

課題名	産業革命以降の気候の再現に関する研究		
担当研究機関	国土交通省気象庁気象研究所		
研究期間	平成14 - 16年度	合計予算額 (当初予算額 へ-ス)	79,197千円 (うち16年度 25,998千円)
研究体制			
<p>(1) 観測データ及び各種強制力データの整備とデータ解析</p> <p>(2) 歴史的海面水温・海氷データを用いた大気大循環モデルによる気候再現に関する研究</p> <p>(3) 気候モデルによる気候再現と気候変化への各種要因の影響評価に関する研究</p>			
研究概要			
<p>1. 序 (研究背景等)</p> <p>過去の地球の気候はさまざまな要因によって変化してきた。自然要因である太陽活動の変化や火山活動による硫酸エアロゾルなどに加え、産業革命以降においては、人間活動起源による二酸化炭素、メタン、一酸化窒素、ハロカーボン類などの温室効果ガス、および硫酸エアロゾルなどの増加が、放射強制力として全球的な気候の変化をもたらしてきたと考えられている。</p> <p>気候モデルによって過去の気候変化が忠実に再現可能となれば、各種強制力をそれぞれ独立に変化させる実験により、気候変化の要因を自然変動による変化と人間活動による変化に分離することが可能である。一方、観測された気候変化には数十年規模の変動がみられるが、これが自然変動(すなわち気候システムの内部変動)なのか、あるいは人為的な強制によるものか、よく分かっていない。同じ強制を与えた初期値の異なる複数の再現実験(アンサンプル実験)を行うことにより、内部変動と強制力に対する応答とを分離し、これを調べることが可能となる。</p> <p>2. 研究目的</p> <p>本研究では、二酸化炭素・メタンなどの温室効果ガスやエアロゾルの変化などの人間活動、太陽活動や火山性エアロゾルによる自然起源の外力の変動を考慮して、気候モデルを用いた産業革命以降の気候変化再現実験を行い、その結果の解析から気候変化の各種要因の影響を定量的に評価することを目的とする。</p> <p>そのために、サブ課題1「観測データ及び各種強制力データの整備とデータ解析」では、大気大循環モデルや大気海洋結合モデルでの数値実験を行うための産業革命以降の太陽放射や火山エアロゾル等の長期データを収集・整理する。また、気候変動の実態把握やモデル結果との比較のため、長期に存在する地上気温や地上気圧データを整備し、その他の気象観測データも併せて解析し、外力による長期変動や、それと大気自身が有する内部変動との関連を解析的に明らかにする。また、サブ課題2「歴史的海面水温・海氷データを用いた大気大循環モデルによる気候再現に関する研究」では、気候モデル(大気海洋結合モデル)の大気部分である大気大循環モデルの気候再現性を評価するため、及び海面水温が変動したときの大気の変動を調べるため、19世紀後半からの観測・解析された歴史的海面水温・海氷分布を境界条件としたアンサンプル実験を行い、観測データと比較する。さらにサブ課題3「気候モデルによる気候再現と気候変化への各種要因の影響評価に関する研究」では、気候モデル(大気海洋結合モデル)を用いて気候変化の各種要因の影響を定量的に評価するために、サブ課題1で収集した強制力データを気候モデルに組み込み、産業革命以降の強制力を与えた気候再現シミュレーションを行い過去の気候変化を再現することで、強制力の影響評価(自然変動と人間活動の要因分離)を行う。</p> <p>3. 研究の内容・成果</p> <p>(1) 観測データ及び各種強制力データの整備とデータ解析</p> <p>放射強制力を生じる各種(太陽放射、火山エアロゾル)の長期データや地上気温・気圧データを整備し、また、それらデータや他の気象データを解析した。</p> <p>1900年から1999年における100年間の冬期平均の北大西洋振動(NAO)指数と太陽黒点数の関係について調べた。NAO指数は、60年代までは負の値を多く取るが、以後は増加傾向を示し、最近特に90年代には正の値を取ることが多い。同様の傾向は、NAOではなく北極振動(AO)指数を用いても認められた。同じ1900-1999年の期間で、太陽活動の高い時期と低い時期に分類すると、太陽活動が弱い場合にはNAOは北大西洋上に局在し、それに伴う気温の変化もヨーロッパ上にしか現れない(図1)。</p>			

