

## 第4章 水理地質

## 第4章 水理地質

内部収束流域（IDB）における水理地質状況は以下の方法で調査された。

- (1) 既存資料の収集,
- (2) 既存給水施設インベントリ調査の実施,
- (3) リモートセンシング調査
- (4) 物理探査
- (5) 試掘調査

### 4.1 既存資料の収集

水理地質状況を調査するために、調査団は既存の井戸データや資料を収集した。収集資料は以下の様である。

- 水省ボアホールカタログ (タンザニア全土)
- DDCA ボアホールカタログ
- RWSSP-WADATA (2002年, シニャンガ州)
- 辺境地域における給水および健康プロジェクト (2002年, ドドマ州)
- アルーシャ州マスタープラン (2000年, アルーシャ州およびマニヤラ州)
- タボラ州マスタープラン (1978年, タボラ州)
- 地下水開発計画調査 (1998年, JICA)
- アルーシャ州モンドリ地区水資源開発調査 (1995年, JICA)
- JICA 専門家が各県に要求した給水施設データ
- ボアホール・コンプリーション・フォーム

ボアホール・データベースと給水施設データベースがこれらのデータから作成された。

#### 4.1.1 ボアホール・データベース

ボアホール・データベースは水省のボアホールカタログを基にして、それに他の資料からのボアホールデータを付け加える形で作成された。データベースの内容を表 4-1 に示す。水省のボアホールカタログは調査範囲を統一的にまとめられており、IDB の水理地質構造を理解するための基本的な資料として使われた。このカタログの特徴を以下に示す。

- ✓ 調査地域である流域内の6州に3,456本のボアホールデータがあり、1937年以降の多くのボアホールデータが納められている。
- ✓ 帯水層に当たらなかったり、塩分濃度がたかかったりして放棄された井戸が載っている。
- ✓ 掘削深度、静水位、水の出た深度、揚水量、水位降下そして、帯水層の地質が記述されている。
- ✓ 井戸の位置が記載されておらず、村落名が書かれているのみである。それから井戸の位置を特定することは非常に難しい。

- ✓ 表の中の欠損データが多い。
- ボアホールカタログの中の不十分なデータ項目には、相当の時間をかけて、他の井戸情報からのデータを加えた。データ追加・修正の基本的なルールを以下に示す。
- ✓ ボアホール・コンプリーション・フォームを正しいものと見なし、このフォームの記載と異なるものは修正した
  - ✓ もし、ボアホール・コンプリーション・フォームを基にしたボアホールカタログのデータが明らかに間違いがあったならば、そのデータは上記のマスタープラン等やボアホール・コンプリーション・フォームを参考にして修正される。例えば、あるボアホールカタログのデータはフィートとガロン単位で記載されていた。
  - ✓ 村落名はセンサスのリストと一致するように修正する。さらに郡とワードの項目がデータベースには追加された。

表 4-1 ボアホールデータベースの項目

| No. | Items                     | Type   |
|-----|---------------------------|--------|
| 1   | Serial Number             | Number |
| 2   | Region                    | String |
| 3   | District                  | String |
| 4   | Division                  | String |
| 5   | Ward                      | String |
| 6   | Village                   | String |
| 7   | Longitude (E)             | Number |
| 8   | Latitude (S)              | Number |
| 9   | Sub-village               | String |
| 10  | Borehole Number           | String |
| 11  | Year                      | Number |
| 12  | Location Village          | String |
| 13  | Depth (m)                 | Number |
| 14  | Static Water Level        | Number |
| 15  | Water Struck (m)          | String |
| 16  | Yield (m <sup>3</sup> /h) | Number |
| 17  | Drawdown (m)              | Number |
| 18  | Nature of Aquifer         | String |
| 19  | Quality Standard          | String |
| 20  | Remarks                   | String |

#### 4.1.2 給水施設データ

給水率については、本調査では表 4-2 に示された WaterAid という英国の NGO が出版したデータ (WaterAid, 2005) が使用された。IDB の給水率分布は図 4-1 に示す通りである。給水率は、改善された水源による給水を受けている人口の各県の総人口に対する比である。この比は、表 2-4 と同じデータに基づくものであるが、本調査は IDB の地方に注目しているのでシンギダやマニョニの町のような都市給水のサービスを受けている所は除外されている。

表 4-2 及び図 4-1 によると、このデータからは、タボラ州の Sikonge 県と Igunga 県の給水率が非常に低く、アルーシャ州の Arumeru 県は最高の比率を示す。この結果は地下水開発ポテンシャルの評価に考慮された。

表 4-2 改善された水源にアクセス出来る世帯の比率

| District                | Population | % Using improved | Breakdown by type of source (%) |           |             |       |
|-------------------------|------------|------------------|---------------------------------|-----------|-------------|-------|
|                         |            |                  | Piped                           | Protected | Unprotected | Other |
| <b>Arusha Region</b>    | 854,491    | <b>63.4</b>      | 52.6                            | 10.8      | 39.5        | 0.8   |
| Monduli                 | 160,521    | <b>39.2</b>      | 29.1                            | 10.1      | 60.7        | 0.1   |
| Arumeru                 | 421,495    | <b>81.8</b>      | 71.5                            | 10.3      | 16.8        | 1.4   |
| Karatu                  | 168,514    | <b>61.3</b>      | 53.3                            | 8.00      | 38.6        | 0.1   |
| Ngorongoro              | 122,838    | <b>30.8</b>      | 12.9                            | 17.9      | 69.1        | 0.1   |
| <b>Dodoma Region</b>    | 1,478,782  | <b>50.3</b>      | 38.6                            | 11.7      | 49.6        | 0.1   |
| Konoda                  | 409,877    | <b>36.5</b>      | 28.9                            | 7.6       | 63.5        | 0.1   |
| Dodoma Rural            | 431,001    | <b>50.8</b>      | 39.8                            | 11.0      | 49.2        | 0.0   |
| Dodoma Urban            | 173,631    | <b>38.2</b>      | 19.6                            | 18.6      | 61.8        | 0.0   |
| <b>Manyara Region</b>   | 896,886    | <b>33.7</b>      | 22.2                            | 11.5      | 65.8        | 0.5   |
| Babati                  | 260,664    | <b>48.7</b>      | 36.7                            | 12.0      | 51.3        | 0.0   |
| Hanang                  | 185,081    | <b>40.3</b>      | 30.3                            | 10.1      | 59.7        | 0.0   |
| Mbulu                   | 218,159    | <b>16.5</b>      | 3.6                             | 12.9      | 83.5        | 0.0   |
| Simanjiro               | 99,672     | <b>36.6</b>      | 16.2                            | 20.4      | 62.4        | 1.0   |
| Kiteto                  | 133,310    | <b>18.1</b>      | 14.0                            | 4.1       | 79.7        | 2.2   |
| <b>Shinyanga Region</b> | 2,540,578  | <b>33.7</b>      | 6.0                             | 27.6      | 65.7        | 0.6   |
| Maswa                   | 279,466    | <b>31.7</b>      | 12.7                            | 19.0      | 68.3        | 0.0   |
| Shinyanga Rural         | 275,357    | <b>26.5</b>      | 0.6                             | 26.0      | 69.1        | 4.3   |
| Kahama                  | 528,840    | <b>32.6</b>      | 3.0                             | 29.6      | 67.3        | 0.1   |
| Meatu                   | 241,389    | <b>36.1</b>      | 5.4                             | 30.6      | 63.8        | 0.2   |
| Shinyanga Urban         | 60,755     | <b>60.6</b>      | 19.3                            | 41.3      | 36.9        | 2.5   |
| Kishapu                 | 226,136    | <b>9.6</b>       | 3.2                             | 6.4       | 90.3        | 0.1   |
| <b>Singida Region</b>   | 938,081    | <b>33.9</b>      | 10.3                            | 23.6      | 66.1        | 0.0   |
| Iramba                  | 334,355    | <b>29.7</b>      | 10.3                            | 19.4      | 70.3        | 0.0   |
| Singida Rural           | 379,613    | <b>38.1</b>      | 4.7                             | 33.4      | 61.9        | 0.0   |
| Manyoni                 | 167,164    | <b>33.6</b>      | 23.9                            | 9.8       | 66.3        | 0.0   |
| Singida Urban           | 56,949     | <b>32.0</b>      | 6.5                             | 25.5      | 68.0        | 0.0   |
| <b>Tabora Region</b>    | 1,490,581  | <b>11.8</b>      | 0.5                             | 11.3      | 88.1        | 0.0   |
| Nzega                   | 385,877    | <b>20.5</b>      | 0.0                             | 20.5      | 79.5        | 0.0   |
| Igunga                  | 303,952    | <b>5.0</b>       | 0.3                             | 4.7       | 94.8        | 0.2   |
| Uyui                    | 276,793    | <b>10.4</b>      | 1.1                             | 9.3       | 89.6        | 0.0   |
| Sikonge                 | 123,493    | <b>4.0</b>       | 0.1                             | 4.0       | 96.0        | 0.0   |
| Tabora Urban            | 60,118     | <b>10.9</b>      | 5.3                             | 5.7       | 89.1        | 0.0   |

Source: Water Aid (2005): Water and Sanitation in Tanzania

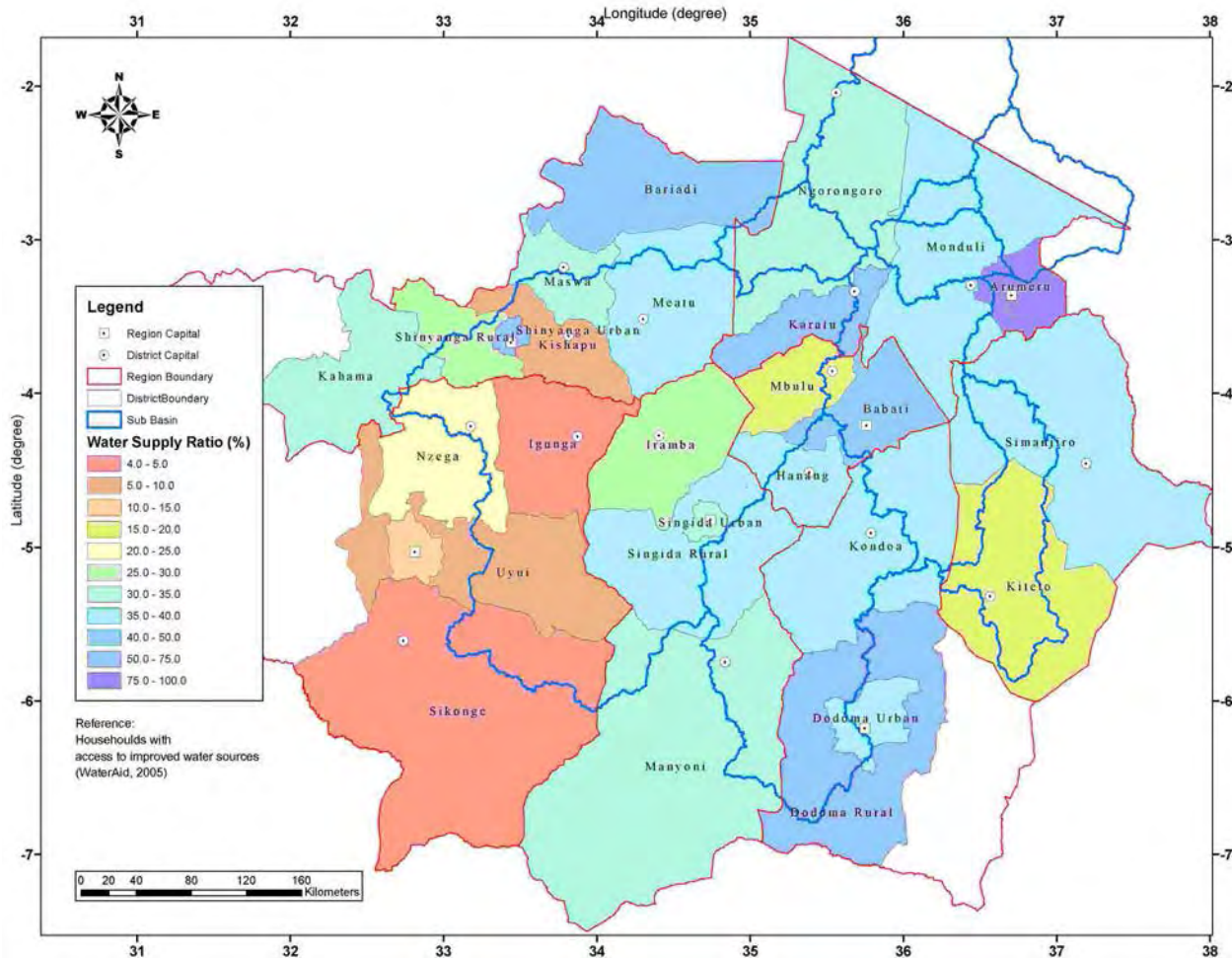


図 4-1 内部収束流域の県毎の地方給水率

給水施設のデータベースは水資源の利用状況を把握するためにまとめられた。水省の JICA 短期専門家(2005-2006 年)が 2005 年に全国の県水利官に対して、給水施設に関するデータシートを配布し、記入を求めた。調査団では、内部収束地域内の各県からこのデータを収集し、水理地質解析のために用いた。

この給水施設データベースの集計結果を表 4-4 に示す。各州の水源タイプの比率を図 4-2 に示す。管井戸、ハンドポンプ井戸と手掘り井戸は、地下水を水源としていると見なすことができ、ダム、チャルコダム、重力スキーム(川か湧水)は表流水を使っていると見なすことができる。アルーシャ州の表流水への水源依存率は 80%であるのに対して、その他の州では地下水依存度が高いことが分かる。

