

乾燥地域リモートセンシング

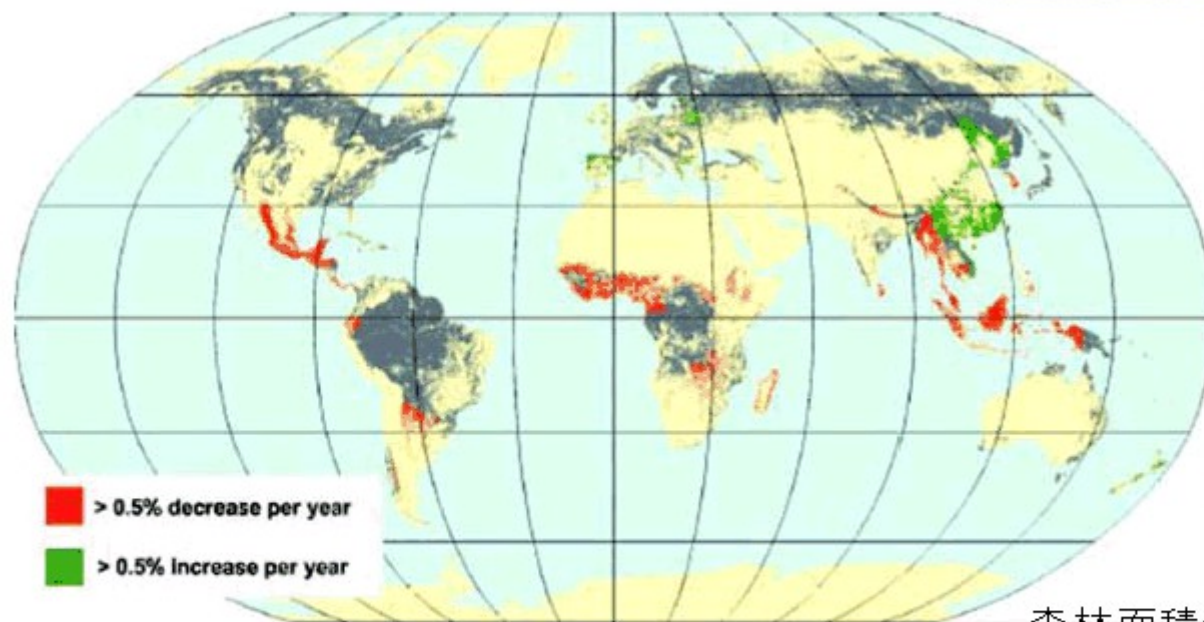
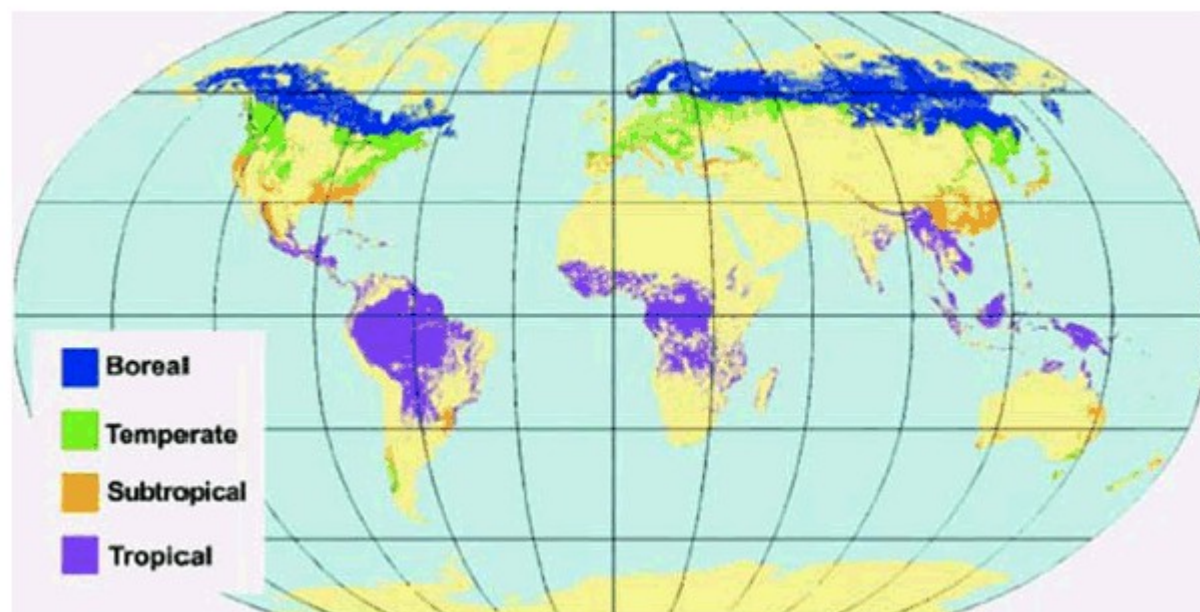
乾燥・半乾燥地域の環境と水循環



近藤昭彦@環境リモートセンシング研究センター

世界の大半は森林
以外の土地被覆で
占められている

乾燥・半乾燥地域



世界の森林分布
Global Forest Resources
Assessment 2000
[http://www.fao.org/DOCREP/
004/Y1997E/Y1997E00.HTM](http://www.fao.org/DOCREP/004/Y1997E/Y1997E00.HTM)

日本語版あり
「世界森林白書2000」農文協

森林面積の変化

ベージュ：乾燥地域、雪氷圏

沙漠(砂漠)とは

「降水量が少ないため、植物の根圏の土壌水分が少なく、植生が少ない自然景観」(篠田、2002)*

森林と対立する存在としての沙漠



降水量が少ないという気候学的要因が砂漠形成の原因

右の写真は鳥取砂丘

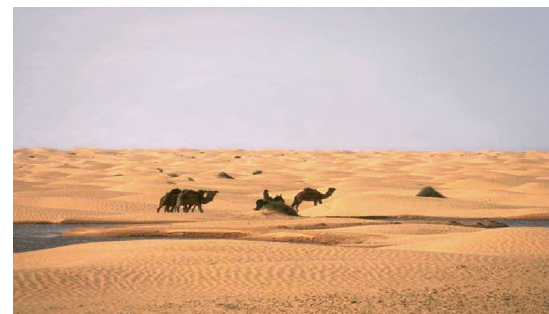
- ・海岸砂が季節風によって吹き上げられて形成
- ・降水量は約1900mm
- ・よって、沙漠的景観であるが、沙漠ではない



* 気象ブックス014 「砂漠と気候」 篠田雅人著 成山堂書店

沙漠という用語

砂漠とどう違うのか？



砂漠は desert の訳 例えば、ゴビ砂漠 the Gobi (Desert).

でも、Gobiは礫に覆われた”砂漠”のこと... なんか変？

「さばく」には砂ばかりでなく、礫や岩石でできたものもある

「さばく」の訳には中国語の「荒漠」が最適と思われます

荒漠：沙漠（砂でできたさばく）、礫漠（ゴビ、礫で覆われたさばく）

沙漠は「水が少ない」という意味で使われることが多いが、中国語では砂でできたさばくの意味で用いられている



礫砂漠

(左)トルファン盆地アイディン湖畔から南を望む. 山の向こうはタクラマカン



地表面の様子

砂の表面に礫が敷き詰められている. 礫は風食の履歴を示す三稜石の形状を示すものが多い.



砂砂漠



アラブ首長国連邦
ルブ・アルハリ砂漠の一部



現地で知ったこと

- ・砂丘は貯水庫ー少し掘ると湿っている
- ・バルハンの風下側斜面の下には水がある
(もちろん、地域の乾燥度によってことなるだろう)



砂丘は美しい

- ・砂丘間低地の地下水を利用して農業を営んでいるが、水位低下、塩分濃度の上昇が発生している場所もある
- ・この写真の場所がそうであるかどうかは、この場所の地域の特性に依り、現地調査が必要である
- ・だから、重要でないとは言えるか？フィールド科学は地域の生活と結びついた経験科学なのである



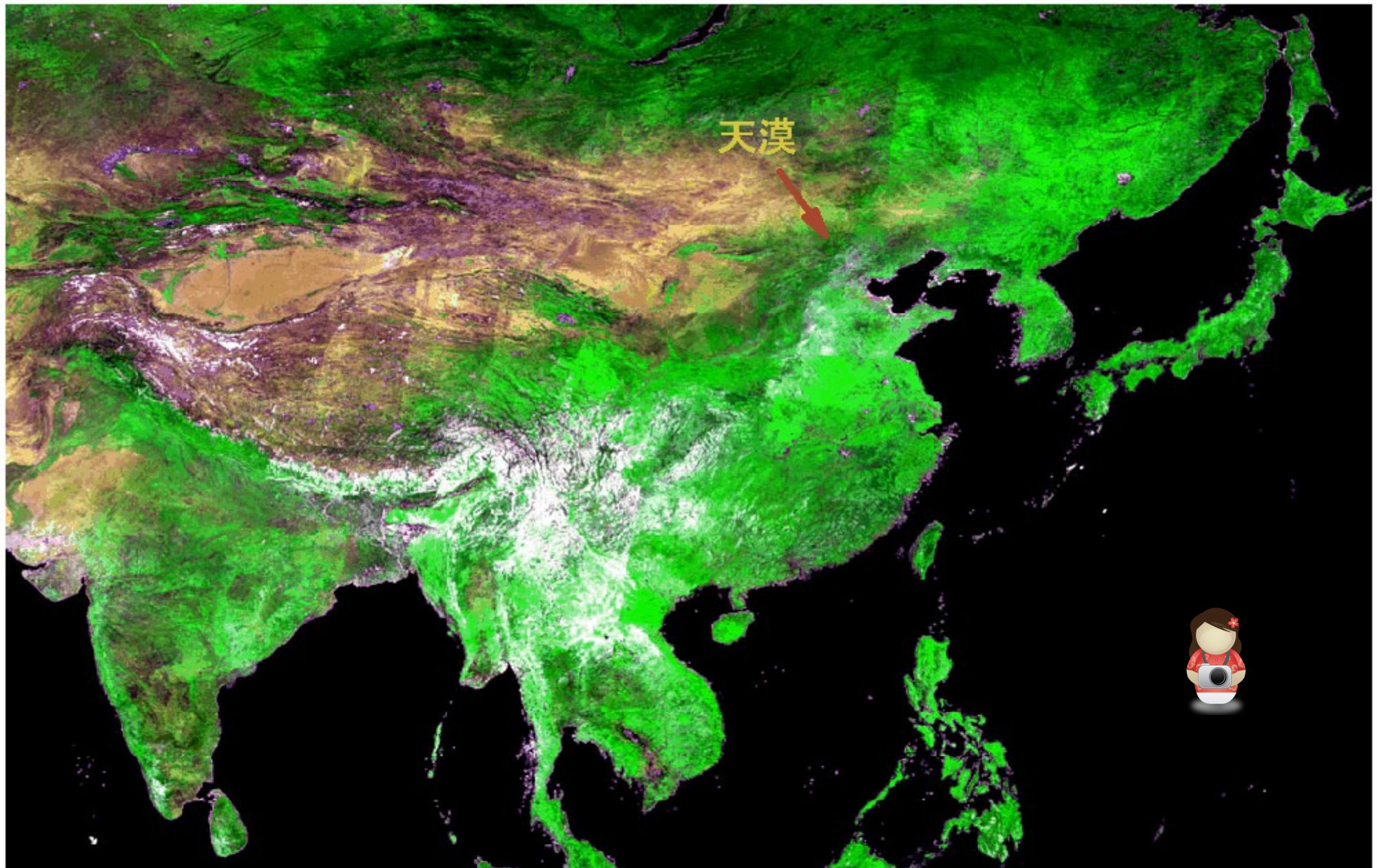
日本に最も近い砂漠的景観は

- ・八達嶺の長城に登ると、北側に湖(官庁水庫)が見えるが、その手前にバルハン型の砂丘がある
- ・北京からほんの70kmほどの距離である



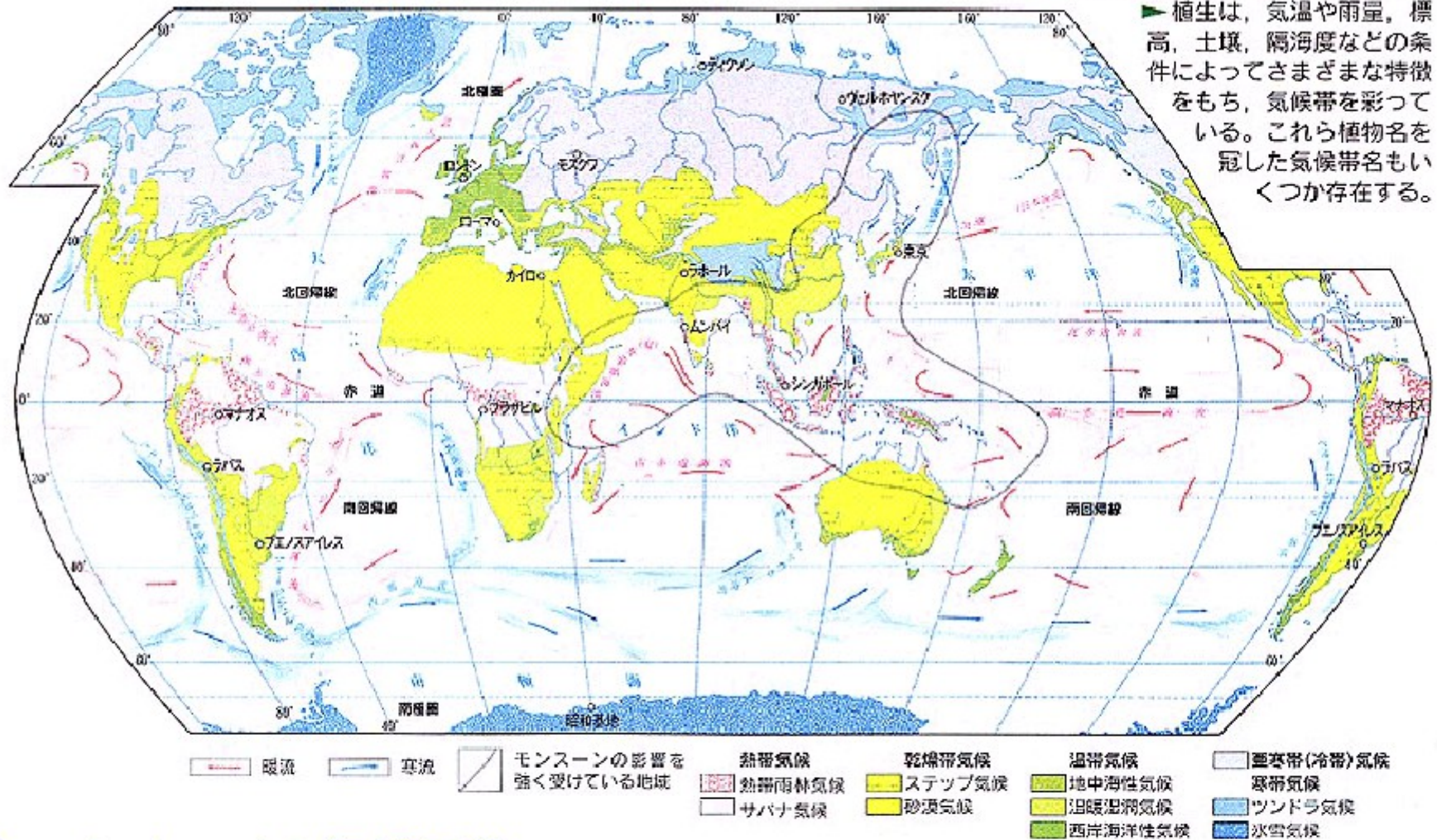
退耕環林

- ・農地を森林に戻す中国の政策
- ・乾燥地域からダストを舞い上げ、北京の街を襲う
- ・黄砂となり東アジアを広く覆う



SPOT-4/VEGETATIONによる2000年8月上旬のアジア画像

1 世界の気候帯



ケッペン(1918)の気候区分

- ・気温・降水量とその季節配分に基づく気候区分であるが、分布図を作成するために、**植生分布から気候を類推する**という手法をとった
- ・砂漠気候(BW)は図で**黄色**で表されている

1 気候要素と気候因子

1 気候要素と気候因子

気候要素——気象観測で測定可能なもの
 (例) 気温・降水量・風向・風速・気圧・湿度・日照量
 気候因子——気候要素の分布に影響を与える
 (例) 地形・海流・緯度・高度

大気の大循環とは、地球をとりまく大気の運動をいう。おもな原因は、低緯度と高緯度で太陽から受ける熱量が違い、大気の移動が生じるためである。

2 風

1 大気の大循環

ジェット気流
 平均風速50~60m/秒
 西から東へ吹く。
 冬は緯度30°~40°、
 夏は緯度45°~50°。
 ジェット機は、東へ向かうとき、この気流を利用。

ジェット気流

日本の上空5~15kmを西から東へ吹くジェット気流は左記のようにたいへん速い。東京から東へ向かう飛行機は、この気流によって燃費や時間を軽減し、西へ向かうときは高度を下げ、これを避けるようにする。

西 ← 東京 → ロサンゼルス → 東

9時間30分
11時間20分

偏西風
 北半球では南西風、
 南半球では北西風。
 低気圧が発生しやすく雨が多い。

気象p.32

亜熱帯高圧帯
 下降気流が強く、晴天・乾燥、風は弱い。
 回帰線付近にあり、砂漠気候形成の原因の一つになる。

貿易風
 北半球では北東風、
 南半球では南東風、
 年中一定方向に吹き、天気も安定。

気象p.26

2 貿易風を利用した交易 —ダウ船—



砂漠の成因

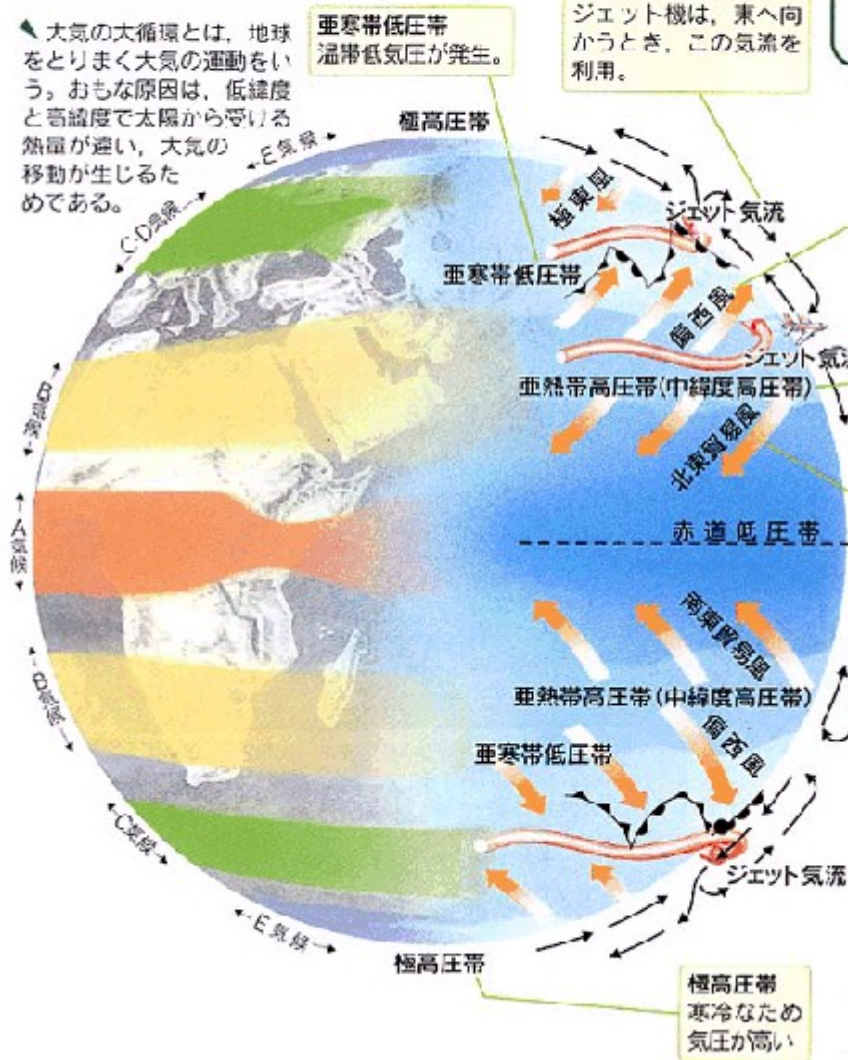
① 亜熱帯高圧帯

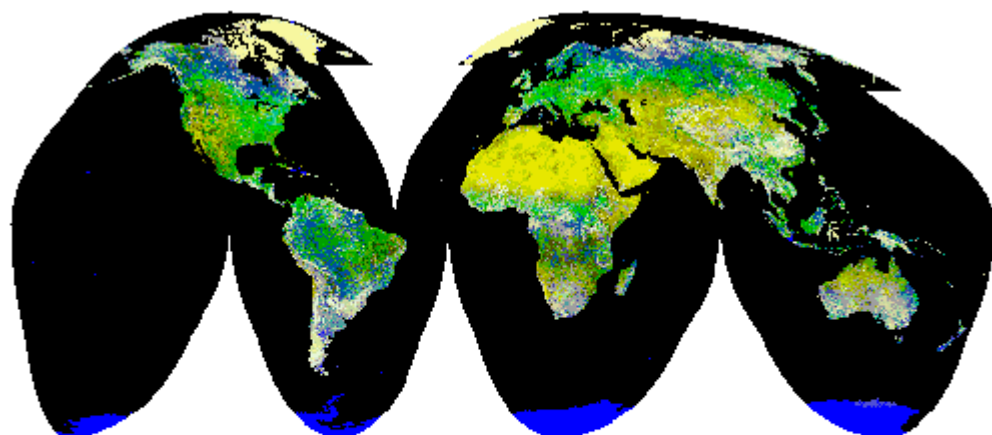
・赤道付近で暖められた大気が上昇し、上空から局方高に向かう流れが、北緯30°付近で下降し、形成。

