

5.3 地下水シミュレーション

地下水シミュレーションによって調査対象地域における地下水賦存量を推定し、将来的な地下水開発の可能性を検討した。本調査では以下に示すステップで地下水シミュレーションを実施した。

- 調査対象地域を含むクンディナマルカ県の大部分を含む地域を対象とした広域地下水シミュレーションの実施
- 調査対象地域を対象とした地下水シミュレーションの実施

上記各ステップの検討・解析結果を以下に説明する。

5.3.1 広域地下水シミュレーション

広域地下水シミュレーションの解析対象範囲

本調査団は調査対象地域であるボゴタ平原を中心とし、西はマグダレーナ川、東はオリノコ川水系に至る範囲をモデル化した。解析対象地域の面積は 32,200km² であり、この範囲はクンディナマルカ県のほぼ全域をカバーしている（図 5-14 参照）。

広域地下水シミュレーションの目的

ボゴタ平原を中心とした広域的な地下水流動を解明する目的で実施した。

広域地下水シミュレーションモデル

広域地下水シミュレーションモデルの概要を以下に示す。広域地下水シミュレーションで使用したプログラムは Visual Modflow である。

モデルのサイズ

モデルのメッシュ間隔は 1,500m、モデルの総節点数は 42,000 である。

モデル化した範囲と境界条件

広域地下水シミュレーションでモデル化する範囲を設定するに当たって、以下の事項を考慮した（図 5-14 参照）。

- モデルの外周には境界条件を設定する必要がある。その境界条件の影響が調査地域の地下水流動に直接的に影響しないようにモデルの外周を十分遠方まで拡張する。
- 調査域の地下水流動を考察するためにはマグダレーナ川とオリノコ川低地へ向かう地下水流動を再現する必要があり、この両者をモデルに含む。
- モデルの外周はマグダレーナ川の流路、オリノコ川低地との境界、主要河川、分水界と一致させる（図 5-15 参照）。

上記方針に基づき、境界条件を以下のように設定した。（図 5-15 参照）

- マグダレーナ川には水位一定条件を設定する。
- オリノコ川低地部分には水位一定条件を設定する。
- その他の境界に関しては、境界が分水界と一致する場合は流量=0 とし、また境界が河川と一致する場合は、地下水位=河床標高値として一定値を与えた。
- モデルの内部の主要河川には「排水境界」条件を設定した。

帯水層構造

帯水層モデルは、INGEOMINAS が発行した ATLAS GEOLOGICO DIGITAL DE COLOMBIA(1997) から地質断面を作成しこれを 3 次元化しモデルを作成した。この地質図の地層区分に従い、表 5-15 に示す様にモデルの帯水層構造を 8 層構造とした。図 5-16 にモデル化した地質断面の例を示す。

