

3. 水資源開発技術マニュアル

—小規模ダム、井戸、溜池—地域に適した取水施設を造る—



3. 水資源開発技術マニュアル

第1章 総説	3- 1
1. 1 背景	3- 1
1. 2 目的	3- 1
第2章 水資源開発の留意点	3- 2
2. 1 水資源開発の流れ	3- 2
2. 2 水資源の現況調査の進め方	3- 2
2. 2. 1 机上調査	3- 3
2. 2. 2 現地踏査	3- 3
2. 2. 3 観測調査	3- 4
2. 2. 4 詳細調査	3- 4
2. 2. 5 調査結果の解析	3- 4
2. 3 水資源の持続的な利用	3- 4
第3章 水資源の現況調査	3- 6
3. 1 水資源の現況調査の概要	3- 6
3. 2 気象調査	3- 6
3. 2. 1 気象の現況と調査の目的	3- 6
3. 2. 2 調査の方法	3- 7
3. 2. 3 調査結果の解析	3- 9
3. 3 地表水の調査	3-12
3. 3. 1 地表水の現況と調査の目的	3-12
3. 3. 2 調査の方法	3-12
3. 3. 3 調査結果の解析	3-18
3. 4 地下水の調査	3-21
3. 4. 1 地下水の現況と調査の目的	3-21
3. 4. 2 調査の方法	3-22
3. 4. 3 調査結果の解析	3-35
第4章 水資源の技術開発	3-43
4. 1 水資源開発手法の選定	3-43
4. 2 小規模ダムによる地表水開発	3-44
4. 2. 1 ダム適地の選定	3-44
4. 2. 2 ダム諸元の決定・設計	3-46

4. 2. 3	施工	3-53
4. 2. 4	ダムの維持・管理	3-53
4. 2. 5	ダム周辺の地下水開発	3-53
4. 3	溜池の整備による水源開発	3-54
4. 3. 1	溜池の整備	3-54
4. 3. 2	溜池整備の工法	3-54
4. 3. 3	適地の選定	3-56
4. 3. 4	溜池の貯水深	3-57
4. 3. 5	溜池の貯水量の算定	3-58
4. 3. 6	洪水吐の設置	3-58
4. 3. 7	溜池周辺の地下水開発	3-59
4. 4	井戸による地下水開発	3-59
4. 4. 1	井戸位置の選定	3-59
4. 4. 2	井戸構造の選定	3-61
4. 4. 3	井戸の施工	3-67
4. 4. 4	井戸の改修	3-67
4. 4. 5	井戸の維持・管理	3-68

図・表リスト

表2. 2. 1. 1	机上調査における資料の収集項目と収集先
表3. 1. 1	水資源の現況調査の調査項目と目的
表3. 2. 3. 1	ニジェール国トロディ地点の確率年間雨量
表3. 2. 3. 2	ニジェール国トロディ地点確率年最大日雨量
表3. 3. 2. 1	WHO飲料水水質ガイドライン
表3. 3. 3. 1	ゴルビ川流域における流域面積区分と河川流出状況
表3. 4. 2. 1	比抵抗値と地質との関係
表3. 4. 2. 2	揚水試験の水位測定間隔
表3. 4. 2. 3	ブルキナファソ国ヤクタ村世帯別揚水量実態調査結果
表3. 4. 3. 1	ゴルビ川流域の帯水層の分類及び特徴
表3. 4. 3. 2	揚水可能量の季節的変化予測値一覧表
表4. 1. 1	サヘル地域における水資源の賦存形態と開発手法
表4. 1. 2	サヘル地域の地域区分と主な水資源開発手法
表4. 4. 2. 1	井戸構造の概要
表4. 4. 4. 1	井戸の改修内容と改修効果
表4. 4. 4. 2	井戸1箇所あたりの改修費の例
表4. 4. 5. 1	井戸の維持・管理方法
図2. 1. 1	水資源開発の流れ
図3. 2. 2. 1	簡易雨量計
図3. 2. 2. 2	雨量計の設置場所
図3. 2. 3. 1	ニジェール国トロディ地点年間雨量ヒストグラム
図3. 2. 3. 2	ニジェール国トロディ地点年最大日雨量ヒストグラム
図3. 2. 3. 3	ニジェール国マグー地点におけるPenman法蒸発散位と計器蒸発量
図3. 2. 3. 4	ニジェール国マグー地点における計器蒸発量・Penman法蒸発散位・補完法蒸発散量
図3. 3. 2. 1	衛星画像の例 (マリ国セグー市周辺)
図3. 3. 2. 2	マリ国コバ沼の水位観測結果
図3. 3. 2. 3	流速測定方法模式図
図3. 3. 2. 4	ニジェール国トロディ地点ゴルビ川の水位－流量曲線
図3. 3. 2. 5	USDA灌漑水の水質基準
図3. 3. 3. 1	ニジェール国マグー地点ゴルビ川年最高水位ヒストグラム
図3. 3. 3. 2	ニジェール国マゴ川タンクモデル構造図
図3. 3. 3. 3	タンクモデルによる計算流量と実測流量
図3. 3. 3. 4	トロディダム貯留モデル
図3. 3. 3. 5	トロディダムの貯留計算結果
図3. 4. 2. 1	ブルキナファソ国全域のリニアメント判読図
図3. 4. 2. 2	マリ国セグー南部地域地下水位等高線図
図3. 4. 2. 3	ニジェール国マグー実証圃場内での地下水位観測記録
図3. 4. 2. 4	電極配置の例
図3. 4. 2. 5	電気探査解析例
図3. 4. 2. 6	弾性波速度と地質との関係
図3. 4. 2. 7	ニジェール国マグー実証圃場内での簡易弾性波探査記録と解析例
図3. 4. 2. 8	ニジェール国マグー周辺地域での実測基盤深度と解析基盤深度
図3. 4. 2. 9	簡易トリガーの模式図

- 図3. 4. 2. 10 オーガーボーリングの実施例
- 図3. 4. 2. 11 地質柱状図の例
- 図3. 4. 2. 12 簡易揚水試験と井戸揚水試験との比較
- 図3. 4. 3. 1 第三紀層のメサと基盤岩（花崗岩）の露頭
- 図3. 4. 3. 2 タイス法による解析事例
- 図3. 4. 3. 3 ヤコブ法による解析例
- 図3. 4. 3. 4 回復法による解析例
- 図3. 4. 3. 5 ニジェール国ゴルビ川沖積帯水層における揚水量と水位低下量の例
- 図3. 4. 3. 6 揚水量と水位回復時間
- 図3. 4. 3. 7 揚水量と水位降下量
- 図3. 4. 3. 8 沖積帯水層の揚水試験実測値と水位低下量計算値
- 図3. 4. 3. 9 帯水層ごとの地下水位変化の例
- 図4. 2. 2. 1 乾季のマゴダム洪水吐
- 図4. 2. 2. 2 堰堤の法面の傾き
- 図4. 2. 2. 3 堰堤の高さ
- 図4. 2. 2. 4 マゴダム洪水吐で発生した浸透水による堰堤内部浸食の状況
- 図4. 2. 2. 5 洪水吐を越流する流出水
- 図4. 2. 2. 6 下流側から見たマゴダム洪水吐
- 図4. 2. 5. 1 ニジェール国トロディダム貯水位と周辺地下水位
- 図4. 3. 2. 1 沼底地盤の掘り下げ
- 図4. 3. 2. 2 地盤の掘り下げによる溜池の整備
- 図4. 3. 2. 3 沼周縁部の拡張
- 図4. 3. 2. 4 堤防の盛立
- 図4. 3. 2. 5 地盤掘り下げ及び堤防盛立てによる溜池の整備
- 図4. 4. 1. 1 ワジ氾濫原に露出している基盤岩（花崗岩）の露頭
- 図4. 4. 2. 1 近代的大口径井戸の設置状況
- 図4. 4. 2. 2 コルゲート管を用いた半伝統的井戸
- 図4. 4. 2. 3 近代的大口径井戸の構造例
- 図4. 4. 2. 4 半伝統的井戸の構造図
- 図4. 4. 2. 5 フィルターの粒度条件
- 図4. 4. 2. 6 近代的大口径井戸の上部構造の例（1）
- 図4. 4. 2. 7 近代的大口径井戸の上部構造の例（2）

第1章 総説

1. 1 背景

サヘル地域は、降雨量が年間250～750mm程度、蒸発散位（植物で完全に覆われた地表面に十分に水が供給されている場合に失われる蒸発散量）が年間1,800～3,000mm程度の半乾燥の地域である。この地域は、雨季と乾季が明瞭であり、降雨は雨季に集中している。年間降水量は年によって大きな変動を示し、降雨の少ない年には干ばつ被害が発生する。大河川を除くほとんどの河川は、雨季にのみ流水があるワジ川である。また、地形の凹部には、雨季に沼が形成される箇所があるが、乾季の中期～末期にはそのほとんどが枯渇する。地下水は、沖積層、第三紀層及び基盤岩等の中に不圧地下水または被圧地下水として賦存している。井戸による地下水の開発可能量は、地形・地質等の条件の違いにより、ばらつきが大きい。

このようにサヘル地域の水資源は、地域的、季節的に著しく偏在しており、十分な量の水資源を得ることができない地域や必要水量を確保するのに多大な労力を要する地域が広がっている。このことが、この地域に住む人々の生活や生産活動を制約し、近年の砂漠化進行を招いている大きな要因の一つとなっている。

1. 2 目的

水資源開発の目的は、現況において水資源が不足しているため住民の生活や生産活動が制約を受けている地域において、飲料用水、家畜用水、灌漑用水等に供される必要な水資源を確保することである。その地域において、新たに確保された水資源を利用して持続的な農牧林業を展開し、土地の適正な利用を行うことにより、砂漠化防止が可能となる。

本マニュアルは、水資源を開発するに当たって必要となる現況調査の手法と水資源の開発技術から構成されている。

なお、本マニュアルは、JGRCが、マリ、ブルキナファソ及びニジェールにおいて行った試験や調査から得られた成果を踏まえて作成されたものである。

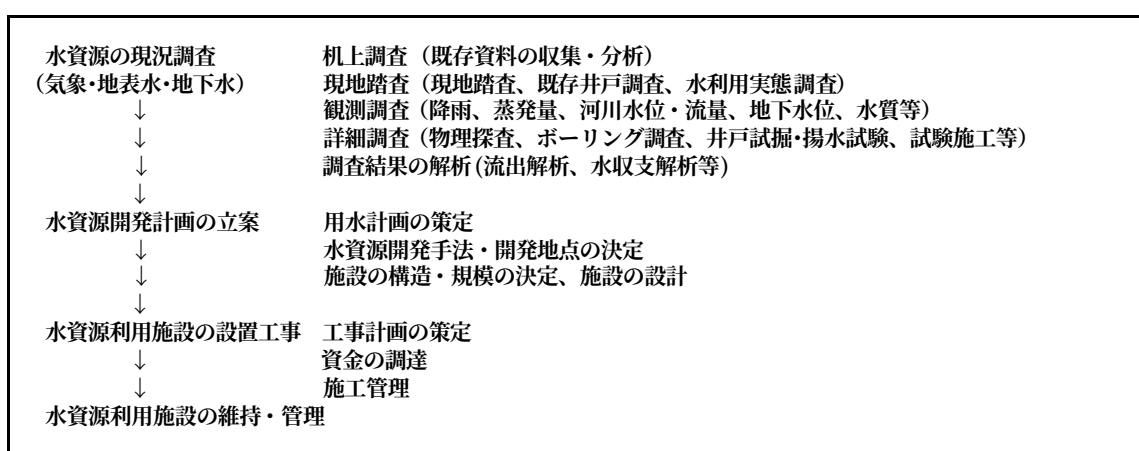
第2章 水資源開発の留意点

2.1 水資源開発の流れ

水資源開発にあたっては、はじめに水資源開発対象地域（以下、「対象地域」という）における水資源の現況調査を行い、水資源の賦存形態や賦存量を把握する必要がある。その結果を踏まえて、水資源開発計画の立案を行う。さらに、事業の実施段階として、水資源利用施設の設置工事を行うとともに、その施設を維持・管理して行くこととなる。

水資源開発は、概ね、図2.1.1に示す手順で実施する。

図2.1.1 水資源開発の流れ



2.2 水資源の現況調査の進め方

対象地域での利用可能な水資源の賦存形態は、その地域の気象、地形、地質等を含めた水文状況に大きく左右される。また、水資源開発の目的、水資源を必要とする場所、供給方法、必要水量・水質等によっても開発対象となる水資源が限定される場合がある。例えば、ワジ近傍の地域では、ワジの河川水や地下水に水資源を求めることができ、その両方を開発する場合は、地表水並びに地下水の現況調査を実施する必要がある。一方、ワジや沼等の地表の水資源から離れた地域では、地下水以外に水資源を求めることは困難であり、現況調査や利用計画も地下水に限定されたものとなる。また、良好な水質が必要となる飲料水の場合には、多くの場合、地下水にその水源が求められる。

このように対象地域における水資源の賦存形態や水資源開発の目的等に応じて開発対象となる水資源が限定される場合には、現況調査で実施する調査項目を取捨選択するとともに、調査の数量・精度を決定する必要がある。

現況調査は、一般に、以下に示すような手順で行われ、段階的に精度を上げて実施することが多い。

2. 2. 1 机上調査

対象地域に関する地形図、地質図、空中写真、学会誌等の文献、既往プロジェクトの報告書、書籍など、入手可能な資料をできるだけ多く収集し分析する。サヘル地域の水資源については、フランス国等の各国や国連機関も調査を実施しており、報告書や図書も多く出版されている（BRGM¹⁾、ORSTOM²⁾等）。現地政府機関等からの既存データ（井戸台帳等の水利施設現況データ、水位・流量データ、気象データなど）や文献の収集もこれと並行して進める。

表2.2.1.1に、机上調査で収集するべき主な資料の項目と収集先を示す。

これらの資料によって現地の概況を把握し、水資源の開発可能地域の選定を行うとともに、以後の調査計画を立案する。

表 2. 2. 1. 1 机上調査における資料の収集項目と収集先

収集項目		収集先
地形・地質等	衛星画像	LANDSAT、SPOT等
	空中写真	各国政府機関等
	地形図	各国政府機関等
	地質図	各国政府機関、鉱山会社等
	植生・土地利用図	各国政府機関等
	ボーリング等地質資料	各国政府機関、鉱山会社、井戸掘削業者等
気象・水文	気象	各国政府機関、国際機関等
	河川水位・流量	各国政府機関、国際機関等
	地下水位	各国政府機関等
	水温・水質	各国政府機関等
水利現況	表流水利用施設	各国政府機関、国連機関等
	井戸	各国政府機関、国連機関、井戸掘削業者等
	水利用量	各国政府機関等
水資源開発計画等	水資源に関する法律、基準、国家活動計画等	各国政府機関
	水資源開発プロジェクト	各国政府機関、プロジェクト機関
その他	既往調査・プロジェクトの報告書	プロジェクト機関等
	学会誌・書籍	各種学会、出版社等

2. 2. 2 現地踏査

次に、実際に対象地域を踏査し、机上調査で得られた情報の確認と補足を行う。現地では、地質図の補足、井戸等の水利施設の位置や諸元の調査、水利用の実態と問題点の把握などを現地調査や住民からの聞き取りにより行う。これらの調査によって、今後どのような調査が必要であるかを確認する。

¹⁾ BRGM : BUREAU DE RECHERCHES GÉOLOGIQUES ET MINIÈRES

²⁾ ORSTOM : OFFICE DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE ET TECHNIQUE OUTRE-MER

2. 2. 3 観測調査

調査目的にかなった地点を選定し、降雨、蒸発量、河川等の水位・流量、地下水位などの水文・気象観測を開始する。限られた期間内で必要なデータを取得するため、これらの観測はなるべく早い時点から始める必要がある。また、必要に応じて地表水、地下水の水質分析を実施する。

2. 2. 4 詳細調査

前段までの調査で水資源の開発候補地点が具体的に絞り込まれた後、水資源探査のための詳細調査にとりかかる。地下水を開発の対象とする場合は、物理探査、ボーリング調査、井戸の試掘、揚水試験などを行う。地表水が開発の対象であれば、小規模ダムの試験的施工や天然湖沼の掘り下げなどを行うこともある。

2. 2. 5 調査結果の解析

上記までの調査の結果に基づき、流出解析や水収支解析を行う。さらに、調査結果を総合的に分析し、対象地域の水資源賦存量と開発可能量を定量的に評価し、開発計画立案のための基礎資料を得る。

2. 3 水資源の持続的な利用

ある一定の地域での1水文年の水収支を考えた場合、降雨（P）によって供給された水は、蒸発散（E）・地表流出（R）・地下浸透（G）として流出する。これを数式で表現すると $P=E+R+G$ となる。持続的に利用可能な水資源の賦存量は、降雨から蒸発散量を差し引いた量すなわち自然涵養量であり、これを超えて利用するとやがて水資源の枯渇を引き起こす。降雨が少なく、蒸発散の盛んなサヘル地域では、常にこのことを念頭において水資源の開発を進める必要がある。特に、深層の非循環性の地下水を多量に揚水する場合には、地下水が枯渇する可能性がある。一方、浅層の不圧地下水は、循環性があり、降雨等の地表からの地下水涵養により回復し易い水資源である。このため、浅層の不圧地下水は、揚水が適正規模であれば持続的に利用可能な水源である。

また、小規模ダムの建設や沼の整備は、地表水の湛水範囲を広げるとともに滞留時間を長くすることにより地下水涵養を増加させる働きが期待できる。これは、地下水を持続的に利用するために有効な方法である。

現在のところ、水資源の自然涵養量に比較して、実際に利用されている水量は全体としてはまだ少ないようである。このため、開発の余地はまだ残っていると言える。したがって、当面の課題は、未利用の水資源をいかに効率よく開発するかであろう。ただし、将来、河川開発や地下水開発が大規模に行われるようになれば水資源枯渇の問題も深刻化する可能性があるので、今の時点から注意が必要である。

一方、水資源開発事業によって設置した施設を持続的に活用していくためには、受益者である住民が事業に参加することが不可欠である。具体的には、住民組織を整備

し、水資源開発における村落レベルでの現状分析、開発手法の選定、計画策定、事業の実施及び維持・管理の各段階に住民が主体的に参加する必要がある。特に、事業の実施にあたっては、住民により労力の提供や事業費の一部の負担が行われることが望ましい。さらに、施設の維持・管理について、住民自らが費用を捻出し、適切な維持・管理を行うことが持続的な施設の運営のために必要である。井戸の維持・管理については、住民により構成される井戸管理委員会が、井戸使用料の徴収と資金の管理、ポンプの修理、井戸周辺の定期的な清掃等を行っている事例がある。

第3章 水資源の現況調査

3.1 水資源の現況調査の概要

現況調査は、水資源の賦存形態、賦存量、開発可能量等を把握するために行う。この調査結果は、種々の解析や開発計画の立案を行うための最も基本的な資料となる。

表3.1.1には、調査項目とその目的を示す。

表3.1.1 水資源の現況調査の調査項目と目的

調査項目		調査の目的	実施時期		
			準備段階	予察段階	計画段階
資料収集	既存報告書、書籍、図幅等の収集	対象地域の決定、調査計画立案	○		
	既存観測データの収集	各種解析	○		
気象調査	雨量観測	流出解析、水収支解析		○	
	蒸発量観測	蒸発散量の推定		△	
	気温、湿度、風速、日照時間、日射量、気圧の観測	蒸発散量の推定		△	
地形調査	地形図収集	調査計画作成、調査結果のとりまとめ	○		
	地形測量（水準測量）	水位観測基準点等の標高決定		○	
	詳細地形図作成	構造物の計画・設計		△	○
	空中写真の判読	地形図代替、地形分類、リニアメント判読等	○		
	リモートセンシング	土地利用状況の把握、大規模地質構造の判読	△		
地表水調査	水位観測	流出解析、水収支解析、ダム等の設計、水利用可能時期の推定		○	
	流量観測	河川流量の算定		○	
	水質調査	水利用の適否の判定		○	
地下水調査	地質調査	地質構造・帯水層分布状況の把握		○	
	既設井戸調査	帯水層の特定	○		
	地下水位一斉観測	井戸位置・深度の決定、地下水流動方向の推定		○	
	地下水位連続観測	井戸深度の決定、地下水利用可能量の推定、水収支解析		○	
	物理探査	地質構造の把握、井戸位置・深度の決定		△	△
	ボーリング調査	地質構造の把握、井戸位置・深度の決定		△	△
	井戸試掘調査	地下水利用可能量の把握			○
	揚水試験	地下水利用可能量の把握			○
	水質調査	水利用の適否の判定、地下水起源の推定			○
	揚水量実態調査	地下水利用量の把握		△	

○：必ず実施した方が望ましい調査 △：必要に応じて実施する調査

3.2 気象調査

3.2.1 気象の現況と調査の目的

サヘル地域の年間降水量は、250mm～750mm程度である。雨季と乾季が明瞭であり、11～3月の乾季には降雨は全く見られない。降雨は6～9月に集中しているが、降水量の年変動は大きい。4～5月及び10月には、降水が見られる年もあるが、その量はわずかである。

一方、蒸発散量は年間1,800～3,000mm程度であり、年間降水量の数倍となる。乾季には空気が非常に乾燥するため、蒸発散量は大きいものの、蒸発すべき水が少なくなるため、実際の流域での蒸発散量（実蒸発散量）はほとんどない。雨季には、大気が

湿潤で日射量が少ないため蒸発散位は乾季に比較して小さいが、蒸発すべき水が流域にあるため、実蒸発散量は多い。計算式等から蒸発散量を推定する場合には上記のことに注意する必要がある。

気象調査は、対象地域の流域にどの程度の水資源が涵養されるか、降雨等が地表水・地下水とどのような関連があるかを検討するために実施する。気象調査の結果は、以下のような事項を目的とした統計的解析、流出解析、水収支解析等を使用される。

- ①ダム等への流入量の推定
- ②地下水涵養量の推定
- ③洪水規模の推定
- ④灌漑の用水計画の策定

3. 2. 2 調査の方法

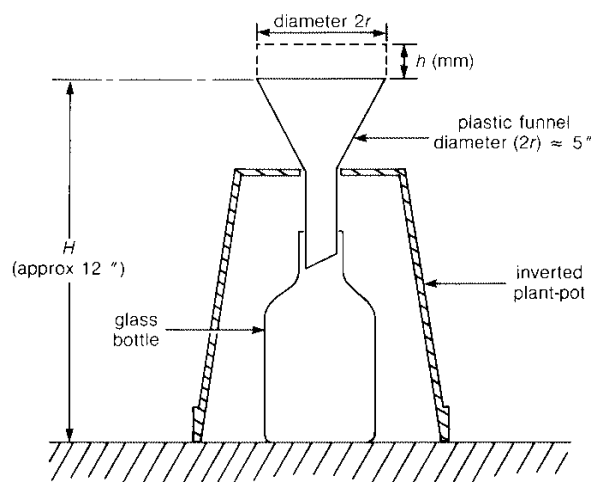
1) 資料収集

対象地域または近傍の地域の日降雨量等の気象資料を収集する。収集期間は、最低でも過去10年分程度とするが、できれば20年分以上が望ましい。統計的解析を行うためにはデータが多いほどよい。また、降雨量の他に気温、蒸発量、湿度、風速、日照時間、日射量、気圧などの資料の収集を行う。

2) 雨量観測

対象地域に既存観測施設がなければ雨量計を設置し、雨量観測を実施する。雨量計には、貯水型雨量計と転倒升型雨量計がある。貯水型雨量計は、円筒式の採水器に雨を集めその体積をメスシリンダーで測定し、深さ（通常0.5mm単位）に換算するものである。アフリカ諸国では直径22cm、高さ38cmの雨量計が標準的に使用されているが、必ずしもこの規格でなくとも、図3.2.2.1に示すように空き瓶などで簡単に自作できる。

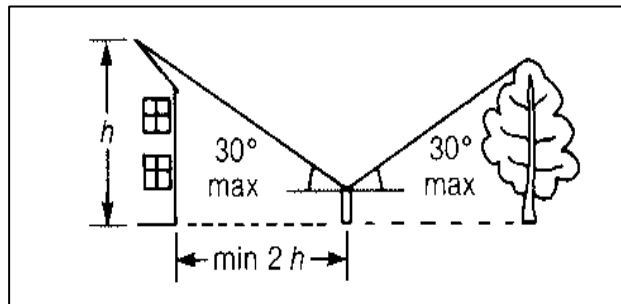
図3. 2. 2. 1 簡易雨量計 (Brassington, 1988)



転倒升型雨量計は二つの升の一方に一定量だけ溜まると、その重さで反対側に転倒し、別の升に水が溜まるようになって同じことを繰り返し、転倒するとき一つの信号を出すようになっている。自記記録により時間毎の降雨強度の測定が可能であるため、洪水流出を調査する場合などに必要である。

雨量計の設置場所は、図3.2.2.2に示すように、周囲に高い樹木などの障害物がなく、平坦で近づきやすい場所が望ましい。

図 3. 2. 2. 2 雨量計の設置場所 (Brassington, 1988)



