

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

2023年6月

近藤昭彦
千葉大学名誉教授
理学博士

地下水の不思議



千葉県養老川上流の自噴井

見えない地下水循環の理解

- 現場における観察 経験的な理解
⇒ 地形・地質・気候・植生、...



- モデルによる理解 演繹的な理解
⇒ 科学的なモデルの活用



自噴井の位置は河床より20m以上高い位置にある



カバーフォットの自噴井の場所●

(地図閲覧サービス(ウォッチズ) <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？

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

単斜構造を呈する砂泥互層一房総の下総層群・上総層群



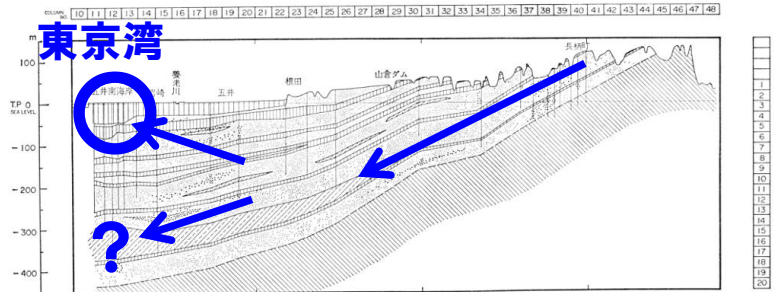
図12-4 地質断面と自噴井の取水深度および自噴量状況図(A-B) (高村原図)



養老川の地質断面と自噴井の採水深度(高村、1972)

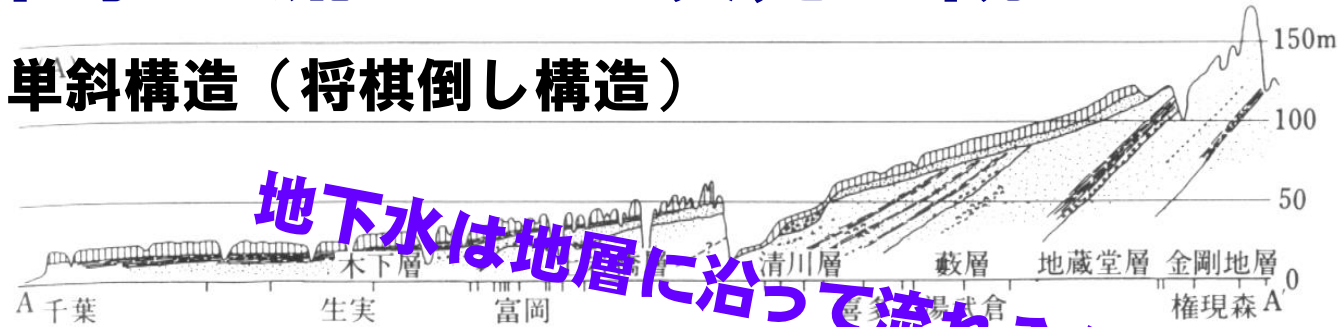
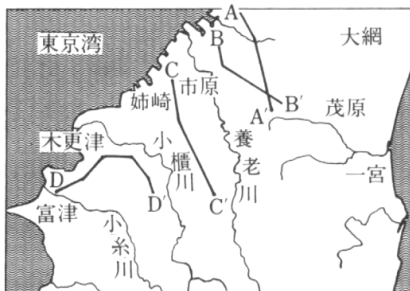
下総層群中の地下水の流れ 三次元で観ると

東京湾に向かって傾斜する単斜構造（将棋倒し構造）

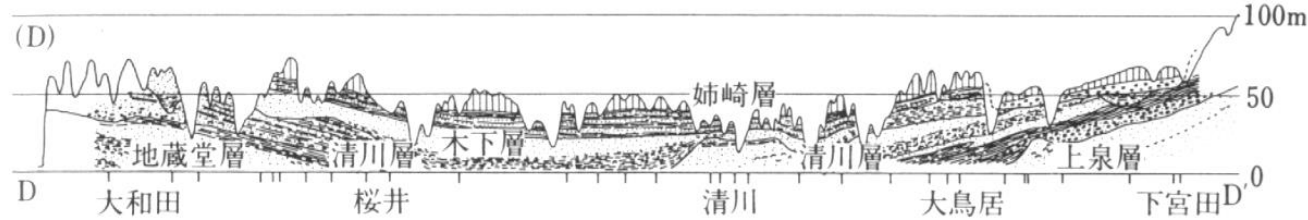
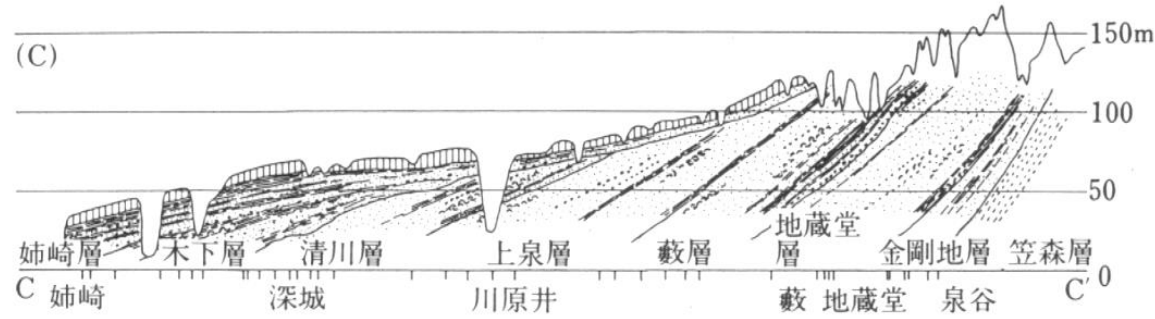
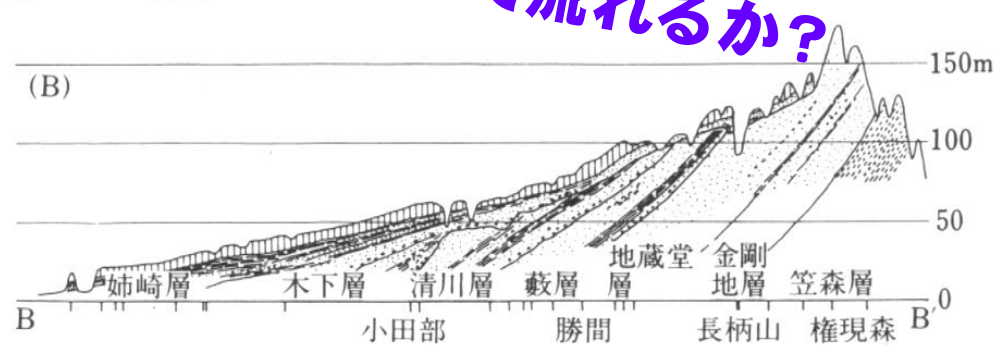
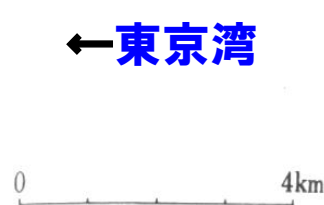


沖積層 砂層 砂質粘土層 礫 粘土 砂質粘土 砂 粘土 砂質粘土 砂質シルト 軽石 貝化石

関東ローム層 大網 茂原 一宮 養老川 小瀬川 富津 小川 木更津 姉崎 市原 東京湾



←東京湾



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.

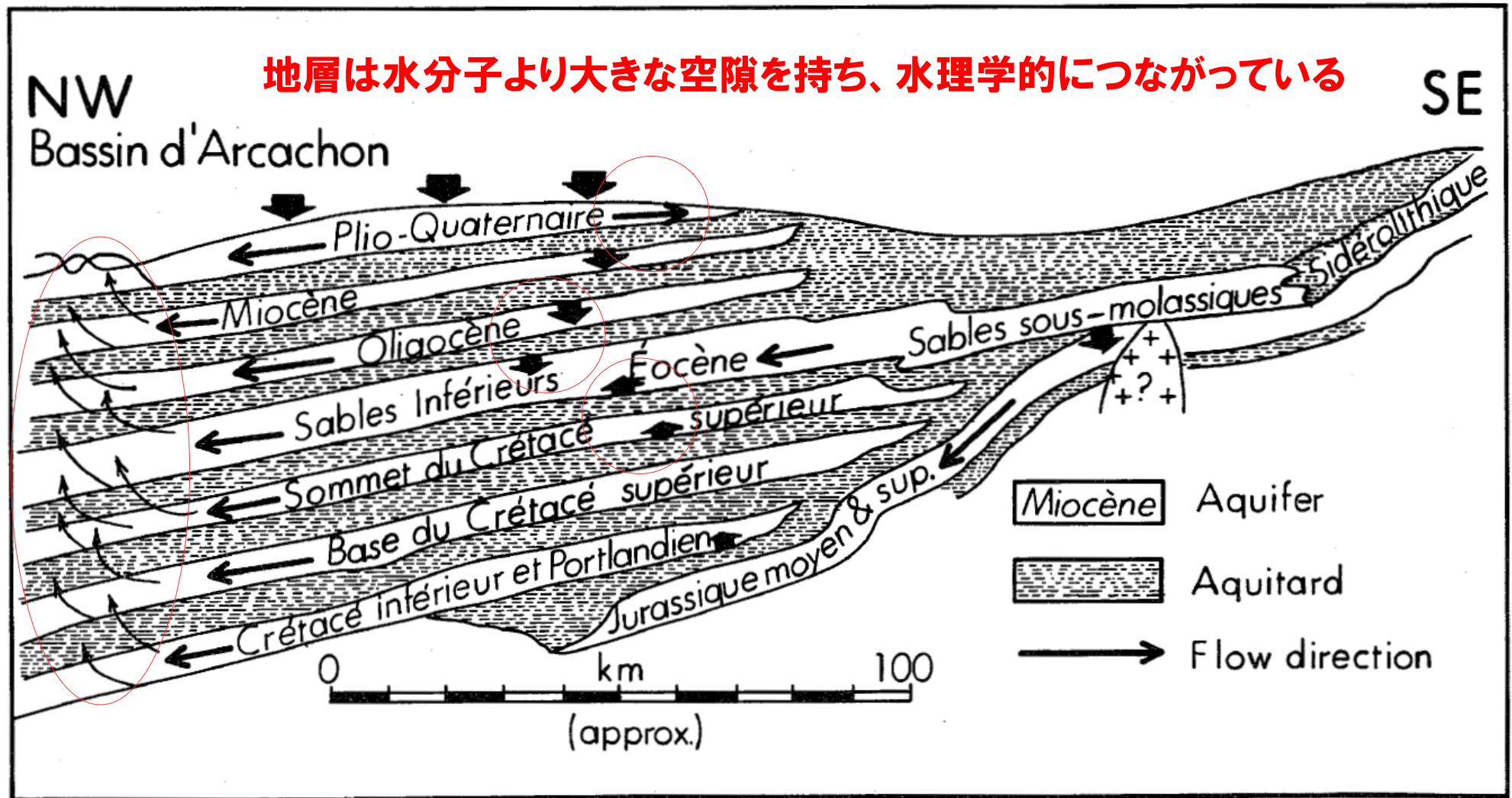


Figure 3. Schematic of multiple-aquifer systems and computed flow rates, Aquitain Basin, France (modified from Besbes et al., 1976).

水は低きにつく・・・何の低きに？

ポテンシャル（水理水頭）

水理水頭(h) = 高さ + 圧力

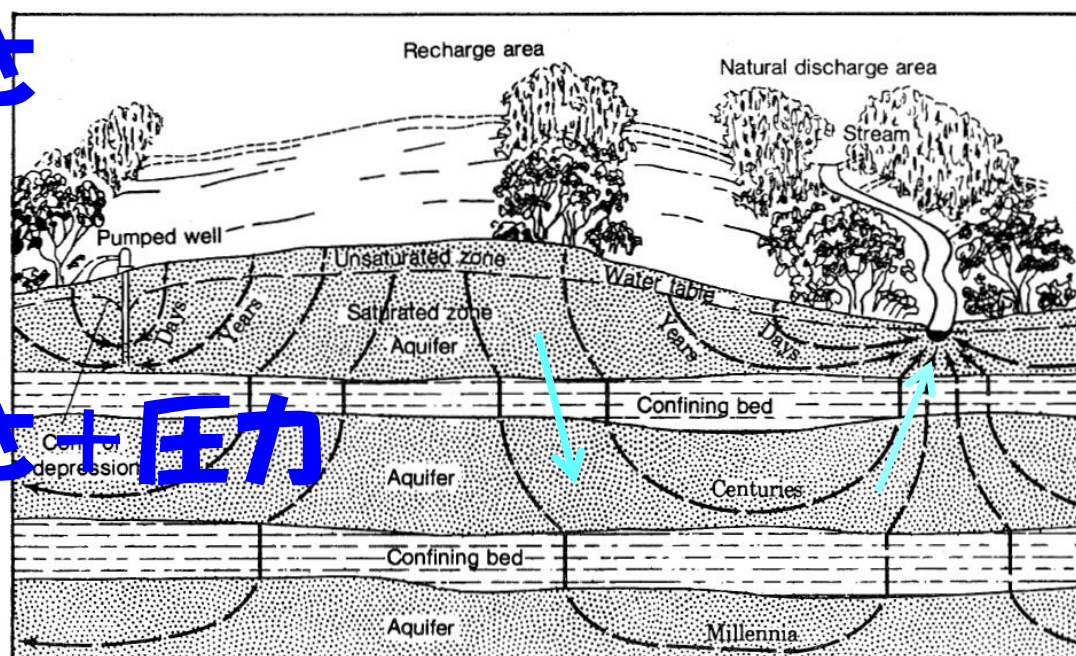


川の場合は圧力は0（大気圧）

水理水頭(h) = 高さ

地下水の場合

水理水頭(h) = 高さ + 圧力



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)

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

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。

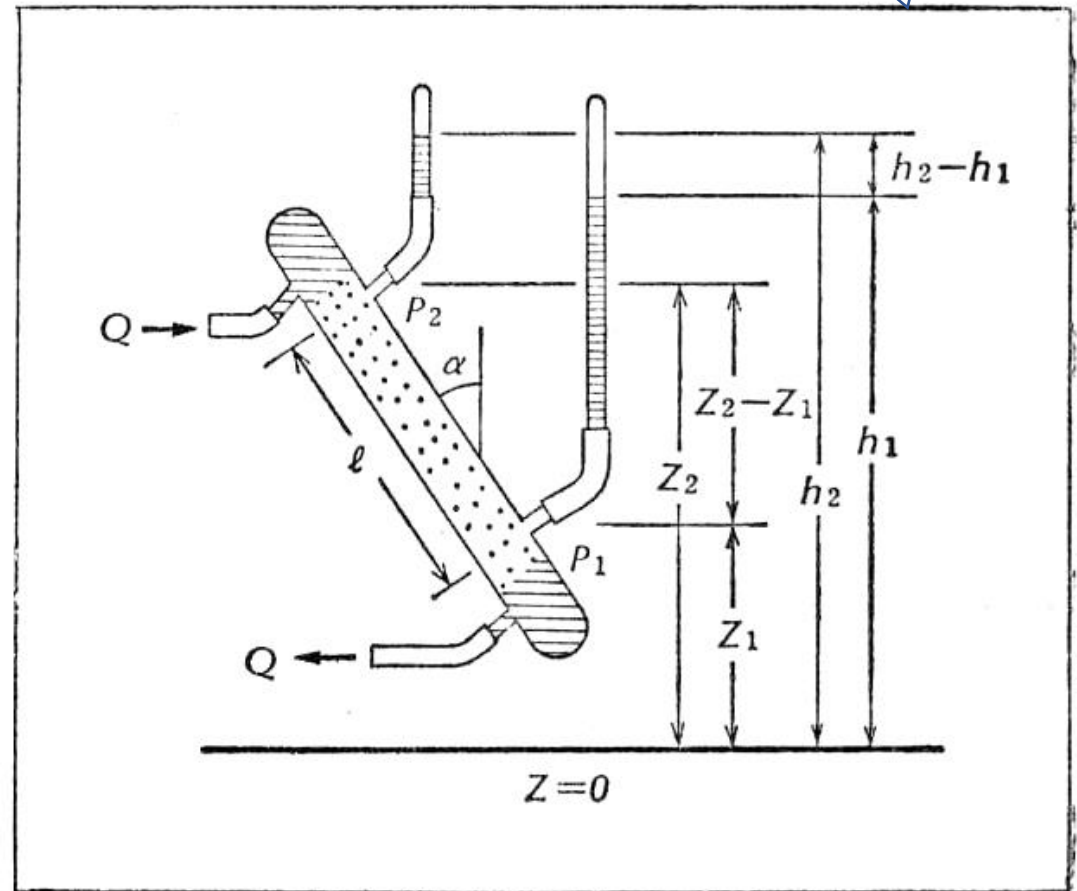


図 1.12 ダルシーの実験

(山本莊毅、新版地下水調査法、古今書院)

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

ダルシー式

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

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

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

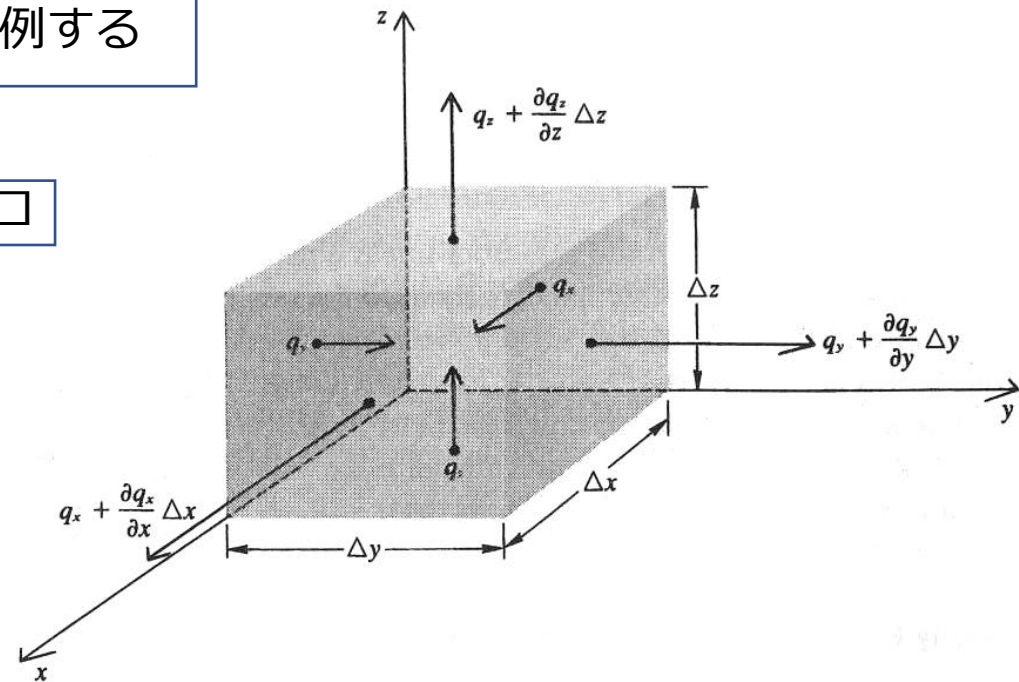
$$\frac{\partial q_x}{\partial x} + \frac{\partial q_y}{\partial y} + \frac{\partial q_z}{\partial z} = 0$$

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

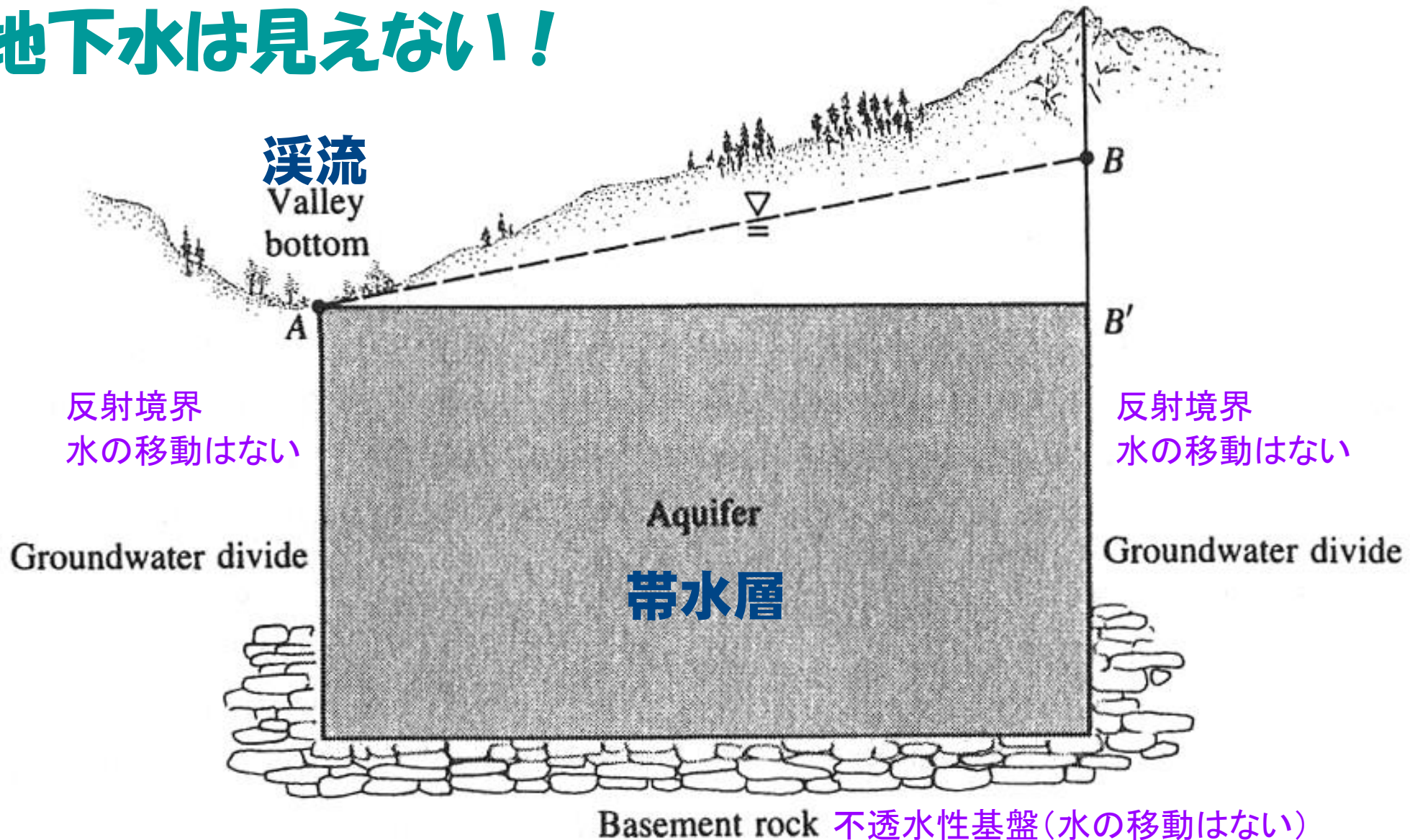
$$\frac{\partial^2 h}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 h}{\partial z^2} = 0$$



尾根

Topographic high

地下水は見えない！



左端に大河川、右端が流域界となっている波丘地を仮定

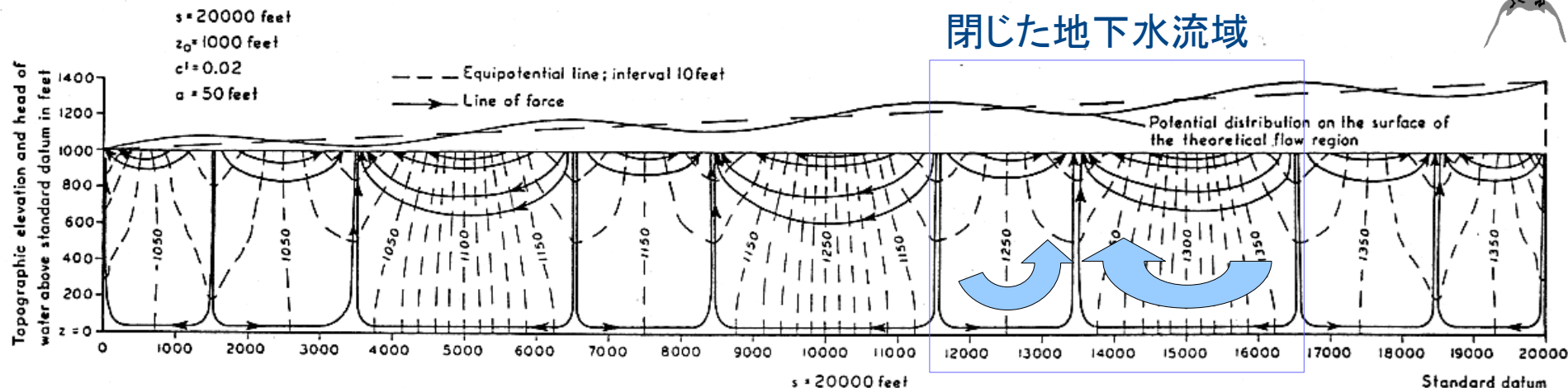


Fig. 2a. Potential distribution and flow pattern as obtained by equation 6.

