

エジプト国

シナイ半島地下水開発計画調査 要約報告書

1992年10月

国際協力事業団

社調二

CR(3)

92-098

エジプト国

シナイ半島地下水開発計画調査

要約報告書

一九九二年十月

国際協力事業団

R1WR

JICA LIBRARY



1101785121

24448

エジプト国

シナイ半島地下水開発計画調査
要約報告書

1992年10月

国際協力事業団

国際協力事業団

24448

序 文

日本国政府は、エジプトアラブ共和国政府の要請に基づき、同国のシナイ島地下水開発計画にかかる開発調査を行うことを決定し、国際協力事業団がこの調査を実施いたしました。

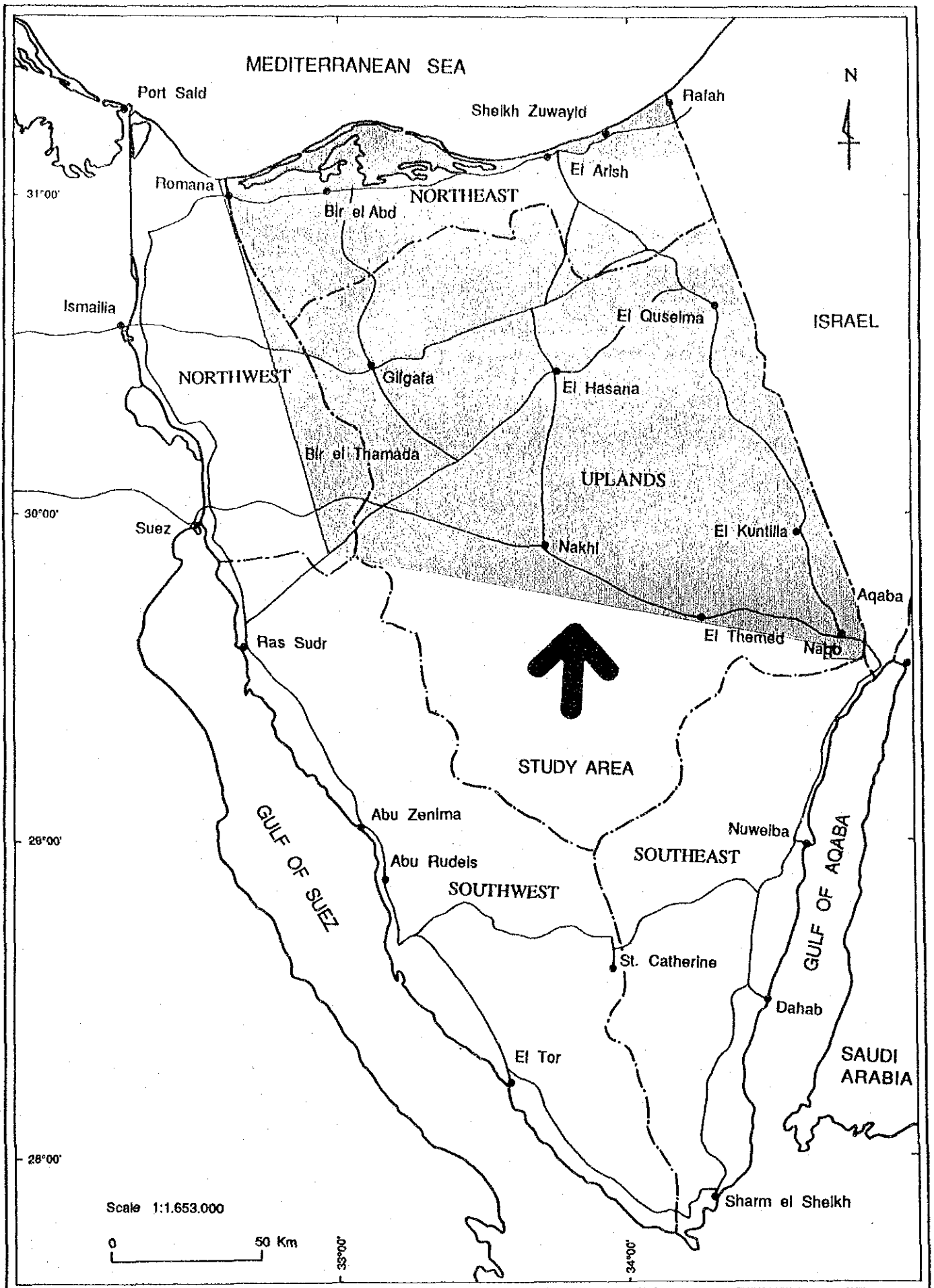
当事業団は、昭和63年12月から平成4年3月までの間、9回にわたり、株式会社パシフィックコンサルタンツインターナショナルの河田清雄氏を団長とする調査団を現地に派遣しました。

調査団は、エジプト政府関係者と協議を行うとともに、計画対象地域における現地調査を、実施し、帰国後の国内作業を経て、ここに本報告書完成の運びとなりました。この報告書が、本計画の推進に寄与するとともに、両国の友好・親善の一層の発展に役立つことを願うものです。

終りに、調査にご協力とご支援をいただいた関係者各位に対し、心より感謝申し上げます。

平成4年10月

国際協力事業団
総裁 柳谷 謙介



調査位置図

目 次

序 文	
1 序 論	1
2 調査の背景	2
3 既存調査	4
4 調査の内容	5
(1) データベース	5
(2) ランドサット画像解析	5
(3) 地質調査	6
(4) 物理探査	6
(5) 試掘揚水試験	7
(6) 水文水質調査	7
5 地質概要	9
5-1 先カンブリア紀 (Precambrian)	9
5-2 古生代 (Palezoic)	9
5-3 中生代 (Mesozoic)	9
5-3-1 三疊紀 (Triassic)	9
5-3-2 ジュラ紀 (Jurassic)	9
5-3-3 白亜紀 (Cretaceous)	10
5-3-3-1 下部白亜紀 (Lower Cretaceous)	10
5-3-3-2 上部白亜紀 (Upper Cretaceous)	11
5-4 新生代 (Cenozoic)	11
5-4-1 第三紀 (Tertiary)	11
5-4-1-1 暁新世 (Paleocene)	11
5-4-1-2 始新世 (Eocene)	12
5-4-1-3 漸新世 (Oligocene)	12
5-4-1-4 中新世 (Miocene)	12
5-4-1-5 鮮新世 (Pliocene)	12
5-5 第四紀 (Quaternary)	12
5-6 地質構造	13
5-6-1 概 要	13
5-6-2 Centrall Sinai Stable Foreland	13
5-6-3 North Sinai Strongly Folded	13
5-6-4 North Sinai Foreshore Area	14

6	主要対象帯水層の分布	17
6-1	概説	17
6-2	第四紀層	17
6-3	先第四紀層	23
7	水理地質	25
7-1	第四紀	25
7-1-1	水理地質構造	25
7-1-2	第四紀帯水層の水質	31
7-1-3	第四紀帯水層の水位	31
7-2	第三紀	37
7-2-1	概説	37
7-2-2	中新世	37
7-2-3	始新世	39
7-2-4	暁新世	41
7-3	上部白亜紀	41
7-3-1	Senonian	41
7-3-2	Turonian	43
7-3-3	Cenomanian	45
7-4	下部白亜紀	47
7-5	ジュラ紀	55
7-5-1	概説	55
7-5-2	上部ジュラ紀	55
7-5-3	中・下部ジュラ紀	55
8	地下水源評価	57
8-1	第四紀の帯水層	57
8-2	第三紀の帯水層	61
8-2-1	中新世の帯水層	61
8-2-2	始新世の帯水層	61
8-3	上部白亜紀の帯水層	62
8-3-1	Senonianの帯水層	62
8-3-2	Turonianの帯水層	62
8-3-3	Cenomanianの帯水層	62
8-4	下部白亜紀の帯水層	63
8-5	ジュラ紀の帯水層	65
8-5-1	上部ジュラ紀の帯水層	65
8-5-2	中・下部ジュラ紀の帯水層	65

9	地下水開発・調査への提言	66
9-1	序言	66
9-2	地下水開発優先地域	66
9-2-1	第四紀帯水層	66
9-2-2	先第四紀帯水層	66
9-3	地下水開発手法への提言	67
9-3-1	第四紀帯水層	67
9-3-2	先第四紀帯水層	68
9-4	今後の課題	70
9-4-1	第四紀帯水層	70
9-4-2	先第四紀帯水層	70
9-4-2-1	第三紀帯水層	70
9-4-2-2	上部白亜紀帯水層	71
9-4-2-3	下部白亜紀帯水層	72
9-4-2-4	ジュラ紀の帯水層	74
10	Naqb および Themed 地域の地下水開発	75
11	結論および提言	80
11-1	結論	80
11-1-1	第四紀帯水層	80
11-1-2	先第四紀帯水層	81
11-2	提言	83

1 序 論

本調査は、日本国政府とエジプト国政府との間に1988年7月15日に締結された技術援助協力協定に沿って、国際協力事業団（JICA）が実施したものである。

エジプト国側のカウンターパート機関は水資源研究所（RIWR）である。

本調査のための事前調査および SCOPE OF WORK (S/W) 締結のための調査団は、1988年7月および10月に派遣された。

本ファイナルレポートは、SCOPE OF WORK (S/W) に基づいて1988年12月から1992年3月迄に実施された調査の結果をまとめたものである。

ファイナルレポートは、メインレポート、テクニカルレポート及び水理地質図（ポートフォリオを含む）から構成されている。なお、テクニカルレポートは、次の構成となっている。

- I. WELL SURVEY
- II. FOSSIL ANALYSIS
- III. GRAIN SIZE ANALYSIS
- IV. COMPOSITE COLUMN
- V. LANDFORM CLASSIFICATION

2. 調査の背景

エジプト国の大半は沙漠地帯で、利用できる地域は国土のわずか 3% に過ぎず、しかもそのほとんどがナイル河の流域およびそのデルタ地域に限られている。国内経済発展と人口増加に対応するため、エジプト国政府は鉱物資源を胚胎し、かつ観光および農業開発に適するとみられるシナイ半島の開発を余儀なくされているのが現状である。このため、様々の国際協力がシナイ半島において実施されている。

シナイ半島は 61,000km² の面積を有し、1988年における人口は約 200,000 人である。半島の地中海に面した北部の海岸平野と南部の山岳地帯を除くと大部分は沙漠となっており、年間の降水量は地中海沿岸部を除けば極端に少なく、約 60~100mm/年程度である。これに対応するためいくつかの地域では表流水の利用を目指してダム建設も行われているが、そのいずれも困難に直面している。

半島北東部の El-Arish や、南西部の El-Tor では、地表面下 50~100m から得られる第四紀層の地下水を飲料水や農業用水として利用している。しかしながら、近年の過剰揚水のため海岸平野における地下水は水質の悪化を来しているとみられている。

第四紀層以外の白亜紀層や第三紀層も良好な帯水層であると想定されているが、その地下水資源としての性質や有効性についてはさらに検討が必要である。

シナイ半島における水資源の開発は、諸々の調査研究が様々の国際機関によって組織されたが、その中で USAID による Sinai Development Study (SDS) は、シナイ半島の水資源開発を含む広域的な開発計画策定を目指し、1985年に着手された。

さらに RIWR は、EC からの技術協力による水資源調査を実施している。また、RIWR は半島北東部の El-Arish から Rafah 地域において Groundwater Management Study (GMS) を実施し、既存の水理地質学的データを取りまとめている。

シナイ半島の地下水資源を考慮した体系的な調査は未だ実施されていないため、全体的な開発計画が策定されるには至っていない。

このような背景のもとに、エジプト国政府は本プロジェクトの実施をわが国に要請してきたものである。

調査対象地域は北シナイ州全域であり、その面積は 26,000km² に及んでいる（調査位置図参照）。調査地域の北部には Syrian Arc Movement の結果形成されたドーム構造山地が分布し、さらに北方の地中海に向かって緩やかに高度を下げている。これらの褶曲山塊をのぞけば、他地域はほとんど風成砂丘によって覆われている。

本調査の目的は次のとおりである。

- 1) 地下水資源を評価するための水理地質図を作成すること
- 2) 地下水開発のための優先地域を選択すること
- 3) 将来の地下水開発のための方法を提言すること
- 4) 一連の調査を通じてエジプト側の技術者に対して技術移転を行うこと

3 既存調査

調査地域では、様々な地質学的および水理地質学的研究が成されている。その主なものは、EGYPTIAN GEOLOGICAL SURVEY AND MINING AUTHORITY (EGSMA) と、イスラエルによるものである。

そのほか、1985年にはSDSのファイナルレポートが提出された。この調査はシナイ半島全域の総括的な開発計画策定を目指したものである。この中には、予察的な水資源開発評価を含めた将来の開発目標および戦略が記述されている。

また、Maghara 地域ではイタリアの協力による、Gebel Maghara Rural Development Project (GMRDP) が実施中であり、これには水資源としての水理地質学的調査が含まれている。このプロジェクトで掘削された試掘井により Maghara 地域におけるジュラお紀および上部白亜紀の石灰岩についての知見を得ることができる。

1988年にはRIWRによって、Groundwater Management Study (GMS) Phase 1 が終了した。この調査はEl-ArishからRafah地域の地下水資源の評価および貴重な地下水資源のモニタリングシステムの確立を目的としている。PHASE 1 調査では既存の水理地質学的データと次フェーズ以降の必要な調査の確認を行っている。

GMS Phase 1 の最終報告書ではこれまでに実施されている既存の調査全般にわたって、レビューと検討が行われた。特に Appendix としてまとめられた第四紀帯水層についてのデータは既存データの大半を網羅している点で利用価値が大きい。

4 調査の内容

調査地域に関する既存データは多いが、調査地域は 26,000km²の面積を有していることを考慮すると未だ不十分である。水理地質学的調査のためには岩相区分と層序が揃った完全な井戸資料が必要である。しかしながら、これについては既存データは不完全である。さらに調査地域の地質分布や地質構造を明確に把握するためのデータに欠けている。

したがって、既存井戸資料のレビューと再解析作業に多くの時間を費やす必要があり、同時に、既存井戸資料解析のための参考資料として地質柱状図を作成する必要があった。これらの結果は、Technical Report IV に Composite Column としてまとめた。

下部白亜紀砂岩層は、有望な帯水層を胚胎している可能性が高いことから、対象とする帯水層の一つとして選定した。実際、この砂岩層は調査地域内に広く分布し、層相も帯水層として適している。

第四紀層もその地下水が利用できる地域では経済的な帯水層となるため、もう一つの対象帯水層として選定した。第四紀帯水層は、地中海沿岸のEI-ARISH から Rafah にいたる海岸平野では盛んに揚水されている。1980年代には井戸数が急速に増大したため地下水位の低下を生じその結果、帯水層の汚染を招いている。したがって、第四紀帯水層は将来の開発よりも地下水揚水のコントロールが急務の課題となっている。

その他の地層、例えばジュラ紀層・上部白亜紀層および第三紀層も十分考慮した調査を行った。

調査の主要な内容は次に示す通りである。

(1) データベース

既存データおよび本調査を通して得られたデータはこれらを解析に用いることを考慮して、データが所属するグリッド毎に dBASE III に格納した。

(2) ランドサット画像解析

調査地域の全体の特徴を把握するため、衛星画像解析を実施した。解析は画像処理された衛星写真を用い、次に示すテーマ図を縮尺 1/250,000 で作成した。

- 1) LINEAMENT
- 2) GEOMORPHOLOGICAL MAP
- 3) GEOLOGICAL MAP

4) VEGETATION AND LAND USE MAP

(3) 地質調査

既存地質図の確認のため地質調査を実施した。その成果は本調査で作成した地質図に反映した。

詳細な地質調査は 3,700km² にわたって行い、12本の地質柱状図を作成した。調査地域には石灰岩を主とした類似の地層が厚く分布し、層相のみからでは地質年代を決定することが困難であることから、化石分析を行い地質時代を決定するため、露頭及び試掘井から 200 以上の資料を採取した（テクニカルレポートⅡ参照）。

これらの調査結果から主要帯水層についてのコンターマップを作成した。

本調査では下部白亜紀砂岩層は対象帯水層の一つであるが、その物理的特性については知見に乏しい。そこで砂岩層の性質を把握するため、粒度分析を実施することとし、11地区から700以上の試料を採取した（テクニカルレポートⅢ参照）。

(4) 物理探査

地質調査実施対象地域以外の地質情報を補足するため、浅層（主として第四紀層を対象に200-300mの探査深度）を約600点、深層（主として先第四紀層を対象に約1,000mの探査深度）を約50点の電気探査を実施した。また、深部の基盤構造を把握するため、Naqb地域を中心とした調査地域南東部で約50点の重力探査を実施した。

電気探査の測線配置は参照地点（試掘地点のように地質柱状図で地下地質が明かな地点）を通るように配慮した。しかしながら、深い砂丘地帯や未処理の地雷原が存在する地域では必ずしもこの条件を満たせなかった。

第四紀層を対象とした電気探査では、第四紀層の基底をとらえることができた。一方、先第四紀層を対象とした探査では、砂漠の接地抵抗が極めて大きいこと、測線距離が長大などが探査結果に大きく影響する。また、塩分濃度の高い地下水が存在する場合、比抵抗値が極端に低くなるために、解析が困難になる。このような条件のため、深層の電気探査については必ずしも良好な結果を得たとは言い難い。

電気探査結果は地質学的解析を行い、地質断面図としてまとめた。

重力探査結果についても、基盤岩の上面構造を推定するための資料として用いた。

(5) 試掘揚水試験

本調査の主要対象帯水層である第四紀層および先第四紀層を主体に試掘調査を実施した。その目的はこれらの地層の水理地質学的情報を得、水理地質構造解析のための資料とすることである。

第四紀層の試掘地点選定に当たっては、次の様な点を考慮した。

- 1) 主要帯水層であるkurkarの分布を把握すること
- 2) 未開発の礫層の確認とその分布を把握すること

実際の試掘地点は既存データの検討結果に基づき地域を選定し、さらに電気探査を行い最終地点を決定した。

合計の試掘延長は4,239mで、そのうち951mが第四紀層を対象とし、3,288mが先第四紀層を対象としている。図4-1に試掘地点図を示す。

(6) 水文水質調査

シナイ半島における水収支は1985年にSDSにおいて試行的に実施されている。しかしながら概算的なものであり、これを確かなものにするためには正確でかつ十分な水文気象データを得ることが必要である。従って、本調査では次のような実際的な面において調査を実施した。

- 1) 既存井戸資料のUp-Dating
- 2) 試掘井から得られたデータの解析
- 3) 水位の解析及び揚水に対する水位の挙動
- 4) 必要な地点の地下水の年代測定
- 5) 必要な地点の地下水の水質測定

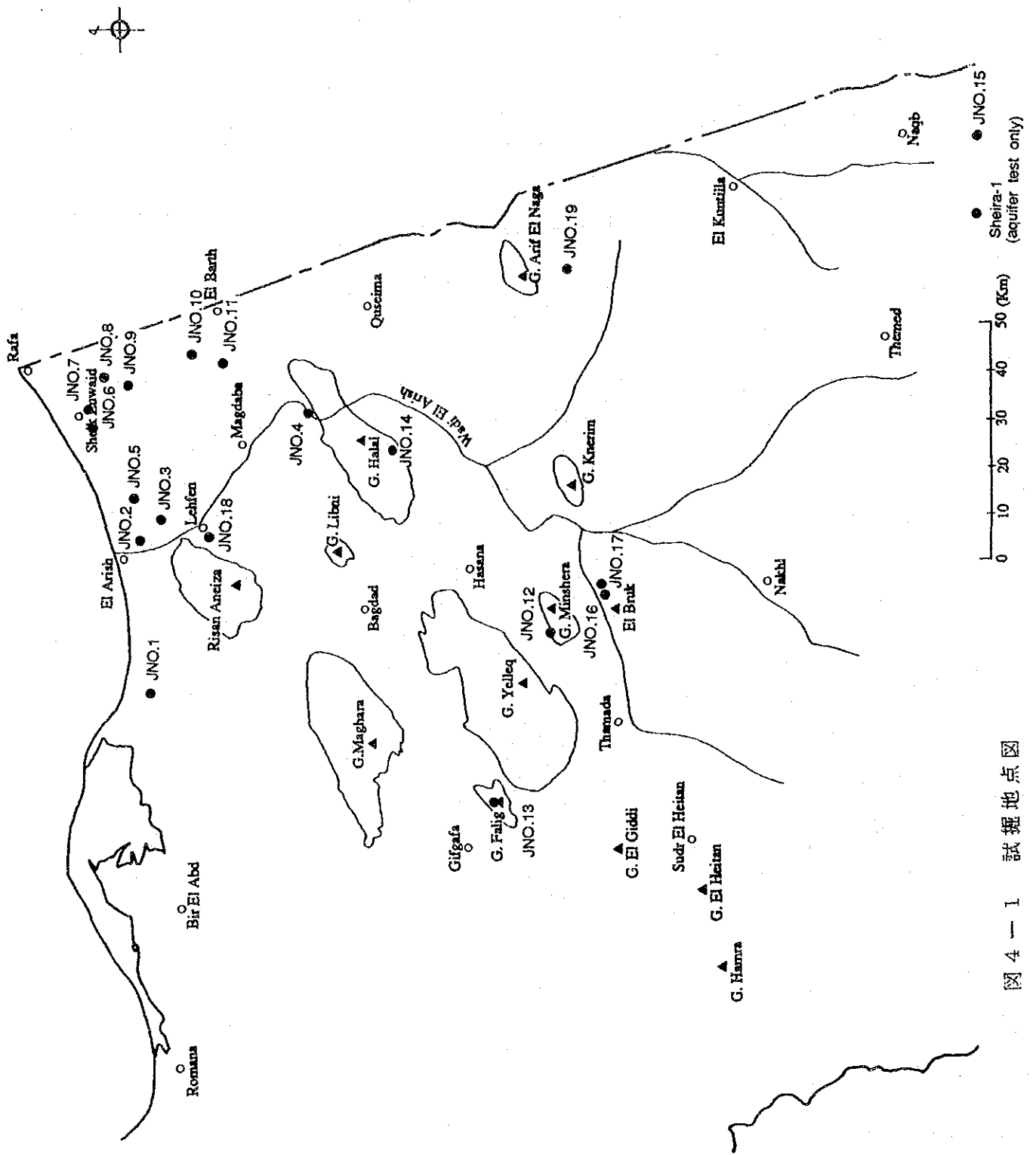


图 4-1 試掘地点图

5 地質概要

地層の層相、層序、分布、地質構造等は当該地域の水理地質学的構造を大きく支配する。したがって、これらの地質情報について水理地質学的観点から検討を加えた。以下、調査地域に分布する地層の概要を述べる。

5-1 先カンブリア系 (Precambrian)

調査地域の南東部のNaqb地域には先カンブリア系の古期岩類が分布する。岩相は花崗岩、片麻岩およびアルカリ流紋岩から成り、いずれも堅硬緻密である。

先カンブリア系は急峻な山地を形成し、他の新しい時代の地層が造る地形と景観を大きく異にしている。

5-2 古生代 (Paleozoic)

古生代の地層は南シナイのUmm Bogma山地地域に分布している。岩相は砂岩を主体とし、石灰岩を伴っている。層厚は中央シナイで600mに達している。

5-3 中生代 (Mesozoic)

5-3-1 三疊紀 (Triassic)

三疊紀の地層はArif El-Nagaのドーム構造の中心部にのみ分布する。この地層は下位から順に次の5つの層に区分される。

- 1) The Lowermost Formation
- 2) The Overlying Formation
- 3) Gevanim Formation
- 4) Sharonim Formation
- 5) Mashabba Formation

北シナイ地域は三疊紀を通して浅海の環境下にあったと推定される。この環境は北東部にあったテーチス海の支配下にあったものである。この期間に堆積物はテーチス海の縁辺部の潮間帯やデルタに堆積した。

5-3-2 ジュラ紀層

ジュラ紀の地層は調査地域のドーム構造地域に分布する。下部から上部までの連続した露頭はMaghara地域で観察される。全層厚は2,000mに達し、6つのグループに区分さ

