

大気海洋結合モデルによる夏季アジアモンスーン予測の進展

高谷 祐平 気象研究所気候研究部

1 はじめに

アジアモンスーン域には、世界の総人口の 6 割以上が居住し、アジアモンスーンによってもたらされる水資源は、その地域に居住する人々の生活に不可欠なものである。豊富な流量を誇る大河川の流域には人口が集中しており (Webster et al. 2010)、それらの地域では農業も盛んである。米及び小麦の生産量はいつでも中国が世界 1 位、インドが 2 位である (総務省 2018) ことから、両国は世界の「フードバスケット」として食糧安全上重要である。こうした理由から、古くからアジアモンスーンの年々変動の正確な季節予測が切望されてきた。インドモンスーンの予測の歴史は古く、その始まりは 1890 年代頃の Sir Henry Blanford, Sir Gilbert Walker らの統計的長期予測に遡る (Blanford 1884)。数値モデルを用いた力学的季節予報においては、1990 年代後半から 2000 年代にかけて、各国の気象機関が大気・海洋結合モデルを季節予報、エルニーニョ予報に導入した。気象庁も 2003 年に大気モデルを季節予報に導入した (第 1 図)。当時は、大気・海洋結合モデルと大気モデルの予測精度に大差はなく、気象庁の季節予報の現業予測は世界トップレベルの予測精度を有していた。気象庁は 1998 年にエルニーニョ予測を目的とした大気・海洋結合モデルの現業運用を開始し、エルニーニョ予測のリアルタイムの予測精度は世界屈指である (Barnston et al. 2012)。その後、各国機関は大気海洋結合モデルの予測精度を向上し、気象庁においても、当時の大気モデル (現業モデル) を上回る予測性能を得られたことから (第 2 図)、2010 年には大気海洋結合モデルを季節予報に導入した (Takaya et al. 2017)。大気海洋結合モデルの導入によって大幅に精度の改善が得られたのは、主に熱帯域であった。特に日本の季節予測の改善に大きく寄与したのは本稿で焦点を当てる夏季

アジアモンスーンである (Takaya et al. 2017)。第 3 図は、北西太平洋モンスーンの変動を代表する北西太平洋モンスーン指数の予測精度を示す。リードタイムが長くなるにつれて、大気モデルに比べて結合モデルの予測精度 (相関係数) が良いことが見て取れる。本稿では、大気海洋結合モデルの導入による夏季アジアモンスーン予測の予測改善、気候変動の理解の進展を振り返るとともに、最新モデルを用いた予測可能性を議論し、夏季アジアモンスーン予測の将来展望を述べる。

2 大気海洋結合システムとしての夏季アジアモンスーン

大気と海洋が結合系であるとはどういうことか？それは、大気と海洋の相互作用がその時間発展に本質的な役割を果たす、ということである。大気と海洋の変動に相互に因果関係がある、と言っても良い。逆に言えば、大気ないしは海洋が一方的に他方を強制するのであれば、大気海洋結合モデルは不要である。エルニーニョ現象、インド洋ダイポールなど多くの大気海洋結合変動が発見され、それらの予測において、大気海洋相互作用が本質的であることが知られている。一方、違った形で大気海洋相互作用が重要な海域がある。その代表的海域が夏季の北西太平洋である。エルニーニョ現象やインド洋ダイポールでは、大気と海洋間に正のフィードバック (ビヤクネスフィードバック) が働くが、北西太平洋では海洋が大気の遠隔強制を受ける形で、大気海洋相互作用が働く。当該域では、遠隔的な強制による循環場の変動が対流活動の変動をもたらす、それによる海面放射・熱フラックスの変動が海洋 (SST) を変動させているために、3 か月程度の時間スケールでは SST と降水量の負相関が生じる (Wang et al. 2005, Lu et al. 2014)。海洋を結合しない

