

# 20 世紀における長期気候変動の要因推定

## —20 世紀気候再現実験の結果から—

\*野沢 徹, 永島 達也, 小倉 知夫, 横畠 徳太, 岡田 直資, 塩竈 秀夫(国立環境研究所),  
CCSR/NIES/FRCGC 共生プロジェクトチーム

### 1. はじめに

温室効果気体やエアロゾルなどの人為起源物質の増加に伴う将来の気候変化を見通すためには、数値気候モデルを用いるのが有効である。しかし、全く同一の排出シナリオに対して、世界の各研究機関の気候モデルによる将来見通し実験結果は大きくばらついてしまっている(IPCC, 2001)。気候モデルによる地球温暖化予測の信頼性を向上させるためには、現在の平均的な気候状態を現実的に再現するだけでなく、過去の気候変化についても尤もらしく再現することが重要となる。このような観点から、最近では、大気海洋結合モデルを用いた 20 世紀の気候再現実験が行われてきている(Stott et al., 2000; Meehl et al., 2004 など)。過去の気候再現実験では、温室効果気体の増加などの観測された様々な気候変動要因を、モデルの外部から境界条件として与えている。しかし、従来の研究では、気候変動要因に関する情報が不足していたため、重要と考えられる一部の気候変動要因しか考慮されてこなかった。このようなことから、我々のグループでは、先行研究では考慮されていなかった気候変動要因の情報を収集・整備し、人間活動に伴って排出される煤などの炭素性エアロゾルの増加や、土地利用変化など、現状で考えられるほぼすべての気候変動要因を考慮した、20 世紀の気候再現実験を行った。ここでは、その結果について報告する。

### 2. モデルおよび実験設定

本研究では、東京大学気候システム研究センター(CCSR)と国立環境研究所(NIES)、地球環境フロンティア研究センター(FRCGC)が共同で開発した大気海洋結合モデル MIROC3.2(K-1 model developers, 2004)を用いた。モデルの解像度は大気側が水平約 300km(T42)鉛直 20 層、海洋側が水平約 100km 鉛直 44 層である。対流圏エアロゾルと気候との相互作用を陽に表現するため、大気モデルにはエアロゾル輸送モデル(Takemura et al., 2000; Takemura et al., 2002)を簡略化して組み込んでいる。エアロゾルによる放射効果としては、エアロゾルが日射を散乱・吸

収する効果(直接効果)だけでなく、親水性エアロゾルが雲凝結核となって雲粒の散乱効率や雲粒から雨粒への変換効率など雲の微物理学的特性を変化させる効果(第 1 種および第 2 種間接効果)も考慮している。大気海洋間のフラックス調節は一切使用していないが、500 年以上もの長期にわたり、ほとんどドリフトせずに安定した気候を維持できることを確認している。

気候再現実験は 20 世紀を含む過去 150 年間(1850 ~ 2000 年)に対して行った。外部境界条件として考慮した気候変動要因は以下の 8 つである。

太陽活動に伴う日射量の変化

大規模火山噴火に伴う成層圏エアロゾルの変化

温室効果気体(二酸化炭素, メタン, 亜酸化窒素, ハロカーボン)濃度の増加

人間活動に伴う成層圏オゾン濃度の減少

人間活動に伴う対流圏オゾン濃度の増加

工業活動に伴う二酸化硫黄(硫酸エアロゾルの元物質)排出量の増加

人間活動に伴う煤などの炭素性エアロゾル排出量の増加

土地利用変化

上記のうち、～ は自然起源の気候変動要因、～ は人為起源の気候変動要因である。

なお、上記～ は我々のグループが独自に収集・整備したデータであり、本研究で初めて導入された気候変動要因である。観測された平均地上気温の変動要因を推定するために、人為起源のみ、自然起源のみなど、気候変動要因を切り分けた場合の計算も行った。また、統計的に有意なシグナルを検出可能にするため、すべての実験について、初期値の異なる 4 メンバーのアンサンブル実験を行った。

