

初級技術者のための地下水講座

—地下水概説—

1.地下水の理論と実際

2022年6月

近藤 昭彦

千葉大学環境リモートセンシング研究センター

教授 理学博士



地下水の不思議



千葉県養老川上流の自噴井

自噴井の位置は河床より20m以上高い位置にある



カバーストの自噴井の場所 ●

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

地下水の不思議



養老川上流域—養老溪谷

千葉時代
命名なった！

● 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？

単斜構造を呈する砂泥互層一房総の下総層群・上総層群



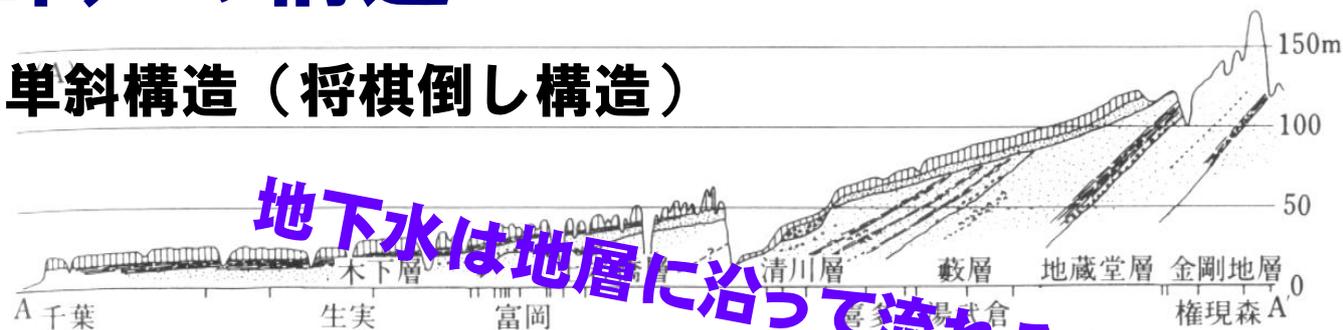
図12-4 地質断面と自噴井の取水深度および自噴量状況図(A-B) (高村原図)



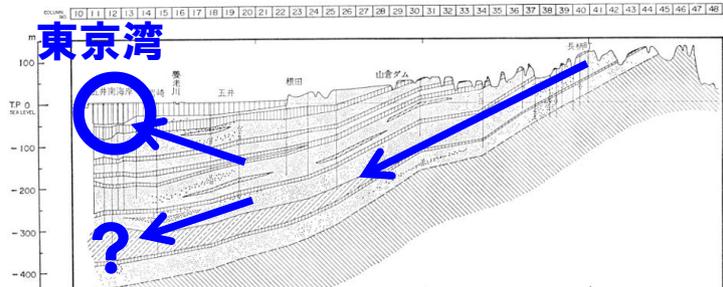
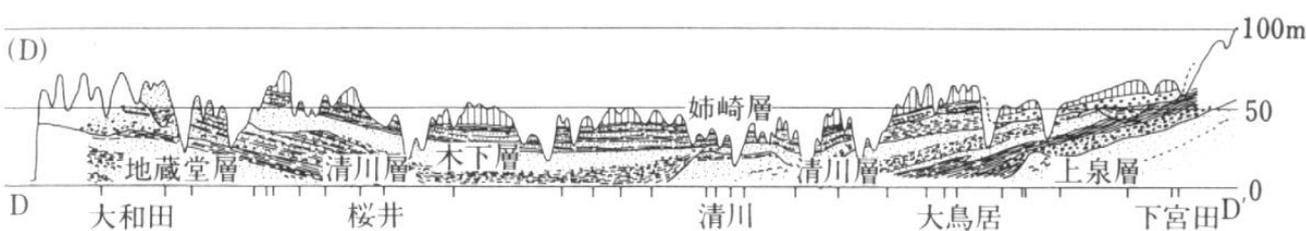
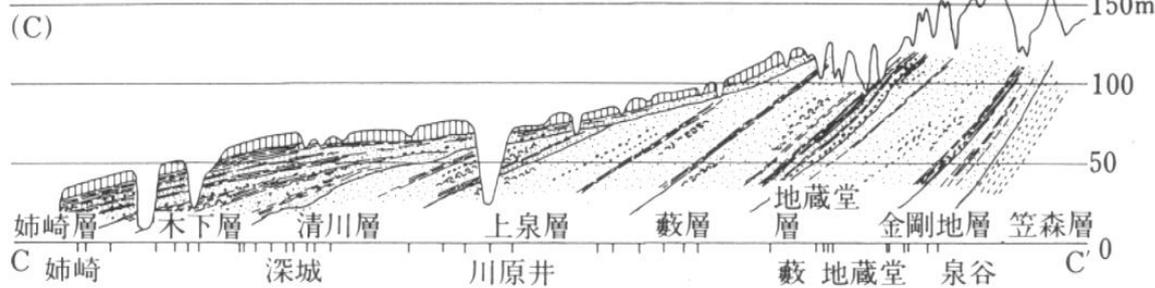
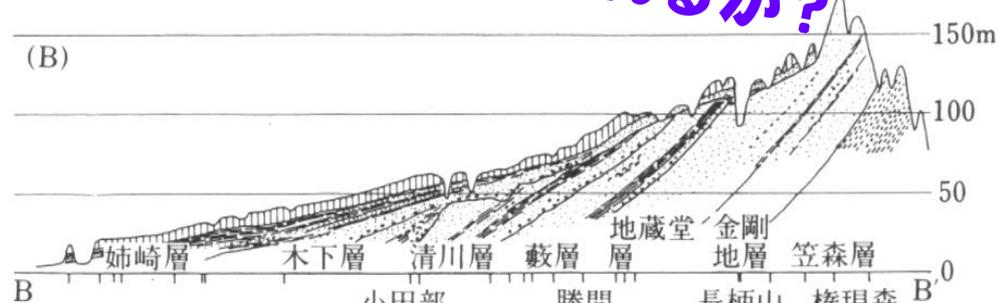
養老川の地質断面と自噴井の採水深度(高村、1972)

成田層（下総層群）の構造

東京湾に向かって傾斜する単斜構造（将棋倒し構造）



←東京湾



- 沖積層
- 砂層
- 砂質粘土層
- 砂礫層
- 粘土層
- 笠森層

- 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
- 露頭的位置



東京湾下の地下水は淡水

(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.

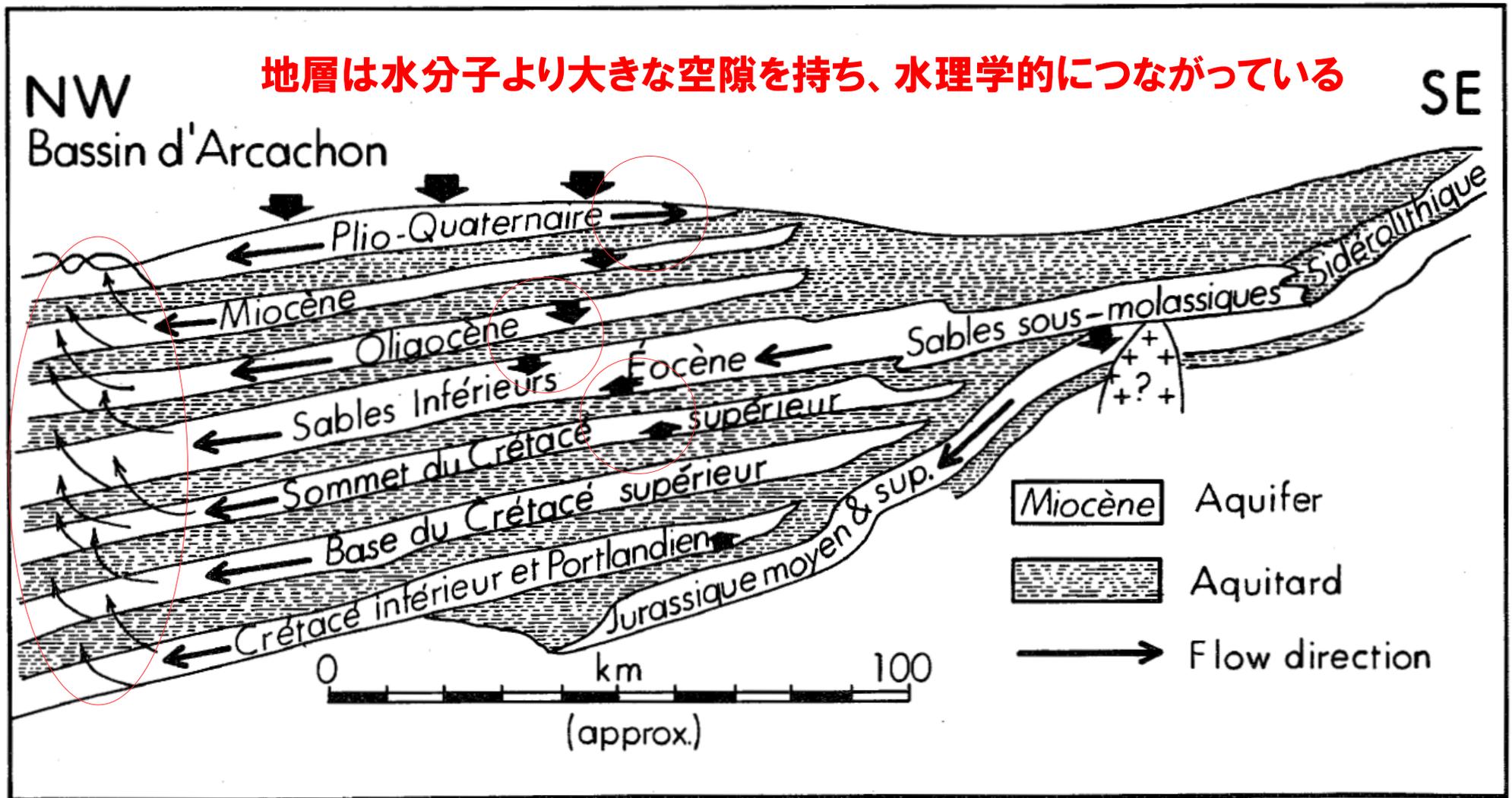


Figure 3. Schematic of multiple-aquifer systems and computed flow rates, Aquitain Basin, France (modified from Besbes et al., 1976).

水は低きにつく・・・何の低きに？

ポテンシャル（水理水頭）

$$\text{水理水頭}(h) = \text{高さ} + \text{圧力}$$

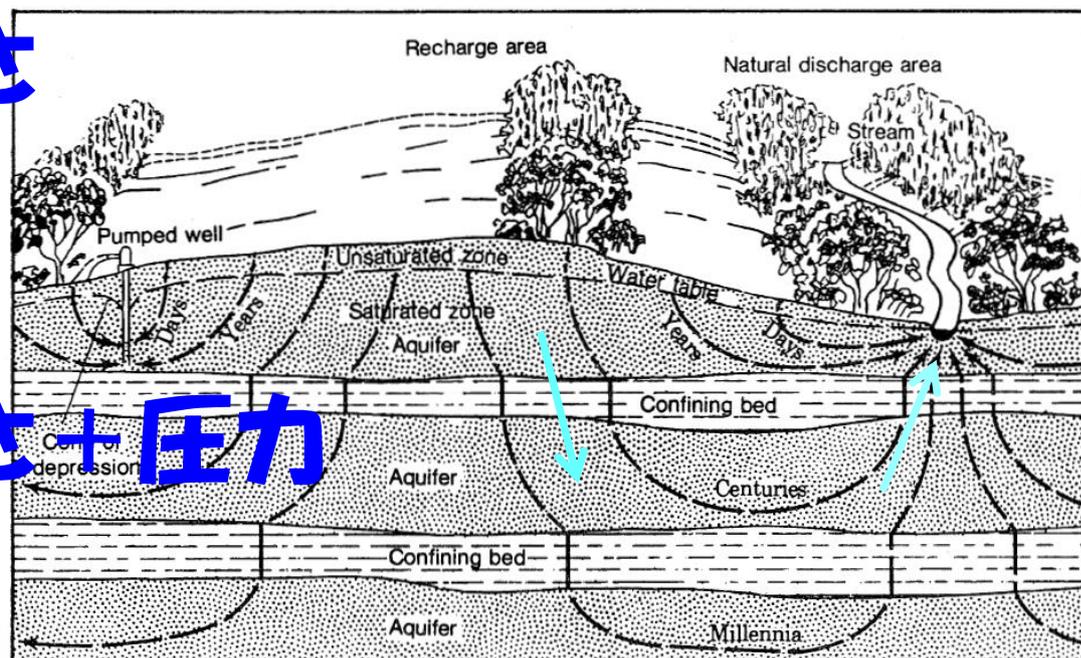


川の場合は圧力は0（大気圧）

$$\text{水理水頭}(h) = \text{高さ}$$

地下水の場合

$$\text{水理水頭}(h) = \text{高さ} + \text{圧力}$$



注) 水理水頭 h: hydraulic head

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)

$$q = -K \text{grad} h$$

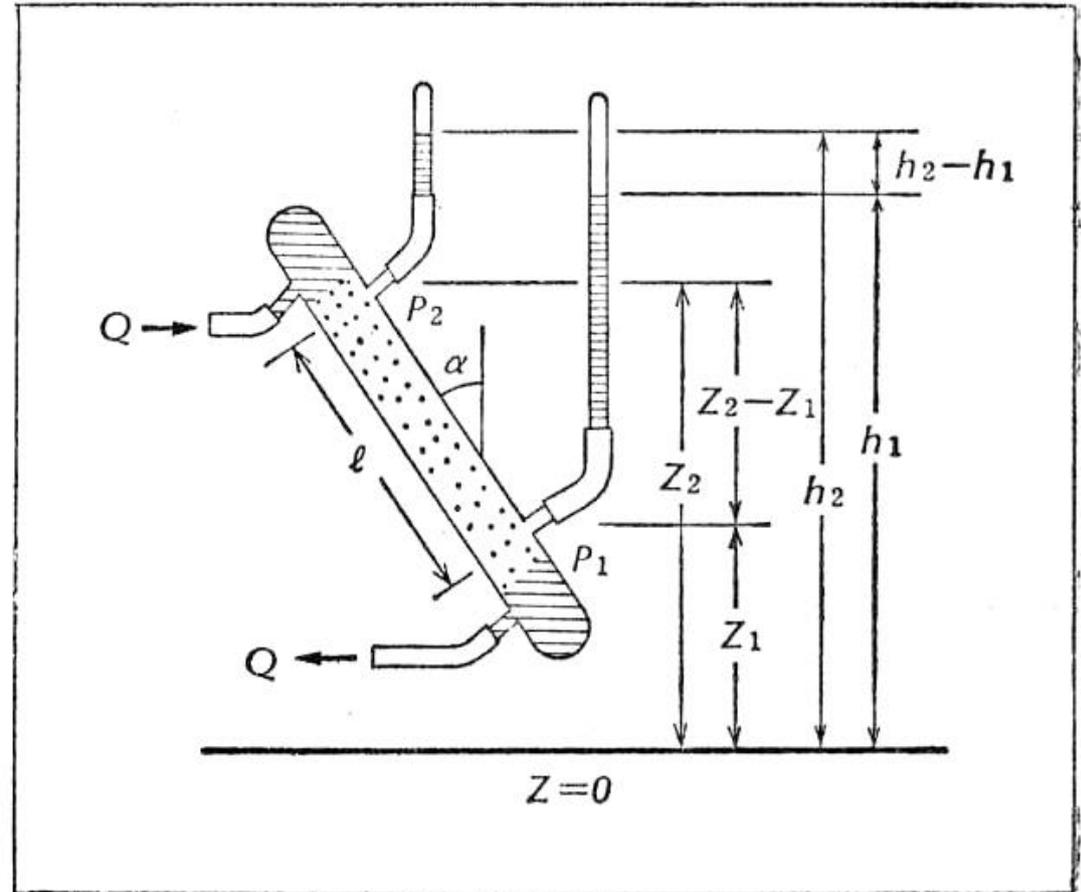


図 1.12 ダルシーの実験

(山本荘毅、新版地下水調査法、古今書院)

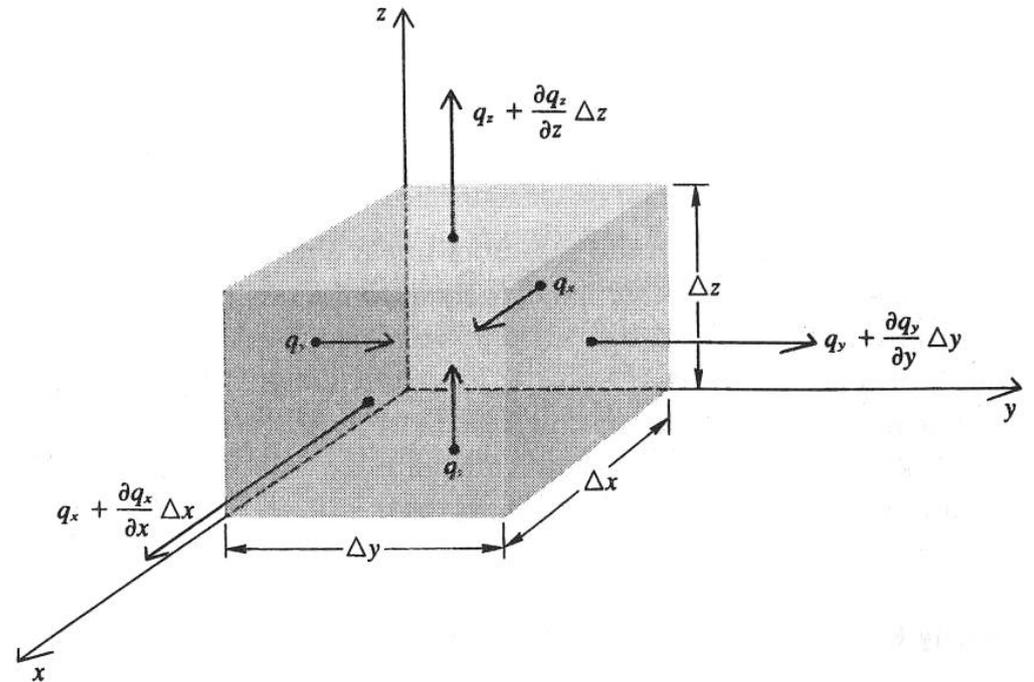
地下水の運動 基礎式

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

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

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

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、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

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

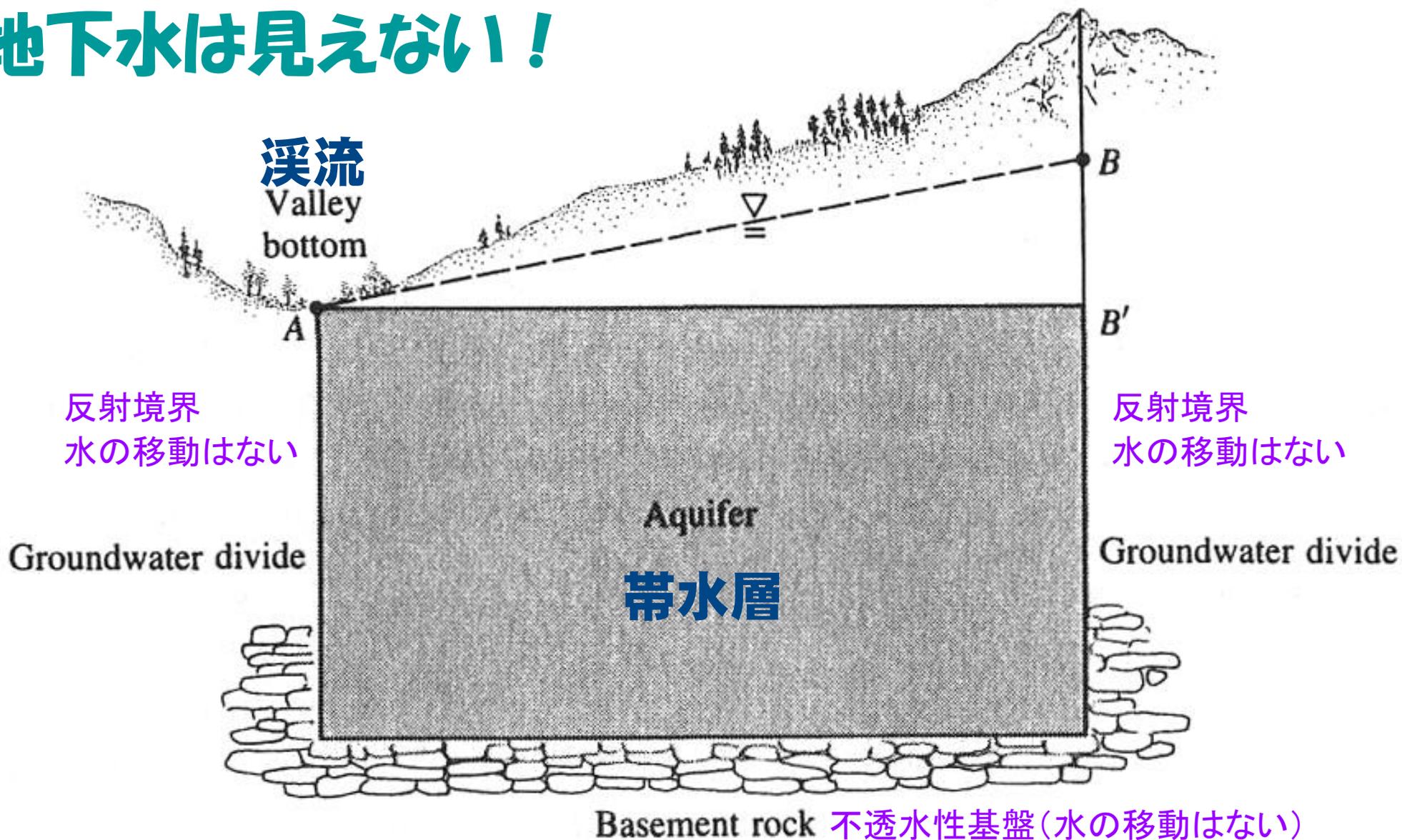
$$\frac{\partial^2 h}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 h}{\partial z^2} = 0$$



尾根

Topographic high

地下水は見えない!



反射境界
水の移動はない

反射境界
水の移動はない

Basement rock 不透水性基盤(水の移動はない)

左端に大河川、右端が流域界となっている波丘地を仮定

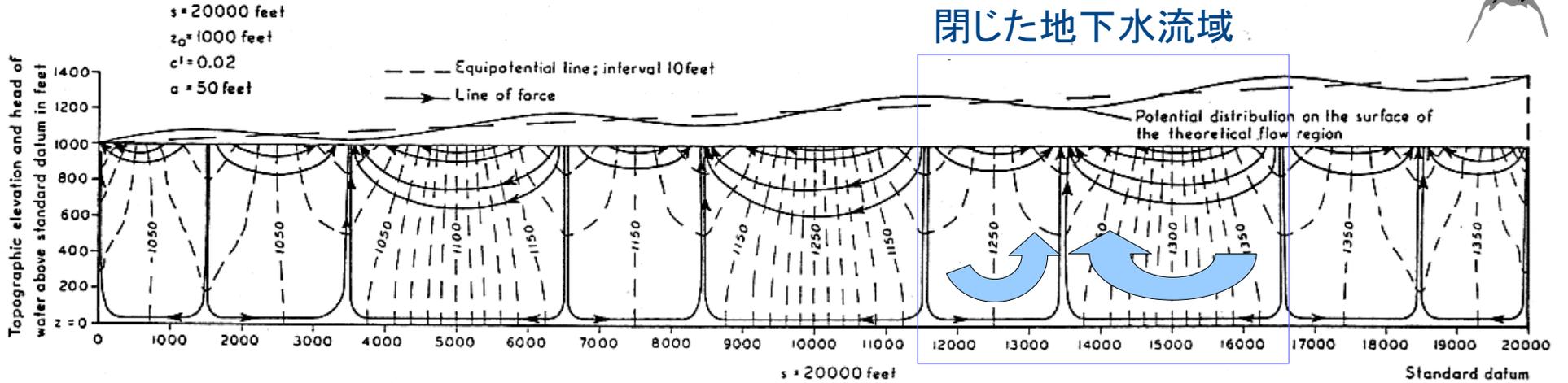


Fig. 2a. Potential distribution and flow pattern as obtained by equation 6.

→ 流線

地域全体の勾配が大きくなるとうなるか？

注) 帯水層は等方・均質

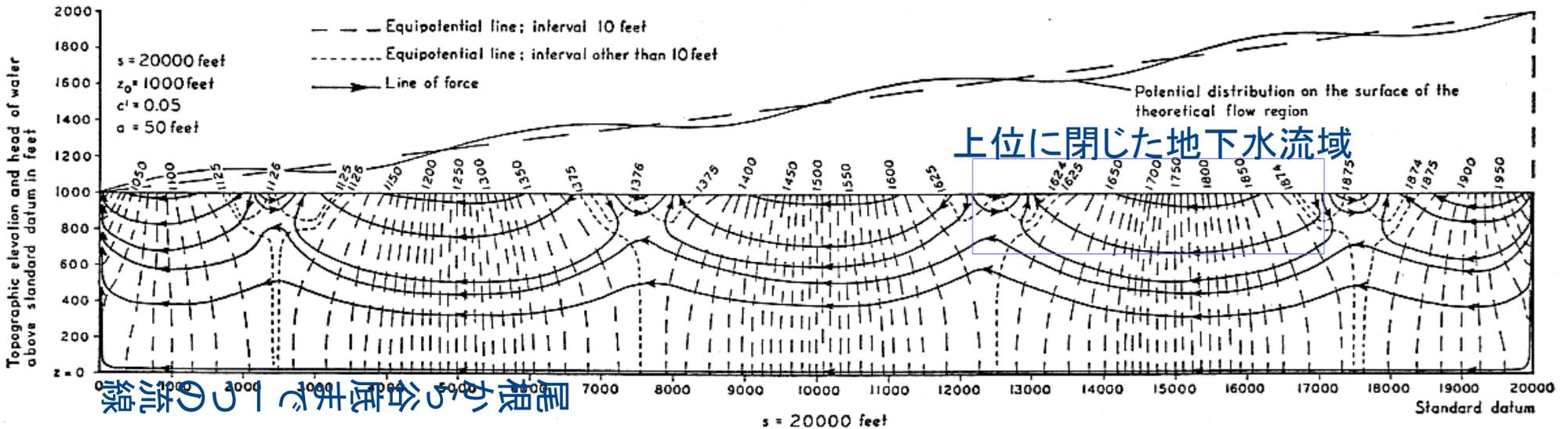


Fig. 2c. Potential distribution and flow pattern as obtained by equation 6.