大気モデルでは、この大気海洋相互作用を表現できないため、たとえ、解析 SST を与えたとしても、降水-SST の関係を必ずしも正しく再現できない(Kobayashi et al. 2005)。より短い時間スケールでは、SST 変動が降水量の変動に遅れることが知られている(Arakawa and Kitoh 2004)。これらのことは季節内から季節スケールの予測を精度良く行うためには、結合モデルが不可欠であることを意味している。

それでは、北西太平洋の大気循環に遠隔影響を与えるものは何であるか？これに関しても、近年の研究で明らかになってきた。後ほど詳述するが、もっとも大きな遠隔影響をもたらすのは、インド洋の海盆スケールの SST 変動である。この変動は、前年のエルニーニョ(ラニーニャ)現象の発生時にその遠隔影響によりインド洋が蓄熱(放熱)するため、インド洋コンデンサー効果(Indian Ocean Capacitor effect)と呼ばれる。さらに、昇温(降温)したインド洋は北西太平洋モンスーンの循環を弱化(強化)し、下層に高気圧性(低気圧性)循環を生じる(Xie et al. 2016)。また、Pacific-Japan パターン(PJ パターン、Nitta 1987)を通じて、東アジア域の地上気温や降水に影響する。さらに、熱帯低気圧の活動も変調することが知られている(Du et al. 2011, Takaya et al. 2017)。このインド洋から西太平洋にかけての大気海洋変動は、一連の大気海洋結合モードとして捉えることができ、Indo-Pacific Ocean Capacitor モード(IPOC モード)とも呼ばれている(Kosaka et al. 2013)。

気象庁の大気・海洋結合モデルの開発を振り返ると、2007 年頃に JMA/MRI-CPS1 を開発した際、夏季アジアモンスーンの顕著な精度向上が得られたが(Takaya et al. 2017, Yasuda et al. 2007)、当時はその要因が十分に解明されていなかった。インド洋コンデンサー効果が広く認知される以前である。近年の一連の研究で、IPOC モードなど夏季アジアモンスーンにおける大気海洋相互作用の役割が明らかになり、日本を含むアジアモンスーン域の大気海洋結合モデルの重要性が認知されるようになった。それとともに、夏季アジアモンスーンの季節予測における大気海洋結合モデルの重要性が認識されるようになった。もちろん、夏季アジアモンスーンの季節予測の精度向上の

裏には、大気海洋結合モデル、海洋データ同化技術の向上が不可欠であったことは言うに及ばない。

3 夏季アジアモンスーンの季節予測可能性

気候変動メカニズムの理解と合わせて、その予測可能性の理解も過去 15 年余りで進んできた。予測可能性の理解は現業的な季節予報にとって重要である。近年では、大気海洋結合モデルおよびアンサンブル技術の向上により、アンサンブル予測を用いて不確実性のある程度議論できるようになってきた。本節では、夏季アジアモンスーンの潜在的季節予測可能性について議論する。

まず、予測可能性の R と呼ばれる完全モデルを仮定した、相関係数に対応する予測可能性の推定量を示す(Sugi et al. 1997、第 4 図)。3か月平均降水量の予測可能性をみると、陸地ではインド東北部、インドシナ南部、スマトラ島などで R の値が大きく、予測可能性が高いことを示す。また、東アフリカのエチオピア付近でも比較的予測可能性が高いことは特筆に値する。さらに海上では、西部太平洋の赤道域、フィリピン東方で予測可能性が高い。これらの領域では、予測精度も比較的高く、予測可能性の推定量の分布と概ね類似している。なお、アンサンブル予測から得られる R は実際の相関係数より全体的に大きい。R は完全モデルによって無限のアンサンブルサイズが得られた場合の相関係数に対応する。このことは、今後、モデルの精度向上、アンサンブル技術、アンサンブルサイズの増強が得られれば、将来、予測精度をさらに向上できる可能性を示すものである。

