

日本気象学会誌 気象集誌
(Journal of the Meteorological Society of Japan)

第85B 巻 2007年 7 月 目次と要旨
125周年記念特別号

招待論文

巻頭言	i
Yimin LIU・Brian HOSKINS・Michael BLACKBURN：夏季アジアの大気循環に 対するチベット高原の地形と加熱の影響	1-19
Yihui DING：夏季アジアモンスーンの変動	21-54
安成哲三：アジアのモンスーン気候とその変化における大気・陸面相互作用の役割	55-75
余田成男：大気予測可能性	77-102
二宮洗三・柴垣佳明：梅雨前線と梅雨降水系の多種スケールの様相	103-122
Dennis L. HARTMANN：大気大循環とその変動	123-143
山岬正紀：CISK としての熱帯低気圧（台風）に関する見解	145-164
Theodore G. SHEPHERD：中層大気の輸送過程	165-191
Jeffrey M. FORBES：熱圏の力学	193-213
深尾昌一郎：大気レーダー研究の発展	215-239
David L. WILLIAMSON：全球大気モデルの力学コアの発展	241-269
斉藤和雄・石田純一・荒波恒平・原 旅人・瀬川智則・成田正巳・本田有機： 非静力学大気モデルと気象庁での現業開発	271-304
Wei-Kuo TAO：雲解像モデル	305-330
露木 義・三好建正：気象学におけるデータ同化法の最近の発展	331-361
神田 学：都市気象研究の進展	363-383
真鍋淑郎・Ronald J. STOUFFER：温暖化における海の役割	385-403

.....◇.....◇.....◇.....

Yimin LIU・Brian HOSKINS・Michael BLACKBURN：夏季アジアの大気循環に対するチベット高原の
地形と加熱の影響

Yimin LIU, Brian HOSKINS, and Michael BLACKBURN: Impact of Tibetan Orography and Heating on the
Summer Flow over Asia

本研究では、全球プリミティブモデルを用いた数値実験により、夏季アジアの大気循環に対するチベット高原の地形効果と熱的効果を調査した。数値実験では帯状平均風は固定し、現実的な地形と加熱分布の実験に加えて、理想化した地形と加熱分布を与えた実験を行った。

チベット高原の地形と加熱の効果をそれぞれ単独で

与えた実験の結果には、いくつかの共通点が見られる。加熱のみを与えることによって対流圏上層のチベット高気圧はほぼ完全に形成されるが、地形のみを与えることによっても弱いながら形成される。チベット高原の地形と加熱の2つの効果により、チベット高気圧より下層の西側の大気は等温位面にそって高気圧性循環の中を赤道方向に移動しながら下降し、東側で

は極方向に向かって移動しながら上昇する。加熱のみを与えた実験では、チベット高原の南から南東域の下層で強い上昇流を伴う南西風が形成されるが、地形の効果を加えると周辺地形に沿って流れる。チベット高原の北側の西風域では、風下に向かって高くなる地形上では上昇流が、低くなる地形上では下降流が生じる。

チベット高原上の加熱は渦位の極小域を形成し、これが強い場合には、流れは不安定になり準2週間振動が発生する。この振動が見られる期間には、チベット高気圧は、チベット高原の南西部分に単一の中心を持つ分布から、中国と中東にそれぞれ中心を持つ分離した分布に変化し、次にはもとの単一中心の分布に戻る変化を繰り返す。これらの特徴は、この地域で現実に観測される振動と類似している。この準2週間の振動と関係して、チベット高原上の上昇流および北太平洋

域のロスビー波列の強さは明瞭に変化する。

この準2週間振動の起源は、Hsu and Plumb (2000) によって提案されているように、温位面上で東西に広がった渦位の極小域によって引き起こされる力学的不安定である。この東西に広がった極小域は、チベット高原上の加熱域上部で渦位が減少する傾向が生じるところに、渦位の減少の結果生じる高気圧性循環がもたらす東側への高い渦位の移流と西側への低い渦位の移流の効果が加わって形成される。チベット高原の南から南東にかけての背の高い対流は、準2週間振動を抑制する傾向がある。なぜならば、対流の上層で生成される低い渦位は、チベット高原南側に形成された渦位の南北逆勾配を解消するように働くからである。したがって、準2週間振動の発生は、チベット高原上およびその南～南東域の2つの地域での加熱の相対的な大きさに依存していることになる。

