



自然変動と地球温暖化

地球温暖化に含まれる数十年規模変動

筑波大学
計算科学
研究センター
教授
田中 博



1. はじめに

これまでに、自然変動としての北極振動 (Arctic Oscillation:AO) の力学については「てんきすと」第56号に掲載させていただき、北極振動と地球温暖化に見られる不都合な真実については、第66号と第67号に掲載させていただきました (田中 2009; 2010)。地球温暖化の研究を進めるうちに、1970年から2000年にかけて見られた急激な温暖化には、自然変動の影響が約半分の割合で含まれていると考えられたので、IPCC-AR4 (第4次評価報告) の気候モデル群による温暖化の将来予測は過大評価されている、と主張しました (田中 2010)。当時、観測された急激な温暖化のほとんどは人為起源によるもので、しかもその温暖化の速度は近年、加速度的に増大している、という認識が一般的でした。

その後、21世紀にはいると地球温暖化は停滞期となり、上述の温暖化の速度が加速度的に増大している、という説明は啓蒙書から姿を消しました。そして、温暖化の停滞(ハイエイタス)が明瞭になると、これは人為起源の温暖化に数十年スケールの自然変動が重なったことによるという論調が見られるようになりました (田中 2015)。これまでは、IPCC報告の結論と異なるような主張は、おおむね懐疑派の枠にはめられ、論拠に欠けるという理由で迷惑がられたように記憶しております。ともあれ、地球温暖化研究における数十年規模変動の研究を推進する中で、最近また新たなIPCC報告と異なる興味深い研究結果がTanaka and Tamura (2016) によって得られましたので、紹介したいと思います。

2. 地球温暖化と北極温暖化 増幅の関係

はじめに、地球温暖化が進むと、北極圏や高緯度の温暖化が増幅して現れるという現象を、簡単なエネルギーバランスモデルで再現してみましょう。この現象は北極温暖化増幅と呼ばれています。図1は Alexeev and Jackson (2012) により考案された低緯度と高緯度の気候システムの2ボックスモデルです。大気の外に海洋混合層までを含めて領域積分したボックスをコントロール領域といい、そこでの全熱エネルギー量から平均温度 (T) が算出されます。その平均温度の時間変化は、大気上端の短波放射 (S) や長波放射 (OLR)、ボックス境界の南北熱輸送 (フラックス)、そしてボックス内での熱源 (ソース) によって決まる、というモデルです。CO₂ の倍増によ

る放射強制力などはこのソースになります。これは連続流体のバランス方程式という第一原理に基づいており、複雑な気候システムモデルも、同じコントロール領域で積分してしまえば、同一のボックスモデルに帰着します。このモデルでは特に雪氷圏を導入し、アルベド (α) の大きな雪氷圏の面積変化が短波放射を変化させる雪氷アルベドフィードバックが考慮されているのが特徴です。

最も基本的な実験として、南北の熱輸送がなく、平均温度は各領域での放射平衡温度で決まるとすると、低緯度と高緯度の平均温度はそれぞれ 317K、257K となり、半球平均温度 (以下ではこれを全球平均と呼びます) は 287K、南北の温度差は 60K という結果が得られます。通常、赤道と北極での放射平衡温度差は 100K と言われていますが、2ボックスモデルなのでこの程度になります。この大きな南北の温度差は、傾圧不安定により温帯低気圧を発達させるので、大気大循環を考慮し、温度差に依存した熱輸送をモデルに導入すると、南北の温度差は 20K に減り、全球平均温度は変化なしという結果が得られます。さらに雪氷圏を考慮すると、その大きなアルベドにより全球平均温度は 284K に低下し、南北の温度差は 24K に増加します。極めて簡単なモデルですが、気候システムの特徴を大枠で再現できることが分かります。

以上を現在気候と定義し、次に CO₂ の倍増により、放射強制力が一様に 4 W/m² だけ増加したとすると、低緯度の温度は 2K 上昇する一方で、高緯度の温度は 4K 上昇し、全球平均温度は 3K 上昇するという結果が得られ

