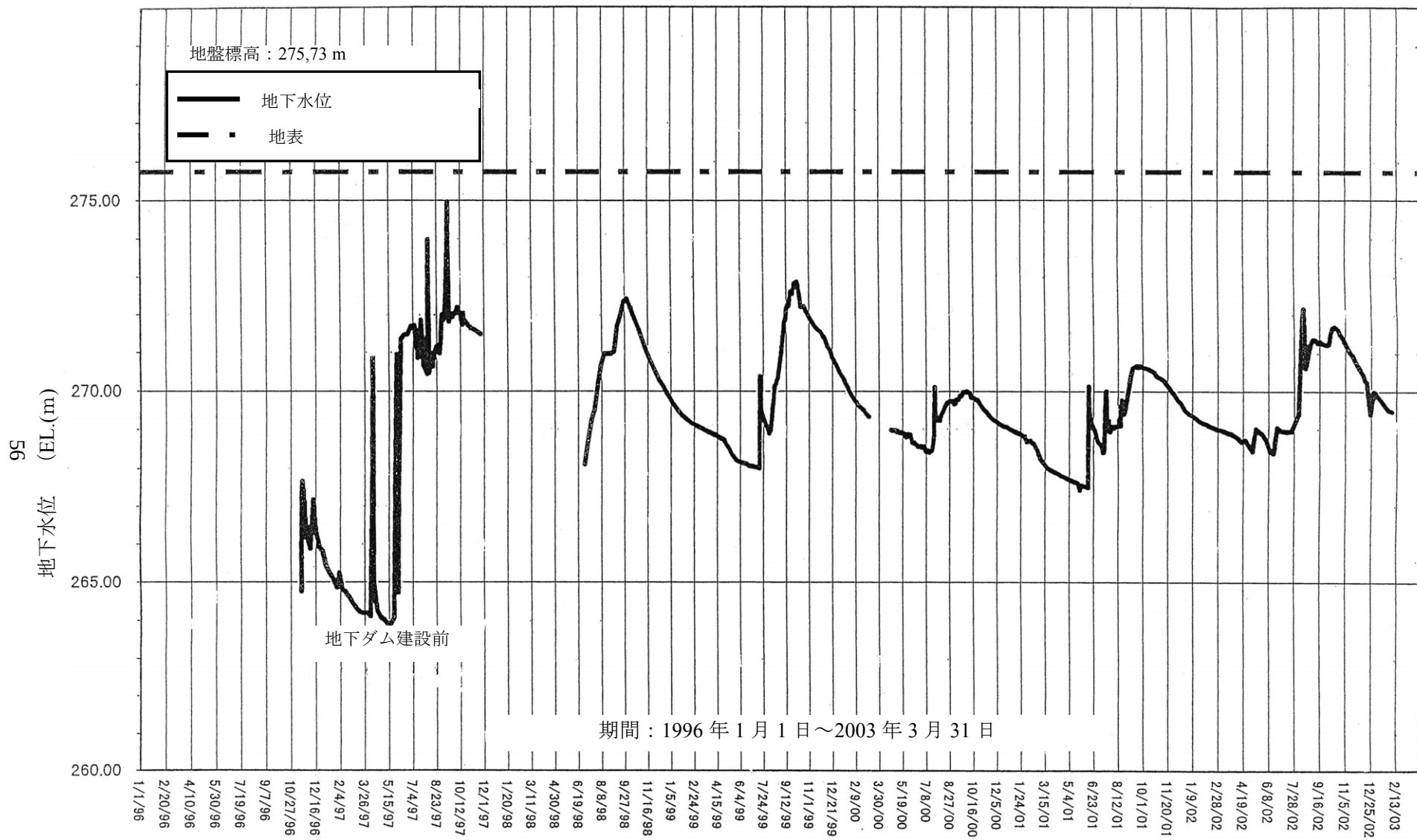


図 6.4 地下ダムの貯水水位の継続観測結果

(P-4 観測井)

