

## 気象力学・気候力学・地球流体力学とコンピュータ

余田 成男

京都大学 大学院理学研究科

## 1. はじめに

1973年に京都大学理学部に入学して以来、学生、院生、奨励研究員、助手、助教授、教授とずっと理学部地球物理学教室そして理学研究科地球惑星科学専攻にお世話になってきました。この間、1985年10月~87年9月には日本学術振興会海外特別研究員として、また、1994年10月~95年7月には文部省長期在外研究員として、米国ワシントン大学大気科学科のJames R. Holton教授のもとで成層圏を中心とした気象力学の研究を行うことが出来ました。合計3年間近く在職のまま京都を離れて研究に専念する機会を与えていただきましたが、それは本当に有難いことであったと、恩師の廣田 勇先生、諸先輩方、関係者の皆様に心より感謝申し上げます。

修士論文内容を中心とした最初の論文(Yoden 1979)を出版してからこれまで40年間にわたり合計118編の査読有原著論文<sup>2</sup>を公表してきました(図1)。講演では、第I期から第III期に分けてお話しさせていただきましたが、第I期の論文は基本的に単著が多く、研究がもっぱら個人で閉じていた時期にあたります。1983年8月に助手に採用されて以来、これまでに博士学位論文を直接指導した博士課程の学生<sup>3</sup>は14名、主査をした論文博士3名、直接指導した修士課程学生は30名となりました。第II期の論文はこれらの学生さん達との共著論文が中心とな

っています。さらに第III期に入るあたりから、発表論文の共著者も大学院生からポスドク研究員に、日本人学生・研究員から留学生・外国人研究員へと徐々に変遷してきました。一点観測ではありますが、大学の研究教育現場の近年の変容を10年オーダーの長期変動として記録しているのかもしれない。(ちなみに、1994年には大学院重点化で

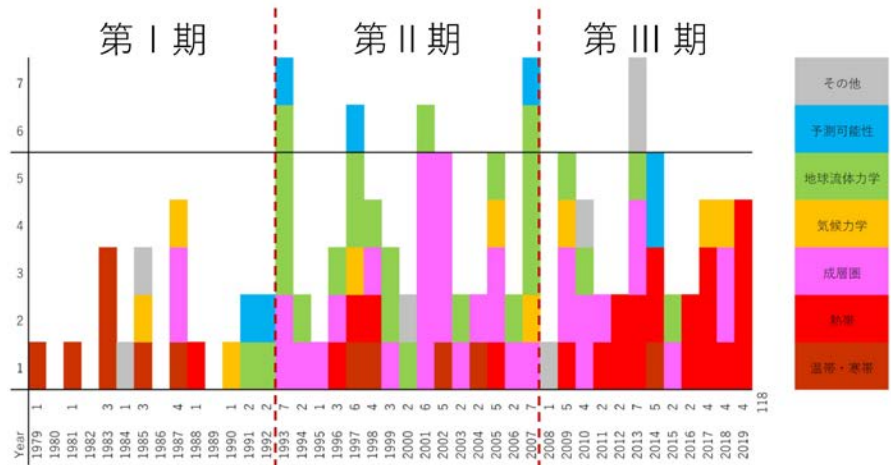


図1 査読有原著論文118編(英文112編, 和文6編)の年別発表状況. 細分化した分野ごとに色分けしている. 温帯・寒帯(茶色), 熱帯(赤), 成層圏(桃色), 及び予測可能性(水色)は気象力学分野. 気候力学と地球流体力学の各分野は黄色と緑で表示.

<sup>1</sup> 知球会総務の諏訪 浩さんより原稿依頼と督促をもらいながら、完成が今日になってしまいました。誠に申し訳ありませんでした。本稿を読んでいただくことなく亡くなられたことは、慙愧の極みです。諏訪さんのご冥福をお祈りします。

<sup>2</sup> この度、気象学研究室のWebページなかに私の専用ページURL(<http://www-mete.kugi.kyoto-u.ac.jp/emeritus-professor-yoden/>)を用意していただきましたが、論文・出版物の全リストは「履歴書・論文目録」ページの「論文目録」欄に分類して収録しております。

<sup>3</sup> 皆さんの名前と研究題目は、私の新Webページのなかの「教育」ページ「研究指導」欄にまとめています。また、海外および国内からの受入研究者(各々、のべ39名と12名)は、「研究」ページ「研究交流活動」欄に一覧表示しています。

地球惑星科学専攻が発足し、2004年には国立大学の法人化が行われております。)

これらの発表論文を本講演題目の3分野「気象力学」「気候力学」「地球流体力学」の何れかに分類し、一番多い気象力学分野は対象領域や課題で「温帯・寒帯（中・高緯度）」「熱帯（低緯度）」「成層圏」「予測可能性」に細分化しています。本稿の3~5節では、およそ年代順に第I期~第III期に分け、さらに分野ごとの小節に分けて研究成果のハイライトを述べさせていただきます。また、「寄り道」をして「研究基盤環境としてのコンピュータ」と「数値モデルの階層性」の話を書かせていただきましたが、これらはこの半世紀ちかくにわたる「計算科学」を基盤とした私の研究教育活動を貫く基本的認識であり、次の第2節でまとめさせていただきます。さらに、今世紀に入ってから力を入れてきた「国際学术交流」についても第6節に書き留めておきます。そしてこの講演要旨を定年退職記念のまとめのひとつとさせていただきます。これまでの研究成果の概要は2022年5月の気象学会藤原賞受賞記念講演および2022年9月の日本流体力学会年会特別講演(各学会機関誌の報告記事は、余田 2022, 2023b)と重なるところが多くありますが、どうぞご寛容のほどよろしくお願いいたします。

## 2. 計算科学の黎明期・大発展期に巡り合わせて

### 2.1 研究基盤環境としてのコンピュータ

地球科学は他の学問分野と同様に、2つの技術革新と相まってこの半世紀余り飛躍的に発展してきました。その1つは観測やデータ記録に関わるエレクトロニクス技術であり、もう1つはコンピュータ技術の進歩です。図2に示すように、1940年代に最初の電子計算機Electronic Numerical Integrator And Computer(ENIAC)が誕生して以来、これまで半世紀以上にわたり世界最先端のコンピュータの演算処理速度はほぼ指数関数的に向上してきました。

私が1976年に気象学研究室で学部課題研究を履修した時に初めて使ったのは、研究室にあったHITAC-10ミニコンピュータでした。入力には紙テープ(進行方向に直交してあけた8個の孔の有無で1と0の信号を記録する)、外部記憶装置は磁気ドラムで、FORTRANが使えました。1977年に大学院に入ると大型計算機センターのFACOM M190が使えて、入力はパンチカードでした。やがて300baudsの音響カプラで繋ぐタイムシェアリングシステム(TSS)が入り、研究室からも内線電話でコンピュータが使えるようになりました。当時の計算機環境は、今日のノートパソコン(図2の水平点線)よりもはるかに低性能のコンピュータ一台か二台を大型計算機センターで管理運用し、何百人で共用するという状況でした。

その頃は「計算科学」や「非線型科学」の黎明期にあたり、各時代の最高性能コンピュータを駆使して新たな学問を切り開いていくという状況でした。従来は、非線型な流体力学(気象力学)の支配方程

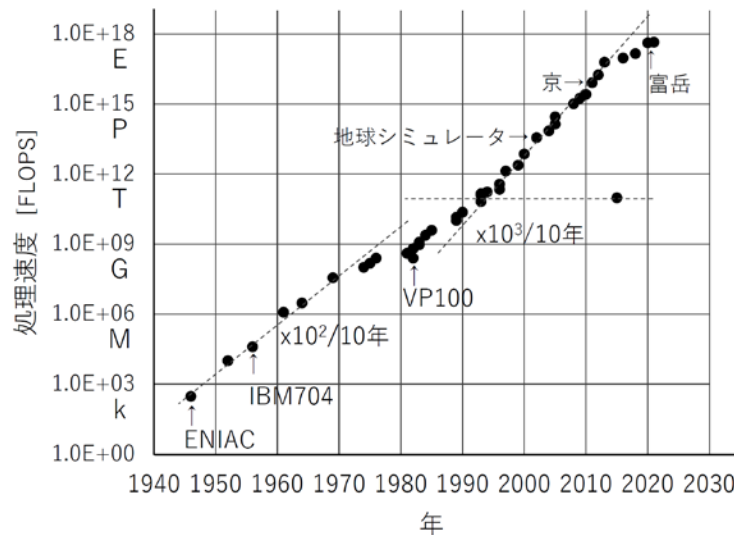


図2 世界最先端計算機の処理速度向上の歴史(余田 2023b). 処理速度はENIACの誕生以来およそ指数関数的に伸び続けている。2016年の離れた一点は私のノートパソコンの処理速度で、その約20年前の世界最速レベルに相当する。

式を線型化して紙と鉛筆で理論解析するのが伝統的な研究手法でしたが、コンピュータを用いて非線型のままに数値的に解を求めてその振舞いをもとに力学的な理解を深める、という研究手法が確立され始めた時代でした。もっとも、計算機性能の制約により元の支配方程式系が直接数値計算で解けたわけではなく、近似し簡略化した方程式系の数値解を求めて解析するというのが当時の一般的な状況でした。

コンピュータの処理速度は1980年代まではおよそ10年で2桁程度の伸びであったものが、それ以降はベクトル型計算機や超並列計算機の開発により10年で約3桁の伸びに加速されています。そのような時代と重なって、私は気象・気候・地球流体の力学分野でコンピュータを駆使した数値実験やデータ解析を中心に研究を展開することができました(余田 2016, 2020)。次々と新しい計算機環境がもたらされるなかで、かつてなかったような枠組みや規模で数値実験を行うことができ、誰も見たことがない新奇的な結果を得ることができました。そのような時代に巡り合わせたことに感謝したいと思います。

1980年代の2年間にわたる米国留学は、ちょうどUNIXやXウィンドウシステムが開発中あるいはプロトタイプ製品が米国の市場に出始めた頃のことであり、柔軟で機能性の高い計算機環境に驚かされました。研究コミュニティの共通プログラム開発活動や大量データの解析・描画ソフトウェアの開発整備など、先端的コンピュータを活用したグループ研究のあり方についても多くを学び、また考えさせられました。帰国後に、当時米国の大学・研究機関に留学し同様の経験をしていた仲間らと地球流体電脳倶楽部を立ちあげ、地球科学と計算科学・計算機科学にまたがる研究教育活動を開始しました(余田 2023a, b)。その活動は次の世代に重心を移しつつ今日まで続いています(<https://www.gfd-dennou.org/>)。

## 2.2 数値モデルの階層性

学位論文作成中の頃、大気力学研究の進展と階層的数値モデル群の活用に関するHoskins(1983)の年頭所感論文が発表されましたが、その内容は我々世代に大きな影響を与え(例えば, Held 2005), 以来これまで私自身の状況認識・判断の規範となってきました(余田 2023b)。彼はまずコンピュータをめぐる気象学研究分野の不健全な状況の認識から述べ始めています。広く地球科学の諸分野は、観測(データ解析)と理論、そしてコンピュータを活用した数値モデル研究とで成り立ってきましたが、当時これらの研究手法間の連携は必ずしも良いものではありませんでした。観測技術の飛躍的進歩で大量の観測データが蓄積され始め、先端的な数値モデルからはいつの時代も大量の計算出力結果がもたらされていましたが、これらの大量データは何十年も変わっていない観念的な理論的枠組みで診断されるばかりでした。他方、理論的研究は現実の大気観測や数値モデル計算結果にほとんど触れることなく進められ、具体的な現象の診断に寄与することはほとんどありませんでした。

そのような不健全な状況に対して、彼は図3を示して、階層的な力学モデル群を駆使した最適な気象学研究分野の形成を提案しました。ここで、「複雑」精緻な気象予報や気候予測の数値モデルは、階層的な力学モデル群のハイエンドに該当しており、定量的な議論に不可欠です。他方、「簡単」モデルは新たな概念を提案し定性的な記述を行うのに有効であり、また、これらの「中間」のモデルはメカニズムの理解に有効です。今日の全球数

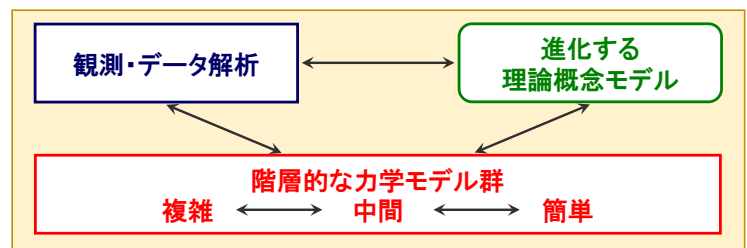


図3 Hoskins(1983)による気象学研究の最適な状況を示す模式図の和訳版。今日的な状況認識においては、第4の研究アプローチとして、先端的な観測データと先端的な数値モデルの融合による最適な実況推定・パラメータ値推定を行う「データ同化」をこの図の中心に3極と接する形で配置することができる。

値天気予報モデルはおよそ数十kmの水平分解能であり、各従属変数を離散化して数十億次元の自由度を持ちます。他方、カオス発見の気象学者Edward N. Lorenz博士が導出した熱対流の3元力学系(常微分方程式系)モデル(Lorenz 1963a; L63と略記)は簡単モデルの典型例ですが、初期値に対する鋭敏な依存性を示し予測可能性という新概念を提案することに用いられました。また、中間階層の大気モデルの自由度は1万~1億変数程度であることが多く、メカニズム理解のためにさまざまな設定で実験がなされてきました。図3で提案された最適状態においては、すべての階層のモデル研究がお互いに、また現実大気の観測データ解析とうまく相互作用して、進化する理論概念モデルを作り出し、その理論概念が大気や複雑モデルのふるまいの診断に役立つ、という観測・理論・数値モデル研究の緊密な連携による学問の発展状況が描かれています。ここで、モデル自由度による複雑-簡単な切り分けは各時代の計算機性能とともに変遷してきており、定量的議論、メカニズム理解、定性的議論、という性格付けがよりふさわしいかもしれません。

最近、Maher et al. (2019)は気象予報・気候予測に用いられる大気大循環モデルを基準として、いくつかの異なる観点からのモデル階層性に関する認識をまとめました。支配方程式の近似度合いから見た力学的階層性、大気下端境界条件の階層性、非断熱過程表現の階層性、あるいは、対流組織化の空間規模階層性の諸観点から整理して、それぞれの簡単モデル側には順圧モデル、海面温度固定の水惑星モデル、乾燥大気力学コアモデル、あるいは、乱流モデルを配置しています。他方、対極の複雑モデル側には、現実の大気や地球システムの「デジタル・ツイン」にあたるハイエンドモデルがあります。単純化し理想化した簡単・中間階層モデルでの実験設定は必ずしも現実には存在しない仮想的条件の場合もありますが、概念提案やメカニズム理解のうえで有効です。それぞれに、計算機資源への負荷がかからない分だけ、大量のアンサンブル実験やパラメータ空間走査型実験、長時間積分による気候状態・気候変動状態の詳細把握実験など、工夫を凝らした使い方がいろいろ可能になります。