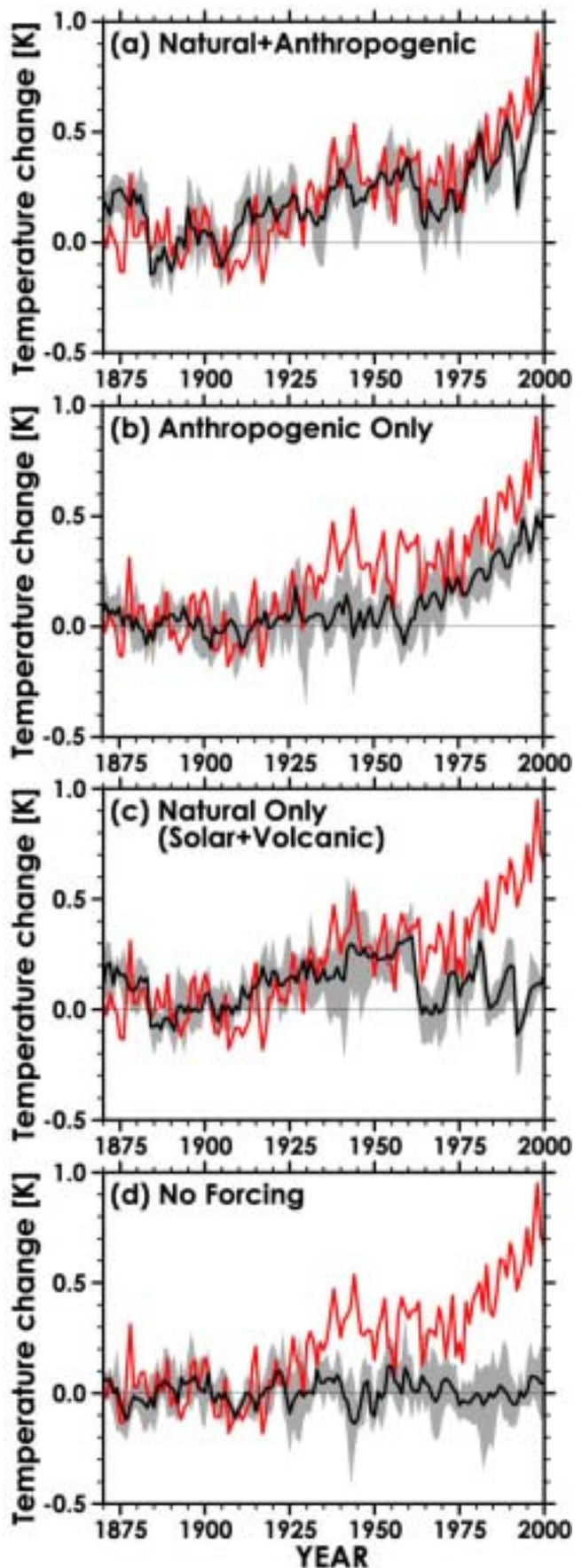
### 3. 結果

図 1 は、全球年平均した地上気温の経年変化を示す。シミュレーション結果と観測とでデータの質を統一するため、モデルの出力データはすべて観測データと同じ解像度に変換し、観測値が欠損である期間・格子では、モデル出力で

も欠損として処理を行っている。すべての気候変動要因を考慮した場合(図 1a)では、モデルにより再現された平均地上気温の変動は、観測と非常に一致を示していた。すなわち、モデルは 20 世紀前半(1910~1945 年ころ)や近年(20 世紀最後の 30 年程度)の昇温傾向を非常によく再現していた。これに対して、一切の気候変動要因を考慮しなかった場合(図 1d)には、観測されたような数十年規模の気温変動は全く再現されなかった。このことから、20 世紀に観測された数十年規模の平均地上気温変動は、何らかの気候変動要因によりもたらされたものであることが示唆される。

人為起源の気候変動要因のみ考慮した場合(図 1b)では平均地上気温は 1970 年ころまでほぼ一定の気温を保っており、観測データに見られるような 20 世紀前半の昇温傾向はまったく再現されていないが、1970 年ころ以降の著しい昇温傾向については非常によく再現されている(ここでは、モデルと観測で気温が一致する必要はなく、その傾きのみが意味を持つ)。一方、自然起源の気候変動要因のみ考慮した場合(図 1c)では、20 世紀前半の昇温傾向については非常によく再現されているが、観測に見られるような 20 世紀最後の著しい昇温傾向は一切再現されていない。以上のことから、20 世紀最後の 30 年程度の昇温傾向は人為起源の気候変動要因を考慮しなければ再現できないこと、20 世紀前半(1910~1945 年頃)の昇温傾向は、自然起源の気候変動要因を考慮しなければ再現されることが示唆された。

図 1 全球年平均地上気温の時間変化。赤線は観測値を、黒線は計算結果(初期値の異なる 4 メンバーのアンサンブル実験の平均)を示す。観測、モデル結果とも、1881~1910 年の平均気温からの偏差を示す。灰色の部分は 4 メンバーのアンサンブル実験結果のばらつきの範囲を示す。(a)すべて(自然+人為)の気候変動要因を考慮した場合、(b)人為起源の気候変動要因のみを考慮した場合、(c)自然起源の気候変動要因のみを考慮した場合、(d)一切の気候変動要因を考慮しない場合。