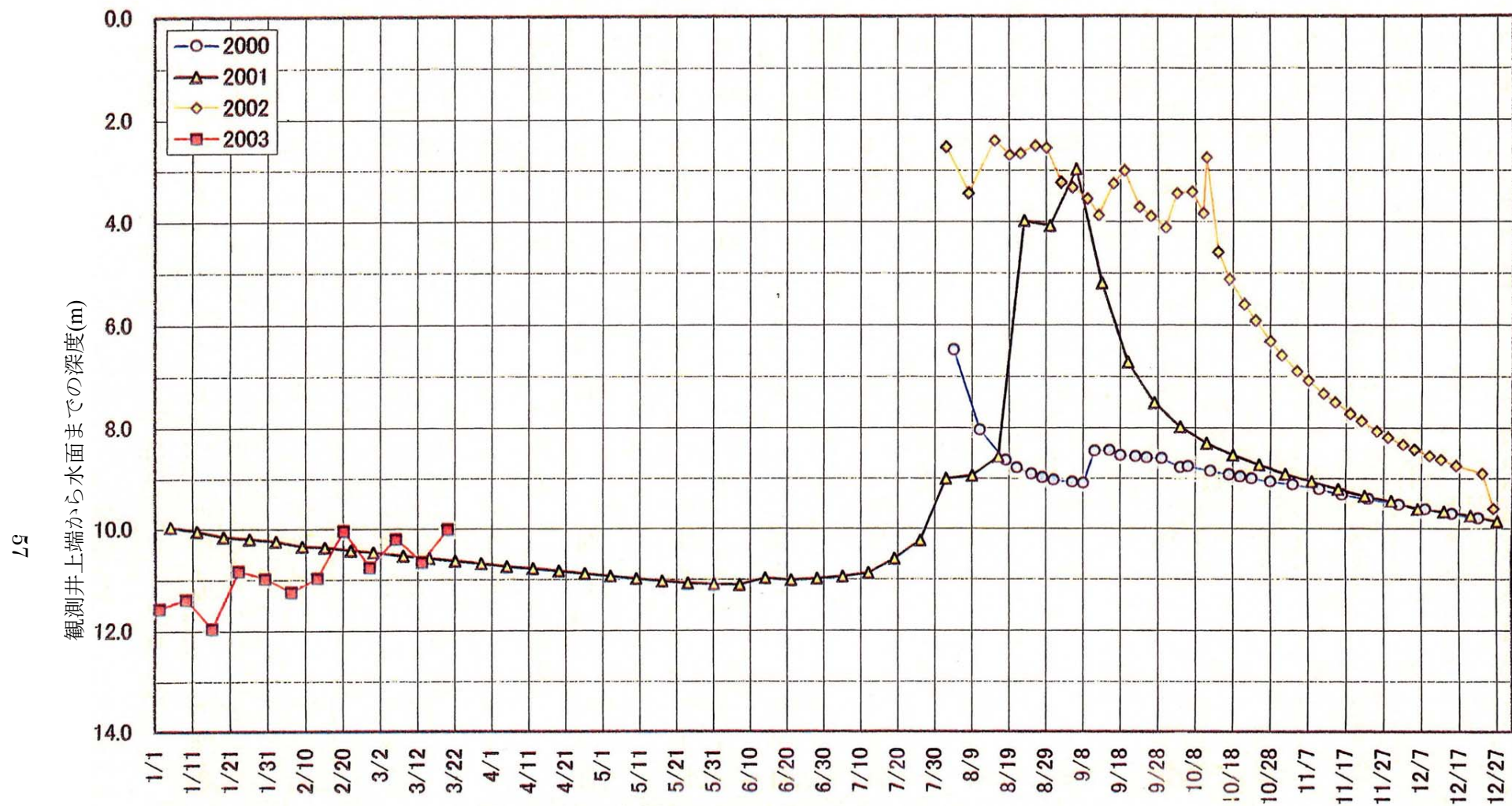


図 6.5 NP-1 観測井における地下水位の経年的変化

地下水位は、顕著な「季節変動」を示しながらも、全般的に年とともに上昇しつつあることが読み取れる。

6-4. 貯水水位の「季節変動」についての検討

前章で示したように、地下ダム貯水水位は雨季に急上昇するが、その水位は維持されず、乾季に入ると顕著な水位低下を生じている。

このような貯水水位の低下の原因として、貯水域からの「漏水」が考えられる。ここで、図 6.3 に示されているように、地下ダムの上流側と下流側とでは地下水位が顕著に異なり、地下ダム堤体の遮水性には大きな問題はないと考えられる。よって、基盤岩中への「漏水」が生じている可能性がある。

一方で、掘削工事の際に、「化石谷堆積物」中に「宙水」が観察されたが、オールストレーナー型地下水観測井で観測される水位はこの「宙水」の影響を受け、地下水「本体」の水位を正しく表さない。

そこで、「宙水」の挙動を確認するために、図 6.1 の B) に示すような「層内地下水観測井」(ピエゾメーター) を 4 箇所(地下ダム貯水域に 3 箇所 (PA, PB, PC)、地下ダムの下流約 50 m に 1 箇所 (PD)) に設置した。

その観測の結果、地下ダムの貯水層となっている「化石谷堆積物上部層」に少なくとも 2 層の「宙水」が出現することが確認された。このような 2 層の「宙水層」の存在は、地下ダム貯水域に設置した 3 箇所の観測井 (PA, PB, PC) の全てで確認され、当地の「化石谷堆積物」の全般的特徴であると判断される。2 層の「宙水層」のいずれにおいても、乾季末～雨季初頭には「宙水」は認められないが、コロongo川に河川水が流下し、氾濫原が水で覆われる時期に「宙水」が出現するようになる。河川水が消滅すると、「宙水」の水位も低下し、乾季中盤にはほとんどの「宙水」が消滅してしまう。

これに対し、地下水「本体」の水位(「層内地下水観測井」における最下位の地下水の水位として示される)の上昇は、「宙水」の出現時期よりも遅れて起こり、また上昇速度も「宙水」に比べて遅い。そして、この地下水「本体」の毎年の最高水位は、同時期の「オールストレーナー型観測井」での観測水位よりも低い。

よって、「オールストレーナー型観測井」によって観測される地下水位の季節変動は、「宙水」の存在により、地下水「本体」の水位の季節変動よりも過大になっていると思われる。

このような「層内地下水観測井」(ピエゾメーター) と「オールストレーナー型観測井」での観測結果から地下ダムの貯水状況を評価するに当たっては、以下の点に留意する必要がある。

- ① 「宙水」が存在する場合、雨季における「オールストレーナー型観測井」による観測水位の上昇は、必ずしも「地下ダム貯水水位の上昇」を意味しない。
- ② 「宙水」が消滅する乾季後半においては、「オールストレーナー型観測井」による観測水位を貯水水位(地下水「本体」の水位)と見なすことができる。
- ③ 地下水「本体」の水位は、「層内地下水観測井」における最下位の地下水の水位である。
- ④ 「オールストレーナー型観測井」によって観測される地下水位の季節変動は、「宙水」が存在する場合、地下水「本体」の水位の季節変動よりも過大になっていると思われる。

