

資料-8

シリア国ダマスカス市新規水源開発計画  
水理地質ノート

1 . 水理地質概要 .....	A8-2
2 . 揚水試験と水質分析（再委託業務） .....	A8-4
2.1. 試験概要	
2.2. 揚水試験結果（ヤブース地区）	
2.3. 水質分析結果	
2.4. 試験結果の解析	
3 . DAWSSA による揚水試験、水質試験 .....	A8-12
3.1. 試験概要	
3.2. 揚水試験	
3.3. 水質試験	
4 . 群井揚水解析 .....	A8-16
4.1. 概要	
4.2. 単井揚水解析	
4.3. 群井揚水解析	
4.4. 群井揚水試験	
5 . 水資源開発ポテンシャル .....	A8-21
5.1. 背景	
5.2. 地下水資源量と開発可能量	
5.3. 適正揚水量と許容揚水量	

添付資料

揚水試験解析結果図

## 1. 水理地質概要

調査対象地区たる、マーダル II、ヤブース、及びディエル・アル・アシャエール地区は、いずれも首都ダマスカスの西方、24～36km に位置しレバノンとの国境に隣接している。対象3地区の内マーダル II 地区は、アンチ・レバノン山脈の西側にこれとほぼ平行に走る二つの付随山脈の内、一番西のマシャット山脈の更に西側の斜面に位置し、この更に西側は直ぐにレバノン領ベカー高原となる。ヤブース地区は上記アル・シャルキ山脈とヘルモン山塊とを区切る峡谷を西側（レバノン側）に抜け、マーダル谷が開けた部分に位置する。ディエル・アル・アシャエール地区は上記峡谷を走るハイウェイの南側、ヘルモン山脈の最北端に位置する。

対象地域のうち、ヤブース及びディエル・アル・アシャエール地区は首都ダマスカスを含む「バラダ川流域」に位置する。マーダル II 地区はレバノン側を流下する「リタニ川流域」に含まれる。

バラダ川流域は中生代ジュラ紀の石灰岩・苦灰岩を基盤とし、これを覆う白亜紀および古第三紀の石灰岩類、新第三紀の礫岩、第四紀堆積物等が分布している。構造的には、アンチ・レバノン山脈と平行な南西～北東の方向性が顕著で、この方向に沿った激しい褶曲と断層とにより、ヤブース山系、ザバダニ谷、パルミリデ山脈、ダマスカス平地といった尾根部と谷部が順に並んだ“Basin & Ridge 構造”が出来上がった。バラダ川は、その最上流部を除き、この構造をほぼ直角に切って流下している。

バラダ川はほぼ南東に流下し、約20km 下流で“フィジェ湧水”を加え、更に約20km でダマスカス市街地に達する。同川はダマスカスを経た後東に方向を変え、その東約30km で“アテイバ湖”に注ぐ。アテイバ湖は内陸湖でどこにも流出しない。このようにバラダ川は全長およそ70km、流域面積約2,359km<sup>2</sup>の閉鎖流域である。閉鎖流域は、もともと流入量と流出量との微妙な水理バランスの基に形成されたもので、現在は上水、農業に加え工業用として過剰な揚水が行われ、表流水・地下水共に危機的な状況に置かれている。

バラダ流域には大小無数の湧水が見られる。上記バラダ及びフィジェ湧水がずば抜けて大きな湧水量を誇り、ダマスカス及び周辺部上水の主水源として利用されている(図 1-1 参照)。一方、アンチ・レバノン山脈の西側、マーダル II 地区のすぐ西側の麓には、レバノン有数の大湧水“アンジャール湧水”と“シャムシーン湧水”が存在する。これは当地域に位置するアンチ・レバノン山脈の周辺部は中近東では例外的に非常に大きな年間降雨量に恵まれていること、および当流域の大部分を占める基盤地質が極めてカルスト質の石灰岩・苦灰岩類であることに関連する。これら石灰岩類は随所にシンクホールや溶解空洞を有し、浸透性も高い。豊富な降雨は大量に地下に浸透し、その内部の空洞、地下水脈、地下河川等を潤し、これらを通ってきた地下水が地表に流出して多くの湧水を出現させている。もっとも上述バラダ、フィジェ等の大湧水は、かつては極めて豊富な湧水量があり、ダマスカス市の飲料水を賄って有り余るほどであったが、近年その湧水量は減りつつあり、また地下水位も、かなり顕著に低下している。

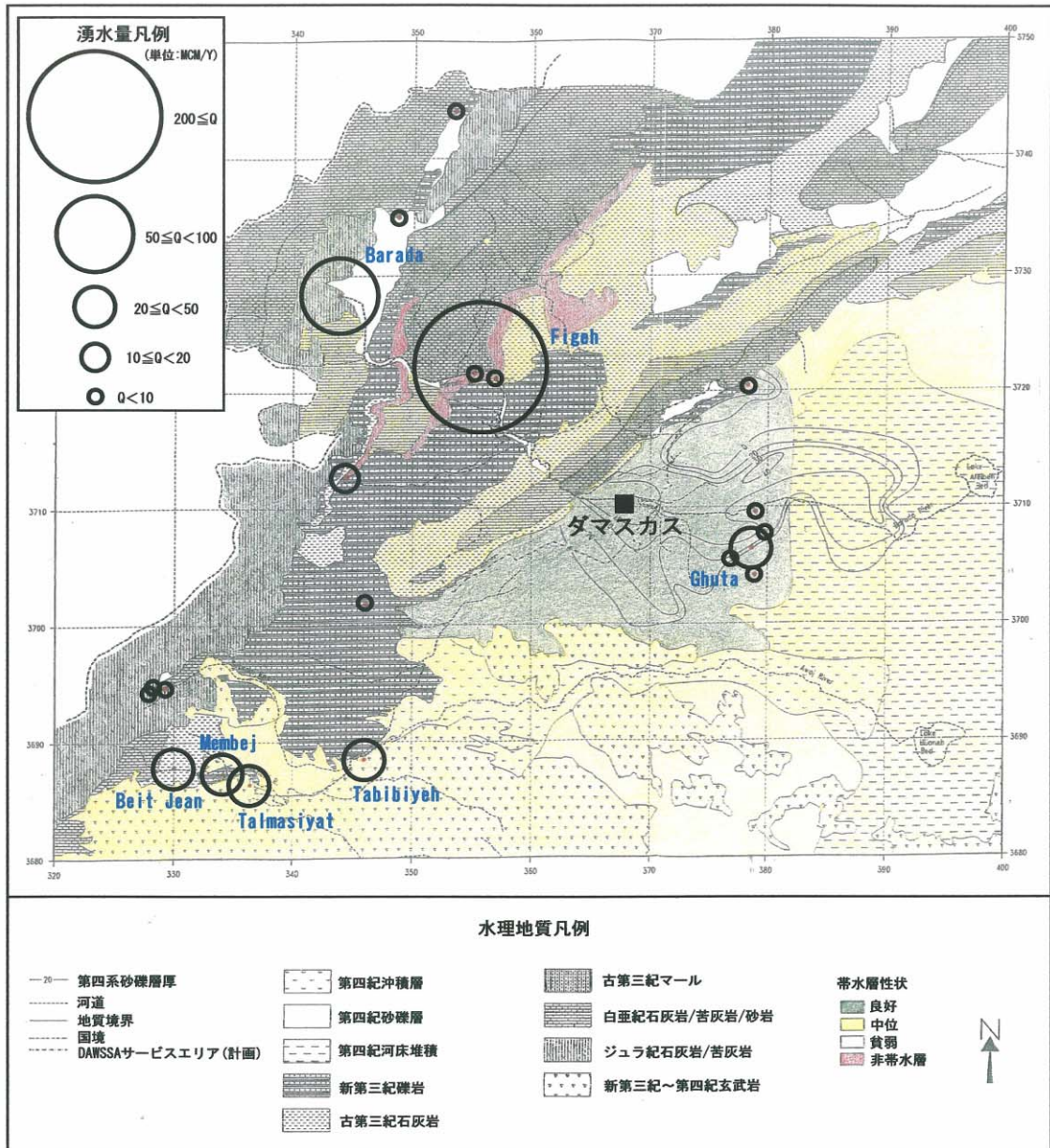


図 1.1 水理地質図と主要な湧水

## 2. 揚水試験と水質分析（再委託業務）

### 2.1. 試験概要

第1次現地調査（平成16年3月14日～4月17日）において、水源井に関する調査の一環として、揚水試験と水質分析とが実施された（再委託調査）。それぞれの試験・分析の内容及び数量を以下に示す。この時期は乾季に入って間もない頃であり、水位は年平均より若干高めと考えられる。

#### (a) 揚水試験

試験内容： 予備揚水試験  
段階揚水試験  
連続揚水試験  
回復試験

試験数量： 「ヤブース」地区 3回

（いずれも、灌漑局によって掘削された観測井で、DAWSSA が計画している生産井の直ぐ近辺である）

#### (b) 水質分析

試験内容： 現位置試験； 水温、EC、pH  
試験室試験； Ca, Mg, Na, K, HCO<sub>3</sub>, SO<sub>4</sub>, CO<sub>3</sub>, Cl, NO<sub>3</sub>,  
NO<sub>2</sub>, NH<sub>4</sub>, 色度, 濁度, 総硬度, 蒸発残留物  
衛生関連試験； 大腸菌群、一般細菌群、残留塩素  
水道水用試験； Zn, Fe, Cu, Mn, 味, 臭気

分析数量： 「ヤブース」地区 3資料

### 2.2. 揚水試験結果（ヤブース地区）

#### (1) 試験位置、試験井

ヤブース地区では、灌漑省により掘削され DAWSSA に移管された観測井群の一部の井戸を利用して揚水試験が行われた。表 2.2.1 に、同試験に用いられた揚水井と観測井とを示し、その位置関係を図 2.2.1 に示す。

表 2.2.1 揚水試験井一覧（ヤブース地区）

試験番号	揚水井	観測井-1	距離(m)	観測井-2	距離(m)
No.1	No.7	M40	75.4	No.38	60.1
No.2	M40	No.7	75.4	No.38	98.6
No.3	M37	M14	82.6	-	-

#### (2) 試験方法・結果

上表に示されるように、No.1 試験では「No.7 井戸」を揚水井とし、「M40 井戸」及

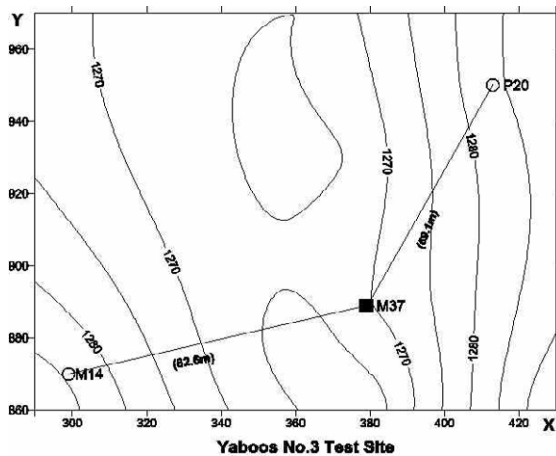
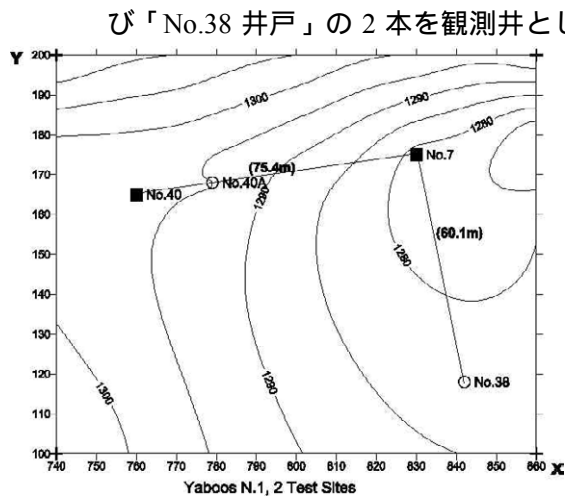


図 2.2.1 揚水試験位置図 (ヤブース)

び「No.38 井戸」の 2 本を観測井とし、No.2 試験では 逆に「M40 井戸」を揚水井とし、「No.7 井戸」と「No.38 井戸」の 2 本を観測井として試験を行った。No.3 試験では「No.37 井戸」を揚水井とし、当初「P10 井戸」を観測井とする予定であったが、同井が開放できないため、道路を挟んで反対側にある「M14 井戸」を観測井として試験を行った。

### No.1 試験

第 1 回目の試験であるため、慎重に予備揚水試験が行われた。No.7 井戸では自然水位が約 GL-60m と、かなり深かったため、ポンプを GL-160m と深い位置にセットした。流量測定用の大型ノッチ箱と、クロスチェック用の積算流量計とを設置し、配管配線を完了した後に、まず少量の揚水を行い配管及び水位測定機器のチェックを行った。次に、ポンプの最大揚水量約 61m<sup>3</sup>/hr で揚水し水位低下量がおおよそ 70m であることを確認し、段階揚水試験の揚水量段階をおおよそ 35 50 60 55 45 m<sup>3</sup>/hr とすることを決めた。

予備揚水での水位低下が完全に回復した後、上記の揚水量で段階揚水試験を行った。

各段階での揚水継続時間は 4 時間、実際の揚水量は 37.2 51 61 54.5 45 m<sup>3</sup>/hr であった。また、この各揚水段階での最終水位低下量は、それぞれ 6.28、11.61、15.06、13.10、おおよび 7.9m であった。

続く 48 時間連続揚水試験は 7 ~ 8 m の水位低下が得られ、またポンプが最も安定して運転できる約 40 m<sup>3</sup>/hr で実施した。揚水 2 日目に現位置で簡易水質試験を行い、同時に水質分析 (室内試験) 用の水質試料を採取した。連続揚水による最終水位低下量は 7.65m であった。このとき、観測井「M40」では 3.55m、「No.38」では 3.87m の水位低下量が観測されている。

### No.2 試験

第 2 回目の試験も、第 1 回目の試験とのつりあい上ポンプを GL-165m と深い位置にセットした。前回同様流量測定用の大型ノッチ箱と、クロスチェック用の積算流量計とを設置し、配管配線を完了した後に、まず約 30 m<sup>3</sup>/hr の揚水を行い配管及び水位測定機器のチェックを行った。次に、ポンプの最大揚水量約 61m<sup>3</sup>/hr で揚水し水位低

下量がおよそ 25 m であることを確認し、段階揚水試験の揚水量段階をおよそ 30 50 60 45 35 m<sup>3</sup>/hr とすることを決めた。

予備揚水での水位低下が完全に回復した後、上記の揚水量で段階揚水試験を行った。各段階での揚水継続時間は 4 時間、実際の揚水量は 32 52 62 45 35 m<sup>3</sup>/hr であった。各揚水段階での水位低下量は、それぞれ 8.1、18.3、27.45、14.25、及び 9.85m であった。

以上の結果を受けて、約 50 m<sup>3</sup>/hr の揚水量で 48 時間連続揚水試験を行った。現位置水質試験、水質試料採取は前回どおりである。この連続揚水による最終水位低下量は 19.73m、観測井における水位低下量は、「No.7 井戸」及び「No.37 井戸」でそれぞれ 3.7m 及び 4.54m であった。

### No.3 試験

ヤブース地区における第 3 回目の試験は、レバノンへ向かう幹線道路の東側にある「No.37 井戸」を揚水井とし、道路を挟んで反対側の「M14 井戸」を観測井として実施された。ポンプ深度は約 160m、観測に係る機器は前回どおりである。予備揚水の結果、約 60 m<sup>3</sup>/hr の揚水で 25.6m の水位低下量があることが判明した。この結果から、次の揚水段階を約 25 45 60 50 40 m<sup>3</sup>/hr とすることを決めた。

段階揚水試験は、仕様書どおり各段階 4 時間揚水を継続した。実際の揚水量は 24 45 60 50 37 m<sup>3</sup>/hr であり、これら各揚水段階での水位低下量はそれぞれ 7.42、18.24、28.01、20.07、及び 14.27m であった。

連続揚水試験は、段階揚水試験の結果を参考に 60 m<sup>3</sup>/hr の揚水量で行われた。試験実施中に現位置水質試験及び水質サンプルの採取が行われている。最終的な水位降下量は 27.13m、観測井 (M14 井戸) における最終水位低下量は 3.78m であった。