れる。

上部ジュラ紀

1) Masajid Formation

中部～下部ジュラ紀

2) Safa Formation

3) Bir Maghara Formation

4) Shusha Formation

5) Rajabiah Formation

6) Mashabba Formation

これらの地層は砂岩、頁岩、石灰岩等から成っている。

5-3-3 白亜紀

5-3-3-1 下部白亜紀

調査地域の下部白亜紀層は、Malha Formationで代表される。これは、ジュラ紀の地層を不整合に覆い、上位のCenomanianのGalala FormationおよびRaha Formationに整合に覆われる。しかしながら、調査地域の下部白亜紀層には最上位に頁岩層を欠いているため不整合であるという意見もある。

層相は石英質砂岩を主体とし、頁岩を挟在することがある。調査地域北部では層相が砂岩相から石灰岩相に変化し、Risan Aneiza Formationと呼ばれるようになる。

本層に関する詳細な報告は限られているが、イスラエル(1980)やCONOCO(1989)の地質図によってドーム構造の中心部に分布することが知られている。

本調査では砂岩層の詳細な層相、層序および水理地質学的特性を明らかにするために、Naqbを含む9地区の11地点で詳細な地質柱状図を作成するとともに、粒度組成分析のための試料を採取した。

下部白亜紀砂岩層の層相は次に示す通りである。

- 1) 大部分が中粒～粗粒で多孔質の砂岩が卓越する。
- 2) 斜交層理がしばしば発達する。
- 3) 時折、頁岩を挟在する。その層厚はほとんどが10m以下であるが、Halalでは最上位から150mの層厚を有している。頁岩の量は調査地域の北部で多く、南部に向かうに連れて少なくなる。

- 4) 調査地域南部のNaqb地域では頁岩に替わって、亀裂に乏しい泥岩が分布する。
- 5) 下部白亜紀砂岩層は調査地域全体を通して多孔質な層相を呈している。

5-3-3-2 上部白亜紀層

シナイ半島の上部白亜紀層は下位から順に次の3つの階に区分される。

- 1) Cenomanian
- 2) Turonian
- 3) Senonian

Cenomanianの地層は下部白亜紀層を整合に覆い、Turonianの地層に整合に覆われる。Turonianの地層はSenonianの地層に不整合に覆われる。TuronianからSenonian下部の一部の地層は地域によっては浸食によって一部あるいは全部が欠如していることもある。

Cenomanianの地層は石灰岩、ドロマイトおよび最下部の石灰質砂岩を主とした構成を成している。層厚は調査地域では345m～575mである。層厚が厚い地域はMinshera、Maghara、Hamra、Halal、Giddi等の山地およびWadi Khareizaである。一方、層厚が薄い地域はYelleq、Falig、Kherim、Arif El-Naga等の山地である。

Turonianはドーム構造の山地の山麓部に主として分布し、層相はCenomanianの層相とほぼ同じであるが、石灰岩は有孔虫が卓越している。

調査地域のSenonianは上部はチョークが、下部はマールが卓越する単調な層相である。Senonianの地層はTuronianを不整合に覆う。層厚が厚いのはMinshera地域である。

5-4 新生代

5-4-1 第三紀

5-4-1-1 暁新世 (Paleocene)

北シナイの暁新世の地層はEsna Formationと呼ばれる頁岩及びマールを主体とする地層で代表される。

上部白亜紀の終わりにはシナイには海進により海が広がり、Esna Formationはこの海の主要な構造的高地（ドーム構造の山地を主とする）の間に形成された低地に上部白亜紀層を覆って堆積したものである。

5-4-1-2 始新世 (Eocene)

始新世の地層は石灰岩とドロマイト質石灰岩から成るEgma Formationで代表されるが、他の始新世の地層を含んでいる可能性がある。

本層はHalal~Quseima地域・Arif El-Naga地域・El-Kuntilla~Themed地域にかけて暁新世の地層と同様の分布を示す。Quseima地域では本層に始新世の示準化石である貨幣石を含んでいるのが観察される。

本層はEsna Formationを整合に覆っている。

5-4-1-3 漸新世 (Oligocene)

漸新世の地層は沖合いの石油試掘井において記録されているのみで、北シナイ地域においては報告されていない。したがって、本層は調査地域の水理地質構造に対して無関係である。

5-4-1-4 中新世 (Miocene)

CONOCO(1989)による地質図には中新世の地層は表現されていない。しかし、イスラエルが作成した地質図にはRisan Aneizaの南~南東地域に漸新世~中新世の地層が表現されている。このため、本調査において化石分析を実施したところ始新世の地層であるという結果が得られた。

試掘井に出現した中新世の地層は頁岩が卓越し、マール・石灰岩・砂岩を含んでいる。

5-4-1-5 鮮新世 (Pliocene)

Plioceneの地層は沿岸部や沖合いの石油探査井から報告されているのみで、調査地域に直接分布するという報告は無い。

5-5 第四紀 (Quaternary)

第四紀層は、砂、旧海浜砂(Old Beach Sand)およびkurkarから構成され、80-100mの層厚を有している。kurkarという名称は浅海に堆積した石灰質砂岩に対してつけられた名称である。kurkarは地中海沿いの海岸平野に分布している。

旧砂丘砂は細粒~粗粒砂から成り、部分的には砂岩となっており、礫層や粘土層を挟むこともある。層厚は20~60mであるが、上位の砂丘堆積物との境界を識別することは

困難である。これらの地層がkurkarを覆う地域では、不圧滞水層が形成されている。

砂丘は旧海浜砂を覆って海岸平野に広く分布している。所により礫層や粘土層を挟み、層厚は20～30mである。

5-6 地質構造

5-6-1 概要

北シナイの地質構造は、図 5-1に示すように、3つの主要なユニットに区分される。

- 1) Central Sinai Stable Foreland
- 2) North Sinai Strongly Folded Belt
- 3) North Sinai Foreshore Area

Ragabet El-Naam Faultは、上記1)および2)の地質構造を境する断層となっている。これらの地質構造は、調査地域内の水理地質構造に重要な関連をもっている(図 5-2参照)。

5-6-2 Central Sinai Stable Foreland

この構造はRagabet El-Naam Fault以南に広がる構造ユニットで、極めて緩やかな向斜構造が北へ向かって徐々に沈み込む構造を示している。この地域では、断層も見られるが全体としては穏やかな地質構造を呈している。本地域の南部は下部白亜紀砂岩層が露出する地域となっている。

5-6-3 North Sinai Strongly Folded Belt

本地域はRagabet El-Naam Fault以北の調査地域の広い範囲を占め、Syrian Arcと呼ばれる構造に支配されている。この構造地域は両プランジグ褶曲構造(ドーム構造)、スラスト、逆断層等の構造が発達する。

典型的な褶曲構造は、Maghara、Yelleq、Halal等の山地にみられる。また、小規模な褶曲構造は、Minshera、Arif El-Naga、Kherim、Falig等に見られる。

Ragabet El-Naam Faultは、調査地域東端のNaqbからSyrian Arc Zoneのフロント沿いに走り、西端のGebel Hamra南部に至っている。断層の南部側は上昇し、Naqb地域では先カンブリア紀の基盤岩が露出している。Naqb地域では、Ragabet El-Naam Faultは先カンブリア紀の基盤岩と、より若い地層との境界となっている(図 5-2)。

5-6-4 North Sinai Foreshore Area

本地域はNorth Sinai Strongly Folded Areaの北側に接している。この地域内では上部白亜紀層は前者に比較してより深いところに分布している。これを厚い第三紀層が覆い、さらに第四紀の砂丘砂がこの地域の大半を覆っている。

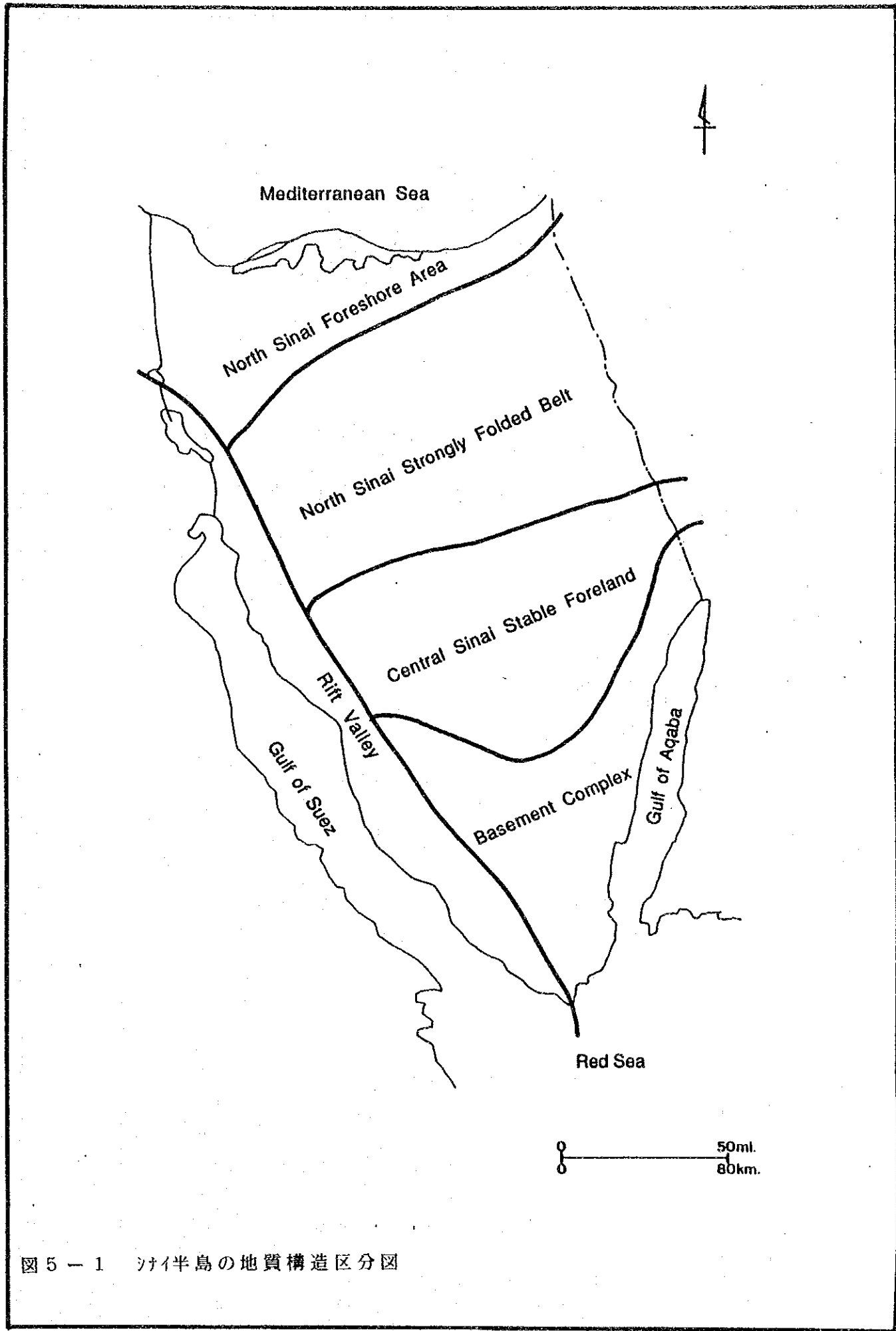


図 5 - 1 シナイ半島の地質構造区分図

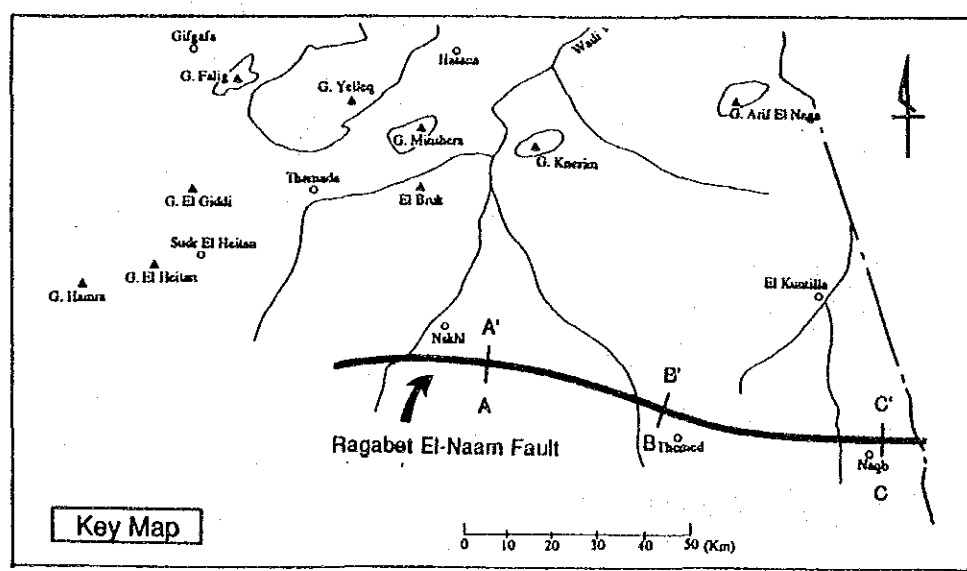
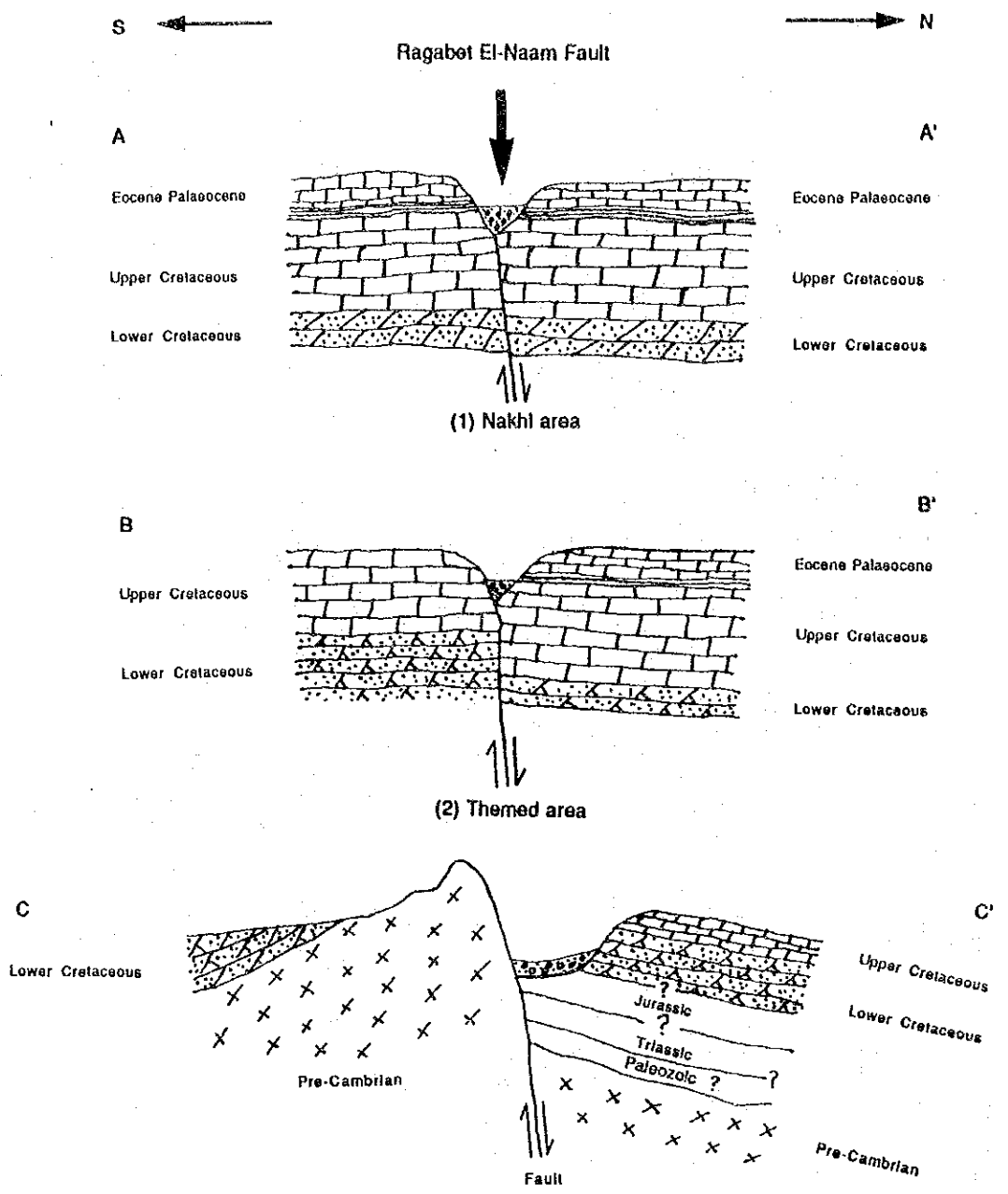


図 5 - 2 RAGABET EL-NAAM FAULT 沿いの模式地質断面図

6 主要対象帯水層の分布

6-1 概 説

対象帯水層を含む可能性のある主要地層の状況を明らかにするために、これらの地層についての解析が必要である。そのため、多くの地質柱状図や断面図の解析を行った。

第四紀層について利用できる地質柱状図は、Wadi El-Arish沿いのMagdaba周辺における柱状図のみである。したがって、第四紀層についての主要データ源は試掘井のデータと物理探査の解析結果である。

先第四紀層についての柱状図は、Minshera、Risan Aneiza、Arif El-Naga、Kherim、Wadi Khareiza、Umm Mafruth、Magdaba等の地域における地質柱状図が存在する。これらの柱状図に加えて、調査地域内の9地区で12本の地質柱状図を作成した。既設試掘井の柱状図についても、Composite Column作成のため解析を実施した。

6-2 第四紀層

第四紀層は調査地域内に広く分布する。なかでも、地中海に沿った海岸平野や、Wadi El-Arish沿いの沖積平野に主として分布する。Wadi El-Arishの上流地域では層厚が薄いため対象帯水層とはなり得ない。

対象帯水層を含む第四紀層の分布は、海岸平野に限られる。しかしながら、海岸平野のうち西部地域（El-Arish以西）では、地域の大半が厚い砂丘に覆われているため調査が困難である。

海岸平野のうち東側の地域は、多くの生産井や試掘井が存在する。図 6-1に海岸平野における試掘井の分布図を示す。

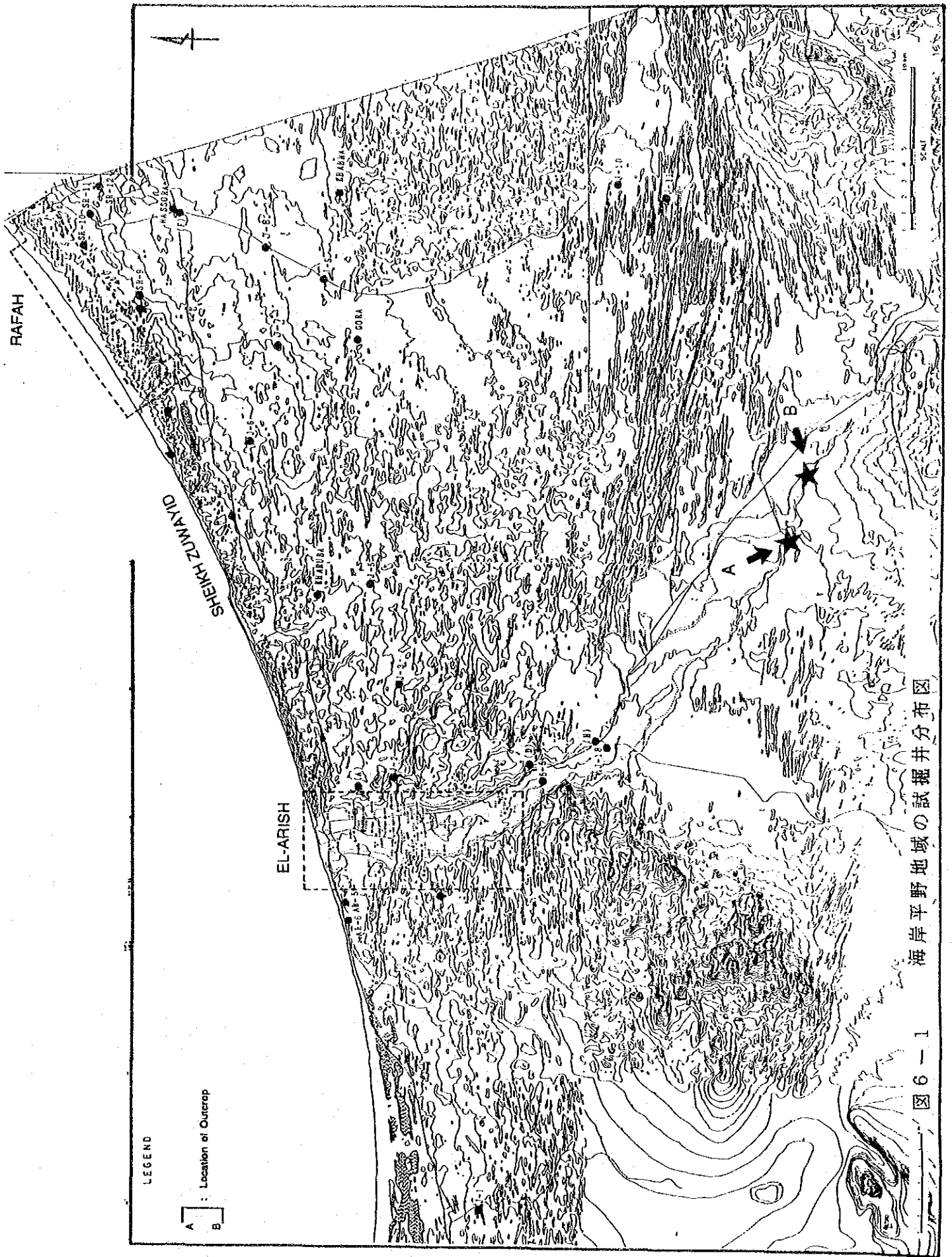
第四紀層はWadi El-Arish沿いの数カ所に露出するが、その最南端はMagdaba付近である。Magdabaにおける地質柱状図を図 6-2に示す。

井戸試料に基づく柱状図や電気探査結果から第四紀層の基底を図 6-3のようにまとめた。

第四紀層の基底の勾配には東西方向の急激な変化が、LehfenからRafahの10km南の地域にかけて見られる。これはこの地域に断層が存在することを暗示している。

海岸沿いに堆積盆地が形成された後沈降が生じ、このため、第四紀の基底は-60mより深くなっている。

第四紀層の等層厚線図を図 6-4に示した。第四紀層が厚い地域はWadi El-Arishから約20km東方からイスラエルとの国境へ向けて広がっている。その面積はおよそ800km²である。



海岸平野地域の試掘井分布図

図 6-1-1

LOCATION	Thickness (m)		LITHOLOGY	PERIOD	LITHOLOGICAL DESCRIPTION
A	5	1.5		Quaternary	Silty Sand (very fine)
		3			Medium Sand with Granule
		3.5			Fine Sand
		4.5			Clay
		5.5			Fine Sand with Granule
		6			Clay
		7			Medium and Fine Sand
		7.4			Sandstone (Medium)
		8			Sandstone (Fine)
B	10	10		Tertiary	Calcareous Conglomerate with shell fragments
		11			Calcareous Sandstone with Pebble ~ Granule
		11.5			Calcareous Sandstone
	15	15			Silt - Shale

图 6 - 2 地質柱状图 (露頭 A, B)