特に、転倒升型雨量計の場合は、しっかりした基礎の上に、できるだけ水平に設置する必要がある。貯水型雨量計の場合は降雨の都度読み取りを行う必要があるため、地元住民に測定を委託することが多い。このため、雨量計の設置場所として、読み書きできる住民がいる集落に近い場所を選定すべきである。観測は毎日定時に行うが、通常は午前9時の測定値をもって前日の降雨量とする。観測地点の密度は調査目的及び地形条件により異なるが、調査対象流域に最低1か所は必要である。

ダム計画地点でダムの貯水域と上流の集水域で降雨量が異なる場合がある。この場合には、雨量計を貯水域と集水域に別個に設置することが望ましい。

3) 蒸発量等の観測

蒸発計には地面に埋め込むタンク式と地上に設置するパン式がある。WMOが暫定的に世界標準と定めているものは、直径122cm、深さ25cmの円筒形の容器 (US NWS Class A pan) である。この中に水深18~20cmの水位を保つように水を入れ、1日当りの水位の減少量を測る。降雨があった場合は、雨量計から読み取った雨量を差し引く。実際の地表面からの蒸発量は土壌や植生状態などにより異なる。また、実際の湖水面からの蒸発量も気象条件により異なるが、蒸発計の観測値の0.60~0.80とされている。蒸発計は水平に設置し、鳥や動物が水に近づけないようフェンスや金網を張る。

また、気温、湿度、風速、日照時間、日射量、気圧などのデータがあればPenman法などによって蒸発散量が推定できるため、これらについても観測を行うことが望ましい。

3. 2. 3 調査結果の解析

雨量データは、後述する流出解析や水収支解析に使用されるほか、年間雨量や年最大日雨量等の確率雨量を求めるための統計的解析に用いられる。

1) 確率雨量

年間雨量は経験的に正規分布することが知られており、これによって年確率雨量を求めることができる。図3.2.3.1はニジェール国トロディ地点での年間雨量のヒストグラムであり、正規分布の適合性がよい。これに基づき確率雨量を求めたのが表3.2.3.1である。

図3. 2. 3. 1 ニジェール国トロディ地点年間雨量ヒストグラム
(1970～1998年)

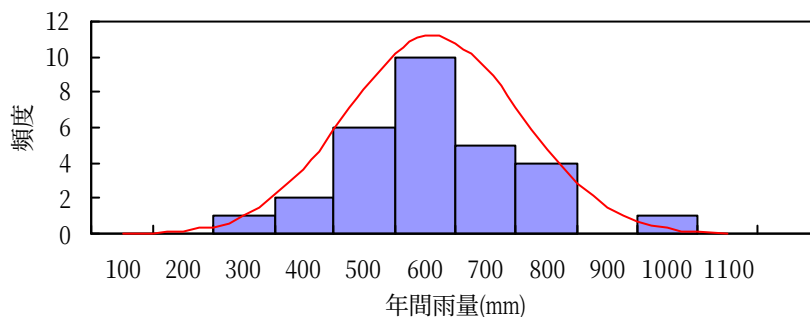


表3. 2. 3. 1 ニジェール国トロディ地点の確率年間雨量

確率	1/100	1/50	1/30	1/20	1/10	1/5	1/2
超過確率雨量(mm)	893.6	854.9	823.7	796.9	745.3	682.9	563.4
非超過確率雨量(mm)	233.2	271.8	303.1	329.9	381.5	443.9	563.4

一方、年最大日雨量は対数正規分布することが経験的に知られている。図3.2.3.2はトロディ地点での年最大日雨量のヒストグラムであり、対数正規分布と見なして良いことがわかる。表3.2.3.2は、これに基づいて算出した確率年最大日雨量である。

図3. 2. 3. 2 ニジェール国トロディ地点年最大日雨量ヒストグラム

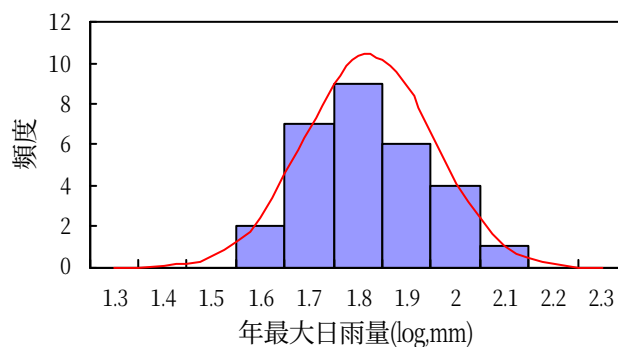


表3. 2. 3. 2 ニジェール国トロディ地点確率年最大日雨量

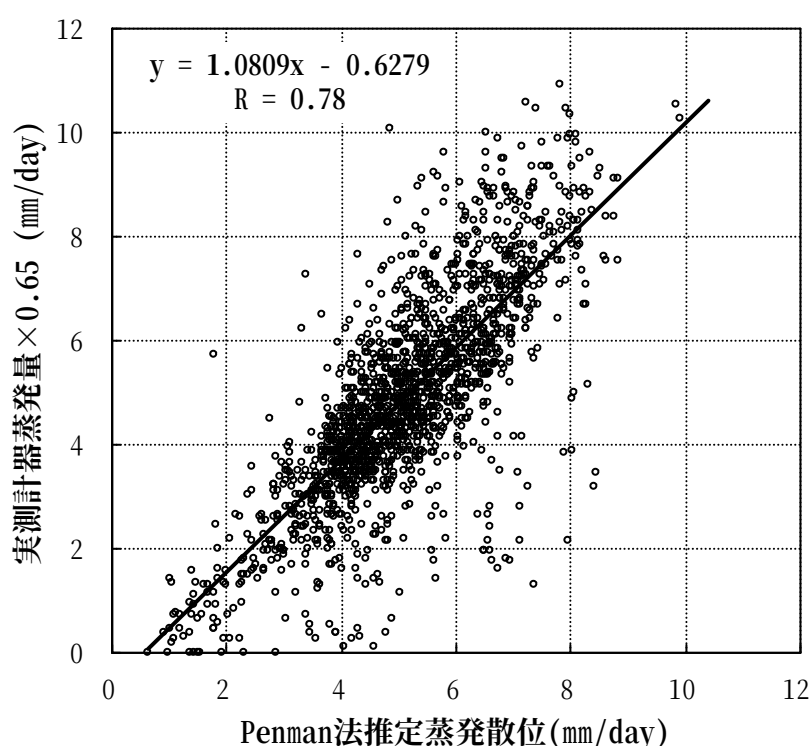
超過確率	1/100	1/50	1/30	1/20	1/10	1/5	1/2
対数正規法	118.8	109.5	102.5	96.9	86.9	76.1	59.2
岩井法	116.9	108.2	101.6	96.3	86.7	76.3	59.5

(単位はmm/day)

2) 蒸発散量の推定

蒸発散量は流出解析や水収支解析で必要になるが、これを直接測定するのは困難である。このため、計器蒸発量や気象データから蒸発散量を推定するのが一般的である。気象データからの推定方法にはThornthwait法、Penman法、Morton法、Brutsaert and Stricker法などがある。図3.2.3.3は、ニジェール国マゲー地点で観測した、降雨・気温・湿度、風速、日射時間日射量・気圧に基づきPenman法で求めた蒸発散位と、同じくマゲー地点で観測した計器蒸発量を比較したものである。計器蒸発量に0.65を乗じたときに、両者はほぼ1:1になる。

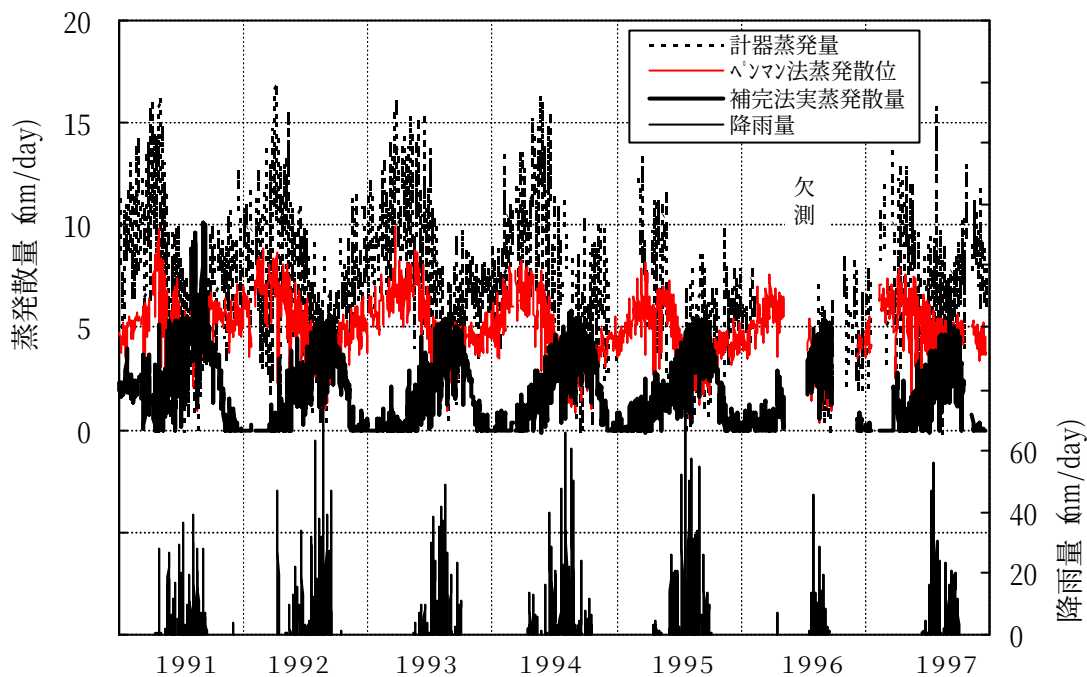
図3. 2. 3. 3 ニジェール国マゲー地点におけるPenman法蒸発散位と計器蒸発量
(1990年～1997年)



Penman法で求められる蒸発散位は、最大可能蒸発量であり、実蒸発散量ではない。特に、サヘル地域のような乾燥地域では、蒸発散位が高い場合でも蒸発散すべき水がないため、Penman法では蒸発散量を過大に見積もることとなる。このため、Morton法やBrutsaert and Stricker法などの補完法が用いられる。補完法とは、乾燥して水分が少

なくなって実蒸発散量が減少すると蒸発散位が増え、湿潤状態では実蒸発散量が増えて実蒸発散位が減少するというように、両者が補完関係にあるという仮定に基づいた蒸発散量推定方法である。マゲー地点における計器蒸発量、Penman法蒸発散位、及び補完法（Brutsaert and Stricker法）から計算した蒸発量を図3.2.3.4に示す。これらの値を比較すると、計器蒸発量及びPenman法蒸発散位は雨季に低く乾季に高いのに対して、補完法による蒸発量はこれらとは逆の傾向を示している。蒸発すべき水の有無を考えると、後者の推定値の方が実蒸発散量に近いものと考えられる。

図3. 2. 3. 4 ニジェール国マゲー地点における計器蒸発量・Penman 法蒸発散位・補完法蒸発散量



〈参考〉

Penman法 (Glenn et al., 1993)

$$ET_0 = \{ \Delta (R_n - G) / (\Delta + \gamma) + \gamma \cdot 6.43 (1.0 + 0.53 v_2) (e_s - e_a) / (\Delta + \gamma) \} / \lambda$$

≪ ET_0 =蒸発散位(mm/day)

Δ =飽和水蒸気圧曲線の気温 $T(^{\circ}C)$ における勾配($kPa/^{\circ}C$)= $0.20(0.00738T+0.8072)^7-0.000116$

T =平均気温($^{\circ}C$), γ =乾湿計定数($kPa/^{\circ}C$)= $0.00163P/\lambda$

P =大気圧(kPa) $101.3-0.01055(EL)$, EL =標高(m)

λ =水の蒸発潜熱(MJ/kg)= $2.501-0.002361T$

R_n =純放射量 ($MJ\ m^{-2}\ day^{-1}$)= $(1-\alpha)R_s-\sigma T_a^4[0.34-0.139(e_a)^{0.5}](0.1+0.9n/N)$

R_s =日射量($MJ\ m^{-2}\ day^{-1}$) $(0.35+0.61n/N)R_{so}$, R_{so} =快晴日の平均日射量($MJ\ m^{-2}\ day^{-1}$)

α =アルベド, σ =ステファン・ボルツマン定数= $4.903 \times 10^{-9} MJ\ m^{-2}\ day^{-1}\ ^{\circ}K^{-4}$, T_a =絶対気温($^{\circ}K$)= $(T^{\circ}C+273)$

n/N =日照時間/可照時間, G =地中熱伝導量($MJ/m^2/day$) 0 , v_2 =地上2mの風速(m/s)

e_s =気温 $T(^{\circ}C)$ の飽和水蒸気圧(kPa)= $3.38639[(0.00738T+0.8072)^8-0.00019(1.8T+48)+0.001316]$

e_a =大気の水蒸気圧(kPa)= $e_s \times$ 平均相対湿度≫

Brutsaert and Stricker法 (Brutsaert and Stricker, 1979)

E_{ac} (実蒸発散量)= $2E_p$ (可能蒸発量)- E_{pp} (Penman法による蒸発散位), $0 \leq E_{ac} \leq E_{pp}$

$E_p=1.26 \Delta R_n / \lambda (\Delta + \gamma)$

3. 3 地表水の調査

3. 3. 1 地表水の現況と調査の目的

サヘル地域の地表水は、大規模な河川及びその支流となるワジ、湖沼等に見られる。年間を通じて常時地表水が見られるのは規模の大きな河川及び湖沼であり、ワジや小規模な沼では、雨季から乾季前半までの一時期にしか地表水が見られないものが多い。

代表的な大規模河川はニジェール川である。ニジェール川は、ギニア国とシエラネオネ国の国境付近の高地ギニア地域を源流とし、河口をナイジェリアのギニア湾にもつ国際河川である。流域関係国は9カ国、流域面積は190万km²、総延長4,200kmを有し、アフリカ第3の大河である。

ワジは、年間のうち一時期にしか流水が見られない河川であるが、流域が広くなるにしたがって、流出の遅れにより、河川水位の維持時間は長くなる。流域がブルキナファソ国からニジェール国に広がるゴルビ川のような流域面積の広いワジでは、雨季の期間中連続して流出が見られる。ゴルビ川では、流出は6月に始まり、8～9月上旬頃にかけて高水が保たれ、10月上旬頃に流水が見られなくなる。流域が狭いワジでは、河川流出は降雨に敏感に反応し、降雨後数時間～1日程度のうちに流出はなくなる。

規模の大きな湖の一つにチャド湖がある。チャド湖は、チャド国、ニジェール国、ナイジェリア国、カメルーン国にまたがっているが、近年干ばつの影響を受けて湖水面積は縮小し続けており、水利用や漁業に大きな打撃を与えている。

窪地や粘土採取跡地または河川沿いの低地には、雨季に沼が形成される場所がある。また、ワジを堰き止めたダムを建設し、水源として利用している場所も見られる。特に、ブルキナファソでは、貯水量が数万～数百万m³規模のダムが多数建設され、飲料用、工業用、灌漑用、養魚用等に利用されている。これらの沼やダムで規模の小さなものは、雨季の開始とともに湛水し、乾季には涸れてしまうことが多い。

地表水の調査は、河川水または湖沼水の出現時期、量、流出形態を把握することを目的に実施する。特に河川の調査の目的は、対象河川の形状やその流出状況を把握することにあり、調査データは流出解析や水収支解析のほか、直接的にはダムなどの河川構造物の設計に使用される。

3. 3. 2 調査の方法

1) 地形調査

地形図は、地表水の調査ばかりでなく、すべての調査で必要である。縮尺1:50,000程度の地形図が望まれるが、この縮尺はサヘル地域では首都周辺の一部しか発行されていないことが多い。当地域では縮尺1:200,000が一般的であり、この地形図を基本地図として利用する以外に方法はない。ただし、1:50,000の空中写真は、ほぼ全域をカバーしているため、地形図のかわりに使用できる。また、特に標高に関して十分高い精度を期待できないが、既存の小縮尺地形図と空中写真に基づき、1:50,000程度の地形図を作成することも可能であり、調査基図として使用できる。衛星画像からも地形の状況を読み取ることができる。

本地域のような平坦な地形のところでは、一般に調査位置の特定が困難である。このような場合は、衛星により緯度経度を特定する小型GPS機器を携帯すると便利である。ただし、誤差により、大縮尺の地図では位置の特定が困難な場合がある。

これら地形図、空中写真、衛星画像により河川・湖沼の形状や周辺の地形を読み、河川の発達状況を把握する。さらに、リモートセンシングの利用や現地調査により、植生、土地利用、氾濫原の形状などの詳細を明らかにする。地形から読み取るべき情報としては、河川では、流域界、谷密度、河道・旧河道の形状、氾濫原の広がり、自然堤防、狭窄部の有無などがあげられる。湖沼やダムの場合は、湖沼の集水範囲、湛水範囲、水位と貯水量の関係等を把握する必要がある。

図3.3.2.1にマリ国セグー市周辺の衛星画像の例を示す。

図 3. 3. 2. 1 衛星画像の例 (マリ国セグー市周辺)



2) 水位観測

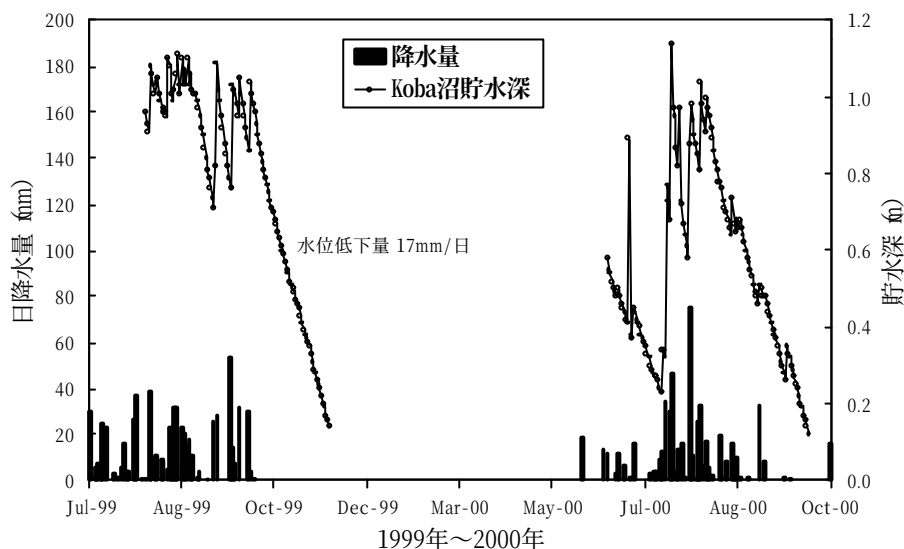
地形の状況を把握した上で、河川、湖沼等について水位観測を実施する場所を選定する。この場所の選定にあたっては、接近が容易な場所であること、最高水位から最低水位までが一貫して測れる場所であること、長期間の観測が可能であること、などを考慮して決定する。河川の場合は、堆砂や浸食を避けるため、蛇行による曲線部を避け、流況の安定した直線区間に設置した方がよい。また、他の河川による影響を避けるため、合流点付近は避けるべきである。

水位観測は、標尺を設置し定期的に読みとる方式と、自記水位計を設置し自動記録する方式がある。標尺は最も簡単で確実な方法であり、ニジェール川など安定した流出がある大河川ではこれでも十分である。一方、流域が小さく、降雨毎に流出する水位変動の激しい河川で流出解析を行うには、自記水位計が必要である。自記水位計を設置する場合でも、標尺は水位の基準になるものであるため必ず併置し、自記水位計

の記録を定期的（例えば記録紙やバッテリーの交換時）に点検する必要がある。また、インク式のペンを用いた自記水位計ではペン先の乾燥に注意する。

図3.3.2.2に、マリ国のコバ沼の水位観測結果を示す。湖沼やダムの場合は、推定蒸発量と乾季における水位の低下率から、貯留水の地下浸透量を見積もることができる。

図3. 3. 2. 2 マリ国コバ沼の水位観測結果

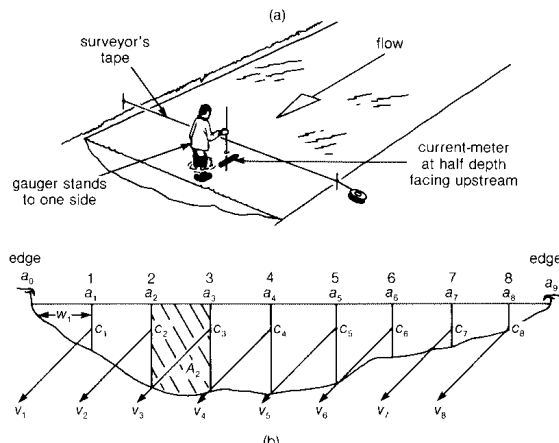


3) 流量観測

流速測定と河川横断測量により、水位を流量に換算する関係式（水位－流量曲線）を求める。水位の観測データと水位－流量曲線から、河川の流量を算定することができる。

流速測定は、河川水位の高低に応じて、プロペラ式流速計や浮子を用いて行う。河川の流速は一様でなく、深度方向及び左右岸方向で差がある。このため、深度方向については、水深が浅い場合は表面から測って水深の60%の深度における流速を測り平均流速とする。水深が深い場合は、水深の20%と80%の2点で測定し、平均値を平均流速とする。左右岸方向については、河川断面をいくつかのセクションに区切り、それぞれについて測定を行い合計する（図3.3.2.3）。

図3. 3. 2. 3 流速測定方法模式図 (Brassington, 1988)



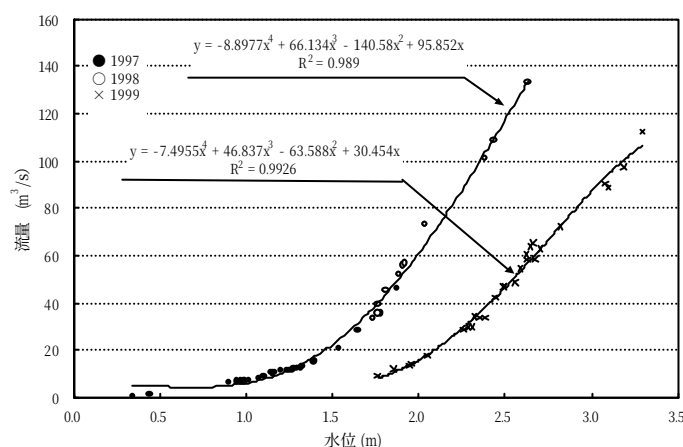
洪水時など流速が激しい場合は、流速計による測定は困難であるため、浮子を投入し、あらかじめ距離を測っておいた区間を流下する時間を測定して流速を求める。この場合、測定値に係数（0.85程度）を乗じて平均流速に換算する必要があるため、ある程度の誤差は避けられない。なお、オレンジなどの果実は浮子として代用でき、適度な自重があるため投入しやすい。また、遠方からでも識別が容易であり、回収する手間もいらない。

水位－流量曲線の精度を向上させるためには、洪水時等の大流量時にできるだけ正確な観測を行うとともに観測数を増やすことが重要である。図3.3.2.4に、トロディ地点におけるゴルビ川の水位－流量曲線の事例を示す。

流量が少ない場合は、三角堰や四角堰で河川を塞ぎ止め、越流深を測ることにより流量を求めることができる。測定可能な最大流量は、三角堰では切り欠き角90°で約70ℓ/sec、四角堰では幅1.6mで約470ℓ/secである。越流深から流量を求めるための公式や数表は、水理学の参考書を参照されたい。

河川の水位・流量観測では、堆砂や浸食により断面形状が変化する場所での観測は避けるべきである。このような地点で観測を行わざるを得ない場合には、流量観測の回数を増やし、水位－流量曲線を図3.3.2.4のように、常に更新する必要がある。

図 3. 3. 2. 4 ニジェール国トロディ地点ゴルビ川の水位－流量曲線



4) 水質調査

水質調査は、用途に適した水質であるかどうかを確認するために行う。現地では携帯計器により、温度、pH、電気伝導度（Electric Conductivity）等の測定が可能である。主要イオン、窒素、有機物、細菌などについては、試料を採取して専門の分析機関に分析を依頼する。

最近では、試薬の入ったチューブを用いて現場で直ぐに分析できるパックテスト等の簡易水質分析方法もある。

一般的に必要な分析項目は、 Na^+ 、 K^+ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 Cl^- 、 SO_4^{2-} 、 HCO_3^- 、 Fe 、 NH_4^+ 、 NO_3^- 、 NO_2^- 、TDS、pH、EC、一般細菌、大腸菌である。流域に鉱山や工

場などがある場合には、懸念される重金属などの項目を追加する。

これらの分析値を、WHOの飲料水水質ガイドライン（表3.3.2.1）、USDA灌漑水の水質基準（図3.3.2.5）などに照らして、水質の適否を判断する。

電気伝導度は、電気抵抗（比抵抗値）の逆数であり、水の場合、溶存する塩類総量が多いほど大きい値を示す。電気伝導度は、簡単に測定することができ、水質の代表的な指標とすることができる。電気伝導度が高く、溶存する塩基総量が多い水は、飲料用水や灌漑用水として不適となる場合が多い。

