

一般社団法人 地下水技術協会
一般社団法人 日本さく井協会基
礎知識講習会 2024

初級技術者のための地下水講座

－地質との関係と現場の実際－

1.地下水概説 地下水の理論と実際

2024年6月

国立大学法人 千葉大学 名誉教授

近藤 昭彦

見えない地下水循環の理解

地下水の基礎

- 現場における経験の蓄積 ← 文献を通じた経験
⇒ 地形・地質・気候・植生、. . .
⇒ 3 + 1次元で地下水をみる

組み合わせでみる

- 演繹的な理解 モデルによる理解
⇒ 科学的なモデルの活用
⇒ 地下水流動系の理解

不思議な地下水の世界

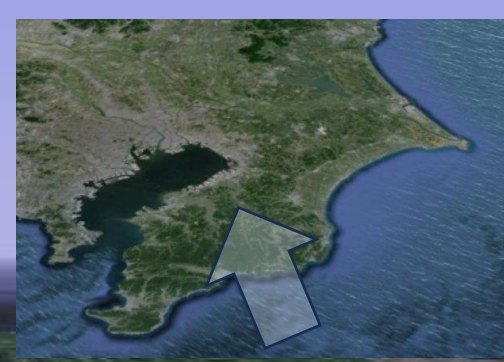


千葉県養老川上流の自噴井

自噴井の不思議

千葉県養老川上流域

- ・ 東京湾に向かって緩く傾斜する第四系の未固結砂泥互層



千葉期
命名なった!

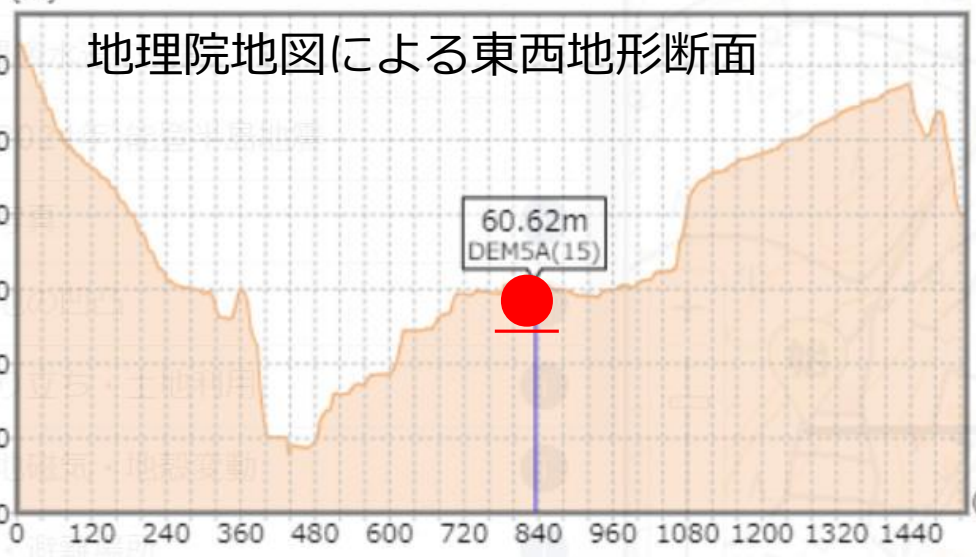


次々ページの地質断面の方向

砂泥互層の丘陵地域の地下水の流れは?
地下水はどこから来て、どこへ行くのか?



上総丘陵を穿入蛇行する養老川
段丘化した旧河道が存在
自噴井（深度600m）は段丘の上に位置する
そこは現河床より20m以上高い位置

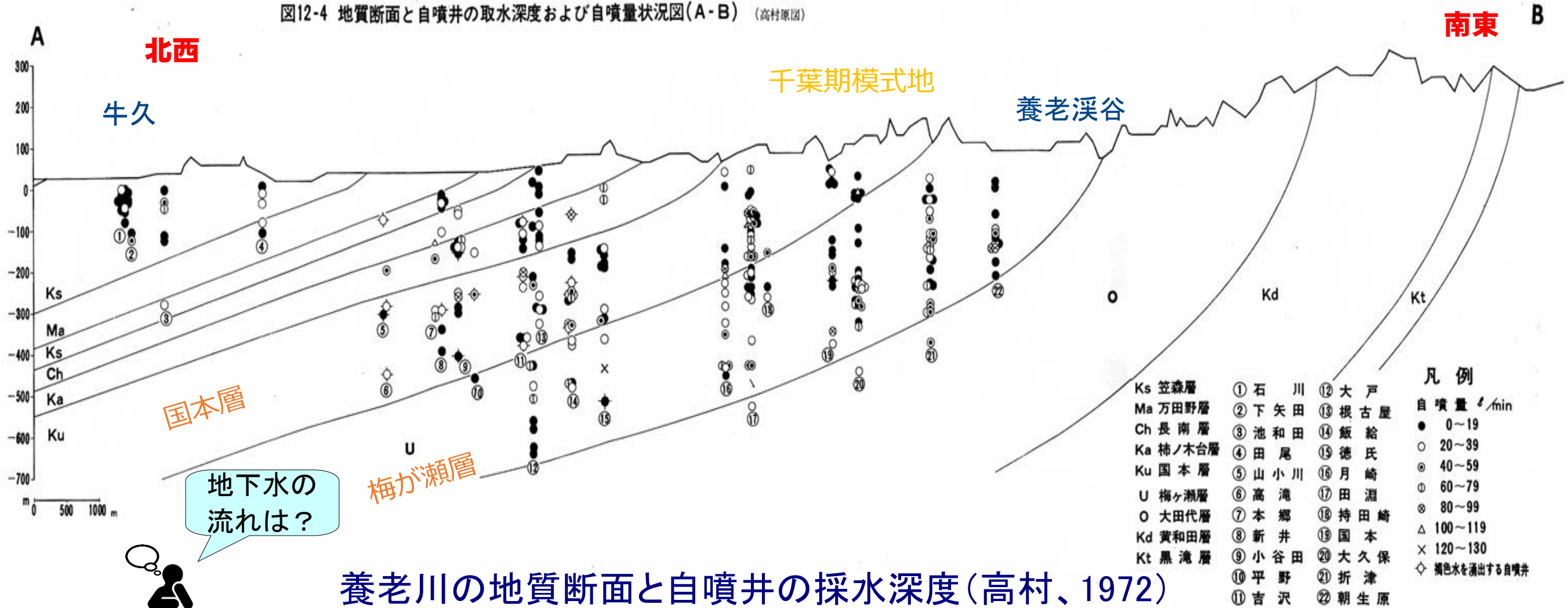


カバーフォトの自噴井の場所 ●

単斜構造を呈する砂泥互層一房総の下総層群・上総層群



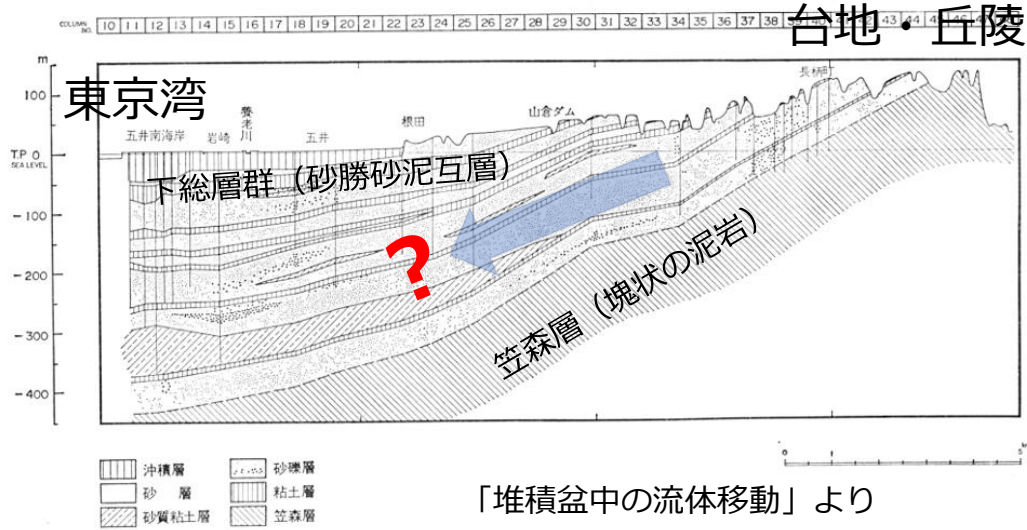
図12-4 地質断面と自噴井の取水深度および自噴量状況図(A-B) (高村原団)



養老川の地質断面と自噴井の採水深度(高村、1972)

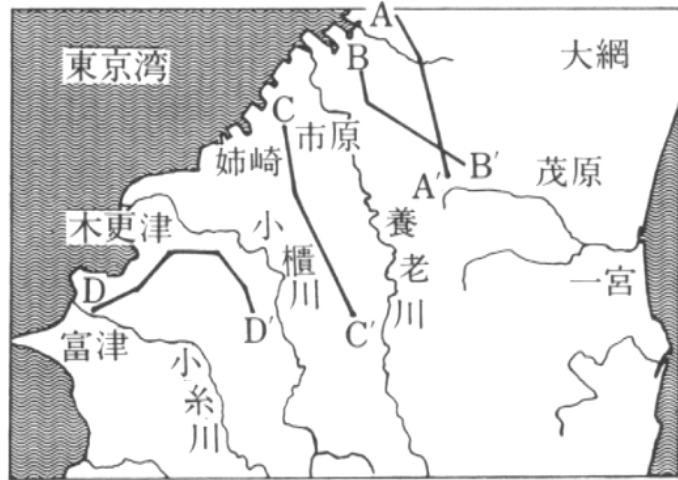
下総層群—明瞭な砂泥互層—の地下水の流れは？

東京湾に向かって傾斜する単斜構造（将棋倒し構造）

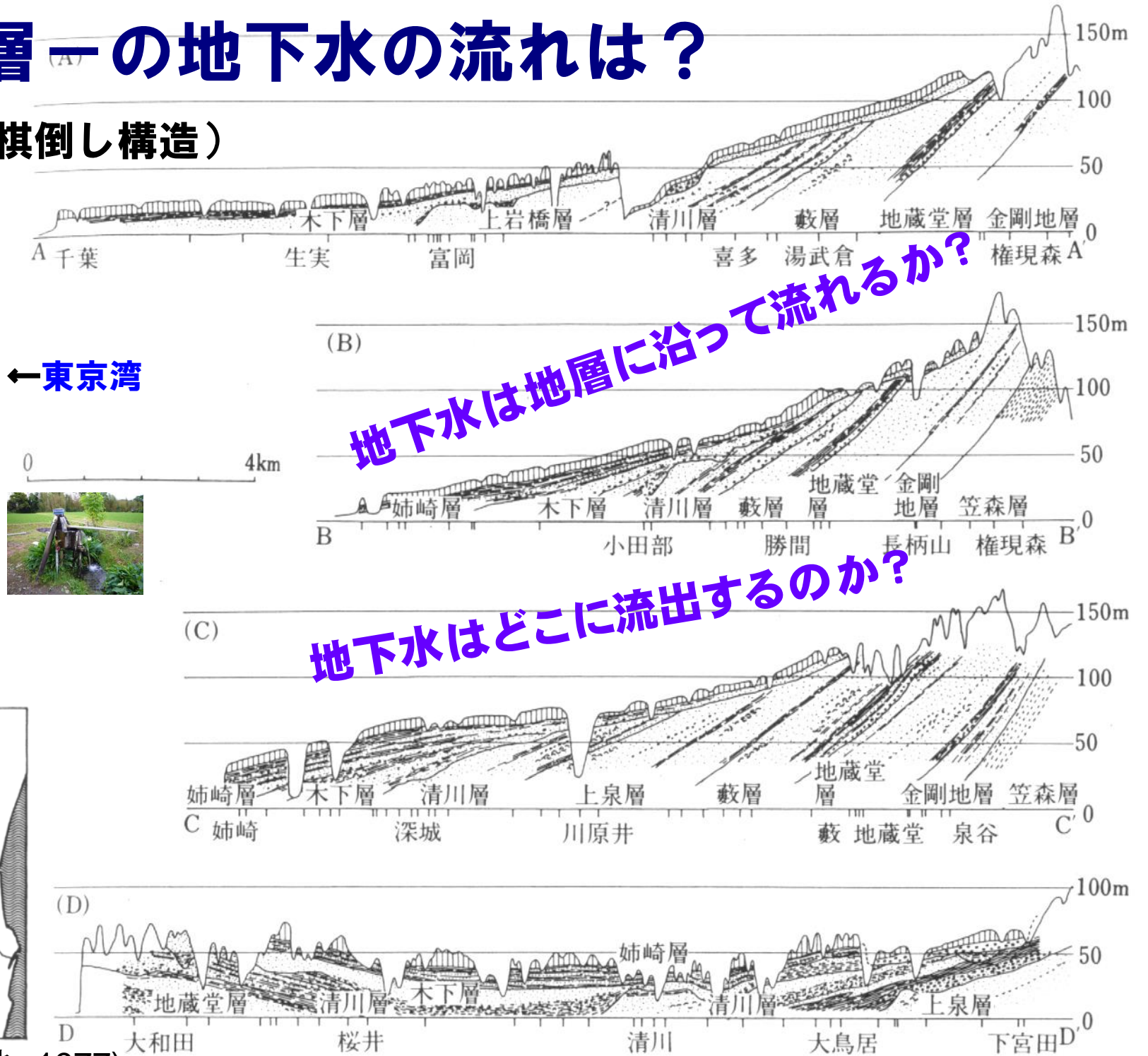


地下水が傾斜する砂層（帯水層）の傾斜方向に流れるのであれば、出口がなければならぬ。泥層は不透水層ではなく、難透水層。

- 関東ローム層
- 礫
- 砂
- 砂・泥互層
- 粘土, 砂質粘土
- シルト, 砂質シルト
- 軽石
- 貝化石
- 露頭の位置



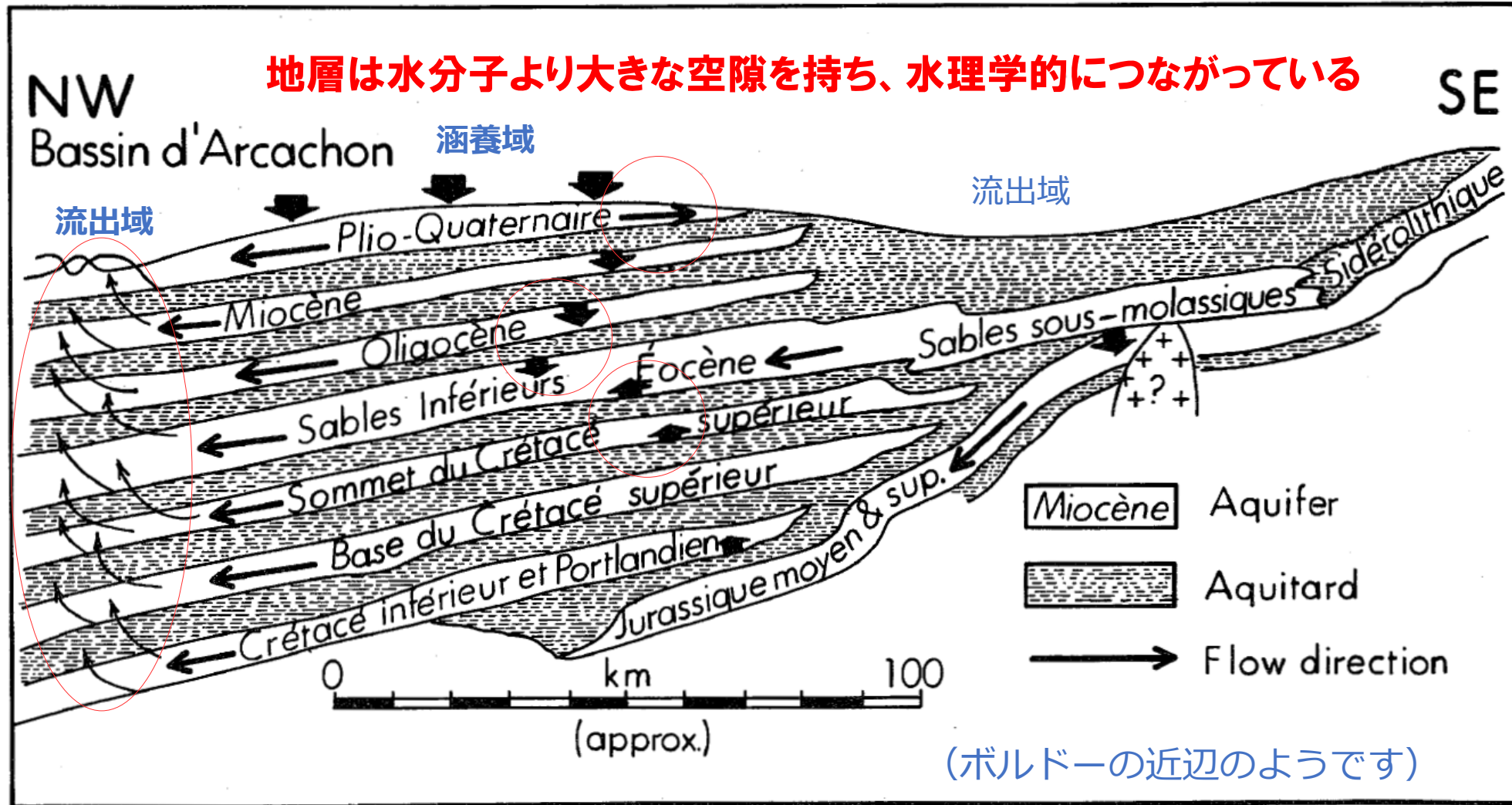
(菊池、1977)



Hydraulic Continuity in Large Sedimentary Basin

Tóth(1995), Hydrogeology Journal, 3(4)

Regional hydraulic continuity is a phenomenological property of the rock framework.



地下水の涵養域は地域の最高所

流出域は地域の最低所

難透水層を通過する地下水の流れがある

主要な地下水流動の経路となる層準（帯水層）がある

いつも地層の傾斜方向に地下水が流れるわけではない



Figure 3. Schematic of multiple-aquifer systems and computed flow rates, Aquitain Basin, France (modified from Besbes et al., 1976).

水は低きにつく・・・何の低きに？

ポテンシャル（水理水頭、全水頭）

水理水頭(h) = 高さ + 圧力

= 位置水頭 + 圧力水頭



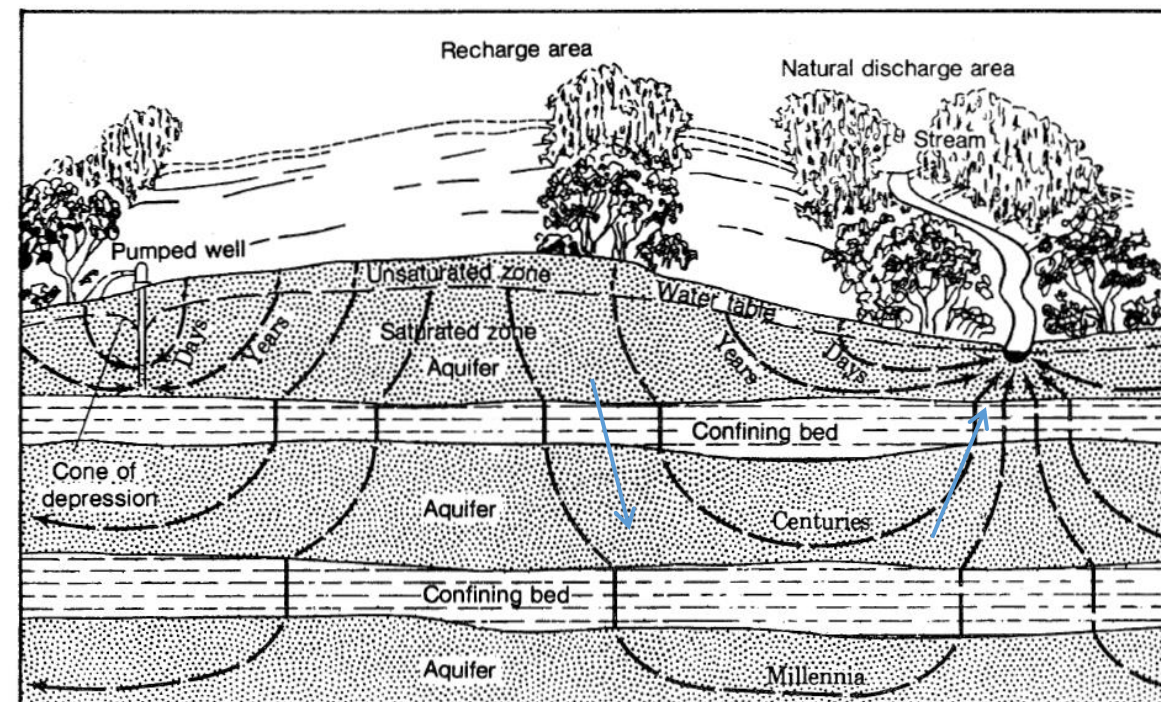
川の場合は圧力は0（大気圧）

水理水頭(h) = 位置水頭

地下水の場合

水理水頭(h) = 位置水頭

+ 圧力水頭



注) 水理水頭 h: hydraulic head

Tóth(1995)

地下水の運動

ダルシーの法則 (1856)

$Q=KA(h_2-h_1)/\ell$ 流出量Qは、水頭(h)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

$q=Q/A=-K(dh/d\ell)$

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)

$q=-Kgradh$

この図では、水は流れている。
水を流すことを止めたら、水頭
はどうなるでしょうか。

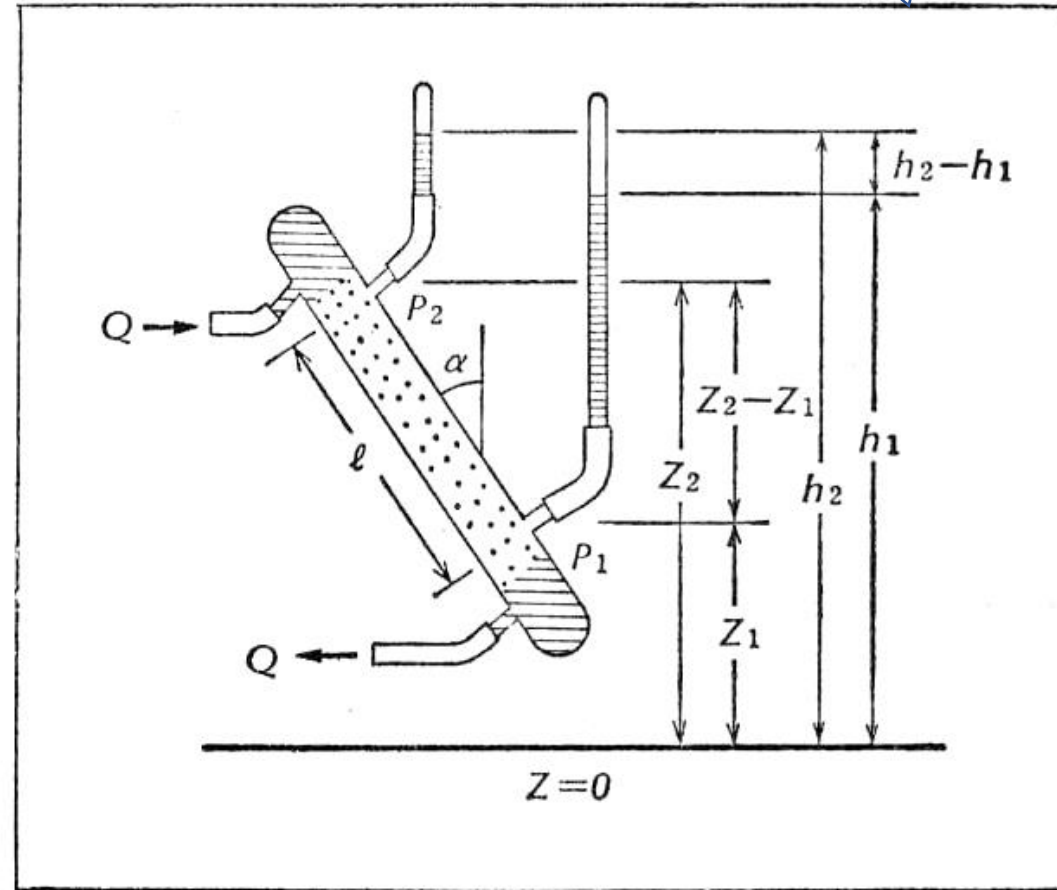


図 1.12 ダルシーの実験

(山本荘毅、新版地下水調査法、古今書院)

ピエゾメーターとは底部が地下水面と連続するパイプ（自作できる！）

ある深度の圧力水頭はピエゾメーター内部に立ち上がる水柱の高さ

位置水頭は、その場所の任意の基準面からの高さ

全水頭は位置水頭 + 圧力水頭

地下水は全水頭が勾配の方向に流れる



地下水の運動 基礎式

ちょっと難しいかも知れませんが、じっくり考えて

数式は難しく感じるかもしれませんが、その意味を考えて！

q_{xyz} はxyz方向のフラックス（単位面積を単位時間に通過する流量）

ダルシー式と連続の式を組み合わせると、（定常状態の）地下水流動方程式が導かれる

この式を h （水理水頭）について解くと地下水流動系の特徴が顕わになるのだ！



ダルシー式

$$q_x = -K \frac{\partial h}{\partial x} \quad q_y = -K \frac{\partial h}{\partial y} \quad q_z = -K \frac{\partial h}{\partial z}$$

$$q = -K \frac{dh}{dl}$$

流量は動水勾配に比例する

連続の式

入る量と出る量の和はゼロ

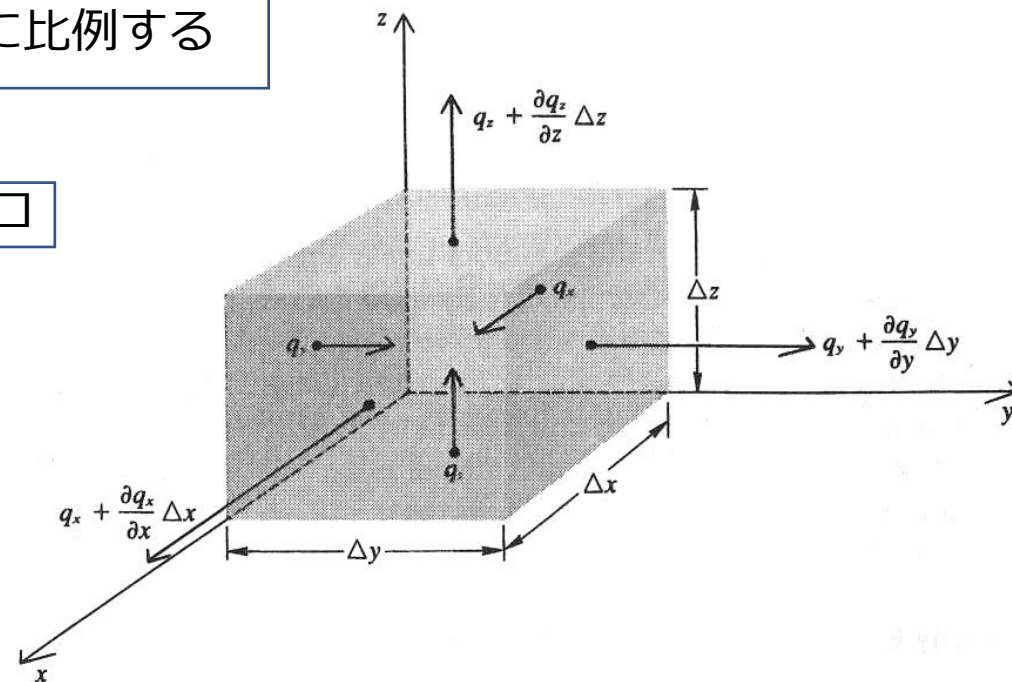
$$\frac{\partial q_x}{\partial x} + \frac{\partial q_y}{\partial y} + \frac{\partial q_z}{\partial z} = 0$$

組み合わせるとこうなる！

地下水流動方程式

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

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



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、等方・均質な媒体（帯水層）における定常状態の地下水のポテンシャル分布がわかる

○ポテンシャル（水理水頭）分布がわかれば流線がわかる

時間によって流れが変化する場合
は非定常といいます

非定常の場合は右辺に時間変化を表す項が入りますが、それは上級コースで！

ラプラスの式は差分法を使って簡単に解くことができます。
⇒アプリを作ることはできないかなあ



Tóth (1963) の計算

●地下は見えないので数学的に地下水の流れを計算

ラプラスの式を解析的に解いた→地下水学の古典

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



尾根

Topographic high

地下水は見えない!