Tóthが到達した地下水流動系の概念

$s = 20000$ 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

Topographic elevation and head of water above standard datum in feet

局地流動系

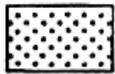
中間流動系

地下水流動系の
階層構造

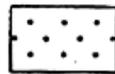
地域流動系

$s = 20000$ feet

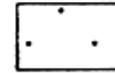
Standard datum



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.

-
- 湿潤地域では地形の高まりは地下水面の高まりとなる
 - 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
 - 涵養域では地下水は下向きに流れる
 - 流出域では地下水は上向きに流れる
 - 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

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—

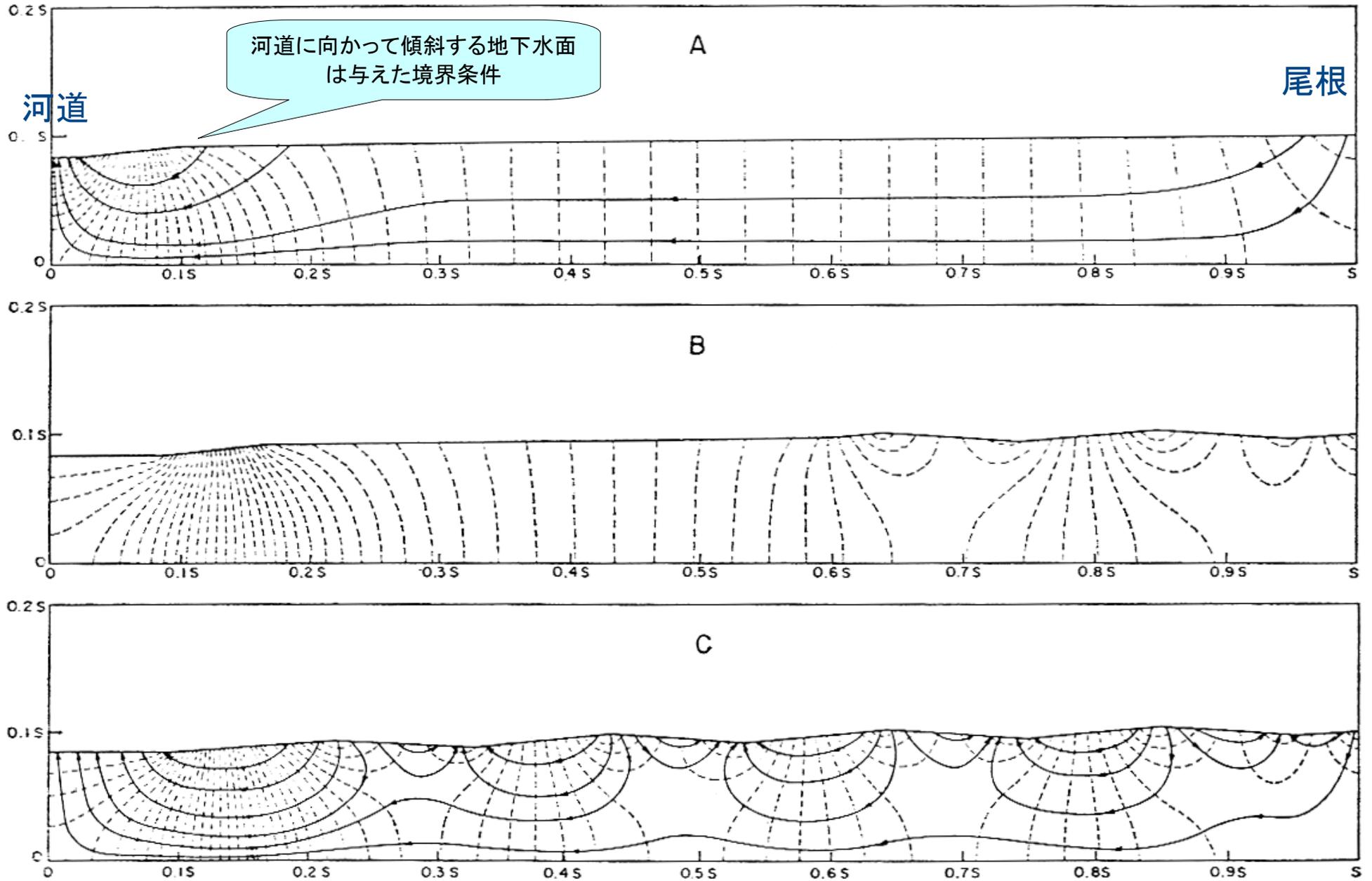


Fig. 1. Effect of water-table configuration on regional groundwater flow through homogeneous isotropic mediums.



透水係数の異なる水平層の累重の効果

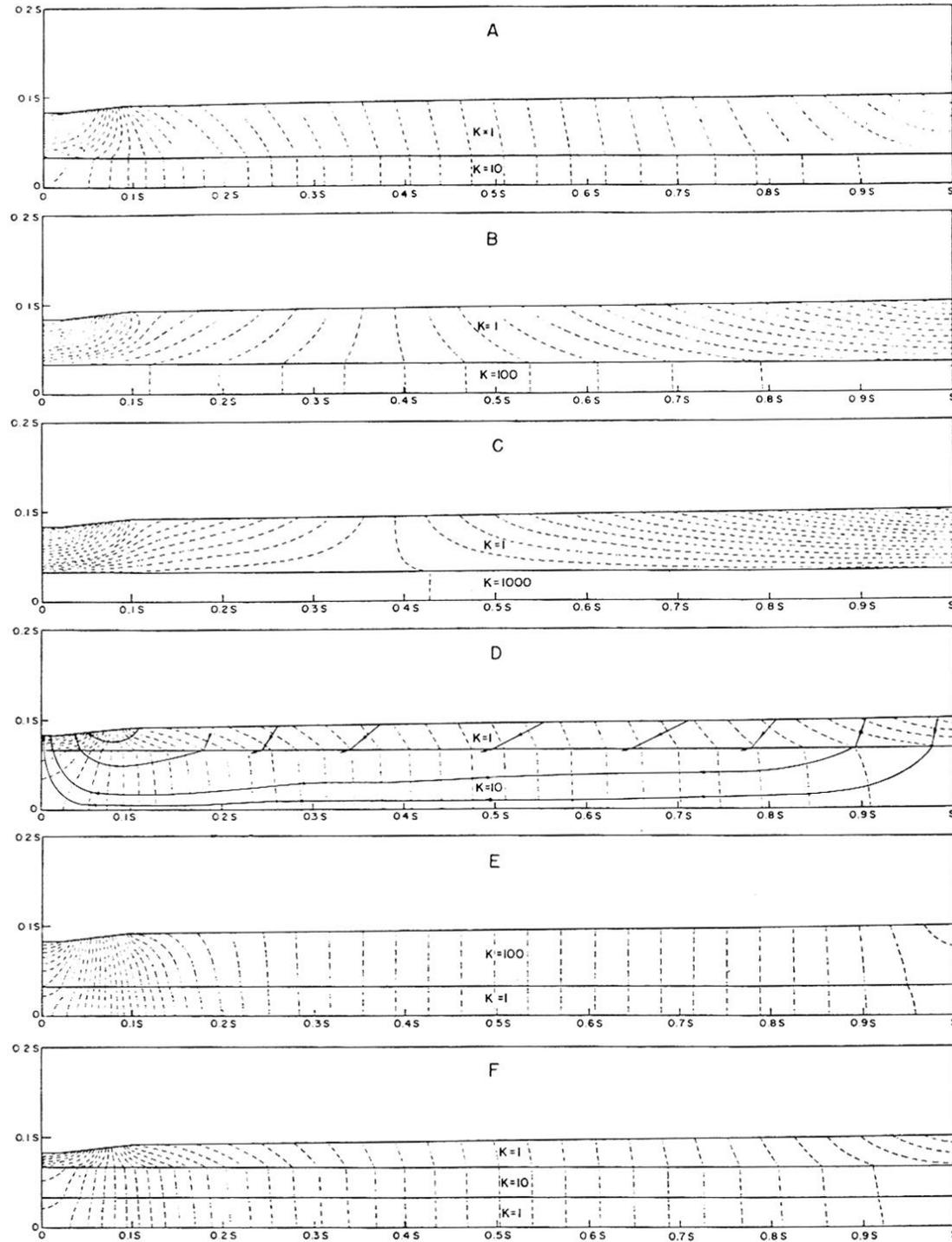


Fig. 2. Regional groundwater flow through layered mediums with a simple water-table configuration.

解析解では解けない問題も

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

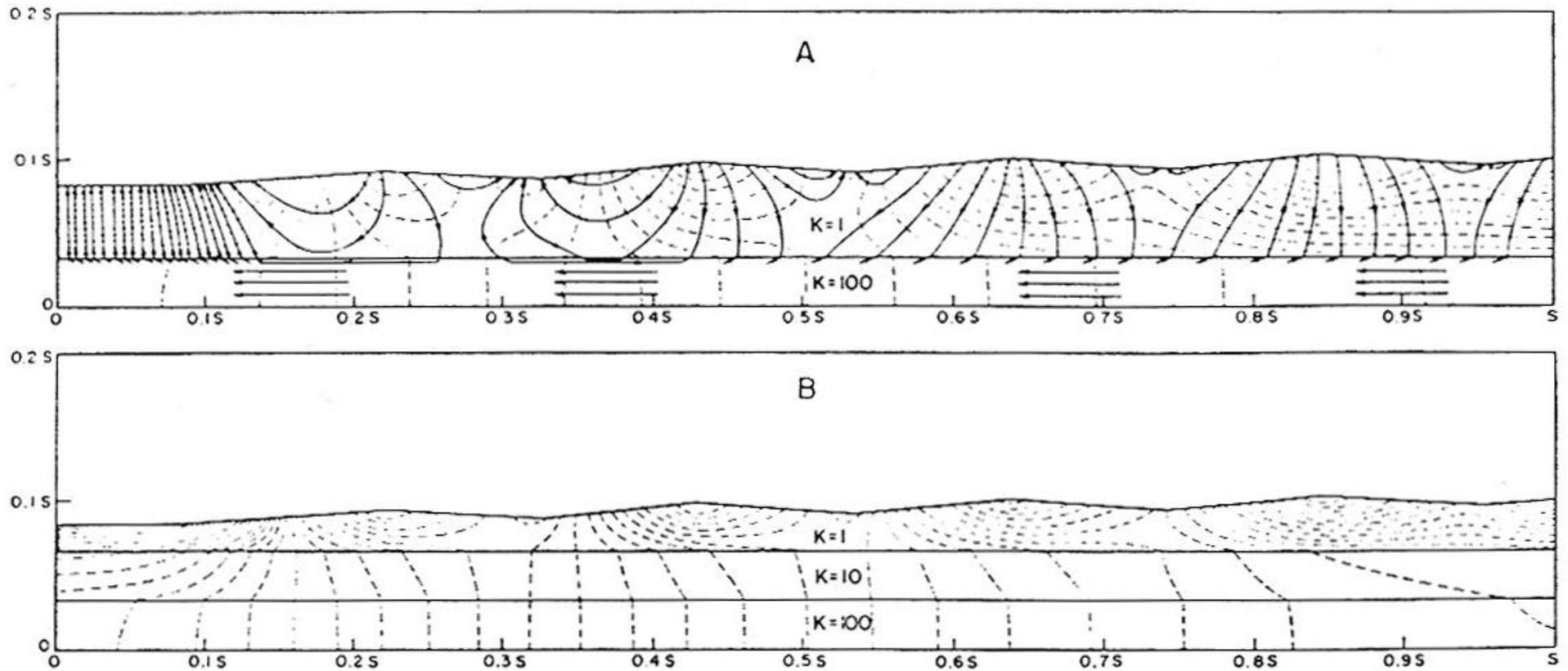
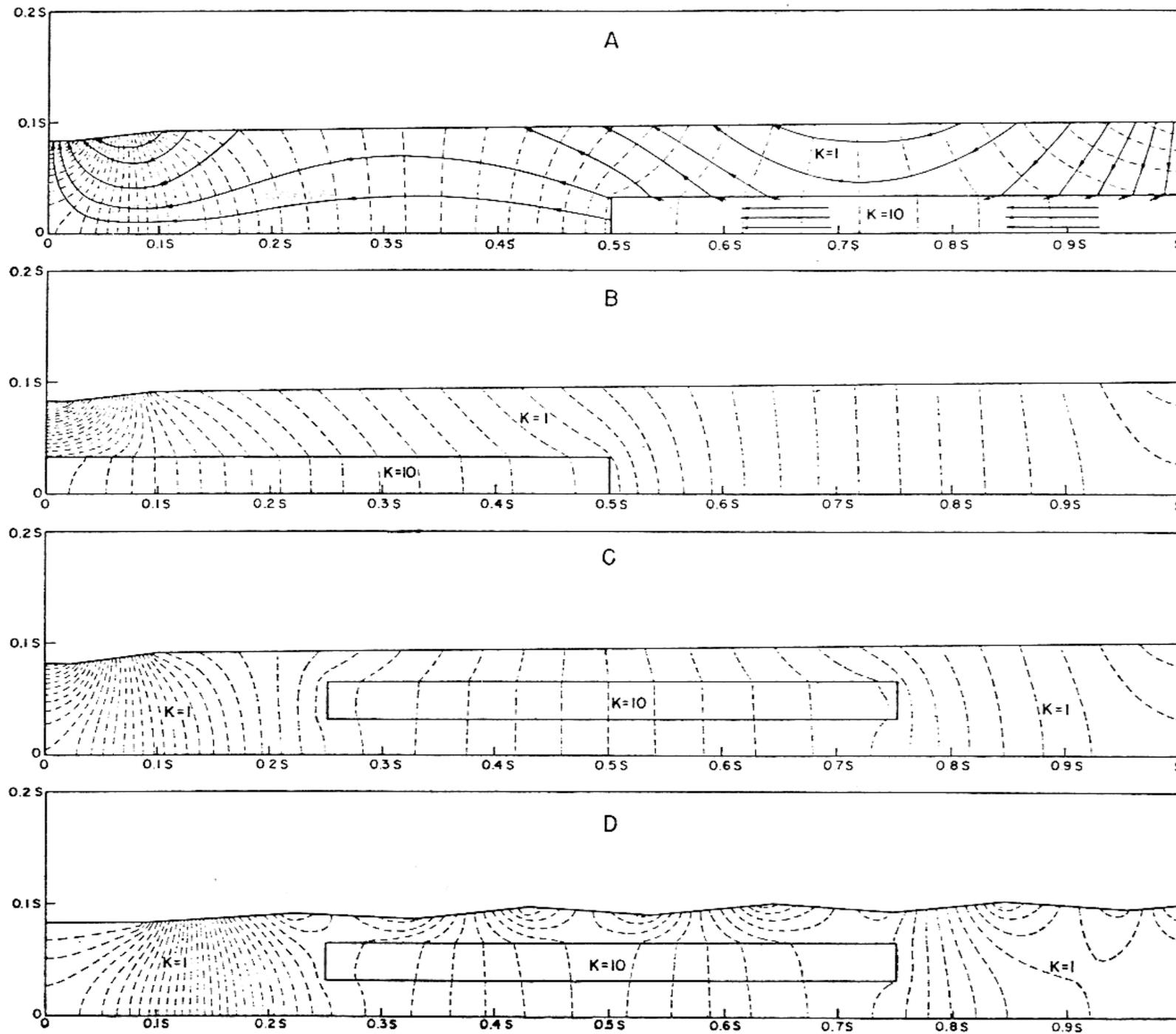


Fig. 3. Regional groundwater flow through layered mediums with a hummocky water-table configuration.

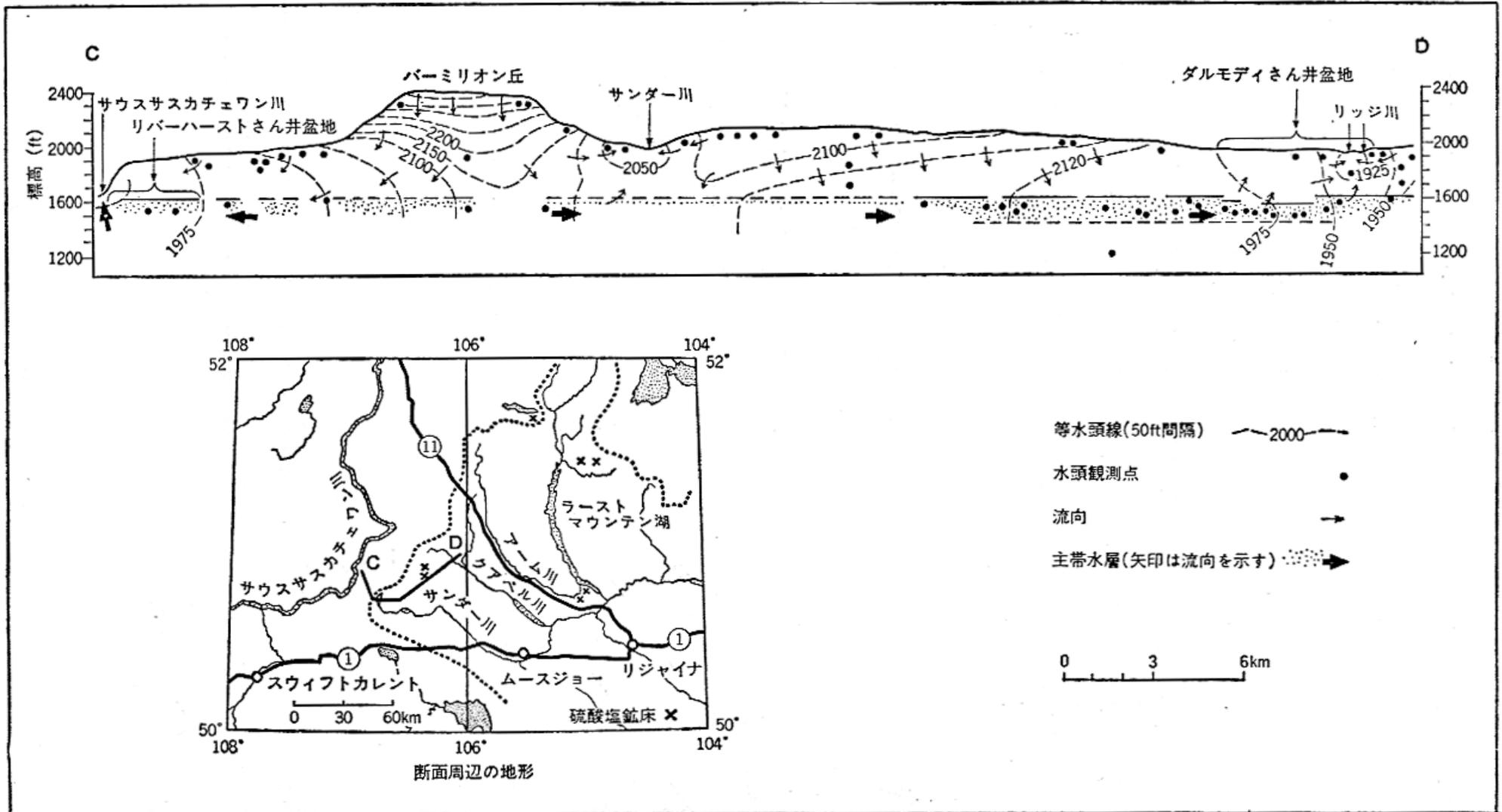
地表に現れない帯水層が地下にあったら？



(例)熊本の砥川溶岩

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 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 千葉県下総層群、上総層群の単斜構造

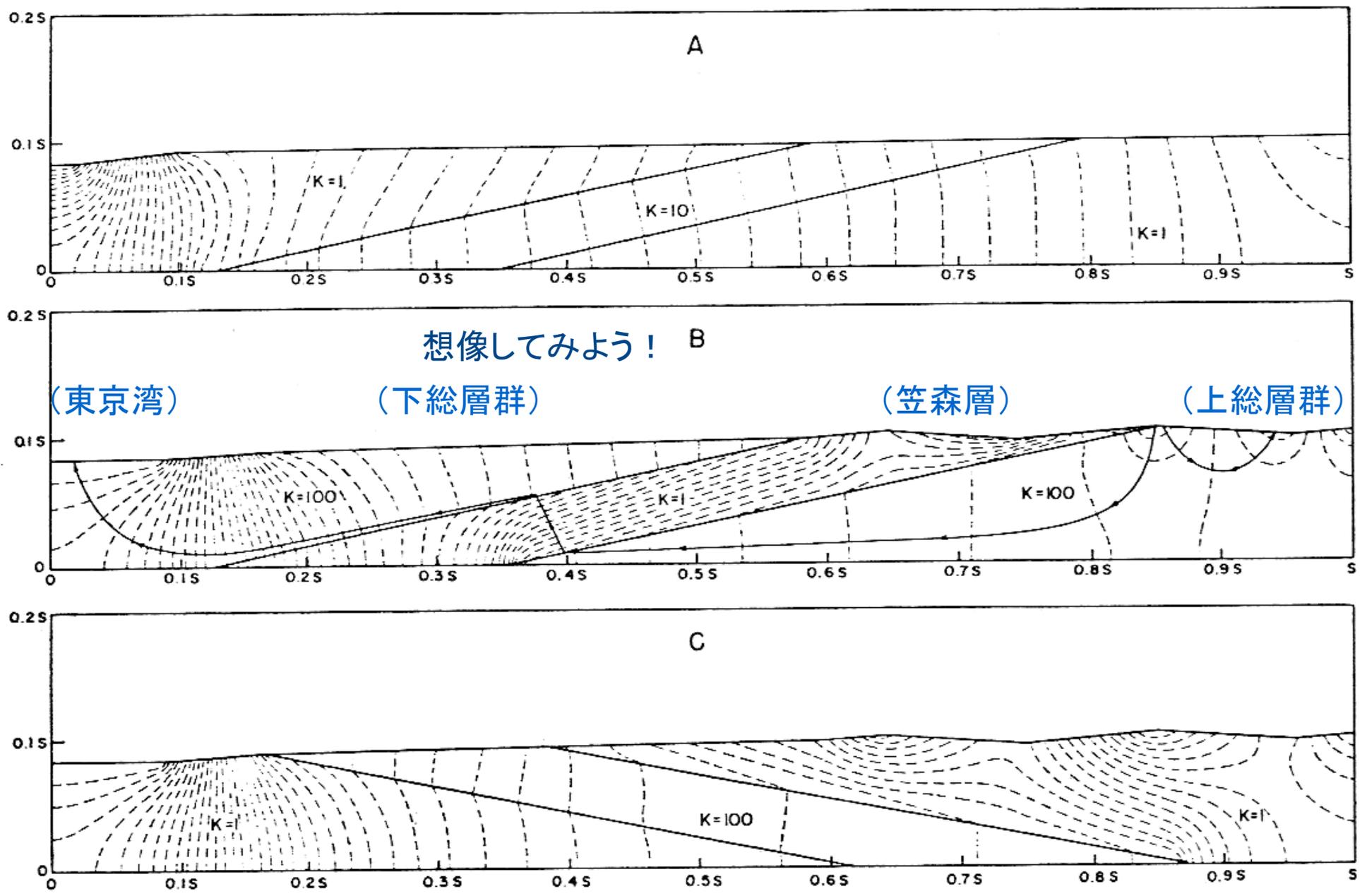
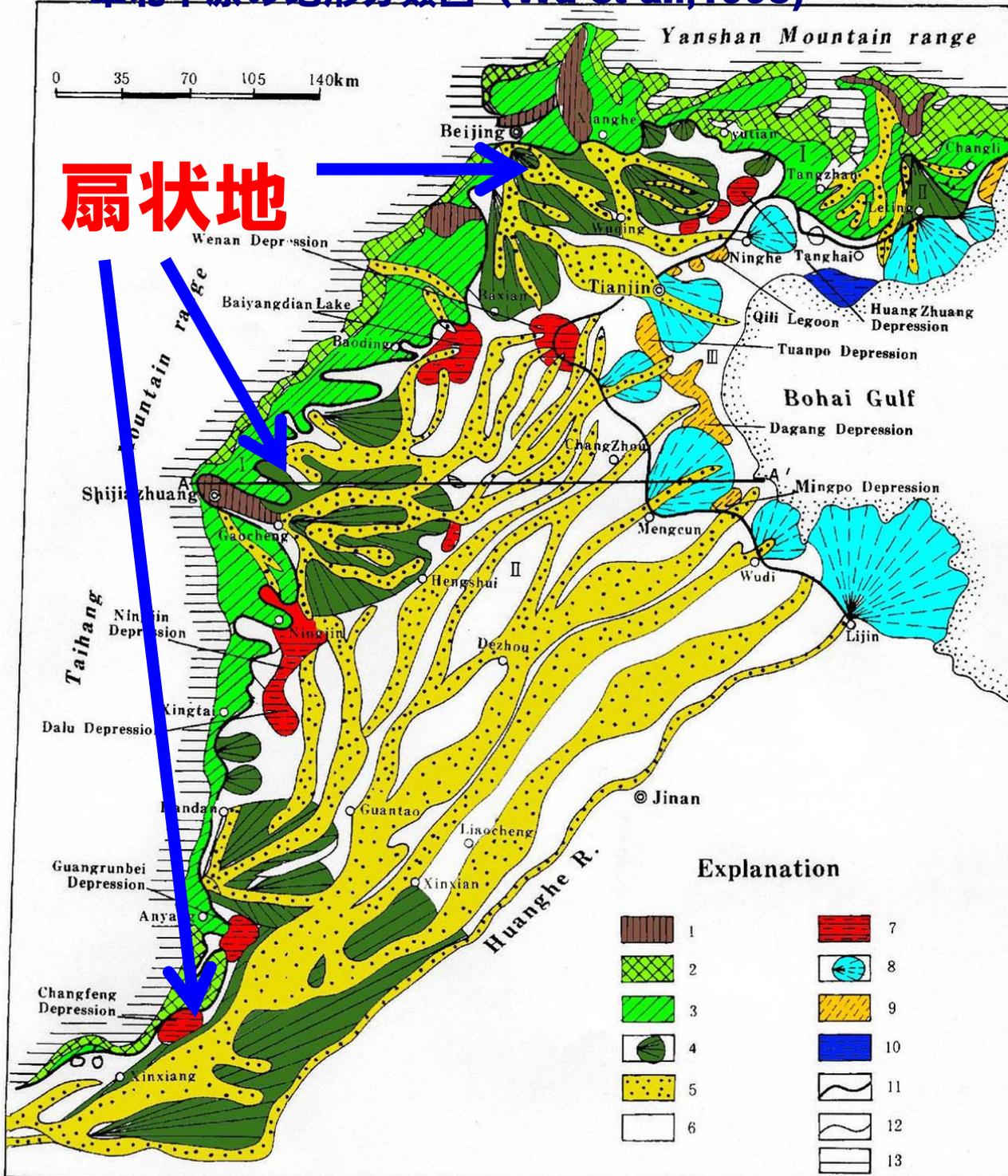


Fig. 5. Regional groundwater flow in regions of sloping stratigraphy.