② 雨陰効果と内陸効果

・海との間に山があると、大気が風上斜面で水蒸気を落とし、風下斜面側で乾燥気候をもたらす
 ・海からの距離が遠いと大気は途中で水蒸気を落とす

タクラマカン砂漠
 トルキスタン砂漠



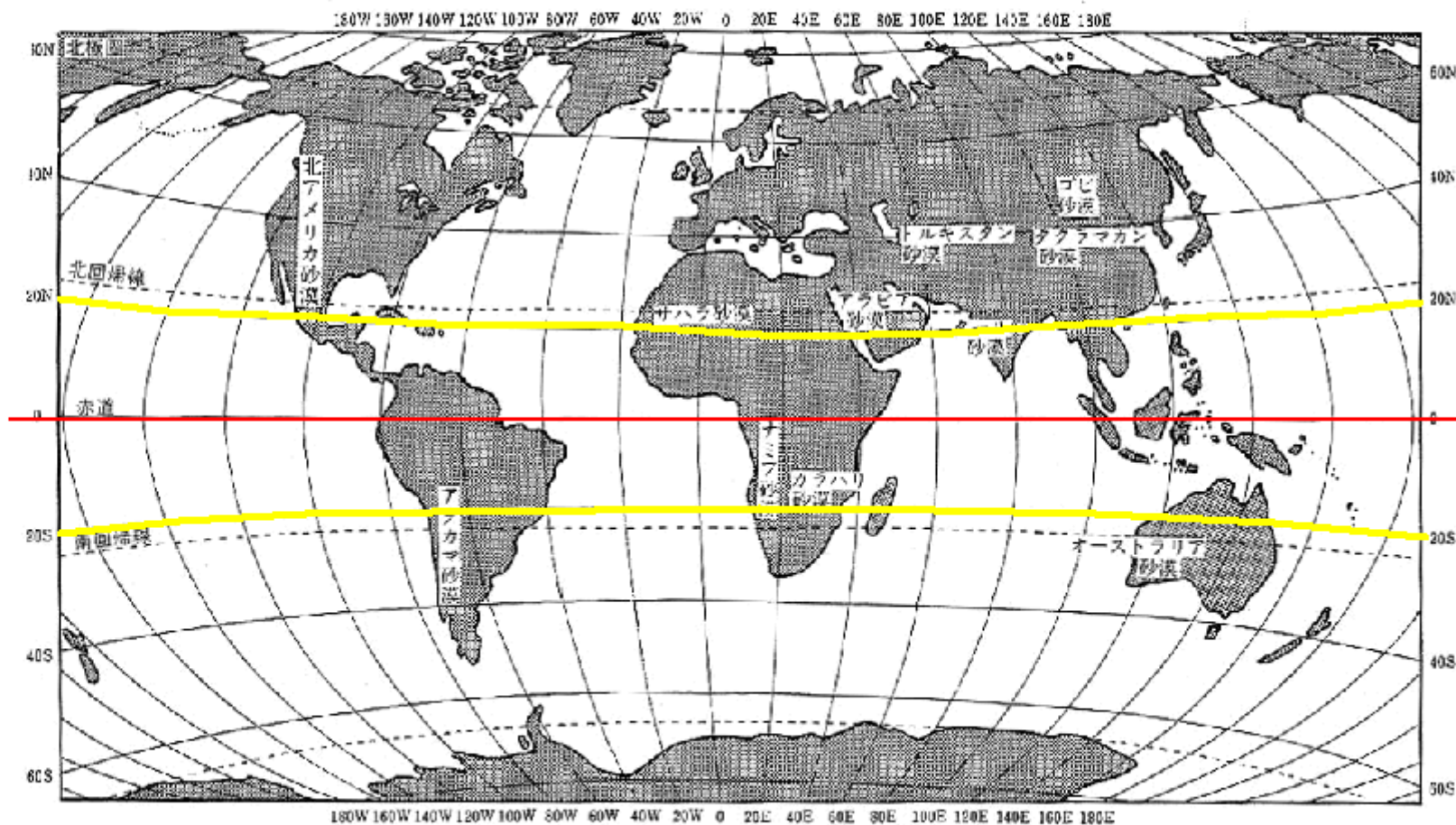


砂漠の分布

北緯20度

赤道

南緯20度



砂丘の種類

砂漠の砂丘は何か人を魅了するものを持っている

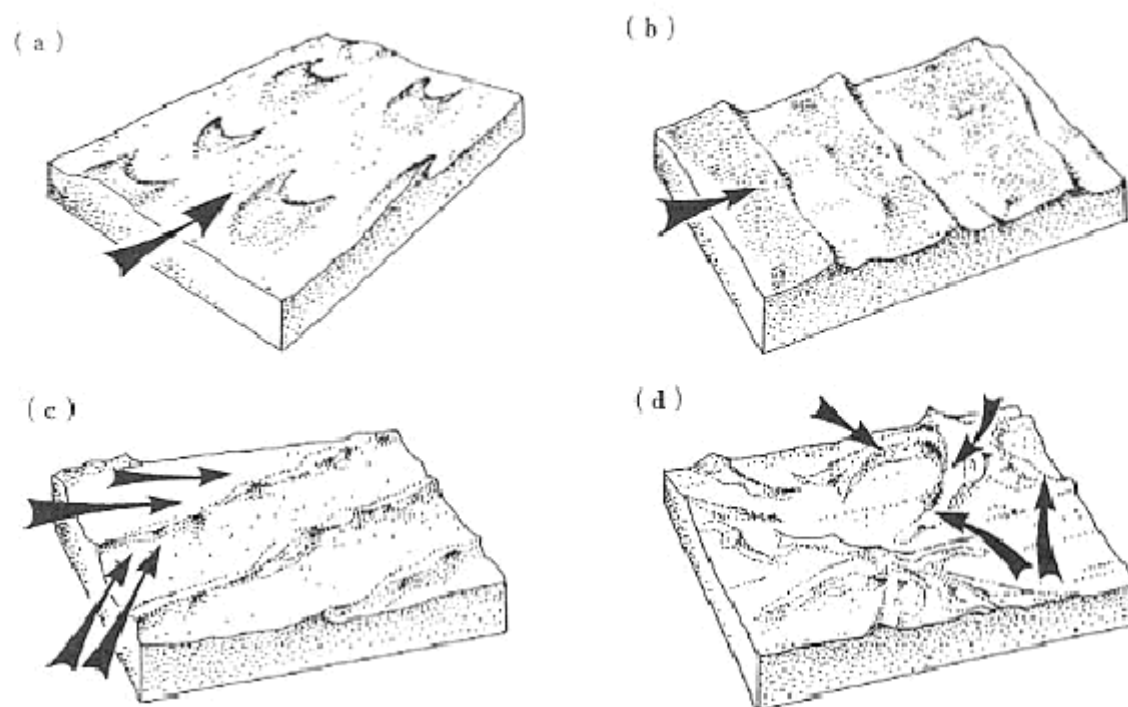


図4.3 砂丘の種類（貝塚他，1985を改変）

a：バルハン型砂丘，b：横列砂丘，c：縦列砂丘，d：星状砂丘

バルハン砂丘：砂の供給が少なく風向が一定している地域に形成
→砂丘という思い浮かべる形状

横列砂丘：風向に直角に延びる砂丘

縦列砂丘：風向が90度以内で季節変化する場合に形成

星形砂丘：風向が一定しない地域で形成





バルハン砂丘

・風向は左上から右下

・砂丘の間は内陸サブカ

縦列砂丘の例



星形砂丘



砂丘の形状を観察することによって砂の輸送経路がわかる

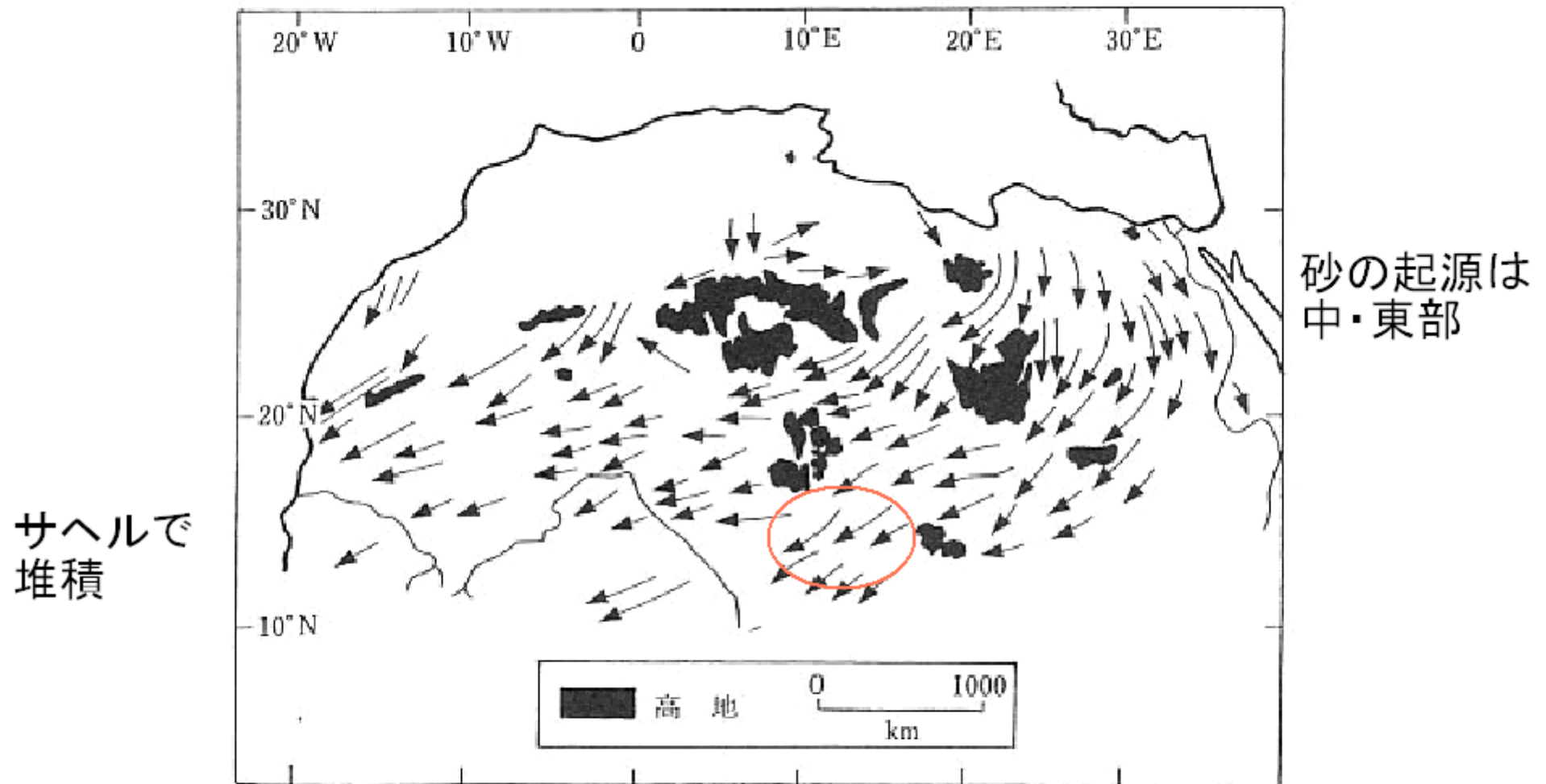
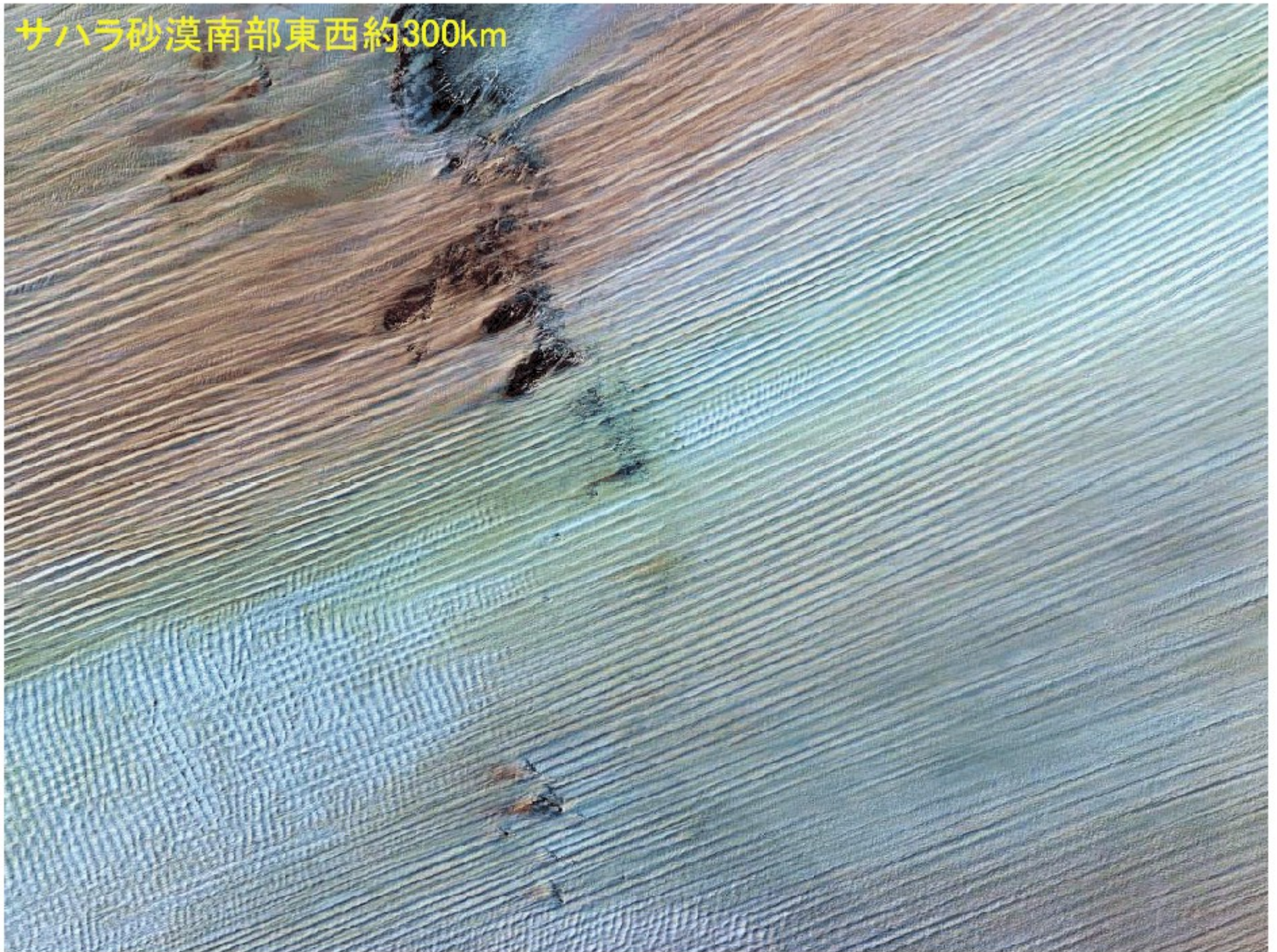


