

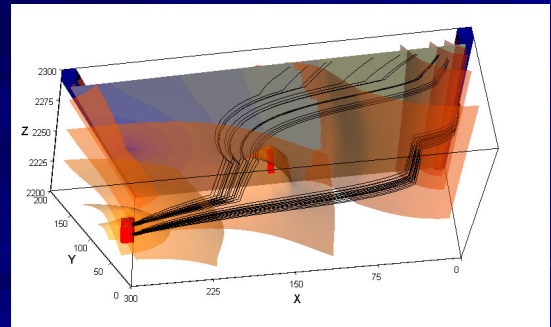
2025年度(R07年度)

## 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

## 13. 地下水シミュレーション 基礎と歴史, 種類



3次元モデルの解析例

## 地下水シミュレーションの意義

地下水盆管理で重要な役割を果たしている

- 1) 直接目にするのでできない地下水盆の動態を明らかにすることができる
- 2) 地下水盆管理の最終目標を決定するために欠かすことができない

3

## シミュレーションの基本概念

- ① システム(地下水系)を構成する要素を抽出して, 現実の状態を反映するモデルを設定し, そのモデルで実験を行う手法のこと
- ② モデルとは, システムの現象を支配している物理的・化学的・生物的, さらには経済的な特性の相互関係を, 数学的・論理的に記述したもの

4

## シミュレーションにおけるモデル化

- ① 対象となる現実のシステムの観察・認識・分析と, 再構築の過程
- ② 地下水盆のモデル化には, 地下水盆自体のモデル化と, 地下水と交流のある地表水(河川水など)との相互関係や, 地下水涵養, 地下水揚水などもモデル化する必要がある

5

## シミュレーションのメリット(1)

現実のシステムが示す動態には, 観測することが困難であるとか, その変化の観測に莫大な経費がかかる場合がある



シミュレーションでは, 個々の観測データをもとにシステムの動態を統一的に任意の時間で示すことができる

6

## シミュレーションのメリット(2)

システムを記述する数学的モデルにより、現実には起こりえない状態も含めて、さまざまな任意の条件下で実験を行い、その比較検討が可能である

7

## シミュレーションのメリット(3)

さまざまな条件下での予測をすることで、現実のシステムの危機を回避するための対策や、緊急時の意思決定をより迅速に行うための予行演習をすることができる

8

## 地下水シミュレーションモデルの区分

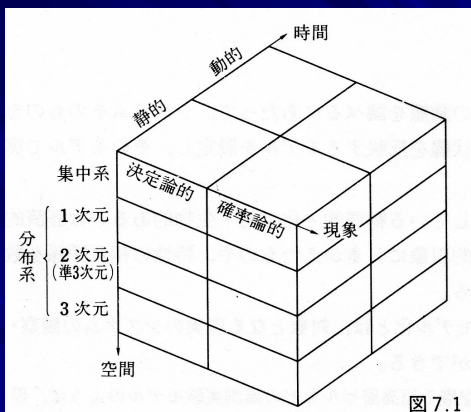
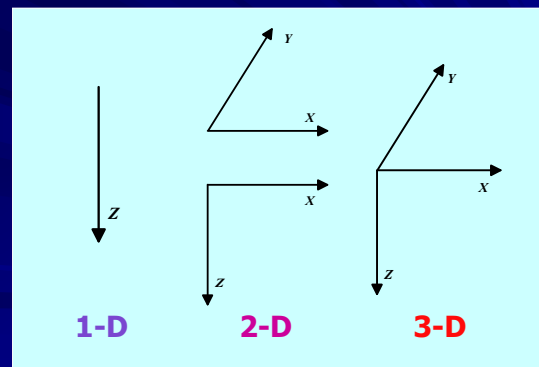


図 7.1

(「地下水資源・環境論」より)

