

— 4. 平成22年度第1回支部研究発表会要旨 —

日時：平成22年6月8日（火）14時40分～16時30分
場所：北海道大学 百年記念会館 大会議室

- 1 アラスカの雷について 31
北海道大学大学院工学研究科 早坂 洋史
M. H. Farukh
北海道大学大学院情報科学研究科 木村 圭司

- 2 監視カメラを用いた局地現象の長期モニタリング —その1— 33
北海道大学低温科学研究所 藤吉 康志
北海道大学大学院環境科学院 中村 一樹

- 3 2009年1月の成層圏突然昇温期における熱帯対流圏界層の気温変動要因 35
北海道大学大学院環境科学院 吉田 康平
北海道大学大学院地球環境科学研究院 山崎 孝治

- 4 双方向ネスト実験はGCM バイアスを低減できるか？ -1997年夏の例- 37
北海道大学大学院理学研究院 稲津 將
東京大学大気海洋研究所 木本 昌秀
北海道大学大学院理学研究院 佐竹 祐哉

- 5 系外惑星気候の数値計算にむけて 39
北海道大学大学院理学研究院 石渡 正樹

1. アラスカの雷について

早坂 洋史・M. H. Farukh (北海道大学大学院工学研究科)

木村 圭司 (北海道大学大学院情報科学研究科)

1. はじめに

アラスカの森林火災は主に雷が原因で発生している。2004年と2005年には2年連続で大火災が発生、2年間でアラスカの森林面積の10%に相当する約45,000km²が焼損した。この背景を明確にするため、過去約20年間の雷データを分析した。この結果、2004、2005、2007年の3ケ年の雷発生回数は、年間約12万回に達しており、年の平均約3万回の約4倍も発生していた。そこで、本論文では、2005年6月の雷が活発した気象条件について調べたので報告する。なお、2004年の結果の一部は前報¹⁾で報告済みである。

2. アラスカの雷の概要

アラスカは北米大陸の最北西部の北緯58°～71°、西経141°～166°に位置している。年間平均気温は-2.5℃で、年間降水量は260mmである。雷は、ブルックス山脈とアラスカ山脈で囲まれた内陸アラスカで発生する。

アラスカ火災局 (Alaska Fire Service、以下AFSと略記) から入手した、1986年6月から2009年7月までの約百万個の雷データを分析した結果、年間約12万回の雷が発生した2004、2005、2007の3ケ年を除いた年平均の雷発生数は約3万回であること、雷の約90%が6、7月の2ヶ月に集中して発生していること、雷の発生は、アラスカ標準時間の11時頃より始まり、雷の発生ピークは17時頃で、夜11時頃には終焉する傾向から、アラスカの雷は、主に“熱雷”であること、などがわかっている¹⁾。

3. アラスカの6月の雷発生特性

3.1 2000年以降の6月の雷発生傾向

アラスカでの6月の雷発生特性を知る事は、森林火災との関連で重要である。図1に2000年からのアラスカ全域での6月の雷発生傾向を示した。図1より、2005年の雷発生数は例年の平均2万6千回の2倍、5万1千回ほどであることなどがわかる。

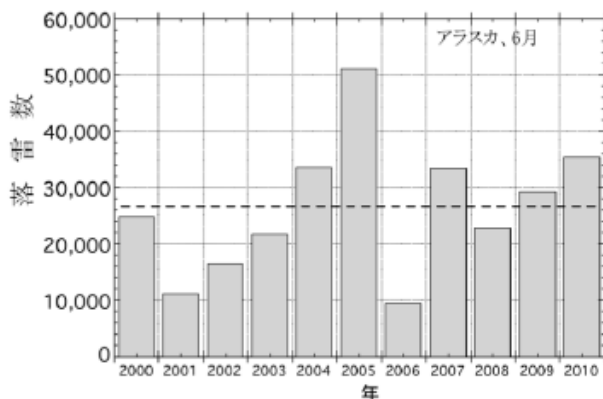


図1 6月の雷発生傾向(2000～2010年、アラスカ全域)

3.2 雷発生の気圧配置の傾向

図2に2005年6月の平均気圧分布図を示した。図2から、高圧部は北極海と太平洋に、低圧部はアリューシャン列島付近とアラスカ中央部に位置していることがわかる。このうち、アラスカ中央部の低圧部は、所謂“サーマルロウ(熱的低気圧)”である。この熱的低気圧は、夏期のアラスカでは、太陽高度は低いものの昼間の長さが長くなり、晴天でもあることから日射量が増え、地表面が暖められることで生じている。但し、砂漠地帯などで生じる熱的低気圧と比べると弱く、数日間しか継続しないようである。

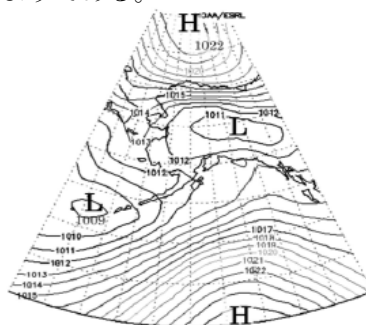


図2 2005年6月の平均気圧分布図(海面更正気圧図)

アラスカで雷が発生しやすい気圧配置を知るために、2005年の他に、雷発生数の平均数2万6千回より多い年の、2004、2007、2009、2010年の平均気圧分布図を比較した。この結果、1.アラスカ中央部の熱的低気圧に加え、2.北極海と太平洋に高圧部、3.低圧部はアリューシャン列島付近かアラスカ湾に位置している、ことがわかった。これ以外の年では、熱的低気圧がアラスカ中央部に生じなかったり、北極海に低圧部が存在していたりと、上記1+2+3の気圧配置の組み合わせが雷発生の活発化に重要であると言える。

