

植生と気候との関係、 そのモデリング

佐藤 永 (海洋研究開発機構 / 東大院農学生命科学)



講師略歴

【佐藤永（さとう ひさし）】

海洋研究開発機構（JAMSTEC） 副主任研究員、1972年生まれ

18～22歳 @東京大学 理学部 生物学科 植物学教室

「21世紀はバイオの時代」と言われていた頃。分子生物学ばかり勉強したものの、進化生態学の世界に。

23～28歳 @九州大学大学院 理学研究科 生物学専攻

植物の性表現進化を研究。主な研究手法は、野外調査と野外操作実験。これで学位取得。

ちなみにこの間、大隅良典先生（2016年ノーベル賞受賞）のご実家に、月1万円の家賃で住んでました。

28～30歳 @九州大学農学部

最初のポスドク職。野外調査する予算が無かったので、ネタは同じで、研究手法を理論に移行。

31～37歳 @JAMSTEC／地球フロンティア

地球シミュレーター上で動かす「地球システム統合モデル」の開発チームにて、植生シミュレーターを開発。

38～41歳 @名古屋大学大学院 環境学研究科

特任准教授として教育にも少し関わる。

42歳～現在 @海洋研究開発機構（JAMSTEC）

元の職場に戻る。テニユアトラック採用→順調に定年制雇用に移行し、やっと安定しました。

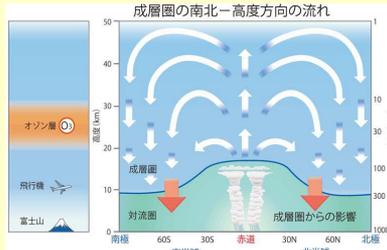
51歳～現在 @東京大学大学院 農学生命科学研究科

連携准教授として、再度、教育にも関わらせていただくことになりました。

コンテンツ

1. 気候モデル発達の歴史
2. 気候に対応した植生分布
3. 気候エンベロップモデル
4. 気候エンベロップで扱えない諸問題
5. 動的全球植生モデル (DGVM)
6. DGVMの現状と課題

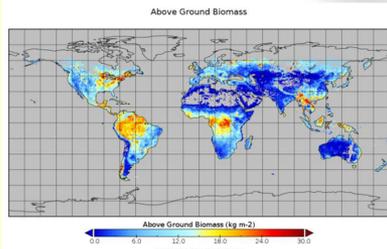
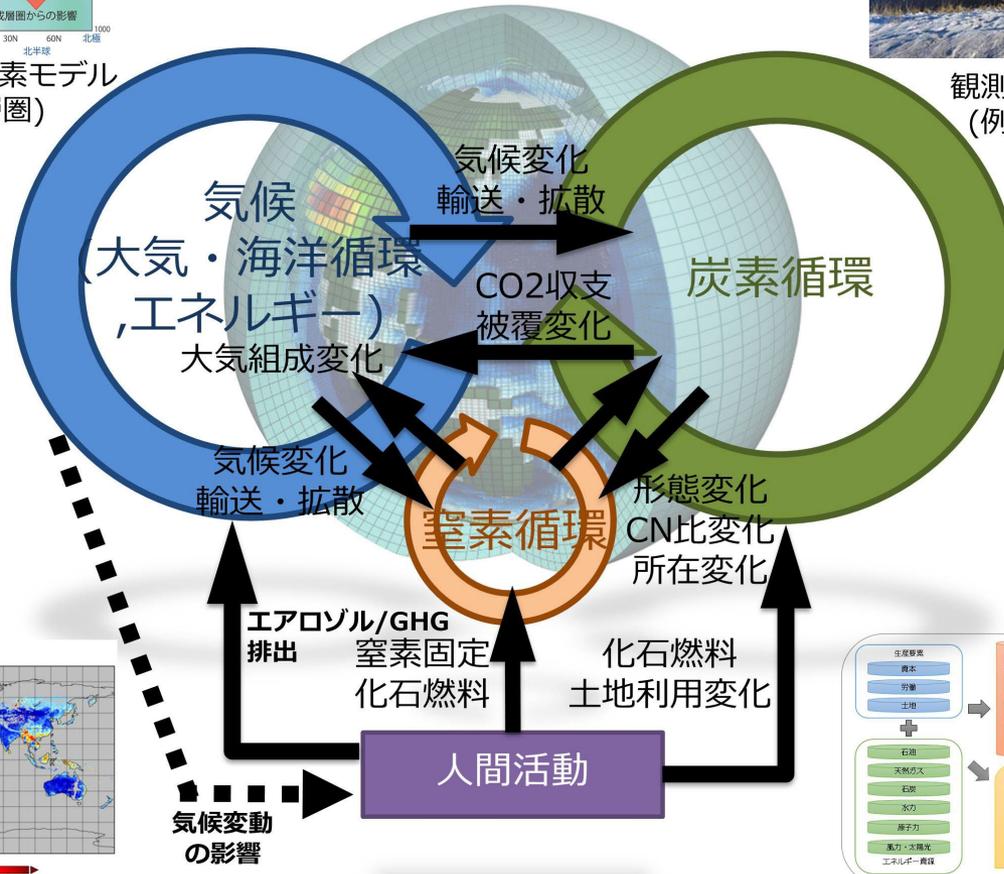
地球システム統合モデル



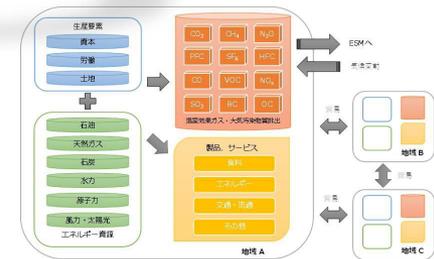
素過程理解と先端要素モデル
開発 (例：成層圏)



観測研究との連携
(例：永久凍土)



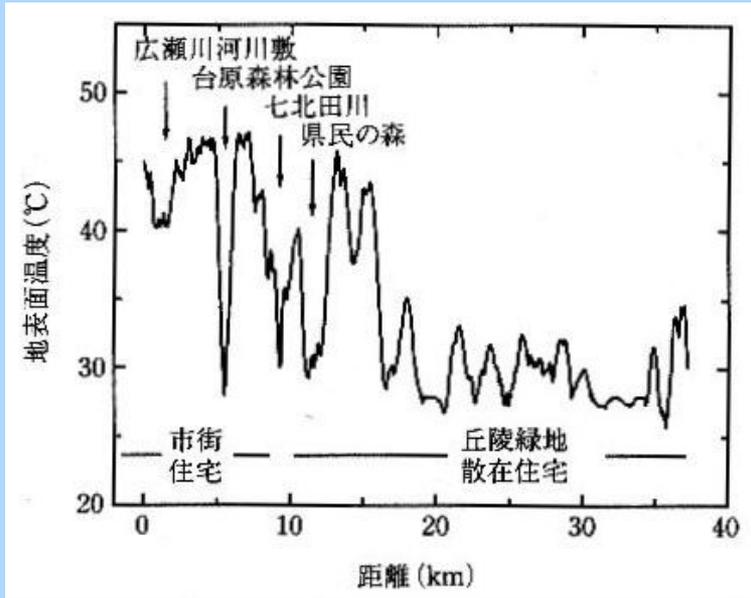
衛星データを用いた評価解析



社会経済モデルとの連携

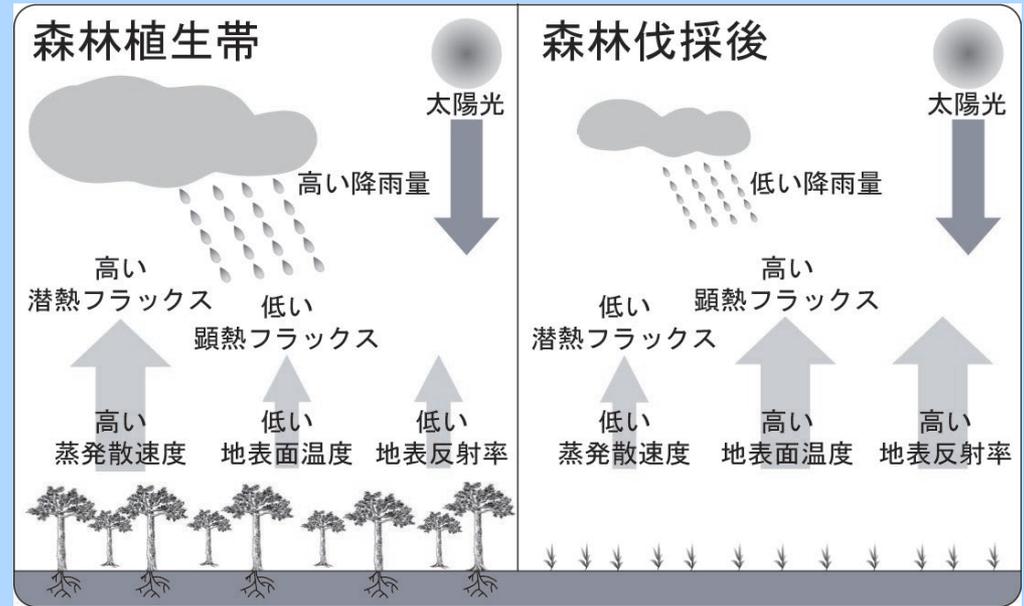
植生から気候環境へのフィードバック（熱・水・放射）

真夏の昼間に、ヘリコプターで観測した地表面温度@仙台市



出典: 近藤純正「地表面の気象学」、データ元: 菅原広史

熱帯・温帯域において、森林伐採が水収支・境界層フラックス・気象へ与える影響



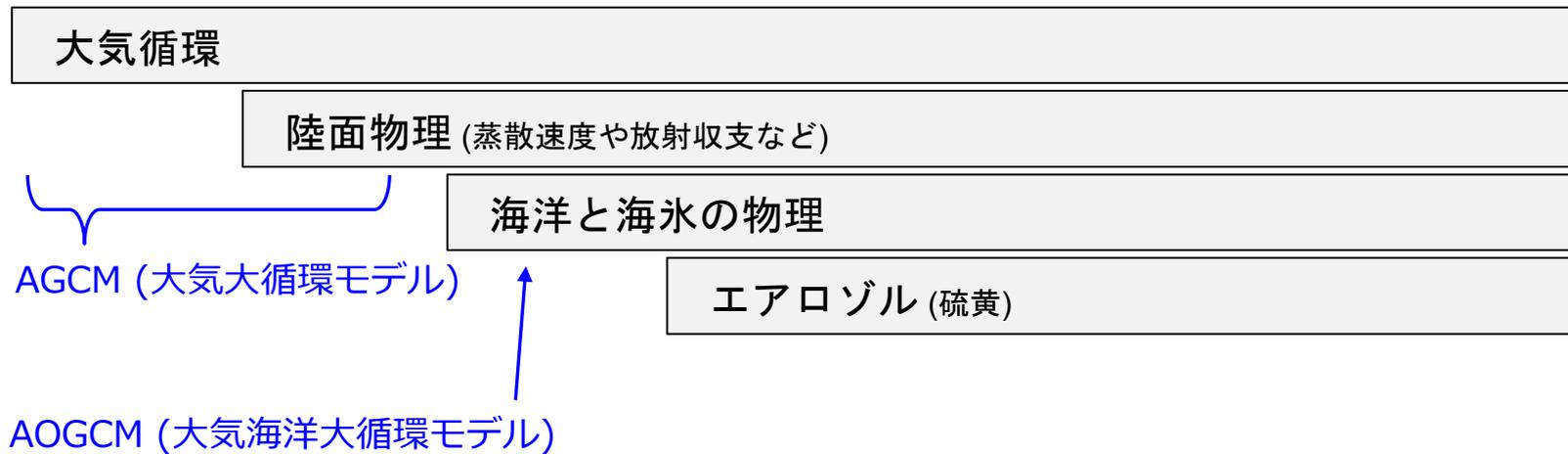
出典: 佐藤永(2008) 日本生態学会誌 58、原図: Foleyら(2003) *Front Ecol Environ* 1

森林が存在することで、例えば年平均気温は一般に

- ・ 低～中緯度帯 → 下降
- ・ 高緯度帯 → 上昇

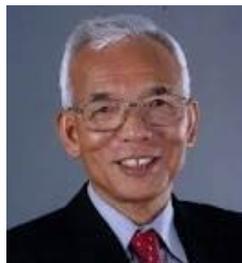
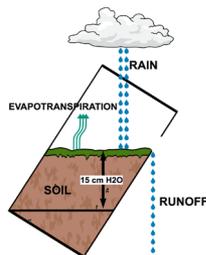
気候モデルの発達

1970年代 1980年代 1990年代 1990年代 2000年 2000年代 2010年代
 中旬 中旬 中旬 下旬 前後 月上旬 月上旬



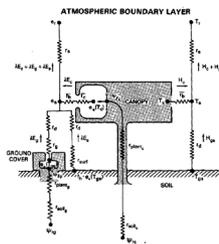
この時代の関連する陸面物理モデルと鍵となる論文

BudykoのBucket model



Manabe (1969)
MWR 97

SiB, SiB2

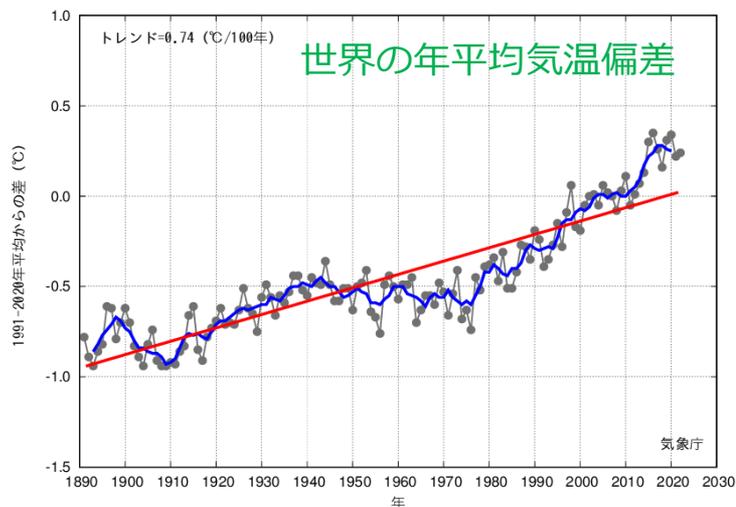


Sellers et al. (1986)
J. Atmos. Sci. 43

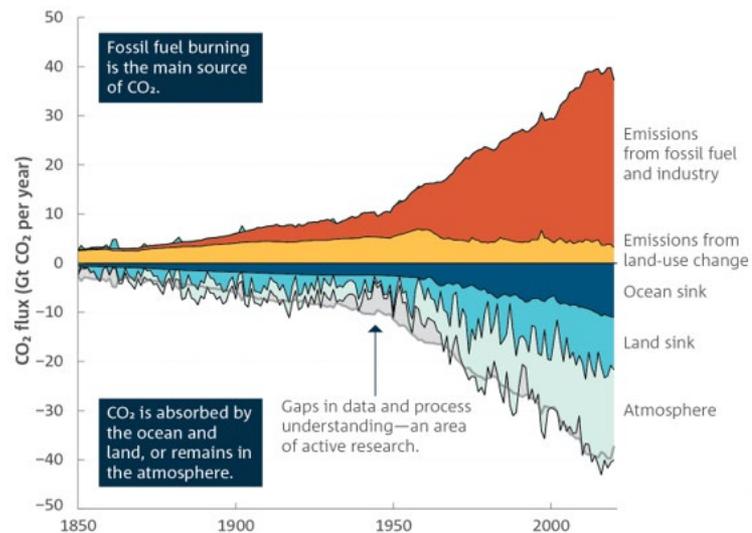
従って、気候モデル（数10～数100年先の気候を予測するモデル）は、ごく初期の段階から陸面物理が考慮されていた。

