

海洋相互作用現象が存在するためと考えられるのである。

この新しい大気海洋現象を解明し、予測することはインド洋周辺諸国だけでなく、わが国を含む東アジア諸国にきわめて有益な効果をもたらすことになるであろう。またこの現象と太平洋の現象とのカップリングがより長期の気候変動とどのような関係にあるのか、発生初期にオーストラリア大陸の東方の南半球から吹き込む冷涼な南東貿易風の変動と海水分布も関係する大気海洋相互作用現象である南極周極波動⁽¹⁸⁾との関係など、海と気候の研究はますます賑やかになりそうである。

文 献

- (1) 多田隆治: 地学雑誌, **100**, 657(1991)
- (2) 増田耕一・阿部彩子: 気候変動論, 岩波講座地球惑星科学 **11**(1996) pp. 103~156
- (3) S. MANABE & R. J. STOUFFER: Nature, **378**, 165 (1995)
- (4) F. R. DICKSON et al.: Prog. Oceanogr., **20**, 103 (1988)
- (5) 山形俊男: 科学, **61**, 689(1991)
- (6) P. N. VINAYACHANDRAN et al.: J. Geophys. Res., **104**, 11077(1999)
- (7) P. N. VINAYACHANDRAN et al.: Geophys. Res. Lett., **26**, 1613(1999)
- (8) S. K. BEHERA et al.: Geophys. Res. Lett. (印刷中)
- (9) N. H. SAJI et al.: Nature (投稿中)
- (10) 例えば, 山形俊男: 科学, **54**, 699(1984); T. YAMAGATA & Y. MASUMOTO: Phil. Trans. R. Soc. Lond., **A329**, 225(1989)
- (11) G. MEYERS: J. Geophys. Res., **101**, 12255(1996)
- (12) Y. MASUMOTO & G. MEYERS: J. Geophys. Res., **103**, 27589(1998)
- (13) 山形俊男・松浦知徳: 科学, **63**, 673(1993)
- (14) P. N. VINAYACHANDRAN & T. YAMAGATA: J. Phys. Oceanogr., **28**, 1946(1998)
- (15) T. NITTA: J. Meteor. Soc. Japan, **65**, 373(1987)
- (16) 田中博ら: 気象研究ノート, **189**, 97(1997)
- (17) 木本昌秀ら: 気象研究ノート, **189**, 232(1997)
- (18) W. B. WHITE & R. PETERSON: Nature, **380**, 699 (1996)

特集■気候変動期の到来か

変わりつつある アジアモンスーン - ENSO 結合システム

安成哲三

季節のリズム

モンスーンとは、季節的に大きく変化する地上の卓越風系と、これにともなう雨季・乾季の交替という、大陸スケールの気候現象である。大陸と海洋の分布によって生じる季節的な大気加熱の差が大陸・海洋間の気圧分布を生じさせ、モンスーンを引き起こしている。この現象は、毎年繰り返される太陽高度の季節変化がある限り続く、季節変化のリズムそのものである。モンスーンアジアに位置する日本では、この季節のリズムによって、美しい自然の四季の移り変わりがもたらされている。

この季節のリズムも、地域によって、その現われ方は大きく異なっている。たとえば、日本や中国では、季節進行の中で、梅雨とよばれる雨季が夏の前半の6, 7月に存在するが、インドや東南アジアでは、雨季はいったん始まると、季節内の変動はあっても、雨がまったく降らなくなる乾季までの数カ月継続するのがふつうである。季節のリズムそのものが地域ごとに大きなバラエティをもっているのである。

季節のリズムはまた、年々微妙に、あるいは大きく揺れ動いている。そのリズムの揺れのメカニズムの解明は、気候の季節予報と長期予測につながる重要な課題である。年々変動に最も関連しているのが、熱帯太平洋でのエルニーニョ/南方振動(ENSO)である。そのENSOも、規則的に数