3.3 雷発生の分布と雷雲

図3に2005年6月15日の雷発生分布図を示した。この日、一日で8,484回の雷発生が観測されている。これは過去約20年間の雷観測データの最高回数である。

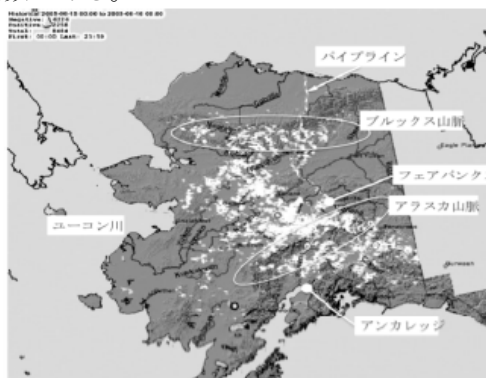


図3 2005年6月15日の雷発生分布図(アラスカ全図)

図3の雷分布から、主な雷発生地域は、北のブルックス山脈の南斜面、アラスカ中央部、アラスカ山脈の主に北側の斜面、アンカレッジ北方域からのカナダ国境までの地域であることがわかる。

図4に2005年6月15日の衛星 Terra の画像を示した。この図から白く丸い形が、発達した積乱雲であり、ほぼ図3中央部の激しい落雷点と一致していることがわかる。また、図4中のユーコン川の文字の側には、白くたなびく煙が見てとれるが、これは森林火災による煙で、北東方向から風が吹いていることがわかる。

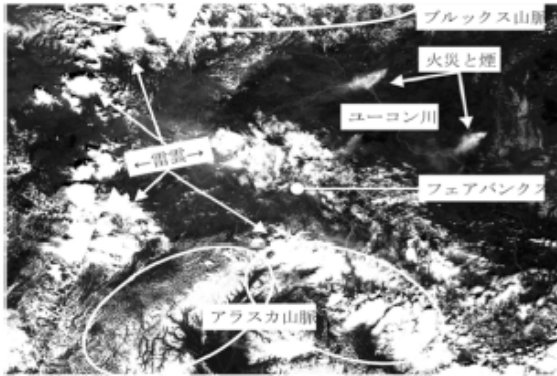


図4 2005年6月15日の雷雲分布図(アラスカ中央部)

3.4 2005年6月の雷発生傾向

図5に2005年6月のアラスカ中央部(北緯62.4~66.15度、西経142~151.5度の領域)での日ごとの雷発生傾向を示した。6月15日の落雷数は、約3千3百回であった。図5より、15日の雷は9日頃より始まり、17日には終焉したと言え、この間の地上天気図(海面更正気圧図)で、熱的低気圧の形成や移動、この他の低気圧や高気圧の移動を調べた。

3.5 2005年6月中旬の熱的低気圧の挙動

図6に2005年6月8~15日のアラスカ及び周辺の主な気象状況の変化を地上天気図で示した。図6中の左から、6月8、11、15日の3日の天気図を示してある。6月8日に、アリューシャン列島付近の低気圧の端にアラスカ中央部で、熱的低気圧が発生した。この後、この熱的低気圧は、アラスカ中央部で東西に移動し、6月16日にブルックス山脈上に移動し消滅するまで、約9日間持続した。

この間、アリューシャン列島付近の低気圧はアラスカ湾に移動し、熱的低気圧と共に、低圧部を形成した。11日には、アラスカ全域で約4千回の落雷が観測された。その後、アラスカ湾の低気圧は分裂し弱まったが、アリューシャン列島西方の低気圧から生じた低圧部がアラスカ湾の南北緯50度付近で発達し、そのまま西方へ移動した。この間の6月15日に、アラスカ全域で約8.5千回の雷が観測された。

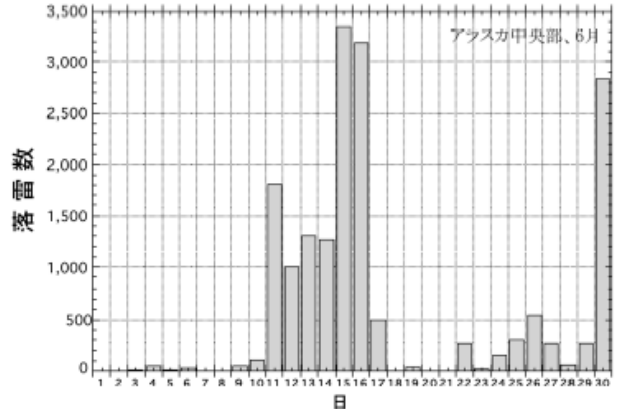


図5 2005年6月の雷発生傾向(アラスカ中央部)

3.6 2005年6月中旬の上空温度

2005年6月8~15日の925hPaでの温度を調べてみた。この結果、925hPa高度では、6月8~9日にアラスカとカナダの西経141度の国境のカナダ側に存在していた288Kの高温域が次第に大きく、温度も289Kとなった。この後、10~11日とこの高温域縮小していき、これに代わって、12日にアラスカ中央西部域で285Kの高温域が生成され、13、14日と徐々に温度を上げると共に、高音域も拡大していった。15日には、最高289Kまで温度が高まり、アラスカの内陸部は、286K以上の温度域で覆われていた。

参考文献

- 1) ファルク、早坂:アラスカの森林火災、日本気象学会北海道支部機関誌細氷、No.55,pp.26-27,2009.

