

## 講義名:環境計測学

目的:リモートセンシングとGISによる環境解析の手法と環境認識の方法について講義する。単なる技術の解説ではなく、環境をどのように理解すればよいか、という点について事例を通して考察を試みる。講義を通して、環境の持つ多様性、空間性、関連性、歴史性、階層性を理解することを目的とする。

## 講義予定

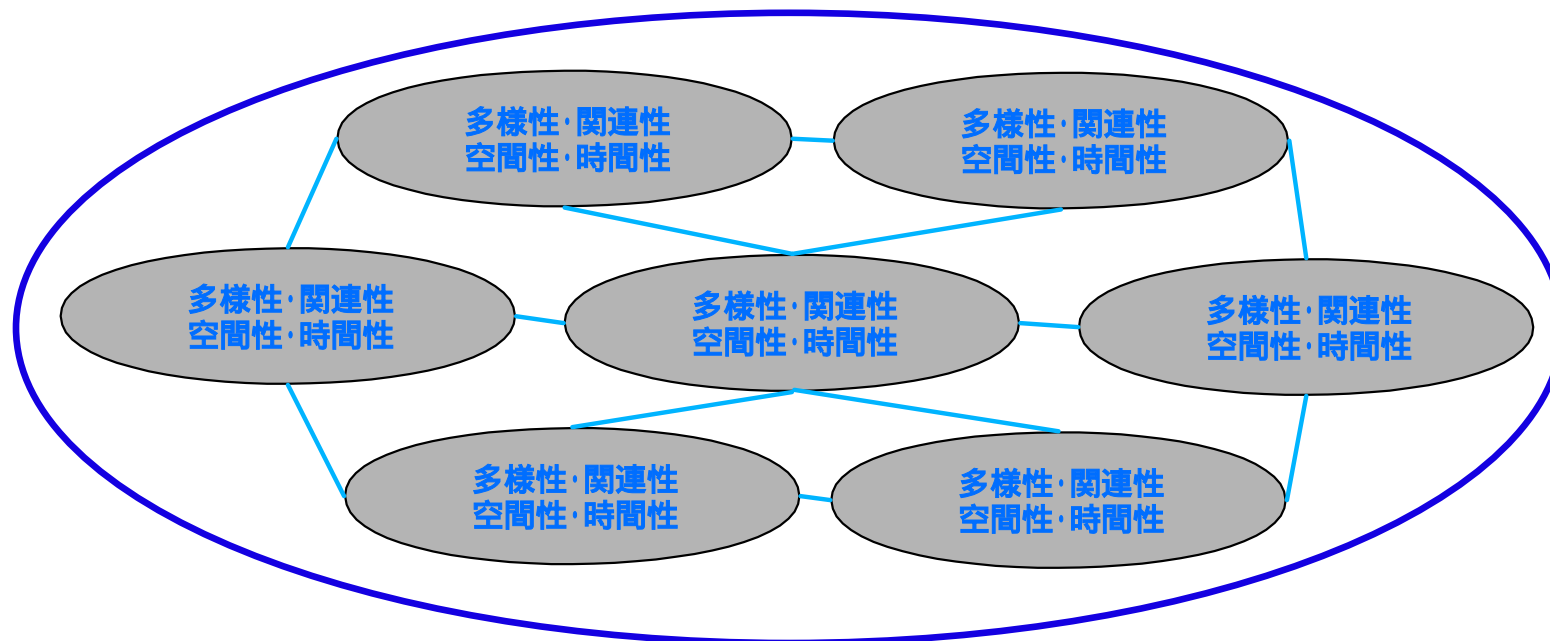
- 4月14日 序論:地球環境と地域環境の関係について
- 4月21日 リモートセンシングの基礎 . センサーとプラットフォーム
- 4月28日 リモートセンシングの基礎 . 何を計測しているか 可視・赤外・熱赤外
- 5月12日 リモートセンシングの基礎 . 何を計測しているか マイクロ波
- 5月19日 画像処理の方法と地理情報システム
- 5月26日 リモートセンシングによる土地被覆分類、地表面の状態量の推定
- 6月2日 環境をどのように捉えるか - 水収支・熱収支 -
- 6月9日 地域の環境変化 - 都市型洪水 -
- 6月16日 地域の環境変化 - ヒートアイランド -
- 6月23日 世界の環境問題 - 洪水 -
- 6月30日 世界の環境問題 - 水問題と食糧 -
- 7月7日 世界の環境問題 - 砂漠化 -
- 7月14日 世界の環境問題 - 森林 -
- 7月28日 新しい衛星 - 高空間分解能衛星 - 何が見えるか、何を判読すべきか
- 7月30日

## 環境とは

- ・ 様々な要素からなる (多様性)
- ・ 要素間に関連性がある (関連性)
- ・ 空間的に分布している (空間性)
- ・ 歴史を持つ (時間性)
- ・ 認識の仕方において階層性を有する (階層性)

人間との関連

この5つの～性を認識することは多くの局面で、創造性の発揮、ビジネスチャンスの獲得、につながる





## 多様性

どんな要素から成り立っているか

- ・都市、住宅地、農村、...
- ・海、陸、河川、湖沼、...
- ・低地、台地、丘陵、...
- ・ゴルフ場、埋め立て地、...
- ・上下水道システム、交通システム
- ・生態系
- ・人間
- ・...

## 空間性

空間の中に配置されている

- ・千葉県の環境を特徴付けている
- ・...

## 関連性

それぞれの要素に関連性がある

- ・都市化と気候
- ・都市化と水汚染
- ・都市化と生態系
- ・...

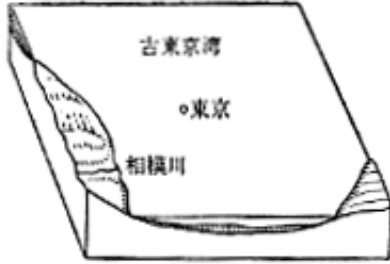
# 歴史性

我々を取り巻く環境は第四紀の地史的変動の中で形成され、近代化の過程で改変されてきたものである。

## 関東平野と東京の地形の変遷 (貝塚, 1977)

は活動中の火山。右列の断面の黒い層は関東ローム層、点は河岸段丘礫層、縦線は海成層(成田層群と沖積層)。

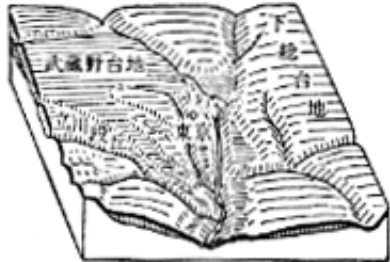
大地の歴史を知ること、その性質を知ることにもつながり、災害を未然に防ぐ智慧につながる。



(1) 下末吉期(S)  
12-13万年前



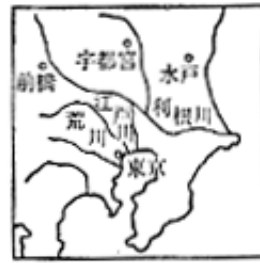
(2) 武蔵野期(M<sub>2</sub>)  
約6万年前



(3) 立川期(Tc<sub>3</sub>)  
約2万年前



(4) 縄文前期  
約6000年前



(5) 現在

## 歴史性(近代化、現代化)

これらの変化が何をもたらしたか？



(左) 1972年  
12月14日

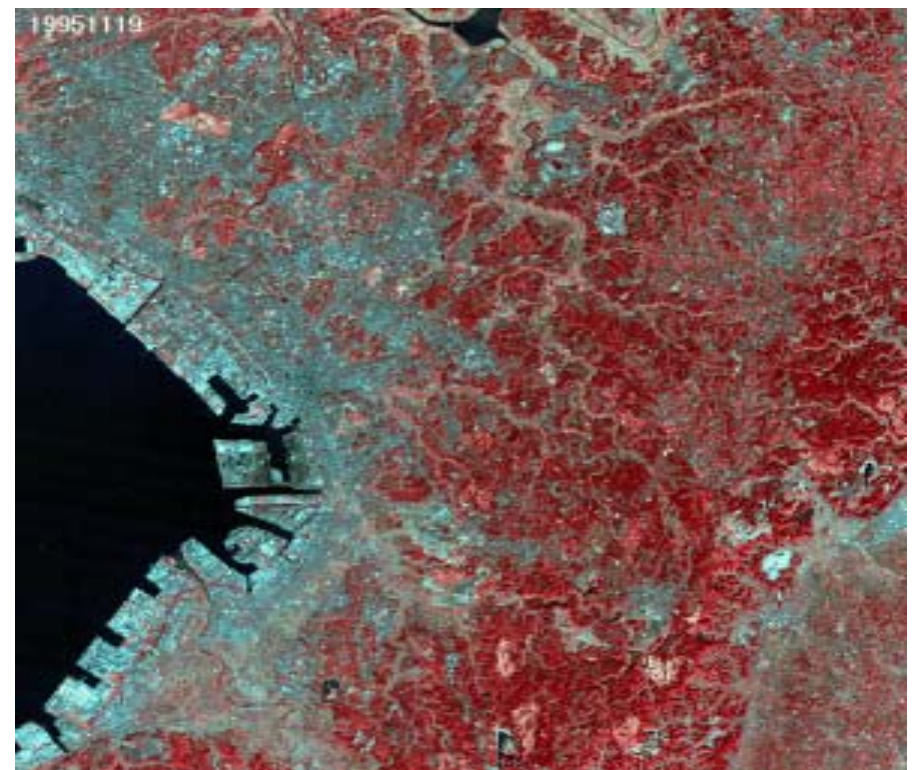
初めて80mの分解能  
を達成したランドサット  
TMSS画像

(左下) 1985年  
1月23日

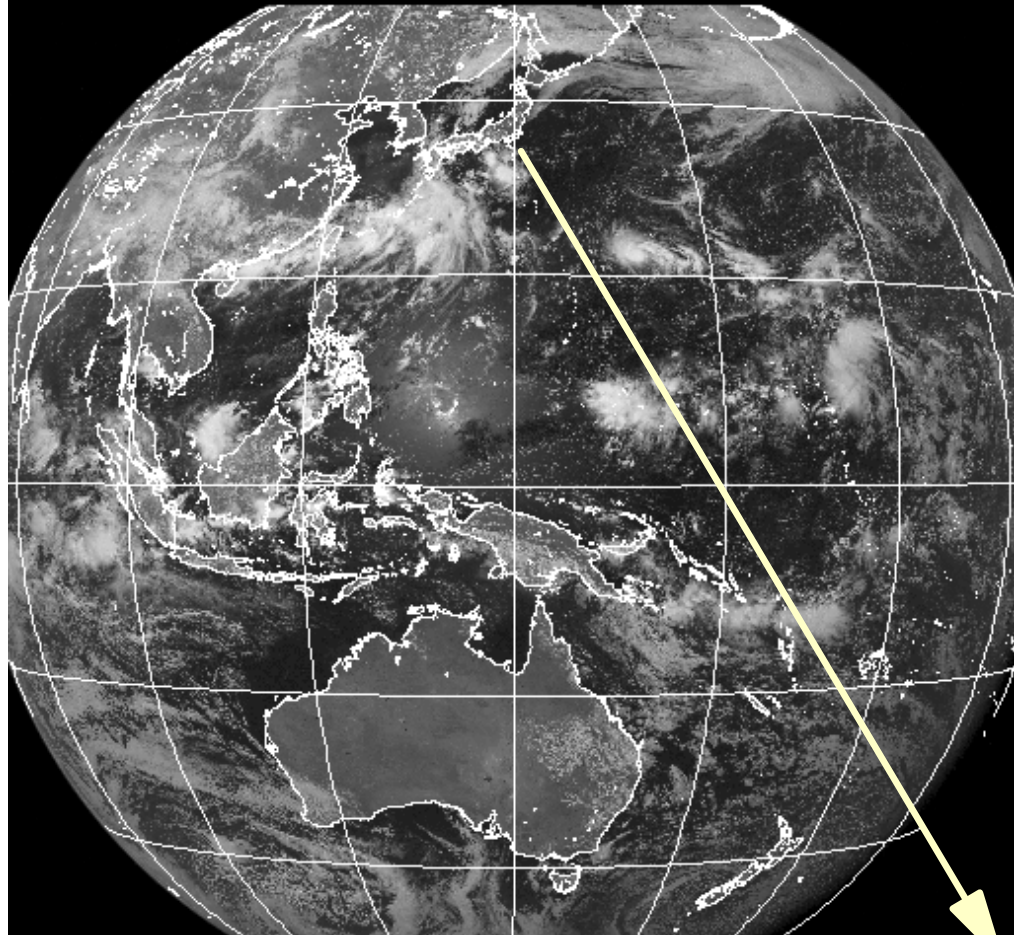
海岸線の形が変わり、都市  
が拡大した。ランドサット  
TM、分解能30m。

(下) 1995年  
11月19日

郊外の住宅団地の開発  
が進んでいる。

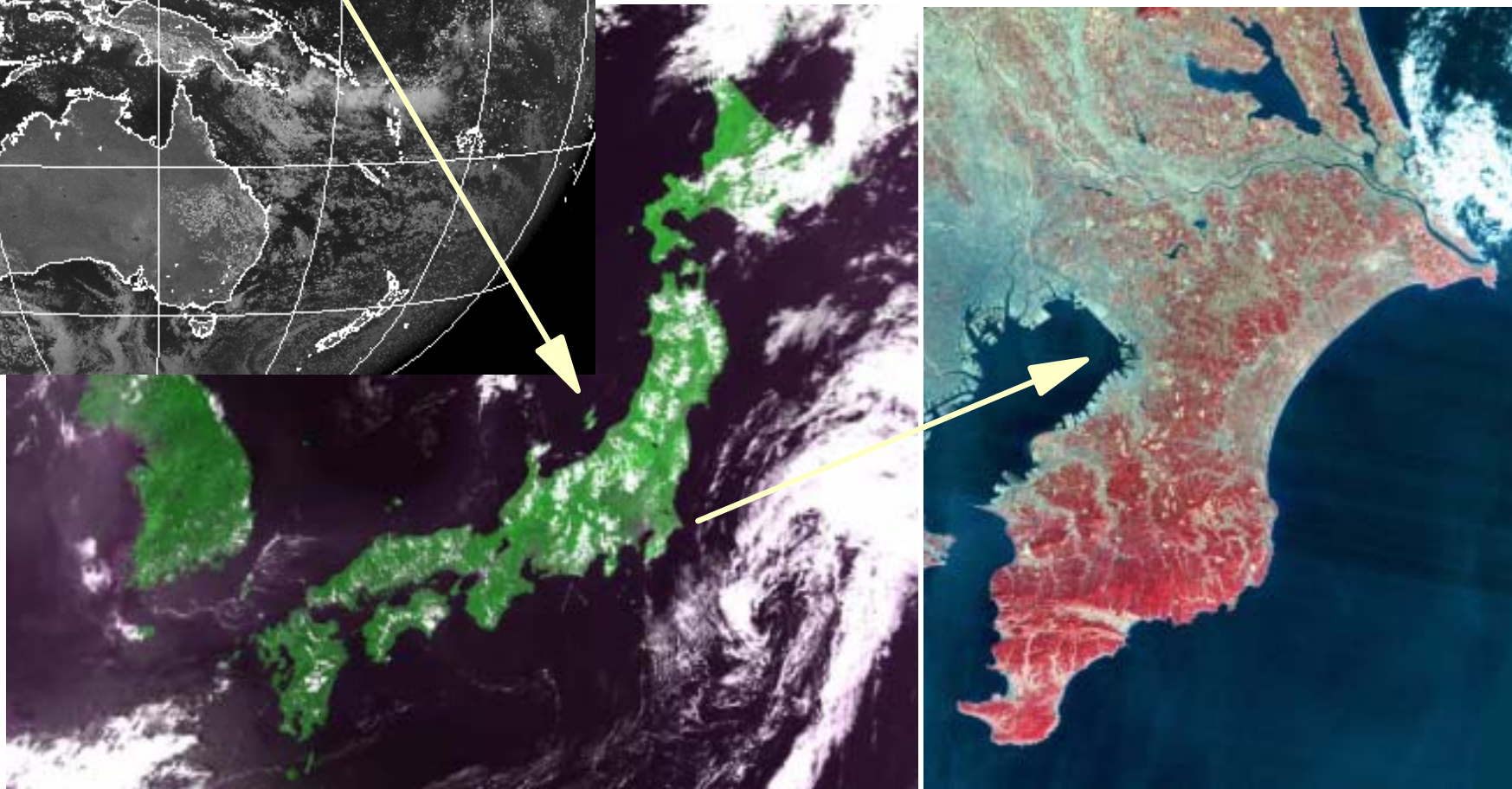


CERES, CHIBA U. (05N, 140E) GMS-5 VIS 08/01/00 03:32:00 20.3 X 20.1 KM



## 階層性

- どんなスケールでも宇宙と同じくらい複雑である
- スケールによって重要な現象は異なる



# 帰納的な方法と演繹的な方法

演繹： 前提を元に結論を導き出す方法

帰納： 個々の具体的事実から一般的命題ないし法則を導き出す方法

環境の理解にはスケールダウンとスケールアップの両方が必要

世界を対象にする場合： ex) 温暖化予測の ” 全球大気循環モデル ”