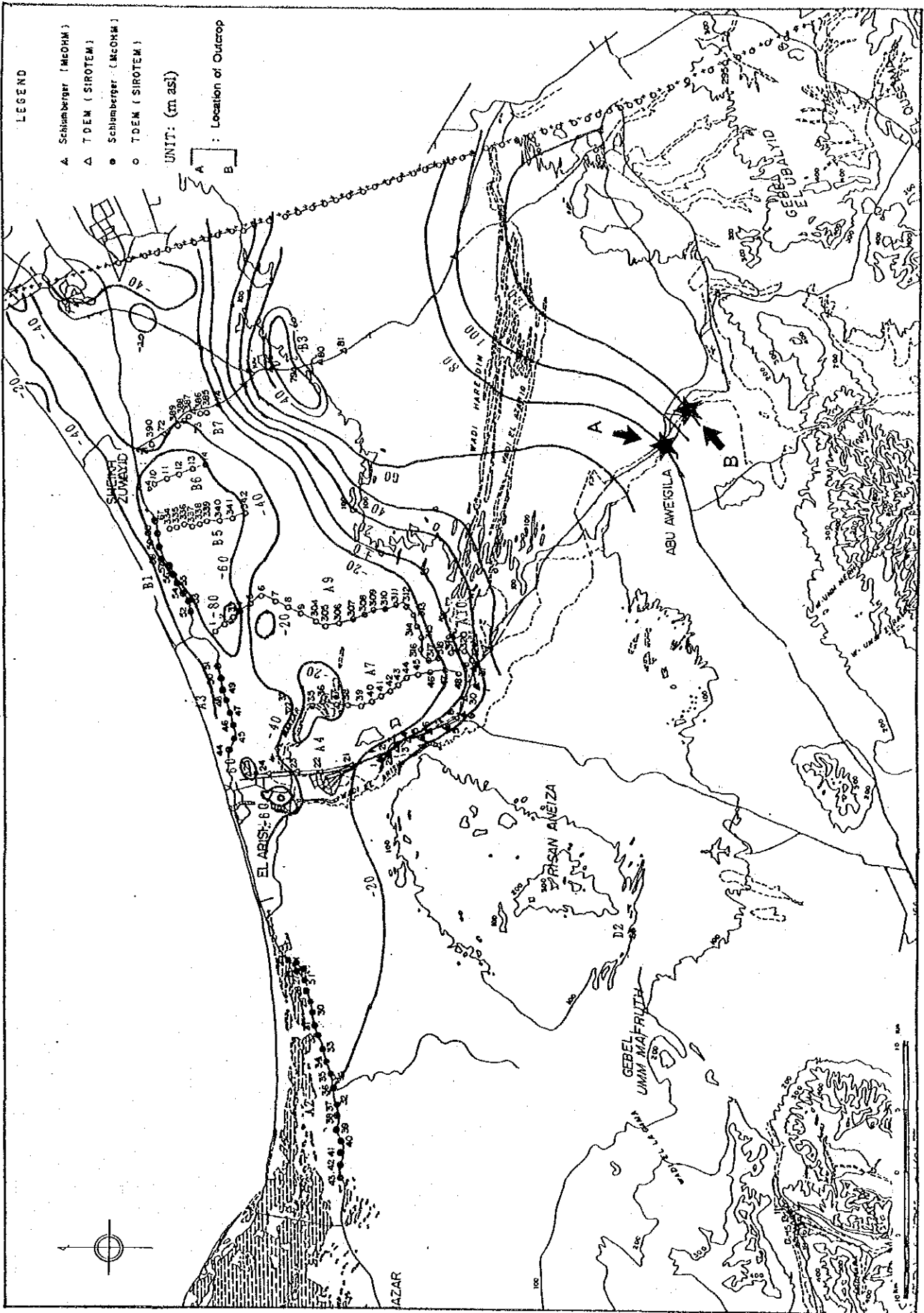


図 6-1-3 第四紀層基底図 (電気探査結果による)

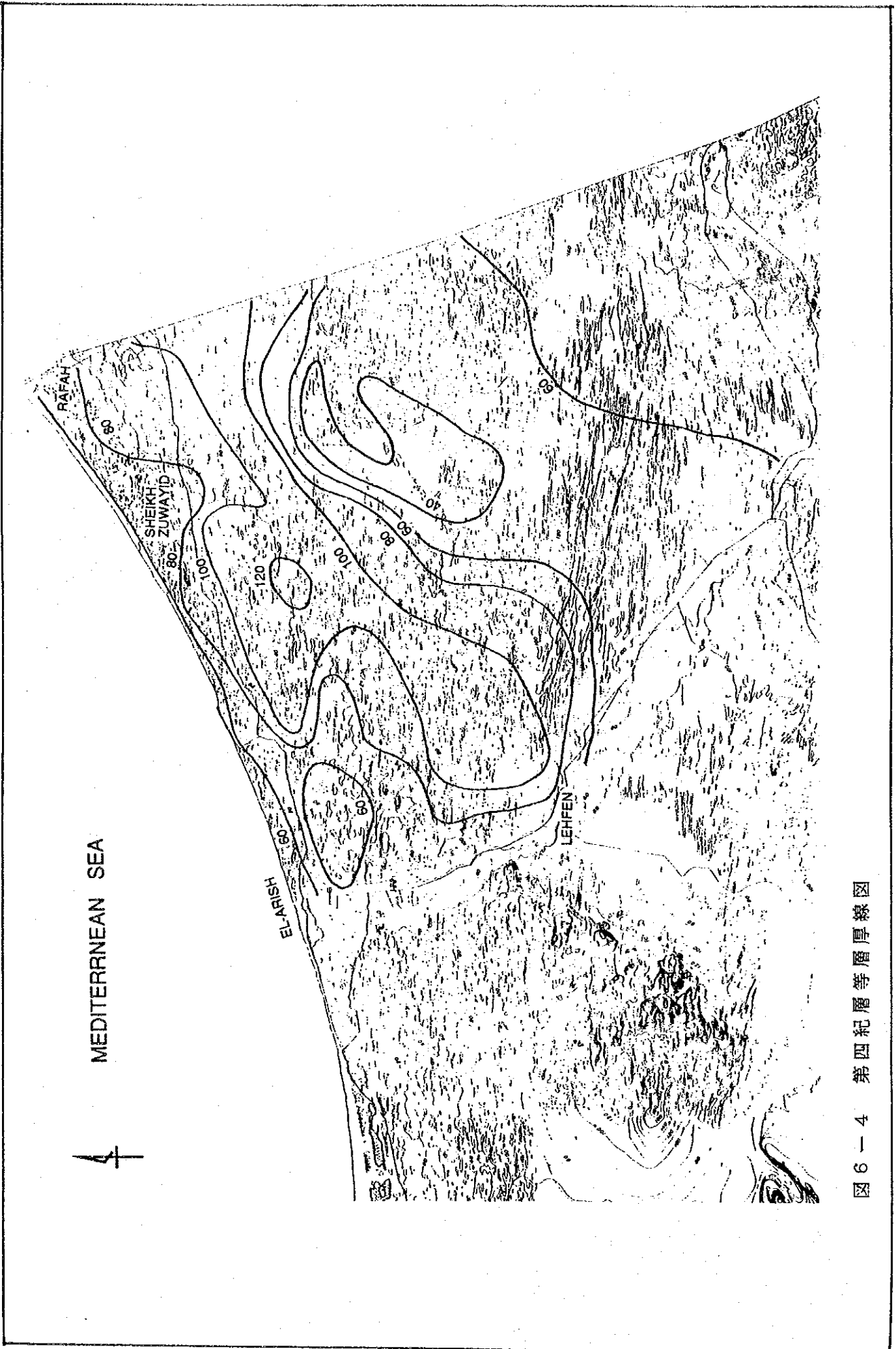


图 6-4 第四纪层等厚线图

6-3 先第四紀層

本調査の結果、調査地域内に分布する主な帯水層は次の時代の地層に出現することが判明した。

(1) 第三紀

中新世

始新世

(2) 上部白亜紀

Senonian

Turonian

Cenomanian

(3) 下部白亜紀

(4) ジュラ紀

上部ジュラ紀

中～下部ジュラ紀

水理地質図のポートフォリオとしてこれらの各帯水層について次に示すContour Mapを作成した。

(1) Isobath Map

Lower Cretaceous

(2) Top Surface

Upper Cretaceous

Lower Cretaceous

(3) Isopach

Lower Cretaceous

次に各ポートフォリオについて記す。

(1) Isobath Map of Lower Cretaceous

本図は下部白亜紀砂岩層の上面の深度を地表面からの深さで表現したものである。深度は概して調査地域の中央部の地域で深い傾向にある。すなわち、Hasana地域 800～1,000m、Nakhl付近 900m、Kuntilla付近 500～600m、Sadr El-Heitan付近 700～800mである。

(2) Top Surface of Upper Cretaceous

地表下の上部白亜紀層には明瞭な二つの谷地形が見られる。一つはNakhlからHasanaを

経てBagdadへ至る緩やかな谷地形である。二つ目はGifagfaから東北東へ流れBagdadへ至る谷地形である。両者はBagdadで合流した後、Gebel Risan Aneiza-Libniの間を抜け、北東に開きEl Arish東方へ至る。これらの谷の分布標高はNakhl付近で約400m、東方のEl-Kuntilla付近で約600m、西方のGifagfa付近で300M弱、谷が合流するBagdad付近で約100m、El-Arish東方で約-200mである。

(3) Top Surface of Lower Cretaceous

地表下の下部白亜紀層には上部白亜紀層と同様に明瞭な二つの谷地形が認められる。下部白亜紀砂岩層の上面の標高は、Nakhl地域で-400m、El Arishの東方地域で-900mである。

下部白亜紀層のコンターには個々の他断層の影響を受けたとみられる形態が認められる。その最大のものは、NaqbからNakhlへ向けて東西に走るRagabet El-Naam Faultの影響である。この断層沿いには垂直変位と水平変位とが認められる。東方のNaqb付近で最も変位が大きく数百Mに達しているが、Nakhl付近では極めて小さくなっている。この変位のためNaqb南方では断層を挟んで南と北の下部白亜紀層の連続性が絶たれている。

Minshera付近では山体の北部を東北東に走る断層があり、そのため分布標高にずれが生じている。Gifgafa付近では北西方向に走る断層のためGraben状の凹地が生じている。また、Hasana東方のTalet El-Badanでは山体の北部を北西～西北西に走る逆断層により、南側のLower Cretaceousが北側のCenomanianの上に乗っている。これらの断層により、Lower Cretaceousの連続性に地域的なずれが生じている。

Lower Cretaceousの層厚は調査地域の南部では約200～300mであるが、中・北部では厚くなる。特にHalal地域では、確認できるだけで約660mの層厚をもっている。

Ragabet El-Naam Fault以南ではSheiraにおいて確認された246mが唯一の層厚である。

7 水理地質

7-1 第四紀

7-1-1 水理地質構造

第四紀層が厚く堆積している地域が、Wadi El-ArishからRafahにかけての地中海沿いの海岸平野に分布する。このうち、El-Arish地域・Sheikh Zuwayid～Rafah地域においては第四紀層から盛んに揚水が行われている。

El-ArishからRafahにかけての地域の水理地質学的状況を示すため、図 7-1に模式断面図を示した。

kurkarは第四紀層の主要帯水層であるが、頁岩を主体とする先第四紀層を覆っている。この先第四紀層は所によって砂岩や石灰岩であることがある。

試掘井JNo.9においては、先第四紀層は頁岩に挟まれて砂岩と礫岩が出現する。この砂岩及び頁岩は、先第四紀層の浸食面に現れ、その上に堆積した第四紀層と接触していると考えられる。同様な条件は断面図G-G' (図 7-4)、H-H' (図 7-5)においても見られ、そこでは先第四紀の石灰岩が第四紀の帯水層と接している。これらの事実は第四紀の帯水層は先第四紀の帯水層と接していることを意味している。

kurkarの層厚は10～40mであるが、所によっては尖滅する。その例は、Rafah地域の海岸砂丘地帯にあるNo.11-11、No.11-20の井戸である。kurkarは南部地域では礫岩、砂岩等の他の第四紀の堆積物にとって替わられている。

kurkarは旧海岸砂丘砂に覆われ、旧海岸砂丘砂は現世の砂丘に覆われている。旧砂丘砂と現世の砂丘砂との境界は概して不明確である。泥質堆積物と礫質堆積物とはお互いに共存し、層厚は地域によって様々である。kurkarが厚い粘土に覆われる地域では被圧帯水層が形成されている。

海岸付近の地下水位は、1～2m ASLであるが、分布の南限地域では4～5m ASLであると推定される。kurkarの分布標高と地下水位を比較すると、kurkarは分布の南限地域においてはdryであると考えられる。

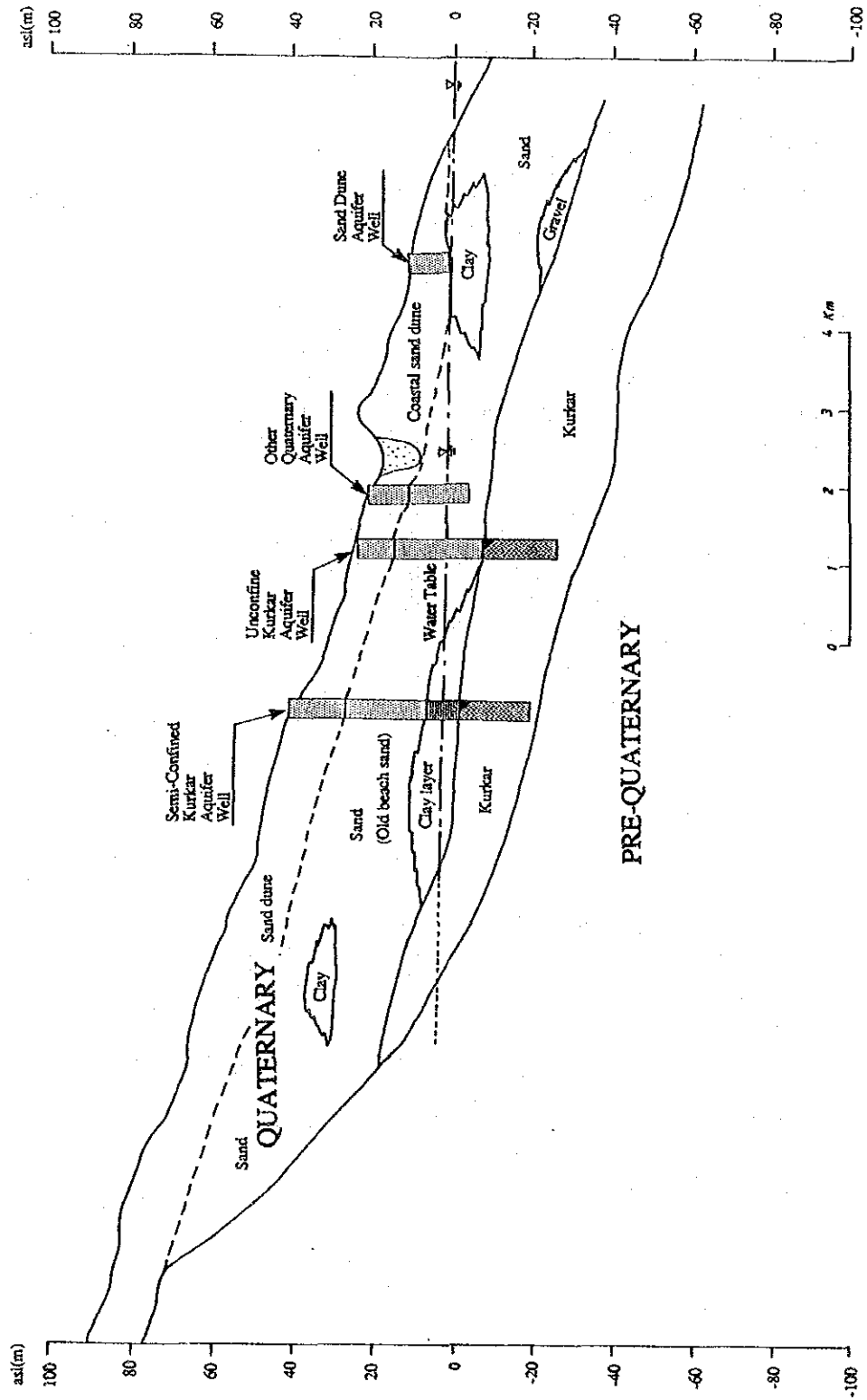
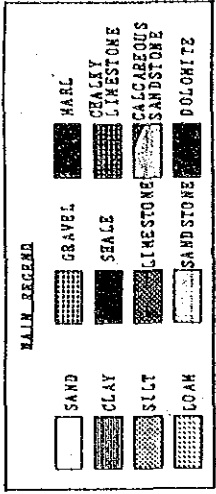


图 7-1 第四纪模式断面图 (海岸平野)



图 7-2 地质断面图位置图

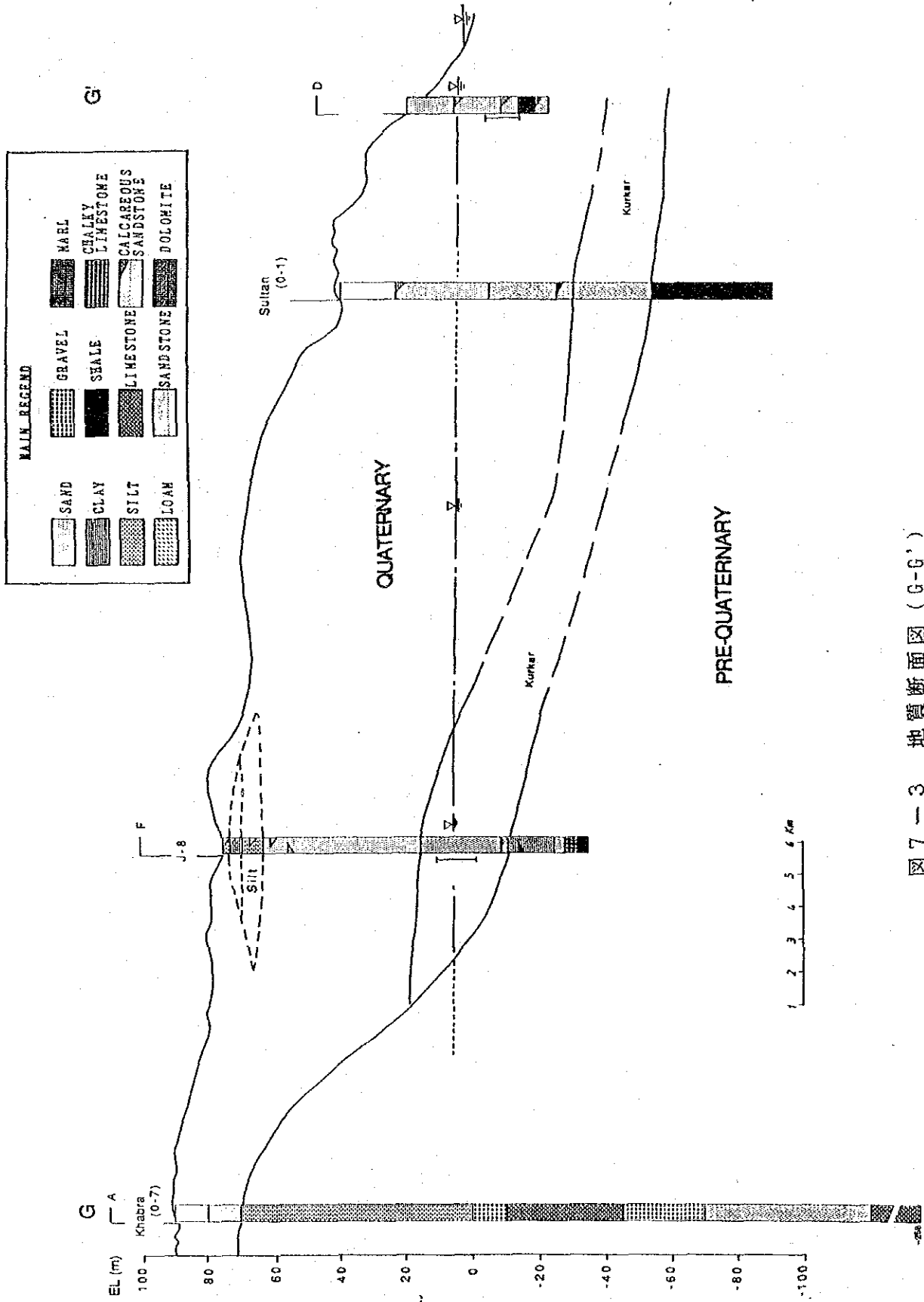


图 7-3 地质断面图 (G-G')

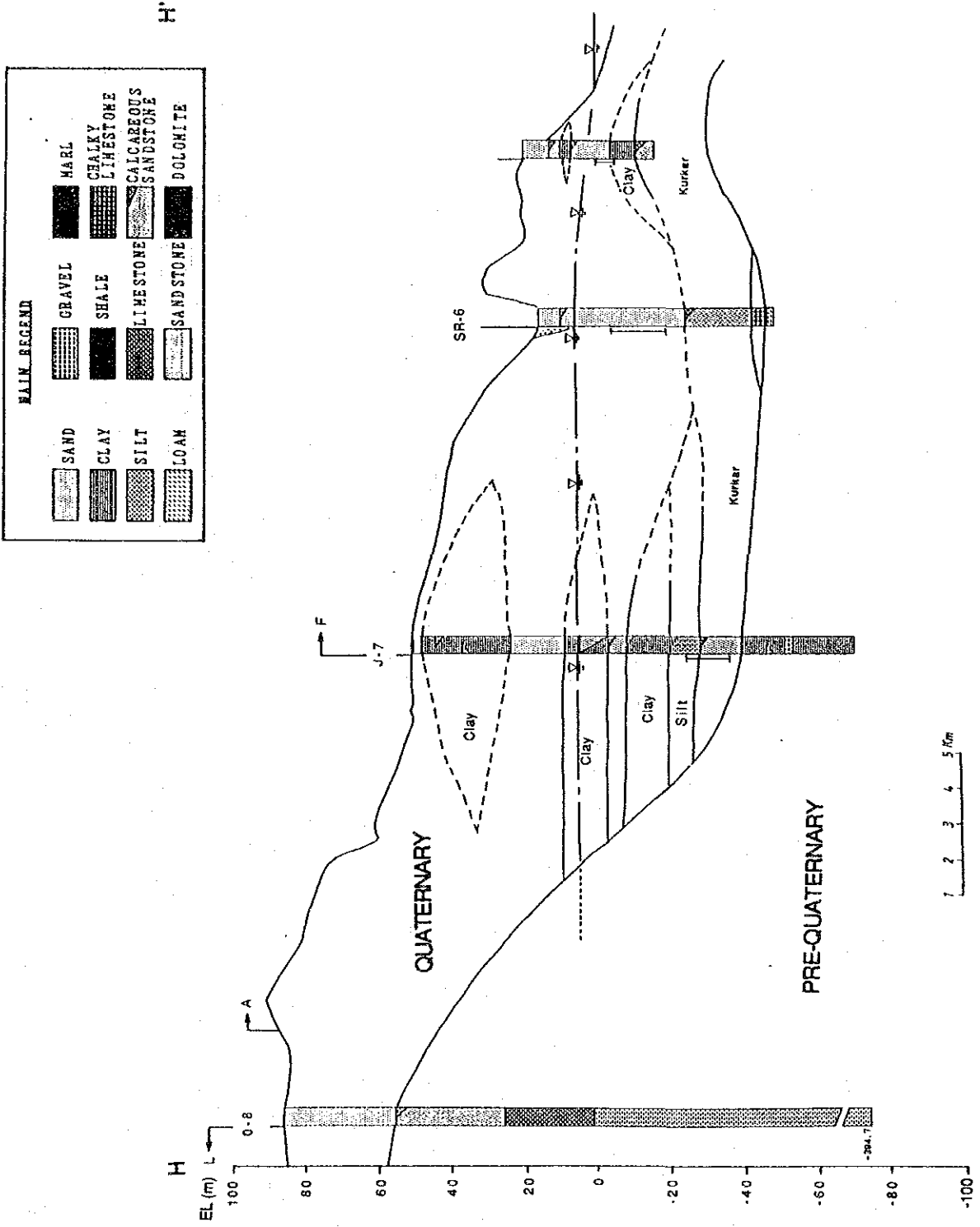


图 7-4 地质断面图 (H-H')