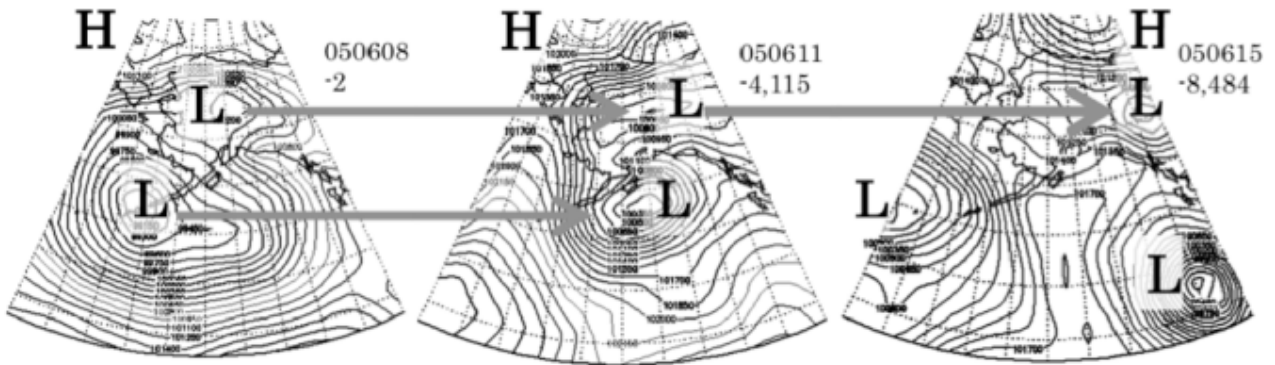


図6 2005年6月8~15日の主な天気図の変化

2. 監視カメラを用いた局地現象の長期モニタリング -その1-

藤吉 康志 (北海道大学低温科学研究所)

中村 一樹 (北海道大学大学院環境科学院)

1. はじめに

ドップラーライダーや新しい波長を用いたレーダのように、「新しい目」で自然を観ることも面白いが、気象の本質は、肉眼で見ることがやはり基本と考えている。しかし、1年中空を見ているわけにはいかない。また、雲、霧、海氷などは、インターバルで撮影した画像を再生することで、ようやくその変化を認識することができる。そこで、自分の目の代わりにしてくれる監視カメラを日本各地に設置して、通年のインターバル撮影を開始した。

2. 観測装置とデータ

用いた監視カメラは、画像データ記録装置【KADEC21-EYEII】(ノースワン株)である。画素数は、1.3Mピクセル(1024×1280)で、ファイルサイズは1枚約130KBである。画像は、日の出から日没まで、自動的に1分毎に1枚撮影する。画像のデータ形式JPGで、16GBのコンパクトフラッシュに記録するので、約200日分のデータが保存できる。電源は、電池も使用可能であるが、我々は長期に無人で観測を行いたいため、商用電源が使用できる場所(紋別市のオホーツクタワー、苫小牧市の苫小牧高専、北海道虻田郡真狩村役場、北海道勇払郡占冠村字中トマム、長崎市池島)で撮影を行っている。撮影対象は、以下の通りである。

紋別市のオホーツクタワー：流氷の動き、雪雲、湾内の結氷風景、霧

苫小牧高専：樽前山にかかる雲、噴煙、積雪変化、霧

真狩村役場：羊蹄山にかかる雲、積雪変化、植生変化、霧

トマム：雲海(朝の霧)

長崎市池島：海面の波、雲、黄砂、霧

3. 撮影画像の例

3.1 紋別市のオホーツクタワー

我々は、雄武と紋別の2か所にドップラーレーダを設置して、海氷、雪雲、雨雲の通年観測を行っている。本監視カメラは、現場の天気状況をとらえることと、紋別港内での結氷状況をモニターすることにより、海氷の生成と流動を調べることが可能である。特に、指状筏氷は、カメラを設置して3冬目で、ようやくその生成過程の撮影に成功した(図1右)。



図1 紋別港に侵入した流氷とガリンコ号(左)と、指状筏氷(右)

3.2 樽前山

樽前山は目の前に千歳空港があり、山によって生ずる複雑な気流や地形性雲が飛行機の離発着に影響する。また、樽前山の積雪は、地形性の雪雲によってもたらされ、山岳積雪と雪崩との関係、千歳空港のドップラーレーダデータとの比較も重要な課題である。さらに、山頂からの噴煙と地形性の雲との相互作用も興味深い。図2は、樽前山上空に発生した、一種の吊るし雲であるが、次の羊蹄山や富士山のような孤立した円錐形の山とは異なり、上層の広い範囲に雲を発生させているのが特徴的である。また、冬季で顕著であるが、北から雪雲が侵入したときに風下でハイドロリックジャンプが頻繁に見られた。そこで、現在は、苫小牧高専に微気圧計をセットしている。



図2 樽前山上空に形成された地形性の上層雲(一種の吊るし雲)

3.3 羊蹄山

富士山と形がうり二つの羊蹄山には、富士山と同じような地形性の雲が発生する。特に、笠雲はほとんど連日出現する(図3左)。それ以外にも、吊るし雲(図3右)、旗雲など多様な雲の変化は、見ている飽きない。ただ意外であったのは、朝方に放射霧が多いことである。



図3 羊蹄山にかかる笠雲(左)と吊るし雲(右)

3.4 トナム

トナムにはテラスから雲海を眺める施設がある(雲海テラス)。ただ、雲海とは言っても様々な形態があり、それが出現する気象条件もまだ明らかではない。摩周湖の霧のように、北海道の観光資源のひとつとして定着させるためにも、通年を通した観測が必要である。図4左は、典型的な雲海(朝に出現)であるが、霧が晴れると、3.2と3.3と同様に、吊るし雲が形成されることも多い(図4右)。