4 インド洋の夏季アジアモンスーン予測精度への寄与

第 5.2.2 節に述べたように、特に顕著なエルニーニョ・ラニーニャ現象の後の夏季には、インド洋を介した ENSO の遅れ影響が夏季アジアモンスーンにみられる。しかし、その定量的な寄与の見積もりはこれまで調査されていない。そこで、本研究では、インド洋をモデル気候値に緩和した実験を行い、夏季アジアモンスーンの季節予測の予測精度(予測可能性)に対するインド洋の寄与を定量的に見積る。

4.1 実験方法

現行気象庁季節予報システム(JMA/MRI-CPS2, Takaya et al. 2018)を用いて、インド洋 SST の影響を調べた。実験方法は発表者らの先行研究 (Takaya et al. 2017)で用いた方法と同様であり、通常の予測実験(以下 EXP-CTRL)とインド洋 SST (20° N-20° S)をモデル平年値に緩和する実験(以下 EXP-IOCL)を行った。両実験ともに 30 年間(1981 年から 2010 年)の 4 月末を予測初期日とする 10 メンバーのアンサンブルの実験を行った。両実験の相関係数を比較することで、インド洋 SST の夏季アジアモンスーン変動への寄与を調べた。

4.2 結果

第 5 図に両実験の北西太平洋モンスーン指数(WNPM 指数, Wang and Fan 1999)、IOBW 指数(Yang et al. 2007)の時系列を示す。全期間を通してみると、予測と解析との相関係数は、EXP-CTRL の 0.73 から EXP-IOCL では 0.42 に低下しており、インド洋 SST が予測精度に寄与していたことを示す。また、エルニーニョ現象の翌年の 1983 年、1998 年、2010 年には、WNPM 指数は負になる傾向がある。EXP-IOCL と EXP-CTRL の各年の差をみると、それらの年は、EXP-IOCL の WNPM 指数の偏差の絶対値が EXP-CTRL に比べ小さくなる傾向がみられ、インド洋の高い SST が不活発な北西太平洋モンスーンの要因となっていることが示唆される。さらに代表的なエルニーニョ現象の翌年(1983 年、1998 年、2010 年など)を詳しくみると、インド洋の影響はイベント毎に異なるのがわかる。これはインド洋の直接影響のみならず、ENSO の影響、さらにインド洋の ENSO への影響が異なることが要因であると推察される。

両実験の相関係数の差の分布(第 6 図)をみると、インド洋北部、特にアラビア海、東インド洋などで EXP-CTRL の相関係数の方が高い。それに対応して、海面気圧の相関係数の差にはインド洋から海洋大陸において楔状の正パターン、フィリピン付近に正の差がみられ、IPOC モードの変動が当該域の予測に寄与していることを示唆する。さらに、200hPa 高度をみるとチベット高気圧の南側に東西に延びた正のパターンがみ

られ、インド洋 SST に影響を受けた降水変動が南アジア高気圧の予測可能性をもたらしていることが確認できる。寄与の大きい領域では、予測できる分散成分(r^2)の約 7 割程度をインド洋 SST の変動が説明していることを示しており、夏季アジアモンスーンにおけるインド洋の影響の重要度が改めてわかる。さらに、興味深いのは、この解析でもみられるように、インド洋がチベット高気圧、北西太平洋の亜熱帯高気圧という 2 つの経路を通じて、夏季の東アジア域の天候の予測可能性に影響していることである。

5 夏季アジアモンスーン予測精度向上のための今後の課題

最後に夏季アジアモンスーン予測精度の向上のための今後の課題について述べる。

まず一つ目は、IPOC モードに関するテレコネクション(PJ パターン)の再現性を向上することである。第 7 図は規格化した北西太平洋モンスーン指数に対する回帰パターンであるが、大規模なパターンは類似しているものの、細かくみると回帰の強さやパターンの位置ズレがみられる。インド洋から西太平洋の熱帯・亜熱帯の変動のテレコネクションの再現性を向上することは中緯度域の予測精度向上に重要であると考えられる。

