

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)



SEIB-DGVM

Spatially Explicit Individual Based
Dynamic Global Vegetation Model



JAMSTEC

Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology

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

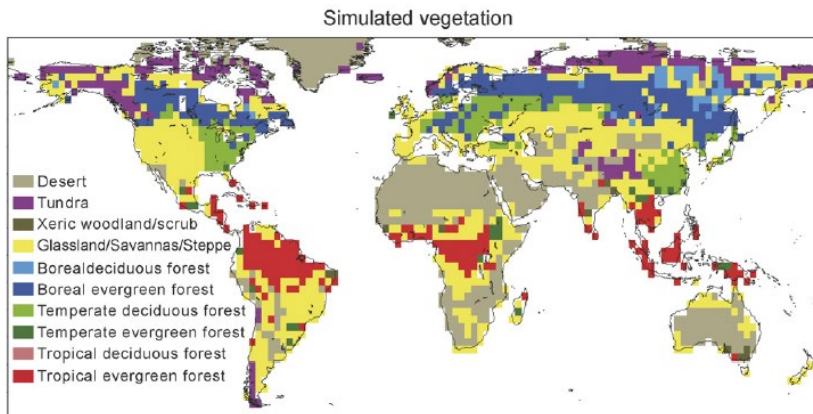
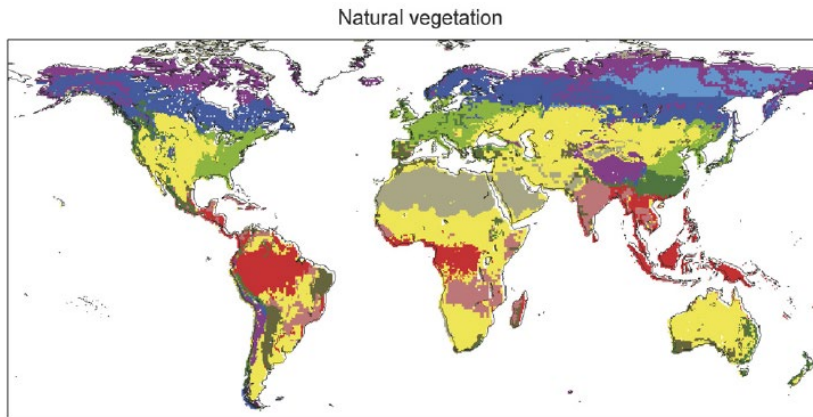
連携准教授として、再度、教育にも関わらせていただくことになりました。

動的全球植生モデル(DGVM)とは

SEIB-DGVMを例として

SEIB-DGVMの全球出力

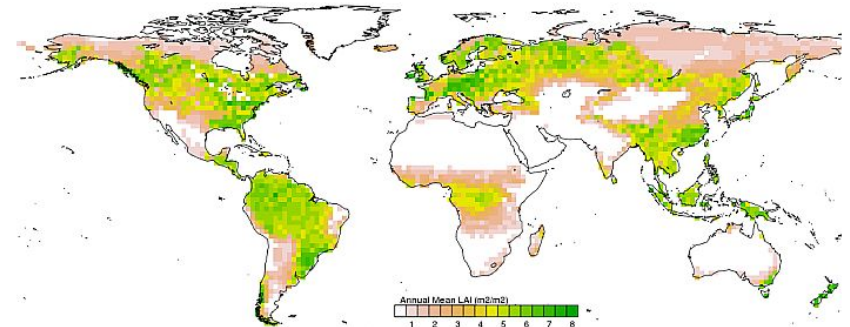
植生タイプの地理分布



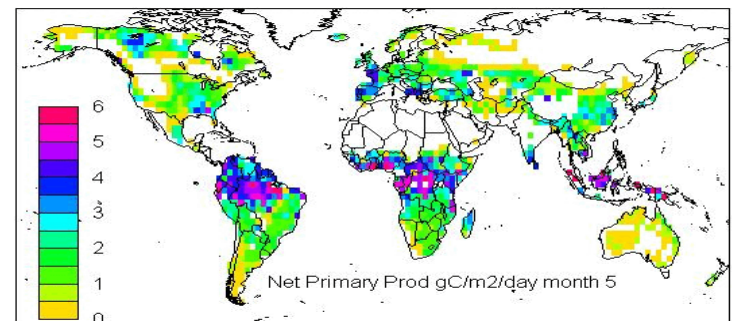
植生タイプの分類基準は様々（後述）

植生の構造と機能

Annual mean of LAI



純一次生産量



他には、生物量・アルベド・蒸発散速度など

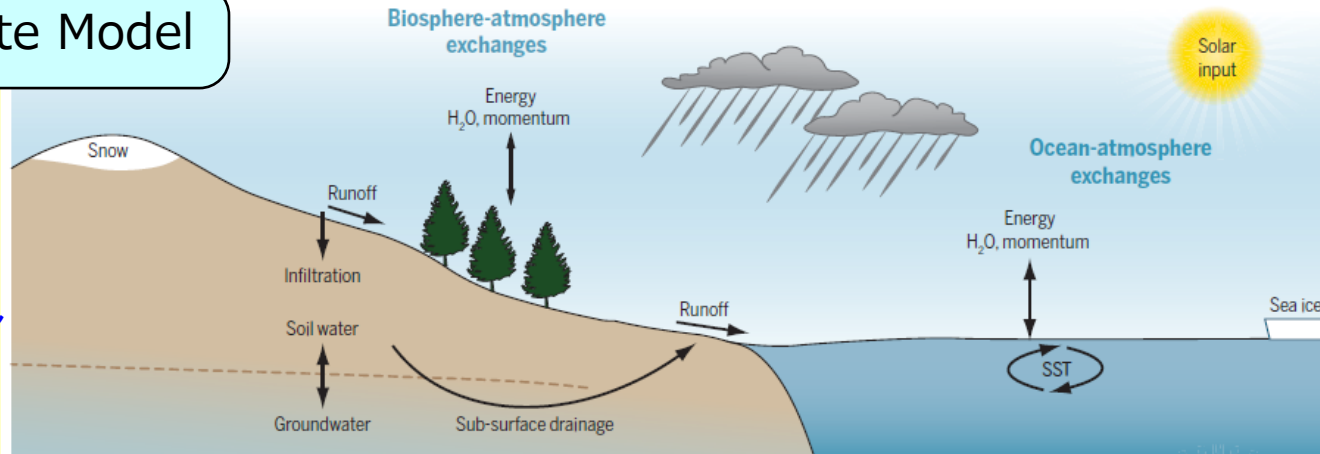
イントロダクション

気候モデルから地球システムモデルへの発展と
動的全球植生モデル(DGVM)

気象モデルと地球システムモデル

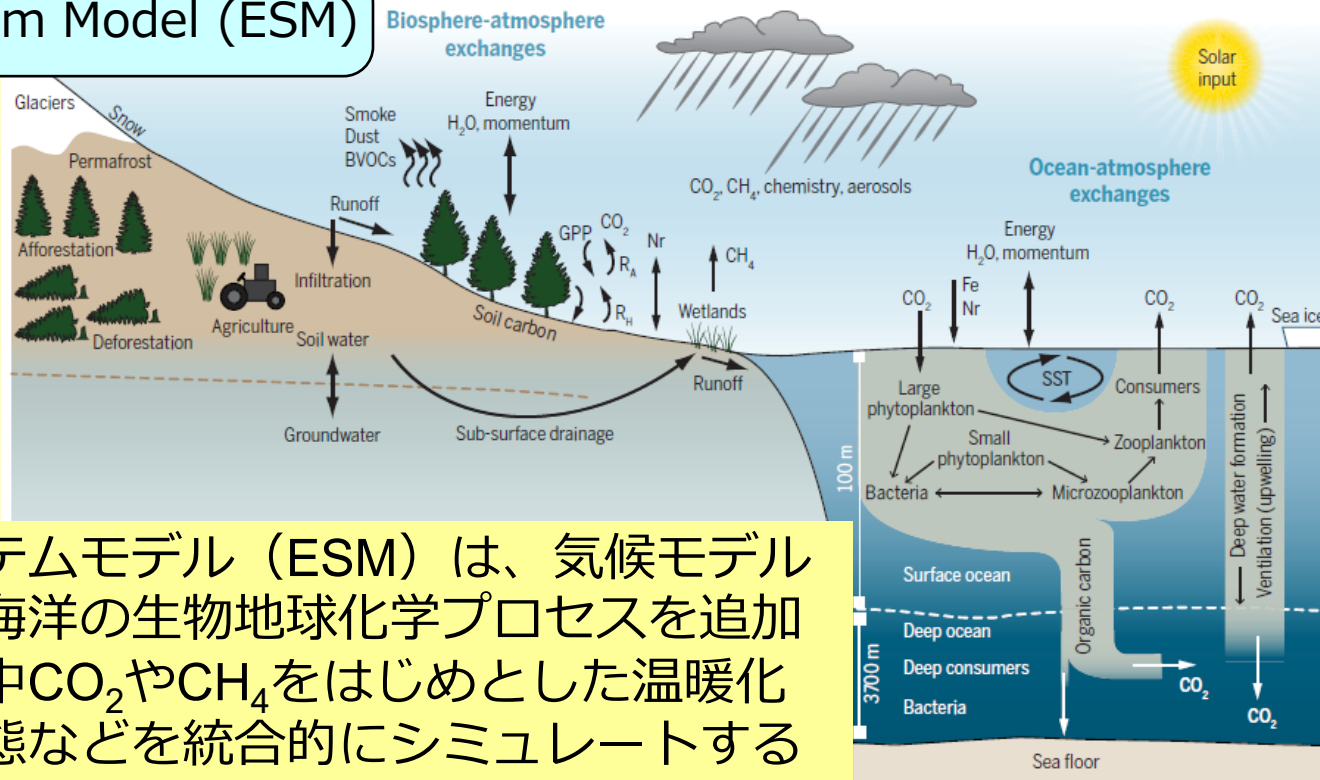
Climate Model

「気象」
を扱うモデル



Earth System Model (ESM)

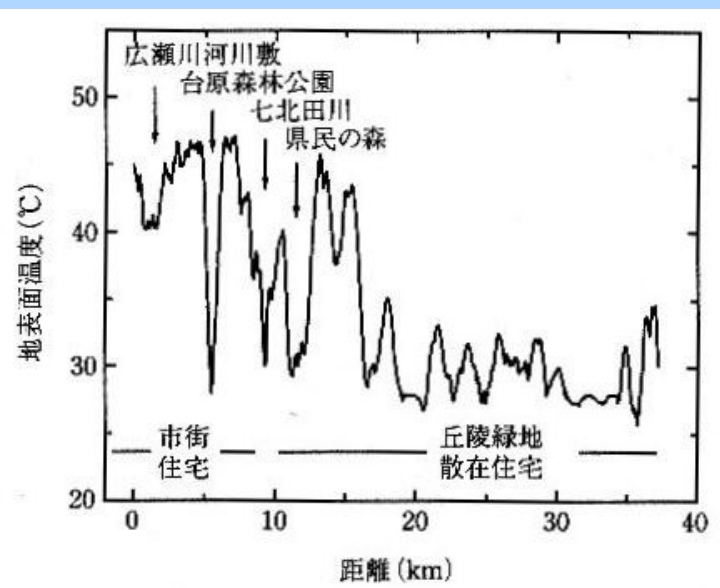
「気候」
を扱うモデル



地球システムモデル（ESM）は、気候モデルに陸上・海洋の生物地球化学プロセスを追加し、大気中CO₂やCH₄をはじめとした温暖化ガスの動態などを統合的にシミュレートする

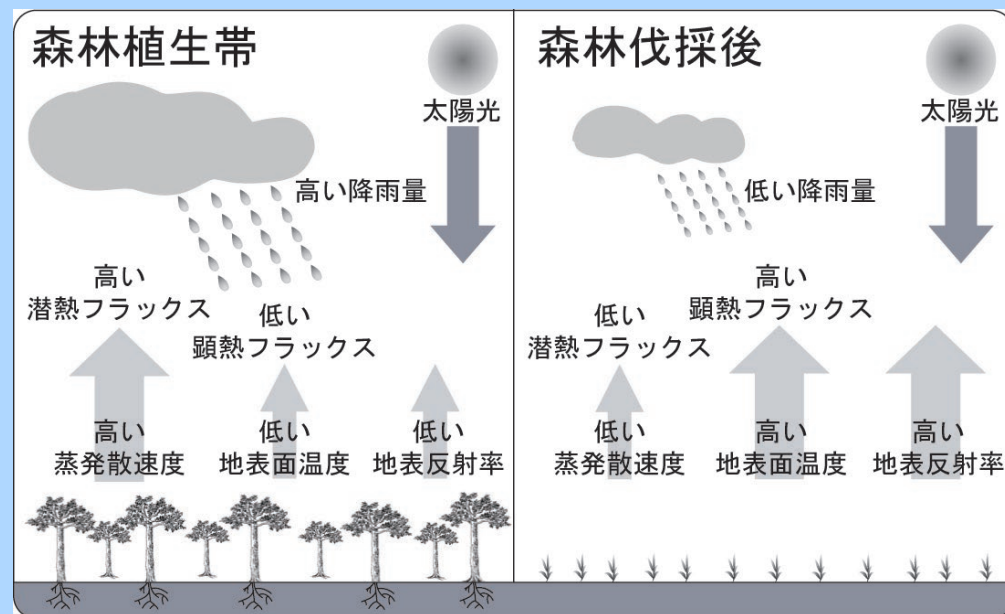
植生から気象・気候へのフィードバック（熱/水/放射）

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

植生が存在することで、例えば年平均気温は一般に

・ 中低緯度帯

→ 下降

・ 高緯度帯

→ 上昇

気候モデルの発達 (1/3)

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

大気循環

陸面物理 (蒸散速度や放射収支など)

海洋と海氷の物理

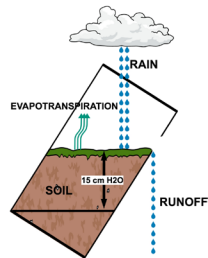
エアロゾル (硫黄)

AGCM (大気大循環モデル)

AOGCM (大気海洋大循環モデル)

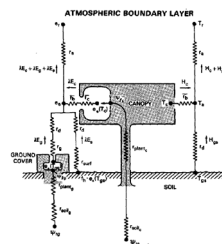
この時代の関連する陸面物理モデルと鍵となる論文

BudykoのBucket model



Manabe (1969)
MWR 97

SiB, SiB2

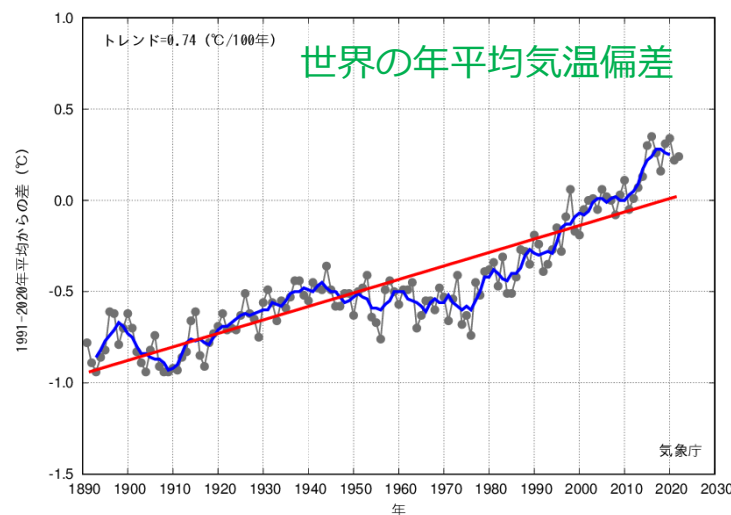


Sellers *et al.* (1986)
J. Atmos. Sci. 43

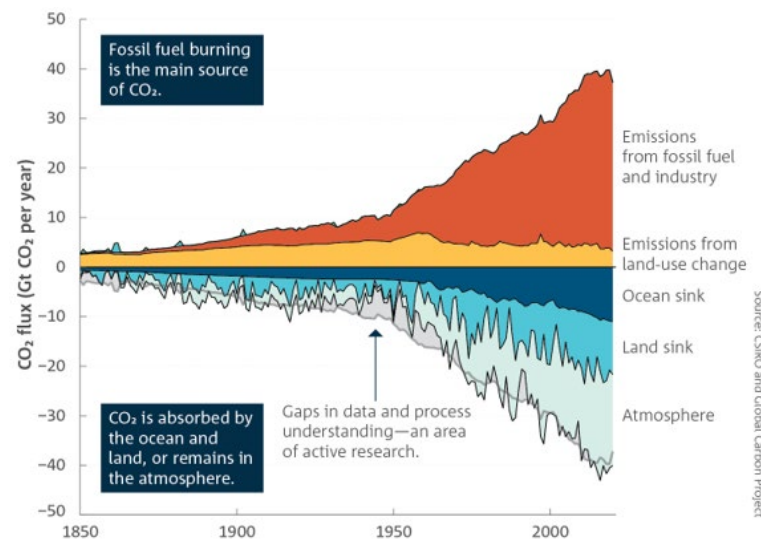
従って、気候モデル（数10～数100年先の気候を予測するモデル）は、ごく初期の段階から陸面物理が考慮されていた。

