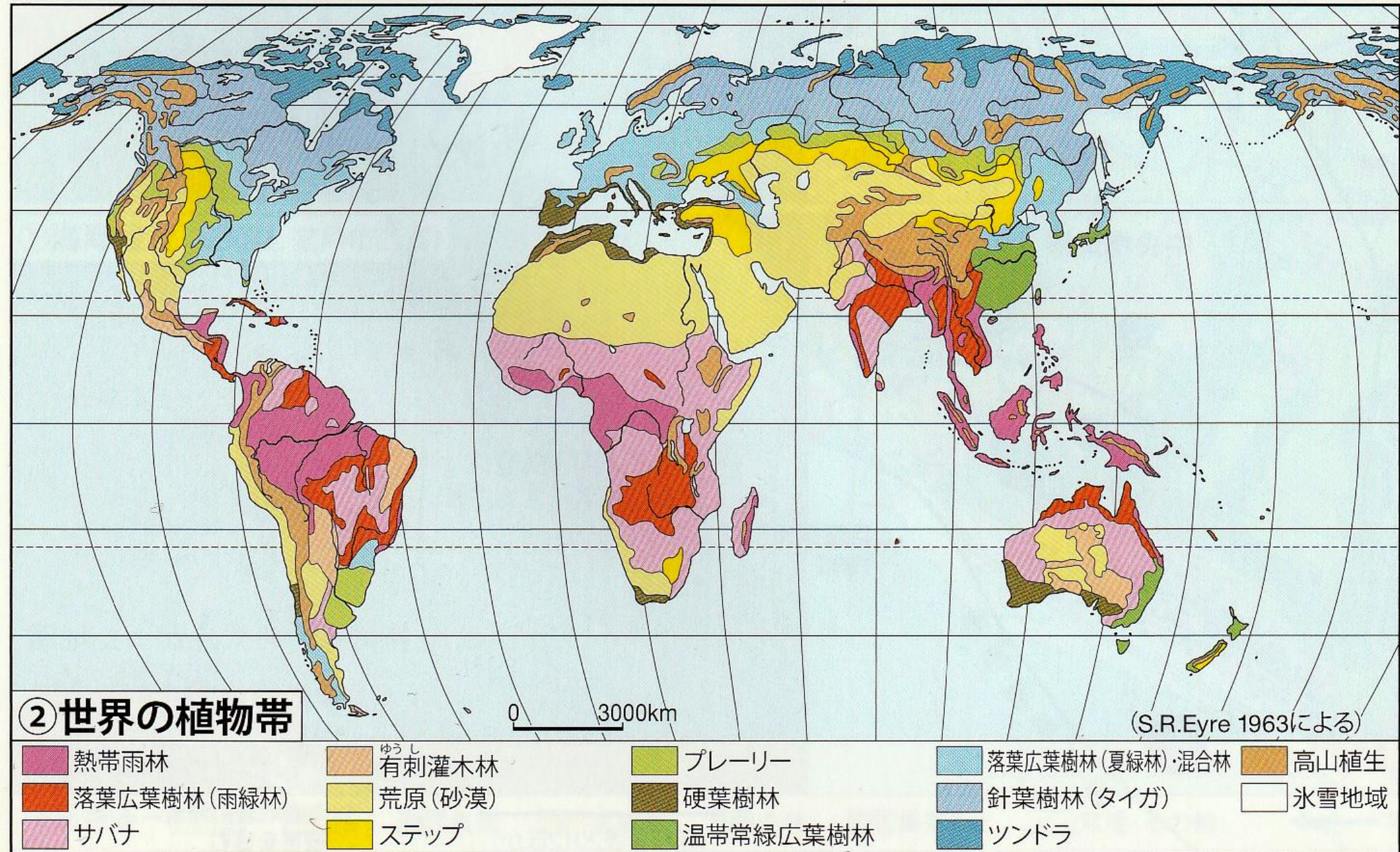
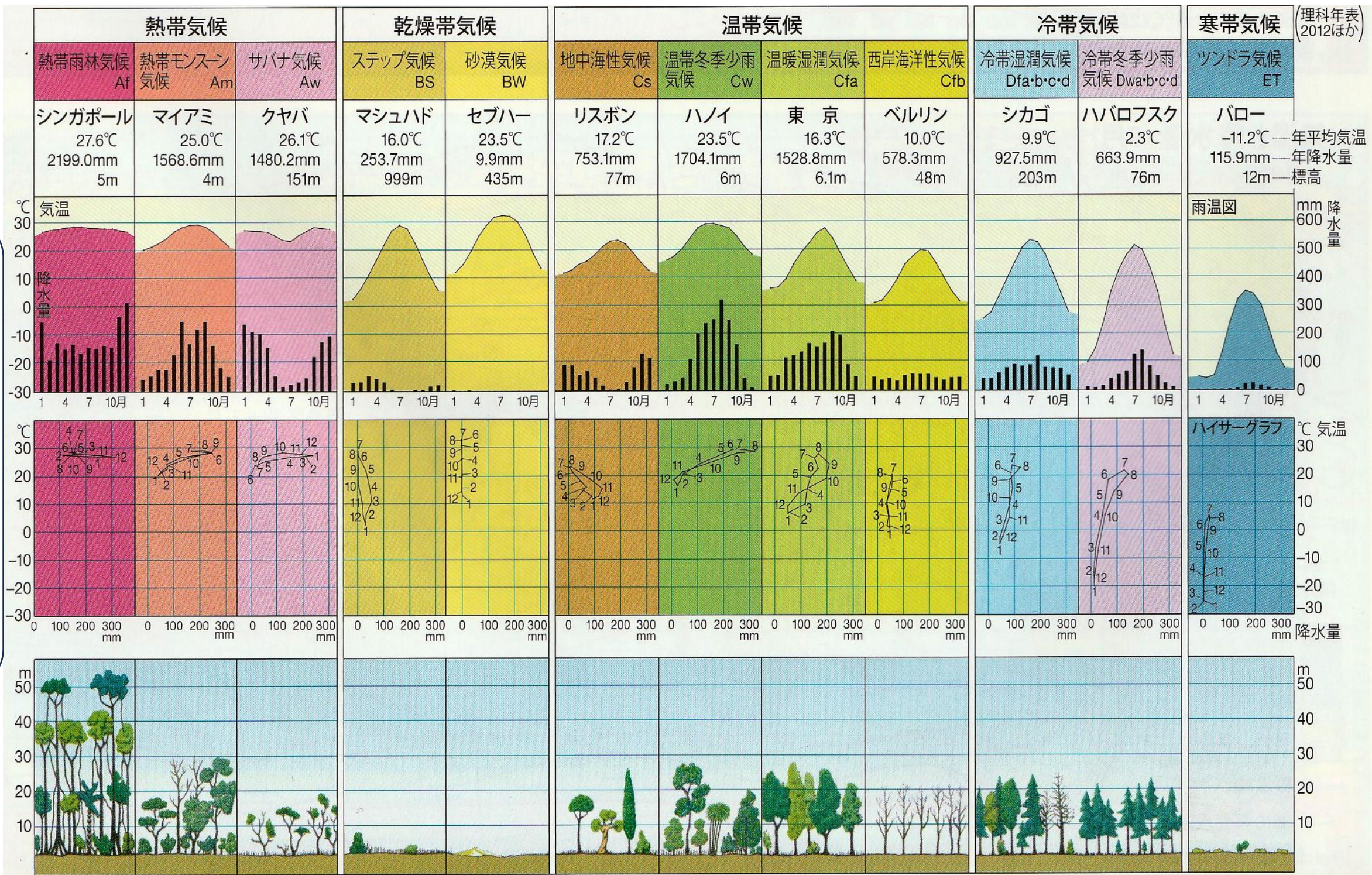


水と植生－植生の分布と機能



(二宮書店「基本地図帳」より)

(理科年表
2012ほか)



気候帯と植生帯は対応。

それぞれ固有の形態、生活形をもつ。

それは大気や地中とのエネルギー交換、水交換とも関わる。



地球環境変動においてなぜ植生が重要か

気候システムの理解のためには地表面における熱収支・水収支の解明が不可欠

熱収支 $R_n = H + LE + G$

地表面が受け取る正味のエネルギー (R_n) は空気を暖める顕熱 (H)、蒸発散に使われる潜熱 (LE)、地面を暖める熱量 (G) に分配

水収支 $P = R + E + I$

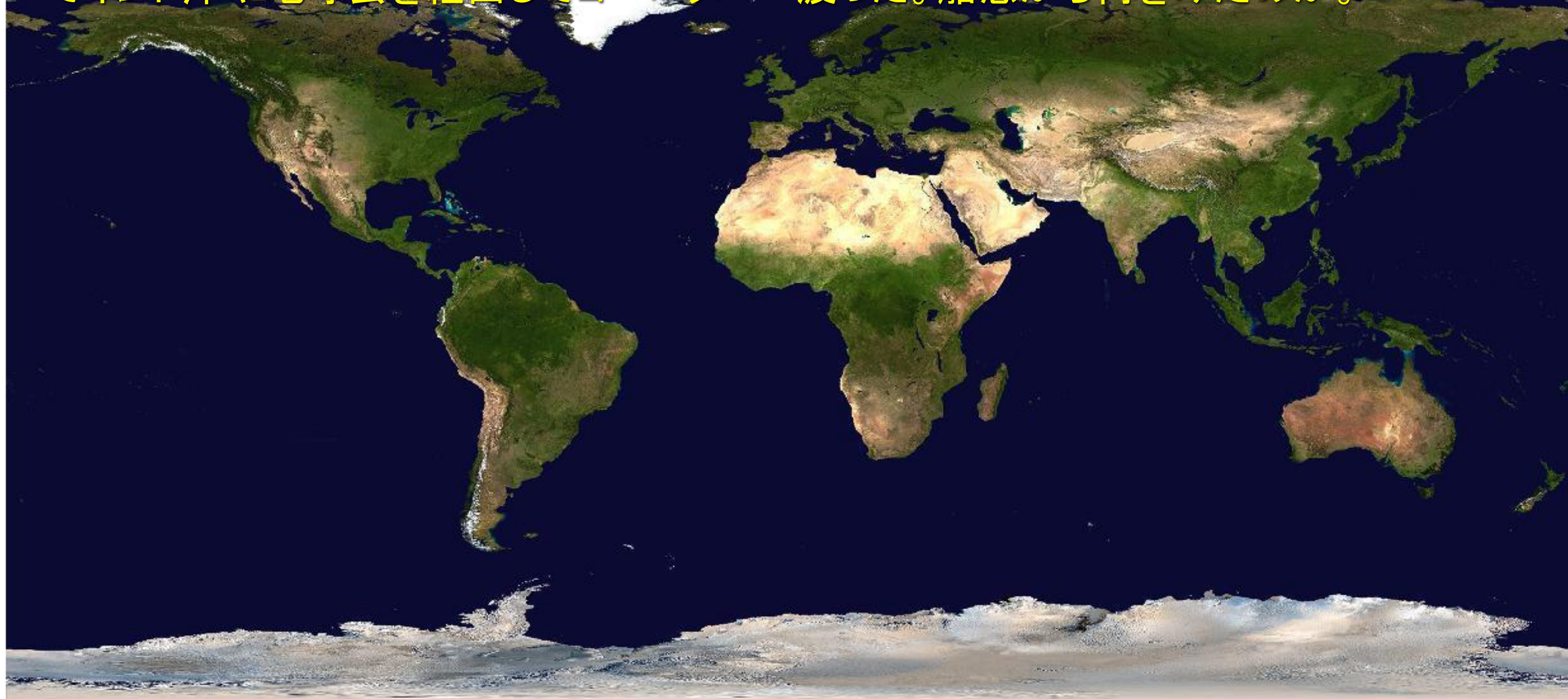
降水量 (P) は流出量 (R)、蒸発散量 (E)、浸透量 (I) に分配

- 水と熱の分配の割合（熱収支・水収支）の変化は気候の形成に影響する
- 植生は蒸発散を通じて両収支に影響を与える
- その他、光合成を通じて炭素収支とも関連
- 風土としての植生

その土地固有の気候・地味など、自然環境、土地柄、特に住民の気質や文化に影響を及ぼす環境（広辞苑第六版）

和辻哲郎 風土ーその人間的考察

人間への気候・風土の影響を論じた。和辻は1927年に文部省在外研究員として、船でインド洋や地球会を經由してヨーロッパへ渡った。船窓から何をみたのか。



人間の存在は歴史的・風土的なる特殊構造を持っている。この特殊性は風土の有限性による風土的類型によって顕著に示される。もとよりこの風土は歴史的風土であるゆえに、風土の類型は同時に歴史の類型である。自分はモンスーン地域における人間の存在の仕方を「モンスーンの」と名づけた。我々の国民もその特殊な存在の仕方においてはまさにモンスーンの的である。すなわち受容的・忍従的である。

しかし我々はこれのみによって我々の国民を規定することはできない。風土のみを抽象して考えても、広い大洋と豊かな日光とを受けて豊富に水を恵まれ旺盛に植物が繁茂するという点においてはなるほど我々の国土とインドとはきわめて相似ているが、しかしインドが北方は高山の屏風にさえぎられつつインド洋との間にきわめて規則的な季節風を持つのは異なり、日本は蒙古シベリアの漠々たる大陸とそれよりもさらに一層漠々たる太平洋との間に介在して、きわめて変化に富む季節風にもまれているのである。大洋のただ中において吸い上げられた豊富な水を真正面から浴びせられるという点において共通であるとしても、その水は一方においては「台風」というごとき季節的ではあっても突発的な、従ってその弁証法的な性格とその猛烈さにおいて世界に比類なき形を取り、他方においてはその積雪量において世界にまれな大雪の形を取る。かく大雨と大雪との二重の現象において日本はモンスーン域中最も特殊な風土を持つのである。それは熱帯的・寒帯的の二重性格と呼ぶことができる。温帯的なものは総じて何ほどの程度において両者を含むのではあるが、しかしかくまで顕著にこの二重性格を顕わすものは、日本の風土を除いてどこにも見いだされない。(中略)

そこで日本の人間の特殊な存在の仕方は、豊かに流露する感情が変化においてひそかに持久しつつその持久的変化の各瞬間に突発性を含むこと、及びこの活発なる感情が反抗においてあきらめに沈み、突発的な昂揚の裏に俄然たるあきらめの静かさを蔵すること、において規定せられる。それはしめやかな激情、戦闘的な恬淡である。これが日本の国民的性格にほかならない。しかしこの国民的性格は歴史においておのれを形成しているのであるゆえに、歴史的な形成物を除いてどこにもその現われている場所はない。(下略)

「風土」、まさにEnvironmentにいちばん近い言葉。

みなさんが関係性を持つ“周り”のあり方は、あなたの自然観に影響を及ぼしているのでしょうか。



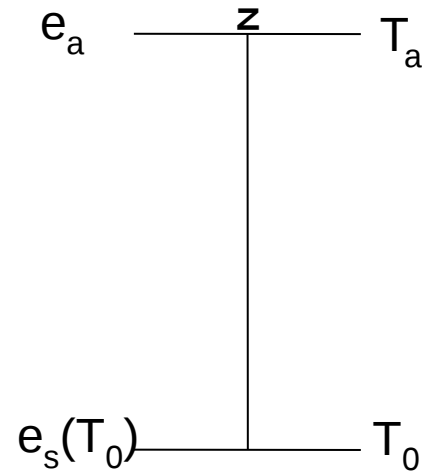
植生とモデル（水収支・熱収支モデル）との関係を前期に開講した「人間活動と物質循環Ⅰ：水文学(Hydrology)入門」の講義資料で復習しよう。



蒸発散量の推定：組み合わせ法

顕熱フラックス $H = \frac{\rho C_p}{r_a} (T_0 - T_a)$

潜熱フラックス $\lambda E = \frac{\rho C_p}{\gamma r_a} (e_s(T_0) - e_a)$



十分に湿った蒸発面

ここで、 ρ : 空気の密度、 C_p : 空気の定圧比熱、 r_a : 空気力学的抵抗、 γ : 乾湿計定数、 T_0 : 表面温度、 T_a : 高さ z における気温、 $e_s(T_0)$: 表面温度 T_0 における飽和水蒸気圧、 e_a : 高さ z の水蒸気圧、 λ : 蒸発の潜熱で λE でエネルギーになる。

このように考えよう

顕熱フラックスは温度の差($T_0 - T_a$)に比例

潜熱フラックスは飽差($e_s(T_0) - e_a$)に比例

(飽差: 湿った空気の水蒸気圧と同じ温度の飽和水蒸気圧の差)



乾湿計定数 γ とは

乾湿計公式

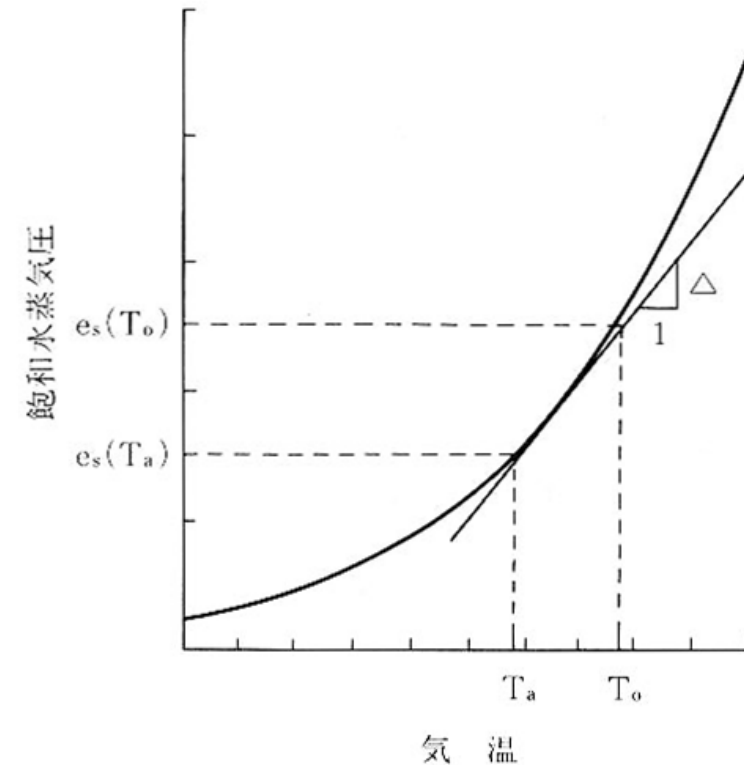
$$e = E(T_w) - \text{Cp} \cdot p / \{\epsilon L(T_w)\} (T_d - T_w)$$

における乾湿差 $T_d - T_w$ の項の係数、 $\text{Cp} \cdot p / \{\epsilon L(T_w)\}$ のこと。ここで、 e : 求める水蒸気圧、 T_d : 乾球温度、 T_w : 湿球温度、 $E(T_w)$: 湿球温度 T_w における飽和水蒸気圧、 Cp : 乾燥空気の定圧比熱、 p : 気圧、 ϵ : 比熱比 (=0.622)、 $L(T_w)$: 湿球温度 T_w における潜熱である。空気塊内における水物質の相変化による気温低下 1°C 当りの水蒸気圧の増加率を意味する。

飽和水蒸気圧曲線の勾配とは

気温に対する飽和水蒸気圧は気温の関数になる。その曲線の勾配ことで、下式で近似できる。

$$\Delta \doteq \frac{e_s(T_0) - e_s(T_a)}{T_0 - T_a}$$



ペンマン・モンティース式の誘導

$$\Delta \doteq \frac{e_s(T_0) - e_s(T_a)}{T_0 - T_a} \quad (3)$$

ここで、飽和水蒸気圧
曲線の勾配を(3)式で
近似する

$$e_s(T_0) = \Delta(T_0 - T_a) + e_s(T_a) \quad (4)$$

書き換えて、(4)式を
得る

$$H = \frac{\rho C_p}{r_a}(T_0 - T_a) \quad (1)$$

これを(2)式に代入す
ると(5)式を得る

$$\lambda E = \frac{\rho C_p}{\gamma r_a}(e_s(T_0) - e_a) \quad (2)$$

$$\lambda E = \frac{\Delta \rho C_p}{\gamma r_a}(T_0 - T_a) + \frac{\rho C_p}{\gamma r_a}(e_s(T_a) - e_a) \quad (5)$$

$$\lambda E = \frac{\Delta \rho C_P}{\gamma r_a} (T_0 - T_a) + \frac{\rho C_P}{\gamma r_a} (e_s(T_a) - e_a) \quad (5)$$

右辺の第一項を(1)式で置き換えると(6)式を得る。

$$\lambda E = \frac{\Delta}{\gamma} H + \frac{\rho C_P (e_s(T_a) - e_a)}{\gamma r_a} \quad (6)$$

熱収支式から $H = (R_n - G) - \lambda E$ を代入すると(7)式を得る

$$\lambda E = \frac{\Delta}{\Delta + \gamma} (R_n - G) + \frac{\rho C_P (e_s(T_a) - e_a)}{(\Delta + \gamma) r_a} \quad (7)$$

