

## 5. 気候研究におけるデータ解析の意義と今後の課題

植田 宏 昭\*

### 1. はじめに

日本気象学会の誕生125周年という節目の年に講演させていただく機会をいただき、ありがとうございます。このお話を頂いたのは米国で研究生活を送っている時で、主題に関し日本の気象学会の置かれている状況や学問の進展などについて思いを巡らせ、それらを同僚と議論をしていた時期でもありました。今回頂きましたテーマ「大気科学研究の展望」はいささか私には大きすぎますので、私自身の専門である広域モンスーンのデータ解析やモデリングの視点から私見を述べさせていただきます、議論の緒となれば幸いです。

本講演の前半では、再解析や観測データの現在の状況を地球温暖化予測と照らし合わせながら整理し、それらの抱える課題についてお話しさせていただきます。後半では、アジアモンスーン域における季節予報の精度向上に向けて、これからどのような方策を採っていけばよいのかについて、国内外の論文をご紹介しますながら皆様と一緒に考えていきたいと思います。

### 2. 温暖化予測と客観解析

21世紀に入った今、「地球温暖化」という言葉は小学生でも知っている日常用語になりつつありますが、今から30年ほど前にこのような現在の状況を予想していた人は少なかったと思います。大衆科学雑誌「National Geographic」の1976年11月号に、気候予測に関する興味深い記事が載っています。当時は、1920年代から50年代に比べ全球的に温度が低下する傾向が顕著で、少なからぬ科学者が寒冷化傾向について警鐘を鳴らしていました。特集が組まれた1976年当時

は、現在のようには数値モデルや観測データの整備が進んでおらず、雑誌のグラフには温暖化と寒冷化の2つの予測が「？」マークともに併記されていました。果たして1980年代から地上気温が上昇に転じ、それらは人為起源の温室効果気体によって引き起こされている可能性が高いことが、気候変動に関する政府間パネル報告書 (IPCC 1990, 1995, 2001) によって段階的に指摘されてきました (Weart 2005)。

2007年にはIPCCの第4次評価報告書 (AR4) が全て提出されますが (IPCC 2007)、中でも温室効果気体の排出シナリオ (SRES) に基づいた世界各国の大気海洋結合モデルによるマルチモデルアンサンブル実験の結果が注目されています。マルチモデルアンサンブルの利点とは、複数 (最大23個) の大気海洋結合モデルの出力データを比べることによって、モデル間の誤差と自然変動とを分離できる点にあります。研究者はより多くのモデルを使ったアンサンブル平均の作成にやっきになっており、私自身もその例外ではありません。しかし、解析を進めていくうちに、幾つかの疑問がふと脳裏を横切ようになりました。実際に各々のモデルを子細に見ていくと、解析対象によってはモデル間でのばらつきが非常に大きく、「いくら統計的に有意といっても、そう簡単にアセスメントをしてしまってもよいのか？」という自問自答の日々が続いています。特に、20世紀気候再現実験の結果が全球大気の再解析データや現場観測データと整合していない場合、本当に信頼の得られる将来予測が果たして可能なのかという疑念が高まっています。

AR4向け解析の「騒動」が少しだけ落ち着き<sup>†</sup>、気

\* Hiroaki UEDA, 筑波大学生命環境科学研究科。

hueda@kankyo.envr.tsukuba.ac.jp

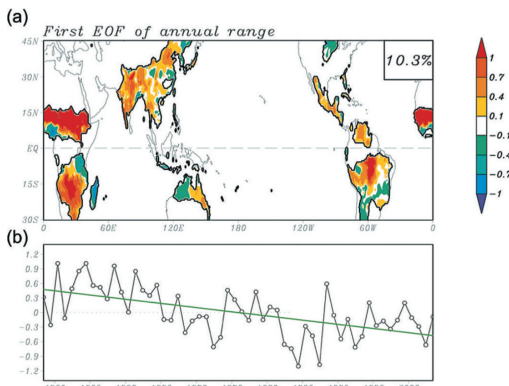
© 2009 日本気象学会

<sup>†</sup> 気候モデルによる温暖化予測データの配信が2004年冬に開始され、その解析結果がAR4に引用されるには翌年5月までには論文を投稿することが義務づけられていた。