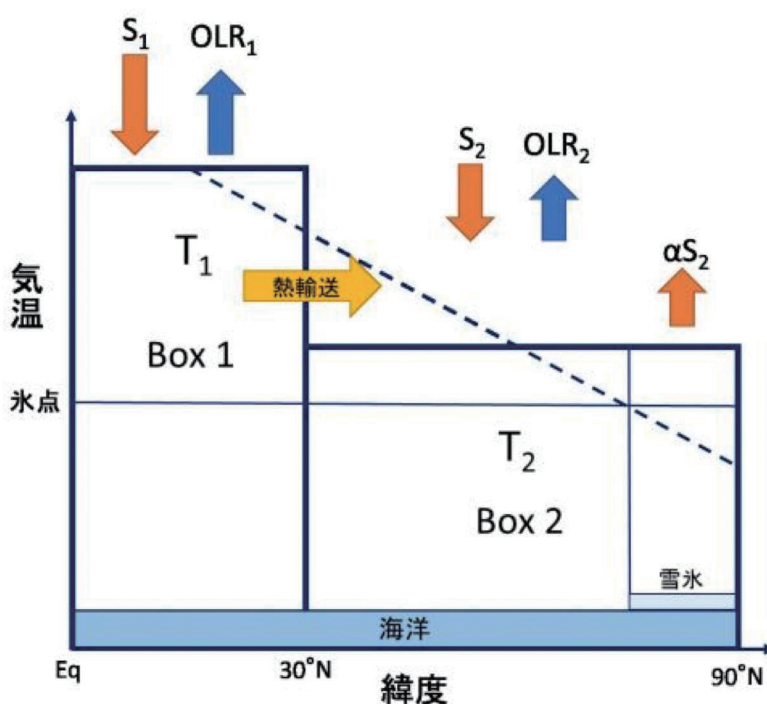


図1 気候システムのエネルギーバランスモデル (2ボックスモデル)。(Alexeev and Jackson 2012を改変)

ます。これがCO₂倍増に伴う地球温暖化の再現実験です。高緯度の昇温により、雪氷圏の南限は緯度にして5度北上するという結果が得られます。ここで注目すべきは、一様な放射強制力に対し、高緯度は低緯度の2倍昇温するという結果です。そこで、問題となっている北極温暖化増幅(A)を、温度上昇の南北の比(A=4K/2K)で定義するとA=2と定量化されます。

このモデルは極めて簡単なので、北極温暖化増幅のメカニズムを理論式で確認することができます。まず、多くの気候モデルの解析結果から、地球温暖化により北極温暖化増幅が起こると、南北の温度差の減少により北向き顕熱輸送が減る一方で、温暖化により潜熱輸送が増えるので、両者の和はあまり変化しないという傾向があります。したがって、高緯度を暖めて北極温暖化増幅をもたらしているのは、南北の熱輸送ではなく雪氷アルベドフィードバックである、という結果が理論的な数式で導かれます。さらに、全球平均温度は放射強制力と北極温暖化増幅Aの関数として定式化されます。理論式ではCO₂倍増による温暖化はA+1に比例し、A=2の時に3Kとなります。北極温暖化増幅が起こらない時にはA=1なので、温暖化は2Kとなります。これがプランク応答と呼ばれる量です。つまり、地球温暖化は北極温暖化増幅により増幅されるという特徴が解ります。そして、それをもたらしているのは、このモデルでは雪氷アルベドフィードバックという理解になります。

3. 地球温暖化と自然変動の重ね合わせ

次に、この簡単な2ボックスモデルを用いて地球温暖化を再現してみます。現在気候を初期値として、CO₂による放射強制力を100年で2W/m²の割合でリニアに増加させて地球を温暖化させます。さらに、自然変動により雪氷面積を10%変動させた結果を図2に示しました。雪氷面積の変化は60年周期とし、1910年、1970年に正偏差、

1940年、2000年に負偏差のピークが来るものと仮定しました。図中の赤線は温暖化を入れた場合で、温度は100年で約1Kの割合で上昇します。青線は温暖化を入れずに、60年周期の自然変動のみとした場合です。この実験結果は、過去100年の温度変化を再現したひとつの仮説で