図4.7 サハラ砂漠における風による砂の輸送方向 (Adams et al., 1996)
衛星画像から読み取ったもの。

砂丘の形態と風向の関係を手がかりに、砂の移動方向を衛星データから読みとることができる

サハラ砂漠南部東西約300km



ダストは舞い上げられた砂や塵が風に乗って長距離輸送されるもの

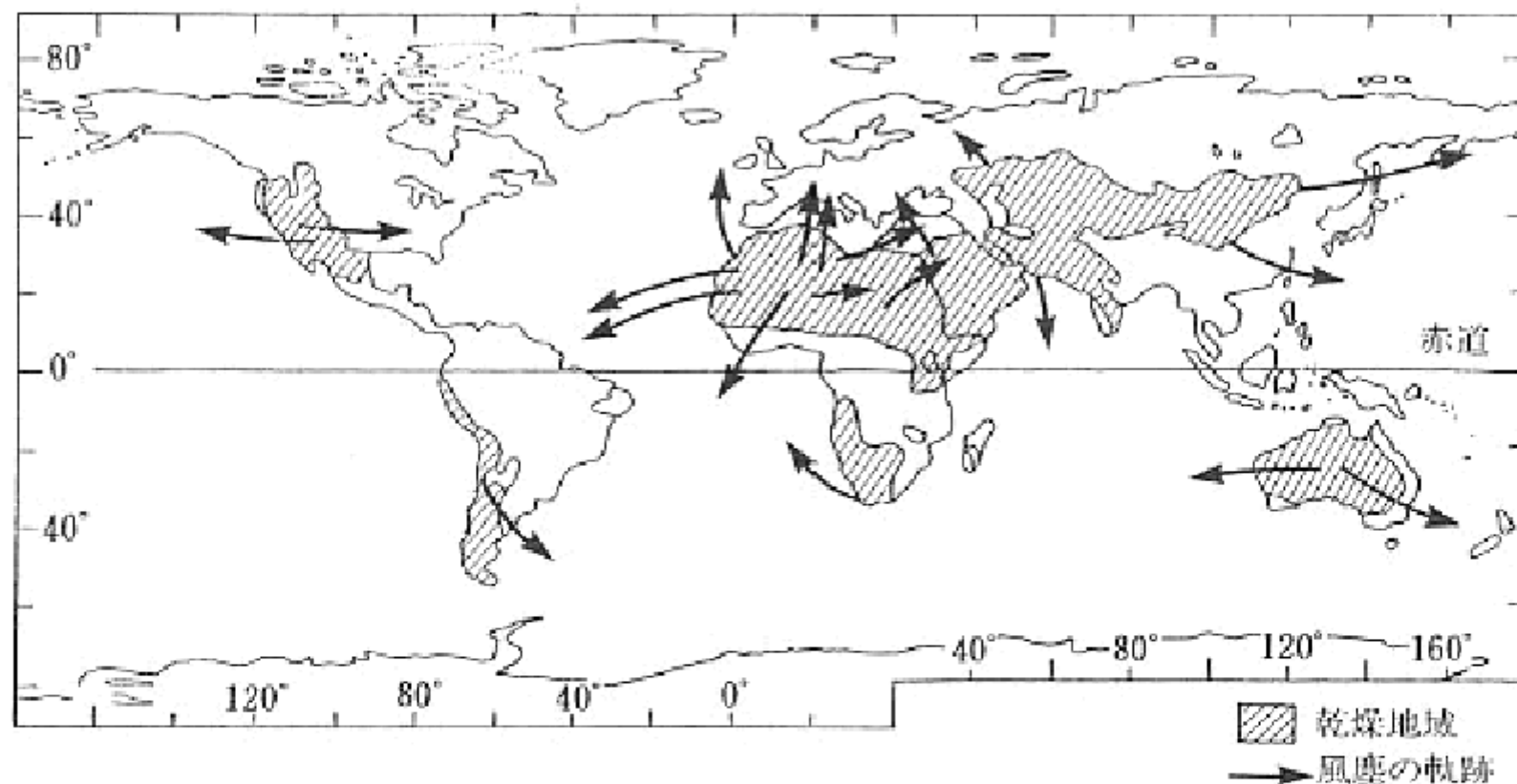
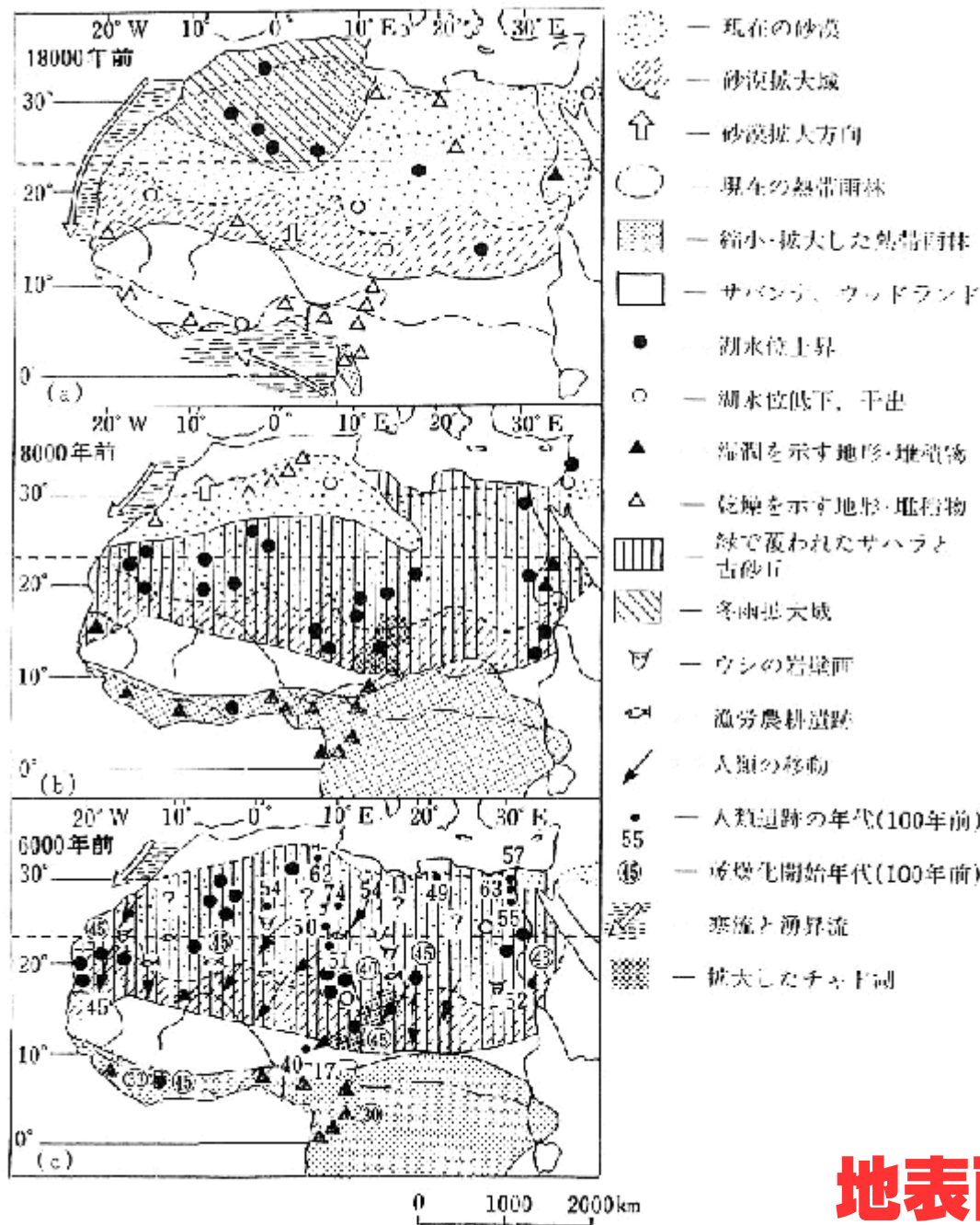


図4.8 ダストの起源と輸送経路 (Livingstone and Warren, 1996)

- ・タクラマカン砂漠やゴビ砂漠から東部に運ばれるものは、黄砂として有名
- ・最近黄砂が増えていると言われている
→人間活動

リモートセンシングの重要課題 ダストの発生と拡散
⇒人間要因と自然要因について考えよう



サハラ砂漠の歴史を理解しよう

氷期・間氷期の変動と森林の変遷
はすでに理解した

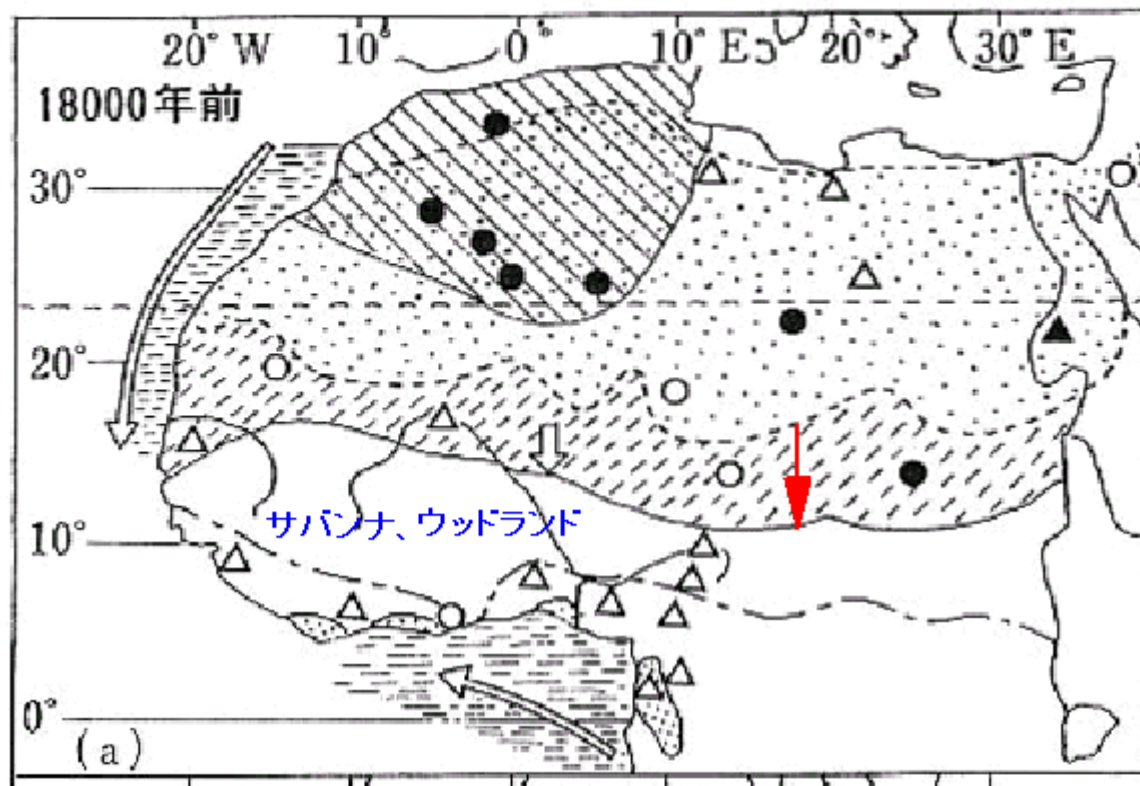
それは、中緯度の出来事の話で
あったが、熱帯ではどうか

熱帯では**乾湿**の変動として現れた

まず、自然な変動について理解した
後に、人間活動の影響を述べよう

地表面の性質と歴史





最終氷期の最寒冷期には熱帯アフリカは乾燥

サハラ砂漠の南限は現在より数百Kmも南下 ↓

この時の乾燥はサヘルで見られる古砂丘として残っている

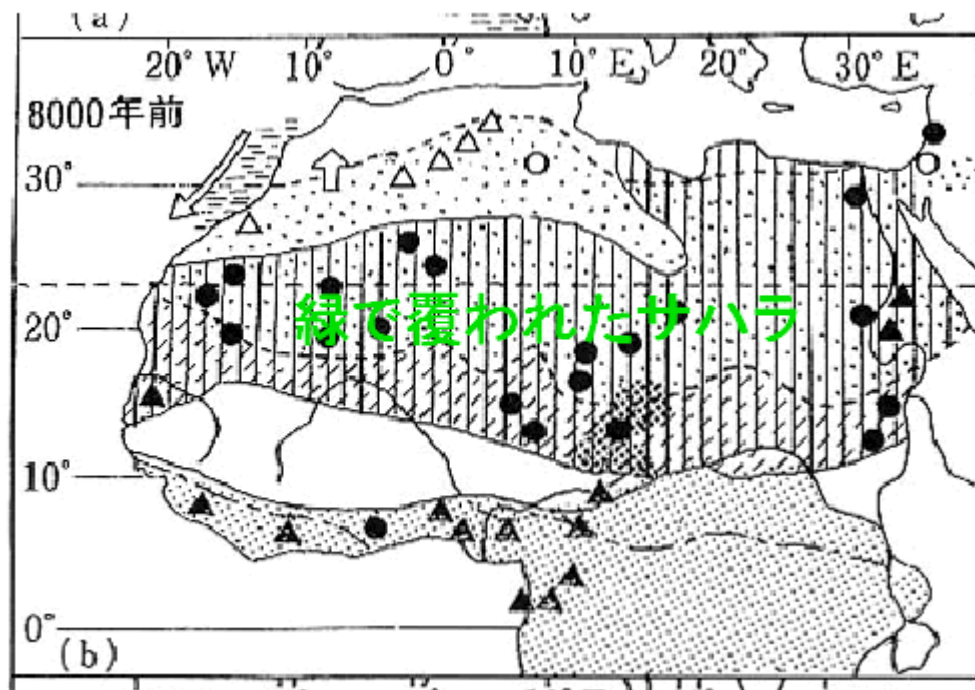
チャド湖は干上がっていた

熱帯林は縮小、じっと耐えていた

地表面の性質は歴史によって形成される

1963年のチャド湖

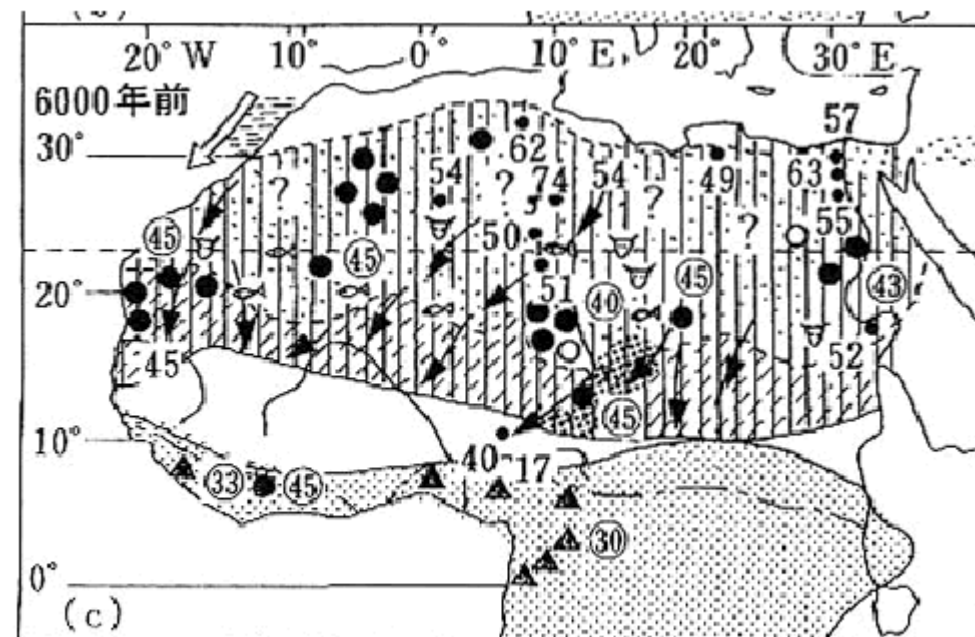




地球規模で温暖化が始まった1万2千年以降、湿潤化が始まり、9000～8000年前と、7000～5000年前にピークを迎えた

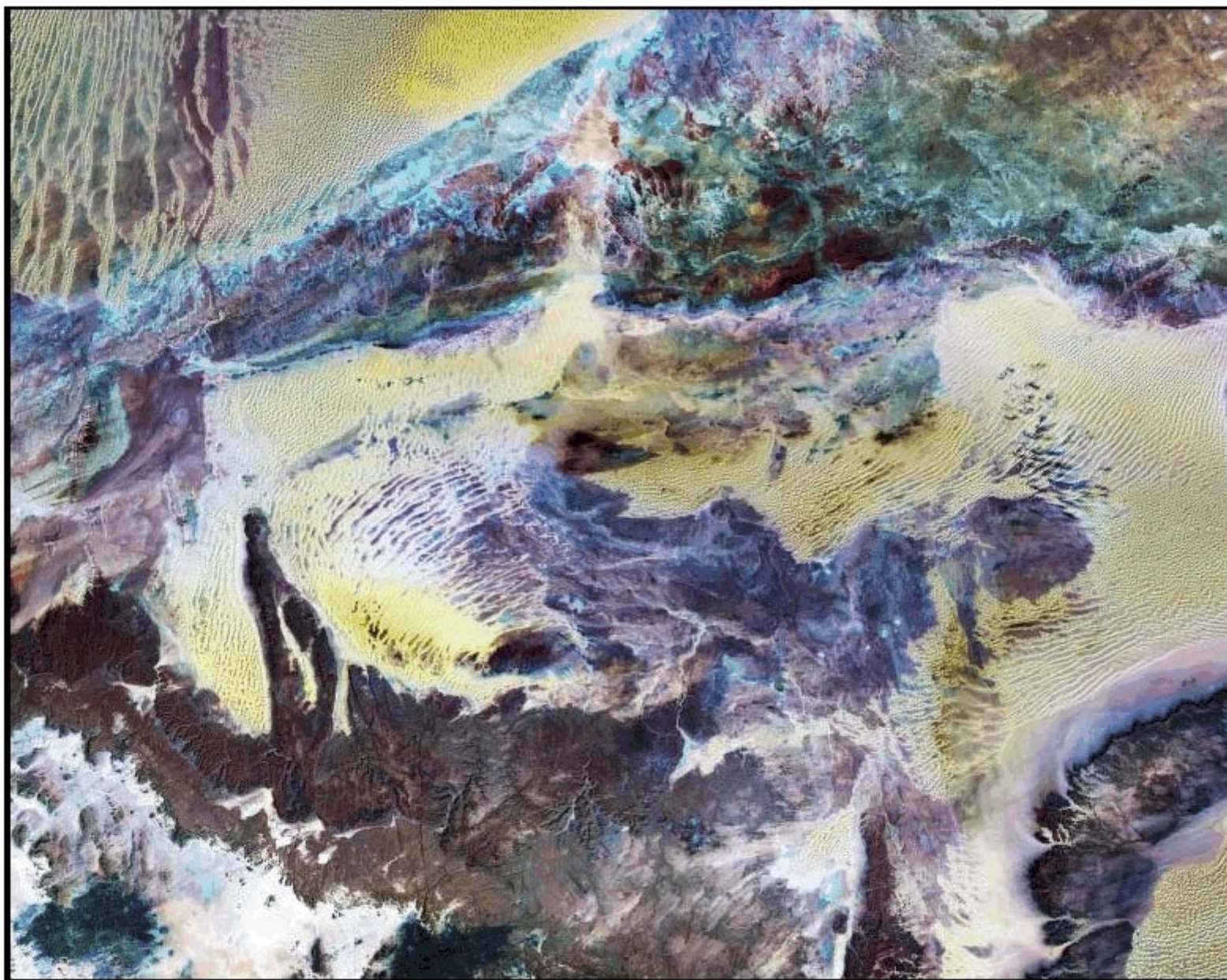
緑のサハラの時代を迎える

6000年前のチャド湖の水位は現在より高い位置にあった



タッシリ・ナジェールの遺跡





サハラ砂漠中央部タッシリ高原周辺(横幅約360km)

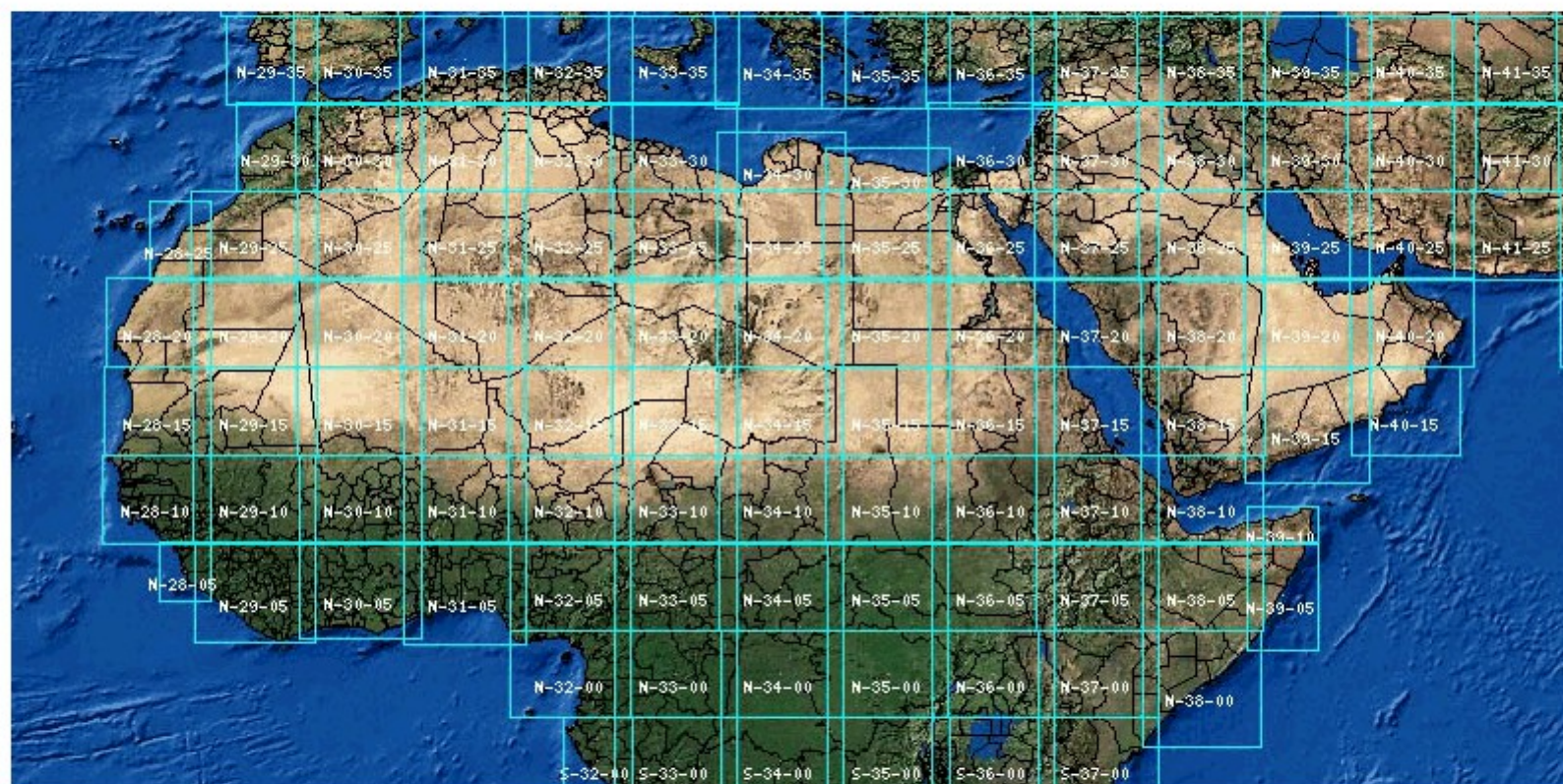
これまで沙漠の景観を見てきました

では、沙漠化地域と沙漠は違うの？

違います！

(バックはサウジアラビア、ルブ・アルハリ沙漠 横幅約300km)