Yihui DING : 夏季アジアモンスーンの変動

Yihui DING : The Variability of the Asian Summer Monsoon

アジアモンスーンは世界の気候システムの中でもとりわけ顕著であり、過去20年間アジアモンスーンに関する研究はこれまで以上に精力的に行われてきた。1978年から1979年に行われたMONEX以来、物理プロセスや予測可能性に関して大きな進歩があった。とりわけ本論文では、夏季アジアモンスーンの変動に関する研究成果に焦点を絞り、その主要な進展を概観する。本論文は4つの部分から構成される。最初にアジアモンスーンの新たな地域区分や、モンスーン研究における主要なプロジェクト等を中心とした研究史を紹介する。次の章では、気候学的な年サイクルや季節進

行について、モンスーンのオンセットや終了などについて詳細に述べる。特に赤道付近の東インド洋からインドシナ半島にかけて生じる最も早いモンスーンオンセットについては細かく触れる。第3章では、おもに10日から20日、または30-60日スケールの振動や、対流圏の準二年周期振動、あるいはインド洋の双極子モード、さらには60年スケールの振動などの数十年規模スケールの変動に着目して、大気海洋相互作用や大気陸面相互作用の観点から取り上げる。第4章ではこれまでに得られた知見を総括した結論を述べるとともに、今後必要とされる研究について提案する。

安成哲三 : アジアのモンスーン気候とその変化における大気・陸面相互作用の役割

Tetsuzo YASUNARI : Role of Land-Atmosphere Interaction on Asian Monsoon Climate

本論文では、アジアモンスーン気候とその変動における大気・陸面相互作用についての最近の研究をレビューし、問題点をまとめた。積雪・土壌水分は気候システムの季節変化と経年変動における内部変数と考えられるが、地表面でのエネルギー・水循環を通して、モンスーン循環と降水の変動において限定的ながら重要な役割を果たしている。特に、比較的低緯度に

位置するチベット高原では、積雪のアルベド変化を通して、大気に影響していることが、気候モデルによる数値実験と観測の両方から示唆されている。また、GCM実験からは、乾燥・半乾燥地域における土壌水分アノマリーが大気に大きな影響を与えることが示唆されている。アジアモンスーン気候の形成には、チベット高原の力学的役割に加え、植生の存在そのもの

が水の再循環過程を通して、重要な役割を果たしていることも、GCM 実験で示されている。

人間活動による（森林破壊などの）土地利用・植生変化が地域的なモンスーンや降水過程に与える影響は、GCM と RCM（領域気候モデル）によるいくつかの数値実験によりなされているが、地表でのエネルギー・水循環変化を通して、大気境界層と雲・降水活

動に影響することが指摘されている。この場合、地表面変化が、大気での水蒸気収束と蒸発散に与えるフィードバック過程が重要である。さらに、大気下層および境界層における水蒸気量変化は、モンスーン地域の降水量変化に非常に重要なポジティブフィードバックを有することも指摘されている。

余田成男：大気の予測可能性

Shigeo YODEN : Atmospheric Predictability

日本気象学会創立125周年を記念して、この論文では数値天気予報と大気予測可能性研究の歴史を概観する。第1節で述べるように、20世紀における数値天気予報の発展は気象力学の進歩と密接に関係してきた。例えば、大規模な平衡流を近似的に記述する基本的道具である準地衡風方程式系の構築や、大気予測可能性の中心的概念であるカオスの発見などである。1990年代には、簡単な非線形力学系を用いた基礎的理論的研究（第2節）から現業の数値天気予報モデルを用いた実際の応用的研究（第3節）へと、コンピュータ技術

の急激な進展が予測可能性研究のレジームシフトをもたらした。そして、20世紀の終わりにはアンサンブル予報が主な予報センターで現業化されることとなった。第4節では、機動的観測法、新データ同化手法、双方向型多数全球アンサンブル予報など、現在、THORPEX (The Observing System Research and Predictability Experiment) 国際共同研究で取り組んでいる大気予測可能性研究の挑戦のいくつかを紹介する。

二宮洗三・柴垣佳明：梅雨前線と梅雨降水系の多種スケールの様相

Kozo NINOMIYA and Yoshiaki SHIBAGAKI : Multi-Scale Features of the Meiyu-Baiu Front and Associated Precipitation Systems

1991年7月の強い降水を伴う梅雨前線についての最近の幾つかの解析に基づき、梅雨前線と梅雨降水系の多種スケールの様相を議論する。

強い降水を伴い揚子江流域から日本列島に伸びる梅雨前線は西方に張伸した太平洋亜熱帯高気圧の西北縁に沿って形成された。この期間には、ブロッキングリッジが沿海州上空に、上層寒冷低気圧がモンゴル上空に出現していた。梅雨前線は下層ジェット、湿潤中立成層と大きな比湿傾度によって特徴付けられる。大陸上では前線の温度傾度は極めて小さいが、東シナ海・日本海・北西太平洋では熱帯海洋気団と極海洋気団の間はかなり大きな温度傾度が維持されている。