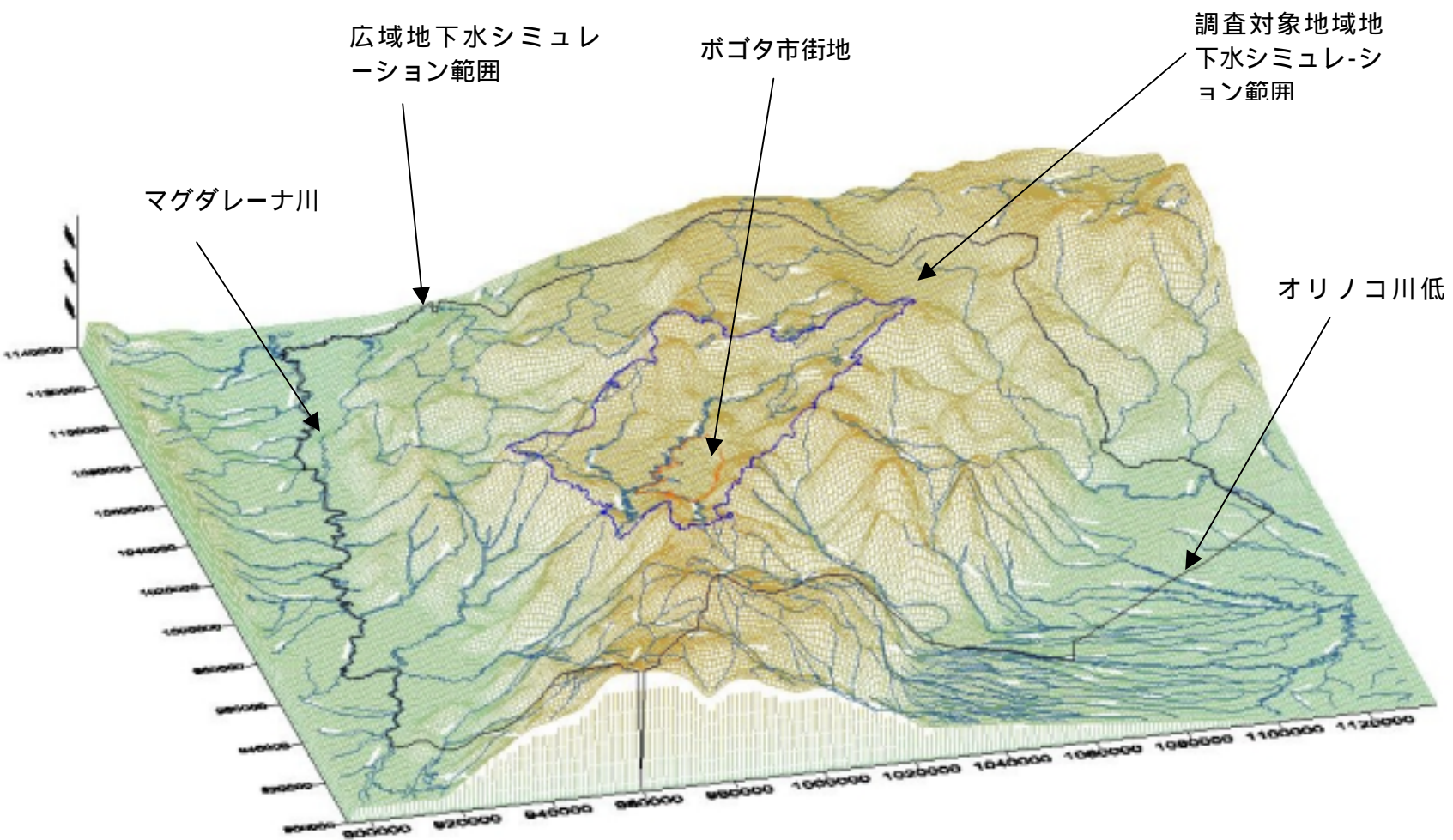


図 5-14 広域地下水シミュレーション範囲

帯水層の水理定数

帯水層定数の設定に当たっては、「水理地質解析」で分析された水理定数の統計値を参考とし値を設定した。最終的に使用した帯水層の水理定数を表 5-15に示す。

表 5-15 帯水層区分と水理定数

No.	帯水層区分	透水係数 (cm/s)	
		水平方向	鉛直方向
1	第四紀層	6×10^{-5}	3×10^{-6}
2	上部第三紀層	3×10^{-4}	3×10^{-5}
3	下部第三紀層	3×10^{-4}	3×10^{-5}
4	上部 Guadalupe 層	1.2×10^{-4}	1.2×10^{-5}
5	下部 Guadalupe 層	6×10^{-5}	6×10^{-6}
6	中部白亜紀層	3×10^{-5}	3×10^{-6}
7	下部白亜紀層	1.5×10^{-5}	1.5×10^{-6}
8	古生層	6×10^{-5}	3×10^{-6}

地下水涵養量

本調査でモデル化した広域の地下水涵養量を直接的に推定するデータは存在しない。そこで以下に示す手順で地下水涵養量を設定した。

- IDEAM および CAR が作成したクンデナマルカ県全域をカバーする年間降雨量分布図をベースとして涵養量を推定した。
- INGEOMINAS が作成した涵養 Map を参考として年間降雨量の何%が地下水涵養になるかを地質ごとに仮定した。
- 地下水シミュレーションの実施の過程で、合理的な計算結果が得られるように、許容できる範囲内で地下水涵養量の値を変更した。最終的に採用した地質ごとの地下水涵養量は表 5-16に示す通りである。

表 5-16 広域地下水シミュレーションで用いた地質ごとの地下水涵養量

No.	帯水層区分	降雨量に対する地下水涵養量比率(%)
1	第四紀層	5%
2	上部第三紀層	15%
3	下部第三紀層	3%
4	上部 Guadalupe 層	10%
5	下部 Guadalupe 層	10%
6	中部白亜紀層	3%
7	下部白亜紀層	3%
8	古生層	3%

揚水井戸

調査対象地域の揚水が広域的な地下水流動に与える影響を検討するために、調査対象域に単純化した井戸分布をモデルに設定した(図 5-17参照)。井戸からの合計揚水量を涵養量の 0%、10%、20%、30%、40%に変化させ、それによる地下水流況の変化を考察することによって、広域地下水流動における揚水の影響を検討した。

広域地下水シミュレーションの解析結果

地下水流動系

調査対象地域の揚水量を無視した場合の広域地下水流動状況を図 5-18に示す。また、調査対象地域の揚水量が地下水涵養量の 40%の場合の地下水流動状況を図 5-19に示す。図 5-18、図 5-19によると、解析領域の地下水流動系は以下の2つに大別される。

