進化する地球気候を考える

東京大学名誉教授
独立行政法人海洋研究開発機構
アプリケーションラボ　所長

山形俊男

はじめに

昨今、異常気象や極端現象が世界各地で報告され、専門家の間でさえも短絡的に地球温暖化の影響とみなすことが多い。自然界の現象は時空間スケールの異なる階層構造をしており、このような短絡的な発想は現象の解明、予測、対処の仕方において問題が多いと考えている。温暖化気体の増大にもかかわらず、二一世紀に入ってからは地球大気の年平均気温は上昇していないという厳然たる事実がある[1,2]ことは意外に知られていない。この矛盾を理解するには気候変化と気候変動の違いを知る必要がある。残念なことにわが国ではこの二つの違った概念が混同されて使われてきた。本稿ではこれまでいろいろなところに書いてきたものを纏めながら、この問題を再度取り上げてみたい。

産業革命以来、二酸化炭素に代表される温室効果気体の濃度が大気中で著しく増大し、人間活動と地球温暖化の関係が久しく危惧されてきて久しい。そこでWorld Meteorological Organization（ＷＭＯ）と United Nations Environment Program（ＵＮＥＰ）は一九八八年に地球気候システムに起きている科学的事実を明らかにして、適応策と緩和策に関する国家の意思決定に役立てるために、Intergovernmental Panel on Climate Change（ＩＰＣＣ）を組織した。ＩＰＣＣは一九九〇年以来、世界の多くの科学者の協力のもとで報告書を発表してきたが、特に二〇〇七年に出された第四次報告書においては、人間活動による温暖化気体の濃度の増大と地球温暖化の関係を確実視するに至った。二〇一四年に発表予定の第五次報告書の作成に向けて多くの会合が開催され、数千の科学者と一九五か国に及ぶ政府関係者の協力のもと活発な準備がなされているところである。気候変化と気候変動の違いを知ることはＩＰＣＣの報告書を正しく理解する一助になると信じている。

地球温暖化とは何なのか

太陽系の第三惑星である地球は高温の太陽から短波放射を受けているが、その三〇％をそのまま反射（この反射率をアルベドという）してしまう。残りの七〇％が大気を温めるのに使われる。

温められた大気は宇宙空間に向けて長波を放射し、全体として地球大気は熱平衡の状態にある。平衡温度（有効放射温度）をT_eとすれば$4\pi a^2\sigma T_e^4 = \pi a^2(1-A)F_s$で与えられる。ここでaは地球の半径、σはステファン―ボルツマン定数（$5.67\times10^{-8}Wm^{-2}K^{-4}$）、Aは地球―大気系の反射能（アルビード：約〇・三）、F_sは太陽定数（$1.37\times10^3Wm^{-2}$）である。これからT_e=255K（-18℃）が得られる。これは地球大気全体の平均温度（250K）に近い値を与えているが、地表の平均気温は288K（15℃）でこれよりもずっと高い。この差を説明するのが多原子分子からなる温暖化気体（水蒸気、二酸化炭素、メタンなど）の存在である。多原子分子の振動、回転状態が遷移する過程で地表からの長波放射のかなりの部分が吸収される。この多原子分子の気体から逆に地表に向かう長波放射を考慮すると、地上気温としてほぼ妥当な値が得られる。このため多原子分子からなる大気成分を温暖化気体と呼ぶのである。温暖化気体は太陽からの短波放射についてはあまり吸収せず、地表からの長波放射を良く吸収するために温室効果が働く。言い換えれば、温暖化気体が増大すると地球大気は赤外放射に関して光学的により不透明になるので、仮にほかの天体から赤外線望遠鏡で地球の地表を観察しようとしてもよく見えなくなる。金星はこうした惑星の典型である。

