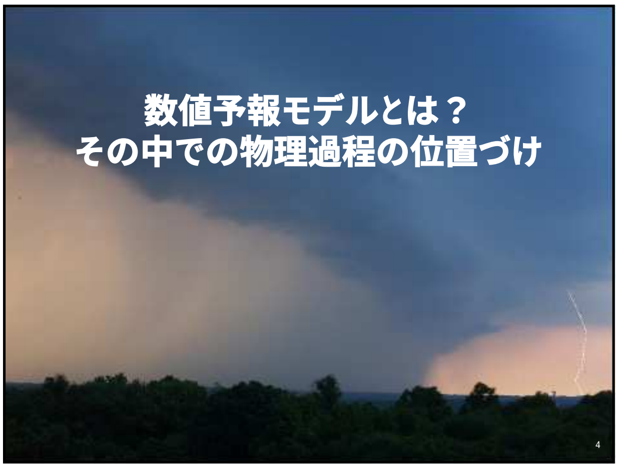
物理過程開発の基礎知識

気象庁予報部数値予報課
原　旅人

この講義の目的

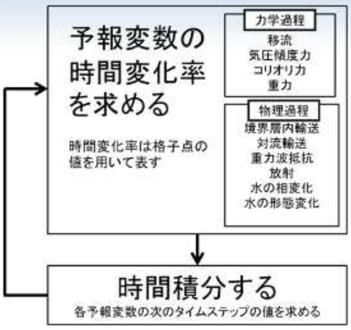
- 数値予報モデルの大きな枠組みとその中における物理過程の位置づけを理解する。
  - 一つの応用として、物理過程の解像度依存性を理解する。
- その位置づけを念頭に、物理過程がどのような現象を対象として、それをモデル化しているかの概要を理解する。
- 物理過程の開発手法を概観する。
  - ボトムアップ･アプローチ(鉛直1次元モデルなどによる理想実験)
  - トップダウン･アプローチ(モデルの検証から)

目次



数値予報モデルの2つの柱

- 数値予報モデルを理解するには、それぞれの計算がこの柱のどこに対応しているかに常に注意。



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 $f_{\rho u}$ の一部として、コリオリ力や重力は $K_{\rho u}$ 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、

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

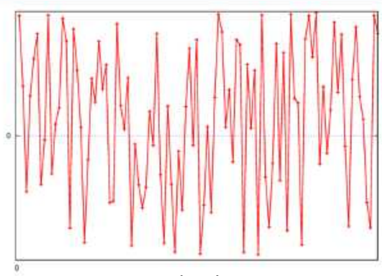
  - $\phi' = \mathbf{u}' = 0$ ならば、 $\overline{\mathbf{u}\phi} = \overline{\mathbf{u}}\,\overline{\phi} \qquad (\mathrm{R}_\phi = 0)$
  - $\overline{\mathbf{u}\phi}$ を $\overline{\phi}, \overline{\mathbf{u}}$ で表現できることを「**輸送を格子スケールで表現できる**」という。
  - $\overline{\boldsymbol{u}\phi} = \overline{\boldsymbol{u}}\,\overline{\phi} + \boldsymbol{f}'_\phi$ 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、

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

対流による上昇流

格子平均によってモデルが表現するもの(1)

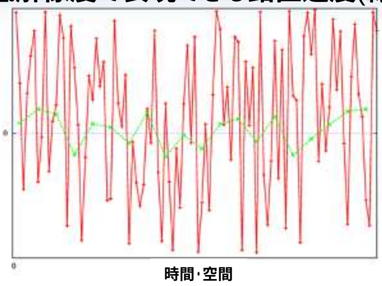
もともとの現象における鉛直速度(模式図)



時間・空間

鉛直速度は局所性が大きく、揺らぎが大きい。

対流による上昇流
格子平均によってモデルが表現するもの(2)
低解像度で表現できる鉛直速度(緑線)



•平均化すると(緑色)、短波長成分が少なくなるとともに、振幅もだいぶ小さくなってしまう。(基本的には上昇流と下降流でほぼ打ち消す)

パラメタリゼーションとは？

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

- もし、f′が $\overline{\phi}, \overline{u}$ で記述することができれば、$\overline{\phi}, \overline{u}$ 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** $\overline{\phi}, \overline{u}$ **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。

物理過程とは？

$$\frac{\partial\overline{\phi}}{\partial t} = -\nabla\cdot(\overline{u}\overline{\phi}) \underbrace{-\nabla\cdot f'_{\phi}}_{(I)} \underbrace{-\nabla\cdot\overline{f}_{\phi}}_{(II)} \underbrace{+\overline{K}_{\phi}}_{(III)}$$