一方、インド降水については、変動メカニズムが複雑で十分に理解されていないため、今後の課題であると言えよう。気象庁のモデルは他のモデルに比べて、インド域の夏季降水量の予測精度が高いことが報告されている (Jain et al. 2018)。推定される予測可能性(アンサンブル平均と各メンバーの相関)と実際の相関スコアがほぼ同程度であり、アンサンブルシステムとしても、比較的良好に不確実性を表現していると言える。これが意味するところは、現在の数値モデルで推定される予測精度の限界は、概ね JMA/MRI-CPS2 の予測精度程度であるということである。もちろん、この見積もりは、モデルの気候再現性に依存する。例えば、インド亜大陸には顕著な乾燥バイアスがあるなど、インド降水のモデル再現性に課題がある。また、インド降水の精度向上のためには、インド降水と ENSO(NINO3.4 SST)との関係も重要な要素である(Jain et al. 2018)。

ENSO とインド降水の関係は、10 年規模で変動すると
の指摘もあるが、アンサンブル予測の結果によると見
かけ上の統計である可能性もあり、モデル・観測結果
を用いた精査が必要である (Jain et al. 2018)。

夏季アジアモンスーンの予測可能性には、海洋に
加え、陸面の土壌水分、土壌温度も影響する。ローカ
ルな陸面状態の影響は、海洋影響に比べ理解が進
んでいないものの、陸面解析値を用いた初期化がで
きるようになり、そのインパクトを評価できるようにな
りつつある。現在、GEWEX/GASS において、チベットの土
壤温度、土壌水分のアジア域への影響を調べる相互
比較実験プロジェクト(LS4P¹)が進められているところ
である。

大気と海洋、陸面が複雑に相互作用して変動する
アジアモンスーンはまさに地球システムモデルによる
予測が最も求められる領域と言える。本稿で述べたよ
うに、太平洋、インド洋など海洋の影響を受けたモン
スーン変動についてはある程度再現できるようになり、
精度向上が得られた。一方で、包括的な地球システム
のモデリングによるアジアモンスーン予測の研究開発
は始まったばかりである。季節内から季節予測 (S2S)
に対するエーロゾルの影響も注目されており、S2S プロ
ジェクトにおいてモデル比較実験が計画されている。
大気、海洋、陸面さらにその他のコンポーネントのモ
デリング、初期化手法を高度化し、その相互作用をよ
り現実的に再現することが、将来のアジアモンスーン
の季節予測の発展につながる。今後の発展に期待し
たい。

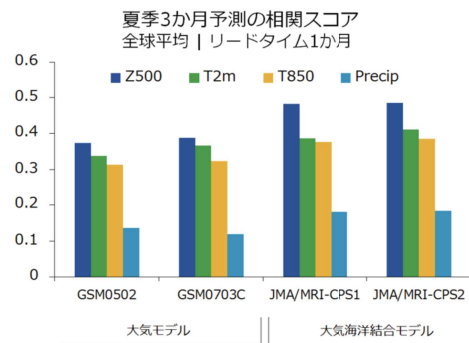
1980年代
ENSOのモデル予測技術の萌芽
Cane-Zebiak ENSO prediction (1986, Nature)
国際的ENSO観測に向けた準備

1990年代
← TOGA-COARE (1992/1993年)
ECMWF/NOAA 結合モデルによる季節予報
NCEP/ECMWFの結合モデルの現実化 Ji et al. 1994, Stockdale et al. 1995
気象庁 ENSO 予測 (1998年)
気象庁 力学的1か月予報の開始 (1996年)

