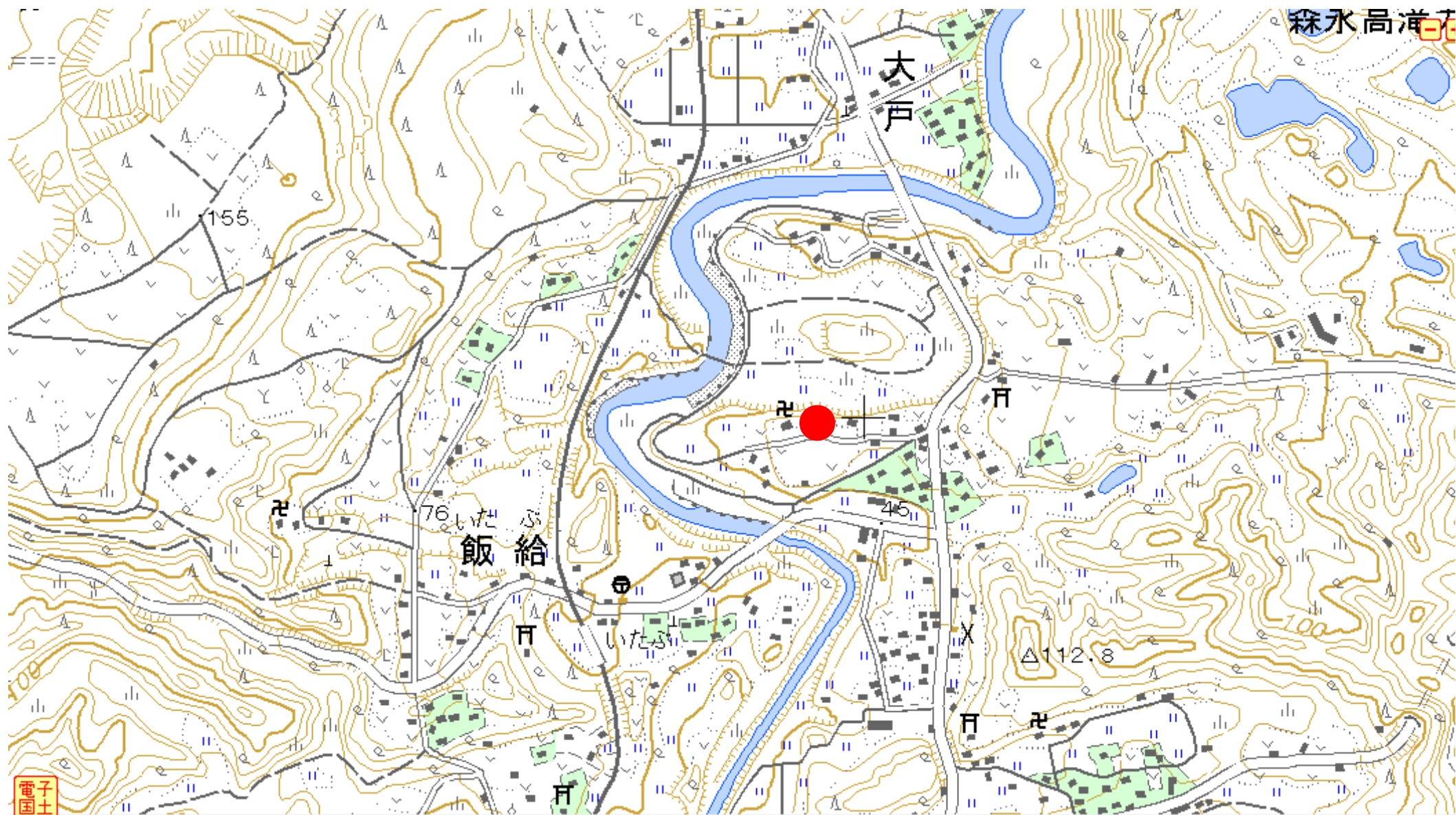


# 第4話 地下水流動系



近藤昭彦(環境リモートセンシング領域)

# カバーフォトの自噴井の場所● なぜ自噴するか、地下水の不思議、おもしろさ



(地図閲覧サービス(ウォッチズ) <http://watchizu.gsi.go.jp/index.html>)

# 養老川上流域—養老溪谷



● Ushiku

## 砂泥互層の丘陵地域の地下水の流れは

Image NASA

© 2008 Europa Technologies

Image © 2009 Digital Earth Technology

Image © 2009 DigitalGlobe

ストリーミング 100%

© 2007 Google

39.16° N 140° 09'26.79" E 高度 53 m

上空 2.61 km

## 地下水流動系 Groundwater Flow System

- 水は低きにつく
- 水はポテンシャルの高い部分から低い部分に向かって流動する
- ポテンシャルとは

総ポテンシャル = 位置ポテンシャル + 圧力ポテンシャル  
(水頭 : Hydraulic Head)

$$h = z + \phi$$

例) 河川では上流から下流に向かって水は流れる  
 $\phi$  は大気圧を基準にすると、水流は  $z$  のみで決まる

例) 地下水の流れは下向きだけでなく上向き鉛直成分もある  
 $\phi$  が正で、場所によって異なるから

# 地下水の運動

ダルシーの法則 (1856)

$Q=KA(h_2-h_1)/l$       流出量  $Q$  は、水頭の損失  $(h_2-h_1)$  に比例

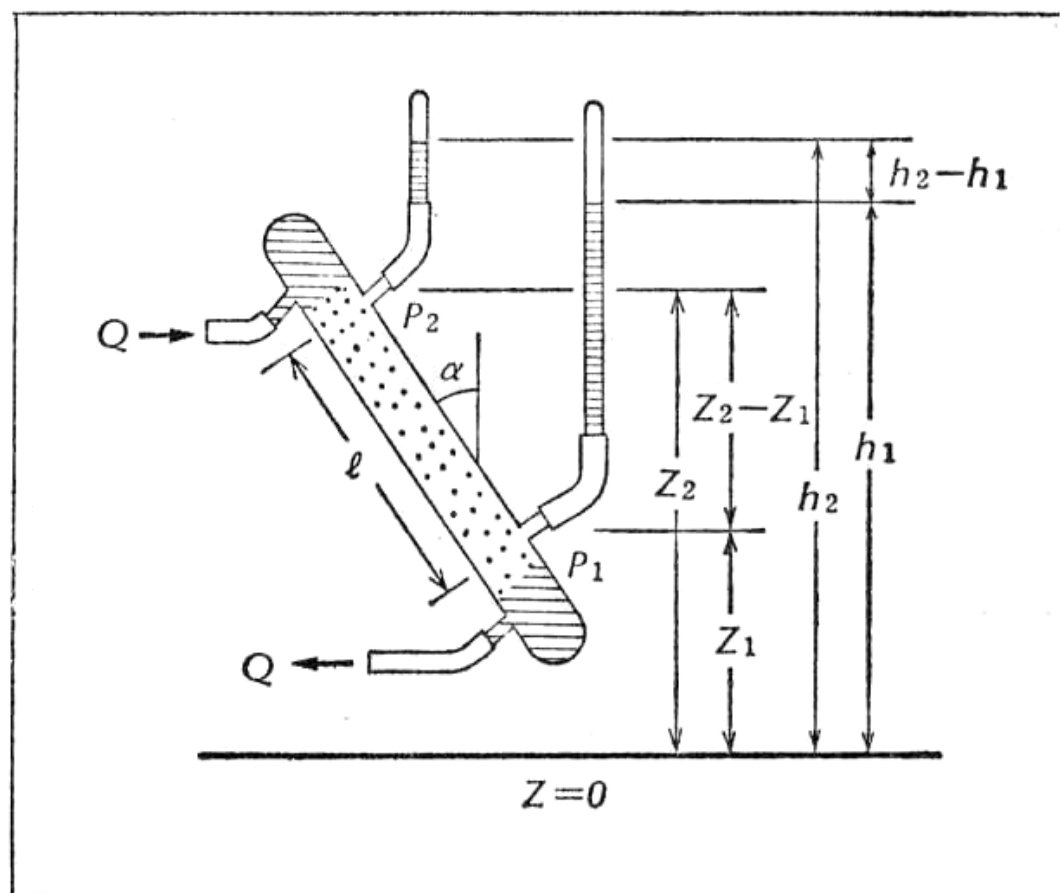
ここで、 $A$ : 断面積、 $K$ : 透水係数  
 $l$ : 流れの長さ

$$q=Q/A=-K(dh/dl)$$

ここで、 $q$  は単位時間に  
単位断面積を通過する  
流量

→ ダルシー流速  
(見かけの流速)

$$q=-Kgradh$$



# 透水係数の範囲

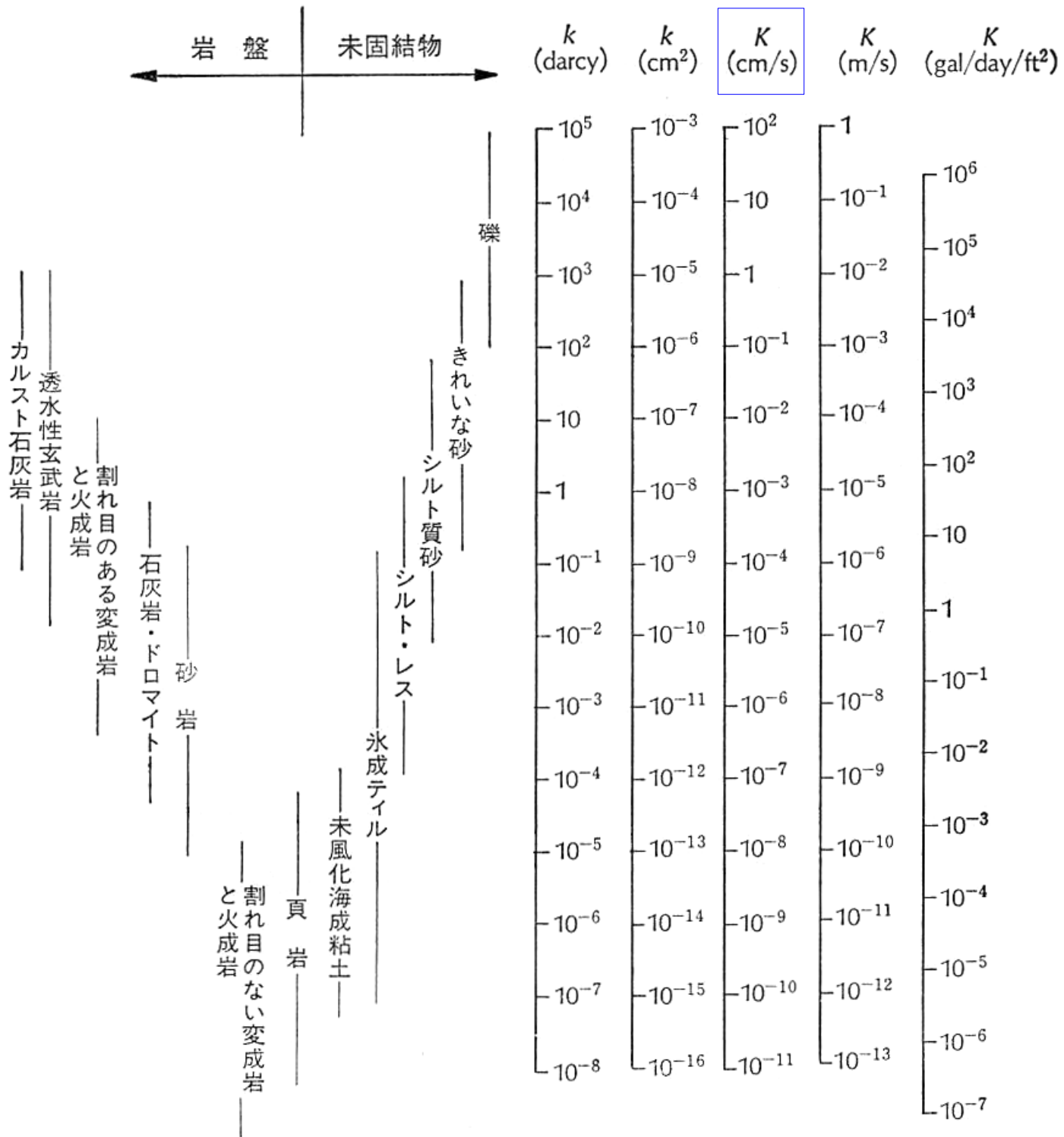


図 1.14 透水係数の範囲

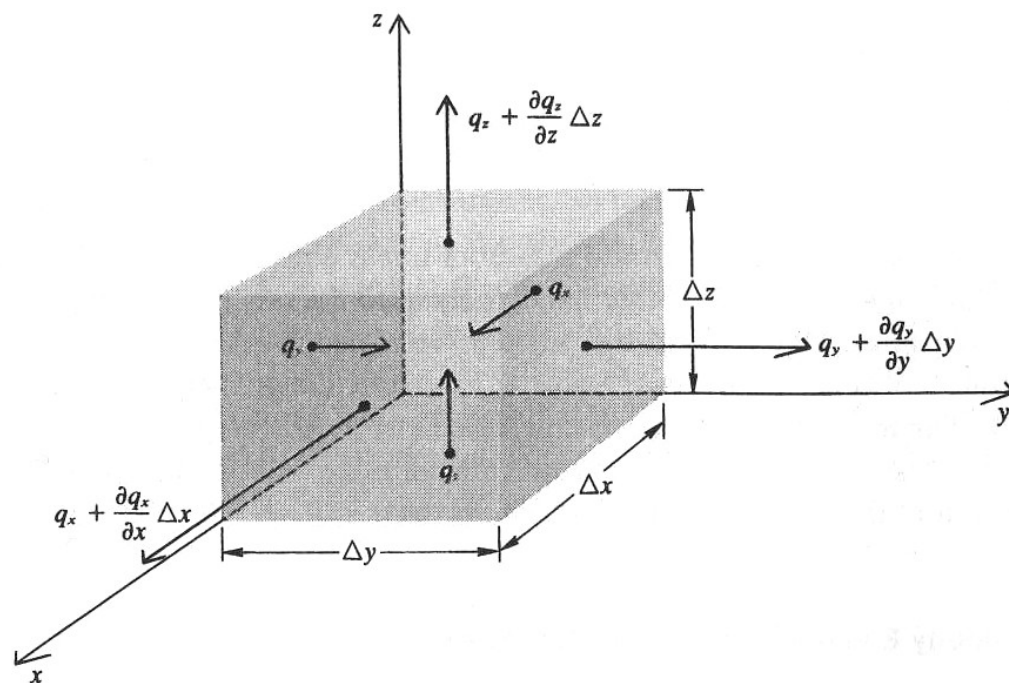
## 地下水の運動

ダルシー式  $q_x = -K \frac{\partial h}{\partial x}$      $q_y = -K \frac{\partial h}{\partial y}$      $q_z = -K \frac{\partial h}{\partial z}$

$$q = -K \frac{dh}{d\ell}$$

## 連続の式

$$\frac{\partial q_x}{\partial x} + \frac{\partial q_y}{\partial y} + \frac{\partial q_z}{\partial z} = 0$$



## 地下水流動方程式

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( -K \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( -K \frac{\partial h}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( -K \frac{\partial h}{\partial z} \right) = 0$$

$$\frac{\partial^2 h}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 h}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 h}{\partial z^2} = 0 \rightarrow \text{ラプラスの方程式}$$

## 地下水の運動

- ダルシー式
- 連続の式

地下水の流れが定常、  
すなわち時間によって  
流れが変化しない場合

組み合わせると、地下水流動方程式

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( -K \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( -K \frac{\partial h}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( -K \frac{\partial h}{\partial z} \right) = 0$$

水頭の時間変化がなくなった状態→定常状態→ラプラスの方程式

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

ラプラスの方程式を解けば、定常状態の地下水のポテンシャル分布がわかる（今回は時間変化を含む非定常は扱わない）

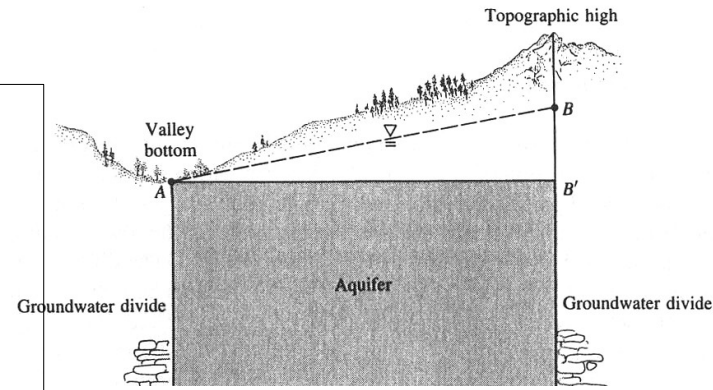
ポテンシャル分布がわかれば流線がわかる



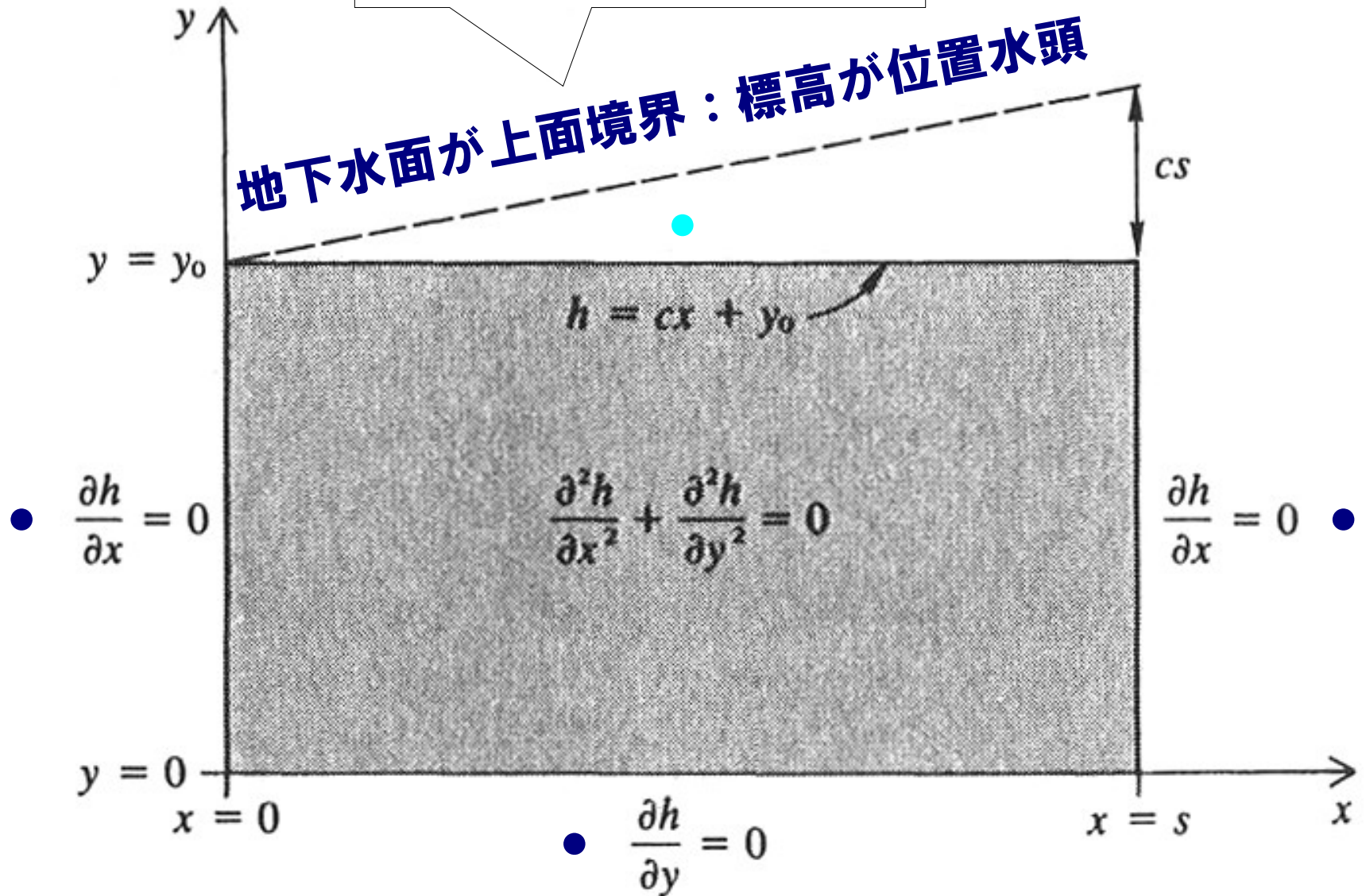
# 境界条件

- 不透水境界
- 固定水頭境界
- フラックス境界

設定した境界条件のもとで、領域内部の水理水頭分布を計算



地下水面が上面境界：標高が位置水頭



Tóth, J (1963): A Theoretical Analysis of Groundwater Flow in Small Drainage Basins. JGR, 68, 4795-4812.

● ラプラスの式を解析的に解いた→地下水学の古典、バイブル

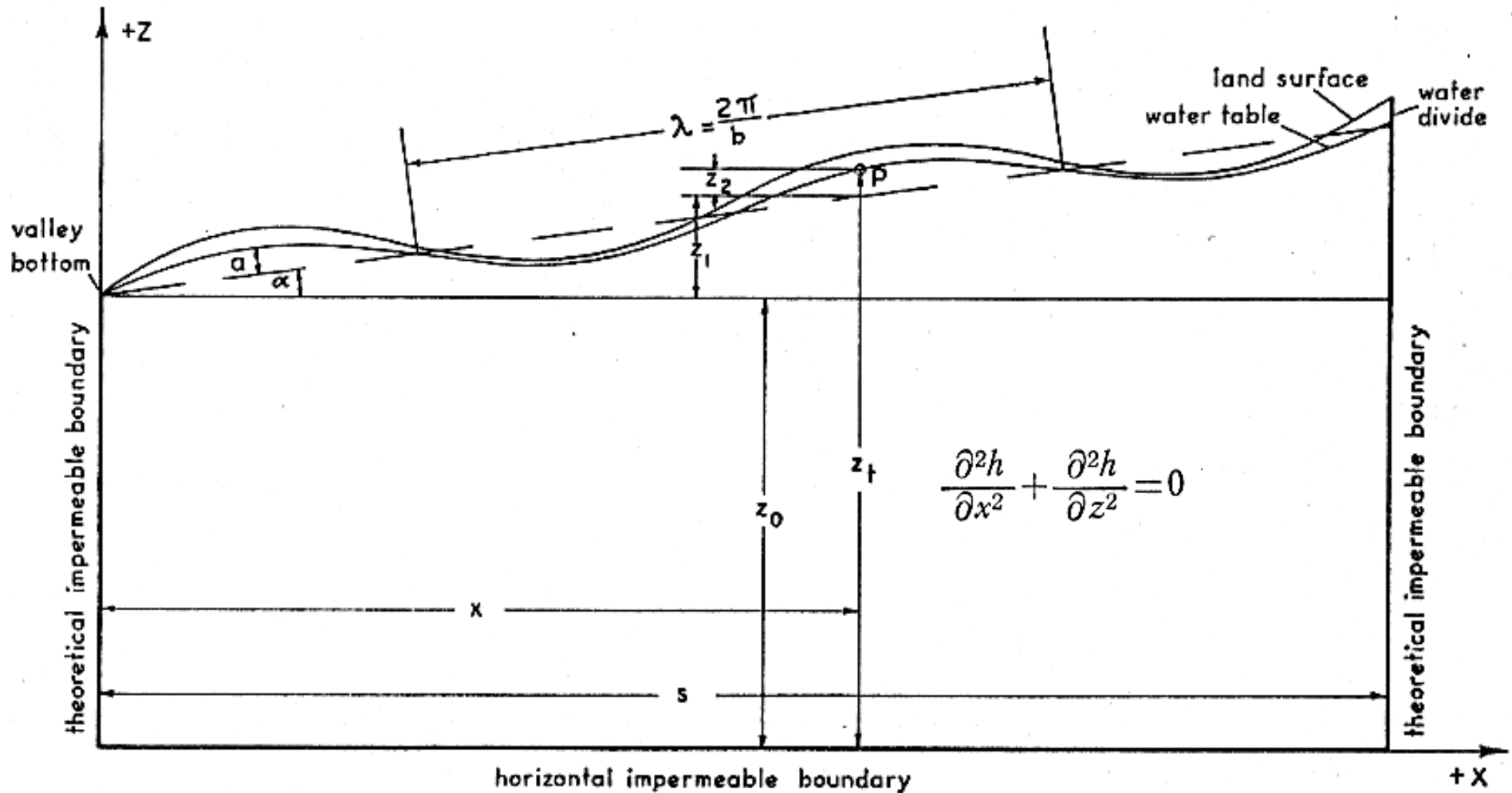


Fig. 1. Idealized cross section of a valley flank in a small drainage basin.