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。

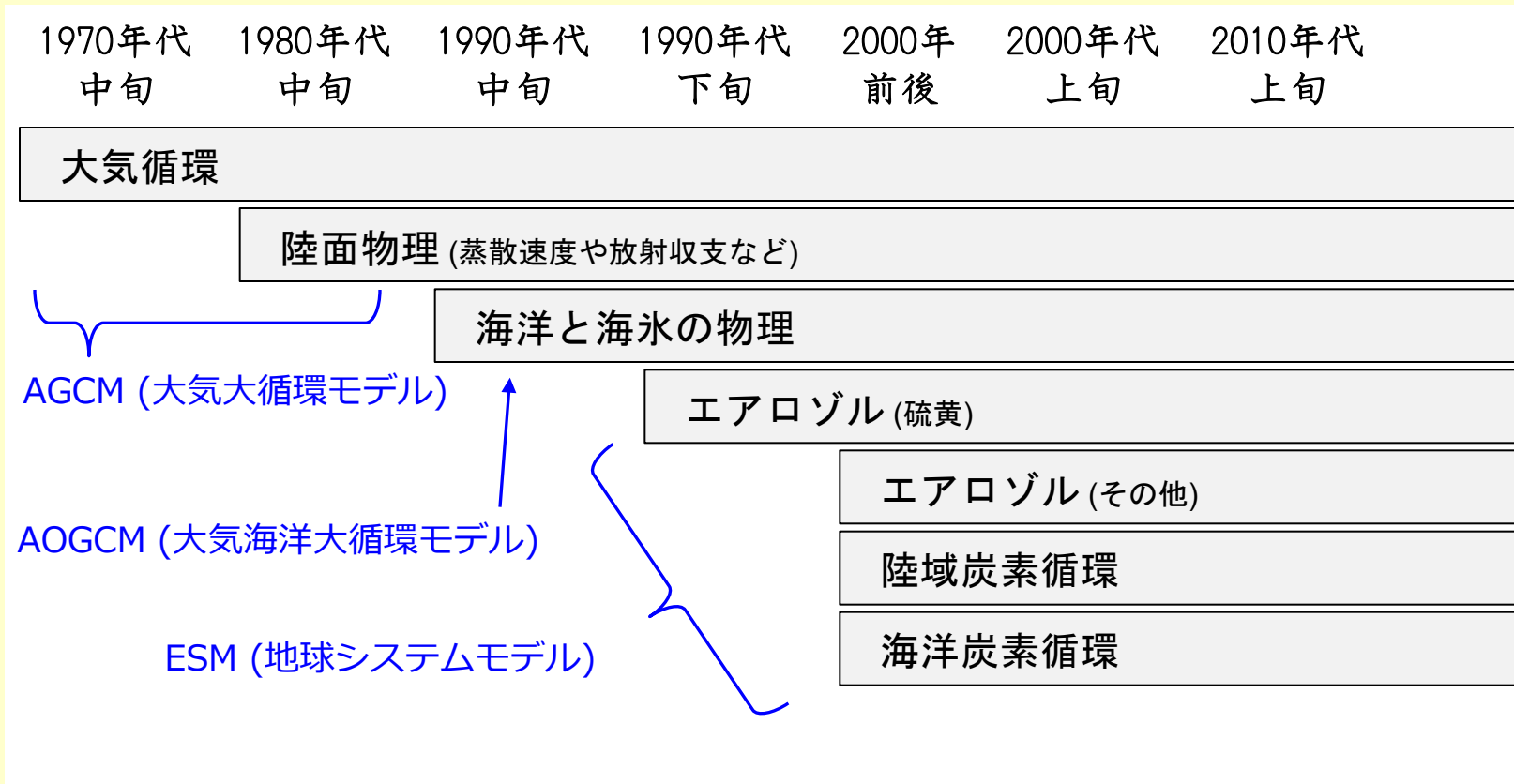


上半分：人為的CO₂の大気への排出フラックス時系列変化
下半分：大気中CO₂吸収フラックス時系列変化



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 (2/3)



原図：IPCC 3rd Assessment Report

そのため、気候モデルに陸面や海洋における炭素循環を扱う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

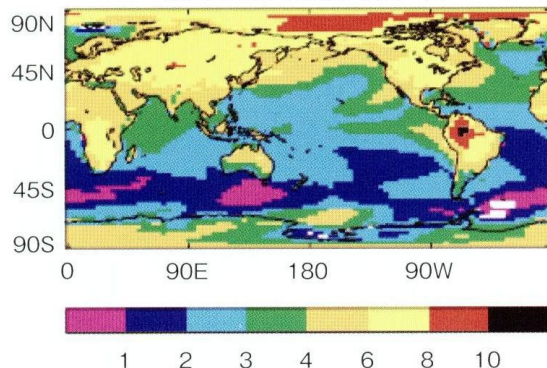


気候変動シミュレーションにおける動的植生の影響

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

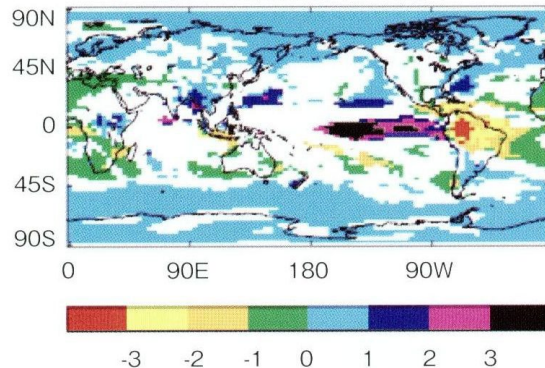
気温

(a) Screen Temperature (K)



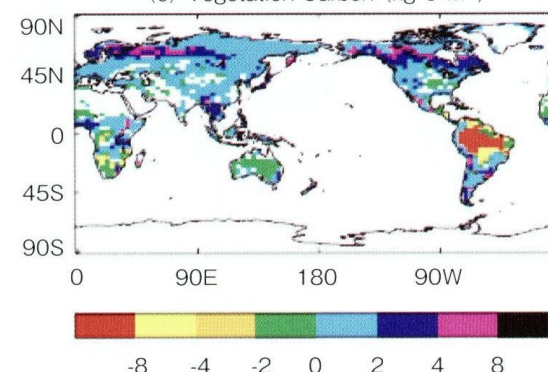
降水量

(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



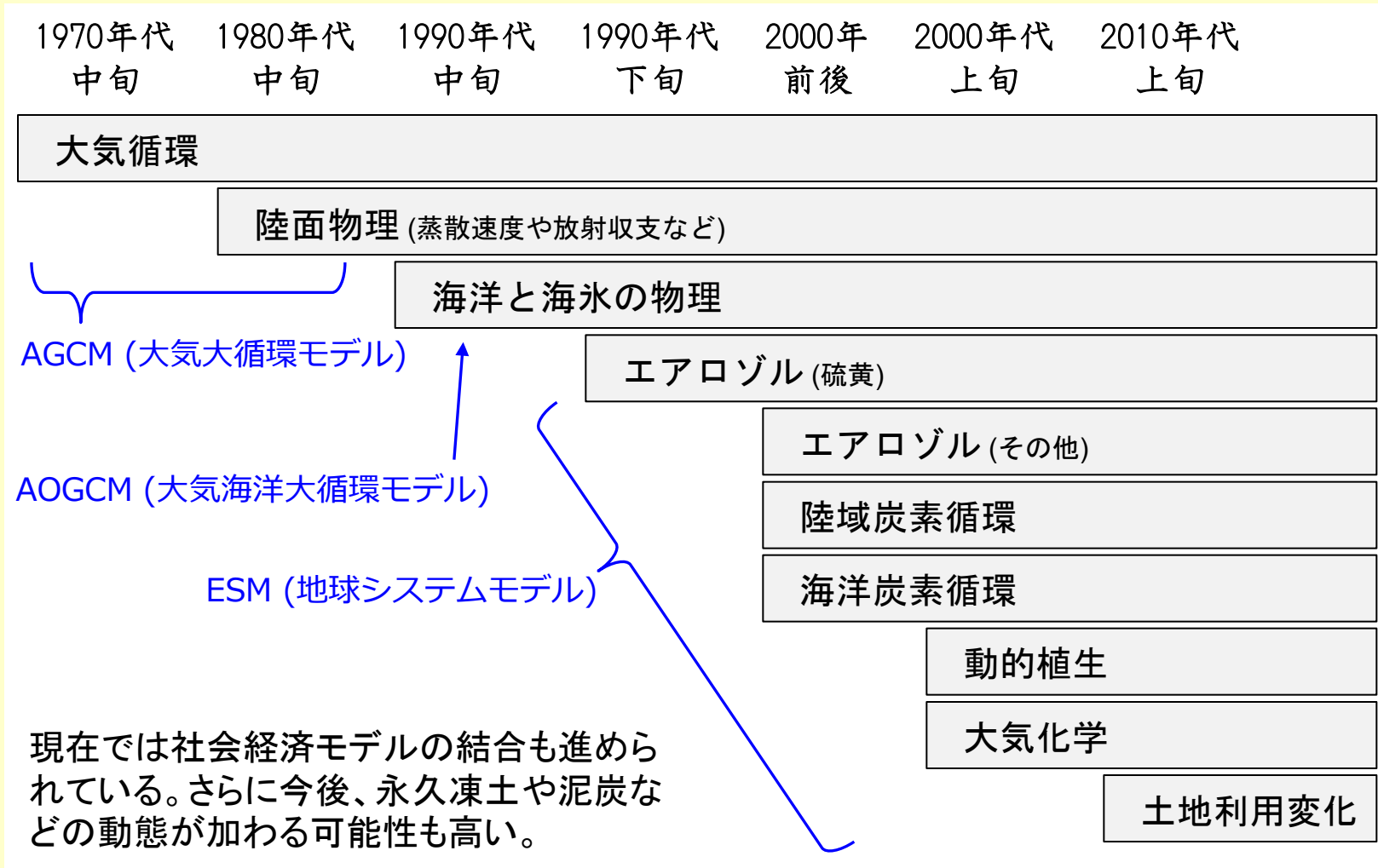
アマゾン盆地において生じる大規模な植生崩壊が、この差の主な理由

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 (3/3)

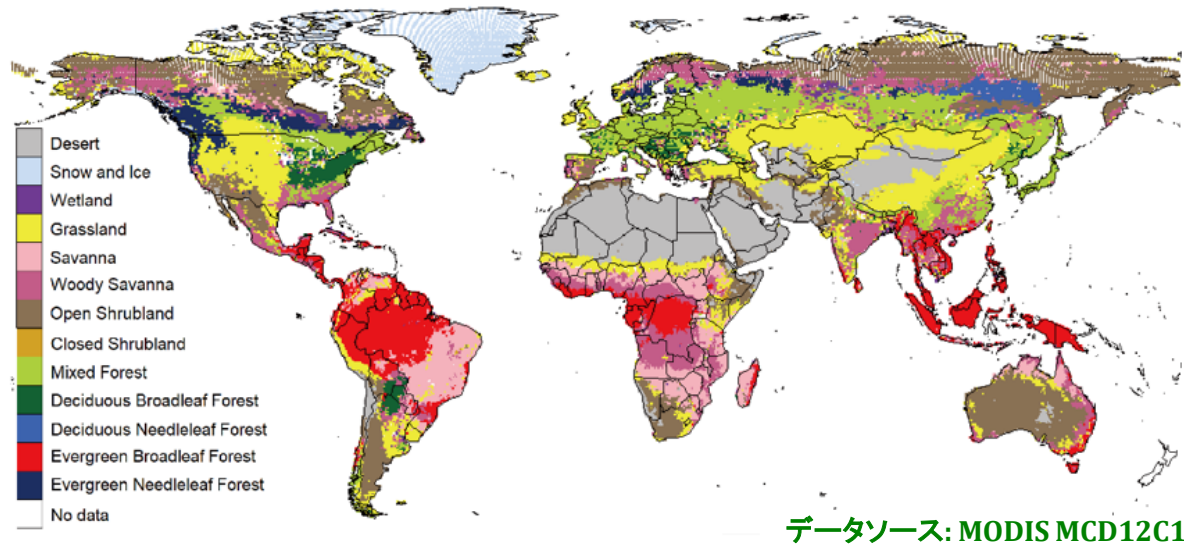
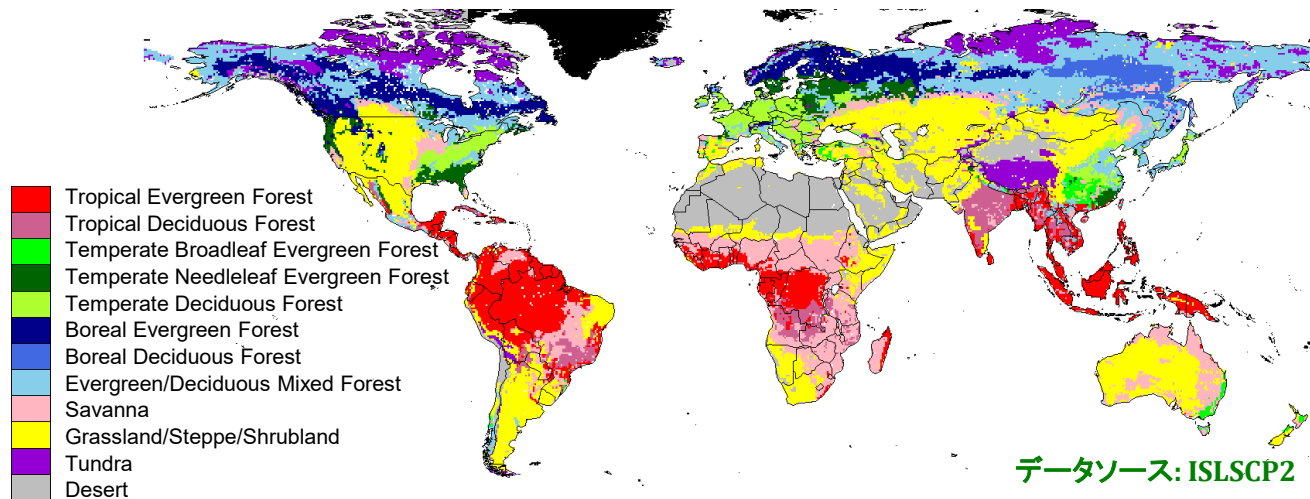


原図： IPCC 3rd Assessment Report

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

気候に対応した植生分布

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)

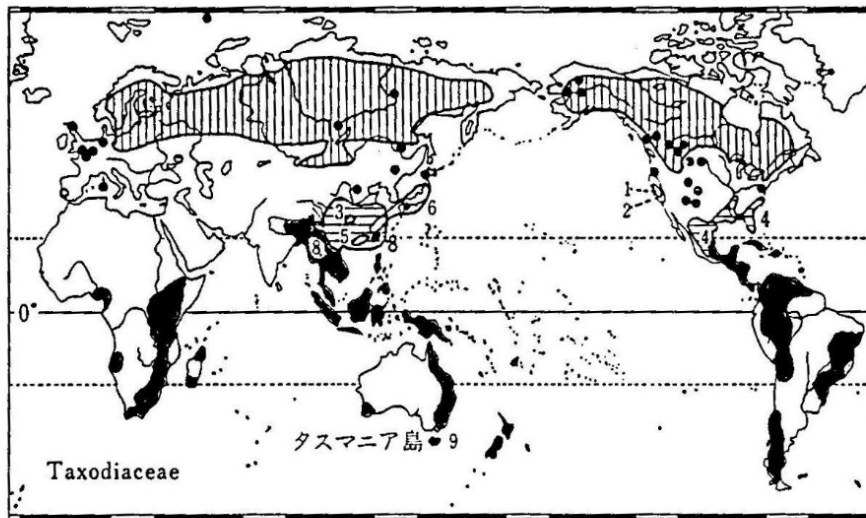


図 11.1 マツ科針葉樹からなる北方亜寒帯林と南半球のイヌマキ科針葉樹の分布 (Florin 1963)
縦線地域：マツ科針葉樹からなる北方亜寒帯林，横線：スギ科植物の分布域，数字は遺存地域を示す。
黒色地域：イヌマキ科針葉樹の分布。

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

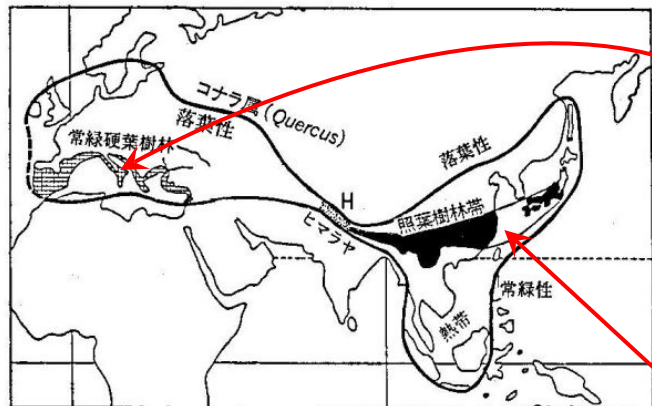


図 9.5 ヒマラヤを境にしたユーラシア大陸の二つの常緑カシ林、照葉樹林帯（右側）と硬葉樹林帯（左側）（Sealy 1958, Wang 1961, 安田 1988）
右下の太線（常緑性）はツバキ属の分布（Sealy 1958）を示す。また常緑樹林の北部が落葉性コナラ属の分布である。

図の出典：酒井昭著、「植物の分布と環境適用」朝倉書店

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）。

夏乾燥し、冬に多雨。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。

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、マキーと呼ばれる）である。良質の土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。

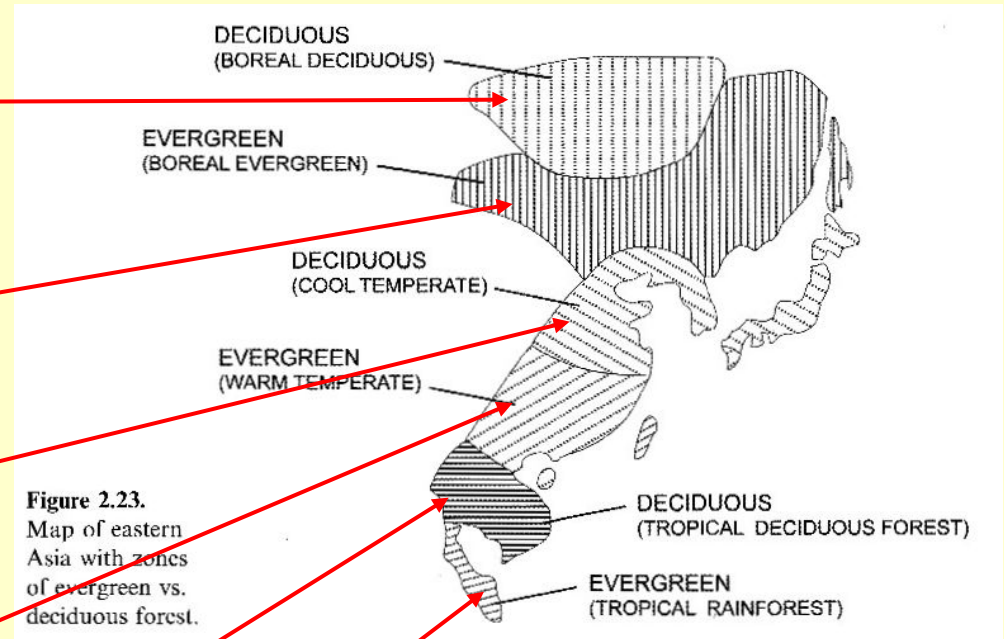
乾燥と霜害に強い針葉樹種が優占する

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-Climate 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

