

# 1

## コロンビア国ボゴタ平原持続的地下水開発計画調査 (JICA 開発調査)

中村 浩

NAKAMURA Hiroshi

八千代エンジニアリング株式会社/国際事業部/水資源部/担当課長



日本が行っている国際的な技術協力は、アフリカやアジアなどの貧困を抱えた発展途上国だけでなく、南米などの経済が比較的発達した

国々(いわゆる中進国)でも行われている。ここでは、我が国の国際技術協力として南米コロンビアの首都ボゴタ市地域において実施された地

下水開発調査の概要について紹介する。

### 1—調査の背景

南米コロンビア(図1)の首都ボゴタ市は(写真1)人口約650万人であるが今後の経済発展と人口増加が予測されている。ボゴタ市への給水は、約35km離れた山中に建設されたダム貯水池を水源としている。しかし、6年前の地震によって貯水池からの送水施設が崩壊し、半年間にわたって送水量が半減した。また、コロンビア国は未だに内戦状態にあるため、反政府ゲリラによる送水施設への攻撃が脅威となっている。ボゴタ市は今後の人口増加や非常事態に対する信頼性の高い水源として地



■図1—コロンビアとボゴタ平原の位置



■写真1—ボゴタ平原とボゴタ市



■写真2—ボゴタ平原の丘陵(中央は農業用溜池)



■写真3—ボゴタの一大産業である花卉栽培



■写真4—ボゴタ市内道路路沈下

下水に注目し日本政府に調査を要請した。当社はこの調査を国際協力事業団(現国際協力機構JICA)から受注し、ボゴタ平原の地下水賦存量の評価と開発計画マスタープランの作成(12年12月から2年間)を行った。

### 2—ボゴタ平原の現状

ボゴタ平原は面積4,268km<sup>2</sup>、海拔約2,600m、東アンデス山脈のほぼ7~8合目に位置し、山脈の中の大草原と言うべき異なる景観を呈している。ボゴタ平原は赤道付近に位置するものの標高が高いため、1年を通じて日本の春や秋のような快適な気候(年降雨量800mm、平均気温14℃)であり豊かな緑が平原から絶えることはない(写真2)。この恵まれた気候は花の栽培をボゴタ平原

の重要な産業に押し上げた(写真3)。ボゴタ平原の南部には首都ボゴタの市街地が広がっている。

#### ●1 帯水層の地質構造

図2にボゴタ地下水盆の東西断面を示す。盆地表層の広大な平原は第四紀層で形成されている。この地層の厚さは最大で800m以上あり、大深度電磁探査(CSAMT法)で調査された。その下には第三紀層と白亜紀層が分布している。白亜紀層は盆地の両端部で褶曲によって地表部分に現れて山脈を形成している。ボゴタ地下水盆の構造は、あたかも白亜紀層が形作った入れ物の中に第四紀層と第三紀層が詰まっているかのごとくである。

