最新の気象予測
～その理論と技術～

北海道大学地球惑星科学集中講義

札幌管区気象台　室井ちあし

集中講義の内容

- １日目
  - 気象予測の基礎
  - 気象とコンピュータ
  - 数値予報モデル
- ２日目
  - 数値予報モデル（続）
  - データ同化
  - アンサンブル予報
  - （セミナー）北海道の気象災害リスクと防災気象情報

数値予報モデル（Ⅱ）

北海道大学地球惑星科学集中講義
札幌管区気象台　室井ちあし

物理過程

数値予報モデル

現在の大気の状態（気温、風、湿度など）から、物理法則に基づいて数値計算を行い、未来の大気の状態を予測する

- **力学過程**

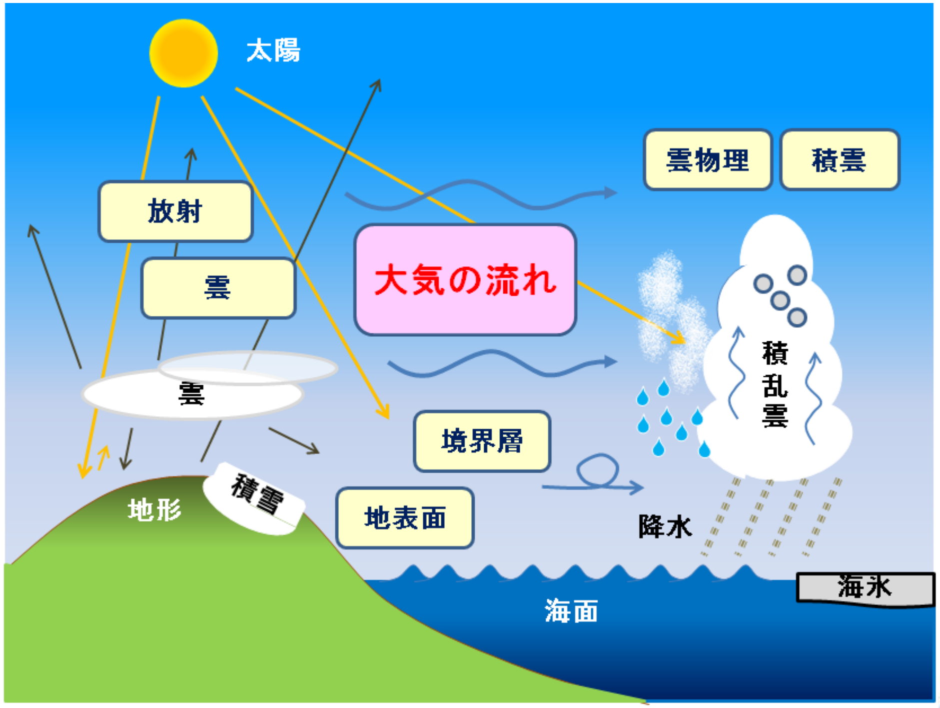
  主に力学（大規模な大気の流れ）を扱う「数値予報の骨格」
  - 移流、コリオリ力、気圧傾度力、収束発散
- **物理過程**

  力学以外。方程式系の時間変化率のうち非断熱加熱・加湿項
  - 放射、雲水、積雲、乱流、陸面、重力波
  - 複雑で未解明な要素を含む

大気を記述する方程式

$$\boxed{\frac{\partial \phi}{\partial t}} = F \quad \Rightarrow \quad \phi_{t+\Delta t} = \phi_t + F_t \Delta t$$

時間変化率　未来の値　現在の値



大気の運動・状態を支配する方程式

- 運動方程式（球面上の回転流体）
  - 3次元なので3方向
  - 鉛直方向は、重力と気圧傾度力が釣りあうと近似することもあり（静力学近似）
- 熱力学方程式
  - 断熱＋非断熱（諸過程）
- 水蒸気の式
  - 保存則＋相変化（諸過程）
- 気体の状態方程式
- 連続の式

$$\frac{d\mathbf{v}}{dt} = -\frac{1}{\rho}\nabla p - f\mathbf{k}\times\mathbf{v} + F + D$$

運動方程式

$$\frac{dw}{dt} = -\frac{1}{\rho}\frac{\partial p}{\partial z} - g + D$$

（非静力学）

$$p = \rho RT$$

状態方程式

$$\frac{d\theta}{dt} = \frac{\theta}{C_p T}\frac{dQ}{dt}$$

熱力学の式

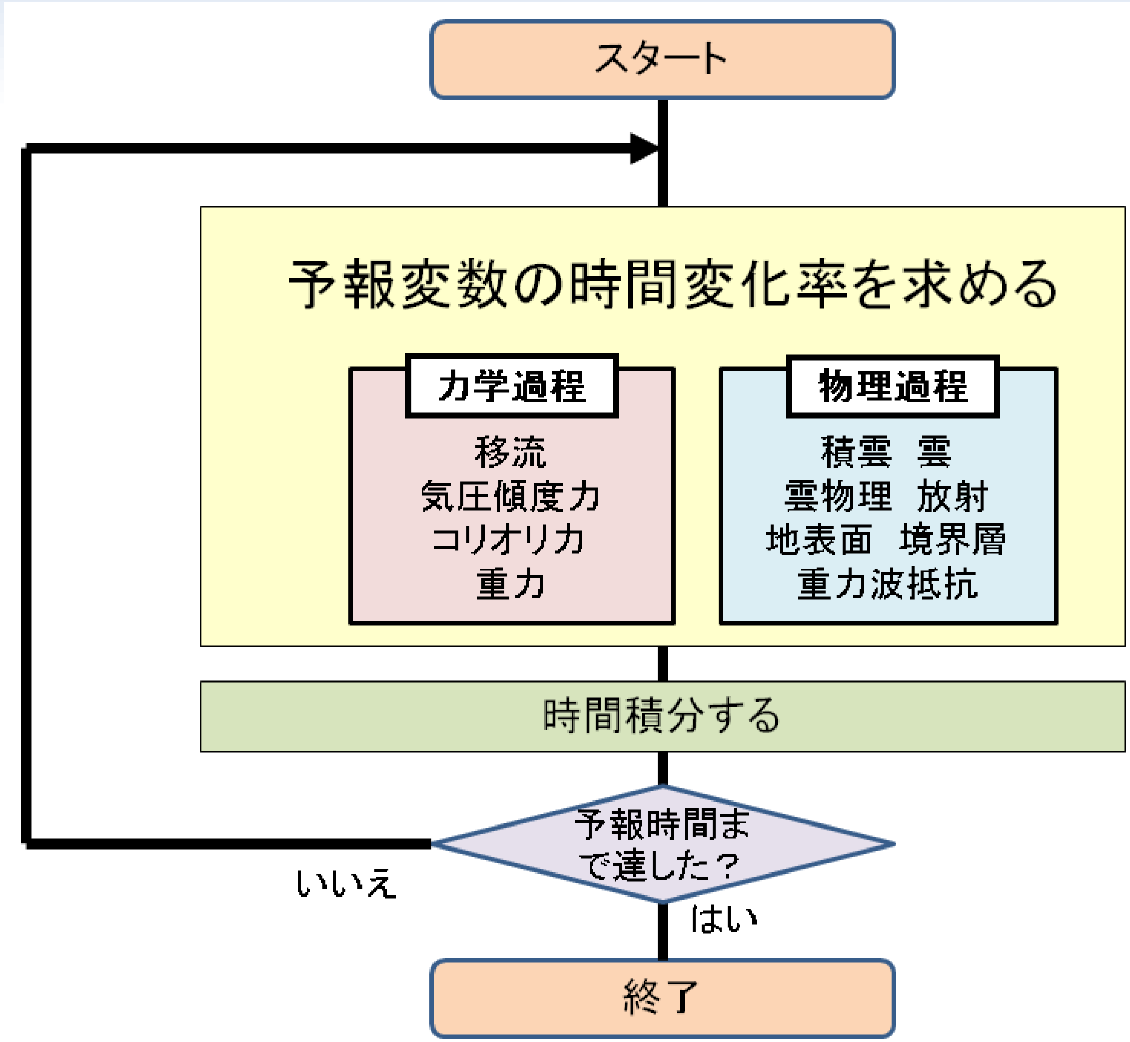
$$\nabla \cdot \rho v + \frac{\partial \rho w}{\partial z} + \frac{\partial \rho}{\partial t} = 0$$

連続の式

$$\frac{\partial q}{\partial t} + \mathbf{v}\cdot\nabla q + \omega\frac{\partial q}{\partial p} = Ev + Cn$$

水蒸気保存

数値予報モデルの流れ



スタート
予報変数の時間変化率を求める
力学過程
移流
気圧傾度力
コリオリカ
重力
物理過程
積雲　雲
雲物理　放射
地表面　境界層
重力波抵抗
時間積分する
予報時間まで達した？
いいえ
はい
終了

各過程からの時間変化率の扱い

- 一般に解くべき偏微分方程式の右辺は複数の時間変化率の和 $$\frac{\partial \phi}{\partial t} = \sum_i F_i(\phi)$$
  - 一つ一つの項がそれぞれの過程に対応
  - 数値予報モデルでは、一般には、時間変化率を構成する各項は独立とみなし、各過程からの時間変化率を足し合わせる。
    - そのためには、他の過程による場の変化の影響を無視できるような時間積分間隔を取る必要がある。
      - 時間積分間隔は必ずしも力学の計算安定性の要請からのみで決まるわけではない。

時間変化率

- 保存則(支配方程式)の右辺に現れる。
- 保存則の構成(有限体積法の考え方)

微小体積における物理量の時間変化率 = 壁面を通じた流入 + 内部での生成 外力による生成

$$\int_V \frac{\partial \phi}{\partial t}\, dV = -\int_S \boldsymbol{f}_\phi \cdot \boldsymbol{n}\, dS + \int_V K_\phi\, dV$$

ガウスの定理を使って面積分を体積積分に変換して

$$\frac{\partial \phi}{\partial t} = -\nabla \cdot \boldsymbol{f}_\phi + K_\phi$$

右辺が時間変化率に対応

フラックス

- フラックス F
  - ある面を通過する単位面積・単位時間あたりの量
  - 場の流れによる輸送の場合は、物理量に場の速度を乗じたもの。
- フラックスには場の流れによる輸送と流れによらない輸送がある。

$$\boldsymbol{f}_\phi = \boldsymbol{u}\phi + \tilde{\boldsymbol{f}}_\phi$$

  - 場の流れによる輸送:移流
  - 場の流れによらない輸送:
    - 放射によるエネルギー輸送
    - 地表面フラックスによる地表面からの運動量、熱、水蒸気の供給
    - 降水物質の落下による質量の輸送