[完全湿面の蒸発式]

$$\lambda E = \frac{\Delta}{\Delta + \gamma} (R_n - G) + \frac{\rho C_P (e_s(T_a) - e_a)}{(\Delta + \gamma) r_a} \quad (7)$$

(7)式右辺は二つの項からなる。 放射項＋空力項 →組み合わせ法

$$E_t = f \times E_o \quad (3-1)$$

$$= f \times \left\{ \frac{\Delta}{\Delta + \gamma} R_n + \frac{\gamma}{\Delta + \gamma} E_a \right\} \quad (3-2)$$

ここで、 E_t ：可能蒸発散量(mm/day),

E_o ：貯熱量を無視できる浅い仮想水面の蒸発量(mm/day),

f ：仮想水面蒸発量を可能蒸発散量に変換する経験定数,

Δ ：気温における飽和水蒸気圧曲線の勾配(hPa°C⁻¹),

γ ：乾湿計定数(hPa°C⁻¹),

R_n ：正味放射量(mm/day),

E_a ：空気力学的効果による蒸発を表す項(mm/day),

である。(3-2)式の右辺の中括弧内の第一項を放射項、第二項を空力項と呼ぶ。

R_n の推定式はPenman(1948)を用い、 E_a の式はDunne and Leopold(1978)による次式を用いた。ただし、単位の変換のために10を掛けてある。

ペンマン法(Penman,1948)

ペンマンは気温、風速、水蒸気圧、日照率の4気象要素から可能蒸発散量を計算する半経験式を誘導した。

(7)式と比較してみよう。

(3-2)式右辺第一項では、 G が無視できる時間で計算を行うことを前提としている。

(3-2)式右辺第二項では、空力項を経験的に求めているが、基本的には飽差の関数になることがわかるだろう。(近藤、1994)

$$E_a = 10 \times (0.013 + 0.00016u_2) (e_{sa} - e_a) \quad (4)$$

ここで、 u_2 ：地上2 mにおける風速(km/day),

e_{sa} ：気温における飽和水蒸気圧(hPa)

e_a ：水蒸気圧(hPa),

である。

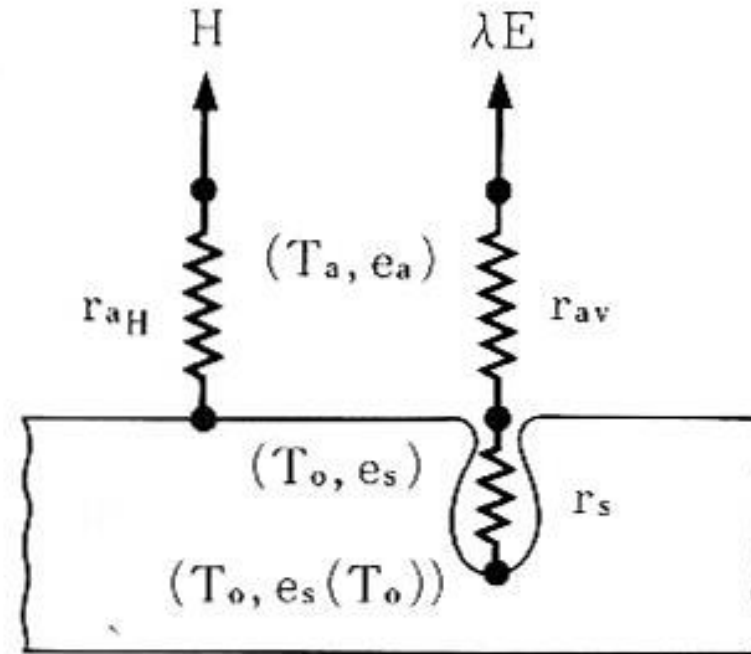
[不完全湿面の蒸発式]

(2) 式を(8)式のように変形する。

$$\lambda E = \frac{\rho C_p}{\gamma (r_a + r_c)} (e_s(T_a) - e_a) \quad (8)$$

ここで、 r_c : 気孔抵抗(群落抵抗)、 r_a : 空力抵抗。

気孔から水蒸気が大気へ出るには、気孔を通過する際の抵抗、葉から自由大気へ出る際の抵抗の二つを受ける。



$$\lambda E = \frac{\Delta(R_n - G) + \rho C_p (e_s(T_a) - e_a) / r_a}{\Delta + \gamma (1 + r_c / r_a)} \quad (9)$$

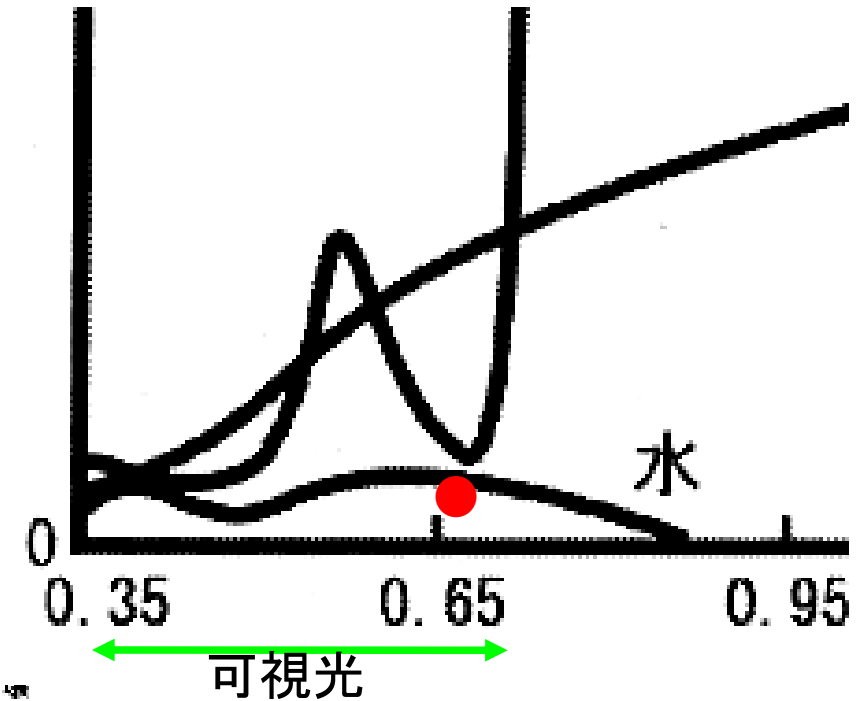
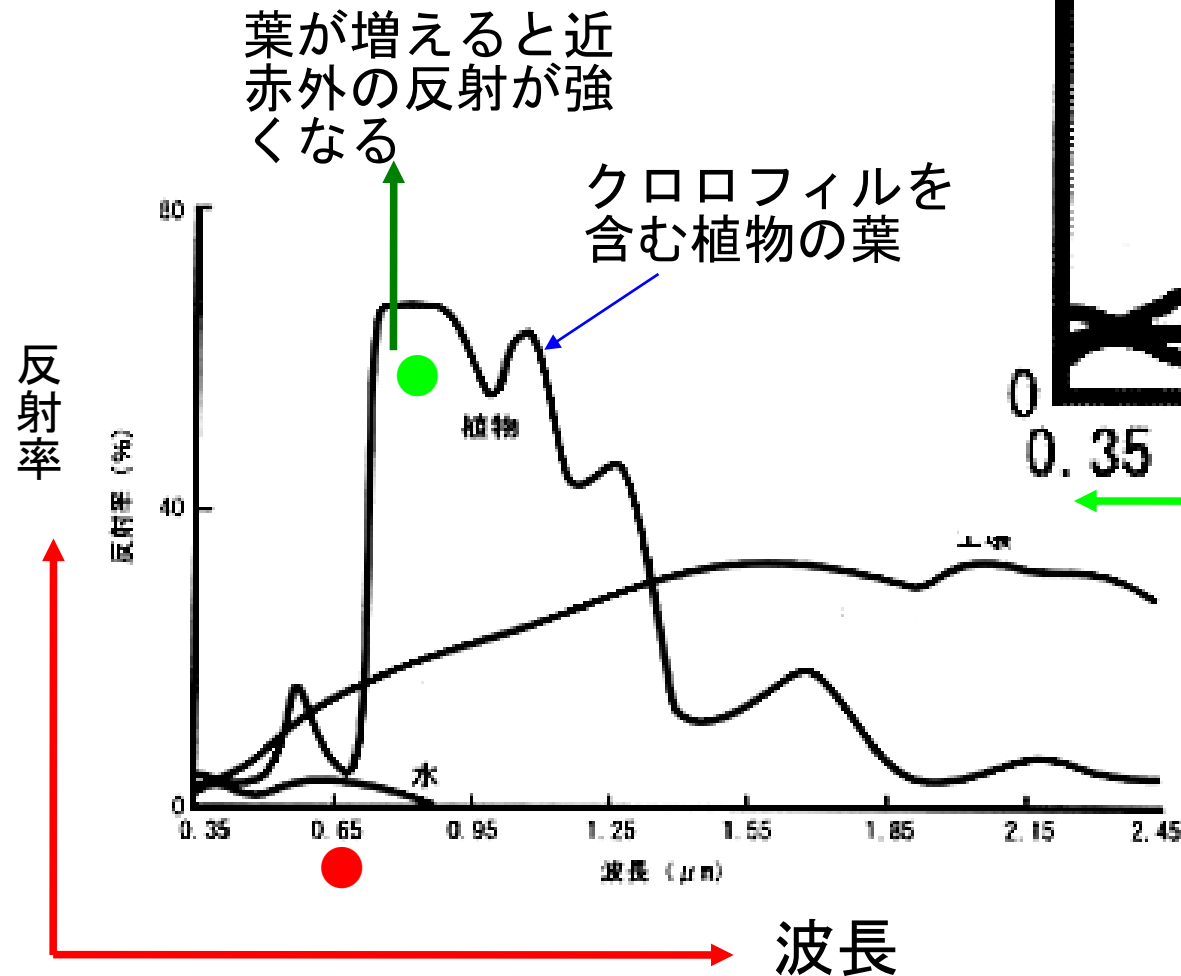
(8) 式を用いると、(9) 式の不完全湿面に対する蒸発散量を求めるPenman-Monteith式が得られる。

大気－陸面相互作用モデルの基本的考え方

衛星による植生観測の原理

なぜ、衛星で植生のことがよくわかるか？

●赤の光を吸収、●近赤外の光を反射



葉っぱがいっぱいついているほど近赤外の反射が大きい

植生指標とは



● 緑色の葉に含まれるクロロフィルの反射率は、 $0.5 \sim 0.7 \mu\text{m}$ （緑～赤）で20%未満であるのに対して、 $0.7 \sim 1.3 \mu\text{m}$ の近赤外域では60%を越える

● 春から夏の植生の生育期には緑葉は可視光、特に赤の光をより強く吸収し、近赤外の光はより強く反射するようになる。また、植被率が増加すると全体として近赤外の反射率が増加する。したがって、赤と近赤外の波長帯の反射率、あるいはセンサーで計測された反射輝度ないしデジタル値の差、あるいは比は植生の活性、植被率、葉面積指数（LAI）といった植生パラメーターと相関を持つようになる。
→ 赤と近赤外のデータを利用すると緑色植生の観測密度や活力を表すことができるぞ

● ランドサット1号が打ち上げられた1970年代以降、赤と近赤外の波長域の衛星データを用いて様々な植生指標が提唱された。

近赤外カメラではどのように 世界が見えるか？

デジタルカメラの
青のプレーンに近
赤外を割り当て



衛星データによる植生解析の歴史 その1. ランドサット

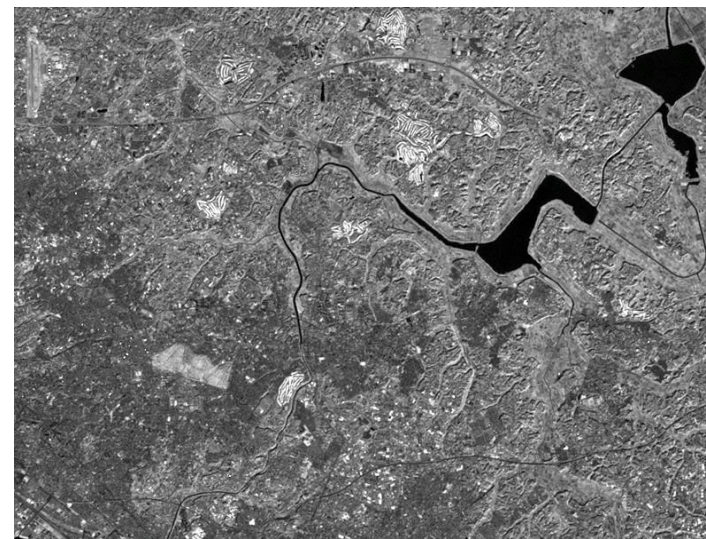
ランドサット衛星による解析(1972～)

- ・ 1972年に打ち上げられた**ランドサット1号**には**MSS**と呼ばれるセンサーが搭載されていた（その後、**TM**に発展）
- ・ MSSとTMは**緑（G）**、**赤（R）**、および**近赤外（NIR）**の波長域に感度を持つ
- ・ よってRとNIRの画像を使うと植生に関する指標が計算できる



●左は赤の画像、右は近赤外の画像

●植生域はどうなっているかな



(2001年11月27日のETM+画像)

●赤と近赤外の観測値の差あるいは比を計算すると、それは植生の量あるいは活性を表す指標になる

差植生指標	NIR-R
比植生指標	NIR/R

ここで、NIR, R: 近赤外の分光反射率あるいは衛星データに記録されたデジタル値 (DN) *

●最もよく使われる植生指標

正規化差植生指標
(**NDVI**: Normalized Difference Vegetation Index)

$$NDVI = (NIR - R) / (NIR + R)$$

* DN : 衛星画像には地表面で反射された太陽光の強さに対応する整数値が格納されています

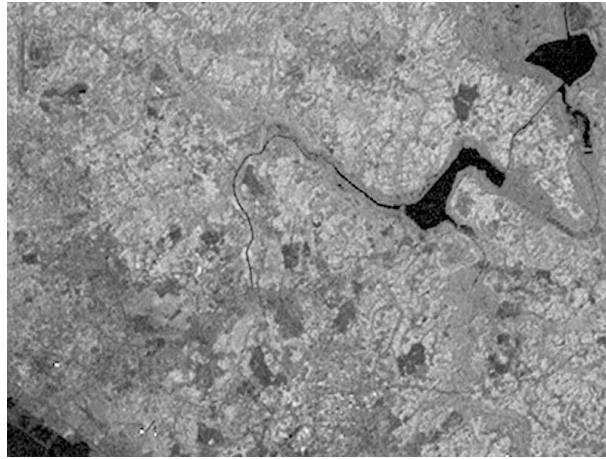
1972年11月26日の八千代付近のNDVI画像（L1-MSS）



2001年11月27日の八千代付近のNDVI画像（L7-ETM+）



1972年、1985年、2001年の変化を植生指標（NDVI）画像とフォールスカラー画像（BGR=GRNir）で見てみよう



1972



1985



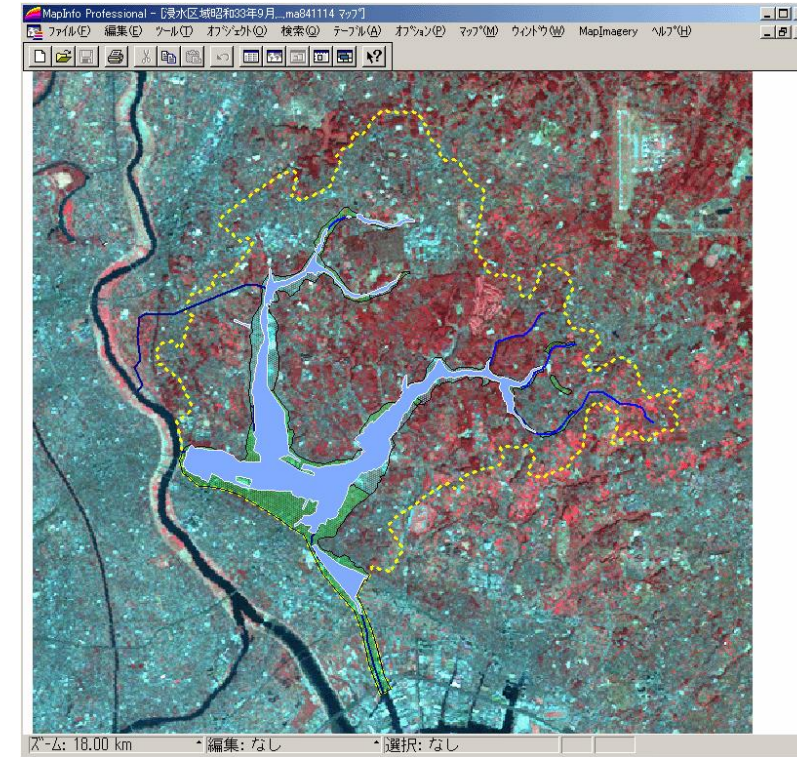
2001



- ・都市化の進行を、植生域の減少として捉えることができます
- ・このような変化が何をもたらしたか→**これが環境研究**

土地被覆（植生）変化に起因する環境変化

- 都市域における洪水
海老川、真間川、ほか
- 大気汚染やヒートアイランド
交通、産業、都市化
- 生態系の変化
植生域の分断・・・緑のコリドー
野生生物
- 環境アメニティー



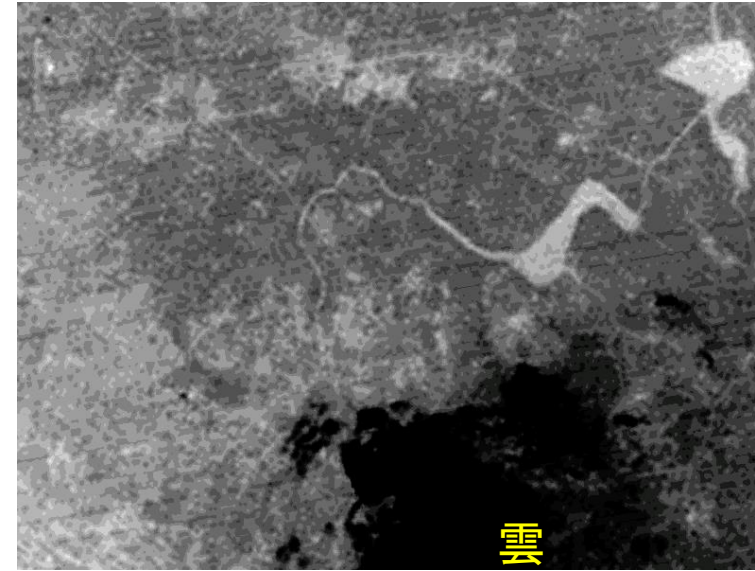
まだまだ数え上げることはできますが、これらの問題の空間的フレームワークとしてリモートセンシングを使うことができる

空間的に見てみよう

地図を頭に浮かべない環境研究は大事なものを見落とすことになる

都市化は温度環境も変化させている

(10年も働き続けてちょっとセンサーが劣化しています)