地球温暖化の研究史を眺めてみよう

一八世紀後半から一九世紀前半に活躍したフランスの数理物理学者J．B．フーリエは数学の世界ではフーリエ級数などでよく知られているが、熱力学にも造詣が深く、温度の高いところから低いところに流れる熱量は温度傾度に比例するというフーリエの法則を定式化したことでもよく知られている。彼は一八二四年に地球大気の温暖化効果に気づき、あたかも温室を覆うガラスの役割に似ていることから〈ガラスの効果〉と呼んだ。次いでアイルランドの物理学者J．チンダルは一八五九年に地球大気の中で温室効果に最も重要な役割を担っているのは水蒸気であり、次いで濃度は低いが二酸化炭素であることを正しく指摘した。また地質時代の氷河期は二酸化炭素の濃度の減少によって引き起こされたものと考えた。しかし、南極などのボーリングで得られた氷床コアの解析によれば、第四紀の氷期―間氷期の気温変動と二酸化炭素の濃度変動は極めてよい相関を示すが、両者の因果関係については未だにわかっていない。寒冷化して氷床が拡大して、生物活動が減退して、炭素循環が抑制され、大気中の二酸化炭素濃度が減少したのか、チンダルが考えたように大気中の二酸化炭素濃度が減少したために、気温が下がって氷河期が出現したのか、まだ明らかになっていないのである。おそらくは、太陽に対する地球の軌道要素の周期的変化に伴って、地球に届く放射量が僅かに減少し、何らかの原因で地球の気候システムが不安定化して、上述の両方のシナリオが相互に正のフィードバックを起こして氷河期が出現したと考えられる。また、太陽から地球に届く放射量が僅かに増大した場合に逆のフィードバック機構が働くと考えるなら

ば、間氷期の出現をある程度は説明することができる。しかし、なぜ間氷期の出現が氷河期の出現に比べて急激なのかはわからない。太陽から地球に届く放射量の変化と氷期―間氷期サイクルに関係があることはセルビアの地球物理学者M.ミランコビッチが一九四一年に初めて仮説として提唱したものである。

人間活動が大気中の二酸化炭素濃度を増やすことから地球温暖化をもたらす可能性があることを初めて示唆したのはスウェーデンの化学者S.A.アレニウスであり、一八九六年であった。彼は比較的簡単な計算から二酸化炭素が倍増した場合に地球の平均気温が五～六度上昇すると指摘している。これは今日から見ても驚くほど正確な指摘である。一九三八年に英国のアマチュア気象学者G.S.カレンダーは人間活動による二酸化炭素の濃度上昇が既に地球温暖化を起こしていると主張した。米国スクリップス海洋研究所のC.D.キーリングは国際地球観測年の一九五八年からハワイのマウナロアで二酸化炭素濃度の観測を開始し、毎年〇・四～〇・五%程度増大していることを明らかにした。一八世紀後半の産業革命までは約二八〇ppmでほぼ一定だった二酸化炭素の濃度は今では世界平均で四〇〇ppmに迫っている。このキーリングによる観測を支援したのは米国気象局（当時）のH.ウェクスラーで、プリンストン高等研究所において汎用計算機を開発していたJ.フォン・ノイマンらによる天気予報の世界初の試みや、その後、気候研究の中心となった地球流体力学研究所の設立も支援したことで知られている。フォン・ノイマンにより指名されて地球流体力学研究所の初代所長となったJ.スマゴリンスキーはS.マナベを日本から招聘し、詳細な放射過程、対流過程を考慮した温暖化研究を本格的に開始するとともに、海洋学者のK.ブライアンとの共同チームを編成し、大気・海洋結合大循環モデルの発展に尽力した。今日、IPCCの報告書をはじめとして地球温暖化問題を議論するのに使われる大気・海洋結合大循環モデルは、すべて何らかの形でこのモデルに依存している。

気候変化と気候変動の違いを知ろう

気候変動はClimate Variationsに対応する訳語で気候の平年状態からのずれ（偏差）を意味する。ここで気候の平年状態としては通常過去三〇年間の平均を用いることが多い。一方、気候変化はClimate Changeに対応する訳語で、気候の平均状態が大気組成や太陽放射など大気海洋システムの外からの影響によって長期的に変化することを意味する。