N. H. Mean Temperature with Linear Trend
Two Box Enelgy Balance Model

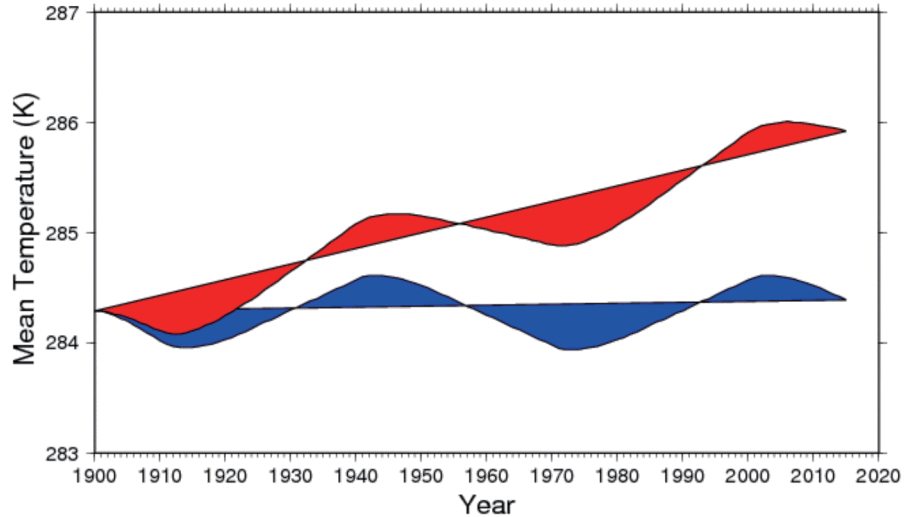


図2 2ボックスモデルによる温暖化の数値実験。赤線は温暖化を入れた場合で、青線は入れない場合。(Tanaka and Tamura 2016)