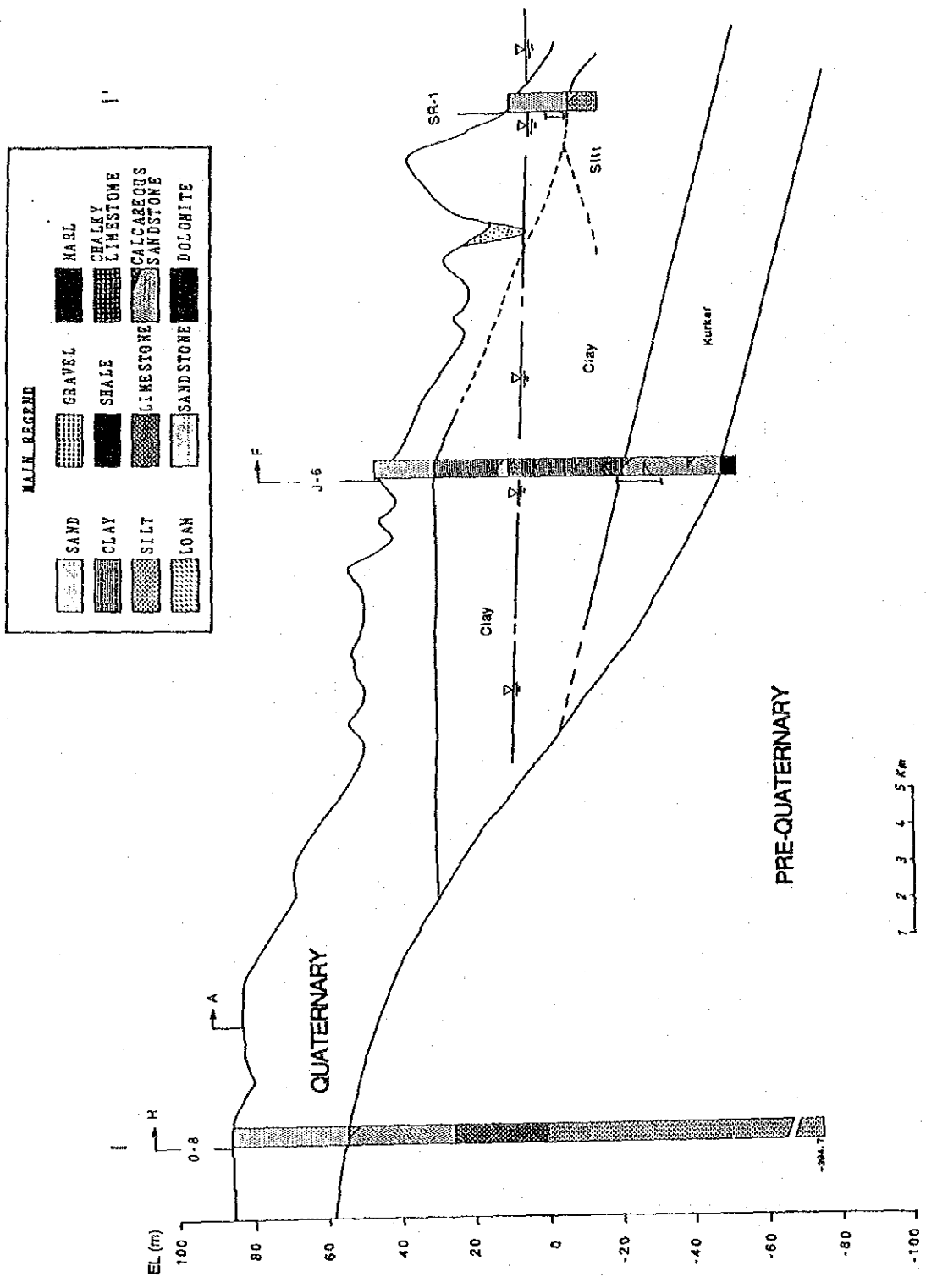


图 7-5 地质断面图 (I-I')

7-1-2 第四紀帯水層の水質

地下水の高塩分濃度は調査地域全域にわたる問題である。地下水の塩分濃度に影響を及ぼす可能性については、古い塩分濃度の高い地下水との混合あるいは海水の浸入という2つの可能性が考えられる。これは、先第四紀の地下水の塩分濃度が高いこと、および第四紀の帯水層が地中海に面して分布していることによる。

海水の浸入の可能性について検討するため、および地下水の化学的性質を比較するために、 $(Na^+ + K^+) / (Ca^{++} + Mg^{++}) = R_{0.00u}$ および Na^+ / Cl^- の当量比を求めた。その結果、第四紀の地下水の高塩分濃度は、kurkarあるいは先第四紀帯水層中の高塩分濃度の地下水との混合によるものであると推定された。

また、第四紀の地下水の年代測定結果は、1,700~8,600年以前となっており古い地下水の影響が大部分を占める可能性が高いことを示唆している。

調査地域には砂、礫、kurkarといった異なったタイプの帯水層が存在することは明らかであるが、それらの各帯水層毎の水質の特徴を区分することは困難である。

各帯水層毎のTDS値の範囲を次に示す。

帯水層	TDS値 (ppm)
海岸砂丘	300~ 800
内陸の砂	2,500~3,000
旧海浜砂	1,300~2,700
礫	1,500~5,000
kurkar (El-Arish)	2,500~3,500
kurkar (内陸部)	3,600~5,600

海岸砂丘地域の帯水層の地下水のみが唯一飲料水として適している。その典型的な例が図 7-5におけるSR-1の井戸である。

7-1-3 第四紀帯水層の水位

Wadi El-Arish下流域の沖積平野およびSheikh ZuwayidからRafahにかけての海岸平野には数多くの井戸が存在するために、水位のデータは豊富である。しかしながら、異なったタイプの帯水層が狭い地域に分布し、その各々から揚水しているため、観測された地下水位は異なった帯水層の地下水位を示している可能性がある。このため、平均的な地下水位の状況を把握するために、調査地域に1kmのメッシュをかけて検討を行った。

1962年にはEl-Arish地域の地下水位は、一部に例外はあるが2~4mの範囲にあった。これを図 7-6(A)に示す。

1980年代には、多くの井戸が建設され、揚水量も飛躍的に増大した。それにつれてEl-Arish地域の地下水位は図 7-6(B)に示すように低下した。

1962年から1988年の間に生じた地下水位の低下は顕著で、特にEl-Arishの西部地区で大きくほとんどのメッシュで1~3mの低下を来している(図 7-7)。

Sheukh ZuwayidからRafahにかけての地域には適当な時間間隔での比較できる地下水位のデータが無いが、地下水位は過剰な揚水のため大きく低下したことが予想される。海岸に極めて隣接した地域では、地下水位は極端に低いグリッド7-9および17-2を除いて海水準よりわずかに高い程度である(図 7-8)。

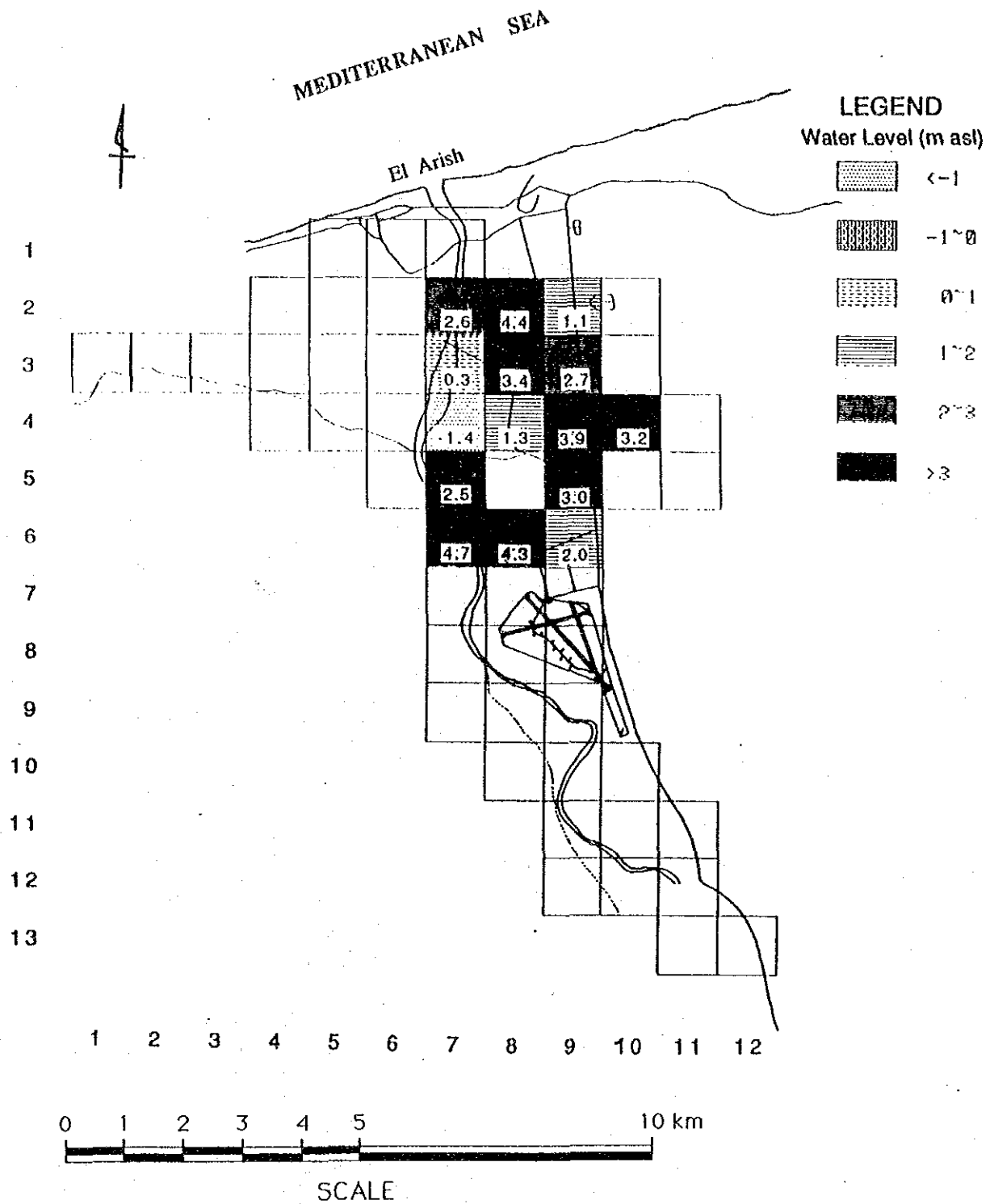


图 7-6 (A) 平均地下水位 (EL-ARISH : 1962年)

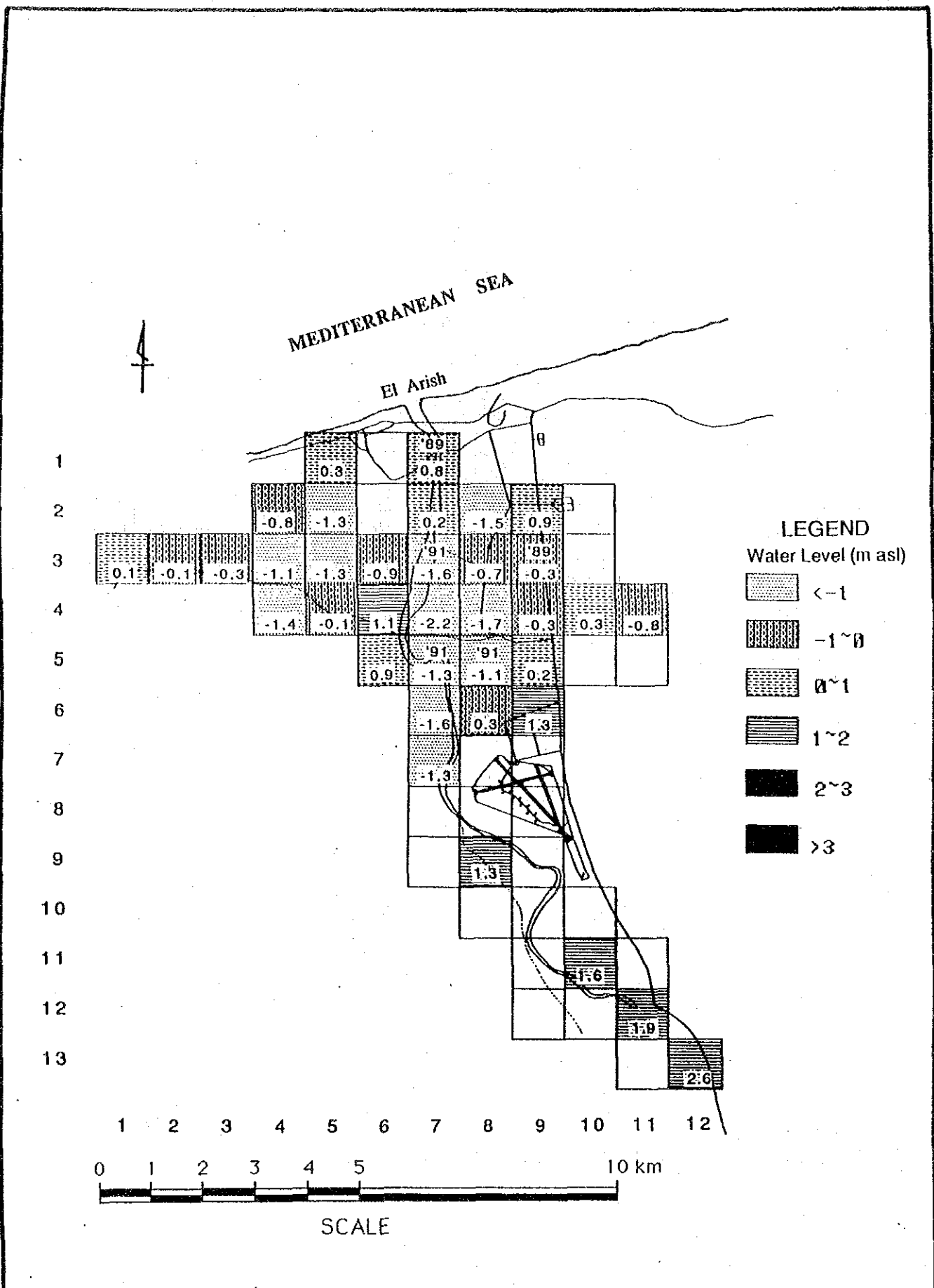


图 7 - 6 (B) 平均地下水位 (EL-ARISH : 1988年)

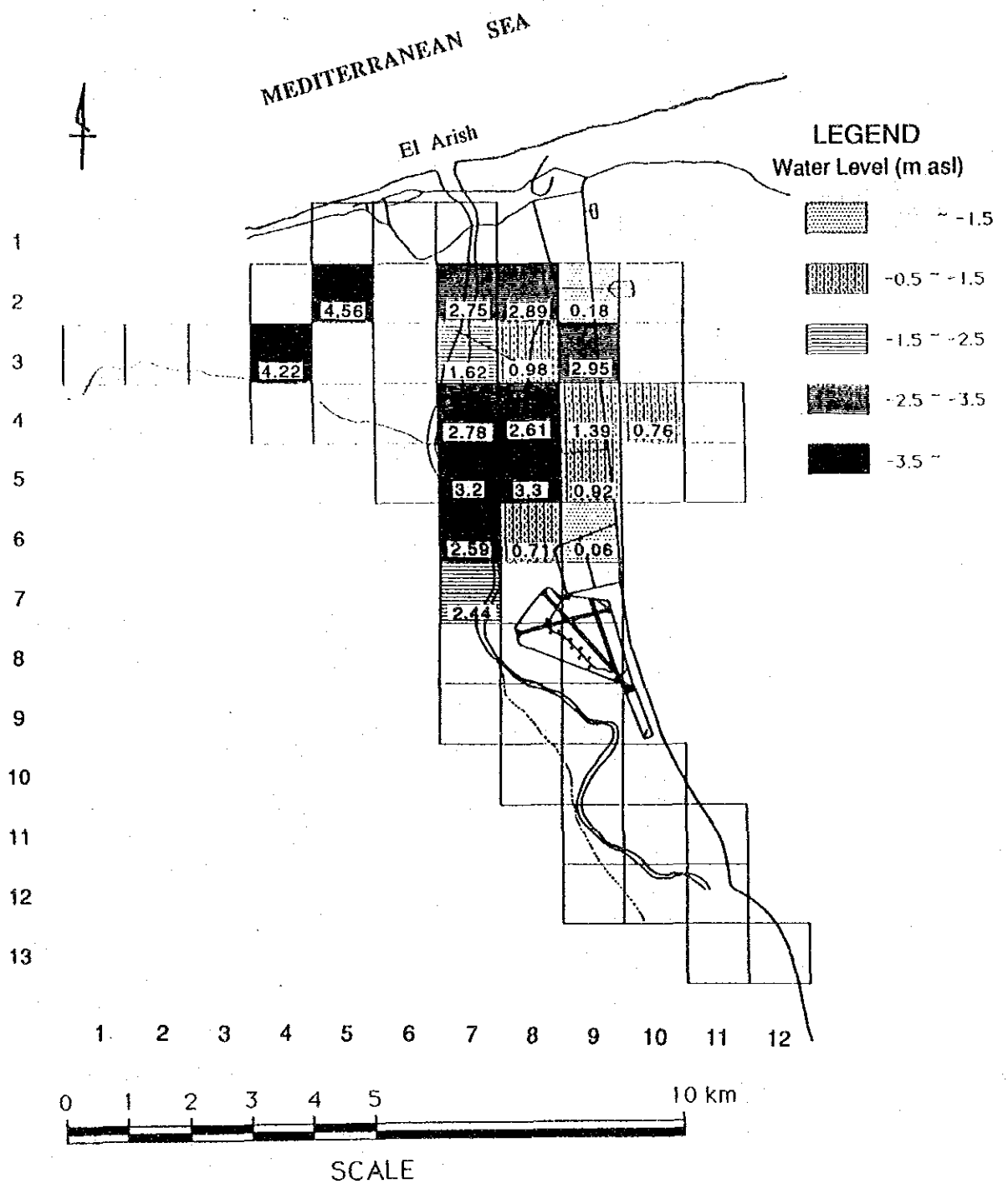


図7-7 地下水位の低下量 (EL-ARISH : 1962年-1988年)

LEGEND

Water Level (m asl)

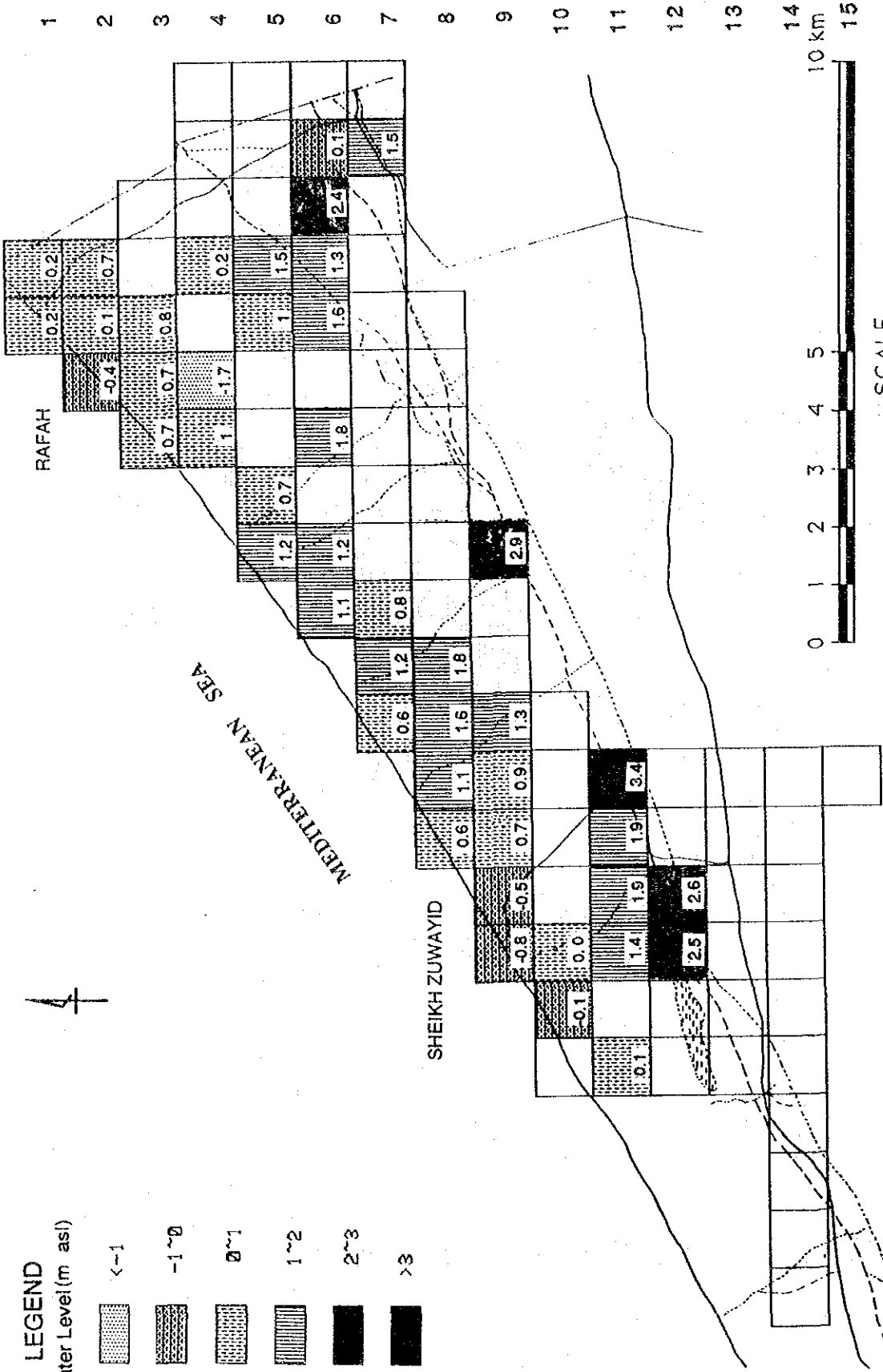
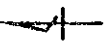
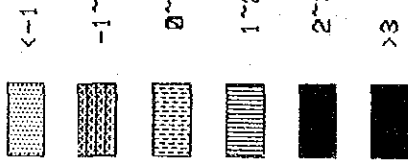


图7-8 平均地下水位 (SHEIKH ZUWAYID-RAFAH : 1988年)

7-2 第三紀

7-2-1 概説

第三紀の地層のうち、調査地域の水理地質に関連があるのは中新世・始新世・暁新世の各地層である。鮮新世及び漸新世の地層は地中海沿いあるいはその沖合いの石油試掘井によって捉えられているのみで、調査地域内では確認されていない。

7-2-2 中新世 (Miocene)

中新世の地層は、調査地域北部のCoastal Foreshore Areaに主として分布している（図7-9参照）。層相は、頁岩あるいは粘土を主とし、砂岩及び石灰岩を挟在している。これらの地層は一般に砂丘堆積物やその他の第四紀堆積物に覆われており直接地表に露頭として表れることは少なく、一部で砂丘堆積物の間に小規模な露頭が分布することがあるといわれているのみである。。

中新世の地層で帯水層となっているのは、石灰岩および砂岩である。これらは、いずれも頁岩に挟まれて分布している。石灰岩と砂岩とはお互いに、不透水層の頁岩によって水理地質学的に分離されているため、互いに独立した帯水層を形成している。

Coastal Foreshore Areaにおいては砂岩および礫岩は帯水層としての性質を有している。

水質（TDS）は、Rafa南部の3,450ppm（JNo.9）が良い方で、Magdaba近傍のMisri-1においては、は10,450ppmと極めて高くなっている。これらの状況から判断すると、中新世の帯水層は石灰岩及び砂岩ともに水質は良くないといえる。