9

## 分布系の次元 (Model Dimension)

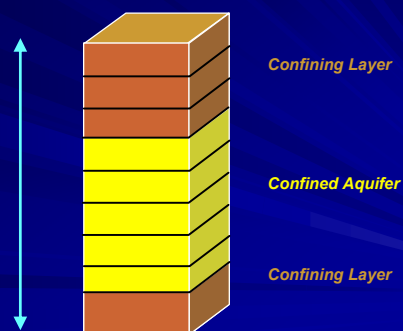


1-D

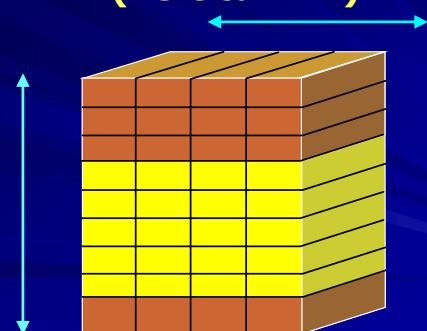
2-D

3-D

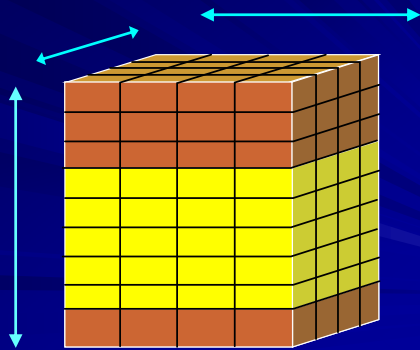
## 1次元モデルの例 Example of 1-D Model



## 2次元モデルの例 Example of 2-D Model (Vertical 2-D)



### 3次元モデルの例 Example of 3-D Model



### 定常 (Steady-State) と非定常 (Transient)

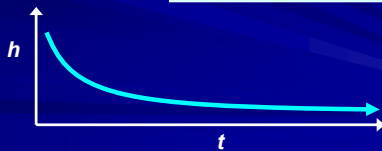
- 定常状態とは:  
時間に依存しない
- 非定常状態とは:  
時間に依存する

### 定常状態とは何か？

時間に依存しない

時間  $t$ :

$$t = 1 \rightarrow \infty$$



### 定常シミュレーションでは...

$S$  や  $S_s$  を入力する必要はない

なぜ？

なぜならば、定常状態ではシステムへの流入量と流出量は平衡状態にあるため、そのシステムにおいて時間の経過による貯留量の変化がないため

### 地下水の水収支基本式

$$R(t) - D(t) = \frac{dS}{dt}$$

$R(t)$ : ある期間における地下水盆へのかん養量  
 $D(t)$ : ある期間における地下水盆からの流出量  
 $dS/dt$ : ある期間における地下水盆内の貯留量変化

17

### 非定常とは何か？

時間に依存する  
(Transient または Unsteady-state)



## 非定常シミュレーションでは...

$S$  または  $Ss$  を入力する必要がある

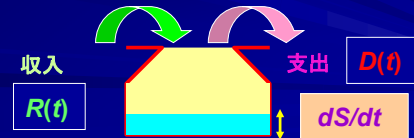
なぜ?

なぜならば、非定常状態ではシステムへの流入量と流出量は時間とともに変化する(非平衡状態)、そのシステムにおいて時間の経過により貯留量が増加するため

## 地下水収支式の例

$$R(t) - D(t) = \frac{dS}{dt}$$

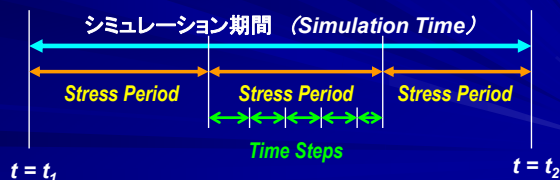
[収入] - [支出] = [財布の中の残金]



20

## 非定常シミュレーションでは...

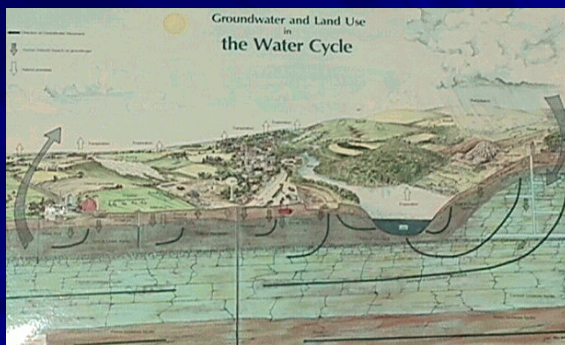
$S$  や  $Ss$  だけではなく  
時間に関するパラメータ  
も入力する必要がある



## 地下水モデルの発展の歴史

- 概念モデル (Conceptual Model) 19世紀後半から
- 図解モデル (Graphical Model)
- 物理モデル (Physical Model)
- アナログモデル (Analog Model) 1950～1960年代
- 数学モデル (Mathematical Model)
- デジタルモデル (Digital Model) 1960年代中期