#### ●2 第四紀層と集中揚水

ボゴタ平原では7,000本あまりの

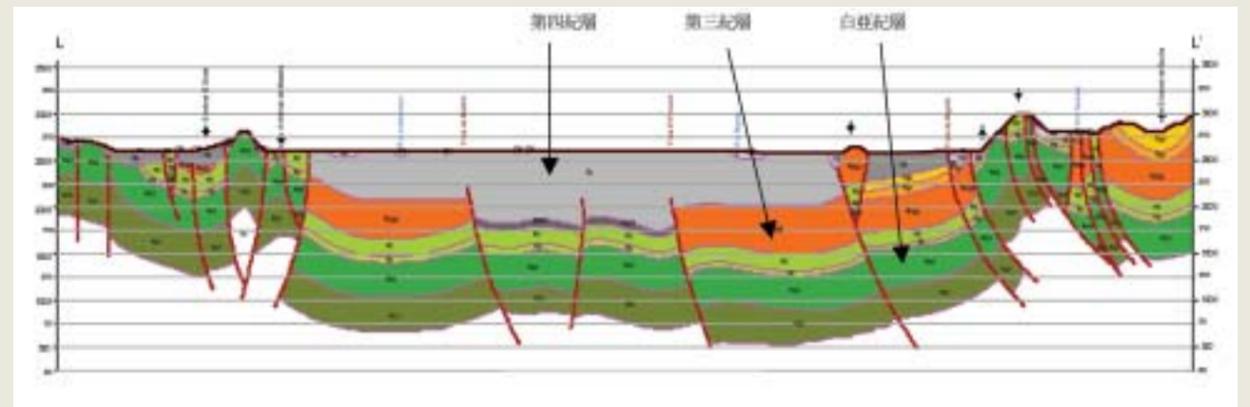
ボーリング井戸と無数の手掘井戸がある。毎日32万m<sup>3</sup>の地下水が揚水され農業(大口需要は花卉栽培)や工業に利用されている。井戸はボゴタ平原の中央部に偏って分布している。この地域では第四紀層が優れた帯水層となっている。しかし一方では、井戸が集中している地域では地盤沈下などの環境問題の発生が懸念されている(写真4)。

### 3—地下水賦存量の推定

地下水の開発計画を作成するに当たっては、まず地下水の賦存量を知る必要がある。賦存量が大きいほど地下水の開発可能性が大きくなる。

#### ●1 水収支の基礎式

水収支解析によって、ボゴタ平原



■図2—ボゴタ地下水盆の地質構造

の地下水涵養量の分布を求めた(図3)。その平均値は144mm/年(年降雨量の18%、615百万m<sup>3</sup>/日)となった。使用した水収支式は以下のとおりである。

$$W = P - ETR - D$$

ここで、

W: 年間地下水涵養量(mm/年)

P: 年間降雨量(mm/年)

ETR: 年間実蒸発散量(mm/年)

D: 年間河川流出量(mm/年)

## ●2 実蒸発散量(ETR)の推定

水収支式の中で実蒸発散量(ETR)は通常は実測値がないために推定が極めて困難である。我々は土壌の水収支計算によってETRを推定した。ボゴタ平原の土壌をモデル化し、過去10年間の日々の気象データを用いて土壌内部の水収支を計算した。その結果を統計的に処理することによって、ETRを降雨量・可能蒸発散量・土壌水分特性の関数として算出

