

# 季節予報モデルについて

新保明彦（気象庁気候情報課）

## 1. はじめに

本講義では、気象庁において運用している数値予報モデルのうち、季節予報に利用されている「1か月予報モデル」、「3か月、暖・寒候期予報モデル」について、その概要と予報精度、短期予報モデルとの違いについて示し、季節予報において注目する大気現象について紹介する。

### 1.1 現象の時間、空間スケール

「季節予報」の対象とする大気現象の時間スケールは1週間～半年程度である。空間スケールとしては数千キロメートルを超える。これは、短期（週間）予報で対象としている大気現象の内、スケールの大きい現象の一つである移動性高低気圧の時間、空間スケールよりも更に大きく、地球規模のスケールのもので含まれる。具体的には、ロスビー波、熱帯季節内振動、エルニーニョ/ラニーニャに伴う大気の応答などが挙げられる。

### 1.2 気象庁における季節予報

ここで、気象庁で発表されている季節予報について簡単に紹介する。季節予報は、1週間、1か月間あるいは3か月間の平均的な気温や降水量、天候等の大まかな傾向を予報するもので、気温・降水量等を3つの階級（「低い(少ない)」「平年並」「高い(多い)」）に分け、それぞれの階級が現れる確率を数値で示す。1か月予報は週1回（毎週金曜日）、3か月予報は月1回（25日頃）、暖（寒）候期予報は毎年2（9）月25日頃に発表される。

第1.1節では、季節予報で対象とする時間、空間スケールについて示した。これについて現業予報的な見方から短期予報との違いを考えると、天気図の「描画範囲」と「時間の取り方（瞬間値か平均値か）」、「値（そのもの）か平年値からの偏差か」に現れていることがわかる。短期予報で用いられている実況図、予想図は、日本周辺またはアジア域を対象とし、予報対象の各時刻の「瞬間」について描画されてい

るのに対し、季節予報では、北半球全体または熱帯を対象とし、1週間または1か月平均（1か月予報）、1か月または3か月平均（3か月、暖・寒候期予報）されたものについて、実際の値そのものよりも、平年値からの偏差がわかるように描画している（図1）。

## 2. 季節予報モデル

### 2.1 歴史

気象庁において、短期予報のための数値予報モデル（短期予報モデル）の定常的な運用が開始されたのは、1956（昭和31）年6月である。これに対し、季節予報モデルの運用の歴史はとても浅い。季節予報モデルの現業化については、前田と小林（2007）にまとめられているのでこちらも参照していただきたい。

1か月予報モデルは1996（平成8）年3月に運用が開始された（高野 1996）。当時の解像度は水平約180km、鉛直に30層である。導入当初からアンサン

28( 2-29)DAY MEAN ( 6/14- 7/11)  
500hPa HEIGHT AND ANOMALY

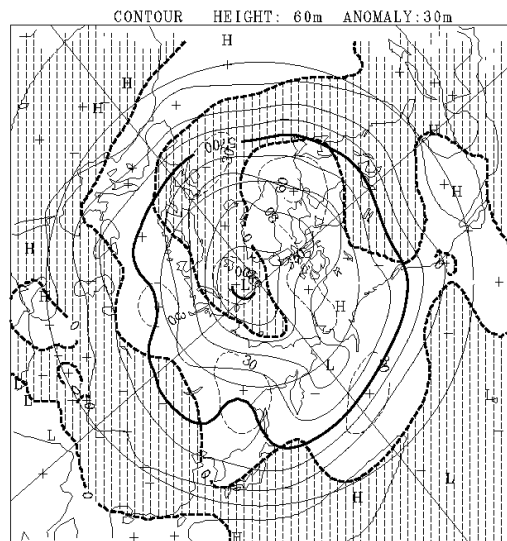


図1 月平均500hPa高度場の予測の例  
予報対象期間は2008年6月14日～7月13日（初期時刻は同6月12日12UTC、予報発表日は同6月13日）の1か月予報を対象。気象庁1か月予報資料より。

ブル手法（後述）が採用され、アンサンブルメンバ（以下、メンバ）の数は10であった。その後気象庁のスーパーコンピュータシステムの性能向上に伴い、解像度の向上とメンバ数の増強が行なわれ、2008（平成20）年7月現在、水平解像度約110km、鉛直60層、メンバ数50となっている。