-
- 湿潤地域では地形の高まりは地下水面の高まりとなる
 - 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
 - 涵養域では地下水は下向きに流れる
 - 流出域では地下水は上向きに流れる
 - 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

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。済南の近く。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、灌漑に使えない

②政策によっても穀物生産量分布は変わる

地下水の流れの考え方 水は低きにつく

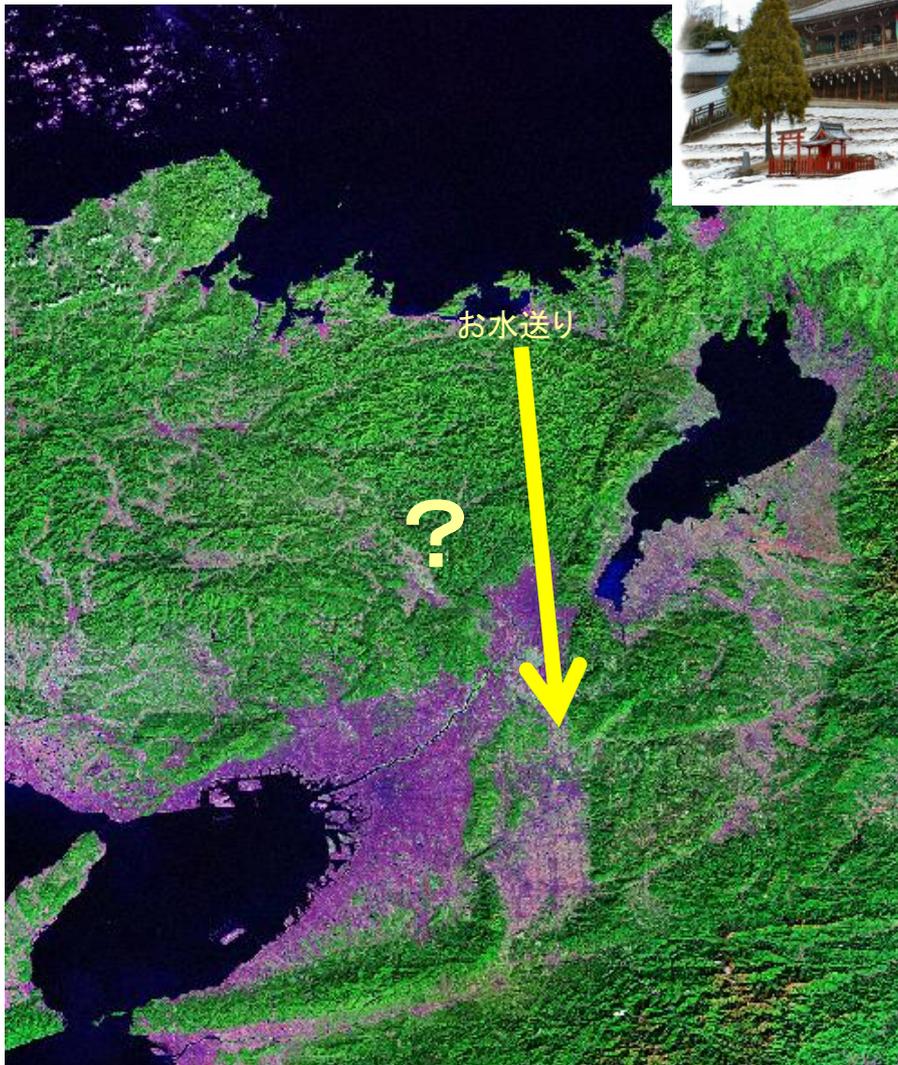
お水取りの水を汲む若狭井の水は若狭から来た？

水脈？ **ムリ!**

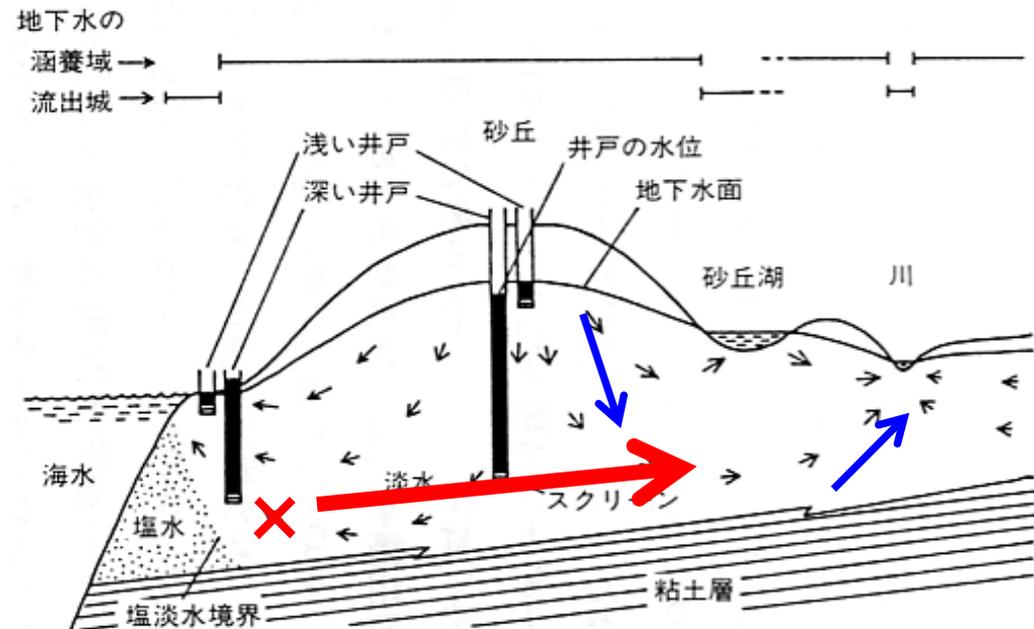
東大寺二月堂(東大寺HPより)



- 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)

地形を見て、地下水の流れを想像してみよう！

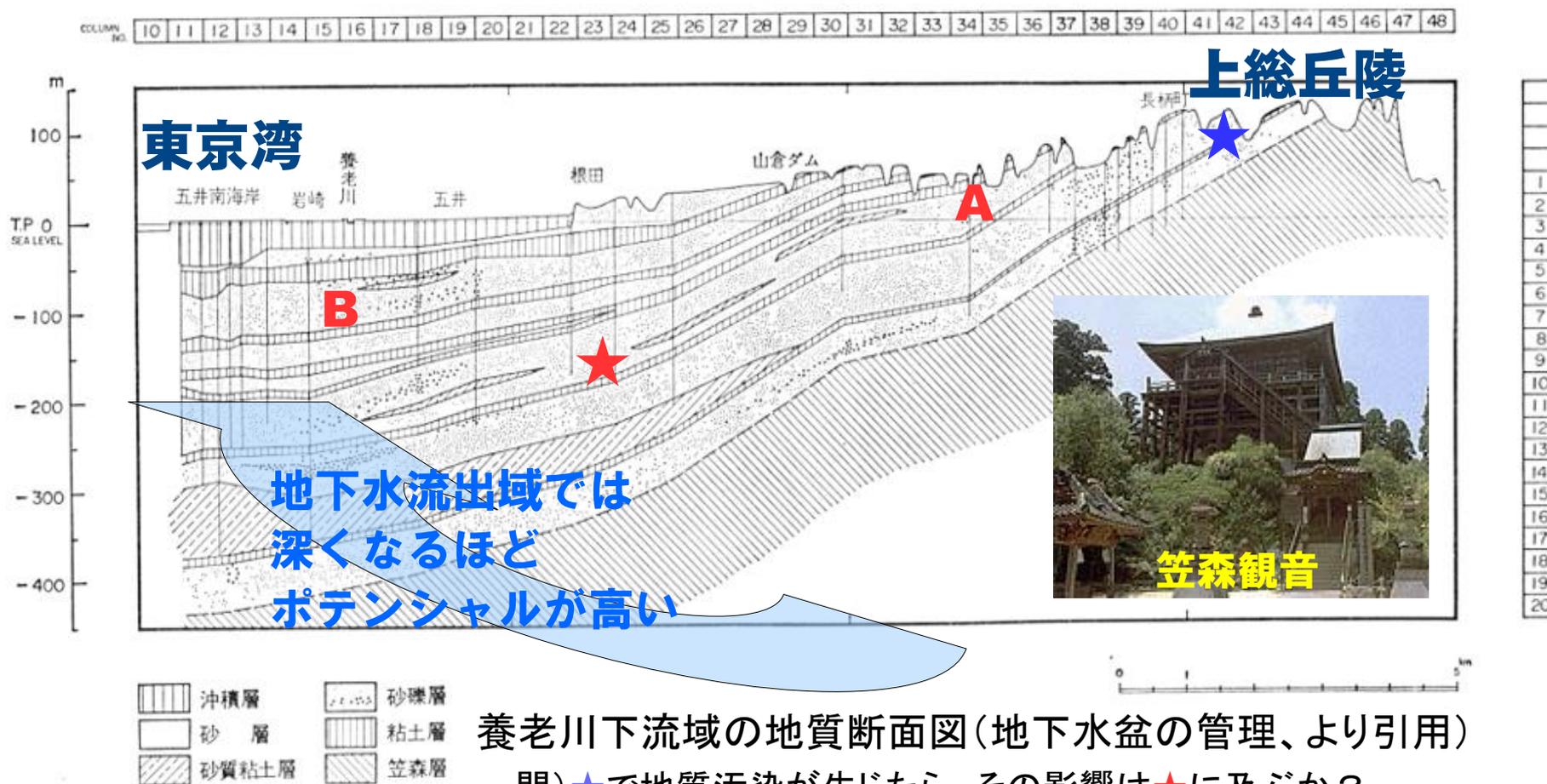


● Ushiku

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？

水理水頭の分布は地質構造によって修飾

大きなスケール 地形が効く



養老川下流域の地質断面図(地下水盆の管理、より引用)
問)★で地質汚染が生じたら、その影響は★に及ぶか？

台地を刻む谷の成り立ちと水循環



● ローカル地質、地形変化の歴史、を知ることの大切さ

(C)Google

氷期-間氷期サイクルによる気温変動に宍答して大気中のCO₂濃度は規則的な変動を繰り返してきた。

ところが、近年のCO₂濃度は過去60万年で経験したことがないレベルまで上昇し、西暦2100年にはこれまでの2~3倍に達するという。

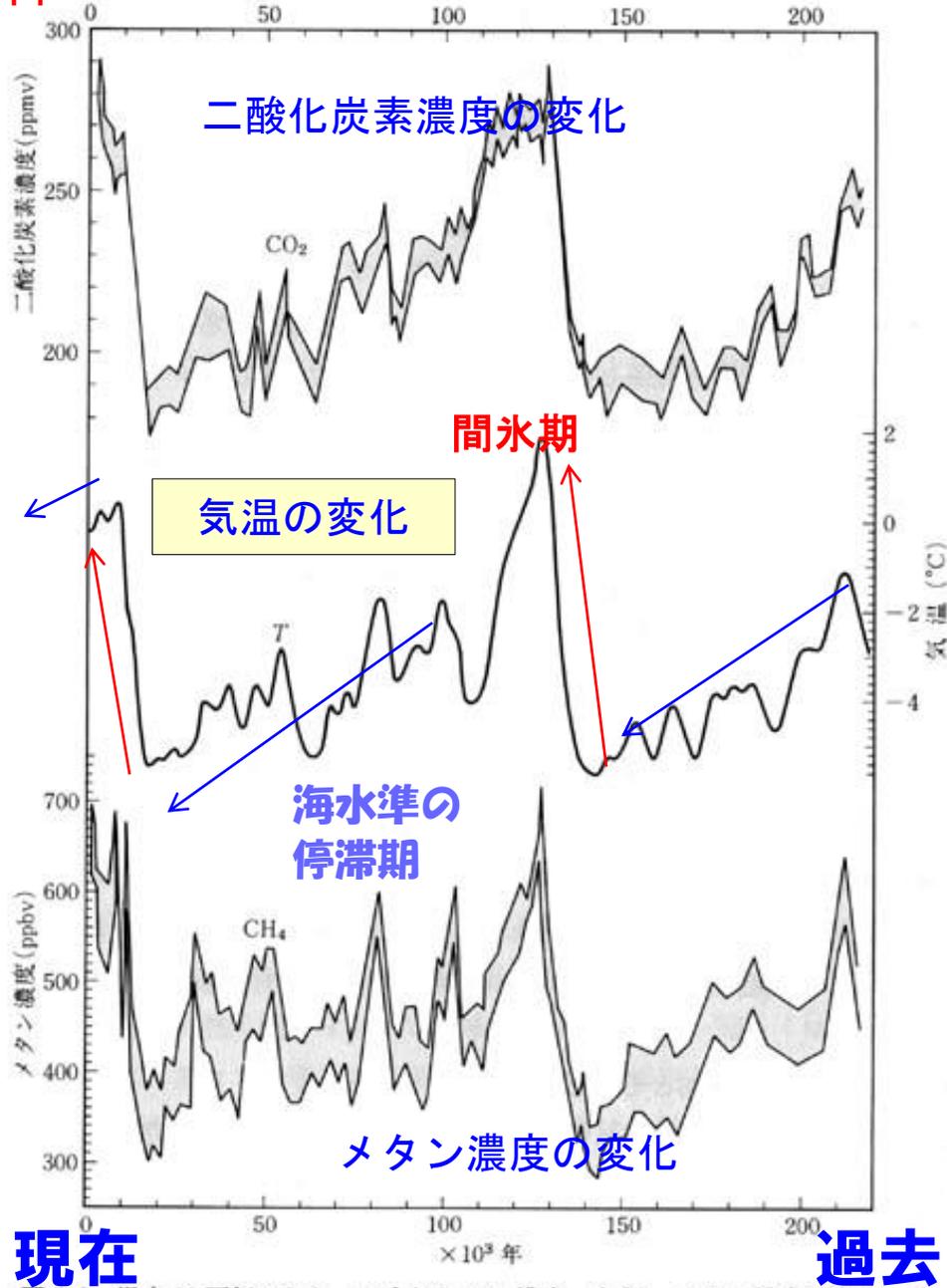
このような変動が下総台地の地形の形成、湧水のありかたとどのように関連しているのだろうか。

過去60万年間の大気CO₂濃度の変遷



300ppmv

13万年前 20万年前



現在

過去

図5.3 過去22万年にわたって生じたCO₂濃度、気温、メタン濃度の変化。南極のポストーク基地での氷床コアの分析による (IPCC, 1990)。

過去20万年前以降の気候変化

- 氷期・間氷期サイクルの気温変化は急激な温暖化、短い間氷期、長期の寒冷化
- 約2万年前に最終氷期は突然終わり、急激な温暖化が始まった
- 現間氷期で、最も温暖な時期はすでに過ぎ去った

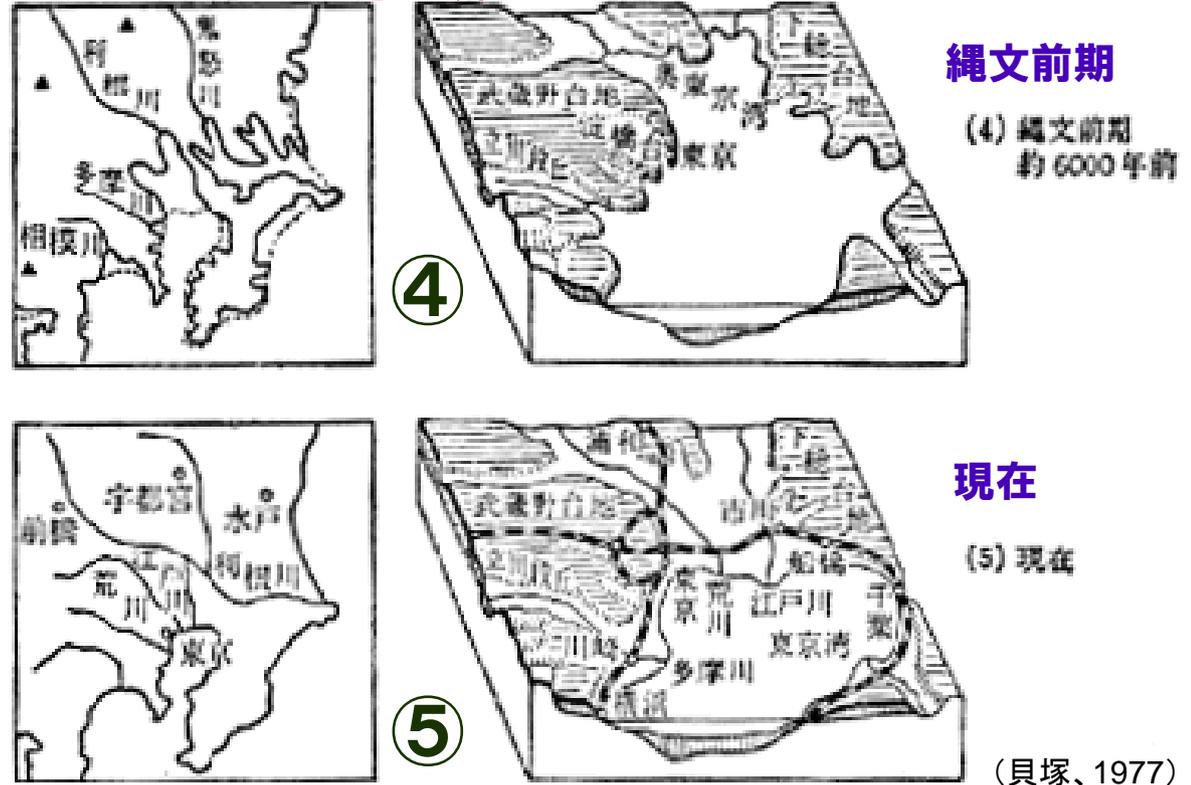
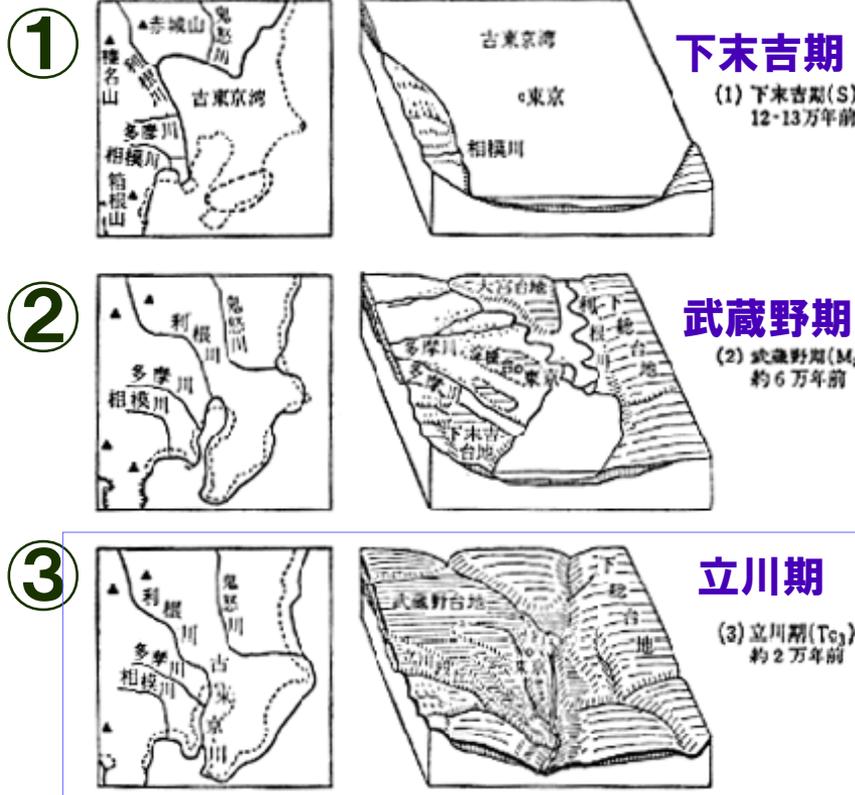
気温の変化⇒海水準の変化



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)

東京湾周辺の地形の形成

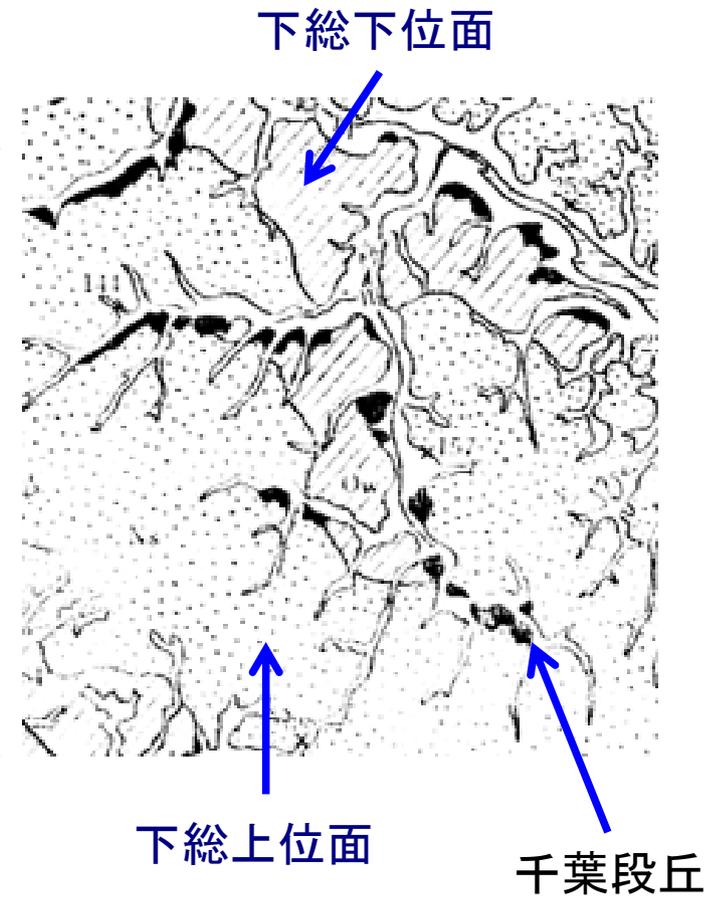


- 約12万年前、下総台地は古東京湾の海底だった
⇒この海底が隆起して現在の台地になった(下末吉面=下総上位面)
- 約6万年前の海水準の停滞期に下末吉面の下位に武蔵野面と呼ばれる地形面が形成された
- 約2万年前の最終氷期最寒冷期に海水準は100mほど低下し、古東京川が形成された

- 氷期が約1万年前に終わりを迎え、海水準は上昇し、約6千年前に現在より約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

海水準の停滞期には地形面が形成される

杉原重夫(1970):下総台地西部における地形の発達、地理学評論、43、703-718.



★ 千葉大は6万年前の東京湾の海岸

杉原(1970)によると八千代周辺の台地は下総上位面と下総下位面および神崎川沿いの千葉段丘から構成される

下総上位面 約12万年前

下総下位面 約9万年前

台地を谷が刻んでいく

第1図 下総台地西部における地形面の分布

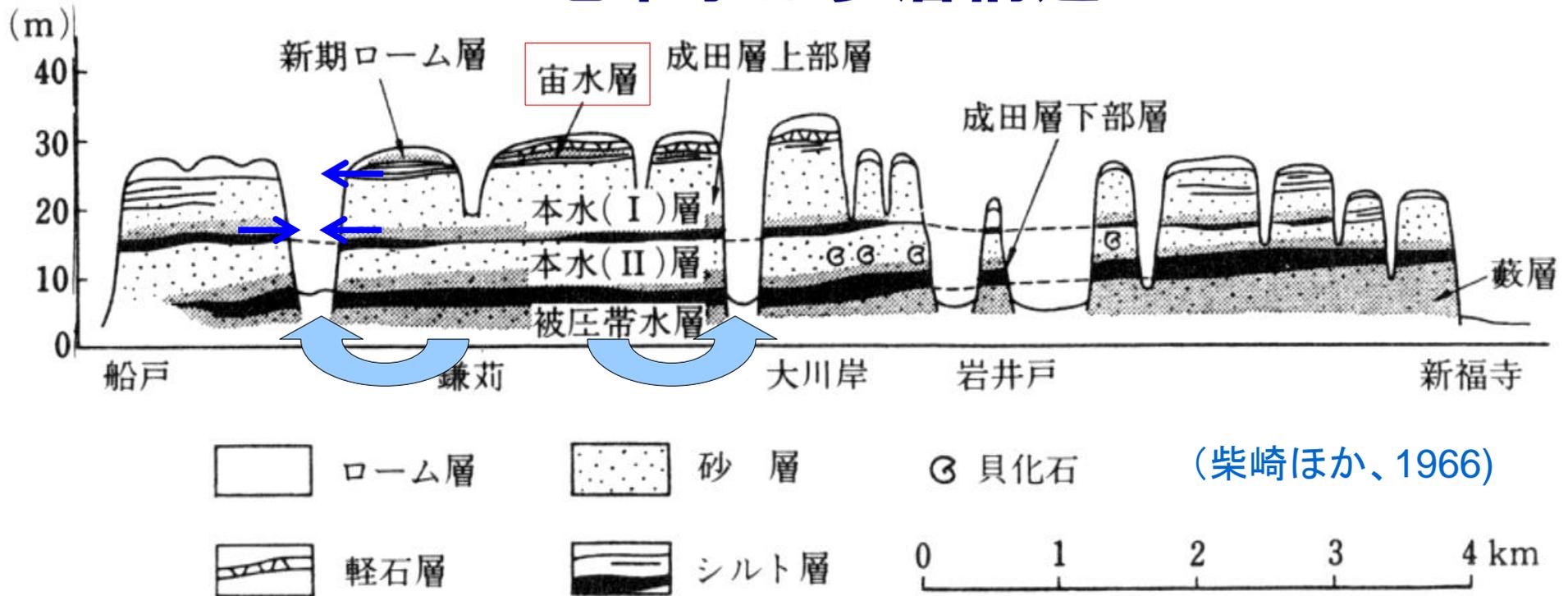
1. 下総上位面, 2. 下総下位面, 3. 千葉段丘, 4. 主な露頭観察地点,

Ab: 我孫子, Chb: 千葉, Ed: 江戸崎, Fj: 藤代, Fn: 船橋, Ich: 市川, Kb: 小林, Km: 鎌ヶ谷, Ko: 木下, Ks: 柏, Mb: 馬橋, Mk: 幕張, Mr: 守谷, Mt: 松戸, Nd: 野田, Ng: 流山, Nr: 成田, Ns: 習志野原, Ow: 大和田, Rg: 竜ヶ崎, Sz: 志津, Sa: 栄町, Sk: 佐倉, Sr: 白井, Ss: 酒々井, Tsd: 津田沼, Us: 臼井, Ych: 八街, Yk: 四街道.

