

数値予報モデルの最新動向

～太陽光発電量予測への利用可能性を念頭に～

気象庁 予報部数値予報課
原 旅人



Japan Meteorological Agency

太陽エネルギー学会太陽光発電部会第13回セミナー
(2015/03/27)

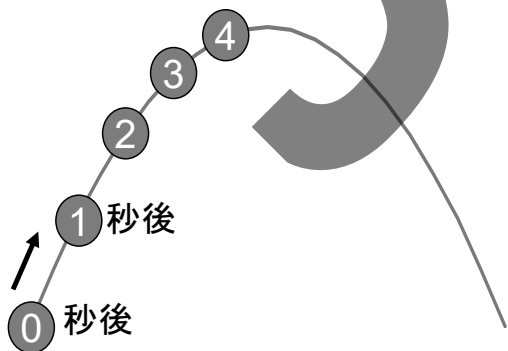
1 Numerical Prediction Division

数値予報課

数値(天気)予報とは何?

ある特定の時刻の大気状態を数値的に解析し、物理法則に基づいて大気の状態の時間変化を定量的に求める(物理量の時間変化率を未来に向かって足し合わせる)ことにより、将来の大気の状態を予測する手法

例えば、ボールの軌道を予測することを考えます。



- 最初の状態がわかり
(ボールを投げる角度と初速度)
- 現象を支配する法則がわかれば
(ボールに働く重力と空気抵抗)
- ボールの軌道は予測可能

数値天気予報(以後"数値予報"と呼びます)も原理は同じ。



Japan Meteorological Agency

太陽エネルギー学会太陽光発電部会第13回セミナー
(2015/03/27)