3か月、暖・寒候期予報モデルは、1か月予報モデルの運用が開始されてから7年後の2003（平成15）年3月に運用が開始された。水平解像度は約180km、鉛直40層であり、メンバ数は31であった。現在では、水平、鉛直解像度は導入当初と同じであるが、メンバ数は51に増強されている。

なお、1か月予報モデル、3か月、暖・寒候期予報モデルともに、上述の解像度とメンバ数の変更に加え、数値予報モデルにおける物理過程や計算方法の改善が随時行われ、精度向上が図られている。

## 2.2 1か月予報モデルの概要

現在の1か月予報モデルの仕様を表1に示す。用いられている大気モデルは、基本的に短期予報で用いられている（高解像度）大気モデルの解像度を低くしたものである。また、初期値に微小な誤差を与えたものを初期値とし、複数の数値予報モデルを実行する「アンサンブル手法」を採用している。

## 2.3 3か月、暖・寒候期予報モデルの概要

3か月、暖・寒候期予報モデルの仕様を同じく表1に示す。全体的には前述の1か月予報モデルと同

様であるが、大気モデルの解像度は1か月予報モデルより更に低い。海面水温については、エルニーニョ/ラニーニャ現象の予測情報を取り入れるために工夫がされている。

## 2.4 ハインドキャストと予報モデルの精度

季節予報モデルでは、系統誤差（後述）の推定と予測精度の確認を目的として、過去にさかのぼって複数の年の事例を対象にした予報実験（ハインドキャストと呼ぶ）を行う。例えば現在の1か月予報モデルについて、過去20年に関する過去実験を行った結果から評価を行うと、月平均500hPa高度場の北半球におけるアノマリー相関は約0.4である。

## 2.5 短期予報モデルとの違い

本章では、主に短期予報モデルとの違いに注目し、季節予報モデルについて理解するために必要な事項について示す。

### (1) アンサンブル予報：予報の不確実性

予測対象時間が長くなると、初期値に含まれるわずかな誤差が成長してしまうことがよく知られている（バタフライ効果）。但しこの誤差の成長の度合いは、対象とする現象や、そのときの場の流れの状態などに依存する。このことは、一つの初期時刻における単一のモデルの予測結果が、いつも最善であるかどうかかわからないことを意味する。これらのことを考慮し、1か月予報モデル、3か月、暖・寒候期予

表1 季節予報モデルの仕様（2008（平成20）年7月現在）

	1か月予報モデル	3か月、暖・寒候期予報モデル
水平解像度*1	約110km	約180km
鉛直解像度	60層（最上層0.1hPa）	40層（最上層0.4hPa）
予報時間	34日	120日または210日
海面水温	予報開始時の偏差を持続。季節進行を考慮。	予報開始時の偏差の持続と、エルニーニョ監視海域*1の予測から統計的に求めた海面水温分布の組み合わせ。季節進行を考慮。
海氷分布	気候値。季節進行を考慮。	
土壌水分、土壌温度、積雪被服	予報する。初期値は解析値。	予報する。初期値は気候値。
アンサンブルメンバ数	50	51
実行頻度	週1回（2日に分けて実行）	月1回（2日に分けて実行）

\*（参考）短期予報モデルは、水平解像度20km、鉛直解像度60層（最上層0.1hPa）、予報時間は最大216時間（9日）。

\*1 エルニーニョ監視海域は、北緯5度～南緯5度、西経150度～西経90度。

報モデルでは、わずかに異なる初期値を用いて、複数の予報モデルを実行する「アンサンブル予報」を採用している。アンサンブル予報のメリットとしては、①数値予報モデルが完全に自然大気を再現できれば（完全モデルの仮定）、そのアンサンブル平均予報により、単一の予報（毎回ただ一つの数値予報の結果を利用する予報）よりも予報精度を向上させることができる、②複数のメンバから予報された、予報確率密度関数から、予報の対象とした現象の発生する確率を予報できる、ということが挙げられる。

アンサンブル予報は、週間予報モデルでも利用されている（例えば、経田と林 2007）。また、昨今ではメソ数値予報モデルにおいてもアンサンブル予報の有効性について研究、開発が進められている（斉藤ほか 2008）。