支配方程式一般形

$$\frac{\partial \phi}{\partial t} = -\nabla \cdot (\boldsymbol{u}\phi) - \nabla \cdot \tilde{\boldsymbol{f}}_\phi + K_\phi$$

- 気圧傾度力は $\mathrm{f}_{\rho\mathbf{u}}$ の一部として、コリオリカや重力は $K_{\rho\mathbf{u}}$ の一部として含まれる。

- 格子点値が表すものは

  「時間的・空間的な平均値」

とよくいわれるけど、それはなぜ？

数値予報で解いている方程式は時間的・空間的な平均値についての支配方程式だから

格子平均値の支配方程式

$$\frac{\partial \overline{\phi}}{\partial t} = -\nabla \cdot (\overline{\boldsymbol{u}\phi}) - \nabla \cdot \overline{\tilde{\boldsymbol{f}}_\phi} + \overline{K_\phi}$$

- $\overline{\mathbf{u}\phi}$ の取り扱い
  1. $\overline{\mathbf{u}\phi}$ の時間変化についての方程式を導いて解く。
     - 3次の項についての方程式が必要(クロージャー問題)
  2. 次のように格子平均値の積と余りで記述

$$\overline{\boldsymbol{u}\phi} = \overline{\boldsymbol{u}}\overline{\phi} + \boldsymbol{f}'_\phi$$

     - 一般にf′は0ではない。

グリッド/サブグリッドスケール

- 一般の場φ、流れの速度uを時間的・空間的な平均とそこからの揺らぎに分解したとき、

$$\phi = \overline{\phi} + \phi', \quad \mathbf{u} = \overline{\mathbf{u}} + \mathbf{u}'$$

  - $\phi' = \mathbf{u}' = 0$ ならば、 $\overline{\mathbf{u}\phi} = \overline{\mathbf{u}}\,\overline{\phi} \qquad (\mathbf{R}_\phi = 0)$
  - $\overline{\mathbf{u}\phi}$ を $\overline{\phi}, \overline{\mathbf{u}}$ で表現できることを「輸送を格子スケールで表現できる」という。
  - $\overline{\boldsymbol{u}\phi} = \overline{\boldsymbol{u}}\,\overline{\phi} + \boldsymbol{f}'_\phi$ のf'は、輸送のうち、格子平均値(格子スケール)で表現できないサブグリッドスケールによる輸送を示す。
    - » f'を評価することが物理過程の役割の一つ(乱流輸送、対流、重力波など)
- 「解像度が高い」ということは、平均化するスケールが小さいということ
  - よって、解像度が高いほど格子平均値で表現できることが多くなり、

$$\phi \to \overline{\phi}, \quad \mathbf{u} \to \overline{\mathbf{u}} \quad (\phi' \to 0, \mathbf{u}' \to 0)$$

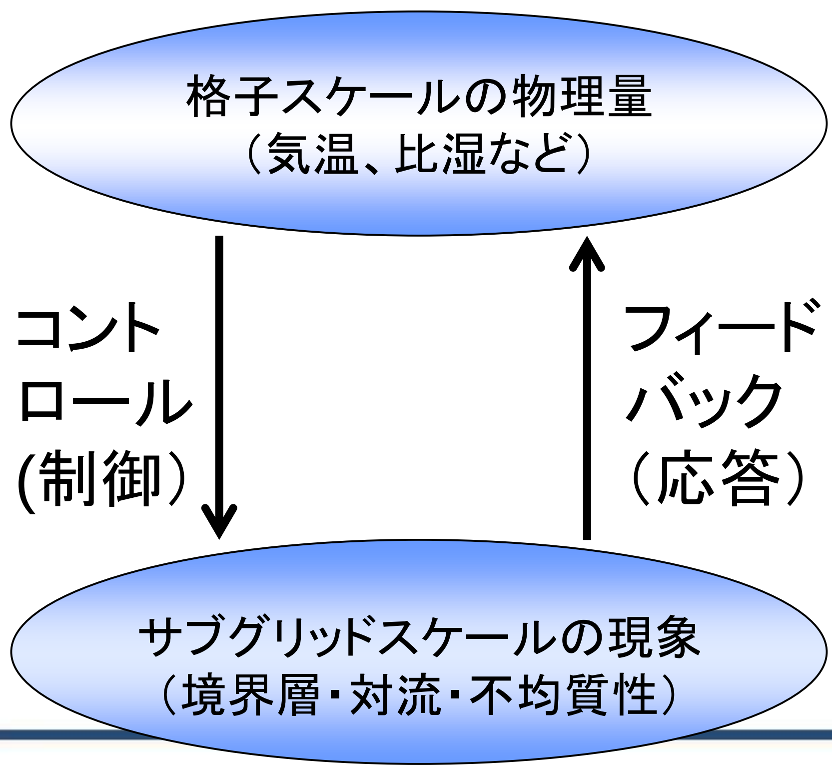
パラメタリゼーションとは？

$$\overline{\boldsymbol{u}\phi} = \overline{\boldsymbol{u}}\,\overline{\phi} + \boldsymbol{f}'_{\phi}$$

- もし、f’が $\overline{\phi}, \overline{\mathbf{u}}$ で記述することができれば、$\overline{\phi}, \overline{\mathbf{u}}$ の方程式を閉じさせることができる。
  - 既知変数または未知であるが解く対象になっている変数で記述可能
- パラメタリゼーションとは？
  - 輸送全体に占めるサブグリッドの輸送f’を格子平均値 $\overline{\phi}, \overline{\mathbf{u}}$ で評価すること
    - 一般には、輸送に限らず、格子平均値へのサブグリッドの効果を格子平均値で評価することも指す。

パラメタリゼーションの特徴

- 小さなスケールの効果を**格子点値で評価**
  - 格子点の値からサブグリッドの現象を支配しているとして(**コントロール**)、そのサブグリッドの効果が格子点の時間変化率に反映される(**フィードバック**)



パラメタリゼーションの限界

- 格子点値だけで、格子の中のことをすべてがわかるわけではないから、手法として限界がある。
  - いくら緻密にやっても、格子点値が持っている情報以上のことは不可能であり、完璧なパラメタリゼーションはない。
  - 現象そのものの理解は不可欠だが、それに加え統計的・経験的なものも加味して構築する。
  - モデルの大きな不確定性の1つ
    - 高解像度になれば平均値からのずれによる効果、すなわちパラメタリゼーションで見積もるべき効果は小さくなるので、この不確定性を小さくすることは高解像度化の動機の一つ

物理過程とは？

$$\frac{\partial \overline{\phi}}{\partial t} = -\nabla \cdot (\overline{\boldsymbol{u}}\overline{\phi}) - \nabla \cdot \boldsymbol{f}'_{\phi} - \nabla \cdot \overline{\tilde{\boldsymbol{f}}_{\phi}} + \overline{K_{\phi}}$$

(I) (II) (III)

- 以下のような効果による時間変化率を見積もること。
  - (I) 格子点値では表現できないサブグリッドの輸送
  - (II) 流れによらない輸送(力学で扱う気圧傾度力を除く)
  - (III) 内部での生成・消滅(力学で扱うコリオリ力・重力は除く)
- 物理過程の最終生産物は時間変化率であることに大いに注意すること。
  - それぞれの物理過程を理解する際には、どのように時間変化率を計算するのかに注意すること。

タイプI: サブグリッド輸送

$$\frac{\partial \overline{\phi}}{\partial t} = -\nabla\cdot(\overline{\boldsymbol{u}}\overline{\phi}) \boxed{-\nabla\cdot\boldsymbol{f}'_\phi} - \nabla\cdot\overline{\tilde{\boldsymbol{f}}_\phi} + \overline{K_\phi}$$

- 格子平均の速度では表現出来ない輸送
  - 対流による輸送
  - 境界層乱流による輸送
  - 重力波による輸送
- 解像できる部分と解像出来ない部分の割合は解像度に依存。

$$\Delta x \to 0 \quad \Rightarrow \quad \underbrace{\boldsymbol{f}'_\phi}_{\text{解像できない輸送}} = \underbrace{\overline{\boldsymbol{u}\phi}}_{\text{全輸送}} - \underbrace{\overline{\boldsymbol{u}}\overline{\phi}}_{\text{解像できる}} \to \boldsymbol{0}$$

- 高解像度モデルでは、解像できないスケールのみをパラメタライズする必要(例:LES)

Grey Zone problem
例:対流

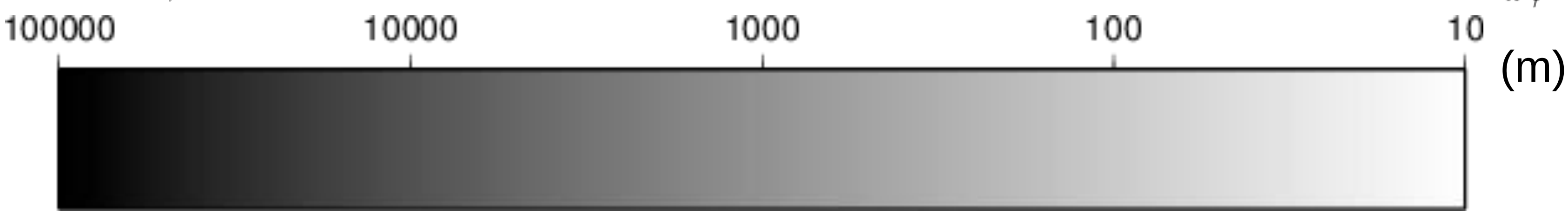
格子平均の鉛直速度では全く輸送を解像できない

格子平均の鉛直速度で部分的に解像できる

格子平均の鉛直速度で輸送をすべて解像できる

$\overline{w\phi} \simeq f'_{w\phi}, \quad \overline{w} \sim 0$

$\overline{w\phi} \simeq \overline{w}\overline{\phi}, \quad f'_{w\phi} \sim 0$



すべての輸送はパラメタリゼーションによる

?