地球の気候システムは太陽から短波として受ける熱エネルギーを長波の形で宇宙空間に放出し、全体として熱平衡の状態にあるが、地球温暖化はこの熱平衡状態を壊すものではない。緯度別に見るならば年間を通して低緯度では過剰な太陽エネルギーの供給を受け、高緯度では過剰に宇宙空間に熱エネルギーを放出するため、これを補償すべく大気や海洋の循環が低緯度から高緯度に熱を運んでいる。地軸の傾きは太陽からの熱エネルギーの供給の緯度分布に季節変化を与えているが、蒸発や凝結に伴う潜熱の吸収・

放出過程が大気海洋システムの正のフィードバックを強めて、その循環に強い季節性をもたらしている。しかし、海洋や海氷、氷床の熱容量は大きく、この季節性は単年度では地域的に解消せず残差として残ってしまう。これを解消すべく大気海洋システムの中に経年変動が生まれるのである。こうした変動、すなわち気候変動の代表的なものが熱帯太平洋のエルニーニョ現象（注参照）や、筆者らが発見、命名した熱帯インド洋のダイポールモード現象(3)（注参照）であり、その影響が世界各地に波及して異常気象を起こしているのである（図1、図2）。大気中の温暖化気体の濃度が産業革命後一貫して増大し、それと一九七〇年代後半以降に著しくなった気温上昇との相関関係がＩＰＣＣの第四次報告書で確実視されたことを既に述べたが、これは気候変化の問題である。その意味ではＩＰＣＣを「気候変動に関する政府間パネル」と訳したのは誤りである。「気候変化に関する政府間パネル」とすべきなのである。