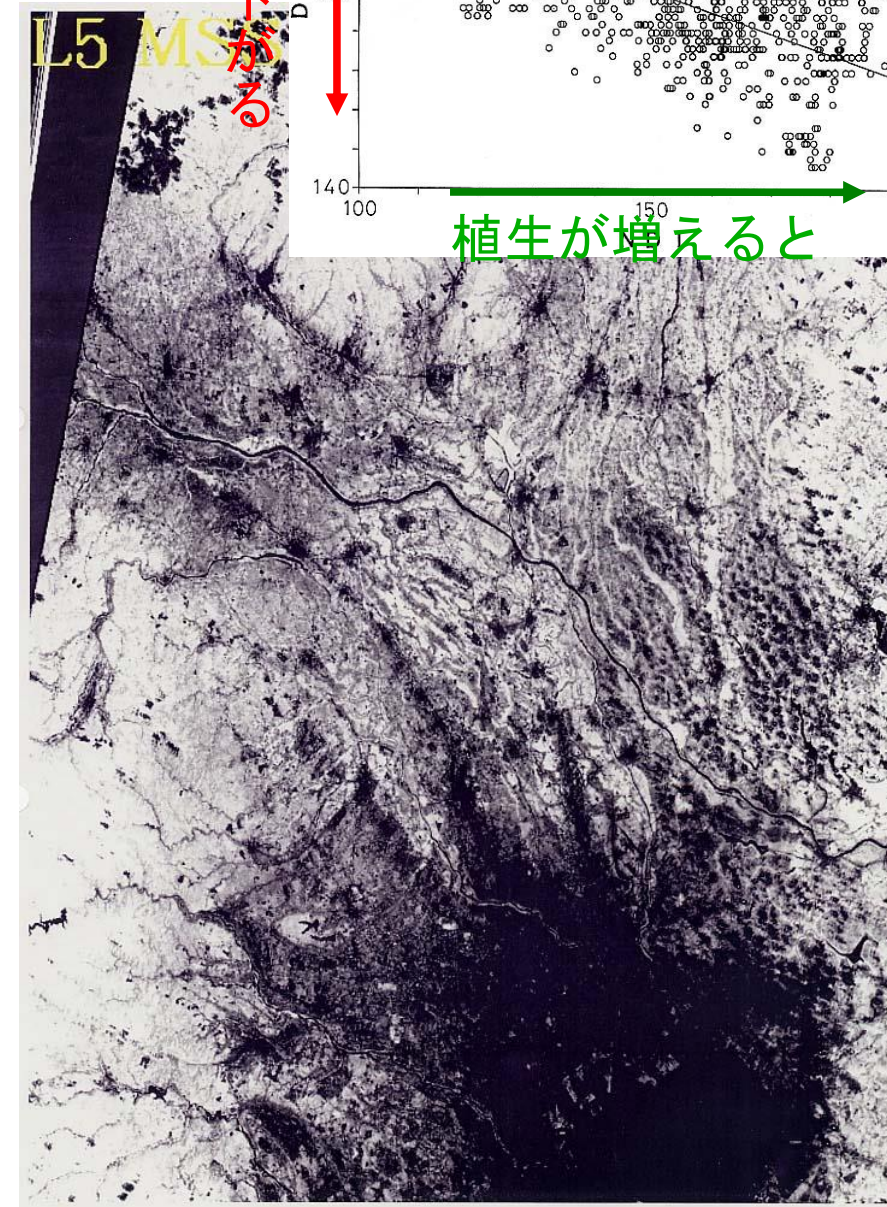
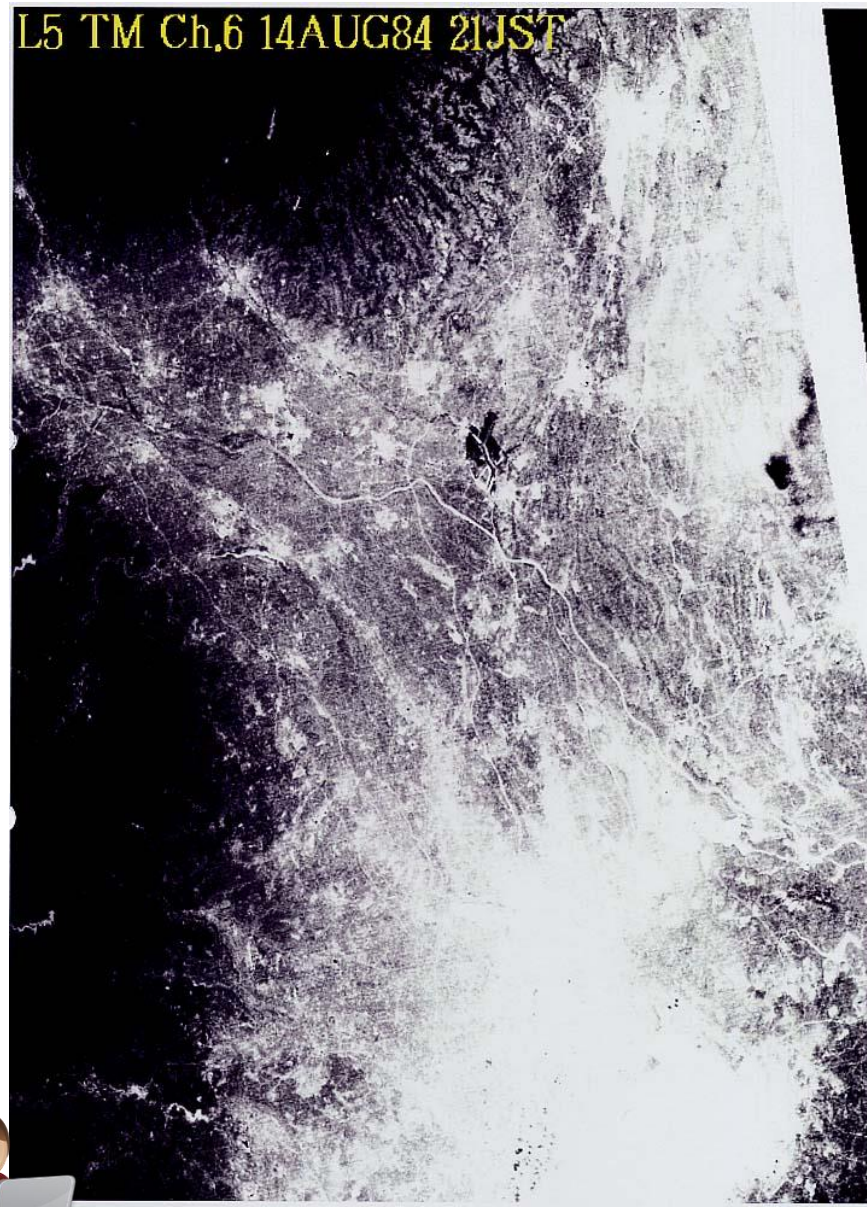
1984年8月14日（左）と1994年8月10日（右）のランドサット5号による夜間熱赤外画像（午後9時頃）



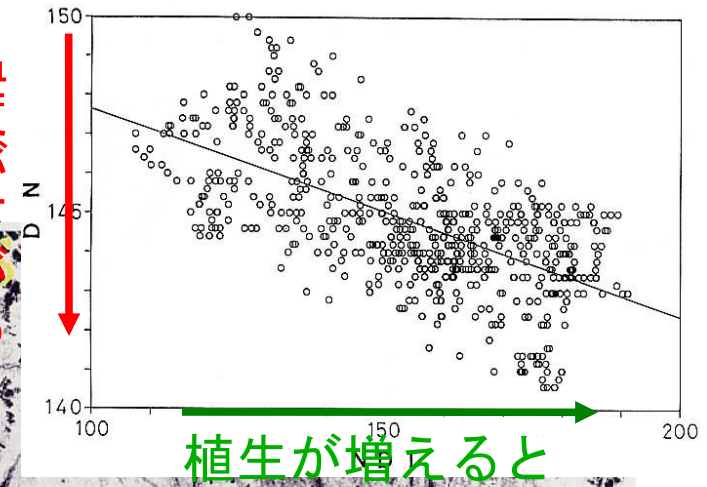
- 左の画像は1985年1月23日のNDVI画像
- 左上の同時期の熱赤外画像と比べてみよう

地表面温度と植生分布の関係はどう見えますか

地表面温度（左）と植生指標（右）の画像はまるでポジとネガ



温度が下がる



●重要なこと

- ①1972年に打ち上げられたランドサット 1号および、その後継機のデータで、植生分布がわかる。
- ②1972年以降、現在までの間の40年を超える期間の変化がわかる。
- ③数10mスケール(以下)の分解能で解析ができる。

●ここから何が得られるか

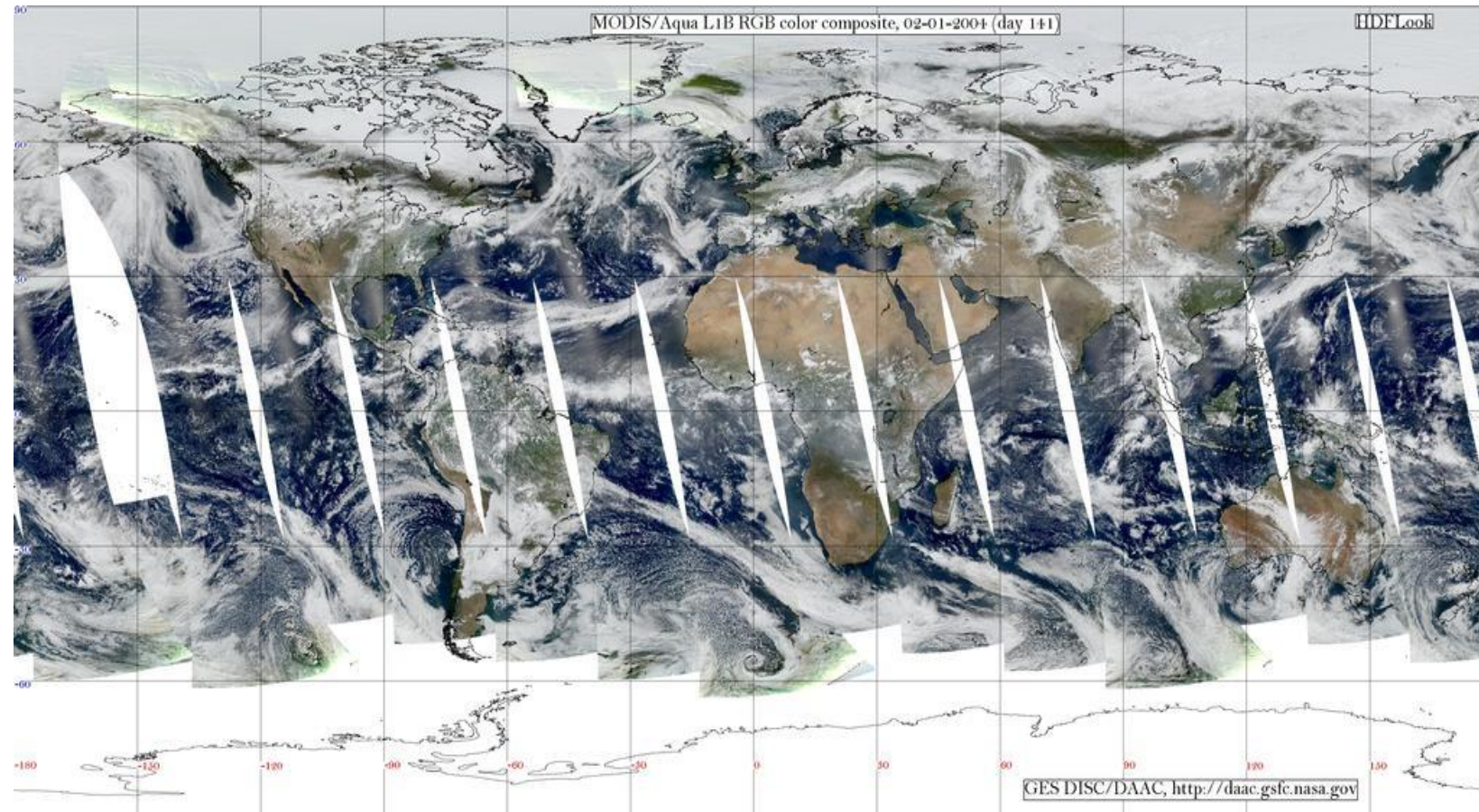
どんな環境解析に使うことができるのかを考えてみよう。

- ・土地被覆変化
- ・森林伐採
- ・生態系との関係
- ・温度環境との関係
- ・都市計画
- ・ . . .

本や論文を読んだり、講義を聴いたら、それが自分の目的に使えるかどうかを考えることによって知識が生きてくる。

現象の理解のために必要な精度、空間分解能を考える必要がある。
⇒技術やアルゴリズムができれば応用できるわけではない。

視点をグローバルに変えてみよう



AQUA/MODISによるコンポジット画像（2004年5月21日）
（GSFC/NASAのホームページより）

衛星データによる植生解析の歴史 その2. NOAA

- 1972年以降、ランドサット衛星によって数10mスケールの分解能で、植生解析が行えるようになった
- ランドサット画像の1シーンは180km程度であるので、地域の詳細な植生解析に適している
- 一方、広域かつ時間的に変化する植生の分布や変動の解析にはNOAA衛星のAVHRRデータを利用することができる



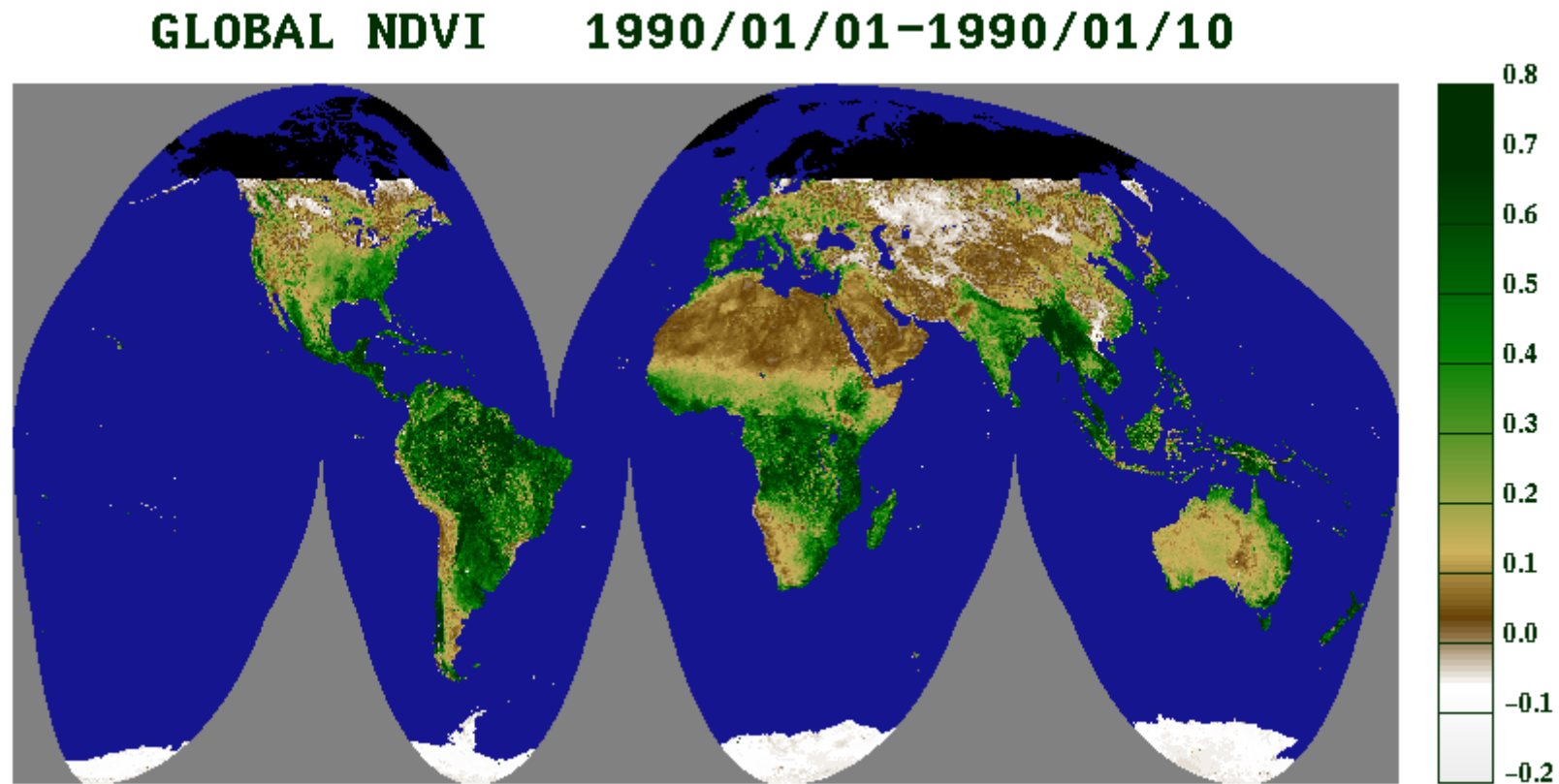
NOAA11号のイメージ

NOAA 衛星の名前
(National Oceanic and
Atmospheric
Administration) AVHRR センサ
ーの名前
(The Advanced Very High
Resolution Radiometer)

約3000kmの刈幅で地上を撮影するから、1日で全球を撮影

●NOAAシリーズのAVHRRデータを使って、1981年から全球データが作成されるようになった

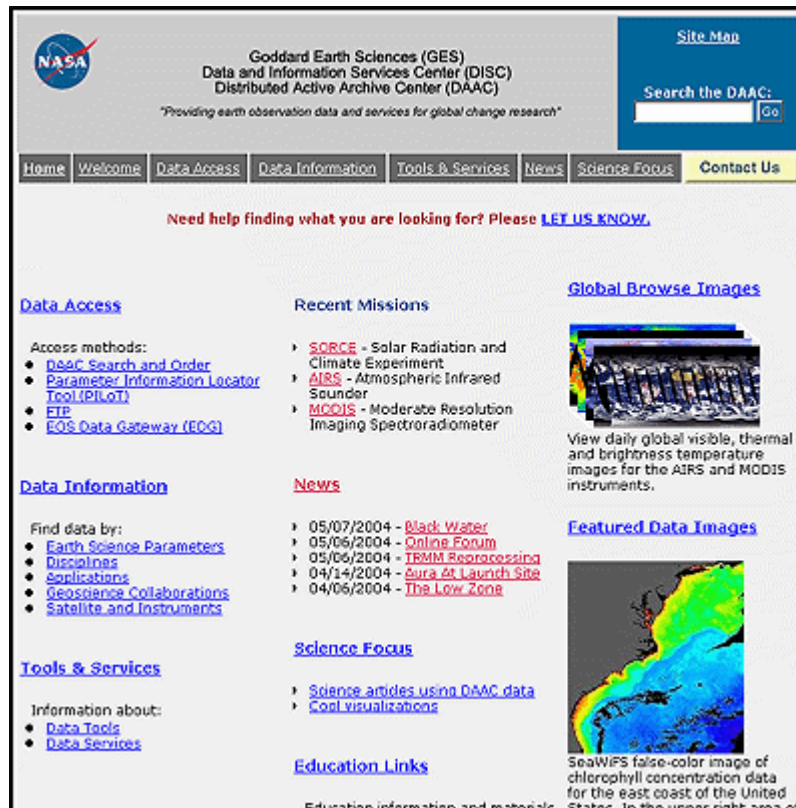
●それが**GVI** (Gloval Vegetation Index)



●データは1981年7月から利用可能だが、年間のデータが使えるのは1982年から→**過去22年間の変動の解析が可能**

●1990年代に地球規模の環境変動(Global Changes)が意識されたことにより、Global Change研究のデータセットがインターネットを通じて公開されるようになった

ネットワークに接続できれば、だれでも
Global Change研究ができるのである



●先進各国は競ってデータセンターを作って重要なデータを世界に公開している

●左はNASA/GSFCのデータセンターのページ

<http://daac.gsfc.nasa.gov/>

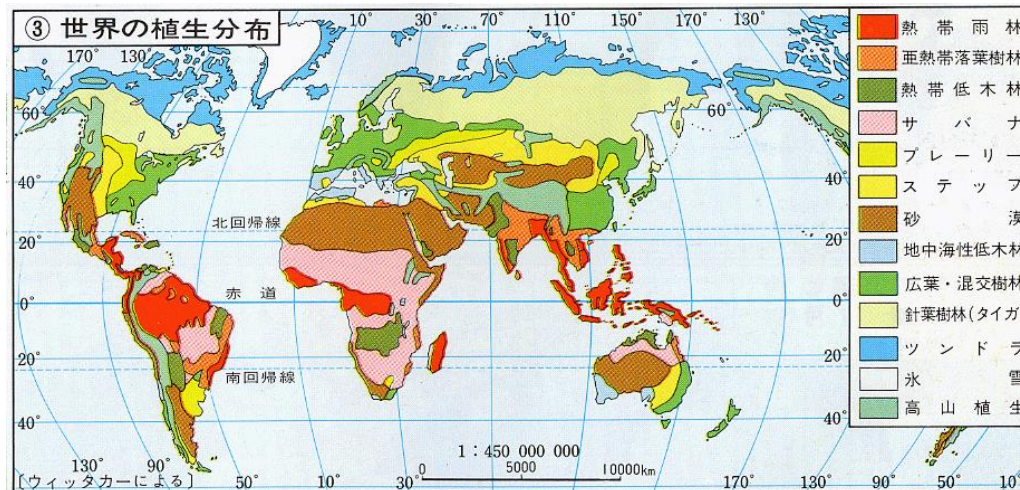
●この他にも多数のデータセンターがある

3-3 植生観測の初期の成果

1980年代の半ばにGVIが使える様になり、様々な全球スケールの研究が行われるようになった

●衛星フェノロジーによる植生分布図の作成

- ・ GVIは年間の植生指標（NDVI）の連続的な変化を表す
- ・ 植生帯ごとに、その季節変化のパターンは異なる
→衛星フェノロジー
- ・ よってNDVIの季節変化を用いて、全球の植生区分を行うことができる（初期の成果Justice *et al.*, 1985)



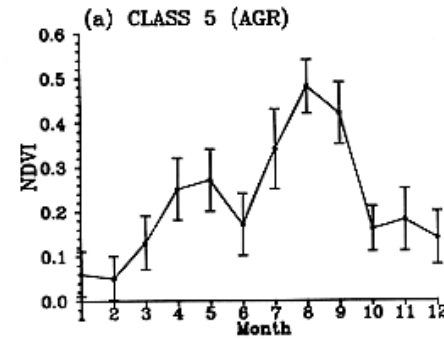
●植生図は教書で見たことがありますけれど...

