

第9話 環境同位体水文学

—水にラベルを付ける—

近藤昭彦

自然界における水循環を追跡するトレーサーとして重要な同位体

● デューテリウム (^2H またはD)

水素の同位体で質量数が2
安定同位体

● トリチウム (^3H またはT)

水素の同位体で質量数が3
放射性同位体

● 酸素-18 (^{18}O)

酸素の同位体で質量数が18
安定同位体

表 8.3 水文科学で利用される環境トレーサー (田瀬, 2003a)

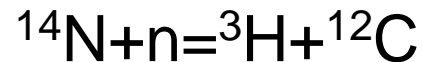
元素物質	安定放射性 (半減期)	主な起源	主な利用
$^2\text{H}, \text{D}$	安定		涵養源・プロセス・年代測定
^3H	12.3年	核実験・宇宙線	年代測定
^3He	安定	^3H 崩壊・原子力産業	年代測定
^4He	安定	α 崩壊	供給源・年代測定
^{13}C	安定		供給源・プロセス
^{14}C	5,730年	宇宙線・核実験	年代測定
^{15}N	安定		供給源・プロセス
^{18}O	安定		涵養源・プロセス・年代測定
^{34}S	安定		供給源・プロセス
^{36}Cl	301,000年	宇宙線・核実験・核反応	年代測定
^{39}Ar	269年	宇宙線	年代測定
^{40}Ar	安定	原子力産業	年代測定
^{81}Kr	210,000年	宇宙線	年代測定
^{85}Kr	10.72年	原子力産業	年代測定
^{87}Sr	安定		供給源・プロセス
^{129}I	1.57×10^7 年	宇宙線	年代測定
^{222}Rn	3.82日	^{226}Ra 崩壊	プロセス
^{238}U	4.47×10^9 年	始原性	年代測定
^{232}Th	1.40×10^{10} 年	始原性	年代測定
フロンガス	その他	人為起源	年代測定
SF_6	その他	人為起源	年代測定

[安定同位体を含む水分子の存在比]

$$\text{H}_2^{16}\text{O} : \text{HD}^{16}\text{O} : \text{H}_2^{18}\text{O} = 997,680 : 320 : 2,000 \text{ ppm}$$

トリチウム

上層大気中で主として宇宙線の中性子の作用により生成



その99%以上がHTOの形で水分子を作って水循環の過程にある

→ソースが大気中にある

●半減期 12.26年

β 崩壊で壊変し、 ^3He に変わる

●単位：トリチウム・ユニット(TU)

10^{18} 個の水素原子の中にT原子が一つ含まれている場合

(分野によってTRを使うが、一般に水文学分野ではTUを用いる)

トリチウムの循環



- 大気上層で生成
- HTOとして成層圏にしばらく滞留
- 圏界面を横切り、対流圏に入る
- HTOはH₂Oと良く混合され、水循環に加わる
- β 崩壊によりT濃度は一方的に減少

自然レベルは約10TUでバランス

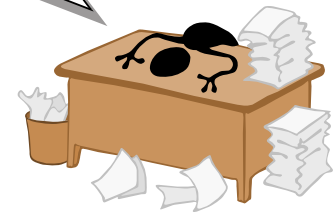
- 1952年以降、熱核実験により大量のトリチウムが大気中、とくに成層圏に放出

平衡状態は崩壊

but 降水中の時系列データを利用した水循環研究も可能になった

注) 1UT = 0.118Bq/l

ところが、



トリチウムの地球的分布

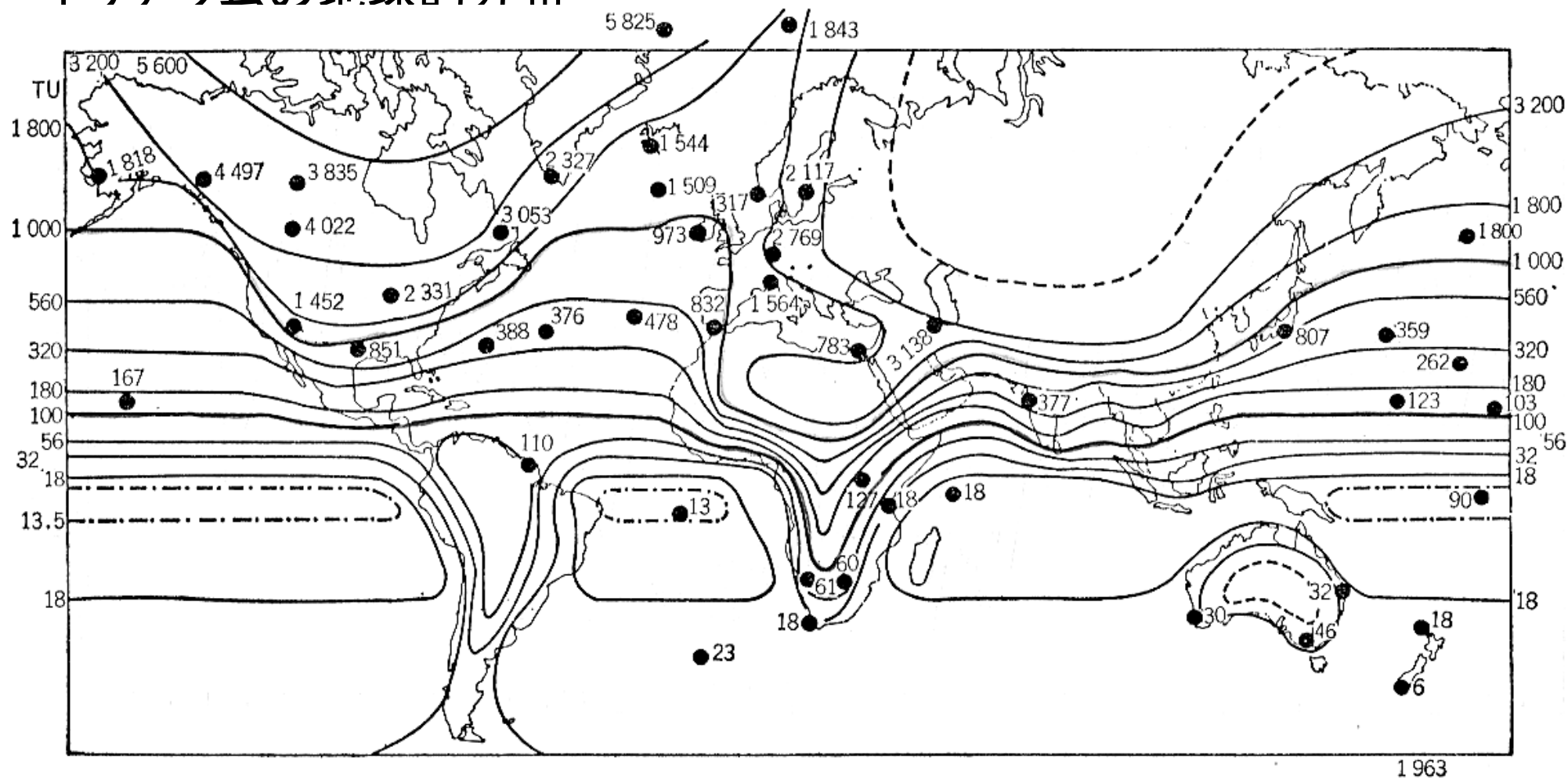


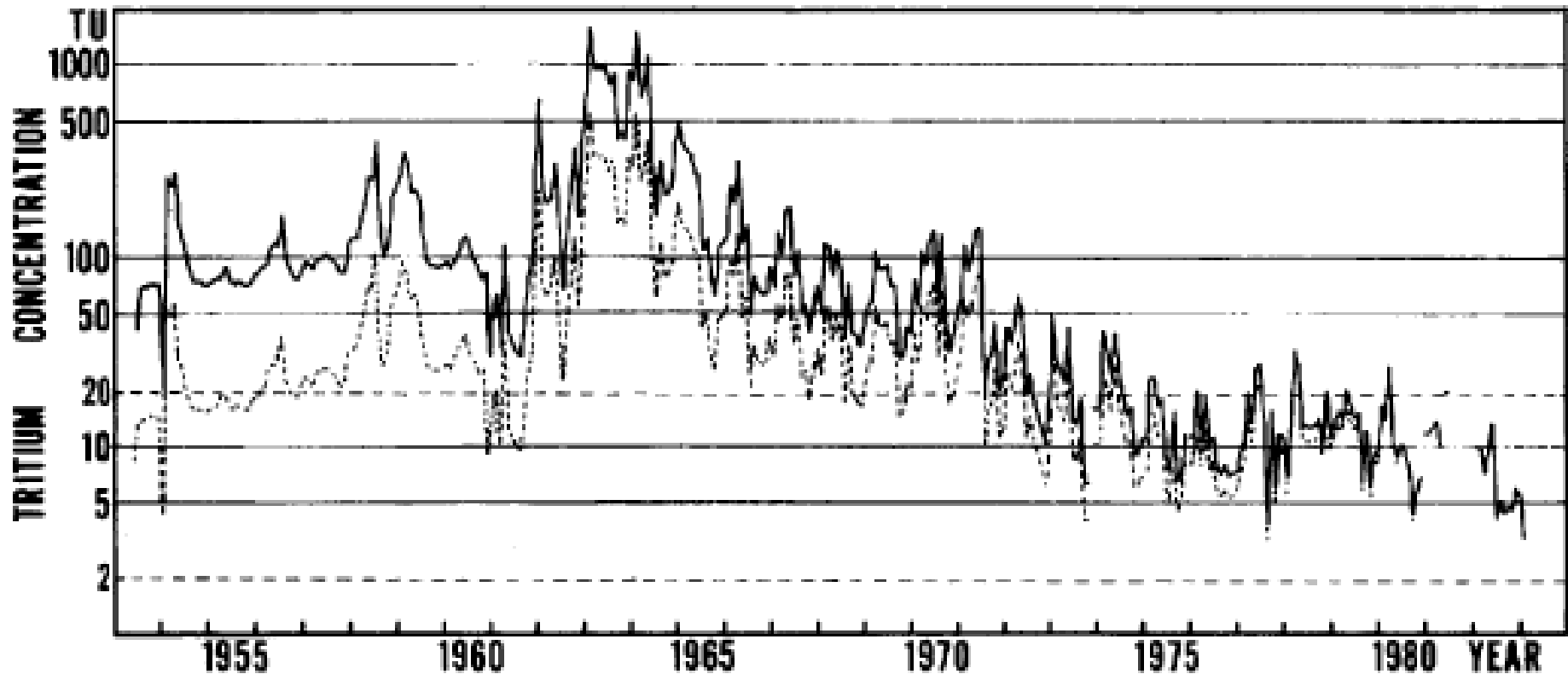
図 10.5 1963年における降水のトリチウム濃度の地理的分布 (Guidebook on Nuclear Techniques in Hydrology, Wien, IAEA, 1968 による)



1963年は降水中のトリチウム濃度がピークを記録した年

注) 1000TU=118Bq/l、5000TU=590Bq/l

降水中のトリチウム濃度



- トリチウム濃度の自然レベルは10TU程度
- その存在の発見とほぼ同時に熱核実験が開始された
- 1963年にピーク
- その後、核実験による変動を経て、現在はほぼ天然レベル

どんな利用法が考えられるか



復習

下総台地の地下水—養老川流域



台地

台地

低地

養老川下流域の台地—低地系では
どのような地下水の流れがあるか

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

© 2007 Google

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

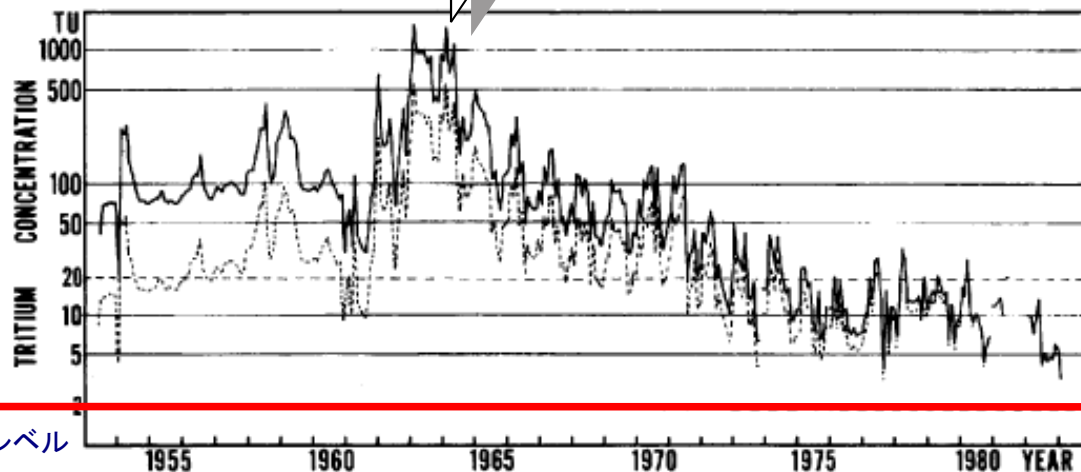
ストリーミング 100%

上空

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

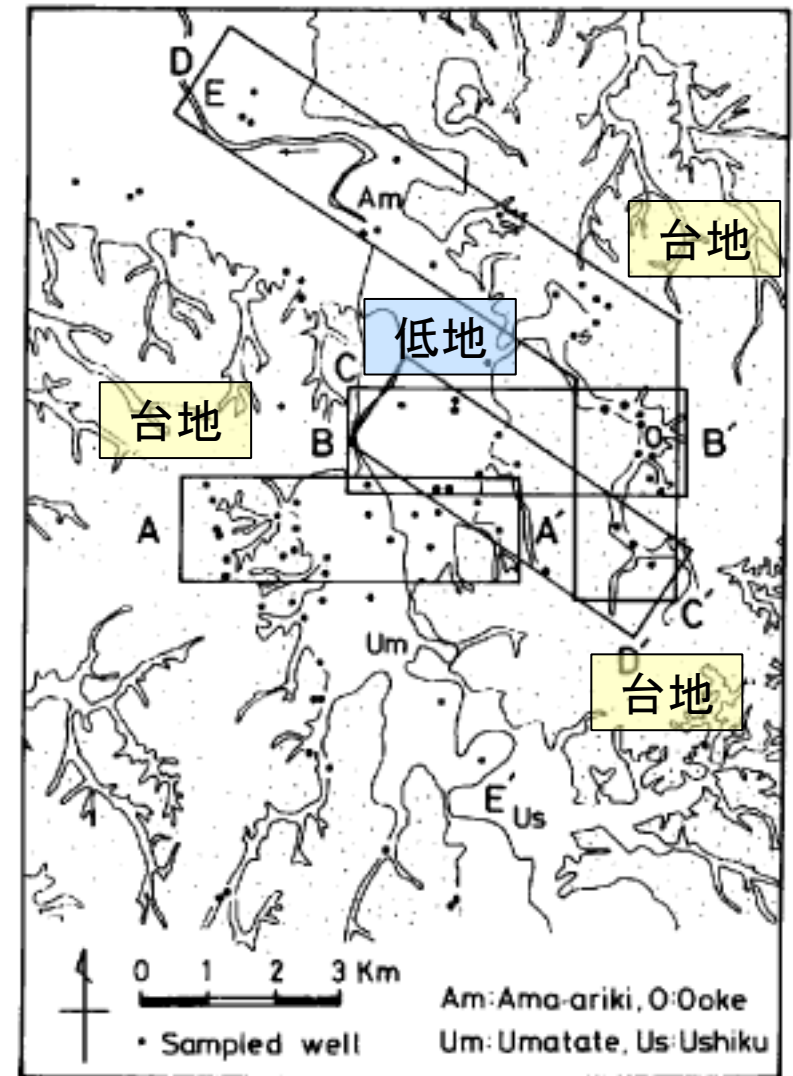
東京および筑波における降水のトリチウム濃度

1963年に濃度ピーク
雨に濡れると禿げる!?