## (2) 解像度の違い：有用な予測を得るために

短期予報モデルと季節予報モデルの仕様のうち、異なるものの一つは、解像度と積分時間であろう。

積分時間については、短期予報モデルでは最長で9日（216時間）であるのに対し、1か月予報モデルは34日、3か月、暖・寒候期予報モデルは120日または210日である（表1）。積分時間が長くなればなるほど、必要な計算機資源は多くなる。加えて、アンサンブル予報を採用していることから、さらに必要な計算機資源は多くなる。

ここで、予測対象とする大気現象の時間、空間スケールについて考えてみる。季節予報（モデル）が対象とする大気現象は、短期予報（モデル）が対象とする大気現象に比べて時間、空間スケールが大きい。これにより、季節予報モデルで低解像度モデルを利用することによる精度の劣化は、短期予報モデルと比べると大きくはない（注意：劣化をしないわけではないので、高解像度化も精度向上には重要である）。

そこで、限られた計算機資源を有効に利用し、より有用な予測を得るために、気象庁では、1か月予報モデル、3か月、暖・寒候期予報モデルそれぞれについて、短期予報モデルよりも低解像度の数値予報モデルを利用し、メンバ数を増やすことによるメリットを得るようにしている。

## (3) 大気現象の予測可能性：初期値と境界値

数値予報モデルによる大気現象の予測については、予測の初期（予測開始から約2週間程度まで）は、「初期値」の精度が高いほど予測精度が高く、その後は、時間変化の時定数の長い海面水温や陸面の状態などの、大気からみた「境界値」の精度が高いほど精度が高いことがわかっている。短期予報モデルでは基本的に初期値の精度が重要であるが、3か月、暖・寒候期予報モデルでは境界値の精度、1か月予報モデルでは初期値と境界値の両方の精度の向上が重要である。

## (4) モデル平年値と系統誤差補正

数値予報モデルが完全モデルであれば、数値予報モデルを複数の年について、様々な初期時刻から実行したものについて平均した状態（モデル平年値）と解析値を同じ期間で平均した状態（解析平年値）では差は無いはずである。しかし、残念ながら現状の数値予報モデルは完全では無いので、モデル平年値と解析平年値の間には差が見られる。すなわち、数値予報モデルの示す大気の状態と現実の大気の状態の分布に「ずれ」が生じていることになり、このずれは、一般に予報対象時間が長くなるほど大きくなる。

短期予報モデル、週間予報モデルでは、予報対象時間が短いことから影響は小さい。しかし、現状の1か月予報モデル、3か月、暖・寒候期予報モデルにおいては、より有用な予報を提供するために、このモデル平年値と解析平年値の差を「系統誤差」として見積もり、500hPa高度、850hPa気温、海面気圧について系統誤差を予報結果から減じることで予報結果を補正（系統誤差補正）し、予報結果の利用、解釈をしやすくしている。季節予報では、基本的に平年値からの偏差を予報対象としているため、他の要素については、モデル平年値からの偏差を直接用いている。

季節予報モデルの開発においては、「系統誤差をできるだけ小さくする」ということが一つの課題になっており、最近の開発によって系統誤差は小さくなってきているが、更に努力が必要である。

## 3. 季節予報で注目する大気現象

本章では、季節予報で対象としている大気現象について、特に1か月予報の現業で注目している1つ

の現象について簡単に紹介し、季節予報モデルにおけるシミュレーションの結果について示す。なお、以下にあげる他にも、ブロッキング高気圧やオホーツク海高気圧、北極振動、エルニーニョ/ラニーニャ現象に対する大気の応答、定常ロスビー波といろいろなテレコネクションなど、季節予報にとって重要な現象は多く存在するが、紙面の関係上割愛させていただくことをご了承いただきたい。