3) 関東ローム研究グループ (1956): 関東ロームの諸問題. 地質雑, 62, 302~316.

海に堆積したほぼ水平な砂泥互層の中の地下水

地下水は多層構造



宙水：不透水層の存在によって、連続的な飽和帯である本水と独立に存在する地下水
⇒関東ローム層下位の**常総粘土層**上に対する宙水

本水：連続する飽和帯

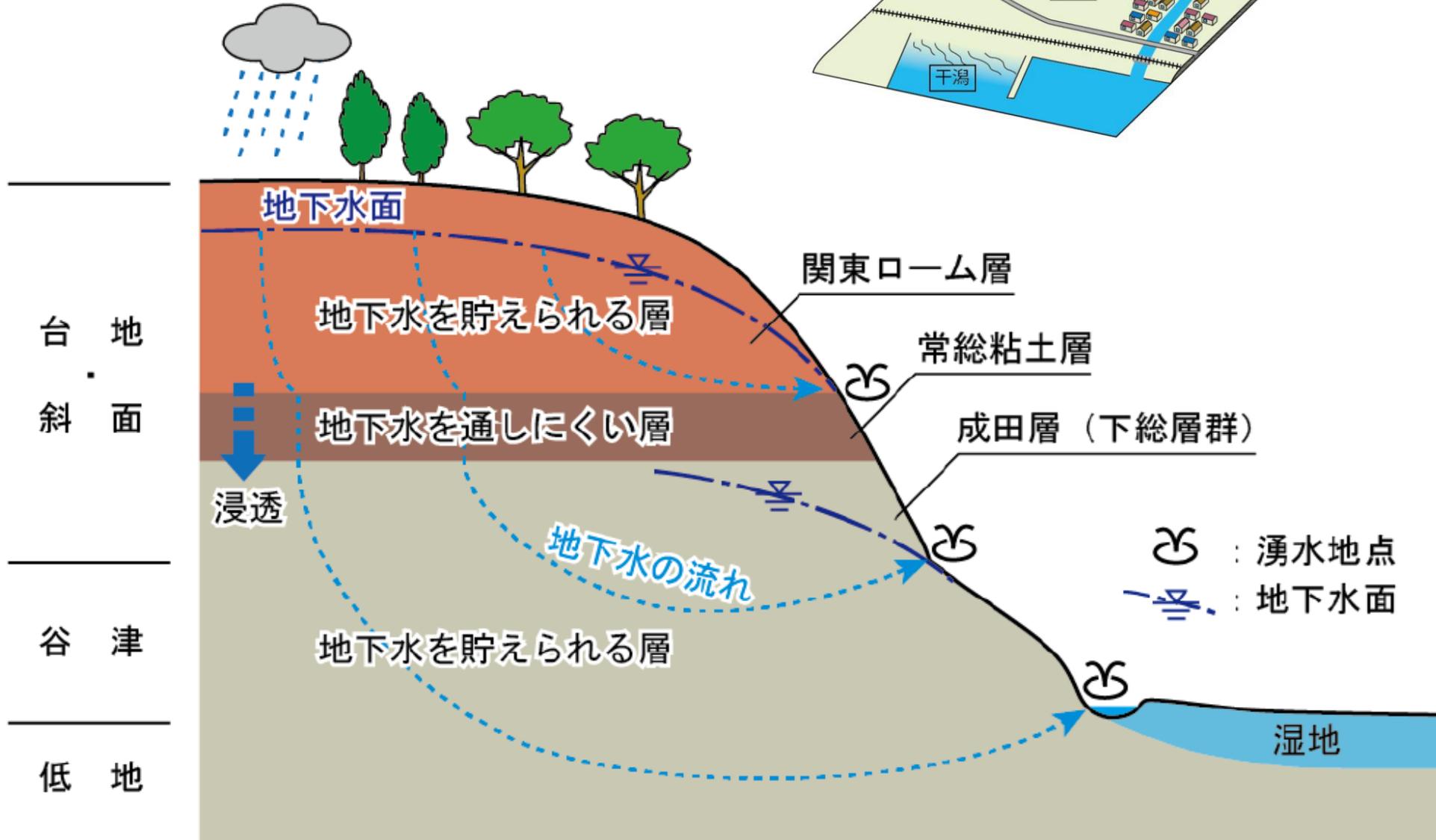
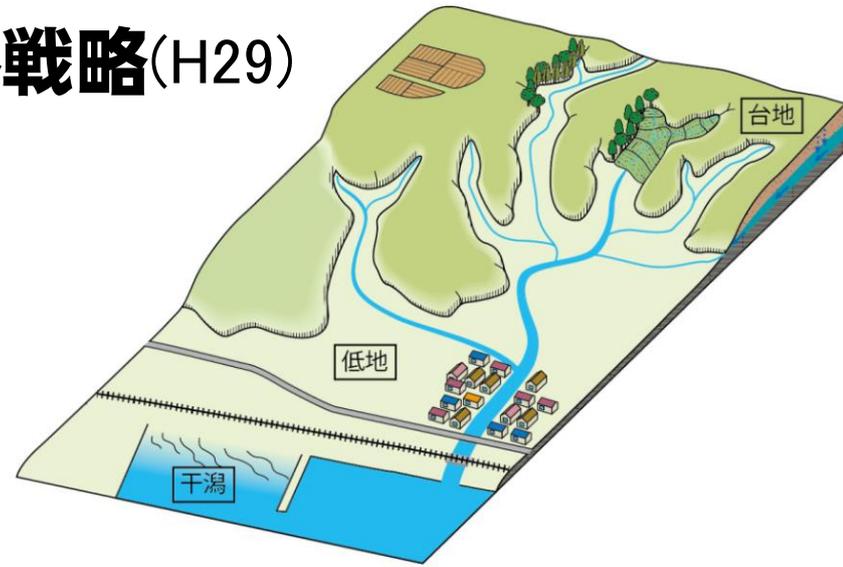
⇒上の図の本水Iと本水IIは降水量の多い時期には一連の地下水であった
かもしれない

⇒気候の乾燥化、あるいは地下水位の低下により、本水I（実質的には宙水）と
本水IIに分離したかもしれない

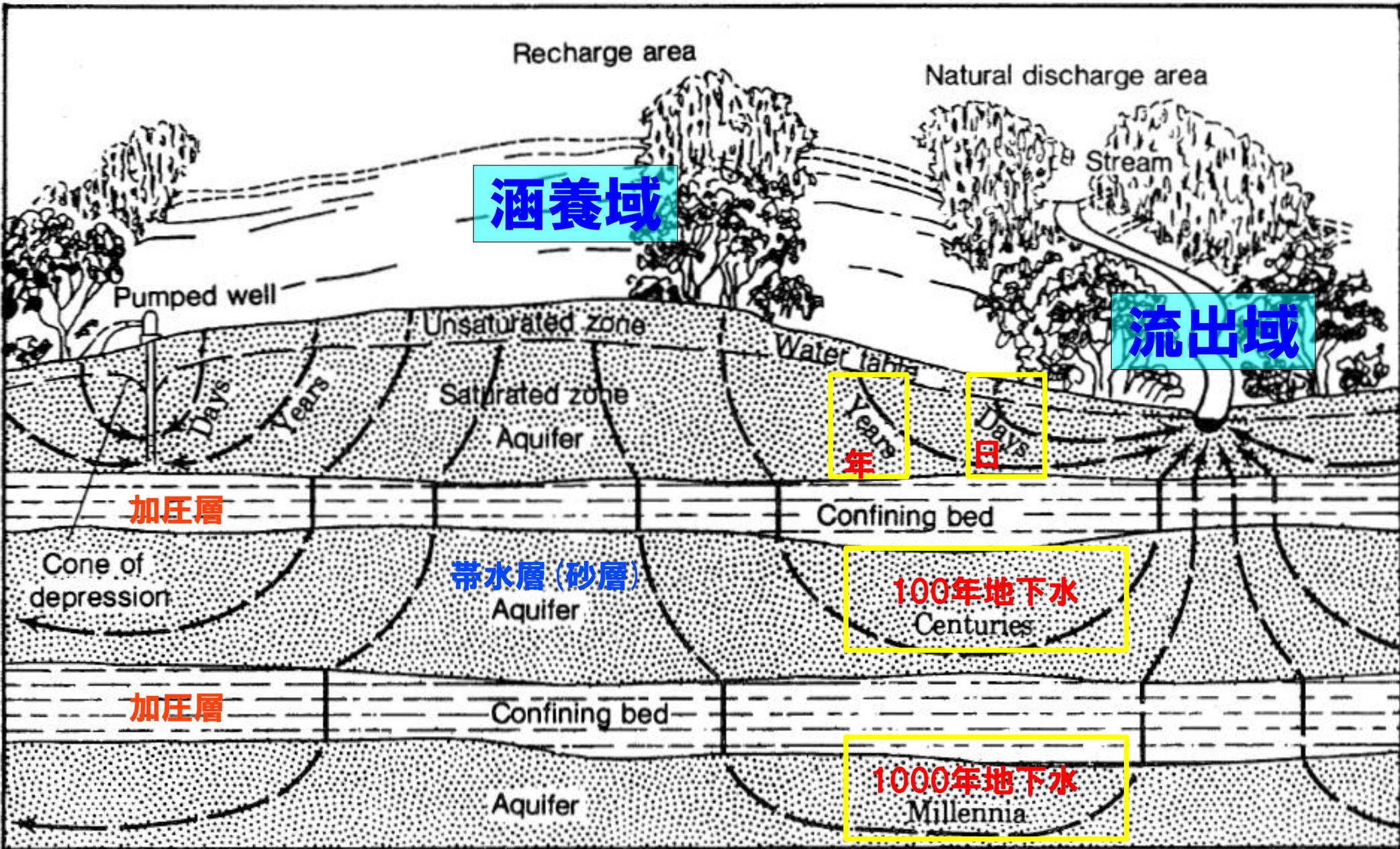
【閑話休題】 生物多様性ふなばし戦略(H29)

生物の棲息域、湿地と地形、水循環

地形の縦断的な特徴



地下水はどのくらいの時間をかけて流れるか



水はポテンシャル（高さ+圧力）の低きにつく

(Tóth, 1995)

新しい地下水の年代は？ フロンがトレーサーとして使える

オゾン層を
壊すという

CFCs (クロロフルオロカーボン類)

1950年

1980年

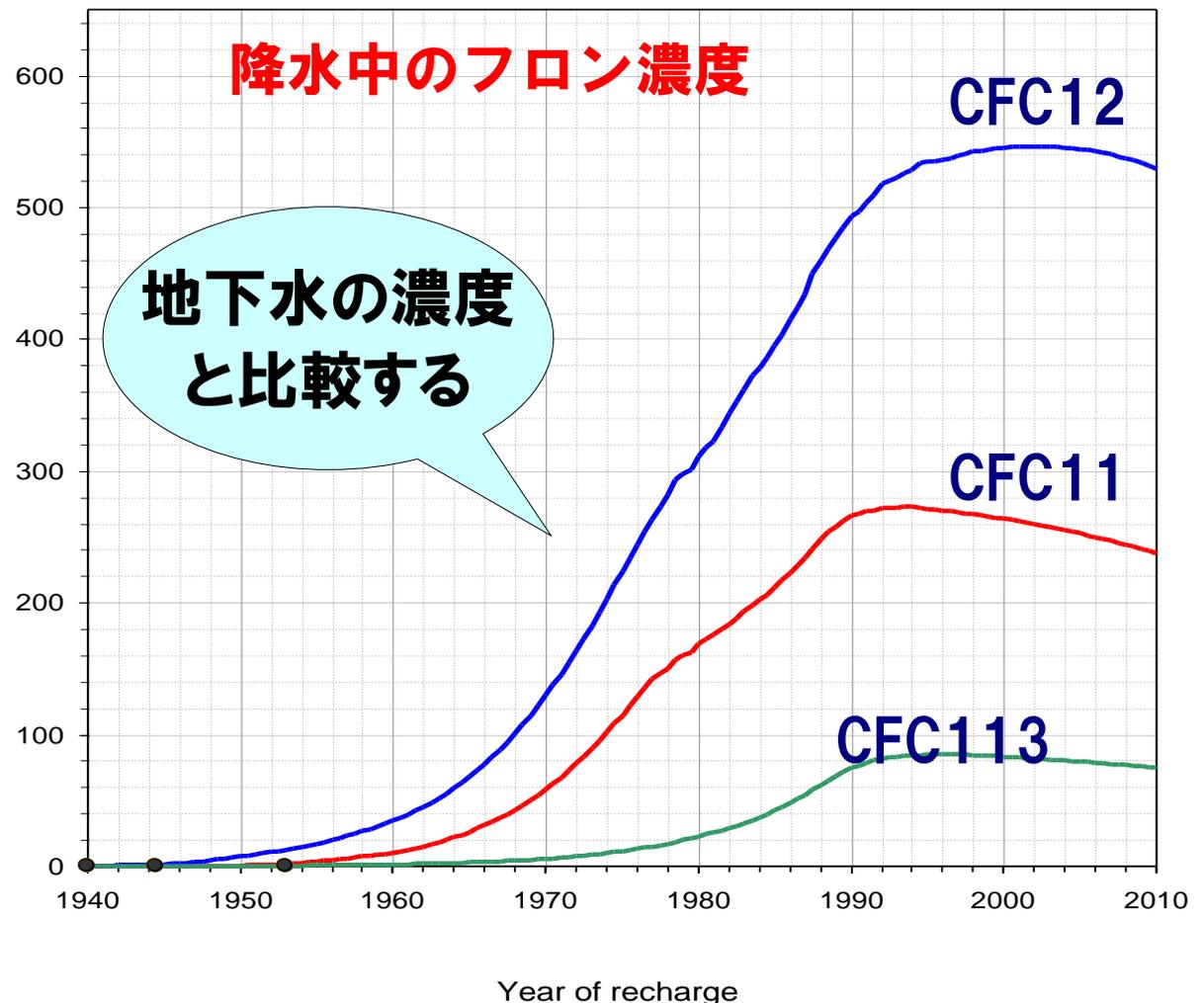
2010年

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された。

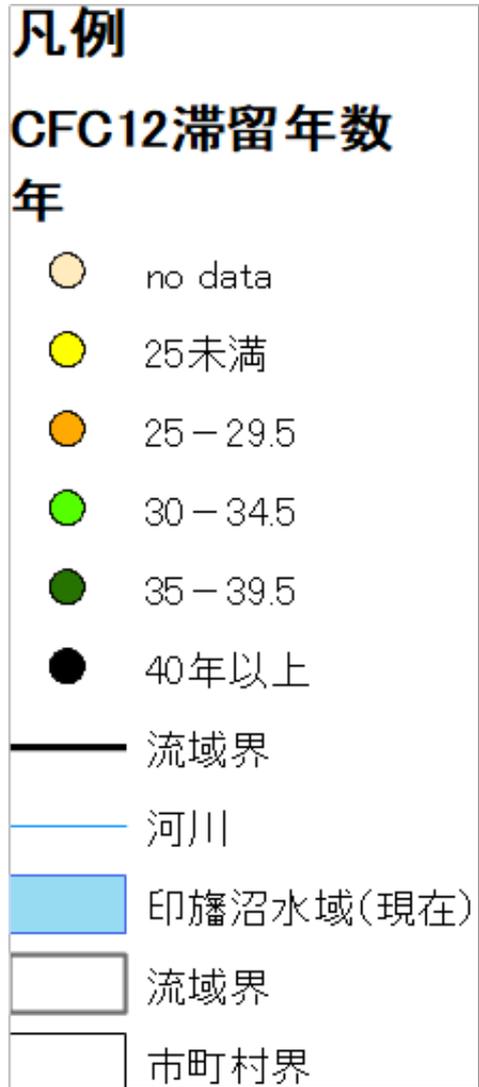
降水に溶け込んだフロンが地下水循環に加わる

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が可能。

CFC concentrations in pptv



CFC12による 年代測定結果



20~40年
程度の年代

身近な湧水も20~40年前の雨
ダルシーの法則と集水面積を
使って湧水量を説明してみよう



上総堀
深井戸

(堀田先生湧水調査地点)

下総台地の地下水—養老川下流域



牛久

市原市

台地

海士有木

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

五井

Image © 2009 Digital Earth Technology

© 2008 ZENRIN

ストリーミング 100%

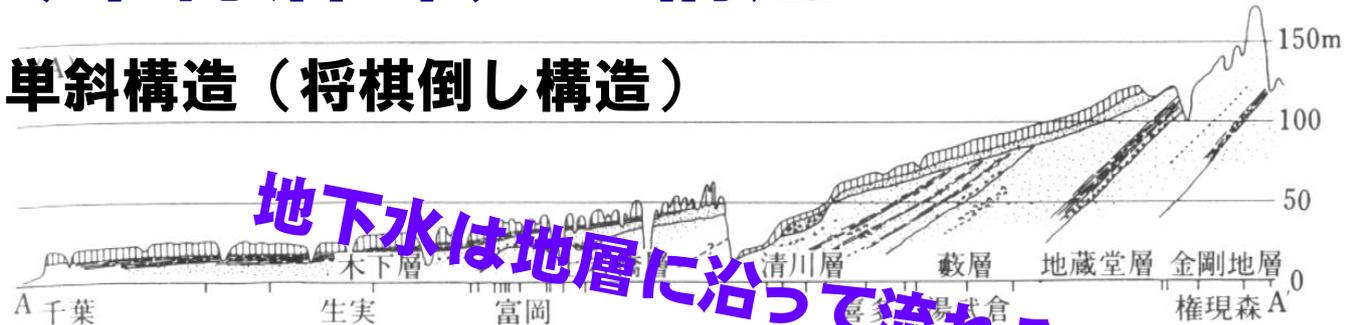
© 2007 Google

5° 27'49.00" N 140° 07'10.84" E 高度 8m

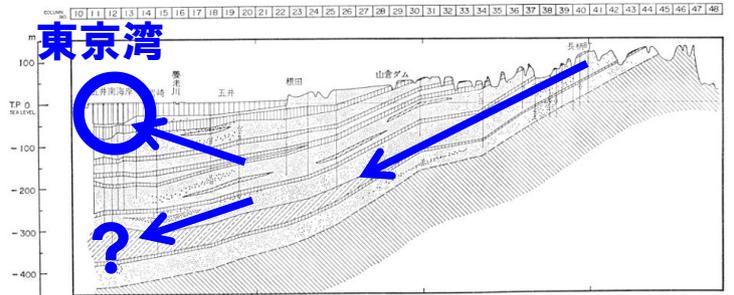
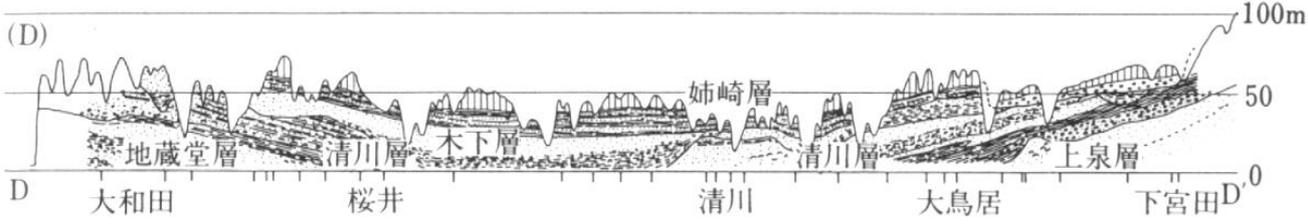
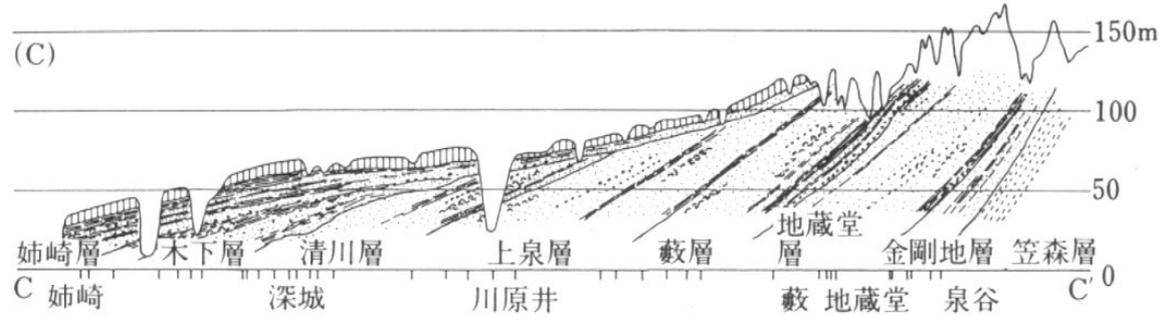
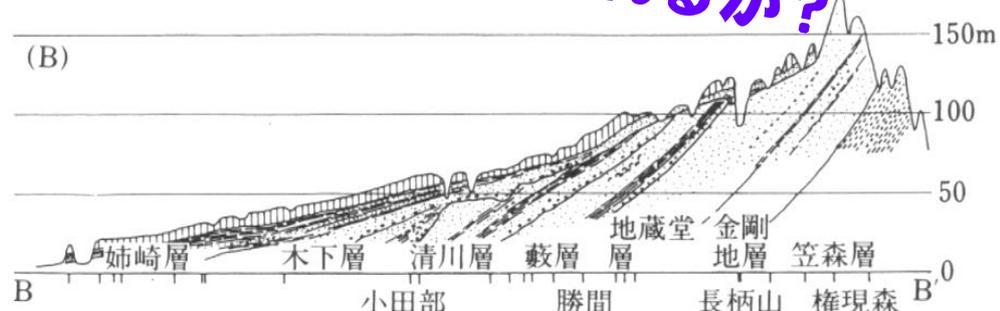
上空

(再掲) 成田層 (下総層群) の構造

東京湾に向かって傾斜する単斜構造 (将棋倒し構造)

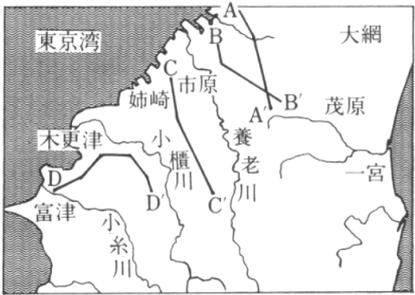


← 東京湾



- 沖積層
- 砂層
- 砂質粘土層
- 砂礫層
- 粘土層
- 笠森層

- 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
- 露頭的位置



東京湾下の地下水は淡水

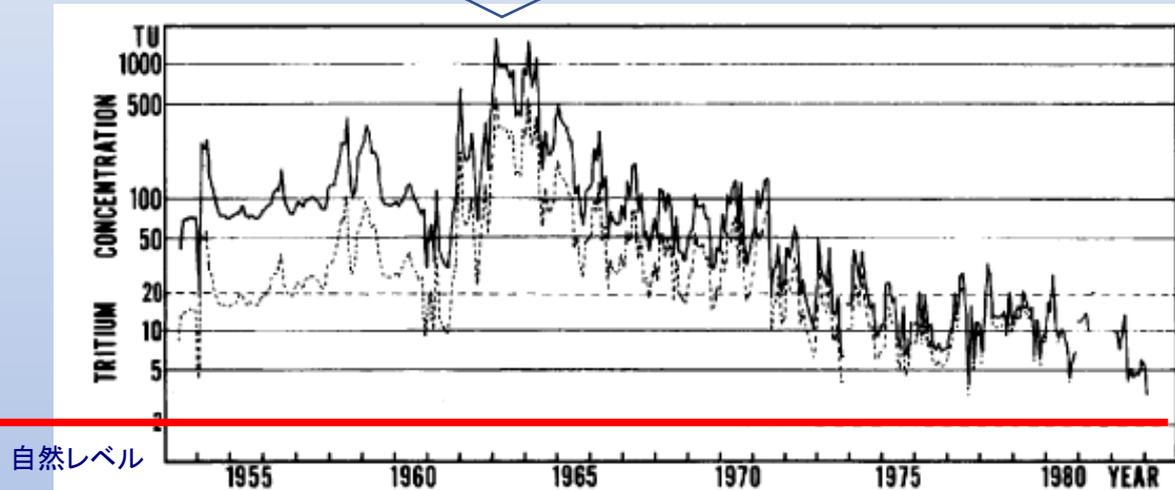
(菊池、1977)

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

(小湊鉄道が走る養老川低地)

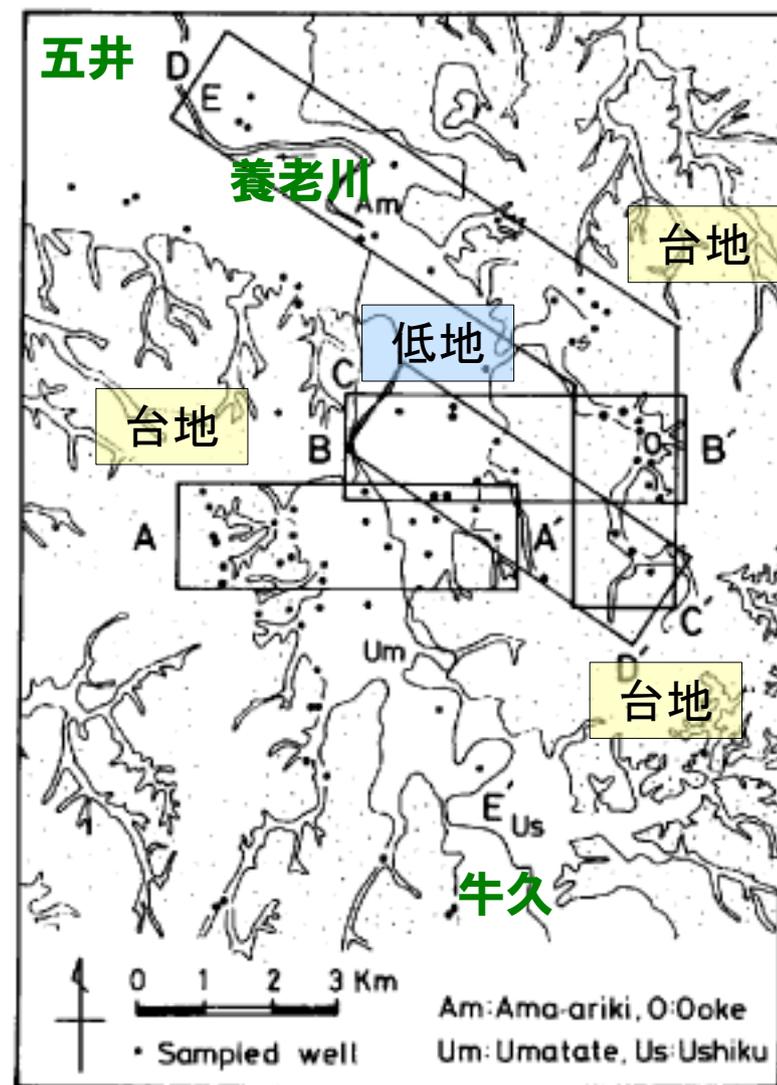
東京および筑波における降水のトリチウム濃度

1963年に濃度ピーク



- ・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—
- 地下水の流れはきわめて遅い この場所では、年間100m程度