→ 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

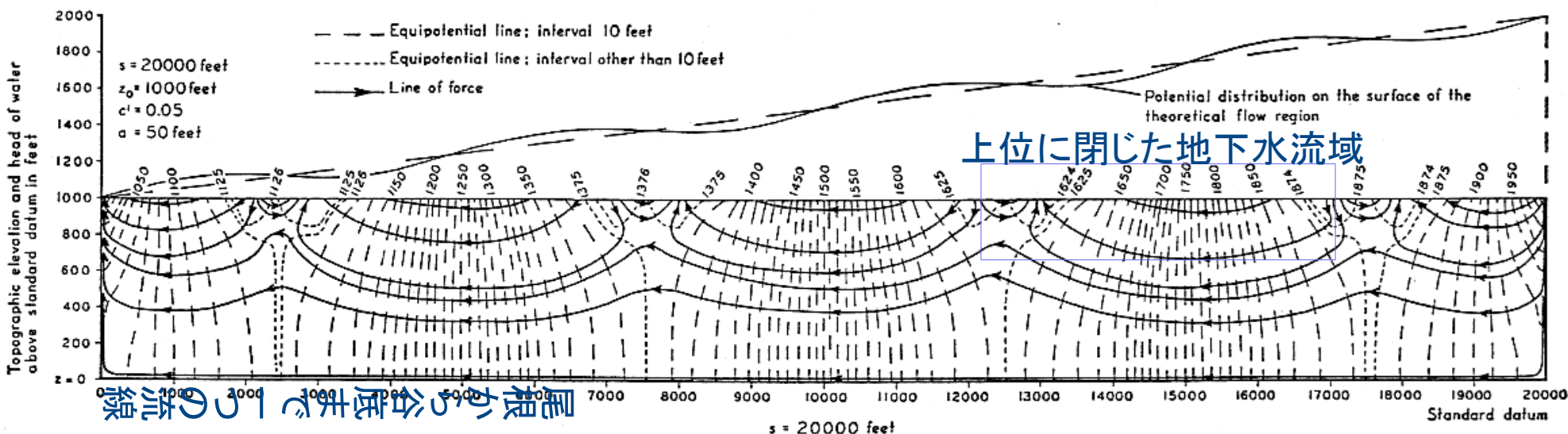


Fig. 2c. Potential distribution and flow pattern as obtained by equation 6.

Tóthが到達した地下水流動系の概念

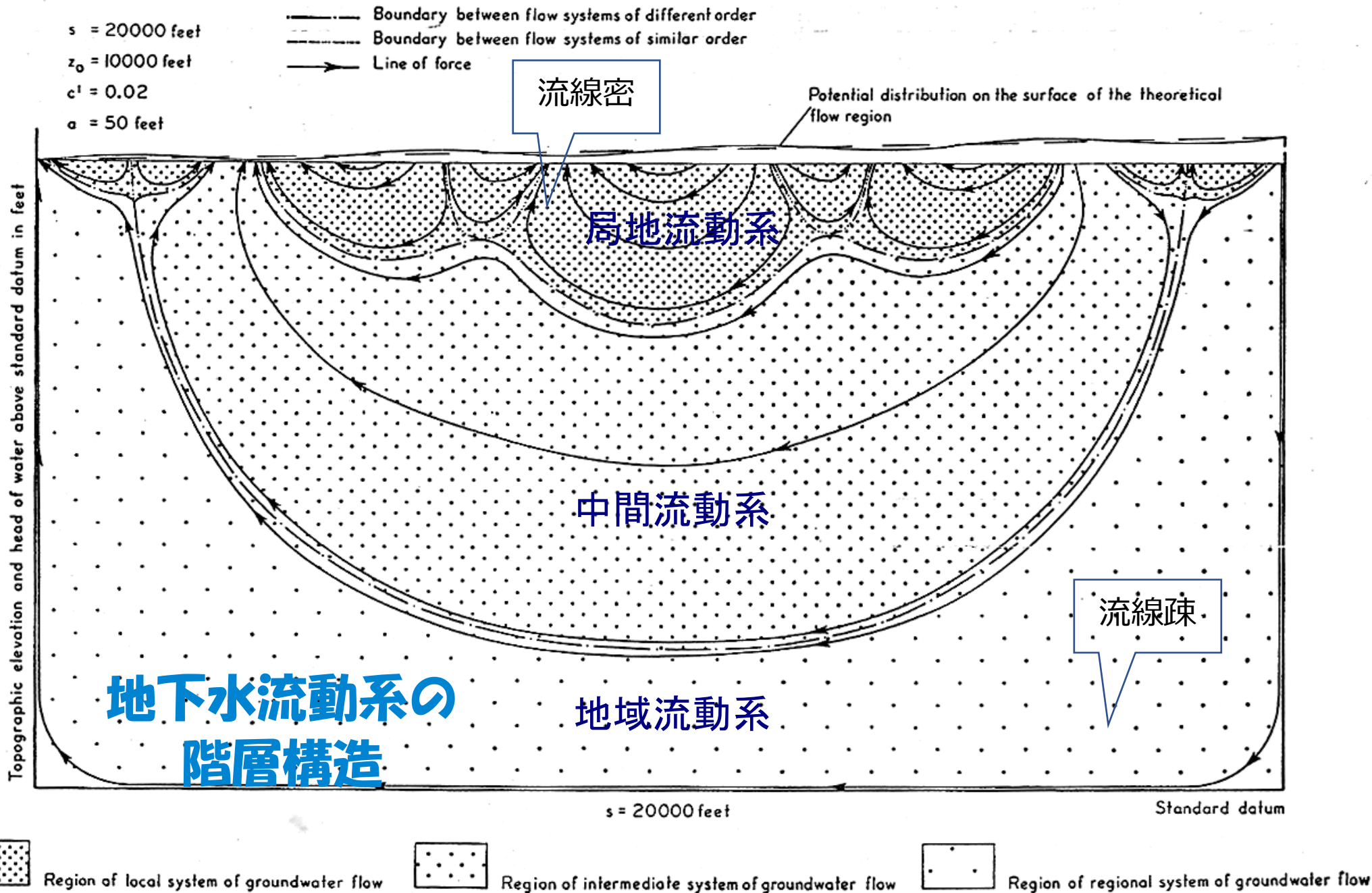
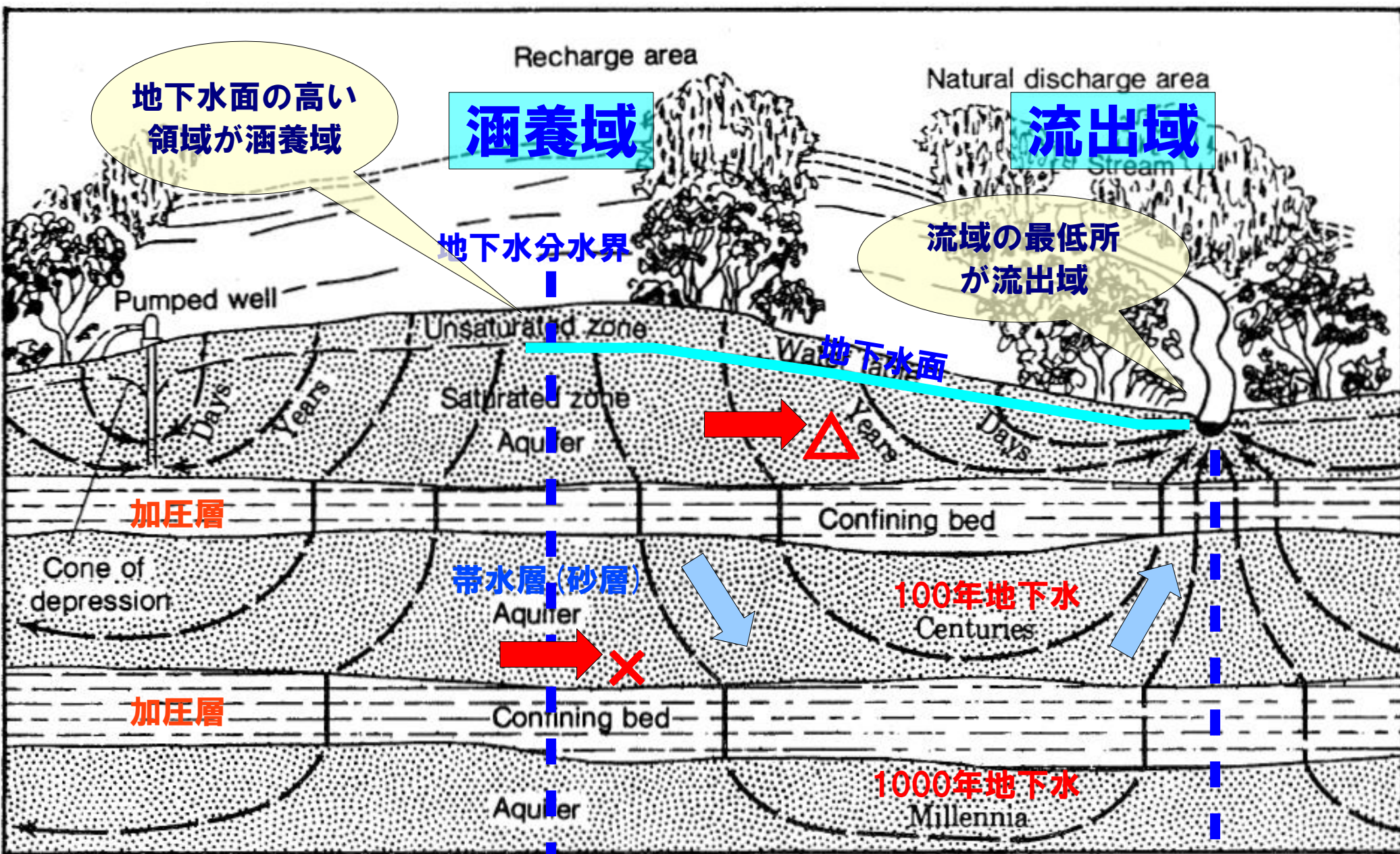


Fig. 3. Theoretical flow pattern and boundaries between different flow systems.

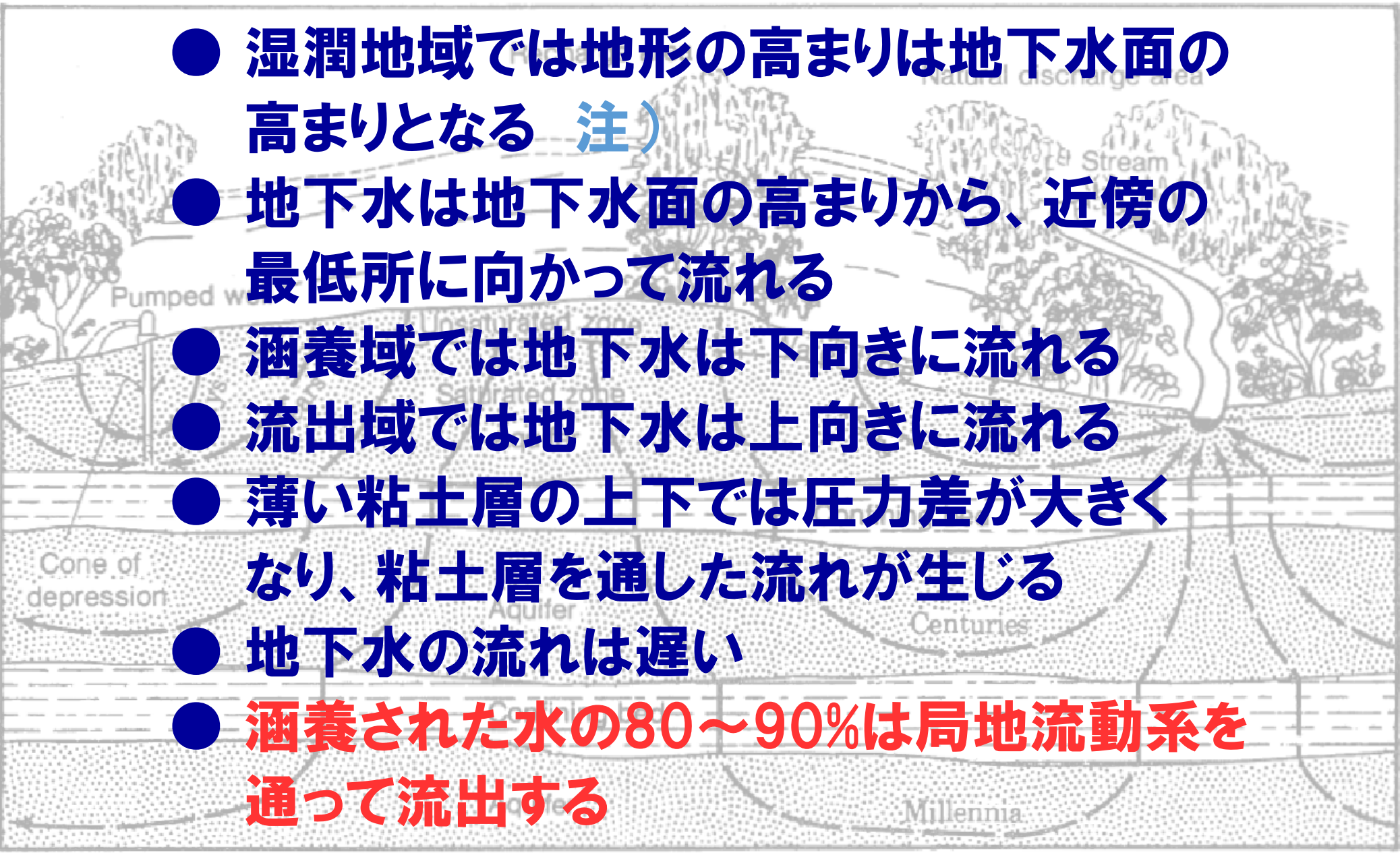
河川近傍の地下水の流れの模式図

黒い破線は流線



水はポテンシャル（高さ+圧力）の低きにつく

(Tóth, 1995)

- 
- 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

注) 地下水面は涵養と流出の動的平衡で形成

涵養された水の80～90%は局地流動系を通して流出するという...

考えよう！

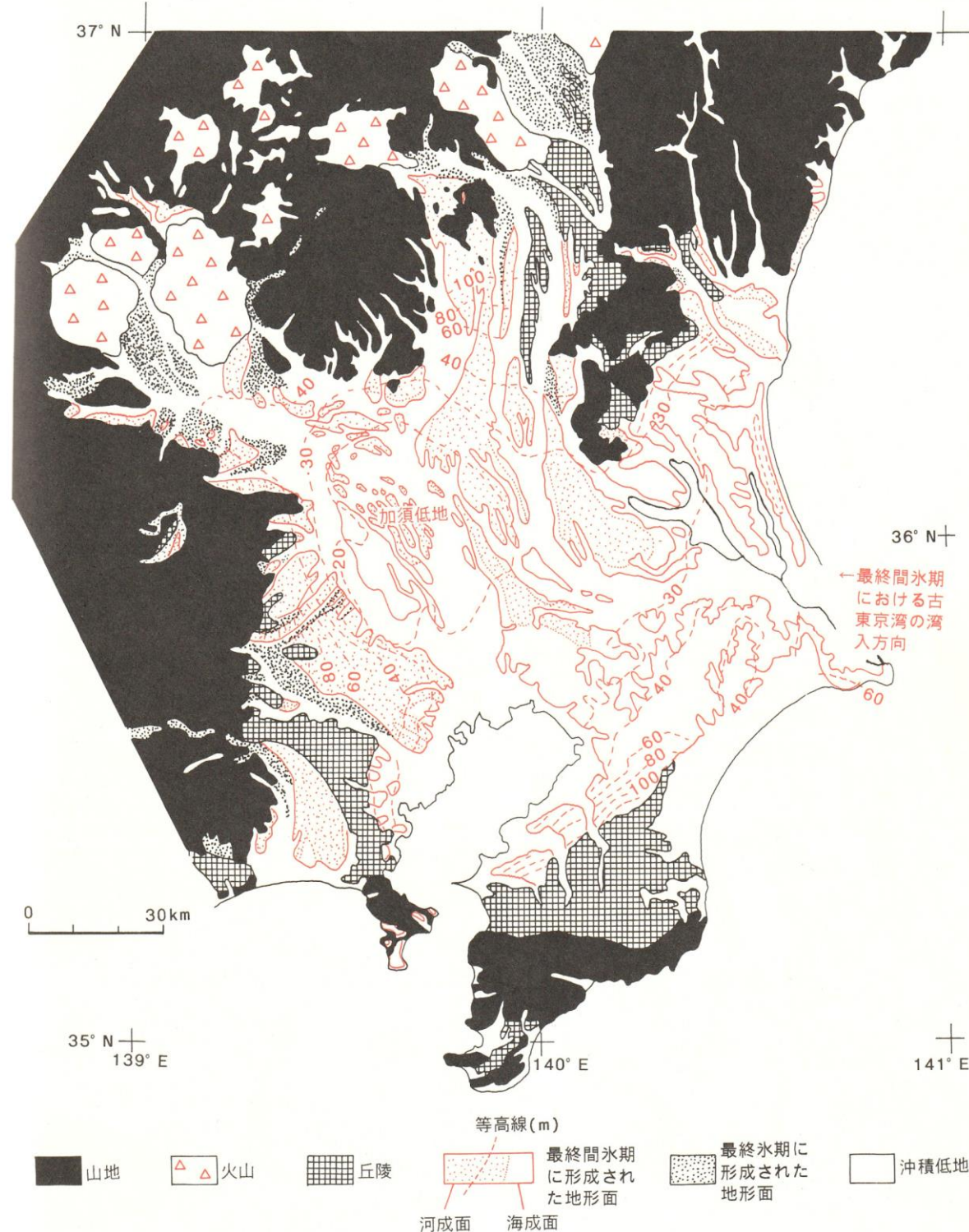
・ 関東平野は低地と台地から構成される

・ 関東平野（地下水盆）の地下水流動系はどんな構造か

・ 台地で涵養された地下水はどこに行くか

・ 周辺の扇状地と平野の地下水の関係は

・ 地質、地形が作り出す地下水流動系の構造を想像しよう！



(風景のなかの自然地理、古今書院より)

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—

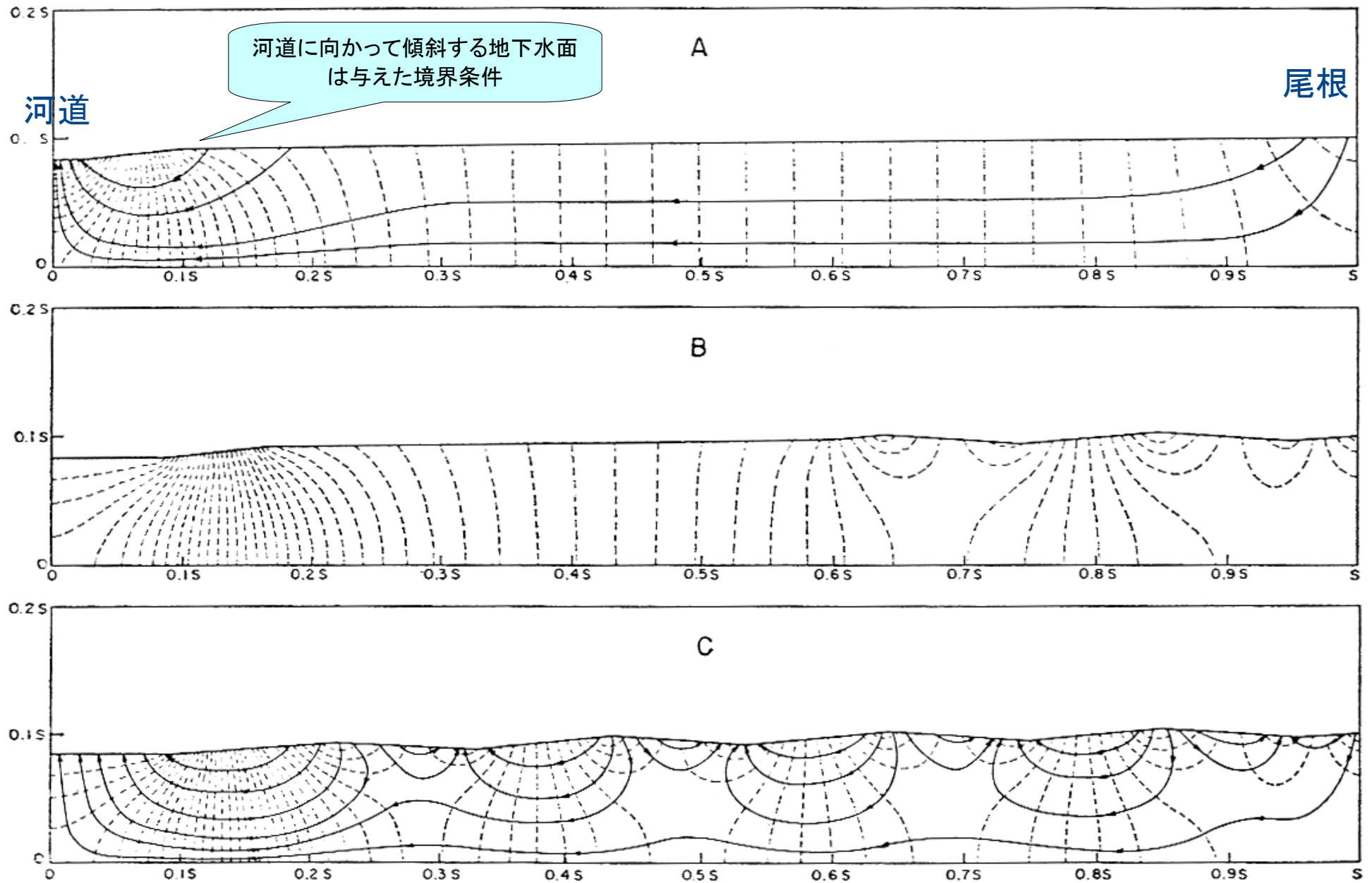


Fig. 1. Effect of water-table configuration on regional groundwater flow through homogeneous isotropic mediums.



透水性の異なる水平層の累重の効果

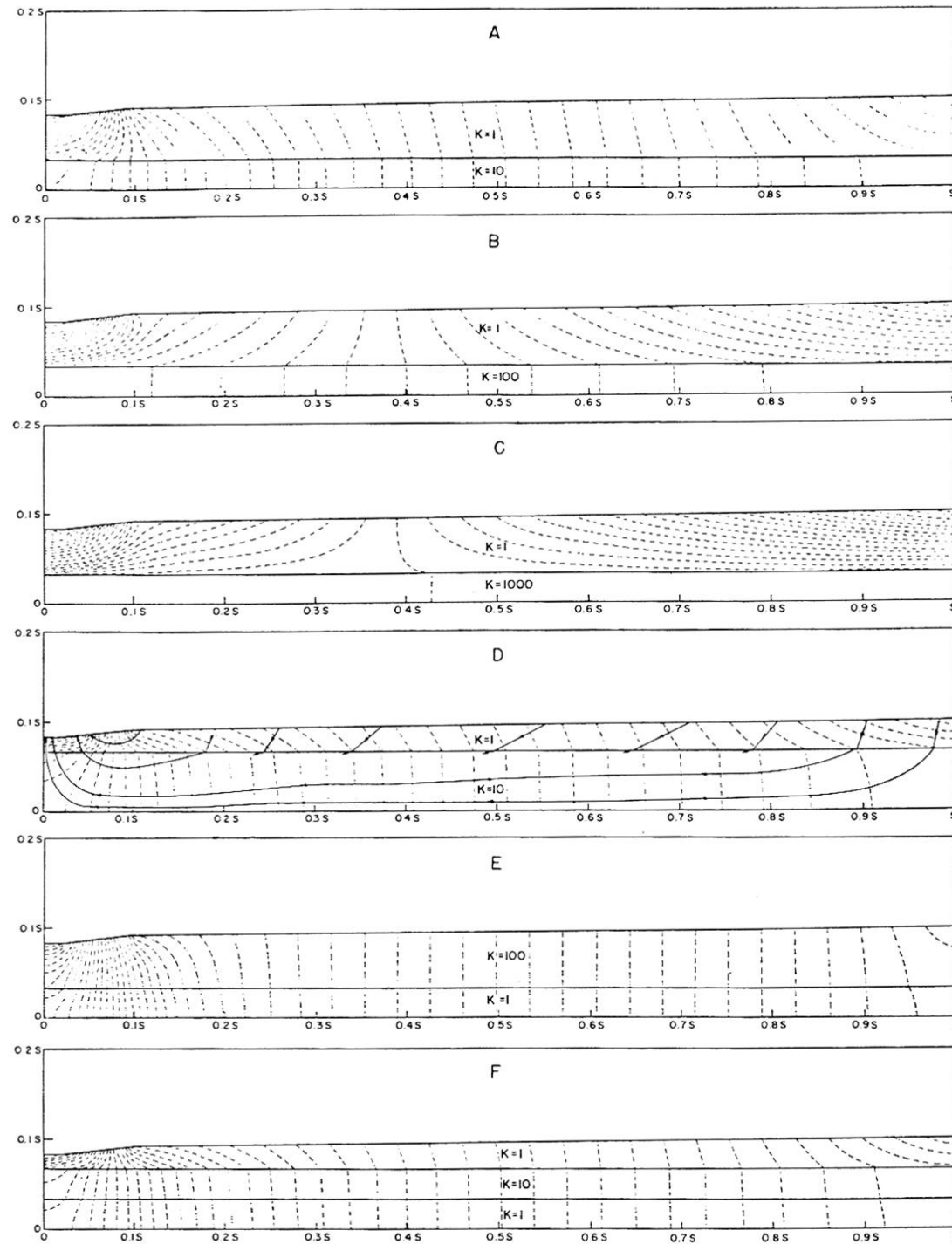


Fig. 2. Regional groundwater flow through layered media with a simple water-table configuration.