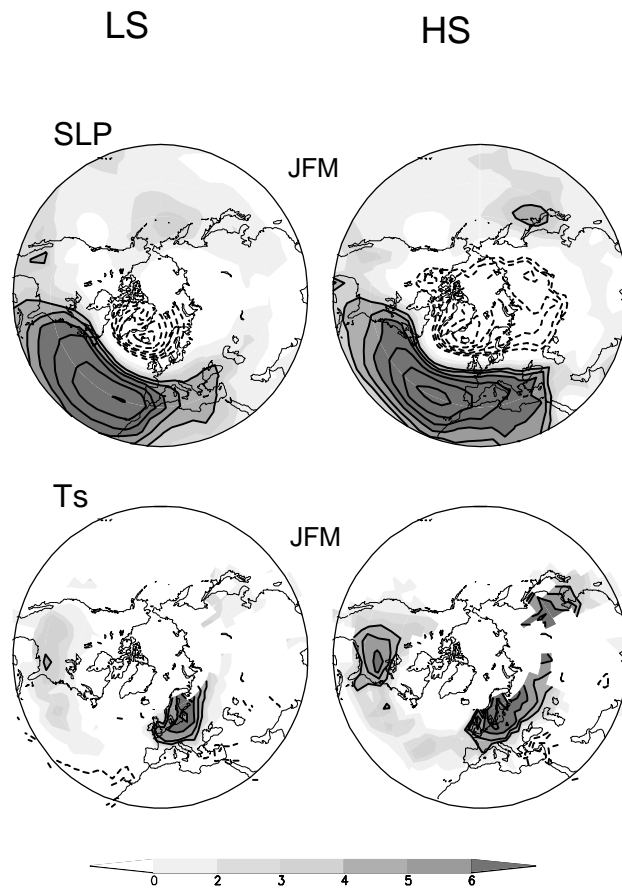


図1 NAO指数と、(上)冬平均地上気圧、(下)地上気温との相関係数。1900-1999年のデータを太陽活動の(左)高い時期と(右)低い時期に二分して計算。等値線は0.1おき、負値は破線で示す。0.4未満は図示していない。

それに反し、太陽活動の盛んな時期には、気圧場の正負のシーソーパターンが北大西洋からユーラシア大陸に現れ、特に高緯度の作用中心は極域全体を覆い北半球規模で循環場の変動の様相を呈している。これに対応した地上気温の変動はアメリカ、ユーラシアの両大陸で認められた。

太陽活動と極夜ジェット (PJ0) 振動との関連についても調べた。その結果、太陽活動の影響は南北両半球で共通に初冬に亜熱帯域上部成層圏から下部中間圏のジェットの強化やE-Pフラックスの伝播の減少として現れていることがわかった。このことは、太陽活動の極大期には夏半球での紫外線量が増大し、そのため日の当たらない冬半球極との温度差が増大するため温度風の関係よりジェットが強化されるためと理解される。さらに、亜熱帯域上部成層圏ジェットの強化は波の伝播にも影響を与えジェットコアへの波の伝播を減少させていると考えられる。

初冬にその影響が強く現れているのは、冬季にほぼ自立的に発生する極夜ジェット振動の全体の位相を決めるのが初冬だからであり、そのため初冬での太陽活動が冬季にわたる極夜ジェット振動の位相を決めるトリガーになっていると考えられる。

