

### 第3章 水理地質調査/賦存量評価

#### 3.1 気象・水文

キファ市内には計画省が管轄する気象観測所があり、ここでは気温、湿度、蒸発量、降水量、風向、天候日数の観測を1989年より実施している。ここでは、キファ市を縦貫するコウダ・ワジ (Wadi Khouda) に水が流れることが無いため、ワジの流量観測は実施していない。

キファ市内の観測所で、1989年から1997年までの8年間に観測されたデータに基づくと、キファ市の年間平均降水量は235.4mmであり、蒸発量は3,062mmである。キファ市における月別平均降水量と蒸発量を下図に示す。

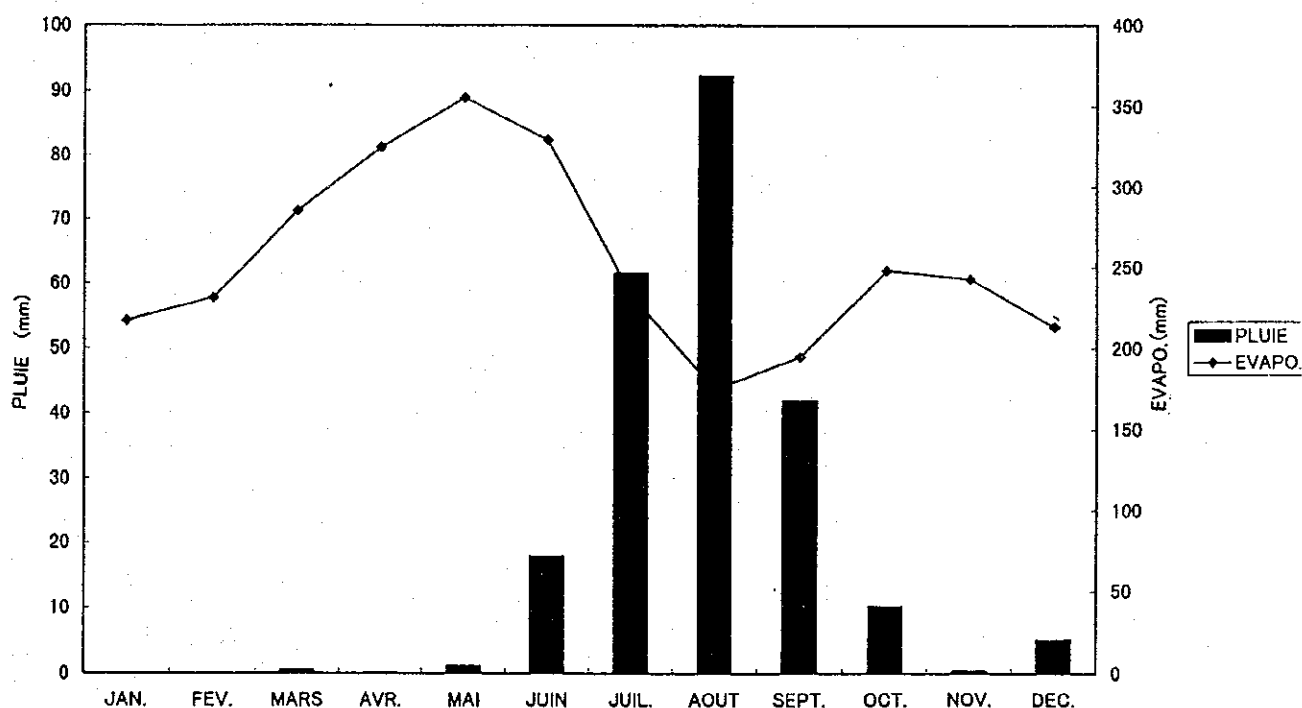


図 3.1-1 キファ市における平均月別降水量と蒸発量

以上の図に示すように、調査地域における雨季は6月から10月の5ヶ月間であり、8月に最も多くの雨が降る。なお、上図で12月に降雨が認められるのは、1995年の12月に大量の降雨があったためであり、他の年の12月では降雨は観測されていない。一方蒸発量は5月が最も多く、雨季に減少する傾向がある。

降水量と蒸発量を比較した場合、すべての月で大幅に蒸発量が上回っており、最も降水量の多い8月でも、蒸発量は降水量の約2倍である。

### 3.2 地形・地質

#### 3.2.1 調査地域の地形・地質概要

##### (1) 地形概要

キファ市は、西をアッサバ (Assaba) 台地により、北をアウケル (Aouker) 砂丘状山地により、東をアフォレ (Affolé) 山地により制限されている平原に位置している。

キファ市周辺地域は、多くの場所で、北東-南西方向に平行する砂丘により覆われている。キファ市近辺の露岩地帯は、ゆるやかに褶曲したジャスパーや珪質ペライトがなだらかな丘と谷を形成している。丘の間に分布する谷は、流出口の無い窪地となっていることが多く、数多くのワジが流入している。

セネガル河の支流の一つであるカラコロ (Karakoro) 川の北の延長にあたるエル・ムシレ (El Msilé) ワジに流入するコウダ (Khouda) ・ワジがキファを横切っている。コウダ・ワジには、雨季の間ワジ沿いに池が断続的に形成されている。

##### (2) 地質概要

キファ市付近の地質図を図 3.2-1 に示す。

キファ市の周囲にはインフラカンブリア紀からカンブリア-シルル紀までの堆積岩層および第四紀層が見られる。地層の層序は表 3.2-1 の様に構成されている。

表 3.2-1 キファ周辺の地質層序

第四紀	—	砂丘、沖積層、湖沼底の粘土
—	貫入岩類	粗粒玄武岩
シルル紀	アッサバ・シリーズ	砂岩、珪岩
		上部ドロマイト
カンブリア紀	キファ・シリーズ	淡黄色細粒砂岩
		ペライト (泥岩、頁岩)
		ジャスパー (チャート)
		下部ドロマイト
	カンブリア基部・シリーズ	上部漂レキ岩
		ダール・タレブ砂岩
		下部漂レキ岩
インフラカンブリア紀	アフォレ・シリーズ	アフォレ山塊頂上の緻密な砂岩 アユーン砂岩

キファ市の東 (アフォレ山地) から西 (アッサバ台地) まで、西方にゆるく傾斜したカンブリアからシルル紀までの地質系統が見られる。キファの東方には、アフォレ山地にインフラカンブリア紀のアユーン (Ayoun) 砂岩が広く露出している。キファ市付近においては、露頭は主にカンブリア紀～シルル紀のペライト (泥岩、頁岩)、ジャスパー (チャ

一ト)、漂レキ岩よりなる。キファ西方は、おそらくシルル紀～オルドビス紀の砂岩・珪岩が、アッサバ台地の頂部を形成している。

アユーン砂岩はアフォレ山地の土台をなし緻密な砂岩がその屋根を形成する。これらアフォレ・シリーズの砂岩は大規模な斜葉理により特徴付けられ、層厚は約 100m である。岩質は柔らかく、その色は白、黄、又は薔薇色で、時々粘土質の薄い層と互層している。

インフラカンブリア紀のアフォレ・シリーズの砂岩はカンブリア紀の漂レキ岩に不整合に覆われる。漂レキ岩の上部にはキファの北東に露出するダール・タレブ (Dhar Taleb) 砂岩が見られる。さらにこれを、上部漂レキ岩が覆う。これらの漂レキ岩は、著しく淘汰が悪く粘土-砂-角レキからなる。漂レキ岩中の角レキは、花崗岩からなりさまざまな大きさである。

上部漂レキ岩は、主にペライト (泥岩、頁岩) とジャスパー (チャート) からなるキファ・シリーズの古生層により覆われている。漂レキ岩とジャスパーの間に部分的に薄い 1 枚のドロマイト～石灰岩の層 (約 15m) を挟む。カンブリア～シルル紀の年代のこのシリーズは、ジャスパー、泥岩および淡黄色細粒砂岩よりなる。ペライトとジャスパーはキファ付近およびキファ北部に広く分布している。ペライトは、いろいろな色 (灰色、緑色、ベージュ色、帯紫色、黒色) の緻密な珪質-粘土質の非常に細粒な岩石であるが、時々砂岩質である。層厚は 200m を超える。

これらキファ・シリーズの堆積岩類は、アッサバ台地の断崖に露出しているアッサバ・シリーズの珪質砂岩により覆われている。この砂岩の基底には、1 枚の薄いドロマイト質石灰岩の層 (15～20m) がおそらく存在すると考えられる。