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

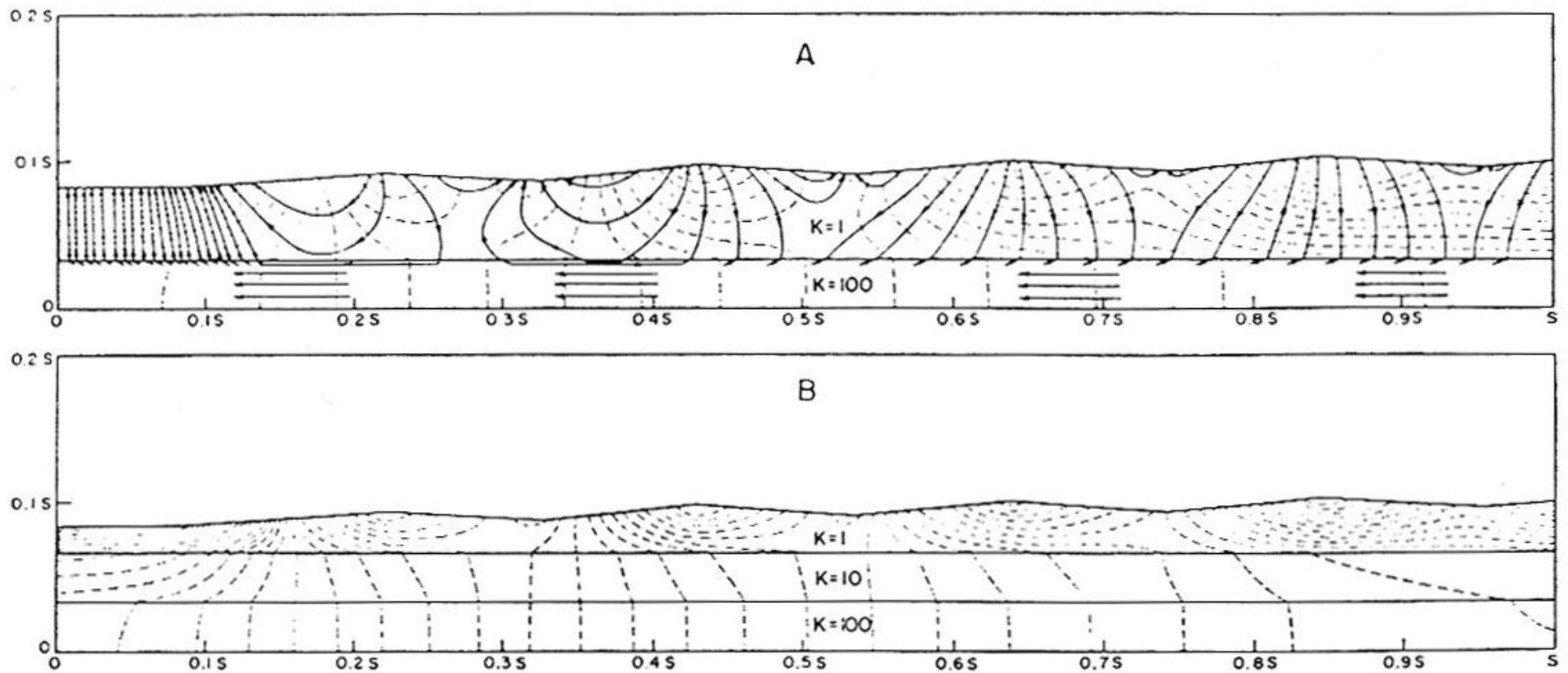


Fig. 3. Regional groundwater flow through layered mediums with a hummocky water-table configuration.

地表に現れない帯水層が地下にあったら？

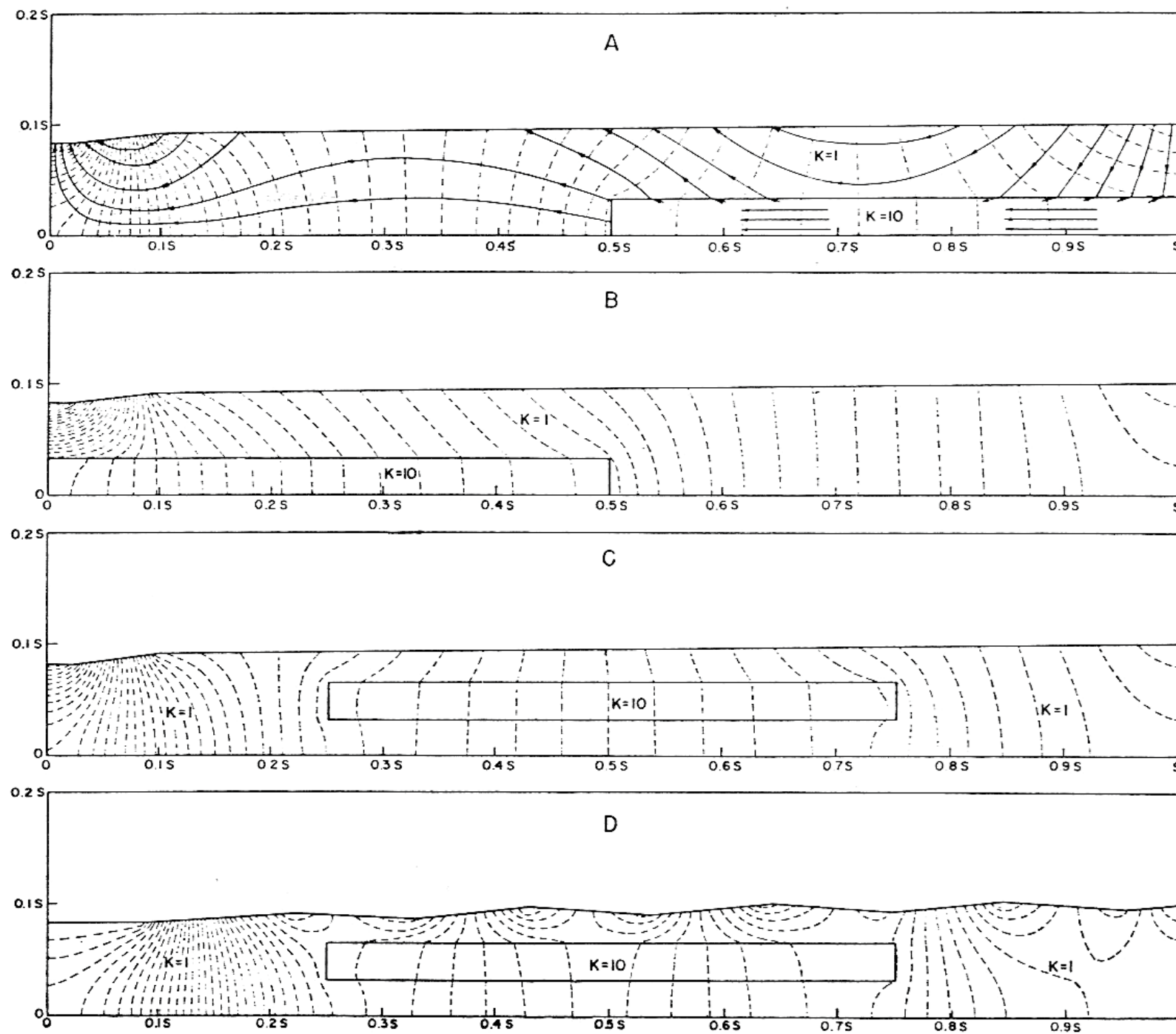
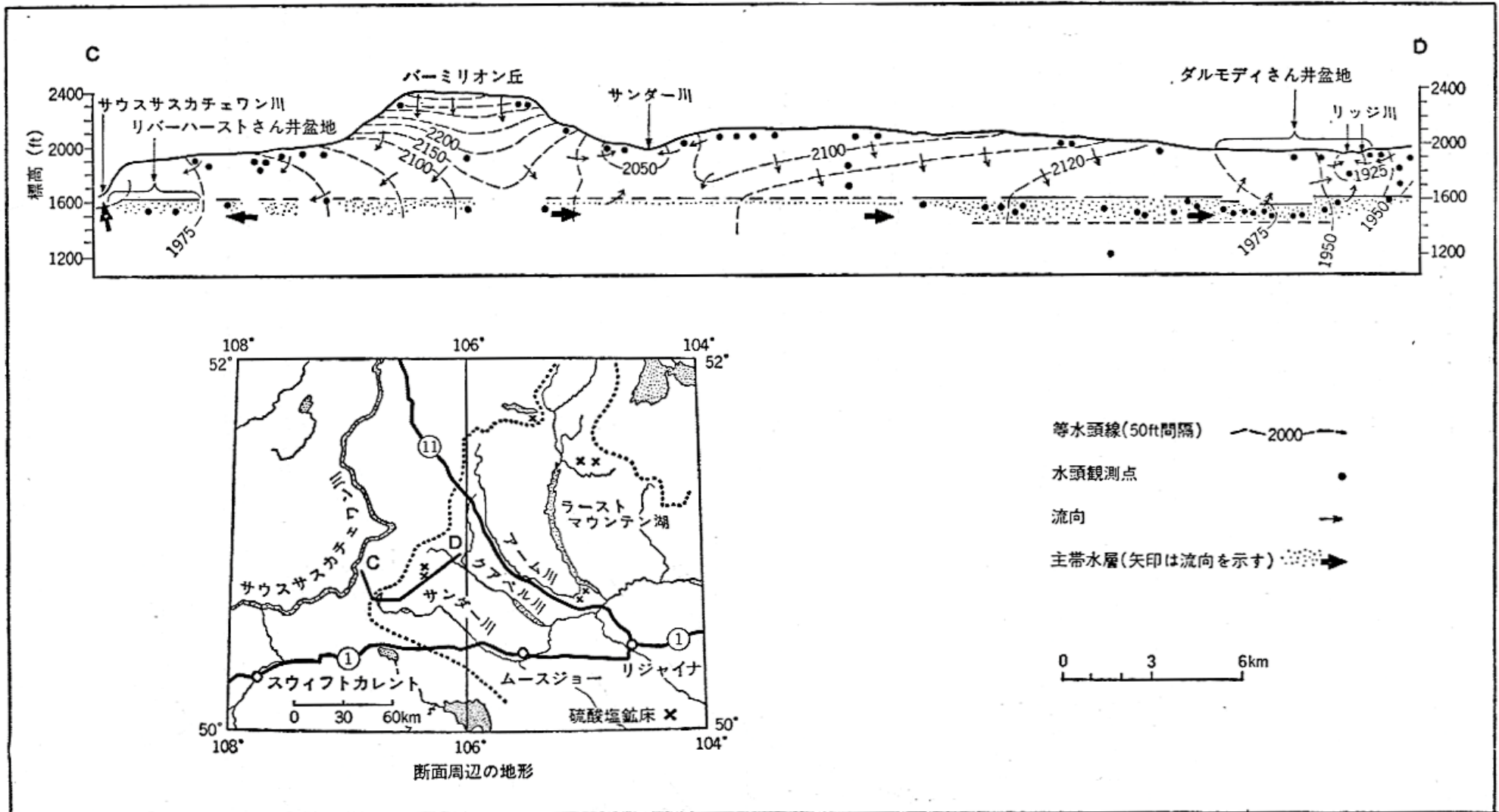


Fig. 4. Regional groundwater flow through partial layers and lenses.

(例) 熊本の砥川溶岩

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

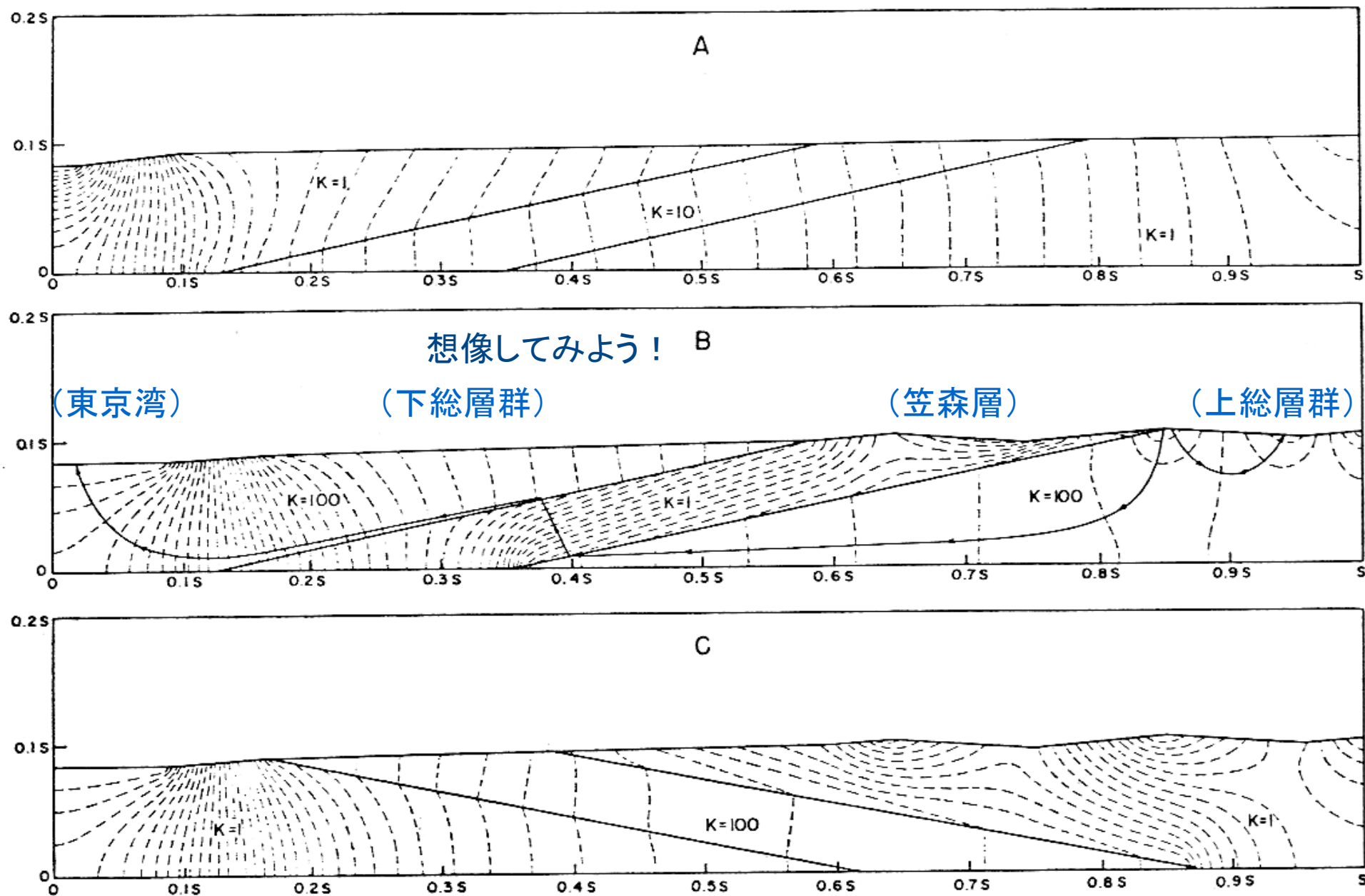
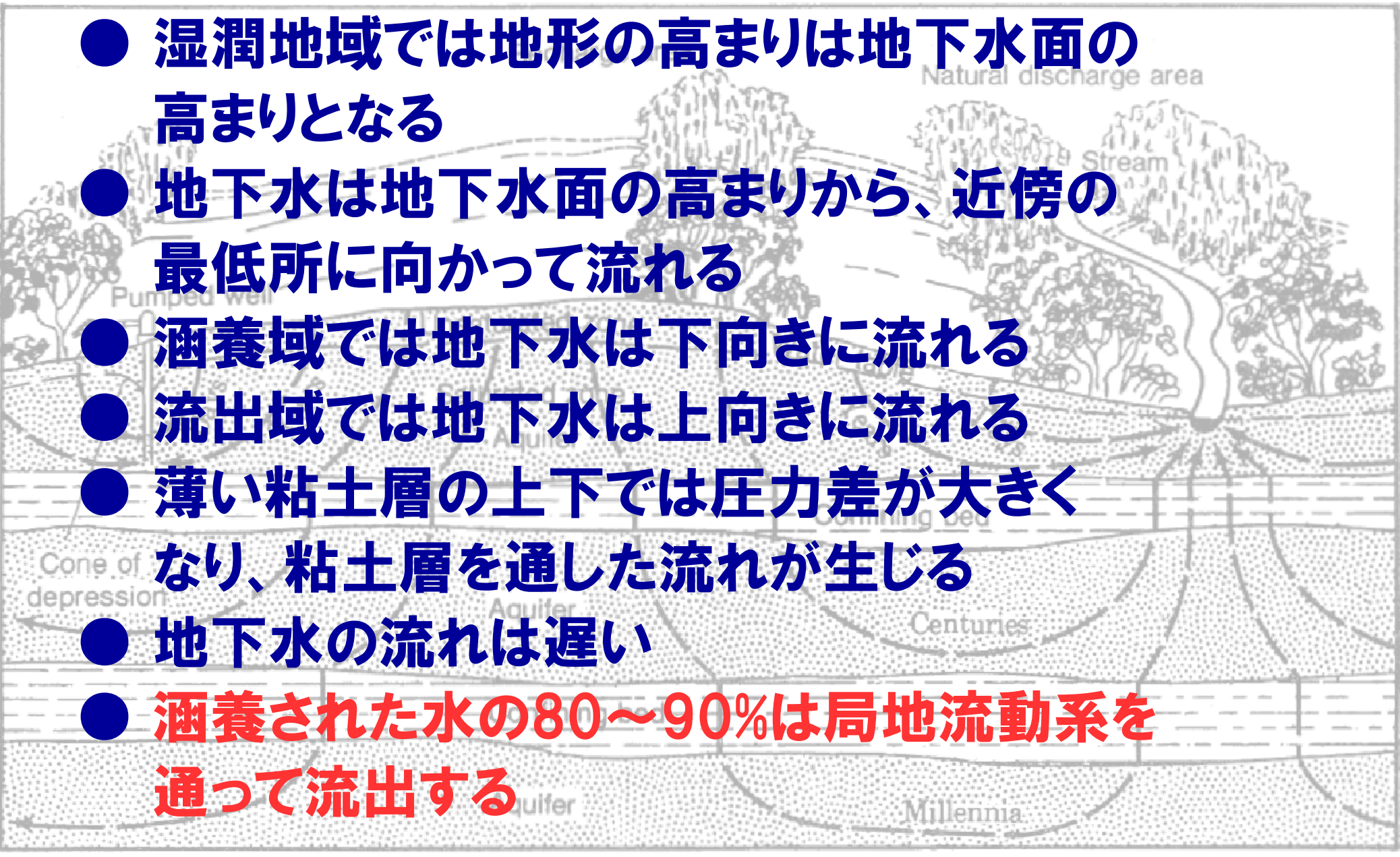


Fig. 5. Regional groundwater flow in regions of sloping stratigraphy.

- 
- 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

地下水流動系の要点 – 地下水流動系を決める二つの要因 –

地質要因

- ・ 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

地形要因

- ・ 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

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

地下水流動のスケール ディメンジョン		局 所 的	局 地 的	地 域 的
		$10^1 \sim 10^2 \text{ m}^2$		$10^4 \sim 10^6 \text{ m}^2$
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 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)

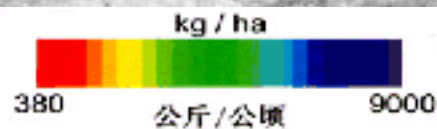
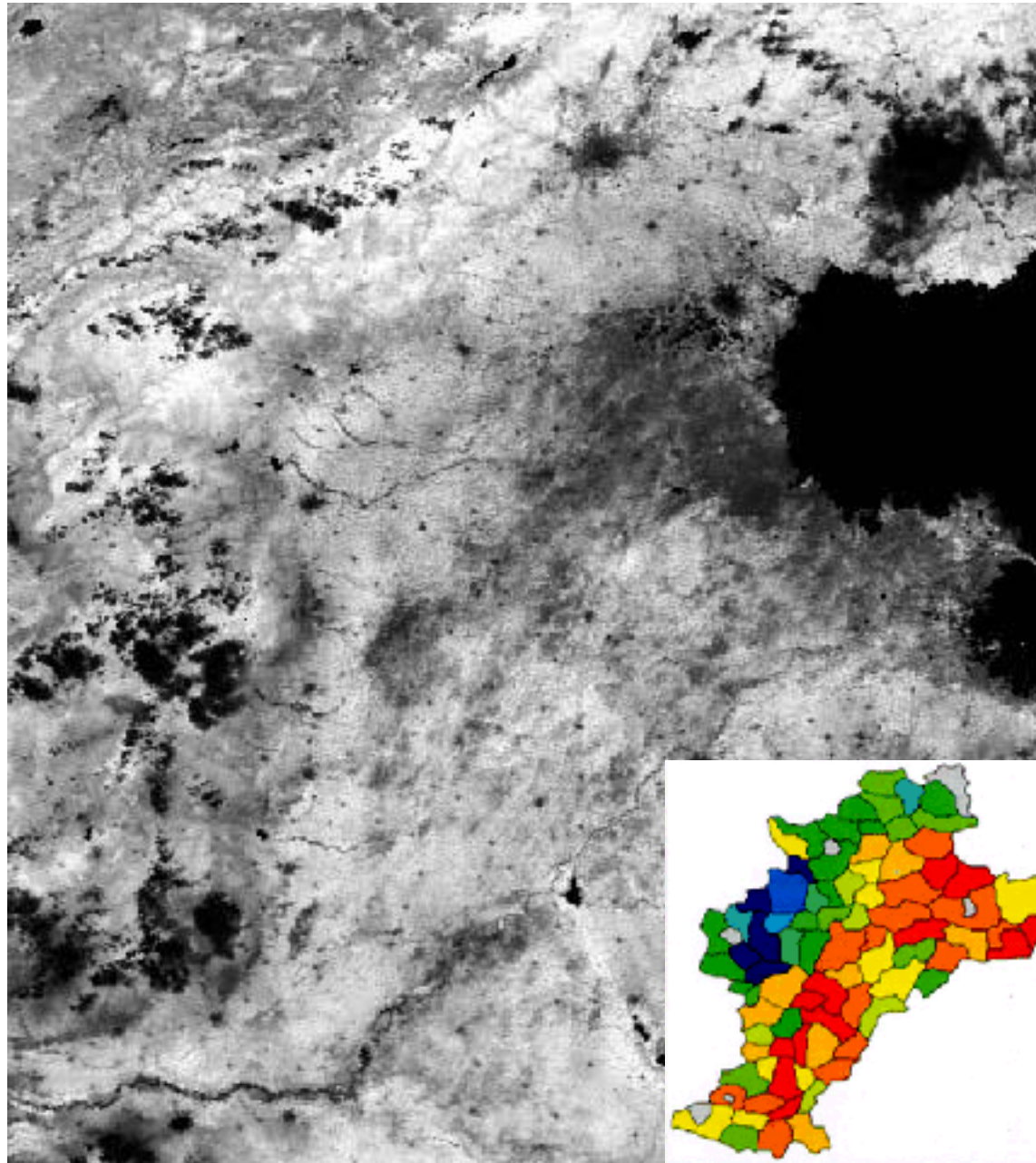
(堆積構造)

(砂泥互層)

(台地・低地系)

(新藤・石川、地下水学会誌)

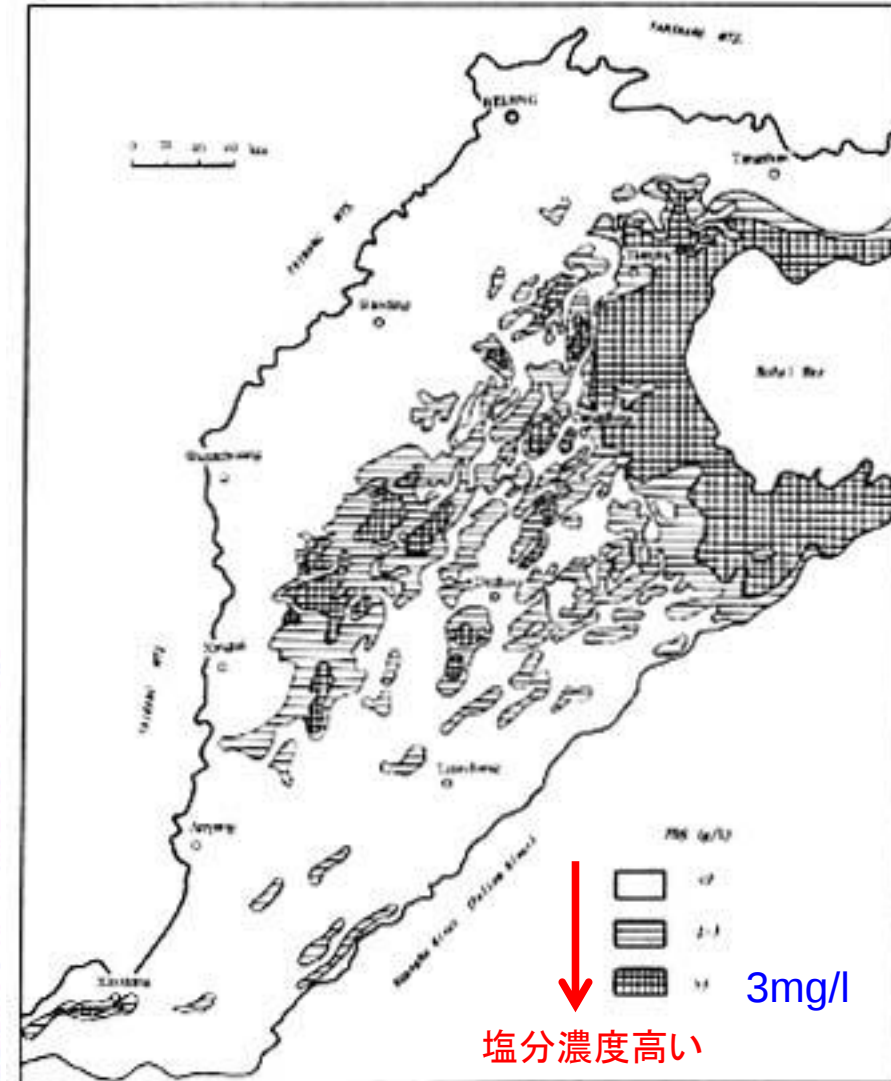
【閑話休題】 1997年8月11日NDVI画像



1992年(旱魃年)のコーン生産量(CAS)