- 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カ・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

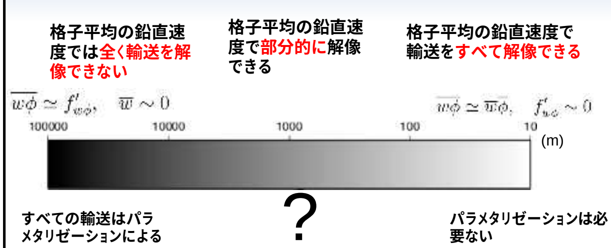
$$\frac{\partial\overline{\phi}}{\partial t} = -\nabla\cdot(\overline{u}\overline{\phi}) \boxed{-\nabla\cdot f'_{\phi}} -\nabla\cdot\overline{f}_{\phi} + \overline{K}_{\phi}$$

- 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。

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

- 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



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

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

- 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

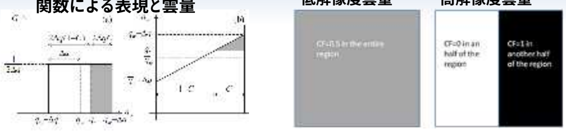
$$\frac{\partial \phi}{\partial t} = \nabla\cdot(\overline{u\phi}) \quad \nabla\cdot f'_\phi \quad \nabla\cdot \overline{f}_\phi \quad \boxed{K_\phi}$$

- 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

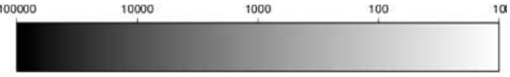
格子内不均質

大　小

幅大　幅小

PDFの形

100000　10000　1000　100　10　(m)



例: 雲

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

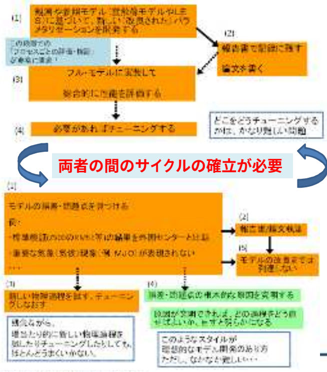
どのスケールで不均質性を無視できるかは？？？

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

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。

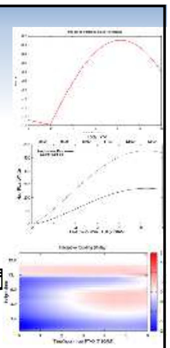
理想実験

- 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)

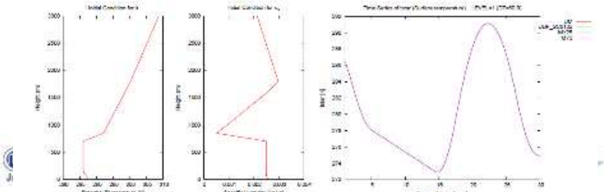
- 鉛直1次元だけの自由度
  - 現在の現業モデルでは**物理過程はほぼ鉛直1次元**。
  - つまり、入力も出力も1次元であり、ソフトウェアのテストとしては鉛直1次元で十分であり**基本的な動作確認に使える**。
  - 水平方向の相互作用がないので、**入力に対するモデルの応答をつかみやすい**。
  - 時系列、鉛直プロファイルという形態でデータ全体を容易に見渡せる
    - 1ステップごとの出力も気軽にできる。

鉛直1次元モデルの限界

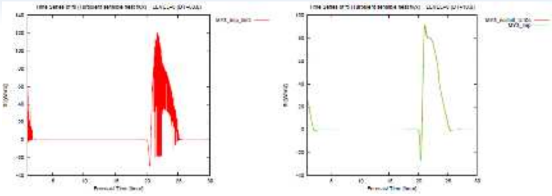
- 水平方向の効果は直接考慮されない。
  - たとえば、対流が発生するのに必要な自由対流高度(LFC)までの強制上昇のうち、水平収束や地形効果によるものは表現できない。
- **鉛直1次元で望ましい挙動をしていても3次元モデルでそうなるとは限らない。**
  - いろいろなカラムを網羅しているわけではないから
  - **しかし、鉛直1次元で挙動がおかしければ3次元でもおかしくなる**
- 限界を認識しつつ活用することが重要