パラメタリゼーションは必要ない

乱流では、Grey Zone を “Terra Incognita”(未知なる大地)と呼ぶ
ただし、乱流の方が、Grey Zone 問題が現れるスケールが小さい(1km程度)

タイプII: 流れによらない輸送

$$\frac{\partial \overline{\phi}}{\partial t} = -\nabla\cdot(\overline{\boldsymbol{u}}\overline{\phi}) - \nabla\cdot\boldsymbol{f}'_\phi \boxed{-\nabla\cdot\overline{\tilde{\boldsymbol{f}}_\phi}} + \overline{K_\phi}$$

- 場の流れによる輸送ではない輸送
  - 放射、地表面フラックス
    - 地表面フラックスの大きさは最下層の風速に依存するが、その風による輸送ではない
- このフラックスは格子平均なので、格子内の不均質性を取り入れる必要がある
  - (例)放射では、雲なしと雲ありの場合を計算し、雲量を重みとして平均。すなわち、雲量は格子内の不均質性を示す
  - (例)陸面モデルにおけるタイル(モザイク)は、陸面の格子内の不均質性を考慮しようとするもの

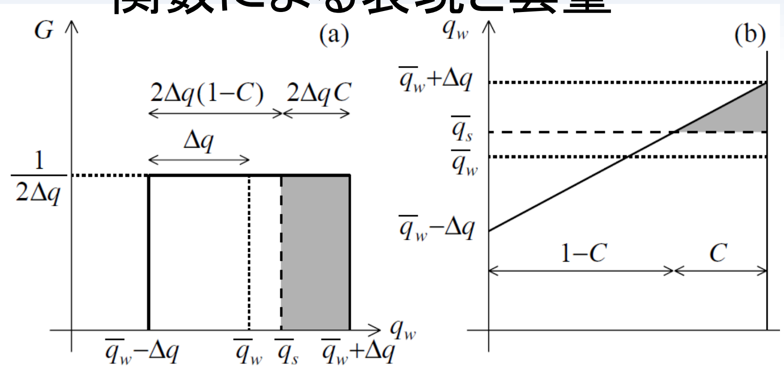
タイプIII: 局所的な生成・消滅

$$\frac{\partial \overline{\phi}}{\partial t} = -\nabla \cdot (\overline{\boldsymbol{u}}\overline{\phi}) - \nabla \cdot \boldsymbol{f}'_{\phi} - \nabla \cdot \overline{\tilde{\boldsymbol{f}}}_{\phi} \boxed{+ \overline{K_{\phi}}}$$

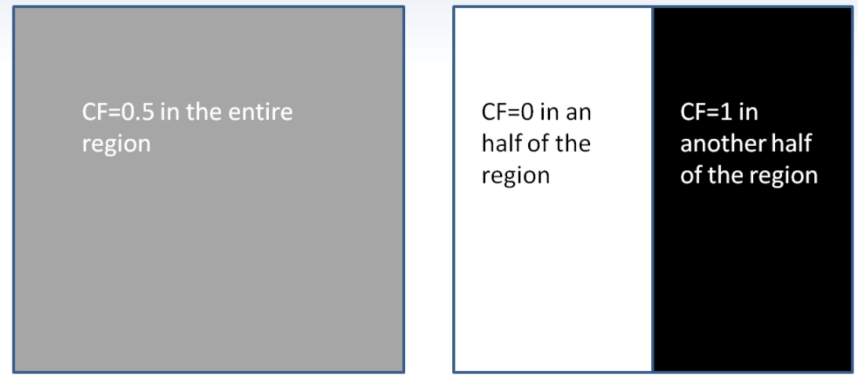
- 例
  - 凝結による潜熱解放、蒸発
  - 水蒸気、雲水等の間の遷移
- タイプIIと同様に、求められるのは格子平均の効果。格子内の不均質性を考慮する必要あり。

格子内の不均質性

格子内不均一の確率密度
関数による表現と雲量



低解像度雲量　高解像度雲量



- 不均質性を考慮しない場合(つまり格子内は均質で、格子全体が格子平均値の量)、凝結(雲水)は格子平均の水蒸気量が飽和水蒸気量を超えたときに初めて生成する。
  - 多くのメソモデルの雲物理過程では、不均一性を考慮していない。
- タイプIでもモデル化する際に不均質性を考慮する
  - 低解像度モデルにおけるアンサンブル対流モデル (A-S)
  - 高解像度モデルにおけるバルク対流モデル (K-F)

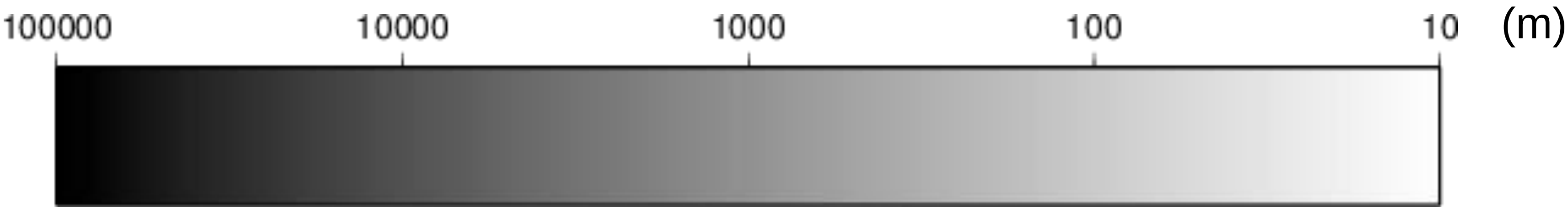
格子内不均質性の解像度依存性

格子内不均質

大　　　　　　　　　　　　　　　　　　　　　　　　　　　　　　小

幅大　　　　　　　　　　　　　　　　　　　　　　　　　　　　　幅小

PDFの形



例: 雲

格子内部分凝結(雲量)　　　　　? ? ?　　　All or nothing (0 or 1)

どのスケールで不均質性を無視できるかは???

最近の航空機観測では、180mの解像度まで、不均質性は無視できないとの指摘も

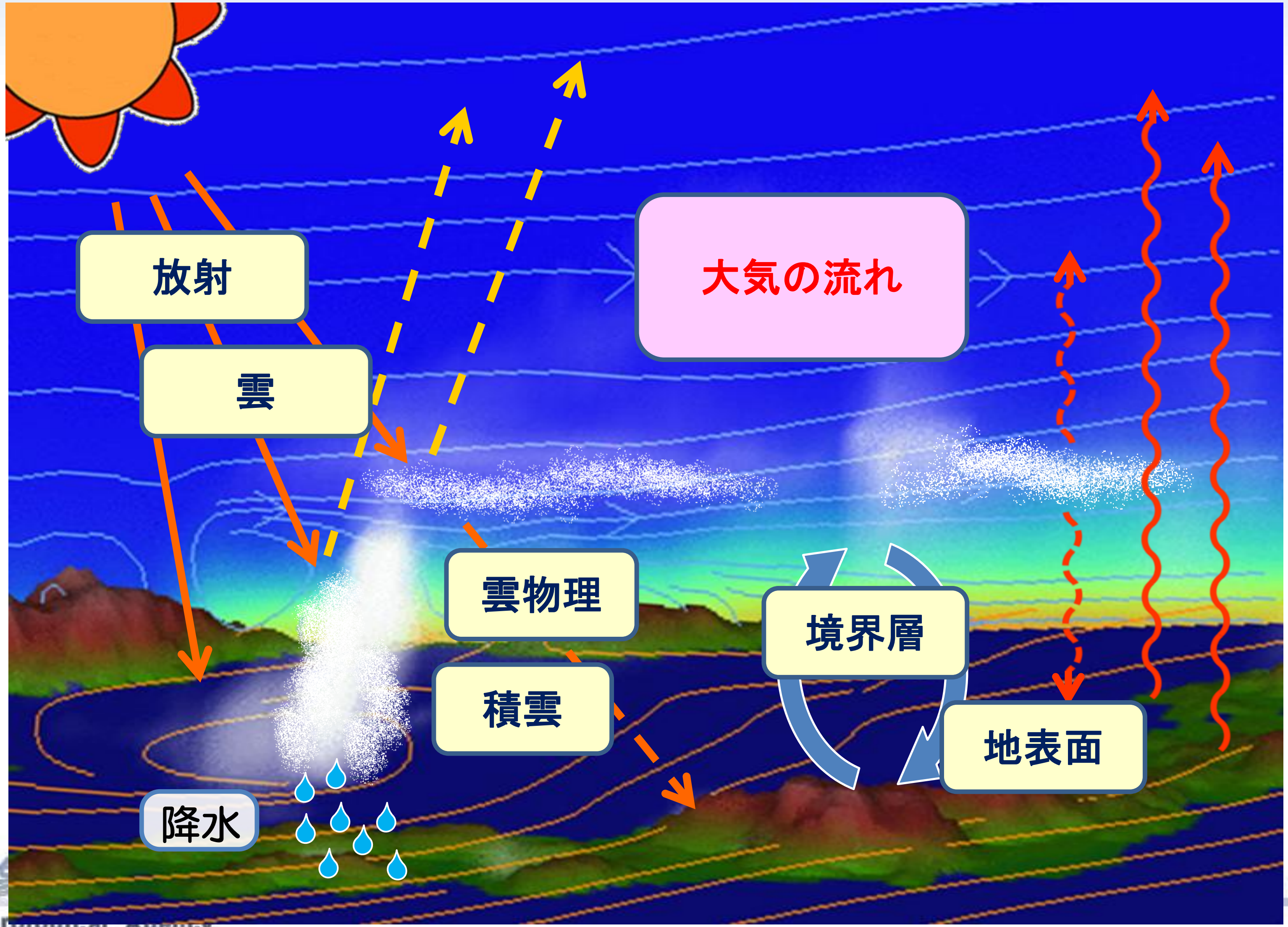
数値予報モデルで表現できる、とは？

- 基本的には、連続空間を格子のまわりで平均した値の場が格子点で表現できること
  - 小さなスケールの現象もその効果が格子点に反映されているという点では表現されていることになる。
    - 「表現されていない」とはその現象が格子点値におよぼす効果も反映されていないことをいうべきだろう。
- 「陽に表現する」とは？
  - 格子点(平均値)によってある現象が表現されていること。
    - その反対がパラメタリゼーションによって表現

各物理過程の簡単な解説

現象・モデル化・時間変化率の算出に注目して

数値予報モデルでモデル化する現象



物理過程の簡単な解説

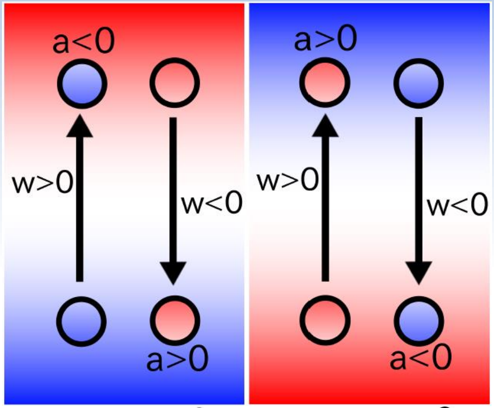
- 境界層･積雲対流 (サブグリッドの輸送)
- 放射(流れによらない輸送)
- 雲･雲物理(内部の生成･消滅)