表 4-3 給水施設の集計結果

| Region           | District          | Village      | Piped Boreholes |             |              | H/P Boreholes |             |              | Dug Well   |             |              | Dam       |             |              | Charco Dam |             |              | Gravity Scheme |             |              |
|------------------|-------------------|--------------|-----------------|-------------|--------------|---------------|-------------|--------------|------------|-------------|--------------|-----------|-------------|--------------|------------|-------------|--------------|----------------|-------------|--------------|
|                  |                   |              | F               | N/F         | Ratio (%)    | F             | N/F         | Ratio (%)    | F          | N/F         | Ratio (%)    | F         | N/F         | Ratio (%)    | F          | N/F         | Ratio (%)    | F              | N/F         | Ratio (%)    |
| Arusha           | Monduli           | 65           | 17              | 0           | 100.0        | 1             | 0           | 100.0        | 1          | 0           | 100.0        | 60        | 0           | 100.0        | 0          | 0           | 0.0          | 28             | 0           | 100.0        |
|                  | Karatu            | 45           | 0               | 0           | 0.0          | 15            | 1           | 93.8         | 9          | 0           | 100.0        | 0         | 0           | 0.0          | 1          | 0           | 100.0        | 0              | 0           | 0.0          |
|                  | Arumeru           | 146          | 8               | 0           | 100.0        | 4             | 0           | 100.0        | 0          | 0           | 0.0          | 4         | 0           | 100.0        | 0          | 0           | 0.0          | 126            | 0           | 100.0        |
|                  | Ngorongoro        | 37           | 3               | 0           | 100.0        | 0             | 0           | 0.0          | 0          | 0           | 0.0          | 0         | 0           | 0.0          | 0          | 0           | 0.0          | 15             | 0           | 100.0        |
|                  | <b>Sub-total</b>  | <b>293</b>   | <b>28</b>       | <b>0</b>    | <b>100.0</b> | <b>20</b>     | <b>1</b>    | <b>95.2</b>  | <b>10</b>  | <b>0</b>    | <b>100.0</b> | <b>64</b> | <b>0</b>    | <b>100.0</b> | <b>1</b>   | <b>0</b>    | <b>100.0</b> | <b>169</b>     | <b>0</b>    | <b>100.0</b> |
| Manyara          | Babati Rural      | 43           | 0               | 1           | 0.0          | 61            | 16          | 79.2         | 6          | 1           | 85.7         | 0         | 0           | 0.0          | 0          | 0           | 0.0          | 13             | 4           | 76.5         |
|                  | Babati Urban      | 14           | 1               | 0           | 100.0        | 15            | 1           | 93.8         | 0          | 0           | 0.0          | 0         | 0           | 0.0          | 0          | 0           | 0.0          | 11             | 2           | 84.6         |
|                  | Hanang            | 63           | 0               | 3           | 0.0          | 4             | 10          | 28.6         | 8          | 6           | 57.1         | 1         | 0           | 100.0        | 0          | 0           | 0.0          | 20             | 0           | 100.0        |
|                  | Kiteto            | 48           | 21              | 0           | 100.0        | 0             | 0           | 0.0          | 2          | 0           | 100.0        | 0         | 0           | 0.0          | 0          | 0           | 0.0          | 6              | 0           | 100.0        |
|                  | Mbulu             | 71           | 0               | 0           | 0.0          | 33            | 12          | 73.3         | 62         | 25          | 71.3         | 0         | 0           | 0.0          | 0          | 0           | 0.0          | 8              | 0           | 100.0        |
|                  | Simanjiro         | 47           | 19              | 2           | 90.5         | 42            | 9           | 82.4         | 237        | 14          | 94.4         | 6         | 0           | 100.0        | 6          | 0           | 100.0        | 15             | 0           | 100.0        |
|                  | <b>Sub-total</b>  | <b>286</b>   | <b>41</b>       | <b>6</b>    | <b>87.2</b>  | <b>155</b>    | <b>48</b>   | <b>76.4</b>  | <b>315</b> | <b>46</b>   | <b>87.3</b>  | <b>7</b>  | <b>0</b>    | <b>100.0</b> | <b>6</b>   | <b>0</b>    | <b>100.0</b> | <b>73</b>      | <b>6</b>    | <b>92.4</b>  |
|                  | Dodoma            | Dodoma Rural | 131             | 84          | 55           | 60.4          | 0           | 0            | 0.0        | 165         | 17           | 90.7      | 6           | 0            | 100.0      | 0           | 0            | 0.0            | 0           | 0            |
| Dodoma Urban     |                   | 9            | 9               | 0           | 100.0        | 0             | 0           | 0.0          | 22         | 0           | 100.0        | 0         | 0           | 0.0          | 0          | 0           | 0.0          | 1              | 0           | 100.0        |
| Kondoa           |                   | 171          | 83              | 15          | 84.7         | 5             | 0           | 100.0        | 98         | 6           | 94.2         | 5         | 0           | 100.0        | 7          | 0           | 100.0        | 96             | 7           | 93.2         |
| <b>Sub-total</b> |                   | <b>311</b>   | <b>176</b>      | <b>70</b>   | <b>71.5</b>  | <b>5</b>      | <b>0</b>    | <b>100.0</b> | <b>285</b> | <b>23</b>   | <b>92.5</b>  | <b>11</b> | <b>0</b>    | <b>100.0</b> | <b>7</b>   | <b>0</b>    | <b>100.0</b> | <b>97</b>      | <b>7</b>    | <b>93.3</b>  |
| Shinyanga        | Maswa             | 103          | 2               | 2           | 50.0         | 0             | 0           | 0.0          | 0          | 0           | 0.0          | 23        | 3           | 88.5         | 0          | 0           | 0.0          | 0              | 0           | 0.0          |
|                  | Meatu             | 64           | 2               | 0           | 100.0        | 0             | 0           | 0.0          | 392        | 37          | 91.4         | 1         | 0           | 100.0        | 1          | 0           | 100.0        | 0              | 1           | 0.0          |
|                  | Kishapu           | 103          | 4               | 1           | 80.0         | 0             | 1           | 0.0          | 172        | 0           | 100.0        | 9         | 0           | 100.0        | 7          | 0           | 100.0        | 0              | 0           | 0.0          |
|                  | Shinyanga Urban   | 26           | 33              | 36          | 47.8         | 185           | 51          | 78.4         | 0          | 0           | 0.0          | 8         | 0           | 100.0        | 0          | 0           | 0.0          | 0              | 0           | 0.0          |
|                  | Shinyanga Rural   | 106          | 19              | 0           | 100.0        | 0             | 0           | 0.0          | 207        | 0           | 0.0          | 4         | 4           | 50.0         | 0          | 0           | 0.0          | 0              | 0           | 0.0          |
|                  | <b>Sub-total</b>  | <b>402</b>   | <b>60</b>       | <b>39</b>   | <b>60.6</b>  | <b>185</b>    | <b>52</b>   | <b>78.1</b>  | <b>771</b> | <b>37</b>   | <b>95.4</b>  | <b>45</b> | <b>7</b>    | <b>86.5</b>  | <b>8</b>   | <b>0</b>    | <b>100.0</b> | <b>0</b>       | <b>1</b>    | <b>0.0</b>   |
| Singida          | Singida Municipal | 19           | 23              | 15          | 60.5         | 59            | 5           | 92.2         | 249        | 175         | 58.7         | 13        | 1           | 92.9         | 178        | 4           | 97.8         | 0              | 0           | 0.0          |
|                  | Singida Rural     | 146          | 33              | 30          | 52.4         | 40            | 25          | 61.5         | 230        | 194         | 54.2         | 4         | 0           | 100.0        | 8          | 0           | 100.0        | 0              | 0           | 0.0          |
|                  | Iramba            | 125          | 40              | 3           | 93.0         | 159           | 59          | 72.9         | 56         | 71          | 44.1         | 0         | 0           | 0.0          | 16         | 12          | 57.1         | 0              | 0           | 0.0          |
|                  | Manyoni           | 73           | 42              | 7           | 85.7         | 16            | 10          | 61.5         | 9          | 29          | 23.7         | 13        | 0           | 100.0        | 5          | 4           | 55.6         | 1              | 0           | 100.0        |
|                  | <b>Sub-total</b>  | <b>344</b>   | <b>138</b>      | <b>55</b>   | <b>71.5</b>  | <b>274</b>    | <b>99</b>   | <b>73.5</b>  | <b>544</b> | <b>469</b>  | <b>53.7</b>  | <b>30</b> | <b>0</b>    | <b>100.0</b> | <b>207</b> | <b>20</b>   | <b>91.2</b>  | <b>1</b>       | <b>0</b>    | <b>100.0</b> |
| Tabora           | Igunga            | 43           | 3               | 0           | 100.0        | 11            | 17          | 39.3         | 8          | 6           | 57.1         | 5         | 0           | 100.0        | 15         | 0           | 100.0        | 0              | 0           | 0.0          |
|                  | Nzega             | 128          | 7               | 0           | 100.0        | 0             | 0           | 0.0          | 1          | 0           | 100.0        | 7         | 0           | 100.0        | 0          | 0           | 0.0          | 5              | 0           | 100.0        |
|                  | Uyui              | 29           | 3               | 0           | 100.0        | 12            | 4           | 75.0         | 12         | 14          | 46.2         | 2         | 0           | 100.0        | 0          | 0           | 0.0          | 0              | 0           | 0.0          |
|                  | Sikonge           | 53           | 0               | 0           | 0.0          | 0             | 0           | 0.0          | 38         | 13          | 74.5         | 2         | 0           | 100.0        | 2          | 0           | 100.0        | 1              | 0           | 100.0        |
|                  | <b>Sub-total</b>  | <b>253</b>   | <b>13</b>       | <b>0</b>    | <b>100.0</b> | <b>23</b>     | <b>21</b>   | <b>52.3</b>  | <b>59</b>  | <b>33</b>   | <b>64.1</b>  | <b>16</b> | <b>0</b>    | <b>100.0</b> | <b>17</b>  | <b>0</b>    | <b>100.0</b> | <b>6</b>       | <b>0</b>    | <b>0.0</b>   |
| <b>Total</b>     | <b>1,889</b>      | <b>456</b>   | <b>170</b>      | <b>72.8</b> | <b>662</b>   | <b>221</b>    | <b>75.0</b> | <b>1,984</b> | <b>608</b> | <b>76.5</b> | <b>173</b>   | <b>7</b>  | <b>96.1</b> | <b>246</b>   | <b>20</b>  | <b>92.5</b> | <b>346</b>   | <b>14</b>      | <b>96.1</b> |              |

F: Functioning N/F: Not Functioning

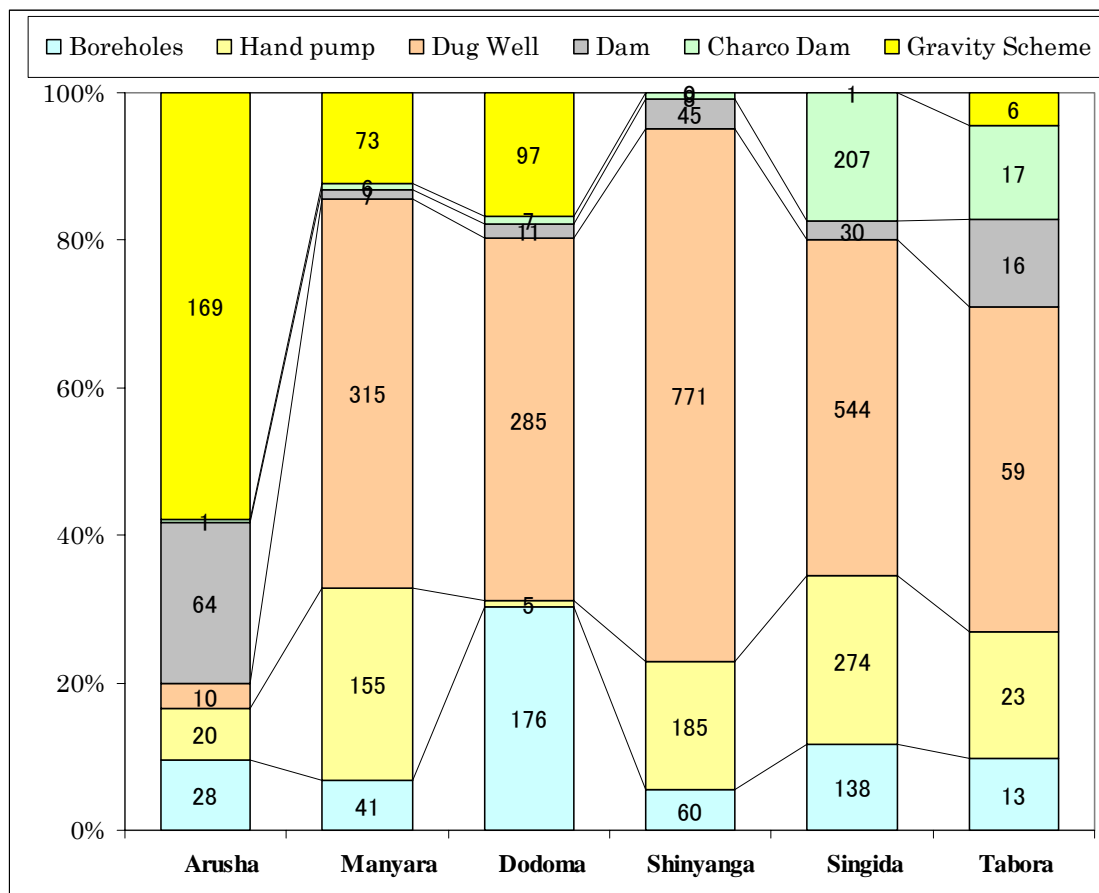


図 4-2 州毎の水源地タイプの比率

図 4-3 は、前述の関係を説明するものである。このグラフによれば、各州の特徴は次の3つのグループに分けることができる。1)高表流水依存の地域(アルーシャ州)、2)表流水依存度は高くないが管井戸給水比率の比較的高い地域(ドドマ州)、3)表流水依存度も管井戸給水比率も低い地域。マニヤラ、シンギダ、シニャンガ、タボラはハンドポンプ井戸や手掘り井戸のような点水源に頼っていることがわかる。それに比べて、ドドマ州の管井戸比率が高いのはドナーによる給水施設建設が比較的多く行われているためではないかと考えられる。

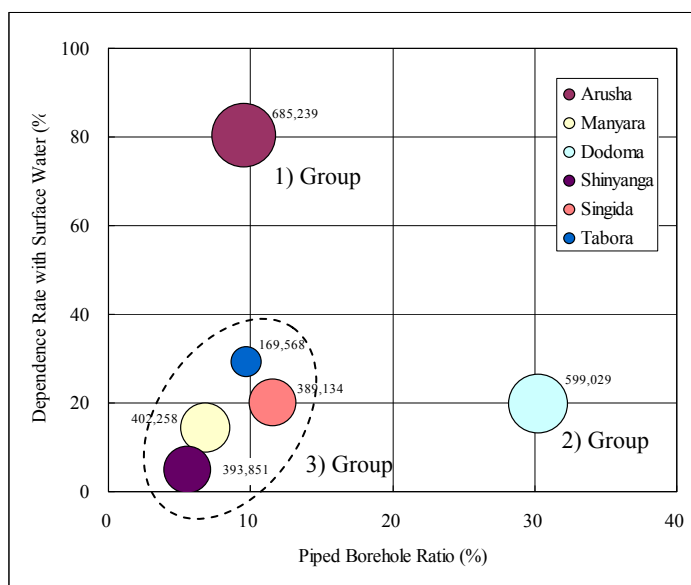


図 4-3 管井戸給水比率と表流水依存率の関係  
 それぞれの円の横の数字は給水人口を示す。

## 4.2 水理地質調査

### 4.2.1 既存給水施設のインベントリー調査

水理地質状況把握のための基礎情報を得るために、既存給水施設のインベントリー調査が実施された。ボアホールカタログの中からインベントリー調査の 500 村落を選んだ。これらは水理地質状況解析に適用された。調査班は井戸の位置と水位、水質を現場で測定した。収集されたデータのほとんどが位置情報がなかったため、インベントリー調査の主な目的は井戸の位置を測定することであった。しかし、調査班が選ばれた村に行ってみると、現在は井戸が存在しないことも多かった。そのような場合には、調査班は手掘り井戸やダム、湧水などの代替の水源を探した。