Tothが最初にラプラスの方程式を解析的に解いた

矩形の帯水層を仮定し、左右下面は不透水境界、上面を地下水面として地下水面標高（すなわち位置水頭 = 全水頭）を与えた

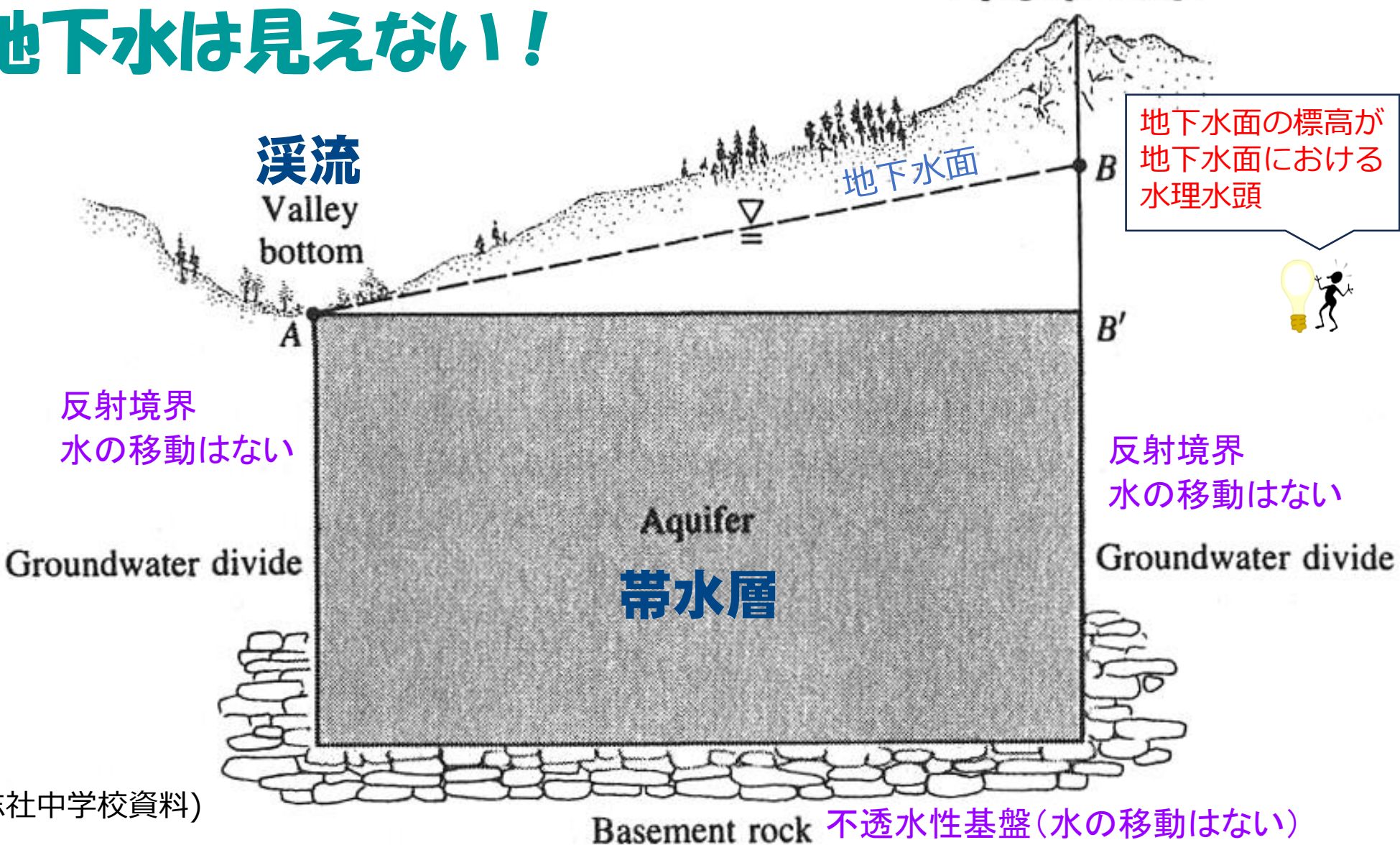
帯水層は等方均質、ひとつの透水係数を持つと仮定

それでも、多様な地下水流動のあり方を示すことができた

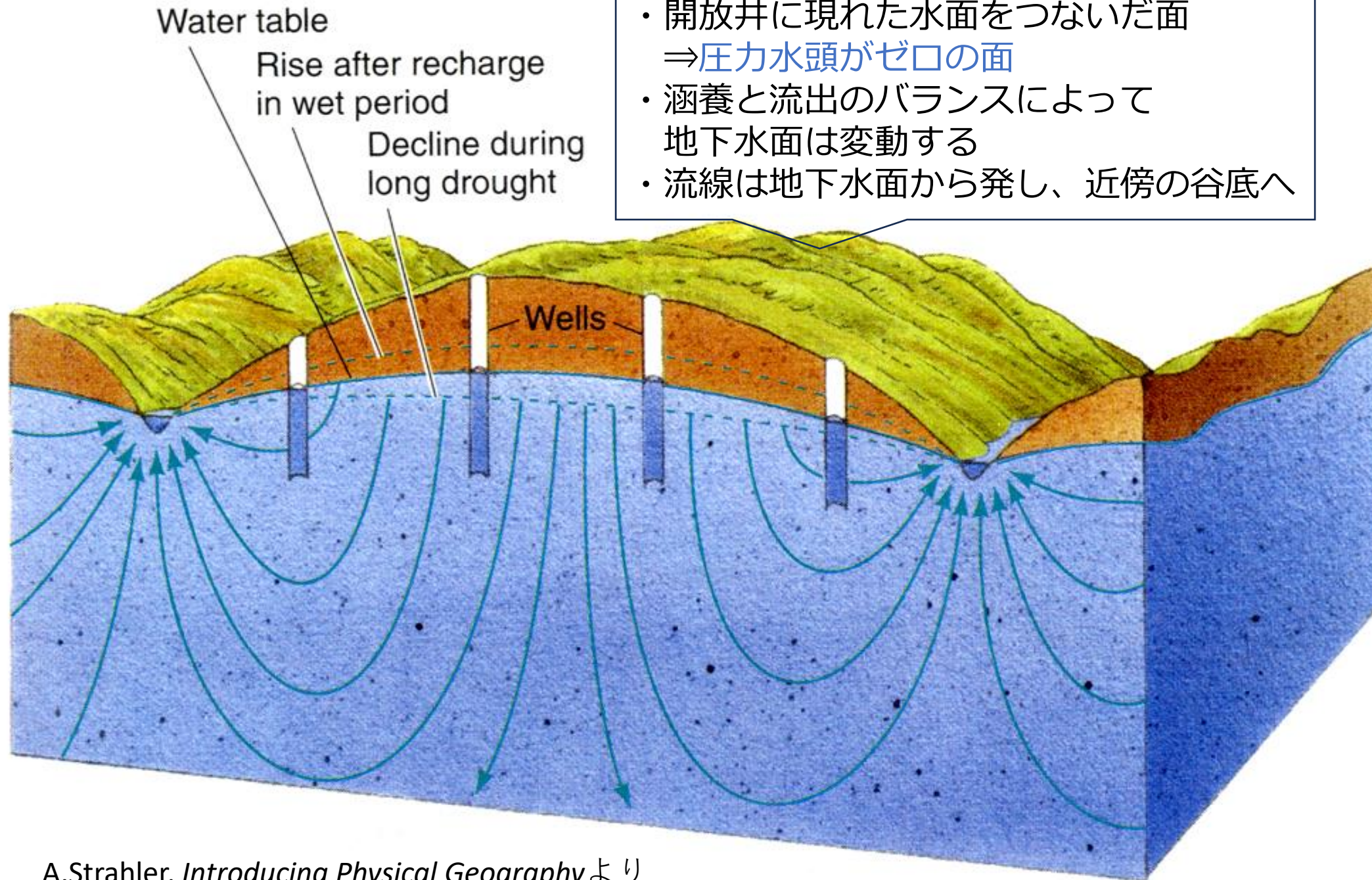


タイガー計算機

(同志社中学校資料)



地下水面とは何か？



- 開放井に現れた水面をつないだ面
⇒ 圧力水頭がゼロの面
- 涵養と流出のバランスによって地下水面は変動する
- 流線は地下水面から発し、近傍の谷底へ

地下水面は不飽和帯と飽和帯の境界（毛管水帯と地下水体の境界）

圧力水頭がゼロ（大気圧）の面として定義できる

浸透（浸潤）・降下浸透により飽和帯（地下水）に付加される地中水と、地下水面から流動していく地下水の量がバランスする面（動的平衡）

水収支の変動によって、地下水面の位置も変動する



Tothの計算結果を見てみよう

左端に大河川、右端が流域界となっている波丘地を仮定

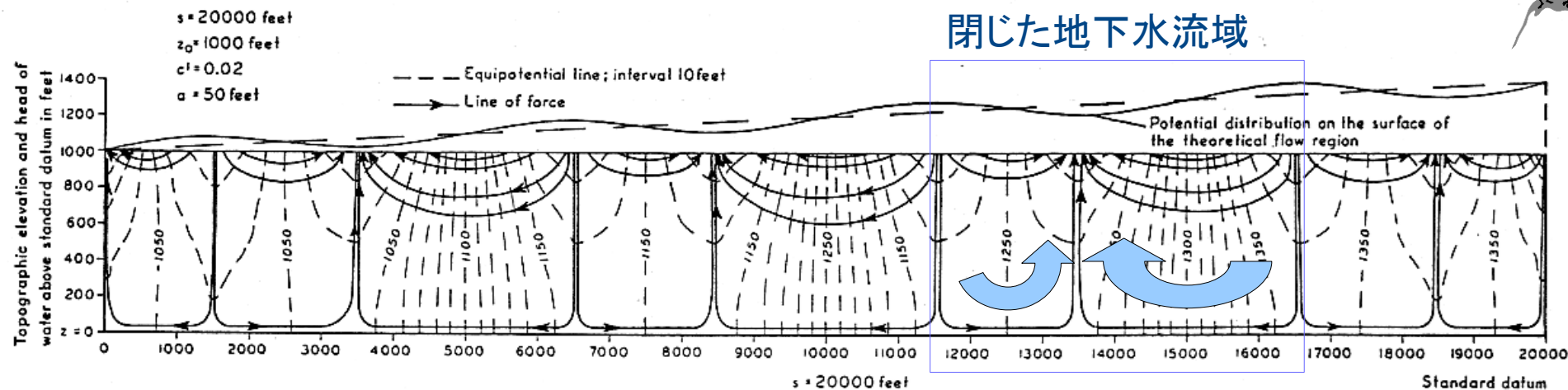


Fig. 2a. Potential distribution and flow pattern as obtained by equation 6.

上面の地下水面標高としてサインカーブを与えた

カーブの凸部は尾根、凹部は低地を表す (⇒想像しよう!)

すると、隣り合う尾根と低地の間に閉じた地下水流動系が現れた

地下水面の勾配を大きくすると、流域最高所から最低所に向かう地下水流動系が閉じた地下水流動系の下部に形成された

このことの示唆することは?

→ 流線

地域全体の勾配が大きくなるとどうなるか?

注) 帯水層は等方・均質

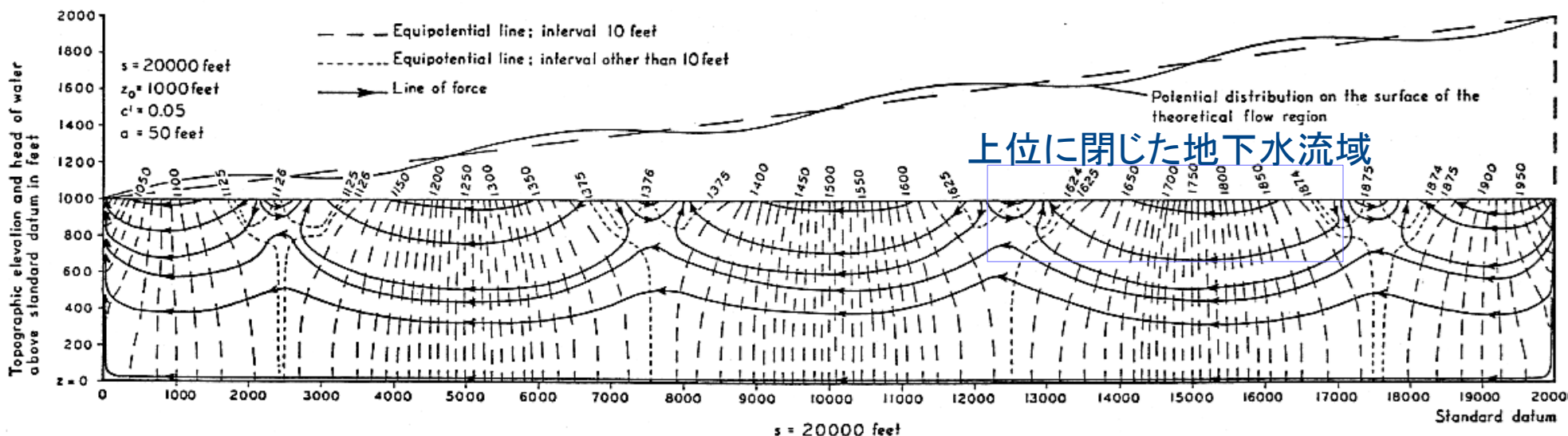


Fig. 2c. Potential distribution and flow pattern as obtained by equation 6.



Tóthが到達した地下水流動系の概念

Tothは多様な境界条件のもとで計算を繰り返すことによって、地下水流動系の概念に到達した

地下水流動系は階層構造を持つ

それは地下水面の凹凸が作り出す

帯水層が均質でも地下水の流れは複雑多様なのだ

それでも地下水流動系の概念を理解していれば、現場を観察することによって地下水の流れを推定することができるのだ！

地下水流動系は裏切らない！！

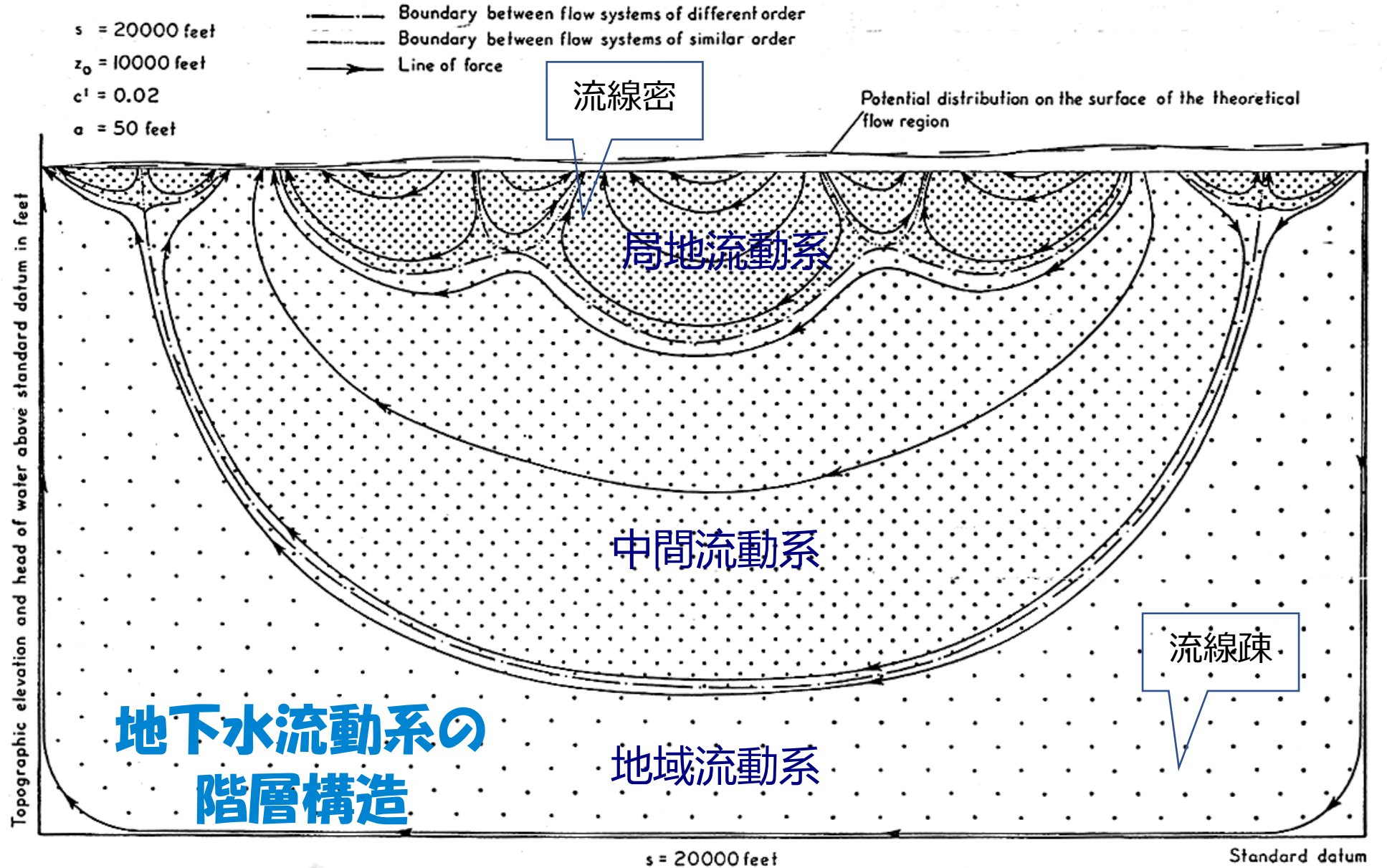


Fig. 3. Theoretical flow pattern and boundaries between different flow systems.

Tóthのモデルは地下水盆の深度がちょっと大きすぎるように見えますが？



砂泥互層 (千葉県中央博HP)

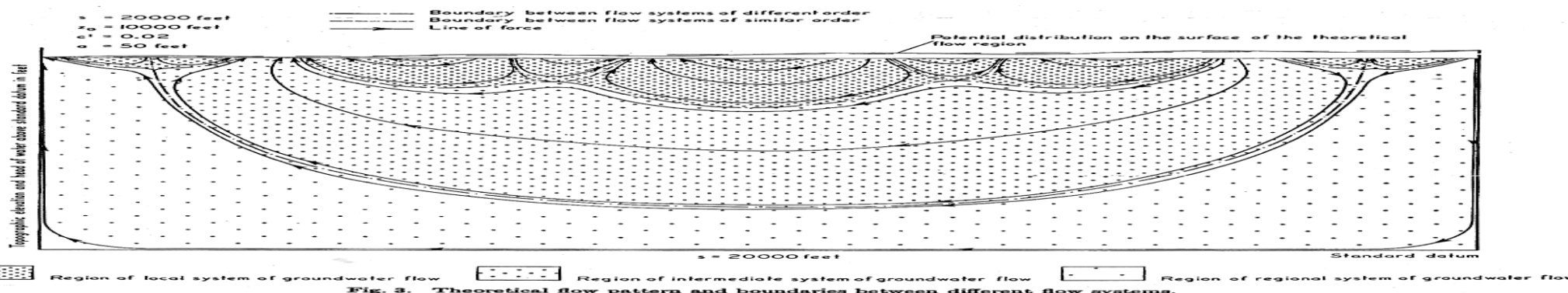
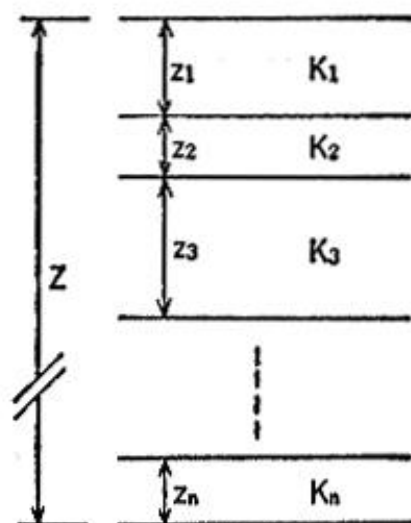


Fig. 3. Theoretical flow pattern and boundaries between different flow systems.

- 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)

Tóthの計算は解析解なので、複雑な境界条件は設定できなかったのですね。

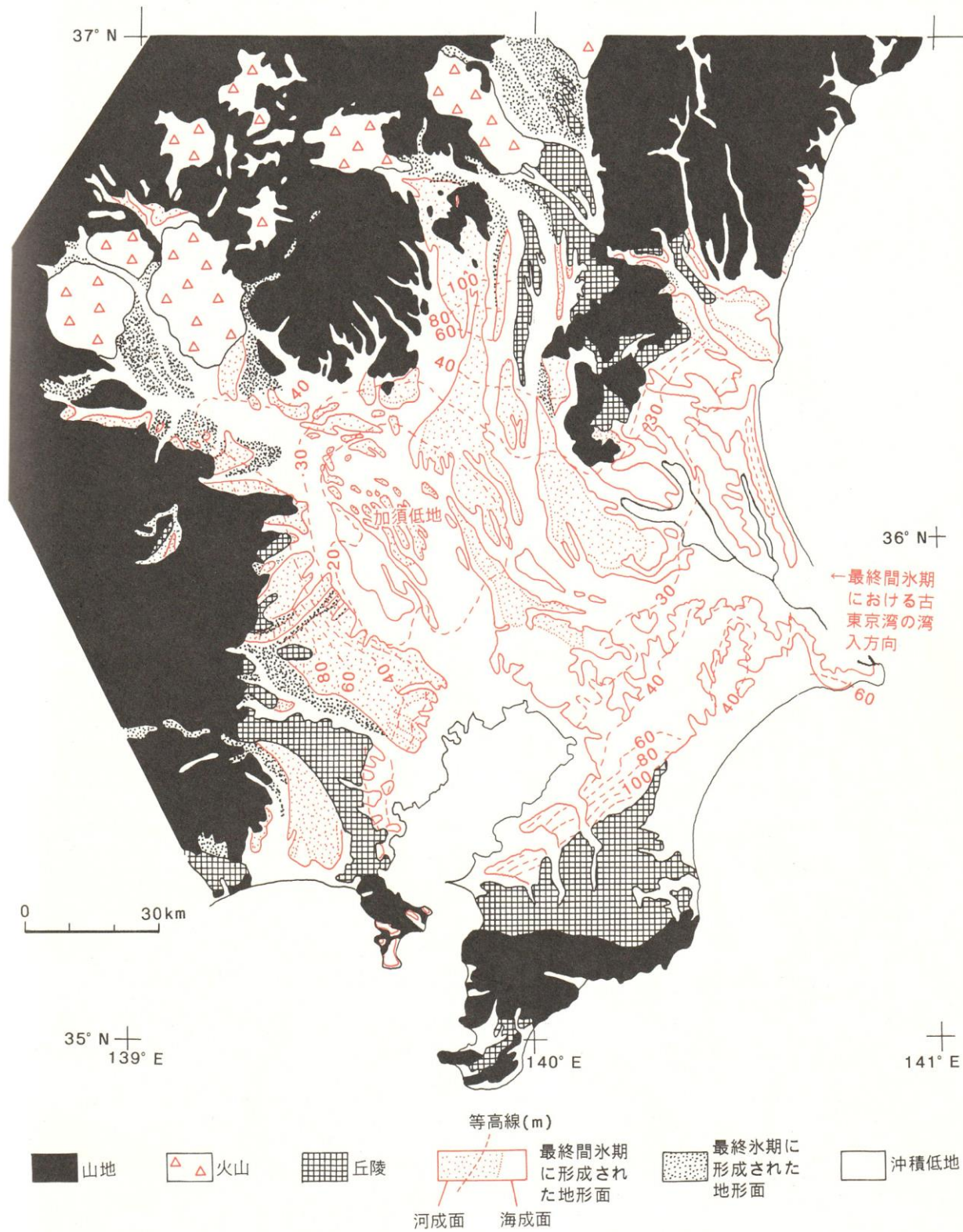
水流によって形成された地層は砂泥粒子の配列に異方性があります！



Tothの演繹的な研究から明らかになったこと

- 湿潤地域では地形の高まりは地下水面の高まりとなる 注)
- 地下水は地下水面の高まりから、近傍の最低所に向かって流れる
- 涵養域では地下水の流線は下向きの成分を持つ
- 流出域では上向きの成分を持つ
- 薄い粘土層の上下では圧力差が大きくなり、粘土層を通した流れが生じる
- 地下水の流れは遅い
- 涵養された水の80～90%は局地流動系を
通って流出する

注) 乾燥地域では過去の気候条件で形成された地下水面の勾配が維持されていることもある



涵養された水の80～90%は局地流動系を流れて流出するという...