以上について、

- 対象とする現象
- その現象に対するモデル化
- 時間変化率をどのように求めるか

に注目して解説(詳細は各講義を参照)。

境界層(乱流)過程



乱流(乱渦)による、鉛直輸送を表現
- 熱・水蒸気・運動量の輸送
- 大気境界層(接地層、エクマン層)の形成

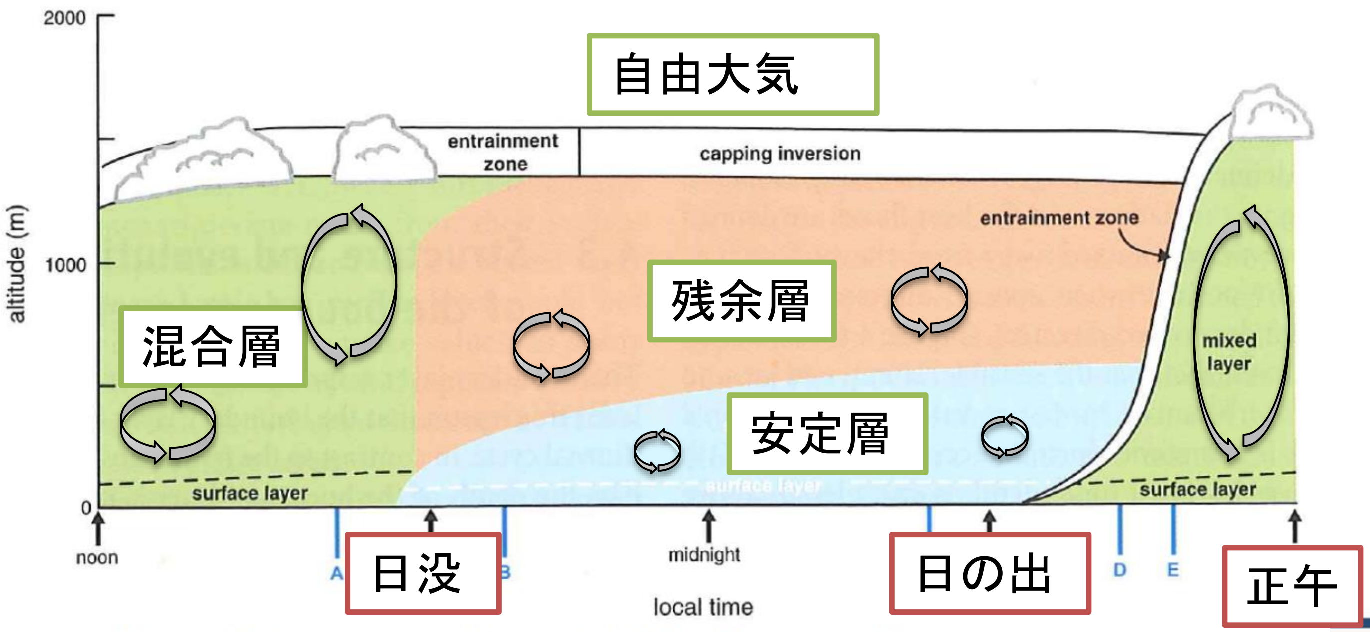


図 1.3.5 陸上での比較的穏やかな気象状況における境界層。横軸が時刻で縦軸が高度 (Stull 1988)。Markowski and Richardson (2010) より転載。

大小様々な
乱渦による輸送を
表現する

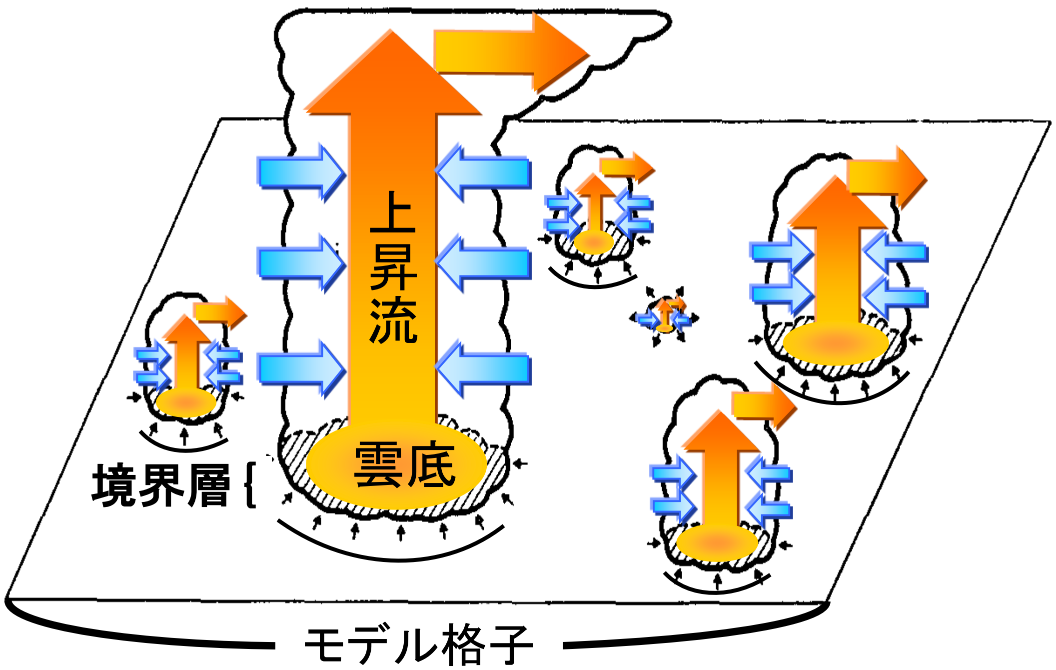
乱流の活動度は
おおよそ大気の
安定度に依存する

境界層

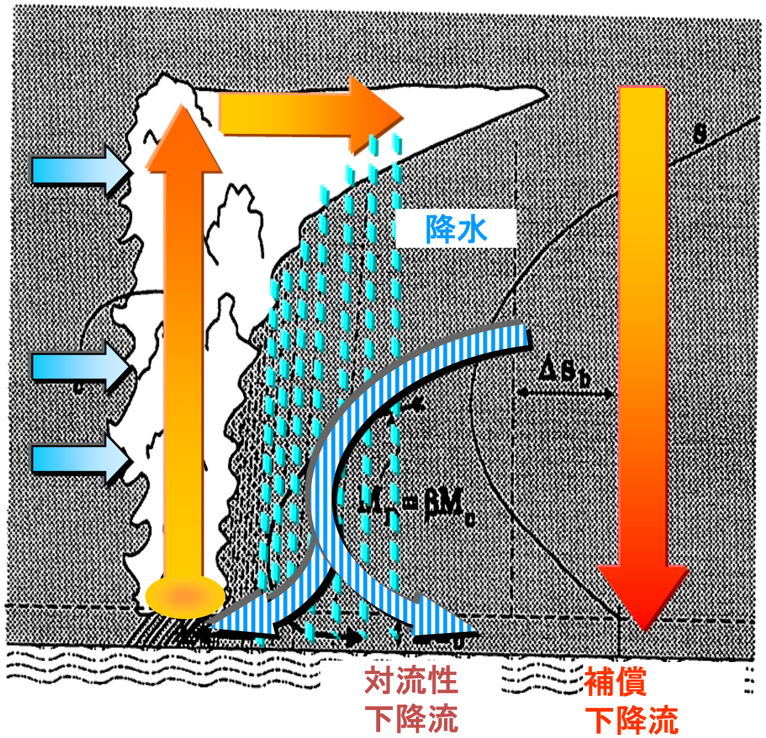
- 対象とする現象
  - 大気中に存在する乱流による運動量・熱・水蒸気の鉛直(サブグリッド)輸送
    - 起源は大小さまざまなスケールの乱流であり、その一つひとつの乱流による輸送を考慮できない。
- モデル化 $F = -K\dfrac{\partial\overline{\phi}}{\partial z}$
  - 大小さまざまなスケールの乱流による輸送フラックスを格子点値の down-gradient でモデル化
    - Kがわかればフラックスがわかる。
- 時間変化率 $\left(\dfrac{\partial\overline{\phi}}{\partial t}\right)_{\mathrm{PBL}} = -\dfrac{\partial F}{\partial z}$
  - フラックスが分かれば時間変化率がわかる。

積雲対流

- 積雲対流活動による、水物質の生成・成長・相変化、鉛直輸送に伴う大気中の熱や水の配分を扱う



【Arakawa and Schubert (1974)に加筆】



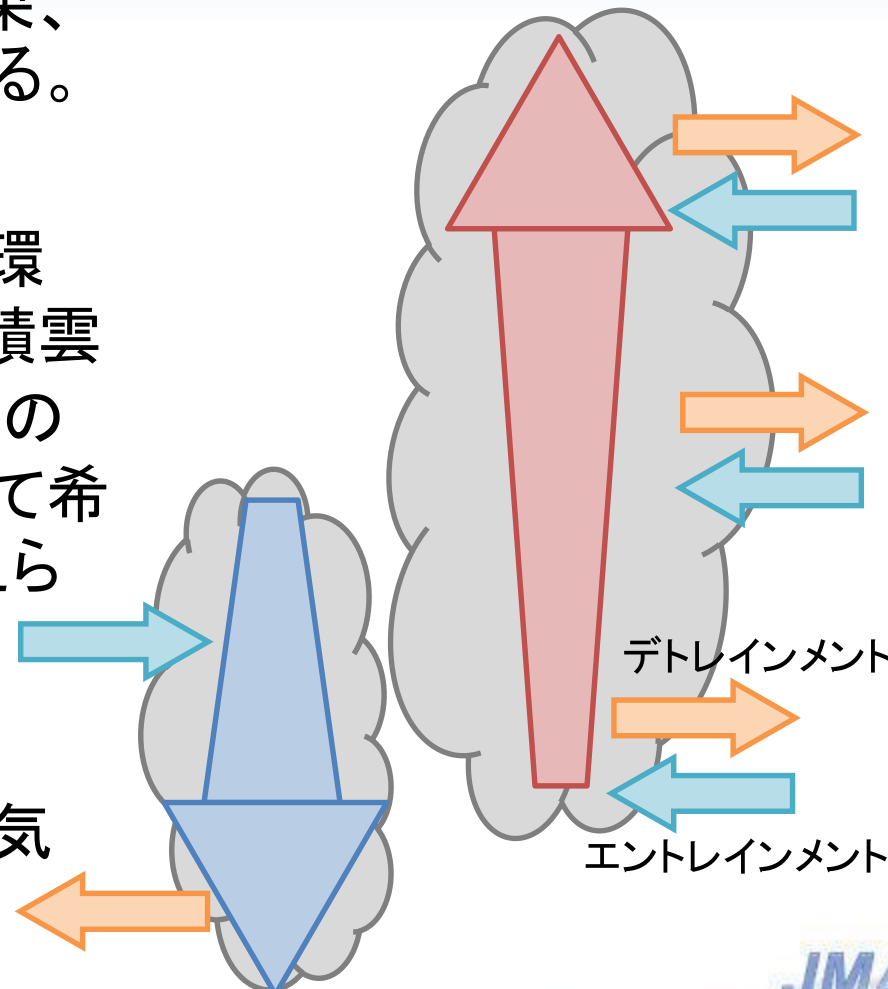
【Emanuel(1994)に加筆】

積雲対流(1)