しかしながら、乾季には、「オールストレーナー型観測井」による地下水位だけでなく、「層内地下水観測井」での最下位の地下水位も低下しているので、地下ダム貯水域の基盤岩から「漏水」が生じていることも確実と判断される。その漏水量は、「層内地下水観測井」での最下位の水位低下量にほぼ対応しているものと考えられる。

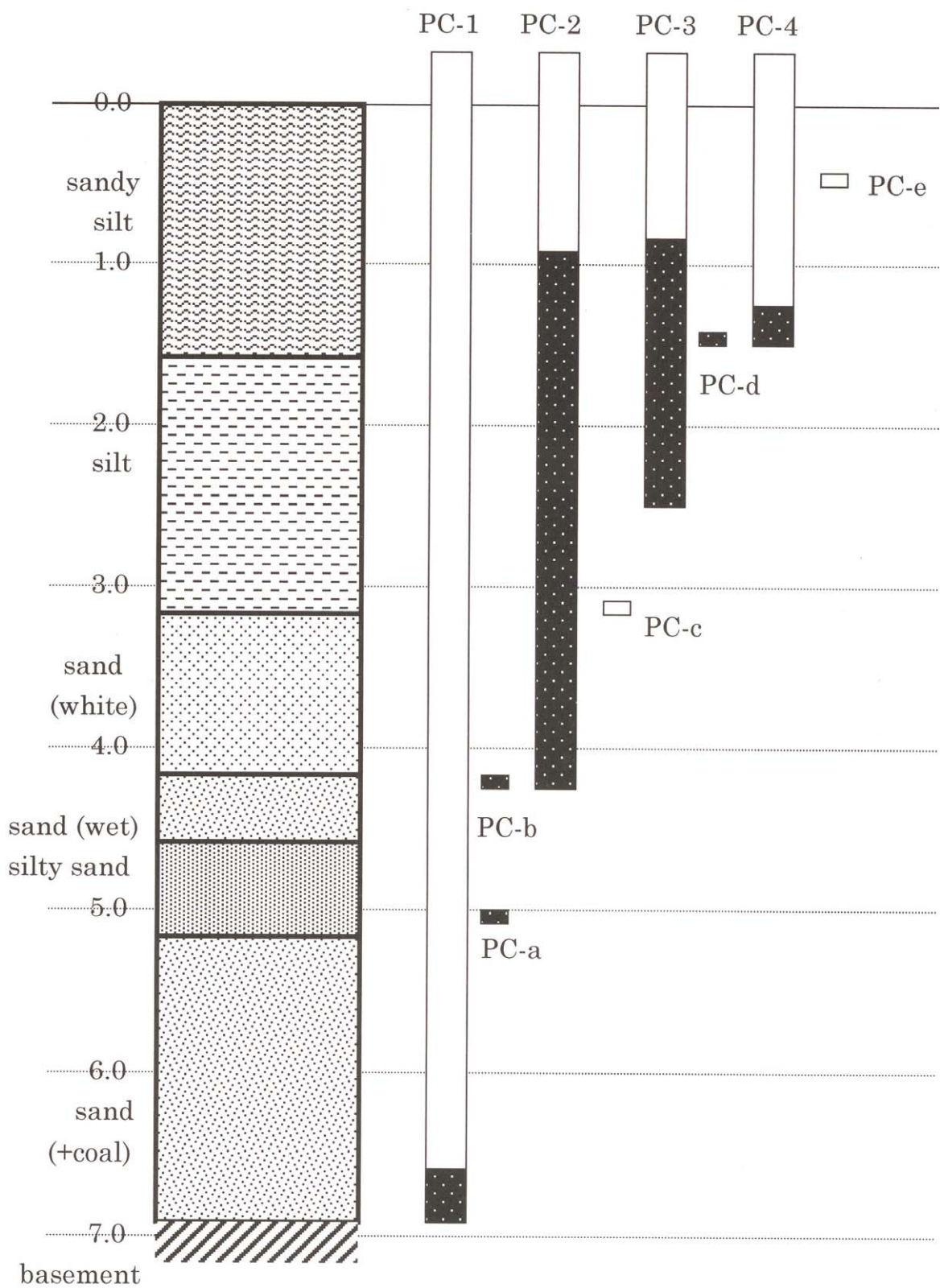


図 6.6 「層内地下水観測井」(PC 観測井)による観測結果

6-5. 地下ダム貯水状況の評価

以上の調査・観測結果にもとづいて、図 6.7 に示すような流れにしたがって、地下ダムの貯水メカニズムについての解析を行った。

ここでは、具体的な解析過程は省略し、解析結果のみを報告する。

なお、ここで用いた解析方法は、利用できるデータの制約等から非常に簡略なものであり、今後、改善する余地も多く残されている。

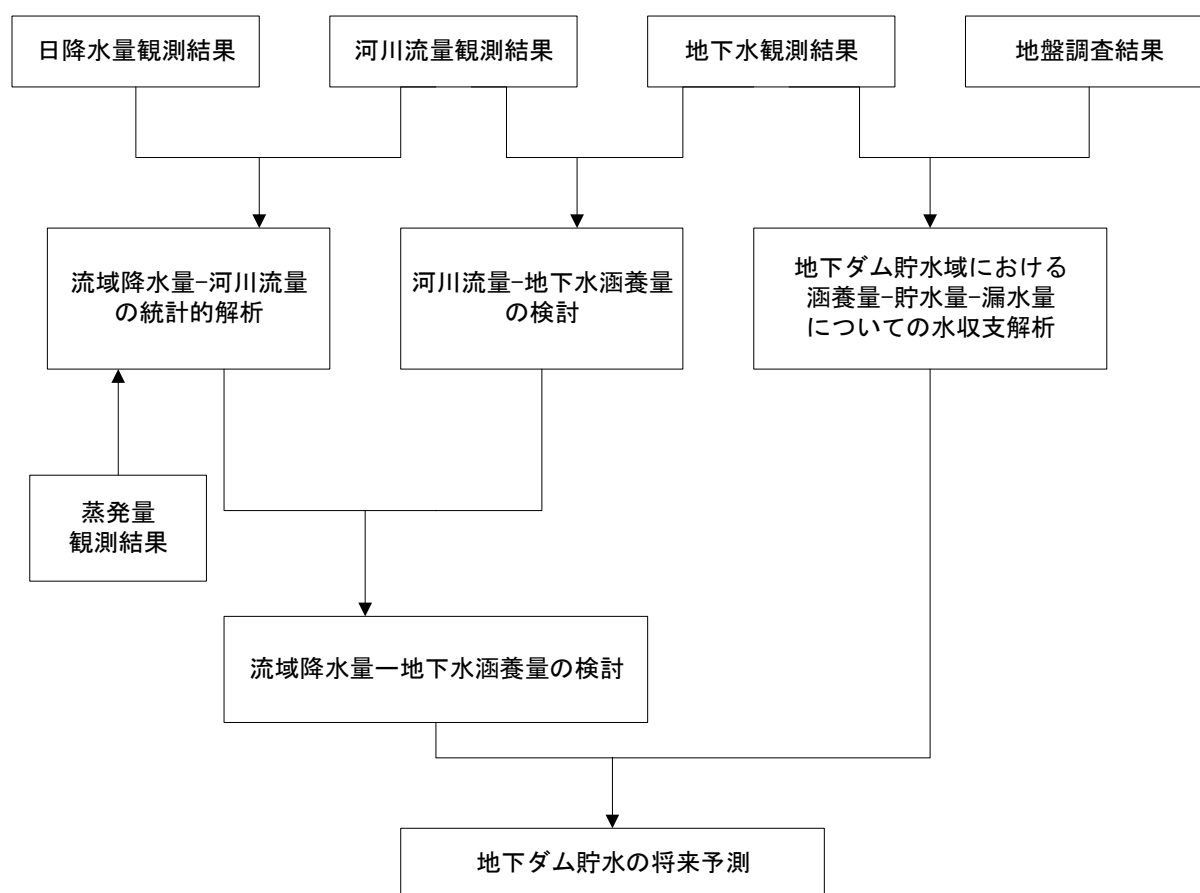


図6.7 貯水メカニズム解析の流れ図

(1) 流域降水量と河川流量の関係；

ナレ村の旧幹線道路がコロongo川を横断する地点での日河川流量と、コロongo川流域での日降水量（*）との統計的解析により、図 6.8 に示すような関係式が求められた。

（* Nare/Koulikare, Ouanobian, Noka, Kaya での降水量観測記録より流域降水量を推定した。）

(2) 河川流量と地下水涵養量との関係；

2000 年及び 2001 年の河川流量の観測値と地下水涵養量の推定値から、両者の関係は次のように推定される。

地下水涵養量＝「7 月～10 月の河川流量」（*）の約 10～15%
（*ナレ村地内を流下する河川流量）

(3) 流域降水量と地下水涵養量の関係；

(1)及び(2)の関係式により、コロンゴ川流域における降水量観測結果から地下水涵養量を見積ることができる。

(4) 地下ダム貯水域の規模；