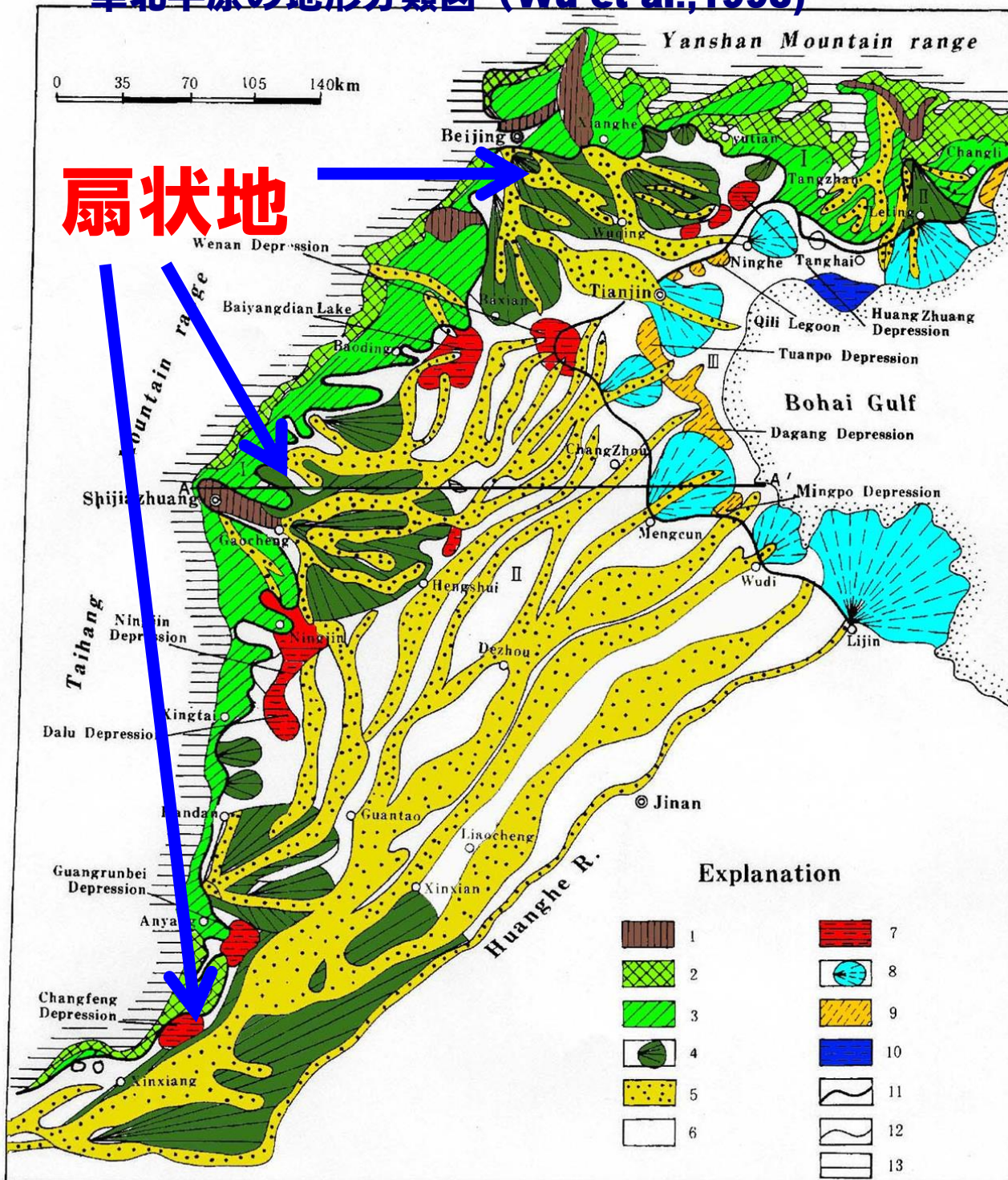
浅層地下水の塩分濃度が
穀物生産量を決めている

浅層地下水のTDS濃度 (塩分濃度)



(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。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

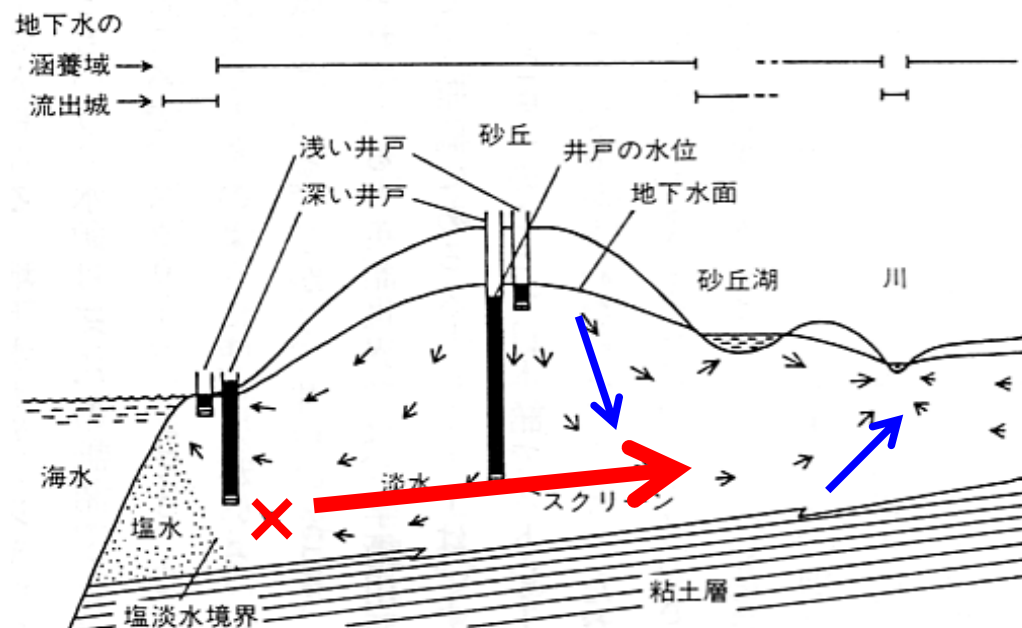
水脈？ **ムリ！**

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！



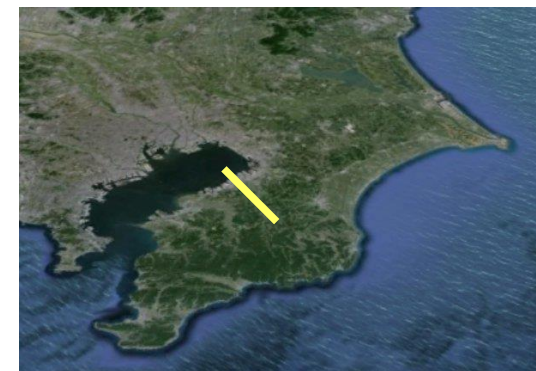
砂泥互層の丘陵地域の地下水の流れは？
地下水はどこから来て、どこへ行くのか？

水理水頭の分布を地形・地質から観る

大きなスケール 地形を観る

小さなスケール 地質を観る

注) 三次元的に観る



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？

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



© 2007 Google
Image © 2009 Digital Earth Technology
© 2008 ZENRIN

5° 27'49.00" N 140° 07'10.84" E 高度 8 m

ストリーミング 100%

上空

地下水の年齢は？ いつの雨なのか？

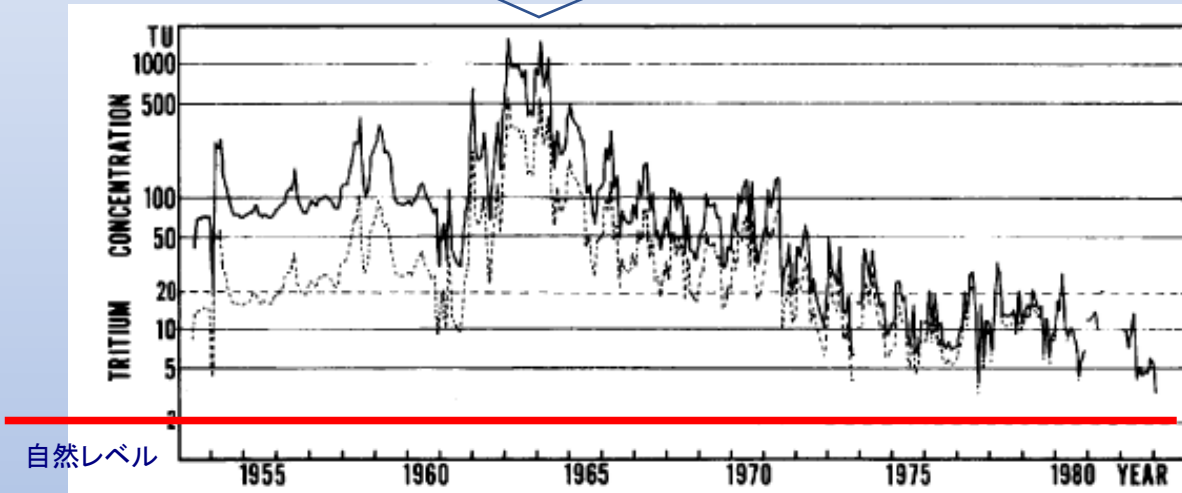
トリチウム(^3H)による地下水の年代測定



(小湊鉄道が走る養老川低地)

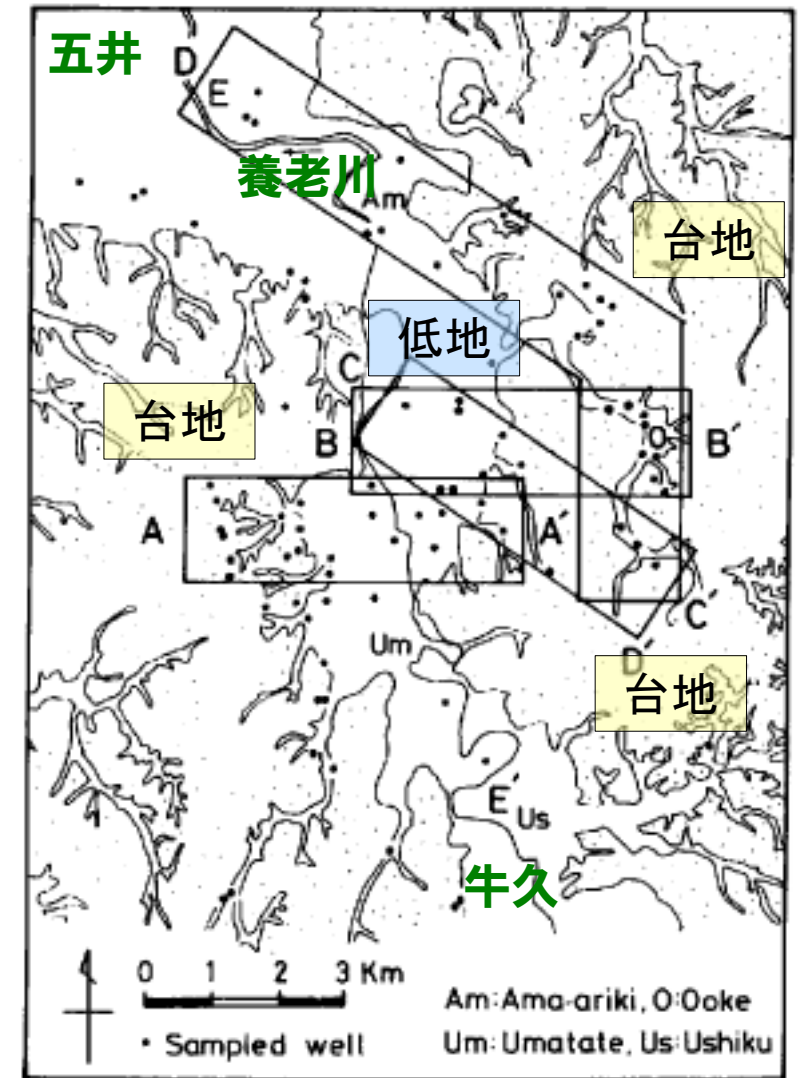
東京および筑波における降水のトリチウム濃度

1963年に濃度ピーク
($1\text{TU}=0.118\text{ Bq L}^{-1}$)



- ・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

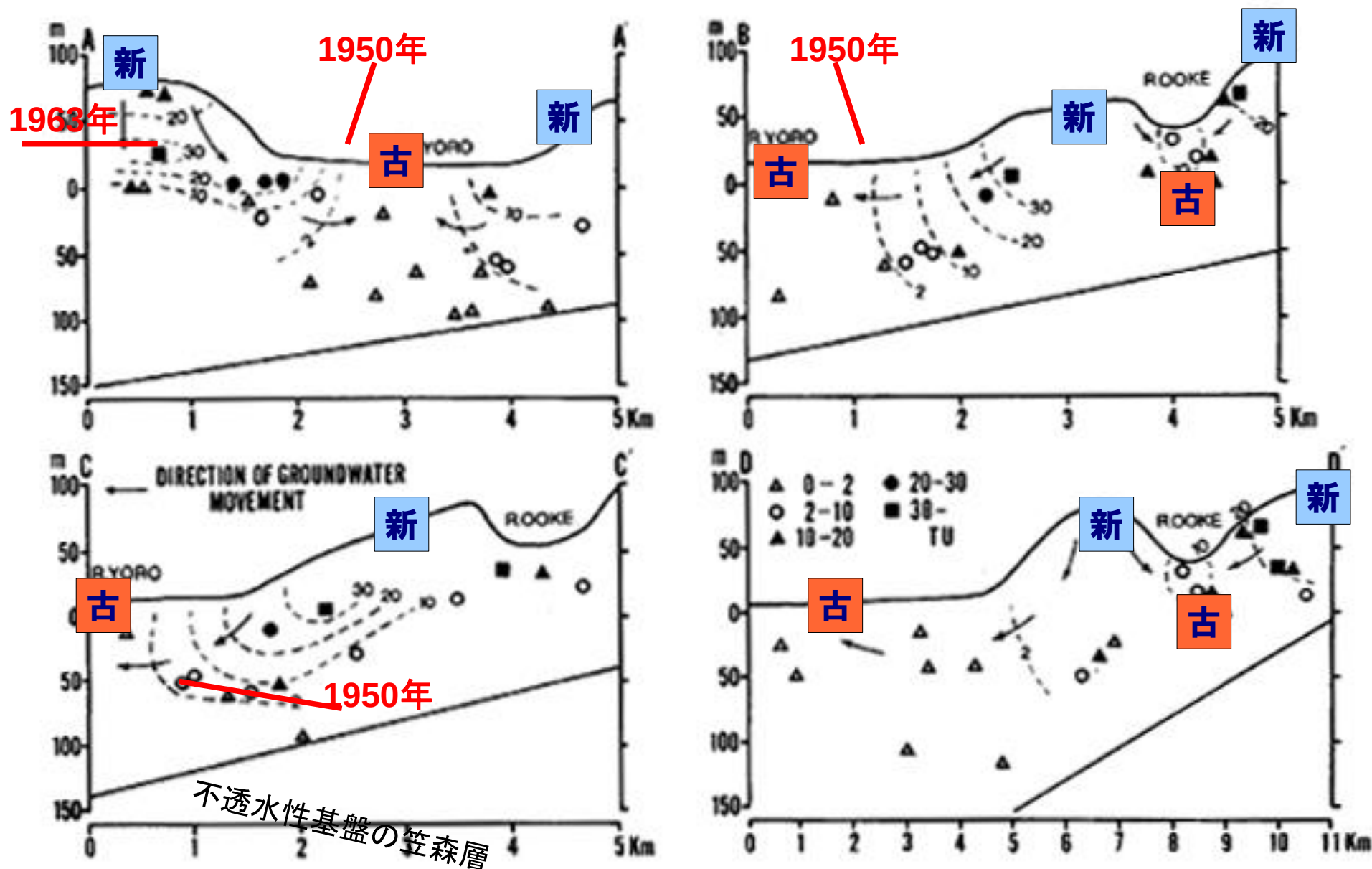


Figure 13 Estimated directions of groundwater movement based on Figure 12.

(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

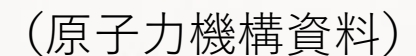
Google

39.16° N 140° 09'26.79" E 高度 53 m

ストリーミング 100%

上空 2.61 km

NW



もっと小さなスケールの地下水循環

台地を刻む谷の成り立ちと地下水



●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応答して大気中の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

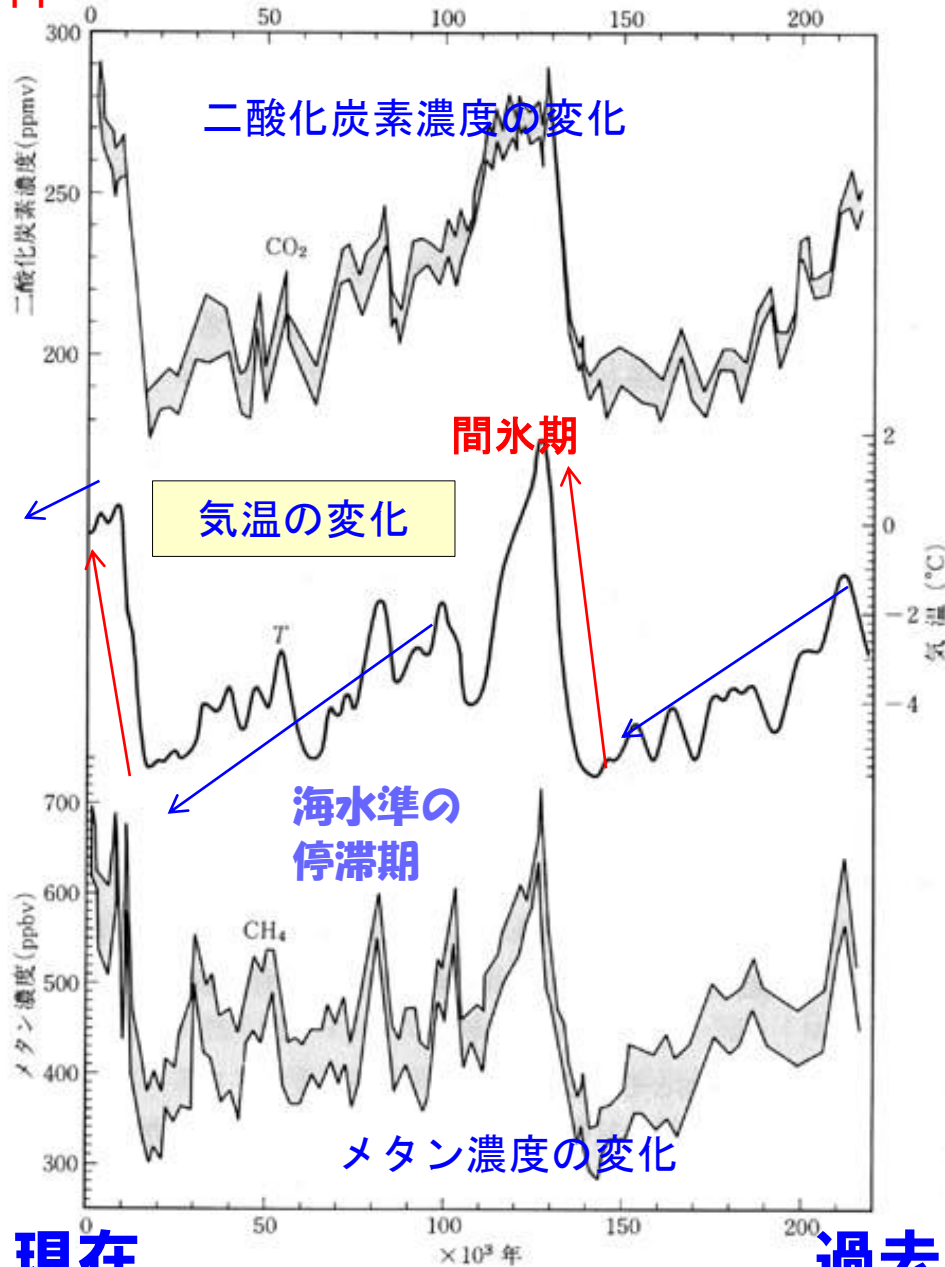
氷期・間氷期サイクル



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。南極のボ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

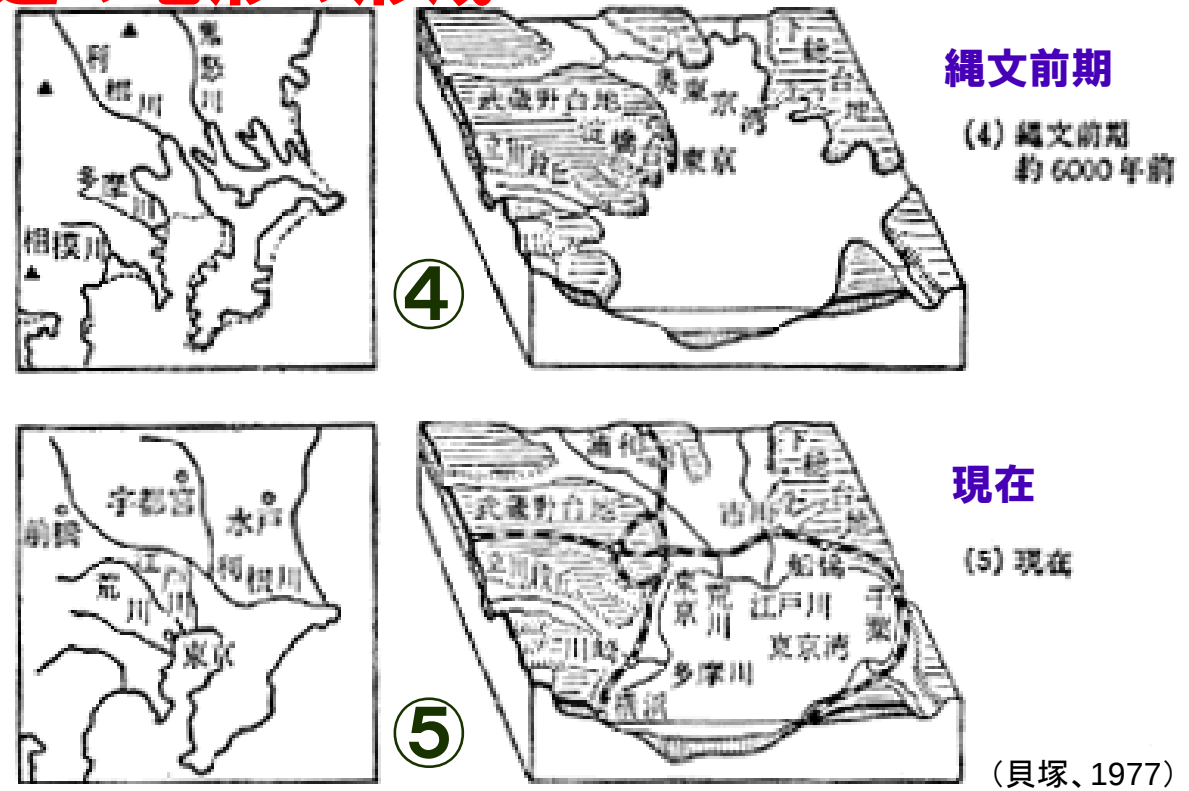
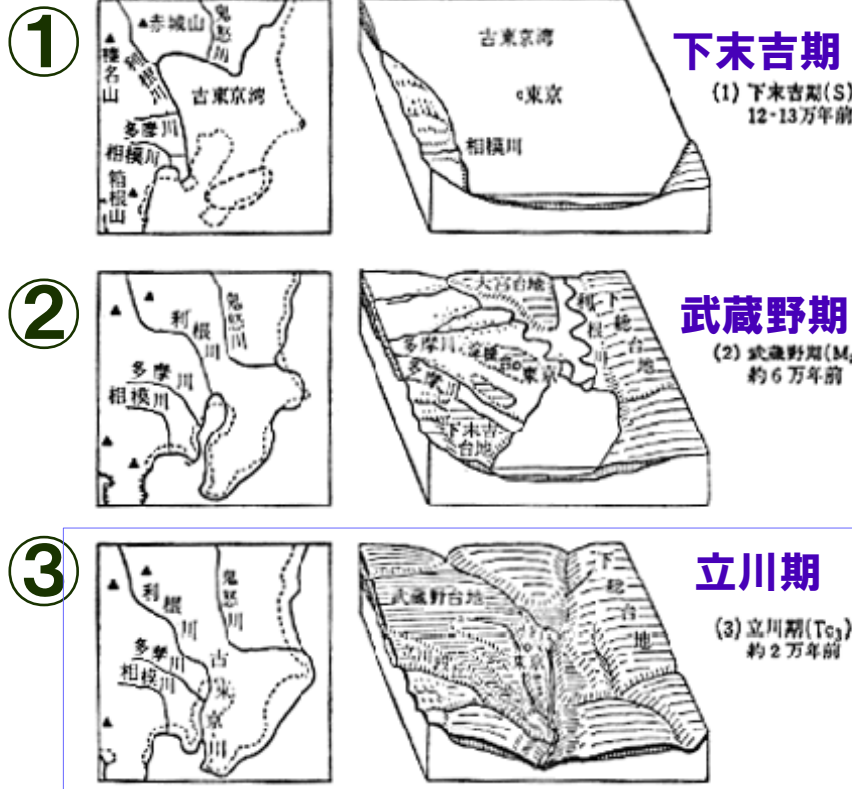
気温の変化⇒海水準の変化



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面になった(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

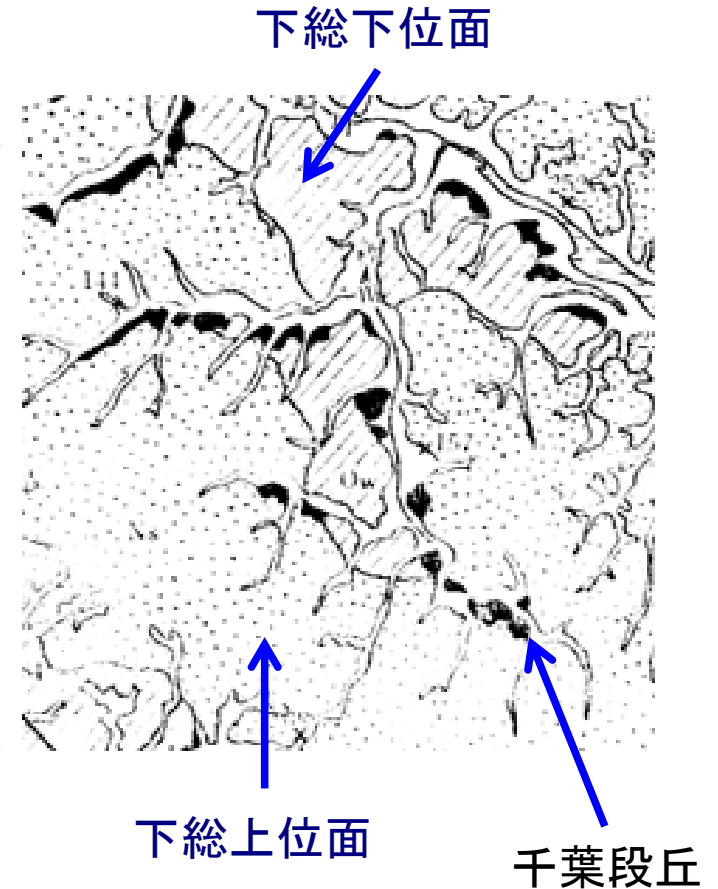
- 氷期が約1万年前に終わりを迎え、海水準は上昇し、約6千年前に現在より約3mほど高くなり、台地を刻む谷は溺れ谷になった
- その後、海水準は現在のレベルまで低下し、沖積低地が形成された

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.