### 3. 第I期：1979~1992

#### 3.1 対流圏中・高緯度気象力学：ジェット気流蛇行パターンの二様性（その1）

1983年に「地形を含む二層・準地衡・低次モデルを用いた大規模大気非線型相互作用の研究」で学位をいただきましたが、Yoden(1983a,b)の2編の英語論文が基礎となっています。Lorenz(1963b)と同種の中緯度大気を模した少数自由度非線型力学系(6~28変数)の数値解を解析し、解のパラメータ依存性を詳述するとともに、地球大気に対応する外部パラメータ域での不規則変動解の長期間データの統計解析をして、平均帯状流と停滞波、移動波の相互関連の現象論的記述を行いました。そして、さらに簡略化した順圧流体中の帯状平均帯状流強制と表面地形に強制されたロスビー波を陽に含む強制散逸系を対象として、その非線型解の分岐と安定解の多重性を調べて、ジェット気流の蛇行パターンの二様性を論じました(Yoden 1985a,b)。これらの研究で用いた数値モデルはL63流の簡単モデル(すなわち、元の偏微分方程式系のスペクトル表現で少数波数切断した高々数十変数の力学系モデル)でした。これは計算機資源が限られていた当時ならではの問題設定であったかと思います。

計算機事情もあり用いられる数値モデルは簡単階層のものでしたが、大気海洋中のさまざまな現象を念頭に置いた非線型システムのパラメータ空間での解の振舞いは、諸現象の理解を深める新たな切り口となりました。松田・余田(1985)は、当時の気象力学、地球流体力学、惑星大気大循環、気候力学等の分野において研究が進められていた解の多重性問題について、統一的な視点で網羅的にレビューし「気象研究ノート」としてまとめたものです。



### 3.2 成層圏気象力学：成層圏突然昇温現象の力学的理解

1980年代中頃ワシントン大学での在外研究ではHolton and Mass(1976; HM76)の成層圏バシレーションモデル(81変数力学系モデル)のもつ非線型構造を徹底的に調べることにしました(Yoden 1987a,b,c). それは、冬季成層圏中を上方伝播する惑星規模ロスビー波が帯状平均帯状流と相互作用するモデルで、定常解を求め、その線型安定性を調べ、さらに、時間積分により非定常解(周期解)を求めて、この系の分岐構造を明らかにしました. 図4(a)は下端の圏界面での強制ロスビー波振幅を分岐パラメータ(横軸)として高度25kmでの平均帯状流の強さを示したもので、ある範囲では波振幅が小さく放射平衡状態に近い定常解Aと波振幅が大きく平均帯状流が減速された定常解Cがともに安定に存在します. 定常解Cは図中の点Hで不安定化し、Hopf分岐により周期解が出現します(◆が時間平均値、縦棒が変動幅). これがHM76で見つけられた成層圏バシレーション解で、定常振幅のロスビー波強制でも数か月周期で成層圏突然昇温現象を繰り返す内部周期変動が存在可能です.

このような理想化簡化された力学的枠組みの非線型モデルで、成層圏突然昇温理論の系統的な力学解釈を試みました(図4(b)). 当時、対流圏からの波強制が急増幅するとき上方伝播する波の先端域での平均帯状流との相互作用で周極渦崩壊・突然昇温に至るというMatsuno(1971)理論が流布していましたが、それは図4(b)では①のロスビー波の急増幅に対する解A→Cの遷移として表現されます. 一方、HM76のバシレーション解は、波強制の急増幅がなくても突然昇温現象が周期的に生起するという図4(b)②で現わされるもので、新たな突然昇温理論の提案でした. また、Chao(1985)は波の急増幅は必要なく一定値以上の大振幅になるだけで突然昇温現象が起るというカタストロフィ理論(図4(b)③)を提唱していました. これら是对流圏からの波強制に対して異なる仮定をしており、①~③の何れが現実大気の突然昇温現象をうまく表しているかは、観測データによる検証が必要です. 実際のところ現実は多様であり、①対流圏が支配的な場合も②独立した成層圏内部変動もそれぞれにあるようです.

その後、赤道域成層圏東西風の準二年周期振動(QBO)現象の簡単モデル(Plumb(1977)の内部重力波を繰り込んだ鉛直1次元平均帯状流モデル)や成層圏の季節進行の南・北半球比較に関する簡単モデル(HM76で帯状平均帯状流の強制

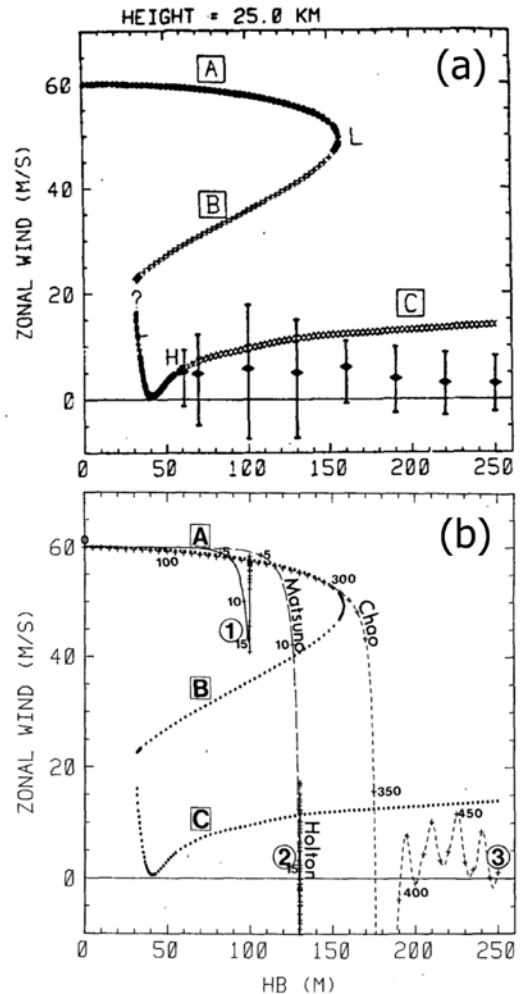


図4 (a) 下端での強制ロスビー波の振幅 $h_B$ をパラメータとした分岐ダイアグラム(Yoden 1987aより). 縦軸は高度25kmでの平均帯状流の強さで、安定定常解を●、不安定定常解を+ (実固有値) または× (複素固有値) で示す. また、安定周期解の平均値を◆で、その変動幅を縦棒で示す. さらに、定常解の極限点をL、Hopf分岐点をHで示す. (b) 成層圏突然昇温モデルの相対関係. 3つの非定常解を分岐ダイアグラム内にプロットしたもの. 定常解(A~C)を黒点で示す. ①~③の3本の線はそれぞれ異なる波強制に対する非定常応答. ① $h_B(t) = 100m \times [1 - \exp(-t/\tau)]$ ; ② $h_B(t) = 130m \times [1 - \exp(-t/\tau)]$ ; ③ $h_B(t) = t \times 0.5 \text{ m/日}$ . ただし、 $\tau = 2.5 \times 10^5$  秒. ①と②では5日毎に、③では10日毎に+印をつける. 小さな数字は $t=0$ からの日数.

を一年周期変化させる非自励系モデル)のパラメータ走査型実験を行い、それぞれYoden and Holton (1988)とYoden(1990)の論文として発表しました。これら一連の「簡単化された非線型モデルによる大気循環形態の研究」により1992年度日本気象学会賞をいただきました(余田 1993)。

### 3.3 応用気象力学：予測可能性－天気予報の当たり外れの科学（その1）

1980年代の約2年間の留学を終えて間もない頃に、気象庁数値予報課勤務だった**木本昌秀**さん、東京管区気象台勤務だった**向川 均**さんとの共同研究で、応用的気象力学の王道である数値天気予報における予測可能性の研究を始めました。

計算科学の黎明期にENIACを用いた実験的数値天気予報の研究はCharney et al.(1950)に始まります。北米大陸域を対象領域とする簡単階層の予報モデル(回転系の水平2次元順圧渦度方程式)を用いて、観測に基づく初期値から時間積分して一日先の大規模な流れ場を予報しました。当時の計算機性能では約5週間の計算時間を要し、対象事象発生前の予報ではありませんでしたが、大気運動の時間発展を流体運動の物理法則に基づいて予報するという数値計算の基本原理を実行するものでした。以来、計算機性能の飛躍的向上とともに、数値天気予報モデルによる初期値問題としての気象予報は研究開発と現業実装が並行して進められてきました(例えば、余田 2002)。高分解能化、微物理過程パラメタリゼーションの精緻化、アンサンブル予報化等で予報モデルの性能が向上するとともに、衛星観測など新観測データの活用およびデータ同化技術の革新等で初期値データの品質・精度が向上したことにより、数値天気予報の精度はこれまで飛躍的に向上してきました。

しかし、最新の予報モデルも完全なものではなく、時間とともに予報誤差が増大してやがて予報価値がなくなります。さらに、例えモデルが完全でも初期値誤差が存在するかがり、大気運動のカオス的性質によりそれが時間とともに指数関数的に増大して、やがて予報の情報価値をなくしてしまいます(例えば、Yoden 2007)。ここでカオスは初期値に対する鋭敏な依存性で特徴付けられる非線型力学系の非周期不規則変動解の特質です。L63はわずか3元までにまで簡単化した熱対流の力学系(連立非線型常微分方程式系)モデルですが、非周期解の鋭敏な初期値依存性を示して、予測の限界、すなわち予測可能性という新概念の提示に用いられました。このカオスの発見と計算科学としての気象学の研究基盤確立の功績により、Lorenz博士は1991年京都賞を受賞しました。

私は彼の京都賞受賞記念ワークショップ「天気予報からカオスへ」に参加し、大気循環場の状況に依存した予測可能性の変動について講演しました。L63モデル(Mukougawa et al. 1991；図5)および中緯度順圧大気モデル(Yoden and Nomura 1993)の接線型システムで特異値解析を行い、局所的な予測可能性の変動を例示し、定量的評価をしました。また、気象庁および欧州、米国の予報センターの1週間予報に共通して予報誤差が急拡大する事例を見つけ、そのときには太平洋東部でブロッキング高気圧が出現し初期値のわずかな違いで予報の成否が分かれる(Kimoto et al. 1992)ことを指摘しました。これらは、流れ場の状態に依存した予測可能性変動を簡単モデルから複雑モデルまでの階層で調べて、それぞれに

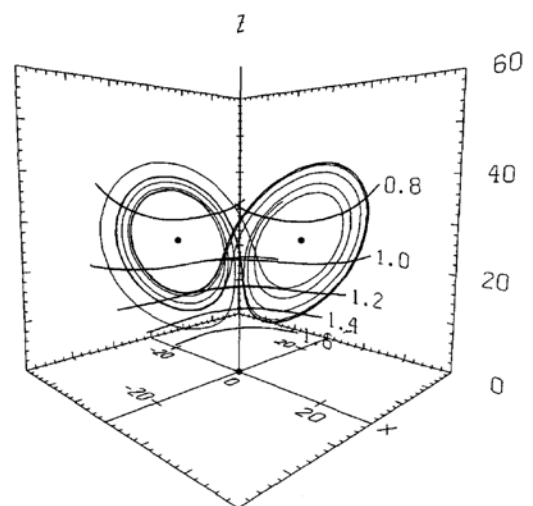


図5 ローレンツ・アトラクター上における、予報期間  $\tau = 0.1$  に対する予報誤差拡大示標の局所的分布(Mukougawa et al. 1991)。値が1より大で拡大、小で縮小。軌道の一部を実線で示す。

具体的な実例を示すものでした。

### 3.4 地球流体力学：回転水槽中の熱対流実験に関する数値モデル実験

地球流体力学は地球・惑星上の流体運動に関する物理学で、大気や海洋の運動を個別に議論するのではなく、理想化抽象化して統一的に論じ普遍的な力学の理解を深めるという学問分野です。図3の中間階層モデルを用いた力学メカニズム理解のための研究と重なる分野といえます。研究の枠組みとしては、惑星の自転の影響を受けた回転系での流体や、重力の影響を受けた成層流体、あるいは回転成層流体に関する力学理論、室内実験、数値モデル実験があります。

1987年に助教授に昇進すると、大学院生を指導して成果を共著論文として発表をする状況になりました。直接指導した最初の博士後期課程学生の菅田誠治君は、大気の赤道-極加熱差と惑星自転の効果を残した同軸二重円筒の「回転水槽中の熱対流に関する数値的理論的研究」(1993)を行いました。軸対称2次元および2½次元セミスペクトルモデルを作成し、幅広い実験パラメータ領域で2次元定常解を求め、その線型安定性を調べ、さらに、有限振幅波動時間発展解を求めるという解析ツール群を整えました。そして、高粘性流体の傾圧不安定遷移における遠心力項の重要性(Sugata and Yoden 1991)や軸対称子午面循環と温度場パターンのパラメータ依存性(Sugata and Yoden 1992)に関する数値実験的研究をおこないました。

## 4. 第II期：1993~2007

### 4.1 成層圏中・高緯度気象力学：水平2次元周極渦の変動と物質混合

1990年代に入り、石岡圭一君の学位論文は南半球冬季周極渦(極夜ジェット流)を念頭に置いた「回転球面上における順圧不安定な流れの非線型過程に関する理論的研究」(1995)でした。今日では理想化した簡単モデルの力学的階層性にあたる(当時はLorenz流の簡単モデルに対して完全非線型な中間階層モデルの範疇にあたるような)球面上の高分解能2次元順圧モデルを自作し、順圧不安定な極渦の非線型時間発展についての初期値問題(Ishioka

and Yoden 1994)および、強制-散逸系における順圧不安定な周極渦の非線型様相(Ishioka and Yoden 1995)について、パラメータ走査型数値実験を行いました。また、南半球春季に出現する成層圏オゾンホールを念頭に置いて、不規則変動する流れ場に伴う受動的トレーサーの水平輸送および混合の現象論的記述を行いました(図6)。極夜ジェットの流軸にあたる周極渦の周縁では局所的にロスビー波の復元力が大きくなり、そこを横切るような運動が抑制されて、極渦内外の流体混合がほとんど起らないことがわかりました。このような水平2次元的な地球規模での物質輸送過程のイラストは、雑誌「科学」