これらの古生層は、一般にゆるく西に傾斜して整合して重なっている。また、これらの地層はしばしば、塩基性貫入岩 (粗粒玄武岩、閃緑岩等) により貫入されている。

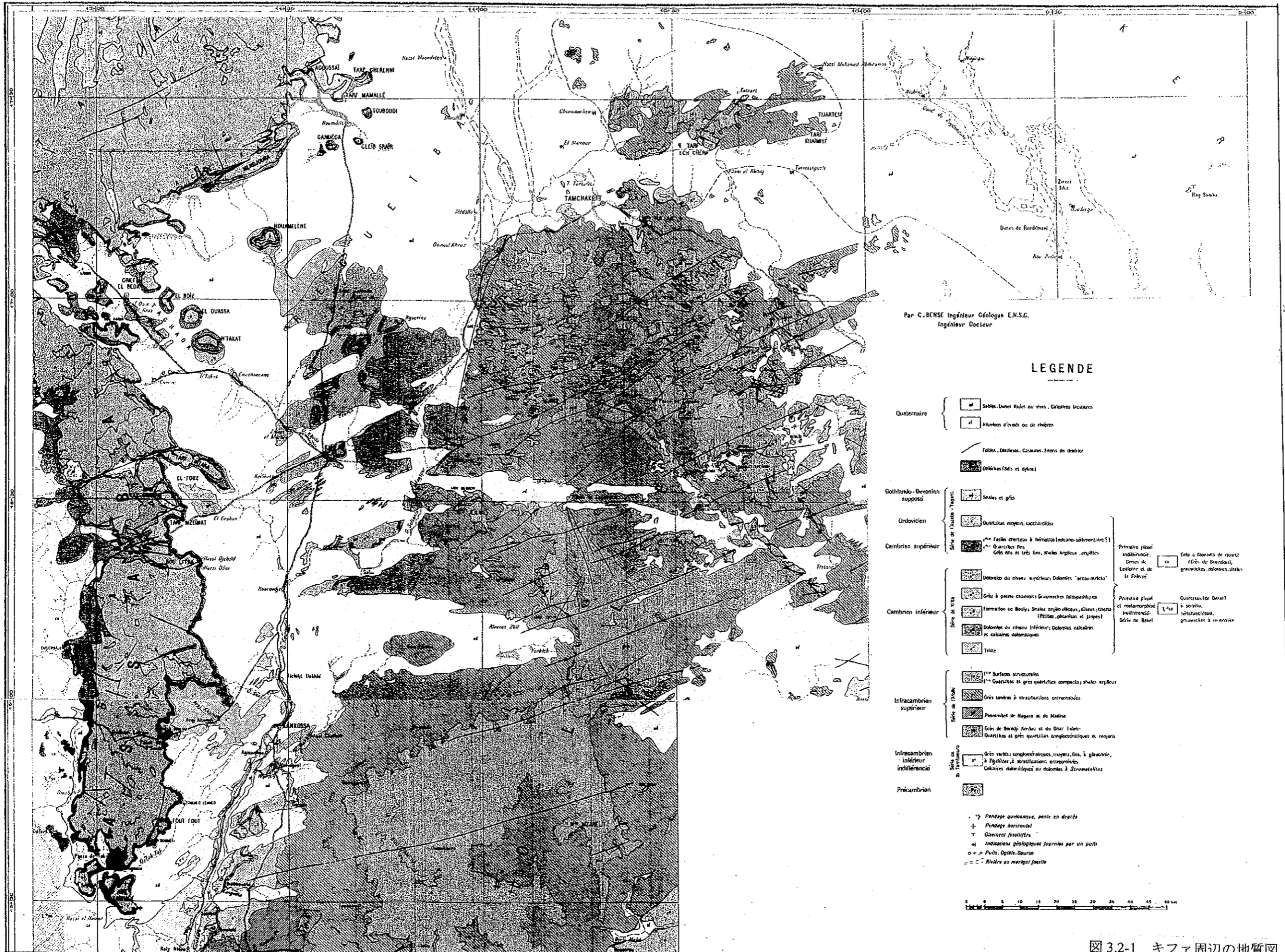


図 3.2-1 キファ周辺の地質図

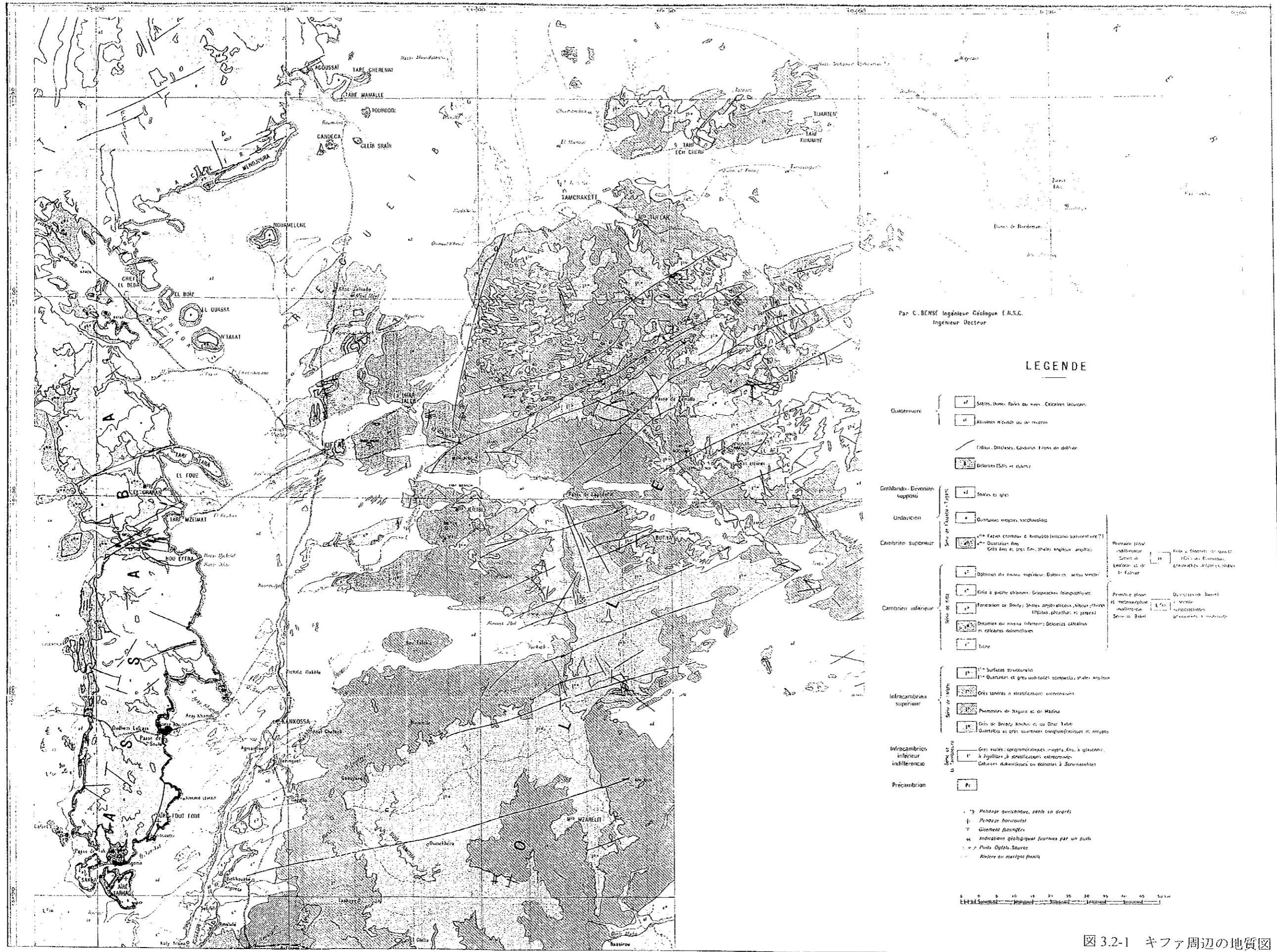


図 3.2-1 キファ周辺の地質図

### 3.2.2 航空写真判読結果

1956年撮影の1/50,000モノクロ航空写真を用いて、調査地域周辺の航空写真判読を行った。判読の範囲はキファ市を中心に半径約20kmの区域である。判読の結果は図3.2-2に示す通りである。

#### (1) 航空写真判読による地形区分

航空写真判読によると、調査地域周辺には次に示す10の特徴的な地形が分布する。

- a. 固定砂丘
- b. 砂層被覆地域
- c. 段丘
- d. 急崖
- e. 基盤岩露出地域
- f. 残丘
- g. 準平原面
- h. 窪地
- i. 草地
- j. 湿地

#### 1) 固定砂丘

固定砂丘は調査地域周辺に普遍的に分布する。固定砂丘は、高さが10mから30m程度の風成砂より成る丘と、その間に挟在される谷の集合から成り、丘と谷は西南西-東北東方向に、平行して直線的に延長している。丘と丘の間隔は100mから300m程度である。固定砂丘上には植生が疎らに点在し、固定砂丘の名が示す通り砂の移動はほとんど認められず、ほぼ安定している。

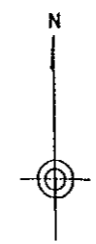
既存井戸調査の結果、固定砂丘は全て砂層より成るのではなく、ここでの砂層の厚さは最大で10m程度であり、丘の内部は岩盤より構成されていることが判明した。つまり固定砂丘は、西南西-東北東方向に平行して延長している基盤岩の山脈群を、風成砂層が覆うことによって形成されたものと推定される。

丘の間に分布する谷は、主として基盤岩露出地域となっている。ここはまた流出口の無い窪地となっていることが多く、数多くのワジが流入している。















#### 2) 砂層被覆地域

この地域は主要ワジ沿いや固定砂丘間の低地に主に分布しており、基盤岩を厚さ1mから3m程度の移動性の風成砂層が薄く覆う平坦な地形を形成している。砂層被覆地域には、小規模な基盤岩露出地域が点状に疎らに分布する。





**LEGEND**

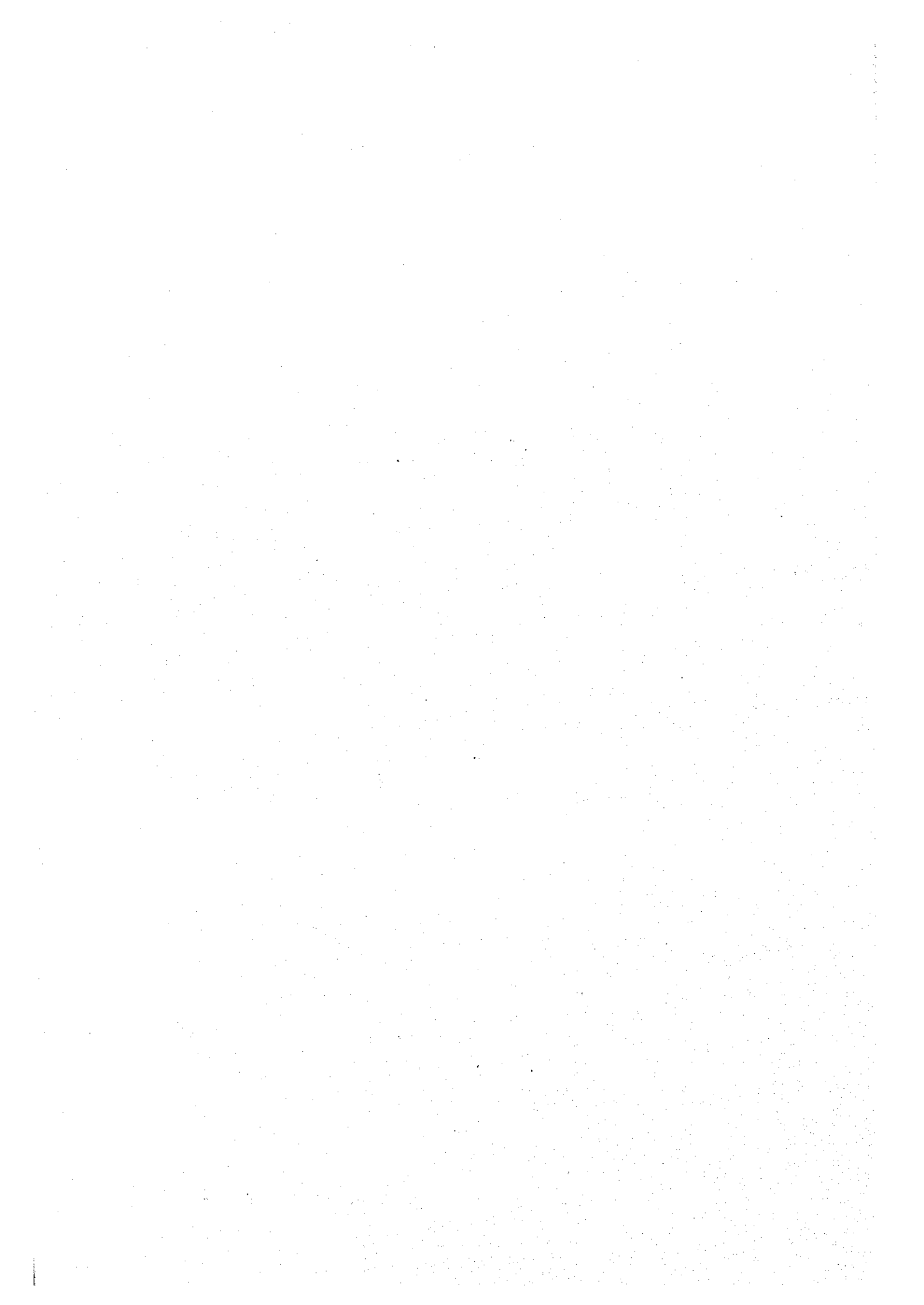
-  Stabilized Sand-dune
-  Sand Cover
-  Wadi Terrace
-  Outcrop of Bedrocks
-  Residual Peak
-  Depression
-  Cliff
-  Planation Surface
-  Main Wadi Course
-  Tributary Wadi Trace
-  Grass Land
-  Wet Land
-  Lineament
-  Main Road

Note: This figure was prepared based on the uncontrolled aerialphoto mosaics of 1/50,000 in scale taken in 1956.