★ 千葉大は約9万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

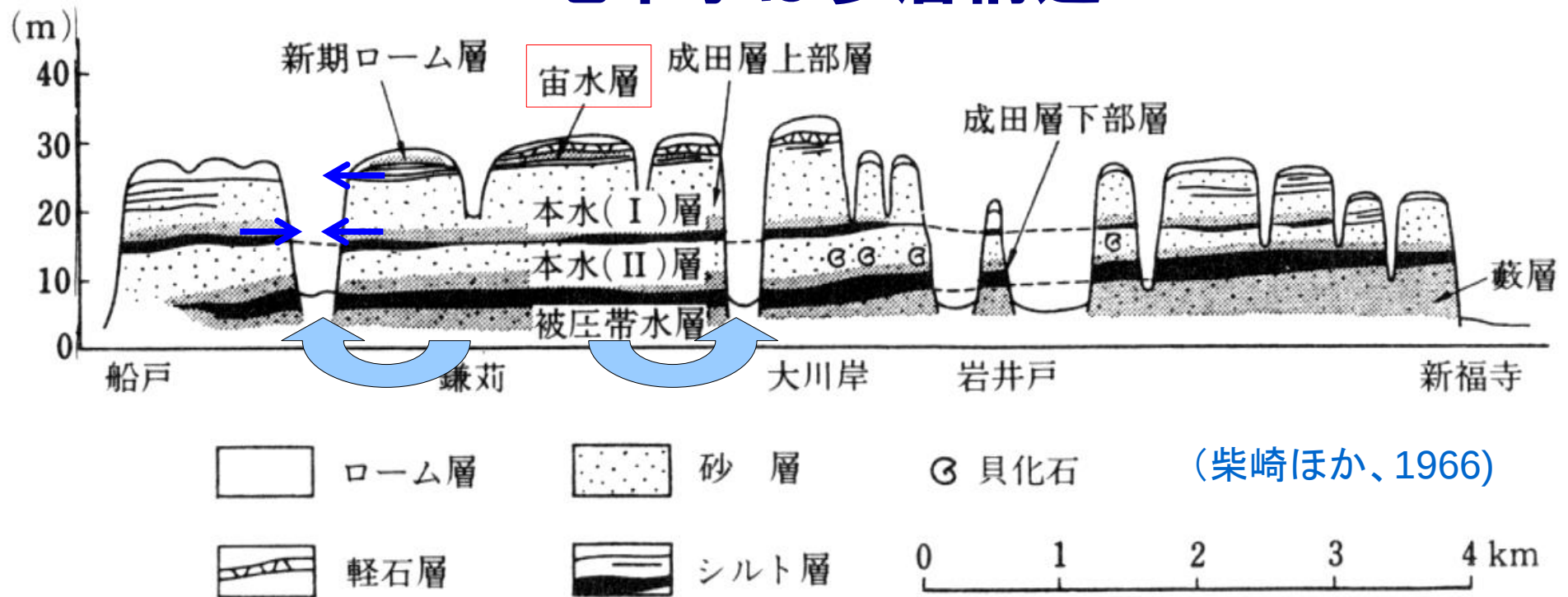
1. 下総上位面, 2. 下総下位面, 3. 千葉段丘, 4. 主な露頭観察地点,

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**上に滞水する宙水

本水：連続する飽和帯

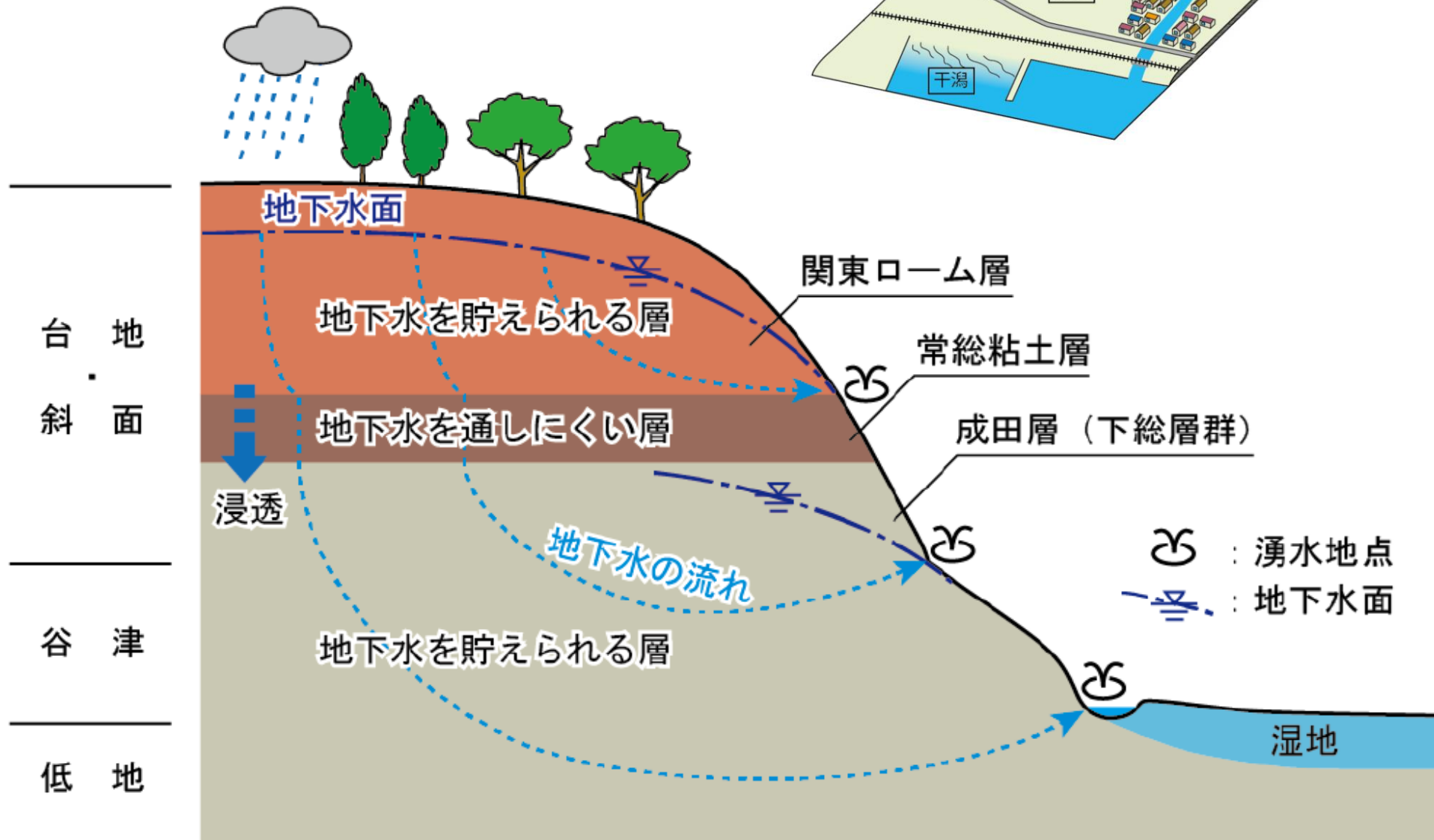
⇒上の図の本水Ⅰと本水Ⅱは降水量の多い時期には一連の地下水であった
かもしれない

⇒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に分離したかも知れない

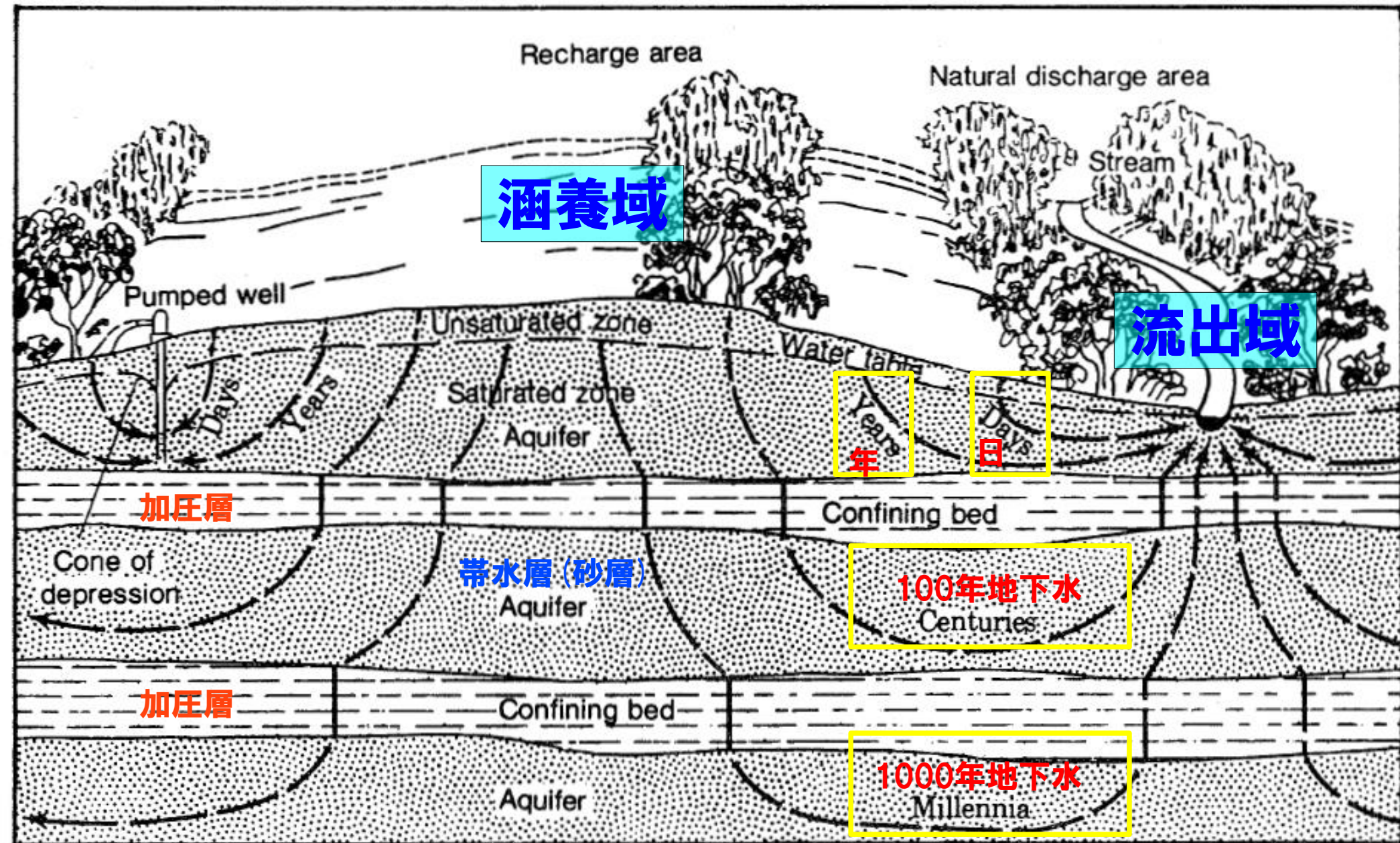
【閑話休題】 生物多様性ふなばし戦略(H29)

生物の棲息域、湿地と地形、水循環

地形の縦断的な特徴



涵養から流出にいたる地下水の旅にかかる時間



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

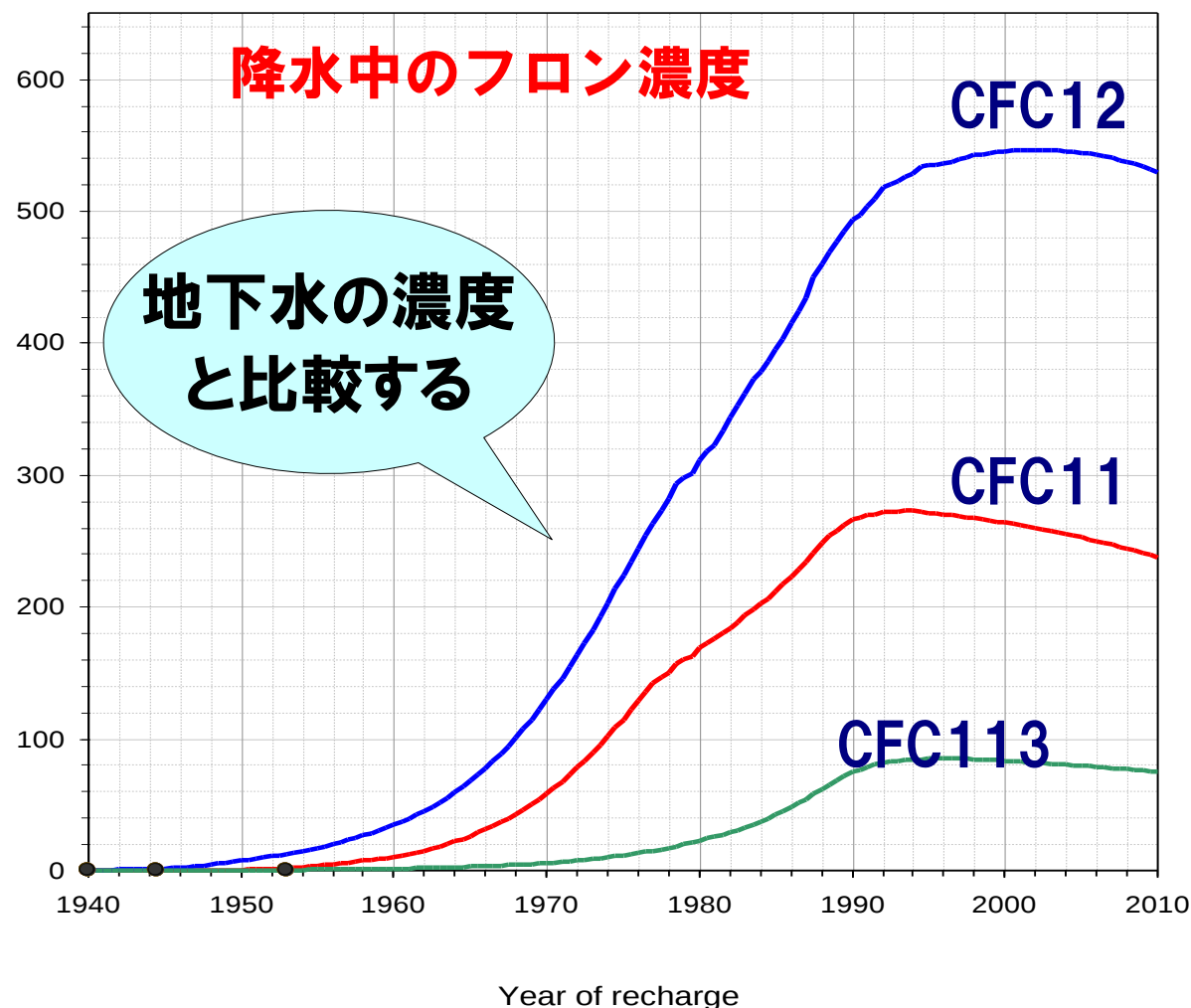
2010年

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

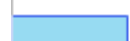


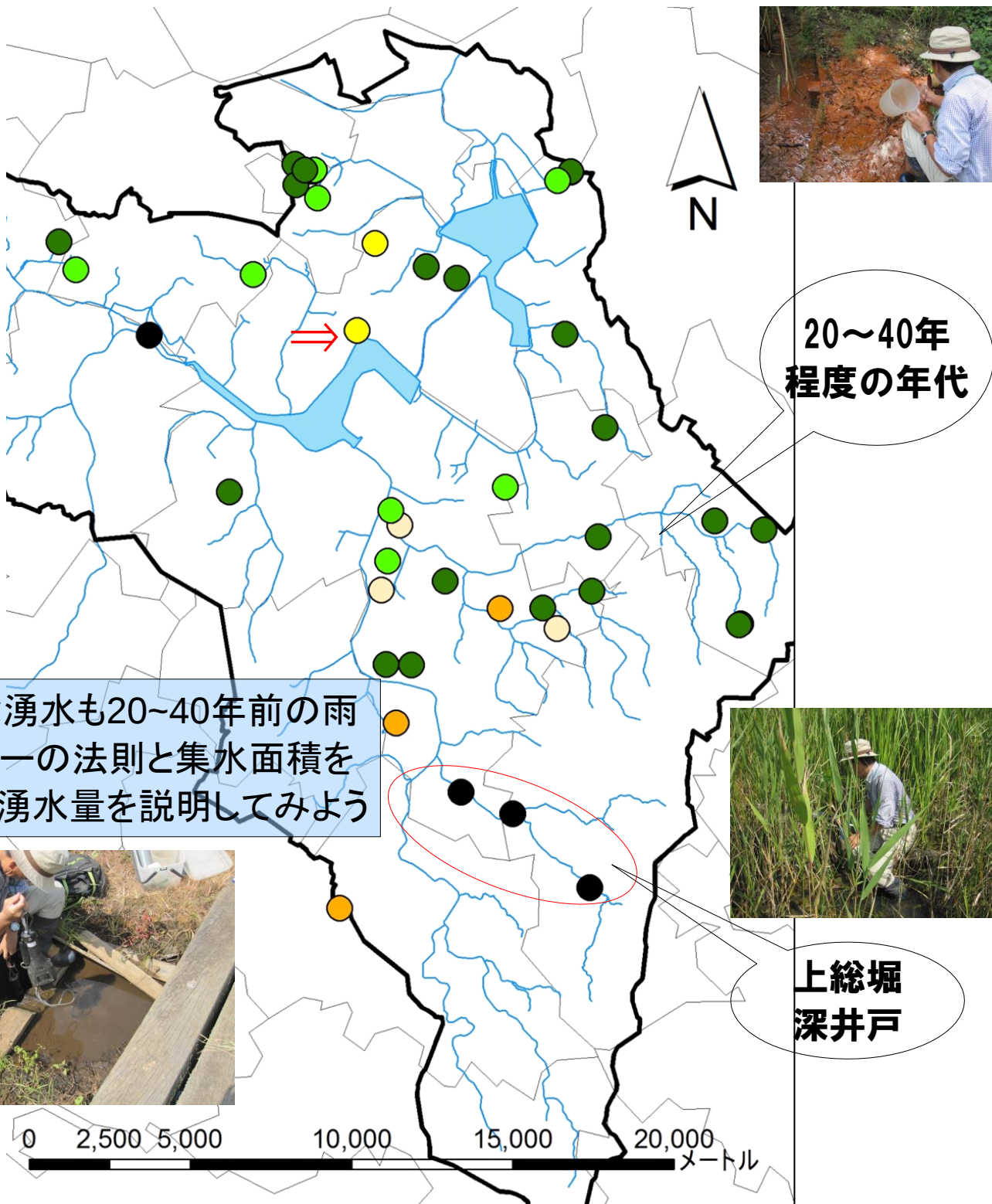
CFC12による 年代測定結果

凡例

CFC12滞留年数 年

-  no data
-  25未満
-  25 - 29.5
-  30 - 34.5
-  35 - 39.5
-  40年以上

-  流域界
-  河川
-  印旛沼水域(現在)
-  流域界
-  市町村界



(堀田先生湧水調査地点)

崖端湧水の涵養域の広さは？．．．ただし、いろいろな場合がある

日本の平均的な地下水涵養量は1 mm/日とされているので（榎根、1980）、湧水の流量を Q (l/s)、流域面積を A (km²) とすると、

$$1 \text{ (mm/day)} = (Q \times 100 \times 100 \times 86400) \div (A \times 100000 \times 100000)$$

$$A = 0.0864 \times Q$$

$Q = 20$ (l/s) ならば、上式に代入して $A = 1.7$ (km²) となります。

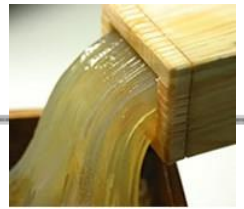
※ 86400 (秒) = $60 \times 60 \times 24 = 1$ 日

$Q = 100$ (l/s) で8.64 (km²)、 $Q = 1000$ l/s) で86.4 (km²) です。

ただし、台地の地下水涵養量は日本平均より多いので、流域面積はもっと狭いかも知れません。

西印旛沼の一本松機場の近くには自噴井があります（前図の⇒）。その水の年代は25年未満で、地下水としては若い水です。今から2万年前の海水準が低かった時期は谷が刻まれ、その時に川が運んだ砂が沖積層の中に埋もれているのかも知れません。





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

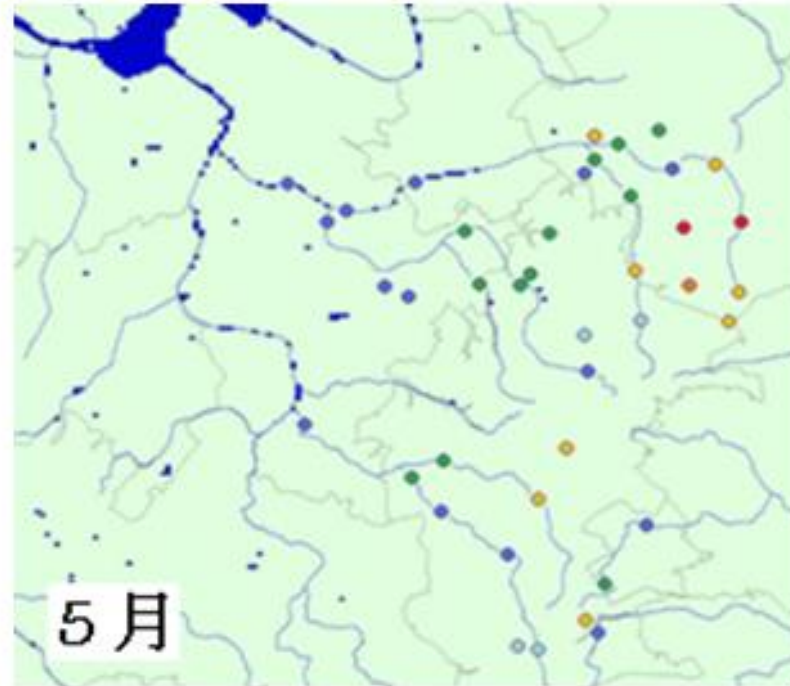
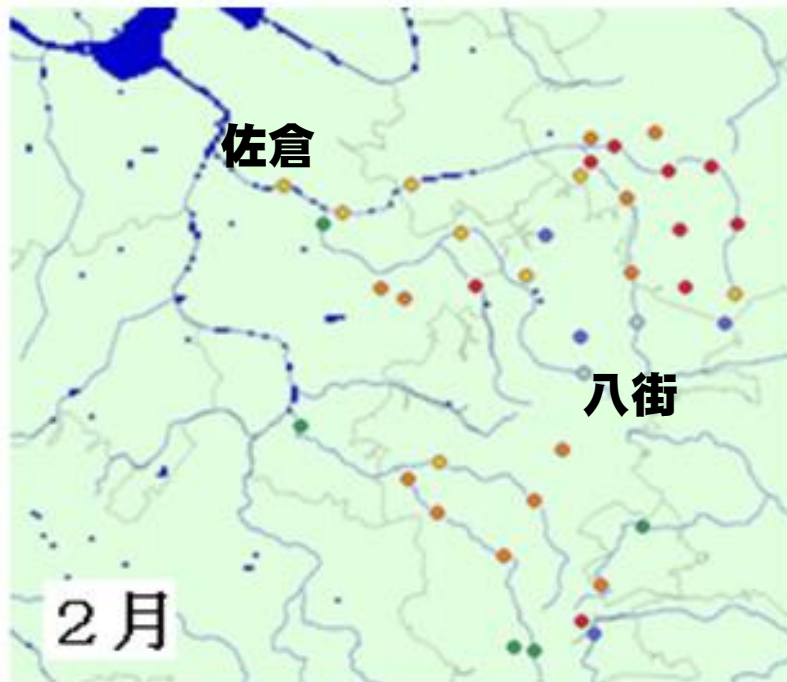
（水流発生機構：自然流域で降雨時に増える河川水は、ほとんどが地下水起源）