2 Numerical Prediction Division

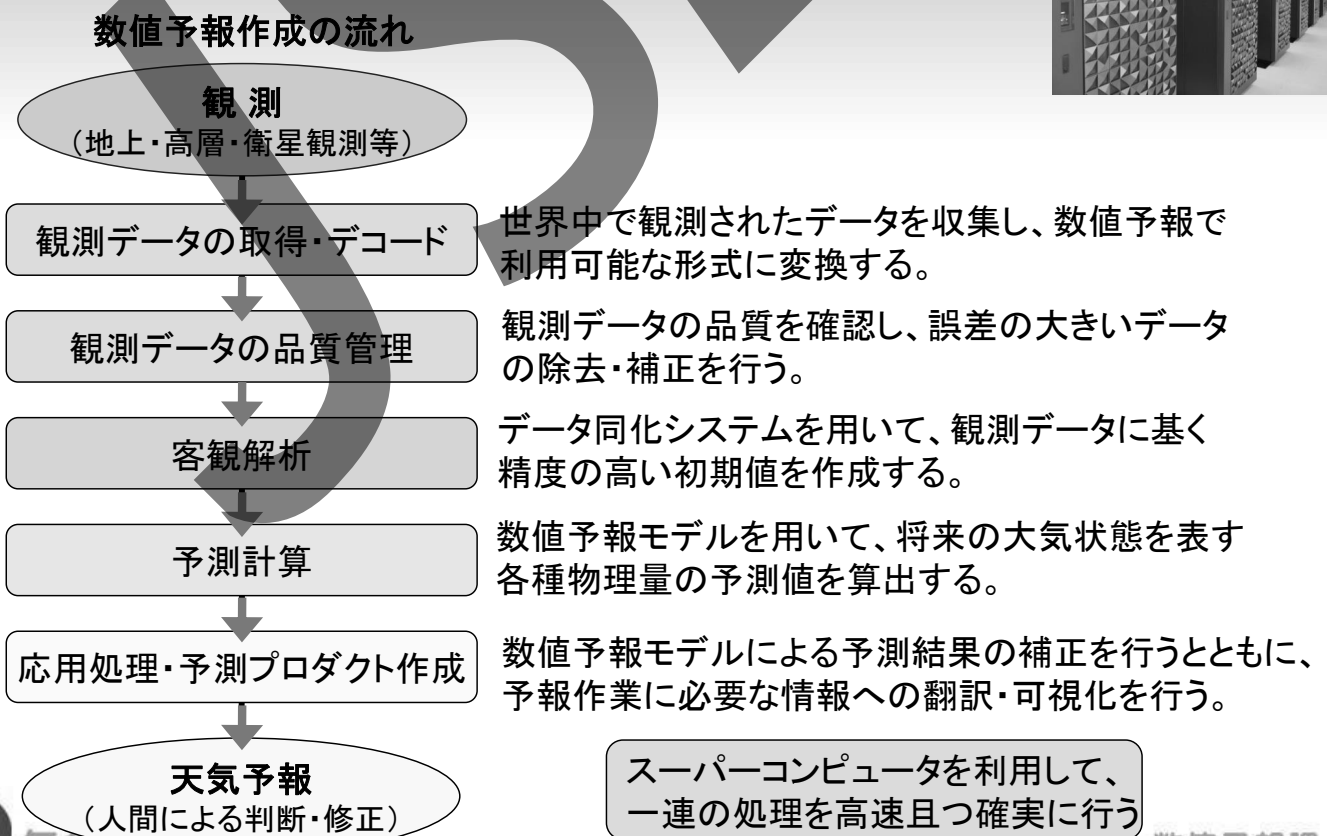
数値予報課

数値予報の役割 (1) 気象業務における数値天気予報の位置づけ



日付	11 火	12 水	13 木	14 金	15 土	16 日	17 月
東京地方 (前夜天気予報へ)	曇のち雨	曇時々雨	曇	曇一時雨	曇	曇一時雨	曇
降水確率(%)	30/40/60/60	70	40	60	40	50	40
最低(°C)	10(-)	12(±2)	13(±2)	12(±4)	7(±4)	7(±4)	8(±4)
最高(°C)	14(-)	16(±4)	21(±3)	15(±4)	14(±4)	14(±4)	17(±4)

数値予報の流れ



現業数値予報システムの仕様

短期予報用の大気モデルのみ、2015年3月現在

	モデル	領域 水平解像度	鉛直 層数	予報時間 (初期時刻(UTC))	目的
決定論的予報	全球モデル (GSM)	地球全体 約20km	100層	84 hours (00,06,18)	<ul style="list-style-type: none"> 各種予報・ガイダンスの基礎資料 各種数値予報モデルの入力値 (波浪, 黄砂, 移流拡散など) メソモデルの側面境界条件
				264 hours (12)	
	メソモデル (MSM)	日本周辺 約5km	50層 (48+2)	39 hours (00,03,06,09, 12,15,18,21)	<ul style="list-style-type: none"> 各種予報の支援 (防災気象情報など) 各種数値予報モデルの入力値 (波浪, 高潮, 火山灰移流拡散など) 局地モデルの側面境界条件
局地モデル (LFM)	日本周辺 約2km	58層	9 hours (毎時)	<ul style="list-style-type: none"> 各種予報の支援 (飛行場予報, 防災気象情報など) 	
確率論的予報	週間 アンサンブル予報 システム(WEPS)	地球全体 約40km	60層	264 hours (00,12) ※各27メンバー ～54メンバー/日	<ul style="list-style-type: none"> 週間天気予報 東南アジア等諸外国の予報支援
	台風 アンサンブル予報 システム(TEPS)	地球全体 約40km	60層	132 hours (00,06,12,18) ※25メンバー	<ul style="list-style-type: none"> 台風進路予報 ※台風発生が予想される時、 台風が存在する時等に実行される



気象庁

Japan Meteorological Agency

※赤字は現スパコン導入(2012年6月)後に導入・更新された箇所

数値予報課

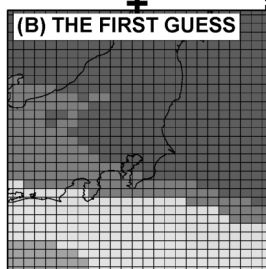
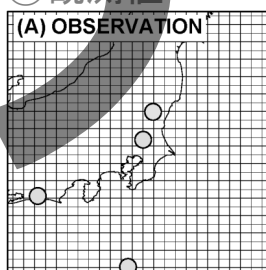
太陽エネルギー学会太陽光発電部会第13回セミナー
(2015/03/27)

5 Numerical Prediction Division

解析(データ同化:初期値作成)の手順

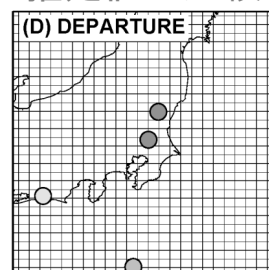
- ① 観測値と第一推定値 (叩き台)の準備
- ② 観測値と第一推定値を比較(図D)
- ③ 右図の場合、第一推定値の気温が低いため、第一推定値の気温を上げるよう修正(図E)
- ④ 以上の処理の結果、解析値(図C)ができる

① 観測値

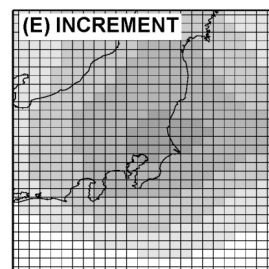
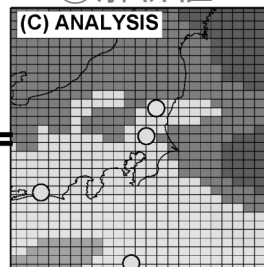


