

# 途上国における地下水問題と その解決に向けて



「＊:このマークが付してある著作物は、第三者が有する著作物ですので、同著作物の再使用、同著作物の二次的著作物の創作等については、著作権者より直接使用許諾を得る必要があります。」

大学院新領域創成科学研究科 環境システム学専攻  
工学部 システム創成学科 環境・エネルギー・システムコース  
徳永 朋祥

<http://park.itc.u-tokyo.ac.jp/tokunaga/>  
[tokunaga@k.u-tokyo.ac.jp](mailto:tokunaga@k.u-tokyo.ac.jp)

# 本日の内容

- 地下水とは?
  - 地球上の水のうちの地下水の割合
  - 地下水の“滞留時間”
- 水循環における地下水
  - 地下水資源の再生可能性
  - 脆弱な水環境と人間活動の影響(メソポタミア湿原)
- 乾燥地域での地下水拳動
  - サハラ砂漠の大帯水層(ヌビア帯水層)
- 私たちが考えるべきこと

## 世界の水

塩水と淡水の体積と、  
全体に占める割合

塩水は97.5%

塩水  
13億5,100万 km<sup>3</sup>  
97.5%

淡水  
3,500万 km<sup>3</sup>  
2.5%

淡水は2.5%

水全体：

13億8,600万 km<sup>3</sup>

利用可能な淡水のほとんどすべては地下水

## 利用可能量

湖、土壤水分、大気中の湿度、沼澤、  
湿地、河川、植物、動物

13.5万 km<sup>3</sup>  
0.4%

利用可能な  
地下水  
1,050万 km<sup>3</sup>

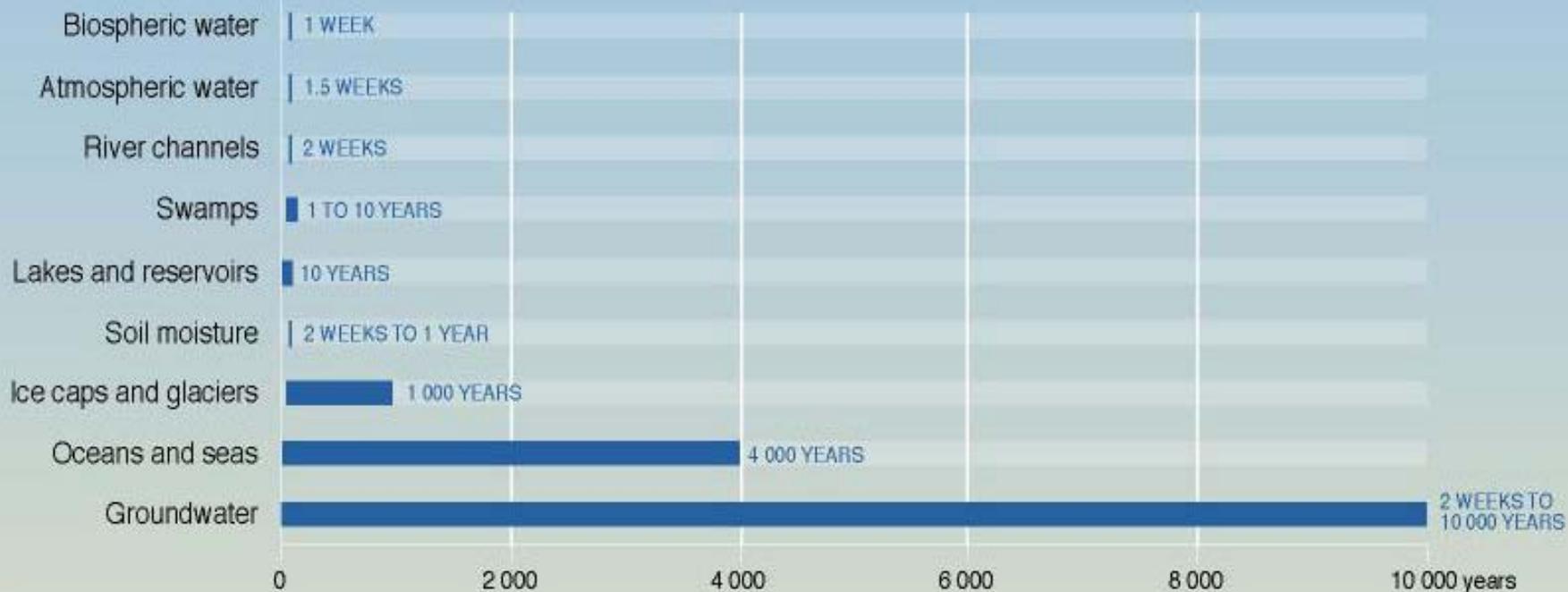
利用不可能な  
氷河、雪、氷、  
永久凍土  
2,440万 km<sup>3</sup>

69.5%

30.1%

# 滞留時間の違い

Estimated Residence Times of the World's Water Resources



PHILIPPE REKACEWICZ  
APRIL 2002

# From Wetlands to Dry Lands

## The Destruction of the Mesopotamian Marshlands

1973



2000



Note: These two maps are sourced from satellite images and maps originally created by Hassan Partow, GRID-Geneva.

Source: Hassan Partow, *The Mesopotamian Marshlands: Demise of an Ecosystem*, United Nations Environment Programme (UNEP), Division of Early Warning and Assessment (DEWA), 2001.

# Natural Hawizeh



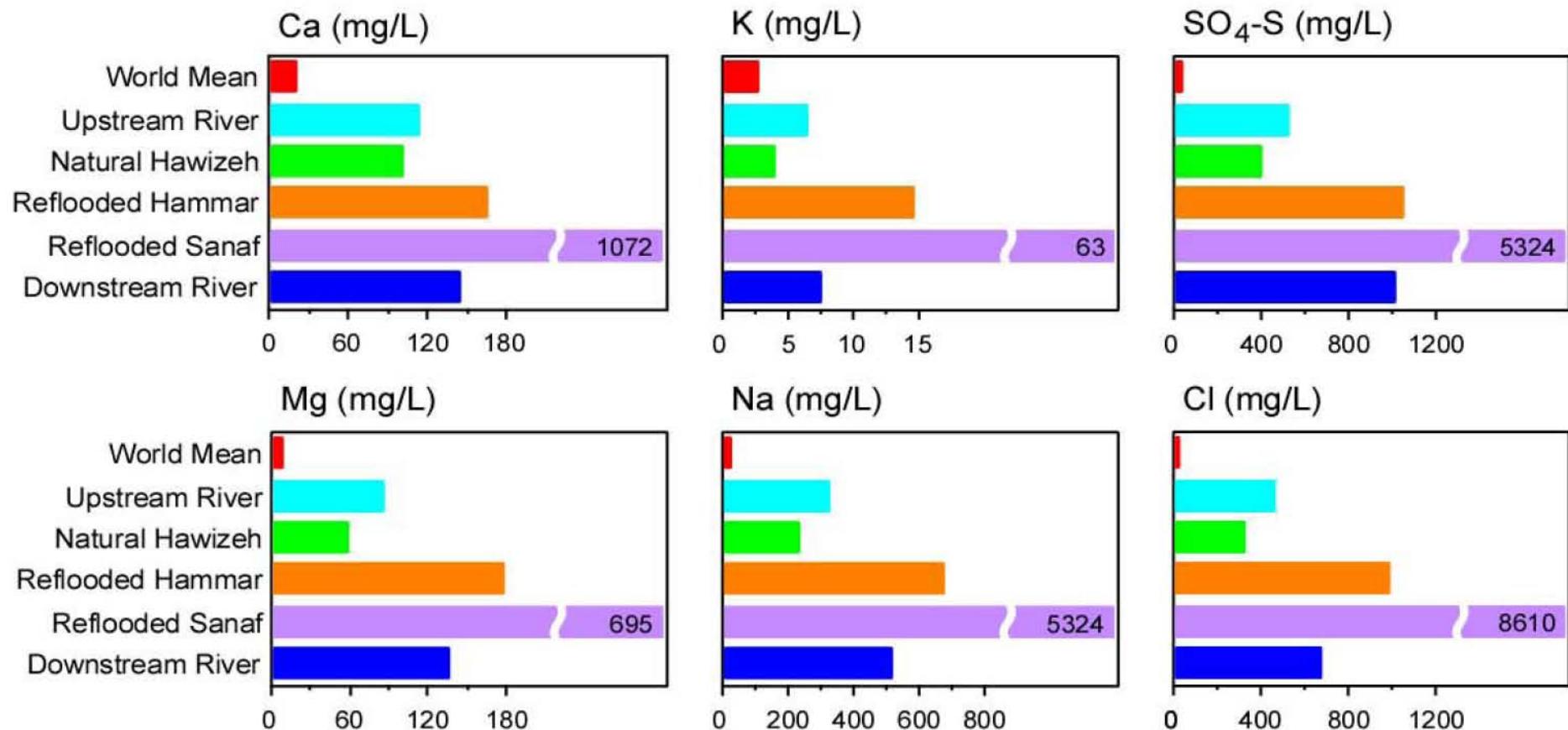
Reflooded Hammar



Reflooded Sanah



Richardson et al. (2005)



Richardson et al. (2005)

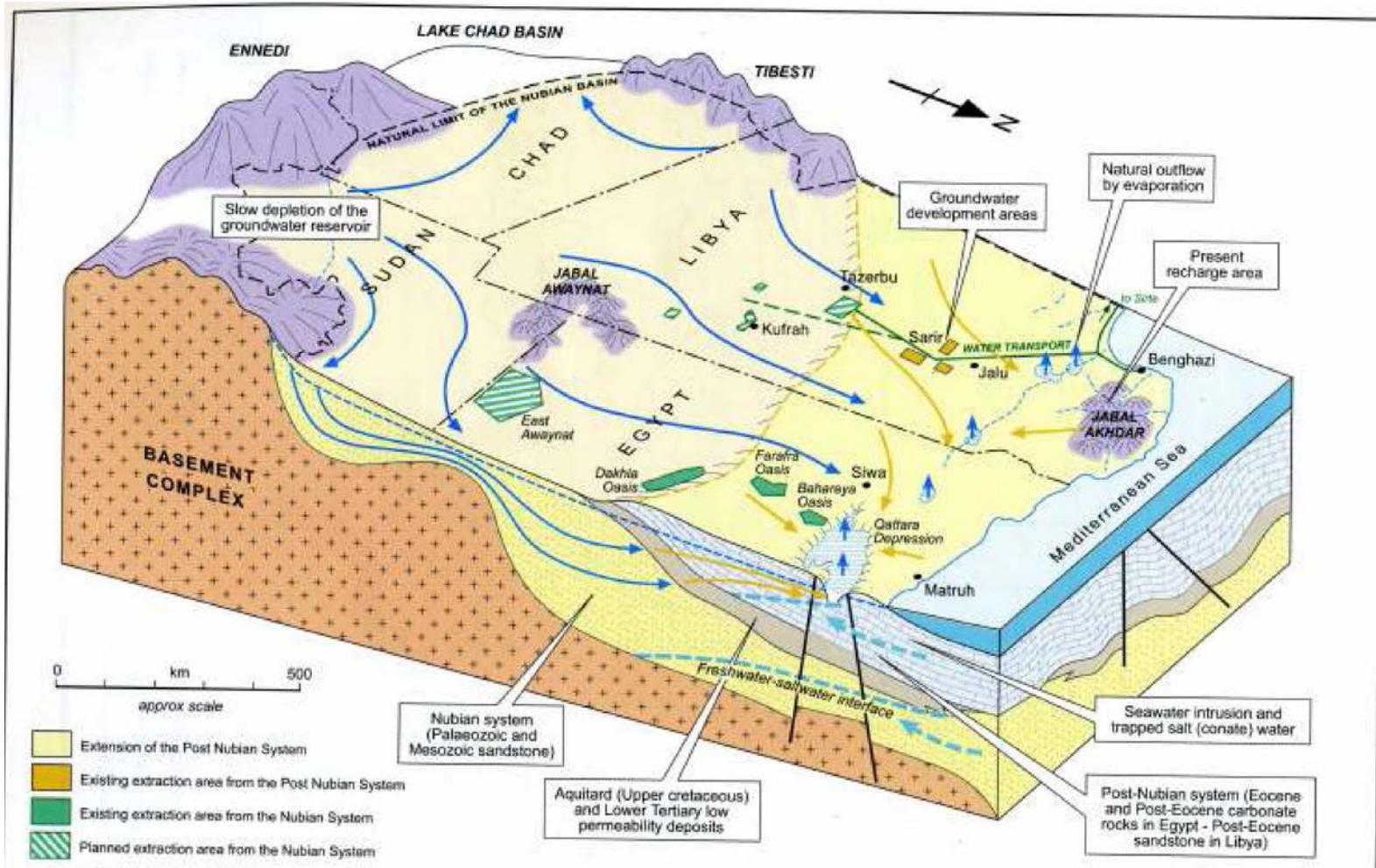
# 非再生可能な地下水(サハラ)







