

Q

沿岸部において、井戸による地下水利用や工事による地下水排除等で地下水位が低下すると、地下水の塩水化が気になります。塩水化を評価する簡易な方法はありませんか？

A

海岸付近の地下水は、密度の大きな海水が陸側の淡水の下にもぐりこんで塩水くさびを形成します。この海水と淡水の境界は塩淡水境界といわれ、その深度はガイベン-ヘルツベルグの式から推定でき、塩淡水境界は地下水位低下の40倍で上昇するといわれています。塩淡水境界が井戸底や水替え深度付近に近づくと、地下水の塩水化が懸念されることから、対象地点での地下水位や塩淡水境界の位置が塩水化問題を評価するポイントになります。

### (1) 沿岸部での地下水の流れと塩水くさび

沿岸部の地下水（淡水）は、陸側からの水頭差によって海へ流れています。一方海水（塩水）は、淡水と比べ密度が大きいことから淡水の下へくさび状にもぐりこみます（図-1）。これが「塩水くさび」です。また塩水と淡水の間には広い遷移領域が形成され、海→内陸部→海の海水循環の流動経路の一部になります。

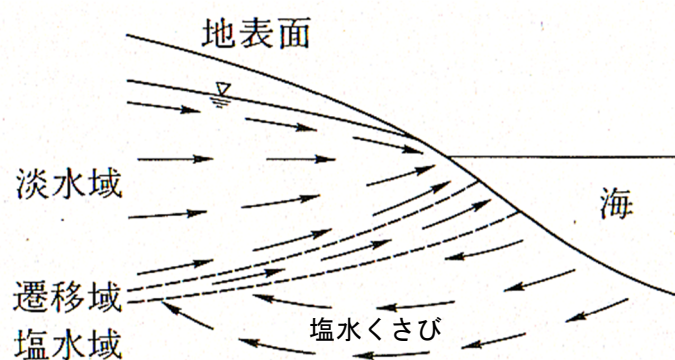


図-1 海岸帯水層中における地下水の流れ  
文献<sup>1)</sup>に加筆

### (2) ガイベン-ヘルツベルグの式

ガイベンとヘルツベルグ (Ghyben, 1889 ; Herzberg, 1901) は、塩水と淡水の境界を塩淡水境界（内部境界）から「長さ  $h_f + z$  の淡水の柱の質量は長さ  $z$  の塩水の柱の質量と等しい」と考え、塩淡水境界（内部境界面）は海水面上の淡水の高さの約40倍に相当する海水面下の深さの所に生じているであろうと論証しました。これがガイベン-ヘルツベルグの式です。例えば、地下水位 ( $h_f$ ) が EL. 1m であれば、塩淡水境界の深さ ( $z$ ) はその40倍下の EL. -40m に存在することになります。

$$z = \frac{\rho_f}{\rho_s - \rho_f} h_f \quad \dots \{式 1\}$$

ここに、 $z$ が海水面から下の内部境界面までの深さ(m)、 $h_f$ が地下水面高さ(m)で、淡水の密度( $\rho_f$ )が $1.000\text{g/cm}^3$ 、塩水の密度( $\rho_s$ )が $1.025\text{g/cm}^3$ ならば、

$$z = 40 h_f \quad \dots \{式 2\}$$

となります(図-2)。

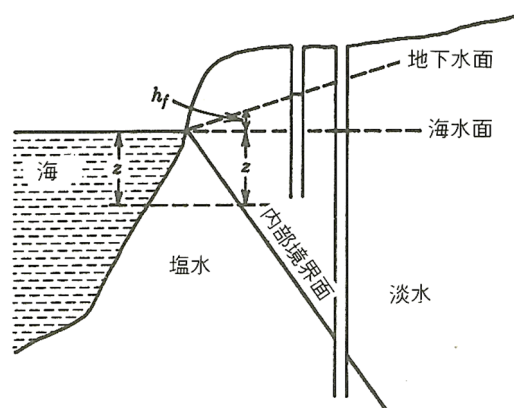


図-2 Ghyben-Herzberg の塩水と淡水のつり合い<sup>2)</sup>

### (3) 塩淡境界の調査方法

塩淡境界の調査方法には、井戸や地下水観測孔を用いた鉛直方向の観測が一般的で、ポータブル電気伝導度計による鉛直方向の電気伝導度測定があります。このほかに、電気探査による地盤の比抵抗値や、電磁探査による地盤の導電率測定などの物理探査手法もあります<sup>3)</sup>。