① 第一推定値

② 観測値と第一推定値の比較



④ 解析値



③ 第一推定値を修正



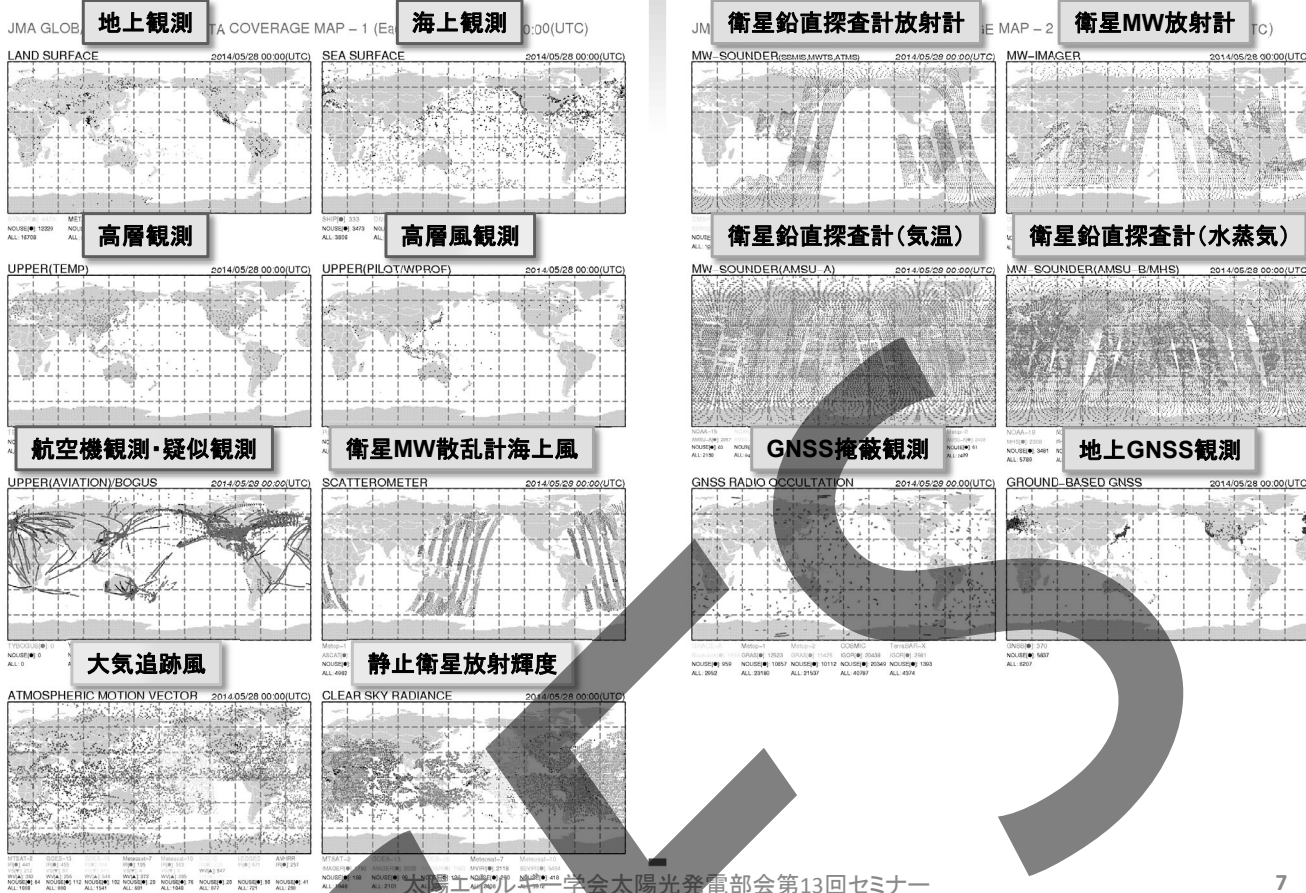
気象庁

Japan Meteorological Agency

太陽エネルギー学会太陽光発電部会第13回セミナー
(2015/03/27)

JMA

観測データ分布(全球速報解析)