することができた。

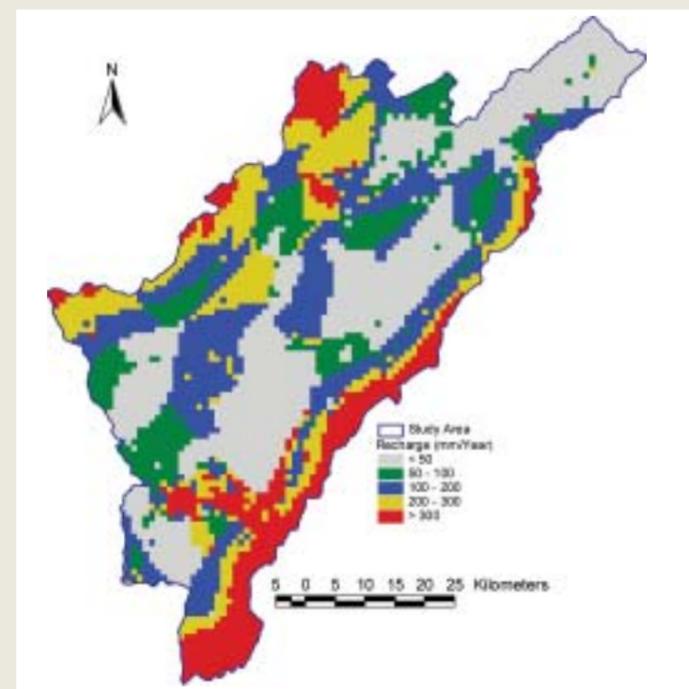
## ●3 地下水シミュレーション

水収支解析によって算出した地下水涵養量144mm/年の妥当性を検討するために地下水シミュレーションを実施した。調査開始時点においては、ボゴタ平原の地下水流動のコンセプトが確立されていなかった。我々は試行錯誤的に大小2つのモデルを作成し、2段階のシミュレーションを実施した。図4に示す様に、第1段階では、ボゴタ地下水盆が所属する東部アンデス山脈全体を対象とした大モデルを作成した。第2段階ではボゴタ地下水盆だけを対象とした小モデルを作成した。大モデルの計算結果を小モデルの計算に利用することによって、地下水流動のイメージが明らかになった(図5)。

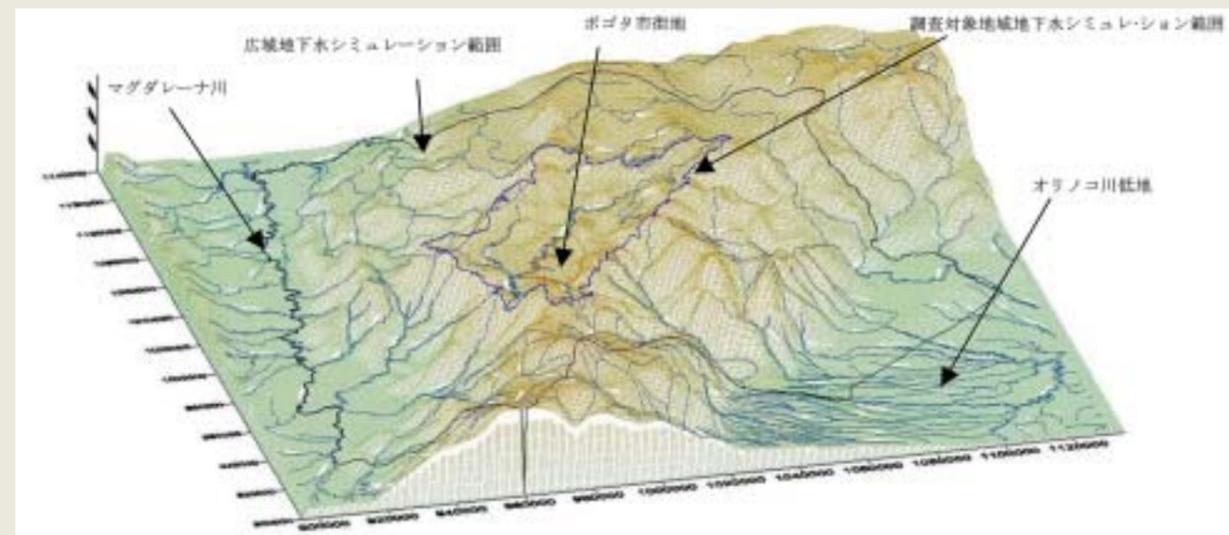
## 4—地下水開発/保全の問題点

### ●1 新たな帯水層の開発

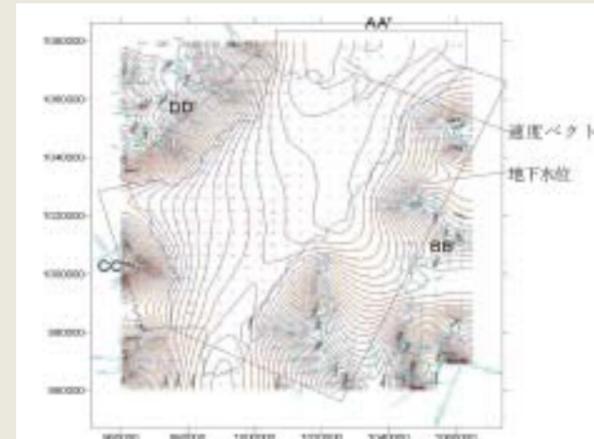
図2に示す様に、ボゴタ平原の外周部にはアンデス山脈を形成する白亜紀層が分布しているが、現在まで地下水開発の対象として注目されることはなかった。この白亜紀層は、水の大消費地であるボゴタ市の背後に分布し開発に好都合な位置にあ



