



2. 宇宙気候学の現状と課題

2. Understanding Space Climate: Current Status and Open Issues

草野 完也^{1,2)}

KUSANO Kanya^{1,2)}

¹⁾名古屋大学太陽地球環境研究所, ²⁾独立行政法人海洋研究開発機構システム地球ラボ

(原稿受付: 2013年9月25日)

太陽の周期的活動およびその長期変動が地球気候に影響を与えていることを示唆する観測データは少ない。しかし、太陽放射、太陽風、太陽高エネルギー粒子、銀河宇宙線など太陽活動に関係する物理過程の何げどのような物理機構を通してそうした変動を生み出し得るかは未だに十分解明されていない。地球環境の長期変動メカニズムを明らかにすると共に環境変動の予測を高めるためにも、自然起源の環境変動に重要な役割を果たす太陽と地球の関係を理解することが求められている。そのためには太陽活動の詳細な理解と宇宙と地球環境を一体として扱う新しい科学的視点が求められる。本章では宇宙気候学の現状と共に今後の研究課題について議論する。

Keywords:

space climate, solar cycle, little ice age, total solar irradiance, cosmic ray, climate change

2.1 太陽と地球

1. で示したとおり、宇宙気候学とは宇宙、特に太陽の活動に起因する長期環境変動を扱う学問分野である。太陽は様々な形で地球に影響を与えるため、宇宙気候学は多様な物理過程を包括的に考えなくてはならない総合科学である[1]。地球の環境は様々な要素が複雑に作用しながら決まる複合システムであるが、太陽放射は地球表面環境における主たるエネルギー源としての役割を果たしている。それ故、はじめに地球の平衡温度について考察してみよう。

地球の平均表面温度は地表へのエネルギー入射にバランスする黒体放射によって決まると考えられる。このため、その平衡温度 T はステファン・ボルツマンの法則

$$\sigma T^4 = 1/4 I_{TS} (1-A) + G \quad (1)$$

に従うであろう。ここで、 σ はステファン・ボルツマン定数である。一方、右辺は気候強制力と呼ばれ、地表へのエネルギー入射流束に対応する。このうち、 I_{TS} は地球の平均公転軌道上における総太陽放射量 (total solar irradiance) を表し、気候強制力の第1原因を与える。ただし、大気中のエネルギーの流れは複雑であるため、気候強制力の決定にはさらに多くの過程が関与する[2]。図1に大気中のエネルギー流束の主なものを図示するが、大気上端に入射した太陽放射は大気と地球表面などによって一定の割合 (アルベド) A だけ反射される。地球のアルベドは約0.3であり、その多くは対流圏の雲の反射が担っている。また、地球が球であるため表面に入射する平均エネルギーには球の断面積と表面積の比 (1/4) がかかる。一方、赤外

線として地表から放射される電磁波は大気中の温室効果ガスで吸収され、大気から地表に向け G だけ再放射される。その結果、地球表面の平均平衡温度は主に総太陽放射量 I_{TS} 、アルベド A 、温室効果 G の3つの要素から決まることがわかる。

1970年代後半からの衛星観測によって、総太陽放射量を精密に測定する努力が続けられている。測定器の絶対較正は難しいため総太陽放射の絶対値に関しては未だに不定性が残るが、最新の観測値によると太陽極小期における総太陽放射は $1360.8 \pm 0.5 \text{ W/m}^2$ とされている[3,4]。一方、総太陽放射の黒点周期に伴う変動についても明らかにされており、総太陽放射量は黒点が多数現れる太陽活動極大期に平均的に増加し、極小期に減少することが知られている(図2)。黒点は文字どおり太陽表面に現れる暗い部分なので、大きな黒点が現れると総太陽放射量は一時的に減少する。しかし、極大期には白斑と呼ばれる明るい領域が多数現れる為、太陽の光度は平均的に増加する。実は、黒点も白斑も太陽表面を横切る磁束管に対応している。ただし、黒点は大きな磁束管であるため、対流を抑制し下層からの熱流束を抑えるのに対し、白斑は小さな磁束管であるため磁束管内で透明度が増す効果で明るくなると考えられている。