●それは、数少ない現地観測と気象データ等を用いて、推定で描いた図

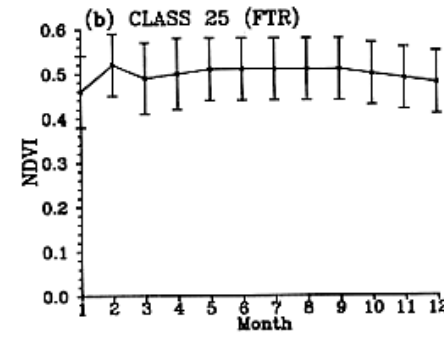
●植生帯ごとのフェノロジーの違い



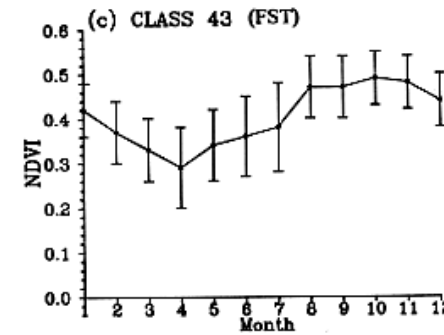
中国華北の農地
は冬小麦と夏の
コーンの二つの
ピークがある



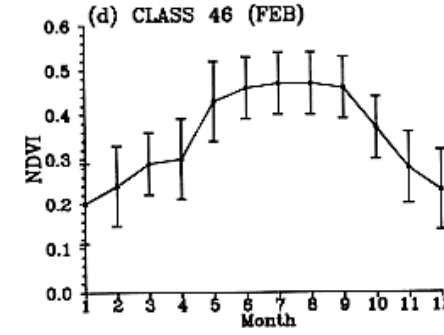
熱帯雨林は一年
中NDVIが高い



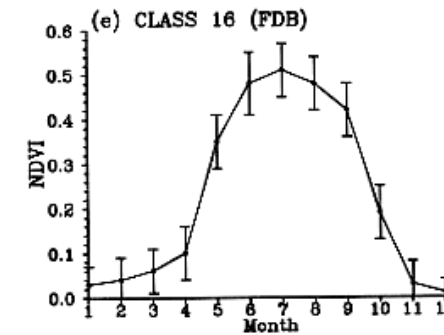
熱帯季節林は乾
季と雨季の季節
変化が明瞭（雨
緑林）



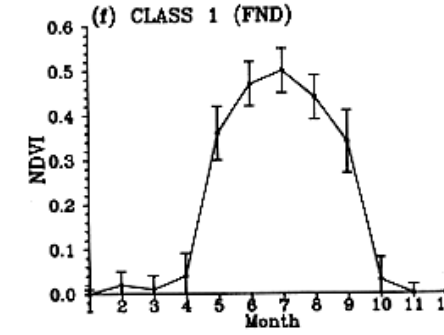
照葉樹林（常緑
広葉樹）は季節
変化はあるが、
全体としてNDVI
は高い



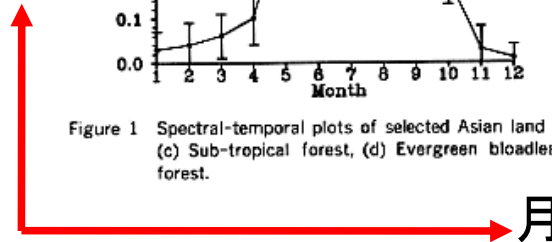
落葉広葉樹林は
明瞭な季節変化
を持つ



これは北方林の
常緑針葉樹、冬
は雪に覆われる



NDVIの
大きさ



月

Figure 1 Spectral-temporal plots of selected Asian land cover types. (a) Agriculture fields, (b) Tropical Forest, (c) Sub-tropical forest, (d) Evergreen broadleaf forest, (e) Deciduous broadleaf forest, (f) Coniferous forest.

Kondoh (1995) より

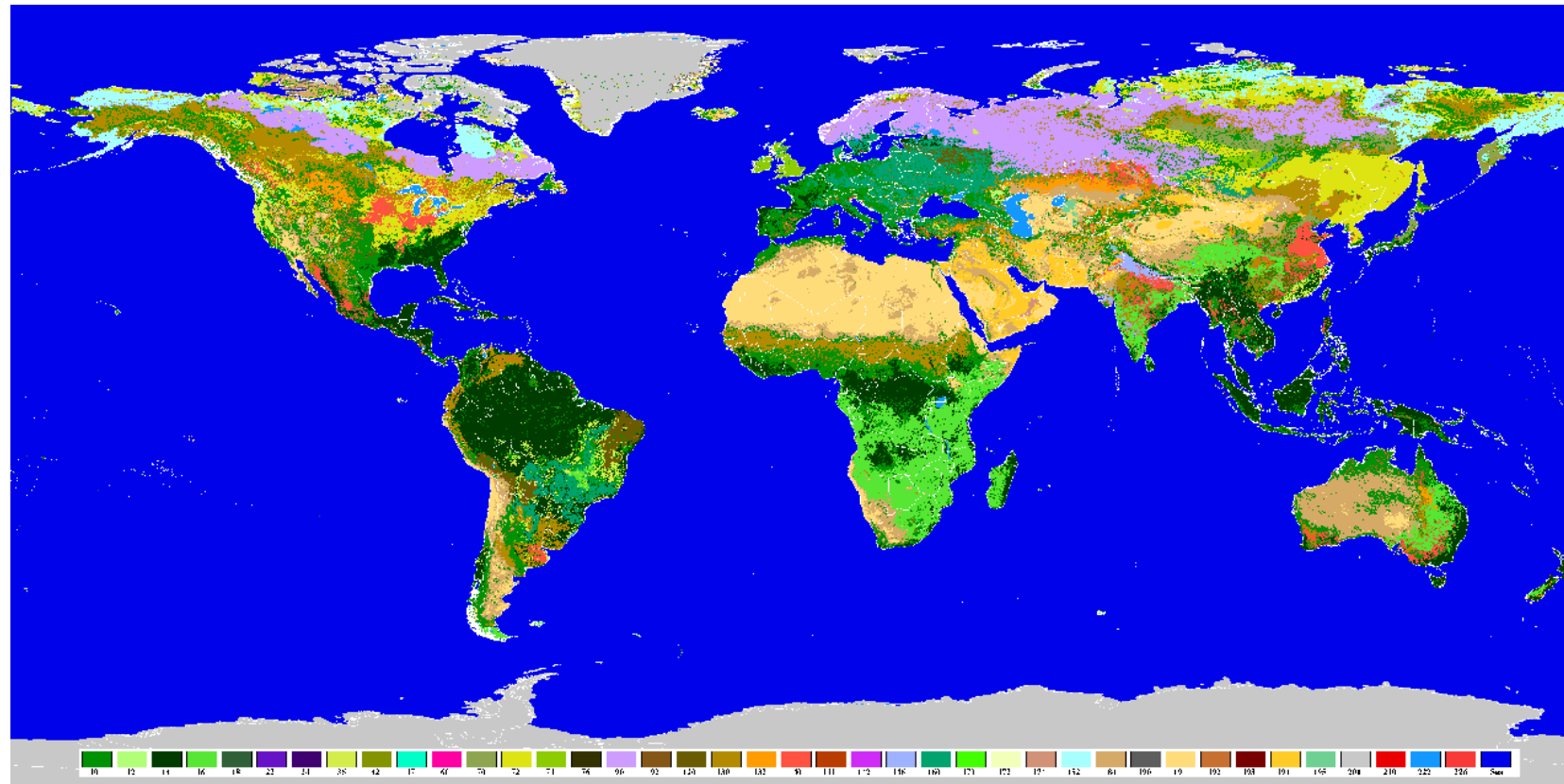
衛星植生図



Tucker (1985) アフリカ
Justice *et al.* (1985) 全世界
Malingreau (1986) アジア
Townshend *et al.* (1987) 南アメリカ
Lloyd (1990) 全世界

これまでに、たくさんの植
生図が作られました。下
の図はCERESの建石先生に
よる4分分解能の全球土地
被覆図

.

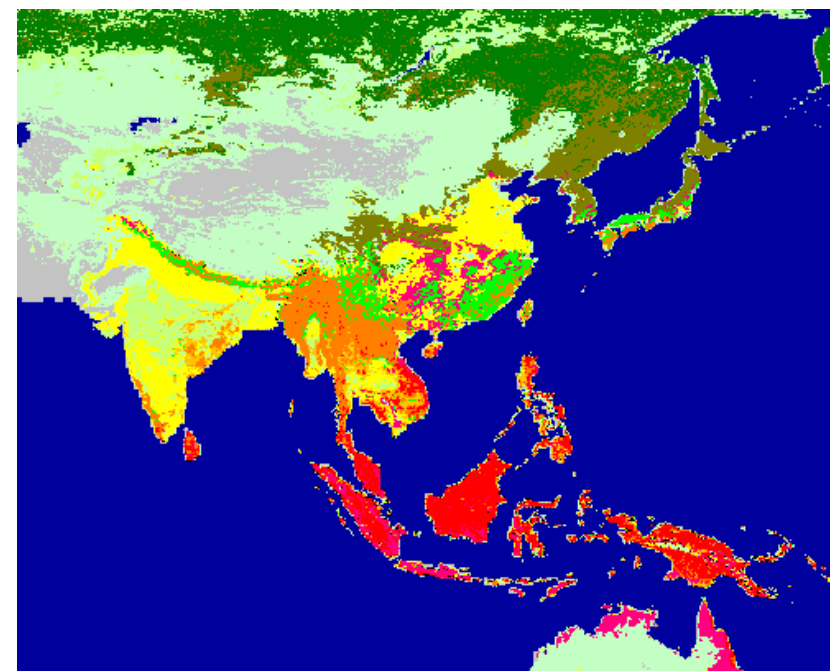
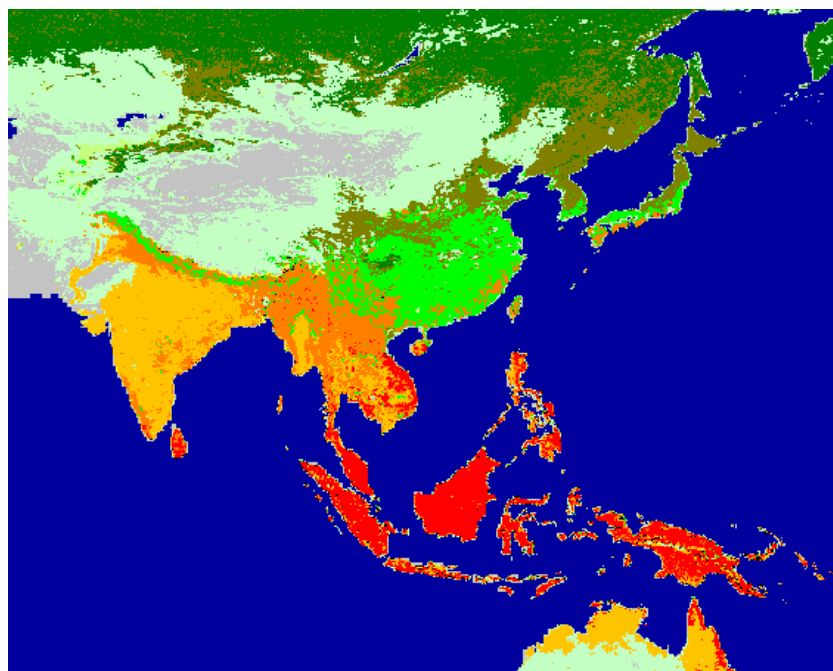


<http://www.cr.chiba-u.jp/database.html> グローバル4分土地被覆データセット

従来の植生図と何が違うか

- 全球を等しい精度でカバー
- 衛星データ撮影時の状況を記録
→ 年度ごとに作れば、変化がわかる

● 黄色：農耕地、● 赤：熱帯雨林、● 橙：熱帯季節林、● 緑：常緑広葉樹、● 緑：落葉広葉樹、● 緑：常緑針葉樹、● 緑：草地、● 灰：沙漠



- これは、自然植生（左）と現土地被覆（右） (Kondoh, 1995)
- インド、中国およびタイやミャンマーの中央平原で変化が大きい→農業

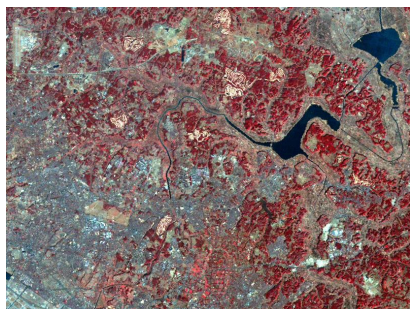
注) 自然植生図は気候と植生の関係を利用して描きました。現土地被覆には若干の誤分類もあります (東北平原)

●人間活動によって、地球上の広い面積が農耕地として利用されている！

何を考えるべきか

●現在の気候は、現在の土地被覆を境界条件として成立している

都市化が温度環境を変えている、すなわち地域の気候を変えていることを思い出そう



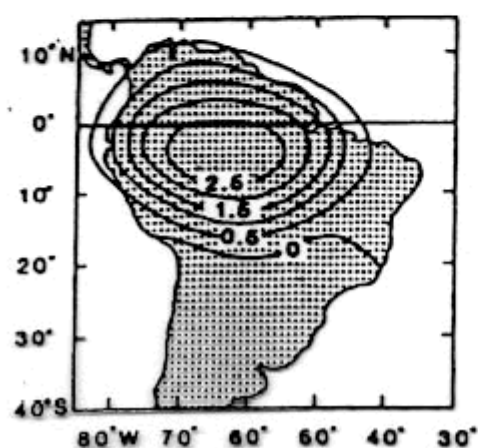
1984/5年の植生指標
と地表面温度画像

では、陸地の大部分を覆う農地化は、現在の気候にどのような影響を及ぼしているのだろうか

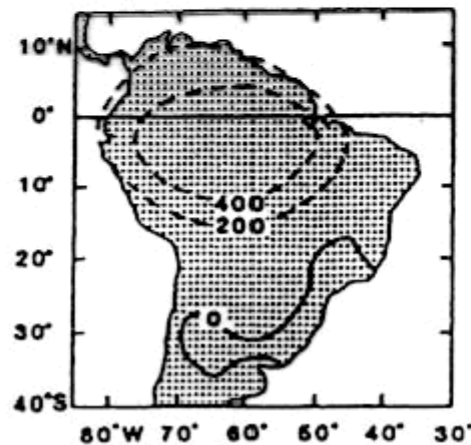
●これは気候学が解くべき、重要な課題の一つである

第1回目に紹介した内容を思い出そう

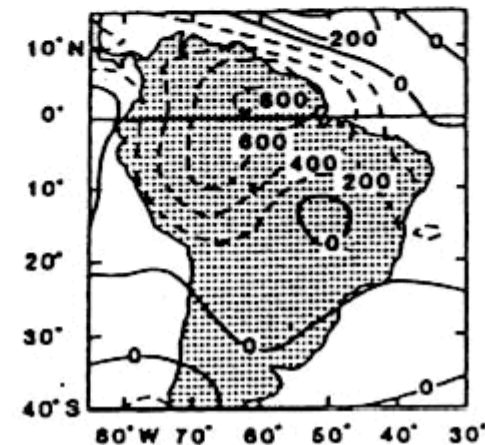
土地利用の変化が気候に及ぼす影響



(a) Temperature Increase (°C)



(b) Evaporation Decrease (mm/y)



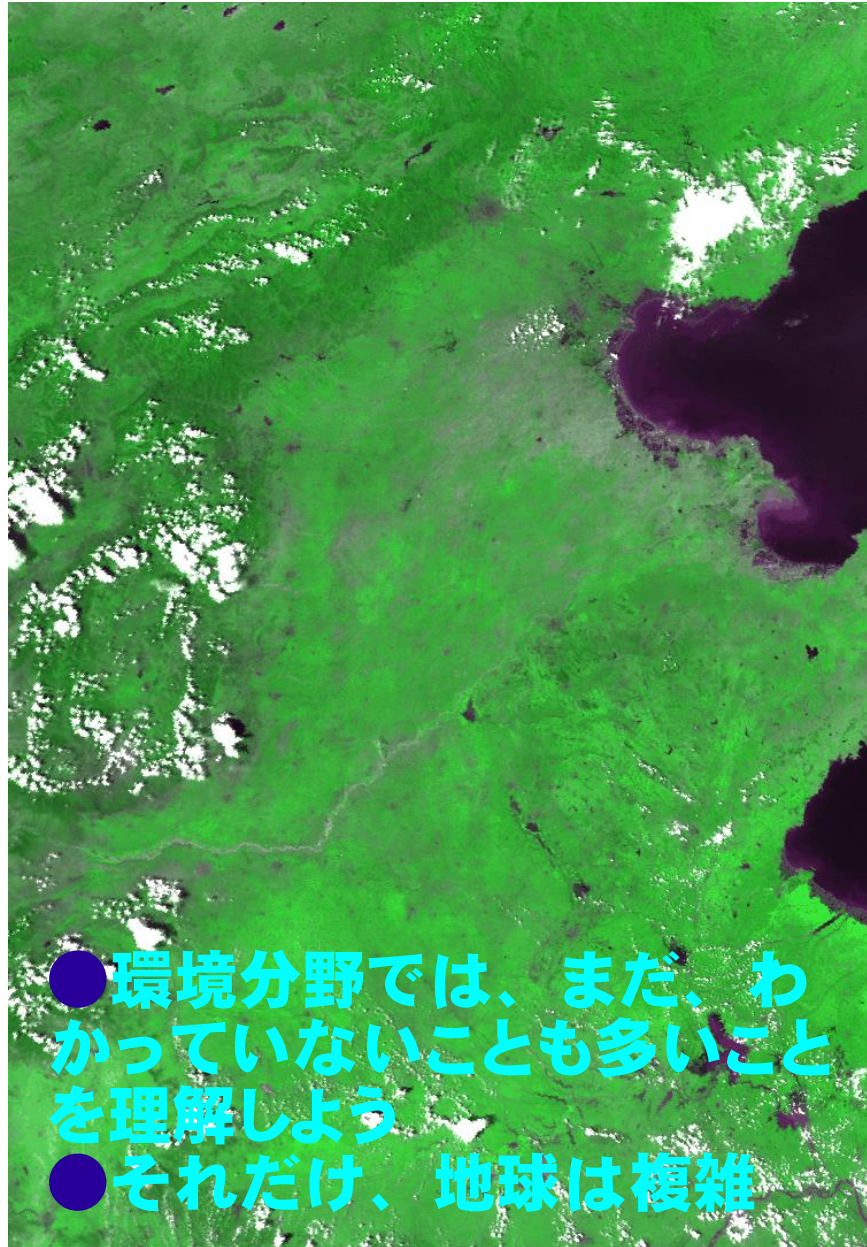
(c) Rainfall Decrease (mm/y)

