

2025年度(R07年度)

地下水盆管理学

福島大学 共生システム理工学類
地球環境コース
柴崎 直明

1

9. 地下水障害(塩水侵入)

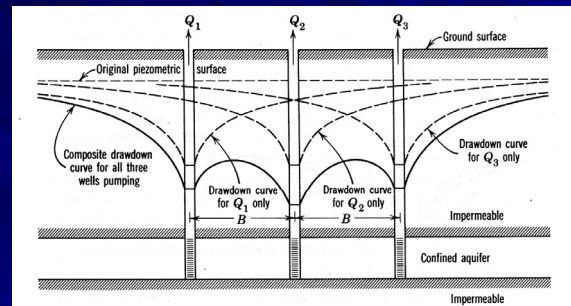


Fig. 4.27 Individual and composite drawdown curves for three wells in a line.

複数の井戸からの揚水

塩水侵入



沖縄県・竹富島の海

(「日本の海」平凡社より)

地下水の塩水化とは...

地下水中の塩分濃度が高くなること

- ❖ 臨海部の帯水層に海水が侵入
- ❖ 地層中の化石塩水の移動・拡散
- ❖ 蒸発による塩分の濃集

塩水侵入とは...

塩水侵入ともいう

英語では、Saline Water Intrusion

海岸地帯の帯水層に海水が侵入することを、

海水侵入(浸入)とも呼ぶ

Sea Water Intrusion

淡水(Fresh Water)と塩水(Saline Water)の違い

海水の場合、塩分濃度は3.3~3.7%くらい

塩分濃度の公式:

濃度(%) =

溶質の質量 ÷ (溶質の質量 + 溶媒の質量) × 100

濃度3.5%の塩水の場合、1kgの塩水は

965cc(=965g)の水 + 35gの塩からなる。

海水の塩分濃度

海水には、塩化ナトリウムなどのいろいろな塩類（無機電解質）が溶けている。

海水中の塩類の濃度を、塩分（濃度）とよぶ。

通常、ppt（千分率）や‰（パーミル）の単位（質量千分率）で表す。

外洋水の平均的な塩分濃度＝約35‰

海水1kg中に、約35gの塩類が溶けている

海水の主要成分の組成（塩分35‰）

成 分	濃度 (g/kg)	重量百分率 (%)
Cl ⁻	19.35	55.07
Na ⁺	10.76	30.62
SO ₄ ²⁻	2.71	7.72
Mg ²⁺	1.29	3.68
Ca ²⁺	0.41	1.17
K ⁺	0.39	1.10
HCO ₃ ⁻	0.14	0.40
Br ⁻	0.067	0.19
Sr ²⁺	0.008	0.02
B ³⁺	0.004	0.01
F ⁻	0.001	0.01
合 計		99.99

（「海水の化学」
東海大学出版会
より）

海水の塩分濃度の変化（1）

塩分の濃集作用

海面からの水の蒸発

海水の形成など

塩分の希釈作用

陸水や淡水の流入

融氷など

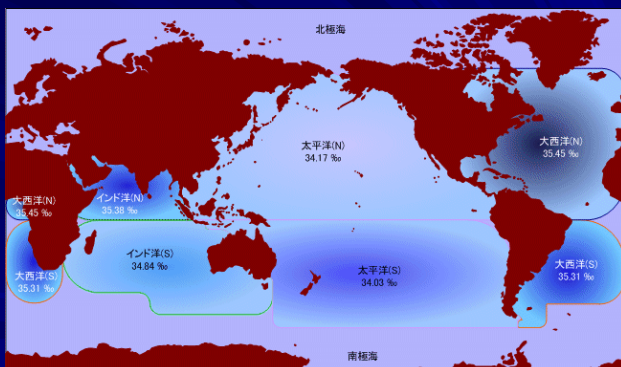
海水の塩分濃度の変化（2）

地域による違い

河川から大量の淡水が流入する沿岸地域＝塩分濃度が低い

降水量よりも海面からの蒸発量が上回っている地域＝塩分濃度が高い

海水の塩分濃度の変化（3）



（Little Waves社HPより、原データは「海のはなしⅡ」技報堂出版を使用）

淡水と海水の密度

純水の密度：

20℃、1気圧の場合、0.99820g/cm³

塩分35‰の海水の密度：

20℃、1気圧の場合、1.02478g/cm³

【復習】流体ポテンシャル式の変形(1)