## 2.3. 水質分析結果

次ページに水質試験の結果を、一覧表にして示す。

表 2.3.1 水質試験結果一覧

項目	単位	ヤブース地区			
		M37	No.7	M40	平均
A. 現位置試験					
水温	°C	15.8	16.0	16.1	16.0
EC.	μ S/cm	37.5	35.8	36.2	36.5
pH		7.46	7.76	7.71	7.6
B. 試験室試験					
飲料水項目					
1 濁度	NTU	3.5	2.5	4	3.3
2 色度	度	n	n	n	n
3 味	TT	n	n	n	n
4 臭気	TON	n	n	n	n
5 総硬度	mg/リットル	21	24	22	22.3
6 蒸発残留物	ppm	235	260	235	243.3
7 残留塩素	ppm	0	0	0	0.0
8 pH		7.7	7.5	7.7	7.6
理化学項目					
9 Ca	mg/リットル	72	80	80	77.3
10 Mg	mg/リットル	7	10	5	7.3
11 Na	mg/リットル	5	4	4	4.3
12 K	mg/リットル	0.5	0.5	0.5	0.5
13 HCO3	mg/リットル	232	268	224	241.3
14 CO3	mg/リットル	0	0	0	0.0
15 SO4	mg/リットル	16	14	18	16.0
16 Cl	mg/リットル	8	8	6	7.3
17 NO3	mg/リットル	7	6	7	6.7
18 NO2	mg/リットル	0	0	0	0.0
19 NH4	mg/リットル	0	0	0	0.0
重金属					
20 Zn	mg/リットル	n	n	n	n
21 Fe	mg/リットル	n	n	n	n
22 Cu	mg/リットル	n	n	n	n
23 Mn	mg/リットル	n	n	n	n
衛生項目					
24 大腸菌	個/100ml	100	200	500	266.7
25 一般細菌	個/100ml	2000	500	6000	2833.3

## 2.4. 試験結果の解析

### 2.4.1. 段階揚水試験

段階揚水試験は、次に行う連続揚水試験の最適揚水量を定めると言う目的の他、井戸効率を算定し、所定揚水量に対する比湧水量を推定し最適ポンプ設置位置を決定するための重要な試験である。前者については、既に前項「試験結果」の項で述べた。以下に後者についての解析を述べる。

揚水に伴う井戸のケーシング内部の水位低下量(s)は、種々のロスや干渉のためにケーシング外部の水位低下量(s')よりも大きい。ここに井戸効率 (Efficiency of Well: We と表す) はケーシング内部で観測される実際の水位低下量(s)に対する外部における理論的な水位低下量(s')との比として表される。

一般に、ケーシング内の水位低下量(s)は、以下の式で表される：

$$s = aQ + BQ^n \dots\dots\dots (1)$$

ここに、a:帯水層ロス係数、B:井戸ロス係数、Q:揚水量

井戸効率(We)は、

$$We = \frac{aQ}{aQ + BQ^n} \dots\dots\dots (2)$$

で表され、3段階以上の段階揚水試験結果から a, B, n を求めることが出来る。ここに、aQ を帯水層ロス、BQ<sup>n</sup> を井戸ロスと呼ぶ。各井戸における井戸効率の解析結果を図 2.4.1(1)~(2)に示す。

同図に示されるように、ヤブースにおける井戸は井戸効率が全般に低く、特に「No.7 井戸」や「No.37 井戸」は井戸効率 35%以下と言う極めて雑な仕上がりとなっている。しかし、逆に井戸効率がこれだけ悪くても、この程度の水位低下で済んでいるということは、適切なスクリーンを用いきちんとした井戸を建設すれば、水位低下量はまだまだかなり小さく抑えることが出来ることを示している。

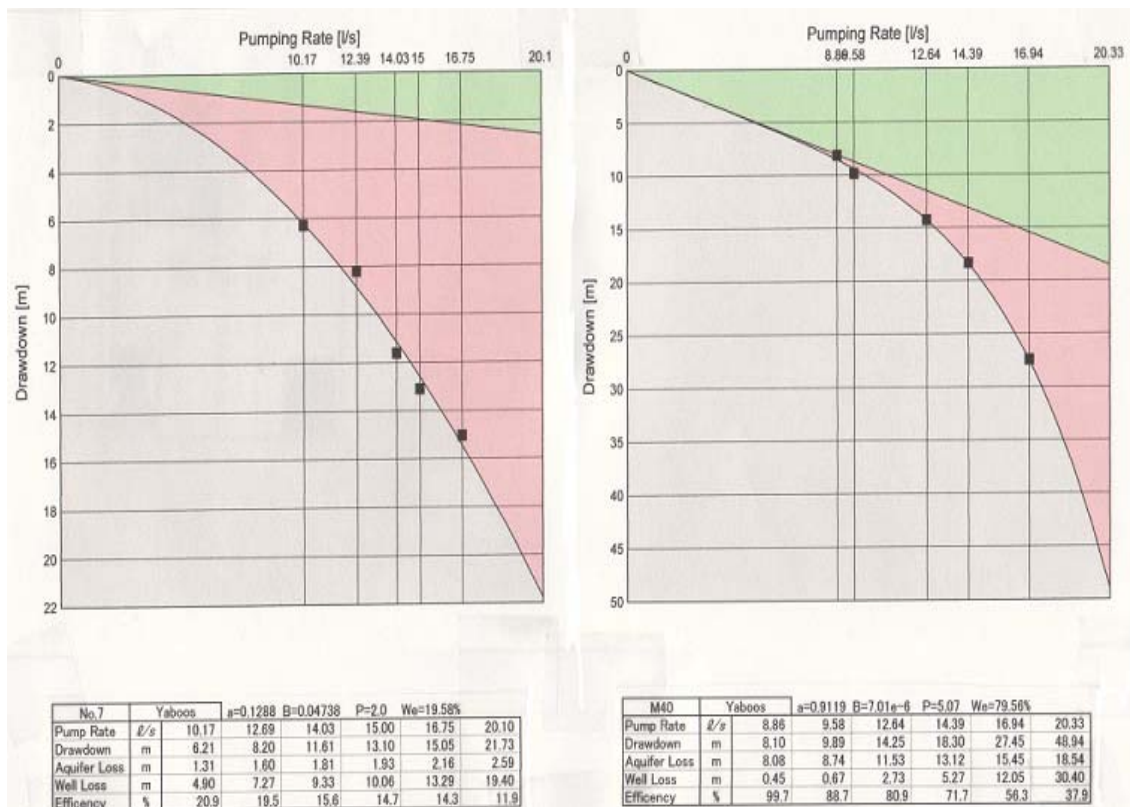


図 2.4.1 (1) 段階揚水試験結果の解析-1 「No.7 井戸」、「M40 井戸」



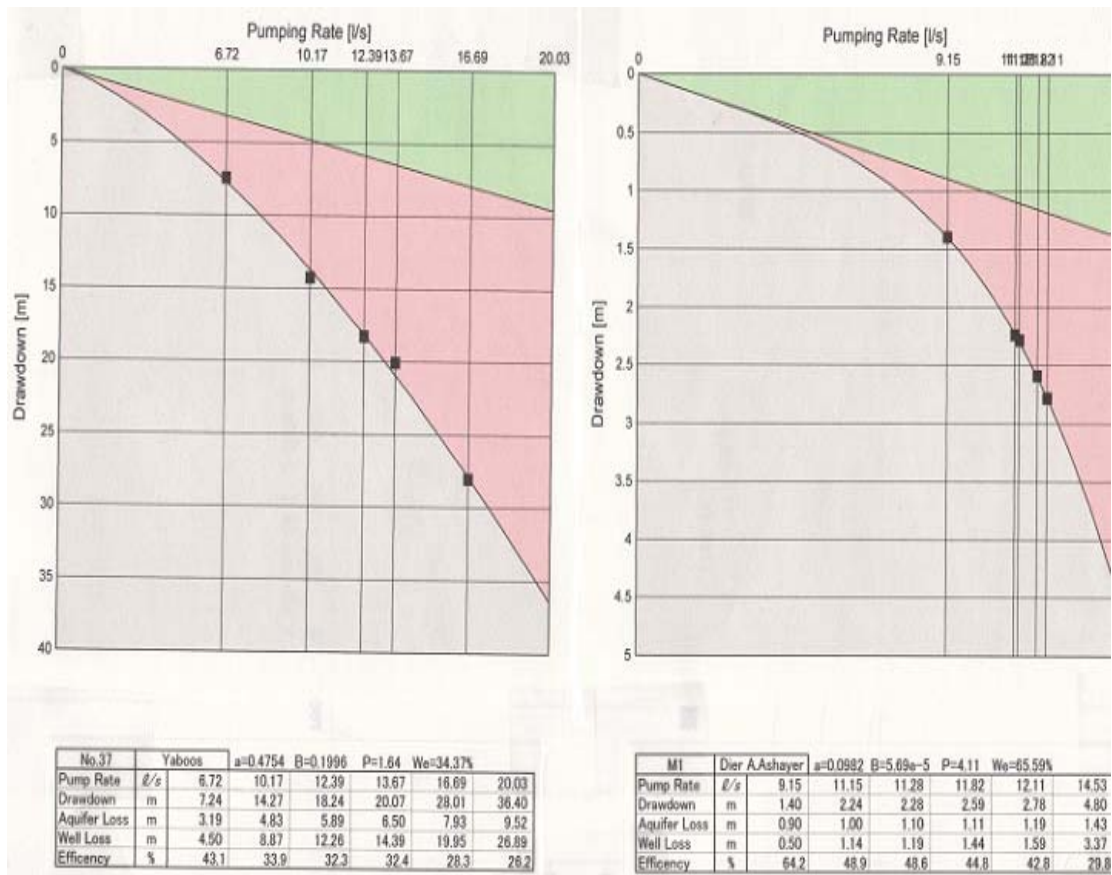


図 2.4.1.(2) 段階揚水試験結果の解析-2 「No.37 井戸」

## 2.4.2. 連続揚水試験・回復試験

連続揚水試験の結果からは、透水量係数 (T)、貯留係数 (S)、透水係数(k)、あるいは漏水率 (L) 等の帯水層常数が求められる。揚水試験の解析は、帯水層が石灰岩中の帯水層であることから被圧帯水層であると考え、タイスの非平衡式、ハンタッシュ・ヤコブの漏水解析、及び回復式によって計算し、最終的に誤差率を参考に代表値を評価する方法を取った。代表的な解析図を図 2.4.2.に示す（その他は巻末資料集に添付）。

Pumping Test			
Well ident M14	Description		
Obs. Well Distance [m] 82.80	Average Pump. Rate [m3/day] 18.66139	Duration [min] 4020.000	Initial Sat. Thickness [m]
			Results
Transmissivity [m2/day] 121.3881	Storage Coefficient 0.0002168680	Leakance [1/day] 0.0004626043	Estimation Error [m] 0.14
Fit Method			Hantush Method

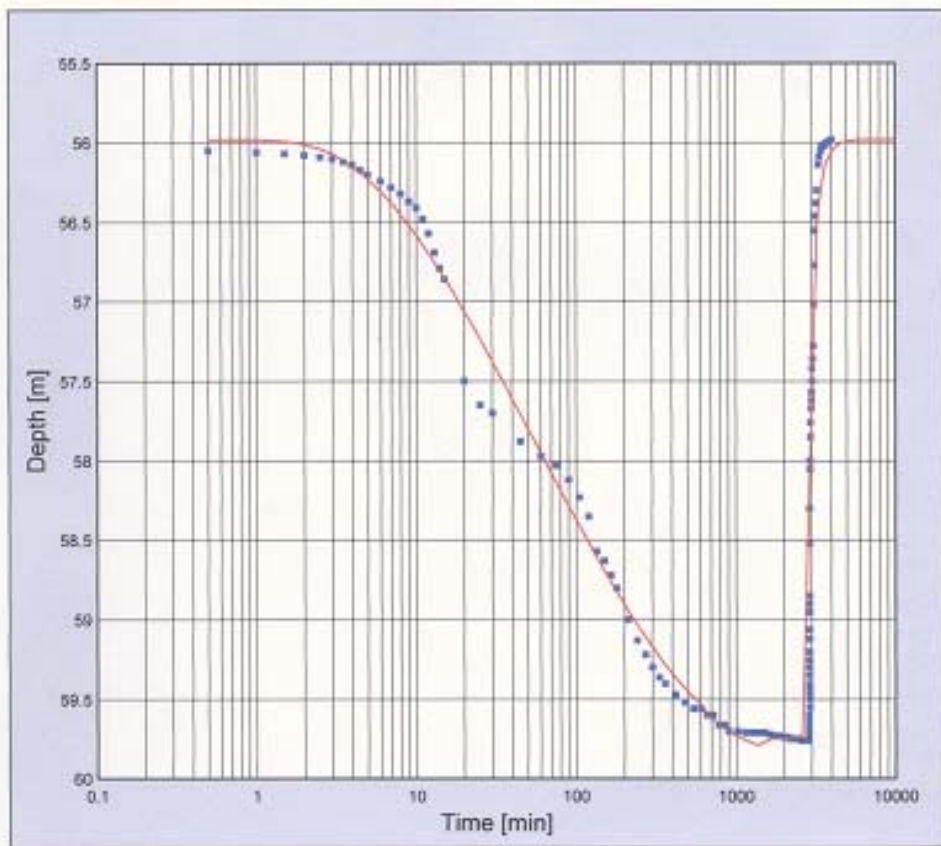


図 2.4.2. 連続揚水試験解析結果の一例（観測井 M14）

揚水試験解析図にはそれぞれ解析結果が添付されているが、表 2.4.1.にこれらの揚水試験解析結果を一覧表にして示す。

表 2.4.1. 揚水試験解析結果一覧図

試験番号	揚水井	観測井	距離 (直径)m	解析法	揚水量 $Q$ :(lit/sec)	透水量係数 $T$ :(m <sup>2</sup> /day)	貯留係数 $S$ :(-)	透水係数 $k$ :(cm/sec)	帯水層厚 $d$ :(m)	漏水率 $L$ :(1/day)
No.1	No.7		(0.13)	タイスイ ハンタッシュ 回復法	10.89	139.020	-	2.68E-03	60	-
						113.172	-	2.18E-03		0.0999
						139.120	-	2.68E-03		-
		M40	75.42	タイスイ ハンタッシュ 回復法	10.89	111.590	4.67E-04	2.15E-03	-	-
						103.051	6.37E-04	1.99E-03	4.16E-18	
						128.513	-	2.48E-03	-	
	No.38	60.08	タイスイ ハンタッシュ 回復法	10.89	85.722	6.74E-04	1.65E-03	-	-	
					73.952	8.23E-04	1.43E-03	1.87E-04		
					103.807	-	2.00E-03	-		
No.2	M40		(0.13)	タイスイ ハンタッシュ 回復法	13.59	110.857	-	1.51E-03	85	-
						51.605	-	7.03E-04		0.0287
						96.039	-	1.31E-03		-
		No.7	75.42	タイスイ ハンタッシュ 回復法	13.59	137.493	4.82E-04	1.87E-03	-	-
						140.746	4.40E-04	1.92E-03	7.77E-18	
						162.549	-	2.21E-03	-	
	No.38	98.62	タイスイ ハンタッシュ 回復法	13.59	106.125	3.04E-04	1.45E-03	-	-	
					88.064	3.91E-04	1.20E-03	1.11E-04		
					127.808	-	1.74E-03	-		
No.3	M37		(0.13)	タイスイ ハンタッシュ 回復法	16.66	72.456	-	1.40E-03	60	-
						22.904	-	4.42E-04		8.756
		M14	82.64	タイスイ ハンタッシュ 回復法		220.898	7.83E-04	4.26E-03	-	
						121.388	2.17E-04	2.34E-03	4.63E-04	
採用値					129.400	1.62E-04	2.21E-03		2.54E-04	

上表に有るとおり、ヤブース地区はその貯留係数、漏水率から見て完全な被圧帯水層である。

帯水層厚 (m)や加圧層厚 (m<sup>2</sup>) は、既存柱状図からは明らかでは無いが、それぞれおよそ 100m、50m と想定すると、帯水層常数は以下のようにまとめられる。

ヤブース地区

- 主帯水層： ジュラ紀上部カローピアン階 (J3K)  
石灰岩/ドロマイト
- 帯水層の型： 漏水型被圧帯水層 (m = 100m、m<sup>2</sup>=50m: 推定)
- 透水量係数： T = 130 m<sup>2</sup>/day
- 透水係数： k = 1.3 m/day (1.50 x 10<sup>-3</sup> cm/sec)
- 貯留係数： S = 5.22 x 10<sup>-4</sup>
- 漏水率： L = 2.54 x 10<sup>-4</sup> /day

### 2.4.3. 水質分析

前項で示した水質分析結果から、各種イオン濃度を取り出しトリリニア・ダイアグラム (Trilinia Diagram、別名 Piper Diagram) を作成すると、図 2.4.3. のようになる。