電気伝導度とは、電気抵抗の逆数で表され、塩分など水に溶ける溶存イオン量が多いほど高い値を示します。電気伝導度測定は、観測孔に電気伝導度センサーを用いて所定深度の電気伝導度(EC)値を観測します。EC値の目安としては、我が国の平均的な海水で $4,500\text{mS/m}$ 程度、河川水(淡水)で $11\text{mS/m}$ 程度です<sup>4)</sup>。その結果をEC値と深度のグラフにすることで、その地点での塩淡境界の深度を推定することができます(図-3)。なお塩淡境界は淡水と海水の接する部分で、その分布に幅がある場合が多いです。その際は、図の様にEC値による塩淡境界の目安を定義すると評価しやすくなります。

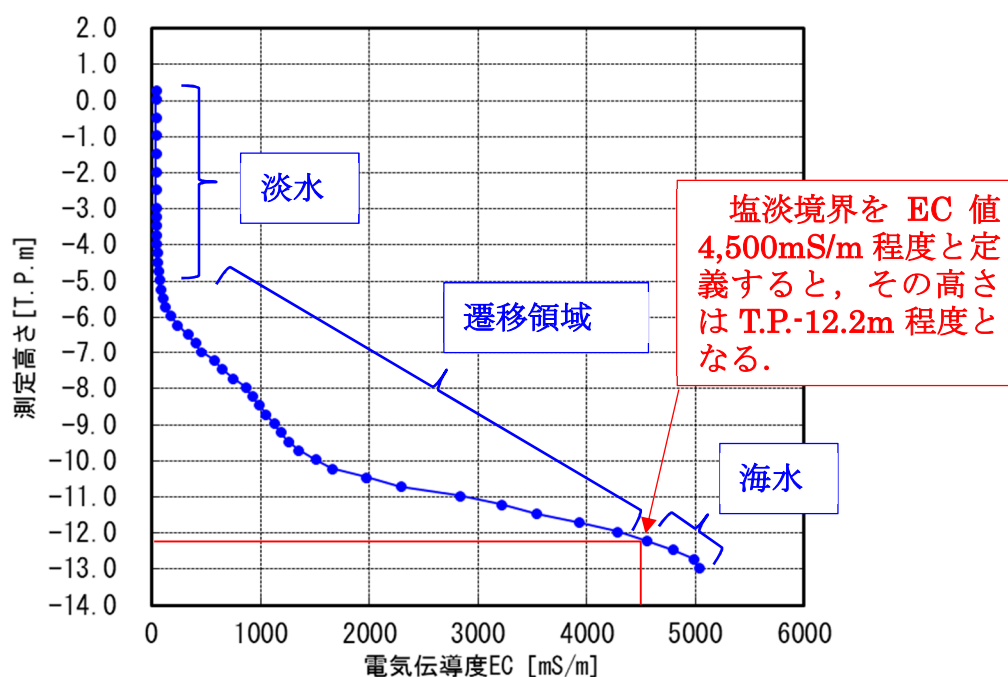


図-3 鉛直方向の電気伝導度測定結果の例

#### (4) 塩淡境界に着目した地下水の塩水化評価

観測孔で塩淡境界がつかめれば、断面図でその地点と海岸線地点を結んだ直線が塩淡境界（静水圧条件下）となります。このときの地下水面が海水面より十分高ければ、淡塩境界は地下深くに押し下げられます（図-4a）。しかし、過剰な揚水や地下水排除を行うと、井戸底に塩淡境界が近づき、地下水の塩水化が発生することになります（図-4b）。