炭素収支を通じた全球気候への影響

1990年代以降、大気中の温室効果ガスが気候変動をもたらすという懸念が広まり、人類が排出したCO₂の量と、その行方について研究が進んだ。

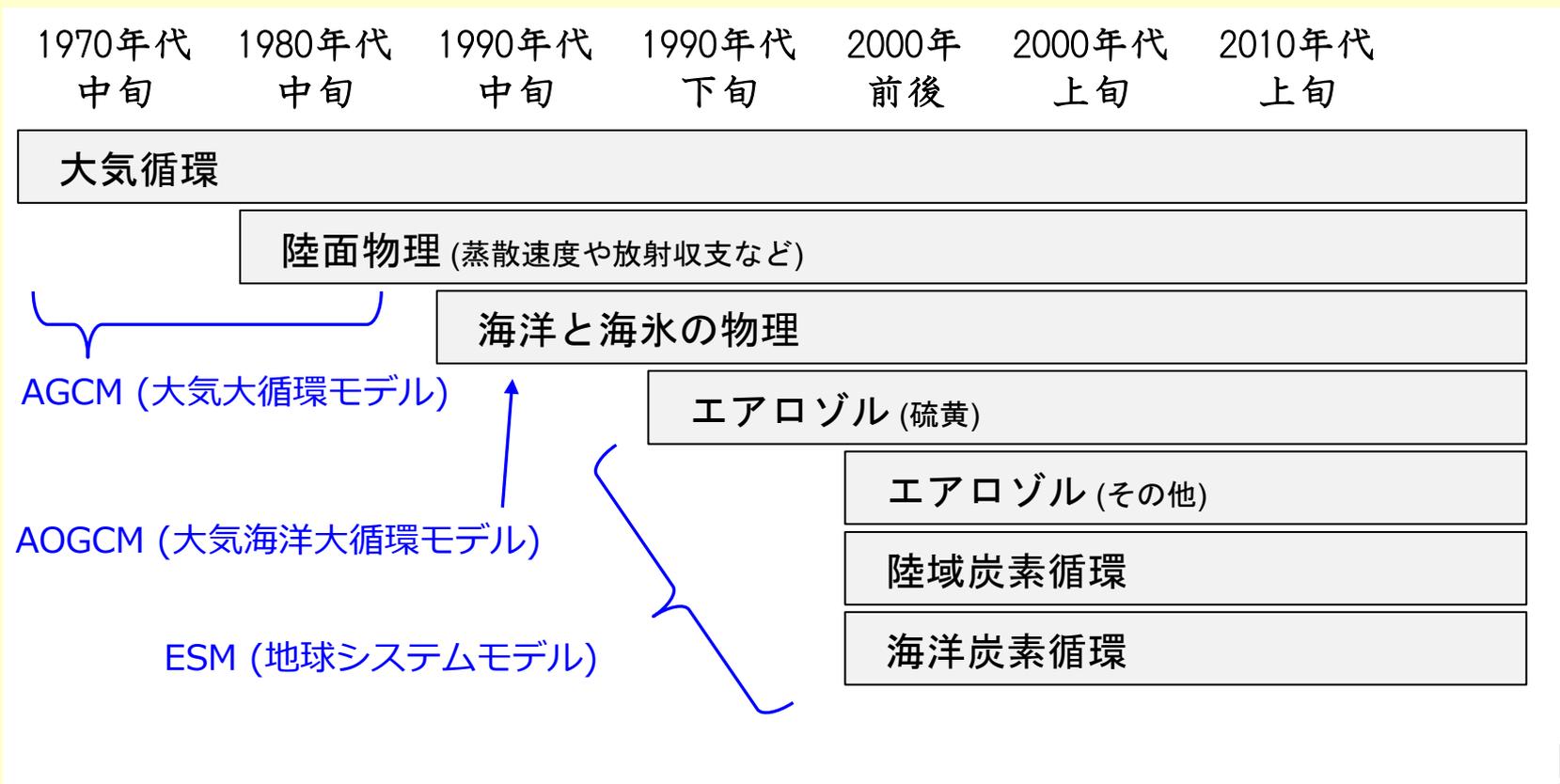


上半分：人為的CO₂の大気への排出フラックス時系列変化
下半分：大気中CO₂吸収フラックス時系列変化



その結果、これまでの化石燃料の燃焼と土地利用によって排出されたCO₂のうちその少なくとも半分くらいは、海洋と陸面に吸収されたと見積もられている。

気候モデルの発達



そのため、気候モデルに簡単な生物過程モデルが結合された。このあたりから、長期気候変動シミュレーションに用いられるモデルは**Earth System Model (ESM)** と呼ばれるようになった。

Cox et al. (2000)の衝撃

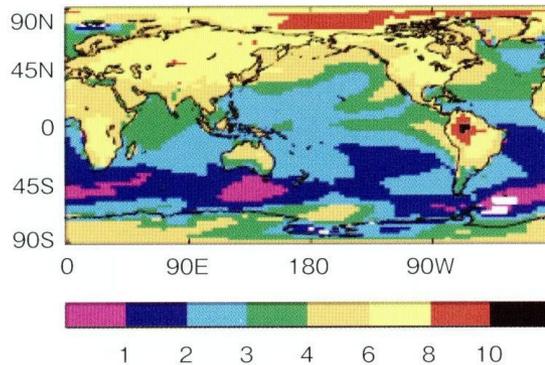


気候変動シミュレーションにおける動的植生の影響

@IPCC IS92a "Business as usual" 炭素排出シナリオ

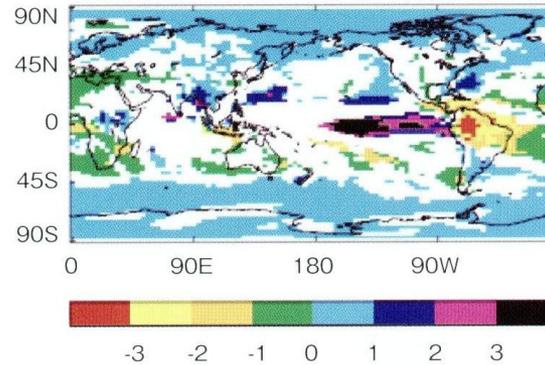
気温

(a) Screen Temperature (K)



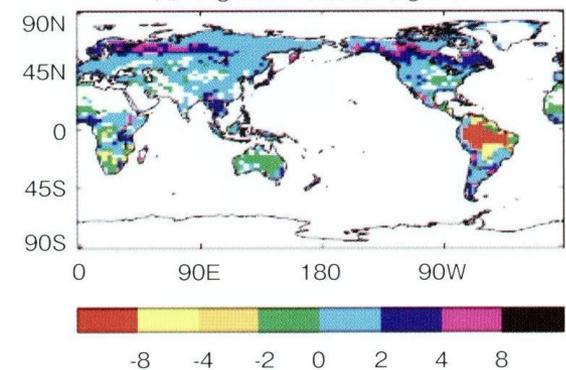
降水量

(b) Precipitation (mm day⁻¹)



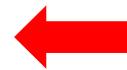
植生炭素

(c) Vegetation Carbon (kg C m⁻²)



1850~2100年にかけての全球平均気温の変化

- 植生分布を変化させない場合 : +6°C
- 植生分布を変化させた場合 : +8°C



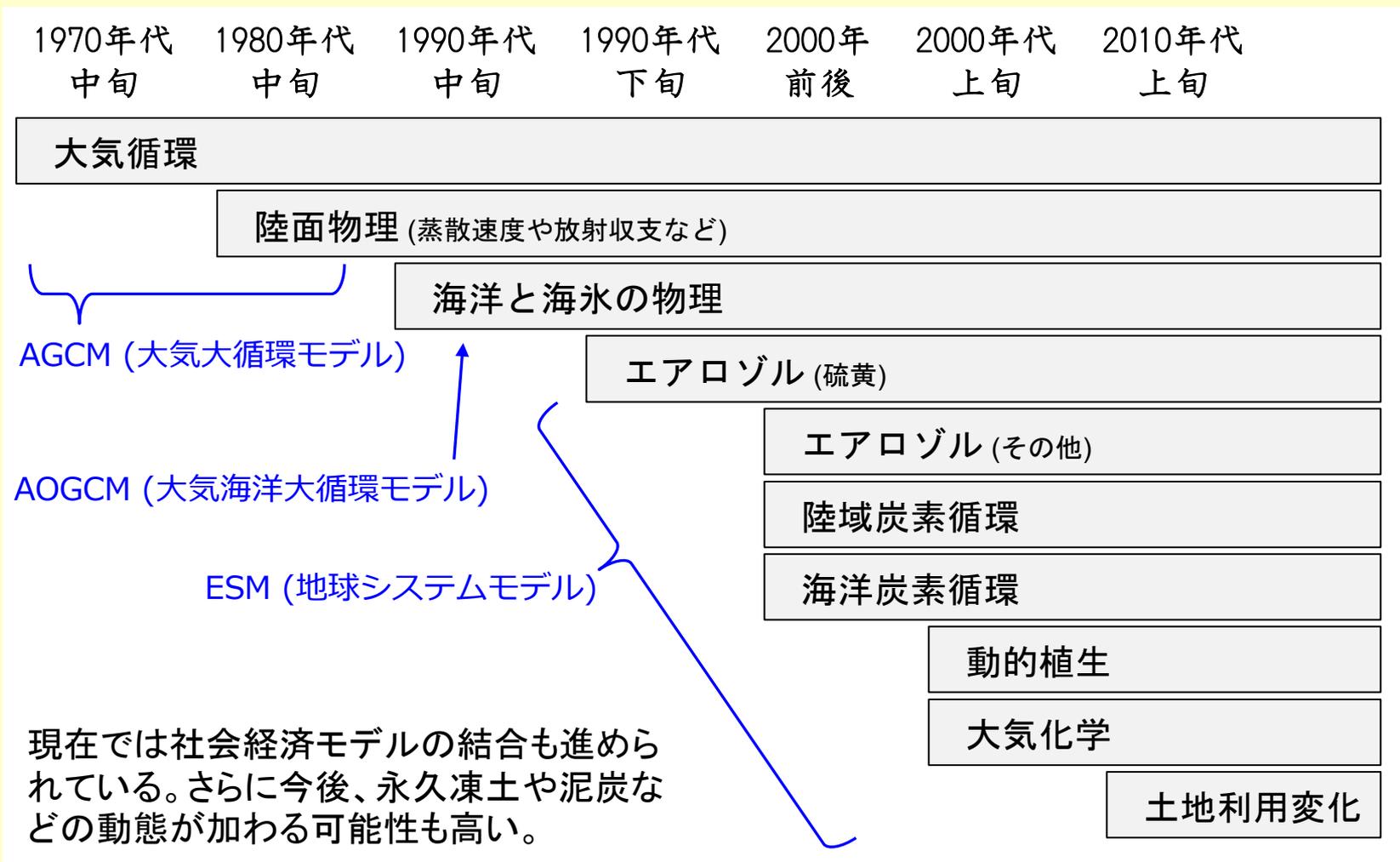
アマゾン盆地において生じる大規模な植生崩壊が、この差の主な理由

Cox et al. (2000) *Nature* 408

Cox et al. (2004) *Theoretical and Applied Climatology* 78

気候変動に応じた、植生の機能に加えて、その地理分布も動的に取り扱うモデルとしてDynamic Global Vegetation Models (DGVMs; 動的全球植生モデル)が勃興した。

気候モデルの発達



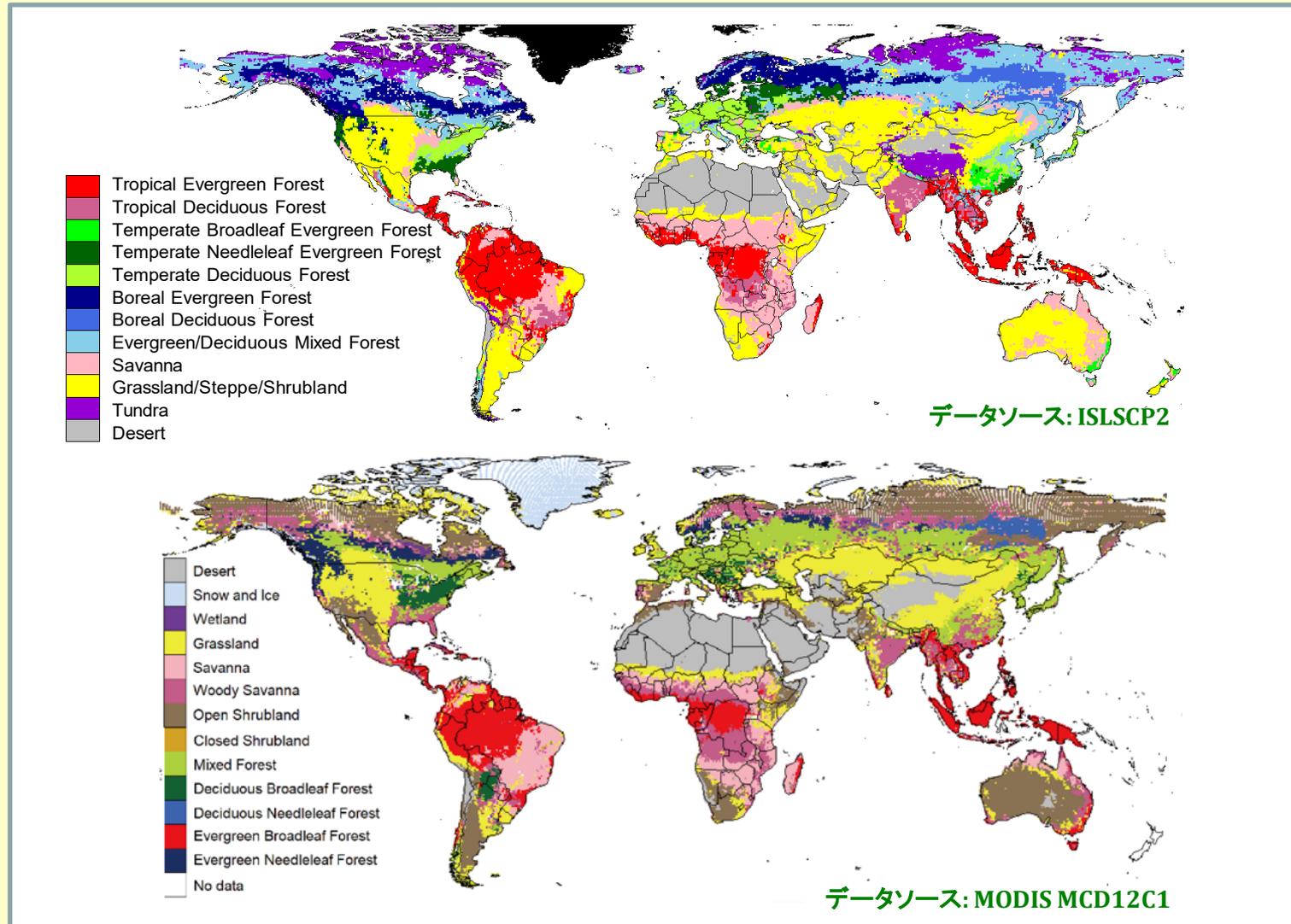
原図：IPCC 3rd Assessment Report

気候モデル（数10～数100年先の気候を予測するモデル）は複雑な地球システム統合モデルへと発展しつつある

コンテンツ

1. 気候モデル発達の歴史
2. 気候に対応した植生分布
3. 気候エンベロップモデル
4. 気候エンベロップで扱えない諸問題
5. 動的全球植生モデル (DGVM)
6. DGVMの現状と課題

全球のバイオーム分布



5~20種類の**バイオーム**により陸面が区分される。バイオームに標準的な分類基準は存在せず、データセットごとに異なる。

バイオームの例：熱帯多雨林

共通した特徴

Drip tips



発達した板根



着生植物



水平・鉛直ともに
密な樹冠構造



Photos are gathered from the Web

バイオーム (Biome) とは：

植生を外から見た時の外観上の特徴を**相観**と言うが、**その相観を粗く分類したもの**。
優占する植物の生活型（樹木、草本、灌木）、針葉か広葉か、落葉性か常緑性か、個体密度（密林・疎林）などが分類に用いられる。

種群の環境適応の違いが、バイオームを形成する。このため、例えば「熱帯多雨林」というBiomeは、大陸や地域ごとに種構成が異なるが、似た環境条件に対する適応様式が似ているため、上記のような共通した特徴を持つ。

バイオームの例：針葉樹林帯

- 北半球の亜寒帯 → マツ科 (トウヒ、モミ、ツガ、カラマツ、マツ)
- 北半球の温帯 → スギ科
- 南半球 → マキ科 (イヌマキ科)

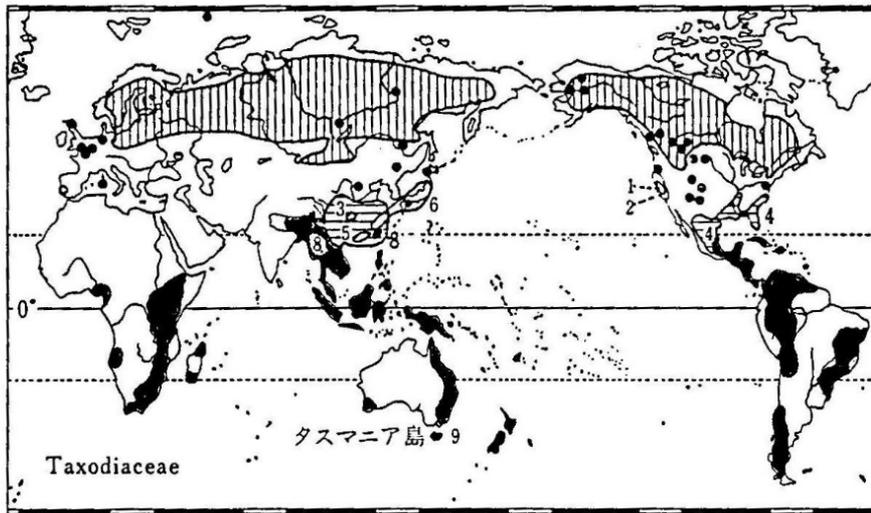


図 11.1 マツ科針葉樹からなる北方亜寒帯林と南半球のイヌマキ科針葉樹の分布 (Florin 1963)
縦線地域：マツ科針葉樹からなる北方亜寒帯林，横線：スギ科植物の分布域，数字は遺存地域を示す。
黒色地域：イヌマキ科針葉樹の分布。

図の出典：酒井昭著、「植物の分布と環境適用」朝倉書店

針葉樹の地理分布は歴史的な制約によっても形成・維持されているようである。

実際に、オーストラリアの降水量が少なく自生の広葉樹が育たない土地に、乾燥と貧土に耐える北半球の乾燥地のマツが大量に植樹され、よく成林して大規模なマツ植林地となった例がある。