- マグダレーナ川に向かう地下水流動系
- オリノコ川低地に向かう地下水流動系

調査域の大部分は「マグダレーナ川に向かって南西に向かう地下水流動系」に属する(図 5-18参照)。

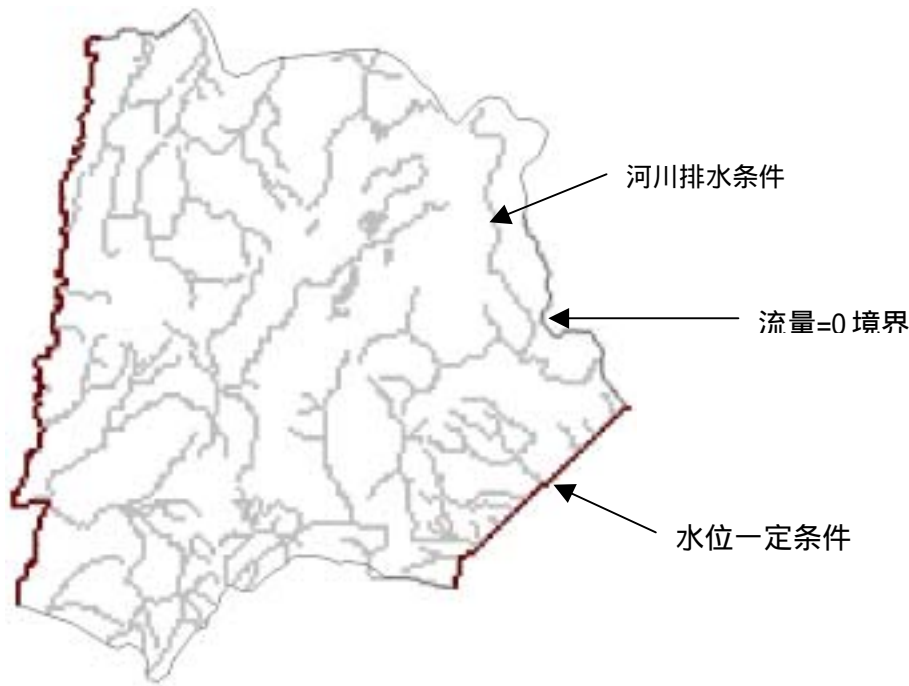


図 5-15 広域地下水シミュレーションモデルの境界条件

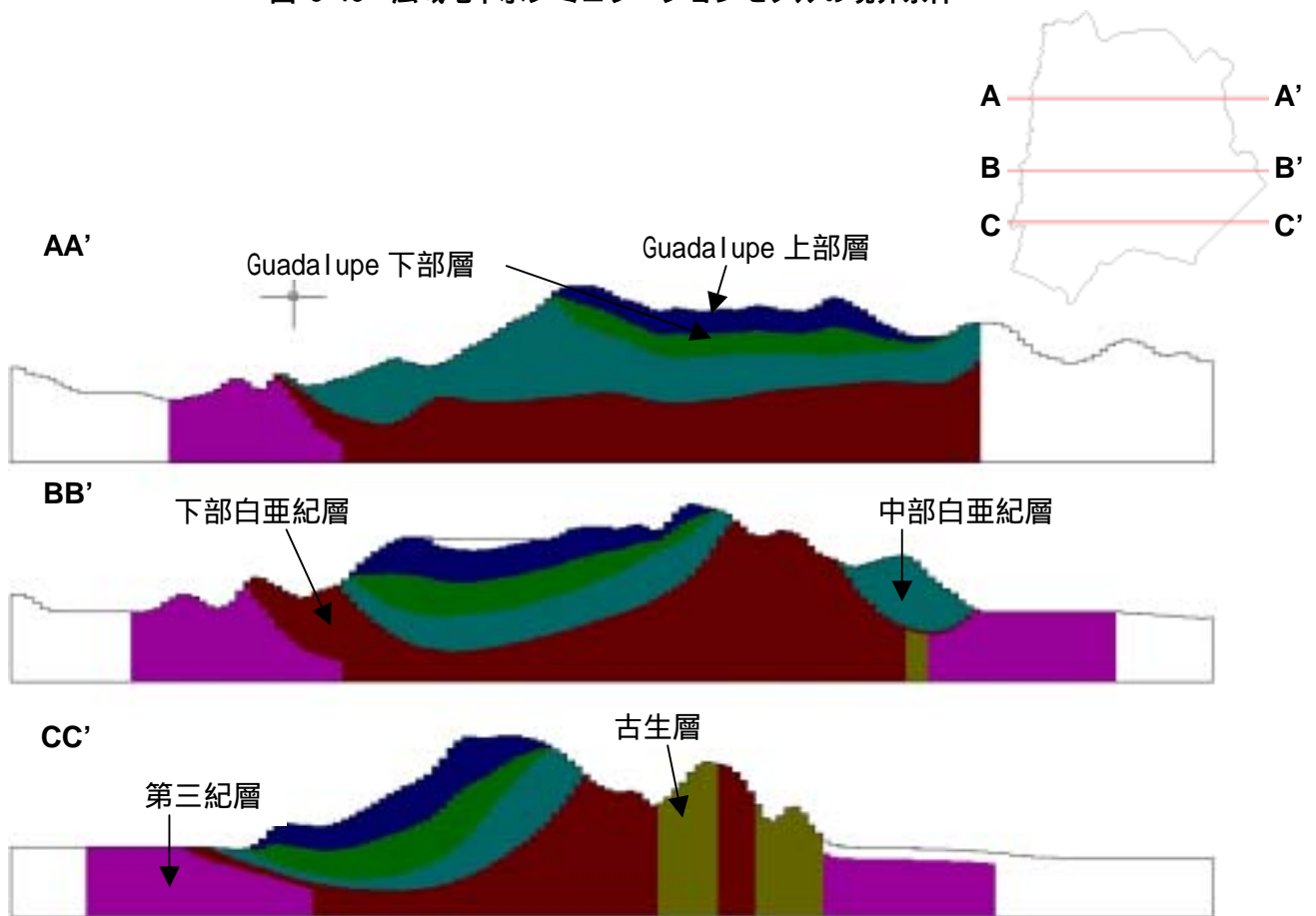


図 5-16 広域地下水シミュレーションモデルの地質モデル



図 5-17 広域地下水シミュレーションにおける井戸分布

調査対象域の揚水が地下水流動に与える影響

図 5-20によると調査対象域の揚水が地下水流動に与える影響は以下の通りである。

- 揚水の増大にともなって、ボゴタ平原の地下水流動が井戸群に向かって促進される。同時に井戸群の位置で地下水位低下が発生する。
- 調査域の揚水量を増大するにしたがって、地下水分水界が調査域の外側に向かって拡大される。揚水の増大に伴ってその影響圏が外側に更に拡大され、調査対象域の外側に存在する地下水が調査域内に引き込まれる。

広域シミュレーション結果の考察

広域シミュレーションの結果から以下の事項が推定される。

- 地下水開発以前から調査対象域の地下水は大局的な地形勾配に従ってマグダレーナ川に向かって南西方向に流れていた。
- ボゴタ平原の地下水開発以後は、ボゴタ平原の中央部（井戸群）に向かう地下水流動が促進され、同時にボゴタ平原の地下水位が全体的に低下した。
- ボゴタ平原の地下水開発量を増やすに従って、地下水分水界はより調査対象域の外側に向かって拡大されていった。
- 以上述べた結果は、地下水の流動が調査対象域内にのみ限定されているのではなく、地下水開発量に応じてその影響範囲が調査対象域の外側にも拡大されていくことを意味する。
- 地下水の流動が調査対象域に限定されている場合は、地下水開発量の増加とともに地下水位は連続的に低下する。しかし、実際には地下水開発量の増加とともに影響範囲が調査域の外側にまで拡大され、そこから地下水が引き込まれる。さらに調査域外からの地下水流入量と揚水量がバランスした時点で地下水位の低下が停止することが予想される。

5.3.2 調査地域の詳細地下水シミュレーション

調査地域地下水シミュレーションの目的

調査地域であるボゴタ平原を対象として詳細なモデルを作成し、調査地域地下水シミュレーションによって、調査対象地域の地下水涵養量の推定値 144mm/年の妥当性を評価した。