太平洋亜熱帯高気圧西縁における大きな南北方向の水蒸気流束の収束が梅雨前線帯の大きな降水を惹き起こしている。相当温位の鉛直差分移流は積雲対流の成層安定化作用に抗して、対流不安定を生成し、その結

果この期間の強い降水と湿潤中立成層を維持していた。

西方に張伸した太平洋亜熱帯高気圧から北に向かう大きな非地衡風に伴って、梅雨前線南側の発散（下降流）と前線内の収束（上昇流）が出現した。

上層寒冷低気圧の南縁を東進する短波長トラフと前線帯を東進する短波長トラフが結合する場合には、明瞭な短波長トラフが形成され、サブシノプテックスケール擾乱 (SD) が発達する。SDにはサブシノプテックスケール雲システムが伴う。SD後面の弱い寒気移流により長い雲域がSD後面の前線上に形成され、そこに東西に連なる幾つかのメソ α スケール雲システムが形成される。このような、一つのサブシノプテックスケール雲システムを先頭とし、それに後続する複数のメソ α スケール雲システムからなる、全長~2000 km に及ぶ“梅雨前線雲システム家族”が形

成される。これらの雲システムの構造と発達過程についても議論する。

Dennis L. HARTMANN : 大気大循環とその変動

Dennis L. HARTMANN : The Atmospheric General Circulation and Its Variability

大気大循環の理解がこの25年間でどこまで進展したかを概観する。渦の生成・伝播・消散と、渦による運動量フラックスおよび帯状平均風の間関係はいまや十分に理解されているので、運動量に関して強固な理論的土台にもとづく直感的な論証が可能である。帯状平均風の変動は、渦と平均流の相互作用の過程として理解することができる。潜熱が駆動する熱帯の子午面

循環と、波の駆動する中緯度のジェット気流の相互作用は、興味深い研究分野になってきている。重力波は大循環の運動量収支において重要な要素であることが明らかになり、現在は気象および気候のモデルにパラメータ化されて取り込まれている。惑星波は主に線形論で説明することが可能である。

山岬正紀 : CISK としての熱帯低気圧 (台風) に関する見解

Masanori YAMASAKI : A View on Tropical Cyclones as CISK

第2種条件付不安定 (CISK) としての熱帯低気圧 (台風) に対する著者の見解を述べる。これまでの熱帯低気圧に関する理論的、数値モデルによる多くの研究では、摩擦収束が重要な役割を果たす Ooyama (1964, 1969) や Charney and Eliassen (1964) の CISK が論じられてきた。この論文では、この CISK は主に目の壁雲に伴う循環としての強い熱帯低気圧に

適用 (限定) されることを述べ、他のタイプの CISK, すなわち、熱帯擾乱の発生や発達、熱帯低気圧の発生などを説明する CISK について述べる。また、粗い分解能の数値モデルにおいてはメソスケールに組織化した対流を解像することが重要であることを強調する。

Theodore G. SHEPHERD : 中層大気の輸送過程

Theodore G. SHEPHERD : Transport in the Middle Atmosphere

中層大気の輸送に関する現在の理解を概観する。これまでの25年間で、このテーマは Brewer-Dobson 循環の基礎的な理解から、輸送に関する多くの重要事項、例えば、成層圏のサーフゾーン、混合障壁、フィラメントの力学などの詳細な理解へと進化した。およそ20年前に現れた中層大気の輸送に関する美しい理論的枠組みは期待に応えることはなかったが、より現象

論的なモデルが斬新な診断手法とともに開発されてきた。これらの進展は、データ同化や数値モデルの開発とともに、長寿命化学種の衛星・航空機観測の出現によって可能となり、成層圏オゾンの減少などの問題により加速された。本レビューは、知識・関心においてもっとも高い成層圏を主に解説し、併せて中間圏についても簡単に取り上げる。

Jeffrey M. FORBES : 熱圏の力学

Jeffrey M. FORBES : Dynamics of the Thermosphere

地球の熱圏 (高度約90~500 km) の力学に関する過去25年間の研究発展についてレビューする。熱圏は

基本的に外部強制システムなので、はじめに、電離圏—熱圏におけるエネルギーの流入、変換および輸送の

メカニズムの概要を述べる。これは、熱圏を専門としない方々への熱圏力学の基礎とその背景に関する導入でもある。次に、進展の見られたいくつかの分野について、順に詳しく述べる。すなわち、(i) 熱潮汐波の下部熱圏(高度約100~150 km) 東西非一様性への役割や、東西平均循環への影響、(ii) 熱圏の東西平均循環とこれに伴う酸素原子と窒素分子の密度比の変動、循環の構造を決める放射加熱とジュール加熱の相