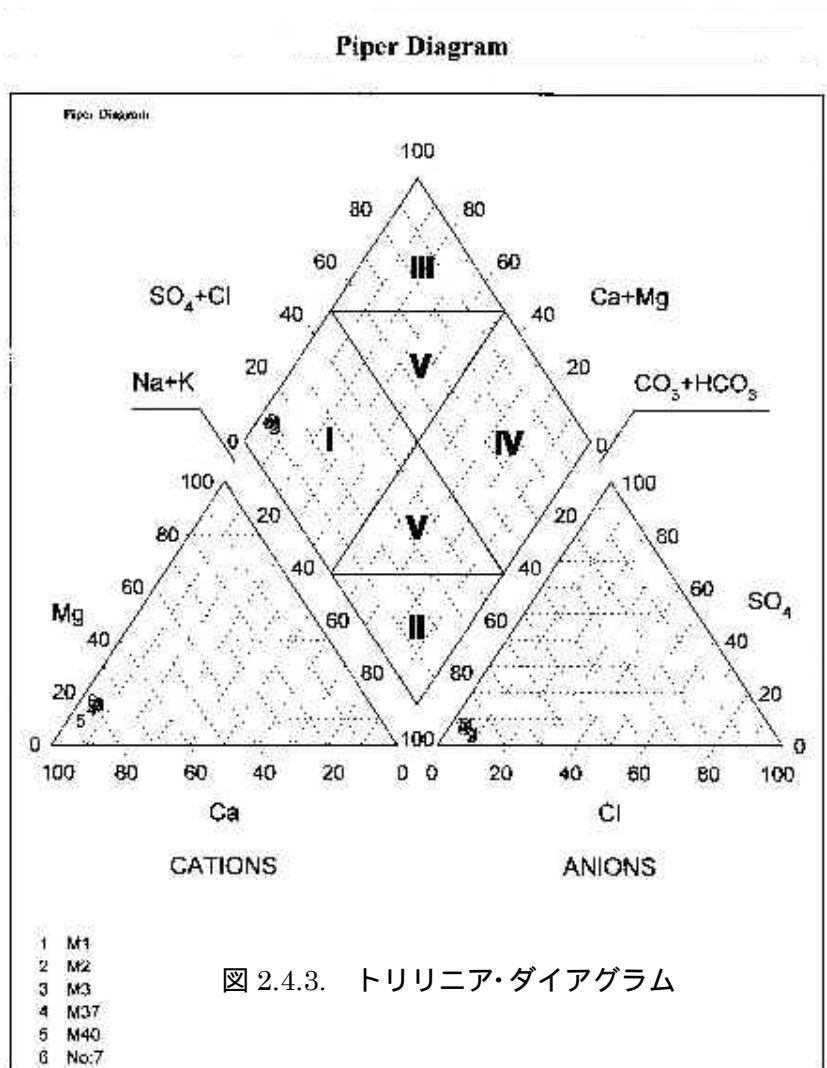


図 2.4.3. トリリニア・ダイアグラム

水質は、石灰岩地域ではごく一般的な「重炭酸カルシウム型：Ca(HCO<sub>3</sub>)<sub>2</sub>」である。また、水道水項目として分析されつた重金属類もほとんど検出されなかった。当地区の地下水水質は、このように物理化学的には全く問題ないが、生物衛生検査項目では、いずれの井戸からも一般細菌・大腸菌群が検出され、半分以上の井戸水は飲用不可のコメントが付されていた。

## 3. DAWSSA による揚水試験、水質試験

### 3.1. 試験概要

DAWSSA は調査団による第 1 次・第 2 次現地調査の間に予定された全ての生産井 (25 本) の建設を完了することが出来なかった。このため DAWSSA は、井戸建設工ことの進行に伴い独自にそれぞれの井戸で揚水試験・水質試験を行い生産井としての可否、許容される揚水量、ポンプ運転水位の検討等に供すると共に、環境社会配慮の観点から群井揚水試験を実施することとなった。

揚水試験は調査団が再委託業務として実施した際の技術仕様書を準用し、予備試験・段

階揚水・連続揚水試験・回復試験と一連の揚水試験を実施した。水質試験も同じく調査団の仕様を準用し化学試験・細菌試験を実施した。なお、本案件は要請対象3地区の内ヤブース地区のみを対象とするため、以下の試験結果の解析もヤブース地区のみを対象とする。

### 3.2. 揚水試験

ヤブース地区においては計画11本の生産井建設に向け井戸建設が行われた。当初に建設された11本の井戸(Ya1~Ya11)の内、Ya10とYa11の2本は揚水試験の結果その比湧水量が小さかったため、更に2本が追加掘削された(Ya12及びYa13)。以下に各試験の結果の概要を示す。

#### 3.2.1. 段階揚水試験結果

段階揚水試験は、ほとんどの井戸で予定揚水量の50 m<sup>3</sup>/hrを挟んでその上下の5段階の揚水量で実施されている。試験結果の概要を表3.2.1.に示す。試験結果は前述、再委託業務と同様に解析された。ヤブースでの試験結果は、既存の井戸で行われた再委託業務の試験とは異なり、大部分の井戸の仕上がりは非常に良い値を示している。

#### 3.2.2. 連続揚水・回復試験結果

連続揚水試験は、調査団が再委託業務で行った試験と同様48時間連続揚水で行われ、その後に引き続き回復試験も実質的に水位が自然水位に戻るまでを目処に行われている。ただし、適当な位置に観測井がある井戸を選択できた再委託調査と違い、生産井同士で揚水井・観測井を選んだため揚水井-観測井間の距離が非常に大きくなってしまった試験もある。

表 3.2.1 Summary of Step Drawdown Test (Yaboos)

Well	Items	1st	2nd	3rd	4th	5th	S.Yield* <sup>3</sup>	Efficiency* <sup>4</sup>
Ya1	Discharge* <sup>1</sup>	21.5	40	58	46.5	30.1	5.89	98.8
	Drawdown* <sup>2</sup>	3.65	6.85	9.95	8	5.15		
Ya2	Discharge* <sup>1</sup>	24.5	40.8	59	48.5	35.8	12.05	98.3
	Drawdown* <sup>2</sup>	2.05	3.3	4.85	4	2.9		
Ya3	Discharge* <sup>1</sup>	21.6	36.5	60.1	50.7	31.7	2.5	97.9
	Drawdown* <sup>2</sup>	8.8	13.7	23.5	20.1	12.2		
Ya4	Discharge* <sup>1</sup>	18	40	61	51	29	1.97	94
	Drawdown* <sup>2</sup>	8.81	20.85	31.72	25.75	14.59		
Ya5	Discharge* <sup>1</sup>	18.5	34	60	48	31	4.37	95.4
	Drawdown* <sup>2</sup>	4.15	7.55	13.7	11.05	7.45		
Ya6	Discharge* <sup>1</sup>	23	37.2	60.5	48.5	33	6.96	98.5
	Drawdown* <sup>2</sup>	3.35	5.1	8.55	6.9	4.6		
Ya7	Discharge* <sup>1</sup>	18	35.5	65	50.7	30.6	2.01	66.6
	Drawdown* <sup>2</sup>	8.6	16.75	36	26.15	13.85		
Ya8	Discharge* <sup>1</sup>	44	60.9	72			4.73	51.8
	Drawdown* <sup>2</sup>	8	13	17.8				
Ya9	Discharge* <sup>1</sup>	18	40.9	60	50.7	26	2.22	70.7
	Drawdown* <sup>2</sup>	7.5	19.6	33	22.65	11		
Ya10	Discharge* <sup>1</sup>	11.5	16.1	20	15.3	13.6	0.29	63.9
	Drawdown* <sup>2</sup>	36.7	53.4	76.65	54.5	44		
Ya11	Discharge* <sup>1</sup>	18.9	28	44.5	36	22.9	0.85	94.1
	Drawdown* <sup>2</sup>	22.3	32.3	52.4	45.4	25.85		
Ya12	Discharge* <sup>1</sup>							
	Drawdown* <sup>2</sup>							
Ya13	Discharge* <sup>1</sup>							
	Drawdown* <sup>2</sup>							

Unit: \*1: m<sup>3</sup>/h, \*2: m, \*3: m<sup>3</sup>/h/m, \*4: %

連続揚水・回復試験の結果は、再委託調査の結果と同様、国連の開発調査用に開発された“GWW (Ground Water for Windows)”で解析された。表 3.2.2.に解析結果の要約を示す。

表 3.2.2. 揚水試験結果のまとめ

Well Name	Depth (m)	S.W.L (m)	S.Yield* (m <sup>3</sup> /h/m)	D.Down** (m)	D.WL** (m)	WEffic.* (%)	T (m <sup>2</sup> /day)	S (-)	L (1/day)	k (m/day)
Ya1	397.1	97.0	5.84	8.56	105.56	99.4	108.49	0.000655	0.00346	1.085
Ya2	400	101.5	12.20	4.10	105.60	98.7	369.13	0.00158	3.44E-16	3.691
Ya3	400	93.2	2.56	19.52	112.72	98.0	63.49	0.000783	0.00288	0.635
Ya4	386	111.6	1.97	25.38	136.98	96.9	39.22	4.68E-05	0.00089	0.392
Ya5	400	99.3	4.37	11.44	110.74	97.4	156.95	0.000088	0.000637	1.570
Ya6	396.6	87.0	7.09	7.05	94.05	98.5	51.84	0.000257	0.00224	0.518
Ya7	400	90.7	2.03	24.60	115.30	79.1	191.68	0.000131	1.31E-11	1.917
Ya8	400	57.5	4.74	10.54	67.99	33.4				0.000
Ya9	400	107.0	2.18	22.90	129.90	70.7	38.56	0.000272	0.000704	0.386
Ya10	425	117.8	0.29	170.58	288.38	64.0	62.76	0.000259	0.000219	0.628
Ya11	450	127.7	0.85	58.93	186.63	96.7	92.03	0.000444	2.15E-19	0.920
Ya12	185	95.4	1.58	31.65	127.05	89.0				
Ya13	190	86.5	0.29	50.00	136.50	92.0				
Ave.	404.97	99.11	4.01	16.761	132.17	84.79	120.18	0.000468	0.000907	1.067

Note: \*: from Step dd-test, \*\*: at pumping of 50 m<sup>3</sup>/h

### 3.3. 水質試験

各生産井では揚水試験の際（連続揚水試験の第3日目）に水質サンプルを採取し、試験室にて水質分析を行っている。試験項目は調査団が行った再委託調査による試験時の仕様にはほぼ準じているが、重金属試験は行っていない。以下にその要約を示す。

表3.3.1. 水質試験結果

項目	単位	Ya1	Ya2	Ya3	Ya4	Ya5	Ya6	Ya7	Ya8	Ya9	Ya10	Ya11	Ya12	Ya13
色度	TCU		なし	なし			なし	なし		なし	なし	なし		
臭気			なし	なし			なし	なし		なし	なし	なし		
濁度	NTU		2	30			8.5	70		65	25	55		
温度			20	22			19	21		18	25	20		
電気伝導度	μs/cm		400	410			400	440		440	450	455		
pH値			7.6	7.6			7.5	7.7		7.6	7.7	7.9		
Cl <sub>2</sub>	mg/l													
KMnO <sub>4</sub>	mg/l													
NO <sub>3</sub>	mg/l		9	11			10	11		13	10	13		
NO <sub>2</sub>	mg/l													
NH <sub>4</sub>	mg/l													
CO <sub>2</sub>	mg/l													
全硬度(TH)	mg/l		24	24			25	25		25	23	25		
TH Mg	mg/l		4	4			5	5		5	4	5		
THp	mg/l		2	3			2	3		4	2	4		
TA	mg/l													
TAC	mg/l		22	21			23	22		21	21	21		
CO <sub>2</sub>	mg/l													
HCO <sub>3</sub>	mg/l		268	256			281	268		256	256	256		
CO <sub>3</sub>	mg/l													
SO <sub>4</sub>	mg/l		12	16			16	16		19	13	19		
Cl	mg/l		8	8			8	8		10	10	10		
NO <sub>3</sub>	mg/l		9	11			10	11		13	10	13		
Ca	mg/l		80	80			80	80		80	76	80		
Mg	mg/l		10	10			12	12		12	10	12		
Na	mg/l		5	4			5	5		5	5	5		
K	mg/l		1	0.5			0.5	0.5		0.5	1	0.5		
Fe	mg/l													
TDS	mg/l		260	260			275	270		270	255	270		
総細菌類	/100ml		610	8000			8000	10000		10000	20000	30000		
大腸菌類	/100ml		10	3500			4000	5000		4000	10000	20000		

解析の結果は、当地区の地下水水質は石灰岩地帯に一般的な「重炭酸カルシウム型：Ca(HCO<sub>3</sub>)<sub>2</sub>」であり、物理化学的には全く問題はない。しかし、前回調査時とほぼ同様に生物衛生検査項目では大部分の井戸で一般細菌、大腸菌群いずれもが検出されている。この汚染源はジュデイタ・ヤブースを通過して垂れ流し状に流下している排水路と考えられ、この水が浅層帯水層を汚染していると思われる。そして現地には、未だ一部の古く不完全な井戸（灌漑省の観測井戸）が10井ほど残っており、この不完全な井戸の上部工を通して汚染された浅層地下水が、また時には排水そのものが深部帯水層に浸透しているものと考えられる。このため、まずこれらの完全な古い井戸の埋め戻し・閉塞が必要である。次いで、排水路の水が浅層地下水に浸透しないように、完全なコンクリートライニングを施すべきである。

#### 4. 群井揚水解析

##### 4-1. 概要

第1次現地調査では、調査団がヤブース地区において、3本の既存の井戸（灌漑省の観測井）を用いた揚水試験を行った（再委託調査による）。これは揚水井とその近傍の観測井とを一組とし、5段階の段階揚水試験、48時間の連続揚水及びその後の回復試験を行ったものである。これらの試験結果は前項で述べた。その後はDAWSSAが独自に各地区における生産井において、同様な仕様で揚水試験を行っている。

再委託による既存井戸での試験および今回掘削された井戸での試験結果から、ヤブース地区の帯水層性状は以下のようにまとめられる。主帯水層の地質区分は、DAWSSA及び灌漑局（バラダ・アワジ総局）の地質技術者の区分による。帯水層の種別については、貯留係数（S）の値がほとんどの場合 $10^{-4}$ オーダーを示すことから被圧帯水層と判断され、揚水時の水位低下が比較的短時間で安定してしまうこと、 $10^{-3} \sim 10^{-4}$ オーダーのかなり大きな漏水率（Leakance）を示すこと等から漏水性帯水層であると想定された。もちろん地域全体が均一では無く、一部に極めて小さな漏水率を示す井戸があることから、部分的には非漏水型となっている部分もあることは確かであるが、全体を平均してみると「漏水性被圧帯水層」に分類できるということである。

##### ヤブース地区

主帯水層：	ジュラ紀上部カローピアン階（J3K） 石灰岩/ドロマイト
帯水層の型：	漏水型被圧帯水層（ $m = m' = 100\text{m}$ : 推定）
透水量係数：	$T = 120 \text{ m}^2/\text{day}$
透水係数：	$k = 1.2 \text{ m/day}$ ( $1.39 \times 10^{-3} \text{ cm/sec}$ )
貯留係数：	$S = 4.68 \times 10^{-4}$
漏水率：	$L = 9.62 \times 10^{-4} / \text{day}$

本章では、実際の揚水試験結果から得られた上記に示す平均的な帯水層常数を用いて、単井で揚水した場合の影響圏を計算し、次いで群井揚水を行った場合の影響を解析する。

##### 4-2. 単井揚水解析

漏水型被圧帯水層の場合、揚水量 $Q$ に対する水位降下量 $s$ は以下の式（ハンタッシュ・ヤコブ）で得られる（無限に地下水が分布する理想帯水層の場合）。

$$s = \frac{Q}{4\pi T} W\left(u, \frac{r}{B}\right) \dots\dots\dots (1)$$

ここに、 $s$ は水位降下量、 $Q$ は揚水量、 $T$ は透水量係数、 $W(\ )$ は漏水系の井戸関数で、 $r$ は揚水井戸からの距離、 $B$ は漏水関数 $< 1/B = (L/T)^{1/2} >$ 、 $u$ は以下の式で表される。

$$u = \frac{Sr^2}{4Tt} \dots\dots\dots (4)$$



ここに、 $S$  は貯留係数、 $t$  は揚水時間である。

井戸関数  $W\left(u, \frac{r}{B}\right)$  は  $u$  及び  $r/B$  の値からハンタッシュ・ヤコブの井戸関数表で求められる。これから、生産井 1 本で計画されている  $50\text{m}^3/\text{hr}$  の揚水を行った場合の水位降下量を、井戸から 1、50、100、500、1000、2000、3000m の距離で、それぞれ 1、5、10、30、60 日間揚水したケースを計算すると以下ようになる。

表 4.2.1. 単井揚水時の水位降下量、 $Q=50\text{m}^3/\text{hr}$  (ヤブース)

揚水時間	$r = 1.0\text{m}$	$r = 50\text{m}$	$r = 100$	$r = 500$	$r = 1,000$	$r = 2,000$	$r = 3,000$
1 日	9.54	3.29	2.24	0.32	0.05	0.001	-
5 日	9.54	3.31	2.27	0.39	0.07	0.002	0.0001
10 日	9.54	3.33	2.28	0.40	0.07	0.003	0.0001
30 日	9.54	3.33	2.28	0.40	0.07	0.003	0.0001
60 日	9.54	3.33	2.28	0.40	0.07	0.003	0.0001

上表に示されるように、(無限に広がっている理想的帯水層と仮定した場合であるが) 水位降下量は 10 日も過ぎるとほぼ平衡状態に達し、それ以上の水位低下を来たさなくなる。しかも、揚水井から 3km も離れるとほとんど揚水の影響は無くなる。