- ・ 現場で実験は不可能、演繹的な方法に頼らざるを得ない
- ・ 大気の運動を表す微分方程式をたて、コンピューターで解く
- ・ しかし、多様な地表面の条件をモデルに入れることは不可能

演繹的手法で ” 地域への影響評価 ” は可能か？

・ 雨が増える・・・ > 洪水？、高温化・・・ > 干ばつ？

新聞記  
事をよく  
読んで  
みよう

・ そうは単純ではない

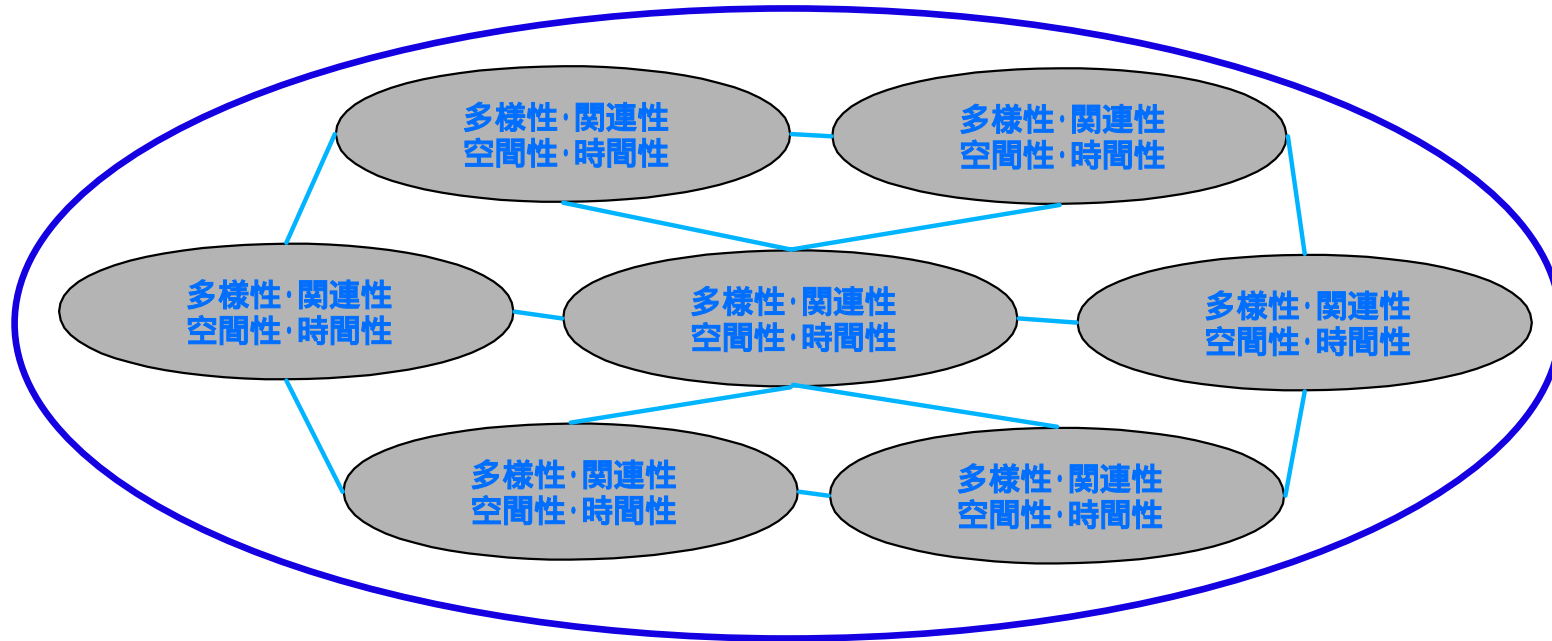
・ 地域における経験を積み上げることによってのみ、実効的な対策を講じることができる

地域に根ざした ” 帰納的な手法 ” による環境認識の重要性

## 環境とは

- 様々な要素からなる (多様性)
- 要素間に関連性がある (関連性)
- 空間的に分布している (空間性)
- 歴史を持つ (時間性)
- 認識の仕方において階層性を有する (階層性)

システム



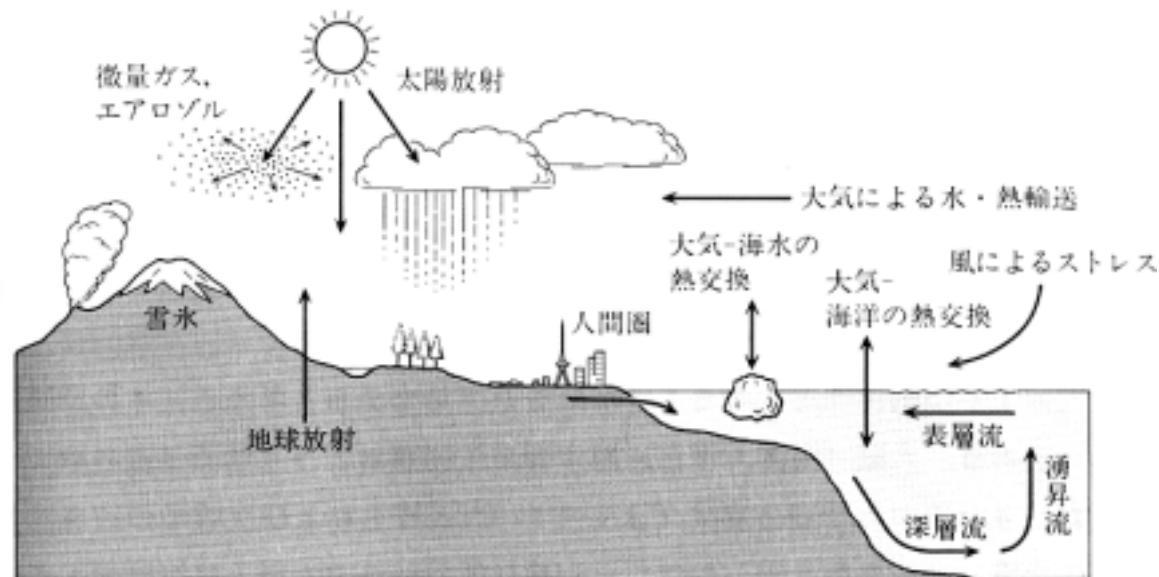
地域の個性をグローバルの中に位置付ける



## 環境をシステムとして捉える必要性 個々から全体へ

### 気候システム:気候とは

- 1) 古典的な定義では、気温、降水量、植生などの地表面状態、等々の物理量に基づいた長期間におよぶある平均的な自然環境(地表面)の状態
- 2) 現在は地表面だけでなく、人類の生息環境を支配する、高層大気から深海までも含めた地球の表層環境を規定している系全体をシステムとして捉える必要が出てきた



### システム

多数の要素から構成され、それぞれの要素間で相互作用がある

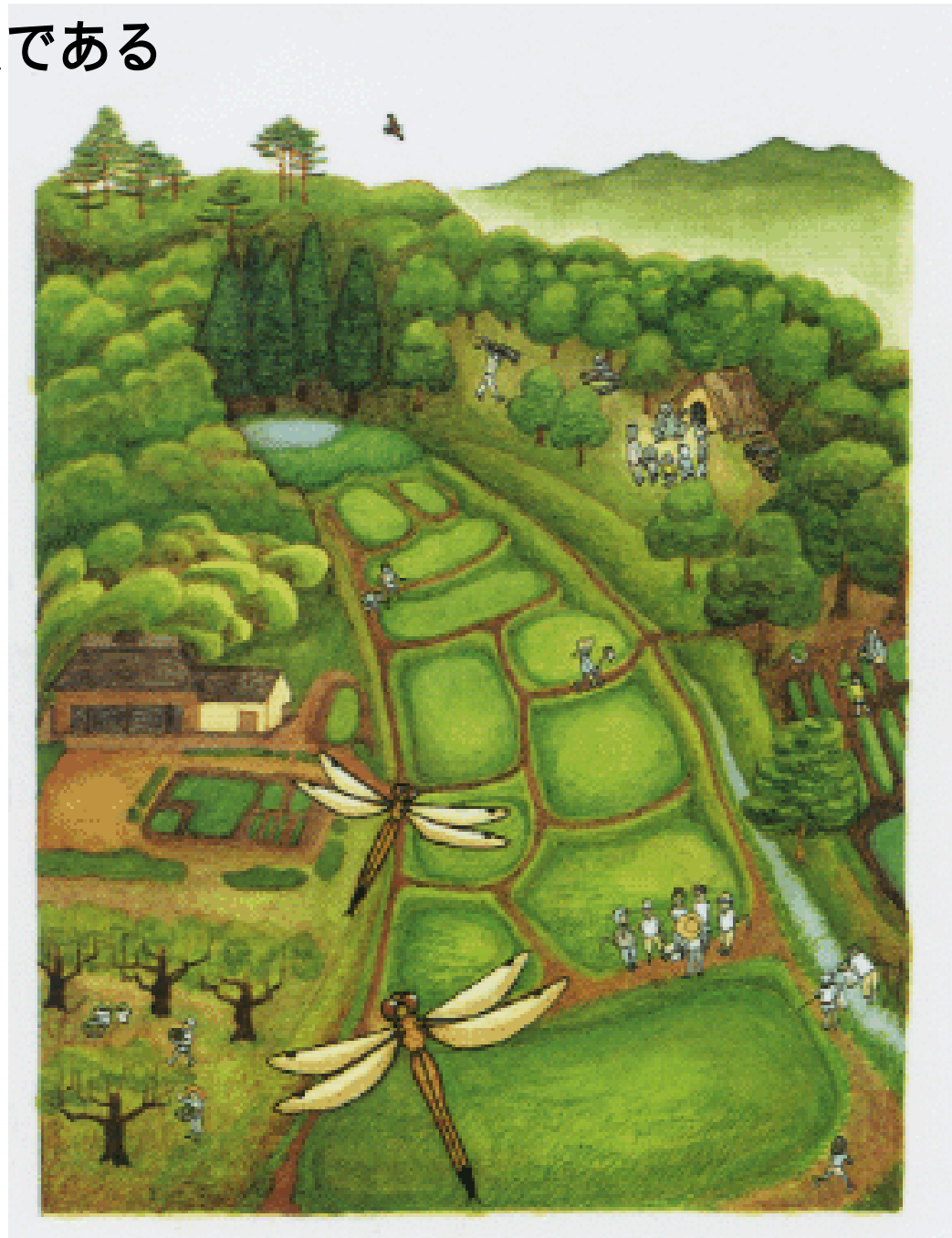
## 身近な環境、これもシステムである

### 流域

- ・ 上下水道システム
- ・ 土地利用
- ・ 森林
- ・ 地形
- ・ ...

### 里山

- ・ 水田
- ・ ため池
- ・ 二次林
- ・ 生態系
- ・ 茅場
- ・ ...



# INTRODUCTION

リモートセンシングをどのような問題の認識・解決のために使うか



最近、水問題や食糧問題、地球温暖化といった環境に関する記事が多くないか？

- 日本は食糧のほとんどを海外に頼っている
- 食糧の増産を支えているのは半乾燥地域だ
- 豊富な太陽エネルギーと地下水で穀物を栽培している
- ところが、半乾燥地域では水問題に苦しんでいる  
地下水位低下、塩分集積、地盤沈下、...
- 穀物の輸入は水の輸入と同じだ(グリーンウォーター)
- 日本は何か貢献すべきではないのか！？
- 何ができるのか
  
- どうも最近暖かくなってきたようだ
- 温暖化はどんな問題があるのだろうか



# 地球温暖化はどんな問題を含んでいるのか？

植生帯の変化、雪氷圏、水資源、食糧生産、干ばつ、洪水、高潮、健康影響、.....

どのような影響があるのかはわからないけれど子孫のために対策を考えよう！

## 実態認識なしに対策無し！

ただし、地球温暖化は実態認識の前に対策が必要となった

環境は複雑系！単純な因果関係では説明が難しい

環境科学・野外科学の成果 < > 情報技術とのリンク

リモートセンシングで何を明らかにすれば良いのかを知ろう！



# 過去から現在を見ることから将来を展望

過去から現在、 現在から未来、 望ましい未来を仮定して現在がどうあるべきかを考える

地球は何度も温暖期、寒冷期を経験している

スーパーサイクル、氷河時代の開始、歴史時代の気候変動(ヒプシサーマル、中世温暖期、LIA、...)