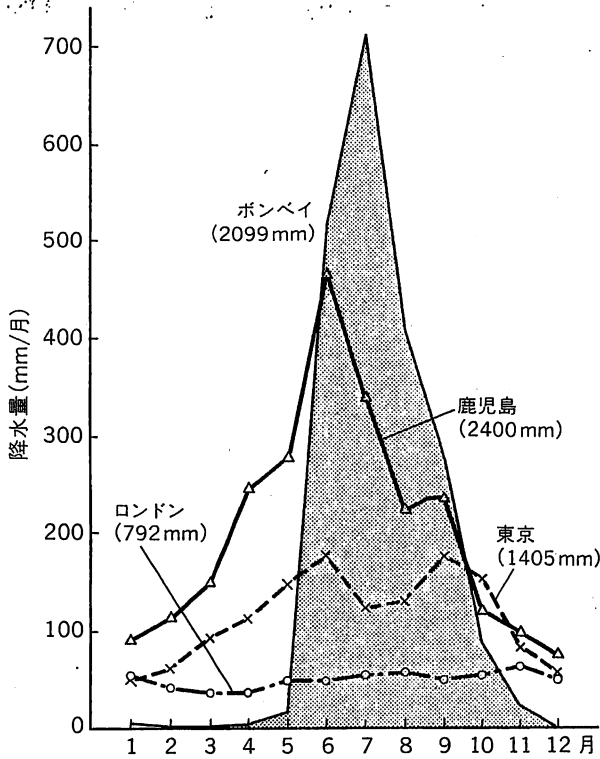


図1 アジアモンスーン地域(ボンベイ, 鹿児島, 東京)における降水量季節変化。

年周期でおこる現象ではなく、20年前と現在では、その発現の仕方や規模、周期など、大きく変化している。このように変化している ENSO と、季節リズムの異なるアジアモンスーンの変動は、どのように相互に関連しつつ変動しているのだろうか。ここでは、最新のいくつかの成果を踏まえつつ、この問題について考えてみよう。

熱帯モンスーンと梅雨

ひとくちにアジアモンスーンといっても、大きくふたつのモンスーンがある。ひとつは、インド、東南アジアにおける熱帯モンスーンであり、もうひとつは、中国、朝鮮半島、日本付近の東アジア中心に卓越する梅雨である。熱帯のモンスーンは、熱帯アジアの雨季そのものであるが、梅雨は春から夏への季節の遷移期に現われる前線による長雨の季節である。しかし、これらふたつのモンスーンは、アジアにおける季節変化において密接に関連しつつ現われる。図1に示すように、インドの雨季の開始と日本の梅雨の開始はほぼ同時期である。これは、図2のように、インド洋での南西モ

ンスーン気流系の成立が、熱帯モンスーンの開始そのものであると同時に、梅雨前線の形成においても、必要条件となっているからである。梅雨前線の形成には、しかし、同時に北(高緯度)側での乾いた、あるいは冷たい気団の存在も必要である。

夏への季節進行とともにこの北の気団が衰退し、インド付近の低気圧(モンスーントラフ)と北太平洋上の亜熱帯高気圧が強くなっていくと、梅雨前線は、北に押し上げられ、やがて消えてしまう。亜熱帯高気圧の強化は、熱帯モンスーンの強化と密接に関係している。非平衡熱力学のプリゴジン流にえば、梅雨前線は、熱帯モンスーンという非平衡熱力学的现象の季節進行という時間発展過程の中で一時的に現われる“散逸過程”の構造そのものであるともいえる。

では、熱帯モンスーンと梅雨に代表される東アジアモンスーンは、年々変動ではどのような関係を示しているのだろうか。過去数十年のデータにもとづくこれまでのいくつかの研究⁽²⁾⁽³⁾⁽⁴⁾によると、インドモンスーンの降水量変動とは、中国華北部のとくに黄土高原地域の降水量が正の相関を、西日本が負の有意な相関を示しているが、梅雨前線の最も中心地域である長江流域の降水量は、あまり相関のないことが示されている。長江流域は、むしろ西太平洋上の亜熱帯高気圧の華南への張り出しと密接に関係していることが指摘されている⁽⁵⁾。このことは、熱帯と東アジアのモンスーンの年々変動が、季節変化の大きな動きを支配する三つのシステム、すなわち、南西モンスーン気流の強さに直接かかわるモンスーントラフ(インド付近の低気圧)、西太平洋上の亜熱帯高気圧、および北の気団の強さにかかわる中緯度偏西風循環系の微妙な力関係で決まっていることを示している。