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

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



養老川下流域の台地—低地—台地の地形の連鎖

台地で涵養された地下水は低地に流出する—水は低きにつく—

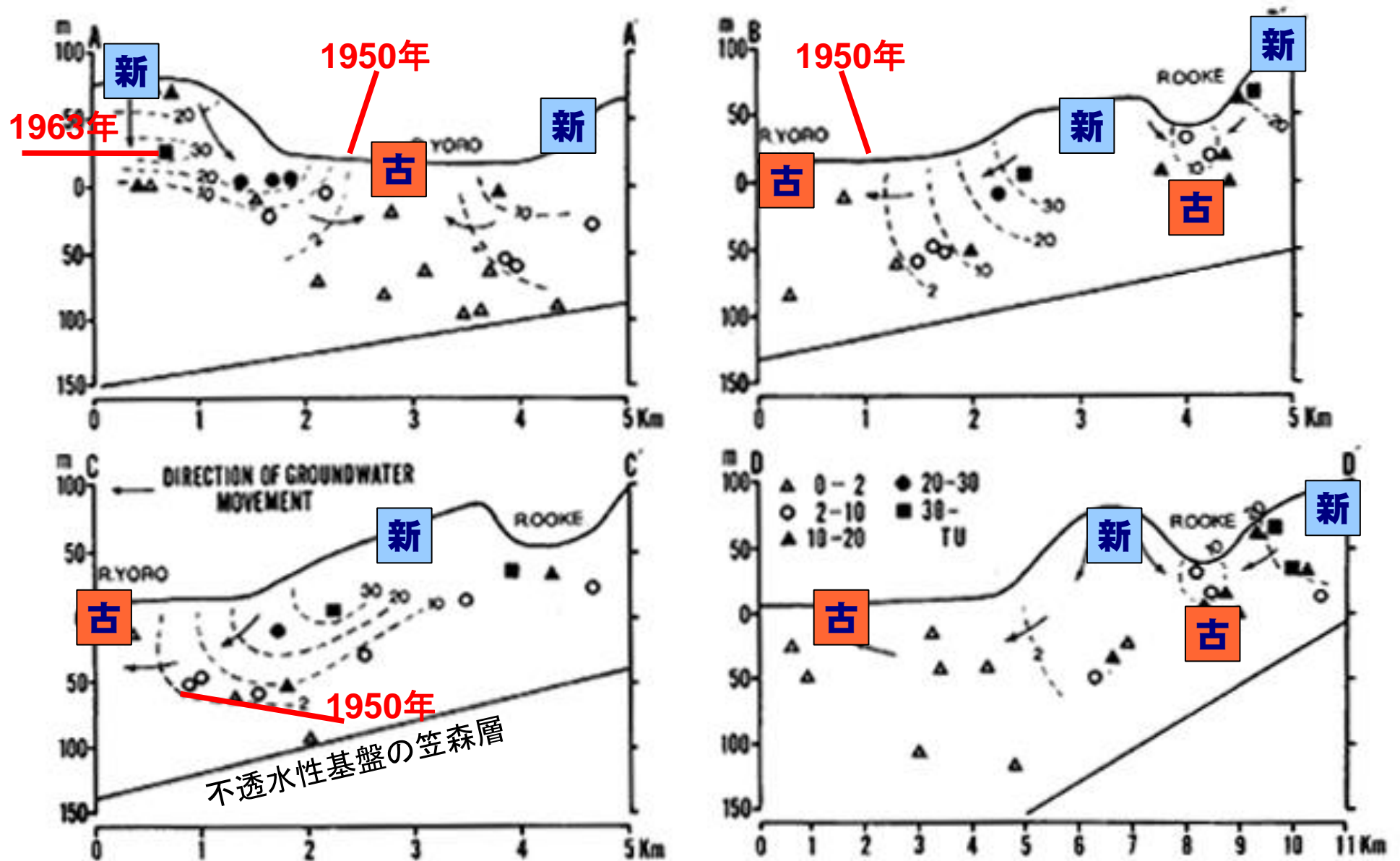


Figure 13 Estimated directions of groundwater movement based on Figure 12.

(近藤、1985)

近藤昭彦(1985)：下総台地南縁部の小流域における渇水期の流量と地形との関係について

なぜ、小流域の比流量が異なるのか？

日本の河川の基底流量1mm/day

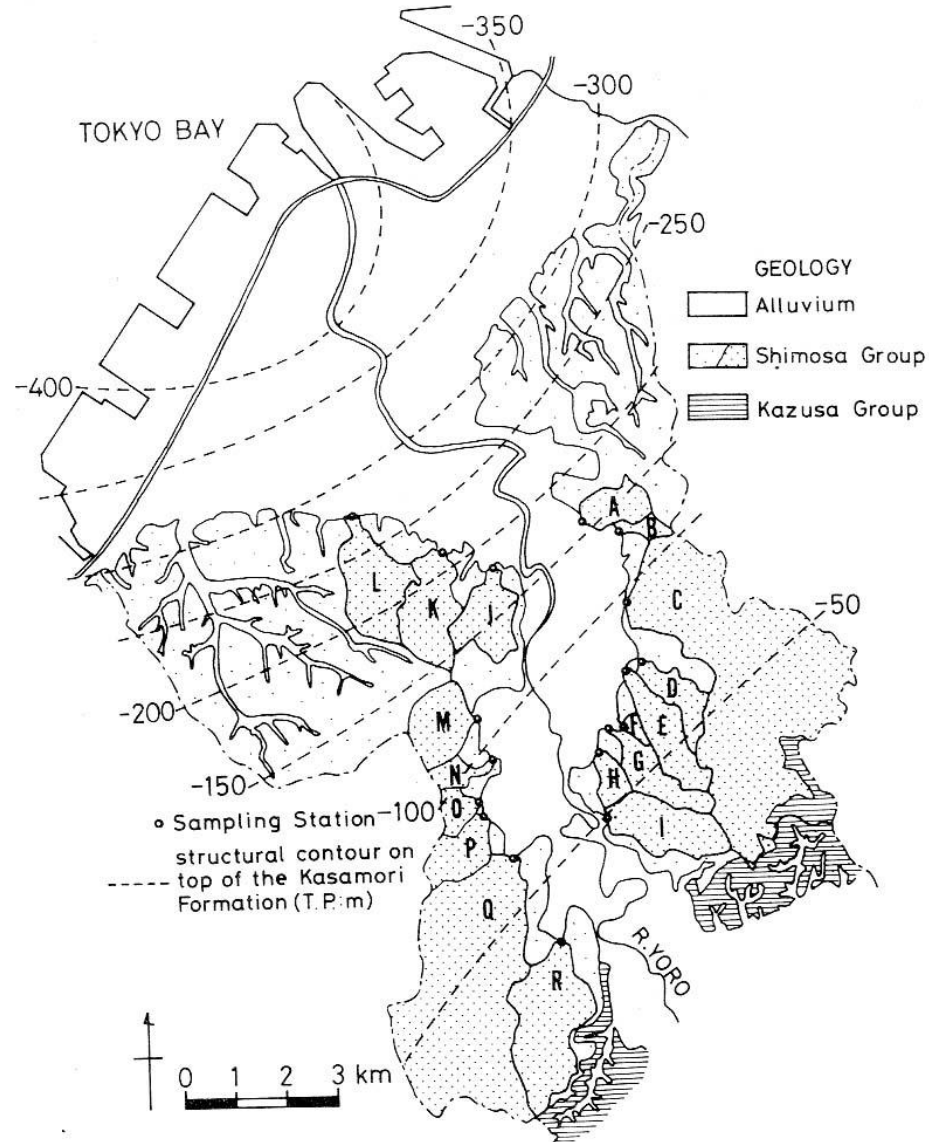


Fig. 1 Location of the study area.

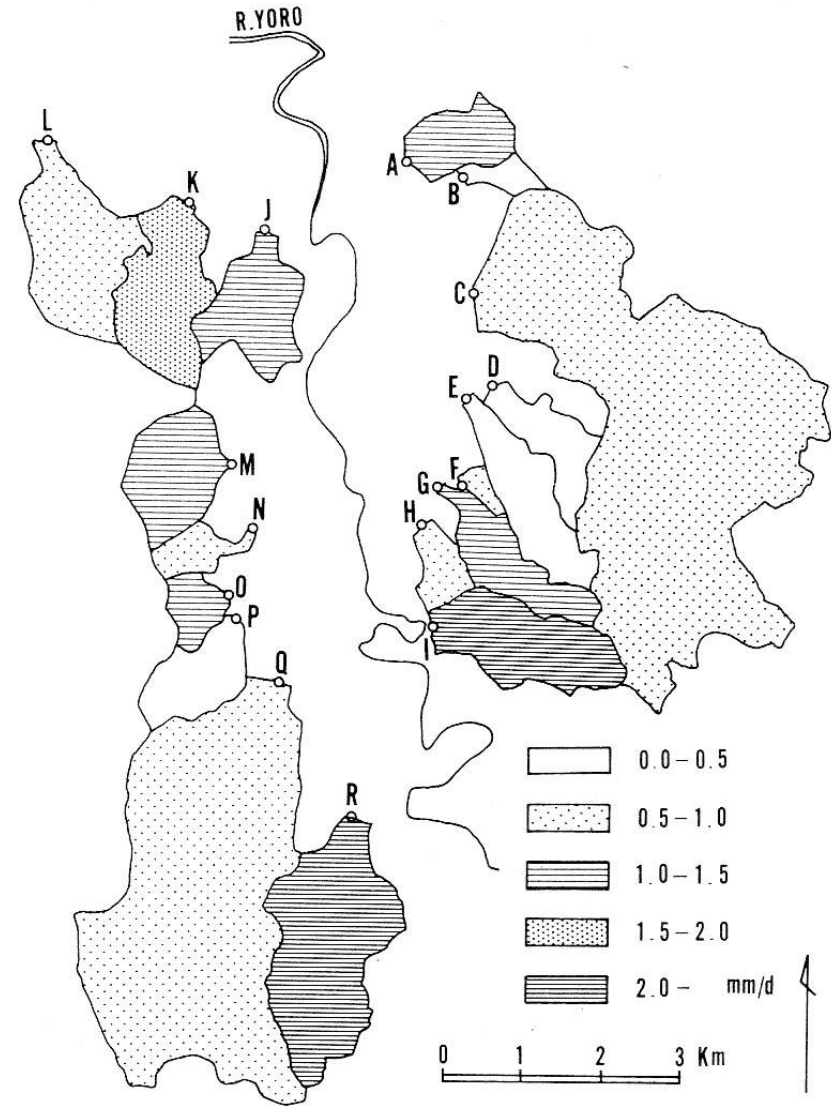
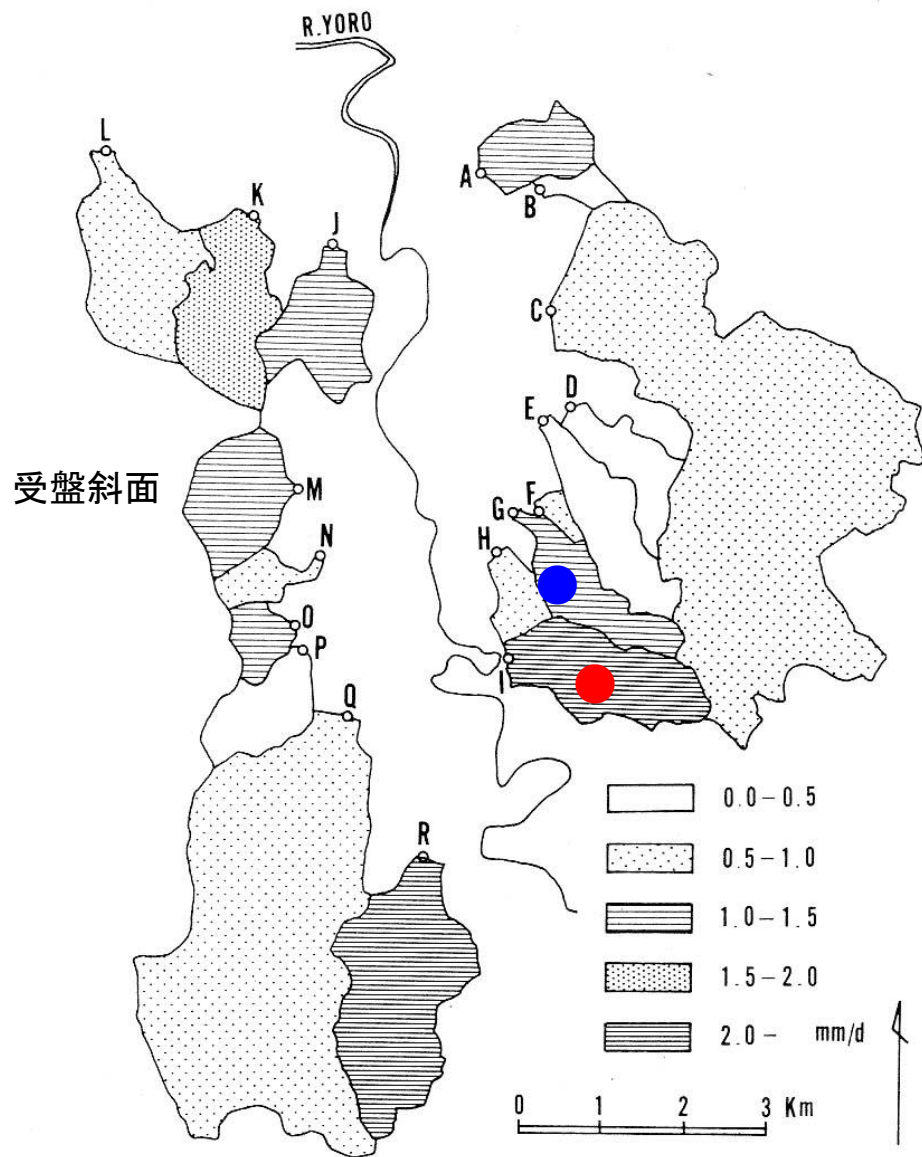


Fig. 3 Daily discharge in mm H₂O in dry season.

河川水の滞留時間は小流域ごとに異なる

流出水のトリチウム濃度が高い → 比較的古い水
 低い → 最近の水



Basin	Nov. 1982	Jan. 1983
A	11.9	16.8
B	10.4	17.3
C	16.8	14.8
D	10.4	5.6
E	9.5	NF
F	11.2	9.6
G	7.8	8.5
H	9.0	12.1
I	22.6	21.8
J	12.5	14.7
K	9.3	13.4
L	NM	12.2
M	13.9	9.9
N	19.6	14.6
O	12.6	13.6
P	7.5	6.1
Q	13.1	12.1
R	13.4	NM

Note) NF: not flowed, NM: not measured.
 UNIT: TU

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

流水の滞留時間が比較的長い流域は大きな地下水流域を獲得

I流域に隣接したC流域の上流には多くのニックポイント(遷急点)
→化石谷(abandoned valley)