反的な役割、(iii) 極域のオーロラを含む熱圏の力学と、関連する磁気圏や電離圏素過程との結びつき、(iv) 地磁気擾乱、すなわち、磁気圏からのエネルギーや運動量の比較的急激な注入に対する熱圏のグローバルな応答、である。最後に、将来の研究の方向と今後数十年に取り組むべき問題について個人的見解を述べる。

深尾昌一郎：大気レーダー研究の発展

Shoichiro FUKAO : Recent Advances in Atmospheric Radar Study

大気レーダーは観測の対象となる大気圏に因んで、MST(中間圏・成層圏・対流圏)レーダー、あるいはST(成層圏・対流圏)レーダーなどと呼ばれている。ウィンド・プロファイラーあるいはプロファイラーという呼称も広く用いられているが、これはこの技術で上層風の高度プロファイルが計測できることによる。大気レーダーの他に比肩するものの無い優れた特徴は、晴天大気からの極めて微弱な散乱波を受信して、風や波動・乱流などを広い高度域で連続に観測できることである。なかでも鉛直流の直接観測は大気レーダーによって初めて可能となった。これに加えて運動量フラックスを高精度で直接に観測できることも大きな特色である。レーダーの規模にもよるが、観測の時間・高度分解能は数分・数百メートル以下である。また大規模な大気レーダーでは地表近くから高度100 kmに至る高度域で観測が可能となる。

一方、マイクロ波帯気象レーダーは、通常、降水粒子からの散乱波を受けるのみであるが、VHF帯大気レーダーは大気散乱波と降水粒子散乱波を同時に捉え、しかも両者を分離して解析することができる。これにより大気レーダーは、降雨を背景大気の振る舞いと同時に観測することが可能となった。大気レーダーが誕生して約30年になるが、その間に関連技術は急速に発展し、気象の観測研究に新しい可能性を拓いてきた。なかでもメソあるいはマイクロ・スケールの対流や降雨、大気重力波や乱流の精密な観測が可能になるなど、画期的な成果がもたらされた。さらに欧米や我が国で、小型プロファイラーの実用化が進められ、これを構成レーダーとしたネットワークが構築されて、気象予報業務に利用されるまでとなっている。

本レビューでは大気レーダーのこれまで30年間の発展の過程を辿る。

David L. WILLIAMSON : 全球大気モデルの力学コアの発展

David L. WILLIAMSON : The Evolution of Dynamical Cores for Global Atmospheric Models

全球大気モデルの力学コアに関する1960年代初頭の黎明期の開発から今日に至るまでの発展をレビューする。いわゆる「極問題」のために、大気モデルの数値的手法は直線的な発展をたどらなかった。黎明期には、複合メッシュに基づく方法、球面上の測地線や立法格子に基づく準一様格子法、あるいは極に近いほど時間ステップを短くする緯度経度格子が試みられたが、いずれもうまくいかなかった。そのため、その後スペクトル変換法が開発されると、この方法が全球大気モデルの主要な力学コアとして定着することとなっ

た。セミラグランジアン・セミ陰解法は計算コストの削減に有用であり、数値天気予報の分野で広く用いられている。気候モデルの物理的な特性を改良する必要から、シェーププリザービング(形保存)法や保存的な計算手法が開発された。今日では数値計算法を開発するグループは、必要な物理的な特性を得るための努力を活発に進めている。特に、精度や計算効率を維持しつつも、保存性やシェーププリザービングの性質を得る手法の開発を競っている。これらの手法は、準一様格子に基づく開発が主である。本論文ではより優れ

た物理的特性の必要性を強調するが、数千個のプロセッサと分散メモリ上での効率的な数値スキームの必要性が数値計算法の開発の大きな原動力になってきたことも見逃すことができない。

力学コアを評価するためのテストケースについても

簡単に紹介する。明確な決定論的なテストから、理想的な外力と完全なパラメタリゼーションセットが単純な条件のもとで与えられた長期の統計的なテストに至るまでさまざまである。最後に、力学コアとパラメタリゼーションの組み合わせに関する問題点を述べる。

斉藤和雄・石田純一・荒波恒平・原 旅人・瀬川智則・成田正巳・本田有機：非静力学大気モデルと気象庁での現業開発

Kazuo SAITO, Jun-ichi ISHIDA, Kohei ARANAMI, Tabito HARA, Tomonori SEGAWA, Masami NARITA, and Yuuki HONDA : Nonhydrostatic Atmospheric Models and Operational Development at JMA