☒ 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

森林から草原や裸地になると地域の乾燥化を促す

●一方で、半乾燥地域で行われている灌漑農業は、気候学的に期待できる蒸発散量を上回る水蒸気を大気に放出する



●環境分野では、まだ、わかっていないことも多いことを理解しよう
●それだけ、地球は複雑

●中国華北平原の年降水量は400～500mm程度であるが、灌漑のために300mmもの地下水が使われており、そのほとんどはやがて大気に戻る

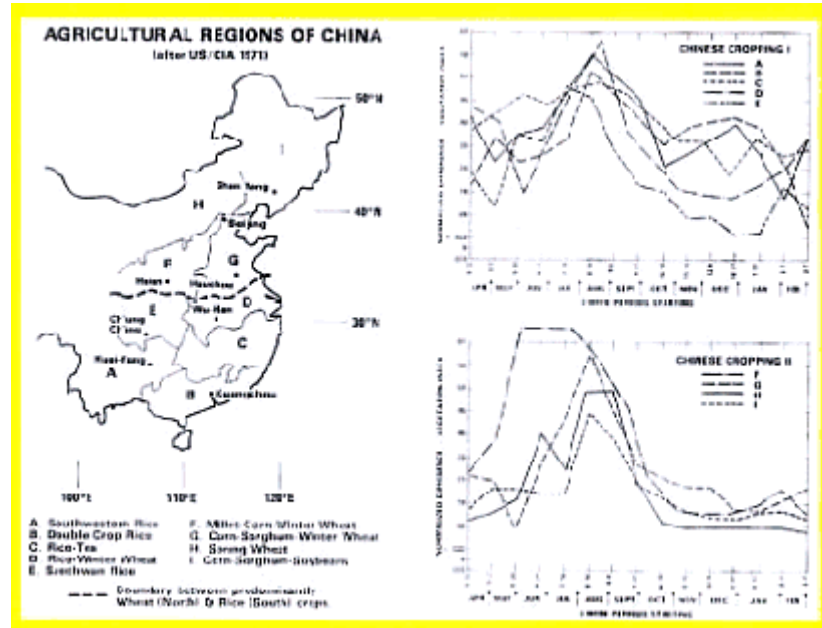
●その水蒸気の地域の気候に及ぼす影響は？



衛星による植生観測の初期の成果

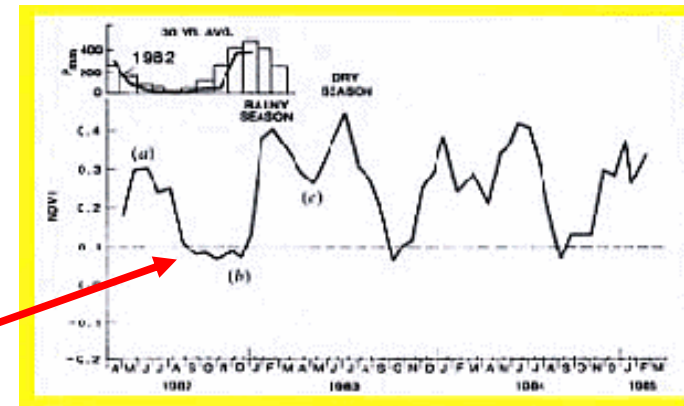
研究の歴史を知ること

●農業モニタリング

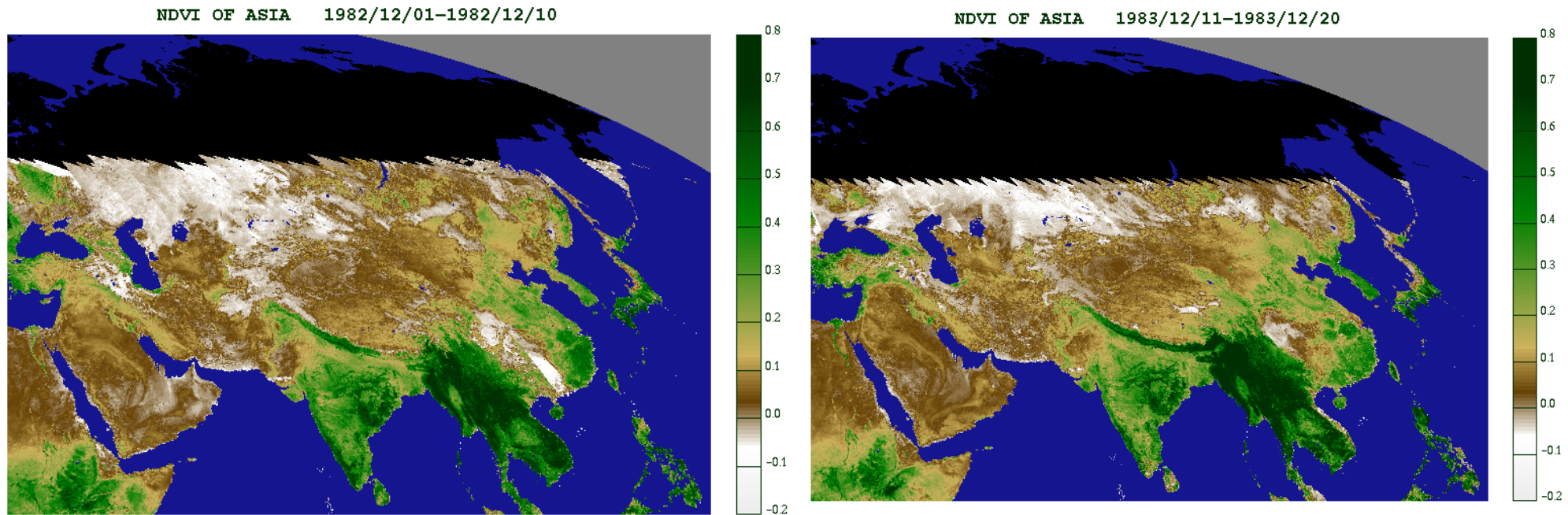


Justice *et al.* (1985) では、GVIを使って植生分類ができることを示したが、さらに農事暦を記録していることも発見
→農業モニタリングへの応用

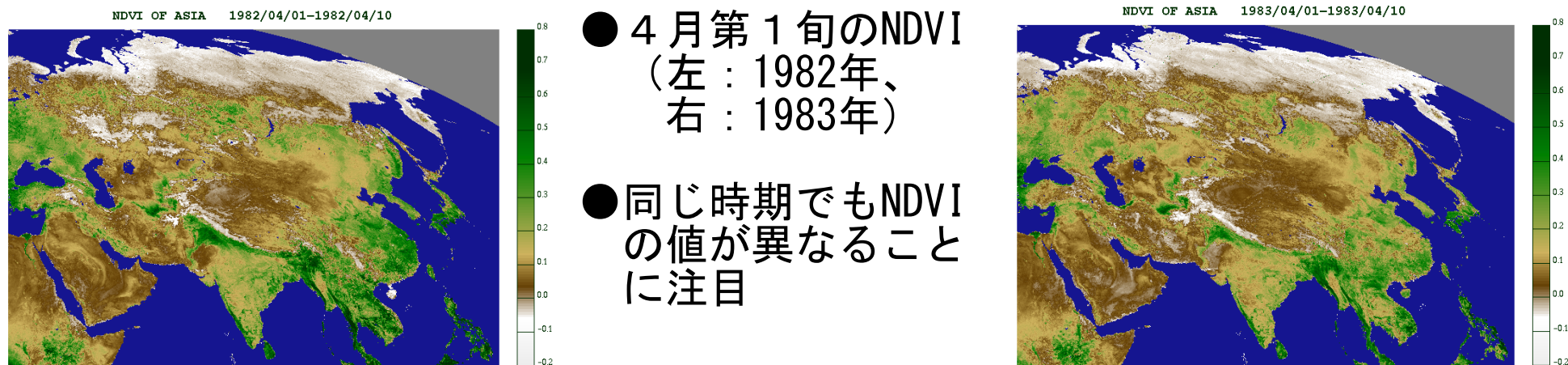
Malingreau (1986) では、衛星フェノロジーの年々変動が旱魃の影響を記録していることを発見
→旱魃モニタリング



エルニーニョ年（1982年）では、乾季の低NDVIが長く続き、雨期のNDVIの立ち上がりが遅い



- 上の動画は1982年と1983年のNDVIの様子
- 1982/1983はエルニーニョ年でした
- エルニーニョ発生時には東南アジアは乾燥します



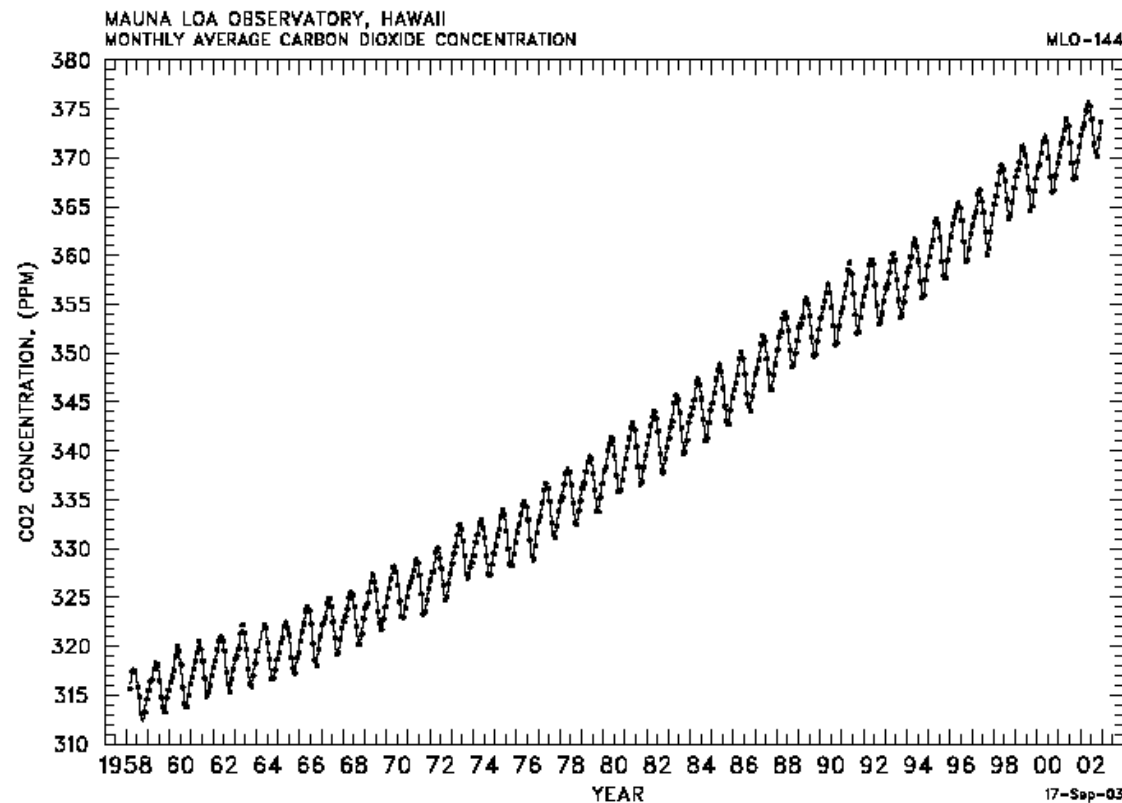
- 4月第1旬のNDVI
(左：1982年、
右：1983年)

- 同じ時期でもNDVI
の値が異なること
に注目

衛星による植生観測の初期の成果

●大気CO₂濃度と植生変動の関係

Tucker *et al.* (1986)は大気CO₂濃度の季節変動と、NDVIの季節変動が同期していることを発見



●北半球の春から夏にかけて、大気CO₂濃度は減少

●これは植生の成長により、大気中のCO₂が植生に取り込まれるから

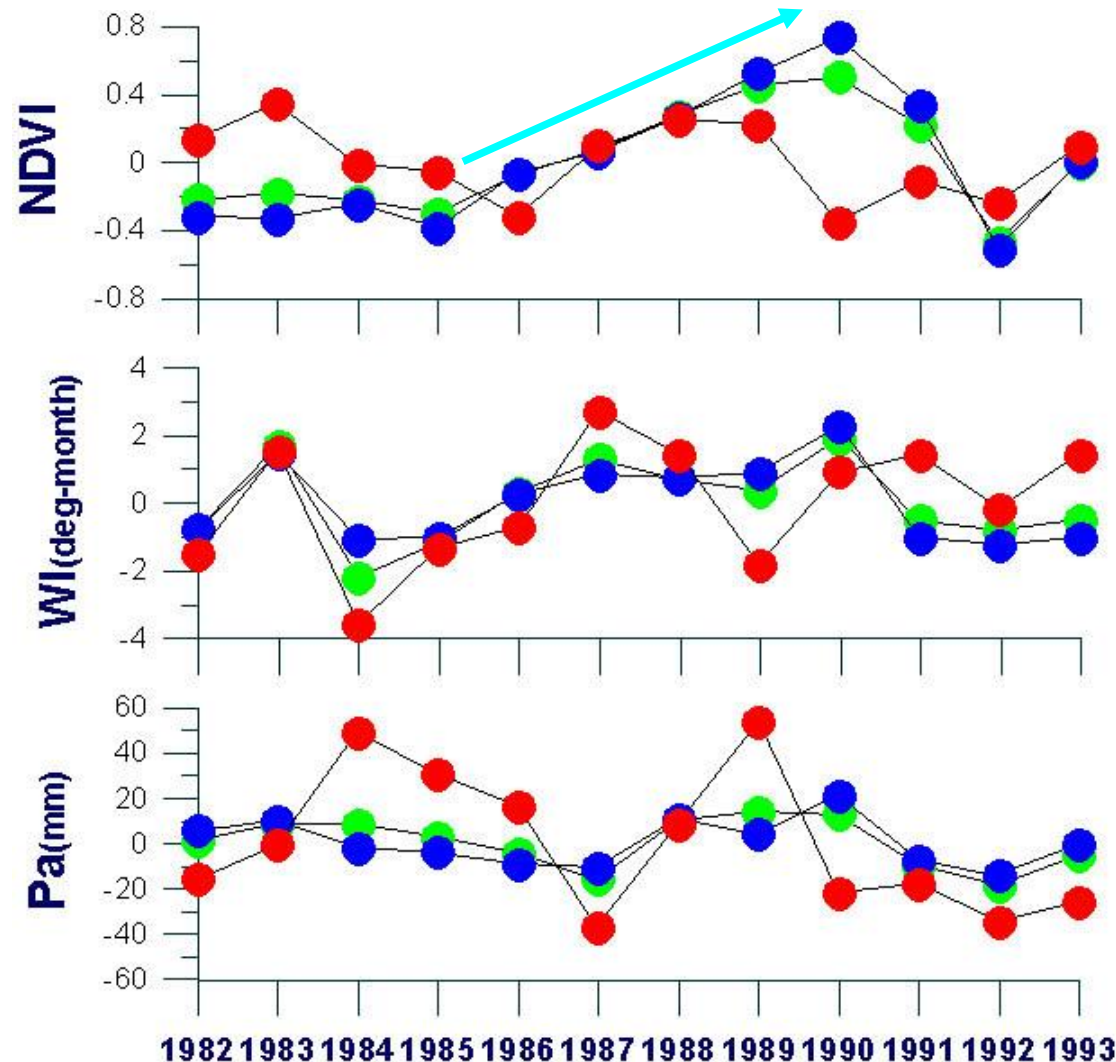
植生と大気CO₂濃度のダイナミックな関係

ハワイ、マウナロアにおける大気CO₂濃度の観測記録(CDIAC)

最近の成果

結果の意味するところ

- 世界の植生の機能的分類
世界の植生はどのように気候に適応しているか



●北半球（全球）の
 Σ NDVI ●は1980年代半ば
から1990年まで増加傾向

●それは、北半球の温量
指数●とほぼ調和

●これは、平均的に見て、
温度条件の良い年に、植
生は活発に成長すること
を表している

注) 温量指数：月平均気温が
5度を超える温度の年間積算
値

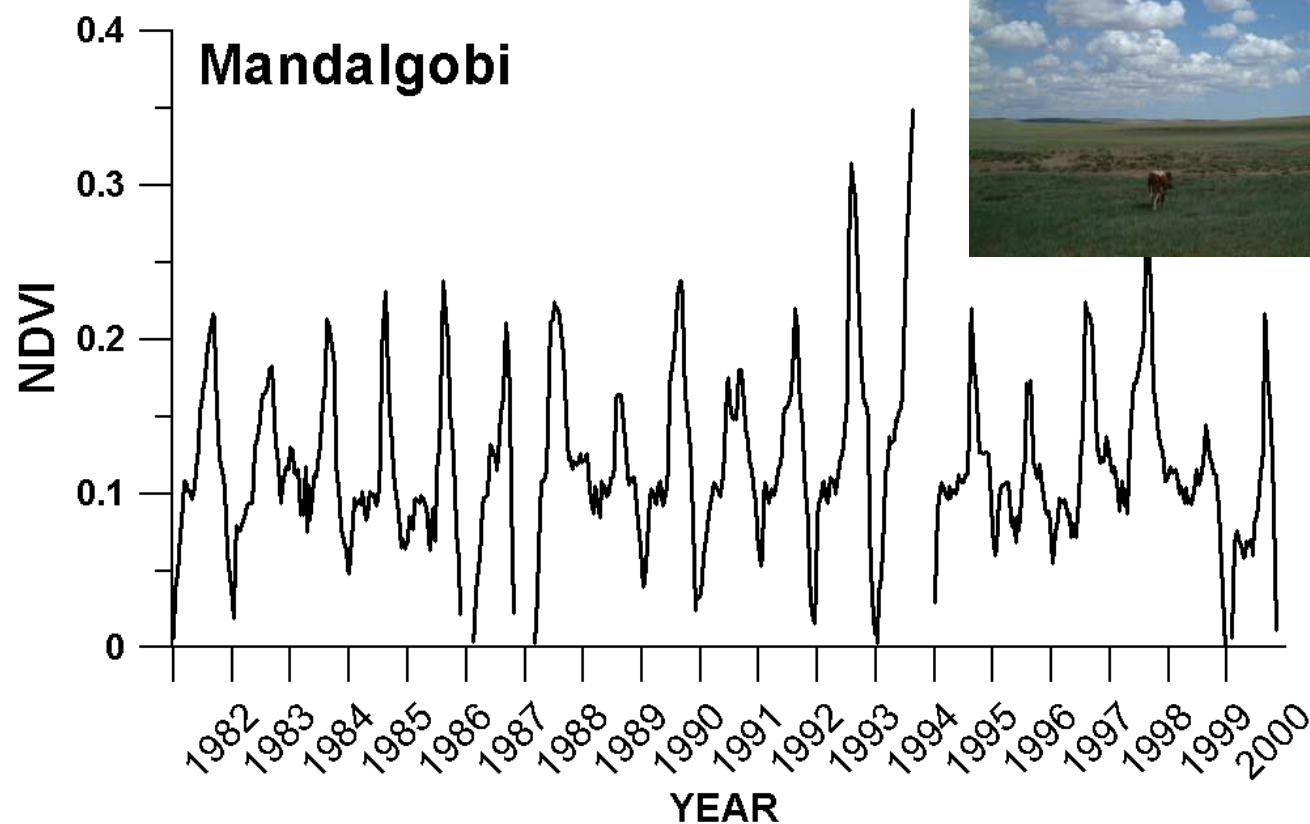
南●北●半球および全球●の平均NDVI, 平均温量指数、
年降水量の1982年から1993年の平均からの偏差

南半球は？

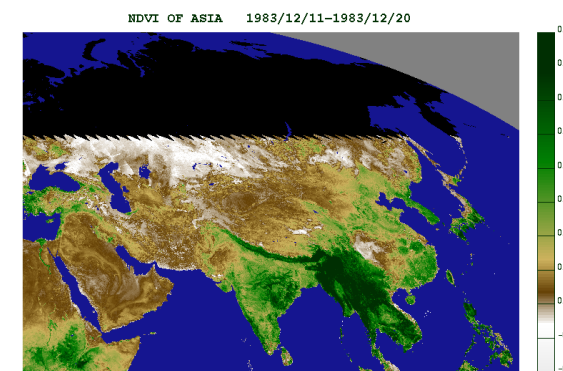
近藤ほか（2003）

注) グローバルな視点

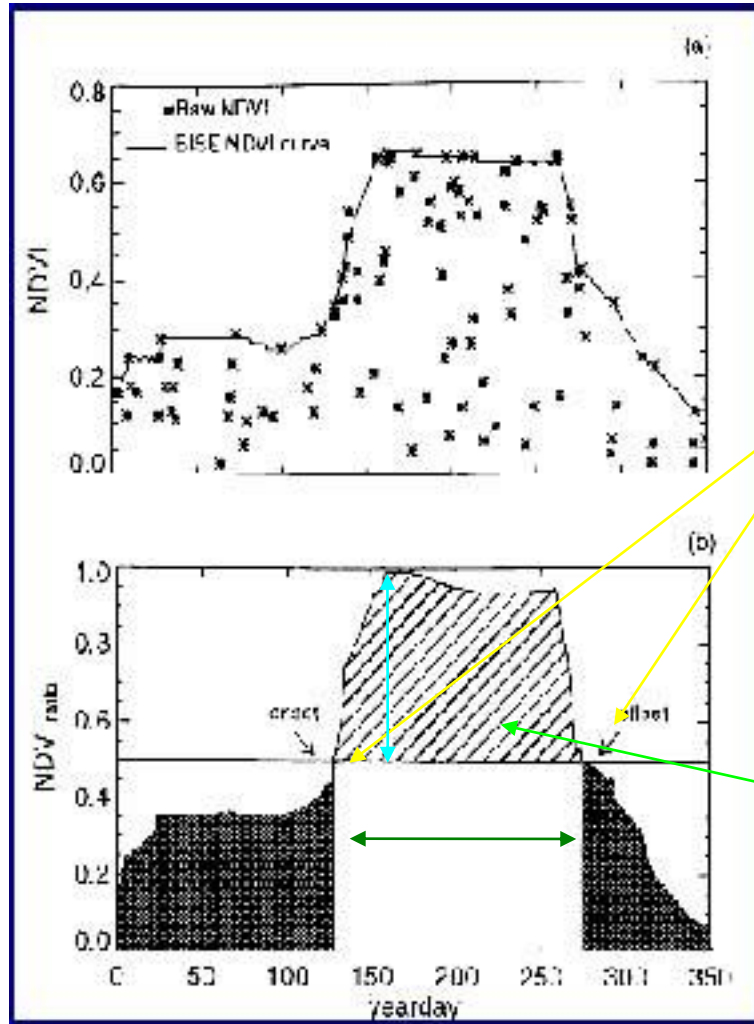
- ・ グローバルな視点は重要、しかし、グローバルな視点は地域に関してはおおざっぱな情報しか与えない
- ・ そこで、メカニズムはわからないけれど、長期間の変動がわかるように指標を用いる