図4 トナムの雲海テラスから眺めた雲海(左)と吊るし雲(右)

4. まとめ

監視カメラの数は今後も増やし、新たな「観天望気」の可能性を探っていく予定である。

謝辞:

監視カメラの設置にあたって協力していただいた、トナムアルファリゾート、真狩村役場、苫小牧高専、紋別ガリンコタワーの皆様には大変お世話になりました。厚く御礼申し上げます。

3. 2009年1月成層圏突然昇温期における熱帯対流圏界層の 気温変動要因

吉田 康平・山崎 孝治 (北海道大学大学院地球環境科学研究院)

1. はじめに

2009年1月に顕著な成層圏突然昇温(SSW)が発生した。SSWは極域成層圏での昇温現象であるが、その原因となる成層圏子午面循環は同時に熱帯成層圏でも降温をもたらす。小寺ら(2009年気象学会秋季大会)は2009年1月のSSWが熱帯対流圏界層(TTL)に影響を及ぼしていると指摘している。本研究では同時期におけるTTLでの気温変動とそのメカニズムに関する考察を行い、SSWとの関連性も調べた。

2. データと解析手法

使用データはヨーロッパ中期予報センターの再解析データERA-Interimを用いた。解析では主にTransformed Euler Mean(TEM)方程式を用いた。波の解析は子午面場についてはEliassen-Palm(EP)fluxを、3次元のものについてはPlumb(1985)で提唱されたwave activity fluxを用いている。残差鉛直流の診断は簡略化したTEM方程式を残差鉛直流について解くことで行っている。

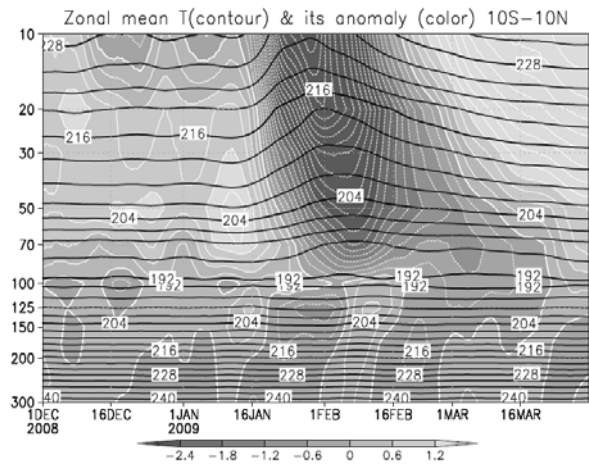


図1. 10°S-10°N平均した帯状平均気温[黒等値線; K]と帯状平均気温偏差[陰影と白等値線; K]の時間高度断面。等値線の間隔は(黒)2 [K]、(白)0.6 [K]

3. 結果

熱帯について1月16日周辺からSSWに伴う10 hPa面気温の急激な減少が見られ、気温減少傾向が下方へ伝播する(図1)。150-100 hPaについても気温低下が見られるが、70 hPaの降温より時期が先行しており上層とは異なる気温の変動要因が考えられる。熱帯の150-10 hPaについて帯状平均気温と残差鉛直流の関係を比較すると、70-10 hPaまではSSWに伴う気温減少が上昇流による冷却で説明可能である。

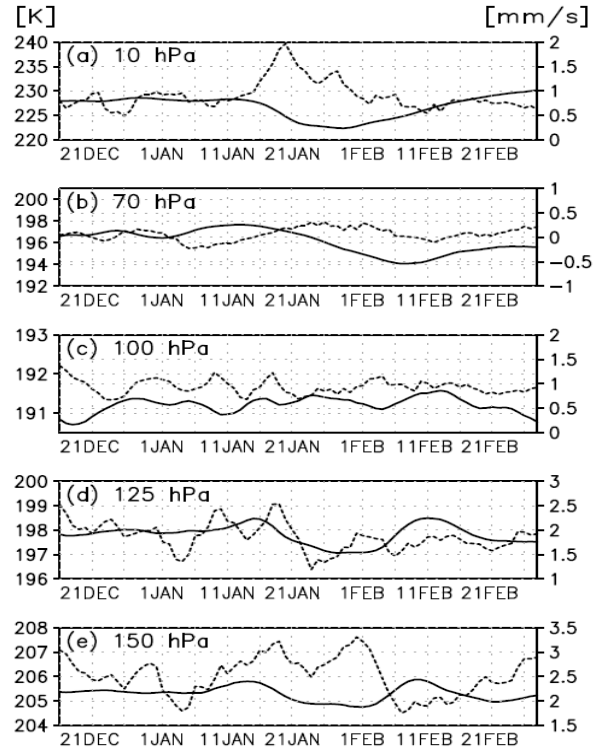


図2. 10°S-10°N平均した帯状平均気温[実線; K]と残差鉛直流[破線; mm/s]の時系列 (a) 10 hPa (b) 70 hPa (c) 100 hPa (d) 125 hPa (e) 150 hPa

だが、150-100 hPaでは70 hPaに先行して上昇流に伴う気温低下が生じ、さらに125-150 hPaでは上昇流の効果のみでは説明できない気温減少が存在する(図2)。この気温変動の成因を明らかにすべく10°S-10°N平均したTransformed Euler Mean(TEM)熱力学エネルギー方程式の収支解析を行った。150-100 hPaでの気温減少の序盤である1月18日前後は上昇流による冷却効果が卓越し、150-125 hPaではその後、対流構造の変化が原因とみられるVertical eddy heat flux (VEHF)収束による加熱効果の緩やかな弱化に伴い気温減少が維持されたことが明らかになった。150-100 hPaは70 hPaと異なる鉛直流の変動をしていることから熱帯対流圏界層付近での波活動による循環の駆動が考えられる。EP fluxとWave activity fluxを用いた解析を行ったところ、1月18日前後に200-100 hPaでSSWを駆動した波と波源が同じと考えられる中緯度から熱帯に向かう波が見られた(図3、4)。