北半球NAOと同様に、南半球環状モードにおいても成層圏対流圏結合の強まる10/11月に太陽活動の高い時期と弱い時期でその信号が大きく異なる事が見出された。即ち、高太陽活動時にはその信号は上部成層圏まで伸びると共にその持続性が飛躍的に高まった。他方、低太陽活動時にはそのような性質は無かった。また、観測データの解析から信号持続性の原因として風信号の伸びに伴うブリュワー=ドブソン循環の強弱によるオゾン分布の変動が示唆された。このことを調べるために気象研究所の化学-気候結合モデルによる実験を行なった。モデル実験の結果は晩冬に形成される下部成層圏のオゾン偏差が晩冬のSAM信号の持続性の原因である事を示した。

以上のことから、太陽活動とNAOの空間構造との間には関連のあることが明らかとなった。

(2) 歴史的な海面水温・海水データを用いた大気大循環モデルによる気候再現に関する研究

大気大循環モデル"MJ98"によって1872年から2001年までの130年間の気候再現実験を行った。観測された海面水温と二酸化炭素濃度の変動に対する、気候モデルの応答を調べることで、モデルの性能を評価した。また、観測された海面水温と二酸化炭素濃度の外的強制力に対する大気への応答として、過去の気候変動がどの程度説明できるかを調べた。

大気大循環モデル MJ98 は水平分解能が約 270 km である。鉛直層は 30 あり、上端は 0.4 hPa で成層圏界面付近の高度約 55km に相当する。短波放射、長波放射、積雲対流、乱流鉛直輸送、陸面過程、重力波抵抗などの物理過程を含んでいる。

モデルに与える外的境界条件としての海面水温と海氷については、HadISST1 データを用いた。温室効果気体として最も重要な二酸化炭素 (CO₂) の濃度は、Hansen et al. (2002)³⁾ による観測値を用いた。濃度は 1872 年に 288 ppmv であるが、次第に上昇し 2001 年には 366 ppmv に達している。季節変化は無い。二酸化炭素以外の温室効果気体では、メタン (CH₄) を 1650 ppbv、一酸化二窒素 (N₂O) を 306 ppbv として大気全体に一律に与えた。年々変動と季節変化は無い。

2 種類の実験を行った (表1)。第 1 の基準実験は、1872年から2001年までの130年間について観測された海面水温、海氷、二酸化炭素濃度を大気モデルに与えた。第 2 の実験は1951年以降のアンサンプル・サイズを増やすために行った。第 1 の基準実験と合わせると、1951年から2001年までの51年間についてはアンサンプル・サイズが 1 2 となる。モデルの性能のアンサンプル・サイズ依存性を調査することができる。

表 1 実験設定

通番	期間開始	期間終了	年数	アンサンプル数	海面水温 (SST)	CO2 ppm	備考
1	1872	2001	130	6	観測	観測	基準実験
2	1950	2001	52	6	観測	観測	

陸域の地上気温と降水量の再現性

図 2 は、全球平均した陸域地上気温の 130 年間のトレンドを季節別に検証したものである。観測では年平均とすべての季節で昇温トレンドが顕著である。特に春と冬の昇温が大きい。モデルでは、年平均とすべての季節で、昇温トレンドを再現しているが、季節変化が小さい。モデルは、観測された春と冬の大きな昇温を過小評価している。春や冬は北半球では雪の多い季節であり、地上気温は雪の影響を受けやすいことから、あくまで推測であるが、降雪や融雪に関連したモデルの陸面過程に問題がある可能性がある。