全村落数と調査位置はそれぞれ図 4-4 と表 4-4 に示した。

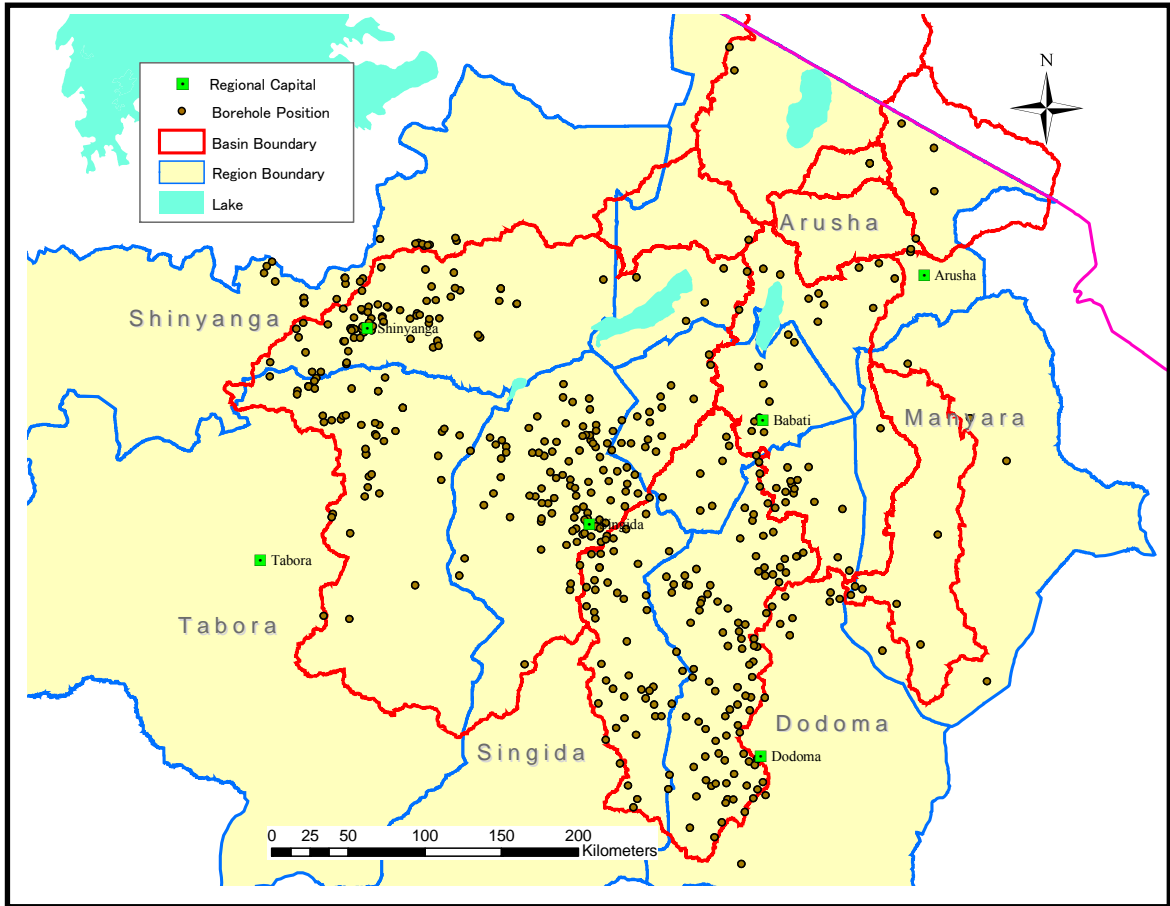


図 4-4 給水施設インベントリー調査の調査地点



表 4-5 県毎のインベントリ調査村落数と地点数

| Region    | District |                        | Planned village No. | Surveyed village No. | Surveyed Point No. |
|-----------|----------|------------------------|---------------------|----------------------|--------------------|
| Singida   | 1        | Iramba                 | 49                  | 49                   | 53                 |
|           | 2        | Manyoni                | 27                  | 26                   | 28                 |
|           | 3        | Singida Rural          | 41                  | 41                   | 44                 |
|           | 4        | Singida Urban          | 23                  | 23                   | 24                 |
| Tabora    | 5        | Igunga                 | 29                  | 22                   | 27                 |
|           | 6        | Nzega                  | 11                  | 11                   | 17                 |
|           | 7        | Sikonge                | 1                   | 1                    | 1                  |
|           | 8        | Uyui                   | 2                   | 2                    | 2                  |
| Shinyanga | 9        | Kishapu                | 14                  | 11                   | 17                 |
|           | 10       | Maswa                  | 13                  | 10                   | 17                 |
|           | 11       | Meatu                  | 7                   | 7                    | 8                  |
|           | 12       | Shinyanga Rural        | 22                  | 22                   | 28                 |
|           | 13       | Shinyanga Urban        | 26                  | 23                   | 31                 |
| Arusha    | 14       | Arumeru                | 5                   | 5                    | 5                  |
|           | 15       | Karatu                 | 8                   | 8                    | 8                  |
|           | 16       | Monduli                | 17                  | 17                   | 17                 |
|           | 17       | Ngorongoro             | 4                   | 4                    | 4                  |
| Manyara   | 18       | Babati                 | 23                  | 23                   | 23                 |
|           | 19       | Hanang                 | 18                  | 18                   | 18                 |
|           | 20       | Kiteto                 | 6                   | 6                    | 6                  |
|           | 21       | Mbulu                  | 25                  | 25                   | 25                 |
|           | 22       | Simanjiro              | 7                   | 7                    | 7                  |
| Dodoma    | 23       | Dodoma Rural and Urban | 51                  | 49                   | 51                 |
|           | 25       | Kondoa                 | 71                  | 70                   | 73                 |
| Total     |          |                        | <b>500</b>          | <b>480</b>           | <b>534</b>         |

既存給水施設インベントリ調査の結果はデータベースに示されている。経済性に関するいくつかの重要な結果を以下に示す。

(1) 掘削深度分布

既存井戸の掘削深度分布を図 4-5 に示す。それぞれの井戸は異なった条件で掘削しているが、この分布図は IDB 内の有効な帯水層の深度を概略示していると考えられる。掘削深度は IDB の南東側と北部よりも、西側と中央部で浅い。

表 4-5 それぞれの地域における掘削深度

| 地域                                    | 掘削深度 (m)  |
|---------------------------------------|-----------|
| アルーシャ州 (Karatu 県を除く)                  | 100 - 200 |
| Kiteto 県、Kondoa 県                     | 80 - 200  |
| Karatu 県、Mbulu 県、Simanjiro 県、Hanang 県 | 40 - 100  |
| Dodoma 県、Manyoni 県                    | 80 - 180  |
| Singida 県、Iramba 県                    | 40 - 140  |
| Igunga 県、Nzega 県、Uyui 県、Sikonge 県     | 20 - 100  |
| Shinyanga 県、Kishapu 県、Meatu 県、Maswa 県 | 20 - 60   |
| Hanang 県西部、Singida 県東部                | 80 - 200  |

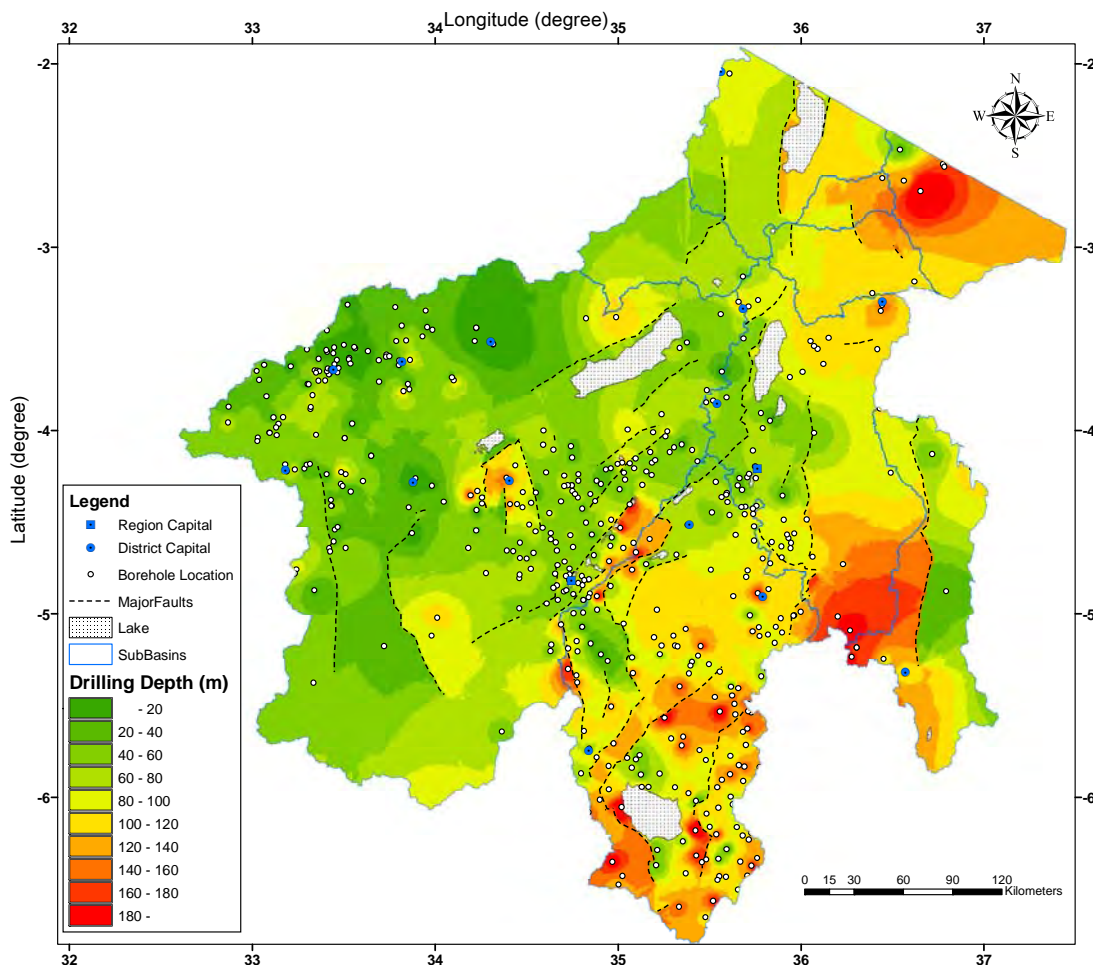


図 4-5 インベントリー調査結果に基づく掘削深度分布

(2) 静水位分布

既存井戸の静水位分布を図4-6に示す。この分布は本プロジェクトの試掘井戸の結果も含まれている。静水位分布の特徴を表4-6にまとめた。

表 4-6 内部収束流域内の静水位分布

| Areas  | Static water level |
|--|--------------------|
| アルーシャ州 (Karatu 県を除く)                                 | 50 - 100           |
| Kiteto 県、Kondoa 県                                    | 40 - 100           |
| Simanjiro 県、Karatu 県 Mbulu 県、Babati 県                | 15 - 30            |
| ドドマ州西方とマニヤラ州北方                                       | 100 - 140          |
| マニヤラ州の南西方  | 25 - 40            |
| Singida 県、Iramba 県、Igunga 県、Nzega 県、Uyui 県、Sikonge 県 | 5 - 20             |
| Shinyanga 県、Meatu 県、Kishapu 県、Maswa 県                | 5 - 15             |
| Hanang 県、Singida 県東部、Kondoa 県西部、Dodoma 県東部           | 30 - 50.           |

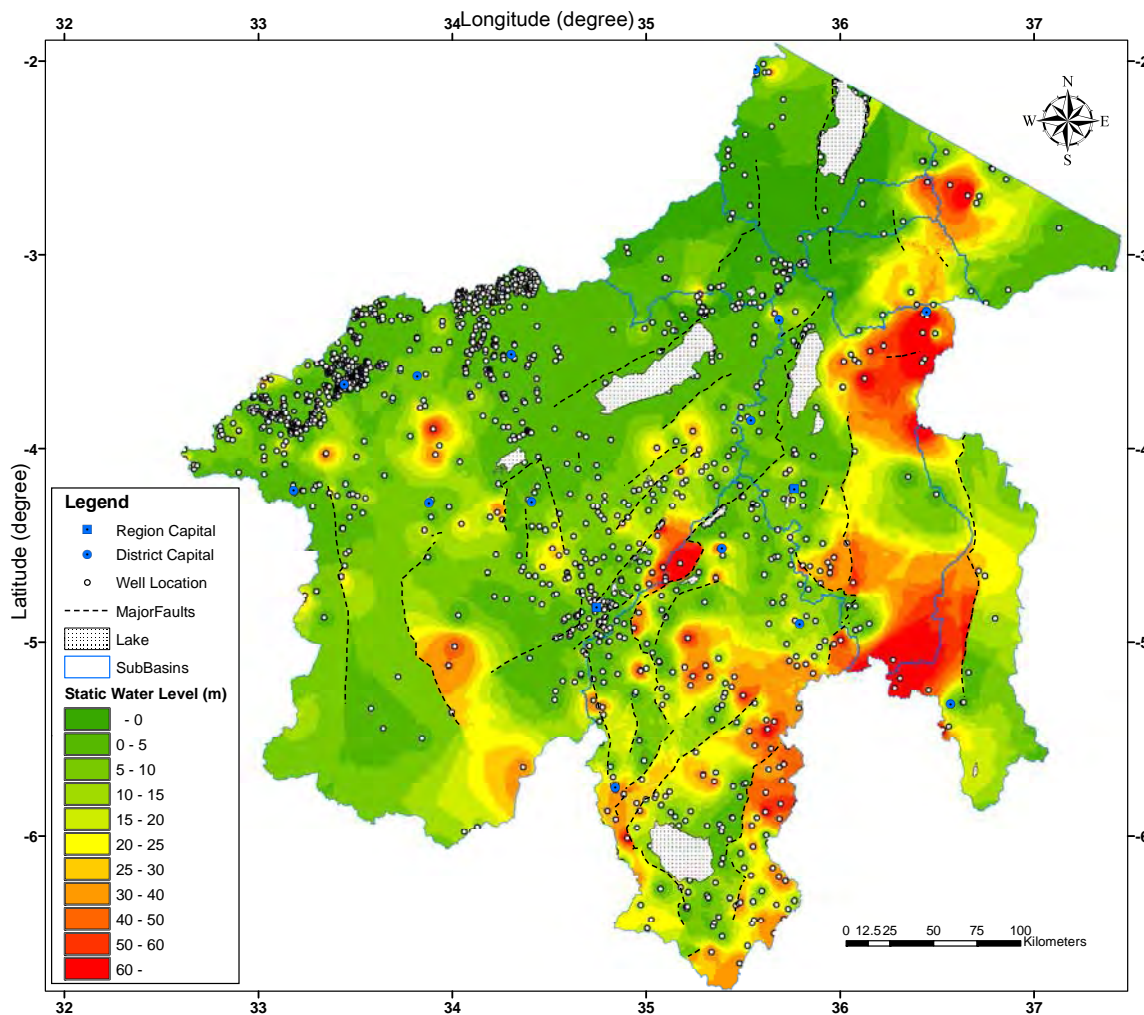


図 4-6 内部収束流域内の静水位分布

## 4.2.2 リモートセンシング調査

### (1) 目的

この調査の目的は、IDB の水理地質的な特徴を把握するためである。

### (2) 方法

13 シーンのランドサット ETM 画像データを用いて、植生や地表水、土壌水(地下水)、土地被覆などを解析した。

### (3) 結果

SAVI 画像と VSW 画像をそれぞれ図 4-7 と図 4-8 に示す。ランドサットデータが取得された 1 月から 2 月の間では、植生インデックスの高い地域は 2 つのタイプに分けられる。一つは高地(標高 1,500 から 2,000m)で、もう一つは鉄道に沿った IDB の南西部(標高 1,000 から 1,400m)。後者は地形的にも花崗岩の厚い風化帯によるなだらかな地形的特徴を示している。