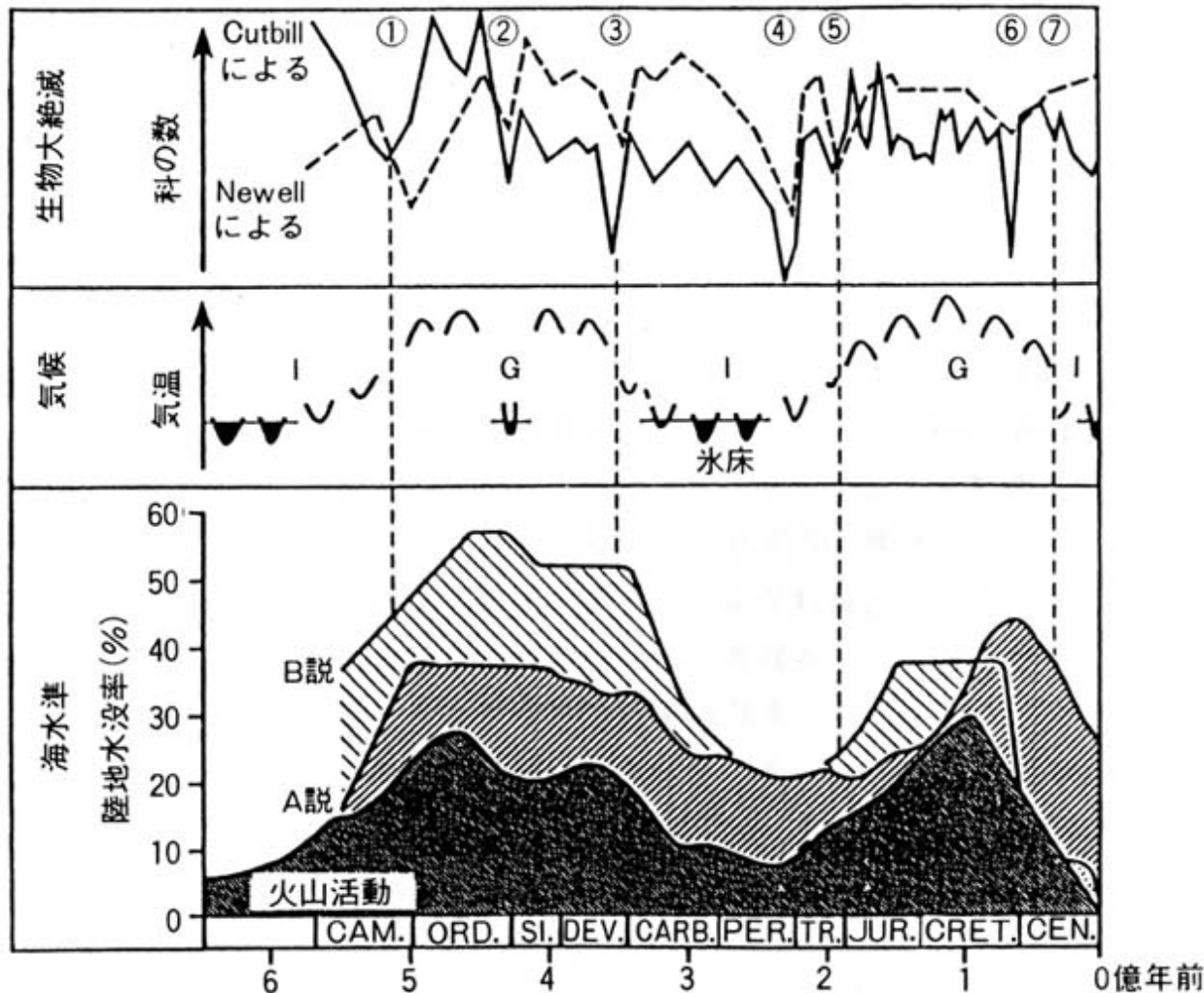
温暖化が氷期への引き金？ 熱塩循環

地球上の特定の地域の水循環の変化が氷期を引き起こした！

空間を見る眼の重要性



# 地球の過去の気温変動は？



古生代までさかのぼり、億年スケールで見ると、過去に2回の温暖～寒冷のスーパーサイクルがあった。

1億年前の恐竜の時代は現在より火山活動が活発で、非常に温暖な気候であった。

気候変動に対して7回の生物大絶滅があった。

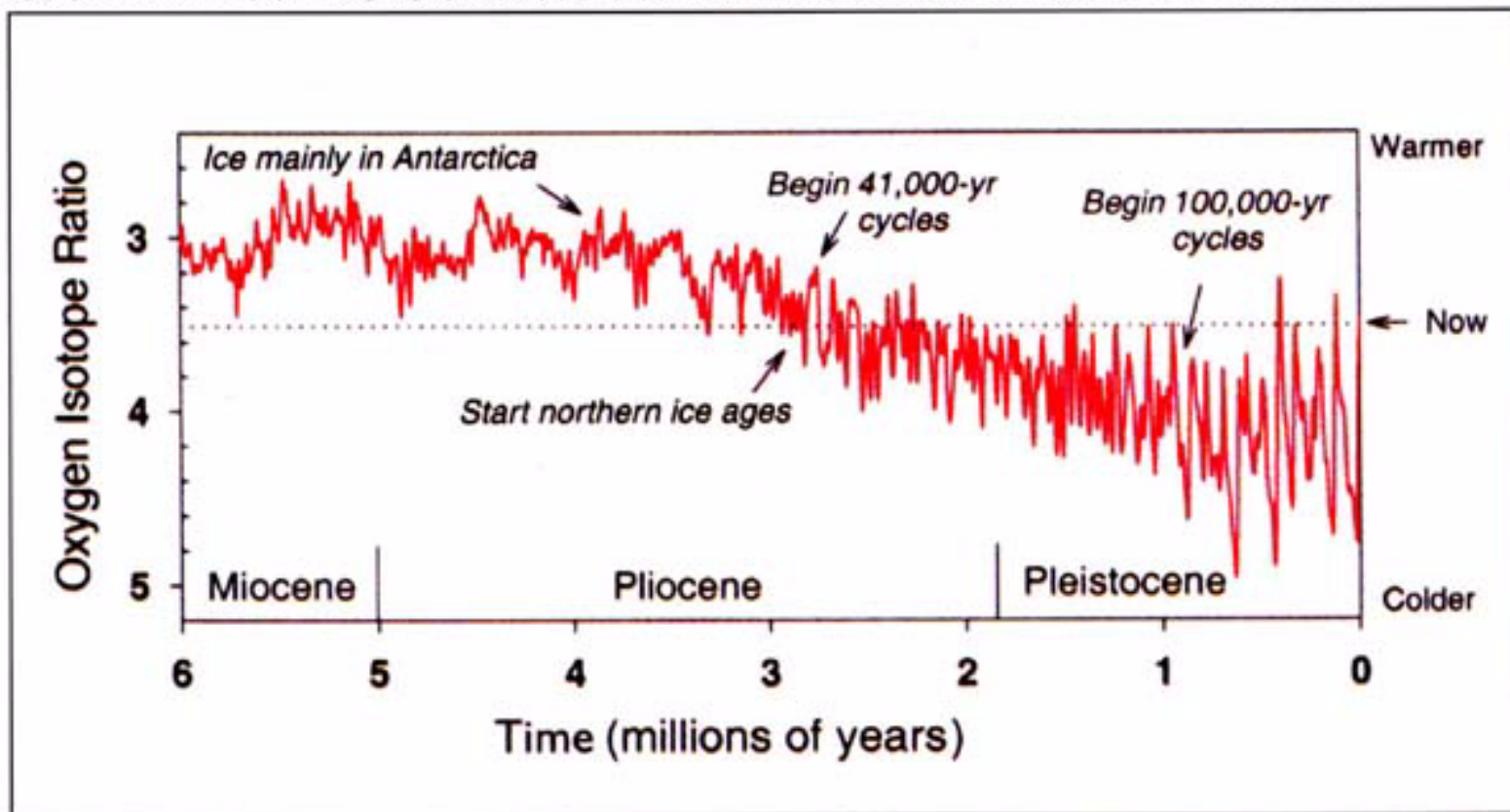
Fisher (1984) による、I は氷河時代 (Icehouse), G は温室時代 (Greenhouse)

丸印の数字は7回の生物大絶滅を表わす

図4 過去6億年間の2回のスーパーサイクル



本図はオレゴン州立大学海洋大気科学学部A.MIX氏のご厚意により提供されたものです。



<図2> 熱帯太平洋の深海底コアに見られる過去数万年間の環境変動。300万年前から4.1万年周期の変動が現れて寒冷化し、100万年前から10万年周期の氷期-間氷期サイクルが始まった。

過去300万年のスケールで見ると、地球は全体として寒冷化している。300万年前にパナマ地峡が閉じ、80万年前にはヒマラヤの隆起が始まった。



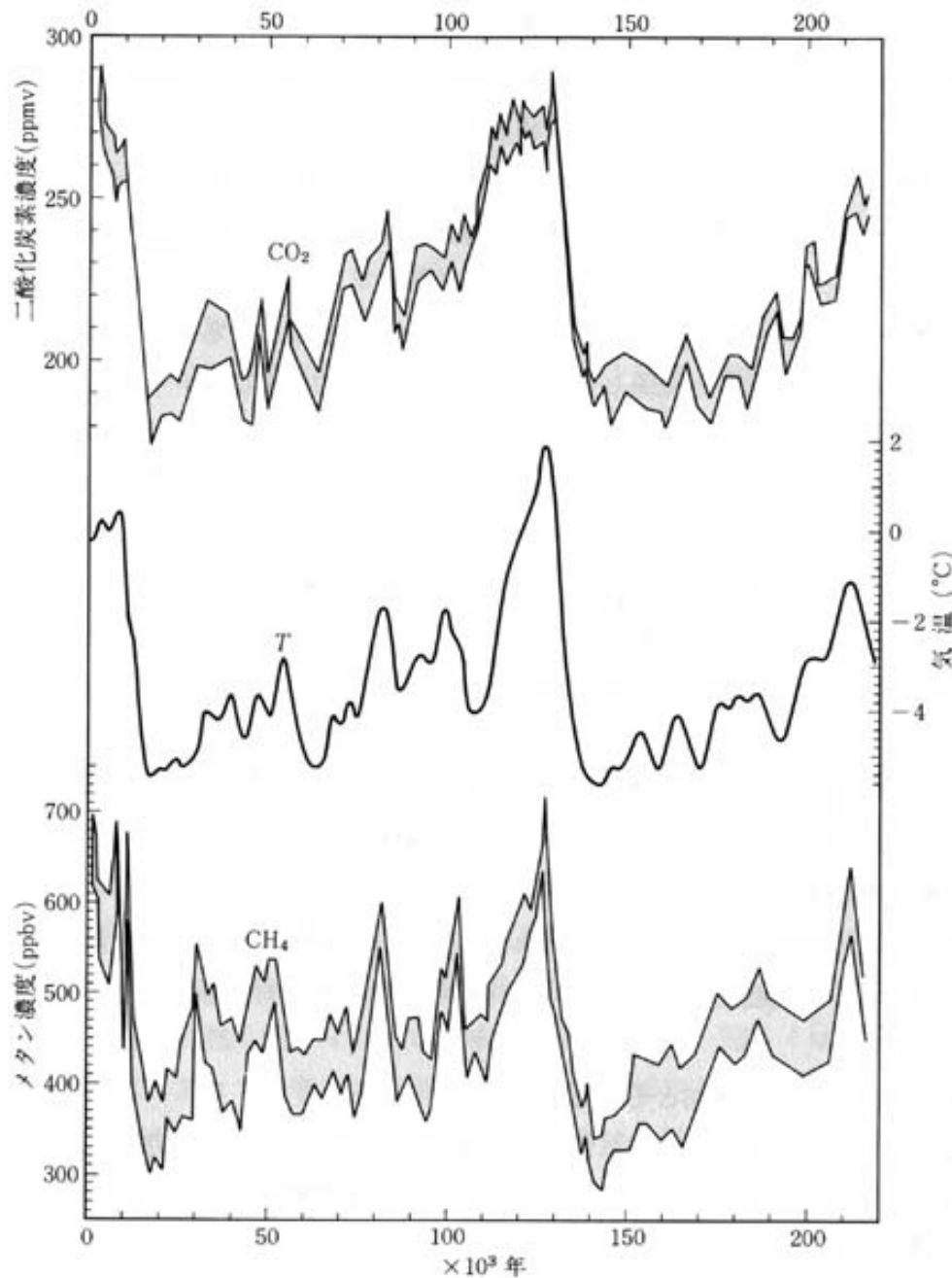


図 5.3 過去 22 万年にわたって生じた CO<sub>2</sub> 濃度、気温、メタン濃度の変化。南極のポストーク基地での氷床コアの分析による (IPCC, 1990)。