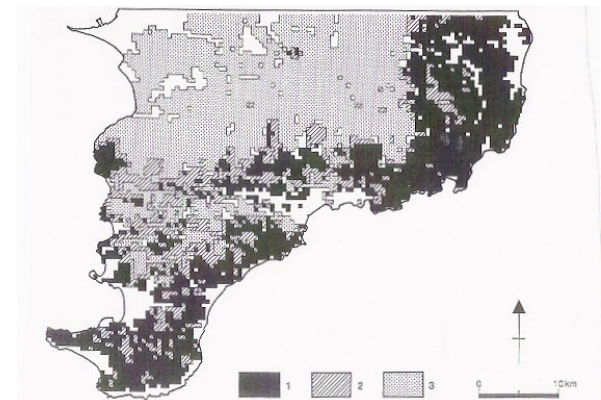


図8.1 南房総における二次林の分布（磯谷，1989）。表境庁発行5万分の1現存植生図をもとに作成。

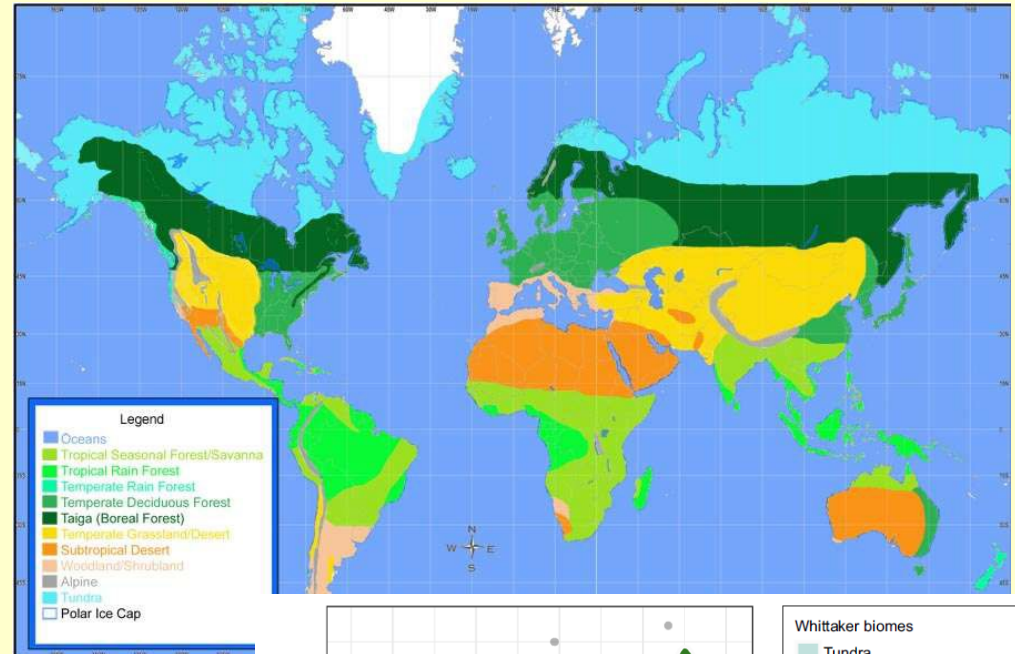
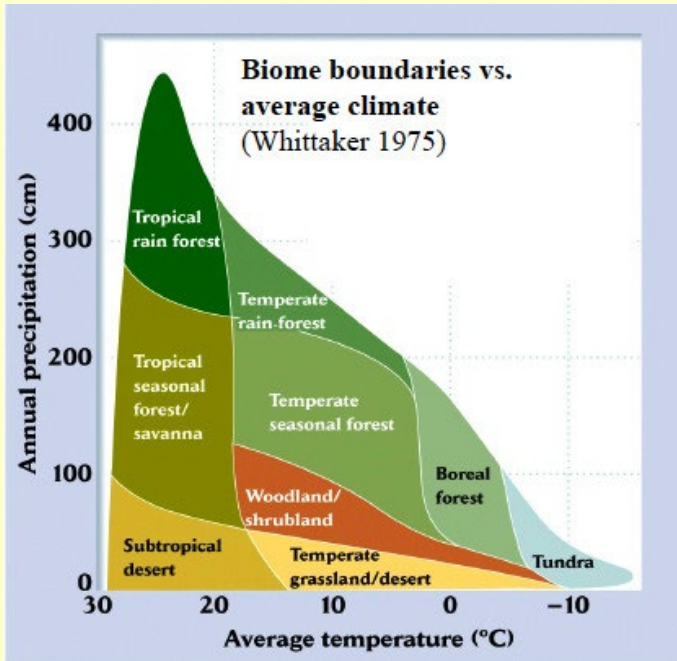
1：常緑広葉二次林，2：常緑および夏緑広葉二次林，3：夏緑広葉二次林

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。

気候エンベロップモデル

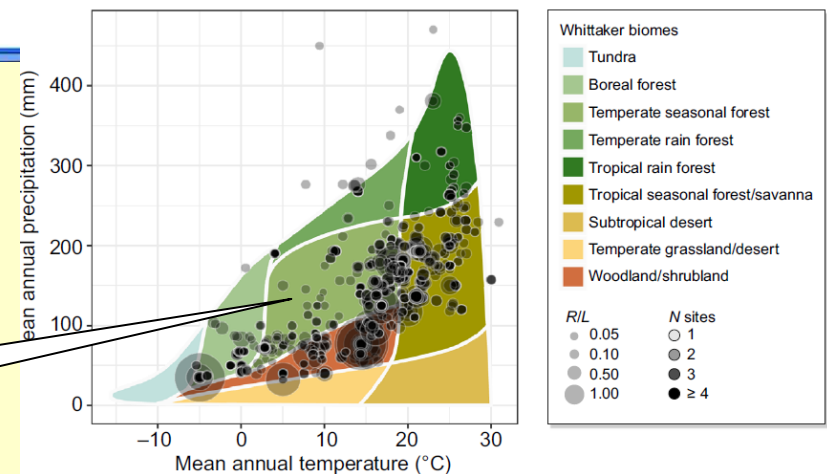
気候とバイオームとの対応関係をモデル化する方法の発達

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



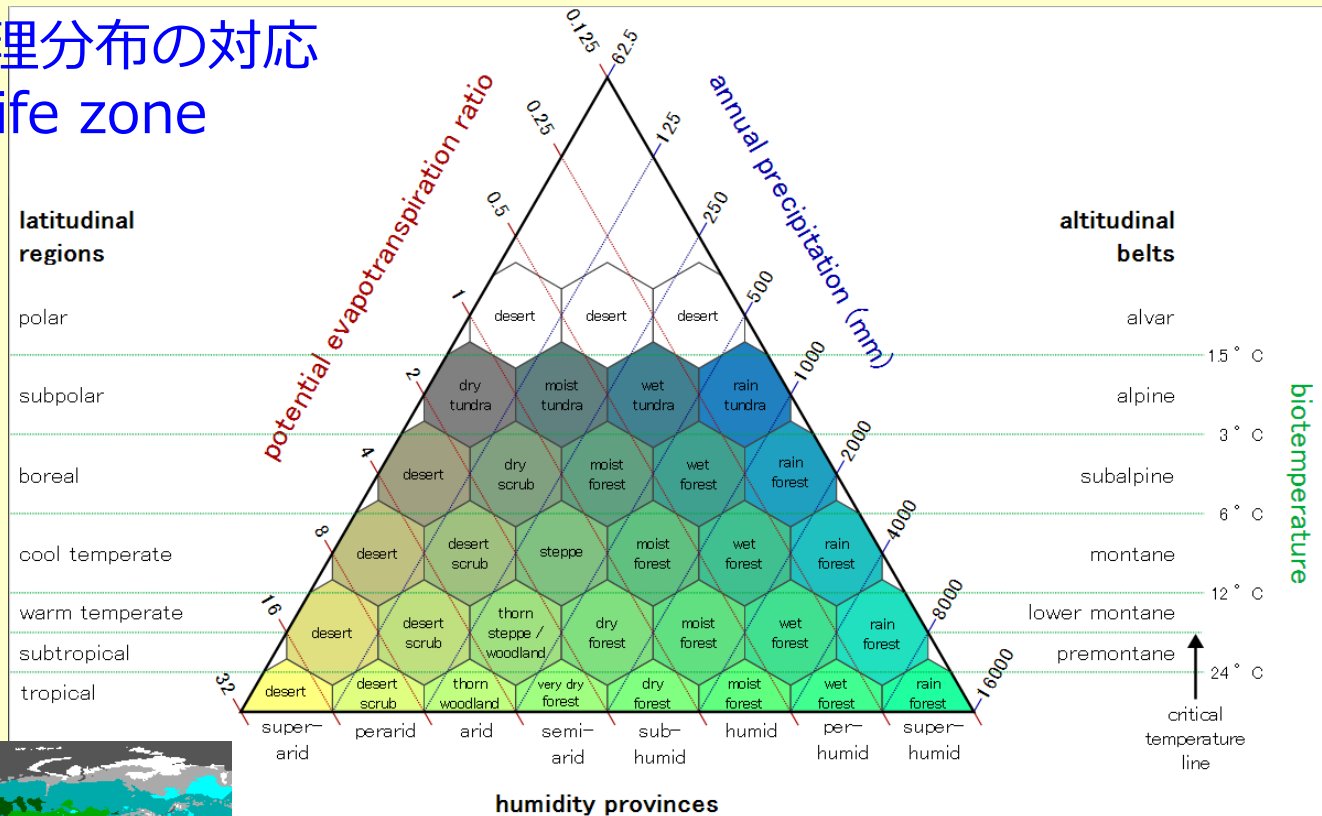
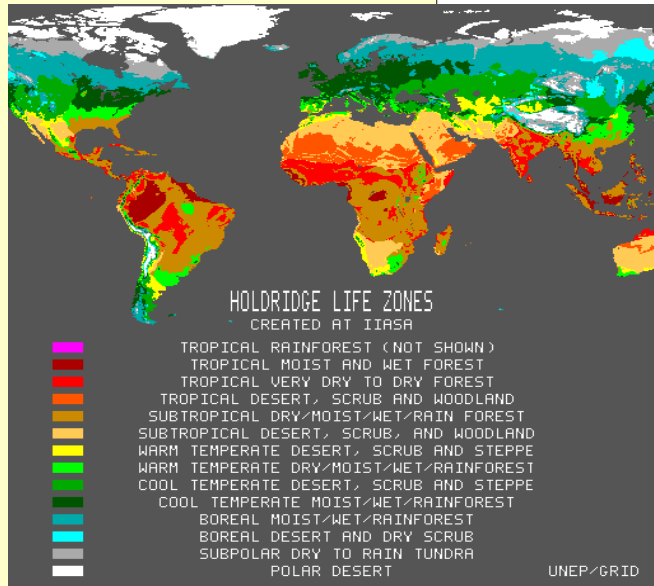
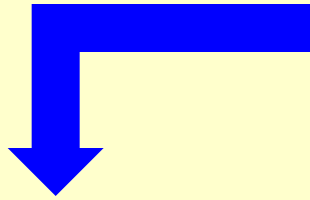
年平均気温と年降水量のみを考慮に入れた経験モデル。精度は低いものの、そのシンプルさ故に現在でも存在感あり。

この例のように「幅広いBiomeからサンプリングしましたよ」的な事を示すのに使われます



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、季節性を無視したモデルなので、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

基本的な植物生理要求[†]

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℃ : 多くの植物種にとっての限界

64℃ : 幾つかの多肉植物種

[例2] 霜害の生じる気温

-15℃以下 : 常緑性広葉樹種

-40℃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**気候エンベロープ**
(**Bioclimatic Envelope**)、
あるいはBioclimatic Limitと
言います

[†] : Beerling & Woodwell (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

PFTごとの生理条件をベースにした気候エンベロップモデル

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

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 min	GDD ₀ 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).

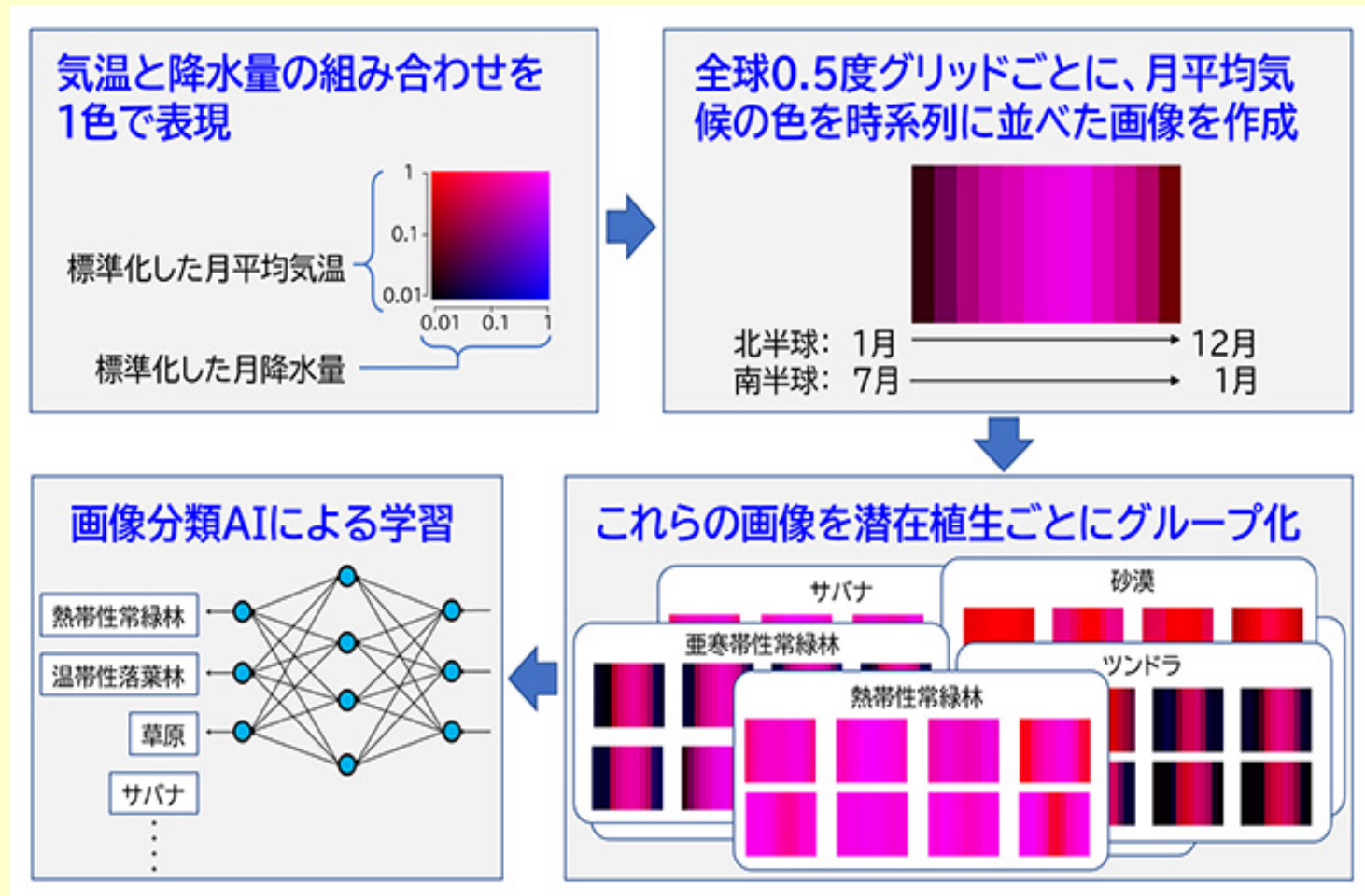
TABLE 5. Combinations of dominant plant types that occurred in the global model application, and the names they were given for mapping

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

PFT

優占するPFTの組合せにより
バイオームを決めてやる

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」

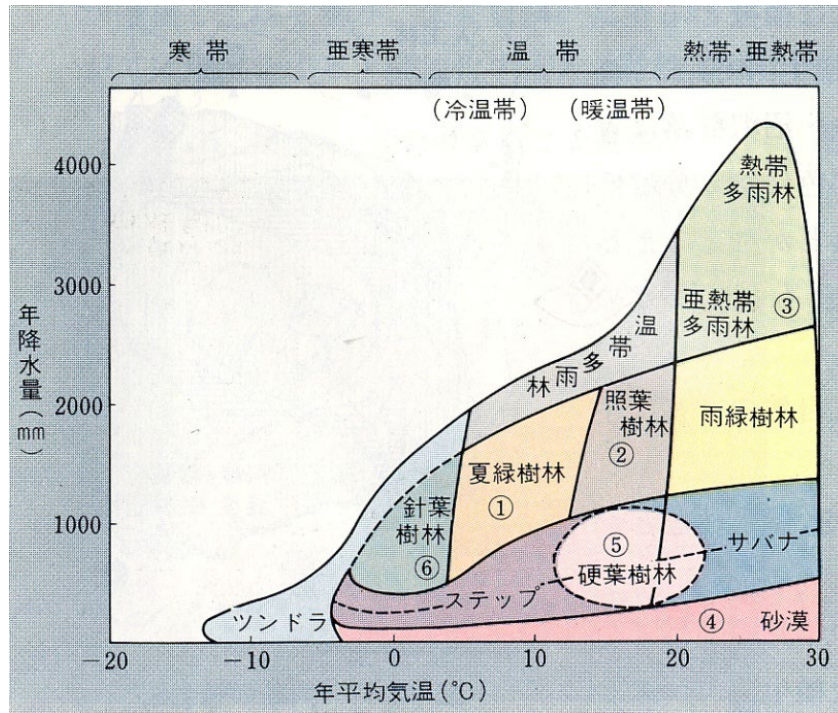
現在使える気候エンベロープモデルの中で、たぶん精度が最も高い方法。
ただし、モデルの中身はブラックボックス、かつ計算的に手軽でもない。

気候エンベロップで扱えない 生物地理学的な諸問題

(植生分布変化の時間遅れ)