ただし、図2のように極大期と極小期の総太陽放射量の変化は約0.1%にすぎない。このため、(1)式の右辺に対応する気候強制力の変動は約 0.2 W/m^2 程度しかない。この微小な放射変動がどのような役割を果たすかは宇宙気候学の重要な研究課題である。一方、総放射量の変化は小さく

¹⁾Solar-Terrestrial Environment Laboratory, Nagoya University, Nagoya, AICHI 464-8601, Japan

²⁾Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology (JAMSTEC), Laboratory for Earth Systems Science author's e-mail: kusano@nagoya-u.jp

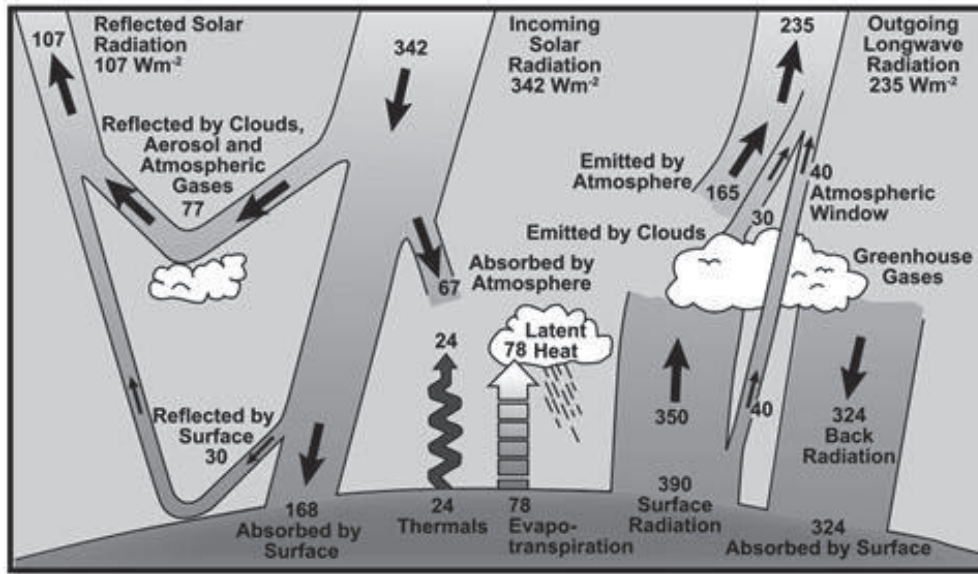


図1 地球大気中のエネルギー流束. それぞれの数字は各過程のエネルギー流束 (Wm^{-2}) を示す. ([2]より転載)

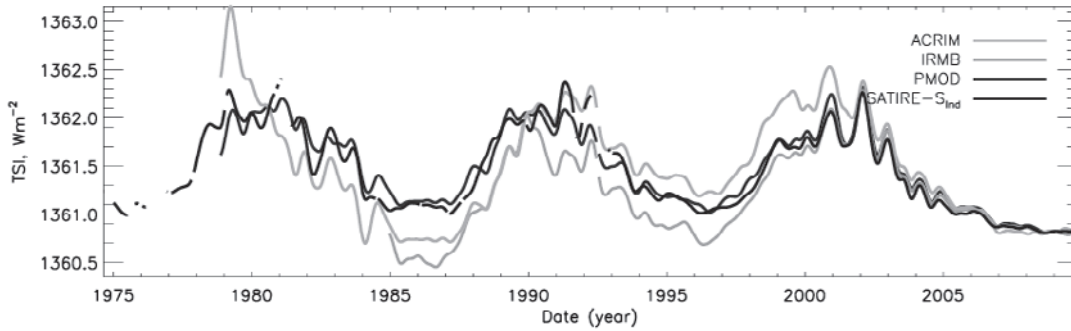


図2：総太陽放射量の年変化. 3つの異なるデータセット (ACRIM, IRMB, PMOD) および STIRE モデルによる再現結果, PMOD を基準としてプロットしてある ([2]より転載).

でも紫外線域のみをみれば, 太陽活動に伴う変化は比較的大きい. それゆえ, 総放射線のみならず太陽放射スペクトルの変化と気候変動の関係を探ることも宇宙気候学の重要課題となっている. この問題に関しては3.2節で詳しく議論される.

