

# 地球環境変動論：温暖化概論

生態系・社会への影響

## 植生への影響

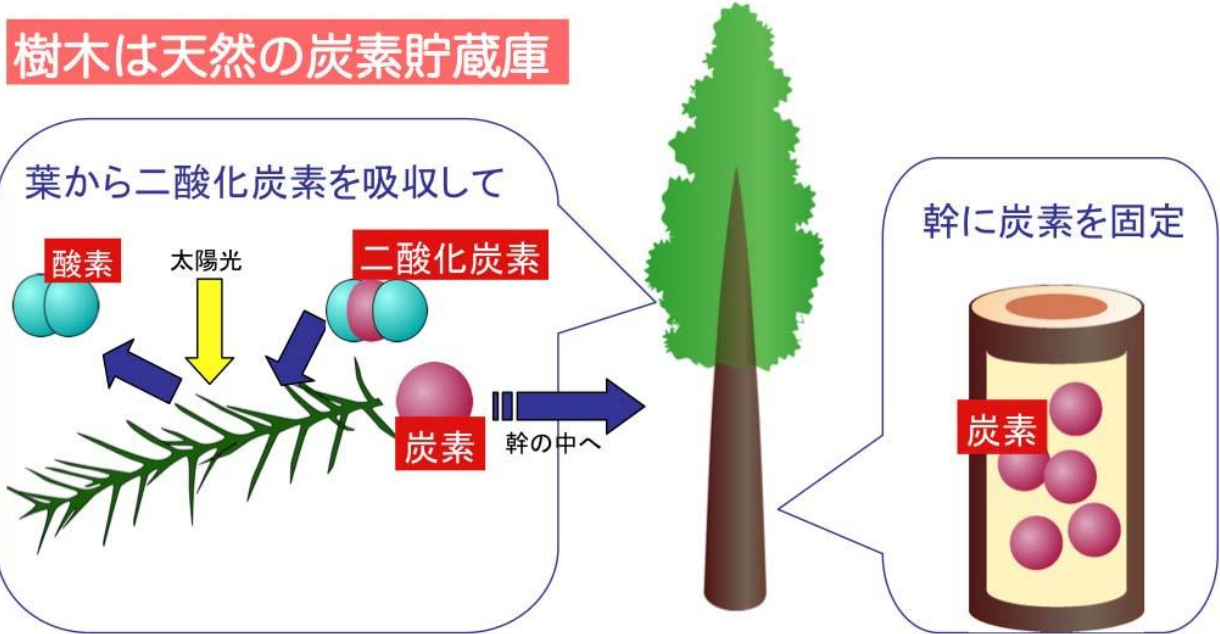
地球水循環研究センター

熊谷 朝臣

(くまがい ともおみ)

よくある「温暖化防止に対する森林の役割」

# 森林は二酸化炭素を吸収する。



( (独) 林木育種センターセンターホームページ)

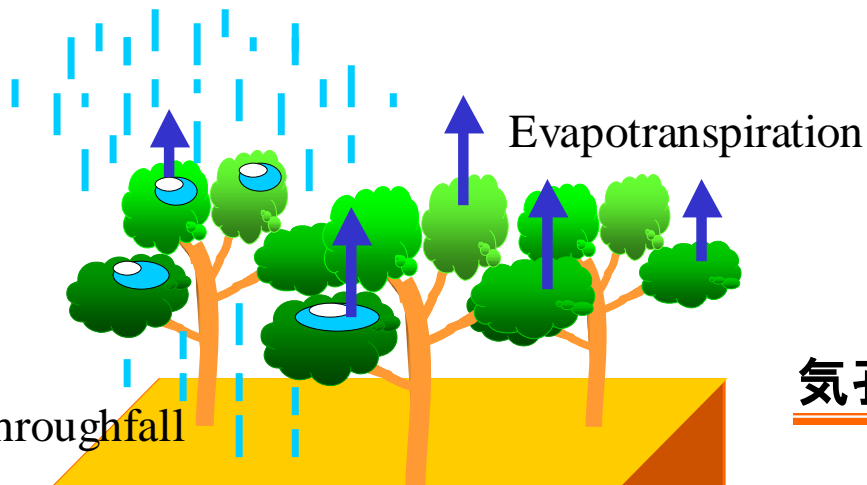
## だから、木を植えましょう。

# 話は、そんなに簡単じゃない。

水循環と炭酸ガス吸収(光合成)には深い関係がある。

## 植生地における水循環

Rainfall



Evapotranspiration

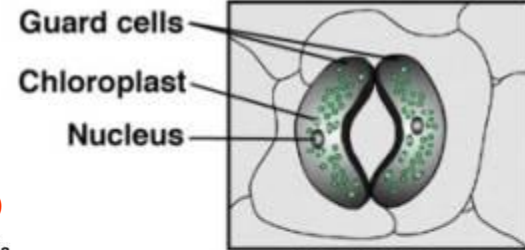
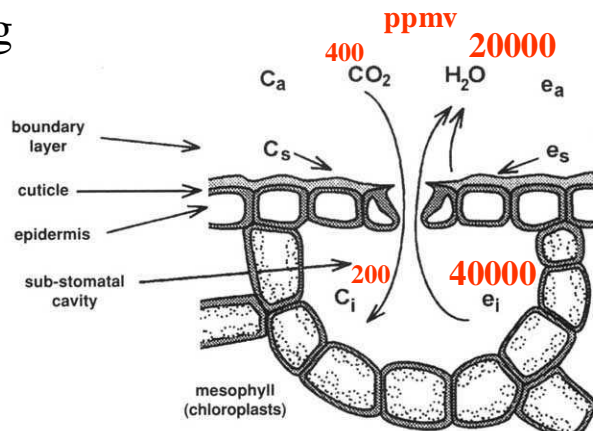
Throughfall

Infiltration

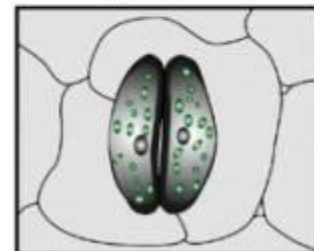
Leakage

Rooting depth

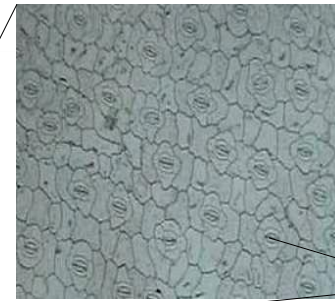
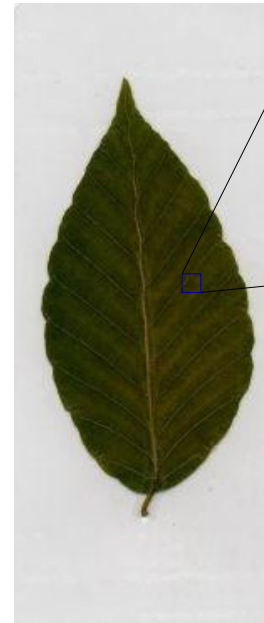
## 気孔開閉は“ジレンマ”



