

4. 領域モデルによるアンサンブル予報

余田 成男*

1. はじめに

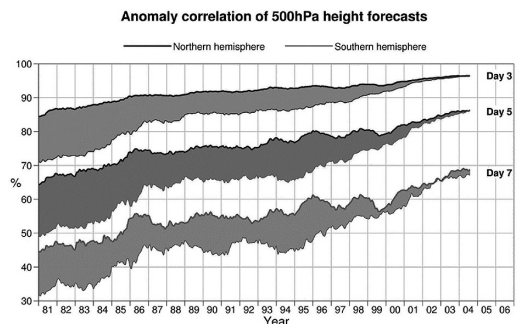
リチャードソンが手動計算で数値天気予報の端緒を開き (Richardson 1922), チャーニィらがプリンストン高等研究所のデジタルコンピュータ ENIAC を用いて順圧大気モデルによる24時間予報を成功 (Charney *et al.* 1950) させて以来, 数値天気予報技術は, コンピュータの飛躍的発展と相俟って進歩発展してきた. 今日では, 数値天気予報は20世紀において科学的技術的社会的に成功した最も重要な事業の一つといわれている. 日々の天気予報から週間, 1か月, 3か月, 暖候期・寒候期の予報まで, 数値天気予報モデルの時間積分による将来予測が基本となっている.

過去半世紀にわたり, コンピュータの演算処理速度が指数関数的に速くなり, 記憶装置の容量も同様に大きくなるとともに, 数値計算方法の高精度化や格子間隔以下の諸過程のパラメタリゼーション法の精緻化などが進み, 予報スキルは目に見えて良くなってきている (第1図). また, 人工衛星による全球的な観測データの活用やデータ同化技術の進展で初期値がより適切に与えられるようになってきたことも, 予報スキル向上の重要な要因となっている. 近年では, これらにより南半球と北半球の予報スキルの差はほとんどなくなっている.

予報誤差が生じる原因は, (1) 予報モデルが不完全で現実大気の変化を正しく表現できていないこと, (2) 大気のもつカオスの性質により初期値に含まれる誤差が増大すること, の二つである. 観測データから初期値を求める際に推定誤差は避けられないので, (2) より例え完全なモデルでも予測には限界があることになるが, これを予測可能性の問題という. Lorenz (1963) のカオス発見以来, 非線形力学系理論に基づく予測可能性の基礎的理論的研究が進展したが,

1990年代になると数値天気予報モデルの精緻化とコンピュータ資源の飛躍的充実により, 基礎理論を実際に現業の中・長期予報へ応用する段階となった. 原因 (1) の減少で予報誤差の変動が初期値誤差の増大に関連するとみなしうようになり, その認識に基づいて「アンサンブル予報」が実現し, 日々の天気予報に用いられるようになった (予測可能性研究の歴史的経緯については, 余田 (2002) や Yoden (2007) を参照のこと).

ここではまず, 全球モデルによるアンサンブル予報を概観し, その基本的概念と現業的な活用状況をまとめる. そして, ダイナミックダウンスケール技術としての「領域モデルによるアンサンブル予報」について, 研究の現状の一端を紹介する. 全球モデルアンサンブル予報との類似点・相違点に留意しつつ, 地域の詳細な気象の確率的予測がどのようにして可能となるか, 東南アジア域などでの実験例を交えながら, その可能性を考える.



第1図 北半球および南半球の予報スキルの変遷. THORPEX International Science Plan (Shapiro and Thorpe 2004) より. ECMWF による500hPa 高度場の3日, 5日, 7日予報の北半球温帯域 (上太線) および南半球温帯域 (下細線) でのアノマリー相関. 陰影部が北半球と南半球のスコアの差を示す.

* 京都大学大学院理学研究科.

