

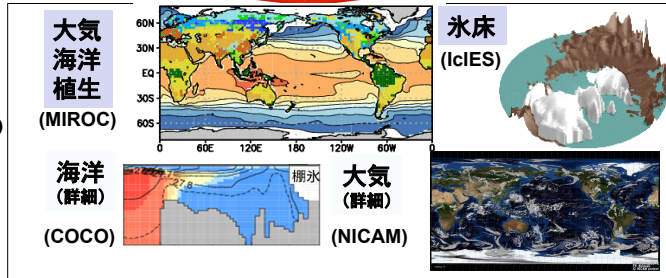
気候システム学 阿部 過去と将来の気候システム:モデルアプローチ

モデル境界条件

日射変動, 温室効果ガスなどの大気組成,
大陸配置/海底地形 など

入力

モデル構築,
使用するモデルの
選定と数値実験



数値計算
モデル出力

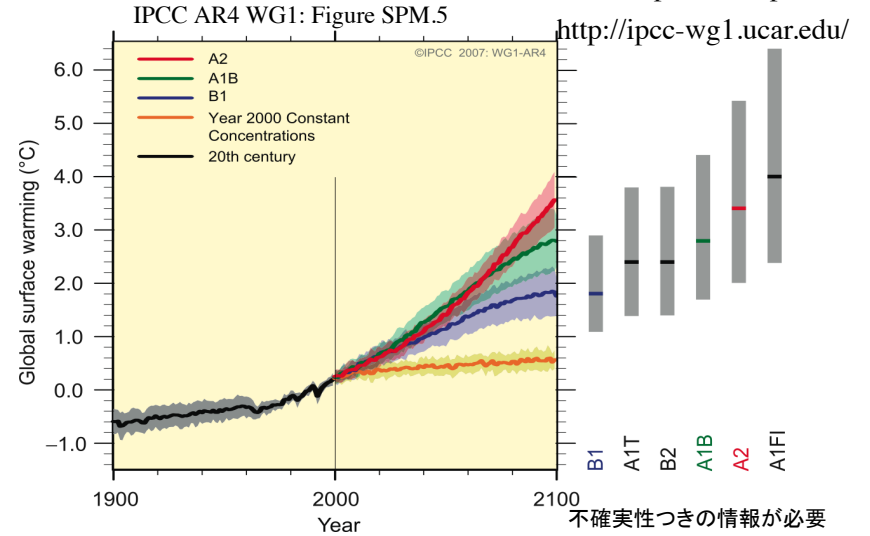
プロセスと
力学の理解

モデルの検証,
古環境変動
メカニズムの
説明

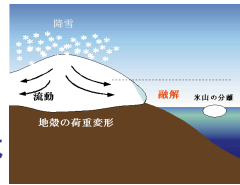
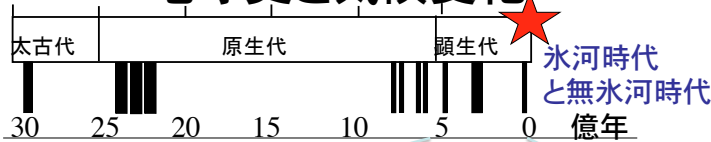
気温, 降水量, 大気循環, 水同位体, エアロゾル,
海洋水温, 塩分, 海洋循環, 海水, 生物生産, 炭素量, 栄養塩,
氷床形状, 海面水位, 氷床融解量, 固体地球形状 など

気候モデルによる過去100年の 再現と将来100年の気候予測

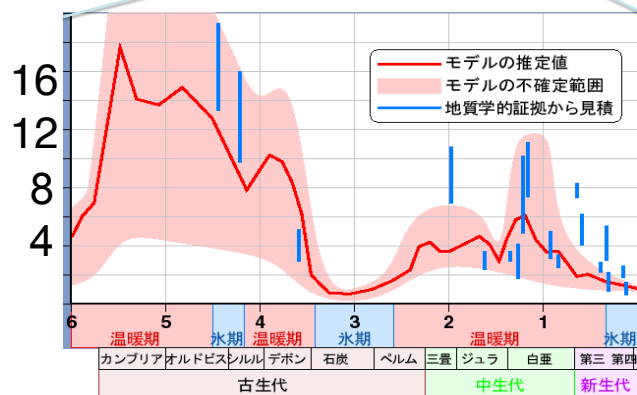
<http://www.ipcc.ch/>



地球史と気候変化



過去6億年間の気候変化とCO₂(推定)



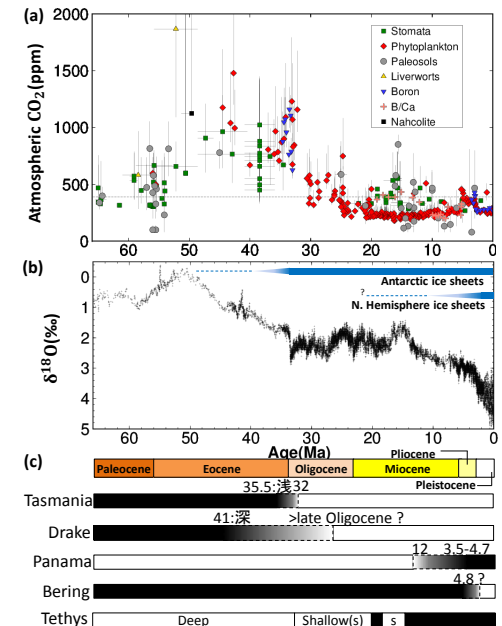
CO₂ → 気候?

GEOCARB
Berner, 1990, 1994

(億年)

過去6千万年の環境変化

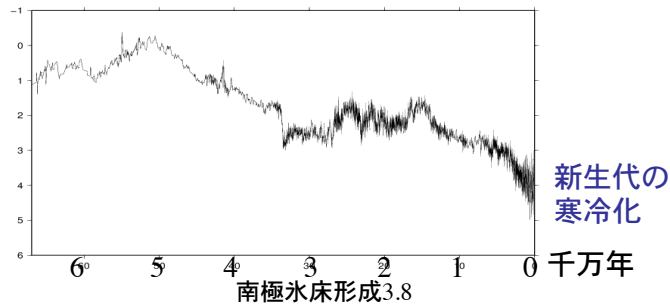
大気中CO₂変化と
酸素同位体比(氷床量と
深海温度指標)