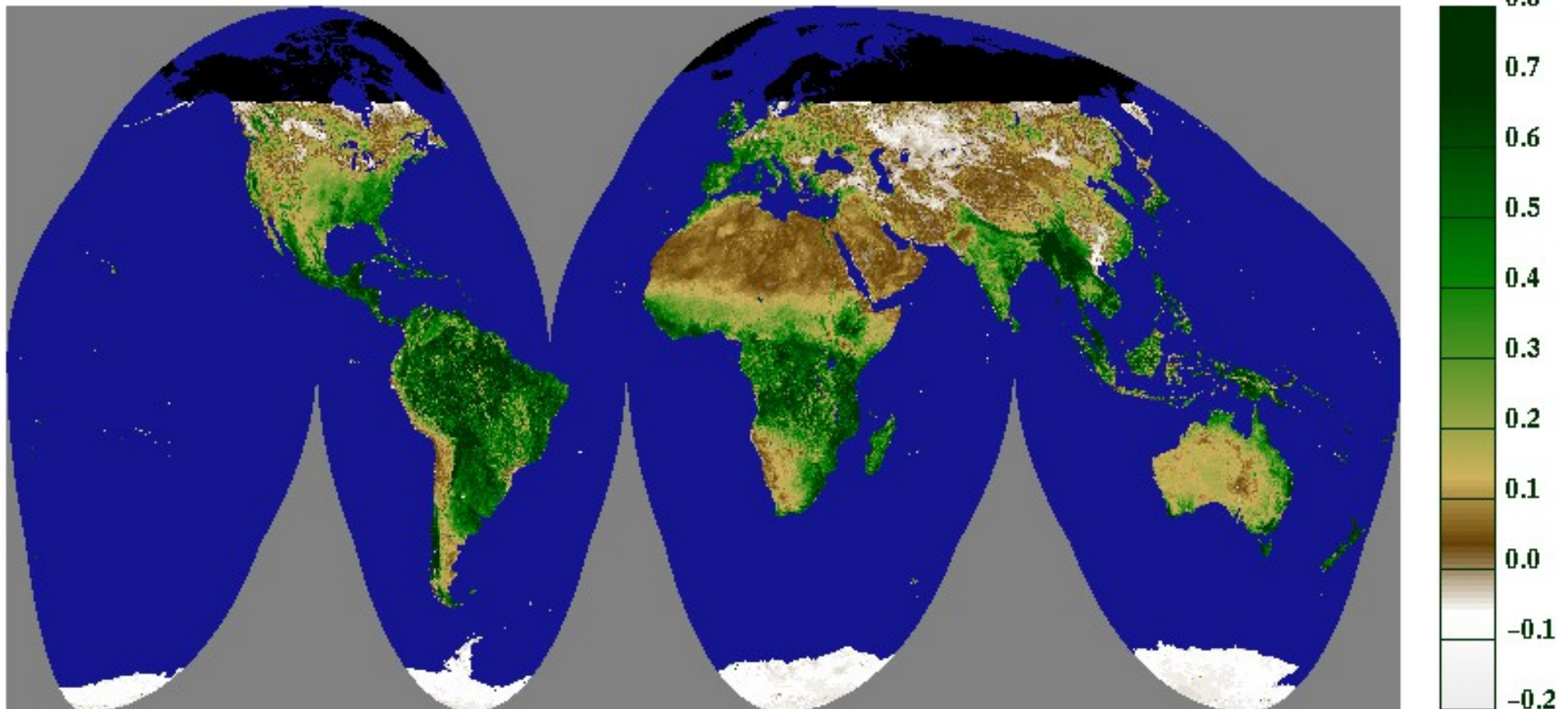
サヘルとはサハラ沙漠の南縁に位置する帯状の半乾燥地域



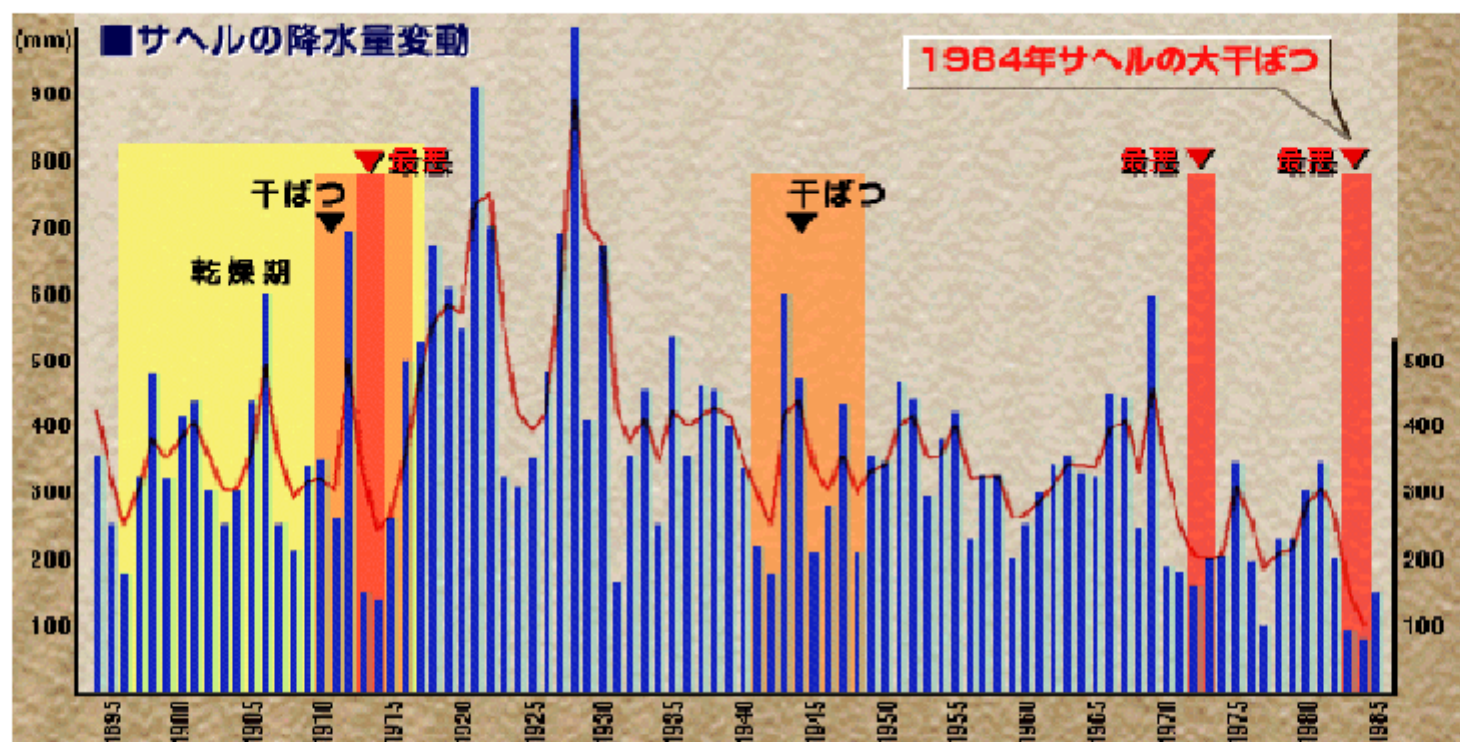
半乾燥地域では1年は雨季と乾季から構成される

NOAA 衛星による植生指標の季節変化 (1990 年)

GLOBAL NDVI 1990/01/01-1990/01/10



サハラ砂漠南部、サヘル地域は近年何度も深刻な干ばつに見舞われた



(鳥取大学乾燥地研究センター)

干ばつは、砂漠化を引き起こし、ますます生活維持基盤が少なくなっていく

砂漠化とは

「乾燥、半乾燥および乾性半湿潤地域における種々の要素(気候変動および人間の活動を含む)に起因する土地の劣化」

砂漠化対処条約(1994)による定義: 日本も1998年に批准し、砂漠化地域を支援する立場になった

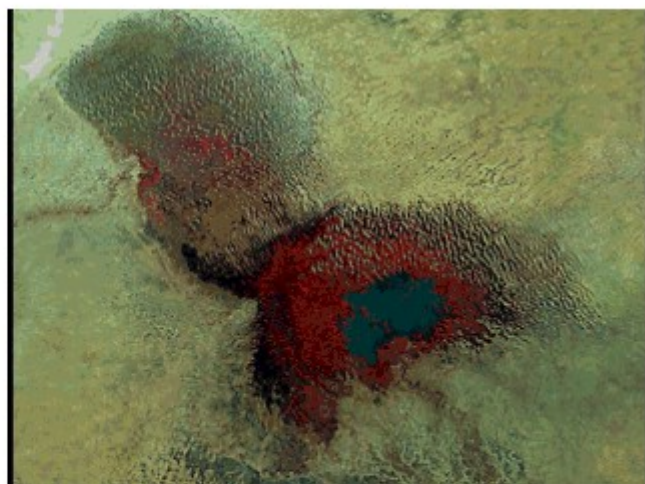
チャド湖の水面積の変遷



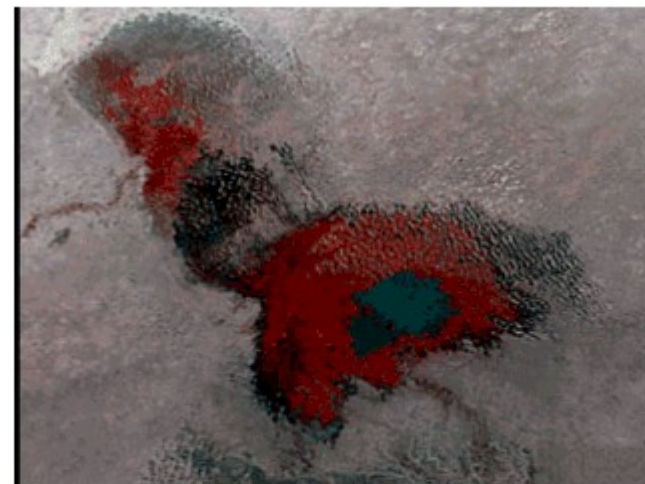
1963年



1973年



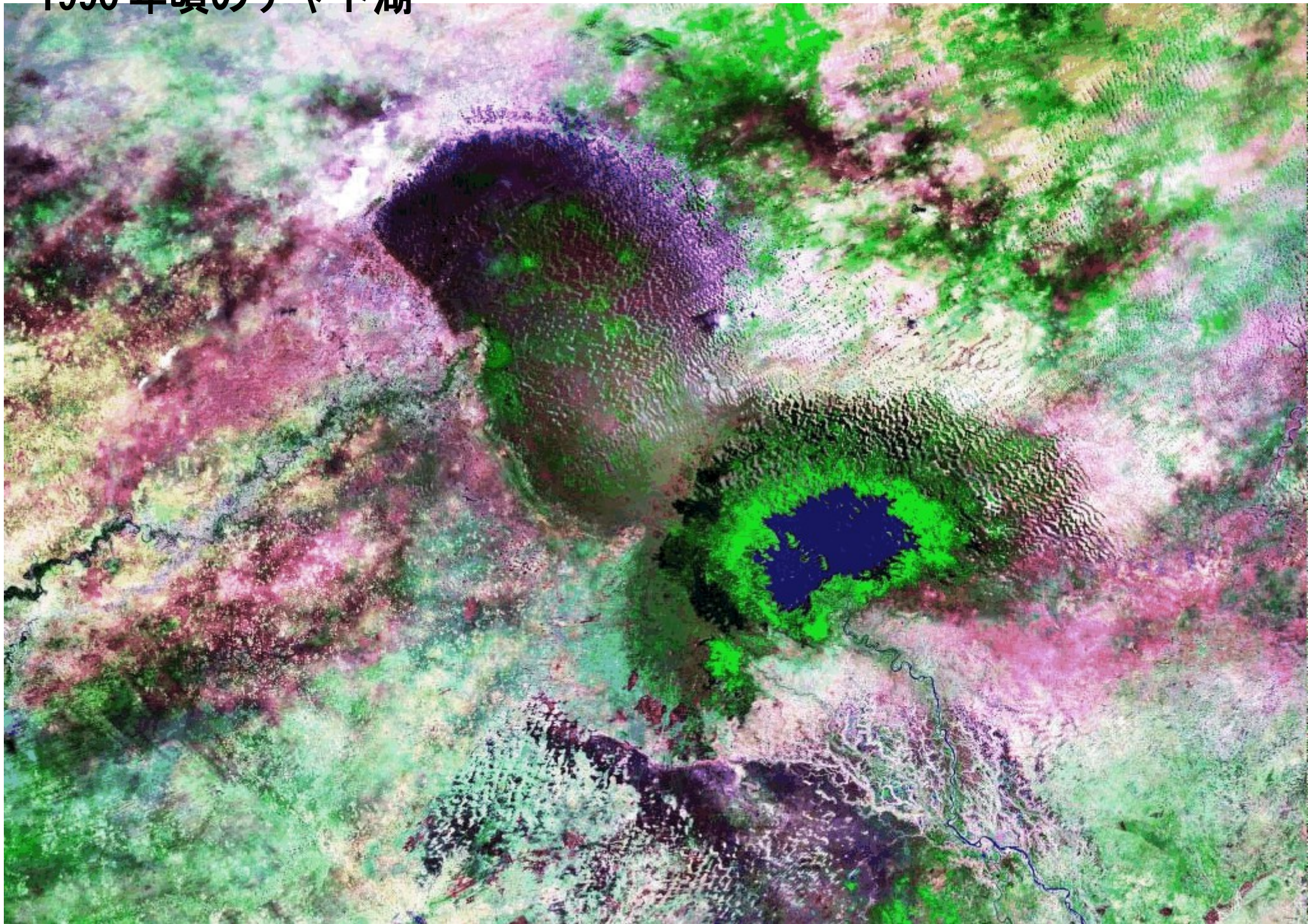
1987年



1997年

水面積が小さくなっても、かつての湖底は土壤水分が多いので植生が繁茂している
(画像の赤い部分)

1990 年頃のチャド湖



これまでに理解したように「**砂漠**」はそれが存在する必然性がある

・「**砂漠化地域**」は**気候的要因**による必然的なものと**人為的要因**によるものがある(気候要因も人為的なものが含まれている可能性もある)

・気候的要因<人為的要因

人為的要因とは

過放牧、薪炭材の過剰採集、過開墾、塩類集積、等

一般論で説明しようとすると、時に現実を見誤ることあり

注意

乾燥地における人為的要因別土壌の劣化面積(極乾燥地は除く)(単位: 10^6 ha)

地域	乾燥地面積	うち土壌の劣化面積					小計
		過放牧	樹木過伐採	過開墾	不適切な土壌・水管理	その他	
アフリカ	1286.0	184.6	18.6	54.0	62.2	0.0	319.4
アジア	1671.8	118.8	111.5	42.3	96.7	1.0	370.3
オーストラリア	663.3	78.5	4.2	0.0	4.8	0.0	87.5
ヨーロッパ	299.6	41.3	38.9	0.0	18.3	0.9	99.4
北米	732.4	27.7	4.3	6.1	41.4	0.0	79.5
南米	516.0	26.2	32.2	9.1	11.6	0.0	79.1
計	5169.1	477.1	209.7	111.5	235.0	1.9	1035.2

UNEP1997を改変

(鳥取大学乾燥地研究センター)

過放牧、過開墾、薪炭材の過剰採集、塩類集積、等とはどういうこと？

人間要因

土地のポテンシャルを超えて、多くの家畜を放牧、開墾を行うこと

- ・中国、内蒙古では清朝時代からの漢民族の移住により、放牧地が減少、また農業に適していない地域の農業活動
- ・モンゴルではもともと人口密度が小さいため、砂漠化は顕著ではなかったが、最近はカシミヤヤギの飼育により、草原の衰退が起こっているようである

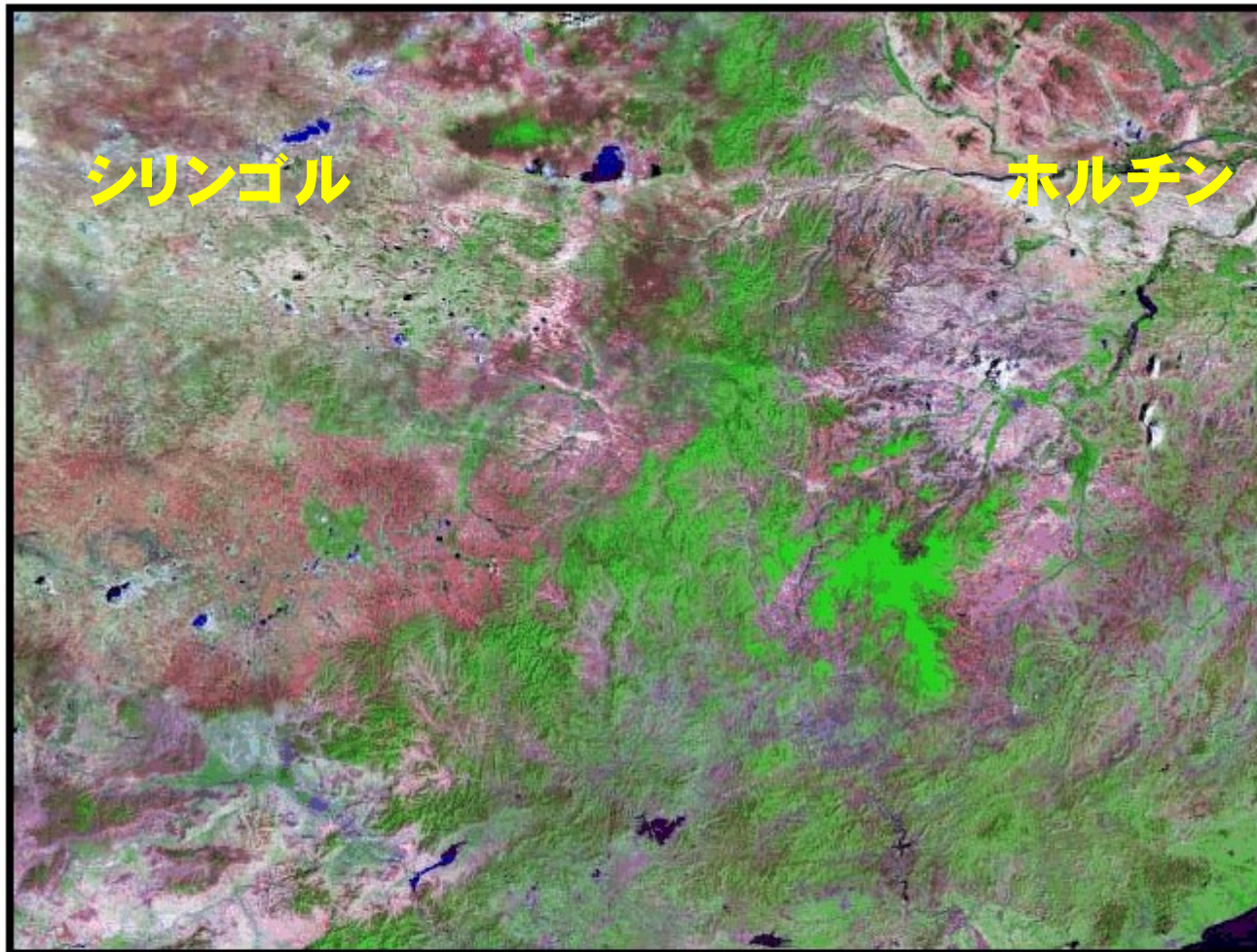
・再生より多くの量の樹木を伐採

- 燃料としての樹木（途上国では薪炭材としての樹木の利用が最も多い）
→ 燃焼効率の改善、熱源の変更（ただし、石油資源の限界は見えている）

不適切な水管理

- ・灌漑により地下水面を上げすぎると、蒸発により地表面近傍に塩類が集積
→ 管理により回避、人間活動には智慧が必要

砂漠化問題の理解には地域性の理解が不可欠
フィールド科学では一般性の追求だけでなく、個別性の理解が必要



中国、内蒙古も砂漠化に悩む地域のひとつ

しかし、国境を越えたモンゴルではまだ深刻な問題にはなっていないようである

(ただし、カシミヤ人気で若干問題になっているようである)

なぜか？

- ・清朝以降の中国政府による漢民族の移住政策
- ・漢民族は農耕民族→乾燥地域における農業→地域の条件にあった農法が必要だが...
- ・蒙古民族は遊牧民族→持続可能な草原経営可能

環境問題を認識するには総合的な視点が必要



その背景にあるものは何か



地域の住民の貧困と急激な人口増 → **社会経済的要因**

どうすればよいか

(これは教えてもらうものではない、自分で考えるべきことである)

・子どもを生まない、・贅沢をしない、....