图 3.2-2 航空写真判読图





### 3) 段丘

段丘はワジの旧河道面が一部残存したものであり、調査地域の主要ワジであるコウダ・ワジ (Wadi Khouda) 沿いに数段確認される。段丘の現河道からの比高は 2-3m 程度であり、幅は 400m から 500m 程度である。段丘面の上は、移動性の風成砂層によって覆われている。

### 4) 急崖

急崖はワジの侵食によって形成されたものであり、主としてワジの河岸や段丘面の背後に発達している。急崖の比高は、約 3m 程度である。

### 5) 基盤岩露出地域

基盤岩露出地域は、主として固定砂丘内の谷部に広く分布している。基盤岩露出地域では、基盤岩の表層部が風化により礫状化しているため、いわゆる“礫沙漠”の様相を呈する。

### 6) 残丘

残丘は、調査地域の東部に広く分布するタレブ砂岩分布地域の特徴的な地形であり、平坦な砂層被覆地域に尖塔状あるいは環状の砂岩の残丘が突出している。残丘の高さは大規模なものでは 10m 以上に達する。

### 7) 準平原面

準平原面は、侵食作用から逃れた過去の平原面のなごりであり、キファ市西方 30km に位置する Tarf Tintara と呼ばれる比高約 50m 程度の台地上に広く分布している。Tarf Tintara の麓の固定砂丘にも、丘の頂部が平坦になっている個所が認められ、これは上述の面より一段低い準平原面と判定される。

### 8) 窪地

窪地は固定砂丘の中の谷や被覆砂層分布地域の中の低地に認められ、ここには多数のワジが流入し閉鎖した水系を形成している。窪地には周辺の表流水が流入し、流入した表流水は流出水系が無いためここで蒸発、地下浸透する。このため、窪地は調査地域周辺における地下水の、重要な涵養源となっているものと推測される。

### 9) 草地、湿地

上述の窪地の中で、流域面積が大きく、流入する水量が多いものには、草地や湿地が形成されている。草地は、低木や草の繁茂する窪地を指し、湿地は草地よりも流入する水量が多いため、雨季には池となり、乾季においても湿潤な窪地を指す。草地や湿地の底面には、シルトや粘土が堆積している。

## (2) 水系

航空写真判読により追跡されるワジを、図 3.2-2 の航空写真判読図に示してある。この図に示されるように、調査地域の主要ワジであるコウダ・ワジが、蛇行しながら南に向かって調査地域を南北に貫流している。しかし、固定砂丘や砂層被覆地域内に発達する小規模なワジのほとんどはコウダ・ワジに流入すること無く、その末端は窪地で消滅している。このようなワジは一般に固定砂丘内に数多く発達しており、これらは東北東-西南西にのびる谷に沿ってながれているため、典型的な平行水系 (parallel pattern drainage system) を形成している。

また、航空写真判読結果の現地確認によると、主要ワジであるコウダ・ワジであっても大洪水時以外は水が連続して流れることはなく、通常の降雨の場合流出水はワジの中に停滞し、ワジ沿いに池が断続的に形成されることが判明した。

以上のように調査地域の水系は、小規模な閉鎖水系の集合によって形成される、極めて特徴的な流況を呈している。つまり調査地域においては、流出水は長距離を流下すること無く、近傍の窪地やワジの中で蒸発、地下浸透している。

## (3) リニアメント

調査地域におけるリニアメントとしては、調査地域の北部および東部において、東北東-西南西にのびるものが顕著に認められる。航空写真判読図に示すように、これらのリニアメントの方向は、ほぼ固定砂丘の延長方向と一致しており、連続性の良いものは、その延長が 15km にも及ぶ。調査地域の南部には南-北方向および北北東-南南西方向のリニアメントが密集している地域があるが、これらのリニアメントは連続性に乏しい。

キファ市の北部には、東北東-西南西方向の連続性の良いリニアメントが 2 本認められる。この 2 本のリニアメント間の距離は約 10km であり、この間には小規模なリニアメントが多数多数認められる。これらの小規模なリニアメントは西北西-東南東方向のものが多数を占める。このことから、この 2 本の東北東-西南西方向に延びるリニアメントは、右横ずれのセンスを有しているものと推定される。

これら 2 本のリニアメントの西側の延長を追っていくと、図 3.2-3 に示すように、既存の水文地質図に示されている大規模断層に行き当たる。この断層は台地 (Tarf Tintara) とその麓の固定砂丘 (Dune de Hassel Nkheile) を横切り、これら 2 本の断層に分岐しているものと推定される。

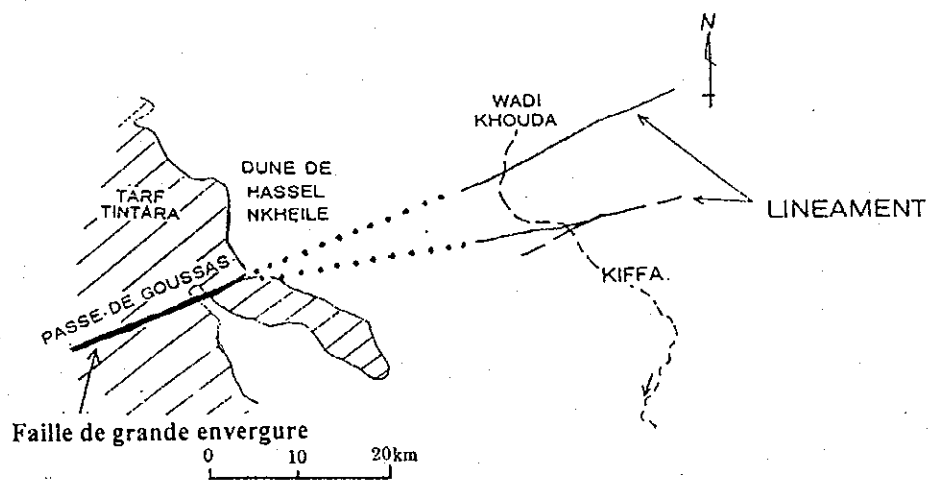


図 3.2-3 リニアメントと主要断層との関係

### 3.3 地下水水質

#### 3.3.1 市内浅層地下水の水質

##### (4) 調査の概要

本調査では、乏しい水資源の中でキファ市内浅層地下水の重要性がますます上がっていることが判明し、生活用水として利用するための水質評価が必要になってきていると判断された。キファ市内の既存井戸は約 1,000 本があり、これらの井戸水の電気伝導度（塩分濃度）と大腸菌群について井戸調査の時点で全て測定したが、地下水汚染状況を表す重要な指標である硝酸性窒素について全既存井戸の中から約 90 本を選んで分析を行なった。その結果に基づき、市内における井戸水水質の地域的分布を概略的に把握したが詳細な評価を行ない得る情報は、なお不十分であることが判明した。したがって、第3次現地調査において、詳細な追加水質調査を実施した。

詳細水質調査は、キファ市内の既存浅井戸 200 本を対象として実施し、調査期間は 1998 年 6 月の 1 ヶ月間とした。分析項目は次の 6 項目とした。

- a. 野外分析項目：水温、pH、電気伝導度
- b. 室内分析項目：大腸菌、硝酸性窒素、アンモニア性窒素

上記 a. については携帯式 pH 計（HM-12P、東亜電波製）と電気伝導度計（CM-14P、東亜電波製）を用い、b. の大腸菌については大腸菌群試験紙（TPA-CG、共立理化学製）、硝酸性窒素とアンモニア性窒素については DREL/2000 分光光度計（米 HACH 社製）を用いた。

浅井戸の水質と井戸周辺の衛生状況との関係を把握するため、井戸周辺の衛生状態、すなわち、井戸と便槽との位置関係、地表の衛生状況、家畜糞便の存在状況等を採水時に調査した（サポーティング・レポート S-3 水質分析参照）。

##### (2) 調査結果

水質調査を実施したキファ市内の浅井戸 200 個所の位置を図 3.3-1 に示す。これらの採水個所は下記の点を考慮して選定した。

- a. 浅井戸が点在している区域全体をなるべくカバーすること。
- b. 井戸の数が多く、かつ前回水質調査で硝酸性窒素濃度は低いと思われた区域（中央市場の北側）に重点を置くこと。
- c. よく使われている井戸を選ぶこと。

しかし、6 月はちょうど乾季が終わって雨季に入る直前の時点であったため、どの井戸も前回水質調査時点（1997 年 11 月）より水位が大幅に低下していた。半数以上の井戸において、採水時にバケツを降ろすと井戸の底に当たり、水を少しづつしか取れない状況で

行われた。また、前回の調査で採水できた井戸も、今回の調査時点では涸れているものが多くあった。「サポーターン・グレポート S-3 水質分析」に、200本の既存井戸の水質測定結果を示す。

### (3) 測定結果の解析

図 3.3-2、3.3-3、3.3-4 に塩分濃度（電気伝導度）、硝酸性窒素（硝酸塩  $\text{NO}_3$  として）とアンモニア性窒素濃度の地域的分布を示す。大腸菌については、定量的な表示ができないため、測定結果を大腸菌群数によってマーク別に示す分布図にまとめた（図 3.3-5）。

#### 1) 塩分濃度

電気伝導度で表す塩分濃度の分布状況は、雨季と乾季でほとんど変わっていない。塩分濃度の高い井戸は、主に市街地の中心部とその北と南の方向にある。特に市街地北部に、 $8,000\mu\text{S}/\text{cm}$  も超えた塩分濃度のピークがある。南部にも塩分濃度がもっと高い井戸があるが、あまり使われていないため、今回の調査対象井戸としなかった。

詳細水質調査は、井戸の密集する市街地を中心として行なったが、この結果地下水の塩分濃度分布について注目すべき点が認められた。つまり、後述するように、キファ市内の3箇所地下水位低下地域（Depression）が形成されているが、図 3.3-2 の地下水電気伝導度分布図に示すように、電気伝導度（塩分濃度）の高い地下水、あるいは電気伝導度の低い地下水が帯状になって、市の周辺地域から地下水の流れに乗って、これらの地下水位低下地域に引き込まれている様にも見える。このことから、帯状に分布する高塩分濃度地域は自然原因に起因するものと判断される。一方、キファ市の左岸にはこれらの分布とは異なった島状の分布を示す高塩分濃度地域が存在する。この分布は、硝酸性窒素の高濃度帯と良く一致していることから、人為的な汚染に起因するものと想定される。

これとは異なった見方として、高塩分濃度分布域が南南西-北北西、東北東-西南西の2方向の格子状配列（Lattice Pattern）を示していることに着目し、断層系が塩分濃度分布を規制していることも考えられる。

いずれにしても、キファ市浅層地下水塩分濃度分布が、どのような要因で形成されたかについては未だ不明な点が多いが、少なくとも、人口密集地における浅層地下水の塩分濃度は、おおむね高い傾向があることは確かである。

#### 2) 硝酸性窒素

硝酸性窒素濃度は全体として、雨季より乾季の方が高い傾向が認められた。これは、乾季の終わりの時期で水量が最も少なく、水質的に最も不利な条件であったことが関係していると思われる。しかし、これに対して塩分濃度は季節的变化があまりないのは、地下水の硝酸性窒素による汚染と地下水の塩水化は機構的に異なることを示唆している。前者は人為的活動と強く関連し、局地的に発生する可能性が大きいのに対して、後者は前述したように広域的の要素（例えば帯水層の水文地質構造、地下水の流れ等）の影響

が大きいであろうと推測される。

硝酸性窒素濃度が最も高く検出された井戸は、市街地中心部の人口密集地にある 350 番の井戸であり、窒素濃度として 319mg/L、硝酸塩に換算すると 1,400mg/L といった非常に高い数字であった。周りにも硝酸塩濃度 400~700mg/L の井戸が複数あり、分布図上で高いピークになっている。

硝酸性窒素濃度の高い地域は、市街地中心部及びその南部の広い範囲、北部の部分的な地域、西部及び北西部の一部の地域で、分布の傾向は雨季の時点と変わっていない。

### 3) アンモニア性窒素

アンモニア性窒素は人間及び動物の糞便中に含まれている窒素の最初状態であり、通常の場合、大量の下水等が地表から井戸へ直接流入でもしない限り、地下水中には存在しないはずである。要するにアンモニアは不安定なもので、土壤中に存在している硝化細菌等の微生物の働きで容易に亜硝酸性窒素を経て酸化態の硝酸性窒素になる。水質調査の結果、半数以上の井戸から極低濃度のアンモニア性窒素しか検出されなかった。アンモニア性窒素を比較的に高く検出された井戸は図 3.3-4 に示すように市街地中心部に近い北東方向に集中している。これらの井戸は水があるものの、水位が低くて井戸底の岩まで見えるようになっていたり、ゴミか虫が浮んでいたり、臭気を発していたりする状況であった。これは水量が非常に少ない季節で発生した異常の現象かもしれないが、井戸口はよく保護されていない原因で地上から汚濁物の直接流入がかなり発生していると思われる。