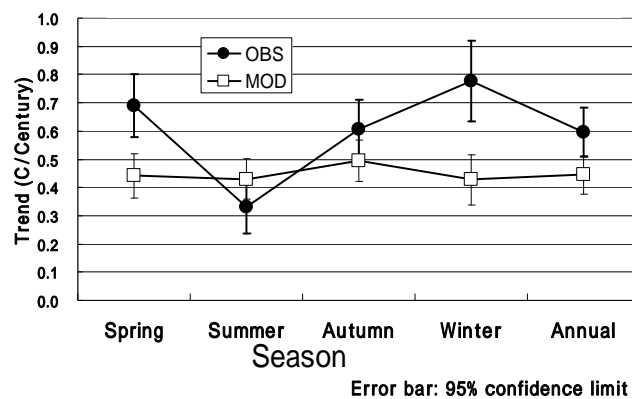


図 2 1872 年から 2001 年までの全球平均した陸域地上気温偏差のトレンド (/100 年) の季節依存性。横軸は、左から年平均、春 (3 ~ 5 月)、夏 (6 ~ 8 月)、秋 (9 ~ 1 1 月)、冬 (1 2 ~ 2 月)。1872 年の冬は 1872 年 12 月から 1952 年 2 月までの平均で定義した。黒丸 が Jones et al. (2001) による観測値のトレンド。白四角 がモデルのアンサンプル平均値のトレンド。95%水準信頼限界を誤差バーで示した。観測の誤差バーを太線で、モデルの誤差バーを細線で示した。

図3は、全球平均した陸面降水量の98年間のトレンドを季節別に検証したものである。観測では年々変動が大きいため、誤差バーの範囲が大きい。モデルは、春、夏、秋、年平均の正のトレンド、冬の負のトレンドを再現しているが、季節変化が小さい。

同様のトレンド解析を各格子点で行い、観測されたトレンドの地理分布をモデルと比較した。モデルは、観測されたトレンドの分布を概ね再現していたが、ユーラシア大陸の高緯度地方の大きな性のトレンドを過小評価していた。

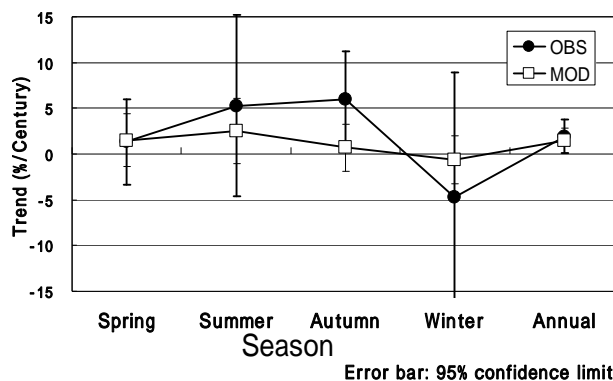


図3 1900年から1997年までの全球平均した陸域降水量偏差のトレンド（ /100年）の季節依存性。横軸は、左から年平均、春（3～5月）、夏（6～8月）、秋（9～11月）、冬（12～2月）。1900年の冬は1900年12月から1901年2月までの平均で定義した。黒丸がHume et al. (1998)による観測値のトレンド。白四角がモデルのアンサンブル平均値のトレンド。95%水準信頼限界を誤差バーで示した。観測の誤差バーを太線で、モデルの誤差バーを細線で示した。

モデルによる年々変動の再現性を調べるため、各格子点で観測とモデルの長期トレンドをそれぞれ除去した後、両者の時系列の相関係数を計算した。陸面地上気温については、モデルは沿岸地域、欧州、北米で比較的高い再現性を示したが、ユーラシア大陸の内部では低かった。モデルの陸面降水量の年々変動再現性は、気温に比べ低いことがわかった。

最大月降水量の算定

200年確率最大月降水量を算定した。その結果は観測値から推定される値と比較して、有意な差は認められなかった。従って、モデル計算結果から推定された、確率最大月降水量は意志決定に資する精度ではないが、定性的な議論には用いることができると言える。

この推定に用いられたモデルの年最大月降水量時系列とSSTの年々、数10年変動との関係を調べたところ、PDOと関係する地域が熱帯地域に見られた。従って、熱帯地方では、SSTの変動によって、年最大月降水量が決まっている割合が高いが、中高緯度ではSST変動によらない、自然変動の影響が卓越していることが示された。この結果は、季節予報で得られている結果から類推できるものであった。

モデルが作る大気状態は決して現実のものではなく、気候値や年々変動の再現性以上に、極値の再現性には疑問の余地が残る。しかし、アンサンブル手法を用いれば、統計的に十分な時系列の長さのデータを得ることができるので、観測からの推定値と合わせて、モデル実験からの推定値を利用することができよう。