象庁 (JRA25; Onogi *et al.* 2007), 欧州中期予報センター (ERA40; Uppala *et al.* 2005), 米国環境予測センター (NCEP1, NCEP2; Kalnay *et al.* 1996; Kanamitsu *et al.* 2002) などの全球大気再解析データが出そろった今こそ, 温暖化が顕著になった1980年代から現在までの気候システムの変化を改めて見直し, 温暖化のシグナルを注意深く検証していくことは, より信頼性の高い将来予測を行う上で必要不可欠と考えています。以下に例を挙げてご説明いたします。

第1図は陸上で観測された降水の第1主成分の空間分布(上段)とスコア時系列を示しています(Wang and Ding 2006)。熱帯・中緯度の多雨地域の多くで, 1950年代から現在まで降水量の季節変化の振幅は全般に減少傾向を示していますが, 温暖化が顕著になってきた20世紀の終盤にはそのトレンドが不明瞭になっています。第2図は1980年から2200年までの8つのモデルでシミュレートされた夏季(6~8月)アジアモンスーン降水量(赤道~30°N, 60°~100°E)の時系列を示しています(Ueda *et al.* 2006)。第1図とは異なり, 海洋上の降水も含まれていますが, 全てのモデルでの降水量は1980年代から増加傾向を示し, 21世紀の年降水量の増加は平均で100年あたり約255 mmとなっています。一方, 20世紀再現実験の結果には両者には大きな違いがあることが指摘されていますが, 総じて高解像度のモデルの信頼性が高いことが報告されています。

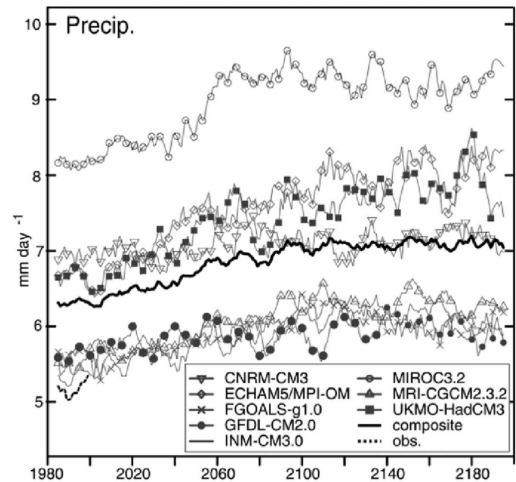
アジアモンスーンの降水を考える上では, 循環場や



第1図 (a) グローバルモンスーン域における正規化された降水量の年変化量に対する第1主成分の空間分布(経験直交関数)。(b) 対応する主成分スコア時系列。Wang and Ding (2006) に拠る。

水蒸気場の議論, つまり力学的・熱力学的な視点が不可欠です(Emori and Brown 2005)。この問題に最初に注目した Kitoh *et al.* (1997) は, 二酸化炭素(CO<sub>2</sub>)の倍増実験によってモンスーンの降水量は増加する一方で循環自体は弱まる「風と雨のパラドックス」を指摘しています。なお, マルチモデルアンサンブルの解析からは, アジアモンスーン域に輸送される水蒸気量が温暖化に伴って増加することがその主な原因であることが確認されています。

この水蒸気の増加は温暖化によって暖まった海洋からの蒸発の増加によって主にもたらされるものと考えられますが, どの海域からどのように循環しているのかについては今のところよくわかっていません。Douville *et al.* (2002) は, 地上気温の顕著な上昇と降水量にみられるわずかなトレンドとの間を説明するメカニズムとして, 水蒸気の循環率の変化が鍵であることを指摘しています。マルチモデルアンサンブルデータに基づき水蒸気の循環率・降水効率を計算しますと, 第3図に示すように, 温暖化時には双方とも著しく減少する傾向にあることが分かりつつあります(Kamae 2007)。なお, IPCCのマルチモデルデータは大気海洋結合モデルからの出力に基づき作成されていますが, 海洋の基本場や変動特性はモデル間で大き