なお、全球植生モデルでは、南半球の針葉樹林は、ほぼ無視されている。

東シベリアには、落葉性針葉樹であるカラマツが優占する世界最大の針葉樹林帯が存在する。

他方、北米の高緯度帯では、常緑性針葉樹であるトウヒが優占する。気候環境の近い両地域で、優先樹種の常緑・落葉性が異なる理由については、決定的な説明はされていない。

バイオームの例：ユーラシア大陸の2つの温帯性常緑広葉樹林帯

地中海性気候の常緑広葉樹林帯（オリーブ、セイヨウヒイラギ、コルクカシ、など）。

夏の乾燥と、冬が多雨に適応。葉は小さく厚い。高温な夏には蒸散を抑え、その前後の4～6月、10～11月に最大の蒸散量を持つ。

温暖（最寒月の平均気温2℃以上、かつ土壌は凍結しない）なモンスーンや沿海地域の常緑広葉樹（カシ、シイ、マテバシイ、クスノキ科、ツバキ科など）

夏の乾燥に弱いことが多い。

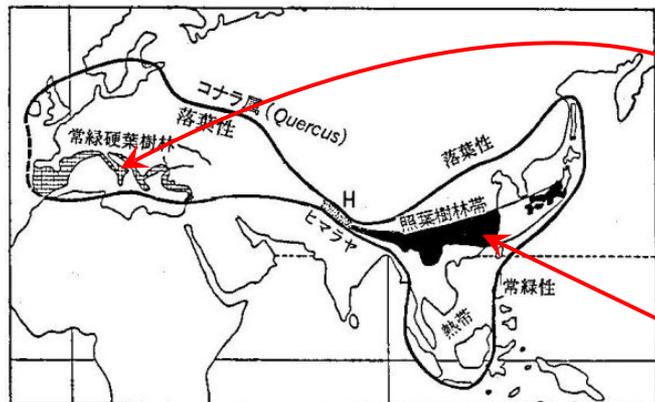


図 9.5 ヒマラヤを境にしたユーラシア大陸の二つの常緑カン林、照葉樹林帯（右側）と硬葉樹林帯（左側）
(Sealy 1958, Wang 1961, 安田 1988)

右下の太線（常緑性）はツバキ属の分布 (Sealy 1958) を示す。また常緑樹林の北部が落葉性コナラ属の分布である。

図の出版：酒井昭著、「植物の分布と環境適用」朝倉書店

ギリシア、トルコなどでは硬葉カシの高木林はほとんど破壊され、現在よくみられる硬葉樹林は高さ1mほどの灌木林（maquis、macchie；マキ、マッキー、マキークと呼ばれる）である。良質の土壌地帯では放置すると高木林に遷移する場合もあるが、一般に山火事や放牧などにより、この状態で維持されるか、低木種や草本などから構成される植生となる。なお、地中海性気候には乾燥耐性を持つ常緑針葉樹（マツ類、ヒマラヤシーダの仲間、イトスギ、ビャクシン）も分布する。

東アジアのバイオーム分布

非常に短い夏（成長期間は年3ヶ月未満）、非常に厳しい冬。永久凍土上に発達した植生。

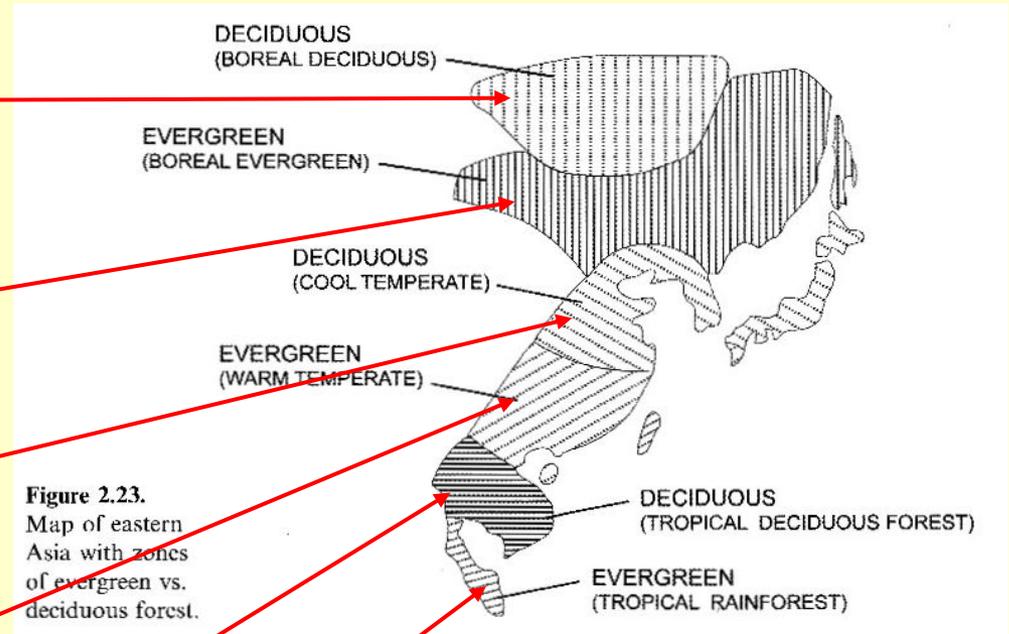
乾燥と霜害に強い針葉樹種が優占する

冬期は光合成に適さないため、落葉樹が優占

年間を通じて適度な気候

年間を通じて暖かいが、乾期が存在する

年間を通じて温暖で湿潤な気候区



Adams (2010) Vegetation-Climature Interaction

東アジアでは、緯度に沿って優占樹種の常緑性・落葉性が交互に入れ替わる

実際のバイオーム境界

[例1] モンゴル-ロシア国境付近



Photo: Forests of Northern Mongolia - FCA Today (www.fca-today.com/page13.html)

[例2] 房総半島南部

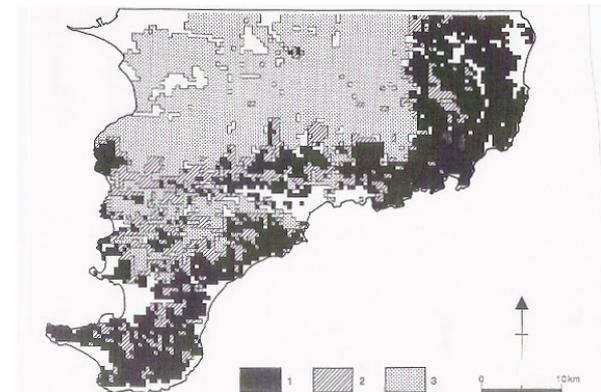


図8.1 南房総における二次林の分布 (磯谷, 1989), 表境庁発行5万分の1地形図をもとに作成.

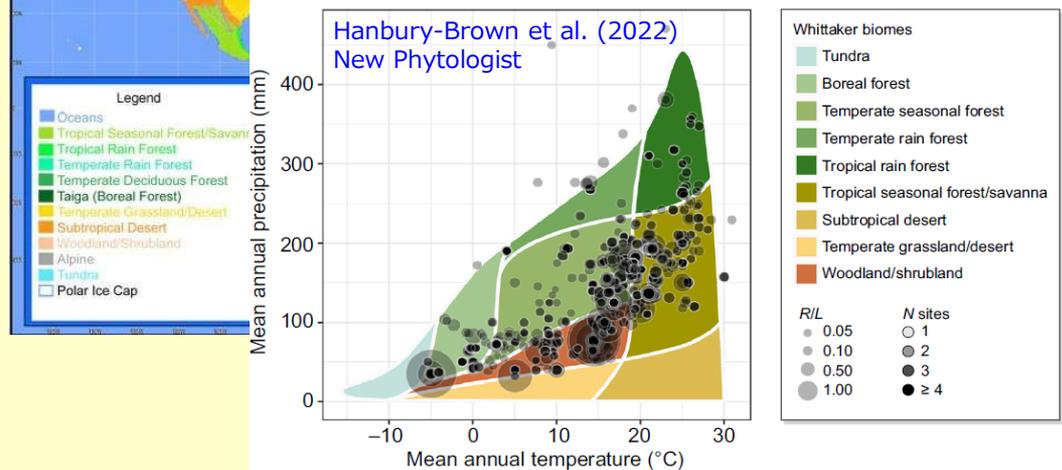
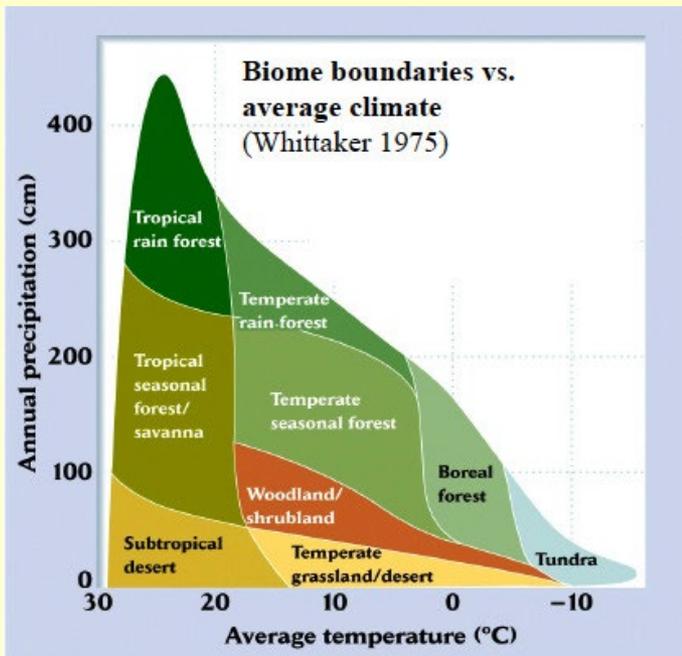
1: 常緑広葉二次林, 2: 常緑および夏緑広葉二次林, 3: 夏緑広葉二次林

一般にバイオームは徐々に入れ替わる。バイオーム境界（移行帯）では、地形に応じてモザイク状にバイオームが入れ替わる場合もある。

コンテンツ

1. 気候モデル発達の歴史
2. 気候に対応した植生分布
3. 気候エンベロップモデル
4. 気候エンベロップで扱えない諸問題
5. 動的全球植生モデル (DGVM)
6. DGVMの現状と課題

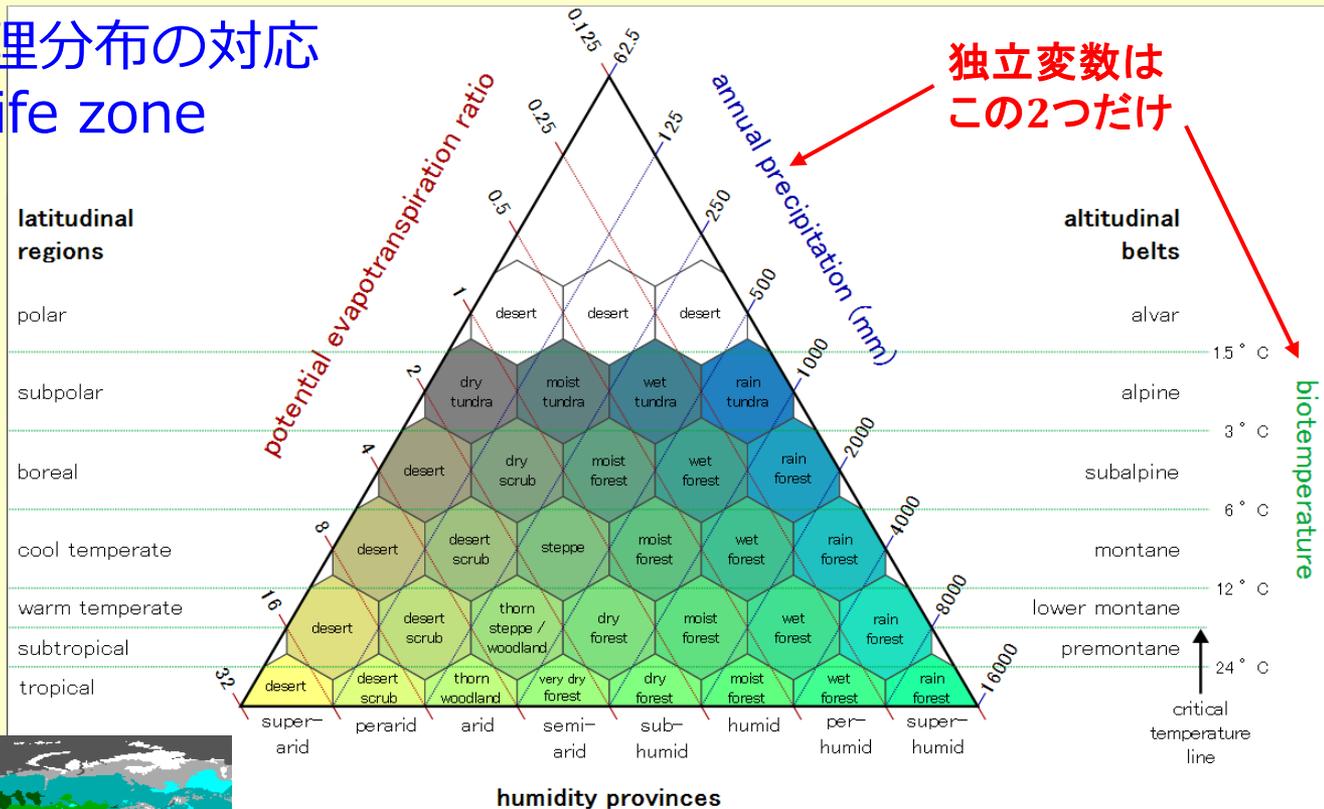
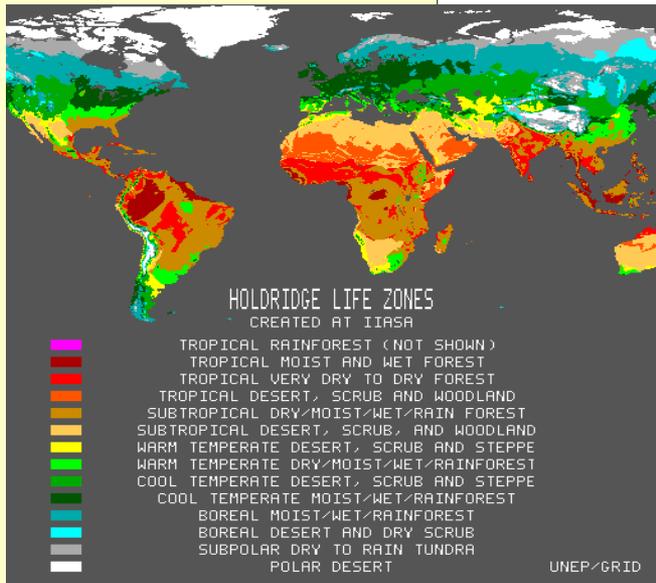
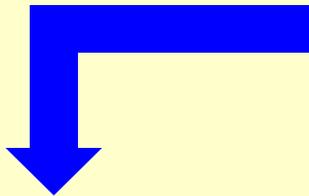
気候とBiomeとの地理分布対応 ホイットカー(Whittaker)の植生型



年平均気温と年降水量のみを考慮に入れた経験モデル。
精度は低いですが、そのシンプルさのため現在でも存在感あり。

気候とBiome地理分布の対応

Holdridge life zone



Images are gathered from the Web

年降水量と生物気温（0℃以下の日は、全て0℃と考える）の2変数を用いたバイオーム分布モデル。年平均気温ではなく、生物気温を考慮することで、より植物生理的な視点が加わっている（値の軸も対数となっている）。

とはいえ、季節性を考慮していないモデルなので、精度は、それほど高くない。

植生分布を制御する生物気候的な条件1:

生理的な要求[†]

バイオームの地理分布を実際に決めているのは、生物気候的な制限の植物機能型 (PFT; **Plant Functional Type**) ごとの差であることが一般的

植物種を、その生理的・系統的・フェノロジー的な特徴でザックリと分類したもの

[例1] 高温障害の生じる気温

49°C : 多くの植物種にとっての限界

64°C : 幾つかの多肉植物種

[例2] 霜害の生じる気温

-15°C以下 : 常緑性広葉樹種

-40°C以下 : 落葉性広葉樹種

No limits[‡] : 亜寒帯性の針葉樹種

こういうの**気候エンベロップ** (Bioclimatic Envelope)、あるいはBioclimatic Limitと言います

[†] : Beerling & Woodesrd (2001) Vegetation and the Terrestrial Carbon Cycle: "植生と大気の4億年(及川武久 監修)"

[‡] For the Minimum Air temperature in the nature of the earth surface

植生分布を制御する生物気候的な条件2: 生活史を完結させるために必要な生物気候条件

[例1] 樹木の生存に必要な気温と降水量

Koppen (1936)

$$T > -5$$

$$T < 42 \times \log P - 106$$

※両条件を満たす必要がある

Ojima (1991)

$$P > 100$$

$$P > 20.0 \times T$$

※両条件を満たす必要がある

T : 年平均気温 (°C), P : 年降水量 (mm)

[例2] LPJ-DGVMで用いられている木本PFTsのGDD* 要求

GDD > 1200 : 温帯性広葉樹種 (常緑性・落葉性)

GDD > 900 : 温帯性常緑針葉樹

GDD > 600 : 亜寒帯性常緑針葉樹

GDD > 350 : 亜寒帯性落葉樹 (針葉・広葉)

* 5 °C以上の日平均気温を1年分足し合わせた数値

生物気候的な条件を用いて作成された気候エンベロップモデル

Growing Degree Day

最暖月の平均気温

湿潤ファクター

最寒月の平均気温

Dominating hierarchy

TABLE 1. Environmental constraints (mean temperature of the coldest month, T_c ; growing degree-days on 5°C base, GDD; growing degree-days on 0°C base, GDD₀; mean temperature of the warmest month, T_w ; Priestley-Taylor coefficient of annual moisture availability, α) and dominance class (D) for each plant type in the model.*

	T_c		GDD ₀ min	GDD min	T_w min	α		D
	min	max				min	max	
Trees								
tropical evergreen	15.5					0.80		1
tropical raingreen	15.5					0.45	0.95	1
warm-temperate evergreen	5					0.65		2
temperate summergreen	-15	15.5	1200			0.65		3
cool-temperate conifer	-19	5	900			0.65		3
boreal evergreen conifer	-35	-2	350			0.75		3
boreal summergreen		5	350			0.65		3
Non-trees								
sclerophyll/succulent	5					0.28		4
warm grass/shrub					22	0.18		5
cool grass/shrub			500			0.33		6
cold grass/shrub				100		0.33		6
hot desert shrub					22			7
cold desert shrub				100				8

*An additional 'dummy type' is defined for computational consistency. This type has dominance class 9 and no environmental limits, representing the 'plant type' that would occur under conditions unfavourable for any other type (e.g. ice caps).