VSW 画像からは、IDB の北部に土壌インデックスの高いところが分布しており、水インデックスの高いところは東部の低地にあることが分かる。大きな湖とスワンプのほとんどが赤紫色を示しており、これは土壌と水のスペクトルの混合したもので、それらが浅いことを示唆している。

図 4-9 は、SAVI 画像と VSW 画像の結果から合成される土地被覆図を示している。

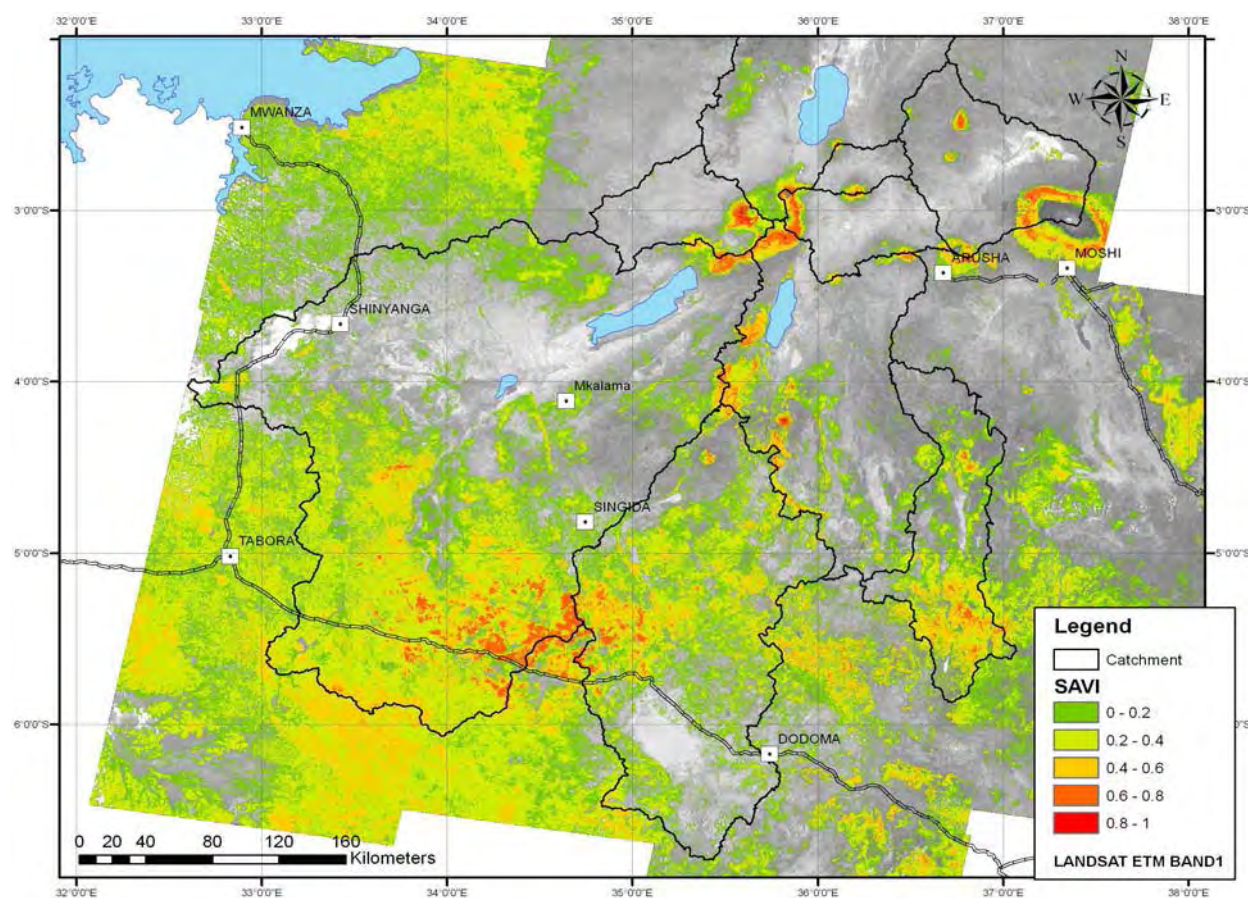


図 4-7 SAVI (Soil Adjusted Vegetation Index) 画像

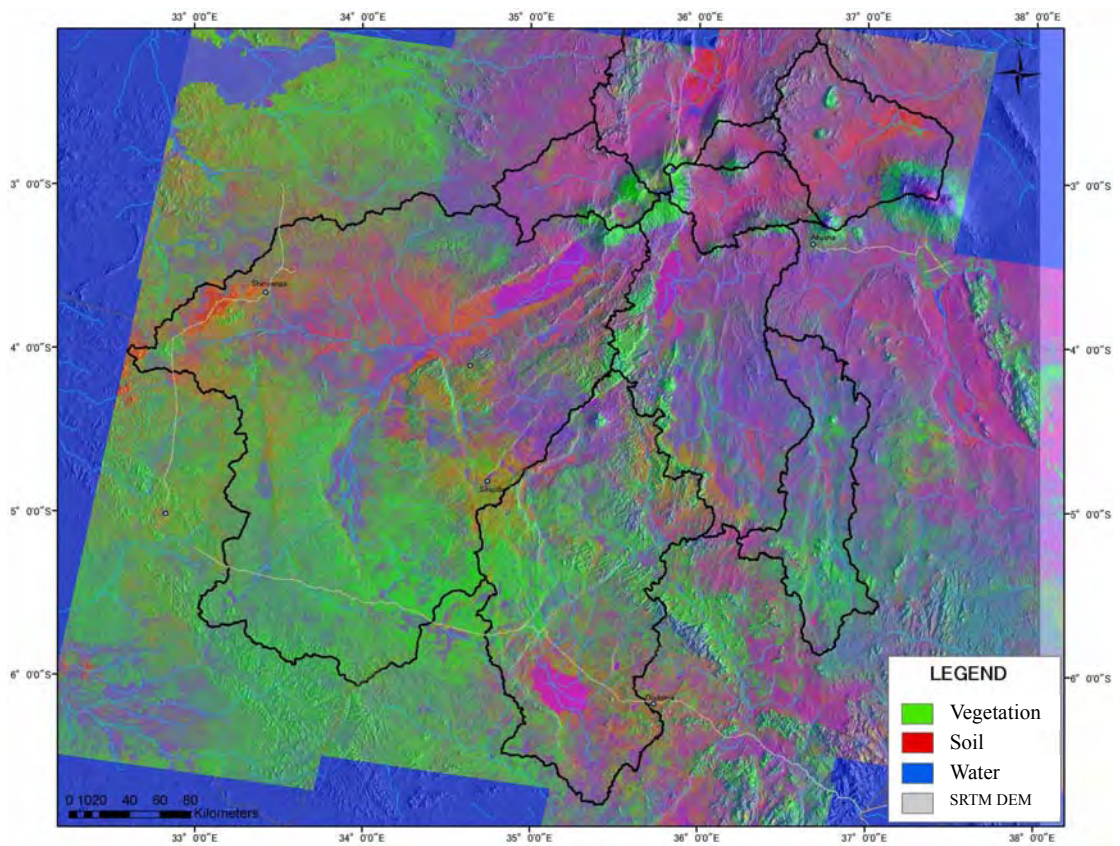


図 4-8 VSW 画像(V; 植生, S; 土壌, W; 水または水分)

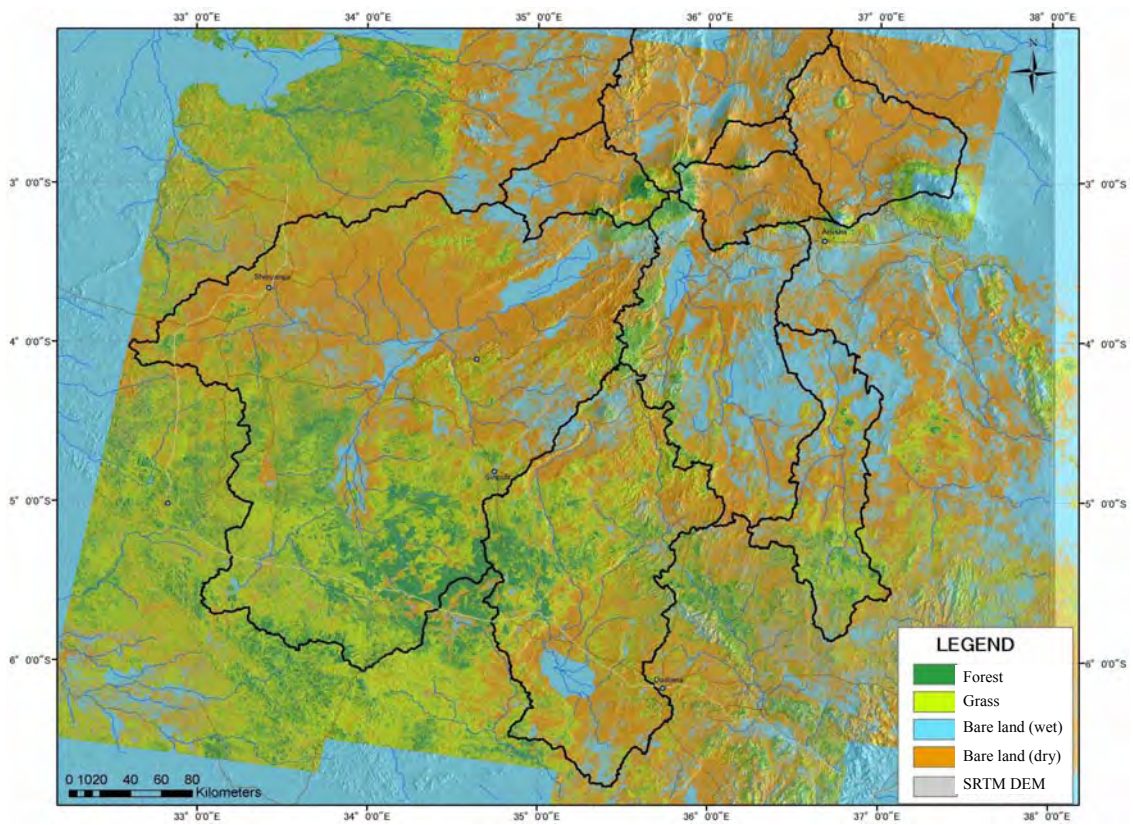


図 4-9 土地被覆図

### 4.2.3 物理探査

#### (1) 探査の目的

物理探査の目的を以下に示す。

- ✓ IDB 全体の地質構造を把握する
- ✓ 試掘井戸の掘削地点を選ぶ
- ✓ 調査地点周辺の帯水層構造を明らかにする

#### (2) 方法

2 種類の調査、つまり地質構造調査と掘削地点調査を実施した。地質構造調査としては垂直電気探査を適用し、掘削地点調査では原則的に垂直電気探査をそれぞれの村で 3 箇所、2 次元電気探査と磁気探査をいくつかの村で実施した。

垂直電気探査の解析では水平成層構造を仮定しているため、比抵抗の垂直的な変化を表現出来る。2 次元電気探査では、垂直方向だけでなく水平方向の変化を解析することができる。ほとんどの新鮮な岩は非常に高い比抵抗を示すのだが、実際の地層の比抵抗は間隙の中の地下水の比抵抗によって支配される。断層や破碎帯の間隙は、岩石中の間隙よりも大きいことが多い。そのような水分含有率の高いゾーン(破碎帯)は通常かなり低比抵抗を示す。それゆえ、比抵抗は地下水探査においてこのような異常域を探すための有効な指標と考えられている。

磁気探査は岩石の透磁率によって生じる磁気異常を検出する。今回は、岩盤地域において破碎帯を検出するために適用した。

#### (3) 調査数量

水平成層構造が予測される地点（つまり新規堆積物地域）においては、高精度で最適の探査手法ということで垂直電気探査を実施した。一方、岩盤地域に関しては、磁気探査と垂直電気探査を主に実施し、複雑な地質構造にもつ地域に対してのみ 2 次元電気探査が試みられた。これは磁気探査の方が 2 次元電気探査よりも効率が良いためである。

調査方法毎の調査地点の数を表 4-7 に示した。

表 4-7 物理探査の調査数量

| 目的     | 調査手法     | 数量     |
|--------|----------|--------|
| 地質構造調査 | 垂直電気探査   | 114 地点 |
| 掘削地点調査 | 垂直電気探査   | 76 地点  |
|        | 2 次元電気探査 | 2 測線   |
|        | 磁気探査     | 12 地点  |