これ以外の理由としては、地下水が著しい還元状態にあったため、アンモニアが硝酸に酸化されずに残っていたことも、一つの可能性として考えることができる。帯水層であるペライト (Pelite) 中にはしばしば黄鉄鉱 (Pyrite, FeS) の微粒子が含まれていることがあり、大量の黄鉄鉱が含まれている帯水層では、黄鉄鉱の酸化により硫酸塩と水酸化鉄が形成されるとともに、著しい還元状態が形成されていることも考えられる。

### 4) 大腸菌群

どの井戸からも大腸菌群が検出され、しかも濃度が高かった。試験紙に直接試料を付けると、培養後紙が真っ赤になり菌群数を数えできないことがあったため、無菌水で試料を 10 倍希釈した後培養することとした。大腸菌群数の最も少ない井戸は、市の給水車の水源となっている 127 番の井戸で、濃度は 10 個/mL 程度であった。その他の井戸のほとんどは数百個/mL の濃度で、1 千個/mL を超えた井戸も 14 箇所であった。ばらつきが大きいので、地域的な分布な特徴を明確にすることはできないが、家屋が密集し人口密度の高い場所の井戸ほど大腸菌群数が多い傾向がある。

#### (4) 市内浅層地下水の水質評価

地下水を飲料水として使用する場合、原則として世界保健機関（WHO）の水質基準に合うことが要求される。塩分濃度（全蒸発残留物）について WHO の基準値は 1000mg/L となっている。電気伝導度（ $\mu\text{S}/\text{cm}$  として）の値はたいてい塩分濃度（mg/L として）の 1.5 倍になる場合が多いことから、ここでは電気伝導度 1500 $\mu\text{S}/\text{cm}$  が塩分濃度 1000mg/L に相当すると考える。また硝酸性窒素に関する WHO 基準値は 50mg/L ( $\text{NO}_3$  として) である。アンモニア窒素は、WHO 水質基準の項目にはなっていないが、許容濃度を 0.2mg/L (N として) とする場合が多いから、この濃度を目安として飲料水としての適用性を評価する。なお大腸菌群については、WHO の基準は検出されないこととされているが、塩素類の薬品（例えばモーリタニアで使用されている漂白剤 Javel、調査団は同薬品の消毒効果を確認した。）を加えて消毒すれば基準に達成できるから、ここでは地下水水質評価の指標とはしない。

塩分、硝酸性窒素、アンモニア性窒素濃度について上記の基準値をキファ市内の浅層地下水に適用する場合、飲料水としての適用性を評価すると、各水質項目に関して「適」或いは「不適」と評価される範囲を図 3.3-6 の示すように区分することができる。図から分かるように、塩分濃度について「不適」とされた地域（斜線の部分）は主に市街地の北部と南部にあり、また中心部の部分地域と西側町外れのところにも基準値を超えているが、西部と東部の広い範囲内には塩分濃度が基準値以下になっている。硝酸性窒素について「不適」とされた範囲は主に市街地の中心部、西、北東と南東方向の町外れのところにあり、現在市の給水車の水源地を含む西および東の地域には基準値以下になっている。アンモニア性窒素に関しては市街地中心の北東方向の比較的狭い範囲内に 0.2mg/L の濃度を超えているが、その他の地域には大抵 0.2mg/L 以下の低濃度になっている。

以上のことからキファ市内の浅層地下水の水質を総合的に評価すると、市街地の西と東両側は水質が良く、飲料水として利用できると考えられる。市街地中心部の地域には、硝酸性窒素或いはアンモニア性窒素による水質汚染が広範囲に及んでいることから、地下水を飲料水として利用できる地域は、キファ市の西部地域等の一部に限られている。

「適」と判定された地域の中で最も広いものは、ほとんど人の住んでいないキファ市の西側であり、この地域は「3.4 水理地質状況解析」に示す地下水位コンター図によれば、地下水の流れの上流域にあたる。この地域の地下水が汚染されると、汚染された地下水がキファ市域に流れ込み、キファ市の地下水汚染がより一層拡大することは明白である。したがって、キファ市西部地域の地下水水質の保全を図るため、将来この地域における土地利用の規制等の方策をとる必要がある。

「適」と判定された地域にある全ての井戸を各地区ごとにリストアップすると、表 3.3-1 に示すように合計 296 本の井戸がある。これはキファ市内に存在する全井戸（1061 本）の 28%にあたる。しかし、乾季に枯れる井戸が多数あることには留意しなければならない。



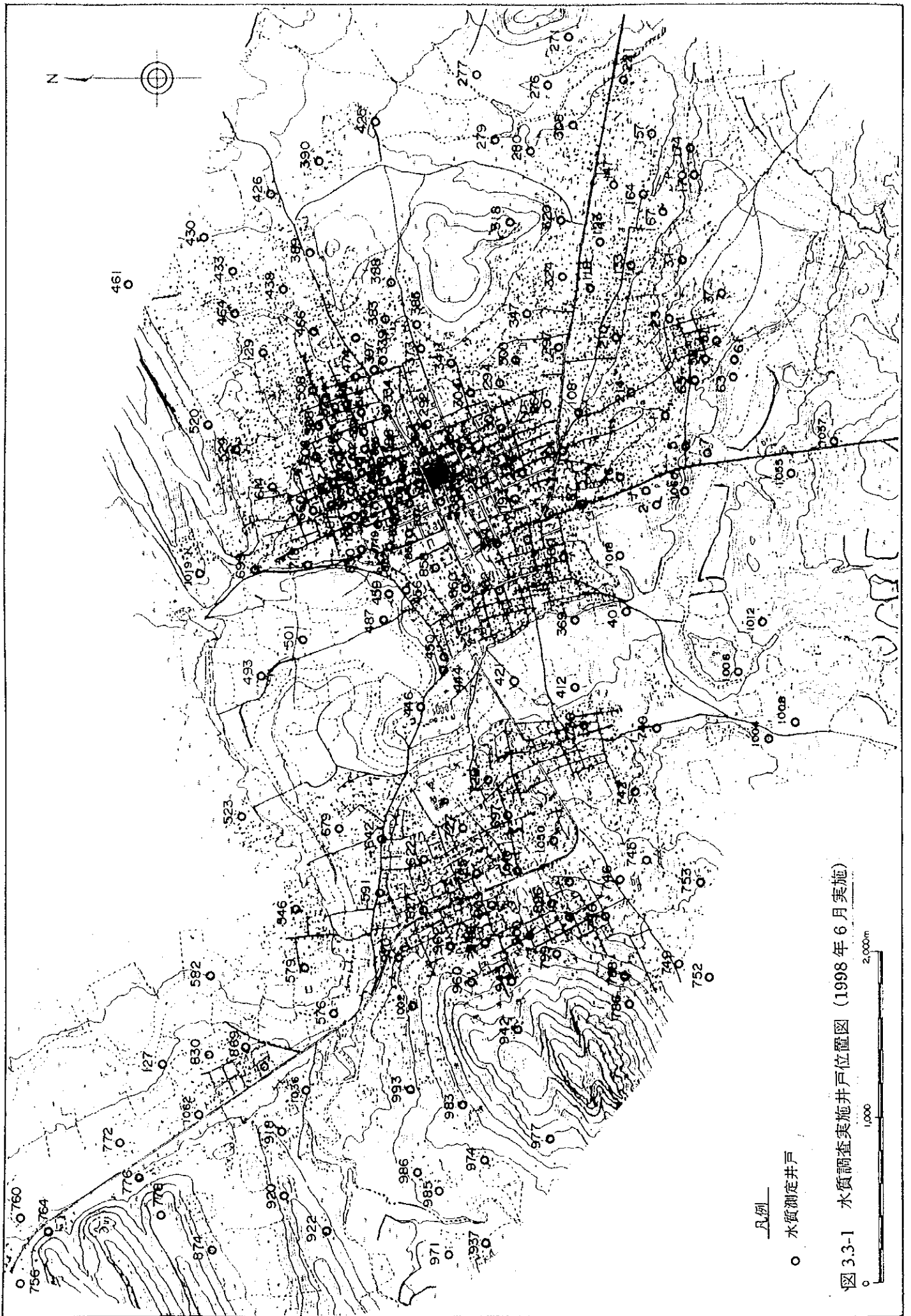


図 3.3-1 水質調査実施井戸位置図 (1998年6月実施)