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

大気を記述する方程式

$$\frac{\partial \phi}{\partial t} = F$$

時間変化率

$$\phi_{t+\Delta t} = \phi_t + F_t \Delta t$$

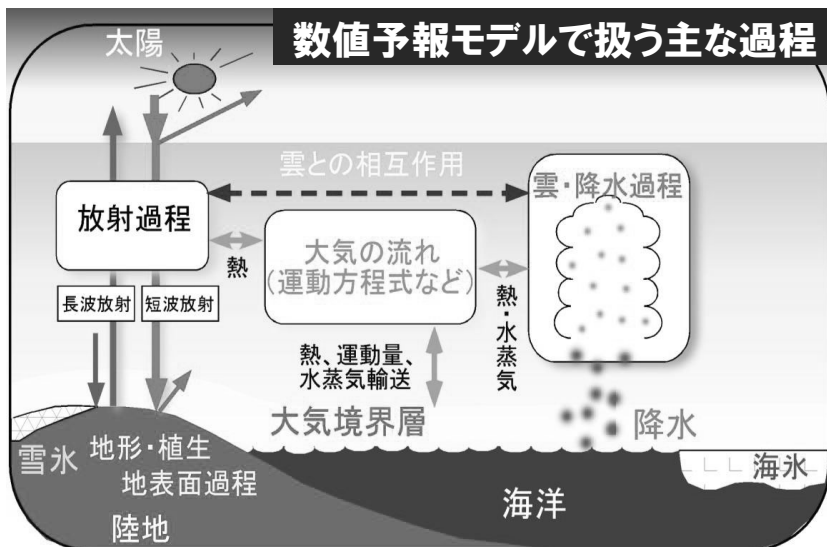
未来の値

現在の値

• 物理過程

方程式系の時間変化率のうち

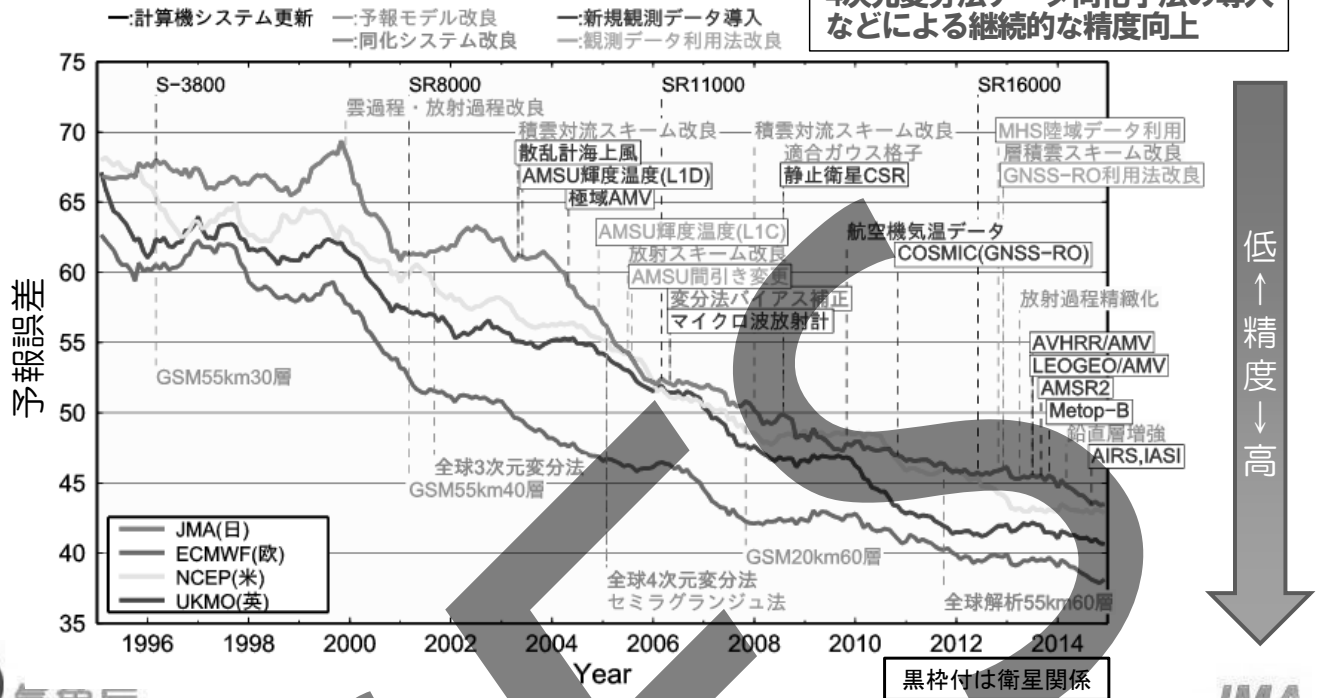
- 格子平均からのずれがもたらす効果(サブグリッドの輸送)
- 大気の運動では表現できない運動量、熱(エネルギー)、水蒸気の輸送
- 格子内の非一様性の効果
- 水の相変化によるエネルギーの放出
- 放射、雲水、積雲、乱流、陸面、重力波
- 複雑で未解明な要素を含む



北半球5日予報500hPa高度RMSEの経年変化

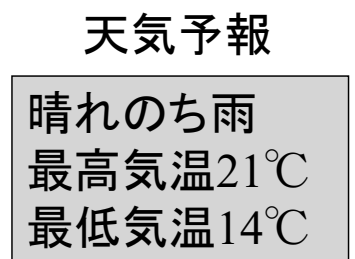
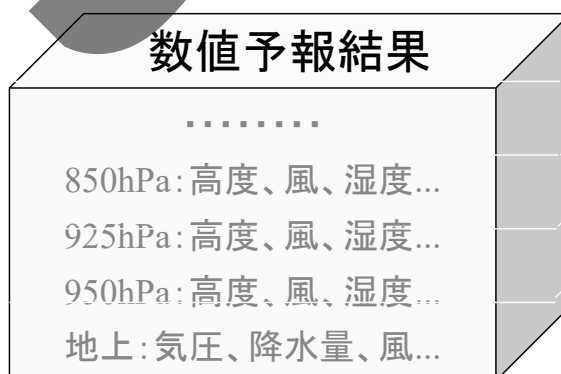
(1995年1月～2014年12月、前12ヶ月移動平均)