表 3. 3. 2. 1 WHO飲料水水質ガイドライン（一部を抜粋して掲載）

項 目	ガイドライン値
Sb	0.005 mg/litre
As	0.01 mg/litre
Ba	0.7 mg/litre
B	0.5 mg/litre
Cd	0.003 mg/litre
NH ₂ Cl	3 mg/litre
Cl	5 mg/litre
Cr	0.05 mg/litre
Cu	2 mg/litre
CN	0.07 mg/litre
F	1.5 mg/litre
Pb	0.01 mg/litre
Mn	0.5 mg/litre
Hg	0.001 mg/litre
Mo	0.07 mg/litre
Ni	0.02 mg/litre
NO ₃ ⁻	50 mg/litre
NO ₂ ⁻	0.2 mg/litre
Se	0.01 mg/litre
U	0.002 mg/litre
E.coli or thermotolerant coliform bacteria	Must not be detectable any 100-ml sample
Gross alpha activity	0.1 Bq/litre
Gross beta activity	1 Bq/litre

図 3. 3. 2. 5 USDA 灌漑水の水質基準

$$SAR = Na^+ / \sqrt{(Ca^{2+} + Mg^{2+})/2}$$

C1:ほとんどの作物・土壌に使用可能

C2:適度のリーチングが起こる土壌で使用可能。中位の塩分耐性作物に使用可能

C3:排水不良土壌では使用不能。適度の排水があれば、塩分耐性の強い作物に使用可能。

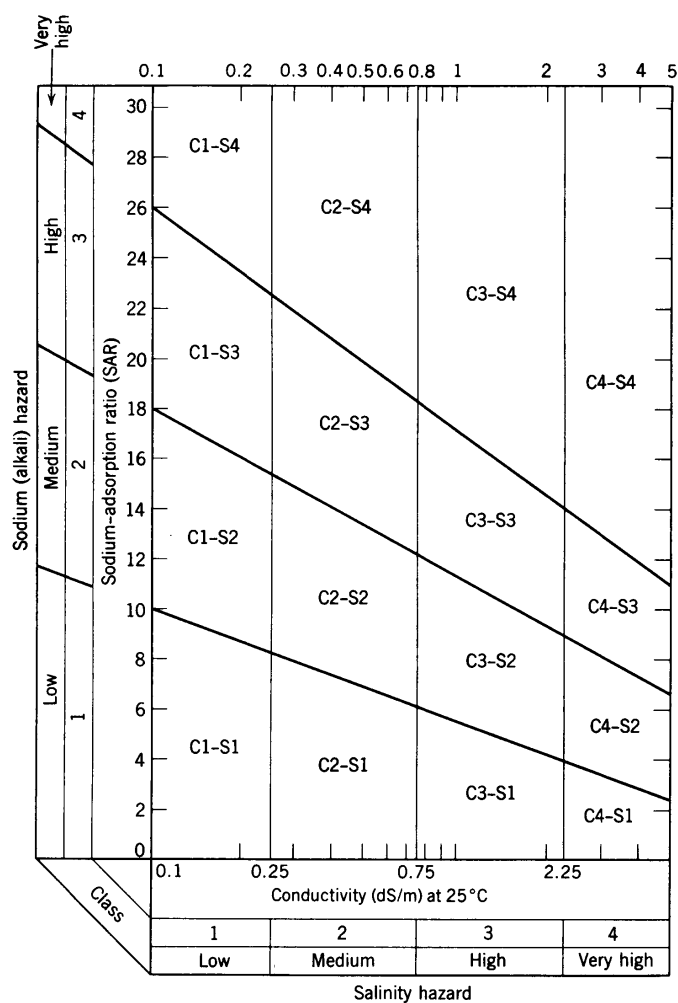
C4:通常の灌漑には使用不能。特殊な塩害対策が必要。

S1:ほとんどの土壌で使用可能

S2:細粒で高い陽イオン交換能力を持つ土壌では明らかなナトリウム害が発生する。

S3:ほとんどの土壌でナトリウム害が発生する。特殊な土壌処理、リーチングおよび有機物付加が必要。

S4:灌漑目的には不適。



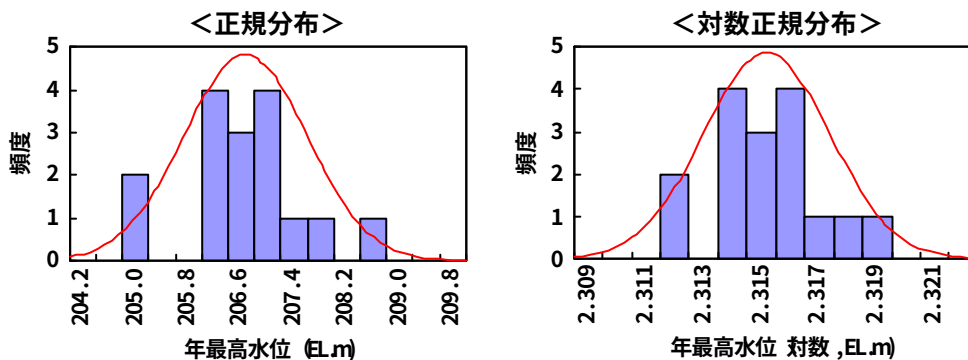
3.3.3 調査結果の解析

河川水の解析では、観測により得られた河川水位から流量を求める。この計算により、ある期間にどの程度の流出があるかがわかる。また、降雨と流量の関連を解析することにより、降雨に対しての流出量や流出率が得られる。これらの解析結果は、ダムなどの河川構造物を計画する上で必要な情報となる。

1) 確率水位の計算

河川水位も、降雨量と同様に統計的に処理することができる。例えば、洪水時の最高水位は、対数正規分布をすることが経験的に知られている。図3.3.3.1は、ニジェール国マゲー実証圃場内に雨季耕作が可能のように小規模ダムを設置するにあたり、その高さをどの位にすれば良いか検討するため、過去のゴルビ川の年最高水位をヒストグラムにしたものである。ヒストグラムの形状から、正規分布よりも対数正規分布の方が適合性が良いと判断され、マゲー地点におけるゴルビ川の1/2確率年最高水位は206.9mと推定された。

図3.3.3.1 ニジェール国マゲー地点ゴルビ川年最高水位ヒストグラム



2) 流出解析

河川流出は、流域面積、降雨強度、土地利用等の各種因子により変化する。

流域面積と流出状況の関係について、雨季にだけ流水があるワジのひとつであるゴルビ川の事例を表3.3.3.1に示す。

表3.3.3.1 ゴルビ川流域における流域面積区分と河川流出状況

河川流域面積	河川流出状況
概ね 100km ² 以下	常時流水はなく、降雨に応じた短時間洪水が発生する。
概ね 100～1,000km ²	常時流水はないが、降雨に応じた短期間流水がある。
1,000km ² 以上	雨季には、ほぼ常時流水がある。

流出量や流出率の算定にあたっては、降雨と河川流出の関係を解析することが重要である。ゴルビ川支流の流域面積200km²以下の例では、降雨があると1～数時間後に

河川流出が始まり、ほぼ一日以内に流出は終了してしまう。このような全降雨に対応した洪水流出の実態から、降雨は短時間に流域に一様に降るとの仮定で、洪水追跡法によって解析すると流出率15～31%が得られた。一方、同様の流域に対して、単純に流出率＝河川流出量÷（降雨量×流域面積）として求めると12～18%が得られる。また、流出解析によく利用されるORSTOM法（Rodier & Auvray, 1965）では、流域面積120km²での10年確率洪水時の流出率は28%となる。さらに、タンクモデルでは、後述するように流出率は5%程度と推定される。

このように流出率は計算方法により異なり、その値を正確に見積もることは難しい。これは流出率が流域の土地利用状況、地形、土壌、地質、雨の降り方などに影響されるためである。流出率の計算にあたっては、計画される施設の重要性によって計算方法を選択する必要がある。

ダムなどの河川構造物を計画する場合、その川の流量資料が必要となるが、大河川は別として支流のワジ川では流量資料は全くないといってよい。一方、雨量データは流量データに比べて多い。そこで、雨量データから流量を推定する流出解析法が用いられる。すなわち、観測資料の整っている流量と雨量のデータから流出モデルを作成し、これに過去の雨量を入力することにより、過去の流量を推定するものである。これに基づき確率流量を統計的に求めれば、ダムの設計洪水流量等が決定できる。

流出解析法には種々の方法があるが、ここでは、ゴルビ川支流のマゴ川の解析に用いたタンクモデルによる方法を紹介する。タンクモデルとは、流域を孔の開いたタンクでモデル化したものである。雨は、タンク上部から入り、開けられた孔から流出する。流出量は、孔から水面までの高さ、孔がもつ係数に比例する。底の孔で浸透を表し、横孔で河道への流出等の側方への流動を表現するモデルである。図3.3.3.2に解析に用いたタンクモデルの構造とパラメータを示す。このモデルは、土壤水分構造に対応するタンクが最上段のタンクの左側についている。また、最上段タンクの浸透孔が底面から突き出ている特徴をもつ。図3.3.3.3には、このモデルで再現した計算流量と実測流量を示す。

図 3. 3. 3. 2 ニジェール国マゴ川タンクモデル構造図

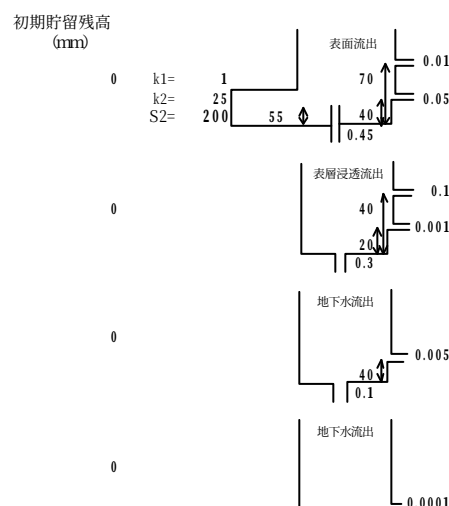
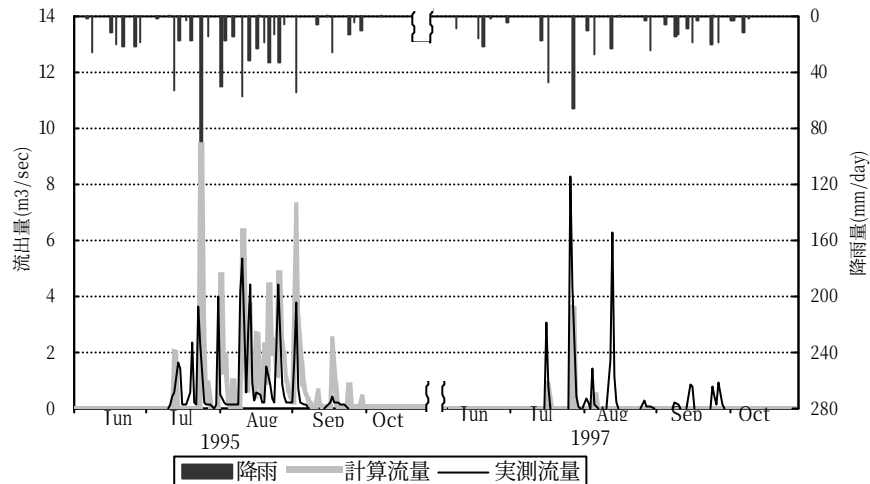


図 3. 3. 3. 3 タンクモデルによる計算流量と実測流量 (1995 年、1997 年)



3) 水収支解析

前述のタンクモデルを用いて、流域内の水収支を推定することができる。ゴルビ川流域におけるタンクモデルによる解析では、降雨に対して、蒸発散量66%、河川流出量5%、地下水流出量29%程度と推定されている。

タンクモデルを用いて、地下水位を推定することもできる。前述の図3.3.3.3のようなタンクモデルでは、下側の第3段タンクや第4段のタンクにおける水深から地下水位を推定することが可能である。もし、対象地域で地下水位の観測が行われているならば、そのデータを用いて、タンクモデルの精度を検証することもできる。

また、ダムや沼について、簡単な水収支モデルを用いて、貯水状況の再現と予測をすることができる。図3.3.3.4は、トロディダムの貯水状況を表すモデルの一例である。このモデルを用いて、貯水位の変動を計算した結果を図3.3.3.5に示す。

図 3. 3. 3. 4 トロディダムの貯留モデル

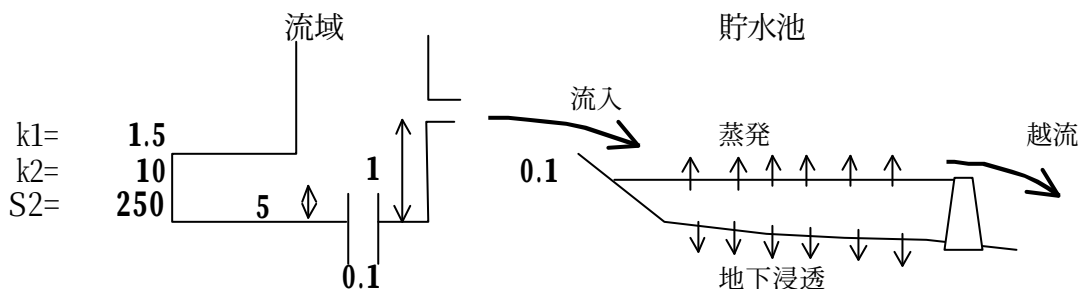
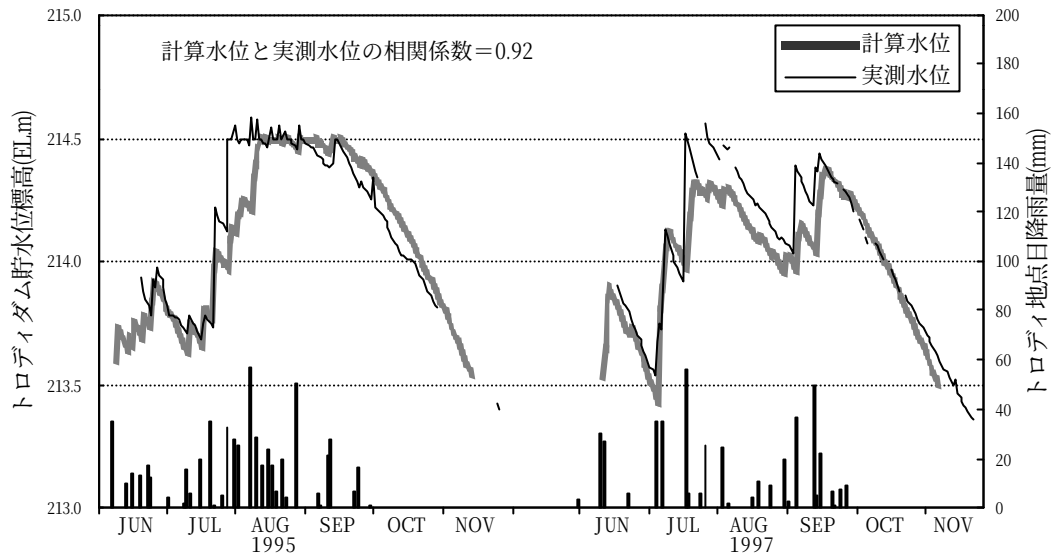


図3.3.3.5 トロディダムの貯留計算結果



対象流域での水収支を明らかにすることにより、利用可能な地表水の量や地下水の賦存量を推定することができる。

3.4 地下水の調査

3.4.1 地下水の現況と調査の目的

一般に、地下水は賦存形態により、層状水（間隙水）と亀裂水（裂か水）に区分される。

層状水は、沖積層等の帯水層の間隙を満たし、層状をなして分布する地下水である。その賦存量は、帯水層の厚さや広がりによって左右される。ワジ氾濫原に分布する沖積層中の層状水は、循環性が高く、賦存量も豊富なため、重要な水源の一つとして評価されている。帯水層が厚く、ワジ等から豊富な地下水涵養がある場合には、1つの井戸当たり数百 m^3/day の取水が可能である。

一方、亀裂水は、岩盤の亀裂や断層破碎帯中に存在している地下水である。井戸による亀裂水の開発可能量は、層状水に比較して一般に少ない。

サヘル地域では、地下水は降雨から直接涵養される他に、河川や沼等の地表水からも涵養されている。このため、地下水涵養源である河川や沼から離れるに従って、地下水位は深くなる傾向がある。ワジ近くの井戸では、雨季には河川水位に近い地下水位となり、乾季には、10m程度低下する場合がある。一方、地下水涵養源から離れた井戸では、地下水位変動幅が比較的小さく、地下水位は地表下30m以深となる箇所がある。循環性がある地下水を対象とした持続的な地下水利用を行うためには、地下水涵養源の分布状況や地下水涵養量を把握しておく必要がある。新たに小規模ダムを建設したり、既存の沼の改修を行い貯水容量を増やすことにより、地下水涵養量を増加させることも有効な水資源開発の方策の一つである。

地下水の現況調査は、地下水の賦存形態や帯水層の性質を知り、最適な取水方法や

適切な利用計画を検討するために行う。

現況調査では、始めに、地形・地質状況を把握し、地下水の入れ物である帯水層の分布状況を明らかにする。また、亀裂水の開発に当たっては、断層や褶曲構造を把握し、岩盤の亀裂や破碎帯が発達している箇所を把握する。このような地形・地質調査には、空中写真判読、地表踏査、物理探査等の手法が用いられる。

さらに、帯水層の性質や地下水の流動機構を明らかにし、開発可能量をもとめるために、地下水位観測や井戸の試掘・揚水試験等が行われる。

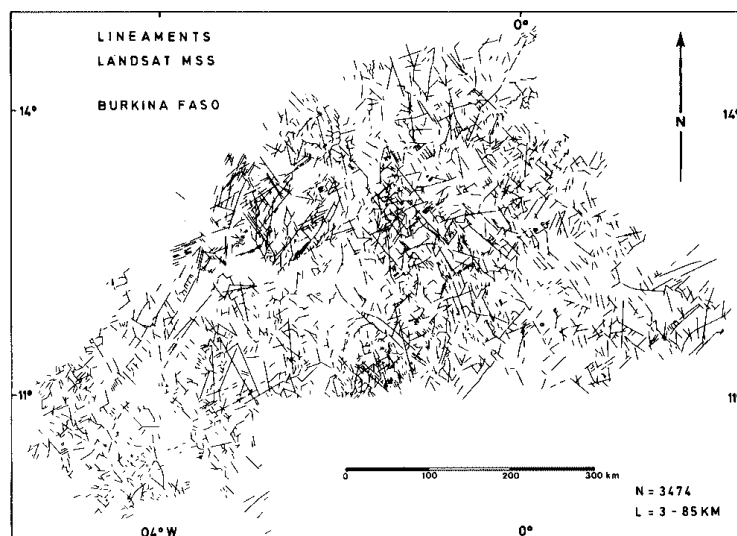
地下水は飲料用として供される場合が多い。この場合には、良質の地下水の確保が重要となる。このため、水質分析を行い、目的に適合した水質であることを確認しておく必要がある。

3. 4. 2 調査の方法

1) 地形調査

対象地域の水文状況や地質の状況を把握するために地形調査を行う。調査にあたっては、地形図、空中写真、衛星画像が用いられる。空中写真や衛星画像は、地形図では省略されているような詳細な情報が得られる。空中写真を立体視することにより、地形の起伏の詳細、土地利用状況、植生、地質構造等の判読が可能である。特に、岩盤地帯で亀裂水を開発の対象とした井戸の位置を選定するには、空中写真や衛星画像を判読し、リニアメントの位置を把握することが有効である。リニアメントとは、地形不連続点が直線上に配置する線状の構造であり、亀裂水を多く含む断層や断裂を反映することが多い。図3.4.2.1にブルキナファソ国のリニアメント判読図を示す。LANDSAT、SPOTなどの衛星画像解析では、波長帯の選択により植生、土地利用、地表水の分布、表層地質、地質構造などの情報も得られる。

図3. 4. 2. 1 ブルキナファソ国全域のリニアメント判読図 (Bannert et al., 1980)



2) 地質調査

地下水は、地層の空隙や岩石の割れ目に存在する。したがって、地下水の調査では、帯水層となり得る地質の分布状況を把握することが基本である。地層や岩石の広がりや構造を表現している地質図があれば、地下水の存在しやすい地層の分布状況が把握できる。

BRGMはサヘル地域の地質データを豊富に蓄積しており、地質図、地質関係の報告書類、各種調査法についてのマニュアル類を多数出版販売している（BRGM（1960）など）。

より詳細に地形・地質条件を把握するために、地質踏査を行う。踏査にあたっては、地形状況や崖に露出する地層や岩石の状況、湧水地点などに注意し、地下水を含む地層・岩石の分布や空隙の状態を把握する。また、露頭から試料を採取し、粒度分析を行うことにより、概略の透水係数を知ることでもある。

3) 既設井戸調査

井戸台帳は個々の井戸について、位置（緯度・経度）、構造、井戸深度、地下水深度、可能揚水量、帯水層の地質などを記載したもので、多くの国でデータベース化されている。地質図と併用することにより、より有用な資料となる。ただし全ての井戸を網羅しているわけではないので、現地調査で補足する必要がある。井戸によっては柱状図の記録が残っていることがあるため、これらも可能な限り入手する。

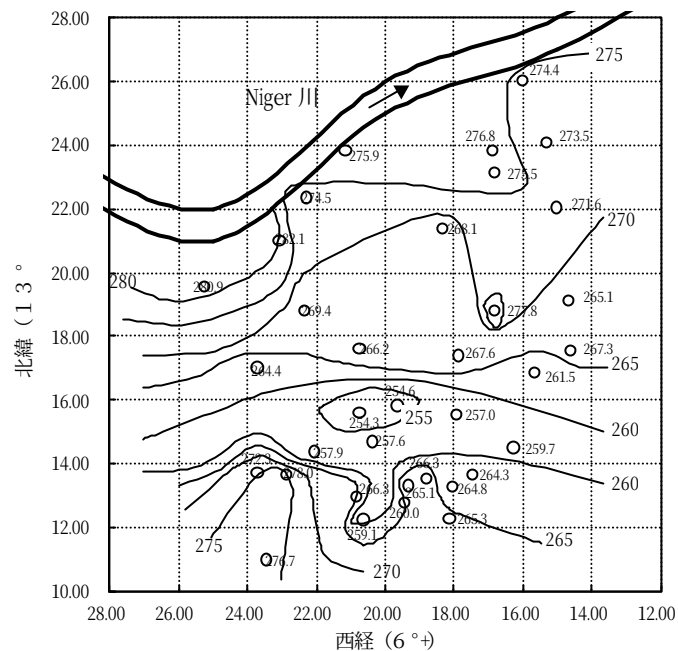
現地調査は、既設の井戸について、地下水位、井戸深度、井戸孔径、地盤からの立ち上がり高、井戸形式、揚水方法、設置場所の地形（氾濫原、氾濫原斜面、台地など）を把握するために行う。また、住民からの聞き取りにより、主な用途、おおよその日揚水量、設置時期、掘り下げなどの改修履歴などを記載する。GPS機器等で測定した緯度・経度、地盤標高、スクリーン区間の深度なども分かれば記入する。調査の結果は、井戸周辺の見取り図、水位測定基準点を明示した井戸のスケッチ、写真をつけて整理する。また、井戸の壁面が観察できる井戸では、懐中電灯などを使用してその地層を観察する。可能であれば揚水試験を実施し、帯水層の透水量係数や貯留係数等の水理定数を算出する。

4) 地下水位一斉観測

多くの井戸の水位を短期間（数日間程度）で調べ、水位を地形図に示せば、地域の地下水面の形状が明らかになる。さらに井戸の地盤標高を水準測量等によって求めれば、地下水位等高線図を描くことができる。地下水は等高線に直交方向に流れるので、等高線図から地下水の流れの方向を知ることができる。対象地域が広く井戸数も多い場合は、水準測量は経費と時間がかかるため、気圧式高度計（誤差は10m程度ある）や既存地形図から標高を求める。これらの方法は精度は落ちるものの、大略的傾向は知ることができる。図3.4.2.2は、マリ国セグー南部地域の地下水位等高線図である。この図では、地下水位標高は調査地域の中央付近で標高255m弱と最も低くなっている。

このことより、地下水は、北方に位置するニジェール川および調査地域の南を流れるバニ川から涵養されていることが推定できる。

図3. 4. 2. 2 マリ国セグー南部地域地下水位等高線図 (1998年10月)