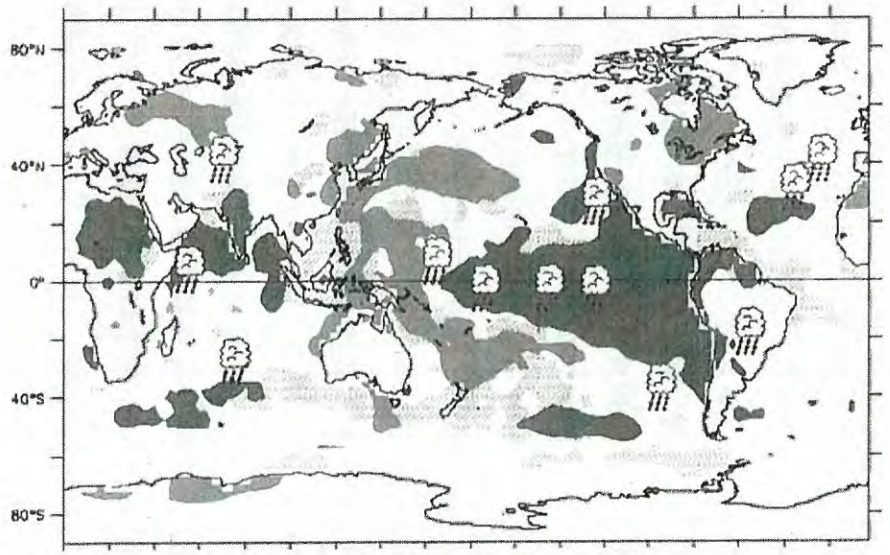

図1　エルニーニョ現象が世界各地の夏に及ぼす影響
影部分は旱魃、雲マークは大雨、淡い黒色部分は低温異常、濃い黒色部分は高温異常を示す

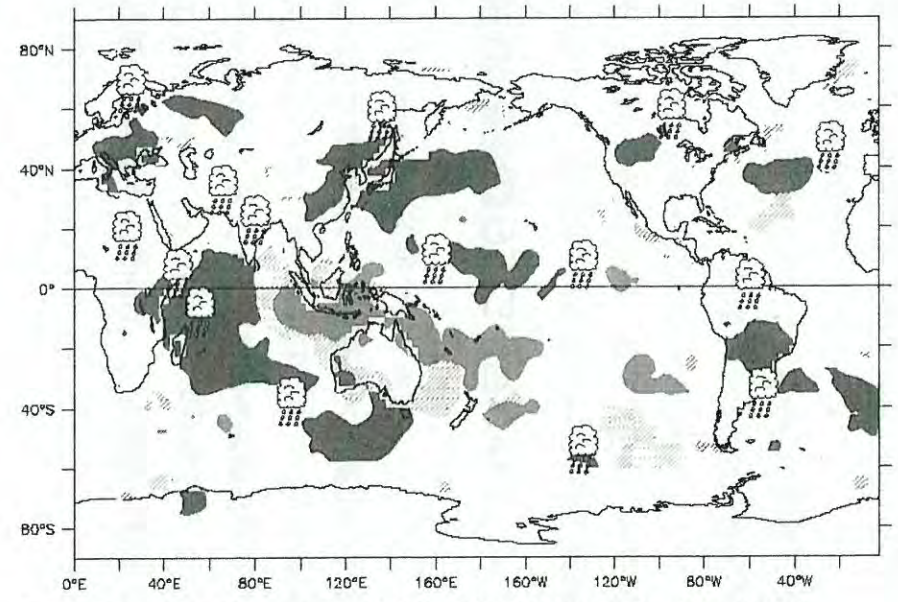

図2　正のダイポールモード現象が世界各地の夏に及ぼす影響
影部分は旱魃、雲マークは大雨、淡い黒色部分は低温異常、濃い黒色部分は高温異常を示す

また、地球温暖化の未来を考えるGlobal Warming Projectionを我が国では地球温暖化予測と訳すことが多いが、自然現象の不確定性に加えて、更に将来の経済、社会構造などのシナリオに依存する不確実性の極めて高い未来の議論であるから、地球温暖化の予想、あるいは推定と訳すべきなのである。一方、気候変動の予測は大気変動だけでなく、海洋変動や陸面過程の変動も含むもの

ではあるが、天気予報と同じく完全に数理科学の世界の話である。ＩＰＣＣの報告書では変動(variations)と変化(change)、予測(prediction)と予想(projection)を慎重に使い分けている。わが国では政策担当者はもとより気候研究の専門家の間でも、いまだに混同して使われているケースが見られるのは残念である。気象庁では両者の違いをこれまで正しく認識していたが、残念なことに、その後、政府の公式文書に合わせて気候変化に統一してしまった。

気候変動の予測（prediction）では衛星や現場観測から得られる地球観測データを初期値として、大気海洋システムの時間発展をコンピュータを用いて解き、数ヶ月から数年先までの未来を実際に予測（predict）する。大気海洋システムにはいろいろな時定数を持つ現象が階層構造をなして生起するために、一週間先の天気予報が困難であっても一年先のエルニーニョ現象は予測可能なのである。私たちの社会に直接的な影響を及ぼす異常気象や極端現象は、自然界の変動である気候変動によるものであって、この気候変動を予測することが防災、減災をはじめ、今を生きる私たちの社会経済活動に直接的に貢献する。地球温暖化はこのような自然変動現象の振幅や発生頻度、現象同士の関係に長期的な変調を与えるものとして理解することができる。実際、二一世紀に入りラニーニャ現象や筆者らが命名したエルニーニョモドキ現象[4、5、6]（注参照）が多発するようになっており、この影響が地球の平均気温に影響して、本稿の冒頭で述べたように、気温の上昇があたかも止まったかのように見えるのである。インド洋にダイポールモード現象が起きやすくなっているのも、地球温暖化を緩和している海洋の温暖化が影響していると考えられる（図３）。