ミクロとマクロの視点で考えよう！

- ・ 関東平野は**低地**・**台地**・**扇状地**から構成される
- ・ 関東平野（地下水盆）の地下水流動系の構造は地形に対応した階層構造
- ・ 関東平野に降った雨はどこに行く？
- ・ 周辺の扇状地と平野の地下水の関係は？
- ・ 人間活動（都市化や揚水）が地下水流動系を変えていないか？
- ・ **地質、地形、土地被覆が作り出す地下水流動系の構造を想像する力！**

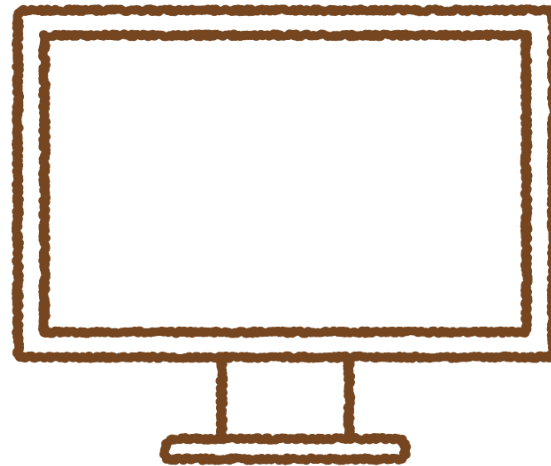
(風景のなかの自然地理、古今書院より)

Tothはもっとも単純な地下水
流動方程式を解析的に解いた

Freeze & Witherspoonはコン
ピューターを使って数値的に
解いた

そのことにより、複雑な境界
条件を地下水モデルで考慮す
ることが可能となった

これも演繹的な成果だが、地
下水流動の本質について得ら
れることは多い！



コンピューターの時代がやってきた！

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.

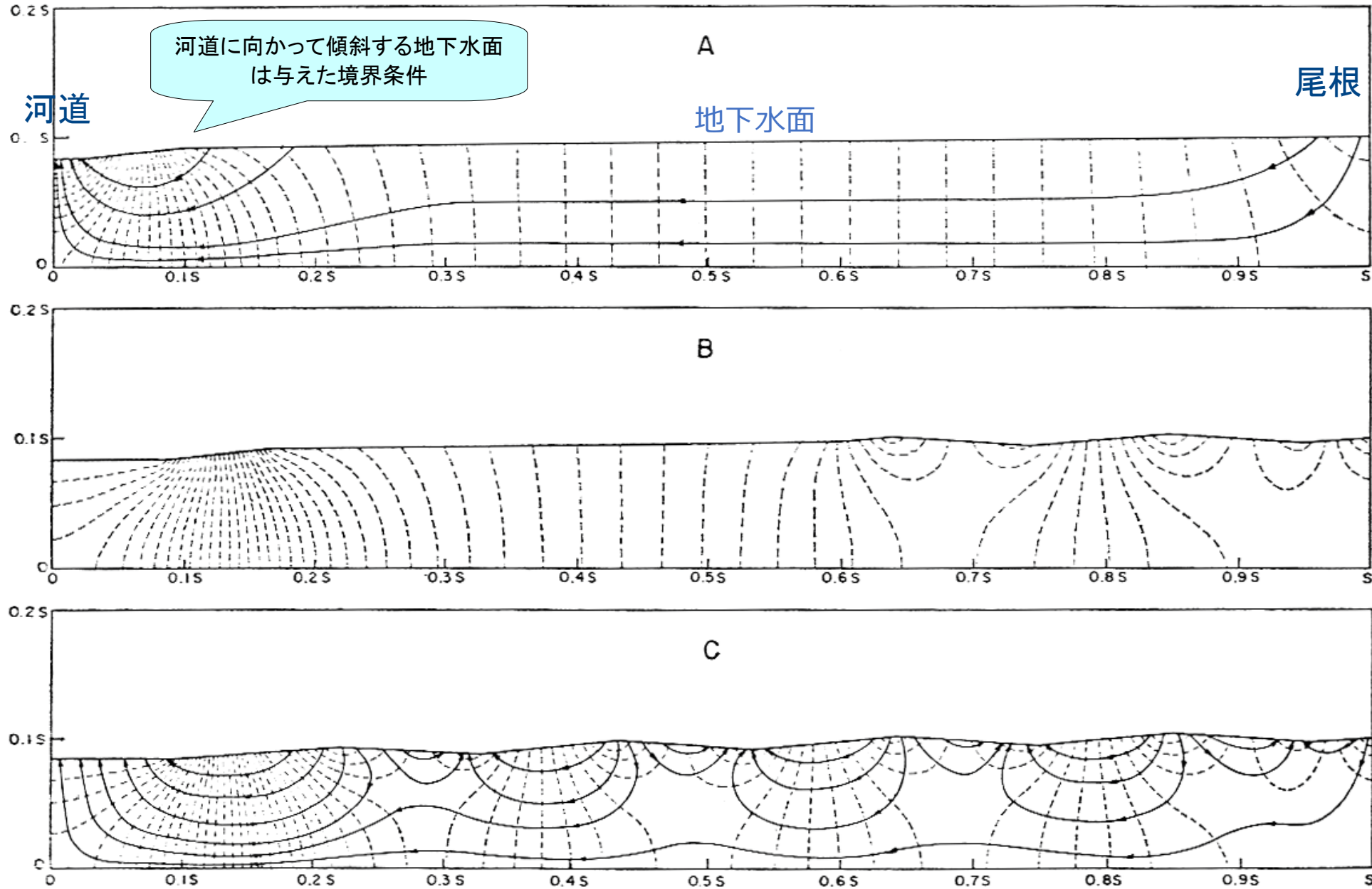
Freeze and Witherspoon(1967): Theoretical analysis of regional groundwater flow: 2. Effect of water-table configuration and subsurface permeability variation. *Water Resour. Res.*, 3, 623–634.

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

よい論文はプログラムを再現できる論文。初歩的な差分法の知識があれば自分でプログラムを書き、地下水流動系の理解を深めることができるぞ。



地下水面形状の効果—等方・均質帯水層における—



この計算では地下水面標高を境界条件として与えている

実際の地下水面の位置は、地下水面への涵養と、地下水面からの流出の動的平衡によって決まることに注意

本来は地下水面における水収支に基づいて地下水面の位置を決めなければならないが、初期の成果ということでご容赦！

なお、地下水面におけるフラックスはダルシーの法則で計算できる

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

考えてみよう！

地下に透水性の地層（例えば、溶岩層）が埋没している場合の流線、あるいは動水勾配はどうか

地下水の流動量はどの帯水層が大きくなるか
⇒ダルシーの法則に基づいて考えてみよう

地下水流動は透水性の高い層が主体となる

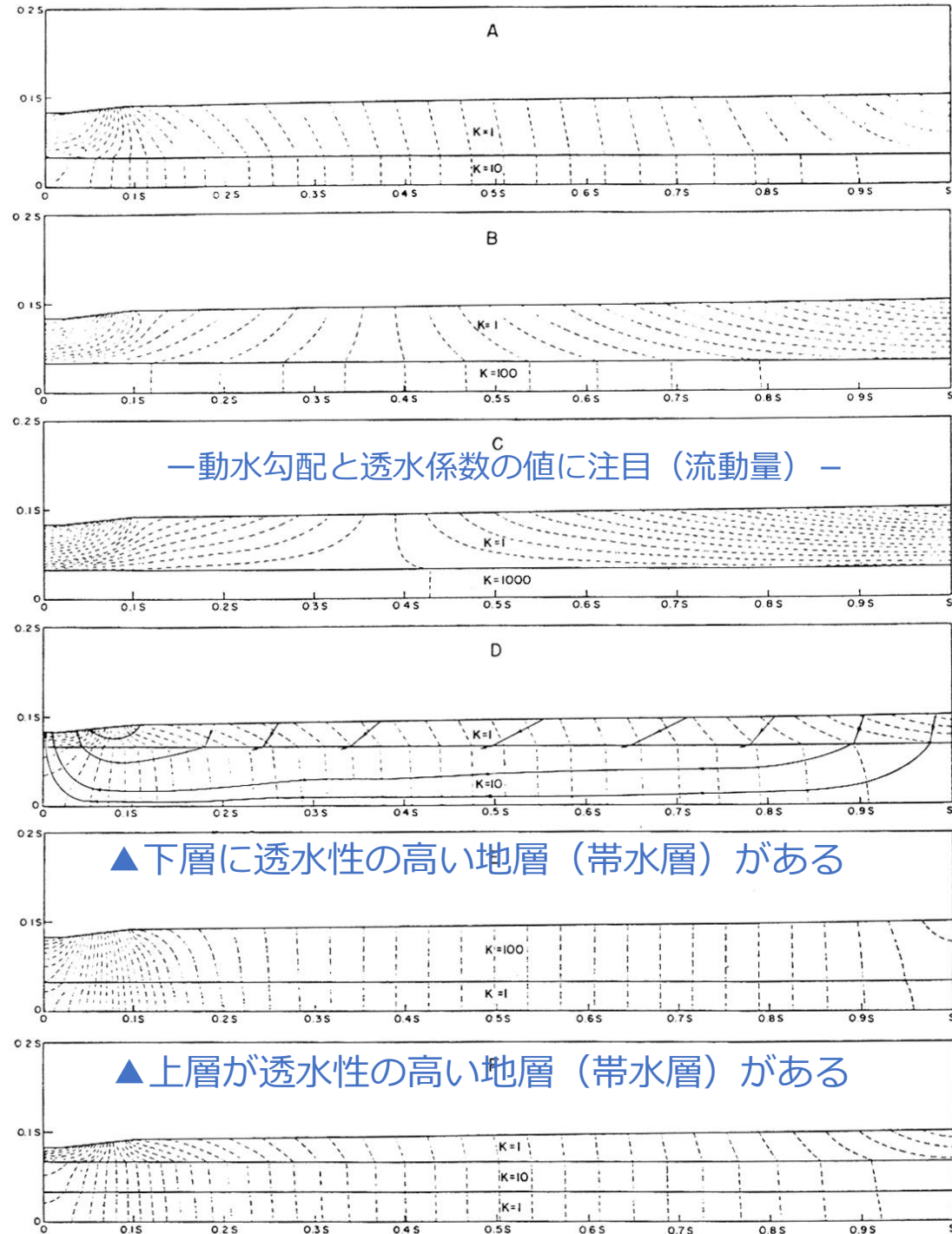


Fig. 2. Regional groundwater flow through layered media with a simple water-table configuration.

解析解では解けない問題
も数値解なら解ける！

近藤は差分法による簡単な数値解析で、地下水流動系の性質を学んだ



ハンモッキー・タレインにおける水平な透水層の効果

ハンモッキー・タレインとは北アメリカ大陸北部のローレンタイド氷床が後退した後にできた緩やかな波丘地であり、多くの先駆的な地下水流動系研究の成果を生んだ

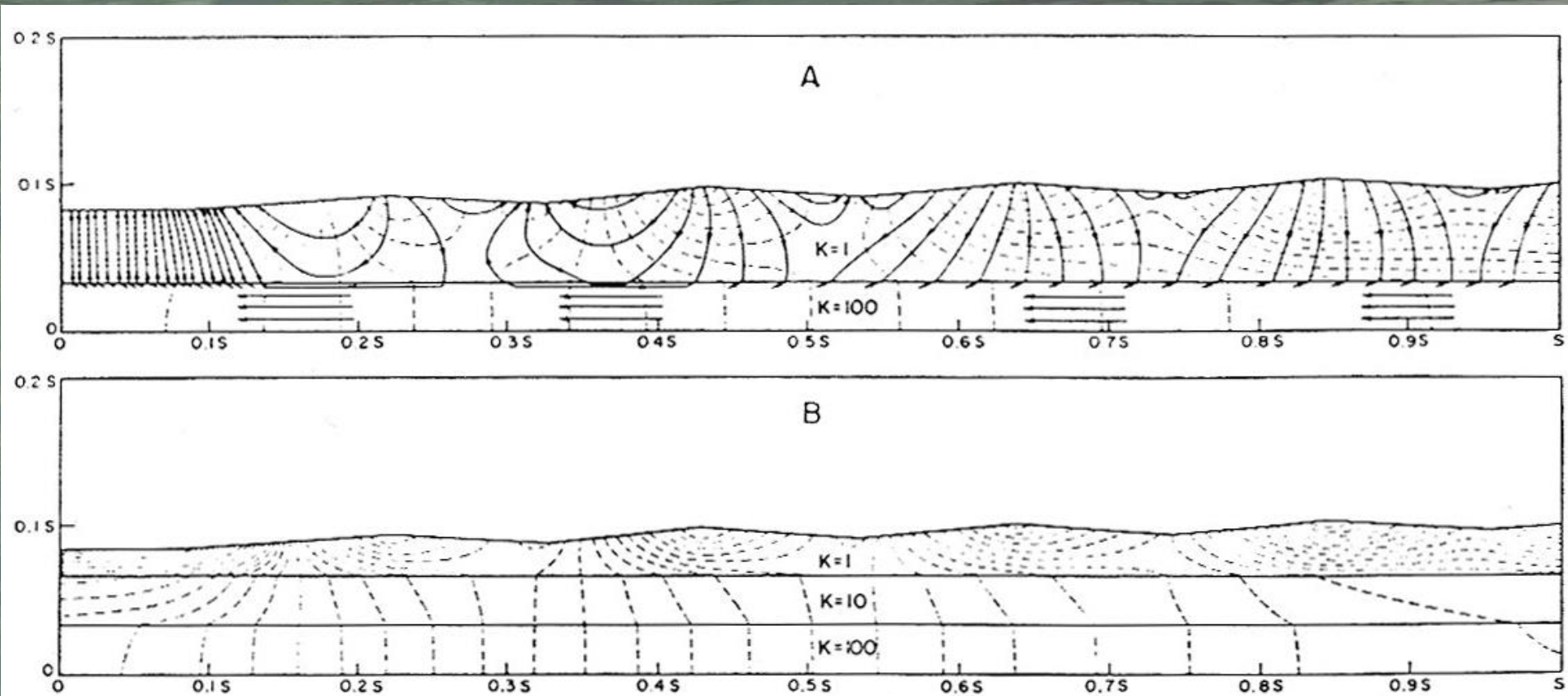


Fig. 3. Regional groundwater flow through layered mediums with a hummocky water-table configuration.

阿蘇火山

熊本平野

(例)熊本の砥川溶岩

©Google

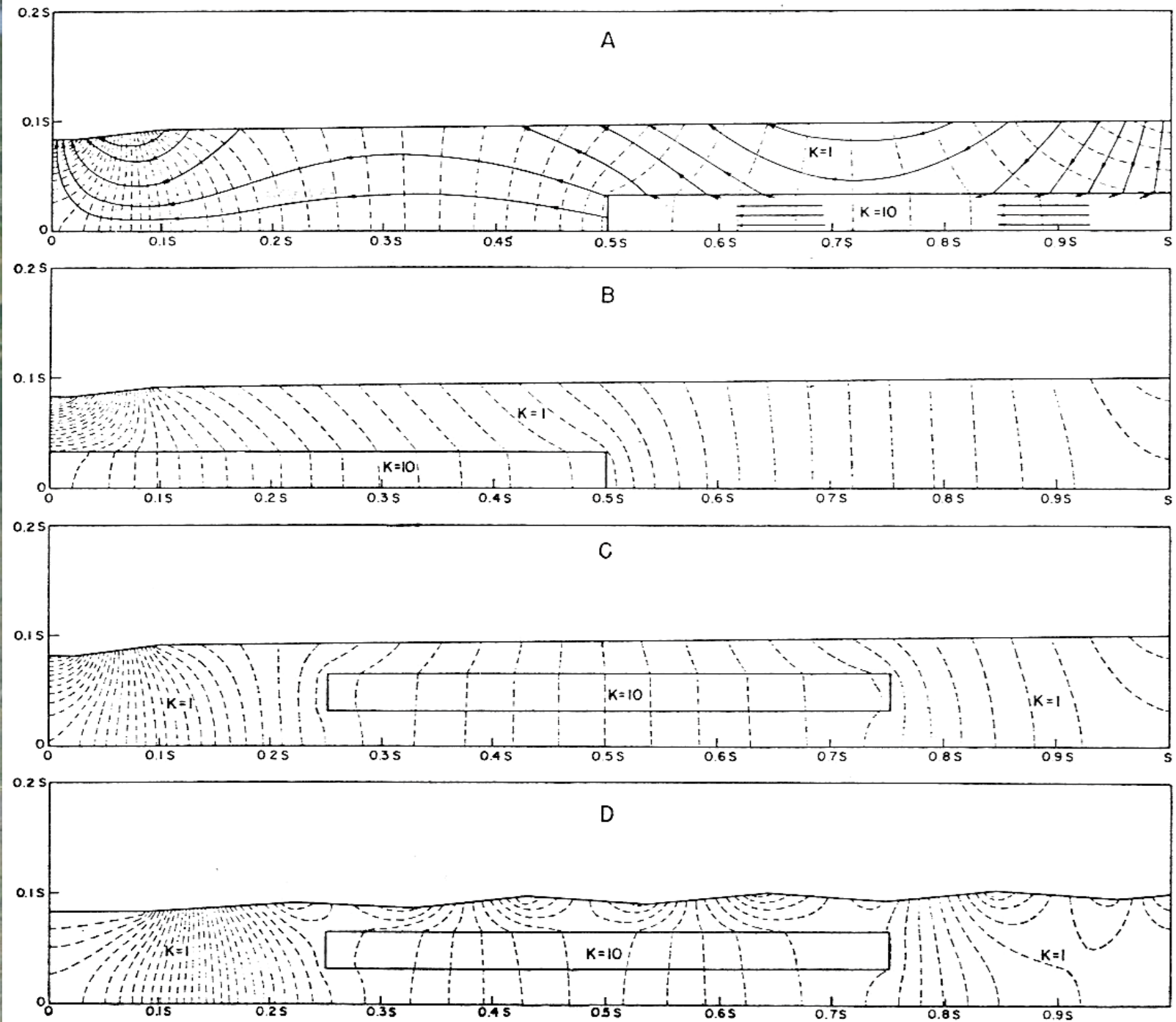
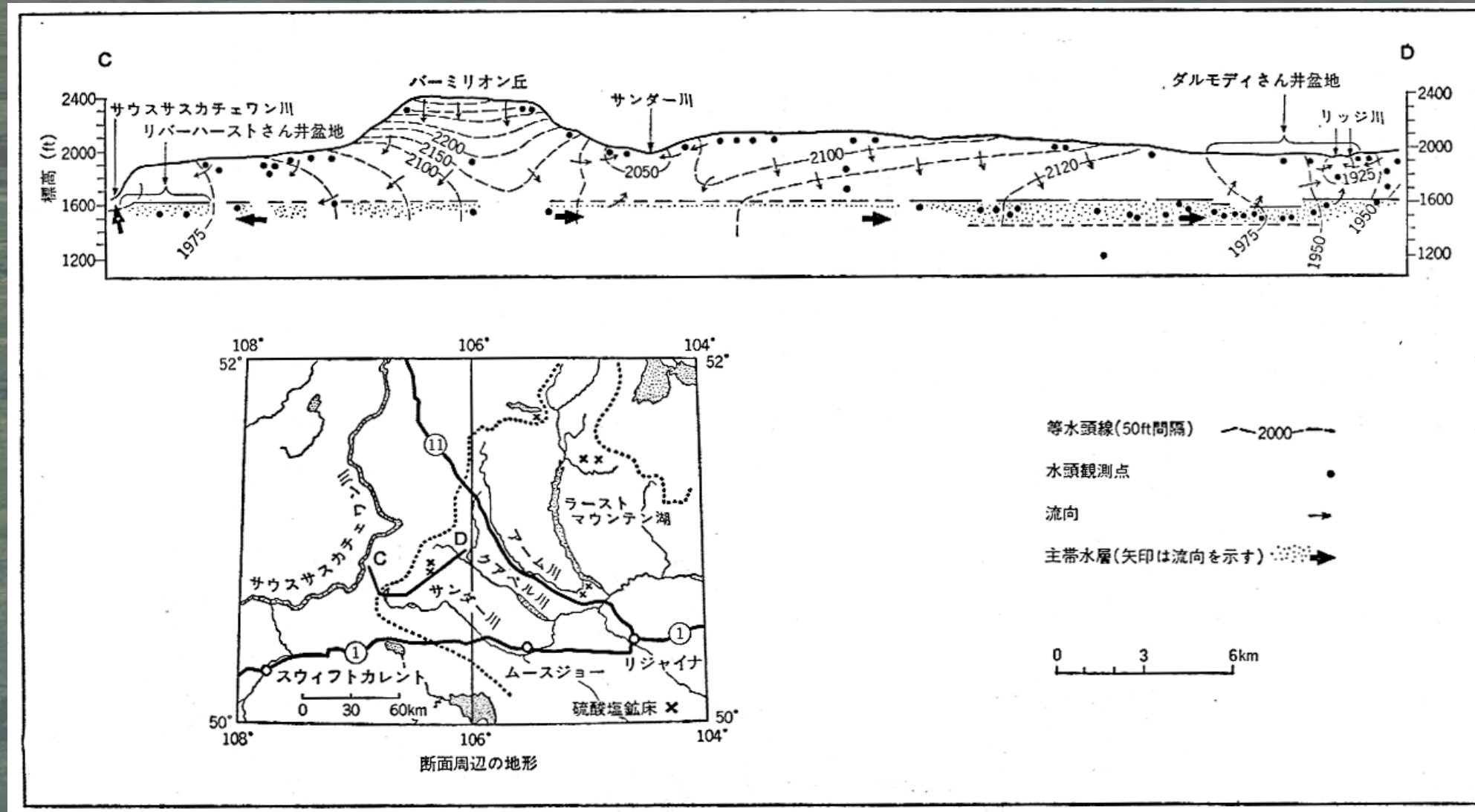


Fig. 4. Regional groundwater flow through partial layers and lenses.

地表に現れない帯水層が地下にあったら？

現実世界に地下水流動系は存在するのか



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 湿潤地域における地下水面の形状を決める地形の重要性
- 地下に水平な透水層がある場合の地下水流動系

傾斜する地層の効果 千葉県下総層群、上総層群の単斜構造

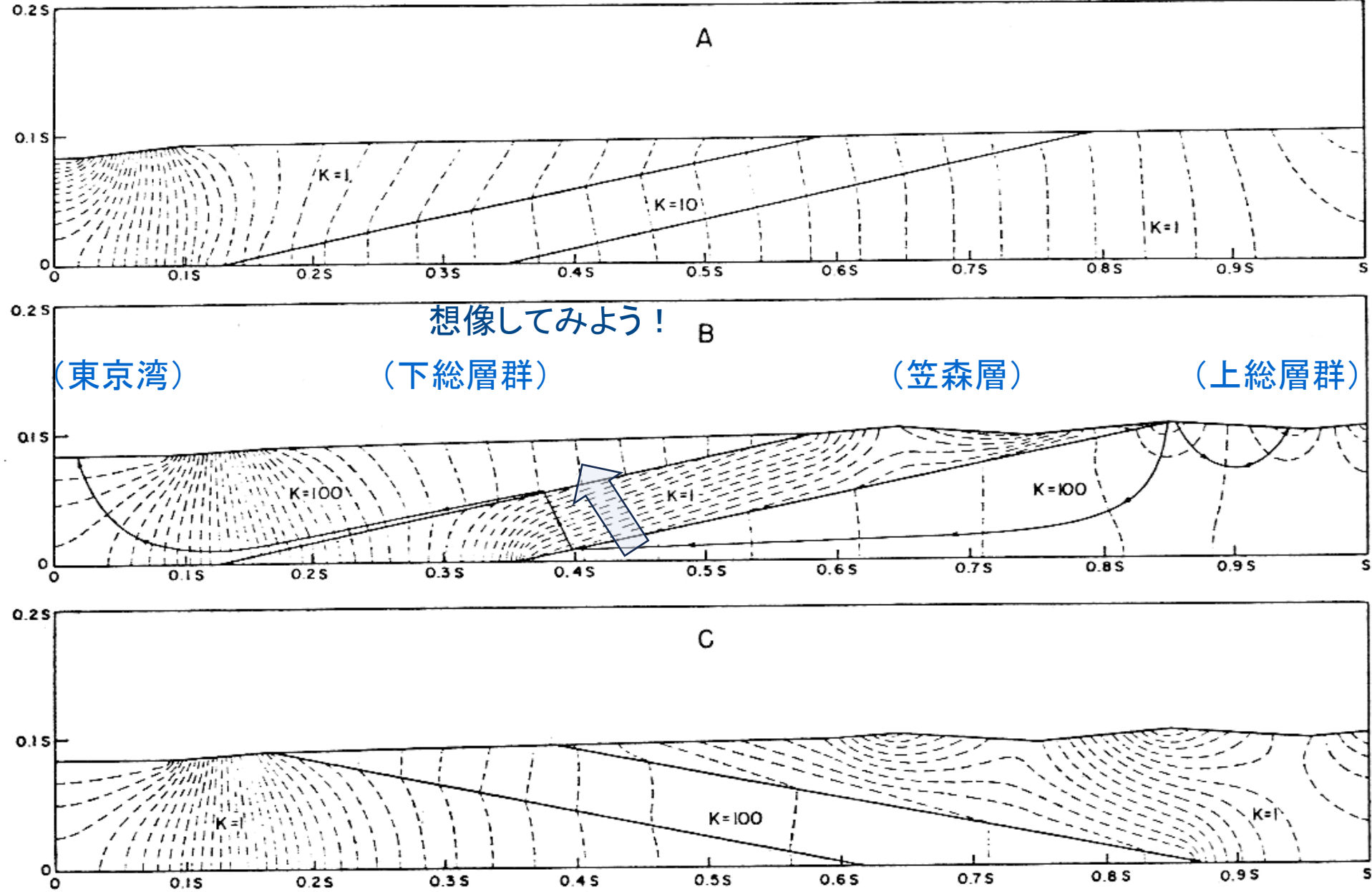
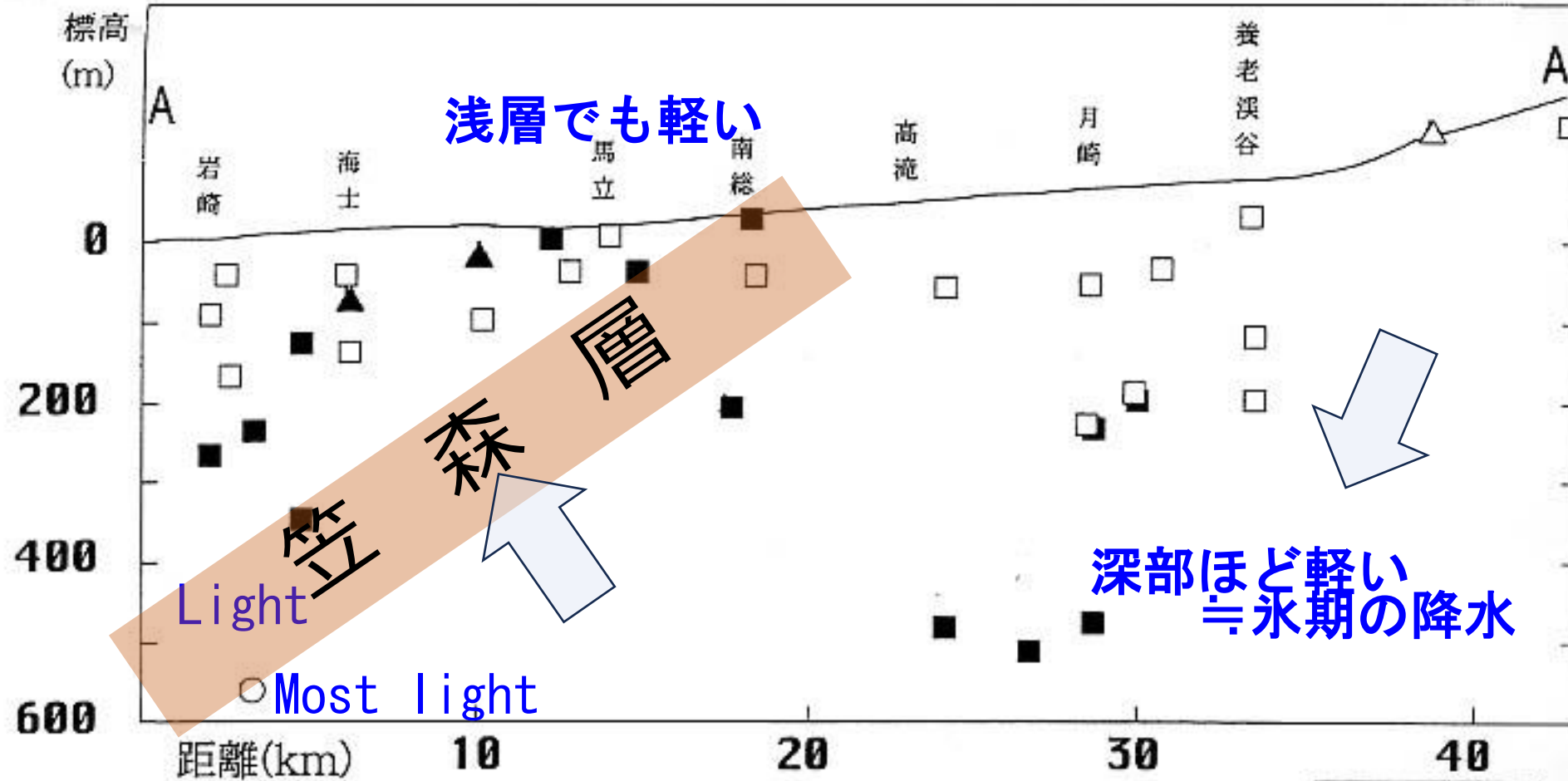


Fig. 5. Regional groundwater flow in regions of sloping stratigraphy.