2万年前頃から急激に温暖化が始まった。すなわち、この時に最終氷期が終わって間氷期の時代に入った。

寒冷化は徐々に進み、温暖化は急激に進行する。

約13万年前が前の間氷期であるが、この時、千葉大学が載っている台地の地形面ができた。

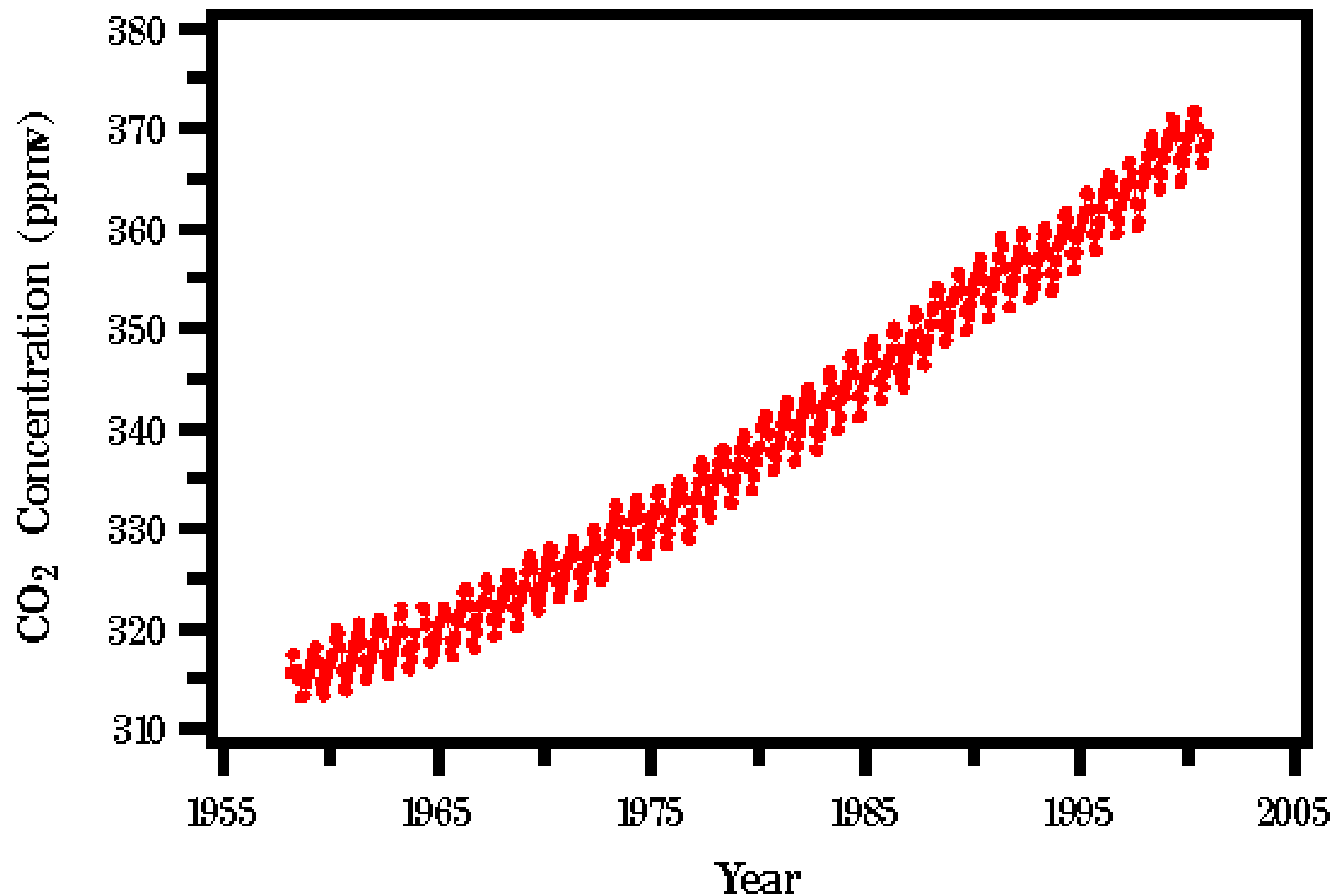
間氷期の継続時間は？

二酸化炭素濃度のレベルに注目！

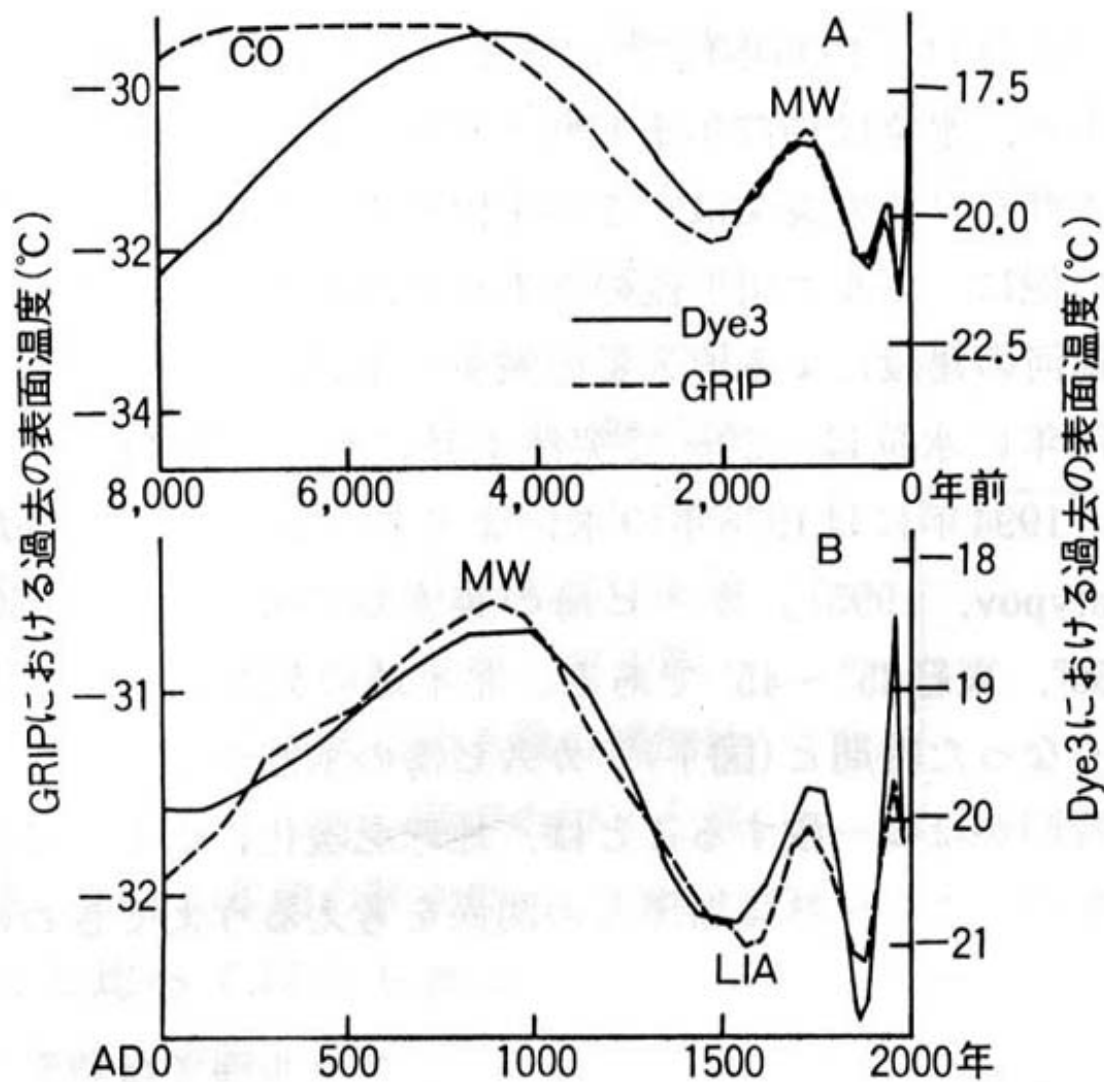




# Mauna Loa, Hawaii



Source: Dave Keeling and Tim Whorf (Scripps Institution of Oceanography)



Dahl-Jensenら(1998)による

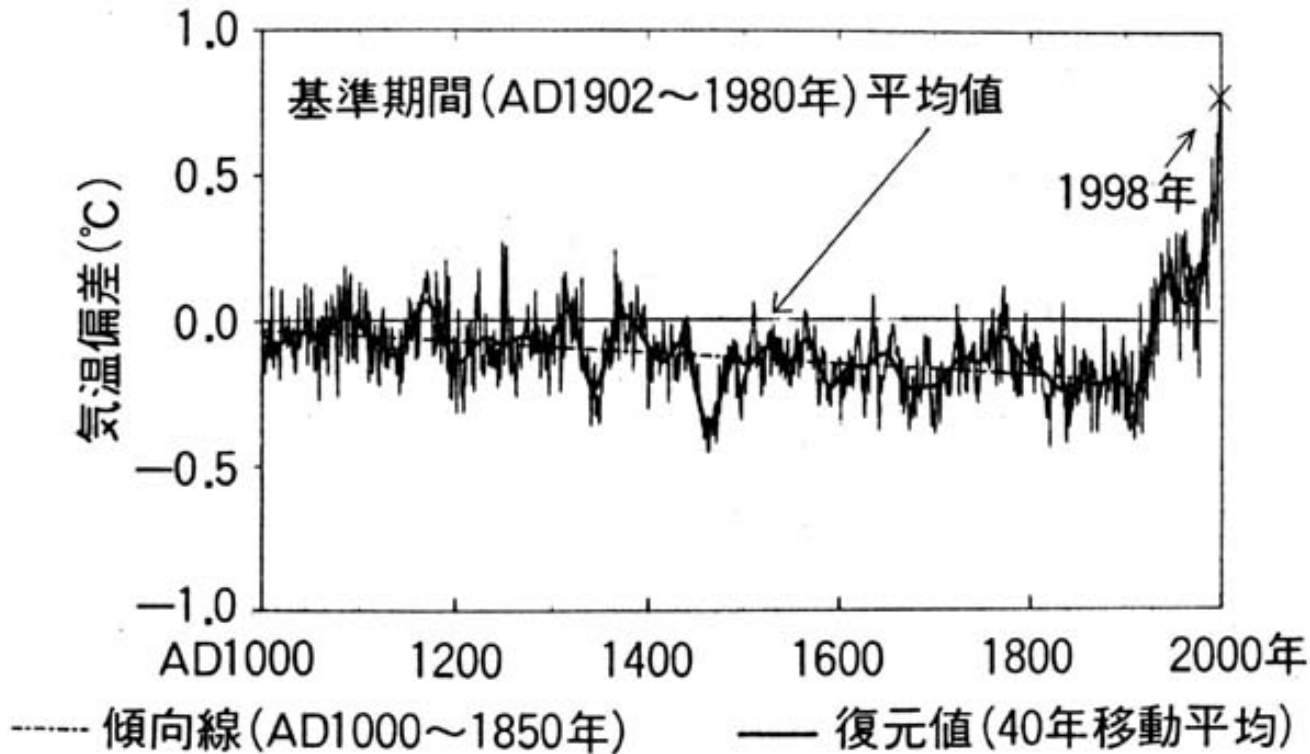
図10 グリーンランド氷床コアから直接復元した過去8,000年の気温変化

後氷期の温暖化は約5000年前がピークであり、ヒプシサーマルの時代を迎えた。

この時、サハラ砂漠は緑で覆われ、日本では縄文文化が花開いた。世界の古代文明が栄えたのもこの頃である。

約1000年前の中世温暖期にはヨーロッパで封建社会が成立し、500年前頃の小氷期の時代はペストの流行や魔女狩りが行われた時代であった。





AD1000~1980年は復元値, AD1902~1998年は観測値

Mann ら(1999)による, 1902~1980年の平均値からの偏差

図1 復元した過去1,000年の北半球の平均地表気温

**地球の平均気温は全体として低下傾向にあったが、産業革命後急激に上昇した。**

**これはもはや自然のサイクルでは説明が付かない。**

**温室効果ガスによる地球温暖化は1990年代半ばになってようやく事実として認められるようになった。**



# 地球の気候システムが変わっている！？

科学的には人間活動が温暖化の原因かどうかは証明されていない

とはいえ、温暖化が進行していることは観測事実によって確かめられ、コンセンサスは得ている

ただし、将来の温暖化予測結果は極めて不確かである

温暖化が悪であるか、善であるか？  
どのような生き方をしたいか

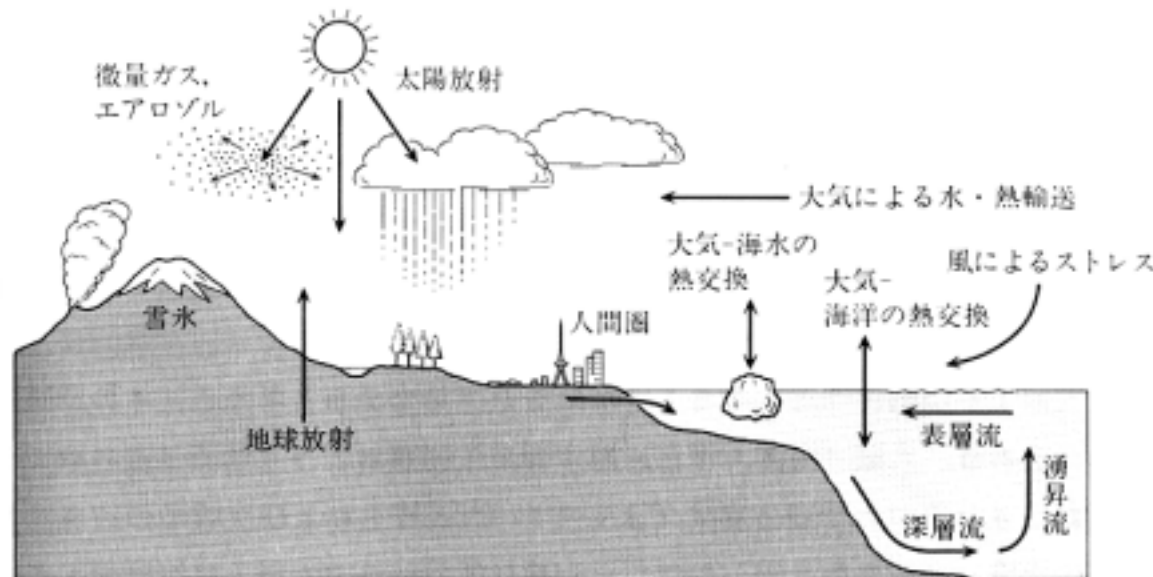
温暖化が氷期への引き金を引くとしたら？

# 気候システムとは何か？

## 気候とは

1) 古典的な定義では、気温、降水量、植生などの地表面状態、等々の物理量に基づいた長期間におよぶある平均的な自然環境(地表面)の状態

2) 現在は地表面だけでなく、人類の生息環境を支配する、高層大気から深海までも含めた地球の表層環境を規定している系全体をシステムとして捉える必要が出てきた



## システム

多数の要素から構成され、それぞれの要素間で相互作用がある

# 地球の気候システムは何を指標にして理解したら良いか

## 太陽から得たエネルギーの配分

太陽からのエネルギーを受け取るだけだったら、地球は暖まるばかりである

余分なエネルギーは宇宙空間に放出して、地球はバランスをとっている

地球上には暖かい地域、寒い地域がある。どこでエネルギーを吸収して、どこで放出しているか？

## 地球上における熱の再配分を理解しよう

低緯度で吸収された太陽エネルギーは高緯度に運ばれて、宇宙空間に放出される

## 何がエネルギーを運んでいるのか

海流と大気、最近では陸水の役割も無視できないことがわかってきた

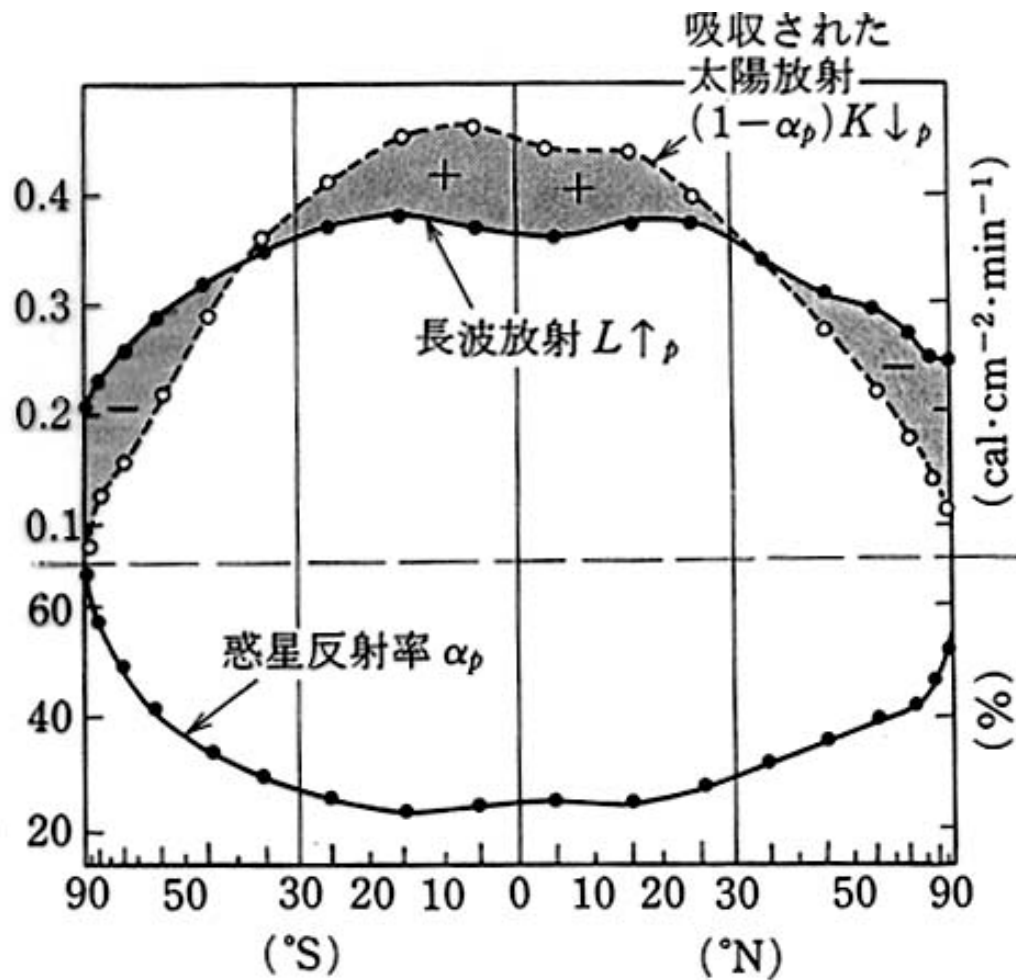


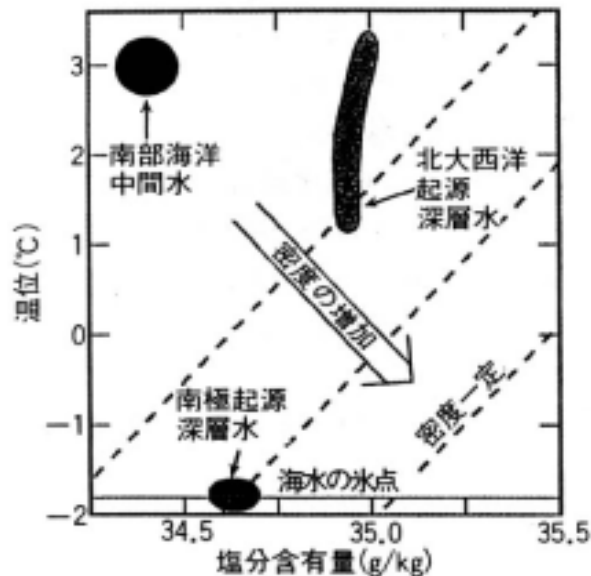
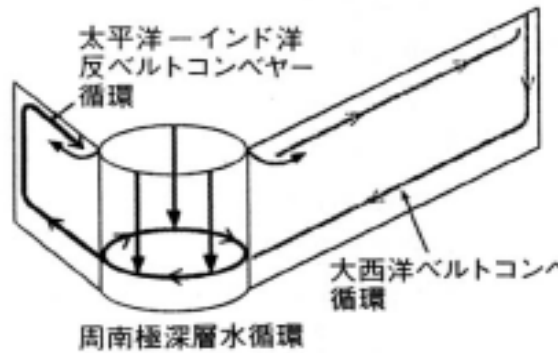
図7 1962～1966年に測定された地球の放射収支項の緯度的分布 (Haar and Suomi, 1971)