環境水の硝酸性窒素汚染問題は地球環境問題の一つ

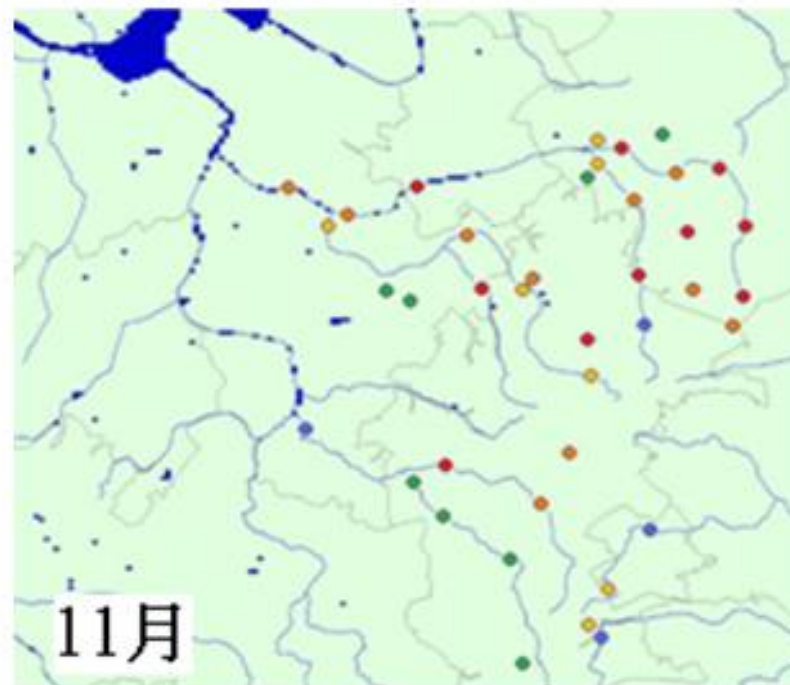
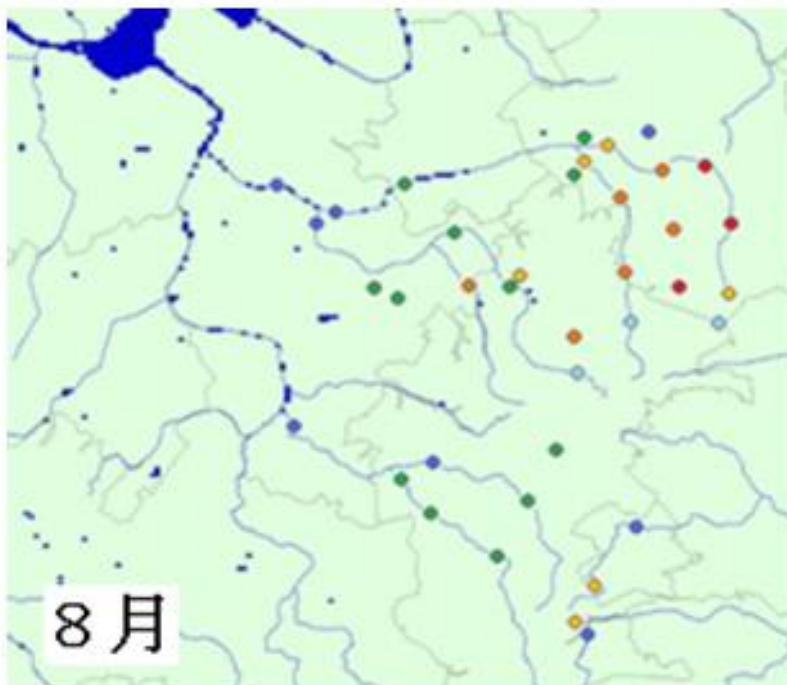
—高崎川流域の硝酸性窒素—



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



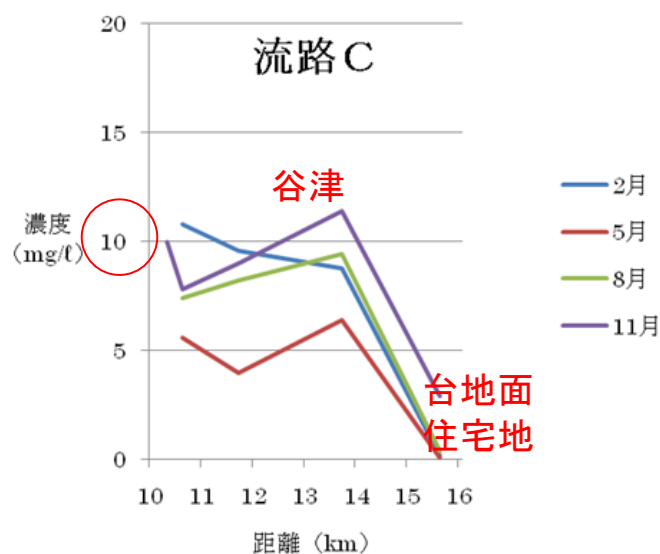
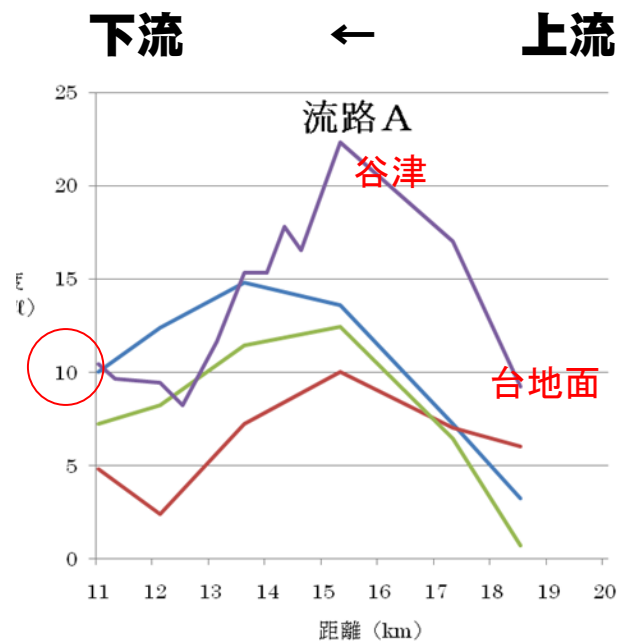
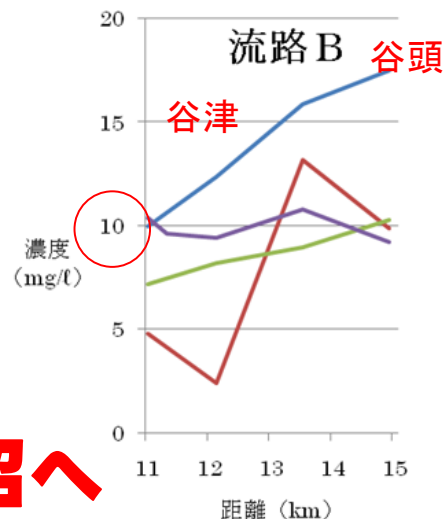
(郡、2009)

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



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

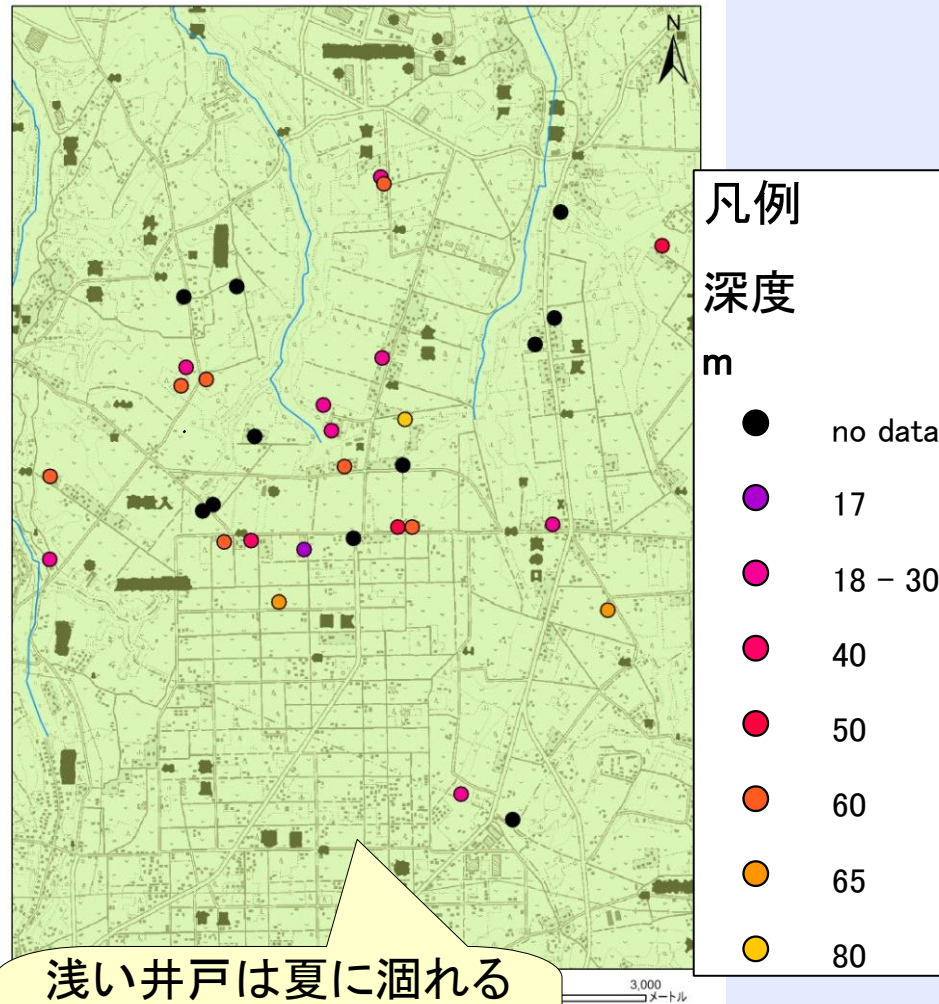
八街市街



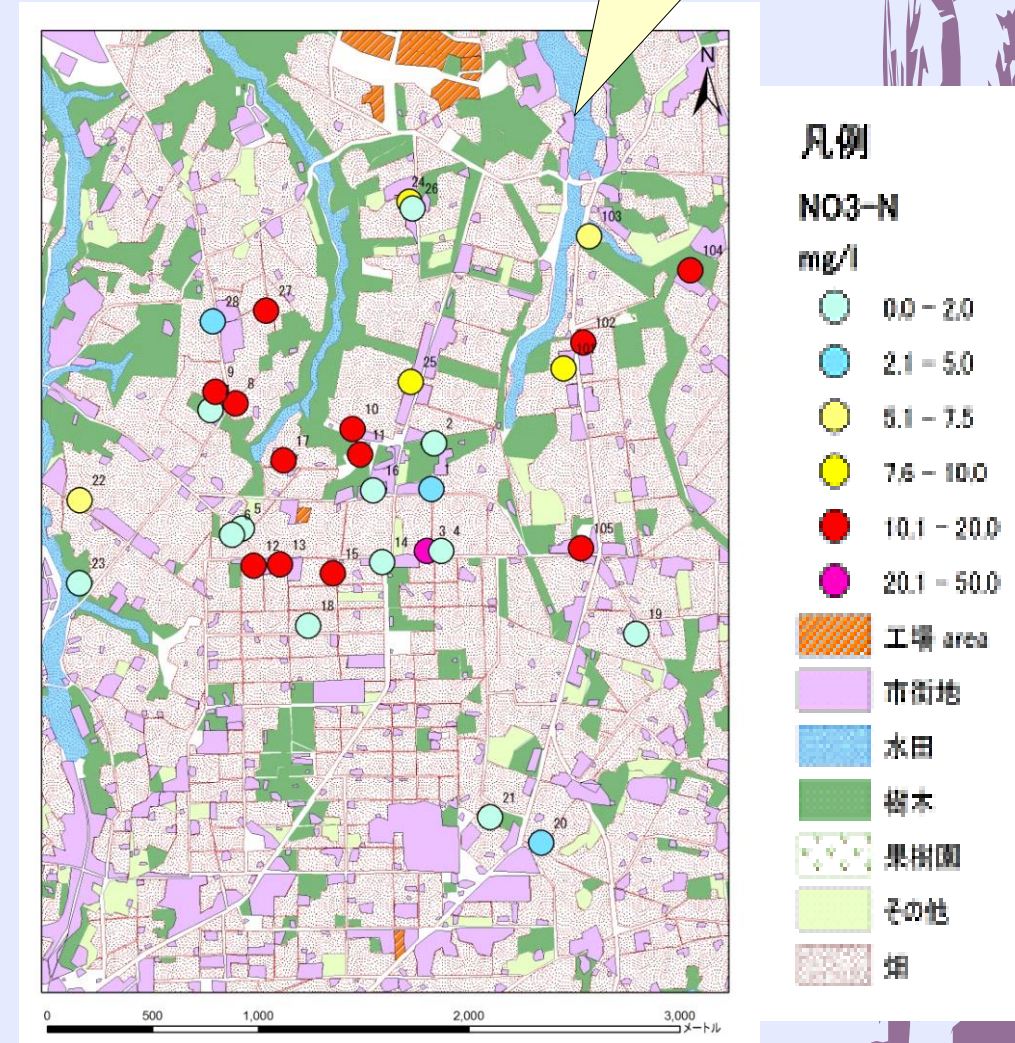
地下水の硝酸性窒素の分布

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

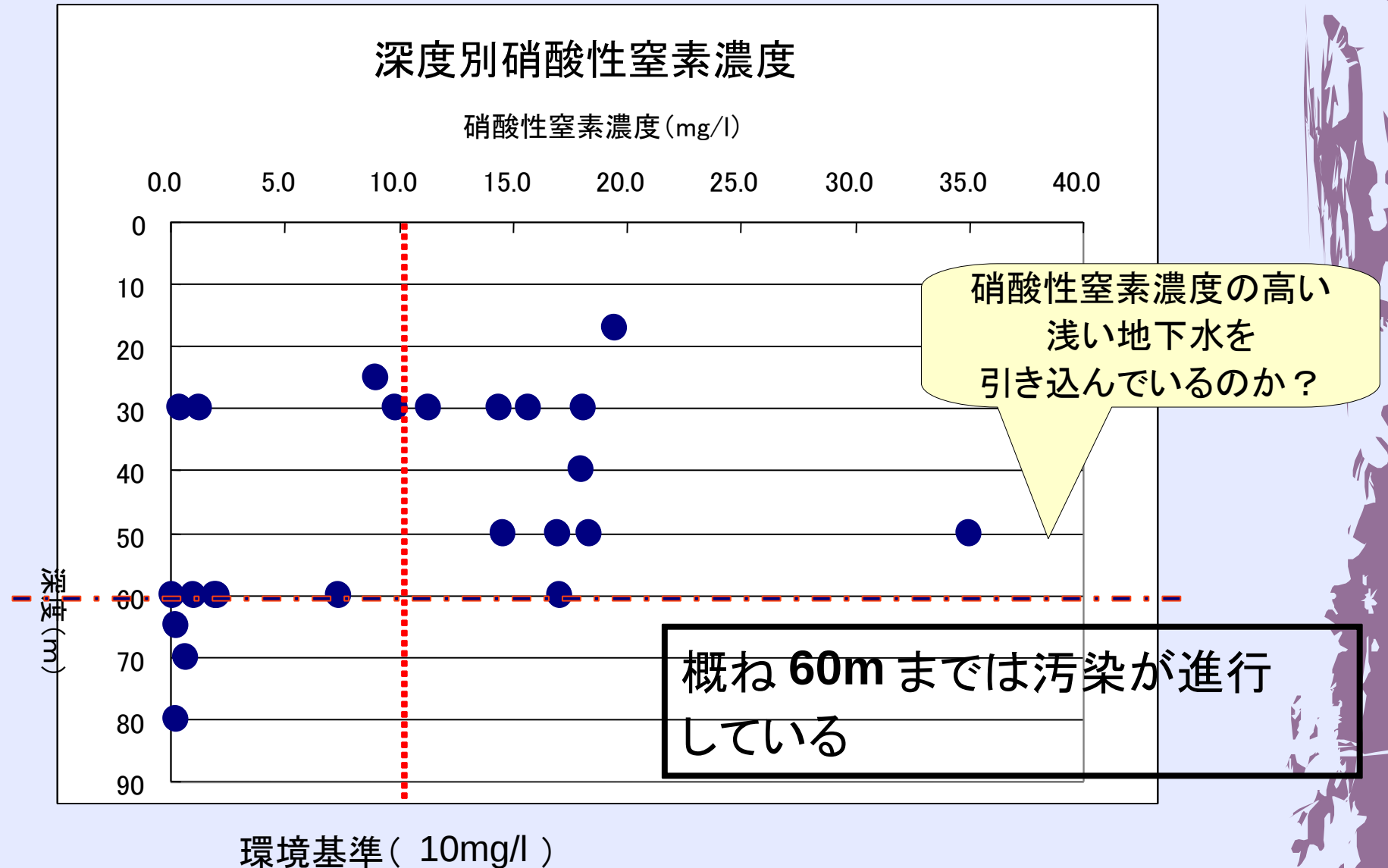


浅い井戸は夏に涸れる
ようになったので
深い灌漑用井戸を掘削



(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

ーそれは台地に住む我々の足下ー

- **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

土地の塩漬け問題



■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



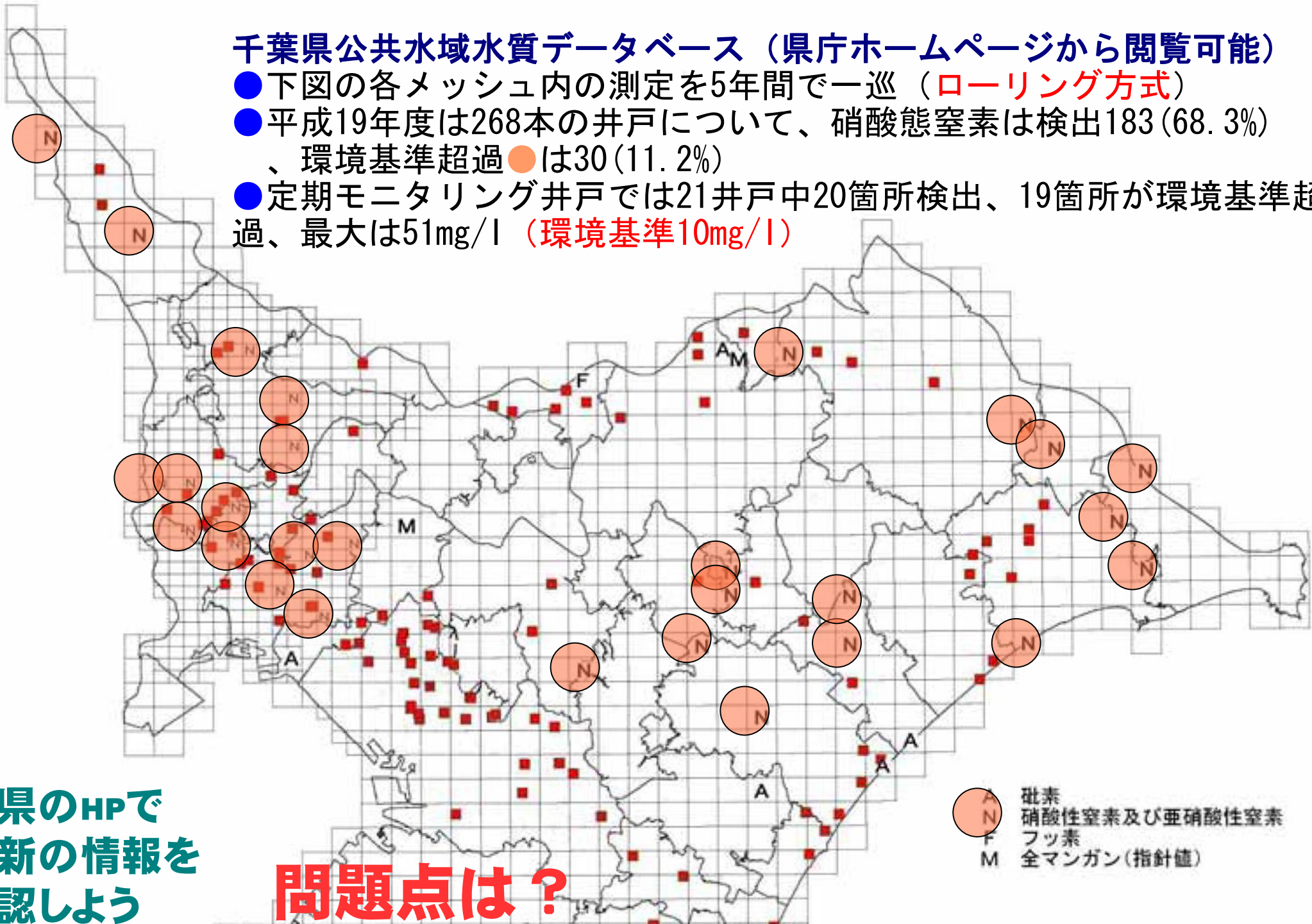
平成19年度 環境基準等超過地点図

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）



各県のHPで
最新の情報を
確認しよう

問題点は？

● 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）

●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

以下、付録

台地には歴史がある

・・・地史的歴史、人間の歴史

湧水

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



平成22年3月
湧水保全・復活ガイドライン
土壌環境調査、地下水・地質環境調査



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

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

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

湧水保全・復活ガイドライン



平成 22 年 3 月
環境省 水・大気環境局
土壌環境課 地下水・地盤環境室

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

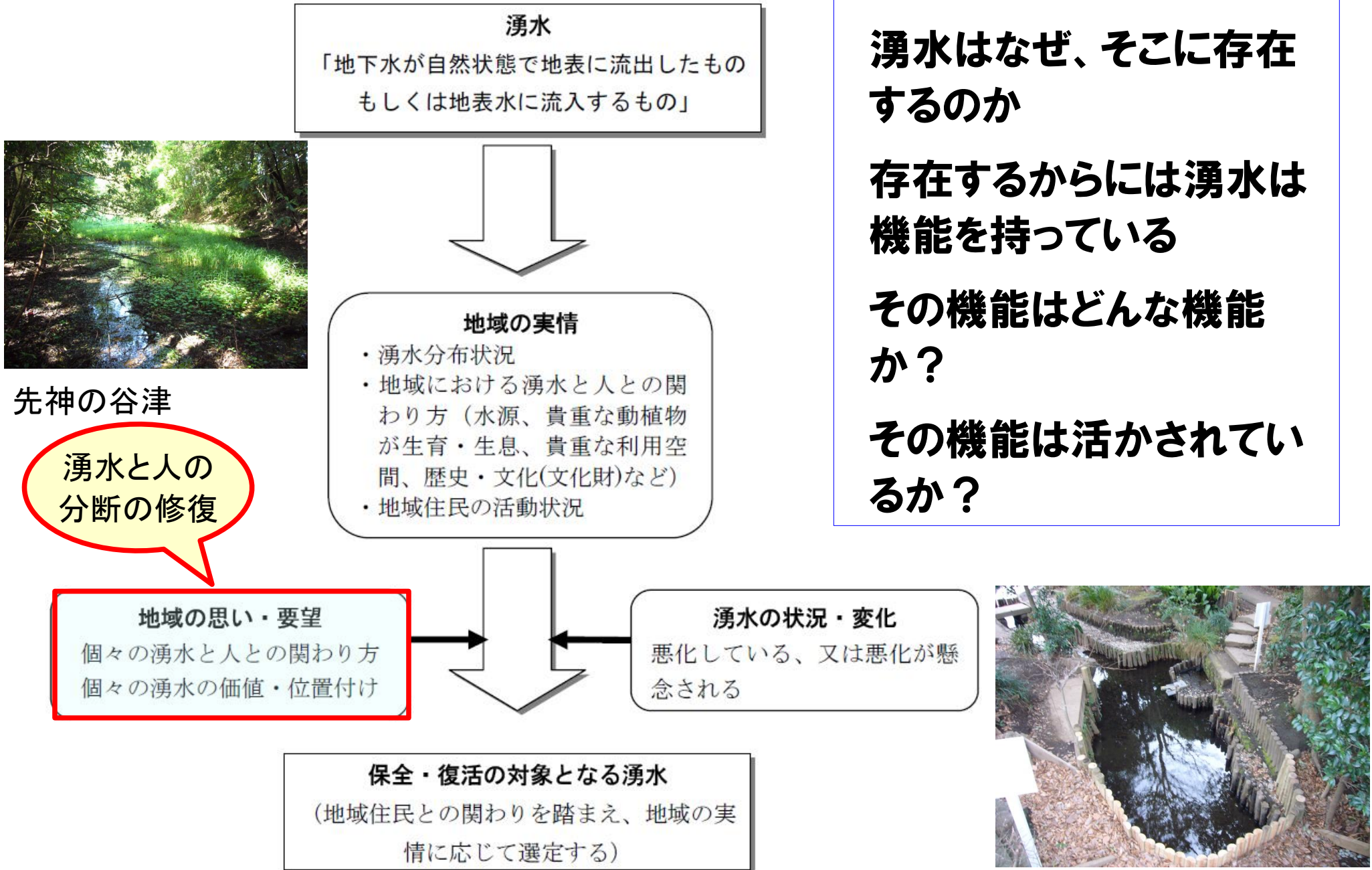
湧水保全・復活支援活動検討会
(座長: 田中正筑波大学教授)