Open Stoma



Closed Stoma



気孔は、二酸化炭素を吸う場所であり水蒸気を排出する場所である。

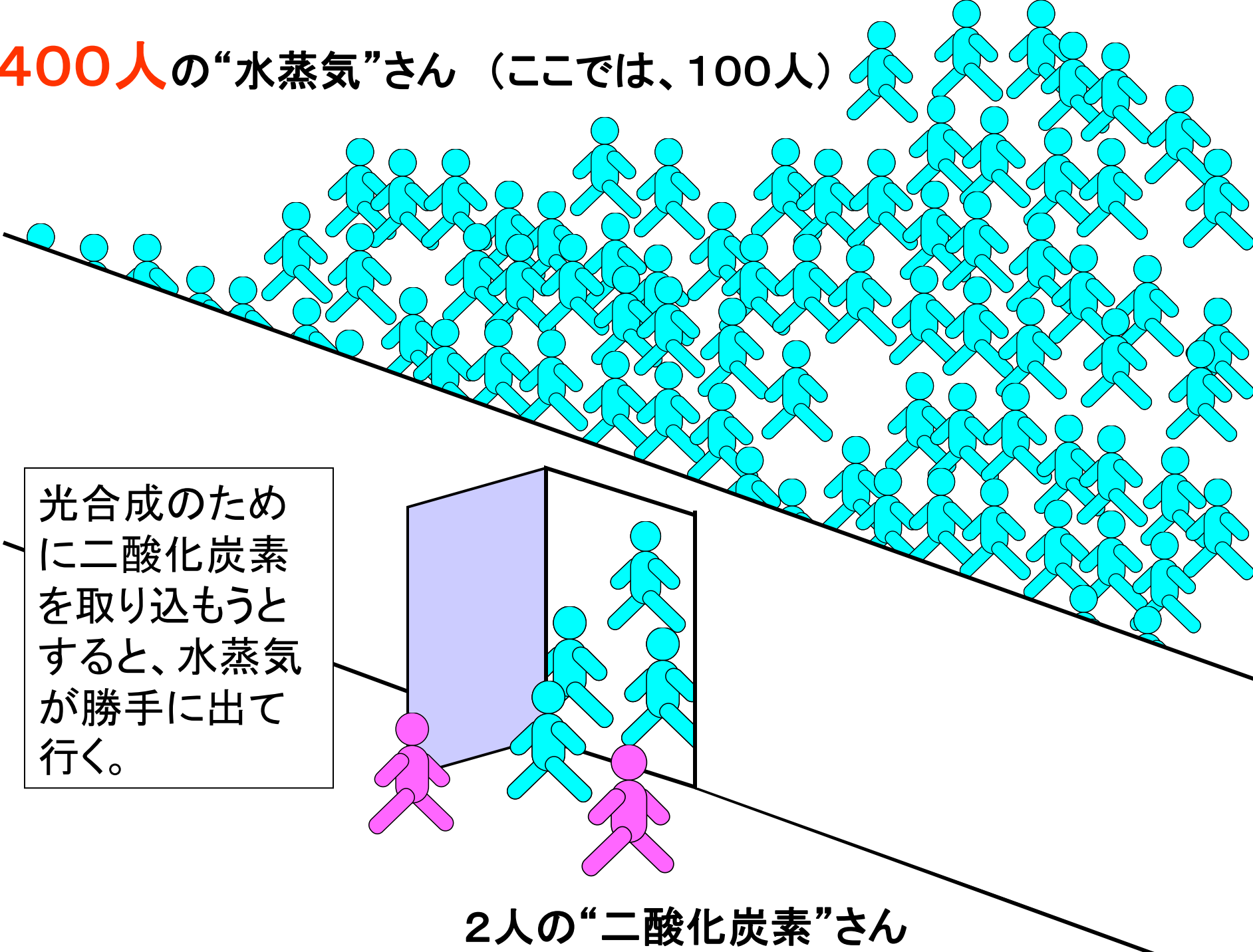
**Stomata**



Light

CO<sub>2</sub> Water

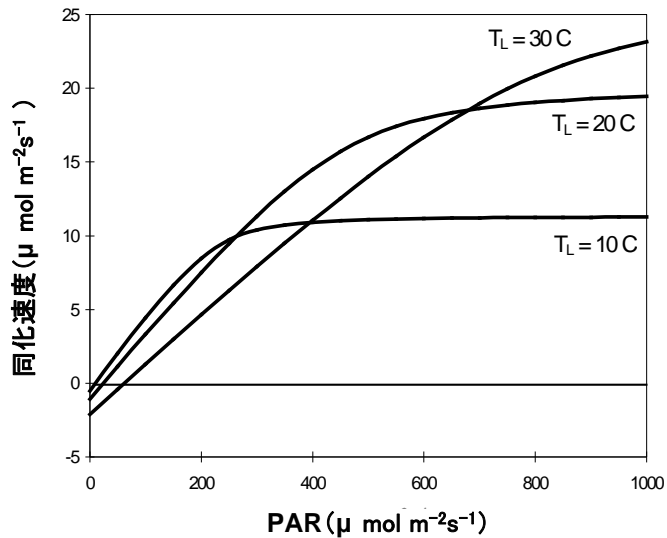
400人の“水蒸気”さん（ここでは、100人）



光合成のために二酸化炭素を取り込もうとすると、水蒸気が勝手に出て行く。

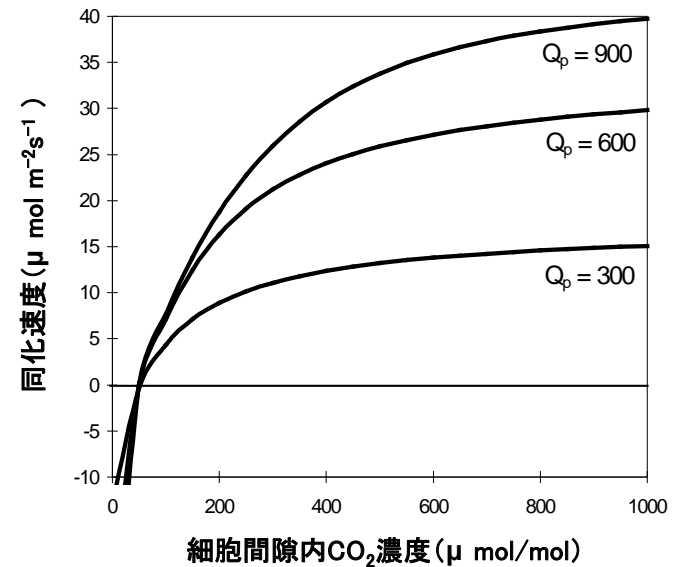
2人の“二酸化炭素”さん

## よくある光合成話—その1—



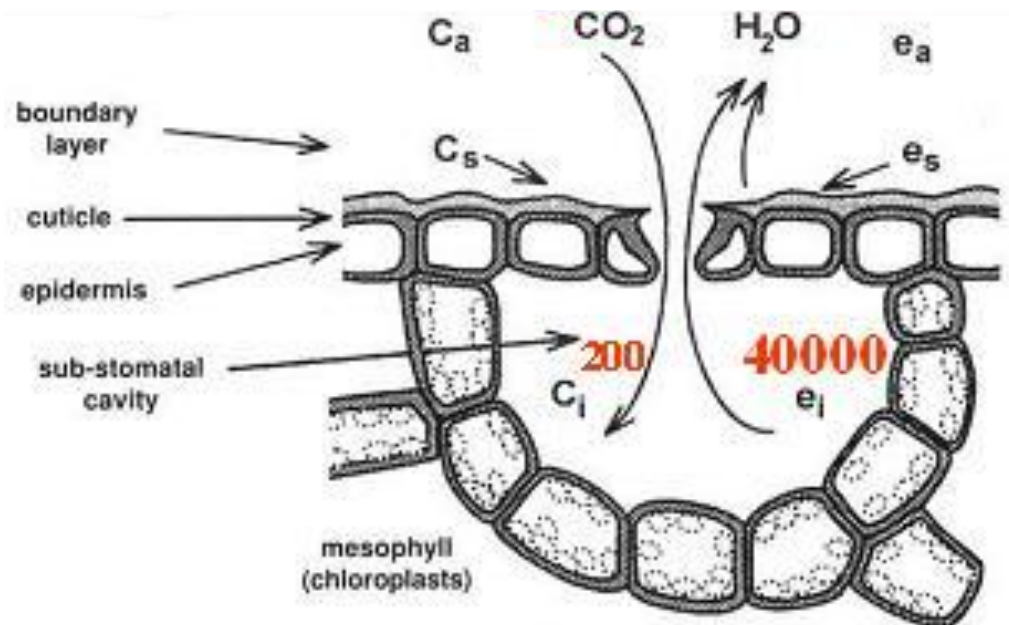
PARの関数として表現された3段階の葉温における光合成

## よくある光合成話—その2—

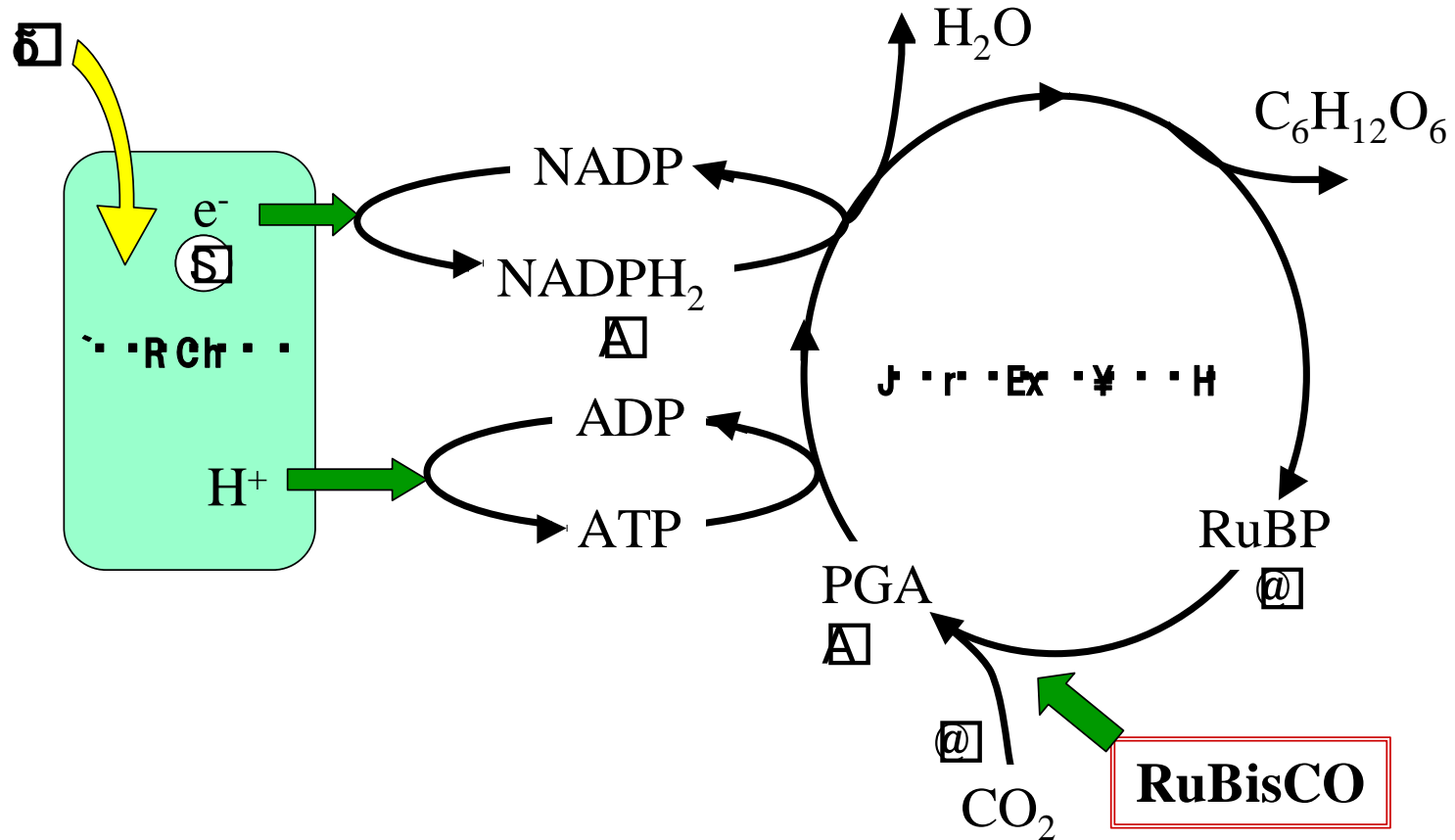


$\text{CO}_2$ 濃度の関数として表現された3段階のPARにおける光合成

↑  
ここでは、“気孔開閉”  
について考えてない。

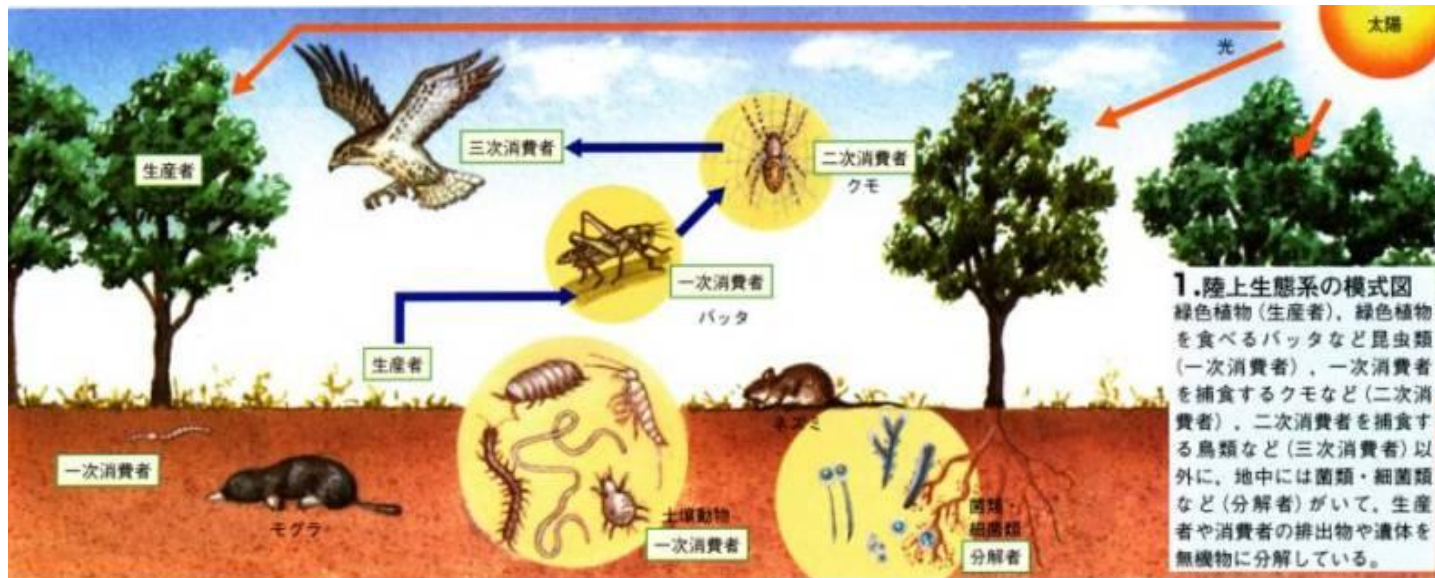


# 光合成の機作:基本

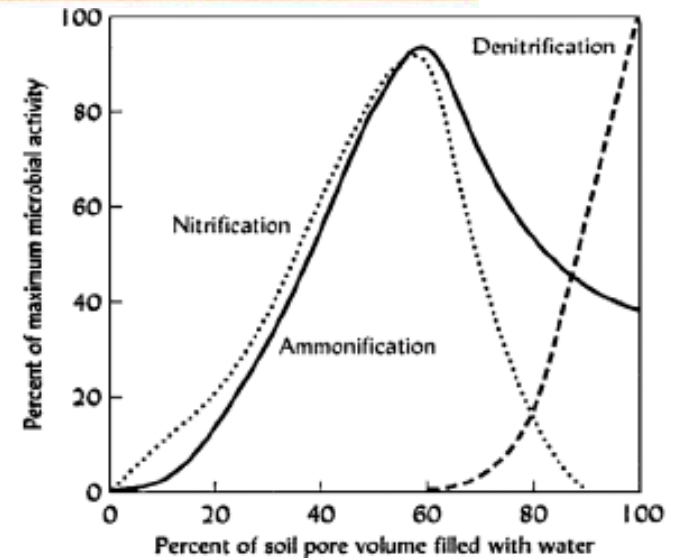
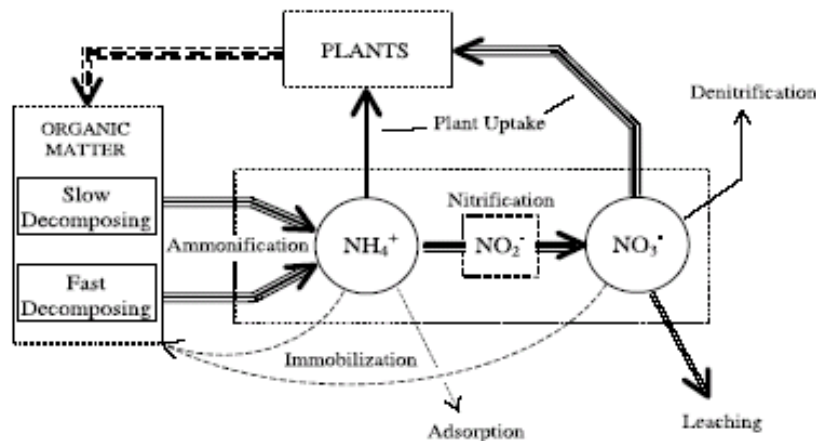


光合成の反応過程. ※carboxylationを中心とする.  
 PGA: ホスホグリセリン酸, RuBP: リブロースニリン酸,  
 RuBisCo: RuBPカルボキシラーゼ・オキシゲナーゼ.  
 図中の丸で囲まれた数字は反応に関わるモル量を意味する.