最も初期のリモートセンシングの成果。

地球が放出するエネルギーを衛星から計測し、惑星反射率を仮定することにより得られる吸収された太陽放射と比較すると、低緯度でエネルギー過剰、高緯度で不足になる。

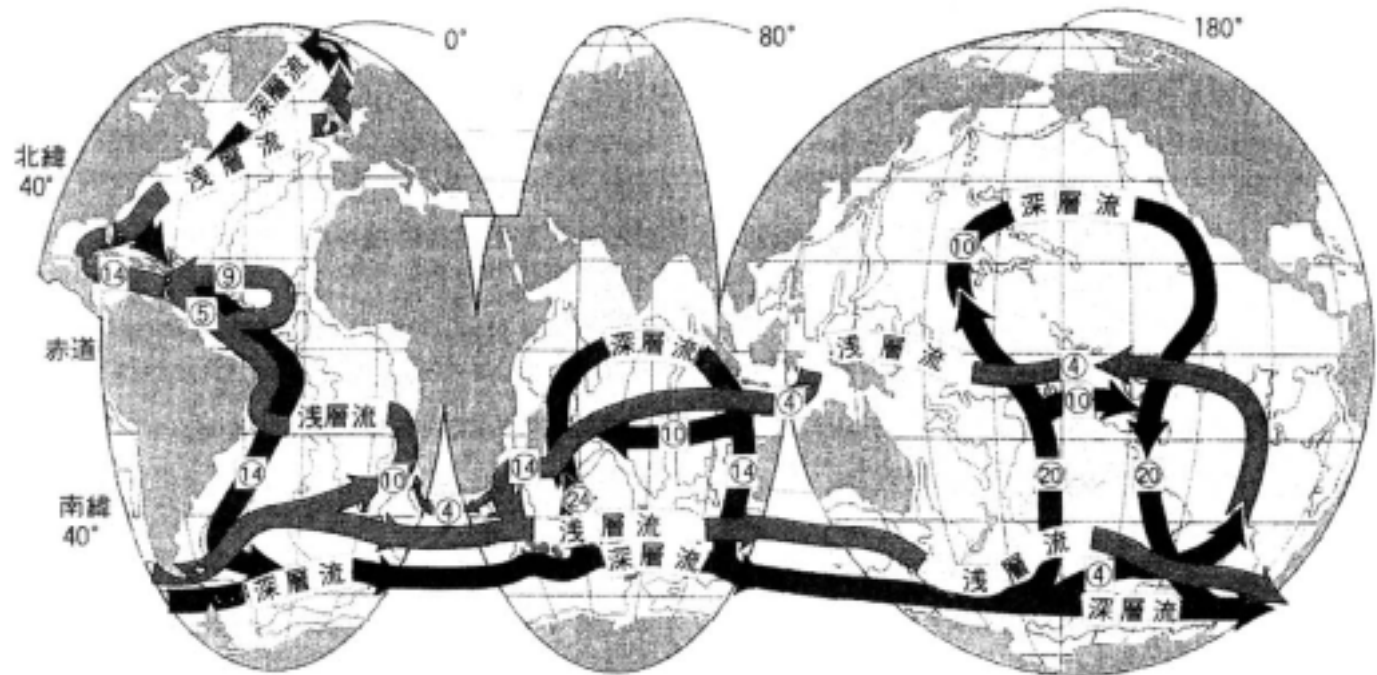
ということは、エネルギーの移動が生じている。

大気と水(海水)によるエネルギー運搬がある。



Broecker (1997) による

熱塩循環の模式図(上)と海水の密度(下)



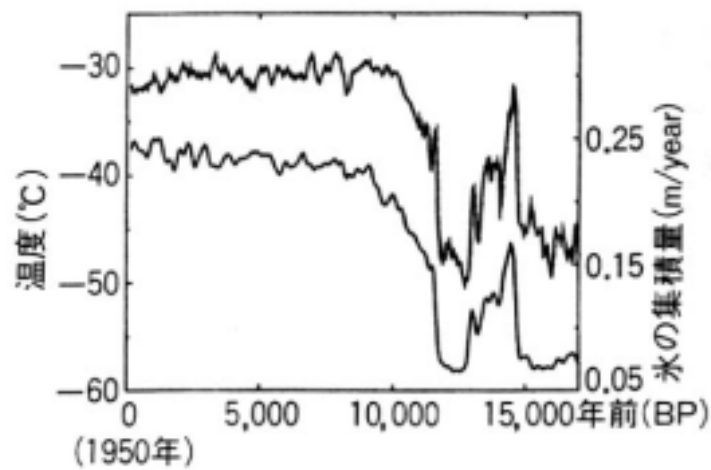
Schmitz (1995) による, 丸印の数字は Sv 単位で表わした輸送量

2層モデルによる熱塩循環の模式図

## 突然、海洋大循環の話題、なぜか？

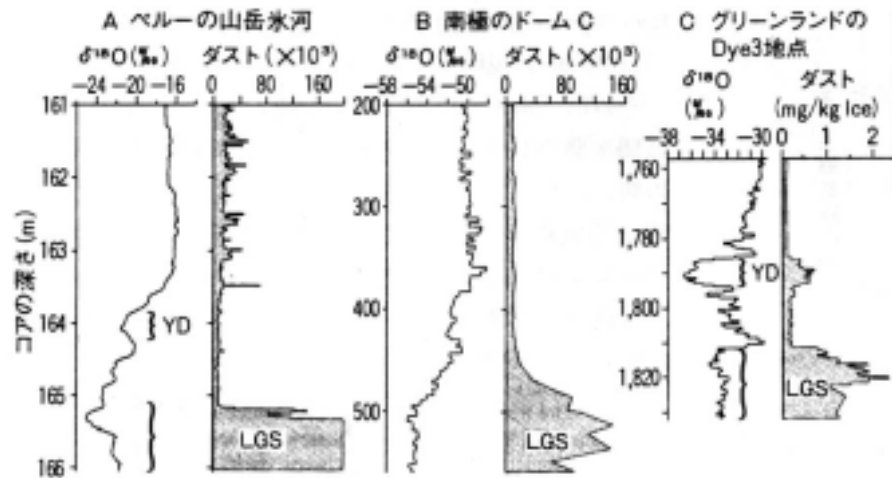
**熱塩循環：低緯度の熱を高緯度に運ぶベルトコンベアーとして海洋の深層循環は重要な役割を果たしている。**





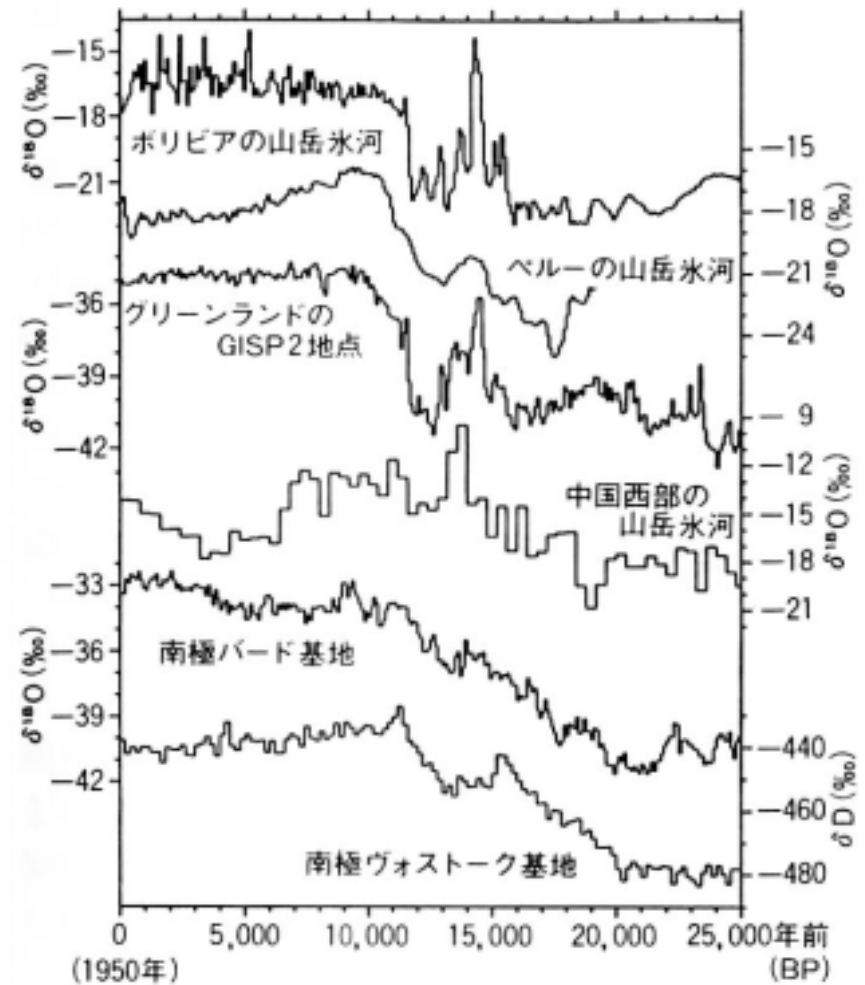
Alley ら(1993)による  
 上の折れ線：新ドライヤス期の気温  
 下の折れ線：新ドライヤス期の年降水量