調査地域地下水シミュレーションモデル

調査地域地下水シミュレーションモデルの概要を以下に示す。調査地域の地下水シミュレーションに使用したプログラムは Visual Modflow である。

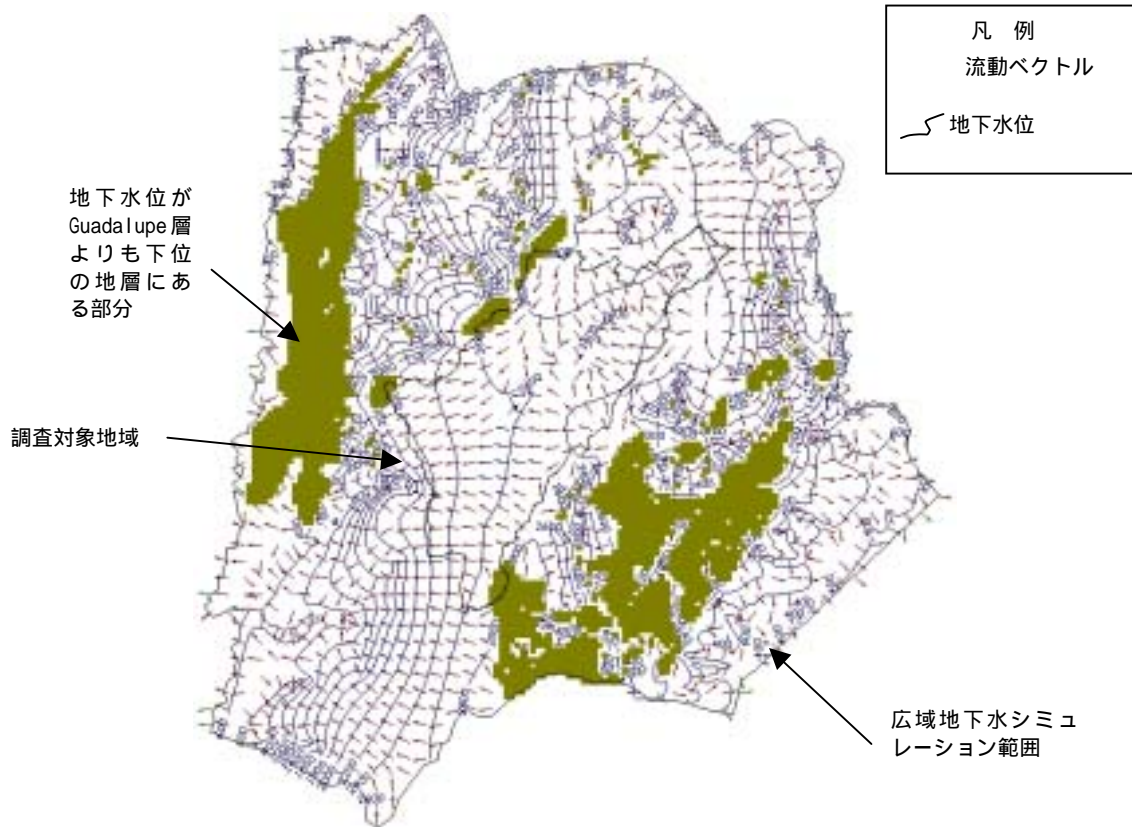


図 5-18 揚水量0の場合の広域地下水流動

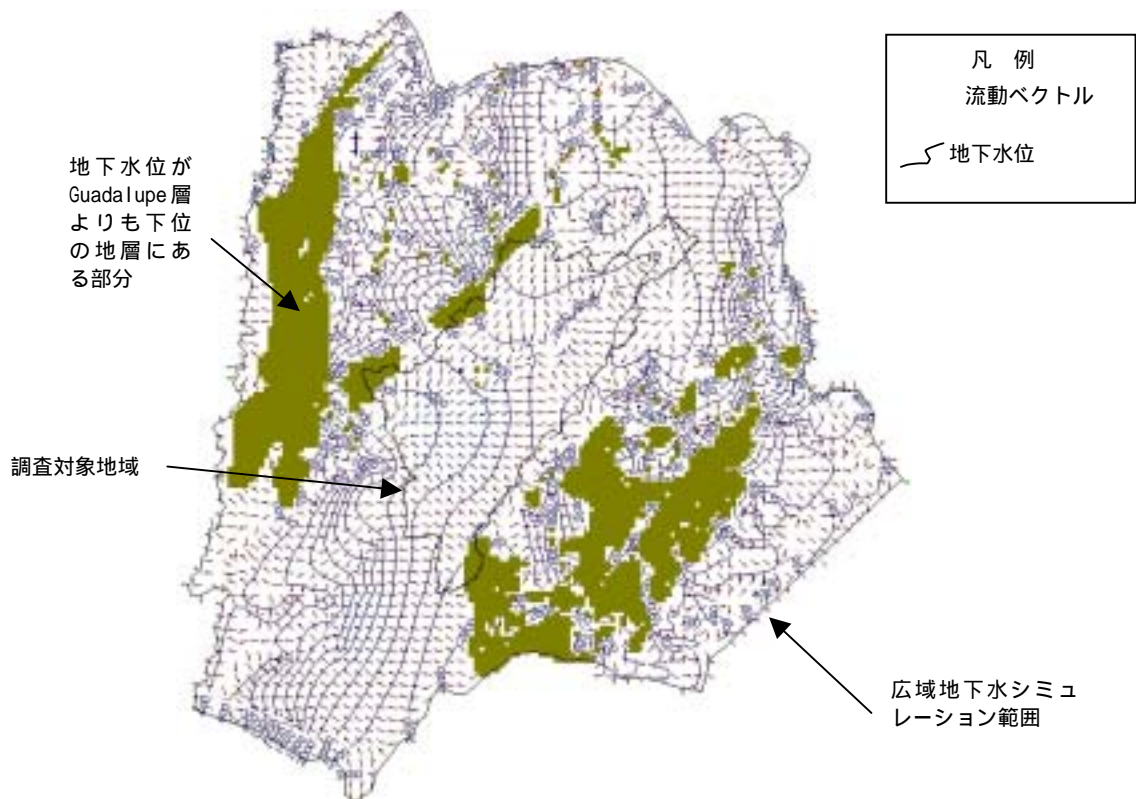
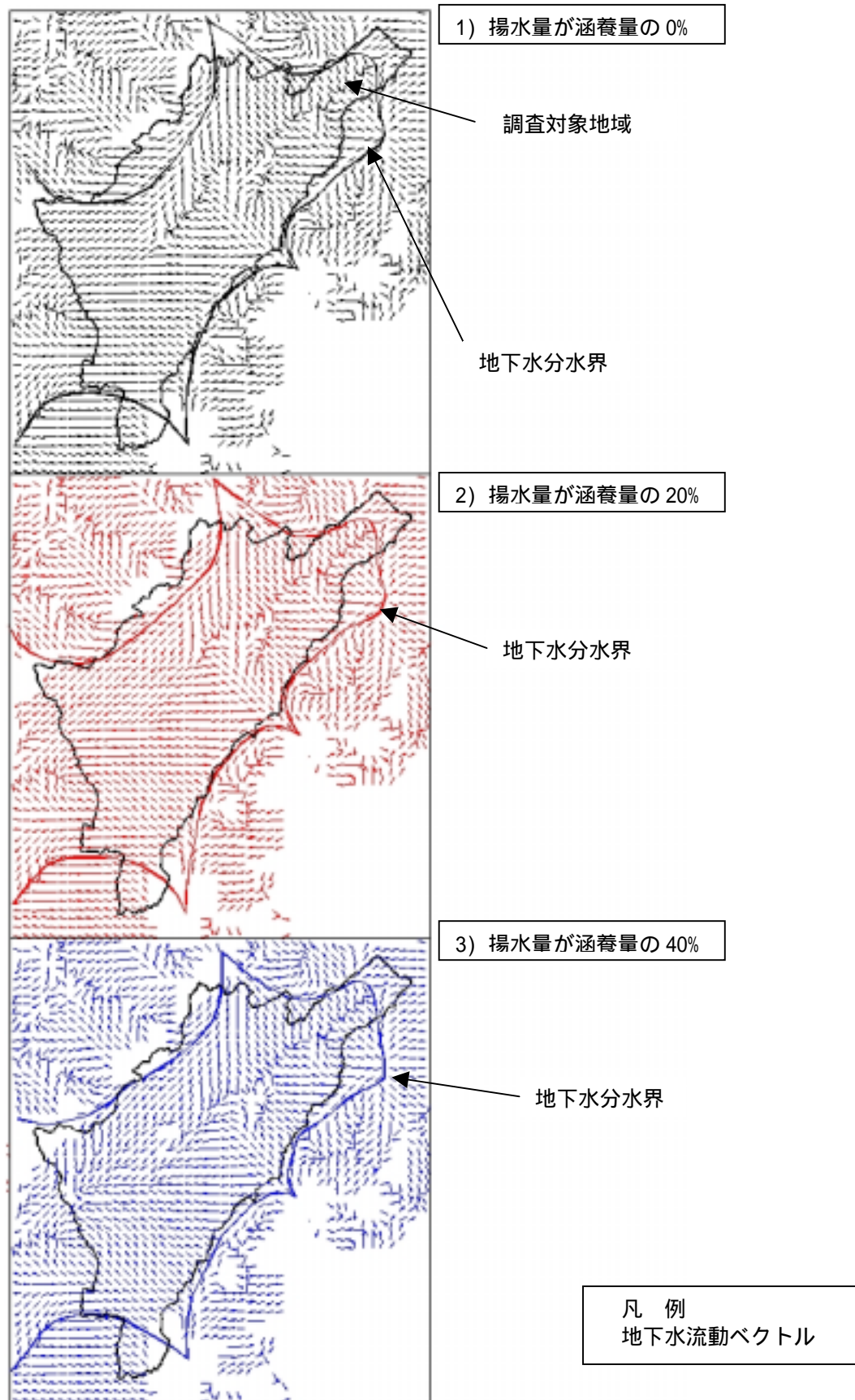