→ 自分にできるか？、“人道的”という言葉も気にかかる

どう生きるべきか

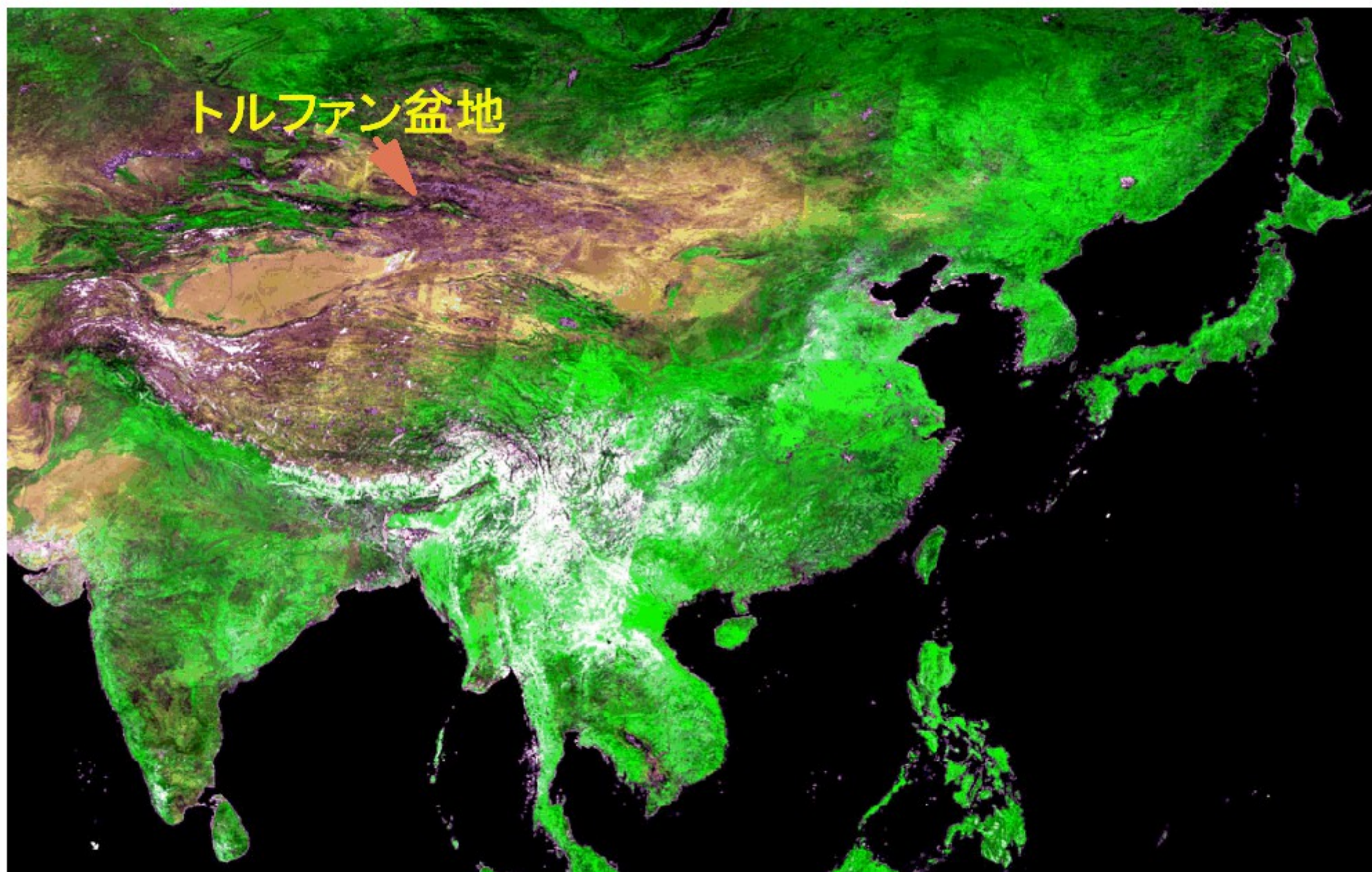


未来のあるべき姿を想定して、それに合わせて現在の生き方を変える

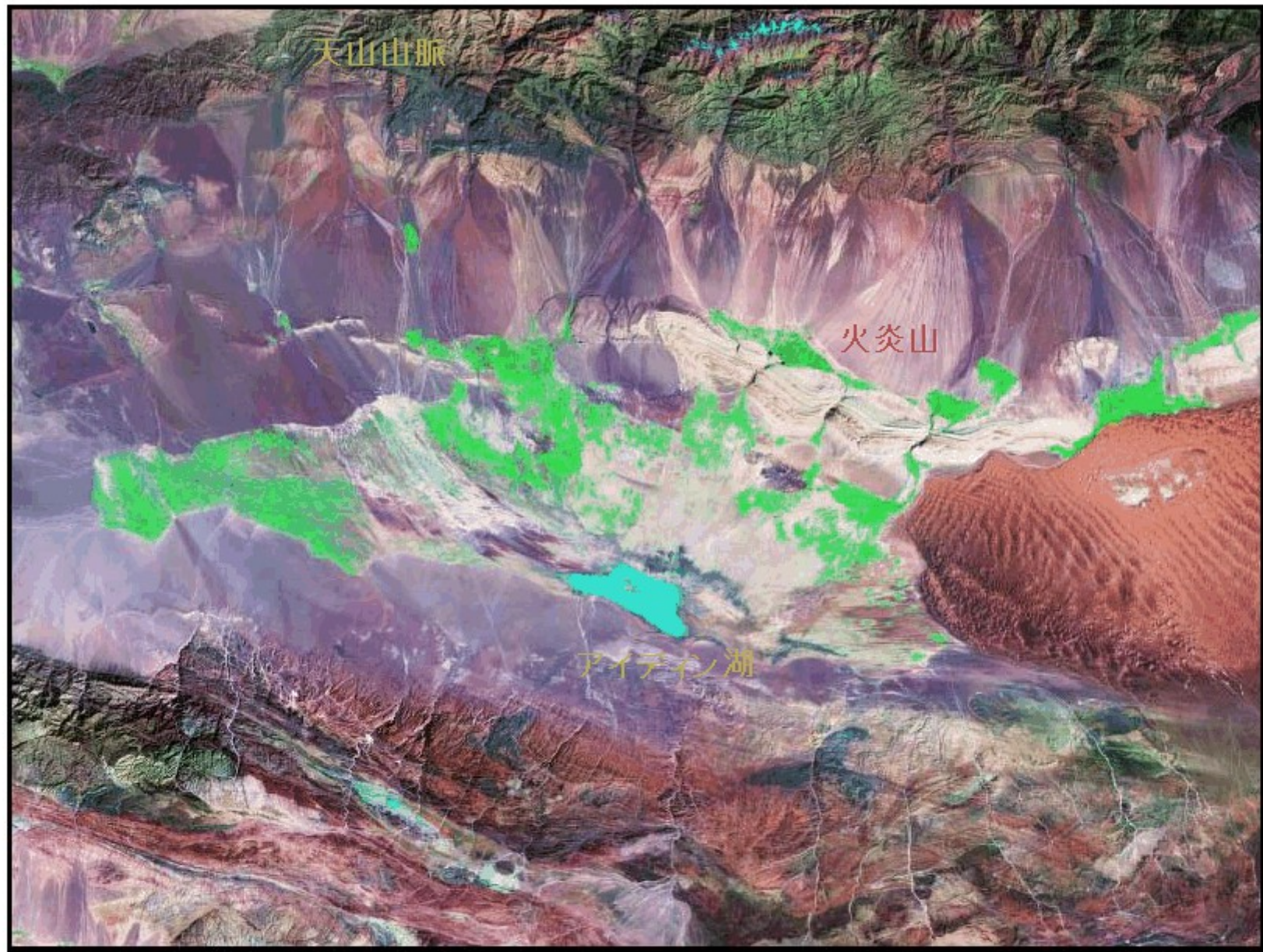
→ 困難だが、認識レベルが高まってきた現在、生き方を変えることも可能か？

サヘルの例では、降水の多い時期に合わせて生活を変えているから、降水の少ない時期に大打撃を受けるとも考えられる。環境の認識レベルが上がったら、生き方を変えるモチベーションになるか？ <> 南北問題

【閑話休題】 未来を変えるから今を良くするへ

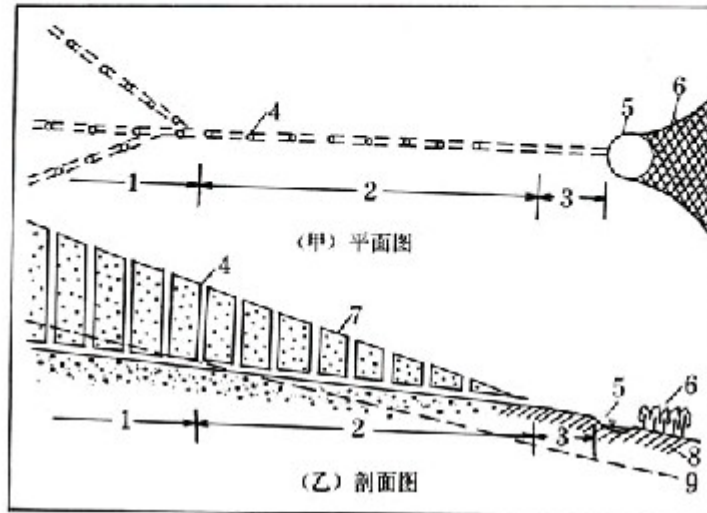


SPOT-4/VEGETATIONによる2000年8月上旬のアジア画像

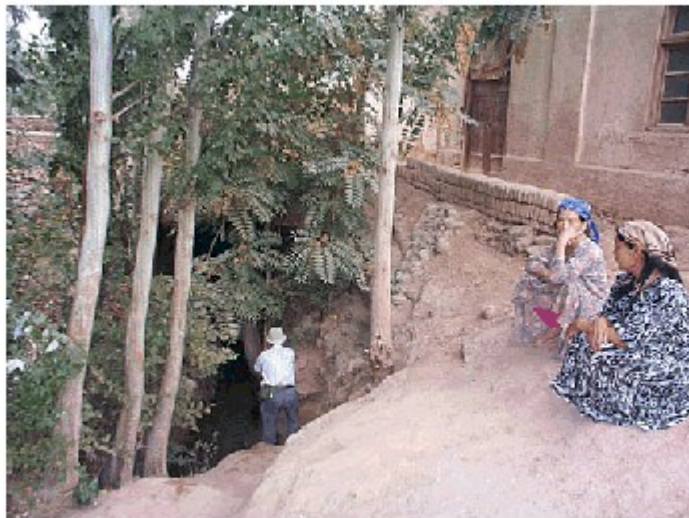


トルファン盆地 緑色部の大部分は人間により作り出された景観

新疆トルファンの坎儿井(カレーズ)



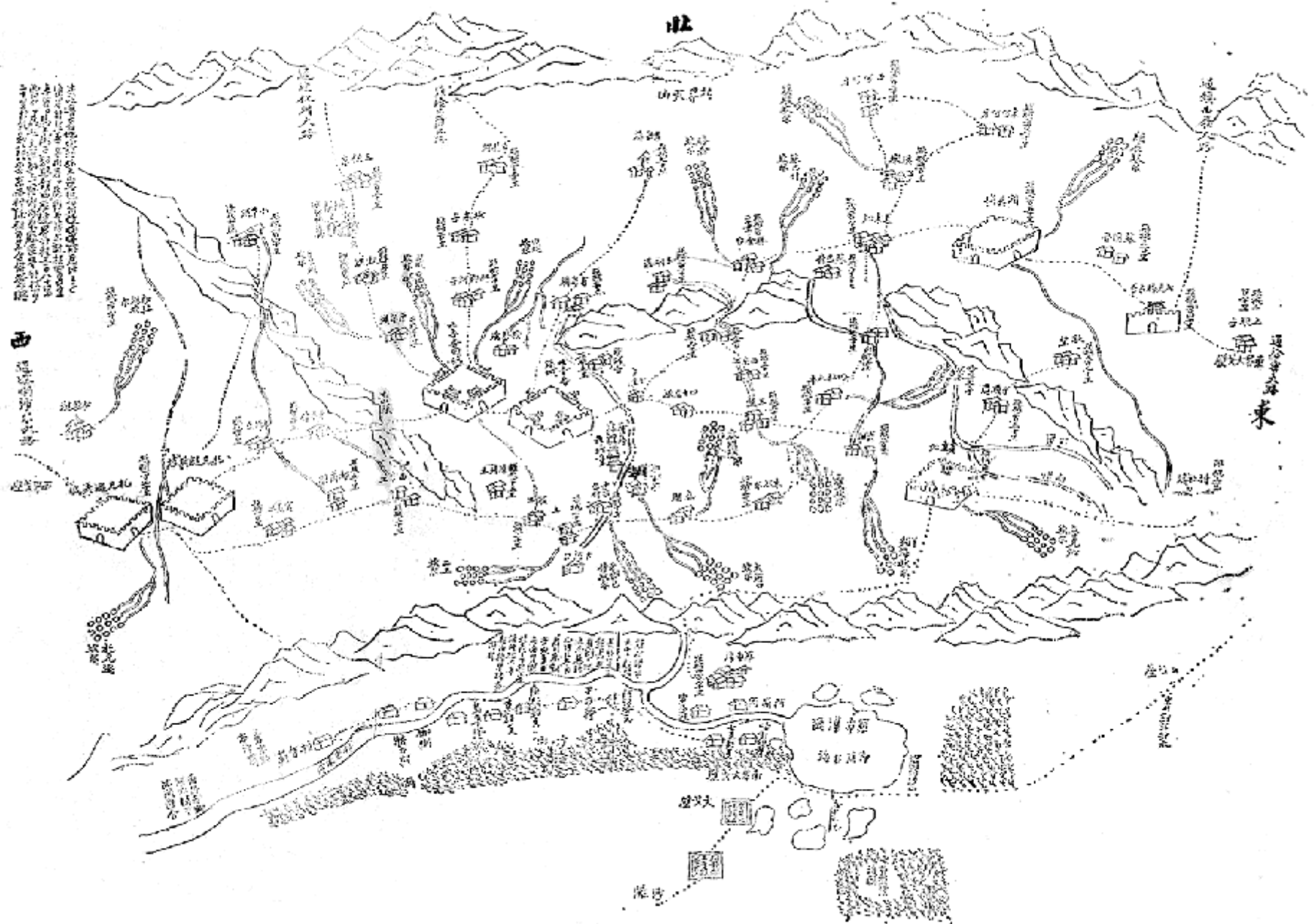
坎儿井は天山山脈の融雪水を源とする扇状地の地下水を長い人工トンネルを穿ってオアシスに導水する伝統的システムである。持続可能なシステムであるが、維持・管理が大変であるため最近では井戸、開水路による導水が盛んに行われ、坎儿井は衰退しつつある。同時に地下水位は低下を続けているという。



左: 爽やかな風が吹く坎儿井の出口、しかしオアシスを一歩出ると、そこは荒涼としたゴビである。

右: 地下水揚水井。資金さえあれば簡単に水が手に入り、維持・管理も楽である。

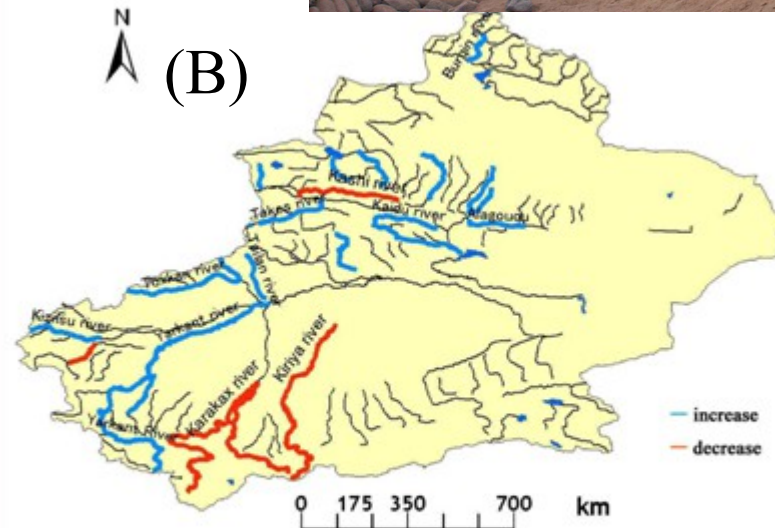
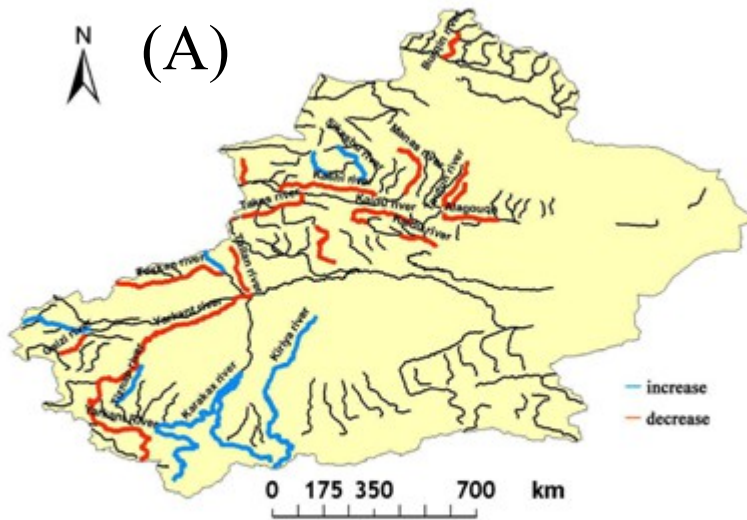