### グリーンランド中部における新ドライヤス期の気温と年降水量の急激な変化



Thompson ら(1995)による

ベルーの山岳氷河(A), 南極ドームC(B), グリーンランド Dye 3 地点(C)における氷のコアの酸素同位体比とダストの変化



Thompson ら(1998)による

熱帯の2地点(ポリビアとベルー), 北半球の2地点(グリーンランドと中国), 南半球の2地点(南極のバード基地とヴォストーク基地)の記録を示す

### 過去25,000年間の酸素同位体比で表わした気候逆転期(YDとDCR)の比較

- YD: Younger Dryas 事変
- 地域性がある

# そのとき、何が起こったのか？

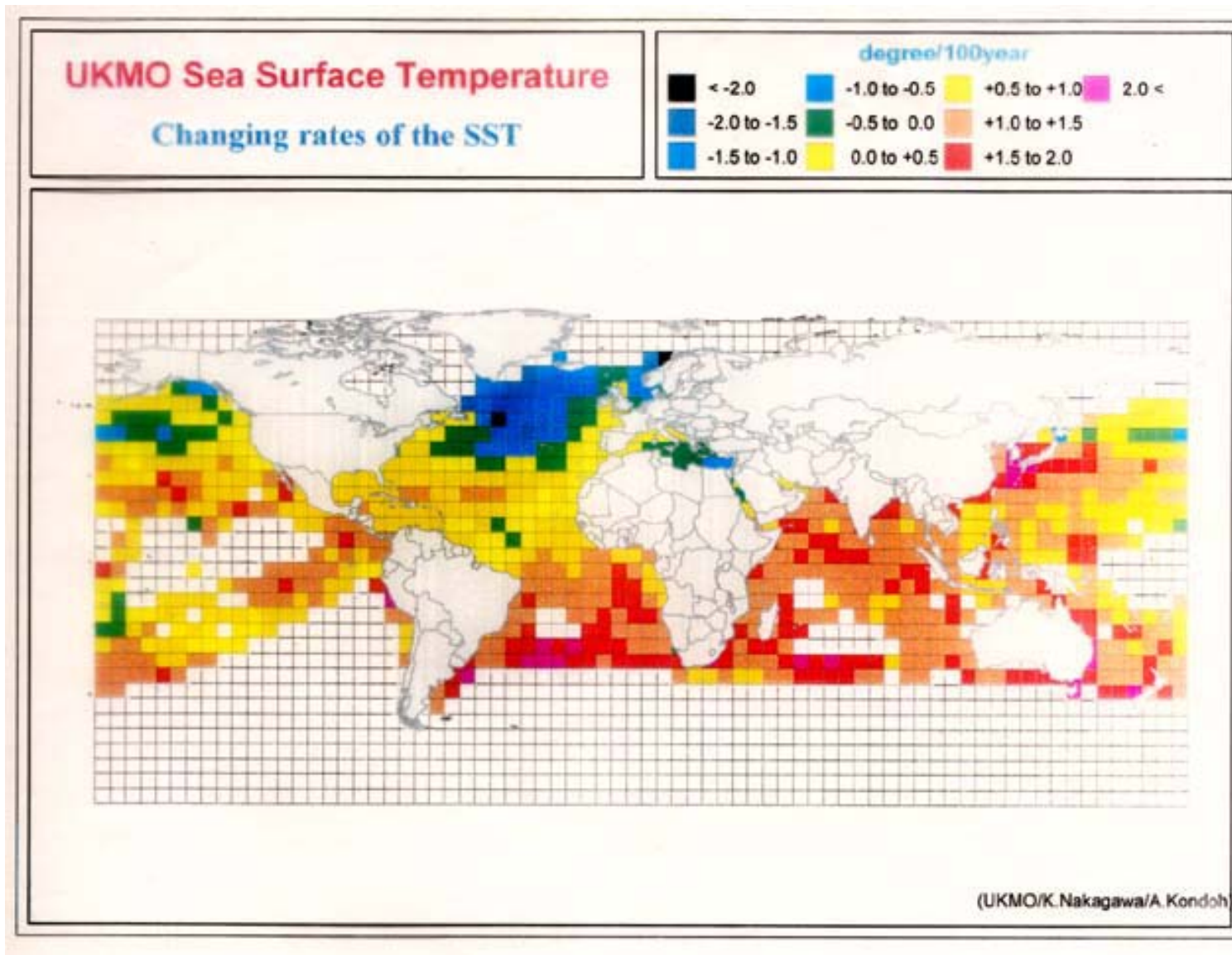


融氷水が北大西洋に流れ込み、表層水の塩分濃度が下がった。その結果、表層水は深海に沈み込むことができなくなった。すなわち、熱塩循環が切れた！

熱塩循環が止まる条件とは？

Broecker ら (1990) による

最終融氷期にローレンタイド氷床が後退する過程で融出水がセントローレンス川へ流路を変更する様子



SST (Sea Surface Temperature)の変動(単位は100年あたりの水温の変化) 英国気象局(UKMO)のデータによる

リモートセンシングで何をモニタリングすれば良いか

# 人間はどんな変化を引き起こしているか

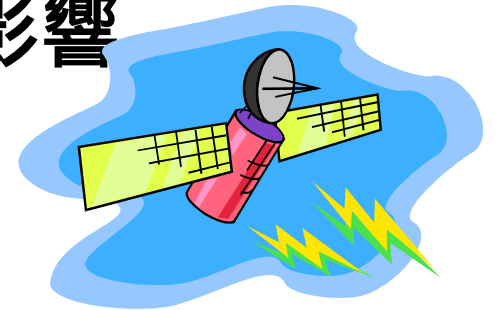
農地化・都市化が水収支に及ぼした影響

カスピ海・アラル海問題

森林の変遷

人間と自然の複合系

衛星は過去30年間に渡って地球  
の表層を観測し続けている



インド洋に浮かぶ孤島スリランカでは、海岸部では降水量は増えているが、山地では減っている。

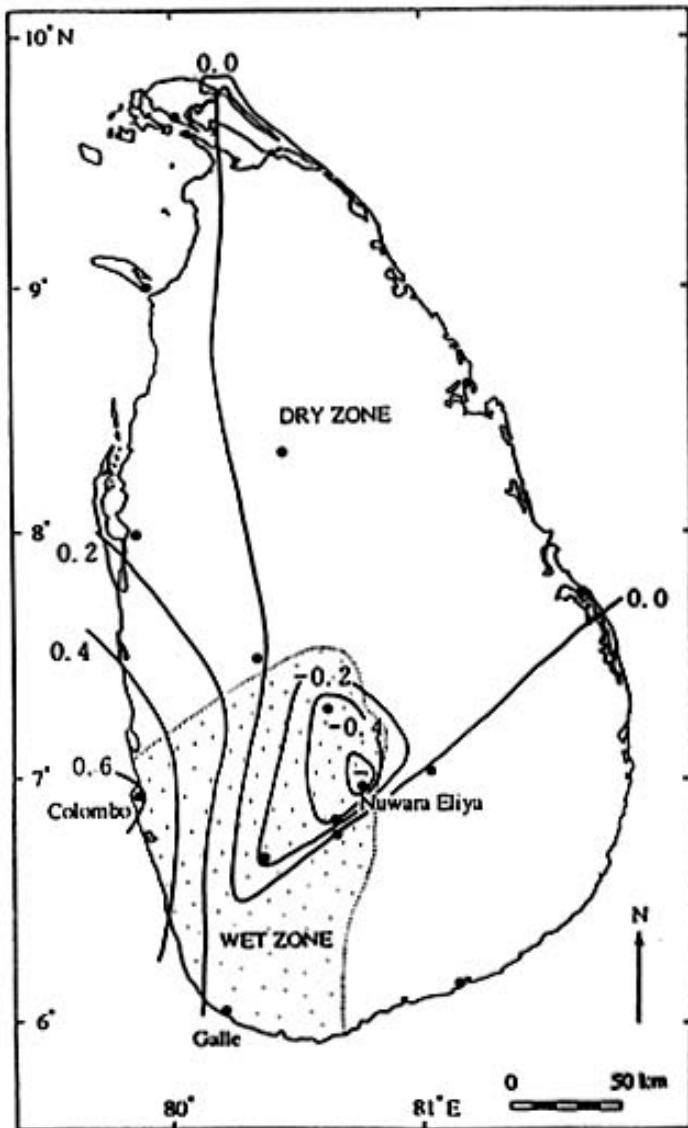


図4 南西モンスーン季の平均月降水量のトレンドの傾き (mm/y) の地理的分布

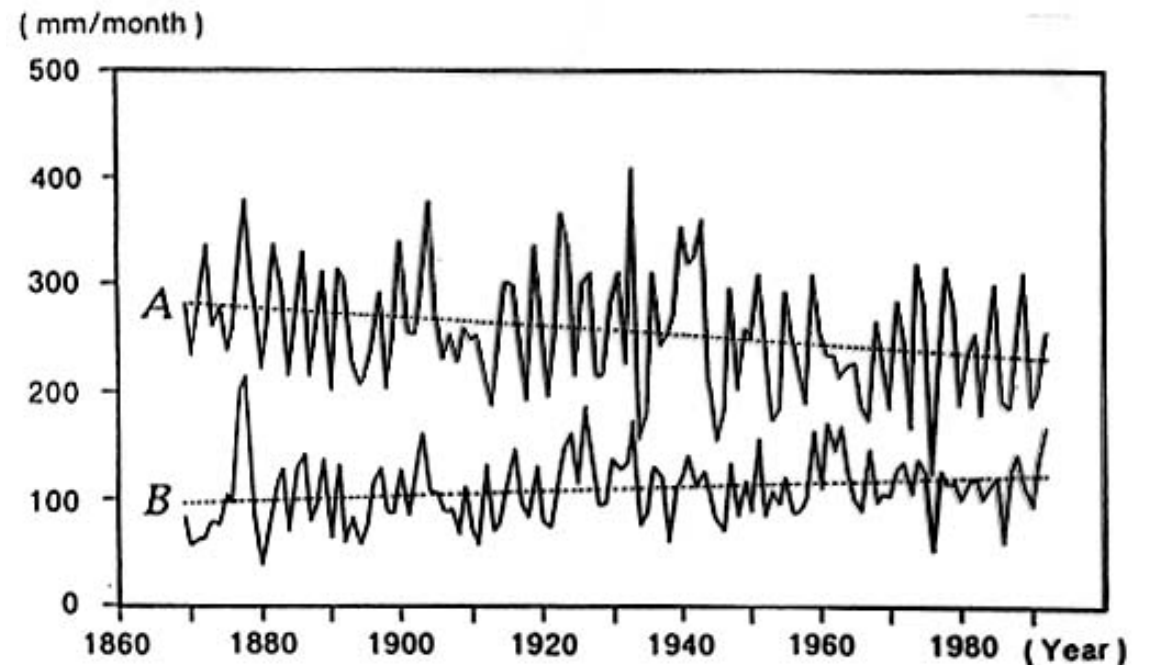
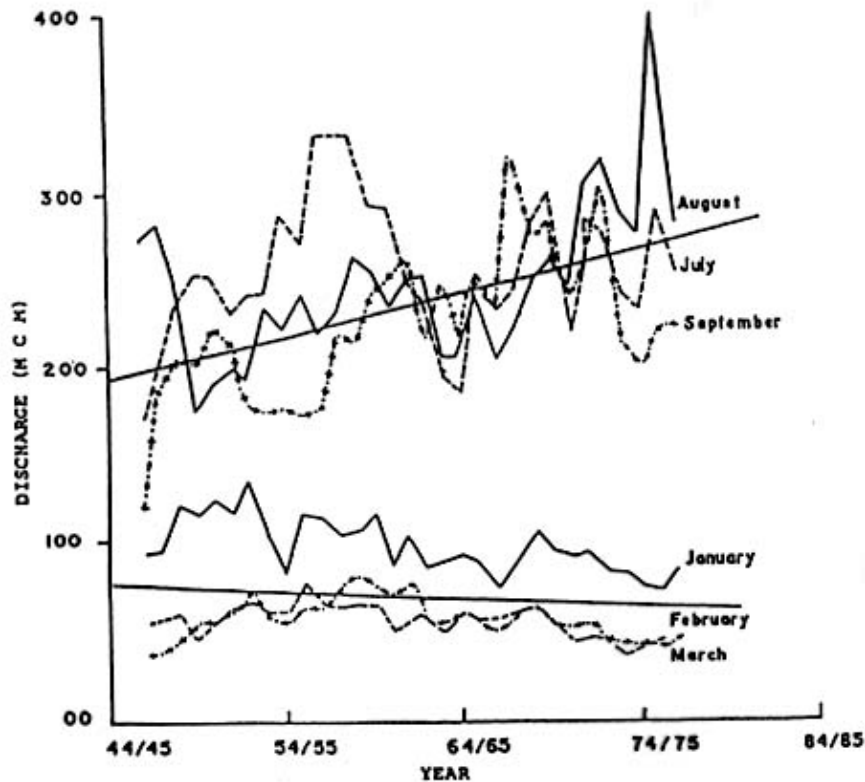


図3 南西モンスーン季におけるスリランカ南西部の山地6地点 (A) と平地6地点 (B) の平均月降水量の時系列とトレンド





スリランカ中央山岳域を流れるマハウェリ川の流量は雨期には増えたが、乾期には減った。

紅茶価格の暴落によりハイランドティーの農園が放棄されたり、商品作物に転換、土壌が荒れた。

1950年代から1980年代にかけてお茶の栽培面積が激減したことが表から読みとれる。

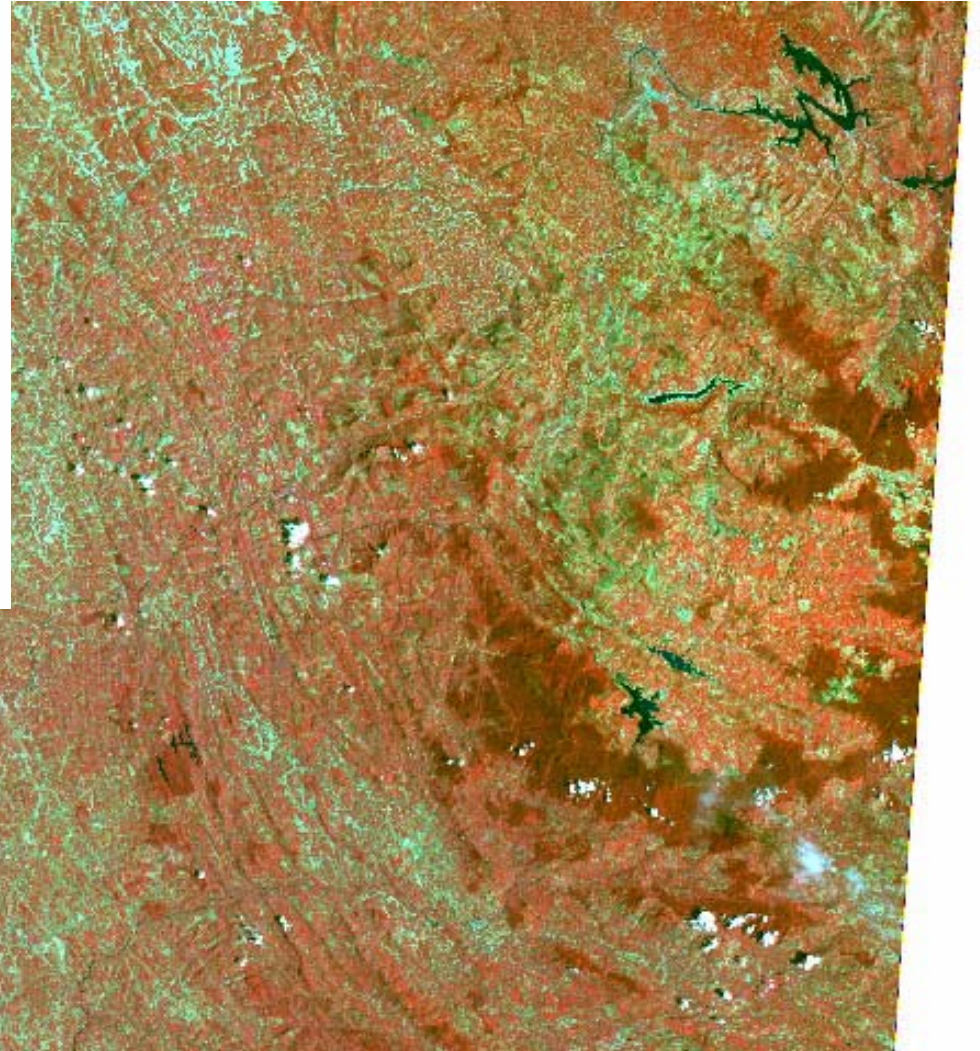
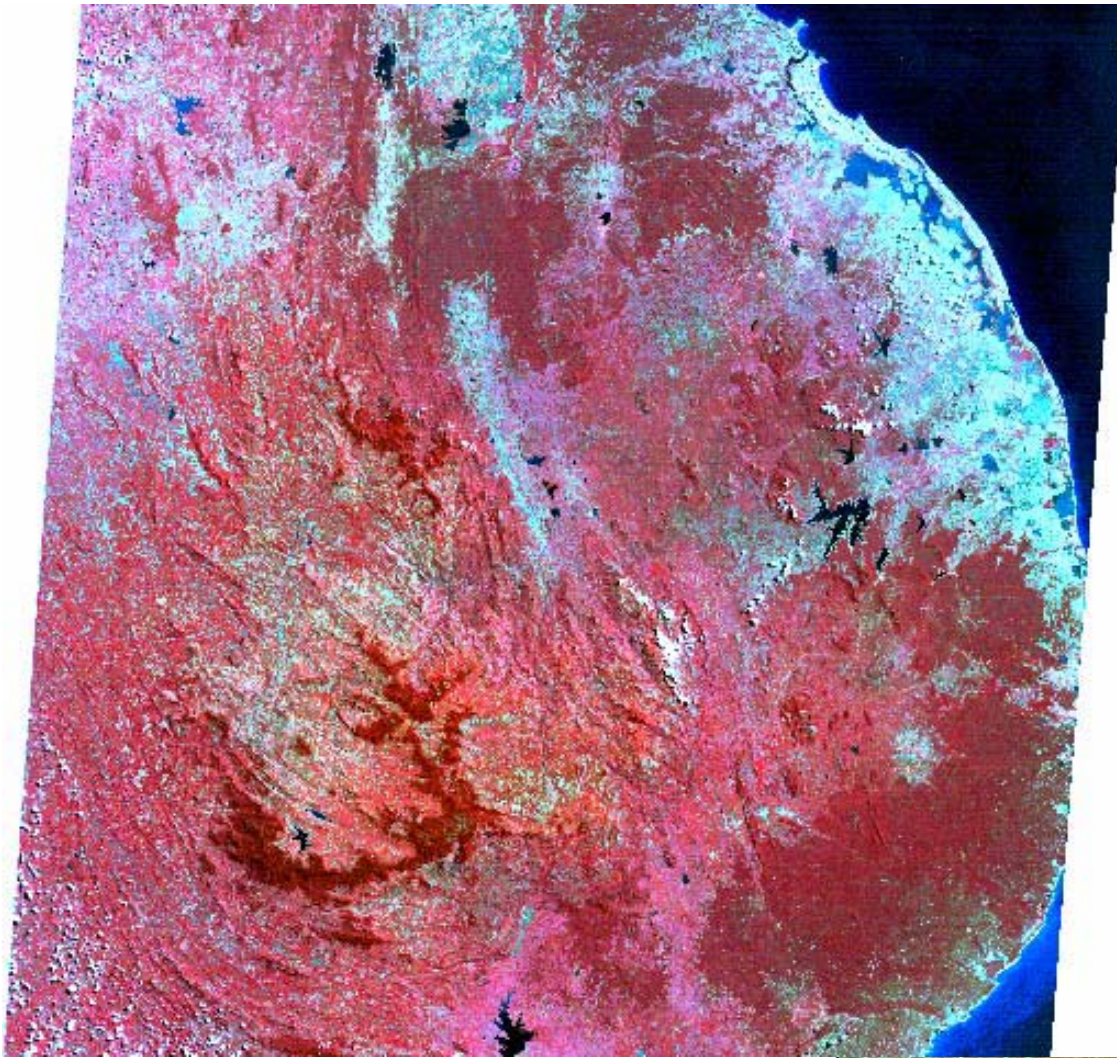
Table 1 Land use change in the Mahaweli basin above Peradeniya (1956-1981).

