

気象シミュレーションの意義と役割

時岡達志（海洋研究開発機構・地球環境フロンティア研究センター）

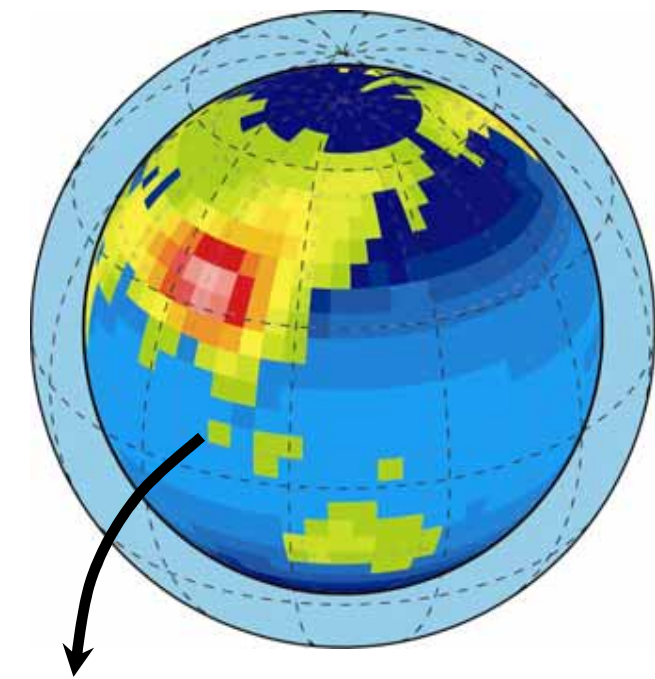
1. 気象の数値シミュレーション
2. 気象シミュレーションの意義
3. 数値天気予報から大気大循環・気候モデルへ
-----コンピュータの進歩とモデルの発展-----
大気大循環モデル、気候モデル
地球システム統合モデル
雲解像全球大気モデル、渦解像全球海洋モデル
4. 山岳の気候に及ぼす影響—数値実験の一例として
大気大循環モデルによる実験、気候モデルによる実験
5. 地球温暖化の予測
放射・対流平衡モデル、気候モデル、地球システム統合モデルによる
予測実験

1. 気象の数値シミュレーション

- 気象は基本的に物理法則に従った大気の振舞い ➡ 物理法則の数値時間積分による気象の変化の模倣
- その際の物理法則の数値時間積分方式を「数値モデル」と呼ぶ
- 物質が連続的に繋がっている流体(大気)を数値的に取り扱う方法 ➡ 格子点法、スペクトル法など
- 数値的に取り扱うことから生ずるいくつかの問題 ➡ “にせ”の数値解を如何に回避するか、“サブグリッドスケール”の現象の効果のモデルへの導入(パラメタリゼーション)

1.2 気象(数値天気予報)のモデル

大気・海洋・陸面を3次元の格子に切る(格子点法: 離散化の一方法)



U, V, p, T, q, \dots

各格子で物理量を定義

流体の方程式を離散化して解く

大気中の流れを記述する物理法則は、

流体の運動方程式

$$\begin{aligned} \frac{du}{dt} - \left(f + \frac{\tan \varphi}{a} u \right) v &= -\frac{\partial p}{\rho a \cos \varphi \partial \lambda} + F_\lambda \\ \frac{dv}{dt} + \left(f + \frac{\tan \varphi}{a} u \right) u &= -\frac{\partial p}{\rho a \partial \varphi} + F_\varphi \\ \frac{dw}{dt} &= -\frac{\partial p}{\rho \partial z} - g + F_z \end{aligned}$$