- 対象とする現象
  - 対流による熱・水蒸気・運動量の(鉛直サブグリッド)輸送とそれに伴う凝結・降水
    - 降水はこれらの鉛直輸送の結果として生じるもので積雲対流スキームは降水を生成することが主目的ではないことに注意。
  - 高解像度(=平均化するスケール小さい)になれば、鉛直速度が格子平均値でゼロではなくなり、それによって輸送が表現できるようになる。
    - ただし、ある解像度で突然、すべての対流輸送を表現できるわけではなく、中間の解像度では一部のみが格子平均値で表現できることになる。

積雲対流(2)

- 積雲に付随する現象
  - 熱や水蒸気の鉛直輸送の結果、凝結が生じてそれが降水となる。
  - エントレインメント
    - 積雲の壁を通じて積雲外(環境)の乾燥・寒冷な空気が積雲内に取り込まれて、積雲内の湿潤・温暖な空気と混合して希釈(dilute)され、積雲は抑えられる。
  - デトレインメント
    - エントレインメントと逆の空気の流れ



積雲対流(3)

- モデル化の一つ: マスフラックススキーム
  - 格子内を対流性上昇流、下降流、環境場に分ける
  - 上昇流域/下降流域のマスフラックス:

$$M^{\mathrm{u}} = \rho \sigma^{\mathrm{u}} w^{\mathrm{u}}, \quad M^{\mathrm{d}} = \rho \sigma^{\mathrm{d}} w^{\mathrm{d}}$$

    - σは対流による上昇流/下降流が格子を占める面積割合
  - 格子平均の温位の時間変化率

$$\left[\frac{\partial \overline{\theta}}{\partial t}\right]_{\mathrm{cu}} = \frac{L}{C_{\mathrm{p}}\pi}(c-e) - \frac{\partial(\overline{w'\theta'})}{\partial z}$$

$$= \frac{L}{C_{\mathrm{p}}\pi}(c-e) - \frac{1}{\rho_0}\frac{\partial}{\partial z}\left[M^{\mathrm{u}}(\theta^{\mathrm{u}} - \overline{\theta}) + M^{\mathrm{d}}(\theta^{\mathrm{d}} - \overline{\theta})\right]$$

上昇流/下降流のマスフラックス、上昇流/下降流の中の温位が求まれば時間変化率が求まる。

積雲対流(4)

- マスフラックス方程式

$$-\frac{1}{\rho_0}\frac{\partial M}{\partial z}+E-D=0$$

$$-\frac{1}{\rho_0}\frac{\partial (M\theta^{\mathrm{c}})}{\partial z}+E\overline{\theta}-D\theta^{\mathrm{c}}+\frac{L}{C_{\mathrm{p}}\pi}c=0$$

$$-\frac{1}{\rho_0}\frac{\partial (Mq_{\mathrm{v}}^{\mathrm{c}})}{\partial z}+E\overline{q_{\mathrm{v}}}-Dq_{\mathrm{v}}^{\mathrm{c}}-c=0$$

  - 最初の式からMのプロファイルが求まり、それを使って、雲中の量(cのついた量)が求められる。
- スキームによっては対流終了時のプロファイルを診断するものもある(KF、対流調節など)。
  - その場合には、現在と終了時との差を対流の生存時間で割ったものを時間変化率とする。

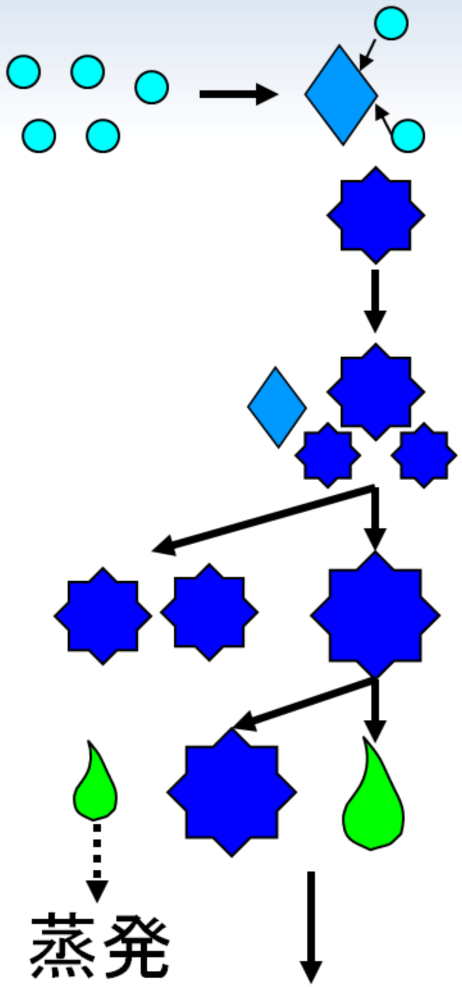
放射

- 対象とする現象
  - 太陽からの短波、大気からの長波の放射による大気の加熱・冷却
- モデル化・時間変化率
  - 評価すべき物理量: 放射フラックスF $\left(\frac{\partial\overline{\phi}}{\partial t}\right)_{\mathrm{rad}} = -\frac{\partial F}{\partial z}$
    - 雲がない場合には格子平均値をそのまま使って放射計算を行う
      - サブグリッドの効果は小さく無視できる。
      - 物理過程ではあるが、パラメタリゼーションではない例
    - 雲がある場合は、雲の部分的な存在を格子平均値から見積もる必要がある(つまりパラメタリゼーション)

雲･雲物理(1)

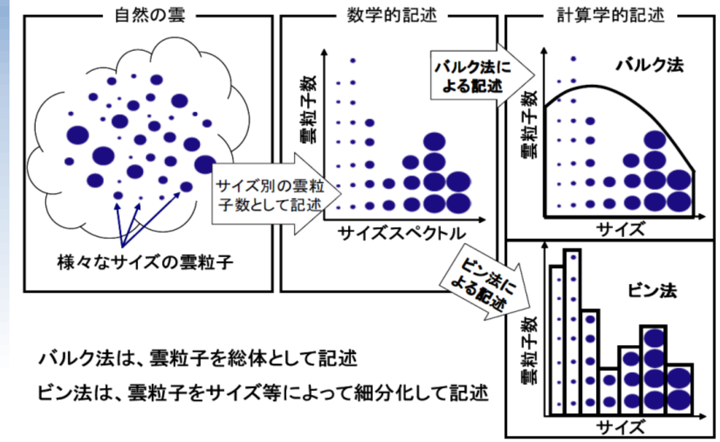
- 現象
  - 水の相変化とそれに伴う熱の放出
  - 形態の変化(雲水から雨へ、など)
  - 降水粒子の落下
- モデル化･時間変化
  - 凝結は飽和水蒸気量を超えた水蒸気を水に変化させる、相変化した量に比例した熱を放出
  - 形態の変化は、質量(混合比)や数濃度の時間変化率を計算。

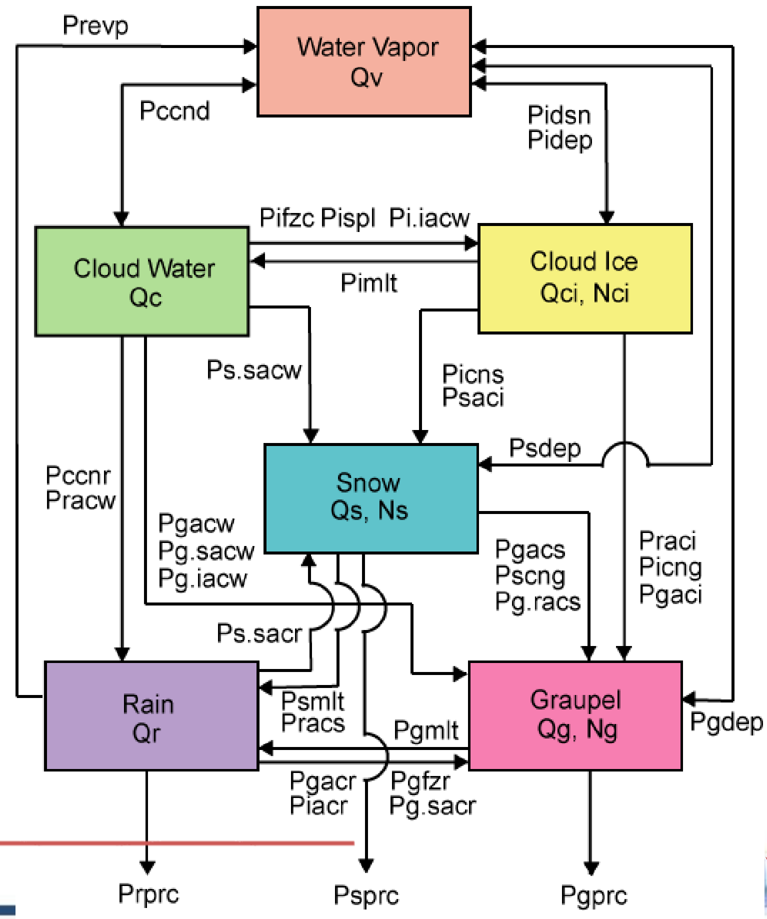
雲･雲物理(2)



モデル化

質量(混合比)や数濃度の時間変化率を追跡

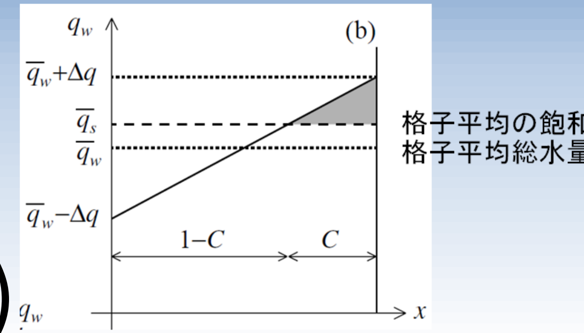




雲・雲物理(3)