### 3.1 マッデン・ジュリアン振動 (MJO)

熱帯には波数1で東進し、地球を30~60日程度(20~70日程度とする文献もある)で1周するような波が存在する。これは熱帯季節内振動と呼ばれ、その発見者の名前から、マッデン・ジュリアン振動(Madden Julian Oscillation)、略してMJOと呼ばれる。MJOは赤道上的外向き長波放射(OLR)や対流圏上層(例えば200hPa)の速度ポテンシャル、降水量の時間変化を描くと、対流の活発、不活発な領域の時間変化から東進の様子がわかる(図3)。熱帯で起こっている現象ではあるが、このMJOの位相と振幅、すなわちどこで対流が活発か不活発かということが、中緯度の天候に影響がある可能性があることが多くの研究で示されている。そのため、気象庁の季節予報、特に1か月予報で注目する現象の一つである(尾瀬 2003; 遠藤と原田 2008)。例えば遠藤と原田(2008)は、日本の地上気温とMJOの位相の位置に着目し、20~70日の時間スケールにおいて、インド洋付近(インドネシア付近)で対流が活発である時期に、特に西日本で高温(低温)の傾向がある

ことを示している。

### 3.2 MJOの予測

それでは、MJOの予測の例を見てみよう。図4はMJOの実況と1か月予報モデルによる予測の例である。(a)は実況、(b)は50メンバによるアンサンブル平均、(c)は50メンバのうちのある一つのメンバである。実況(a)を見ると、60°E付近に中心を持つ発散が強い領域が、約1か月で地球を半周している様子がわかる。このときの予報について見てみると、予報開始後1週間程度は、発散の強い領域の移動の速さと強さの度合いはアンサンブル平均(b)も一つのメンバ(c)を見ても実況に近い。しかし、その後

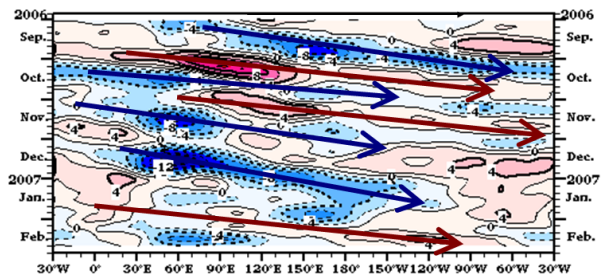


図3 赤道付近5日平均200hPa速度ポテンシャルの時間-経度断面図

南緯5度~北緯5度、3半旬移動平均した年平均偏差(1半旬は5日)。等値線の間隔は $2 \times 10^6 \text{m}^2/\text{s}$ 。青色領域は年平均より発散が強く(=対流が活発)、赤色領域は年平均より発散が弱い(=対流が不活発)ことを表す。年平均は1979年-2004年の期間の平均値。縦軸は時間で、2006年9月~2007年2月(6か月間)。上から下へ時間は経過する。図中矢印はMJOの位相の伝播を示す。気象庁HPの図に追記。

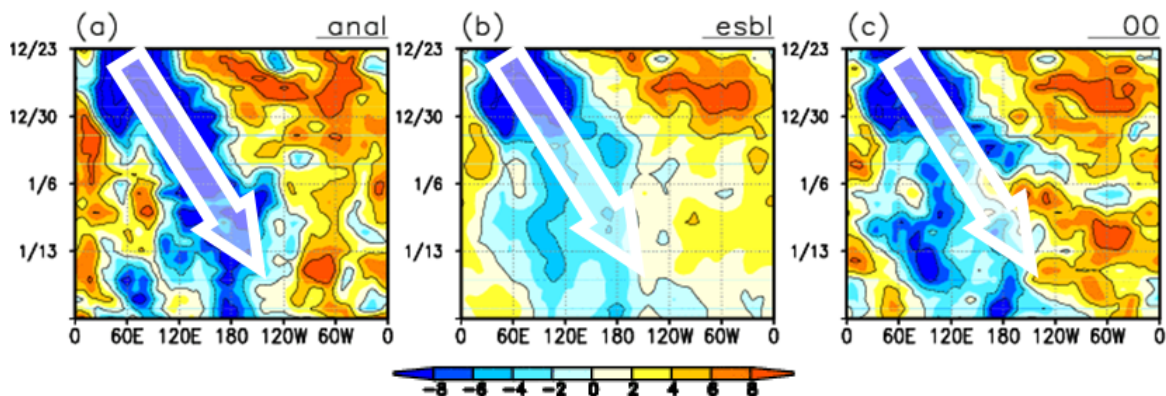


図4 MJOの実況と予測の例(1か月予報)