ENSO とモンスーン変動

アジアモンスーン変動と ENSO とのあいだには密接なリンクのあることが、すでに多くの研究によって指摘されている。例えば図3は、インドモンスーン降水量と熱帯太平洋の海水温変動のあ

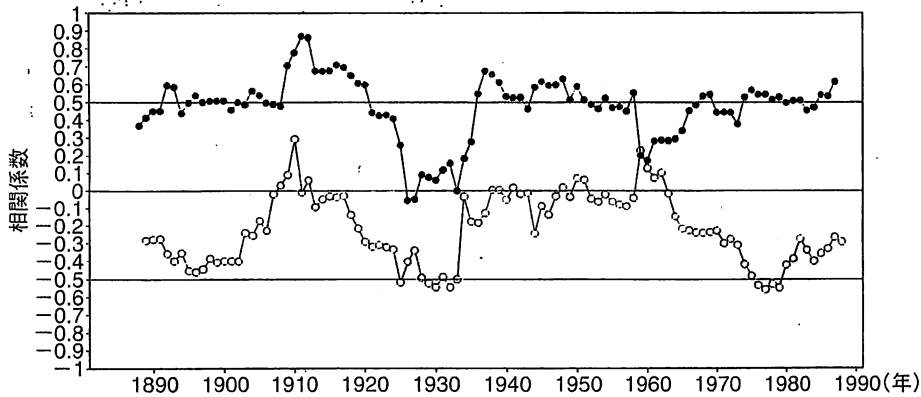


図5 インドモンスーン(夏)の降水量とその後(前)の冬における南方振動指数(SOI)の相関係数の過去100年間における変化。15年間の相関係数を1年ずつずらして時系列にしている。後の冬のSOIとの相関を黒印(●)、前の冬のSOIとの相関を白印(○)で示す。

方振動指数(SOI)との相関、白丸はその前の冬の南方振動指数との相関である⁽¹¹⁾。この図で興味深いのは、モンスーンとその後(SOI)の相関(黒丸)は、1920~1930年ころと1960年前後の一時期を除き、有意な正の相関を示し続けているが、モンスーンとその前のSOIとの相関(白丸)は、1890~1900年、1930年前後、および1970年代後半ころに弱いながら負の相関を示しているほかは、どの時期もほとんど相関がないという全体として対照的な相関の傾向である。この図で、準2年周期的な振動を示す期間は、黒丸が正、白丸が負と、対となって有意な(に近い)相関を有する期間に限られることになるが、1970年代後半から1980年ころまでは、100年間のなかでも例外的に準2年周期的な振動が卓越していた時期があったことがわかる。同様な期間は、1890年代に一時期あったこともわかる。同様の傾向を、同じインドモンスーン降水量と東部赤道太平洋の海面水温の相関からも指摘されている⁽¹²⁾。

インドモンスーン降水量とその後(前)の冬のSOIが100年間にわたり、おおむね高い正の相関を示している事実は、すでに数十年前からWALKERやNORMANDが指摘してきた、アジアの夏のモンスーンがグローバルな気候の年々変動における積極的な役割をはたしている可能性を裏づけるものである。それをもたらす基本的なメカニズムは、アジアモンスーン域を上昇域とし、東太平洋を下降域とする熱帯東西循環(あるいはウォーカー循環)が、大気・海洋相互作用を通して、夏から冬へ季節的に発達することにあると考えられる。実際、夏のモンスーンの強弱によって、この循環と熱帯太平洋の大気・海洋系の状態が大きく変わる