地下ダム貯水域における縦断測量の結果、地表面の勾配は約 0.65/1000 である。また、貯水域での地下水観測井の掘削結果から、貯水域における「化石谷堆積物」（地下ダム貯水層）の層厚は、地下ダム建設位置における層厚と大差ない。そこで、地下ダム貯水層の底面の勾配も地表面の勾配に等しいと仮定することにより、地下ダム貯水域の規模を以下のように推定した。

- ・ 貯水域の幅： 平均約 150 m（推定最小値）
- ・ 最大貯水時の貯水域： 上流約 13.4 km までの領域
- ・ 地下ダム満水時の水位： -3 m
- ・ 貯水層の容量： 約 9,000,000 m³
- ・ 最大貯水量： 約 1,800,000 m³（貯水層の有効間隙率を約 20%と仮定）

(5) 地下ダム貯水域での水収支解析結果；

地下ダム貯水域での地下水涵養量、貯水量、漏水量についての水収支解析の結果、地下ダム建設以降の貯水状況は表 6.5 のように推定される。

表 6.5 地下ダム貯水状況の推移

(単位：m³)

	(1) 地下水 涵養量	(2) 漏水量	貯水増加量 (1)－(2)	乾季末貯水総量 (貯水増加量累計値)
1998 年雨季	1,200,000		(1,200,000)	(1,200,000)
～1999 年乾季末		990,000	210,000	210,000
1999 年雨季	1,200,000		(1,200,000)	(1,410,000)
～2000 年乾季末		990,000	210,000	420,000
2000 年雨季	750,000		(750,000)	(1,170,000)
～2001 年乾季末		990,000	－240,000	180,000
2001 年雨季	1,200,000		(1,200,000)	(1,380,000)
～2002 年乾季末		990,000	210,000	390,000
合 計	4,350,000	3,960,000	390,000	390,000