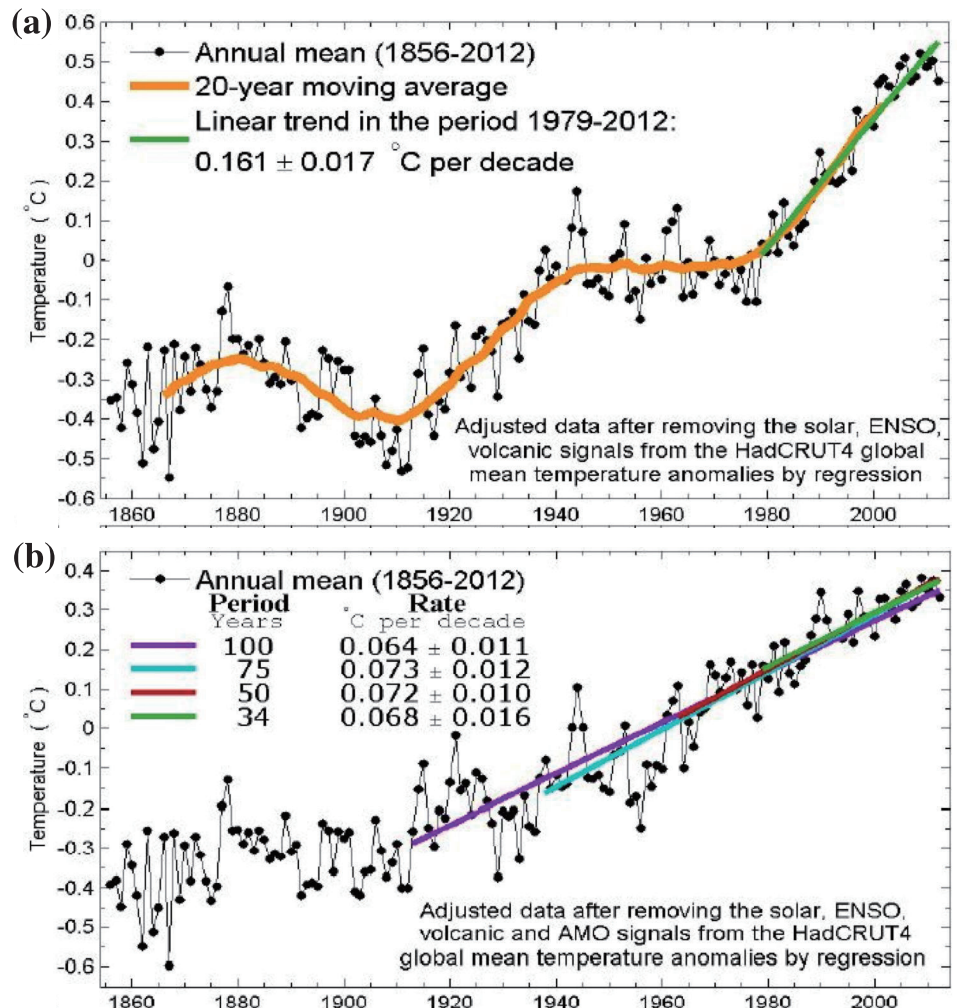


図3 HadCRUT4による1856から2012年までの年平均温度の時系列。(a) AMOを含んだ場合と(b) 含まない場合。(Tung and Zhou 2015)

す。仮説は正しく検証されなければなりません。このモデルは、複雑な気候システムモデルで再現されている個々のプロセスを、コントロール領域で積分し、大括りにしてパラメタリゼーションを施すことで、過去の観測結果と合致するようにチューニングしたものです。モデルの自由度に程度の差こそあれ、人間が頭で考えたプロセスのモデル化という点では、複雑なモデルと大差ないと考えます。

モデル実験の結果、2000年以降に温度上昇が停滞し、温暖化ハイエイタスが再現されています。もし、このモデルの仮説が正しければ、温暖化ハイエイタスは人為的な放射強制力による地球温暖化に、数十年周期の自然変動が重なることで生じたと言えます。さらに、1970年から2000年にかけての急激な温暖化の半分は自然変動によるものであり、自然変動を取り除いた温暖化は100年で1K程度しかない、という重要な結果が得られます。多くの気候モデルでは、この1970年から2000年にかけての急激な温暖化が、人為起源の温暖化としてチューニングされていると筆者は考えています。それは妄想であると言われますが、この問題は検証できない温暖化の将来予測とは異なり、検証可能なサイエンスの問題です。いつか真実が判明すると思います。

図3は、1856年から2012年までのHad CRUT4解析データを用いて再構築された年平均気温の時系列です(Tung and Zhou 2015)。図3aでは、元データから太陽放射の変化、ENSOと火山噴火の影響が統計的手法により取り除かれており、滑らかなオレンジの曲線は20年移動平均です。緑の直線は1979年から2012年の間の線形トレンドを示し、100年で1.61Kとなります。1910年と1970年に寒冷期があり、1940年と2000年以降に温暖期がありますが、この長周期変動は、大西洋数十年規模変動(AMO)の影響とされています。図3bでは、図3aと同様の統計的手法でAMOの影響が取り除かれています。解析の結果、残ったトレンドは地球温暖化トレンドとなりますが、最近100年、75年、50年、34年の期間でトレンドを計算すると、100年換算ではそれぞれ0.64K、0.73K、0.72K、0.68Kとなりました。トレンドの傾きはあまり変化せず、最近、加速度的に傾きが大きくなるという傾向は見られません。これが地球温暖化のトレンドであるとする、1970年から2000年までの急激な温暖化の約半分はAMOという自然変動が原因となります。この結果は図2で示した仮説と同じです。

4. プラネタリーアルベドの数十年規模変動

上述のエネルギーバランスモデルを用いた温暖化実験では、60年周期の変動としてAMOが想定されており、その60年周期は雪氷アルベドフィードバックの変化で再現されました。このモデルでは雪氷面積が変数として扱われていますが、図1によると、領域平均した大気上端のプラネタリーアルベドの変化が本質的に重要と考えられます。

Correlation map for SAT and Albedo
Northern hemisphere (0 N – 90N, 0E – 360E)
1958/59 – 2011/12 DJF