天気予報の歴史を振り返ってみよう

ここで変動と変化の違いをより正確に理解するために、変動予

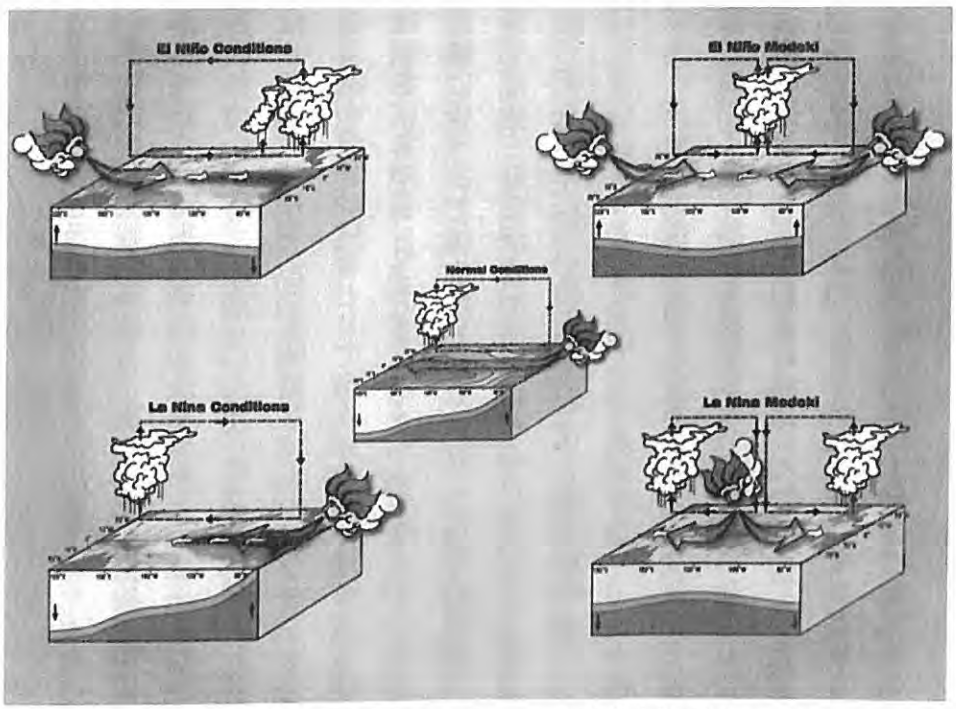

図３　エルニーニョ現象(左上)、ラニーニャ現象(左下)とエルニーニョモドキ現象(右上)、ラニーニャモドキ現象(右下)。中央の図は気候値。海面水温偏差と風の偏差を模式図で示している。地球温暖化が海の温暖化を引き起こし、モドキ現象が頻発するようになったと考えられる。Ashok and Yamagata (2009) から

測の著しい成功例である天気予報の歴史を簡単に振り返ってみよう。ノルウェーの気象学者であるV.ビヤルクネスは一九〇四年に天気予報とは大気運動を支配する力学、熱力学方程式系の初期値、境界値問題を解くことと正しく位置づけてはいたものの、非線形の偏微分方程式系を解く技術の遅れから、天気予報は久しく統計と経験に基づいて行なわれていた。一九二二年にL.F.リチャードソンは地球上のすべての流体現象を記述可能な方程式系を差分化し、一七世紀にB.パスカルが考案して以来ほとんど進歩していなかった手回し計算機を使って、天気予報に挑戦した。しかし、階層構造をなす気象現象の力学構造への理解がまだ進んでいなかったことと計算技術の遅れから、成功を収めることはできなかった。リチャードソンは計算技術の遅れを正しく理解し、六四〇〇〇台の手回し計算機を用意し、旗を用いて信号を送り合えば天気が進む前に計算結果を出すことができると考え、「天気工場」の夢を描いた。これは天気予報における「リチャードソンの夢」といわれる。リチャードソンの偉大さはこれにとどまらない。彼は、海洋変動や陸面過程の変動は当面は無視して考えるが、ゆくゆくは大気変動と相互作用するシステムとして取り扱うべきであると正しく指摘している。これこそ、後の気候変動予測、気候変化予想に繋がる先駆的な視点であり、リチャードソンのもう一つの夢と言ってよいであろう。一九八八年に英国の王立協会でエルニーニョ／南方振動現象の討論会が開催され、私も数理モデルを最初に提唱した一人として招かれた。この会をリードしたH.チャーノック、G.フィランダー両博士がリチャードソンのもう一つの夢に言及したのはまさに正鵠を得たものであった。