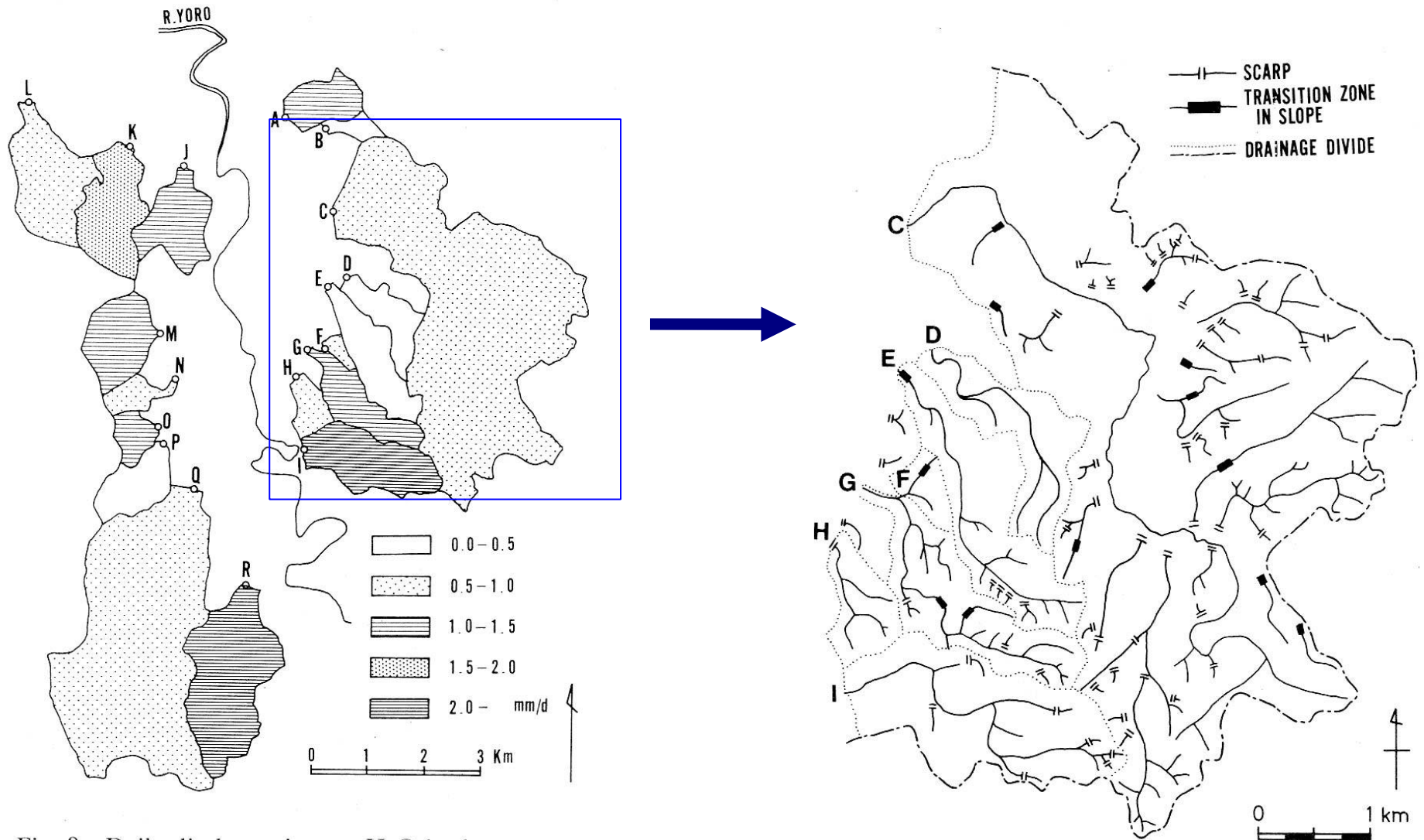
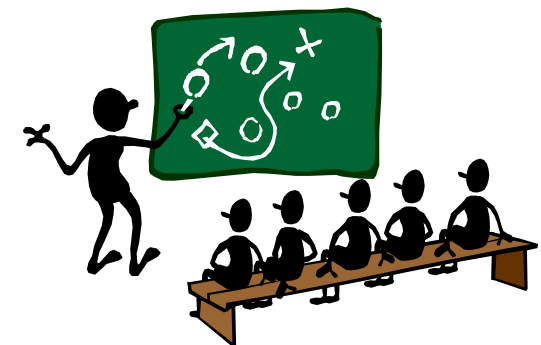
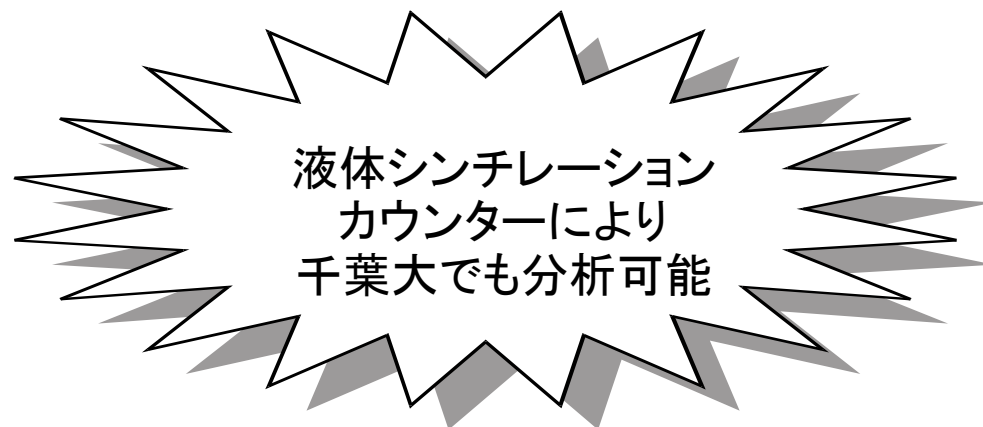


Fig. 3 Daily discharge in mm H₂O in dry season.

トリチウムを始めとする放射性同位元素の水循環研究への応用について考えよう

- ・T濃度の時系列変化を用いた地下水の年代測定
- ・T濃度の時系列変化とモデルによる地下水や湖沼の滞留時間の推定
- ・Tの収支を用いた土壌水の浸透機構の解明
- ・T濃度の計時変化を用いた河川水の流出成分の分離
- ・その他



デュートリウムDと酸素-18



- ソースは海洋
- その平均値は標準平均海水 (SMOW)

Standard Mean Ocean Water

- 濃度の表示

SMOWからのずれの千分率

$$\delta \text{ 値} = (R_{\text{sample}} / R_{\text{standard}} - 1) \times 1000$$

δ 値が大きい	→	重い同位体に富む
小さい	→	軽い同位体に富む

同位体分別 (fractionation)

同位体を含む重い水は、普通の水より飽和水蒸気圧がやや低い
→蒸発や凝結の過程で、同位体を含む水は分別される

$$\alpha = p/p'$$

ここで、 α : 分別係数、 p 、 p' : 普通の水と重い水の蒸気圧 ($p > p'$)

常温における α の値 :

表 15 同位体 (D および ^{18}O) を含む水の分別係数
(Dansgaard, 1964).

HDO : 約 1.08
 H_2^{18}O : 約 1.009

温度 ($^{\circ}\text{C}$)	α_D	α_{18}
100	1.029	1.0033
80	1.037	1.0045
60	1.046	1.0058
40	1.060	1.0074
20	1.079	1.0091
0	1.106	1.0111
-10	1.123	1.0123
-20	1.146	1.0135



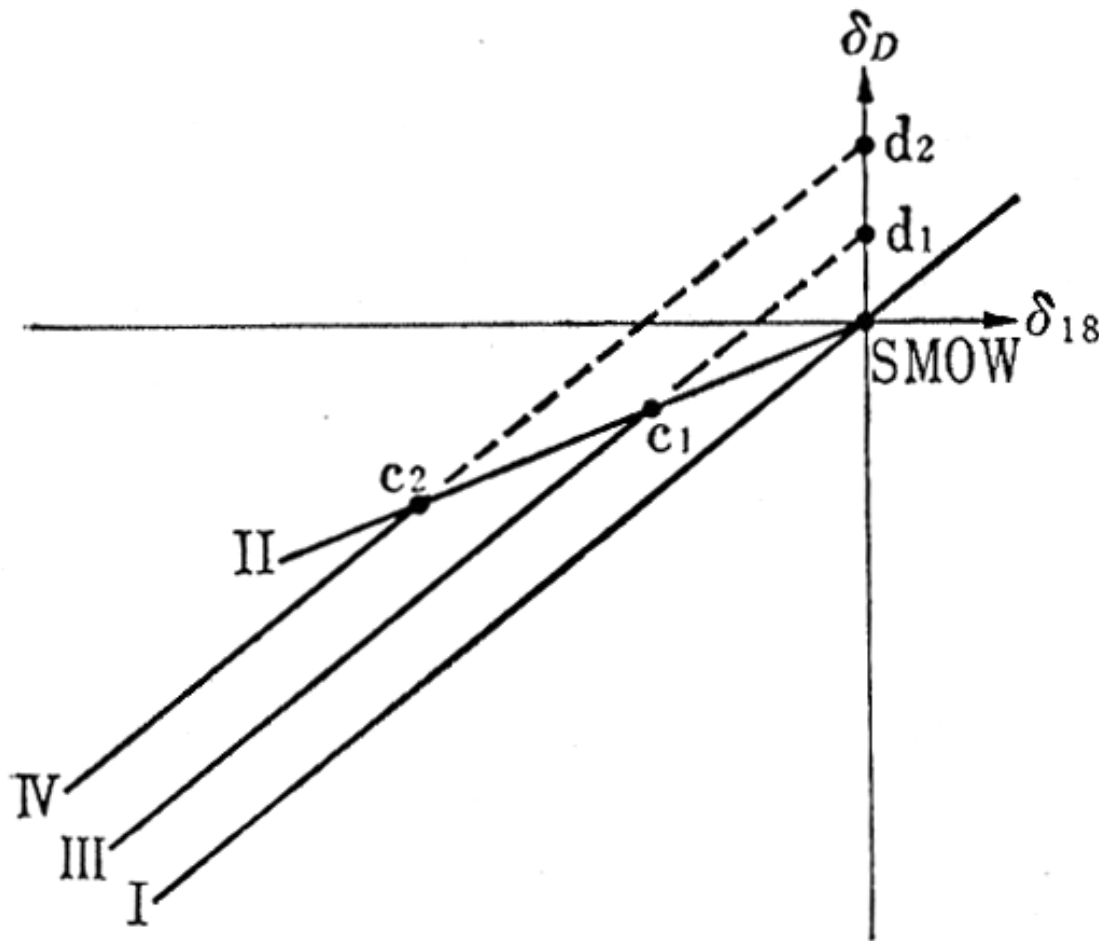
同位体分別の特徴

これを知ると様々な水循環研究に応用することができる

- 同位体の質量差による物理的、化学的性質のわずかな違いによって濃度差が生じる
- 同位体の相対的な質量差が大きいため、一般には軽い元素の方が同位体分別はより大きい
- 分別係数は温度が上昇すると1に近づく
- 分別を引き起こす最も重要な現象は、蒸発と凝結
- 海洋から蒸発する水蒸気は、海水に比較して ^{18}O は約12~15‰、Dは80~120‰程度少なくなる
- 大気中の水蒸気が継続的に冷却、凝結の過程を経て雲を形成し、降水となれば、気化しにくい重い分子が優先的に凝結するので、当初同じ蒸気団から連続的に降水があれば、重い同位体は次第に減る
- 降水が形成されたときの温度が低ければ降水の δ 値は減少

δ ダイアグラム

横軸に $\delta 18$ 、縦軸に δD をとって試水の値をプロットした図
→ここから様々な情報を読み取ることができる



- 凝結がSMOWから出発すれば、原点を通る
- 勾配は約8になる(液相と気相が平衡状態、すなわちレイリー過程で凝結した場合)
- 海洋から蒸発したばかりの水蒸気は、強制蒸発(たとえば、乾燥大気中の落下による運動学的効果)による場合には $\delta 18$ に対する δD の値が相対的に小さい
→SMOWから出発すれば曲線 II になる
- その後平衡状態で降水が形成されれば、また傾きは約8になる

図 15 δ ダイアグラム

初期の降水

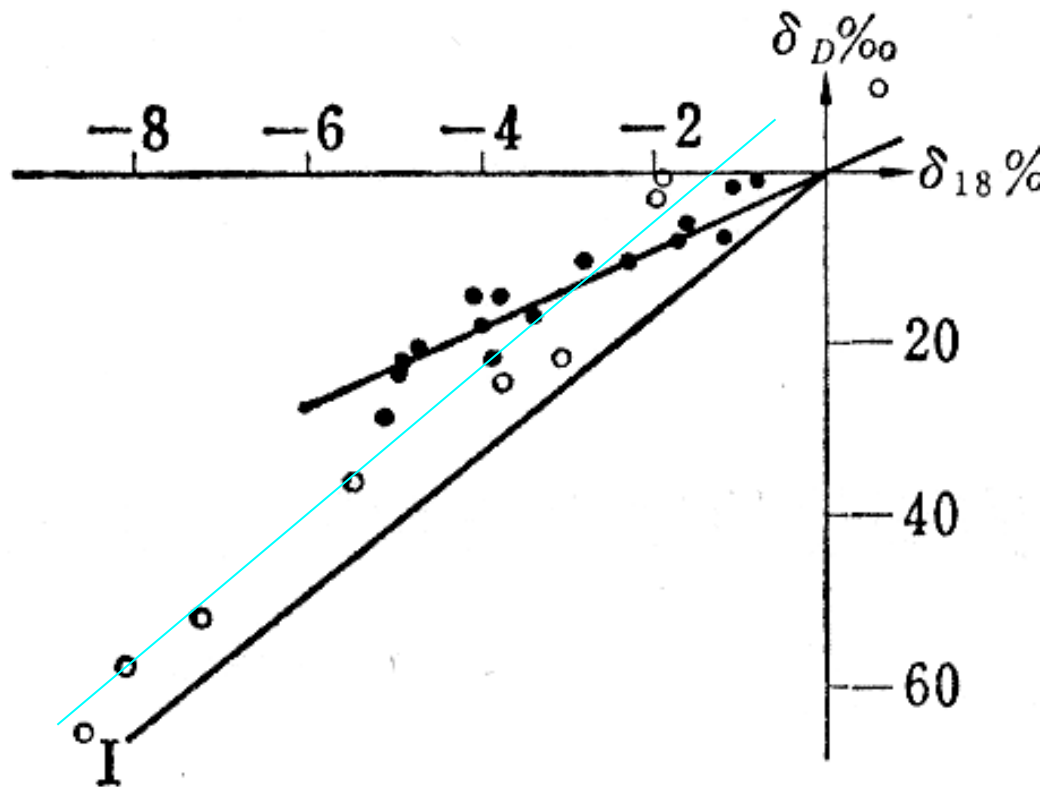


図 16 島の降水の δ ダイアグラム (Dansgaard, 1964).

- 熱帯および亜熱帯の島
- それ以外の島

● 熱帯および亜熱帯の島では勾配が4.6

● 降水が平衡状態の凝結過程で生じたものではない

● 原点を通る → 海洋から蒸発したばかり

● その他の島は傾き8 → 平衡状態の凝結



水は低緯度の海域で蒸発し、中高緯度に運搬され、凝結して地表面に落ちる

天水線

基本的には、気温が低くなる、あるいは緯度が高くなるとともに、同位対比はある線上に沿って小さくなる→温度効果、緯度効果

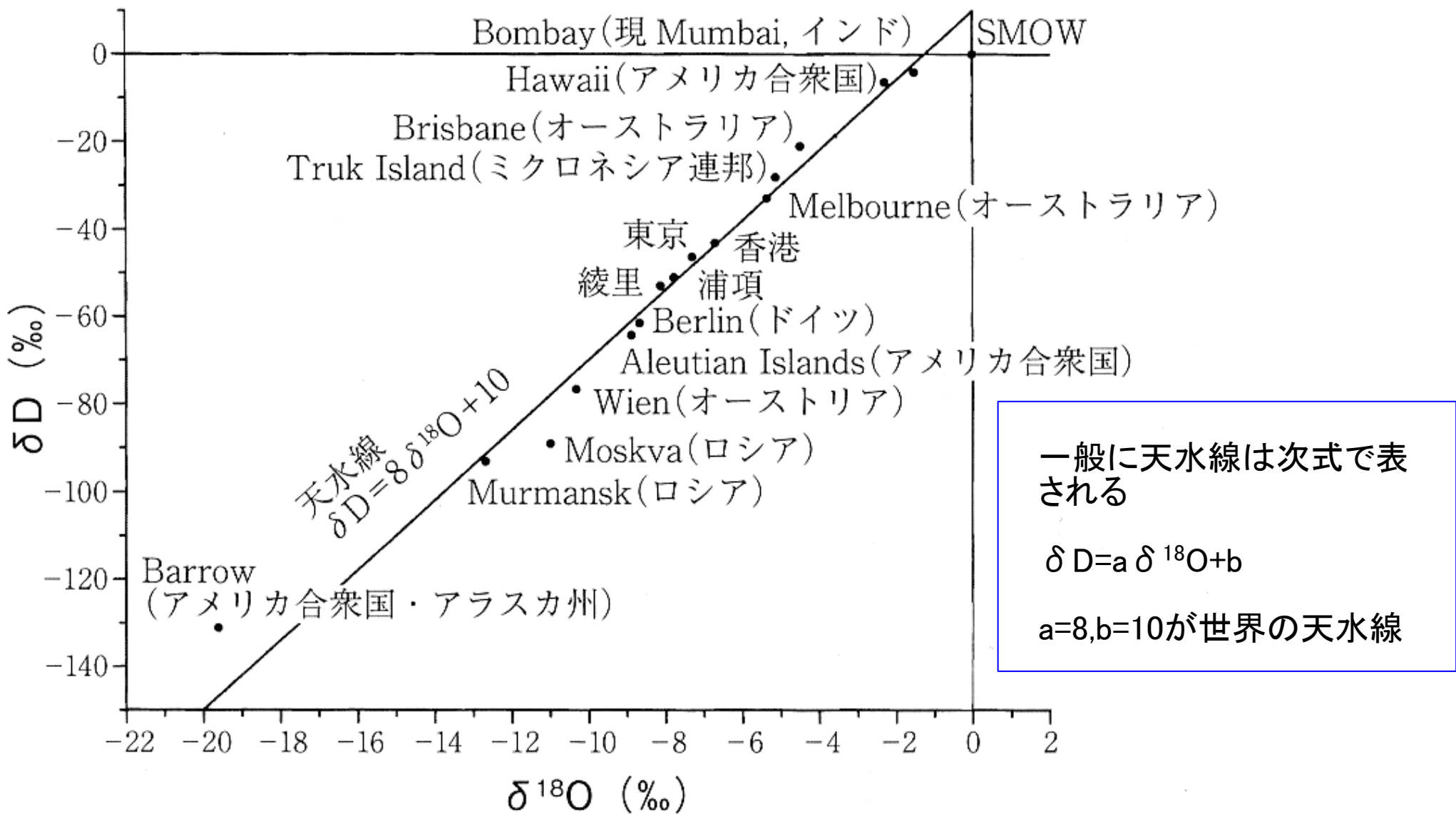


図 8.3 世界各地の降水の δ ダイアグラム (田瀬, 1997).