図 5-19 揚水量が涵養量の40%の場合の広域地下水流動



(上図)揚水量が涵養量の0%、(中図)揚水量が涵養量の20%、(下図)揚水量が涵養量の40%

図 5-20 揚水量の増加による地下水分水界の拡大

モデルのサイズ

モデルのメッシュ間隔は 1,000m、モデルの総セル数は 105 × 120=52,500 である。

モデル化した範囲と境界条件

調査地域地下水シミュレーションでは調査対象地域の全体を含む面積 105km × 120km 範囲をモデル化した。モデル外周の境界条件の設定に当たっては、広域地下水シミュレーションの結果を参考とした。

<調査域内の境界条件>

モデルの調査地域内にはほとんど河川境界条件を与えていない。モデルに与える地下水涵養量は第 5.2 章で説明したように河川への地下水基底流出量を除いた量である。したがって、モデルに与える地下水涵養は河川へ流出しないことを前提としているため、河川条件は不要である。しかし、モデル内の一部分の地域では計算誤差が大きくなるため、一部分の地域には河川条件を入れた。

<調査対象域外の境界条件>

広域地下水シミュレーションの結果によると、調査地域の外部の水系に従って、マグダレーナ川およびオリノコ側水系の方向へ地下水が流動している。したがって、境界条件として、調査地域外の主要水系を境界条件としてモデルに組みこんだ。

帯水層構造

帯水層モデルは INGEOMINAS 発行の 1/10 万地質図から地質断面を作成しこれを 3 次元化しモデルを作成した。この地質図の地層区分に従い、表 5-17 に示す様にモデルの帯水層構造を 6 層構造とした。図 5-22 にモデル化した地質断面の例を示す。

帯水層の水理定数

帯水層の水理定数は表 5-17 に示す様に設定した。帯水層定数の設定に当たっては、「水理地質解析」で分析された水理定数の統計値を参考とした。また、鉛直方向透水係数/水平方向透水係数=1/15 と設定した。最終的にモデルに設定した透水係数値は、表 5-17 に示す通りである。

表 5-17 帯水層区分と水理定数

層 No.	帯水層区分	透水係数 (m/日)	
		水平方向透水係数	鉛直方向
1	第四紀層	0.6	0.04
2	第三紀層	0.06	0.004
3	Labor Tierna 層	1.0	0.067
4	Plaeners 層および Dura 層	0.5	0.033
5	Chipaque 層	0.13	0.009
6	ボゴタ断層	10	10

地下水涵養量

モデルに与える地下水涵養量は、水収支解析の結果を利用した。モデルに与えた地下水涵養量の分布を図 5-23 に示す。また、調査対象地域外では地下水涵養量が求められていないので、広域地下水シミュレーションで使用した地下水涵養量を参考にして調査対象域外の地下水涵養量を設定した。