第2図 8個の気候モデルにより計算された夏季(6~8月)アジアモンスーン域(赤道~30°N, 60°~90°E)の降水量(mm/day)の時系列(1980~2200年)。太実線は8個のモデルの平均を示す。破線は現在までの観測値(CMAP)。Ueda *et al.* (2006) に拠る。

く異なり、それが大気に与える影響も無視出来ないものとなっています (Timmermann *et al.* 1999)。

話が少し細かくなりましたので、温暖化と客観解析に関し、最後にハドレー循環の議論を採り上げたいと思います。ハドレー循環は熱帯で上昇した空気塊が中

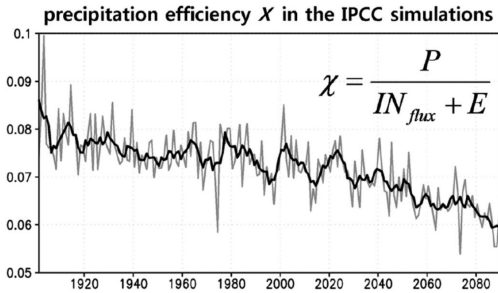
緯度で下降する南北循環を指します。温暖化に伴って中高緯度の地上気温の上昇が熱帯に比べて相対的に大きい場合は、温度傾度は減少します。一方、熱帯域の降水量の増加によって対流圏の中上層部の気温は凝結熱加熱で暖まるため、大気の安定度の観点から考えると、ハドレー循環は弱まることが予想されます。Mitas and Clement (2005) は冬期ハドレー循環のトレンドを各種の客観解析やシミュレーションデータ間で比較していますが、同じNCEPの中でもNCEP1 (Kalnay *et al.* 1996) とNCEP2 (Kanamitsu *et al.* 2002) では異なる傾向を示しているなど、問題が山積しています (第4図)。なお、Kobayashi and Maeda (2006) は、循環の季節シフトを考慮すれば問題は軽減されるとしています。

このように、客観解析データと各種の観測データとの定量的な検証がさらに必要であり、その際には衛星観測など客観解析以外の指標との整合性のチェック、より細かい時間スケールの現象の寄与 (例えば、Klingaman *et al.* 2006 ; Shinoda 2005) などが今後の課題になると考えられます。さらに、人為起源のダストやブラックカーボンなどのエアロゾルが、アジアモンスーンの季節サイクルや年々変動に大きな影響を与えていることが指摘されており (Lau and Kim

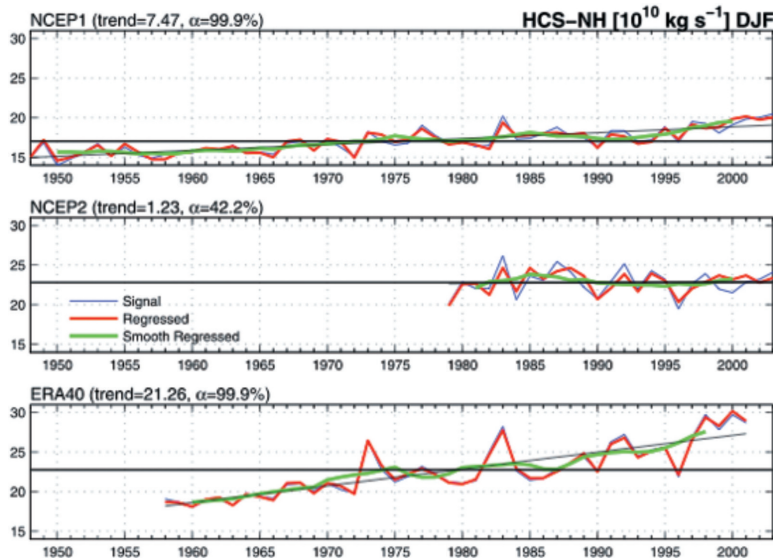
2006 ; Meehl *et al.* 2008), 今後の研究が待たれていることを付記しておきます (第5図参照)。

### 3. 季節予報の精度向上にむけて

日本の2005/06年の寒冬、2006/07年の暖冬は皆様のご記憶にも新しいかと思えます。このような気候の変動、とりわけ年々の変動は、人々の暮らしや経済、農業などに様々な影響をもたらします。日本は中緯度に位置しているため、熱帯や高緯度からの影響をも考慮しなくてはならず、またモンスーン変動の影響も大きいため、季節予報が非常に難しい地域であると言わ