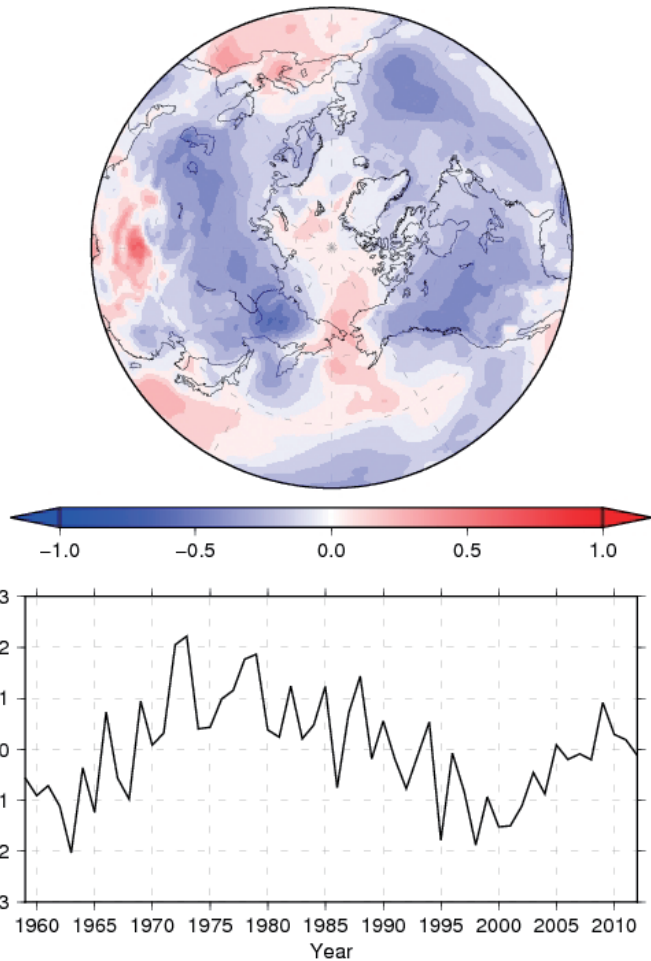


図4 北半球平均のプラネタリーアルベドの時系列と、それに回帰した地上気温の分布図。(Tanaka and Tamura 2016)

そこで、気象庁が作成したJRA-55再解析データを用いて、短波放射の下向きと上向きの比から計算した冬季(DJF)北半球平均プラネタリーアルベドの時系列を計算してみました(図4)。計算の結果得られた時系列は、1958年から1970年まで増加、1970年から2000年まで減少、2000年以降には増加の傾向が見られます。興味深いことに、得られた時系列は、AMOの時系列、および地球温暖化に上乗せされた自然変動の時系列と高い相関を持ちます。この時系列は正規化されていますが、生のアルベドの値は0.319から0.326の範囲で変動しており、変動幅は約1%になります。平均的な太陽放射の値を掛けると、変動幅は 2 W/m^2 程度となります。この値は地球温暖化トレンドを相殺するに足る大きさです。

図4の分布図は、このプラネタリーアルベドの時系列と地上気温との相関分布です。その結果は、北半球でほぼ一様に負の値を示し、アルベドが大きい時には気温が低下し、アルベドが小さい時には気温が上昇するという関係が見られます。とりわけ、シベリアと北米、そして東大西洋で大きな負の相関が見られます。この気温分布は、1970年から2000年までの間の気温上昇や、2000年以降の温暖化ハイエイタスに伴う気温低下の分布と類似しており、大変興味深い結果です。ここで示したJRA-55再解析に見られる

プラネタリーアルベドの長期変動を用いれば、観測される数十年スケールの地上気温の変化が十分に説明されてしまいます。衛星観測によるプラネタリーアルベドの変化は小さいと言われていますが、半世紀を超える長期間の衛星観測はないので、直接観測による評価は困難です。ひとつの再解析データでは信用が置けないので、他の再解析データを用いて同様にプラネタリーアルベドの時間変化を解析したところ、EAR-Interim 再解析データでは JRA-55 再解析データと同じ結果が得られました。しかし、NCEP-NCAR 再解析データでは、このような長周期変動は解析されません。全期間を対象に、4次元変分法といった高度な4次元同化技術を用いることで、初めてこの傾向が見えてくると考えられます。図は省略しますが、同じアルベドの時系列で、積雪深との相関分布図を調べた結果、北米、ヨーロッパ、中国では、正相関となり、アルベドが大きいと積雪深が増加する、という傾向が見られました。しかし、例外として西部シベリアでは、アルベドの時系列と積雪深の時系列は逆相関となりました。これは、卓越する自然変動としての北極振動の影響であることが、解析により示されています。詳細は今後の課題ですが、この逆相関の領域や数十年規模変動については、雲によるプラネタリーアルベドの変化を詳しく調べる必要があります。