# 地下水面の位置はどのようにして決まるか

- ・ 地下水面へ向かうフラックスと、地下水面から発するフラックスのバランス

⇒ 動的平衡 (dynamic equilibrium)  
 動的平衡の例：砂浜海岸の位置

## 湿潤地域では地下水面形状は概ね地形に平行

- ・ 乾燥地域では異なる
- ・ 対象とするスケールによっても異なる  
 → 地質が効くスケール、地形が効くスケール

Table 1 The dominating factors on groundwater flow systems in the Dejima area. (新藤・石川、地下水学会誌)

地下水流動のスケール		局 所 的	局 地 的	地 域 的
ディメンジョン		10 <sup>1</sup> ~ 10 <sup>2</sup> m <sup>2</sup>		10 <sup>4</sup> ~ 10 <sup>6</sup> m <sup>2</sup>
自然的要因	地質要因	<u>堆 積 相</u> (出島台地の場合、下位から上位へ、大きくは浅海域から陸域にかわる古環境下で形成され、それに対応した堆積相を示す。)	<u>堆 積 層 位</u> (出島台地の場合、比較的連続性の良い泥層によって3層準に帯水層が区分される。しかし連続性は下位のものを除いて良くない。)	<u>堆 積 域</u> (出島台地の場合、東部、西部、北部、南部)の4つぐらいに区分される。
	地形要因		<u>部 分 地 形</u> (出島台地の場合、南北方向にみて、台地中央部の分水界、谷地田排水域、及び上記2地区の中間部の3つぐらいに区分される。	<u>1 ~ 2 次 谷 流 域</u> (出島台地の場合、一ノ瀬川、菱木川あるいは霞ヶ浦の各低地のいずれかの一部と台地中央部の地形的分水界を含む一流域のスケール)

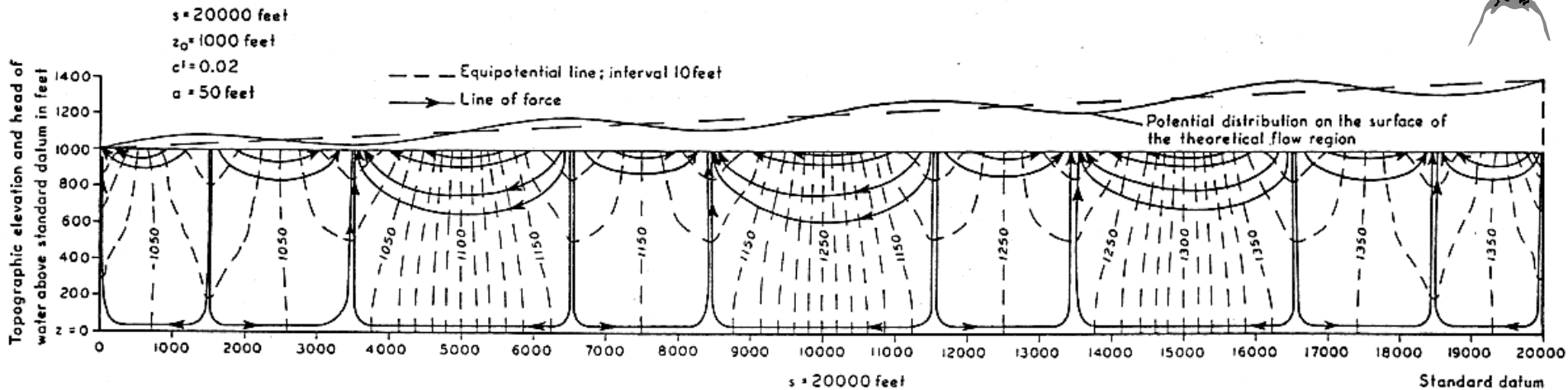


Fig. 2a. Potential distribution and flow pattern as obtained by equation 6.

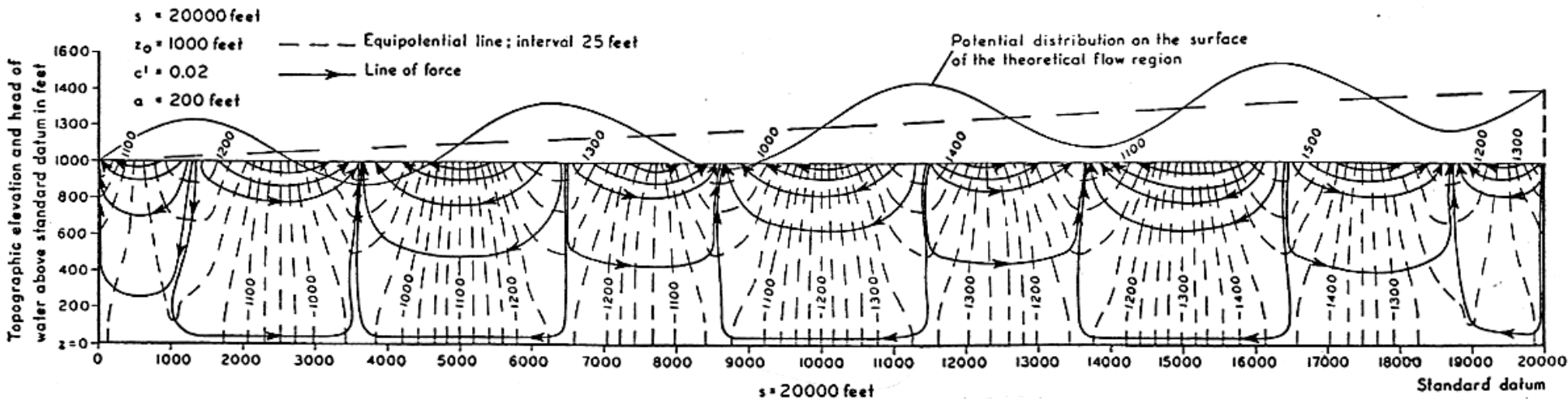


Fig. 2b. Potential distribution and flow pattern as obtained by equation 6.

左端に大河川、右端が流域界となっている波丘地を仮定

# 地域全体の勾配が大きくなるとうなるか？

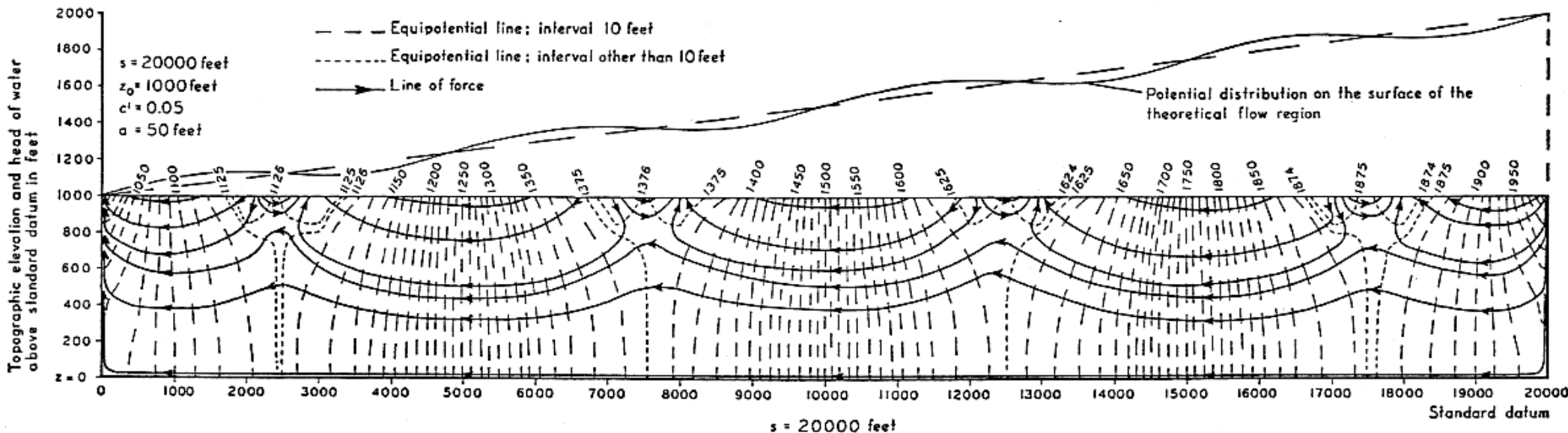


Fig. 2c. Potential distribution and flow pattern as obtained by equation 6.

# 支谷の勾配が大きくなるとうなるか？

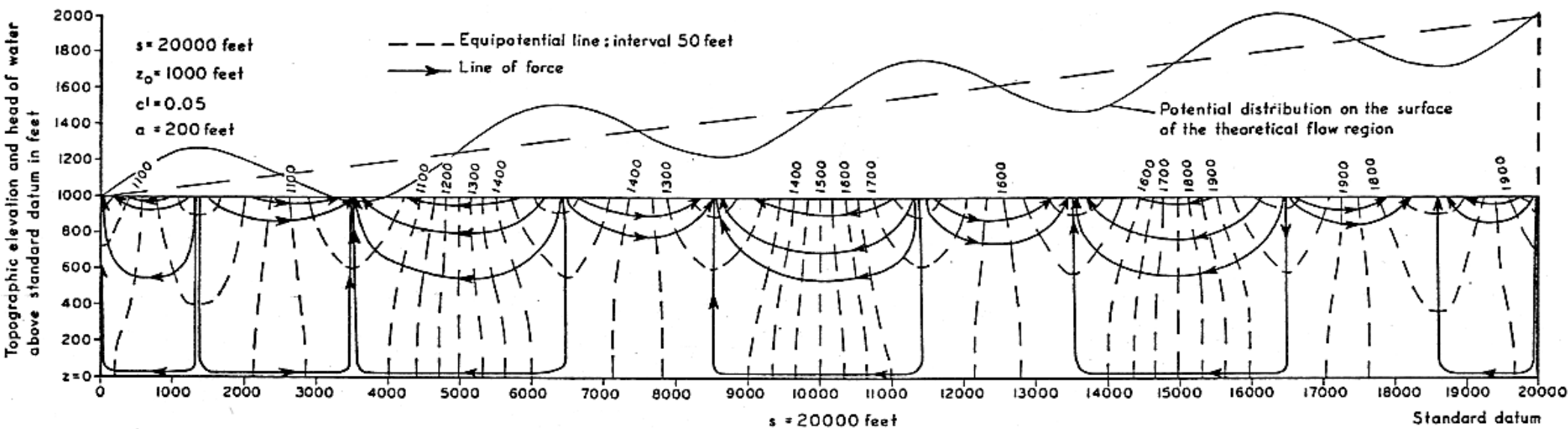


Fig. 2d. Potential distribution and flow pattern as obtained by equation 6.

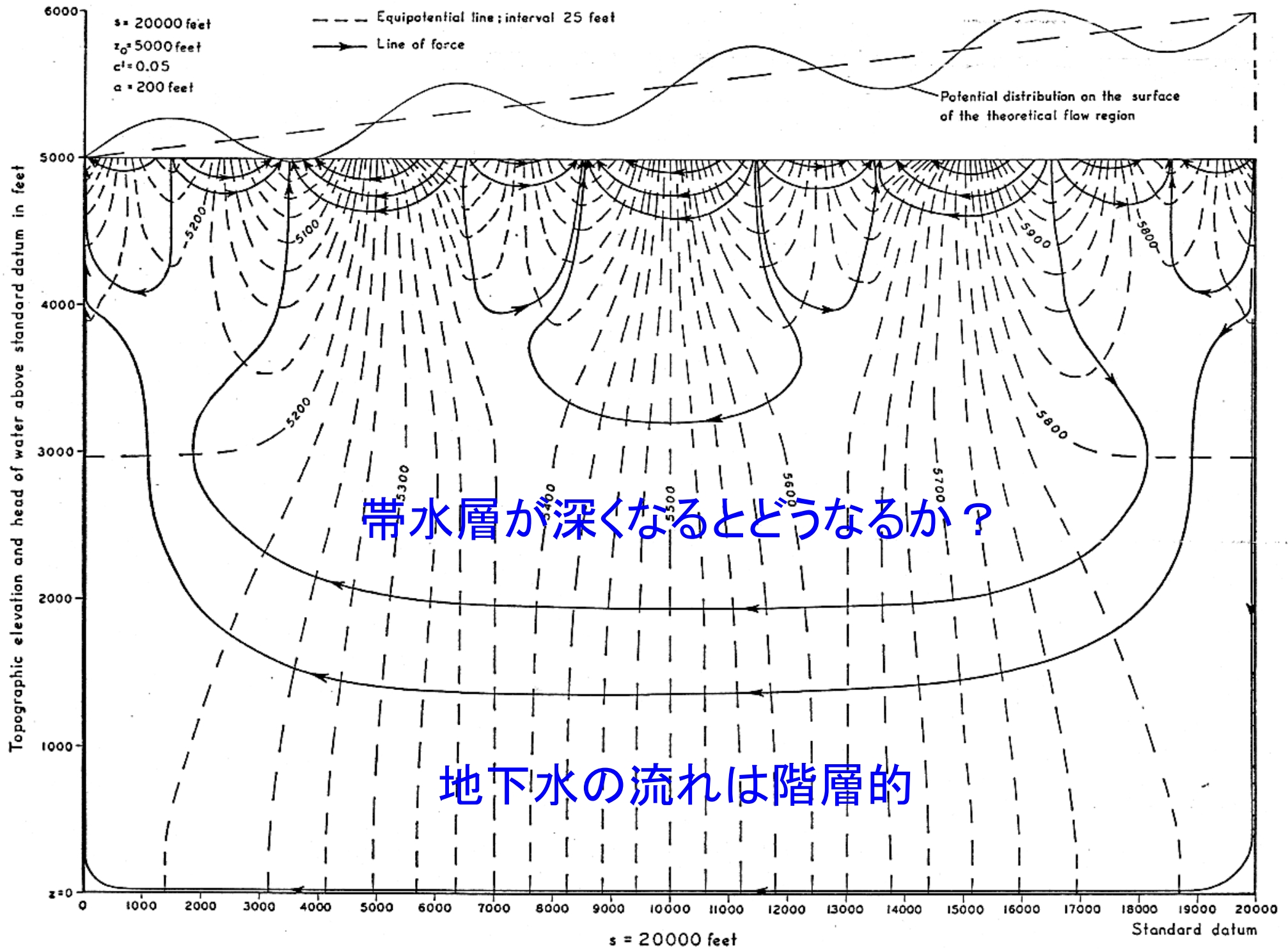


Fig. 2e. Potential distribution and flow pattern as obtained by equation 6.

# 地形(≡地下水面)の勾配の影響

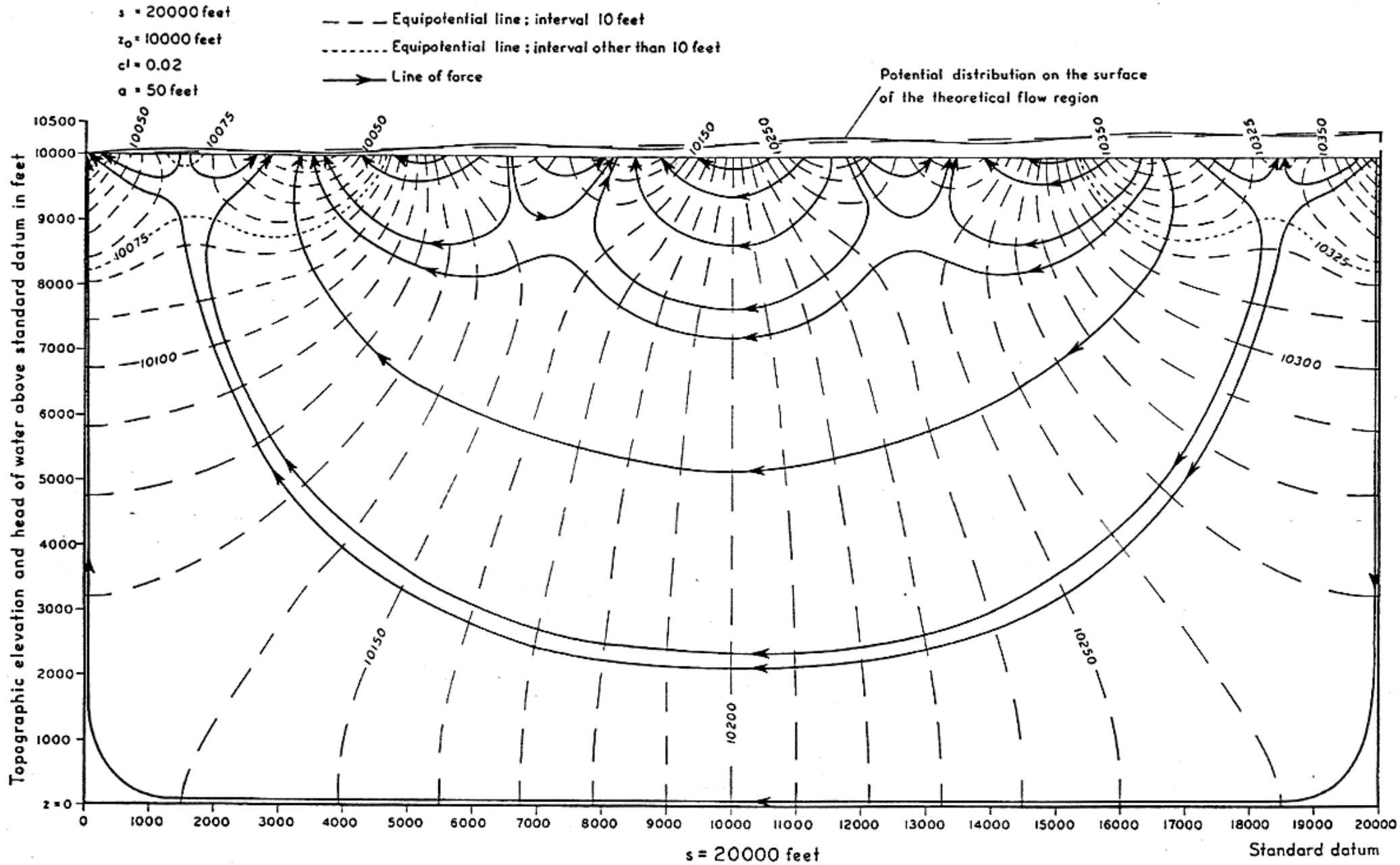


Fig. 2f. Potential distribution and flow pattern as obtained by equation 6.

# 局地的な地下水面の勾配が大きい場合

$s = 20000$  feet

$z_0 = 10000$  feet

$c' = 0.02$

$a = 200$  feet

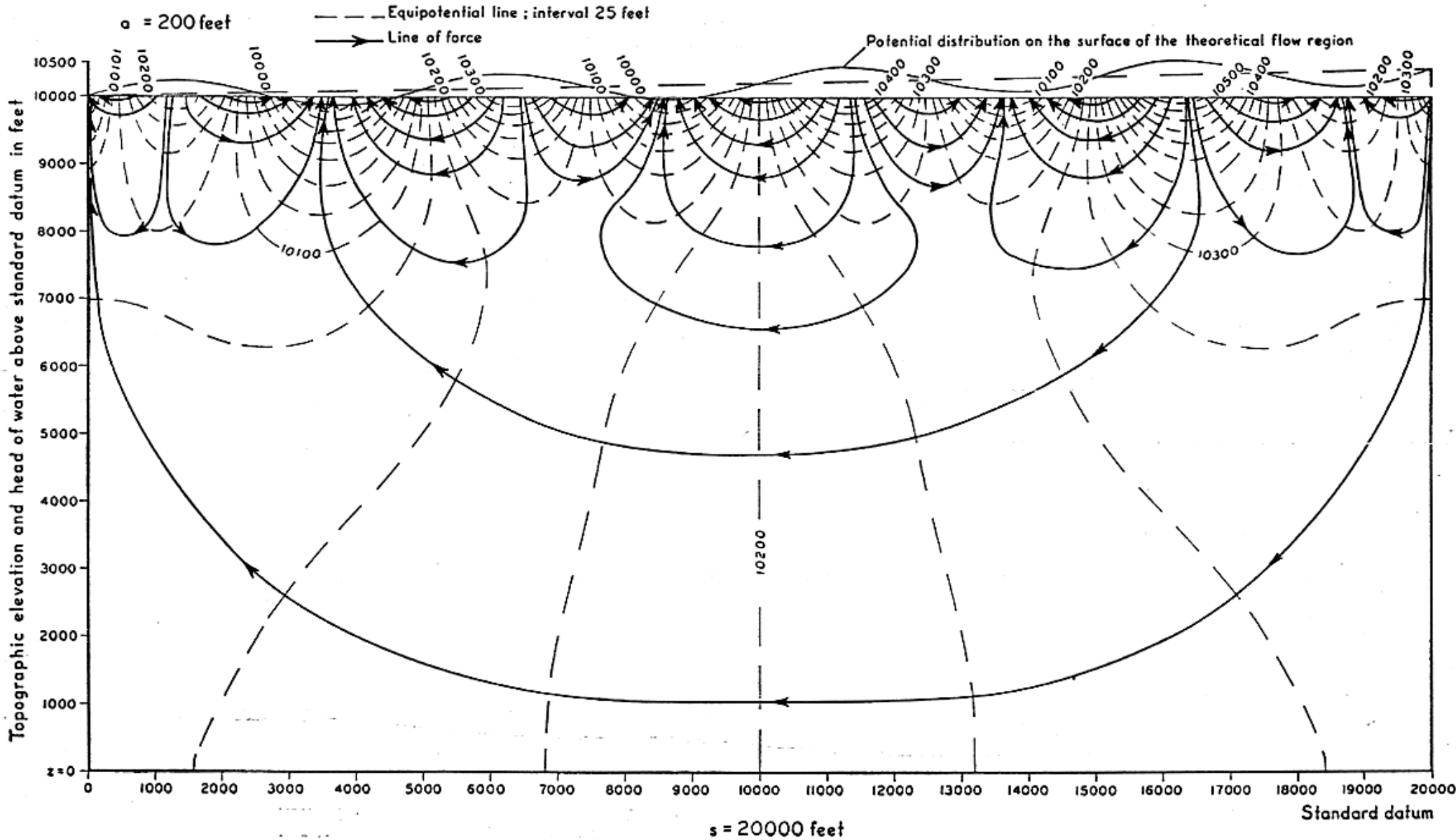


Fig. 2g. Potential distribution and flow pattern as obtained by equation 6.



# 地域的な地下水面の勾配が緩い場合

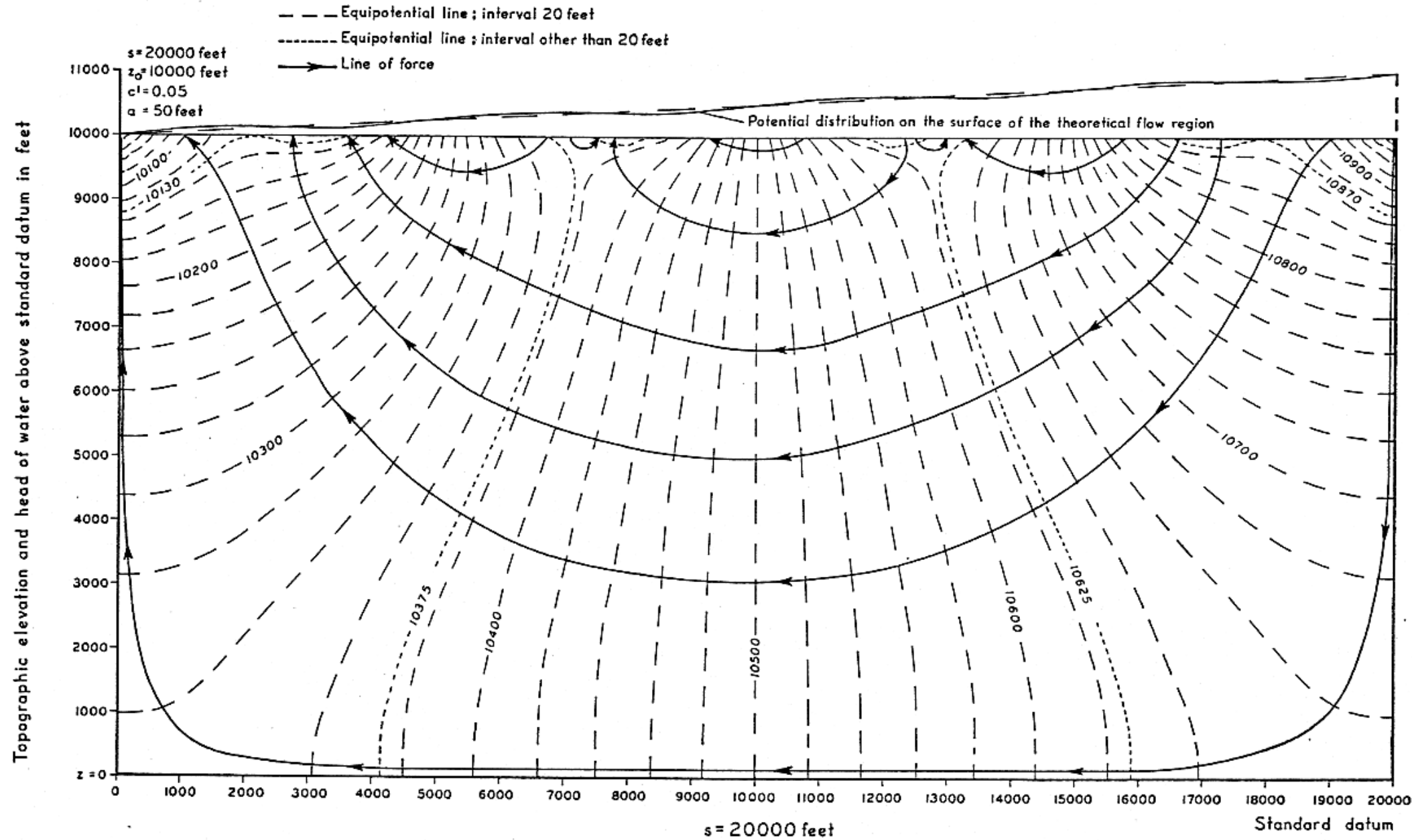


Fig. 2h. Potential distribution and flow pattern as obtained by equation 6.