清朝末期頃のトルファン盆地周辺のカレーズの分布

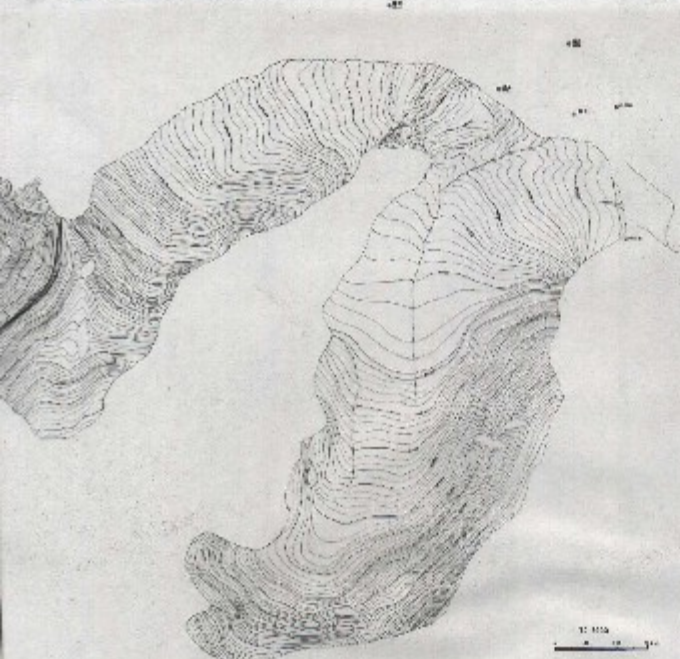
トルファン盆地の問題点は

- 地下水揚水
地下水位低下により伝統的な
カレーズの水が枯渇
- 開水路による灌漑水路の建設
なぜか？地球温暖化
水はどこから来るのか？
氷河？

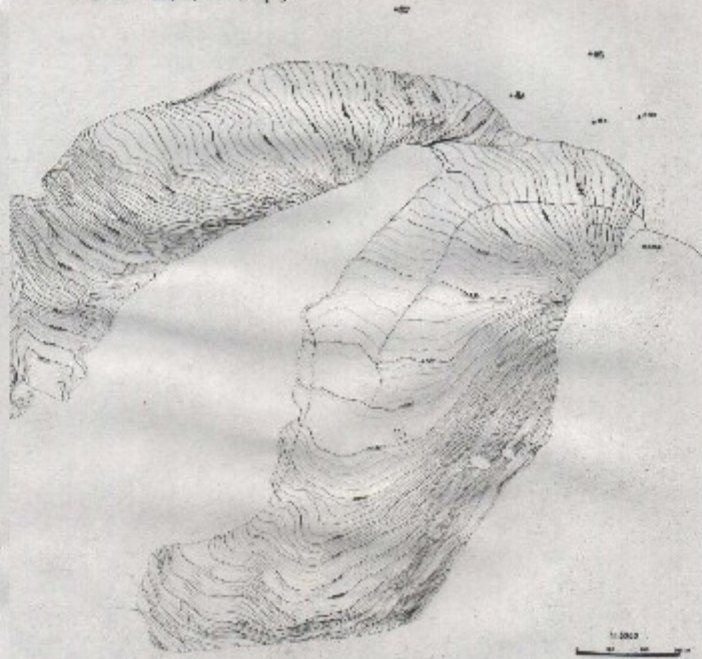


(A) 1956～1986年、(B) 1987年～2000年の期間における河川流量の変化。赤が減少、青が増加を表す。

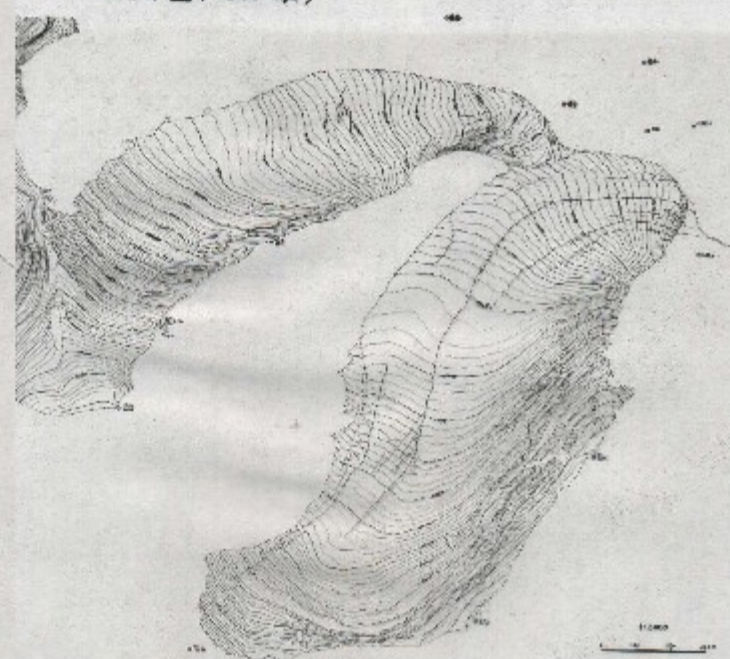
天山乌鲁木齐河源1号
冰川图(1962年)



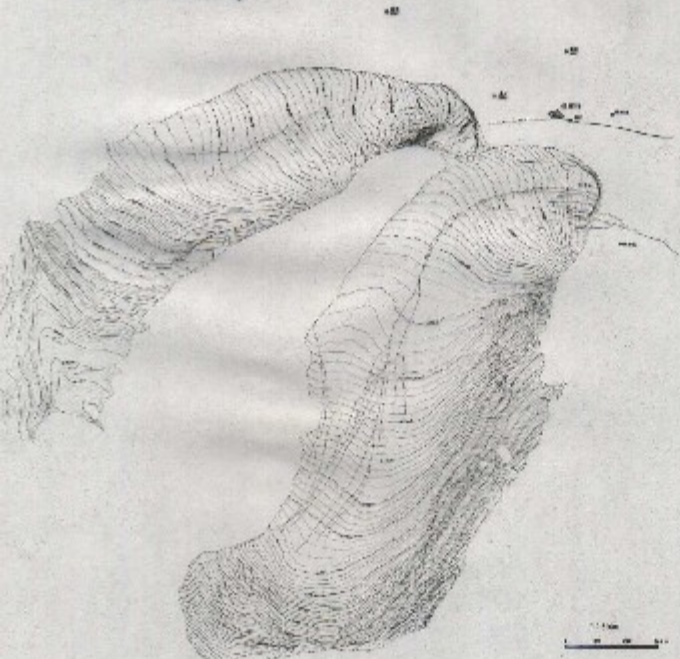
天山乌鲁木齐河源1号
冰川图(1973年)



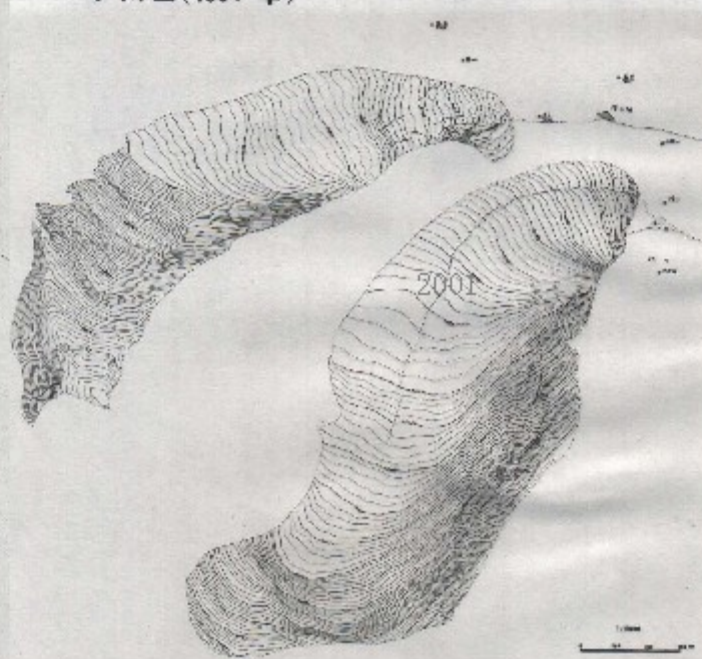
天山乌鲁木齐河源1号
冰川图(1980年)



天山乌鲁木齐河源1号
冰川图(1986年)



天山乌鲁木齐河源1号
冰川图(1994年)

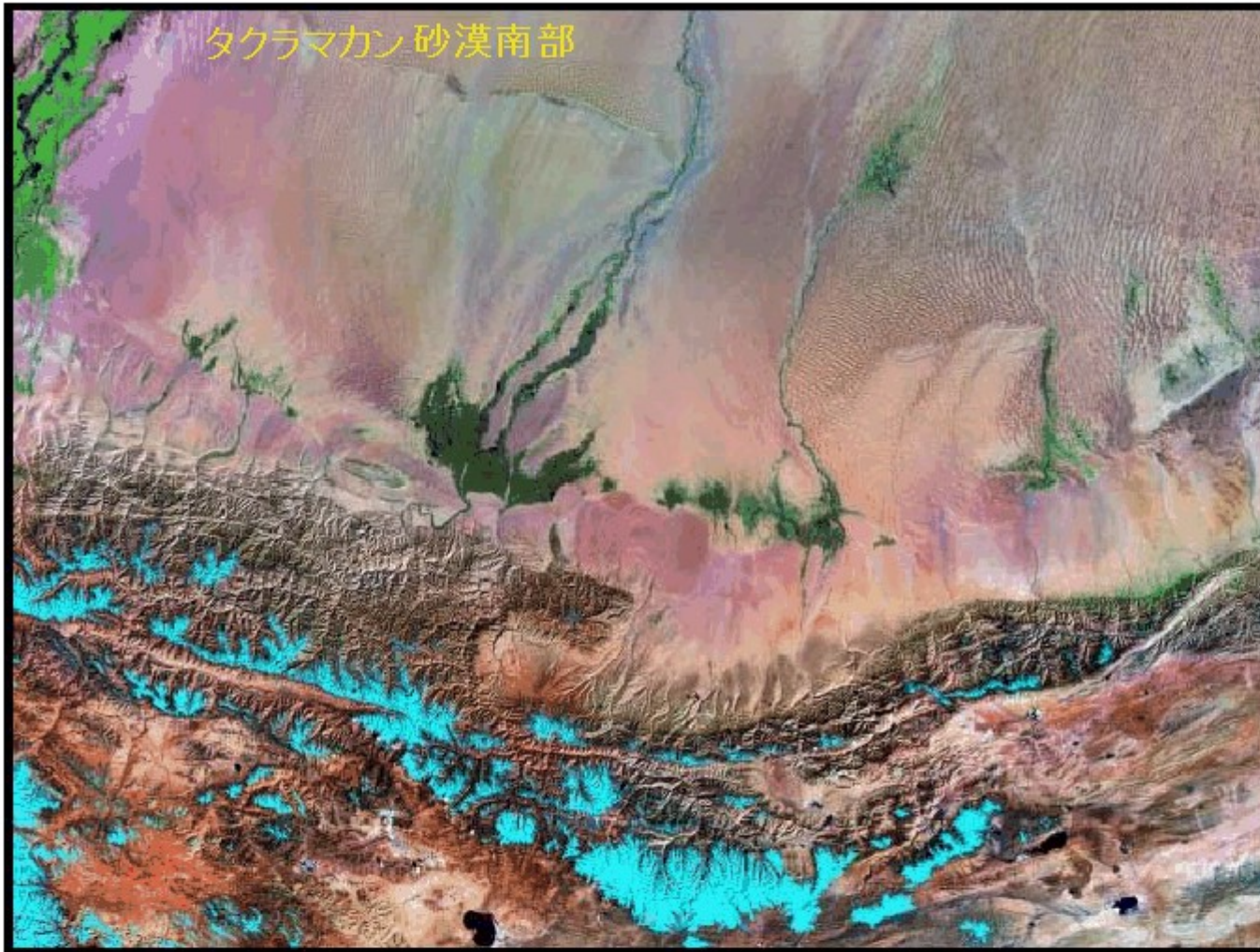


**ウルムチ1号氷河
縮小中！**
(李忠勤、PC)



中緯度の山岳氷河では温暖化により、気温が 0° を越えれば融ける

タクラマカン砂漠南部



地球温暖化によって
氷河が融けていると
しても、氷河の堆積
には限界があるので、
増えた水資源は
持続的なものではない



- ・中央アジアの砂漠地域では融雪・融氷水が重要な水資源となっている
- ・最近、山地から平地にでる扇状地の扇頂から開水路による導水による農地開発が増えているように思える
- ・(仮説)河川流量が増えている？

砂漠の水

一般的に考えられているオアシスの成因

山脈で降った雨が帯水層内を流れて、地表に顔を出す



中国のアルチン山脈、何キロメートルも離れたところに降った雨が地下を流れて砂漠のオアシスを作り、その周囲に植物が茂っている。



ふつう、オアシスの水の供給源は山脈（上左）の風上側に降る雨で、これが帯水層と呼ばれる多孔質の岩（点々の部分）にしみこむ。この地下水が帯水層の傾斜に沿って流れ、断層の部分（右）で岩に行く手を阻まれると、水圧によって地表に押し上げられてくる。



デフレーションと呼ばれる風と砂による侵食のため、地下水面よりも低い窪地（右）がつくられた場合にも、オアシスができる。帯水層の飽和している部分（青い部分）の水は傾斜にしたがって流れ、砂漠の表面が低くなった部分で地表に現れる。



砂漠の地下水はどのくらい
の時間をかけて流れて
いるのか？

万年のオーダー
→氷期の水

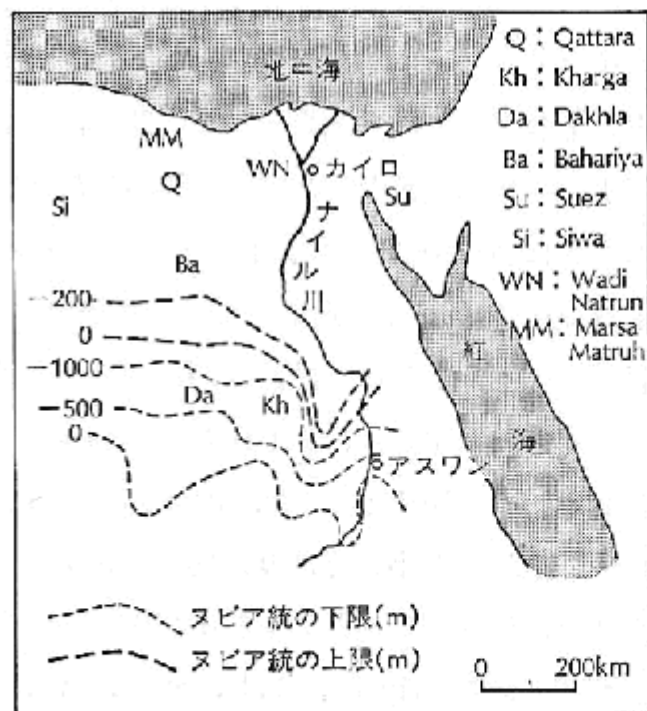


図 7.9 リビア砂漠の地下水採水地点
(Münnich *et al.* 1962)

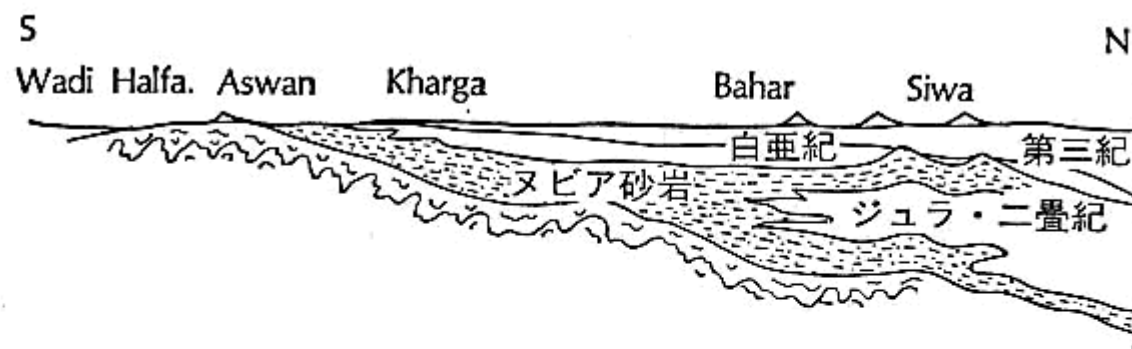


図 7.10 リビア砂漠の地質断面 (Knetsch, G. 1963)

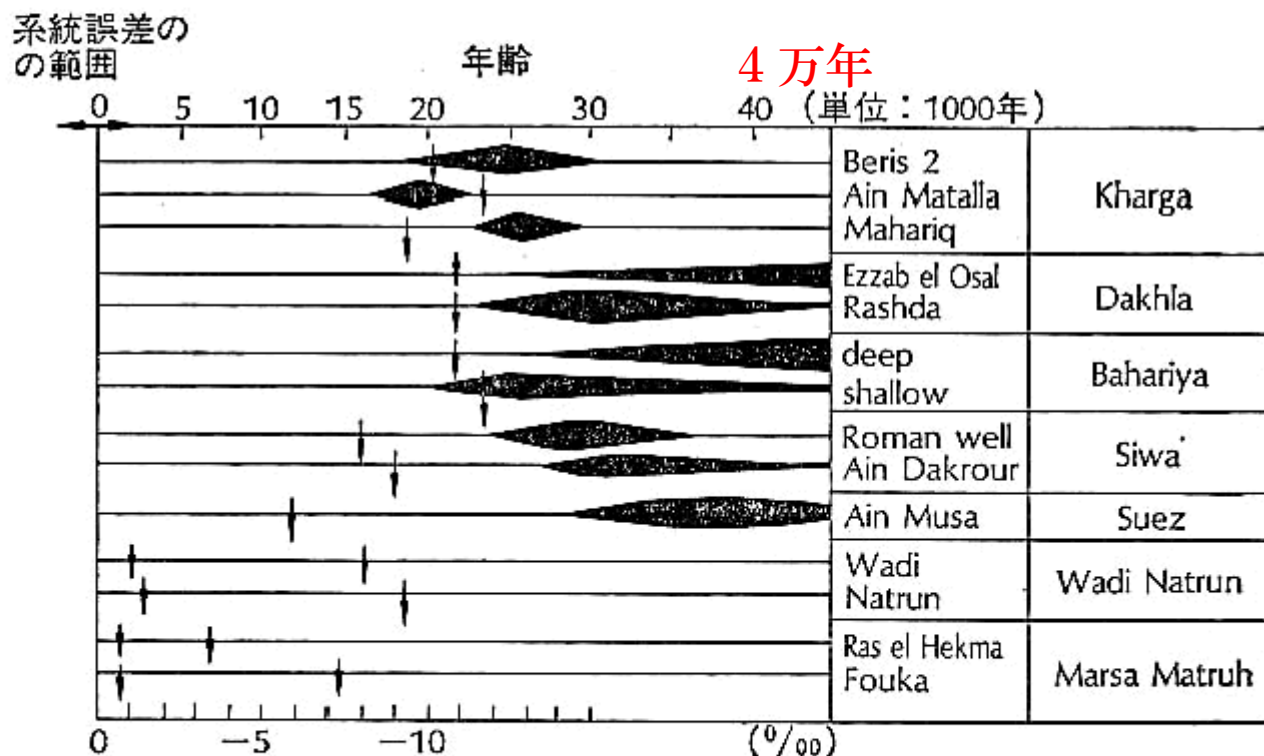


図 7.11 リビア砂漠の地下水の年齢 (Münnich *et al.* 1962)
(下向きの矢印は ^{13}C の δ 値を示す)