ことが、いくつかのモデル実験で確認されている⁽¹³⁾⁽¹⁴⁾。図5で相関が弱い時期は、インドモンスーン変動もSOIも非常に振幅が小さく、相互作用が弱くなっている時期にほぼ対応している。

モンスーン変動とグローバルリンク

では、ENSOからモンスーンへのリンクを含め、モンスーンの変動を年々変動から10年~数十年スケールで支配している要因と機構は何であろうか。図3で示されたように、強いモンスーン→ラニーニャ→弱いモンスーン→エルニーニョ→強いモンスーンという、ENSO-モンスーンシステムにおける2年周期的なサイクルは、ある条件がそろえば出現するが、そのような条件が存在する期間は、過去100年間の観測データをみる限り、むしろまれであり、大部分の期間は、そのようなサイクルは明瞭ではない。しかし、モンスーンの強さは確かに変動しており、数十年スケール程度の周期で変動している。

このようなENSO-モンスーンシステムの非正常でカオス的な変動を理解するためには、ENSO→モンスーンのリンクに、何らかの非線形な過程が存在することが必要になる。これを模式的に示したのが、図6である。ENSOは、大気循環場でのテレコネクションを通して、南北両半球の中・高緯度に影響を与えることがよく知られている。この中・高緯度で形成された大気循環の異常が、さらに大気・海洋・陸面系の何らかの過程を通して、アジアモンスーンに作用するというリンクが、この問題の鍵であると考えられる。

著者は、“この何らかの過程”で最も重要なも

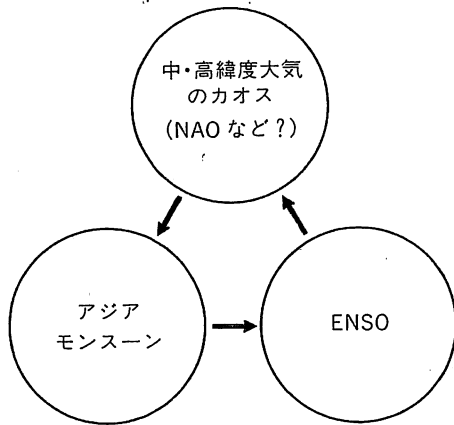


図6 モンスーン、ENSO、中高緯度大気のカオス的ふるまいのあいだの非線形な相互作用過程の模式図。

のが、北大西洋振動(NAO)とこれに関連したユーラシア大陸での(積雪・土壌水分などの)陸面過程であることを、いくつかの観測的事実から主張している⁽¹¹⁾⁽¹⁵⁾。NAOは、南方振動とともに、WALKERによって今世紀はじめに発見された、地球大気振動におけるもう一つの作用中心であるが、南方振動とは独立に(無関係に)振動していることが指摘されている⁽¹⁶⁾ため、ENSO-モンスーンシステムの研究ではほとんど無視されてきた。しかし、この独立性こそが、じつはこのシステムをカオス的に振る舞わせていることに一役買っている可能性がある。

最近、インド洋での大気・海洋相互作用という、もう一つのリンクが注目されている⁽¹⁷⁾⁽¹⁸⁾。この議論では、熱帯太平洋の大気・海洋系の10年～数十年スケールの変動が、熱帯・亜熱帯インド洋での大気・海洋系に作用し、それがモンスーン→ENSOのリンクにも影響しているという指摘である(本号山形俊男氏・升本順夫氏の解説、前号中村尚氏の解説参照)。その他のリンクも、まだありうる可能性がある。

いずれにせよ、地球の気候システムは常に変動しており、その変動の物理過程も、システムに内在する非線形な過程と、そして(温室効果ガスの

増加などの)人間活動の影響で、刻々と変化している。システムに内在する過程と人間活動は、決して独立ではなく、むしろ、システムのもつ固有のモードの振幅や頻度などを変調するというかたちで現われる可能性が強い⁽¹⁹⁾。例えば、近年のNAOや南方振動の偏った状態は、すでに人間活動の影響が現われているのかもしれない。大気・海洋・陸面系としての気候システムの長期的・継続的モニタリングとプロセス解明の努力が、いまこそ重要であろう。