#### (4) 調査結果

##### 1) 地質構造探査

垂直電気探査の調査地点を図 4-10 に示す。

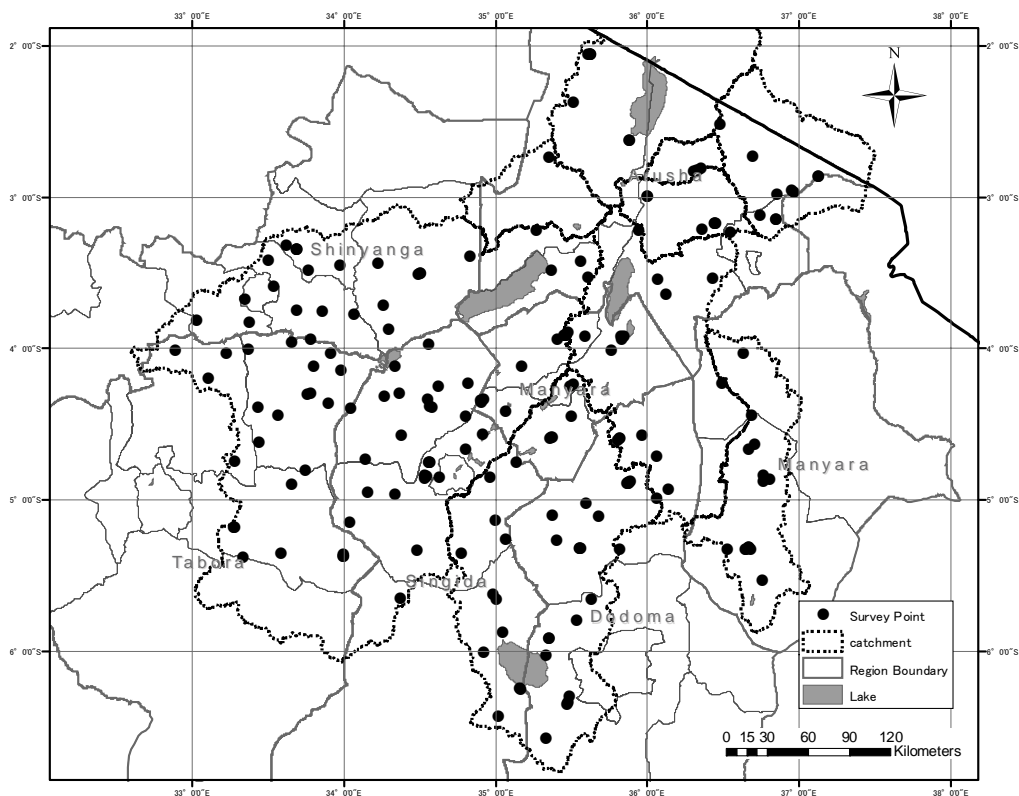


図 4-10 垂直電気探査の探査位置図

i) 比抵抗と地質の関係

垂直電気探査の結果である比抵抗値と試掘によって確認された地質とを比較した。その結果を表 4-8 に示す。

表 4-8 地質と垂直電気探査による比抵抗値との比較

| 地質    |          | 比抵抗範囲         | 平均比抵抗 ( $\Omega\text{m}$ ) |
|-------|----------|---------------|----------------------------|
| 火成岩   | 花崗岩      | 35.8 - 2000   | 472                        |
|       | 風化花崗岩    | 87.9 - 355.4  | 189                        |
|       | 強風化花崗岩   | 7.5 - 7.5     | 8                          |
| 変成岩   | 片麻岩      | 357.9 - 5000  | 2331                       |
|       | 風化片麻岩    | 10.5 - 864.1  | 212                        |
|       | 強風化片麻岩   | 8.4 - 8.4     | 8                          |
|       | 片岩       | 357.9 - 357.9 | 358                        |
| 火山岩   | 玄武岩 (溶岩) | 83.3 - 539.0  | 311.2                      |
|       | 火山碎屑物    | 105.2 - 180.9 | 143.1                      |
|       | 凝灰角礫岩    | 13.5 - 141.1  | 60.7                       |
|       | 集塊岩      | 19.9 - 677.1  | 245.3                      |
| 堆積岩   | 縞状鉄鉱石    | 43.7 - 43.7   | 44                         |
|       | 凝灰岩      | 12.4 - 147.5  | 92.1                       |
| 新期堆積物 | 砂混じり礫    | 34.2 - 52.4   | 43                         |
|       | 礫混じり砂    | 12.9 - 12.9   | 13                         |
|       | 礫混じり中砂   | 4.0 - 22.9    | 11                         |
|       | 砂        | 2.1 - 82.2    | 31                         |
|       | 粘土混じり砂   | 18.5 - 27.9   | 23                         |
|       | 砂混じり粘土   | 2.6 - 12.9    | 8                          |
|       | 粘土       | 1.2 - 4.7     | 3                          |

ii) 比抵抗解析パターンと帯水層

典型的な比抵抗解析のパターンは以下に示す 3 つであった。

**パターン 1: 高(中) - 低 - 高**

このパターンは火成岩と変成岩地域において典型的である。探査は乾季に行われたので、地表に近い層は比較的高い比抵抗を示す。中間の低比抵抗の層は風化層か破碎帯であろうと推定されるが、その比抵抗値が 10 ohm-m よりも低い場合には、その層は粘土層か塩分を多く含んだ地下水があることを示している。高比抵抗を示す最下層は、基盤岩であると考えられる。基盤岩の中では地下水に当たる可能性は低いが、花崗岩の中では裂隙水を期待することが出来る

**パターン 2: 中(高) - 低**

このパターンは未固結堆積層地域での典型的なパターンである。低比抵抗層の値が 10 ohm-m よりも低い場合には、その層は粘土層か塩分を多く含んだ地下水である可能性がある。このような低比抵抗層の中で新鮮な水を得ることは難しい。未固結堆積層地域では、垂直電気探査の探査深度 200m までには高比抵抗層を検出出来なかった。

**パターン 3: 低(中) - 高**

このパターンは風化層の浅い花崗岩地域の典型的なパターンである。低比抵抗を示す風化層は非常に薄い。そして、500 ohm-m 以上の高比抵抗層がすぐに現れる。この高比抵抗は硬い岩を示している。地下水の可能性は低い。

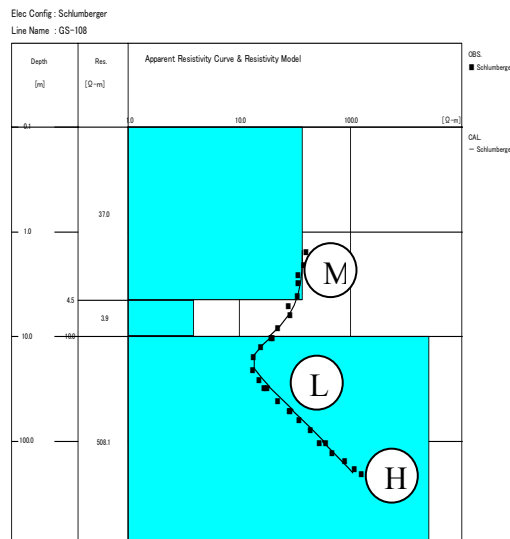


図 4-11 典型的な比抵抗パターン 1 (高-低-高)

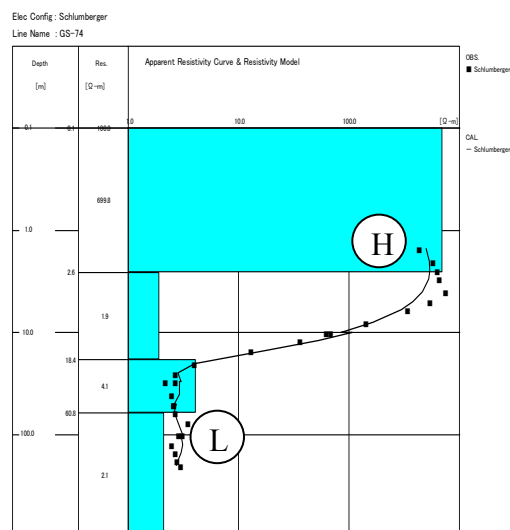


図 4-12 典型的な比抵抗パターン 2 (高-低)

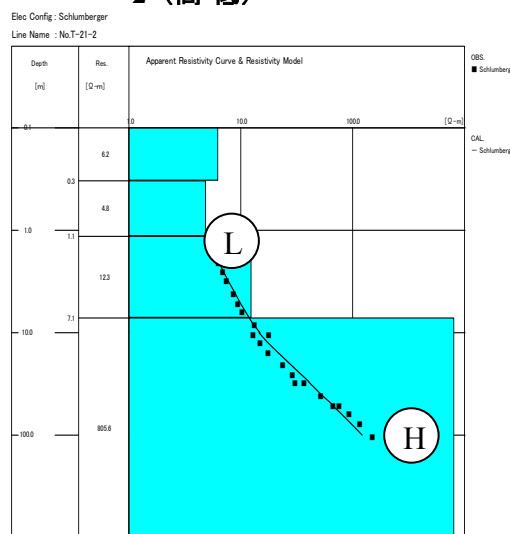


図 4-13 典型的な比抵抗パターン 3 (低-高)



iii) 垂直電気探査による比抵抗分布

物理探査に基づく基盤岩の比抵抗分布は図 4-14 に示される。比抵抗分布は表 4-9 に示されるように地質と良く対応している。

表 4-9 比抵抗範囲と地質

| 比抵抗 ( $\Omega m$ )      | 地域  | 基盤岩地質 | Remark                |
|-------------------------|---|-------|-----------------------|
| Very High<br>(800-2000) | Kondoa 県, Shinyanga 県,<br>Kishapu 県 Meatu 県, Maswa 県, | 花崗岩類  | 断層やリニアメン<br>トが少ない     |
|                         | Babati 県南部  | 変成岩   |                       |
| High<br>(500-800)       | Singida 県, Iramba 県, Hanang 県,<br>Uyui 県西部, Sikonge 県 | 花崗岩類  | -                     |
|                         | Mbulu 県, Kiteto 県, Karatu 県,                          | 変成岩   | -                     |
| Middle<br>(200-500)     | Bahi 県, Manyoni 県, Uyui 県東部                           | 花崗岩類  | -                     |
|                         | Simanjiro 県   | 変成岩   | -                     |
| Low<br>(100 - 200)      | Monduli 県, Ngorongoro 県,<br>Arumeru 県                 | 火山岩   | -                     |
| Very Low<br>(10 - 100)  | Shinyanga 県南部, Kisyapu 県南<br>部, Igunga 県, Nzega 県     | 新期堆積物 | 200m 以深でも基盤<br>岩に届かない |

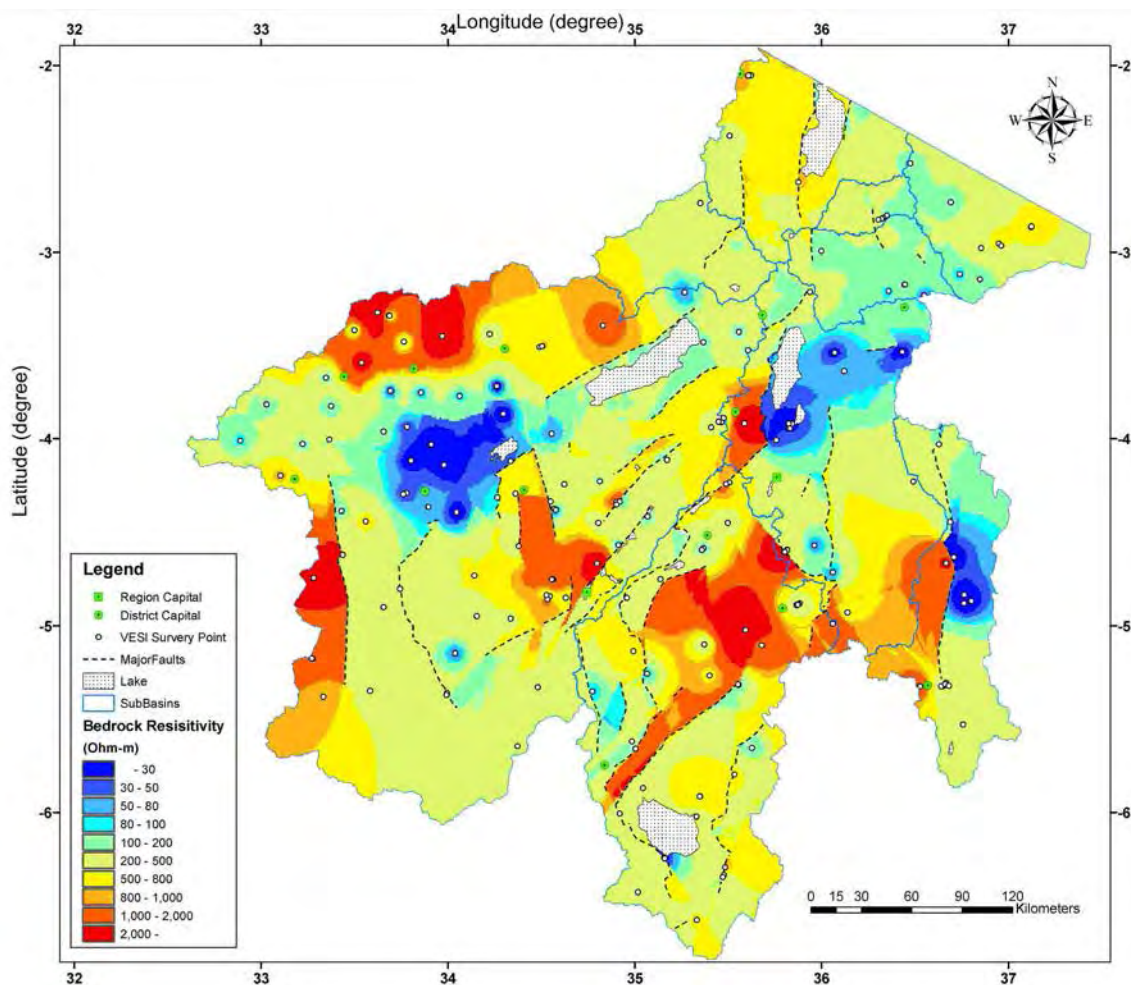


図 4-14 物理探査による基盤岩比抵抗分布図

一方、垂直電気探査から推定された基盤岩出現深度を図 4-15 に示す。この分布の特徴を下の表に示した。これらも地質の分布と良く対応している。

表 4-10 基盤岩深度の分布の特徴

| 非常に浅い地域  | 非常に深い地域                   |
|--|---------------------------|
| Shinyanga 県, Meatu 県, Maswa 県,<br>Uyui 県, Manyoni 県, Singida 県 | Manonga 河と Wembere 河の地域   |
| Kondoa 県, Mbulu 県, Kiteto 県                                    | Magugu (Babati 県)         |
|  | Ndedo と Makame (Kiteto 県) |

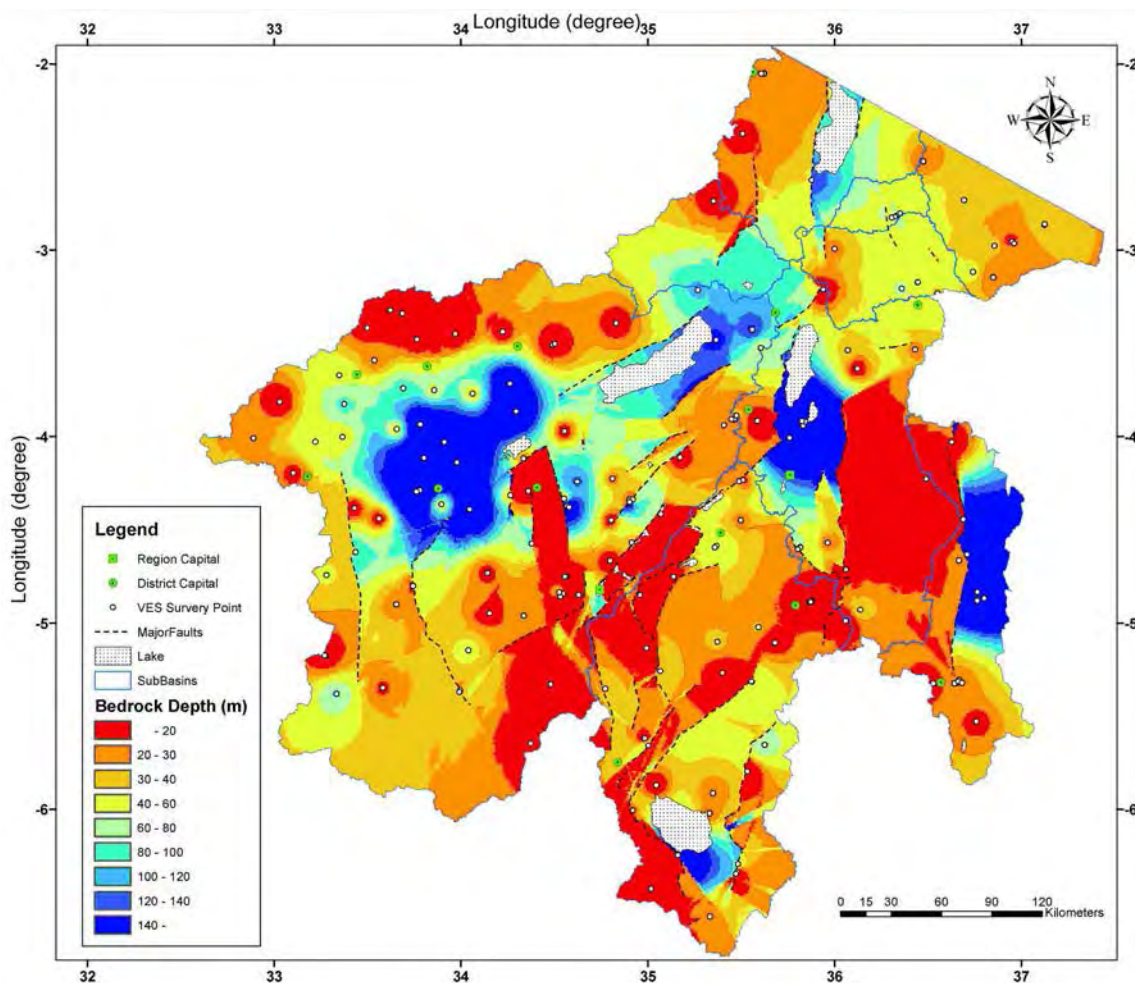


図 4-15 物理探査による基盤岩出現深度分布図

## 2) 試掘地点選定のための探査

2種類(3手法)の物理探査が試掘地点選定のために適用された。垂直電気探査は地質構造を把握するために実施され、水平成層構造でないと判断されたときには候補地域の中の適切な測線を選んで2次元電気探査か磁気探査を実施した。最終的に、物理探査結果とアクセス、地形的特徴を基にして試掘地点は決定された。試掘の候補地点はIDB全体から選ばれた。その掘削地点を図4-16に示す。