© 2010 日本気象学会

2. 全球モデルによるアンサンブル予報：基本的概念のまとめ

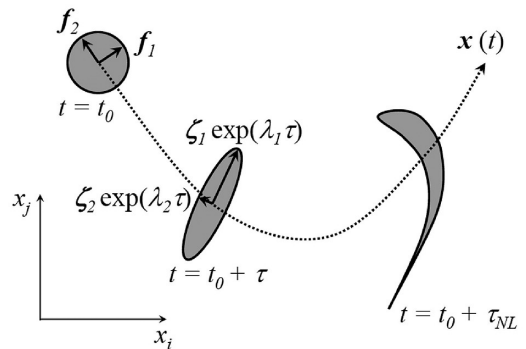
まず、完全モデルを仮定し、予報誤差が原因(2)だけであるとする。時間発展する系で、ほんのわずかな初期値の違いが時間とともに指数関数的に増大する場合、このような振舞いをカオスと呼んでいる。この指数を系の大域的な場に対して求めたのがリアプノフ指数であるが、それが正の値をとることがカオスの数学的定義となっている。二つの解の差を予報誤差と考えると、有限時間で予報誤差がある許容レベルを超えることになり、予測が不可能となる。一方、第2図に示すように、有限時間に対するリアプノフ指数を定義すると、それは初期時刻 $t=t_0$ からの状態 $x(t; t_0 < t < t_0 + \tau)$ に依存して変動する。これが予報誤差の時間変動をもたらす成分であるとする、接線型解析で得られる特異値は誤差成長率の指標となり、対応する特異ベクトルは急発達する誤差の空間パターンに関する情報を与える(詳細は、余田 2002; Yoden 2007, および、そこで引用した文献を参照のこと)。

有限時間リアプノフ安定性解析は、あくまで初期値誤差の接線型成長の理論である。誤差が大きくなると非線型性が重要となり、ランダム誤差の等確率密度面は楕円体ではなくなり(第2図で $t=t_0 + \tau_{NL}$ の段階)、さらに複雑な形状へとどんどん変化していく。この非線型段階も含めて予報誤差を予測するには、原理的にはその確率密度関数の時間発展を支配するリウヴィル方程式を解析すればよい(Ehrendorfer 1994a, b) のであるが、現実的には、巨大自由度系の数値天気予報モデルでの解析は不可能である。しかし、コンピュータ資源の充実した昨今では、存在確率の高い多くの初期値から時間積分を繰り返して、アンサンブル(=統計集団)の時間発展をもとに確率的な予測を行うことが可能になってきた。

とはいうものの、系の自由度が 10^7 オーダーの数値天気予報モデルで数十程度の初期値しか選べないとき、乱数を用いて初期時刻での確率密度関数のランダムサンプリングを行うモンテカルロ法も、やはり効率的でない。このような数値天気予報独特の制約の下で実現した確率的予測がアンサンブル予報である(高野 2002; Kalnay 2003; Palmer and Hagedorn 2006など)。カオス理論に基づいた適切な初期値摂動作成方法が提案され、1992年12月にはヨーロッパ中期予報センター(ECMWF)と米国環境予報センター(NCEP)で初めてアンサンブル予報が現業化され

た。気象庁では、1996年3月にまず1か月アンサンブル予報が現業化され、1999年には週間予報が、2003年には3か月・6か月の季節予報が現業化されて、基本的に全球モデルを用いた数値天気予報はすべてアンサンブル予報となっている。一般に、アンサンブル平均は単独の決定論的予報よりもスキルが高く、また、アンサンブルメンバーの相空間内での広がり(スプレッド)は予報精度を見積もる指標として活用されている。

2008年現在、気象庁の週間(9日間)予報は、毎日51メンバーのアンサンブル予報で行われているが、少ないアンサンブルメンバー数でできるだけ効率良くかつ精度良く誤差の広がりを推定するには工夫が必要である。第2図に示したような初期値誤差の接線型成長段階が数日はあると考えられる(第3図上段を参照)ので、特異値解析により急激に成長する前方特異ベクトルを求めて、初期値の摂動とするのが、ECMWFで開発された特異ベクトル(Singular Vector; SV)法である(Mureau *et al.* 1993)。他方、NCEPでは