天水線 (2)

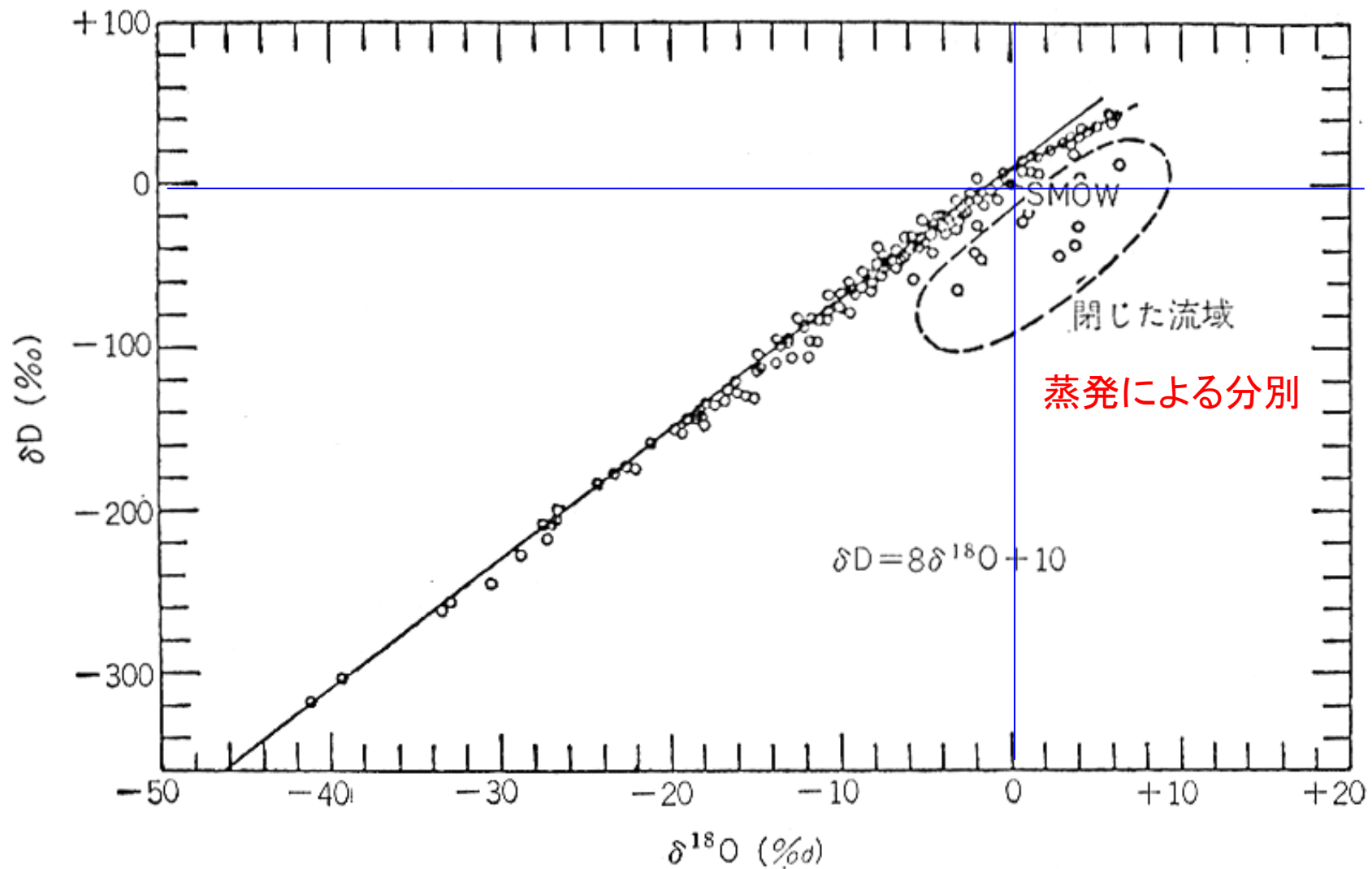
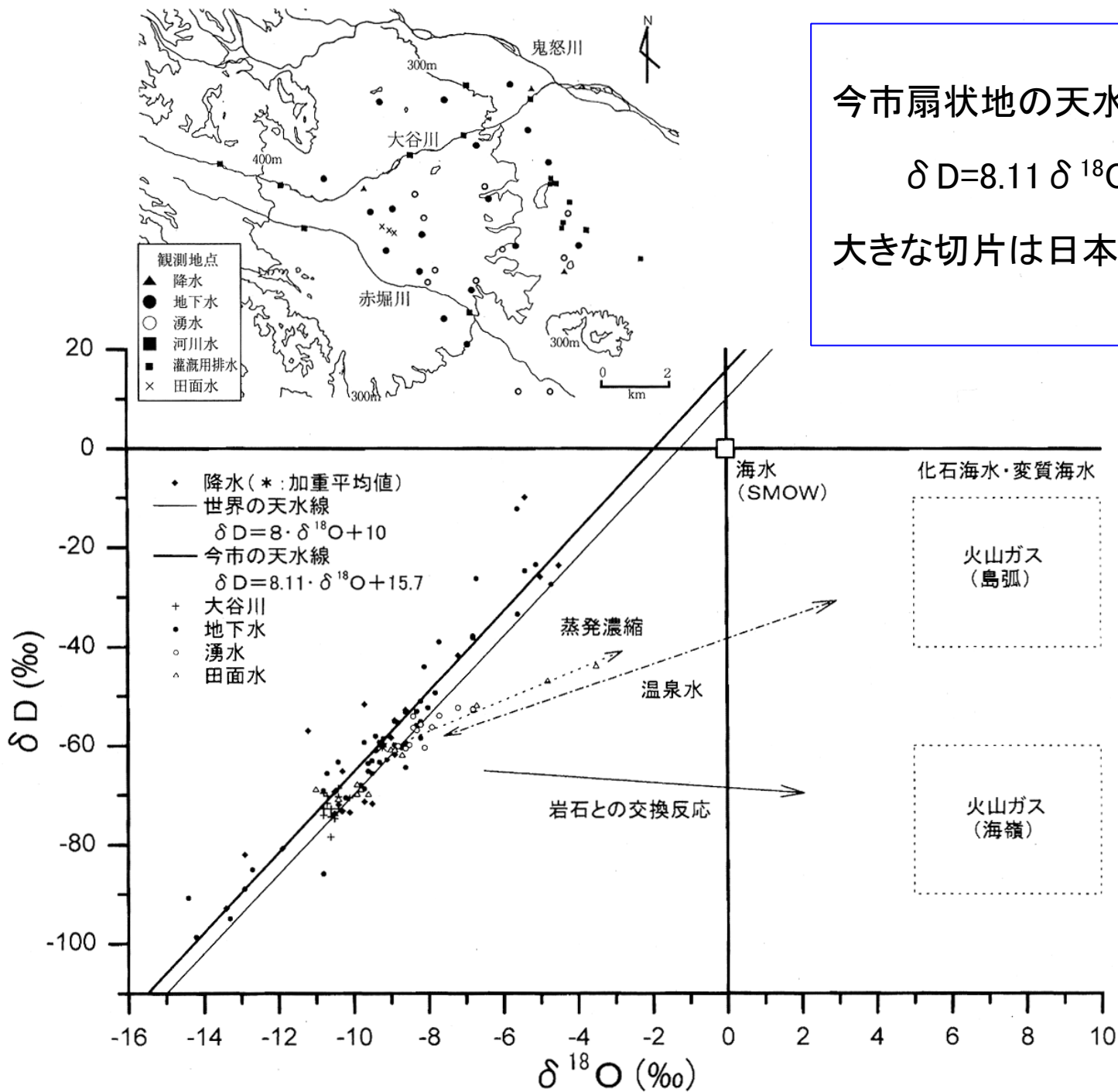


図 10.2 降水と地表水における D と ^{18}O との相関関係。閉じた流域の水は蒸発のために全体の直線関係には合致しない。上方の点線内の点は、東アフリカの河川と湖沼から採取した試料のものである (Craig, 1961)



今市扇状地の天水線は次式で表される

$$\delta D = 8.11 \delta^{18}O + 15.7$$

大きな切片は日本海の水蒸気の効果

日本の例

図 8.4 栃木県今市扇状地において採水した各種水体の δ ダイアグラム (田瀬 (1997) に加筆).

降水中の安定同位体

水循環の過程で安定同位対比は変化←蒸発や凝結による分別作用

●降水中の同位体の季節変動

同位体組成は温度に左右される(温度効果)

●緯度による変動

温度効果、降水量効果(高緯度の降水は低緯度の降水に比較して少ない)

●降水量効果

初期の降水は重い

●高度による変動 (高度効果)

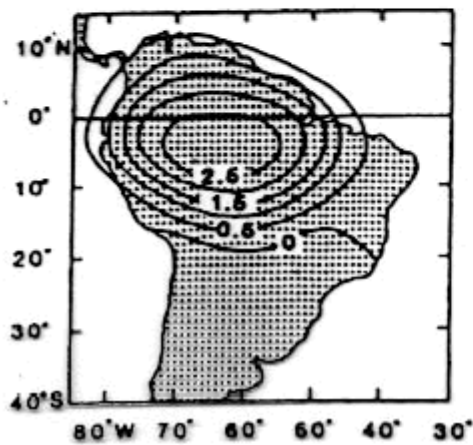
降水中の重い同位体は高度の増加につれて減少

●内陸効果

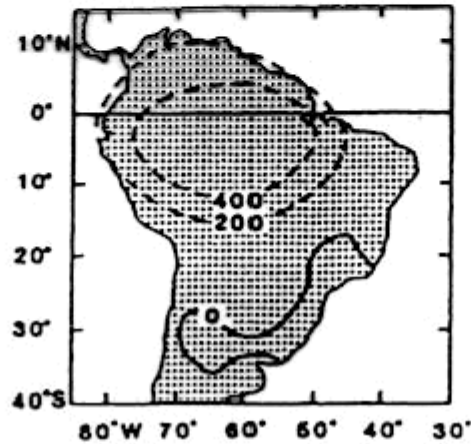
再蒸発効果 →アマゾン

アマゾンの水蒸気のソースは大西洋

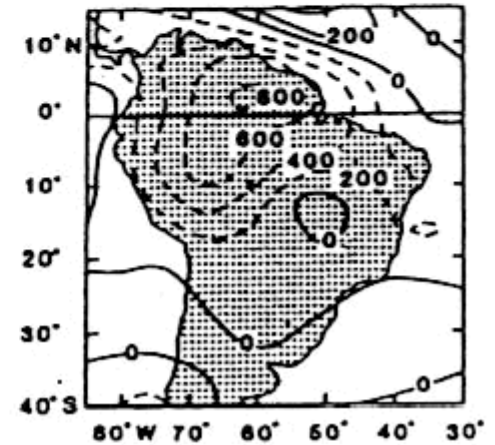
土地利用の変化が気候に及ぼす影響



(a) Temperature Increase (°C)



(b) Evaporation Decrease (mm/y)



(c) Rainfall Decrease (mm/y)

☒ Predictions of the change in climate following a conversion of Amazonian rain forest to grassland (after Shukla et al. 1990).

- ・人間による地球表層への最強のインパクトは土地利用の変化である
- ・土地利用の変化は環境へどのような影響を与えるのか



蒸発の効果

ある地域の降水や陸水の同位体濃度を δ ダイヤグラムにプロットし、天水線と比較する

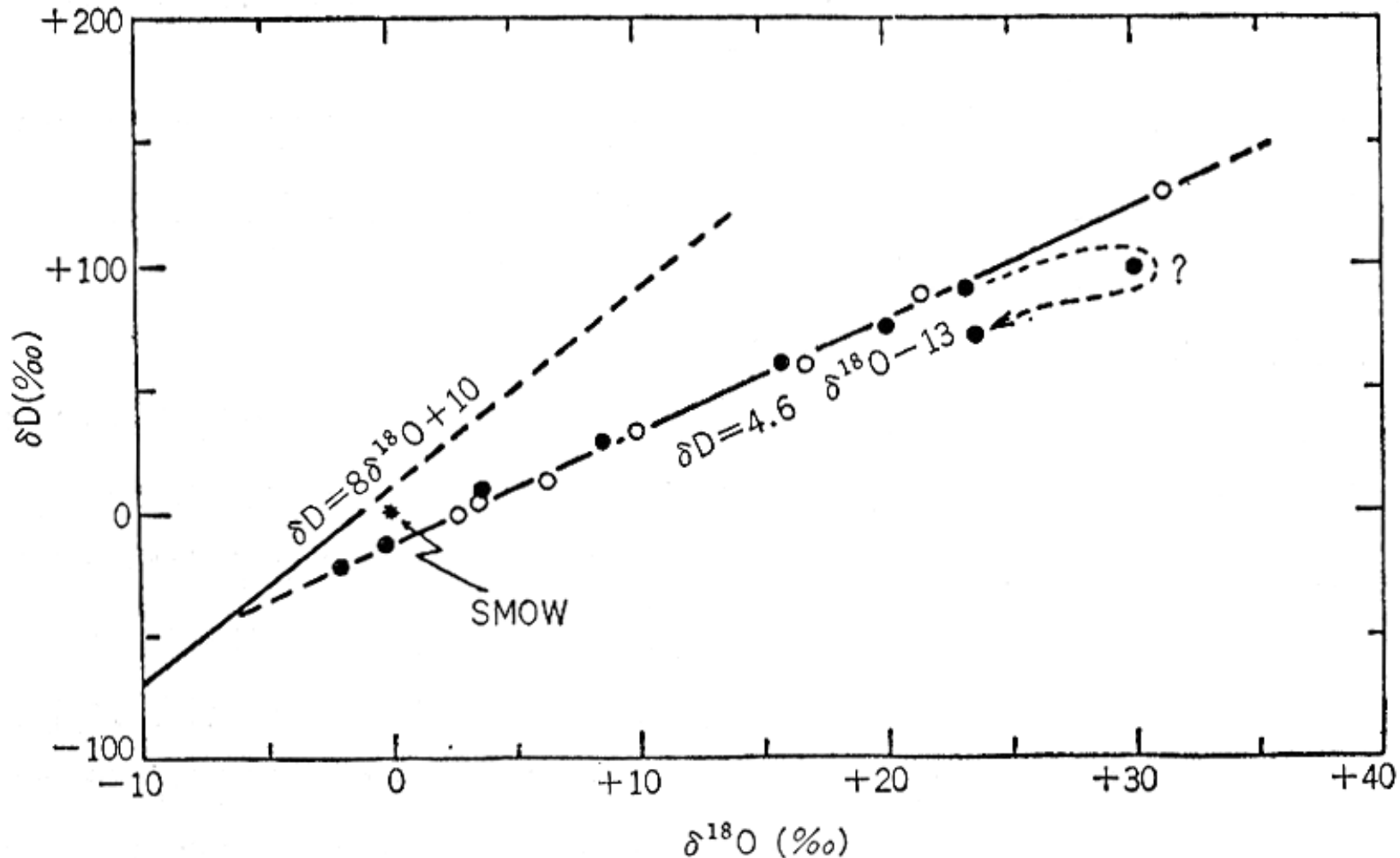


図 10.3 Sahara 地方にある干上がりつつある 2 つの湖沼における D と ^{18}O の関係。その 1 つは塩水を含み (黒丸), 高い塩分濃度では同位体組成が直線関係から外れている (Fontes and Gonfiantini, 1967)