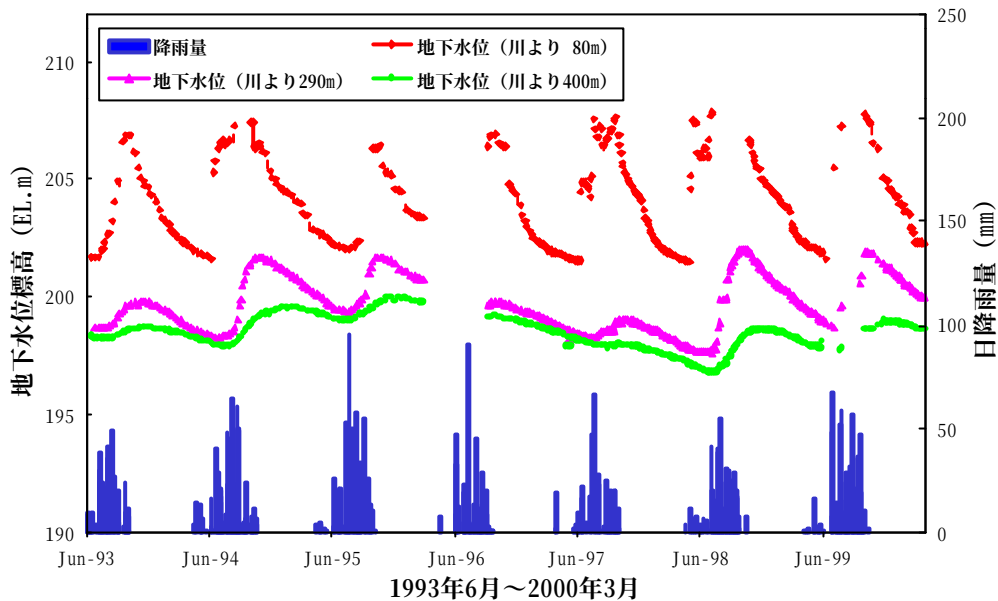


地下水等高線からは、地下水の流向のほか、帯水層の透水性についてもおよその情報を得ることができる。すなわち、コンターが密な地域は透水性が低く、コンターが粗い地域では透水性が高い。したがって新たに井戸を設置する場合、コンターが密な地域より粗い地域が良く、さらに地下水の流向が集中するような地点を選定すればなお良い。

5) 地下水位連続観測

地下水位連続観測は、地下水位の季節的変動や経年的変動傾向を知るために行う。一般に、不圧地下水位は雨季に上昇し乾季に下降する変化を示すが、年間の水位変化量や変化の時期は帯水層によって異なる。したがって、地下水位観測は、どの帯水層の地下水位を計っているかを明確にしておかなければならない。既設井戸を利用する場合、人為的な揚水の影響を受けるため、できれば専用の観測孔を新設することが望ましい。観測方法は人間が現地に出かけ携帯水位計で定期的に測定する方法と、自記水位計を井戸に設置し自動記録する方法がある。測定間隔は少なくとも週に1回以上で、1年以上は継続することが望ましい。携帯水位計は電極式が一般的であり、コードと測量用テープで自作することもできる。地下水位があまり深くない場合はチョークを塗ったスティールテープでも代用できる。なお、地盤標高は水準測量等で求め、地下水位測定基準点(孔口)までの高さも測っておく。図3.4.2.3に、ニジェール国マグー実証圃場内での地下水位観測記録の一例を示す。

図3. 4. 2. 3 ニジェール国マグー実証圃場内での地下水位観測記録



6) 電気探査

電気探査は、地盤中に電気を流し、地盤の比抵抗値を求めることにより基盤深度、風化帯深度、岩相と層厚、塩水浸入域の分布等の地質状況を間接的に推定する方法である。ボーリング調査などの直接的方法と比較すると低コストかつ短期間で実施できるため、広域的調査に適している。ボーリング調査等のその他の地質調査手法と併用することで探査精度は向上する。

(1) 必要な機材

探査装置本体、電極4本、電線4本、バッテリー（通常DC12V）、電極打ち込み用ハンマー4本、測量ロープ

(2) 作業人員

5名（本体オペレータ×1、電極設置要員×4）

(3) 探査原理と探査方法

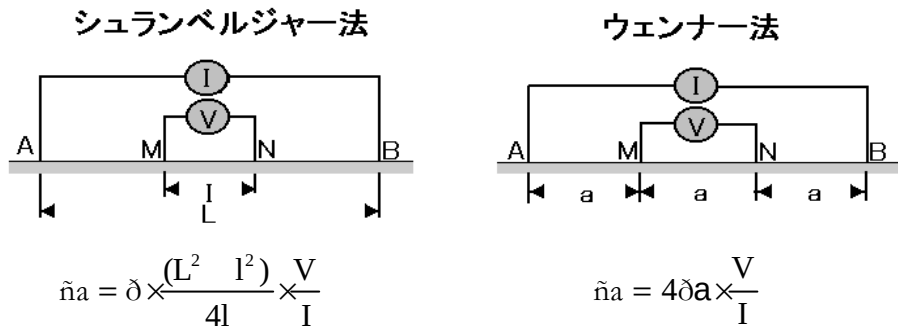
1対の電極（電流極AB）から地盤に電流を流し、その結果として形成される電場を他の1対の電極（電位極MN）で観測する。

電気探査は、大きく分けて水平探査と垂直探査に分けられる。水平探査は、電極間隔を一定に保ったまま電極系を1組にして測線上を移動して、見掛け比抵抗値 ρ_a を測定する方法で、地盤の比抵抗値の水平方向の変化を把握できる。垂直探査は、ある1点を中心に順次電極間隔を増やしていく方法で、その地点の比抵抗値の深さ方向の変化を調べるものである

電極配置には多くの種類があるが、1本の測線上に展開するシュランベルジャー法と

ウェンナー法が最も普及している。小規模な調査では電極間隔が等しく作業性のよいウェンナー法が、大規模な調査では深部探査に向くシュランベルジャー法が用いられることが多い。ともに、流した電流 I と観測された電位差 V および電極間の距離から ρ_a を計算する。図3.4.2.4にシュランベルジャー法とウェンナー法の電極配置と ρ_a の計算式を示す。

図 3. 4. 2. 4 電極配置の例



垂直探査では、見掛け比抵抗値と電極間隔との関係（ $\rho - a$ 曲線）を標準曲線法やコンピュータによるリニアフィルタ法で解析することにより、地層の真の比抵抗値と層厚がもとめられる。地層の比抵抗値は、概ね表3.4.2.1のような範囲の値を取ることが知られているので、既存地質図、地質踏査結果、既設井戸調査結果などを参考にして地質を推定する。

表 3. 4. 2. 1 比抵抗値と地質との関係（Meyer de Stadelhofen, 1991）

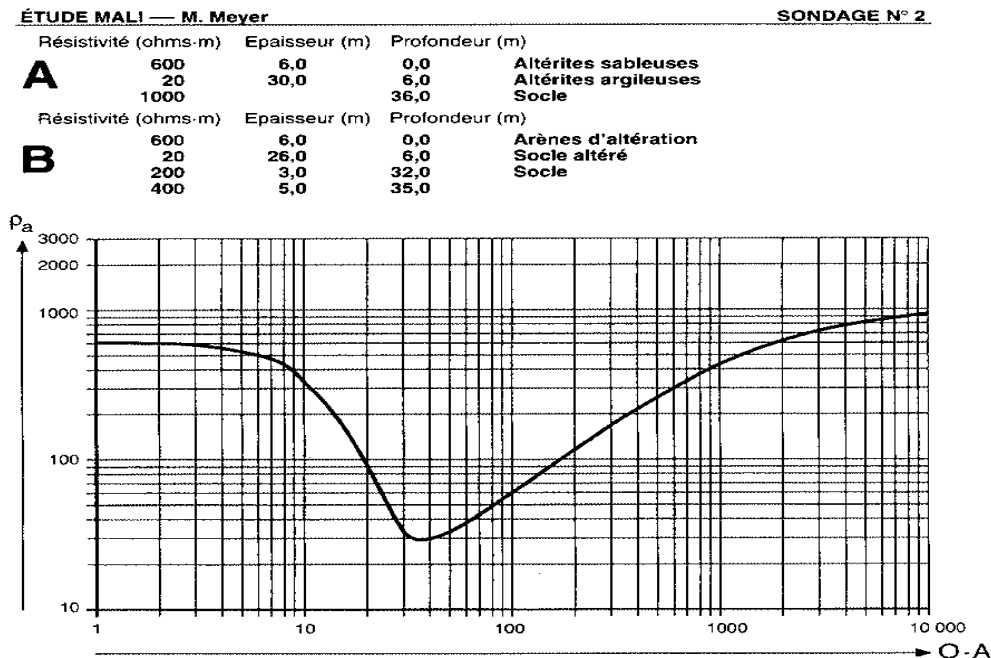
	Valeurs pour les formations saturées (Ωm)	Valeurs les plus fréquentes proches de (Ωm)
Argiles	5 à 10	10
Sables	50 à 400	60
Graviers	150 à 500	200
Schistes cristallins	100 à 10000	3000
Basaltes	10 à 50000	3000
Granites	100 à 50000	5000
Calcaires et dolomites	100 à 10000	2000
Eau de mer	<0.2	
Eaux douces de surface et de subsurface	10 à 300	
Eaux connées	0.05 à 10	
Limite de potabilité	2 à 6	

電気探査は、次のような手順で実施される。

- ①探査地点の選定→②電極の設置・抵抗値の測定→③比抵抗値算出→
- ④ $\rho - a$ 曲線作成→⑤標準曲線・補助曲線による解析、またはコンピュータによる最適解の計算

図3.4.2.5に電気探査の解析例を示す。この例では、2通りの解釈が示されている。

図 3. 4. 2. 5 電気探査解析例 (Meyer de Stadelhofen, 1991)



この例のように、一つの ρ_a 曲線に対し地質構造を一つに絞り込んで推定することが難しい場合がある。探査の精度を高めるためには、同一地点でのボーリングや比抵抗検層、露頭での直接比抵抗測定等の結果を加味して解析を行い、解の範囲を狭める努力が必要である。

また、サヘル地域では乾季には、地表面が乾燥し、接地抵抗が大きくなって電流が流れにくくなるため、測定精度が低下する。このような場合は、電極接地部に水や塩水をかけたり、電極を複数にするなどの方法がとられる。

7) 弾性波探査

弾性波探査は、地盤中を地震波（弾性波）が伝わる速度から、基盤深度、風化帯深度、地下水位等を推定する方法である。土木地質調査や地下水調査では、地層面等の地質境界面で弾性波が屈折する現象を利用した屈折法弾性波探査が一般に行われている。弾性波の起振源として爆薬等が用いられることが多いが、ワジ氾濫原での浅層地下水の探査にあたっては人力起振による方法（簡易弾性波探査）が有効である。以下に、簡易弾性波探査の仕様を述べる。

(1) 必要な機材

探査装置本体、ジオフォン、大型ハンマー、鉄板、ハンマースイッチ、コード、測量テープ

(2) 作業人員

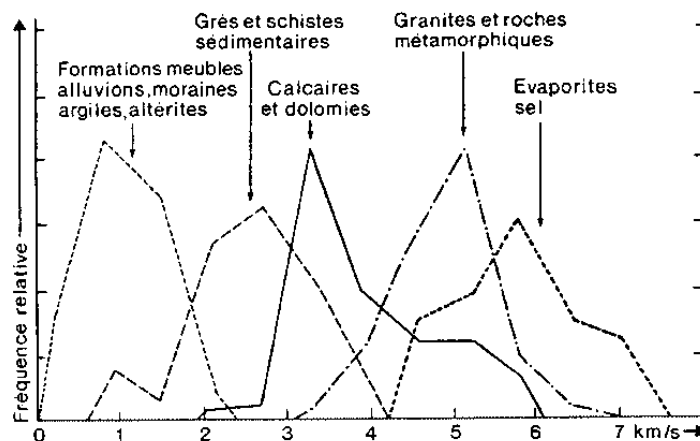
3名（本体オペレータ、ハンマー打撃者、ジオフォン設置者各1名）

(3) 探査原理と探査方法

爆薬等の人工的振源から地下に弾性波を送れば、その一部は地層面等の弾性的不連続面で反射、屈折され、再び地表に帰ってくる。したがって、これを観測すれば地下構造や地下の物理的性質を知ることができる。屈折法は各受振点に最初に到達する波、すなわち初動を観測するもので、この初動の到達時間を受振点の距離に対してプロットした走時曲線から弾性波速度と弾性的不連続面の深度を求め、図3.4.2.6に示すような岩質と弾性波速度の関係を勘案しつつ地下構造を解析する。

爆薬による起振はエネルギーが大きいため測線長を長くでき深部まで探査できるが、火薬の使用は手続きや安全面から取り扱いが難しい。一方、人力ハンマー打撃による起振は、エネルギーは小さいが取り扱いが容易で深度20m程度までなら十分探査可能であるため、浅層地下水の探査に適している。

図 3. 4. 2. 6 弾性波速度と地質との関係 (Meyer de Stadelhofen, 1991)



探査は以下のような手順で実施される。

①探査測線の選定→②起振→③受振記録採取→④初動読み取り→⑤走時曲線作成
→⑥弾性波速度断面の計算

図3.4.2.7にニジェール国マゲー実証圃場内で実施した簡易弾性波探査記録と解析結果を示す。

図 3. 4. 2. 7 ニジェール国マゲー実証圃場内での簡易弾性波探査記録と解析例

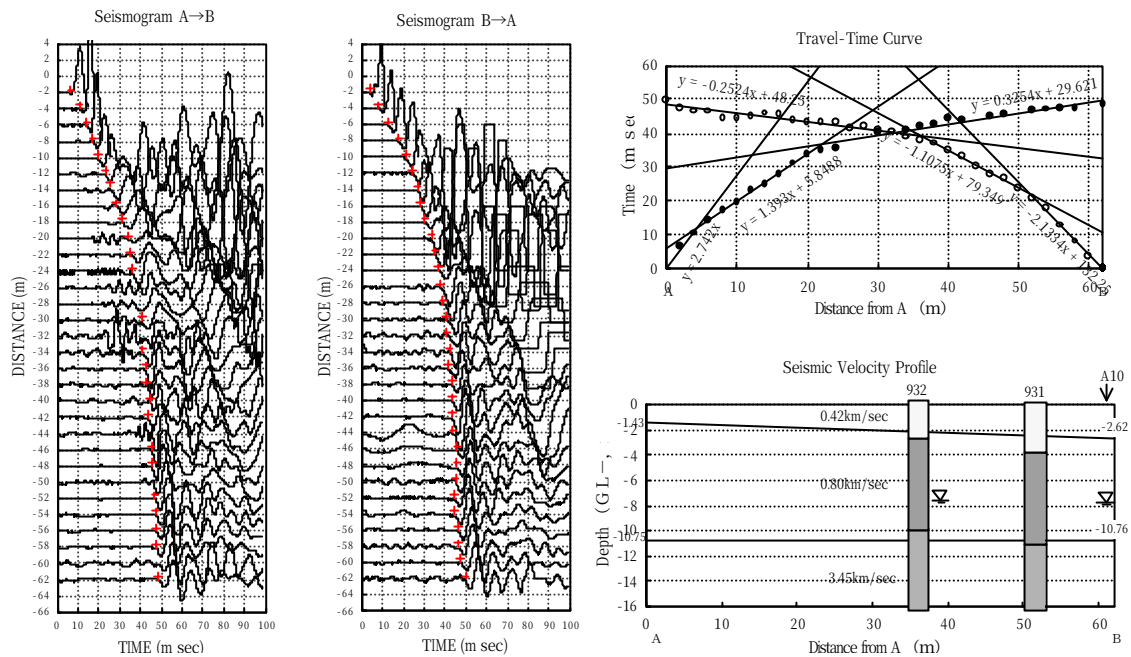
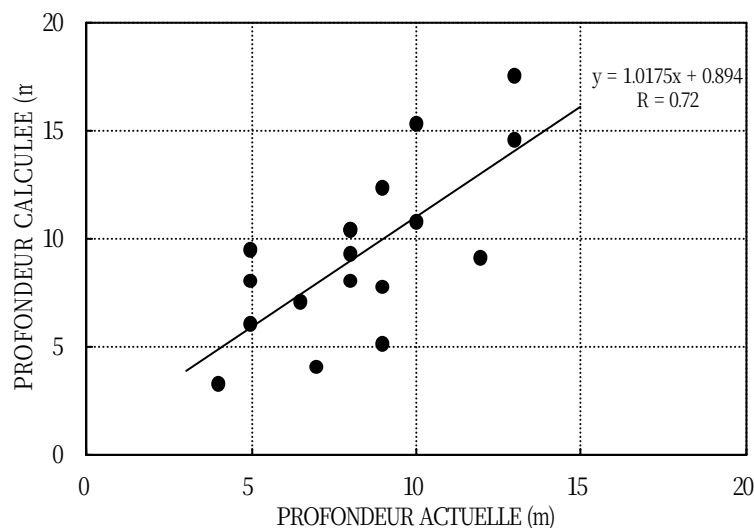


図3.4.2.8は、同一地点で実施した簡易弾性波探査結果とボーリング結果とを比較したものである。調査地域の地質は、沖積層と花崗岩質基盤から構成されている。簡易弾性波探査から推定された基盤深度とボーリングで実測された基盤深度では、±5m程度の誤差はあるが、相関係数は0.72と比較的良好である。このことより、簡易弾性波探査は、沖積層と基盤の境界を予測する手法として有効であることが確認された。同様に、地下水位が10m程度より浅い場合は、飽和沖積層と不飽和沖積層との境界も検出でき、地下水位を推定することが可能であった。

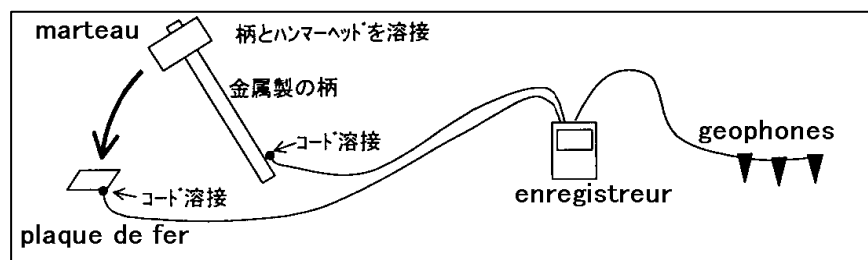
図 3. 4. 2. 8 ニジェール国マゲー周辺地域での実測基盤深度と解析基盤深度



(4) 弾性波探査における留意事項

- ①屈折法弾性波探査の場合、原理的制約により、下部の地層ほど弾性波速度が速くないと屈折波が地表に到達しないため探査が不可能である。したがって、地表部に硬いラテライト層などが分布しているような地域には弾性波探査を適用できない。また、地中の中間に位置する地層の厚さが薄い場合は検出できないことがある。
- ②測線長は、探査深度の5～7倍に設定する。ハンマー起振の場合、測線長は100mが限界である。
- ③風の影響を受けてノイズが大きくなりやすいため、風の強い時期は探査を控えたほうが良い。受振器を樹木から離して設置することでノイズを低減できる場合がある。機種によってはデジタルスタッキングによりS/N比が低減できる。
- ④距離測定用の測量テープは、ノイズの伝達経路になる。起振点と受振点との間でテープを足で踏みつけることにより、ノイズが吸収され良好な信号が得られる。
- ⑤ノイズがどうしても除けない場合は、起振点を測線に沿ってずらすことにより、ノイズが低減することがある。
- ⑥簡易弾性波探査では、ハンマーの打撃時刻を検出するため、一般に、コンデンサーマイクが内蔵されたスイッチ（ハンマースイッチ）をハンマーに取り付けて測定を行う。ハンマースイッチの代わりに、図3.4.2.9に示すように、打撃時に回路が短絡することにより信号を探査装置に伝える簡易トリガーを用いた方法でも十分な探査を実施できる。

図3. 4. 2. 9 簡易トリガーの模式図



8) ボーリング調査

ボーリング調査は、直接地下を掘削することにより、コアを採取し地下地質を確認するものである。

機械掘削によるボーリングの経費は、ニジェールの場合で約10万FCFA/mするなど高価である。このため地質踏査や物理探査などの事前調査を十分行った上で、最も効果

的な調査位置を選定すべきである。未固結堆積物や強風化帯ではコアを採取することが困難であることが多く、この場合、地質の判定は掘屑（スライム）で行う。

簡易なボーリングとして、人力で掘るオーガーボーリングがある。沖積層や軟質な風化帯の所では、図3.4.2.10に示すように表層をシャベル等で掘り込んでからオーガーボーリングを実施することにより、9m程度までの掘削、サンプリングが可能である。オーガーボーリングで地下水面以深を掘る場合、ケーシングを立て込んで孔壁の崩壊を防ぐ必要がある。ただし、礫層の掘削は困難である。

地下水位が比較的浅い場合は、後述するように、オーガーボーリング孔を利用して簡易揚水試験を行うことができる。また、本井戸の揚水試験の観測孔としても活用が可能である。

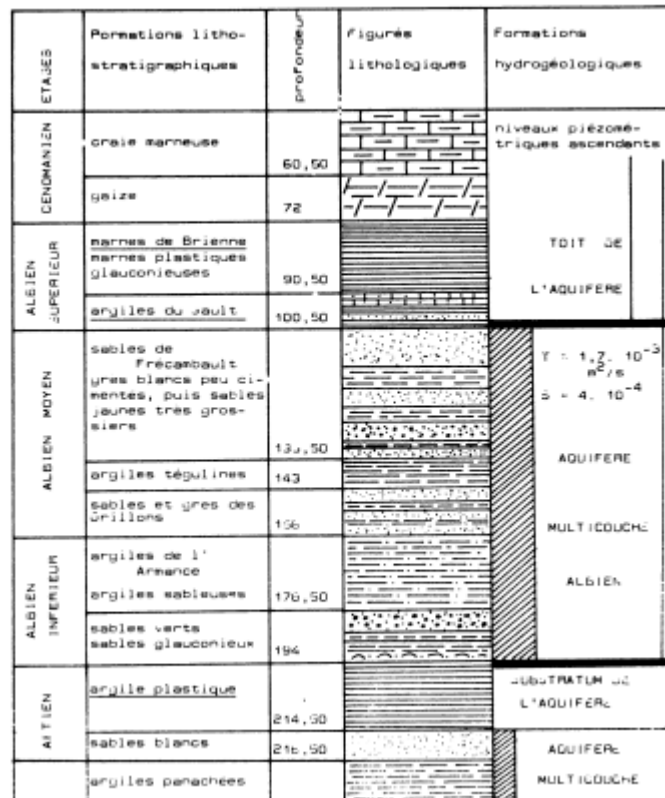
図3.4.2.10 オーガーボーリングの実施例



ボーリングにより得られたコアサンプルやスライムを観察して、図3.4.2.11のような地質柱状図に地質の種類、粒度、色調などを整理する。

掘削後の孔に穴を開けた塩化ビニール管を挿入して、観測孔として仕上げ、地下水位等の観測を行うことができる。ワジ川の氾濫原など雨季に湛水するような地点に観測孔を設置する場合、地表水の流入を防ぐため塩化ビニール管と孔壁との間を粘土やセメントでシールしておかなければならない。また、子供のいたずら（孔中に物を投げ入れ詰まらせてしまうことが多い。）を防ぐため、立ち上がりを1.5m以上と高くしたり、鍵のかかる蓋を設けることも必要となる。また、家畜によって倒壊されることもしばしば起こるため、周囲にフェンスを設けることも必要である。

図 3. 4. 2. 1 1 地質柱状図の例 (Castany, 1982)



9) 井戸試掘調査

井戸の試掘調査は、帯水層の性状を把握する上でもっとも確実な方法である。本調査では、掘削中の孔壁の観察とスケッチ、柱状図の作成、井戸壁からの湧水状況等を観察する。掘削後は、井戸仕上げを行い、揚水試験を実施する。井戸は、難透水性の基盤まで到達した完全井とすることが望ましい。ただし、人力掘削で地下水面以下を掘り下げることは難しいので、地下水位が最も低下する時期を選んで掘削する必要がある。井戸掘削及び仕上げについては「4.4 井戸による地下水開発」の項を参照されたい。

10) 揚水試験

揚水試験は、既設井戸あるいは新井戸から地下水を汲み上げ、井戸の能力や帯水層の性状を把握するものである。試験で測定すべき項目は、揚水開始・揚水停止からの時間、地下水位の時間的变化、揚水量である。

揚水試験には、段階揚水試験と連続揚水試験の2種類があり、前者は井戸自体の能力すなわち揚水可能量を把握する目的で、後者は帯水層の水理定数を解析する目的で実施する。また、オーガーボーリング孔を使用して揚水試験を行うことができる（簡易揚水試験）。この他に、アフリカ諸国水理研究委員会（CIEH）の簡易法がサヘル地域

で広く行われているが、これは連続揚水試験に含まれる（CIEH, 1982, 1988）。

揚水のためのポンプは、地下水位が地表から6～7m程度以内であれば、吸い上げ式のポンプを使用できるが、それより深い場合は水中モーターポンプが必要である。帯水層の透水係数が小さい場合は、手動ポンプやつるべを用いる。

揚水量の測定は三角堰を用いるのがよいが、ドラム缶等の既知容量の容器が満水になるまでの時間から求めてもよい。なお揚水によって水位が低下すると揚水量が減少するため、ポンプの出力やバルブの操作によって揚水量が一定となるよう調節する必要がある。しかし、これは、実際にやってみると難しい。このため、本試験に先立って予備的な揚水を行い、この調節に慣れておくとともに、揚水量をどの程度に設定したらよいかの見当をつけておく。