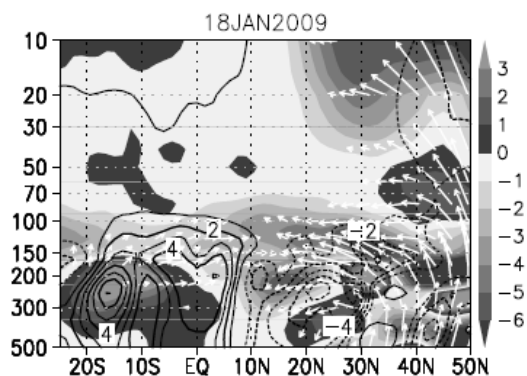


図 3. 2009 年 1 月 18 日の残差鉛直流[等値線; mm/s]、EP flux [ベクトル; kg/s²]、EP flux 発散[m/s/day]の子午面断面

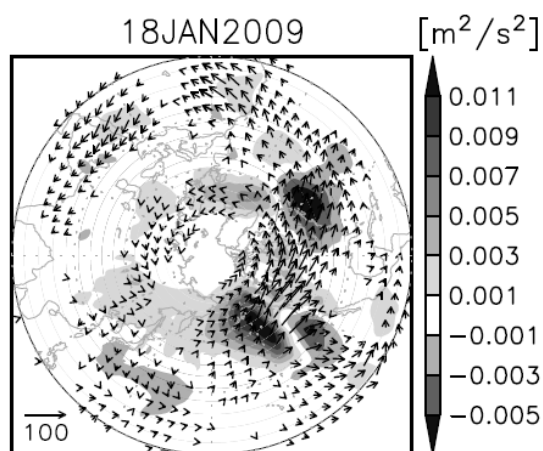


図 4. 2009 年 1 月 18 日の 125-100 hPa 平均した wave activity flux の水平成分[ベクトル; 10⁷ m²/s²]、鉛直成分[カラー; 10⁷ m²/s²]で、いずれも緯度の余弦を乗じている。

これらの波の挙動と残差鉛直流の関係を調べるべく鉛直流診断を行った。その結果、2009 年 1 月 18 日前後の熱帯 150-100 hPa の上昇流は 90 hPa より下層の外力(波の運動量輸送、非断熱加熱など)ではほぼ説明でき、さらに 100 hPa、10N 付近の EP flux 鉛直成分の収束が最も寄与していることが明らかになった(図 5)。この波は図 3、4 で示した SSW と同起源の北半球中緯度対流圏から熱帯に向かう波が熱帯付近で上方に伝播したものに相当する。

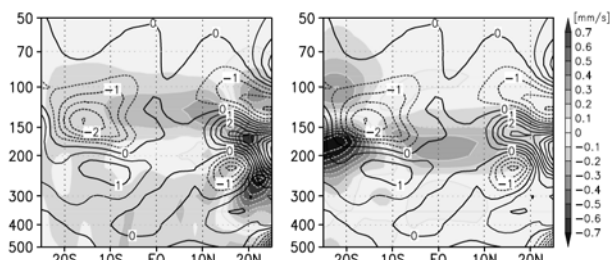


図 5. 2009 年 1 月 18 日の EP flux 鉛直成分の発散編差 [等値線; m/s/day]と(左)その 5°N 以北の作用で駆動される残差鉛直流偏差(右)赤道以南の作用で駆動される残差鉛直流編差[mm/s]の子午面断面。

4. まとめ

ここまでの解析から、以下のことが明らかになった。

- 1) SSW 発生時の 2009 年 1 月 18 日前後の 150-100 hPa での上昇流は北半球中緯度対流圏から熱帯に伝播した波が駆動した
- 2) 150-125 hPa では 1 月 18 日前後の上昇流に加え、その後の Vertical eddy heat flux 収束の弱화가気温低下を維持した

また 1 月 18 日の wave activity flux が Kiladis and Weickmann (1992) で示された対流に寄与をもたらす波の水平構造に酷似していることから、この波が対流の変動に寄与していることも考えられ、これは今後の課題である。

5. 参考文献

Kiladis, G. N. and K. M. Weickmann, 1992: Extratropical forcing of tropical Pacific convection during Northern winter. *Mon. Wea. Rev.*, 120, 1924-1938.

Plumb, R. A., 1985: On the three dimensional propagation of stationary waves, *J. Atmos. Sci.*, 42, 217-229.

小寺 邦彦、江口 菜穂、一丸 知子、2009: 2009 年 1 月の成層圏突然昇温現象の熱帯成層圏・対流圏への影響, 日本気象学会 2009 年度秋季大会講演予稿集, A203.