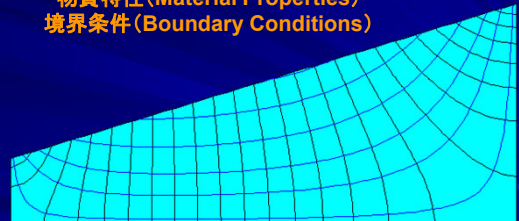
## 概念モデル (Conceptual Model)



## 図解モデル (Graphical Model)

### 流線網図 (Flow Net)

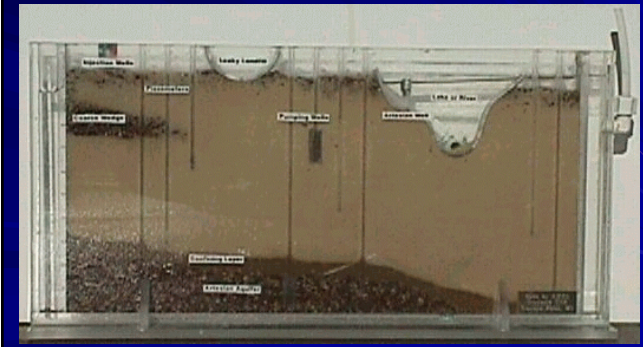
幾何的条件 (Geometry)  
物質特性 (Material Properties)  
境界条件 (Boundary Conditions)





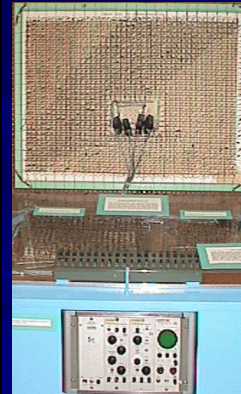
## 物理モデル(Physical Model)

### 砂箱(Sand Tank)モデル



## アナログモデル(Analog Model)

### 電気回路モデル



1960年代にイリノイ州シャンペン-アーバナ地区(Champaign-Urbana, Illinois)で作られたモデル。

上部のパネルは抵抗とコンデンサーによるモデル。

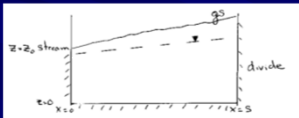
任意の点で電圧(=水頭)を測定。

モデルの変更が極めて面倒。

## 数学モデル(Mathematical Model)

### 解析モデル(Analytical Solution)

Toth (1962) developed a solution for Steady State flow in a 2-D section from a stream to a divide



he solved the Laplace Equation

$$\frac{\partial^2 h}{\partial x^2} - \frac{\partial^2 h}{\partial z^2} = 0$$

boundaries

left  $\frac{\partial h}{\partial x}(0, z) = 0$  right  $\frac{\partial h}{\partial x}(s, z) = 0$

lower  $\frac{\partial h}{\partial z}(x, 0) = 0$

upper water table  $h(x, z_0) = z_0 + cx = z_0 + \tan(\alpha)x$

### Result of Toth (1962) solution

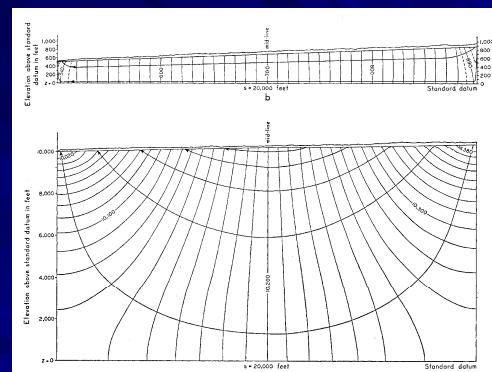


Fig. 3. Two-dimensional theoretical potential distributions and flow patterns for different depths to the horizontal impermeable boundary.

## デジタルコンピュータモデルの歴史 History of Digital Computer Model

Tyson and Weber (1964)が  
最初の数値シミュレーションモデル  
を地下水盆に適用

カリフォルニア州ロスアンゼルス  
の海岸平野の地下水盆に適用した

## 地下水数値シミュレーション発祥地



## カリフォルニア州の位置



## Tyson and Weber (1964)のモデル

差分法を使用した  
平面2次元地下水流動モデル

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( T \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( T \frac{\partial h}{\partial y} \right) - Q = S \frac{\partial h}{\partial t}$$

$T$ : transmissivity,  
 $S$ : storage coefficient,  
 $Q$ : net external inflow,  
 $h$ : head,  
 $t$ : time.

日本では....