- 凝結:雲・降水を生じる出発点
  - 昔のモデル:格子平均の水蒸気量が飽和水蒸気量を超えた分を直ちに降水とする(大規模凝結)
    - つまり、雲は陽には考えない。
    - 格子平均で飽和することが必要。
      - サブグリッドで凝結する効果が考慮されないので、格子平均で凝結するまでに時間がかかり、降水の開始が遅れるとともに、大きな凝結熱を出すことも。
    - オリジナルの雲微物理も、格子平均で飽和することが必要。
      - ただし、雲を作り、ただちに降水にしない点が大規模凝結と異なる。
  - 雲スキーム:サブグリッドの凝結を考える。
    - 格子に対する凝結量: 雲量

雲・雲物理(4)



(別冊報告58号、中川さんの原稿より)

- 格子の一部分を占める雲(凝結)
  - 格子点値はあくまでも平均値で、その平均値の周りに空間的・時間的に揺らいでいる。
    - 格子平均の総水量が飽和水蒸気量より小さくても一部分は飽和水蒸気を超えているかも(逆もあり)。
  - とりうる総水量の確率分布Gを与え、そのモーメントで雲量C、凝結量qlを計算する。すなわち、Gは

$$\int_{-\infty}^{\infty} G(q_{\mathrm{w}})\,dq_{\mathrm{w}} = 1, \quad \int_{-\infty}^{\infty} q_{\mathrm{w}} G(q_{\mathrm{w}})\,dq_{\mathrm{w}} = \overline{q_{\mathrm{w}}}$$

を満たし

$$C = \int_{\overline{q_{\mathrm{s}}}}^{\infty} G(q_{\mathrm{w}})\,dq_{\mathrm{w}}, \quad \overline{q_{\mathrm{l}}} = \int_{\overline{q_{\mathrm{s}}}}^{\infty} (q_{\mathrm{w}} - \overline{q_{\mathrm{s}}}) G(q_{\mathrm{w}})\,dq_{\mathrm{w}}$$

雲・雲物理(5)

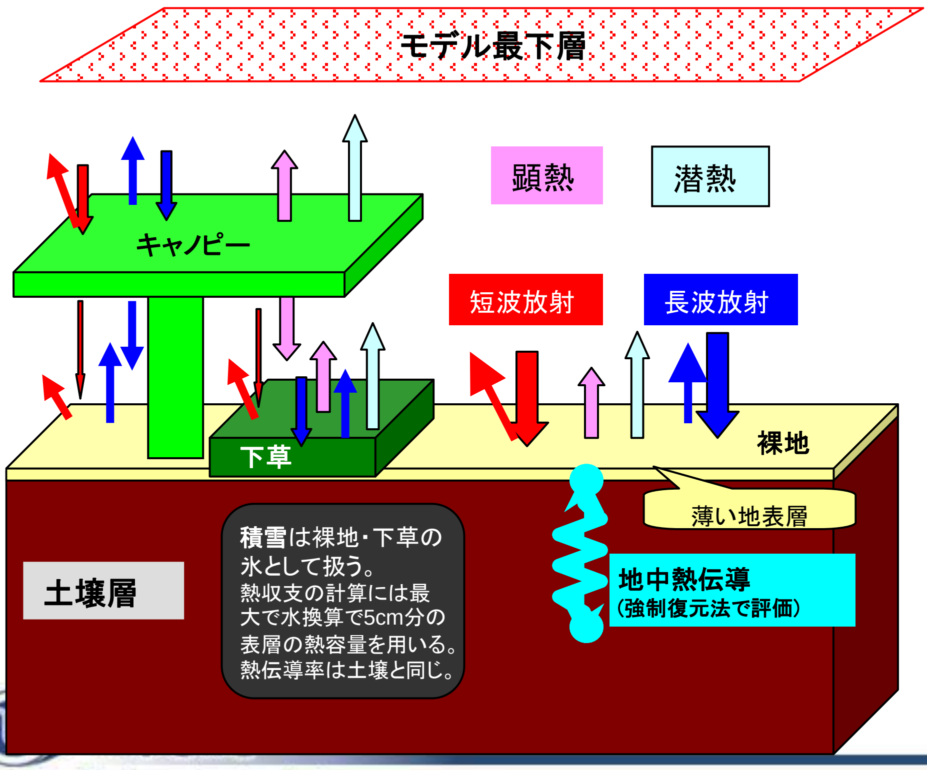
- 確率密度関数としては
  - ガウス関数
  - 三角形
  - トップハット などが使われる。
- 雲に関連するある過程の時間変化率が $f(q_\mathrm{a})$ で与えられるなら、格子の部分的な凝結を考慮した場合の時間変化率は、通常の場合、

$$Cf\left(\frac{q_\mathrm{a}}{C}\right)$$

となる。(ただし、過程ごとにチェックする必要あり)

地表面過程(全球モデル)

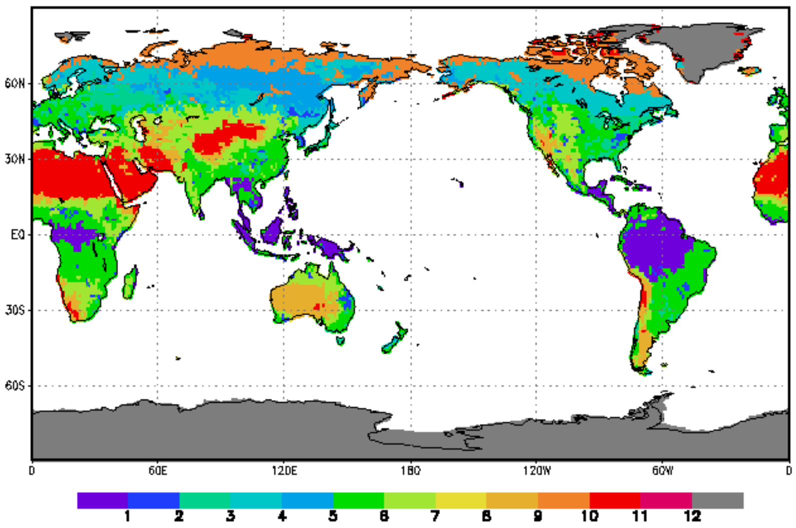
SiB (Simple Biosphere) モデル



- 地表被覆(植生、積雪、土壌)における温度と含水量を予報
  - キャノピー、下草/裸地面、深い土壌の温度を予報
  - 積雪がある場合、下草/裸地面の熱容量を修正
  - キャノピー、下草/裸地面、土壌3層の水分量を予報
  - 土壌水の凍結・融解は取り扱えない
  - 表面および土壌底面からの水の流出を計算

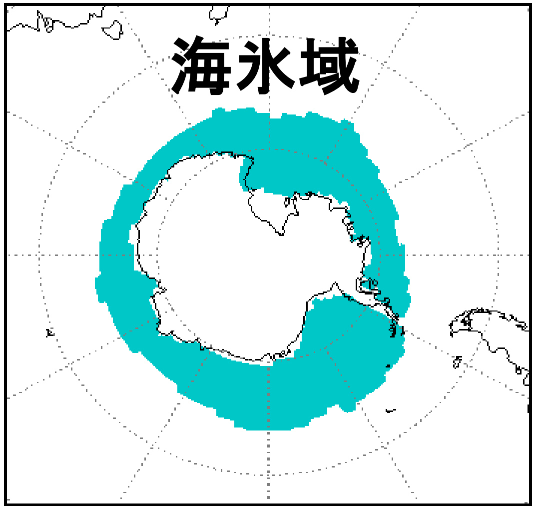
陸面モデルでの地表の扱い

- 各格子を、開水（海洋・湖沼）、海氷、陸上に分類する
- さらに陸上格子は、植生により12種類に分類される



海氷

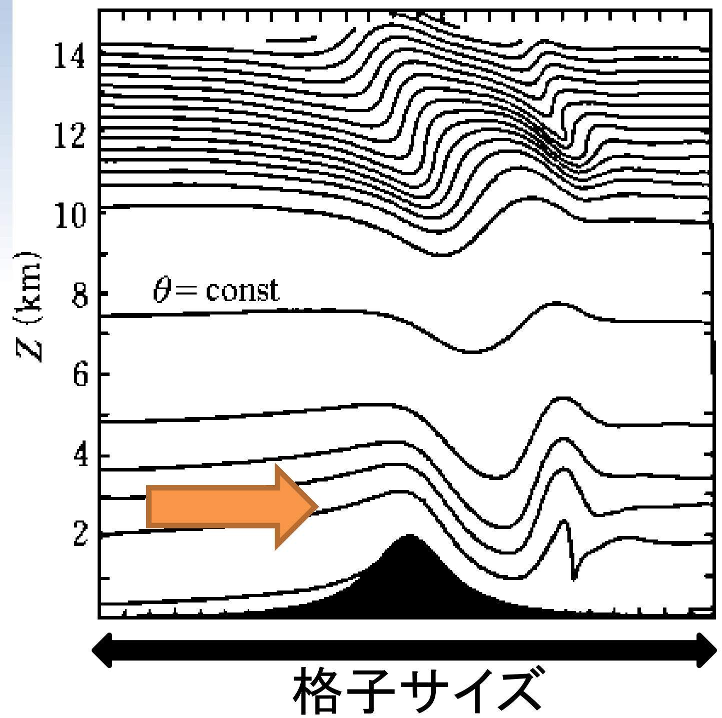
- アルベド ー 0.8（紫外/可視） 0.4（近赤外）　 射出率 ー １
- 一様な厚さ 2m（うち表層 5cm）を仮定
- 表層温度は予報（ただし0℃以下） 深層は一定（-1.65℃）
- 海氷上の積雪効果は考慮されない