衛星観測データの利用や
4次元変分法データ同化手法の導入
などによる継続的な精度向上



ガイダンスとは

- 数値予報結果の、客観的な気象要素への**翻訳**
 - モデルが直接予報しないものも予測(降水確率、発雷確率など)
 - 数値予報の系統誤差の修正(地形の反映)
- 数値予報が持つ膨大な情報から、
防災気象情報・天気予報に直結する情報を抽出
- 予報の基本資料としての利用



ガイダンスの作成手法

- 作成手法
 - 過去データから翻訳ルールを作成し、そのルールに従って予測する
- 利用している統計手法
 - カルマンフィルター
 - 予測式は線形
 - (例)最高最低気温ガイダンス ※係数は逐次学習
 - ニューラルネットワーク
 - 非線形の関係を予測可能
 - (例)最大降水量ガイダンス
 - ロジスティック回帰
 - 事象発現の有無の確率の予測に適している
 - (例)発雷確率ガイダンス
 - フローチャート
 - 数値予報結果の値により、判定基準に従って予測
 - (例)お天気マップ

逐次学習型: 数値予報モデルの変更に自動的に追従するため、変更時のコストが小さい「最もすぐれた手法」は存在せず、それぞれに長所・短所がある。

太陽光発電予測に必要なもの

- 地表面への短波放射フラックス
 - 気象においても、短波放射によって地表面を加熱し、それが混合層を発達させたり、対流のトリガーになるため、精緻に扱うことは非常に重要
 - 古くは、短波放射の結果として生じる地表面温度の日変化を適当に表現するだけのモデルもあった。

難関は雲

- 雲は短波放射フラックスの大きな吸収源
 - であると同時に、その吸収による加熱も現象によっては重要
- しかし、「雲」といってもいろいろ。
 - マクロ的には
 - 形(水平の広がり、厚さなど)
 - 存在する高さ
 - 光の透過性 など
 - よりミクロ的には
 - 構成される水粒・氷粒の大きさ(の分布)、密度、形など
 - モデルの観点では
 - 格子内の不均一性(特に低解像度モデルでは顕著)

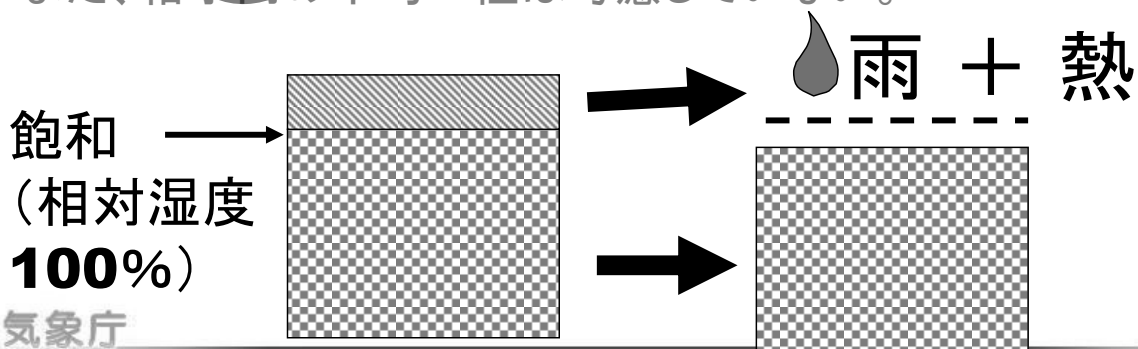


古いモデルの雲・雨の取り扱い

大規模凝結

- 格子全体で一様な雨が降る場合に対応。
- 格子点の水蒸気量が過飽和になると、
 - その分を凝結させて雨にする。
 - 下層が乾燥している場合は落下の途中で蒸発
 - 潜熱で格子点の空気を暖める or 冷やす。

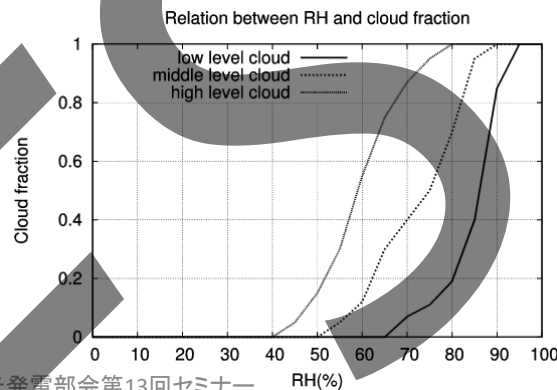
つまり、水蒸気はすぐに雨になって雲は存在しない
また、格子内の不均一性は考慮していない。