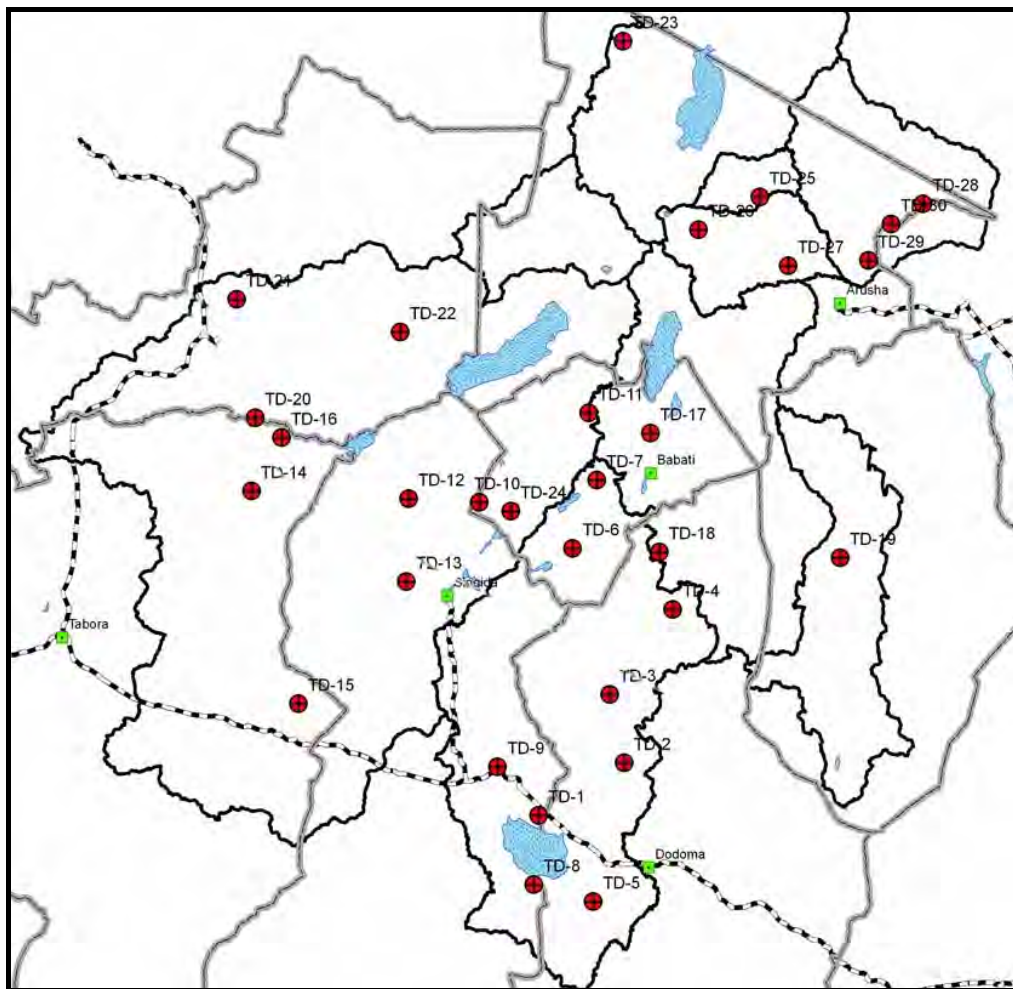


図 4-16 試掘地点位置図

#### 4.2.4 試掘調査

##### (1) 目的

この調査は以下の情報を得るために実施された。地質状況、地質構造、地下水状況、帯水層状況、既存井戸データの補足、地下水位と水質のモニタリング

これらの調査で得られた情報は、IDB の水理地質図と地下水ポテンシャル評価のための基礎データとした。

##### (2) 調査の仕様

試掘調査は掘削作業、物理検層、井戸仕上げ、そして揚水試験から成っている。この調査は以下の仕様の基で実施された。

##### 1) 掘削

柔らかい土壌ではロータリー掘削が、風化または硬い岩に対してはダウンザホールハンマー掘削が適用された。保護パイプと適切な掘削流体が孔壁を維持するために用いられた。掘削口径はロータリー掘削の 250mm と、ダウンザホールハンマー掘削では 200mm とした。掘削を始めて最初の地下水に当たった時には、地下水位と地下水の電気伝導度を測定した。掘削が終了したら、物理検層を実施した。

##### 2) 井戸仕上げ

###### i) 標準井戸構造

標準井戸構造を図 4-17 に示す。

###### ii) ケーシング口径

ケーシングパイプの口径は、揚水試験の水中ポンプが十分に入る 150mm とした。

###### iii) 物理検層

ケーシングを挿入する前に、帯水層の検出とスクリーンの位置を決めるために物理検層を実施した。物理検層として比抵抗検層と自然放射線検層が使われた。比抵抗検層は井戸に沿った比抵抗値を測定出来る。自然放射線検層は井戸に沿った自然放射線の強度を測定出来る。これらの検層結果から地層や帯水層の推定を行った。

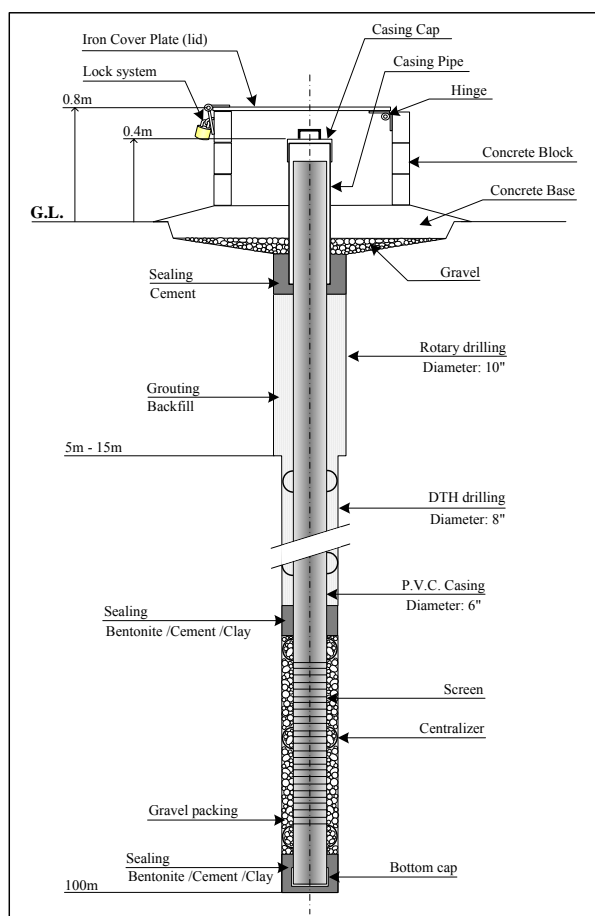


図 4-17 標準井戸構造の概念図

**iv) スクリーンパイプ**

スクリーンパイプとしてはスリット（幅 1mm）の入った PVC パイプを使用した。スクリーンパイプを設置する深度や長さは掘削状況と物理検層の結果を基に決めた。

**v) グラベルパッキングとシール**

珪酸質で汚れが無く、円礫で粒径の揃ったグラベルがグラベルパッキングに使われた。粒径は 3 から 8mm である。グラベルパッキングの範囲は少なくともスクリーンを挿入した部分の端から上下に 2m ずつとした。グラベルパッキングの上下に範囲 1m ずつ粘土でシールを行った。掘削土砂は埋め戻しに使われた。

**vi) 保護工**

井戸の孔口の回りは、ケーシングの保護と固定および雨水の浸入を防ぐためにセメントで固められた。最終的には鍵のついた保護箱を設置した。

**3) 井戸洗浄**

井戸建設の後、エアーリフトによって井戸洗浄が行われた。井戸洗浄は水がきれいになるまで続けられた。井戸の水位は井戸洗浄が終わって 3 時間後に測定された。

**4) 揚水試験**

それぞれの井戸洗浄が終わったら、揚水試験を実施する。揚水試験の目的は限界揚水量と帯水層定数を定めるためである。揚水試験は段階試験、連続一定量試験、回復試験から構成される。揚水試験の概要を下の表にまとめた。

| 揚水試験  | 仕様               | 測定時間       | 試験の結果           |
|-------|------------------|------------|-----------------|
| 段階試験  | 5 段階             | 1 段階: 2 時間 | 限界揚水量           |
| 一定量試験 | 揚水量: 限界揚水量の 80 % | 48 時間      | 透水係数、透水量係数、貯留係数 |
| 回復試験  | 水位が安定するまで測定する    | 12 時間以上    | 透水係数、透水量係数      |

**(3) 結果**

試掘調査の結果を表 4-11 にまとめる。

表 4-11 試掘調査の結果

| Boring No. | National BH No. | Region    | District    | Village         | Drilling Depth (GL- m) | Well Depth (GL- m) | Presumed Target Aquifer                | Aquifer                                  |                       |                                |                                      | Water level (m) | Critical Yield (m <sup>3</sup> /hour) | Water Condition |                                |
|------------|-----------------|-----------|-------------|-----------------|------------------------|--------------------|--|--|-----------------------|--------------------------------|--------------------------------------|-----------------|---------------------------------------|-----------------|--------------------------------|
|            |                 |           |             |                 |                        |                    |  | Nature of Aquifer                        | Depth (GL- m)         | Hydraulic Conductivity (m/min) | Transmissivity (m <sup>2</sup> /min) |                 |                                       | Storageivity    | Electrical Conductivity (mS/m) |
| TD-1       | 654/2006        | Singida   | Manyoni     | Lusitile        | 100                    | 40                 | Sediments                              | Fractured granite                        | 16.4-22.3, 28.2-37.05 | —                              | —                                    | 12.05           | —                                     | 1,190.0         | 0.555                          |
| TD-2       | 640/2006        | Dodoma    | Dodoma Rura | Kongogo         | 105                    | 100                | Weathered/ Fractured rock              | Fractured granite                        | 57.5                  | 4.16E-04                       | 1.59E-02                             | 8.29E-01        | 22.0                                  | 90.1            | 1.590                          |
| TD-3       | 636/2006        | Dodoma    | Kondoa      | Bubutole        | 80                     | 80                 | Weathered rock                         | Fractured granite                        | 44, 65                | 7.02E-05                       | 9.16E-04                             | 1.64E-01        | 3.6                                   | 158.2           | 1.187                          |
| TD-4       | 381/2006        | Dodoma    | Kondoa      | Loo             | 100                    | 100                | Fractured rock                         | Fractured gneiss                         | 47.5-55, 75           | 1.13E-04                       | 3.39E-03                             | 9.48E-01        | 6.0                                   | 106.3           | 0.049                          |
| TD-5       | 638/2006        | Dodoma    | Dodoma Rura | Nholi           | 105                    | 103                | Fractured rock                         | Weathered/ Fractured gneiss              | 80-90                 | 5.11E-04                       | 1.53E-02                             | 6.75E-01        | 15.0                                  | 163.3           | 0.330                          |
| TD-6       | 366/2006        | Manyara   | Hanang      | Numbeta         | 120                    | 74                 | Weathered volcanic rock                | —  | —                     | —                              | —                                    | N/W.L.          | —                                     | —               | —                              |
| TD-7       | 371/2006        | Manyara   | Babati      | Bermi/Seloto    | 80                     | 78                 | Fault                                  | Weathered/ Fractured gneiss              | 42-45, 58-74          | 5.99E-03                       | 1.76E-01                             | 2.11E-03        | 33.1                                  | 17.3            | 0.560                          |
| TD-8       | 637/2006        | Singida   | Manyoni     | Ikasi           | 120                    | 120                | Fault                                  | Weathered/ Fractured granite             | 42-48, 70-76, 95-100  | 1.42E-05                       | 1.10E-03                             | 4.39E-02        | 15.0                                  | 261.0           | 0.273                          |
| TD-9       | 162/2006        | Singida   | Manyoni     | Ilalo           | 135                    | 135                | Fractured rock                         | —  | —                     | —                              | —                                    | N/W.L.          | —                                     | —               | —                              |
| TD-10      | 372/2006        | Manyara   | Hanang      | Hirbadaw        | 147.5                  | 147.5              | Fracture zone                          | Fractured granite                        | 115-130               | 3.57E-06                       | 8.54E-05                             | 1.99E-01        | 1.0                                   | 82.4            | 0.354                          |
| TD-11      | 370/2006        | Manyara   | Mbulu       | Tlawi           | 101                    | 100                | Fracture zone                          | Fractured schist                         | 63-86                 | 3.35E-05                       | 7.91E-04                             | 2.85E-01        | 5.6                                   | 79.7            | 0.180                          |
| TD-12      | 651/2006        | Singida   | Iramba      | Misingi         | 100                    | 100                | Fractured/ weathered rock or sediments | Fractured granite                        | 44-92                 | 2.15E-03                       | 6.36E-02                             | 7.64E-01        | 20.4                                  | 84.8            | 4.650                          |
| TD-13      | 642/2006        | Singida   | Singida     | Sepuka          | 45                     | 42                 | Weathered rock                         | Fractured granite                        | 40                    | 9.90E-05                       | 5.84E-04                             | 2.34E-02        | 3.2                                   | 136.6           | 3.138                          |
| TD-14      | 161/2006        | Tabora    | Igunga      | Igogo           | 100                    | 100                | Weathered rock                         | —  | —                     | —                              | —                                    | N/W.L.          | —                                     | —               | —                              |
| TD-15      | 650/2006        | Tabora    | Uyui        | Nkongwa         | 60                     | 60                 | Sediment or weathered rock             | Weathered/ Fractured granite             | 30-37, 47-58          | 1.81E-04                       | 4.27E-03                             | 1.88E+00        | 4.7                                   | 384.0           | 1.270                          |
| TD-16      | 644/2006        | Tabora    | Igunga      | Kiningimila     | 80                     | 80                 | Sediments                              | Calcareous Clay                          | 62-68                 | —                              | —                                    | —               | 40.5                                  | 1,600.0         | —                              |
| TD-17      | 652/2006        | Manyara   | Babati      | Maepa           | 80                     | 80                 | Sediments                              | Clayey sand/ Weathered gneiss            | 27, 40, 72            | 7.61E-05                       | 2.68E-03                             | 2.20E-01        | 4.7                                   | 195.1           | 7.910                          |
| TD-18      | 385/2006        | Dodoma    | Kondoa      | Masange         | 70                     | 69                 | Fractured rock                         | —  | —                     | —                              | —                                    | 68.9            | —                                     | —               | —                              |
| TD-19      | 635/2006        | Manyara   | Kireto      | Makeme          | 75                     | 72                 | Fractured rock                         | Fractured gneiss                         | 44-50, 68             | 9.87E-04                       | 2.71E-02                             | 6.29E-01        | 16.0                                  | 1090.0          | 0.991                          |
| TD-20      | 653/2007        | Shinyanga | Kishapu     | Ngofila         | 75                     | 75                 | Sediments                              | Sand                                     | 50                    | 3.20E-05                       | 9.61E-04                             | 9.61E-03        | 0.8                                   | 687.0           | 34.950                         |
| TD-21      | 522/2007        | Shinyanga | Maswa       | Mwasayi         | 70                     | 70                 | Fractured or weathered rock            | Weathered/ Fractured granite             | 35                    | 6.67E-06                       | 3.14E-04                             | 8.20E-02        | 4.3                                   | 414.0           | 1.410                          |
| TD-22      | 523/2007        | Shinyanga | Meatu       | Mwangudo        | 100                    | 62                 | Fractured or weathered rock            | —  | —                     | —                              | —                                    | N/W.L.          | —                                     | 685.0           | 26.500                         |
| TD-23      | 526/2007        | Arusha    | Ngorongoro  | Loliondo        | 100                    | 75                 | Fractured or weathered rock            | Sediment                                 | 65, 70, 80, 85        | 1.36E-03                       | 4.52E-05                             | 2.50E-03        | 4.0                                   | —               | —                              |
| TD-24      | 527/2007        | Manyara   | Hanang      | Bassotu         | 100                    | 100                | Fractured rock                         | Fractured schist                         | 52, 60, 70            | —                              | —                                    | —               | —                                     | —               | —                              |
| TD-25      | 520/2007        | Arusha    | Longido     | Orkejuloongishu | 50                     | 45                 | Fault                                  | —  | —                     | —                              | —                                    | N/W.L.          | —                                     | —               | —                              |
| TD-26      | 518/2007        | Arusha    | Monduli     | Engaruka Chini  | 130                    | 115                | Sediment                               | —  | —                     | —                              | —                                    | N/W.L.          | —                                     | —               | —                              |
| TD-27      | 519/2007        | Arusha    | Monduli     | Mfereji         | 100                    | 98                 | Fractured or weathered rock            | —  | —                     | —                              | —                                    | N/W.L.          | —                                     | —               | —                              |
| TD-28      | 524/2007        | Arusha    | Longido     | Olimolog        | 100                    | 90                 | Fractured or weathered rock            | —  | —                     | —                              | —                                    | N/W.L.          | —                                     | —               | —                              |
| TD-29      | 521/2007        | Arusha    | Arumeru     | Uwiro           | 105                    | 100                | Fractured rock                         | Weathered/ Fractured basalt, agglomerate | 30, 45, 60            | 3.17E-05                       | 2.15E-03                             | 1.12E-01        | 8.6                                   | 95.3            | 15.390                         |
| TD-30      | 525/2007        | Arusha    | Longido     | Tingatanga      | 130                    | 129                | Sediment                               | —  | —                     | —                              | —                                    | N/W.L.          | —                                     | —               | —                              |