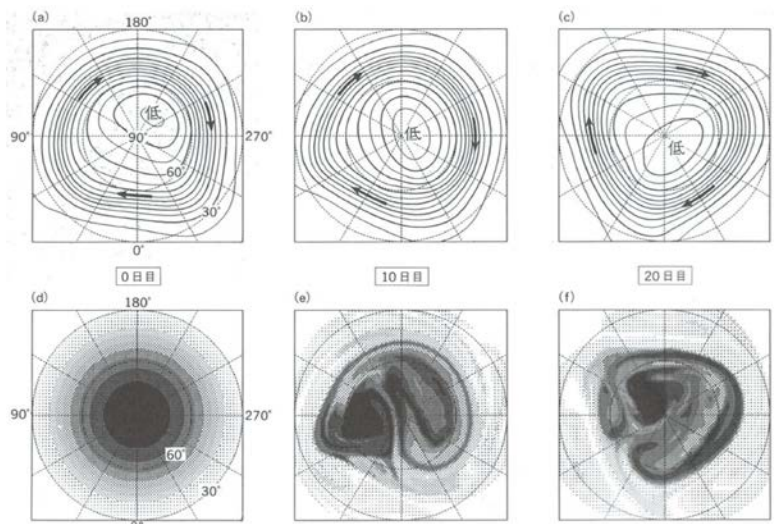


図6 南半球を念頭に置いた周極渦の不規則変動とそれに伴う仮想的物質輸送混合過程の理想化モデル数値実験(Ishioka and Yoden 1995, 余田 1995). (a)~(c) 流線関数の時間変動を10日毎に示す。等値線に沿って矢印の向きの流れがあり、間隔が狭いところでは流れが速い。(d)~(f) 仮想的な帯状一様初期分布のトレーサーを与え、移流させた結果の0日目、10日目、20日目。

1995年5月号の表紙を飾ることができました(余田 1995)。また、このテーマは地球流体力学的なラグランジアン・カオス(第4.9小節)と関連した興味とも重なって、水田 亮君の学位論文「南半球冬季成層圏極域でのカオスの移流による輸送・混合過程」(2002)へと発展していきました。

さらに、Ishioka and Yoden(1996)は、同様の球面上2次元モデルで帯状ジェット流の順圧不安定による擾乱の発達に対して厳密な上限値を求める数値的手法を提示しました。数値実験結果を記述する現象論を脱して、その実験結果を制約する地球流体力学の理論的枠組みを構築した論文であり、その後の彼独自の研究テーマを展開させていく端緒となりました。

#### 4.2 中・高緯度気象力学：成層圏-対流圏結合系としての冬季周極渦の変動(その1)

第3.2小節に記した成層圏突然昇温の大昇温現象は、2~3年に一度程度の頻度で生起する周極渦崩壊という極端現象です。Labitzke(1982)はそれまでの26年分の「ベルリンマップ」データをもとに北極30hPaでの月平均気温のヒストグラムを月ごとに描き、周極渦運動の季節進行と年々変動を議論しました。図7(b)は衛星観測データを中心とした再解析データの19年分で同様の図を描いたものです(Yoden et al. 2002b)。夏は高温、冬は低温で、年々変動は夏に小さく12月から3月にかけて大きいです。また、図7(a)の南極での季節進行・年々変動と対比すると、夏秋はほぼ同じですが、冬春は南・北半球で変動の様子が異なります。原因はこれらの季節に対流圏から上方伝播する惑星規模ロスビー波の違いによると考えられていましたが、第3.2小節でふれたYoden(1990)では、HM76型の簡単階層モデルで一年周期の平均帯状流強制に対する応答を求めて、南・北半球間の季節進行の違いが下端境界(対流圏)でのロスビー波強制振幅の小・大に起因していることを示しました。

1990年代はじめ頃の計算機環境では、中間・複雑階層の3次元全球大気モデルをふんだんに使うような研究にはなかなか手が届きませんでした。そこで、1994~96年度日本学術振興会日独科学協力事業「中層大気循環の季節内変動と年々変動に関する研究」(代表：廣田 勇京都大学教授, Karin Labitzke ベルリン自由大学教授)のなかで、ベルリン対流圏-成層圏-中間圏大気大循環モデルの長時間積分データセットを解析しました。Yoden et al.(1996)では、計算資源節約のため季節進行させず1月の太陽放射条件に固定した1000日間の積分データを詳細に解析し、簡単階層モデルで得た成層圏-対流圏結合変動

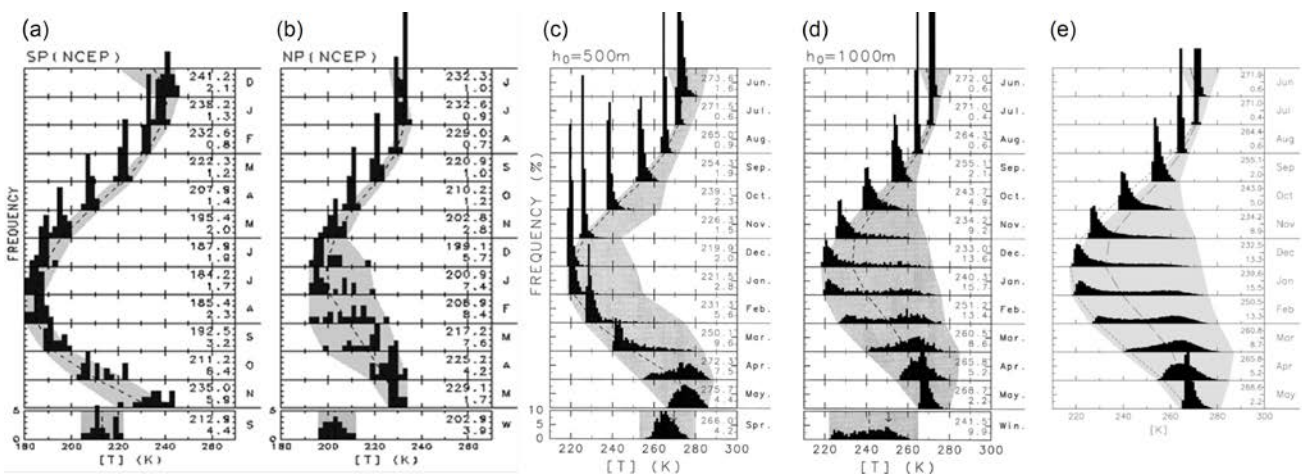


図7 1979~97年のNCEP再解析データで求めた南極(a)と北極(b)での30hPa月平均気温ヒストグラムの月ごと(夏秋冬春の順)の推移(Yoden et al. 2002b)； 中間階層モデルの1000年積分で得られた南半球(c)と北半球(d)を模した地形振幅ラン(それぞれ、 $h_0=500\text{m}$ と $1000\text{m}$ )で得られた極の月平均気温ヒストグラムの月ごとの推移(Taguchi and Yoden 2002b)； 同じく15,200年積分の北半球ラン(e； Nishizawa and Yoden 2005)の結果。



の新視点から複雑非線型システムの内部変動の実態を記述し、現実大気の季節内変動における力学的役割を論じました。さらに、Yoden et al.(1999)では1月固定の7,200日間に生じた64回の成層圏突然昇温現象について、卓越する惑星規模ロスビー波に着目し、東西波数1成分および2成分の相対的強度をもとに波数1型34事例、波数2型30事例の二つのグループに分けて、コンボジット解析を行いました。今日的には、変位(displacement)型、分裂(split)型として認識されている現象論的分類です。そして、突然昇温現象が各々推移していく様子を調べて、成層圏のみならず対流圏でも両型間の力学的差異が認められることを明らかにしました。季節固定の長時間積分実験は近年あまり見聞きしなくなりましたが、当時の計算機状況においてはたくさんの事例を得る工夫であったと言えます。

#### 4.3 気候力学：成層圏-対流圏結合周極渦変動の長期間積分データ統計解析

気象力学と気候力学の切り分けは必ずしも明瞭ではありません。初期値問題か長期時間発展の平均状態かは元々の定義に依る一つの判断基準かもしれませんが、常に例外がありそうです。岩波講座「気候変動論」の一章では、気候および気候変動の数値モデルについて、力学系の基本概念に基づいてモデル分類を試み、研究対象となる問題を整理しました(余田 1996, 2011)。前小節では、成層圏-対流圏結合系としての冬季周極渦の変動を気象力学の一課題として紹介しましたが、ここでは同様の視点で中間階層モデルを長期間積分したデータの統計解析を気候力学の課題の成果として紹介します。

田口正和君の学位論文は「対流圏-成層圏結合系の内部変動に関する数値実験」(2001)でした。地球流体電脳倶楽部の大気大循環モデルを用いて全球3次元の数値実験ができる計算機環境となっていました。当時としては中間階層の乾燥大気力学コアモデルで東西波数1の表面地形を下端境界とし、その振幅を走査パラメータとして、成層圏域を十分に分解したモデルで100年あるいは1000年の時間積分を多数例行いました(Taguchi and Yoden 2002a,b)。図7(c)(d)は1000年積分データから得られた極域月平均気温ヒストグラムの季節進行を地形振幅が500mと1000mの場合について描いたもので、それぞれ南・北半球で観測された季節進行の特徴(a)(b)を捉えています。理想化した中間階層モデルで一年周期の外部放射強制を与える実験設定とし、既存観測データより2桁近く長いデータの詳細解析を行って、頻度分布の歪度の季節進行や二峰性の有無などの統計的な特徴を得ることができました。このような中間階層モデル実験ならではの、モデル内部非線型過程のみで生じた年々変動の現象論的な詳細記述となりました。

また、西澤誠也君は「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」(2005)に関する学位論文研究で、15,200年という十分なデータ長を確保して、図7(e)のように頻度分布の細部まで求めました(Nishizawa and Yoden 2005)。そして、そのような純粋に内部変動だけをもつ状況において、外部条件変化に対する線型応答トレンドを有限長の部分時系列データから見積もる場合を考え、有限長のときに生じる「見かけのトレンド」の確率統計理論を構築しました。我々が実際に観測・蓄積し、解析できるデータは高々数十年であり、大気内部変動は常に存在するので、外因変化に対する線型応答の検知可能性を認識し評価しておくことは重要です。この理論的考察により、緯度や季節に依存して線型応答トレンドの検知可能性が異なることを示し、統計的に有意で有効な検知方法を論じました。

さらに、助手時代の内藤陽子さんが中心となり、同様の成層圏解像乾燥大気力学コアモデルを用いて、赤道域成層圏でのQBO風系を異なる振幅あるいは位相でナudging強制する1月固定永続の長時間積分を繰り返して、それぞれ約1000件ずつの成層圏突然昇温事例を得て、大量サンプルに基づく統計解析を行いました(Naito et al. 2003, Naito and Yoden 2006)。下部成層圏でQBOの東風期には突然昇温

現象の発生頻度が有意に高いことを確認した後、突然昇温の前後で対流圏から成層圏に伝播する惑星規模ロスビー波の振る舞いがQBOの状態にどのように依存しているかを、多数例のコンポジット解析で明らかにしました。

日尾泰子さんは学位論文「南半球成層圏における惑星波の構造と相互作用の年々変動に関する研究」(2004)のなかで、モード展開した惑星規模ロスビー波の非線型相互作用に関する再解析データ解析および球面2次元簡単階層モデルの数値実験(Hio and Yoden 2004, 2007)を行うとともに、1979~2002年の再解析データを用いて南半球の季節進行の年々変動に関する力学的特徴を調べました(Hio and Yoden 2005)。その平均的な進行は、春先の惑星規模ロスビー波と平均帯状流の相互作用による極夜ジェットの減速(Yoden 1990)によって特徴づけられますが、そのタイミングの早晚が年々変動の主要成分であり、同季節に上方伝播する惑星規模ロスビー波活動の大小と相関していること、そして平均帯状流の季節進行の早・晩年コンポジット差が9~10月には対流圏下層まで有意であることを示しました。また、2002年9月には成層圏突然昇温の大昇温現象が南半球で初めて観測されましたが、他の23年間の変動特性と比較することにより、この顕著事例の特徴を明らかにしました。当時、正規分布を仮定すると1000年に一度程度の稀な発生頻度であるというような議論が流れましたが、図7(c)のように大きく歪んだ頻度分布であり、年々変動特性の仮定には注意が必要であることを指摘しました。せいぜい100年に一度程度の稀さの現象であるというのが正しい認識です。

#### 4.4 対流圏中・高緯度気象力学：ジェット気流蛇行パターンの二様性（その2）

第3.1小節で述べたように、ジェット気流蛇行パターンの二様性(直進型あるいは蛇行/ブロッキング型)という現象論的な認識は非線型システムにおける安定解の多重性という枠組みを援用しうる課題のひとつでしたが、その当時に用いられる数値モデルはおおよそ簡単階層のものに限られていました。

それから10年ほどが経ち1990年代後半になった頃、赤堀浩司君の学位論文研究は「対流圏長周期変動にともなう傾圧擾乱と基本力学場との相互作用に関する理論的・数値的研究」(1999)でした。計算機性能は10年で3桁以上伸びており、地球流体電脳倶楽部全球3次元大気大循環モデルの力学コア部分を残して乾燥大気モデルとし、東西一様な外部強制条件を課す理想化した(当時の)中間階層のモデルで、実験条件を変えて長期間の時間積分を繰り返すことができました。そして、現実の大気変動と似た帯状平均帯状流の時間変動状態をつくり出し、自励的に変動するジェット軸の緯度位置に依存して低気圧擾乱のライフサイクルの二様性があることを明らかにしました(Akahori and Yoden 1997など)。すなわち、高緯度ジェット期には上層トラフの高気圧性砕波パターンが卓越する一方、低緯度ジェット期には低気圧性砕波パターンが支配的であることを長期間実験データの統計として示すとともに、地表面抵抗の強さを変えたパラメータ実験でも両者の関係性を確認しました。

#### 4.5 熱帯気象力学：赤道域成層圏QBOの再現実験・感度実験

Takahashi(1996)は大気大循環モデルによるQBOの再現に初めて成功しましたが、それを受けて、Horinouchi and Yoden(1998)は地球流体電脳倶楽部の全球3次元大気大循環モデルで、全球一様の海面温度を与える水惑星モデルとしてQBO再現実験を行い、1,400日余りの時間発展計算をして世界で2番目の成功例となりました。理想化したモデル設定でただ現象再現をただだけでなく、積雲対流によって励起され、運動量輸送を担う赤道域大気波動の東西波数-振動数スペクトル解析を代表的な西風期および東風期に対してそれぞれ行い、周期的振動をもたらす波と流れの相互作用の実態を明らかにしました。この成果は、堀之内 武君の「大気波動の積雲対流による励起と赤道域中層大気平均流との相互作用」(1997)に関する学位論文の中心となりました。

それから20年余りが経った2010年代、計算機性能は6桁ほど上がりましたが、簡単・中間階層モデルを用いたQBO実験は依然として興味ある研究テーマです。Yao and Jablonowski(2013)は、乾燥大気力学コアモデルで帯状一様な南北加熱差を強制するモデルの長時間積分を行い、積雲対流や小スケールの重力波が無くともQBO的振動が赤道域成層圏に現れることを示しました。Yao and Jablonowski(2015)はまたモデルの水平移流スキームをセミラグランジュ法からスペクトル変換オイラー法、あるいはスペクトル要素法に取り換えただけでQBO的振動周期が約3年から10~20年周期に変わり、有限体積法ではQBO的振動が得られなかったこと報告しました。それを受けて、大海慎之輔君は修士論文(2018)において、地球流体電脳倶楽部の水惑星モデルでQBO的振動の熱帯域海面温度依存性を調べました(図8)。赤道付近で最大値を持つ4通りの熱帯域海面温度分布を与えて14,000日にわたる時間積分を繰り返し、赤道上で平らな緯度分布(c)にしたり、最大値緯度を赤道からずらして赤道反対称性を加え(d)たりすると、QBO的振動が得られなくなることを示しました。