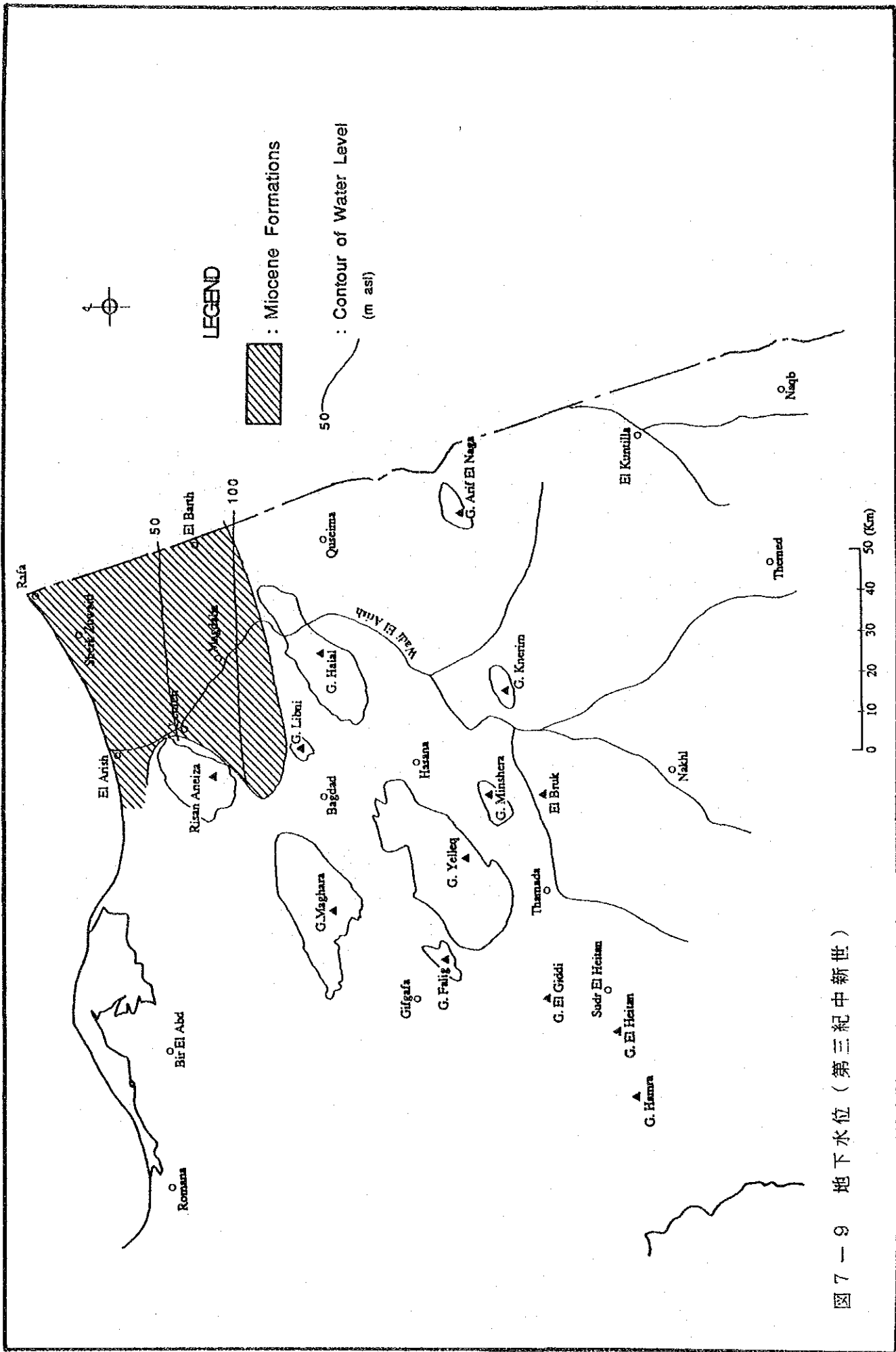


图 7-9 地下水水位 (第三纪中新世)

7-2-3 始新世 (Eocene)

始新世の地層は、貨幣石を特徴的に含む石灰岩及びチョークが発達する。分布地域は、Risan Aneiza～Maghara以南の広い地域である。

始新世の地層で帯水層となっているのは、石灰岩のみである。チョークも一般に 10^{-5} 程度の透水係数をもっているが、これを帯水層とした井戸は調査地域ではみられない。始新世の石灰岩は下位の暁新世の頁岩を不透水性の基盤として、これとの境界面付近に賦存されるという水理地質学的特性を有している。この特徴は井戸 (No.83 EL Mewaleh Well No.1) においても、Ain Gudeiratのような湧泉においても共通していると言える (図 7-10)。Ain Gudeiratは、1,440ppmの水質の地下水を1,500m³/dayの割合で湧出している。

帯水層となっている石灰岩自体の空隙率は高くないようであるが、石灰岩中にみられる裂かを通して地下水の流動が行われているものと考えられる。

始新世の地層は、調査地域の南部に大きく分布を広げている。この地域では始新世の石灰岩が大規模な台地の主要な構成地層となっている。これらの台地はWadiによって深く刻まれているが、始新世の石灰岩は良好な帯水層である可能性がある。これらの地域における始新世の石灰岩の層厚は200～300mであると推定され、下位に頁岩が存在している。したがって、これらの地域において石灰岩の帯水層としての評価を行うために、数本の試掘を行うことが望まれる。

Ain Gudeiratにおいて採取した地下水のC-14年代は、14,100Y.BP(Gak-14806)という年代が得られている。したがって、始新世の地下水は更新世に涵養された化石地下水と見なされる。

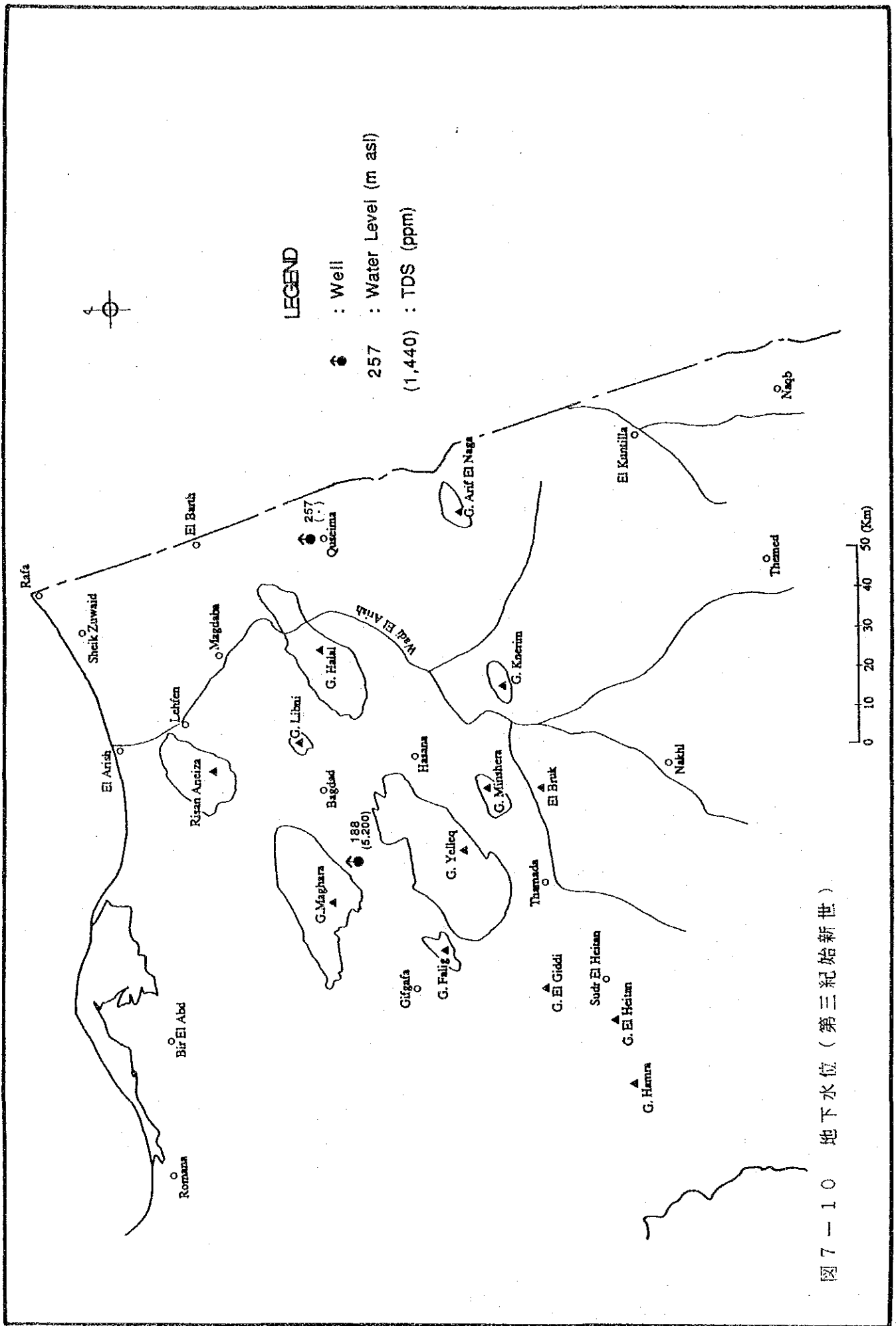


图 7-10 地下水位 (第三纪始新世)

7-2-4 暁新世 (Paleocene)

北シナイの暁新世は、マールを含むこともあるが主としてEsna Formationに代表される頁岩相から成る。層厚は数M~数十mであり、水理地質学的には完全な不透水層である。このことは、前述した始新世の石灰岩が本層を不透水層として境界付近が帯水層となっていることから窺える。本層が分布しない地域では上位の始新世の地層は不透水性基盤を持たず帯水層としての成立条件を欠くことになる。したがって、本層が下位に存在することが始新世の石灰岩が帯水層として成立する条件となっている。

7-3 上部白亜紀

7-3-1 Senonian

Senonianに到達した井戸で実際に水位が確認された井戸は調査地域内で4本ある。その地域は、Hasana、Libni、Gifgafa南方の各地域である(図7-11)。

水位は、Hasana付近で107m、Libni付近で58mと北へ向かって低下している。この間の水頭勾配は約2/1,000である。

水質(TDS)の範囲が大きく変化すること(2,200~8,480ppm)がSenonianの地下水の特徴である。Senonianの地層にはかん度の高い水が堆積時に取り込まれ、その後の涵養により塩分濃度が薄められたものであるが、その度合は帯水層中を通過する水の量によって変化すると考えられる。石灰岩中で裂かや節理が発達した部分では地下水はかんどの高い元々の地下水の塩分濃度を容易に薄めることができる。しかしながら、透水性が低い部分では地下水の流動が小さく、地下水の塩分濃度は高いままに保たれることになる。

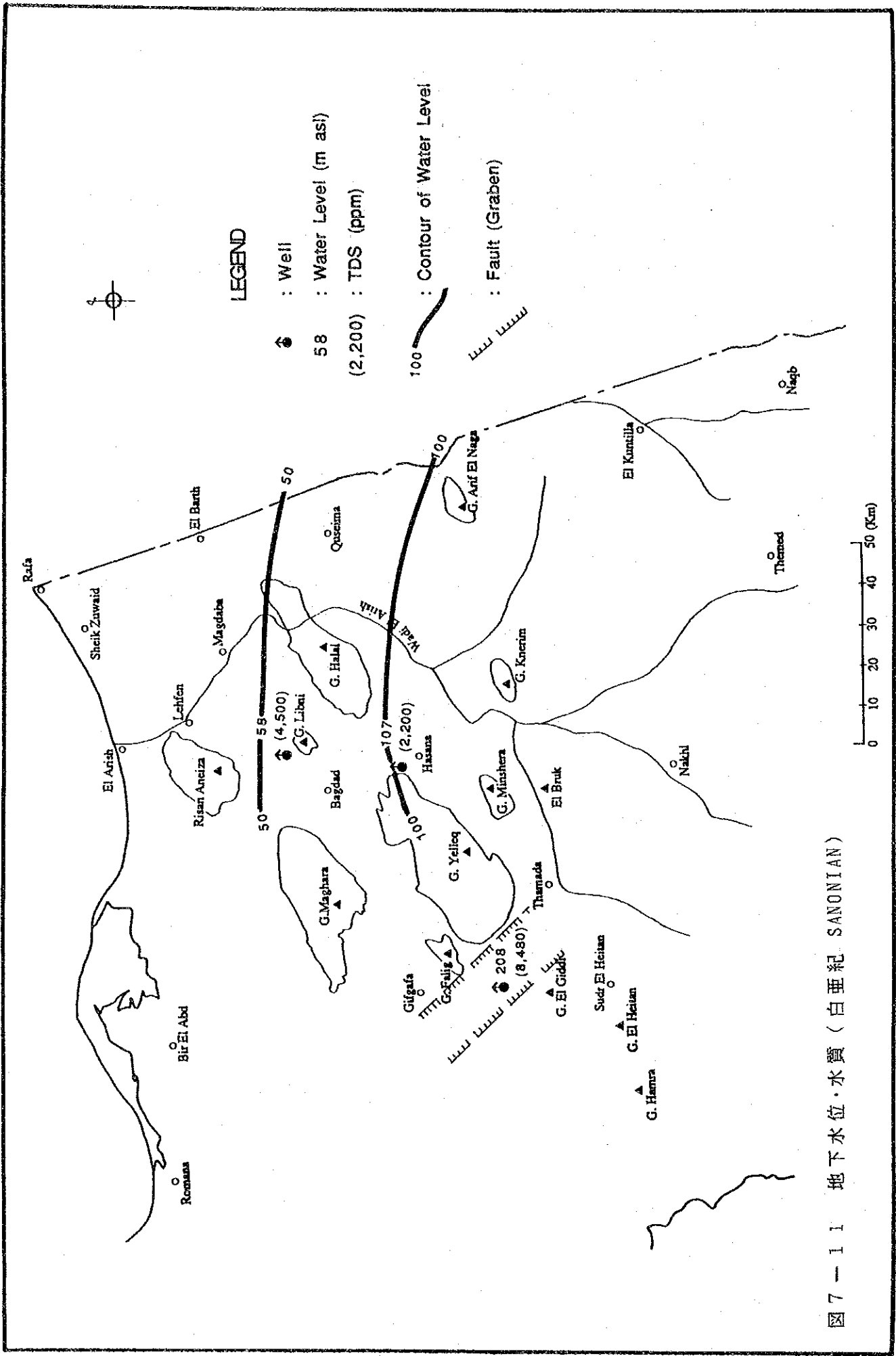


图 7-1-1 地下水水位·水质 (白垩纪 SANONIAN)

7-3-2 Turonian

Turonianは、貨幣石を豊富に含む石灰岩を主体とし、基底に頁岩が出現する。Turonianの地層のうち帯水層となっているのは、石灰岩のみである。Turonianを帯水層とする井戸は、Hasana、Naqb、Sheiraの3地域に見られる(図 7-12)。これらのうち、NaqbとSheiraの2本はRagabet El-Naam Faultを挟んで北と南に位置している。

水位は、Naqbで290m ASL、Sheiraで679m ASLであり、断層を挟んで水位は大きく異なっている。このことはRagabet El-Naam FaultがNaqbとSheiraの両地域の間でダムのような機能を果たしていることを示している。

水質は、断層の南側のSheiraで1,100ppmと極めて低いのに対して、北側のNaqbで35,000~40,000ppmとほぼ海水に匹敵するTDS値を示している。

シナイ半島の中央部では、南から北への地下水の流動が、断層によって阻害されるという一般的な傾向が認められる。中央シナイを東西に走るRagabet El-Naam Faultはこの地下水流動に対するバリアーとなっている。このような水理地質学的条件は地下水を断層の南側に貯留する条件を造り出している。

このような条件の下に、南部から北部への地下水流動は断層によって制限されるため、断層の北側の地下水は高い塩分濃度を保持しているのに対して、南側の地下水は涵養された地下水によって塩分が希釈される可能性が高いと言える。

JNO.17において採取した地下水のC-14年代は、22,670Y. BP(Gak-15949)という結果がでている。

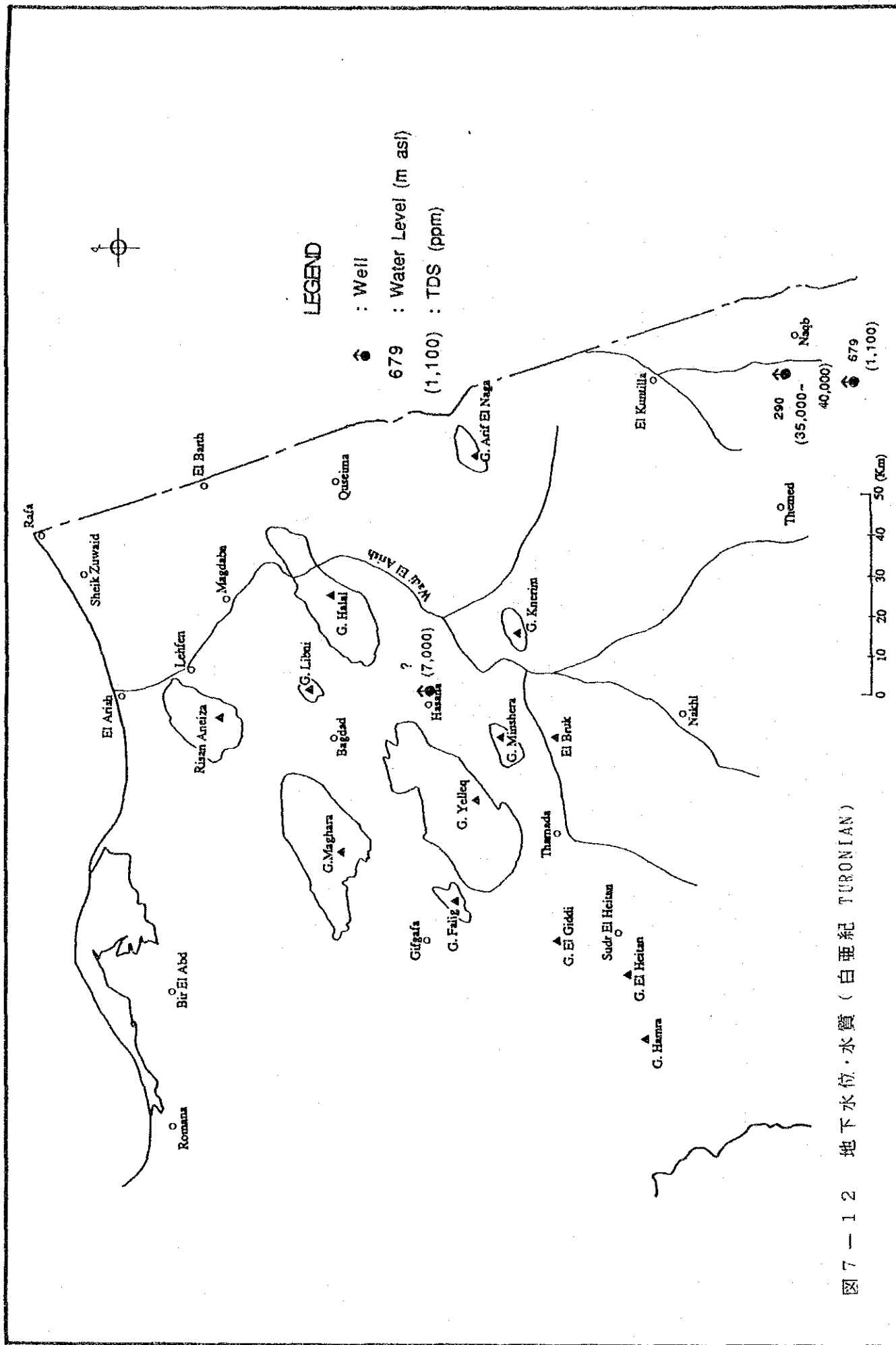


图 7-1-2 地下水水位·水质 (白垩纪 TURONIAN)

7-3-3 Cenomanian

Cenomanianの地層は下部白亜紀との境界となる基底は石灰質砂岩であり、その上位は石灰岩、ドロマイトおよびドロマイト質石灰岩が卓越している。Cenomanianの地層は、ドーム構造地域など上位の地層が浸食を受けて削剥された地域以外では直接地表に分布せず調査地域のほぼ全域で上位の地層に覆われている。

石灰岩は多孔質な部分は少ないが、カルスト状の空洞や裂か・節理が発達することがあり、全体としては透水性を有するものと考えられる。しかしながらこれらの透水性を促進するような特徴は地域的に不均質に発達するため、石灰岩の帯水層の不均質性を示唆する。

Cenomanianを帯水層とする井戸は調査地域内で5本が確認できる。帯水層までの深度はJNo.17が138mで最も浅い。他は、400m(P1 Gifgafa)~818m(P16 El-Amro)と深い。JNo.17が浅いのは、EL BRUK地域は緩やかなドーム構造を形成しており、この構造内で掘削したためCenomanianの深度が浅くなっているものと考えられる。

水位(m ASL)は、南から北へ向かって低くなる。すなわち、El-Brukでは223m、Hasanaでは169mである。

水質は、2,743ppm(Hasana)~5,628ppm(El-Bruk)であり、HasanaのNO.57Aの井戸以外は概して良くない。HasanaではNo.57Aの井戸から約10km離れた地点にUNICEFの井戸があるが、水質は4,120ppmと悪い。Cenomanianの水質の変化は帯水層となっている石灰岩中の節理や亀裂の発達が不均質であり、このため堆積時に取り込まれた海水が十分に新しい地下水と置換されない部分が存在することによるものと思われる。

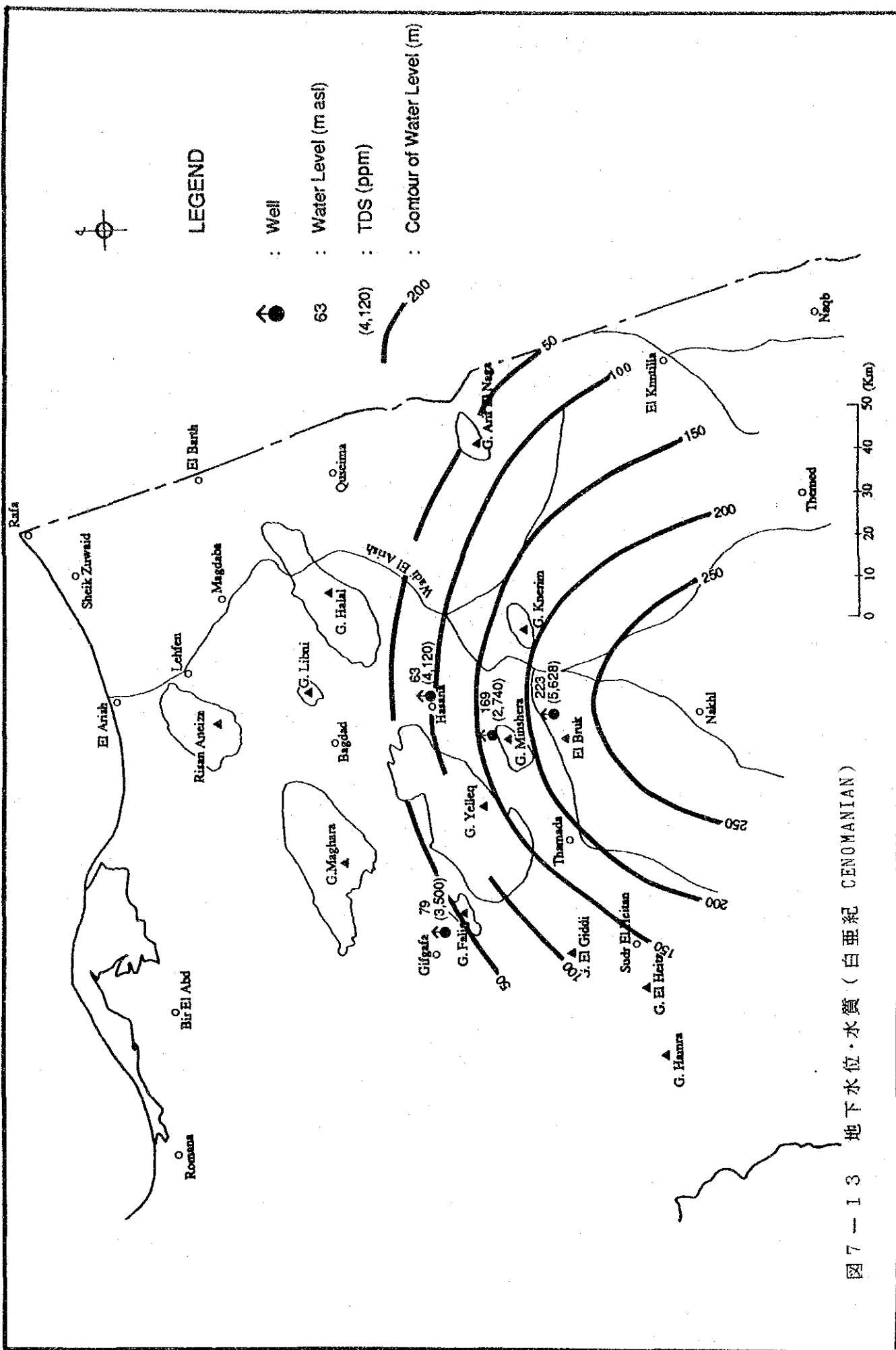


图 7-13 地下水位·水质 (白垩纪 CENOMANIAN)