揚水された水は、再び井戸内に流入しないようにできるだけ離れた場所に排水する必要がある。

（１）段階揚水試験

段階揚水試験は、揚水量を段階的に変化させ、揚水量と水位降下量の関係から井戸の能力を決定する方法である。また、この試験により安定的に揚水できる量を見出し、連続揚水試験での揚水量を決定する。揚水可能量が少ない場合は揚水量を段階的に変化させることが困難であるため、この試験は省略せざるを得ない。

（２）連続揚水試験

連続揚水試験は、一定量の揚水を一定時間継続し、水位の低下量及び揚水停止後の水位の回復量を記録する方法である。水理定数の解析法としては、タイス法、ヤコブ法、回復法が一般的である。揚水井戸単独でも試験は可能である。しかし、試験の精度を向上させるために、井戸から5～10mの範囲に観測孔を設置し、地下水位の計測を行うことが望ましい。水位の測定間隔は、表3.4.2.2のように揚水初期には密にするが、時間の経過に伴い測定間隔を長くしてよい。

表 3. 4. 2. 2 揚水試験の水位測定間隔 (Brassingtonn, 1983)

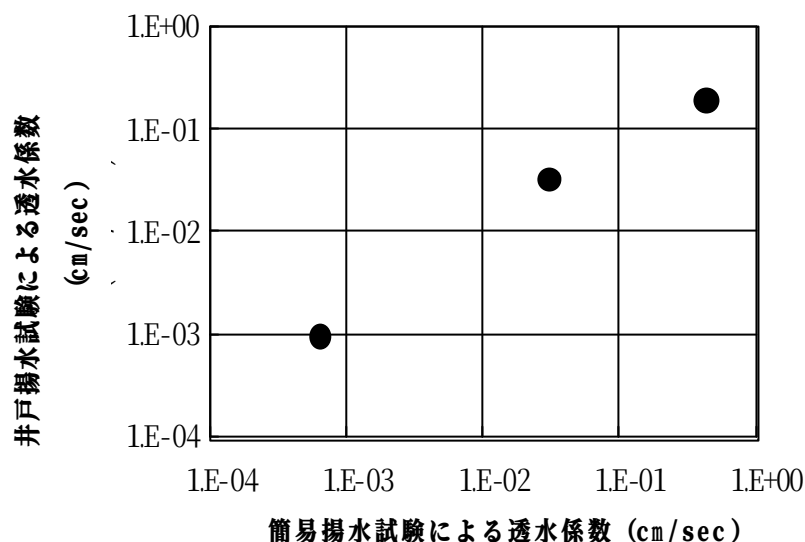
揚水開始からの時間	測定間隔
0-5 min	30 sec
5-10 min	1 min
10-20 min	2 min
20-60 min	5 min
60-100 min	10 min
100 min-4 hrs	15 min
4-8 hrs	30 min

（３）簡易揚水試験

オーガーボーリング孔を利用した揚水試験（簡易揚水試験）を行うことにより、帯水層の性状を低コストで比較的精度良く把握できる。本井戸の掘削に先立ち、簡易揚水試

験を行うことにより、井戸掘削のリスクを減らすことができる。掘削は孔径150mm程度で行い、スクリーン加工した口径100mm程度の塩化ビニール管等を挿入する。試験方法は、井戸の場合と同様である。図3.4.2.12は同一地点での井戸とオーガー孔での揚水試験の結果を比較した図であるが、算出された透水係数は比較的よく一致している。ただしオーガーボーリングの掘削深度は9m程度が限度であるため、地下水位が深い場合は適用できない。

図 3. 4. 2. 1 2 簡易揚水試験と井戸揚水試験との比較



1 1) 水質調査

水質調査は、地表水の調査と同様に、目的とする用途に対する水質の適否を調べるために行う。また、地下水の起源や流動機構を推定するためにも有効でもある。分析項目は地表水の調査に準ずる。水質は季節的に変化するため、少なくとも豊水期と渇水期の年2回程度は必要である。採水に先立って井戸内の水のある程度汲み上げ、新鮮なサンプルを採取するようにする。採水直後に分析を実施すべき項目もあるので、これについて分析を行った後、試料を清浄な容器に入れ分析機関まで搬送する。

1 2) 揚水量実態調査

揚水量実態調査は、既設井戸について、1日あたりの揚水量や用途を明らかにし、用水計画策定の基礎資料を得るための調査である。揚水量は聞き取りではなかなか把握しがたいため、終日井戸に張り付いて調査する必要がある。少なくとも雨季と乾季に1回ずつ行い、年間の揚水量を推定する。表3.4.2.3は、ブルキナファソ国ヤクタ村で行った揚水量実態調査の結果をまとめたものである。

表3. 4. 2. 3 ブルキナファソ国ヤクタ村世帯別揚水量実態調査結果 (1998年8月)

世帯主名	所属集落	世帯人数	揚水量 (リットル)			実使用量 (リットル)			平均消費量 (ℓ/day/人)
			8/25	8/26	8/27	8/25	8/26	8/27	
H.M	Louguereli	8	60	45	30	50	34	20	4.3
A.A	Louguereli	10	66	100	55	46	80	52	5.9
B.A	Louguereli	8	42	48	45	29	31	38	4.1
H.A	Mango	7	48	48	76	43	36	66	6.9
D.S	Mango	19	54	76	84	34	41	61	2.4
A.H	Mango	7	45	49	39	40	49	29	5.6
H.S	Diarriél	26	120	120	120	105	92	88	3.7
H.H	Diarriél	6	60	75	65	55	58	37	8.3
B.H	Diarriél	19	162	78	143	149	75	118	6.0
平均									5.2

3. 4. 3 調査結果の解析

地下水の解析は、各種の現況調査に基づき、帯水層を区分し、その広がりや性状を把握するとともに、地下水の賦存量や利用可能量を明らかにするために実施する。

1) 帯水層の分類

岩石や地層は、水を通しやすい透水層、浸透しにくい難透水層、中間的性質を持つ半透水層に区分できる。このうち、一定の厚さや広がりを持つ透水層で構成され、利用可能な地下水を含む岩石や地層を帯水層という。また、帯水層は、難透水性の基盤や加圧層によって画されている場合が普通である。

一般に帯水層は、地質時代で区分された地層名で区分される。これはある地質時代に形成された起源や履歴を同じくする一定地域の地層や岩石は、同様の物理的・化学的な性質を有することから、同じ帯水層に区分されることが多いためである。

帯水層の区分は、まず対象地域の地質区分をした上で、井戸の分布を重ね合わせ地下水を含むかどうか、帯水層としてのまとまりがあるかを検討する。帯水層としての性格を有する地層であれば、更に地質踏査、物理探査、ボーリング調査などによりこれらの水文地質構造を確かめ、一定の共通性があれば、1つの帯水層としてくることが出来る。区分された帯水層に対して、地下水位変動や揚水可能量を把握することにより、そこにおける地下水賦存状況が明らかになる。

表3.4.3.1に、ゴルビ川流域において、帯水層を、沖積帯水層、第三紀帯水層、基盤岩帯水層に区分した例を示す。このように帯水層の特徴を各項目に整理することにより、開発にあたっての井戸タイプや井戸深度、揚水可能期間、揚水可能量などの見積もりができる。

表3.4.3.1 ゴルビ川流域の帯水層の分類及び特徴

特徴／帯水層	沖積層	第三紀層	基盤岩
分布場所	河床、ワジ氾濫原	メサ、ビュート	準平原
帯水層の構成	シルト・砂・砂礫の互層	シルト岩・砂岩の互層	花崗岩・変成岩の風化帯や亀裂帯
層厚	20m以下	50m以下	数m～30m以上
地下水のタイプ	不圧	不圧	不圧、一部被圧
地下水位（地表下）	0～-6m	-10～-40m	-5～-25m
年間変動幅	3～8m	0.5～8m	3m以下
揚水可能量（1井戸あたり）	最大 900 m ³ /day	50～100 m ³ /day	10～20 m ³ /day
透水量係数	平均 5×10^{-3} m ² /sec ($10^{-2} \sim 10^{-3}$ m ² /sec)	平均 10^{-4} m ² /sec	平均 2.5×10^{-4} m ² /sec ($10^{-3} \sim 10^{-5}$ m ² /sec)
透水係数	平均 1×10^{-1} cm/sec ($10^{-1} \sim 10^{-2}$ cm/sec)	平均 10^{-2} cm/sec	平均 5×10^{-3} m ² /sec ($10^{-2} \sim 10^{-3}$ cm/sec)
水質（平均値）	PH=6.6、EC=210 μS/cm Ca(HCO ₃) ₂ タイプ	pH=6.0、EC=68 μS/cm CaSO ₄ タイプ	pH=7.2、EC=460 μS/cm Ca(HCO ₃) ₂ タイプ

図3.4.3.1に、ニジェール国マゲー村周辺で見られる第三紀層と基盤岩の分布状況を示す。この地域では、写真の右下のように基盤岩である花崗岩が露出している箇所が見られる。また、第三紀層は、メサを形成している。

図3.4.3.1 第三紀層のメサと基盤岩（花崗岩）の露頭



2) 揚水試験の解析

(1) 水理定数の算出

連続揚水試験から求められる帯水層の水理定数は、透水量係数 (T) と貯留係数 (S) の2つである。また、透水量係数を帯水層厚で除すことにより透水係数 (K) が求められる。解析方法としては、以下の3種類が一般的である。なお、回復法では貯留係数は求められない。

a) タイス法

井戸から地下水を汲み上げる際の揚水量、水位降下量、揚水時間の関係は、非定常状態と考える場合には下記の式に表すことができる。

$$W(u) = \left(\frac{4pT}{Q} \right) \cdot s \quad \cdots \cdots ① \quad u = \left(\frac{S}{4T} \right) \cdot \frac{r^2}{t} \quad \cdots \cdots ②$$

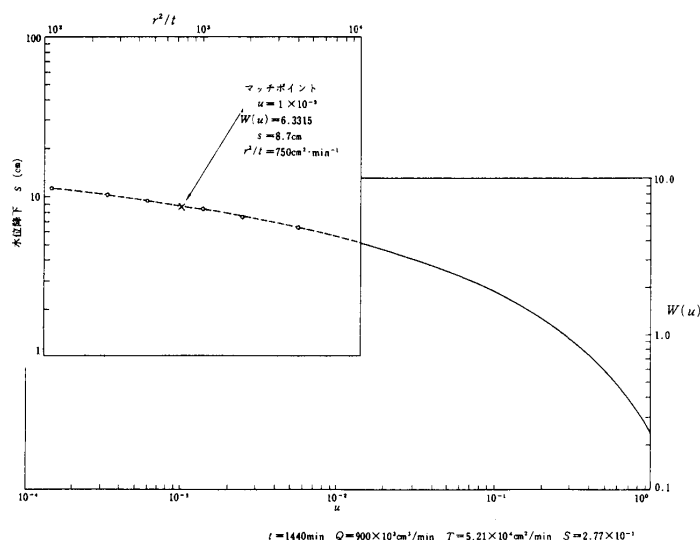
$$W(u) = \int_u^\infty \frac{e^{-u}}{u} du \quad \cdots \cdots ③$$

Q:揚水量 r:井戸中心からの距離 T:透水量係数 S:貯留係数
t:揚水時間 s:水位降下量 W(u):井戸関数

上式の①と②では、括弧の中は一定であるから、W (u) とuの関係は、Sとr²/tとの関係になる。uに対するW (u) の値を両対数グラフ上にプロットしたものは、タイスの標準曲線 (Theis-type curve) と呼ばれる。この標準曲線と同じ大きさの両対数グラフ上に揚水試験から得られたSとr²/tをプロットし、2枚のグラフを縦横に平行移動しながら、重ね合わせる。グラフ上の2つの曲線が良く一致した状態で、任意の点 (マッチポイント) のW (u) 、u、s、r²/tを読み取り、上式①及び②に代入してTとSを得る。

タイスの標準曲線と解析事例を図3.4.3.2に示す。

図 3. 4. 3. 2 タイス法による解析事例 (改訂地下水ハンドブック, 1998)

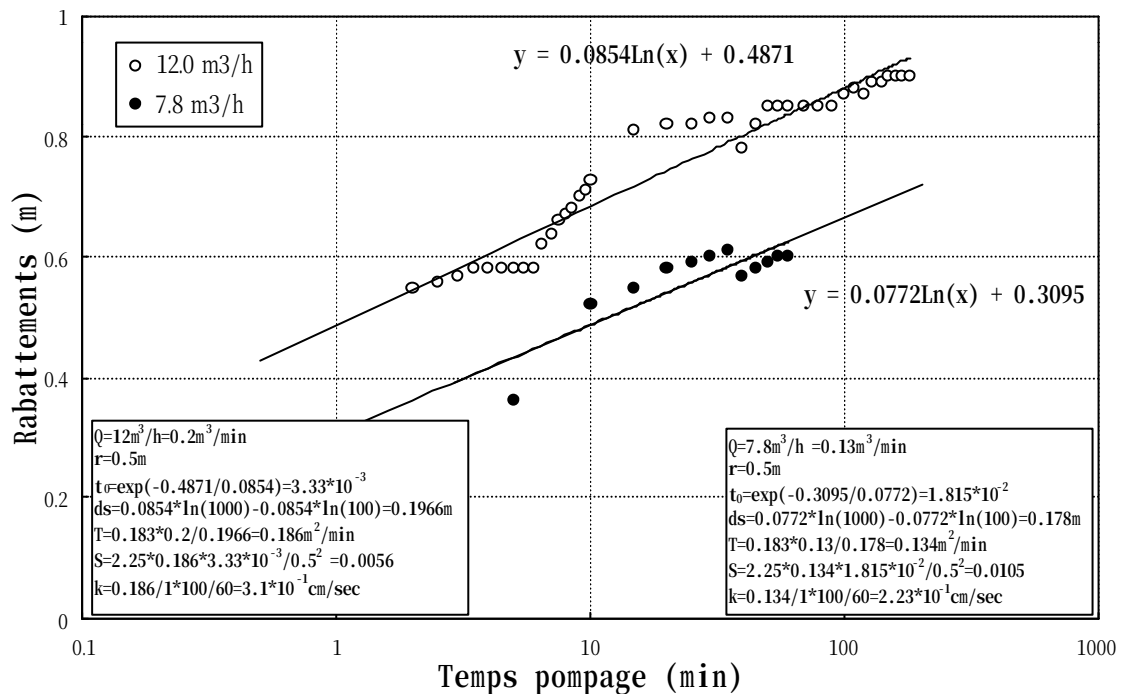


b) ヤコブ法

タイス法を簡略化した方法である。片対数方眼紙の横軸に揚水開始からの時間、縦軸に水位低下量をプロットする。プロットが直線に並ぶことは殆どないため、右側のプロットを直線で近似し、近似直線が横軸と交わる点のX座標から t_0 を、対数1サイクルあたりの水位低下量 ds を求め、下式により T と S を算出する。図3.4.3.3はニジェール国ゴルビ川の沖積帯水層に掘削された井戸の解析例である。この例のように、観測孔を設けない場合は、貯留係数 S の信頼性は低くなるため、算出された値は参考程度にとどめる。

$$T = \frac{0.183Q}{ds} \quad S = \frac{2.25T \cdot t_0}{r^2}$$

図 3. 4. 3. 3 ヤコブ法による解析例

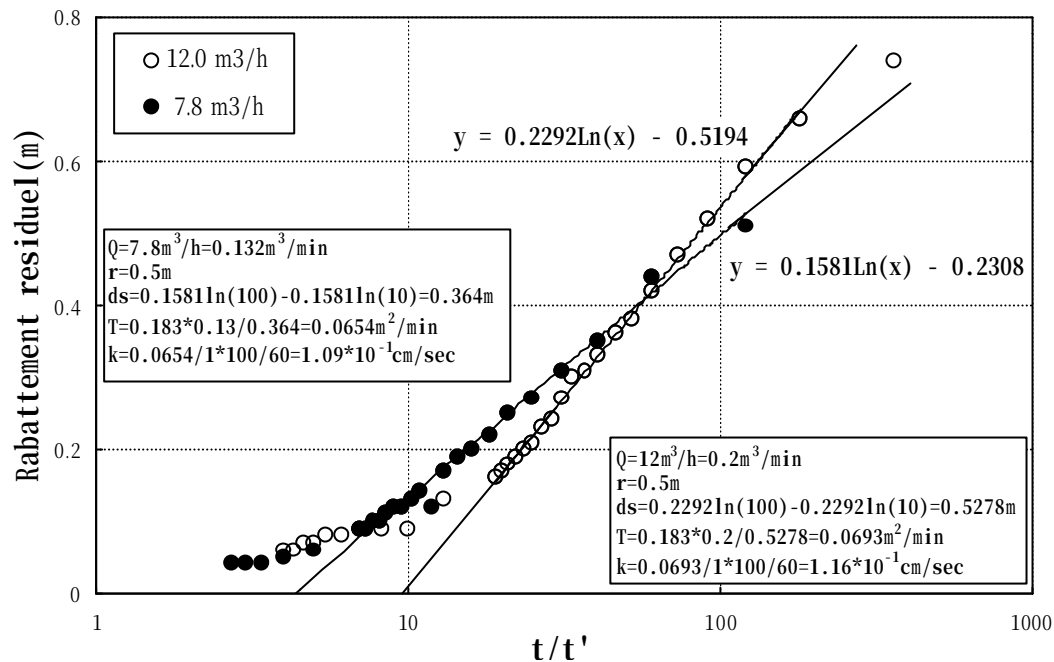


c) 回復法

片対数方眼紙の横軸に、揚水開始からの経過時間 (t) / 揚水停止からの時間 (t')、縦軸に残留水位（初期水位との差）をプロットする。プロットが直線に並ぶことは殆どないため、左側のプロットを直線で近似し、対数1サイクルあたりの水位低下量 ds を求め、下式により T を算出する。図3.4.3.4は、前図と同じ井戸での回復法解析例である。

$$T = \frac{0.183Q}{ds}$$

図 3. 4. 3. 4 回復法による解析例



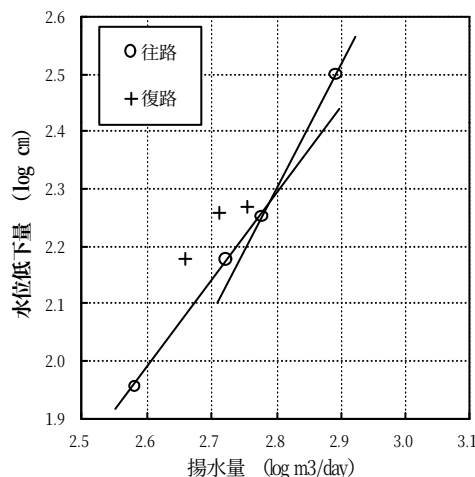
t : le temps ecoule depuis le debit du pompabe
 t' : le tempes ecoule depuis l'arret du pompabe

(2) 井戸からの揚水可能量の解析

井戸からどの程度の揚水が可能かを、段階揚水試験から求める。この方法は、揚水量を変えた段階揚水試験で揚水量と水位低下の関係図を作り、急に水位低下が大きくなる時の揚水量を一応の最大揚水量とする。

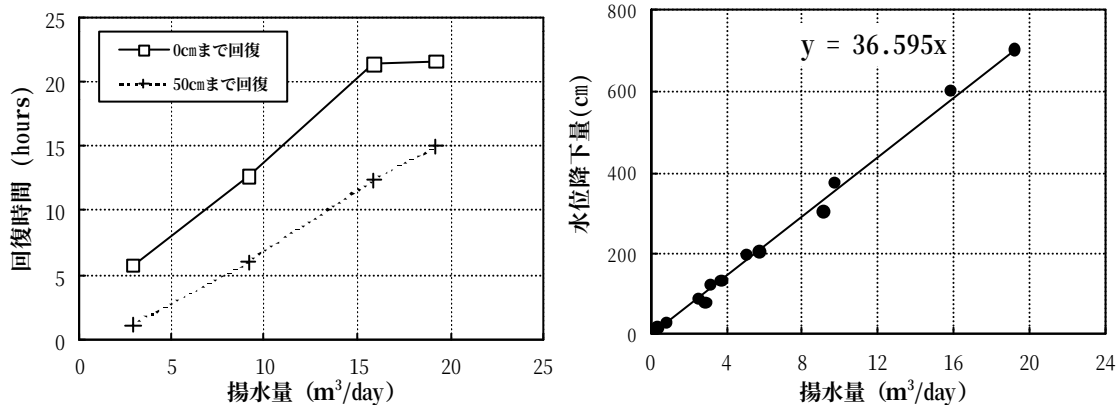
図3.4.3.5は、沖積帯水層での段階揚水試験結果である。 $10^{2.78}\text{ m}^3/\text{day}$ ($600\text{ m}^3/\text{day}$) 付近から上で水位低下が大きくなっている。水位低下が大きくなるのは、流速が一定以上増加すると地下水の流れが層流から乱流状態に変化するためである。乱流状態になると帯水層の砂粒子が井戸内に流入する排砂現象が発生するようになる。したがって、安定的に揚水ができる目安はこの量以下での揚水であるといえる。

図 3. 4. 3. 5 ニジェール国ゴルビ川沖積帯水層における揚水量と水位低下量の例



揚水量が少なく段階揚水試験ができない場合は、揚水停止後の地下水の回復から揚水可能量を見積もる方法がある。ある量の揚水を継続した後、揚水を停止すると地下水が回復する。この回復量が次の揚水開始までに復元できる時、そのときの揚水量を揚水可能量とするものである。図3.4.3.6は基盤岩帯水層における揚水量と水位回復時間の関係、図3.4.3.7は同じ井戸の揚水量と水位低下の関係である。ここで1日の井戸稼働時間を8時間（8:00～16:00）とすると翌日までの回復時間は16時間となる。図3.4.3.6から水位が完全に回復（残留水位0cm）する日総揚水量は12m³、50cmの残留水位では、20m³程度となる。このときの水位降下は、図3.4.3.7からそれぞれ4.2m、7.4mとなる。この井戸ではこの水位降下が可能な井戸内水深が確保されているが、もし十分な水深が確保されなければ、井戸内水深が揚水可能量を決定する。この試算では、翌日の初期水位に影響を与えない揚水可能量は12m³/day程度である。つるべなどの人力揚水における揚水可能量を求める場合、この方法が実用的である。

図 3. 4. 3. 6 揚水量と水位回復時間 図 3. 4. 3. 7 揚水量と水位降下量



揚水可能量は地下水位の季節的变化によって変化し、地下水が低下すれば揚水可能量は減少する。これを予測するには、連続揚水試験で求めた水理定数を用い、以下のような非平衡式に基づいた計算を行う。

井戸底が被圧帯水層の基盤まで達している完全井の場合、揚水にともなう地下水位低下量は、Theisによる以下の式によって表される。不圧帯水層の場合であっても、水位低下量が小さい場合（一般に水深の10%以内とされている）は、この式が適用できる。

$$s = \frac{Q}{4pT} \cdot \int_u^\infty \frac{e^{-u}}{u} du = \frac{Q}{4pT} \cdot W(u) \quad u = \frac{Sr^2}{4Tt}$$

また、揚水停止後の回復水位は以下の式により表される。

$$s = \frac{Q}{4pT} \{W(u_1) - W(u_2)\} \quad u_1 = \frac{Sr^2}{4Tt} \quad u_2 = \frac{Sr^2}{4Tt'}$$

s:水位低下量 S:貯留係数 T:透水量係数 Q:揚水量 W(u):井戸関数
t:揚水開始からの時間（回復時間を含む） t':揚水停止からの時間
r:井戸中心からの距離(井戸内水位の場合は井戸半径)

井戸関数 $W(u)$ は以下の式により近似できる。

$$0 \leq u \leq 1 \text{ のとき} \quad W(u) = -\ln u + C_0 + C_1 u + C_2 u^2 + C_3 u^3 + C_4 u^4 + C_5 u^5$$

$$1 < u < \infty \text{ のとき} \quad W(u) = \frac{1}{u \cdot e^u} \cdot \frac{C_6 + C_7 u + u^2}{C_8 + C_9 u + u^2}$$

ここで、
 $C_0 = -0.57721566$ $C_1 = 0.99999193$ $C_2 = -0.24991055$ $C_3 = 0.05519968$
 $C_4 = -0.00976004$ $C_5 = 0.00107857$ $C_6 = 0.250621$ $C_7 = 2.334733$
 $C_8 = 1.681534$ $C_9 = 3.330657$

図3.4.3.8は、このような計算によって予測した水位低下量と、実際の揚水試験時の観測値をプロットしたものである。この場合、計算値と実測値が比較的良好に一致しているため、水位や揚水量を種々変えて試算し、表3.4.3.2のように揚水可能量の季節的变化を予測した。

