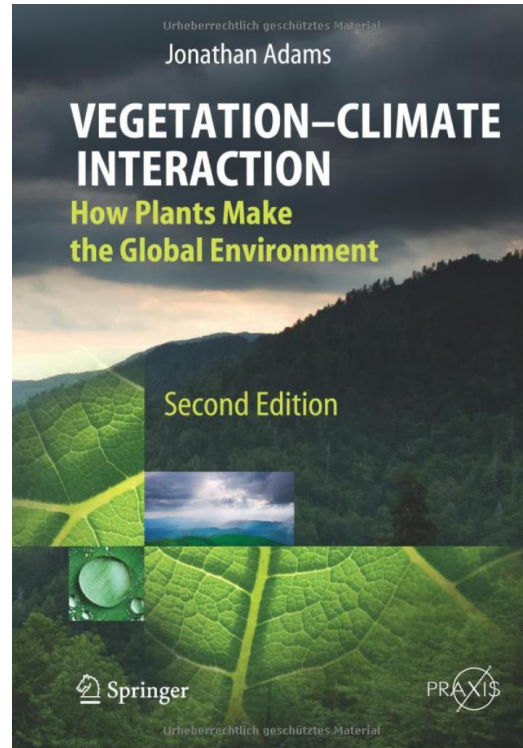


植生から気候環境へのフィードバック

主な参考文献



佐藤永 (2014) シリーズ現代の生態学2
巻「地球環境変動の生態学」, 共立出版,
7章「植生と気候の相互作用と、動的全
球植生モデル」, pp129-147

例 1 : 亜寒帯林は、その低いアルベドにより、大気を暖めている

北緯45度以北の森林帯を全て伐採した場合の気温変化
(大気-海洋結合モデルによるシミュレーション)

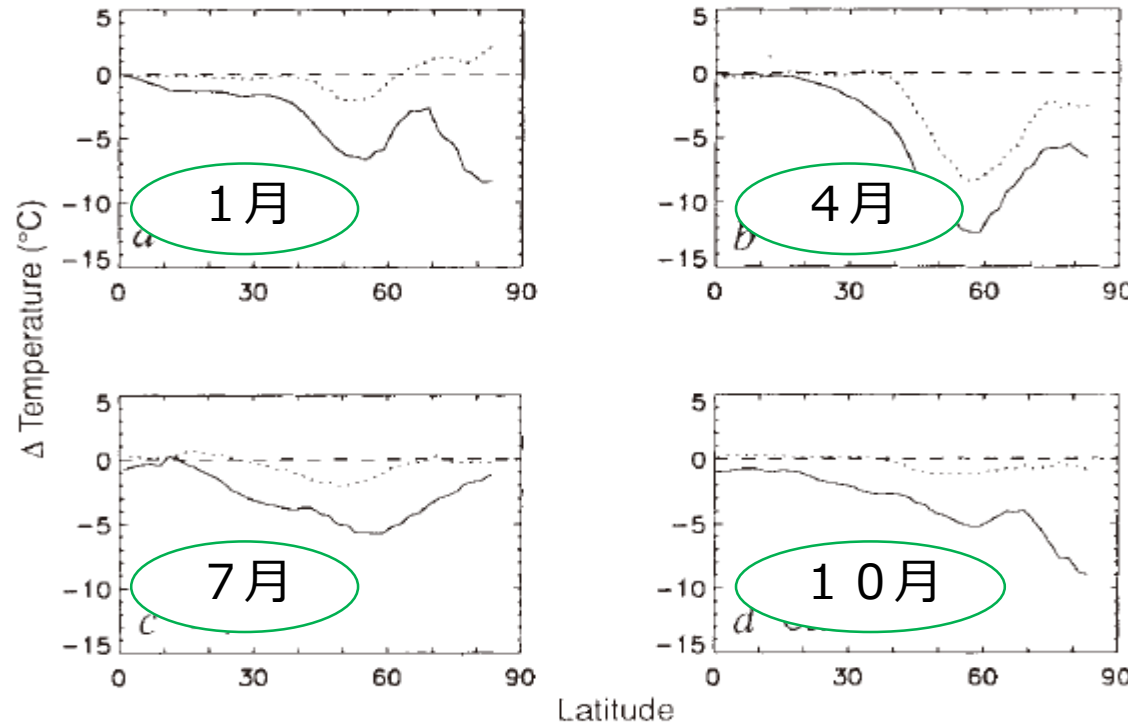


FIG. 2 Zonally averaged air temperature at a height of 2 m above land surfaces. See Fig. 1 for details.

.....
海面温度と海氷は
森林伐採前の状況に固定

—————
海面温度と海氷とも
動的にシミュレート

高緯度帯の森林を全て伐採すると、地球は涼しくなる！

というシミュレーション結果が得られている

例 2 : 熱帯域では、森林は蒸発散量を高めることで降水量を増やしている

タイの森林率推移

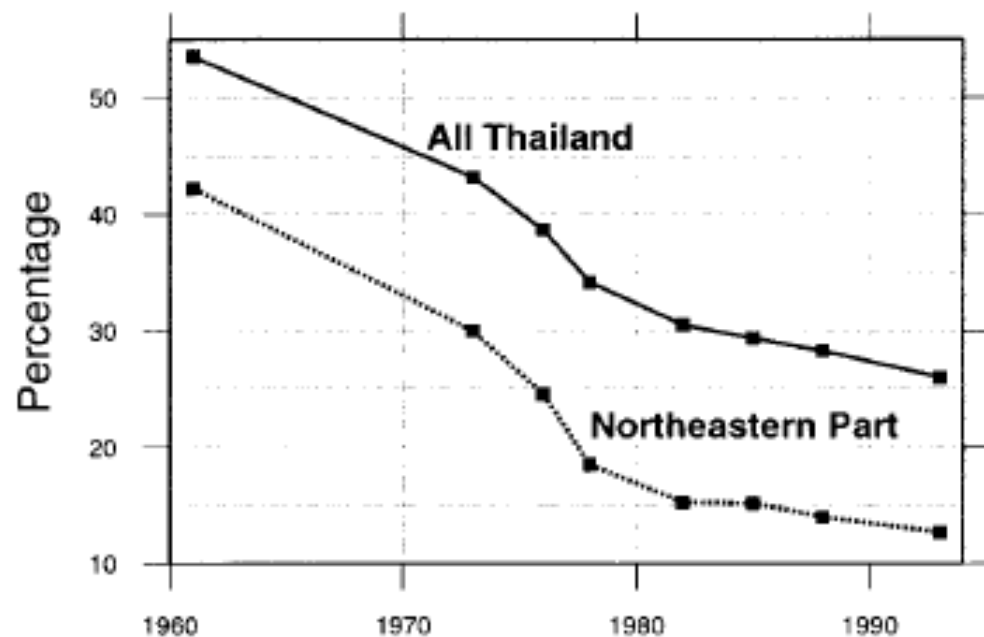
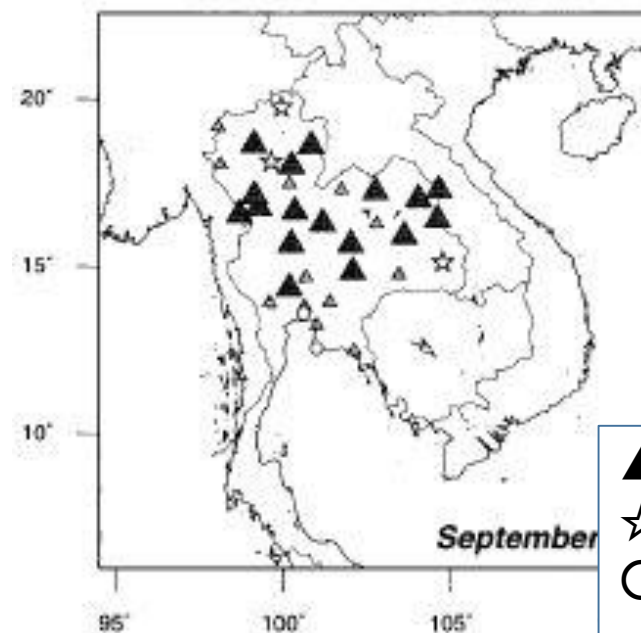