7-4 下部白亜紀

下部白亜紀層は調査地域の大部分の地域に分布し、一部では直接地表に露出している。層相は、石英質砂岩で頁岩を挟在する。全層厚は、200～300mであるが、Halalでは600m以上に及んでいる。頁岩はAlada、Mostadul、KherimおよびMinshera等の南部では少なく、北部のMaghara地域では多い傾向が認められる。これに対し、Halalでは下部に厚い頁岩層が出現する。挟在される頁岩は連続するものではなく、レンズ状であるため下部白亜紀は全体としては単一の帯水層を形成している（図 7-14）。

下部白亜紀は北シナイの大部分の地域では砂岩相であるのに対して、北部のMaghara・Risan Aneiza～Halalの北方では石灰岩相に変化している。調査地域で砂岩相が占める面積は20,000km²を越え、層厚は200～300mである。

砂岩層の帯水層定数は6ヶ所のデータが得られており、透水係数は 10^{-4} ～ 10^{-3} cm/sec、透水量係数は12～400m²/dayの範囲である。

帯水層定数のデータが少ないため、砂岩相の連続性および透水性を検討することを目的として、砂岩層の粒度分析を実施した。粒径加積曲線のD₂₀から推計した透水係数は 10^{-3} ～ 10^{-2} cm/secの狭い範囲に集中する（図 7-15）。






揚水試験から求めた帯水層定数と粒度試験結果から求めた帯水層定数から判断すると、下部白亜紀砂岩層は高い透水性を有すると判断される。

ドーム構造部以外での下部白亜紀層の上面迄の深度は、Naqb北部の0mからMagdaba周辺地域の約1,100mまで変化する。この変化は上に述べた下部白亜紀の上面の形態を反映している。下部白亜紀層の上面はきわめて緩やかで広い南北方向の谷地形を形成し、南から北へ向かって徐々に沈み込む構造を成している。Minshera、KherimおよびHalal等の山地はこの谷から生じた“Insberg”とみなされる。これらとは別に、YelleqおよびHalal山地の両側には、東北東～西南西方向の狭い谷がみられる（図 7-16）。

下部白亜紀はNaqb地域では先カンブリア系を直接覆うが、それ以外はジュラ紀層を覆っている。ジュラ紀層は石灰岩・砂岩・頁岩といった様々な層準で下部白亜紀と接している。

下部白亜紀砂岩層の地下水の水質は、1,200～5,400ppmの範囲にはいる（図 7-17）。TDS値は調査地域の北部より南部の方が低い傾向にある。ドーム構造の周辺では地下水が停滞するとみられるため、TDS値は高い傾向がある。調査地域中央部の構造的に乱されていない地域では、TDS値は低く1,200～1,500ppmの範囲にはいるものと考えられる。

LEGEND

-  : Permeability Coefficient is more than 10^{-3} cm/sec
-  : Permeability Coefficient is less than 10^{-3} cm/sec
-  : Samples unanalyzable
-  : Samples uncollectible
-  : Shale

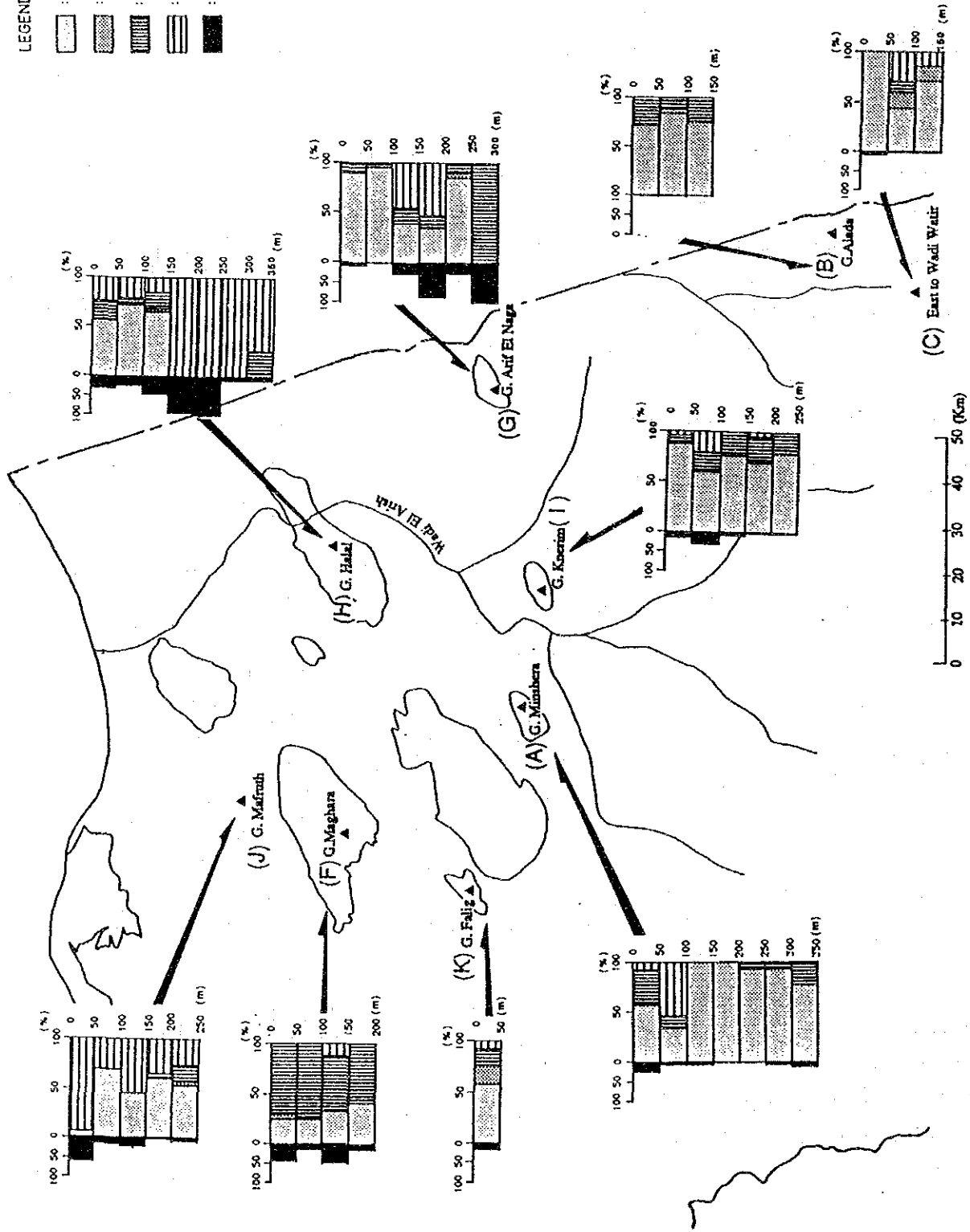
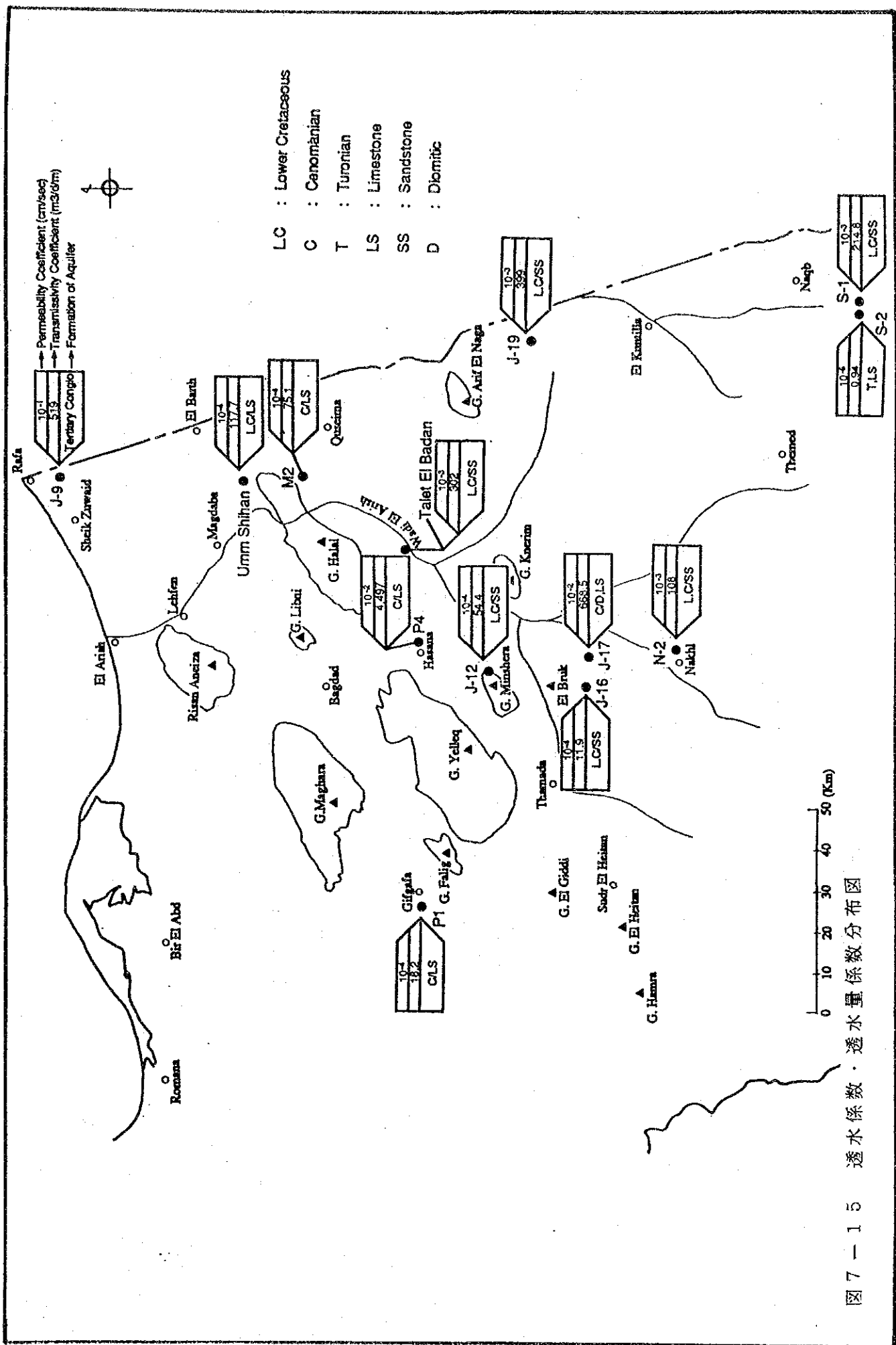


図7-1-4 層厚50m毎の透水係数分布図



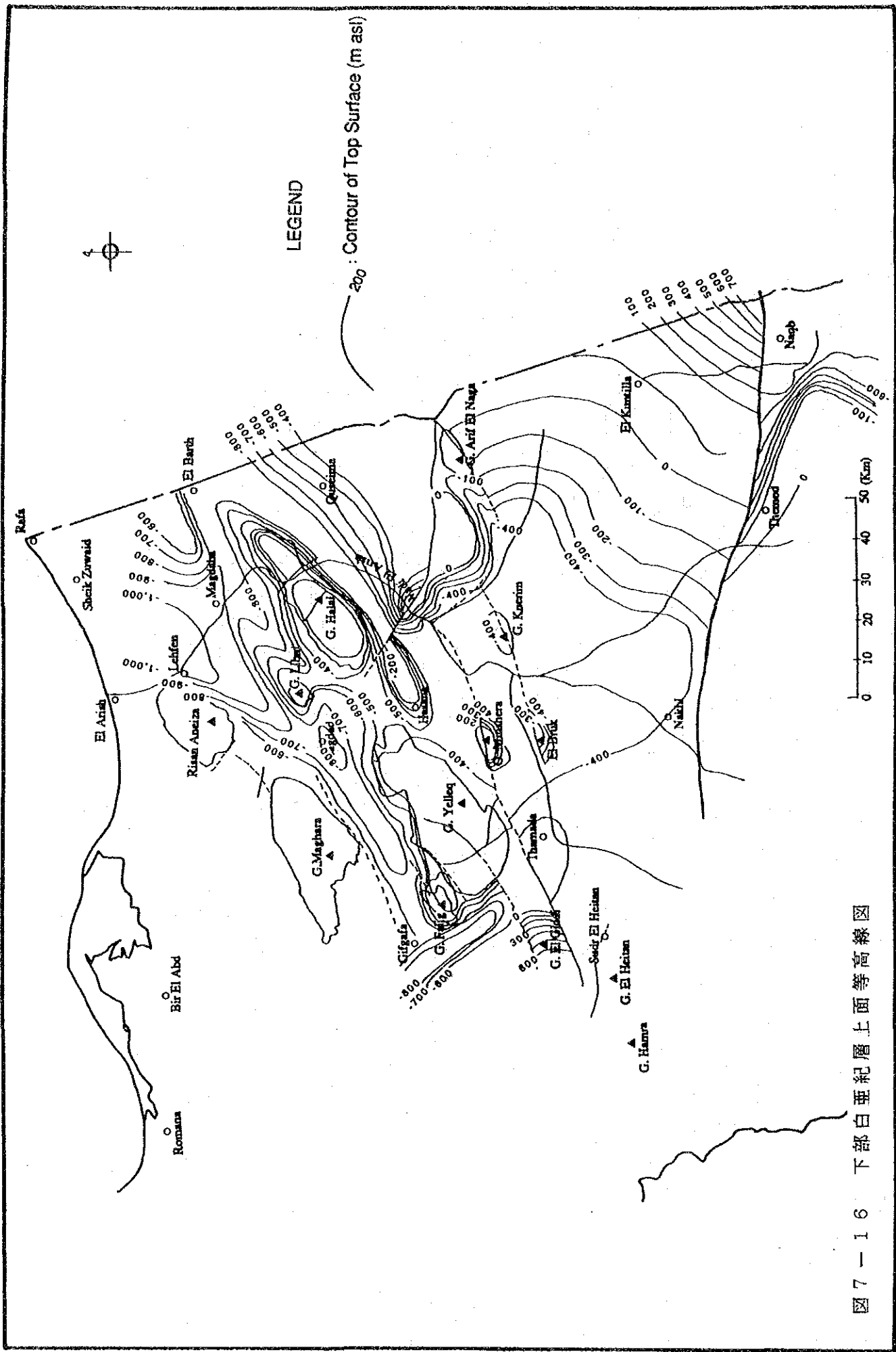


图 7-16 下部白垩纪层上面等高线图

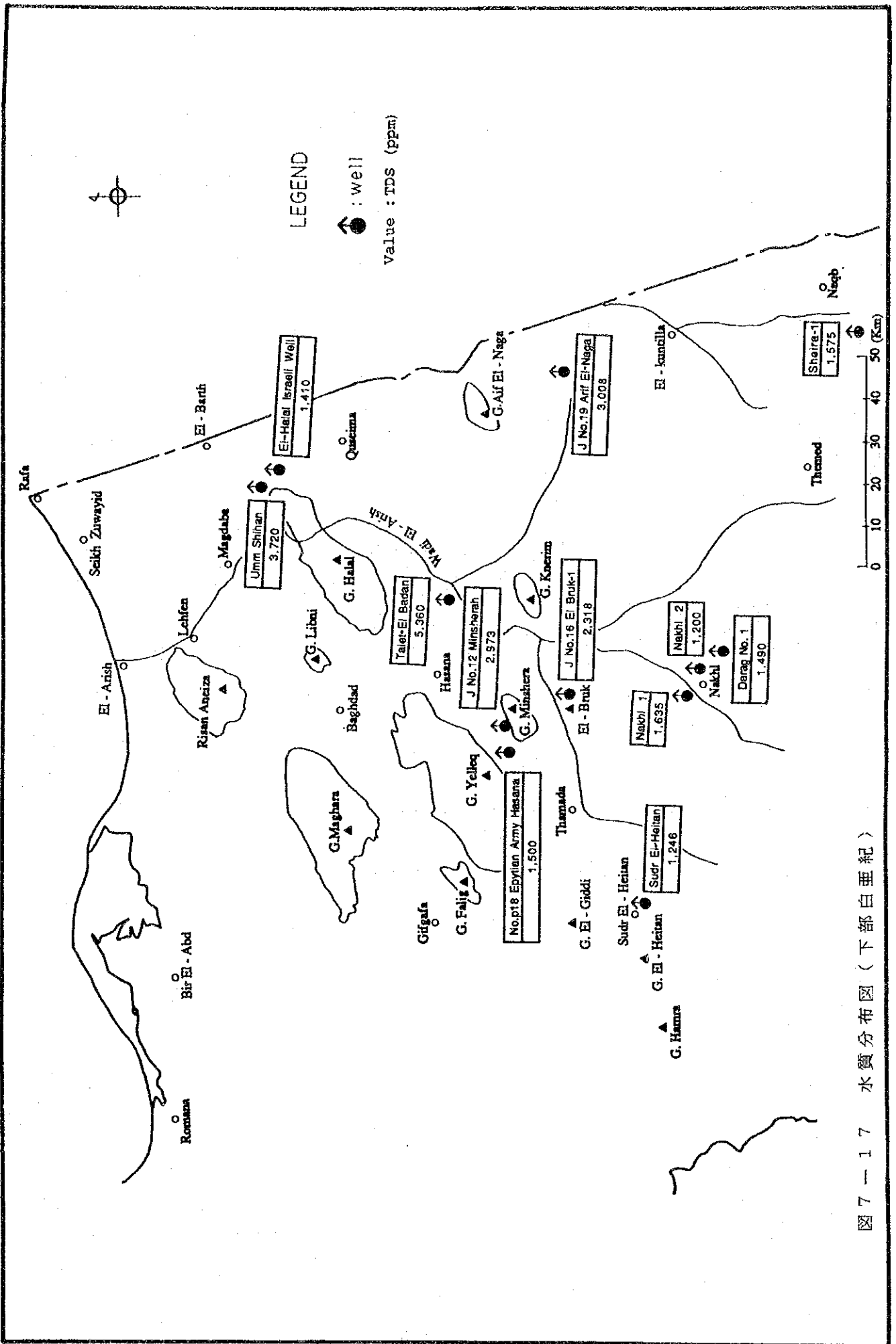


图 7-1-7 水质分布图 (下部白垩纪)

下部白亜紀を帯水層とする井戸は14本ある。水位はRagabet El-Naam Faultの南側のSheiraで420m ASLと最も高く、Halalの北東部で24m ASLが最も低い。水位の変化は調査地域の南部から北部へ向かって緩く低下する傾向がある。その勾配は、きわめて緩く約2/1,000~3/1,000程度である(図7-18)。

下部白亜紀の帯水層はRagabet El-Naam Faultを経て南シナイへと分布は続いている。Ragabet El-Naam Faultは下部白亜紀の分布に次のような影響を与えている。

断層を境にして南側が北側に対し上がっているが、その変位の大きさが地域によって異なっている。すなわち、シナイ半島の中央部に当たるNakhl地域では断層の垂直変位は比較的小さく変位が目立たないのに対し、東西両側特に東側では垂直方向の変位が大きい。このため、Nakhl地域では下部白亜紀の連続性に大きな影響はないが、東側のNaqb地域では変位により先カンブリア系が地表に露出しているため下部白亜紀は連続性を絶たれている。

南シナイから北へ向かって流れてきた地下水流は、Ragabet El-Naam Faultの東西両側の地域では断層による帯水層の変位により流れが阻害され、その影響が少ないシナイ半島中央部に集められる。こうしてRagabet El-Naam Faultを越えた地下水は、中央シナイから再び北シナイへ向かって流れを広げてゆく。その主流は、NakhlからHasanaを経てQuseima方向へ向かう流れである。この流れはいくつかの分岐が見られる。Hasanaからさらに北へ向かうとMaghara・Risan Aneiza~Halal北部で下部白亜紀が砂岩相から石灰岩相に変化するため、流れを阻害され東西へ分流する。

下部白亜紀砂岩の体積は、挟在する頁岩の部分を除けば約 $120 \times 10^9 \text{ m}^3$ と推算される。砂岩の有効空隙率を25%と仮定すると、砂岩中に賦存される地下水の量は、 $30 \times 10^9 \text{ m}^3$ である。

砂岩の揚水試験は7ヶ所で実施されている(図7-18)。砂岩の帯水層定数の分布図を図7-19に示す。これによると下部白亜紀砂岩層の生産性は高いと考えられる。

下部白亜紀砂岩の地下水のC-14年代は22,000~36,000年の範囲に入り、化石地下水と考えられる。

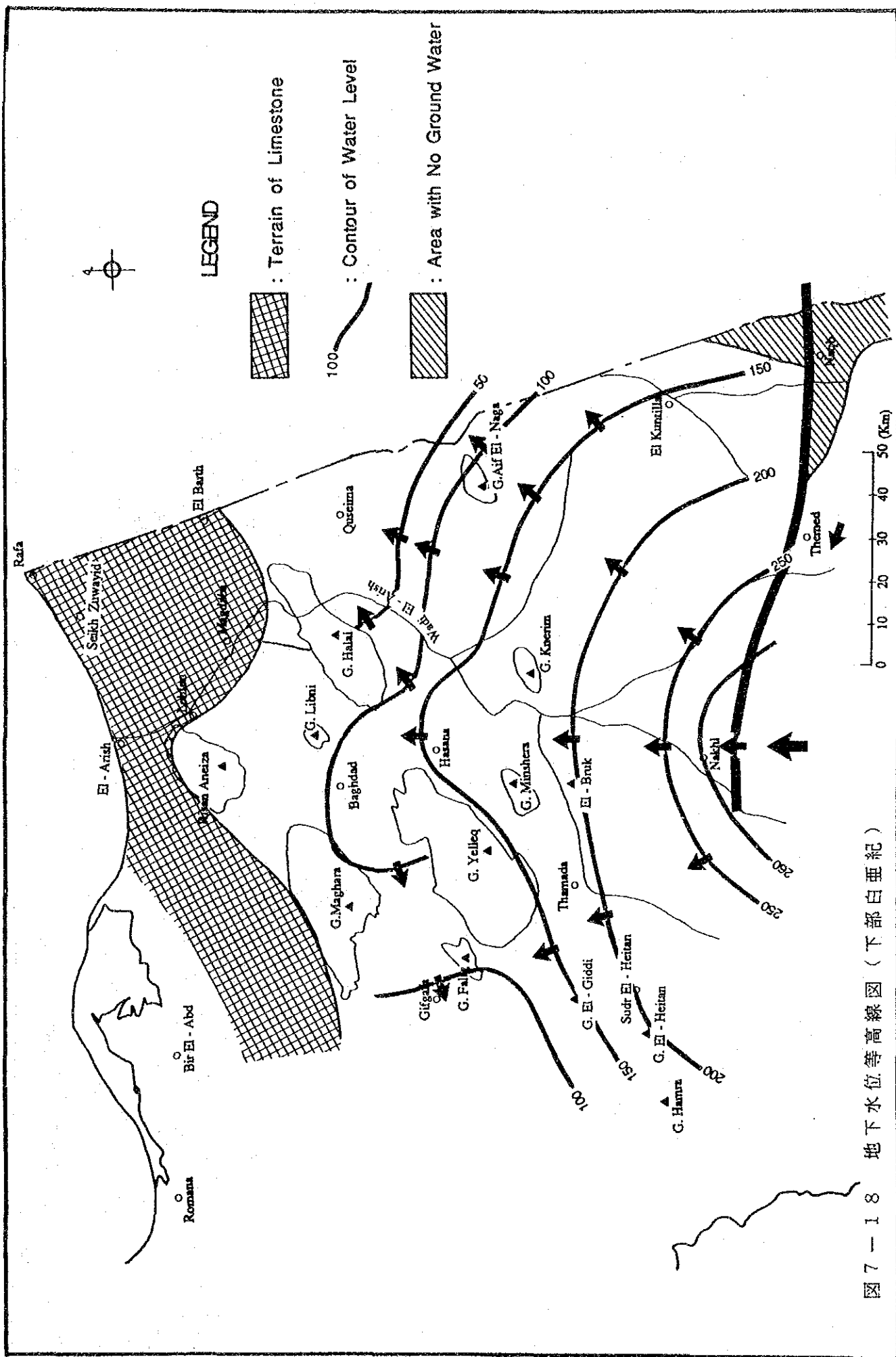


图 7-18 地下水等高线图 (下部白垩纪)