モンゴル中
央、ドンド
ゴビ県マン
ダルゴビに
おけるNDVI
の変動



●NDVIの季節変動、年々変動からどのような情報が抽出できるだろうか



●前のページで見たNDVIはすでにノイズ（主に雲）除去がすすんでいる

●NDVIが一定値以上は植生である

●NDVIがその値を超える日、下回る日を出芽 (onset) および立ち枯れ (senescence) の日と考えることができる

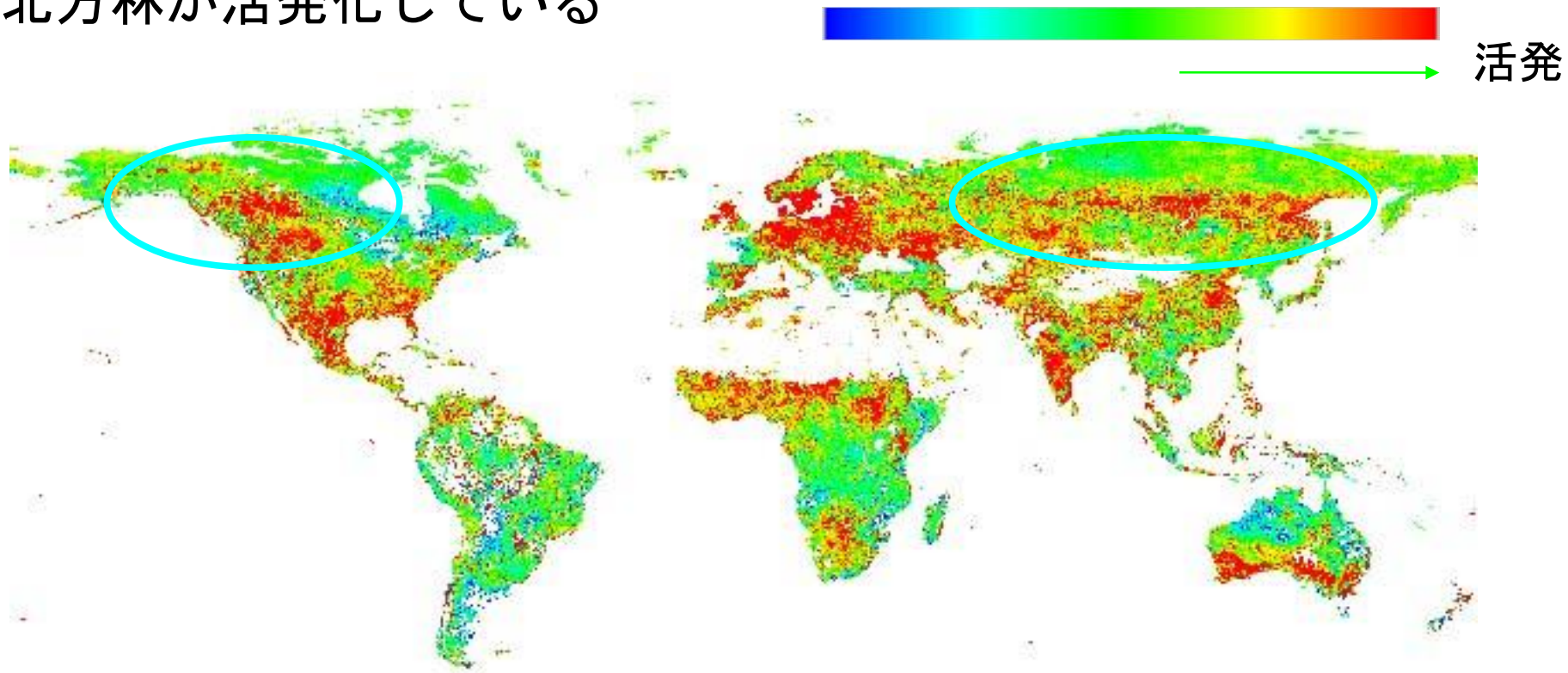
●その間が、生育期間である

●その間の積分値はバイオマスに相当するだろう

●最大値は、その年の生育状況を表すだろう

このような指標の変動から、実際の植生変動を推定するのである

●北方林が活発化している

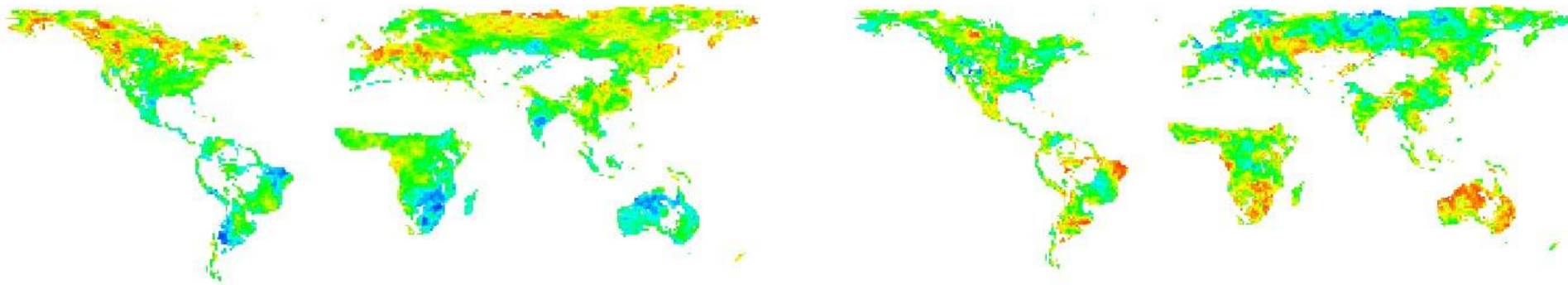


北方林が活性化していることは、1990年代半ばころから、大気CO₂濃度で有名なKeelingはじめ、多くの研究者により指摘され、その原因として「**温暖化により融雪の時期が早まったことが成長期間の伸長につながったこと**」と説明されている。

温暖化の影響に対するひとつの仮説の提唱

上の図は1982年から1993年の間の年間のNDVIの積算値のトレンド(近藤ほか、2003)

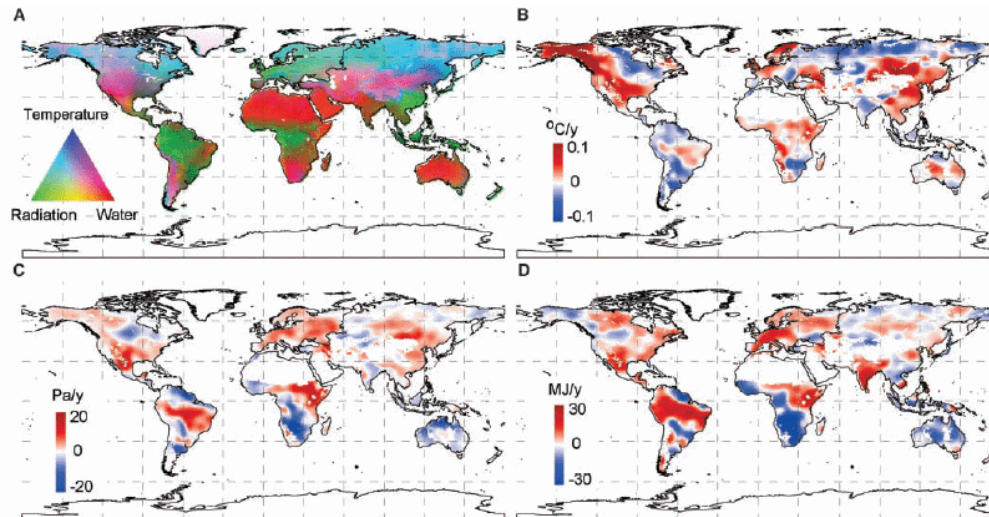
●植生変動の要因はなにか 気温の上昇、降水量の変動、どっちが重要か



温量指数とNDVIの変動の相関が高い地域 ■
→成長が【エネルギー条件】によって制約される植生帯

年降水量とNDVIの変動の相関が高い地域 ■
→成長が【水分条件】によって制約される植生帯

植生は地域の気候条件に適応した生き残り戦略を持っている



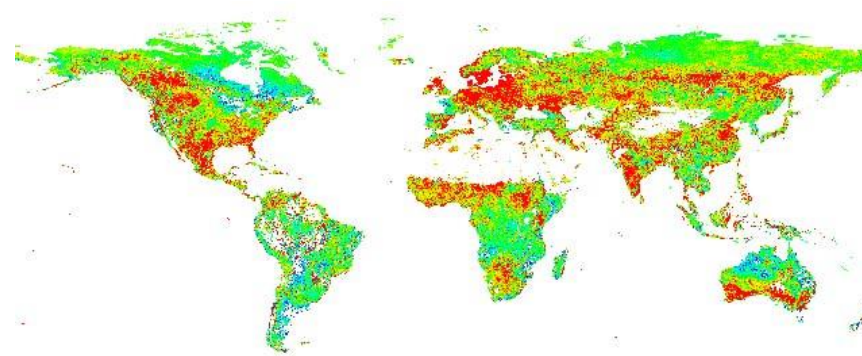
Nemani *et al.* (2003)によると、温度・水・放射が重要という

中緯度では気温は正味放射量との相関は高い

最近の成果（続き）

●人間活動の影響

最近の植生活動が活発化しているのは北方林だけではない



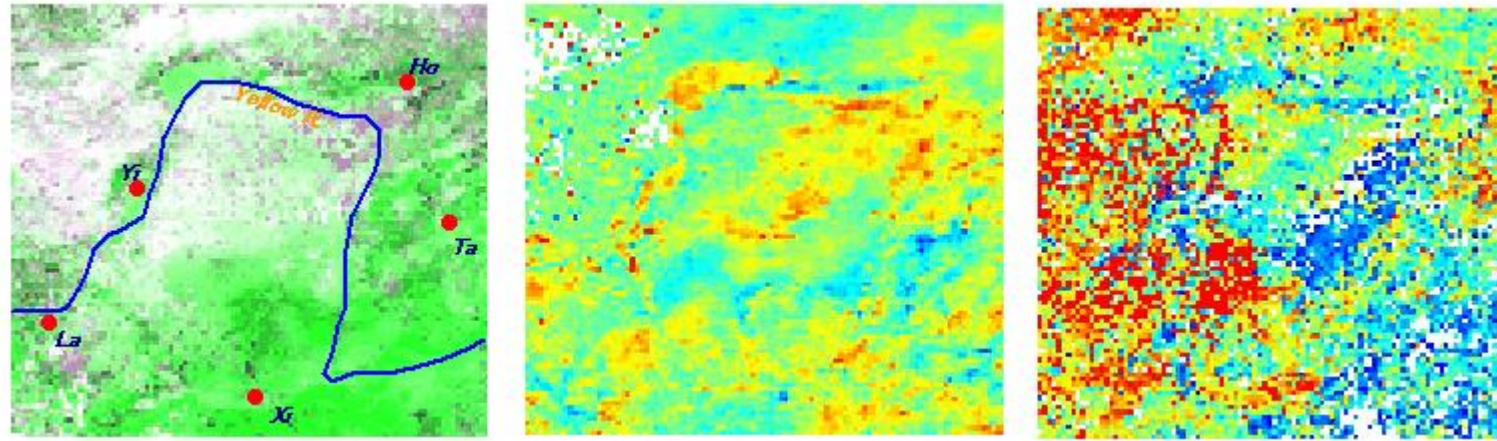
植生変動には **気候要因** と **人間要因** がある

これからの環境研究は自然だけでなく人間側の要因も含めた総合的、包括的、複合的視点が必要

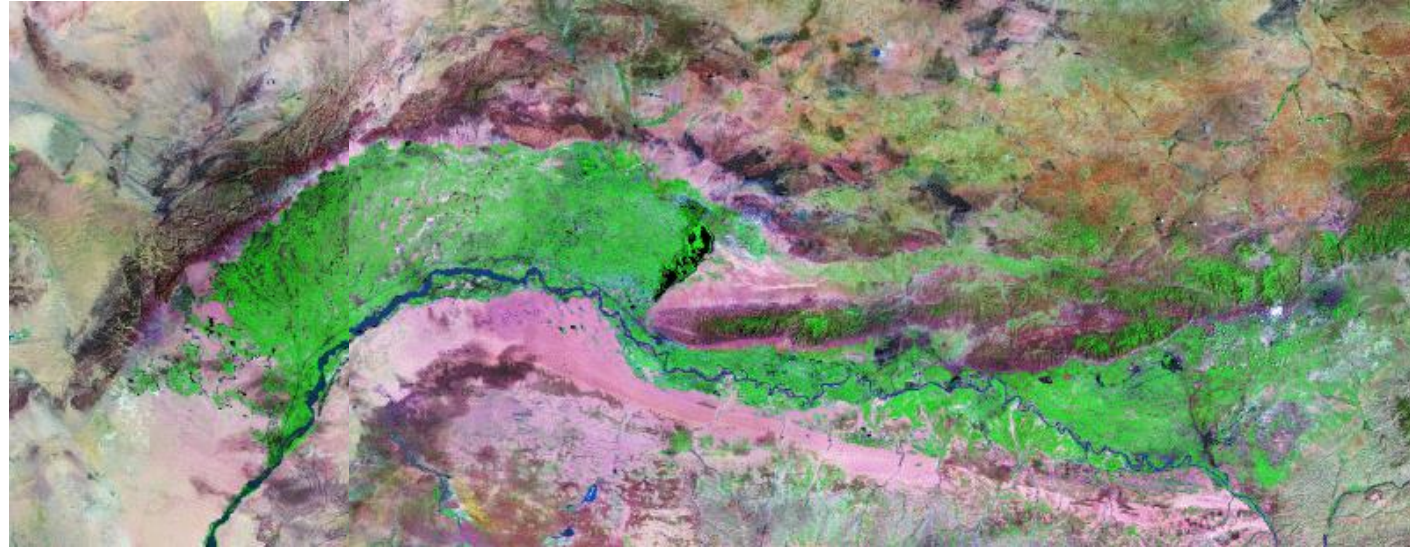
若い君たちにはこのような視点を学ぶチャンスと時間が用意されていることを自覚しよう！



●黄河中流 ー人間要因の植生変動の例ー

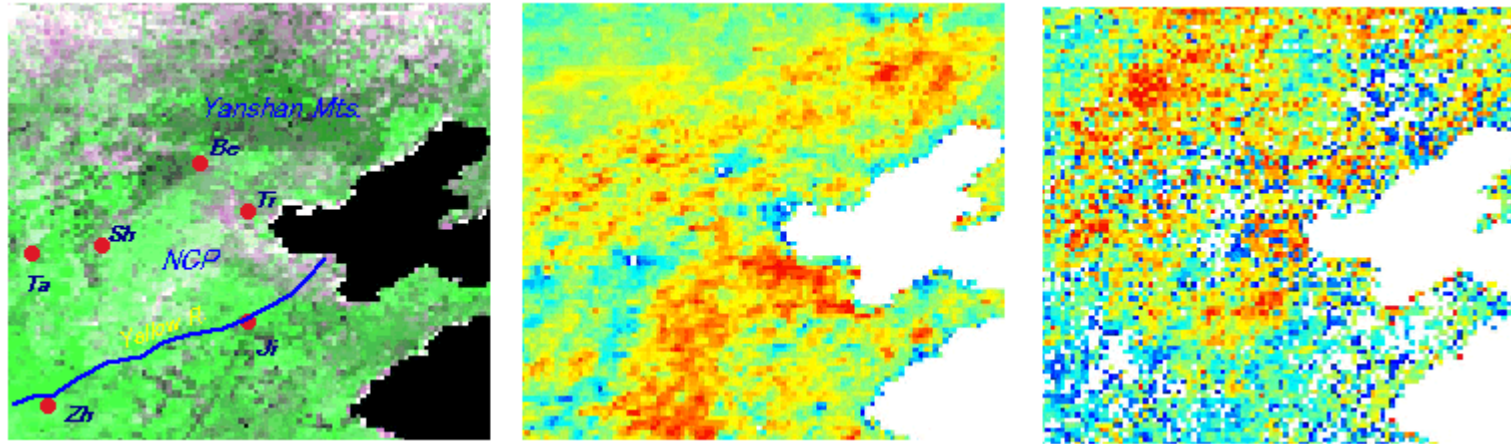


(左) フォールスカラー画像（青線が黄河の河道）、
(中) NDVIのトレンド、（右）最大地表面温度のトレンド

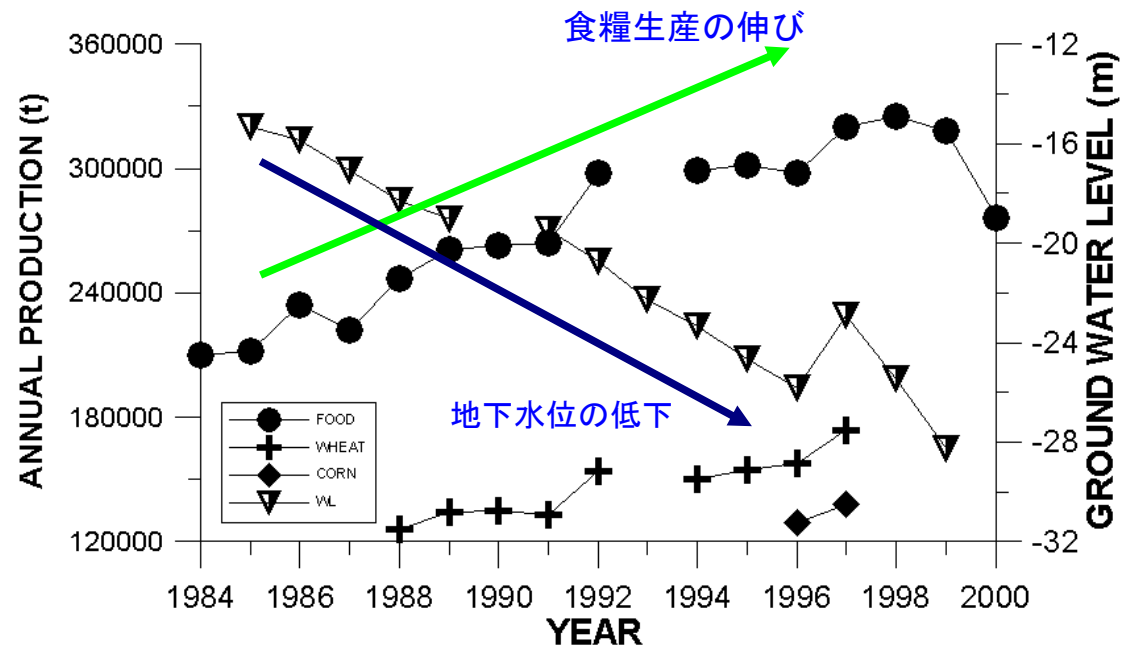


黄河中流には大灌漑区が存在し、食糧生産をのばしたが、黄河からの取水量の増大が「**黄河の断流**」の一因となった

●華北平原



(左) フォールスカラー画像（青線が黄河の河道）、
(中) NDVIのトレンド、（右）最大地表面温度のトレンド



河北省省都石家庄近郊の樂城県における食糧生産量の地下水位の経年変化

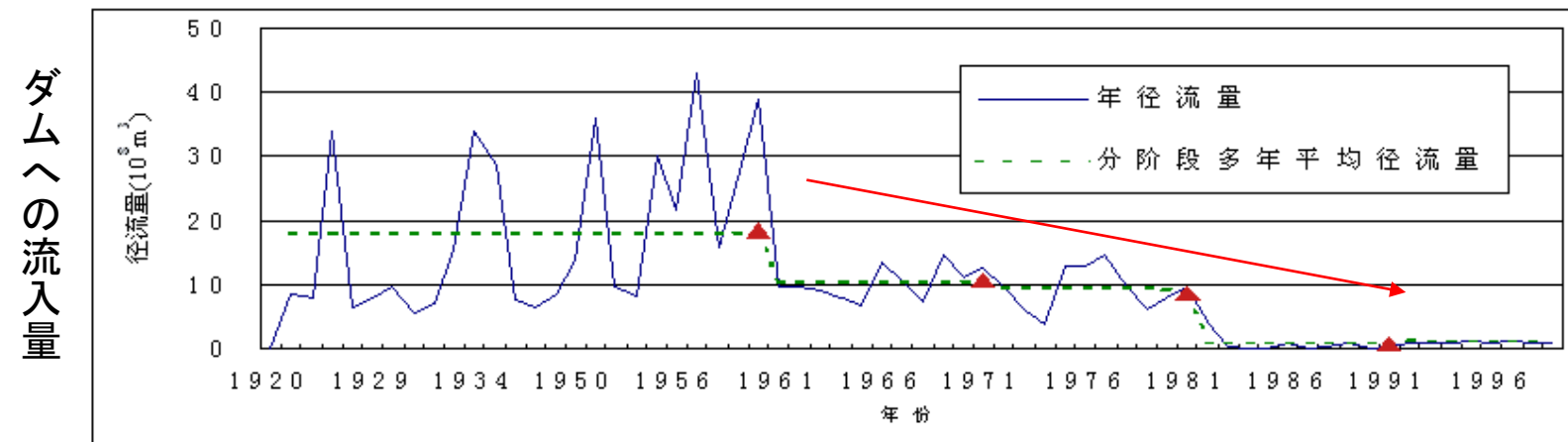
中国華北平原では食糧生産量●は飛躍的に伸び、中国の人口増加を支えたが、灌漑用の地下水の水位▽は低下を続け、持続的な食糧生産の脅威となっている（レスター・ブラウン、1995）