すべての気候変動要因を考慮した場合におけるモデルの再現性について詳しく見るために、モデルにより再現された地上気温の線形トレンドを観測と比較した。図2は20世紀の特徴的な期間(1910~1945年, 1946~1975年, 1976~2000年)における地上気温の線形トレンドの地理的分布を示す。モデルによる再現実験結果は4メンバーのアンサンブル平均から計算している。また、モデルによる再現実験結果のデータには図1と同様の処理を施しており、データの質を観測と統一している。なお、トレンドを計算する際には、データの存在する期間が当該期間の3分の2に満たない格子点については欠損として扱っている。この図より、いずれの期間においても、モデルによる再現実験結果は観測された地上気温の長期トレンドを非常によく再現していることが分かる。特に、20世紀前半

の1910~1945年におけるトレンド分布は驚異的な一致を示している。また、ここでは示さないが、従来の研究では考慮されてこなかった炭素性エアロゾル排出量の変化を考慮することで、特に20世紀中盤において、観測とシミュレーション結果との間で地上気温のトレンド分布のパターン相関が高くなることになっており、地域的な温暖化影響を考える上では、このような気候変動要因についてもきちんと考慮する必要があることを示唆している。

今回の計算によれば、20世紀前半の1910~1945年ころにおける昇温については、自然起源の気候変動要因に起因することが示唆された。自然起源の気候変動要因は太陽活動に伴う日射量の変化と大規模火山噴火に伴う成層圏エアロゾルの変化のみであり、両者の相対的な寄与率を調べるため、太陽活動のみ、火山噴火の