# Nubia帯水層の地下水



地下水の総体積  
約 $370,000 \times 10^9 \text{m}^3$   
(IAEA, 2007)

# 地下水流れの速さ

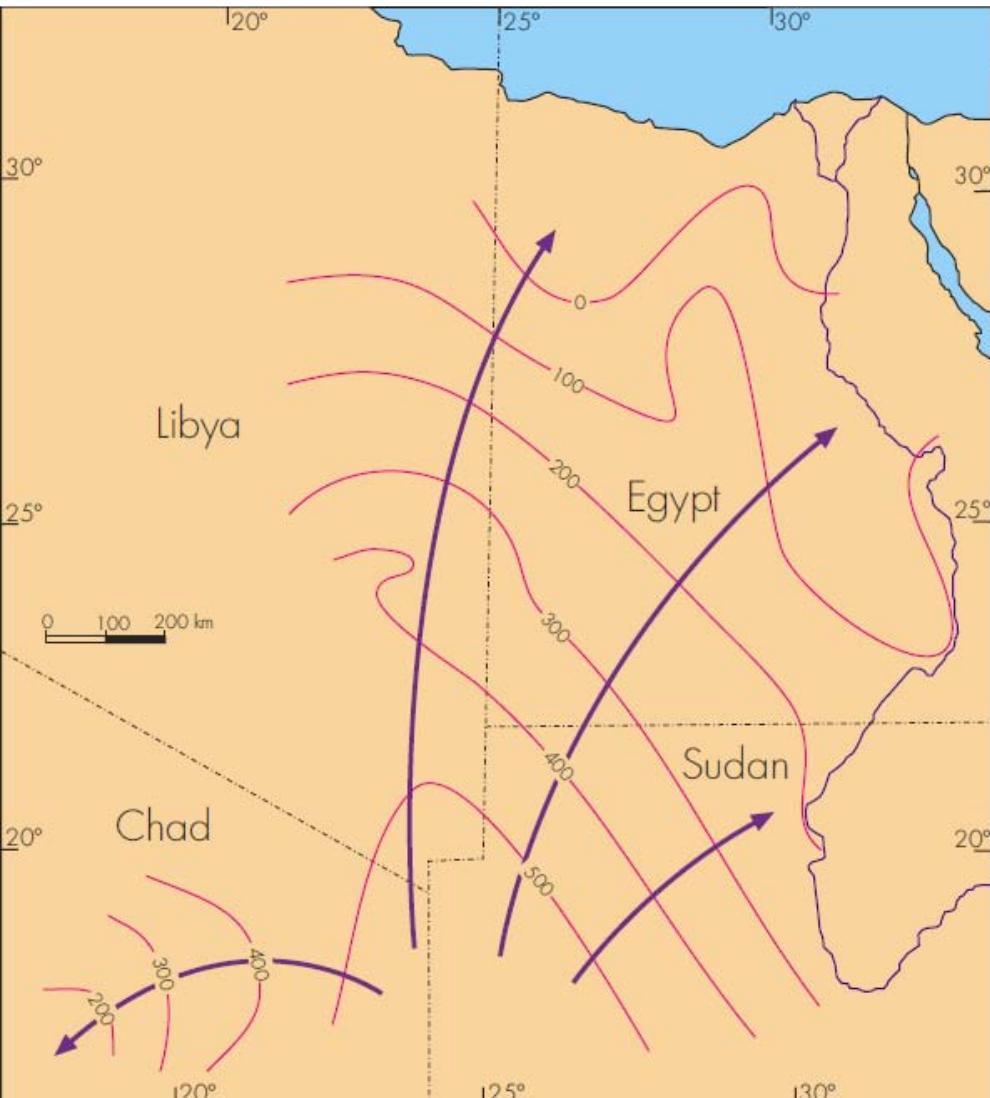


Fig. 8: Interpreted groundwater contours for the Nubian Aquifer System by BALL (1927) and SANDFORD (1935) (modified), which suggest a regional groundwater flow from adjacent areas in the South to major depressions in the system.

見かけ上南部から北部に向かう地下水流れがあるように見える

但し、その速さは、

平均動水勾配:  $3 \times 10^{-4}$

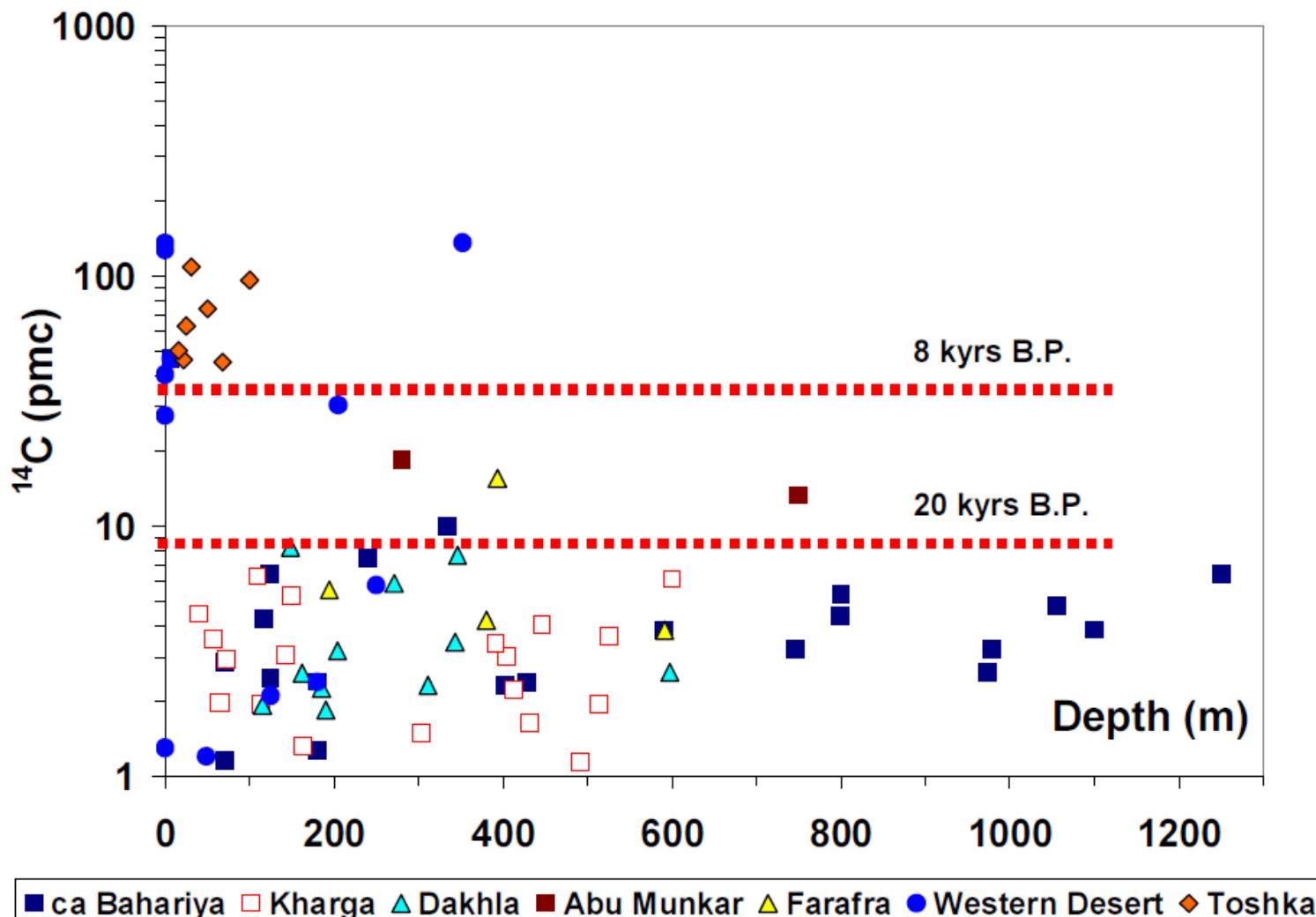
透水係数:  $1 \times 10^{-5} \text{ m/s}$

有効間隙率: 0.1

とすると、約1m/yであり、帶水層内の滞留時間は100万年程度となる

Thorweihe and Heinl, 2002

# ヌビア帯水層の地下水年代 放射性炭素( $^{14}\text{C}$ )を用いた計測



# エジプト南部の水環境と開発

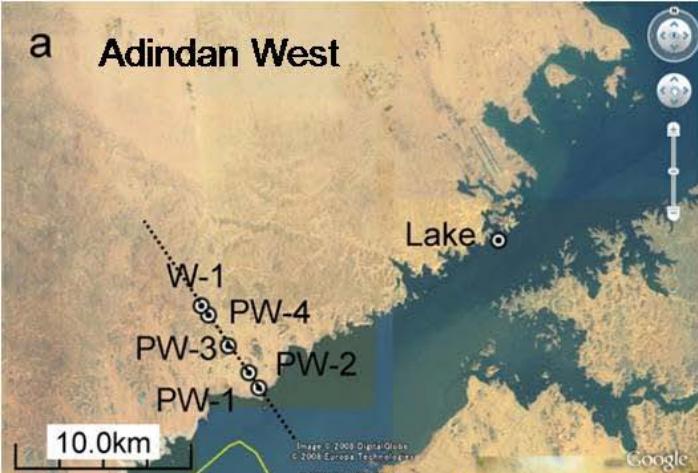
## エジプト

- 降水量: 30mm/年未満  
[気象庁, 2009]
- 水供給量: 645億m<sup>3</sup>/年  
(555億m<sup>3</sup>/年をアスワン・ハイ・ダムから取水)  
[Kim and Sultan, 2006]
- 人口: 2050年に1.5倍の1.2億人に  
[World Population Prospects, 2009]
- 住血吸虫による感染  
[WHO, 2009]

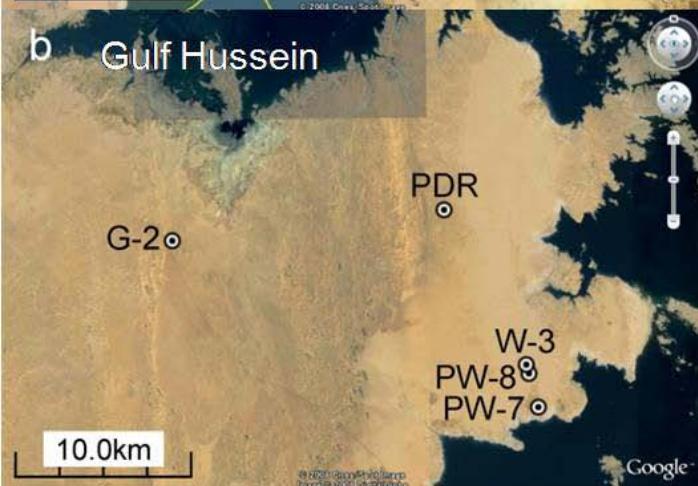


†(Google Earthを用いて作成)

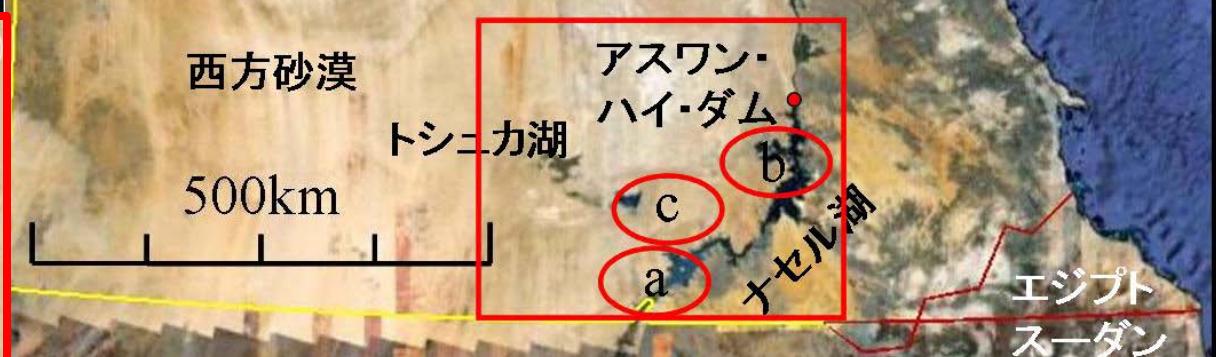
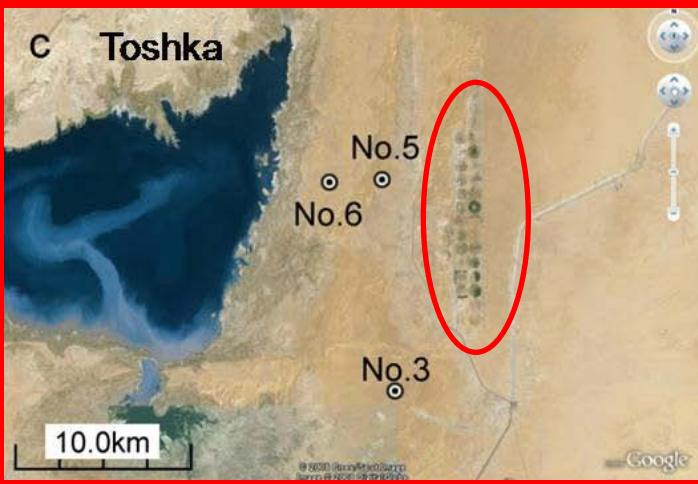
### a Adindan West