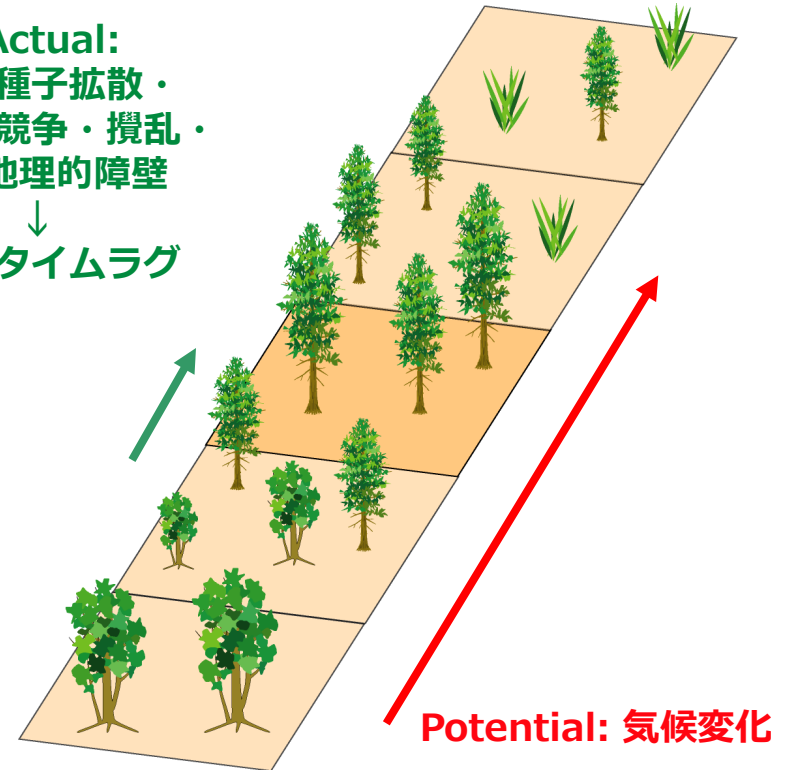
気候変動と植生変化との間の時間遅れ

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

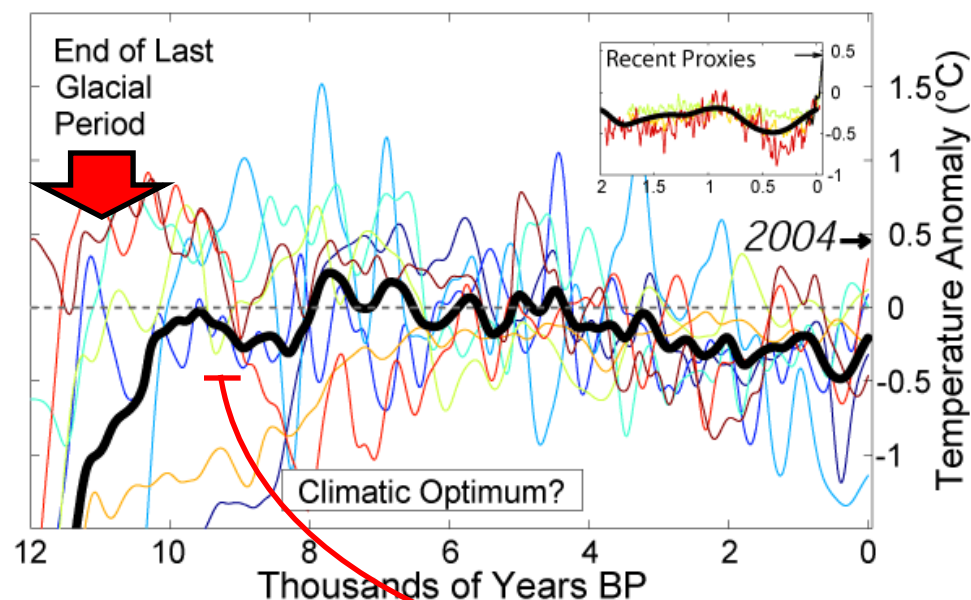
Actual:
種子拡散・
競争・攪乱・
地理的障壁
↓
タイムラグ



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。

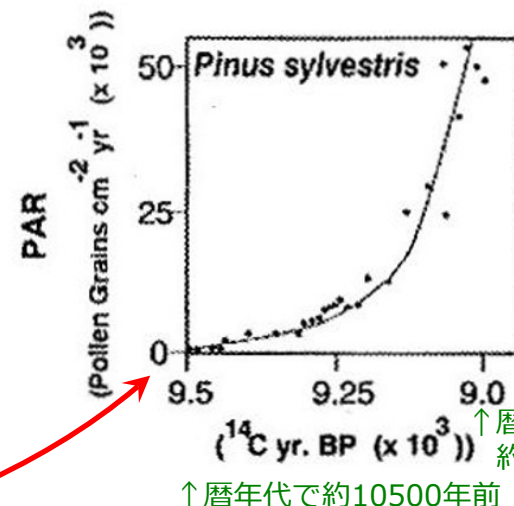
気候変動と植生変化との間の時間遅れ（実際の例）

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）

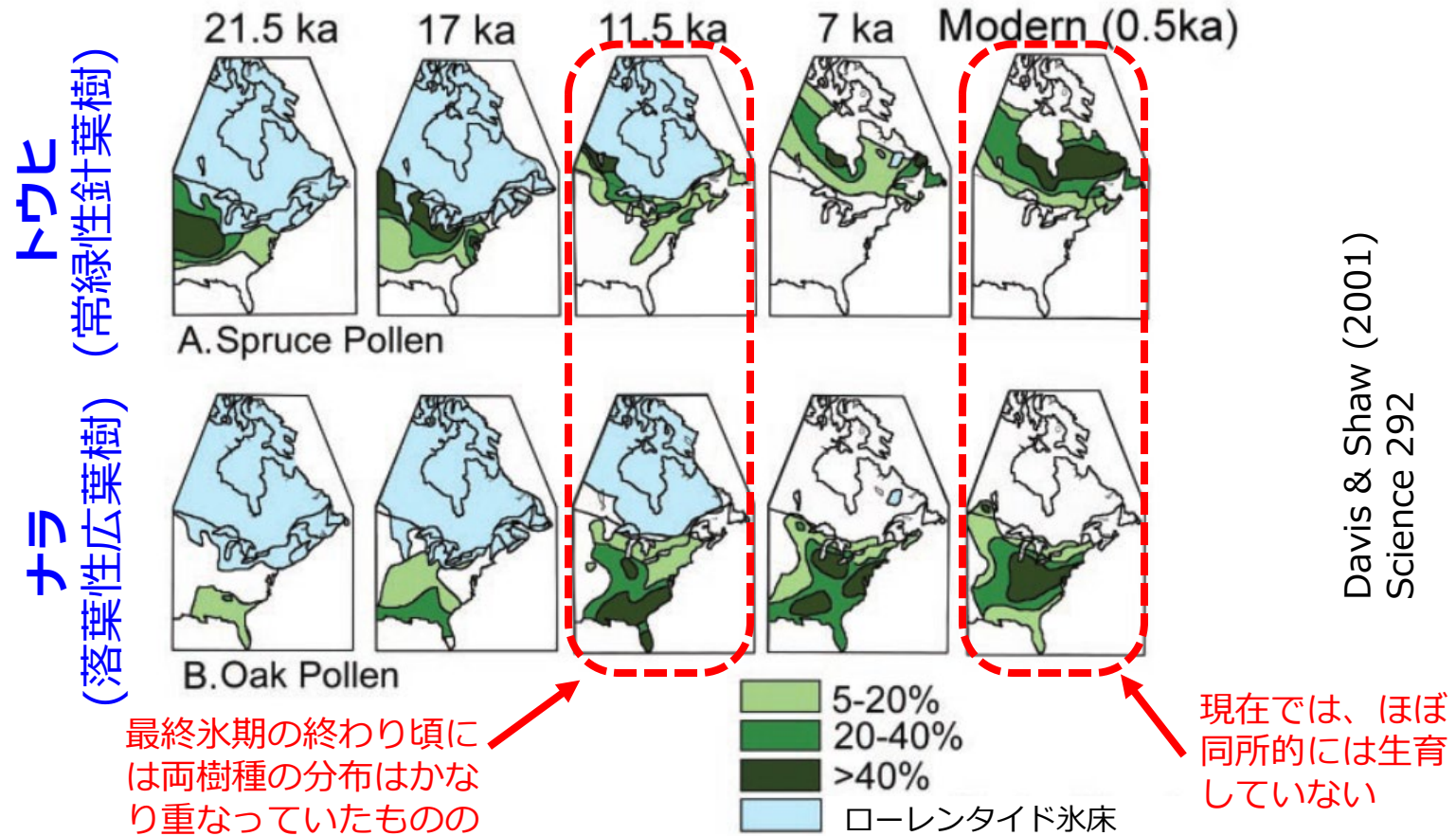


図の出典：
Vegetation-Climate Interaction 2nd edition

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

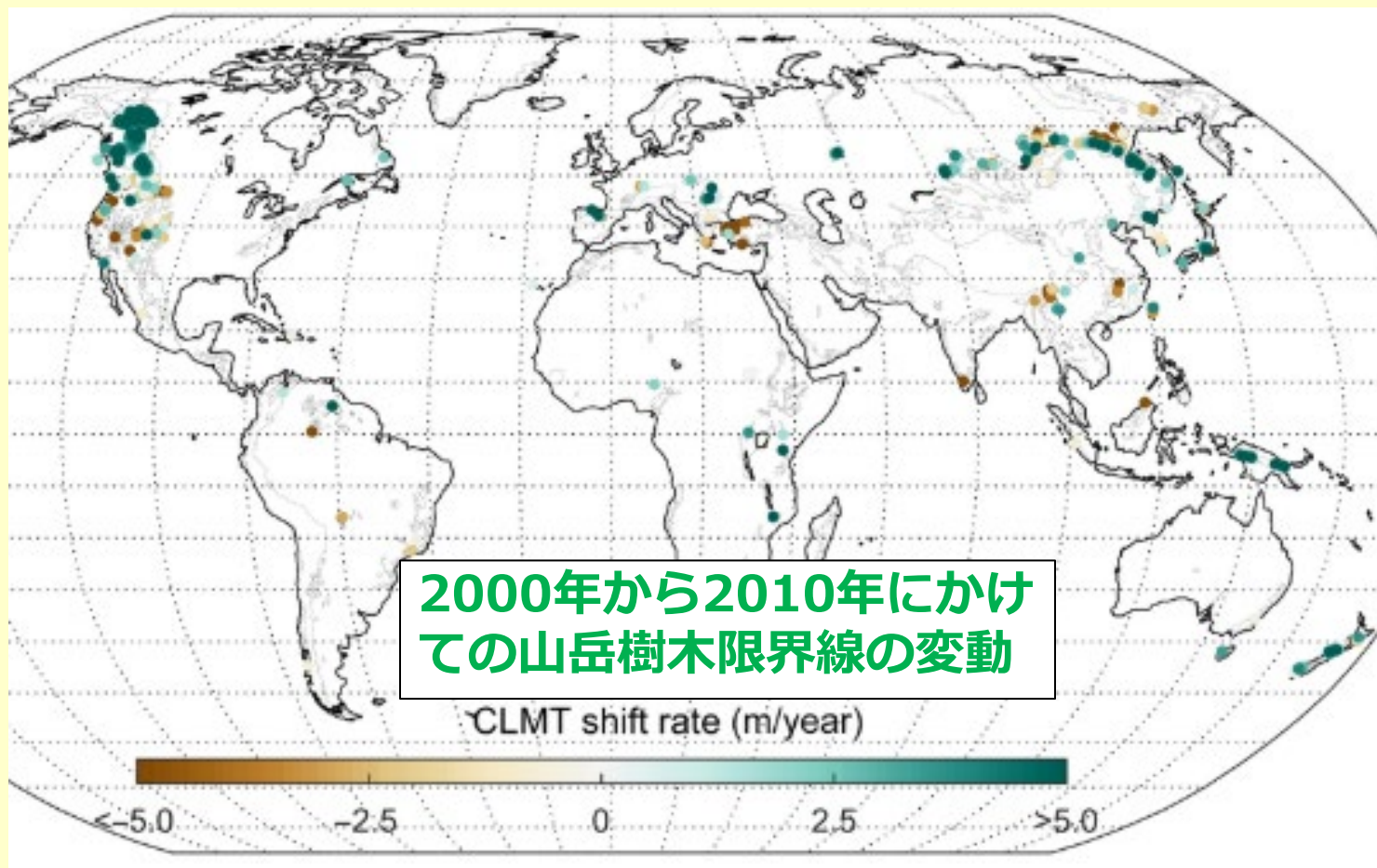
バイオームや植生タイプという植生分類手法の限界

花粉化石から推定された、トウヒとナラの最終氷期後の分布変化



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無く、個々の樹種は、それぞれのニッチに基づいて個別に分布が変化する

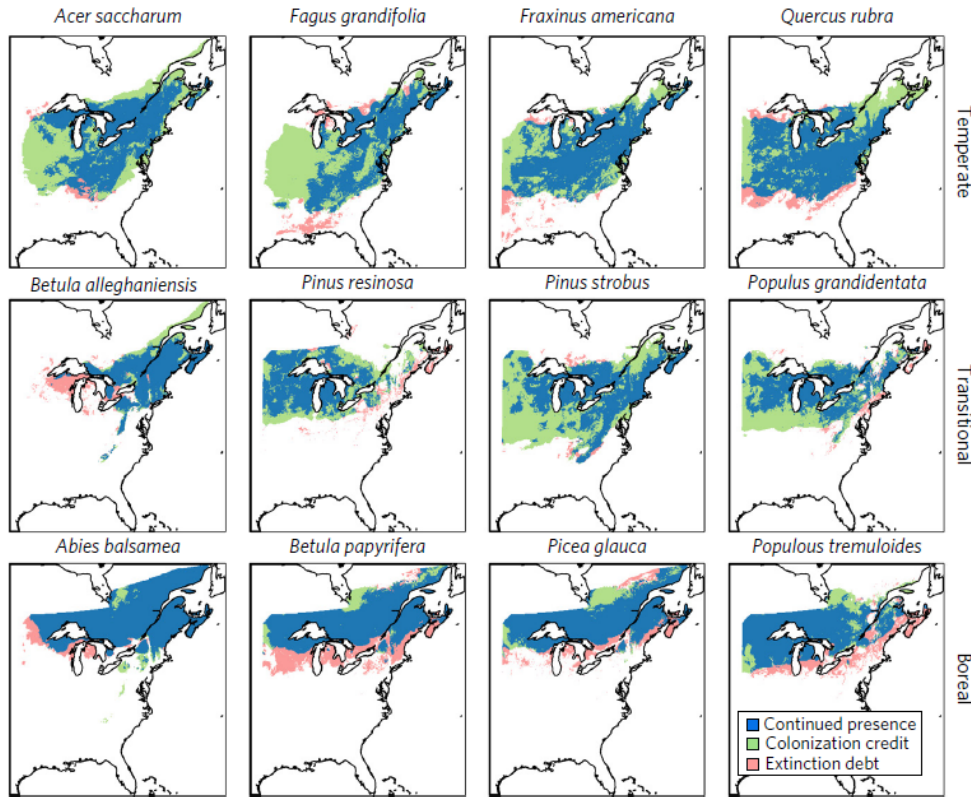
近年の気候変動に伴った植生変化分布の観測例 1



変動を制御する主要な気候的要因は、北方および熱帯地域では気温、温帯地域では降水量。21世紀初頭の10年間では、調査箇所の70%が上昇、平均シフト速度は年間1.2メートル。

近年の気候変動に伴った植生変化分布の観測例 2

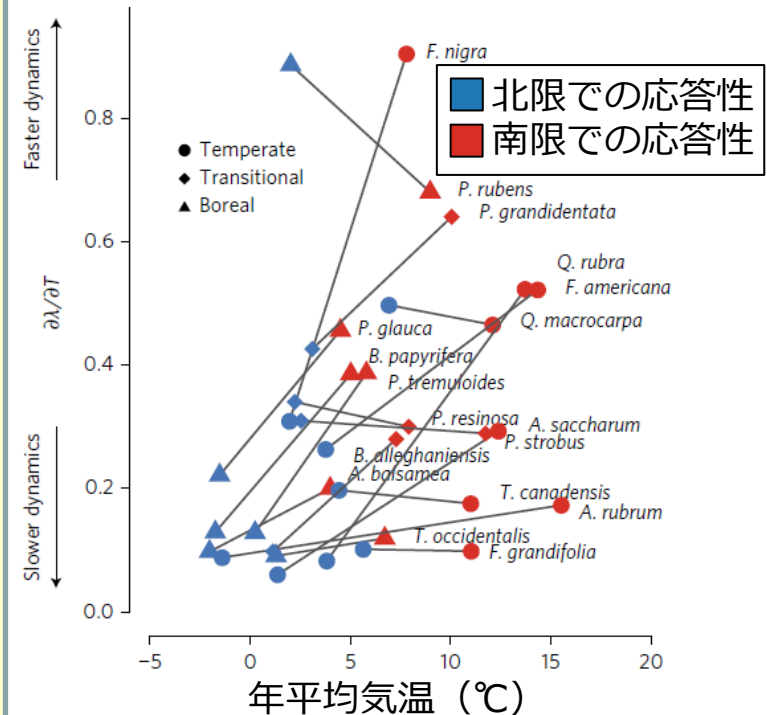
樹種ごとに推定されたColonization credit/Extinction debtの地理分布