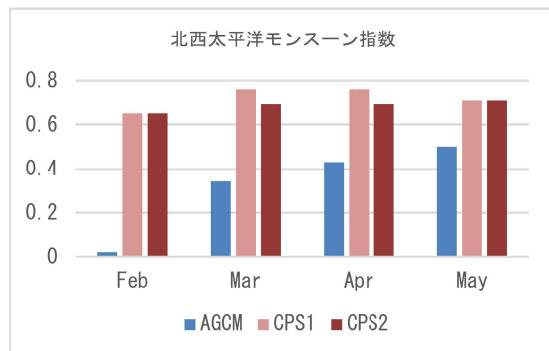
2000年代
気象庁 力学的3か月・暖寒候期予報の開始 (2003年)
← 結合モデルの精度が大気モデルを超えはじめる (2000年前半)
WCRPIによる歴史的予測実験(CHFP)

2010年代
気象庁 結合モデルによる季節予報の開始 JMA/MRI-CPS1 (2010年)
結合モデルにより、アジアモンスーンの予測が大幅に向上
気象庁 大気・海洋・海水結合モデルの導入 (2016年)
第2世代結合季節予報システム JMA/MRI-CPS2

第1図 大気海洋結合モデルと季節予報の歴史。

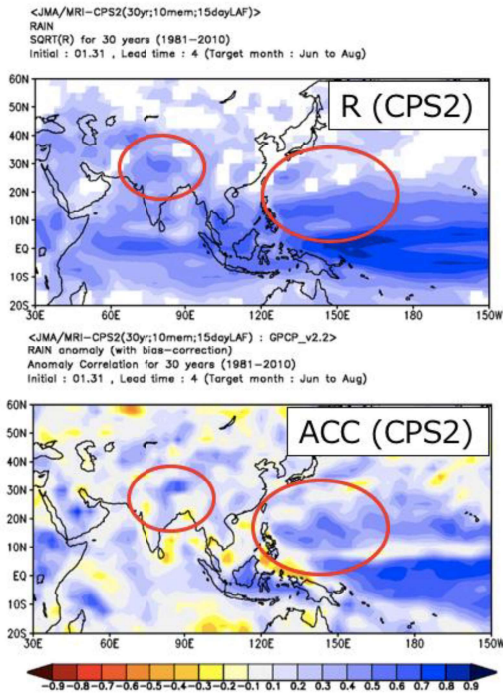


第2図 歴代季節予報モデルの精度比較。夏季3か月
(6-8月)アンサンブル平均の相関係数の全球平均。リ
ードタイムは1か月。特に夏季は大気海洋結合モデルの
導入による予測精度の改善が明瞭である。

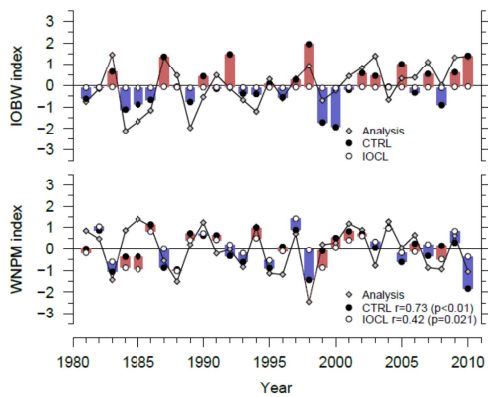


第3図 歴代季節予報モデルの夏季3か月平均北西太
平洋モンスーン指数の相関スコア。横軸は初期月。特に
リードタイムが長い予測で結合モデルによる改善が顕著
である。AGCM は GSM0703C、CPS1 は JMA/MRI-
CPS1、CPS2 は JMA/MRI-CPS2 を示す。