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。



鉛直1次元モデルによる動作確認の例

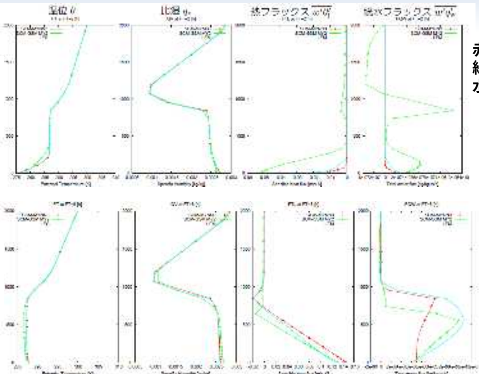


•GABLS2における高度約350mにおける熱フラックスの時系列
•(左)のような時間的振動をSCMで1stepごとに出力することで発見。
•別の物理量の時系列も観察しながら原因を特定し、改良した結果、(右)のように振動のない時系列に。

鉛直1次元モデルによる境界層スキーム比較(GSM/MSM/LES)

安定層

混合層



赤:MSM(MY3)
緑:GSM(MY2)
水色:LES

GSMの安定層のフラックスがかなり大きいこと、安定層上端での水フラックスの不自然な挙動が気になる

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？

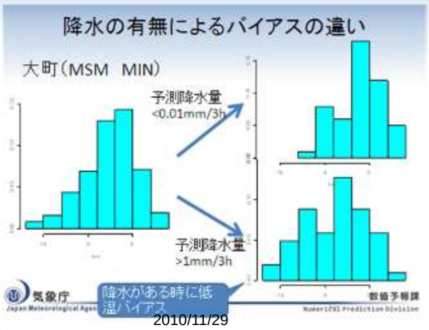
トップダウン･アプローチの例 Initial Tendency

- 相互作用の影響を受ける前の短い予報時間の予報誤差に注目。
- ITeM(“Initial Tendency Method”)
  - Initial Tendencyを処理、モニターするためのツールとして堀田さん(数値予報課)が開発

トップダウン･アプローチの例 Conditional Sampling

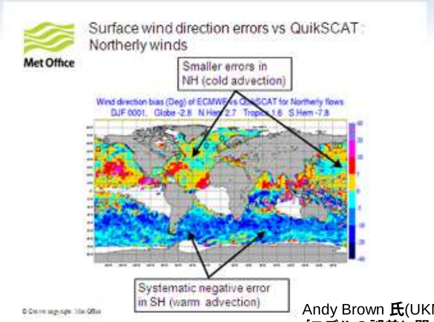
- ある条件を満たしている事例を抽出して統計をとる。
  - 例
    - 地上風速によって場合分けして地上気温などの検証
    - 降水の有無によって地上気温を検証
    - 海上風が極向き(成層不安定化)か赤道向き(成層安定化)か？

Conditional Sampling の例(1)
降水の有無によるMSMの気温バイアスの違い



2010/11/29
高田さん数値予報課コロキウム資料

Conditional Sampling の例(2)



観測が北風の場合の風向の誤差

赤道向きの北半球では誤差は小さく、極向きの南半球では誤差が大きい。

つまり、成層が不安定化する過程での境界層スキームの誤差が大きいということ

Andy Brown 氏(UKMO)
「モデルの誤差に関するワークショップ」(2010)
講演資料より

まとめ(1)

- 数値予報モデル
  - 計算機上で仮想的な大気を時間発展させて未来の大気の状態を予報
- 数値予報モデルの2つの柱
  - 時間変化率を求めること
  - 時間積分すること
- 物理過程の数値予報モデルにおける位置づけ
  - 以下のような過程による**時間変化率**を求めること
    - 格子平均値からのずれがもたらすサブグリッド輸送
    - 流れによらない輸送
    - 内部での生成・消滅

まとめ(2)

- 各物理過程
  - これからの物理過程における各講義で、現象をどのようにとらえ、どのように時間変化率を求めているのか、注目してほしい
- 物理過程の開発
  - ボトムアップとトップダウン
  - 理想実験の活用
    - 初期条件や他の過程による効果を理想化
    - 鉛直1次元モデル
    - 2/3次元モデル

物理過程開発に必要なこと
(自分の反省を踏まえて)

- 現象をよく理解すること
  - モデルはソフトウェアである以前に物理法則・現象をシミュレーションしようとするものである。
    - モデル開発に最重要なのはプログラミング能力ではない。
- 現象を踏まえて、どのようにモデル化するかを考えること。
  - 時間変化率をどのように求めているか、そのために何が必要か。
- 自分で理想実験を行い、つぶさに物理量を観察すること。そして、モデルの中で物理量の振る舞いの理由を考えること。