第2図 非線型力学系における初期値誤差の増大を示す相空間内の概念図(Yoden 2007)。ある時刻 $t=t_0$ において、時間発展する基準解 $x(t)$ にランダムな微小誤差が与えられたとすると、誤差を含む状態の確率密度関数の等値面は n 次元相空間内の球で与えられる。微小な誤差なので、この球は $t=t_0 + \tau$ で楕円体に変形するが、その形状は接線型系の特異値解析により決定できて、楕円体の主軸の長さは特異値 λ_n 、軸の向きは後方特異ベクトル ζ_n で与えられる。また、前方特異ベクトル f_n は、時間 τ 後に軸の向きとなる単位ベクトルである。誤差が大きくなり有限振幅になると、非線型効果により等確率密度面は楕円体ではなくなり($t=t_0 + \tau_{NL}$)、さらに複雑な形状になっていく。

成長モード育成 (Breeding of Growing Mode ; BGM) 法が開発された (Toth and Kalnay 1993). これは、予報解析サイクルで発達率の大きな摂動モードの上位何組かを再規格化して育成し続ける方法である。これらの方法は、現業アンサンブル予報において少ないメンバー数でも有効であることが確認されているが、改良の余地も多く残されている。また、最近、アンサンブルカルマンフィルターを用いた新たな発想の方法が提案され、カナダ気象サービス (CMS) で初めて現業化されている。

今日、世界の現業予報センターにおいて、アンサンブル予報は、全球モデルを用いた中期予報の標準的な手法となっている。これは、予報モデルの不完全さ(1)は小さいという暗黙の仮定のもとに、上述のようなアンサンブル手法により、初期値に含まれる誤差の増大(2)を評価・低減しようとするものである。しかし、前者の仮定は十分に妥当なわけではなく、予報モデルの不完全性の影響を適切に取り扱えれば、さらに有効なアンサンブル予報も可能である。実際、次段落以降で述べるように、マルチモデルアンサンブル手法などさまざまな試みが為されている。また、入手した観測データから初期値自体をより正確に見積もることも重要であり、4次元変分法や各種カルマンフィルターなど先端的データ同化手法の開発が進められている (Kalnay 2003)。さらに、アンサンブル予報で得られた確率的情報を高度利用することも重要である。アンサンブル平均・スプレッドだけでなく、誤差の確率密度分布をよりよく推定できれば、それを社会的経済的環境的な判断の支援に活用できる (WMO 2005)。

モデルの不完全性に起因する誤差を減少させるアンサンブル手法のひとつに、マルチパラメータバリューアンサンブルがある。格子間隔以下の空間規模の過程のパラメタリゼーションスキームでは、パラメータの値が経験則に基づいて設定されている場合が多く、その値を標準値から(意味のある範囲で)変えた場合にどうなるかをアンサンブル実験で調べることができる。初期値アンサンブルと組み合わせれば、マルチパラメータバリューのグランドアンサンブルとなる。数値天気予報ではないが、世界最大規模のマルチパラメータバリューグランドアンサンブル実験は、climateprediction.netによる地球温暖化予測の不確定性を探る一般参加型実験である (Stainforth *et al.* 2005)。このプロジェクトのホームページ ([http://](http://www.climateprediction.net/index.php)

www.climateprediction.net/index.php) の情報によると、2009年1月1日現在、ハドレーセンターの気候モデルの1バージョンについて279,014ランの実行結果が報告されている。