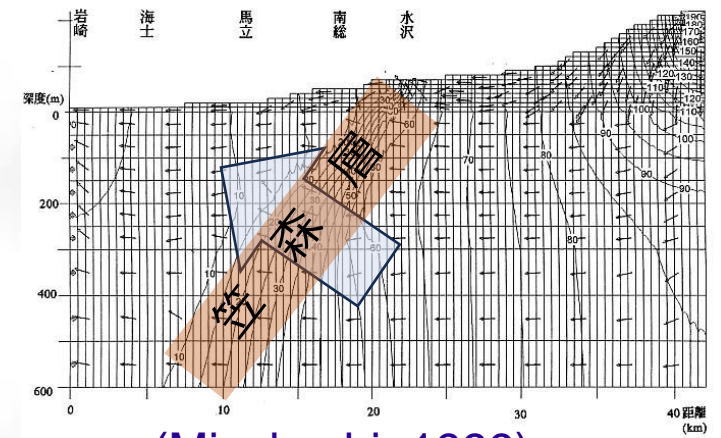
^{18}O content 軽い→寒冷期に涵養→古い水

Tokyo Bay

Upper stream of the Yoro River



(笠森観音公式HPから)



(Miyakoshi, 1999)

笠森層（難透水層）を上向きに通過する流れは安定同位体（紺野、1995）や数値モデル（宮越、1999）で再現されている

Distribution of Oxygen Isotope Content
●Light denotes Old Water, and vice versa.

△	>-6.2
▲	-6.3~-6.7
□	-6.8~-7.3
■	-7.4~-7.9
○	<-8.0

Konno(1995)

千葉大学故佐倉研究室
における卒論・修論



地下水流動系の要点 – 地下水流動系を決める二つの要因 –

地形要因 ⇒ Tothの地下水流動系の概念で地下水流動の概観を掴む

- ・ 広域の地下水流動を概観する際には、地下水の流れを三次元的に捉える
- ・ 基本的な地下水流動系の構造は地形、すなわち地下水面の形状（地下水を駆動するポテンシャルを表す）から考える

地質要因 ⇒ 地下水流動系を修飾する要因を考える

- ・ 建設工事等の局所的な地下水流動を開析する際には地質構造の不均質性が、地下水流動に大きく影響する

(新藤・石川、地下水学会誌)

Table 1 The dominating factors on groundwater flow systems in the Dejima area.

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		地質要因 $10^1 \sim 10^2 \text{ m}^2$		$10^4 \sim 10^6 \text{ m}^2$ 地形要因
自然 的 要 因	地質 要 因	<p style="text-align: center;"><u>堆 積 相</u></p> <p>(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。)</p>		<p style="text-align: center;"><u>堆 積 層 位</u></p> <p>(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。)</p>
	地形 要 因	<p style="text-align: center;"><u>部 分 地 形</u></p> <p>(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。)</p>		<p style="text-align: center;"><u>1 ~ 2 次 谷 流 域</u></p> <p>(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)</p>

(堆積構造)

(砂泥互層)

(台地・低地系)

注) 新藤静夫の地下水四方山話 (地盤環境エンジニアリング株式会社) に集大成あり

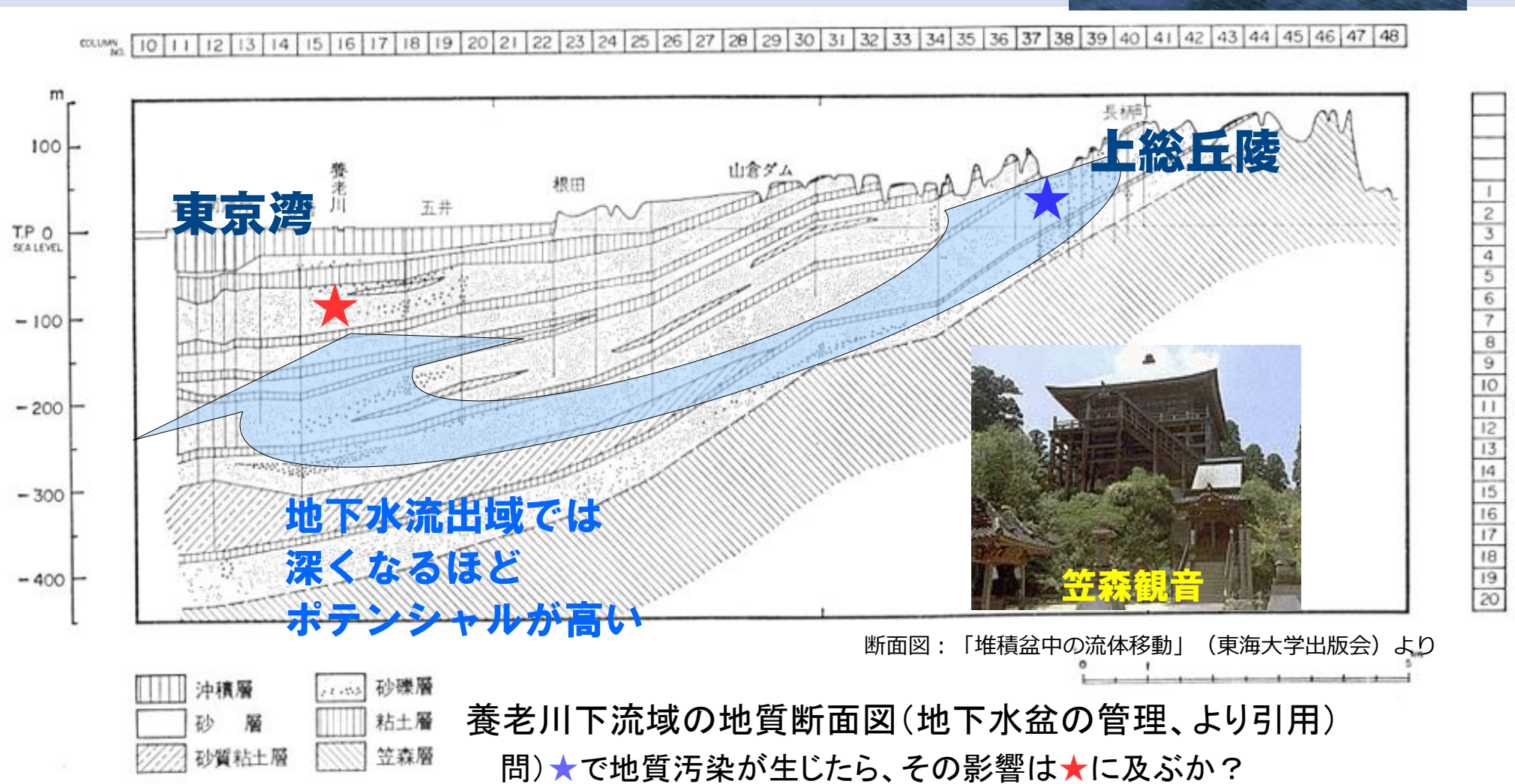
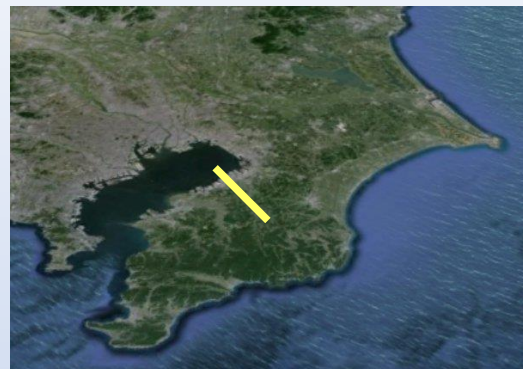
<http://www.jkeng.co.jp/column.html>

水理水頭の分布を地形・地質からみる

大きなスケール 地形をみる

小さなスケール 地質をみる

注) 三次元的にみることを忘れずに!



Q: 単斜構造を呈する砂泥互層において、下位の帯水層の上流側の露頭付近で地下水汚染が発生したら、影響は下流の層準が異なる帯水層に及ぶか?

地下水流動系の概念と、Hydraulic continuityの考え方を思い出してください。

影響が及ぶ可能性はある。ただし、**地域流動系**では時間はかかる。

むしろ、**局地流動系**への影響が大きいだろう。

ここから先は問題の人的側面



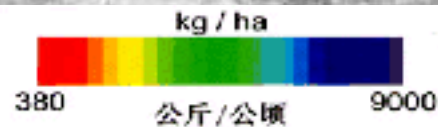
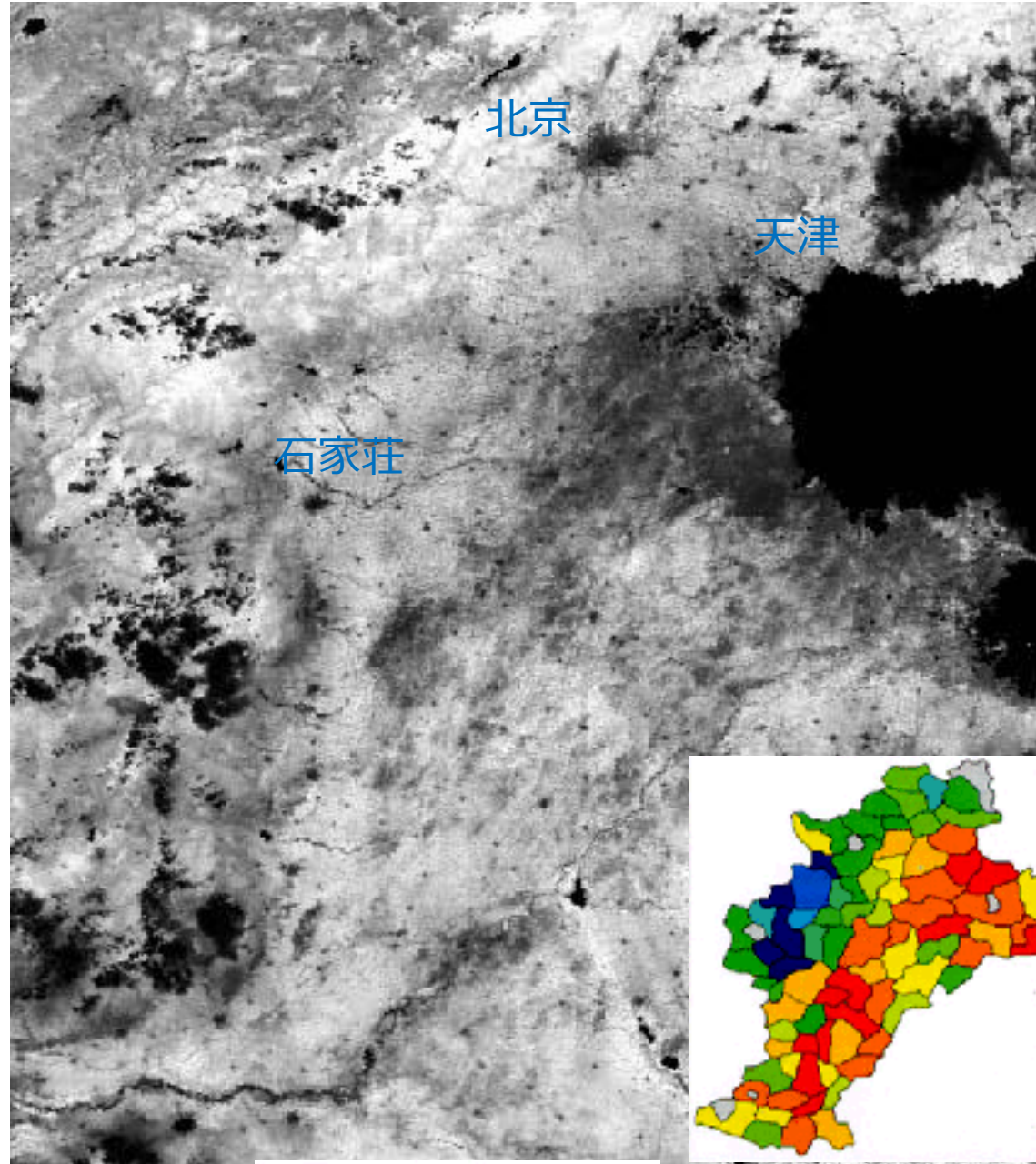
【閑話休題】1997年8月11日中国河北平原の植生指標画像

人工衛星で計測できる植生指標から、地表に植物がどれだけあるか、ここでは作物がどれだけ育っているか、判読することができる。

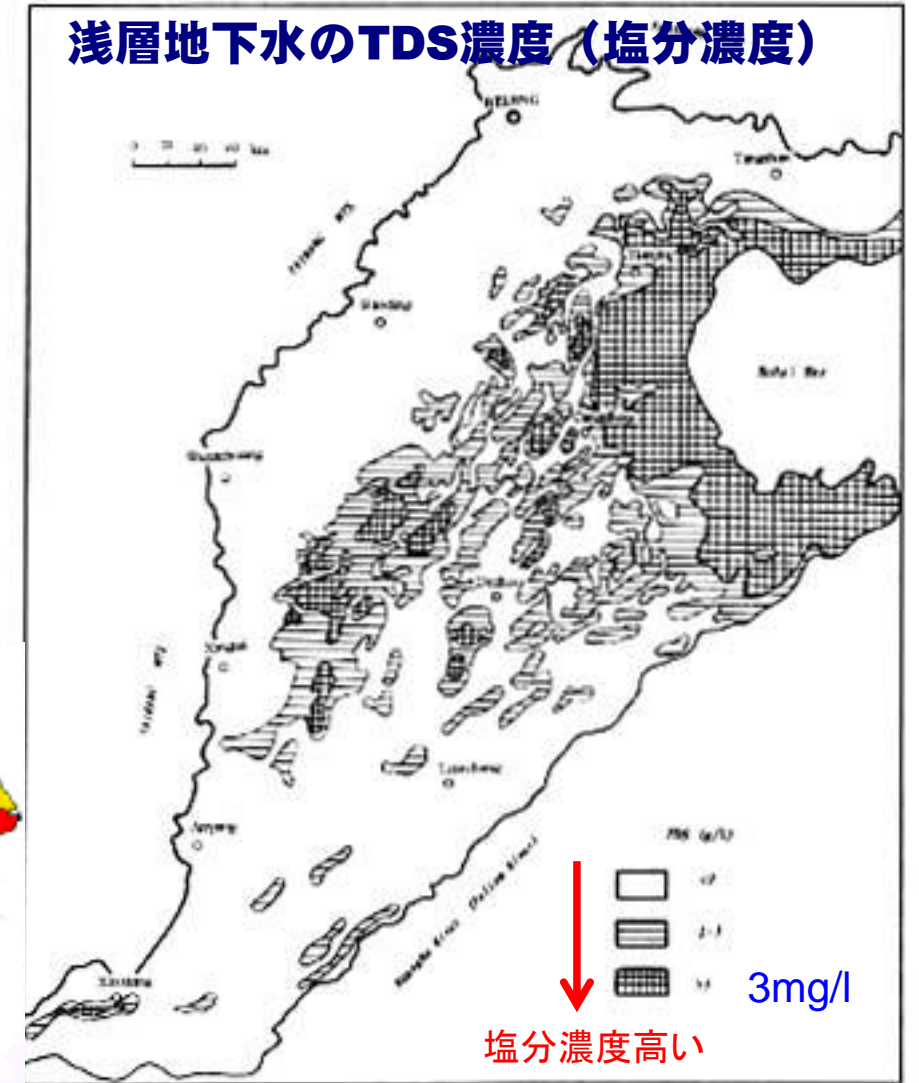
黒い部分は作物が育っていない領域を表す。なぜだろうか？

浅層地下水の塩分濃度の分布図と比較してみよう！

⇒地下水流動系に対する地形(地下水面)の効果は大きい



浅層地下水の塩分濃度が穀物生産量を決めている



1992年(早魃年)のコーン生産量(CAS)

(Fei,1997)

華北平原の地形分類図 (Wu et al., 1998)



扇状地の水循環から淡水資源を利用

扇端部、旧河道の地下水流出域では塩分濃度が高くなる

①地域性で穀物生産量分布が説明できる

黄河からの取水口。济南の近く。2000年。



黄河の水は山東省では灌漑に使えるが、河北省東部では都市用水が優先され、灌漑に使用できない

②政策によっても穀物生産量分布は変わる

作物（ここでは小麦とトウモロコシ）の生産量が多い地域は：

- 扇状地

生産量が少ない地域は：

- 扇状地の前縁
- 旧河道
- 三角洲

個々の地形单元に対応して、どのような水循環が想定できるか、考えてみよう！



[復習] 地下水流動系わかってきたでしょうか！

お水取りの水を汲む若狭井の水は若狭から来た？ 水は低きにつく

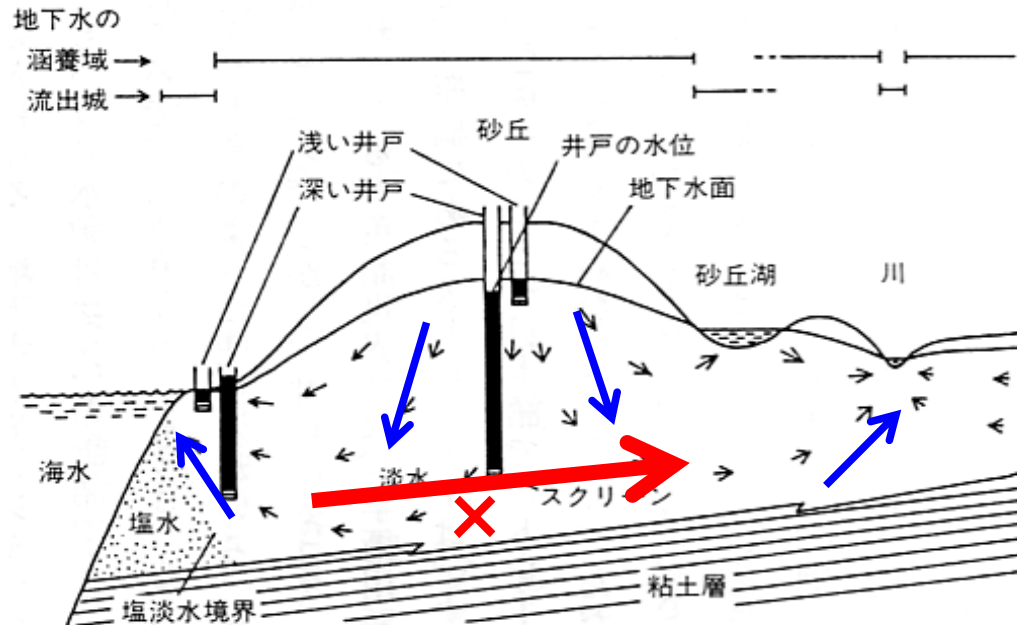
水脈？ △リ！

東大寺二月堂(東大寺HPより)

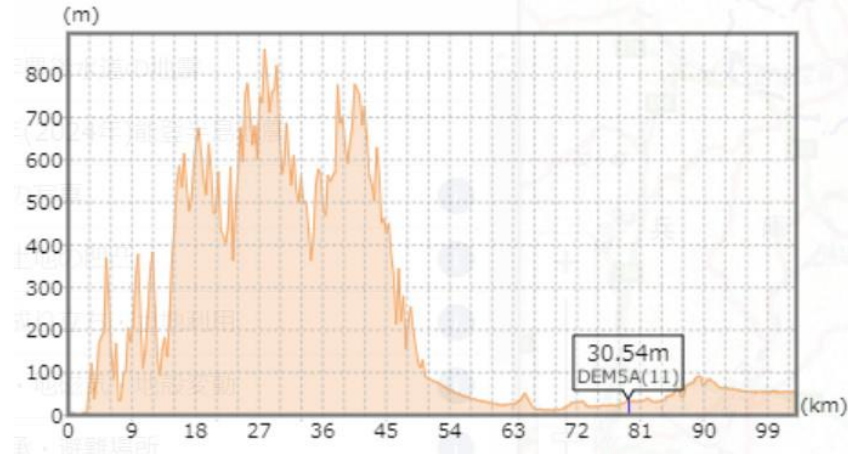


- 何が低いのか
- ポテンシャル
- ポテンシャル = 高さ + 圧力

砂丘の地下水循環を示す模式図



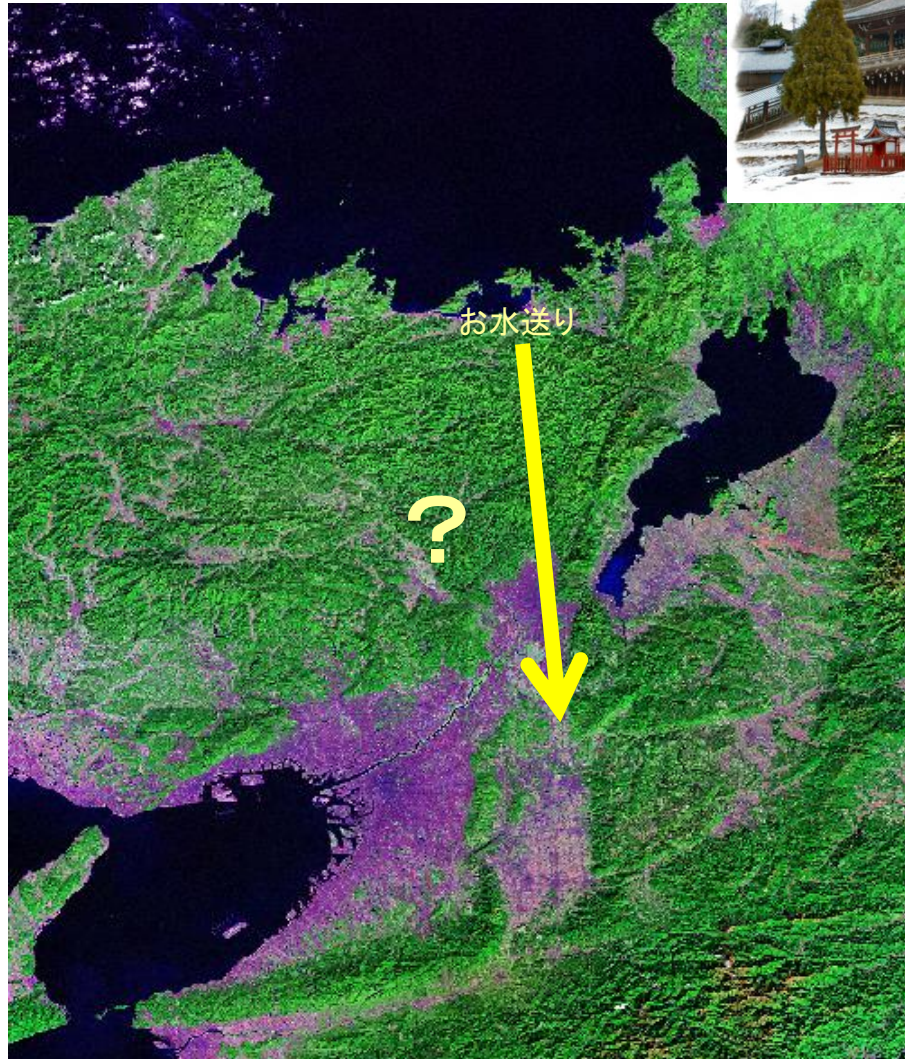
注) 井戸にはスクリーンから地下水が入る。涵養域では深い井戸ほど井戸の水位は低く、流出域では高くなる。 (榎根勇、「地下水の世界」、NHKブックス)



上の図は地理院地図で作製した若狭湾 - 奈良盆地の地形断面図

若狭でお水送りして、奈良で受け取るためには、丹波高地の地下水面の高まりの下を通り抜ける必要があるが...

野暮だけど...