温度効果

温度が低くなると降水のδ値は小さくなる

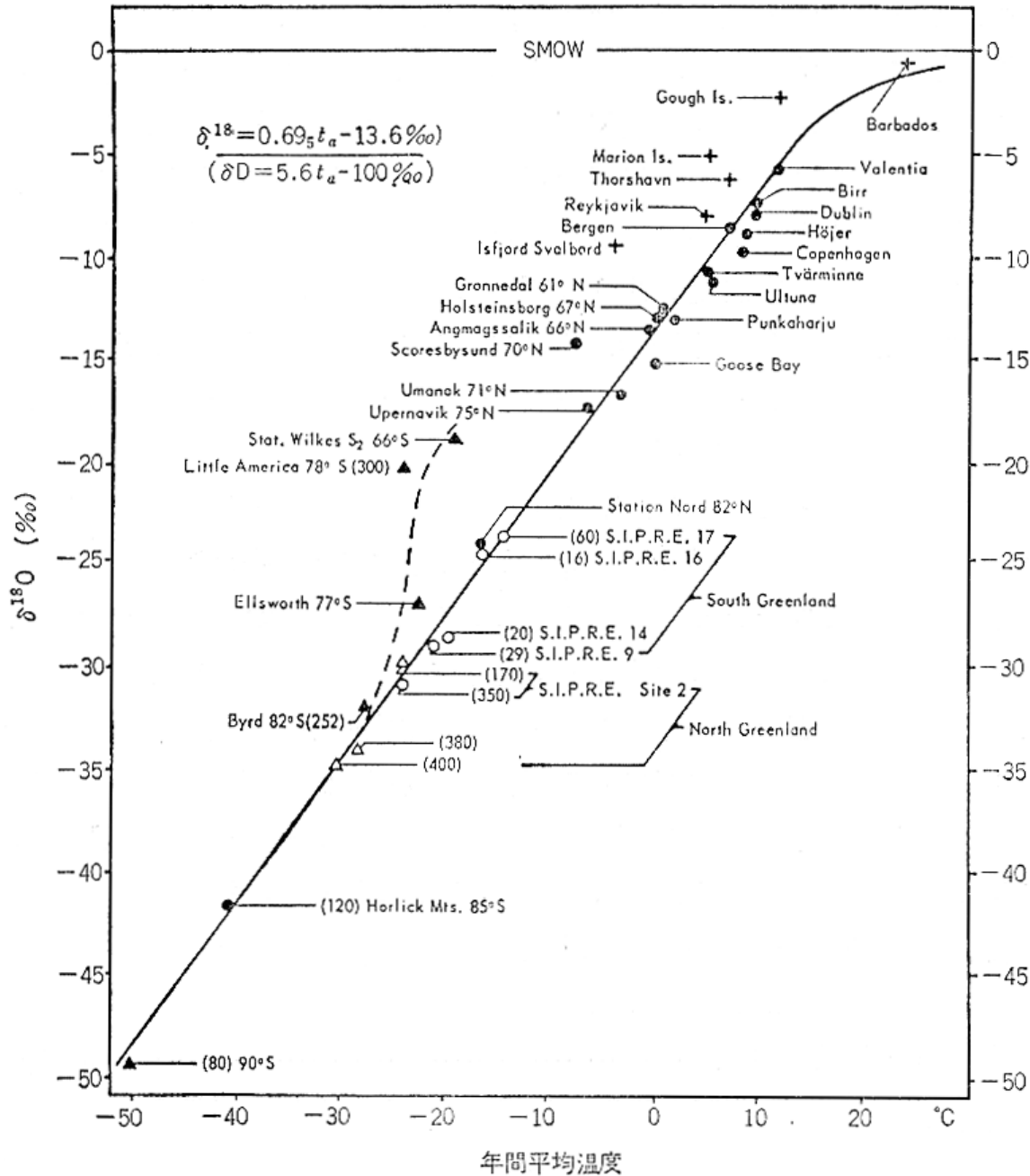
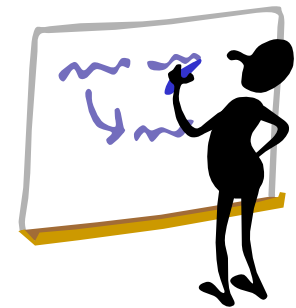


図 10.1 地表における年平均気温と降水の年間平均 $\delta^{18}\text{O}$ 。()内の数字は、全積雪深 (cm) を示す。(Dansgaard, 1964)



安定同位体による水循環の研究

(1) 温度効果を利用した氷河の層位学的研究や水収支(涵養量)の研究

(2) 緯度と高度に伴う δ 値の変化(温度効果)を利用した地下水や地表水の地域的流動の研究

(3) 降水量効果を利用した、熱帯の地下水の局地的循環の研究

(4) 強制蒸発による δ 値の増加と $d\delta D/d\delta 18$ の減少を利用した乾燥地域の水循環の研究

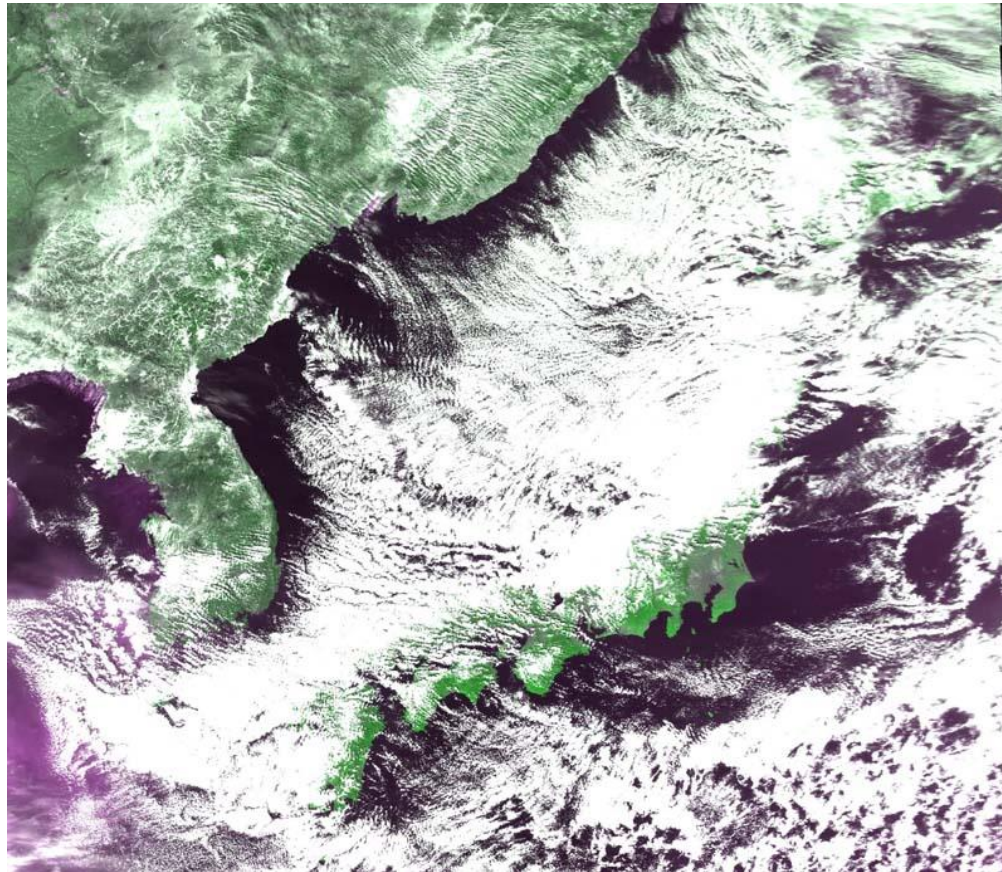
(5) その他



d値とは: 対象とするデータの点を通る傾き8の直線の切片

$$d = \delta D - 8 \times \delta^{18}O$$

d値の大きさはその降水が経験してきた非平衡な蒸発・凝結過程を反映する

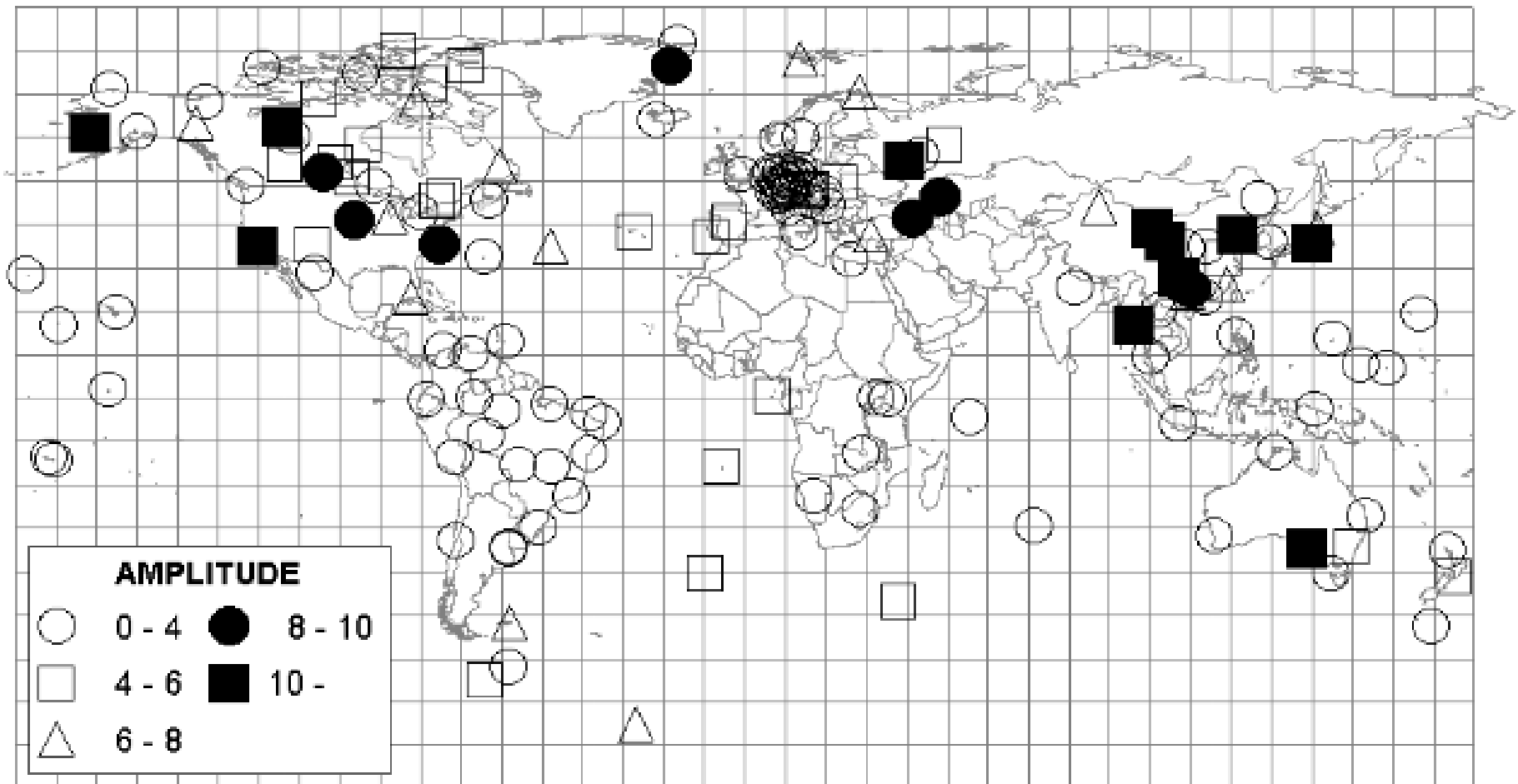


Kondoh,A. and Shimada,J.(1997): The Origin of Precipitation in Eastern Asia by Deuterium Excess. Journal of Japan Society of Hydrology & Water Resources, 10, 627-629.

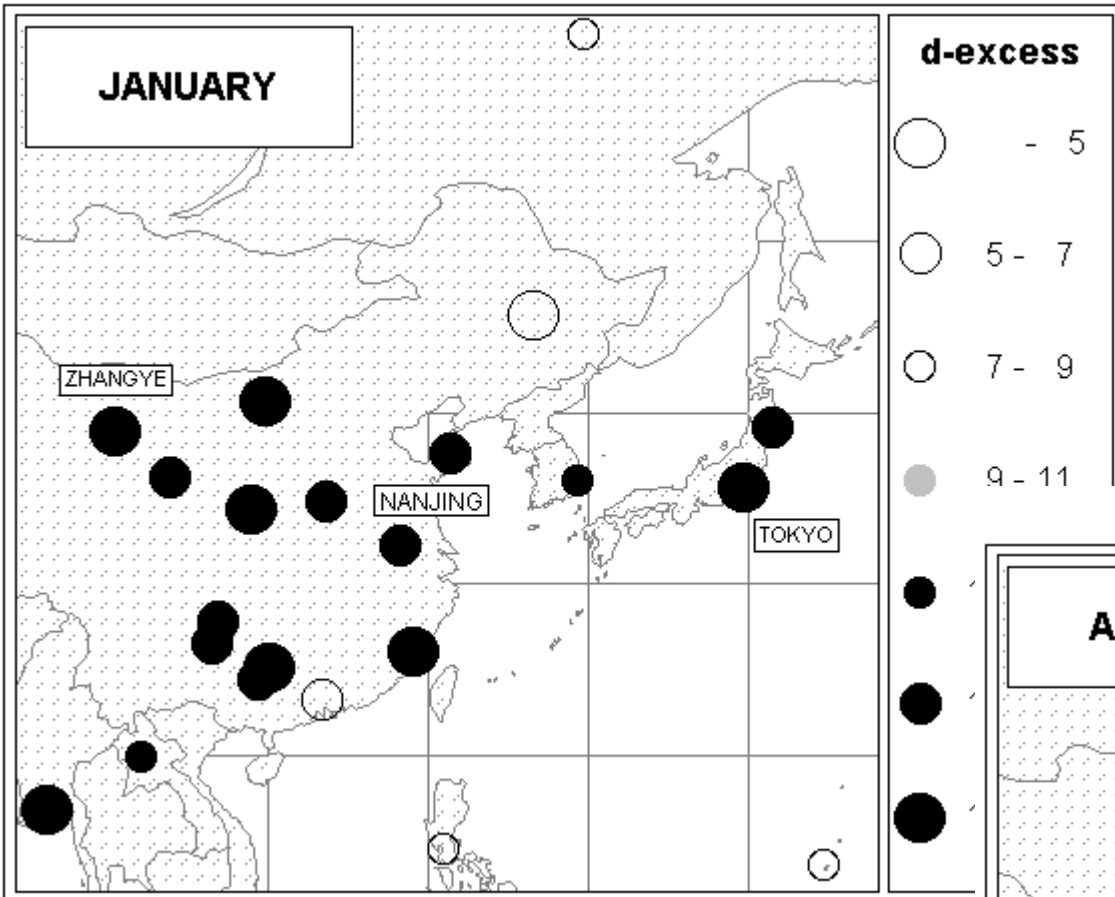
d値はその降水のソースエリアを語る



低い→海から蒸発したばかりの降水
高い→様々な非平衡な過程を経た

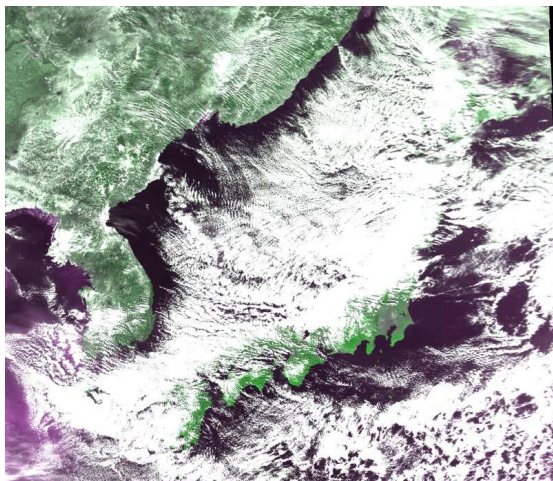
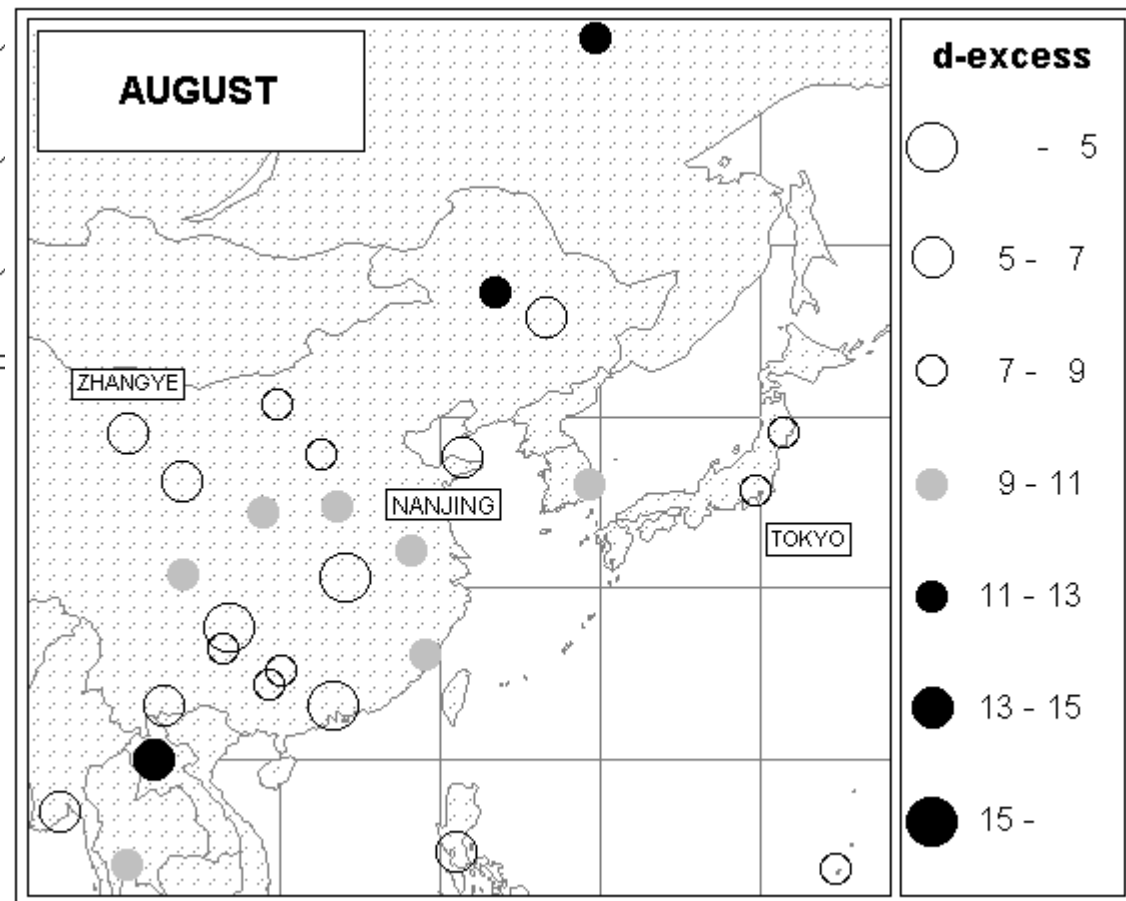