南緯5度~北緯5度で平均をとった200hPa速度ポテンシャルの年平均偏差の時間-経度断面図。(a)は実況、(b)は1か月予報の50メンバによるアンサンブル平均、(c)はある一つのメンバ。初期時刻は2006年12月21日12Z。等値線の間隔は $2 \times 10^6 \text{m}^2/\text{s}$ 。青色領域は年平均より発散が強く(=対流が活発)、赤色領域は年平均より発散が弱い(=対流が不活発)ことを表す(カラーバー参照)。年平均は、実況は1979年~2004年の期間の平均値、予報は1982年~2001年の期間の平均値。縦軸は時間で、2006年12月23日~2007年1月19日を表示(28日間)。上から下へ時間は経過する。図中白矢印は実況の対流活発領域の位相の動きを表す。縦軸のスケールが図3と異なるので注意。

はアンサンブル平均では発散の強さも実況と比べて弱く、また移動していないようにも見える。一つのメンバを見ると、発散の強さはアンサンブル平均よりは強いものの、その位相の移動の様子は実況と同じではない。同様に過去の事例について調べていくと、現在の1か月予報モデルでは、MJOの予測は、予報開始後数日程度についてはおおまかには予測できているのではないかと考えられる。しかしその後は、残念ながら予測ができていないとは言えない。MJOについては、そもそも予測ができるのかどうか、どのような数値予報モデルならば予測ができるのかということが研究者の中でも議論されている。例えば、Miura et al. (2007)は、非常に高い解像度を持つ、全球雲解像モデルを用いた実験において、MJOの詳細な再現に成功し、MJOに伴う雲集団が発生から1か月間先まで予測できる可能性を世界で初めて実証し、週間予報や季節予報の精度向上の可能性を示した。今後の研究の進展が期待される。

#### 4. これからの季節予報モデル：大気海洋結合モデルの利用に向けて

大気現象の予測可能性の議論でも示したように、季節予報モデルに精度の高い予測海面水温を与えることは、大気予測精度の向上に非常に重要である。また、大気現象の再現には、大気と海洋の相互作用も非常に重要である。

気象庁では、既にエルニーニョ現象の予測を目的として、大気海洋結合モデル（エルニーニョ予測モデル）を運用している（図5）。図6はエルニーニョ予測モデルによる、太平洋東部（エルニーニョ監視海域）の海面水温予測の精度について、予測のリードタイム（＝何か月前からの予測か）ごとに示したものである。エルニーニョ予測モデルは2008年2月に更新され、エルニーニョ監視海域（北緯5度～南緯5度、西経150度～西経90度）の海面水温の予測精度について改善が見られた。それに加えて、日本の天候に大きな影響があると言われている太平洋西部の海面水温の予測についても精度向上が計られた。同時に、大気現象の予測精度について調べると、特にリードタイムの長い予測について、現状の3か月、暖・寒候期予報モデルによる予測と同等か、精度が高い可能性が示唆されている。

これらのことから、気象庁では、季節予報、特に

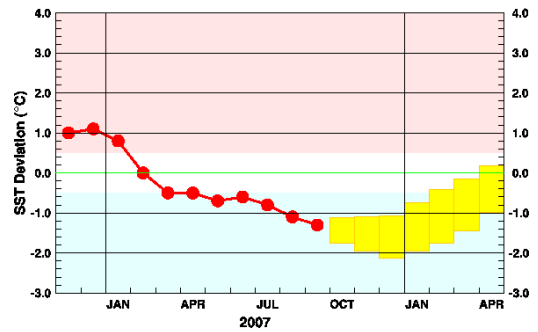


図5 エルニーニョ予測モデルによるエルニーニョ監視海域の予測の例

エルニーニョ監視海域（北緯5度～南緯5度、西経150度～西経90度）の海面水温の基準値との差の推移（赤折れ線グラフ）と、エルニーニョ予測モデルから得られた2007年10月から2008年4月の予測（ボックス）。各月のボックスは、海面水温の基準値との差が70%の確率で入る範囲を示す。（基準値はその年の前年までの30年間の各月の平均値）。エルニーニョ監視速報による。