太陽から地球に届くエネルギーとしては放射以外にも太陽風と太陽高エネルギー粒子がある. 太陽風は完全電離の高温プラズマである太陽コロナが超音速に加速された流れである. また, 太陽高エネルギー粒子は太陽フレアや衝撃波によって加速された非熱粒子である. さらに, 3.3節で議論するように太陽黒点活動の変化によって銀河宇宙線量も増減する. しかし, 太陽風や高エネルギー粒子が運ぶエネルギーは太陽放射に比べて桁違いに小さく, それぞれ $6.5 \times 10^{-4} W/m^2$ および $2 \times 10^{-4} W/m^2$ に過ぎない[5]. それゆえ, 太陽風や高エネルギー粒子がエネルギー源として地球環境に影響を与えることは考えがたい. ただし, 太陽風は磁気圏の変動を介して, 高エネルギー粒子は大気中のイオン化を通して何らかの影響を地球の表層環境に与える可能性が指摘されている. それらの効果を定量的に理解すると共に, そのメカニズムを解明することも宇宙気候学の主要な研究課題である.

2.2 太陽周期活動に伴う気候変動

3.1で議論されるように太陽表面に現れる黒点の数と面積は 11 ± 2 年ほどの周期で増減を繰り返すことが, 過去400年間の黒点観測から見出されている. シュワーベ・サイクルと呼ばれるこの周期活動の原因は太陽対流層における電磁流体力学的ダイナモ作用にあると考えられている. しかし, これを説明するための様々なモデルが提案されているが, その詳細機構は未だに十分には解明されていない. シュワーベ・サイクルに伴って黒点のみならず総太陽放射量, 放射スペクトル, 太陽風, フレア発生数, 銀河宇宙線量, 磁気嵐や電離圏嵐の発生頻度など様々な宇宙環境変数が変化する.

一方, Whiteらは海洋表層温度には $0.08 \pm 0.02 K$ の11年周期変動および $0.14 \pm 0.02 K$ の22年周期変動成分が存在している[6, 7]. さらに, これらの変動は最大2年程度の位相遅れをもって太陽黒点周期に同期している. このことから太陽黒点活動は地球気候に何らかの影響を与えていると思われる. しかし, 平衡温度を $0.1 K$ 変化させるためには少なくとも $0.5 W/m^2$ 程度の気候強制力変動が必要であると考えられるが, これは太陽黒点周期に伴う太陽総放射量変動の2~3倍に対応する. すなわち, 太陽周期

活動は総放射量変動の2～3倍の影響を地球気候に与えている可能性がある。この増幅効果の原因を探ることは宇宙気候学の重要課題である。

この増幅効果の原因を探るために、これまで様々な提案がなされている。それらのいくつかについて以下で概観してみよう。

放射スペクトル変動の効果

太陽影響の増幅効果として初めに考えられる機構は前述したように放射スペクトルの変化に伴う影響である。特に、波長300 nm以下の紫外線の太陽活動に伴う変動は数%から数10%に達する。ただし、こうした紫外線はほとんどオゾン層に吸収されて地表に到達しない。紫外線を吸収するオゾン層は熱容量の小さな成層圏の温度を上昇させることにより、成層圏と対流圏の力学的結合を通して地表環境に影響を与える可能性がある[8, 9]。このプロセスについては3.2節でくわしく議論される。

銀河宇宙線の効果

太陽周期活動によって太陽風と太陽圏の構造が変わるため、地球軌道に侵入する銀河宇宙線の量も変化する。この銀河宇宙線の変化が気候に影響を与えるという仮説も提案されている[10, 11]。特に、宇宙線は大気中の原子を電離することで対流圏にイオンを作り雲核や雲の成長に影響を与えるというモデルが提案されている。この問題については3.3節および5章にて詳しく論じられるように、観測と実験の両面から検討が進められているが、最終的な結論には未だ至っていない。

太陽風と地磁気擾乱の効果

太陽極大期には太陽フレアやコロナ質量放出(CME)のような爆発的現象が太陽で発生し、その影響は衝撃波を伴った太陽風の変化として地球に到達する。こうした太陽風擾乱およびその結果として生じる地磁気変動が気候に影響する可能性も指摘されている。例えば、Seppäläらによると、地磁気活動度の高い年と低い年の表面温度に、特に冬季の高緯度地域で明確な差が現れることが示されている[12]。