注：地下ダムによる貯水は、実質的には 1998 年の雨季から開始された。

(6) 地下ダム貯水の将来予測；

表 6.5 に示されているように、地下ダム貯水域からの漏水量は年間約 990,000 m³程度と推定される。よって、2000 年のような異常干ばつがあると、その翌年の乾季末には貯水量が前年より減少する事態が生じる。

しかし、このような激しい干ばつは滅多に生じないと考え、平均的な年間地下水涵養量を 2001 年（約 1,200,000 m³）の 90%程度（約 1,100,000 m³）と仮定すれば、将来の地下ダム貯水状況は以下のように推定される。

- ① 雨季期間中の地下水涵養（貯水量の増加）によって地下ダムが「満水」状態になるのは、2005 年の雨季になると予測される。この時の貯水量は約 1,800,000 m³である。
- ② しかし、貯水域からの漏水によって、2006 年の乾季末（～雨季初頭）の貯水量は約

800,000 m³に減少する。

- ③ 2006 年の雨季に、推定どおり約 1,100,000 m³の地下水涵養量が得られれば、地下ダムの最大貯水量の約 1,800,000 m³まで貯水され、残りの約 100,000 m³は地下ダムを越流する。
- ④ これ以降、雨季の貯水量が約 1,800,000 m³（満水）であったものが、翌年の乾季末には約 800,000 m³に減少する、というサイクルが繰返される。

なお、以上の地下ダム貯水量の評価においては、「化石谷堆積物」とその直下の基盤岩風化層を地下ダムの「貯水層」としてモデル化し、その中の貯水量のみを対象とした。そして、この「貯水層」から流出していく地下水を「漏水」と位置づけている。しかし、基盤岩への「漏水」は、基盤岩への地下水涵養でもある。上述の水収支解析では、地下ダム建設以降 2002 年乾季末までの「漏水量」は累計約 4,000,000 m³に達するが、これは、この量の地下水が地下ダム周辺の基盤岩中に涵養されていることを意味する。これだけの地下水全てが地下ダム周辺の基盤岩中にとどまっているわけではないだろうが、相当な量が基盤岩中に「貯水」されている可能性がある。

流域降水量 X (m³/日) とナレ村での日河川流量 Y (m³/日) の関係式

5・6 月期： $Y = 0.022X + 29,000$ (相関係数 0.615)

7～10 月期： $Y = 0.057X + 38,000$ (相関係数 0.656)

ただし、流域降水量 X (雨量×流域面積) を算出するには、以下の雨量補正値を用いるものとする。

ここに、E：該当月の平均日蒸発可能量 (mm)

流域 A1・A2： $\{(3 \text{ 日前雨量} - 3.4E) + (2 \text{ 日前雨量} - 3.4E)\} \div 2$

流域 A3： $\{(2 \text{ 日前雨量} - 1.0E) + (1 \text{ 日前雨量} - 1.0E)\} \div 2$

流域 A4： $\{(2 \text{ 日前雨量} - 0.6E) + (1 \text{ 日前雨量} - 0.6E)\} \div 2$

流域 A5： 当日雨量 - 0.6E

* (日雨量 - E) ≤ 0 の場合には、これを 0 とする。

流域区分の概略は下図のとおり。

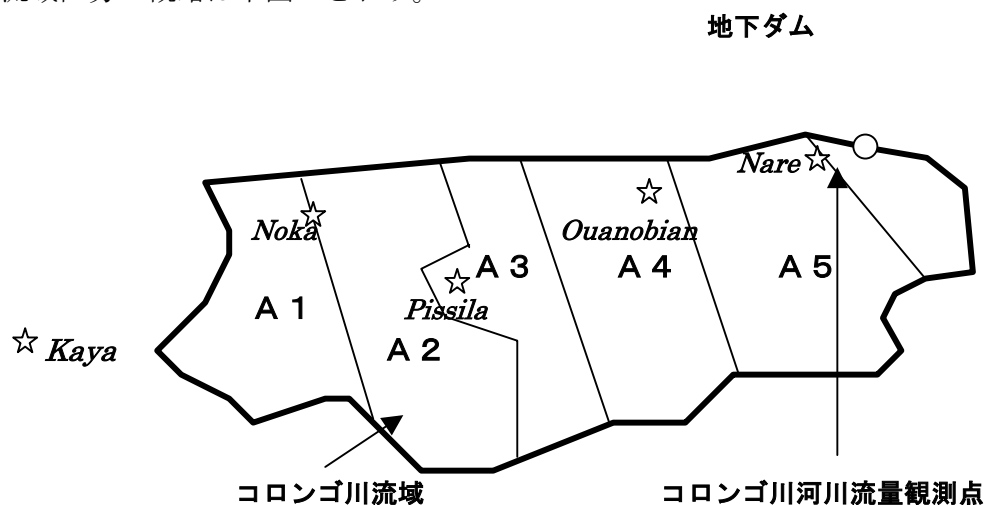


図 6.8 ナレ村コロongo川観測点における日河川流量と流域降水量の関係

7. 関連調査

本事業においては、以上に報告した地下ダム建設とその貯水効果の検証のための調査・観測以外に、以下の調査も実施した。

(1) 太陽光発電給水施設の試験的設置；

地下ダムに貯水される地下水の有効利用方法を実証することを目的として、以下の太陽光発電給水施設を設置した。(本章末の写真を参照)

- ・ 揚水井： 地下ダム貯水域に設置した3基の掘抜き井戸（深度約20 m）
- ・ 太陽光発電施設： 太陽光発電パネル1.76 kwp、3基
- ・ 給水施設： 給水塔（容量10 m³）、生活用給水施設（共同水栓）、家畜用給水施設、農業試験用給水施設