# “光合成”には、水・様々な物質の循環が関係している。

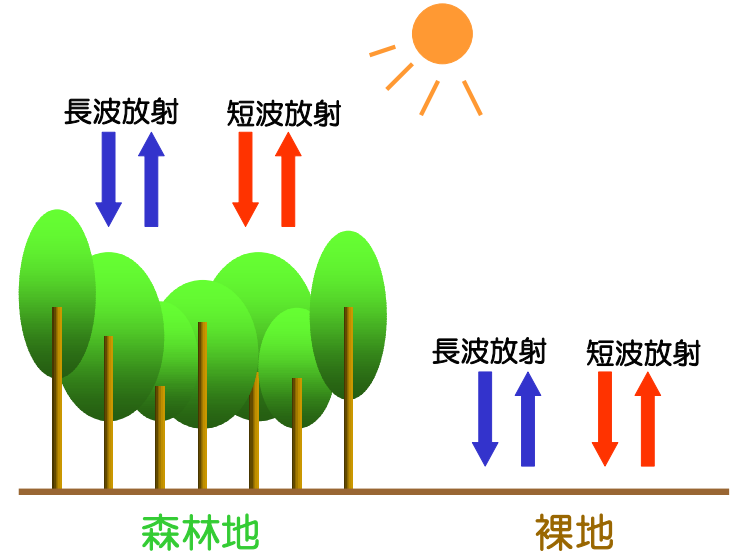


図説生物(東京書籍)より

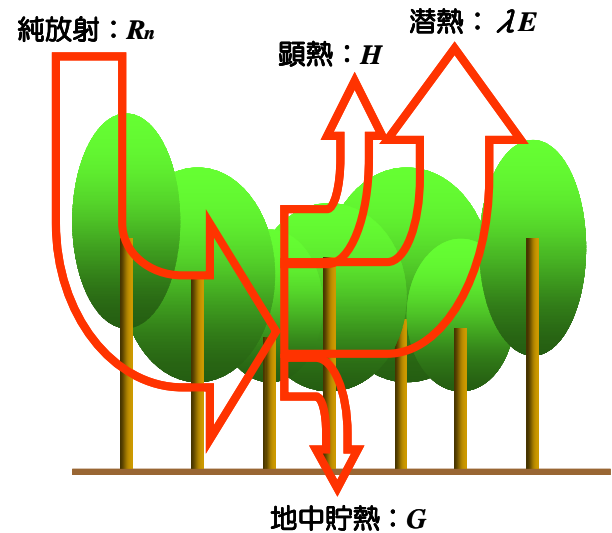


(Rodriguez-Iturbe, 2001. Adv. Water Res. 24;695)

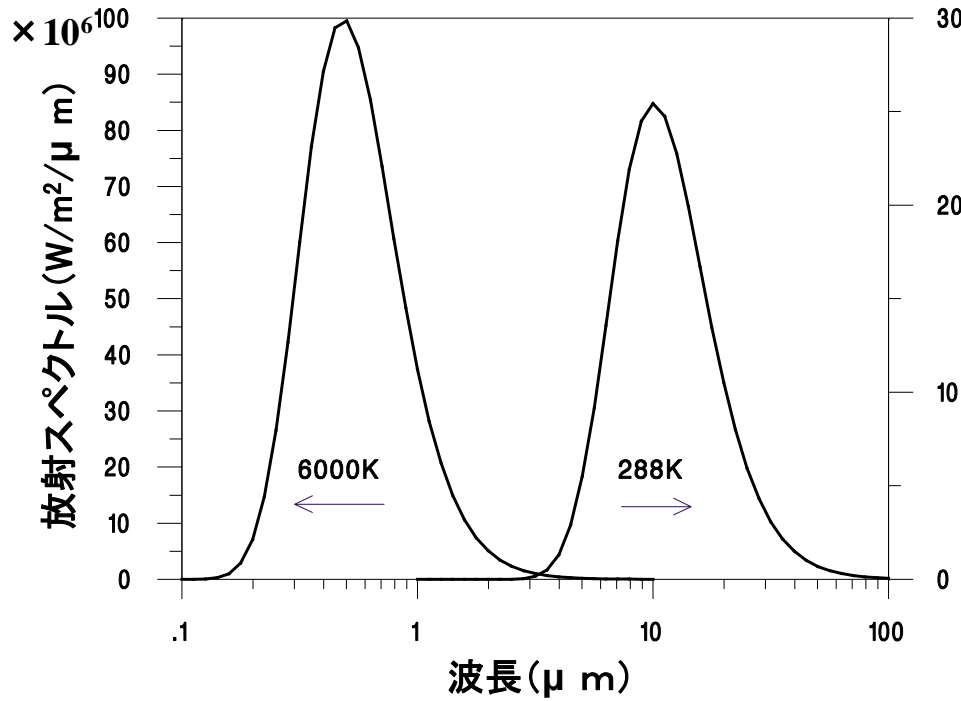
$$R_n = (1 - a)R_s + R_L - \varepsilon\sigma T_s^4$$



$$R_n = H + \lambda E + G$$



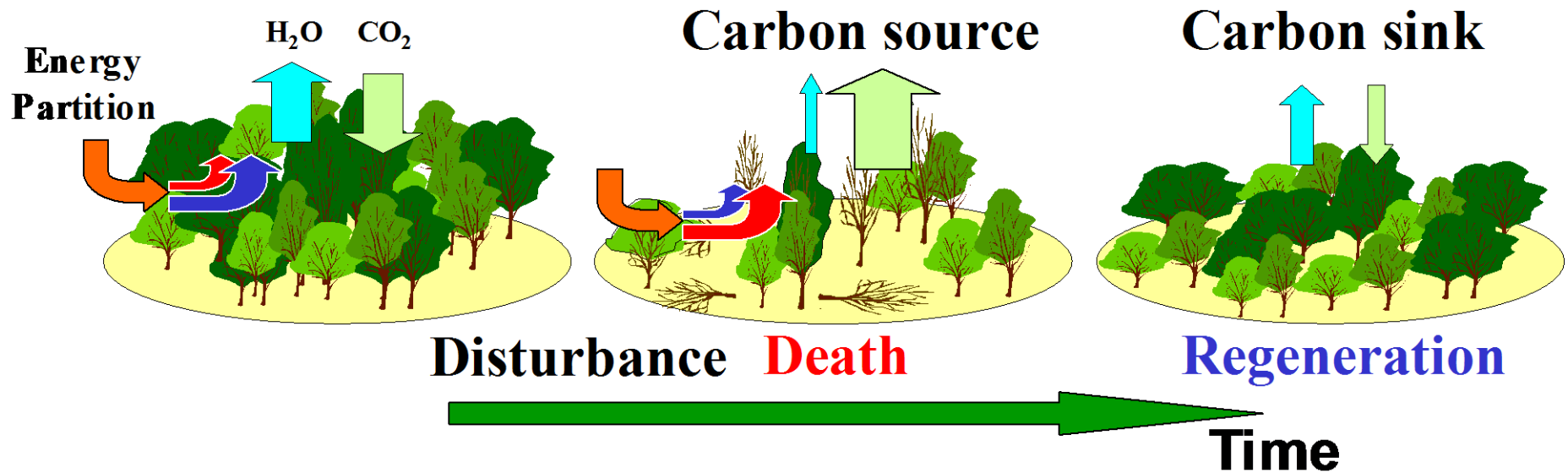
「ステファン・ボルツマンの法則」と「ウィーンの変位則」







Landscape transformation associated with a die-off of piñon pine trees (*Pinus edulis*) triggered by a global change-type drought. Piñon pine trees, evergreen when alive, (a) exhibiting reddish-brown foliage indicating mortality (October 2002). (b) After they have lost their needles, exposed gray trunks of standing dead tree carcasses remain (May 2004). Almost all of the surviving green trees in (b) are junipers. (Breshears et al, 2009. *Front. Ecol. Environ.* 7; 185)



# アマゾン熱帯林の大規模伐採数値実験

(Nobre et al, 1991. J. Climate 4;957)

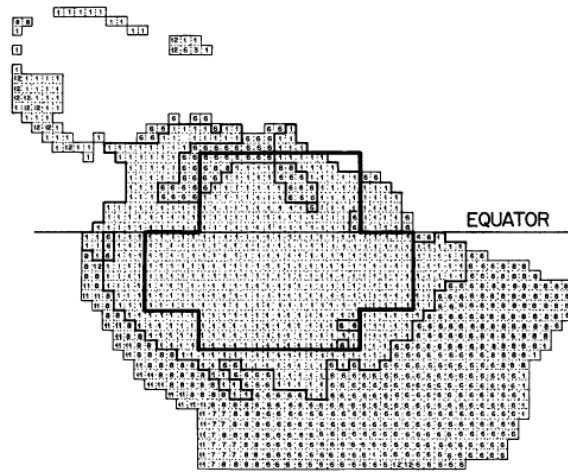


FIG. 3. Distributions of SIB vegetation types over tropical South America on a  $1^\circ$  by  $1^\circ$  long grid. The area of the Amazon tropical forests are encircled by the solid lines. The vegetation types are described in Fig. 2. The two areas shown (box I: northern Amazonia and box II: southern Amazonia) were used for areal averages as indicated in the text.

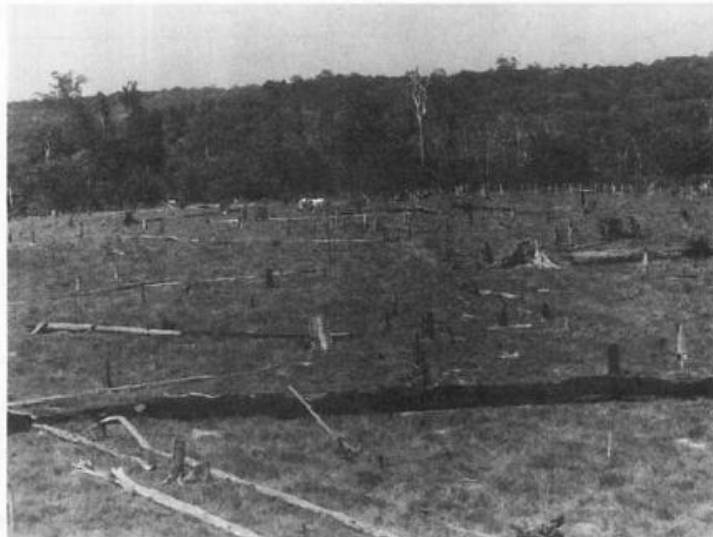


FIG. 4. Photograph of an area in central Amazonia, 100 km north of Manaus, (approximately at  $2.0^\circ\text{S}$ ,  $60^\circ\text{W}$ ) showing a typical pasture in Amazonia. Secondary forest bordering the pasture appears in the background.

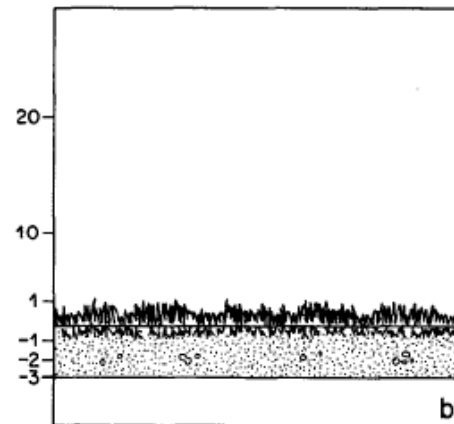
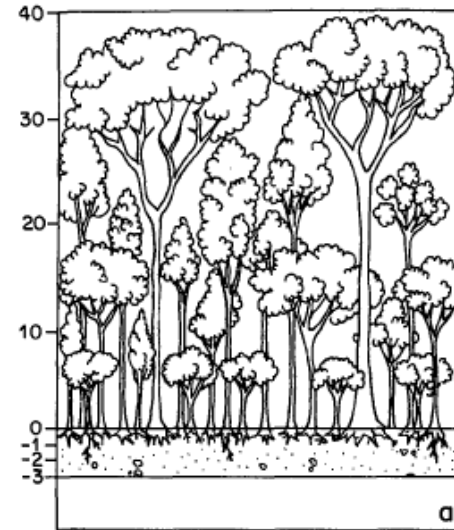


FIG. 5. Schematic diagram depicting the morphologies of (a) the forest and (b) degraded pasture scenarios used in the study.