一般に、 p は大気圧を基準にしてあらわすため、 $p_0=0$ となるから

$$\Phi = gZ + \frac{p}{\rho} = gh$$

流体ポテンシャルは、
重力ポテンシャル(または位置ポテンシャル) gZ と、
圧力ポテンシャル p/ρ の和である

【復習】流体ポテンシャル式の変形(2)

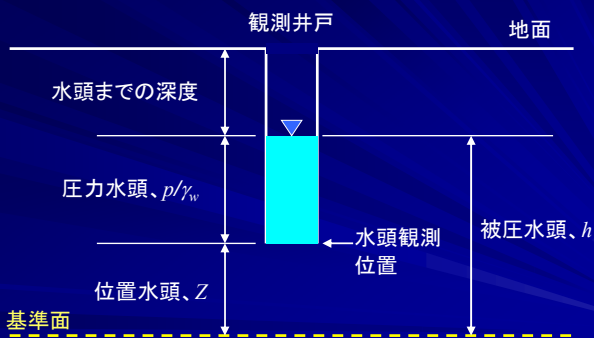
$$\Phi = gZ + \frac{p}{\rho} = gh$$

両辺を g で割ると、

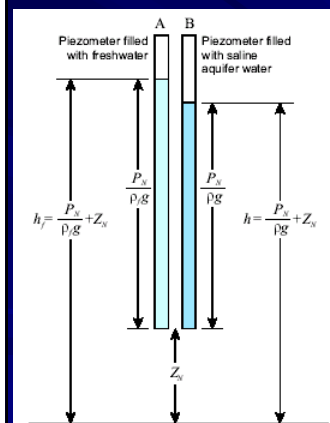
$$h = Z + \frac{p}{\rho g} = Z + \frac{p}{\gamma_w} = Z + \psi$$

h : 水理水頭(=被圧水頭)、 Z : 位置水頭、 $\gamma_w (= \rho g)$: 水の単位体積重量、 ψ (プシー): 圧力水頭

【復習】位置水頭・圧力水頭・被圧水頭

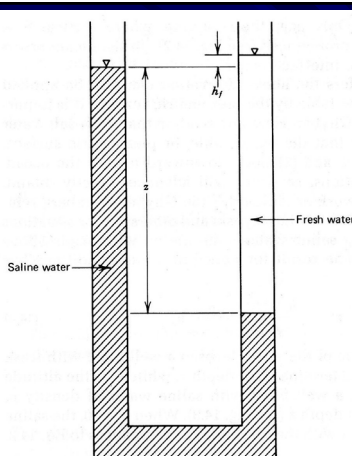


淡水と塩水の水頭



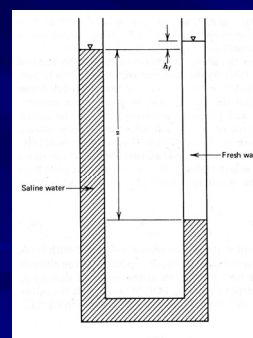
EXPLANATION	
h_f	Equivalent freshwater head [L]
h	Head [L]
P_s	Pressure [$\text{ML}^{-1}\text{T}^{-2}$]
ρ_f	Density of freshwater [ML^{-3}]
ρ	Density of saline aquifer water [ML^{-3}]
g	Acceleration due to gravity [LT^{-2}]
Z_0	Elevation [L]
NOTE: L = length, M = mass, T = time	

U字管における 淡水と塩水の 平衡



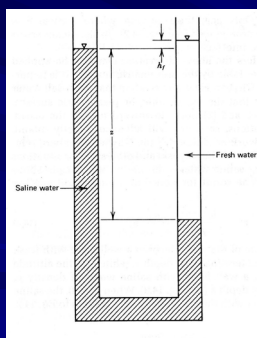
(「Groundwater Hydrology」
Wileyより)

ガイベンヘルツベルグの法則(1) (Ghyben-Herzberg Relation)



ガイベンやヘルツベルグ
たちは、それぞれ個別に
ヨーロッパの海岸地帯に
おいて、地下の塩水は海
水準よりも低い標高に分
布していることを発見した。

ガイベンーヘルツベルグの法則(2) (Ghyben-Hertzberg Relation)