(3) 気候モデルによる気候再現と気候変化への各種要因の影響評価に関する研究

産業革命以降の各種強制力（温室効果気体、硫酸エアロゾル、太陽活動による太陽定数の変化、および火山活動による成層圏エアロゾルの放射強制力）を与えた気候再現実験の結果を解析した。モデルは全球平均地上気温の変化において、産業革命以降の観測された数十年規模の変動をうまく再現している。

アンサンブル実験から、アンサンブル平均を外部強制力に対する応答とし、各メンバーのアンサンブル平均からの残差を内部変動によるものとして分離する解析を行った。最近注目されている「北極振動」の数十年規模変動について調べた。平均海面気圧の主要な変動は北極を中心とする円環状パターンを示し（図4）、そのアンサンブル平均の主成分時系列は20世紀の全般的な上昇傾向と1970年代以降の相対的に大きな上昇トレンドを示す（図5）。これらは観測されている「北極振

動」の数十年規模変動と矛盾しない。

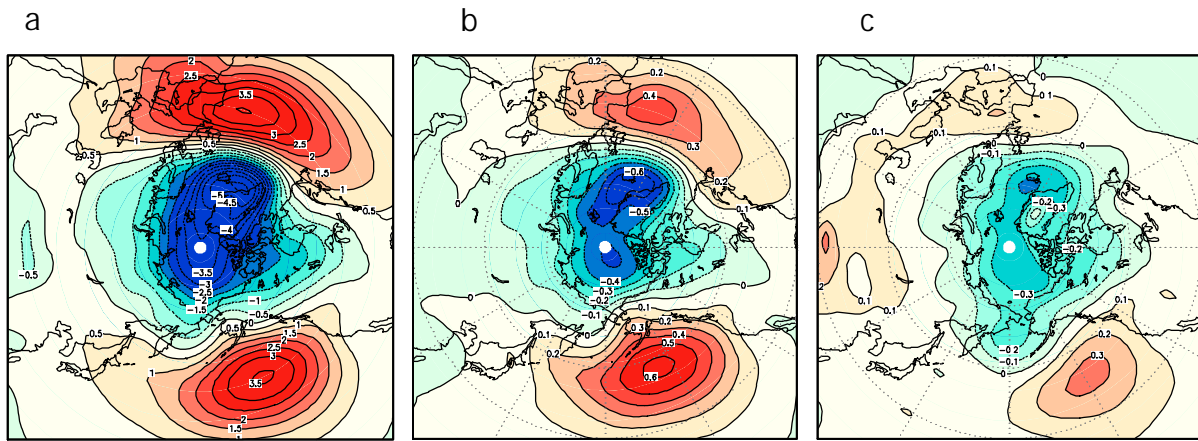


図4 北半球の平均海面気圧 EOF 第1モードの空間分布。(a) 月々の変動、および20年ローパスフィルターした (b) 内部変動、および (c) 外部強制に対する応答。

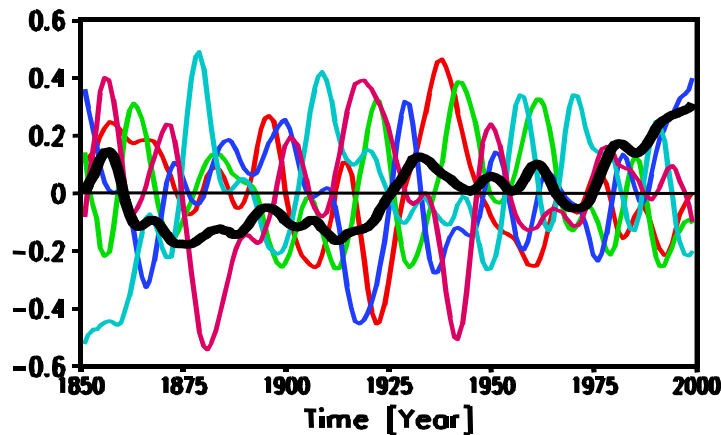


図5 北半球の平均海面気圧 EOF 第1モードの時系列。各メンバー(細線)とアンサンブル平均(太線)。各メンバーはアンサンブル平均を引いた残差であるため、メンバー間でほぼ無相関である。