第3図 夏季(6~8月)アジアモンスーン域(0°~30°N, 60°~90°E)での降水効率の変化 (Kamae 2007)。太実線は5年移動平均値。降水効率は水蒸気流入量  $IN$  と蒸発量  $E$  の和に対する降水量  $P$  の割合 (Schär *et al.* 1999)。5つの気候モデルのアンサンブル平均 (CNRM-CM3, ECHAM5/MPI-OM, GFDL-CM2.0, MIROC3.2 (medres), MRI-CGCM2.3.2) に基づく。



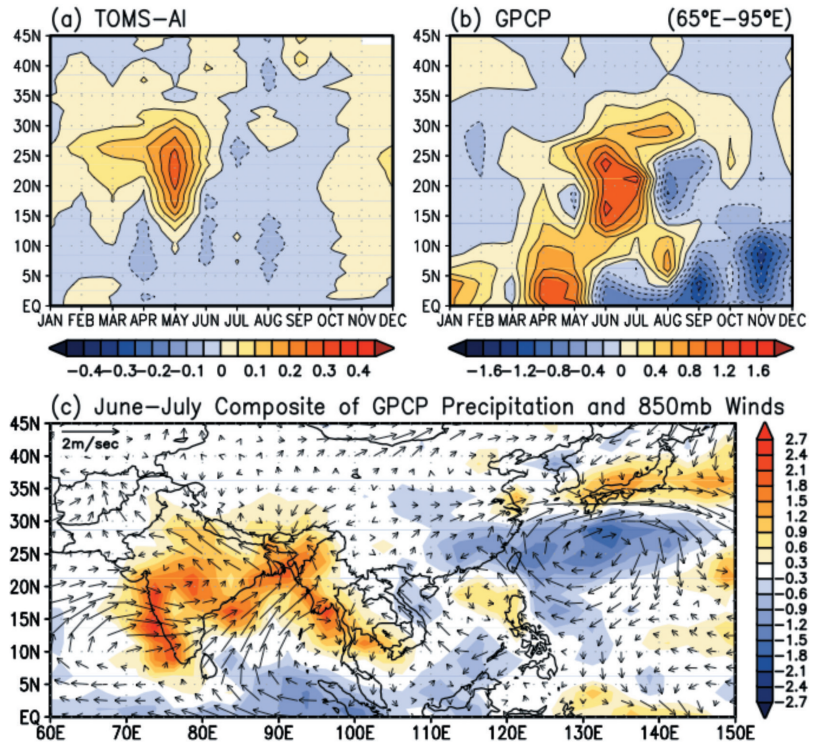
第4図 全球大気再解析データ (NCEP1, NCEP2, ERA40) に基づく北半球冬季(12~2月)のハドレー循環強度の変化 (水色の実線)。赤実線はENSOの影響を除去した長周期成分、緑実線はその6ヶ月移動平均を示す。Mitas and Clement (2005) に拠る。

れています。

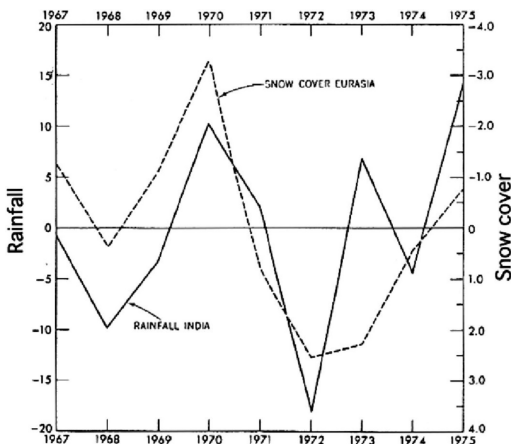
一方、同じモンスーン地域でもインドは、大規模な海陸の温度コントラストによって駆動されるアジアモンスーンの影響を直接受けるため、温度コントラストとインドモンスーン降水量に関する研究が古くから多数行われてきました。例えば、既に19世紀後半には、チベット高原上の冬季の雪の多寡と引き続く夏のインドモンスーン降水量との間の負相関が指摘されていました(Blanford 1884)。同様な相関関係が積雪被覆の1960年代から1970年代にかけての9年間の衛星観測から確認されたことで(Hahn and Shukla 1976)、これは一躍「反転した積雪・モンスーン関係」として有名になりました(第6図)。