質量保存の式

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

空気塊についての熱力学第1法則の式

$$c_v \frac{dT}{dt} + p \frac{d\alpha}{dt} = Q$$

状態方程式

$$p = \rho RT$$

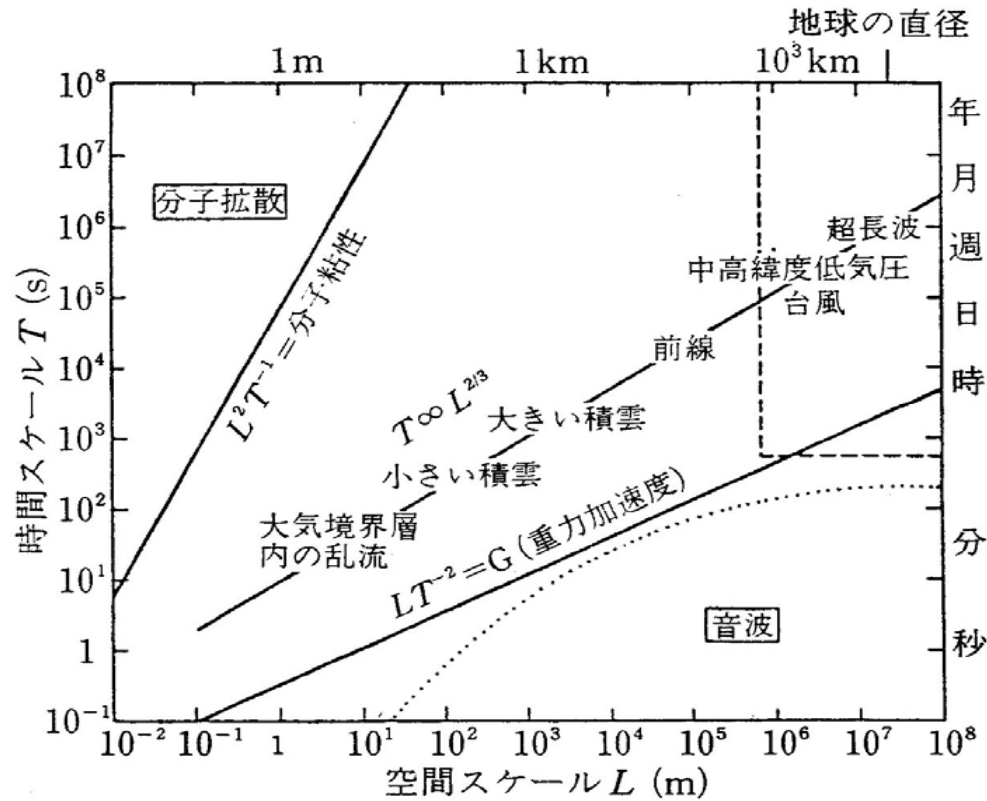
である。但し、

$$\frac{d}{dt} = \frac{\partial}{\partial t} + \frac{u}{a \cos \varphi} \frac{\partial}{\partial \lambda} + \frac{v}{a} \frac{\partial}{\partial \varphi} + w \frac{\partial}{\partial z}$$

水蒸気量の保存の式

$$\frac{dq}{dt} = -c - \frac{1}{\rho} \frac{\partial F_q}{\partial z}$$

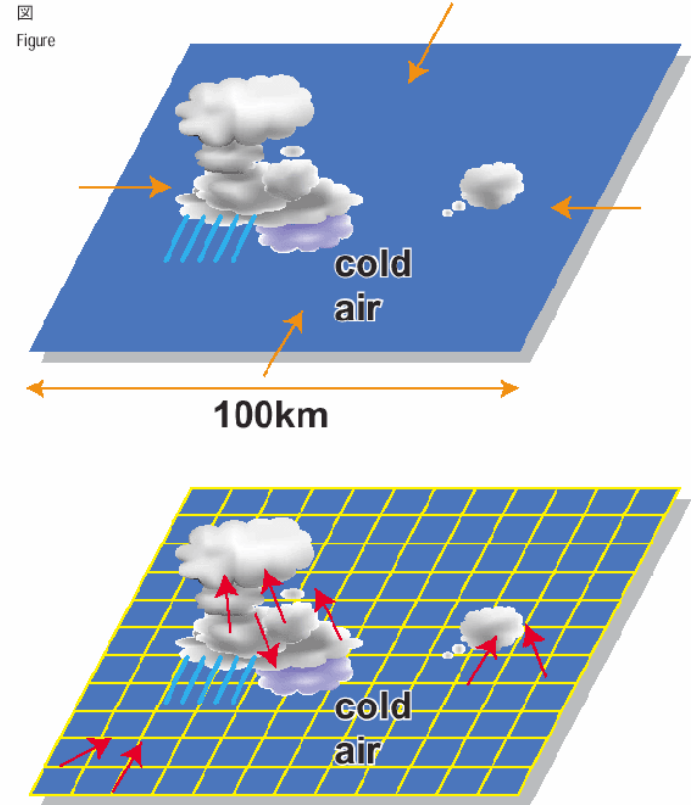
1.3 「パラメタリゼーション」



格子より小さな現象 (積乱雲など) とその効果をどう表わすか? → パラメタリゼーション

格子間隔

天気予報のためのモデル 1960年代: 350km, 現在: 60km
 気候モデル 1990年: 500km, 現在: 100km



- a. 積雲対流
- b. 境界層乱流
- c. 内部重力波
- d. エアロゾル・雲・降水
- e. 放射

パラメタリゼーションの任意性(多様性) ➡ モデルの個性, 多様性

2. 気象シミュレーションの意義

- **物理法則に立脚した気象・気候の理論的説明**

物理法則に立脚したモデルによる数値実験により現象を理解・解明でき、また問題点も明らかにできる。

- **数値予報・実験に基づく情報の取得**

天気予報、長期予報ができ、社会に役立つ基盤的情報が得られる。人間活動が気候・環境に及ぼす影響を事前に評価し、地球環境シナリオを選択するための情報が得られる。また、必要となる対策、適応策の検討・実施のための情報が得られる。

測定しにくい物理量に関するデータが得られる。このためにモデルの中で現象の発見もある。

- **気象・気候の変動・変化の機構の解明**

変動・変化の機構をモデル実験より解明できる。観測データの不十分な長期の変動に関してはそれらの機構解明にモデルシミュレーションが非常に有用である。

地球科学では物理学や化学と違って「実験」が出来ない⇒モデルによる実験で現象のメカニズムを解明

<地球温暖化問題>

ところが「人類は地球に対してCO₂が増えたらどうなるという実験を始めた」(ルヴェル)

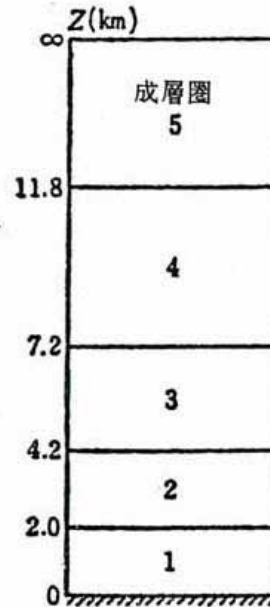
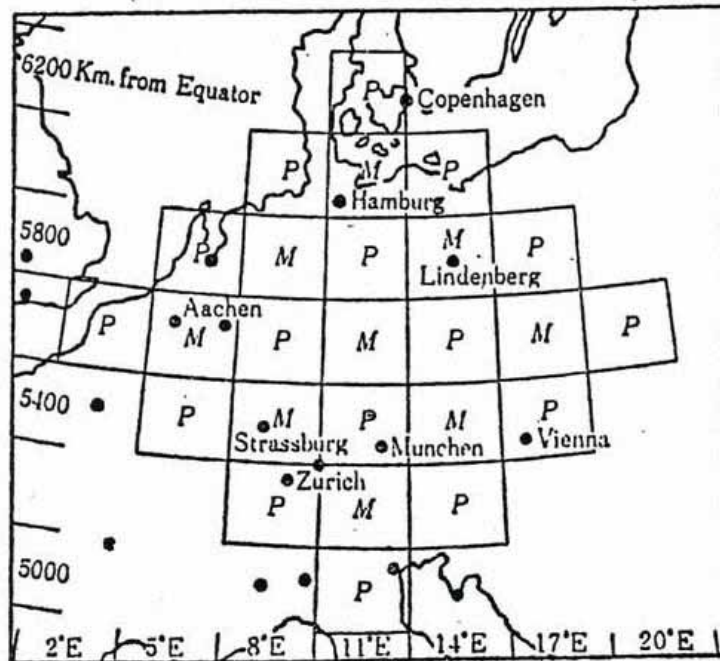
モデルを用いて実験し、危険があれば実際の実験(CO₂放出)を中止・変更させられる