第二次世界大戦が終結し、次第に冷戦構造が明確になって核の冬への恐怖も現実のものとなりつつあった一九四〇年代後半から五〇年代にJ.フォン・ノイマンはプリンストン高等研究所において汎用コンピュータを開発していた。フォン・ノイマンが汎用計算機の最初の挑戦として選んだテーマは天気予報であった。彼は気象学者のJ.G.チャーニイらと共同して、天気予報を世界で最初に行うことに成功した。一九五〇年前後のことである。当時、社会・産業活動が活発に行われていたのは中緯度地域であり、天気予報とは中緯度の高気圧と低気圧の発生、成長、減衰過程を事前にとらえることであった。そこで、チャーニイはまず簡単化された準地衡風方程式を導出して、高気圧と低気圧の発生理論（傾圧不安定論）を構築した。この簡単化された方程式と計算技術の進展が天気予報を可能にしたのである。一九五五年、N.フィリップスが大気の二層モデルを用いて貿易風や偏西風を再現しているのを見たフォン・ノイマンは地球気候の研究所を構想したが、それがスマゴリンスキーらの努力により、一九六三年に実現した。これが前述した地球流体力学研究所である。フォン・ノイマンは一九五四年に太平洋のマーシャル諸島ビキニ環礁で行われた水爆実験の視察で被爆し、この研究所の創立を見ることなく、一九五七年に原爆症で死亡している。

予測にはその初期値とする観測データが必要である。

一九五七、五八年に行われた国際地球観測年の実現に向けた地球物理学者の努力、その折に打ち上げられた人工衛星スプートニクの成功、冷戦構造にあっても人類は等しく天気情報を必要とすることから、一九六一年の国連総会において世界気象監視（World Weather Watch）システムとデータ転送システムの構築を提唱した米国のJ．F．ケネディ大統領の活動などを見落としてはならない。

天気予報はビヤルクネスの定式化にまで遡るならば一世紀以上の歴史を持つ。フォン・ノイマンとチャーニイによる最初の成功からも半世紀以上の月日が経過し、今や地球規模の大気観測とそれに基づいて、スーパーコンピュータを用いた予測は社会生活にも産業活動にも不可欠になっている。気候変動の予測もこのような試みの延長線上にあるもので、こうした〈気候変動予測〉という実証科学を、社会科学と融合した不確実性の高い〈気候変化予想〉と混同すべきではない。異常気象から気候変動に至る自然界の階層構造を正しく理解し、解像し、予測することは地球温暖化問題における適応策、削減策を考える上でも極めて重要なのである。

地球表層の環境変化と「未来の地球」計画

地球温暖化と人類の活動の関係は、より広い視点から捉えるならば生態系を含む地球表層の自然環境と人間活動の相互作用といえるであろう。これは物質循環系の変調を伴っており、地球温暖化は地球圏の炭素循環に人間圏が有意な影響を及ぼし始めたということの証である。地球圏の物質循環系の乱れに適切に対応し、これを持続的に管理してゆくには、循環系の自然構造とその変動、人間活動を含む外部要因による変化をよく知り、その知識に基づいて適切に行動することが大切になる。物質循環には物理、化学、生物学的なプロセスが関与しており、その科学的理解には細分化された科学分野を越えた連携が必要になる。進行する地球環境の劣化に対処し、持続的な地球圏と人間圏からなる「未来の地球」を築き上げてゆくには、実際のアクションが必要であり、人文社会科学分野との連携はもちろん、政策担当者を含む、すべてのステークホールダーとの連携が不可欠である。