PFT

TABLE 5. Combinations of dominant plant types that occurred in the global model application, and the names they were given for mapping

Plant types	Biome name
Tropical evergreen =	Tropical rain forest
Tropical evergreen +	
Tropical raingreen =	Tropical seasonal forest
Tropical raingreen =	Tropical dry forest/savanna
Warm-temperate evergreen =	Broad-leaved evergreen/warm mixed forest
Temperate summergreen +	
Cool-temperate conifer +	
Boreal summergreen =	Temperate deciduous forest
Temperate summergreen +	
Cool-temperate conifer +	
Boreal evergreen conifer +	
Boreal summergreen =	Cool mixed forest
Cool-temperate conifer +	
Boreal evergreen conifer +	
Boreal summergreen =	Cool conifer forest
Boreal evergreen conifer +	
Boreal summergreen =	Taiga
Cool-temperate conifer +	
Boreal summergreen =	Cold mixed forest
Boreal summergreen =	Cold deciduous forest
Sclerophyll/succulent =	Xerophytic woods/scrub
Warm grass/shrub =	Warm grass/shrub
Cool grass/shrub +	
Cold grass/shrub =	Cool grass/shrub
Cold grass/shrub =	Tundra
Hot desert shrub =	Hot desert
Cool desert shrub =	Semidesert
Dummy type =	Ice/polar desert

Prentice *et al.* (1992)
J. Biogeog. 19

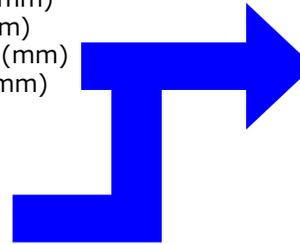
優占するPFTの組合せにより
バイオームを決めてやる

機械学習アルゴリズムを用いて作成した気候エンベロープ

月ごと気温・降水量データから算出した気候インデックス

- BIO1. 年平均気温 (°C)
- BIO2. 平均日気温差 (°C)
- BIO3. Isothermality (%)
- BIO5. 最暖月最大気温 (°C)
- BIO6. 最寒月最低気温 (°C)
- BIO8. Wettest quarter平均気温 (°C)
- BIO9. Driest quarter平均気温 (°C)
- BIO10. Warmest quarter平均気温 (°C)
- BIO11. Coldest quarter平均気温 (°C)
- BIO12. 年降水量 (mm)
- BIO13. Wettest month降水量 (mm)
- BIO14. Driest month降水量 (mm)
- BIO16. Wettest quarter降水量 (mm)
- BIO17. Driest quarter降水量 (mm)
- BIO18. Warmest quarter降水量 (mm)
- BIO19. Coldest quarter降水量 (mm)

決定木 (教師あり機械学習アルゴリズムの1種) の適用



人工衛星データなどから推定した潜在植生地図

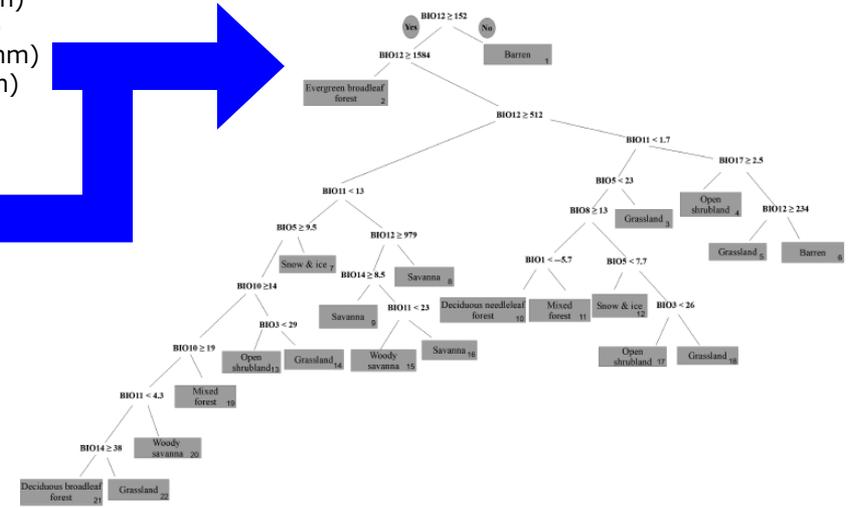
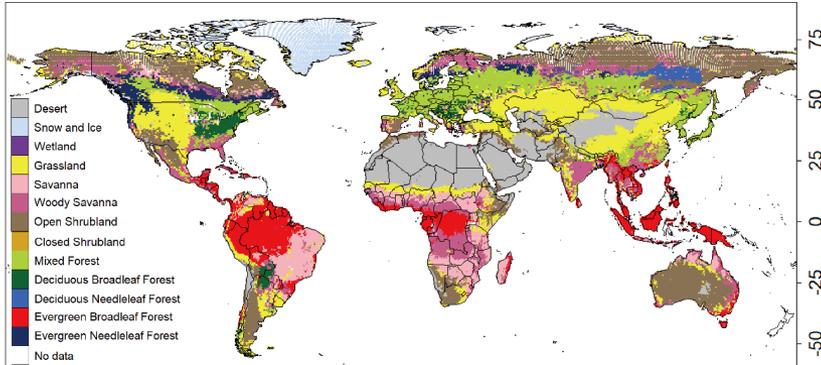
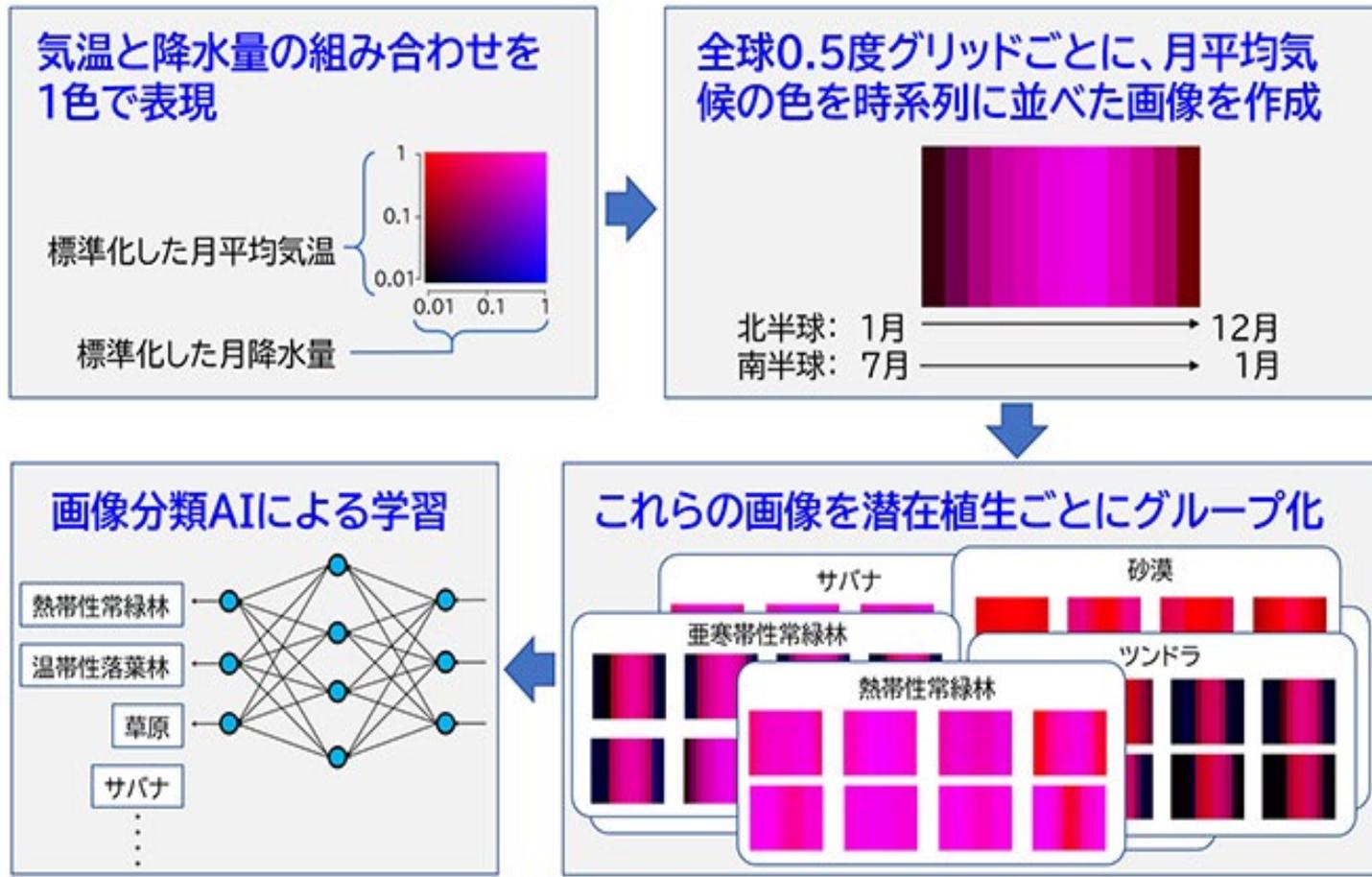


FIGURE 2 Decision tree with only climatic averages from BIOCLIM data set. Numbers in the lower right corners are an arbitrary referencing system

人工ニューロンを用いて作成した気候エンベロープ



Sato & Ise (2022) Geosci. Model Dev., 15

佐藤永・伊勢武史 (2022年4月18日) プレスリリース「画像分類AIを用いた潜在植生を予測する新手法を開発」

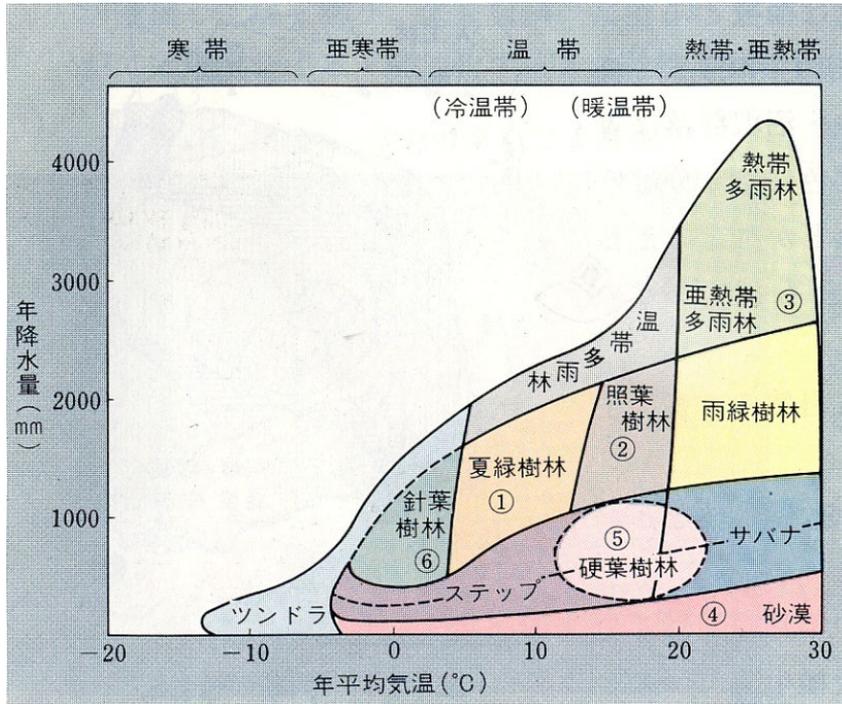
現在使える気候エンベロープモデルの中で、たぶん精度が最も高い方法。
ただし、モデルの中身はブラックボックスで、計算的にも手軽ではない。

コンテンツ

1. 気候モデル発達の歴史
2. 気候に対応した植生分布
3. 気候エンベロップモデル
4. 気候エンベロップで扱えない諸問題
5. 動的全球植生モデル (DGVM)
6. DGVMの現状と課題

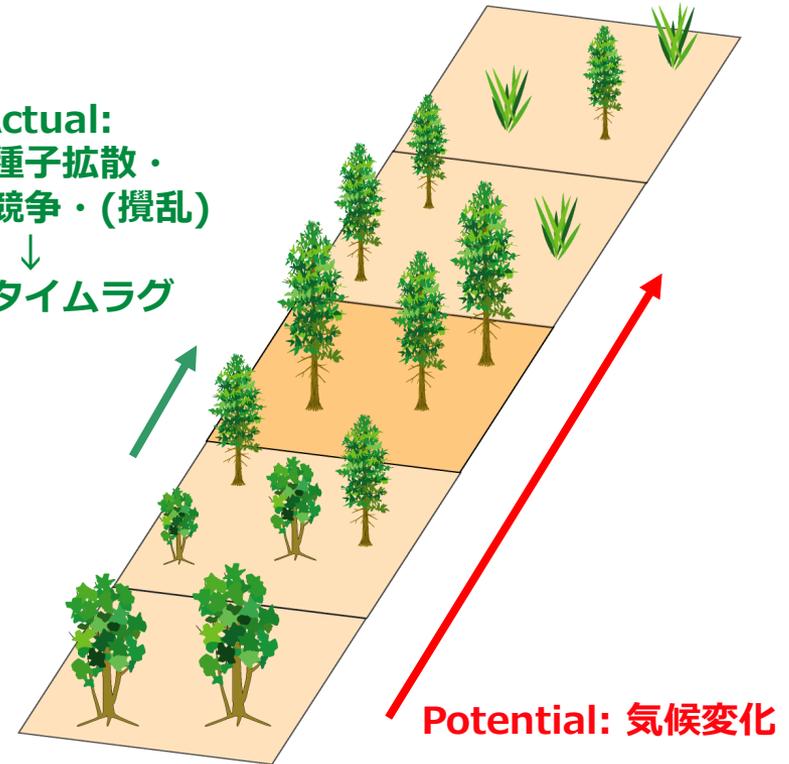
気候変動と植生変化との間の時間遅れ

全球スケールにおいては、植生帯の分布は、主に気候要素で決まる



しかし、気候が変化しても、実際に植生の移動が完了するまでには、最大数千年に及ぶタイムラグが生じる

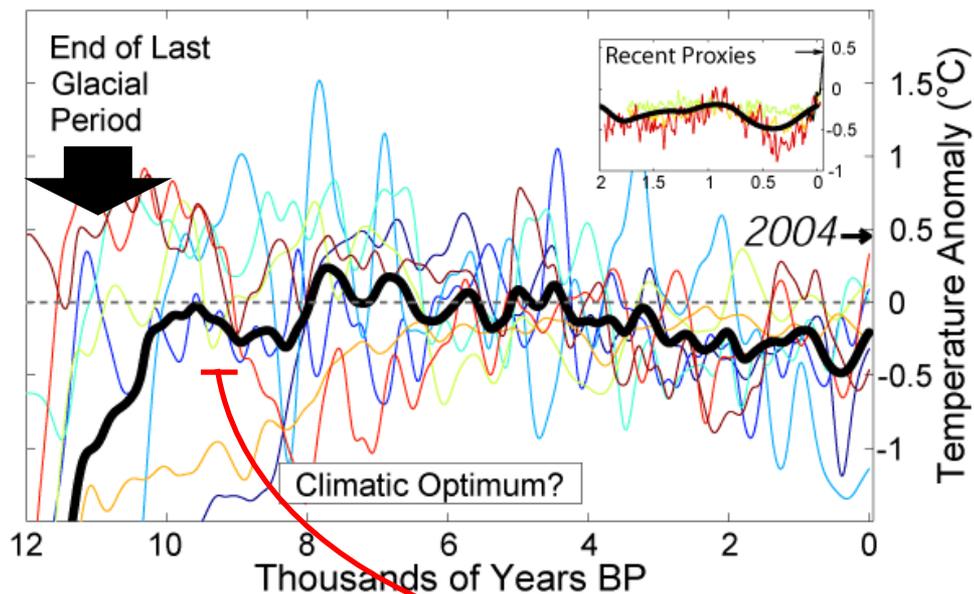
Actual:
種子拡散・
競争・(攪乱)
↓
タイムラグ



人間社会にとって重要なのは、数十～数百年間の気候変動予測。よって、気候変化と植生変化との間のタイムラグは無視できない。

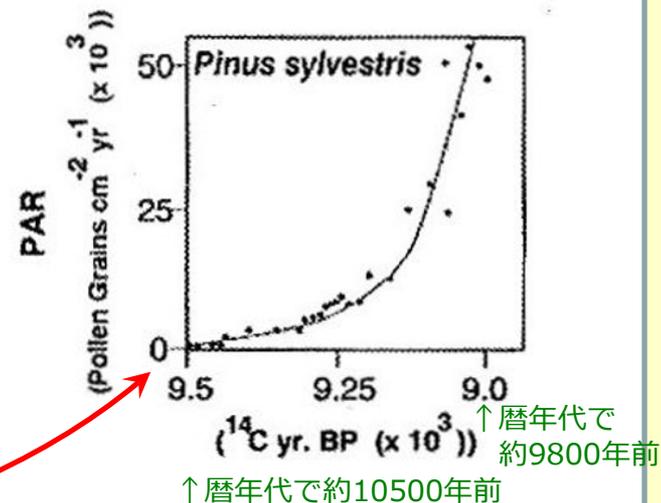
気候変動と植生変化との間の時間遅れ (実際の例)