4. 双方向ネスト実験は GCM バイアスを低減できるか？

- 1997年夏の例 -

稲津 将・佐竹 祐哉 (北海道大学大学院理学研究院)
木本 昌秀 (東京大学大気海洋研究所)

1. はじめに

計算機の長足の進歩と気候モデル技術の進展により、近年、気候実験の高解像度化が著しい。しかしながら、全球一様に数 10 km 格子で気候実験を行うことは、プロジェクト指向研究でなければできない程、莫大な計算機資源を必要とする。

一方で、仮に高解像度実験がなんらかの成功を収めたとして、一体、どこを高解像度化したことが有効であったのかを診断せねばならない。このため相対的に計算コストが小さい部分高解像化モデルを提案する必要がある。

これまで高解像気候実験を診断できる部分高解像度モデルは、大別して3つの方法が提案されている。第1のスーパー=パラメタリゼーション (Khairoutdinov and Randall 2001) は雲を陽に計算した効果を各グリッドに返すため、スケール間相互作用を見る目的には使いにくい。第2の非一様格子全球モデル (Deque and Piedelievre 1995) は細かい格子と粗い格子をシームレスに繋ぐため、パラメタリゼーションやパラメタの共通化に問題がある。そこで、本研究では、第3の方法である双方向ネストモデルを提案する。

双方向ネストモデルの利点は、上記に述べてきたような部分高解像モデルの使命である高解像度化の診断にある。これはすでに Inatsu and Kimoto (2009) で報告済である。一方で、双方向ネストモデルへの別の期待として、大気大循環モデルのバイアスを補正することがあげられる。Lorenz and Jacob (2005) で行われた世界初の双方向ネスト気候実験では、熱帯の対流圏中央部に見られる高温バイアスを見事に低減した。

2. モデルと実験

本研究で用いたモデルは Inatsu and Kimoto (2009) で開発した双方向ネストモデル INCL である。INCL は大気大循環モデル MIROC4.0-AGCM と領域モデル JMA/MRI NHM を内包する。オフラインモードでは自動的に力学的ダウンスケーリングを行い、インタラクティブモードでは領域モデルの計算結果を大気大循環モデルに強制力として課す。本研究では、前者と後者の両方に対して5つのアンサ

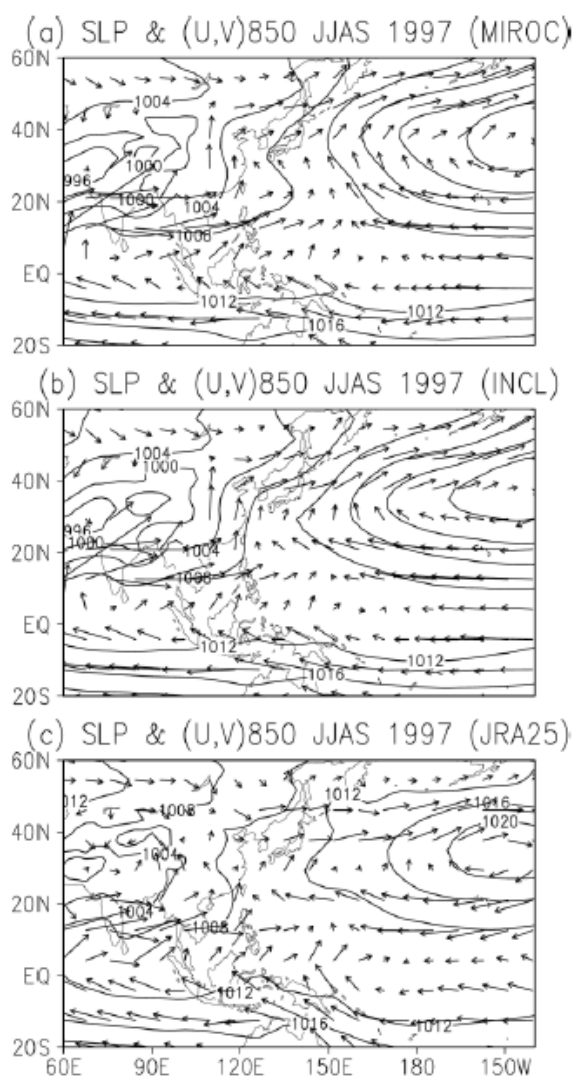


図 1: アジア域における海面気圧(等値線間隔 2 hPa)と 850 hPa 面の水平風(10 m/s の基準を図下に配置)。(a) MIROC4.0-AGCM の AMIP 実験の結果。(b) INCL の AMIP 実験の結果。(c) JRA25 再解析データ。

ンブル実験を行った。以降、前者を MIROC 実験、後者を INCL 実験と呼んで区別する。

なお、すべての実験は 1997 年 5 月 15 日から 10 月 11 日までの AMIP 型実験であり、ネスト領域は熱帯西太平洋域で、領域モデルの解像度は 50 km である。

3. 1997 年夏の気候値のバイアス

図 1 は MIROC 実験、INCL 実験、および JRA25 の 1997 年夏季のアジア域の気候値である。MIROC 実験では太平洋高気圧のアジア域への張り出しが弱く、日本の南に明らかなモンスーン低気圧の侵入というバイアスが認められる。一方、INCL 実験では現実のように日本の南まで太平洋高気圧の張り出しがある。

この要因を分析すると日本の南の領域での対流圏中上層の気温の季節変動が MIROC 実験で大いにずれていることがわかった(図 2)。一方、偶然か必然かはともかくとして領域モデルは MIROC の境界条件を用いて力学的ダウンスケーリングしているにも関わらず、このずれは小さい。従って、MIROC

のバイアスが大きく領域モデルのバイアスが小さいこの性質が INCL 実験でバイアスを小さくするのに貢献したものと考えられる。本研究ではさらに熱帯低気圧の挙動についても、バイアスが低減したことを示した(図略)。

謝 辞

INCL 開発にご助言頂きました齋藤和雄博士、井上孝洋氏、三浦裕亮博士、及び齋藤冬樹博士に感謝いたします。文部科学省革新プロジェクト、DIAS プロジェクト、及び科学研究費若手(B)18740293 並びに環境省地球環境総合推進費 RF-061 および S-5-3 より研究資金を得た。