ところが、Hahn and Shukla (1976)の示した相関関係は1980年代には不明瞭になってしまい、別の

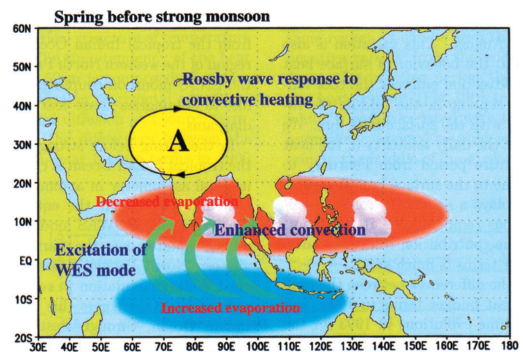
説明が必要とされていました。ちょうどそのころ、「Matsuno-Gillパターン」(Matsuno 1966; Gill 1980)によって、非断熱加熱に対する熱帯大気の定常



第5図 エアロゾルが多く観測された年の合成偏差(Lau and Kim 2006)。インド大陸上(70°~90°E)における(a)対流圏気温、(b)降水量の緯度時間(季節)断面図。(c)850 hPaの風偏差と降水偏差。



第6図 ユーラシア大陸52°N以南の冬の積雪面積(破線)と、その次の夏のインドモンスーン降水量(実線)の経年変化(Hahn and Shukla 1976)。



第7図 強い夏のアジアモンスーンに先立つ春の大気・陸面結合系を示した模式図(Kawamura et al. 2001)。ラ・ニーニャ現象に引き続き起こりやすい大気・海洋の偏差分布を示す(本文参照のこと)。

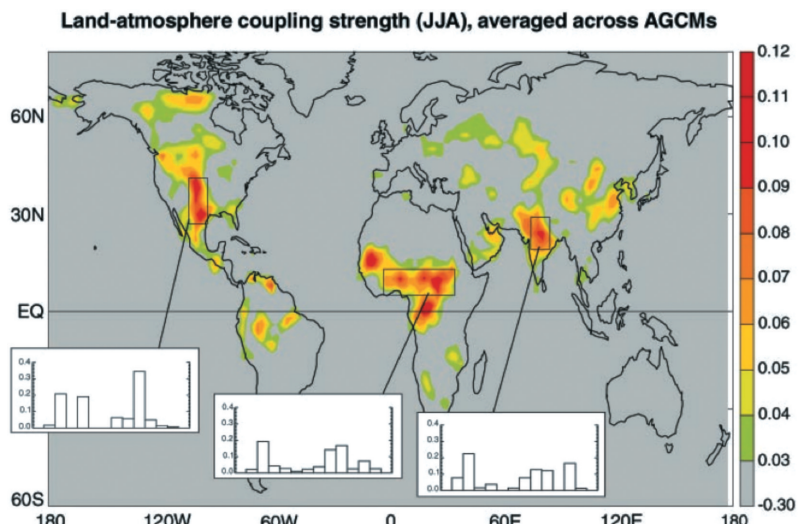
応答の理解が深まり、アジアモンスーンとエル・ニーニョ=南方振動(ENSO)との関係を従来とは違った角度から議論出来るようになってきました。

第7図はアジアモンスーンが強い年の春先の様子を模式的に示したものです(Kawamura *et al.* 2001)。一般にアジアモンスーンはENSOと高い相関関係にあり、ラ・ニーニャ現象(西部熱帯太平洋からインド洋に正の海面水温偏差)の時に強まることが知られています。ここで特に採り上げたいのは、熱帯インド洋上での対流強化に伴って、アジア大陸上に高気圧性の循環偏差が熱源応答として生じている点です。模式図ではアフガン地域に高気圧性の循環偏差が集中していますが、実際はアジア大陸を東西に広範囲に覆っていることが分かっています。