地形を見て、地下水の流れを想像してみよう！



● Ushiku

砂泥互層の丘陵地域の地下水の流れは？
地下水はどこから来て、どこへ行くのか？

© 2008 NASA
© 2009 DigitalGlobe
Image © 2009 DigitalGlobe
ストリーミング 100%

© 2007 Google™

21'39.16" N 140° 09'26.79" E 高度 53 m

上空 2.61 km

下総台地の地下水—養老川下流域



下総台地の特徴は、東京湾(手前)に向かって緩く傾斜する未固結の砂泥互層である、ということ。

地域ごとに、地形、地質の効果を考えながら聞いてくださいね。

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™

ポイント 35° 27'49.00" N 140° 07'10.84" E 高度 8m 五井

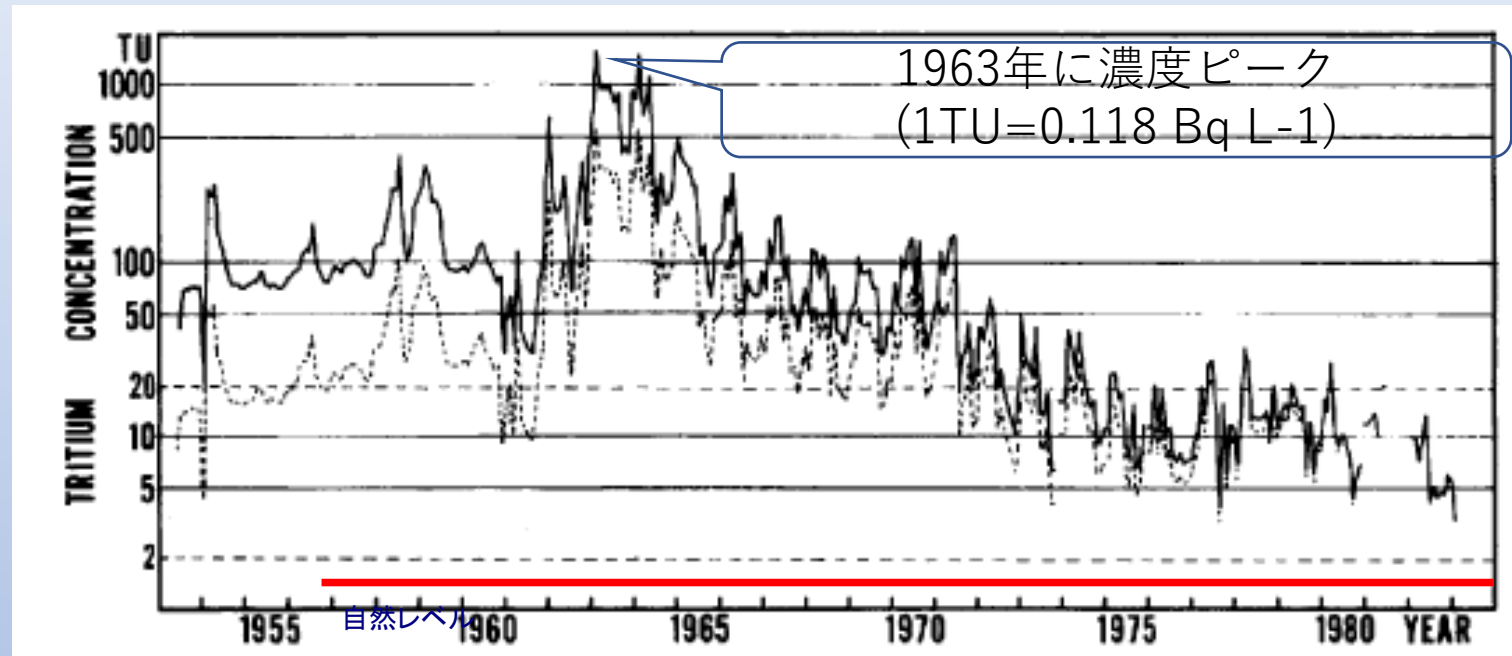
ストリーミング 100%

上空 2.66 km

地下水の年齢は？ いつの雨なのか？

トリチウム(^3H)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

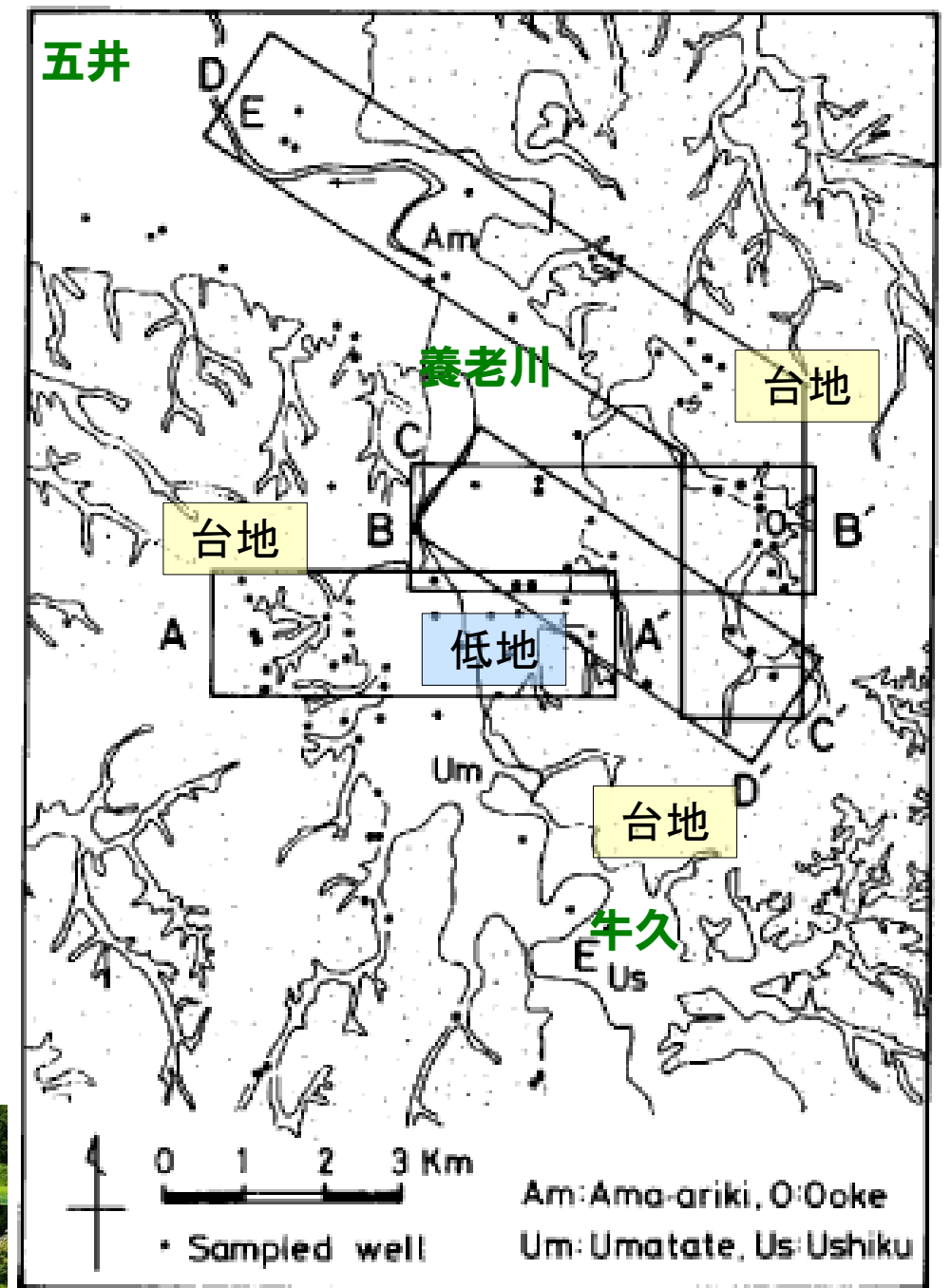


- ・1950年代に開始された水爆実験により、大量の水素の放射性同位体が大気中に放出された
- ・水分子の一部を構成し、水循環に加わった
- ・放射性なので半減期12.26年で減衰する

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



(小湊鉄道が走る養老川低地)



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ー水は低きにつくー
- 地下水の流れはきわめて遅い この場所では、年間100m程度

浅い地下水でもトリチウム濃度が低い場所がある
 ⇒これが近藤が地下水流動系を“わがこと化”した瞬間でした！

近藤の学位論文の図ですが、美しくない図でごめんなさい。

当時は製図ペンで書きましたが、今はコンピューターで描けるでしょうね。

きれいな図を描くことで、成果が伝わるということ学びました。

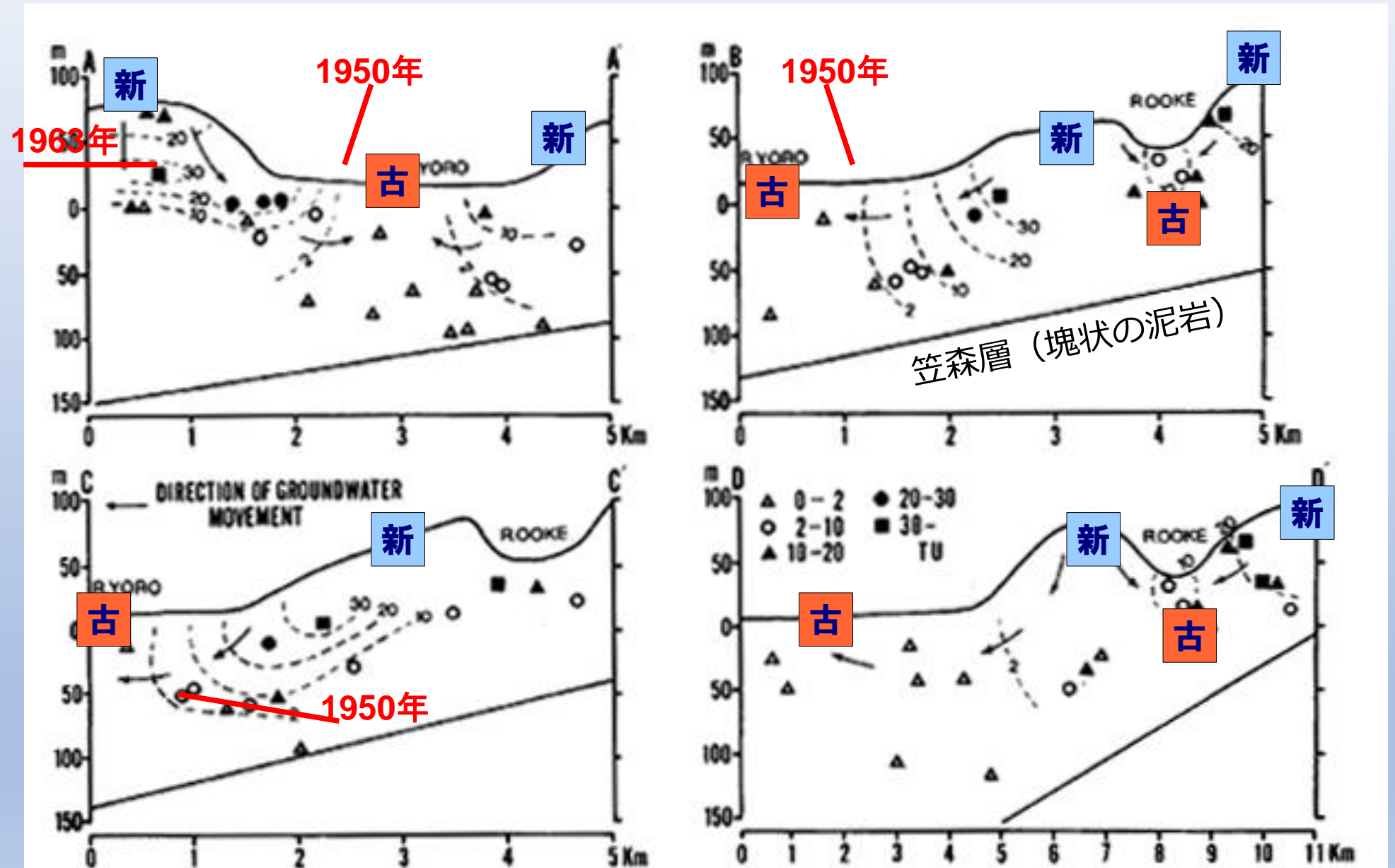


Figure 13 Estimated directions of groundwater movement based on Figure 12.

(近藤、1985)

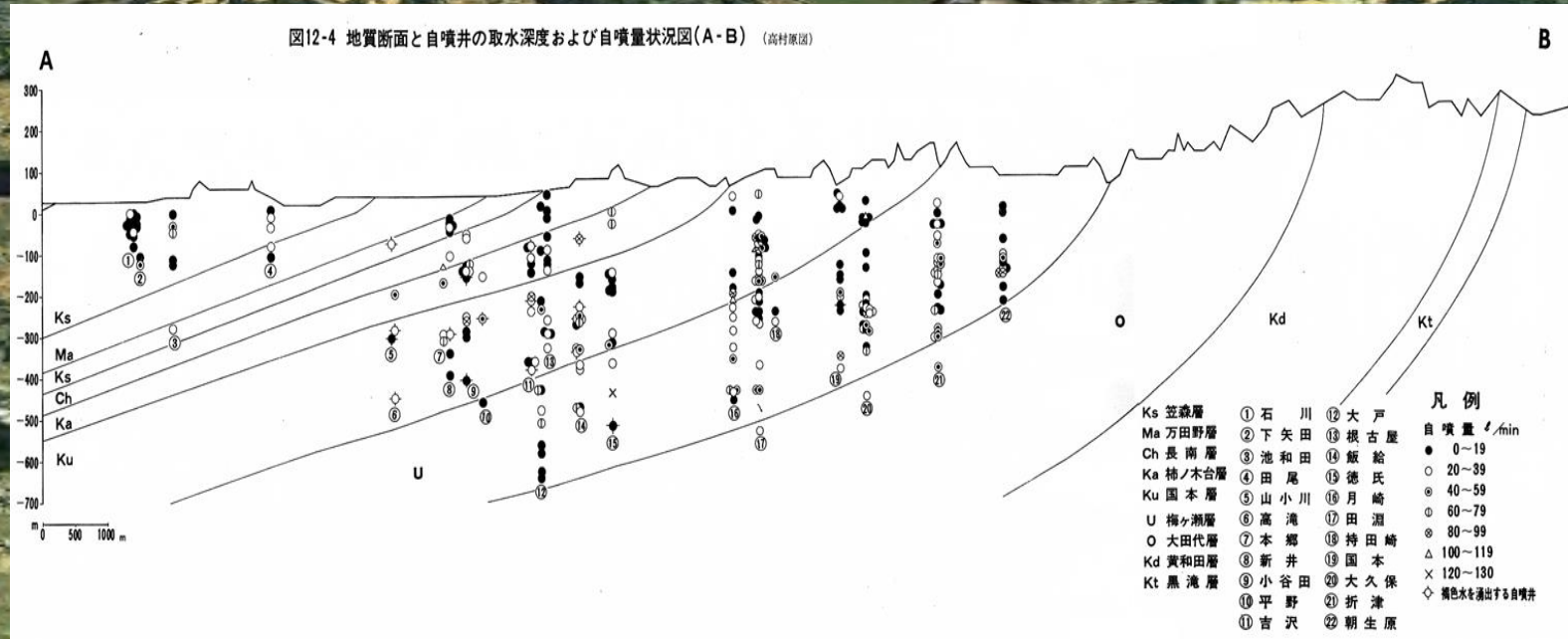


養老川上流域—養老溪谷

養老川上流域は、東京湾に向かって緩く傾斜する上総層群の砂泥互層。

上総掘りによる自噴井がたくさん残っている。

養老温泉の黒いお湯も有名。



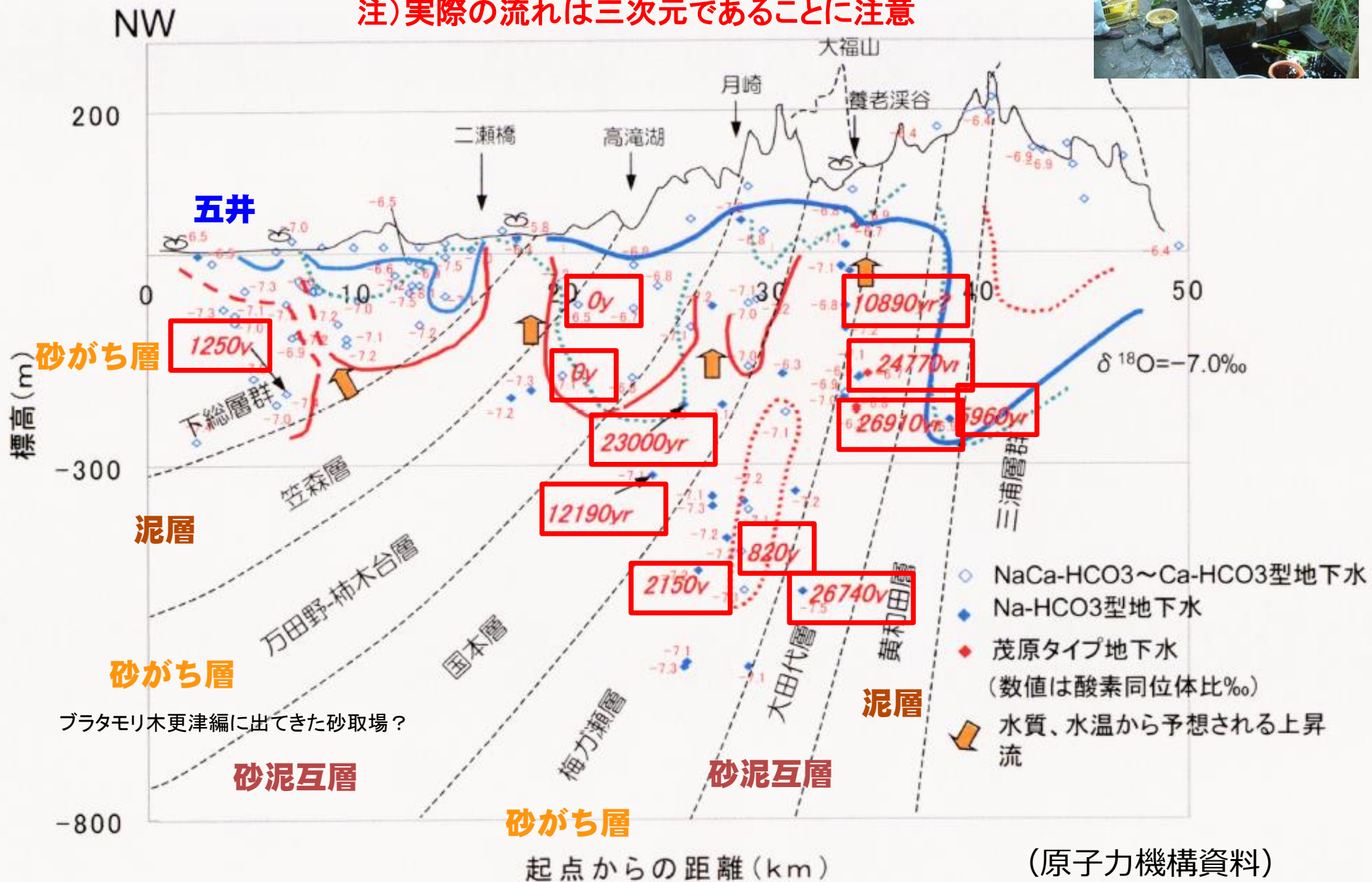
砂泥互層の丘陵地域の地下水の流れは



地下水の年齢—養老川流域の自噴井



注) 実際の流れは三次元であることに注意



千葉県中央部、上総丘陵にたくさん分布する自噴井から湧出する地下水の年代は2万年を超えるものもあります。

すなわち、氷期の寒冷期に涵養された地下水です。

その流れも地下水流動系の考え方で説明できますが、地質構造による修飾も認められます。

例えば、砂勝ち互層では相対的に若い地下水が深部まで到達しています。



確認

地下水流動系の概念を身につけよう！

現場における地下水流動を3+1次元の視点で捉えよう！

その時、地形、地質の両側面から地下水流動系を捉えることを試みよう！

様々な事例のデータベースを持とう！

[練習問題] 写真を見て、地下水のあり方を説明できるかな？



地下水のあり方を地域（ローカル）で読み解く

「台地を刻む谷の成り立ちと地下水」の事例



現場力

地域（現場）の地質、
地形、地理を読み解く
力←J-Stage

総合的に地域(現場)
の状況を読み解く力

環境を構成する要素の
関係性を読み解く力

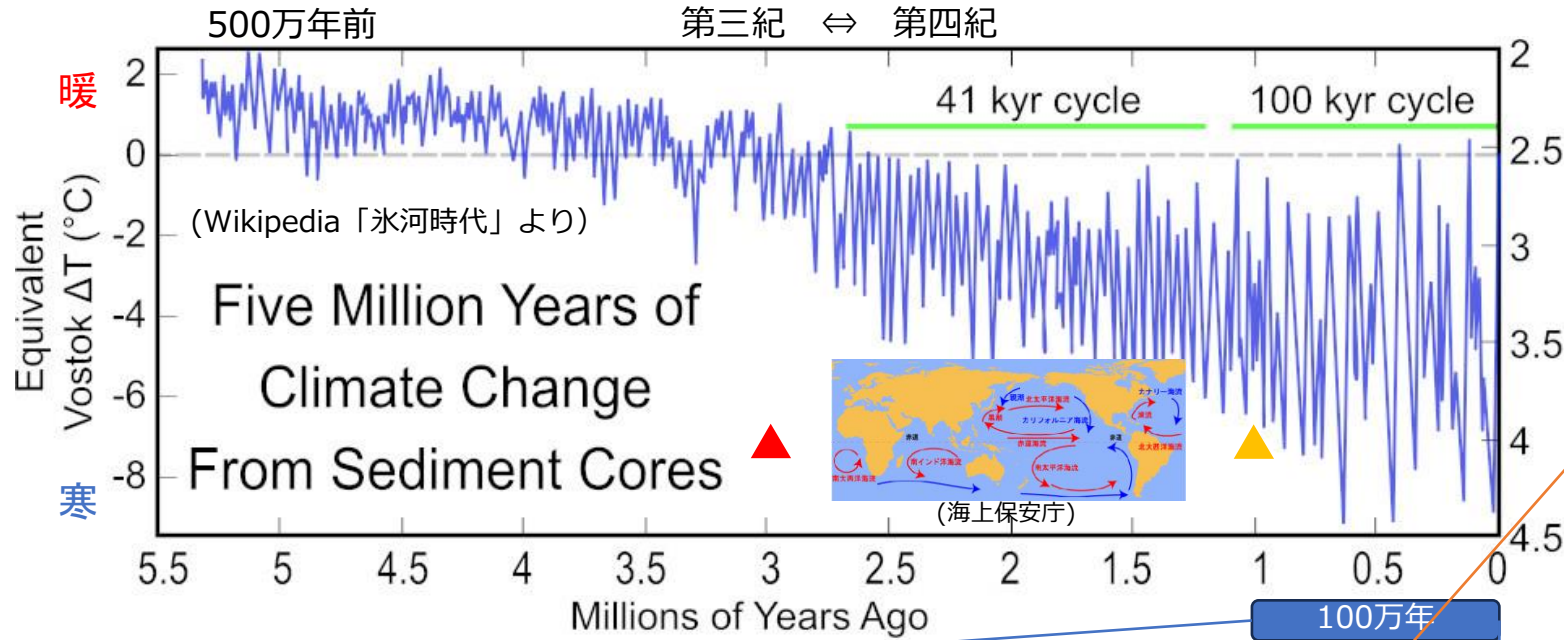
空間軸・時間軸を意識
できる力

(C)Google

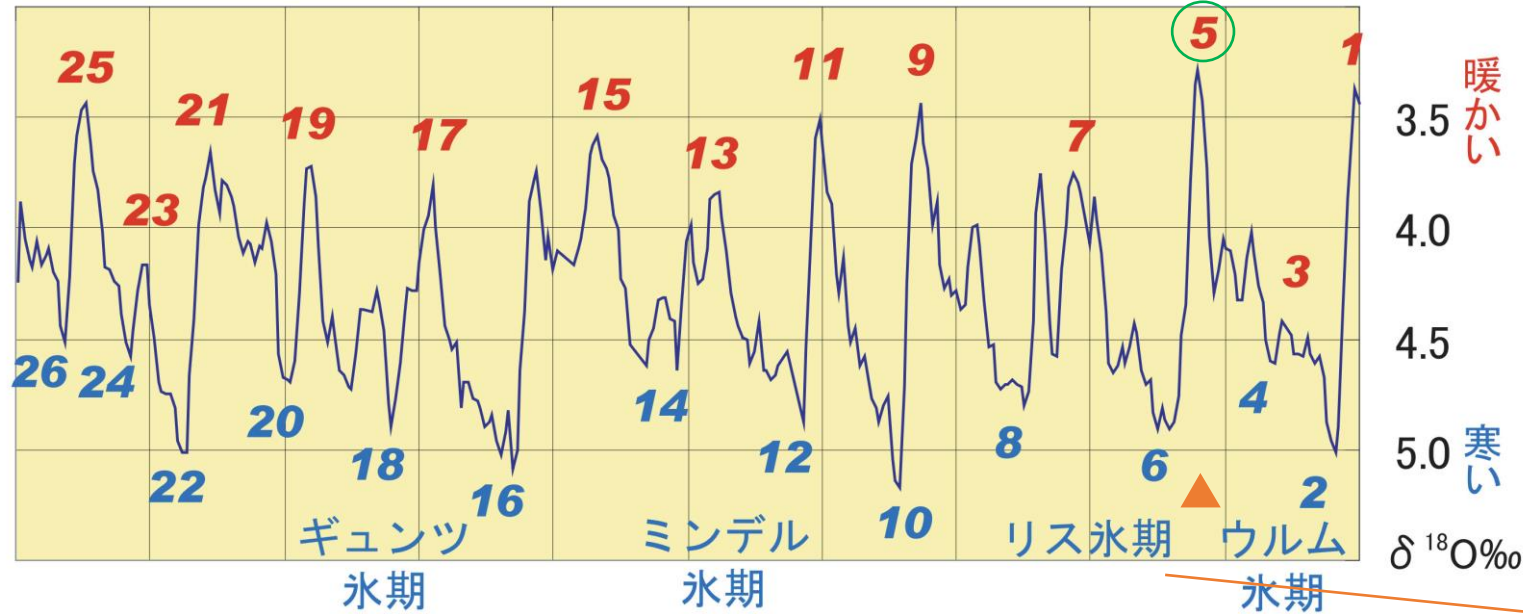


● ローカル地質、地形変化の歴史を知り、水文現象と関連付ける

地球は何度も寒冷な時期と温暖な時期を繰り返してきた

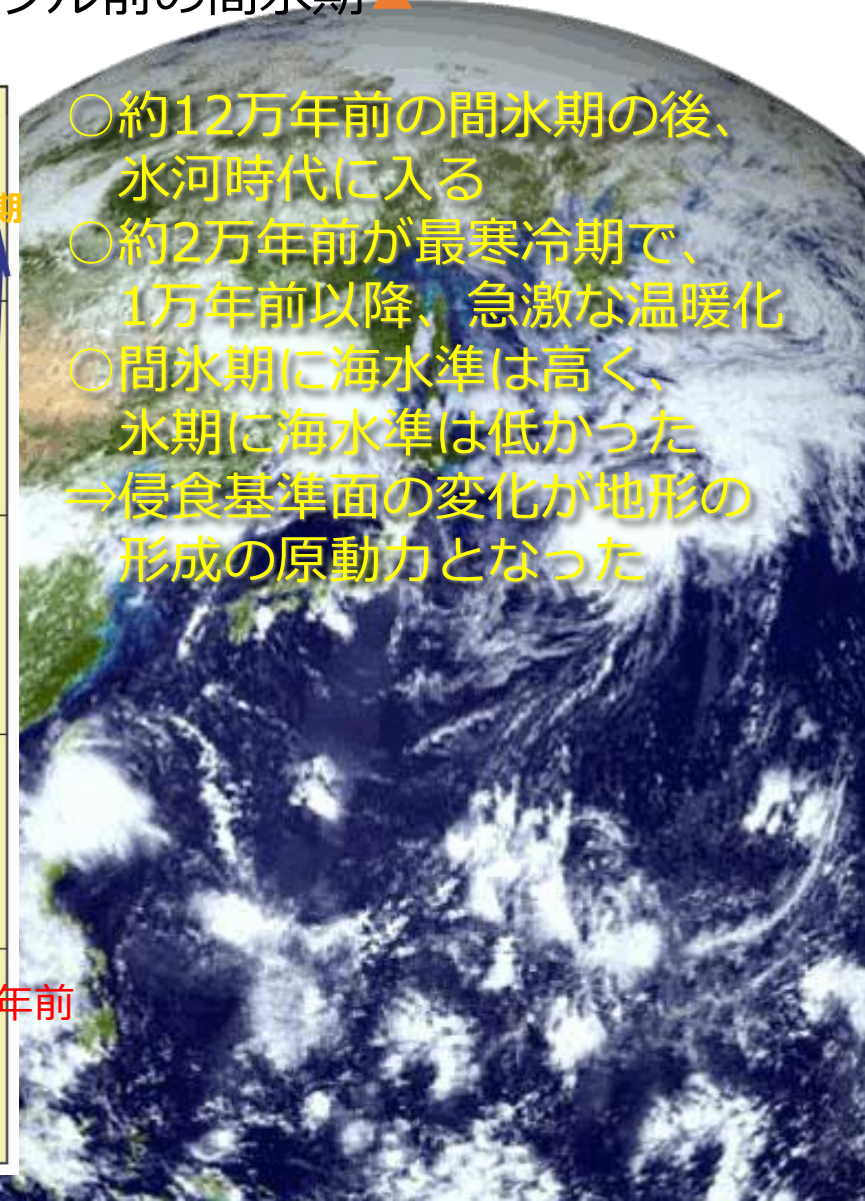


- 約300万年前に始まる寒冷化 ▲
- 100万年前頃から寒暖の振幅増加 ▲
- 1サイクル前の間氷期 ▲



(神奈川県立生命の星・地球博物館HPより)