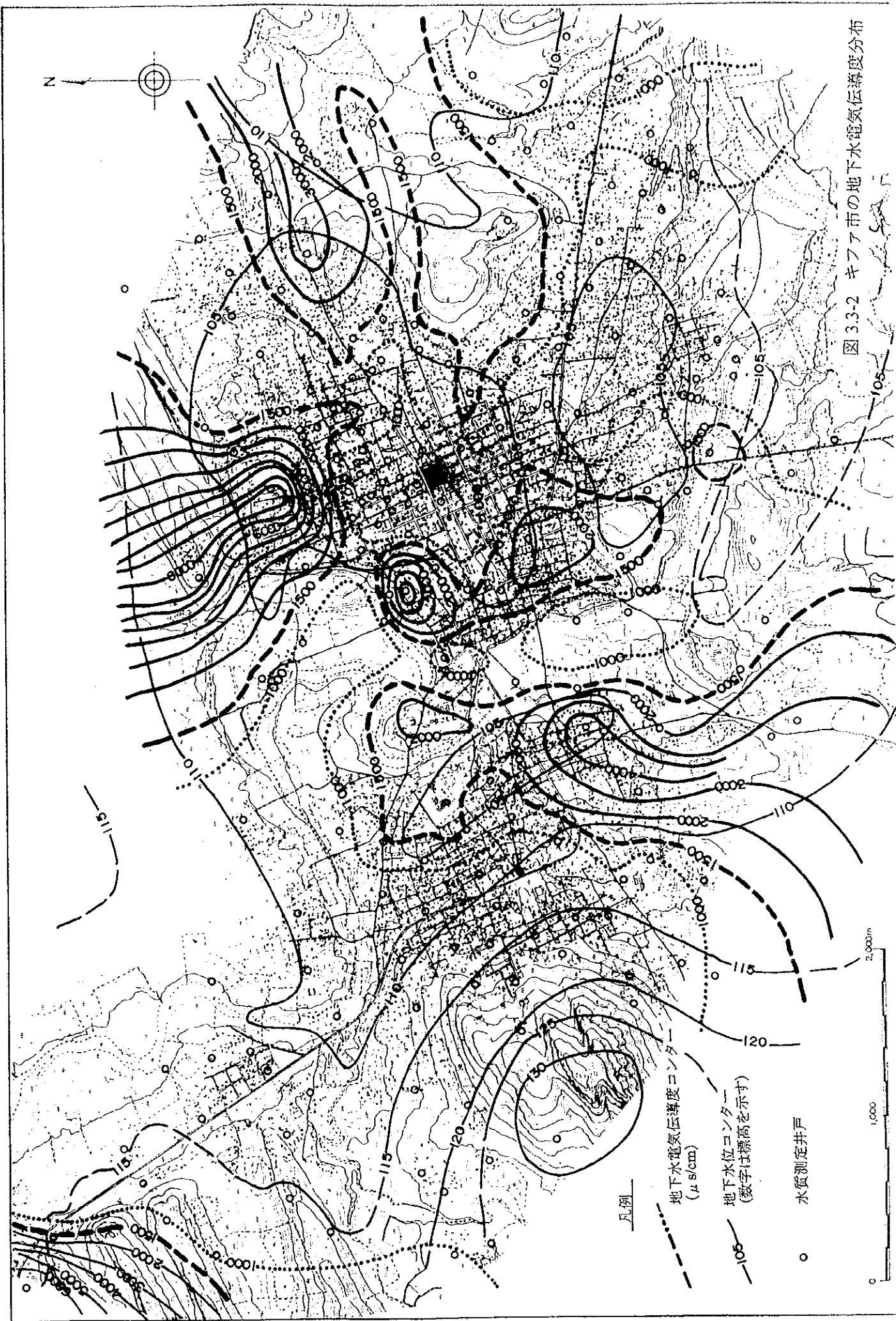
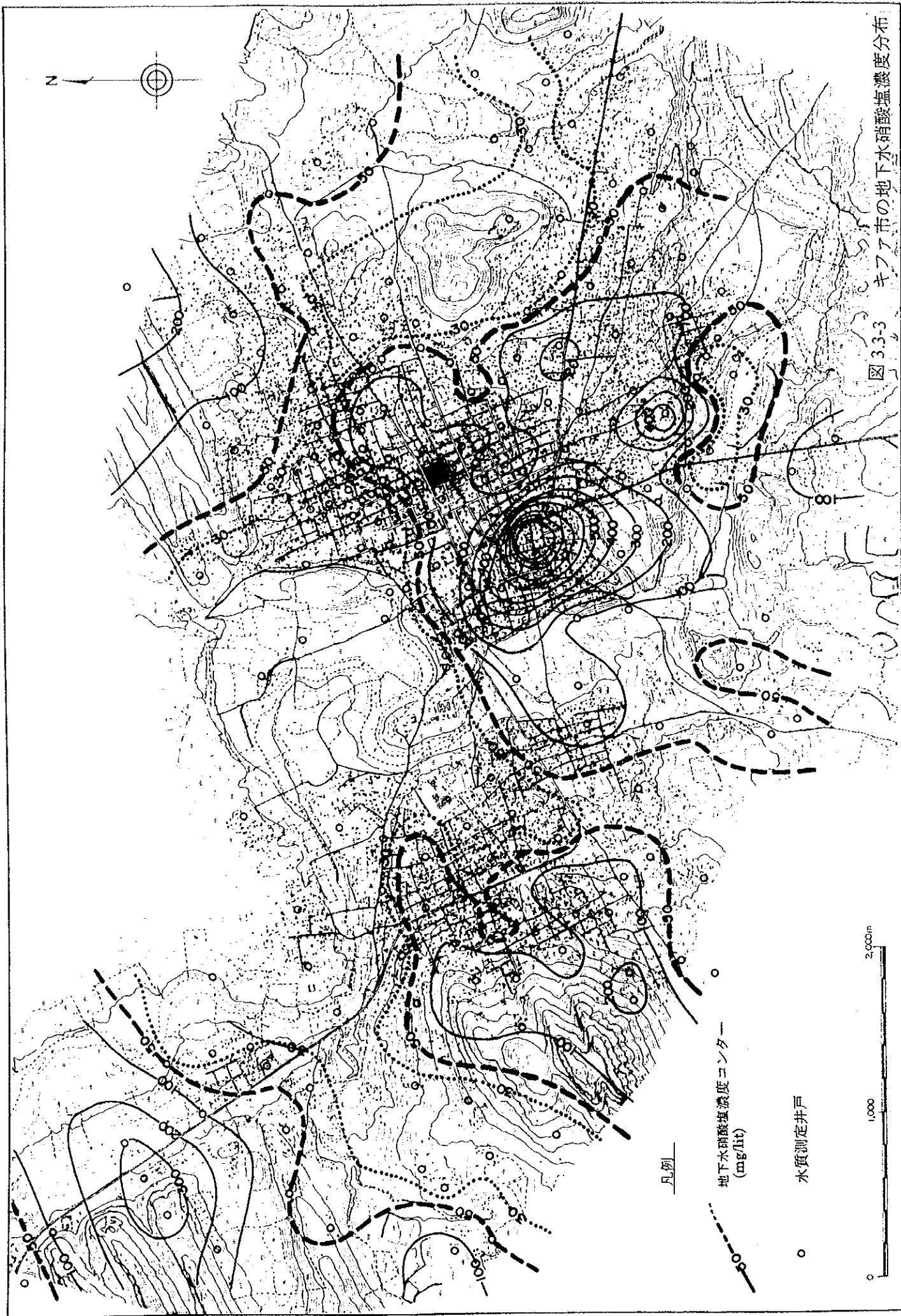