#### 4-3. 群井揚水解析

次に群井揚水の場合であるが、タイスあるいはハンタッシュ・ヤコブの方程式が拡散方程式であり線形であることから、「重ね合わせの原理」が成立する。つまり、複数の井戸で一斉に揚水を実施した場合の影響は、個々の井戸で別々に揚水を実施した場合の合計に等しい。ここではまず、各生産井が一斉に揚水を開始した場合にそれぞれの井戸で見られる相互干渉の結果の全水位降下量を検討し、その後全井同時揚水の際の周辺地域に与える影響を、水位降下量の面から考察する(もちろん、これも適用公式の前提から理想帯水層と仮定した場合の計算である)。

##### (1) 相互干渉

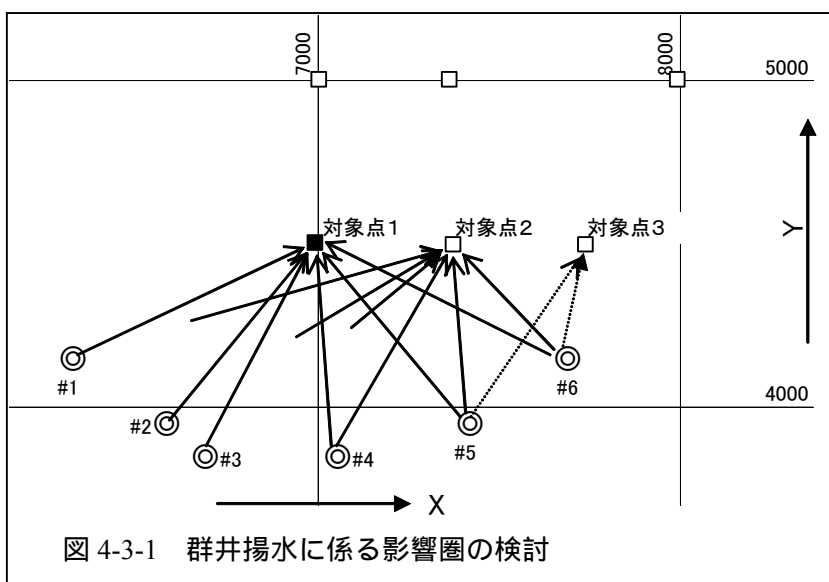
各生産井において一斉に揚水を開始した場合、それぞれの井戸ではまずその近辺の帯水層常数及び独自の井戸効率に応じて水位は降下する。その後近辺の井戸の揚水からの影響、つまり干渉が起こり更に水位は降下することになる。遠方の井戸からの影響はそれだけ遅くまた量も小さいが、近辺の井戸の干渉量は大きく、時に数 m に及ぶ。表 4.3.1 にヤブース地区 11 井の生産井で同時揚水(各  $50\text{m}^3/\text{hr}$ )を行った場合の、水位降下量を示す。

表 4.3.1 群井揚水に係る各生産井の水位降下量 (ヤブース地区)

井戸番号	孔口標高	静水位	自井水位降下	干渉降下量	全降下量
Ya1	1280.62 m	97.0 m	8.56 m	9.48 m	18.04 m
Ya2	1285.32 m	101.5 m	4.10 m	9.60 m	13.70 m
Ya3	1277.69 m	93.2 m	19.52 m	10.0 m	29.52 m
Ya4	1308.59 m	111.6 m	25.38 m	5.53 m	30.91 m
Ya5	1282.13 m	99.3 m	11.44 m	8.80 m	20.24 m
Ya6	1268.49 m	87.0 m	7.05 m	7.09 m	14.14 m
Ya7	1272.07 m	90.7 m	24.60 m	7.16 m	31.76 m
Ya8	1281.19 m	100.0 m	10.0 m	6.94 m	16.94 m
Ya9	1287.19 m	107.0 m	22.90 m	5.54 m	28.44 m
Ya10	1276.88 m	117.8 m	15 m	7.09 m	24.02 m
Ya11	1275.38 m	127.7 m	15 m	8.36 m	25.19 m

(2) 環境影響シミュレーション

群井揚水に係る環境影響は、まず周辺地域に与える地下水位低下量で評価することが出来る。これは当然ながら、実際に生産井を用いた群井揚水試験を行って解析する必要がある。しかし、各生産井単独での揚水試験結果から当地区の平均的な帯水層常数が解析されているので、この値を用いて「重ね合わせの原理」を利用して群井揚水に係る周辺地域の水位降下量をシミュレートすることが出来る。



シミュレーションは、まず各生産井そのものでの全水位降下(自井揚水+干渉降下)を計算する(前掲)。次に周辺地域に関しては図 4.3.1 に示すように、地域内に設けた任意の対象点に対する各生産井 ( Ya1 ~ Ya11 ) による水位

降下量を重ね合わせ、最終水位低下量を計算する。最後にこれら各対象点での全水位降下量を適切な等高線ソフトを用いて滑らかな等水位降下線コンターを描けばよい。今回使用したソフトは「SURFER for Windows, ver7 (Golden Software, Inc.)」で、コンター作成方式は「Kriging」を用いた。帯水層常数は上記平均値を用い、揚水量は各井とも 50 m<sup>3</sup>/hr、

全井同時揚水で2ヵ月後の水位をシミュレートした。

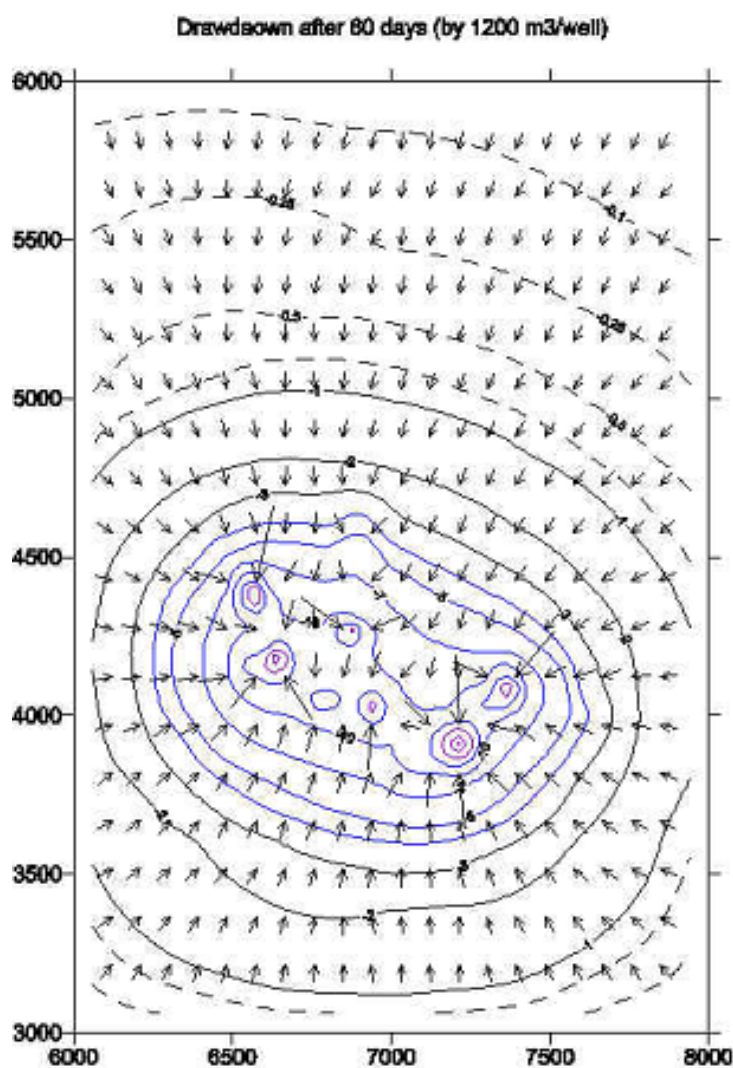


図 4-3-2 群井揚水時の水位低下量

解析の結果、各生産井の近辺では水位降下量は 15m を超えるが、この水源地区を北に離れるにつれ急激に水位降下量は小さくなり、約 1km で 1.0m を切り、1.5km では約 25cm、2.0km も離れると水位低下量は 10cm を下回るという結果が得られた。図 4.3.2 に水位低下の状況を、図 4.3.3 にこれに地形図をオーバーラップした図を示す。

#### 4.4. 群井揚水試験

以上の解析結果は、あくまでも地区の帯水層の状況が既往揚水試験結果の平均値であると仮定した場合のシミュレーションであり、実際の地質は全く均質である（理想帯水層）ということはない。このため、実際に全井で揚水した場合その

影響はこの結果と異なることは十分に有り得る。そのため、実際に 5 井を揚水井として同時揚水する「群井揚水試験」を実施した。群井揚水試験に関する仕様は、第 1 次現地調査の際に既に DAWSSA に手渡してあり、また第 2 次現地調査において、追加の Recommendation を手渡してある。実際に群井揚水試験は、これらの仕様に沿って行われた。また、同書において勧告したように観測に際しては、生産井のみならずジュデイタ・ヤブースの住民の協力を仰いで、灌漑用プライベート井戸における水位観測を行った。

これら、群井揚水試験の結果は、資料集 7、その他の資料(8)に、群井揚水試験結果として示した。試験の結果、周辺生産井、およびヤブースにおける Private Well の水位降下は、試験開始の 1 週間～10 日間はほぼ、上記解析結果と整合していたが、その後は、この地下水盆への地下水流入バランスが大きく変化したせいか、水位降下は減っていき、最後は揚水開始前よりも、高い水位で終了している。

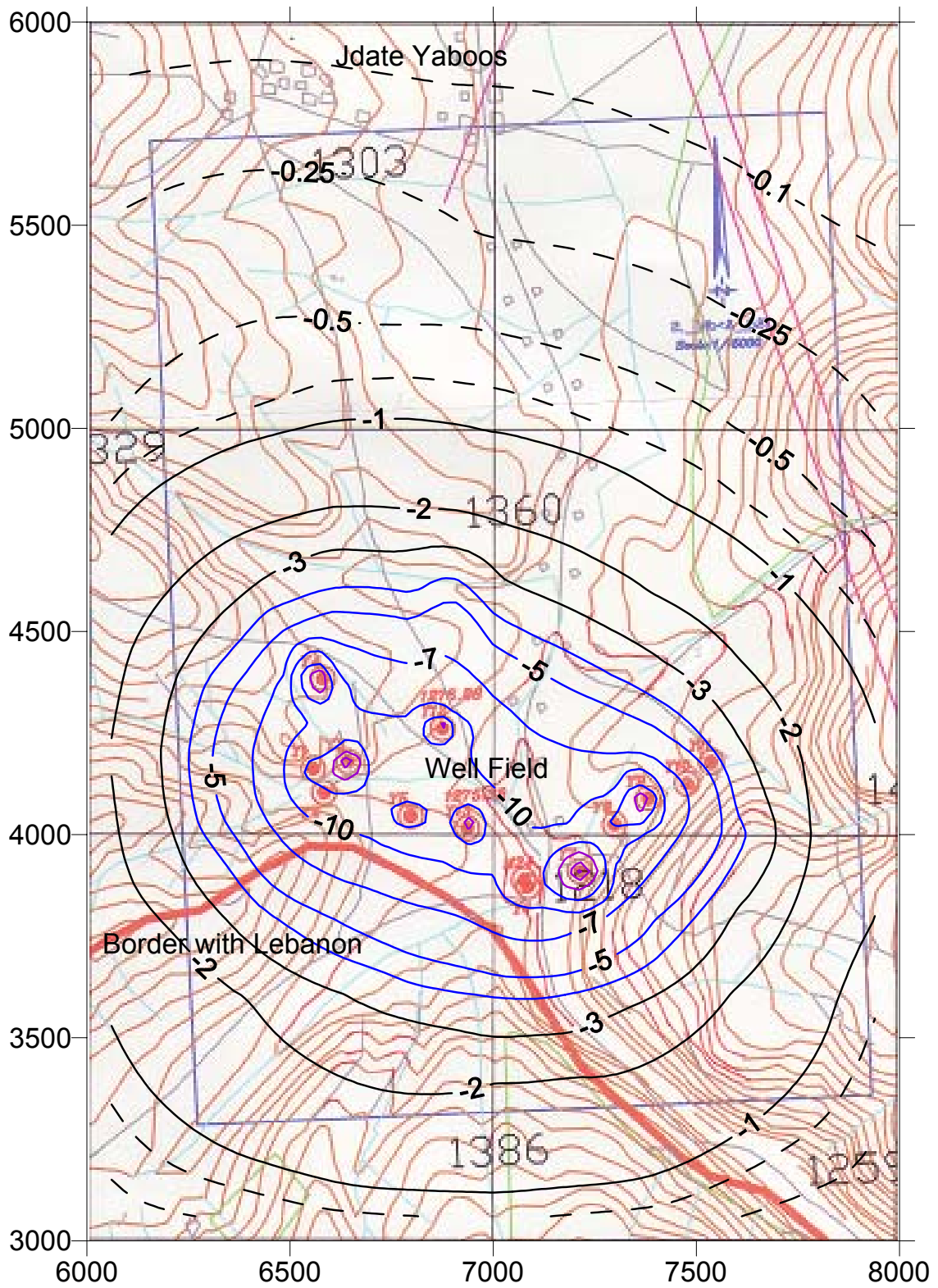


図 4-3-3 群井揚水シミュレーション結果

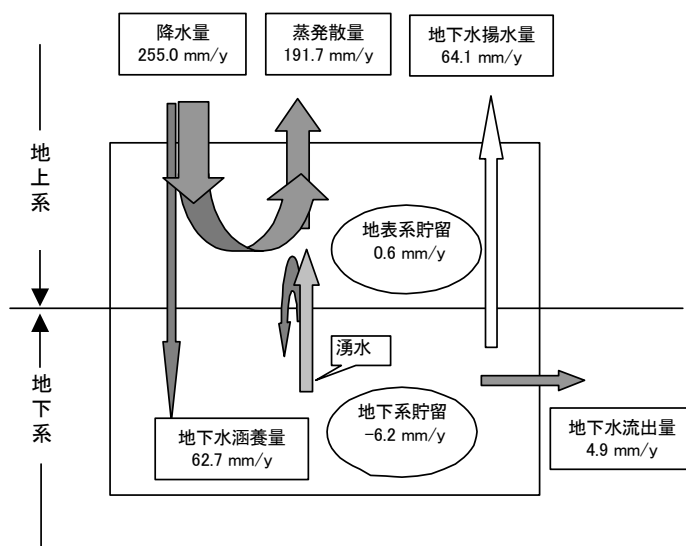
## 5. 水資源開発ポテンシャル

### 5.1. 背景

上述したように本計画対象の 3 地区の内、ヤブースおよびディエル・アル・アシャエール地区は首都ダマスカスを含む「バラダ・アワジ流域」に含まれる。マーダル II 地区の大部分はレバノン領ベカー高原南部を流下するリタニ河流域に属する。

1998～2000 年に実施された「北西部・中部水資源開発計画調査（フェーズ II）」では、このバラダ・アワジ流域の水資源管理システムに係る F/S を実施した。この調査結果によれば「バラダ・アワジ流域が現在、水の利用過多による水収支の不均衡に直面していること、将来、深刻な水不足が懸念されることは過去の調査から明らかである」としている。

同報告書によれば、現在(調査時点)の水収支は、以下のように算定されている。平均降水量 255.0mm のうち 191.7mm が蒸発散として失われる。残る 63.3mm の大部分 62.7mm(量にして約 537MCM) は地下水涵養にまわり、わずか 0.6mm 分が地表水系の貯留量変化に振り分けられる。地下水系では 64.1mm の汲み上げと 4.9mm の地下水流出が算定され、この合計は 69.0mm となり、涵養量 62.7mm を 6.2mm(量にして約 53MCM)オーバーしている(左図



現況の水収支概念図

参照)。この不足分は地下水貯留量の減少となって現れ、90 年代半ばには流域下流部の一部の井戸で地下水位の低下が見られた。

本流域の地下水系が全体としてはマイナス・バランスとなっている。つまり既に流域全体で 145,200 m<sup>3</sup>/日の過剰揚水となっていることから、本案件は「ダマスカス市給水のための抜本対策が取られるまでの間の緊急避難的プロジェクト」と位置づけられている。本計画を

含む原要請 3 地区で予定している新規水資源開発量は、合わせて 30.0 千 m<sup>3</sup>/日(50 m<sup>3</sup>/hr x 24 hr x 25 wells)となり、現時点(2004 年)でのダマスカス市給水不足量とされる 139 千 m<sup>3</sup>/日にははるかに及ばない。しかしながら、本計画はフィジエ・バラダ等の既往水源が不足する時期にそれを補完する水源であることから、8 月～2 月の渇水期に運転を行うが、その間フルに運転するのは 10・11 月の 2 ヶ月であり、この間の累積取水量は約 1.80 MCM である。この量は、上記調査(1989-1998 年平均)における地下水過剰揚水量の 3.4%にしか過ぎない。また本計画対象地区はバラダ・アワジ流域内の涵養域たる上流部に位置するため、90 年代以降ほとんど地下水位に変化は無く、むしろ 03 年の豊水年には地下水位の上昇を見ている。

しかし、流域全体ではマイナス・バランスとなっている状況下では、これまで以上に地下水系に負担を強いる生産井の新たな建設は、少なれば少ないほど良いということになる。

DAWSSA はこの対策として次のような計画を検討しているが、ダマスカスへの給水事情を劇的に改善させられるであろう地中海沿岸流域あるいはユーフラテス流域からの導水事業が実現するにはまだ時間がかかる現状である。