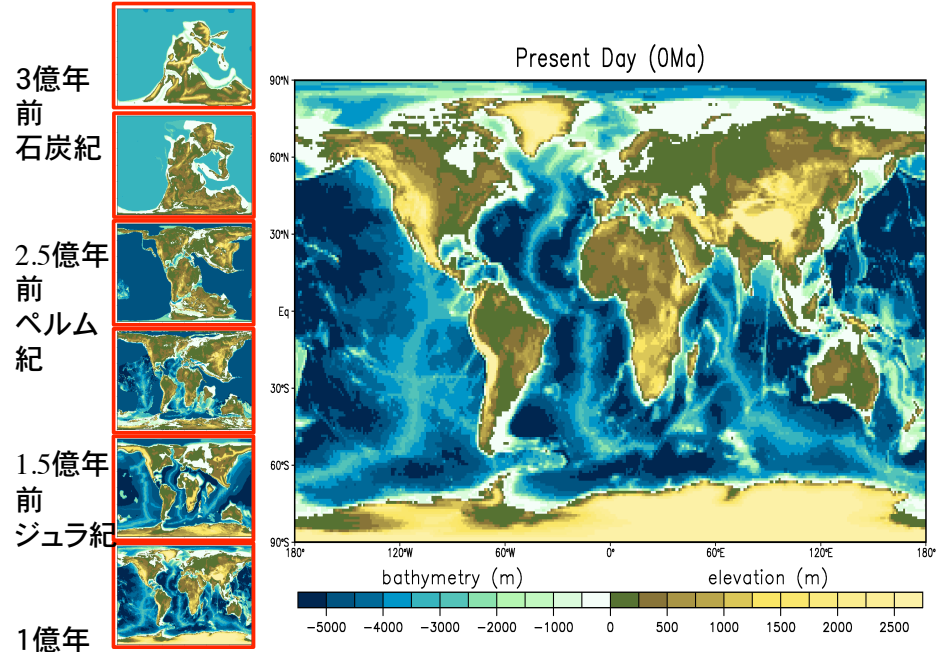
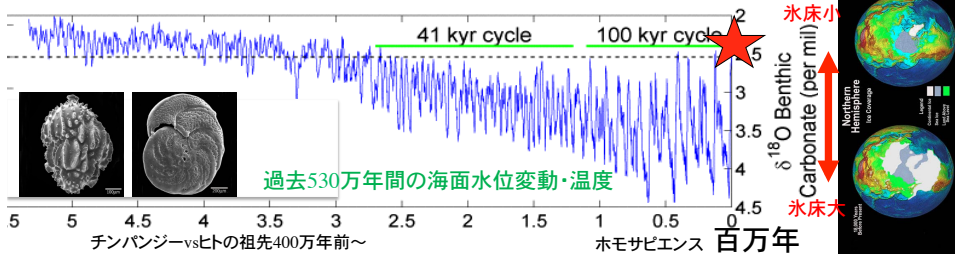
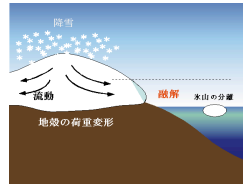
(a)Berling and Royer (2011)を基に作成, (b)Zachos et al. (2008)を基に作成, (c)Barker et al. (2007), Sijp et al. (2014), Brieley and Fedorov (2016), Molnar (2008), Haywood et al.(2016), Zhang et al.(2011)を基に作成

地球史と気候変化

過去6千万年間の深海温度・海面水位変動

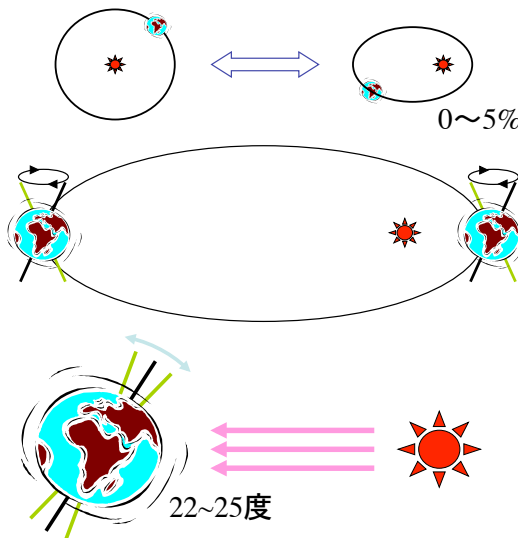


新生代の
寒冷化



軌道要素と日射量変動

(ミランコビッチフォーシング)



全球平均・年平均

離心率, 軌道長半径
10万年周期

夏の日射量の大小

離心率, 自転軸の方向
(歳差), 近日点経度
2万年周期

低緯度と高緯度の
差異

赤道傾角4万年周期(軌道
傾斜角, 昇交点経度)

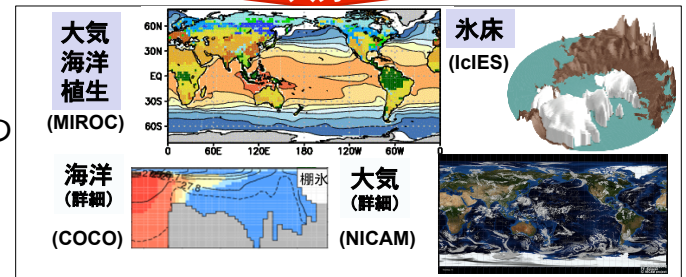
気候システム学 阿部

過去と将来の気候システム: モデルアプローチ

モデル境界条件

日射変動, 温室効果ガスなどの大気組成,
大陸配置/海底地形 など

モデル構築,
使用するモデルの
選定と数値実験

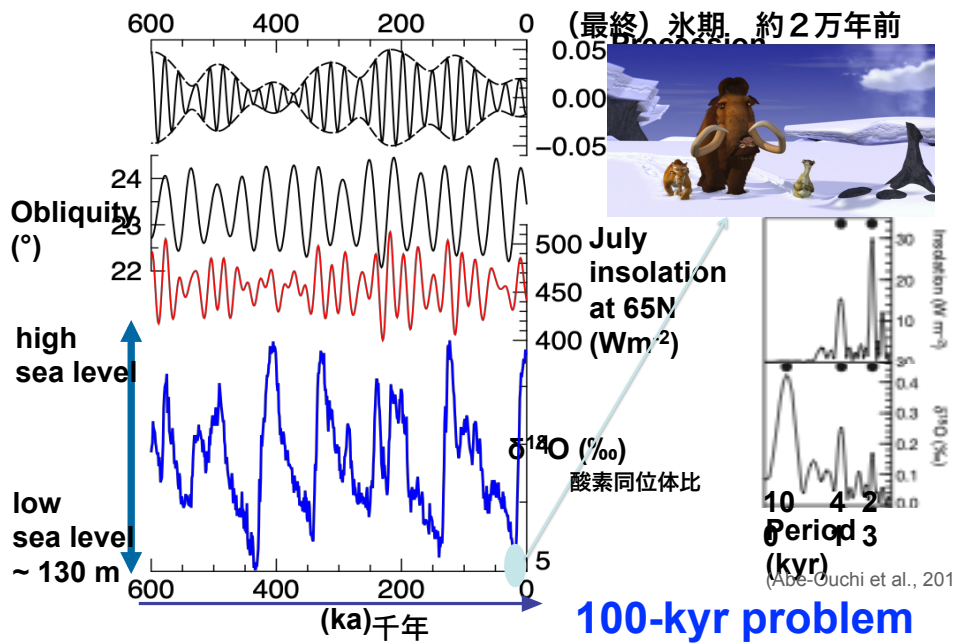


モデルの検証,
古環境変動
メカニズムの
解明

数値計算
モデル出力

プロセスと
力学の理解

気温, 降水量, 大気循環, 水同位体, エアロゾル,
海洋水温, 塩分, 海洋循環, 海水, 生物生産, 炭素量, 栄養塩,
氷床形状, 海面水位, 氷床融解量, 固体地球形状 など



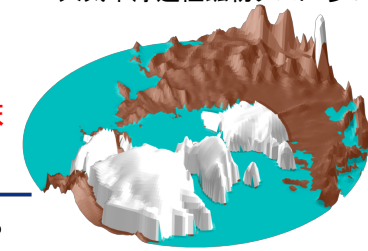
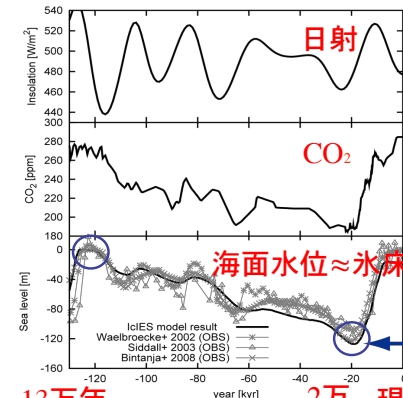
最終(直近の)氷期サイクル

最終間氷期(約13~12万年前)

- 軌道要素: 現在と異なる.
- その他: 現在と似ている.