図 3. 4. 3. 8 沖積帯水層の揚水試験実測値と水位低下量計算値

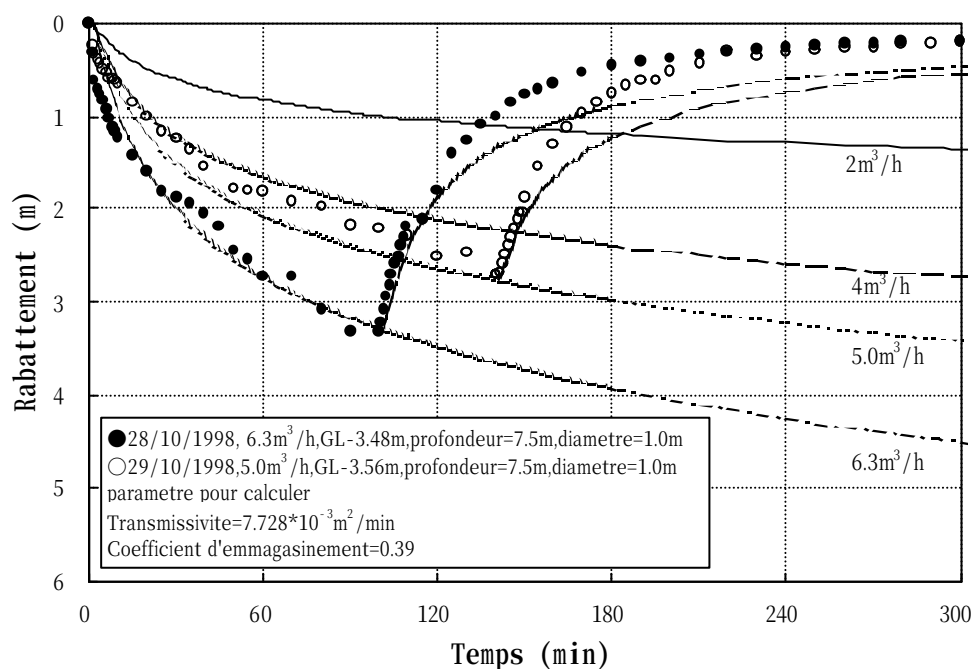


表 3. 4. 3. 2 揚水可能量の季節的变化予測値一覧表

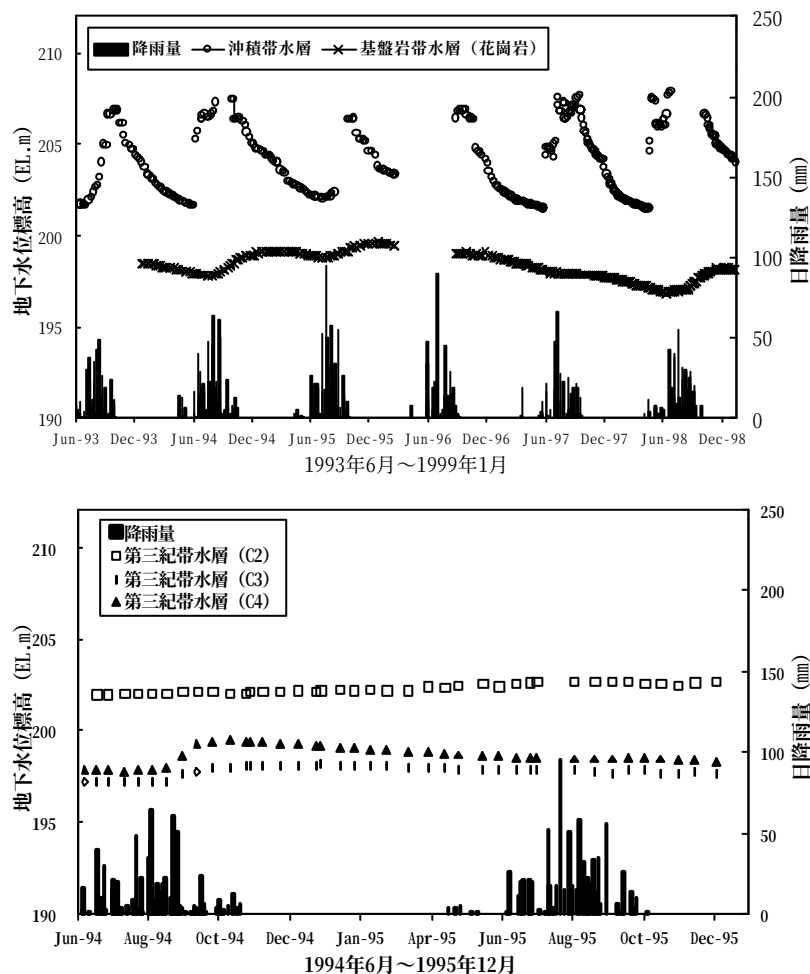
MOIS	NIVEAU STATIQUE (m)	HAUTEUR D'EAU (m)	PARAMETRE		QUANTITE D'EAU pompage 5 heures (m³/jour)
			COEFFICIENT D'EMMAGASINEMENT	TRANSMISSIVITE (m²/min)	
NOV	4.00	4.50	0.39	0.00699	30.5
DEC	4.78	3.72	0.39	0.00578	21.9
JAN	5.25	3.25	0.39	0.00505	17.3
FEV	5.44	3.06	0.39	0.00476	15.7
MAR	5.58	2.92	0.39	0.00454	14.4
AVR	5.72	2.78	0.39	0.00432	13.3

3) 地下水位変動解析

地下水位はおおむね1年を周期として上昇・下降を繰り返すが、その変動量は年ごとの降雨の影響を受ける。図3.4.3.9はニジェール国ゴルビ川流域の3つの帯水層の水位変動を表したものである。沖積帯水層は水位変動が大きく、地下水位は浅い。基盤岩帯水層は水位変動が小さく、地下水位は深い。第三紀帯水層は基盤岩帯水層に近い性状を示している。このように観測資料を整理することにより、地下水位の変動特性を明らかにして、井戸の深度や井戸タイプを選択する際の基礎資料として利用することができる。また、揚水可能量が季節的にどう変化するかを推定する上でも重要な資料となる。さらに、降雨・河川水・地下水を含めた総合的な水収支解析を行う際にも基本的なデータとなる。

長期にわたる経年的な地下水位の変動を観測することにより、帯水層の水収支状況を判断できる。本地域の経年的な地下水位変動は、一般に年間降水量の増減により変化している。もし、年間降水量がほとんど変化しなくても地下水位に低下傾向が見られる場合には、地下水涵養状況の変化や地下水の過剰揚水の影響等が考えられる。持続的に地下水を利用するためには、地下水位の動向に十分注意を払う必要がある。

図 3. 4. 3. 9 帯水層ごとの地下水位変化の例



第4章 水資源の開発技術

4.1 水資源開発手法の選定

現況調査により明らかになった水資源の実態に合わせて、適切な水資源開発手法を選択する必要がある。水資源開発手法の選択にあたっては、自然条件だけでなく、地域の水需要、生活形態、生産活動、あるいは住民の要望などの社会的条件も考慮しなければならない。表4.1.1に、サヘル地域での水資源の賦存形態と主な開発手法を示す。

表4.1.1 サヘル地域における水資源の賦存形態と開発手法

水資源の賦存形態		水資源開発手法
地表水	大河川・湖（常時地表水あり）	大規模ダム
	ワジ（雨季のみ地表水あり）	小規模ダム
	沼（雨季及び雨季終了後数カ月間地表水あり）	溜池（沼）の整備
地下水	沖積帯水層（不圧地下水）	井戸
	第三紀帯水層（不圧地下水）	地下水涵養ダム
	基盤岩帯水層（不圧地下水、被圧地下水）	地下ダム

水資源を確保し効率的に利用する技術として、河川を締め切るダムや地下水を利用する井戸などがある。さらに、河川水、地下水の複合利用として河川水を貯留するとともに地下に浸透させる地下水涵養ダムや、地下水を貯留する地下ダムなどの技術がある。本地域での持続的な水資源の開発・利用には、特殊な技術や機材を必要とせず、比較的 low コストで実施できるとともに、施設の維持・管理が簡単な水資源開発手法が適している。このため、本マニュアルでは、水資源開発手法のうち、小規模ダムや溜池（沼）の整備による地表水の開発並びに井戸による地下水の開発を中心として述べる。

表4.1.2には、地形・水文条件から本地域をワジ氾濫原地域とワジから離れている準平原地域に区分し、それぞれについて適用の可能性がある水資源開発手法を示した。

表4.1.2 サヘル地域の地域区分と主な水資源開発手法

地域区分	土地利用・水文現況	適用可能な水資源開発手法
ワジ氾濫原地域	未利用地が多い。 雨季にワジに流水がある。 沖積帯水層・第三紀帯水層。 地下水位が比較的高い。	小規模ダム 半伝統的井戸 近代的大口径井戸
準平原地域	集落、農地、草地等に利用。 凹地に沼が散在し、雨季に貯水が見られる。 基盤岩帯水層・第三紀帯水層。 地下水位が比較的低い。	溜池（沼）の整備 近代的大口径井戸 ボーリング井戸

4. 2 小規模ダムによる地表水開発

4. 2. 1 ダム適地の選定

小規模ダムは、堤体積が小さく、貯水量が大きいほど経済的である。このためには締め切り部が狭く、貯水域が広がっている地形がダム建設に適する。しかし、サヘル地域は起伏に乏しく、このような条件を満たす地点は少ない。貯水量を増やすため、貯水域を掘り込むことがあるが、地表付近の難透水性の粘土層を破壊し漏水量を増やす原因になることがあるので、事前の土質調査が必要である。

堤体を載せる地盤は、強度があり、透水性が低い均質な地質であることが必要である。ただし10m以下の低いアースダムの場合は基盤の強度はあまり問題にならず、透水性に関する条件の方が重要である。しかし、このような基盤が地表付近に露出していることは少なく、多くは透水性の高い河床堆積物や風化帯に覆われている。基盤深度が浅ければ基礎掘削は困難ではない。しかし、基盤深度が10m以上と深い場合は、河床堆積物や風化帯をある程度残した上に堤体を築造するため、基礎からの漏水をある程度許容せざるを得ない。

堤体は土砂と岩石で作るため、適切な材料が近傍で得られることが重要である。

小規模ダムの有効貯水容量を必要量と平衡させることができれば最も合理的であるが、既述の通りサヘル地域では地形条件による制約から、両者が一致することは少ない。この場合は、流域の降雨量と流出率から推定される流出量の範囲内で、地形や土地所有権等の諸条件並びに工事費等を考慮して、有効貯水容量をできるだけ大きなものとする。また、蒸発量が多いことも考慮に入れ、貯水可能期間についての検討も必要である。

サヘル地域では雨季の土壤侵食が激しいため、小規模ダムの上流から運ばれてきた土砂によって堆砂が進行し、貯水容量が減少することも考慮しなければならない。上流部に裸地化した土地がないかどうか、ガリなどの浸食地形がないかどうか適地選定に当たっての重要な要素である。必要に応じて、小規模ダムの上流に浸食防止工を実施し、農地等の保全を行うとともに貯水域内への土砂流入量の減少策を検討する。

また、貯水によって堤体の上流域は水没するため、土地利用現況の把握、土地所有者または土地利用者との調整、金銭補償あるいは代替地の確保など考慮すべき事柄は多い。さらに、下流域については、流量の減少があり、万一決壊した場合の被害も含め、この影響も考慮する。

これらの条件に従ってダム適地を調査し、いくつかのサイトを選定したうえ、これらと受益地との関係等を検討し、ダムサイトを決定する。

上記の条件を満たすかどうか、どのように改善すればよいのか等を検討するためには以下の調査が必要である。

1) 地形調査

調査の当初は、1:200,000程度の縮尺の地形図や1:50,000程度の空中写真で検討する。一般に、第三紀層（コンチネンタルターミナル層）を開析する河川は明瞭な谷地形を示すが、花崗岩、変成岩などの基盤岩を開析する河川は緩やかな谷地形である。

候補地がいくつかに絞られた後、測量を行い地形図を作成する。縮尺は貯水域全体については1:2,000～1:5,000、ダムサイト部分については1:100～1:500が適当である。ダムサイトの決定にあたっては、いくつかの候補地について水位と貯水量との関係、ダム体積と貯水量との関係を比較し検討する。

なお、ダム貯留水を灌漑用水源とする耕作地を開発する場合には、貯留水を自然流下によって受益地に導水できれば揚水のためのコストや手間を軽減することができるため、こうした場合のダムサイトは受益地の上流地点に選定することが基本である。

2) 地質調査

ゴルビ川のような大きな支流では、シルト・砂等で構成される河床堆積物が発達しており、地盤強度が小さく透水性も大きい。したがって、この分布や性状を正確に調べる必要がある。小さな支流では河床堆積物が薄いため、基盤岩の風化帯が基礎としての評価の対象となる。地質踏査や物理探査などで河床堆積物や風化帯の分布を推定し、オーガーボーリングや地質ボーリングで確認する。また、透水試験（ピット法等）で透水性を確認する。

3) 材料調査

土質材料としては、沖積粘土層や基盤岩の風化部が使われ、これらが材料調査の対象となる。これらの分布状況は場所によって異なるため、地質踏査、物理探査、ボーリング調査で確認する。さらに、土質材料を締め固めてダムとして必要な遮水性と強度が得られることを確認する。特に、ダムの規模が比較的大きい場合はダム本体の安定性確保が重要となる。このため、材料試験用のサンプルを採取し、比重、密度、自然含水量、粒度分布、締固め試験、アッターベルク限界試験等の材料試験を行って盛土材としての適否を検討する。

ロックフィルダムとする場合あるいはアースダムの表面に侵食防止のための張石をする場合は、サヘル地域に広く分布するラテライトや花崗岩等が用いられる。これらは材料としては硬堅で問題は少ない。このため、岩石材料についての調査は、むしろ適度な粒度の岩塊が近傍に十分賦存しているかどうかが重要である。

4) 水文調査

年間河川流量から貯水量が確保できるか検討する。河川流量が得られていない場合は、近傍の観測所の降雨量に流出率を乗じて流出量を算出する。この流出率の推定は、後述するORSTOM法やCIEH法を参考にして行う。

ダム決壊のほとんどは洪水がダム天端を越流することによって起こる。したがって

洪水吐の設計洪水流量決定のため流出解析が必要である。サヘル地域では一般的に設計洪水確率年を1/10とすることが多いが、データが少なく不確定な要素が多いため、1/100でも天端を越流しないよう洪水吐に余裕を持たせた方がよい。

5) 社会調査

堤体の上流域側の水没すると考えられる範囲の人家、農地、道路などの分布、土地所有・利用現況、土地所有者・利用者の意向（同意取得の可能性）を調べる。また、下流域の河川水利用の実態を調べ、ダムによる貯水の影響を検討する。

4. 2. 2 ダム諸元の決定・設計

ダムの貯水容量は、必要水量、地形的条件、堤体規模、水源流量等で決定される。水源流量以上の容量をもつダムを建設しても満水とならないことが多く、不経済なダムになってしまう。また逆に、地形的に大きな貯水容量を確保できる可能性があるのに、検討が不十分であるためにこれを活かせないと後々惜しまれることとなる場合がある。

このため、ダムの諸元の決定・設計に先立ち、前述の調査により、いくつかの候補地について水位と貯水量との関係、ダム体積と貯水量との関係及び水位と水没面積との関係を表した図表を作成し、諸条件に照らし合わせて最も妥当なダムの設置点と貯水深を先ず決定する。

1) 小規模ダムの形式

小規模ダムは、水を堰き止めるために盛立てられる「堰堤」と、貯水容量を超える流出水（ Q ：計画洪水量）を安全に流下させるための切り欠き区間（「洪水吐」あるいは「越流堤」などと呼ばれる）から構成される。

サヘル地域の地形は比較的緩やかなため、堰堤の形状は、堤高数 m 程度、堤長数十～数百 m の長い堤防となることが多い。このため、堰堤の建築には、現地で容易に調達できる土砂が土質材料として用いられ、その形式はアースダムが一般的に採用されている。堰堤の表面は、貯留水の波浪や降雨による浸食を防止するため、岩石材料やコンクリートで保護されることが多い。洪水吐の越流部分は、越流水によって堤体及び下流に不都合な侵食を起こさないよう、コンクリートやフトン簀で保護する。

図 4. 2. 2. 1 乾季のマゴダム洪水吐



左側：貯水域（コンクリート張り法面保護）
右側：下流（フトン竈による法面保護）
堤頂：コンクリート舗装

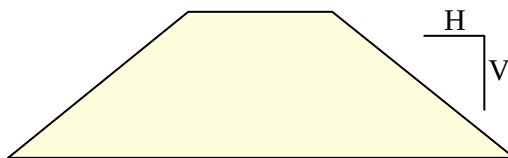
2) 堰堤の断面形状

堰堤の断面形状は、堰堤の規模が大きい場合、前述の通り使用する土砂の特性を材料試験によって把握し、堰堤の安定性を確認して決定する。この場合には各種の試験器具や複雑な計算が必要となり、さらに、所要の性能を確保しつつ工事を進めるため、厳格な施工管理を行わなければならない。

しかしながら、小規模ダムของ堰堤の高さは通常数m程度と小さく、堤頂は道路として利用される場合が多いことから、その断面形状は低い台形状を呈し、厳密な安定計算が必要となることは少ない。したがって、通常は、以下に示すような一般的な安定条件を満足すれば十分である。

- ① 堰堤の法面の傾きは、1：1.5（垂直方向1mにつき、水平方向に1.5mの割合で傾斜していることを表す）より緩やかにする（図4.2.2.2）。

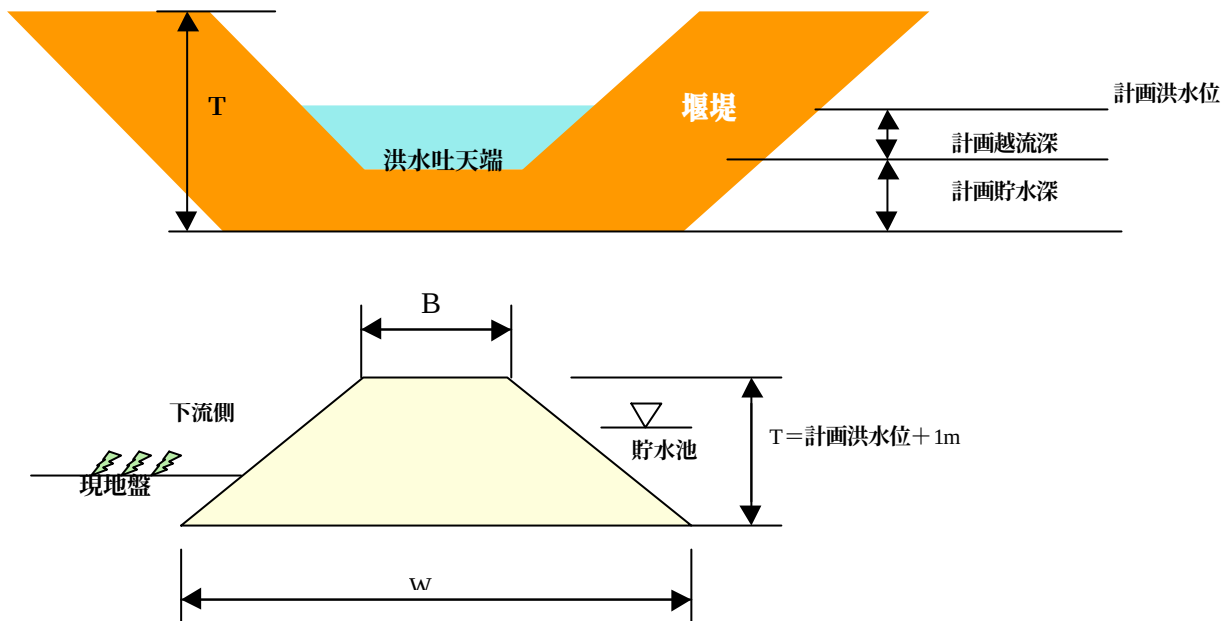
図 4. 2. 2. 2 堰堤の法面の傾き



V= 1 mにつき、
H=1.5mの場合は 1:1.5
H=2mの場合は 1:2 と表す

- ② 堰堤の高さ（T）は、越波や越流が生じないように、計画洪水位（＝計画貯水深＋計画越流深）より1m程度高くする（図4.2.2.3）。

図4. 2. 2. 3 堰堤の高さ



③ 堰堤の底辺の幅（W）は、通常堤頂を道路として利用するため、多くの場合十分な幅が確保されるが、少なくとも貯水深の3～4倍程度以上とする。

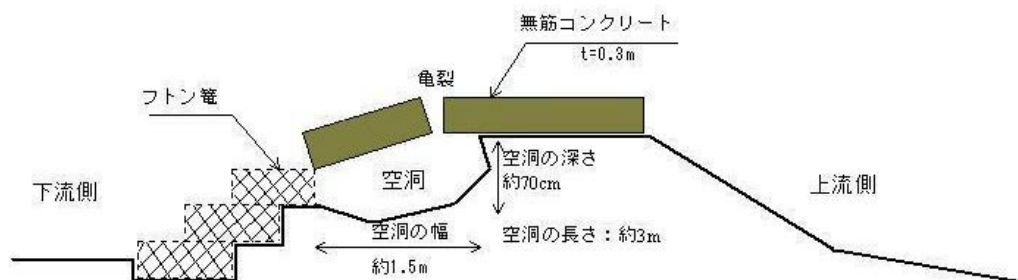
④ 堰堤の堤頂幅（B）は、堤防の高さや道路としての機能に応じて、2～4m程度とする。

⑤ 堰堤は、表土を取り除いた堅牢な地盤上に築堤する。

⑥ 堰堤の盛立て工事は、土砂の1層あたり撒きだし厚を30cm以下とし、ブルドーザなどの重機で3回以上往復して十分転圧する。

⑦ 盛土材には、直径20cm以上の大きな岩石が混じらない材料を用いる。大きな岩石が多く混じっていると、土砂を十分に転圧することができず、堰堤内に隙間が残る。この隙間に水が侵入すると、堰堤内部から浸食が起これ、堰堤の崩壊を招くことがある。図4.2.2.4に、浸透水により堤体の内部が浸食された事例を示す。

図4. 2. 2. 4 マゴダム洪水吐で発生した浸透水による堰堤内部浸食の状況



- ⑧ 洪水吐の表面をコンクリート床盤とする場合、コンクリート内部に鉄筋を配したり、又はコンクリートの厚さを20cm以上としたりして、できる限り亀裂が生じないように配慮する。また、隣接し合うコンクリート床盤の継ぎ目からの水の浸入を防止するため、ゴム製のベルトを埋め込むことが望ましい。

3) 洪水吐の規模

洪水吐の規模（越流長と計画越流深）は、後述する流出解析によって算定された計画洪水量を、安全に流下させることができる大きさとしなければならない。なお、越流深を小さく設定すると越流長が長くなってコンクリートやフトン簀によって保護する範囲が拡大し、また、逆に越流深を大きくして越流長を短くすると堰堤高が高くなるといった関係にある。

以下に、JGRCがニジェール国マグー村に設置したマゴダムで適用した洪水吐及び堰堤高の規模算定式を例示する。

$$L = Q / (\mu \cdot H^{3/2} \cdot (2g)^{1/2})$$

L：越流長（m）

Q：計画洪水量（m³/sec）

μ：断面形状係数（マゴダムでは0.35を適用）

H：計画越流深（m）

g：重力加速度（9.8m/sec²）

$$R = A \cdot (h + V^2 / 2g)$$

R：余裕高（m）

A：安全係数（マゴダムでは1を適用）

h：波浪の貯水池面からの高さ（m） $h = \frac{1}{2} + \frac{\sqrt{F}}{3}$

F：吹送距離（km）

V：波の伝搬速度（m/sec） $V = \frac{3}{2} + \frac{2h}{3}$

$$\text{堰堤高（m）} = \text{計画貯水深（m）} + H + R$$

出典：MANUEL du TECHNICIEN du GENIE RURAL

（TRAVAUX SUR UN PERIMETRE D'IRRIGATION）

SOGREAH: Société Grenobloise d'Etudes et d'Applications Hydrauliques

図4. 2. 2. 5 洪水吐を越流する流出水



4) 流出量の算定

流出量を算定する目的は、計画洪水量を推計して適切な規模の洪水吐を設計することと、貯水容量を満たすだけの流出水が得られるか確認することの二つにある。

計画洪水量は、一般に統計的精度が高いとされる10年確率雨量を推計して、これをもとに算定するが、その結果はあくまでも推計であって、各種の変数を地域特性に応じて適切に適用しないと極めて大きな誤差を生じることを念頭に置かなければならない。

10年確率雨量の推計にあたって、サヘル地域では、ORSTOM法とCIEH法 (Puech & Chabi-Gonni, 1984) の2つが利用されることが多い。前者は流域面積1～120km²の場合のみ適用することができる。後者は年雨量2,000mmまでで、これより大きい流域面積にも用いることができるとされているが、この計算法は流域面積2,000km²を越えて用いてはならない。この計算法の考案者らは、最大1,000km²までの計算図表 (nomograph) を作成している。