**Shibasaki et al. (1969)**  
が類似したモデルを作成した



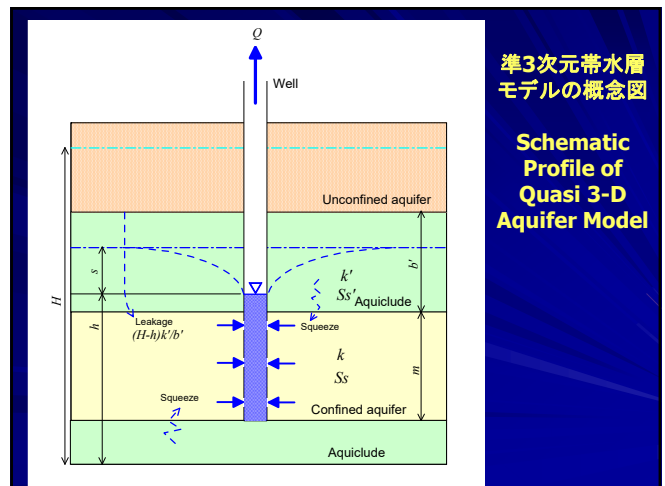
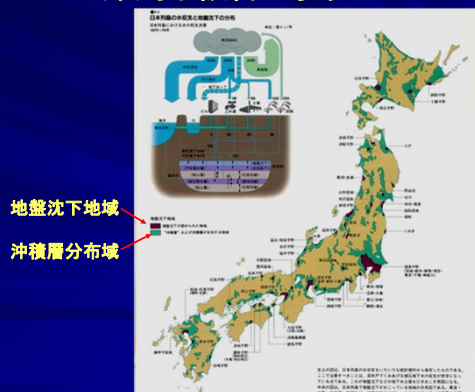
## Shibasaki et al. (1969) のモデル

上位の不圧帯水層からの漏水を考慮した  
平面2次元モデル

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( T \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( T \frac{\partial h}{\partial y} \right) - Q = S \frac{\partial h}{\partial t} - L$$

$T$ : transmissivity,  
 $S$ : storage coefficient,  
 $Q$ : net external inflow,  
 $h$ : head,  
 $t$ : time.  
 $L$ : 上位の不圧帯水層からの漏水