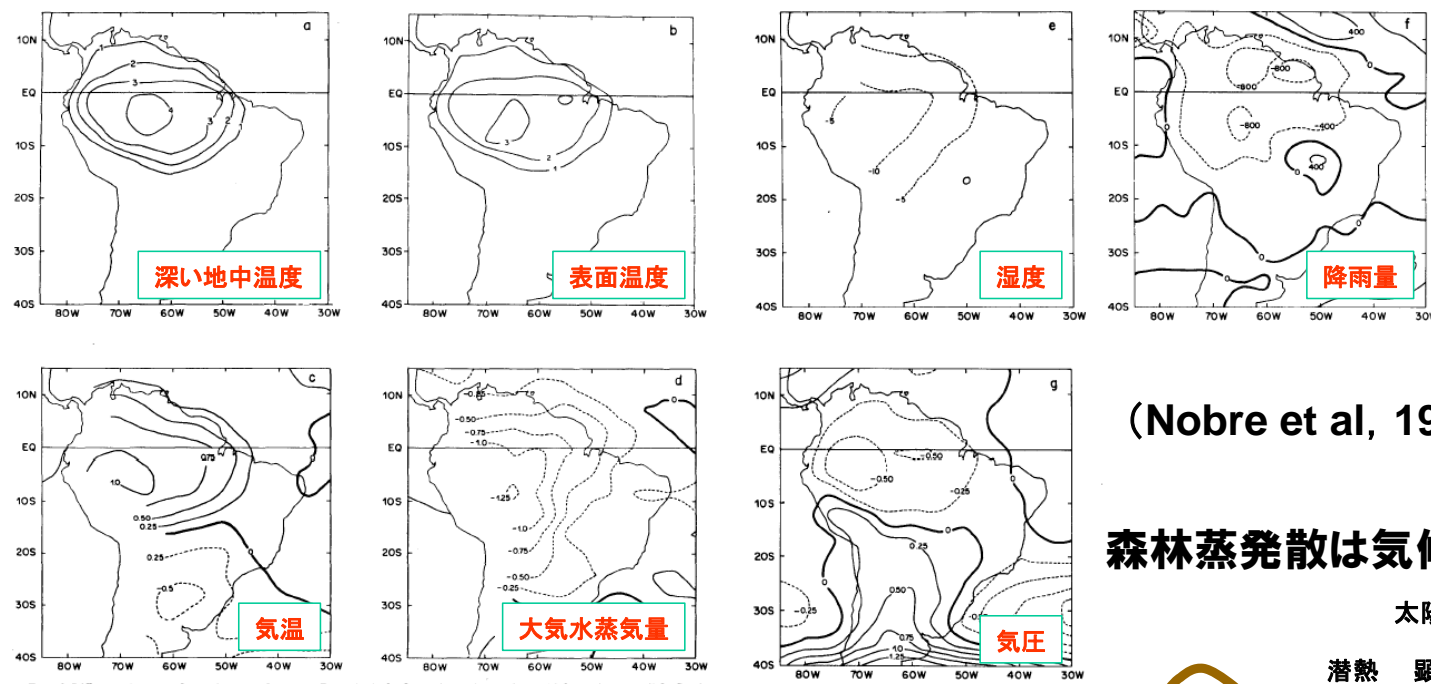
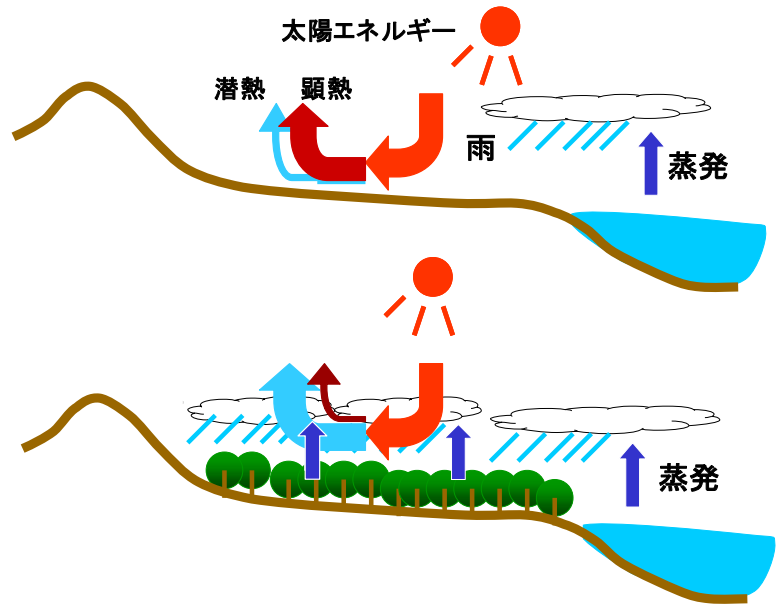


FIG. 10. Differences between 12-month means (January to December) of deforestation and control cases (deforested - control) for South America: (a) deep soil temperature ( $^{\circ}\text{C}$ ), (b) surface temperature ( $^{\circ}\text{C}$ ), (c) 850 hPa temperature ( $^{\circ}\text{C}$ ), (d) 850 hPa specific humidity ( $\text{g km}^{-3}$ ), (e) 850 hPa relative humidity (percent), (f) total precipitation (mm), and (g) sea level pressure (hPa).

(Nobre et al, 1991. J. Climate 4;957)

**森林蒸発散は気候システムにまで影響する**



大陸レベルでは、森林が無くなると雨が降らなくなる。地表面における太陽エネルギーの利用の仕方が変わる。

**対流・気候システムまで変わりうる。**

**観測により  
アマゾンの雨は50%が森林蒸発散由来である  
ことが確認されている。**

ことが確認されている。

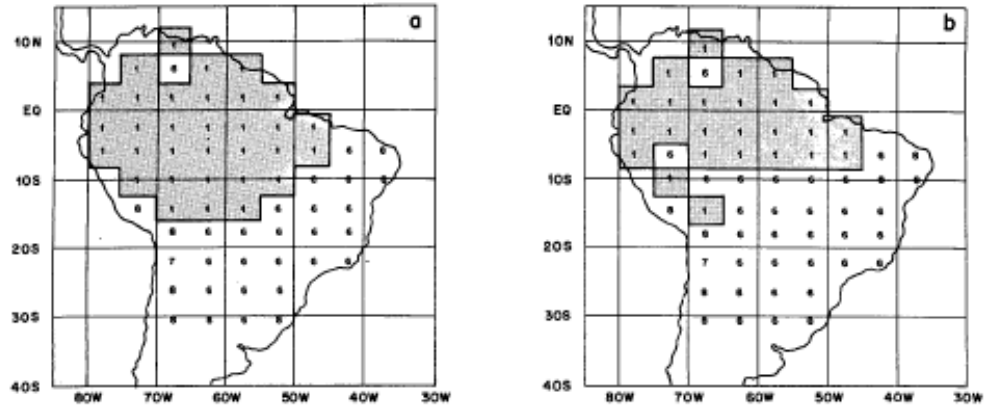
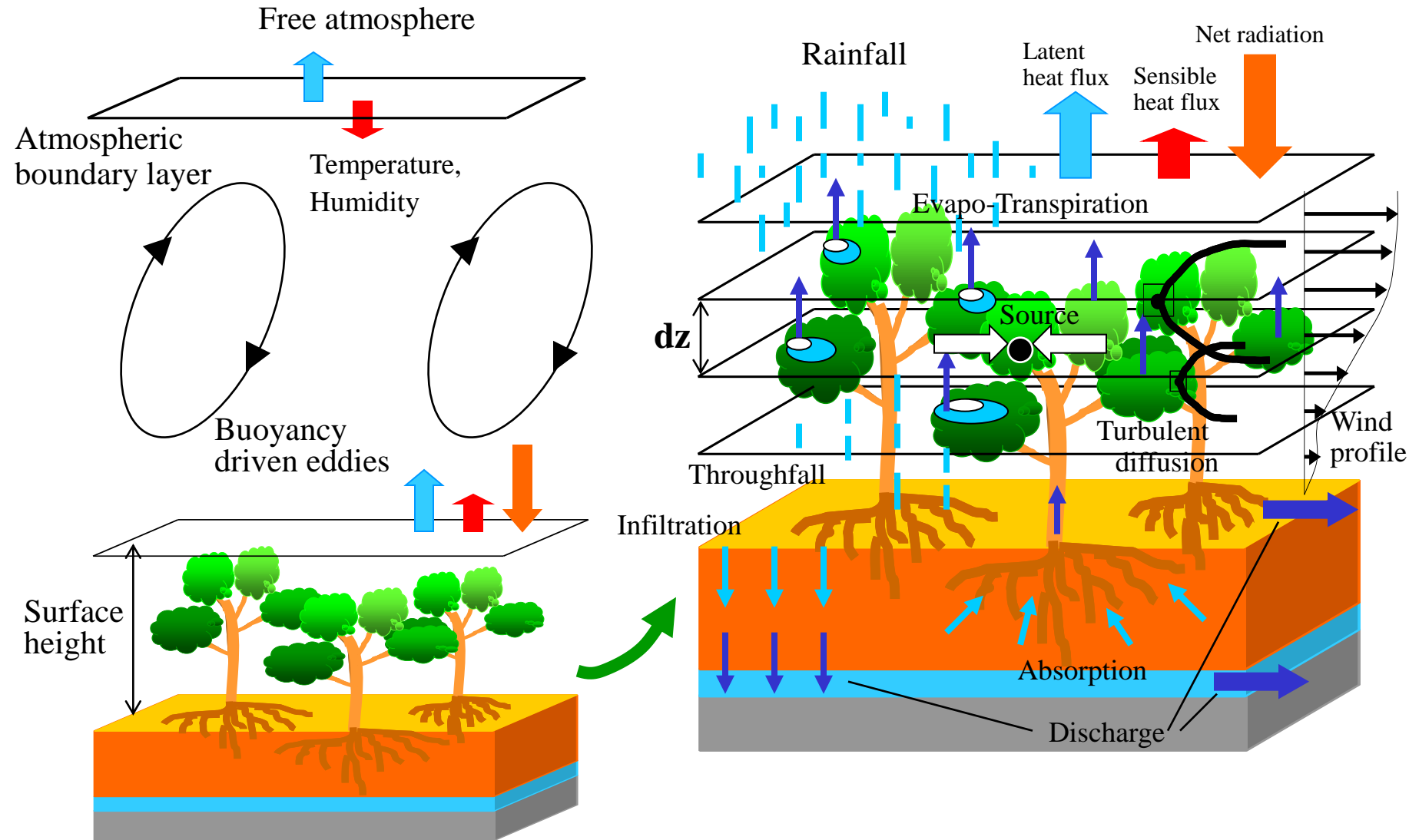


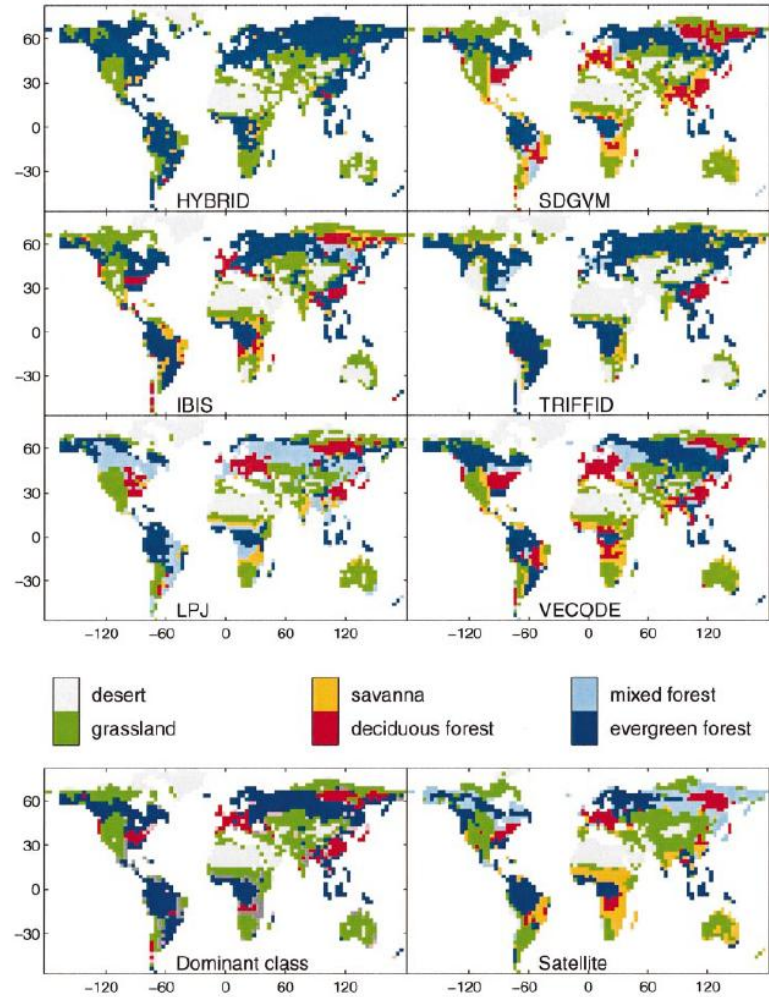
FIG. 27. Bioclimatology for the control case (a, current bioclimatology) associated with deforestation (b, revised bioclimatology after deforestation such as the analysis of the vegetation stress index fields shows). The shaded area with "1" is tropical forest, "6" refers to cerrado. The forest boundary is depicted by the heavy solid line.