### b Gulf Hussein

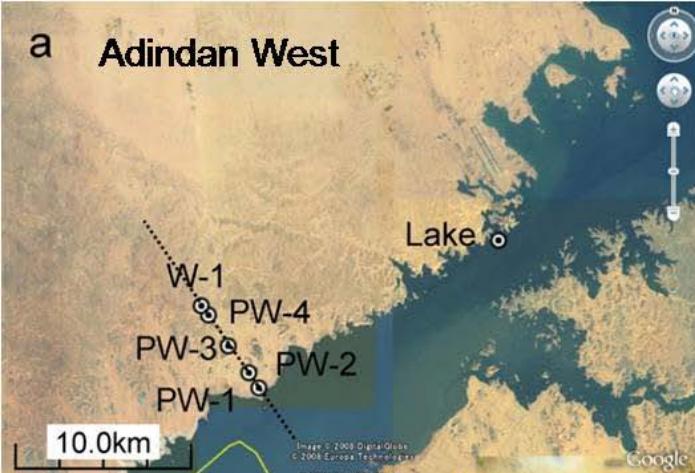


### c Toshka

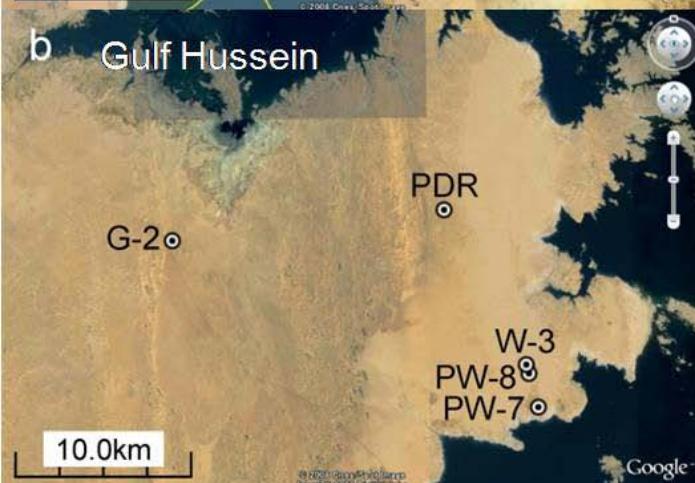


†(Google Earthを用いて作成)  
15

a Adindan West



b Gulf Hussein

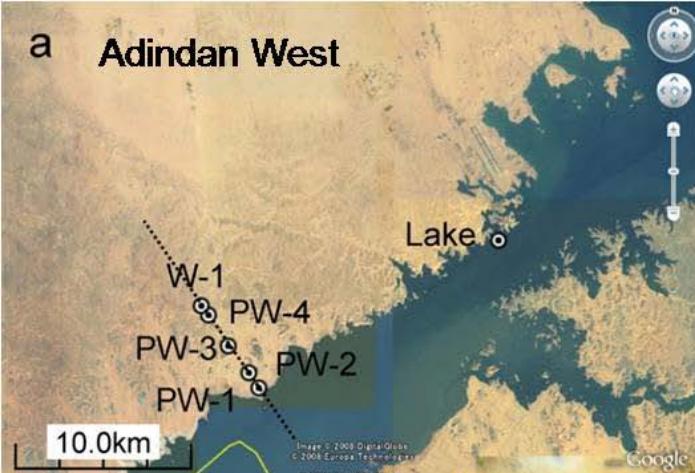


c Toshka

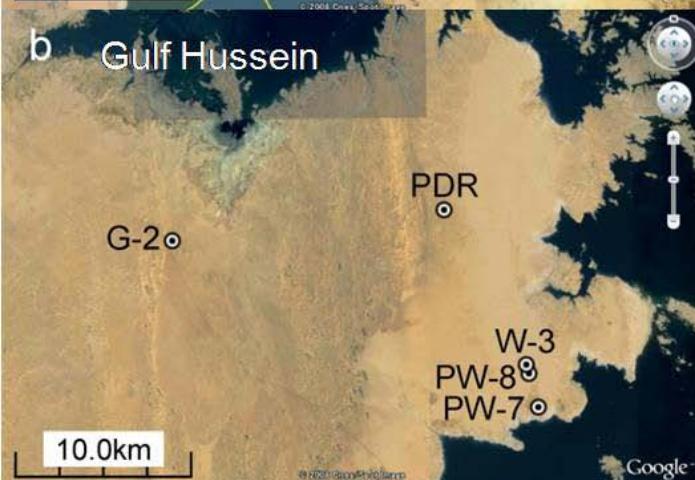


†(Google Earthを用いて作成)

a Adindan West



b Gulf Hussein

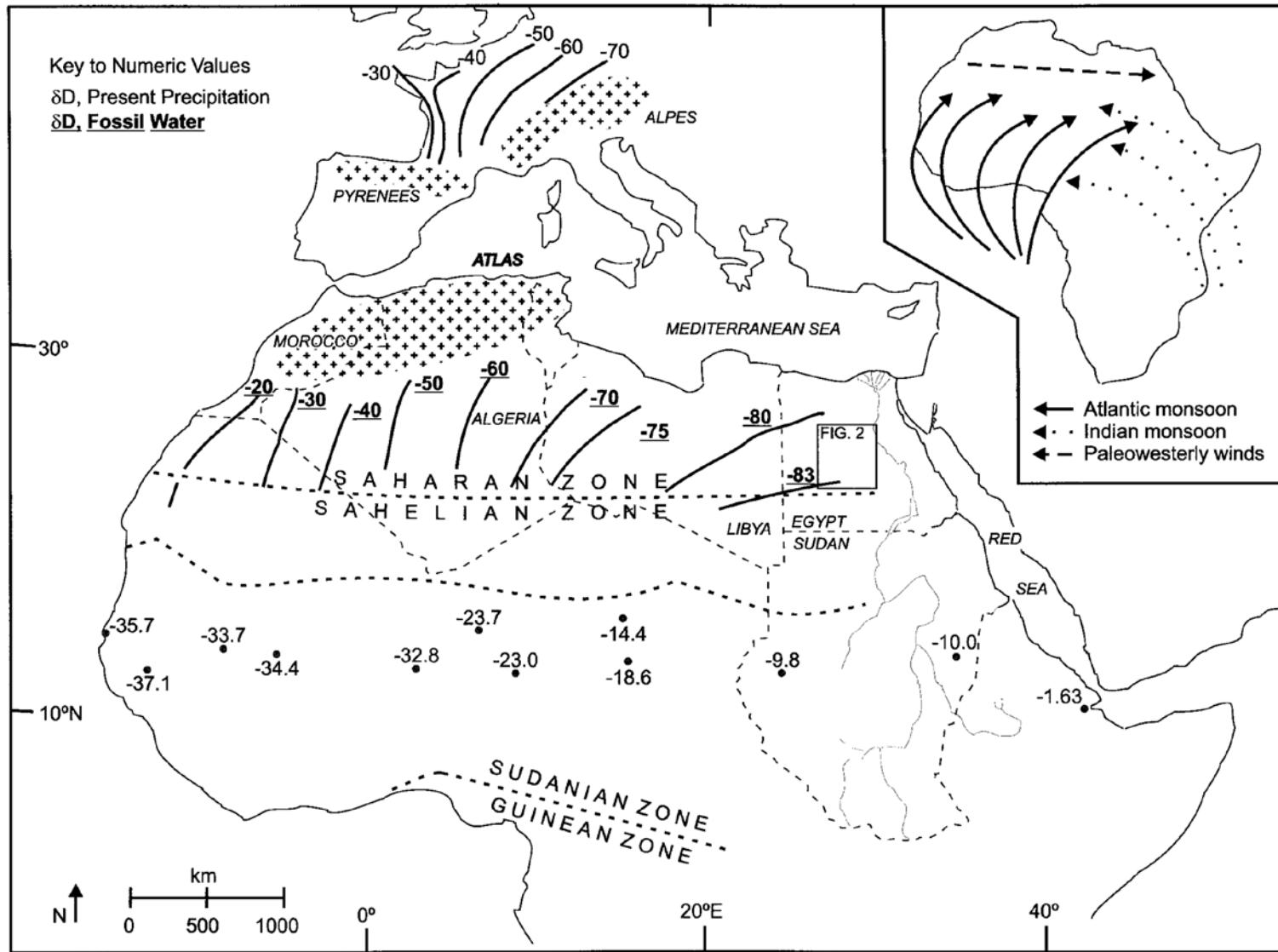


c Toshka



†(Google Earthを用いて作成)

# 地下水の起源を探る (水素安定同位体比)



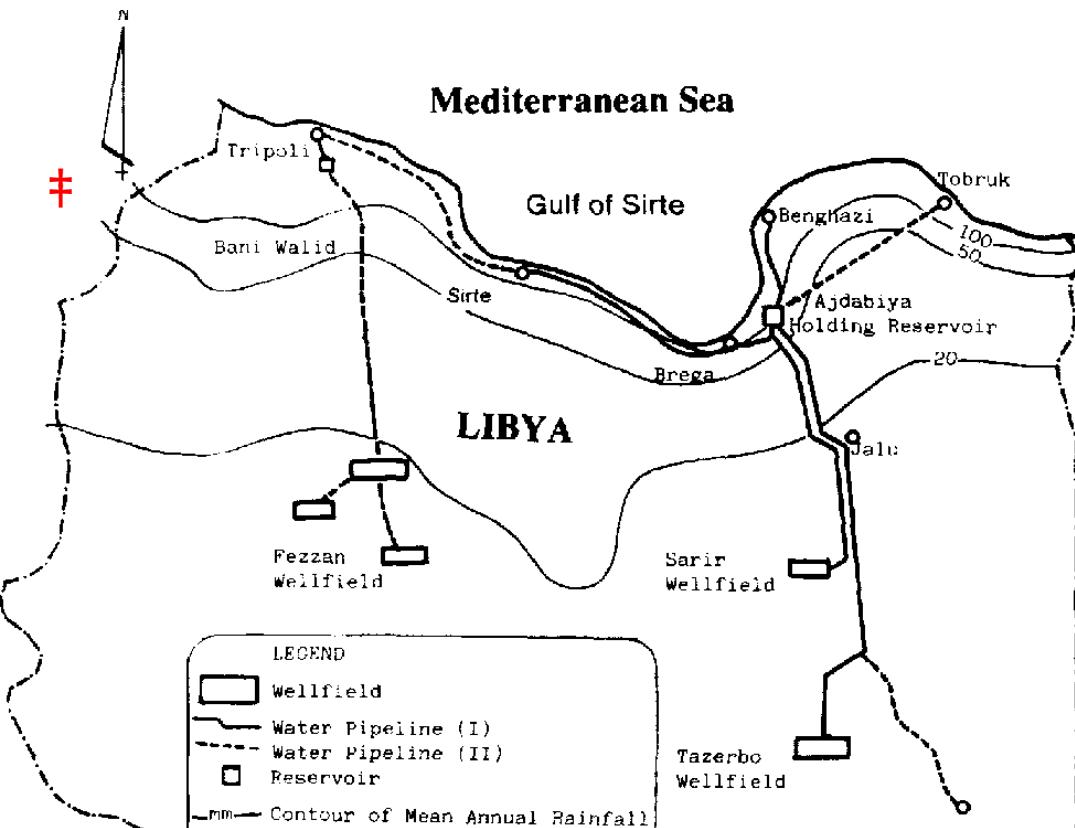
Sultan et al., 1997

# ヌビア帯水層の地下水の特徴

- 地下水は、現在のサハラ砂漠地域が湿潤であった過去に、大西洋から東に向かう大気の流れに伴う降水によって涵養された
- 現在の涵養域(ビクトリア湖周辺)からの地下水の移動は下流域(エジプトetc.)の地下水利用には貢献していない