モデルの不完全さには様々な原因がありうる。パラメータ値の不確かさ以外にも、パラメタリゼーションスキームそのものの完成度、含める物理過程、支配方程式の離散化方法、計算領域(全球モデルの場合にはモデル上端の高度)、計算格子間隔など、様々ある。これらの要素に起因するモデルの不完全性を評価する理論的な方法はなく、実用本位に、いくつかの数値天気予報モデルを用いたマルチモデルアンサンブル実験によって評価されている。季節予報の時間スケールでの実験プロジェクト例として、PROVOST (Prediction Of climate Variations On Seasonal to interannual Time-scales ; Palmer *et al.* 2000) や DEMETER (Development of a European Multimodel Ensemble system for seasonal to inTERannual prediction ; Palmer *et al.* 2004) などがある。これらの結果によると、マルチモデルのグランドアンサンブル平均のほうが個々のモデルのアンサンブル平均よりも予報スキルがある。結論として、マルチモデルグランドアンサンブルは、季節内変動から年々変動の時間スケールでは実行可能な実利本位の有効手法である、といえる。当然ながら、各モデルの性能が十分に高いという前提のもとでの結論ではあるが。

また、週間予報の時間スケールでもマルチモデルグランドアンサンブルで予報スキルが向上するという結果が得られている(例えば、Matsueda *et al.* 2006)。アンサンブルサイズの増加とともに、マルチモデルであることの重要性が指摘されている。しかし、マルチモデルグランドアンサンブルが個々のモデルアンサンブルより常に優っているわけではなく、現状でのメリットは「最悪の予報を避ける」(Matsueda *et al.* 2007) という状況である。

このような現業の数値天気予報モデルを用いたマルチモデルグランドアンサンブル予報は、過去何十年かの再予報実験 (Hamill *et al.* 2006) をそれぞれ行うことにより、予報スキル向上に関する客観的な成績評価が可能となる。結局、そのようなマルチモデルの現業システムを構築するかどうかは、予報結果データの交換に関わる通信コストなども含めて総合的に判断すべき「最適化」問題といえる。

3. アンサンブル予報の領域モデルへの応用

前節でみたように、全球モデルを用いた中・長期予報では、(1)モデルの不完全性、や(2)初期値誤差の増大、に対処する技術として、各種アンサンブル予報が現実化されてきた。しかし、領域モデルを用いた高い空間分解能の短時間予報に対して、このようなアンサンブル予報技術を応用することは必ずしも単純なことではない。

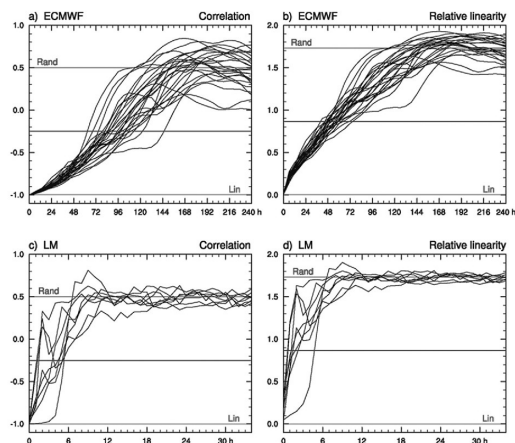
まず、(2)に関わるカオスの性質をもたらす大気的不安定現象が両モデルの対象とする時間・空間スケールで異なっている。全球モデルでは傾圧不安定が誤差成長に支配的であるのに対して、領域モデル、特に雲解像モデルと呼ばれるような高分解能モデルでは、対流不安定（時には水蒸気凝結を伴う湿潤対流）など、より発達率の大きな現象が重要となる（例えば、Kalnay 2003）。これらの不安定擾乱が成長しどのような飽和状態に至るかを擾乱のエネルギーで量的に評価すると、対流不安定成分は急激に発達するがすぐに飽和してしまい、傾圧不安定成分のような擾乱エネルギーとはならない。Hohenegger and Schär (2007) は全球モデルと雲解像領域モデルを用いてこのような違いを比較したが、誤差が倍になる時間はそれぞれ40時間、4時間と一桁の違いがあるのに対して、接線型性の妥当な時間スケールは、54時間、1.5時間とさらに大きな違いとなっている（第3図）。これは、雲解像モデルでは、第2図で示したような接線型解析が有効な段階がごく短時間でしかないことを示しており、雲解像モデルで1日積分を行うことは、全球モデルで10日積分を行うことと大きく異なる作業状況となる。