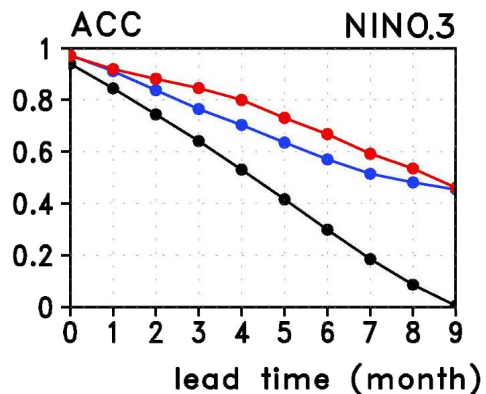


図6 エルニーニョ予測モデルによるエルニーニョ監視海域の予測精度

エルニーニョ監視海域の海面水温予測に関するアノマリー相関。横軸はリードタイム（月）。赤線は現在のエルニーニョ予測モデル、青線は2008年1月まで運用されていた、旧エルニーニョ予測モデル、黒線は持続予報（予報初期の海面水温偏差を持続）。アノマリー相関は0から1をとり、1に近いほど精度が高い。期間は1979年～2003年。

3か月、暖・寒候期予報に大気海洋結合モデルを利用することを目標として、開発を進めている。

#### 5. まとめ

本講義では、気象の数値シミュレーションの理解を深めることを目的として、気象庁における季節予報モデルを題材とし、主に短期予報モデルとの違い

と、季節予報モデルが対象とする大気現象の紹介を中心に話を進めた。

最後に、気象の数値シミュレーションを行う際に考えるべき事柄についてやや一般的に示したい。最も基本的なことは「予測対象とする現象の時間、空間スケール」をしっかり把握することであろう。ここから、「シミュレーションの方法」を考え、「対象とする大気現象」と「予測可能性」について理解を深め、シミュレーション結果を解釈することになると思われる。本講義では示さなかったが、更に実際の発表予報への利用となれば、シミュレーション結果の解釈とともに、どのような情報を提供するのか、更にその情報をどのように現実社会で利用するのかを考えることが重要になる。

気象庁における季節予報モデルの歴史でも示したように、季節予報モデルの運用と利用の歴史は短期予報モデルと比べて非常に浅い。今後の課題としては、数値予報モデル自身の改善を目指すと共に、その解釈と利用方法の高度化を進めることも重要であろう。

## 謝辞

気象庁気候情報課モデル開発関係官の皆様には、本稿作成において資料提供、並びに多くの助言を頂きました。ここに記して感謝いたします。

## 参考文献

- 遠藤洋和, 原田やよい, 2008: マッデン・ジュリアン振動と冬季の日本の天候及び循環場との関係. 天気, **55**, 159-171.
- 尾瀬智昭, 2003: 季節予報の対象としての熱帯マッデンジュリアン振動研究の紹介. 平成 15 年度季節予報研修テキスト, 気象庁気候・海洋気象部, 29-33.
- 経田正幸, 林久美, 2007: アンサンブル予報とその利用. 天気, **54**, 211-214.
- 斉藤和雄, 瀬古弘, 國井勝, 2008: WWRP 北京 2008 予報実証実験 / 研究開発プロジェクト (B08FDP/RDP) ワークショップ報告. 天気, **55**, 81-89.
- 高野清治, 1996: 新しい 1 か月予報. 天気, **43**, 39-44.
- 前田修平, 小林ちあき, 2007: 力学的長期予報の現実化. 天気, **54**, 15-18.

Miura, H., M. Satoh, T. Nasuno, A. T. Noda, and K. Oouchi, 2007: A Madden-Julian Oscillation event realistically simulated by a global cloud-resolving model. Science, **318**, 1763-1765.

以下に、ここでは直接引用していないが、季節予報（と季節予報モデル）を理解する上で参考になる文献を示す。

- 根本順吉, 朝倉正, 1980: 気候変化・長期予報. 気候と人間シリーズ, 朝倉書店, 202pp.
- 古川武彦, 酒井重典, 2004: アンサンブル予報 新しい中・長期予報と利用法. 東京堂出版, 284pp.

なお、気象庁ホームページ

<http://www.jma.go.jp/jma/index.html>

にも、季節予報モデルを含む気象庁の数値予報モデルの情報と、季節予報についての情報が掲載されているので参照していただきたい。