FIG. 1. Time series of forested area in Thailand. Data source: Forestry Statistics of Thailand (Royal Forestry Department of Thailand).

過去50年間における9月の降水量トレンド



- ▲: 負のトレンド
- ☆: 正のトレンド
- : トレンド検出できず

統計的有意なトレンドは
大きな記号で示している

タイ北部では過去50年間に9月の降水量が著しく低下した
これは、その間に進行した森林率の低下によると考えられている

例 3 : アフリカ北部では、植生はそれ自身を維持すると

現在の植生分布

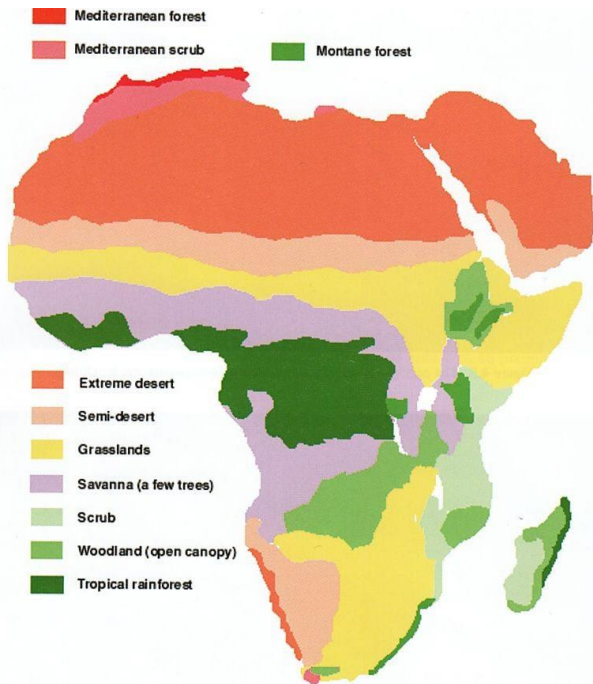


Figure 5.8. (a) The distribution of vegetation zones of the present day. Source: Author.

8000~7000年前の植生分布

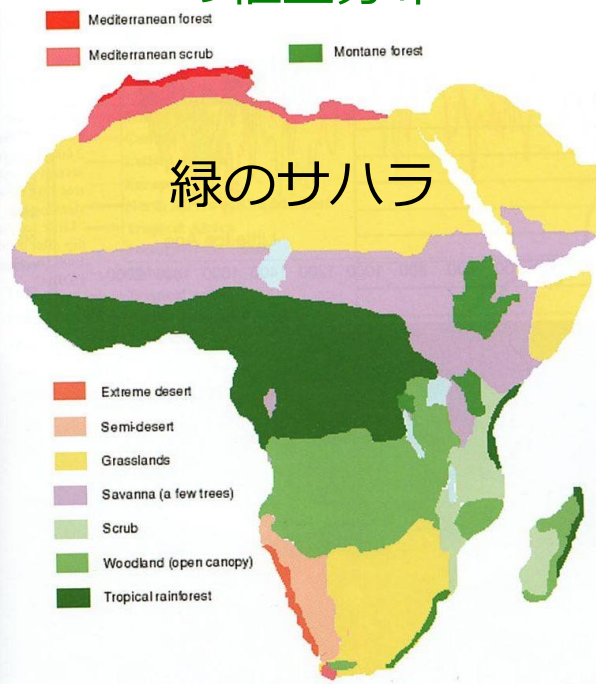
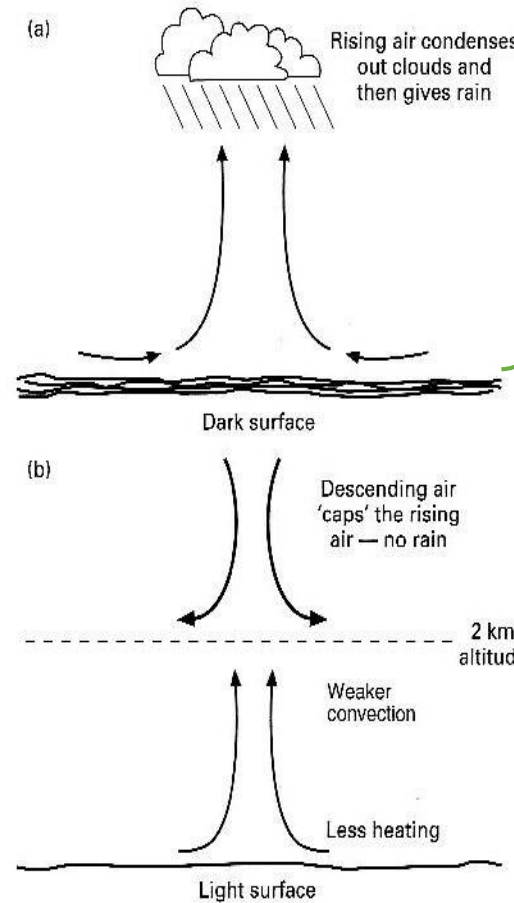


Figure 5.8. (b) The distribution of vegetation zones of the Holocene "Green Sahara" (8,000–7,000 ¹⁴C years ago). Grasslands (mixed with scrub) seem to have covered the whole Sahara desert at that time. Source: Author.