太陽高エネルギー粒子の影響

以上のような相関関係の解析は太陽活動に起因する気候変動が存在することを示唆している。しかし、その原因となる物理機構を明らかにすることは容易ではない。機構解明を難しくする原因の一つは、図3に示すとおり太陽黒点、太陽放射、太陽電波、宇宙線など気候に影響を与える様々な物理量がいずれも太陽黒点活動に同期して変化することにある。それゆえ、たとえ特定の物理量が地球の気候と相関していたとしても、他の物理過程が働く可能性を排除することはできない。

例えば、太陽活動極大期には大型の太陽フレアの頻度が高まる。その結果、地磁気に影響を与えるCMEの数も増えると同時に、地球大気に侵入する太陽高エネルギー粒子も増える。大気中間圏に侵入した太陽高エネルギー粒子は大気中で電離を通して窒素酸化物を生成する。この窒素酸化物はその後、成層圏まで降下し成層圏オゾンを減少させることが知られている[13]。それゆえ、年平均した変動の相

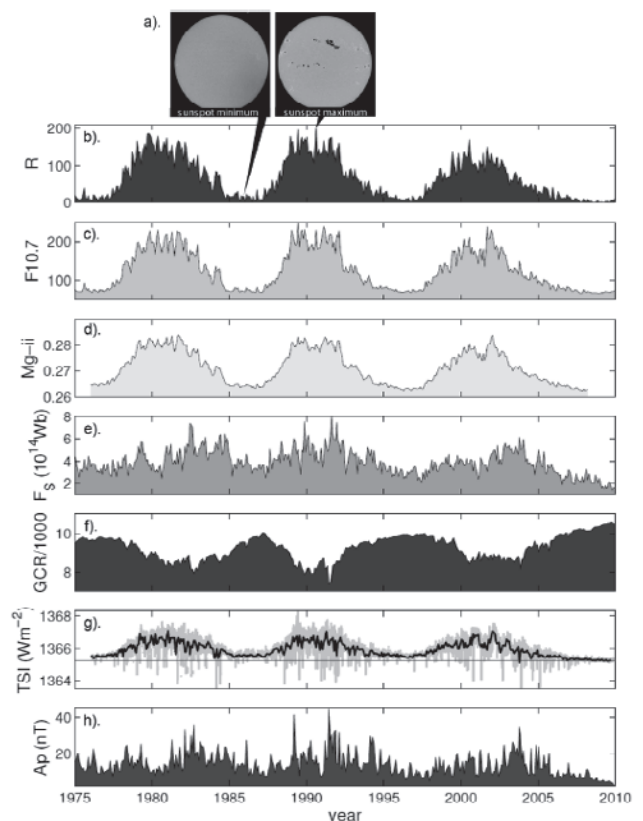


図3 太陽周期活動に伴う様々な変数の変化。(a)黒点像、(b)黒点相対数、(c)10.7 cm 波長太陽電波強度、(d)太陽彩層Mg II 放射強度、(e)太陽から惑星間空間へ開いた全磁束量、(f)銀河宇宙線量、(g)総太陽放射、(h)地磁気変動Ap指数 ([1]より転載)

関関係だけでは、フレアに伴う太陽風変動と高エネルギー粒子のどちらが表層環境により大きな影響を与えたかを明確化することは難しい。こうした同期する複数の現象のいずれが重要な役割を果たすかを明らかにするためには、全地球的な平均気候だけでなく様々な時間・空間スケールにおける相関関係をより詳細に調べることが求められる。

同期協調作用について

複合的な同期作用である太陽活動の影響が地球気候システムにある種の協調作用を与える可能性も指摘されている。Meehlらは全球大気循環モデルを用いて全太陽放射の変化と太陽放射スペクトルの変化の協調作用について解析した[14]。彼らは太陽周期活動に伴う全太陽放射の変化と紫外線の変化をそれぞれ単独に与えた場合とその両方を同時に与えた場合の気候変動を計算した。その結果、それぞれ単独で与えた場合には再現できなかった、赤道からやや離れた領域の降水量の変化や東太平洋赤道域の表層温度の変化などを2つの影響を同時に与えることによって再現することができた。このことは単独では微小な影響しか与えない変動が地球気候システムの中で協調し、その影響を増幅させる可能性を示すものとして注目されている。