**土地改変により変わった環境(森林)は2度と戻らない。**

# Schematic representation of the coupled soil-plant-atmosphere model

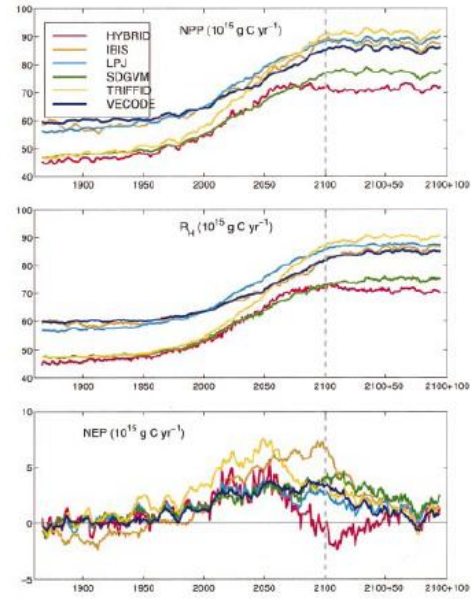
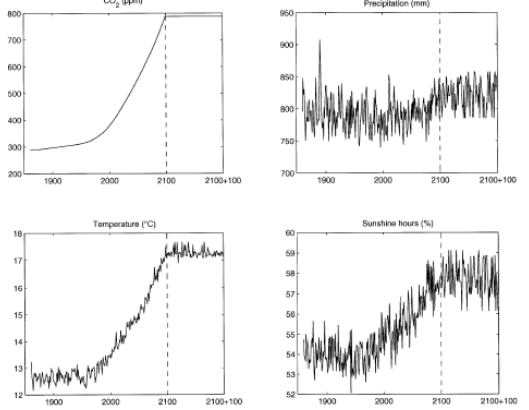
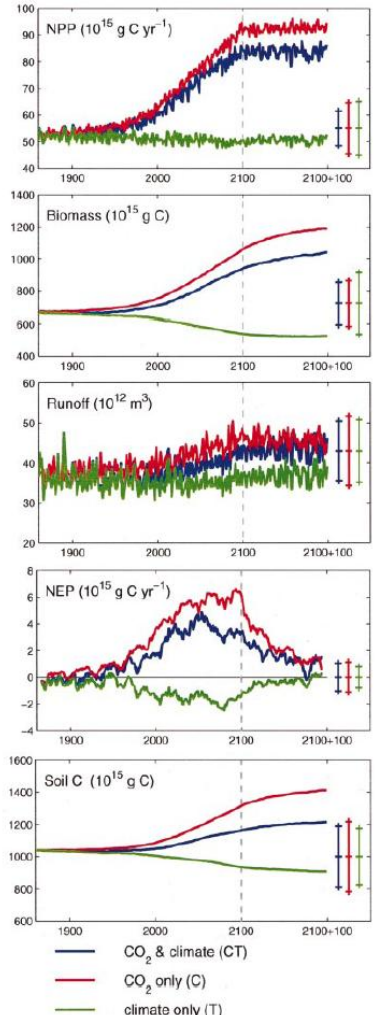


# Cramer et al. (2001: *Climate Change Biol.*, 7, 357)



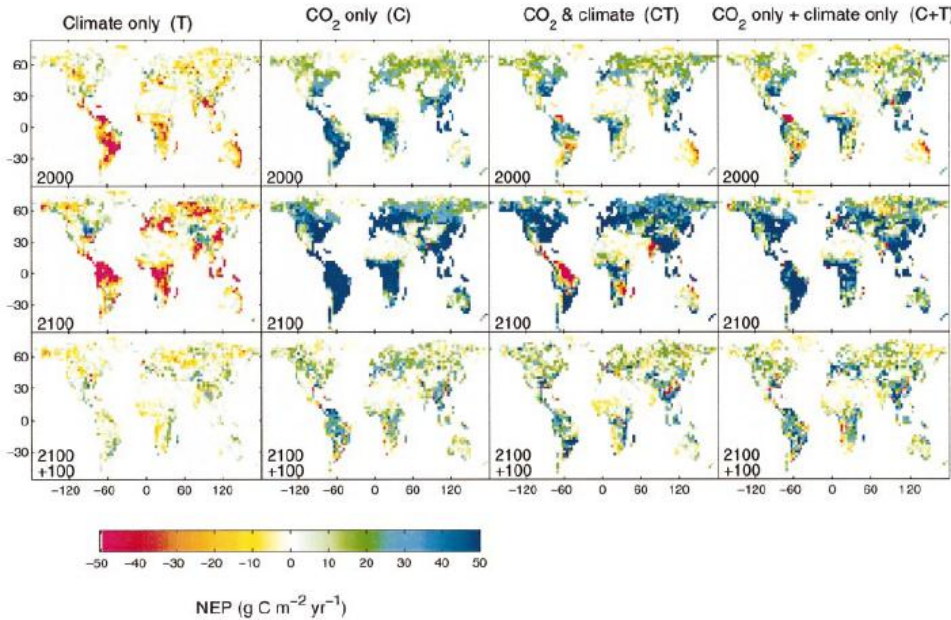
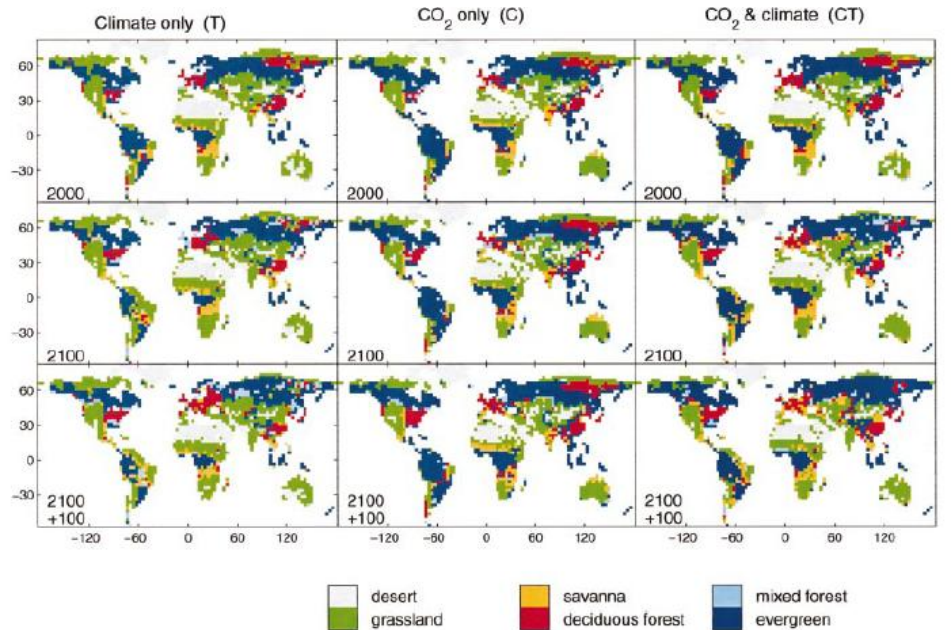
↑ モデルでこんなにも結果が違う。そもそも、あまり良い感じじゃない・・・。

## 実験設定

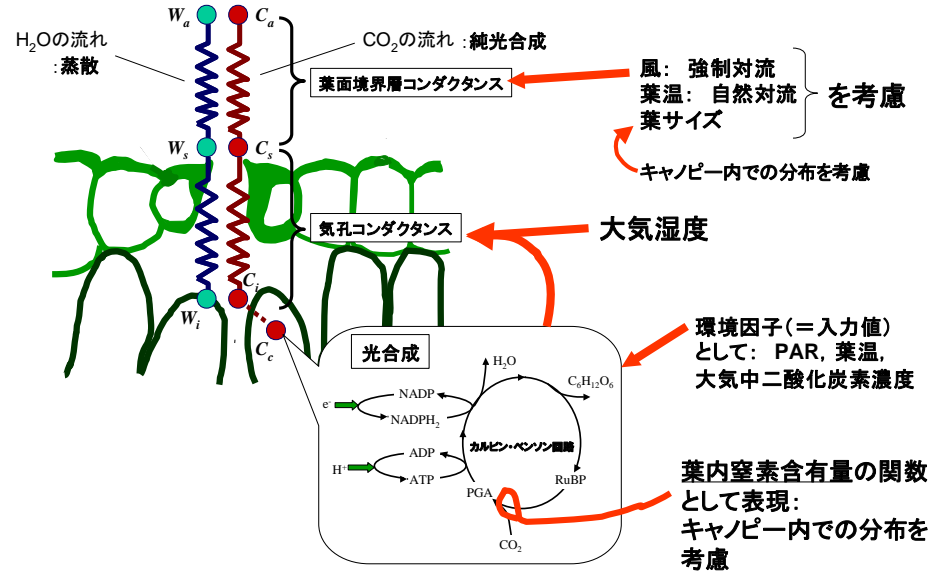


↑ モデルでこんなにも結果が違う。

## 数値実験結果



植物生理学的記述はかなり細かいところまで行っている。



### 炭酸ガス同化(光合成)の基礎式

$$A = Gc(C_a - C_i)$$

$$= GcC_a(1 - C_i/C_a)$$

気候システム・水循環・物質循環の結果としての  
 大気湿度、土壌水分、栄養の関与

数値実験結果:  
 CO<sub>2</sub>と気候因子それぞれの影響度評価

二酸化炭素が増えるので、

・気孔が閉じ気味になる。  
(Wullschleger & Norby, 2001)

・気孔の数が減る。→

結果、蒸散が減る？  
光合成が増える？  
光合成が減る？  
変わらない？

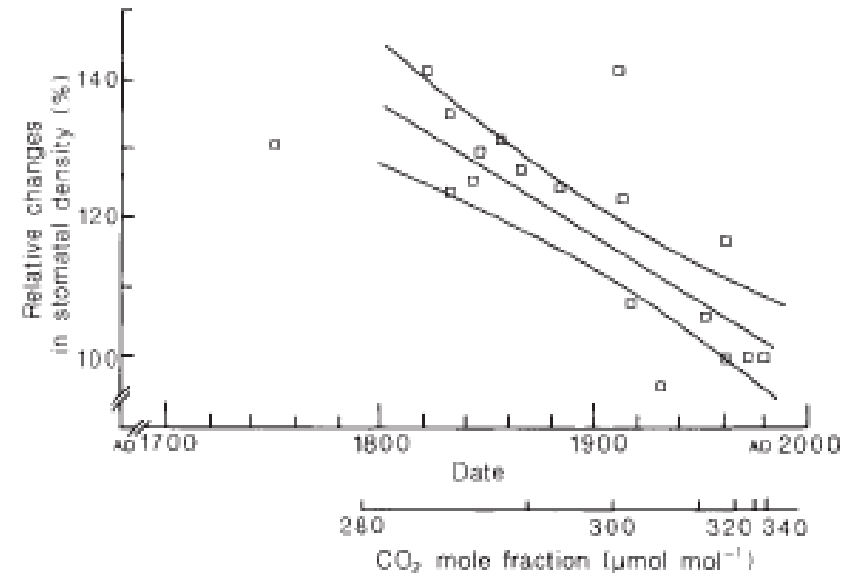


Fig. 1 Abaxial stomatal densities of herbarium stored leaves of *Acer pseudoplatanus*, *Carpinus betulus*, *Fagus sylvatica*, *Populus nigra*, *Quercus petraea*, *Q. robur*, *Rhamnus catharticus* and *Tilia cordata*. Leaves had been stored in the herbarium in the Department of Botany, University of Cambridge. Only leaves on reproductive shoots were sampled, with the assumption that these leaves had developed in full irradiance. Five leaves of each species were sampled from different dates, back to AD 1750, and from collections made in the midlands of England. Stomatal densities varied between species by a factor of about two, however the changes in stomatal densities relative to the recent collections (1970 to 1981) were similar for all species. Reconstructed changes in atmospheric CO<sub>2</sub> based on ice-core studies<sup>1</sup> are also included. The linear regression line, with 95% confidence limits, shows a 40% reduction in the ratio of stomatal densities over a period of 200 years,  $r = -0.828$ .

Woodward (1987; Nature)

# デューク大学演習林

## Duke Forest

FACEとは？

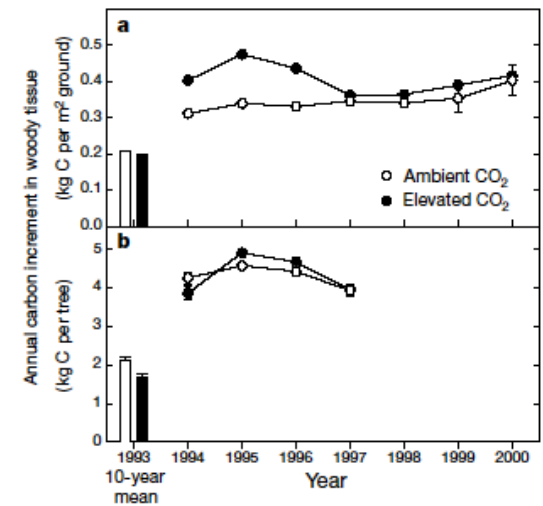
Free

Air

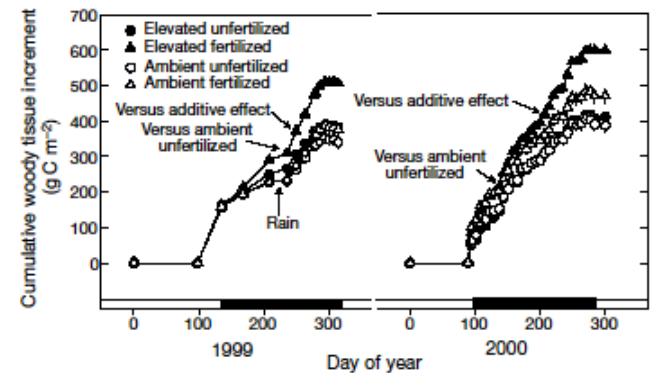
Carbon dioxide

Enrichment

experiment



**Figure 1** A comparison of annual carbon increment under elevated atmospheric CO<sub>2</sub> concentration (initiated in 1994) and ambient concentration without nutrient addition. **a**, Plot-level comparison between the free-air CO<sub>2</sub> enrichment prototype (FACE<sub>2</sub>) and a nearby untreated, ambient CO<sub>2</sub> plot (in the past 2 yr, the number of untreated plots was increased to five). **b**, Individual tree comparison between trees in FACE<sub>2</sub> and trees selected at random from the entire stand. Data for 1993 are shown as means for the first 10 yr of the stand's life.



**Figure 3** Cumulative carbon increment in woody tissue under ambient and elevated atmospheric CO<sub>2</sub> concentration with and without the addition of nutrients. The carbon increment under elevated CO<sub>2</sub> without nutrient addition was never significantly greater than under ambient CO<sub>2</sub> ( $P > 0.05$ ). Arrows depict the earliest time in each growing season in which the carbon increment under elevated CO<sub>2</sub> with nutrient addition was significantly higher than the indicated treatment ( $P < 0.05$ ). The period of CO<sub>2</sub> enrichment in each year is indicated as a horizontal bar at the bottom. In 1999, drought-breaking rains (indicated) raised soil moisture in the root zone from 0.14 to 0.32 m<sup>3</sup> m<sup>-3</sup>. Error bars represent s.e.