理想化した3次元大気モデルで再現されるQBO的振動がこのような移流スキームや下端境界条件に鋭敏に依存している実験事実は、我々のモデル再現能力や力学的理解がまだ十分でないことを物語っています。観測により現実大気のQBOをよく知っているの、それに似ているかどうかで再現性を判断できますが、もしも観測がないならば、予言的に赤道域にはこのようなQBO的振動があるはずだと主張できる理解レベルにはありません。気象力学的「理論」の限界が垣間見える例題です。

#### 4.6 熱帯気象力学：メソ降水系構造・組織化実験（その1）

中・高緯度における総観規模やより大規模の不安定現象・中立波動伝播に関する大気力学の標準的パラダイムは渦位保存則と平衡力学インバーションの非局所性といえますが、低緯度熱帯域においてはそのような力学的枠組みは成り立ちません。前小節の赤道域成層圏QBO現象はその典型例と言えましょう。低緯度ではコリオリの効果小さく、対流圏では湿潤対流とその組織化が基本的な力学過程となりますが、このような多階層連結力学過程に関する我々の理解とモデル予測は未だ限定的です。今世紀に入ってから、研究室の興味の対象としては徐々に熱帯気象力学の割合が高くなっていきました。

大塚成徳君の学位論文は「熱帯対流圏中層に見られる湿潤層状構造に関する数値的研究」(2009)でし

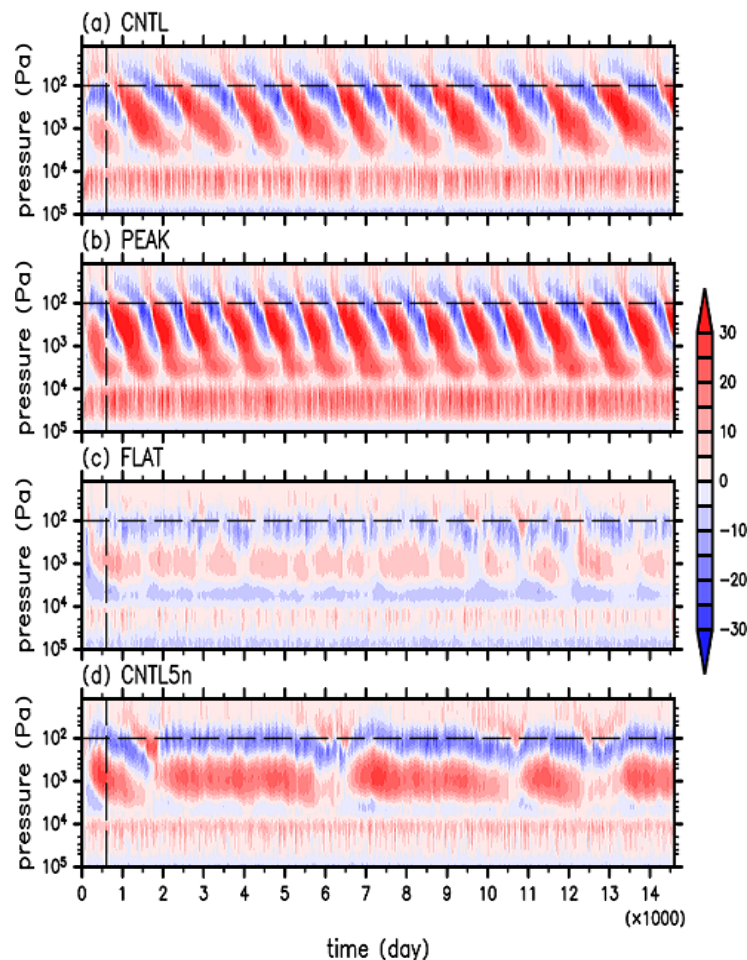


図8 4通りの海面水温分布を与えた各実験における赤道上で帯状平均帯状流の時間高度断面図。横軸の単位は1000日で、100Paの破線はスポンジ層の下端を示し、600日目破線はスピニアップ期間の終点を示す(大海 2018)。

た。Shiotani et al. (2002)は、東部太平洋赤道域航海でのオゾンゾンデ観測に基づいて、熱帯対流圏中層でしばしば見られる高湿度で低オゾン濃度の海面起源空気塊の多重層状構造と熱帯収束帯からの南北流との関係を報告していましたが、そのような非降水域での特徴的な薄い層状構造が研究動機となりました。米国大気研究センター(NCAR)の領域メソ気象モデルMM5を用いて一観測事例について再現実験を行い、湿潤層状構造が水平に1000km規模、鉛直方向には1km程度の広がりであることを示しました。また、仮想粒子追跡実験と流線解析により、層状構造の湿潤部分は熱帯収束帯から北西風によって移流されたこと、2つの水平渦間の停滞点の東西変位に起因する南北風鉛直シアーによって薄い層となっていることを明らかにしました(Otsuka and Yoden 2005)。また、1999~2006年にわたるラジオゾンデ観測データの解析とMM5モデルを用いたダウンスケール数値実験により薄い湿潤層状構造の時空間変動を調べて、出現頻度の季節依存性と経年変化を明らかにしました(Otsuka and Yoden 2009)。第4.1小節で述べたように、南極域オゾンホールに関する研究では成層圏内の準水平な周極渦変動とそれに伴う流体粒子運動が興味の主対象でしたが、コリオリ効果がゼロに近い赤道付近の安定成層域では鉛直にほぼ独立した中立の水平運動が可能です。そのような状況での流れ場とそれに伴う流体粒子運動について、似たような視点、解析道具で研究をすすめるというのがここでの基本的な発想でした。

#### 4.7 応用気象力学：予測可能性－天気予報の当たり外れの科学（その2）

1990年代後半になり山根省三君は学位論文「大気循環の変動と予測可能性についての理論的・数値的研究」(1998年)において、わずか2元概念モデルや簡略化された低次大気循環モデルで予測可能性変動と準定常状態との関連を調べるとともに、中間階層の理想化した球面順圧モデルで長期変動と最適励起擾乱の関係を明らかにしました(Yamane and Yoden 1997, 2001など)。他方、複雑階層ハイエンドモデルを開発する各予報センターでは、初期値に観測誤差程度のゆらぎを加えて予報を数十回繰り返すアンサンブル予報が提案・実装され、やがて予報誤差変動の推定を含む予報が現業化されました(高野 2002)。今日では、週間天気予報の信頼度表示や台風の接近確率マップなど、アンサンブル予報に基づく予報誤差の時空間変動に関する確率情報が活用されています。その頃までの予測可能性研究に関する私自身のレビュー論文として、余田(2002)、Yoden(2007)があります。

「天気予報の当たり外れの科学」は社会とのかかわりも大きい研究テーマであり、アウトリーチ活動として、NHKオモシロ学問人生「来年のきょうは晴れか？曇りか？」(1997年)、NHKクローズアップ現代「台風を観測せよ～国際研究最前線～」(2008年；図9)、MBS「よしもとサイエンスツアー」宇治原「バタフライ効果(海外で蝶々が羽ばたいたのが原因で竜巻がおこる)は本当？」(2009年)などに出演させていただきました。また、第16回稲盛財団盛和スカラーズソサイエティ総会基調講演「数値天気予報と気候予測－不確実性を伴う予測」(2012年)や、京都大学理学部第60回玉城嘉十郎教授記念公開学術講演会「大気変動の予測可能性とデータ科学」(2021年)での一時間講演「不確実性を伴う数値天気予報と気候予測」を行いました(余田 2021)。



図9 NHKクローズアップ現代 N.2646「台風を観測せよ～国際研究最前線～」2008年10月20日(月)生放送終了後の記念撮影。



#### 4.8 地球流体力学：回転球面上の2次元乱流

3次元乱流に対するコルモゴロフ理論のアナロジーとして、一様等方性2次元乱流の理論が構築され、非粘性でエネルギーとエンストロフィーがともに保存するという2次元流体特有の束縛条件により、エネルギー注入波数帯を挟んでエネルギー逆カスケードとエンストロフィーカスケードの2つの慣性領域が存在することが指摘されました (Kraichnan

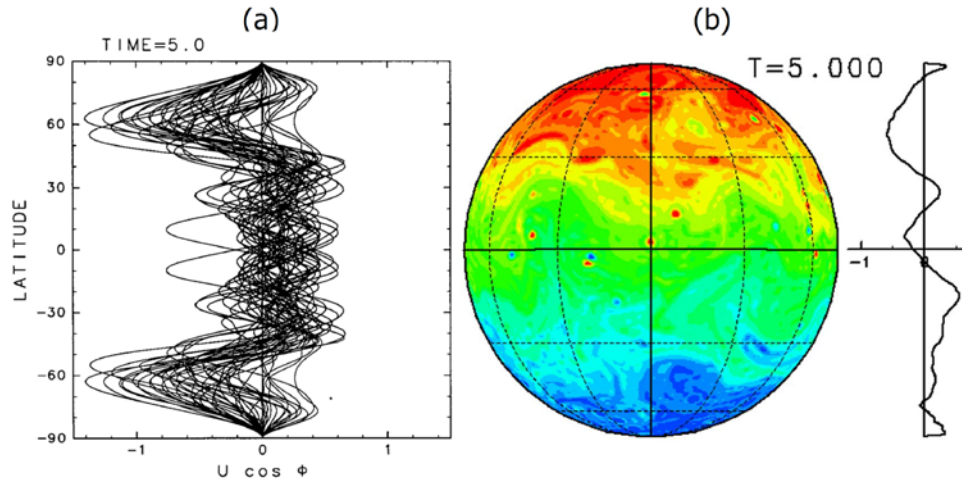


図10 (a) 回転球面上の減衰性2次元乱流の初期値アンサンブル実験で得られた帯状平均帯状角運動量の緯度分布(Yoden and Yamada 1993). 高緯度の負値は西向き周極渦構造に対応する. (b) 時間発展で得られた絶対渦度場と帯状平均帯状角運動量の一例(石岡ほか 1999). 正の絶対渦度を暖色系, 負の渦度を寒色系で示す.

1967). そして、減衰性2次元乱流の数値実験では時間とともに秩序渦構造が出現し、一様性の仮定が破れてスペクトルの冪則にも大きな影響を与えることが明らかになりました (McWilliams 1984). また、コリオリ効果の緯度変化を線型近似した $\beta$ 平面上での減衰性乱流実験では、ロスビー波と2次元乱流の競合により東西方向に引伸ばされた多重ジェット構造が出現することが見つかっており (Rhines 1975), 木星の帯状縞構造を動機付けとして回転球面上の2次元乱流計算が行われて、緯度円に沿う多重の帯状縞構造が得られました (Williams 1978). しかし、当時の計算機事情もあって、それは赤道対称で東西には45度ごとの周期境界条件とする1/16球面での計算でした.

Yoden and Yamada (1993)は計算機性能の向上をいち早く認識し、全球モデル領域でのパラメータ走査型アンサンブル実験を行って、回転球面上の減衰性2次元乱流中のパターン形成とその自転角速度依存性を系統的に調べました. そして、自転角速度が大きいときには中・低緯度の帯状縞構造とともに惑星回転と逆向き(西向き)の周極渦構造が出現することを初めて見出しました (図10(a)). このとき、渦度場は全緯度で非等方的で東西方向に引伸ばされた構造となり、その時間発展はロスビー波運動によって特徴づけられます(図10(b); 石岡ほか(1999)のアニメーション). そして、西向き周極ジェット構造の出現は、ロスビー波の励起・伝播・散逸に伴う角運動量輸送と吸収、特に長波長ロスビー波の極付近での吸収傾向によって理解できることを示しました (Hayashi et al. 2007).

野沢 徹君は学位論文「回転球面上の強制2次元乱流に関する理論的・数値実験的研究」(1997)で強制散逸系での2次元乱流の特徴づけを行いました. 時間変動するランダムな空間配置の渦度生成項を与えて、そのエネルギー注入波数と自転角速度を実験パラメータとして多数例の長時間積分を行いました. 莫大な計算資源が必要なため最終平衡状態への漸近途中までの計算でしたが、帯状縞構造の有無や極域西向周極渦形成のパラメータ依存性を強制散逸系で初めて示すことができました (Nozawa and Yoden 1997a). また、球面調和関数展開した2次元エネルギースペクトルを求めて、その非等方性を論じました (Nozawa and Yoden 1997b).

#### 4.9 地球流体力学：ラグランジアン・カオス

1980年代に発見された春季南極域オゾンホール動態理解を主な動機として、オゾン破壊物質が熱帯域圏界面から成層圏極域に受動的トレーサーとして輸送・混合される様子や、オゾン破壊後の空気塊が衛星観測されるような時間・空間変動をする過程に興味をもたれましたが、流体力学的には、そのような流れ場が与えられたときに流体粒子群に着目してラグランジュ的に運動を記述し、その輸送・混合の基本的性質を認識し理解するという問題になります。コンピュータの進歩とともにカオスの概念が生まれ非線型科学が飛躍的に発展した時代に、そのような視点からの研究も進展しました。3次元定常流や2次元周期変動流という規則的な流れ場でも流体粒子運動自体はカオス的になり得て、そのような状況はしばしばラグランジアン・カオスあるいはカオスの混合と呼ばれています(例えば、Ottino 1989, 船越 2021)。流体要素の混合の運動学を考えるうえで乱流状態の流れ場は一つの典型で、大気境界層内の乱流混合はその具体例といえますが、規則的な流れ場のなかのカオスの混合はまた別の典型といえます。

菅田誠治君は回転水槽中の熱対流実験に関する数値モデル実験(第3.4小節)を行っていましたが、ラグランジアン・カオスの概念に出会い、計算で得られた傾圧不安定波動の3次元定常流で単一粒子を長時間追跡して、その粒子運動に関するデータ解析を行いました(Sugata and Yoden 1994)。ジェット流や高・低気圧内トラップ領域、境界層での滞在時間と頻度、領域通過の順序を求めるとともに、粒子が一度も入り込まない孤立領域が両トラップ領域に隣接して存在することを見出しました。その後、Tajima et al. (1997)は同様の定常傾圧波動流を室内実験で再現し、数滴注入したインクの3次元的な広がりを観察して、我々が数値実験で得た高・低気圧渦内部領域の構造と類似した構造が存在することを確認しました。

成層圏における準水平2次元的な地球規模でのジェット気流やその蛇行、あるいは周極渦運動は、トレーサー物質の多様な輸送混合過程を提供します(余田 1999)。水田 亮君の学位論文(2002)では周極渦という大規模秩序構造の時間変動にともなう物質輸送・混合過程をラグランジアン・カオスの概念を援用しうる自然界の現象のひとつと考えて、理想化した球面上の2次元非発散流モデルで、傾圧不安定な帯状流強制のもとで有限振幅の惑星規模ロスビー波が準周期的に変動する解(図11(a))を得て、粒子群の輸送・混合に関する数値実験を行いました(Mizuta and Yoden 2001)。ポアンカレ断面図解析(図11(b))によりカオス的な混合領域の正確な位置を同定して、急峻な渦位勾配に関連した輸送障壁に加えて、それとは関係のない別種の輸送障壁が存在しうることを示しました。このポアンカレ断面図は雑誌「パリティ」