非再生可能資源としての地下水と捉える必要がある

# Great man-made river project (Libya)

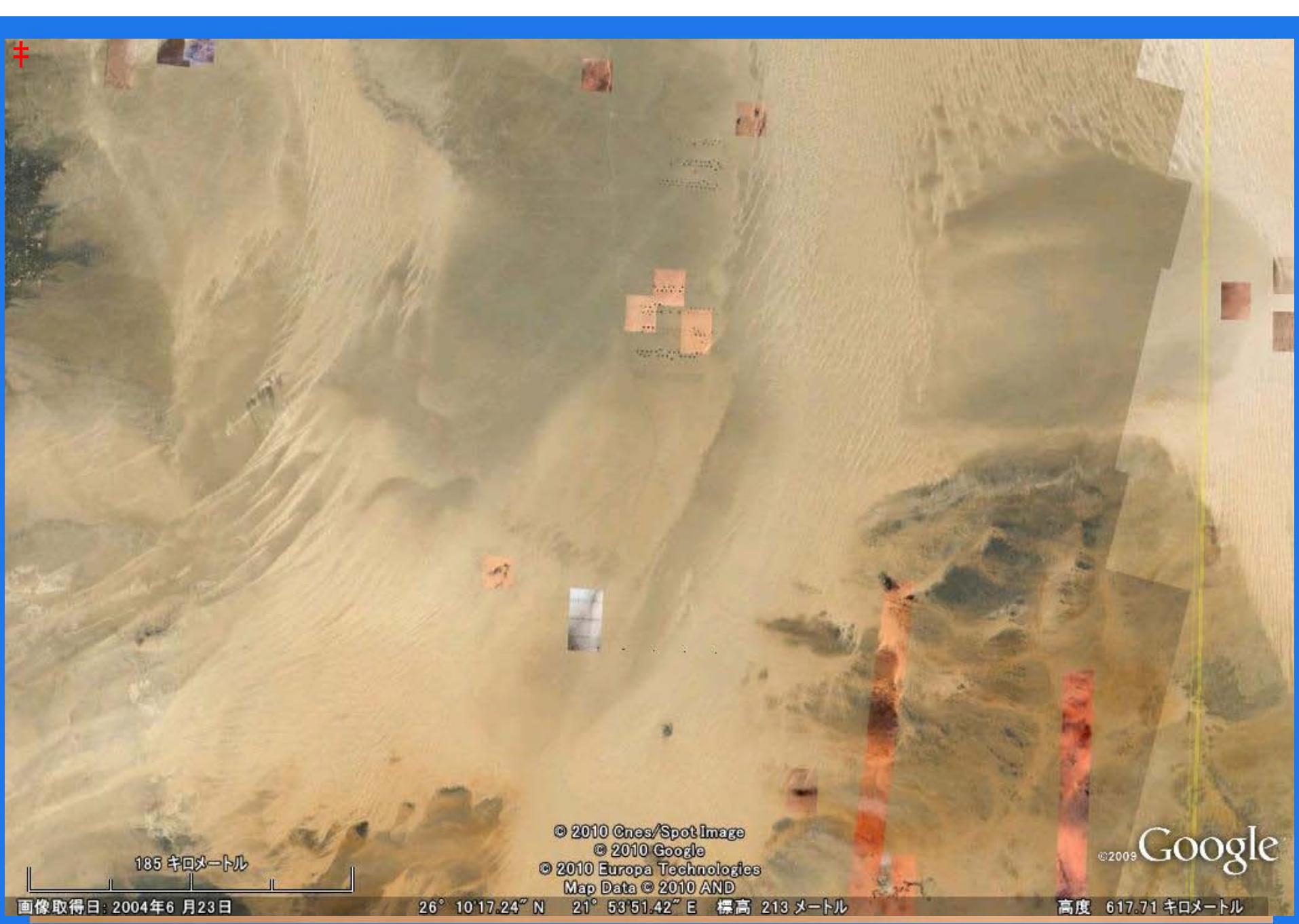


計画揚水量:  $5.7 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{day}$   
cf: 黒部川の流量  $2.8 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{day}$

帶水層からの生産可能な期間: 50年

Masahiro Murakami, 1995,  
Managing Water for Peace  
in the Middle East: Alternative  
Strategies,  
United Nations University Publication,  
p. 100.





+

185 キロメートル

画像取得日: 2004年6月23日 26° 10' 17.24" N 21° 53' 51.42" E 標高 213 メートル

© 2010 Cnes/Spot Image  
© 2010 Google  
© 2010 Europa Technologies  
Map Data © 2010 AND

©2009

Google

高度 617.71 キロメートル

+



21.3 キロメートル

© 2010 Cnes/Spot Image

© 2010 Google

Image © 2010 DigitalGlobe

©2009 Google

画像取得日: 2004年6月23日

26° 56' 39.10" N 21° 59' 19.07" E 標高 151 メートル

高度 73.53 キロメートル

+



15.9 キロメートル

画像取得日: 2004年6月23日 - 2008年5月28日

25° 26' 33.77" N 21° 37' 51.17" E 標高 274 メートル

© 2010 Cnes/Spot Image

© 2010 Google

Image © 2010 DigitalGlobe

©2009 Google

高度 55.25 キロメートル

# 現在のエジプトの水資源戦略の一つ (Tushka project)

著作権処理の都合で、  
この場所に挿入されていた

Kim and Sultan, 2002, Assessment of  
the long-term hydrologic impacts of  
Lake Nasser and related irrigation  
projects in Southwestern Egypt.,  
Journal of Hydrology, 262, 68-83, Fig.1

を省略させていただきます。

- ・ナセル湖のoverflowした水が  
Tushka depressionに流入  
（“自然”のプロセス）
- ・Tushka canalを構築し、ナセ  
ル湖から年間50億tの水を導水  
(Tushka project)

(Kim and Sultan, 2002)

# Tushka project

- ・「国土開発20力年計画」の中心プロジェクトで、ナセル湖の水を砂漠地帯に導いて、東京都より広い面積を緑の大地に変えようという「開発計画」である。ムバラクポンプ場から総延長240kmの水路を引いて、2200km<sup>2</sup>(参考値: 東京は2180km<sup>2</sup>程度)の大地を農耕地に変え、2017年には300万人が定植できるようにする計画である。



# Recent environmental change at southern Egypt

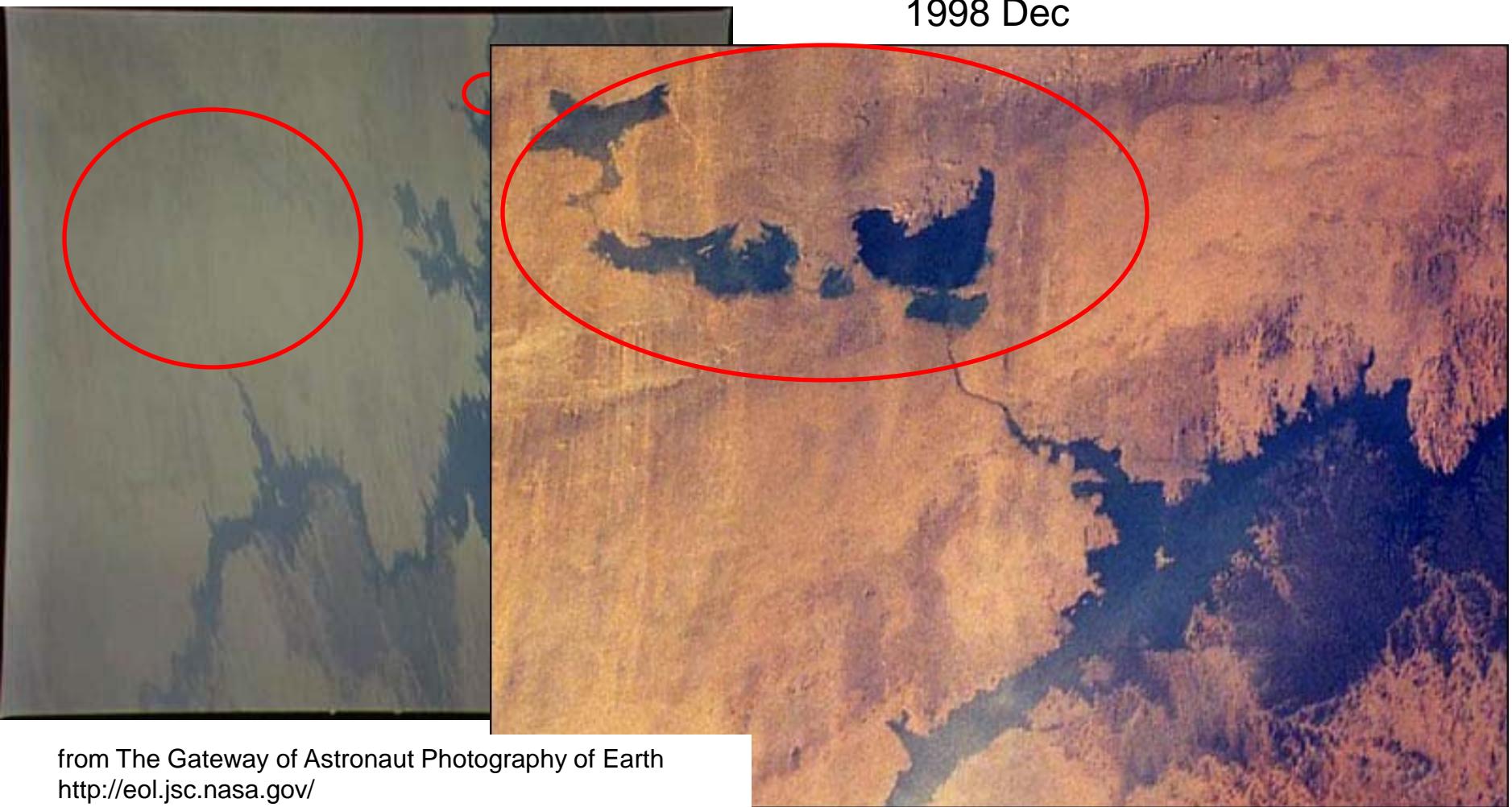
1996 Feb



from The Gateway of Astronaut Photography of Earth  
<http://eol.jsc.nasa.gov/>

# Recent environmental change at southern Egypt

1996 Feb



from The Gateway of Astronaut Photography of Earth  
<http://eol.jsc.nasa.gov/>

from "earth observation"  
[http://earthobservatory.nasa.gov/Newsroom/NewImages/images.php3?img\\_id=4495](http://earthobservatory.nasa.gov/Newsroom/NewImages/images.php3?img_id=4495)



# 研究の目的

乾燥地における淡水資源供給量を増やす方法として、貯水池から地下に浸透している地下水の利用を考える

## ➤ 量のメリット

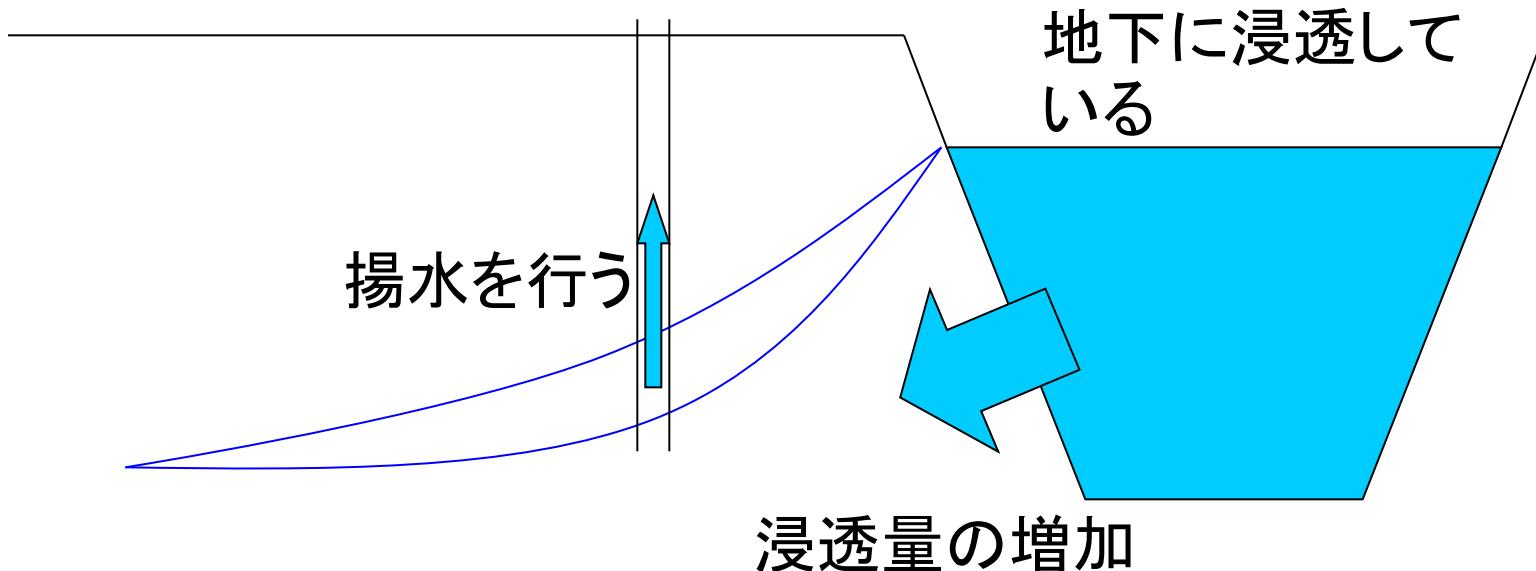
- 誘発涵養が起き、地下に浸透する水量が増える
- 地表面で導水しないため蒸発による損失がない
- 貯水池の水面を下げることで水面積が減り、蒸発量が減る