二酸化炭素が増えただけでは、生産性は上がらない。

Oren et al. (2001: Nature, 411, 469)

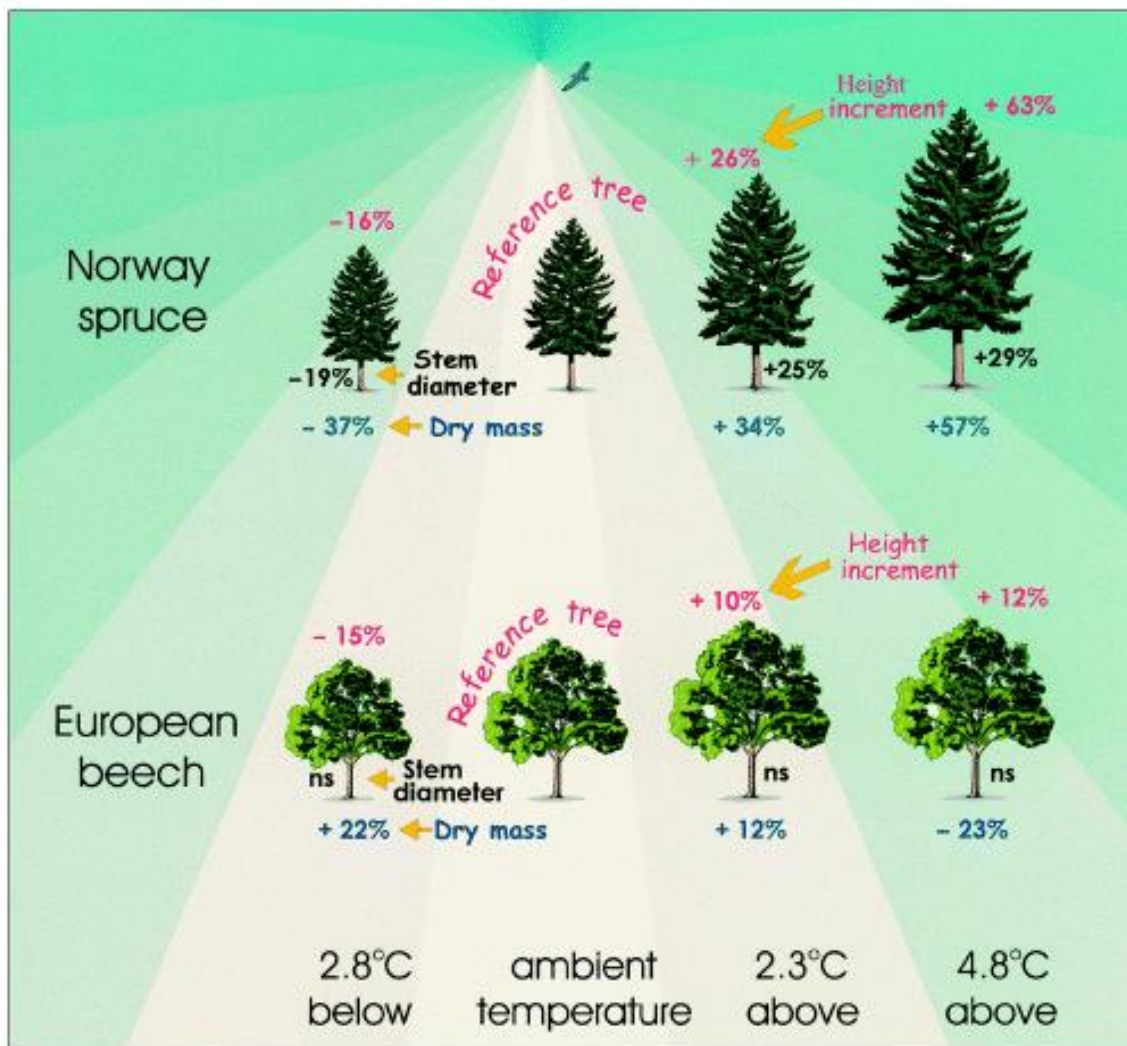


気温が上がるので、

- ・大気の蒸発要求能が上がる。
- ・土壌乾燥と根量増加の相互作用

CO<sub>2</sub>は不変

結果、蒸散が増える(かも知れない)。



北方林を昇温状態で種から育てた。

(Bruhn(1998)を

Saxe et al. (2001)が改変)

- ・樹種によって成長は色々。
- ・“種”の産地によっても色々。

結局、温暖化で光合成・蒸散がどうなるかわからない。

二酸化炭素濃度上昇で、

・葉面積が増える (Lichter et al., 2000)。

昇温で、

・葉面積が増える樹種もあれば  
減る樹種もある。(Bruhn, 2000)。

結果、温暖化で

遮断蒸発が増える(かどうかわからない)。

温暖化で

蒸発散が増える(かどうかわからない)。

二酸化炭素濃度上昇で、

- ・葉面積が増える (Lichter et al., 2000)。
- ・リターが増えて土壤有機物が増え、保水力が増えた (Nicklaus et al., 1998)。
- 
- 
- 
- ・Duke Forestにおける水収支研究：  
蒸散は減った (**理論通り**)。  
リターが増えて保水力が増えた (**理論通り**)。  
林床面蒸発が減って、樹木の水使用量は増えた (**予想外**)。 (Shäfer et al., 2002)



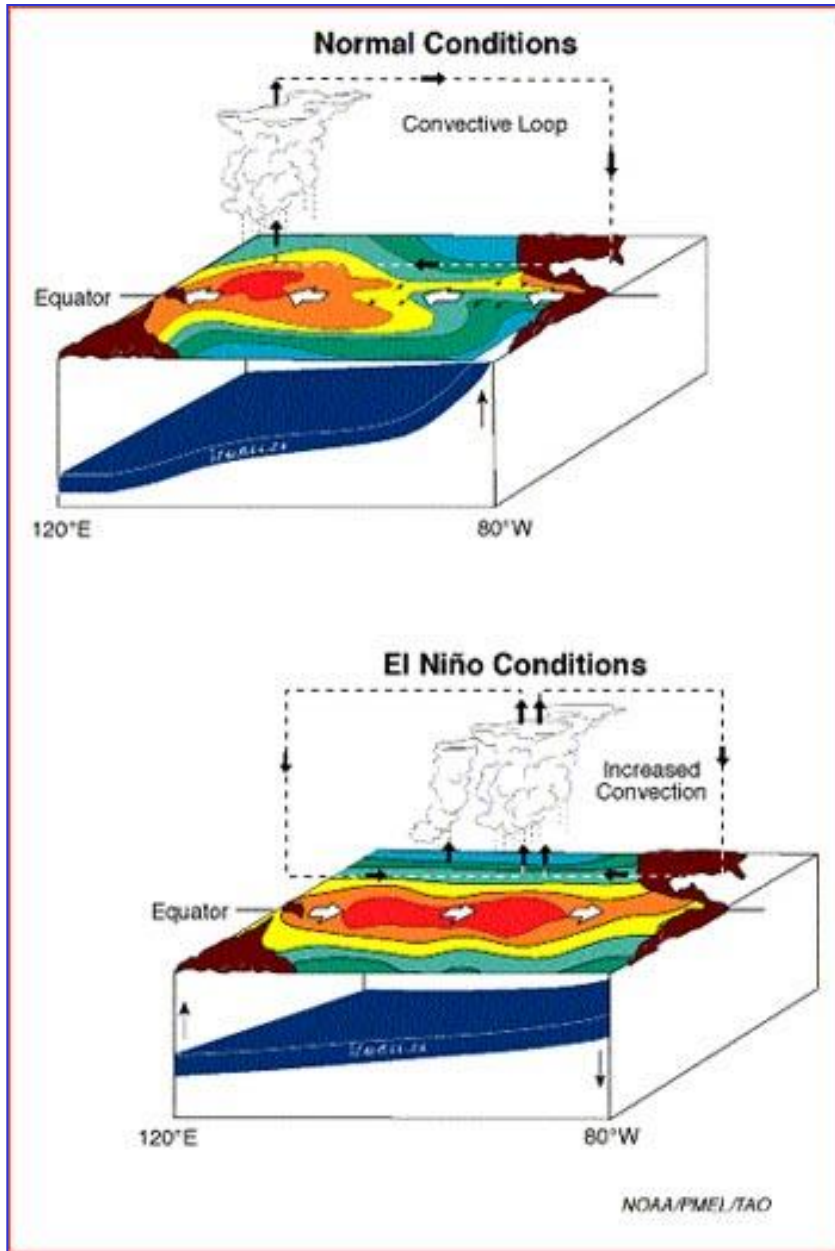
リター増加によって、林床面蒸発が減った。  
土壌中保水量が増えた。  
樹木が、より多くの水を使うようになった。

昇温で、葉面積が増える樹種もあれば  
減る樹種もある。(Bruhn, 2000)。

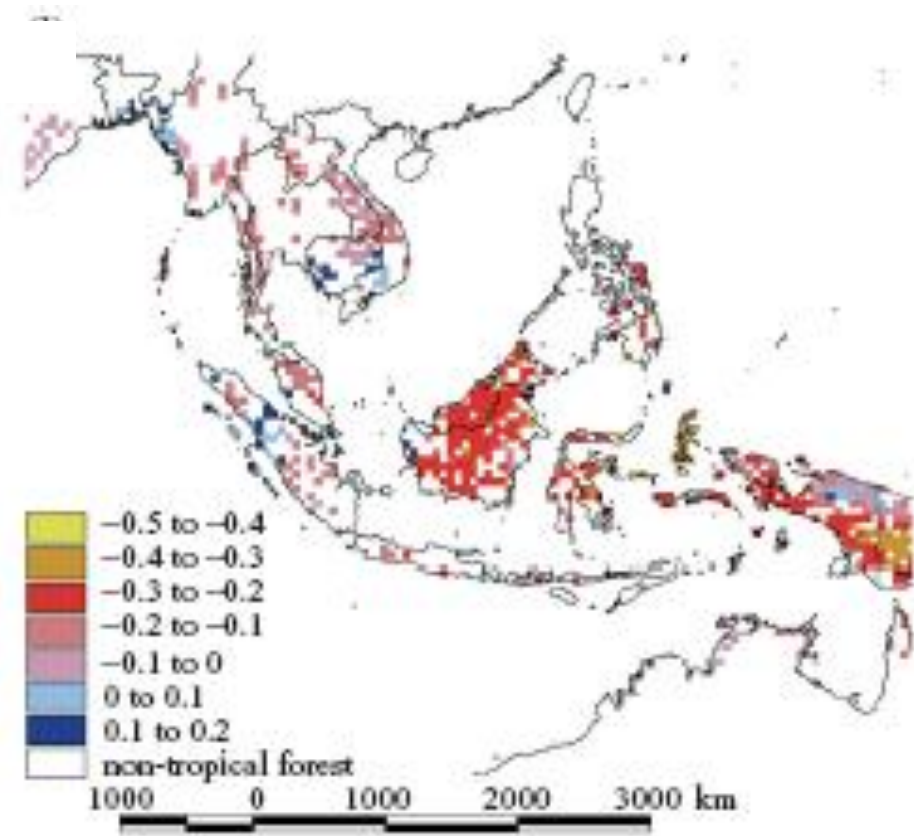
結局、温暖化で

リター生産が増えるかどうかどうかわからないので、

**保水性が増すかどうかわからない。**



**Inter-annual variation in rainfall**  
**Rainfall reduced by El Niño**



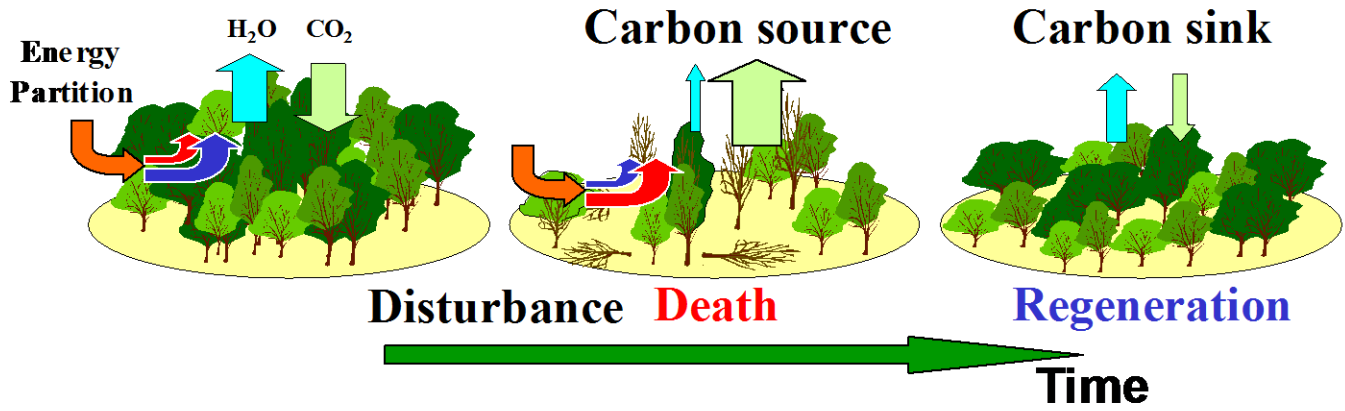
**El Nino Effect; Decrease in above-ground biomass**