図 3.3-2 キョフ市の地下水電気伝導度分布



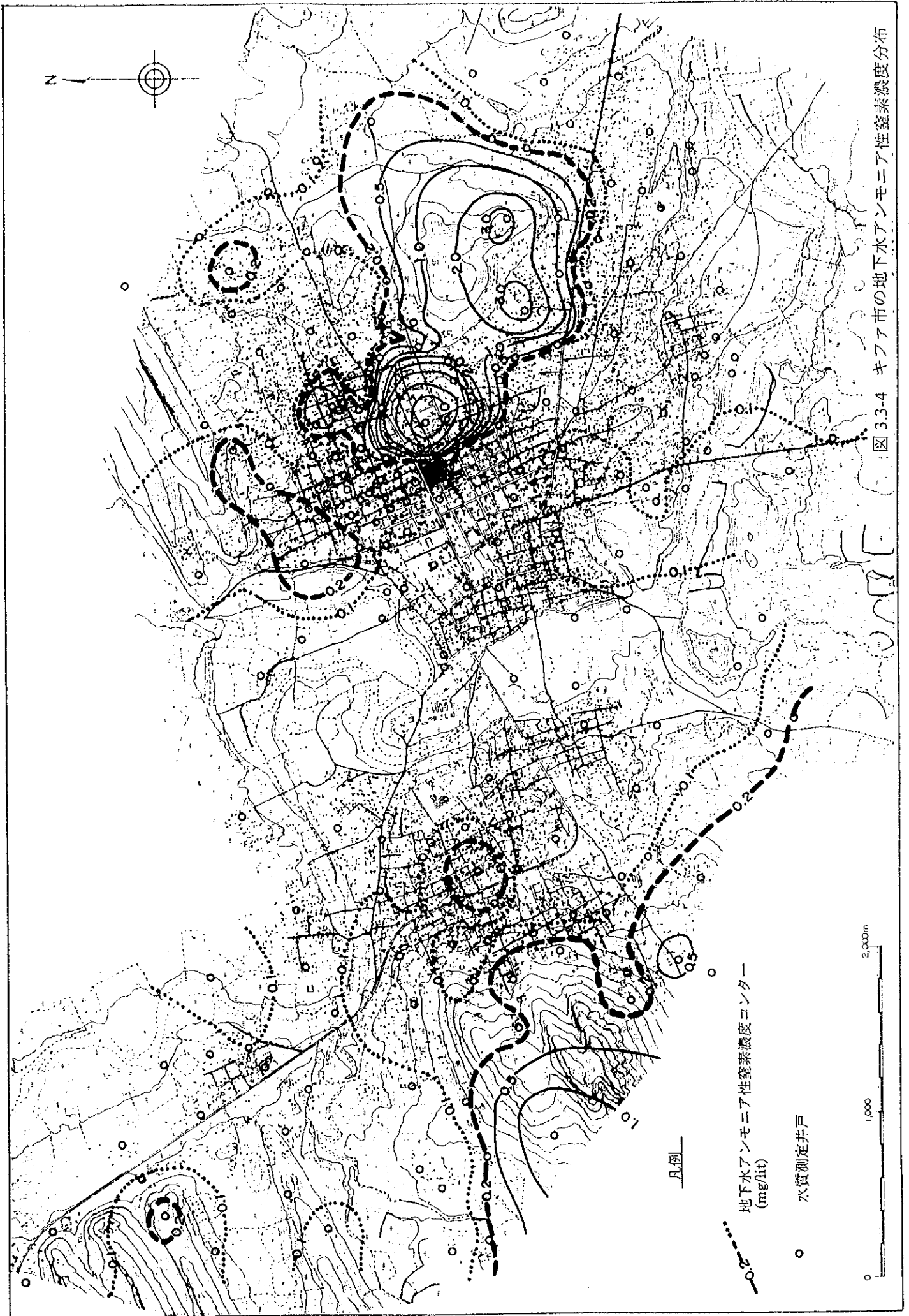


図 3.3-4 キョフア市の地下水アンモニア性窒素濃度分布

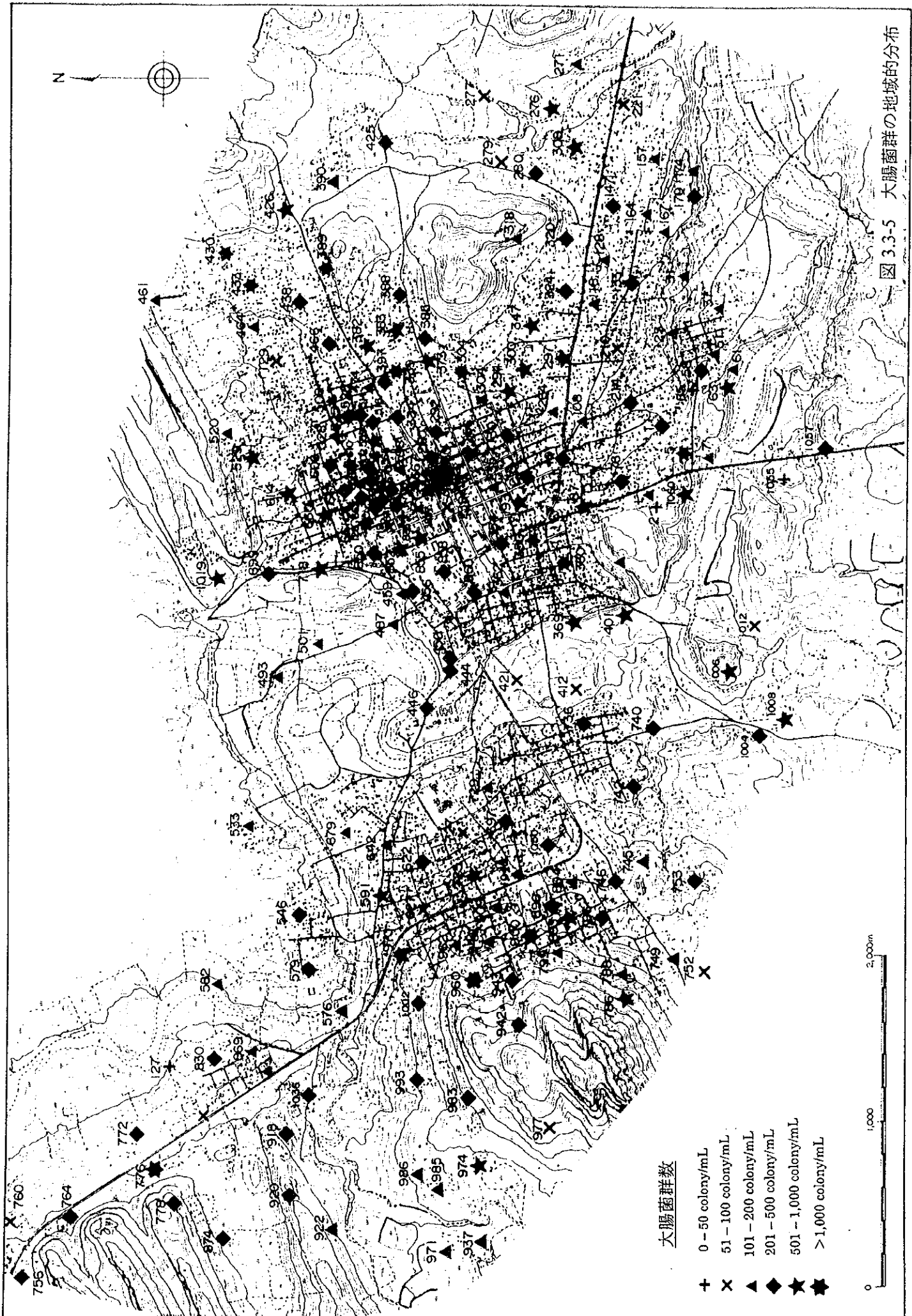


図 3.3-5 大腸菌群の地域的分布

図 3.3-6 キブア市の浅層地下水水质分布

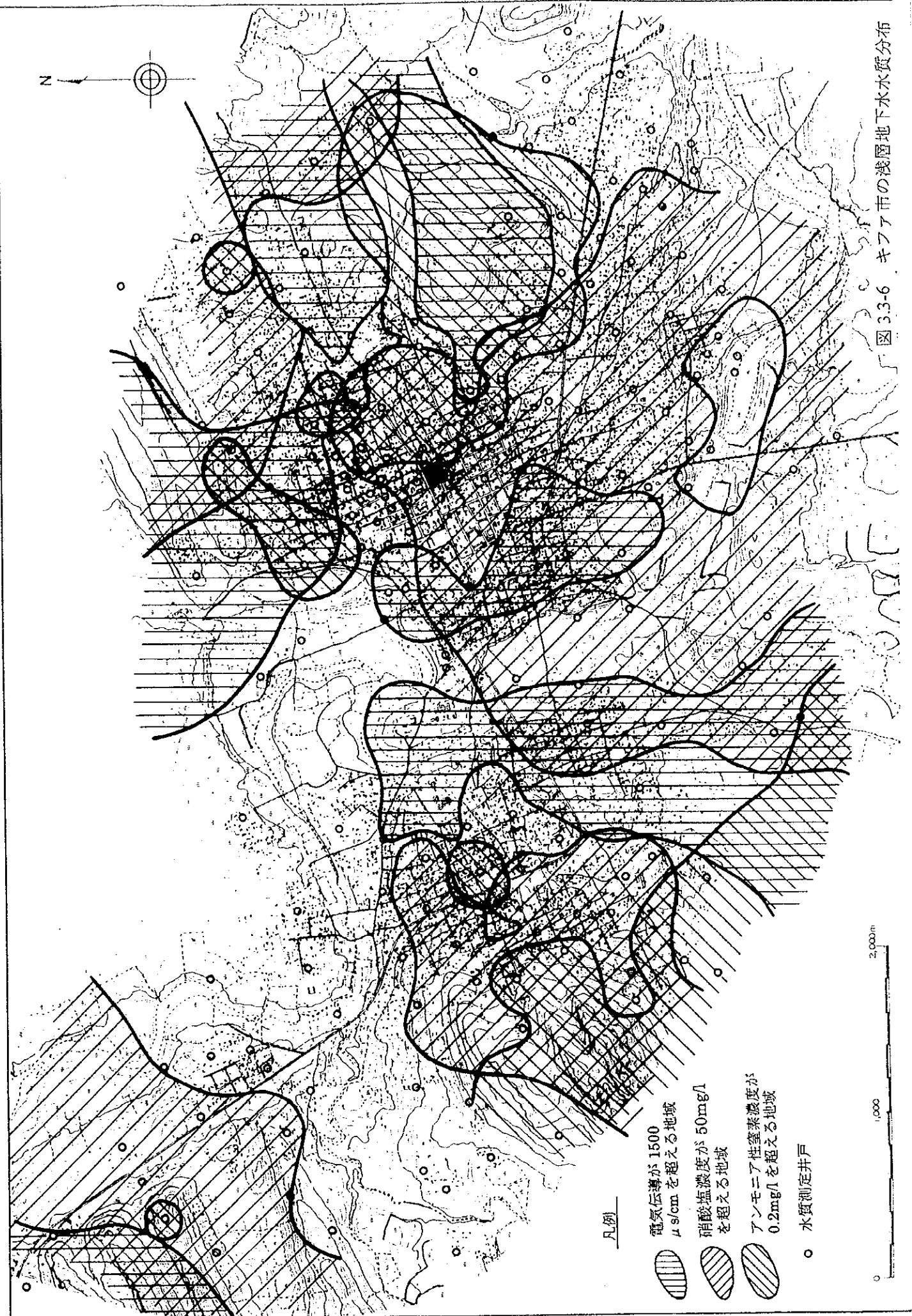


表 3.3-1 キファ市における各地区ごとの水質の良い井戸のリスト

地区名	井戸番号	本数
Belemtar East	127,576,577,578,692,693,829,830,831,832,833,834,835,862,863, 864,865,866,867,868,869,870,871,872,873,974,875,876,877,878, 881,882,883,884,885,998	36 本
Belemtar West	886,887,920,921,922,923,924,1036,1038,1039,1040,1042,1043	13 本
Boulenwar	531,532,533,534,539,540,541,542,543,544,545,546,547,548,549, 550,551,552,573,574,575,579,580,581,582	25 本
Kebata	643,673,675,678,679,680,681,682,683,684,685,686,687,688,689, 690,691	17 本
Kerkeb	937,938,939	3 本
M'sseigila	969,970,973,974,975,976,978,979,980,981,982,983,984,985,986, 987,988,990,991,992,993,994,995,996,997	25 本
Segatar I	569,570,571,572,583,584,585,591,592,638,639,641, 695,697,722,723,728,729,731,1048,1049,1050,1051,1052	24 本
Aleg	444,449,450	3 本
Wadi	452,460,483,484,485,486,487,488,489,490,491,492,493,494,495, 497,498,499,500,501	20 本
Gomez	128,617,657,658,663,661,701,702	8 本
Jedida	653,654,664,672,703,704,705,706,707,714,715,716,717,719,720, 721,836,846,847,848,851,852,855	23 本
Qlig	527,602,603,604,605,606,607,608,609,610,611,612	12 本
Temicha	376,377,378,379,387,388	6 本
Arafat	280,281,282,283,284,285,286,287,288,289,305,306,307,308,309, 310,311,312,313,314,315,316	22 本
Taiba	270,271,272,273,274,275,276,277,278	9 本
Nezaha	121,122,143,144,145,146,147,148,149,150,151,152,154,155,156, 157,158,159,160,161,170,171,172,173,174,218,219,220,221,222, 223	31 本
Siyassa	7, 39, 48, 49, 50, 51, 52, 58, 59, 61, 62, 63,1061	13 本
Entou	64, 65	2 本
Khadima	1060	1 本
El Hanger	750,751,752	3 本
	合計	296 本

### 3.3.2 北西水源地地下水の水質

#### (1) 概要

試掘調査井のうち、揚水量の多い深井戸(JF-2、JF-5A、JF-7B、JF-13A)、漂レキ岩中の地下水の電気伝導度が高い深井戸(JF-1、JF-4、JF-8)、電気伝導度が低い深井戸(JF-12B、JF-10)の計7井について水質分析を行った。さらに、既存の揚水量の多い深井戸(F-5)およびキファ市内の使用頻度の高い浅井戸(P1、P661)についても同様の水質分析を行い、合計11試料の水質分析を行った。

水質分析は、次の19項目とした。

- a. 現場分析項目：水温、pH、電気伝導度
- b. 現地事務所分析項目：大腸菌群、耐熱性大腸菌
- c. 国家保健センター分析項目：Na<sup>+</sup>、K<sup>+</sup>、Ca<sup>2+</sup>、Mg<sup>2+</sup>、Fe(total)、Pb<sup>2+</sup>、Hg<sup>2+</sup>、HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>、SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>、NO<sub>3</sub><sup>-</sup>、NO<sub>2</sub><sup>-</sup>、F<sup>-</sup>、CO<sub>2</sub>

これらのうち pH、水温、電気伝導度、大腸菌群、耐熱性大腸菌の5項目については調査団が測定し、その他14項目についてはヌアクショットの国家保健センター(CENTRE NATIONAL D'HYGIENE)に委託して実施した。

#### (2) 分析結果

水質分析値を表3.3-2に示す。また、主要成分について陰・陽イオンの当量に換算値は、サポーティング・レポート「S-3 水質分析」に示してある。主要成分の組成を図3.3-7のトリリニャー・ダイヤグラムに示す。この図には、陰・陽イオンのバランスの非常に悪い JF-1 と試料が腐敗臭のする JF-10 については、表示していない。

このトリリニャー・ダイヤグラムにおいて、全体的には、Mg<sup>2+</sup>と SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>+NO<sub>3</sub><sup>-</sup>の小さい組成であり、その他の成分にはばらつきがある。しかし、陰・陽イオンの当量数がほぼ一致しており分析精度が良いと判断される試料(JF-2、JF-12B、JF-13A、F-5)についてはダイヤグラムの中央付近に分布している。また、JF-8、JF-4、JF-2は、アルカリ非炭酸塩型(NaCl型)の水質区分に入っている。

以下に述べる電気伝導度、pH、ナトリウムイオン、カルシウムイオン、鉄イオン、塩素イオン、硝酸性窒素についてはWHOのガイドライン値を超えるものが見られるが、生産井に転用する予定の試掘調査井(JF-2、JF-5A、JF-7B、JF-13A)の水質は、おおむねこの基準を満足している。

##### 1) 電気伝導度

JF-1、JF-4 および JF-8 において、1500 $\mu$ s/cm を大きく超えており、飲用に適さない。これらの3つの井戸は全て漂レキ岩中で電気伝導度が高くなっている。



2) pH

ほとんどの試料が、pH7.1-8.0 と弱アルカリ性を示す。JF-8 のみ pH11.43 と強いアルカリ性を示すが、その原因は不明である。

3) ナトリウムイオン

JF-1 と JF-4 においてガイドライン値を超えている。これらの井戸においては高い電気伝導度を示しており塩分濃度が高い。

4) 塩素イオン

JF-1、JF-4 および JF-8 においてガイドライン値を超えている。これらの井戸においては高い電気伝導度を示しており塩分濃度が高い。

5) 鉄イオン

試掘調査井においてはガイドライン値の 0.3mg/l を超えるものは見られないが、既存深井戸の F-5 においては 0.31 mg/l と僅かにガイドライン値を超えている。しかし、鉄イオンのガイドライン値は、健康の観点から決められたものでなく、味覚、給水施設への沈殿、洗濯物を汚す等の観点からものである。また、他の鉄イオン濃度の低い水と混ぜることでガイドライン値以下にすることが出来るので、問題にはならない。

6) 硝酸性窒素

市内の浅井戸の No.1 においてガイドライン値を超えているが、試掘調査井においてはガイドライン値を超えるものはない。

7) 大腸菌

試掘調査井においては、大腸菌群および耐熱性大腸菌とも検出されなかった。

(3) 結論

以上の結果、JF-1、JF-4 および JF-8 においては電気伝導度、ナトリウムイオン、塩素イオンが高いことから、塩分濃度が高く利用できない。その他の試掘調査井の水質は、生産井に転用する予定の試掘調査井を含め、飲用に適している。

北西水源地においては、これまで述べたように、塩分濃度の高い地下水が点在し、これを生産井が引き込む可能性も否定できないことから、水質モニタリングを定期的に行っていく必要がある。