- 約12万年前の間氷期の後、氷河時代に入る
- 約2万年前が最寒冷期で、1万年前以降、急激な温暖化
- 間氷期に海水準は高く、氷期に海水準は低かった ⇒ 侵食基準面の変化が地形の形成の原動力となった



関東広域圏の地質図



地質からいろいろなことがわかるのだ！

- 下総台地の表層地質は新しい時代の砂層と泥層
 - その砂層や泥層はおもに海に堆積したもの
- ⇒その海こそ！古東京湾

約12万年前頃の関東平野の範囲は広い海だった
氷期・間氷期サイクルの海水準の変動が台地地形を形成



(上：横須賀市自然・人文博物館：<https://www.museum.yokosuka.kanagawa.jp/archives/news/35328>)

(左：葛飾区史：<https://www.city.katsushika.lg.jp/history/history/index.html>)

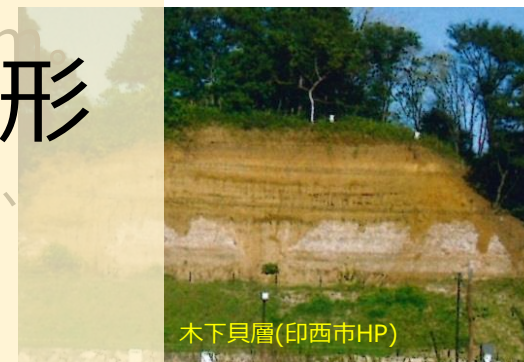
古東京湾の姿と佐久知穴仮説



- 12万年前、多古から印西にかけて上げ潮デルタが発達(木下層上部)
- それ以前、同地域には太平洋に向かう谷が存在

○地質学、地形学の一般的知識は大切
 同時に、地域（ローカル）の地質と地形の形成過程、状況を知ることが重要
 ⇒ **問題・課題は地域にある！**

○それを、水文事象に結びつける
 ○J-STAGEで地域ごとの情報を得ることが



増田(1992)「古東京湾のバリアー島」より

(産総研：都市域の地質地盤図「千葉県北部地域」)

(利根川図誌より「佐久知穴」)

12万年以降の下総台地の地形形成過程 - 地形編年 - (貝塚ダイアグラム)



① 下末吉期

これは静的な地形学の考え方

この間も地表面には雨が降り、川が流れ、地下水が流れ、地形は不断に変化していた

そして、不均質な堆積構造が形成

⇒ダイナミック地層学 (増田富士雄)

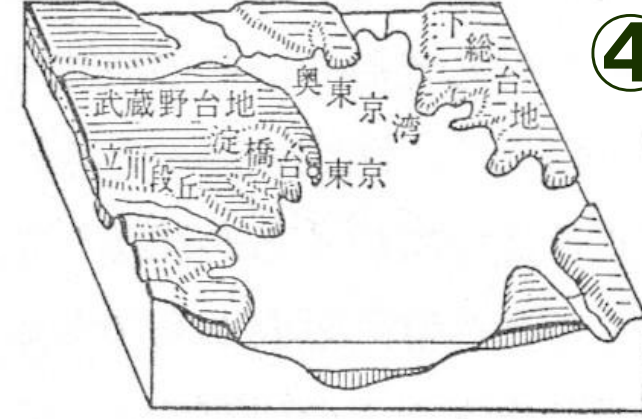


② 武蔵野期 (M₂) 約6万年前



③ 立川期

(3) 立川期 (Tc₃)
約2万年前



④ 縄文前期

(4) 縄文前期
約6000年前

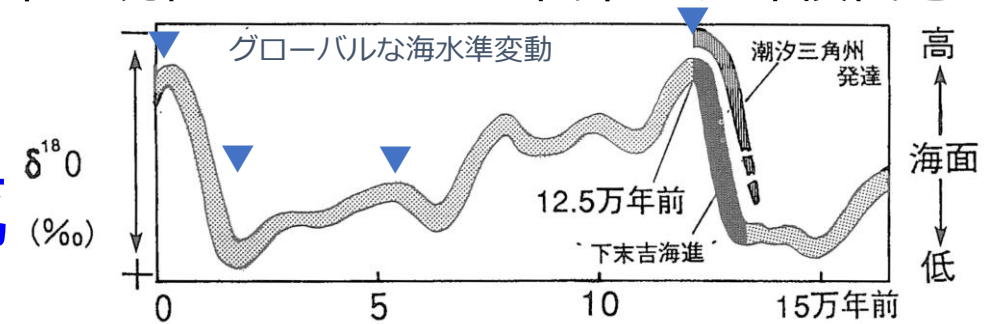
(貝塚, 1979)

- 約12万年前、下総台地は古東京湾の海底だった
- 約6万年前の海水準の停滞期に下末吉面の下位に武蔵野面と呼ばれる地形面が形成された
- 約2万年前の最終氷期最寒冷期に海水準は100mほど低下し、古東京川が形成された

- 氷期が終わり、海水準は上昇し、約6千年前には現在より3mほど高くなり、台地を刻む谷は溺れ谷になった
- その後、海水準は現在のレベルまで低下し、沖積低地が形成された

海水準が安定した時期には地形面が形成

注) 地域によっては地殻変動を考慮しなければならない



(増田, 1992 ; Imbrie at al., 1984)

地形は不断に変化 – 台地の地形を細かくみてみよう –

多様な微地形(小地形)がある

地理院地図を活用しよう

<https://maps.gsi.go.jp/>

【手順】

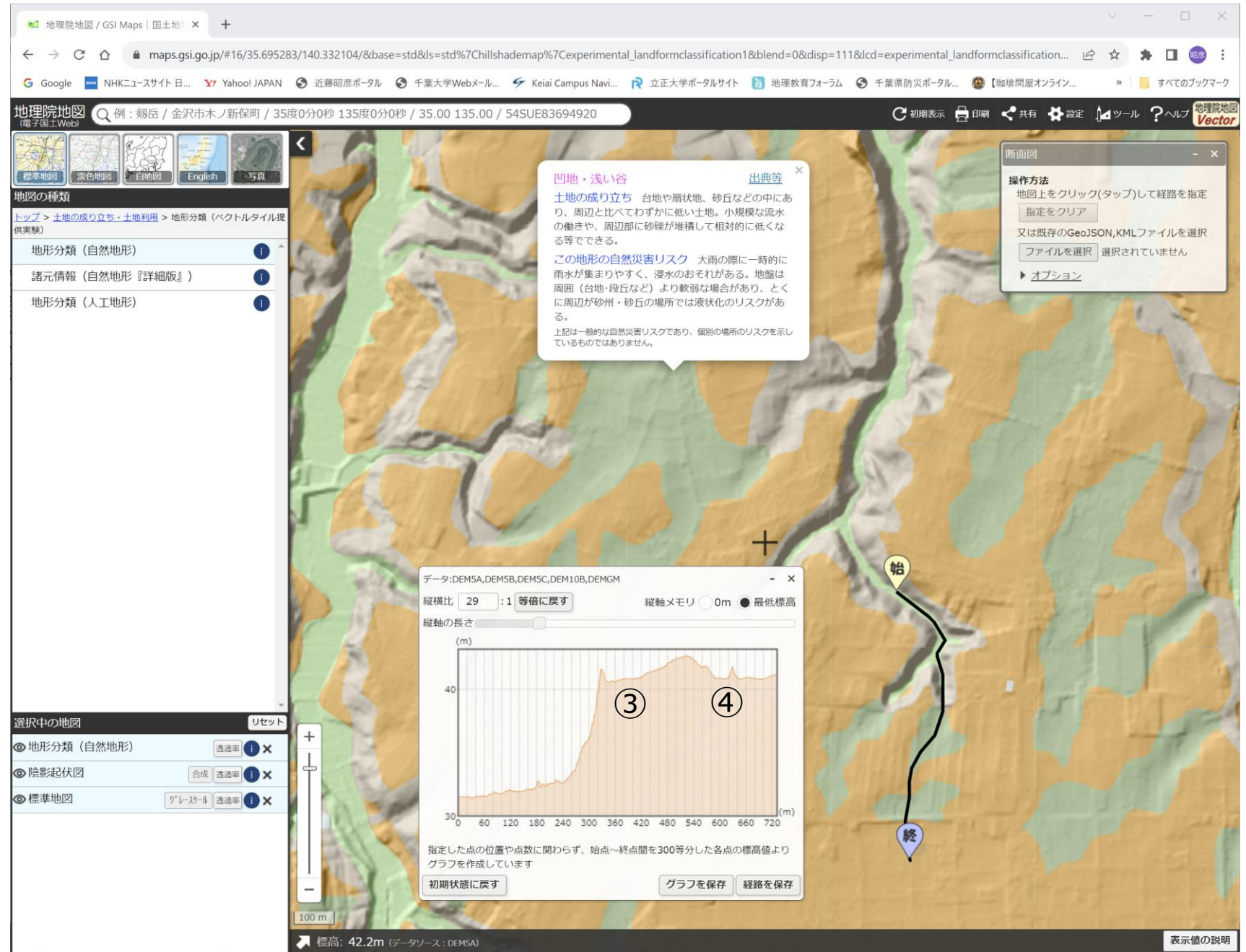
1. 地理院地図を起動
2. ベースマップを選択
3. 左上のメニューから主題図選択
4. 重ね合わせ表示
5. 様々なツールによる解析

何が見えるだろう

- ①数段に区分される地形面
- ②舟底型の谷津
- ③台地上の皿状の浅い谷
- ④台地上の閉じた凹地
- ⑤化石谷（無水谷）

水循環と地形形成の相互作用

⇒ダイナミック地形学(≒水文地形学)



一見、平坦に見える台地．．．そこには多様な形がある
⇒それは、水文学的事象とも関連！



浩養小学校

高野新田

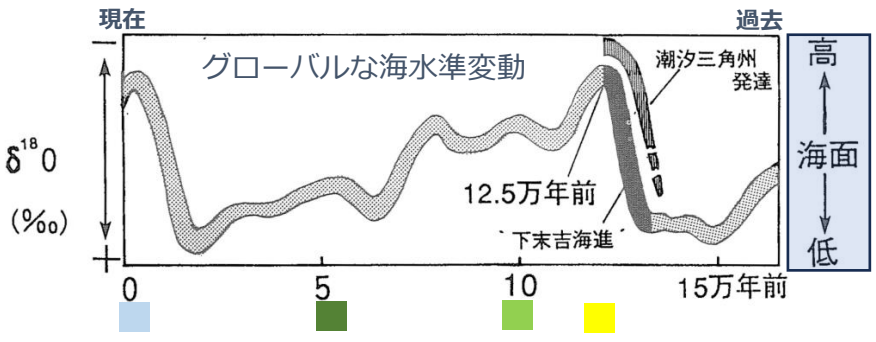
十倉神社

高崎川

①数段に区分される平坦面

下総台地の地形面

- 下総上位面 約12万年
- 下総下位面 約10万年
- 千葉面 約6万年
- 沖積低地 1万年前以降



台地面上にも小地形 “地の形”は形成過程の反映

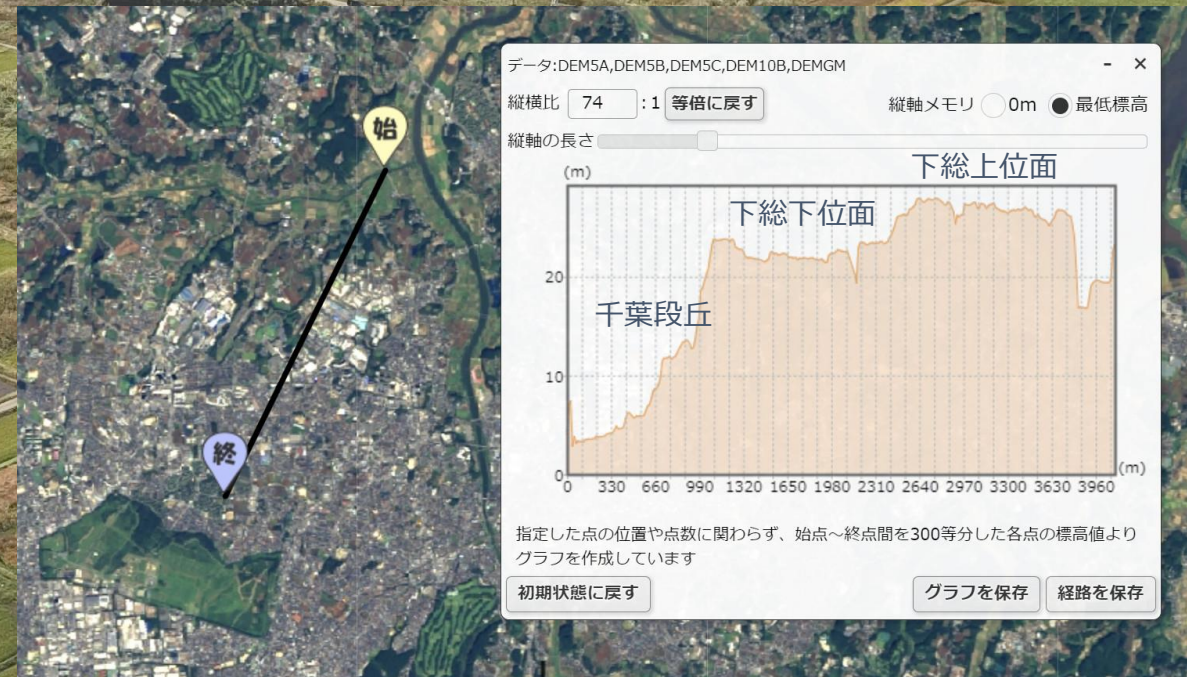
- ①数段に区分される地形面の上に
- ②台地上の浅い皿状の谷
- ③舟底型の谷津
- ④台地上の閉じた凹地
- ⑤化石谷

水循環に注目(水文地形学)



(産総研：都市域の地質地盤図「千葉県北部地域」)

桑納川低地から海浜幕張方面を望む ．．． 低地と数段の段丘面、谷津が見える



②台地上の皿状の浅い谷 古東京湾の陸化の進行に伴う地形変化

古東京湾が陸化していく過程で、浅い水域や湿地に堆積した**火山灰**(主に箱根火山起源の下末吉ローム層)は粘土化して**常総粘土層**を形成した



墨古沢遺跡 (酒々井町)

図13 旧石器時代の関東平野の原風景画 (関東ロームの花粉分析の結果にもとづいたこの復元図は近く大きく変更されるかもしれない)

(環境考古学、安田喜憲、NHKブックス)

地表面

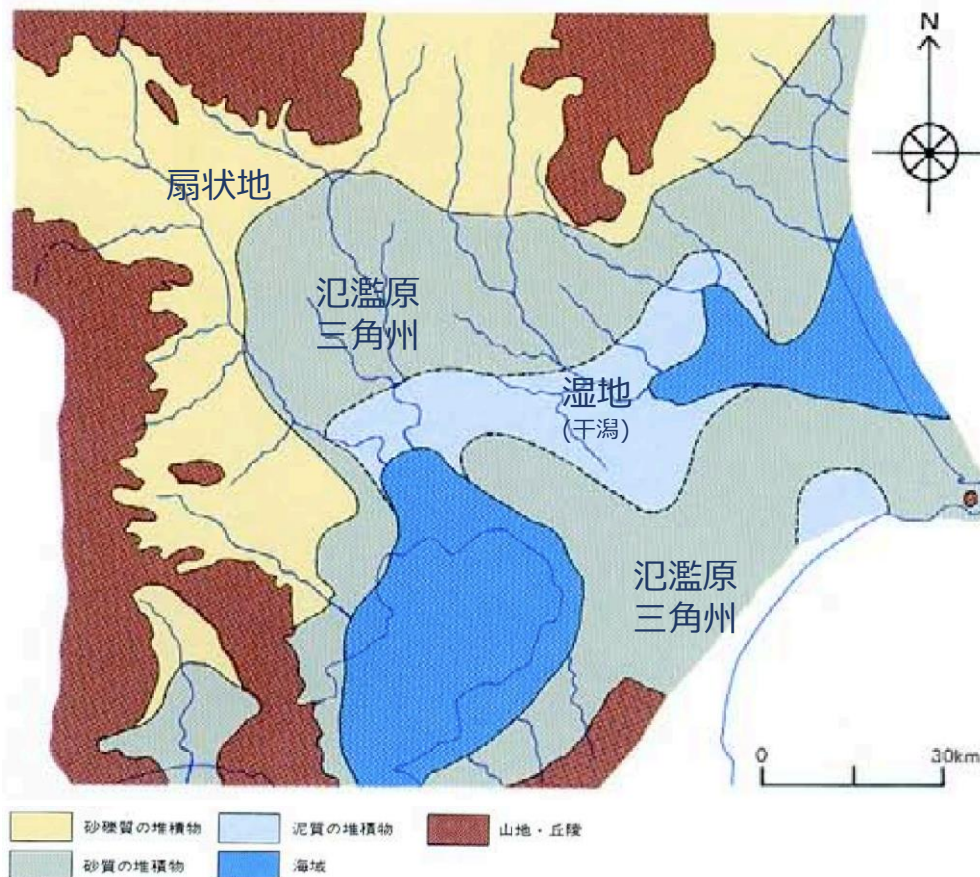
立川ローム

武蔵野ローム

下末吉ローム (常総粘土)

成田層

○関東の火山活動は活発で、火山灰が関東ローム層を形成
○浅い海、干潟、湿地に堆積した下末吉ロームは常総粘土へ



常総粘土層堆積期の古地理図 (菊地,1980,アーバンクボタNo.18; 菊地,1997)

○古東京湾は少しずつ陸化し、その過程で干潟、湿地、三角州、氾濫原、扇状地が形成
○川の流れ、地下水の流れは河川地形、台地地形を形成



東京湾岸の干潟。そこには何本もの滞筋が確かにあった。(千葉港沖海苔ヒビ、林辰雄、中央博デジタルミュージアム)

諫早湾の人によって維持されている滞筋(長崎県HP)



「皿状の浅い谷」仮説

○広大な干潟には滞筋が形成され、平野には川が流れていたであろう
○そこに下末吉ローム層が堆積し、常総粘土層が形成された
○地下水面が浅く、水を通しにくい常総粘土の地表面では表面流が集中
○布状流となり、皿状の浅い谷を形成したのではないかと
○離水(海退、陸化)が進んでも浅い谷の位置は維持され、ある時点で地下水流出による谷頭侵食が始まる

12~10万年前の関東平野で、どんな水文現象が発生したか 「土壌水水文学」

●毛管水縁(capillary fringe)

浸透・浸潤する水が毛管水帯の上端（毛管水縁）に達すると、毛管水帯の水が一気に正圧化し、飽和帯になる。

●キャピラリーバリア

粗粒の物質の上に、細粒の物質が載ると、浸潤する水は細粒物質の下端に滞留し、十分な正圧を得てから下方に浸潤する。境界が傾斜していたら...

自然現象は様々な要因が積分されて出現

⇒物理学ではノイズは省き、シンプルな現象を扱うが...

水文現象は知識・経験の総動員で理解しよう

まず仮説をたてて、検証

●離水したばかりの平野に火山灰が堆積...

●降雨後、急激に飽和帯が成長

●シート状の飽和地表流により、浅い皿状の谷が形成

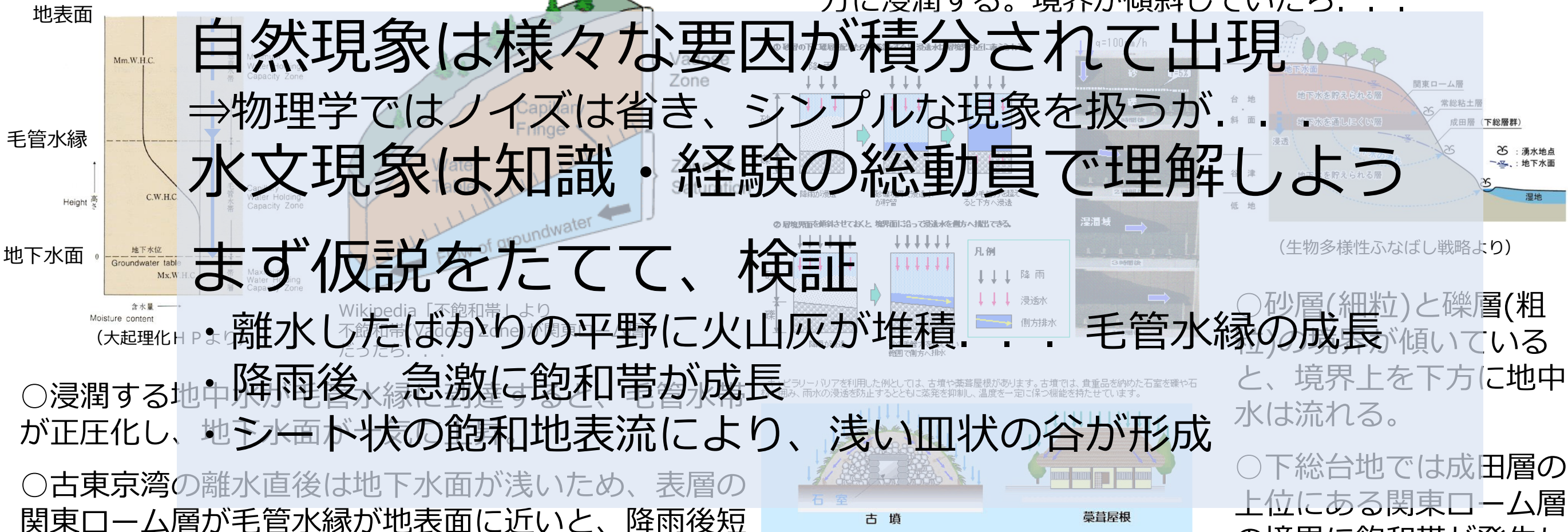
○古東京湾の離水直後は地下水面が浅いため、表層の関東ローム層が毛管水縁が地表面に近いと、降雨後短時間で地表面まで飽和し、地表流が発生。

○地表面を布状に流れる地表流によって、浅い皿状の凹地が形成（仮説）

●毛管水縁の成長

○砂層(細粒)と礫層(粗粒)の境界が傾いていると、境界上を下方に地中水は流れる。

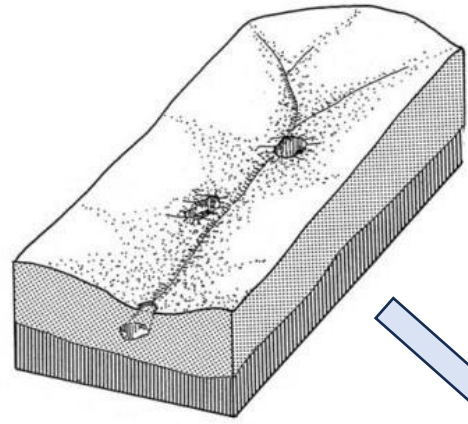
○下総台地では成田層の上位にある関東ローム層の境界に飽和帯が発生し、動水勾配により崖端に向かう流れが生じる。⇒パイプの形成



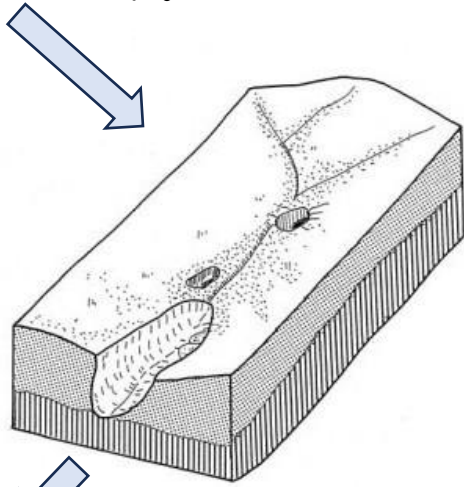
古墳の石室が保護されたのはキャピラリーバリアを古代の技術者が知っていたから！

(日本国土開発株式会社HPより)