2.3 太陽活動の長期変化と気候変動

過去約400年間の黒点観測は太陽周期活動が一定ではな

く、周期ごとに変動することを示している。特に、西暦1645年ごろから約70年間はマウンダー極小期と呼ばれ、黒点が継続してほとんど現れなかった時期であったと考えられている。さらに、3.3節で紹介されているとおり、マウンダー極小期は小氷期と呼ばれる寒冷時代に対応している[15]。このことは太陽活動が長期的な気候変動の原因となる可能性を示唆する。

さらに長期スケールの変動においても太陽活動と気候の間の相関が見出されている。図4はNeffらが見出した太陽活動指標である樹木年輪中の炭素同位体変動 $\Delta^{14}\text{C}$ と北オマーンにある洞窟内石筍中の酸素同位体変動 $\delta^{18}\text{O}$ の相関変化を示している[16]。 $\delta^{18}\text{O}$ は降水量の指標であり、彼らの測定は十年スケールから千年スケールに至る幅広い時間スケールで、太陽活動の低下($\Delta^{14}\text{C}$ の増加)と北オマーンにおける降水量の減少($\delta^{18}\text{O}$ の増加)の間に相関があることを示している。Neffらはこの結果より、モンスーン活動と熱帯収束域の活動に太陽活動が影響を与える可能性を指摘している。

太陽活動の長期的変動と小氷期に代表される数百年スケールの気候変動の間に何らかの因果関係があるのか?もし、あるならばそのメカニズムは何であるのかを解明することは、宇宙気候学の最大の課題である。このためには過去の太陽活動を再現し、マウンダー極小期のような長期の低活動状態が、11年周期変動の極小期とどのように異なるのかを明らかにしなくてはならない。

2.4 宇宙気候学の課題

これまで見てきたように長期的な太陽活動の変化と地球

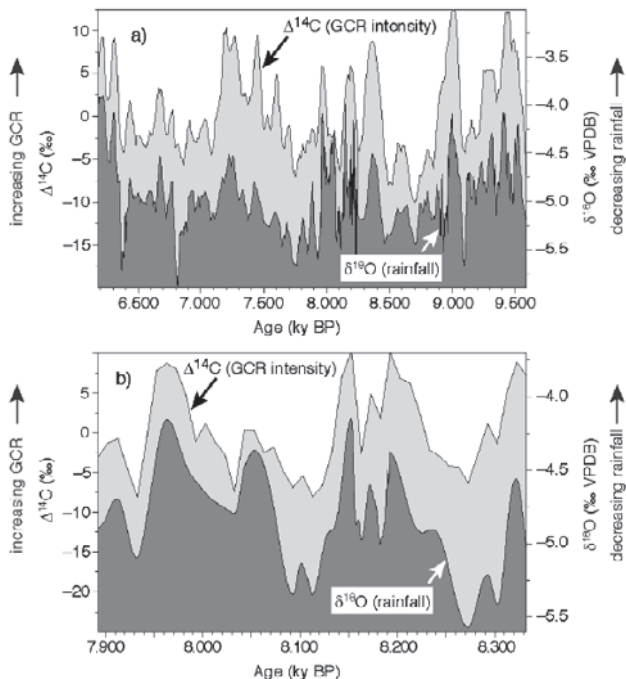


図4：太陽活動によって変化する銀河宇宙線変動の指標である樹木年輪中の炭素同位体($\Delta^{14}\text{C}$)と降水量の指標である酸素同位体($\delta^{18}\text{O}$)の変化。a)は[16]より転載。a)は9600年前から6100年前までを、b)は8300年前から7900年前までの拡大図を示す。

環境の間に何らかの相関関係が存在することを示すデータは数多い。しかし、それらの原因を特定するためには今後とも継続した研究が必要である。特に、過去の太陽活動の精密な再現を行うと共に、様々な刺激に対する地球環境システムの応答を明らかにする必要がある。それゆえ、今後の宇宙気候学における課題として以下の項目を挙げることができる。

①太陽活動の定量的再現

長期的な太陽活動、特にマウンダー極小期における太陽活動を定量的に再現する必要がある。このためには、黒点スケッチと樹木年輪中の ^{14}C および氷床中 ^{10}Be など宇宙線起源同位体の解析から、過去の太陽放射の総量とスペクトル、太陽風強度とその変動、太陽高エネルギー粒子等を定量的に再現する方法論の開発が必要である。現代における精密な太陽観測はそのための貴重なデータを我々にもたらす。特に、太陽表面の微小な磁束と太陽放射スペクトルの関係を明らかにすることは重要である。現在運用中の「ひので」衛星による継続した観測や次世代太陽観測衛星計画Solar-Cは、そのために極めて重要な役割を果たすと考えられる。