また、領域モデルによる予報は、基本的に全球モデル予報を境界条件として定期的に取り込んでいくネスト型ダウンスケール予報であり、外力項が時間に依存しない自励系と考えられる全球モデルと対照的なものとなっている（Warner *et al.* 1997）。この意味でも、全球モデルでのアンサンブル予報の手法のうち自励系のカオス理論に基づいた部分は、天下り的には使えないことになる。

全球モデルによる中・長期予報では、(1)のモデルの不完全さを補うための各種アンサンブル手法が開発されてきた。基本的に実行可能な実利本位の手法であるが、同様の発想で、領域モデルを用いた短期予報でもアンサンブル予報の試みが各方面で始まっている。初期条件境界条件として領域モデルに取り込む全球モデル予報をマルチモデル（アンサンブル）予報にする

マルチ解析アンサンブル予報、解析は同じで複数の領域モデルを使うマルチモデルアンサンブル予報、あるいは、これらの組合せなどである（Yoden 2007）。これらのメリットとしては、アンサンブル平均が単独予報よりも統計的に精度がよいことと、強風や豪雨などの顕著現象の見逃しが減り予測に信頼度情報が付け加わることの二つがある（斉藤 2008）。

領域モデルアンサンブル予報に関する最近の国際的な取り組みとして、北京オリンピックに合わせたWWRP北京2008研究開発プロジェクトがある。気象庁気象研究所を含む各国気象機関が参加するプロジェクトで、水平解像度15kmの領域モデルによるアンサンブル予報の比較実験が行われ、技術情報の共有が図られた。気象研究所では、初期値摂動作成手法として週間アンサンブル予報のダウンスケール、全球ターゲットSV法、メソSV法、メソBGM法、局所アンサンブル変換カルマンフィルターの5つの手法をテストするとともに、領域モデル側面境界への摂動付加の影響について調査している（斉藤ほか 2008）。また、2007年度より京都大学が中心となり、気象研究所、インドネシア・バンドン工科大学などとともに、科学技術振興調整費の「アジア科学技術協力の戦略的推進：自然災害への対応に資する防災科学技術分野の研究開



第3図 全球モデル（ECMWF；上）と領域モデル（LM；下）における摂動（正負の符号をもつ双子ペア）の時間発展の様子（Hohenegger and Schär 2007）。(a) (c) は場の相関係数、(b) (d) は相対的な線型性。横軸が全予報期間で全球モデルと領域モデルで一オーダー異なることに注意。詳細は、原文を参照のこと。

発」課題枠において、「東南アジア地域の気象災害軽減国際共同研究」を推進している(余田ほか 2008; <http://www-mete.kugi.kyoto-u.ac.jp/project/MEXT/>)。東南アジア各国の若手研究者との協働による、気象災害の軽減に向けた3年間の国際共同研究であり、高分解能の領域気象モデルを用いた熱帯域気象のダウンスケール予報実験が中心課題の一つとなっている。