3. 数値天気予報から大気大循環・ 気候モデルへ:

歴史的経緯(1)

- 1922 リチャードソンの試み
- 1950 チャーニー・フィヨルトフト・フォンノイマン
最初の数値天気予報(1層モデル)研究発表
- 1953 チャーニー・フィリップス
2層モデルにより低気圧発達実験
- 1954 スウェーデンで数値予報開始(1層モデル, 北大西洋)
- 1955 アメリカで数値予報開始(1層モデル, 北半球)
- 1956 フィリップス「大気大循環の数値実験」
- [1957-58 IGY ルヴェル「人類はCO₂増加実験を始めた」]
- 1959 日本・気象庁 数値予報開始(1層モデル, 北半球)

1922:L.F.Richardsonは最初の数値予報を試みる



計算は失敗(地上気圧変化が大きすぎた)

#上空の観測データが無かった

#速く伝わる波動を無視

#安定な数値計算条件を知らなかった

8時間先の予測に6週間を要した(64000人で計算:

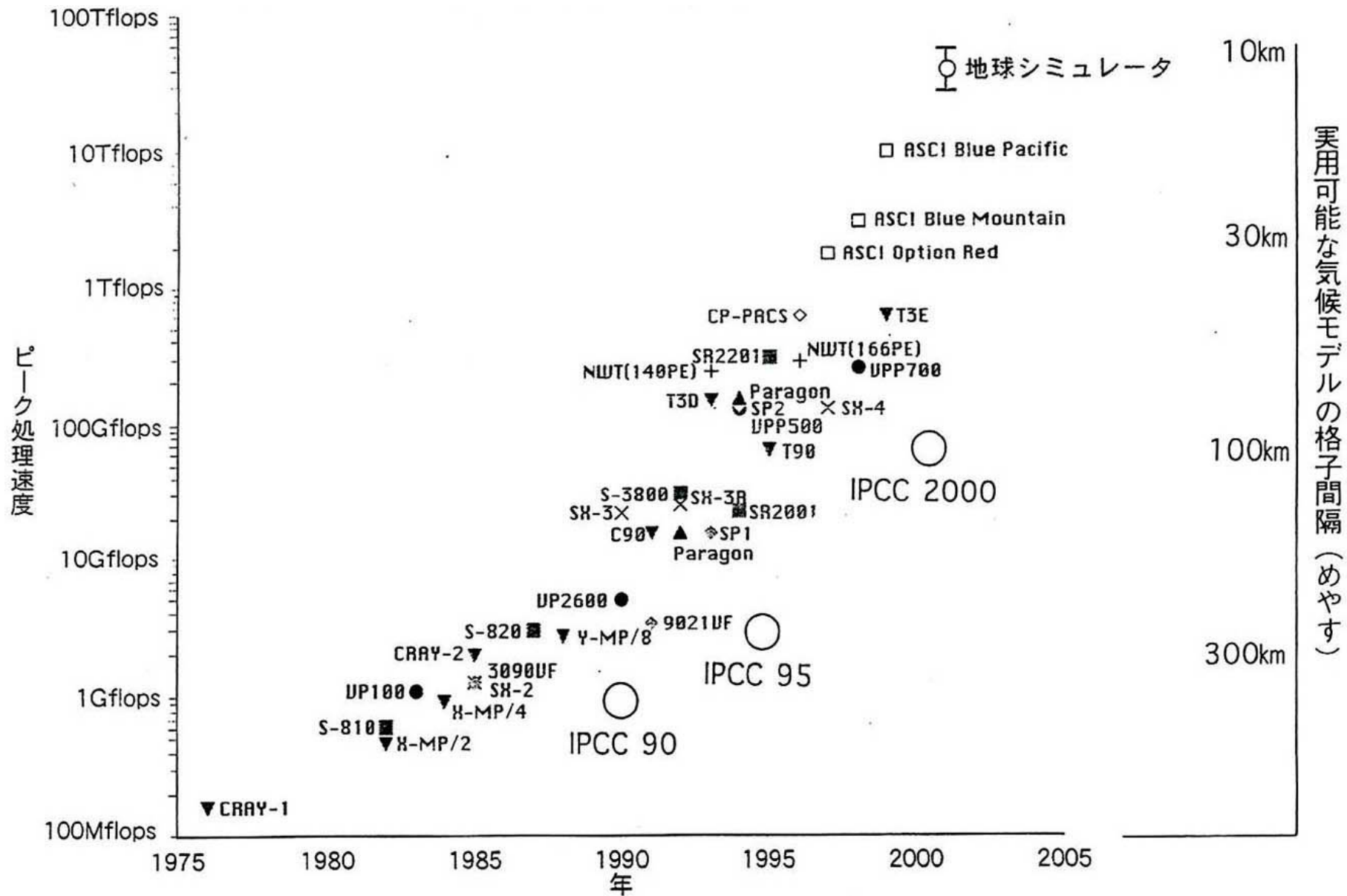
リチャードソンの夢)