②精密な相関解析

太陽放射、太陽高エネルギー粒子、銀河宇宙線、太陽風、地磁気活動など太陽活動に起因する物理量と気候変動の様々な指標との相関解析をより精密化する必要がある。太陽活動の影響は単に平均気温の変動としてのみならず、時間的空間的に構造をもつ気候場のモードの変化としてより顕著に現れる可能性がある。それらを的確に見出すことは重要であり、そのためにはさらに空間分解能の高い精密な相関解析を進めなくてはならない。また、より時間スケールの短い変動を捉えることで、年平均値では見ることのできない物理機構の違いを相関解析から見出す試みも有効であろう。例えば、太陽面爆発に伴う磁気雲の効果で一時的に地球に到達する銀河宇宙線量が低下すること(フォープッシュ減少)が知られているが、その際の気候要素の変化を調べることにより銀河宇宙線の効果のみを抽出することができるであろう。

③気候変動メカニズムの要素研究

放射変動、宇宙線による雲核生成、中層大気の化学変化など太陽活動の影響を受けると考えられる大気中プロセスの詳細メカニズムをその素過程から解明することは重要な課題である。例えば、5章で議論されるように宇宙線による大気の電離が雲核生成にどれほど影響するかについての実験研究が現在進められている。こうした研究は、複雑な大気システムが微小な刺激に対してどのように応答するかを調べるものであり、一般的な大気科学の研究としても重要な課題である。

④大気システムの複合的な協調作用の解明

さらに、同期した複数の刺激に対して大気がどう応答するかを知ることが重要であろう。精密な数値シミュレーションの開発がこのために要求される。例えば、中高層大気の化学変化と対流圏の力学的結合を扱うことができるモデル、雲核の種類と量の変化の影響を直接扱うことができ

るモデルを開発する必要があるだろう。超水滴法と呼ばれる新しい雲物理モデルはそのために有効であると考えられる[17]。

宇宙気候学は太陽から地球気候にまたがる総合科学である。その進展のためには天文学と地球科学の双方を理解し、宇宙と地球をつなぐ新しい視点が必要である。古気候の記録は太陽活動が地球環境に影響を与えてきたことを示しており、将来の気候変動においても太陽は何らかの変化を地球環境に与える可能性が高い。宇宙と地球を一つのシステムとして考える新しい環境学として、宇宙気候学が発展することを願う。

参考文献

- [1] L.J. Gray *et al.*, Rev. Geophys. **48**, 4001 (2010).
- [2] Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) (2007).
- [3] G. Kopp *et al.*, Metrologia **49**, 29 (2012).
- [4] E.T. Ball *et al.*, Astron. Astrophys. **541**, A27 (2012).
- [5] ジュディース・リーン：パリテイ **21**, 4 (2006).
- [6] W.B. White *et al.*, J. Geophys. Res. **102**, 3255 (1997).
- [7] W.B. White *et al.*, J. Geophys. Res. **103**, 355 (1998).
- [8] K. Kodera and Y. Kuroda, J. Geophys. Res. **107**, 4749 (2002).
- [9] L.L. Hood and B.E. Soukharev, J. Atmos. Sci. **60**, 2389 (2003).
- [10] H. Svensmark and E. Friis-Christensen, J. Atmos. Terr. Phys. **59**, 1225 (1997).
- [11] H. Svensmark *et al.*, Geophys. Res. Lett. **36**, L15101 (2009).
- [12] A. Seppälä *et al.*, J. Geophys. Res. A **114**, 10312 (2009).
- [13] C. E. Randall, *et al.*, Geophys. Res. Lett. **32**, 5802 (2005).
- [14] G. A. Meehl, Science **325**, 1114 (2009).
- [15] G. Bond *et al.*, Science **294**, 2130 (2001).
- [16] U. Neff, Nature **411**, 290 (2001).
- [17] S. Shima *et al.*, Quarterly J. Royal Meteorological Soc. **135**, 642, 1307 (2009).