(Tetsuzo YASUNARI 筑波大学地球科学系)

文 献

- (1) 佐々木昭士: 1994年度筑波大学自然科学類卒業論文(1995)
- (2) S. F. TIAN & T. YASUNARI: J. Meteor. Soc. Japan, **70**, 585(1992)
- (3) A. YATAGAI & T. YASUNARI: J. Meteor. Soc. Japan, **73**, 909(1995)
- (4) 森島済・三上岳彦: 地理学評論, **71A-6**, 393(1998)
- (5) C. P. CHANG et al.: J. Climate(投稿中)
- (6) T. YASUNARI: Meteorol. & Atmos. Phys., **44**, 29(1990)
- (7) 安成哲三・小池俊雄: 科学, **63**, 626(1993)
- (8) 陳烈庭・閻志新: 中長期水文気報, 185(1979)
- (9) 中国気象局国家気候中心: '98中国大洪水与気候異常, p. 56~62(1998)
- (10) B. WANG: J. Climate, **8**, 267(1995)
- (11) T. YASUNARI et al.: (投稿中)
- (12) C. TORRENCE & P. J. WEBSTER: Q. J. R. Meteorol. Soc., 印刷中
- (13) Y. MASUMOTO & T. YAMAGATA: J. Meteor. Soc. Japan, **69**, 197(1991)
- (14) T. P. BARNETT et al.: J. Atmos. Sci., **46**, 661(1991)
- (15) T. YASUNARI & Y. SEKI: J. Meteor. Soc. Japan, **70**, 177(1992)
- (16) T. P. BARNETT: J. Atmos. Sci., **42**, 478(1985)
- (17) R. KRISHNAN et al.: Geophys. Res. Lett., 印刷中
- (18) R. KAWAMURA: J. Meteorol. Soc. Japan, **76**, 1009(1998)
- (19) T. PALMER: Bull. Amer. Meteorol. Soc. **79**, 1411(1998)