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？



先神の谷津

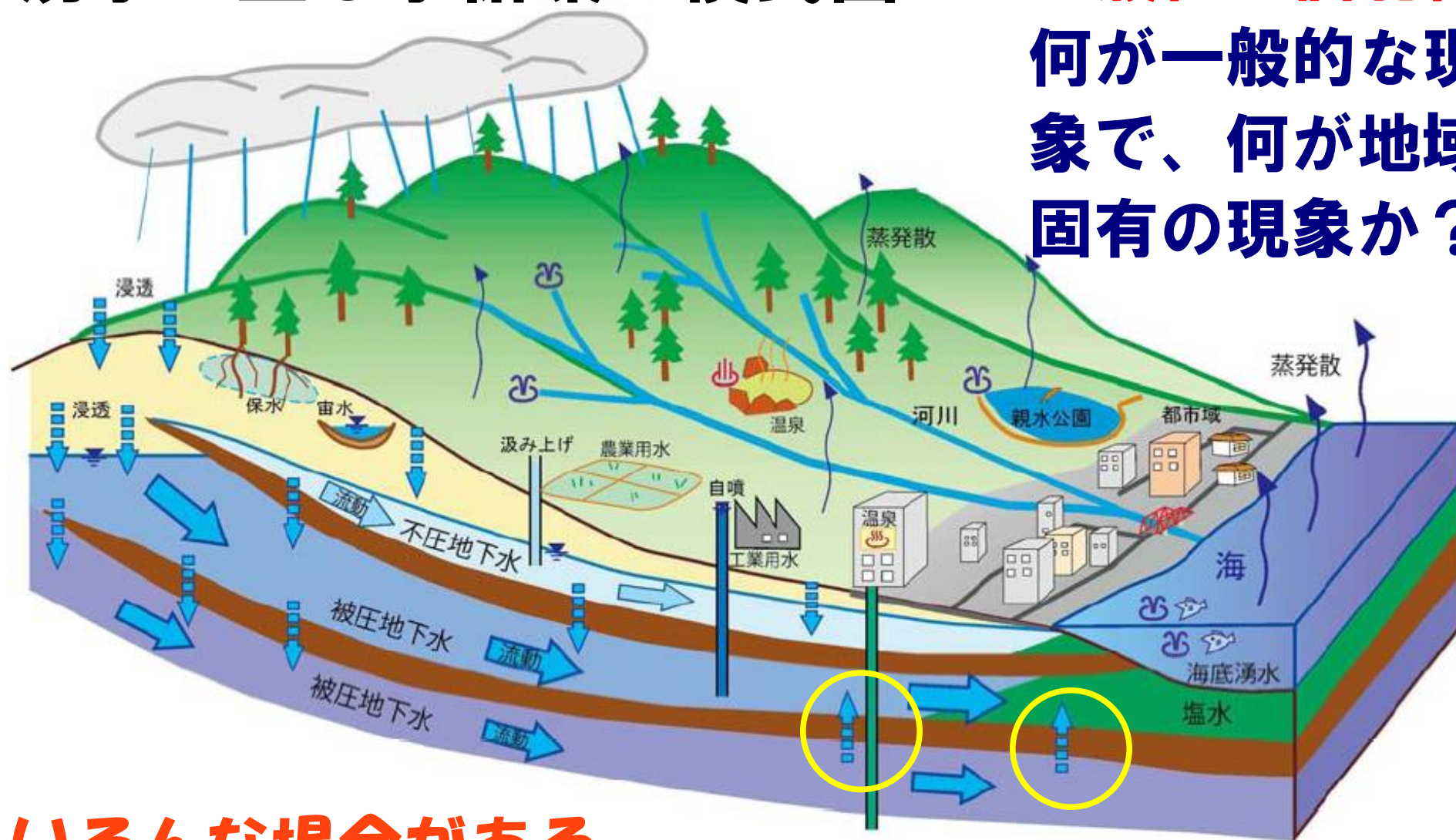
湧水と人の
分断の修復



加賀清水

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

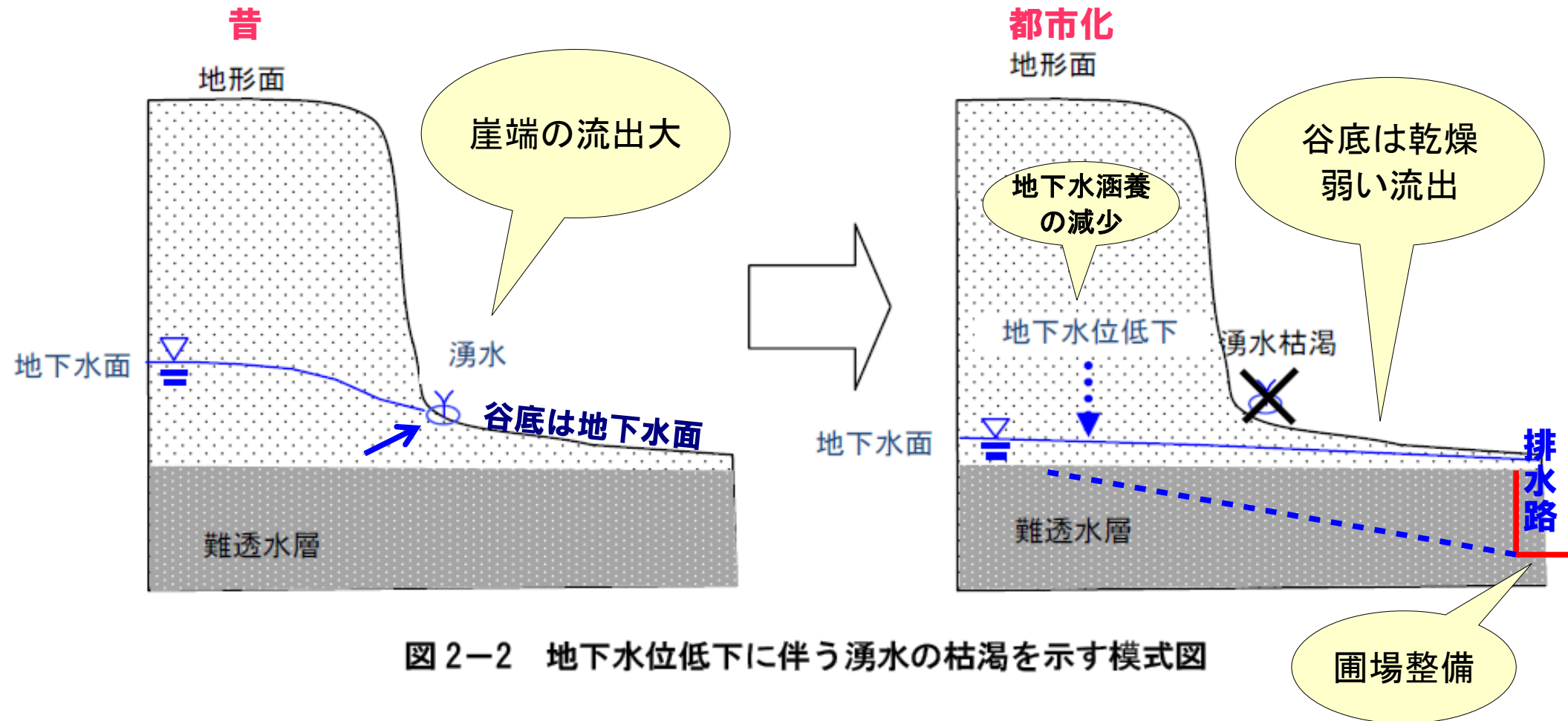


図 2-2 地下水位低下に伴う湧水の枯渇を示す模式図

- ✚
- [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)

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

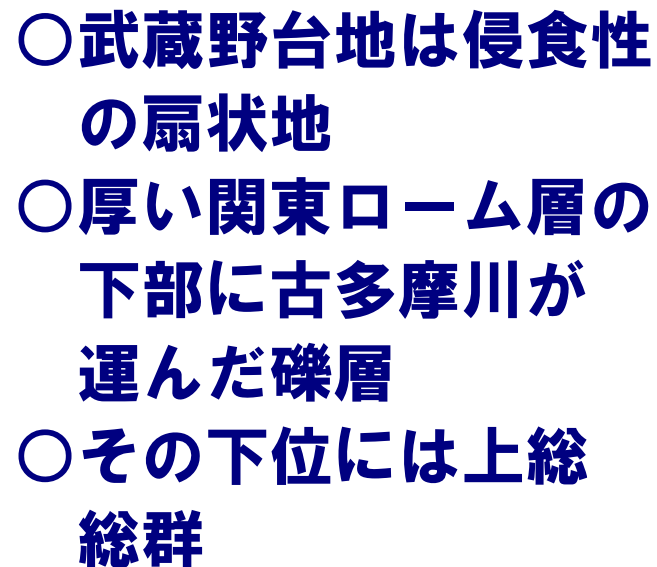


Figure 4-2 is a detailed map of the Sagami River basin study area. It illustrates the topography, including plateaus, hills, and basins. Key features include the Sagami Plateau, Sagami Hills, Sagami New Town, and Sagami Basin. A red dashed line outlines the study area. A legend identifies symbols for Sh: Sagami River, Ze: Sagami River, and In: Sagami River. A scale bar shows 5km.

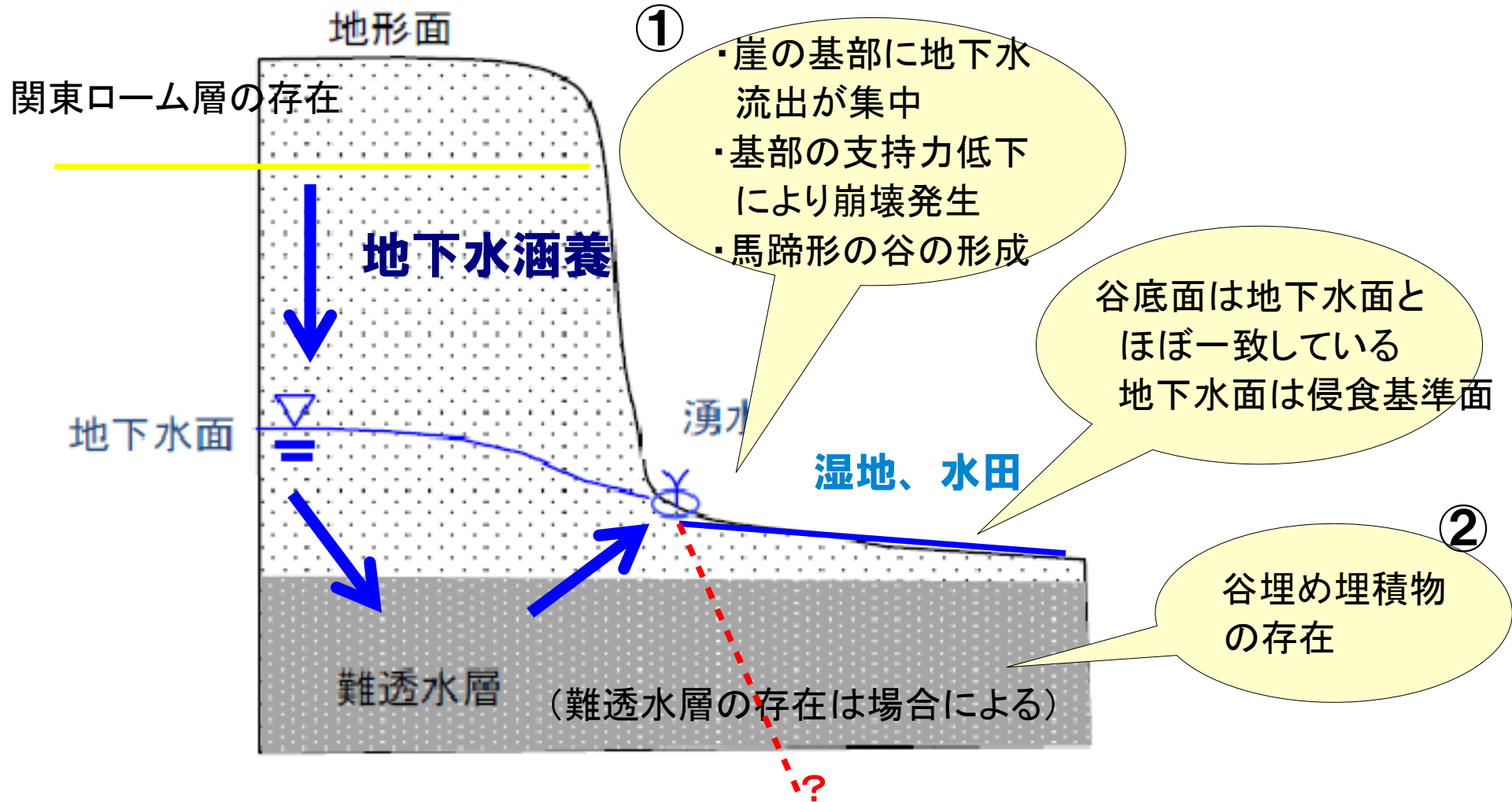
下総台地とは異なる成因と地質構造

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る

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

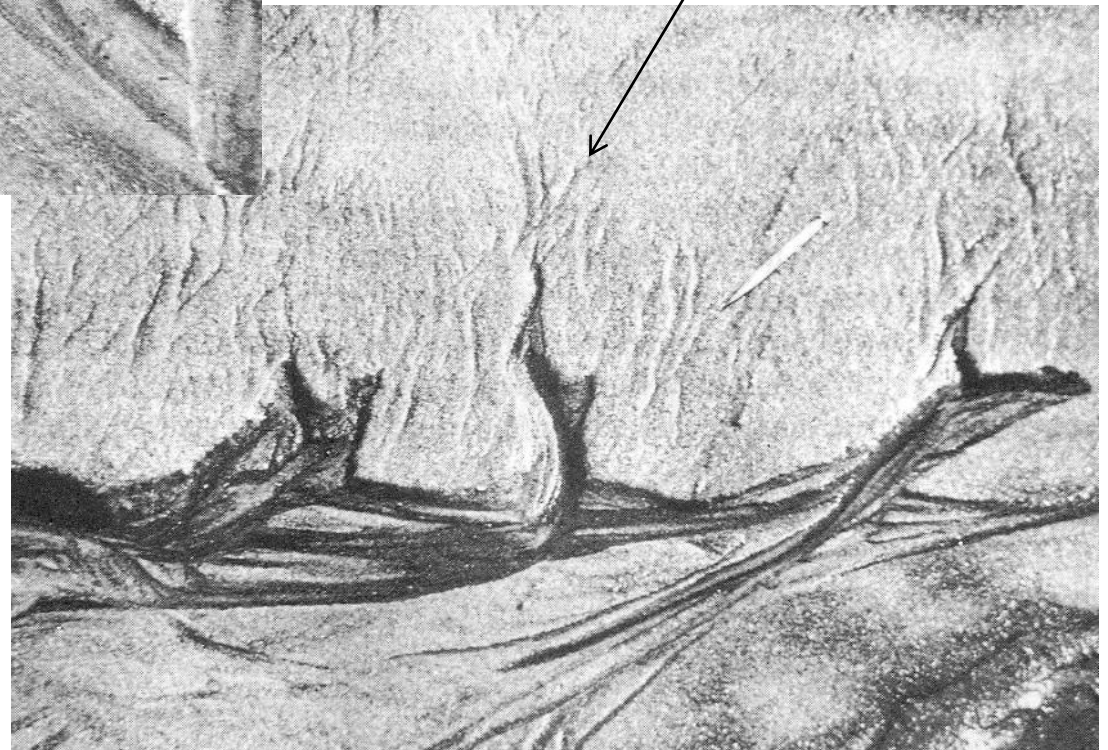
相互作用によって谷が
生まれ、成長していく

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

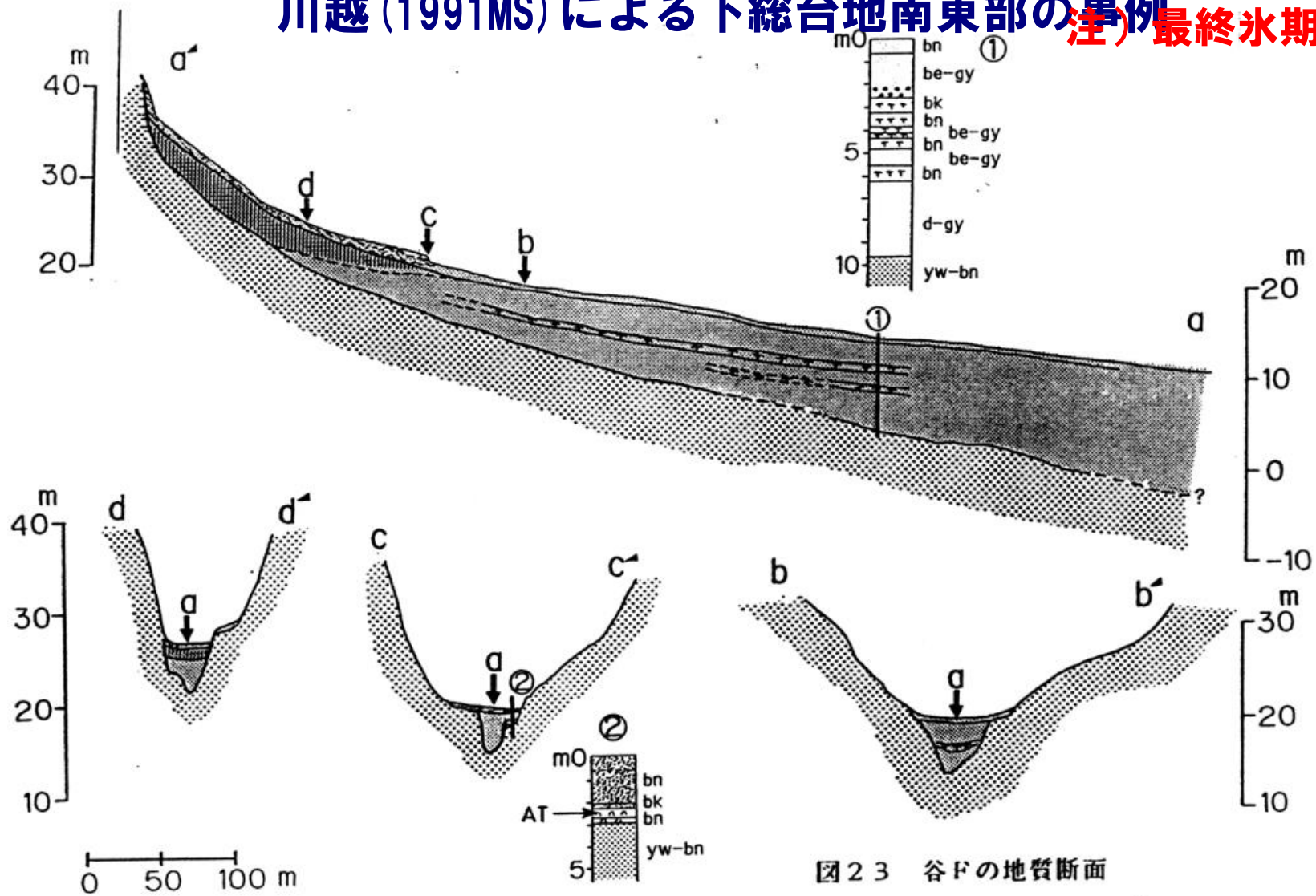
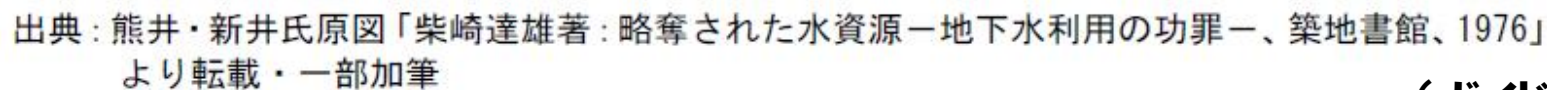


図23 谷Dの地質断面

- 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, be: 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

𩺰 湧水

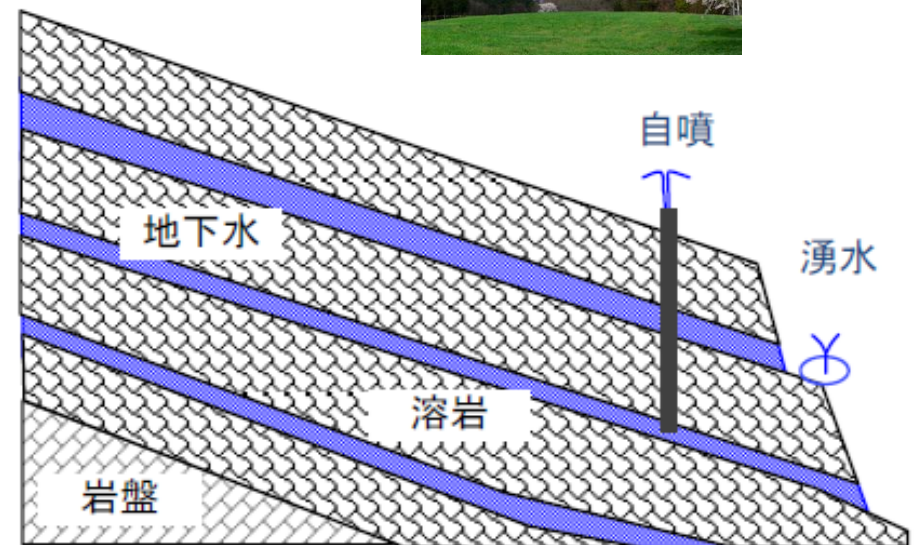
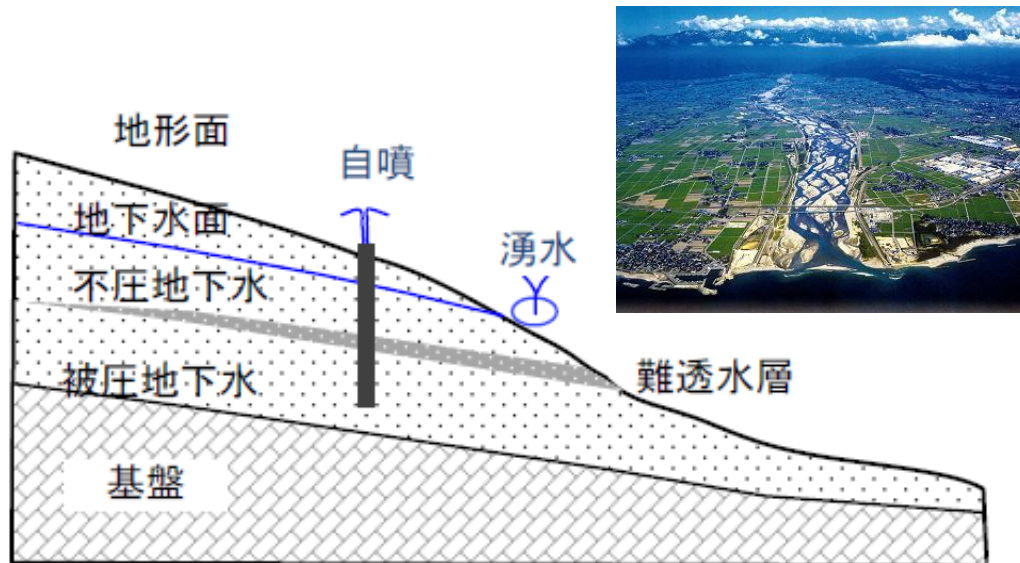
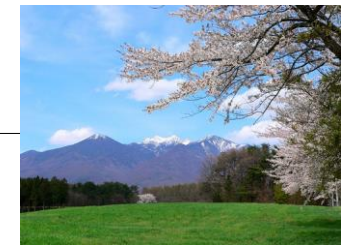


地形地質を踏まえた湧水の分類

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]

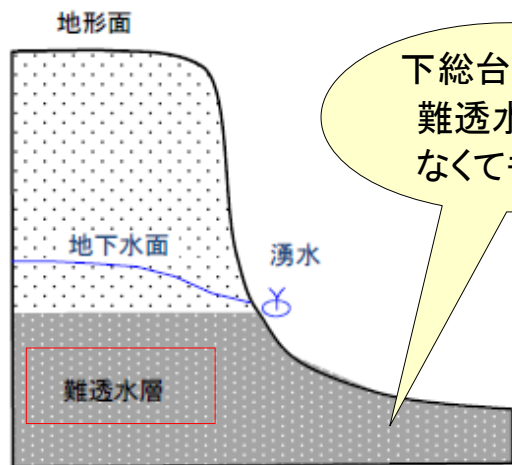
- ・扇端タイプ 例) 黒部川扇状地
- ・崖線タイプ 例) 国分寺崖線、野川湧水群