- 現在は存続し、平衡状態でも存在が予測される
- 現在は存続しないが、将来は存在が予想される
- 現在は存続するが、将来は消失が予想される

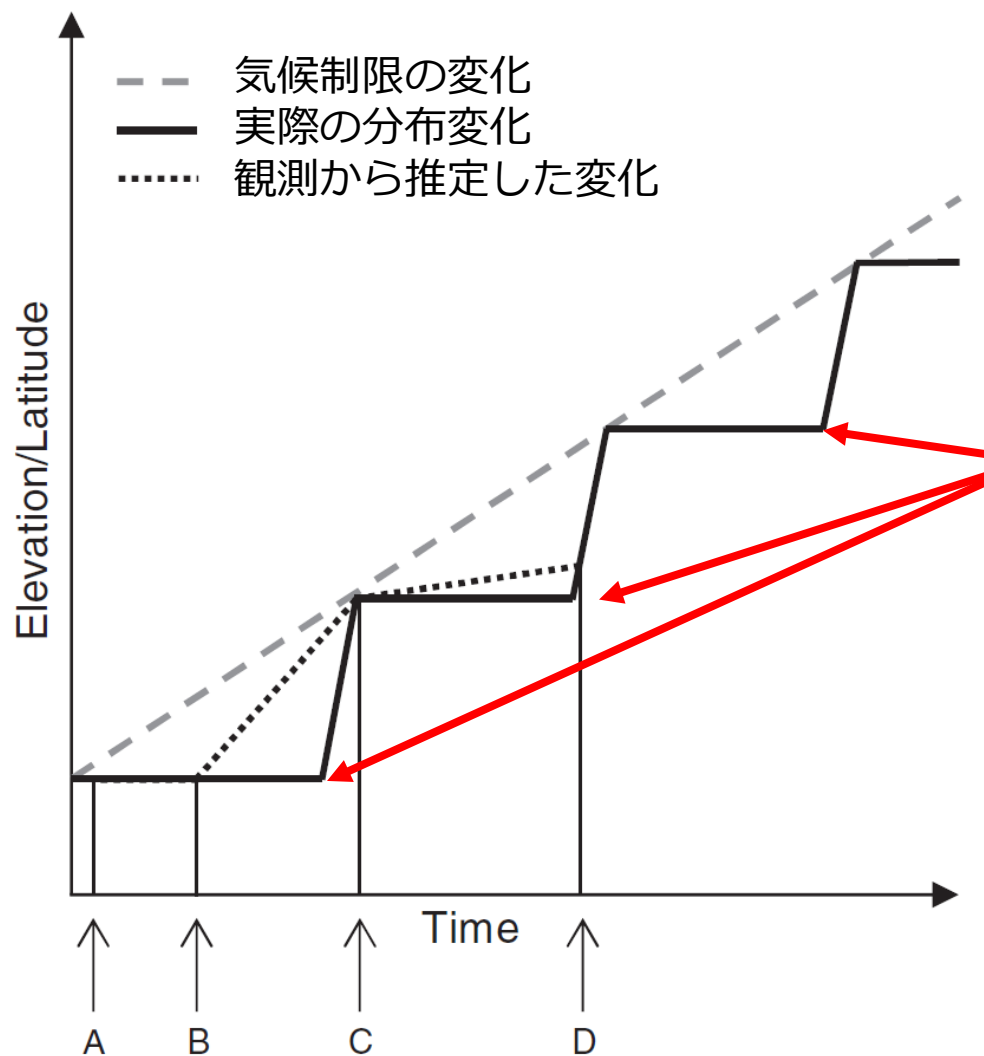
↑現在の分布は、もはや「気候的最適」ではない場合が多い。

温度変化に対する分布応答性



↑南限は北限よりも応答が早い。よって、Extinction debtはColonization creditよりも早く顕在化する

Colonization creditの実現過程を示す概念図



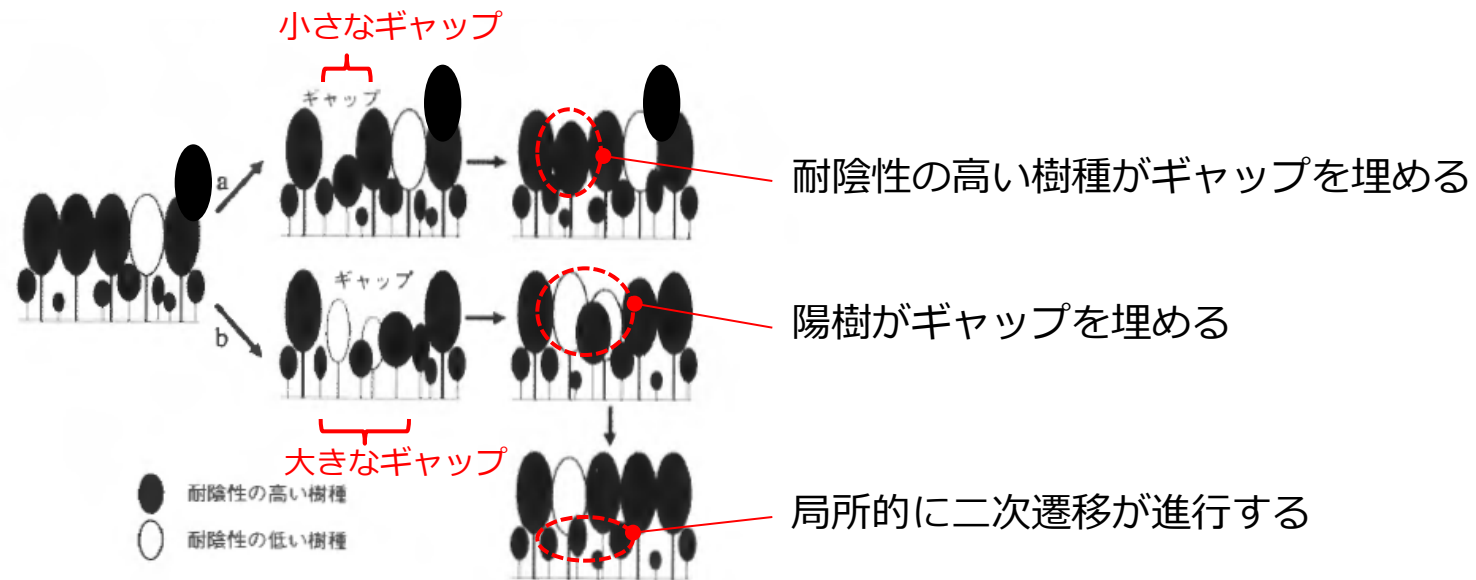
ギャップ動態・山火事・台風・十～数十年に1度生じる極端気候・地理的障壁の克服、などのイベントが発生するたびに、樹種変化が断続的に生じる

エピソード的な契機の繰り返しのによって樹種分布変化が生じる場合、その移動速度の見積もりは、どの段階を観測したのかに強く依存してしまう

森林生態系の動的平衡

そもそも植物生態系は静的な存在ではない

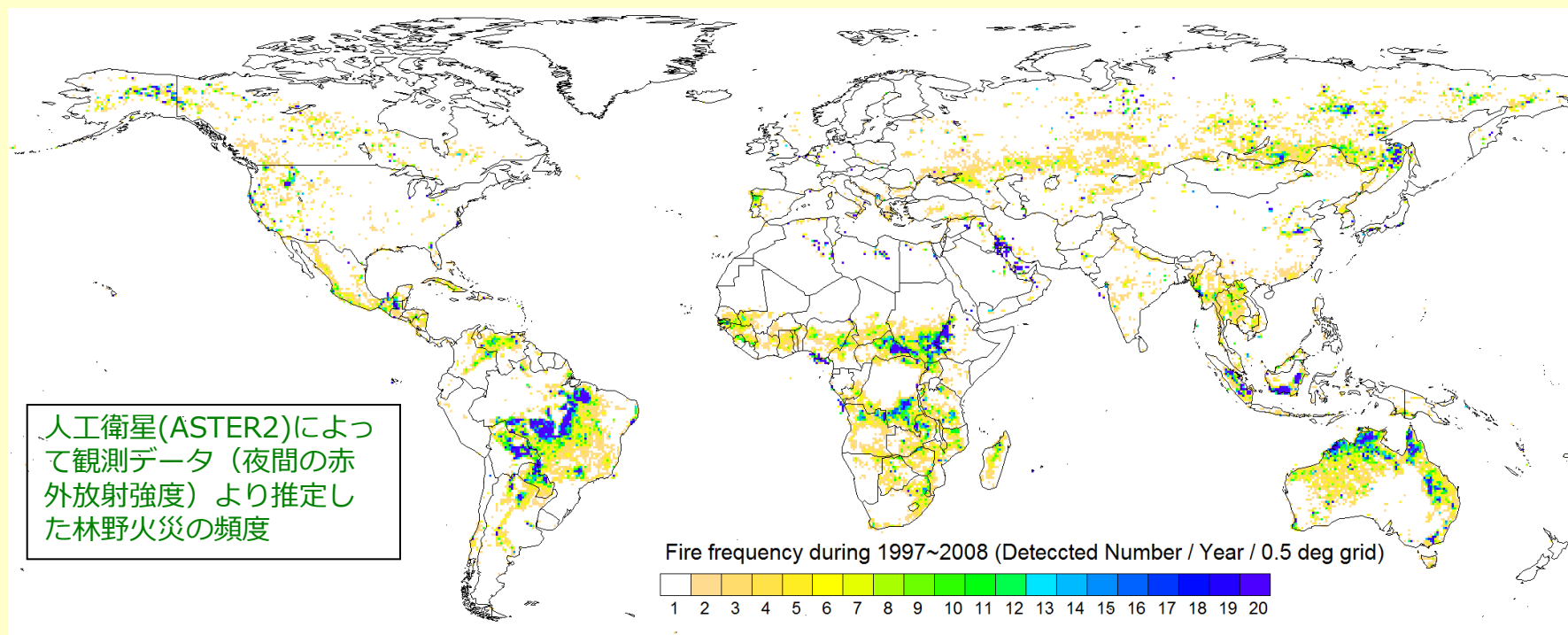
低～中緯度の森林生態系は、局所的な崩壊と再生を繰り返すギャップ動態が顕著に生じる



ギャップ動態モデルSORTIEが示した森林の水平方向構造を考慮することの重要性

光環境を空間的に平均してしまうシミュレーターでは樹種の交代の様子が変化するだけでなく、総バイオマスも実際の森林の半分くらいになってしまう。なぜならば、ギャップの下にはとても明るい環境があるはずなのに、これを暗いところと併せて平均してしまうことで、ギャップ内での森林再生が遅れてしまうから。

全球で働く主要な攪乱要因としての林野火災



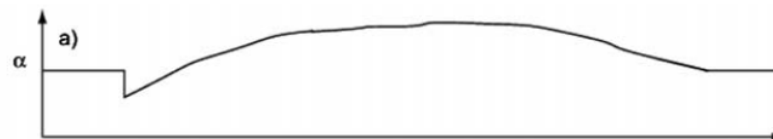
特に半乾燥的なバイオームにおいて重要な攪乱スキーム。

亜寒帯林においては、頻度はさほどでも無いが、植生の回復にかかる時間がとても長いので、やはり重要な攪乱スキーム。

遷移に伴って大気陸面相互作用も変化する

アラスカにおける二次遷移に伴う大気陸面相互作用(夏期)の変化

アルベド
(入射光に対する反射光比)



土壌表面温度



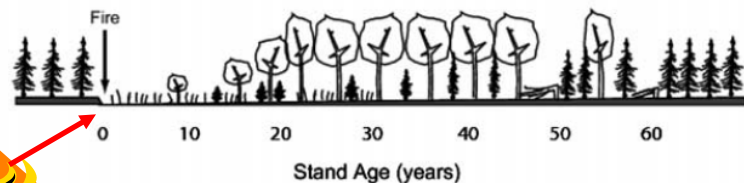
正味放射量



顕熱フラックス



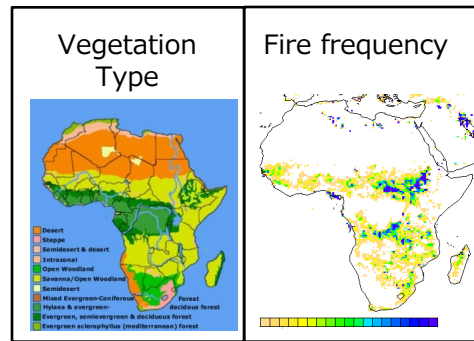
潜熱フラックス



Liu & Randerson (2008) JGR113



アフリカ大陸のサバナは林野火災が維持している



疎林は厚い草本層を生じさせる

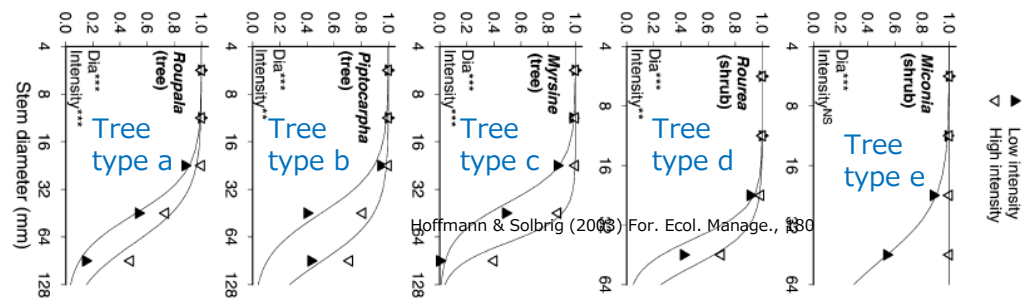


乾期には、この厚い草本層
が林野火災を拡大させる

林野火災は主に草本
層で生じるため、林
野火災に伴う死亡率
は低木ほど高い

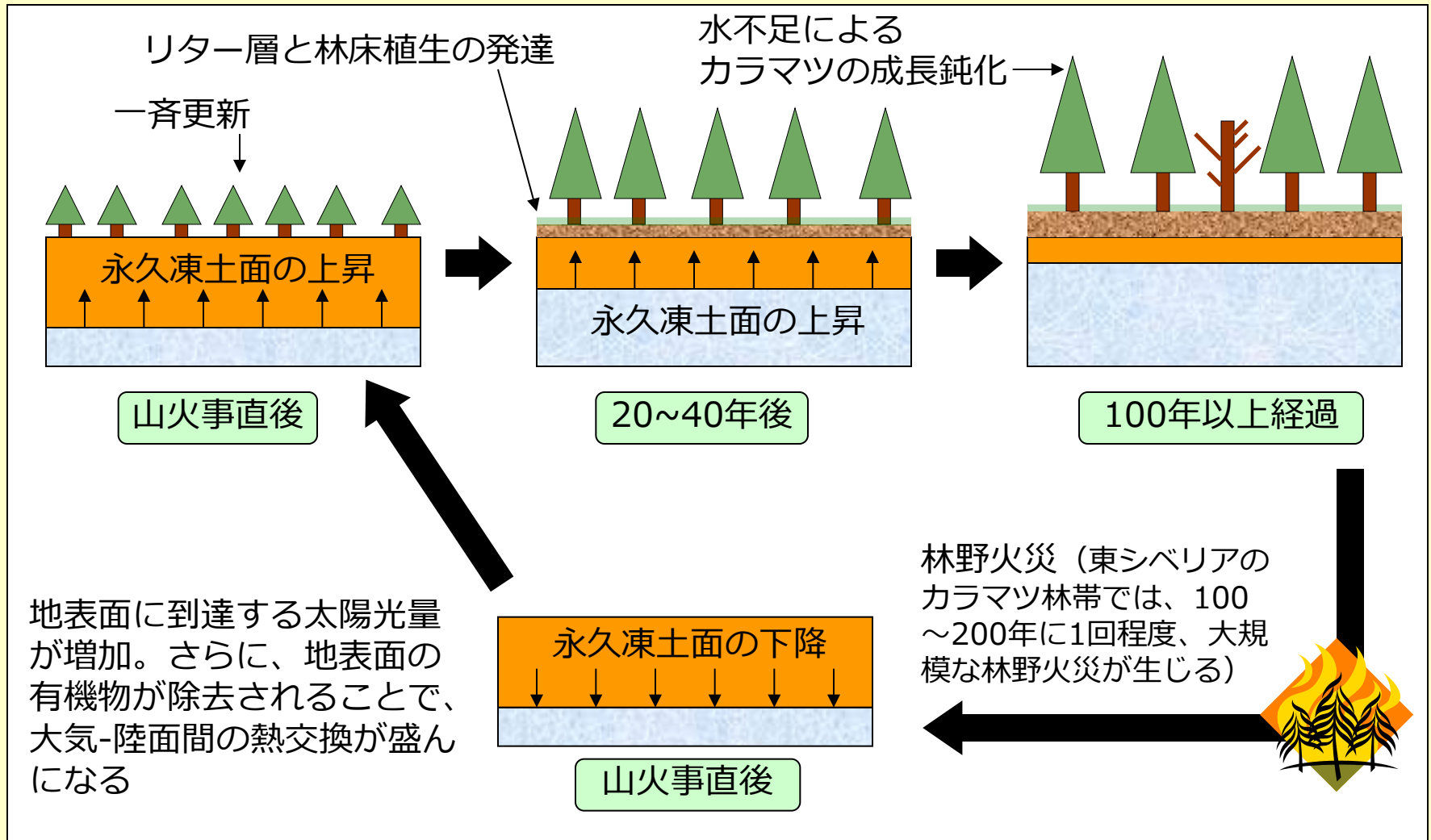
低木
↓
高木

林野火災に伴う死亡率



林野火災はアフリカで最も重要な自然擾乱のひとつであり、サバナの維持に不可欠である。サバナはアフリカの陸地の約4分の1を覆っており、まばらに分布する高い木々と密集した草の層が特徴である。