## ➤ 質のメリット

- 地下で生息できない有害な生物を取り除ける  
例：地下で生息できない巻貝類を中間宿主とする住血吸虫

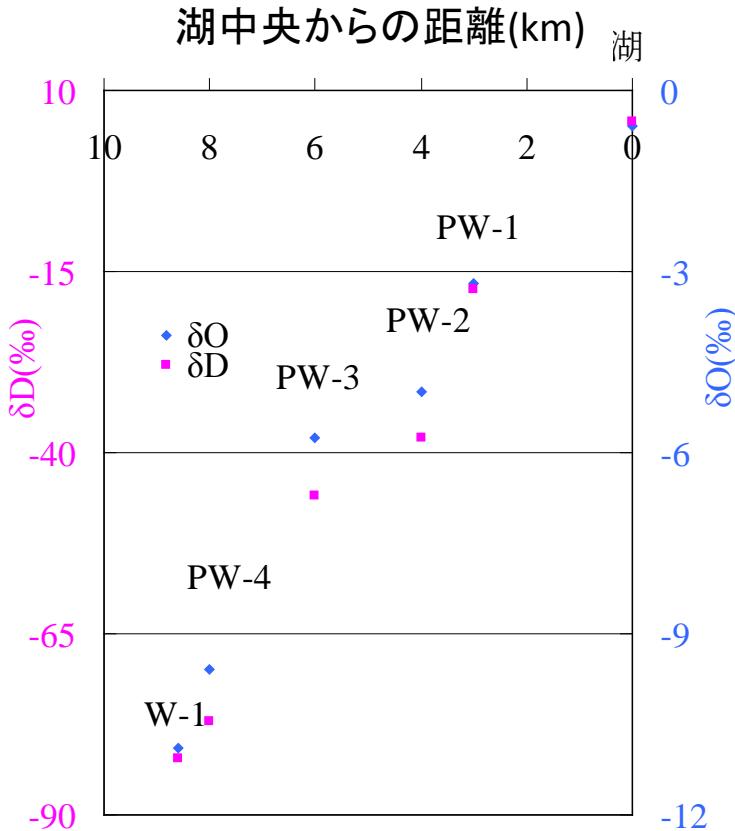
# 研究の目的

乾燥地における淡水資源供給量を増やす方法として、貯水池から地下に浸透している地下水の利用を考える

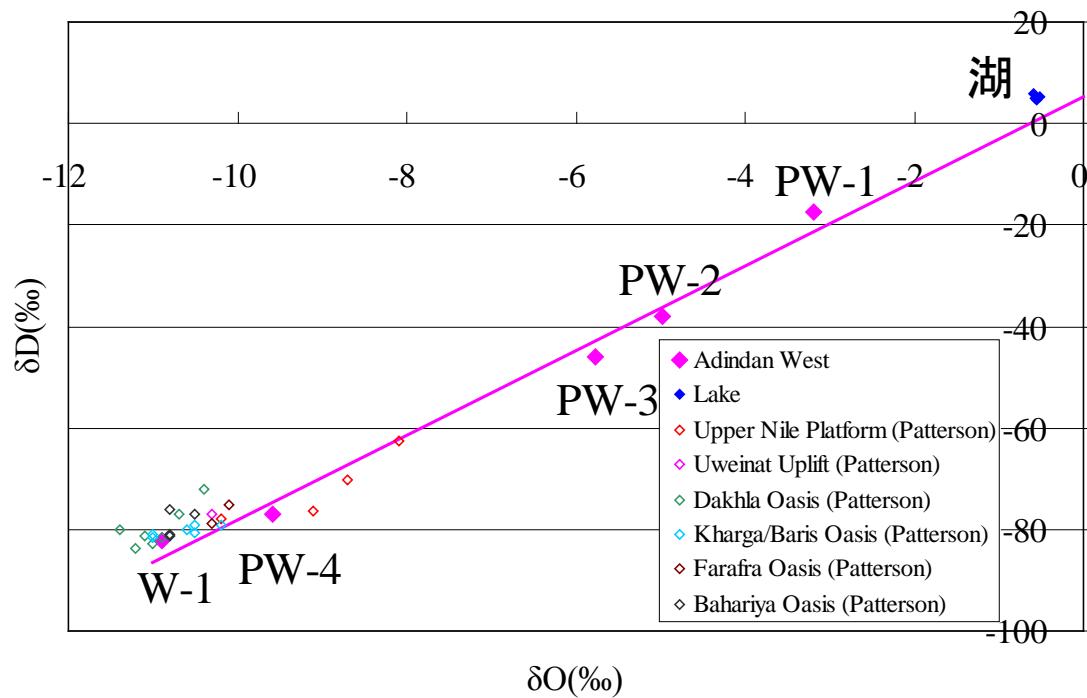


# 湖水と地下水の混合

同位体比と観測井の  
湖中央からの距離

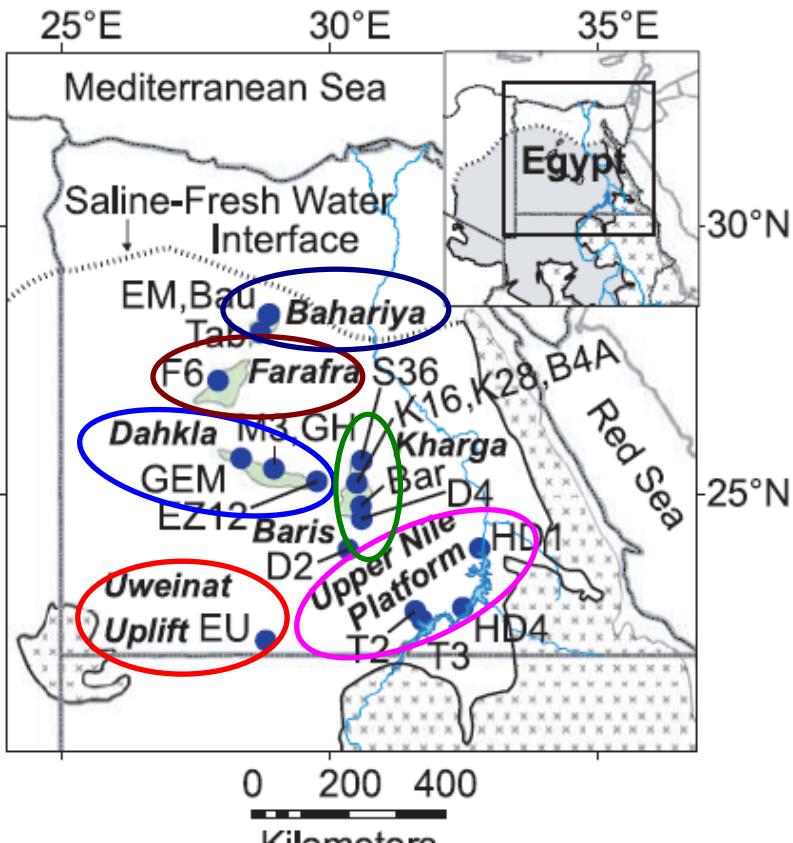


観測井における酸素水素安定同位体比

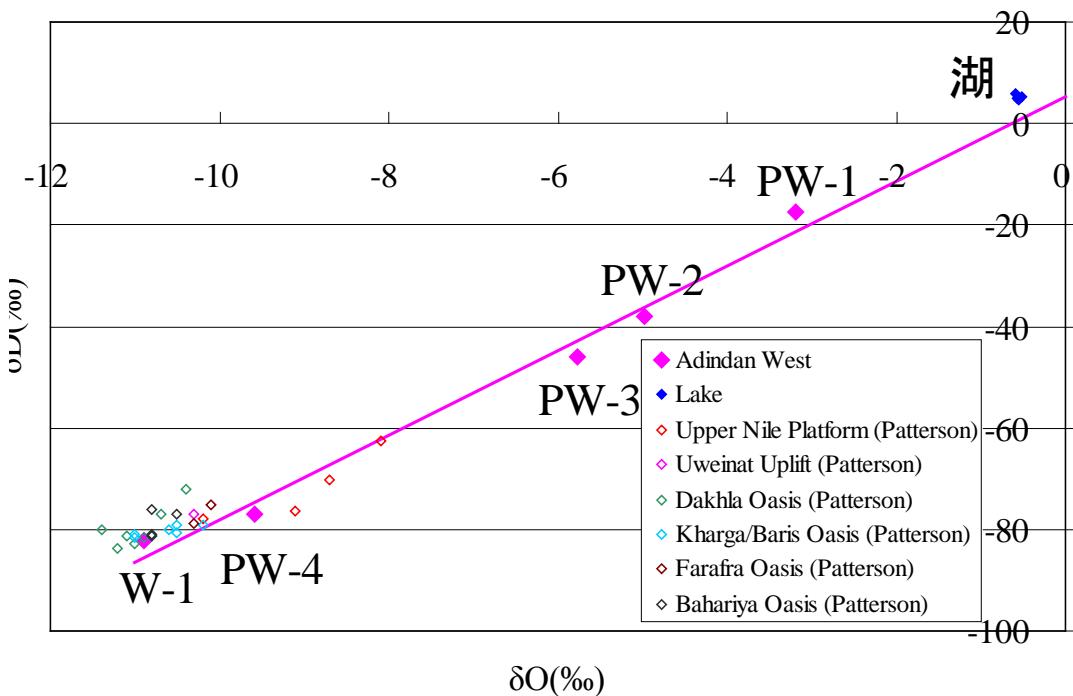


Adindan 地域では湖に近い井戸ほど重い同位体比を示しており、湖の水が地下に浸透していることが読み取れる。

# 湖水と地下水の混合

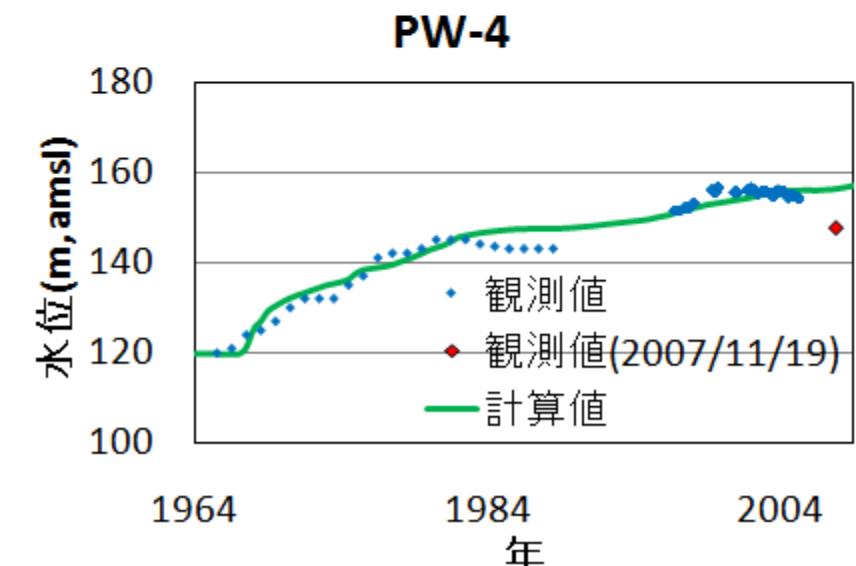
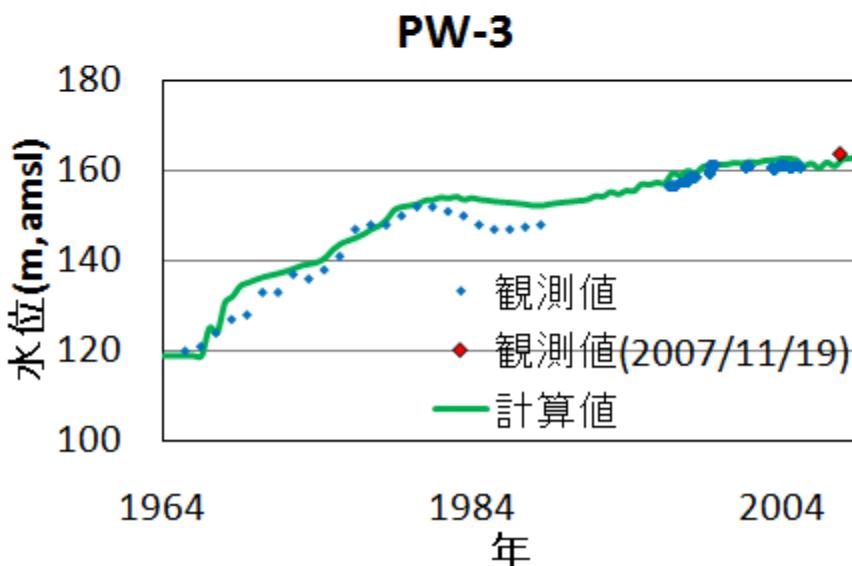
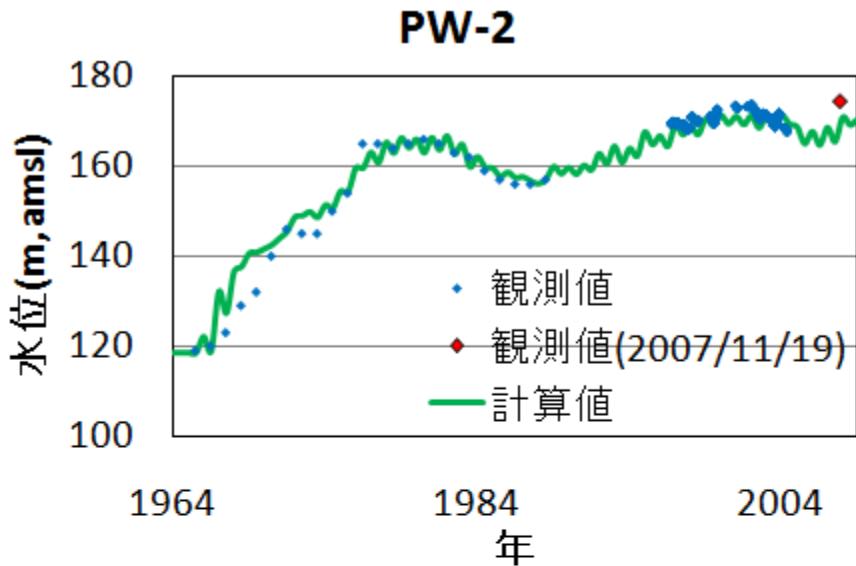
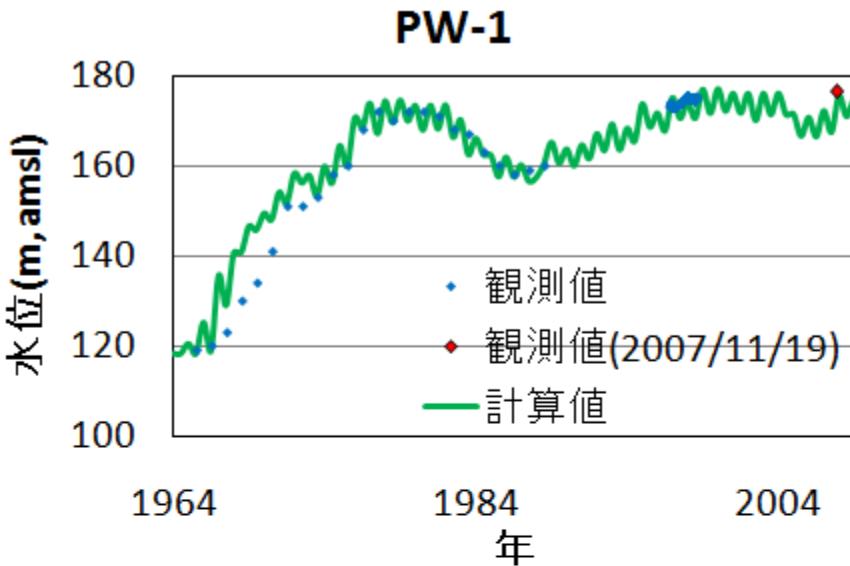