揚水井戸

井戸のモデル化に当たっては井戸インベントリの結果を利用した。モデルには調査地域の全 7,000 本の井戸揚水量を組み込んだ。その総揚水量は約 320,000m³/日である。井戸のモデル化に当たっては、以下の事項に配慮した。

- 井戸データベースに記載された井戸の座標に基づき、井戸の位置を正確にモデルに組み込む。
- 井戸データベースに記載された井戸の帯水層データに基づき、井戸の帯水層をできるだけ正確にモデルに反映させる。
- 個々の井戸の揚水量をモデル上でできるだけ正確に再現する。
- モデル化に必要な情報を持っていない井戸データや、モデル化に当たって矛盾がある井戸は、計算結果に大きな誤差が生じないように配慮を行なった上でデータを修正してモデル化した。



図 5-21 調査域地下水シミュレーションの境界条件

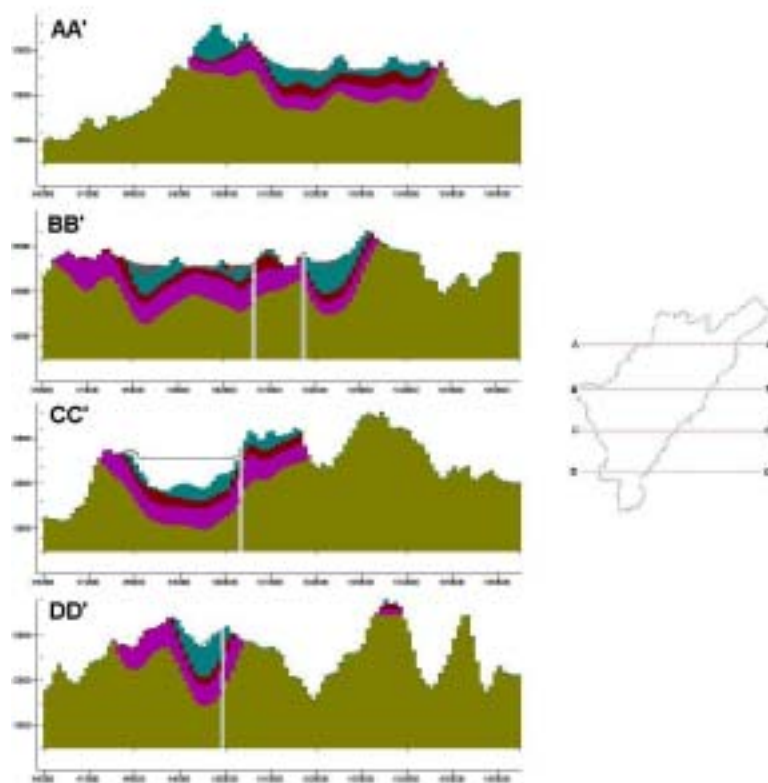


図 5-22 調査域シミュレーションの帯水層モデル例

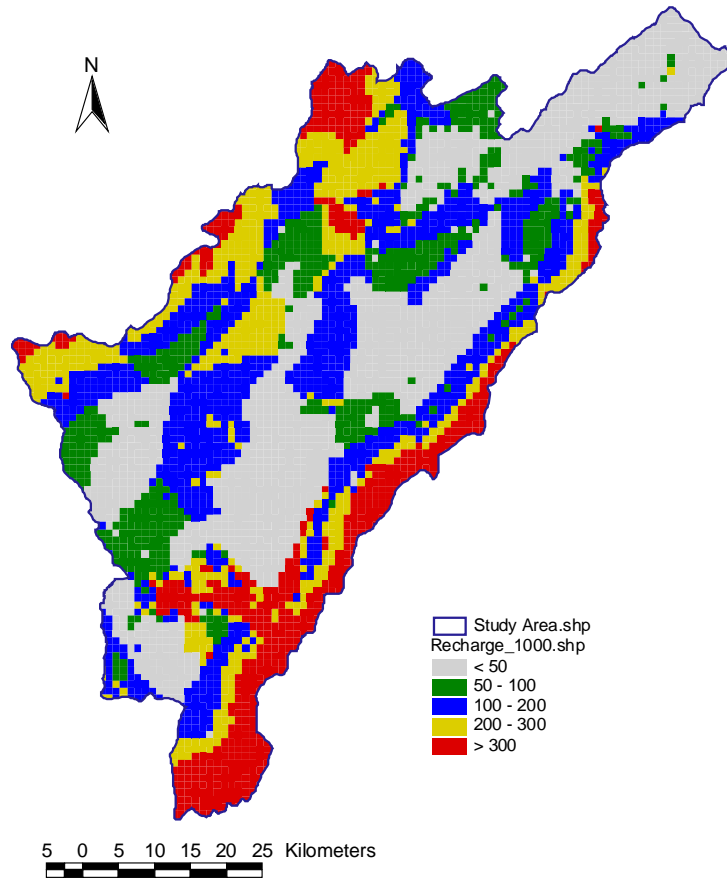


図 5-23 調査域地下水シミュレーションの地下水涵養量分布

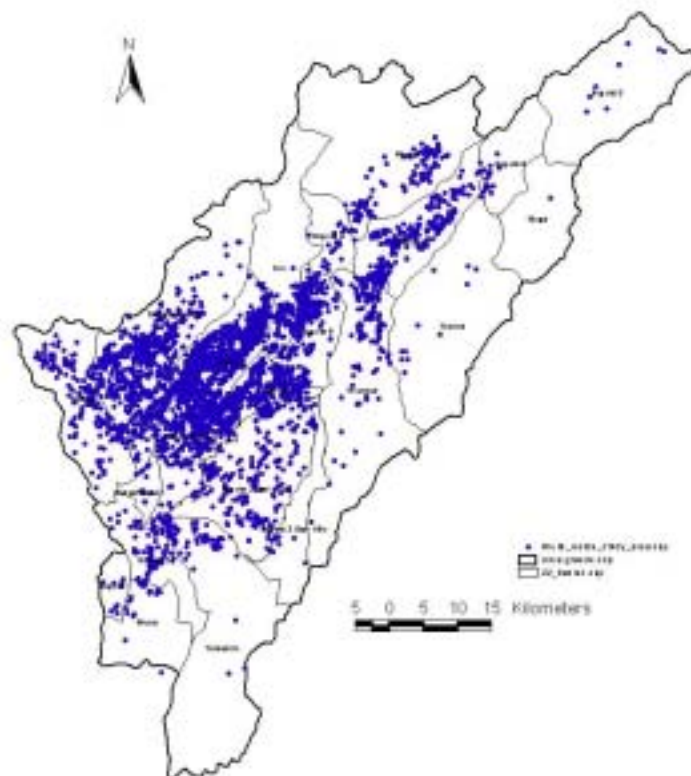


図 5-24 調査地域地下水シミュレーションの井戸分布

調査地域詳細地下水シミュレーションの解析結果

調査地域地下水シミュレーションは、以上述べた地質モデルおよび境界条件の下で、定常計算によって実施した。計算結果に関して以下に示す。

地下水シミュレーション結果の地下水位分布

計算結果の地下水位分布を図 5-25に示す。現況の地下水位と計算結果の地下水位分布の傾向は一致している。計算結果の地下水位は、観測された水位と較べ平坦である。本調査域において井戸で観測された地下水位は、地形の影響を強く受けた見掛けの水位であり、山地部・平地部において不飽和帯の宙水によって形成される場合が多い。そしてこの様な地下水は局所的な流動系を構成し、近傍の河川に向かったものとなる。一方、今回の地下水シミュレーションで計算された地下水位は広域的な地下水流動を示すものであると解釈される。

地下水シミュレーション結果の地下水水収支

地下水シミュレーション結果の地下水水収支は表 5-18に示す通りである。この結果によると、シミュレーションモデルに条件として与えた地下水涵養量の推定値 144mm/年のうち、19%は井戸によって揚水され、残りの 81%は調査対象地域外へ流出している。

表 5-18 地下水シミュレーション結果の地下水の水収支