過去12000千年間の年平均気温変化



図の出典 : Wikipedia (完新世の気候最温暖期)

イングランド東部におけるヨーロッパアカマツ花粉化石の密度時系列変化 (10500~9800年前)

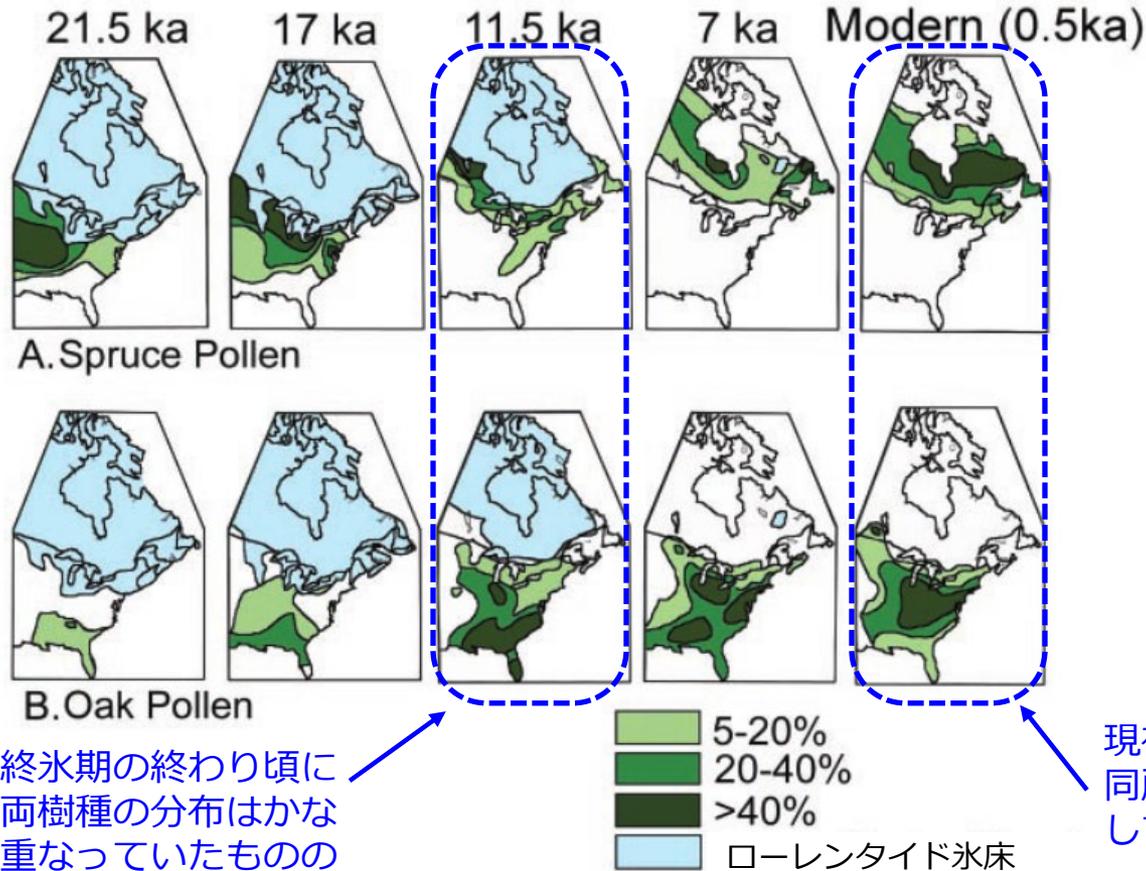


図の出典 :
Vegetation-Climate Interaction 2nd edition

ヨーロッパでは、約11500年前から樹木の成長が可能な温暖な時代が続いている。しかし、イングランドへのヨーロッパアカマツの侵入は約10500年前であり、その被度が増えるためには更に500年を費やした

バイオームや植生タイプという植生分類手法の限界

花粉化石から推定された、北米大陸におけるトウヒ（常緑性針葉樹）とナラ（落葉性広葉樹）の最終氷期後の分布変化



Davis & Shaw (2001)
Science 292

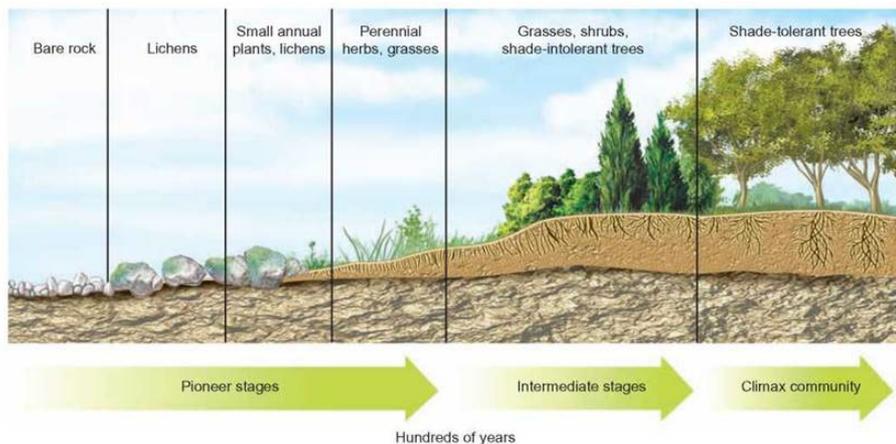
気候環境変動に応じて、森林群落全体が一斉に移動するわけではなく、個々の樹種が、それぞれのニッチに基づいて個別に分布が変化した

氷河退行跡地の植生回復は、土壌の発達に伴って生じる

遷移：植物における、攪乱からの時間経過に対してのニッチ分割

一次遷移

(土壌のない条件から始まる遷移)



図の出典：schoolbag.info/biology/concepts/108.html

二次遷移

(土壌のある条件で始まる遷移)

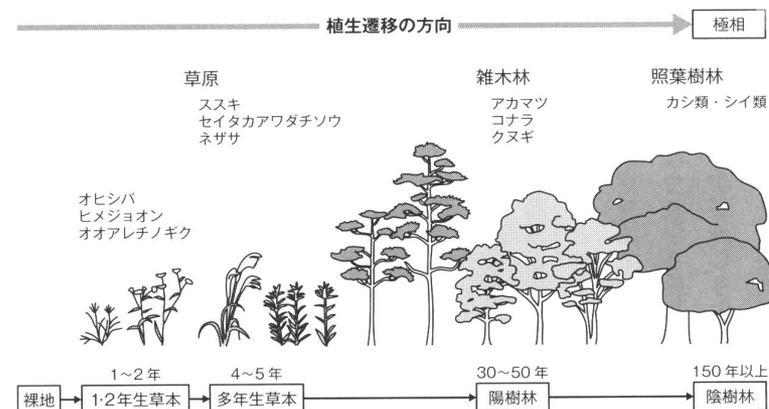


図 3-10 関東および西日本の低地における植生遷移

〈『里山の自然をまもる』築地書館、p.35 を参考に作成〉

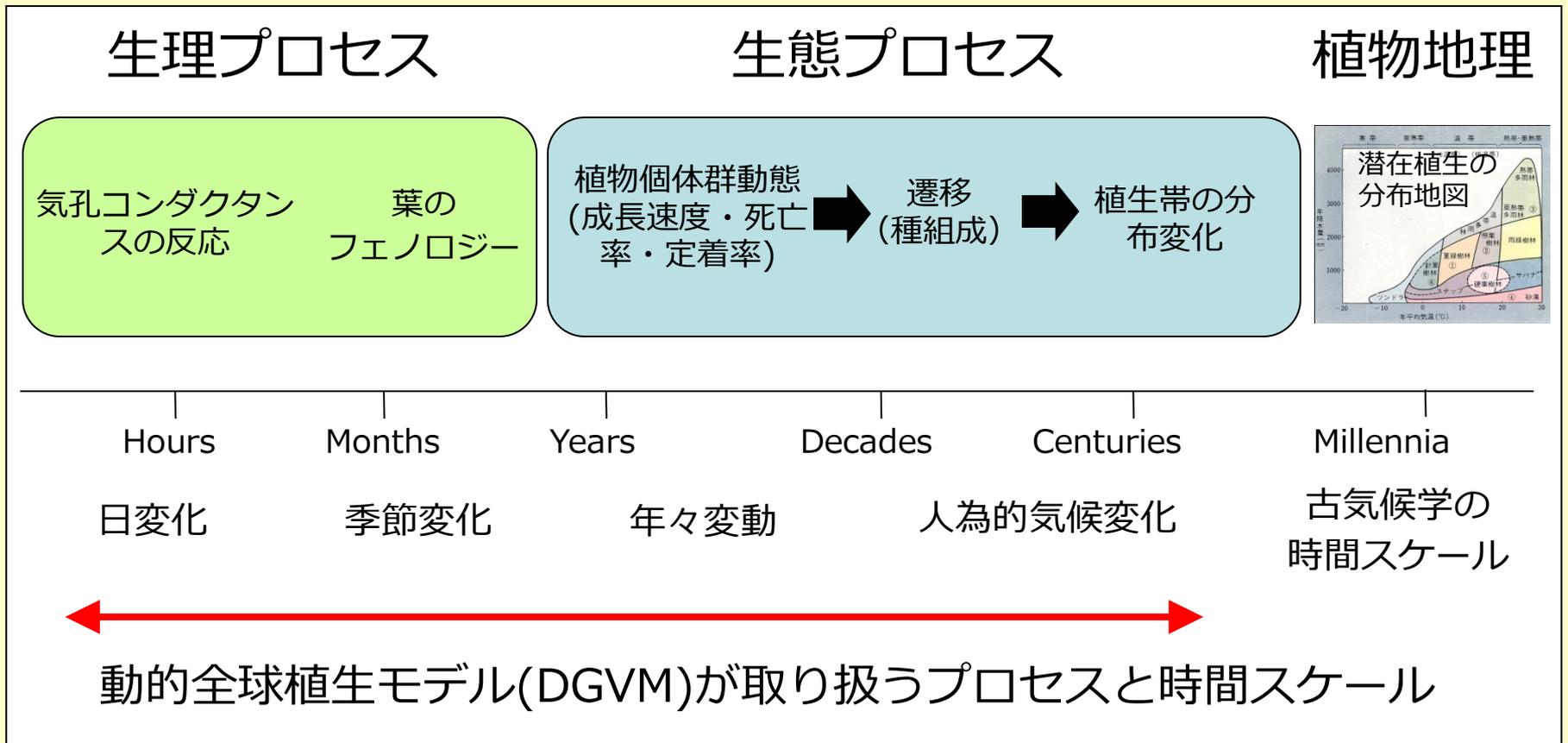
図の出典：富田啓介「はじめて地理学」

遷移は攪乱後の植生回復において、優占種が次々と代わる現象であるが、これは植生の発達に伴う環境変化が、ニッチの異なる植物種を次々と優占させることで生じる。このような過渡的な変化も気候エンベロップモデルでは扱う事ができない。

コンテンツ

1. 気候モデル発達の歴史
2. 気候に対応した植生分布
3. 気候エンベロップモデル
4. 気候エンベロップで扱えない諸問題
- 5. 動的全球植生モデル (DGVM)**
6. DGVMの現状と課題

人為的な気候変動に対する陸面生態系の応答には 植物生理プロセスと植物生態プロセスの両者が関わる



DGVMには、その構造に著しい多様性が存在する

6つのDGVMで各種特性を比較

TABLE 1 Table of attributes of vegetation demographics models discussed in this paper

Model acronym	Name	Vegetation representation	Coupled to ESM?	Stochastic?	Canopy structure	Disturbance history patches?
SEIB	Spatially Explicit Individual-Based model	Individual	MIROC-ESM	Yes	Individuals	No
LPJ-GUESS	Lund-Potsdam-Jena General Ecosystem Simulator	Individual or Cohort	EC-Earth, RCA-GUESS	Yes (optional for some processes)	Flat-top	Yes
LM3-PPA	Perfect Plasticity Approximation	Cohort	GFDL-ESM	No	PPA	No
ED	Ecosystem Demography model	Cohort	RAMS	No	Flat-top	Yes
ED2	Ecosystem Demography model v2	Cohort	RAMS	No	Flat-top	Yes
CLM(ED)	Community Land Model with Ecosystem Demography	Cohort	CESM	No	PPA	Yes

Fisher et al. (2018) Glob. Change Biol.

DGVMごとに異なる樹冠と光分配の扱い

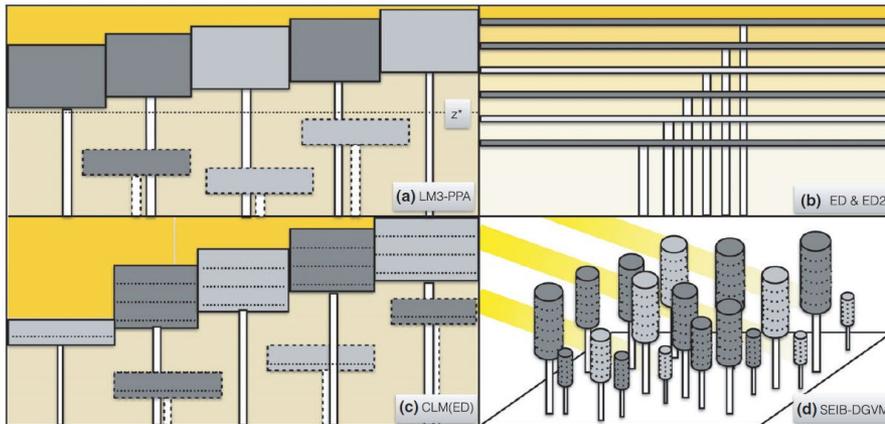
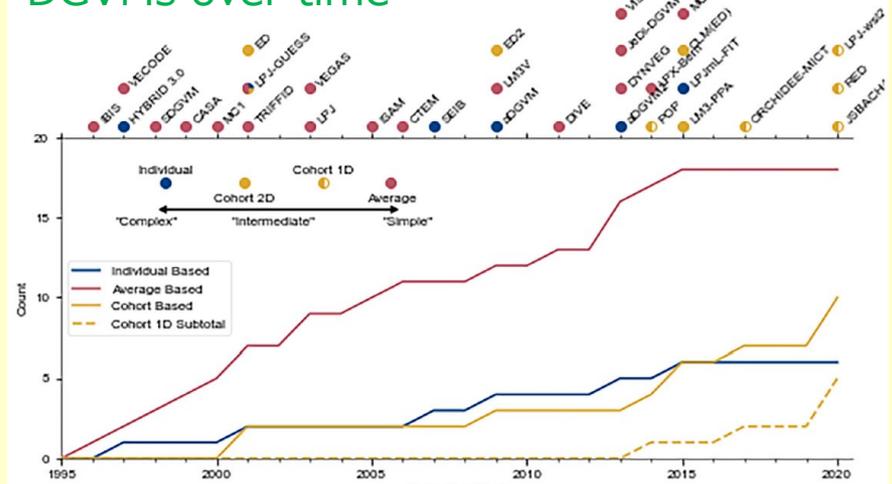


FIGURE 1 Organization of canopy schemes in four vegetation demographic models. Shades of yellow represent incident light levels.

Fisher et al. (2018) Glob. Change Biol.