地中海沿岸流域からダマスカス市および地方部への導水事業  
ユーフラテス河アサダ湖からの導水事業  
下水処理水の再利用計画  
フィジェ湧水およびバラダ湧水余剰水の利用計画  
送水トンネル及び市内配水管の漏水防止計画

以上述べたように、給水需給バランスからは更なる水源開発が要求され、流域全体の水収支からは新期水資源開発の抑制が求められるという状況下、将来計画への考察を含めた本計画の揚水量は、本計画があくまでも将来抜本対策を採るまでの緊急対策と考え、水源開発地区の水資源量とそれらの地区での許容揚水量を評価して決めるものとする。ただし、流域全体の水収支は、地下水位のモニタリングあるいは降雨量・地表流出量等の観測記録による水収支モデルのアップデート等によって注意深く見守る必要がある。

## 5.2. 地下水資源量と開発可能量

上述したように、本計画対象 3 地区の内ヤブースおよびディエル・アル・アシャエール地区はバラダ流域に、マーダル II 地区の大部分 (Ma8 を除く部分) はリタニ流域(レバノン)に属する。また DAWSSA の将来計画に含まれるマーダル I およびセルガヤ地区はバラダ流域に含まれる。これら各地区の地下水資源量を、主に涵養の面から推定を試みる。

地下水資源量(Groundwater Resources)とは、有る一定の地区(一般には地下水盆)の地下に胚胎される地下水の総量を言い、歴史的に蓄積された地下水で通常これは膨大な量になる。一方、降雨が地下に浸透し地下水を増加させる部分を地下水涵養量と言う。これは自然の水循環の中で毎年繰り返される現象であり、「再生可能な水資源量(Renewable Water Resources)」と呼ばれ、持続可能な水資源開発の主たる対象となる。地下水開発可能量(Groundwater Resources Development Potential)とは、この量を指すことが多いが、厳密にはこの量から現在既に取水し利用されている量を差し引いたものを言う。

地下水涵養量(Q)は降雨量(R)、地下水浸透率(P)および涵養域(A)から計算される：

$$Q = A \times R \times P$$

ここで、降雨量 R は涵養域全体の平均雨量(mm/a)で、図 5.2.1 (ダマスカス市給水 M/P、97 年 JICA から)からおおよそ読み取ることが出来る。地下水浸透率 P は、上述水資源開発計画での水収支バランス計算から、バラダ・アワジ流域の平均地下水浸透率 0.246 を取る。なお、この涵養率 (0.246) はバラダ・アワジ流域全体の平均涵養率であり、本地区のよう

に降雨量が流域全体平均より 4 倍近く大きい場合は量的には大きくなるものの率としては減る可能性も有る。しかしヤブース地区での涵養率データがないので、当面この値を用いる。また、本地区のようなカルスト性石灰岩類を基盤とする地域では、地下水の涵養域と地表水の流域とは一致しないことが多い。地下水は主に地層(同一地質)に支配され、またその時々相対地下水位によって流域を超えた流入出を行うため涵養域を推定することは非常に難しい。本調査では、各計画水源地を含む水理地質単元：ヤブース、セルガヤおよびディエル・アル・アシャール地区ではジュラ系石灰岩(一部ドロマイト)、マールⅡや同Ⅰ地区では白亜系石灰岩類、を地域全体の地下水の流向(NE-SW)から上流側へ延長し、大きな地形区分(山塊の切れ目)で括って涵養域とした。図 5.2.2 に本調査対象地域近辺の地質図に推定涵養域を落とした図を示す。これら仮定値の妥当性を検討するためにも、後述する地下水モニタリングは非常に重要である。計算の結果を表 5.2.1 に示す。なお、ここに計算したものは地下水涵養量であり、地下水開発可能量はこれから湧水として地表に戻る分と、井戸によって既に揚水されている分とを差し引いたものとなる。

表 5.2.1 地下水涵養量の推定

地区	(a) 涵養域 (km <sup>2</sup> )	(b) 年間雨量 (mm/a)	(c)=(a)*(b) 総雨量 (MCM/a)	(d) 涵養率	(e)=(c)*(d) 涵養量/年 (MCM/a)	(f)=(e)/365 涵養量/日 (m <sup>3</sup> /d)	(g)=(f)/86.4 同左 (lit/sec)
Srgaya	46	700	32.2	0.246	7.921	21,702	251.2
Maadar I	32	900	28.8	0.246	7.085	19,410	224.7
Maadar II <sup>*1</sup>	46	1,100	50.6	0.246	12.448	34,103	394.7
Yaboos <sup>*2</sup>	67	1,000	67.0	0.246	16.482	45,156	522.6
D.A.Ashayer	51	800	40.8	0.246	10.037	27,498	318.3

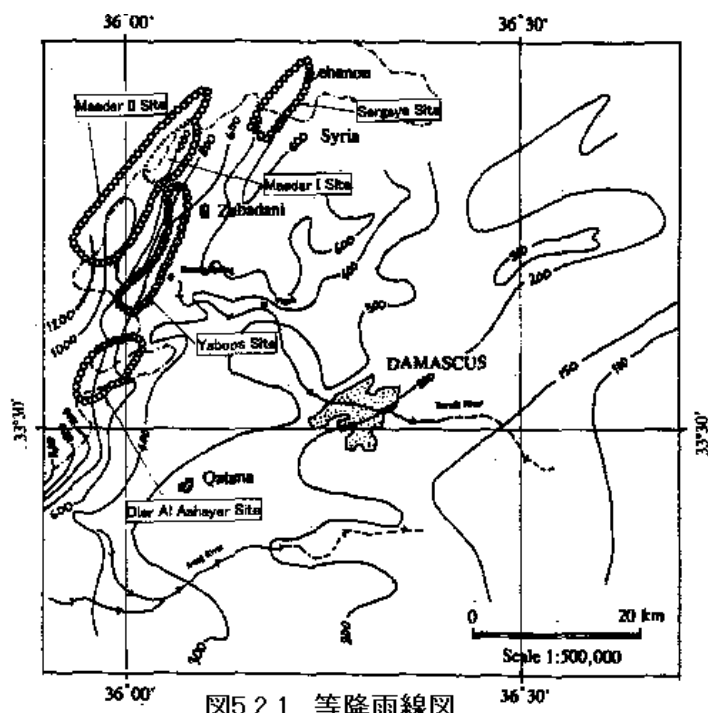


図5.2.1 等降雨線図  
 1000 ——— Mean Precipitation isohet in mm. (Data up to 1984)  
 (鎖線範囲は、推定涵養域)

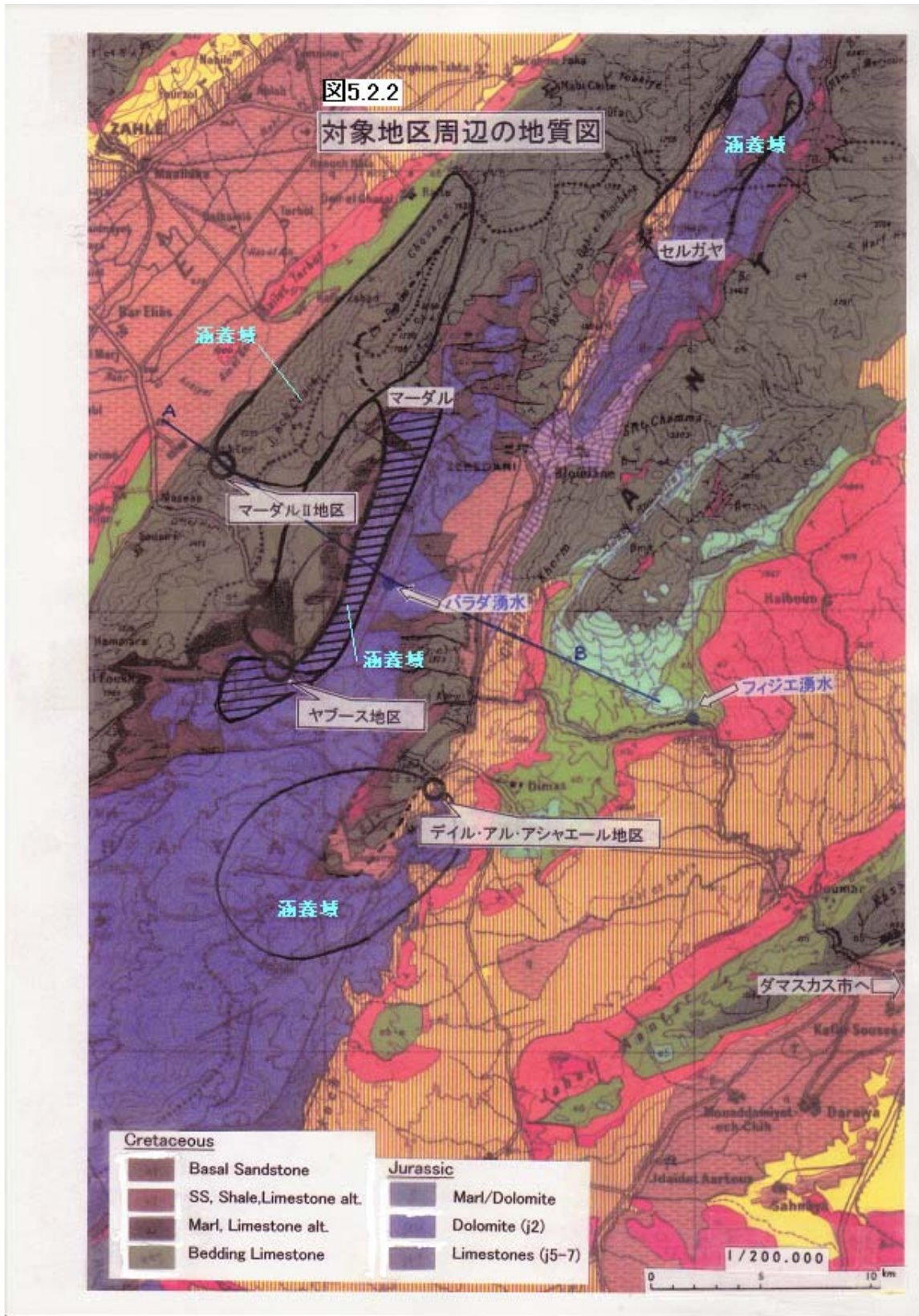
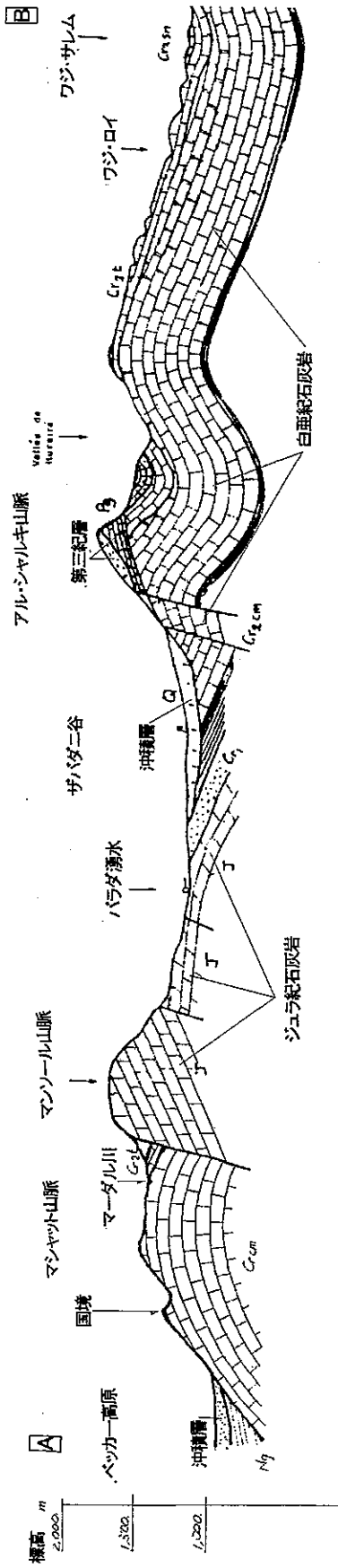


図 5.2.2. 調査対象地域周辺の地質図

(出典:Carte Geologique de LIBAN,1955)



アンチレバノン山脈



縮尺 1:100,000.

図 5.2.3 模式断面図

出典: Geological Map of Syria, Sheet 137-VII (1964) に加筆

### 5.3 適正揚水量と許容揚水量

このバラダ・アワジ流域は、何度も繰り返し述べているように地下水系は既にマイナス・バランスとなっている。このことはこの後のいかなる揚水も地下水過剰揚水を助長するだけであり、適正揚水量(Optimum Pumping Rate)はありえない。しかし、首都ダマスカス市の水不足という大きな社会的政治的な問題のため、やむを得ず緊急避難的に地下水開発を行わざるを得ないとすれば、それは最低限各地区における許容揚水量(Permissible Pumping Rate)の範囲に止めなければならない。ただ救いとなるのは、平均雨量わずか 255 mm というバラダ・アワジ流域の中で、本計画対象 3 地区は平均雨量 700 ~ 1100 mm と例外的に大きな降雨量を有し(図 5.2.1 参照)、流域内唯一の涵養域となっていることである。

許容揚水量とは自然条件のみならず社会科学的な要件を加味した概念で、以下の 5 条件を考慮して決められる量とされている(地下水資源・環境論、水収支研究グループ、1995、共立出版)：

- 好ましくない結果を生じないと言う“経済要件”、
- 水収支が均衡すると言う“自然涵養条件”、
- 水利権その他の法に触れないと言う“法律要件”、
- 地盤沈下や水質悪化を生じさせないと言う“地質環境要件”、そして
- 市民生活の快適性(アメニティ)を維持・増加させるような水辺環境の保全などの“親水環境要件”。

上記要件の内、については DAWSSA は既にこれらの地区での水利権を取得している。あとは EIA を確実に実施することで環境法をクリアすればよい。については、対象地区の大部分が岩盤地域であり地盤沈下の心配はないし揚水によって水質が悪化することも考えられない。の親水環境は湧水のある地区では問題となるが、本件対象の 3 地区では、マーダル地区を除き特に問題となるような湧水は存在しない(マーダル I 地区では、その直下に小規模な湧水が、マーダル II のレバノン側にはアンジャールおよびシャムシン両湧水がある)。結局は、の経済要件及びの自然涵養条件から許容揚水量を検討すればよいことになる。

経済要件としては生産井における管理水位の観点と、直近の集落における地下水位の降下量とから検討し、これを満たす揚水量を限界揚水量とする。更にこの限界揚水量をの自然涵養条件から検討し、最終的に許容揚水量を勘案する。

#### (1) 限界揚水量

まず各生産井の管理水位であるが、前述「北西部・中部地下水開発調査」におけるスタディで新規開発生産井の管理水位を 100m と 150m としている。これは通常市販されているポンプの揚水能力が 100m であること、および揚水に係る水価は深度 150m を超えると急激に上昇することによる。本地区の内、ヤブース地区では自然水位自体が既にほぼ 100m ないし

それ以下であり、これから揚水した場合 100m を管理水位とすることは不可能で、こと前の策として 150m を管理水位とするべきであろう。

当地区においては、揚水試験の結果および後述する群井揚水シミュレーションから、既に完成している 11 井においては計画揚水量 (50 m<sup>3</sup>/hr) で汲んだ場合、水位降下量は全て 150m 以内に収まるとされている。これら各井戸で上記管理水位を念頭に、(5%程度の誤差を見込んで) 水位降下量を 142.5m 以下に抑えて今後更にどの程度揚水量を増やすことが出来るかを検討する。各井戸における揚水量を 10 m<sup>3</sup>/hr 刻みで増加させ自井揚水および干渉による水位低下量および全揚程を計算し、揚程が 142.5m を超えない揚水量を求めると、表 5.3.1 のようになる。同表から判るとおり各生産性の能力には大きな差が有るが、全体で 1,030 m<sup>3</sup>/hr (286 lit/sec) 平均すれば 1 井当り 93.6 lit/sec まで揚水量を増やすことが出来る。これを暫定的に限界揚水量とする。

もしこの許容揚水量いっぱいまで揚水した場合、前項で述べた群井揚水シミュレーションの結果からも、本地区直近のジュディタ・ヤブース地区に及ぼす地下水水位降下の影響はさほど大きくないと考えられる。最悪のシミュレーションではないが、かなりの水不足に見舞われこれらの全ての井戸で 2 ヶ月連続揚水した場合をシミュレーションしても 50cm 以下と想定される (図 4.3.3. 参照)。これは本地区での本格揚水 (100%揚水) が 10 月・11 月であり灌漑需要期ではないので、許容できる範囲の影響と考え本地区の限界揚水量を 1,030 m<sup>3</sup>/hr (286 lit/sec) とする。