林野火災が制御する東シベリアの凍土-植生動態サイクル

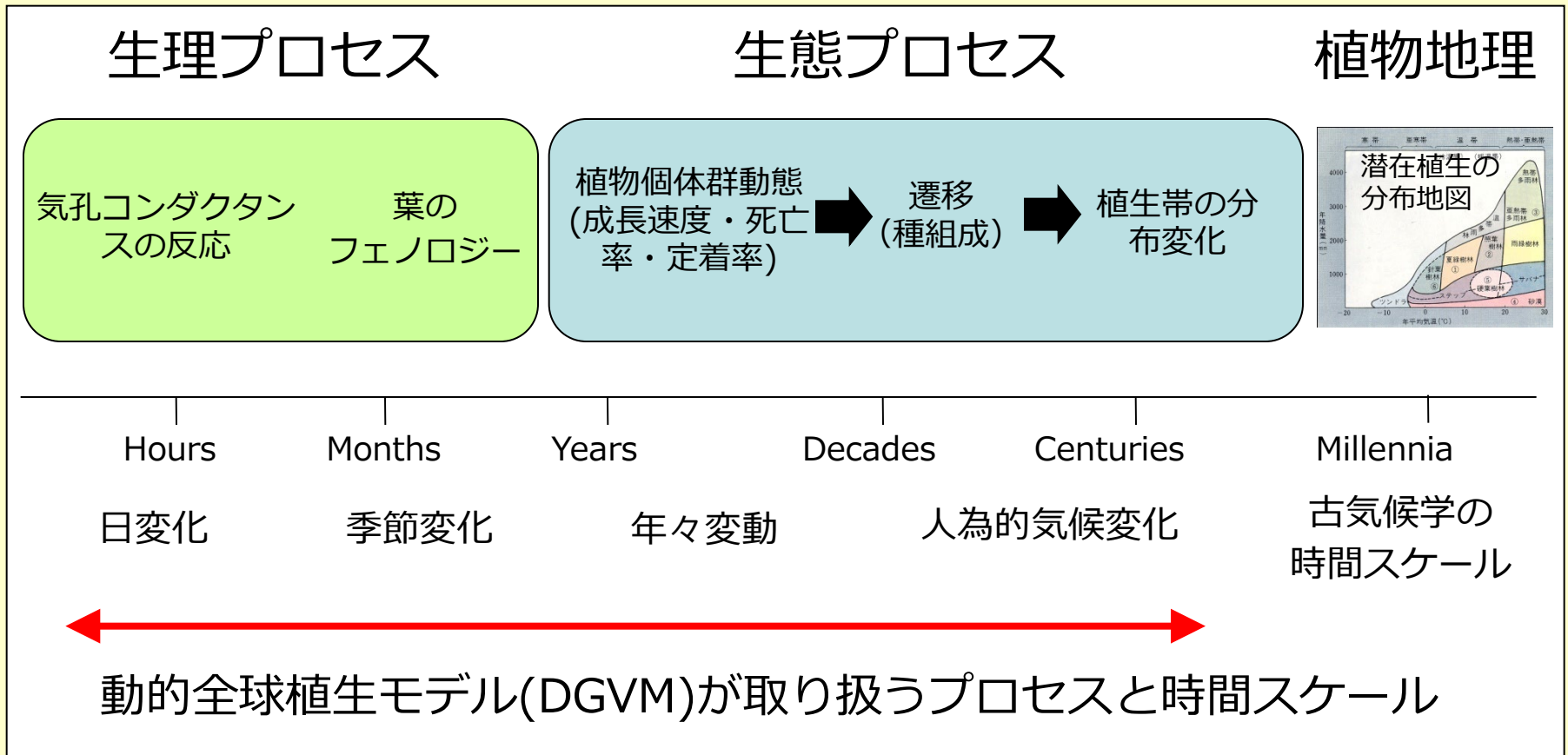




DGVMの構造・バリエーション

植生構造を表現する様々な方法

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





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

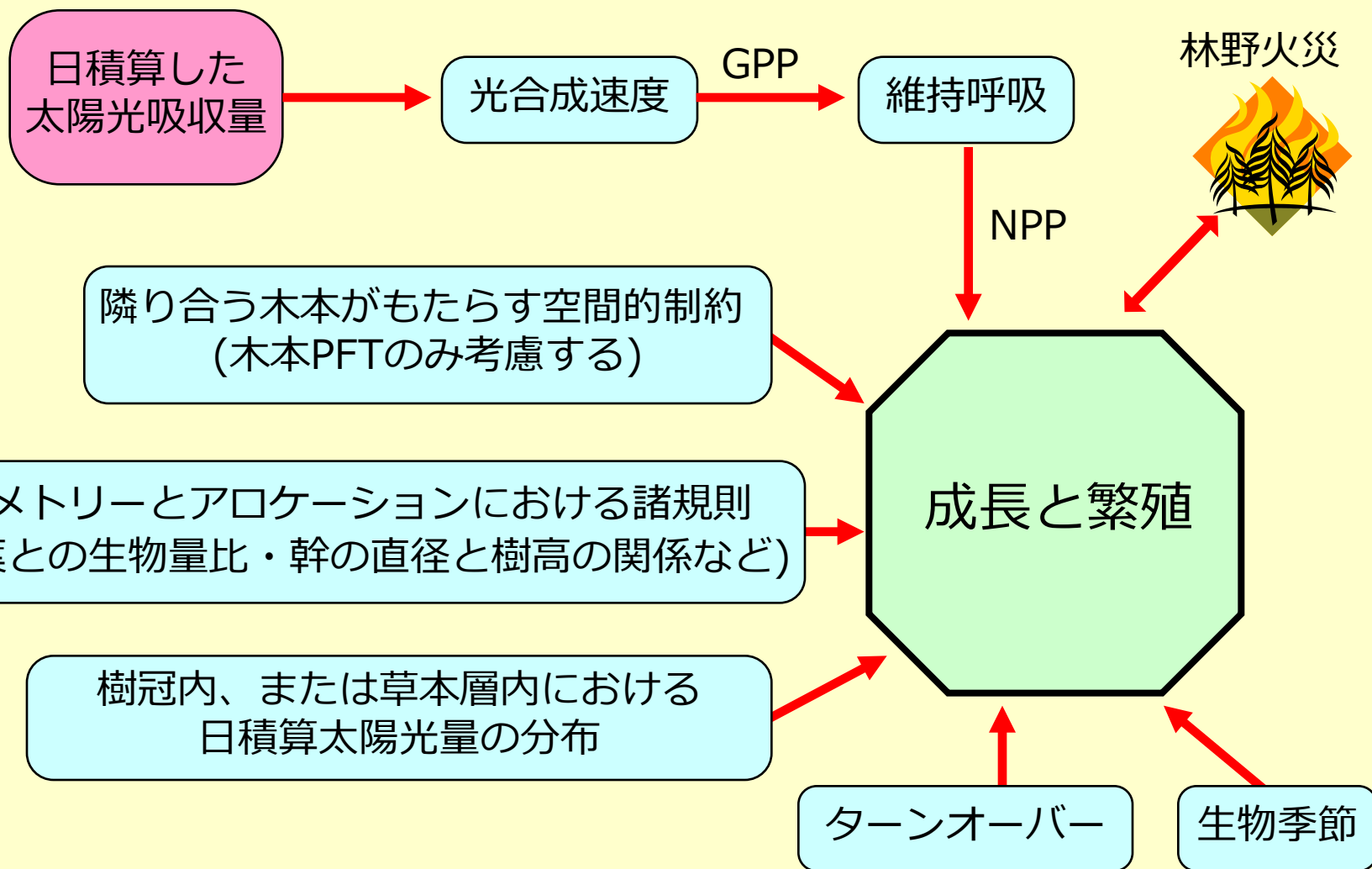
- 1, 熱帯性 広葉 常緑樹 (Tropical broad-leaved evergreen)
- 2, 熱帯性 広葉 雨緑樹 (Tropical broad-leaved raingreen)
- 3, 温帯性 針葉 常緑樹 (Temperate needle-leaved evergreen)
- 4, 温帯性 広葉 常緑樹 (Temperate broad-leaved evergreen)
- 5, 温帯性 広葉 夏緑樹 (Temperate broad-leaved summergreen)
- 6, 亜寒帯性 針葉 常緑樹 (Boreal needle-leaved evergreen)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

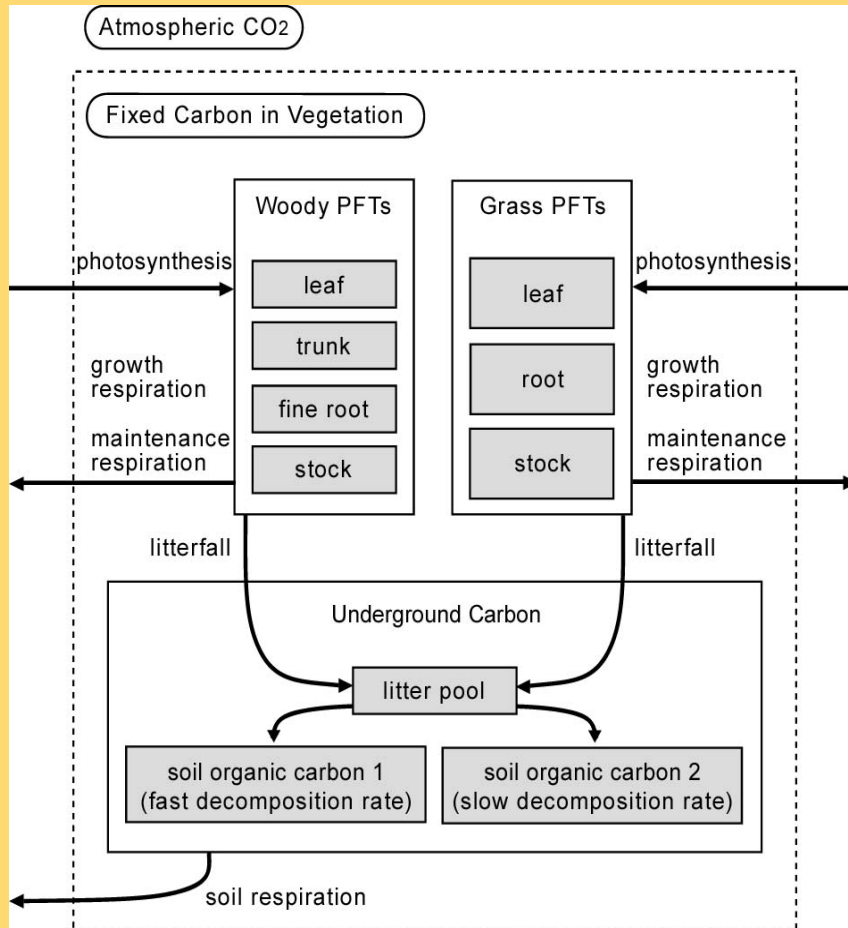
- 1, C₃ 草本
- 2, C₄ 草本

木本と草本の成長プロセス（概略）

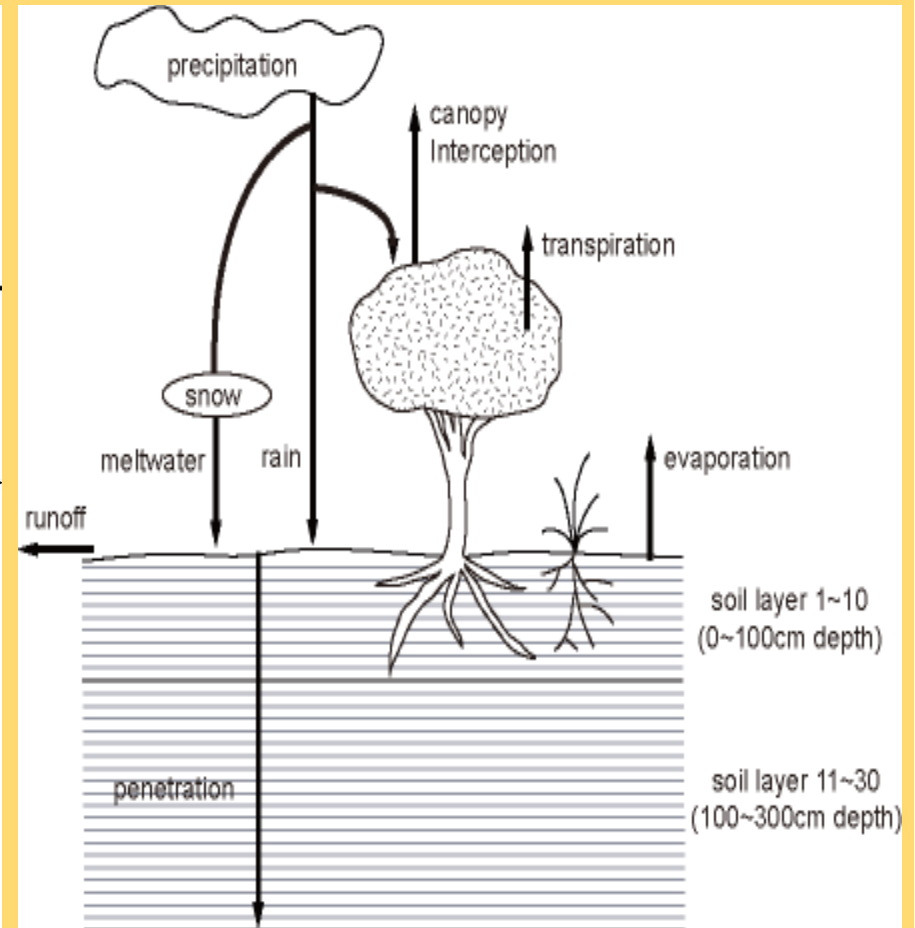


SEIBにおける炭素と水の循環

SEIBの構造



炭素循環の概略



水循環の概略

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

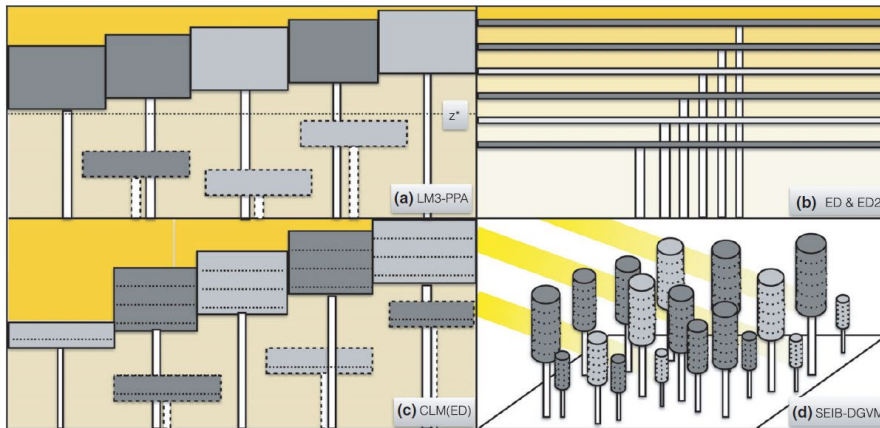
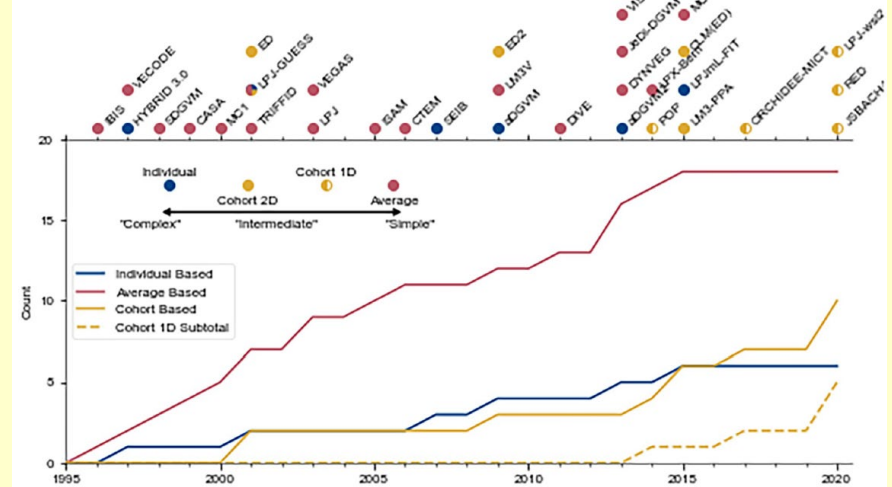


FIGURE 1 Organization of canopy schemes in four vegetation demographic models. Shades of yellow represent incident light levels.

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

DGVMごとに異なる植生の表現方法



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

一部のDGVMが木本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。例えば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、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

→ 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）

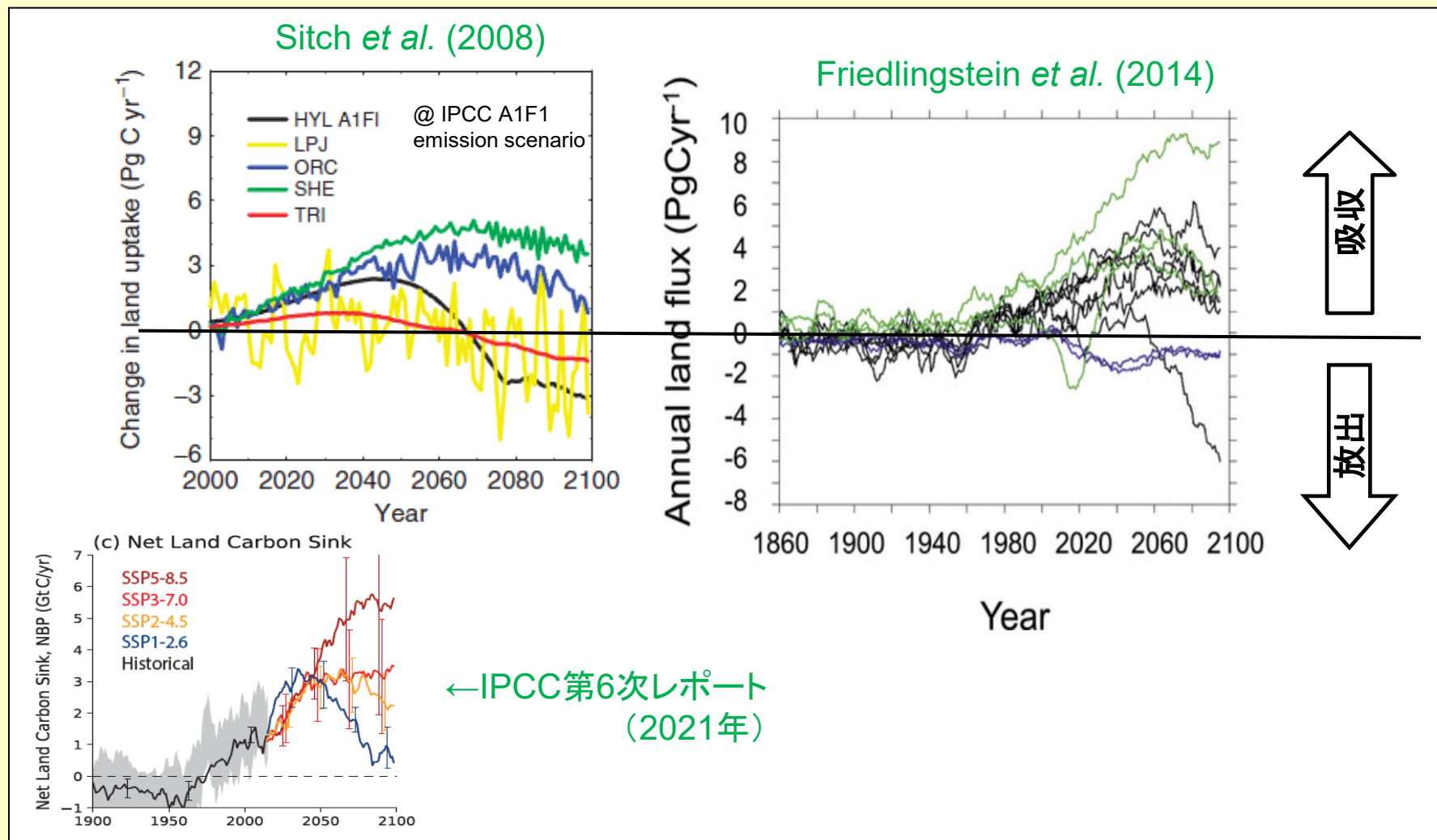
(3) データフュージョン（衛星観測などで得られたLAI・PAR・山火事などのデータと比較しながら、モデルの挙動を適宜修正させるという方法）などに応用するには厳しい。