U字管の両端は同じ圧力を有するから、

$$\rho_s g z = \rho_f g (z + h_f)$$

$$z = \frac{\rho_f}{\rho_s - \rho_f} h_f$$

ガイベンーヘルツベルグの法則(3) (Ghyben-Hertzberg Relation)

$$z = \frac{\rho_f}{\rho_s - \rho_f} h_f$$

$\rho_s = 1.025 \text{ g/cm}^3$, $\rho_f = 1.000 \text{ g/cm}^3$ とすると、

$$z = 40 h_f$$

ガイベンーヘルツベルグの法則 による塩淡水境界分布

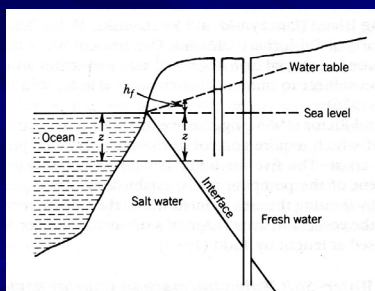


Figure 6.24
Hydrostatic conditions of the Ghyben-Hertzberg relation.

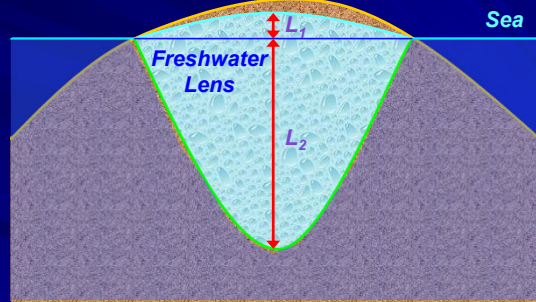
(「Physical and Chemical Hydrogeology」Wileyより)

海で囲まれた島での淡水レンズ

Fresh Water: $\rho_f = 1.000 \text{ g/cm}^3$

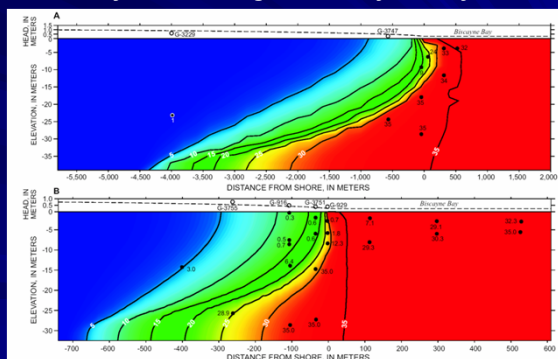
Sea Water: $\rho_s = 1.025 \text{ g/cm}^3$

$$L_1 : L_2 = 1 : 40$$

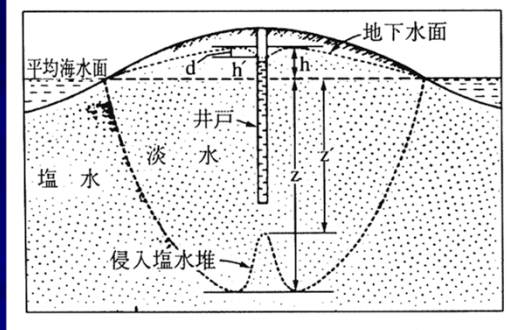


シミュレーションモデルによる 塩淡水境界の変動

Simulated Ghyben-Hertzberg Relation by Density Fluid Model

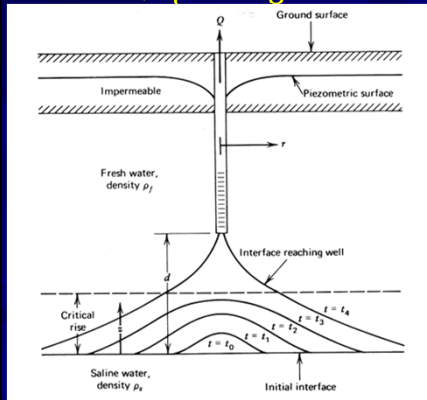


淡水レンズからの揚水すると...