参考文献

- Déqué, M., and J. P. Piedelievre, 1995: High resolution climate simulation over Europe. *Clim. Dyn.*, 11, 321–339.
- Inatsu, M., and M. Kimoto, 2009: A scale interaction study on East Asian cyclogenesis using a general circulation model with an interactively nested regional model. *Mon. Wea. Rev.*, 137, 2851–2868.
- Khairoutdinov, M. F., and D. A. Randall, 2001: A cloud resolving model as a cloud parameterization in the NCAR Community Climate System Model: Preliminary results. *Geophys. Res. Lett.*, 28, 3617–3620.
- Lorenz, P., and D. Jacob, 2005: Influence of regional scale information on the global circulation: A two-way nesting climate simulation. *Geophys. Res. Lett.*, 32, L18706.

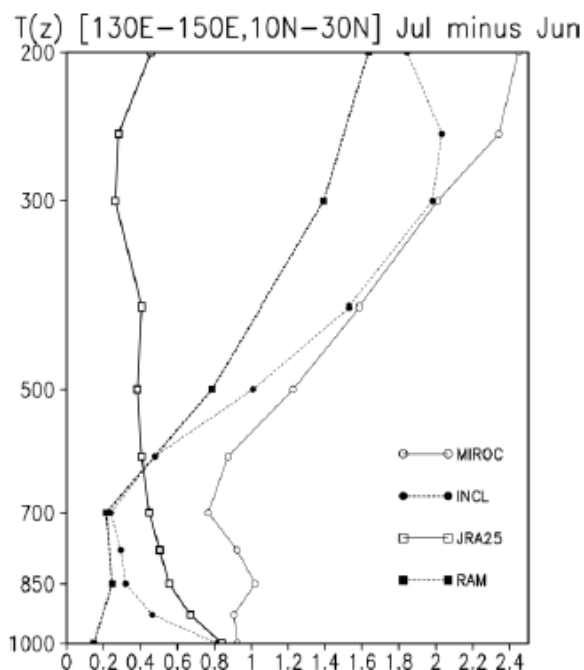


図 2: 東経 130 度～150 度、北緯 10 度～30 度で囲まれた領域で平均した 7 月と 6 月の平均気温の差。(細実線) MIROC 実験の結果。(細点線) INCL 実験の結果。(太実線) JRA25 再解析データ。(太点線) 領域モデルによる力学的ダウンスケーリングの結果。

5. 系外惑星気候の数値計算にむけて

石渡 正樹 (北海道大学大学院理学研究院)

1. はじめに

近年、天文学的な観測技術の発達により、太陽系の外の惑星が約 500 個発見されている。これらの惑星は系外惑星と呼ばれている。その中には、地球の数倍程度の質量を持ち地球型惑星だと考えられるものもある。

地球型の系外惑星の気候に関する情報を直接観測から得ることはまだ成功していないが、系外惑星を念頭においた GCM 計算を行い、系外惑星の気候状態を推定する試みがいくつか行われている。ここでは、地球型惑星を想定した GCM 計算のいくつかをごく簡単に紹介し、系外惑星気候の数値計算に関する問題点を指摘する(詳しくは、細水本号の解説を参照されたい; 石渡、2010)。

2. 系外惑星の気候に関する数値計算

系外惑星は、離心率や軌道長半径などの軌道要素に大きな多様性を持つことが観測からわかってきている。この多様性に注目して、これらのパラメータを地球の値から変更させた計算が行われている。主なものを以下に挙げる。

● エキセントリックプラネット

系外惑星の中には、非常に大きな離心率をもつものが発見されている。これらはエキセントリックプラネットと呼ばれている。Williams and Pollard (2002) は地球用の大気 GCM と 50m の海洋混合層の結合モデルを用いて、エキセントリックプラネットを模した系の数値計算をおこなっている。そこでは、地球と同じ年平均日射量を与え、離心率を 0.7 とした場合に、1 年を通じて惑星表面の一部は温度が結氷点以上に保たれることが示された。この結果をもとに、Williams and Pollard (2002) は惑星表面に液体の水が存在できるかどうかは軌道要素によらず、平均日射量で決定されるだろうと論じている。

● 自転傾斜角の大きな惑星

大きな自転傾斜角を持つ系外惑星を模した数値計算が、Williams and Pollard (2003) によってなされている。彼らは、Williams and Pollard (2002) と同様のモデルを用いて自転傾斜角を変更した数値実験を行った。その結果、自転傾斜角が大きい惑星の気候は低温の熱帯と高温の高緯度で特徴づけられることを示した。この数値実験においても、液体の水が存在できる温度

領域は惑星表面上に常に存在しており、Williams and Pollard (2003) は自転傾斜角の大きな惑星においても生命が存在できる可能性を指摘している。

● 陸惑星

軌道要素ではなく、惑星表層の H_2O 量を減らした場合の研究もなされている。Abe et al. (2005) は、惑星全体が陸で覆われ表層の H_2O 量が地球に比べて少ない陸惑星における気候を考察している。かれらは、大気 GCM と深さ 5m のバケツモデルを結合させたモデルを用いて、自転傾斜角を変更させた数値実験を行った。

その結果、陸惑星条件において地球と同じ太陽定数と自転傾斜角を与えた場合には、1 年を通して赤道域には雨がまったく降らないことが示された。一方、太陽定数を地球と同じ値にし、自転傾斜角を 60 度とした場合には低緯度でも降水が起こる。循環構造は違っても、地球と同じ太陽定数の値のもとでは、 H_2O 量が少量であっても表層の一部には液体の水が存在できる状態が実現される可能性があることが示された。