砂漠にも雨は降る



96年3月、UAE内陸部は数年ぶりの洪水に襲われた

その水は普段は水の流れていないワジに押し寄せ、財産も破壊した

しかし、その水はワジを通じて地下水を涵養し、人間生活に役立っている

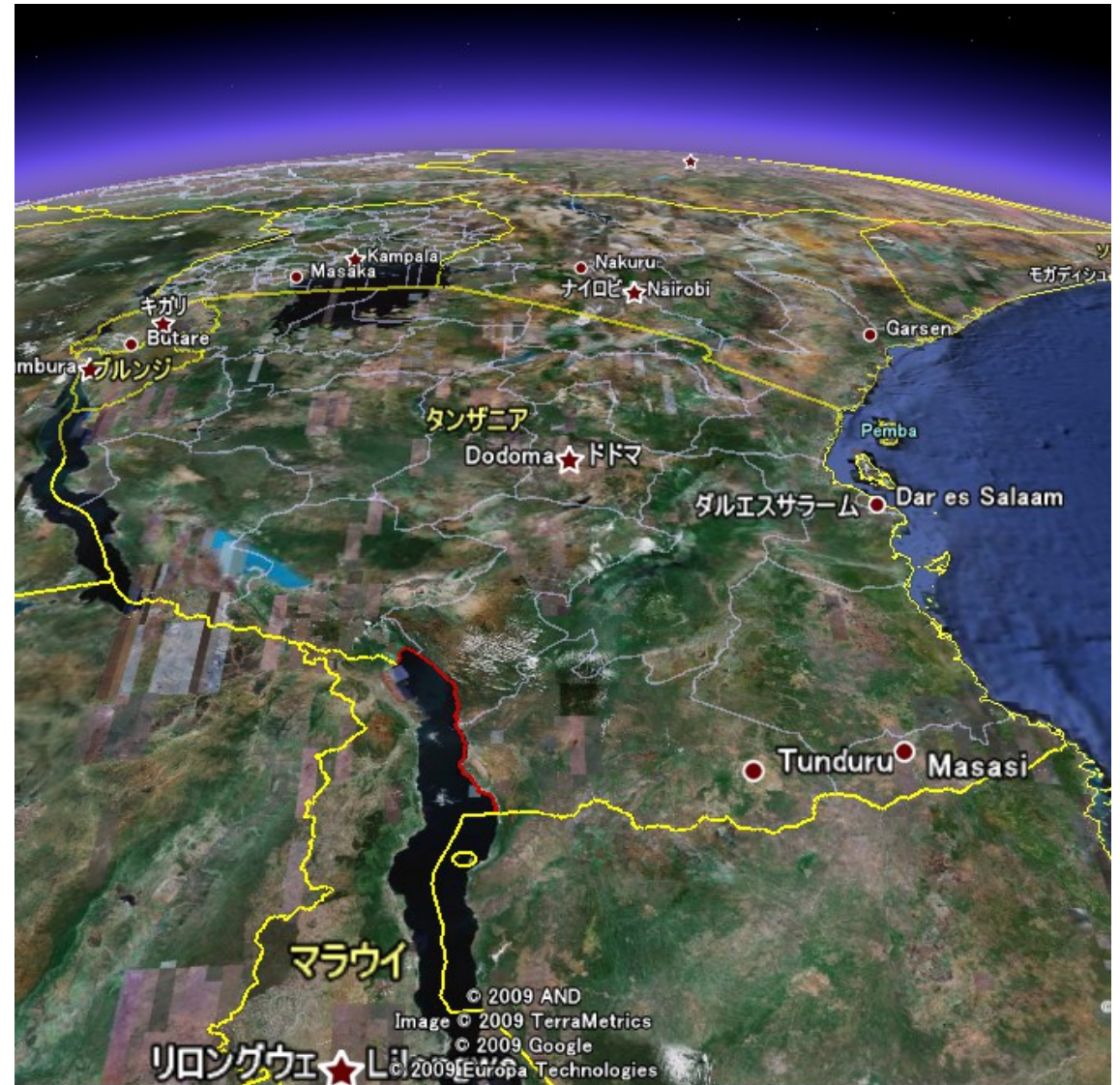
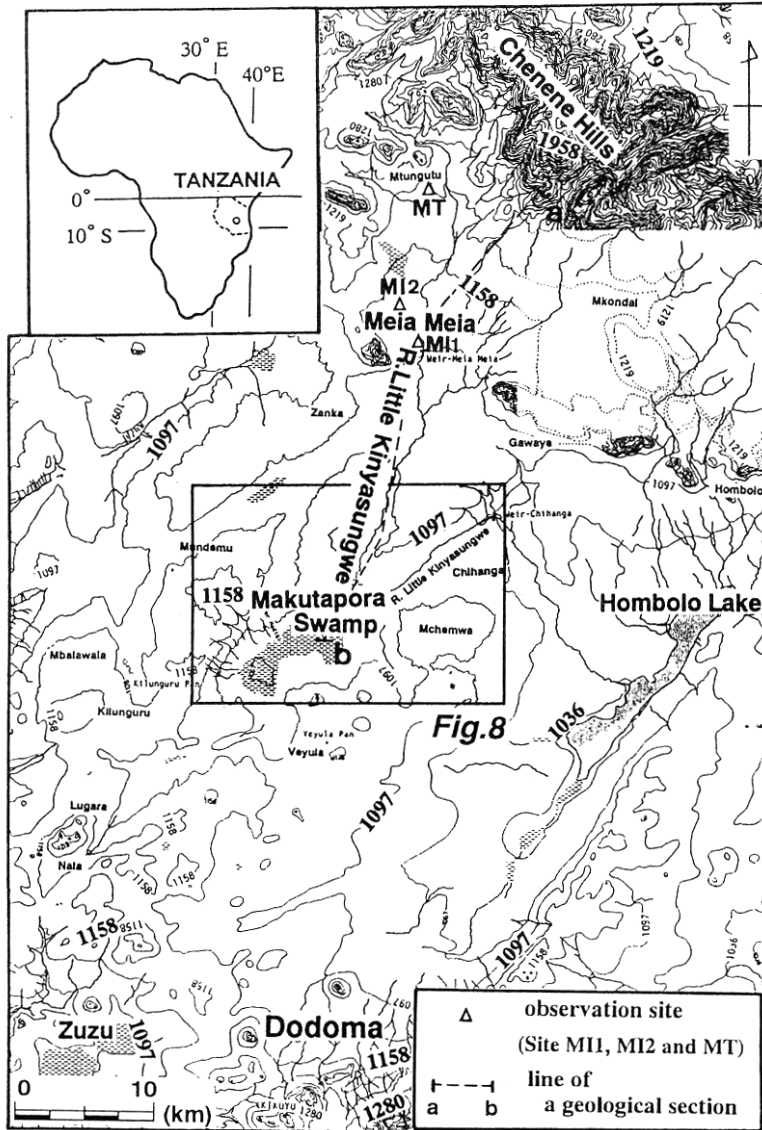


オマーンとUAEの国境付近

- ・オマーン山脈からUAEの砂漠に向かってワジが延びている
- ・数年に一度降る雨水をワジが地下へと導く

タンザニア、東アフリカ高地における水循環

小野寺真一・近藤昭彦・佐藤芳徳・林 正貴・新藤静夫・松本栄次・池田 宏(1996): 東アフリカ、タンザニアの半乾燥地域における地中水循環. 日本水文科学会誌「ハイドロロジー」、26、75-86.



雨季の画像（左）

円形の白い部分は集落周辺の人
為によるサバンナ化地域

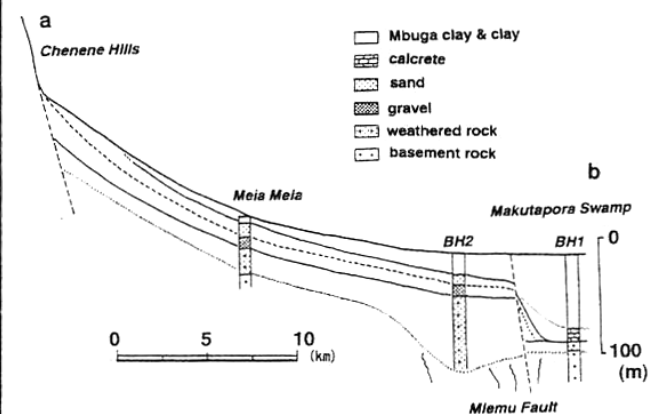
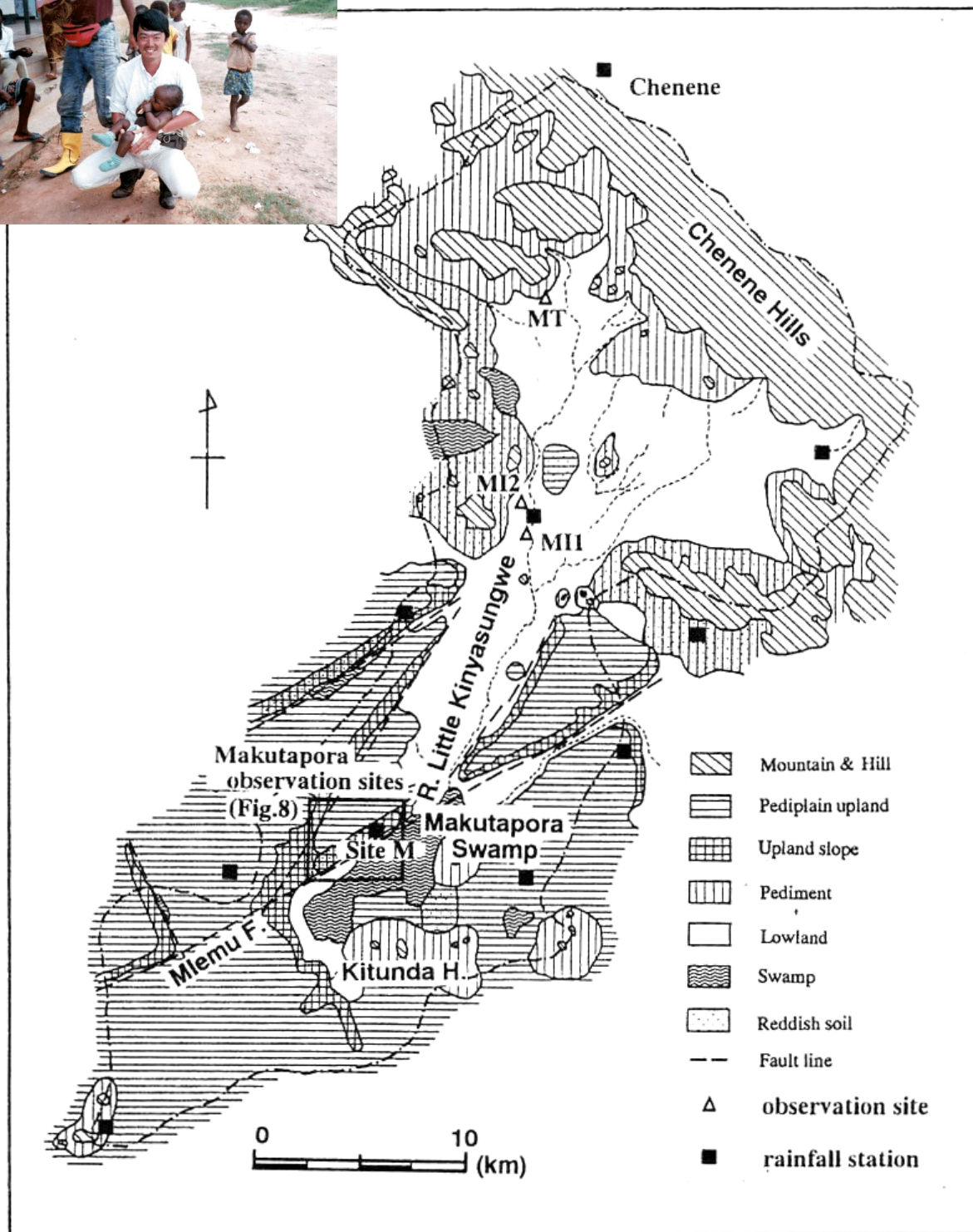
マクタポーラ