5. 北極振動とバレンツ海モード

最後に、気象庁が作成した JRA-55 再解析データを用い

て、冬季 (DJF) の地上気温の経験直交関数 (EOF) 解析を行った結果を図 5 に示しました。図の a~c はそれぞれ、EOF-1 (24.7%)、EOF-2 (15.5%)、EOF-3 (11.8%) で、カッコ内は寄与率です。NCEP-NCAR 再解析データを解析した先行研究 (Nagato and Tanaka 2012) と同様に、EOF-1 は北極振動 (AO) モードと判別され、AO 指数が正の時にグリーンランドに負、それを取り囲むように中緯度に正の気温偏差が現れます。AO モードの時系列を見ると、1958 年から 1970 年まで減少、1970 年から 1990 年まで増加、1990 年以降は減少の傾向がみられます。AO モードの変動の分散は最大ですが、その時系列は AMO と少し異なっています。EOF-2 は北極温暖化増幅 (A) モードであり、北極域に大きな正の値があり、時系列はほぼ単調増加となっています。この A モードの時系列は、地球温暖化と比例しています。これは上述の 2 ボックスモデルと同じ結果です。EOF-3 ではバレンツ海に正のアノマリがあり、それを取り囲むように負のアノマリが見られます。本研究では EOF-3 をバレンツ海 (B) モードと呼ぶことにします。時系列を見ると、1958 年から 1970 年まで増加、1970 年から 2000 年まで減少、2000 年以降で増加の傾向が見られます。興味深いことに、この B モードの時系列は、図 4 で示したプラネタリーアルベドの時系列とほぼ一致しており、AMO とも高い相関があります。北大西洋から北極海に流れ込む暖かい海流の増加が、バレンツ海の海水の減少をもたらしている可能性があります。B モードが正に振れると、シベリアや北米で気温の低下が生じます。つま