3. 数値天気予報から天気大循環・ 気候モデルへ：

歴史的経緯(2)

- 1960 第一回数値予報国際シンポジウム開催(東京)
- 1963 荒川ヤコビアン発表(長期積分可能),
大山台風の理論(パラメタリゼーションの始まり)
- 1965 「現実的」大気大循環モデル発表
GFDL(スマゴリンスキー, 真鍋)
UCLA(ミンツ, 荒川)
- 1967 最初の海洋大循環モデル(GFDL, ブライアン)
- 1969 最初の大気・海洋結合大循環モデル
(GFDL, 真鍋+ブライアン)
- 1970年代 米国3センター(GFDL/真鍋, UCLA/荒川,
NCAR/笠原)

3.1 コンピュータの進歩と気候モデルの解像度



実用可能な気候モデルの格子間隔(めやす)

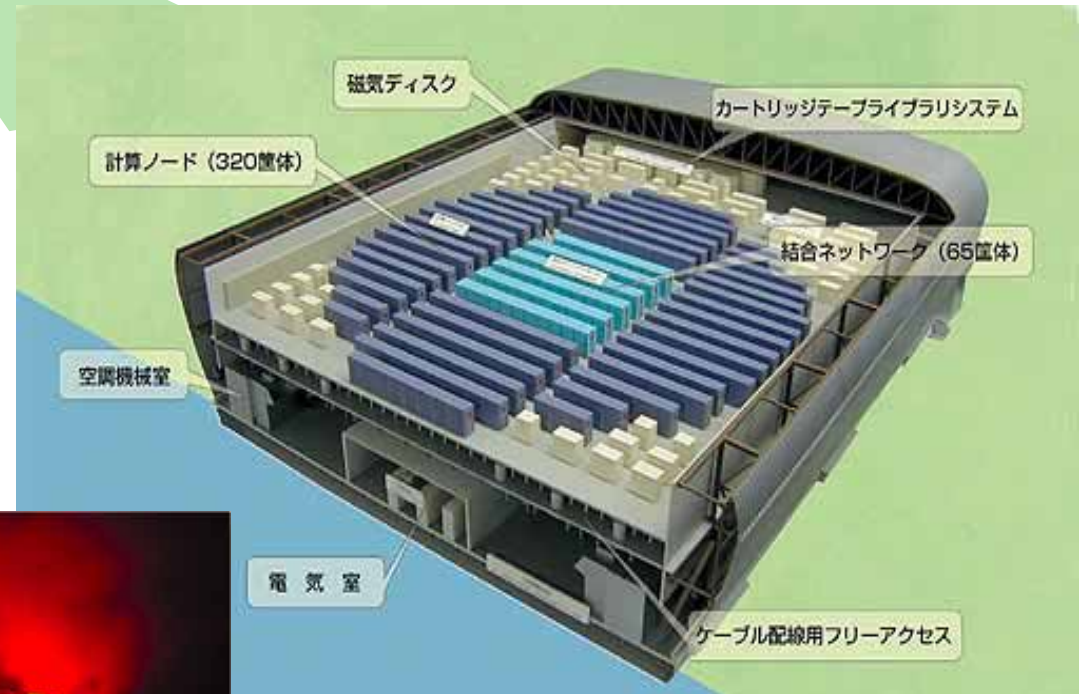
○ : IPCC 報告に用いられた代表的気候モデルの水平解像度 (右スケール)

地球シミュレータセンター



機能:

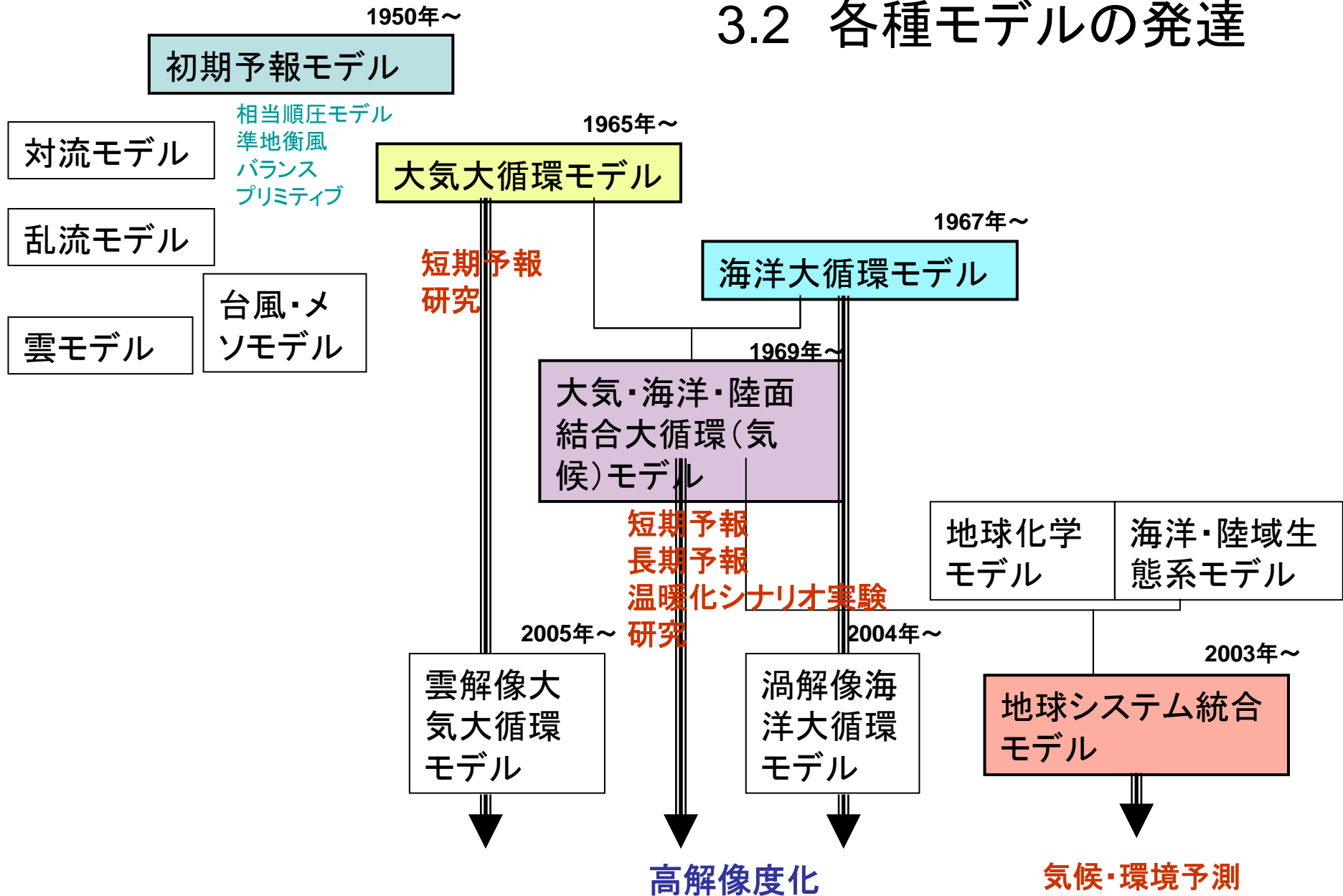
気候変動等の地球規模での現象を
解明・予測するシミュレーションに
貢献



主要性能

- ・総プロセッサ数; 5,120 (640台 × 8)
- ・計算速度(ピーク性能); 40テラフロップス
- ・主記憶容量; 10テラバイト

3.2 各種モデルの発達



3.3 大気大循環モデル、 大気・海洋・陸面結合大循環モデル(気候モデル)

大気大循環 : 大気の平均的運動 (全地球的視点)

気候 : 気象(気温, 降水, 風...)の平均状態

地域的特色(西岸性気候、モンスーン気候...) → 海陸・山岳, 海流・海水温分布が主要因

海水温分布(実際観測)を与えて大気大循環モデルで計算 → 現実的気候のシミュレーション

しかし「地球上の気候はなぜこうなっているか?」の答えとして不十分

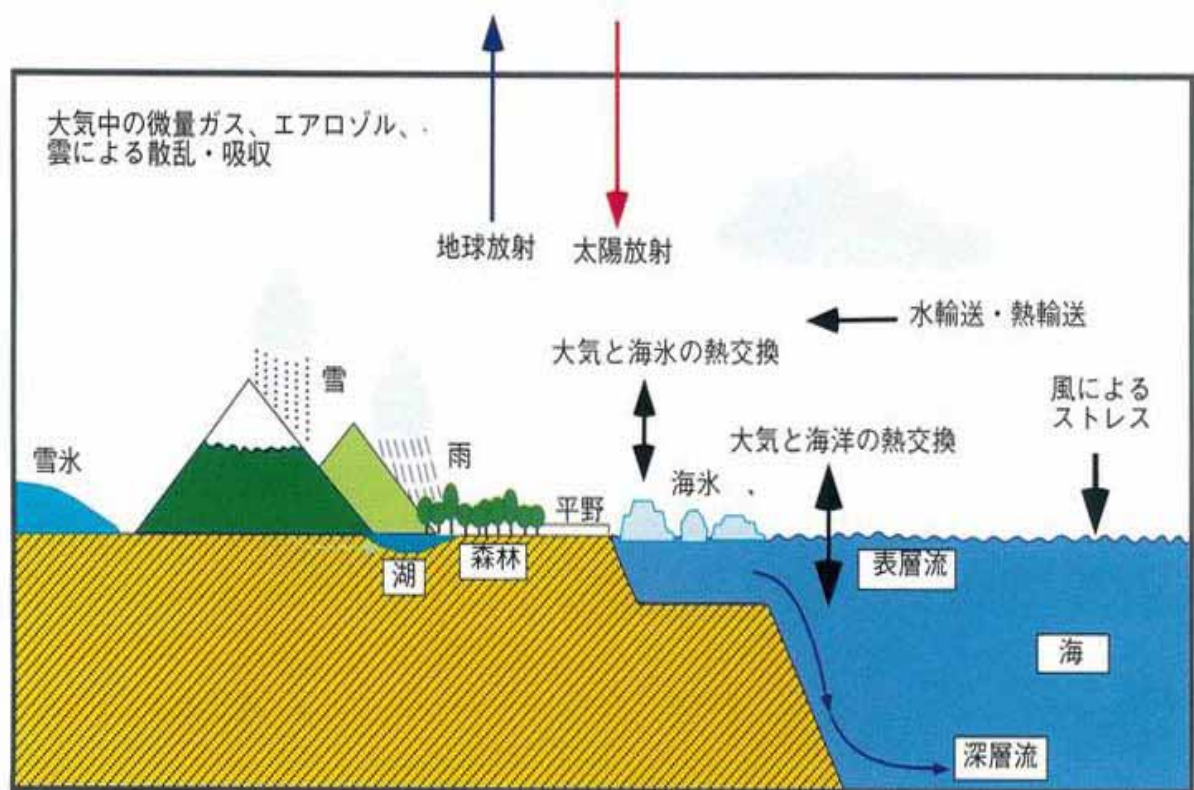
(例)ヨーロッパの温暖気候 → 暖流(湾流, 北大西洋海流) → 何故そのような海流があるのか? → 風(+熱塩対流)