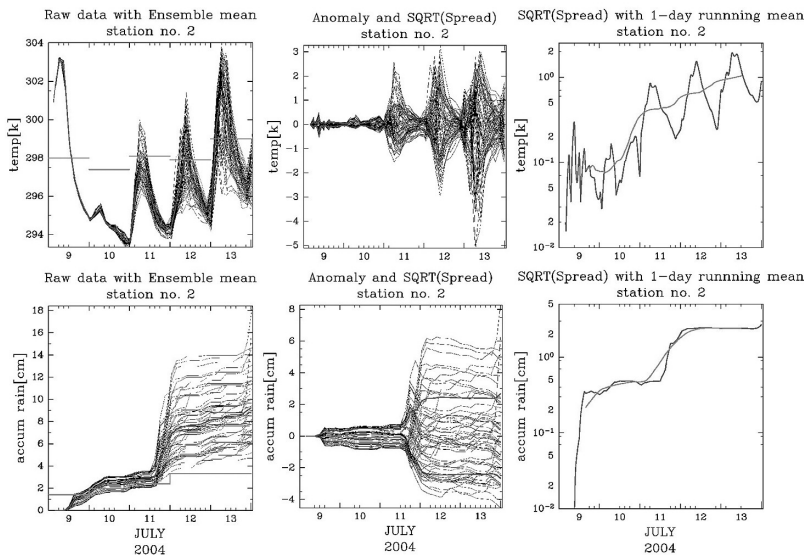
そこで行っている領域モデルを用いたアンサンブル予報実験の初期結果(Yoden *et al.* 2007, 2008)の一端を紹介しよう。インドシナ半島でのダウンスケール予報実験(Thalongsengchanh *et al.* 2006, 2008)の発展として、その対象地域での(2)初期値誤差の増大の特徴を調べた。簡単なLagged (Average) Forecasting法で1分毎に初期時刻を変えた61メンバーで時間発展を行ったところ、誤差成長の日変化が顕著であることがわかった(第4図)。領域モデルであるがゆえに短波放射の日変化が大きく、外部強制が周期的に変化する非自励系となっている。一日移動平均をとるとスプレッドが指数関数的に増大する様子が抽出でき、その地域や流れ場に対する依存性を見出すことができた。また、水蒸気場のスパゲッティ図を描くと、小規模な雲集団の出現場所がやがてメンバー毎にラン

ダムになっていく地域や状況があることがわかった。このような全球アンサンブル予報で定着した表現図法・解析法の領域モデルへの応用は、今後の課題の一つである。また、この初期摂動作成法では類似したパターンしかできず、効率的な方法ではないので、高度な初期摂動作成法を開発し導入することも我々の重要な課題である。

4. おわりに

THORPEX(観測システム研究・予測可能性実験計画; Shapiro and Thorpe 2004; 余田 2007)の重要なテーマの一つにアンサンブル予報で得られた確率的情報の高度利用がある。領域モデルが扱う現象には、突風や豪雨など、その生起が非正規的分布(風速変動に対するワイブル分布、降水量に対するガンマ分布など、西澤(2005)を参照のこと)の裾野の特性に依存しているものが多く、できるだけ多くのアンサンブル予報データから信頼できる出現頻度情報を得ることが肝要である。「観測システム」、「アンサンブル予報システム」、そして、それらから得られる莫大量データを社会的経済的環境的な判断に繋げる「判断支援システム」を加えた「データ管理システム」を構築することがTHORPEXの目標である(WMO 2005; Yoden 2007, Fig.9)。

インドシナ半島でのダウンスケール予報実験のスパゲッティ図でも垣間見えるように、大気現象の階層的構造のなかでダウンスケールしていくと、どこかで確率的な過程が基本となるスケールに行き当たるはずである。すなわち、領域モデルを高分解能化していくと、やがて決定論的な予測の限界に遭遇するはずである。集中豪雨は決定論的に予測できるか? 竜巻発生は決定論的に予測できるか? 逆に、これらの現象が過去の事例の再現実験でどこまで「正確」に再現できるのか? これらの問いに対する答えを求めていくうえで、ダウンスケールアンサンブル予



第4図 インドシナ半島でのダウンスケール予報実験で得られたブリューム図の一例。2004年7月9日00UTC~14日00UTCにおけるラオスの地上観測点#2での地上気温(上)と積算雨量(下)。(左)生データ、(中)アンマリーとスプレッド、(右)スプレッドの一日移動平均値。