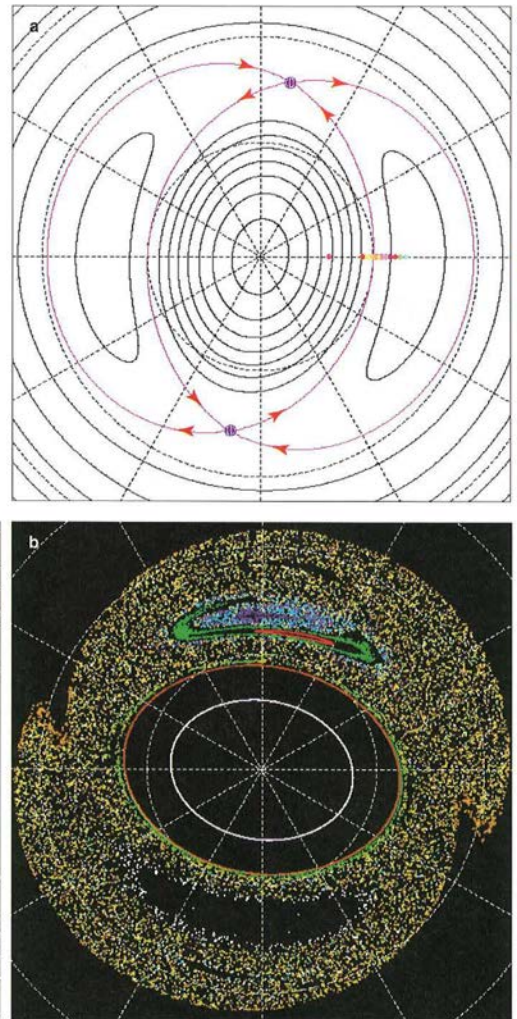


図11 準周期変動をする2次元周極渦での粒子群の輸送・混合に関する数値実験(余田 1999, Mizuta and Yoden 2001)。(a) 渦とともに回転する座標系で求めたある瞬間の流線関数。丸印は淀み点で、それらをつなぐ赤線はヘテロクリニックな軌道である。(b) ポアンカレ断面図。(a)に示した小点20個を、渦伸縮の1000周期にわたり追跡し、1周期ごとにそれぞれの位置をプロット。

1999年3月号のカラー表紙を飾ることができました。

## 5. 第III期：2008~2020

### 5.1 中・高緯度気象力学：成層圏-対流圏結合系としての冬季周極渦の変動（その2）

カナダ・トロント大学で旧知のTed Shepherd教授の大学院生であったPeter Hitchcock君は、JSPSサマープログラムの外国人学生研究者として2008年6月~8月の約2カ月間京都に滞在し、“Dynamical Sources of Variability in the Stratosphere”という研究課題に取り組んで、短い期間ながら既に手懸けていた「中層大気における局所的な線型放射減衰の近似」に関する解析を仕上げ、Hitchcock et al. (2010)の共著論文をまとめました。現実的な時空間変動をする複雑階層の化学-気候モデルから出力された放射加熱率と温度の長期間データで、高度・緯度・季節ごとに線型回帰解析を行い、成層圏と中間圏の大部分で放射加熱率を気候学的平均温度への局所的な線型緩和で近似できることを示しました。ただし、両半球の周極渦の周縁では非線型項が無視できず、また、熱帯域下部成層圏ではスケールに依存しない減衰率の仮定は必ずしも正当化できません。この成果は、複雑な中層大気中の放射過程の簡略化モデル構築に資するものとなりました。また、2010年4月~6月に再来日して、大気大循環モデルデータを用いた中層大気の力学解析をすすめ、彼の学位論文へとつながりました。そして今日まで、SATIO-TCS(第5.3小節参照)に関する国際共同研究等の推進でも協力が続いています。

### 5.2 熱帯気象力学：メソ降水系構造・組織化実験（その2）

インドネシア・バンドン工科大学修士課程の学生であったJoko Trilaksono君に初めて会ったのは第6節で触れるKAGI21国際サマースクールでしたが、やがて博士後期課程留学生として研究室の一員となり「2007年1月~2月のジャワ島西部における豪雨に関する数値的研究」(2012;論文は英文)を始めました。領域メソ気象モデルは計算領域こそ限られますが、精細な雲微物理過程や放射伝達、乱流過程を含む複雑階層のハイエンドモデルですので、それを大学の一研究室で開発していくことはなかなか困難なことです。そこで京大理学部と気象研究所とで共同研究契約を結び、斉藤和雄さんのグループとの連携を進めておりましたが、Trilaksono君の学位論文研究も気象研究所で気象庁非静力学モデル(JMA-NHM)の動かし方を学ぶところから始めました。熱帯域を対象として積雲対流パラメタリゼーションを再調整した版のモデルで、水平解像度20kmのモデルから5km, 4km, 2kmまでダウンスケールして、ジャワ島西部の強い対流活動域の再現実験を行い、衛星観測による降水量推定値で検証しました(Trilaksono et al. 2011)。また、1月~2月の2ヶ月間にわたり初期値時間差アンサンブル時間発展を繰り返して、南シナ海上コールドサージの発生・南進やボルネオ渦の発生・発達を現象論的に記述し、一日周期変動の変調も含む降水量変動との関連を探りました(Trilaksono et al. 2012)。

### 5.3 熱帯気象力学：赤道域成層圏QBOの対流圏影響

赤道域の成層圏QBOと対流圏内のMadden-Julian Oscillation(MJO)はそれまで何十年も独立して研究されてきましたが、2015年に京都で開催した熱帯域成層圏対流圏力学結合ワークショップ(第6節参照)では、北半球冬季において下部成層圏QBOが東風期にはMJOが平年より強く、西風期には平年より弱いことが発表されました(後の Yoo and Son 2016)。ポスドク研究員であった西本絵梨子さんはいち早く反応して、QBOの西風・東風位相毎にMJOイベントを抽出し、外向き長波放射OLRのコンポジット解析を行って、東風期にはMJOが高強度、長寿命で、東進速度が遅いこと、そして西風期は逆の関係にあることを示しました(Nishimoto and Yoden 2017)。このテーマに関連する研究のその後の急展開は



Martin et al. (2021)のレビュー論文に詳しく、120編の論文が引用されるほどになっています。

成層圏QBOの対流圏への影響を調べるために、データ解析とともに、様々な階層の数値モデルを用いた数値実験や予報再現実験が行われてきました。現象の時間空間スケールが広範囲にわたるので、モデル選択や実験設定は多様であり、得られた結果の現実大気への応用や原因推定も未だ収束していない状況にあります。そのようなデータ解析・数値モデル実験の研究経過を踏まえて、「熱帯対流系に対する成層圏と対流圏の影響」(Stratospheric And Tropospheric Influences On Tropical Convective Systems; SATIO-TCS)に関する国際共同研究を2016年に開始し推進しています(第6節参照)。

我々はHeld et al. (1993)の2次元放射-湿潤対流平衡モデルでのQBO的振動に関する先駆的研究を思い出し、ポスドク研究員の**Hoang Hai Bui君**が中心となって、理想化簡単化した非回転系での鉛直2次元領域モデル内での成層圏域QBO的振動の対流圏影響評価実験を行ってきました(Yoden et al. 2014aなど)。水平方向には周期境界条件を課しているため帯状平均帯状流が形成され得て、モデルで陽に表現される湿潤対流と相互作用するQBOに似た自励的振動が得られます。空間2次元で計算領域が限られる(多くの場合、水平640kmで周期境界)この非回転系の2次元雲システム解像非静力学モデルを「成層圏-対流圏結合系におけるQBO的振動の最小モデル」と呼ぶことにしました。Nishimoto et al. (2016)は図12を描き、成層圏では平均帯状流と温度偏差のQBO的振動が下方に伝わり(a)(b)、他方、対流圏ではQBO的振動に伴う降水系の周期的変調(c)~(e)が見られ、地表付近での水平風の鉛直シア(g)に依存してスコールライン型やバックビルディング型の降水パターンが交互に出現(f)していることを明らかにしました。この周期的変動

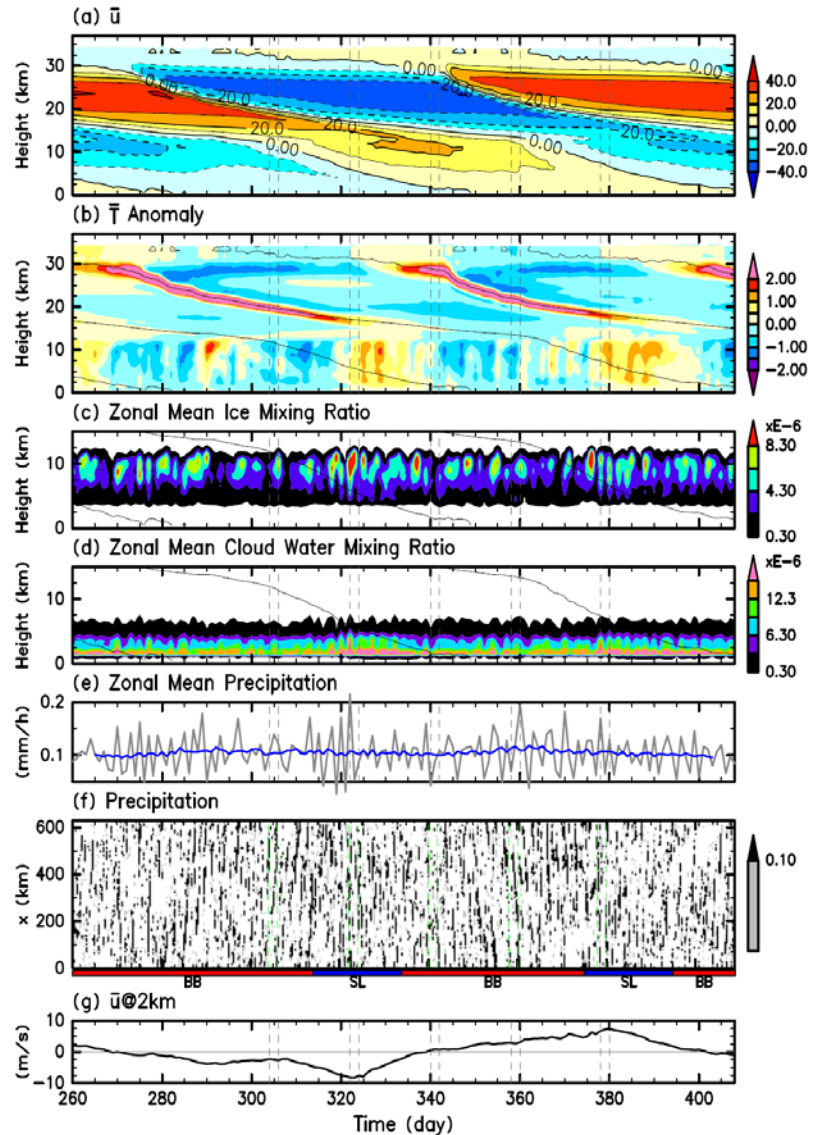


図12 「成層圏-対流圏結合系におけるQBO的振動の最小モデル」で得られたQBO的振動の時間変化(Nishimoto et al. 2016). (a) 帯状平均帯状流[m/s]の時間高度断面図, (b) 帯状平均温度の時間平均からの偏差[K], (c) 帯状平均氷混合比[kg/kg], (d) 帯状平均雲水混合比[kg/kg], (e) 帯状平均降水量[mm/h]の時系列とその21日移動平均値(青線), (f) 降水量[mm/h]の水平時間断面図, (g)  $z=2\text{km}$ での帯状平均帯状流の時系列. (a)-(d)に重ねた黒細線は帯状平均帯状流のゼロ風速線. (f)の下部にある赤と青の棒グラフはそれぞれバックビルディング(BB)型とスコールライン(SL)型の期間を示す。



に伴う水平運動量の鉛直フラックスを、傾斜した対流成分と上方・下方伝播重力波成分に分け、各寄与の時間-高度変動を定量的に評価して、平均帯状流変動とそれに伴う湿潤対流組織化の変調、および運動量輸送変動の関連を示しました。

また、Bui et al. (2017)は、対流圏の帯状平均帯状流の鉛直シアを制御する一連のナッキング実験を行い、QBO 的振動に伴う地表および雲頂付近の水平風鉛直シアに依存して湿潤対流が変調していることを明示しました。地表付近の鉛直シアが大きいと湿潤対流システムの寿命が長くなり強度が増す一方で、雲頂付近のシアが大きいと対流構造を乱し湿潤対流を弱める傾向があるというもので、後者が副次的な効果となっていました。さらに、Bui et al. (2019)は水平に二重周期境界条件の直方体3次元モデルに拡張して時間発展を行い、成層圏域で水平平均した水平流の鉛直螺旋構造が回転し位相が下降する自励的周期変動解を得ました。鉛直伝播する重力波が水平2次元的に選択的に透過されて、時間とともに高度・方向を変えて平均流を加速していく状況です。境界条件が特別で現実世界の対応物を考えるににくい振動状態かもしれませんが、そのような二重周期の仮想的条件下では力学的に矛盾のない解となっているはずで

#### 5.4 気候力学：惑星大気大循環の自転軸対称理論・数値実験

第3.4小節で触れたように、大気大循環の本質を調べる目的で回転水槽中の熱対流実験が行われてきました。同軸二重円筒の内・外壁間で水平加熱差を与え装置全体を回転させて、出現する流れの形態を調べるもので、惑星大気大循環を規定する要因のうち赤道-極加熱差と惑星自転の効果を取り出した実験です。回転軸対称2次元循環を求め、3次元擾乱に対する安定性を解析し、不安定な場合の3次元非線型平衡状態を求める、というのが一連の数値実験研究の流れとなります(例えば、Sugata and Yoden 1993)。

山本(樫村)博基君は学位論文「惑星大気スーパーローテーションの力学に関する研究」(2012)で自転軸対称な理論モデルを構築し、系統的な数値実験を行いました。回転半球上の乾燥ブシネスク流体モデルを東西平均して自転軸対称な系とし、非軸対称擾乱による運動量輸送を渦拡散で組込んで、子午面循環と水平渦拡散により角運動量が赤道上空に供給されてスーパーローテーションが生成・維持されるメカニズムを解析しました(Yamamoto and Yoden 2013)。スーパーローテーション強度を理論的に見積もる5次方程式を導出し、その係数が外部熱ロスビー数、放射緩和と鉛直拡散緩和の時間比、拡散緩和時間と自転周期の比、の3つの無次元パラメータに集約できることを示し、卓越する力学的平衡状態のパラメータ依存性を分類しました。そして、この準自転軸対称系の数値モデルの時間発展計算により統計的平衡状態を求めて、広いパラメータ領域で理論的見積もりの検証を行いました。単に非線型時間発展解の現象論に留まることなく独自の理論展開をした点が評価されて、2013年の気象集誌論文賞をいただくことができました。