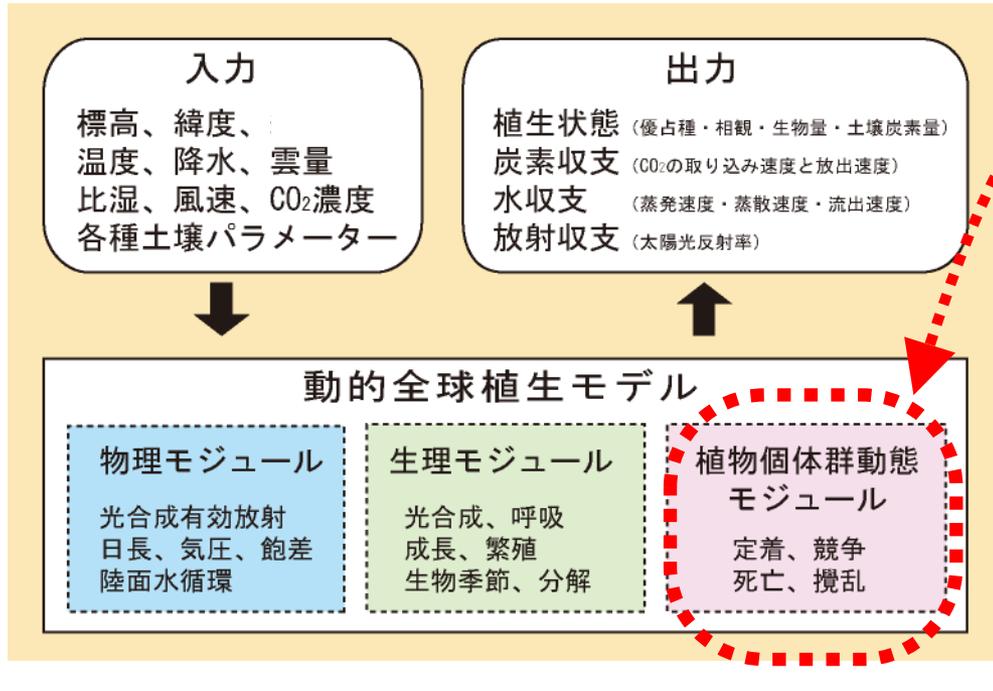
DGVMs over time



Argles et al. (2022) PLOS Clim 1(9)

動的全球植生モデルSEIBについて

動的全球植生モデルの基本構造と入出力



植物個体群動態の扱い方

SEIB-DGVM @ 東シベリアのカラマツ林

場所 (東シベリア)

緯度 : 北緯62度15分
 経度 : 東経129度37分
 標高 : 220m

年平均気候

気温 : -9.9°C
 降水量 : 257mm

仮想林分の大きさ: 100m × 100m

草本は可視化していない

SEIBは、木本の個体間における局所的な相互作用を明示的に扱う動的全球植生モデル。気候変化に対する植生応答のタイムラグを支配する過程を、機構ベースで扱う、という発想の元で設計された。

SEIBが木本個体間の局所的相互作用を扱う理由

(1) パラメーター推定に個体群生態学のデータ（木本密度、サイズ分布、樹齡分布）をそのまま利用することが出来る。

(2) 局所的な光条件によって規定される木本個体間の競争が適切に表現され、したがって気候変動に伴った植生変動の速度を、よりの確に予測できることが期待される。

(3) 個体サイズ依存の事象（例：乾燥に対しては大木ほど死亡率が高い、山火事に対しては大木ほど生存率が高い）を明示的に扱う事ができる。

(4) ギャップの再生速度が適切に表現され、そのようなギャップ動態に伴う炭素収支の変動を適切にシミュレートできる。

発達した森林とは100m²前後の林分単位において崩壊と再生が繰り返される動的な構造体であり、このような動態（ギャップ動態）は、森林の炭素フラックス変動を強く規定している。なぜならば、一般に、成熟した林分では光合成生産量と維持呼吸量とがほぼ釣り合うが、他方、成長途中の林分では光合成生産物の多くが構造体の生産に用いられ、炭素のシンクとして機能するからである

個体ベースでモデルを組むことのデメリット

(1) より多くの計算リソースを消費

→ 最近は大抵問題にならない

(2) モデル挙動のStochasticityが高い。

→ 気軽にアンサンブル計算ができる時代になり、Stochasticityの幅を算出することができるので、最近は大抵問題にならない

(3) ギャップ動態などによって、計算結果の時系列に確率的変動が生じやすい

→ 気軽にアンサンブル計算ができる時代になり、これも最近は大抵問題にならない

→ 個体群動態を解析的に近似する手法もあり広く使われている (ED2モデル)

(4) データフュージョン (衛星観測などで得られたLAI・PAR・山火事などのデータと比較しながら、モデルの挙動を適宜修正させるという方法) などに応用するには厳しい。

→ そういう応用面ではCompartmentモデルを使うべき。

SEIBを構成する様々な素過程モデル

SEIBの構造

	Process	Approach	Source
Physical Process	Radiation	Beer's law	
	Evapotranspiration	Penman-Monteith transpiration + interception + evaporation from soil surface	Monteith & Unsworth (1990)
	Soil water process	Empirical analogs of Darcy's Law: saturated and unsaturated percolation in 3 layer soil	Neilson (1995)
Physiology	Photosynthesis	Michaelis-type function	
	Maintenance respiration	Respiration rate is in proportion to nitrate contents for each organ	Ryan (1991)
	Growth respiration	Respiration rate is based on chemical composition of each organ	Poorter(1994)
	Stomatal conductance	A semi-empirical model	Ball et al. (1987)
	Phenology	A set of semi-empirical models of which parameters were estimated from satellite NDVI data	Botta et al. (2000)
	Decomposition	2 carbon source of decomposition: labile part of litter and passive part in mineral soil	Sitch et al. (2003)
Vegetation Dynamics	Establishment	Climatically favoured PFTs establish as small individuals	Sitch et al. (2003)
	Mortality	Function of "annual NPP per leaf area", "Heat stress", "Bioclimitic limit", and "Fire"	Sitch et al. (2003)
	Disturbance (fire)	An empirical function of soil moisture and above ground biomass	Kirsten et al (2001)

植物種は少数の植物機能型(PFT) で扱う

木本 (8タイプ)

8種類のPFTs (Plant Functional Types、植物機能型) から構成される

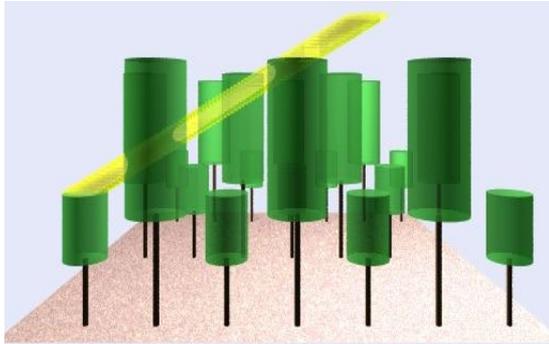
- 1, 熱帯性 広葉 常緑樹 (Tropical broad-leaved evergreen)
- 2, 熱帯性 広葉 雨緑樹 (Tropical broad-leaved raingreen)
- 3, 温帯性 針葉 常緑樹 (Temperate needle-leaved evergreen)
- 4, 温帯性 広葉 常緑樹 (Temperate broad-leaved evergreen)
- 5, 温帯性 広葉 夏緑樹 (Temperate broad-leaved summergreen)
- 6, 亜寒帯性 針葉 常緑樹 (Boreal needle-leaved evergreen)
- 7, 亜寒帯性 針葉 夏緑樹 (Boreal needle-leaved summergreen)
- 8, 亜寒帯性 広葉 夏緑樹 (Boreal broad-leaved summergreen)

草本 (2タイプ)

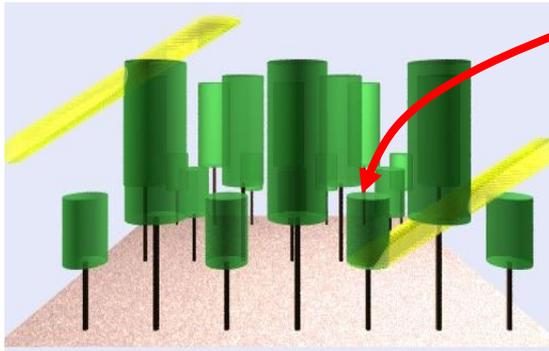
2種類のPFTs (Plant Functional Types、植物機能型) から構成される

- 1, C₃ 草本
- 2, C₄ 草本

木本PFTsの受光量計算（直接光）



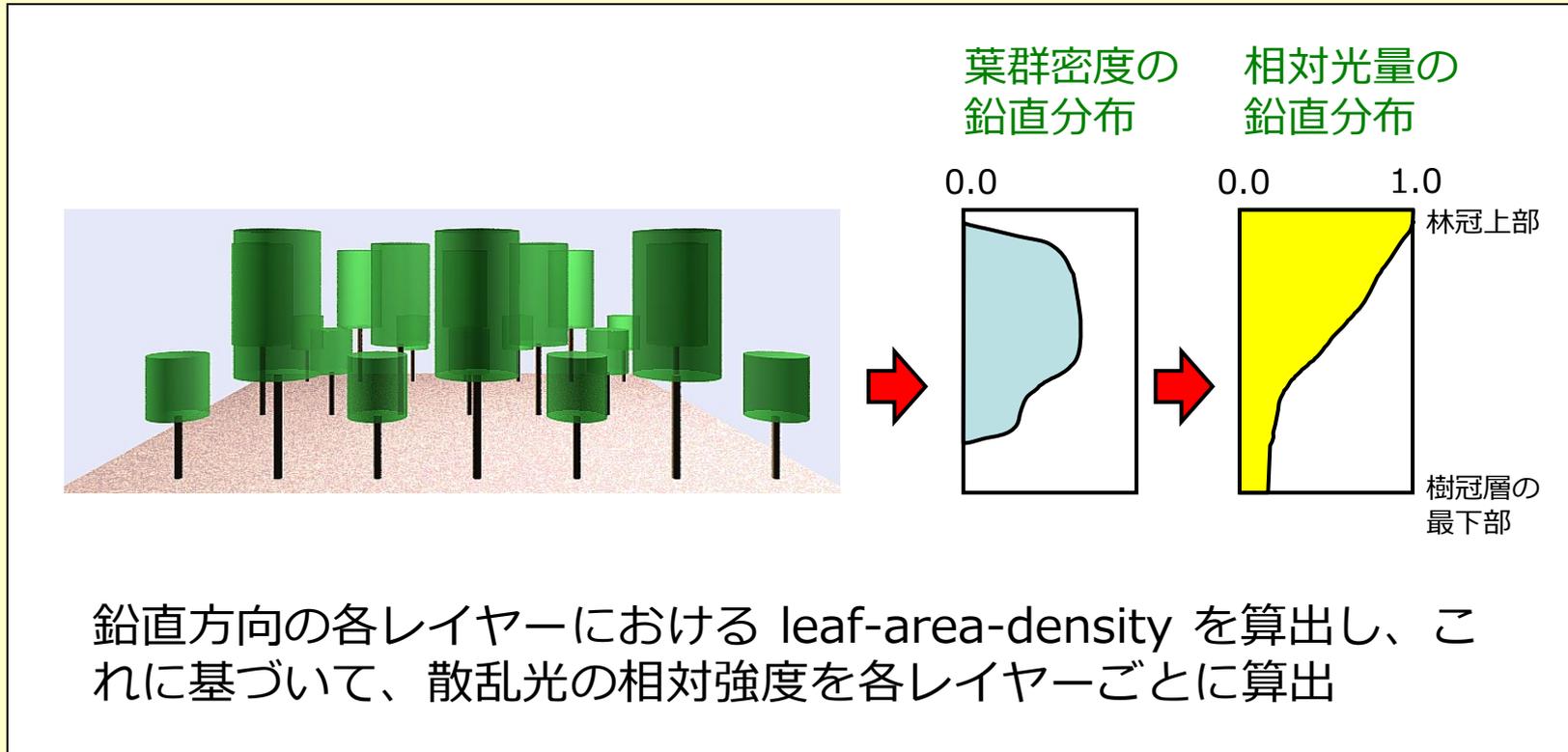
南中時の光量を、各樹冠の各10 cm
間隔レイヤー毎に算出した



下層ほど、自己被陰の効果を強く受ける

「端の効果」を生じさせないため
この仮想森林が繰り返されると仮定

木本PFTsの受光量計算（散乱光）

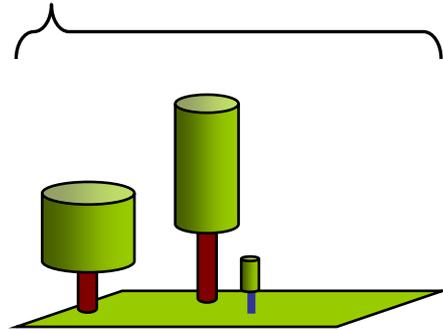


水平方向の構造は無視した

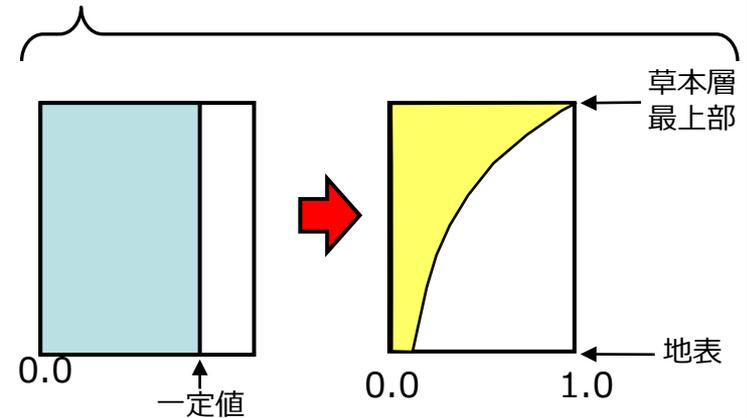
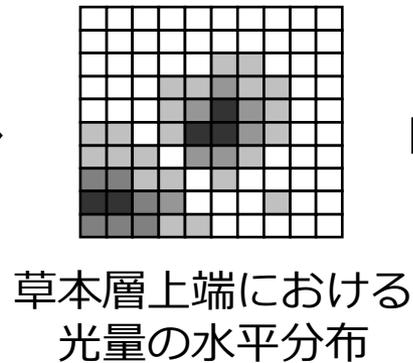
(真面目に計算すると、モンテカルロ法的なレイトレーシングをすることになり計算力の消費量が急増するし、そもそも葉群の空間分布に大きな仮定を置いている状況で、ここの部分だけ詳細に詰める必要も無い)

草本PFTsの光合成条件 (直接光・散乱光)