大気の流れ・温度 と 海洋の流れ・温度 とは 相互に影響を及ぼしあっている。即ち相互に原因・結果の関係

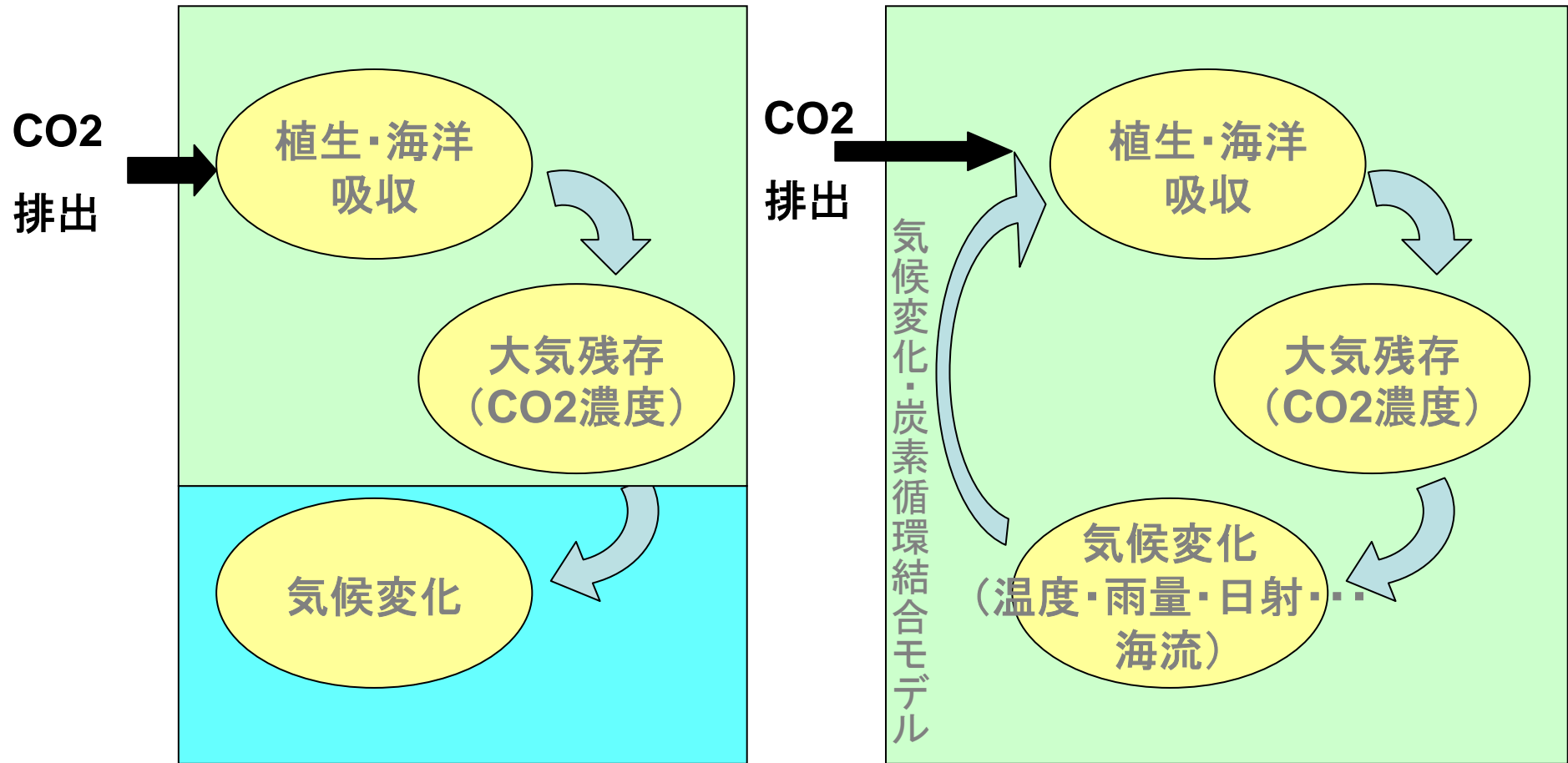
大気大循環モデルでは太陽放射、大気組成、
陸面状態、海面水温を外部データとして与え、
大気の状態を決定する。

気候モデルでは太陽放射、大気組成、陸面状態
は外部データとして与えるが、それ以外のもの
(風、海流、気温、水温など)は全てモデルが決定する。

気候システム模式図



3.4 地球システム統合モデル



これまでの温暖化予測

地球システム統合モデルによる温暖化予測

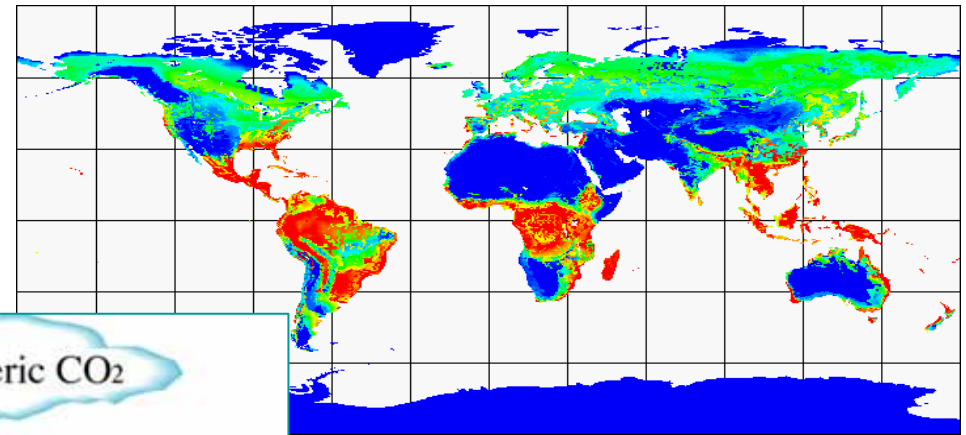
氣候變化・水循環變化

The diagram features a central image of the Earth. Above it is a blue rounded rectangle containing the text '氣候變化・水循環變化'. To the left is a green rounded rectangle with '大氣組成變化', and to the right is an orange rounded rectangle with '生態系變化'. Bidirectional arrows connect the central Earth to each of these three boxes. Specifically, there are two blue arrows between the Earth and the top box, two green arrows between the Earth and the left box, and two orange arrows between the Earth and the right box.