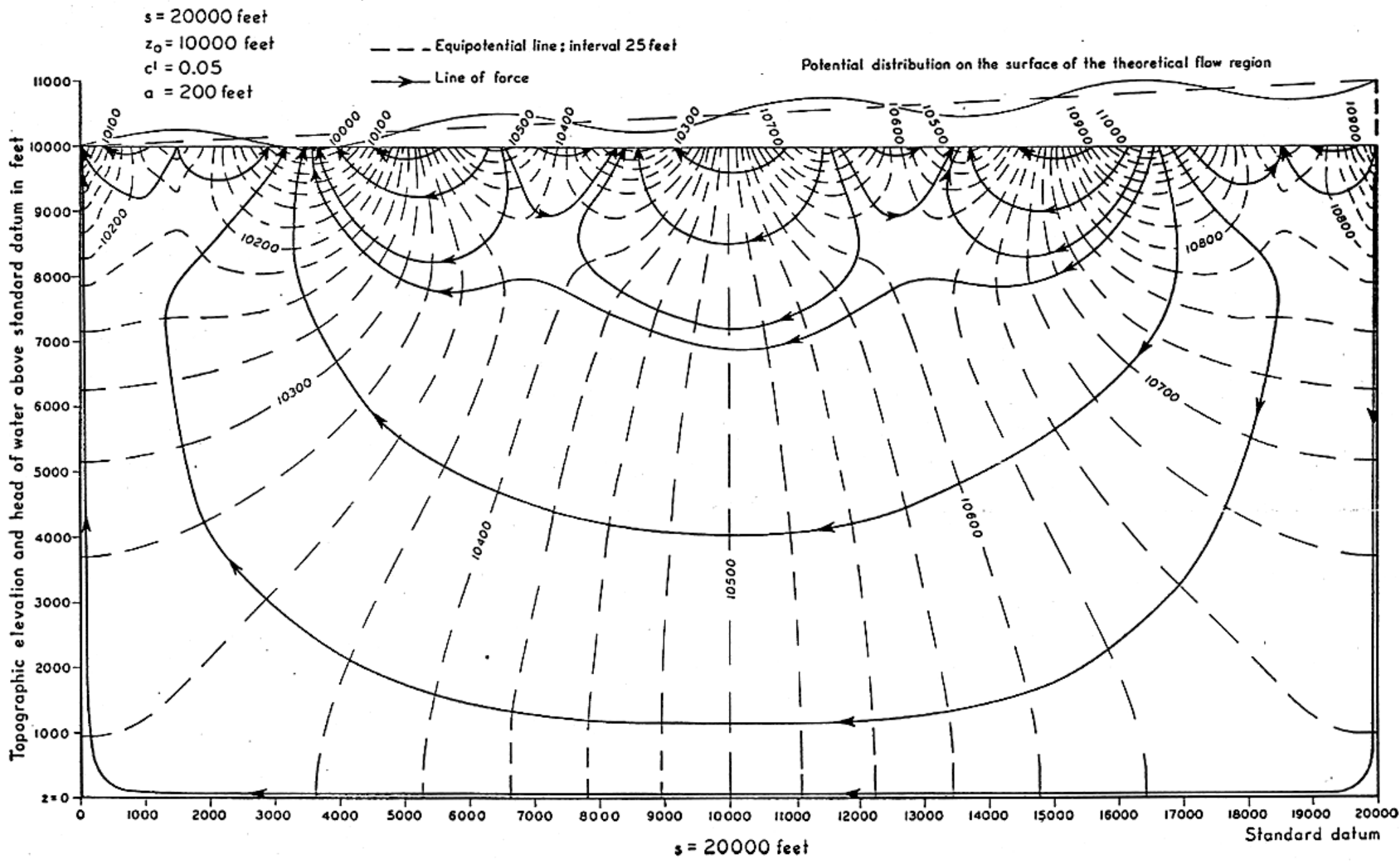


Fig. 2i. Potential distribution and flow pattern as obtained by equation 6.

# Toth が到達した地下水流動系の概念

$s = 20000$  feet

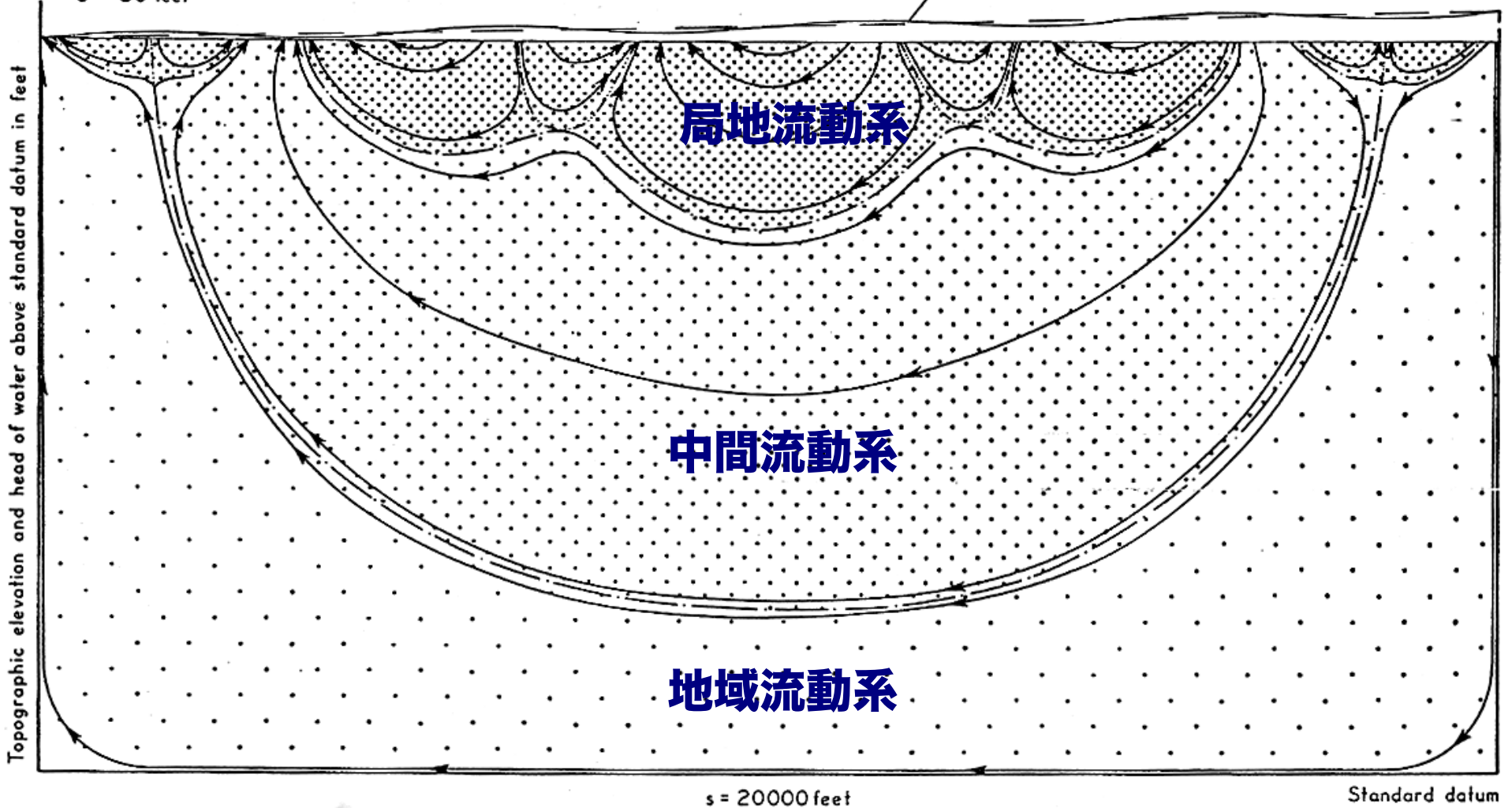
$z_0 = 10000$  feet

$c^1 = 0.02$

$a = 50$  feet

- Boundary between flow systems of different order
- - - - Boundary between flow systems of similar order
- Line of force

Potential distribution on the surface of the theoretical flow region



-  Region of local system of groundwater flow
-  Region of intermediate system of groundwater flow
-  Region of regional system of groundwater flow

Fig. 3. Theoretical flow pattern and boundaries between different flow systems.

## Tóth の計算からわかったこと

- 地下水面の傾斜が一様で、局地的な起伏がないと、ただひとつの地域流動系が出現する
- 地下水面の起伏が増すにつれて、局地流動系の深さとその循環の強さが増大する
- 起伏のある斜面上では流出域と涵養域が交互に出現する
- 涵養された水の 80 ~ 90% は局地流動系を通過して流出する  
→ 流線の密度
- 流出域ではピエゾメーター内の水位は深さとともに高くなり、涵養域ではその逆  
→ 自噴
- 流動系が出会う部分には停滞水域が形成される  
→ 水質組成の違い、炭化水素の集積
- 中間および地域流動系の涵養域と流出域は局地流動系と比べると狭い

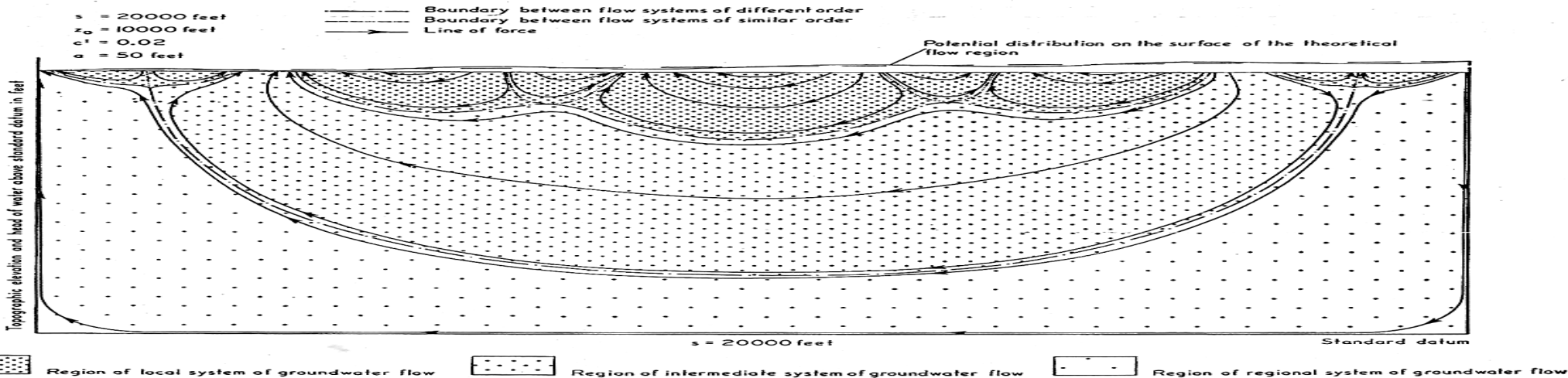
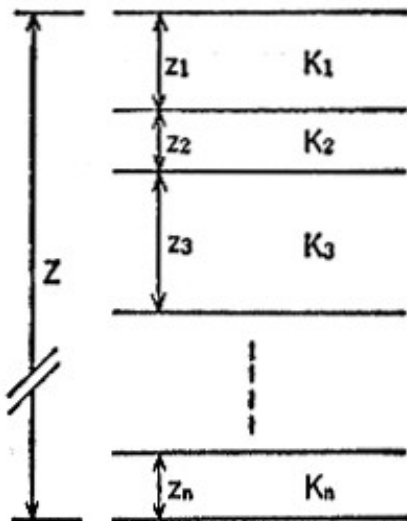


Fig. 3. Theoretical flow pattern and boundaries between different flow systems.

- Tóth のモデルは地下水盆の深度が深すぎるという批判
- 等方均質帯水層に対する結果
- 実際の帯水層は透水係数の異方性 (anisotropy) を持つ
- 垂直方向の透水係数は通常水平方向より小さい
- これは縦軸を圧縮することと同じ



$$K_x = \frac{K_1 z_1 + K_2 z_2 + \dots + K_n z_n}{Z}$$

水平方向平均  
(算術平均)

$$K_z = \frac{Z}{\frac{z_1}{K_1} + \frac{z_2}{K_2} + \dots + \frac{z_n}{K_n}}$$

垂直方向平均  
(調和平均)

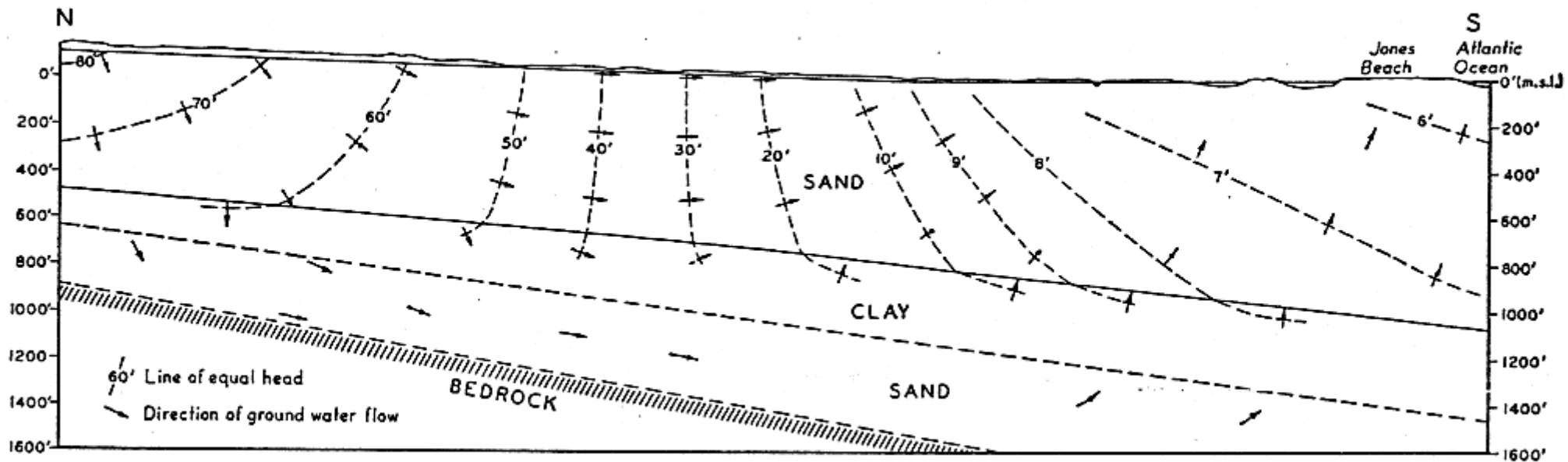


Fig. 4. North-south pattern of groundwater flow in southeastern Nassau County, Long Island, New York [after Geraghty, 1960].

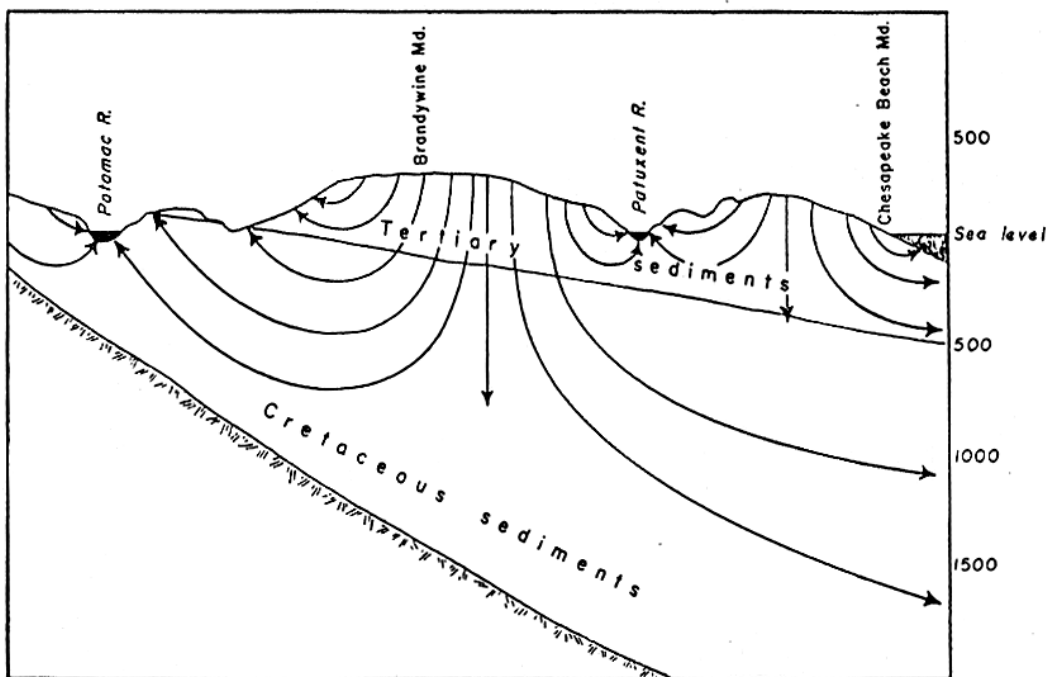
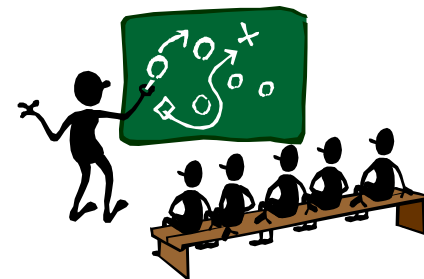


Fig. 5. Diagrammatic cross section through southern Maryland showing the lines of groundwater flow [after Back, 1960].

## 地下水流動系の実測例

野外においても、涵養域から流出域に向かう地下水の三次元的な流れは存在する



## 地形と地下水面形状の関係

地形面は地下水面と平行

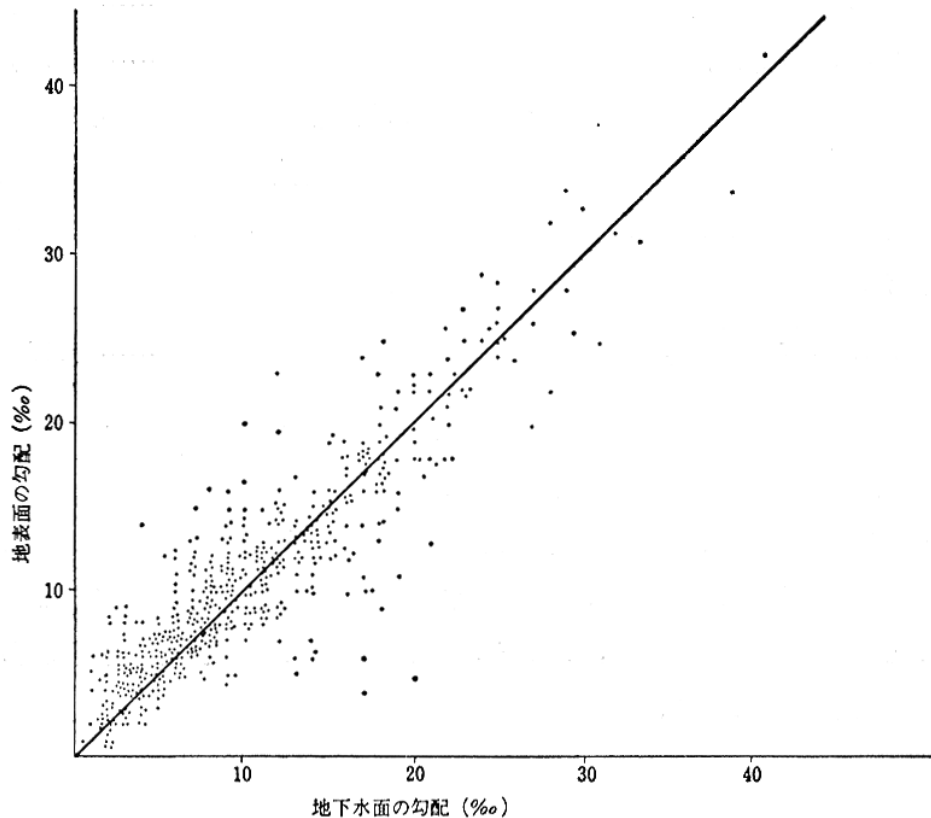
→ 湿潤地域における特徴  
(乾燥地域では異なる！)

地形の高まり → 涵養域

地形的低所 → 流出域

これが基本

地下水流動系の階層性をどのように認識するか！



## 動的平衡

地下水面の位置は、地下水面への涵養と、地下水面からの流出の平衡状態としてそこに存在する → 海岸線を思い出せ

# コンピューター時代がやってきた！

Freeze and Witherspoon(1966): Theoretical analysis of regional groundwater flow: 1. Analytical and numerical solutions to the mathematical model. *Water Resour. Res.*, **2**, 641-656.

Freeze and Witherspoon(1967): Theoretical analysis of regional groundwater flow: 2. Effect of water-table configuration and subsurface permeability variation. *Water Resour. Res.*, **3**, 623-634.

Freeze and Witherspoon(1968): Theoretical analysis of regional groundwater flow: 3. Quantitative interpretation. *Water Resour. Res.*, **4**, 581-590.





# 地下水面形状の効果—等方均質帯水層における—

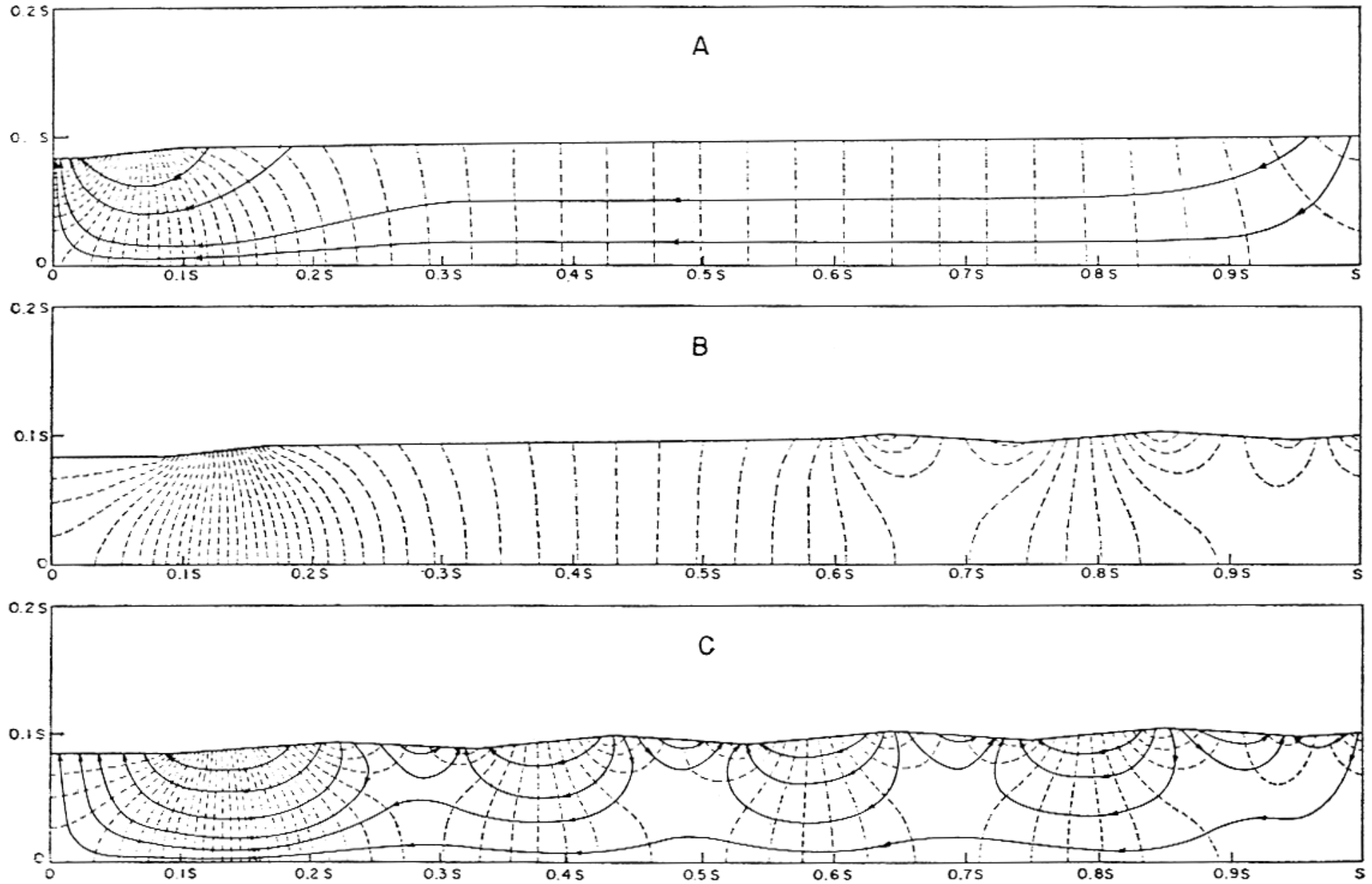


Fig. 1. Effect of water-table configuration on regional groundwater flow through homogeneous isotropic mediums.