## (2) 許容揚水量

前節で述べた限界揚水量 286 lit/sec は、しかしながら、この当地区の涵養量 523 lit/sec の約 55%に相当し、その半分を超えてしまう。ヤブース地区の涵養量は、その一部がクフェア・ヤブースの湧水として地表に戻り、またクフェア及びジュディタ・ヤブース地区の灌漑用水として利用され、さらにはヤブースの給水用井戸が年間通して稼動中である。このため、涵養と灌漑需要、上水需要の時期的なズレの問題はあるが、新規水資源開発量は涵養量の 40%を超えるべきではない。この涵養量はあくまでも平均であり、年間格差がかなりあると考えるためである。よって、ヤブース地区の許容揚水量は、涵養量の面から約 209 lit/sec (753 m<sup>3</sup>/hr) とすべきであろう。ただし、実際に開発を行おうとすればこれらの既存井戸で揚水量を増加させるのではなく、この量に相当する新規井戸を掘削すべきである(その方が安全側である)。つまり標準井戸 (50 m<sup>3</sup>/hr) に換算し 15 井まで増加させることが出来る。

以上の考察からヤブース地区における許容揚水量を 753 m<sup>3</sup>/hr (209 lit/sec) 生産井 15 本とする。

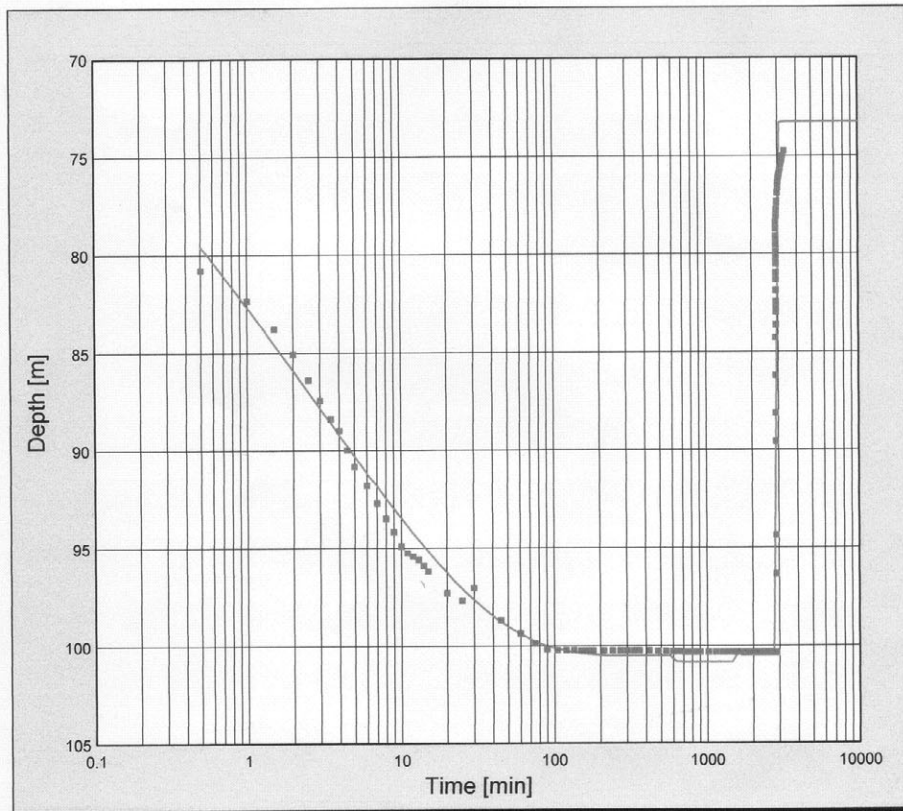
ただし、この量を取水することは当地区の局所的な水理条件から (どうしても必要であれば) 許されるということであり、そのために下流の半乾燥地域に地下水を供給している貴重な水源が、その分だけ損なわれることを十分に考慮せねばならない。

表 5.3.1 許容揚水量の推定

Well	Q (m <sup>3</sup> /h)	60	70	80	90	100	110	120	130	140	150	160	170	180	190	200
Ya1	自井降下	10.47	12.73	15.19	17.09	19.43	21.37	23.85	26.46	29.18	32.05	35.06	38.24	41.58	45.11	48.84
	影響降下	11.38	13.28	15.17	17.07	18.97	20.87	22.76	24.66	26.56	28.45	30.35	32.25	34.14	36.04	37.94
	全降下量	21.85	26.01	30.37	34.17	38.39	42.23	46.61	51.11	55.74	60.50	65.41	70.48	75.72	81.15	86.78
	全揚程	118.85	123.01	127.37	131.17	135.39	139.23	143.61	148.11	152.74	157.50	162.41	167.48	172.72	178.15	183.78
Ya2	自井降下	5.02	5.98	6.98	8.02	9.11	10.25	11.44	12.69	13.99	15.37	16.81	18.33	19.94	21.63	23.42
	影響降下	11.53	13.45	15.37	17.29	19.21	21.13	23.05	24.97	26.89	28.81	30.73	32.66	34.58	36.50	38.42
	全降下量	16.54	19.42	22.34	25.31	28.32	31.38	34.49	37.66	40.89	44.18	47.55	50.99	54.51	58.13	61.84
	全揚程	118.04	120.92	123.84	126.81	129.82	132.88	135.99	139.16	142.39	145.68	149.05	152.49	156.01	159.63	163.34
Ya3	自井降下	23.92	28.48	33.24	38.21	43.40	48.83	54.51	60.45	66.69	73.24	80.13	87.38	95.02	103.08	111.61
	影響降下	12.00	14.00	16.00	18.00	20.00	22.00	24.00	26.00	28.00	30.00	32.00	34.00	36.00	38.00	40.00
	全降下量	35.92	42.48	49.24	56.21	63.40	70.83	78.50	86.45	94.69	103.24	112.13	121.38	131.02	141.08	151.61
	全揚程	129.12	135.68	142.44	149.41	156.60	164.03	171.70	179.65	187.89	196.44	205.33	214.58	224.22	234.28	244.81
Ya4	自井降下	31.08	37.01	43.20	49.66	56.40	63.45	70.83	78.56	86.67	95.18	104.13	113.55	123.47	133.95	145.03
	影響降下	6.63	7.74	8.84	9.95	11.05	12.16	13.26	14.37	15.47	16.58	17.68	18.79	19.89	21.00	22.10
	全降下量	37.71	44.75	52.04	59.60	67.45	75.61	84.09	92.93	102.14	111.75	121.81	132.33	143.37	154.95	167.14
	全揚程	149.31	156.35	163.64	171.20	179.05	187.21	195.69	204.53	213.74	223.35	233.41	243.93	254.97	266.55	278.74
Ya5	自井降下	14.01	16.69	19.48	22.39	25.43	28.60	31.93	35.41	39.07	42.91	46.94	51.19	55.66	60.39	65.38
	影響降下	10.56	12.32	14.08	15.84	17.60	19.36	21.13	22.89	24.65	26.41	28.17	29.93	31.69	33.45	35.21
	全降下量	24.57	29.01	33.56	38.23	43.03	47.97	53.06	58.30	63.71	69.31	75.11	81.11	87.35	93.83	100.59
	全揚程	123.87	128.31	132.86	137.53	142.33	147.27	152.36	157.60	163.01	168.61	174.41	180.41	186.65	193.13	199.89
Ya6	自井降下	8.64	10.28	12.00	13.80	15.67	17.63	19.68	21.83	24.08	26.45	28.93	31.55	34.31	37.22	40.30
	影響降下	8.51	9.93	11.35	12.77	14.19	15.61	17.02	18.44	19.86	21.28	22.70	24.12	25.54	26.96	28.37
	全降下量	17.15	20.22	23.35	26.57	29.86	33.24	36.70	40.27	43.94	47.73	51.63	55.67	59.84	64.18	68.67
	全揚程	104.15	107.22	110.35	113.57	116.86	120.24	123.70	127.27	130.94	134.73	138.63	142.67	146.84	151.18	155.67
Ya7	自井降下	30.16	35.92	41.92	48.19	54.73	61.58	68.74	76.24	84.10	92.36	101.05	110.19	119.82	129.99	140.75
	影響降下	8.59	10.03	11.46	12.89	14.32	15.76	17.19	18.62	20.05	21.49	22.92	24.35	25.78	27.22	28.65
	全降下量	38.75	45.95	53.38	61.08	69.06	77.33	85.93	94.86	104.16	113.85	123.97	134.54	145.61	157.21	169.39
	全揚程	129.45	136.65	144.08	151.78	159.76	168.03	176.63	185.56	194.86	204.55	214.67	225.24	236.31	247.91	260.09
Ya8	自井降下	15.15	18.05	21.07	24.21	27.50	30.94	34.54	38.31	42.26	46.41	50.77	55.37	60.21	65.32	70.72
	影響降下	8.33	9.72	11.11	12.50	13.89	15.28	16.67	18.05	19.44	20.83	22.22	23.61	25.00	26.39	27.78
	全降下量	23.49	27.77	32.18	36.71	41.39	46.22	51.20	56.36	61.70	67.24	73.00	78.98	85.21	91.71	98.50
	全揚程	123.49	127.77	132.18	136.71	141.39	146.22	151.20	156.36	161.70	167.24	173.00	178.98	185.21	191.71	198.50
Ya9	自井降下	28.08	33.45	39.04	44.87	50.97	57.34	64.01	70.99	78.32	86.01	94.10	102.61	111.58	121.05	131.06
	影響降下	6.64	7.75	8.86	9.96	11.07	12.18	13.29	14.39	15.50	16.61	17.71	18.82	19.93	21.04	22.14
	全降下量	34.73	41.20	47.90	54.84	62.04	69.52	77.29	85.39	93.82	102.62	111.81	121.43	131.51	142.09	153.21
	全揚程	141.73	148.20	154.90	161.84	169.04	176.52	184.29	192.39	200.82	209.62	218.81	228.43	238.51	249.09	260.21
Ya10	自井降下	20.41	24.31	28.37	32.61	37.04	41.67	46.51	51.59	56.91	62.50	68.38	74.56	81.08	87.96	95.24
	影響降下	8.50	9.92	11.34	12.76	14.17	15.59	17.01	18.43	19.84	21.26	22.68	24.09	25.51	26.93	28.35
	全降下量	28.91	34.23	39.71	45.36	51.21	57.26	63.52	70.01	76.75	83.76	91.05	98.66	106.59	114.89	123.58
	全揚程	128.91	134.23	139.71	145.36	151.21	157.26	163.52	170.01	176.75	183.76	191.05	198.66	206.59	214.89	223.58
Ya11	自井降下	20.41	24.31	28.37	32.61	37.04	41.67	46.51	51.59	56.91	62.50	68.38	74.56	81.08	87.96	95.24
	影響降下	10.03	11.71	13.38	15.05	16.72	18.40	20.07	21.74	23.41	25.08	26.76	28.43	30.10	31.77	33.45
	全降下量	30.44	36.01	41.75	47.66	53.76	60.06	66.58	73.33	80.32	87.58	95.13	102.99	111.18	119.74	128.68
	全揚程	130.44	136.01	141.75	147.66	153.76	160.06	166.58	173.33	180.32	187.58	195.13	202.99	211.18	219.74	228.68

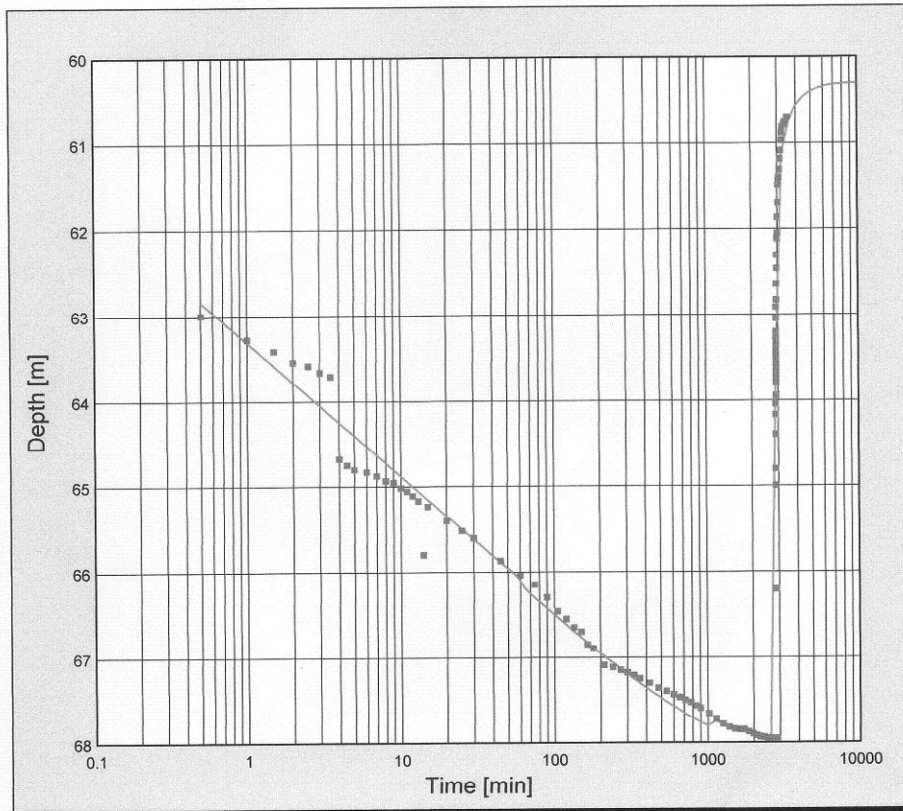
付属資料-1. 揚水試験結果解析図  
 ヤブース M37 井戸 (揚水井戸)

Pumping Test			
Well Ident M37	Description		
Obs. Well Distance [m] 0.13	Average Pump. Rate [m3/day] 16.66139	Duration [min] 3300.000	Initial Sat. Thickness [m]
			Results
Transmissivity [m2/day] 22.90440	Storage Coefficient	Leakance [1/day] 8.756396	Estimation Error [m] 1.29
Fit Method			Hantush Method



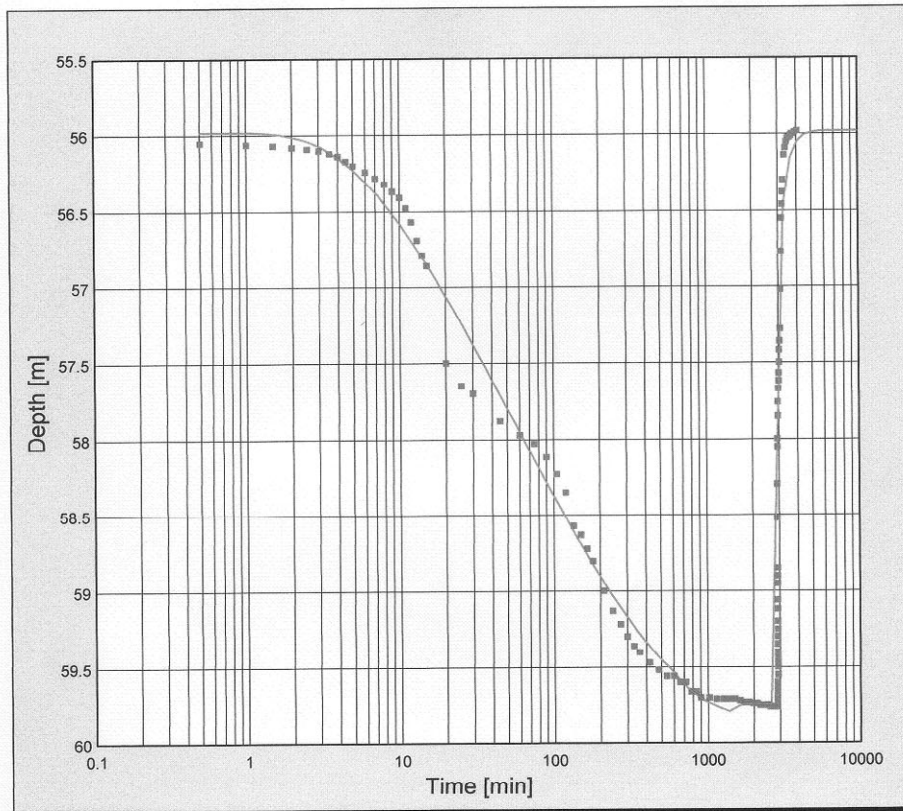
ヤブース No.7 井戸 (揚水井)

Pumping Test			
Well Ident No.7	Description		
Obs. Well Distance [m] 0.13	Average Pump. Rate [m3/day] 10.88666	Duration [min] 3480.000	Initial Sat. Thickness [m]
			Results
Transmissivity [m2/day] 113.1723	Storage Coefficient	Leakance [1/day] 0.09991609	Estimation Error [m] 0.19
Fit Method			Hantush Method