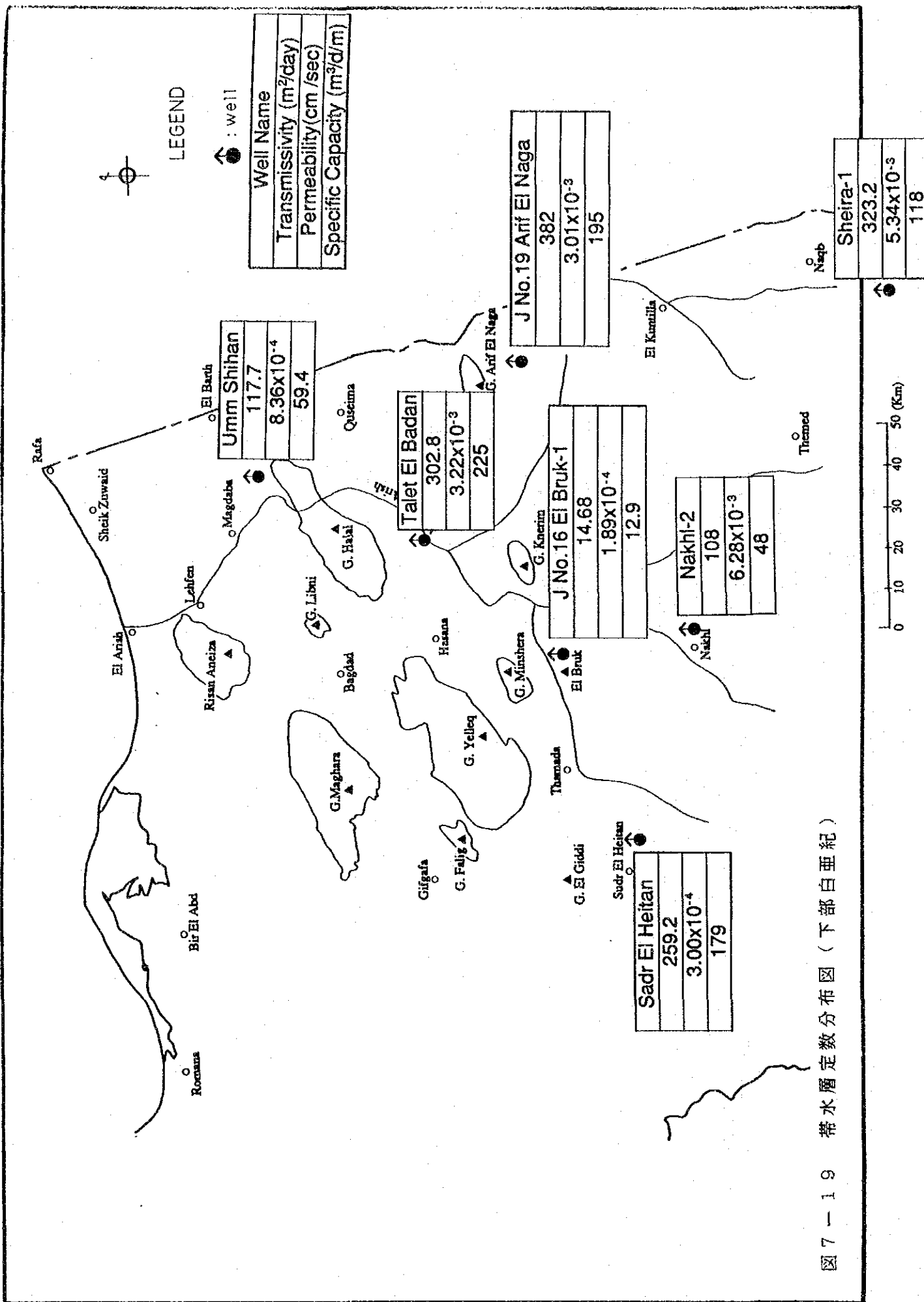


图 7-19 带水层定数分布图 (下部白垩纪)

7-5 ジュラ紀

7-5-1 概説

北シナイに分布するジュラ紀層は上部ジュラ紀層及び中・下部ジュラ紀層である。前者は砂岩及び頁岩を主とした地層であり石炭を挟在している。また、炭鉱内では岩塩が出現している。後者は石灰岩を主とする地層である。これらはドーム構造内に分布するが、実際に帯水層として井戸が掘削されているのはMaghara地域のみである（図 7-20）。

7-5-2 上部ジュラ紀

上部ジュラ紀の石灰岩を帯水層とする井戸は7本あり、Magharaのドームの北縁部に沿って分布している。水位は北縁部の中で中央部に分布するものは147～167mと比較的似通っており、水質は1,650～3,450ppmの範囲である。揚水試験の結果では、揚水量は5～35m³/hrと差が大きい。揚水量が大きい方が水質がよいという結果が認められる。

これに対しドーム北縁部の内、東西両端部に分布するものは、水位は210～232mと中央部と比較して高い傾向がある。水質は3600～3810ppmとやや高い傾向にある。

7-5-3 中・下部ジュラ紀

中・下部ジュラ紀の砂岩を帯水層とする井戸は3本あり、水位は301～305mと似通っているが水質は4,140ppm～7,400ppmと大きな幅をもっている。また、揚水試験の結果でも、揚水量は3.85～5.8m³/hrと小さく、揚水を開始するとTDS値は著しく上昇している。揚水量が小さいにも拘らず水位降下は約15～25mと大きい。

以上のことから中・下部ジュラ紀層中の地下水は、水質(TDS)が高いだけでなく水量も少ないため、今後の開発の可能性は極めて低いと判断される。

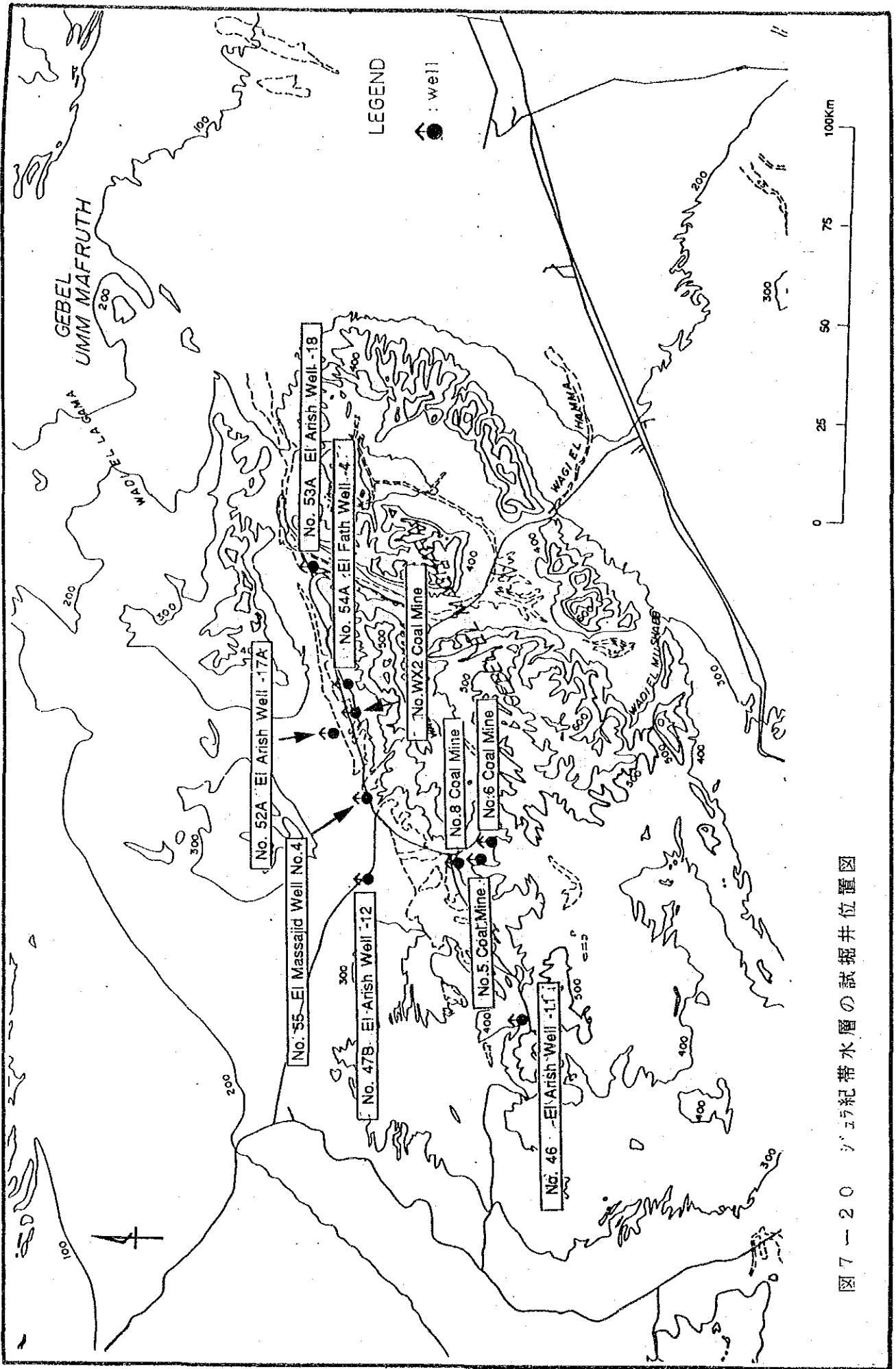


図 7-20 ゾン紀帯水層の試掘井位置図

8 地下水源評価

8-1 第四紀の帯水層

第四紀層は有望な帯水層を挟在しており、主としてEl-ArishからRafahへ至る海岸平野沿いに延長約30km、幅10～30kmにわたる分布を示している。層厚は80～100mで、最大層厚は120mである。

El-Arish以西における分布については今後の調査結果に依る必要があるが、本調査で実施したEl-Arish西側の試掘孔において確認されており、西側への連続性が期待できよう。

第四紀層の南北方向の模式地質断面図を図7-1に示した。

礫層は古いWadiの堆積物であり、その分布は限られていると考えられる。一般に地下水面は礫層より深い位置にある傾向がみられる。したがって、礫層は水理地質学的見地からはあまり重要ではないとみられる。

Wadi El-Arishの堆積物中の礫層で比較的低い標高に分布しているものは、その下半部下位のkurkarによって規定される地下水面下にある。このため、いくつかの井戸では礫層中にスクリーンが設置されている。

kurkarが厚い粘土層に覆われる所では、図8-5に示すように被圧帯水層が形成されている。粘土層の連続性には限界があるため、粘土層を欠くところでは上位の第四紀層中に地下水位が現れる。そのような地域では、地下水位はkurkar中の被圧水位を反映したものとなっている。第四紀層中の地下水位は一般にkurkarの地下水位を反映しているといえる。

kurkarの水理定数は、透水係数が $10^{-2} \sim 10^{-1}$ cm/Secの範囲、透水量係数が100～2,000 m³/day/mの範囲にある。

海岸砂丘の堆積物中の帯水層は粘土層によって他の帯水層と分離されている。この堆積物は帯水層としての能力は低いが、他の帯水層と比較すると極めて低いTDS値(300～700ppm)の地下水を含む点で重要な帯水層である。

調査地域では地下水が唯一利用できる水資源であるため、El-ArishからRafahへかけての海岸平野では、著しく利用されている。ちなみに、El-Arish地域では142本の井戸があり51,000m³/dayを揚水し、Sheikh Zuwayid～Rafah地域では364本の井戸があり39,000m³/dayを揚水している。この激しい揚水のため地下水位の低下や水質の悪化が生じ、El-Arish地域では1962年以来2～4mの水位低下と、2,000～3,000ppmのTDS

値の増加が観測されている（図7-7）。

Well No.1-123およびNo.1-119の地下水のC-14年代測定の結果では、それぞれ、 $8,620 \pm 420Y.BP$ 、 $6,770 \pm 290Y.BP$ という結果が得られている。これらの井戸は沖積平野の東端に位置している。また、Well No.1-75およびNo.1-64はWadi El-Arishの東側に位置しているが、その地下水のC-14年代は $1,730 \pm 140Y.BP$ 、 $4,390 \pm 240Y.BP$ という結果となっている。

地下水位の低下と井戸からの総揚水量とを比較し、El-Arish地域における涵養の量を推算した。その結果、涵養の量はグリッドによって $100 \sim 800 \text{ mm/年}$ となった。この値は、明らかに年間の降水量を越えている。このことは、他の帯水層から第四紀の帯水層に対しての流入があることが考えられる。

第四紀層のうち最も広く分布する帯水層はkurkarである。そのTDS値の範囲は、Wadi El-Arishの沖積平野で $2,500 \sim 3,800 \text{ ppm}$ 、Sheikh ZuwayidからRafahにかけての海岸平野で $3,500 \sim 5,600 \text{ ppm}$ である。

この両者のTDS値の差は10～15年に一度発生する洪水の影響によるものと考えられる。その発生はきわめて希ではあるが、ある程度地下水の塩分濃度を希釈する機能を果たしているとみられる。

これに対し、海岸平野のkurkarは広く粘土層に覆われるため、地下水のTDS値は元々の値を保っている。

Wadi El-Arishによって希釈される沖積平野のkurkarの広がりには、これらの地下水の年代に示されるように制限されていると考えられる。このことは、海岸平野の帯水層に対する現在の水文気象学的条件下での淡水の涵養はある程度制限されていることを意味する。したがって、地下水の過剰揚水が起これば、kurkar以外の第四紀帯水層中の低TDSの淡水レンズを含む地下水は使い果たされ、kurkar中に貯留されていた地下水に容易にとって替わられることになる。

したがって、地下水のTDS値の増加を防ぐためには、揚水量は現在の気候条件下での涵養量以内であることが必要である。しかしながら、その量は現在の降雨量を考慮すると極めて小さい。このため、kurkar中の地下水のTDS値の増大は避けられない。

過剰揚水は容易に地下水位降下を引き起こす。現在海水浸入の証拠は無いが、あるレベルを越えて地下水位が降下すれば、直ちに海水浸入の事態が発生する。海水浸入によってこれ以上の地下水汚染を生じさせないためには、これを防ぐための安全揚水量を決定する必要がある。

安全揚水量は帯水層への推算される流入量によって決定することができる。揚水量と

水位降下を比較して、年間の涵養量を推算したものを図8-1に示す。同様の手法を用いて必要なデータが得られるグリッドについて、水位降下を起こさない安全揚水量について検討した。

水位降下を起こさない安全揚水量

グリッド 番号	安全揚水量 (m ³ /day)	現在の揚水量 (m ³ /day)
7-3	1,650	1,870
7-4	1,090	1,330
7-5	920	1,070
7-6	810	1,000
7-7	30	460
8-2	2,400	2,580
8-3	1,080	1,250
8-4	1,980	3,210
8-5	1,350	1,520
9-2	740	800
9-3	510	510
9-4	2,390	2,490
9-5	760	890
9-6	1,610	1,619
10-4	500	570

El-ArishからRafahにかけての海岸平野における第四紀の主要な地下水源はkurkarである。kurkarの分布と平均的な層厚を考慮してkurkarの体積を推計すると、 $3 \times 10^9 \text{m}^3$ である。kurkarの平均的有效空隙率を25%と仮定すると、kurkar中に賦存される地下水量を推計すると、賦存量は $7.5 \times 10^8 \text{m}^3$ である。

El-Arishおよび海岸平野における揚水量の総合計は、 $90,000 \text{m}^3$ と推算される。この揚水が過去8年間継続したとすると、その総量は $262.8 \times 10^6 \text{m}^3$ となり、kurkar中に貯留されている $750 \times 10^6 \text{m}^3$ と比較してあまりにも大きい。このことは、第四紀の帯水層に対して他の古い地層からの地下水の流入が起こっている可能性を示唆する。ちなみに、kurkarは先第四紀の石灰岩や砂岩と接している。

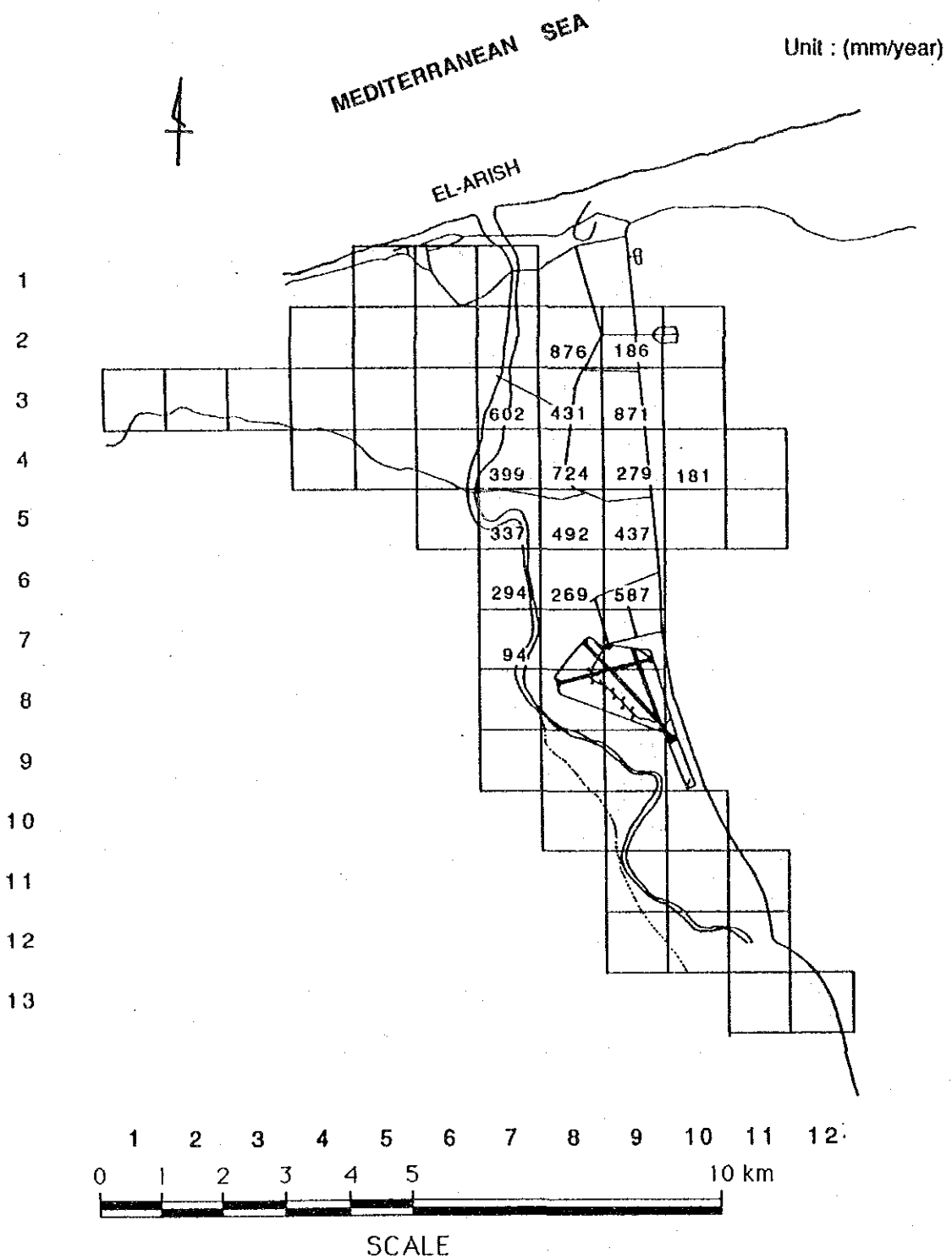


图 8 - 1 推算雨養量 (EL-ARISH)

8-2 第三紀の帯水層

8-2-1 中新世 (Miocene) の帯水層

中新世の地層は、調査地域北部のCoastal Foreshore Areaに分布している。層相は、中新世の地層で帯水層となっているのは、石灰岩および砂岩である。

石灰岩を帯水層とする井戸は、No.45A El-Arish Well No.10 で、砂岩を帯水層とする井戸は、Misri-1である。現在のところ中新世の地層を帯水層とする井戸はこの2本のみである。

中新世の帯水層中の地下水は高いTDS値を有しているおり、かつ第四紀層と接しているため第四紀の帯水層に影響を与えていることが考えられることから、今後さらにデータを収集することが必要である。実際に、中新世の帯水層からUp-Coningにより第四紀の帯水層へ地下水が供給されていることを示す現象がみられる。

8-2-2 始新世 (Eocene) の帯水層

始新世の地層は、貨幣石を特徴的に含む石灰岩及びチョークが発達する。分布地域はRisan Aneiza～Maghara以南の広い地域である。これらの地域においては、台地を形成し互いに独立した分布を成している。始新世の地層で帯水層となっているのは、石灰岩のみである。

既存井戸における地下水面までの深度および帯水層までの深度は浅い傾向にある。これを反映するように、Ain Gudeiratでは湧泉として地表に露出している。その水質はTDS値が1,440ppm、湧出量は1,500m³/dayである。

Ain Gudeiratの南方約10kmの地域には2つの手堀井戸がある。Ain Gudeiratおよびこれらの手堀井戸は、Esna Formationと始新世石灰岩の境界から湧出している。

本帯水層についての今後の調査は、Ain Gudeiratと同様の水理地質学的条件を持っているNakhlおよびThemed以北の分布地域の重要性が高いと考えられる。

8-3 上部白亜紀の帯水層

8-3-1 Senonianの帯水層

Senonianは、Maghara～Yelleq地域では浸食により欠如しているが、これ以外の地域では広く分布する。なお、一部では下部は浸食されて欠如することもある。

帯水層は上部及び下部とも石灰岩中に発達する。石灰岩は多孔質な部分もあるが全体としては緻密であるため、地下水は石灰岩中に発達した節理(joint)や裂か(fissure)中に賦存されているものとみられる。

現在のデータは乏しいが、これらから判断すると比較的低TDS値の地下水が存在する可能性があるのはWadi El-Arish沿いの地域であろう。他の地域でのTDSは高いと考えられる。

8-3-2 Turonianの帯水層

Turonianは、有孔虫に富む石灰岩を主体とし、基底に頁岩が出現する。

Turonianの地下水の水質(TDS)は、北シナイでは一般的に高い傾向がある。これに対し、Ragabet El-Naam Fault以南ではTDS値は低く、生産性も高いと考えられるが、今後の調査が必要である。というのは、Ragabet El-Naam Faultの南側のSheira-2の井戸の地下水は調査地域内で最も低いTDS値を示しているからである。

8-3-3 Cenomanianの帯水層

Cenomanianの地層は調査地域のほぼ全域に分布しているが、ドーム構造地域以外では上位の地層に覆われる。下部白亜紀層との境界となる基底部は石灰質砂岩であり、その上位は石灰岩やドロマイトおよびドロマイト質石灰岩が卓越し、ところどころに頁岩を挟むという構成を成している。

帯水層は石灰岩中に発達する。Cenomanianを帯水層とする井戸は調査地域内に5本存在する。帯水層までの深度は138m(JNo.17)～818m(P16 El Amro)である。地下水面までの深度は35～219mで、El Amro地域で浅い。

水質は、2,743(Hasana)～5,628ppm(El-Bruk)であり、HasanaおよびGifgafa地域で低い傾向がある。

揚水試験による透水量係数は75～4,500m²/dayの広い範囲にある。透水量係数が大きいのはHasanaおよびEl-Bruk地域で、逆に小さいのはGifgafa地域である。Cenomanianの