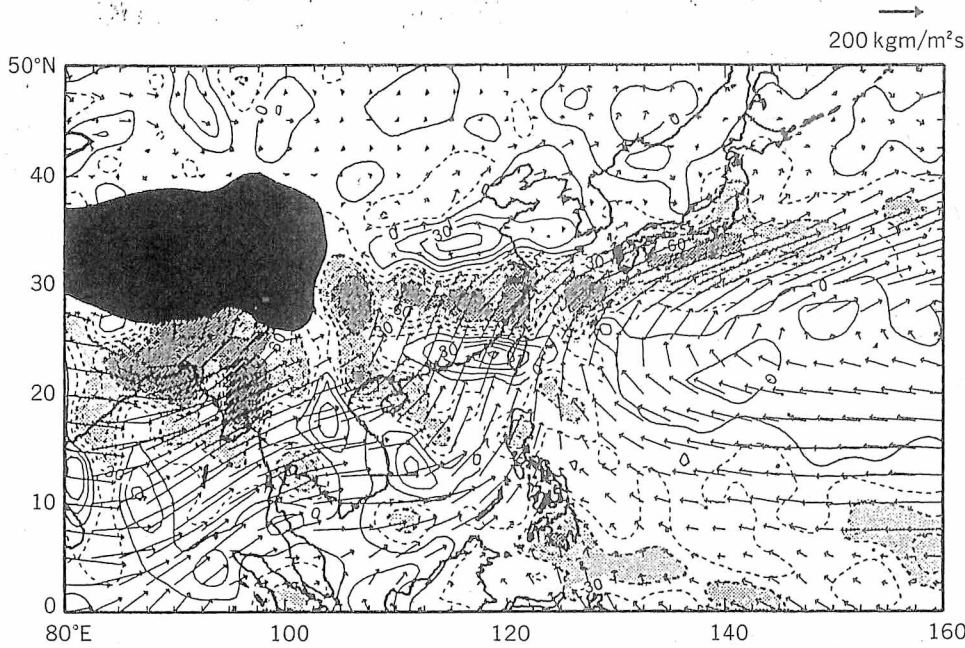


図2 梅雨最盛期(6月30日から7月4日)における水蒸気輸送(フラックス)とその発散⁽¹⁾. 1985年から1992年の8年間平均. 破線は負の発散(すなわち収束)域を示す. 濃いアミの部分は大きな収束のある地域で, 降水量の多い地域にほぼ対応している. 黒くぬりつぶしたところは, 標高3000 m以上のチベット高原域を示す.

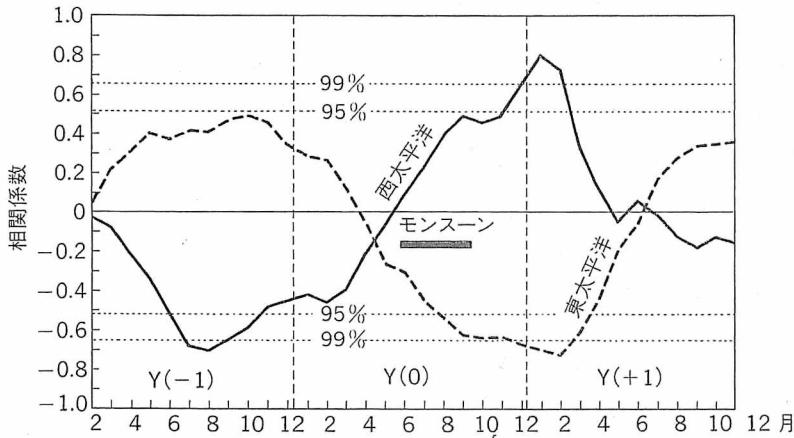


図3 インドモンスーン降水量と, 赤道西太平洋(実線)および赤道東太平洋(破線)の海面水温とのラグ相関⁽⁶⁾. Y(0)は参照したインドモンスーン(太い線)の年を表す. %は有意水準を示す.

いだには数カ月のラグをもった高い相関のあることを示している. すなわち, 夏の熱帯アジアのモンスーンが強い(弱い)と, その後の冬の東部熱帯太平洋の海水温は高い(低い)という関係であり, モンスーンが強い(弱い)状態とラニーニャ(エルニーニョ)的な状態が, 約半年のラグをもって, 密接に関係していることになる. この図をよくみると, 夏のモンスーンの前の冬とはほぼ逆の相関が示されており, ラニーニャ(エルニーニョ)的な状態の冬の後には, 弱い(強い)夏のモンスーンが出現しやすいことも示している. すなわち, ENSOとモンスーンの結合したシステムは, 準2年周期的な振動の特性をもっていることにもなる.

ユーラシア大陸の積雪とモンスーン変動

夏のアジアのモンスーンは, 大陸地表面での太陽エネルギーによる強い加熱によって相対的に熱くなった大陸上の大気と, 海洋上の相対的に冷たい大気とのあいだに生じた気圧勾配によって励起されている. これだけでなく, 海洋から輸送される水蒸気による潜熱放出も, もちろん大気加熱に大きな役割を果たしている⁽⁷⁾. したがって, 大陸地表面上での季節的な加熱の状態は, モンスーンの強さにも影響を与えることになる. モンスーンに先行する冬・春の大陸上の積雪や土壌水分の変動は, このような地表面熱収支を通して, モンスーンの変動に影響することが, 過去の多くの観測データや気候モデルによる研究で示されている.