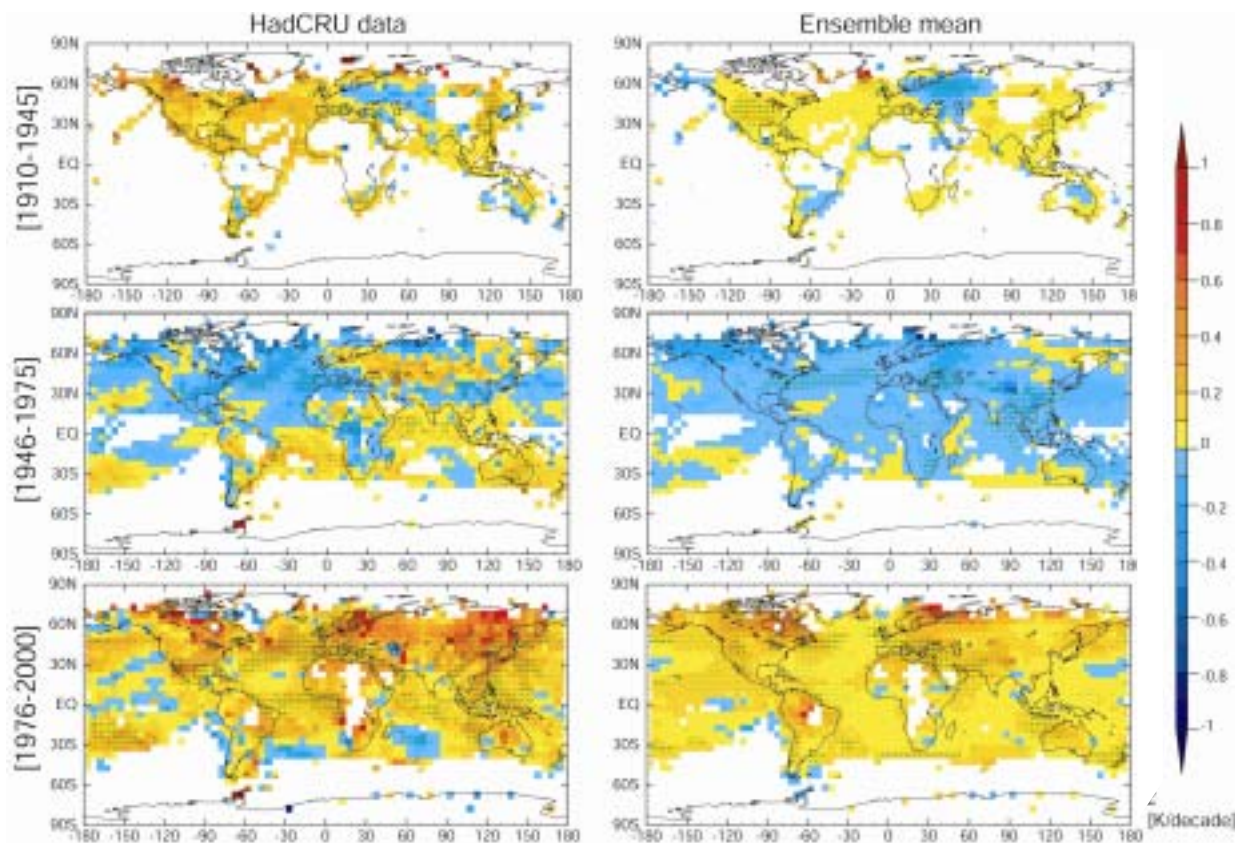


図2 特徴的な期間における地上気温の線形トレンドの地理的分布。単位は10年当たりの気温上昇率( /10年)。上段から1910~1945年, 1946~1975年, 1976~2000年における地上気温の線形トレンドを示す。左側が観測, 右側がモデルによる20世紀気候再現実験結果。モデルはすべての気候変動要因を考慮した実験の4メンバーのアンサンブル平均から求めている。観測, モデルとも、当該期間の3分の2以上のデータが存在する地点についてのみ示している。

みを考慮した実験も行った。図3はこれらの実験結果を示す。これら2つの気候変動要因の経年変化(図3d)からは、20世紀前半の気温上昇には太陽活動に伴う日射量の増加が大きく寄与しているであろうと想像される。しかし、太陽活動のみ考慮した場合(図3b)には、20世紀の初頭と後半で0.1程度昇温しているものの、観測に見られるほどの昇温は再現されなかった。一方で、大規模火山噴火のみ考慮した場合(図3c)には、活発な火山活動(図3dの1885~1915年付近)により低温傾向であった気温が回復するのに伴い、20世紀初頭(1910年ころ)に0.2程度の昇温が確認されるものの、1910~1945年頃における昇温は再現されなかった。以上のことから、20世紀前半では、複数の火山噴火に伴う低温傾向からの回復に引き続き、太陽活動に伴い日射量が増加したため、両者の重ね合わせで観測に見られるような昇温が得られたと考えられる。