透水係数の異なる水平層の累重の効果

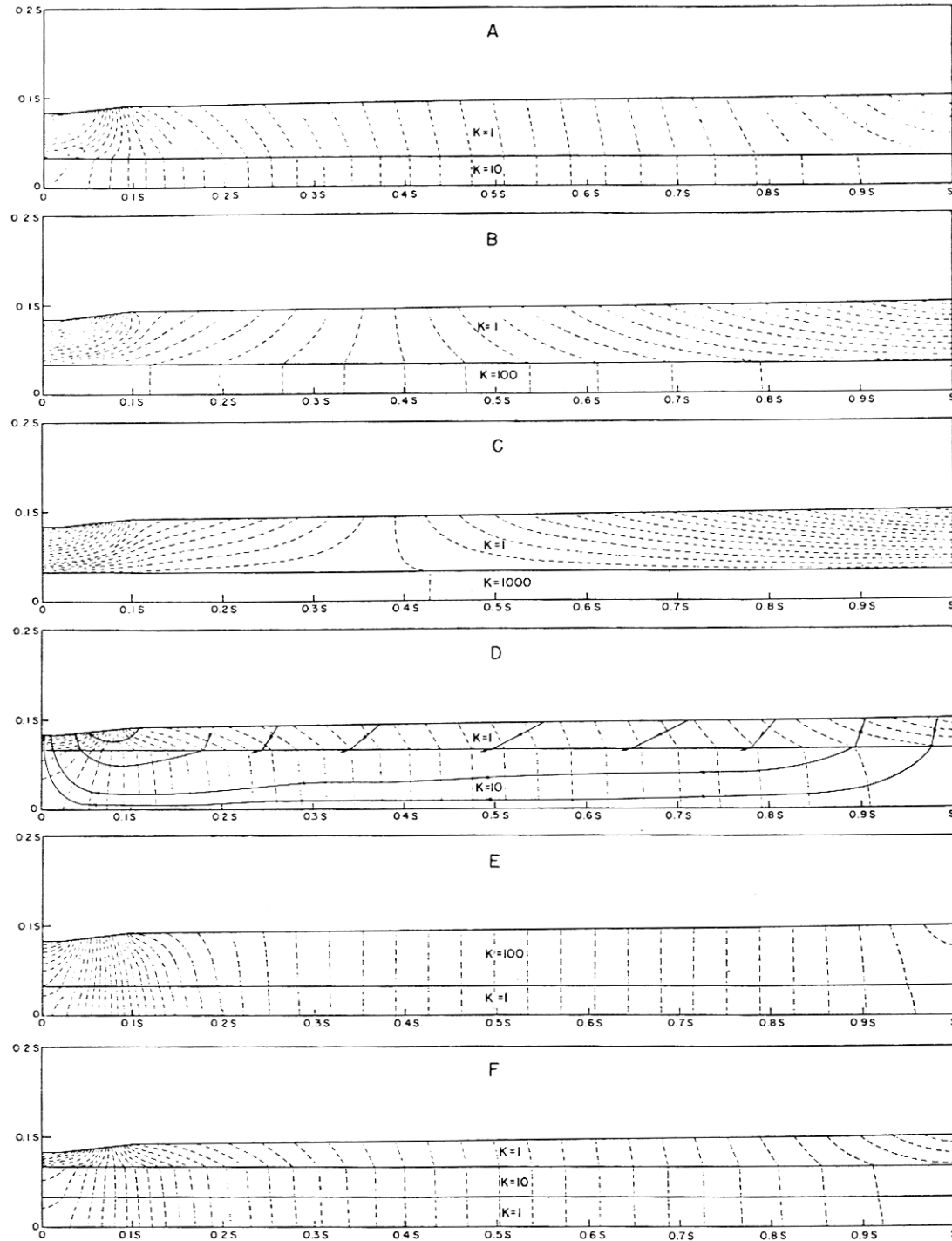


Fig. 2. Regional groundwater flow through layered mediums with a simple water-table configuration.

解析解では解けない問題も数値解なら解ける！



# ハンモッキー・タレインにおける水平な透水層の効果

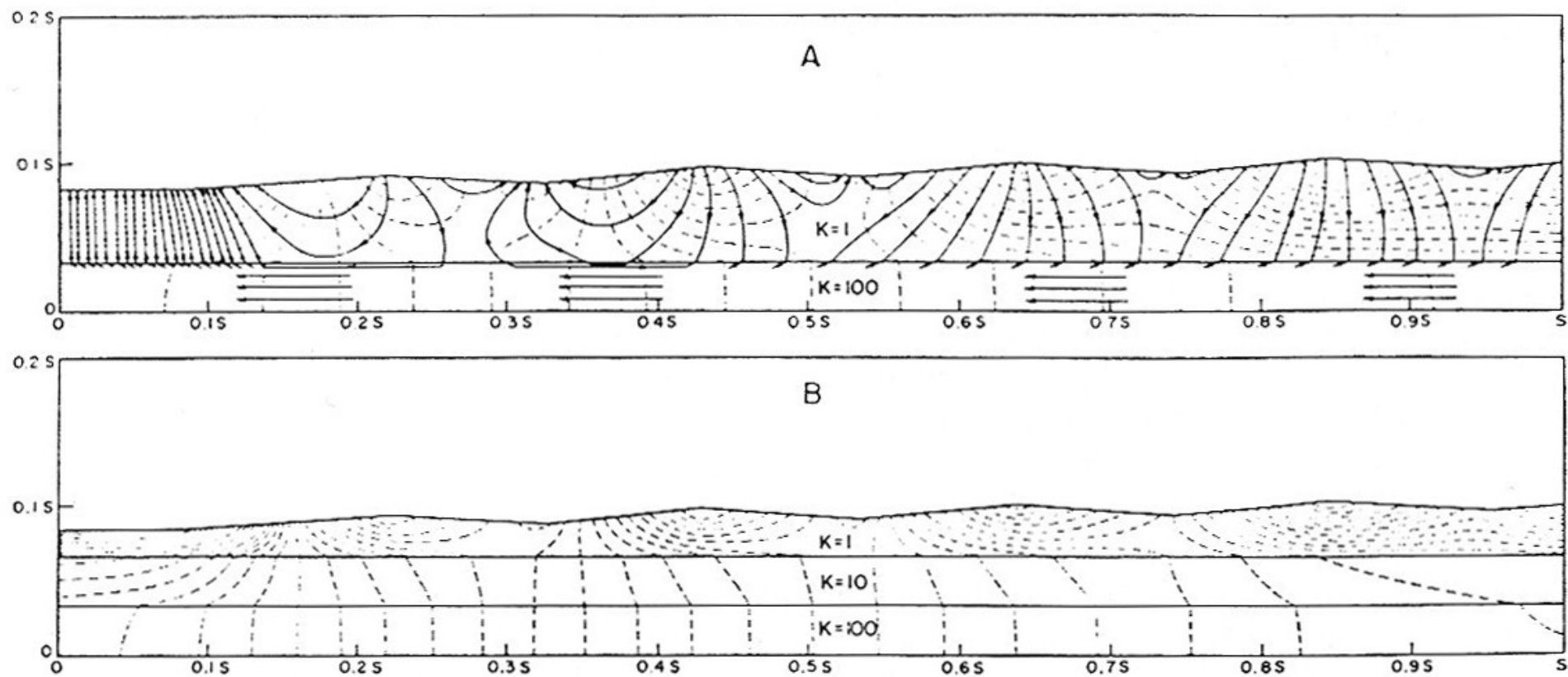


Fig. 3. Regional groundwater flow through layered mediums with a hummocky water-table configuration.

地表に現れない帯水層が地下にあったら？

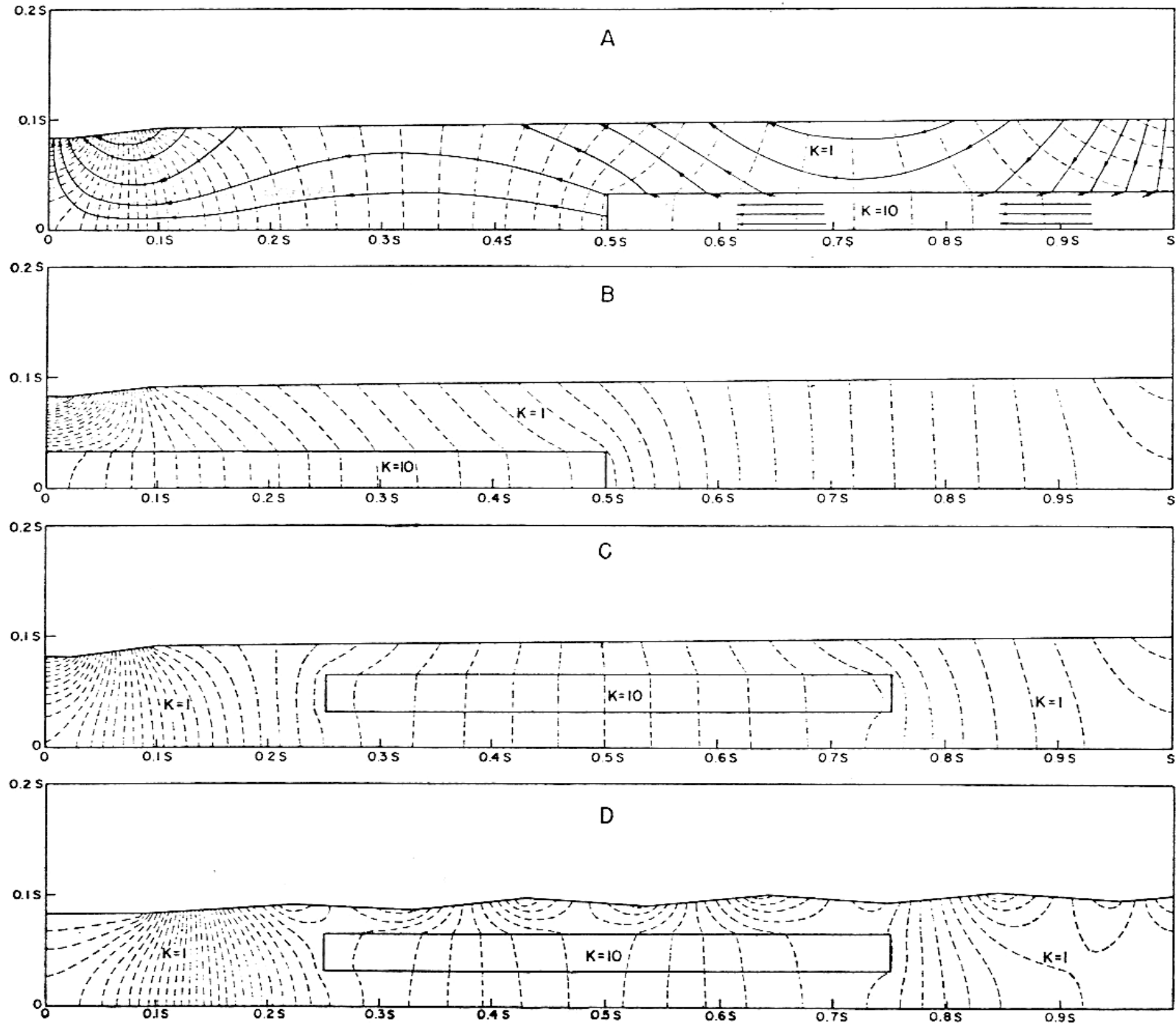
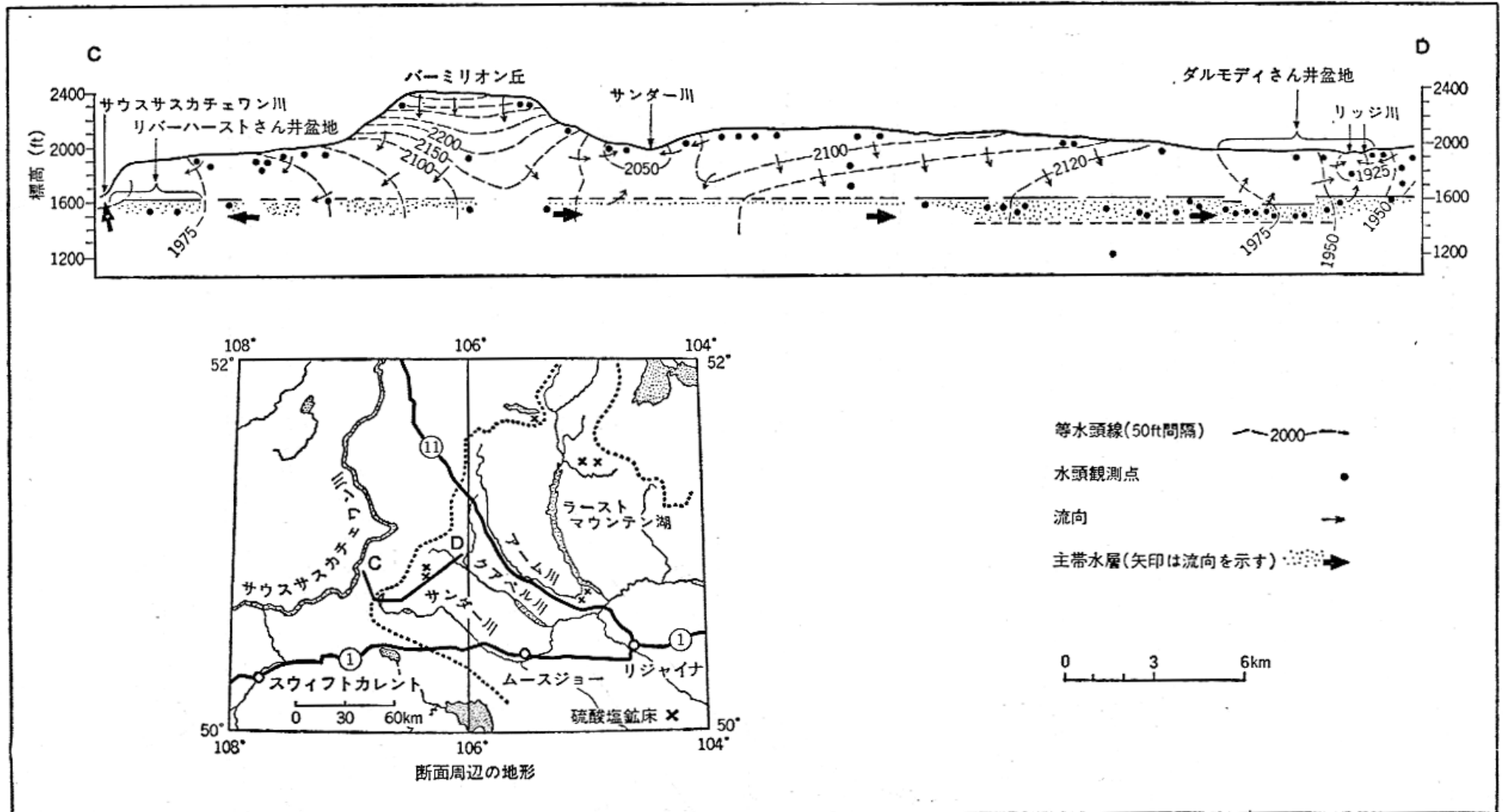


Fig. 4. Regional groundwater flow through partial layers and lenses.

# Meyboom(1967) によるカナダプレーリーの地下水流動系



- 涵養域はどこか
- 地下水水平な透水層がある場合の地下水流動系は？

# 傾斜する地層の効果

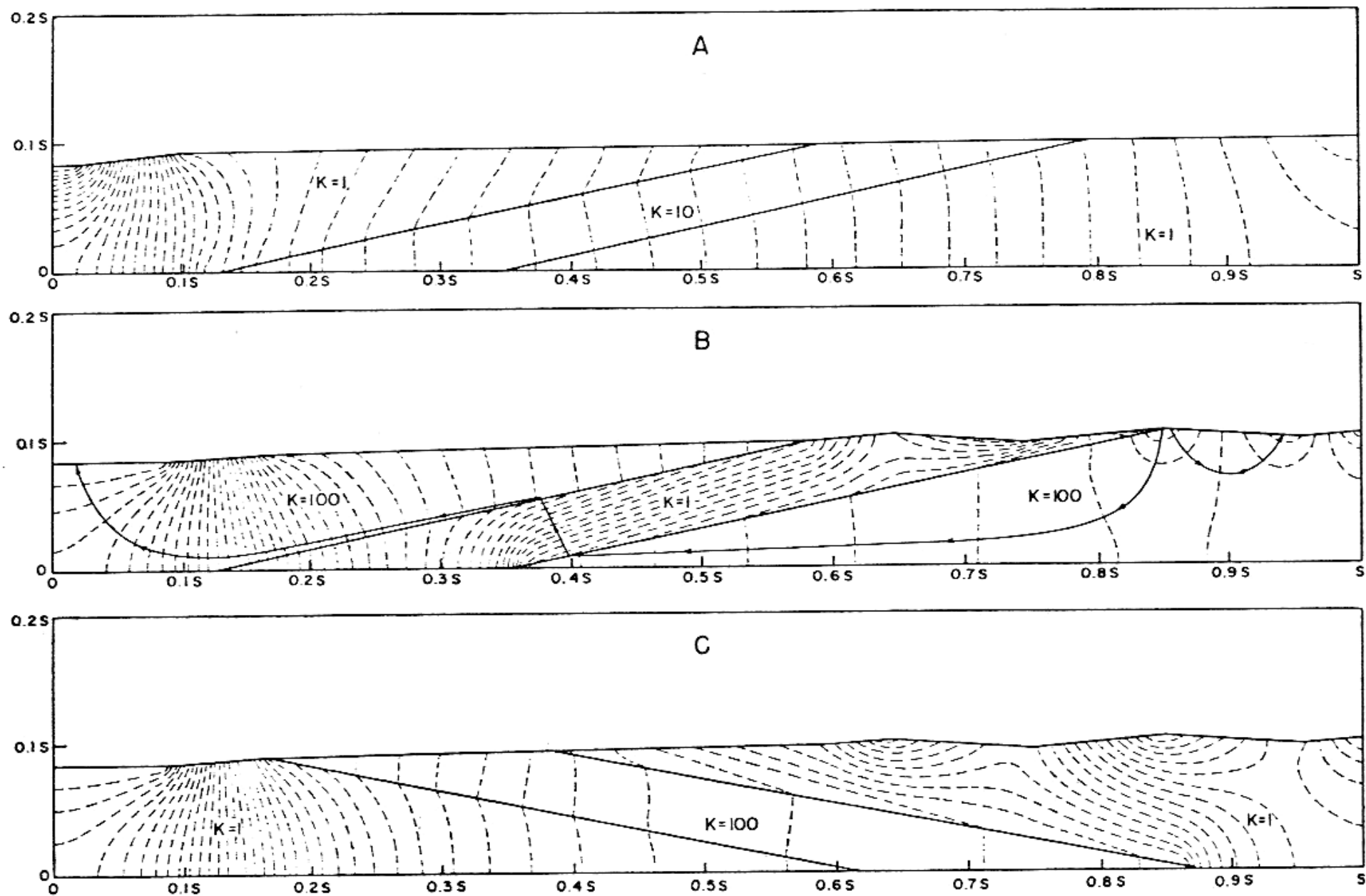


Fig. 5. Regional groundwater flow in regions of sloping stratigraphy.

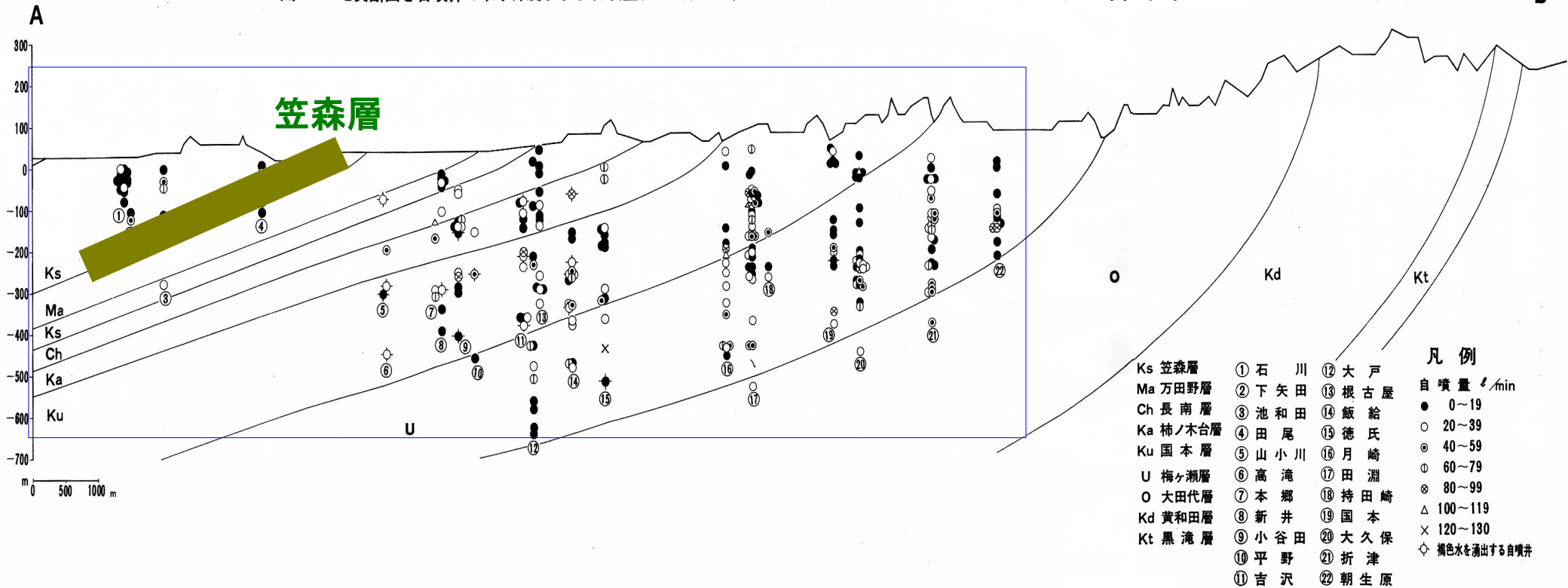
# 単斜構造を呈する砂泥互層一房総の下総層群・上総層群



図12-4 地質断面と自噴井の取水深度および自噴量状況図(A-B) (高村原図)

(笠森観音公式HPから)