放射の雲は？

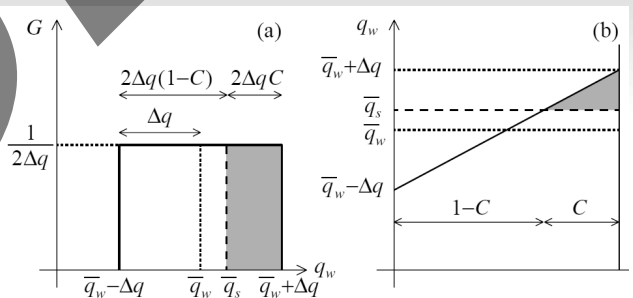
- 格子内の雲の存在の不均一性を無視して、格子平均の水蒸気量が飽和水蒸気量を超えていたら雲あり、それ以外は雲なしという扱いでは放射フラックスの誤差は非常に大きい。
- そこで、格子内の不均一性を雲量(格子の中で雲が占める水平面積の割合)であらわし、晴天のフラックスと雲がある場合のフラックスを雲量で平均化する。
- 古いモデルでは、相対湿度から雲量を求めていた。
 - 衛星観測とゾンデ観測による相対湿度の相関を利用
 - 物理的な背景はあまりない。

以前のモデルで利用されていた相対湿度と放射で用いる雲量の関係 (大野・伊佐 1984 がベース)



格子内の不均一性の取り扱い

- 最近のモデルでは、温度や総水量の格子平均値からの揺らぎがある確率密度関数(PDF)に従うと仮定する。
- PDFは、大きな形が仮定され(一様分布、ガウシアン、ダブルガウシアンなど)、場に依存するいくつかのパラメータを含む。



例: 一様分布のPDF
格子平均値の周りに対称に分布(幅 Δq)

例: 一様分布のときの雲量 C と凝結量 q の空間分布(1次元で記述)

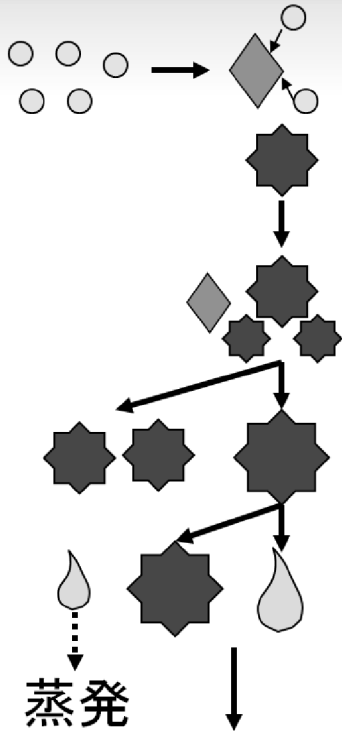
- 「雲量」は、飽和水蒸気量を超える確率

$$C = P(\bar{q}_w + q'_w > q_{sat}) = P(q'_w > q_{sat} - \bar{q}_w) = \int_{q_{sat} - \bar{q}_w}^{\infty} f(q'_w) dq'_w$$

- 「凝結量」は飽和水蒸気量を超えた分の期待値

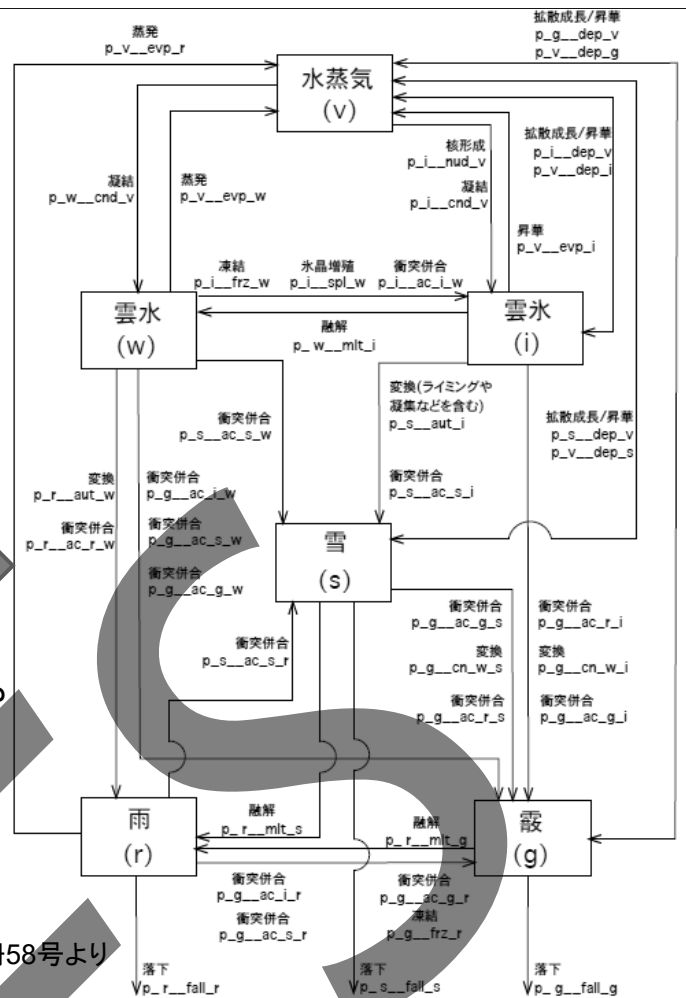
$$\bar{q}_l = E(\bar{q}_w + q'_w - q_{sat}) = \int_{q_{sat} - \bar{q}_w}^{\infty} (\bar{q}_w + q'_w - q_{sat}) f(q'_w) dq'_w$$