### 4.3 地質単元毎の水理地質状況

このセクションでは、IDB の水理地質状況をそれぞれの地質単元を基に説明する。層状帯水層は第三紀以降の堆積地域の中にあると推定される。その他の花崗岩や変成岩、火山岩などの岩盤地域においては、裂隙状帯水層であると推定される。

#### 4.3.1 花崗岩地域 (gs, gs-a, gs-b)

花崗岩は、シニャンガ、タボラ、シンギダ、ドドマ州に広く分布している。花崗岩は粒度の粗い火成岩である。その性質上、花崗岩は風化されやすく、地表近くでは亀裂が入りやすい。風化花崗岩は地表近くで砂状になり、さらにカオリンと呼ばれる粘土鉱物を生成する。くぼみや盆地の様な低地にはこのブガと呼ばれる粘土が蓄積している。これは煉瓦のよい材料となる。花崗岩では、亀裂は垂直方向に入るばかりではなく水平方向にも入る。インセルベルグと呼ばれる花崗岩の小さな丘が花崗岩地域では多く観察される。これは風化の過程で強い部分が残ったものである。この花崗岩地域は主に始生代に形成された。花崗岩は隆起し、その隆起した山の風化と浸食が続き、最終的に準平原が形成された。インセルベルグはこのような準平原の残丘である。



シンギダのインセルベルグ

花崗岩地域では、風化帯の中の層状水と見なせる地下水と亀裂の中の裂隙水が期待出来る。しかし、両方とも通常の砂や礫層状の帯水層とは異なり、その構造はより複雑である。それゆえ、地下水開発のためには風化層の厚さや亀裂の多い場所を調査しなければならない。加えて、

花崗岩には比較的多くのフッ素が含まれ得ていることも知られている。特にペグマタイトは花崗岩地域の中に分布している。ペグマタイトにはところにより蛍石のようにフッ素が濃集した部分もある。含まれている。この岩体の中を通過してきた地下水はフッ素含有量が高い可能性がある。花崗岩地域は地質図では3つの単元に分けられている。すなわち、“gs”と“gs-a”、“gs-b”である。これらは衛星画像解析と既存地質図から分けられた。これらの3単元は衛星画像の地形的な特徴から、粗い構造(gs)、と中間の構造(gs-a)、なめらかな構造(gs-b)と分けられている。

#### (1) 粗い構造 (gs):

この地域には多くのインセルベルグが残っている。それぞれのインセルベルグは、雨季には地下水の特別な涵養場所になっていると考えられる。インセルベルグや断層あるいはリニアメントが集まったところの周辺は地下水開発可能性の高いところと考えられる。調査に際しては、地質図や衛星画像で断層やリニアメントの存在やその方向を確認しておく。現場では、比抵抗探査と磁気探査か電磁法探査を併用し、風化層の厚さと亀裂や断層の存在を確認する。

この地域の表面は透水性の高い花崗岩の砂で覆われているため、地下水は風化帯の下部あるいは新鮮岩の上部に存在することが推定される。そのような風化帯のある地域では基盤岩の深度が深いところが有利である。これは垂直電気探査によって調査出来る。一方、破碎帯は磁気探査か電磁法探査で調査出来る。電気探査も破碎帯探査に適用可能であるが、磁気探査や電磁法探査はより効果的である。浅くから高比抵抗(500Ohm-m 以上)帯が出現するところは、地下水を得ることは難しく、地下水開発には適していない。

予想される掘削深度は 30 から 60m 程度。

### (2) 中間の構造 (gs-a):

この地域は風化層に厚く覆われているので、地下水は風化層の中に期待される。主に、比抵抗探査が使われる。もし、大量の地下水が必要であれば、破碎帯を調査すべきであるが、それは“gs”地域よりも難しい。

予想される掘削深度は 50 から 70m 程度。

### (3) なめらかな構造 (gs-b):

この平らな地域はキリマティンデセメントと呼ばれる方解石か石英の蓄積による硬い堆積層に覆われている。キリマティンデセメントは透水性が低いので、地表からの地下水の涵養があまり多くない。キリマティンデセメントの厚さは厚くても 30m 程度である。この地域での地下水開発のためには断層やインセルベルグの存在を地質図や衛星画像で確認しておくことが必要である。

予想される掘削深度は 50 から 100m 程度。

## 4.3.2 変成岩地域—ウサガランシステム (Xs, Xs-a, Xs-l)

モザンビーク変成帯の一部をなすウサガランと呼ばれる変成岩がアルーシャ、マニヤラ、ドドマ州の北部に分布している。この地域は古い花崗岩や堆積岩が花崗岩の貫入による造山運動によって変成された。それゆえ、いくつかの大規模な褶曲が南北方向に走っている。岩は主に片麻岩である。水理地質状況は概ね花崗岩地域と同じである。

花崗岩に起源をもつ片麻岩は、花崗岩よりも風化されやすく、広大な準平原を作る。マサイステップがその種の準平原の一つである。この地域には雨量計が無いのだが、周辺のデータによるとマサイステップの降雨量は非常に少ないものと思われる。したがって、この地域は最も地下水開発の難しい場所の一つである。

ウサガランは地質図では“Xs”と“Xs-a”、“Xs-l”の 3 つに分類されている。これらは衛星画像解析と既存の地質図から分類した。これら 3 つの違いは、地形的特徴から、粗い構造(Xs)と中間の構造(Xs-a)、そしてなめらかな構造(Xs-l) である。



ムブル近くの片麻岩の山



**(1) 粗い構造 (Xs):**

主に片麻岩がこの地域に分布しており、比較的標高の高いところ分布している。風化した片麻岩はインセルベルグ周辺の崩積土を形成しているため、この変成岩のインセルベルグは花崗岩地域のものよりも広い裾野を持っている。水理地質状況はほとんど花崗岩地域の gs と同様である。インセルベルグの周辺や断層やリニアメントの多いところは地下水開発の可能性の高いところである。

風化した地域では基盤岩深度の深いところが有利である。このような地域は電気探査によって調査することができる。一方、破碎帯は磁気探査か電磁法探査によって検出できる。電気探査も適用可能であるが、磁気探査か電磁法探査の方が効率的である。

予想される掘削深度は 40 から 80m 程度。

**(2) 中間の構造 (Xs-a):**

この地域は花崗岩の gs-a と対応している。Xs-a は地質図では褶曲の軸に沿って帯状の丘状に分布している。この丘陵地は地下水の涵養域であり、涵養された地下水は風化帯の中に帯水層を形成していると考えられる。したがって、比抵抗探査が主に用いられる。もし、大量の水が必要であれば、“Xa”地域よりも難しいが破碎帯を探す必要がある。

予想される掘削深度は 50 から 100m 程度。

**(3) なめらかな構造 (Xs-l):**

この地域は厚い風化層に覆われており、マサイステップと呼ばれる準平原を形成している。既存の地質図には断層やリニアメントはほとんど示されていない。風化層は高い透水性を持っているので、地下水は風化層の深部にある。比抵抗探査が風化層の厚さを推定するために適している。

予想される掘削深度は 70 から 150m 程度。



キテトの片麻岩の縞模様



コンドアの近くの川底

#### 4.3.3 ドドマン系 (D)

タンザニアで最も古い地層であるドドマン系は、ドドマ州の中央部に分布している。これは始生代の堆積岩と花崗岩が変成した変成岩で構成されている。岩種は片岩や片麻岩、ミグマタイトなどである。

ドドマン系の岩は非常に緻密で風化しにくいので、ドドマ周辺の丘陵地を形成している。水理地質状況はほぼ花崗岩地域の“gs”と同じである。ドドマン系の中の風化層や破碎帯は地下水の開発可能な所である。

試掘井(TD-5)はこのドドマン系と花崗岩地域の境界部で掘削され、ドドマン系の花崗岩の中の裂隙水を当てることができた。

予想される掘削深度は 70 から 120m 程度。



ドドマン系の露頭

#### 4.3.4 ニャンジアン系 (Z)

ニャンジアン系は堆積岩と火山岩が変成を受けた変成岩で構成されている。それはタボラ州の北部、シニャンガ州の南部、シンギダ州の北部とマニヤラ州の一部に分布している。特徴的な岩石は Igunga 県に分布する縞状鉄鉱石であり、片岩や珪岩もこの系に分布している。縞状鉄鉱石は非常に緻密で硬く、地下水はこの岩石の分布するところには期待出来ない。片岩や珪岩も緻密であるが、地下水は裂隙水が期待出来る。ニャンジアン系は多くが花崗岩に囲まれている。花崗岩と接している所では多くの亀裂が期待出来る。

磁気探査か電磁法探査が亀裂の探査には推奨される。風化層が薄いため比抵抗探査はこの地域では適していない。

予想される掘削深度は 40 から 100m 程度。



ニャンジアン系の各閃石片岩とペグマタイトの貫入(Iramba 県)



ニャンジアン系の縞状鉄鉱石(Igunga 県)

#### 4.3.5 火山地域 (Nv and Nvd)

第三紀後期以降の新規火山による溶岩の噴出、火山灰や火砕流堆積物がアルーシャ州とマニヤラ州の一部に分布する。これらの火山のほとんどはアルカリ玄武岩や粗面岩と言ったアルカリ火山岩で構成される。これらの火山活動は大地溝帯の活動と時期を同じくしている。マニヤラ湖西岸、シンギダ東部などの大地溝帯周辺には温泉の噴出も見られる。

局所的にフッ素を多く含む火山噴出物が分布している。特に活火山であるレンガイ山はカーボナタイトと呼ばれる特殊な溶岩を噴出し、その成分にはフッ素を多く含んでいる。アルーシャの町の背後にあるメルー山もカーボナタイト溶岩を噴出したと考えられる。



オールドイニョ・レンガイ山

火山の形成時期で古い火山と新しい火山に分けることが出来る。古い火山は、広範囲に粘性の低い玄武岩を分布させた、いわゆる洪水玄武岩を噴出している。これらはキリマンジャロからンゴロンゴロにかけての広範囲の火山岩地域を形成した。

新期の火山は、メルー山やオールドイニョレンガイ山、ハナン山などであり、これらの新期の火山噴出物にフッ素が多く含まれているようである。

火山岩地域の地下水開発は難しく、井戸掘削地点を決めるためには多くの考察が必要である。しかし、もし、帯水層に当たれば大量の地下水が期待出来る。

玄武岩の火山噴出物には、火山灰、スコリア、火砕流堆積物、溶岩がある。火山灰は粉末状の噴出物で、噴火の際に上空に舞い上がり、風に流されて広範囲に広がる。スコリアは発泡性の5mmから数十mmの粒状を示す。火砕流は火山灰を伴った高温の噴出物が周囲の岩石を巻き込みながら高速で山体斜面を下る現象である。溶岩は固化していない液状のマグマが地上に出て冷却されて固まったものである。火山灰は一般的には透水性が高いが、細粒のため、それが堆積して固まると透水性が低くなる。軽石や火砕流堆積物は比較的透水性が高い。溶岩は急冷された溶岩流の下面と上面には亀裂が入り、その部分は透水性が高い。これらの特徴から、火山岩地域は地下水開発の可能性の高い地域であると考えられる。さらに、山岳地域は降雨も多く保水能力も高い。しかし、この地域の不利な点は、透水性の高い火山灰と火砕流堆積物が非常に厚く堆積しているために、水位が非常に深いということである。したがって、地下水開発は非常に難しくなっている。

玄武岩質の岩石はそれ自身が比較的比抵抗が低い。これは比抵抗探査だけで掘削地点や深度を決めることが難しいことを示している。地形的な特徴と湧水の位置は、掘削地点を決める上で非常に重要な情報となる。

予想される掘削深度は100から250m程度。

#### 4.3.6 第三紀と現在の堆積層 (N, NI, and Nf)

層状帯水層はこの地域にのみ期待出来る。砂と粘土が表流水の流れによって水系の末端に厚く蓄積している。IDB では河川は決して海には流れ出ない。地下を通過して多くの鉱物を溶かした河川水は、それぞれのサブ流域の末端にある湖や湿地(Swamp)に流れ込み、やがてそこで蒸発する。湖や湿地の水は蒸発によって鉱物の濃度を増し、様々なタイプの塩類の蓄積が起こる。したがって、湖の堆積物の地下水はそのような塩類の濃度が高い。

粘土層はととも透水性が低い。それは難透水層として振る舞う。砂層と礫層は透水性が高い。これらの層はこの地域の中でも良い帯水層と期待出来る。しかし、良い帯水層を見つけたとしても、その水は塩分濃度が高いと予想される。

垂直電気探査がこの地域の基盤岩深度を知るために適している。ほとんどの地域が粘土鉱物のために 10 Ohm-m 以下の非常に低い比抵抗を示す。比較的高い比抵抗(30 から 50 Ohm-m) の層が帯水層と期待される。

予想される掘削深度は 30 から 200m 程度。



乾季に Bahi 湿地の縁で塩を取っている村人

#### 4.3.7 大地溝帯と関連した断層系

IDB 内の断層系の構造的特徴は大地溝帯に関連している。多くの大規模断層が南北方向あるいは北東-南西方向に向いている。基本的に、これらの大地溝帯に関連する断層は正断層であり、その断層破碎帯には多くの地下水が蓄積されていると思われる。

大地溝帯に沿ったいくつかの場所には温泉がある。たとえば、マニヤラ湖の西岸やシンギダ州の東側の谷は火山からは離れている。温泉の水質は大量の鉱物を含んでいるので、たいていの場合悪い。

地下水開発のための掘削地点を選ぶとき

には、断層の傾斜角度とその方向を考慮する必要がある。急角度を持った正断層は地下水開発にとっては適している。したがって、掘削地点は断層崖に断層の幅以内に十分近づいた地点を選ぶ必要がある。

予想される掘削深度は 70 から 200m。



断層崖の近くの電気探査地点  
(試掘井戸番号 TD-8, Ikasi, Manyoni).