Land Use	1956	1979 / 81	Change
Tea	61.10	38.81	- 22.29
Homesteads	6.56	16.67	+10.11
Grasslands	5.51	7.79	+ 2.28
Forests	16.94	14.55	- 2.39
Forests of Plantations	2.54	4.15	+ 1.61
Croplands	6.68	15.10	+ 8.32
Other uses	0.66	3.03	+ 2.37

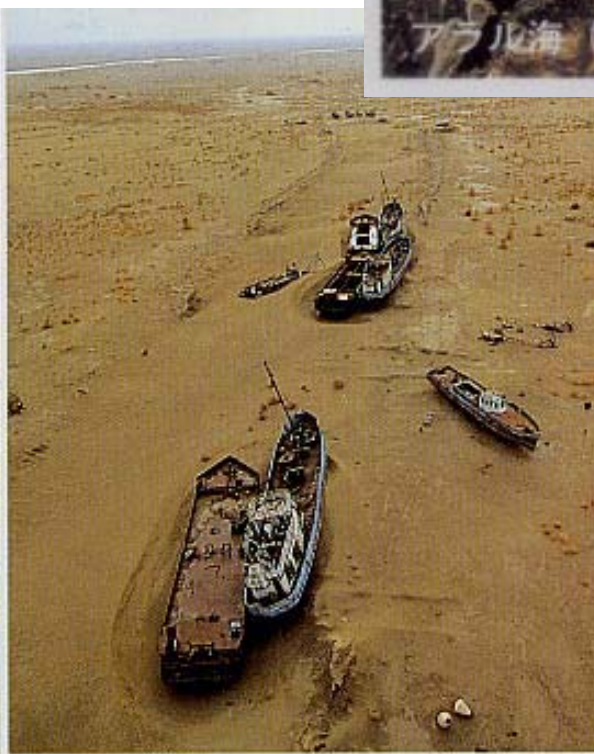
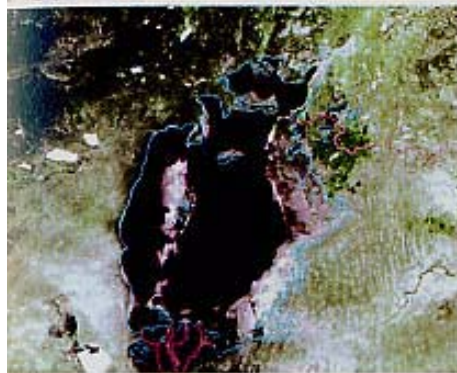
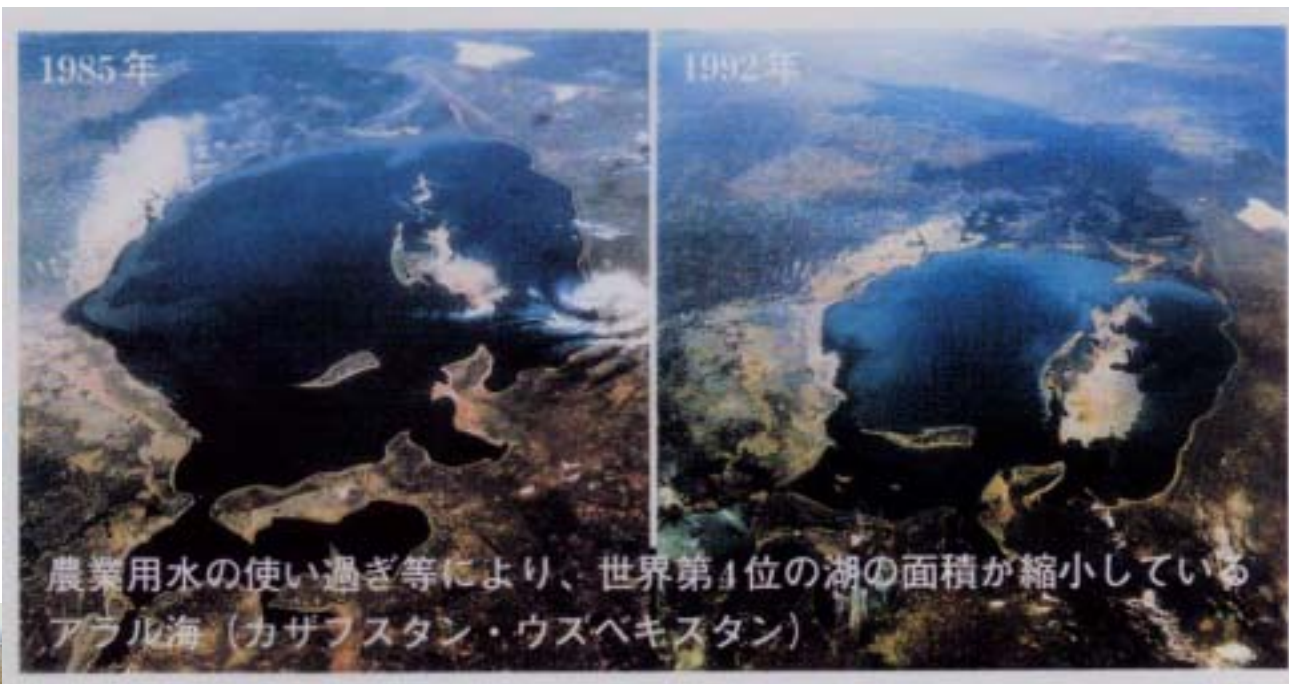
(unit : %)

Source : Land use maps based on air photography by Hunting Air Surveys 1956 ; District Land Use Maps-Survey Department 1981.

LANDSAT MSSとMOS-1  
MESSRによる1976年と1989年  
のスリランカ中央部の画像



# アラル海の縮小

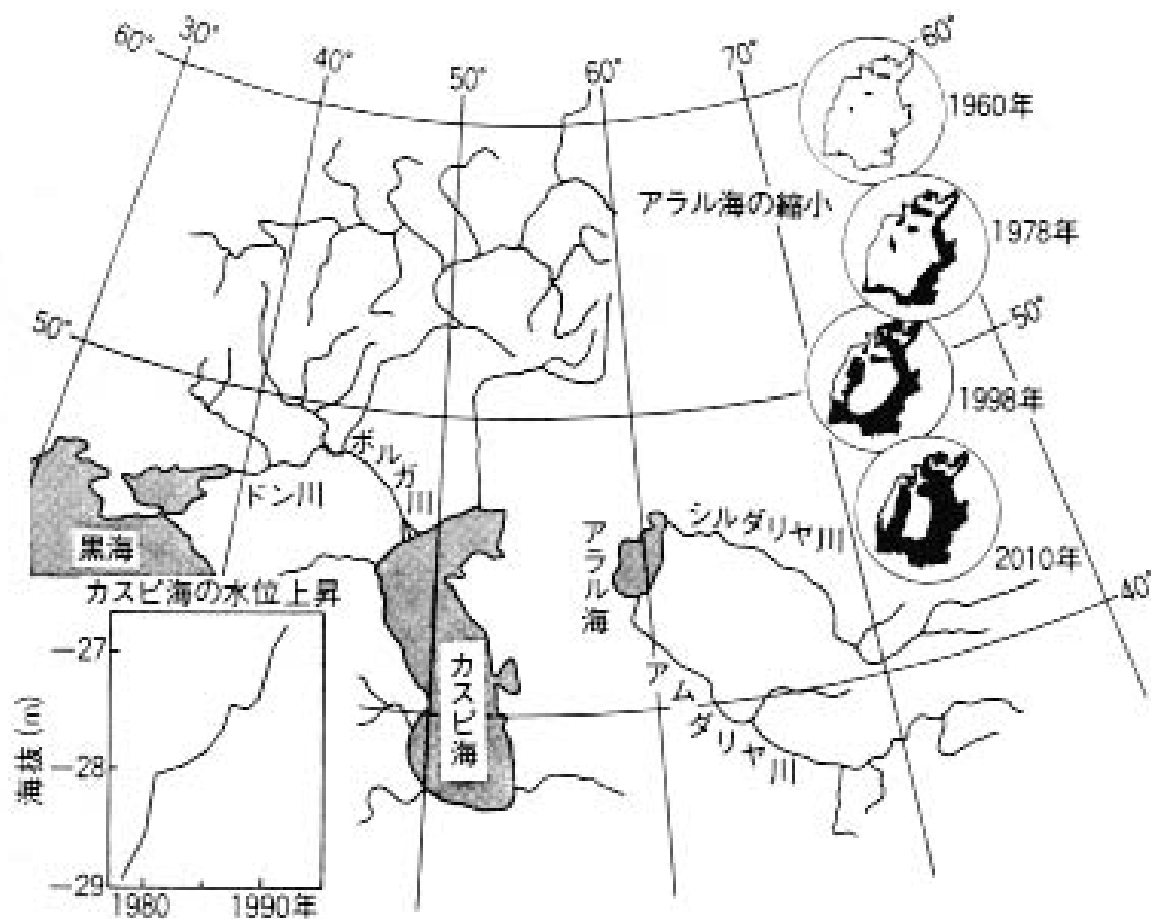


海に出口を持たない内陸流域では、流域末端の湖沼の水位は水収支によって決まる。入ってくる量（流入量）が減って、出る量（蒸発量）が変わらなければ、水位は下がる。

▲ ② アラル海の縮小 縮小の原因は、大量の水が灌漑用水となり、湖へ流入するはずだった水が減少したためである。かつての港にあった廃船がとり残されている(写真右)。左の画像は気象衛星ノアがとらえたもので(上が1983年、下が1992年)、下の画像の青線は1970年代前半の湖岸線、赤線は川である。(→ p.98)







アラル海ではシルダリヤ川と  
 アムダリヤ川の流域で灌漑用  
 の取水が増え、その結果アラル  
 海に供給される淡水量が  
 減った。

一方、カスピ海では1970年代  
 後半から水位が上昇してい  
 る。なぜか？

流域の方向について考えて  
 みよう。

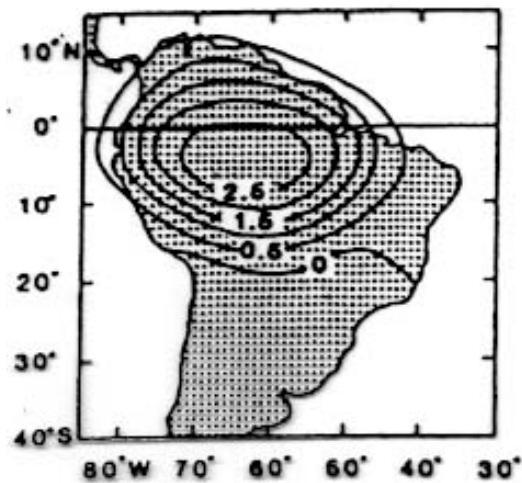
## 地理的なセンスの重要性

カスピ海：Latypov (1995)、アラル海：Stone (1999) による

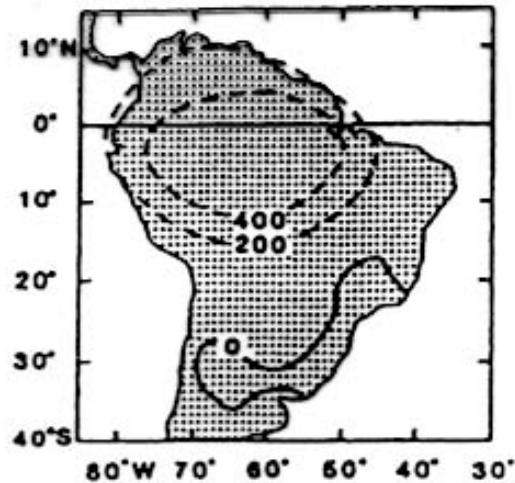
図11 1970年以降のカスピ海の水位とアラル海の水位の逆方向の変化



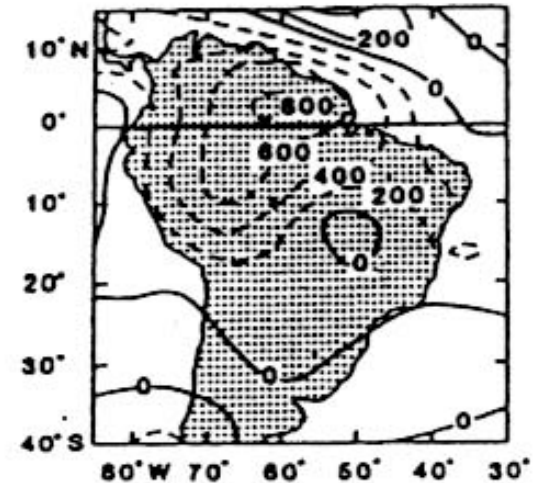
# 土地利用の変化が気候に及ぼす影響



(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).