#### 5.5 気候力学：多数モデルアンサンブル気候予測実験のデータ解析

気候予測の不確実性を把握し、予測モデルの不完全部分を同定し改良するために、世界の数十のモデル予測研究機関による結合モデル相互比較プロジェクト(Coupled Model Intercomparison Project; CMIP)がこれまで5次にわたり実施されてきました(Eyring et al. 2016など)。いくつかの共通実験条件を設定し、多数モデルアンサンブル予測実験を行い、再現・予測結果データを公表して、広く一般の研究にも資するデータ提供を行っています。ポスドク研究員のShipra Jainさんが中心となり、モデルの気候感度を調べる二酸化炭素瞬時4倍増加実験(abrupt 4×CO<sub>2</sub>)において、モデル改良のインパクトを診断する新グラフ手法を提案しました(Jain et al. 2021)。例えば、次小節で紹介するように成層圏オゾン光化学反応過程を双方向型で計算するか、気候値の時空間分布を非直結に参照するかで結果がどう異なるかは

各モデルに依存しており，対象過程のモデル内表現に対する依存性を把握しておく必要があります．図13はこのグラフ手法を応用した例で，図中央の多数モデルアンサンブル平均(MMM)と相対的に個々のモデルの気候感度に影響する要因を診断し，モデル間の相互比較をすることが容易にできます．

また，多数モデルによるアンサンブル気候予測をもとに個々の具体的な対象地域での気候予測情報を得るには，過去の観測データと気候再現実験に基づいて，予測に最適なアンサンブルメンバーを評価指標に応じて選ぶことが重要です．カンボジア工科大学出身の**Rattana Chhin**君の学位論文研究「CMIP5モデルの最適アンサンブルサブセットに基づくインドシナ地域における干ばつの将来予測」(2019；論文は英文)では，CMIP5モデル予測データを用いて，インドシナ半島を対象地域として21世紀の早魃予測を行いました．これまでの観測データとの比較に基づいて最適メンバーを選び (Chhin and Yoden 2018)，バイアス補正を施した後に予測精度を押えて将来気候を予測する，という個々の地域ニーズに根差したデータ解析手順を提案し，その実効性を例証しました (Chhin et al. 2020)．

## 5.6 気候力学：古気候再現における成層圏オゾン光化学の役割

第2.2小節で述べたように階層的モデル群の複雑モデル側には，現実の大気や地球システムの「デジタル・ツイン」にあたるハイエンドモデルが配されていますが，それらは多くの不完全なモデル部分を含んでいます．気候再現・予測モデルの始まりは数値天気予報モデルですが，より長い時間スケールでは変動する海洋，陸水，雪氷，植生，土壌等の状態を内部変数として予測する必要があります．しかし，これらの変動の中には支配法則が不明の過程もあり，予測サブルーチンの構築は困難を極めます．観測に基づいた経験則で代用することもあります，気候変化した後の状況への外挿は難しく，そこでも予測の不確実性が生じます．また，積雲の組織化をはじめとする格子間隔以下の力学現象の大規模場への影響を繰り込むパラメタリゼーション方法や，雲の放射効果の多様性やエアロゾルとの関連など，まだ十分に理解されずモデル化が未完成・不完全な過程も多くあります．さらに，太陽活動変動や火山噴火など外部条件の変化の同定や未来推定にも多くの困難さがあります．

数値天気予報モデルは過去何十年かの日々の観測データによって十分に検証されてきた実用に耐えるモデルですが，気候モデルの性能評価は基本的に産業革命以降の150年余りに限られています．同じモデルで別の時代の気候もよく再現できればモデルの信頼度を高めることになるので，地質学的過去の古気候再現実験 (Valdes et al. 2021)にはモデル検証や性能評価の側面もあります．

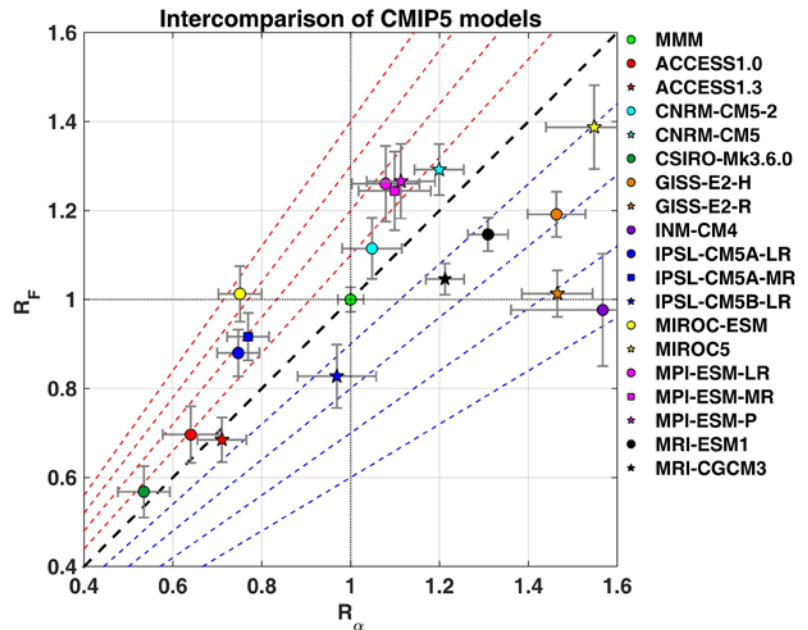


図13 CMIP5のabrupt 4×CO<sub>2</sub>実験に参加した各モデルの気候感度のマルチモデル平均(MMM；図中央)に対する比(Jain et al. 2021)．太破線はMMMと同じ感度で，細破線群は敏感(上側赤破線群)か鈍感(下側青破線群)かを10%毎に示す．横軸 $R_\alpha$ は各モデルの気候フィードバックパラメータのMMMに対する比で，縦軸 $R_F$ は大気上端正味放射フラックスと外部強制の差のMMMに対する比．

近年、我々はポストドク研究者であった納多哲史君が中心となり、気象研究所との共同研究のもと気象研究所地球システムモデル(MRI-ESM)を用いて、6,000年前の完新世中期(MH；縄文海進の頃)や21,000年前の最終氷期最盛期(LGM)の気候再現比較実験を行ってきました(Noda et al. 2017, 2018). ミランコビッチ・サイクルに基づく地球公転軌道、自転軸傾斜、および自転軸歳差運動の周期的変動をもとに、各時期の大気上端での日射量の変化を緯度・季節に依存する形で加え、当時のCO<sub>2</sub>濃度を与えて気候再現を行って、それらの結果を地質学的気候プロキシ試料の分析結果と比べることにより、気候-化学結合モデルの性能評価に資する研究を行ってきました。そして、両時期ともに成層圏オゾン光化学を中心とした大気化学反応過程の気候影響インパクトが大きいことがわかりました。

完新世中期のタイム・スライス100年積分実験(Noda et al. 2017)では、産業革命前(PI)と同じオゾン分布を与えた標準実験での寒冷バイアス(系統的誤差)が、成層圏オゾン光化学反応過程を陽に含むモデルでは減少する(南極域で+1.7 K)という結果を得ました(図14)。その温暖化のメカニズムは近年観測されているオゾンホール地表寒冷化影響と基本的に同じで、逆符号(すなわち、成層圏オゾンが増えて地表が温暖化)であることがわかりました。また、最終氷期最盛期のタイム・スライス100年積分実験(Noda et al. 2018)では、双方向型に計算する成層圏オゾン光化学反応過程の影響で帯状平均地表温度が上昇(熱帯域で+0.5K, 高緯度では+1.6K)しましたが、この全球的な寒冷化の緩和は、子午面循環の変化による下部成層圏オゾンと成層圏水蒸気の増加、および巻雲の減少に伴う長波放射フィードバックと関連しています。このメカニズムは、二酸化炭素増加実験の結果とは逆符号であり、整合的でした。結論として、これらのような古気候再現実験では、成層圏オゾン光化学反応過程を双方向型に結合させて陽に計算するか、あるいは、少なくとも古太陽日射量と整合的な成層圏オゾン気候値の時空間分布を求めておいてそれを非直結に参照するか、の何れかが推奨されることを指摘しました。

### 5.7 気候力学：Miyake Event 時の<sup>10</sup>Be輸送混合沈着実験

気候変動解析の分野では、測器観測の時代や古日記・古記録文書等の残る歴史時代、さらには樹木年輪、鍾乳石や湖底堆積物の年縞、氷床コア等による地質学的時代の古気候復元が進んでいます。また、

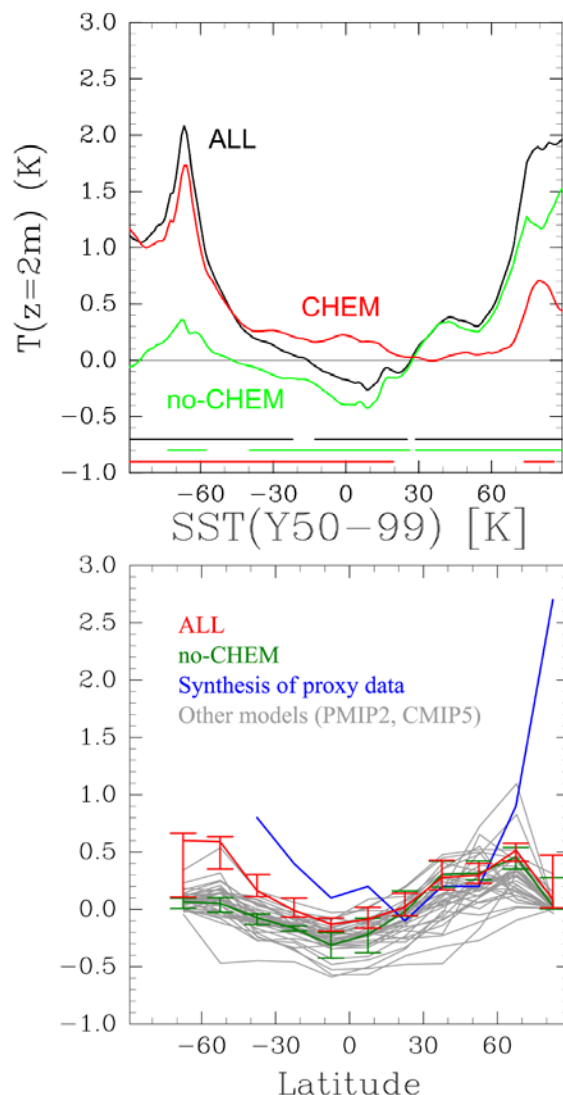


図14 完新世中期(MH)と産業革命前(PI)のタイム・スライス100年積分実験(Noda et al. 2017). (上) 地表気温の気候変化(MH-PI). ALL: 軌道要素+化学過程, no-CHEM: 軌道要素のみ, CHEM: ALL-no-CHEM. (下) SSTの気候変化(MH-PI). 地質学的代用試料分析データの合成(青線), ALL(赤線), no-CHEM(緑線), 他のCMIP5モデル結果(灰色線).



近年、屋久杉の年輪から発見された西暦774~75年の $^{14}\text{C}$ や $^{10}\text{Be}$ の急増(Miyake et al. 2012)は、完新世最大の太陽高エネルギー粒子イベント(発見者に因み”Miyake Event”と呼ばれています)によるとされ、同様の変動記録が世界各地の年輪や氷床コアデータでも検出されていて、過去の巨大な太陽活度変動を知る新たな地質学的試料となっています。半減期の長いこれらの同位体は、イベント発生時におもに成層圏の両極域で生成され、圏界面を経て対流圏に輸送され、最終的に地表面で沈着しますが、沈着量の緯度経度時間分布は成層圏と対流圏をつなぐ3次元的な輸送・混合過程にも依存しているはずで

す。我々は、ベルリン自由大学のTobias Spiegl君をポスドク研究者として迎え、同大学の地球システムモデルEMACを用いてこれらの受動的トレーサーの輸送・混合・沈着過程を計算し、得られた沈着量の時空間変動を4地点の地質学的試料分析で検証して、イベント発生時の制約条件を求めるという新たな分野間連携研究を始めました(Spiegl et al. 2022)。2005年の太陽高エネルギー粒子イベントによる中層大気両極域での $^{10}\text{Be}$ 生成量を航空機被曝警報システムWASAVIESにより見積もり、130倍の振幅増大を仮定して初期値分布としています。詳細なモデル計算結果の分析は、圏界面折畳み等による成層圏-対流圏物質交換過程や地表での乾性・湿性沈着過程を地質学的試料分析データによって定量的に評価し検証をする試みとなるはずで

## 6. 国際学術交流

これまで20年以上にわたり、様々な国際委員をやらせていただきました。なかでも、世界気候研究計画(WCRP)の下での成層圏-対流圏過程とその気候における役割研究(SPARC)では、科学運営委員会委員(1999~2005)、成層圏-対流圏力学結合(STDC)テーマリーダー(2005~15)、熱帯対流系に対する成層圏-対流圏影響(SATIO-TCS)テーマリーダー(2016~)を続けてきております。また、国際測地学・地球物理学連合(IUGG)国際気象学・大気科学協会(IAMAS)下での中層大気委員会(ICMA)では、委員(2003~7)、委員長(2007~11)、前委員長(2011~15)を務めました。さらに、米国気象学会論文誌の一つ Journal of the Atmospheric Sciencesの副編集委員(2001~8)および、編集委員(2009~11)を務めました。とくに、編集委員の3年間は、インターネットを介しての編集作業100%となった最初の世代で、3年間で150編以上の編集を担当させていただきました。たくさんの時間を要しましたが、世界の優れた論文の公表に関わることができ、貴重な経験となりました。

また、WCRP/SPARCの活動の一環として、いくつもの国際会議を京都で開催しました。第10回SPARC科学運営委員会(2002年11月18~21日)、成層圏突然昇温ワークショップ(2012年2月22~24日)、SPARC国際地域会議



図15 JSPS-NSF日米セミナー2021。(上)特別セッション講演者：左から松野太郎教授、加藤 進教授、Mike Wallace教授、Jim Holton教授、廣田 勇教授、Matt Hitchman教授、Alan Plumb教授、宮原三郎教授、田中 浩教授。(下)気象集誌特集号(Yoden et al. 2002a)の表紙。



(2013年4月1~3日), SATIO-TCS準備ワークショップ(2015年10月22~24日), SPARC力学・観測共同ワークショップ(2017年10月9~14日), 第6回SPARC総会(2018年9月30日~10月5日), SATIO-TCS共同ワークショップ(2020年2月21~25日)などです。第6回SPARC総会は, 9月上旬の台風21号の被害や開催初日の24号上陸にかかわらず, 世界31か国から380人以上の参加者がありました。そして, 対流圏-成層圏結合過程に関するJSPS-NSF日米セミナー(2001年3月13~17日; Yoden et al. 2002a; 図15)や気象・気候変動と予測可能性に関する京大数理研国際会議(2013年10月22~25日; Yoden et al. 2014b)では, それぞれに関連する著名研究者に京都に集まってもらうことができました。また, 米国サバンナでの「地球流体中のジェットと環状構造」に関するAGUチャップマン会議(2006年1月9~12日; 余田ほか 2006, Robinson and Yoden 2007)は, 久しぶりにワシントン大学での旧知の仲間も多く集まる機会となりました。