SEIBでは樹冠部の下に
草本層が存在する

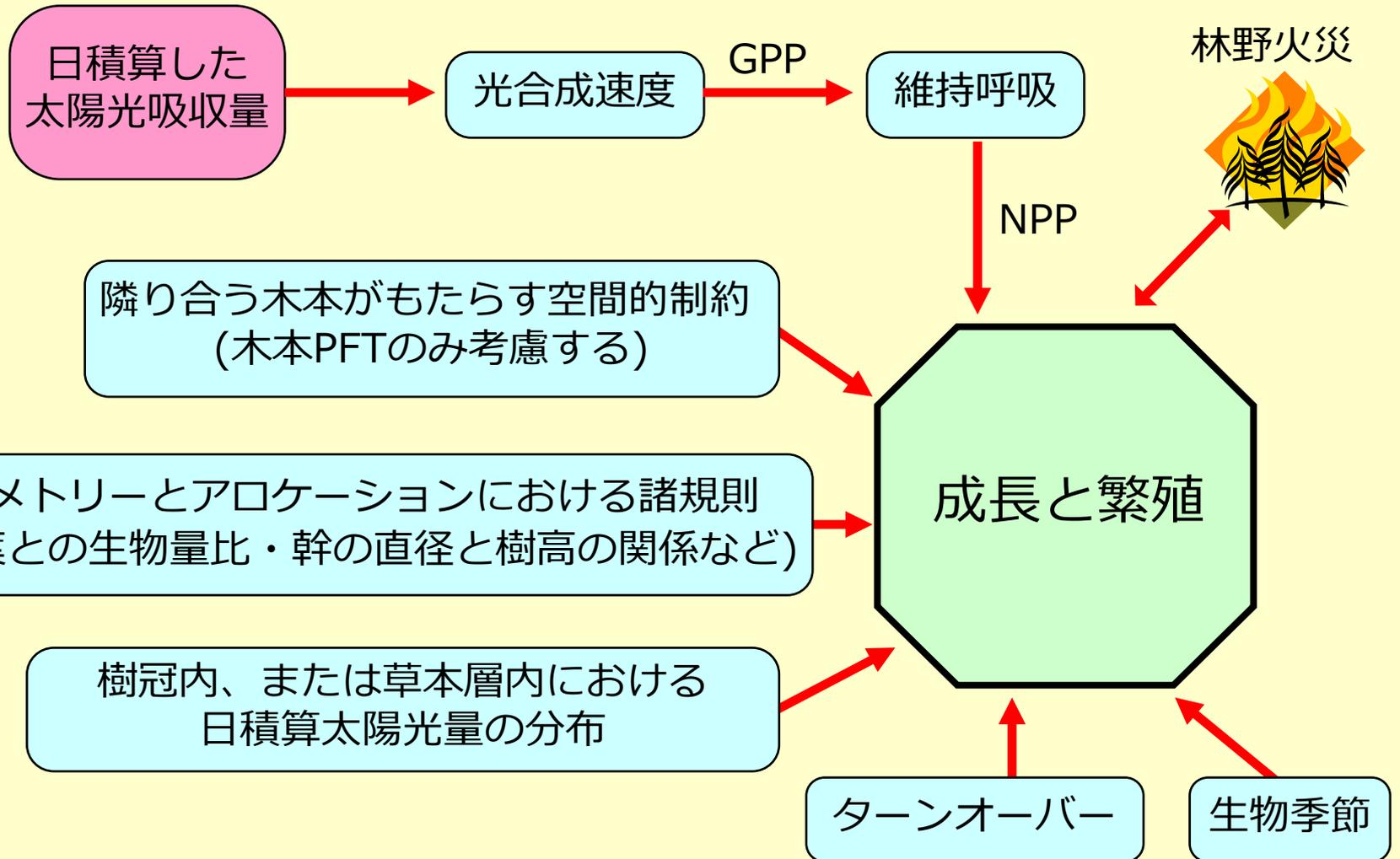


個々の区分における草本層内では、葉群
が鉛直方向に均一に分布していると仮定
して、鉛直方向の光強度分布を算出



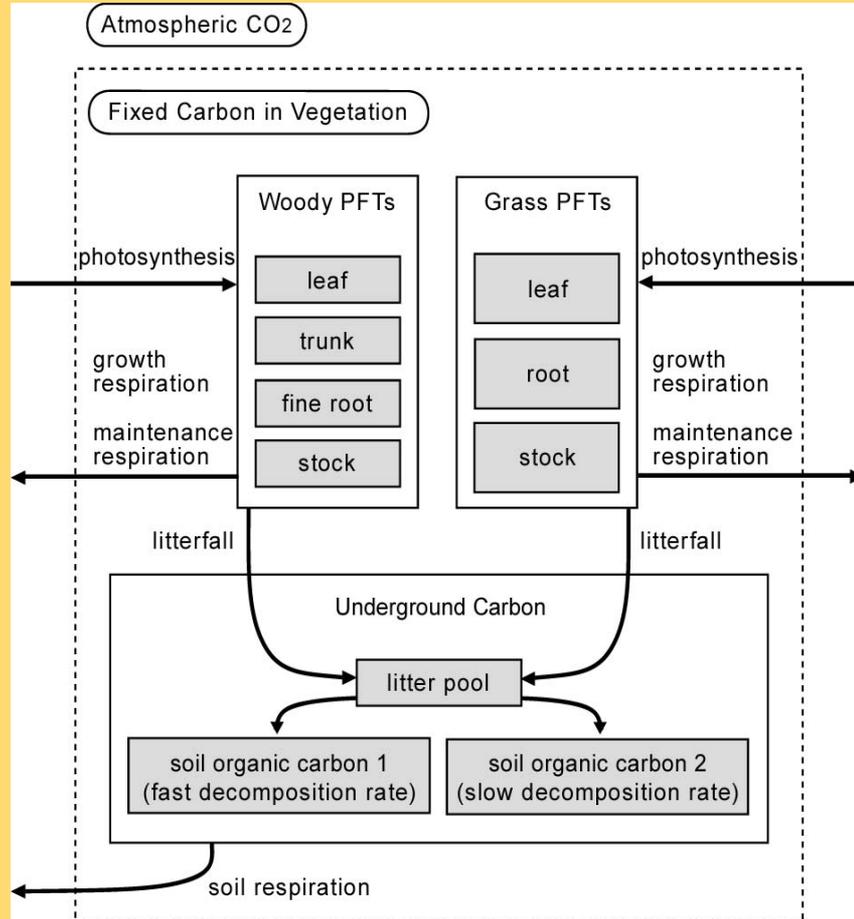
林床を10×10の小区分に分け、個々
の区分で、樹冠層直下の光量を推定

木本と草本の成長プロセス（概略）

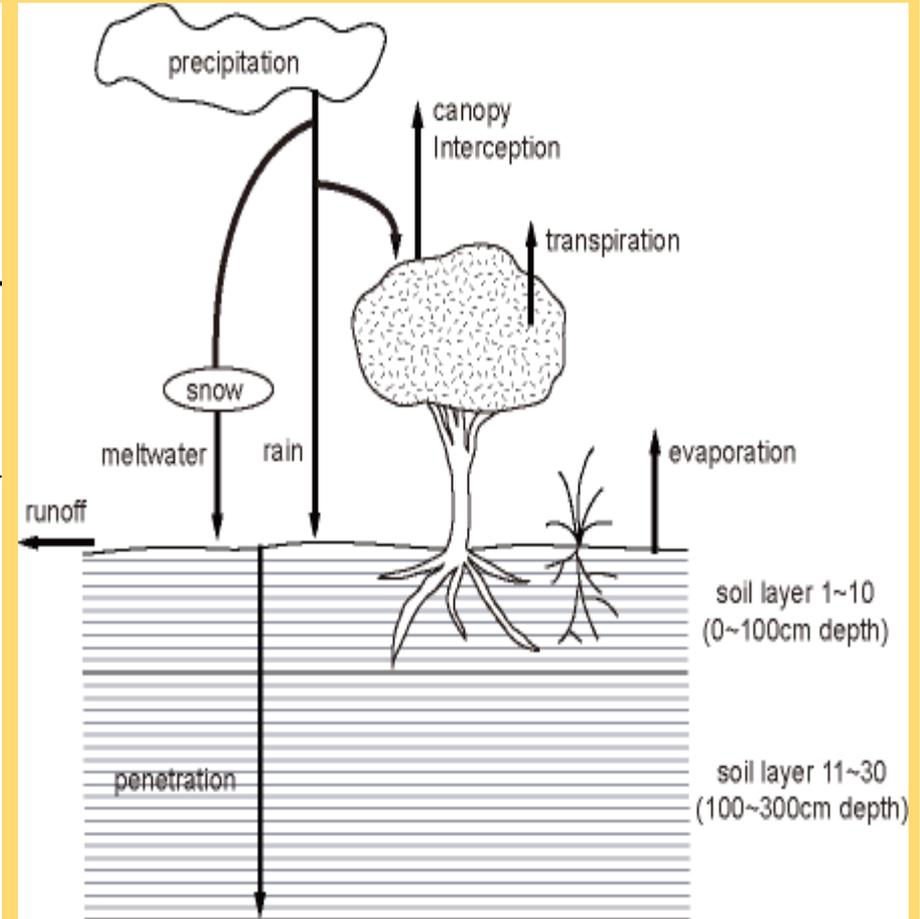


SEIBにおける炭素と水の収支

SEIBの構造



炭素循環の概略

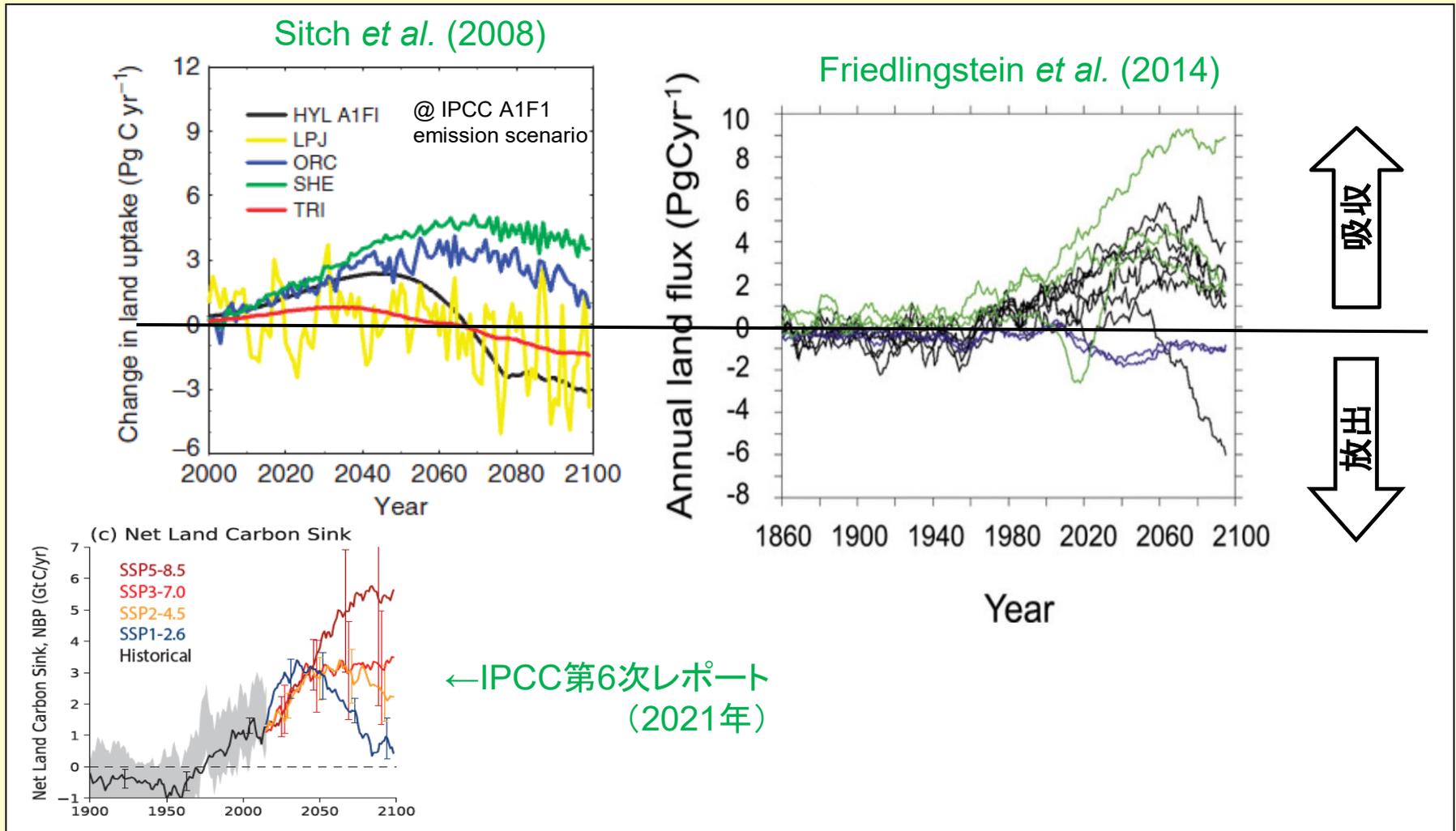


水循環の概略

コンテンツ

1. 気候モデル発達の歴史
2. 気候に対応した植生分布
3. 気候エンベロップモデル
4. 気候エンベロップで扱えない諸問題
5. 動的全球植生モデル (DGVM)
6. DGVMの現状と課題

今世紀末までの全球炭素収支のモデル間比較

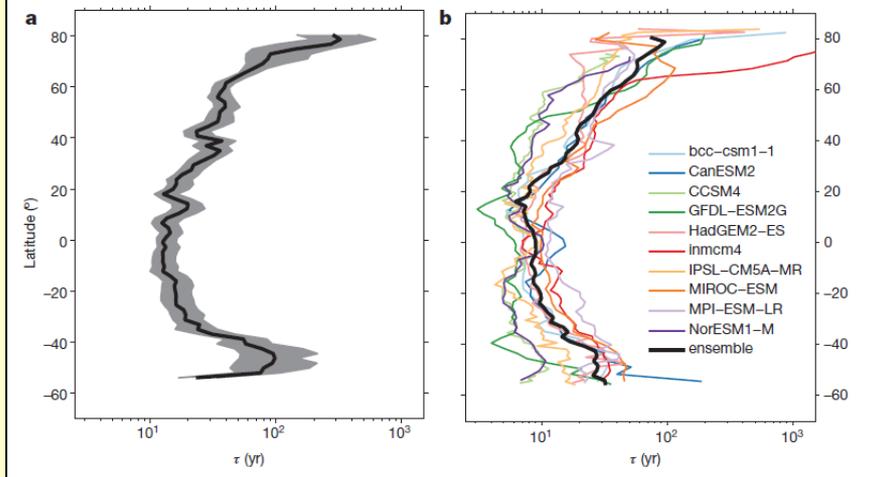


依然としてモデル間で予測が大きく異なる。
その不確実性が、順調に狭まっている状況でもない。

陸域生態系モデルの現状

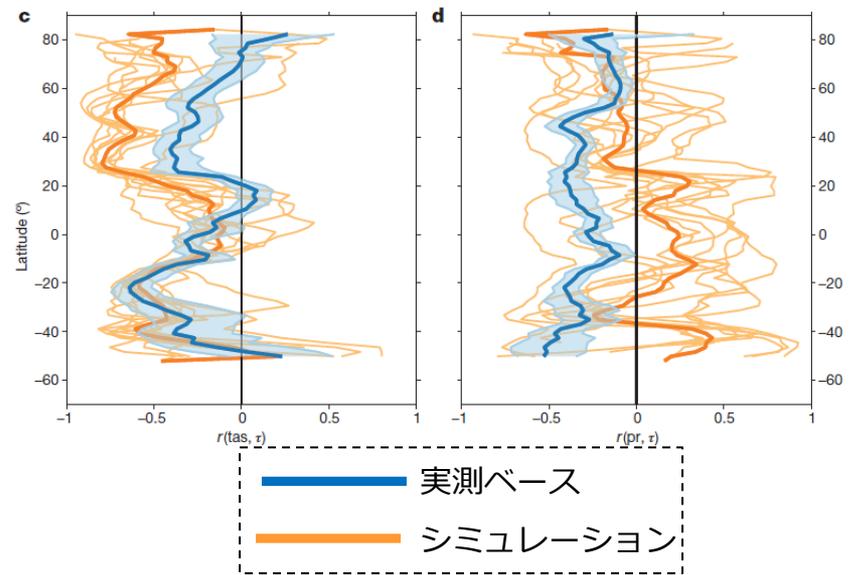
光合成で陸面に取り込まれた炭素の回転率（緯度方向の分布）

実測ベース シミュレーション



気温感受性

降水量感受性



出典 : Carvalhaisら(2014) *Nature* 514

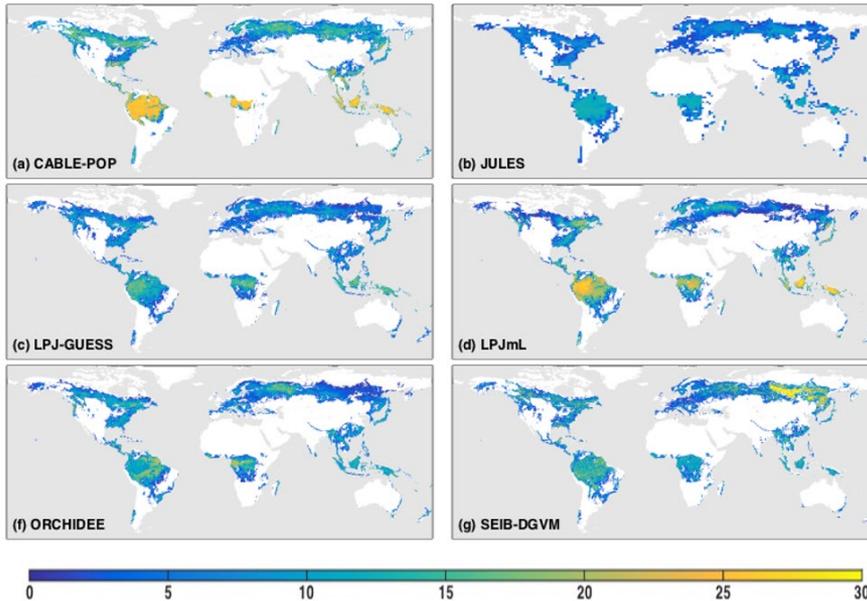
現在の気候条件でシミュレーションの結果を一致させているモデルの構造が、**現実のメカニズムを的確に反映していない可能性が高い。**