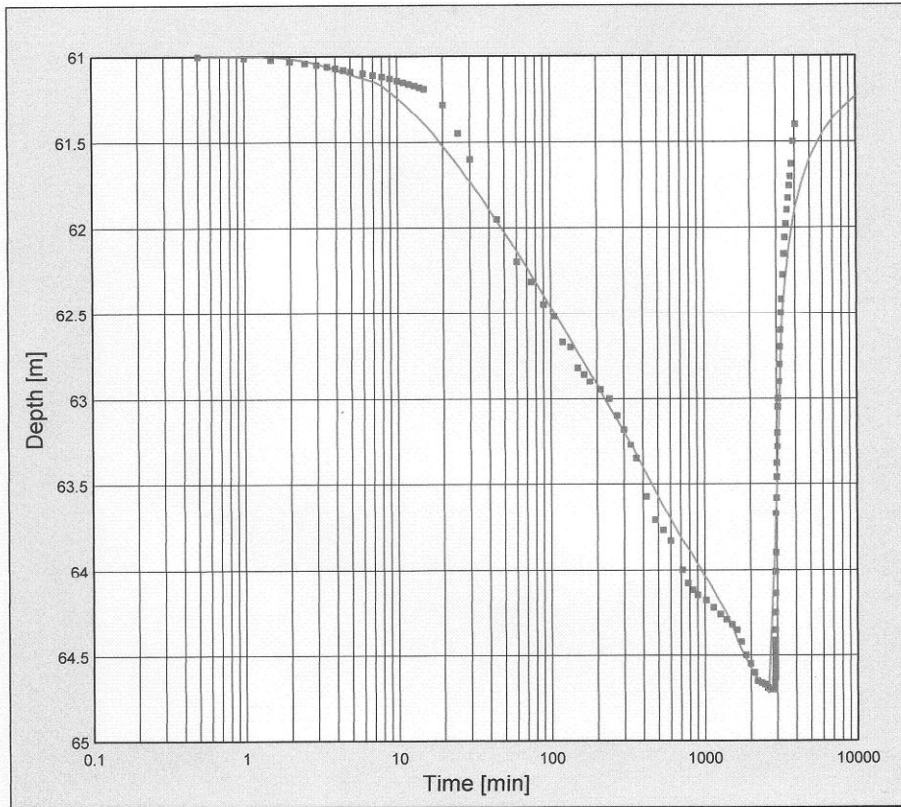
ヤブース M14 井戸 (観測井)

Pumping Test			
Well Ident M14	Description		
Obs. Well Distance [m] 82.60	Average Pump. Rate [m3/day] 16.66139	Duration [min] 4020.000	Initial Sat. Thickness [m]
			Results
Transmissivity [m2/day] 121.3881	Storage Coefficient 0.0002168680	Leakance [1/day] 0.0004626043	Estimation Error [m] 0.14
Fit Method			Hantush Method



ヤブース No.7 井戸(観測井)

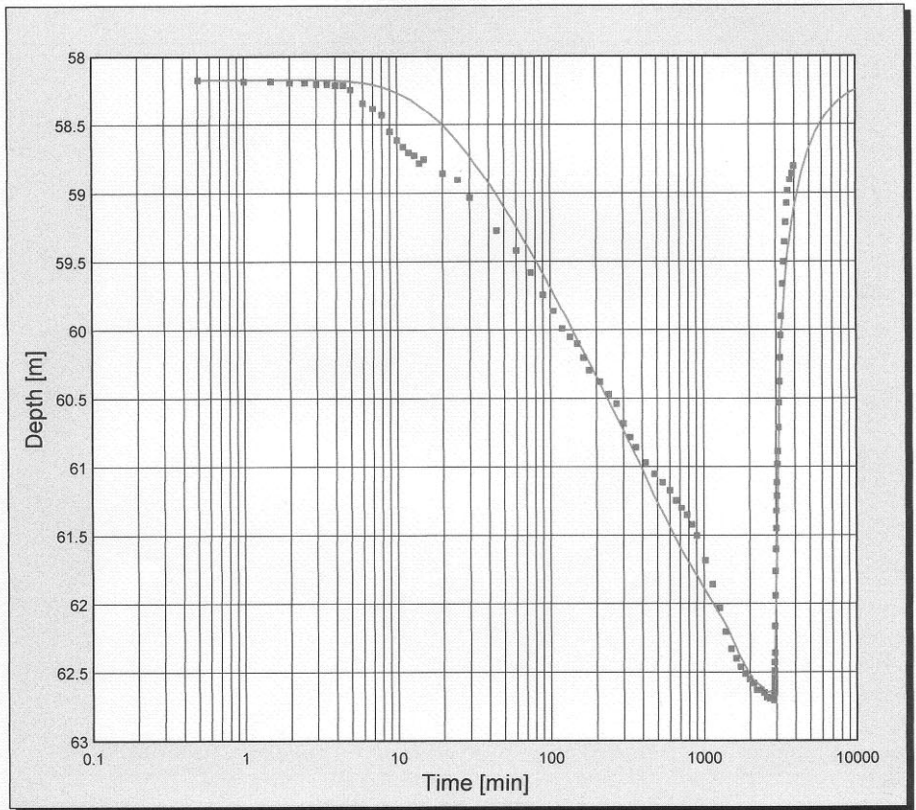
Pumping Test			
Well Ident No.7	Description		
Obs. Well Distance [m] 75.42	Average Pump. Rate [m3/day] 13.58500	Duration [min] 4020.000	Initial Sat. Thickness [m]
			Results
Transmissivity [m2/day] 137.4931	Storage Coefficient 0.0004824527	Leakance [1/day]	Estimation Error [m] 0.14
Fit Method			Theis Method





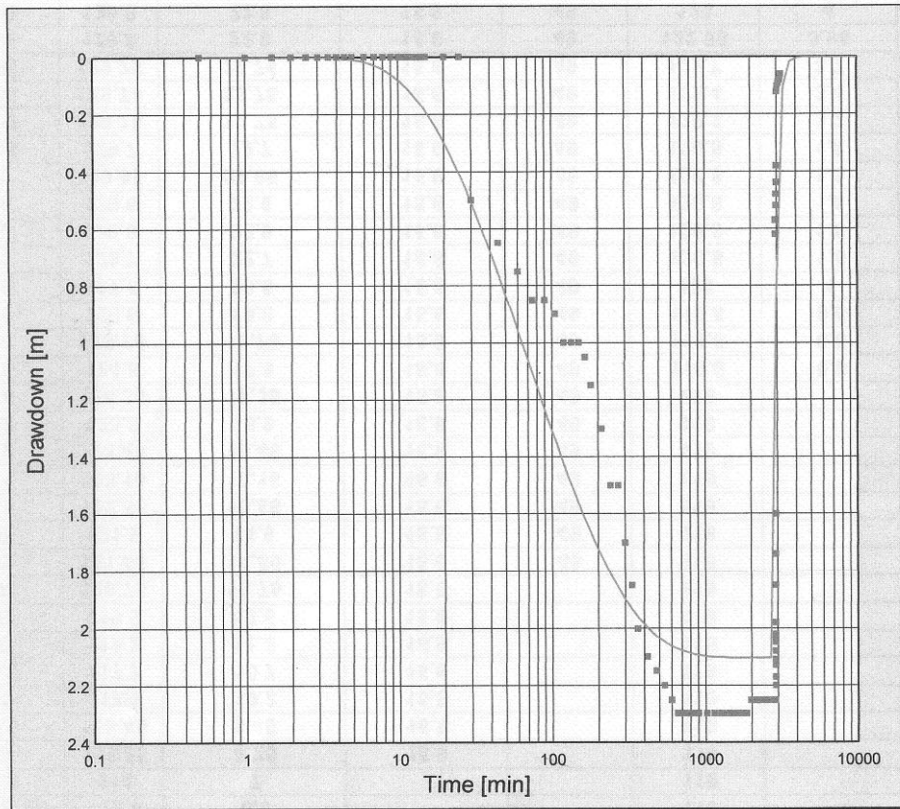
ヤブース M38 井戸 (観測井)

Pumping Test			
Well Ident No.38	Description		
Obs. Well Distance [m] 98.62	Average Pump. Rate [m3/day] 13.58500	Duration [min] 3960.000	Initial Sat. Thickness [m]
			Results
Transmissivity [m2/day] 88.06426	Storage Coefficient 0.0003910696	Leakance [1/day] 0.0001107898	Estimation Error [m] 0.20
Fit Method			Hantush Method



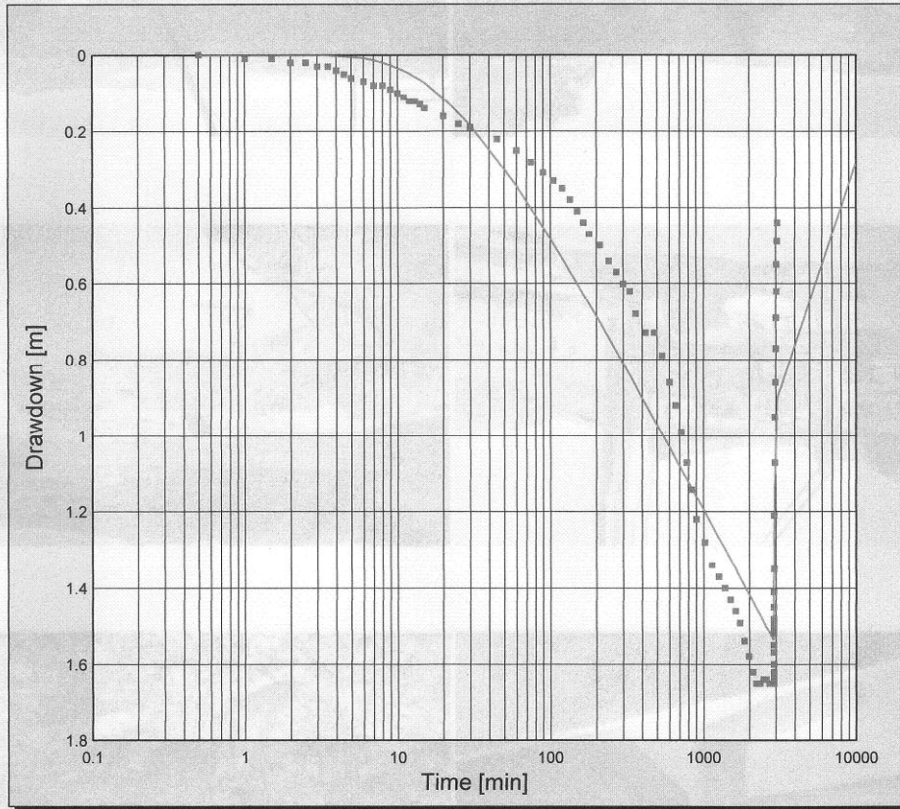
DAWSSA、ヤブース Ya-1 井戸(観測井)

Pumping Test			
Well Ident Ya1-obs		Description	
Obs. Well Distance [m] 88.00	Average Pump. Rate [m <sup>3</sup> /day] 17.50000	Duration [min] 3180.000	Initial Sat. Thickness [m]
			Results
Transmissivity [m <sup>2</sup> /day] 108.4942	Storage Coefficient 0.0006549245	Leakance [1/day] 0.003455610	Estimation Error [m] 0.26
Fit Method			Hantush Method



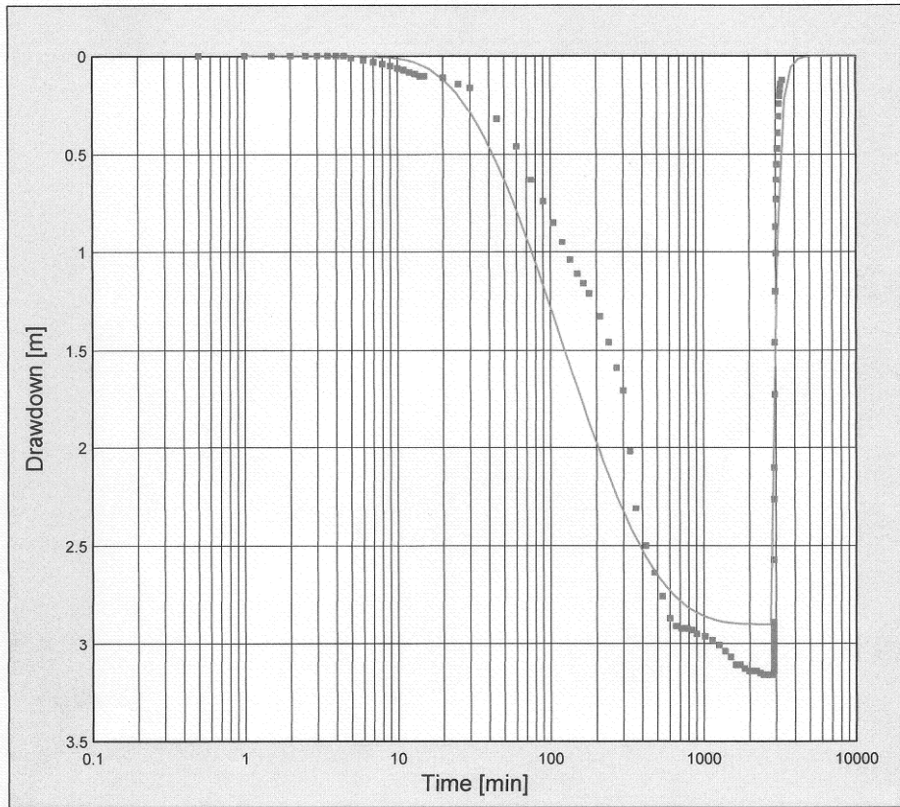
DAWSSA、ヤブース Ya-2 井戸 (観測井)

Pumping Test			
Well Ident Ya2-obs		Description	
Obs. Well Distance [m] 96.10	Average Pump. Rate [m3/day] 16.90000	Duration [min] 3060.000	Initial Sat. Thickness [m]
			Results
Transmissivity [m2/day] 369.1311	Storage Coefficient 0.001577223	Leakance [1/day] 3.436491E-16	Estimation Error [m] 0.15
Fit Method			Hantush Method



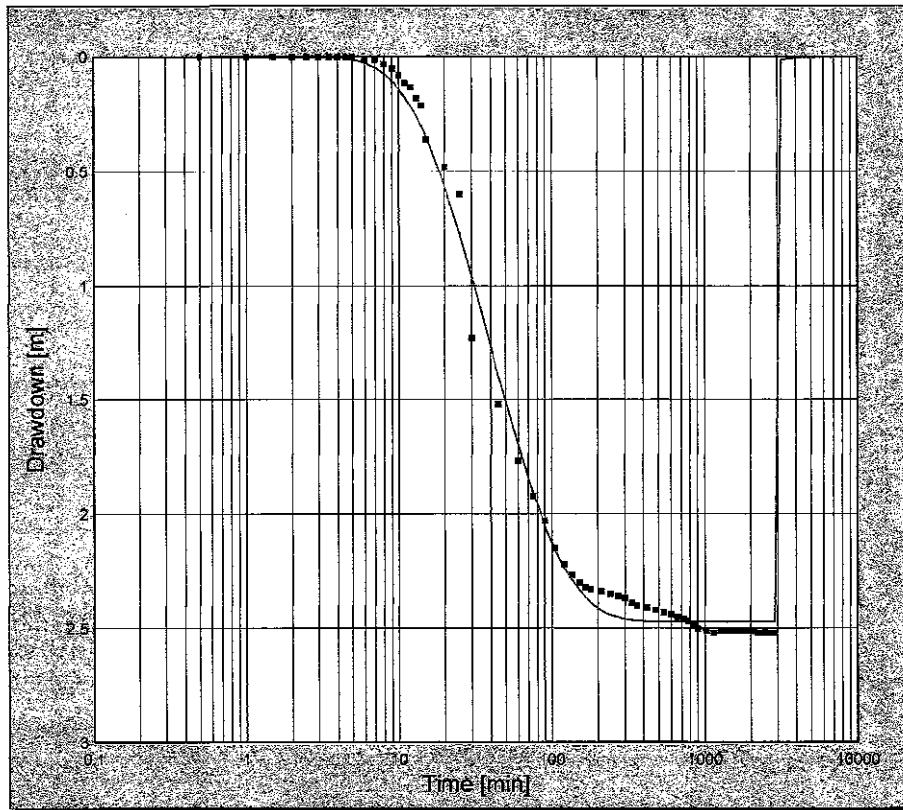
DWSSA,ヤブース Ya-3 井戸(観測井)

Pumping Test			
Well Ident Ya3-obs	Description		
Obs. Well Distance [m] 88.00	Average Pump. Rate [m3/day] 16.70000	Duration [min] 3300.000	Initial Sat. Thickness [m]
			Results
Transmissivity [m2/day] 63.48579	Storage Coefficient 0.0007831824	Leakance [1/day] 0.002877638	Estimation Error [m] 0.31
Fit Method			Hantush Method