地下水流入・流出	項目	計算結果			比率
モデルへの地下水流入	涵養量	1,690,000m ³ /日	144mm/年	19.6m ³ /s	100%
モデルからの地下水流出	井戸からの揚水	321,000m ³ /日	27mm/年	3.7m ³ /s	19%
	地下水流出	1,368,900m ³ /日	117mm/年	15.9m ³ /s	81%

また、調査対象地域の外へ流出する地下水の内訳は以下の通りである。

表 5-19 調査対象地域からの地下水流出

合計流出量	方向別流入出量		
	境界	流入出量	全体流出量に占める割合
1,368,900(m ³ /日)	北側境界 (A-A')	94,640 (m ³ /日)の流入	7%
	東側境界 (B-B')	621,920(m ³ /日)の流出	45%
	南側境界 (C-C')	341,380(m ³ /日)の流出	25%
	西側境界 (D-D')	500,240(m ³ /日)の流出	37%

5.4 地下水開発ポテンシャルの評価

(1) 地下水開発ポテンシャル

本調査において、地下水賦存量は以下のステップで評価された。

- 水収支式解析を用いて地下水涵養量を推定した。
- 地下水シミュレーションによって調査対象地域の地下水流動を解析し、地下水涵養量推定値の妥当性を検証した。

以上の 2 つの解析結果によって、調査対象地域の地下水賦存量は 144mm/年程度と推定された。この推定結果に関し以下に述べる。

過去に行なわれた地下水の年齢測定結果から、調査対象地域の地下水はほとんど流動していないと従来考えられていた。しかし、現在までの解析結果によると、調査対象地域の地下水は地下水涵養を受けまた広域的な地下水流動系に組み込まれている更新性の水資源であると評価するのが妥当である。本調査で推定された調査対象域の地下水涵養量は 144mm/年であり、この量と等しい地下水が調査対象地域の帯水層を流動していると推定される。

地下水開発量を地下水涵養量以上とした場合は、水収支のバランスが成り立たないため、地下水位は下がり続ける。一方、地下水開発量を地下水涵養量以下とした場合、地下水位は低下するが最終的には地下水位は一定する。しかし、この場合でも必ず地下水位の低下が発生する。その大きさは、地下水開発量と開発地域の配置によって決まる。したがって、地持続的地下水開発を計画するに当たっては、調査域の地下水涵養量 144mm/年の条件のもとで、地下水開発によって引き起こされる地下水位低下を予測し、その値が許容できるか否かの判断を行なう必要がある。