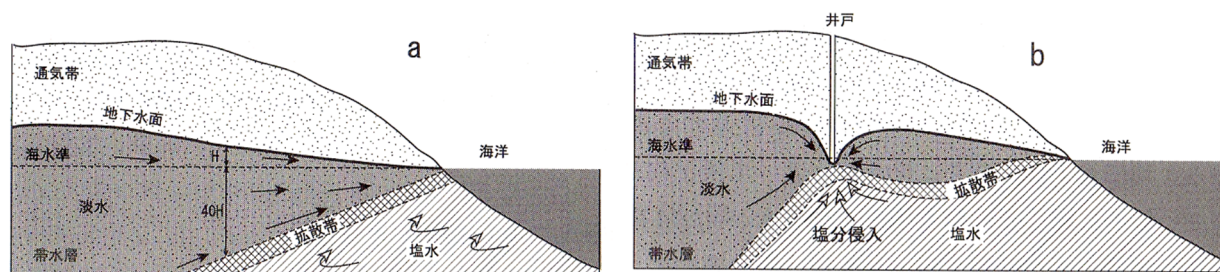


図-4 海岸での塩分侵入<sup>5)</sup>（左図：図-4a、右図：図-4b）

塩水化評価の目安として、Dagan and Bear(1968)は、上昇した塩水コーン高さ  $z$  が、井戸底から初期の塩淡境界（内部境界）面までの距離  $d$  の  $1/3$  を超えない場合に、塩淡境界（内部境界）面は安定であると提案されています（図-5）。つまり  $z < 1/3 \times d$  であれば、塩水コーンの急激な上昇が抑えられ、塩水化が抑制されることとなります。

以上より、沿岸部での地下水を塩水化させないためには、地下水面が海水面より常に高い状態を保っているかを確認することが重要です。ただし、塩淡境界は降水状況や潮位等によって変化することも多いため、塩淡境界の見極めは、十分な地下水位や気象観測データを基にした総合的な判断が必要です。

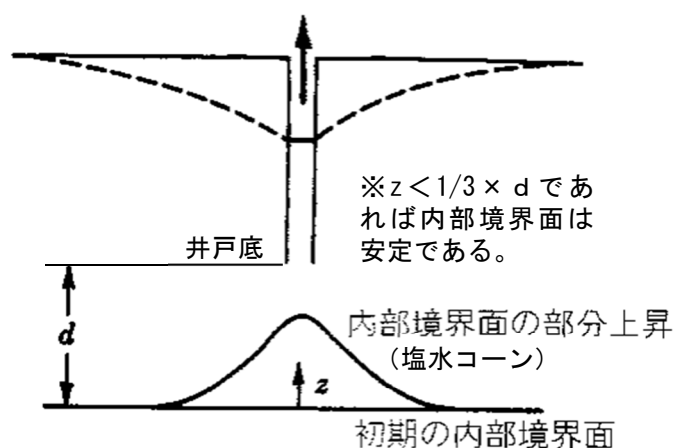


図-5 揚水による内部境界面の部分上昇  
文献<sup>2)</sup>に加筆

## 【引用文献】

- 1) 藤縄克之 (1990) : 地学ワンポイント 2 汚染される地下水, 共立出版, pp. 60-62
- 2) 大西有三 監訳 (1996) : P. A. ドミニコ, F. W. シュワルツ著 地下水の科学Ⅲ-地下水と地質-, 土木工学社, pp. 25-29
- 3) 石田聡・土原健雄・吉本周平・皆川裕樹・増本隆夫・今泉眞之 (2011) : 沖縄県多良間島における淡水レンズ賦存量の推定, 農業農村工学会論文集 273, pp. 157-168.
- 4) 国土交通省 関東地方整備局 霞ヶ浦河川事務所 : 水質用語集 (電気伝導率), <http://www.ktr.mlit.go.jp/kasumi/kasumi00012.html>, 2018年6月15日閲覧.
- 5) 鞠子正 (2002) : 環境地質学入門, 古今書院, 2002, pp. 147-148

(回答者 宮地 修一)