緑のサハラの主な成因は、当時の地球の軌道要素が生じさせたモンスーンの強化。しかし、それのみでは、この規模の緑化は生じないと考えられている。



植生ありの時
アルベドは低く、より強い上昇気流が発生、雲と雨が生じやすくなる。

植生なしの時
アルベドは高く、上昇気流は弱く、上空からの暑く乾燥した沈降気流を押し戻すことが出来ない。

サハラ域において1度成立した植生は、それ自身を維持させるという、正のフィードバックを持つと考えられている

Charney(1975)の実験結果 1

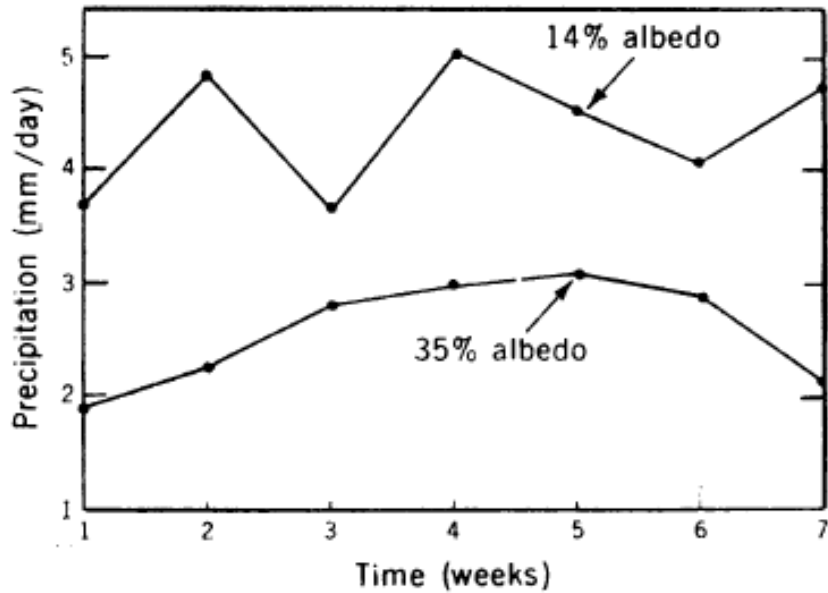
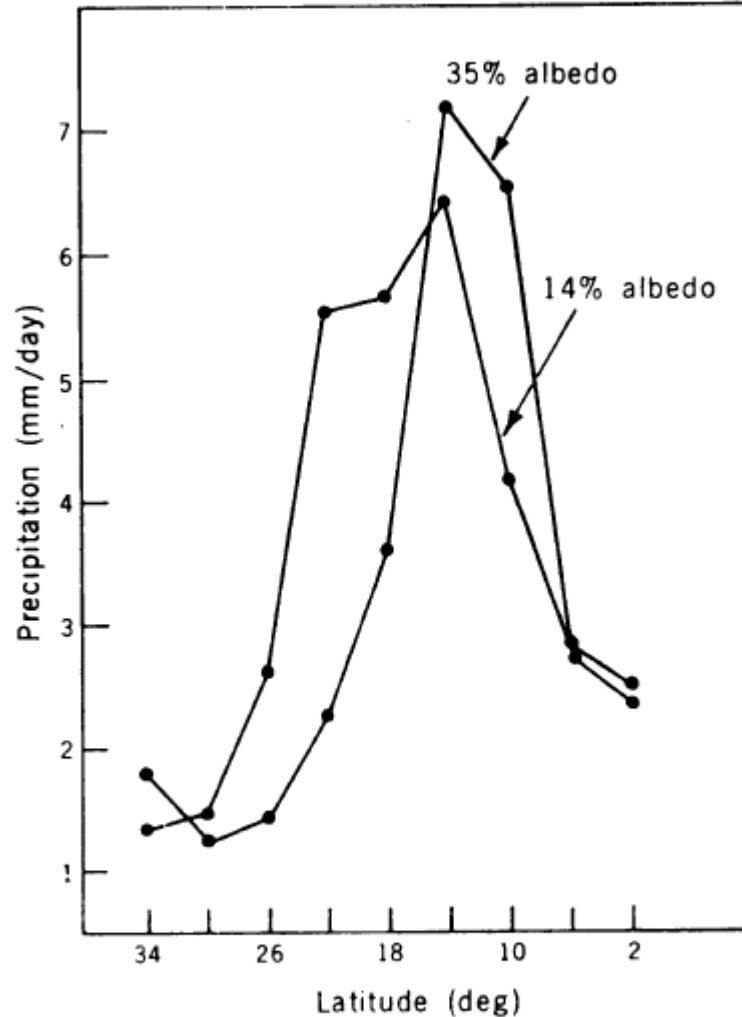


Fig. 1. Weekly mean rainfall rates in the Sahara during the 7 weeks of the experiments.

サハラ域のアルベドを14%と35%に設定したときのGCM出力を比較すると、前者の方が高い降水量が得られる。

図の出典: Charney et al. (1975) Science 187

Charney(1975)の実験結果 2



サハラ域のアルベドが低い条件で、降水域がより北部に拡大

Charney(1975)の考えたメカニズム

- ・砂漠は植生帯よりもアルベドが高く、より多くの太陽光を反射し宇宙に戻すため、大気境界層上端付近(高さ1~2km付近)の気温を下げる。

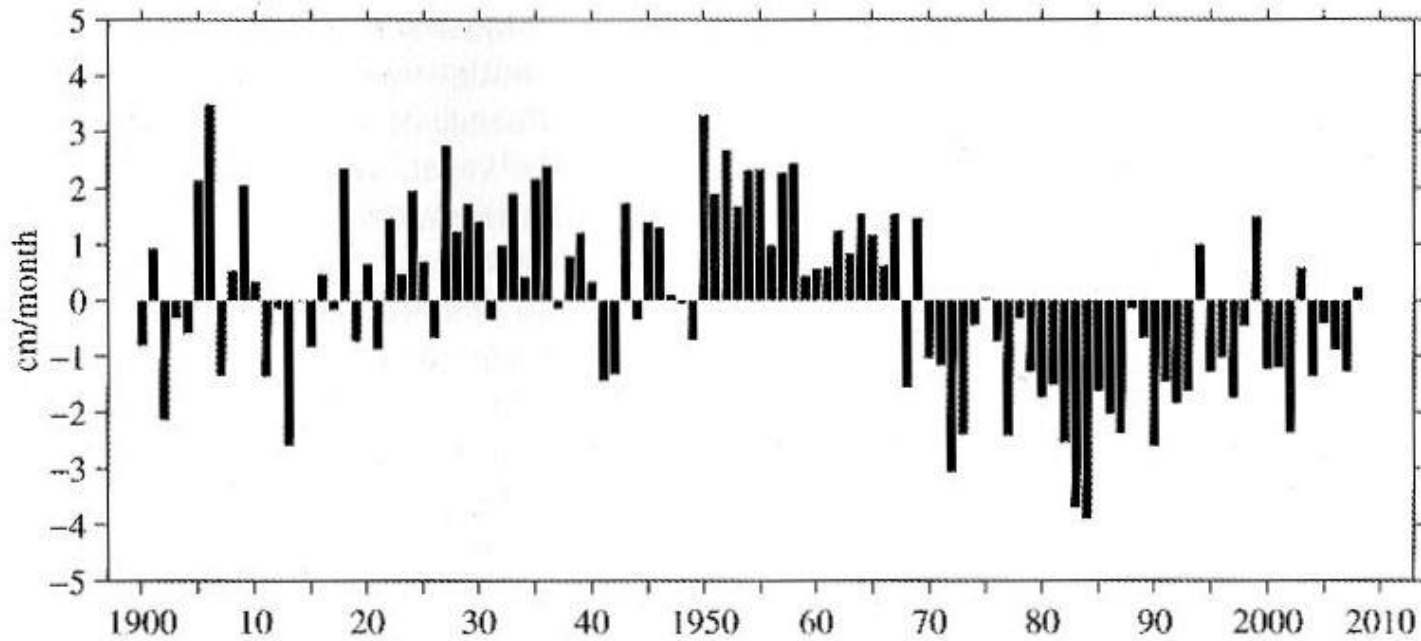
- ・すると地表からの大気の大気対流が弱まり、この地域の上空に元々ある沈降水流に押され気味となるため、雲や降水量が減少する。