ドドマ

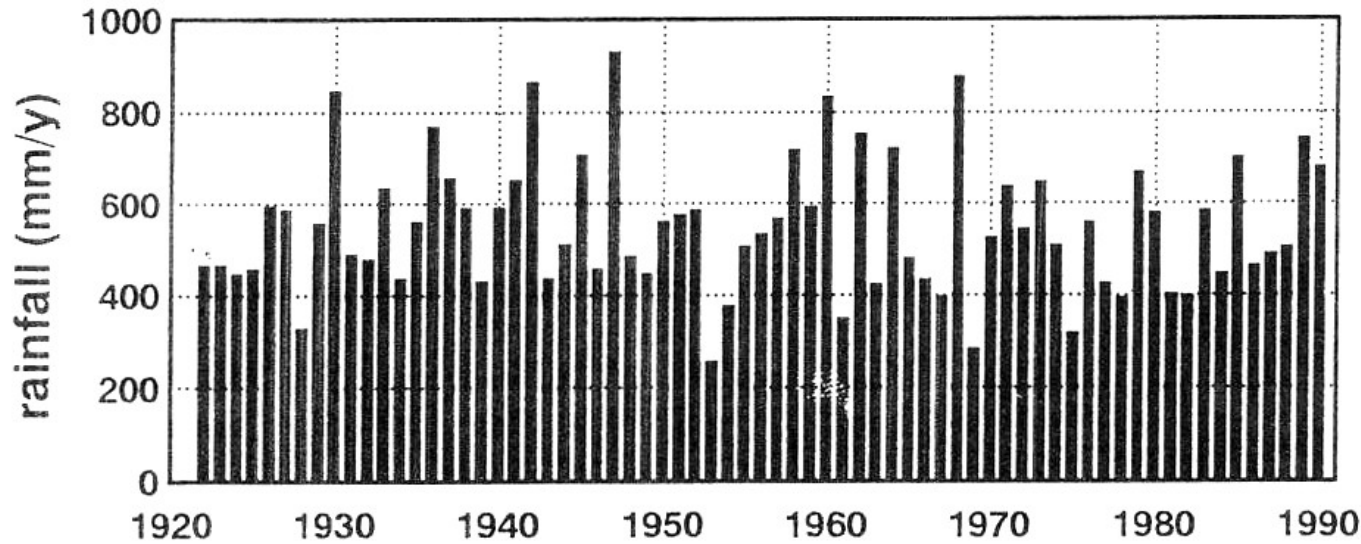
乾季の画像（右）

緑色の部分は実際には赤色土
→ 塩基性岩石の風化土

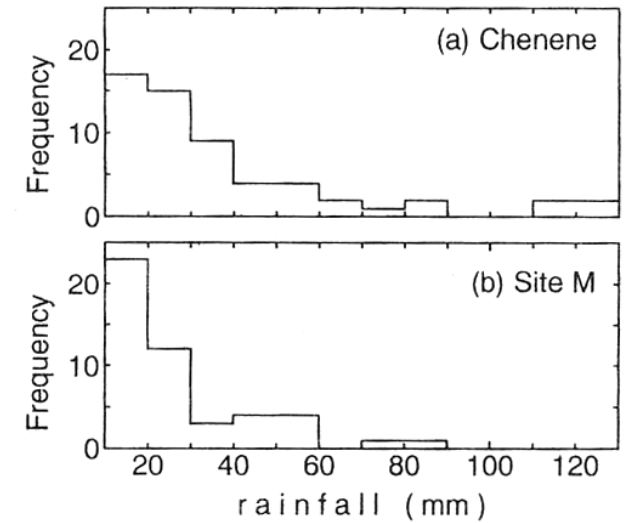




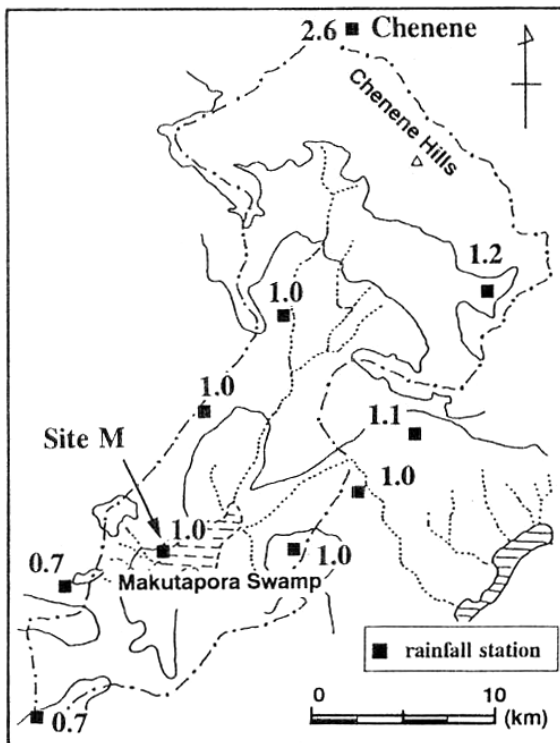
半乾燥地域の降水の特徴



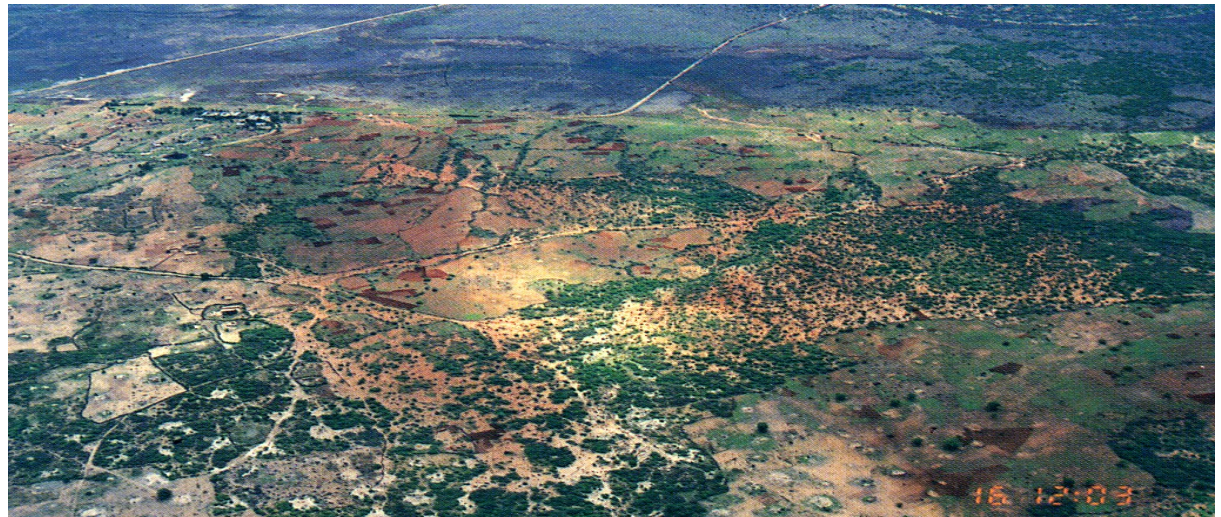
降雨の頻度分布



雨量分布・・・
測ったか？
じゅやって



年降水量は約 500mm... ただし、雨季のみ
降水イベントは降雨強度の強いスコール

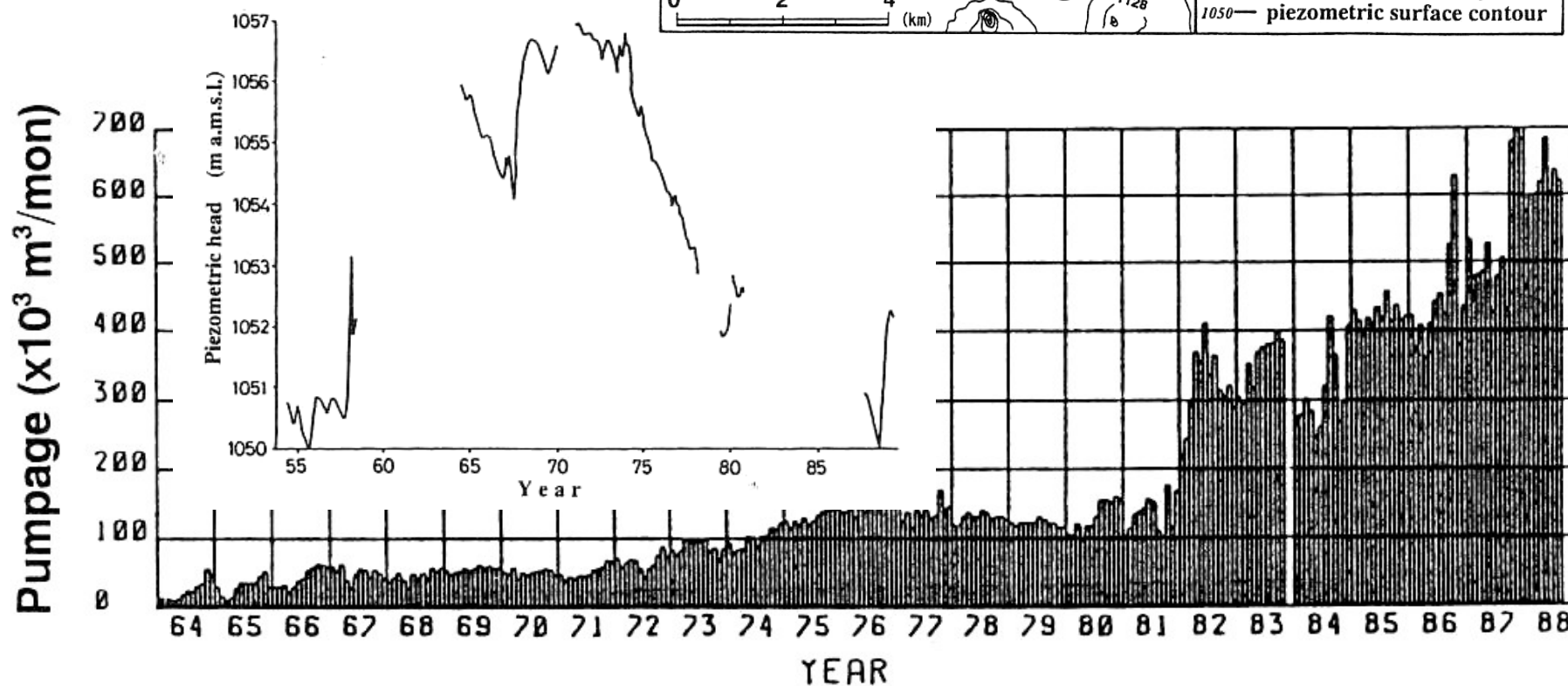
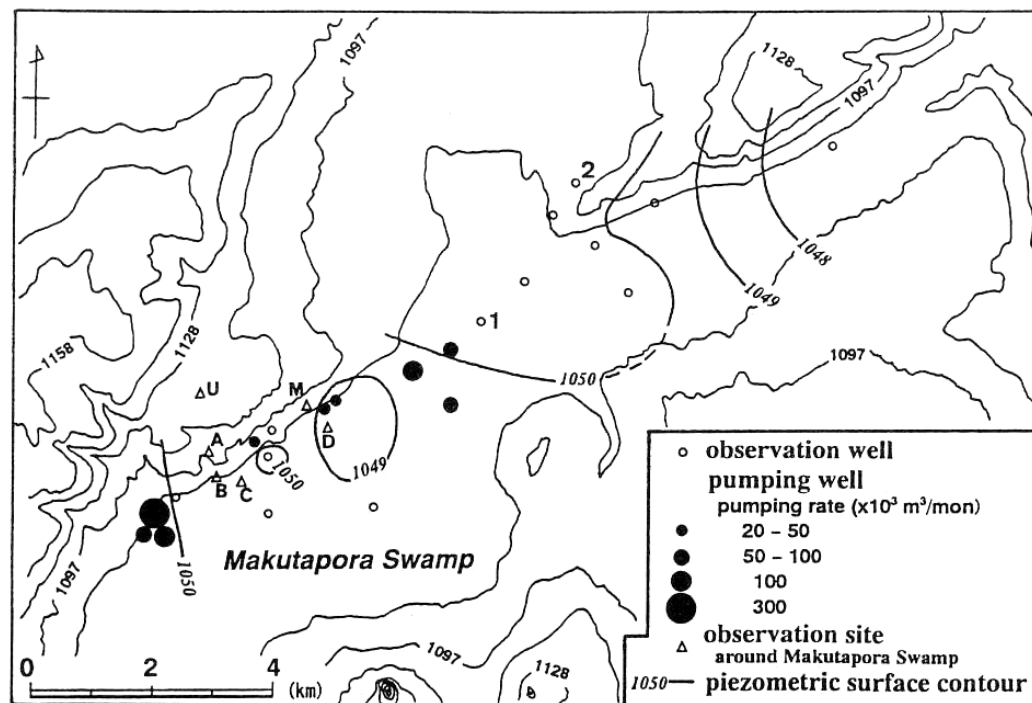


地下水利用

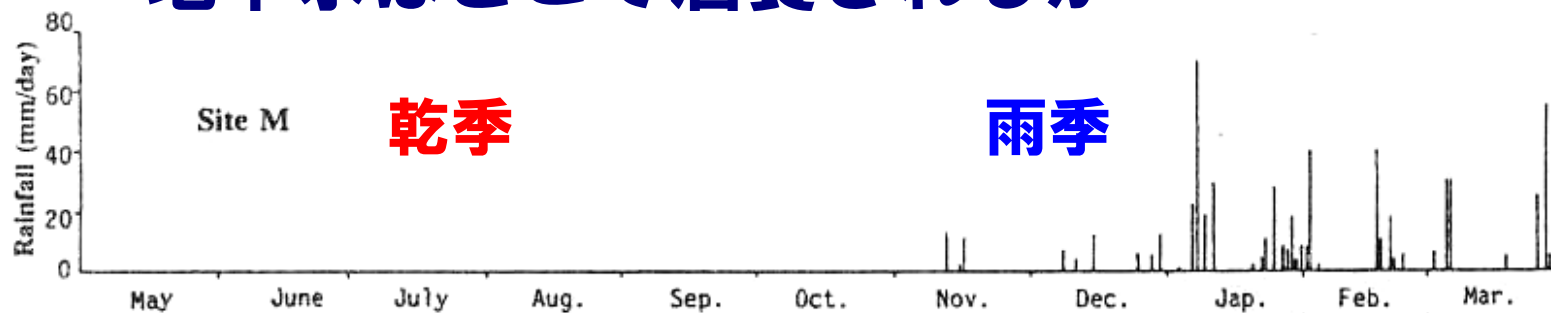
断層線に沿って生産井を配置

揚水量は増加

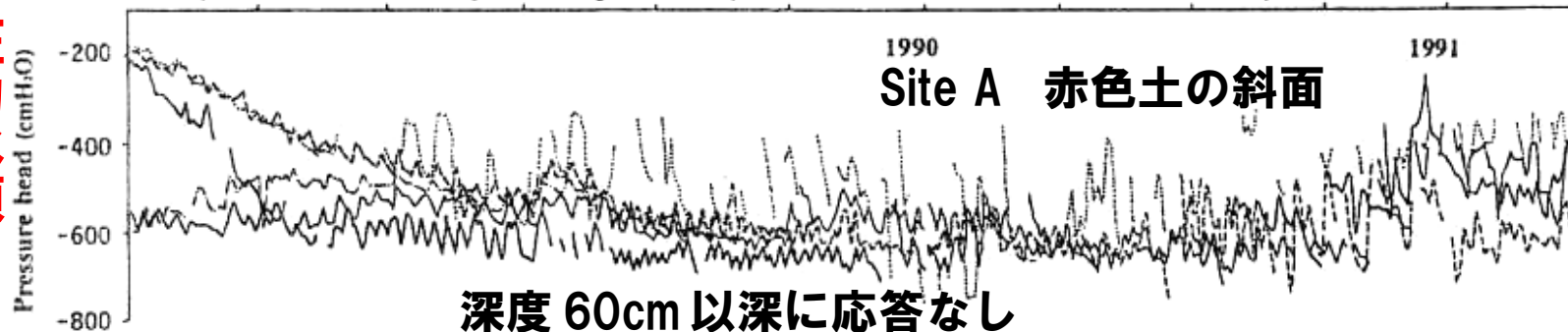
持続可能か



地下水はどこで涵養されるか

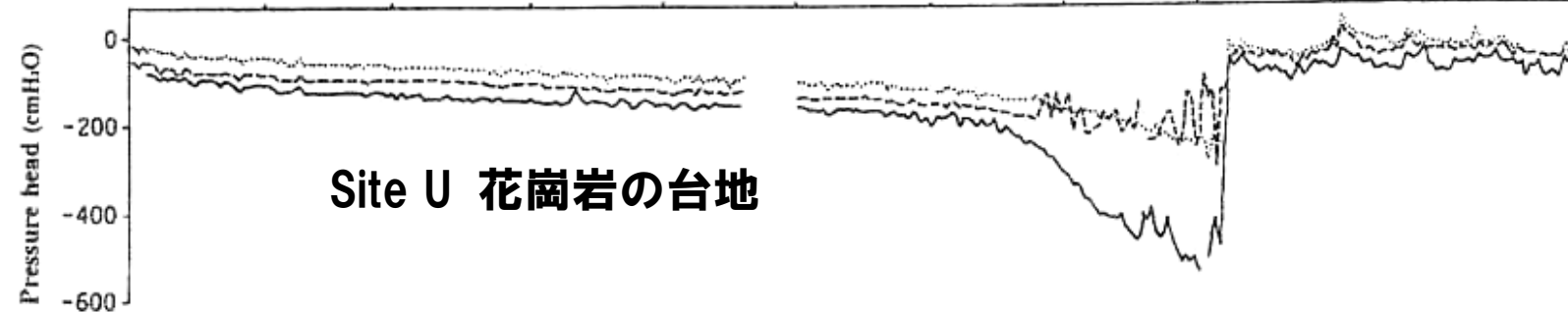
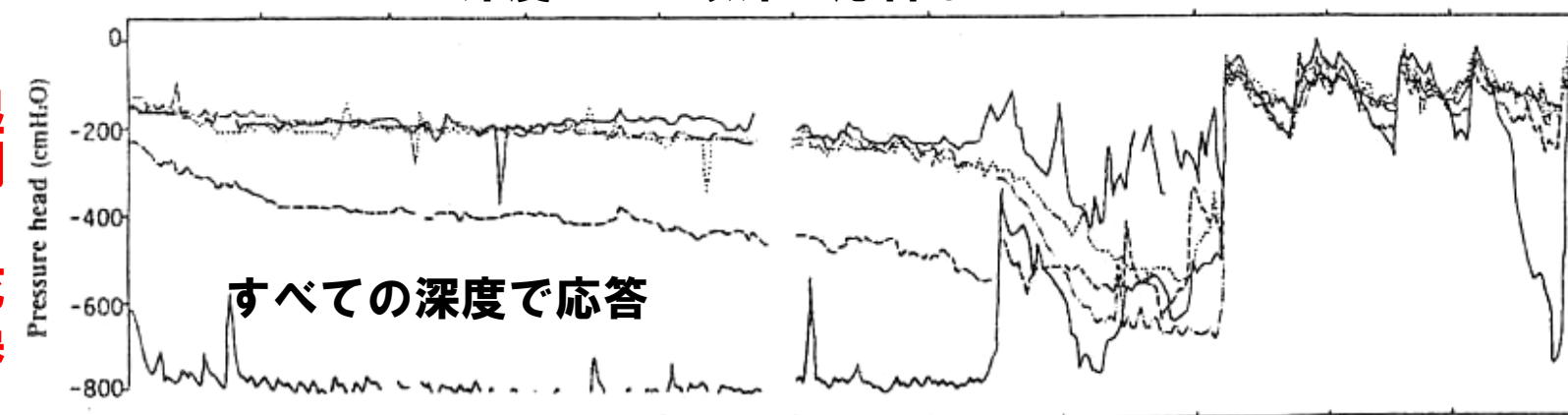


圧力水頭

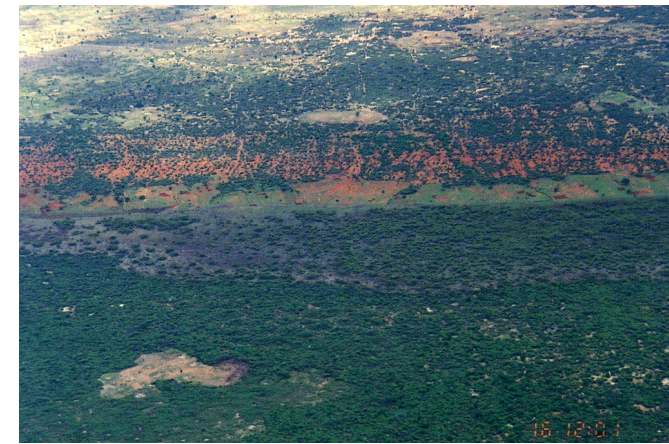
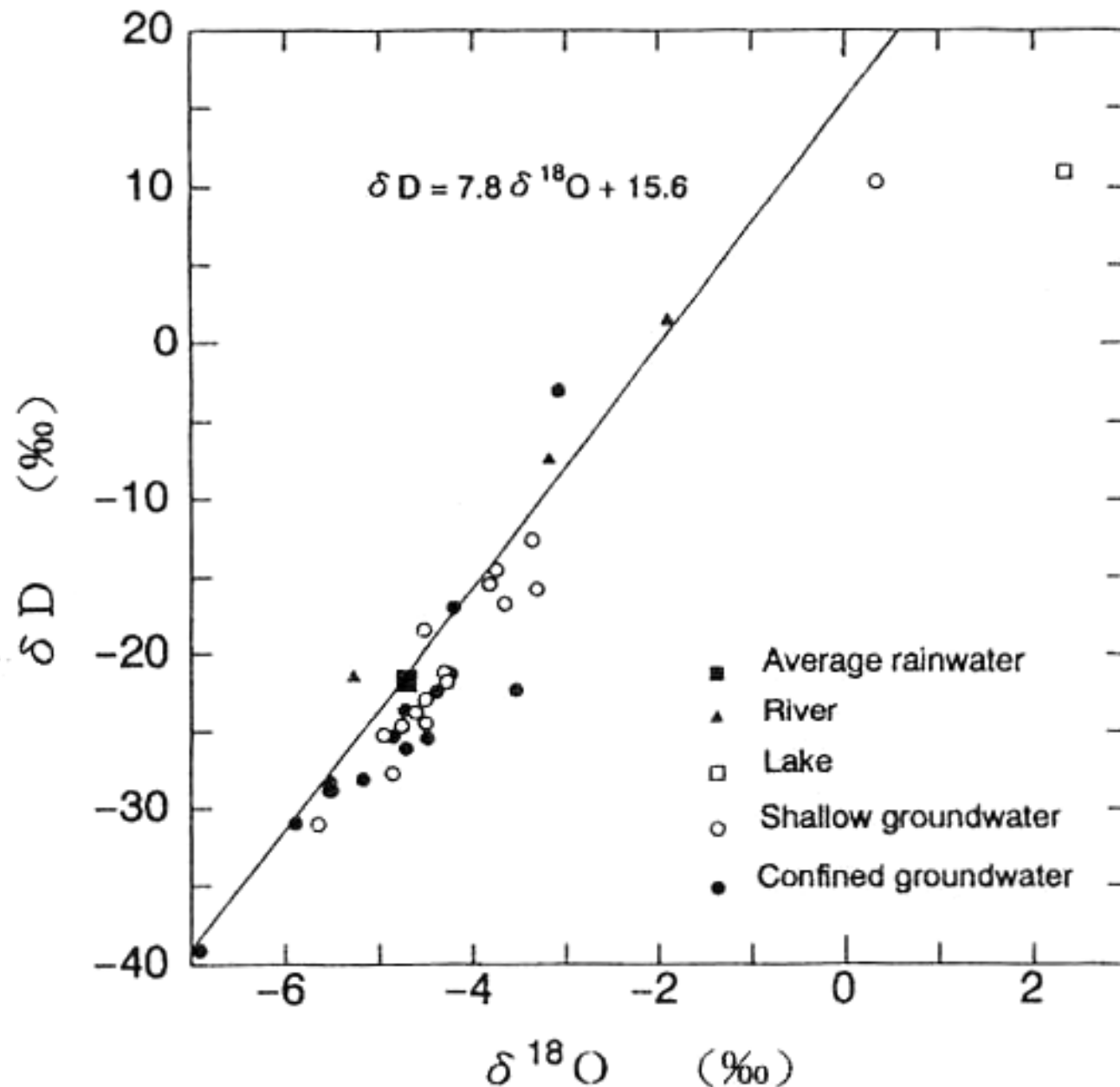


↑ 湿潤

乾燥 ↓



δ ダイアグラム 安定同位体組成

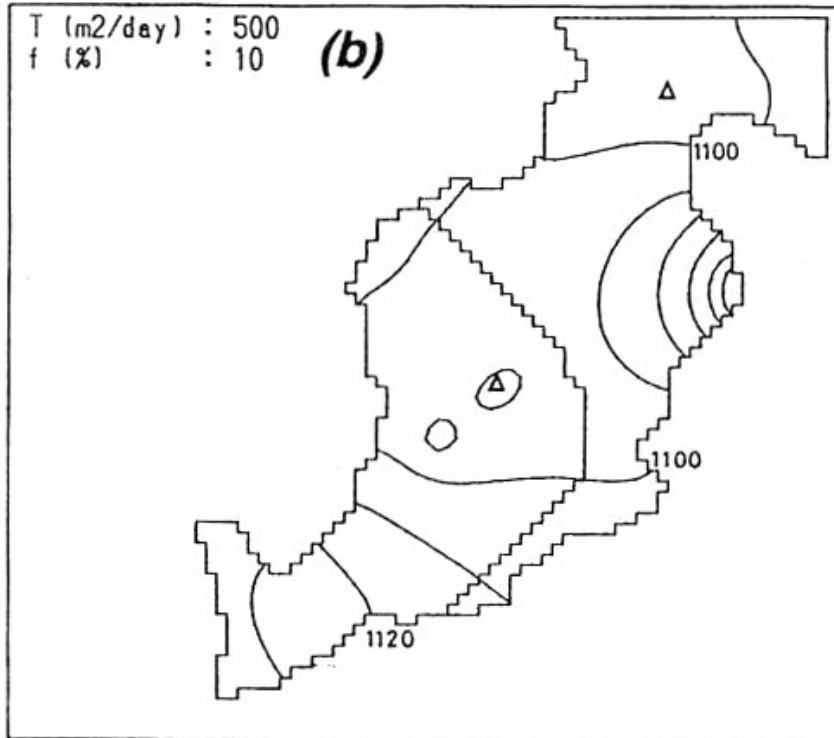
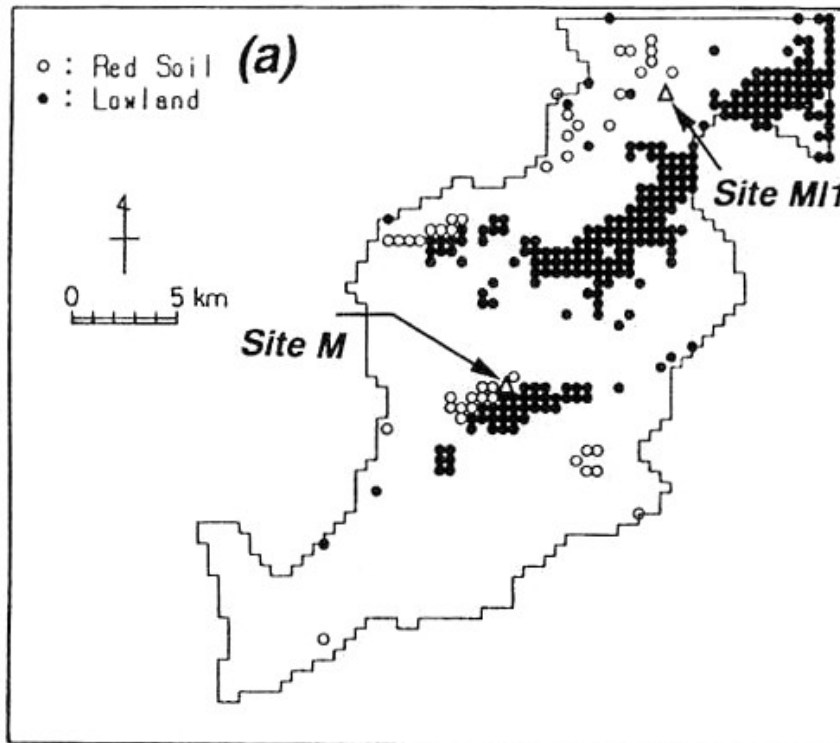


深層地下水は雨の加重平均に近いが、それより低い傾向



深層地下水への涵養は、常時水位のある浅層地下水を経由せずに、蒸発の効果が行われた

単純なシミュレーションでもわかることがある



地下水揚水量と涵養量の関係

わかっていること

- ・ 涵養は花崗岩台地から
(流域界を越える流動はない)
- ・ 流域外部からの涵養はない
(チェネネからの断層破碎帯を通じた涵養は不明)

境界条件

- ・ 赤色土地域には涵養を与えない
(リモートセンシング)
- ・ 涵養量は月別水収支から

結果

- ・ 現在の地下水揚水量は涵養量とほぼバランス
→ **これ以上の開発は？**

乾燥地リモートセンシング

乾燥・半乾燥地域の環境

まとめ

- ・乾燥・半乾燥地域の地域性を知ろう
- ・土地の性質は歴史が作る
(素因と誘因を識別)
- ・経験を蓄積すること

近藤昭彦@環境リモートセンシング研究センター