B

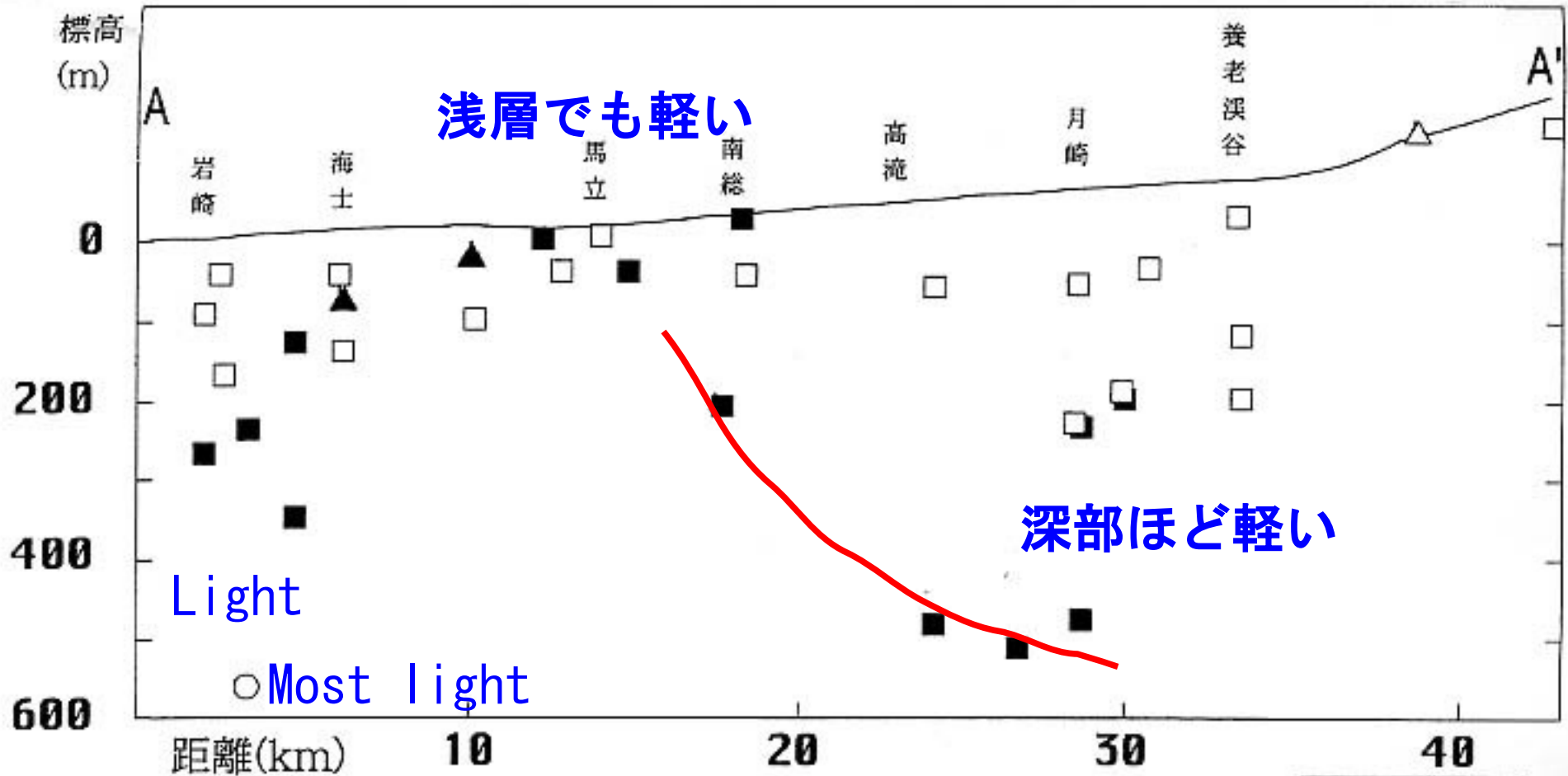


## 養老川の地質断面と自噴井の採水深度と自噴量の状況(高村、1972)

# $^{18}\text{O}$ content 軽い→寒冷期に涵養→古い水

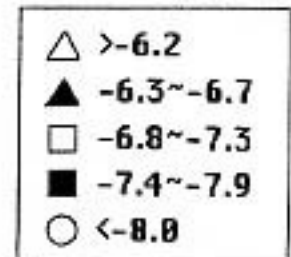
Tokyo Bay

Upper stream of the Yoro River



Distribution of Oxygen Isotope Content

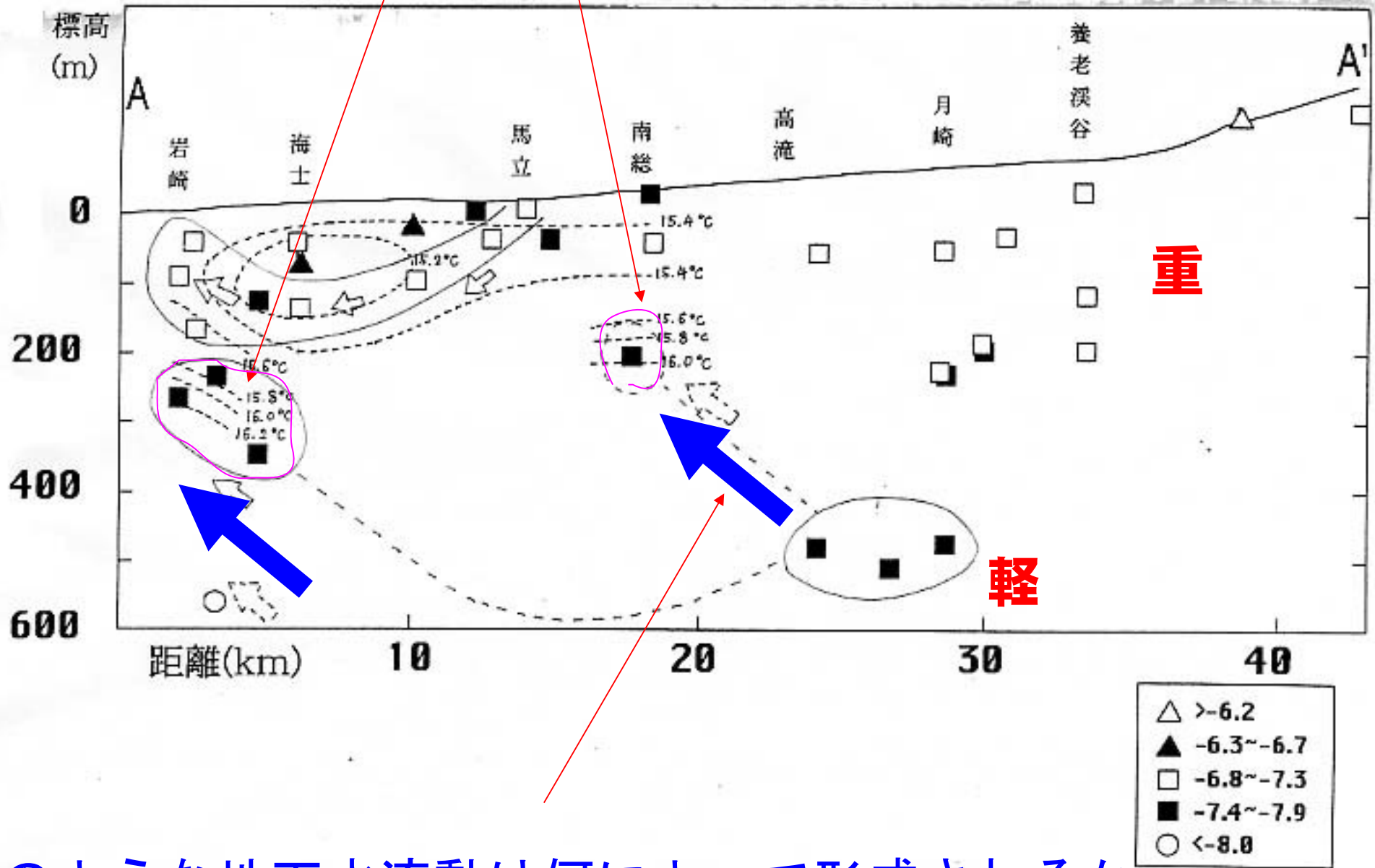
●Light denotes Old Water, and vice versa.



Konno(1995)

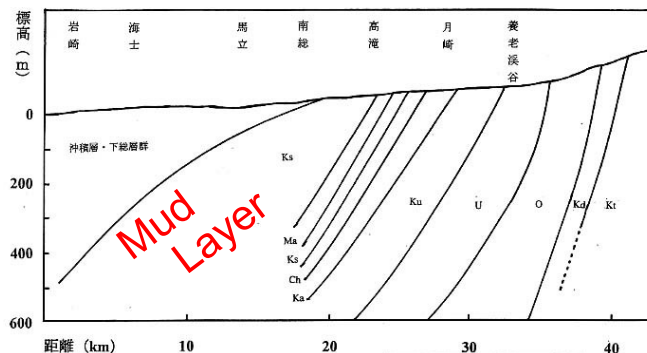


水温が高く、同位体組成が軽い

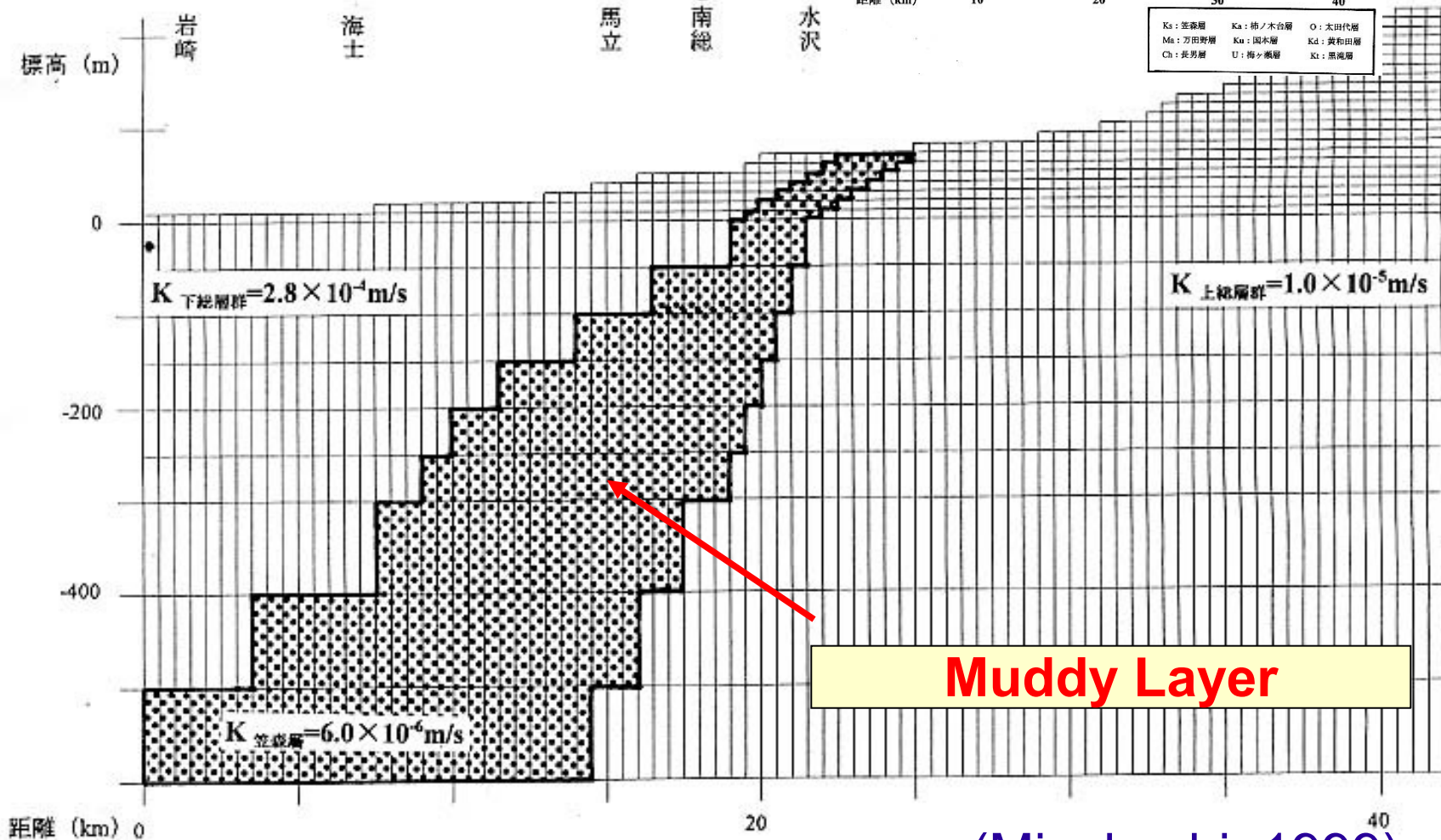


このような地下水流動は何によって形成されるか

# 単斜構造を呈する塊状の泥層—笠森層

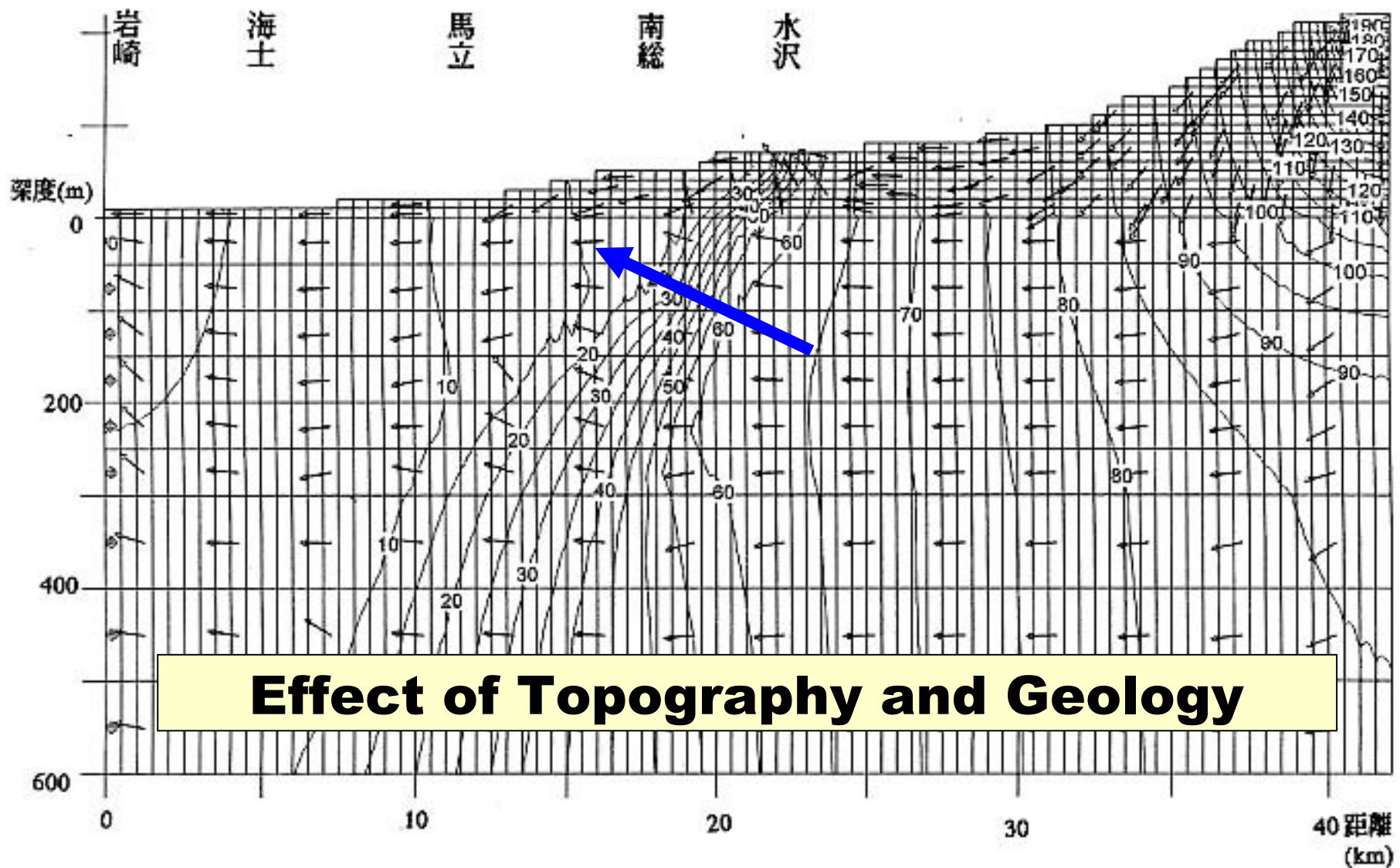


Ks: 笠森層	Ka: 柿ノ木台層	O: 太田代層
Ma: 万田野層	Ku: 国木層	Kd: 黄和田層
Ch: 長男層	U: 海ノ巻層	Kt: 黒滝層



(Miyakoshi, 1999)

# 泥層の存在が地下水の上向き流動を形成



The same boundary condition as Freeze and Witherspoon(1967).

# Freeze&Witherspoon の計算を思いだそう

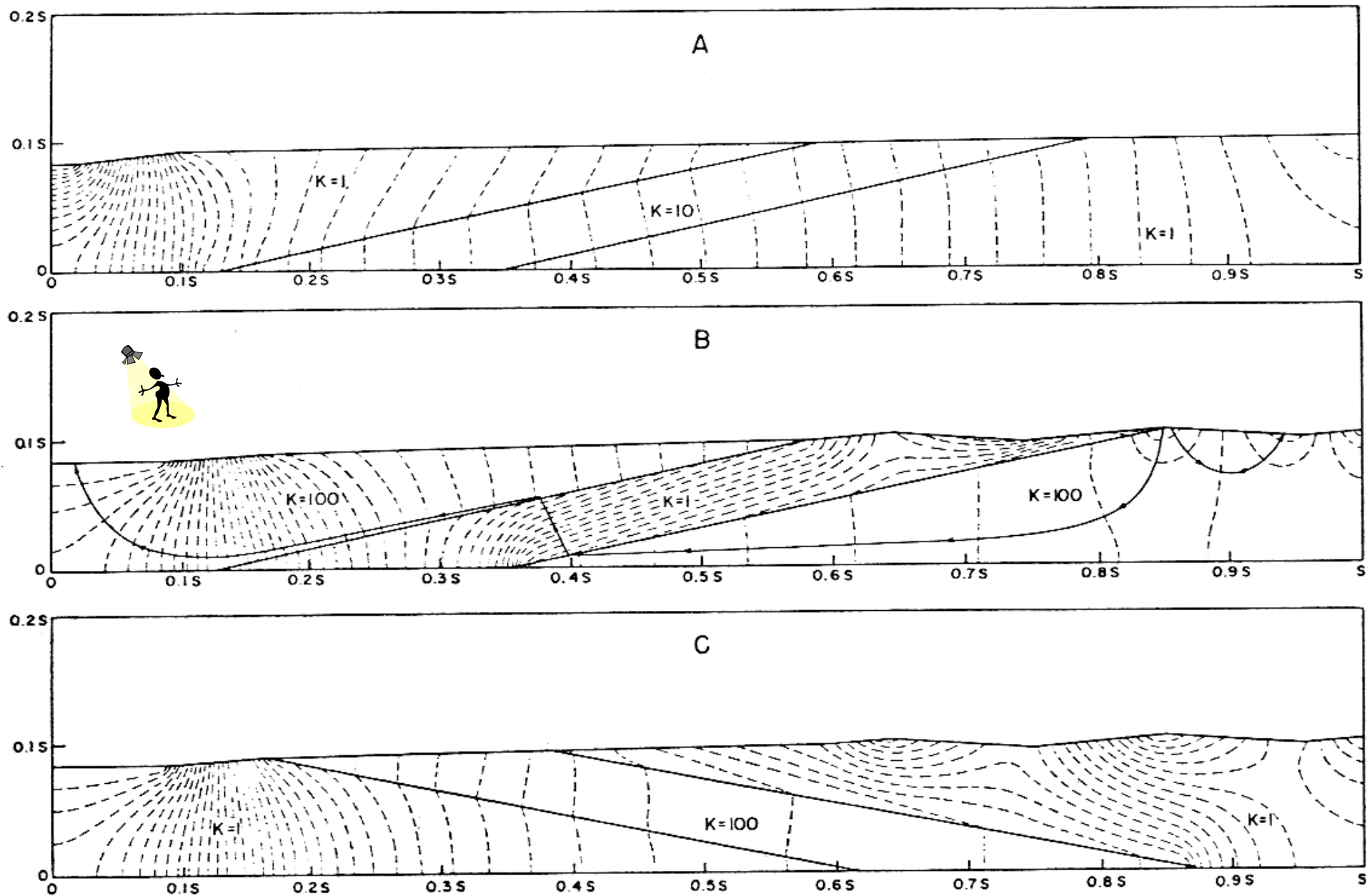
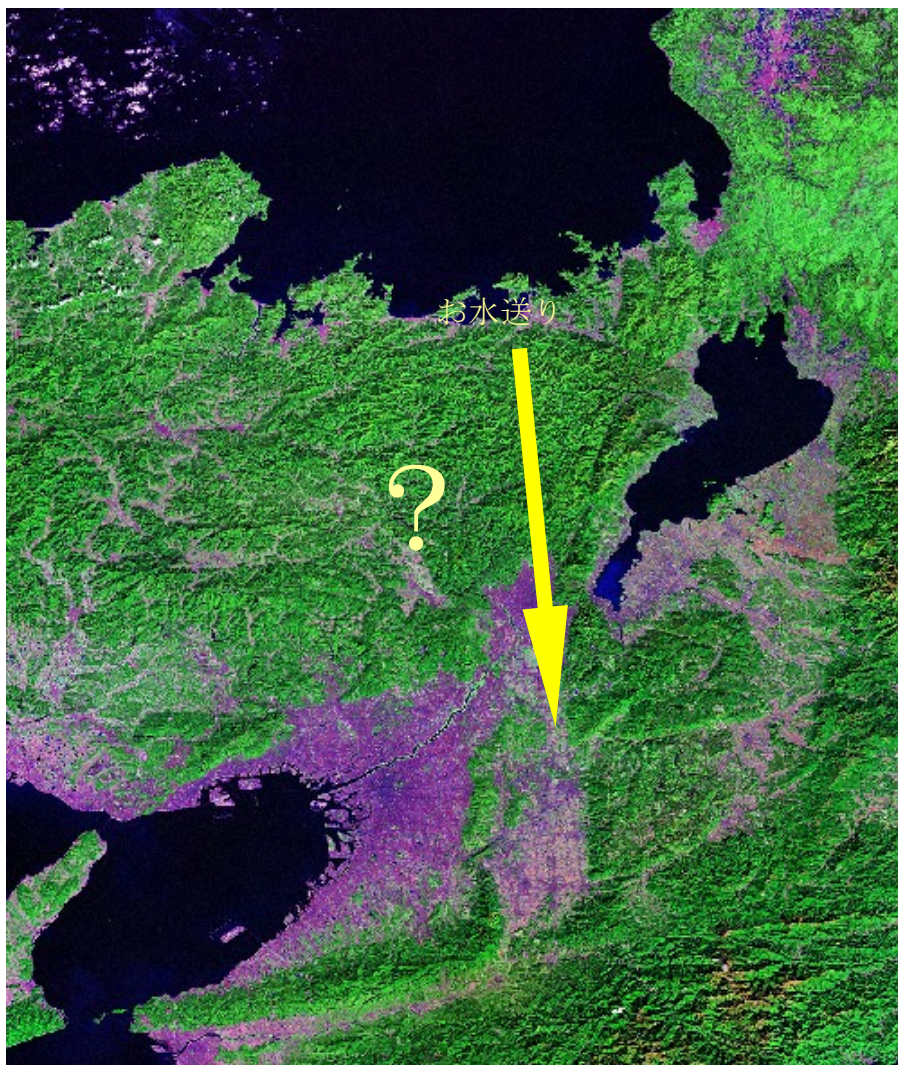


Fig. 5. Regional groundwater flow in regions of sloping stratigraphy.

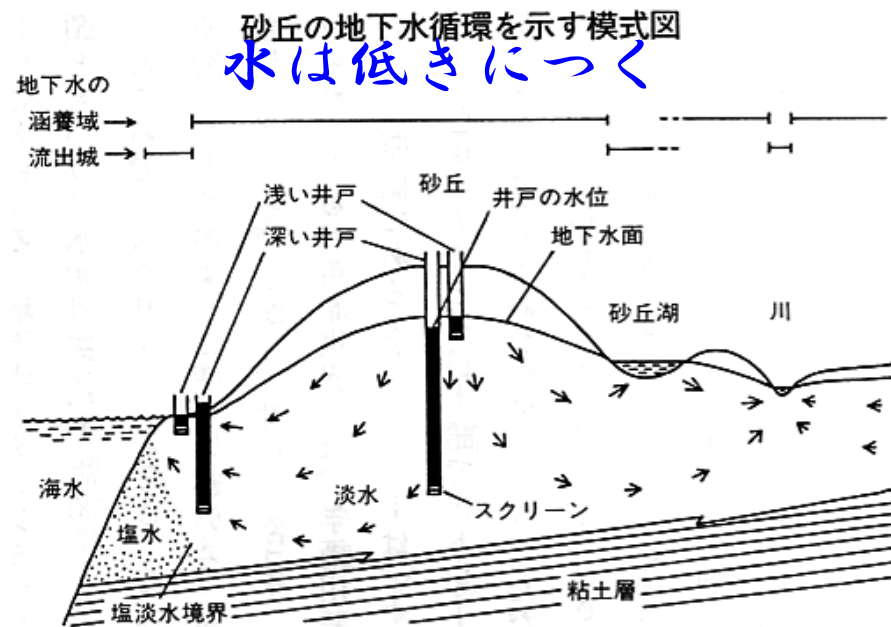
# 地下水に関する基礎的認識

お水取りの水を汲む若狭井の水は若狭から来た？

水脈？



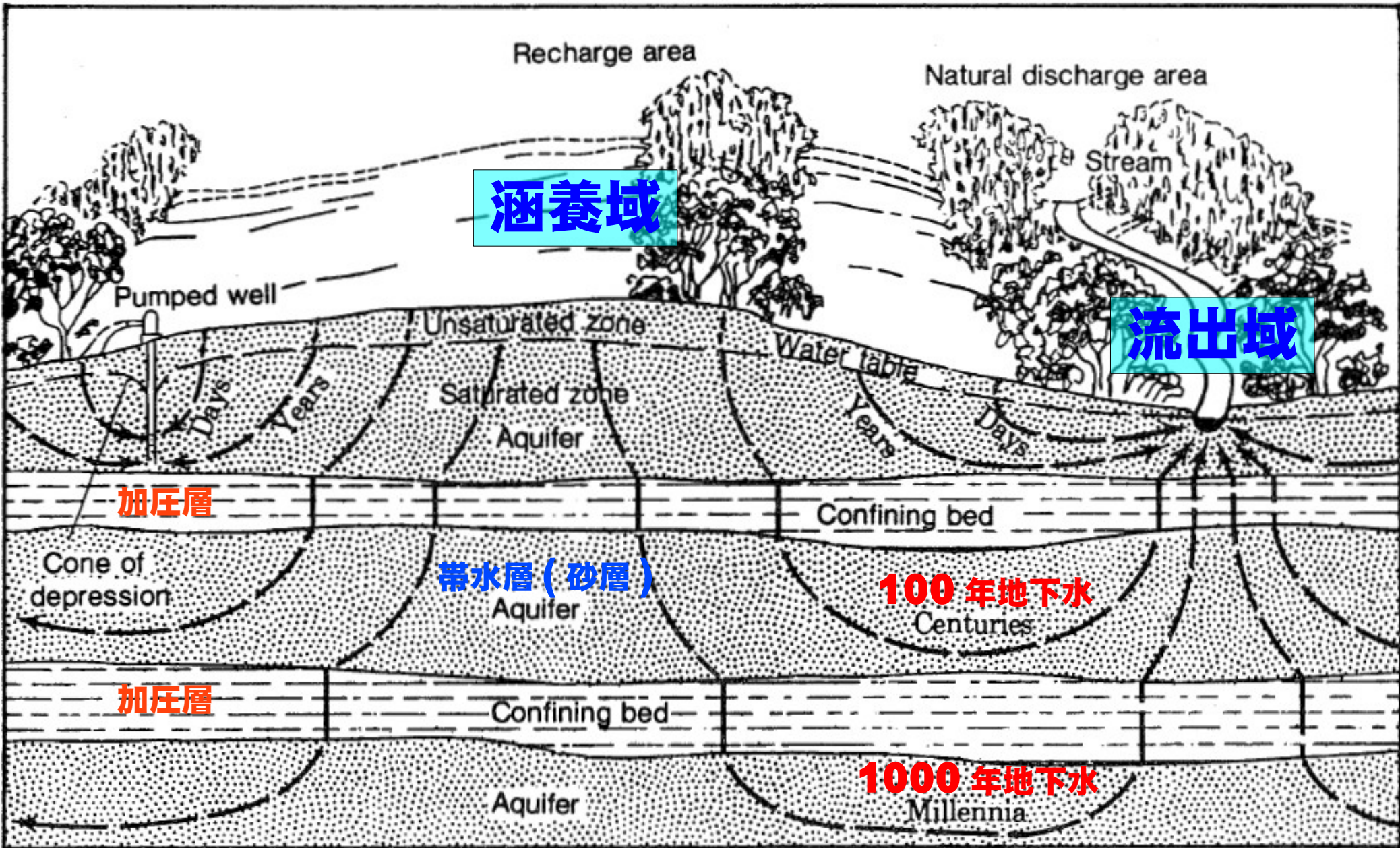
東大寺二月堂（東大寺 HP より）



注) 井戸にはスクリーンから地下水が入る。涵養域では深い井戸ほど井戸の水位は低く、流出域では高くなる。

(榎根勇、「地下水の世界」、NHK ブックス)