本論分では研究と数値予報のための非静力学大気モデルについてレビューする。非静力学モデルの分類と音波を扱うための数値的手法について相対的な利点とともに記述する。現在の各国予報センターにおける現業非静力学数値予報モデルと研究用コミュニティ非静

力学モデルについてレビューする。

日本における研究と数値予報のコミュニティモデルである気象庁非静力学モデルの歴史と開発経緯について紹介する。気象庁での現業非静力学メソスケールモデルの現状と計画について示す。

Wei-Kuo TAO : 雲解像モデル

Wei-Kuo TAO : Cloud Resolving Modeling

気候モデルの中で用いられる雲過程の表現法をテストする最も有望な方法の一つとして、雲解像モデルと組み合わせて観測結果を使用することが挙げられる。雲解像モデルは、気候モデルなどと比べると、より洗練された、より現実的な雲物理過程の表現法を用いており、2~200 kmの空間スケールを持つ個々の雲や雲システムの時間変化・構造・ライフサイクルを解像することが可能である。雲解像モデルは雲・短波放射や長波放射・海面や地表面過程間の相互作用を陽に表現することが出来る。雲解像モデルの初期化や検証

に、観測が必要なことは言うまでもない。

本論文では、雲解像モデルの主な特徴とその応用例に関するレビュー・検討を行った。ここでは、(1) 対流の組織化、(2) 雲による熱・水蒸気収支と対流による運動量輸送、(3) 降水プロセスの日変化、(4) 放射-対流の準平衡状態、(5) 雲化学相互作用、(6) エアロゾル-降水の相互作用、(7) 広領域モデルにおける湿潤過程の改良、などを挙げた。さらに、雲解像モデルに関して、現在進行中のものや将来の開発要素と将来の応用例についても記述した。

露木 義・三好建正：気象学におけるデータ同化法の最近の発展

Tadashi TSUYUKI and Takemasa MIYOSHI : Recent Progress of Data Assimilation Methods in Meteorology

データ同化は、大気のような時間発展する複雑なシステムの状態を、観測データと数値モデルに基づいて高精度に推定する方法である。再解析データセットが研究用に広く利用されているように、データ同化は数値予報のためだけでなく、気象研究のためにも欠かせない道具になっている。1980年代からデータ同化法の新たな発展が始まった。このレビュー論文では、現在

注目されている高度なデータ同化法である4次元変分法(4D-Var)とアンサンブル・カルマンフィルタ(EnKF)について、その理論的背景と実装法を解説する。これらの方法に関する日本における最近の研究成果、特に4D-Varのメソスケール現象への適用と、局所アンサンブル変換カルマンフィルタの試験結果を紹介する。4D-VarとEnKFの比較についても簡単

に議論する。メソモデルのための最初の現業用4D-Varである気象庁のメソ4D-Varシステムの概要を付録に示す。

神田 学：都市気象研究の進展

Manabu KANDA : Progress in Urban Meteorology : A Review

本論では、都市気象に関する過去数10年の研究動向について解説する。ヒートアイランドの地理学的記述(郊外と都市の気温差等)は割愛し、都市が上空の大気環境に及ぼす力学的・熱的影響の記述に焦点を絞る。1章では、都市表面の多様性や人的活動の影響ゆえにその気象学的特徴を一般化することの困難さについて述べ、既存の物理相似則の適用可能性について検

討する。2章では、大気の底面境界としての都市表面の性質について述べ、各種陸面パラメータと地表面エネルギー収支について検討する。3章では、鉛直気温分布、局地循環、降雨を含めた都市大気の性質について説明する。4章では、数値モデリングと有望な新技術の最新動向について述べ、都市気象研究の将来の方向性・可能性を示す。

真鍋淑郎・Ronald J. STOUFFER：温暖化における海の影響

Syukuro MANABE and Ronald J. STOUFFER : Role of Ocean in Global Warming

海は、地球温暖化で、どのような役割を果たしているのだろうか？ いろいろな大気-海洋結合モデルを使って行った予測は、海が温暖化を遅らせることを示している。またこの遅れは、熱の鉛直混合が卓越する南極周海や北大西洋北部で特に大きくなっている。モデルによる予測が、これまで観測された表面気温の変化の分布と似ていることは心強い。しかしながら、海

上、特に南極周海での観測頻度が全く不十分であるため、本当にモデルと観測が合っているかどうか確信を持って結論することはできない。モデルによる温暖化予測を検証するためには、海面だけでなく、海中の全球長期観測を強化することがますます重要になってくる。