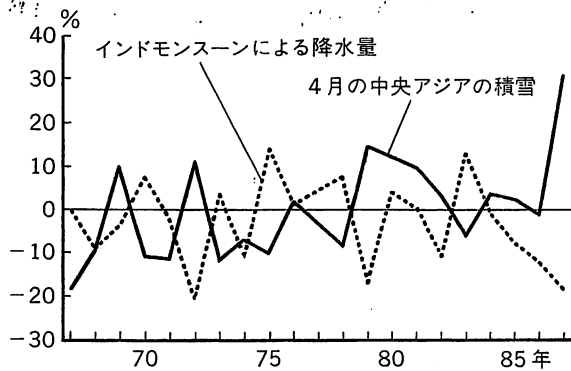


図4 ユーラシア大陸(中央アジア)の4月の積雪面積と夏のモンスーン降水量の年々変動⁷⁾。平均値からの偏差(%)で示す。積雪面積は人工衛星からの観測データ。

例えば図4は、春の中央アジアでの積雪面積変動と引き続きインドモンスーンの降水量変動が、負の相関をもっていることを示しており、大陸地表面での加熱過程の変化とモンスーン変動の上記の関係を示唆している。梅雨前線による東アジアのモンスーンの降水量においては、前線の季節的な北上が、熱帯モンスーンの強弱に支配されるため、積雪-熱帯モンスーンの関係が、中国大陸上では南北の降水量偏差となって現われることが指摘されている。例えば、チベット高原上での冬の寒冷と多積雪は、引き続き夏の華南での降水量を増加させ、華中(長江流域)ではむしろ減少させるという統計が示されている⁽⁸⁾⁽⁹⁾。大陸上の積雪分布変動はまた、直接熱帯のモンスーンに影響するだけでなく、中・高緯度の夏の偏西風循環と高緯度の気団の強さにも影響する。この過程も、東アジアモンスーンの変動に当然関与してくると思われる。大陸上の春の積雪と、日本付近の梅雨を特徴づける夏の初めのオホーツク高気圧とのあいだの統計的な相関関係は、このような物理過程を想定している。

ENSO-モンスーンと、モンスーン変動にかかわる上記のような物理過程を前提とすると、アジアモンスーンは、地球の気候システムの変動の中で、中・高緯度と熱帯を結びつける重要な役割を果たしている。

変化する ENSO-モンスーンの関係

熱帯太平洋の海面水温は、1970年代後半以降、高い状態、すなわち、エルニーニョ的な状況が続いている。これに関連して、エルニーニョの開始や大気・海洋系の空間的な構造も、70年代以前と以降とで大きく異なっている⁽¹⁰⁾。1982/83年冬に今世紀最大といわれたエルニーニョがおきたにもかかわらず、1997/98年冬には再びそれをしのぐエルニーニョが発現したことはまだ多くの人の記憶に新しいが、このような巨大エルニーニョの異常発現も、おそらくこのような長期の大気・海洋系の変化と無縁ではないであろう。

このような熱帯太平洋での大気・海洋系の変化に伴って、アジアモンスーンと ENSO の関係も、大きく変わってきた。図3で示したようなモンスーン変動と ENSO の強いリンクと、結合システムとしての準2年周期的な振動は、1960年代末から1980年代前半の約20年間のデータにもとづくものであるが、この2年周期的特性は、1980年代以降、顕著ではなくなっている。とくに、ラニーニャ(エルニーニョ)的な状態の冬の後には、弱い(強い)夏のモンスーンが出現しやすいといった、前の冬の大気海洋系の状態とモンスーンの関係は、かならずしも成り立たなくなっている。図3にみられた北半球春ころの関係の反転も顕著ではなく、エルニーニョ的な大気・海洋系の状態が、そのまま夏のモンスーン季のころまで引き続き、しかも、モンスーンは弱くなる傾向をもつというのが、近年のいくつかの ENSO イベントでみられた実態に近い。

ENSO とアジアモンスーンの関係の変化を、より長期的に調べてみよう。図5は、インドモンスーン降水量と ENSO システムの大気側の指標である南方振動指数(タヒチと北オーストラリアのダーウィンの地上気圧差, SOI)の相関係数を、ある年の前後7年(計15年間のデータ)で計算し、その年を1年ずつずらして得た値を、19世紀末から約100年について時系列として並べたものである。黒丸はインドモンスーンとその後の冬の南