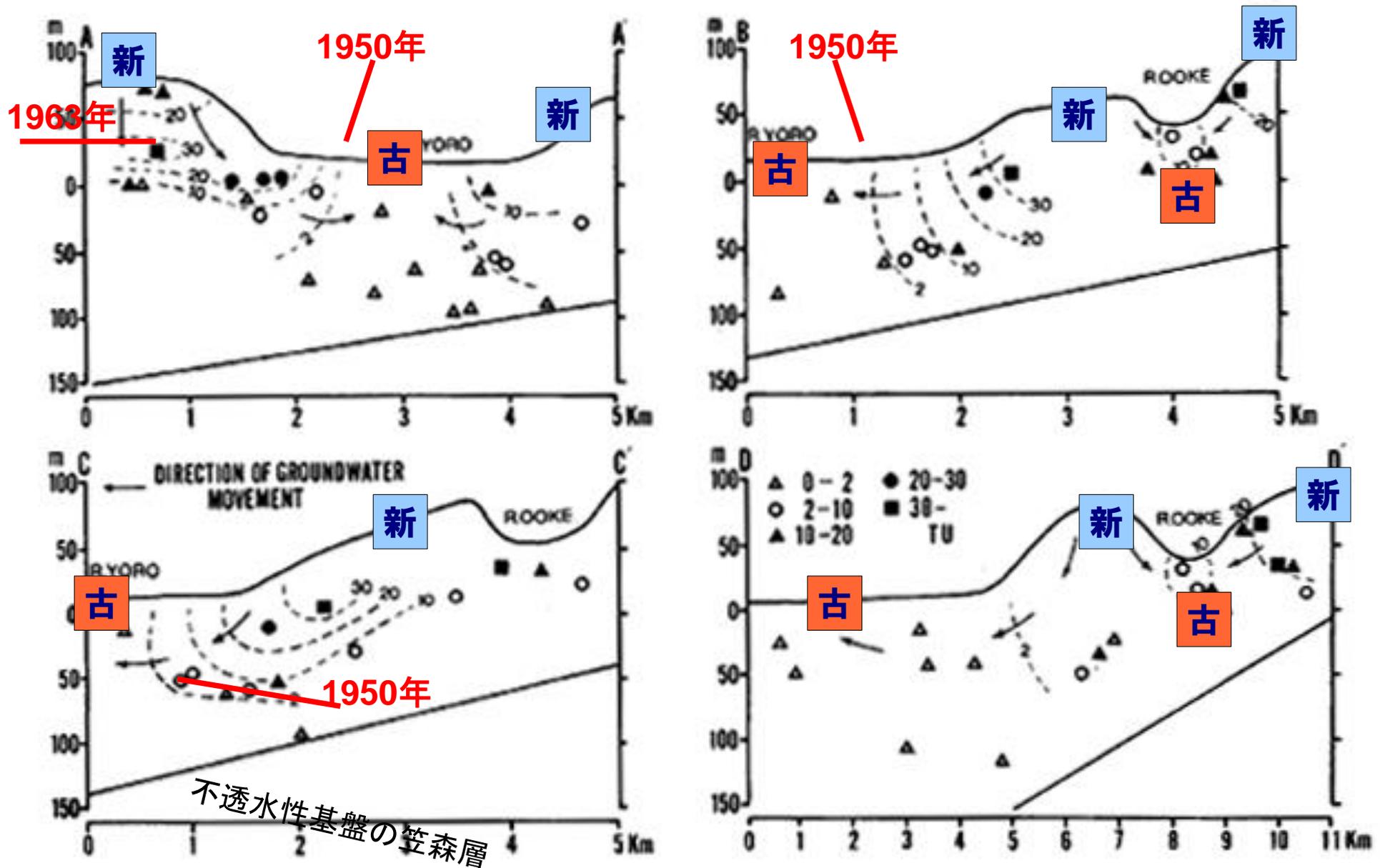


Figure 13 Estimated directions of groundwater movement based on Figure 12.

(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

© 2008 Europa Technologies

Image © 2009 Digital Earth Technology

Image © 2009 DigitalGlobe

ストリーミング 100%

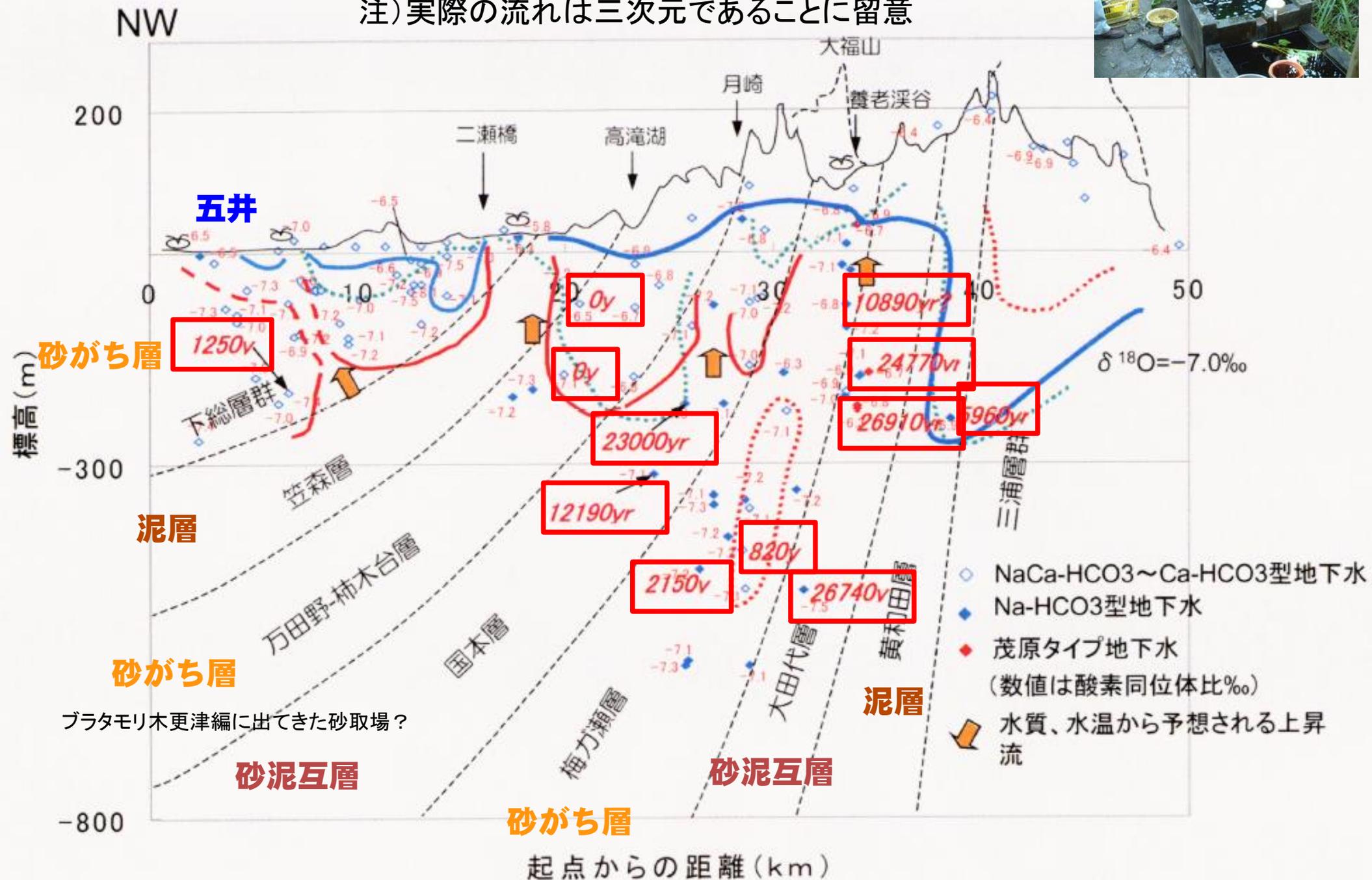
Google

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

注) 実際の流れは三次元であることに留意



ブラタモリ木更津編に出てきた砂取場?



地下水の流れはとても遅い

- 湧水の水は数十年前の雨かも知れない
- 一度汚したらもとに戻すには時間がかかる

雨が降ったら湧水の水量が増える

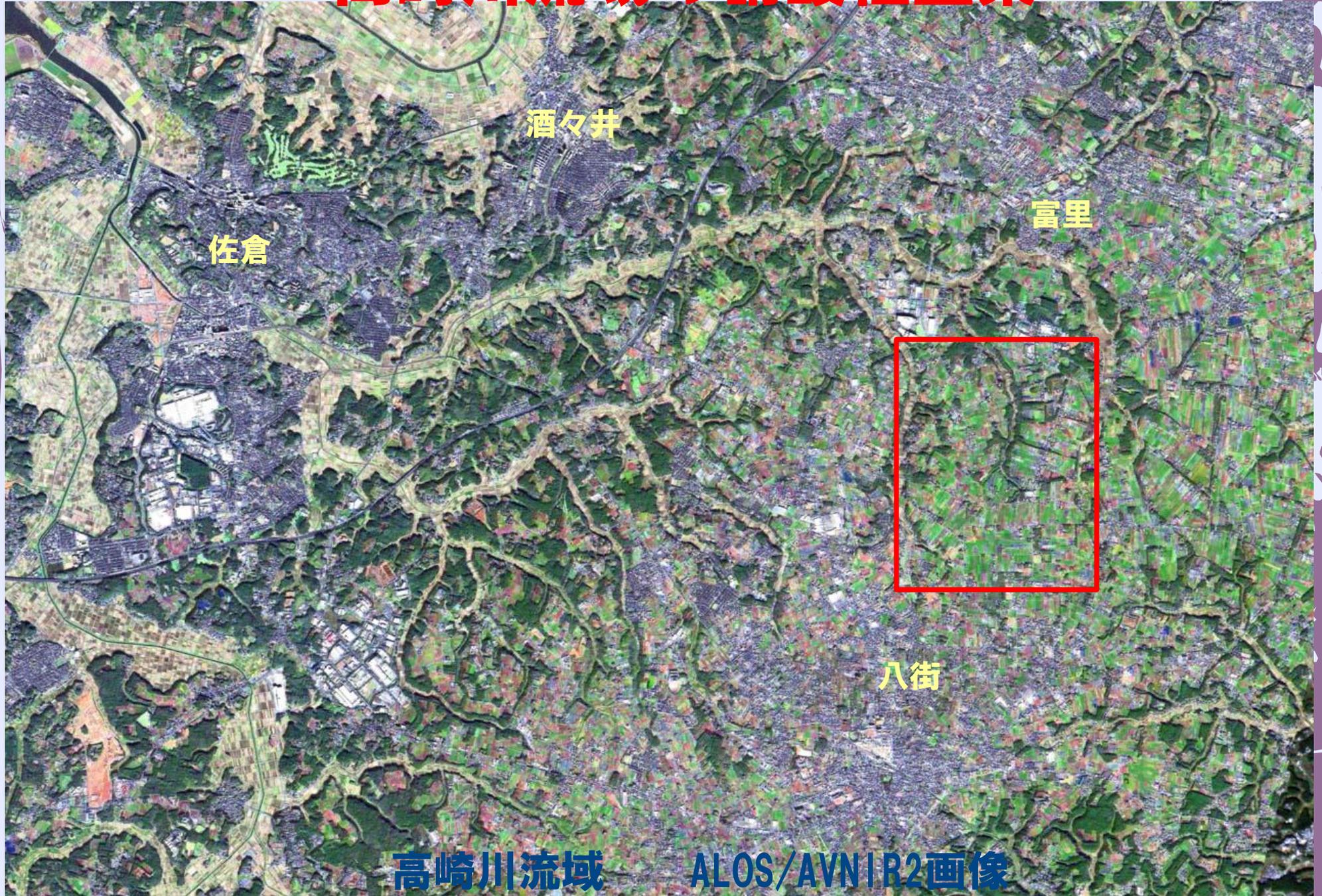
- 数十年前の水？
- 水の圧力は短時間で伝わるので、上流で浸透した水が下流の水を押し出す

量の保全 ⇒ 質の保全

(水流発生機構：自然流域で降雨時に増える河川水は、ほとんどが地下水起源)

環境水の硝酸性窒素汚染問題は地球環境問題の一つ

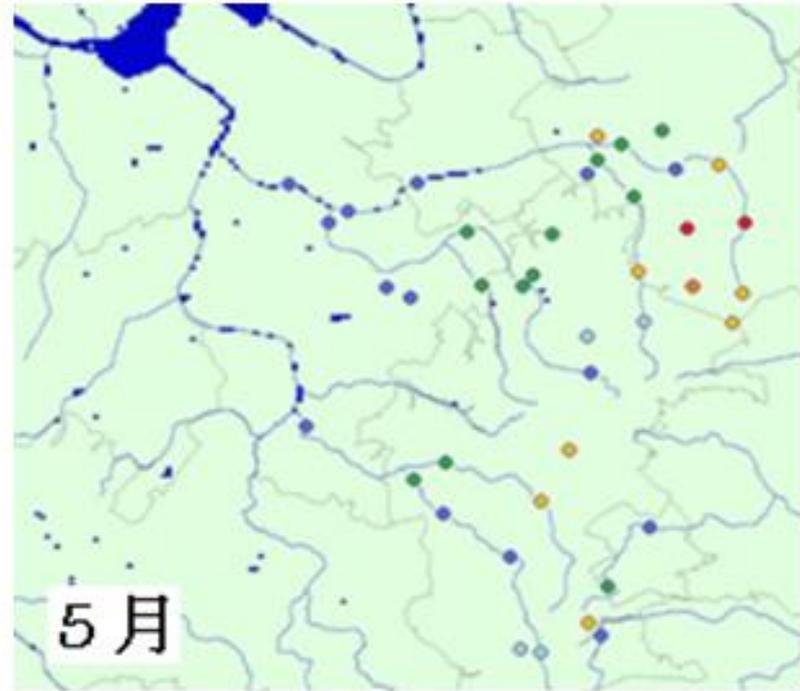
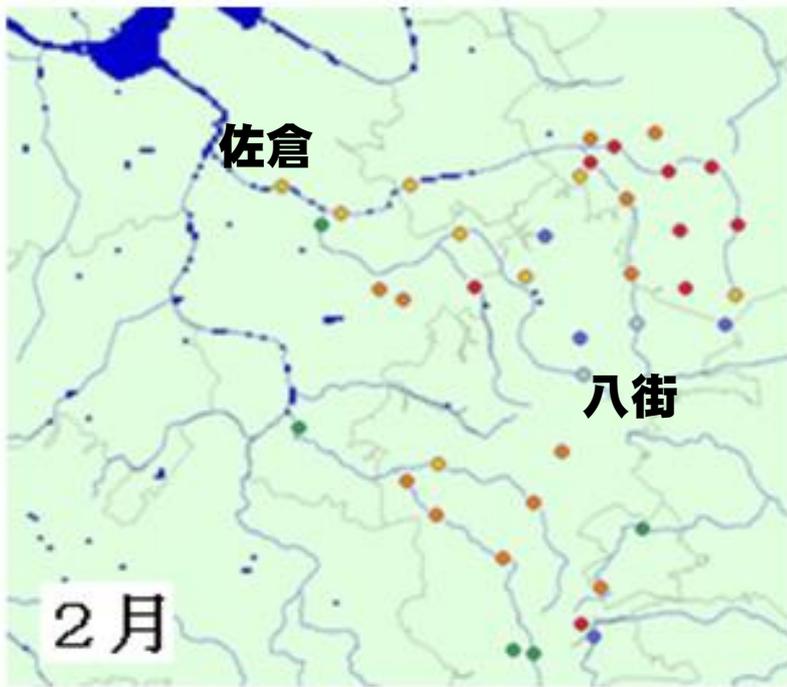
—高崎川流域の硝酸性窒素—



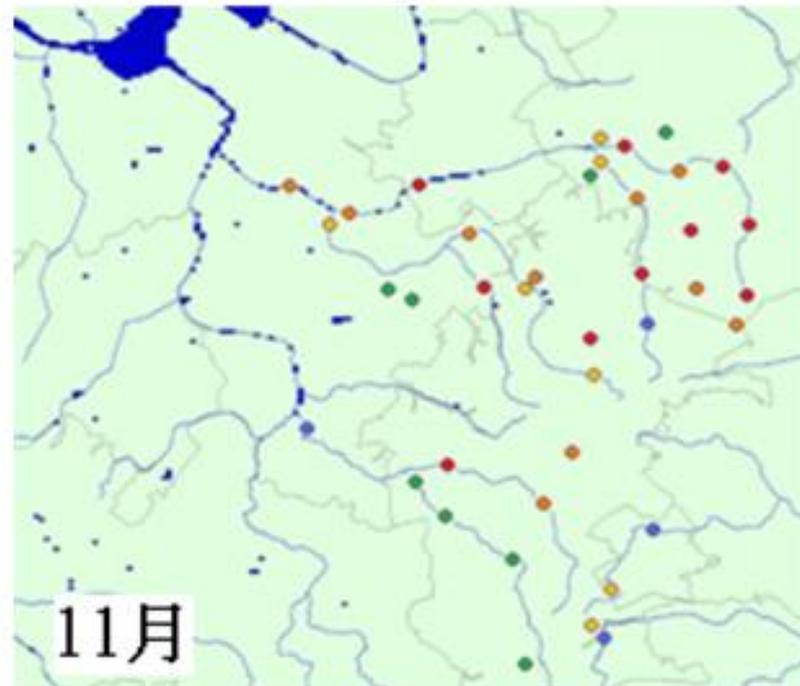
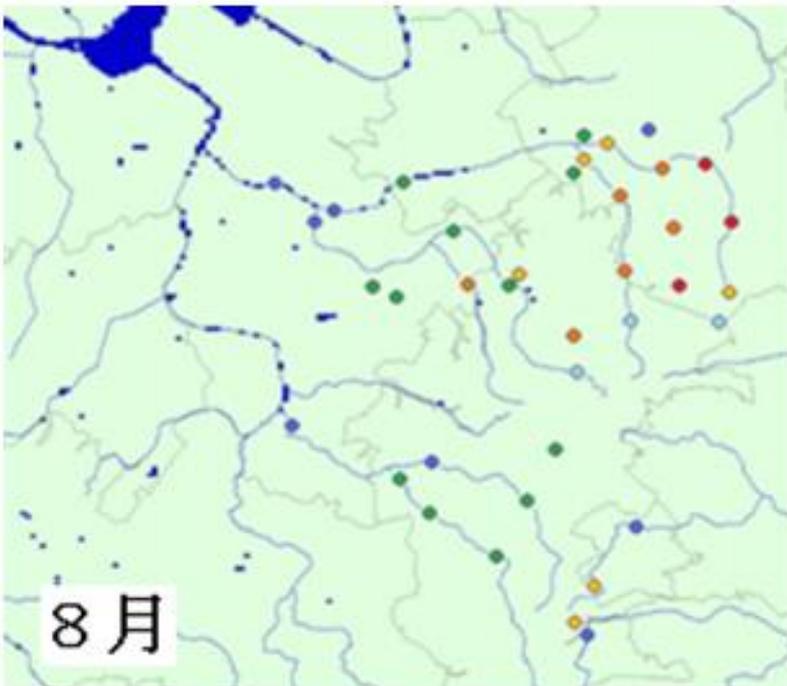
高崎川流域

ALOS/AVNIR2画像

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



- < 2mg/l
- < 4mg/l
- < 6mg/l
- < 8mg/l
- < 10mg/l
- ≥ 10mg/l

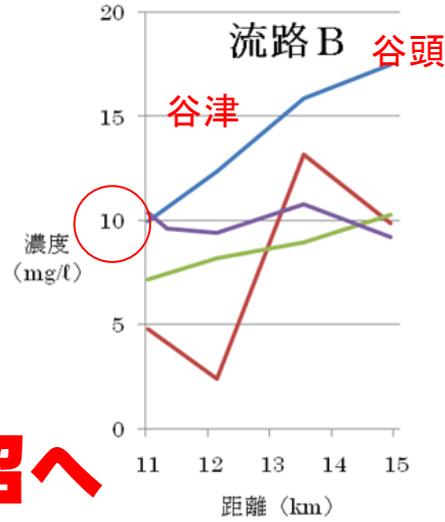
(郡、2009)

河川は地下水の露頭

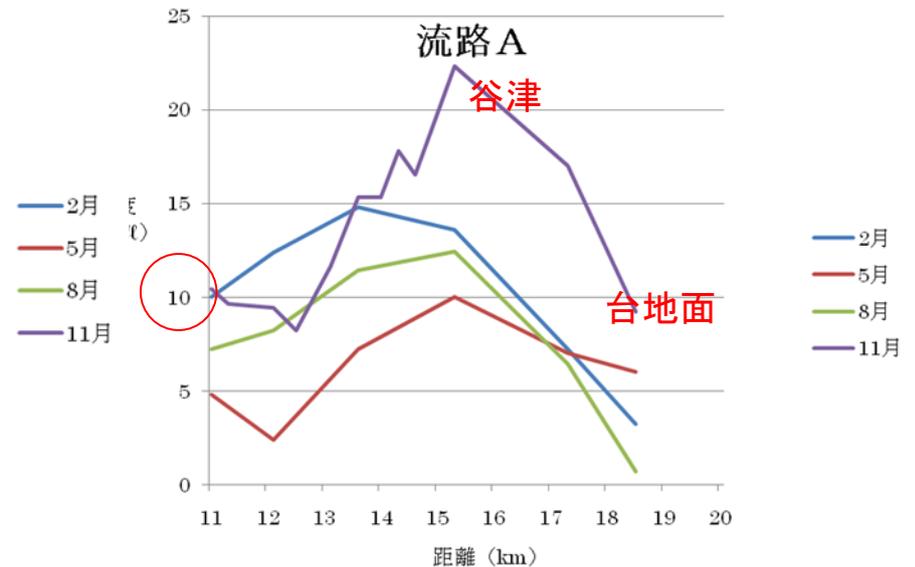
- 河川水は地下水によって維持される
- 表流水の硝酸態窒素濃度を調べると流域の地下水の状況もわかる