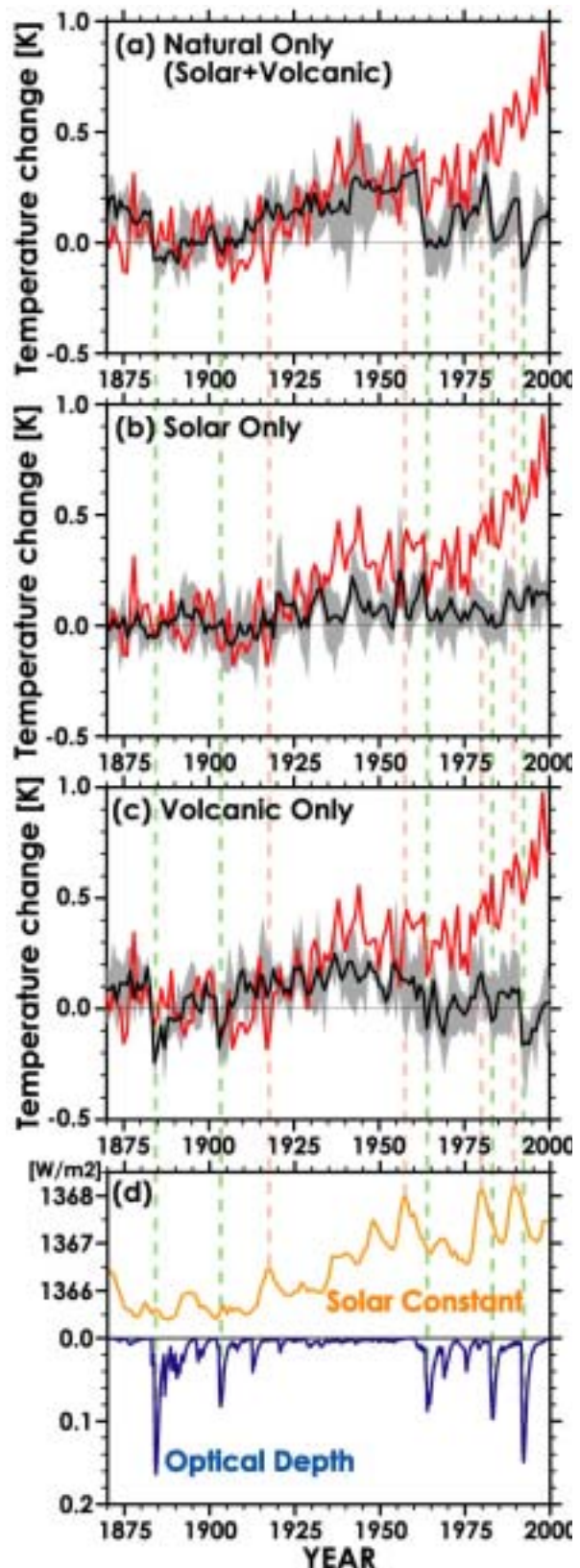


図3 図1に同じ。ただし、(a)自然起源の気候変動要因のみを考慮した場合(図1cを再掲)、(b)太陽活動に伴う日射量変化のみを考慮した場合、(c)大規模火山噴火に伴う成層圏エアロゾルの変化のみを考慮した場合を示す。(d)はモデルに与えた自然起源の気候変動要因の時間変化を示し、黄線は太陽活動に伴う日射量の変化を、青線は大規模火山噴火に伴う成層圏エアロゾルの変化を表す。両者は違う物理量を示しているため、その大きさを直接比較できないことに注意が必要。

#### 4.まとめと考察

数値気候モデルによる温暖化予測の信頼性向上に資するために、現時点で考え得るすべての気候変動要因を考慮した20世紀の気候再現実験を行い、得られた結果を観測事実と比較した。また、観測された平均地上気温の長期変動要因を推定するために、様々な気候変動要因を切り分けた実験も行った。

すべての気候変動要因を考慮した場合には、モデルによりシミュレートされた平均地上気温は観測された数十年規模の気温変動を非常によく再現していた。特徴的な期間における気温トレンドの地理的分布も、モデルの結果は観測事実をほぼ忠実に再現しており、モデルの信頼性を確認することができた。

観測に見られる1970年以降の著しい昇温傾向については、人為起源の気候変動要因のみ考慮した場合にはよく再現されているが、自然起源の気候変動要因のみ考慮した場合には全く再現されておらず、近年の温暖化傾向は人間活動に伴う気候変動に起因することが強く示唆された。人為起源の気候変動要因は、温室効果気体の増加に伴う温暖化と、対流圏エアロゾルの増加に伴う寒冷化とに大別されるが、前者が後者を大きく上回るために、昇温傾向が顕在化していると考えられる。

観測では20世紀前半の1910~1945年ころにも昇温傾向が見られるが、今回の計算によれば、20世紀前半の昇温傾向は自然起源の気候変動に起因することが示唆された。自然起源の気候変動要因は太陽活動と大規模火山噴火のみであるが、これら気候変動要因をそれぞれ個別に考慮した実験では、いずれも観測に見られるほどの昇温は再現されなかった。19世紀終盤から20世紀初頭にかけては火山活動が活発な時期であったため、地球の平均地上気温もやや低温傾向であったが、それが回復しはじめた頃とほぼ同時期に太陽活動が活発化して日射量が増加し始めたため、両者の重ね合わせにより、観測に見られるような昇温が得られたと考えられる。

#### 参考文献

- 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, J.T. Houghton, Y. Ding, D.J. Griggs, M. Noguer, P.J.v.d. Linden, X. Dai, K. Maskell, and C.A. Johnson (eds.), Cambridge University Press, Cambridge, 881 pp.
- K-1 model developers (2004): K-1 coupled model (MIROC) description, K-1 technical report, 1, H. Hasumi and S. Emori (eds.), Center for Climate System Research, University of Tokyo, 34 pp.
- Meehl, G.A., W.M. Washington, C.M. Ammann, J.M. Arblaster, T.M.L. Wigley, and C. Tebaldi, 2004: Combinations of natural and anthropogenic forcings in 20th century climate, *J. Climate*, **17**, 3721–3727.
- Stott, P.A., S.F.B. Tett, G.S. Jones, M.R. Allen, J.F.B. Mitchell, and G.J. Jenkins, 2001: External control of 20th century temperature by natural and anthropogenic forcings, *Science*, **290**, 2133–2137.
- Takemura, T., H. Okamoto, Y. Maruyama, A. Numaguti, A. Higurashi and T. Nakajima, 2000: Global three-dimensional simulation of aerosol optical thickness distribution of various origins, *J. Geophys. Res.*, **105**, 17,853–17,873.
- Takemura, T., T. Nakajima, O. Dubovik, B. N. Holben and S. Kinne, 2002: Single-scattering albedo and radiative forcing of various aerosol species with a global three-dimensional model, *J. Climate*, **15**, 333–352.