1993-1996: 8.6 t/ha year      1997-2001: -4.5 t/ha year

**Increase in mortality**

1993-1996: 0.89 %/year      1997-2001: 6.37-4.35 %/year

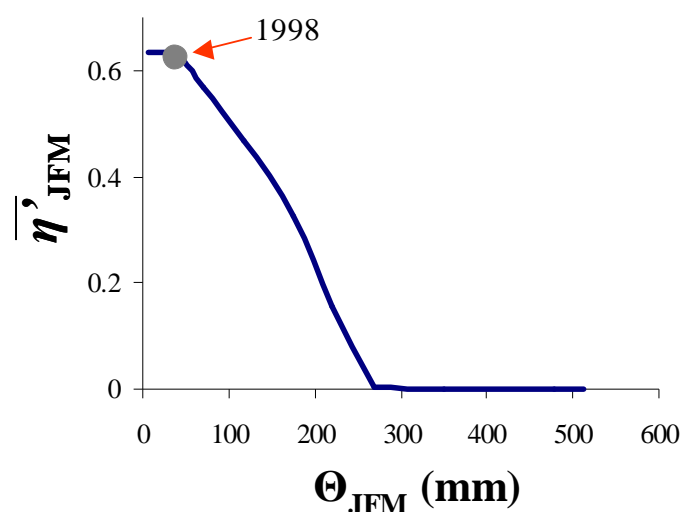
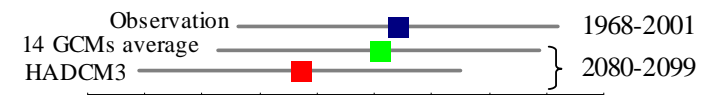
NOTE!! Mortality of Dipterocarpaceae had 12-30 times in 1997-2001.



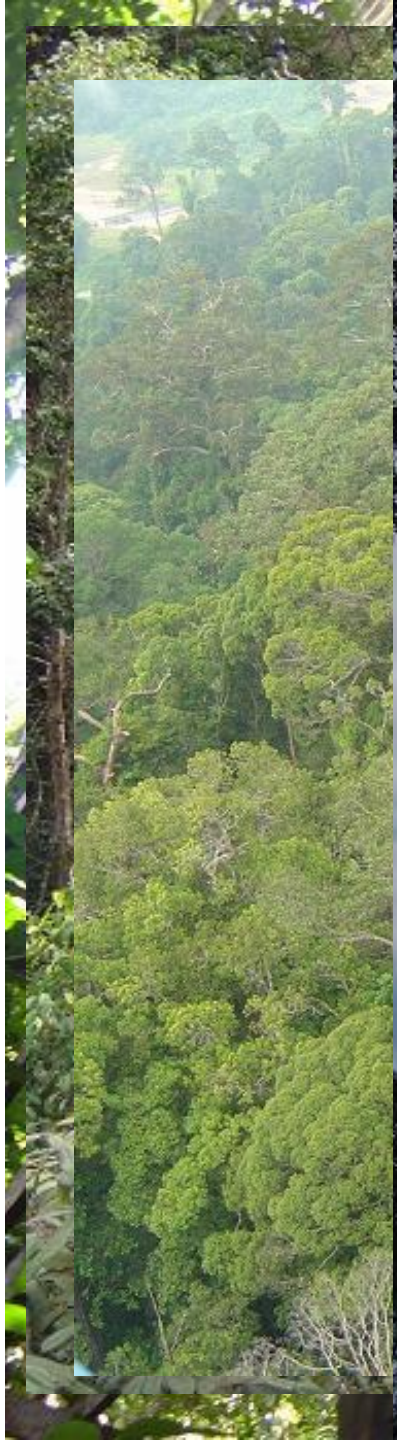
**温暖化** →

“エルニーニョによる乾燥”の**凶暴化**

Timmermann et al. (1999: *Nature*)  
Kumagai & Porporato (2011)











# マレーシア熱帯雨林

ランビルには、  
滅多に“乾燥”がやって来ない。

樹木は、水が十分あるという前提で生きている。  
→水がなくなると、死ぬ？

と言うより、

蒸散の乾燥に対する反応・水ストレスに対する生理反応が  
未だ解らない・・・のかも。

滅多にやって来ない“乾燥”が  
やって来たらどうなるのだろうか？

# Artificial Drought Experiment



**Nakashizuka (Tohoku Univ.) Project**

Five *Dryobalanops aromatica* and Six *Shorea beccariana*

Both species showed insensitivity of stomatal control to atmospheric demand.

*D. aromatica* is special!!



If severe drought comes.....

*D. aromatica* will suddenly die  
“without feeling stress”.

(図A)

■ ブナ林  
□ その他

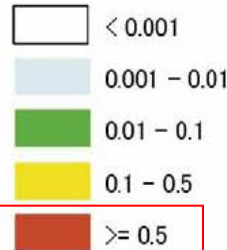
(A) 実際の分布

白神山地 →

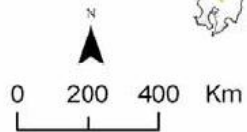
(B) 現在の気候

(C) 100年後  
(2091-2100)

(図B及びC)  
分布確率

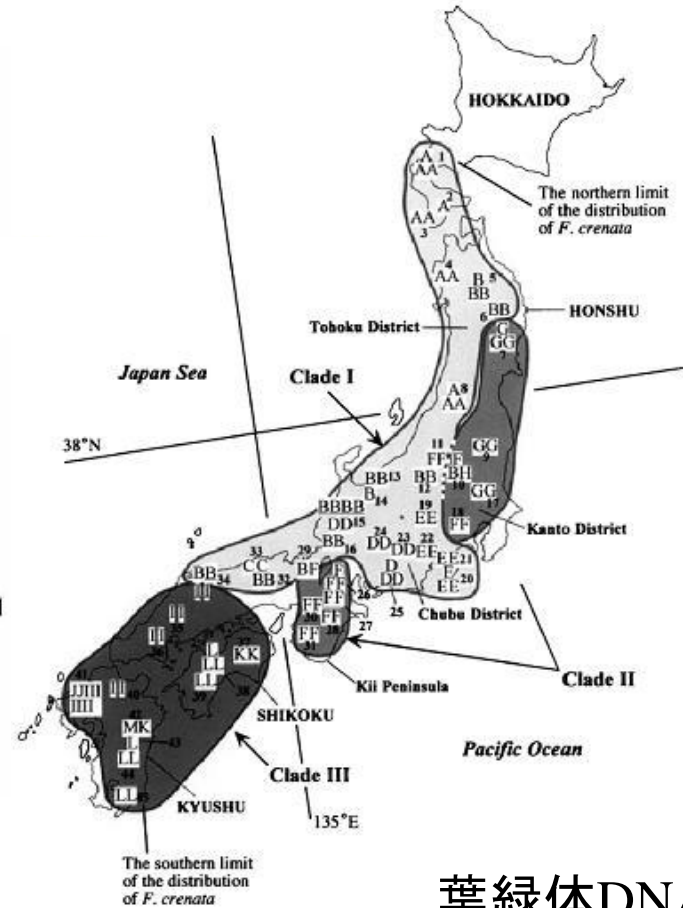


**ブナ最適分布**



## ブナ林の将来分布予測 (Matsui et al. 2004)

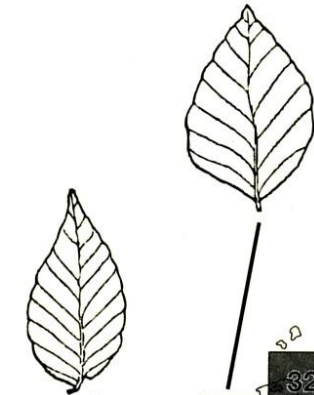
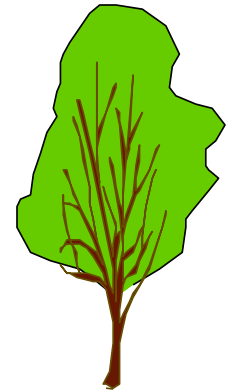
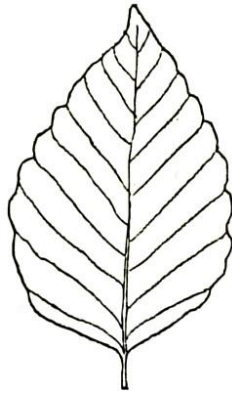
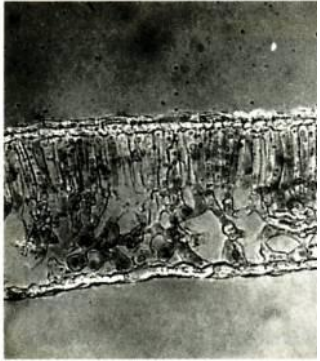
現在のブナ林分布を説明する環境因子を選択  
“統計モデル”を作り、現況と比較  
未来について“外挿”予測



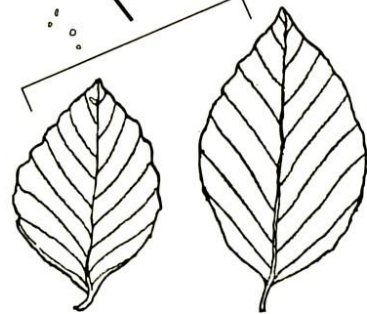
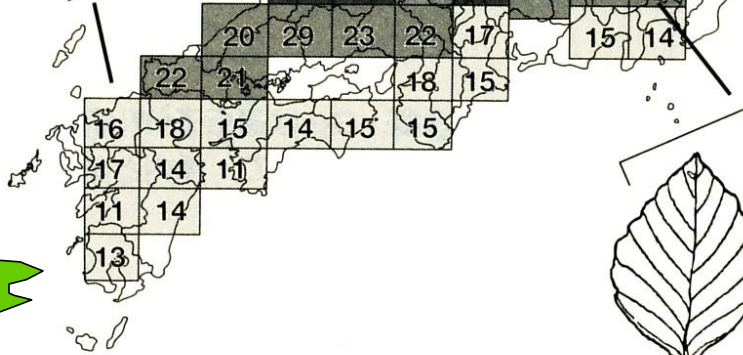
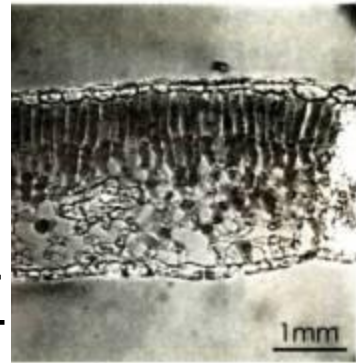
## 葉緑体DNAの 地理的分布 (Fujii et al., 2002)



北海道



伊豆



九州

数字は葉面積 (cm<sup>2</sup>)

(河野, 1974 ; 萩原, 1977 ; 小池, 2008)

# 温暖化に伴う植生分布域の変化を考慮する際重要なこと

同じ種でも、場所によって環境に対する対応が違う

GenotypeとPhenotype (Tateishi et al., 2010)

## 温度馴化・環境への不耐性の問題

繁殖中に経験した気象条件で子孫に影響が出る。: frost耐性の獲得 (Skoppa & Johnson 2000)

Norway spruceの最終氷期からの北上は異常に速かった。  
(Schwartz, 1991)

## 環境への耐性獲得の評価

**DNAレベルから考えた植生分布域変化評価**

15年前



現在



九州大学宮崎演習林  
三方岳自然林保全區



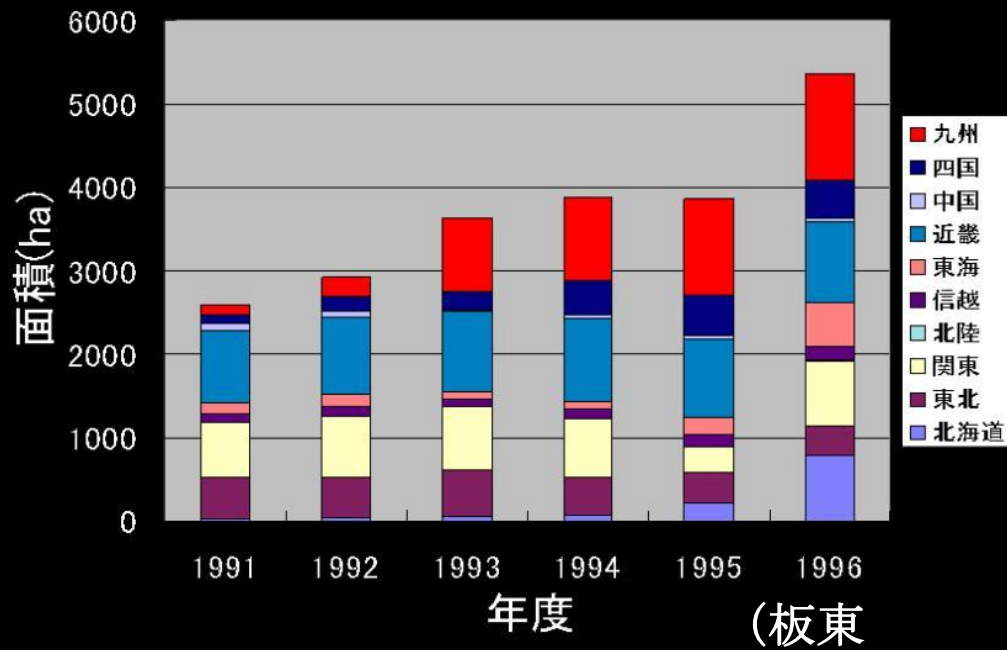


←  
ササの“幹”だけが残る

“公園的景觀”