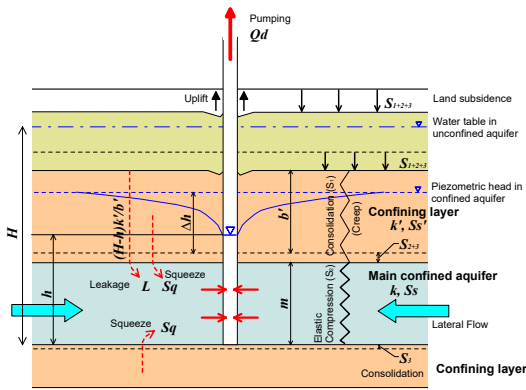
1970年代に入り、日本では地盤沈下による  
深刻な被害が多発



準3次元帯水層  
モデルの概念図

Schematic  
Profile of  
Quasi 3-D  
Aquifer Model

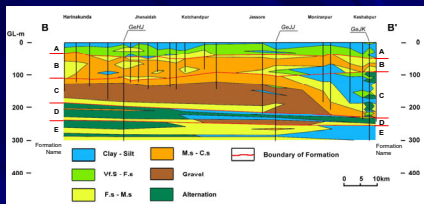
## 地盤沈下を考慮した準3次元帯水層モデル概念図



1970年代中期には、天然ガス採取による深層地盤沈下が発生し問題となった

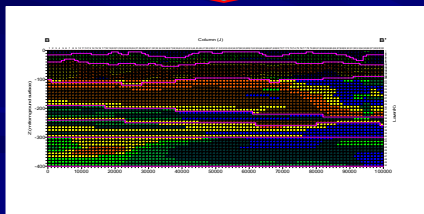
断面2次元多帯水層モデルの開発

なぜならば、準3次元モデル(Quasi 3-D Model)では多層構造をなす地下地質の水頭を計算することができず、層別の地盤沈下も計算できなかったため

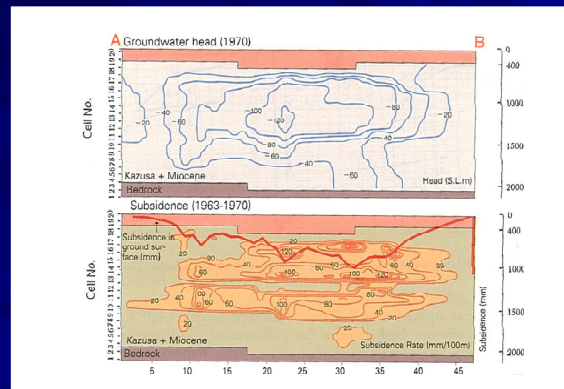


断面2次元多帯水層モデルの構造

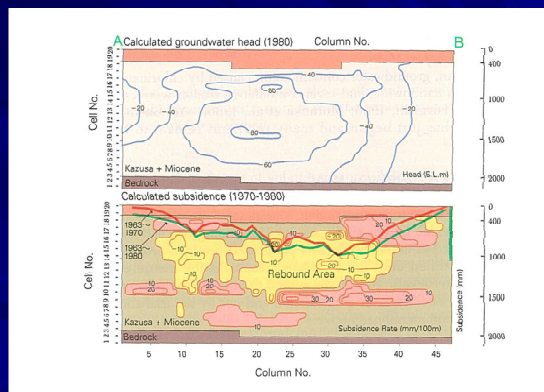
Model Structure of Vertical 2-D Multiple Aquifers Model



## 断面2次元多帯水層モデルの応答 (1) (船橋ガス田)



## 断面2次元多帯水層モデルの応答 (2) (船橋ガス田)



1970年代後半になると、地下水盆管理の必要性が増大した

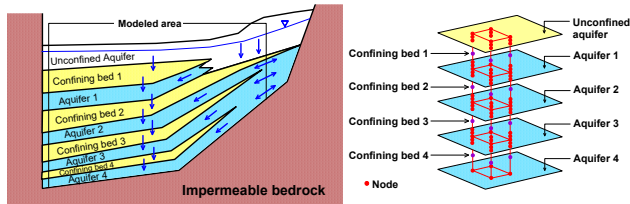
準3次元多帯水層モデル(Quasi 3-D Multiple Aquifers Model)の開発

多層構造をなす地下水盆の地下水収支を評価する必要がでてきたため





## 準3次元多帯水層モデルの概念図 Schematic Profile of Quasi 3-D Multi-Aquifers Model



1980年代に入ると、地下水汚染問題が多発

+

コンピュータ技術が急速に発展



- 物質輸送モデル(Mass Transport Model)の開発
- 3次元地下水流動・地盤沈下モデルの開発

1980年代後半には、  
3次元モデル【MODFLOW Code】が  
米国で開発された

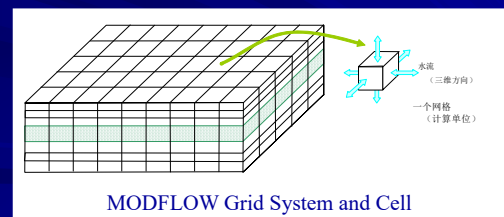
A full 3-D Groundwater Flow Model  
was developed by the U. S.  
Geological Survey  
(McDonald and Harbaugh, 1988)



現在ではさらに改良が加えられ、3次元地下  
水シミュレーションの世界的スタンダードとして  
使用されている

## 3次元地下水流動(MODFLOW)の 基本式

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( K_{xx} \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( K_{yy} \frac{\partial h}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( K_{zz} \frac{\partial h}{\partial z} \right) - W = Ss \frac{\partial h}{\partial t}$$



MODFLOW Grid System and Cell

46

1990年代に入ると、  
3次元地下水流動モデルと物質輸送モデル  
が利用されるようになった

WindowsをOSとした入出力ソフトも  
多数開発された



先進国だけでなく途上国の地下水盆でもシ  
ミュレーション技術が適用されるようになった

*Manila, Bangkok, Hanoi,....*

2000年代に入り、  
多目的の3-DモデルがGISソフトとともに  
開発されるようになった

パソコンのハードおよびソフトのさらなる進歩



GISデータベースを活用しながら、  
地下水流動、地下水汚染、地盤沈下、塩水化、  
水資源一体管理などが行われるようになった

*Arsenic Contamination in Bangladesh...*



## これからの地下水シミュレーション....

数値解析技術は、かなりのレベルに達している



### 現場のデータを再度見直す必要

信頼度の高いデータの習得, 精度の高いモデル入力データの推定, 各種観測データの活用

さらに信頼度の高いシミュレーションを!

## 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

Todd, D. K. : “Groundwater Hydrology

2nd Ed.”, John Wiley & Sons, 1980年

Anderson, M.P.他著, 藤縄克之監訳

「地下水モデル 実践的シミュレーションの

基礎」共立出版, 1994年