→ そういう応用面ではCompartmentモデル（VISITとか）を使うべき。

DGVMの現状

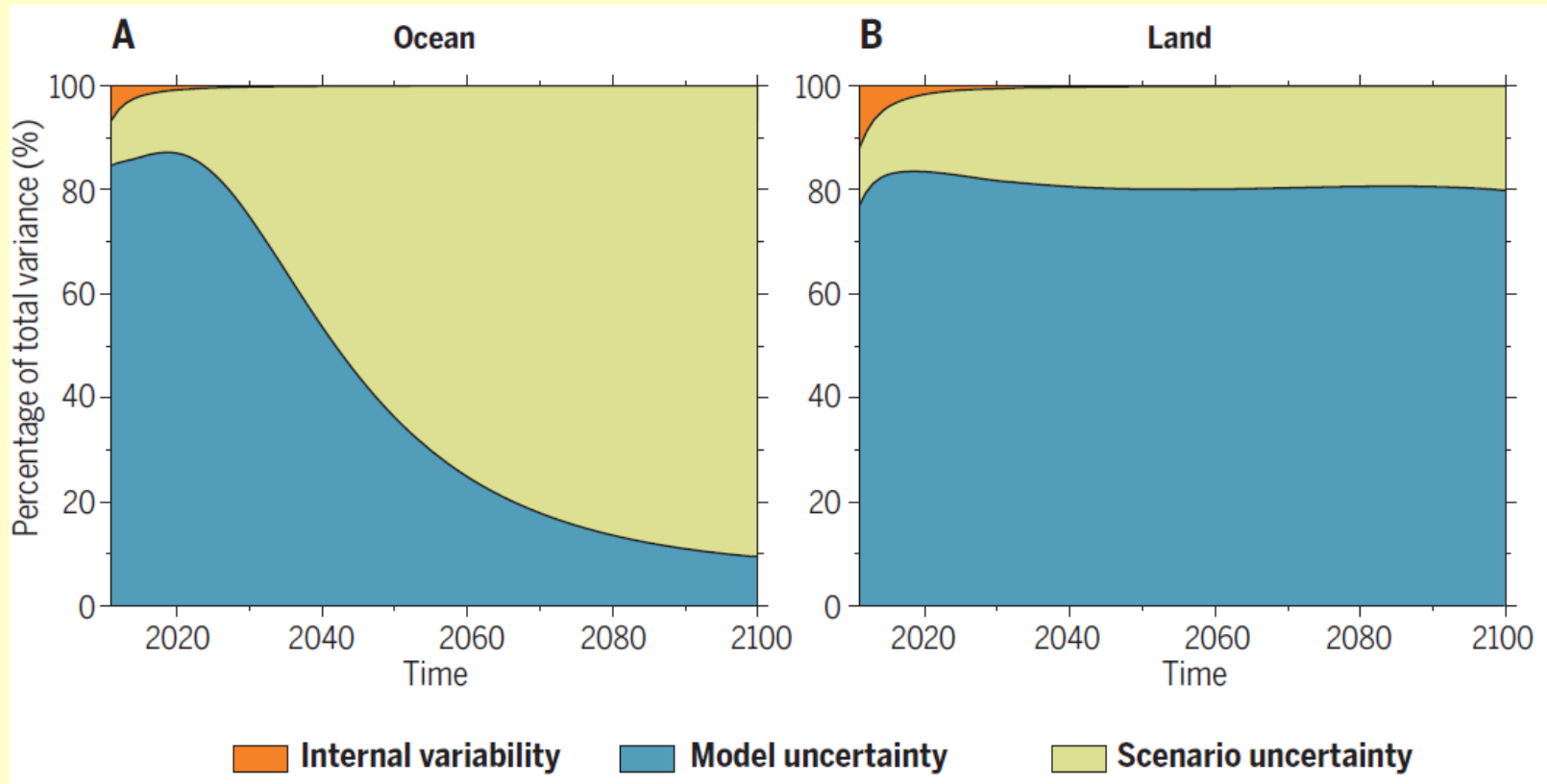
まだまだ発展途上な技術です

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。

12のESM×4シナリオのシミュレーション出力から得られた、累積的な全球炭素吸収予測における、不確実性の要因

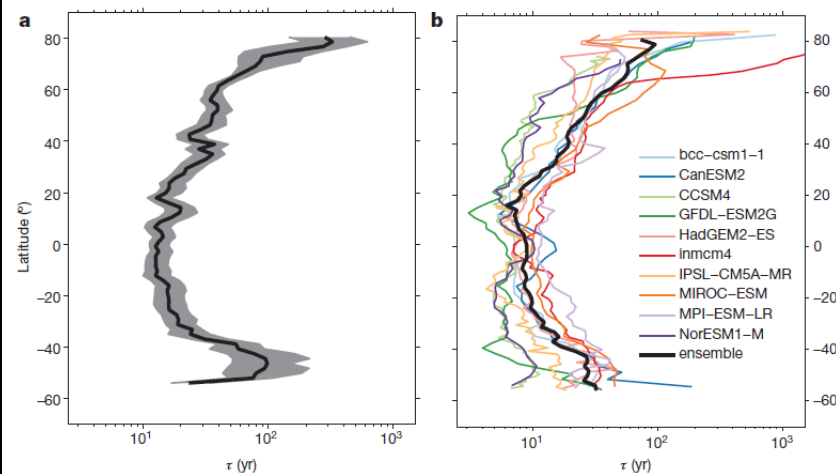


海洋の炭素循環は、21世紀中頃にはシナリオの不確実性が支配的となるが、陸地の炭素循環における不確実性は主にモデル構造に起因する

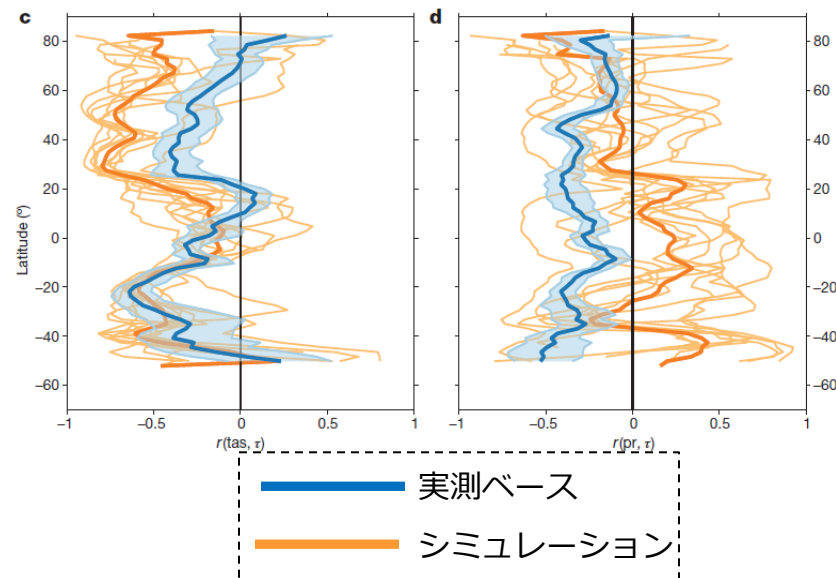
陸域生態系モデルの現状 (現在気候下のシミュレーション)

生態系炭素の回転率(緯度方向分布)

実測ベース シミュレーション



生態系炭素の回転率に対する
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。**よって、気候変動への応答の予測信頼性は、未だ高くない。



森林生物量の貯留期間

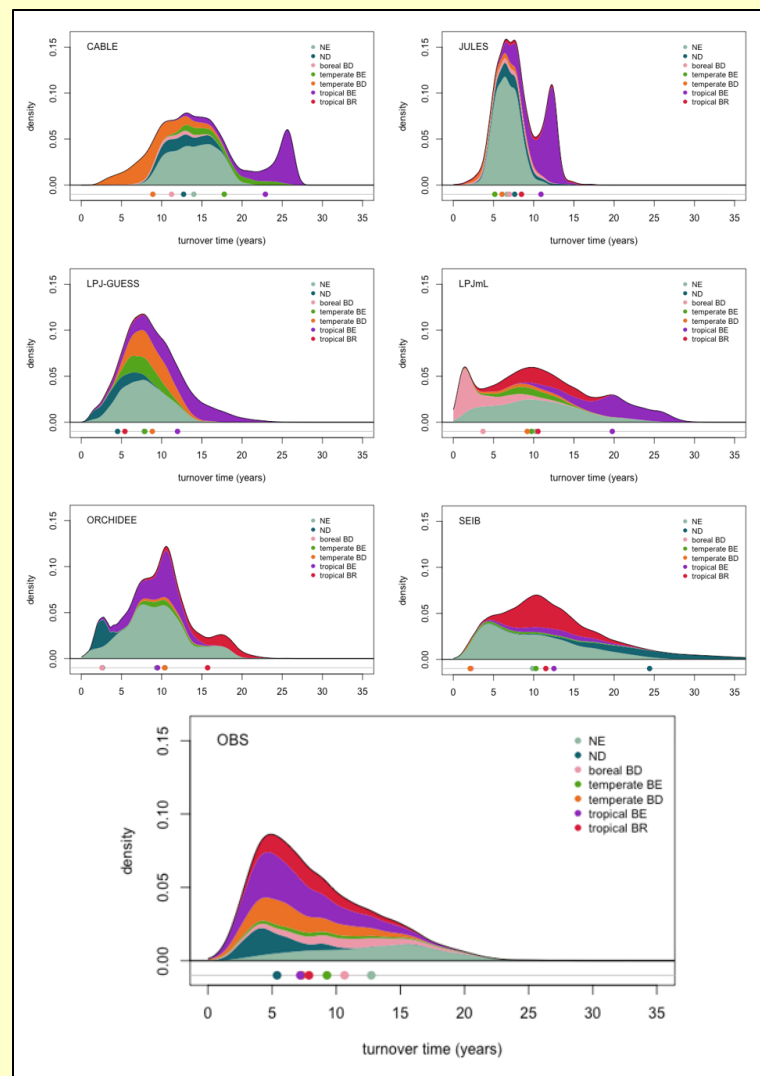
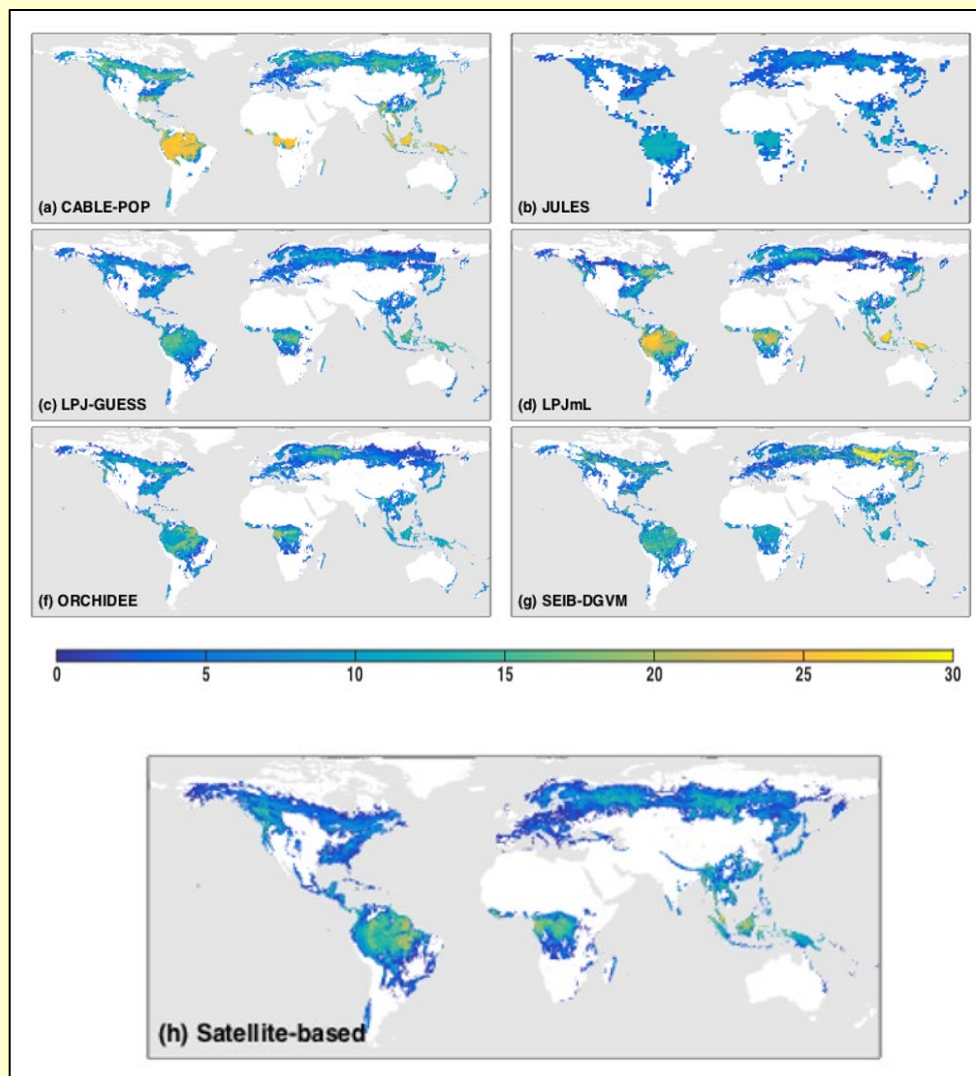
PUGH, T. *et al.* (2020)
Biogeosciences 17

全球分布

回転率の頻度分布(植生タイプ別)