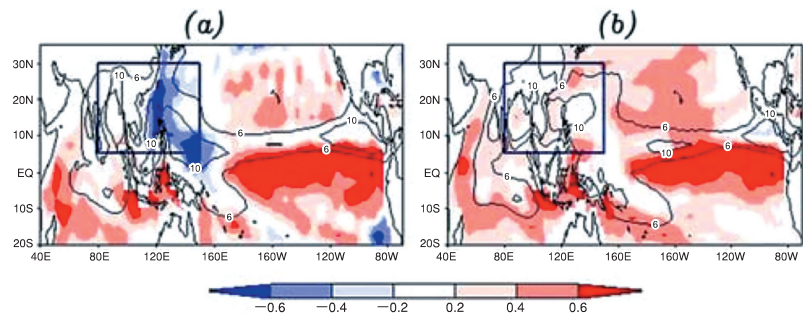
この高気圧圏内では、総観規模擾乱の活動の抑制に伴う降水量の減少が、地上の乾燥化を引き起こし、それがさらに夏に向けて地上気温の上昇を誘引し、結果として強いモンスーンを誘発していると考えられます。つまり、ENSOのシグナルが一旦土壌水分という形で陸面に蓄積され、時間差を伴って大気に影響を与えるというものです。しかしながら、現在ではこの関係を裏付ける土壌水分などの観測データは十分ではなく、また大循環モデルにおける陸面スキームも改良の段階にあります。土壌水分と降水の関係については、近年多くの研究が提出されており(Koster *et al.* 2004; Schubert *et al.* 2004)、次にご紹介する海面水温の影響と並んで季節予報の精度向上における重要な因子として期待が高

まっています(第8図)。

最後に大気海洋相互作用について触れたいと思います。第9図は、熱帯太平洋・インド洋について、北半球の夏の海面水温(SST)と降水の同時相関を、観測と大気大循環モデルについてそれぞれ計算したものです(Wang *et al.* 2005)。負の相関は対流活動が活発であれば、雲による日射の遮蔽効果と海面からの蒸発などによってSSTが下がる傾向を示しています。観測とモデルは概ね類似の傾向を示しています。しかし、西太平洋・南シナ海・ベンガル湾では、観測では



第8図 12個の大気循環モデルによる大気と陸面の結合強度( $\Omega$ )の空間分布。棒グラフは結合が強い領域(hot spot)における個々モデルの $\Omega$ を示す(Koster *et al.* 2004)。 $\Omega$ は土壌水分の降水に対する影響を表す無次元量(Koster *et al.* 2002)。



第9図 6~8月の海面水温(SST)と降水量の経年変動に関する相関係数の分布(Wang *et al.* 2005)。(a)観測された降水量と海面水温との関係。(b)観測されたSSTを境界条件として与えた5つの大気大循環モデルのアンサンブルに基づく評価。

負相関となっていますが、観測された SST を与えた大気モデルの降水量との相関は逆に正となっています。これは、SST が原因ではなく、対流活動(蒸発冷却や雲による日射の遮断)に大きく影響を受けていること、つまり SST 偏差は大気強制の結果であることを示しています。

なお、気象庁の大気モデルでは、春先の SST 観測値で境界条件を固定した予報実験の方が、夏も観測値の SST を与えた実験よりも夏の予報成績がよいことが指摘されており、季節予報における大気と海洋の結合の重要性が示唆されています(Kobayashi *et al.* 2005)。このように、気候システムの理解には、海洋から大気、陸面から大気という一方向的な見方から脱却し、双方向の影響を陽に取り扱うことが肝要で、このことは客観解析の作成(例えば大気海洋結合モデルで再解析を行うなど)にも当てはまると考えられます。

#### 4. まとめ

温暖化という今まで人類が経験しなかった「未来」の問題に立ち向かうために、大気科学者は数値モデルを構築し、将来予測において著しい貢献を果たしてきました。マルチモデルによる温暖化数値実験の結果が一人歩きする前に、今一度気候研究の専門家は、これらのデータの意味と正当性について、現実との整合性などを含め注意深く検討すべきではないでしょうか。そこにおいて客観解析データの果たす役割は大きく、その持続的な精度向上への取り組みに対し、気候研究者は単なるユーザーという立場から脱し、モデル研究者にフィードバックを積極的に行うことが期待されていると思います。