すなわち、3基の揚水井から太陽光発電による電力を使った水中モーターで給水塔に揚水し、ここからKombangbedo村に設置した生活用給水施設等に送水した。

この施設による給水量は、給水開始直後は1日当り最大30 m³以上に達したが、その後、村内にハンドポンプが新設されたことや、村民が家畜用の給水を自主規制したことなどにより、2002年には日平均約7.4 m³、年間約2,700 m³となった。

(2) 農業実証試験；

農業における地下水の有効利用方法を検討することを目的として、試験圃場を設け、上記の太陽光発電給水施設からの給水により、農業実証試験を実施した。点滴灌漑、負圧差灌漑及び人力灌漑により、灌漑水量を変化させて、穀類（ミレット、ソルガム）及び野菜（トマト、玉ネギなど）の栽培試験を行なった。

この農業実証試験により、適正な水量を灌漑すれば「異常干ばつ年」においても確実な収穫が得られることが確認された。ただし、地下ダムの貯留水を実際の農業に利用していくためには、広範囲の農地に効率的・経済的に給水・灌漑する技術の開発が必要である。

(3) 水門式小規模ダムの設置；

地下ダムへの地下水涵養の促進や、農業及び内水面漁業の開発を目的として、地下ダムから約1.5 km上流のコロンゴ川に「水門式小規模ダム」を設置した。(本章末の写真を参照)

この「水門式小規模ダム」は、既存の幹線道路の盛土を「ダム堤体」として利用し、全長約33 m、最大貯水高1.2 mとなるように23の水門を設置したものである。

水門の閉切りの調整は、氾濫原で稲作を行なっている住民が行っている。この水門施設により氾濫原における稲作面積は大幅に拡大し、ダム貯水池からの漁獲量も増加している模様である。

(4) 環境影響評価のための植生調査；

地下ダムの建設に起因する地下水の賦存状態の変化が自然環境に及ぼす影響を評価するため、樹木を中心に、以下の植生調査を実施した。

- ① 地下ダム貯水域周辺における植生変化の追跡調査： 地下ダム貯水域周辺の植生変化の追跡調査を目的として、1998-1999年に実施した。地下ダム貯水域及びその周辺の約15 km²を対象に、約500m間隔に計29箇所の植生観察点を選定し、樹種、樹高、樹径などを観察した。さらに、2001-2002年に、これらの観察点におけるその後の植生変化を確認した。
- ② 地下ダムの上下流部における樹木生育の動態調査： 地下ダムの上流側と下流側での樹木の生育の比較を目的として、2000年11月から2002年12月にかけて、上流側及び下流側それぞれ約50～100 mの箇所に調査区域を設け、樹木生育の動態調査を実施した。

調査対象とした樹木は、*Acacia seyal*、*Mitragyna inermis* 及び *Piliostigma reticulatum* の 3 種である。動態調査の内容は、樹勢、樹形、葉の状態（出芽時期、落葉時期、葉色、葉量など）、花の状態（開花時期、花量など）、果実の状態（結果時期、果実量）などである。調査間隔は月 1～2 回程度とした。

このほか、地下ダム貯水以前の生物種の記録調査や、定量的な環境影響評価方法の検討のための試験を行った。

①の調査の結果として、明らかに人為的なものの以外に、地下ダム貯水域及びその周辺で植生の変化は認められなかった。また、②の調査の結果として、地下ダムの上流部より下流部のほうが早い時期に落葉する傾向が顕著に認められ、地下ダムの上下流で土壤水分環境に相違が生じていると推測された。ただし、上流部・下流部とも、枯死した樹木は認められていない。

このように、地下ダム建設以降 2002 年末までに認められた「環境変化」は、地下ダムの上下流での植生状況の差異だけである。この差異も、地表水の存在状態の差異による可能性があり、地下ダム建設の影響によるものかどうかは不明である。

(5) 本事業に関する住民意識の調査；

2002 年 1 月・2 月に、ナレ村とその周辺村落において、面談式アンケートにより、本事業に対する住民意識を調査した。

その結果、住民は本事業に対し概ね肯定的な感想を持っていることが明らかになった。

なお、ナレ村では、本モデル事業の実施期間中、本モデル事業以外に以下の住民利用施設が設置された。この中には、本モデル事業の実施関係者が関与しているものもある。

- ・ 製粉所： 3 箇所、日本の「草の根無償資金」による。
- ・ ハンドポンプ： 4 基、日本の JICA 無償資金協力による。
- ・ ナレ村女性用菜園： 4 基の大口径井戸付き、ブルキナ・ファソ政府による。
- ・ 果樹菜園： 4 箇所、日本の NGO（GEO-Action）による。

写真 7.1 揚水のための太陽光発電施設



写真 7.2 地下ダム貯水域に設置された揚水井



写真 7.3 コンバンベド村 (Kombangbedo) に作られた生活用給水施設



写真 7.4 本事業による農業実証圃場



写真 7.5 本事業で設置された「水門式小規模ダム」



8. 今後の地下ダム建設への提言

以上に述べた砂漠化防止対策モデル事業調査による地下ダム建設の実証試験結果は、日本で開発された「地下ダム技術」が砂漠化の進行しつつある西アフリカ地域に適用できる可能性があることを示している。

一方で、今後、地域の自然・社会条件に適合した実用的な地下ダムを計画・建設していく上では、以下の点に留意する必要がある。

8-1. 地下ダム建設位置選定に関して

(1) 「化石谷」の評価；

本事業の地下ダムは「化石谷」を利用して建設されたものである。貯水域からの「漏水」という問題が生じたとはいえ、「化石谷」への地下ダムの建設が可能であることが実証されたと思われる。