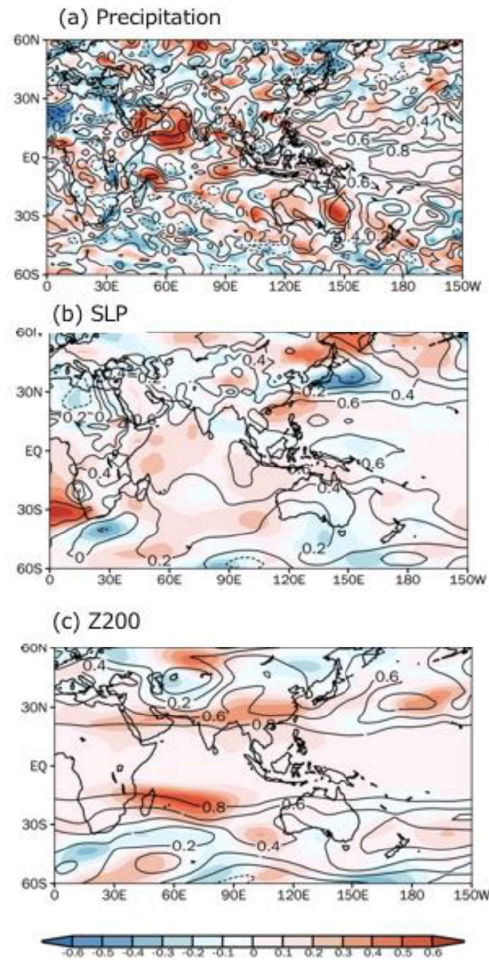
¹ <https://ls4p.geog.ucla.edu/>



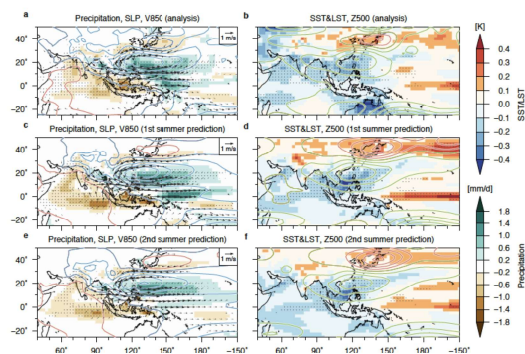
第 4 図 夏季3か月平均降水量の予測可能性の R と相関スコア (10 メンバー平均予測)。リードタイムは1か月 (5 月初期月の予測)。



第 5 図 EXP-IOCL 実験と EXP-CTRL 実験の IOBW、北西太平洋モンスーン指数の時系列。夏季3か月 (6-8 月) アンサンブル平均の相関係数の全球平均。予測値、解析値ともに、規格化している。



第 6 図 EXP-CTRL 実験と EXP-IOCL 実験の相関スコアの差 (色) と EXP-CTRL 実験の相関スコア (コンター)。夏季3か月 (6-8 月) アンサンブル平均の相関係数の全球平均。リードタイムは1か月。特に夏季は大気海洋結合モデルの導入による予測精度の改善が明瞭である。



第7図 解析(上段)と予測(下段)の規格化した夏季3か月平均北西太平洋モンスーン指数との回帰パターン。(右)降水量(色)、SLP(コンター)と850hPa風(ベクトル)、(左)SST/地上気温(色)と500hPa高度(コンター)。予測のリードタイムは1か月。ドットは統計有意な領域を示す($p < 0.05$)。

参考文献

総務省 2018: 世界の統計 2018. <http://www.stat.go.jp/data/sekai/0116.htm>.

Arakawa, O. and A. Kitoh 2004: Comparison of local precipitation-SST relationship between the observation and a reanalysis dataset. *Geophys. Res. Lett.*, 31, L12206.

Barnston, A.G., M.K. Tippett, M.L. L'Heureux, S. Li, and D.G. DeWitt, 2012: Skill of real-time seasonal ENSO model predictions during 2002-11: Is our capability increasing? *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 93, 631-651.

Blanford, H.F., 1884: On the connexion of the Himalaya snowfall with dry winds and seasons of drought in India. *Proc. Roy. Soc. London*, 37, 3-22.

Du, Y., L. Yang, and S. Xie, 2011: Tropical Indian ocean influence on Northwest Pacific tropical cyclones in summer following strong El Niño. *J. Clim.*, 24, 315-322.