雲の中のミクロな振る舞いの表現 (雲物理)



モデル化

質量(混合比)や
数濃度の時間
変化率を追跡



数値予報課報告・別冊58号より

雲物理過程における質量時間変化

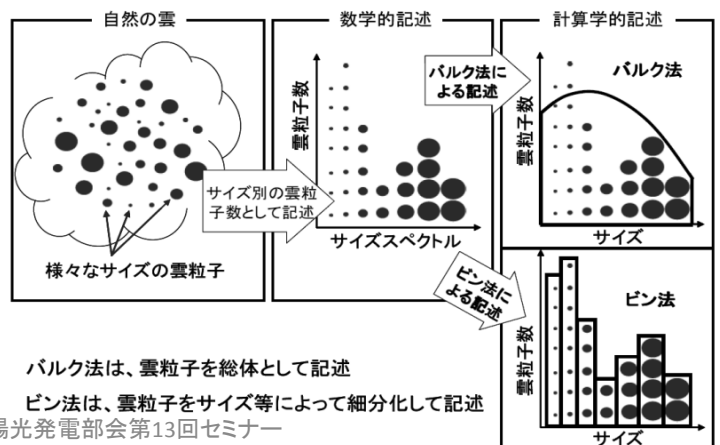
- 粒子1つ1つの記述では、各過程の質量の時間変化率は粒径に依存する。
- しかし、粒子1つ1つを記述するには膨大な計算が必要

→粒径ごとの粒子数を記述する粒径分布関数を作り、統計的に記述する

数値予報課報告・別冊54号より

$$\frac{dM_i}{dt} = \int_0^\infty \frac{dm_i}{dt} n(D) dD$$

$n(D)$: 粒径分布関数



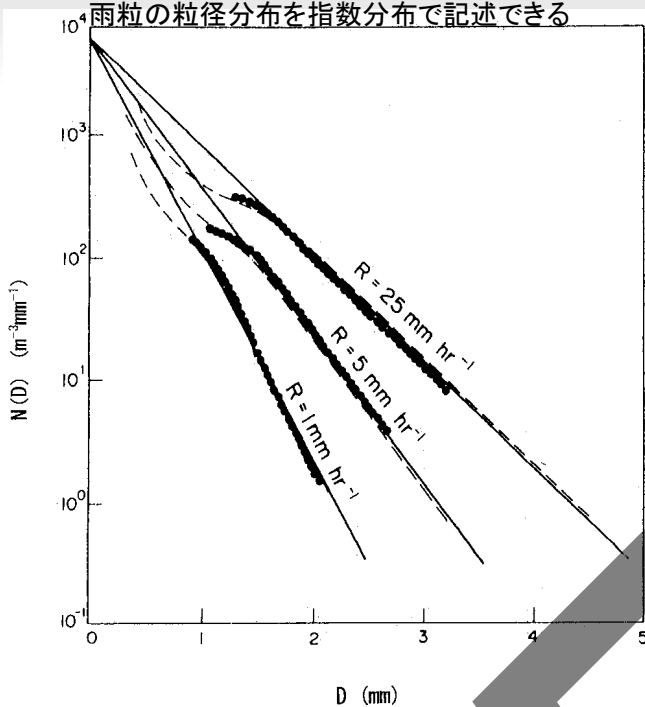
バルク法は、雲粒子を総体として記述

ビン法は、雲粒子をサイズ等によって細分化して記述

バルク法雲物理

Martial and Palmer (1948)

雨粒の粒径分布を指数分布で記述できる



- 粒径に関する分布関数の形を仮定
- 分布関数に表れるパラメータを質量や数濃度で表す。
- 例)

指数分布 $n_i(D_i) = N_{i0} \exp(-\lambda_i D_i)$

$$N_i = \frac{N_{0i}}{\lambda_i}$$

$$q_i = c_i \frac{N_{i0}}{\lambda_i^{d_i+1}} \Gamma(d_i + 1)$$

Ni: 数濃度
qi: 混合比

この2つの関係式から未知パラメータ N_{0i}, λ_i が求まる。

すなわち、質量と数濃度が決まれば、粒径分布が決まって、粒径分布が与えられれば、質量や数濃度の時間変化率がわかる。

Marshall and Palmer, 1948, The distribution of raindrops with size. J. Meteor. 5, 165-166.