- ・雲には、赤外放射を封じ込める機能があるため、雲量の減少は地表面からより多くの赤外放射を宇宙に戻すことに繋がり、その為さらに大気境界層上端の気温は下がり、沈降水流は強まる。

- ・これらより、砂漠には乾燥した空気が吹きつけ、砂漠が維持される。

- ・そして、そのような砂漠地帯に一度、植生が入り込むと、このフィードバック関係が崩れるため、その植生が維持される方向に気候が変化(湿潤化・気温低下・雲量増大に伴う地表面放射量の緩和)する。

サヘルにおける20世紀初頭からの降水量変動



Averages over 20–10N, 20W–10E; 1900–2008 climatology
NOAA NCDC Global Historical Climatology Network data

Figure 5.5. Record of rainfall in the Sahel since 1900 (JJASO mean Sahel precipitation anomalies 1900–2008). A relatively moist phase lasted until about 1970, followed by a substantial reduction in rainfall through the 1970s and 1980s. *Source:* Mitchell (2005).

乾燥・湿潤のトレンドが数年以上続くというトレンドが生じる傾向あり。このようなトレンド持続性の理由の一つに、植生-大気間の正のフィードバックがあると考えられている。

例4：人による植生改変がもたらした気候変化



図 4.1 オーストラリア南西部では、暗色の在来ヒース植生から、入射放射量をより反射するコムギ生産地へと土地利用が変化することによって、相対的にヒース側で表面の加熱が強い状況が発生している。この加熱は空気を上昇させ、水蒸気を多く含む空気をコムギ生産地から引き込み、ヒース上で雲を形成させて降水量を増加させる。それによって、コムギ生産地での降水量は30%も減少し、この乾燥地での農業を支える能力が低下している（第13章参照）。

図：加藤知道監訳「生態系生態学第2版」森北出版

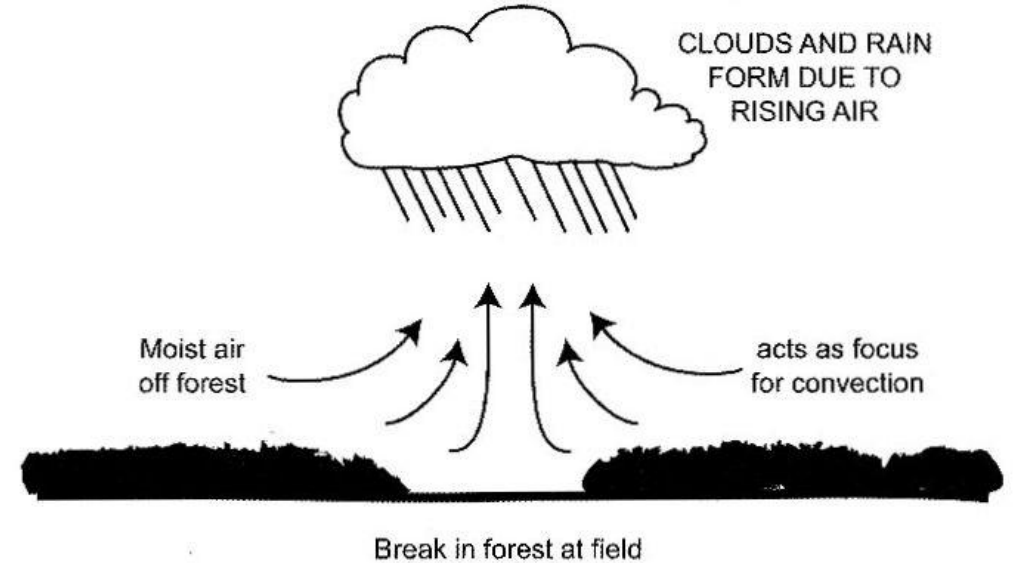


Figure 6.7. Having small open areas in a mainly forested landscape, as in the case of fields, can actually increase rainfall by providing focal points for rising air which can be carried high and condense out rain clouds.