Jain, S., A. A. Scaife, A. K. Mitra, 2018: Skill of Indian summer monsoon rainfall prediction in multiple seasonal prediction systems. *Clim. Dyn.*, <https://doi.org/10.1007/s00382-018-4449-z>.

Kobayashi, C., S. Maeda, A. Ito, Y. Matsushita, K. Takano, 2005: Relation between SSTs and predictability of seasonal mean precipitation over the western tropical Pacific. *J. Meteorol. Soc. Jpn.*, 83, 5, 919-929.

Kosaka, Y., S.-P. Xie, N.-C. Lau and G. A. Vecchi, 2013: Origin of seasonal predictability for summer climate over the Northwestern Pacific. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA*, 110, 7574-7579.

Lu, R. and S. Lu, 2014: Local and remote factors affecting the SST-precipitation relationship over the western North Pacific during summer. *J. Clim.*, 27, 5132-5147.

Nitta, T. 1987: Convective activities in the tropical western Pacific and their impact on the northern hemisphere summer circulation. *J. Meteorol. Soc. Jpn.*, 65, 373-390.

Sugi, M., R. Kawamura, and N. Sato, 1997: A study of SST-forced variability and potential predictability of seasonal mean fields using JMA global model, *J. Meteorol. Soc. Jpn.*, 75, 717-736.

Takaya, Y., T. Yasuda, Y. Fujii, S. Matsumoto, T. Soga, H. Mori, M. Hirai, I. Ishikawa, H. Sato, A. Shimpo, M. Kamachi, T. Ose, 2017: Japan Meteorological Agency/Meteorological Research Institute-Coupled Prediction System version 1 (JMA/MRI-CPS1) for operational seasonal forecasting, *Clim. Dyn.*, 1-2, 313-333.

Takaya, Y., S. Hirahara, T. Yasuda, S. Matsueda, T. Toyoda, Y. Fujii, H. Sugimoto, C. Matsukawa, I. Ishikawa, H. Mori, R. Nagasawa, Y. Kubo, N. Adachi, G. Yamanaka, T. Kuragano, A. Shimpo, S. Maeda, T. Ose, 2018: Japan Meteorological Agency/Meteorological Research Institute-Coupled Prediction System version 2 (JMA/MRI-CPS2): atmosphere-land-ocean-sea ice coupled prediction system for operational seasonal forecasting, *Clim. Dyn.*, 3-4, 751-765.

Xie, S.-P., Y. Kosaka, Y. Du, K. Hu, J. S. Chowdary, G. Huang, 2016: Indo-Western Pacific ocean capacitor and coherent climate anomalies in post-ENSO summer: A review. *Adv. Atmos. Sci.*, 33, 411-432.

Yasuda, T., Y. Takaya, C. Kobayashi, M. Kamachi, H. Kamahori, and T. Ose, 2007: Asian Monsoon Predictability in JMA/MRI Seasonal Forecast System. *CLIVAR Exchanges*, 43, 18-20.

Yang, J., Q. Liu, S.-P. Xie, Z. Liu, and L. Wu, 2007: Impact of the Indian Ocean SST basin mode on the Asian summer monsoon. *Geophys. Res. Lett.*, 34, L02708.

Wang, B. and Z. Fan, 1999: Choice of South Asian Summer Monsoon Indices. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 80, 629-638.

Wang, B., Q. Ding, X. Fu, I.-S. Kang, K. Jin, J. Shukla, F. Doblas-Reyes, 2005: Fundamental challenge in simulation and prediction of summer monsoon rainfall, *Geophys. Res. Lett.*, 32, L15711.

Webster, P.J., J. Jian, T.M. Hopson, C.D. Hoyos, P.A. Agudelo, H. Chang, J.A. Curry, R.L. Grossman, T.N. Palmer, and A.R. Subbiah, 2010: Extended-Range Probabilistic Forecasts of Ganges and Brahmaputra Floods in Bangladesh. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 91, 1493-1514.