季節予報の精度向上には、大気力学の発展に加え、大気・陸面・海洋間の相互作用の理解が重要であり、現場観測、人工衛星、客観解析等で与えられるデータの包括的な解析を通して、熱・水循環に関わる物理プロセスを解明してゆく必要があります。そのためには、大気科学とその境界領域である陸面過程や海洋コミュニティとの対話が一層重要になってくるでしょう。

現実的問題として大型外部資金などを境界領域では取りにくいとの声も聞こえてきますが、こういう時にこそ、アカデミズムを推進する気象学会が、大気科学を主軸として積極的に他の学会や学会内部の異分野間の連携を推進する時期に来ているのではないでしょう

か。講演の最後に提唱した新たなセッションの方法、即ち、各セッションの最初に学会内での異分野の第一人者を招き、それぞれの分野でのホットトピックや問題点などを紹介してもらうなどの試みが、異分野交流の緒となれば幸いに思います。最後になりましたが、講演に際し日本気象学2007年度春季大会実行委員会の皆様に大変お世話になりました。本原稿の作成にあたり、筆者の議論につき合ってくださいましたハワイ大学太平洋研究センター(IPRC)の皆様、そして本原稿を精読して下さいました天気編集委員の中村 尚氏に感謝します。本稿の作成にあたり、環境省の地球環境研究総合推進費(S-5-2)の支援を受けました。

#### 参考文献

- Blanford, H. F., 1884 : On the connexion of Himalayan snowfall and seasons of drought in India. *Proc. Roy. Soc. London*, **37**, 3-22.
- Douville, H., F. Chauvin, S. Planton, J.-F. Royer, D. Salas-Mélia and S. Tyteca, 2002 : Sensitivity of the hydrological cycle to increasing amounts of greenhouse gases and aerosols. *Climate Dyn.* **20**, 45-68.
- Emori, S. and S. J. Brown, 2005 : Dynamic and thermodynamic changes in mean and extreme precipitation under changed climate. *Geophys. Res. Lett.*, **32**, L17706, doi : 10.1029/2005 GL02327.
- Gill, A. E., 1980 : Some simple solutions for heat-induced tropical circulation. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, **106**, 447-462.
- Hahn, D. G. and J. Shukla, 1976 : An apparent relationship between Eurasian snow cover and Indian monsoon rainfall. *J. Atmos. Sci.*, **33**, 2461-2462.
- IPCC, 1990 : Scientific Assessment of Climate Change—Report of Working Group I. Cambridge University Press, 365 pp.
- IPCC, 1995 : Climate Change 1995 : The Science of Climate Change, Contribution of Working Group I to the Second Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, 572 pp.
- IPCC, 2001 : Climate Change 2001 : The Scientific Basis, Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). Cambridge University Press, 944 pp.
- IPCC, 2007 : Climate Change 2007—The Physical Science Basis, Working Group I Contribution to the Fourth Assessment Report of the IPCC. Cambridge