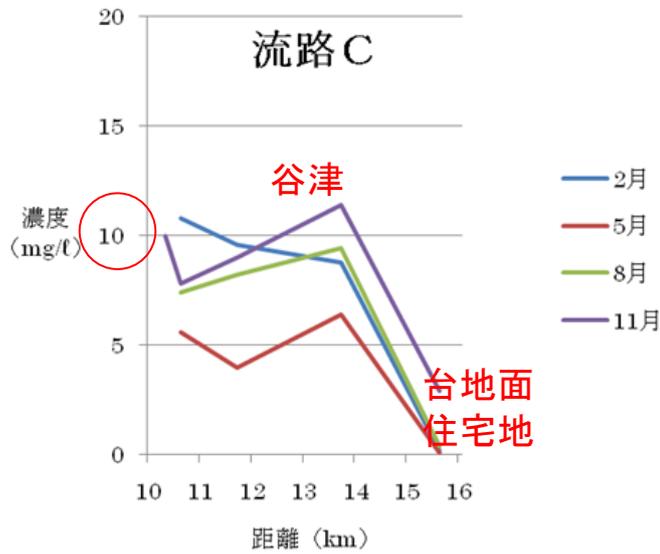
印旛沼へ



下流 ← 上流



大量の窒素が流下、負荷量は増えている

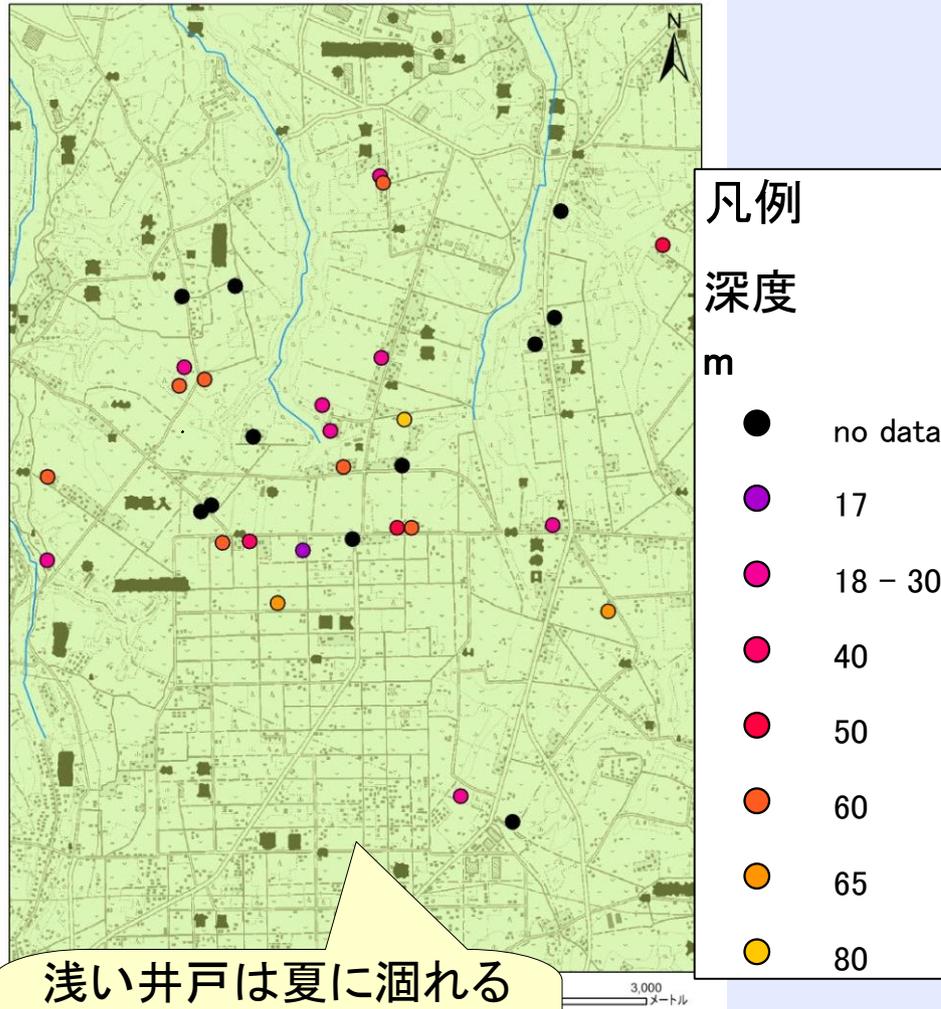


○ 縦軸10mg/lが環境基準

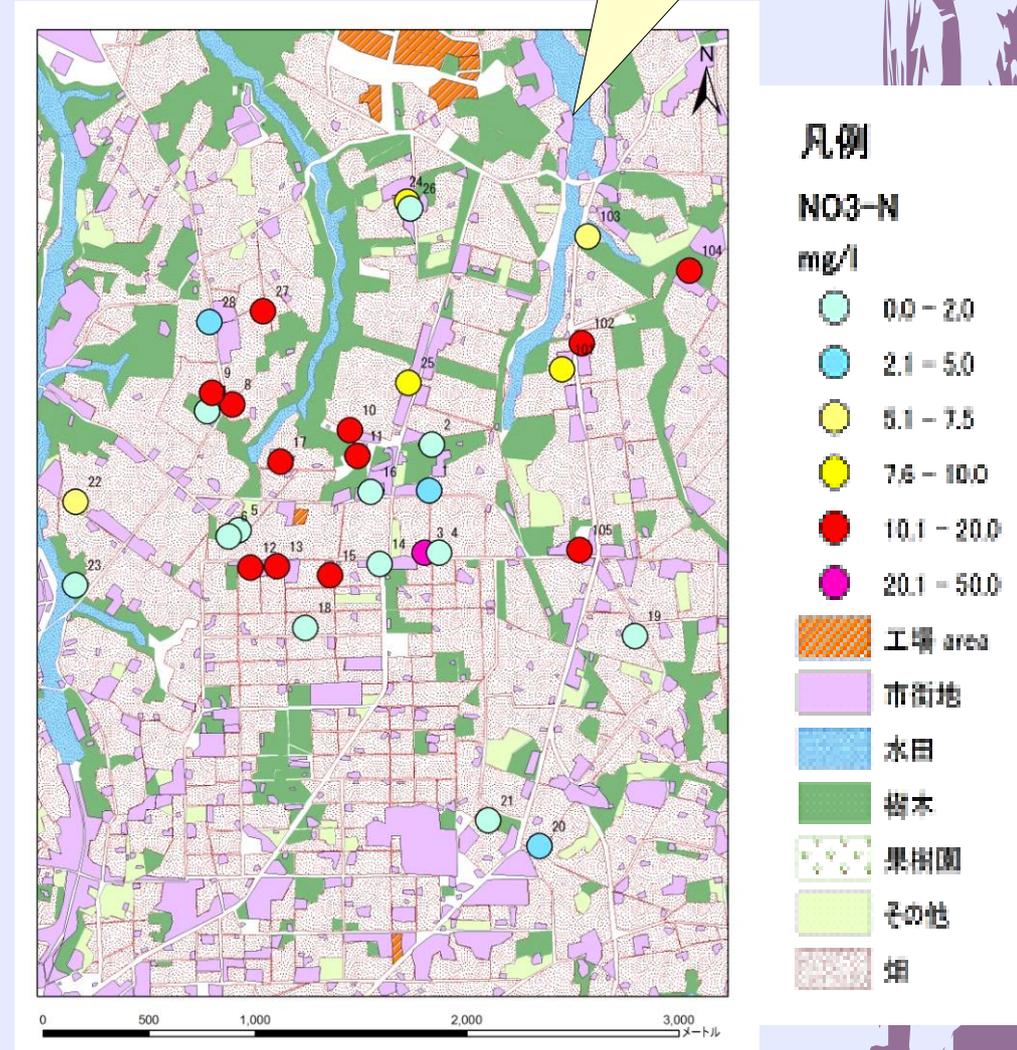
地下水の硝酸性窒素の分布

富里市十倉

赤く塗られた井戸では
地下水の硝酸性窒素
濃度が高い

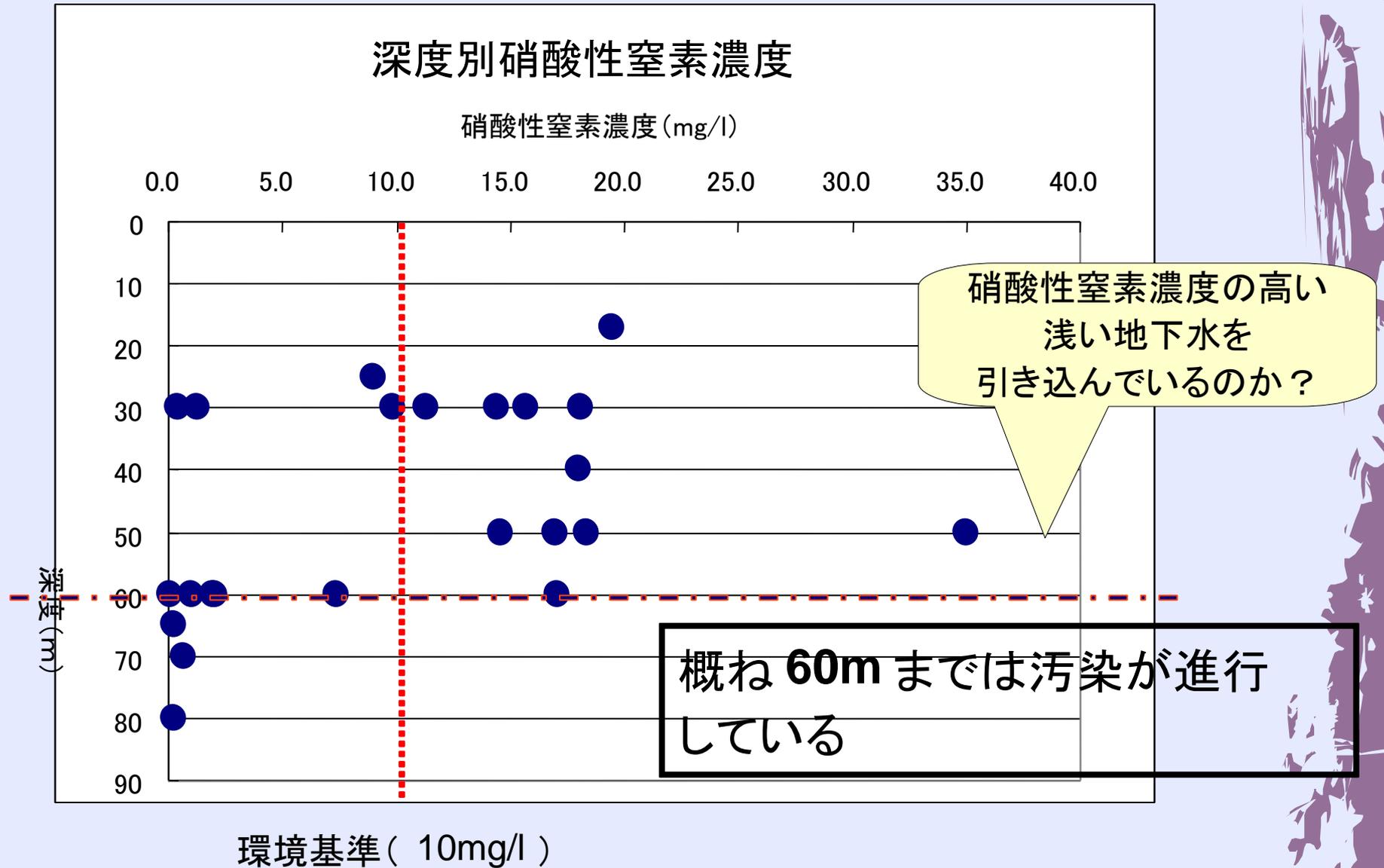


浅い井戸は夏に涸れる
ようになったので
深い灌漑用井戸を掘削



(山本、2011修士論文)

深度と硝酸性窒素濃度の関係



地下水を保全するためには涵養域の保全が大切

—それは台地に住む我々の足下—

- 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
→ 台地を汚染するとどうなるか
- 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もある

土地の塩漬け問題



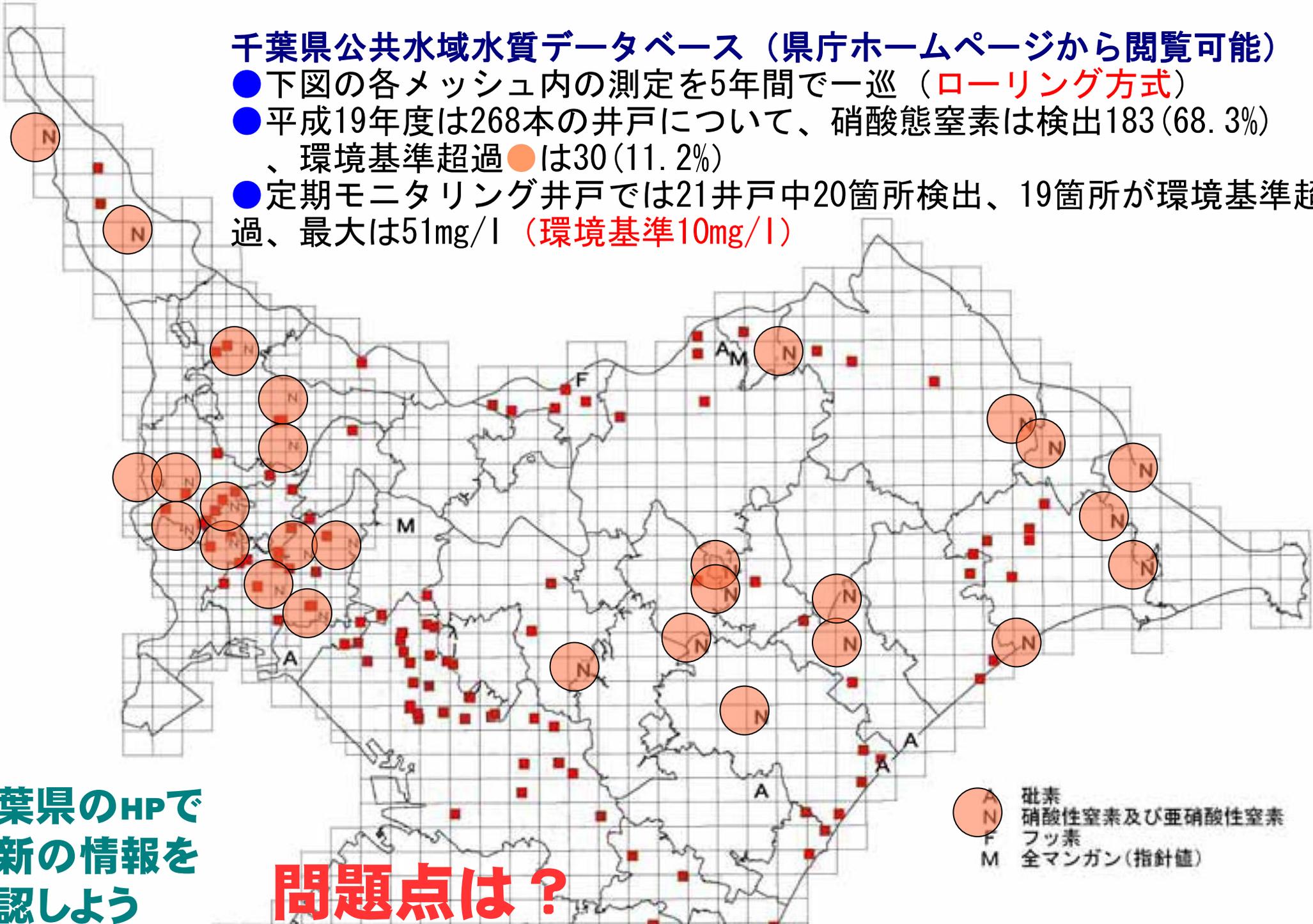
平成19年度 環境基準等超過地点図

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

問題点は？

● N 窒素
硝酸態窒素及び亜硝酸態窒素
● F フッ素
● M 全マンガン(指針値)

●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

肥料や堆肥

地下水の流動速度は遅い

でも農業は生業



どのようにして安全・安心な地下水を保全!?

近藤私案 モード2的な考え方



- **地域経済圏の創出(地産地消)**
- **減肥栽培の農産物を地域が引き取る(千葉エコ)**
- **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(自然の恵み)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

湧水

台地には歴史がある

・・・地史的歴史、人間の歴史

台地の地形は機能を持ち（地下水の排水系）、その機能は歴史の中で変遷してきた

「台地－低地系」は水循環の場であり、地形と相互作用し、生物の生息する場も作る

自然の恵みを享受するためには、ひとは場の機能と水循環のあり方をよく知り、その機能をなるべく損なわないように配慮しながら、人間システムをその場に埋め込まなければならない

湧水は地下水の恵みのひとつ
湧水を保全、復活させようという運動



湧水保全・復活ガイドライン

ガイドラインの趣旨（抜粋）

[なぜ重要か]

- 地域の文化を育んできた
- 地域の生態系を支える重要な存在



[どんな問題があるか]

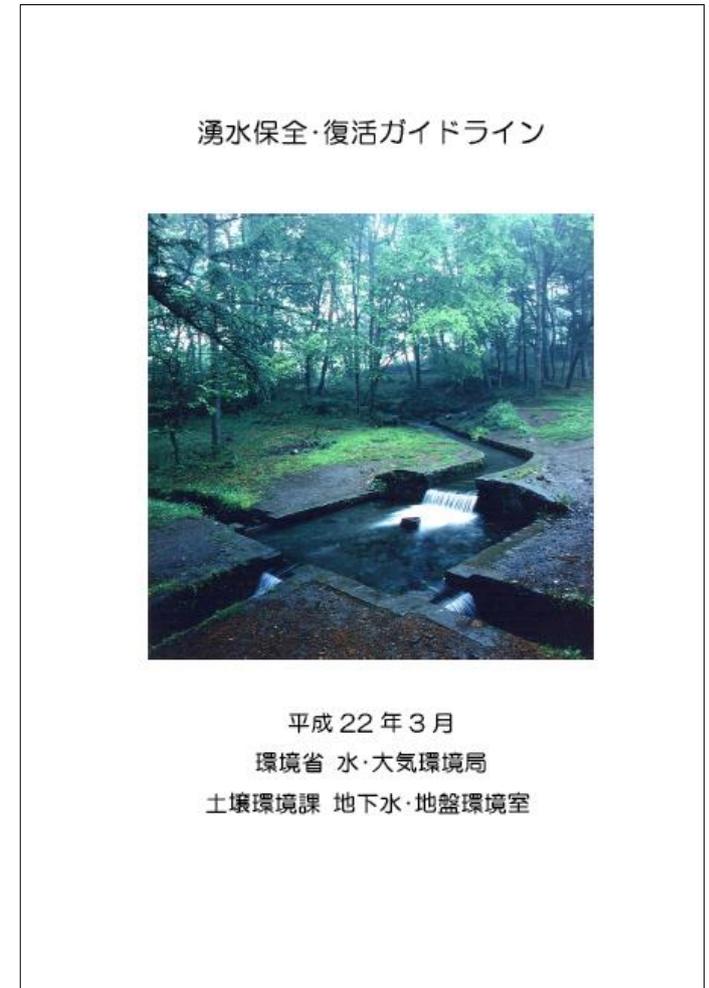
- 湧水量減少、枯渇、水質悪化の問題
- 湧水と人の関わりが希薄化

[なぜ守るか]

- 湧水は地域の環境要素
- 地域の文化資源
- 災害時における水の確保
- 環境学習
- 地域活性化・まちづくり

**未来の社会はどうあるべきか
都市と郊外の良好な関係作り
場の機能を活かした街作り**

湧水や里山と
言った身近な自然は我々の暮らし方の反映である



環境省湧水保全ポータルサイト：
<http://www.env.go.jp/water/yusui/index.html>

湧水保全・復活支援活動検討会
(座長：田中正筑波大学教授)



三方同じ流量

八ヶ岳山麓湧水群三分一湧水

保全・復活の対象とする湧水の選定

湧水
「地下水が自然状態で地表に流出したもの
もしくは地表水に流入するもの」



先神の谷津

湧水と人の
分断の修復

地域の実情

- ・湧水分布状況
- ・地域における湧水と人との関わり方（水源、貴重な動植物が生育・生息、貴重な利用空間、歴史・文化(文化財)など)
- ・地域住民の活動状況

地域の思い・要望
個々の湧水と人との関わり方
個々の湧水の価値・位置付け

湧水の状況・変化
悪化している、又は悪化が懸念される

保全・復活の対象となる湧水
(地域住民との関わりを踏まえ、地域の実情に応じて選定する)

湧水はなぜ、そこに存在するのか

存在するからには湧水は機能を持っている

その機能はどんな機能か？

その機能は活かされているか？

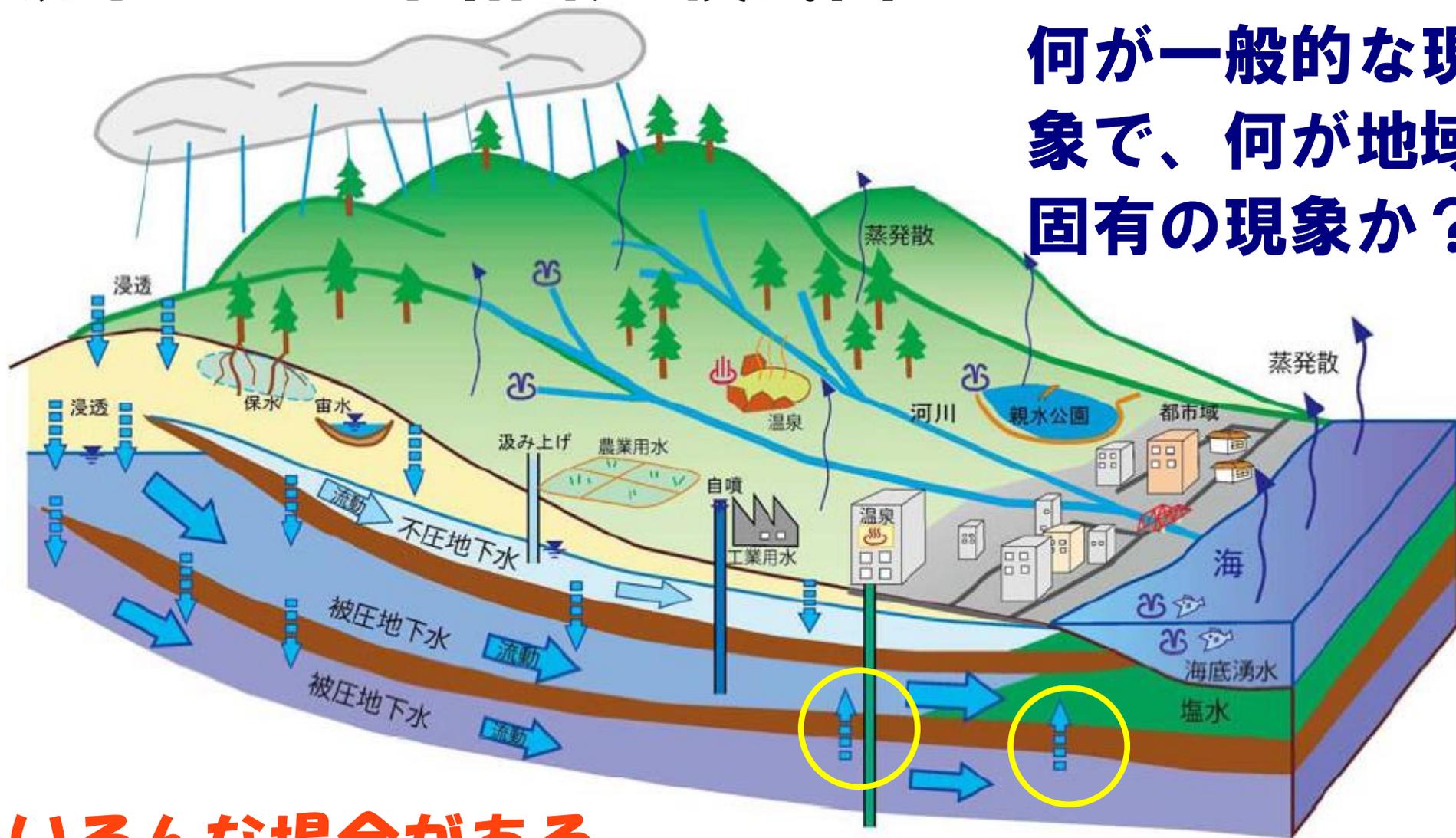


加賀清水

(湧水保全復活ガイドラインより)

湧水に至る水循環の模式図

一般性と個別性
何が一般的な現象で、何が地域固有の現象か？



いろいろな場合がある

出典：「都市における地下水利用の基本的考え方（地下水と上手につき合うために）」
（平成19年12月6日 西垣 誠 監修・共生型地下水技術活用研究会 編）に一部加筆

図 2-1 水循環の模式図

（湧水保全復活ガイドラインより）

地下水位低下に伴う湧水の枯渇を示す模式図

地下水位が低下するから湧水が枯渇する

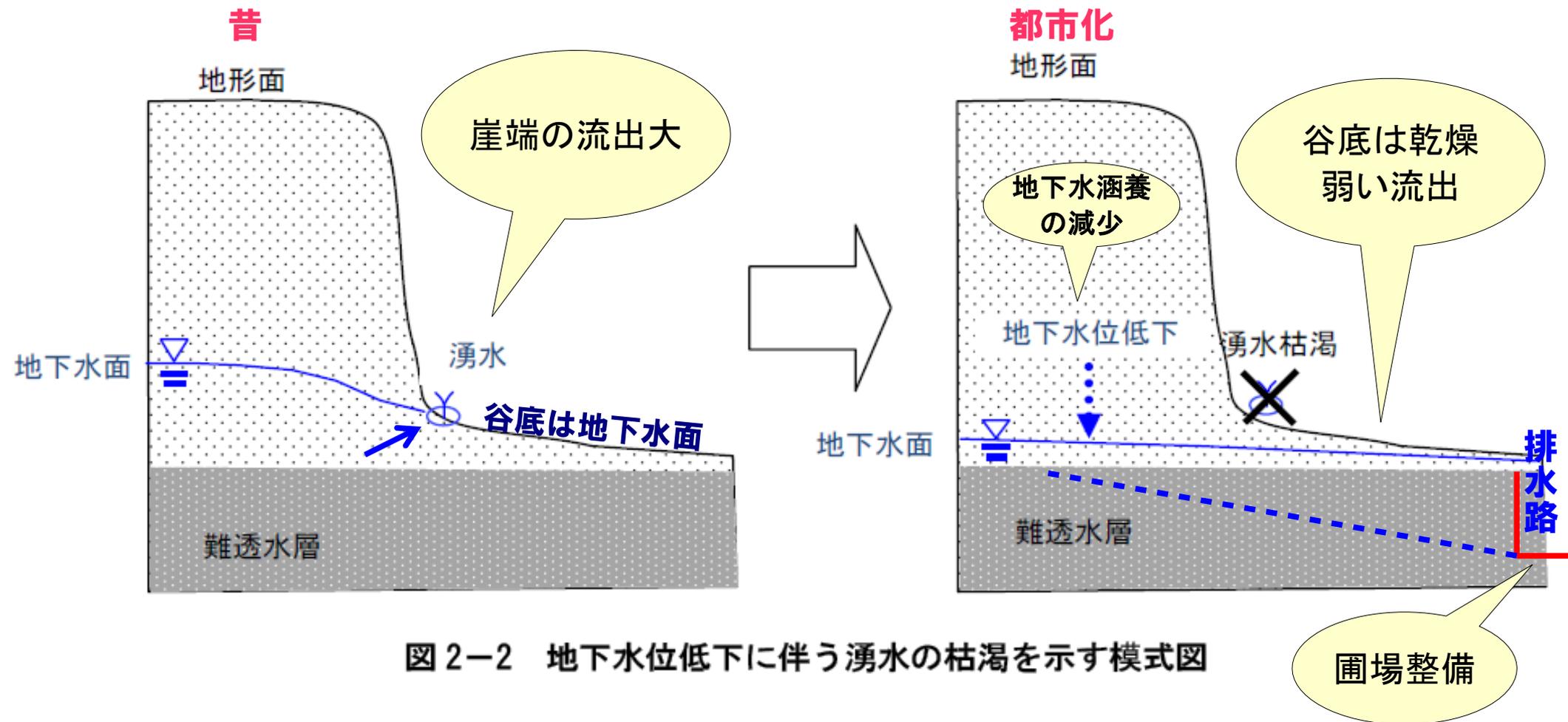


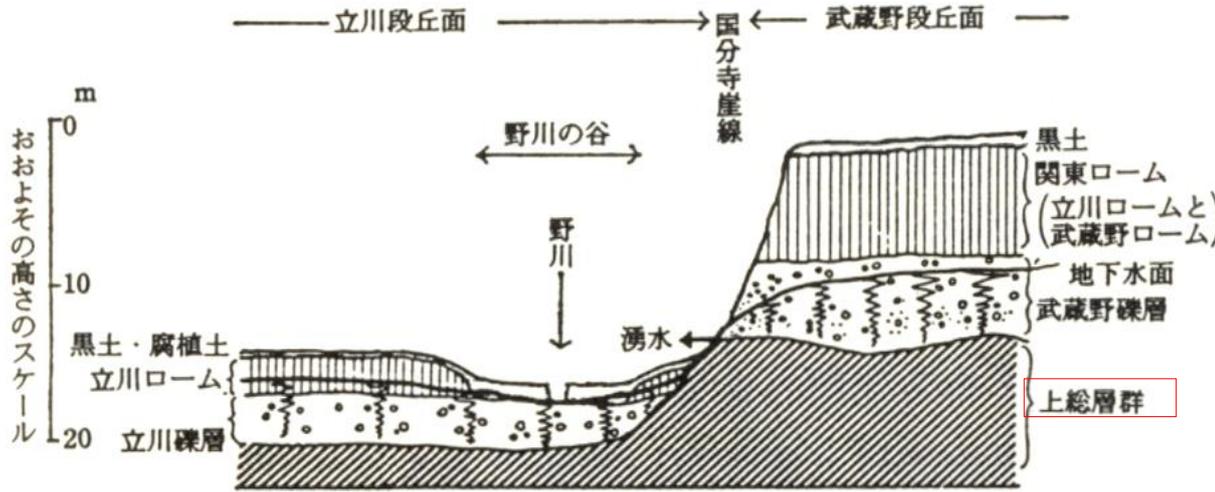
図 2-2 地下水位低下に伴う湧水の枯渇を示す模式図

[地形] 馬蹄形の谷頭、急な谷壁： 下総台地で一般に認められる
[地質] 谷底地下の難透水層： 様々な場合がある
⇒武蔵野台地が模式

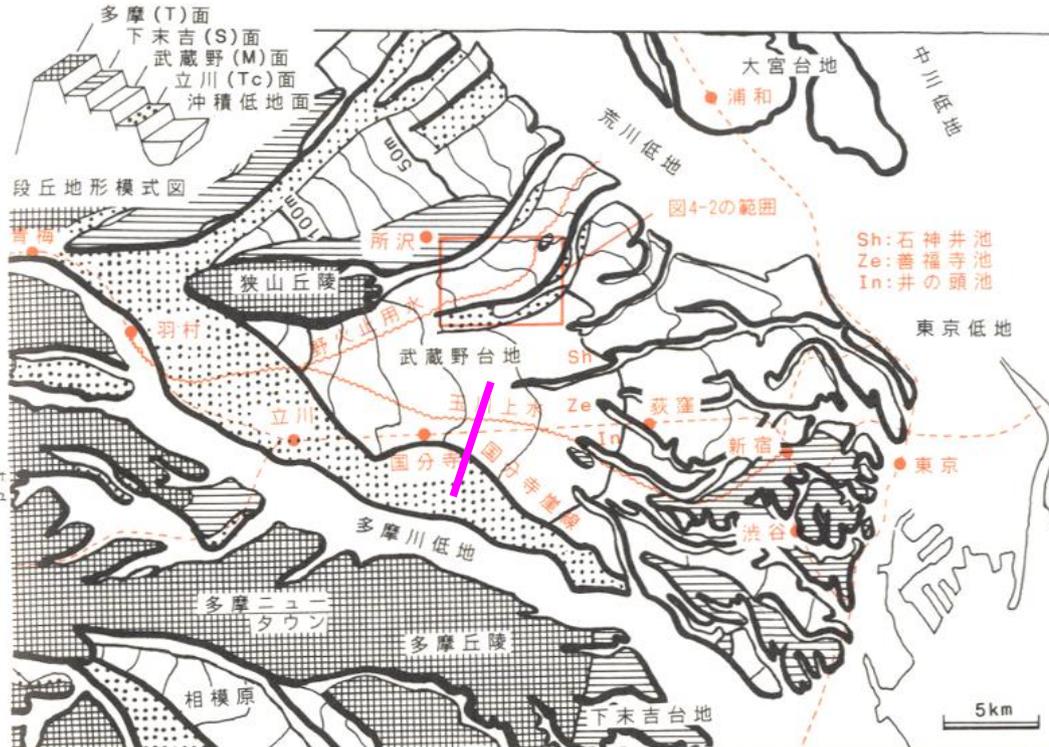
(ガイドラインP7)