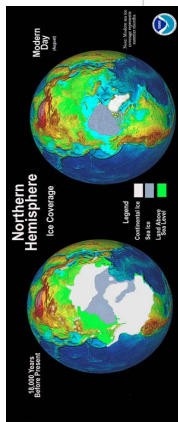
最終氷期最盛期(約2万年前)

- 大陸配置: 現在とほぼ同じ
- 海面水位: ~130m
- 温室効果ガス: CO₂, CH₄, N₂O 現在よりかなり少ない (CO₂: 産業化前の約65%)
- 氷床: 北米と北欧
- 軌道要素: 現在と似ている.
- 植生: 現在と異なる.
- 大気中浮遊性鉱物ダスト: 多い

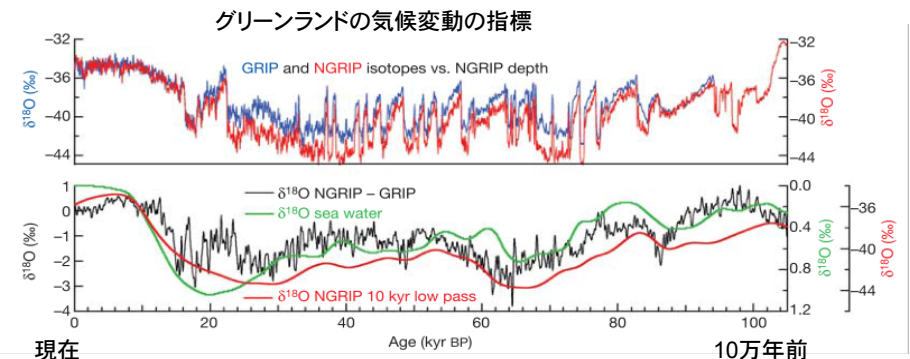
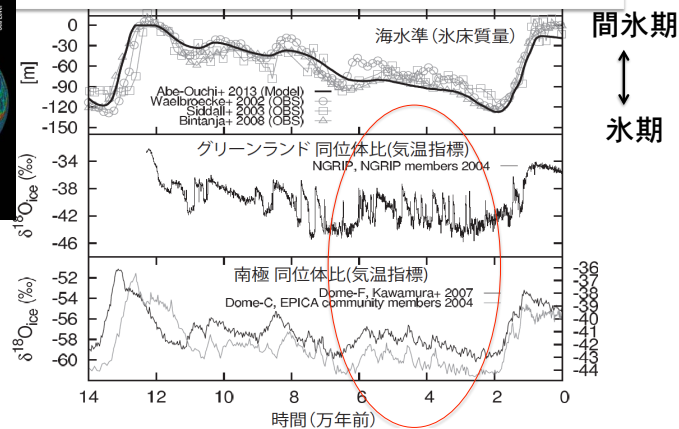
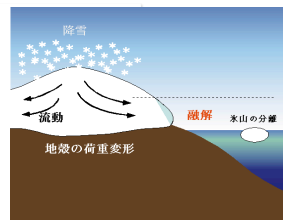


(Abe-Ouchi et al. 2013)

氷期における、急激な気候変動を含む数千年周期の変動

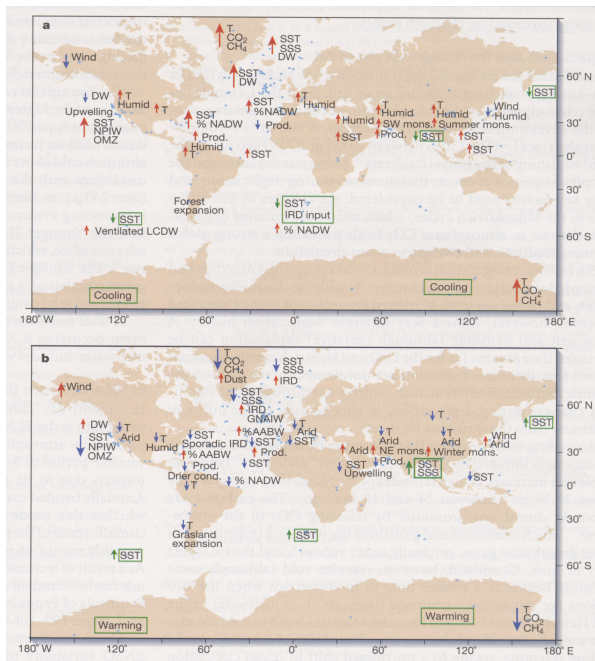


氷期中の急激な気候変化:
DO event 20回以上: グリーンランド定義
H event 5回以上: 北大西洋の氷山

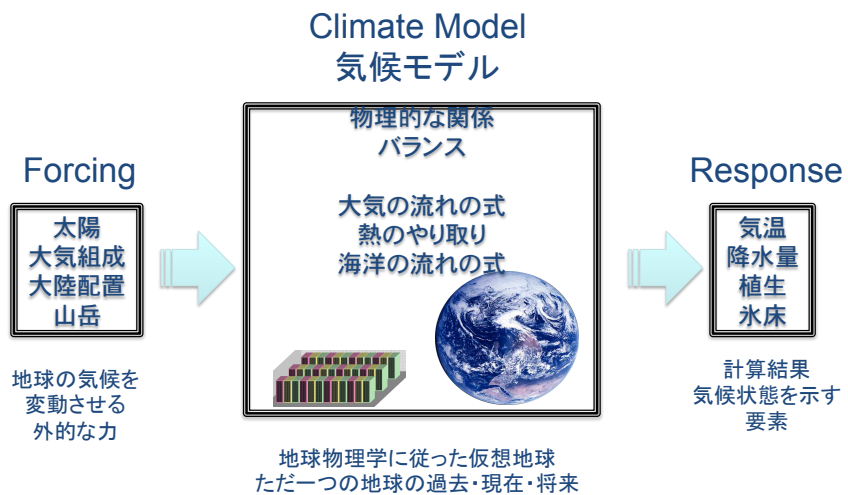


- 非常に速く大きな変化(グリーンランドの温度: 100年以内に10°C以上)
- 北半球で顕著. 南北間のリンク.
- 地球システムのヒステリシス.

D/O eventの
空間分布
cold phase vs
warm phase
(Dansgaard -
Oeschger
event)