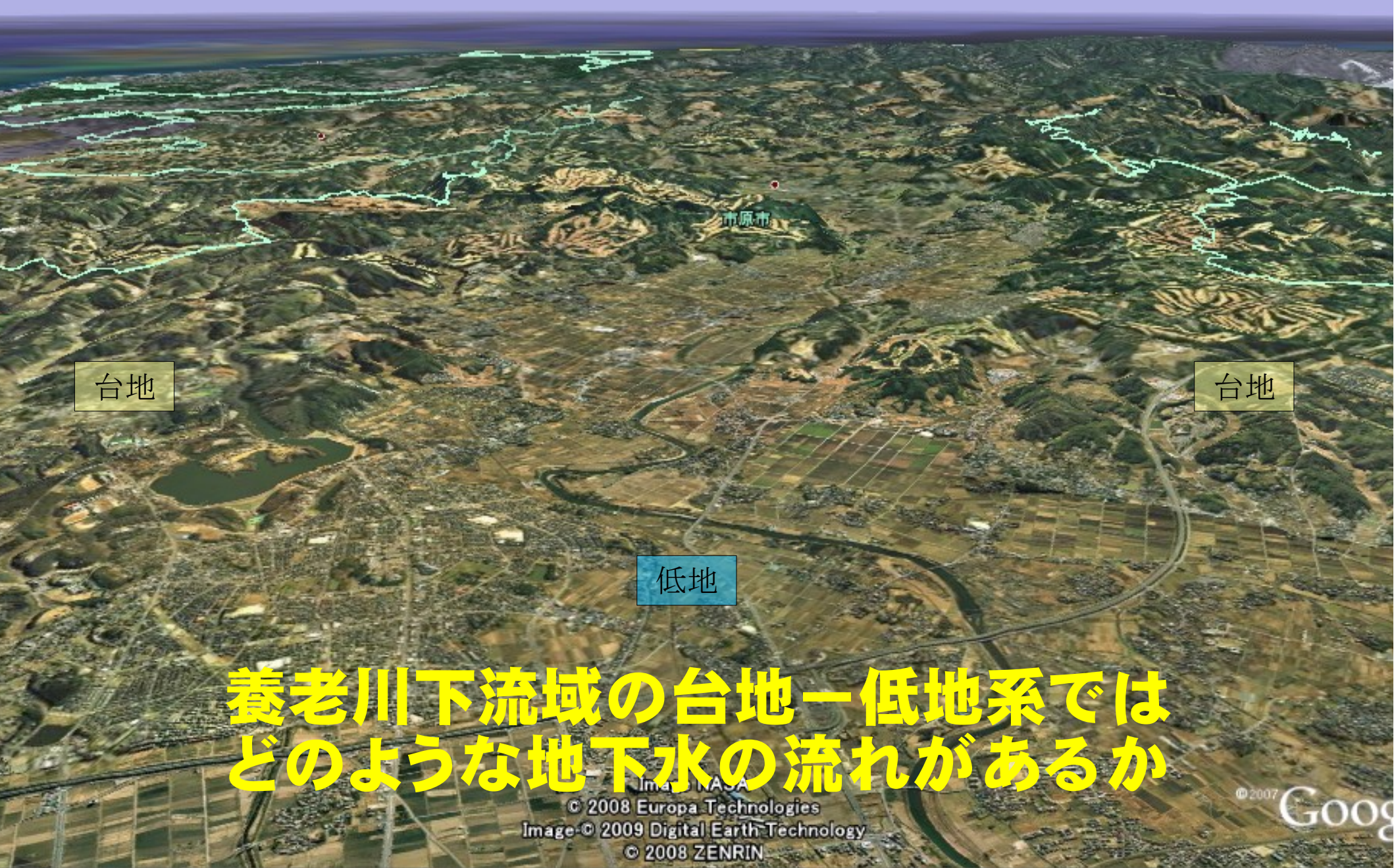
# 河川近傍の地下水の流れの模式図



地下水の年代に注目!

(Tóth, 1995)

# 下総台地の地下水—養老川流域



市原市

台地

台地

低地

養老川下流域の台地—低地系では  
どのような地下水の流れがあるか

Image © NASA  
© 2008 Europa Technologies  
Image © 2009 Digital Earth Technology  
© 2008 ZENRIN

© 2007 Google

5° 27'49.00" N 140° 07'10.84" E 高度 8m

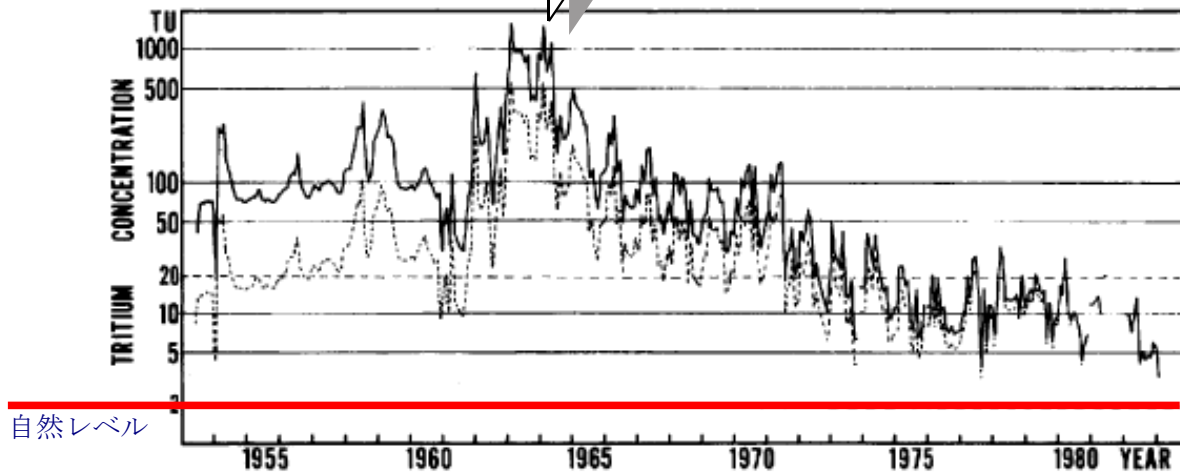
ストリーミング 100%

上空

# 地下水の年齢は？ いつの雨なの？ トリチウム ( $^3\text{H}$ ) による地下水の年代測定

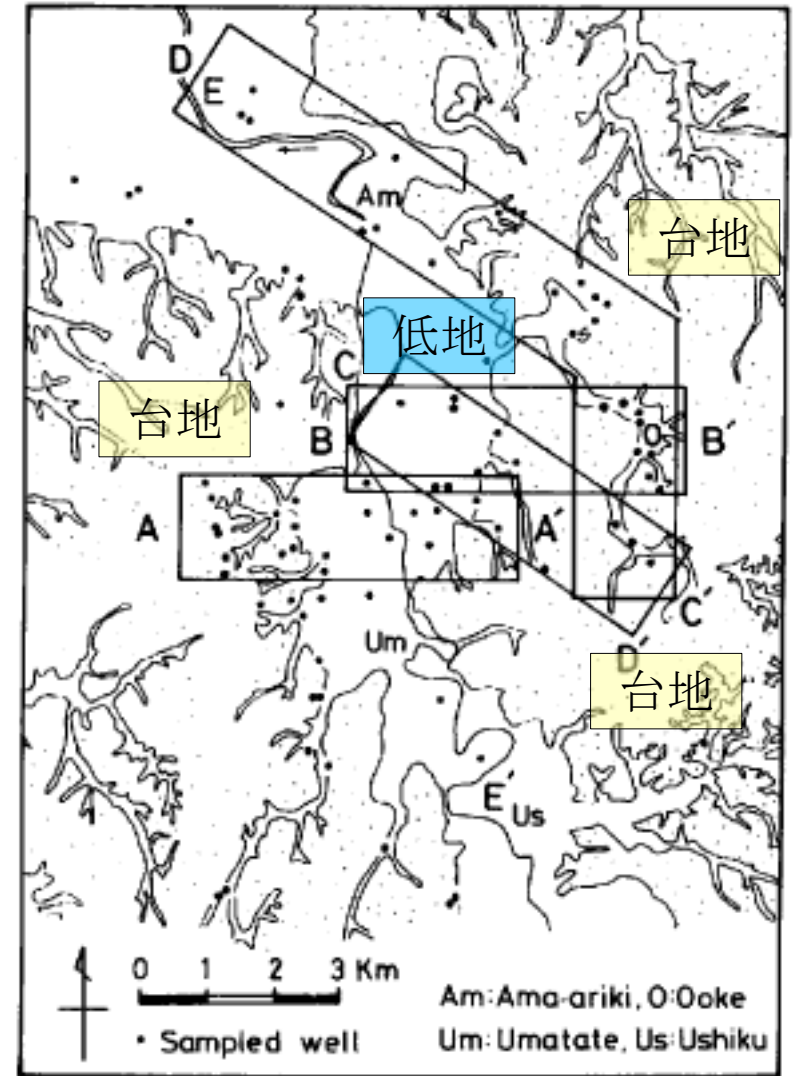
東京および筑波における降水のトリチウム濃度

1963年に濃度ピーク  
雨に濡れると禿げる!?



- ・ 1950年代に開始された水爆実験により、大量の水素の放射性同位体が大気中に放出された
- ・ 水分子の一部を構成し、水循環に加わった
- ・ 放射性なので半減期 12.26 年で減衰する

人為的に放出されたトリチウムを地下水中に追跡することによって、地下水の流動の実態がわかる



養老川下流域の台地—低地—台地の地形の連鎖



# 台地で涵養された地下水は低地に流出する—水は低きにつく—

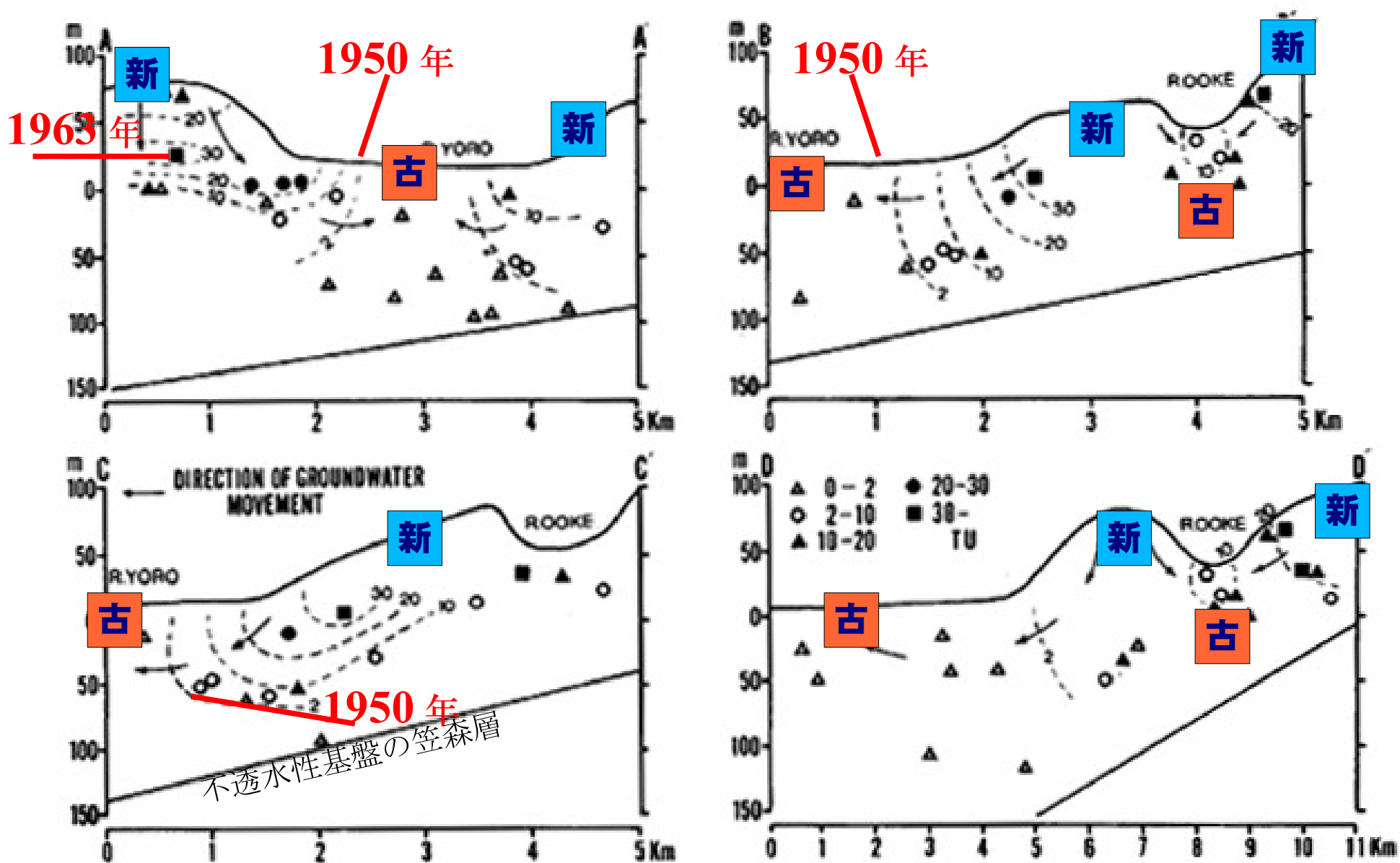
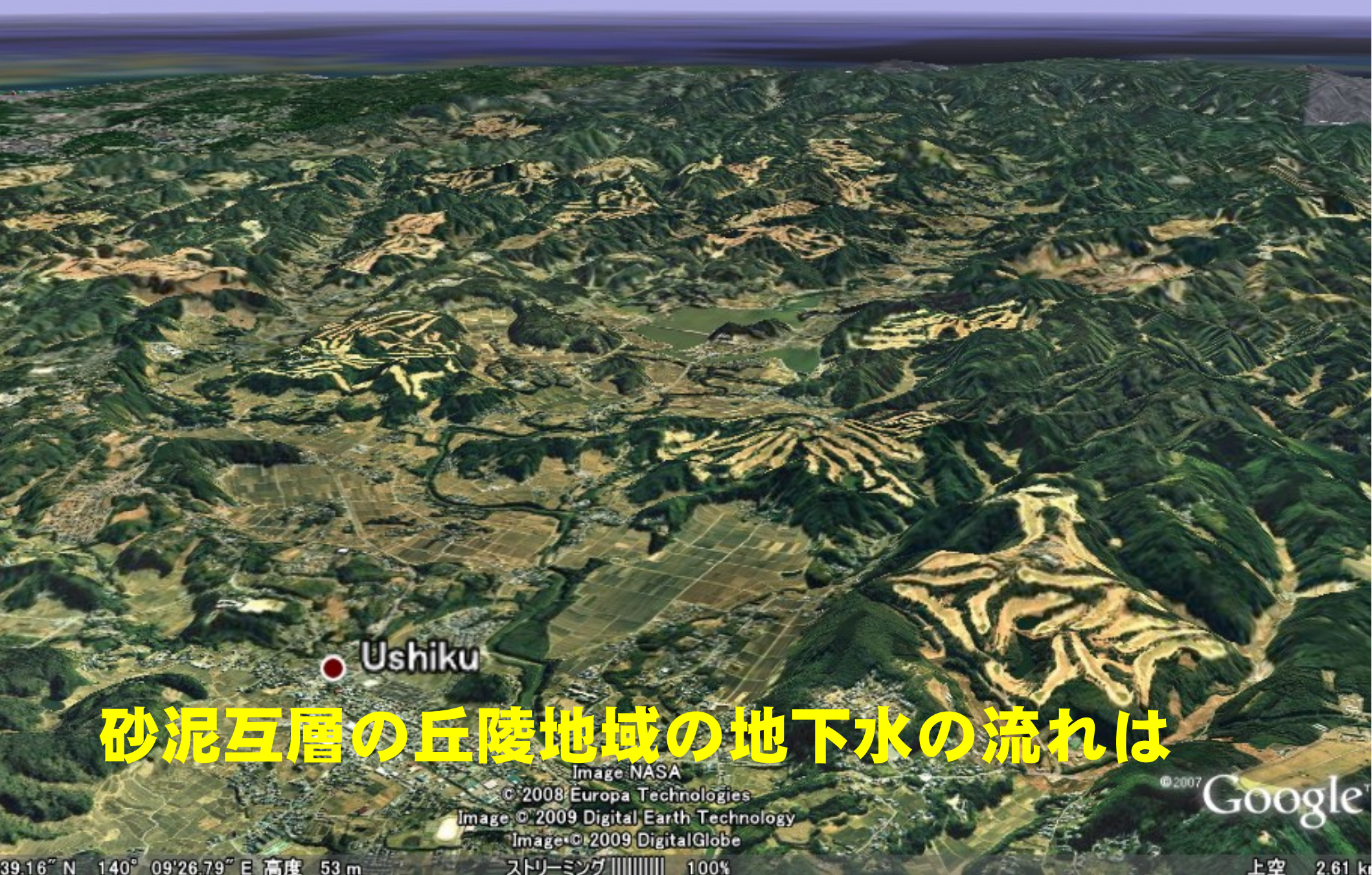


Figure 13 Estimated directions of groundwater movement based on Figure 12.

(近藤、1985)

# 養老川上流域—養老溪谷



● Ushiku

## 砂泥互層の丘陵地域の地下水の流れは

Image NASA

© 2008 Europa Technologies

Image © 2009 Digital Earth Technology

Image © 2009 DigitalGlobe

ストリーミング 100%

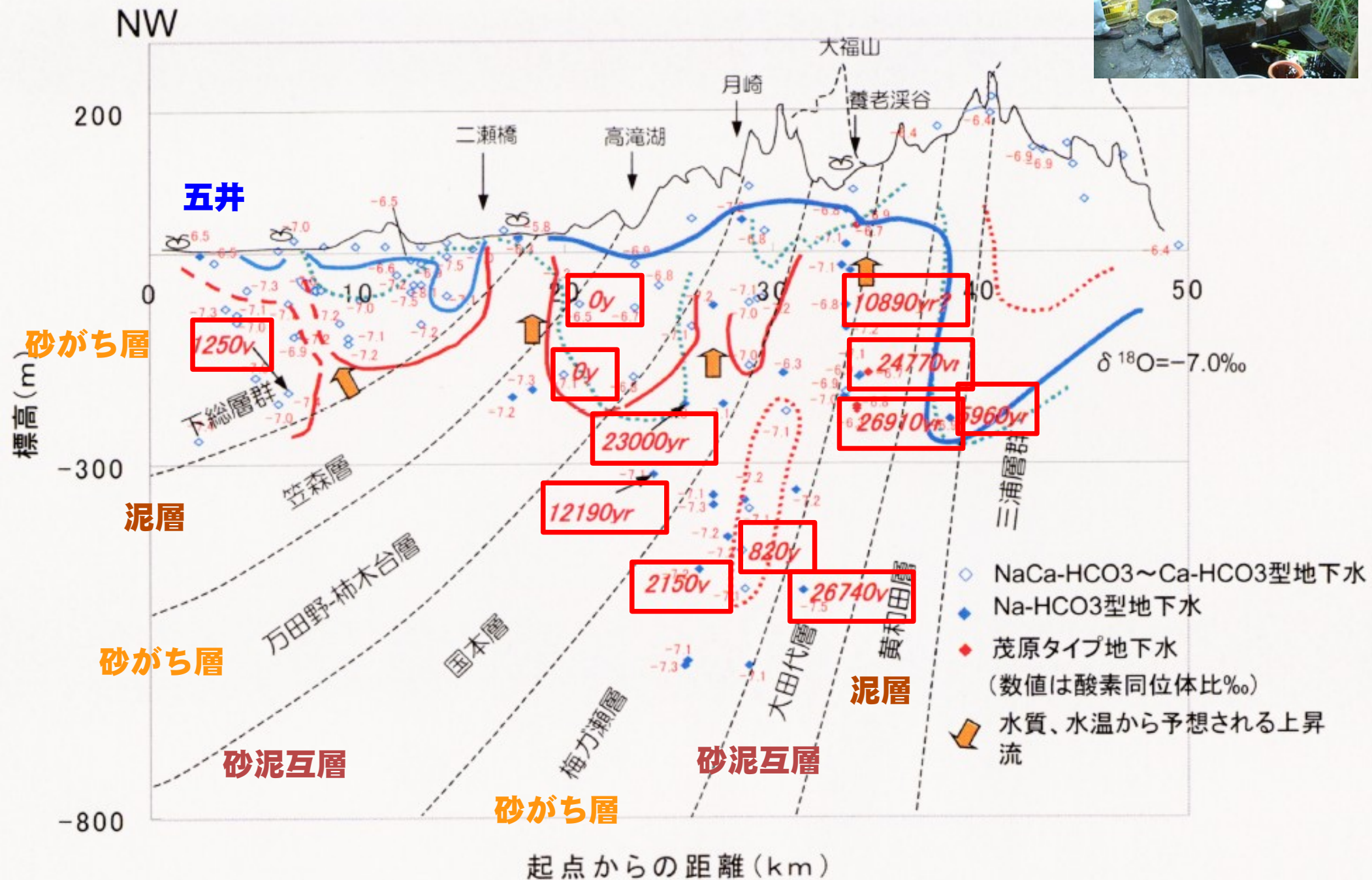
© 2007

Google

39.16° N 140° 09'26.79" E 高度 53 m

上空 2.61 km

# 地下水の年齢 - 養老川流域の自噴井



# その他の地下水年齢測定例

砂漠の地下水はどのくらいの時間をかけて流れているのか？

万年のオーダー  
→氷期の水

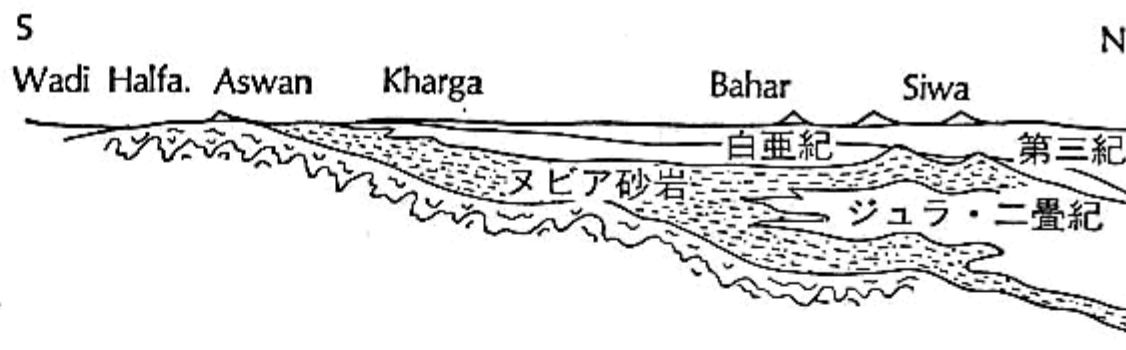


図 7.10 リビア砂漠の地質断面 (Knetsch, G. 1963)

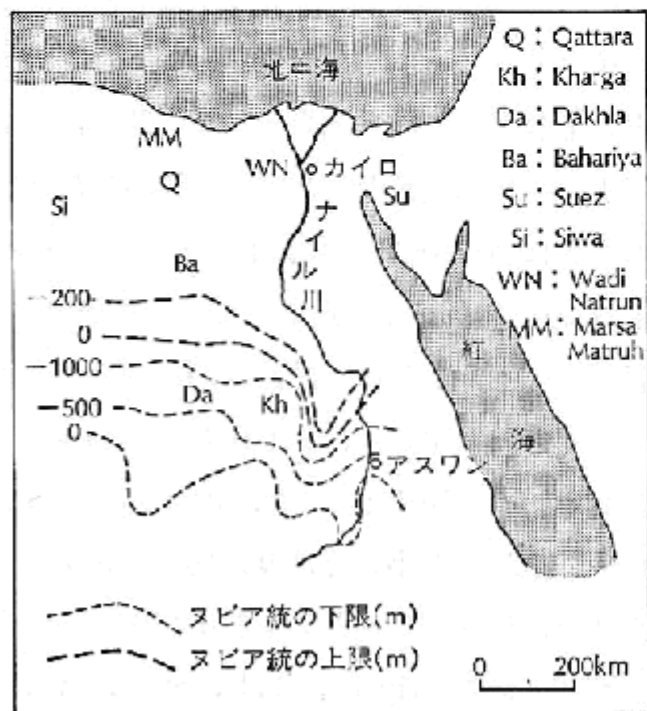


図 7.9 リビア砂漠の地下水採水地点 (Münnich et al. 1962)