武蔵野台地は特殊な扇状地

お鷹の道・真姿の池湧水群【全国名水百選・都名湧水】、野川の水環境の保全



(注) ギザギザの記号は、地下水で飽和していることを示す。



(杉谷ほか、「風景の中の自然地理」、古今書院)

- 武蔵野台地は侵食性の扇状地
- 厚い関東ローム層の下部に古多摩川が運んだ礫層
- その下位には上総層群



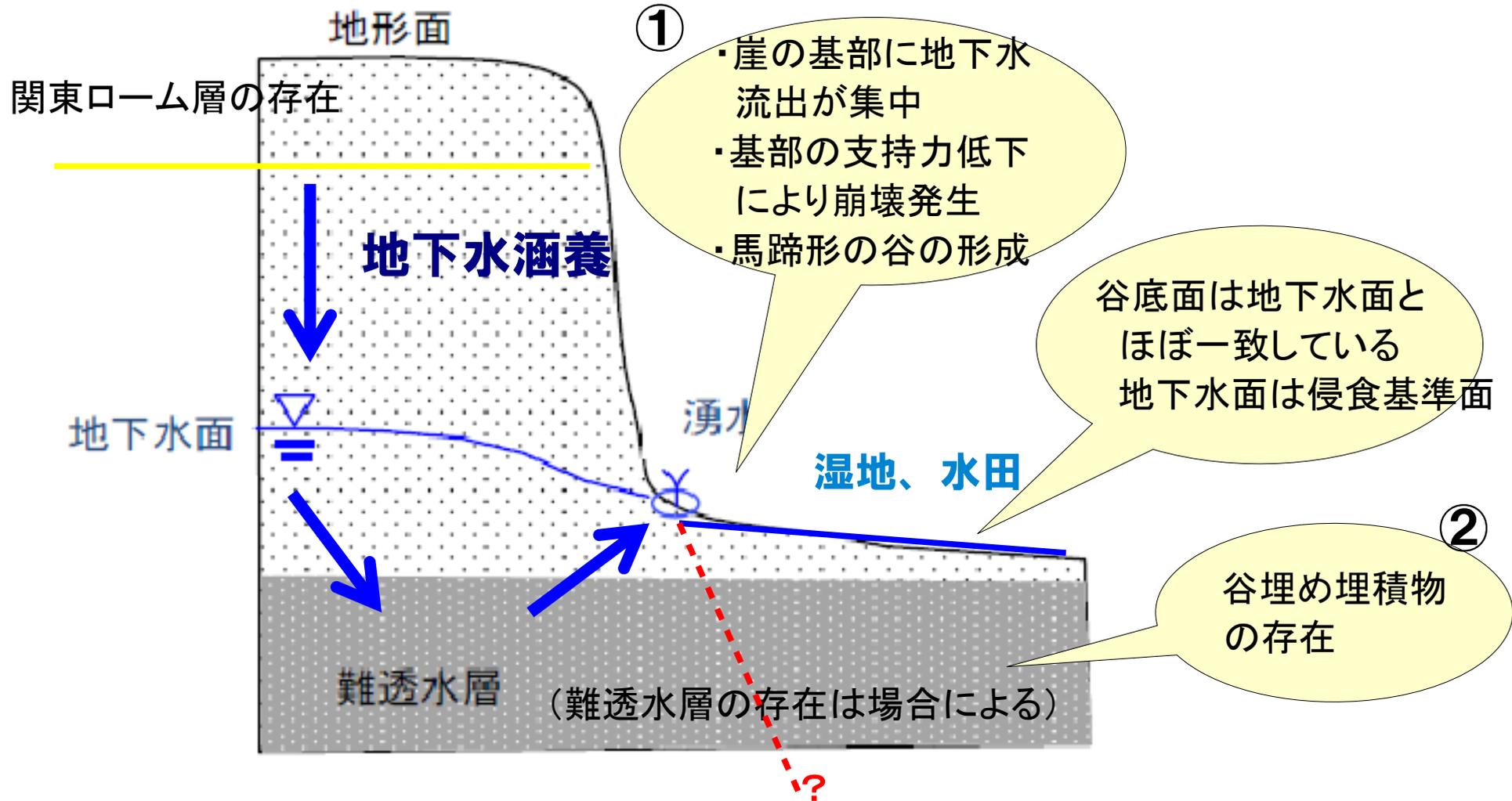
下総台地とは異なる成因と地質構造

野川公園(東京都環境局ホームページ)

(水みちはあるか、水みち研究会)

なぜ馬蹄形谷頭、急な谷壁が形成されるか？

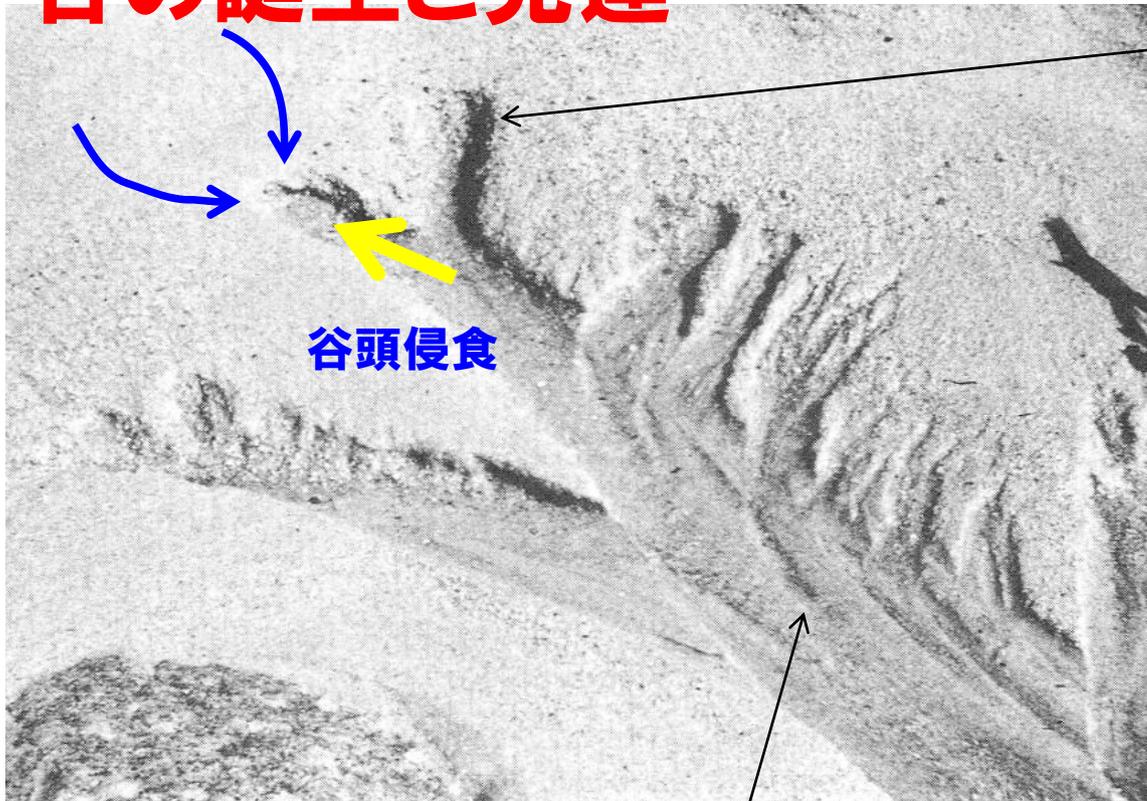
谷の機能は台地の地下水を排水すること



馬蹄形の谷頭を持つ船底型の谷津は台地の豊富な地下水を排水す

地形面の形成はわかった

谷の誕生と発達



谷頭侵食

谷頭は湧水点
地下水の流れが
最も集中する場所

地形発達と地下水流動系

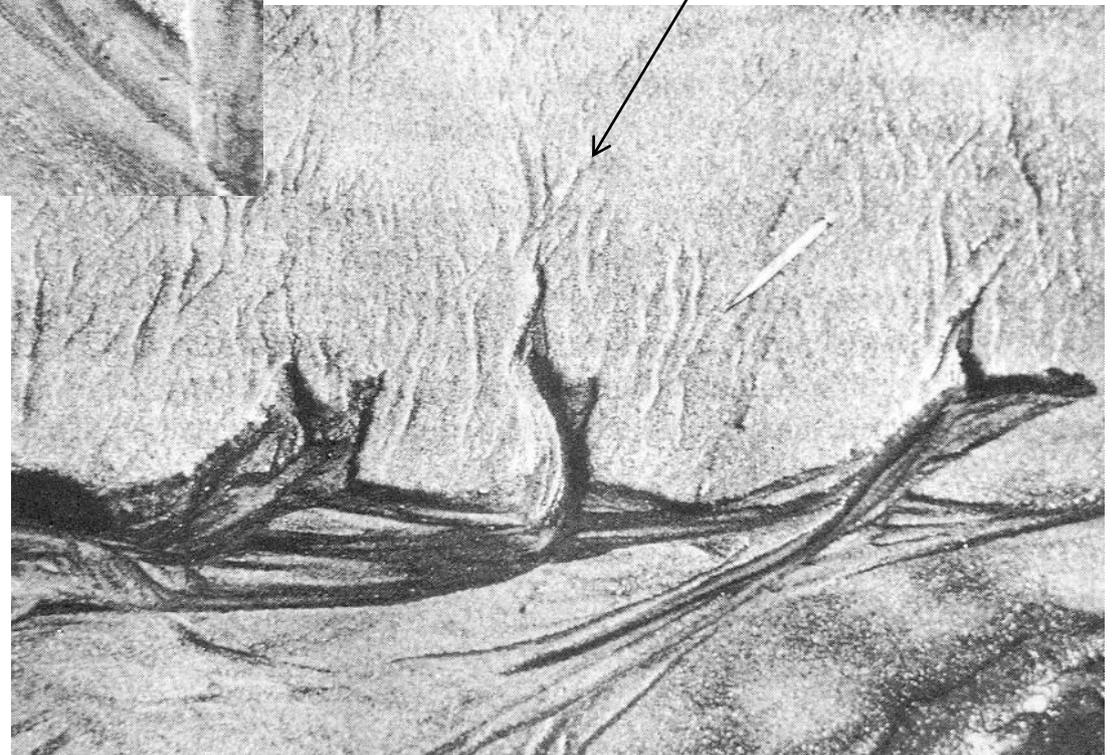
相互作用によって谷が
生まれ、成長していく

台地の上には、主谷が
形成される前にあった谷
が残っている

谷底は地下水面
湿地が形成される

台地の谷の発達は地下水
の流れと密接な関係にある

谷は地下水の排水系



舟底型の谷の地下はどんな構造になっているか

川越 (1991MS) による下総台地南東部の事例

注) 最終氷期以降の海水

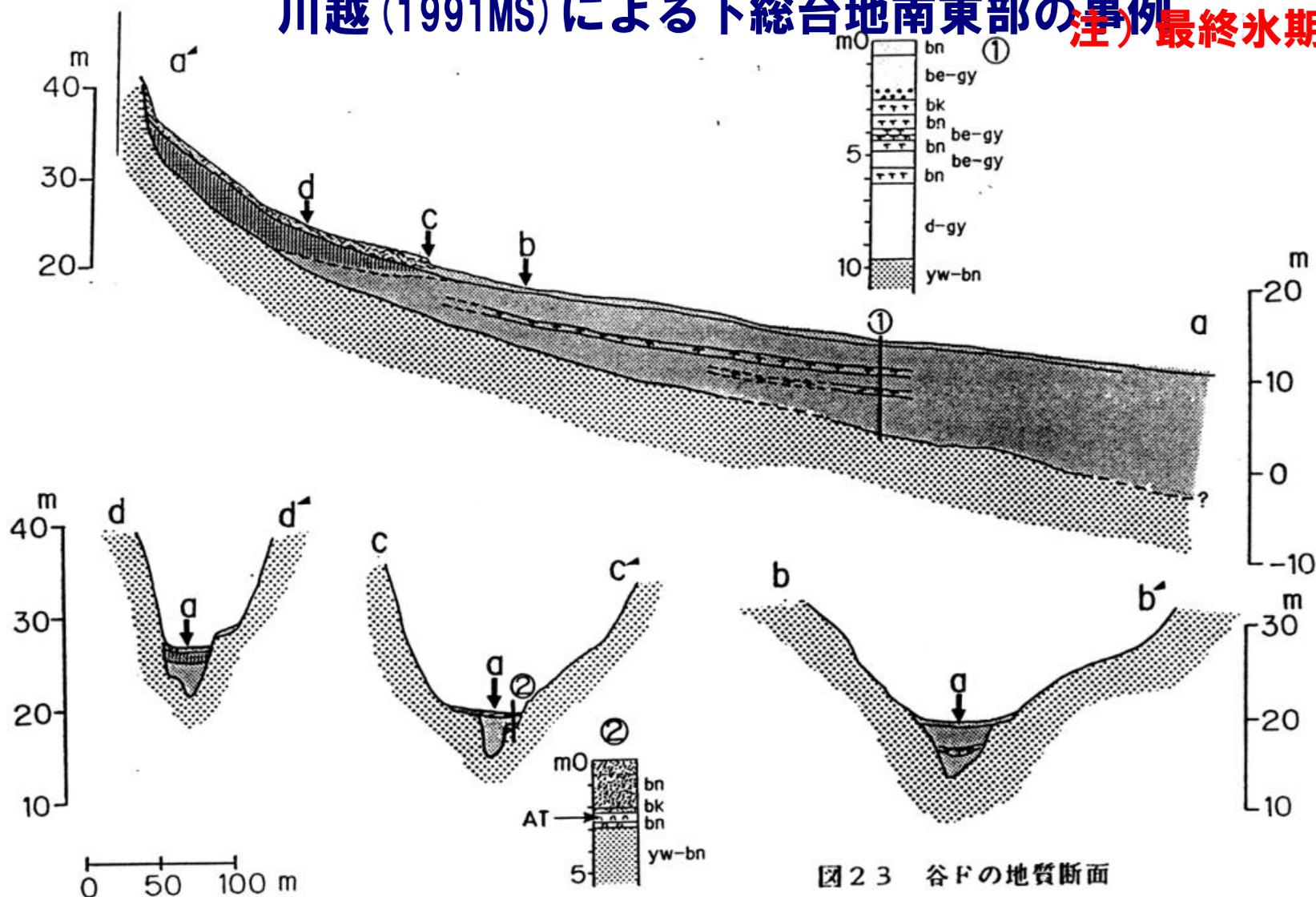


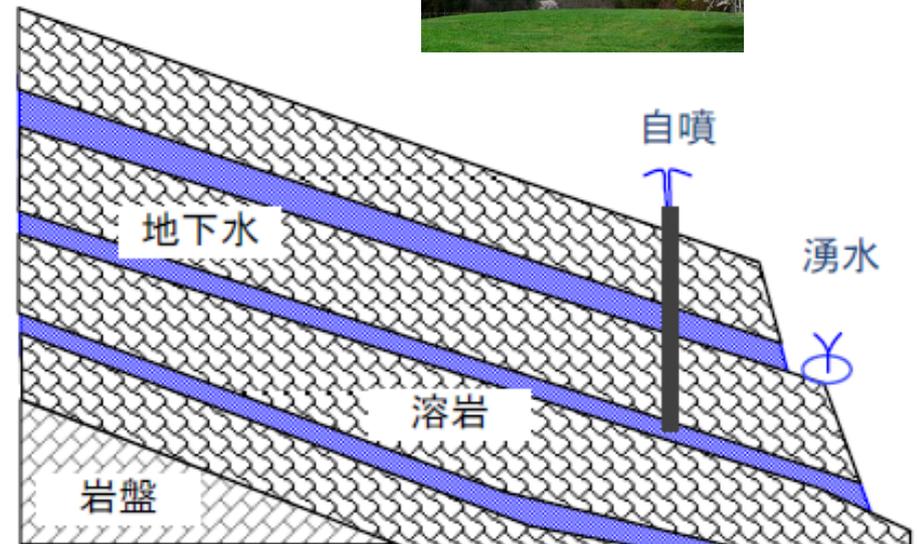
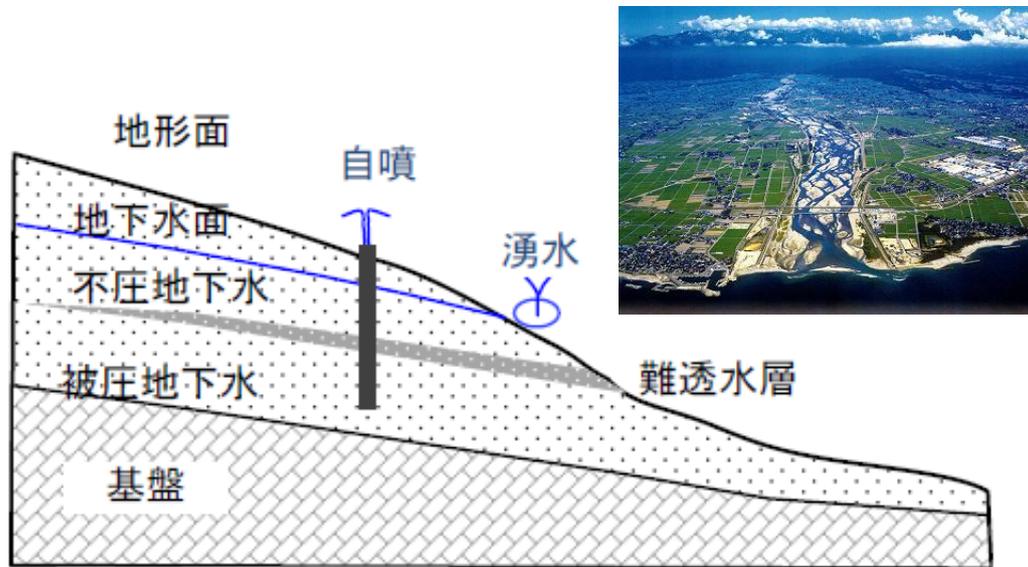
図23 谷Dの地質断面

- 1: 砂層 (洪積層), 2: 泥層 (洪積層), 3: 砂 (細粒~中粒), 4: 砂 (粗粒), 5: シルトまたは粘土, 6: シルト質砂, 7: 腐蝕層 (3~7: 下末吉期以降の堆積物), 8: 表層土または埋没土壌, 9: 風化火山灰 (いわゆる関東ローム層), 10: 不明
- color: bn:brown, gy:gray, bk:black, gn:green, bc:blue, yw:yellow, d-:dark-
- ↓ は他の測線との交点、① は地質柱状図の位置を示す

地形地質を踏まえた湧水の分類

湧水は地域特性に応じて多様な分布形態を示すが、本ガイドラインでは主に地形地質に着目して以下の7つのタイプに分類する。

- a) 崖線(がいせん)タイプ
- b) 谷頭(こくとう)タイプ
- c) 湿地・池タイプ
- d) 扇端(せんたん)タイプ
- e) 火山タイプ
- f) 傾斜丘陵地タイプ
- g) その他



(a) 地形面と地下水面が交差する例および被圧地下水の例

(b) 亀裂中の裂か水の例

図 2-3 湧水の湧出形態

[イメージ]

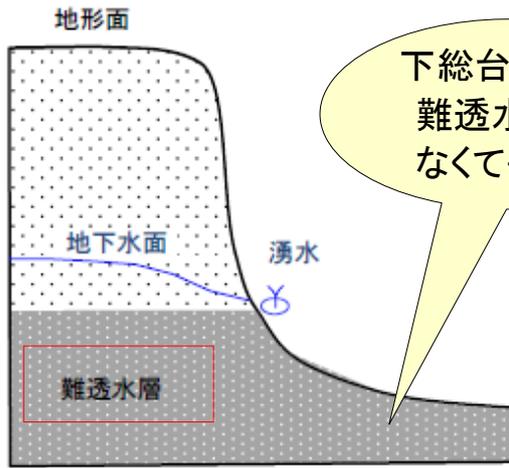
- ・扇端タイプ 例) 黒部川扇状地
- ・崖線タイプ 例) 国分寺崖線、野川湧水群

[イメージ]

- ・火山タイプ 例) 八ヶ岳湧水群、富士山

三分の一湧水

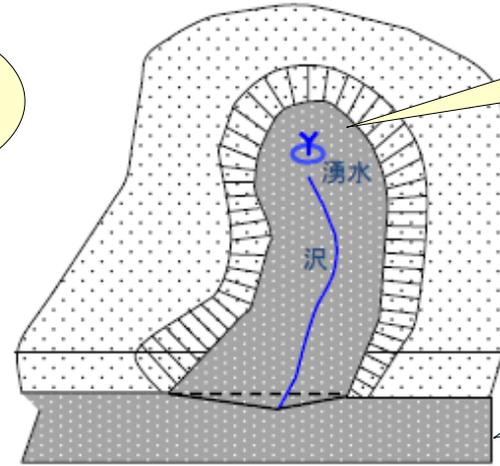
武蔵野台地



a) 崖線タイプ

下総台地では
難透水層は
なくてもよい

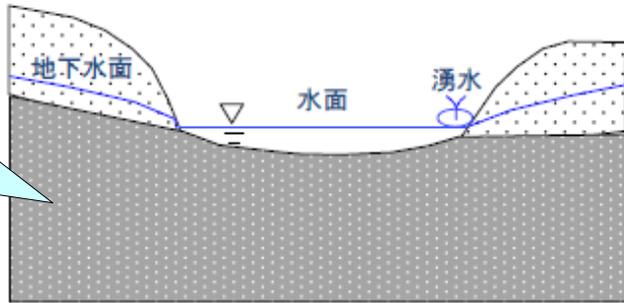
谷頭に地下水
が集中する



b) 谷頭タイプ

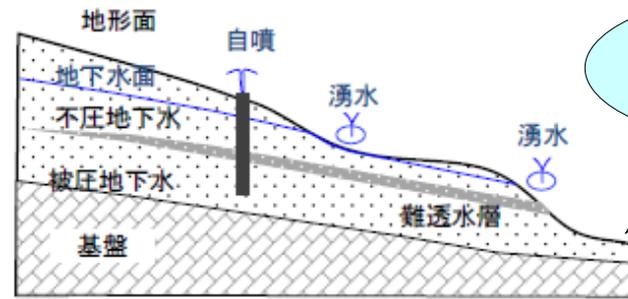
台地タイプ

砂丘・浜堤
氷期に氷床に
覆われた地域



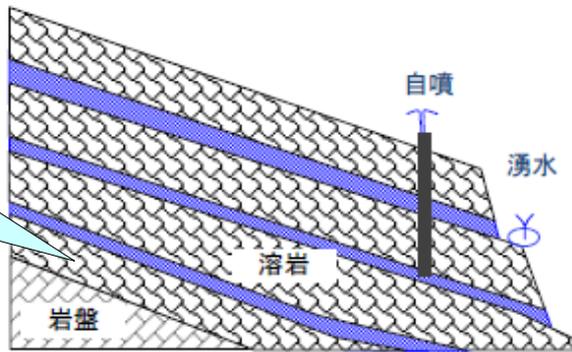
c) 湿地・池タイプ

扇状地タイプ



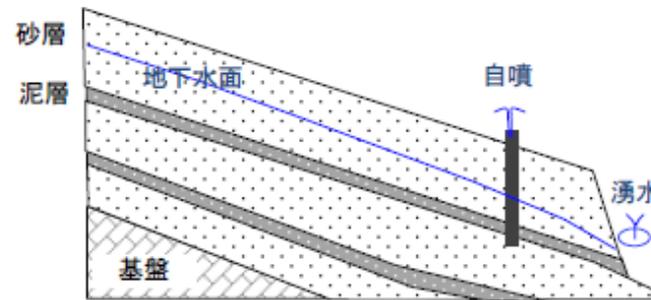
d) 扇端タイプ

火山タイプ
八ヶ岳、富士山、
阿蘇山、...



e) 火山タイプ

上総丘陵
将棋倒し構造



f) 傾斜丘陵地タイプ

下総台地モデルを確立させよう！

地域の水循環系の中で湧水を考える

台地には歴史がある

・・・地史的歴史、人間の歴史



台地の地形は機能を持ち（地下水を排水すること）、その機能は歴史の中で変遷してきた

台地は水循環の場であり、水循環の結果として生物の生息する場を作ってきた



自然の恵みを享受するためには、ひとは場の機能と水循環のあり方をよく知り、その機能をなるべく損なわないように配慮しながら、人間システムをその場に埋め込まなければならない