ニジェール河流域は、「化石谷」が多く分布していると言われており、地下ダム建設に適した箇所が多く存在する可能性がある。

なお、「化石谷」は、浅層地下水が賦存する可能性が高く、また、広い「低地平坦面」を伴うことが一般的なことから、浅層地下水を利用した灌漑農業や牧畜業の開発可能性が高い場所であると考えられる。地下ダム建設に限らず、このような観点からも、今後、「化石谷」の分布やその特性について解明していくことが望まれる。

(2) 「化石谷」以外の地質構造；

本事業では、「環状地形」や「ボトルネック型地形」も対象として地下ダム建設適地の調査を行なったが、「化石谷」以外には適した地質構造を見出すことはできなかった。しかし、より詳細な調査を行うことで、「化石谷」以外の地質構造から地下ダム建設適地を見出せる可能性はある。（ただし、格段に多くの調査が必要になるものと考えられる。）

(3) 地下水開発可能量推定の困難性；

地下ダム建設位置の選定に際しては、貯水される地下水の量を事前に見積ることが必要である。しかし、「ダム貯水量」を見積ることは、「地上ダム」の場合には比較的容易であるが、地下ダムの場合には以下のような困難が伴う。

- ① 地下ダムの貯水層は「地下」に形成されるため、その形状、容量を正確に調査・計測することが困難である。
- ② 地下ダムの貯水可能量は地層の有効間隙率に規制されるが、貯水層全体の有効間隙率を解明するためには多くの調査が必要である。
- ③ 地下ダムの貯水層への地下水涵養量を正確に推定することが困難である。
- ④ 貯水層における「漏水」箇所の検出、及びその「漏水量」の予測が困難である。

今後の地下ダム建設に際しては、より詳細な調査によって地下ダム貯水量の正確な推定に努めるべきであるが、それでもなお、貯水量推定値には相当大きな誤差が含まれざるをえない。地下ダム建設位置の選定や貯水利用計画の策定に当たっては、この点を考慮する必要がある。

(4) 社会経済的観点からの地下ダム建設位置の選定；

本事業はモデル事業であることから、地下ダム建設位置の選定に当たり、水理地質条件を最も優先させた。今後、地下ダムを実用目的で建設する場合は、当然ながら、社会経済的観点も重視する必要がある。

一般に、地下ダムの貯水を利用するためには何らかの「揚水施設」が必要である。また、

貯水の利用地域が地下ダム建設位置から離れている場合は、大規模な「給水施設」が必要となることもある。場合によっては、揚水施設や給水施設の建設費用が地下ダム本体の建設費用を上回ることもありえる。

したがって、地下ダムの建設位置の選定に当たっては、費用対効果を高める上でも、次の点を考慮する必要がある。

- ・ 貯留水の利用人口
- ・ 貯留水を利用した灌漑農業や牧畜業等の開発の可能性

なお、地下ダム貯水域では地下水の循環速度が遅くなるため、汚染された水が貯水域に流入した場合、水質の回復に時間がかかることが予想される。よって、貯水域での土地利用に当たっては、農薬等による水の汚染に留意する必要がある。

8-2. 調査方法に関して

(1) 空中写真の活用；

本事業の調査地域は非常に平坦な地形の部分が多かったため、現地調査に当たっては、空中写真の活用が不可欠であった。空中写真の活用の有効性は、アフリカのように準平原が発達する地域での現地調査全般に言えることである。地形・地質調査等に携わるアフリカの技術者に、空中写真の活用方法を広く普及させていくことが望まれる。

(2) 地下水観測における留意点；

本事業の地下ダム建設地点の「化石谷堆積物」には「宙水」が存在し、これが地下水位の観測結果に強く影響していることが明らかとなった。「宙水」の存在によって、地下水位の季節変動が実際よりも過大に評価される可能性があることに注意する必要がある。

なお、このような「宙水」は、「化石谷堆積物」に限らず、基盤岩にも出現する可能性がある。

(3) 水文観測（降雨、河川流量、地下水位など）の重要性；

本事業では、降水量、河川流量、地下水位等について既存の水文観測資料が不足していたため、調査・評価が困難なものとなった。

降水量は、比較的近い地点間でも極端な差異が見られることがあるので、サヘル地帯など水資源が不足している地域においては、降水量観測点をさらに密に配置することが望まれる。また、河川水の挙動は河川水や浅層地下水の開発に大きく関連しているため、同一水系内であっても多くの地点で河川流量を観測することが望ましい。地下水位については、深井戸が掘削されたときの観測記録は比較的よく管理されていたが、浅井戸の地下水位や、地下水の季節変動・経年変化に関する記録は少なかった。こうした地下水位に関する資料は地下水開発全般に必要とされるものであり、その観測体制や資料管理体制の整備が望まれる。

(4) 地下ダム貯水域における調査；

8-1の(3)で述べたように、地下ダムの貯水層の形状、容量、水理特性、「漏水」の可能性などについて解明することは困難を伴うが、地下ダム建設に際しては、これらを解明するための調査を重視する必要がある。

8-3. 地下ダム建設工法に関して

(1) 「アースダム式地下ダム」の問題点；

本事業の地下ダムでは、「アースダム」（土堰堤）を地下に埋設する工法を採用したが、この工法で問題となるのは、建設工事中における「湧水」である。本事業の地下ダム建設においては、「化石谷堆積物」の掘削面からの湧水は少量であり、特別な湧水対策は必要ではなかった。しかし、浅層地下水が多く賦存する場合は、湧水対策が困難となり、施工不能となることもある。