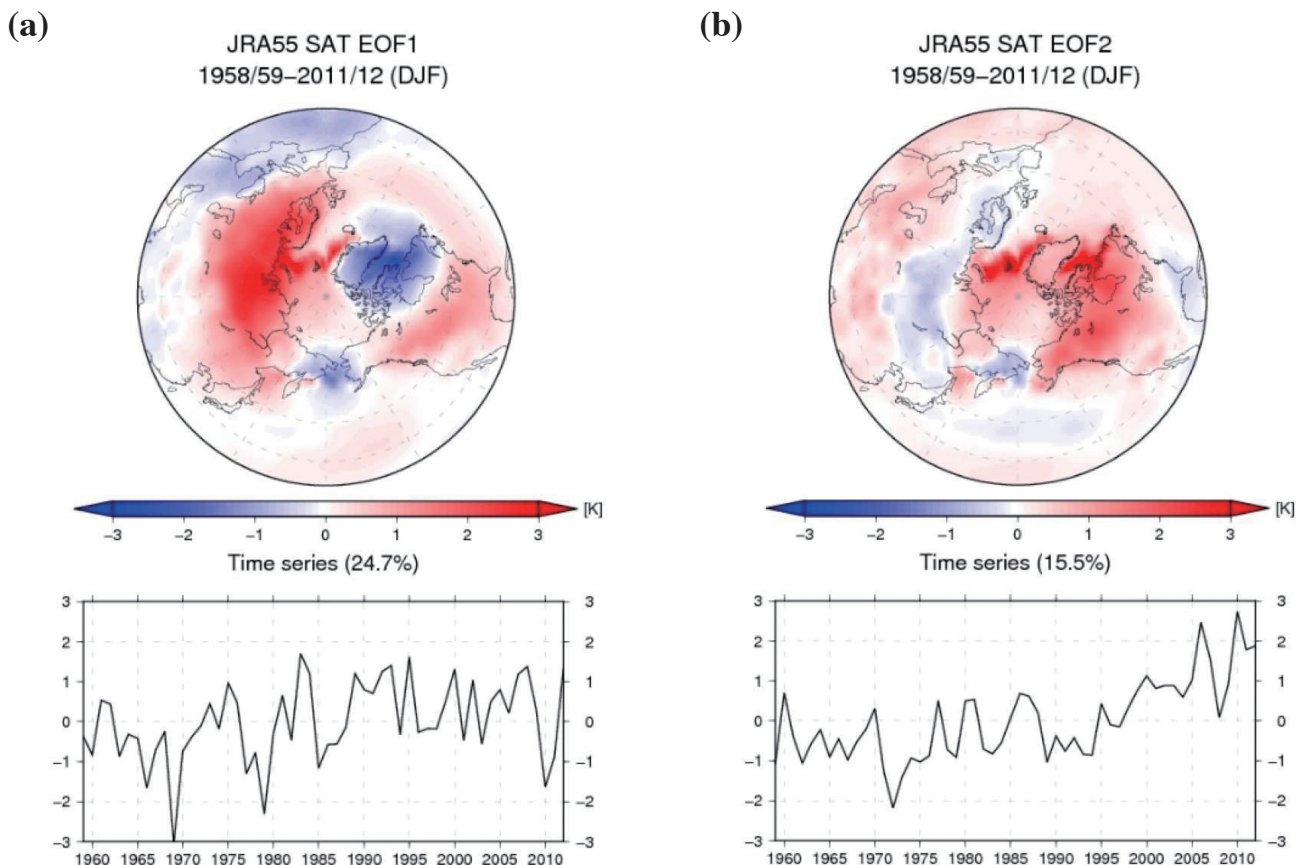


図5 冬季(DJF)の地上気温のEOF解析による分布図と時系列。(a) 北極振動(AO)モード、(b) 北極温暖化増幅(A)モード、(c) バレンツ海(B)モード。(Tanaka and Tamura 2016)

り、中緯度に寒波が訪れやすくなる傾向があります。この傾向は負の AO モードと同様です。AO モードは北半球で最も卓越する自然変動ですが、気温分布を北半球で平均すると、領域平均はほぼ0となるのが先行研究で示されています。それに対し、A モードの領域平均は正となり、B モードの領域平均は負となるため、これらのモードの時間変化は全球平均気温の時間変化に影響を及ぼします。A モードは地球温暖化にともなう北極温暖化増幅のトレンドと整合的であり、B モードは AMO と関係する数十年規模変動と整合的です。以上のプロセスを頭の中で考えて、仮説としてまとめたものが上述の2ボックスモデルの結果になります。プラネタリーアルベドの変化と AMO や B モードの時系列がどのような物理的な関係にあるのかは解っておらず、今後の課題です。

6. おわりに

地球温暖化の研究を進めるうちに、1970年代から1990年代に見られた急激な温暖化には、自然変動の影響が約半分の割合で含まれている、と筆者は考えるようになりました。ところが、IPCC-AR4にある気候モデル群では、この部分が人為起源の温暖化によるものとして数値的に再現されています。このように、間違っただけでチューニングされた気候モデルによる100年先の温暖化の将来予測は過大評価されている、と筆者は主張しました。当時、自然変動の振れ幅は地球温暖化の振れ幅より十分小さいので、観測された