このような状況にあってICSU（International Council for Science）はISSC（International Social Science Council）、BF（Belmont Forum）、UNESCO（United Nations Educational Scientific Cultural Organization）、UNEP（United Nations Environment Programme）UNU（United Nations University）、WMO（World Meteorological Organization: observer）とアライアンスを形成し、科学、政策、資金を統合して持続可能な「未来の地球（Future Earth）」を実現すべく壮大な計画を立案中である（http://www.icsu.org/future-earth参照）。「社会のための科学」を個々の学問分野の健全な発展を阻害することなく促し、多様な地域性、歴史性も尊重して、持続的な社会形成に向けた動きを加速することができるかどうか、今まさに私たちの叡智が問われているといえるのではないだろうか。

参考文献

（1）Easterling, D. R. and M. F. Wehner, Geophys. Res. Lett. 36, L08706 (2009)

（2）Foster, G. and S. Rahmstort, Environ. Res. Lett. 6, 044022 (2011)

（3）Saji, N. H., B. N. Goswami, P. N. Vinayachandran, and T. Yamagata, Nature 401, 360-363 (1999)

（4）Ashok, K., S. K. Behera, S. A. Rao, H. Weng, and T. Yamagata, J. Geophys. Res., 112, C11007, doi:10.1029/2006JC003798 (2007)

（5）Weng, H., K. Ashok, S. K. Behera, S. A. Rao, and T. Yamagata, Climate Dynamics, 29, 113-129 (2007)

（6）Ashok, K., and T. Yamagata, Nature. 461, 481-484 (2009)

注

※エルニーニョ現象／ラニーニャ現象／モドキ現象

数年に一度、東太平洋熱帯域の海水温が上昇し、逆に西太平洋熱帯域の海水温が下降する現象をエルニーニョ現象という。貿易風も弱まり、大気と海洋が連動した現象であることがわかっている。反対の現象をラニーニャ現象という。モドキ現象は中央部太平洋熱帯域の水温が上昇、あるいは下降する現象で風系も付随して変わる。このモドキ現象は筆者らが命名したものである。

※ダイポールモード現象

インド洋の熱帯域に起きるエルニーニョ現象、ラニーニャ現象といってよいものである。東インド洋熱帯域のスマトラ島、ジャワ島沖の海水温が低下し、西インド洋ケニア沖の海水温が上昇する現象を正のダイポールモード現象とよぶ。これに伴って東風の偏差が生じる。反対の状況が負のダイポールモード現象である。この現象は筆者らが一九九九年に発見し、命名した。

山形　俊男（やまがた　としお）

一九七一年　東京大学　理学部　地球物理学科　卒業
一九七五年　九州大学　応用力学研究所　助手
一九七七年　理学博士（東京大学）
一九七九年　九州大学　応用力学研究所　助教授
一九九四年　東京大学　理学部　地球惑星物理学科　教授
一九九七年　海洋科学技術センター（（現）独立行政法人　海洋研究開発機構）、地球フロンティア研究システム気候変動予測プログラム　プログラムディレクター、国際太平洋研究センター（ＩＰＲＣ）プログラムディレクター（兼務）
二〇〇七年～二〇〇九年　東京大学　大学院理学系研究科　副研究科長
二〇〇九年～二〇一二年　東京大学　大学院理学系研究科長　理学部長
二〇一二年　東京大学　名誉教授
二〇一二年　独立行政法人　海洋研究開発機構　アプリケーションラボ　所長

主な受賞歴

一九八一年　日本海洋学会　岡田賞
一九八七年　日本気象学会　学会賞
一九八九年　米国ウッズホール海洋研究所　バー・シュタインバッハ学者
一九九七年　日本海洋学会　学会賞
二〇〇四年　米国気象学会　スヴェルドラップ金メダル賞
二〇〇四年　米国気象学会　フェロー
二〇〇四年　トムソン科学研究アウォード二〇〇四年（最先端研究領域において活躍する日本人研究者一六人）
二〇〇五年　紫綬褒章
二〇〇八年　米国地球物理学連合　フェロー
二〇〇八年　テクノオーシャン　アウォード
二〇一三年　フランス　海洋アカデミー　外国人連携会員