図：Adams (2009), Vegetation-Climature Interaction, 2nd edition

左の例では、アルベドの低いエリアで降水量が増加、右の例では、その逆となっている。この差を生じさせているのは、主には土地改変領域の広さの違い。

例5：炭素収支を通じた全球気候への影響

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考えられている。

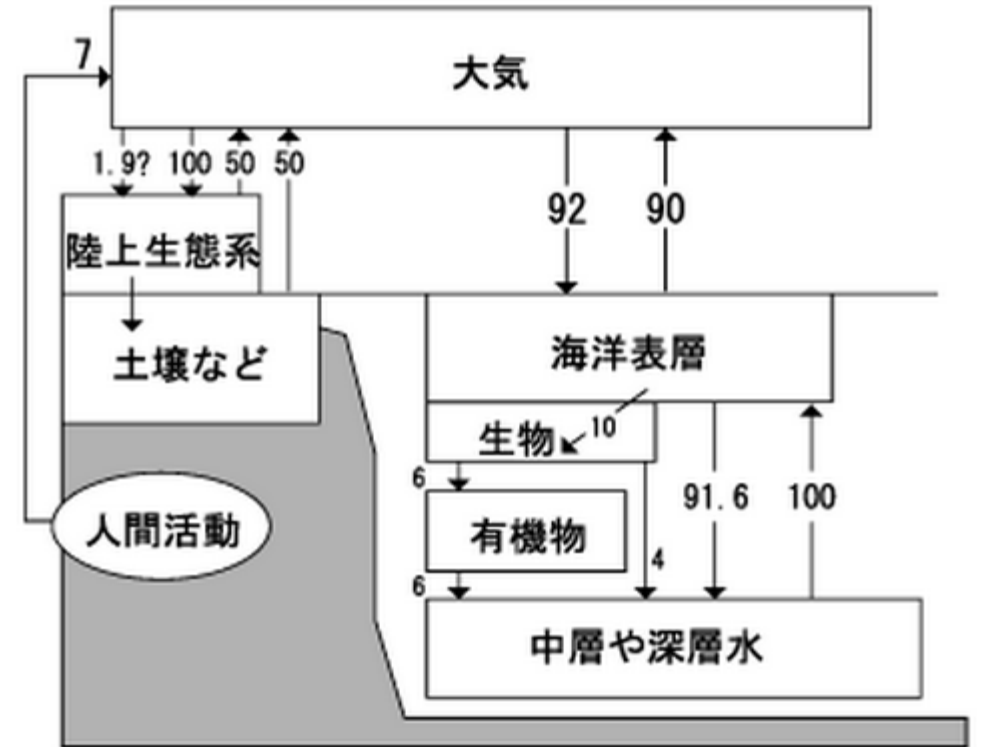
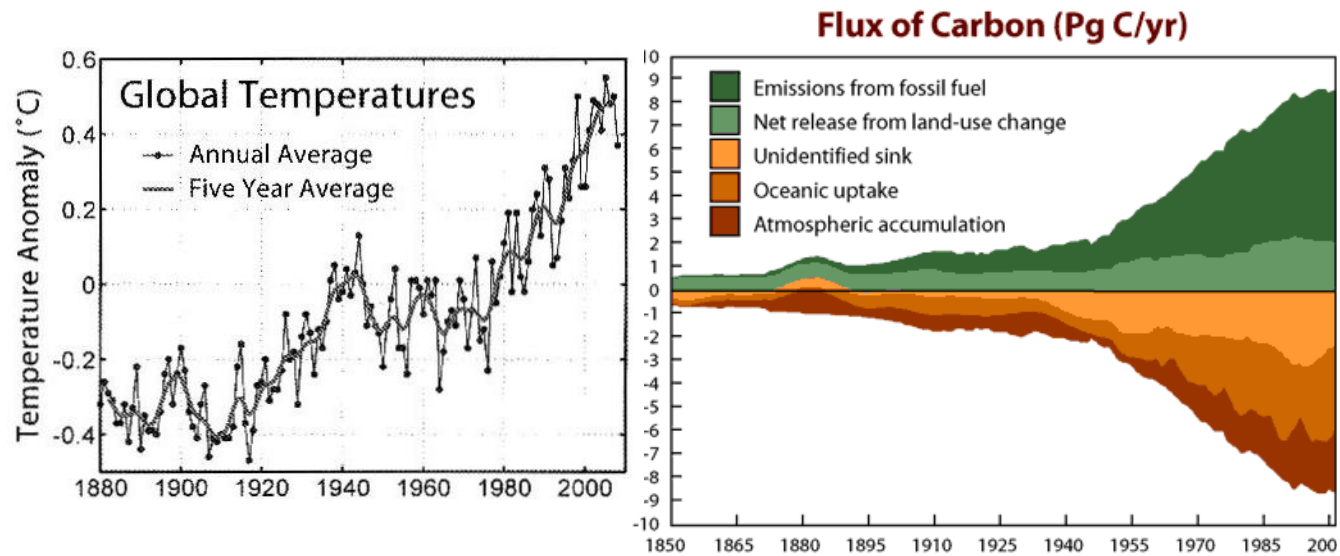


図1 二酸化炭素の移動の様子(1980～89年)
(単位Pg-炭素/年) (Siegenthalerら, 1993)

これまで見てきた例1～4は、全て生物物理過程によるフィードバックであり、その影響は地域限定的。この例5のような、大気中CO₂濃度などを通じた**生物化学的**過程によるフィードバックは**全球的なものとなる**。

広域植生モデルの現状

主な参考文献

Fisher et al. (2018) Vegetation Demographics in Earth System Models: a review of progress and priorities. *Global Change Biology* 24(1) 35-54

伊藤昭彦, 小出大, 中河嘉明 (2017) 陸域生物圏モデルの開発と温暖化研究: 最近の動向, *天気*, 64(6), 409-427.

佐藤永, 伊藤昭彦, 橋本昌司 (2018) モニタリングに基づく物質動態広域評価の最前線-広域における炭素・窒素・水の動態を探る 8. 全球スケールの陸域物質動態シミュレーション, *日本土壌肥料学雑誌*, 89(2), 152-160.

Sato H, Ito A, Ito A, Ise T, Kato E (2015) Current Status and Future of Land Surface Models, *Soil Science and Plant Nutrition*, 61(1), 34-47

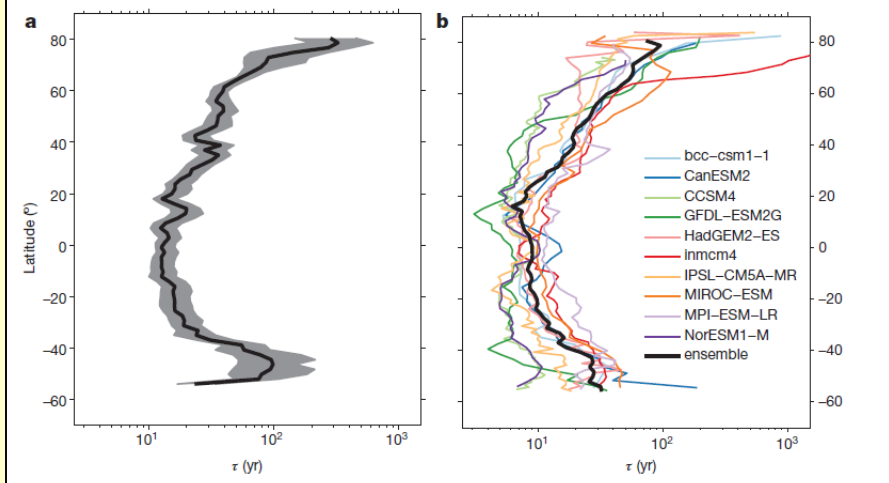
佐藤永 (2014) 植生と気候の相互作用と、動的全球モデル, in *地球環境変動の生態学*, edited by 原登志彦, pp. 129-147, 共立出版, 東京.

佐藤永 (2008) 生物地球化学モデルの現状と未来 - 静的モデルから動的モデルへの展開, *日本生態学会誌*, 58(1), 11-21.