気候変動への応答の予測信頼性が低いのも、当然。

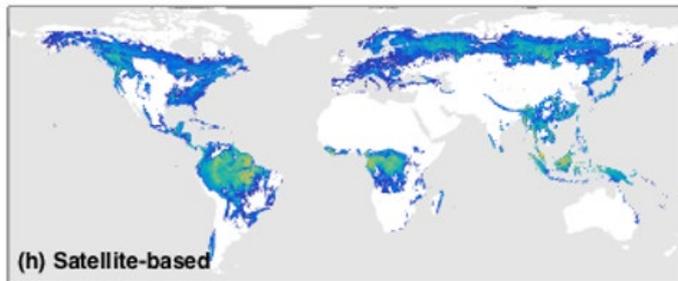
森林バイオマスの回転率

全球分布

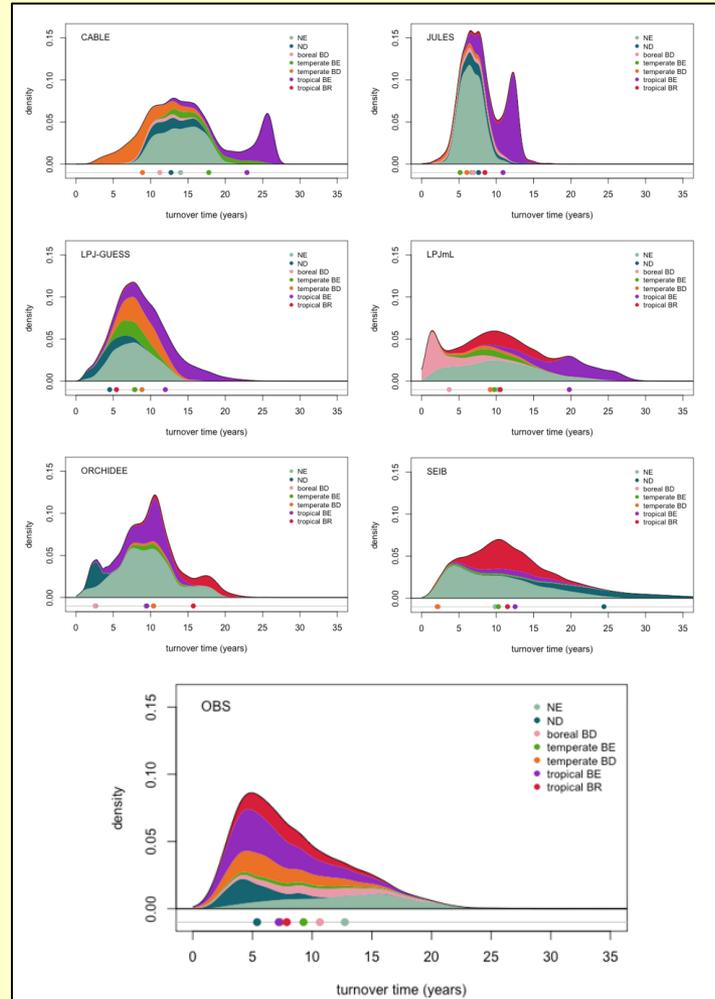
シミュレーション



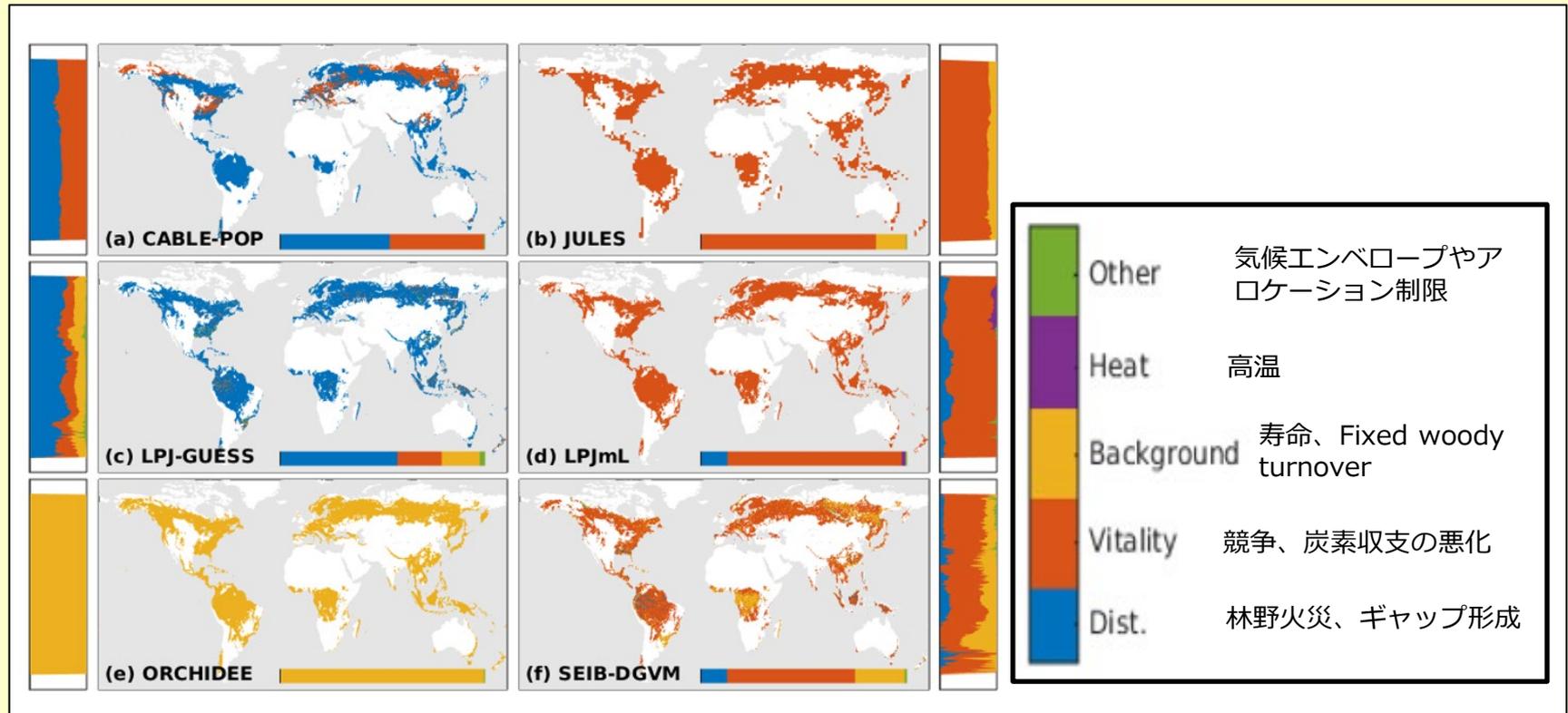
観測ベース



植生タイプ別の頻度分布



木本の死亡要因

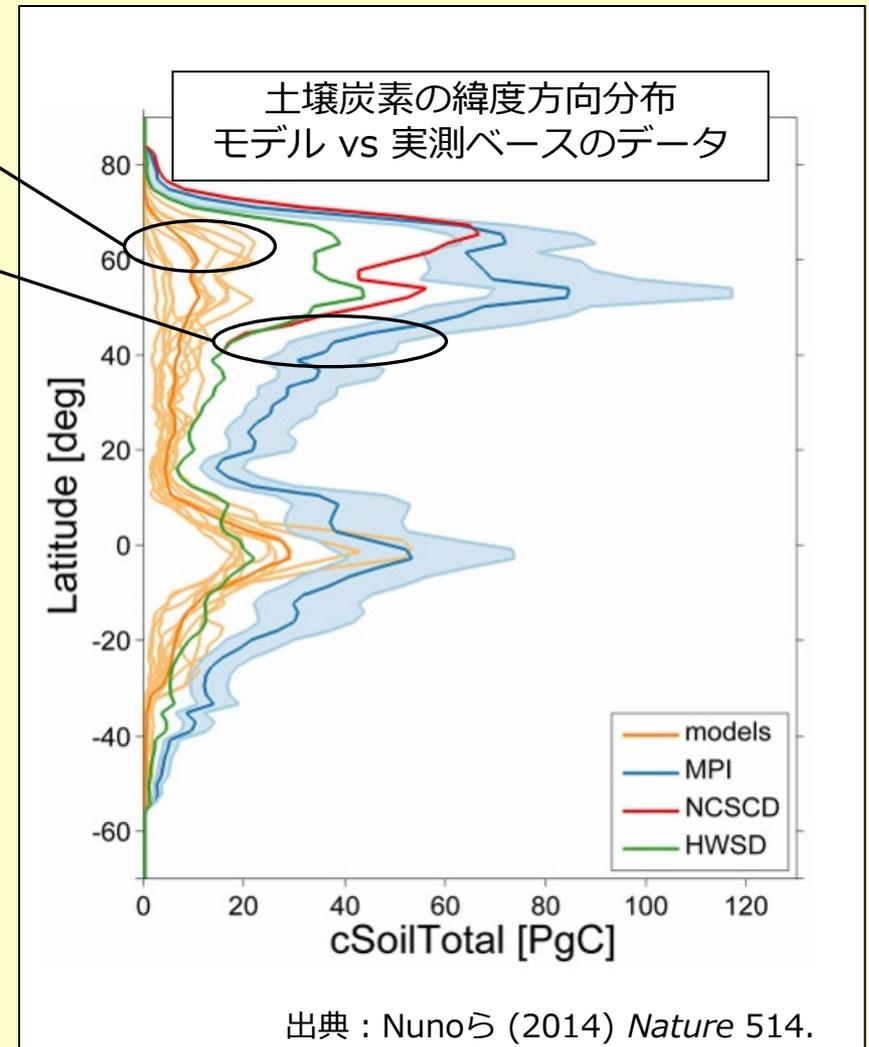


モデル間で大きく異なる。ただし、その理由として、死亡要因の定義がモデル間で一致しているわけでもない事も挙げられる。

扱いの改善が望まれるプロセス1：土壤炭素

CMIP5参加モデル出力

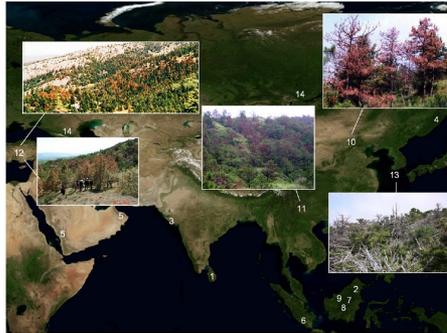
実測ベースのデータ
(MPI以外は、深さ1mまで)



現在のESMは、特に高緯度帯の土壤炭素を過小推定しており、今後は、凍土や泥炭に埋蔵されている炭素なども考慮する必要がある。

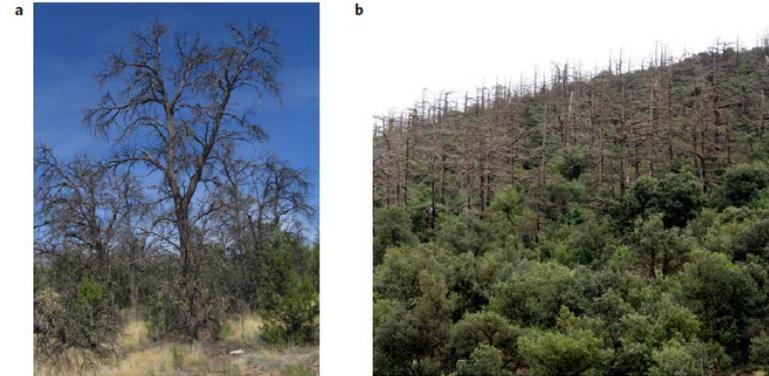
扱いの改善が望まれるプロセス2：乾燥枯死

近年、世界各地で乾燥による樹木の大量枯死が増加している



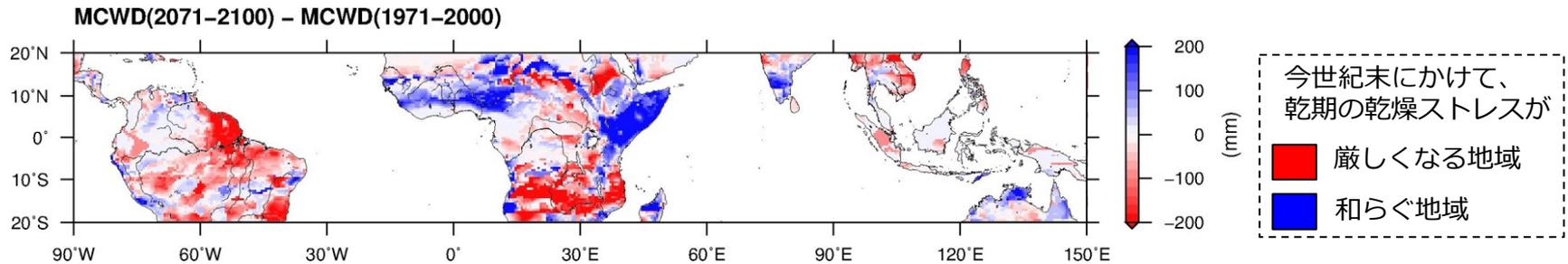
出典：Allenら2010 *For.Ecol.Manage.* 259

乾燥枯死リスクは、高木ほど大きい



出典：McDowell & Allen 2015 *Nature Clim. Change*

乾燥ストレスは、木本生物量が集中分布している熱帯域において特に厳しくなる見通し



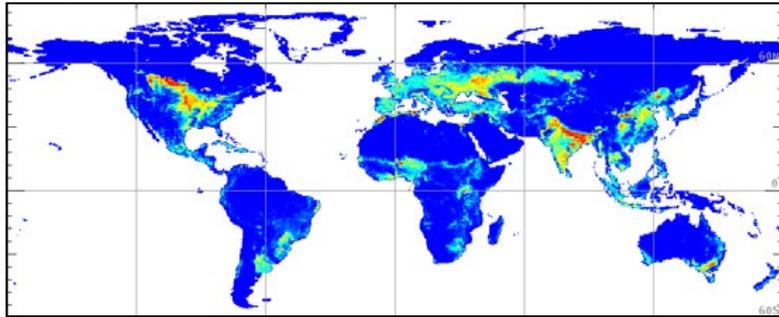
乾期の乾燥の強さを示す指標であるMaximum Climate Water Deficit (MCWD)の30年間最大値を、20世紀末と21世紀末とで比較した。(with MIROC-ESM@RCP8.5)

計算・画像提供：高橋厚裕 (気候変動リスク情報創生プロジェクト、テーマD)

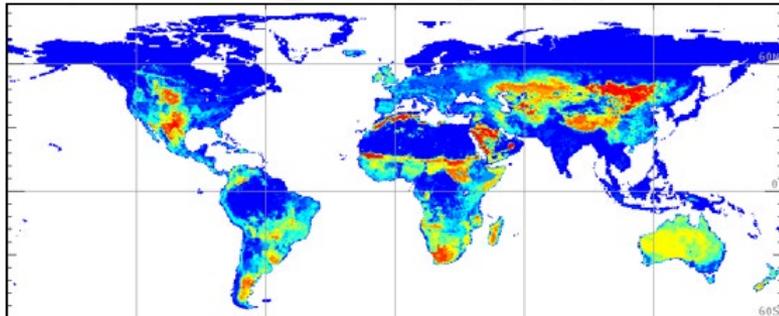
個体ベースモデルを用いた乾燥枯死のモデリングが行われつつある

扱いの改善が望まれるプロセス3：土地利用

陸面のうち耕作地の割合

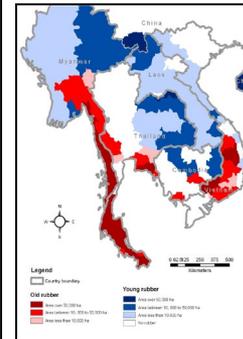


牧草地・放牧地の割合

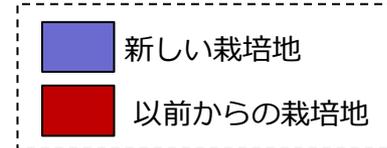


図の作成：加藤知道、データ源：CMIP5指定のForcing Data

近年、インドシナ半島北部を中心にゴムの栽培面積が急増



中国雲南: 540 ha (1950) → 300,000 ha (2008)
ラオス: 100 ha (2003) → 180,000 ha (2010)
タイ: 400,000 ha (1961) → 2,000,000 ha (2003)



出典：J. FOX @East-West Center

ゴム林は天然林に比べ、水利用量が多いため、ゴム造成後に以下のような環境変化も報告されている (Mann 2009, *Science* 325)

- ・霧が消えた
- ・河川流量が減り村の移転を強いられた
- ・土壌浸食が45倍に

土地利用が気候変動に与える影響は、IPCC第5次報告書から検討が始まった。地球システムモデルにおける、その扱いは極めて初期的な段階に留まっている

扱いの改善が望まれるプロセス4：その他

生物多様性

陸域生態系モデルでは、植物の種多様性を10種類前後の機能型に要約することが多い。全球を対象とするためにある程度の要約は避けられないが、本来なら個別に扱うべき遷移初期種や遷移後期種、また低木種や林冠種までをひとまとめにしており、十分な扱いがされているとは言えない。

種子拡散

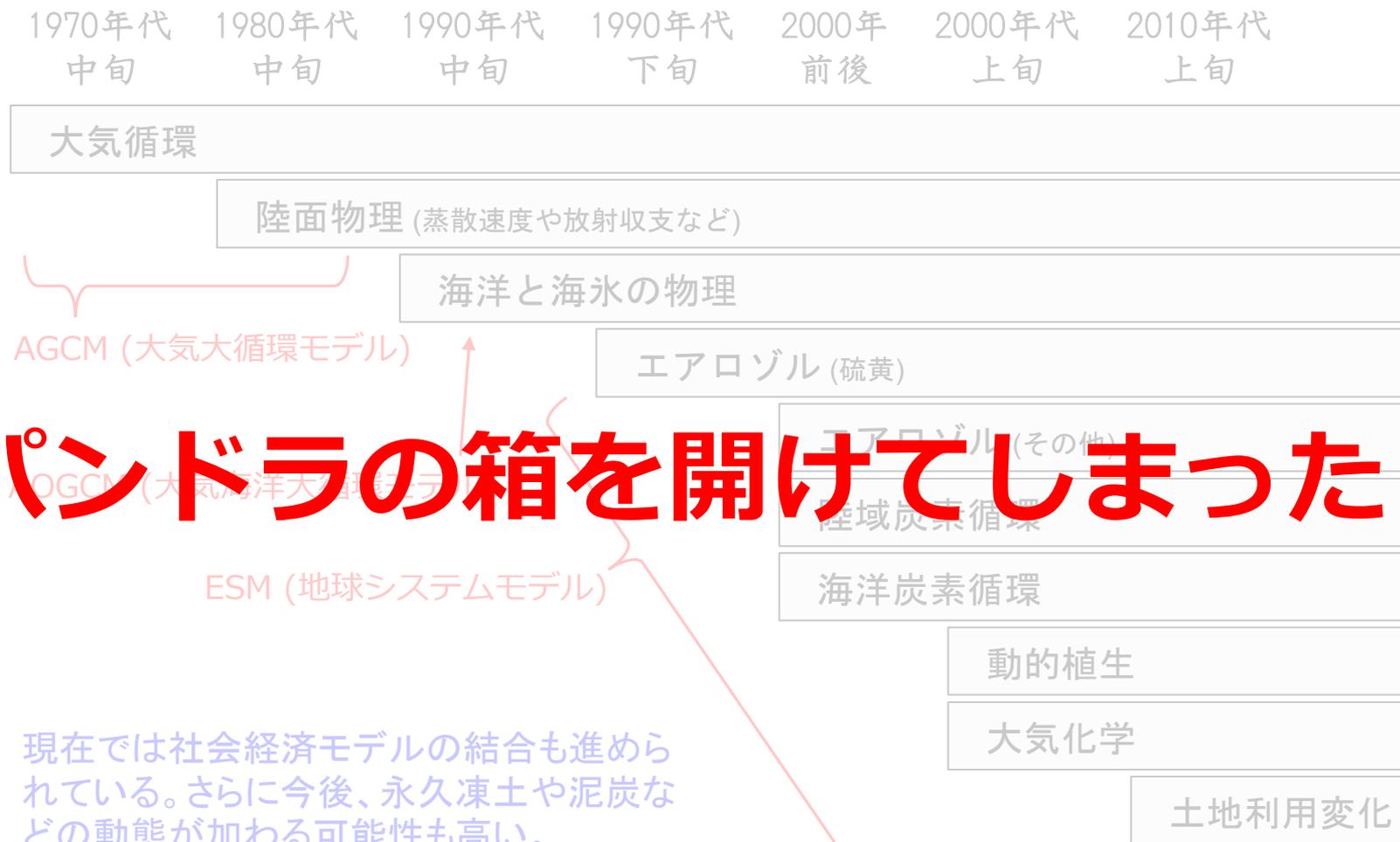
花粉化石記録と古気候の再現を用いた研究からは、種子の分散距離の制限が、植生帯の移動を数十年から数千年のスケールで遅らせる事例が報告されている。

CO₂濃度変化が植物生産性に与える影響

植物群落の全体のCO₂濃度を人為的に上昇させ、それが群落の構造や機能に与える長期的影響を探るFACE実験が、世界各所で実施中。しかし最も歴史の長いFACE実験サイト（北米の2カ所）の間で、植生の応答が定性的に異なるなど、植物群落スケールでの定量的応答が一般化できる段階ではない。

個々の要素が、いかに予測不確実性に大きなインパクトを与えうるかという各論的な研究が熱心に行われる一方で、そのような研究から得られた知見を、統一的なモデルに取りまとめていこうとする努力は、不十分に感じる。

気候モデルの発達



原図：IPCC 3rd Assessment Report

気候モデル（数10～数100年先の気候を予測するモデル）は複雑な地球システム統合モデルへと発展しつつある