これら推計式を用いた計算には、以下の諸係数や数値を設定する必要がある。

- ① ダム地点に流れ込む降雨が集まる面積 (集水面積: $S \text{ km}^2$)
- ② 集水面積の5%がこれを越える標高と集水面積の5%がこれを下回る標高の差 ($\Delta H \text{ m}$) を次式で得られる等積長方形の長辺長 ($L \text{ km}$) で除した値 (全体勾配指数: I_g)

$$L = \frac{I_{\text{comp}} \cdot S}{1.12} \times \left(1 + \sqrt{1 - \left(\frac{1.12}{I_{\text{comp}}} \right)^2} \right) \quad I_{\text{comp}} = 0.28 \times \sqrt{\frac{P}{S}}$$

I_{comp} : 流域形状係数 (indice de compacite (san unite))

P : 流域の模式化した周長 単位: km (perimetre stylise du bassin en km)

- ③ 降水量に占める表面流出量の比率を表す流出係数（流出率%）
- ④ 降雨が地面に浸透する程度を表す透水指数
- ⑤ 地形が流出に及ぼす影響を表す起伏指数

具体的な適用条件や算定方法については、西アフリカ地域での小規模ダム設計に関する参考書として広く活用されている“Le Point Sur La Maitrise Des Crues Dans LES BAS-FONDS petits et microbarrages en Afrique de l’ouest (Sylvain BERTON, 1988)”を参照するとよい。

マゴダムでは、当初の設計で適用した10年確率流出係数が不適切であったため、堰堤の決壊を招いた苦い経験がある。不幸中の幸いとして、人命や下流農地への甚大な被害はなかったものの、事故発生後、JGRCは即座に設計を見直し、適正な規模で改修工事を行ったが、このために大きな経費が必要となった。これから計画される小規模ダムへの重要な警告として、ここに紹介する。

事故の原因は、当初設計と変更設計のそれぞれで適用した10年確率最大流出量の諸係数と流出係数の適用が不適切であったと考えられており、これによって以下のとおり流出量に2倍以上の差が生じている。

$$10\text{年確率最大流出量 } (Q_{10}) = a \times S^b \times I g^c \times K r_{10}^d \quad (\text{CIEH法})$$

当初設計：

諸係数 $a=0.0888$, $b=0.696$, $c=0.953$, $d=0.534$

全体勾配指数 $(Ig) = 3$

流出係数 $(kr) = 14.13\%$

$$Q_{10} = 40\text{m}^3/\text{s}$$

変更設計：

諸係数 $a=0.560$, $b=0.619$, $c=0.279$, $d=0.510$

全体勾配指数 $(Ig) = 3$

流出係数 $(kr) = 36.4\%$

$$Q_{10} = 130\text{m}^3/\text{s}$$

(参考) マグー小規模ダム諸元

① 貯水容量	約85,000 m ³
② 貯水面積	15.32 ha
③ 形 式	堤 体：アースダム（法面石張り） 越流部：越流型鉄筋コンクリート洪水吐（道路兼用）
④ 堤 頂 長	289 m
⑤ 堤 高	4.86 m
⑥ 堤 頂 幅	6 m
⑦ 法 勾 配上流	1: 2.5 下流 1: 2.0
⑧ 年平均雨量	567 mm
⑨ 10年確率日雨量	86 mm
⑩ 計画洪水量	40 m ³ /sec (110 m ³ /sec) [130 m ³ /sec]
⑪ 流域面積	205 km ²
⑫ 流域外周長	58 km
⑬ 年間総流出量	820万 m ³
⑭ 年間計画滞砂量	1,400 m ³
⑮ 越 流 長	45 m [80 m]
⑯ 越流水深	0.7 m [1.0 m]
⑰ 余 裕 高	0.6 m [0.9 m]
⑱ 越 流 幅	6 m
⑲ 天端標高	209.3 m [210.0 m]
⑳ 越流標高	208.1 m (209.45 m)
地 盤 高	204.44 m [204.42 m]
工 事 費	7,200万 FCFA

※ ()内は1998年7月1日の降雨災害時の観測値、 [] 内は復旧工事に伴う再設計値を表す。

図4. 2. 2. 6 下流側から見たマゴダム洪水吐



4. 2. 3 施工

堤体の施工にあたっては、雨季には、河川流出により建設途中の構造物が損害を受けることがあるため、乾季末までに、河川の流出に耐えるような構造物を完成させる必要がある。

乾季の施工となることから、土質材料が乾燥しすぎないように留意し、含水比を最適含水比に近づけて必要な締め固め密度を確保するよう十分な施工管理を行う。

4. 2. 4 ダムの維持・管理

ダムは、万一破堤した場合には、水源を失うばかりではなく、下流域に洪水等の被害を及ぼす。このため、築堤後の堤体の管理は重要である。

ダムは、良好な基盤上に設置できない場合や、不適切な施工が行われた場合には、過大な漏水が生じる場合がある。漏水は、貯留水を減じるばかりではなく、パイピングを引き起こし、ダムの決壊につながる可能性がある。

本地域では、降雨強度の大きな降雨により、洪水が予想される河川が多い。アースダムでは堤体の越流が生じた場合には、堤体の破壊が生じやすい。このため、適正規模の洪水吐や十分な強度をもった堤体の施工及び通水部とその周辺の十分な保護が求められる。

洪水時による衝撃や波浪により、堤体が浸食を受ける場合が多い。十分な強度をもった堤体を施工するとともに、浸食部の修理等の保守・管理を的確に行うことが重要である。

もし、異常な漏水や堤体の亀裂等が発見された場合は、直ちに堤体の補修を行わなければならない。

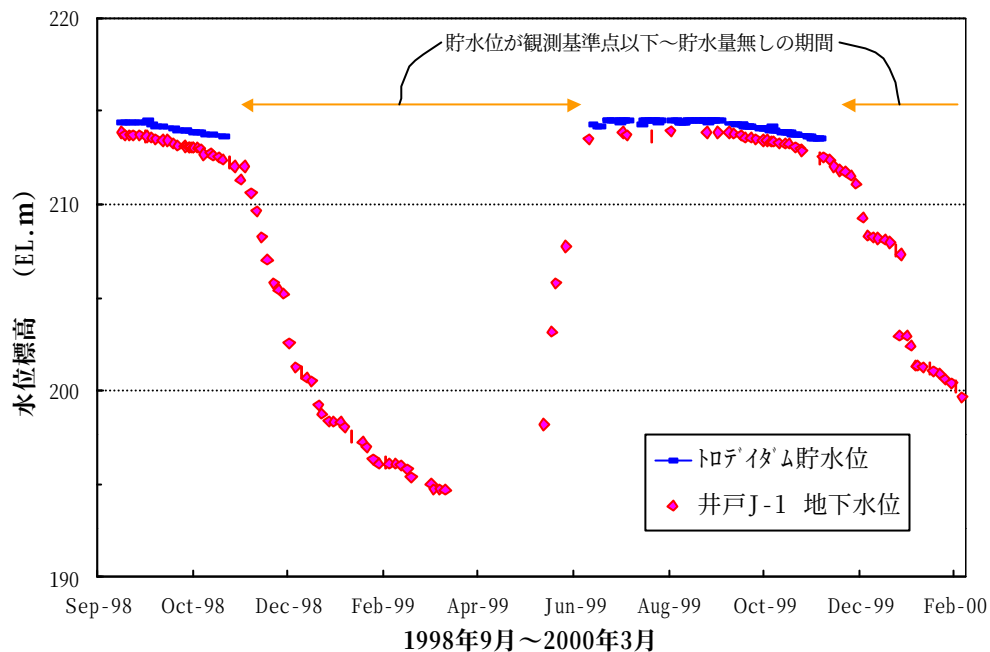
4. 2. 5 ダム周辺の地下水開発

ワジ氾濫原に建設する小規模ダムは、その貯留水を直接利用するとともに、地下水涵養源となり、乾季等に利用できる地下水量を増加させる働きが期待できる。

小規模ダムにより地下水涵養量が増加した例を示す。ニジェールで試験的に建設したトロディダムは、貯水域表層の透水係数は $1 \times 10^{-4} \sim 10^{-5} \text{cm/s}$ 程度、帯水層である花崗岩の風化帯は厚さ約4m、透水係数 $1 \times 10^{-3} \text{cm/s}$ である。ダムの貯水により地下水位が上昇していることが、貯水域の中にある井戸および周囲の地下水観測孔により確認されている。図4.2.5.1に示す貯水位の変化と計器蒸発量から地下かん養量は約7mm/dayと推定された。したがって貯水域全体からは1日約 $1,400 \text{m}^3$ （貯水域面積 $\times$ 涵養量 $= 20,000 \times 0.007$ ）の地下水涵養量があることになる。この量はダム貯水量の1.2%にあたる。ただし、涵養された水は周辺地域一帯に分散するため、井戸から回収できる水の量はその一部にすぎない。

小規模ダムの貯水域周辺または貯水域内に井戸を設置し、地下水を利用することが考えられる。特に、貯水が無くなる乾季の中～末期には、地下水は貴重な水供給源となる。

図4. 2. 5. 1 ニジェール国トロディダム貯水位と周辺地下水位



4. 3 溜池の整備による水源開発

4. 3. 1 溜池の整備

溜池の整備による水源開発は、既存の沼を改修して、あるいは新たに池を設置することによって貯水容量を拡大・確保し、地表水をできるだけ長期間貯留しようとするものである。

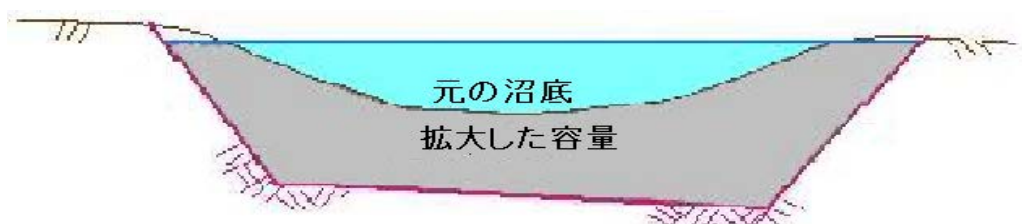
4. 3. 2 溜池整備の工法

溜池の整備工法として、「地盤の掘り下げ」、「周縁部の掘削による拡張」及び「堤防の盛立て」が挙げられる。これらは、現地調査の結果から最適な工法を選択するが、それぞれの特徴と一般的な適用条件を以下に例示する。

1) 地盤の掘り下げ

沼底の地盤が容易に掘削できる程度の固さで、掘削後の地盤が難透水性である場合には、沼底を掘り下げることにより、沼貯水容量を増加させることができる。

図4. 3. 2. 1 沼底地盤の掘り下げ



沼底の地盤が堅固な岩盤の場合、掘削が困難あるいは多大な経費がかかるため、事前に、弾性波探査やオーガーボーリングにより沼底の地質状況を確認しておく必要がある。また、掘削に伴う発生土を溜池の近傍に放置すると、降雨によって溜池内部に流入し、貯水容量が小さくなるため、掘削発生土の処分についても考慮する。

底面は、大きな凹凸が残らないよう整地し、低水時は一箇所に水が集まるよう傾斜をつける。また、沼底の掘削により、難透水層を除去してしまい、沼底からの地下浸透量が増大する場合があるので注意を要する。掘削後の地盤の透水性が高い場合には、漏水損失を低減するため、重機による破碎・攪拌・転圧などの止水力向上対策の追加を検討する。

図4. 3. 2. 2 地盤の掘り下げによる溜池の整備



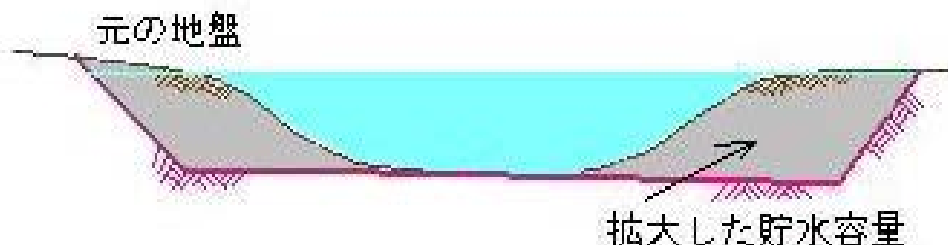
ニジェール国マゲー村の
「エダ池」

主目的：家畜の水飲み場確保
溜池規模：40m×100m
貯水容量：3,800m³
掘下深さ：1.2m
斜面勾配：1:5
施工方法：請負
工事費：176万 FCFA
※ 既存沼の生態系保全のため、
隣接する裸地に新設

2) 周縁部の拡張

沼の底の地盤が堅く、十分に地盤を掘り下げることが困難な場合に適用することができる。ただし、池の拡大用地が周辺に確保でき、掘削発生土の処分が可能な場合に限られる。また、上記1)の工法との組み合わせも可能である。

図4. 3. 2. 3 沼周縁部の拡張



3) 堤防の盛立

沼底の地盤が堅く、掘り下げが困難あるいは多大な経費が見込まれる場合や、周縁部への拡張が困難な場合のほか、1) 及び2) の工法と組み合わせて適用することが可能である。つまり、沼底の掘削土を堤防の材料に使用すれば経済的に有利である。なお、貯水位の高さは、背後地流入域の地盤高さが上限となる。

図4. 3. 2. 4 堤防の盛立



堤防を盛立てる場合、越流によって盛り土が破壊されることがあるので、流水に耐え得る適正な規模の洪水吐を設置する必要がある。

堤防の規模や設計断面については、既述の「4.2小規模ダム」の2) (2) 断面形状の決定を参照されたい。

図4. 3. 2. 5 地盤掘り下げ及び堤防盛立てによる溜池の整備



マリ国セグー地域のコバ池

溜池規模：80m×150m
貯水容量：10,000m³
掘下深さ：0.7m
堤防高さ：1.5m、延長：360m
堤頂幅：5m
法面勾配：1:1.5
施工方法：請負
工事費：1,250万 FCFA

4. 3. 3 適地の選定

1) 調査範囲の特定

溜池の整備を行う場合、適地選定の調査範囲を特定するには、まず、水源の位置的な有利性と、開発水量との、いずれを重視するか考えなければならない。つまり、利用上便利な位置に大きな貯水量の溜池を整備することが理想的であるが、地形条件等によっては必ずしも両方の条件を満足させることができない場合もある。このため、

水の開発量が少なくても利用上便利な溜池を作るのか、または多少遠くて利用上不便でも十分な量の水資源を確保するかの溜池整備の基本方針を、利用する地域住民の意向を踏まえて決定する。

2) 溜池整備の候補地の調査

調査対象範囲内で、既存の沼の位置や規模、背後地流域面積や流出量、地質などの立地条件に関する調査と、現在の利用状況及び地域住民の改修要望や水資源開発に関する意向等について把握して、整備の対象とする溜池の候補を選定する。あるいは、調査の結果、既存の沼の整備が困難と認められた場合には、溜池新設の候補地となる低平地、水みちなど、降雨流出水が集まる場所について、同様の立地条件を調査する。なお、新たな溜池の設置によって、周辺の良い野生生物や植物の生育環境に悪影響を及ぼすことのないよう留意する。

溜池の整備と併せて野菜畑などの開発を行う場合には、水源から畑までの距離が大きくなると用水の汲み上げや運搬にかかる労力が増大し、また、送配水施設の設置経費が嵩むため、溜池の周辺に灌漑農地の確保が可能であることも確認しておく必要がある。

3) 溜池整備のための技術的調査

現地調査の結果、整備対象候補となった沼や場所について、詳細な地形や地質等の調査を行い、物理的な整備の実現性を確認する。

地質調査にはハンドオーガーなどを用いて、地盤の硬軟や透水性、地層の深さを把握し、これらを参考に前述の溜池整備工法から妥当な工法を選択する。

また、流域の平面図と気象観測データから流域面積と溜池地点の流出量を確認しておく。

4) 土木資材の賦存の確認

溜池整備の工法によって必要となる材料は異なるが、次の事項について確認をする。

- ① 堤防を設置する場合、盛土用土として適した材料が、池底の掘削発生土を含めた周辺地域で調達可能か否か。
- ② 家畜通路や法面、越流部保護用材として石材を用いる場合、周辺で十分な量の石材採取が可能かどうか。
- ③ 池底掘削土の処分が必要な場合、周辺の農地や溜池などに悪影響を及ぼさない処分地を確保することが可能かどうか。
- ④ 土砂、石材等の採取によって、良好な自然環境に悪影響を及ぼさないか。

4. 3. 4 溜池の貯水深

ミニダムや溜池の地表貯留水は、家畜の飲用水や灌漑用水として利用されるもののほか、「表面蒸発＋地中浸透」によってもかなりの量が失われる。このため、地表貯

留水の消費量として、これら損失量も考慮しなければならない。

これら損失量は地質や気象条件等に支配されるため、地盤の透水係数や乾季の蒸発量を実際に測定することが望ましい。JGRC調査等で行った観測結果によれば、合計およそ10～15mm/day¹⁾程度となっている。したがって、溜池の深さを概略的に求める場合、 $[10\sim15\text{mm/day}\times\text{計画貯留日数}]$ の損失量を考慮する必要がある。

なお、表面蒸発による損失量は「水面の表面積×蒸発速度」により、地中浸透による損失量は「貯水が接している地盤の斜面積×浸透速度」によって求められるが、便宜上「地盤の斜面積＝水面の表面積」として取り扱っても実用上は差し支えない。

1) ① 砂漠化防止対策技術開発調査 (JGRC 平成9年度報告書)

観測地点：ニジェール国マグー村

観測期間	蒸発速度	浸透速度
95.10～12	6.0mm/day	8.9mm/day
97. 6～ 9	5.1～6.9mm/day	-
97.10～11	8.9mm/day	7.5mm/day

② 砂漠化防止対策モデル事業実証施設設置調査 (環境庁 平成11年度報告書)

観測地点：ブルキナファソ国ナレ村

94～96年の月別蒸発量平均値 9月162.6mm(5.4mm/day) 10月230.1mm(7.4mm/day)

4. 3. 5 溜池の貯水量の算定

現地調査の結果を踏まえて決定した適地の地形と適用する工法をもとに、溜池の貯水容量を算定する。また、溜池の水深と貯水量の関係から、貯留期間を算出する。

4. 3. 6 洪水吐の設置

溜池への集水域は、地形条件によって異なるが、数平方km程度と比較的小規模であることが多い。しかしながら、サヘル地域の降雨流出は、高い流出率でかつ短時間に溜池地点へ到達するため、一時的に溜池容量を超える。溜池容量を超えた流出水は、溜池の縁から溢流する。このとき、従来の溜池水位と整備後の水位の差が小さい場合は問題が起きることはない。しかしながら、堤防設置によって溜池水位を上昇させた場合には、堤頂越流によって堤防が決壊する恐れがあり、この場合、施設を失うとともに、下流に位置する農地の流失や住民の人的被害など思わぬ事故を発生させる可能性がある。

このため、堤防盛立てによって溜池整備を行う場合には、堤防の一部に洪水吐を設置しなければならない。なお、その構造については、堤防の高さや流出量の程度に応じて、コンクリートやフトン箆のほか、単に石材を敷き並べる程度としても支障ない。

洪水吐の規模決定の手法については、既述の「4.2.2 ダム諸元の決定・設計の3)」の洪水吐の規模の項を参照されたい。

4. 3. 7 溜池周辺の地下水開発

上記の小規模ダムと同様に、沼周辺では、沼からの地下浸透により、地下水位が比較的浅く、地下水が豊富な場合が多い。このため、沼周辺に井戸を設置し地下水を利用することが可能である。沼に貯水がある場合は沼の貯留水を利用し、沼が干上がった場合には地下水を利用する複合的な利用が有効である。

4. 4 井戸による地下水開発

現況調査で把握した帯水層に対して、利用目的（灌漑用、家畜用、飲料用など）を勘案の上、地下水を揚水する上でもっとも効率的で経済的な井戸タイプを選定する。さらに、既設井戸との干渉を起こさない範囲に井戸を配置する。

水量の確保の他に、井戸水の水質の改善も重要である。伝統的井戸を改修し、コンクリートケーシングを設置するとともに、井戸の上部構造を改善して地表からの汚水の浸透を防止することにより、水量を確保し、水質を改善できる場合がある。

なお、地下水の開発可能量や井戸の必要深度は、地形の状況、河川等の地下水涵養源からの距離、帯水層の性状等により、ばらつきが見られる。例えば、表3.4.3.1に示すとおり、基盤岩帯水層における一つの井戸からの揚水可能量は沖積帯水層に比較して非常に少ない。したがって、地下水の開発計画を策定する場合には、現況調査により帯水層の性状等を把握し、必要水量を確保できるか十分に検討する必要がある。

また、沖積層等の帯水層の下位に難透水性の基盤が谷状に分布している場合には、地下ダムによる地下水開発も有効である。ただし、その計画策定に当たっては、地域の水理地質状況及び水収支状況を十分に把握した上で、地下ダム建設の効果を明らかにする必要がある。さらに、他の水資源開発手法との経済性の比較も重要である。

4. 4. 1 井戸位置の選定

ワジ氾濫原等での層状水の開発に当たっては、取水可能な地下水量は、基盤の深度（帯水層厚）に影響される。すなわち、基盤の深度が深く、沖積層が厚く堆積した場所では比較的多量の地下水を得ることができる。逆に、基盤の深度が浅いところでは、少ない量の地下水しか得られないか、空井戸となるおそれがある。基盤上面の形状は不規則で凹凸が大きく、深度が20m以上のところもあれば、2～3mと浅い箇所もある。図4.4.1.1（写真）のように、沖積層が堆積しているワジ氾濫原において、基盤の花崗岩が露出している箇所もある。

図4. 4. 1. 1 ワジ氾濫原に露出している基盤岩（花崗岩）の露頭



このため、地下水を確実に得るためには、あらかじめ基盤の深度を予測し、適切な井戸位置を選定する必要がある。基盤の深度を予測する方法は、調査ボーリングが最も確実である。しかしながら、ボーリングマシンを用いた掘削は高価であり、充分に実施するのは困難である。また、人力によるオーガーボーリングは掘削可能深度が9m程度であるため、その適用には限界がある。このため、より安価で容易に実施できる手法として、地表から地盤の物性を測定することにより地質構造を推定する物理探査が挙げられる。比較的浅い深度の地質構造を精度よく把握するためには、弾性波探査が有効である。一方、深い深度の地質構造の把握には、電気探査が有効である。

亀裂水の開発に当たっては、断層や褶曲構造を把握し、岩盤の亀裂や破碎帯が発達している箇所を把握する必要がある。このためには、空中写真判読等によるリニアメント調査等が行われる。

上記のような調査により、できるだけ良好な帯水層が分布する地点に井戸を設置するが、受益地との位置関係も考慮すべき要素である。飲料用等の場合、水の運搬の労力を軽減させるため、集落にできるだけ近い位置での井戸の設置が望まれる。また、灌漑用井戸においては、灌漑農地まで水路により送水することが可能であるが、水路等の設置費や維持管理、送水途中での水損失を考慮して、灌漑農地に近い場所での井戸の設置が望まれることが多い。

また、特に飲用井戸の場合は、細菌や寄生虫による汚染を避けるため、汚染源（ゴミ溜、汚物溜など）の上流側（地下水等高線も考慮）に設けるようにし、最低でも汚染源から30m以上離すことが望ましい。

井戸を新設する際に、既設利用の井戸との競合を避ける必要がある場合には、井戸の影響圏を考慮して既設井戸から十分に離れた位置に井戸を設置する必要がある。

4. 4. 2 井戸構造の選定

1) 井戸タイプ

サヘル地域では、地下水取水施設として、①素掘り井戸、②伝統的井戸及び③近代井戸が一般に使われている。伝統的井戸は、人力掘削した孔を石や木材等で保護して井戸としたものである。

近代井戸は、口径1.8m程度の鉄筋コンクリート製ケーシングを用いた大口径井戸（近代的大口径井戸）と口径150mm程度のボーリング井戸に大別できる。近代的大口径井戸の掘削限界は地下水位の深度によって異なるがおよそ最大で40～50m程度、ボーリング井戸の場合はこれ以上が可能である。揚水可能量は、断面積の大きな近代的大口径井戸が有利であるが、揚水量は井戸径に比例しては増加しない。近代的大口径井戸は安価なつるべ（主にロープ付きのゴム袋を利用）での揚水が可能であるが、ボーリング井戸の場合は別途ポンプ施設が必要であり、維持・管理費がかかる。井戸設置費用は、ニジェールの場合、近代的大口径井戸で25万～40万FCFA/m、ボーリング井戸で8万～13万FCFA/m程度である。したがって、同じ深度であればボーリング井戸のほうが安価である。

図4.4.2.1（写真）に、近代的大口径井戸の設置状況を示す。

図 4. 4. 2. 1 近代的大口径井戸の設置状況



地下水位が10m未満程度の比較的浅い場合には、コルゲート管をケーシングとして用いた井戸（半伝統的井戸）による取水が可能である。堅い岩盤でなければ人力による施工ができ、特殊な機械を必要としない。廃材のコルゲート管を再利用する場合は、比較的安価で設置でき、設置費は深度7mの半伝統的井戸で40～60万FCFA/m程度である。図4.4.2.2に、コルゲート管を用いた半伝統的井戸の例を示す。