陸域生態系モデルの現状

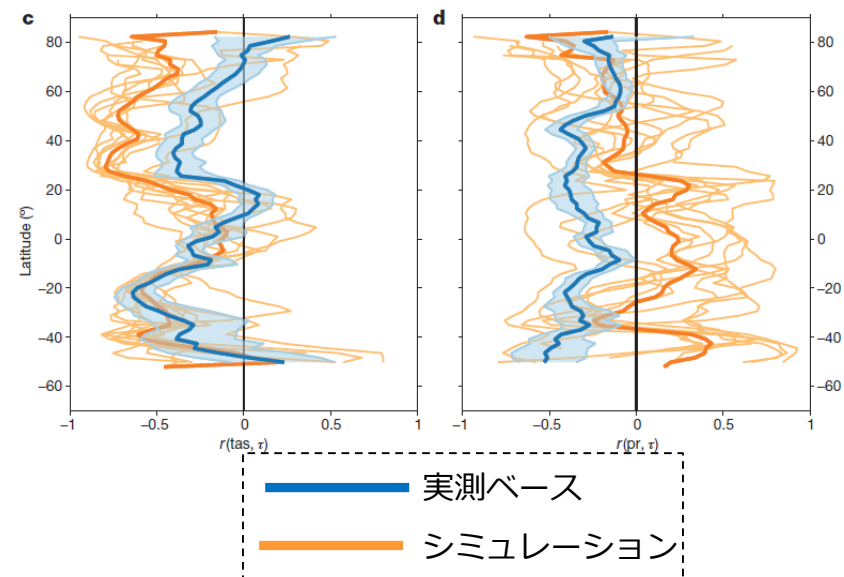
光合成で陸面に取り込まれた炭素の回転率（緯度方向の分布）

実測ベース シミュレーション



気温感受性

降水量感受性

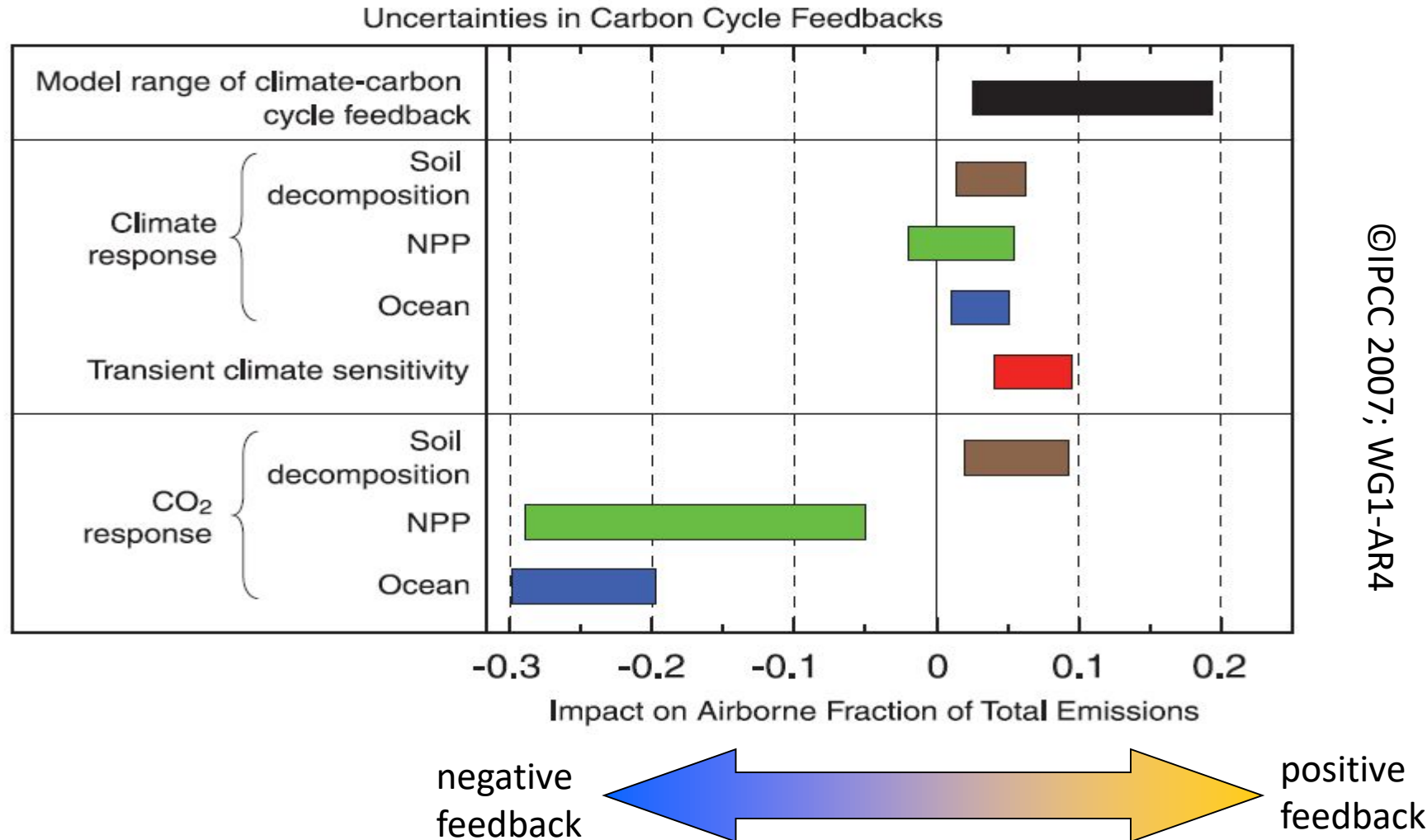


出典 : Carvalhaisら(2014) *Nature* 514

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。**

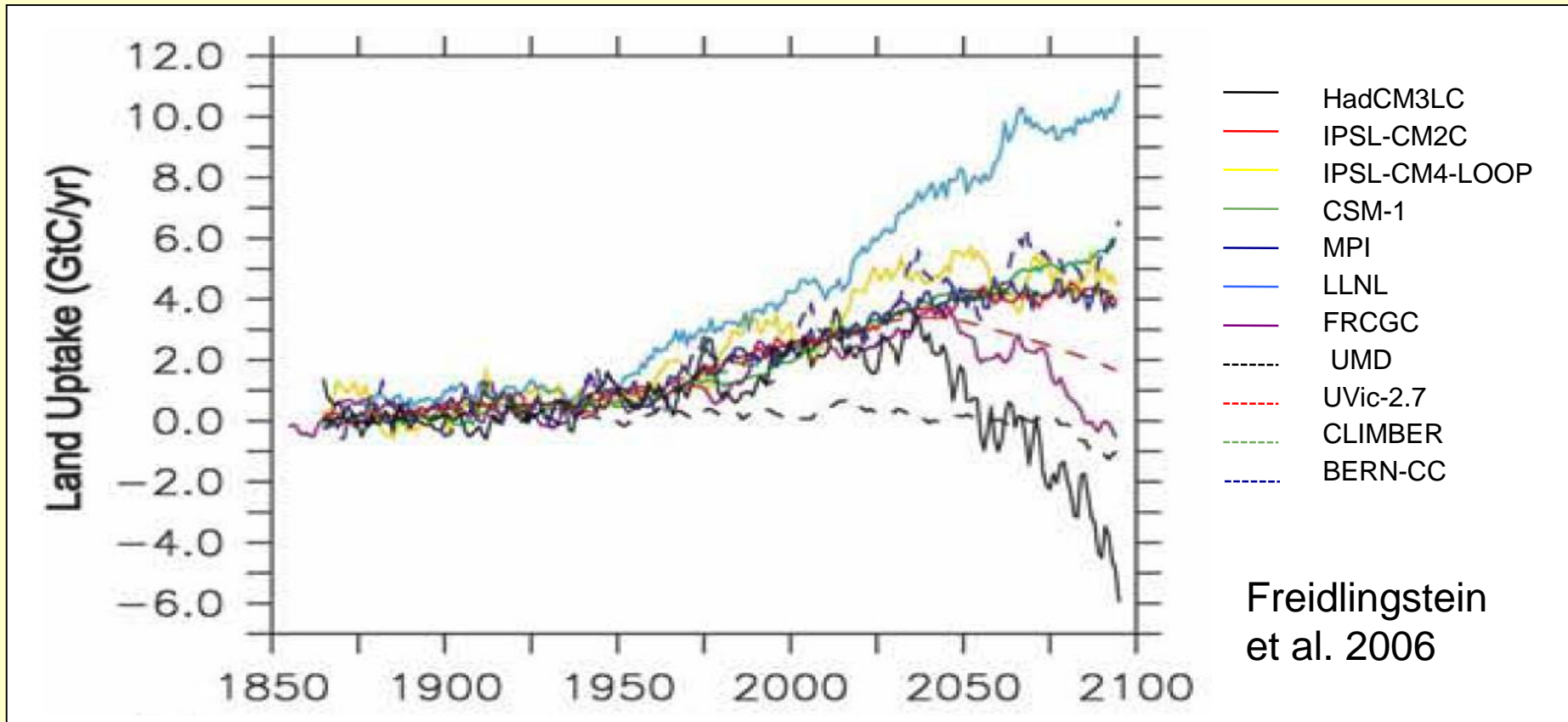
よって、気候変動への応答の予測信頼性は、未だ高くない。

Ecosystem feedbacks to climate



Due to feedbacks, the response of the terrestrial biosphere is now one of the largest sources of uncertainty the amount of climate change over the 21th century