#### 4.4 地下水流解析

地下水の流れを井戸の静水位と水質のデータを使って解析した。

##### 4.4.1 静水位の標高

水位標高分布図を、既存の井戸データ、湧水そして本調査の試掘井戸のデータから作成した。地下水には主に被圧帯水層と不圧帯水層の2種類の帯水層がある。被圧帯水層の水位は被圧水頭と呼ばれ、不圧帯水層の水位は自由水面という。しかし、既存データでは、これらの水位の違いは明確ではない。したがって、その違いは無視して図を作成した。図4-18は静水位の標高の分布図を示す。各地点の静水位の標高はGPSで測定した井戸の標高とそれらの静水位深度から計算された。

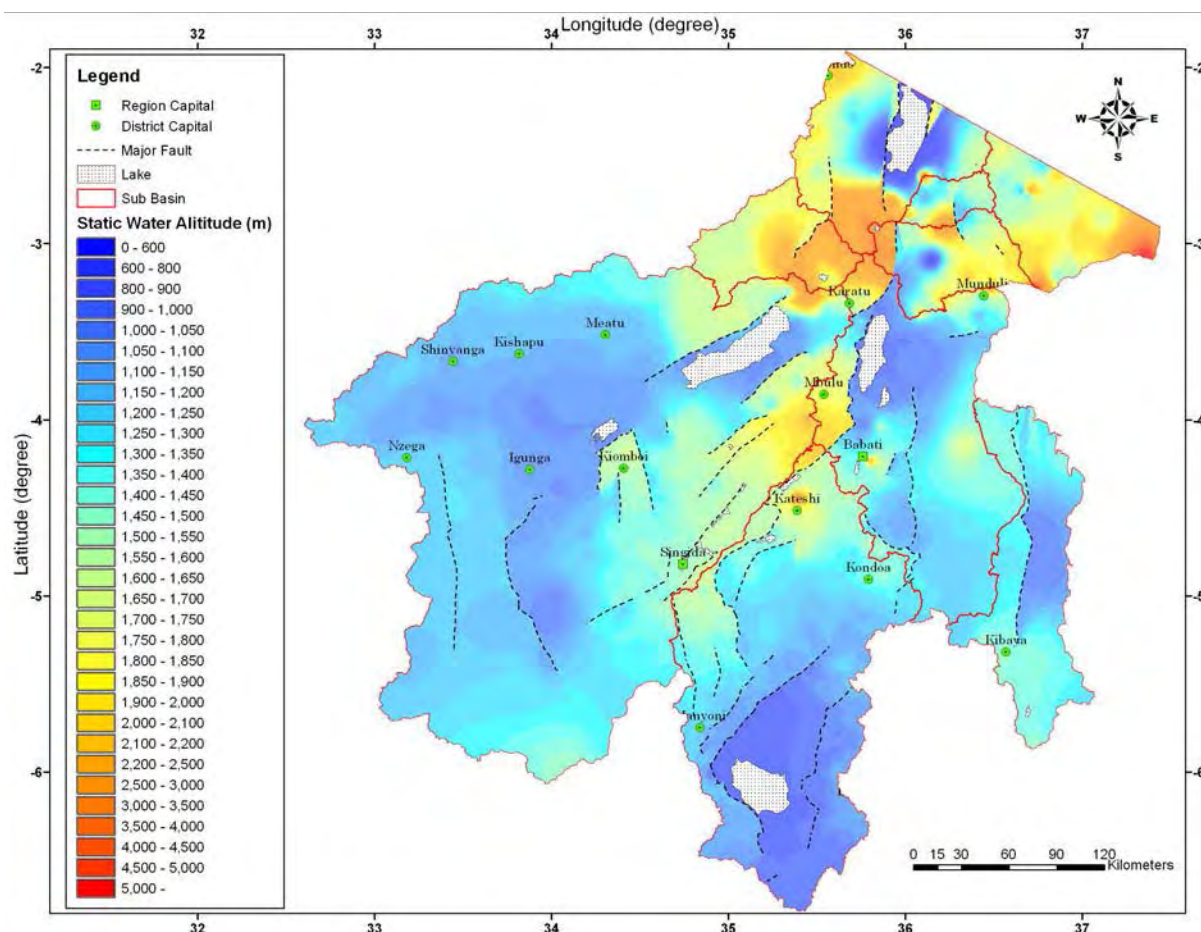


図 4-18 静水位標高分布図

##### 4.4.2 水質ヘキサダイアグラム解析

表流水と雨水は、地下に浸透し、土と岩を通り、岩から鉱物を溶かし、水質を変えながら地下を流れる。それゆえ、水流は地下水の上流側と下流側で水質を比べることによって解析することができる。水質ヘキサダイアグラムの分布を図4-19に示す。水質のパラメータはナトリウムとカリ

ウム ( $\text{Na}^+ + \text{K}^+$ )、カルシウム ( $\text{Ca}^{2+}$ )、マグネシウム ( $\text{Mg}^{2+}$ )、塩素 ( $\text{Cl}^-$ )、重炭酸 ( $\text{HCO}_3^-$ ) そして硫酸と硝酸塩 ( $\text{SO}_4^{2-} + \text{NO}_3^-$ ) である。さらに、ダイアグラムの色はその水源の種類によって変えて示した。青が井戸で、水色が湧水、黄色が浅井戸でオレンジ色が表流水である。

一般に、表流水のダイアグラムは溶存する鉱物が少ないため狭い形を示す。浅井戸の浅層地下水は重炭酸を比較的多く含む。地下水にとって下流側か停留した地下水は、様々な鉱物が多く溶存するためにダイアグラムは幅広になってくる。特に、ナトリウムと塩素の成分の幅が下流側で広がる。カルシウムとマグネシウム、硫酸の溶解は地質状況によって異なる。ちなみに、海水のヘキサダイアグラムは、ナトリウムと塩素の幅が広くその他は狭い、杯の形になる。

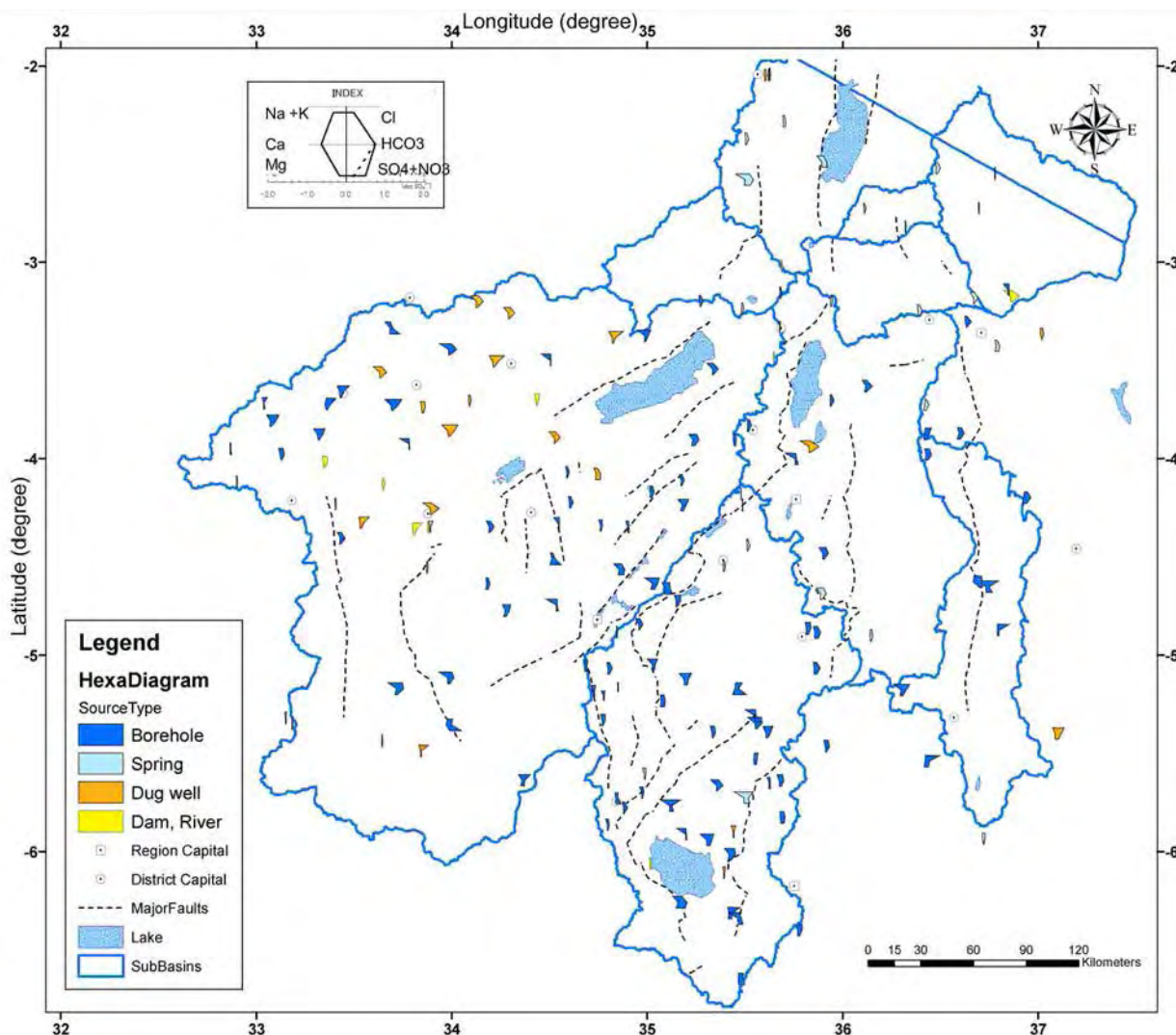


図 4-19 内部収束流域における水質ヘキサダイアグラム分布

#### 4.4.3 地下水の流れ

地下水は重力によって高いところから低いところに流れる。これは表流水の流れと同じである。したがって、地下水の流れる方向は静水位の標高をトレースすることによって導くことができる。さらに、ヘキサダイアグラムの分布によって知ることができる水質の変化が地下水の流れを解析するときに考慮した。図 4-19 は地下水の流れ方向を示した。この図は流れの方向のみを示しており、矢印の長さは流れの速さを示しているわけではない。

地下水流の速度も静水位標高から見積もることができる。その速度はダルシーの法則である、以下の式を用いて計算出来る。

$$V=K(dH/dL),$$

ここで、V は速度(m/min)、K は透水係数(m/min)、H は水頭(m)、そして L(m)は水頭を測定した 2 地点間の距離である。(dH/dL) は動水勾配と呼ばれている。

地下水の流速は試掘井戸の地点で計算された。表 4-12 にその結果を示す。

表 4-12 試掘井戸の周辺の地下水の流速

| Boring No. | Nature of Aquifer                       | Hydraulic Conductivity (m/min) | Distance between contour (m) | Interval of the contour (m) | Velocity (m/year) | Remark        |
|------------|---|--------------------------------|------------------------------|-----------------------------|-------------------|---------------|
| TD-2       | Fractured granite                       | 4.16E-04                       | 20,399                       | 100                         | 1.07              |               |
| TD-3       | Fractured granite                       | 7.02E-05                       | 14,439                       | 100                         | 0.26              |               |
| TD-4       | Fractured gneiss                        | 1.13E-04                       | 8,345                        | 100                         | 0.71              |               |
| TD-5       | Weathered/Fractured gneiss              | 5.11E-04                       | 14,484                       | 100                         | 1.85              |               |
| TD-7       | Weathered/Fractured gneiss              | 5.99E-03                       | 8,193                        | 100                         | 38.43             | Fault area    |
| TD-8       | Weathered/Fractured granite             | 1.42E-05                       | 691                          | 100                         | 1.08              | Fault area    |
| TD-10      | Fractured granite                       | 3.57E-06                       | 6,005                        | 100                         | 0.03              |               |
| TD-11      | Fractured schist                        | 3.35E-05                       | 7,108                        | 100                         | 0.25              |               |
| TD-12      | Fractured granite                       | 2.15E-03                       | 4,426                        | 100                         | 25.53             | Fault area    |
| TD-13      | Fractured granite                       | 9.90E-05                       | 26,945                       | 100                         | 0.19              |               |
| TD-15      | Weathered/Fractured granite             | 1.81E-04                       | 16,653                       | 100                         | 0.57              |               |
| TD-17      | Clayey sand, Weathered gneiss           | 7.61E-05                       | 1,841                        | 100                         | 2.17              |               |
| TD-19      | Fractured gneiss                        | 9.87E-04                       | 370                          | 100                         | 140.40            | Sediment area |
| TD-20      | Sand                                    | 3.20E-05                       | 24,072                       | 100                         | 0.07              |               |
| TD-21      | Weathered/Fractured granite             | 6.67E-06                       | 25,110                       | 100                         | 0.01              |               |
| TD-29      | Weathered/Fractured basalt, agglomerate | 3.17E-05                       | 1,891                        | 100                         | 0.88              |               |

花崗岩と変成岩の中の速度は非常に遅いが、断層での速度は早いことが分かる。