観測井における酸素水素安定同位体比

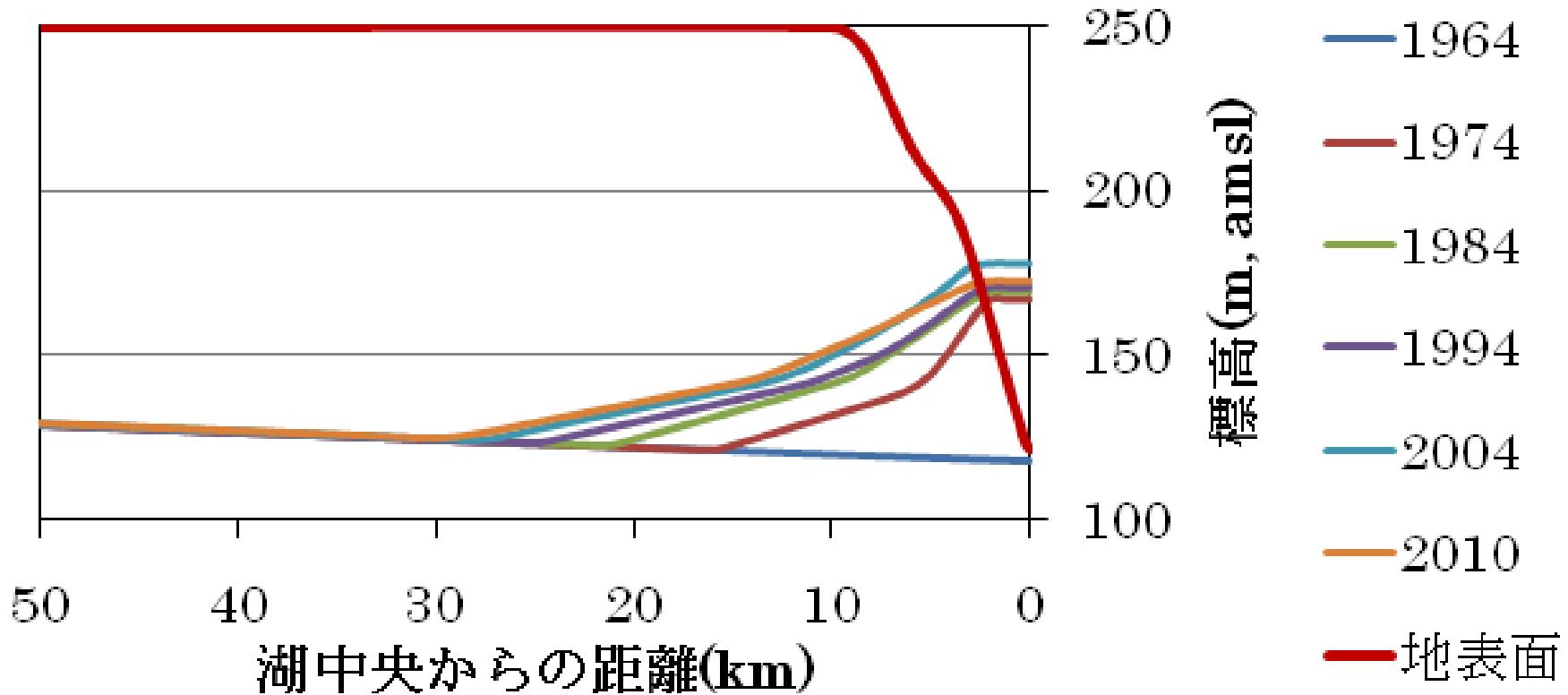


Adindan 地域では湖に近い井戸ほど重い同位体比を示しており、湖の水が地下に浸透していることが読み取れる。

# 計算値と観測値の時間変移

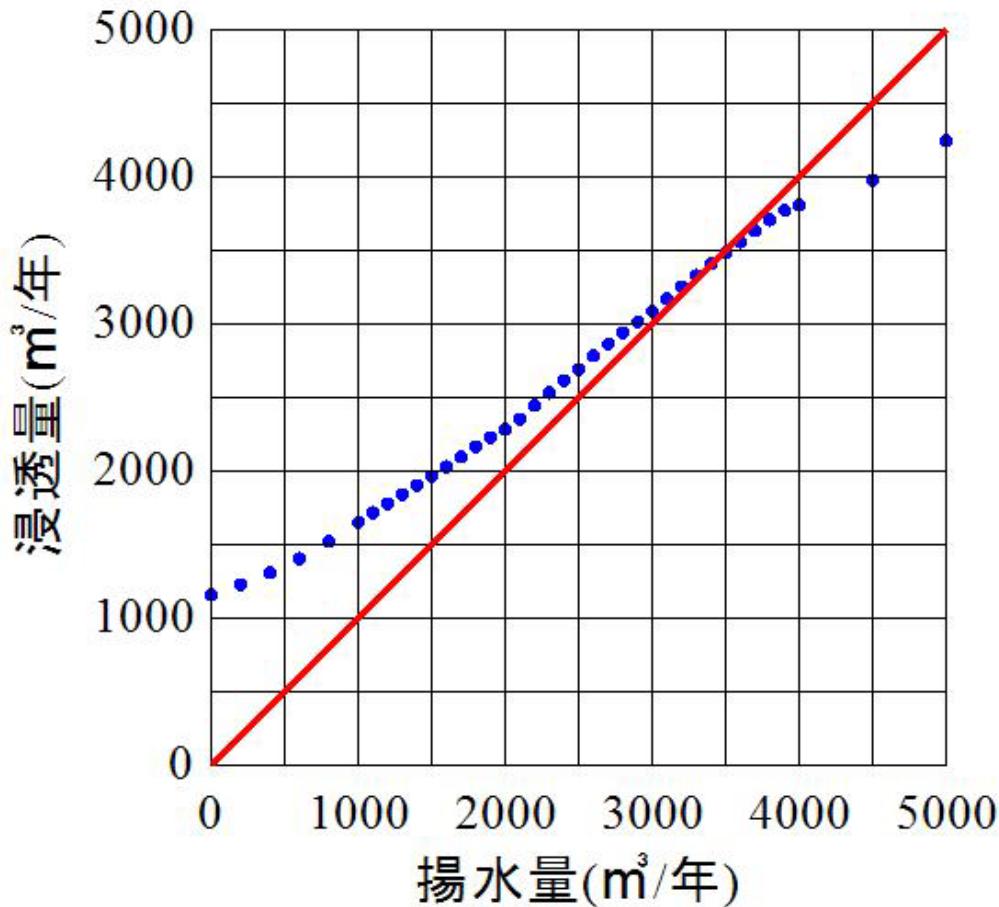


# 水位変動



湖中央から30km離れたあたりまで水位が上昇しており、湖水が浸透していることが表されている

# 湖中央から10km離れた地点で揚水



湖中央から10km離れた地点では単位奥行き当たり年間 $3400m^3$ の水を揚水すると、浸透量とつりあう

揚水を行わない場合

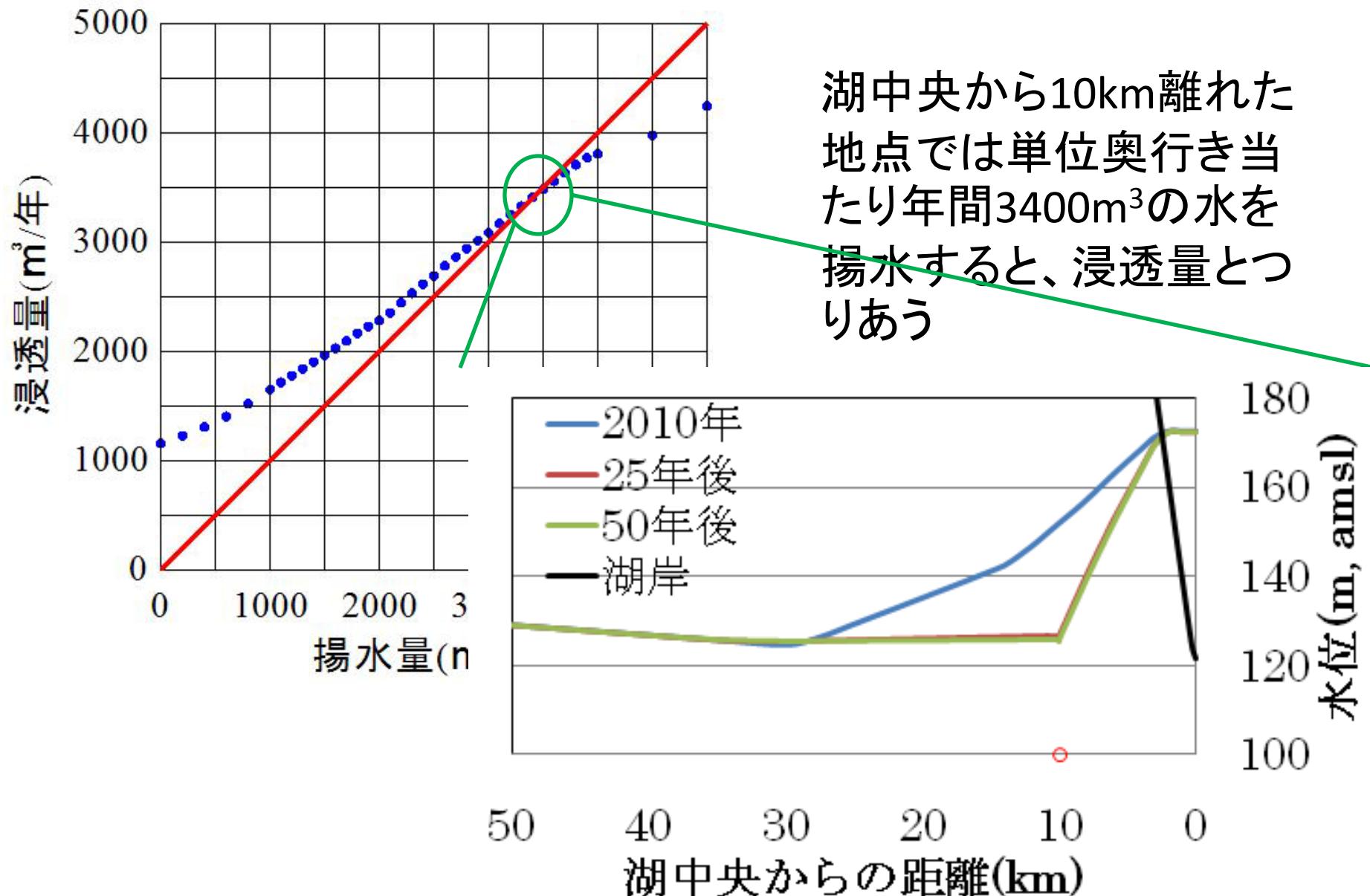
浸透量 :  $1161m^3$

揚水を行う場合

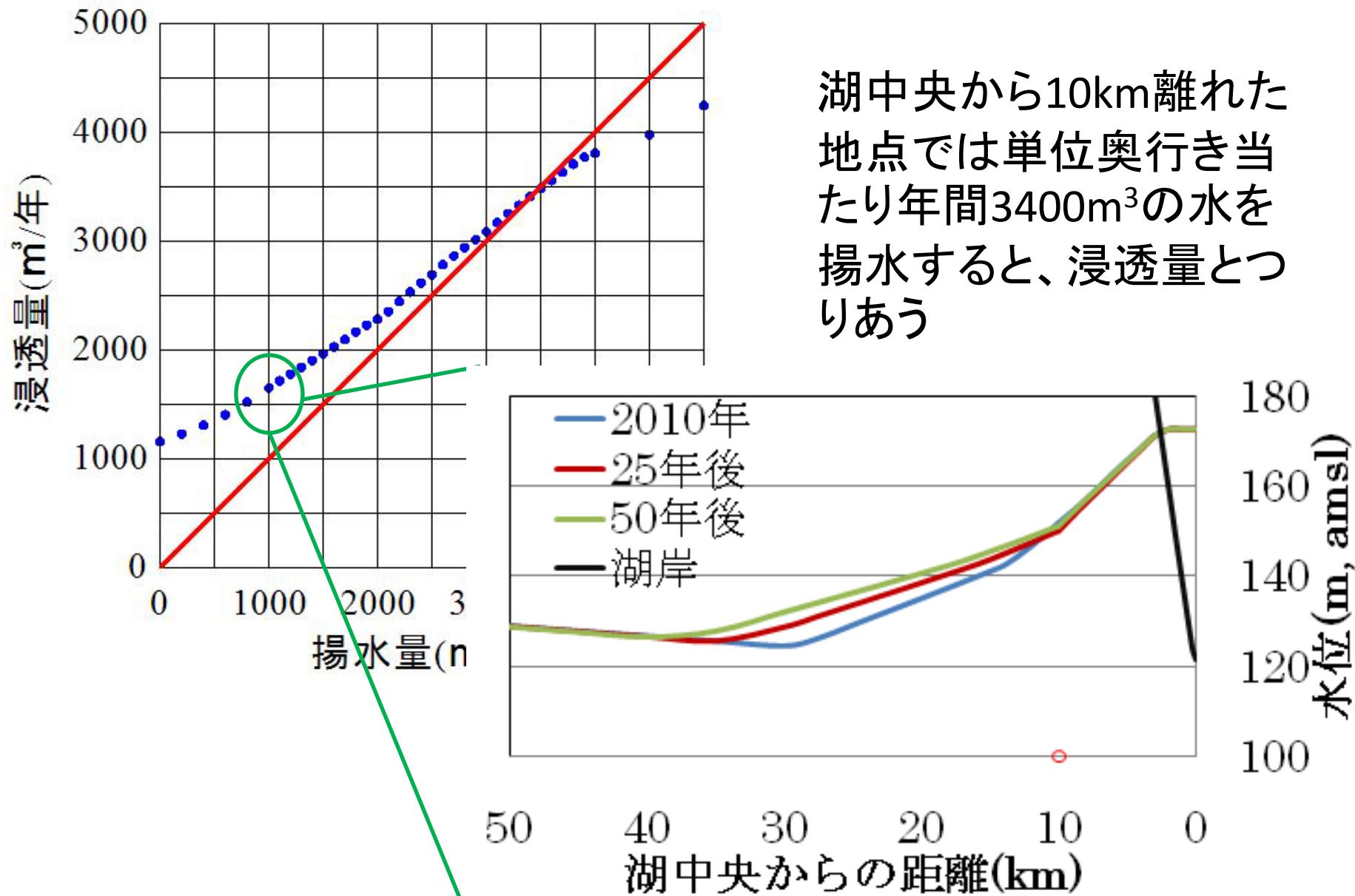
浸透量 :  $3410m^3$

(ともに単位奥行き当たり年間の浸透量)