文部科学省の大学構造改革の方針に基づき2003~7年度に実施された21世紀COEプログラムでは, 京都大学地球科学分野の拠点リーダーとして「活地球圏の変動解明: アジア・オセアニアから世界への発信」をテーマに現地観測を含む研究教育活動に取り組みました。それまで縁のなかったアジア・オセアニアのフィールドを訪ね, 年に何度もシンポジウム・ワークショップや国際スクールを企画・実施しました。なかでも, KAGI21(Kyoto University Active Geosphere Investigations for the 21st Century COE Program)国際サマースクールは, インドネシア・バンドン工科大学で2004年の第1回から2007年第4回まで毎年2週間の期間で開催し, 40人前後の参加者との合宿生活で寝食を共にして, 若手研究者の国際ネットワーク作りに尽力しました(図16)。その後も規模を縮小しつつ, 京大と琵琶湖畔研修施設でほぼ2年に一度のペースでKAGI21国際夏季・春季スクールを開催し, これまでに合計9回, 22か国から306人の参加者を得るという活動となりました。その中には, 学長候補になったりIPCC評価報告書の共同著者になったりと, 多方面で活躍する人材の育成に貢献してきました。

このような国際連携活動の発展として, 2013年より6回にわたり国立台湾大学との大気科学学生/若手研究者交流プログラムを実施し, 教員・研究員・学生が交互に訪問して, 研究教育の交流を続けてきました。また, オクラホマ大学の佐々木嘉和先生とのご縁で, 2009年より隔年5回にわたり, 同大学気象学教室を交互に訪問して地球科学チャレンジ国際シンポジウムを開いてきました。

KAGI21を契機として, 気象学関連の国際共同研究も主導してきました。2007~9年度科学技術振興調整



図16 KAGI21のロゴマークと国際夏季・春季スクールの集合記念写真の一覧。2020年3月に予定していた第10回目がコロナ禍でキャンセルせざるを得なくなり, 合計9回, 22か国から306人の参加者を得てその活動を終了した。

費の「アジア科学技術協力の戦略的推進」では、京大と気象庁気象研究所、バンドン工科大学と共同して「東南アジア地域の気象災害軽減国際共同研究」を進めました。時代背景として、同地域でも観測技術の進歩と計算環境(コンピュータとネットワーク)の改善が著しく、それらを踏まえて、バンドン工科大学で実験的数値天気予報を実施し、それをパイロット事業として国際的な研究者ネットワーク作りを進め、国際ワークショップを毎年開催して防災科学技術の普及と減災意識の啓発を行いました。また、2015~17年度には日本学術振興会の研究拠点形成事業として、京大、バンドン工科大学、ハノイ理科大学、南洋理工大学の4大学共同で「海洋大陸における気候変動下の極端気象に関する国際共同研究」を進めました。さらにその発展として、2018~21年度には日本学術振興会-インドネシアDG-RSTHE二国間交流事業「海洋大陸における気候変動下の極端気象に関する基礎学術研究とその社会的応用」を推進してきました。

これまで関わってきた国際学術交流のもう少し詳しいところは他に記す(余田 2023b)として、交流を続けてきたこの20年近くで各国の産業・経済は飛躍的に発展し、それに伴ってそれぞれの研究教育環境も変化してきました。これまで一緒にやってきた研究者がそれぞれの国あるいは東南アジア地域を基盤として活躍し、さらに次の時代を担う後継者を育てていく状況となってきました。これからは一個人として、そのような展開に協力していければと考えています。

## 7. おわりに

学生時代より今日まで行ってきた約半世紀にわたる気象力学・気候力学・地球流体力学の研究と教育について、およそ年代順に概要を紹介させていただきました。それはちょうどコンピュータ技術の飛躍的進歩(図2)に基づく新たな学問「計算科学」の黎明期・大発展期と重なっています。その間ずっと私の状況認識・判断の規範であったのが、Hoskins(1983)の示した階層的な力学モデル群の有効活用(図3)でした。学位論文に関する研究を始めてから1990年頃までの第I期は、L63やHM76のような簡単階層の数値モデル(少数自由度の低次力学系モデル)を用いた研究が中心で、対流圏中・高緯度の長期変動に関わるジェット気流蛇行パターンの二様性や成層圏突然昇温現象の生起に依存した成層圏冬季周極渦の季節内変動・年々変動の概念化や描写に関するものでした。いわゆる「トイ・モデル」「イラスト・モデル」を用いた研究で、基本的に単著で成果の論文発表をしました。

第II期に入ると、球面上2次元順圧モデルや地球流体電脳倶楽部大気大循環モデルを基にした全球3次元の乾燥大気力学コアモデル・水惑星モデルなど、中間階層のモデルを用いた教育や研究が多くなりました。当時はそれらは十分に中間階層のモデルでしたが、今日的認識では理想化した簡単階層の範疇に入るようなものかもしれません(Maher et al. 2019)。図7をはじめとして成層圏-対流圏結合系としての冬季周極渦の季節内変動・年々変動に関する一連の数値実験は、我々グループの代表的な仕事のひとつとなりました。

そして今につながる第III期には、現業用予報モデルである気象庁非静力学モデル(JMA-NHM)や最先端の地球システムモデル(気象研究所ESM1, ベルリン自由大学EMAC)などの、ハイエンドの複雑階層モデルを駆使した共同研究を展開することができました。2020年度終了の科学研究費(新学術・基盤A)では、地球システムモデル(約1億変数)を用いて何百年間の数値シミュレーションを繰り返し、太陽活動変動の気候影響などを調べました。大学の少人数のグループでハイエンドの複雑階層モデルを作っていくことはとても難しい(ほとんど不可能な)ことですが、地球流体電脳倶楽部や気象研究所、ベルリン自由大学をはじめとする皆様のご協力ご支援を得て、大学ならではの発想の数値実験を続けてくることができました。何十人もの研究者・技術者が何十年にもわたって開発してこられたこれらの最高性能のモデルがあつてこそその共同研究となりました。

これまでの半世紀にわたる研究成果をまとめて特徴づけるとすると、コンピュータ技術の進歩と相ま

った計算科学の誕生・発展を拠り所として、気象力学・気候力学・地球流体力学の諸課題に取り組んできたということになるかと思えます。現実世界と数値モデル結果の複雑性はそれぞれの現象の非線型性によるところが大きいと見定め、まずは素朴な現象論的記述から始めることを第一としてきました。現実の観測データにしろ諸階層モデルの数値実験データにしろ、変動の力学過程の理解を深めていくには、そこに生起する現象を認識し記述するところから始めて、そのような経験・知見を蓄積し共有することが肝要である、と思いついて研究に取り組んできました。何度も繰り返しますが、階層的な力学モデル群の有効活用が意識の根本にあり続けてきました。

以上がこれまでの研究成果に対する自己認識、評価となります。最後に昨今はやりの客観的な指標を調べてみると、Web of Science / Google Scholar それぞれで、出版物 107 / - , 被引用数 2141 / 3484, H-Index 25 / 32, となっています。主観的な印象の総括としては、ホームランは出なかったけれど、それなりにヒットは打ち続けてこられた、といったところでしょうか。本篇で紹介した皆さんの学位論文の主要構成部分が、すべて国際的な一流雑誌に掲載されているという点は、指導した者としてとても満足であり、誇らしく思っております。

## 謝辞

大学入学以来約半世紀にわたり、理学部・理学研究科そして地球物理学教室にずっとお世話になってきました。心より感謝申し上げます。定年退職し教室を離れるに当たり、下鴨神社の書道作品奉納で見た言葉を組み合わせて二つの標語にしました：

「新たな目標に向かって、日々精進する」

「無限の可能性を信じて、初志貫徹する」

これからは、楽しいことだけをゆっくりと続けて行こうと思っています。次の4つを当面の目標に掲げて、励みにしたいと思います：(1) 気象学教科書(日・英)の取りまとめ、(2) 地球流体力学計算機実験集の改訂版(Pythonに変換して)、(3) 前2項を用いた教育活動(インド、インドネシア、台湾、…), (4) 成層圏-対流圏結合、熱帯気象に関する研究(Python/Anaconda等を使って)。

皆様、これまで長年にわたってご厚誼を賜り、本当にありがとうございました。そして、これからもどうぞよろしくお願い致します。

## 参考文献

- Akahori, K. and S. Yoden, 1997: Zonal flow vacillation and bimodality of baroclinic eddy life cycles in a simple global circulation model. *J. Atmos. Sci.*, **54-19**, 2349-2361.
- Bui, H.-H., E. Nishimoto, and S. Yoden, 2017: Downward influence of QBO-like oscillation on moist convection in a two-dimensional minimal model framework. *J. Atmos. Sci.*, **74-11**, 3635-3655.
- Bui, H., S. Yoden, and E. Nishimoto, 2019: QBO-like oscillation in a three-dimensional minimal model framework of the stratosphere-troposphere coupled system. *SOLA*, **15**, 62-67.
- Chao, W. C., 1985: Sudden stratospheric warmings as catastrophes. *J. Atmos. Sci.*, **42**, 1631-1646.
- Charney, J. G., R. Fjørtoft, and J. von Neumann, 1950: Numerical integration of the barotropic vorticity equation, *Tellus*, **2**, 237-254.
- Chhin, R. and S. Yoden, 2018: Ranking CMIP5 GCMs for model ensemble selection on regional scale: Case study of the Indochina region. *J. Geophys. Res. -Atmospheres*, **123-17**, 8949-8974.
- Chhin, R., C. Oeurng, and S. Yoden, 2020: Drought projection in the Indochina region based on the optimal ensemble subset of CMIP5 models. *Climatic Change*, **162-2**, 687-705.

- 大海慎之輔, 2018: 理想化した水惑星大気大循環モデルにおける赤道帯状流のQBO的変動の海面温度依存性. 2017年度京都大学大学院理学研究科 修士論文, 72pp.
- Eyring, V., S. Bony, G. A. Meehl, C. A. Senior, B. Stevens, R. J. Stouffer, and K. E. Taylor, 2016: Overview of the Coupled Model Intercomparison Project Phase 6 (CMIP6) experimental design and organization, *Geosci. Model Dev.*, **9**, 1937-1958.
- 船越満明, 2021: カオスと流体混合 第1回 ラグランジアン・カオス. *ながれ*, **40**, 336-342.
- Hayashi, Y.-Y., S. Nishizawa, S. Takehiro, M. Yamada, K. Ishioka, and S. Yoden, 2007: Rossby waves and jets in two-dimensional decaying turbulence on a rotating sphere, *J. Atmos. Sci.*, **64**, 4246-4269.
- Held, I. M., 2005: The gap between simulation and understanding in climate modeling, *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, **86**, 1609-1614.
- Held, I. M., R. S. Hemler, and V. Ramaswamy, 1993: Radiative-convective equilibrium with explicit two-dimensional moist convection. *J. Atmos. Sci.*, **50**, 3909-3927.
- Hio, Y., and S. Yoden, 2004: Quasi-periodic variations of the polar vortex in the Southern Hemisphere stratosphere due to wave-wave interaction. *J. Atmos. Sci.*, **61-21**, 2510-2527.
- Hio, Y. and S. Yoden, 2005: Interannual variations of the seasonal march in the Southern Hemisphere stratosphere for 1979-2002 and characterization of the unprecedented year 2002. *J. Atmos. Sci.*, **62-3**, 567-580.
- Hio, Y. and S. Yoden, 2007: A parameter sweep experiment on quasiperiodic variations of a polar vortex due to wave-wave interaction in a spherical barotropic model. *J. Atmos. Sci.*, **64**, 4069-4083.
- Hitchcock P., T. G. Shepherd, and S. Yoden, 2010: On the approximation of local and linear radiative damping in the middle atmosphere. *J. Atmos. Sci.*, **67-6**, 2070-2085.
- Holton, J. R. and C. Mass, 1976: Stratospheric vacillation cycles. *J. Atmos. Sci.*, **33**, 2218-2225.
- Horinouchi, T. and S. Yoden, 1998: Wave-mean flow interaction associated with a QBO-like oscillation simulated in a simplified GCM. *J. Atmos. Sci.*, **55-4**, 502-526.
- Hoskins, B. J., 1983: Dynamical processes in the atmosphere and the use of models. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, **109**, 1-21.
- Ishioka, K. and S. Yoden, 1994: Nonlinear evolution of a barotropically unstable circumpolar vortex. *J. Meteor. Soc. Japan*, **72-1**, 63-80.
- Ishioka, K. and S. Yoden, 1995: Non-linear aspects of a barotropically unstable polar vortex in a forced-dissipative system: Flow regimes and tracer transport. *J. Meteor. Soc. Japan*, **73-2**, 201-212.
- Ishioka, K. and S. Yoden, 1996: Numerical methods of estimating bounds on the non-linear saturation of barotropic instability. *J. Meteor. Soc. Japan*, **74-2**, 167-174.
- 石岡圭一・山田道夫・林 祥介・余田成男, 1999: 回転球面上の減衰性2次元乱流からのパターン形成, *ながれmultimedia*, **18-6**, [http://www2.nagare.or.jp/mm/99/ishioka/index\\_ja.htm](http://www2.nagare.or.jp/mm/99/ishioka/index_ja.htm)
- Jain, S., R. Chhin, R. M. Doherty, S. K. Mishra, and S. Yoden, 2021: A new graphical method to diagnose the impacts of model changes on climate sensitivity, *J. Meteor. Soc. Japan*, **99**, 437-448.
- Kimoto, M., H. Mukougawa, and S. Yoden, 1992: Medium-range forecast skill variation and blocking transition: A case study, *Mon. Wea. Rev.*, **120**, 1616-1627.
- Kraichnan, R. H., 1967: Inertial ranges in two-dimensional turbulence. *Phys. Fluids*, **10**, 1417-1423.
- Labitzke K., 1982: On the interannual variability of the middle atmosphere during the northern winters. *J. Meteor. Soc. Japan*, **60-1**, 124-139.
- Lorenz, E. N., 1963a: Deterministic nonperiodic flow. *J. Atmos. Sci.*, **20**, 130-141.
- Lorenz, E. N., 1963b: The mechanics of vacillation. *J. Atmos. Sci.*, **20**, 448-464.
- Maher, P., E. P. Gerber, B. Medeiros, T. M. Merlis, S. Sherwood, A. Sheshadri, A. H. Sobel, G. K. Vallis, A. Voigt, and P. Zurita-Gotor, 2019: Model hierarchies for understanding atmospheric circulation. *Rev. Geophys.*, **57**, 1-31.
- Martin, Z., S.-W. Son, A. Butler, H. Hendon, H. Kim, A. Sobel, S. Yoden, and C. Zhang, 2021: The influence of the quasi-biennial oscillation on the Madden-Julian oscillation. *Nat. Rev. Earth Environ.*, **2**, 477-489.