## ニホンジカによる人工林被害面積の推移



## 世界遺産をシカが喰う シカと森の生態学

湯本貴和・松田裕之 編

1963



1997



“公園的景觀”の数々: 全て、九州大学宮崎演習林



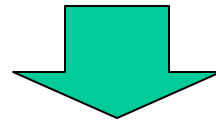
←  
“毒のある木”だけが残る

→  
谷は全部“毒のある木”

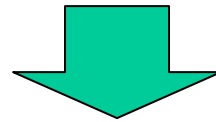




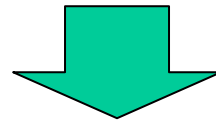
**温暖化で冬季致死率が低下**



**個体数増加＝食害増加**



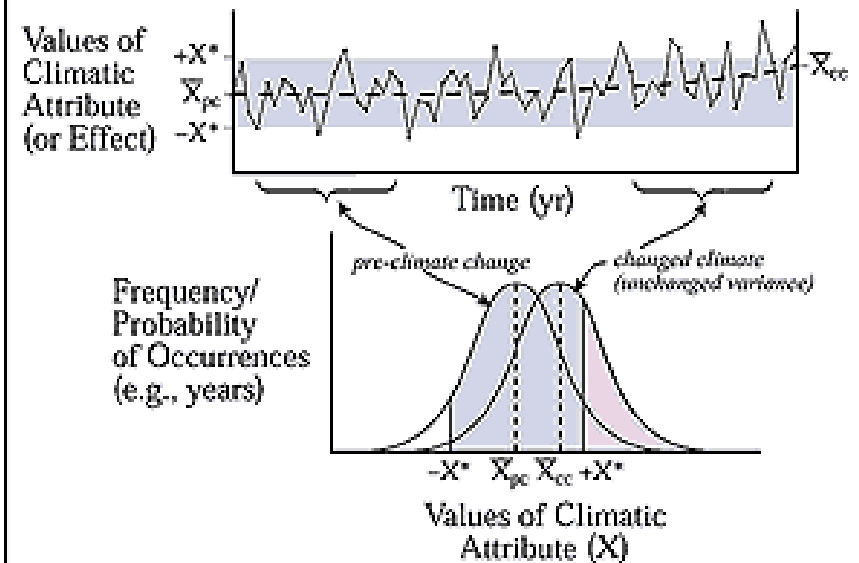
**植生崩壊**



**森林流域水収支の変化**

*Climate change is a stochastic problem because its features are related to variability and extremes, not simply changed averaged conditions.*

[From “CLIMATE CHANGE 2001, Impact, Adaptation, And Vulnerability”]



- - - Trend in mean value of  $X$  (20-yr running mean)

$\bar{X}_{pc}$  = Mean value of climatic attribute ( $X$ ) at start of time series (pre-climate change)

$\bar{X}_{cc}$  = Mean value of climatic attribute ( $X$ ) at end of time series (climate change)

$+X^*$  = Upper critical value of  $X$  for system of interest: values  $> +X^*$  are problematic and considered "extreme" or beyond "damage threshold"

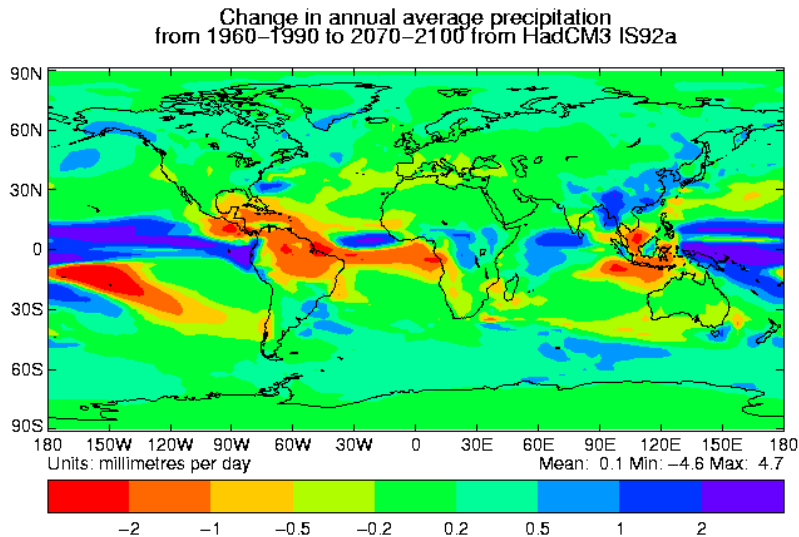
$-X^*$  = Lower critical value of  $X$  for system of interest: values  $< -X^*$  are problematic and considered "extreme" or beyond "damage threshold"

▭ Coping range or zone of minimal hazard potential for system of interest

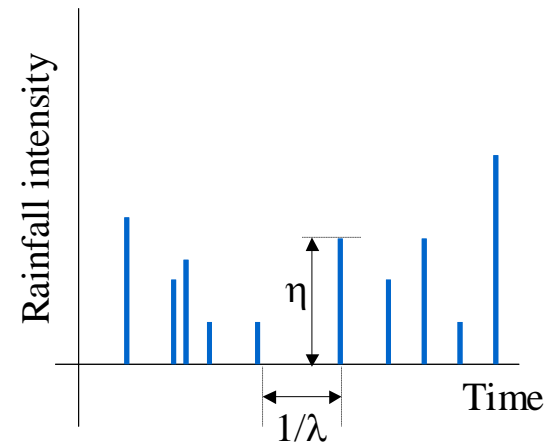
▭ Probability of "extreme" events (i.e., climatic attribute values  $> +X^*$ )

# 確率過程として未来の気候因子を表現する。 (Kumagai et al., 2004)

## Hadley Centre GCM output

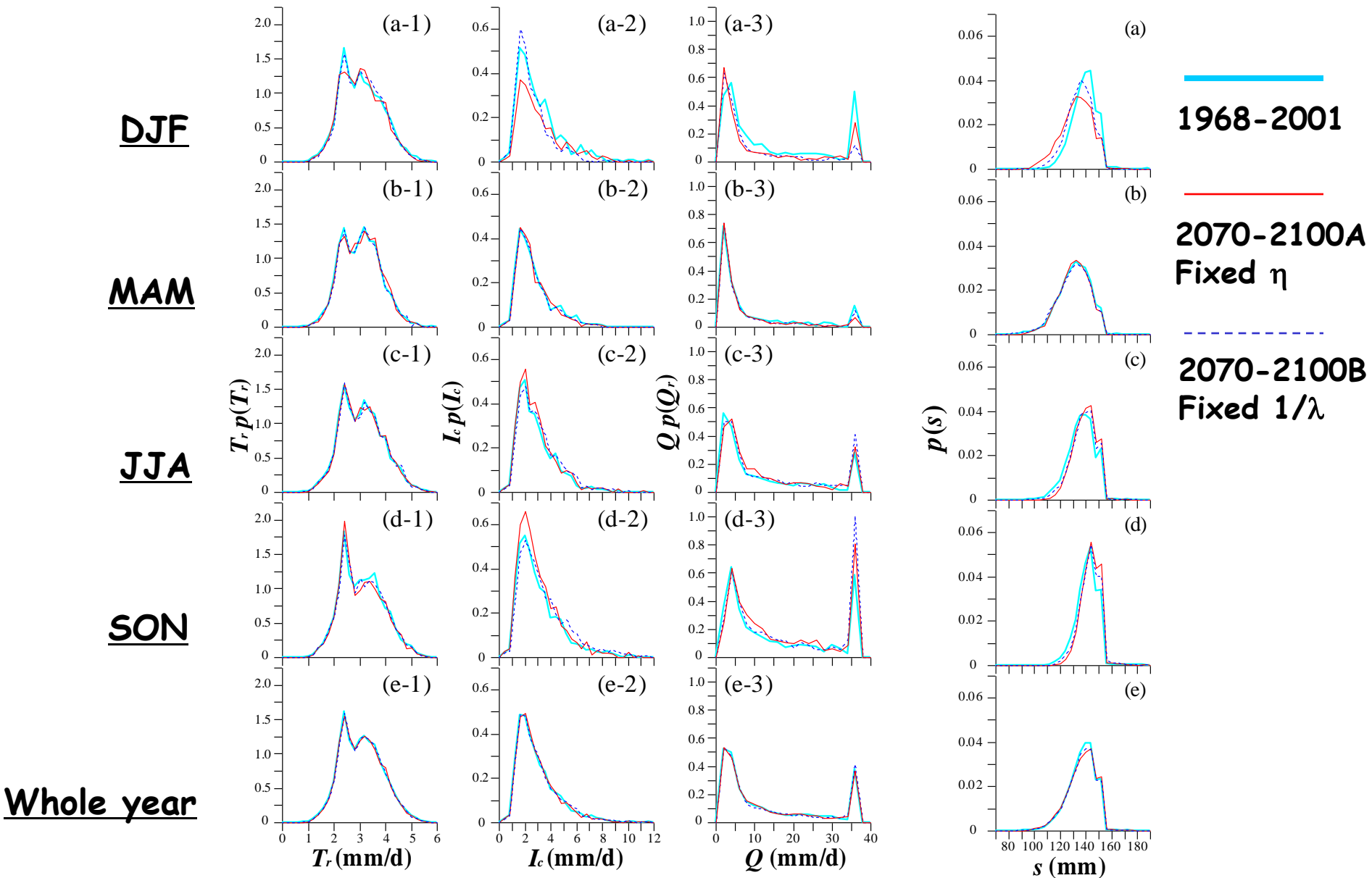


## Marked Poisson Process



$$f_T(\tau) = \lambda \exp(-\lambda \tau), \quad \text{for } \tau \geq 0$$

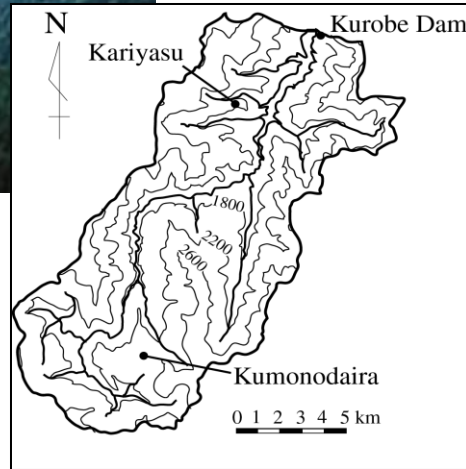
$$f_H(h) = \frac{1}{\eta} \exp\left(-\frac{1}{\eta} h\right), \quad \text{for } h \geq 0$$



**Kumagai et al., (2004)**

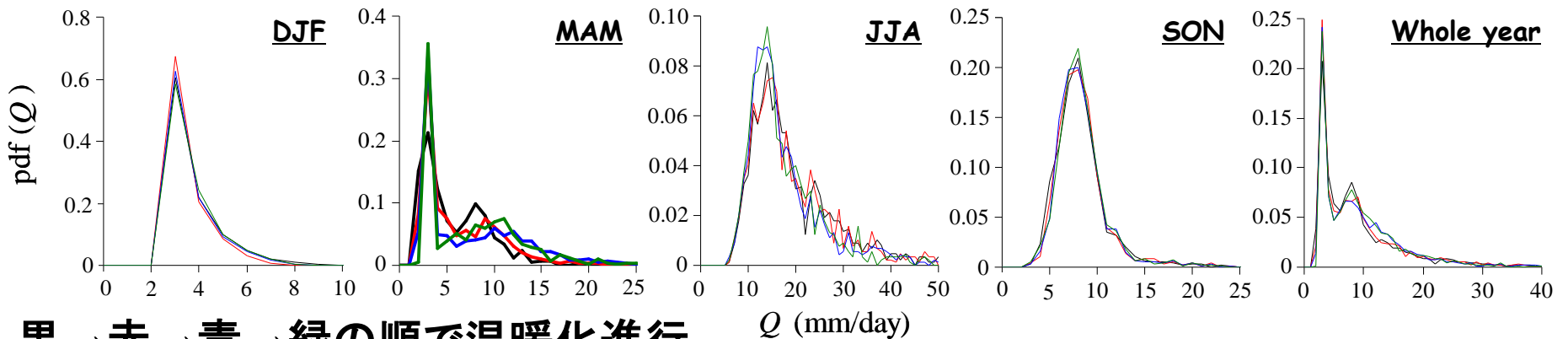


# 温暖化は高山流域からの流出にどのような影響を及ぼすのか？ (Shinohara et al., 2009)



重要なのは「年間の量」ではない。  
「季節への配分」である。

必要な時に水が無い、  
不必要な時に水がある、  
という事態を引き起こす。



黒→赤→青→緑の順で温暖化進行