報(再現)実験が基本的なアプローチとなるであろう。

決定論的過程から確率論的過程への移行の流体力学的なアナロジーとして、決定論的な流体方程式のなかでの偶然的な乱流現象の発生(巽 1995)を考えることができる。カオスの予測不可能性は、一定の時間尺度を越えた長時間にわたっての不可能性をいうが、この時間尺度は少数自由度系では感知できる程度に長く、一般に系の自由度が増すとともに減少する。そして、乱流のような極めて多自由度の系では、時間尺度は感知できない程度に短くなり、ほとんどすべての時刻において予測不可能になる。これが一般的に偶然的といわれる時間変化の属性である。

このような認識を大気現象に当てはめると、確率論的過程が基本となる現象のスケールでは、もはや決定論的予測は望むべくもない。その段階では確率論的なポテンシャル予報が基本となり、確率情報を得る手段としてのアンサンブル予報が今後の重要な研究課題の一つとなるであろう。また、数値モデルの空間解像度がこのような移行スケールに至ったと考える予報モデルの構築もすでに始まっている。ストカスティックパラメタリゼーション(Palmer 2001)など確率過程モデルを含む予報システムがそれである。

大気現象の階層的構造に依存した決定論的な振舞い、あるいは確率論的な振舞いをどう認識し、数値モデル化すれば良いのか? また、そのような理解を深めるために、領域モデルによるアンサンブル予報実験をどのようにやれば良いのか? これらの問いは、単に予報精度を上げるための技術的な問題に留まらず、超多自由度非線型システムとしての大気の有り様の根源的な部分に切り込む理学的な研究題材となっている。これは荒川(1996)が「パラメタリゼーションとは、小規模なプロセスの統計的な効果を、大規模なプロセスと関係づけ、方式化するという」と述べている題材であり、それは「言うは易しくても、実は大変な問題で、数値モデリング特有の技術的問題というよりは、異なったスケール間の相互作用の表現という、気象学にとって極めて基本的な問題の一つ」と考へるべき問題である。

参 考 文 献

- 荒川昭夫, 1996: 大気の数値モデリングの過去, 現在, 将来に関する個人的見解. 気象研究ノート, (186), 33-45.
- Charney, J. G., R. Fjörtoft and J. von Neumann, 1950: Numerical integration of the barotropic vorticity equation. *Tellus*, 2, 237-254.
- Ehrendorfer, M., 1994a, b: The Liouville equation and its potential usefulness for the prediction of forecast skill. Part I: Theory, Part II: Applications. *Mon. Wea. Rev.*, 122, 703-713, 714-728.
- Hamill, T. M., J. S. Whitaker and S. L. Mullen, 2006: Reforecasts. An important dataset for improving weather predictions. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 87, 33-46.
- Hohenegger, C. and C. Schär, 2007: Atmospheric predictability at synoptic versus cloud-resolving scales. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 88, 1783-1793.
- Kalnay, E., 2003: Atmospheric Modeling, Data Assimilation and Predictability. Cambridge Univ. Press, 341 pp.
- Lorenz, E. N., 1963: Deterministic nonperiodic flow. *J. Atmos. Sci.*, 20, 130-141.
- Matsueda, M., M. Kyouda, H. L. Tanaka and T. Tsuyuki, 2006: Multi-center grand ensemble using three operational ensemble forecasts. *SOLA*, 2, 33-36.
- Matsueda, M., M. Kyouda, H. L. Tanaka and T. Tsuyuki, 2007: Daily forecast skill of multi-center grand ensemble. *SOLA*, 3, 29-32.
- Mureau R., F. Molteni and T. N. Palmer, 1993: Ensemble prediction using dynamically conditioned perturbations. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 119, 299-323.
- 西澤誠也, 2005: 大気変動にみられるトレンドに関する確率統計理論および数値実験. 京都大学学位論文, 110pp.
- Palmer, T. N., 2001: A nonlinear dynamical perspective on model error: A proposal for non-local stochastic-dynamic parametrization in weather and climate prediction models. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 127, 279-304.
- Palmer, T. and R. Hagedorn (Eds.), 2006: Predictability of Weather and Climate. Cambridge Univ. Press, 702pp.
- Palmer, T. N., C. Brankovic and D. S. Richardson, 2000: A probability and decision-model analysis of PROVOST seasonal multi-model ensemble integrations. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 126, 2013-2033.
- Palmer, T. N. *et al.*, 2004: Development of a European multimodel ensemble system for seasonal-to-interannual prediction (DEMETER). *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 85, 853-872.
- Richardson, L. F., 1922: Weather Prediction by Numerical Process. Cambridge Univ. Press, 236pp.
- 齊藤和雄, 2008: メソアンサンブル. 日本における顕著現象の予測可能性研究, 天気, 55, 123.