- 松田佳久・余田成男, 1985: 気象とカタストロフィー—気象学における解の多重性—. 気象研究ノート, **151**, 145pp.
- Matsuno, T., 1971: A dynamical model of the stratospheric sudden warming. *J. Atmos. Sci.*, **28**, 1479-1494.
- McWilliams, J., 1984: The emergence of isolated coherent vortices in turbulent flow. *J. Fluid Mech.*, **146**, 21-43.
- Miyake, F., K. Nagaya, K., Masuda, and T. Nakamura, 2012: A signature of cosmic-ray increase in AD 774-775 from tree rings in Japan. *Nature*, **486**, 240-242.
- Mizuta, R. and S. Yoden, 2001: Chaotic mixing and transport barriers in an idealized stratospheric polar vortex, *J. Atmos. Sci.*, **58-17**, 2616-2629.
- Mukougawa, H., M. Kimoto, and S. Yoden, 1991: A relationship between local error growth and quasi-stationary states: Case study in the Lorenz system. *J. Atmos. Sci.*, **48**, 1231-1237.
- Naito, Y. and S. Yoden, 2006: Behavior of planetary waves before and after stratospheric sudden warming events in several phases of the equatorial QBO. *J. Atmos. Sci.*, **63**, 1637-1649.
- Naito, Y., M. Taguchi, and S. Yoden, 2003: A parameter sweep experiment on the effects of the equatorial QBO on stratospheric sudden warming events. *J. Atmos. Sci.*, **60-11**, 1380-1394.
- Nishimoto, E. and S. Yoden, 2017: Influence of the stratospheric quasi-biennial oscillation on the Madden-Julian oscillation during austral summer. *J. Atmos. Sci.*, **74**, 1105-1125.
- Nishimoto, E., S. Yoden, and H. Bui, 2016: Vertical momentum transports associated with moist convection and gravity waves in a minimal model of QBO-like oscillation. *J. Atmos. Sci.*, **73-7**, 2935-2957.
- Nishizawa, S. and S. Yoden, 2005: Distribution functions of a spurious trend in a finite length data set with natural variability: Statistical considerations and a numerical experiment with a global circulation model. *J. Geophys. Res.*, **110**, D12105, doi:10.1029/2004JD005714.
- Noda, S., K. Kodera, Y. Adachi, M. Deushi, A. Kitoh, R. Mizuta, S. Murakami, K. Yoshida, and S. Yoden, 2017: Impact of interactive chemistry of stratospheric ozone on Southern Hemisphere paleoclimate simulation. *J. Geophys. Res. - Atmospheres*, **122-2**, 878-895.
- Noda, S., K. Kodera, Y. Adachi, M. Deushi, A. Kitoh, R. Mizuta, S. Murakami, K. Yoshida, and S. Yoden, 2018: Mitigation of global cooling by stratospheric chemistry feedbacks in a simulation of the last glacial maximum. *J. Geophys. Res. - Atmospheres*, **123-17**, 9378-9390.
- Nozawa, T. and S. Yoden, 1997a: Formation of zonal band structure in forced two-dimensional turbulence on a rotating sphere. *Phys. Fluids*, **9-7**, 2081-2093.
- Nozawa, T. and S. Yoden, 1997b: Spectral anisotropy in forced two-dimensional turbulence on a rotating sphere. *Phys. Fluids*, **9-12**, 3834-3842.
- Otsuka, S. and S. Yoden, 2005: Numerical experiments on the layered structures in the mid-troposphere over the equatorial Pacific. *SOLA*, **1**, 69-72.
- Otsuka S. and S. Yoden, 2009: Temporal-spatial distribution of thin moist layers in the mid-troposphere over the tropical eastern Pacific. *J. Climate*, **22-19**, 5102-5114.
- Ottino, J. M., 1989: The kinematics of mixing: stretching, chaos, and transport. Cambridge Texts in Applied Mathematics, Cambridge University Press, 364pp.
- Plumb, R. A., 1977: The interaction of two internal waves with the mean flow: Implications for the theory of the quasi-biennial oscillation. *J. Atmos. Sci.*, **34**, 1847-1858.
- Rhines, P. B., 1975: Waves and turbulence on a beta-plane. *J. Fluid Mech.*, **69**, 417-444.
- Robinson, W. and S. Yoden (Eds.), 2007: Jets and Annular Structures in Geophysical Fluids (Jets). Special collection *J. Atmos. Sci.*, <https://journals.ametsoc.org/collection/jets>, [https://journals.ametsoc.org/fileasset/collection-docs/jas\\_jets\\_special\\_intro.pdf](https://journals.ametsoc.org/fileasset/collection-docs/jas_jets_special_intro.pdf)
- Shiotani, M., M. Fujiwara, F. Hasebe, H. Hashizume, H. Voemel, S. J. Oltmans, and T. Watanabe, 2002: Ozone observations in the equatorial eastern Pacific—the Shoyo-Marun survey—. *J. Meteor. Soc. Japan*, **80**, 897-909.
- Spiegl, T. C., S. Yoden, U. Langematz, T. Sato, R. Chhin, S. Noda, F. Miyake, K. Kusano, and M. Kunze, 2022: Modelling

- the transport and deposition of  $^{10}\text{Be}$  produced by the strongest solar proton event during the Holocene. *J. Geophys. Res. -Atmospheres*, **127**, e2021JD035658. <https://doi.org/10.1029/2021JD035658>
- Sugata, S. and S. Yoden, 1991: The effects of centrifugal force on the stability of axisymmetric viscous flow in a rotating annulus. *J. Fluid Mech.*, **229**, 471-482.
- Sugata, S. and S. Yoden, 1992: Steady axi-symmetric flow due to differential heating in a rotating annulus and its dependence on experimental parameters. *J. Meteor. Soc. Japan*, **70-5**, 1005-1017.
- Sugata, S. and S. Yoden, 1993: A numerical study on regime transitions of the rotating annulus flow with a semi-spectral model. *J. Meteor. Soc. Japan*, **71-4**, 491-501.
- Sugata, S. and S. Yoden, 1994: Chaotic Lagrangian motion and heat transport in a steady, baroclinic annulus wave. *J. Meteor. Soc. Japan*, **72-4**, 569-587.
- Taguchi, M. and S. Yoden, 2002a: Internal interannual variability of the troposphere-stratosphere coupled system in a simple global circulation model. Part I: Parameter sweep experiment. *J. Atmos. Sci.*, **59-21**, 3021-3036.
- Taguchi, M. and S. Yoden, 2002b: Internal interannual variability of the troposphere-stratosphere coupled system in a simple global circulation model. Part II: Millennium integrations. *J. Atmos. Sci.*, **59-21**, 3037-3050.
- Tajima, T., T. Nakamura, and T., Sakata, 1997: Experimental observations of internal vortex structures in steady baroclinic waves. *J. Atmos. Sci.*, **54**, 1600-1609.
- Takahashi, M., 1996: Simulation of the stratospheric quasi-biennial oscillation using a general circulation model. *Geophys. Res. Lett.*, **23**, 661-664.
- 高野清治 (編), 2002: アンサンブル予報. 気象研究ノート, **201**, 120pp.
- Trilaksono, N. J., S. Otsuka, S. Yoden, K. Saito, and S. Hayashi, 2011: Dependence of model-simulated heavy rainfall on the horizontal resolution during the Jakarta flood event in January-February 2007. *SOLA*, **7**, 193-196.
- Trilaksono, N. J., S. Otsuka, and S. Yoden, 2012: A time-lagged ensemble simulation on the modulation of precipitation over West Java in January-February 2007. *Mon. Wea. Rev.*, **140-2**, 601-616.
- Valdes, P. J., P. Braconnot, K.J. Meissner, and S. Eggleston, 2021: Paleoclimate Modelling Intercomparison Project (PMIP): 30th anniversary. *Past Global Changes Magazine*, **29-2**, doi:10.22498/pages.29.2
- Williams, G. P., 1978: Planetary circulations: 1. Barotropic representation of Jovian and terrestrial turbulence. *J. Atmos. Sci.*, **35**, 1399-1426.
- Yamamoto, H. and S. Yoden, 2013: Theoretical estimation of the superrotation strength in an idealized quasi-axisymmetric model of planetary atmospheres. *J. Meteor. Soc. Japan*, **91-2**, 119-141.
- Yamane, S. and S. Yoden, 1997: Predictability variation and quasi-stationary states in simple non-linear systems. *J. Meteor. Soc. Japan*, **75-2**, 557-568.
- Yamane, S. and S. Yoden, 2001: Finite-time evolution of small perturbations superposed on a chaotic solution: Experiment with an idealized barotropic model. *J. Atmos. Sci.*, **58-9**, 1066-1078.
- Yao, W. and C. Jablonowski, 2013: Spontaneous QBO-like oscillations in an atmospheric model dynamical core. *Geophys. Res. Lett.*, **40**, 3772-3776.
- Yao, W. and C. Jablonowski, 2015: Idealized quasi-biennial oscillations in an ensemble of dry GCM dynamical cores. *J. Atmos. Sci.*, **72**, 2201-2226.
- Yoden, S., 1979: Some dynamical properties of non-linear baroclinic waves in a quasi-geostrophic model. *J. Meteor. Soc. Japan*, **57-6**, 493-504.
- Yoden, S., 1983a: Nonlinear interactions in a two-layer, quasi-geostrophic, low-order model with topography. Part I: Zonal flow-forced wave interactions. *J. Meteor. Soc. Japan*, **61-1**, 1-18.
- Yoden, S., 1983b: Nonlinear interactions in a two-layer, quasi-geostrophic, low-order model with topography. Part II: Interactions between zonal flow, forced waves and free waves. *J. Meteor. Soc. Japan*, **61-1**, 19-35.
- Yoden, S., 1985a: Bifurcation properties of a quasi-geostrophic, barotropic, low-order model with topography. *J. Meteor. Soc. Japan*, **63-4**, 535-546.

- Yoden, S., 1985b: Multiple stable states of quasi-geostrophic barotropic flow over sinusoidal topography. *J. Meteor. Soc. Japan*, **63-6**, 1031-1045.
- Yoden, S., 1987a: Bifurcation properties of a stratospheric vacillation model. *J. Atmos. Sci.*, **44**, 1723-1733.
- Yoden, S., 1987b: Dynamical aspects of stratospheric vacillations in a highly truncated model. *J. Atmos. Sci.*, **44**, 3683-3695.
- Yoden, S., 1987c: A new class of stratospheric vacillations in a highly truncated model due to wave interference. *J. Atmos. Sci.*, **44**, 3696-3709.
- Yoden, S., 1990: An illustrative model of seasonal and interannual variations of the stratospheric circulation. *J. Atmos. Sci.*, **47**, 1845-1853.
- 余田成男, 1993: 简单化された非線型モデルによる大気循環形態の研究－1992年度日本気象学会賞受賞記念講演－. 天気, **40-3**, 145-160.
- 余田成男, 1995: カオスと気象予測. 科学, **65-5**, 305-313.
- 余田成男, 1996, 2011: 気候および気候変動の数理モデル. 「気候変動論」第6章, 岩波講座 地球惑星科学 **11**, 岩波書店, 221-266.
- 余田成男, 1999: 高度30 km, 地球規模でのカオスの混合 成層圏周極渦の変動と, それにともなう物質の輸送・混合過程. パリティ, **14-3**, 4-13.
- 余田成男, 2002: 数値天気予報と予測可能性－歴史的経緯－. 高野清治編「アンサンブル予報」, 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, 2016: 地球流体力学とコンピュータ. 「私と科研費」, [https://www.jsps.go.jp/file/storage/grants/j-grantsinaid/22\\_letter/data/news\\_2016\\_vol3/p07.pdf](https://www.jsps.go.jp/file/storage/grants/j-grantsinaid/22_letter/data/news_2016_vol3/p07.pdf)
- 余田成男, 2020: 名誉教授随想「私の研究教育人生とコンピュータ・情報通信技術」. 京都大学理学部弘報, **216**, 2-3.
- 余田成男, 2021: 不確実性を伴う数値天気予報と気候予測. 京都大学理学部第60回玉城嘉十郎教授記念公開学術講演会「大気変動の予測可能性とデータ科学」, 2021年12月20日(月), Kyoto-U OCW, <https://www.youtube.com/watch?v=IchYYingyu8>
- 余田成男, 2022: 計算科学としての地球流体力学・気象力学・気候力学研究の進展. ながれ, **41**, 374-381.
- 余田成男, 2023a: 朋友 塩谷雅人君の逝去を悼む. 天気, **70**, 33-36.
- 余田成男, 2023b: 成層圏-対流圏結合変動の研究ならびに国際共同研究の推進と人材育成－2022年度藤原賞受賞記念講演－. 天気, **70**, 印刷中.
- Yoden, S. and J. R. Holton, 1988: A new look at equatorial quasi-biennial oscillation models. *J. Atmos. Sci.*, **45**, 2703-2717.
- Yoden, S. and M. Nomura, 1993: Finite-time Lyapunov stability analysis and its application to atmospheric predictability. *J. Atmos. Sci.*, **50**, 1531-1543.
- Yoden, S. and M. Yamada, 1993: A numerical experiment on two-dimensional decaying turbulence on a rotating sphere. *J. Atmos. Sci.*, **50**, 631-643.
- Yoden, S., Y. Naito, and S. Pawson, 1996: A further analysis of internal variability in a perpetual January integration of a troposphere-stratosphere-mesosphere GCM. *J. Meteor. Soc. Japan*, **74-2**, 175-188.
- Yoden, S., T. Yamaga, S. Pawson, and U. Langematz, 1999: A composite analysis of the stratospheric sudden warmings simulated in a perpetual January integration of the Berlin TSM GCM. *J. Meteor. Soc. Japan*, **77-2**, 431-445.
- Yoden, S., P. Haynes, D. Karoly, V. Ramaswamy, W. Randel, K. Sato, T. Shepherd, and M. Shiotani (Eds.), 2002a: Stratosphere-Troposphere Coupling. Special Issue of *J. Meteor. Soc. Japan*, **80-4B**, 769-1102.
- Yoden, S., M. Taguchi, and Y. Naito, 2002b: Numerical studies on time variations of the troposphere- stratosphere coupled system. *J. Meteor. Soc. Japan*, **80-4B**, 811-830.
- 余田成男・林 祥介・伊賀啓太・石岡圭一・田中 博・富川喜弘・中野英之・前島康光, 2006: AGUチャップマン会議”Jets and Annular Structures in Geophysical Fluids”の報告. 天気, **53-5**, 405-412.
- Yoden, S., H. Bui, and E. Nishimoto, 2014a: A minimal model of QBO-like oscillation in a stratosphere-troposphere coupled system under a radiative-moist convective quasi-equilibrium state. *SOLA*, **10**, 112-116.
- Yoden, S., K. Ishioka, D. Durran, T. Enomoto, Y-Y. Hayashi, and M. Yamada, 2014b: Theoretical aspects of variability and

predictability in weather and climate systems. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, **95-7**, 1101-1104.

Yoo, C. and S.-W. Son, 2016: Modulation of the boreal wintertime Madden-Julian oscillation by the stratospheric quasi-biennial oscillation. *Geophys. Res. Lett.*, **43**, 1392-1398.