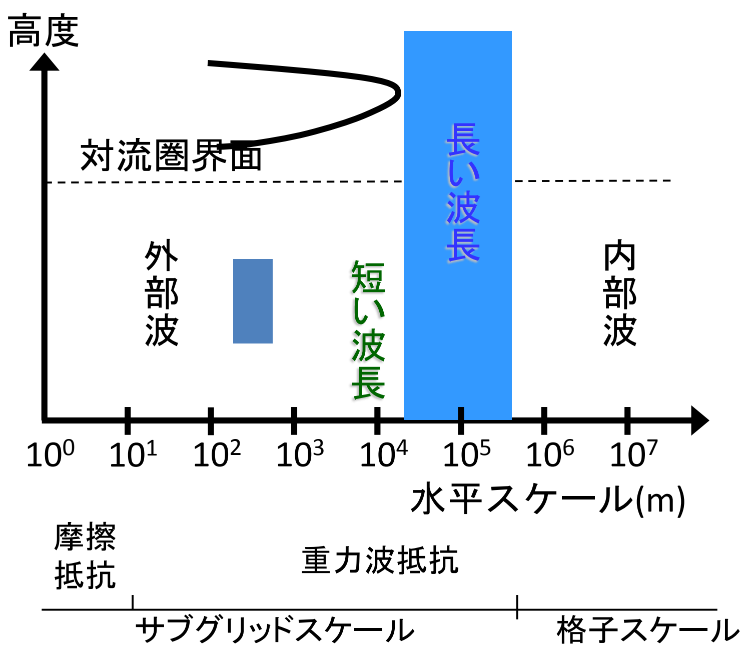


重力波抵抗

重力波による運動量輸送を表現

山岳などに風が当たると重力波ができる（ことがある）。
地形の解像度、モデルの鉛直分解能に限界があるためパラメタライズが必要（GSMのみで利用）。

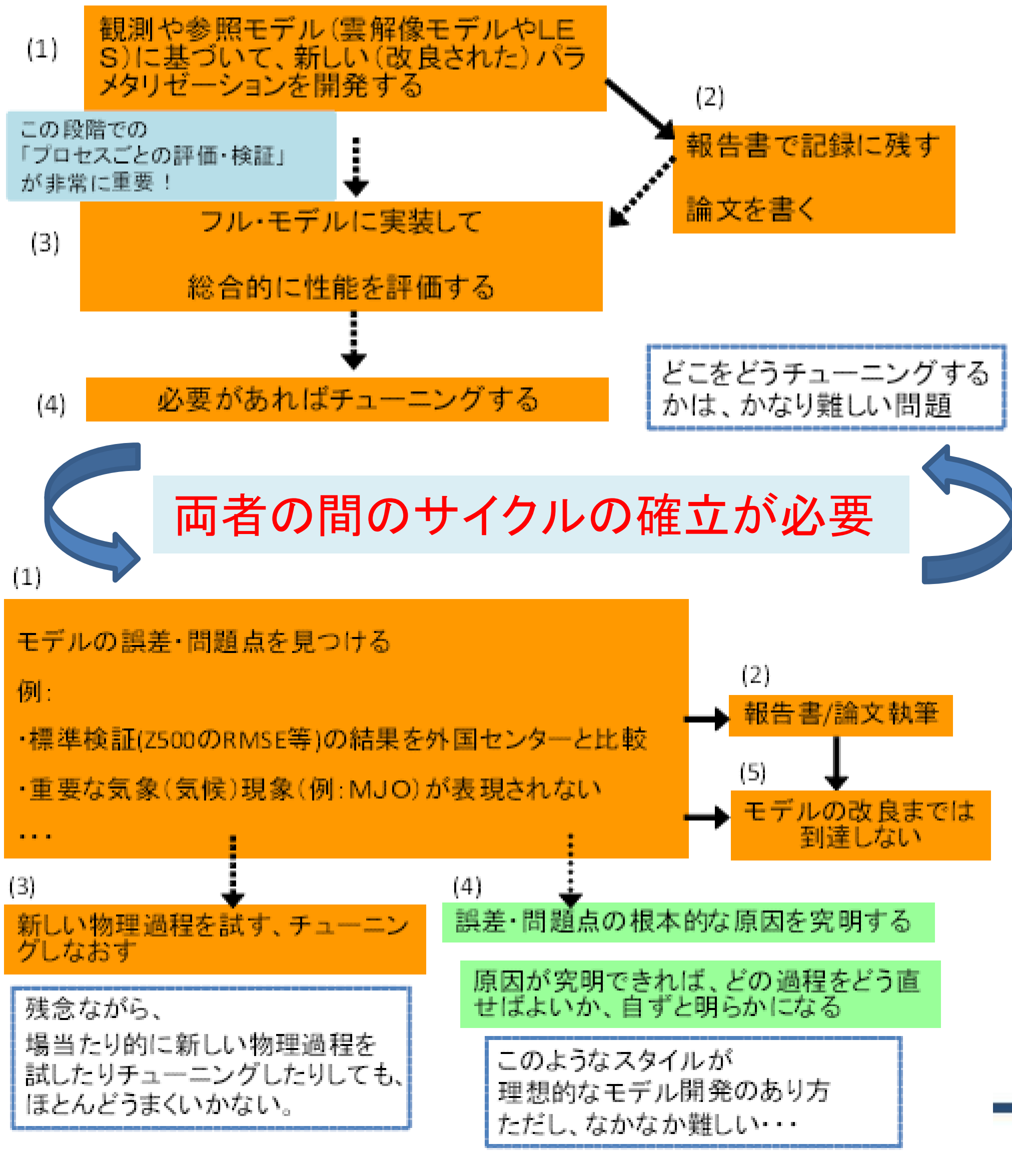




- 短波（波長10km程度）と長波に分け、長波は成層圏に到達できる
  - 重力波は上空へ伝搬し、ある高さでつぶれてその運動量を大気へ渡す（上空の風が弱められる）。
  - ジェットなどの表現に影響がある


物理過程の開発手法

ボトムアップとトップダウン



ボトムアップ・アプローチ
個々の部品の改良を通じて行うモデル改良への手法

部品の改良が逆効果になることも頻発
→
過程間の複雑な相互作用の存在、その結果として「打ち消し合う誤差」

トップダウン・アプローチ
モデル全体の性能の問題点をスタートとして開発を進めていく手法

ボトムアップの弱点を補う手法ではあるが方法論が確立していない。

JMA

理想実験

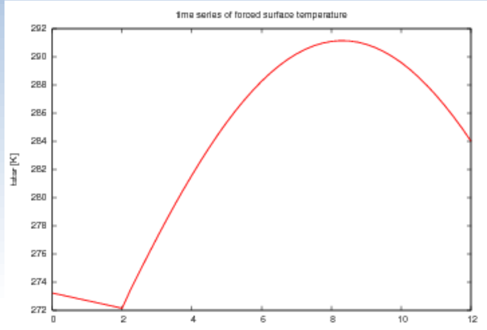
- モデルの設定を単純化して、仮想的な条件を設定して注目したい過程や現象を観察
- 力学の基礎評価では必須であるが、物理過程でも活用できる。
- 特定の過程の特性を浮かび上がらせるために
  - 空間の自由度を小さくする(鉛直1次元、2次元)
  - 典型的な初期条件、境界条件を設定
  - その他の過程の寄与は強制力として与える

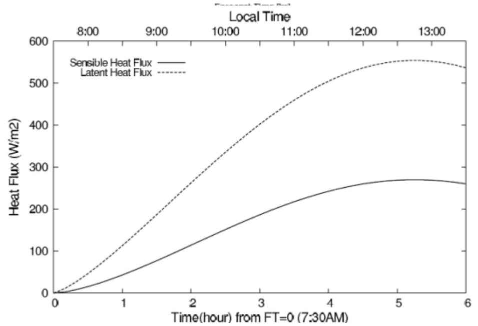
強制力

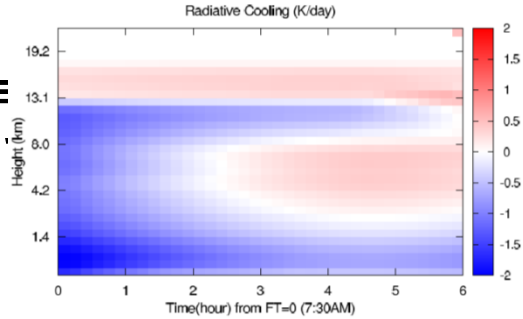
- 問題を単純化するために、いくつかの物理量や時間変化率をモデルの中で計算せずに入力として与える。
  - 対象とする過程を絞る
    - たとえば、境界層過程だけに注目したい場合は、その他の過程の時間変化率を入力として与えてしまう。
    - スキーム比較の際に他の過程からの寄与を無視できてその過程だけに注目できる。
  - 空間自由度を少なくしたことによって失われる効果を補完する。
    - 鉛直1次元モデルにおける水平移流、気圧傾度力など。

強制力の例

- 地面温度を時系列で与える
  - 放射、地面温度予報の差異を無視
- 地表面フラックスを時系列で与える
  - 地表面フラックスの差異を無視
- 水平移流(高度・時間に依存)
  - 移流による風、温度、水蒸気量の時間変化率を加える。
- 地衡風強制
  - 気圧傾度力によって地衡風に近づけるための時間変化率を加える。







鉛直1次元モデル(SCM)

- 鉛直1次元だけの自由度
  - 現在の現業モデルでは物理過程はほぼ鉛直1次元。
  - つまり、入力も出力も1次元であり、ソフトウェアのテストとしては鉛直1次元で十分であり基本的な動作確認に使える。
  - 水平方向の相互作用がないので、入力に対するモデルの応答をつかみやすい。
  - 時系列、鉛直プロファイルという形態でデータ全体を容易に見渡せる
    - 1ステップごとの出力も気軽にできる。

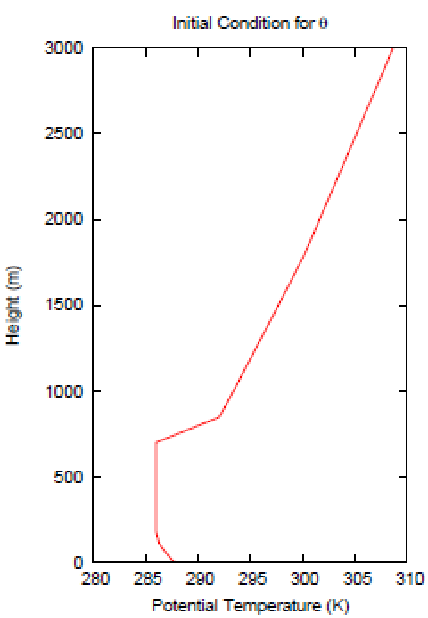
鉛直1次元モデルの限界

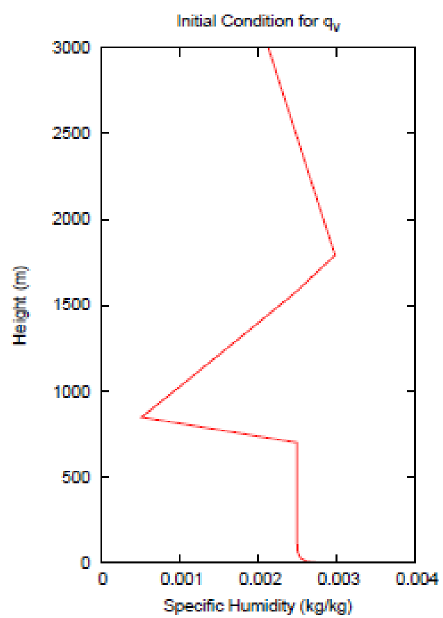
- 水平方向の効果は直接考慮されない。
  - たとえば、対流が発生するのに必要な自由対流高度(LFC)までの強制上昇のうち、水平収束や地形効果によるものは表現できない。
- 鉛直1次元で望ましい挙動をしていても3次元モデルでそうなるとは限らない。
  - いろいろなカラムを網羅しているわけではないから
  - しかし、鉛直1次元で挙動がおかしければ3次元でもおかしくなる
- 限界を認識しつつ活用することが重要