- University Press, 1009 pp.
- Kalnay, E. *et al.*, 1996 : The NCEP/NCAR 40-year reanalysis project. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, **77**, 437-471.
- Kamae, Y., 2007 : Projected future change in water cycle over the Asia. Graduate Pap. University of Tsukuba, 60 pp.
- Kanamitsu, M., W. Ebisuzaki, J. Woollen, S.-K. Yang, J. J. Hnilo, M. Fiorino and G. L. Potter, 2002 : NCEP-DOE AMIP-II Reanalysis (R-2). *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, **83**, 1631-1643.
- Kawamura, R., T. Matsuura and S. Iizuka, 2001 : Inter-annual atmosphere-ocean variations in the tropical western North Pacific relevant to the Asian summer monsoon-ENSO coupling. *J. Meteor. Soc. Japan*, **79**, 883-898.
- Kitoh, A., S. Yukimoto, A. Noda and T. Motoi, 1997 : Simulated changes in the Asian summer monsoon at times of increased atmospheric CO<sub>2</sub>. *J. Meteor. Soc. Japan*, **75**, 1019-1031.
- Klingaman, N. P., P. M. Inness, H. Weller and J. M. Slingo, 2008 : The importance of high-frequency sea surface temperature variability to the intraseasonal oscillation of Indian monsoon rainfall. *J. Climate*, **21**, 6119-6140.
- Kobayashi, C., S. Maeda, A. Ito, Y. Matsushita and K. Takano, 2005 : Relation between SSTs and predictability of seasonal mean precipitation over the western tropical Pacific. *J. Meteor. Soc. Japan*, **83**, 919-929.
- Kobayashi, C. and S. Maeda, 2006 : Phase shift of the seasonal cycle in the Hadley circulation in recent decades. *Geophys. Res. Lett.*, **33**, L22703, doi : 10.1029/2006 GL027682.
- Koster, R. D., P. A. Dirmeyer, A. N. Hahmann, R. Ijpelaar, L. Tyahla, P. Cox and M. J. Suarez, 2002 : Comparing the degree of land-atmosphere interaction in four atmospheric general circulation models. *J. Hydrometeorol.*, **3**, 363-375.
- Koster, R. D. *et al.*, 2004 : Regions of strong coupling between soil moisture and precipitation. *Science*, **305**, 1138-1140.
- Lau, K.-M. and K.-M. Kim, 2006 : Observational relationships between aerosol and Asian monsoon rainfall, and circulation. *Geophys. Res. Lett.*, **33**, L21810, doi : 10.1029/2006 GL027546.
- Matsuno, T., 1966 : Quasi-geostrophic motions in the equatorial area. *J. Meteor. Soc. Japan*, **44**, 25-43.
- Meehl, G. A., J. M. Arblaster and W. D. Collins, 2008 : Effects of black carbon aerosols on the Indian monsoon. *J. Climate*, **21**, 2869-2882.
- Mitas, C. M. and A. Clement, 2005 : Has the Hadley cell been strengthening in recent decades? *Geophys. Res. Lett.*, **32**, L03809, doi : 10.1029/2004 GL021765.
- Onogi, K. *et al.*, 2007 : The JRA-25 reanalysis. *J. Meteor. Soc. Japan*, **85**, 369-432.
- Schär, C., D. Lüthi, U. Beyerle and E. Heise, 1999 : The soil-precipitation feedback : A process study with a regional climate model. *J. Climate*, **12**, 722-741.
- Schubert, S. D., M. J. Suarez, P. J. Pegion, R. D. Koster and J. T. Bacmeister, 2004 : On the cause of the 1930 s dust bowl. *Science*, **303**, 1855-1859.
- Shinoda, T., 2005 : Impact of the diurnal cycle of solar radiation on intraseasonal SST variability in the western equatorial Pacific. *J. Climate*, **18**, 2628-2636.
- Timmermann, A., J. Oberhuber, A. Bacher, M. Esch, M. Latif and E. Roeckner, 1999 : Increased El Niño frequency in a climate model forced by future greenhouse warming. *Nature*, **398**, 694-696.
- Ueda, H., A. Iwai, K. Kuwako and M. E. Hori, 2006 : Impact of anthropogenic forcing on the Asian summer monsoon as simulated by 8 GCMs. *Geophys. Res. Lett.*, **33**, L06703, doi : 10.1029/2005 GL025336.
- Uppala, S. M. *et al.*, 2005 : The ERA-40 re-analysis. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, **131**, 2961-3012.
- Wang, B., Q. Ding, X. Fu, I.-S. Kang, K. Jin, J. Shukla and F. Doblus-Reyes, 2005 : Fundamental challenge in simulation and prediction of summer monsoon rainfall. *Geophys. Res. Lett.*, **32**, L15711, doi : 10.1029/2005 GL02273.
- Wang, B. and Q. Ding, 2006 : Changes in global monsoon precipitation over the past 56 years. *Geophys. Res. Lett.*, **33**, L06711, doi : 10.1029/2005 GL025347.
- Weart, S. R., 2005 : *The Discovery of Global Warming*, Harvard University Press, 240 pp.