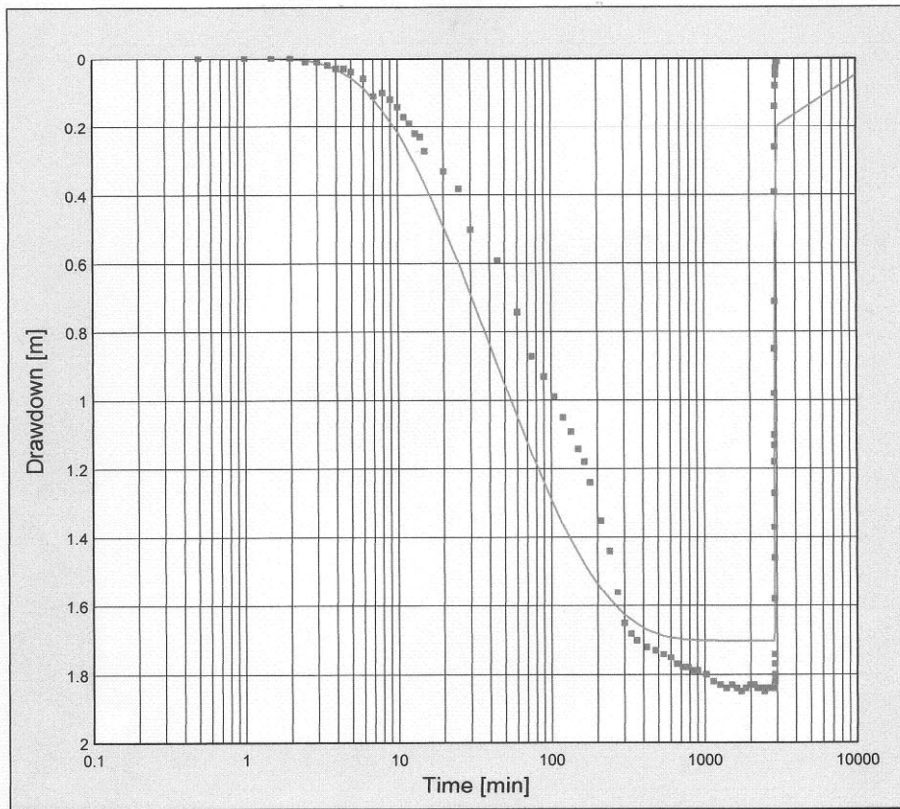
DAWSSA, ヤブース Ya-4 井戸(観測井)

Pumping Test			
Well Ident Ya4-obs	Description		
Obs. Well Distance [m] 211.00	Average Pump. Rate [m3/day] 16.70000	Duration [min] 2880.000	Initial Sat. Thickness [m]
			<b>Results</b>
Transmissivity [m2/day] 39.21865	Storage Coefficient 0.00004677314	Leakance [1/day] 0.0008904913	Estimation Error [m] 0.06
Fit Method			Hantush Method



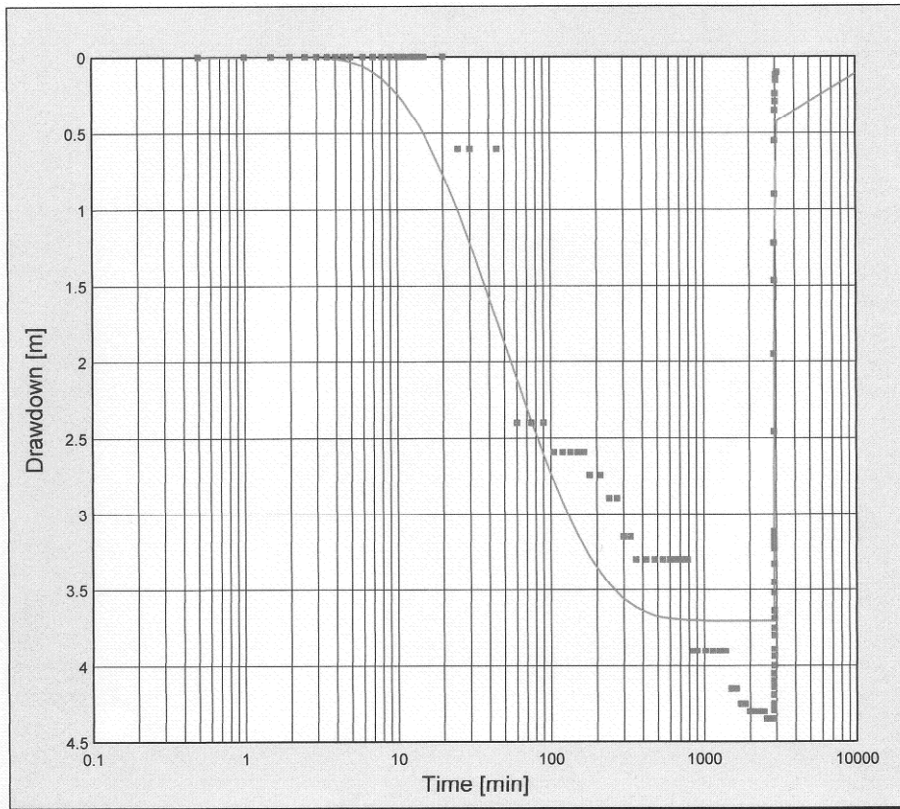
DAWSSA、ヤブース Ya-5 井戸(観測井)

Pumping Test			
Well Ident Ya5-obs	Description		
Obs. Well Distance [m] 201.00	Average Pump. Rate [m3/day] 17.20000	Duration [min] 3060.000	Initial Sat. Thickness [m]
			Results
Transmissivity [m2/day] 156.9536	Storage Coefficient 0.00008799817	Leakance [1/day] 0.0006365557	Estimation Error [m] 0.18
Fit Method			Hantush Method



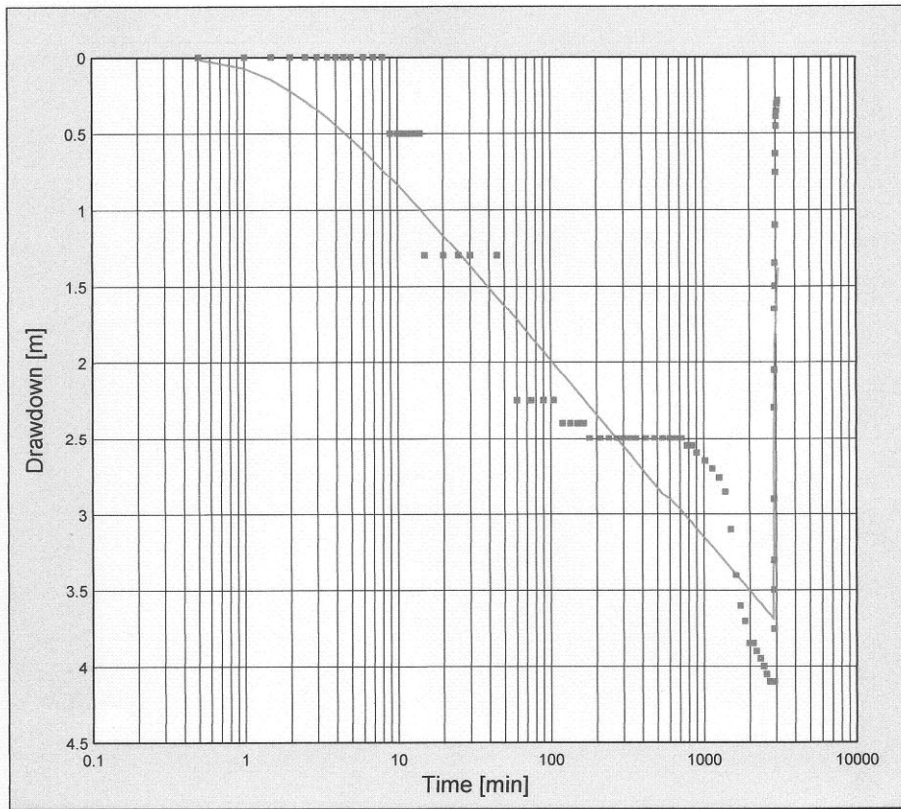
DAWSSA、ヤブース Ya-6 井戸 (観測井)

Pumping Test			
Well Ident Ya6-obs		Description	
Obs. Well Distance [m] 89.00	Average Pump. Rate [m3/day] 17.20000	Duration [min] 3060.000	Initial Sat. Thickness [m]
			Results
Transmissivity [m2/day] 51.84459	Storage Coefficient 0.0002567334	Leakance [1/day] 0.002241837	Estimation Error [m] 0.44
Fit Method			Hantush Method



DAWSSA、ヤブース Ya-7 井戸(観測井)

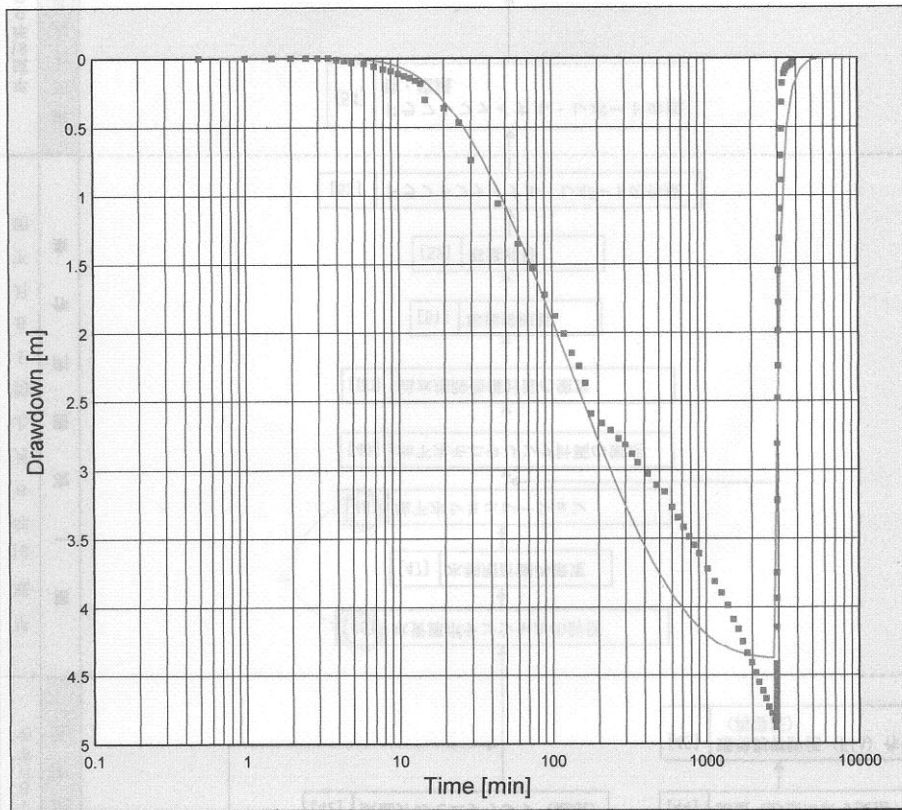
Pumping Test			
Well Ident Ya7-obs	Description		
Obs. Well Distance [m] 71.00	Average Pump. Rate [m3/day] 13.93750	Duration [min] 3090.000	Initial Sat. Thickness [m]
			Results
Transmissivity [m2/day] 191.6793	Storage Coefficient 0.0001314423	Leakance [1/day] 1.307131E-11	Estimation Error [m] 0.51
Fit Method			Hantush Method





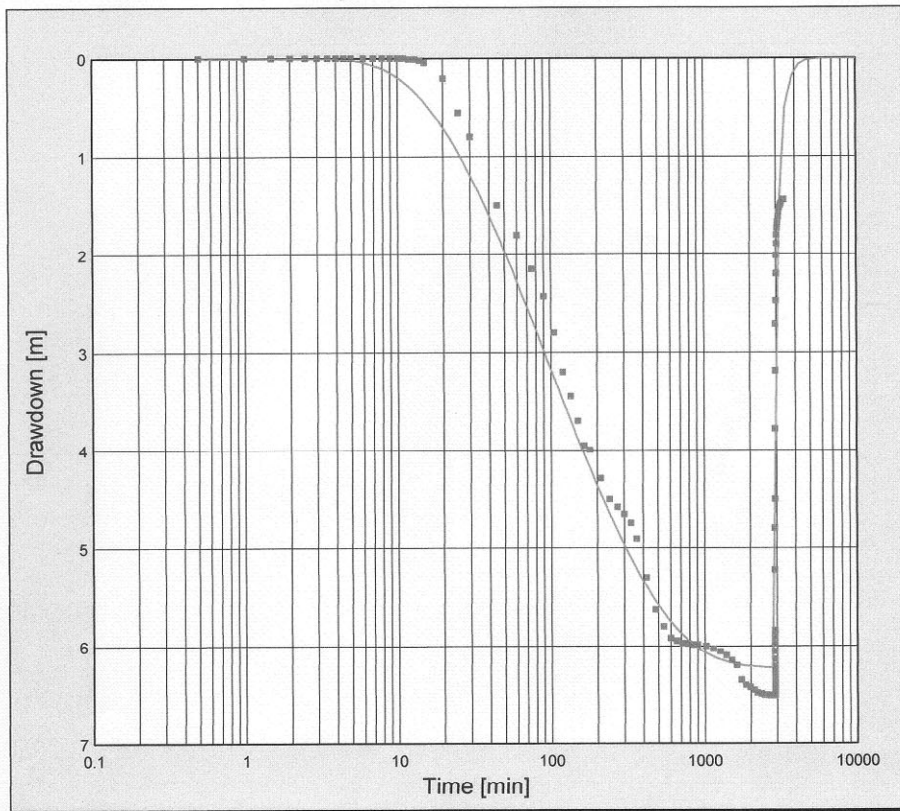
DAWSSA、ヤブース Ya-8 井戸(観測井)

Pumping Test			
Well Ident Ya8-obs	Description		
Obs. Well Distance [m] 102.00	Average Pump. Rate [m3/day] 16.11421	Duration [min] 3780.000	Initial Sat. Thickness [m]
Results			
Transmissivity [m2/day] 60.67812	Storage Coefficient 0.0003752463	Leakance [1/day] 0.0008160109	Estimation Error [m] 0.35
Fit Method			Hantush Method



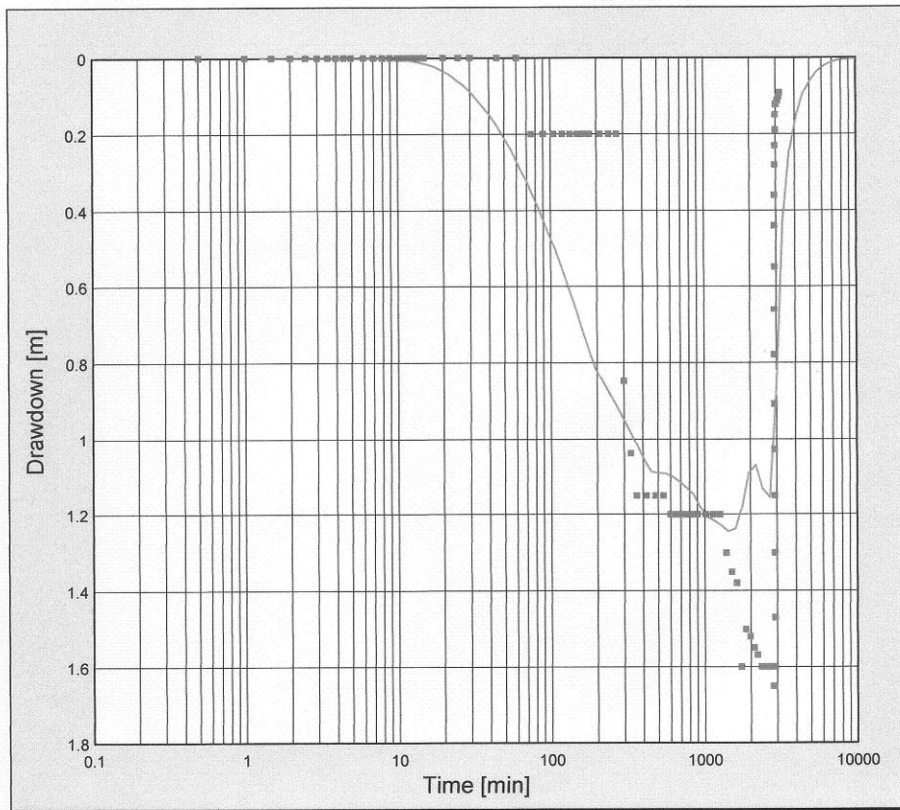
DAWSSA, ヤブース Ya-9 井戸(観測井)

Pumping Test			
Well Ident Ya9-obs	Description		
Obs. Well Distance [m] 80.00	Average Pump. Rate [m3/day] 13.60000	Duration [min] 3360.000	Initial Sat. Thickness [m]
			Results
Transmissivity [m2/day] 38.55914	Storage Coefficient 0.0002718612	Leakance [1/day] 0.0007040359	Estimation Error [m] 0.32
Fit Method			Hantush Method



DAWSSA、ヤブース Ya-10 井戸、(観測井)

Pumping Test			
Well Ident Ya10-obs	Description		
Obs. Well Distance [m] 165.00	Average Pump. Rate [m3/day] 4.360536	Duration [min] 3180.000	Initial Sat. Thickness [m]
			Results
Transmissivity [m2/day] 62.75651	Storage Coefficient 0.0002590501	Leakance [1/day] 0.0002191610	Estimation Error [m] 0.36
Fit Method			Hantush Method



DWSSA、ヤブース Ya-11 井戸(観測井)

Pumping Test			
Well Ident Ya11-obs		Description	
Obs. Well Distance [m] 255.00	Average Pump. Rate [m3/day] 6.656074	Duration [min] 3180.000	Initial Sat. Thickness [m]
			Results
Transmissivity [m2/day] 92.03126	Storage Coefficient 0.0004440598	Leakance [1/day] 2.154721E-19	Estimation Error [m] 0.23
Fit Method			Hantush Method