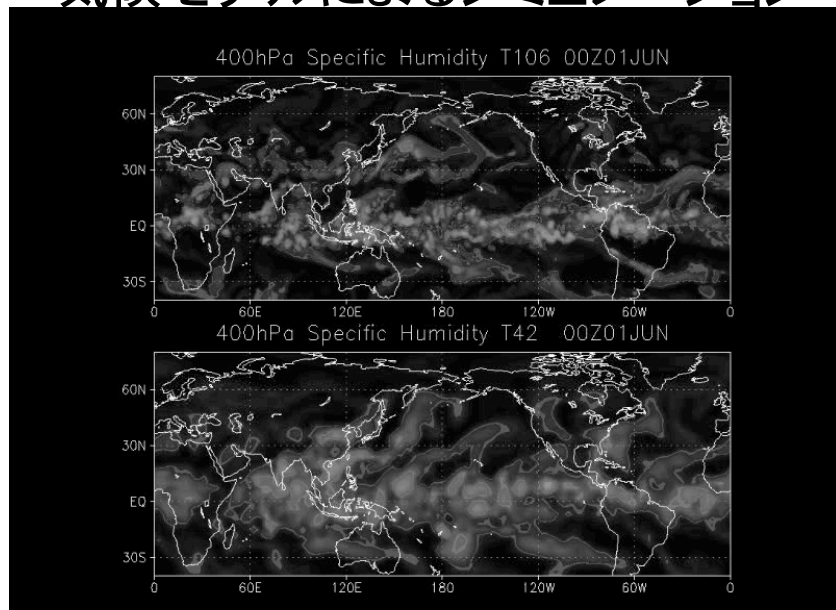


気候モデルと入力/出力

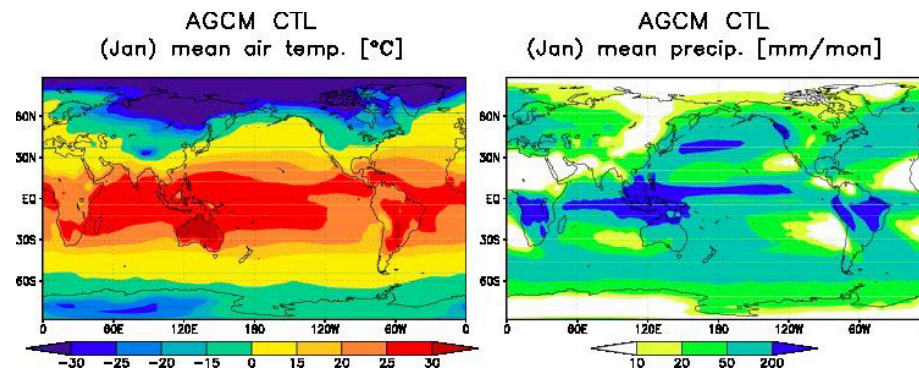


※最新の気候モデルは統計的な経験モデルではない

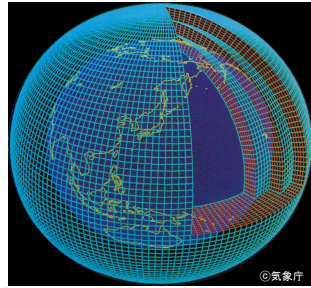
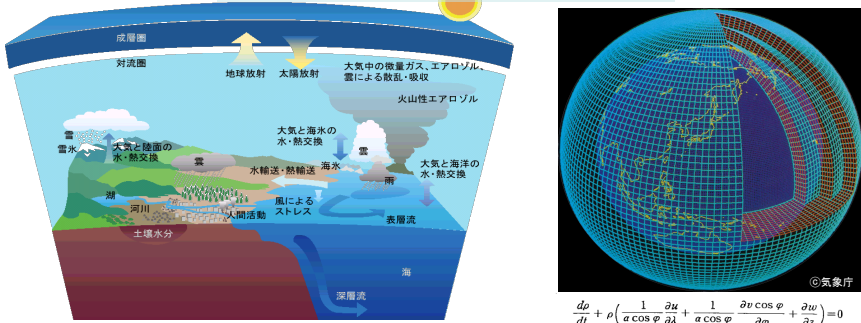
気候モデルによるシミュレーション



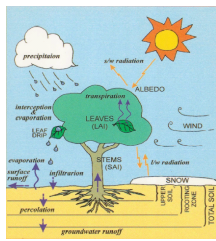
気候モデルによるシミュレーション 世界の月平均気温と降水量



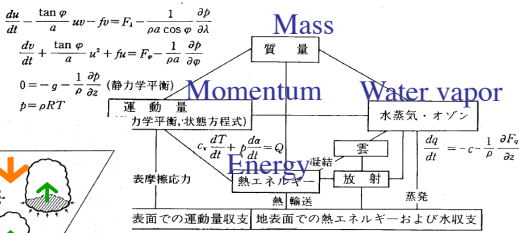
気候モデル(GCM)による数値計算



$$\frac{dp}{dt} + \rho \left(\frac{1}{a \cos \varphi} \frac{\partial u}{\partial \lambda} + \frac{1}{a \cos \varphi} \frac{\partial v \cos \varphi}{\partial \varphi} + \frac{\partial w}{\partial z} \right) = 0$$

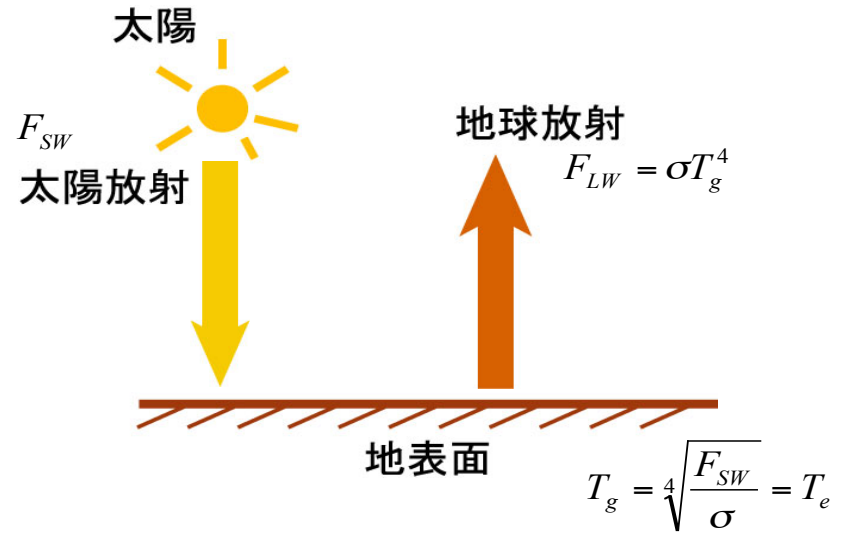


格子表現のため
物理の第一原理
と経験則の組み
合わせ

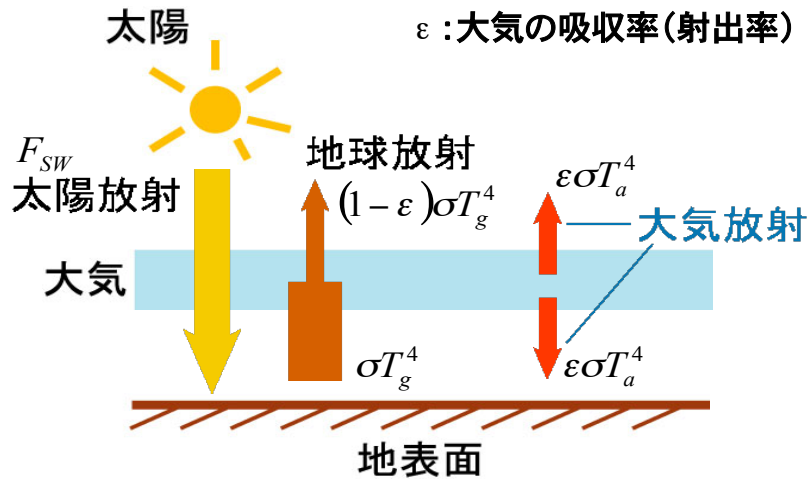


(気象学、海洋学、地球物理学)