シミュレーション

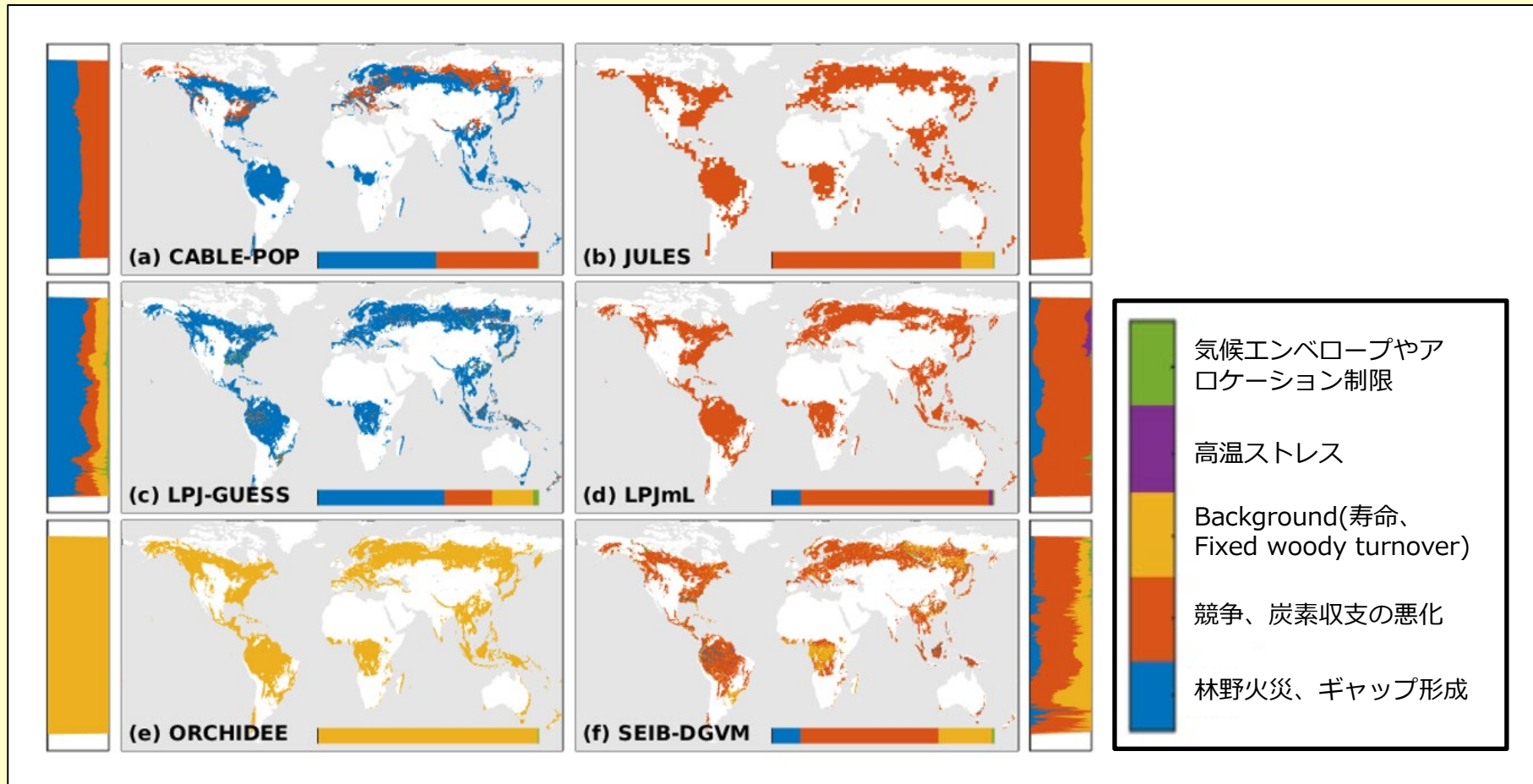
観測ベース



モデルごとに傾向は様々だが、貯留期間の長すぎる植生タイプが出現させる傾向あり

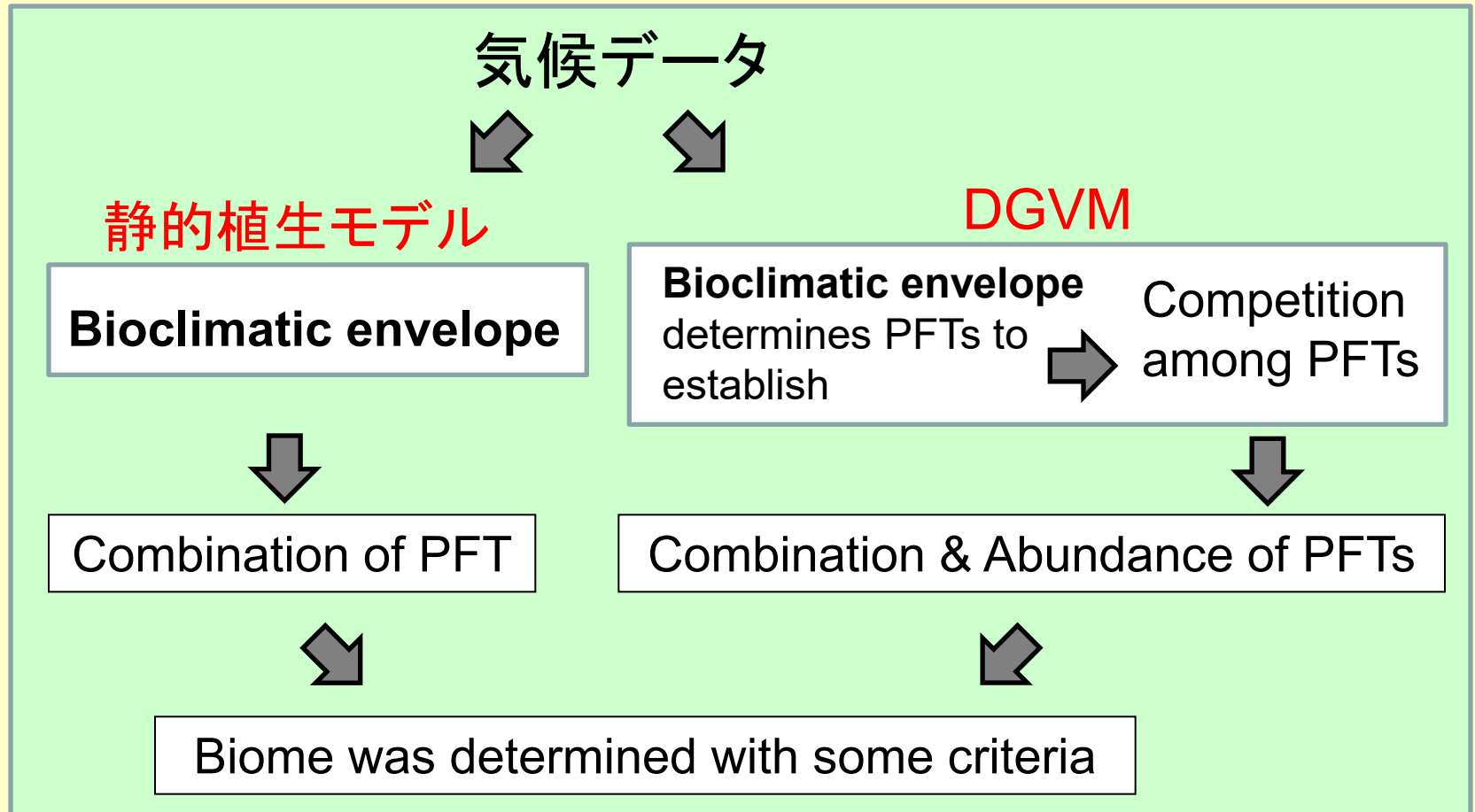


木本の死亡要因



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。

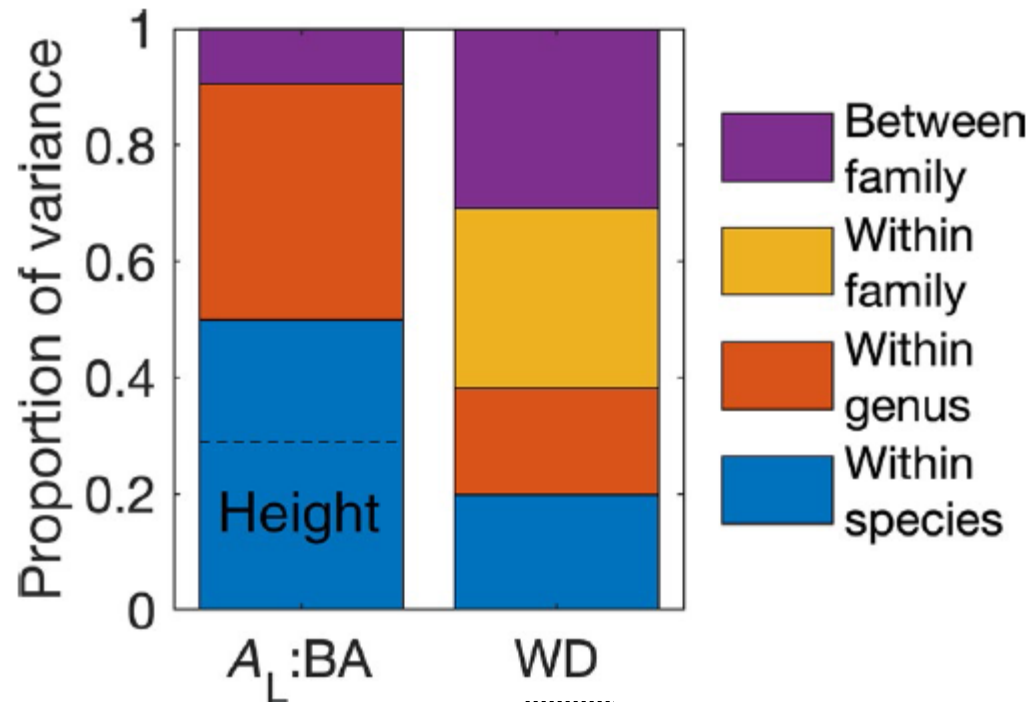
現状、植生モデルは植生分布をいかに再現しているのか



DGVMであっても、生物気候エンベロープに過度に依存しており、実際に働く植物個体群プロセスが適切に考慮できていない

表現型可塑性をいかに扱うか？

植物の機能形質におけるバラツキは、何によって決まる？



材密度
木本のBasal areaあたりの葉面積

分散の半分までもが、表現型可塑性や種内変異で説明される機能形質もある。よって、PFTの設定を改善したり数を増やしても、全く不十分である。

DGVMの課題

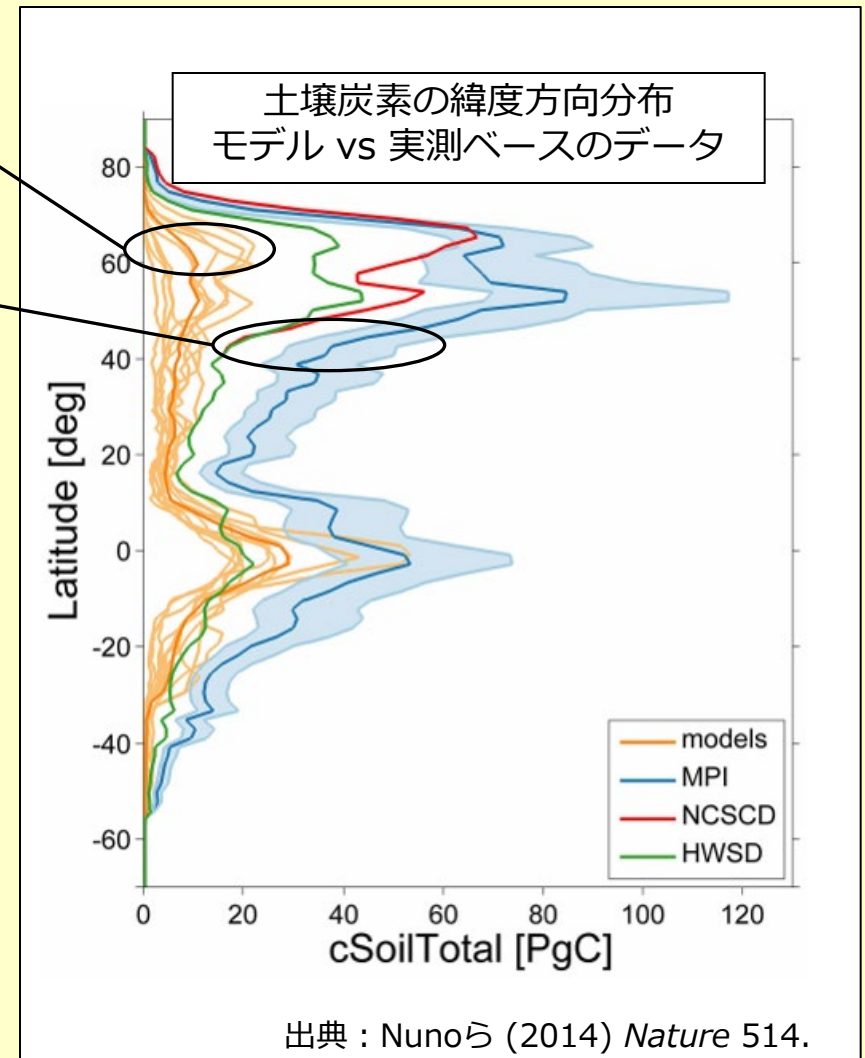
解決できそうな課題もそれなりに残っています

扱いの改善が望まれるプロセス1：土壌炭素

CMIP5参加モデル出力

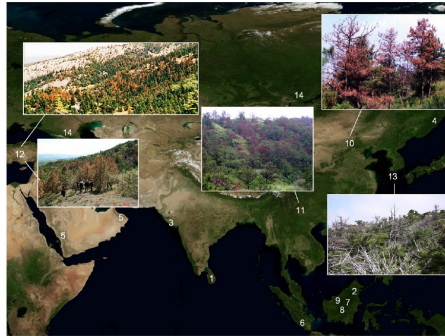
実測ベースのデータ
(MPI以外は、深さ1mまで)

現在のESMは、特に高緯度帯の土壌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。



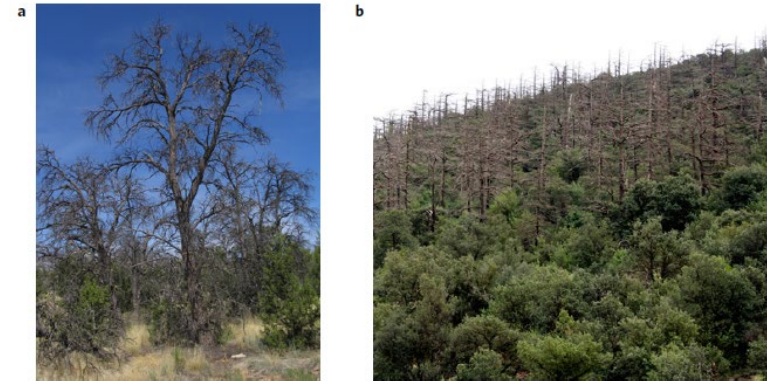
扱いの改善が望まれるプロセス2：乾燥枯死

近年、世界各所で乾燥による樹木の大量枯死が増加している



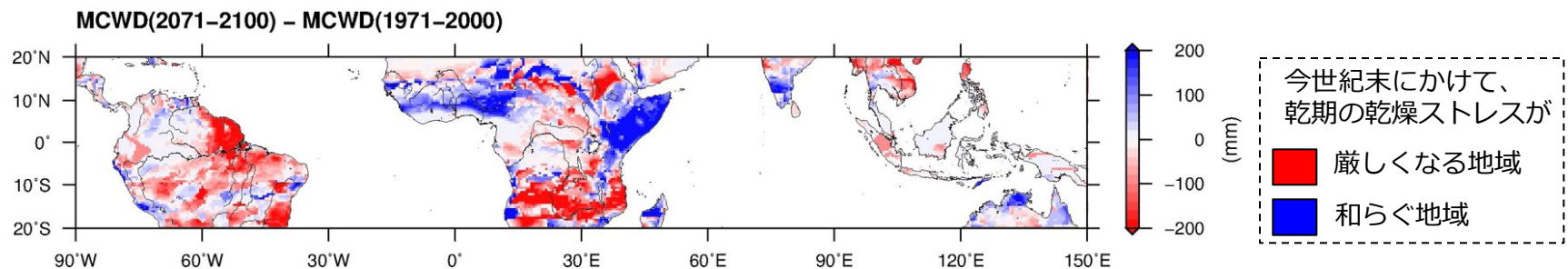
出典：Allenら2010 *For.Ecol.Manage.* 259

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



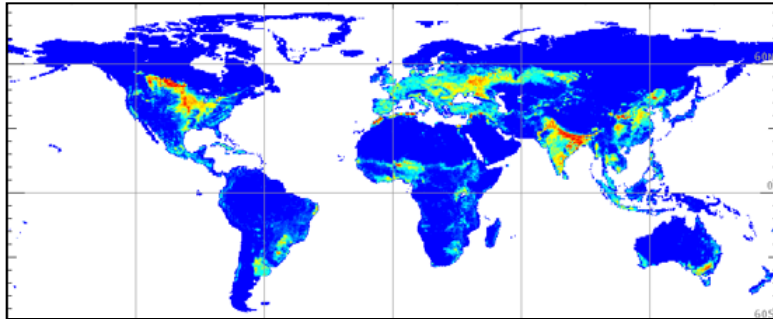
乾期の乾燥の強さを示す指標であるMaximum Climate Water Deficit (MCWD)の30年間最大値を、20世紀末と21世紀末とで比較した。(with MIROC-ESM@RCP8.5)

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）

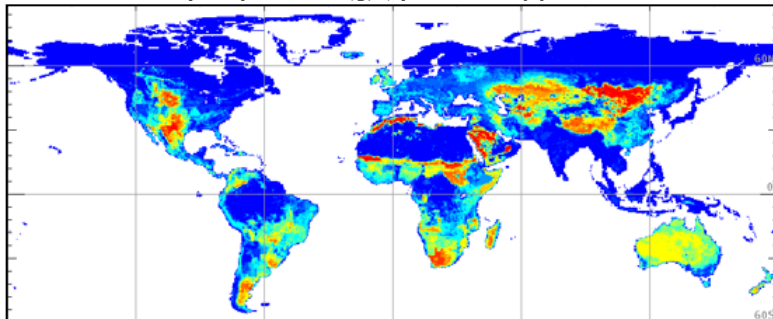
個体ベースモデルを用いた乾燥枯死のモデリングは行われつつあるが
全球モデルの枠組みで、その影響を検討した研究はまだ無い（と思う）

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



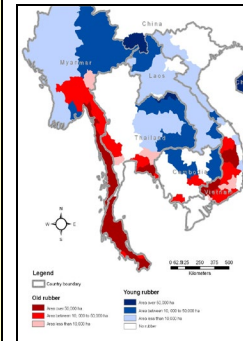
牧草地・放牧地の割合



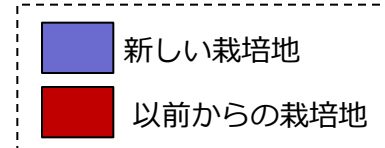
0.0 1.0

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、その扱いは初歩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。

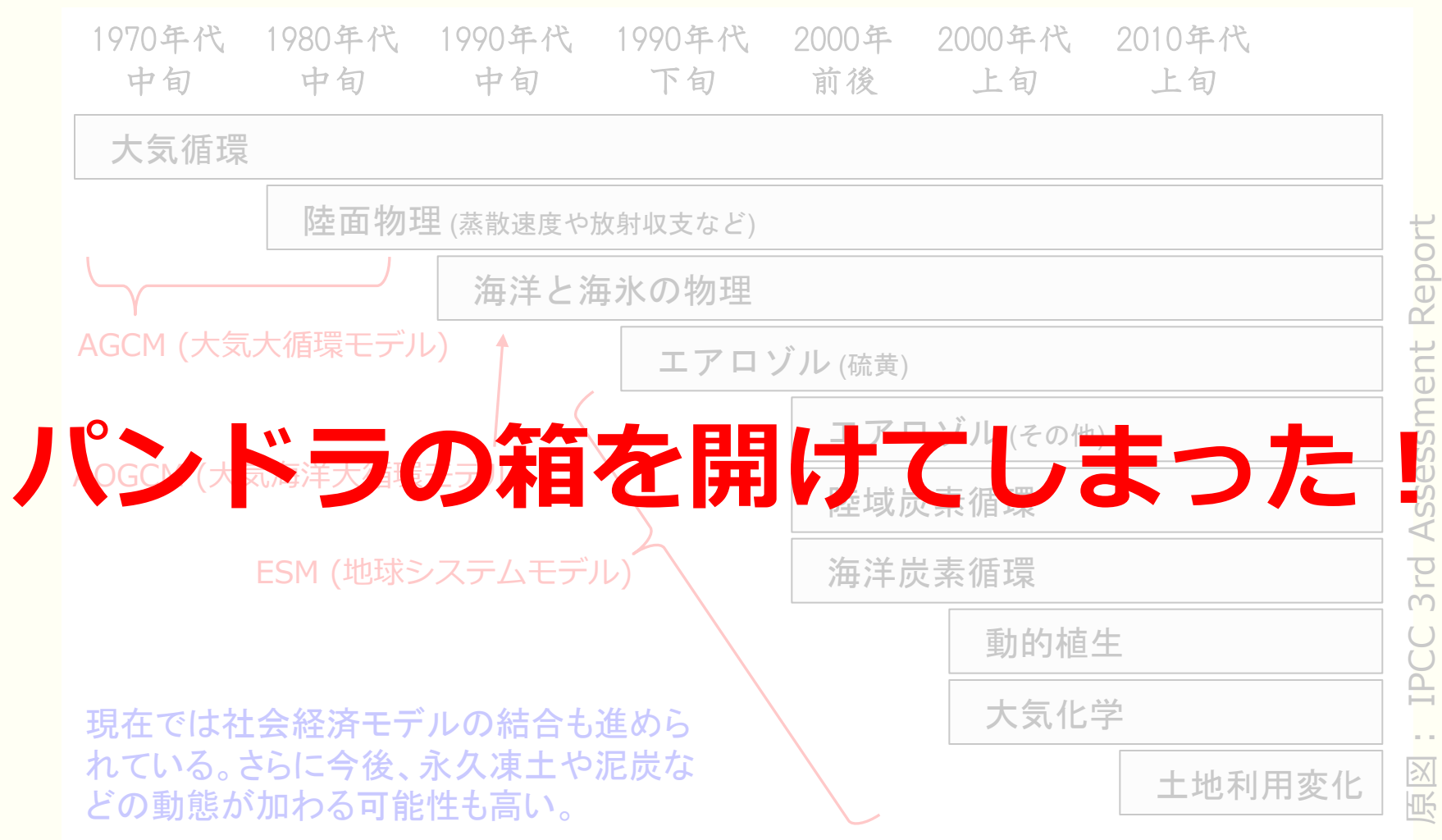
CO₂濃度変化が植物生産性に与える影響

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）の間に、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



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

ま と め に 代 え て



植生モデル研究は何の役に立つのか

1. 現在の陸上生態系がどのように働いているかについて、理解が深まる
2. 将来起こりうる可能性の予測が、科学的に信頼性のある範囲で可能となる
3. どの部分に不確実性が大きいのか、あるいは信頼性がどのくらいあるかという評価ができる
4. 重点的に研究すべき分野や対象を、ある程度しぼり込むことができる
5. 生態系管理（例えば炭素管理）の効果を評価できる

出典：伊藤昭彦(2007)「植物が地球をかえた！」第8章より、一部改変

分野横断的な研究の「場」を提供するDGVM

動的全球植生モデルの構成要素

- **植物生理学**（光合成、呼吸、展葉・落葉タイミングなど）
- **植物個体群生態学**（定着、競争、死亡など）
- **攪乱過程**（山火事、台風、土地利用）
- **地表面付近の気象学・微気象**（粗度長、放射収支など）
- **水文学**（蒸発、蒸散、土壌の凍結融解過程など）

この2グループは研究者集団が学部教育レベルで分かれており、特に接点が少ない

動的全球植生モデルを用いた研究の典型的な作業フロー

1. 観測**サイトレベルでの精密な検証**（遷移のパターン、物質・エネルギー循環の季節と年々変動・経年変化）
2. 広域にモデルを適用し、**地理分布データを利用した検証**を実施。これにより、気候環境の違いに対するモデルの応答の妥当性を検証
3. どの過程やパラメーターが、モデルの不確実性に大きく寄与するか**感度分析**を実施。このような感度分析は、植生の構造や機能に大きな影響を与える環境要素を、スクリーニングする上でも有用
4. 気候変動シナリオや土地利用シナリオを適用した**環境変動予測**