地域の水循環系の中で湧水を考える

【実践】 様々な方々（ステークホルダー）
との協働・協調

【目的】 人口減少、成熟社会における
人と自然の関係をどうするか



健全な水循環と
生物多様性は表裏一体



千葉県は健全な水循環、
生物多様性では世界をリード
世界のモデルとなる街作り
千葉エコタウン

地下水利用の歴史—地盤沈下

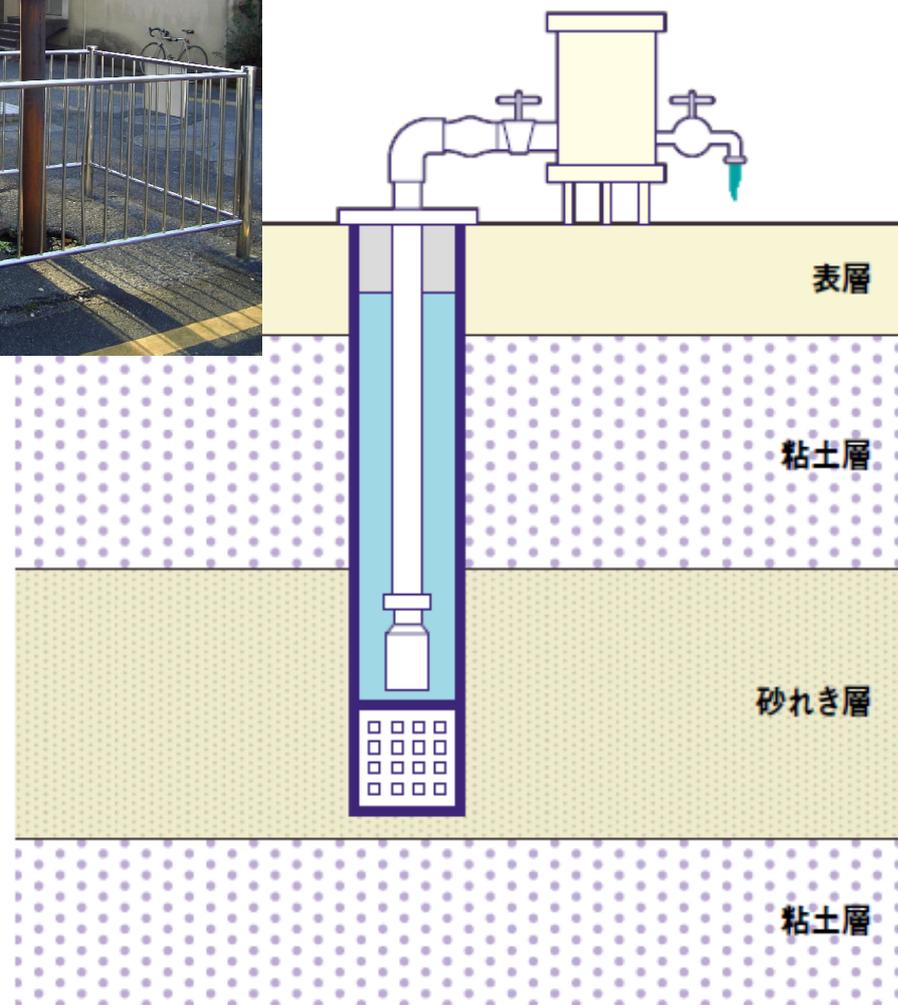
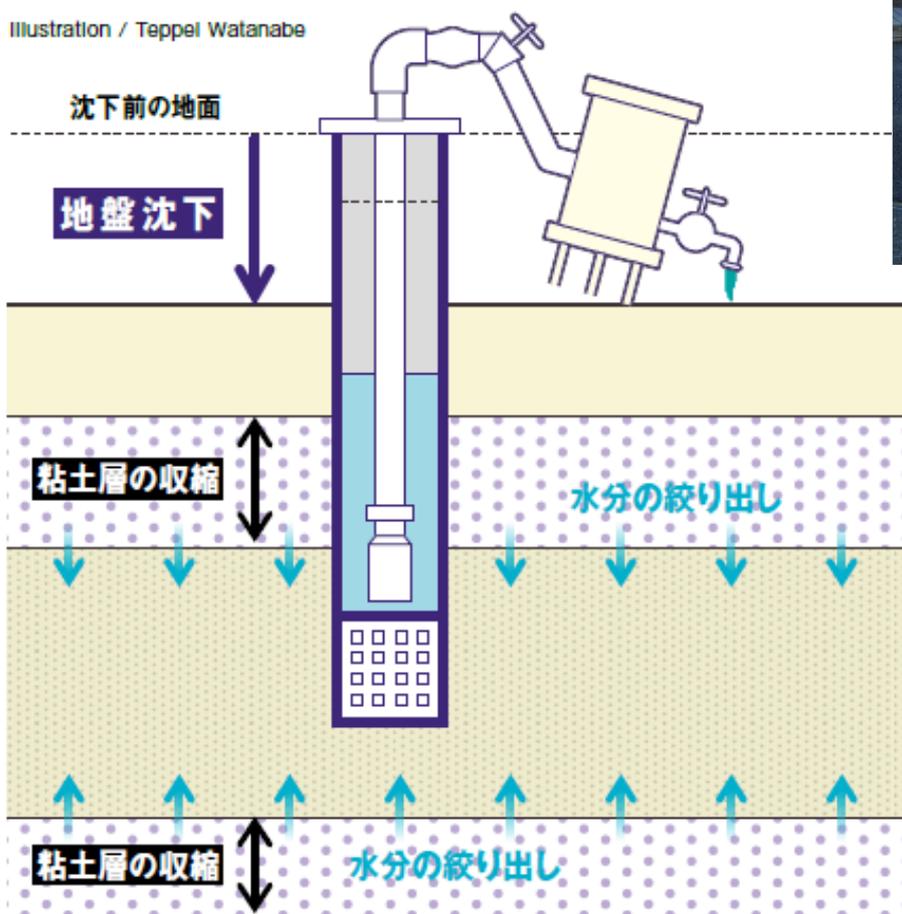


葛飾区東新小岩1丁目第五建設事務所の抜け上がり井戸ポンプ
<http://ido100.ido-jin.net/tokyo/004.html>

地盤沈下は地下水、天然ガス鹹水の揚水によって起こる



Illustration / Teppel Watanabe



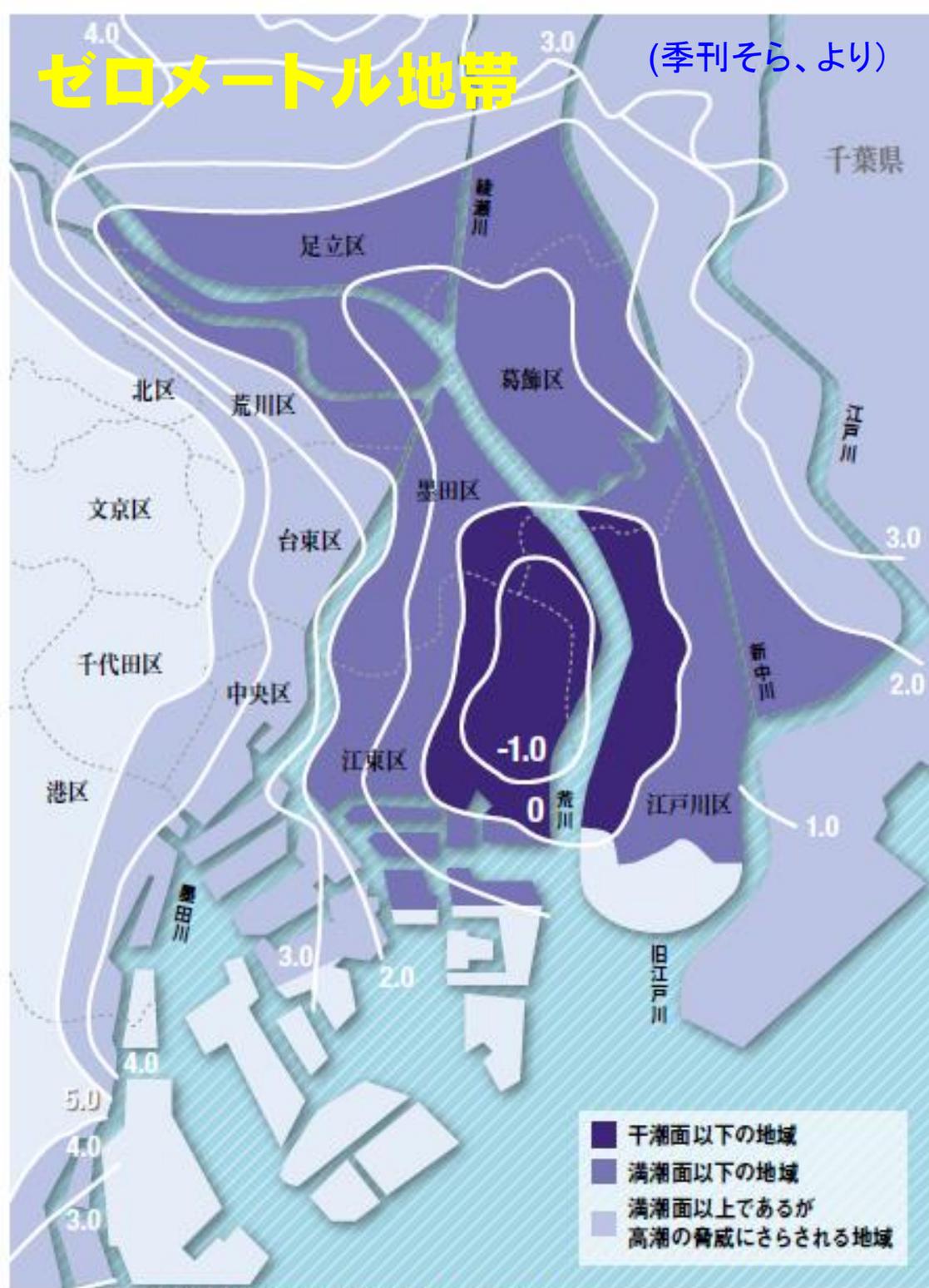
砂れき層の地下水が少なくなると、その不足を補うために上下の粘土層から水分を絞り出そうとする。そのため粘土層が収縮し、地盤沈下が発生する。

（地盤沈下のメカニズム）

地下水は水が豊富にしみ通る砂れき層などからくみ上げられる。その量が地下にしみ込む雨水や河川水などに見合えば、地盤沈下は起こらない。

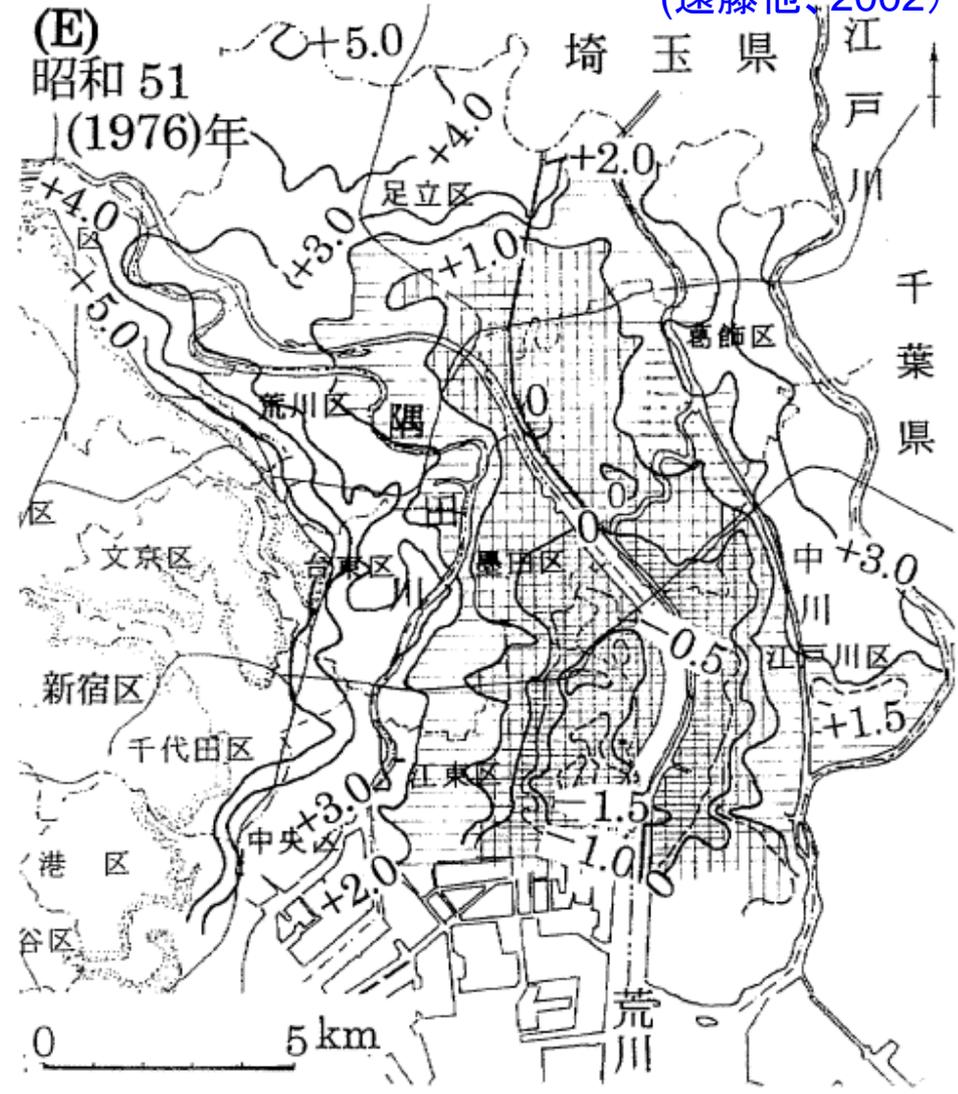
ゼロメートル地帯

(季刊そら、より)



東京都建設局河川部「東京の低地河川事業」をもとに作成

(遠藤他、2002)



A.P.とは？



- A.P.: Arakawa Peil(荒川量水標)の略
- A.P.0 m は東京湾平均海面の-1.1344m
- A.P.2.0m : 東京湾のほぼ満潮面
- A.P.1.0m : ほぼ東京湾平均海面
- A.P. 0m : 東京湾のほぼ最干潮面

A-A': 図-14 の断面線
 (A.P.基準, 単位:m)

東京における地下水位と地盤沈下の水位（明治24年～平成21年）

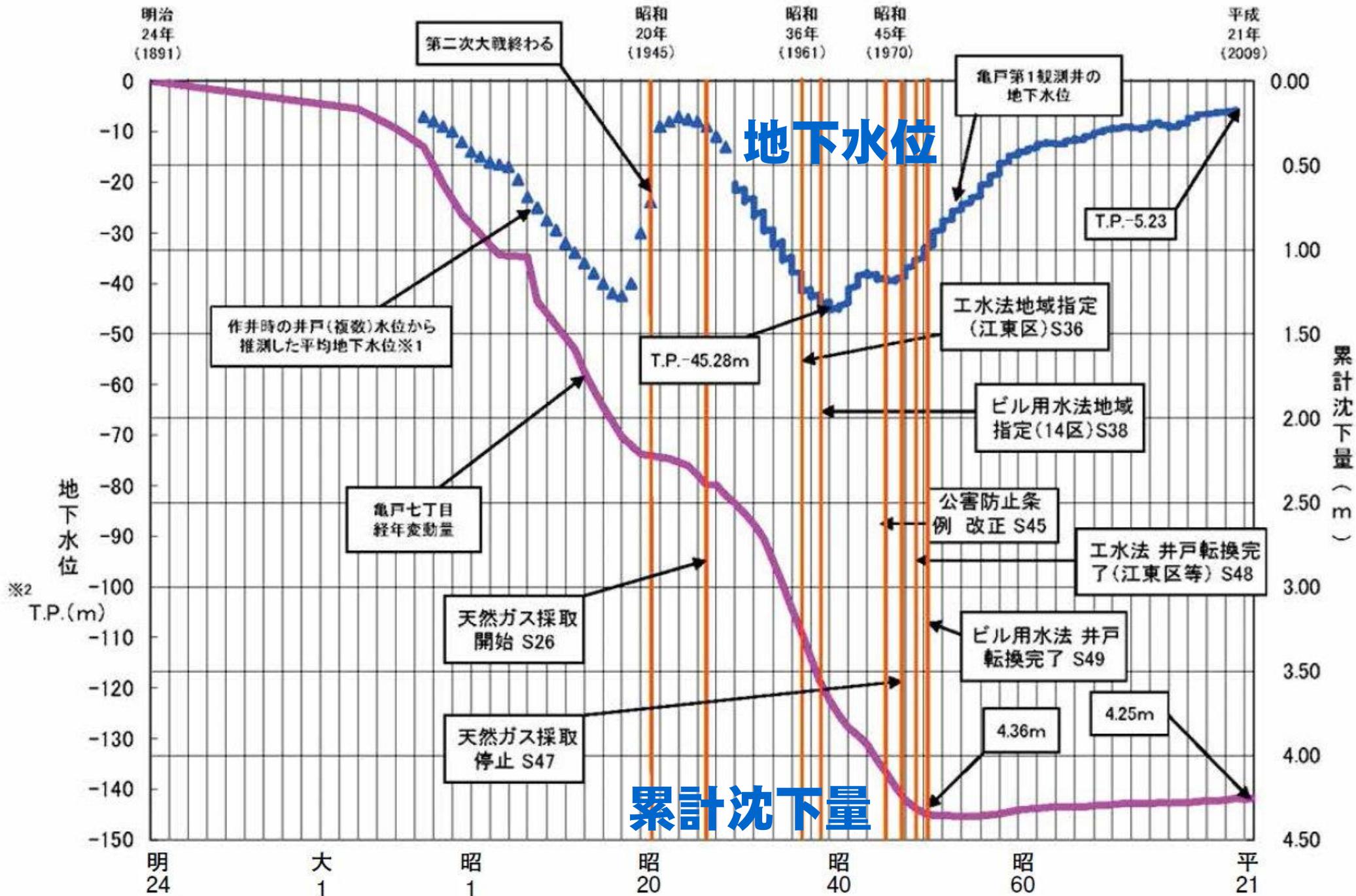


図3 東京都（江東区亀戸）における地盤高と地下水位の推移（東京都，2011）

地盤沈下が暮らしにもたらす被害は……

1971年9月に太平洋岸一帯で起こった異常潮位により東京のゼロメートル地帯では多数の家屋で浸水被害が発生した。左は江東区の民家の被害である。下は月島川水門。現在、江東区等のゼロメートル地帯には、こうした水門や排水機場等が整えられ、高潮や洪水から人々の暮らしを守っている。



地下水は使っちゃだめなのか？

我々はどこから
水を得ているのか

広域水道：

利根川、渡良瀬川、
自奴川上流の水源ダム



人と水の分断はないか



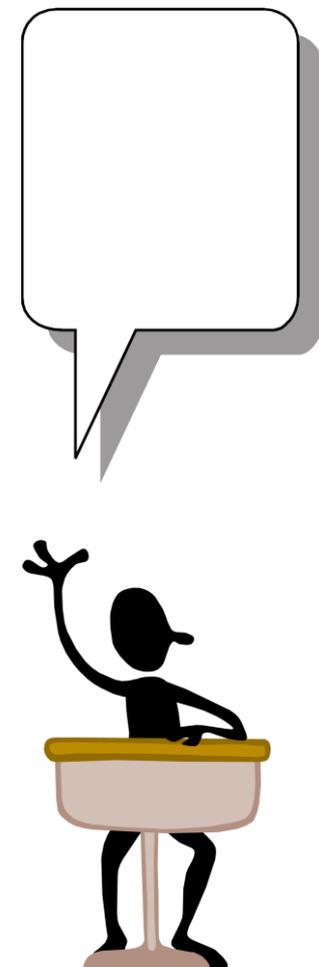
(千葉県水道局ホームページより)

様々な社会資本（国交省所管）の耐用年数

対象事業	対象範囲	耐用年数	
		道路改良	60年
道路	直轄・補助・地方単独	橋梁	60年
		舗装	10年
		港湾	直轄・補助
港湾	直轄・補助	臨港交通施設	60年
		左記以外の施設	無限大
		空港	直轄・補助
空港	直轄・補助	航空路	9年
		公共賃貸住宅	補助・地方単独
公共賃貸住宅	補助・地方単独	1950年代着工	31～36年
		1960年代着工	36～51年
		1970年代着工	51～61年
		1980年以降着工	61年
		下水道	補助・地方単独
下水道	補助・地方単独	処理場	33年
		都市公園	直轄・補助・地方単独
治水	直轄・補助・地方単独	河川	無限大
		ダム	80年
		砂防	67年
		治水機械	7年
海岸	直轄・補助・地方単独	50年	

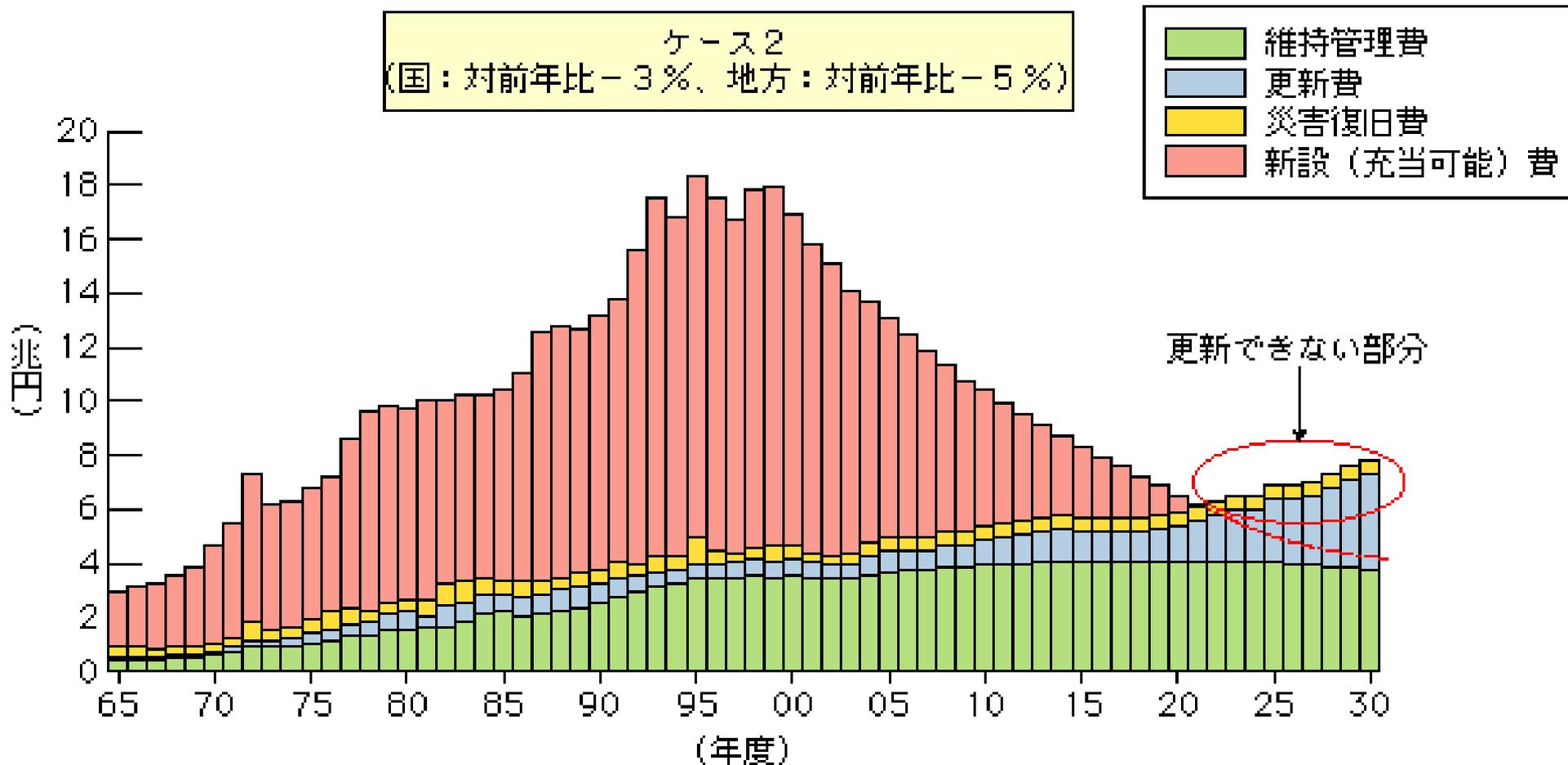
- ・道路改良には、トンネルを含む。
- ・公共賃貸住宅の1950～70年代間の耐用年数は、平均して伸びていくものとした。

(H17国土交通白書より)



国土交通省所管の社会資本(道路、港湾、空港、公共賃貸住宅、下水道、都市公園、治水、海岸)を対象にした平成42年(2030年)までの維持管理・更新費の推計

ケース2) 国が管理主体の社会資本については、2005年度以降対前年比マイナス3%、地方が管理主体の社会資本については、2005年度以降対前年比マイナス5%(ケース2)の2つのケースを設定しました。



**我々の文明はコストの高いハードウェアによって
維持されている**

これをいつまで維持できるだろうか

安心とは、複数の選択肢があること

**遠くの水と近くの水
どちらも大切
近くの水とは？**



栗原 康 著

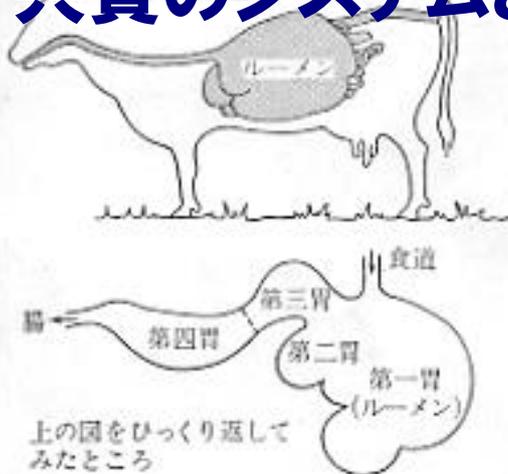
有限の生態学—安定と共存のシステム—
岩波新書949(絶版)



~~共栄のシステム 牛のルーメン.....石油文明~~
~~共貧のシステム フラスコの中のミコロコズム...農村的世界~~
~~緊張のシステム 惑星間航行宇宙船.....都市的世界~~

我々はどちらを選ぶべきか？

共貧のシステムと緊張のシステムの共存は可能か？



二つの世界を行き来できる精神的態度