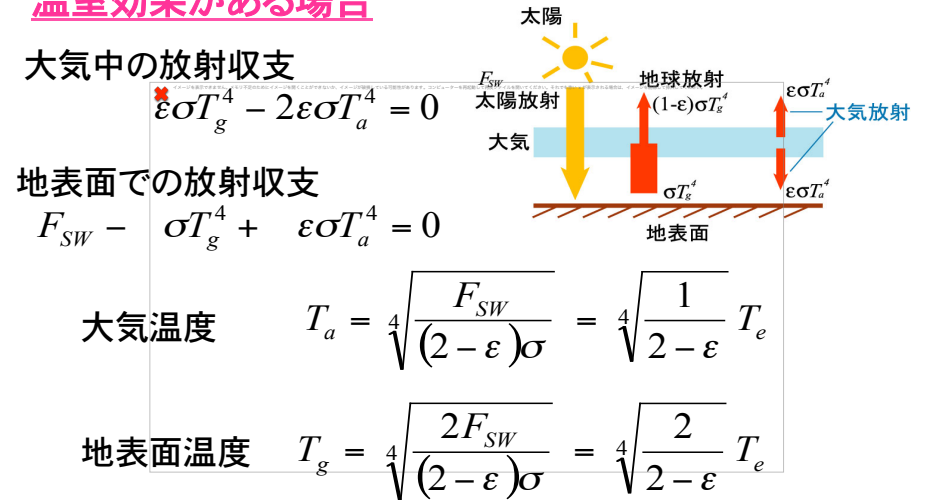
温室効果がない場合



温室効果がある場合

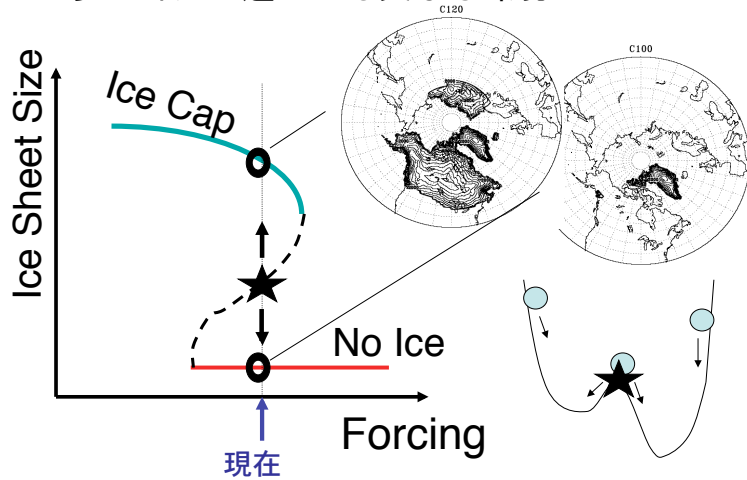


温室効果がある場合

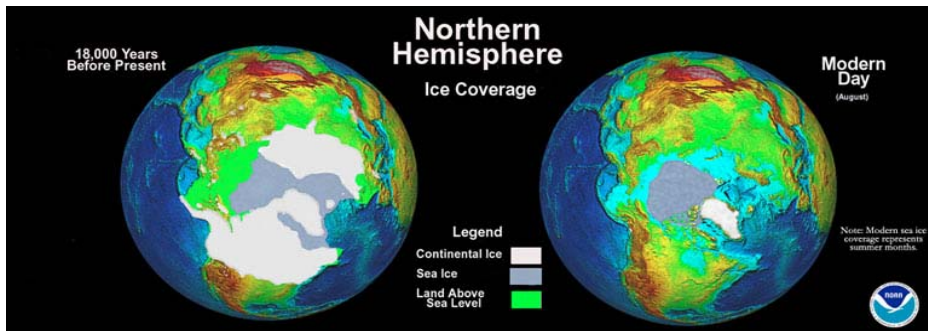


大気の吸収率が大きくなると地表面温度も高くなる!

システムの安定性が
気候の時間変化を左右：
ほんの少し外力の違いでも異なる環境に？



氷期 VS 間氷期



2万年前の水床量は、海面が現在より120メートルほど下がるのに相当した。
各地の気候が大きく現在と違った。全球は5度、気温が今より低かった。
現在は、氷河時代の中の間氷期ということになる。

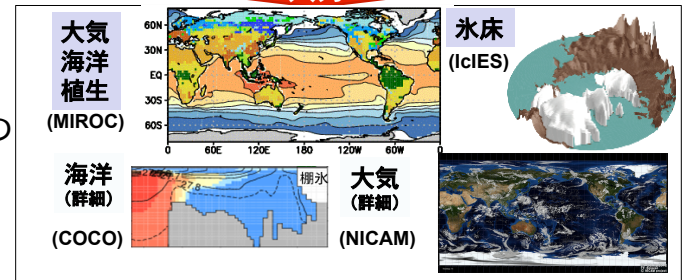
研究動機: なぜ、これほど氷床の大きさが変化したのか？
どれほど気候／氷床は外力に対して敏感なのか？
気候の安定性・感度について、気候モデルを使って調べる。

気候システム学 阿部
過去と将来の気候システム: モデルアプローチ

モデル境界条件

日射変動, 温室効果ガスなどの大気組成,
大陸配置/海底地形 など

モデル構築,
使用するモデルの
選定と数値実験

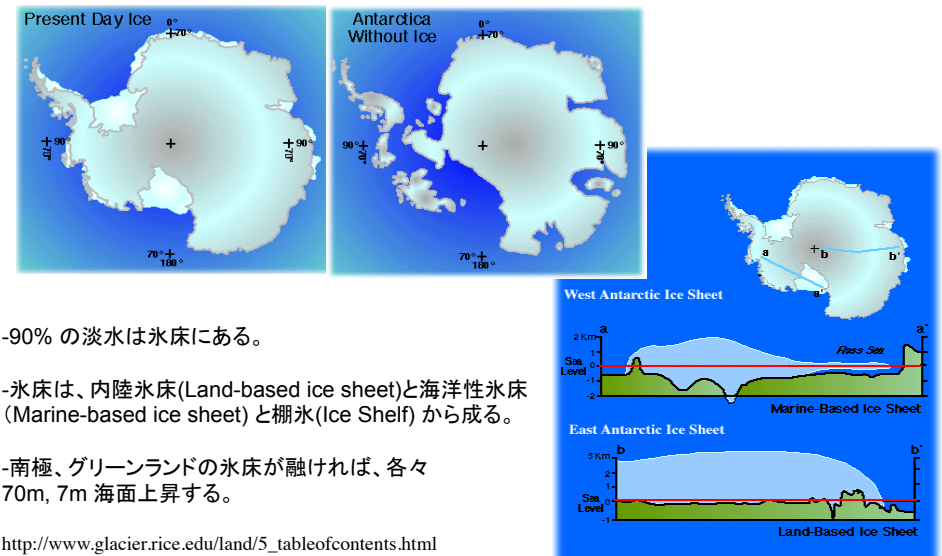


モデルの検証,
古環境変動
メカニズムの
解明

気温, 降水量, 大気循環, 水同位体, エアロゾル,
海洋水温, 塩分, 海洋循環, 海水, 生物生産, 炭素量, 栄養塩,
氷床形状, 海面水位, 氷床融解量, 固体地球形状 など

地球環境学3阿部

Ice sheet 氷床=大陸規模氷河



-90% の淡水は氷床にある。

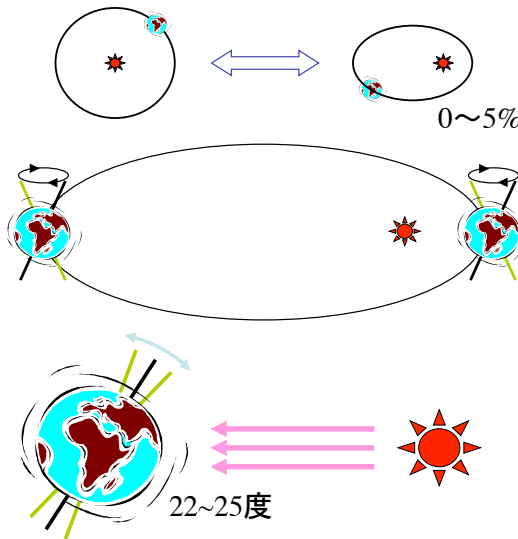
-氷床は、内陸氷床(Land-based ice sheet)と海洋性氷床
(Marine-based ice sheet) と棚氷(Ice Shelf) から成る。

-南極、グリーンランドの氷床が融ければ、各々
70m, 7m 海面上昇する。

http://www.glacier.rice.edu/land/5_tableofcontents.html

軌道要素と日射量変動

(ミランコビッチフォーシング)