大氣組成變化

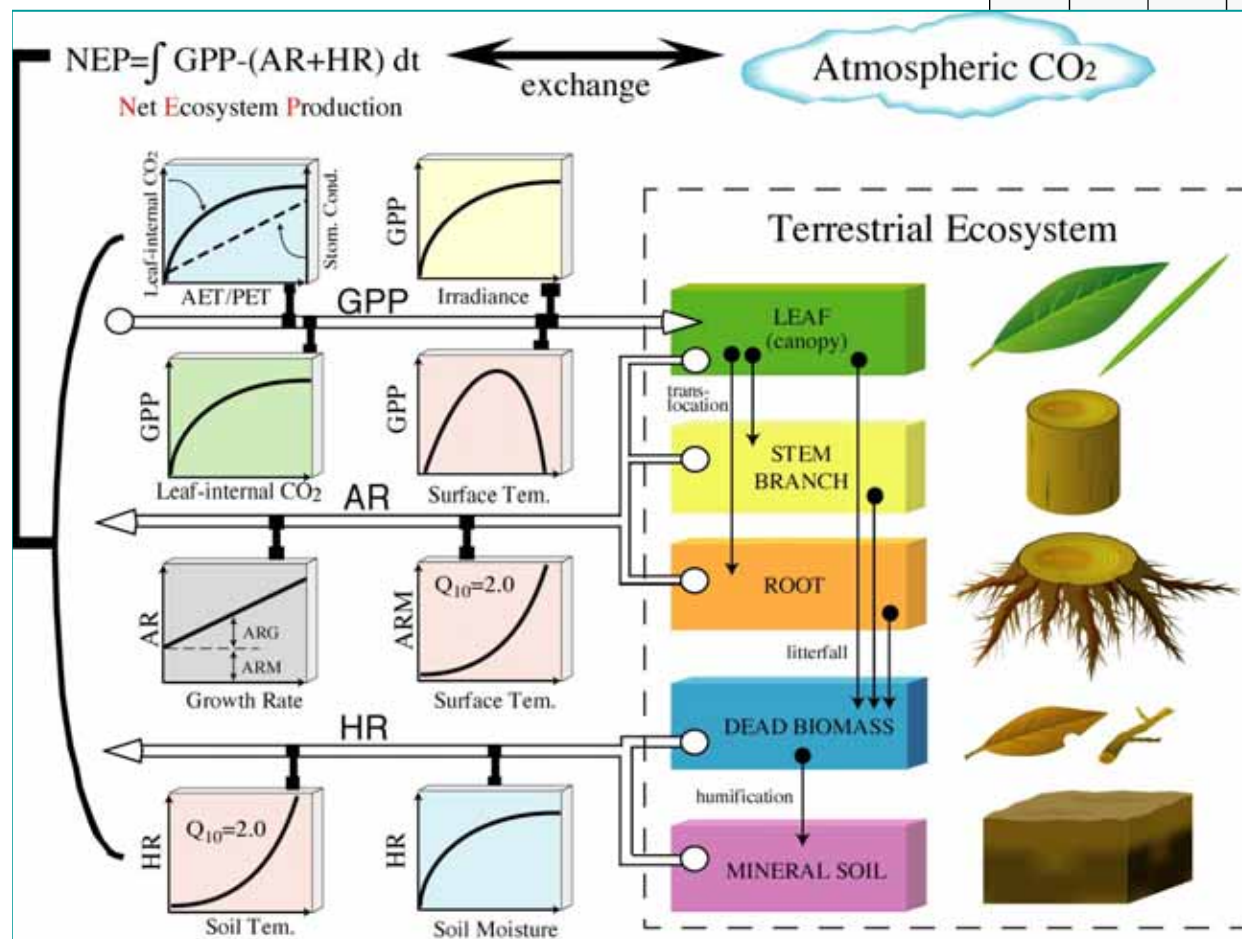
生態系變化

陸域炭素循環モデル (Sim-CYCLE)