■図3—地下水涵養量の地域分布



■図4—地下水シミュレーションに使用した地形モデル(大モデルの東部アンデス山脈と小モデルのボゴタ平原が示されている)



■図5—ボゴタ地下水盆の地下水流動(シミュレーション結果)



■写真5—人工涵養井戸の掘削状況(手前は沈砂池)

る。我々はこの帯水層に焦点を当てて数々の調査を実施した。その結果、白亜紀層は地下水生産能力が非常に高いことが証明できた。白亜紀層に井戸を掘削すれば少数の井戸から大量の地下水を容易に確保できる。しかし同時に局所的な地下水位低下が発生する危険性が高い。

### ●2 開発と保全

我々が解決すべき課題は2つ、すなわち①白亜紀帯水層の開発と、②第四紀帯水層の保全であった。両者に共通した問題点は、井戸群が局所的に高密度で配置されている場合、そこからの集中的な揚水が地下水位低下や地盤沈下を引き起こすことである。ボゴタ地下水盆は全体としては巨大な開発ポテンシャルを持っているが、開発は局部的かつ集中的に行われている。そこで、この問題を解決する方策として地下水の人工涵養というアイデアが浮かび上がった。

## 5—地下水人工涵養

### ●1 人工涵養パイロットスタディ

我々は、白亜紀層に涵養井戸と観測井戸を1本ずつ掘削し人工涵養の可能性を調査した(写真5)。河川水を沈砂池で浄化した後に涵養井戸に3ヶ月間にわたって連続注入した。

注水結果は極めて良好であり、井戸1本から3,000m<sup>3</sup>/日の注水が可能であることが判明した。

### ●2 人工涵養の問題点と対策

涵養井戸は大きな注水可能量を持っているため、雨季の余剰河川水の効率的な利用が期待されたが、問題もあった。酸素を十分に含んだ河川水が地下の帯水層に注入された場合、酸素と地下水に含まれている鉄イオンが反応し、不溶性の水酸化鉄Fe(OH)<sub>3</sub>が生成してしまう。水酸化鉄は井戸の目詰まりを引き起こすため、注水効率が時間とともに低下していく。しかしこれを防ぐには、一時的に注水を停止し逆に揚水すれば良いことが報告されている。井戸内の水酸化鉄は揚水によって井戸の外に排出される。

## 6—地下水開発と保全計画

### ●1 開発計画

給水に係わる非常事態が発生した場合は、遠方のダム貯水池を水源とする給水システムが停止する危険性が高い。このシステムはボゴタ市の東側の地区に給水している。したがってこの地区を地下水開発による給水対象とした。この目的を達成するために、白亜紀帯水層に63本の生産井戸を建設し常時19万m<sup>3</sup>/日、

非常事態時には35万m<sup>3</sup>/日を揚水する。また13本の涵養井戸を建設し、雨季に発生する余剰の河川水を4万m<sup>3</sup>/日で人工涵養し開発可能量の増大を図る。

### ●2 保全計画

保全計画は集中的な揚水がなされている、ボゴタ平原中央部の地下水位の回復を目的とする。この地域の第四紀層に28本の涵養井戸を建設し、雨季に発生する余剰の河川水を4.5万m<sup>3</sup>/日で人工涵養する。これによって地下水位の低下を解消する。

### ●3 涵養井戸の運転システム

一連の計画で最も苦心したポイントは、人工涵養の弱点である井戸の目詰まりをいかに解消するかであった。この方策として、注水と揚水を定期的に交替する井戸運転システムを提案した。井戸の洗浄を目的として揚水した地下水はもちろん給水に利用する。まさに一石二鳥の方法である。

### ●4 当社の今後の取組み

ボゴタ市は当社が提案したボゴタ平原の地下水開発・保全事業の実施を強く望んでいる。当社では今後、本事業の実現に向けた支援活動を積極的に進めていきたい。