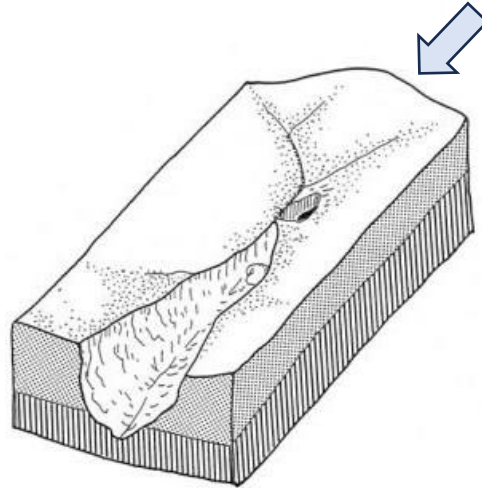
③舟底型の谷津 谷頭侵食による谷の伸長



古東京湾が陸化する最初のステージでは、滞筋等を起源とする水路に水が集中して皿状の浅い谷を形成する。地下水面は浅い。



離水が進み、浅い谷が地下水を集水するようになると、地下水の集中による谷頭侵食が始まる。地下水面が深くなる。



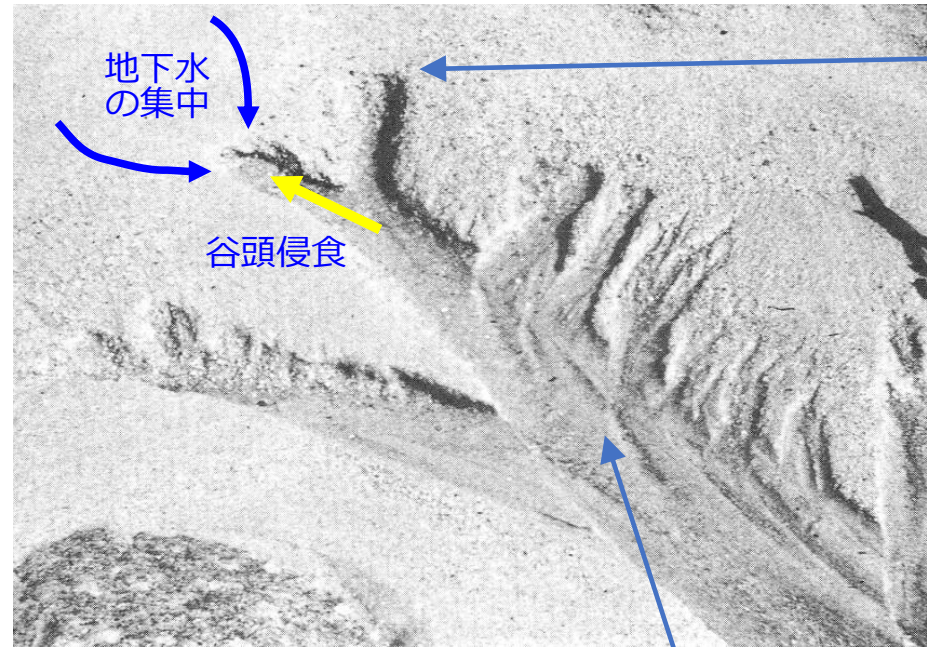
谷頭侵食が進み、側方侵食も始まり、舟底型の谷津が形成され、上部には浅い谷が残される。谷津は多くの地下水を集水する。

- 海退が進むにつれ、滞筋等の水路に水が流れるようになり、地表流(表面流)による侵食で浅い谷が形成される
- 下流では流域面積の増加に伴い、地下水を集水するようになり、地下水の流出の集中によって、谷頭が形成
- 谷頭が形成されると、ますます地下水を集水するようになり、上流に向かって谷が伸長(谷頭侵食)



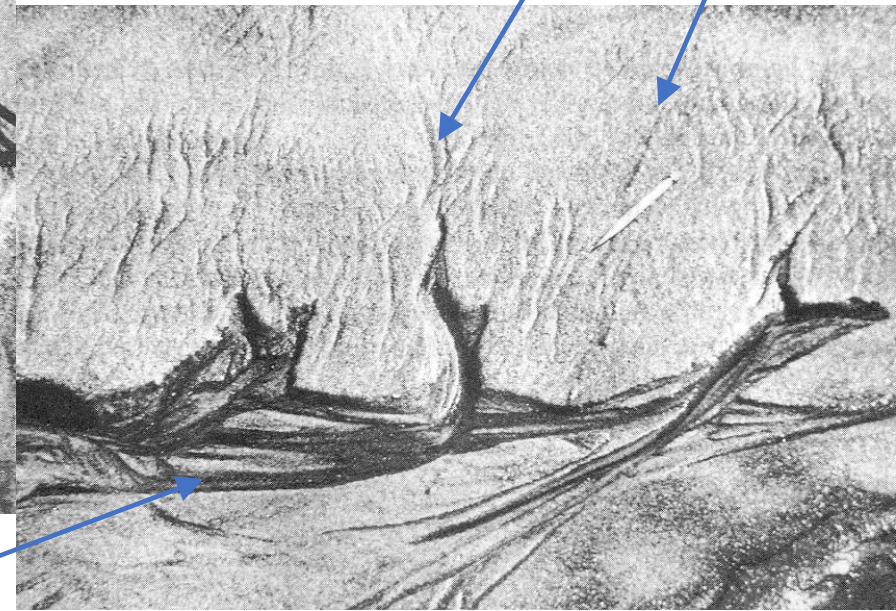
典型的な舟底型の谷津：天神谷津

砂浜海岸における引き潮時の微地形形成



谷頭は湧水点
地下水の流れが
最も集中する場所

台地の上には、
主谷形成以前の
谷が残存



谷底は地下水面
湿地が形成される

地すべり防止事業 | 南部林業事務所「安房地域の地すべりの特徴」より引用
<https://www.pref.chiba.lg.jp/rj-nanbu/nanbu/jisuberi/index.html>
 注) 安房地域の地すべりに発達するボラ(小陥没地形)に類似の地形変化がある

(出典 : LaFleur ed. Groundwater as a Geomorphic Agent, Routledge, 1984)

● 崖端における地中水の動水勾配

舟底型の谷底の崖端における地中水は地下水面上昇時には斜面と谷底の境界に集中し、崩壊を引き起こす要因となる。

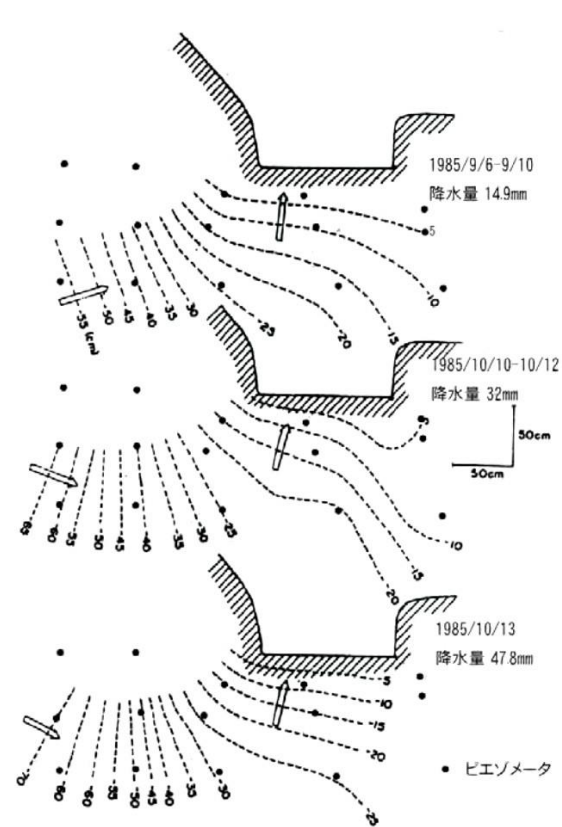
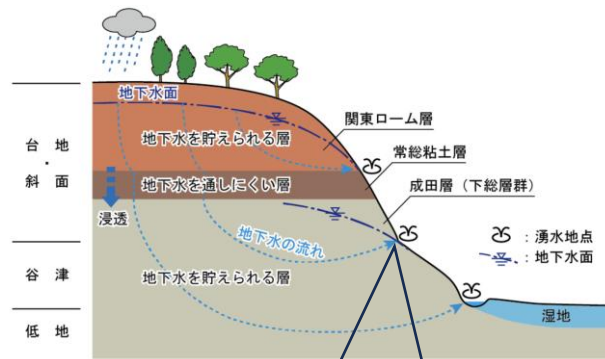


図 14 斜面末端部における集中流の挙動

多摩丘陵の波及地で谷壁斜面下部にピエゾメーターを多数設置し、降雨時の水頭分布を計測すると、谷底に向かう動水勾配が観察された。

(新藤静夫の地下水四方山話コラム56より)



- ・ 谷壁斜面と谷底の境界には地下水流出が集中し、湧水を形成する。
- ・ パイプから流出がみられることが多い。
- ・ 大雨時には集中する地下水が崩壊の要因となる。

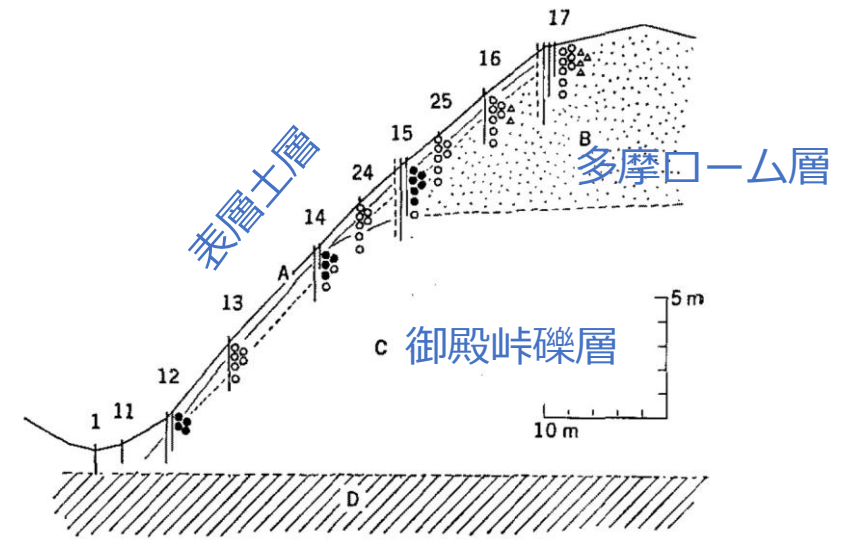


谷壁斜面下部にみられるパイプ

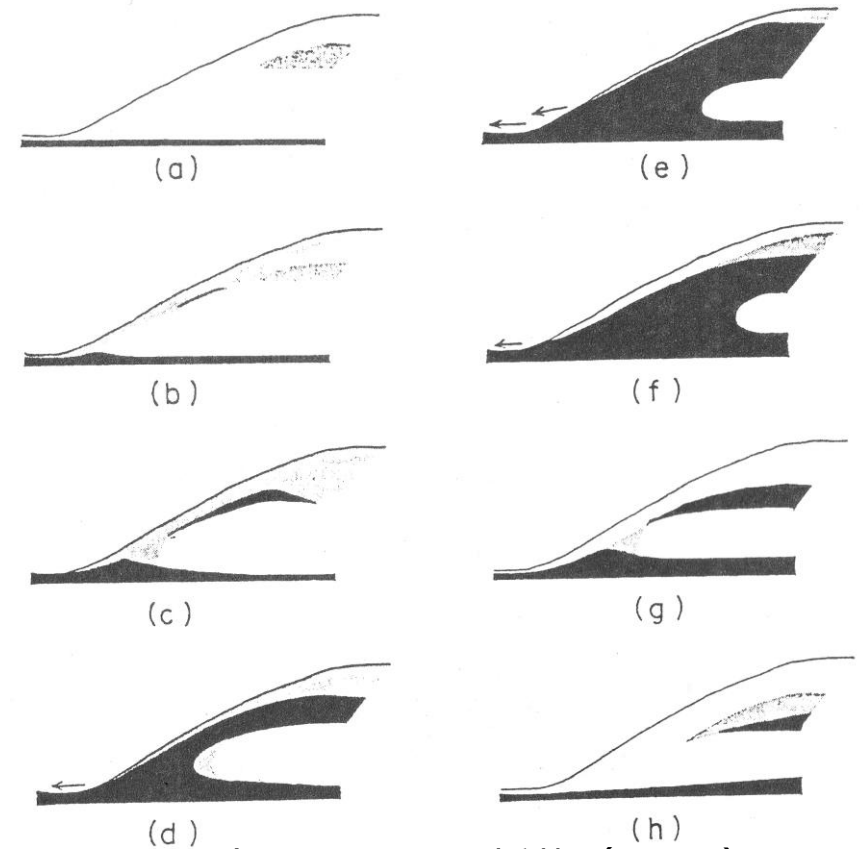
● 多層構造を呈する斜面における地下水体の消長

- ・ 御殿峠礫層の上位に多摩ローム層が重なり、斜面には表層土層が存在
- ・ 降雨が進むと多摩ローム層内に飽和帯が形成
- ・ 斜面基部では毛管水帯の効果により飽和帯が形成
- ・ さらに降雨量が増えるとローム層内と斜面基部の飽和帯が接続
- ・ 斜面基部に向かう地下水の動水勾配が形成
- ・ この時、斜面内部には不飽和帯が残存

斜面の構造と地下水（地中水）の挙動の理解の重要性 ．．． 流出、崩壊



太田ほか(1985)

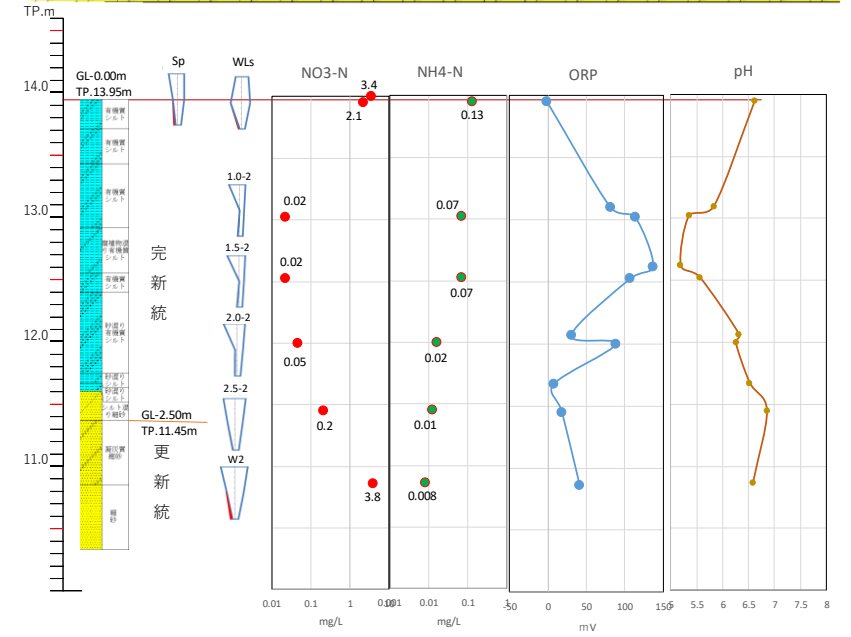
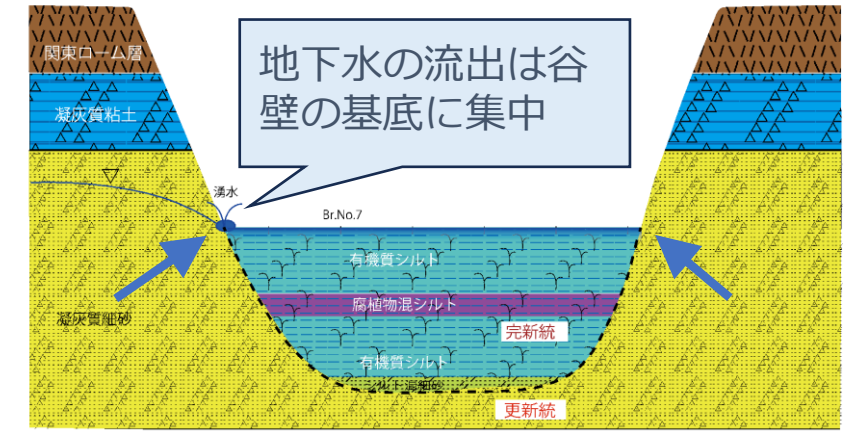
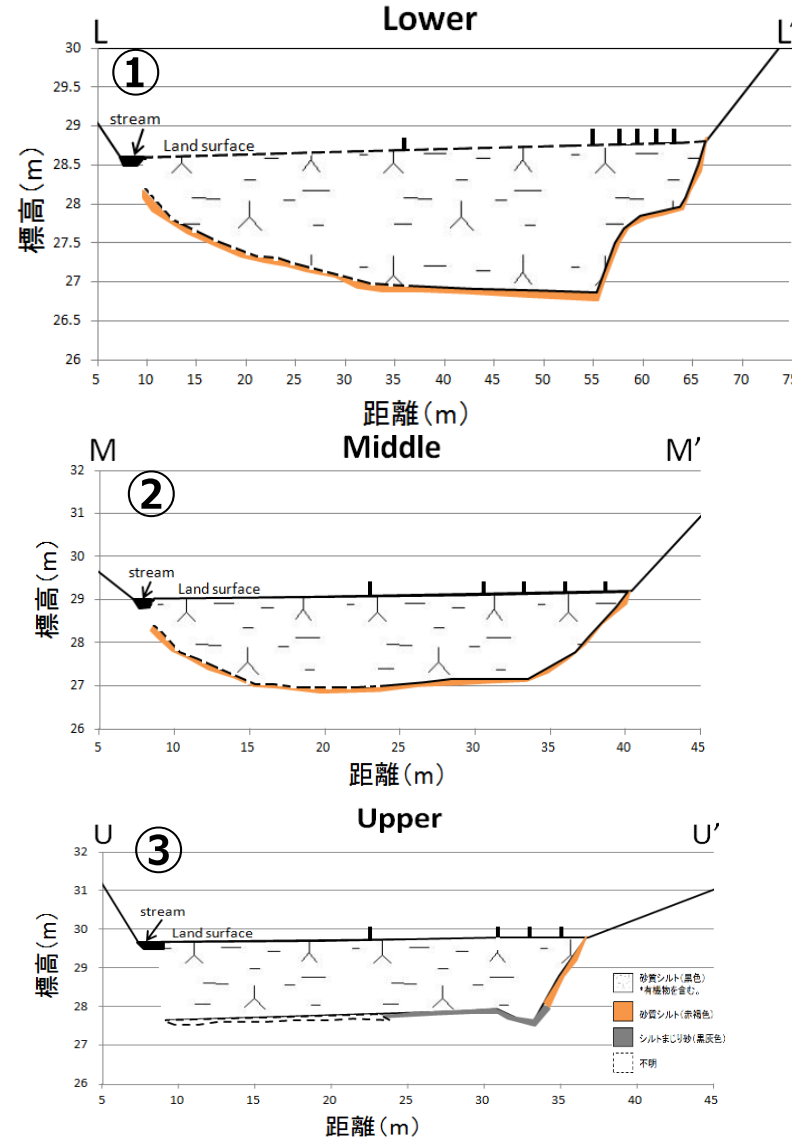


太田(1987)、新藤(1992)

舟底型谷津 – なぜ谷底が平らになるか（側方侵食型の谷）

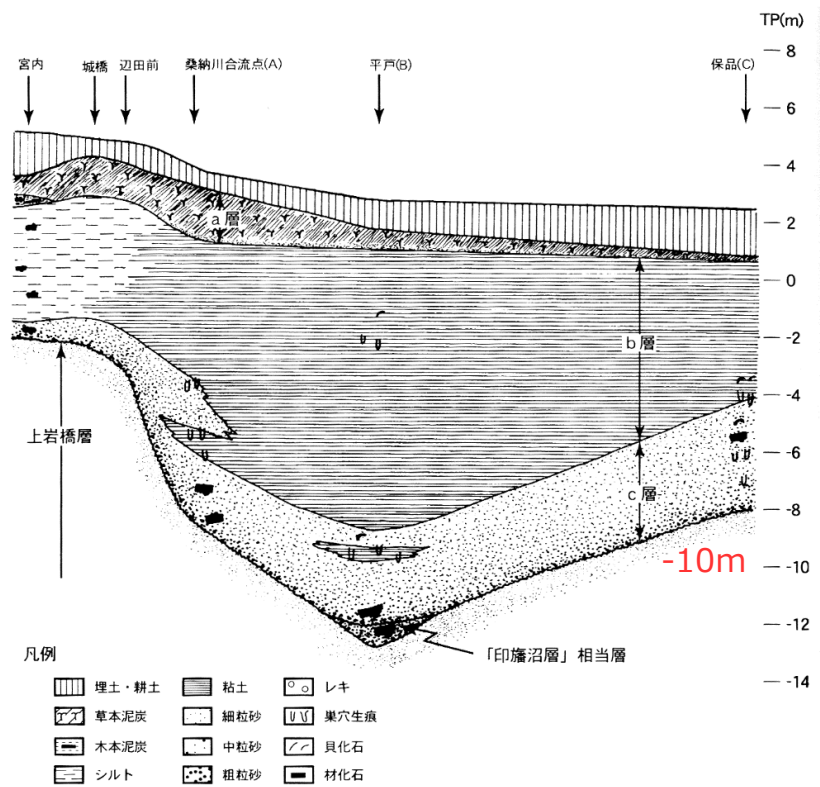
高崎川支谷、十倉の谷津の沖積層は2~3mの厚さで、基盤の形状はほぼ平らだった。それは舟底型の谷が側方侵食によって拡幅していることを示す。

手繰川支流、畦田の上流にある谷津の谷頭部では沖積層の厚さは2m程度で、基盤の形状はほぼ平らだった。このことも側方侵食を示す。



広い大きな谷は谷埋め型

氷期の海水準低下を記録



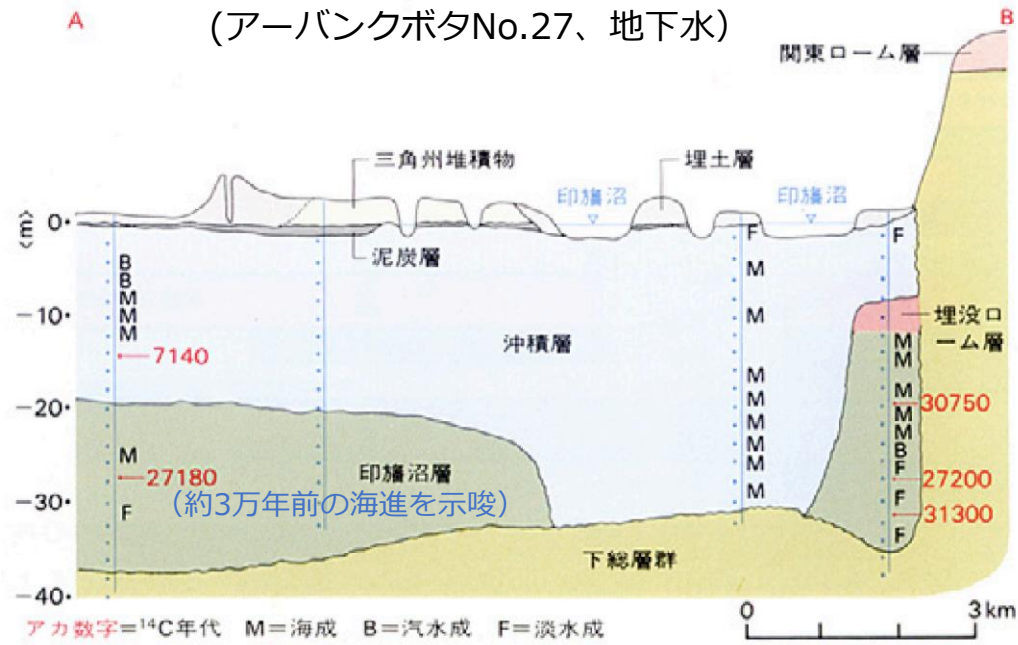
双子公園のナウマン象親子

(左) 新川低地の地質断面図 (八千代市、2002年)

10mくらいの谷が穿たれていた...
あのナウマン像もこの谷を...