(「地球の水圏—海洋と陸水」東海大学出版会より)

揚水による塩水堆の上昇 (Upconing of Saline Water)



(「Groundwater Hydrology」Wileyより)

静岡県富士市の塩水化状況

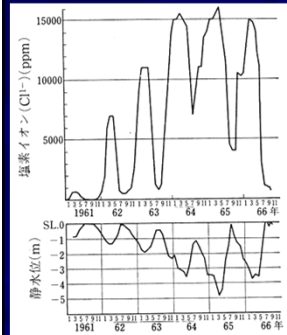


図 1.20 静岡県富士市の深井戸の塩素イオン濃度と静水位の経年変動——海岸線から1.2km内陸部(村下・岸³⁷⁾による)

(「地下水資源・環境論」共立出版より)

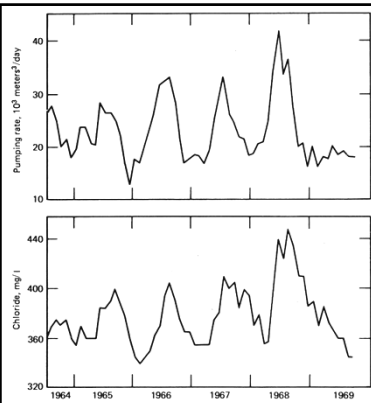


Fig. 14.10 Effect of annual variation in pumping rate on upconing of underlying saline water in Honolulu, Hawaii. Chloride contents were measured in an observation well at a depth of 128 m and located 430 m from the pumping well (after Todd and Meyer²⁰).

ハワイ・ホノルルの塩水化進行状況

(「Groundwater Hydrology」Wileyより)

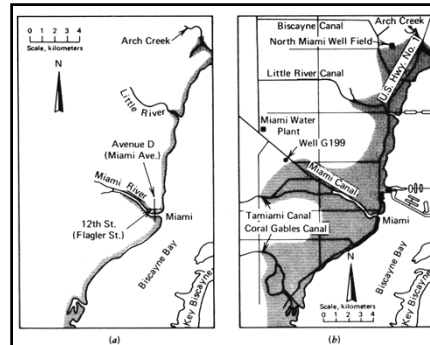
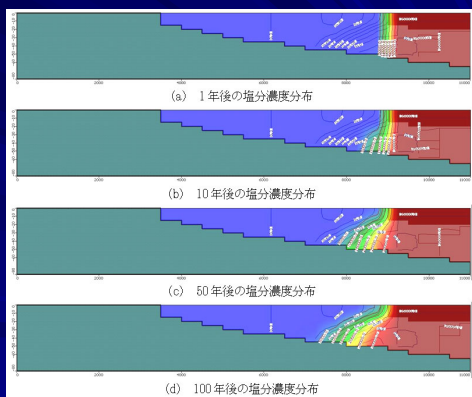


Fig. 14.19 Maps showing extent of seawater intrusion in and near Miami, Florida as of (a) 1904, and (b) 1959. Note the extent of intrusion associated with the drainage canals (after Kohout²²; reprinted from the *Journal American Water Works Association*, Vol. 53, by permission of the Association, copyright © 1961 by American Water Works Association, 6666 West Quincy Avenue, Denver, CO 80235).

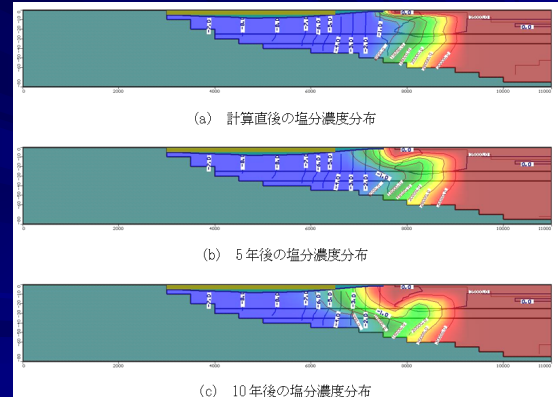
アメリカ・マイアミ付近の塩水浸入

(「Groundwater Hydrology」Wileyより)

仙台平野南部でのシミュレーション結果



揚水有りの場合のシミュレーション結果



地下水障害がもたらした 地下水保全論

まずは個別の井戸管理

井戸群や群井系としての解析

地下水盆としての解析

参考文献

水収支研究グループ編
「地下水資源・環境論－その理論と実践－」
共立出版、1993年