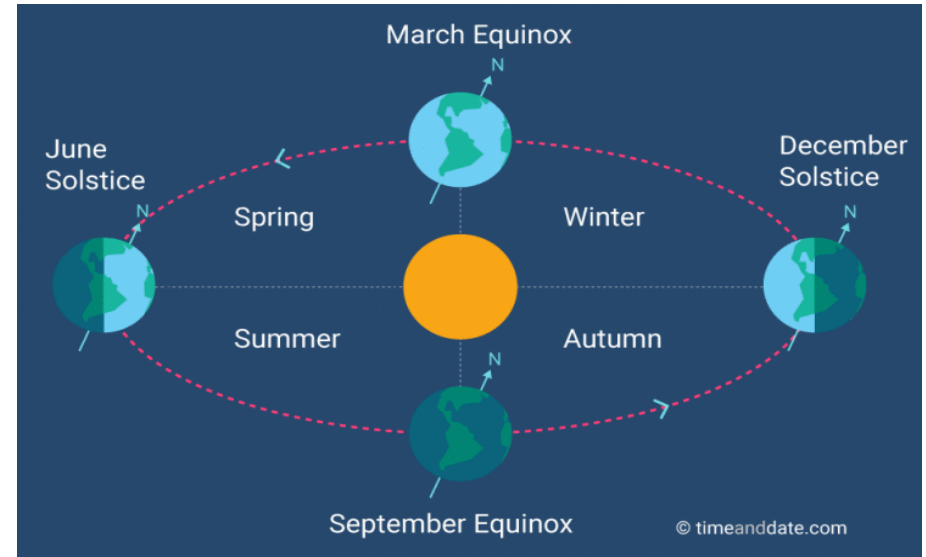
全球平均・年平均
離心率, 軌道長半径
10万年周期

夏の日射量の大小
離心率, 自転軸の方向
(歳差), 近日点経度
2万年周期

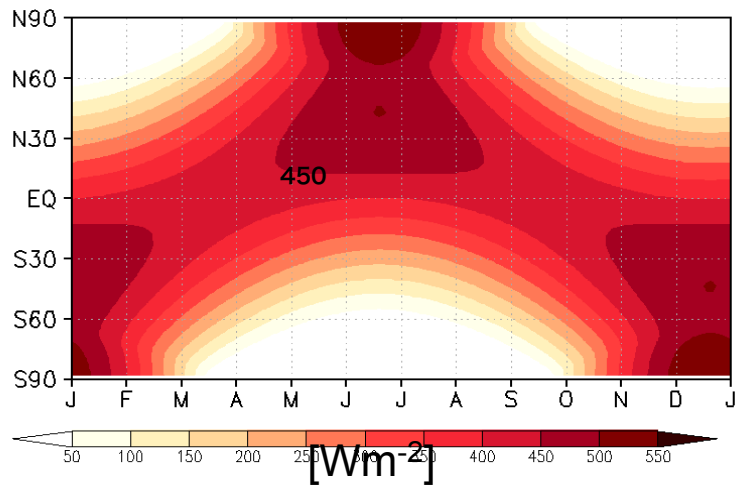
低緯度と高緯度の
差異

赤道傾角4万年周期(軌道
傾斜角, 昇交点経度)