帯水層は生産性が高いと考えられる。透水量係数が最も高いHasana地域ではさらに調査を実施することが望ましい。

8-4 下部白亜紀 (Lower Cretaceous) の帯水層

本帯水層は調査地域の地下に広く分布するが、調査地域の北部では石灰岩相に層相が変化する(図7-18)。砂岩相はほとんど純粋な多孔質の砂岩からなるが、頁岩を挟むことがある。頁岩が含まれる比率は、調査地域北部で高く、南部では少なくなる。

層厚は地域による差があるが、概して200~300mで、Halal地域では600mに達している。頁岩を除いた帯水層としての層厚は、概ね200mである。

地下水のTDS値は、1,200~3,000ppmの範囲にある。TDS値が高いのは石灰岩に含まれる地下水および地質構造的に乱されているドーム構造地域の地下水である。

Talet El-Badanでは、極端に高い5,360ppmというTDS値が得られている。これは、下部白亜紀砂岩層は、逆断層で上部白亜紀層と接するところではその影響により高いTDS値を示すものと考えられる。これに該当するのが、MinsheraおよびArif El-Nagaなどである。

地質構造的擾乱が小さい地域では、TDS値は1,200~1,500ppmを示す。これに該当する地域はHasana、NakhlおよびKuntillaに囲まれる広い地域である。

帯水層までの深度は300~1,000mである。この深度は調査地域中央部で深く、ドーム構造の周辺地域で浅い。

地下水面までの深さは、161~340mである。深度が浅いのは調査地域中央部で、深いのはQuseima、KuntillaおよびSadr El-Heiranである。Ragabet El-Naam Faultの南側のSheiraでも地下水面までの深度は深い。

下部白亜紀砂岩層の透水量係数は12~400m²/dayの範囲である。透水量係数が小さいのはドーム構造地域周辺で、顕著な地質構造的擾乱がみられる地域である。透水量係数が大きいのは、地質構造の乱れが小さい地域であり、北シナイの中央部の広い範囲がこれに相当する。

下部白亜紀砂岩層中の井戸のうち、帯水層の生産性が最も高いと考えられるSheira-1の井戸における比湧出量は118m³/day/mで、これに対する水位降下はわずか4.5mである。

帯水層厚は、その評価に重要な要素であるが、下部白亜紀砂岩層は広い地域で透水量

係数が大きく地域的差が小さい。また、この係数には層厚の要素が加味されている。したがって、下部白亜紀砂岩層の評価に当たっては地下水のTDS値と対す層までの深度を評価の要素とした。TDS値は地下水の利用範囲についての適用制限があり、帯水層までの深度は揚水コストを決定する。

これらの要素で下部白亜紀砂岩層の評価を行ったものを表8-1および図8-1に示す。

表 8-1 下部白亜紀帯水層の評価

Depth to Water(m)		1	2	3	4
		~100	100~200	200~300	300~
TDS(ppm)					
A	~1,500	A1	A2	A3	A4
B	1,500~2,000	B1	B2	B3	B4
C	2,000~2,500	C1	C2	C3	C4
D	2,500~	D1	D2	D3	D4

A1で示される地域は、深度100m以内で、1,500ppm以下のTDS値の地下水が得られる可能性が高い地域である。しかしながら、正確な状況はさらに確認が必要である。B1・B2・B3・C4およびD3についても、2つの等値線に囲まれた狭い範囲であるため、等値線の描き方によって生じた可能性も存在する。したがって、A1の地域と同様にさらに確認が必要である。

Hasana、Sadr El-Heiran、NakhlおよびArif El-Nagaに囲まれた広い地域は、A2に区分される。A2地域は、深度100~200mの範囲に地下水面があり、TDS値はドーム構造の周辺地域を除いて1,500ppm以下の地域である。地下水開発は、この地域が再優先地域である。これらの地域の正確な境界は、実際の開発を通して得られるデータによって修正されるべきである。

A3地域はA2地域を取り巻いて分布している。地下水のTDS値はA1地域と同様のものが期待できよう。しかしながら、地下水面までの深度は、200m~300mと比較的深い。これに相当する地域はSadr El-Heitan、NakhlおよびQuseimaにも分布する。

A4地域では、地下水面までの深度は300mを越している。しかしながら、TDS値は良好な1,600ppmである。

これら以外の地域は高いTDS値を示す地域である。高いTDS値は地下水の流動を阻害する地質構造的擾乱によって生じると考えられるが、その確認には十分なデータによって検証されるべきである。

8-5 ジュラ紀 (Jurassic) の帯水層

北シナイに分布するジュラ紀層は上部ジュラ紀層及び中部～下部ジュラ紀層である。前者は砂岩及び頁岩を主とした地層であり石炭を挟在している。また、炭鉱内では岩塩が出現している。後者は石灰岩を主とする地層である。これらはドーム構造内に分布するが、実際に帯水層として井戸が掘削されているのはMaghara地域のみである。

8-5-1 上部ジュラ紀の帯水層

石灰岩を主とする帯水層で、帯水層までの深度は111～265mである。地下水面までの深度は28～123mである。TDS値は1,650～3,800ppmの比較的幅の広い範囲にある。生産性は高く、120～840m³/dayと高い。

Magharaのドーム構造の北部地域では、本帯水層の開発が可能な地域であると考えられる。

8-5-2 中・下部ジュラ紀の帯水層

砂岩を主とする帯水層で、帯水層までの深度は153～275mである。TDS値はかなり高く、4,140～7,455ppmである。これは、中・下部ジュラ紀層中に岩塩を挟在することによるものである。

中・下部ジュラ紀の帯水層の地下水は、開発対象としてはTDS値が高いと考えられる。

9 地下水開発・調査への提言

9-1 序 言

本調査を通して、調査地域の水理地質学的構造について多くのことが判明した。次項には将来の地下水開発および調査の実施に当たっての提言と考慮すべき技術的課題について述べる。

9-2 地下水開発優先地域

9-2-1 第四紀帯水層

第四紀帯水層からの揚水は El-Arish 地域、Sheikh Zuwayid および Rafah 地域の海岸平野においては著しく行われており、第四紀帯水層については新たな開発よりもむしろ、海水の進入を生じさせない程度の安全揚水量を地域毎に確立し、地下水管理を実施していくことが求められている。

このためには、既設観測井を含めた地下水観測網の整備が早急に必要である。

その一方で、El-Arish および Sheikh Zuwayid の間に広がる海岸平野の地下に分布するとみられる未確認の第四紀層を確認するための調査を実施し、これの開発可能性について検討を行うことが重要である。

また、海岸砂丘中にみられる帯水層についての水理地質学的メカニズムの解明を行い、他の地域においても同様な帯水層が分布する可能性について検討を加える必要がある。

9-2-2 先第四紀帯水層

先第四紀の地下水の開発の優先地域は次の2つの面を考慮して決定するべきである。

- ① 直ちに開発へ移行できる優先度
- ② 地下水資源の評価のための優先度

このうち、①に相当する地域の選定には次のような条件を考慮して決定することが望まれる。

- 水質が良いこと、すなわち、飲料水として使用できる可能性があること
- 地下水面までの深度が小さいこと、すなわち、ポンプによる揚程が低いこと
- その地域で水需要に対する要求が高いこと
- その地域へのアクセスが容易であること

これらの条件に沿って水資源評価図から選定すると、水質及び地下水面までの深度の面からみた優先度が高いのは A2、A3 および A4 の地域が優先地域に該当する。具体的には、次の地域が挙げられる（図9-1）。

A1地域：

Hasana-1500ppm以下の地下水が期待でき、かつ地下水深度が100m以下である可能性がある地域。Hasanaは北シナイ州ではEl-Arishに次ぐ都市でありアクセスも良く、かつ水需要が高い。

A2地域：

Hasana周辺地域-この地域は地下水深度が100～200mであると推定される地域。

Nakhl地域-水文水質条件はHasanaと同様であるが、Nakhl-2の井戸で1200ppmという良好なTDSが測定されており、同様な良好な水質が得られる可能性をもった地域である。主要道路の分岐点に当り中央シナイにおける交通の要所であり、水需要も高い。

Minshera～El Bruk地域-水文水質条件は上記2地域と同じである。アクセスも良い。

A3地域：

Sheira地域-1500ppm程度の水質の地下水が得られる地域であるが、地下水深度が320m前後と深い。PRODUCTIVITYは良好である。本地域はNAQB空港に近のな潜在的な水需要は高い。この地域では下部白亜紀層の地下水の他、開発対象として十分な水質を持つ Turonian の帯水層が分布する。

9-3 地下水開発手法への提言

9-3-1 第四紀帯水層

第四紀帯水層はEl-Arish地域およびSheikh ZuwayidからRafahへかけての地域では著しく揚水が行われている。この地域では現在では過剰揚水気味であり、新たな開発よりも地下水保全が考慮されるべき地域となっている。

本調査によりEl-ArishとSheikh Zuwayidの間の海岸平野には、第四紀の帯水層が連続して分布し、南方へ広がっていることが新たに明かとなった。これらの地域の帯水層はこれまでのところ未調査であり、今回電気探査の解析によって分布構造が判明したものである。したがって、帯水層の特性の把握は今後に残された課題である。これらの地域は今後の開発可能地域として挙げられるが、開発に当たっての留意点として次のような点

が指摘される。

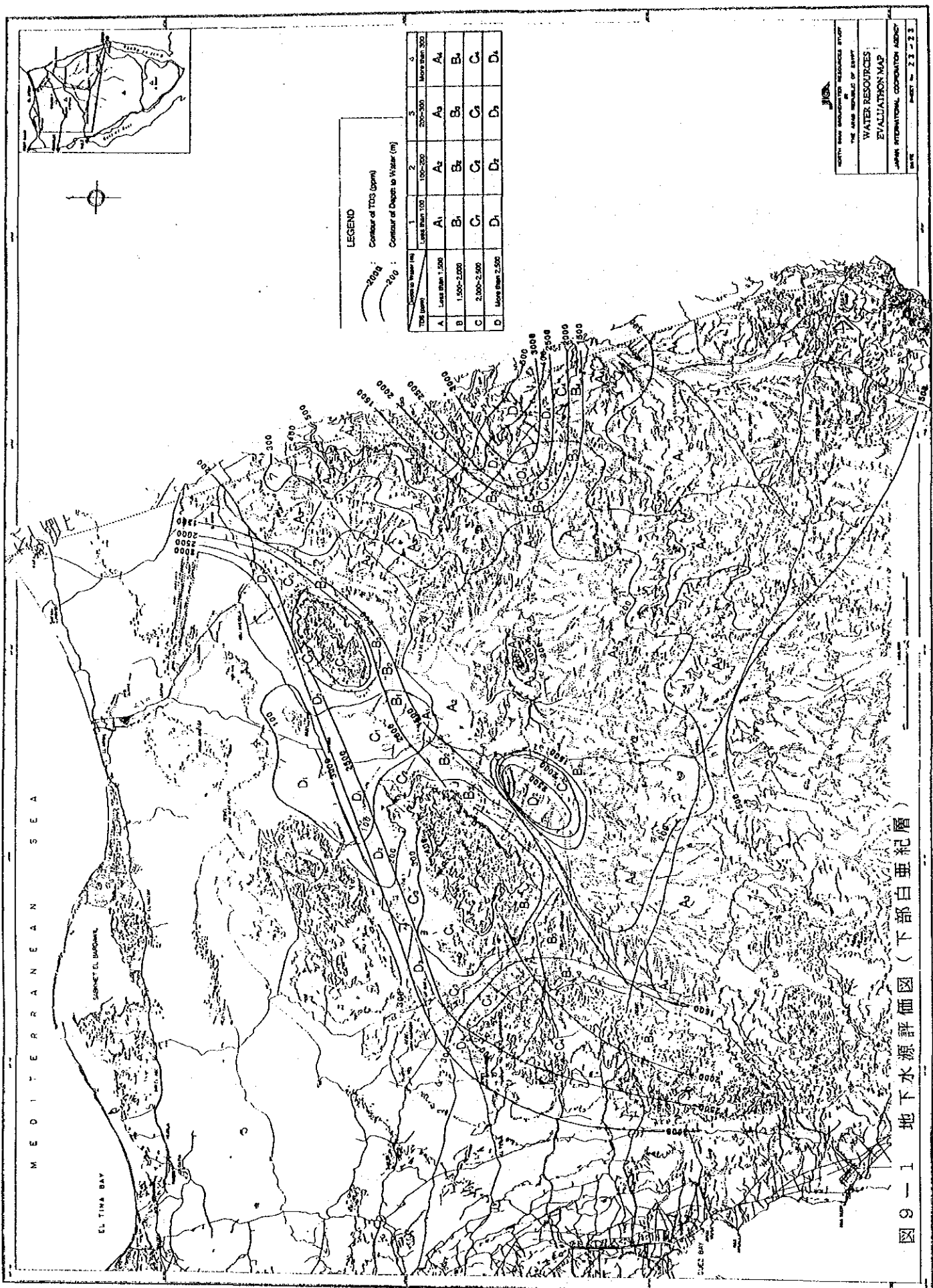
- (1) 試掘によって、第四紀層のIsopach MapおよびIsobase Mapの検証と修正を行う。これによってさらに確実なMapにUp-Dateしていく。
- (2) 定期的な地下水位観測を行い、水位降下を極力発生させない揚水量を検討する。
- (3) 上記(2)と同時に水質分析（特にTDS値、イオン構成）を行い、既存データと比較して地下水塊の分布状況の解明を図る。
- (4) 地下水の年代測定を行い、上記(2)・(3)と併せ、地下水の涵養機構解明の資料とする。
- (5) 試掘に際しては、第四紀層へ地下水を供給していると考えられる第三紀層の情報についても得られるよう配慮する。
- (6) 新規の開発に当たっては、現在のWell Fieldに対する影響の有無を把握するため、El-Arish、Sheikh ZuwayidおよびRafah地域において水位及び水質の観測を継続して行う。

9-3-2 先第四紀帯水層

- (1) 先第四紀帯水層のうち現段階で開発が可能な帯水層は、次の2つである。

- ・ 下部白亜紀砂岩層
- ・ Sheira地域のTuronianの帯水層

- (2) 実際の開発に当たっては、これらの帯水層の地下水はいずれも化石地下水であることを十分認識した対応が必要である。
- (3) 下部白亜紀砂岩層の開発地域の選定には、本調査で作成した水理地質図および水資源評価図を利用することができる。すなわち、帯水層までの掘削深度、地下水位、水質を予測することができる。
- (4) 水資源評価図でA1、A2とした地域の開発優先度は高いが、北シナイ全域を考慮すれば地下水面までの深度が深くなるA3地域も含めた開発・調査計画を立案することが必要である。
- (5) Sheira地域のTuronianを除いて、上部白亜紀帯水層の地下水は水質が良くないため、井戸仕上げに当たっては、下部白亜紀砂岩層以外の地層にスクリーンが設置されないよう十分な注意が必要である。これは、スクリーンを通して高いTDS値の地下水による水質汚染を防ぐためである。
- (6) 第四紀帯水層の項で述べたように、地下水の水質区分、涵養機構の解明のため水質分析および地下水の年代測定を行うべきである。これは、先第四紀帯水層の地下水は化石地下水であることから、これらのことを把握することは開発の方針決定に当たって重要なデータとなることが期待できるためである。



LEGEND

Contour of TDS (ppm)

2000

200

Contour of Depth to Water (m)

Depth to Water (m)	1	2	3	4	5
Less than 100	A ₁	A ₂	A ₃	A ₄	A ₅
100-200	B ₁	B ₂	B ₃	B ₄	B ₅
200-300	C ₁	C ₂	C ₃	C ₄	C ₅
More than 300	D ₁	D ₂	D ₃	D ₄	D ₅

JICA

INTERNATIONAL COOPERATION AGENCY

WATER RESOURCES EVALUATION MAP

THE JAPANESE MINISTRY OF ECONOMY, TRADE AND INDUSTRY

PROJECT No. 2-3-2-3

図9-1 地下水評価図(下部白亜紀層)

9-4 今後の課題

本調査を通して北シナイの水理地質について諸々の事実が明らかとなった。しかしながら今後に残された課題も多い。そこで、将来必要と考えられる調査内容について、主要な帯水層毎に述べる。

9-4-1 第四紀帯水層

第四紀帯水層は、El-Arish から Rafah にかけての海岸平野に分布し、その分布の南限についても電気探査結果を基にして解析することができた。本層の広がりはこの地域における今後の地下水利用を考える上できわめて重要であり、すみやかに試錘調査によって確認することが要求される。

これと同時に、El-Arish 地域の西方への連続性についても確認することが必要である。

El-Arish および Rafah 地域においては揚水に伴う継続的な水位低下が生じている。海水の進入による水質汚染を防ぐためには、それぞれの地域において水質悪化を来さずかつ継続的に揚水できるための安全揚水量を決定するべきである。このため、これらの地域において観測井を設置し、正確な水位変動を長期的に観測する必要がある。

第四紀帯水層の地下水へは、先第四紀層の地下水からの供給が行われている可能性があり、その挙動を把握することが必要である。特に重要な地域は、第四紀層の下位に透水性のある砂岩、礫岩、石灰岩等の地層が分布する地域である。また、第四紀層の地下水への供給源と考えられる先第四紀層の透水量係数を求めるとともに、地下水の化学組成を把握しておくことが必要である。

9-4-2 先第四紀帯水層

9-4-2-1 第三紀帯水層

第三紀帯水層のうち中新世の地下水についてのデータは乏しいが、一般にTDS値は高いと考えられる。第四紀層の帯水層へ先第四紀層の地下水が供給されている可能性については先に述べた。供給源となる先第四紀層のひとつとして第三紀帯水層が挙げられる。このため、El-Arish、Sheikh Zuwayid および Rafah の各地域において、本層の地下水の挙動を把握することは急務の課題である。

始新世の帯水層の地下水を代表する湧水が調査地域東部の Quseima に湧出している。ここでのTDS値は 1,440ppm と良好である。この湧水は下位の難透水層との境界部に湧

出している。これと同様な水理地質条件を備えた地域では、同様の良好な地下水が得られる可能性がある。すなわち、本層が下位の難透水性の Esna Formation を覆って台地上に広く分布する次の地域がこれに該当する。

Quseima東方の Gebel Risha から南に連続する台地
El-Kuntilla に近い Gebel El-Shara の台地
Nakhl から南に連続する台地

これらの地域ではいずれもEoceneの地層の下にEsna Formationが分布しており、Ain Gudeiratの場合と同様な水理地質構造を成している。特に3番目の地域は南シナイの広大なEoceneの分布地と連続しているため重要度は高いといえよう。

9-4-2-2 上部白亜紀帯水層

(1) Senonian の帯水層

Senonian の地層は、上部白亜紀の最上位の地層であるため、地表面からの深度が浅いところに分布するため、次のような利点をもっている。

- ・構成する石灰岩の裂か亀裂を通して、現在の降水による涵養を受ける可能性があること
- ・掘削深度が浅く、かつポンプによる揚程が小さい。

地下水は概してTDS値が高いが、Hasana 地域に近い No.49 El-Arish Well-19 ではTDS値が 2,200ppm とやや低い値である。この地域は Wadi El-Arish の流域の近傍に当たっており、上述した 涵養の条件に該当する。

従って、Senonian の帯水層については、Wadi El-Arish に代表される大きな Wadi の周辺地域における調査を実施し、現在の涵養による比較的良好な水質の地下水体が形成されているか否かの検討が必要である。

(2) Turonian の帯水層

Turonian の帯水層に関するデータは Ragabet El-Naam Fault 以北の北シナイにおいてはきわめて乏しいが、TDS値は Hasana地域で7,000ppm、Naqb地域で35,000~40,000 ppmであり、水質としては期待できないようである。

一方、Ragabet El-Naam Fault 以南では Naqb 南方の Sheira 地域で1,100ppm という良好なTDS値が得られている。この地域の帯水層は南シナイにその主体があるとみられるため、この地域の Turonian の帯水層の評価のためには南シナイのデータを蓄積す

る必要があると考えられる。

Turonian の帯水層に対する今後の調査は、Ragabet El-Naam Fault 以南及び南シナイから北シナイへの地下水流動の中心となる Nakhl 周辺に限られるべきであろう。

(3) Cenomanian の帯水層

Cenomanian の帯水層は調査地域全域にわたって分布しているが、地域によるTDSの変化が認められる。Cenomanian の地下水の水質は、1,800~5,600ppm の範囲にあり、Hasana および Gifgafa 地域においては比較的低いTDS値が得られている。

TDS値が低い Hasana 及び Gifgafa 地域では、透水量係数も高い結果となっている。

従って、Cenomanian の帯水層に対する今後の調査は、上に述べた Hasana 地域および Gifgafa 地域を主体として帯水層および地下水の性質の把握に努めるべきであろう。

9-4-2-3 下部白亜紀帯水層

下部白亜紀層については、各調査結果を基にして水理地質図及びポートフォリオを作成した。

その結果、下部白亜紀層の地下水についての概念を得ることができた。

下部白亜紀層の地下水は、北シナイ地域において水質及び水量の面で先第四紀帯水層のうちで最も有望な帯水層であることが明らかとなった。そこで現在得られている成果の確認及び修正のため、今後の調査は次の2つの段階が考えられる。

STAGE-1:データが不足する地域に対する補足調査

STAGE-2:より詳細な水理地質構造の把握のための調査

① STAGE-1

下部白亜紀層についてのデータには地域による偏在が認められる。そこで現在の成果に、データが不足する地域のデータを補い、さらに普遍性をもたせるために実施する調査である。

このための調査対象地域としては次の地域が重点地域として挙げられる。

-Hasana 地域: 評価図で A1 に該当する地域(低 TDS、浅い水位の地域)の存在の有無の確認。Hasana 地域は下部白亜紀の地下水のもっとも

主体となる流れが通る地域と考えられるため、この地域でのデータを
得ることは極めて重要である。

- El-Kuntilla 地域: Main Stream のひとつである Arif El-Naga の南側を
通ってイスラエルへ向かうとみられる流れの存在の確認を行う。現段階
では水位、水質とも推定の域をでないため、その確認を行う。
- Kherim 地域: Hasana 及び Nakhl を結ぶ線の東側の広い空白地域の中心部
に当たる地域であり、この地域のデータを補う必要がある。但し、
Kherim 自体はドーム構造山地であり、地質構造の擾乱の影響
を避けるため調査地域は山地中央部から 20km 程度は離れた地域
で実施することが望ましい。
- Quseima 地域: Halal の南側を通る最も主要な流れの延長部にあり、この地域
における下部白亜紀帯水層のデータが必要である。
- 既設井戸における長期的水位変化の観測: 下部白亜紀帯水層の地下水の貯流量、
および 涵養等を検討するために必要な観測である。観測位置
としては、JNo.16 El Bruk-1、JNo.19 Arif El-Naga、Sheira-1、
Sadr El-Heitan等である。

2) STAGE-2

下部白亜紀についての全般的な把握ができた段階でさらに詳細な水理地質構造および
水文水質構造の理解を深めるために実施する調査である。具体的には、次のような内
容の把握を目的とする。

- Ragabet El-Naam Fault を越える南から北への流れの確認: この地下水の流れの
主体は Nakhl 付近を通るものであるため、この地域での調査を欠かすことは
できない。
- TDS値の変化状況: ドーム構造地域ではTDS値が増加する傾向が認められるが、ど
の様な地点から増加が始まるか、またその変化は急激なものかあるいは緩やか
なものかを把握する。
- 顕著な地質構造特に逆断層が水理地質構造に与える影響: Talet El-Badan に代表
される逆断層による水質悪化が同様な他の地域でも生じているか否か、またそ
のような現象が生じる範囲はどの程度かを把握する。これに該当する地域は、
Minshera、El-Bruk、Arif El-Naga および Talet El-Badan 等の地域である。

9-4-2-4 ジュラ紀帯水層

ジュラ紀の帯水層は上部ジュラ紀および中・下部ジュラ紀層がある。このうち、前者は比較的低いTDS値（950～3,800ppm）を示しており、この帯水層の確認を行うことはMaghara 地域における地下水開発に有効であると考えられる。