また、地下ダムの建設深度が深い場合には、掘削や埋戻しが大規模なものとなるため工事費用が過大なものとなり、また、湧水が生じる可能性も高くなるので、留意する必要がある。

(2) 堤体材料について；

本事業の場合、地下ダム堤体の材料を地下ダム建設場所から離れた箇所から採取したが、後に、地下ダム建設場所での掘削土も堤体材料に使用できる可能性があったことが判明した。

「アースダム式地下ダム」の施工に伴って生じる掘削土を堤体材料とすることができれば、堤体材料採取のための「土取場」を必要とせず、周辺環境への悪い影響を抑えることができる。「アースダム式地下ダム」の建設を計画する場合には、このような施工方法についても検討することが望まれる。

(3) 地中連続壁工法による止水壁工法の導入；

本事業においては、ブルキナ・ファソ国で入手・使用が可能な建設機材を用いるため、地下ダムの種類を「アースダム式型地下ダム」とした。しかし、「地下ダム」の基本的原理は一般の建設工事における「止水壁」と同じであり、「止水壁工法」を地下ダム建設に適用することができる。特に、上述のように、掘削工事に伴って多量の湧水が生じる可能性がある場合や、地下ダムの建設深度が深い場合、また乾季施工という制約により工期短縮の必要がある場合には、「アースダム式地下ダム」よりも「止水壁工法」が有利である。

ブルキナ・ファソ国などの西アフリカ諸国においても、近年、高層ビルの建設など、限られた都市空間の有効利用が図られつつあるが、今後、このような「都市開発」が「地下の開発」にも向けられていくことが予想される。「地中連続壁工法（例えば原位置混合攪拌工法）による止水壁工法」はこうした「地下の開発」に伴って開発された工法であり、「止水壁工法」とこれに必要な施工機材は、いずれ、西アフリカ地域にも導入されるものと思われる。

このような展望を踏まえるならば、西アフリカにおける今後の地下ダム建設に、「地中連続壁工法による止水壁工法」を適用できる可能性は生まれつつあると考えられる。

8-4. コストに関して

本事業において、地下ダムの建設及び揚水・給水施設の設置に要した直接経費は以下のとおりである。

地下ダム建設工事	108,595 千円
揚水・給水施設の設置工事	24,900 千円（一部推定）

その他、付随する施設の設置に要した直接経費は、以下のとおりである。

地下水観測施設	4,160 千円
水門式小規模ダム	16,933 千円

試験圃場

2,570 千円

なお、地下ダム建設工事の施工管理部分は全面的に日本からの技術者が行ったが、その人件費は上記の費用に含まれていない。

8-5. 維持管理体制に関して

本モデル事業では、給水施設の利用が開始された段階で、給水先の **Kombangbedo** 村住民によって「給水施設管理委員会」が組織された。この委員会により料金の徴収が行われており、また、給水施設の「掃除当番」も組織されている。

一方、太陽光発電施設等の高度な技術が用いられている施設については、現地住民だけでは補修等の対応は困難と思われるため、ブルキナ・ファソ国政府の関与など、より長期的な維持管理体制の構築が必要と思われる。

なお、本事業で設置した太陽光発電施設では、太陽光発電において故障しやすい「夜間用蓄電池」は用いていない。

このように、地下ダムを含め、水資源の維持管理には、現地住民及び現地政府のオーナーシップが不可欠である。地域社会・住民を主体としたアプローチを基本とし、計画段階から住民のオーナーシップを確保することが望まれる。

謝 辞

日本国環境省の委託による「砂漠化防止対策モデル事業調査」は、1995年に開始し、2003年3月をもって終了しました。8年間の長きにわたり、環境省、大成建設株式会社など、多くの関係者の努力により、事業を実施することができました。

また、「砂漠化防止対策モデル事業調査検討会」（座長：松本 聡東京大学農学部教授（当時））及び「砂漠化防止対策モデル事業評価検討会」（座長：宮田春夫広島大学大学院国際協力研究科非常勤講師（当時））の委員を初め、多くの方々に、ご指導・ご助言いただきました。

さらに、本事業の実施に当たっては、ブルキナ・ファソ国環境生活環境省（事業開始時、環境水資源省）、同省大臣が管轄する「環境と持続的開発のための国家評議会常設事務局」（S.P.CONEDD、事業開始時 S.P.CONAGESE）を初めとする同国関係機関と同国ナレ村住民の全面的な協力をいただきました。これらの機関や人々の親身な協力なしには、本報告書で述べたような成果を得ることはできなかったと思います。

本事業の終結、及び本報告書の発表にあたり、ご協力をいただいたこれらの関係機関及び関係者の方々に、厚い感謝の意を表します。

（社）海外環境協力センター

【報告書製作担当】

・（社）海外環境協力センター	専務理事	片山 徹	
同 上	嘱託研究員	藤田 元夫	（株式会社ミュー技研）
同 上		岩上 尚子	
同 上		星野 玲子	

・ 環境省 地球環境局 環境保全対策課 課長補佐 松本 康裕

【協力】

・ 大成建設株式会社 技術センター 土木技術研究所 主席研究員 藤原 靖

【資料等の問合せ先】

- ・（社）海外環境協力センター : E-mail: oecc@oecc.or.jp
- ・ 環境省地球環境局環境保全対策課 : E-mail: chikyu-hozen@env.go.jp