- 斉藤和雄, 国井 勝, 原 昌弘, 瀬古 弘, 2008 : WWRP 北京オリンピック2008予報実証/研究開発プロジェクト. 日本気象学会2008年度秋季大会予稿集, 271-273.
- Shapiro, M. A. and A. J. Thorpe, 2004 : THORPEX International Science Plan. Version 3. 2 November 2004. WMO/TD-No.1246, WWRP/THORPEX No.2, 51pp.
- Stainforth, D. A. *et al.*, 2005 : Uncertainty in predictions of the climate response to rising levels of greenhouse gases. *Nature*, **433**, 403-406.
- 高野清治 (編), 2002 : アンサンブル予報. 気象研究ノート, (201), 120pp.
- 巽 友正, 1995 : 連続体の力学. 岩波基礎物理シリーズ2, 334pp.
- Thalongsengchanh, P., T. W. Hadi, M. Niwano, S. Otsuka and S. Yoden, 2006 : An experimental numerical weather prediction in Indochina region with a meso-scale model. *Ann. Disaster Prev. Res. Inst. Kyoto Univ.*, **49B**, 459-465.
- Thalongsengchanh, P., S. Otsuka and S. Yoden, 2008 : A downscale experiment on numerical weather prediction in Indochina region with a mesoscale model. *Ann. Disaster Prev. Res. Inst. Kyoto Univ.*, **51B**, 457-463.
- Toth, Z. and E. Kalnay, 1993 : Ensemble forecasting at NMC : The generation of perturbations. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, **74**, 2317-2330.
- Warner, T. T., R. A. Peterson and R. E. Treadon, 1997 : A tutorial on lateral boundary conditions as a basic and potentially serious limitation to regional numerical weather prediction. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, **78**, 2599-2617.
- WMO, 2005 : THORPEX : A World Weather Research Program. WMO-No.978, 14pp.
- 余田成男, 2002 : 数値天気予報と予測可能性 —歴史的経緯—. 気象研究ノート, (201), 1-20.
- Yoden, S., 2007 : Atmospheric predictability. *J. Meteor. Soc. Japan*, **85B**, 77-102.
- 余田成男, 2007 : THORPEX (観測システム研究・予測可能性実験計画). *天気*, **54**, 156-162.
- Yoden, S., S. Otsuka, T. W. Hadi and P. Thalongsengchanh, 2007 : Short-range downscaling hindcasts in South-East Asia with a meso-scale model. Oral presentation in MS016 Downscaling to local and regional scales. IUGG XXIV in Perugia, Italy.
- Yoden, S., S. Otsuka, P. Thalongsengchanh and T. W. Hadi, 2008 : An experiment on mesoscale ensemble forecasts with a lagged average method over Indochina region. Invited oral presentation in AS05 Predictability of weather and climate : Theory and Methodology. AOGS 5th Annual Meeting in Busan, Korea.
- 余田成男, 斉藤和雄, 竹見哲也, 西澤誠也, 2008 : 東南アジア地域の気象災害軽減に資する国際共同研究の新展開. *天気*, **55**, 705-708.