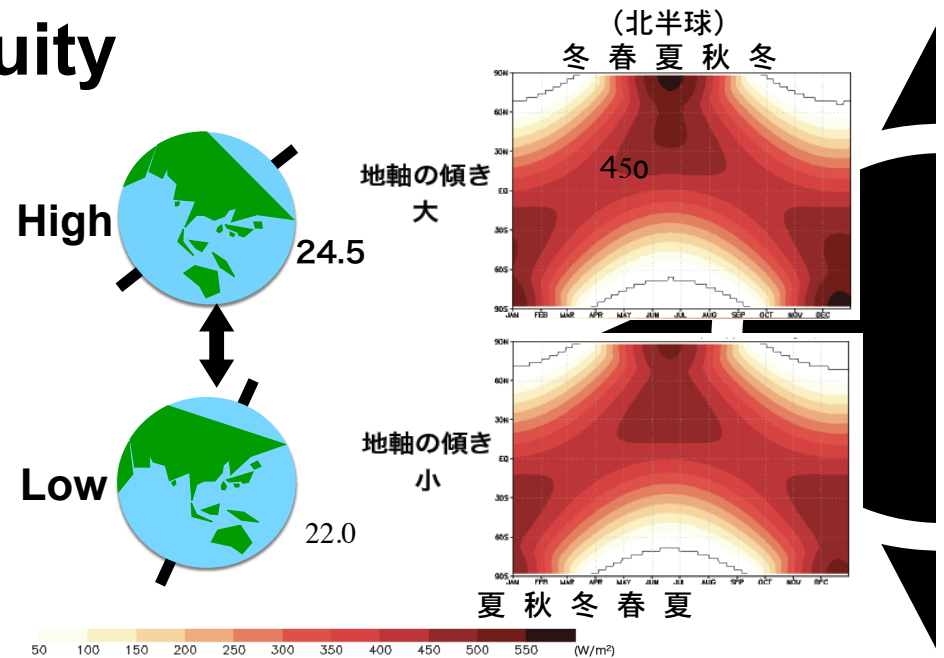
四季: 4 seasons



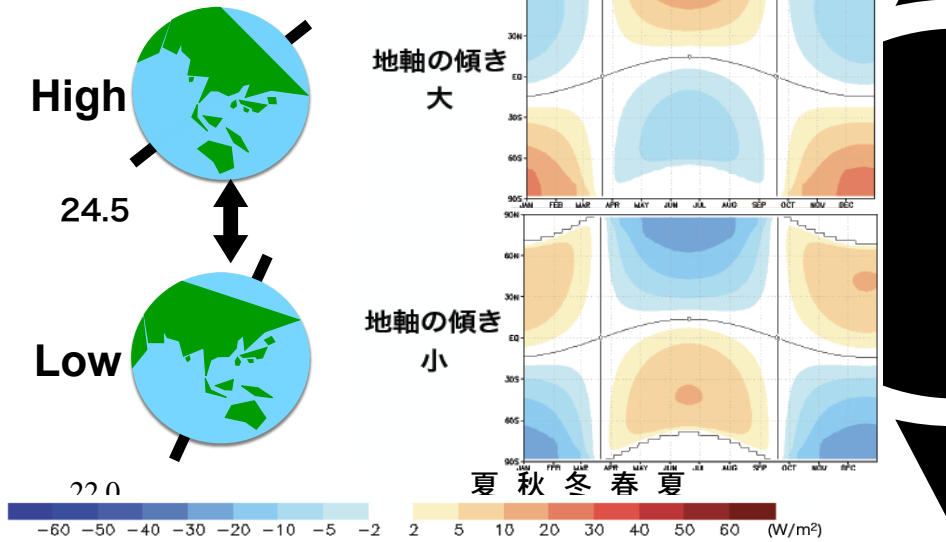
日射の季節／緯度依存性の分布



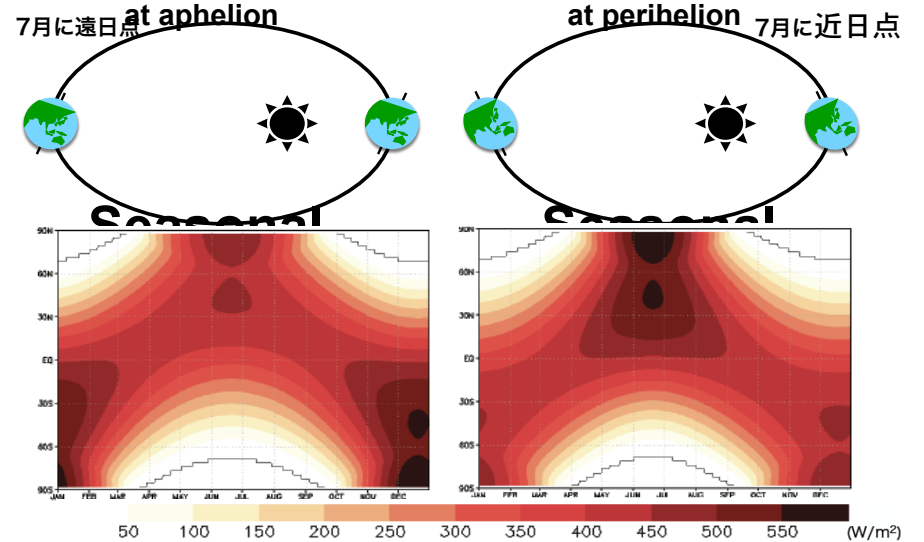
uity



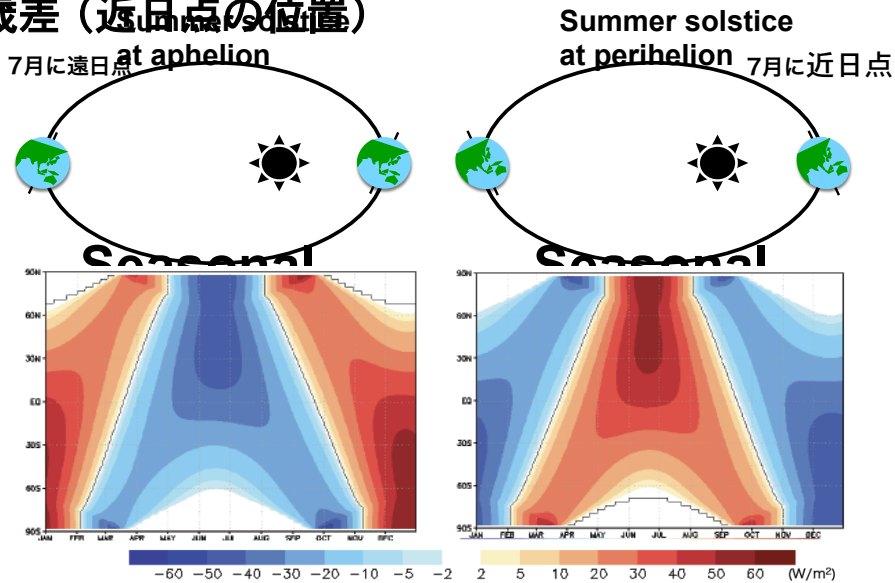
uity



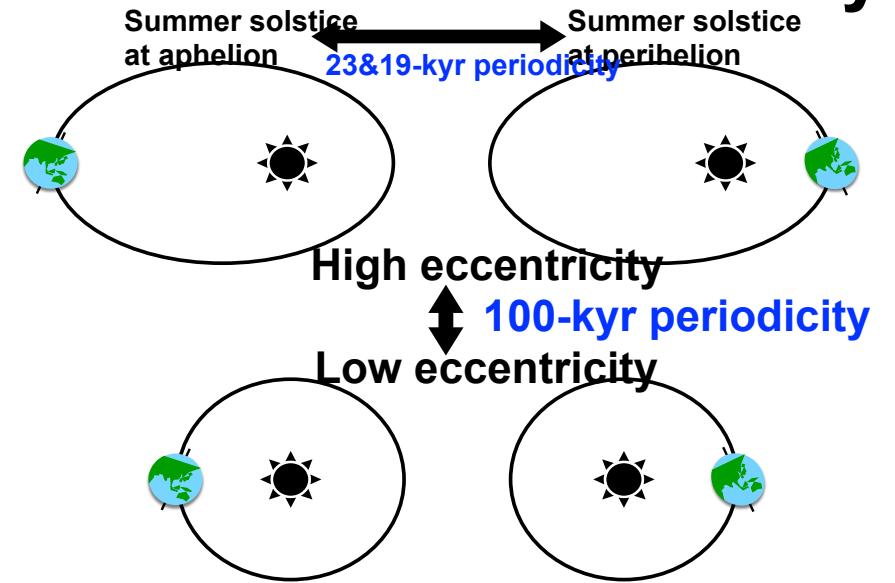
Precession ≡ position of the solstice
 歳差 (近日点の位置)



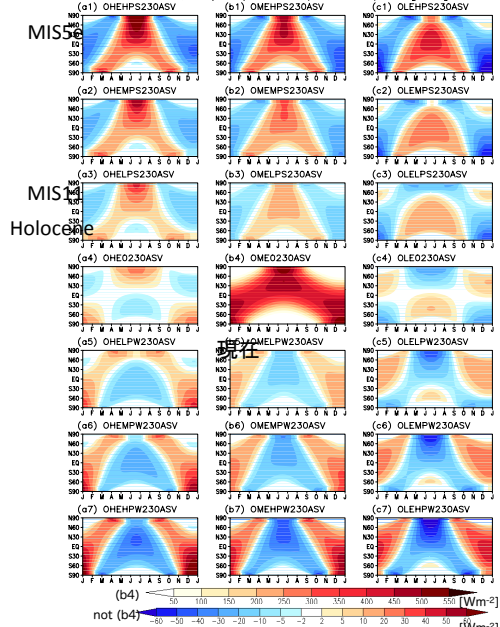
Precession ≡ position of the solstice
 歳差 (近日点の位置)



Precession & Eccentricity



異なる軌道要素の実験



離心率大
近日点北半球夏至

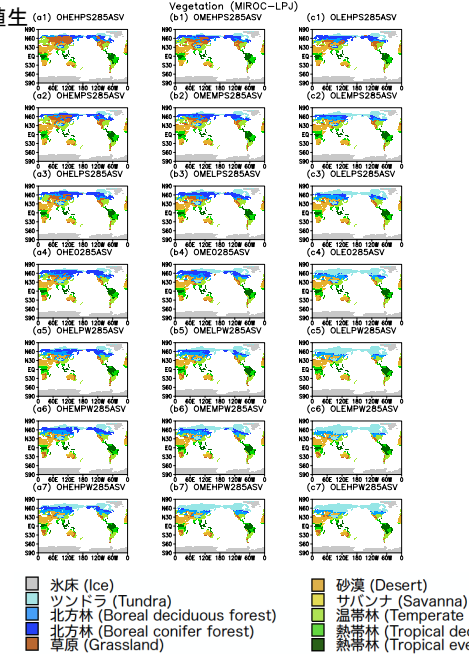
↑
離心率小さい

自転軸の傾き大 → 自転軸の傾き小

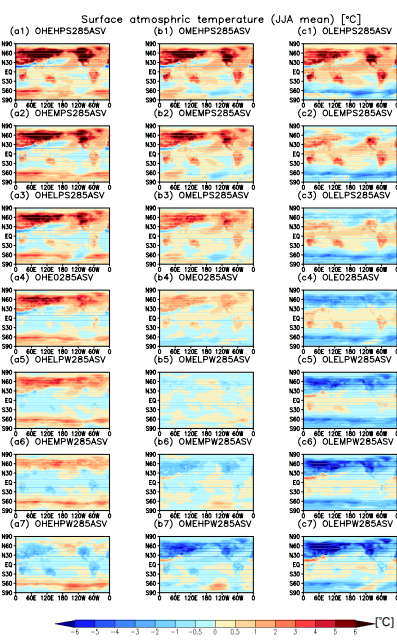
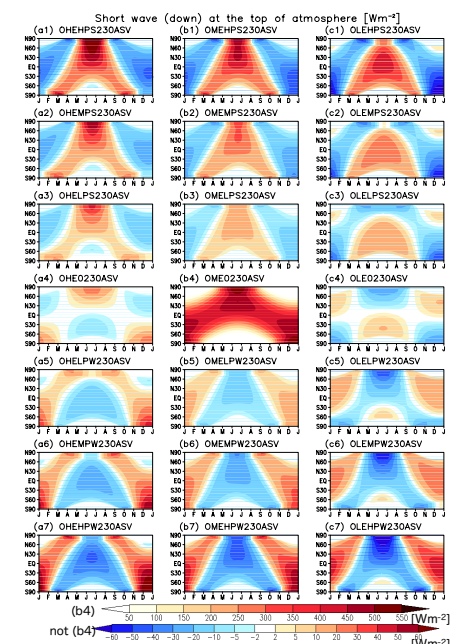
↓
離心率小さい