図4. 4. 2. 2 コルゲート管を用いた半伝統的井戸（口径1m）



このように井戸は、その種類より特性があり、帯水層の性状、地下水位、利用目的、揚水量、揚水方法、予算等を総合的に勘案し、また、利用者の要望も考慮したうえで適切なタイプを選定する必要がある。新たな地下水の開発に用いる井戸のタイプは、耐久性等を考慮して、近代的大口径井戸、ボーリング井戸及び半伝統的井戸の内から選定することが望ましい。浅い帯水層を開発対象とする場合には、メンテナンスが比較的容易な近代的大口径井戸が採用されることが多い。深い帯水層を開発対象とする場合、大口径井戸では掘削に多くの労力が必要となり、工期が長くなるとともに、設置費が増大する。このため、井戸深度が深くなる場合には、ボーリング井戸が適している。特に、良質な地下水を得るためには、ボーリング井戸が最適である。また、浅い帯水層を開発対象とし、水質を考慮しない灌漑用等の井戸としては、半伝統的井戸が経済的である。

帯水層が良好な地点であれば、深度6～7m、孔径150mm程度のオーガーボーリング孔に塩化ビニール管を立て込んだ簡易井戸でも、マザー圃場では18m³/h程度の揚水実績があり、暫定水源・緊急水源として十分利用できる。

サヘル地域では施工例は少ないが、集水井は大口径の井戸内から横孔を放射状に掘削する方式の井戸で、井戸孔径を大きくした場合と同様の効果があり、帯水層が薄い場合でも大量の揚水が可能となる。また、横孔によって岩盤中の亀裂にあたる確率が高くなるため、岩盤地帯にも有効である（Wright et al.,1987）。ただし、横孔を掘削するためには専用の機材が必要で、コストも高いのが難点である。

近代的大口径井戸及び半伝統的井戸の代表的な施工例を図4.4.2.3～4に示す。また、井戸構造の概要を表4.4.2.1に示す。

図4. 4. 2. 3 近代的大口径井戸の構造例 (Clark,1988 他)

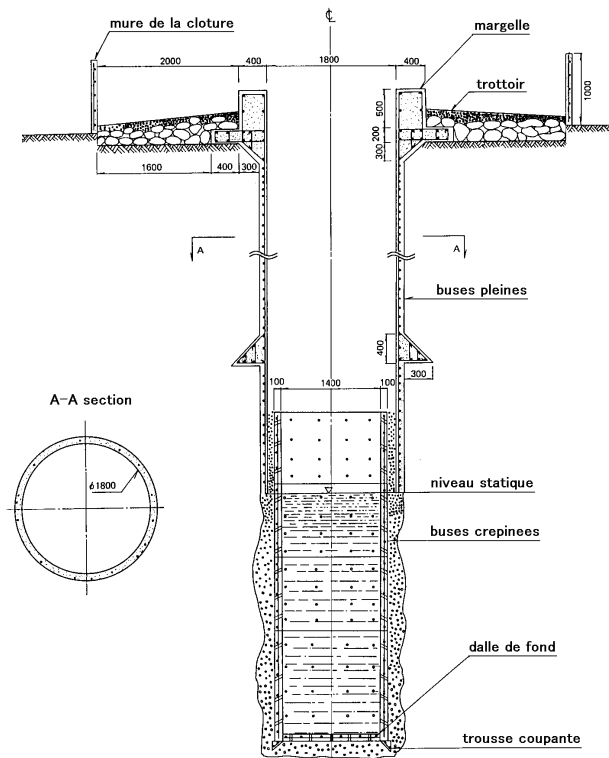
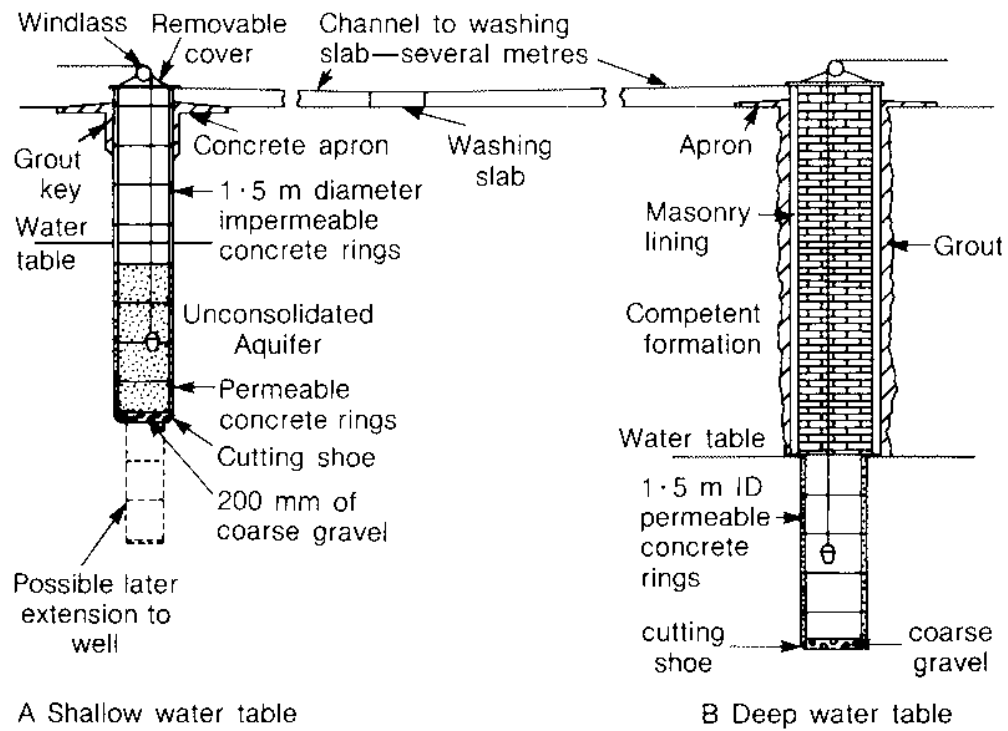


図 4. 4. 2. 4 半伝統的井戸の構造図

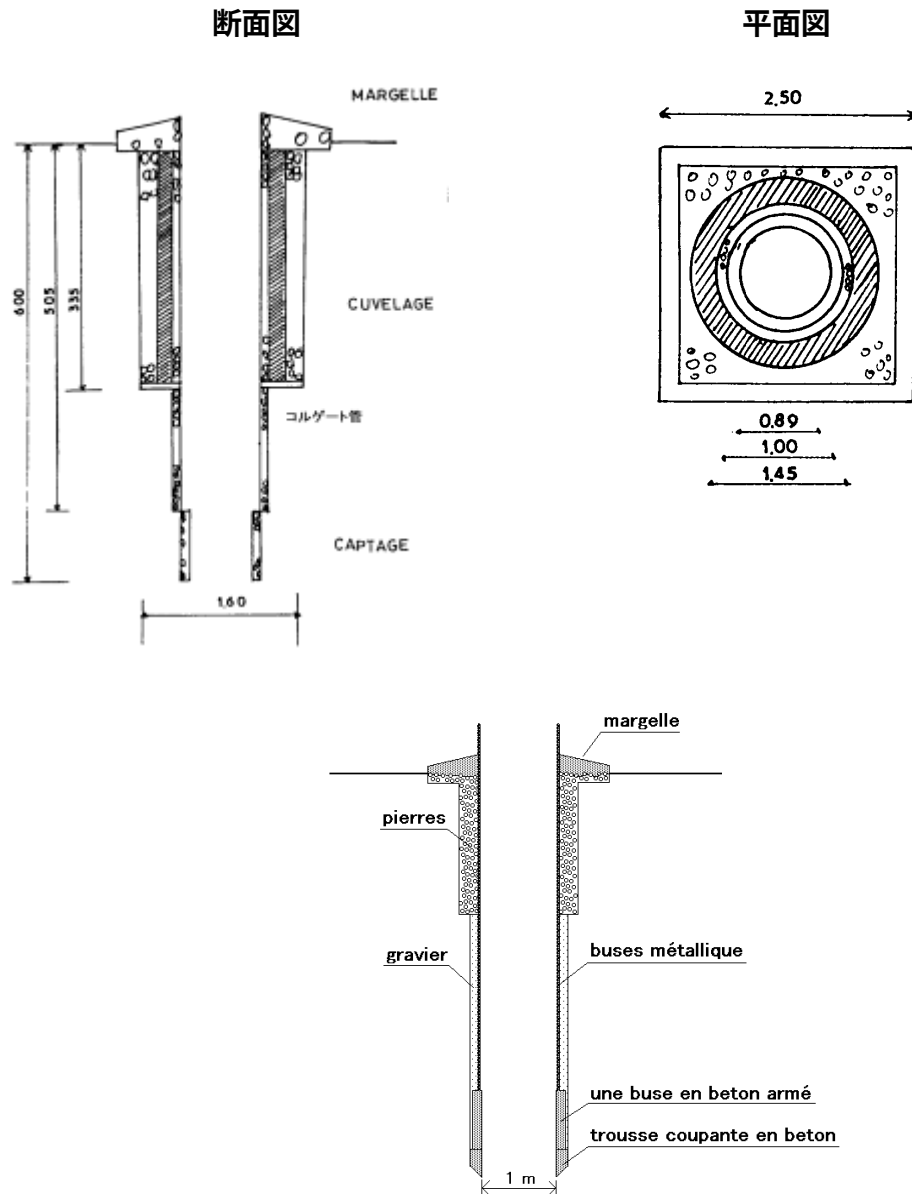


表 4. 4. 2. 1 井戸構造の概要

井戸の形式		井戸諸元	特徴	適用
近代 的 井 戸	近代的大口径 井戸	口径 1.2～1.8m程度 深度～50m 鉄筋コンクリート製ケーシング 人力またはポンプ揚水	設置費は高価 (25万～40万 FCFA/m) 人力掘削またはクムシ機械掘削 井戸上部に滑車を複数個設置することにより、数人が同時に揚水可能	浅い帯水層～比較的深い 帯水層の開発 (飲料用井戸、準平原地 域の灌漑用井戸等)
	ボーリング井戸	口径 0.1～0.3m程度 大深度が可能 鉄製ケーシング ポンプ揚水	設置費は比較的安価 (8万～13万 FCFA/m) 掘削にはボーリング専用機械が必要 人力ポンプによる揚水が可能	比較的深い帯水層の開発 (飲料用井戸等)
半伝統的井戸		口径 1.0m程度 深度～10m コルゼー管ケーシング 人力またはポンプ揚水	設置費は比較的安価 (6万～8万 FCFA/m) 人力掘削が可能 コルゼー管の廃材利用が可能	浅い帯水層の開発 (ワジニ・サハラ地域の灌漑 用井戸等)

※井戸設置費は JGR 調査での実績等からもとめた。

2) 井戸深度

井戸深度の決定には、帯水層の層厚（基盤岩の深度）と地下水位の季節的变化に関するデータが必要であり、これらは現況調査段階で把握する。その上で、現地では対応可能な掘削技術、揚水方法、予算などの条件を総合的に勘案し、もっとも効率が高くなるよう深度を決定する。井戸の深度が地下水位に対して浅すぎる場合には、乾季の地下水位低下時に井戸水が枯渇するおそれがある。井戸の利用期間や必要揚水量を勘案して、十分余裕のある深度とすることが必要である。近代的大口径井戸の場合、井戸底を掘削時の地下水面からさらに5m程度深くすることが望ましい。

利用目的が灌漑用または家畜用であれば、浅井戸でも問題ないが、人間の飲料用に供する場合は細菌や寄生虫による汚染を避けるため、最低でも30m以上の深井戸とすることが望ましい。

3) ケーシング・スクリーン

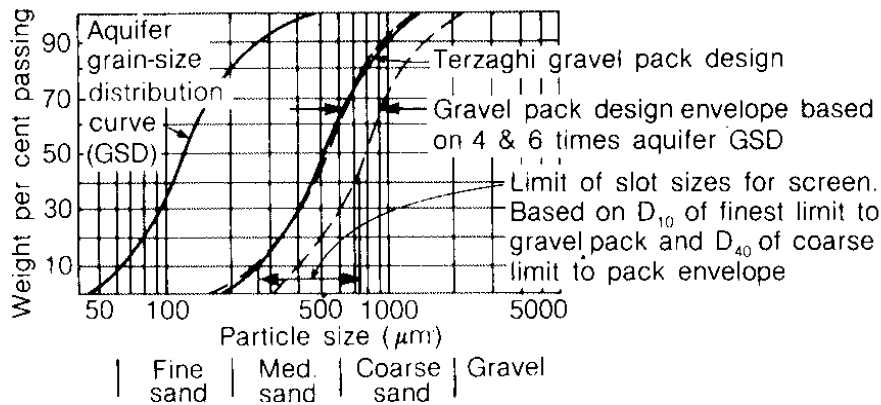
掘削後、孔壁を保護するため井戸内にケーシングを挿入する。ケーシングには鉄筋コンクリート管、鉄管、コルゲート管、プラスチック管などが一般的であるが、サヘル地域ではコンクリートブロックや煉瓦ブロックなども利用される。ただし帯水層が固結しており崩壊の可能性が低い場合は、素堀りのまま仕上げてよい。帯水層区間にはスクリーンを設ける。スクリーンには、ケーシングに溝や小穴を明ける場合と、専用のスクリーンを使用する場合がある。前者は安価であるが、開口率は2～3%と低い。後者は高価だが開口率は20%に達するものもある。開口率は帯水層の空隙率を上回っても意味がないが、最低でも10%以上とすることが望ましい。ただし、つるべによる揚水など揚水量が極めて少ない場合は、開口率はもっと小さくても差し支えない。

4) フィルター

ケーシングと孔壁との間には砂利などのフィルターを充填する。フィルターの目的は、帯水層を構成する砂粒子が井戸内に流入するのを防ぐためである。したがって固結した帯水層の場合は必要ない。特に、帯水層がゆるい砂層から成る氾濫原等で雨季に湛水する箇所に設置された井戸では、湛水時にスクリーン周辺の砂がスクリーン孔から井戸内に流入して井戸の滞水層部分が埋没するとともに、井戸周辺が陥没することがある。このような場合は、スクリーン周辺に適切な粒度のフィルターを設置するなどの対策が必要である。

フィルターは、帯水層の粒度分布と類似した分布を示し、粒径は4倍から6倍の間であることが望ましい（図4.4.2.5）。厚さは75mm～150mmが適当である。

図4. 4. 2. 5 フィルターの粒度条件 (Clark,1988)



5) 井戸上部・周辺構造物

汚染された地表水の浸入を防ぐため、地表部付近においてケーシングを立ち上げるとともに、ケーシングと孔壁との間にグラウチングを施したり、コンクリートのエプロンを設ける。井戸の周囲に囲いを設置することにより、家畜が井戸に近寄れないようにすることも水質保全に役立つ。

大口径井戸においては、採水容器を使用した人力による揚水を容易にするために、井戸上部に滑車を設置することが望ましい。複数の滑車を設置することにより、多くの人が同時に揚水を行うことができる。近代的大口径井戸の上部構造の事例を図4.4.2.6～7に示す。

図4. 4. 2. 6 近代的大口径井戸の上部構造の例（1）

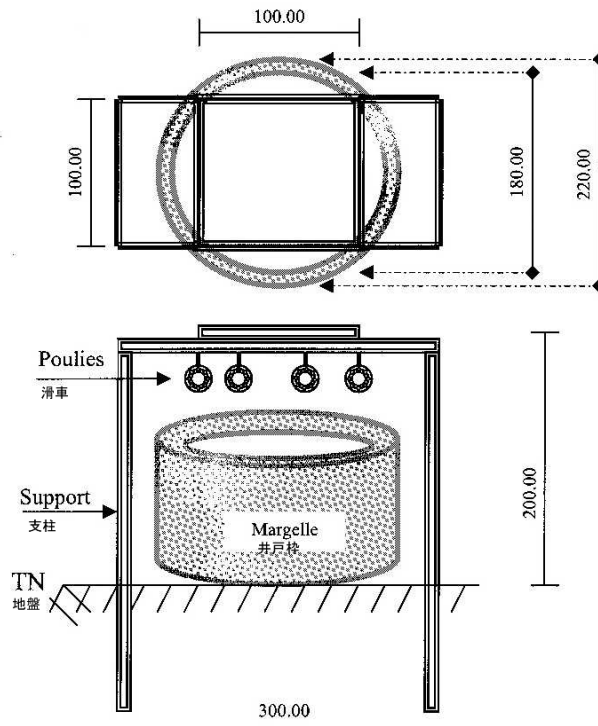


図4. 4. 2. 7 近代的大口径井戸の上部構造の例（2）



4. 4. 3 井戸の施工

井戸の掘削方法は人力掘削と機械掘削とに大別され、機械掘削はさらにロータリー式、パーカッション式、クラムシェル式等に区分される。

人力掘削は特別の機械や高度な技術を要しないため適用性は高いが、あまり深くまで掘れず、とくに地下水位以深の掘削は容易ではない。軟らかい地層の場合は、スコップ等で掘削が可能である。硬い地層では、コンプレッサーを使用したピックハンマーやダイナマイト発破が用いられている。

人力掘削の際は、掘削面に必ず支保を設けること及び地下水面以深を掘る場合は緊急避難用の梯子か予備の排水ポンプを備える等の安全対策が必要である。

また、井戸施工の時期は、乾季に行い、雨季が始まる前に終了した方が望ましい。人力掘削の場合には乾季の地下水位が低い時の方がより深くまで掘削しやすい。また、ワジ氾濫原に井戸を設置する場合には、雨季には湛水するため掘削が不可能なばかりでなく流水により施工中の井戸が破壊・埋没してしまうことがある。さらに、乾季は農閑期のため、井戸の施工にあたり地元住民の労働力提供等の協力が得られやすい利点がある。

4. 4. 4 井戸の改修

伝統的井戸は、飲料用及び家畜用として利用されている例が多い。伝統的井戸は、井戸深度が不十分で十分な揚水量を確保できないものがある。また、孔壁のケーシングが不十分であり、井戸内水が汚染されており大腸菌が検出される等飲料用としては不適当な井戸が多い。

このため、必要水量を確保するとともに、井戸水の水質の保全を行うことを目的として、伝統的井戸の改修を行う。改修内容は近代的大口径井戸と同様な構造とする。

表4.4.4.1～2に、JGRCがマリ国で行った井戸の改修事例を示す。

表4. 4. 4. 1 井戸の改修内容と改修効果

改修内容	改修効果
井戸深度を掘り下げる	地下水位低下による井戸涸を防ぐ
鉄筋コンクリート製ケーシングとする	井戸の耐久性を向上させる 井戸内壁の崩壊による井戸水の濁りを防ぐ
井戸口径を1.2～1.8m程度とする	数人が同時に揚水できるようにする
上部に滑車4個以上装着可能な支柱を設置する	
地表部の立ち上がり1m程度とする	孔口から井戸内への異物の侵入を防ぐ
井戸周辺をコンクリート床で覆う	地表からの汚水の地下浸透を防ぐ
井戸周辺に防護壁を設置する	井戸から家畜を遠ざけて、家畜の糞尿による井戸水の汚染を防止する

表4. 4. 4. 2 井戸1箇所あたりの改修費の例

項目	規格・数量	金額(FCFA)
1. 機材の輸送・設置費		250,000
2. 鉄筋コンクリート製ケーシングの作製費 (φ1.0～1.2m、45個)		1,692,000
鉄筋	φ8mm、135barre	182,300
セメント	135袋	742,500
針金	5kg	2,300
砂・砂利		201,000
労務費	材料費計の50%	564,000
3. 掘削費・ケーシング設置費 (深度32m)		2,239,000
掘削費	土砂10m	390,000
掘削費	硬岩22m (コンプレッサー使用)	1,731,000
労務費		45,000
人件費	井戸掘り人夫	29,100
人件費	助手	33,800
危険手当		10,200
4. 上部構造物設置費		542,000
鉄筋		26,300
セメント	15袋	82,500
板	12m	42,000
砂・砂利・石		140,500
支柱・滑車		63,000
溶接		7,000
人件費	材料費計の50%	180,600
5. 現場確認調査費		95,000
6. 予備費		20,000
合 計		4,838,000

※井戸の設置にあたり住民が提供した労働力分の費用は差し引いてある。

4. 4. 5 井戸の維持・管理

1) 井戸機能の維持

井戸の機能は時間とともに低下する。その主な原因は、帯水層や地表からの土砂の流入による井戸の埋没と、スケール（炭酸カルシウム、珪酸、鉄等の沈着物）によるスクリーンの目詰まりである。井戸の埋没に対しては、定期的に井戸内の浚渫を行えばよい。目詰まりに対してはスクリーンの洗浄や酸によるスケールの除去等を行う。大口径井戸であれば人間が孔内に入って作業できるため作業は比較的容易であるが、

ボーリング井戸ではこのようなメンテナンスは容易ではなく、専用の機材を用いたサージング、スワビング³⁾といった方法が必要になる。

また、経年的な水位低下が見られる地域では、井戸の掘り下げが必要になってくる。

2) 水質の保全

飲料用井戸において、良質な井戸水を得るためには、前述のように水質保全のための構造をもつ井戸の新設・改修が有効である。それに加えて、日頃の井戸の利用方法の改善や井戸の維持・管理を適切に行うことも重要である。

表4.4.5.1に井戸機能の維持と水質保全を目的とした井戸の維持・管理方法を示す。

表 4. 4. 5. 1 井戸の維持・管理方法

項 目	維持・管理方法
水質の保全	・飲料用井戸を飲料専用とし、家畜用には使用しない。 ・飲料用と家畜用を共有する場合には、家畜の水飲み場を井戸から離す。 ・揚水器具（ゴム袋、ひも）を地面に直接置かないようにする。 ・井戸周りの排水を良好にし、井戸周辺に汚水が湛水しないようにする。 ・井戸周辺の清掃を定期的に行う。 ・大口径井戸の場合、井戸に蓋をする。
大口径井戸の管理	・井戸の底ざらい（堆砂の排除）を定期的に行う。 ・必要に応じて井戸の掘り下げを行う。 ・井戸の上部施設等の補修を行う。
ボーリング井戸の管理	・ポンプのメンテナンスを定期的に行う。 ・ポンプの修理を行う。 ・サージング、スワビングを定期的に行う。

3) 維持・管理体制

井戸を持続的に運用するために、適切な維持・管理を行う必要がある。

井戸の維持・管理は、住民（受益者）が行うことが原則である。このため、住民自らが井戸管理委員会を設置し、井戸の維持・管理を行うことが望ましい。維持・管理のための費用を調達するために、井戸の利用者から分担金（利用料）を徴収するなどのシステムの構築が必要である。

さらに、住民に対して、施設の維持・管理の必要性と方法について、啓蒙活動と教育を行うことも重要である。

³⁾ サージング、スワビング：井戸内にピストン状のもの（サージブランジャー）を入れ、これを上下させることにより、水の動揺を大きくし、その衝撃作用によって、井戸内及びスクリーン周辺の地層の閉塞を除去する方法。

参考文献

- BANNERT, et al. 1980. Etude de reconnaissance des ressources en Afrique à l'aide d'images de satellite en République de Haute-Volta .Géologie .Hydrogéologie,Pédologie et Utilisation du sol. Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe,Hannover.
- BRASSINGTON,R.1988.Field Hydrogeology.Geological Society of London Professional Handbook Series, John Wiley,175pp.
- BRGM. 1960. Afrique Occidentale-Carte Géologique. 1:2000000
- Brutsaert,w. and Stricker,H.1979.An advection-aridity approach to estimate actual regional evapotranspiration. Water Resour.Res.15(2),443-450pp.
- CASTANY,G. 1982. Principes et méthodes de l'hydrogéologie. BORDAS,Paris, 236pp.
- CLARK,L. 1988. The Field Guide to Water Wells and Boreholes .Geological Society of London Professional Handbook Series,John Wiley,155pp.
- COMITE INTERAFRICAIN D'ETUDES HYDRAULIQUES. 1982. Essais de Débit Simplifiés sur Puits.
- COMITE INTERAFRICAIN D'ETUDES HYDRAULIQUES. 1988. Essais de Débit Simplifiés sur Forages D'hydraulique Villageoise.
- Glenn, et al. 1993. Soil and Water Conservation Engineering. John Wiley & Sons.
- U.S.DEPARTMENT OF AGRICULTURE(USDA). 1954. Handbook No.60. Diagnosis and Improvement of Saline and Alkali Soils.GPO,Washington,DC.
- MEYER DE STADELHOFEN,C. 1991. Applications de la géophysique aux recherches de l'eau.Technique et Documentation-Lavoisier. Paris,183pp.
- Puech,C. et Chabi-Gonni,D. 1983. Méthode de calcul des débits de crue pour les petits et moyens bassins versants en Afrique de l'Ouest et Centrale. CIEH,Ouagadougou.
- J.Rodier and C.Auvray. 1965 .Estimation des débits de crues décennales pour des bassins versants de superficie inférieure à 200 km² en Afrique Occidentale. CIEH,Orstom, Paris.
- WRIGHT,E.P. et al. 1987. Collector wells in crystalline basement aquifers. A review of results of recent research. In.Proceedings of the XXI Congress of the International Association of Hydrogeologists, Rome,Italy,12-17 April 1987.
- 改訂地下水ハンドブック編集委員会. 1998. 改訂地下水ハンドブック. p.308,建設産業調査会