表 3.3-2 北西水源地下水質分析結果

	JF-1	JF-2	JF-4	JF-5A	JF-7B	JF-8	JF-10	JF-12B	JF-13A	Puis No.1	Puits No.661	F-5	O.M.S. Guideline
CE (µs/cm)	15030	985	4610	816	953	2560	1092	241	654	1421	974	814	(1500)
pH	7,93	7,86	7,99	7,12	7,20	11,43	8,3	7,54	7,52	7,18	7,61	7,2	6,5-8,5
T (°C)	33,1	34,1	34,1	34,6	32,9	33,5	33,2	33,8	32,8	32,5	32,4	-	-
Na <sup>+</sup> (mg/l)	390	101	238	47	48	133	108	23	64	57	50	92	200
K <sup>+</sup> (mg/l)	17	2	6	2	3	32	2	2	17	3	4	4,2	-
Ca <sup>2+</sup> (mg/l)	245,29	20,04	13,62	48,20	45,54	52,10	13,62	12,02	16,83	70,26	96,12	68	100
Mg <sup>2+</sup> (mg/l)	24,81	7,78	6,32	12,00	5,47	8,03	8,75	4,86	12,16	6,41	5,58	20	50
Fe <sub>total</sub> (mg/l)	0,05	0,06	0,07	0,08	0,05	<0,05	<0,05	0,07	0,06	0,08	0,05	0,31	0,3
Pb <sup>2+</sup> (mg/l)	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	-	0,05
Hg <sup>2+</sup> (mg/l)	<0,02	<0,02	<0,02	<0,02	<0,02	<0,02	<0,02	<0,02	<0,02	<0,02	<0,02	-	0,001
HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> (mg/l)	143,07	183,32	410,12	90,78	70,22	198,85	305,10	67,90	189,16	118,41	90,63	370	-
Cl <sup>-</sup> (mg/l)	3500	43	302	75	72	305	60	30	60	193	100	91	250
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> (mg/l)	3,60	72,40	0	6	10	6,40	0	1,2	6,00	7	12	45	400
NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> (mg/l)	gené par Cl	27,42	32,16	39,73	33,62	32,16	13,12	10,20	21,1	129	8,36	0,74	50
NO <sub>2</sub> <sup>-</sup> (mg/l)	<0,001	<0,001	<0,001	0,035	0,028	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	0,022	0,025	-	-
F <sup>-</sup> (mg/l)	0,03	0,01	0,02	0,05	0,05	0,01	0,02	0,03	0,02	0,05	0,05	0,25	1,5
CO <sub>2</sub> (mg/l)	0,0	0,0	0,0	0,02	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,68	0,0	<0,5	-
Coliforms	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
Thermotolerant Coliform	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND

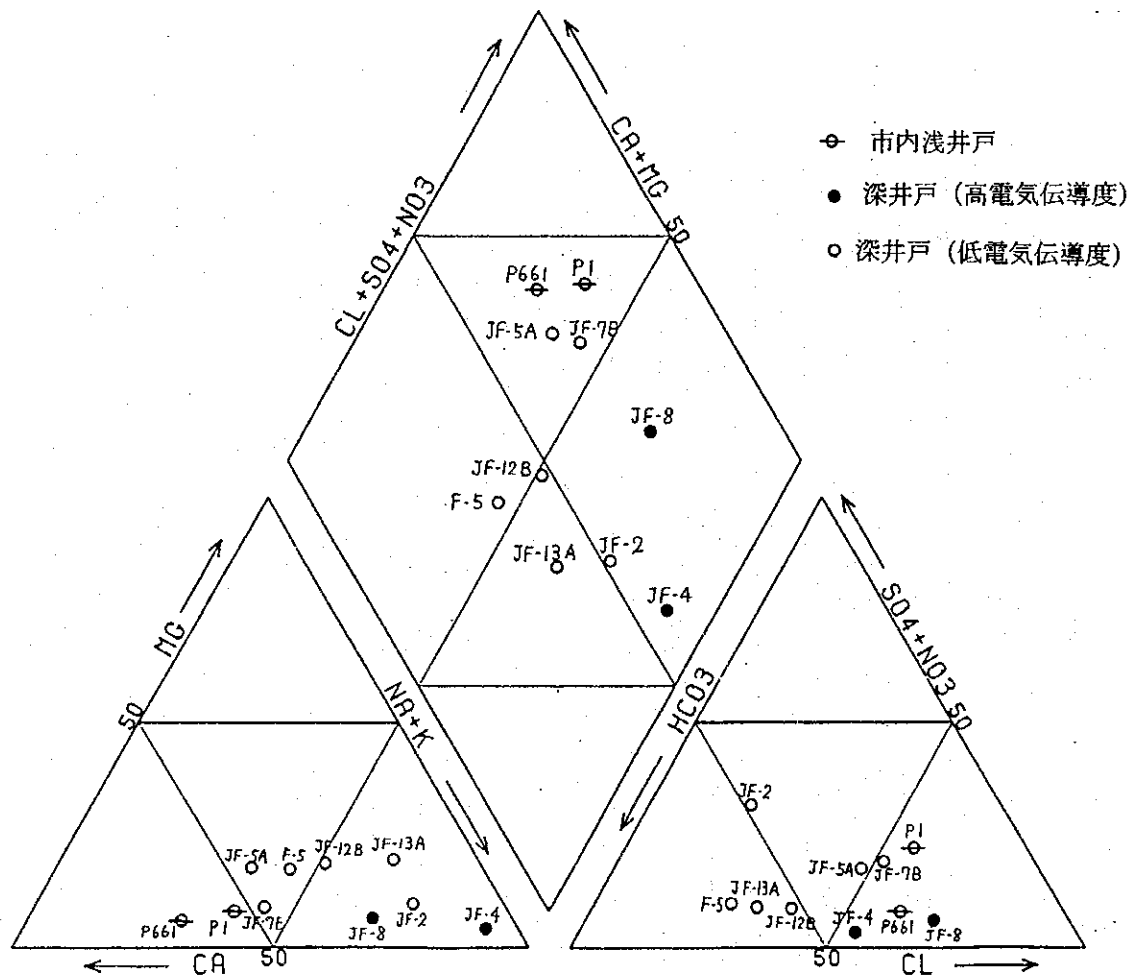


図 3.3-7 北西水源地地下水水質のトリリニャー・ダイアグラム

### 3.4 水理地質状況解析

#### 3.4.1 地下水位の変動特性

##### (1) 観測井の選定

井戸調査の結果に基づき、雨季と乾季の中間期および乾季に一斉水位観測を行う井戸 90 本と、一斉観測以外に 2 週間ごとに定期観測を行う井戸 10 本を選定した。

一斉観測用の井戸の選定にあたっては、キファ市全域に均等に観測井を配置すること、断面上で水位の変化を捉えること等を配慮した。また、定期観測を行う井戸の選定にあたっては、市内に均等に配置すること、ワジ沿いの低い地域と砂丘上の高い地域の地下水位変動の違いを把握できるようにすること等を考慮した。

図 3.4-1 に選定された観測井の位置を示す。なお、観測井 126 (F5) は市の北西約 10km に位置するため、この図には示されておらず、この位置については「3.5 地下水賦存量評価」を参照されたい。

##### (2) 定期水位観測の結果

###### 1) 地下水位の季節変動

定期水位観測結果を、図 3.4-2 の水位変動記録に示す。定期水位観測井は生活用井戸として使用されているため、井戸内の水位変動が自然の地下水位変動を示しているとは言えず、観測井 493 のように不規則な水位変動を示すものもあり、また各井戸での水位の季節変動は完全には一致しないものの、雨季が始まる 6 月から水位が上昇する傾向が認められる。なお、観測井 493 はワジの中に位置する揚水ポンプ付きの農業用井戸であり、1998 年の 2 月まで揚水を行っていたが、1998 年 3 月に作物が全て枯れてしまったことから以降揚水を停止しており、この理由により 3 月以降水位が上昇している。

以上の地下水位の季節変動特性から、調査地域の地下水は、降雨により涵養される不圧地下水であると判断される。

###### 2) 地下水位の長期変動傾向

観測井 126 (F-5) では、周囲に既存井戸が全く存在しないにも関わらず、図 3.4-2 に示すように地下水位が年間を通じて低下する傾向が明瞭に認められる。この理由としては、広域的な地下水位の低下傾向が考えられる。図 3.4-3 にキファ観測所における過去 11 年間の、年間降雨量の変動を示す。

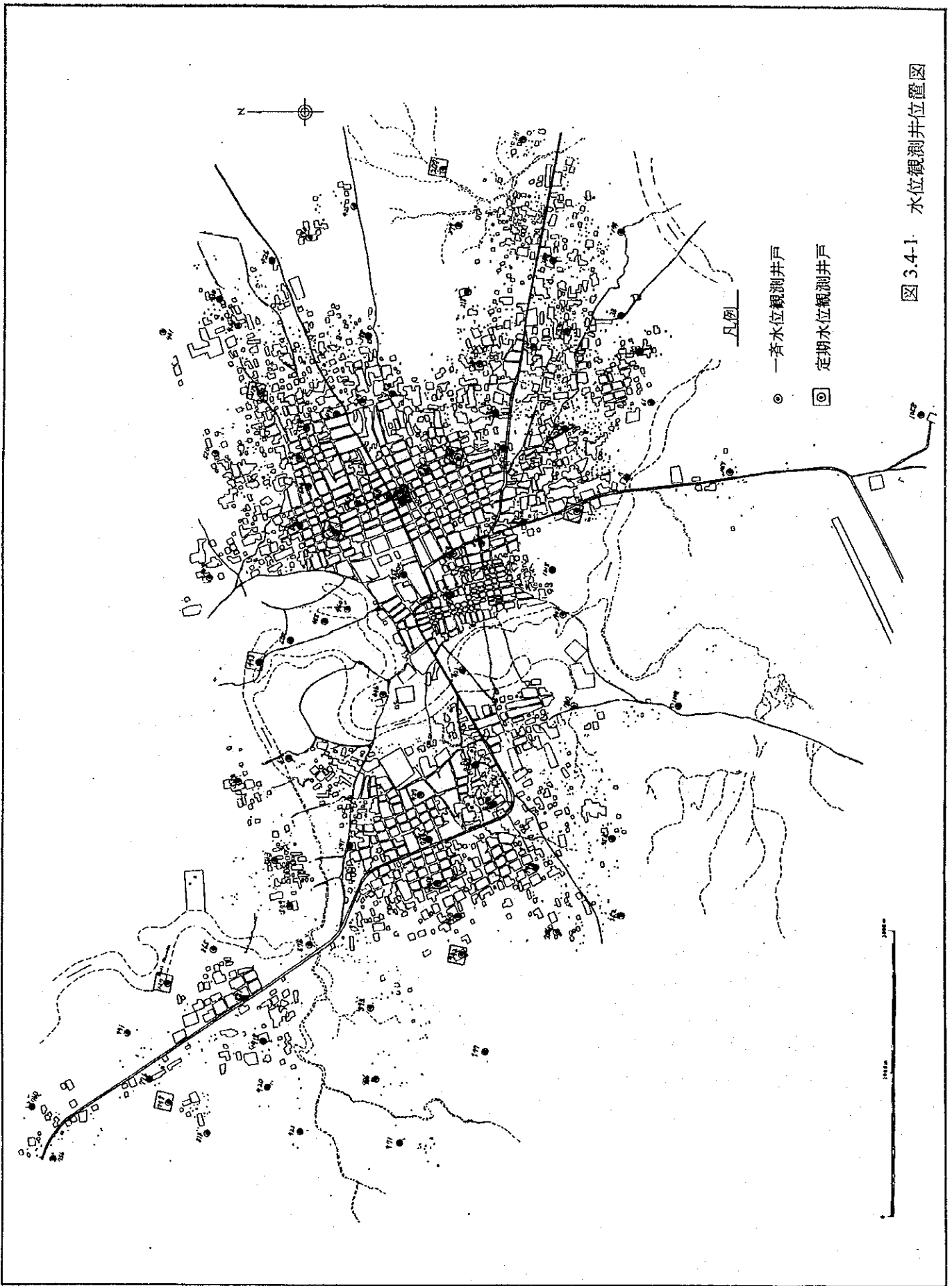
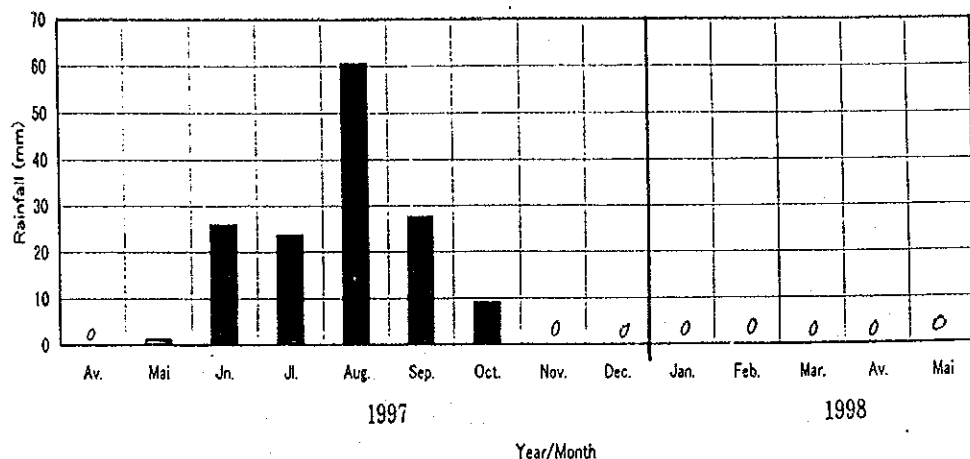