離心率大
近日点北半球冬至

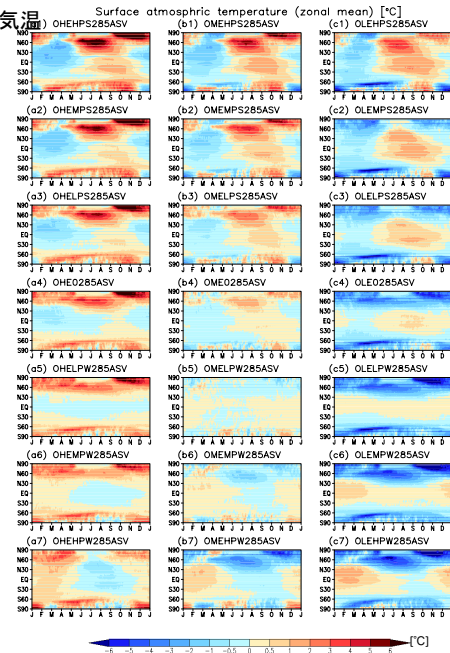
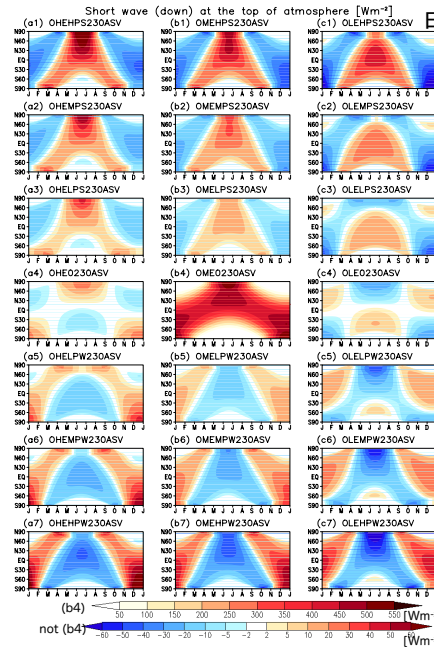
日射と植生



Kino et al, in prep.

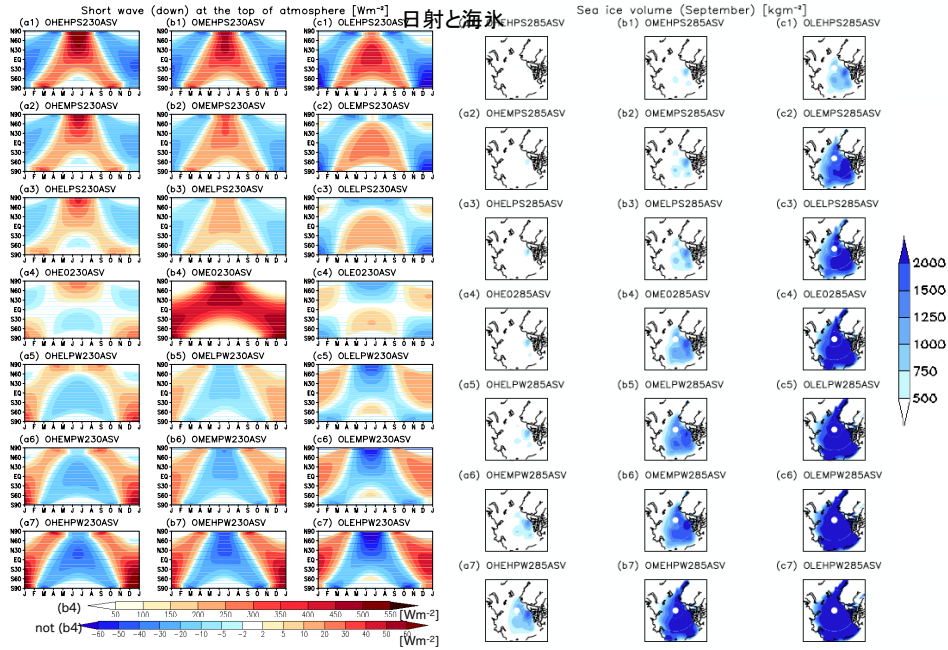
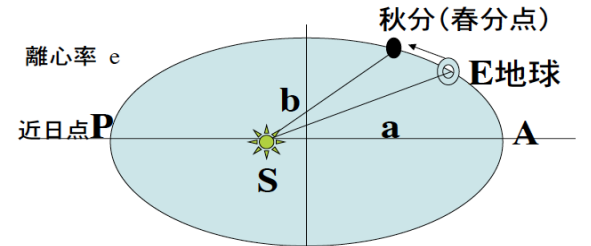


日射と気温



気候外力としての地球軌道要素(1)Kepler運動

Kepler運動: 地球に太陽の重力だけが働くとするれば地球の公転軌道は太陽を片方の焦点においた、楕円となる。地球は面積速度一定(角運動量一定)で運動。楕円の形は離心率(eccentricity)であらわす。
 $e=0$ でない、地球と太陽の距離は軌道を回るにつれて変化する。太陽に一番近付いた点Pを近日点という。地球と太陽の平均距離(時間を重みとして1周分平均したもの)は面積速度一定の結果として長軸長さaに等しくなる。
 この運動を宇宙空間のなかで指定するためには、aとeのほか、軌道ののっている平面(黄道面)を指定するための2つの角度とその面内での近日点の方向を指定するために1つの角度、それに特定の時刻の地球の位置を指定すればよい。実際の太陽-地球系には他の惑星(たとえば木星)の重力も働いているので、軌道要素はゆっくりと変化していく。離心率eは0から0.06の範囲で変化し、変動周期は約10万年と40万年である。



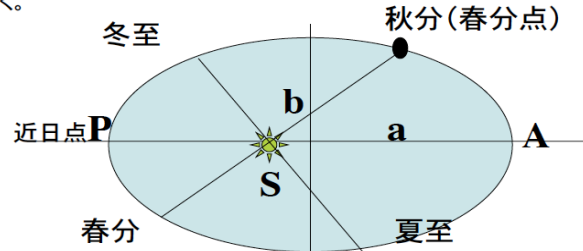
気候外力としての地球軌道要素 (2)自転面と公転面

自転軸の傾きobliquity: 地球上の季節変化をもたらしているのは、地軸が公転運動の軸に対して傾いている(赤道面と黄道面の傾き)ためである。この自転軸の傾きは22~24.5度の間で変化しており、周期およそ4万年である。

春分点: 太陽を含んで地球の赤道に平行な平面は、地球の公転軌道と2点で交わる。ここを通る時が春分と秋分である。地球が秋分に通る点が春分点である。

歳差運動: 春分点の方向が時代とともに変わる。周期は約2.57万年である。ところで日射量に関係するのは、春分点から近日点までの角 ω (近日点黄経)である。近日点も変化するので、 ω のひとまわりの周期は約2.3と1.9万年である。

ω (近日点黄経)は離心率ゼロのときは意味をもたない。日射量などに及ぼす ω の効果は、 $e \sin \omega$ と $e \cos \omega$ という形で効いてくる。夏/冬の日射量に効く $e \sin \omega$ の方を便宜的に「歳差の因子」precessionとよんでおく。



過去100万年の日射量変化