JERS1の合成開口レーダーで撮影したブラジル、 Rondônia地方(上)

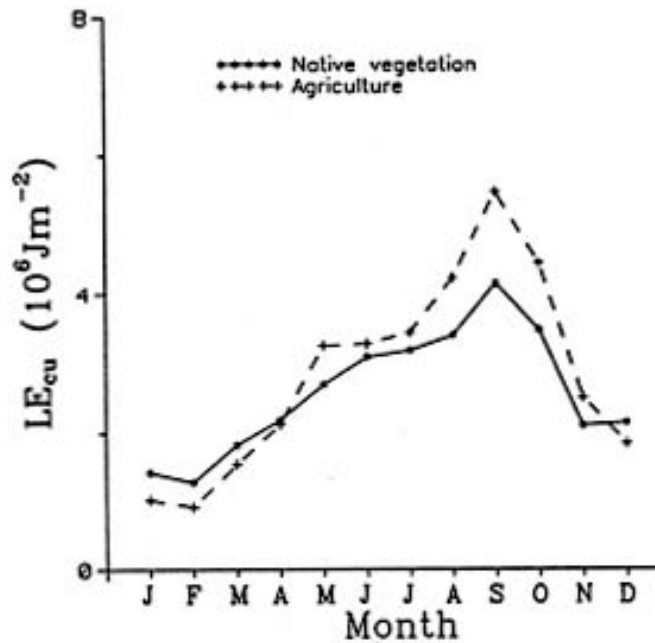
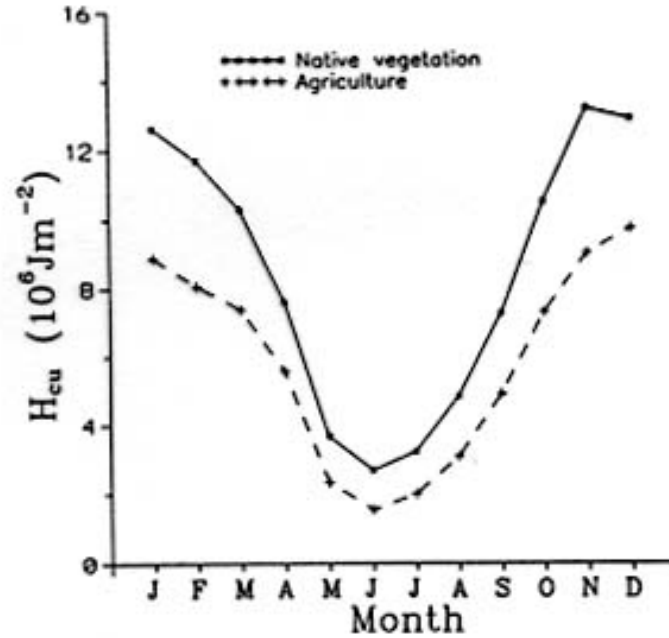
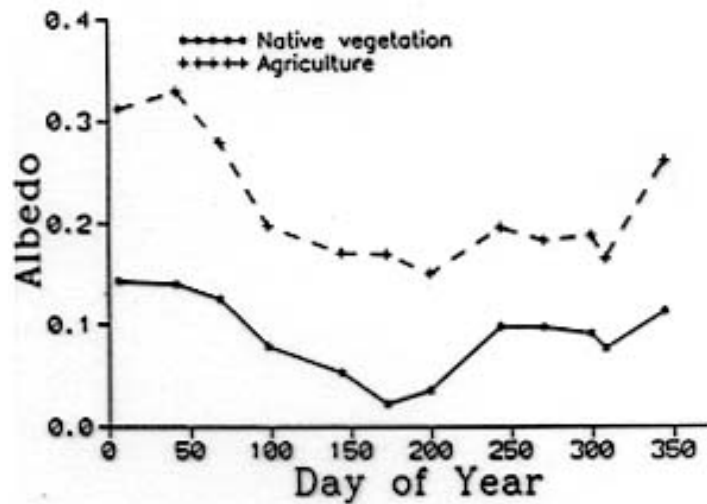
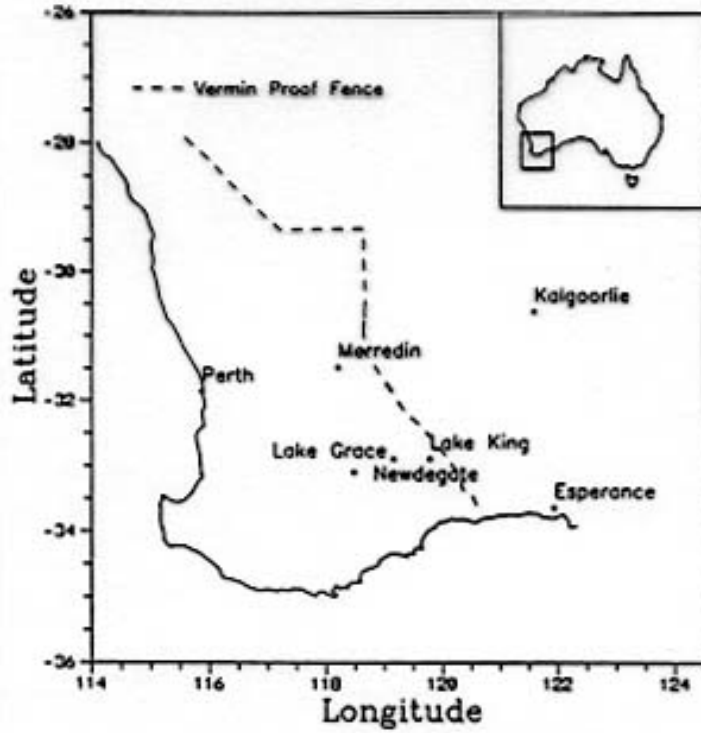
赤い部分が森林伐採が行われた地域、魚の骨に似ているのでfishboneと呼ばれる。

約800km四方の広さを撮影した画像である。

口絵4  
むしばまれる地球



◀▲① アマゾン開発にともなう熱帯林破壊(ブラジル) アマゾン川流域を横断する全長5600kmに及ぶ幹線道路の建設は、1970年から始まった。たけの高い木の日陰にならないように、40mの幅で樹木を伐採し、道路敷地を乾いた状態に保つようにした(写真左、1992年撮影)。上の3枚の写真は、衛星から送られたきたデータを画像処理したものである(上から1973年、1979年、1986年)。幹線道路から多くの支線道路が建設され、その両側の熱帯林が伐採され、崩壊されていくようすが読み取れる。(→p.93)



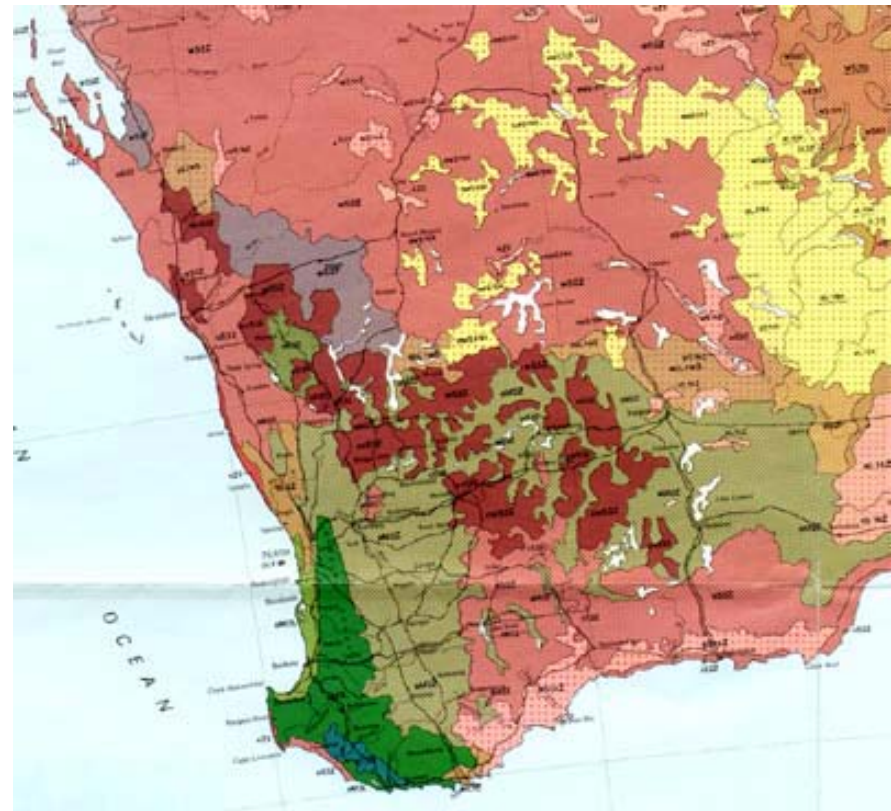
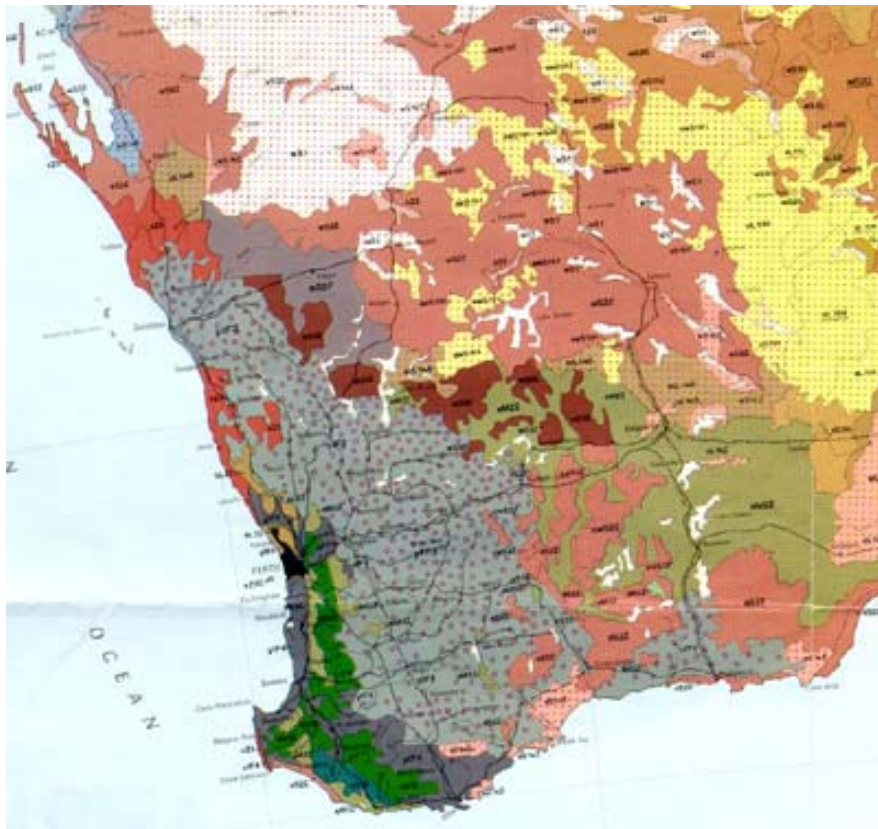
・Vermin Proof Fenceとは？

・アルベドは上がった

・顕熱は下がった

・蒸発はあまり変わらなかった

雨が減った  
なぜか？



左: オーストラリアの現植生(1980年代)

右: 自然植生(ヨーロッパからの植民が始まった1788年頃)

# イスラエルでは10月の雨が増えた。なぜか？

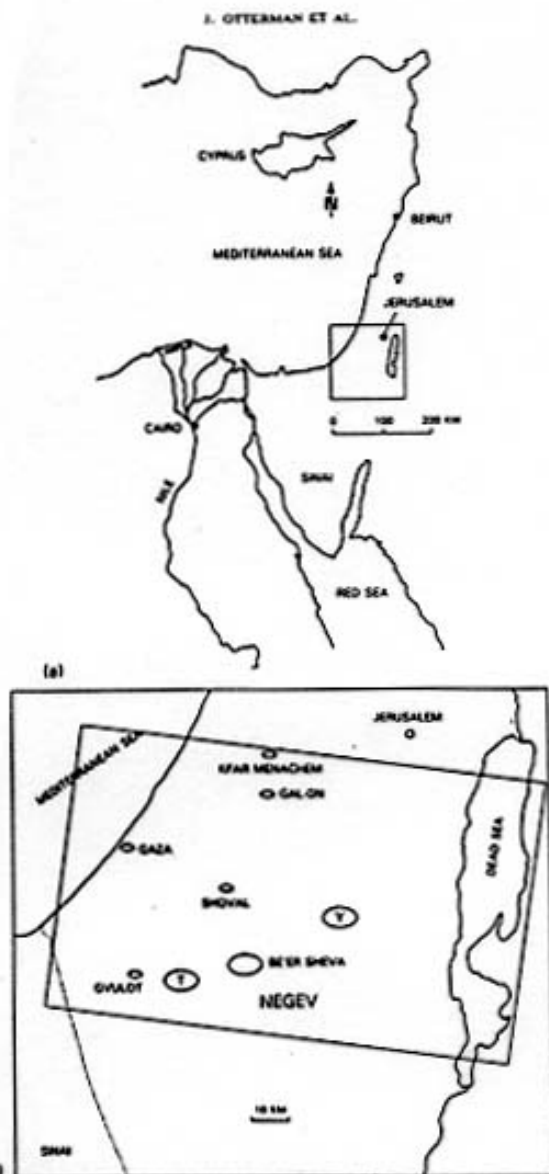


Fig. 1. Schematic map of the Eastern Mediterranean region (a). Study region is located within the rectangular box which is enlarged in (b) showing locations of the surface stations and relevant geographic features.

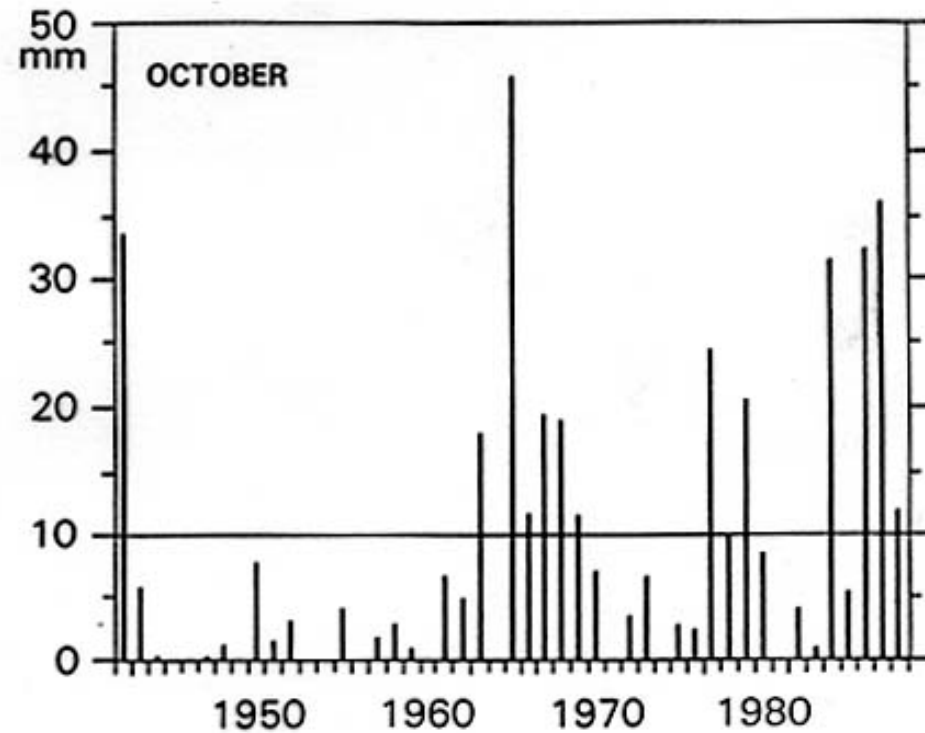


Fig. 3. Time-series 1942–1988 of October precipitation in mm averaged over 5 stations in southern Israel. Months with a higher precipitation than 10 mm are referred to as HP Octobers, those with lower, as LP Octobers.

TABLE I

Rainfall data for selected five stations in southern Israel: comparison of the 1942/1943–1962/1963 period with the 1963/1964–1988/1989 period

	Rainfall (mm per month or season)		Increase	
	1942–1962	1963–1988	Percent	Difference (mm)
October	4.0	12.9	222.5	8.9
November	37.8	39.8	5.3	2.0
December–April	243.9	278.4	14.1	34.5
Entire season	285.7	331.1	15.9	45.4

Southwestern part of Dead Sea, ISRAEL



キブツ（集団農場）の収穫作業。このお嬢さんは、最近キブツへ移住してきたカナダ系ユダヤ人。午前中はヘブライ語の特訓で、午後は農作業の毎日だ。



日本のセンサーASTERによる死海近辺の画像(左)。乾燥地域をイスラエルは卓越した灌漑技術で果樹園に変えた(右:NHK「水と文明」より)

# 衛星リモートセンシング

広域を同時に観測する

[空間性・多様性]

繰り返し、観測する

[時間性]

人間には見えない波長の電磁波で観測する

コンピューターによる処理が簡単

[関連性の抽出]

地理情報・データベースとのリンク





# 画像を見るための基本

空間分解能 1画素の大きさ

バンド 光を含む電磁波の領域を細かく分けて観測

周期

空間分解能の高い衛星は同じ場所を観測する頻度は少ない

空間分解能の低い衛星は同じ場所を短い周期で繰り返し観測できる