図 3-4-16 新川低地の地質断面図(稲田専門調査員の未発表資料)

北印旛沼周辺

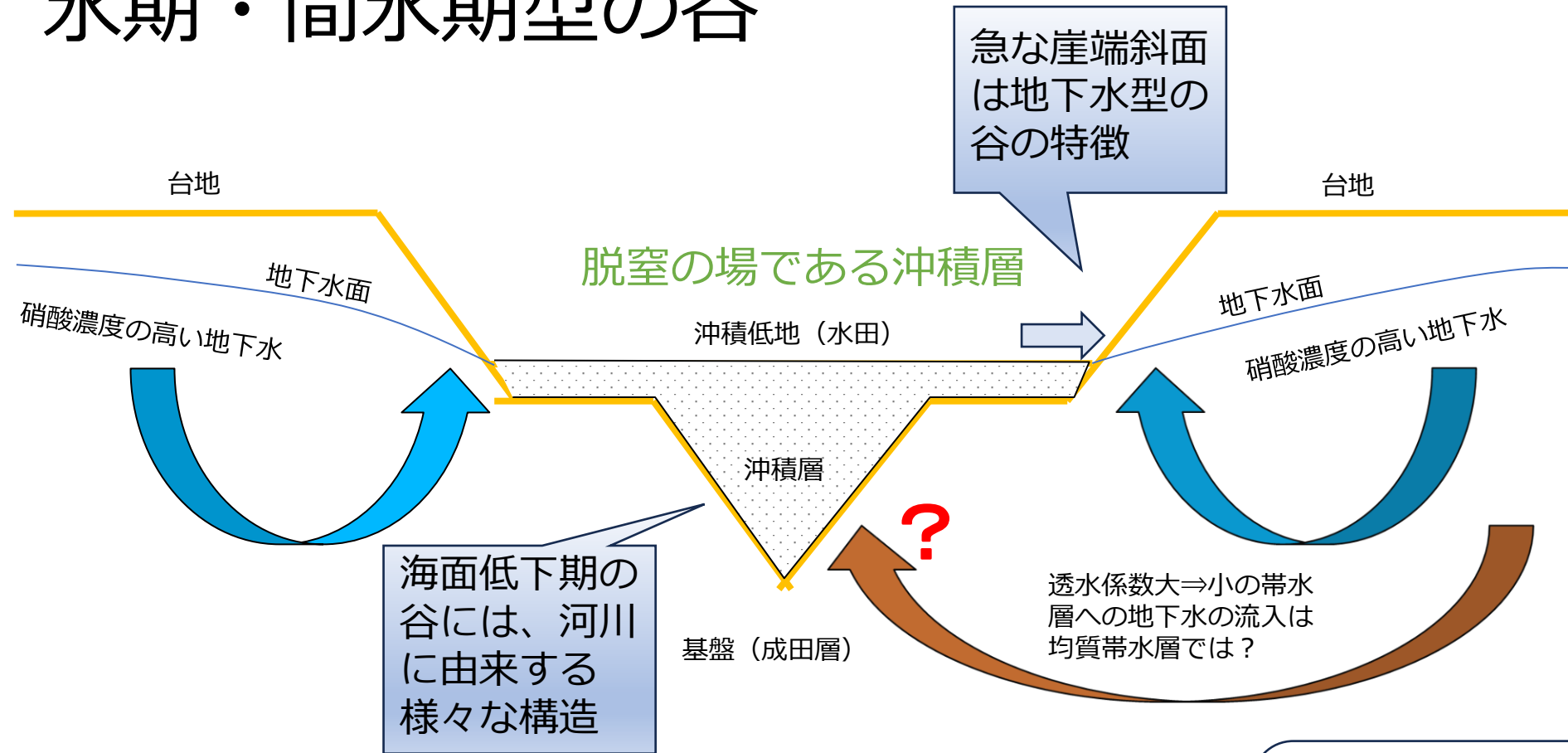


○氷期の海水準低下時に穿たれた谷は新川低地(桑納川合流点付近)で30数m、北印旛沼付近では50数mも台地を穿っていた。(台地面標高を25mとして)

○後氷期の海水準上昇に伴い、谷は沖積層で埋積され、広い沖積低地が形成された。

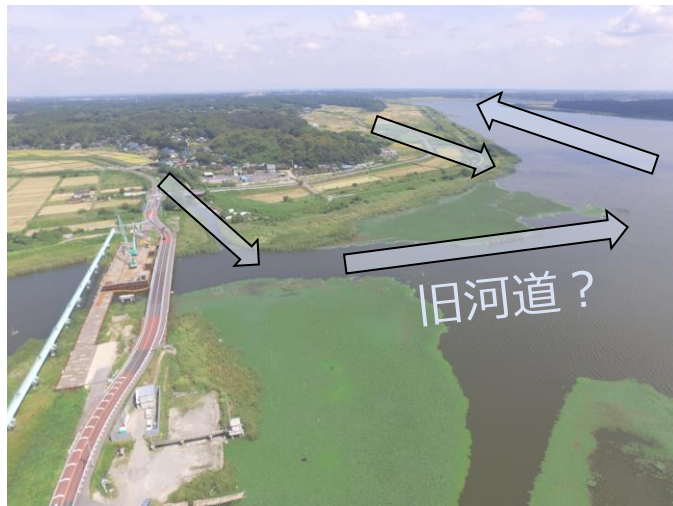
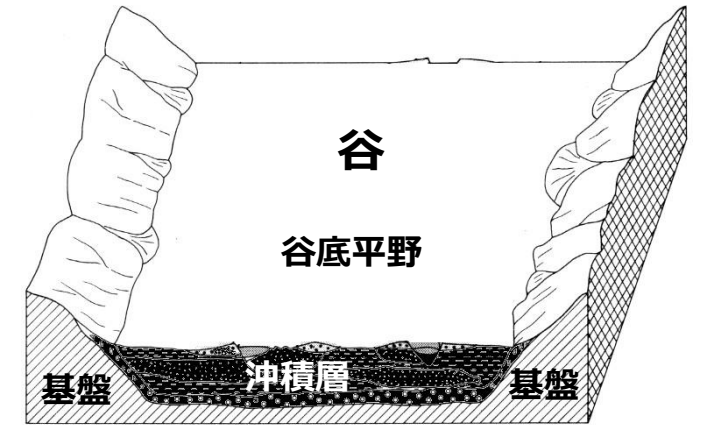
○これが、広い平野を持つ谷のストーリー

氷期・間氷期型の谷



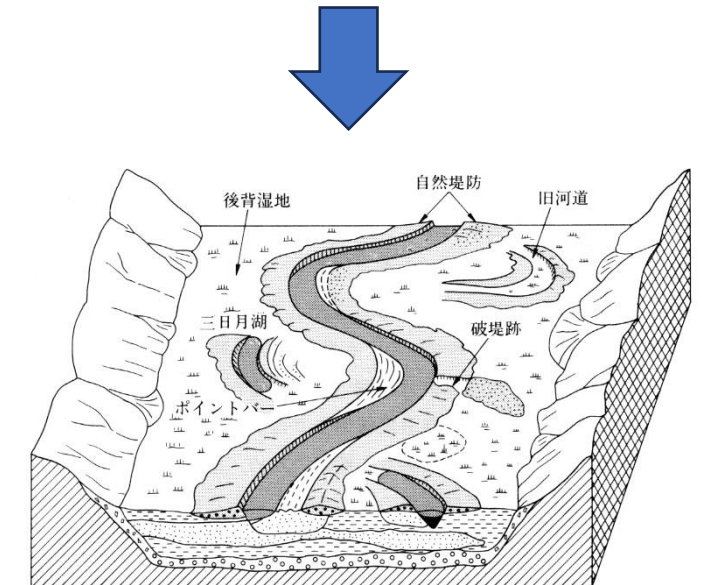
●自然をどう見るか

人は自然の全体の姿を単純化して理解しようとするが、実際は多様で複雑。多様で複雑な自然をそのまま捉えてみよう。

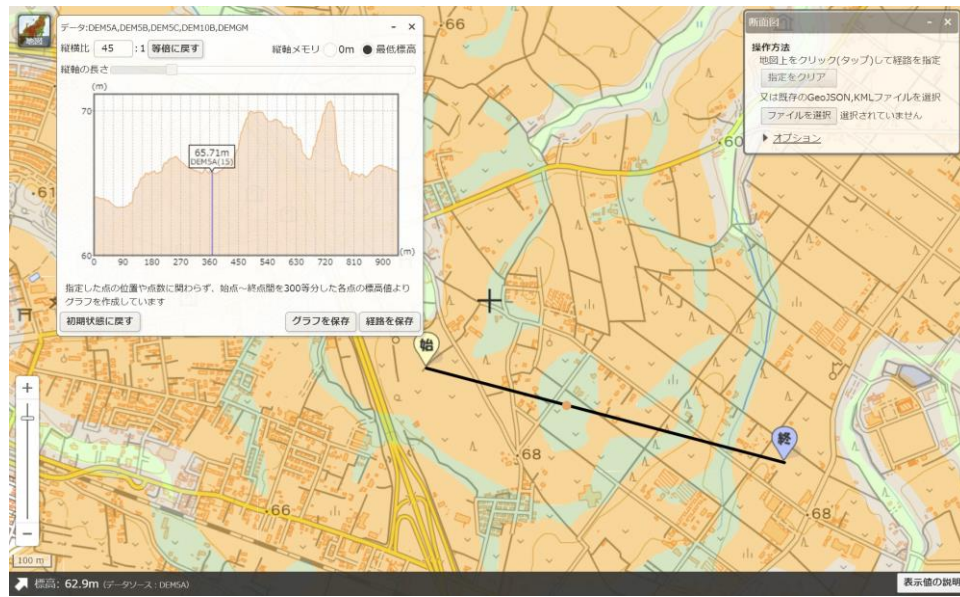
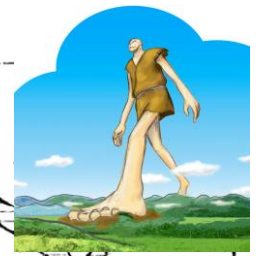
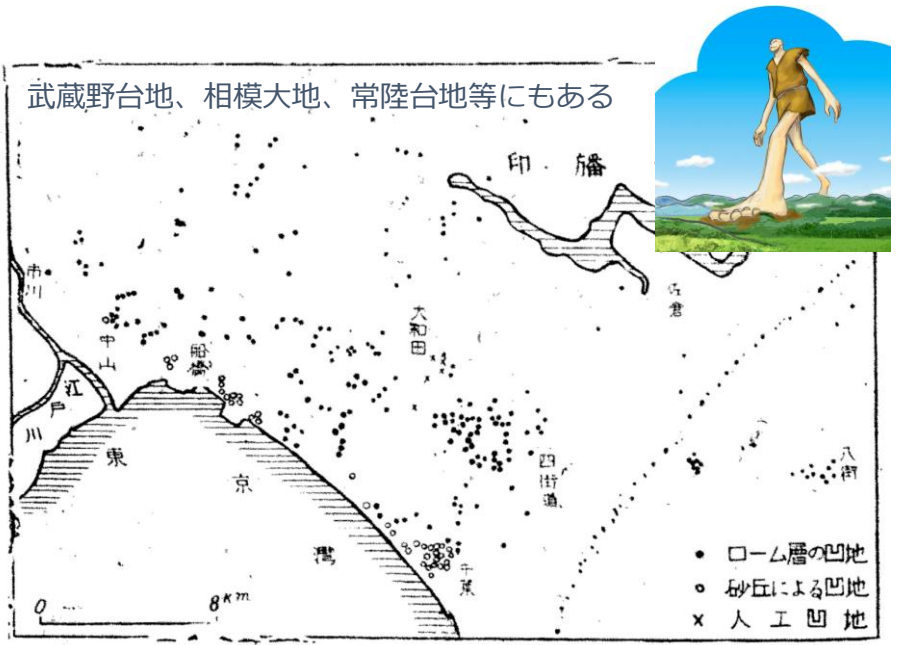


- 印旛沼の地下には砂で充填されている旧河道が下流方向へ伸びているだろう。
- 不均質な構造を経由する台地域からの地下水の供給があるはず。
- 我々は水循環の場をありのままに理解しているといえるか。
- 概念（すなわち普遍性）を探究するのが科学とすると、現実に対峙するのが市民科学

ダイナミック地層学
(増田富士雄) の考え方の重要性



④台地上の閉じた凹地 台地の上には閉じた凹地がたくさんありますが何？ -ダイダラボッチの足跡？



下総台地西部の凹地分布 (花井、千葉、1939)

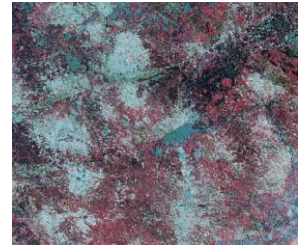
(ダイダラボッチ: 加曽利貝塚応援サイト <https://www.kasori.net/>)

千葉市高田町の凹地

凹地底部より南西方向を望む。左右、前方が高くなっていることがわかりますか。

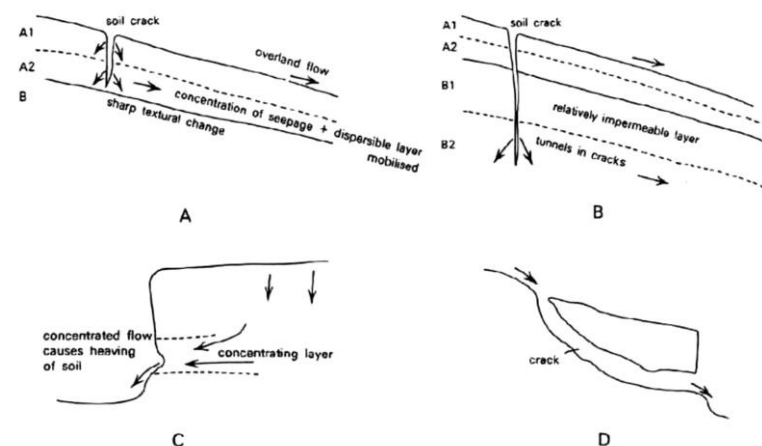
閉じた凹地の成因は？

- ①ダイダラボッチの足跡 (?)
 - ②人工説 (△)
 - ③溶食ドリーネ説(○) ⇒地下侵食説
 - ④湧水地の乾涸説 (△) 東アフリカ高地にあり
 - ⑤埋積谷説(△) 浅い谷が火山灰の降灰によって埋積
- 注) ②~⑤は花井・千葉(1939)による



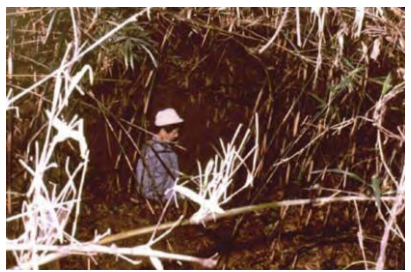
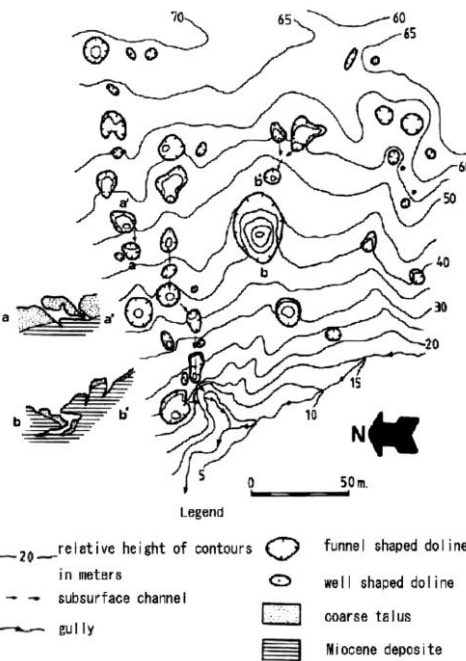
地下侵食説の可能性

- 「佐倉南方岩富の凹地では豪雨時に水が溜まってそれが付近の崖端より浸出. . . ローム層と粘土層の層間よりなされる. . .」(花井・千葉、1939)
- 多摩丘陵では谷頭に巨大パイプが存在
- 上総丘陵でも谷頭部に巨大パイプ、ボラ穴(地すべり)



(上)パイプの発生と地下侵食の進行(概念図)
(右)多摩丘陵の谷頭斜面の陥没孔
(新藤静夫の地下水四方山話より)

地下侵食は一般的な現象



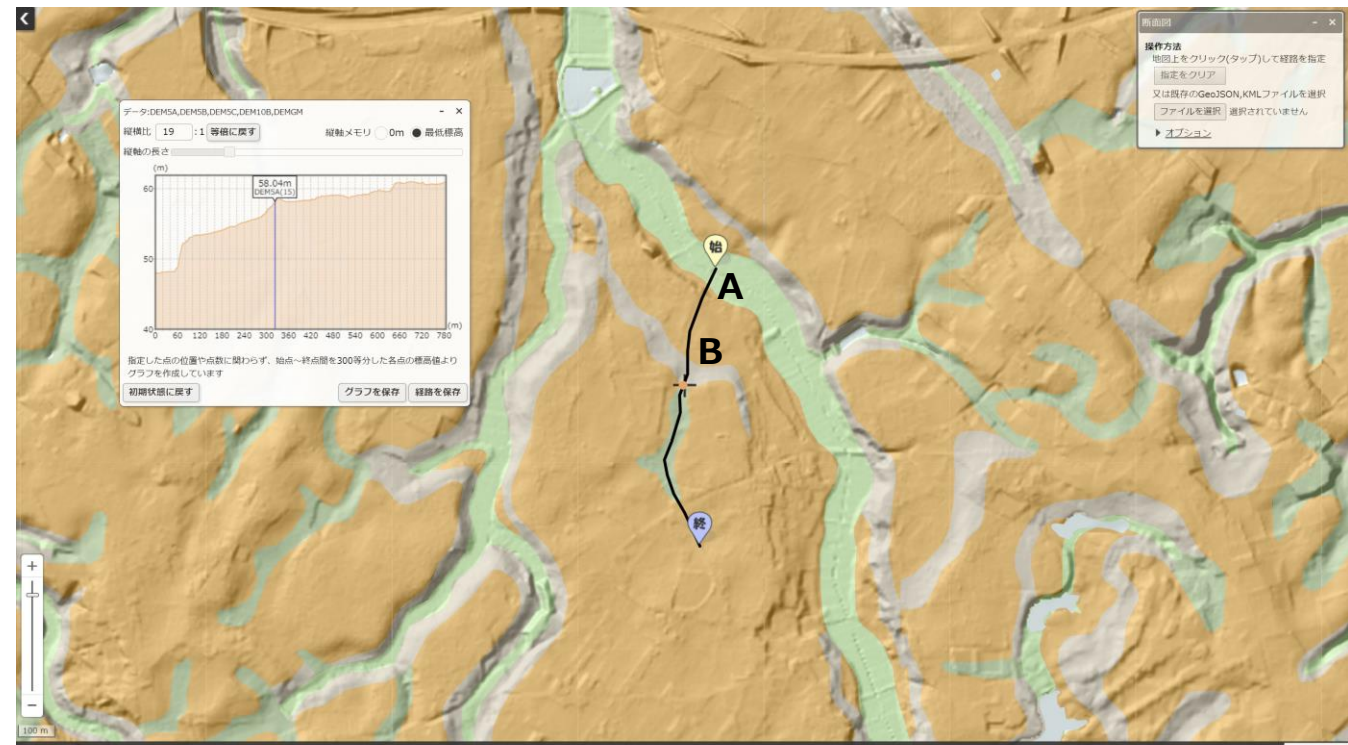
(上)多摩丘陵の陥没孔
(新藤静夫による)

⑤化石谷 (abandoned valley)、無水谷

その1.下流側で地形の回春が起こり（新しい侵食基準面に適応した侵食谷の形成）、上流側の古い谷が谷の形成を停止して形成（ローカルな侵食基準面であった谷底面の地下水面が下がり、地下水流出による地形発達が停止）。

その2.隣接する流域が、より大きな地下水流域を獲得して、当該流域の谷底の地下水面が低下し、谷の形成を停止。

[判定] 主谷との合流点に崖があるかどうか（不協和合流しているかどうか）



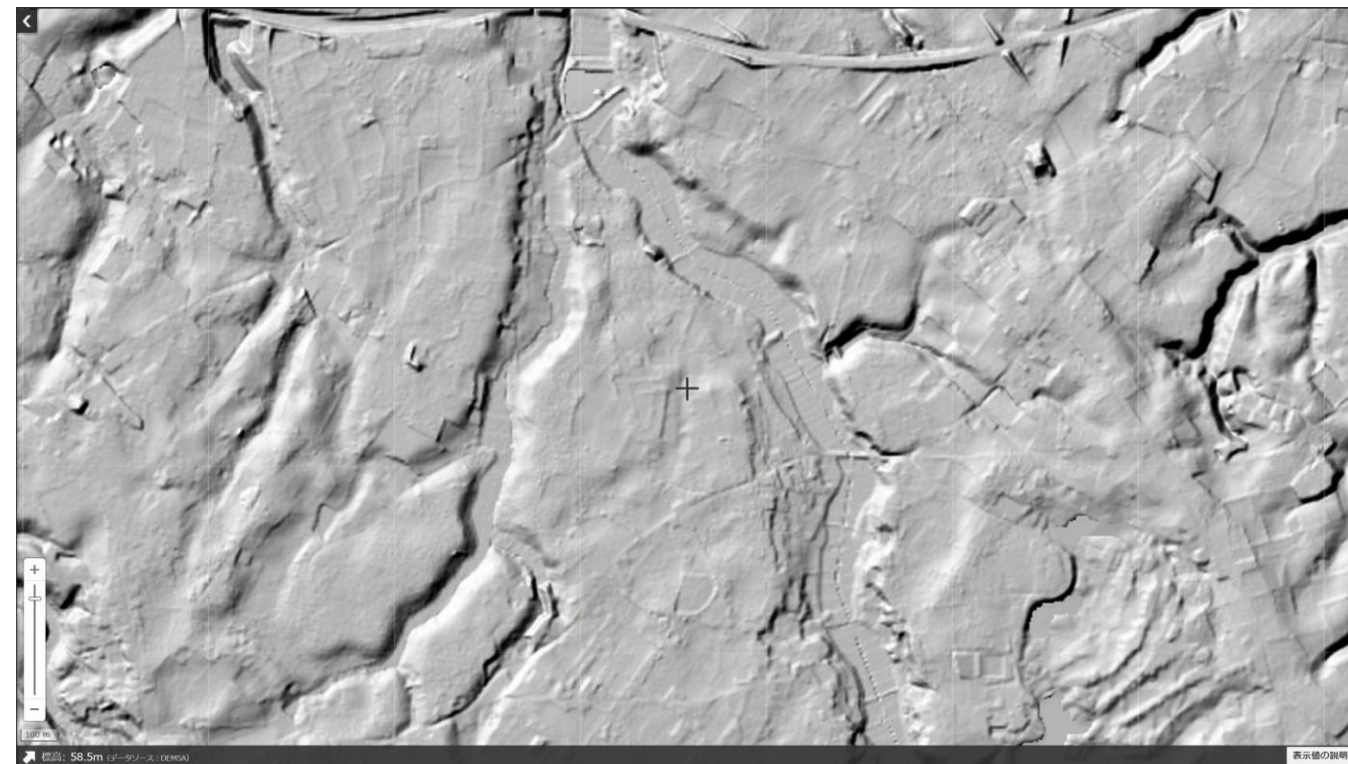
A.本流（右上が上流）と支谷（右から合流）の合流点に崖があり、段丘化している。



A.支谷合流点の崖を本流低地側から望む。この地点では段差は約5m。

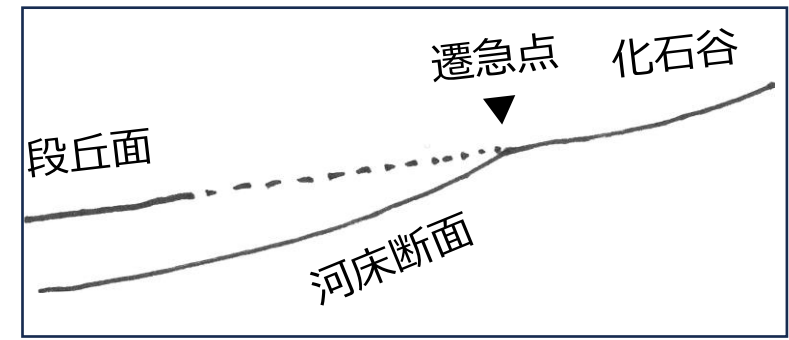


B.支流を遡ると、緩やかな斜面がある。ここは地理院地図では斜面（山地と表記）で、その上流は浅い谷に続く。



現象：小流域ごとに比流量が異なる
 ⇒地下水流域の大きさが異なる
 ⇒上流に化石谷

- ・化石谷は山地流域上流部では良く見られる構造
- ・処分場建設、地層汚染、等の事象を観察する際に重要



ローカルな地質、地形を観察し、
 水文現象との相互作用を想像しながら
 考察、想像する...
 すると、自然の営みが見えてくる！

Fig. 1 Location of the study area.

Fig. 3 Daily discharge in mm H₂O in dry season.

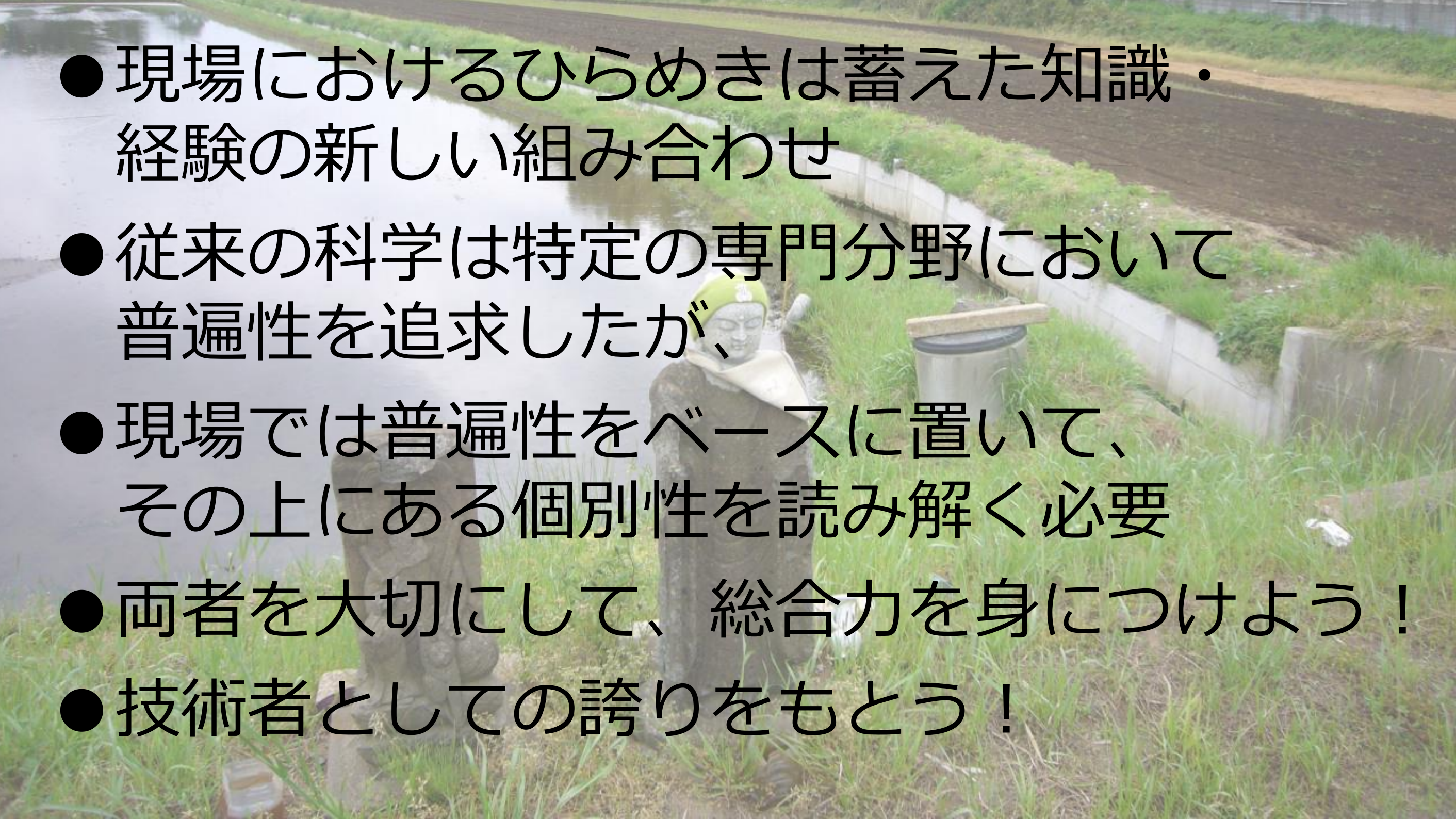
“地下水のありかた” ご理解いただけたでしょうか

- 地下水は私たちの暮らしと関係性を持つ
一要素として環境を構成している
- 今は、その関係性が忘れられているようだ
- 世の中は高度成長期を経た低成長時代だが、成熟時代に
移行する必要がある
- その時こそ、人、自然、社会が関係するまわりである
“環境”を構成する要素としての地下水を意識する
- そして、自然の恵みを活かした暮らしを構築していきたい



環境学としての
水文学



- 
- 現場におけるひらめきは蓄えた知識・経験の新しい組み合わせ
 - 従来の科学は特定の専門分野において普遍性を追求したが、
 - 現場では普遍性をベースに置いて、その上にある個別性を読み解く必要
 - 両者を大切にして、総合力を身につけよう！
 - 技術者としての誇りをもちよう！