●燕山山地 —北京の水源林—

密雲水庫への流入量減少 —流域の植生変動—

●仮説

- 退耕環林政策による植生の増加
- 蒸発散量の増加
- 流入量の減少

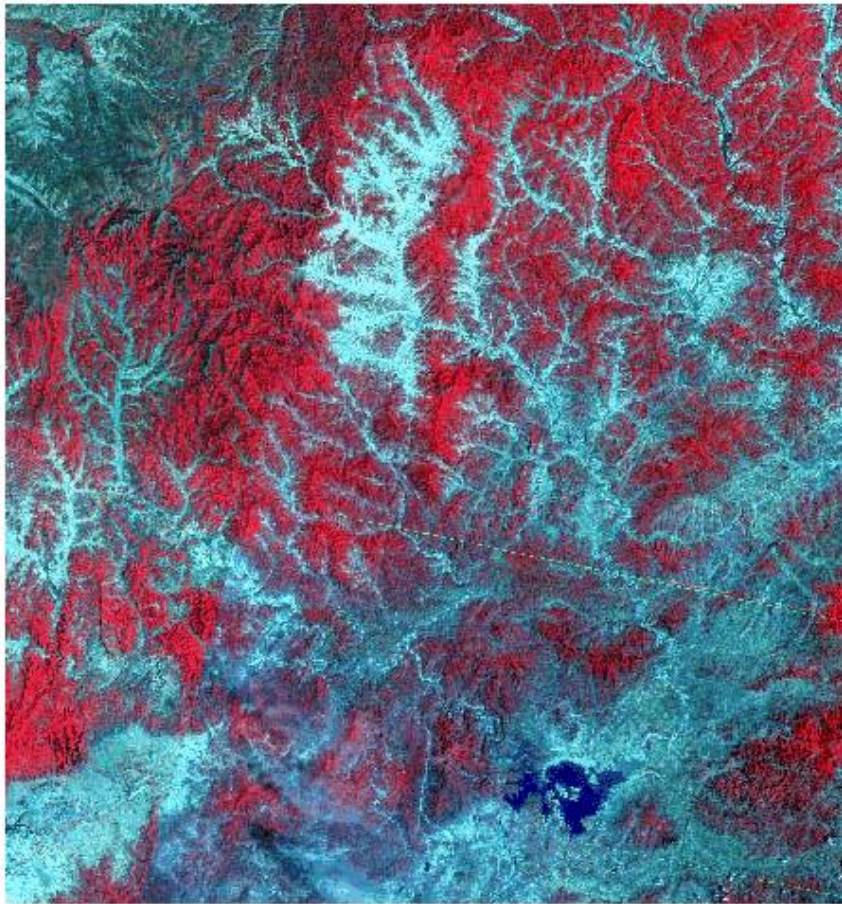


Five Periods of Annual Runoff in Chaobaihe River

1970年代から最近の密雲水庫流域の衛星画像

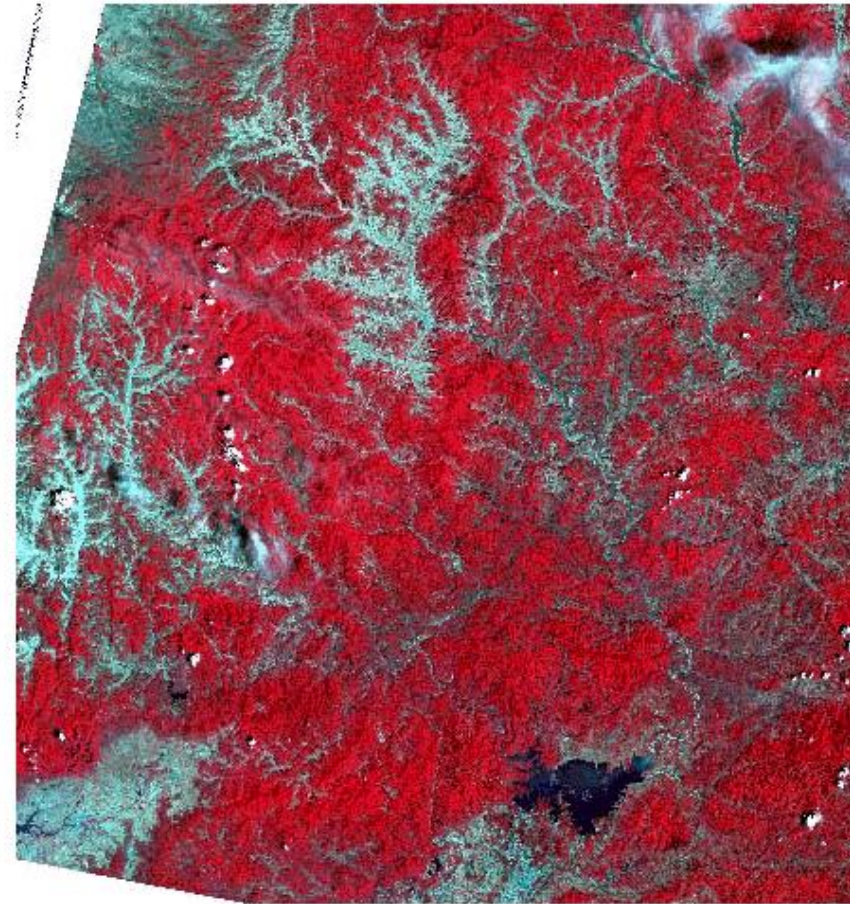
MSS(1975)とETM+ (1999年)

(植生を赤く表示するフォールスカラー画像)



1975年6月

<25年>



1999年6月

確かに、植生は回復しているように見える **Great Green Wall**

●流入量減少の理由はなにか

- ・ 森林の蒸散による損失量の増加
- ・ 流域における水利用の増加
- ・ 気候変動

(燕山における植林の成果)



注意 植林→水資源の減少ではない **短絡的に考えてはいけない、科学的思考方法を身につけよう！**

- ① ひらめき 検証すべき仮説の発見
- ② 仮説の検証 適切な手法、データはあるか
- ③ 結論 ②の結果によってこう考えざるを得ないと結論付けられた仮説

①の段階と③の段階を区別しよう！
これができるこそ大学を卒業する意味がある

環境問題は危機を煽ることによって一般に重要性を認識させるという面もあるが、観測事実なのか、悲観的な仮説なのか、十分考察する必要があるだろう。ただし、地球温暖化はその影響が未知の段階で、世界的コンセンサスのもとで対策が講じられることになった特殊な環境問題

参考) 森林の回復と水資源 ー 林学の成果ー

① 土壌の保全

- ・ 初期の段階では土壌保全を最優先させる
- ・ 樹木の活着をはかる

燕山はこの段階にあると思われる

降水を吸収し、ゆっくり流出させる緑のダム機能を持つ森林土壌の発達を最優先させる

② 森林の保全

- ・ 樹木の生長

この段階では樹木の蒸発散によって水資源は減少

③ 水保全

- ・ 十分に土壌が発達し、森林が成立した段階で、枝打ち、間伐といった森林施行により水保全をはかることができる

日本は③の段階にある

この段階で森林の持つ機能（水源涵養機能、気候緩和機能）を最大限に享受することができる

周辺諸科学の成果を知ることが必要

3-4 植生モニタリングの重要性

●植生指標とフラックスの関係

フラックスとは何か：単位断面積を単位時間に何かが通過する量、日本語では流束という

用法）水蒸気フラックス、潜熱フラックス、顕熱フラックス、CO₂フラックス、等々

これらのフラックスは気候変動を研究するための重要なパラメーターとなっているので、世界中で盛んに観測研究が行われている

国際共同研究（キーワードをインターネットで検索してみよう）

水・エネルギー循環：GEWEX/GAME
炭素循環：IGBP/FLUXNET

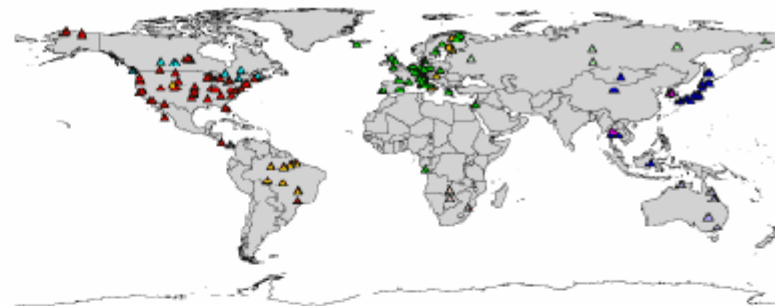
フラックスを覚えよう！

FLUXNETのホームページ

<http://daac.ornl.gov/FLUXNET/>



FLUXNET
Integrating
Worldwide CO₂
Flux Measurements



[Home](#) | [General](#) | [Sites](#) | [Maps](#) | [Map Server](#) | [Data](#) | [Mailing List](#) | [Pubs](#) | [Contacts](#)

[AmeriFlux](#) [CarboEurope](#) [AsiaFlux](#) [KoFlux](#) [OzFlux](#) [Fluxnet-Canada](#) [GREENGRASS](#) [CARBOMONT](#) [ChinaFLUX](#)

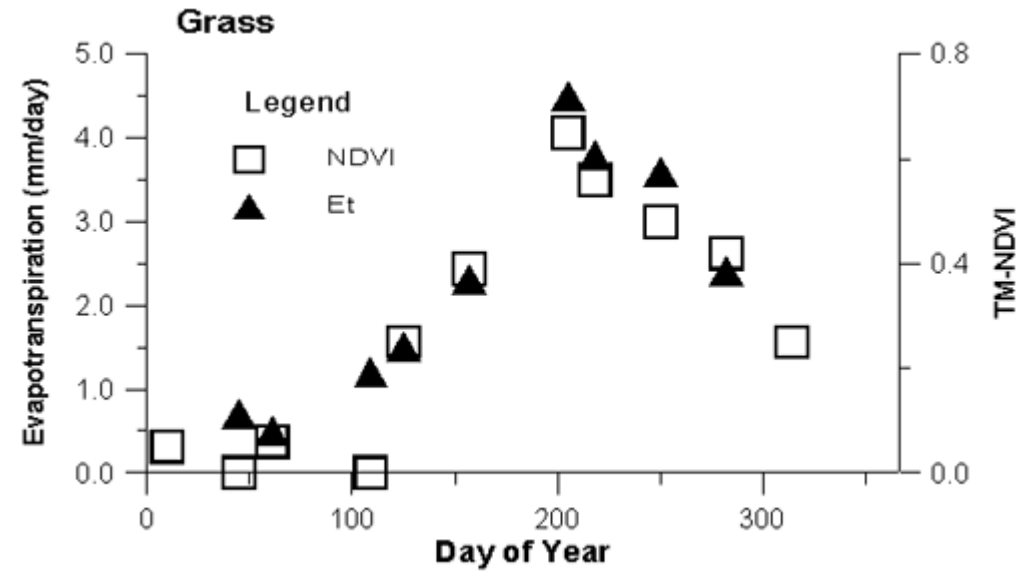
FLUXNET - A global network of micrometeorological tower sites that use eddy covariance methods to measure the exchanges of carbon dioxide (CO₂), water vapor, and energy between terrestrial ecosystem and atmosphere. At present, over 200 tower sites are operating on a long-term and continuous basis. Researchers also collect data on site vegetation, soil, hydrologic, and meteorological characteristics at the tower sites.

FLUXNET's goals are to understand the mechanisms controlling the exchanges of CO₂, water vapor and energy across a spectrum of time and space scales. *FLUXNET* also provides ground information for validating estimates of net primary productivity, evaporation, and energy absorption that are being generated by sensors on the [NASA TERRA](#) satellite.

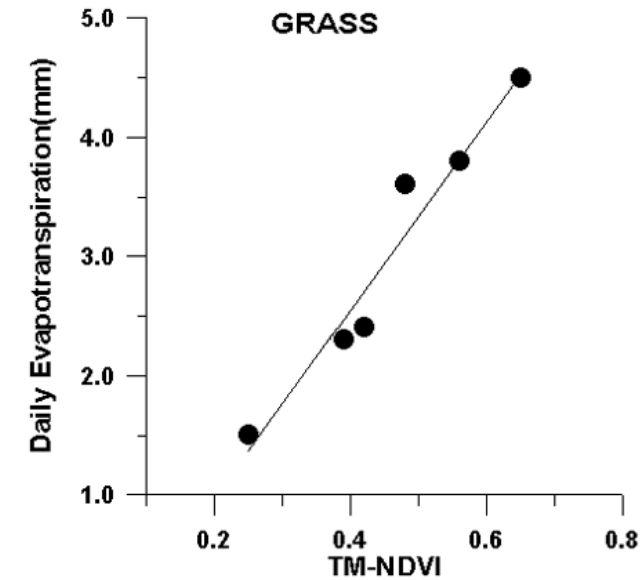
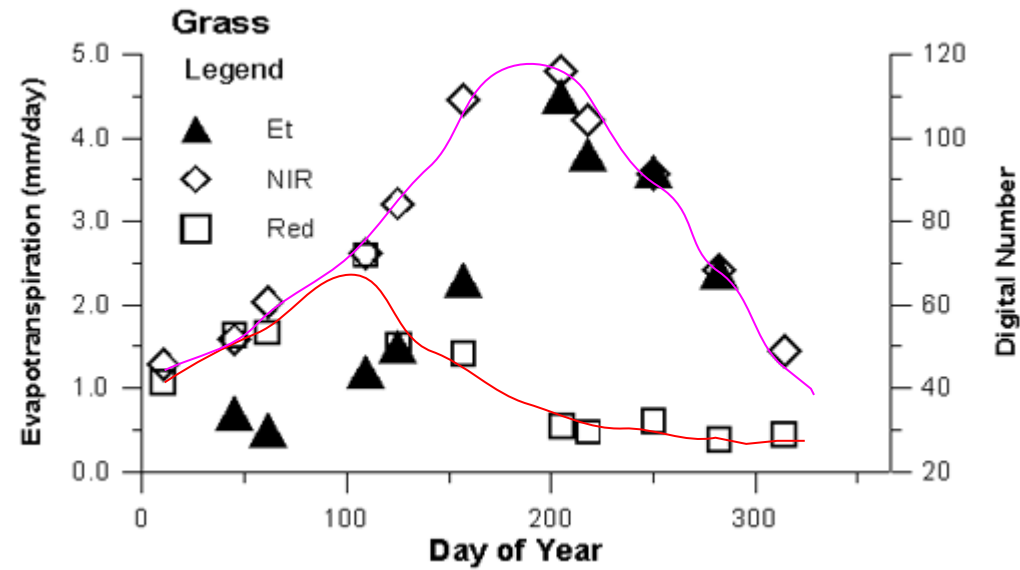
FLUXNET also has a goal to provide information to *FLUXNET* investigators and the public. [FLUXNET data](#) available at the ORNL DAAC include monthly and annual heat, water vapor, and CO₂ flux, gap-filled flux products, ecological site data, and remote sensing products.

AsuaFluxもある。国際共同研究における日本の役割を理解しよう！

●NDVIの季節変動と蒸散量の間には良好な関係



左の図でNDVI□と実測された蒸散量▲の変動はよく一致している



蒸散量とNDVIの間には経験的關係がある→広域への拡張

フィールド科学における研究の流れ

Step.1 経験的な関係の発見

対応関係を発見したらしめたもの、ただし、それが直ちにメカニズムにつながるとは限らないから注意

Step.2 その物理性の解明

見かけの関係からメカニズムへの解明へ

Step.3 モデル化

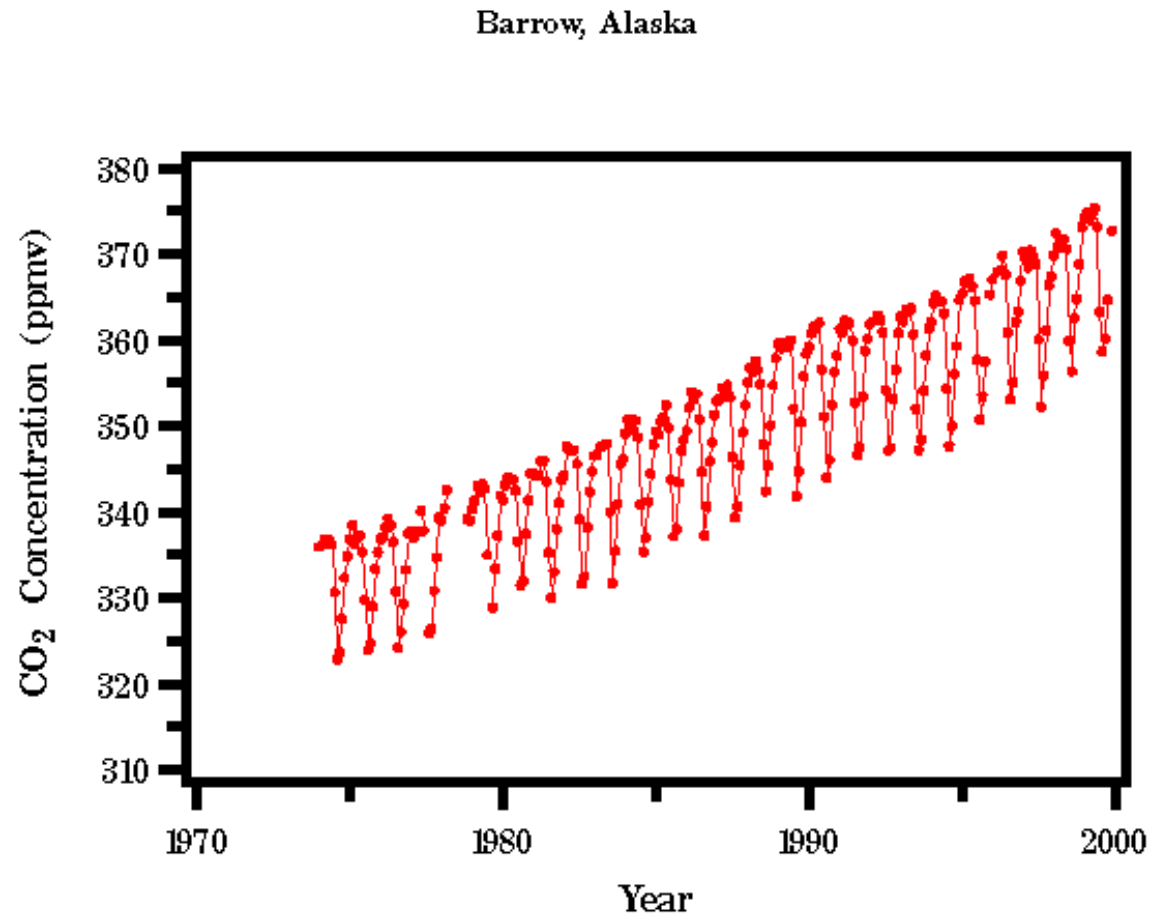
理論の構築と予測へ

閑話休題ー近藤の最近の考え方ー

モデルは現象の理解のためには必要であるが、未来を予測しなければ生き様を決めることができないようでは、成熟した人間とは言えないのではないか！ 皆さんはどう考えますか？

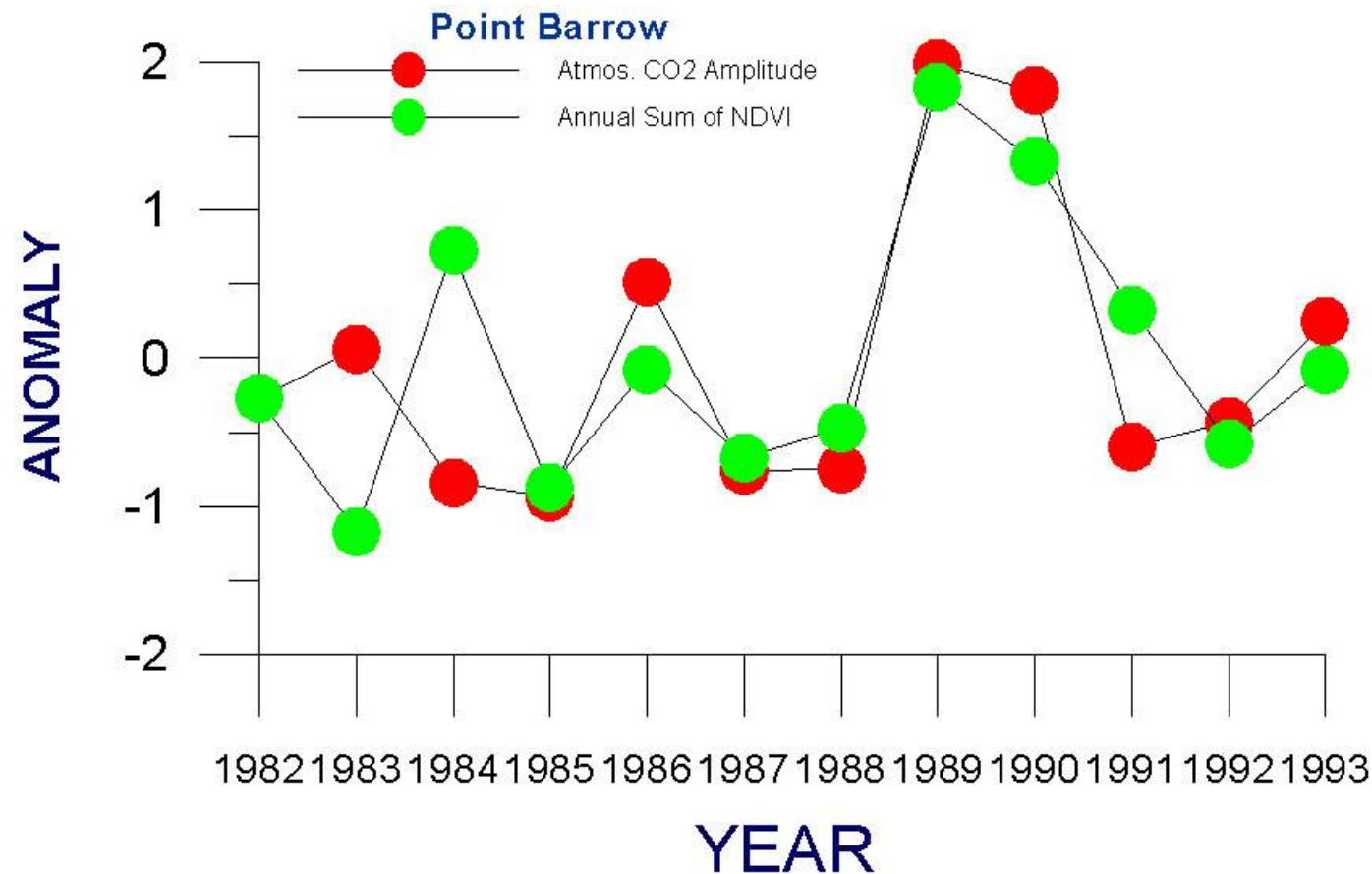
● 植生と大気CO₂濃度変動

- ・ Tucker *et al.* (1986) は大気CO₂濃度とNDVIの季節変化が同期することを発見
- ・ 北半球の春の植物の生長→大気CO₂濃度の減少
→植生による吸収