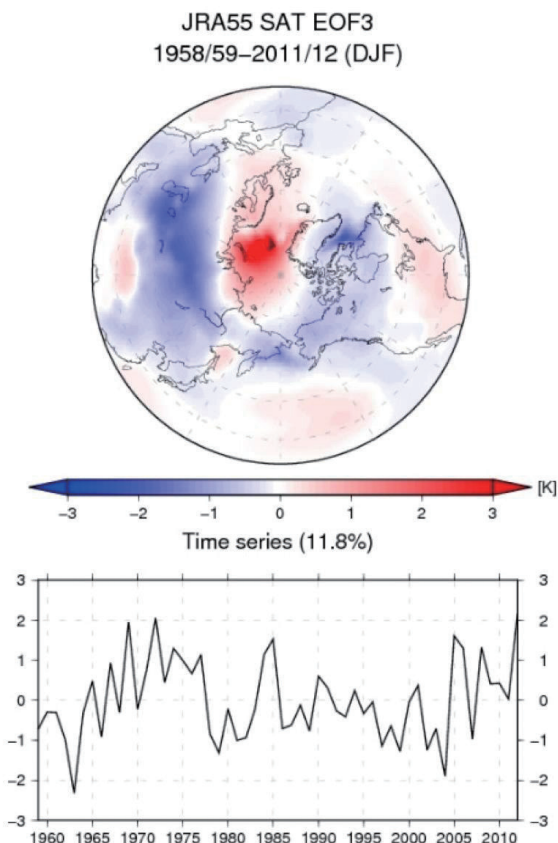
急激な温暖化のほとんどは人為起源によるもので、しかもその温暖化の速度は近年、加速度的に増大している、という認識が一部で横行していました。そのため、筆者の主張は根拠のない妄想として、受け入れられることはありませんでした。

その後、21世紀にはいると地球温暖化の停滞（ハイエイタス）が15年ほど続きました。この停滞は、人為起源の温暖化に数十年スケールの自然変動が重なったことによる、という論調が見られるようになりました。それ以前には、IPCC報告の結論と異なるような主張は、おおむね懐疑派の枠にはめられ、論拠に欠けるという理由で相手にされませんでした。しかし、最近では自然変動の重要性を認める学者が徐々に増えているのではないかと思います。

結局、検証できない温暖化の将来予測という研究は、国家政策として推進されているために、巨額の研究資金が動き、サイエンスよりポリティクスが優先されて当然、という空気が支配しています。問題なのは、IPCC報告通りに現実が推移しなかったときに、ポリティカルな理由で懐疑派をさんざん排除してきた主流派が、その当たらない将来予測の責任を取ろうとしない点にあります。新たな知見の下で古いサイエンスを捨て去り、新しいサイエンスに移行することで、主流派は常に主流であり続けるという事を最近ようやく学習しました。

2015年秋、エルニーニョ現象が戻ってきたので、ハイエイタスの議論は終わったようですが、気温が高止まりせず、元に戻る可能性もあります。大方の予測通りに高止まりするのもかもしれません。数年後の結果が楽しみです。しかし、もし、ここで示したアルベドの数十年規模変動が今後も続けば、気温は戻ると予測されます。そして、雲の放射過程の理解が進んで、このアルベドの数十年規模変動が科学界で認められたとしたら、地球温暖化のサイエンスもまた大きく変化し、研究は主流派によって強力に推進されることでしょう。

(c)



参考文献：

- 田中博, 2009: 異常気象をもたらす北極振動の力学. てんきすと, 第56号, 2009年1月, 3-5.
 田中博, 2010: 北極振動と地球温暖化 - 地球温暖化が示す不都合な真実, てんきすと 2010年9月, 66号, 11月, 67号.
 田中博, 2015: 地球温暖化のハイエイタスが自然変動によるものならば人為起源の温暖化の将来予測は過大評価となる. 伝熱, 54, 226, 12-15.
 Alexeev, V. A., and C. H. Jackson, 2012: Polar amplification: is atmospheric heat transport important? *Clim. Dyn.*, doi:10.1007/s00382-012-1601-z.
 Nagato, Y., and H. L. Tanaka, 2012: Global warming trend without the contributions from decadal variability of the Arctic Oscillation. *Polar Sci*, 6, 15-22.
 Tanaka L. H., and M. Tamura, 2016: Relationship between the Arctic Oscillation and surface air temperature in multi-decadal time-scale. *Polar Science*, doi: 10.1016/j.polar.2016.03.002.
 Tung, K. K., and J. Zhou, 2015: Evidence for a recurrent multi-decadal oscillation in global temperature and possible impacts on 21th century climate projections. *Climate Change: Multi-decadal and Beyond*: pp. 183-201.