d値の年間の振幅 → 降水の供給源の季節変化

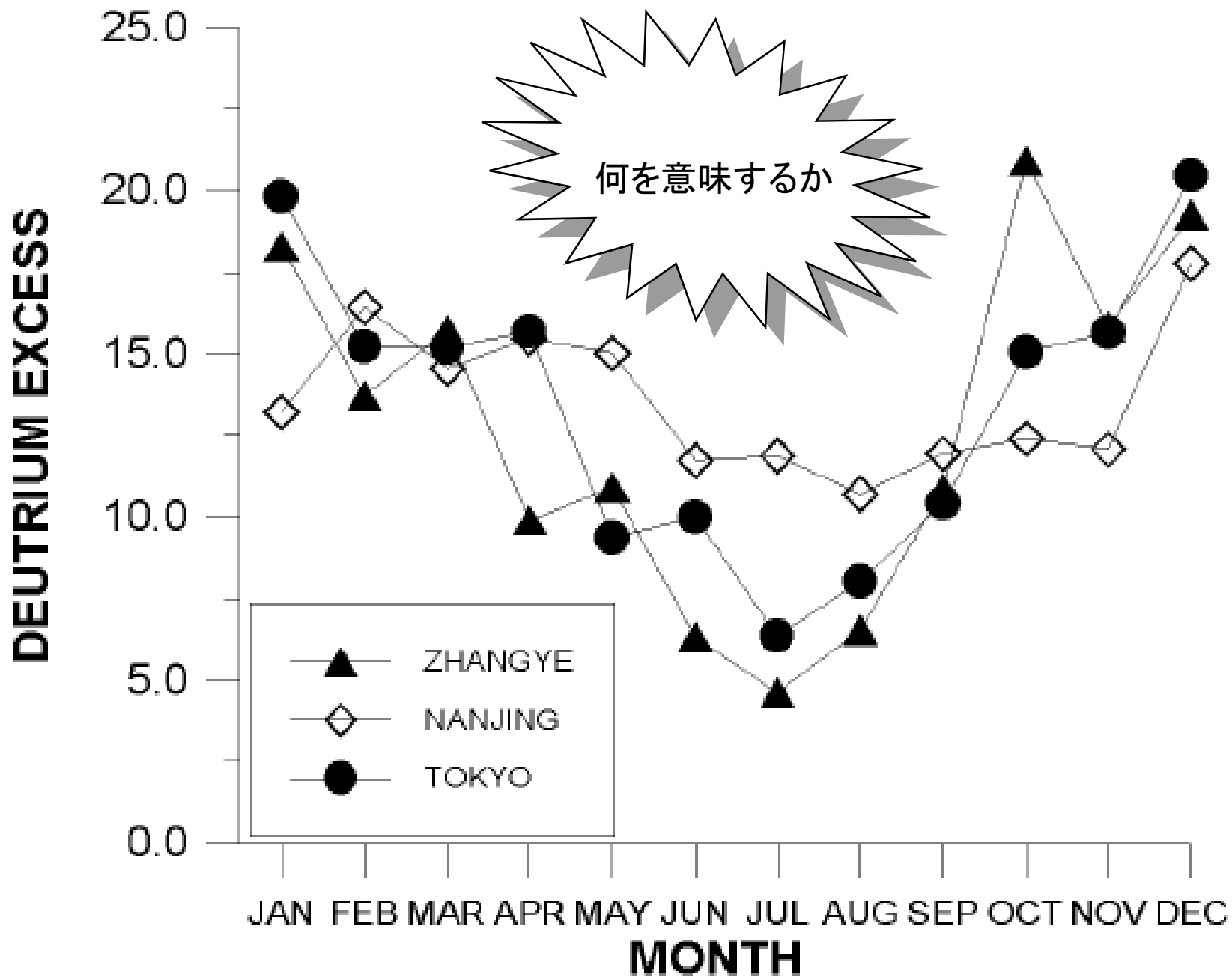


東アジアにおける冬と夏のd値の分布

- ・夏に小さく、冬に大きい
- ・アジアモンスーン

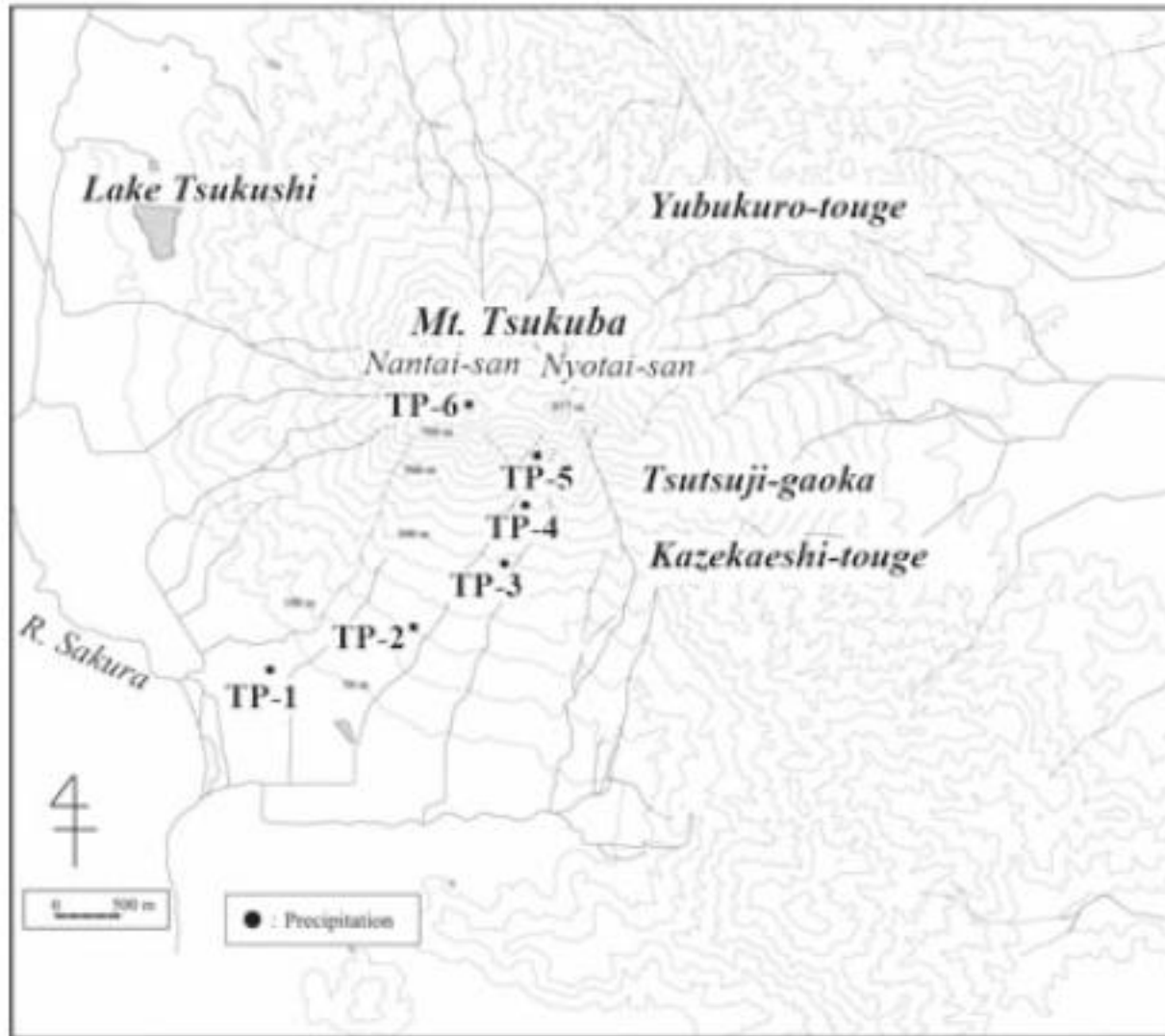


d値の季節変化



高度効果

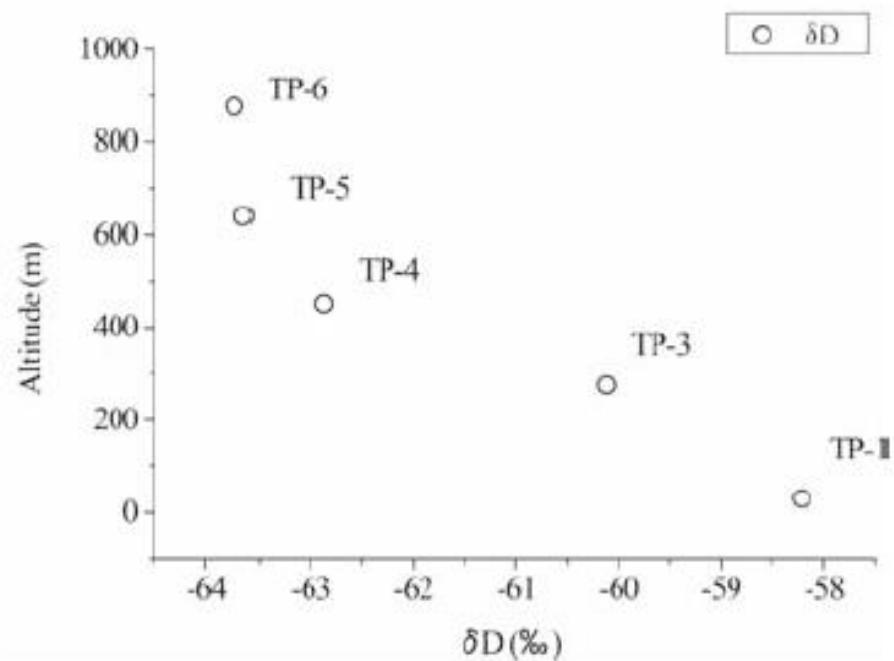
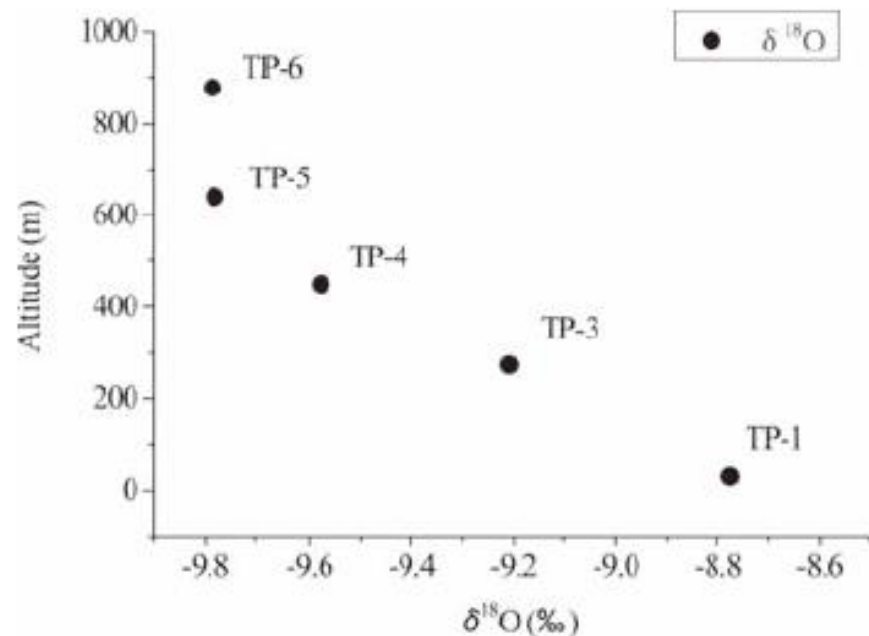
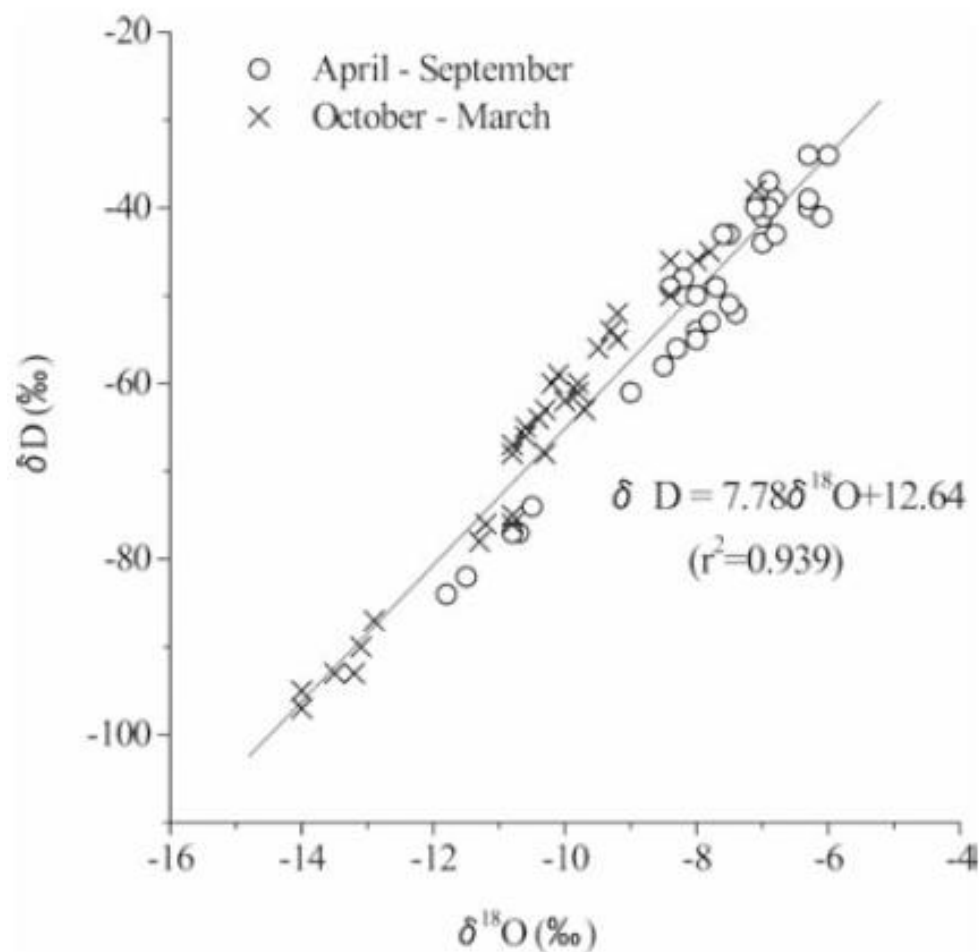
降水の同位体組成は標高が高いほど、軽くなる



藪崎ほか(2008): 筑波山南斜面における降水の安定同位体比特性、筑波大学陸域研究センター報告、No.9、15-23.