放射過程における雲の光学特性

○ 短波放射

- 雲の光学特性 水雲: Slingo (1989), 氷雲: Ebert and Curry (1992)
- 雲の光学的厚さ $\tau = (a + b/r_e) \times CWP$
- 一次散乱アルベド $1 - \omega_0 = c + d \times r_e$ 観測に基づいた経験的なもの
- 非等方因子 $g = e + f \times r_e$

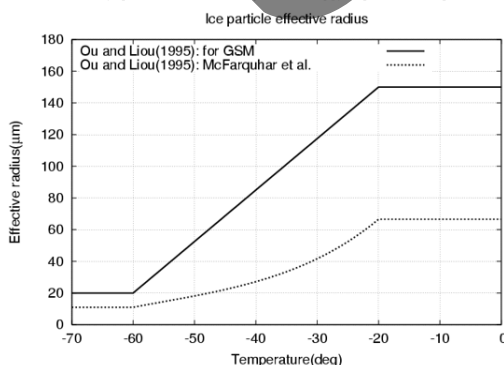
a, b, c, d, e, f : バンド毎に決まる定数 CWP: 雲水(氷)量 r_e : 雲粒の有効半径

- 雲のオーバーラップ(鉛直方向の重なり方)としてランダム オーバーラップを採用。

$$\text{有効半径 } r_e = \frac{\int_{r_{\min}}^{r_{\max}} \pi r^3 n(r) dr}{\int_{r_{\min}}^{r_{\max}} \pi r^2 n(r) dr}$$

$n(r)$ 粒径分布

雲粒などの多分散粒子系の粒子の平均サイズを表わす場合の代表的な値



雲水の有効半径は固定
雲氷の有効半径は温度のみに依存

凝結水の水と氷の割合も、温度のみで決定

雲を巡るモデルの課題 (1)

- 格子内不均一性の扱い
 - 多くの種類の雲を取り扱うPDFをどのように仮定するのか。また、そのパラメータをどのように決めるのか？
 - 層雲と積雲ではPDFの形状が異なることは観測からも知られている。
 - 最近もホットな話題のひとつ。
 - 積雲対流スキームからの雲量の寄与はどのように見積もるか？
 - 積雲対流スキームも陽には雲の生成を考慮しないことが多い。

雲を巡るモデルの課題 (2)

- 格子内不均一性と雲物理過程の融合
 - 雲物理過程は、もともとは格子内不均一性を考慮していない。
 - 融合のためには雲のオーバーラップに加え、雨、雪のオーバーラップを考慮する必要もあり、難しい。
 - 現在では、
 - 格子内不均一性を考慮しているモデルでは、雲の過程は簡略化されている(気象庁全球モデルなど)
 - 雲物理過程を導入しているモデルでは、格子内不均一性を雲物理過程では考慮せず、放射の雲では、別に不均一性(雲量)を見積もっている(気象庁メソモデルなど)。

雲を巡るモデルの課題 (3)

- 雲の光学特性の表現
 - 雲水・雲氷の有効半径の決め方は非常に荒っぽい。
 - 雲物理過程が精緻化されて、粒径分布がより精度よくなれば、その粒径分布を用いて有効半径を求める手法もありうるだろう。
- 初期値の問題
 - 雲を生成する水蒸気に関する観測は必ずしも多くなく、いくらモデルが精緻化されても、初期値に雲ができる種がなければ、雲は正しく表現できない。

参考文献

- 気象庁予報部, 2008: 数値予報課報告・別冊54号「気象庁非静力学モデルII」
- 気象庁予報部, 2012: 数値予報課報告・別冊58号「物理過程の改良にむけてI」
- 気象庁予報部, 2012: 平成24年度数値予報研修テキスト「数値予報の基礎知識と最新の数値予報システム」
- 大野久雄、伊佐正好, 1984: GMS観測に基づく総観スケール雲量と相対湿度の統計的關係. 天気, **31**, 493-495
- Marshall, J. S. and W. M. K. Palmer, 1948: The distribution of raindrops with size. J. Meteor., **5**, 165-166

数値予報課報告・別冊や数値予報研修テキスト(一部)は
<http://www.jma.go.jp/jma/kishou/books/> にあります。