Predictions for the long-term responses of terrestrial ecosystems to climate change from the IPCC 4th Assessment.

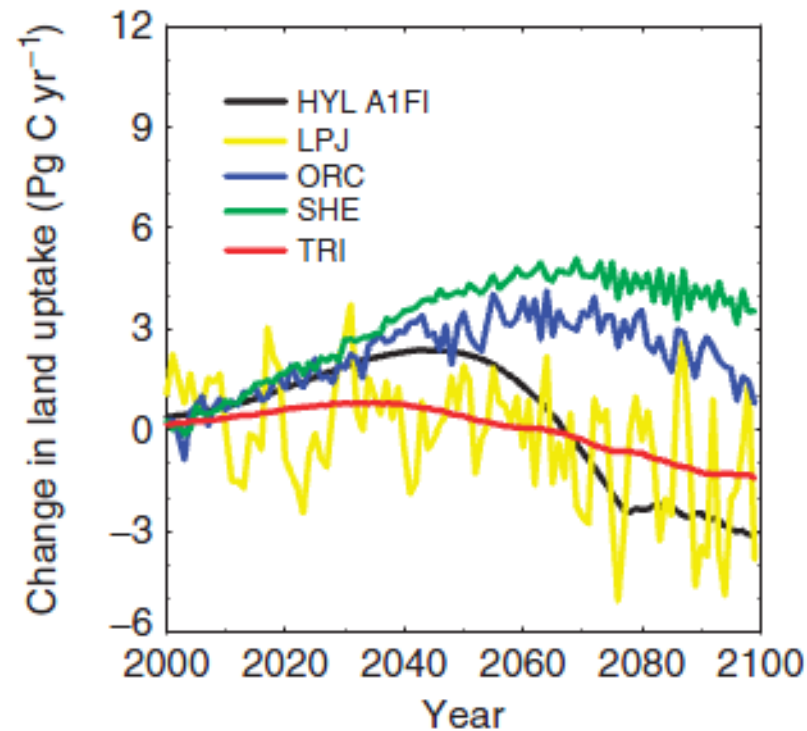


There is a large degree of uncertainty in the predicted response of the terrestrial biosphere to anthropogenic climate change.

Due to feedbacks, the response of the terrestrial biosphere is now one of the largest sources of uncertainty the amount of climate change over the 21st century.

Current (poor) state of DGVMs

Responses of land carbon uptake to climate change under IPCC A1F1 carbon emission scenario



Sitch et al. (2008)

The response of the terrestrial biosphere is now one of **the largest sources of uncertainty** for climate change over the 21th century

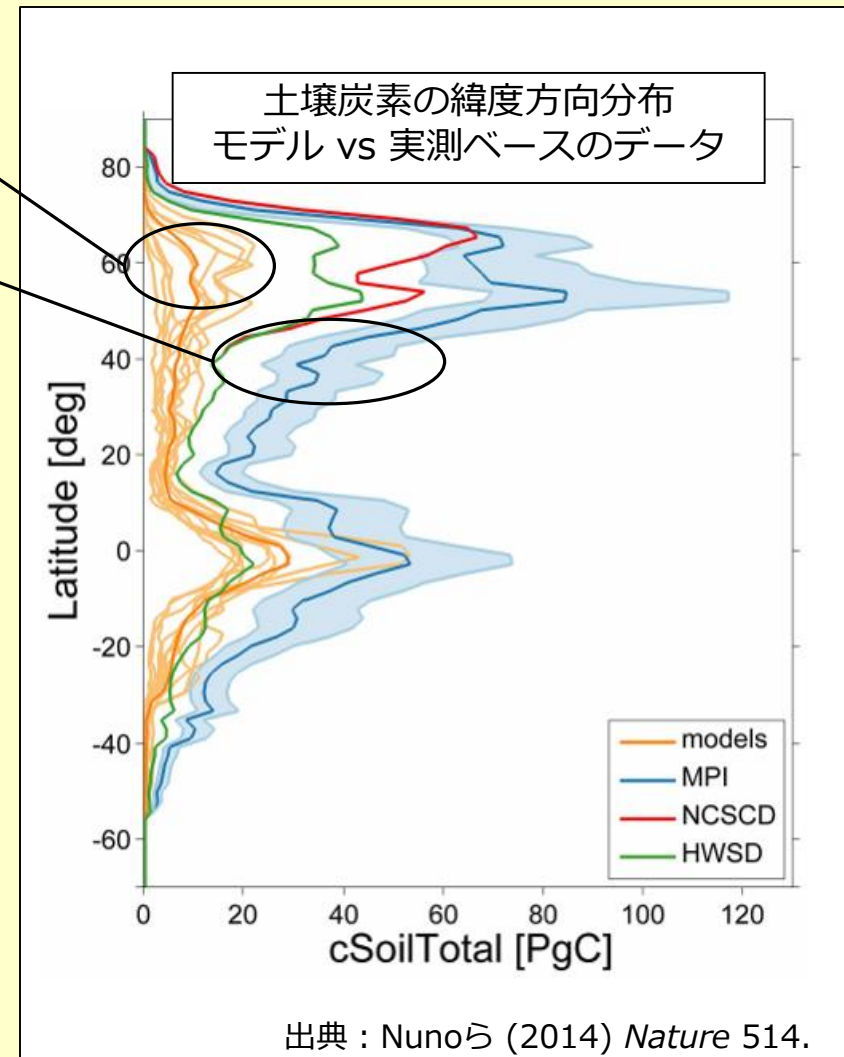
扱いの改善が望まれるプロセス1：土壌炭素

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)

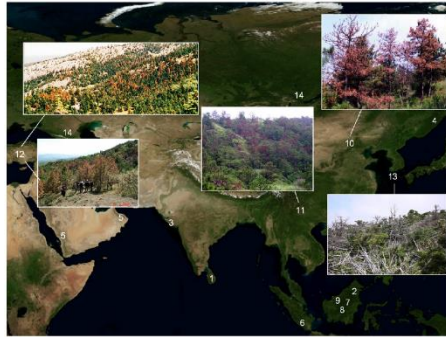
現在のESMは、特に高緯度帯の土壌炭素を過小推定しており、今後は、凍土や泥炭に埋蔵されている炭素なども考慮する必要がある。