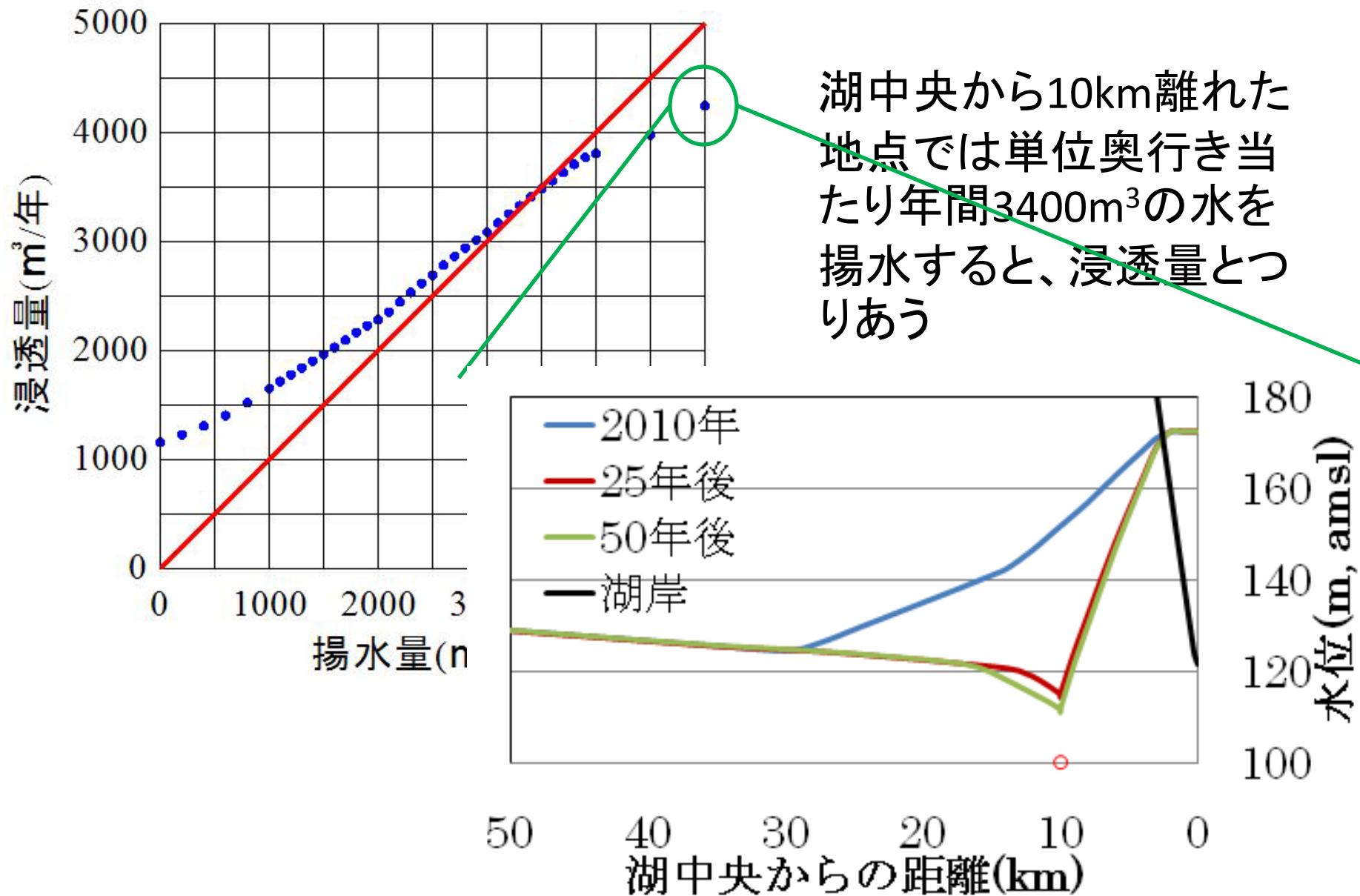
# 湖中央から10km離れた地点で揚水



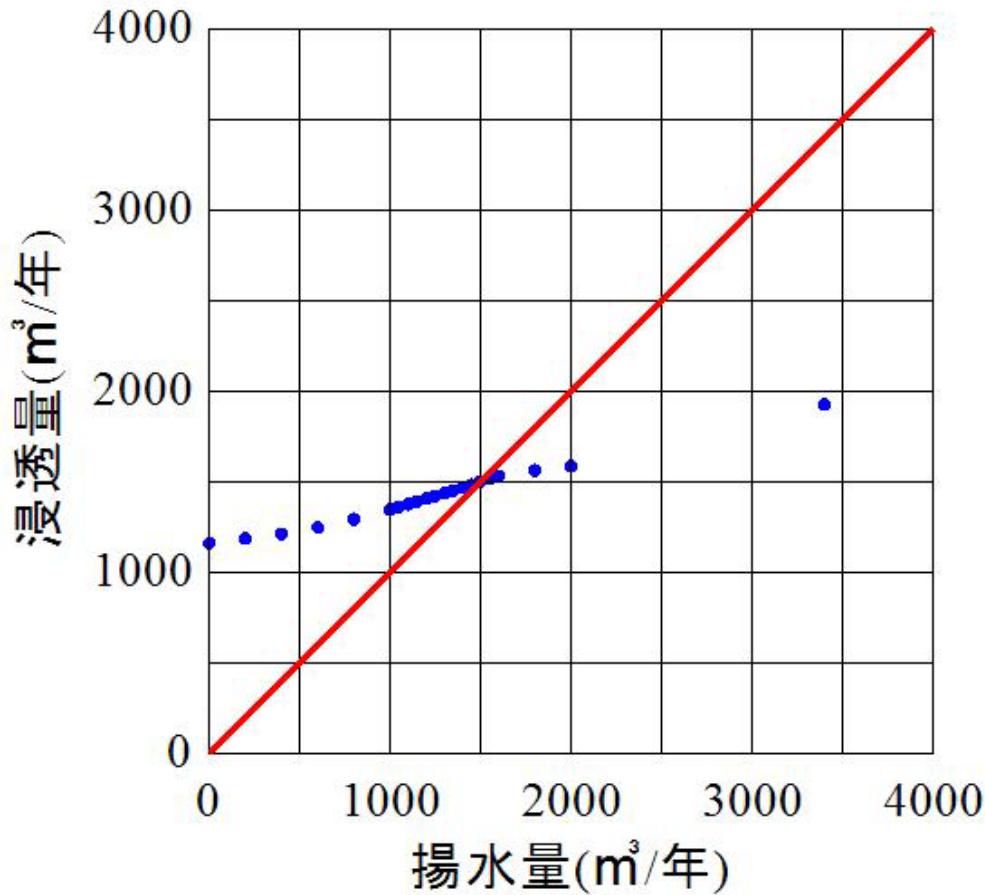
# 湖中央から10km離れた地点で揚水



# 湖中央から10km離れた地点で揚水

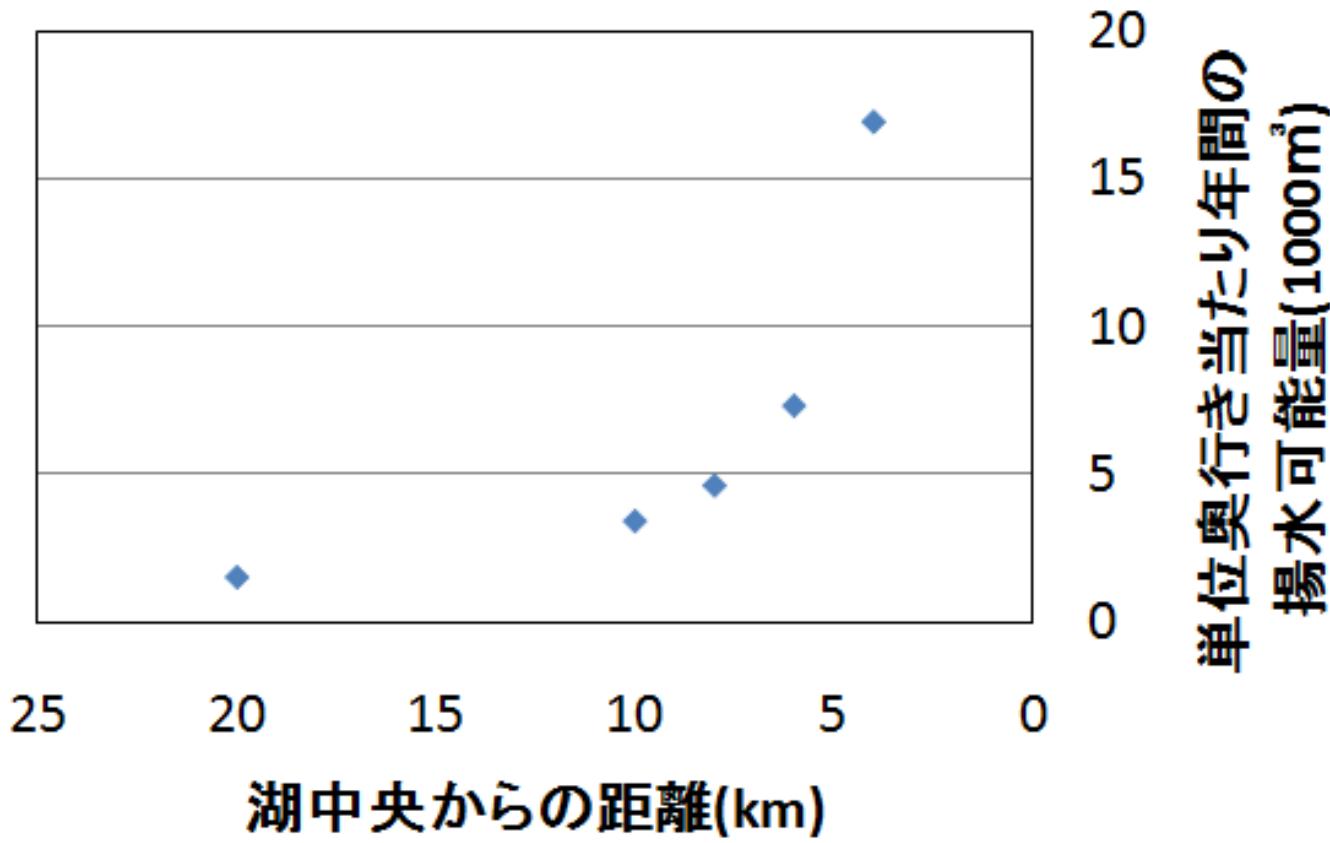


# 湖中央から20km離れた地点で揚水



湖中央から20km離れた地点では単位奥行き当たり年間 $1500m^3$ の水を揚水すると、浸透量とつりあう  
単位奥行き当たり年間 $3400m^3$ の水を揚水すると揚水量が浸透量を上回り持続可能な水資源開発がない

# 揚水位置と揚水可能水量の関係



揚水位置が湖に近いほど揚水可能量が増加する

# 地下水と人間のかかわり (特に途上国・乾燥地域において)

- 地下水は人類にとって主要な淡水資源である
- 地下水を非再生可能な資源として取り扱うことが必要な場合がある
- 地域の状況に適合した水利用を検討する上では地下水/表流水の両者の特性を理解することが極めて重要になる(総合流域水管理というコンセプト)

地下水に関しては:

直接見ることができない現象が対象

地下水を胚胎する地下の状況を完全に理解することはできない

水の量の議論のみではなく質とその変化についてもよく理解することが必要

乾燥地等では主要な水源であり、「非再生可能な資源」の性格を持つ地下水をどう利用し、管理するかが持続可能な社会を実現するために考えないといけないこと

# 水と人間のかかわり (地下)水を研究することの意義

- 人類にとって重要な資源である「水(淡水)」循環の把握 → 資源としての水