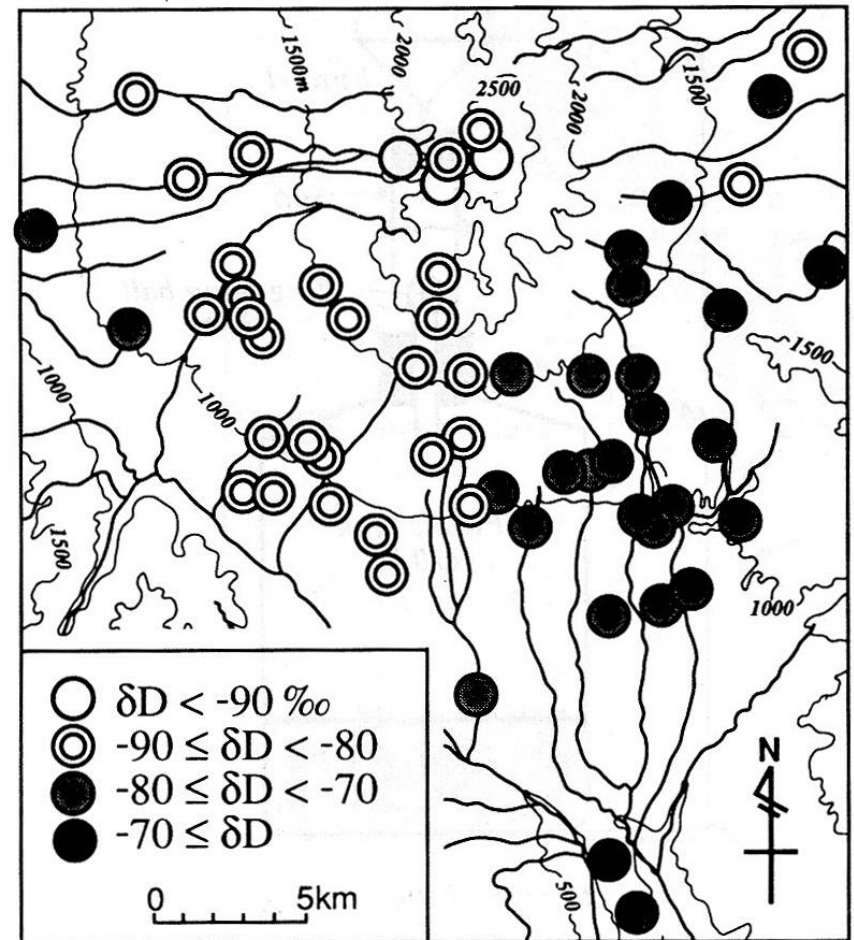
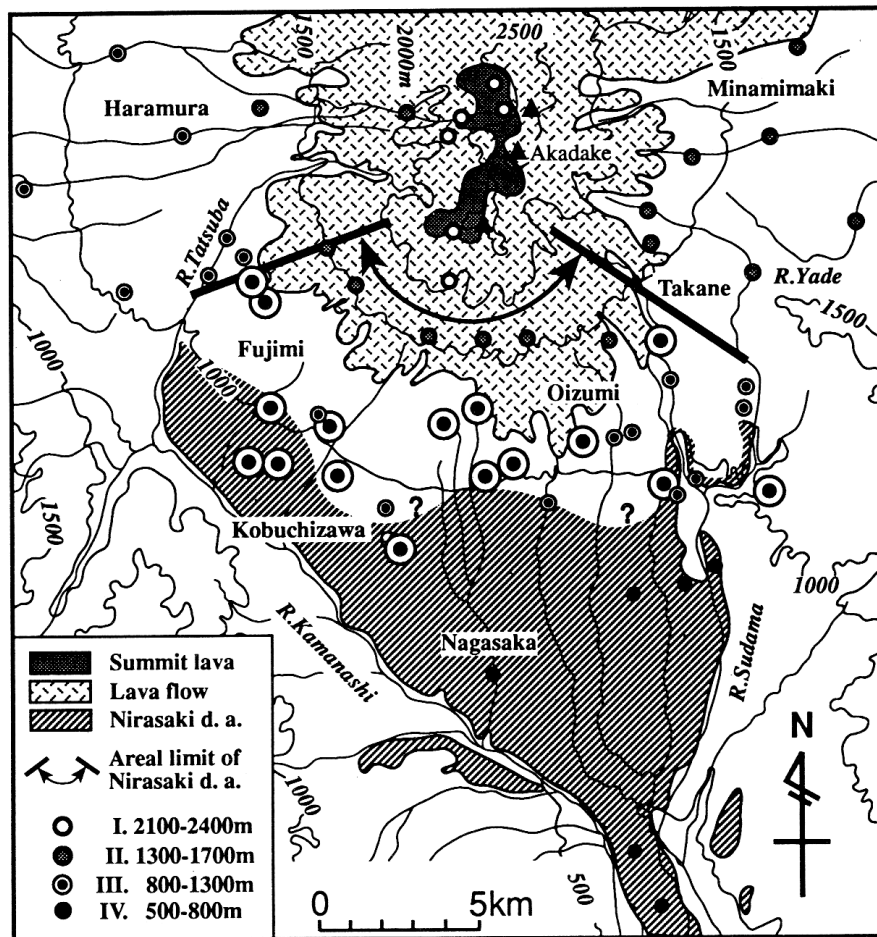
(右) 降水の同位体組成の
標高による変化

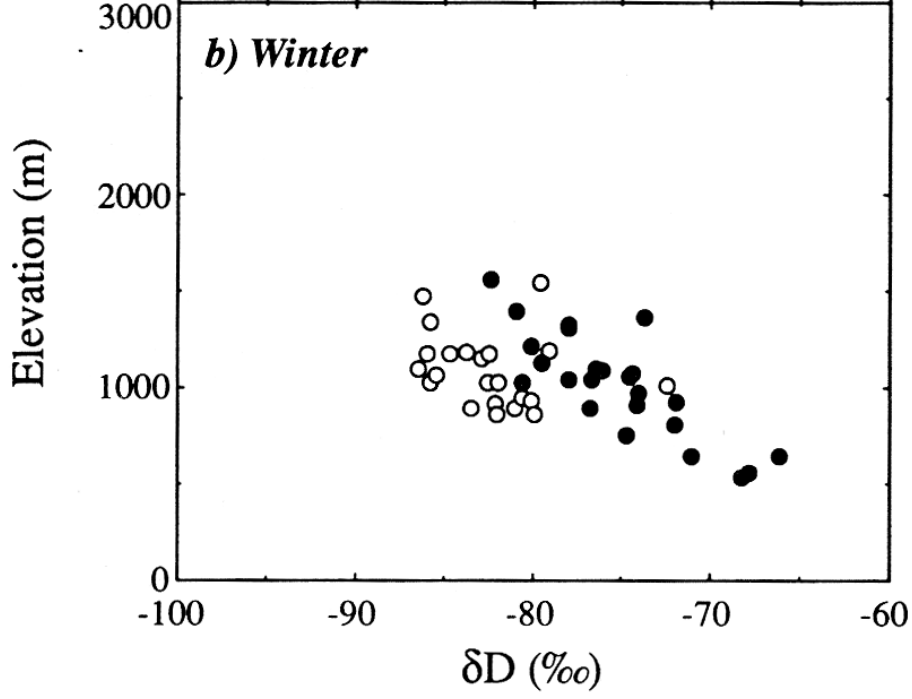
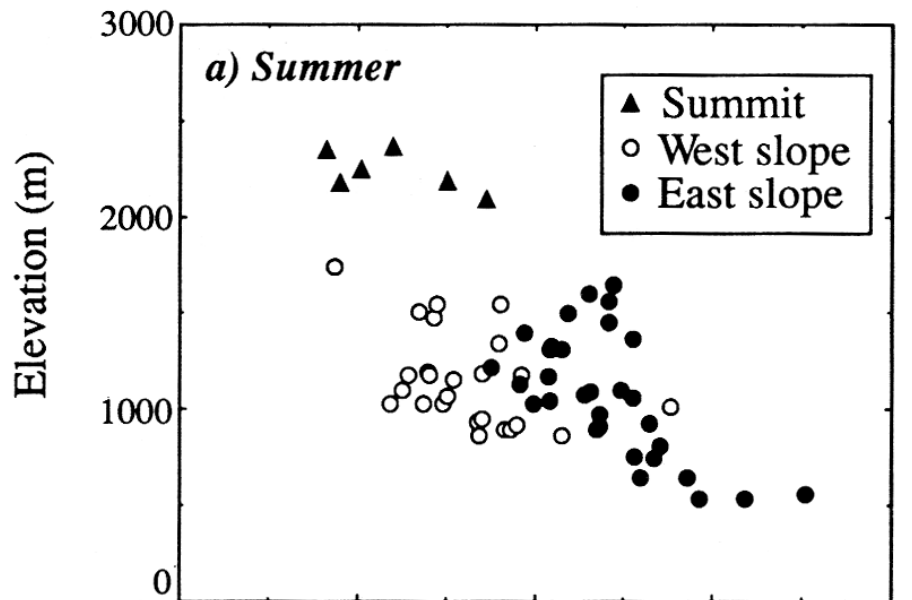
(下) 天水線



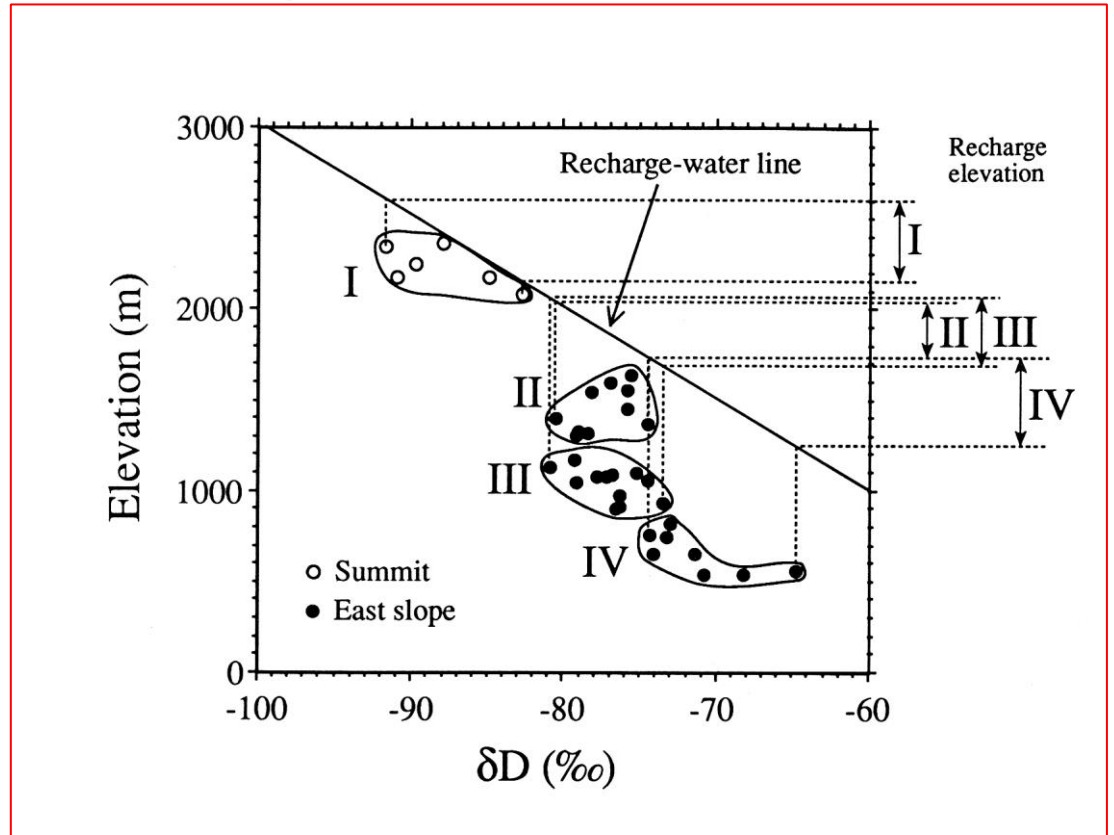
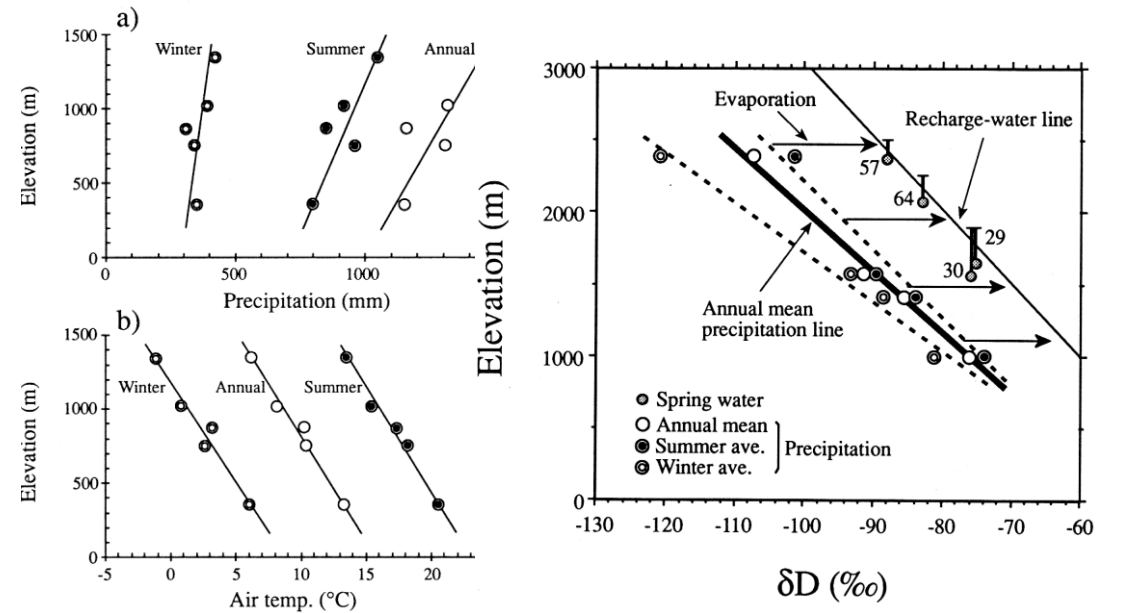
高度効果を利用した湧水の涵養高度の推定

風早康平・安原正也(1994): 湧水の水素同位体比からみた八ヶ岳の地下水の涵養・流動過程. ハイドロロジー、24(2)、107-120.