米国エネルギー省は2011年より“Next-Generation Ecosystem Experiments, **NGEE-Arctic**”という研究プログラムに1億ドルの予算を付けており、高緯度帯の陸域炭素の気候応答研究を先導している



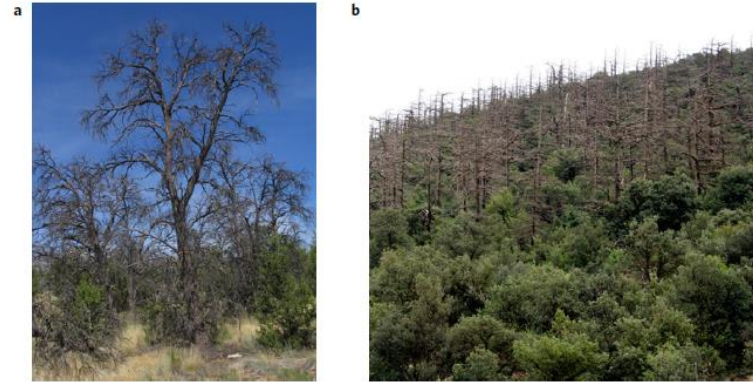
扱いの改善が望まれるプロセス2：乾燥枯死

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



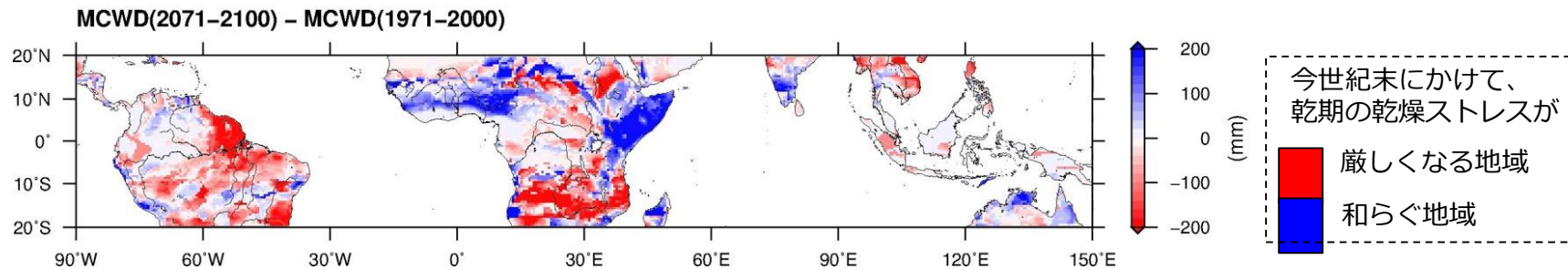
出典：Allenら2010 *For.Ecol.Manage.* 259

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



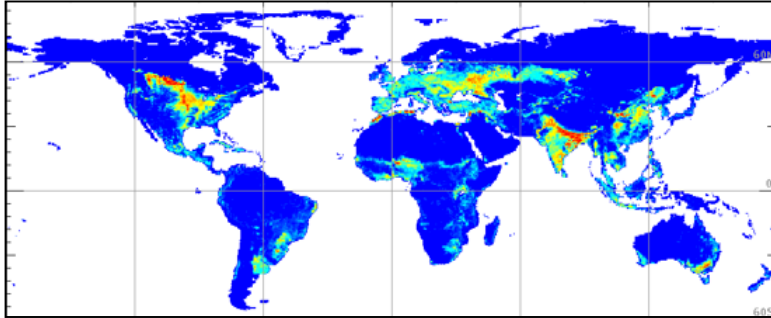
乾期の乾燥の強さを示す指標であるMaximum Climate Water Deficit (MCWD)の30年間最大値を、20世紀末と21世紀末とで比較した。(with MIROC-ESM@RCP8.5)

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)

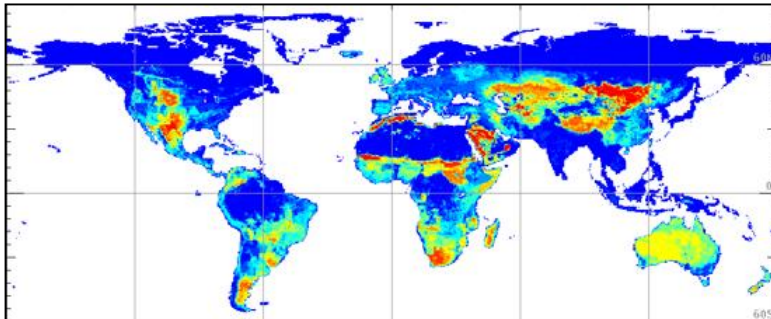
個体ベースモデルを用いた乾燥枯死のモデリングが行われつつある

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

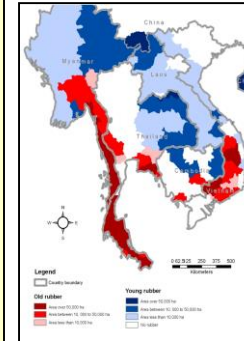


牧草地・放牧地の割合

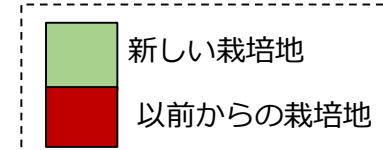


図の作成：加藤知道、データ源：CMIP5指定のForcing Data

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、世界各地で実施中。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。

森林動態モデルの検証

(1) 振る舞いのそれらしさ

- ・モデルを作成するに際しては、前もって何も再現したいモデルであるのかを明確にしておく。その上で、モデルの予測を実際の現象と対比させる。
- ・元となったデータを得た森林とは別の森林の振る舞いを再現できるか否かを調べれば、更に進んだ検証となる
- ・再現できない場合、疑われるのは、a:そのモデルの一般性に限界がある、b:その森林では重要でなかった要素が別の森林では重要である、c:入力データがある範囲から逸脱するとモデル内の近似式の誤差が大きくなる

(2) 構造の妥当性 ~自然の仕組みを適切に写し取れているか?~

対象となる森林をどのようなシステムと捉え、それをどのようにモデルの形に表現するのか。その表現に無理は無い。モデルは多かれ少なかれ、現実を単純化・抽象化するものであり、どの部分を本質的な要素としてモデルに組み入れ、どの部分を捨てるのかは、モデルをつくる目的に依存する。関心があるプロセスを捨てたモデルでは使い物にならないし、詳細に過ぎるモデルでは、かえって本質を見えづらくする。

(3) 関数の妥当性

変数にとる値の範囲も十分に注意する必要がある。なぜならば、変数の値がある範囲内であれば妥当な関数が、その範囲外ではとんでもない値をとる可能性が排除できないため

(4) パラメーターの妥当性

パラメータには少なからぬ推定誤差が含まれている。それらが、どのくらいシステム全体の挙動の不確かさを生じさせるのかについては感度分析により推定することが出来る。