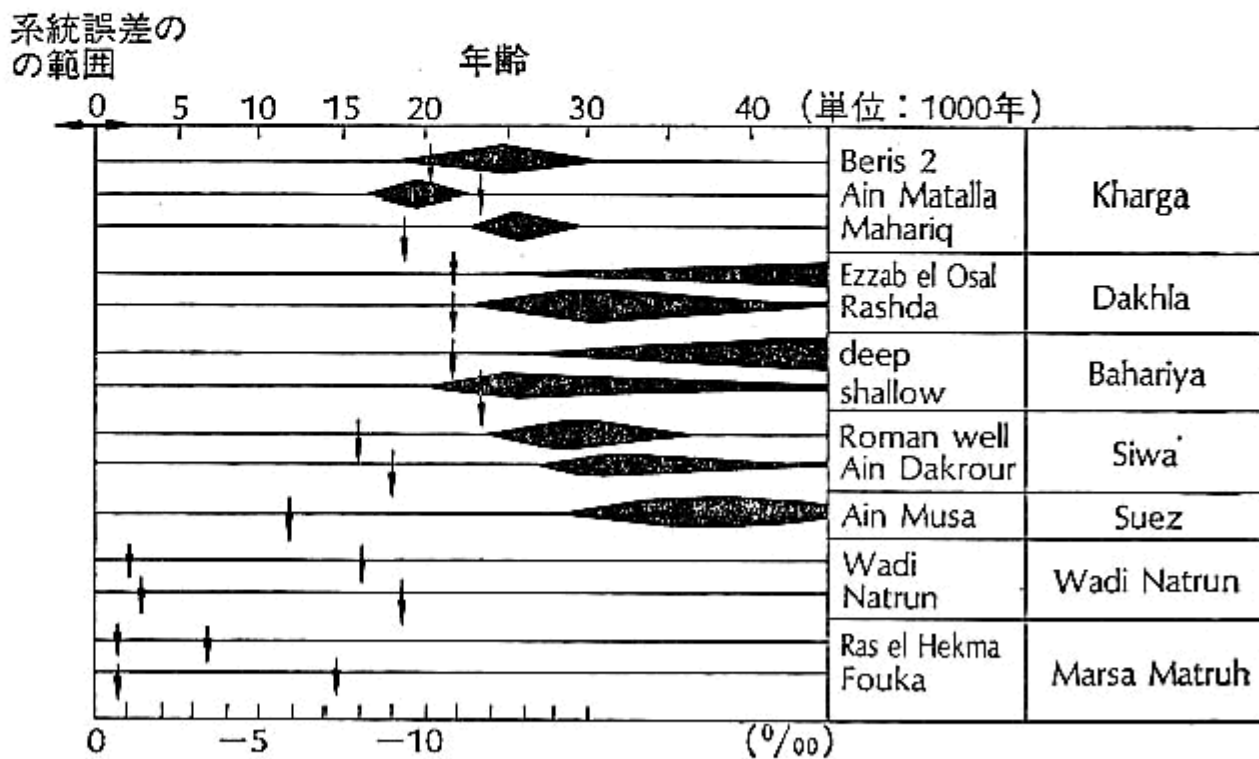
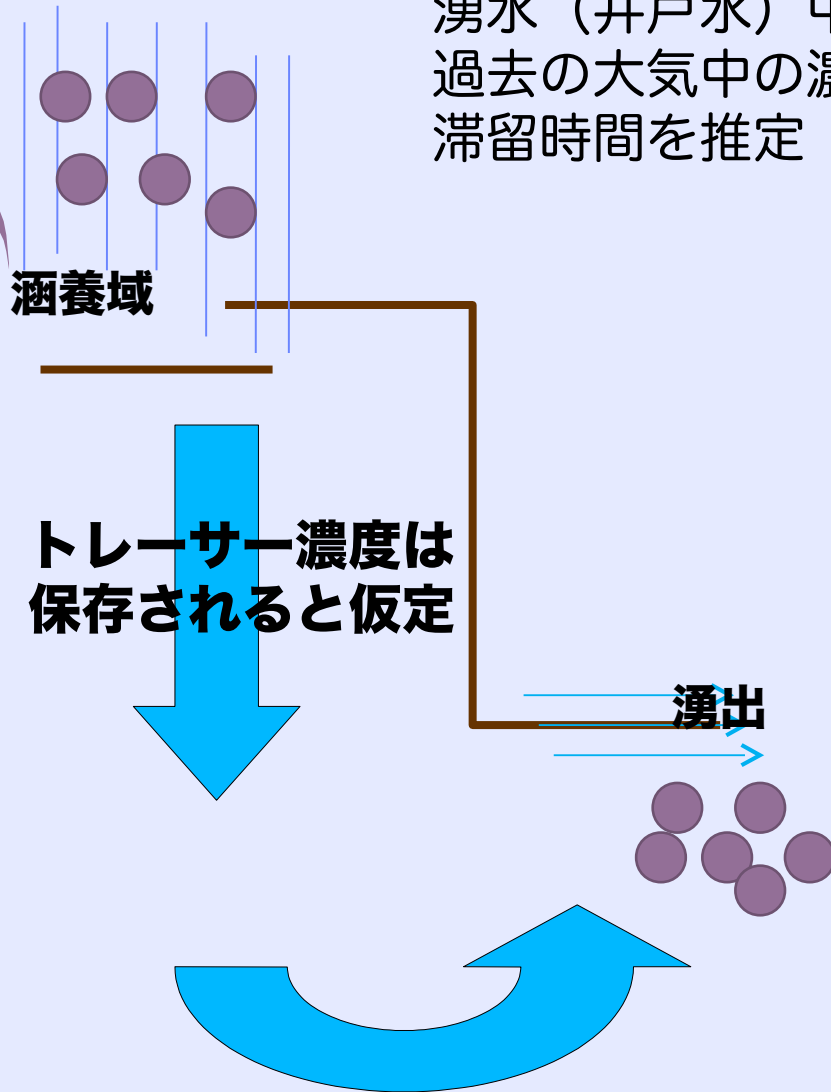


図 7.11 リビア砂漠の地下水の年齢 (Münnich et al. 1962)  
(下向きの矢印は  $^{13}\text{C}$  の  $\delta$  値を示す)

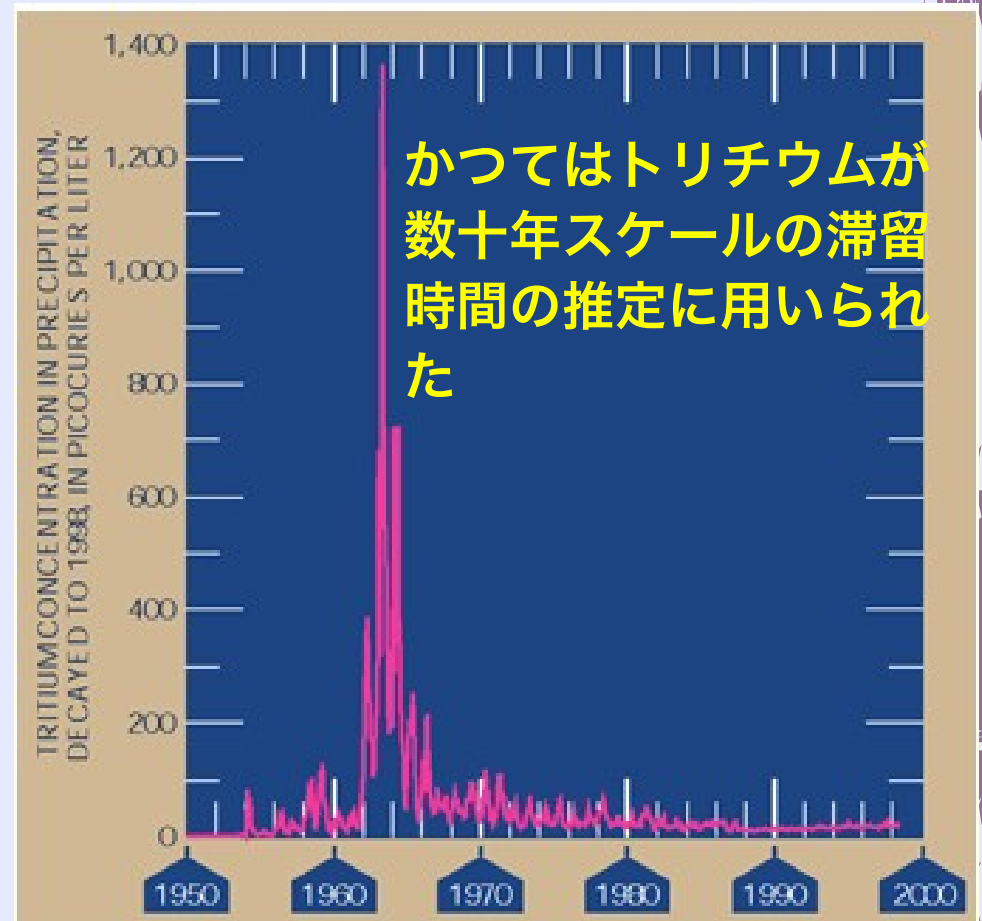
# 最近の地下水年代推定方法

## CFC s

湧水（井戸水）中のトレーサー濃度を測定し  
過去の大気中の濃度と比較することにより  
滞留時間を推定



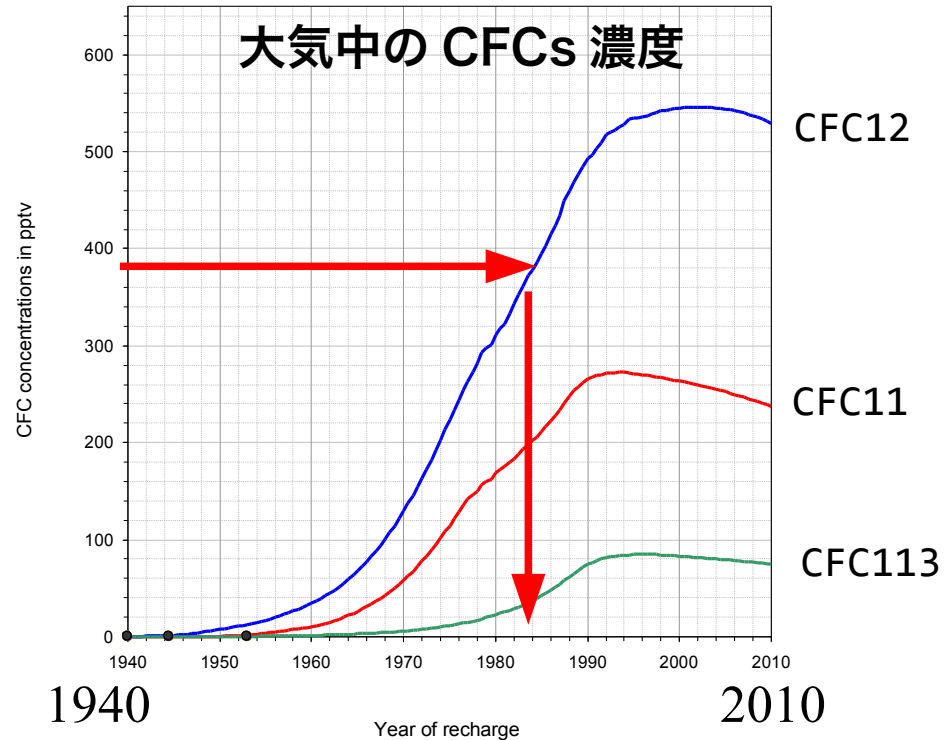
## 大気中のトリチウム濃度



(福井、2011 修士論文)

# CFCs ( クロロフルオロカーボン類 )

- ◆ **CFC-11** (CFCI3)  
**CFC-12**(CF<sub>2</sub>Cl<sub>2</sub>)  
**CFC-113**(C<sub>2</sub>F<sub>3</sub>Cl<sub>3</sub>)  
の3種類がトレーサーとして利用可能
- ◆ 冷却剤や洗剤などの工業用の用途で 1930 年代に人工的に生成
- ◆ 1950 年代から 1990 年代に涵養された地下水に対して年代推定可能



# CFCs 分析

## 滞留年数 (CFC12)

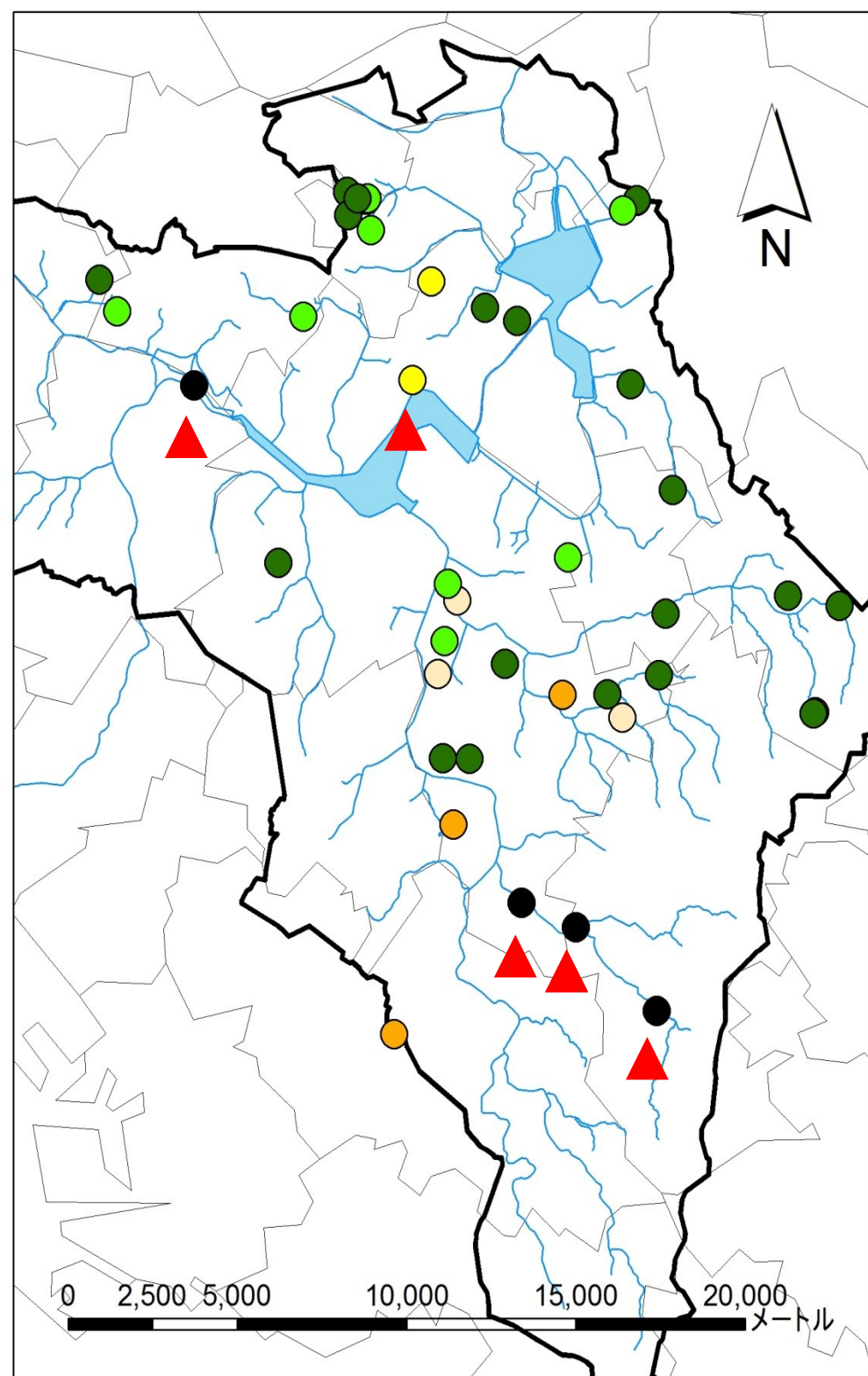
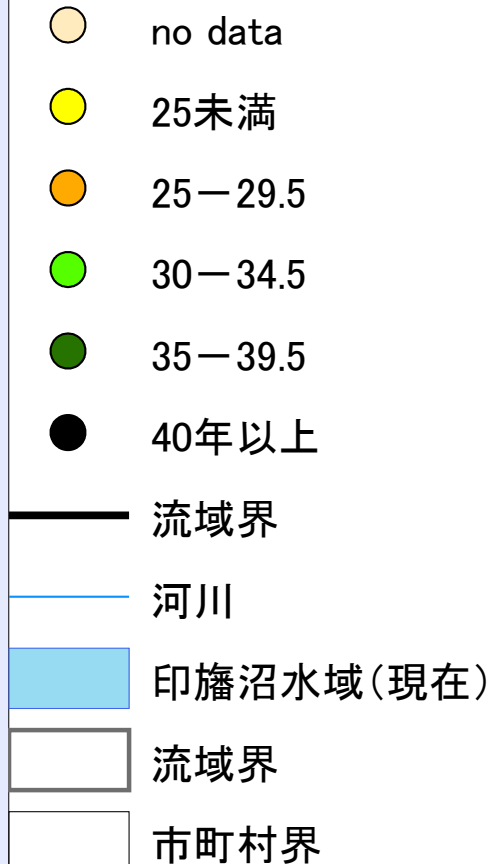
湧水の滞留年数

**20 年以上  
~ 40 年未満**

40 年以上 ( 4 地点 )  
は上総掘り井戸 ( 自噴井 ) ▲

凡例

CFC12 滞留年数  
年



# 課題

## 印旛沼流域水循環健全化会議の活動として

① 30 ～ 40 年の滞留時間は妥当か？

$$v=KI=10^{-3}(\text{cm/s})\times 0.01 \\ \approx 3\text{m/y}$$

② 現在の湧水の水質（特に硝酸）は、  
30 ～ 40 年前の土地利用を  
反映しているのか⇒課題 1

③ 湧水のタイプと滞留時間の関係

地形駆動型の地下水流動系のあり方⇒課題 2



# 地下水を保全するためには涵養域の保全が大切

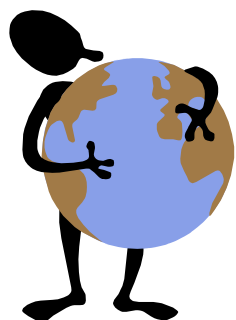
## —それは我々の足下—

● 湿潤地域では地下水は地形の高まりで涵養されて低地に流出する

→ 台地上に汚水を流すのはやめよう

● 地下水の流れる速度は極めて遅い

→ 一度汚してしまったら元に戻すには長い時間がかかる



# 地下水汚染の現状はどうなっているのか

## ■ 点源汚染

工場等のポイントが汚染源

## ■ 面源汚染

広い面積が汚染源

→ 地下水の硝酸態窒素汚染



- ・肥料である窒素は硝酸態窒素として地下水へ
- ・煮沸や活性炭では除去できない
- ・健康被害が出る可能性がある

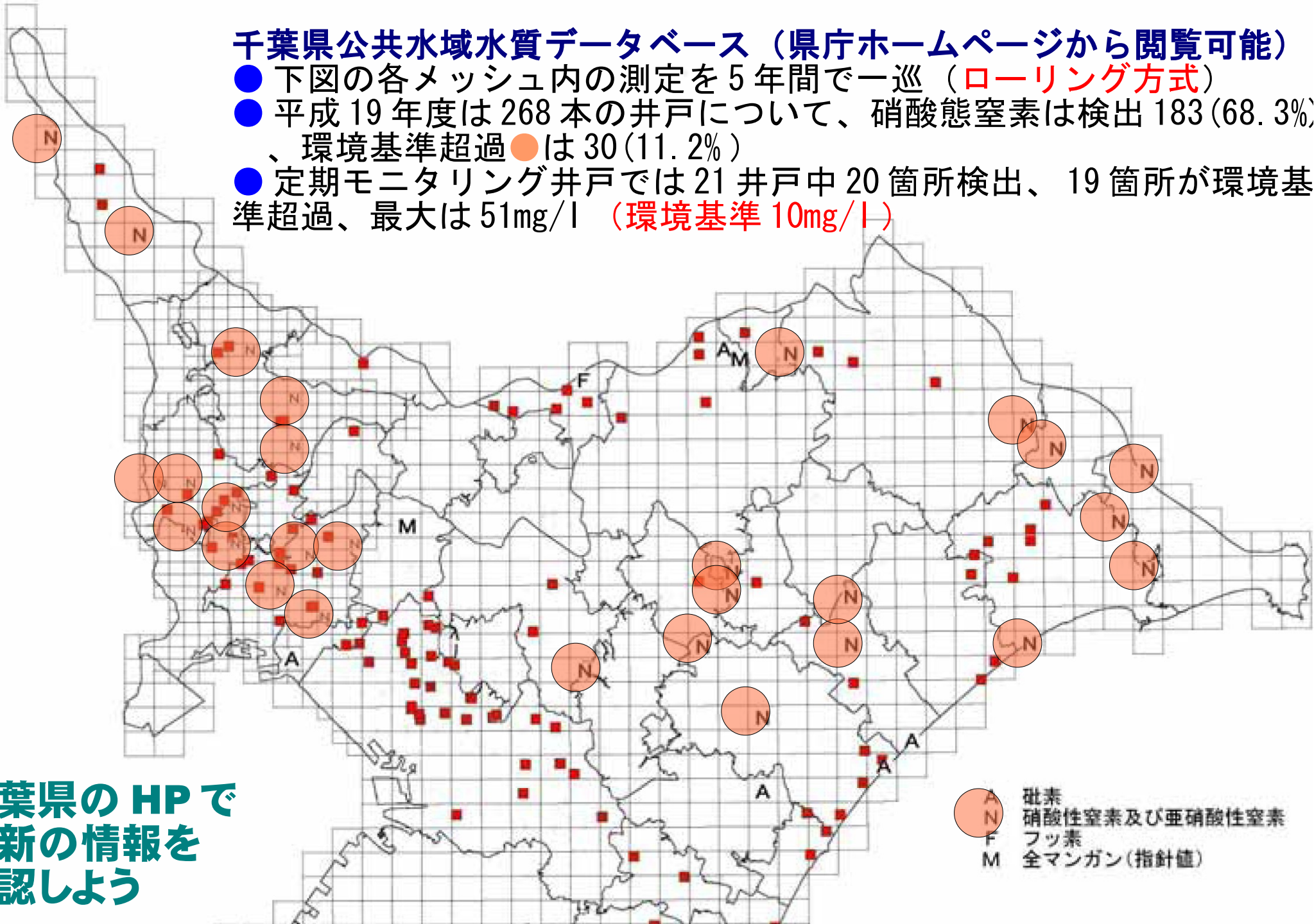
# 平成19年度 環境基準等超過地点図

千葉県公共水域水質データベース（県庁ホームページから閲覧可能）

● 下図の各メッシュ内の測定を5年間で一巡（ローリング方式）

● 平成19年度は268本の井戸について、硝酸態窒素は検出183(68.3%)、環境基準超過●は30(11.2%)

● 定期モニタリング井戸では21井戸中20箇所検出、19箇所が環境基準超過、最大は51mg/l（環境基準10mg/l）



千葉県のHPで  
最新の情報を  
確認しよう

A 砒素  
N 硝酸性窒素及び亜硝酸性窒素  
F フッ素  
M 全マンガン(指針値)