● 同期回転惑星

これまでに発見された系外惑星の多くは、中心星のごく近傍に存在している。これらの惑星には強い潮汐力が働くために、自転周期と公転周期が等しくなる(同期回転している)と考えられている。二酸化炭素大気を持つ同期回転惑星の場合について、Joshi et al. (1997) が GCM を用いた考察を行っている。その場合、地表面気圧が 100 hPa 以上であれば、二酸化炭素大気は暴走凝結を起こさず、地表面温度は高く保たれる、という結果が得られている。これに対して、我々は水蒸気を含む大気に関する考察を行った(納多、2010)。

灰色放射、雲無し、swamp ocean など単純化した GCM を用いて経度 180 度までの西半球領域にのみ入射放射が存在し、東半球領域には入射放射が無いものとして計算を行った。太陽定数と自転角速度の値は現在の地球の値を与えた。その結果、昼半球から夜半球へ相当量の熱輸送が起こり、暴走温室状態には至らず液体の水が存在できる温度範囲が実現されることが示された。

昼半球から夜半球への熱輸送は、赤道波の伝播に伴うものと擾乱に伴う潜熱輸送によるものがある(図 1)。

3. まとめ

系外惑星を想定した数値的な研究がおこなわれるよ

うになってきた。その手法は、地球用のGCMを用いて離心率や自転傾斜角などのパラメータを変更した数値実験を行う、というものである。それらの結果は、地球とは異なる条件下であっても惑星表面に液体の水の存在を許容する状態が得られる場合があることを示している。今後もこのようなGCM実験を継続することにより、系外惑星の気候の多様性が明らかになるであろうと期待される。しかしながら、系外惑星を想定した数値計算の大きな問題点は、観測が困難あるいは不可能であるため、数値解と観測結果の比較によって計算結果の正当性を評価することができないことである。

この問題に対して、我々は、簡単モデルから大気大循環モデルに至るまで複数種類のモデルの数値解を順次対応づけることができれば、複数のモデルで得られた結果同士の整合性を確認することができ個々の結果の正当性も補強できるであろう、と考えている。我々は、複数種類のモデルの数値解を順次対応づける一連の数値実験を行うのに適したモデル群の姿を模索してきている(dcmoel プロジェクト)。これらのモデル群による数値計算と新たな観測プロジェクトの結果を有機的に結合することにより、地球型の系外惑星の気候の姿が明らかになるであろうと期待される。

参考文献

地球流体電脳倶楽部 dcmoel プロジェクト,
 2005: <http://www.gfd-dennou.org/library/dcmoel/>, 地球流体電脳倶楽部.
 納多哲史他、2010: 第24回大気圏シンポジウム講演集, <http://www.isas.ac.jp/j/researchers/symp/>
 石渡正樹、2010: 細氷, **56**, 2-10.
 Abe et al., 2005: *Icarus*, **178**, 27-39.
 Joshi et al. 1997: *ICARUS*. **129**, 450-465.
 Williams, D. M., Pollard, D., 2002: *International Journal of Astrobiology*, **1**, 61-69.
 Williams, D. M., Pollard, D., 2003: *International Journal of Astrobiology*, **2**, 1-19.

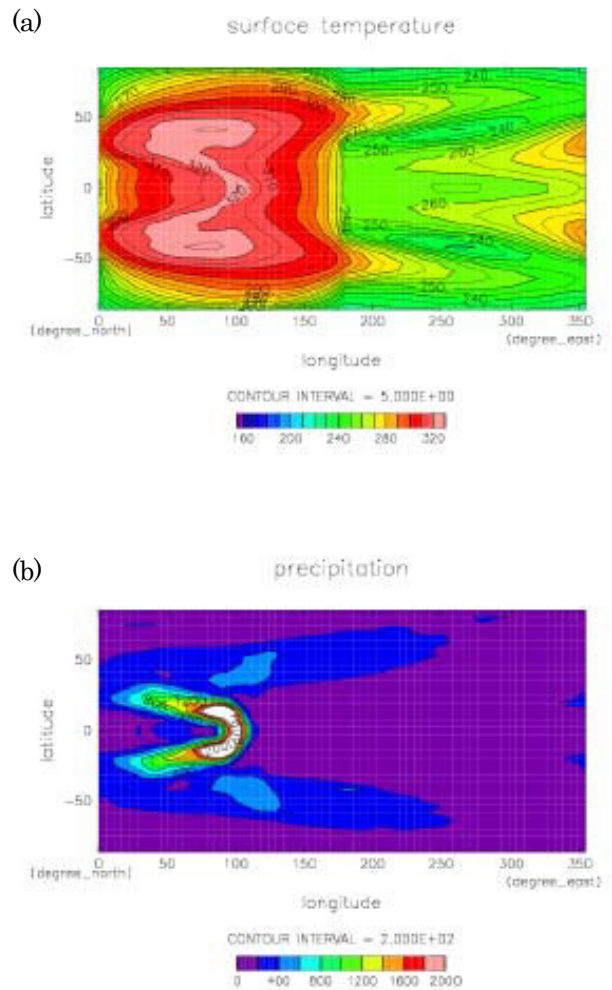


図1: 同期回転惑星に関する数値実験結果。1000 - 2000 日の時間平均場。(a) 地表面温度[K]。等値線の間隔は 5 K。(b) 凝結加熱率[W/m²]。等値線の間隔は 200 W/m²。白い部分は 2000 W/m² 以上を示す。