- 自然のプロセス/人間活動の結果としての水及び溶存物質挙動の理解と適切な対策の検討 → 物質移行をつかさどる水
- 持続可能な環境調和型地図利用(開発)のための自然環境情報取得 → 自然・人間系の構成要素としての水

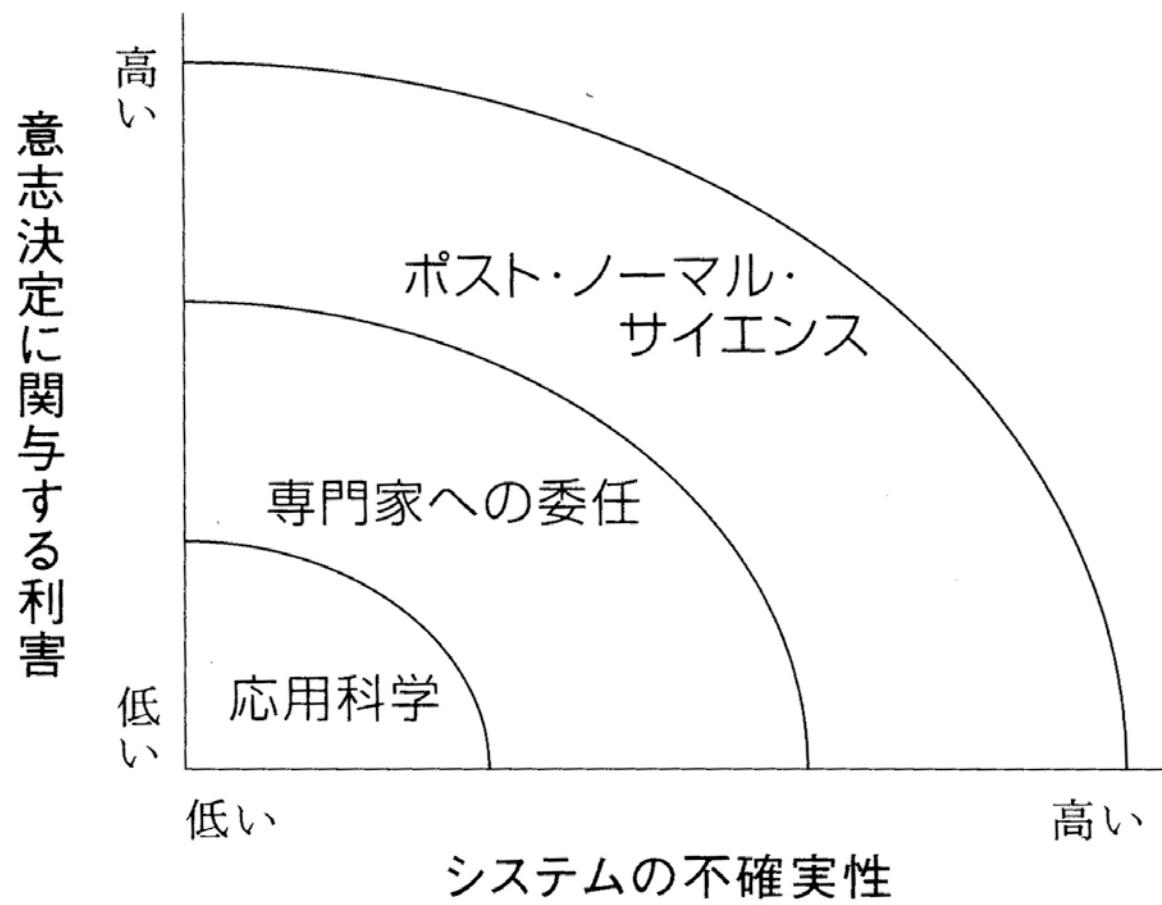


図 2 ポスト・ノーマル・サイエンス ラヴェッツ(1999) より。

# 21世紀は水の世紀 (20世紀…石油の世紀)

by Ismail Serageldin (世界銀行副総裁)

人類の生存にとって不可欠な水(淡水)  
はどのように挙動しているのだろうか

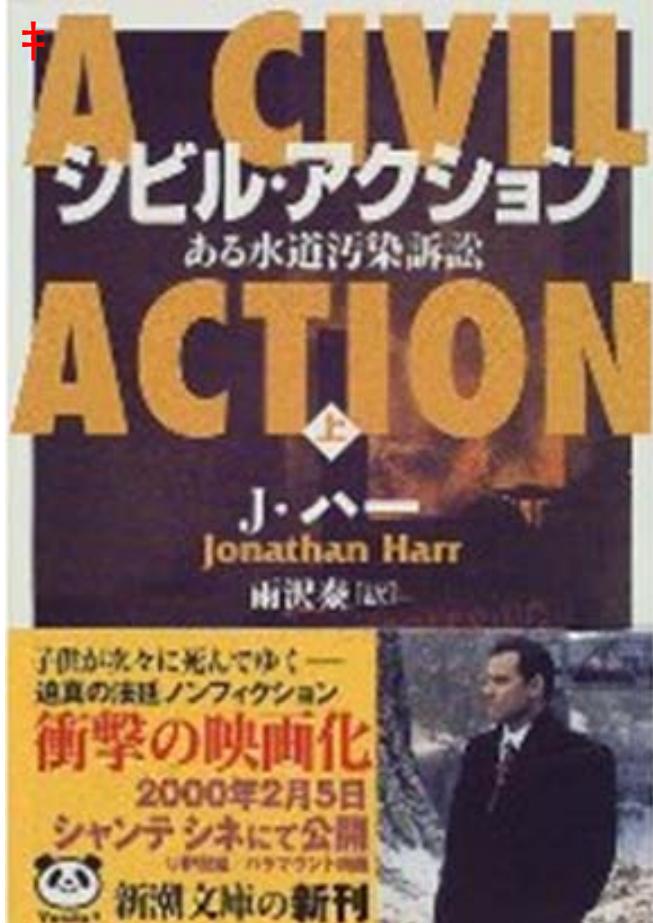
# 見えない巨大水脈 地下水の科学

使えばすぐには戻らない「意外な希少資源」

日本地下水学会／井田徹治



日本地下水学会/井田徹治  
見えない巨大水脈 地下水  
の科学  
講談社ブルーバックス  
2009  
¥987



J・ハー（雨沢泰 訳）  
シビルアクション ある水道  
汚染訴訟（上・下）  
新潮文庫  
2000  
¥780+740



ジャレド・ダイヤモンド（榆  
井浩一 訳）  
文明崩壊 滅亡と存続の命  
運を分けるもの（上・下）  
草思社  
2005  
¥2,100×2

+

NTT出版  
ライブ・ラリー  
レゾナント

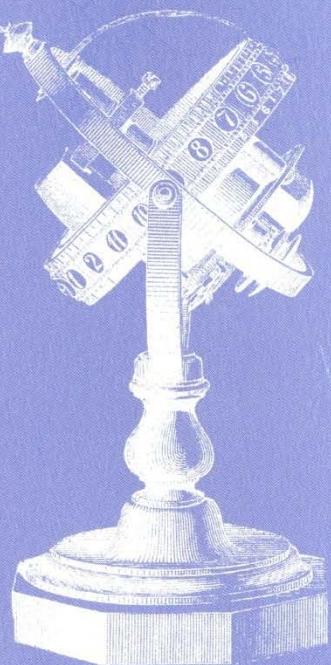


# トランス・サイエンスの時代

科学技術と社会をつなぐ

## 小林傳司

Kobayashi Tadashi



NTT出版

小林傳司  
トランス・サイエンスの時代  
NTT出版  
2007  
¥1800+税