成田

成田空港

高崎川

佐倉

流域スケールでの詳細な硝酸態窒素分布の実態は  
高崎川の河川水の硝酸態窒素濃度

(C)Google

Image © 2009 DigitalGlobe

© 2008 Europa Technologies

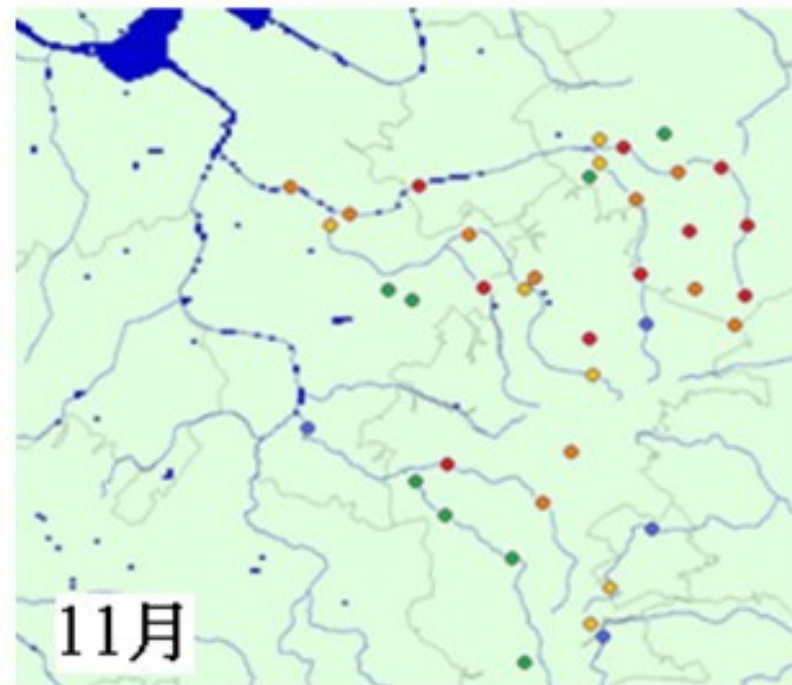
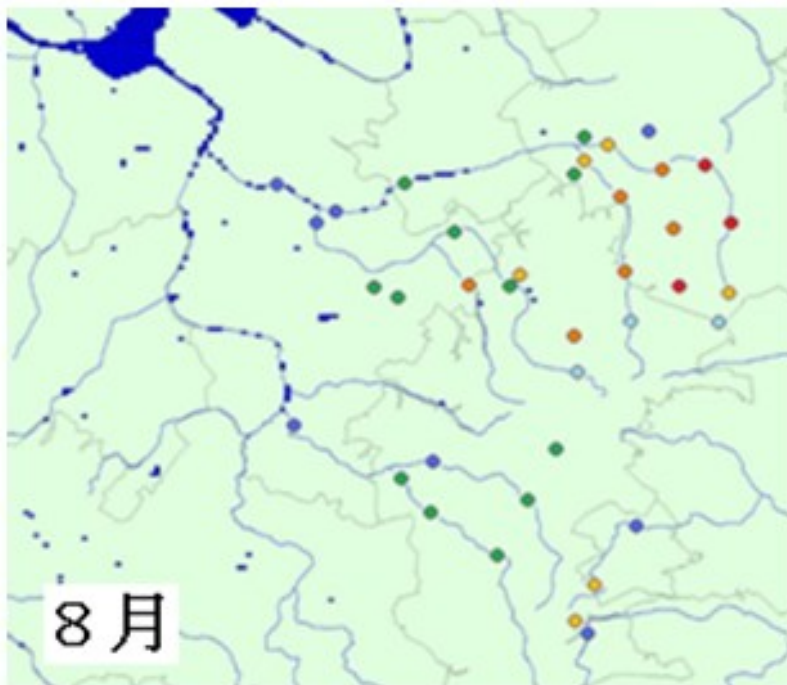
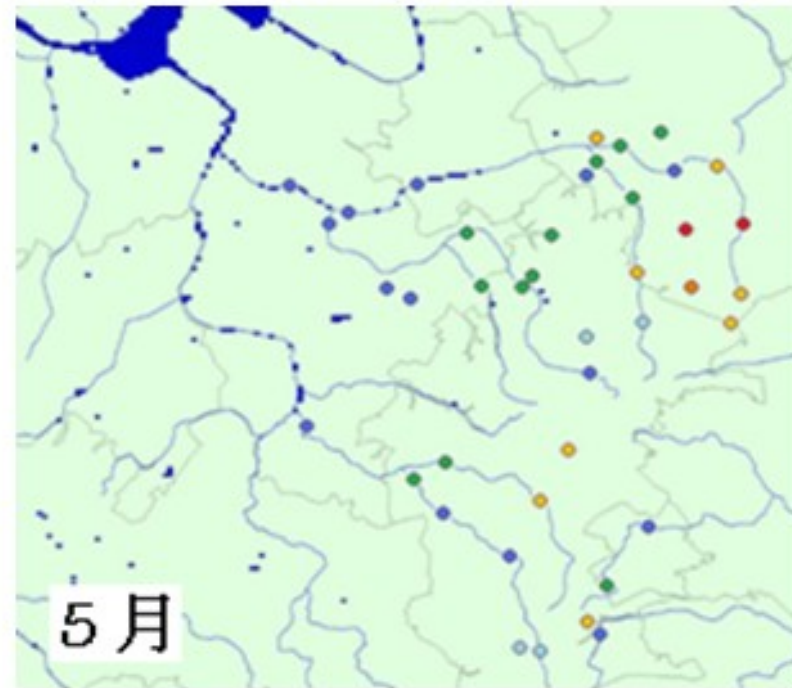
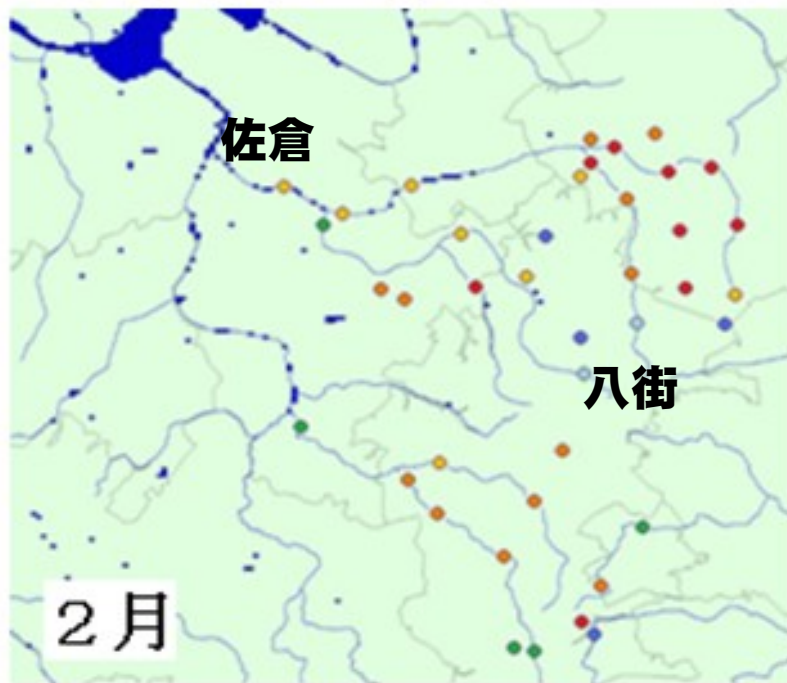
Image © 2009 TerraMetrics

Image © 2009 Digital Earth Technology

© 2007

Google

# 2008年調査 高崎川流域における河川水の硝酸態窒素濃度



● が環境基準を超えた地点

- $< 2\text{mg/l}$
- $< 4\text{mg/l}$
- $< 6\text{mg/l}$
- $< 8\text{mg/l}$
- $< 10\text{mg/l}$
- $\geq 10\text{mg/l}$

(郡、2009)

# 河川は地下水の露頭

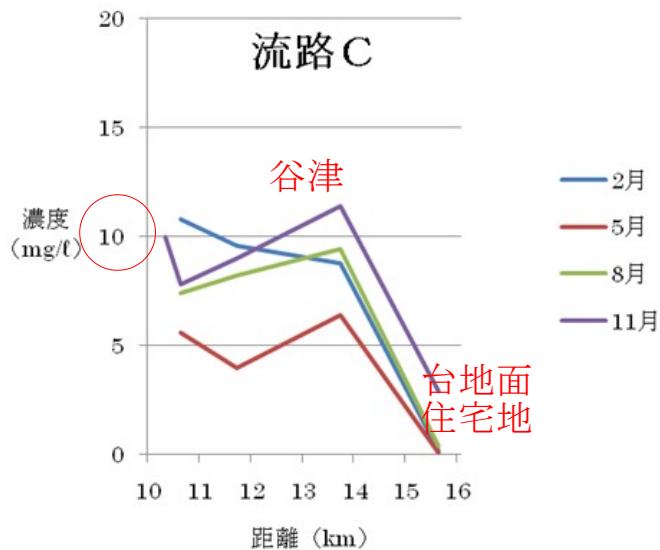
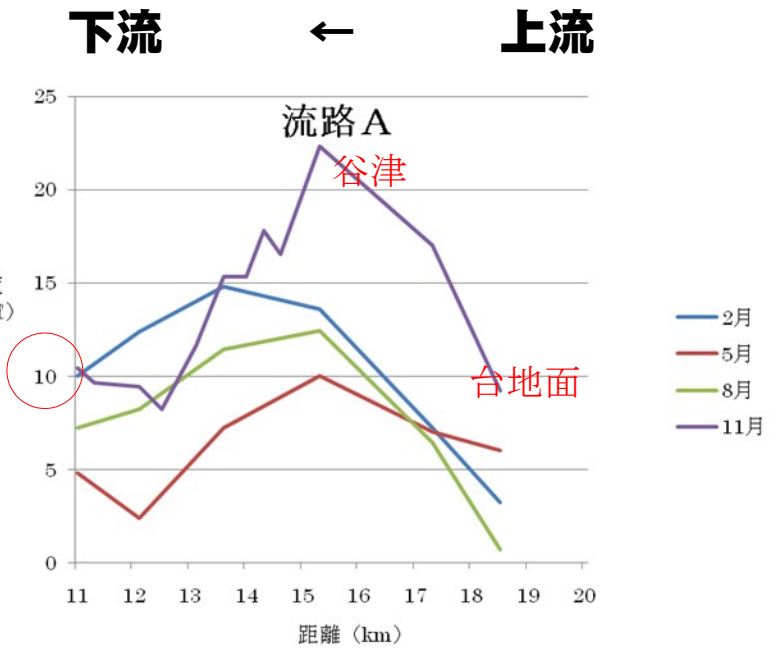
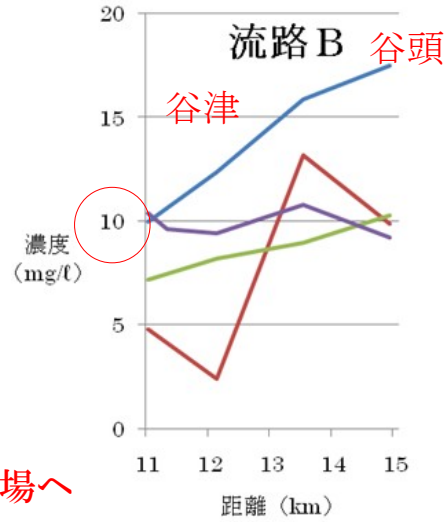
- 河川水は地下水によって維持される
- 表流水の硝酸態窒素濃度を調べると流域の地下水の状況もわかる



印旛取水場へ



鹿島川  
高崎川起点  
佐倉



○ 縦軸 10mg/l が環境基準

## ● わかったこと



**台地の地下水は硝酸態窒素のプール**

**広域水道のない区域ではその水を利用  
→ 浸透膜式浄水器の利用**

**すでに数十年以上に及ぶ窒素の付加**

**地下水の流動速度は遅い**

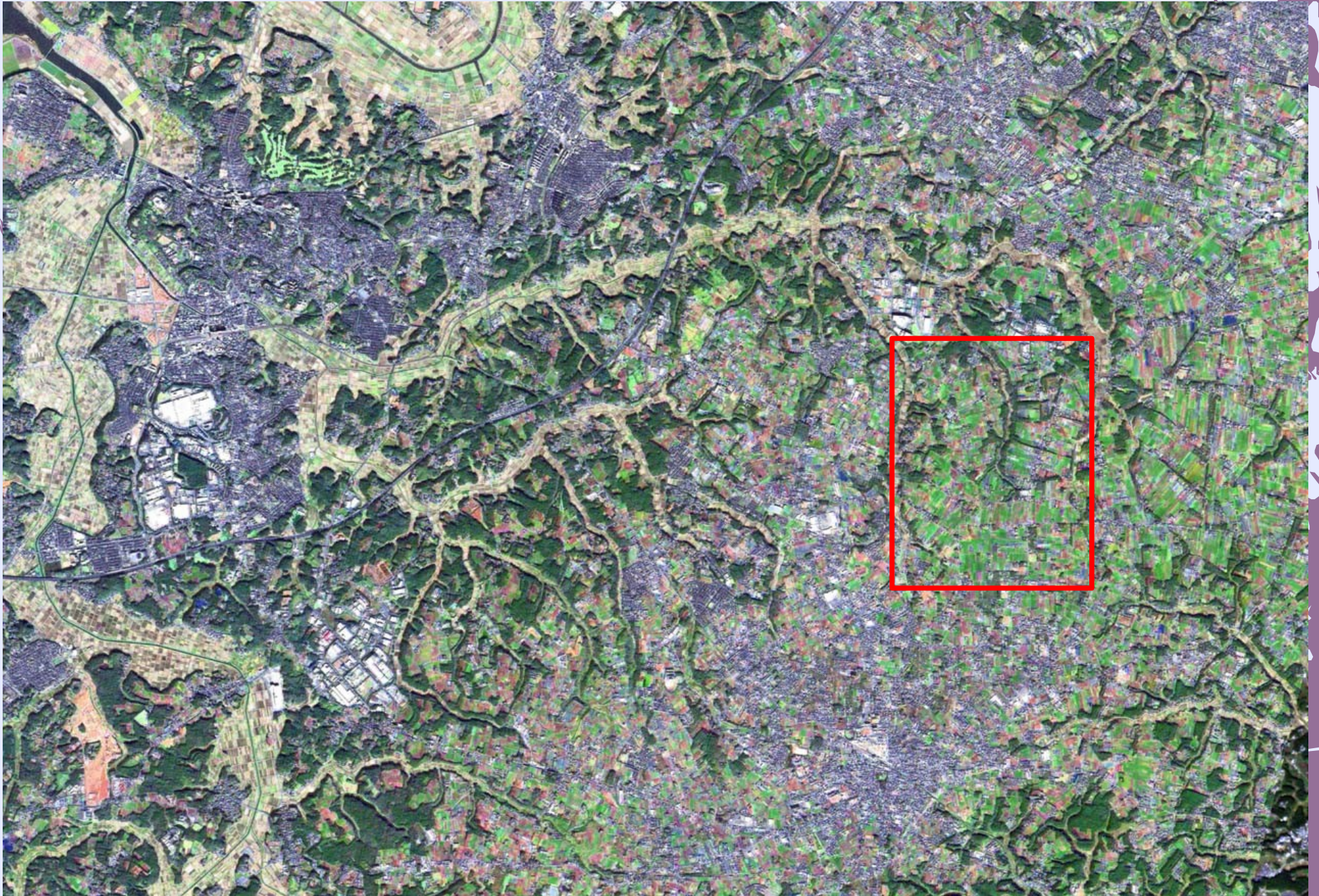
**農業は生業**



**どのようにして安全・安心な地下水を保全!?**

# 高崎川流域

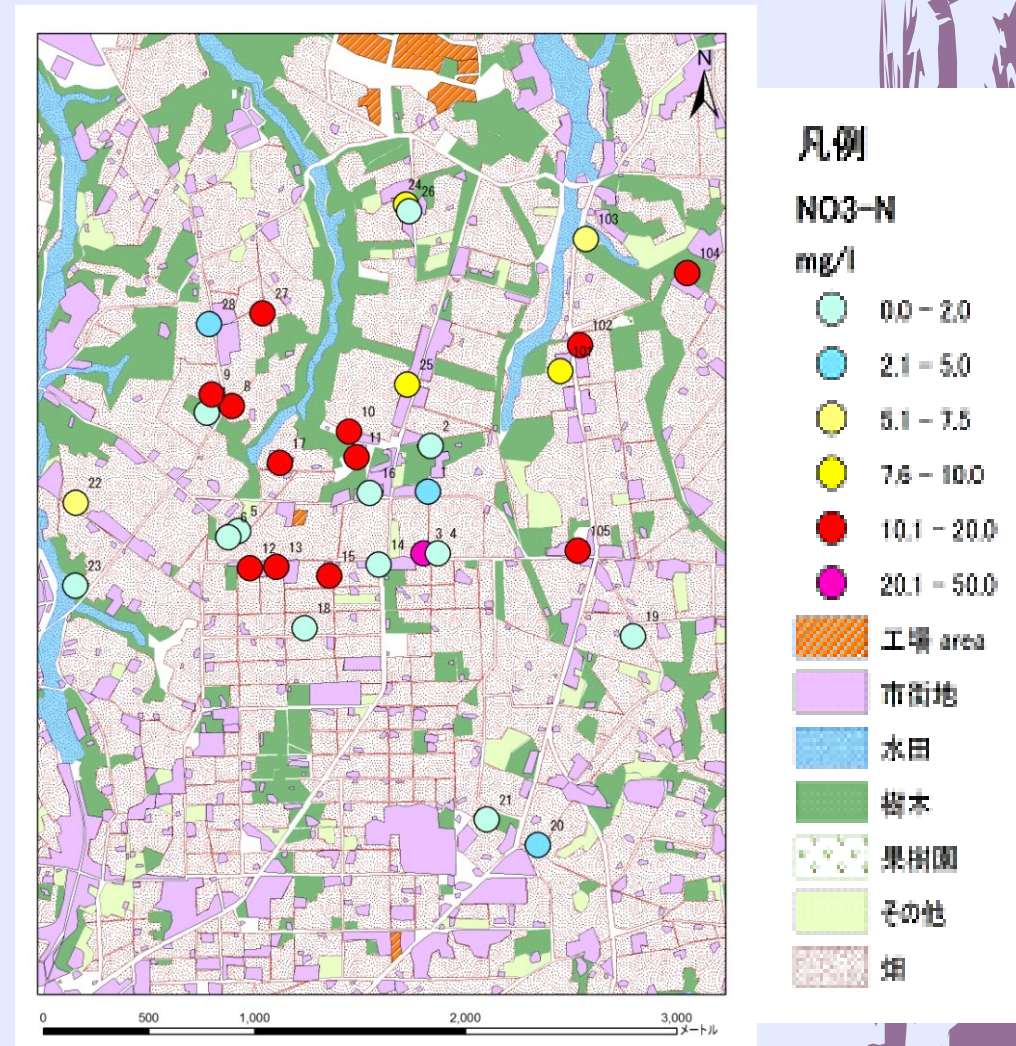
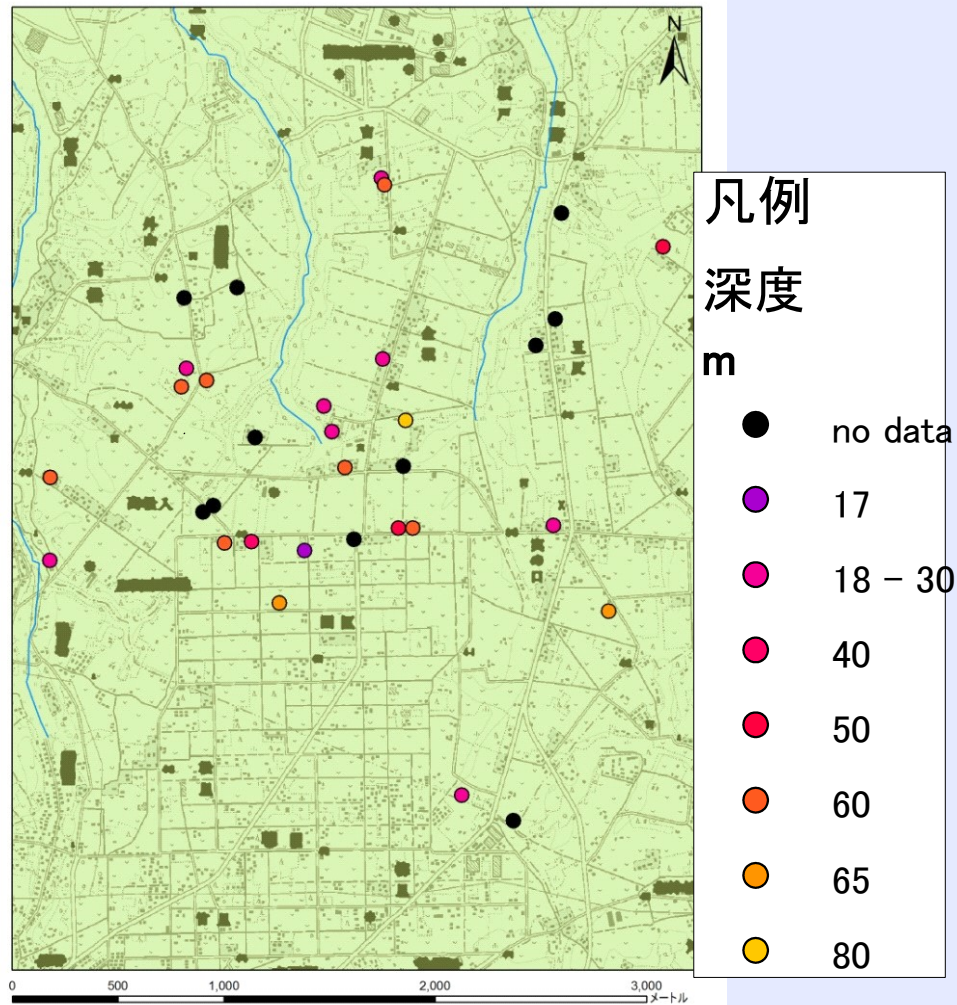
# ALOS/AVNIR2 画像





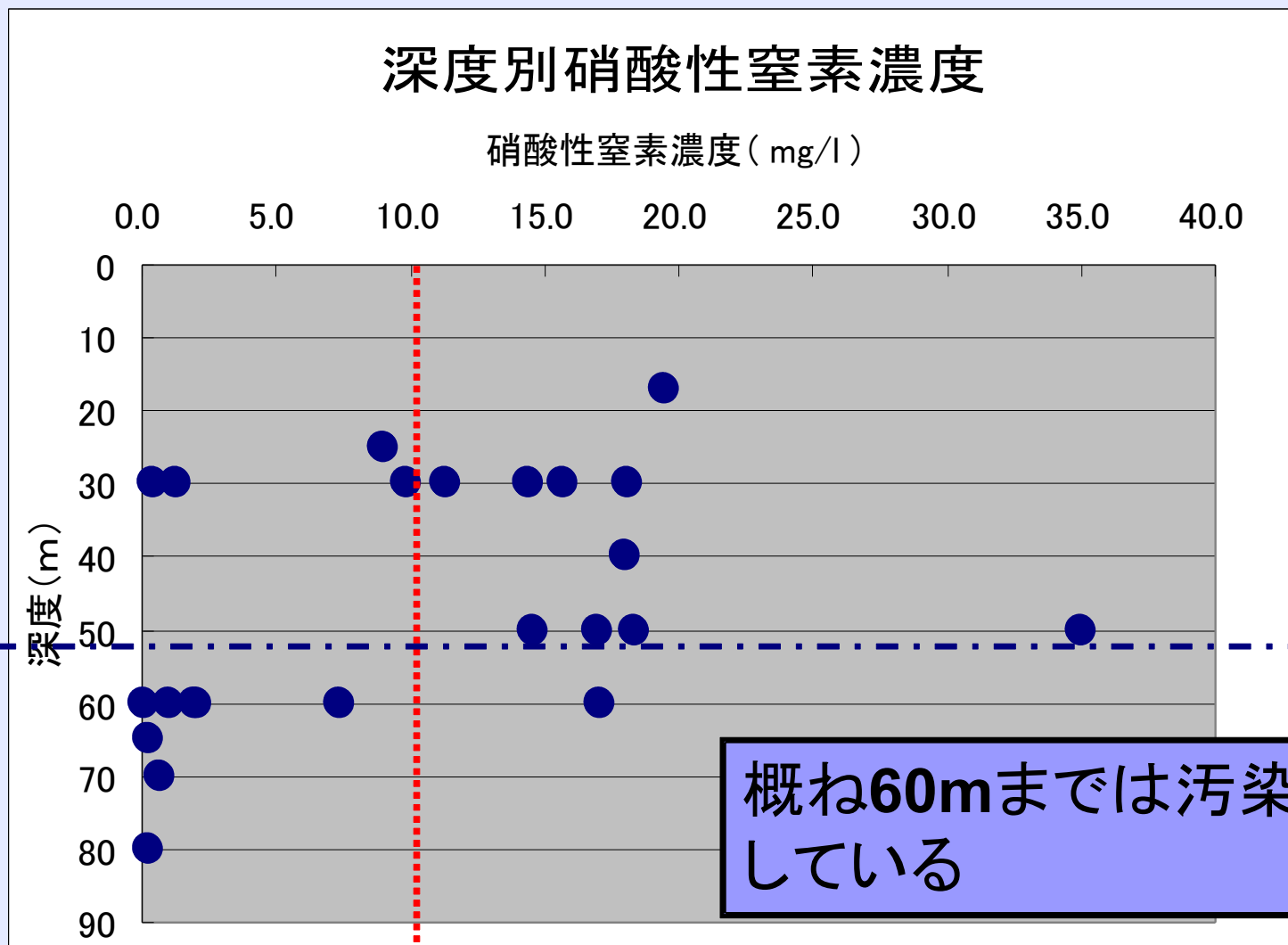
# 地下水の硝酸性窒素の分布

## 富里市十倉



(山本、2011 修士論文)

# 深度と硝酸性窒素濃度の関係

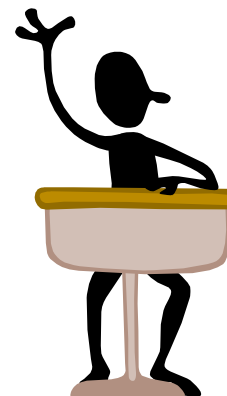


# 近藤私案 モード2的な考え方

- 地域経済圏の創出(地域通貨)
- 減肥栽培の農産物を地域が引き取る
- 地域の環境保全に役立っているという意識  
→人と自然の良好な関係、分断の修復
- 地域の水循環を知り、生態系サービスの利用を推進



地域を中心に  
考える時代



環境学としての  
水文学

# 問題解決型の地下水学へ