δD の実測値



^{36}Cl によるThe Great Artesian Basinの地下水の年代測定

Chlorine 36 Dating of Very Old Groundwater, WRR, 1986, 1991

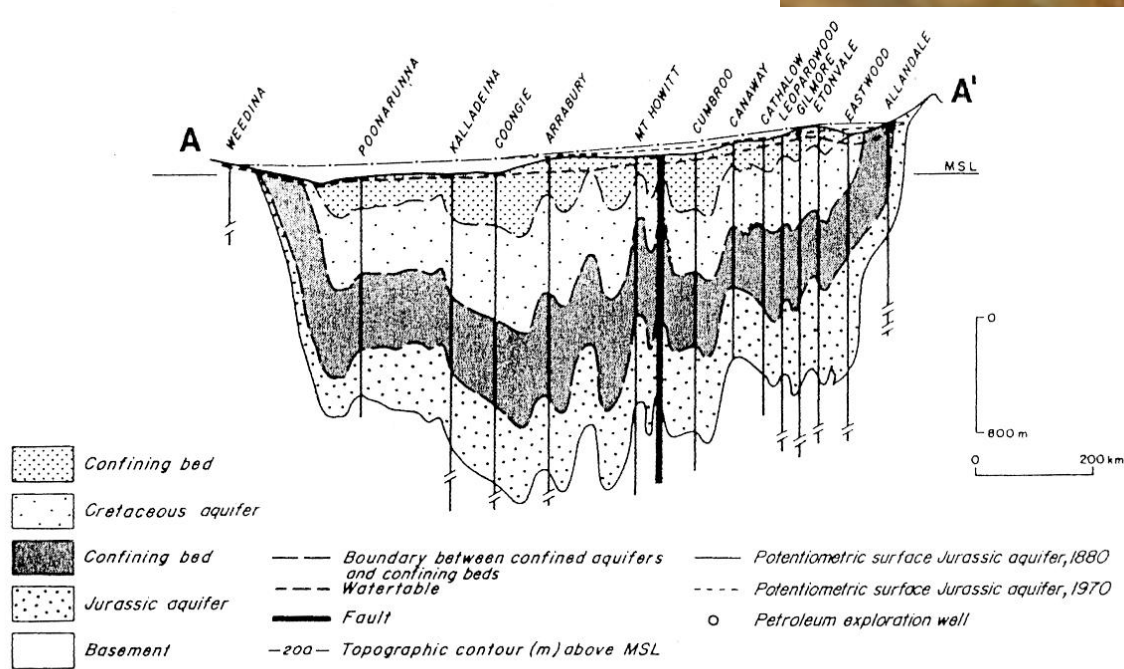
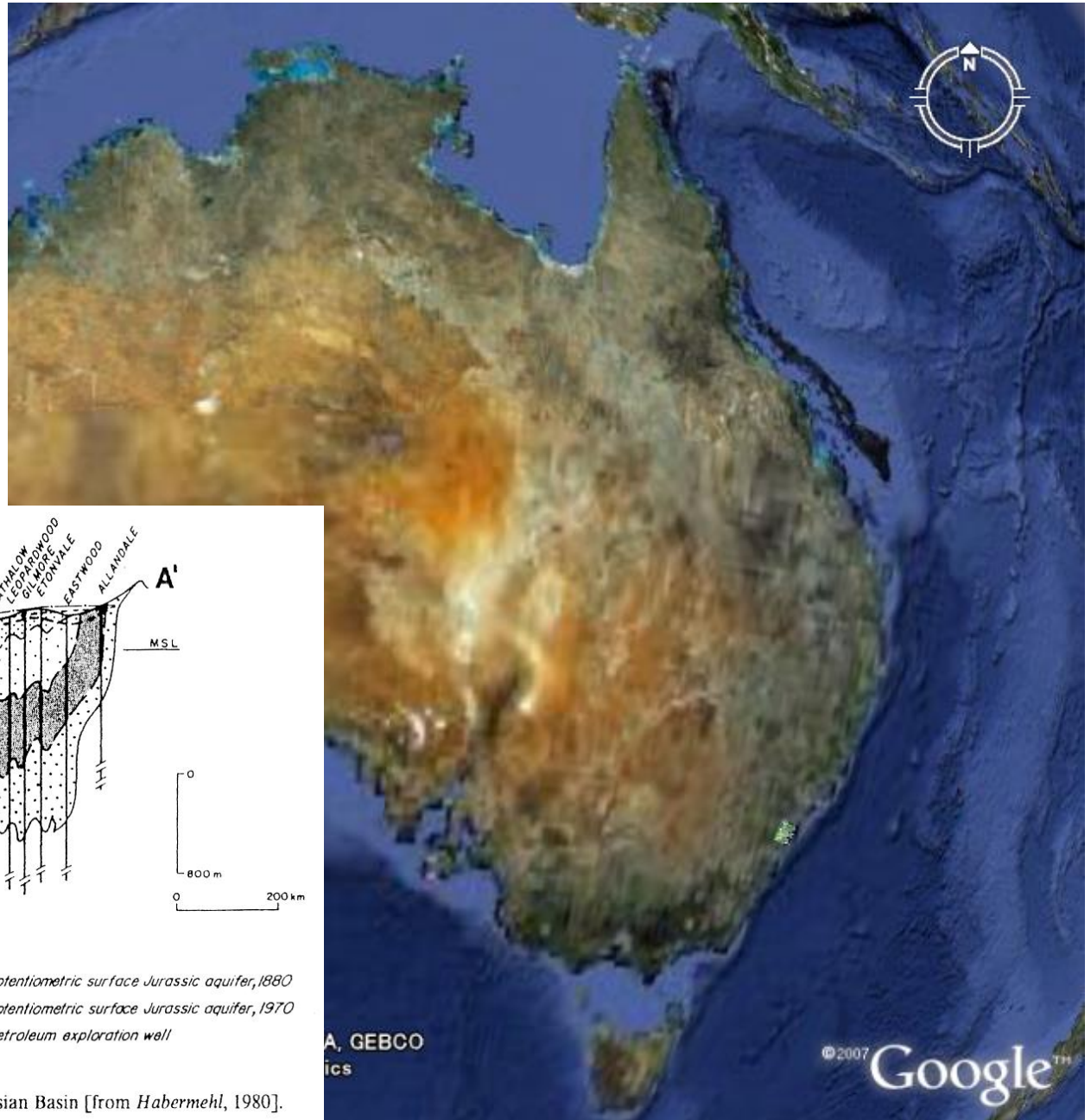
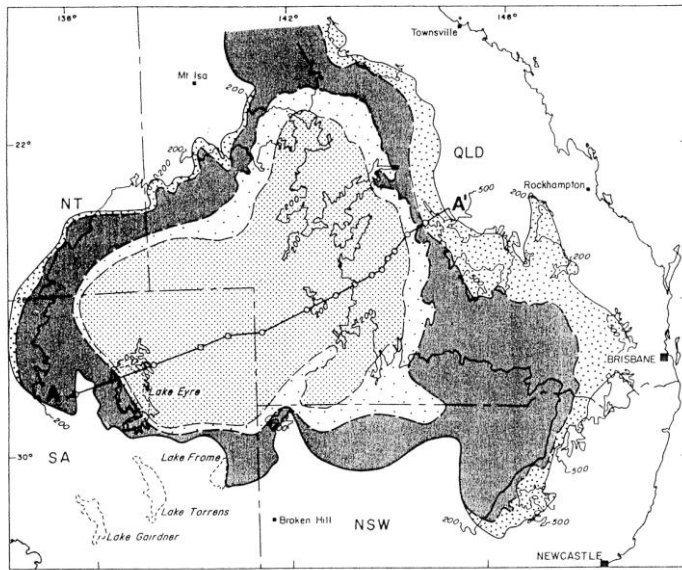
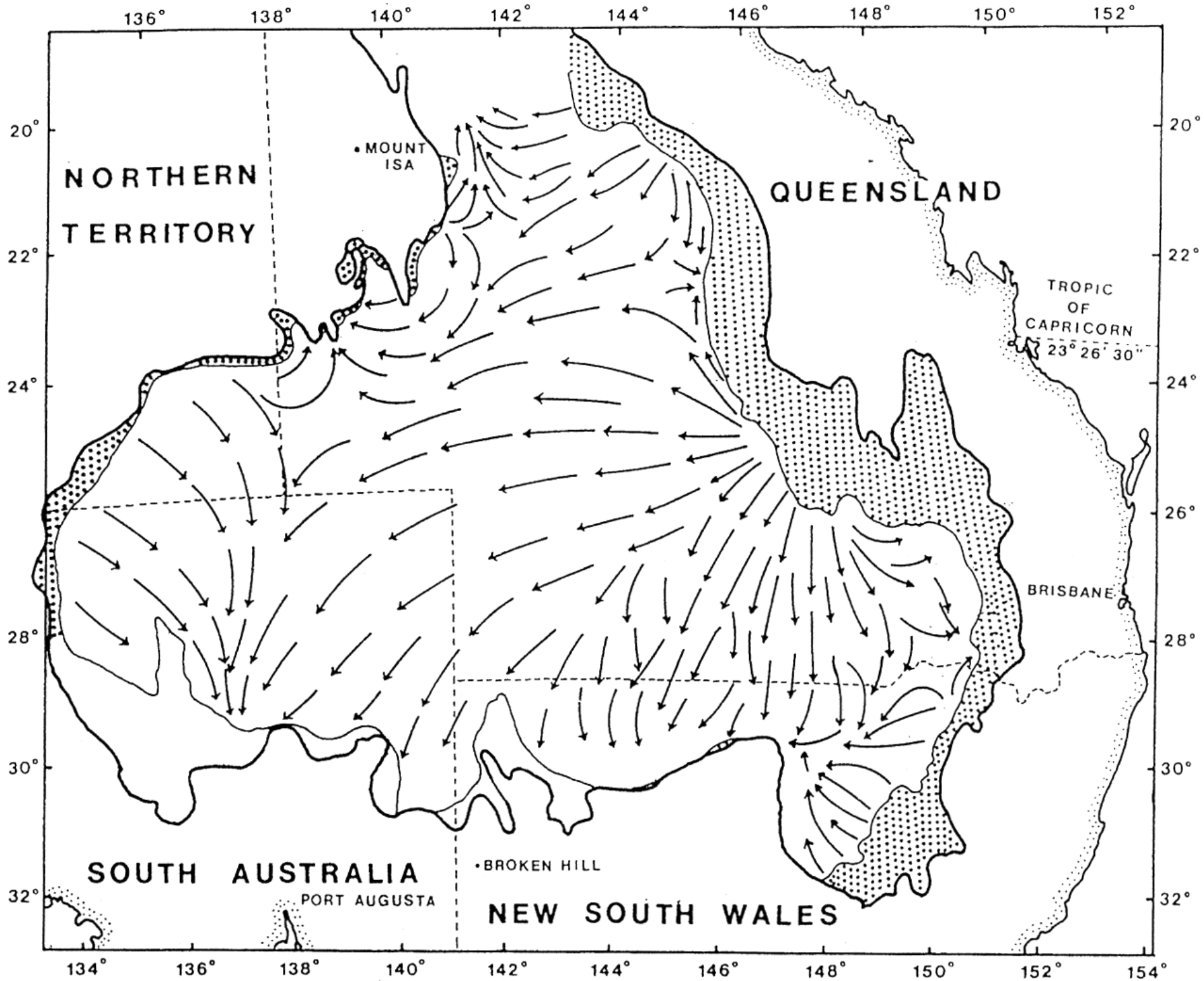
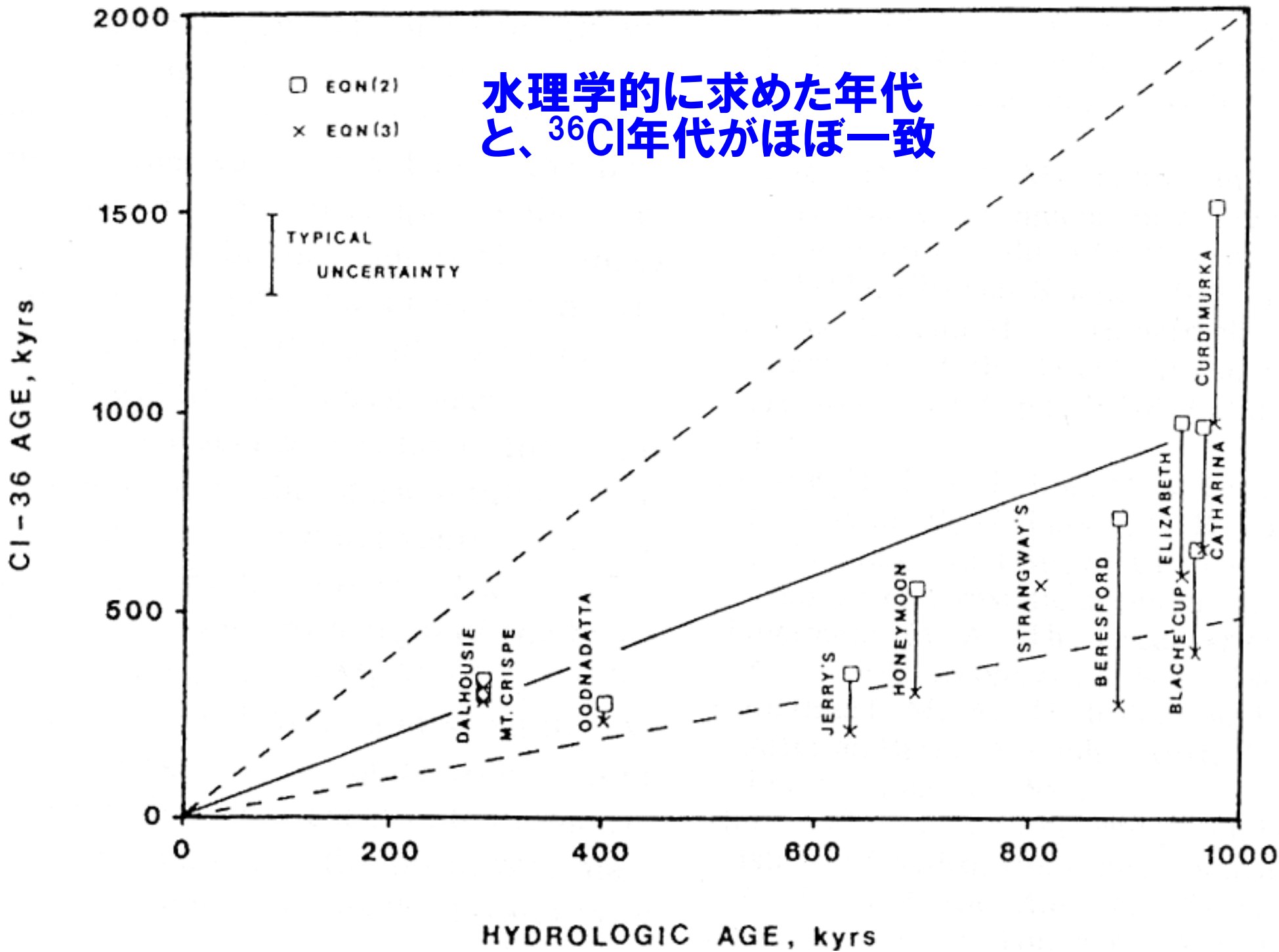


Fig. 3. Simplified hydrogeologic map and cross-section of the Great Artesian Basin [from Habermehl, 1980].

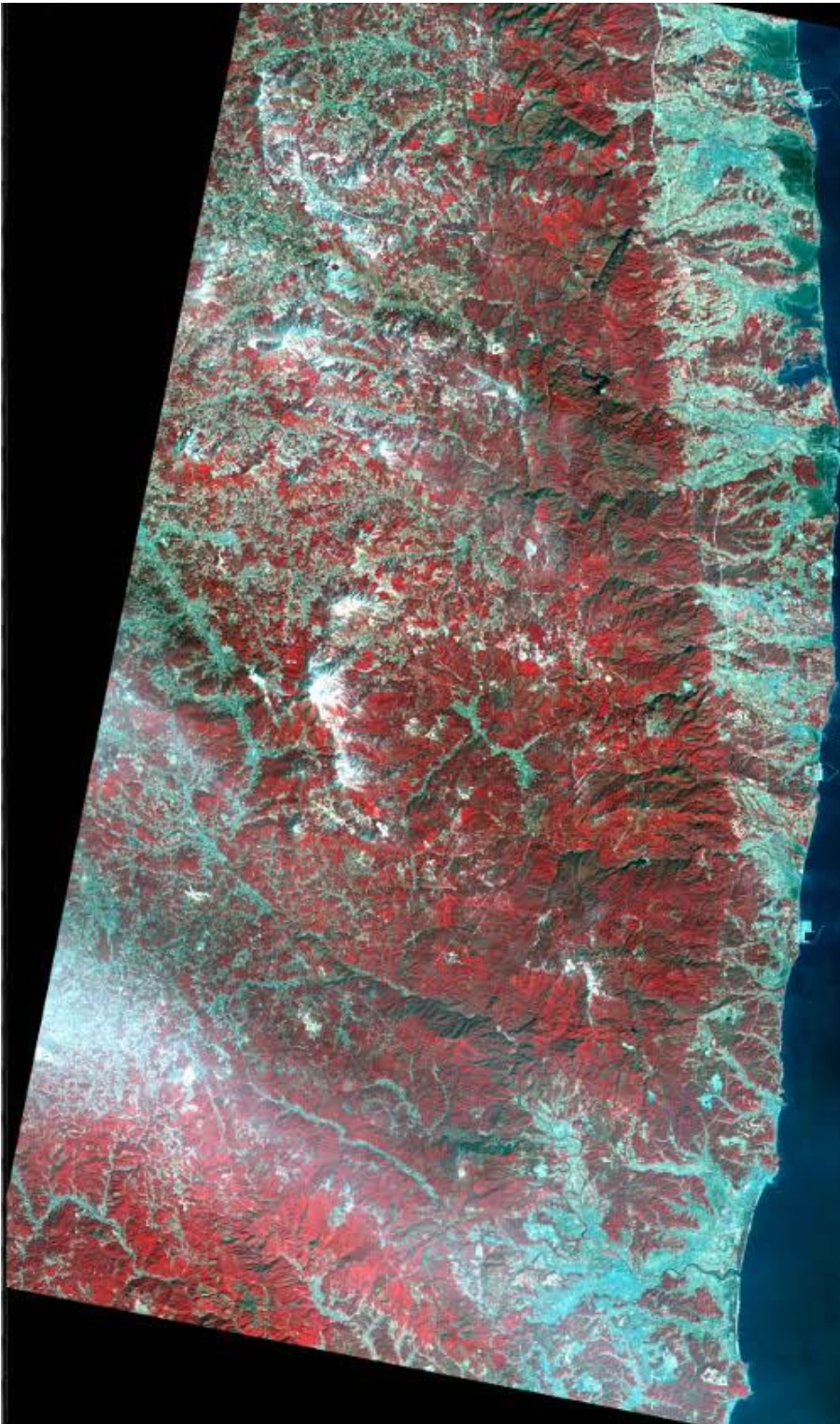




同位体水文学：新しいトレーサーの利用により、水循環の素過程が解明されつつある

表 8.3 水文科学で利用される環境トレーサー（田瀬，2003a）

元素 物質	安定 放射性（半減期）	主な起源	主な利用
$^2\text{H,D}$	安定		涵養源・プロセス・年代測定
^3H	12.3年	核実験・宇宙線	年代測定
^3He	安定	^3H 崩壊・原子力産業	年代測定
^4He	安定	α 崩壊	供給源・年代測定
^{13}C	安定		供給源・プロセス
^{14}C	5,730年	宇宙線・核実験	年代測定
^{15}N	安定		供給源・プロセス
^{18}O	安定		涵養源・プロセス・年代測定
^{34}S	安定		供給源・プロセス
^{36}Cl	301,000年	宇宙線・核実験・核反応	年代測定
^{39}Ar	269年	宇宙線	年代測定
^{40}Ar	安定	原子力産業	年代測定
^{81}Kr	210,000年	宇宙線	年代測定
^{85}Kr	10.72年	原子力産業	年代測定
^{87}Sr	安定		供給源・プロセス
^{129}I	1.57×10^7 年	宇宙線	年代測定
^{222}Rn	3.82日	^{226}Ra 崩壊	プロセス
^{238}U	4.47×10^9 年	始原性	年代測定
^{232}Th	1.40×10^{10} 年	始原性	年代測定
フロンガス	その他	人為起源	年代測定
SF_6	その他	人為起源	年代測定



**新しい手法が
新たな現象の
認識を
もたらす**