[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

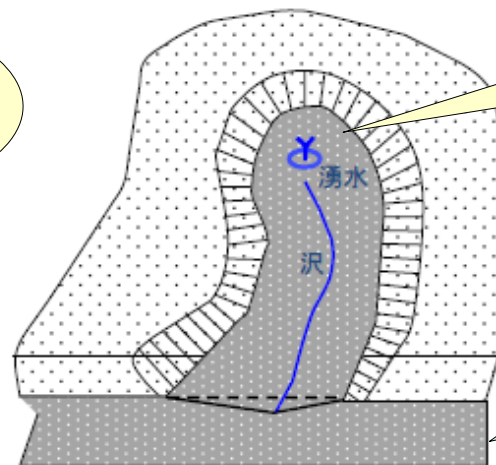
武蔵野台地



a) 崖線タイプ

下総台地では
難透水層は
なくてもよい

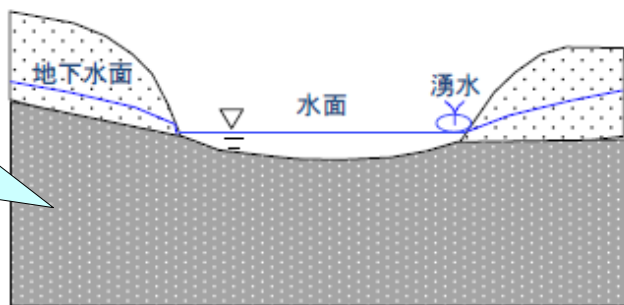
谷頭に地下水
が集中する



b) 谷頭タイプ

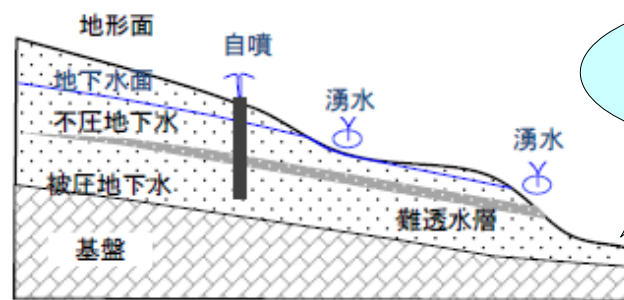
台地タイプ

砂丘・浜堤
氷期に氷床に
覆われた地域



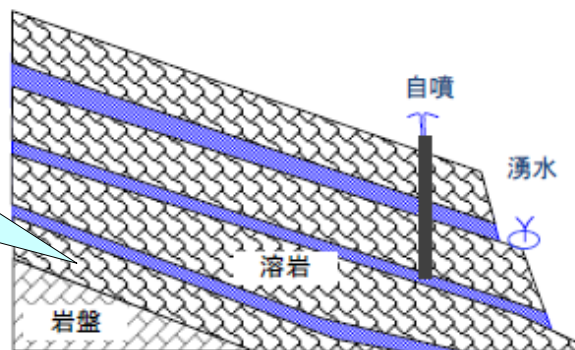
c) 湿地・池タイプ

扇状地タイプ



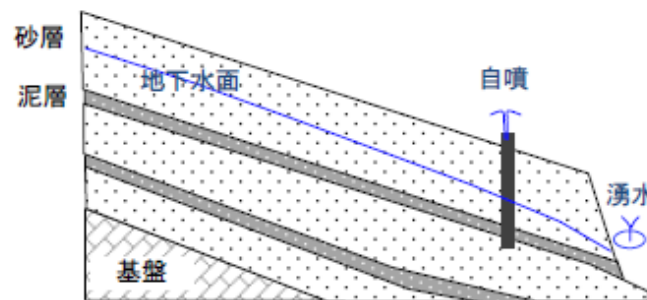
d) 扇端タイプ

火山タイプ
ハケ岳、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

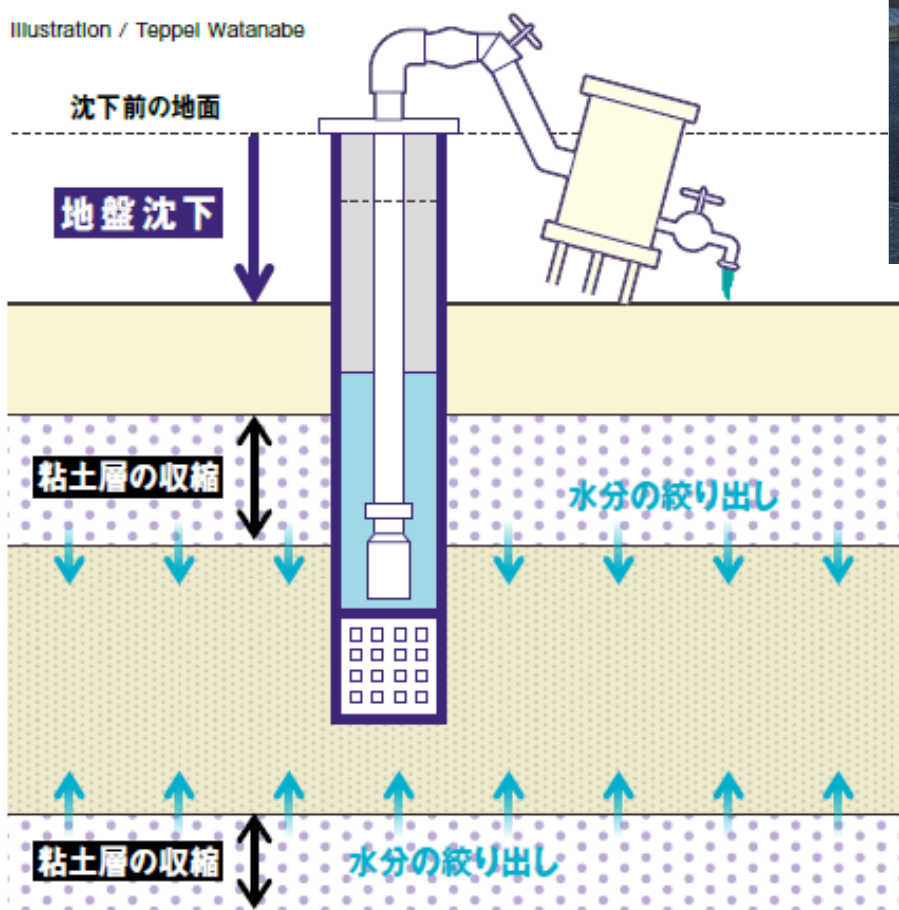
地下水利用の歴史―地盤沈下



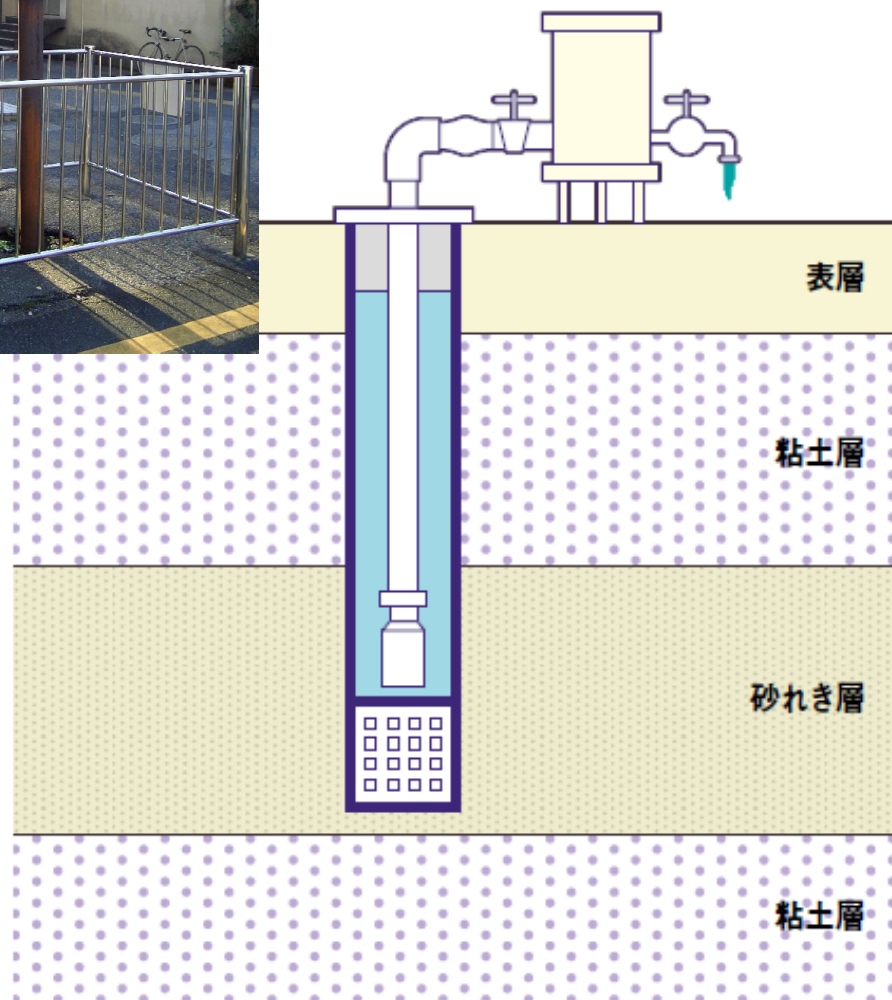
葛飾区東新小岩1丁目第五建設事務所の抜け上がり井戸ポンプ
<http://ido100.ido-jin.net/tokyo/004.html>

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



地下水を
過剰に汲み
上げると……



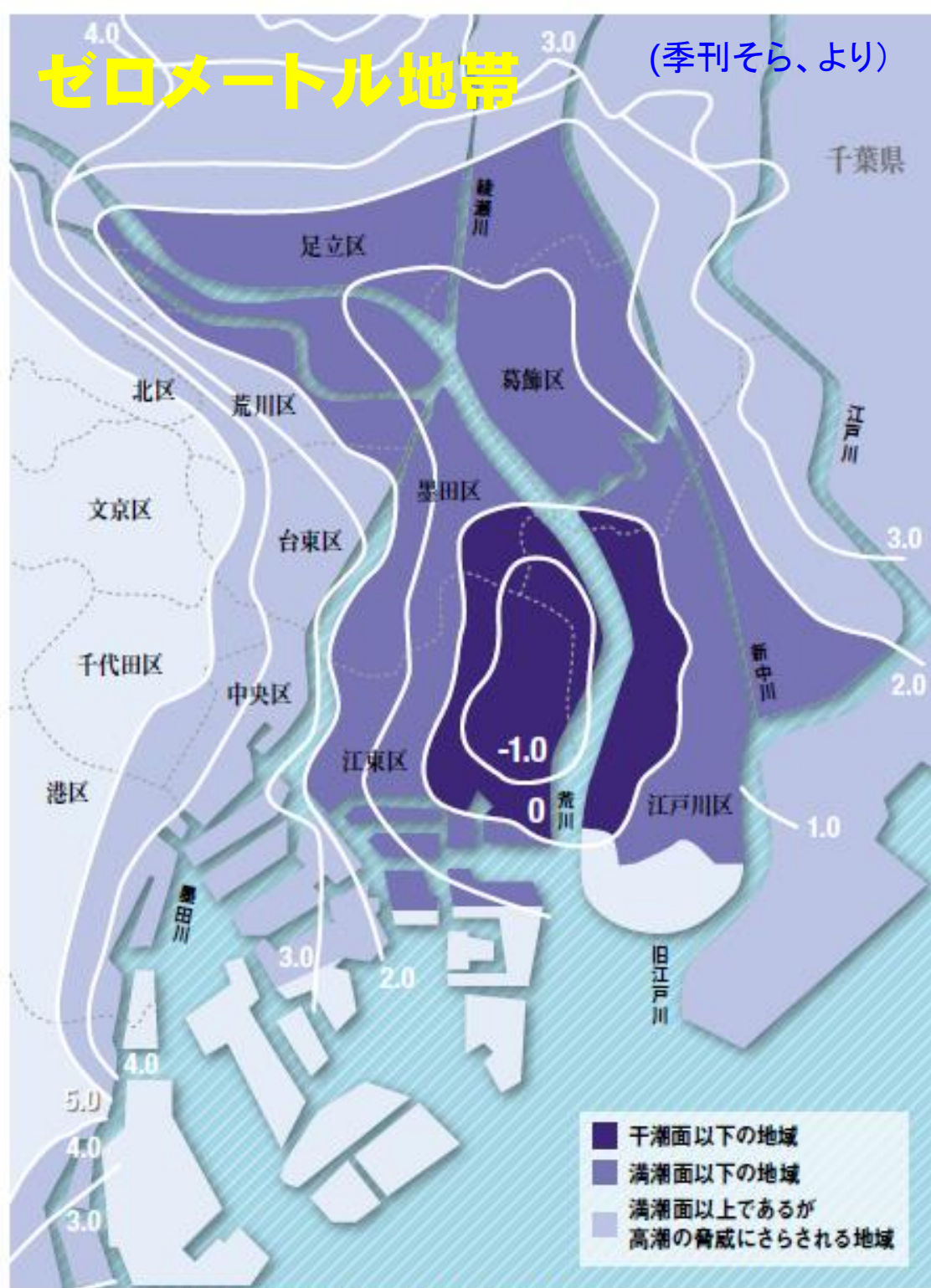
砂れき層の地下水が少なくなると、その不足を補うために上下の粘土層から水分を絞り出そうとする。そのため粘土層が収縮し、地盤地下が発生する。

（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。

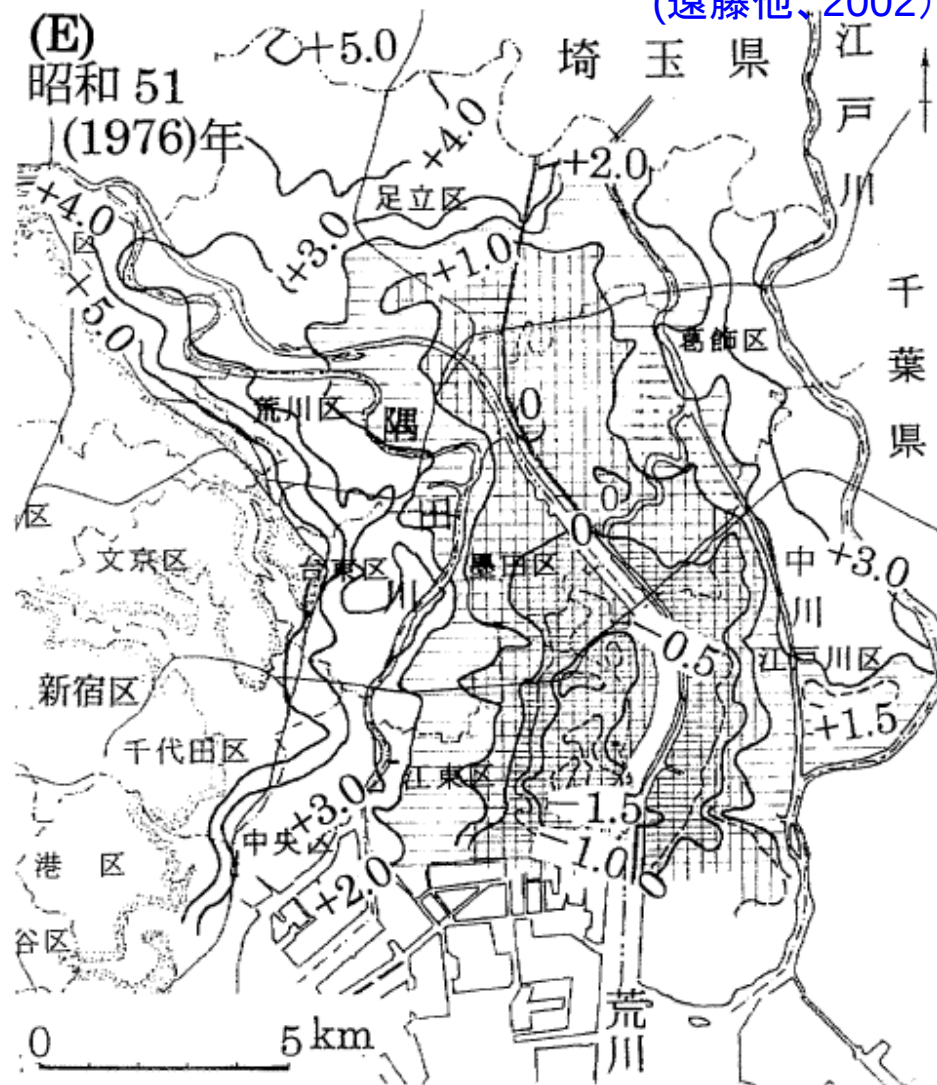
ゼロメートル地帯

(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）

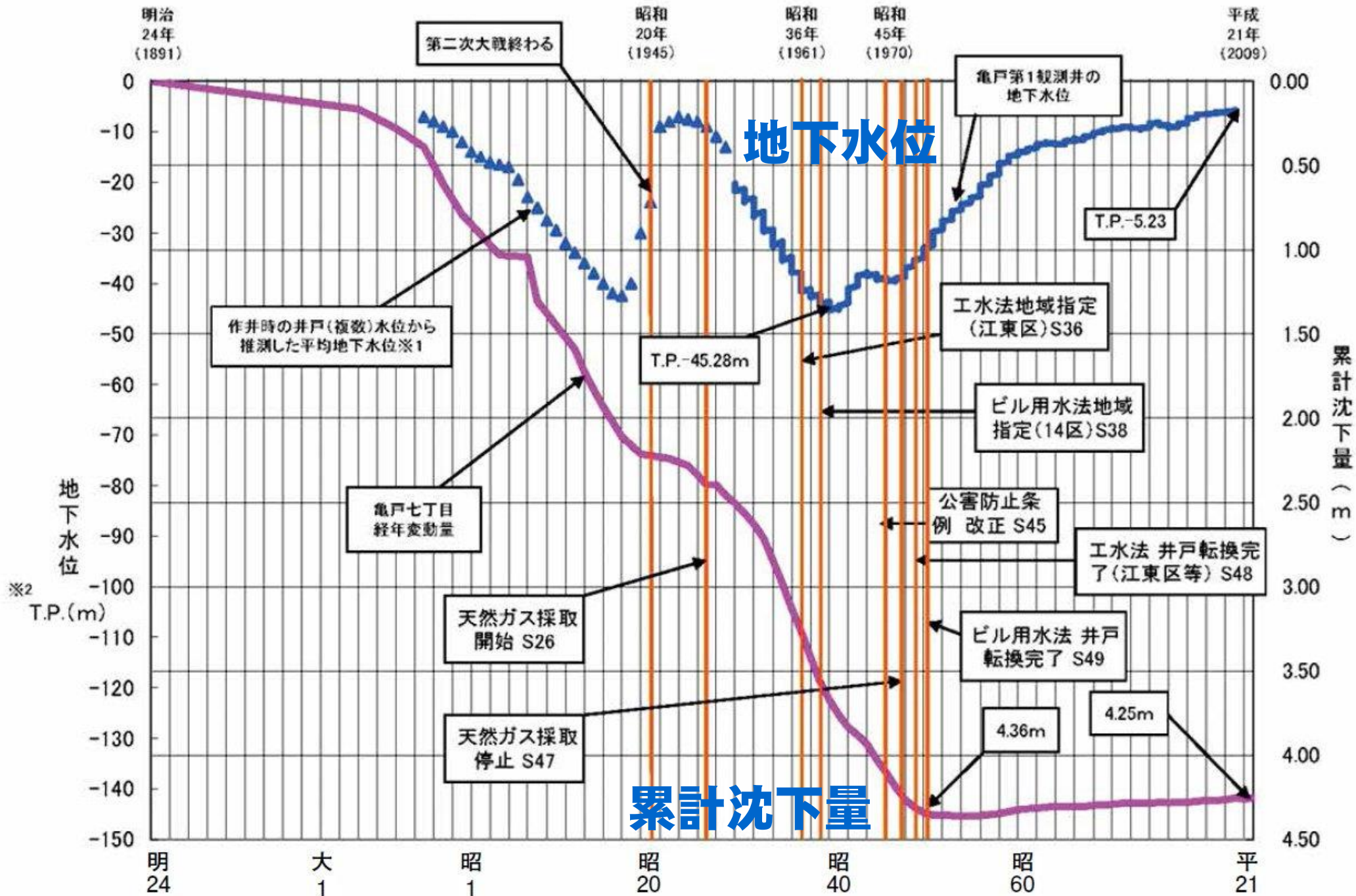


図3 東京都（江東区亀戸）における地盤高と地下水位の推移（東京都，2011）

（ 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。



地下水は使っちゃダメなのか？

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、
由良川上流の水源ダム



人と水の分断はないか



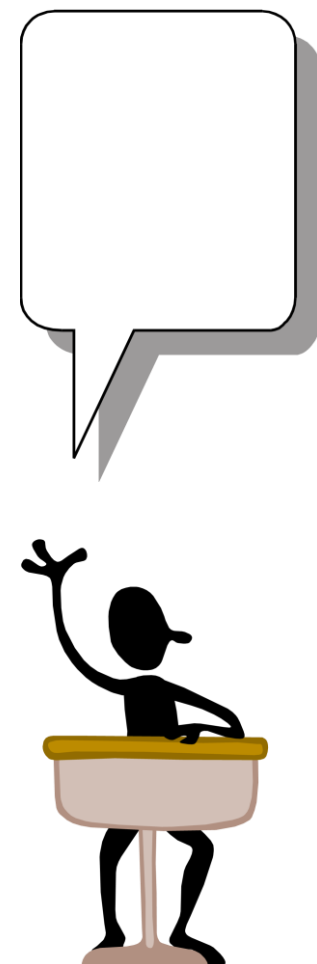
(千葉県水道局ホームページより)

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	直轄・補助・地方単独	道路改良	60年
		橋梁	60年
		舗装	10年
港湾	直轄・補助	係留施設	50年
		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	50年
		航空路	9年
公共賃貸住宅	補助・地方単独	1949年以前着工	31年
		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	管きょ	50年
		処理場	33年
都市公園	直轄・補助・地方単独	43年	
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	

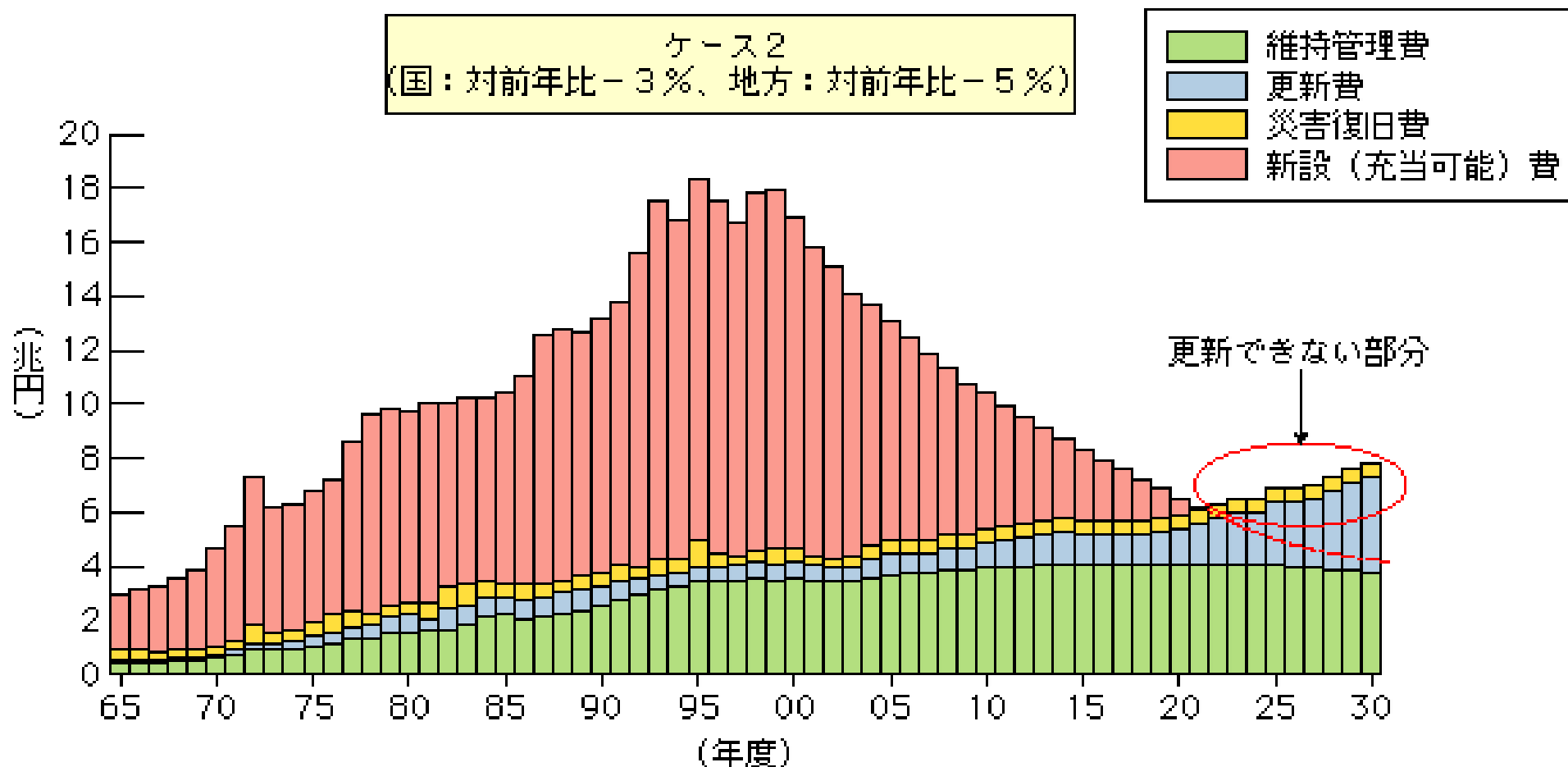
- ・道路改良には、トンネルを含む。
- ・公共賃貸住宅の1950～70年代間の耐用年数は、平均して伸びていくものとした。

（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

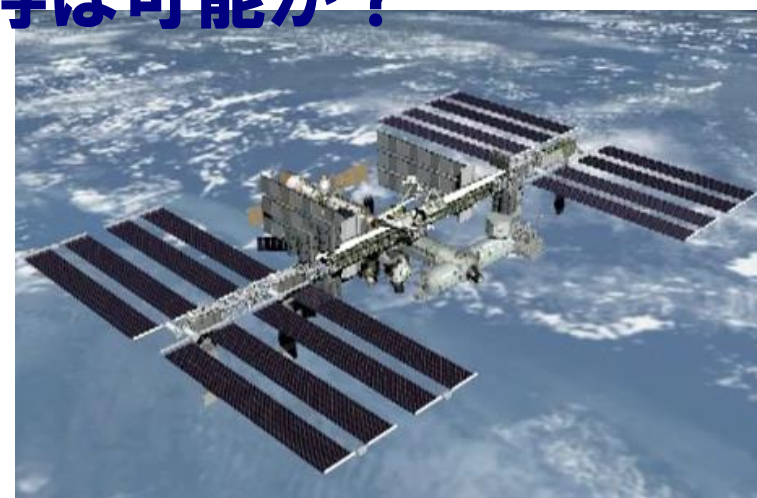
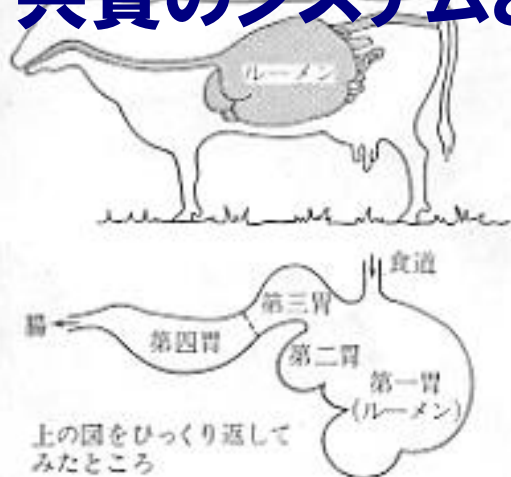
生態学から

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