图 3.4-1 水位观测井位置图

### RAINFALL RECORDS AT KIFFA STATION



### GROUNDWATER LEVEL OBSERVATION RECORDS AT KIFFA

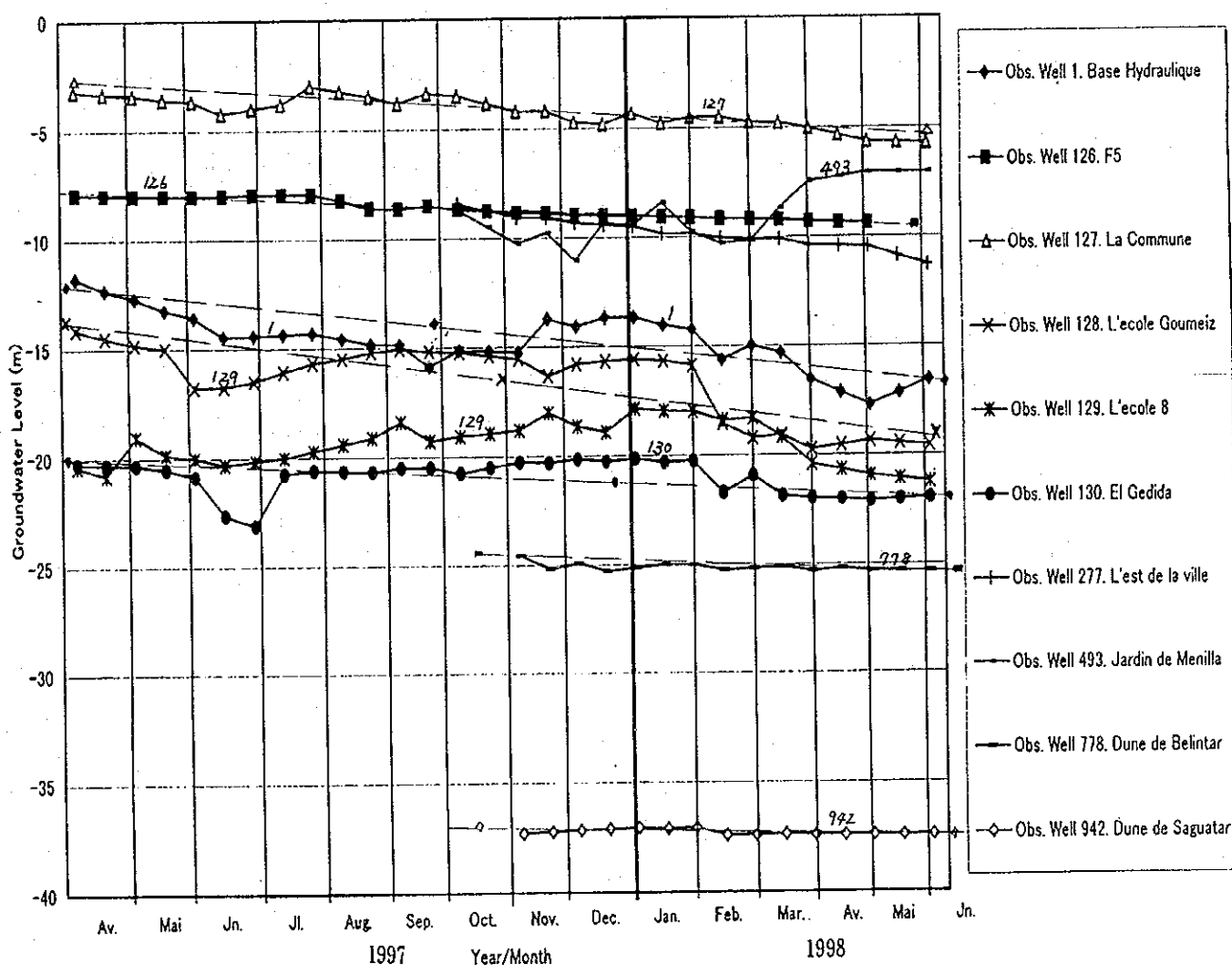


図 3.4-2 定期水位観測井の水位変動記録

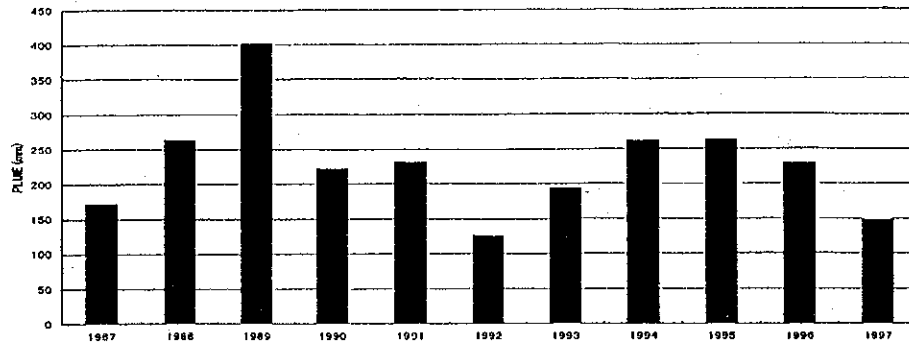


図 3.4-3 キファ市における年間降水量の長期的変動

図 3.4-3 に示されるように、過去 11 年間の記録を見ると、おおよそ 5 年の周期をもって降水量の多い年と少ない年が繰り返しており、水位観測を実施した 1997 年は年間降水量が減少する時期にあたっている。

以上の理由から、ここ 2 年間の年間降水量の減少により、調査地域の地下水位は広域的に低下しているものと判断され、その低下量は、揚水による影響を全く受けていない、観測井 126 (F-5) の水位変動記録から、約 1.5m/年と想定される。

### 3) 地下水位低下傾向

図 3.4-2 に示すように、キファ市内の既存井戸の水位は雨季には上昇し、乾季には低下する変動パターンを示しながら、年間を通じて全体に低下する傾向が認められる。この現象は、前述した降水量減少に伴う広域地下水位低下の影響があると判断されるが、次図に示すように、市内の観測井の中には年間水位低下量が、前述した広域地下水位低下量よりも大きいものがある。

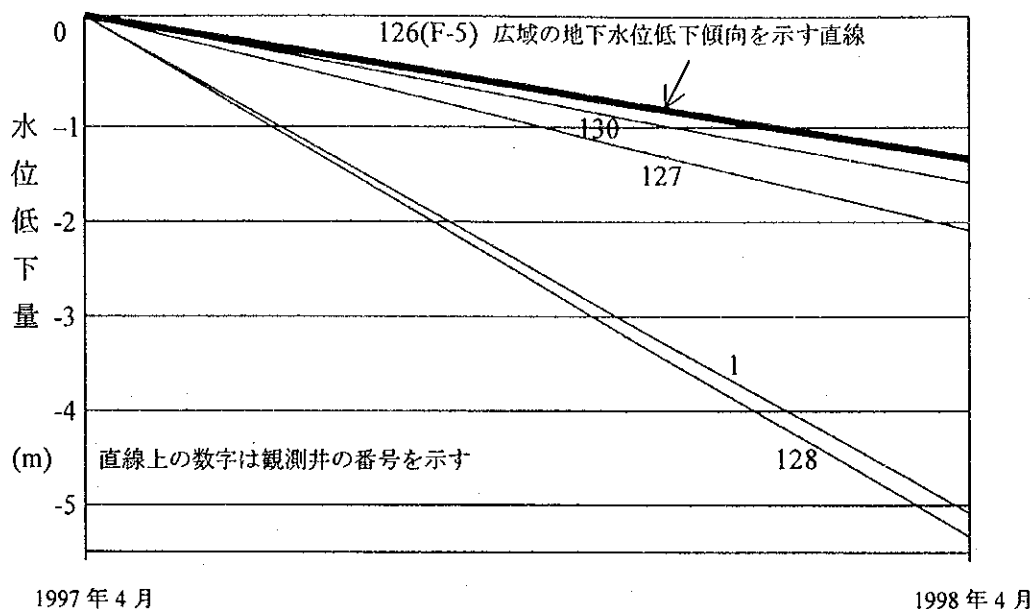


図 3.4-4 観測井の水位低下傾向 (1997年4月上旬を基準として)

図 3.4-4 に示した 4 本の観測井の内、1 及び 128 は後述する 2 つの地下水位低下地域の中に位置しており、130 はこれら 2 つの地下水位低下地域の間位置する。また、128 は給水車を用いたキファ市の給水用揚水井である。その他の観測井の年間水位低下傾向は、広域的な地下水位低下傾向を示していると考えられる 126 (F-5) の水位低下傾向と、ほぼ同様の年間水位低下傾向を示す。

観測井 126 (F-5) の年間水位低下率を大きく超えて水位低下が進む地域は、過剰揚水が行われていると判断される。図 3.4-4 から、キファ市内の地下水低下地域の中心部においては、観測井 126 (F-5) の水位低下率を基準とした場合、ここ 1 年間で約 4m の水位低下が認められ、後述するように、今後とも現在のような集中揚水を行なっていくと、この率で水位低下が進み、将来枯渇する井戸が大量に発生する恐れがある。また、キファ市の給水車の揚水井である観測井 128 でも、市内の地下水位低下地域ほどではないにしても、年間 1m 程度の水位低下傾向が認められ、今後地下水位の監視が必要である。

### (3) 一斉水位観測の結果

地下水位の一斉観測は、市内の 90 本の井戸について、1997年9月(雨季)、同年11月(雨季と乾季の中間期)、同年12月(雨季と乾季の中間期)、1998年4月(乾季)の4回実施した。この結果を、地下水面等高線図として、図 3.4-5 から図 3.4-7 に示す。また、雨季(9月)と乾季(4月)の地下水位の違いを、図 3.4-8 の地下水位断面に示す。



## 1) 地下水面の形状

地下水面等高線図および地下水位断面図に示すように、キファ市での地下水面はほぼ地形面に沿っており、標高の高い砂丘で高く、標高の低いコウダ・ワジ (Wadi Khouda) 沿いに向かって傾斜している。つまり自然状態では、地下水は両岸からワジに向かって流入し、ワジ沿いに流下している。このことは、調査地域の地下水が地表から涵養を受ける不圧地下水であり、その地下水面形状が地形に規制されていることを示す。

## 2) 地下水位低下地域

地下水面等高線図に示される様に、全ての時期において、大きな地下水位低下地域 (depression) が、ワジの左岸に 2 つ、右岸に 1 つ形成されており、キファ市に流入する地下水のほとんどは、これらの地下水低下地域に流れ込み、下流に流出しない状況となっている。これらの地下水低下地域は、既存井戸からの過剰揚水により形成されたことは明らかである。また、雨季 (1997 年 9 月) と乾季 (1998 年 4 月) の地下水低下地域を比較した場合、乾季の地下水位低下地域は雨季のそれよりも大幅に拡大しており、左岸の低下地域は雨季時の 2 倍以上に拡大している。

雨季と乾季の水位変動幅は、地下水位断面図に示すように地下水低下域で大きく、低下量は最大で 5m にも及ぶ。また、図 3.4-9 の雨季と乾季の地下水位差分布図に示すように、低下量の大きい地域は地下水低下地域と一致し、これは住宅密集地域である旧市街地とも一致している。