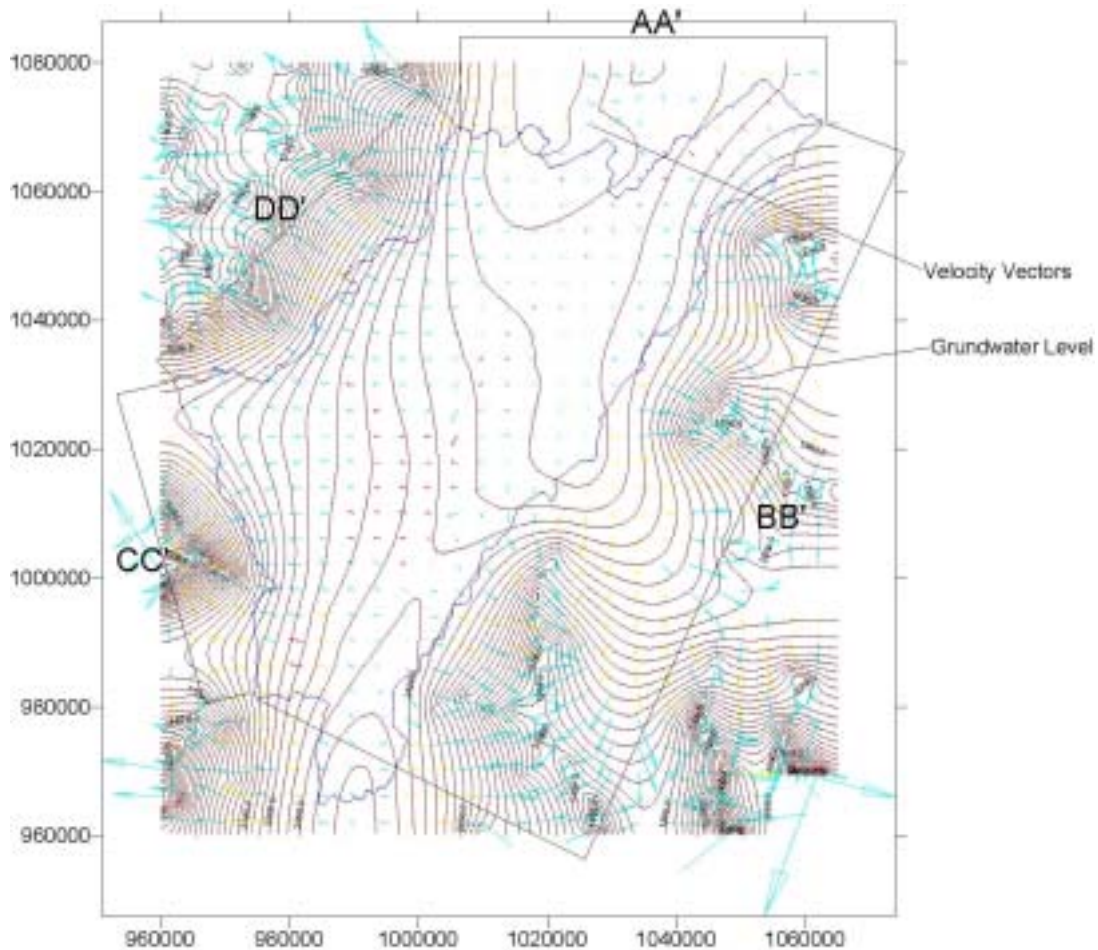


図 5-25 地下水シミュレーション結果の白亜紀層地下水位分布

(2) 流域ごとの安全揚水量

現況の井戸揚水量と地下水涵養量

流域ごとの現在の地下水利用率（揚水量と地下水涵養量との比率）を表 5-20に示す。現在の調査域全体における井戸揚水量は地下水涵養量の 19%に過ぎないが、流域ごとの（地下水利用率）は 1%～65%であり流域ごとの地下水開発量に大きな差があることが明らかである。現在の地下水開発量は地下水涵養量と比べ相当小さいため、全ての流域で、揚水と地下水の供給の関係はバランスし地下水位の低下は既に終了しているものと考えられる。

表 5-20 流域ごとの井戸揚水量と地下水涵養量

流域名	流域面積(km ²)	井戸本数	揚水量 (mm/年)	地下水涵養量 (mm/年)	地下水利用率
Bogota 1-3	678	1559	42	105	40%
Bogota 4-6	232	1141	72	149	48%
Bogota 7-9	557	429	18	62	29%
Bojaca	219	311	36	129	28%
Chicu	134	1,620	122	187	65%
Frio	194	320	23	100	24%
Neusa	432	185	7	187	4%
Sisga	152	1	0	143	1%
Muna	128	40	4	58	6%
Subachoque 1	32	18	3	71	5%
Subachoque 2	386	1,078	52	150	35%
Teusaca	353	256	15	166	9%
Tomine	368	21	1	109	1%
Tunjuelito	404	103	10	330	3%
調査域全体	4,268	7,081	27	144	19%

注) 地下水利用率 = 揚水量 ÷ 地下水涵養量

安全揚水量

地下水開発に当たって、理論上は地下水涵養量の100%を開発できる。しかし相応の地下水位低下が発生し既存井戸に影響を与える。表5-21に示すとおり、調査地域内における地下水利用率の最大値は65%（Chicu流域）である。地下水開発による既存井戸への影響を考えた場合、調査地域における現在の地下水位低下の状況は許容できる範囲内にあるものと考えられる。したがって、安全揚水量として現在の地下水利用率の最大値である60%程度以下（地下水涵養量の60%以上）とすることが推奨される。流域ごとの安全揚水量を表5-21に示す。

小規模な地下水開発（第四紀層、第三紀層）に当たっては、流域ごとの安全揚水量を基準に井戸計画がなされるべきである。また、白亜紀層に対する大規模な地下水開発に当たっては、白亜紀層が流域区分を超えて連続的に分布していることを考慮し、開発可能量として、その地下水開発が影響する複数の流域の安全揚水量を基準とすべきである。また、シミュレーションモデルによって、開発の影響を事前に評価することが望ましい。

表 5-21 流域ごとの安全揚水量

流域名	全流域面積 (km ²)	安全揚水量 (mm/年)	流域名	全流域面積 (km ²)	安全揚水量 (mm/年)
Bogota 1-3	678	63	Sisga	152	86
Bogota 4-6	232	90	Muna	128	35
Bogota 7-9	557	37	Subachoque 1	32	43
Bojaca	219	77	Subachoque 2	386	90
Chicu	134	112	Teusaca	353	100
Frio	194	60	Tomine	368	66
Neusa	432	112	Tunjuelito	404	198
調査地域全体					86 mm/年

注) 安全揚水量は流域の地下水涵養量×60%として算出

揚水と地盤沈下

過剰揚水によって生じる障害は、地下水資源の枯渇と地盤沈下である。揚水量を地下水涵養量以下とすることによって地下水資源の枯渇は防ぐことができる。

地表部で容易に観測される地盤の沈下は、土壤の乾湿に原因した陥没や建設工事に原因した局部的地盤沈下であることが多い。一方、地下水の過剰揚水による地盤沈下は広域的な地盤沈下と呼ばれ、広い範囲の地盤が長期間にわたって徐々に等しく沈下する。これを地表部分の変状から観察することは困難であり、長期間にわたる地盤標高の測量によって始めてその実態が明らかにされるものである。調査地域ではこのような測量がなされていないため、過剰揚水を原因とした地盤沈下の証拠は無い。また地盤沈下は、地下水位の低下と地盤の沈下特性によって決まる。調査対象地域において、地下水位低下の影響を受ける地盤は地下100m以深の硬質な地盤であり、本調査地域においては100m以深の地盤の沈下に対する抵抗は非常に大きい。したがって地下水位低下によって発生する広域的な地盤沈下は無視できる程度のものである。特に、ボゴタ平原西部地域は広域的な地盤沈下によって被害を受ける深いクイ基礎を持った高層構造物は存在しないため、その影響はないと結論される。