(左) アラスカ、ポイントバローにおける大気CO₂濃度変動
きれいな季節変化を認めることができる

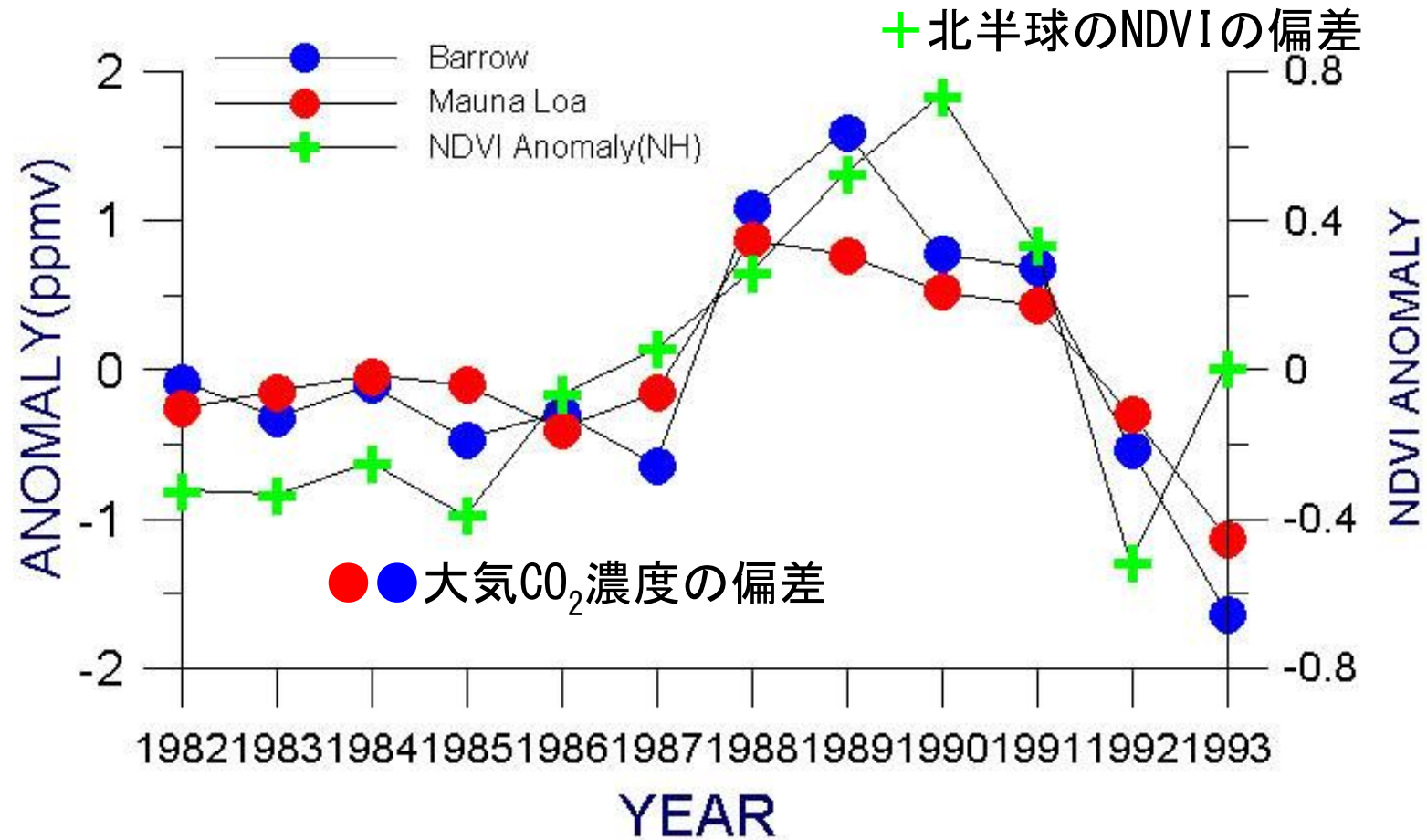
●ポイントバローで、春から夏の大気CO₂濃度の減少量と、NDVIの上昇量をプロット



●植生の成長の活発な年と、大気CO₂濃度の変動幅が大きな年は一致

●確かに植生の成長によって、大気CO₂は吸収されている

● 季節変動では植生による大気CO₂の吸収が認められる
では、年々変動ではどうか



- 比較的暖かかった1990年頃は大気CO₂濃度とNDVIの偏差が正
- 暖かい年に植生活動が活発で、大気CO₂濃度も高い
- おそらく土壌呼吸 (CO₂の放出) → 仮説
- まだまだ研究すべきことが多い

●ここで重要なこと

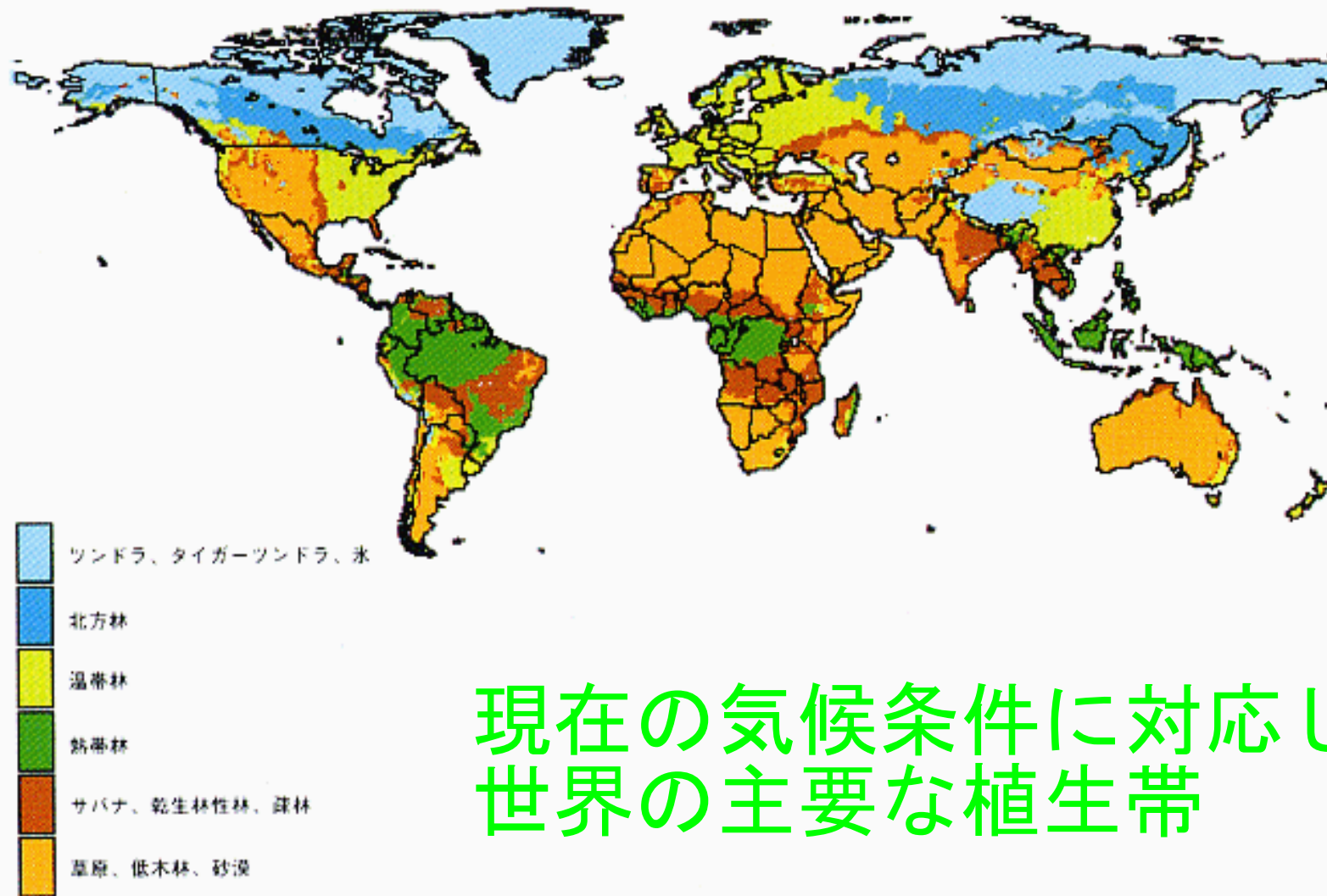
- ・年単位で見ると、植生の成長に伴う大気CO₂の吸収が認められた
- ・しかし、全球スケールで、年々変動を見ると、植生活動の活発な年は大気CO₂濃度も高かった

空間スケール、時間スケールが異なると、重要な現象が異なってくる

環境の認識

- 1) 多様性 様々な要素から構成される
- 2) 関連性 要素間で相互作用する
- 3) 空間性 空間の中に配置されていることが重要
- 4) 時間性 環境は歴史によって形成される
- 5) 階層性 扱うスケールによって重要な観点が異なる

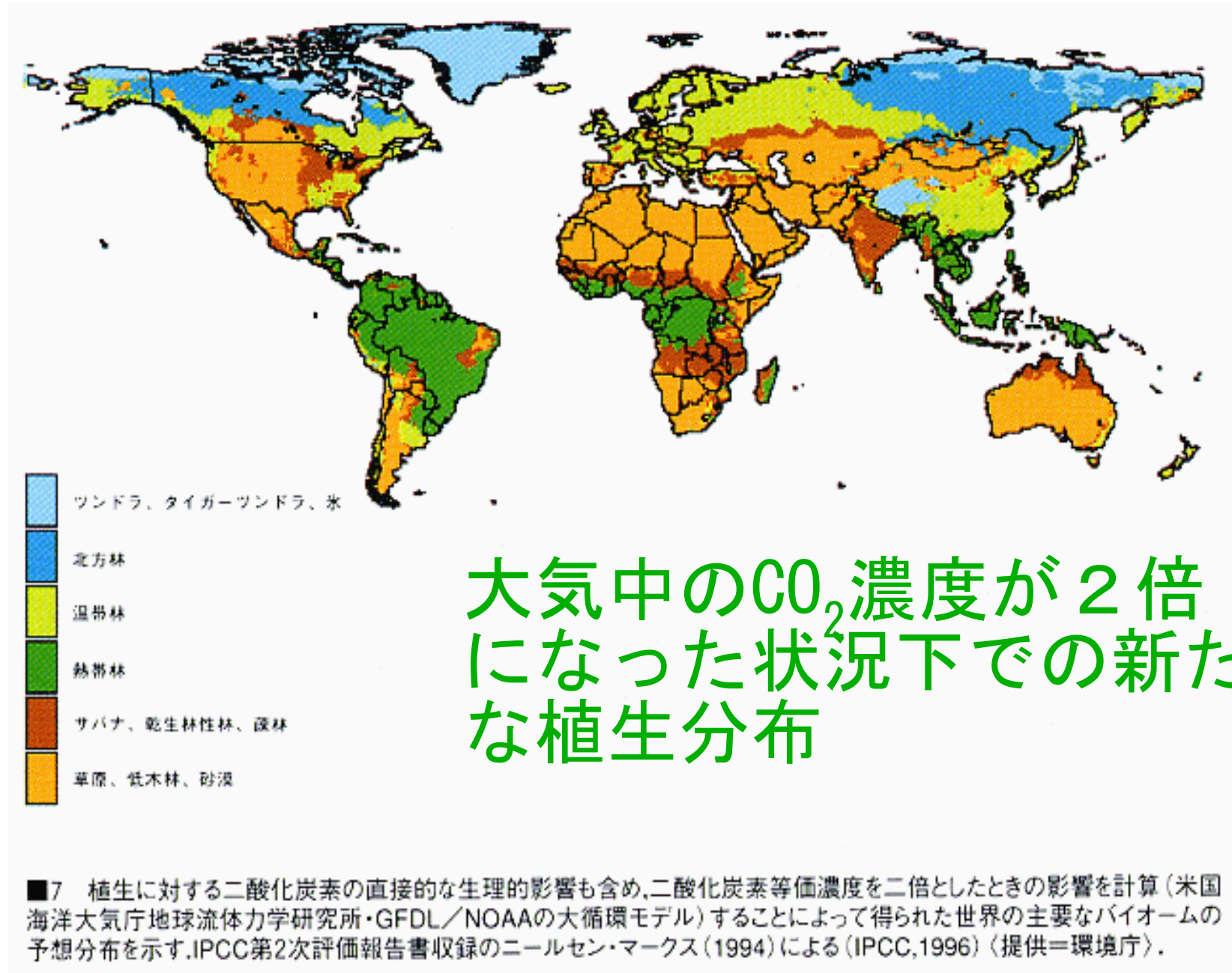
地球温暖化によって植生帯はどのように変化するか



現在の気候条件に対応した
世界の主要な植生帯

■6 大気—植物—土壌系作図モデル (MAPSS) で計算された現在の気候条件下における世界の主要なバイオームの潜在分布. 潜在分布とは各地点で降水量, 気温, 湿度及び風速の月平均値から期待される自然植生を意味する (IPCC, 1996 より) (提供=環境庁).

どこがどう変わったか見てみよう



（予測結果のひとつであってコンセンサスが得られたものではないことに注意）

日本ではどう変わるか

(複数の予測のひとつであることに注意)

温量指数：月平均気温で
5℃を越える温度を12
ヶ月積算した値
→植生分布をよく表す

21世紀末に予測される気
温分布（GSFCモデル、3～
4℃）で計算した温量指数
に基づく植生分布
→予測の過程に注意しよ
う！

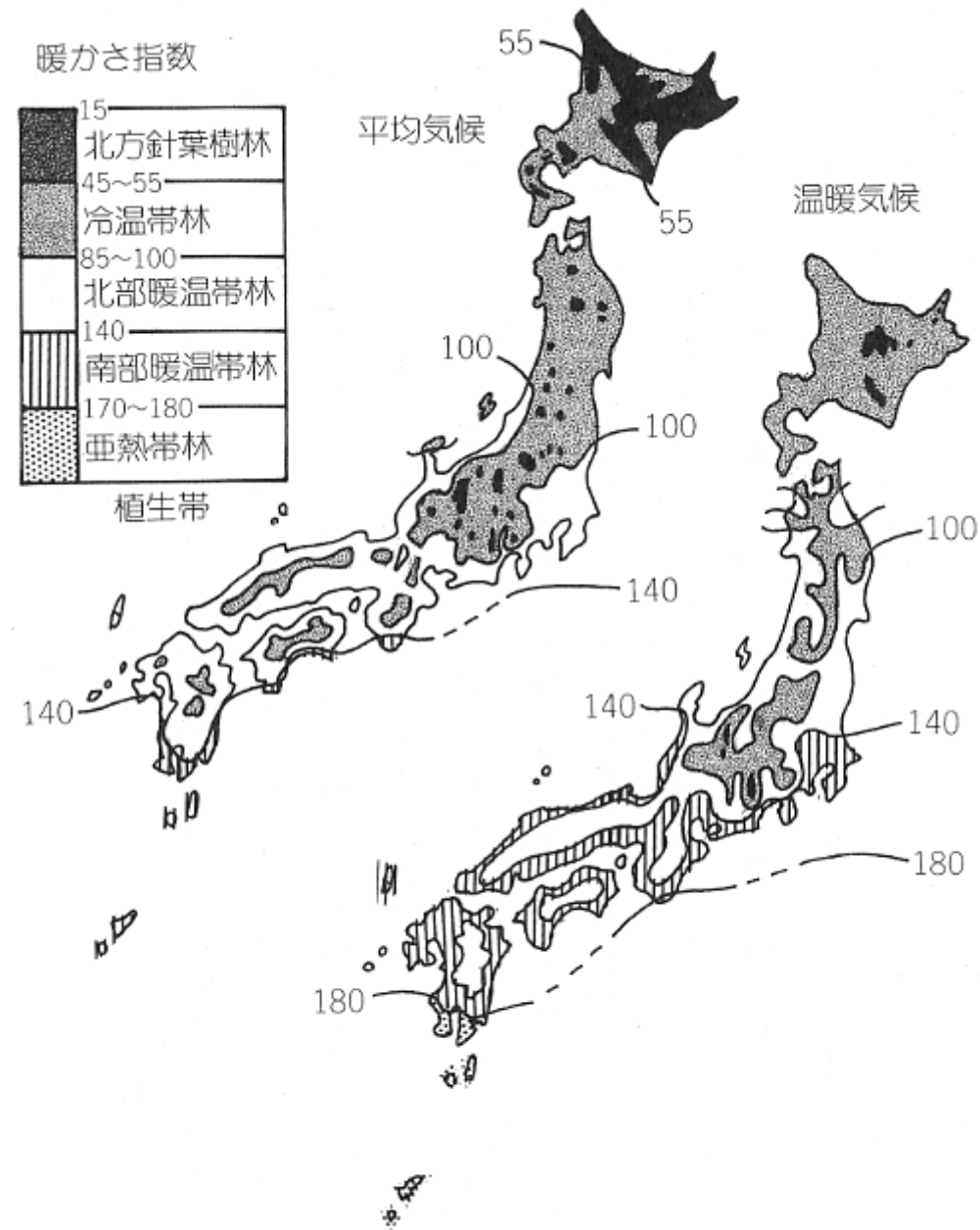


図4・6 平年気候と温暖気候（21世紀末）のもとでの日本列島の植生帯分布の比較（内嶋ら，1992より）

- 温暖化は確実に起こっていることは確認されている
- では実際に植生帯の変化は生じているのだろうか
- ・ アラスカのツンドラでは灌木が増えてきている
- ・ 温暖化に伴い乾燥化が進行するユーコンの北方林で衰退が生じているようだ
- ・ 北方林の南限の沿海州で自然枯死が問題になっている
- ・ その他

Walther *et al.* (2002): Ecological responses to recent climatic change, NATURE, 416(28), 389–395

多数の植物	ヨーロッパ	開花、展葉が10年で1.4–3.1日程度早まっている	過去38～48年
	北アメリカ	開花、展葉が10年で1.2–2.0日程度早まっている	過去35–63年
18種の蝶類	UK	10年で2.8–3.8日程度出現が早まっている	過去23年
両生類	UK	産卵が早まっている	過去25年
野鳥	ヨーロッパ 北アメリカ	渡りの時期が早まっている	過去30–60年

確認されている緯度および高度方向へのシフト

(Walther et al., 2002, NATURE)

種類	場所	観察された変化	気候変化との関連
森林限界	ヨーロッパ ニュージーランド	高標高帯への移動	気温の上昇
極圏の灌木植生	アラスカ	灌木の無かった場所 への灌木の拡大	気温の上昇
山岳植生	ヨーロッパアルプス	10年で1～4mの上昇	気温の上昇
南極植生、軟体動物	南極	分布の変化	液相水の利用 気温上昇
動物プランクトン 潮間帯の軟体動物 魚類	カリフォルニア沿岸 北大西洋	暖水域の種の増加	沿岸水温の上昇
39種の蝶	北アメリカ ヨーロッパ	過去27年間で200km の北方へのシフト	
ある種の蝶	西USA	20世紀間で上方へ 124m、北方へ92km	
低地の野鳥	コスタリカ	高山への分布の拡大	乾季の霧の頻度
12種の鳥類	イギリス	20年で18.9kmの 北方への移動	冬の気温
キツネ	カナダ	赤キツネの北方拡大 極キツネの分布減少	気温の上昇

衛星データを使って環境変動のシグナルをいち早く捉えて、社会に発信していく必要があるのだ

アメリカは京都議定書から離脱した

その理由は科学的根拠にとぼしいから

(それでも将来を考えて対策を講じようというのが国際的コンセンサスだったのだが)

やはり、対策への動きを加速するには証拠に勝るものはない

リモートセンシングの役割

しかし．．．研究者のステークホルダーは誰だろう？