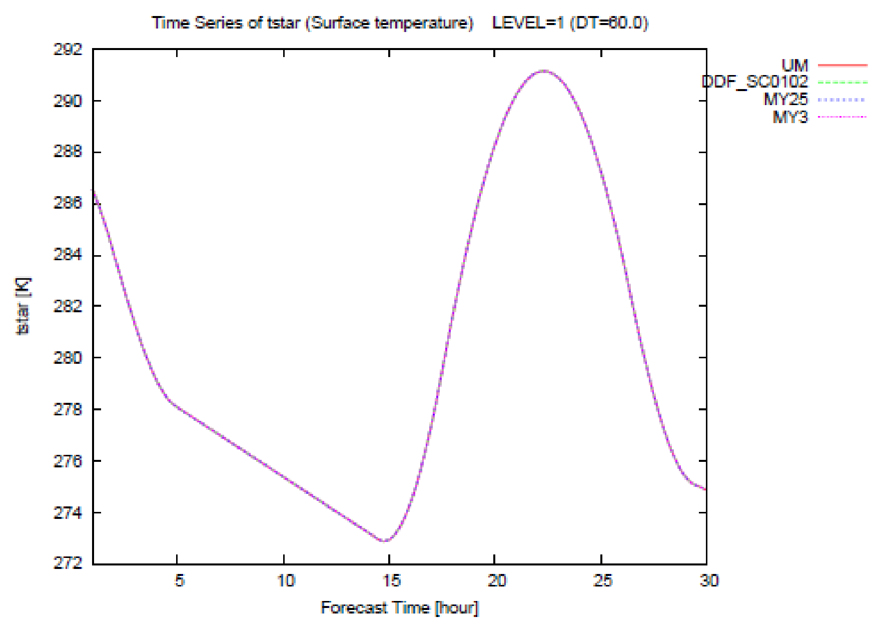
鉛直1次元モデルの例:GABLS2

- 雲なしの境界層の日変化
  - 放射過程なし、地面温度の時系列を強制

    →境界層スキーム、地表面フラックススキームを焦点に
  - 地衡風強制
  - 観測データをもとに初期値や強制力を作成。



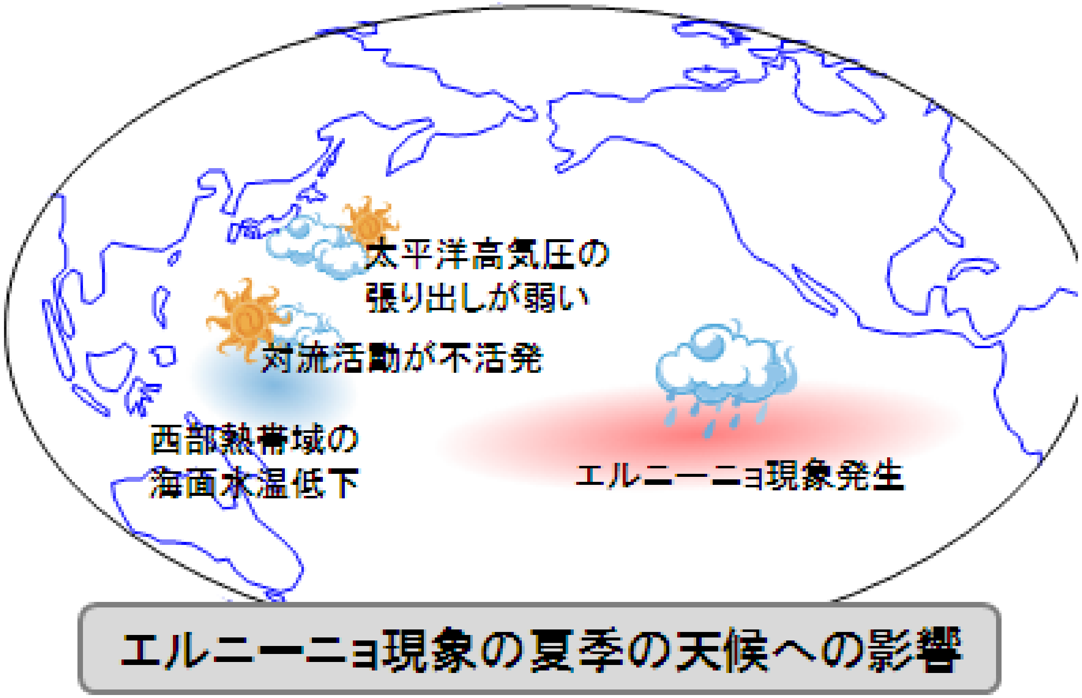




トップダウン･アプローチによるモデルの診断

- 手法はまだ確立されていない。
- 重要かつ困難な課題
  - 鉛直カラム内の物理過程間の相互作用
  - 大気波動による力学的な相互作用(移流による伝播と波動による伝播)
  - 移動性擾乱から長周期波動のフィードバック
- これらの過程には摂動の振幅を増大させるような不安定過程もあり、統計的に有意なシグナルの抽出が困難
- これらの複雑な相互作用を如何に解きほぐすか？

現実大気の複雑さの例：テレコネクション（ENSO）



エルニーニョが起きると・・・

いろんなことがめぐりめぐって・・・

日本が冷夏や暖冬になりやすい。

（※エルニーニョ自体は大気海洋相互作用だが、その中緯度への影響は、主に中緯度大気の複雑なメカニズムによる、と考えられている。）

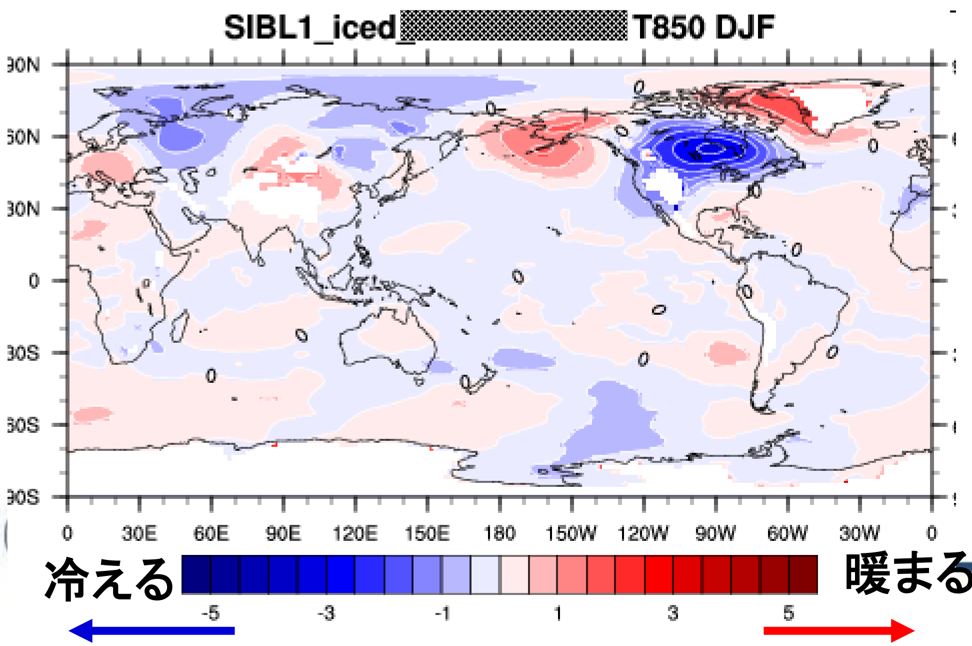
「風が吹けば桶屋が儲かる」という言葉があるが、現実大気はそれ以上に複雑！

大気モデルも複雑

- そんな複雑な現実大気をシミュレートするために作られている大気モデルも、やはり複雑。

一例：

下図はGSMにおいて、北半球の「ある場所」に強制的に雪を置いた場合と、そうしない場合の、850hPaの気温(12－2月平均)の差を示したものです。



【クイズ】

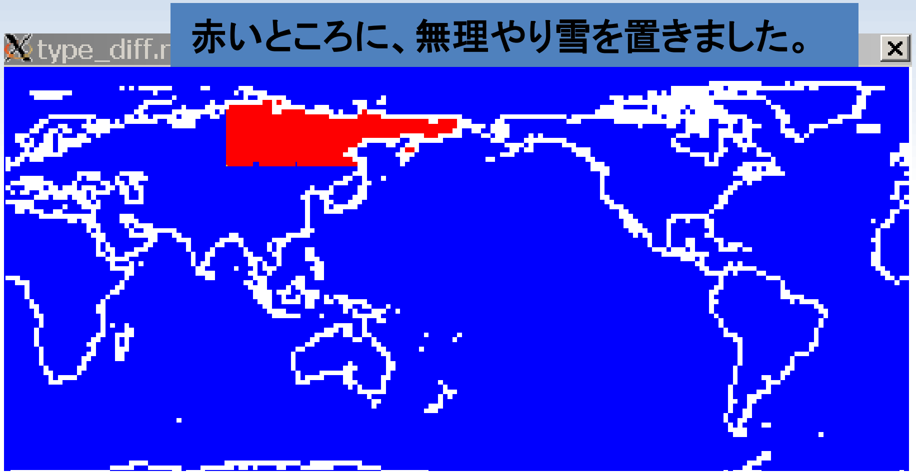
どこに強制的に雪を置いたでしょうか？

a. カナダ

b.アラスカ

c.シベリア

大気モデルも複雑



正解は・・・・なんと！

「c. シベリア」

です。

※現実ではもともと雪がある場所ですが、現在のGSMでは雪が現実より融けやすく、積雪の表現が過少です。

もしも、原因（どこに雪を置いたか）を知らなかった場合、
結果（カナダの上空が冷える）だけを見て、原因を特定することは、
はたして可能なのでしょうか・・・？
誰だって、カナダあたりに原因がある、と思い込んでしまうでしょう・・・

⇒　しかし！
モデル開発の現場では、これができなくてはならない！