low

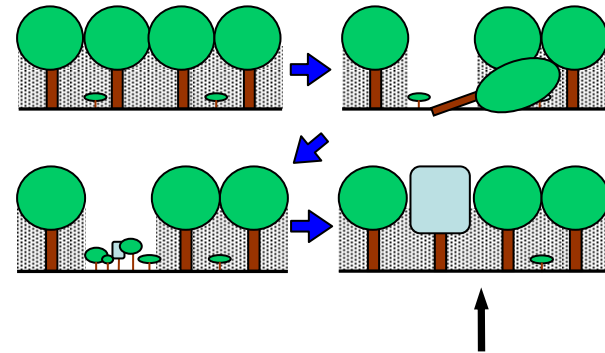
high



FRCGC

力学的全球植生モデル(DGVM)の特長

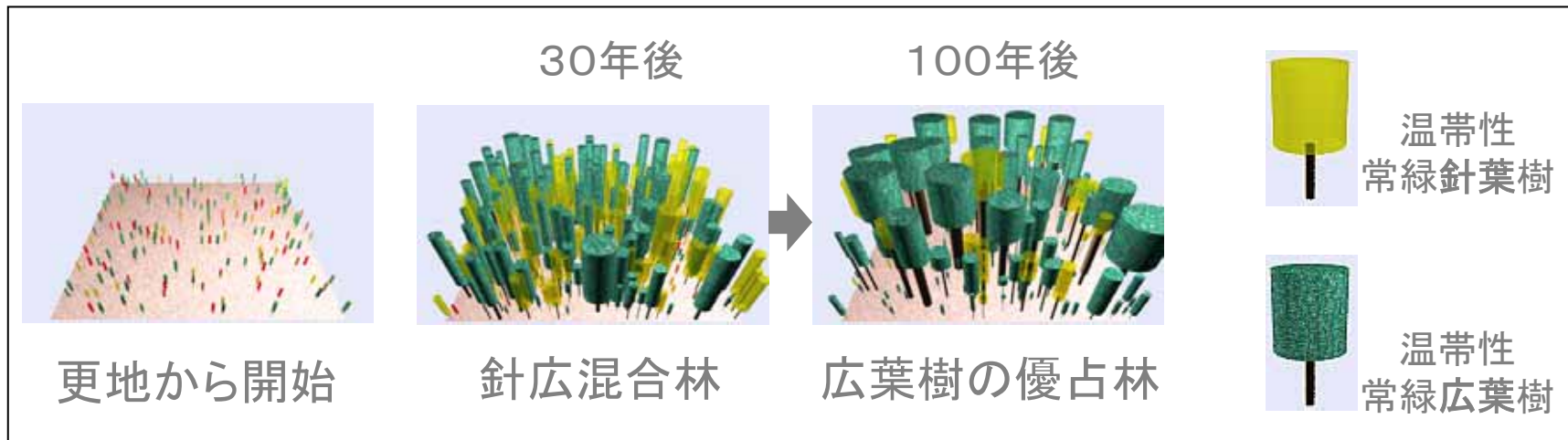
- 木本については個体ベースで扱う
- 空間的に明示的な林分の中で木本個体は光を巡り競争を行う



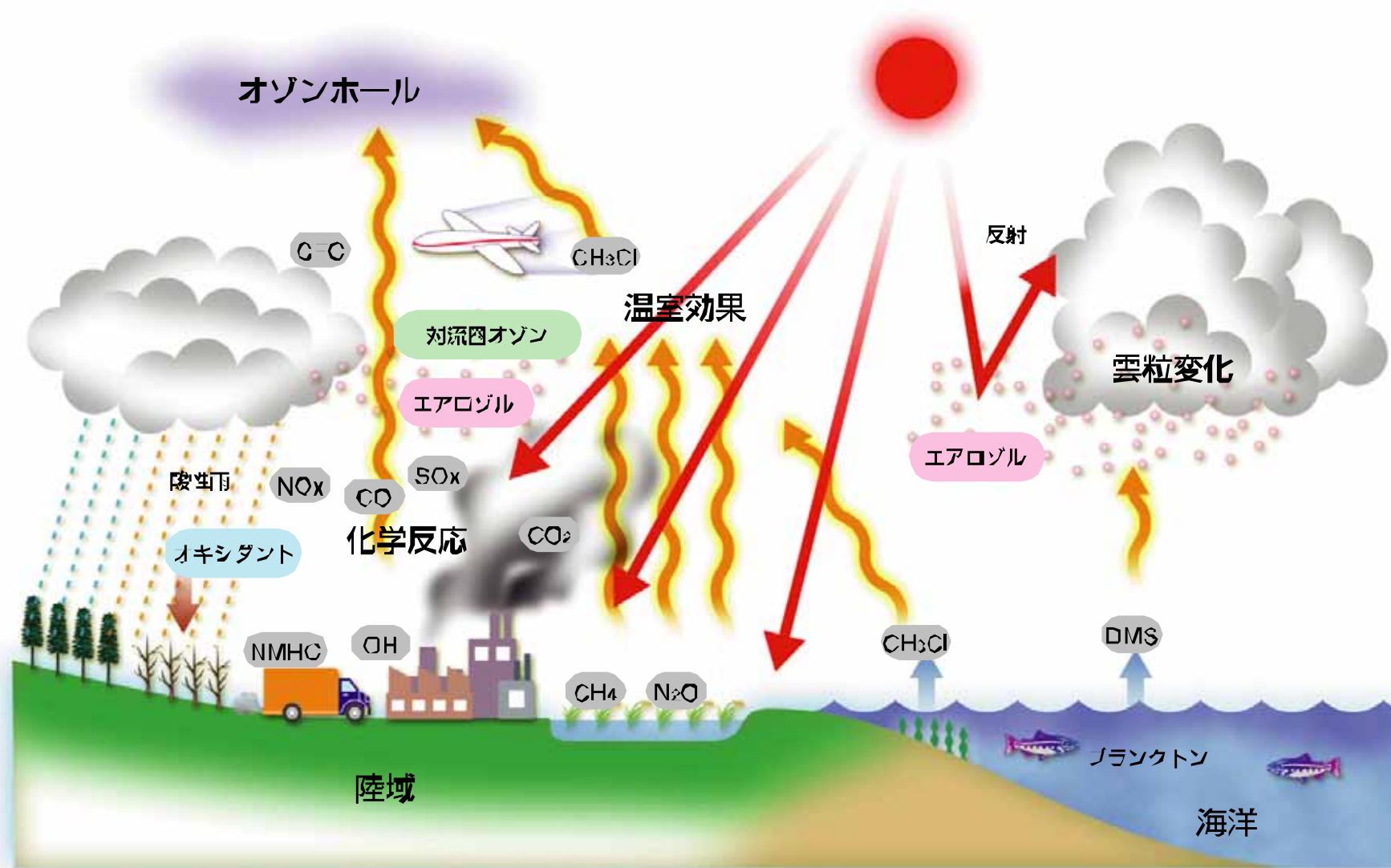
これらの特長により、気候変動に伴う植生変動の速度を適切に予測できる。

相観のシミュレーション結果(@熊本県)

Preliminary result



(佐藤, FRCGC)



(FRCGC)