この平均海面気圧の円環状パターンは内部変動あるいは短周期の北極振動に似ているが、より東西対称的で、中緯度の北大西洋と北極海の偏差が小さい。数十年規模変動に伴う大気の変動の3次元構造は、内部変動によるものと、外部強制力に対する応答で大きく異なることが示された。内部変動では、短周期の北極振動と同様、等価順圧的な構造で波と子午面循環の相互作用を伴う力学的効果によることが示唆される。一方、外部強制に対する応答は対流圏で昇温、成層圏で冷却となる熱的構造が支配的である。これは温室効果気体の放射強制力に対する熱的応答によって説明できる。すなわち、温室効果による地表付近の昇温により、熱帯では対流が活発化して対流圏上部が大きく昇温し、また高緯度では雪氷のアルベド・フィードバックなどにより地表付近で昇温が大きくなる。

さらに、この応答構造に対する成層圏の応答による寄与と対流圏の応答による寄与を分離する実験を行った。その結果、中緯度成層圏の西風強化が、温室効果気体増加による成層圏冷却と海面昇温による低緯度上部対流圏昇温の足しあわされた効果が寄与していることが示された。

4. 考察

本研究においては全球大気海洋結合モデル(気候モデル)に各種外部強制力を与えて気候再現実験および観測された歴史的な海面水温を境界条件として与えた大気大循環モデル実験をそれぞれ複数(アンサンブル)行い、それらの結果を解析することで内部変動と外部強制力に対する応答の違いを調べた。特に北半球の気候に大きく影響を与えていることが近年明らかになってきた北極振動に焦点を当て、観測データの解析も含めて総合的に研究を行った。

温室効果ガス等の歴史的な外部強制力を与えた気候モデルで再現された全球平均地上気温の変化は、1970年代以降を除き、観測とほぼ一致した。20世紀半ば以前においては、人為起源の強制力は

小さく、火山活動や太陽活動などの自然起源の強制力による影響が支配的である。モデルはこれら自然変動をうまく表現できていると考えられる。一方、1970年代以降は、人為起源の強制力が急激に増加している。これに対応してモデルは急激な気温上昇を示しているが、観測された気温の変化よりも大きい。これは負の放射強制力として働く硫酸エアロゾルの効果が過小であることが原因と推測される。現在のモデルでは、硫酸エアロゾルの直接効果しか反映されておらず、エアロゾルが雲の凝結核や雲粒子の平均寿命など雲の特性に及ぼす影響等の間接効果は取り入れられておらず、十分な検討が必要である。

気候モデルに各種外部強制力を与えた気候再現実験から、モデルの北極振動の数十年規模変動について、内部変動と外部強制力に対する応答の違いを調べた。その結果、内部変動としては北極振動が、外部強制力に対する応答としては別の構造であることが示された。さらに応答構造に対する成層圏の応答による寄与と対流圏の応答による寄与の分離も行った。温室効果気体の強制は地表を温める一方成層圏を冷却する効果を持つが、太陽活動の場合は対流圏と成層圏で同じ符号の強制力を与えると考えられるので、両者による強制に対する応答についてのメカニズムを調べることは今後の課題である。

NCEP再解析データの解析から北極振動の形成には、波の伝播に伴う運動量輸送が子午面循環の変化を通じて極域の地表面気圧を変動させることが重要であることを示した。南半球においては、南半球環状モードが成層圏対流圏結合の強まる10/11月に太陽活動の高い時期と弱い時期でその信号が大きく異なる事が見出されたが、ブリュワー＝ドブソン循環の強弱によるオゾン分布の変動がメモリー機構として作用していることが示唆された。モデル実験はこれらの仮説を支持している。このことは、観測された北極振動等の変動やトレンドを気候モデルで再現するためには、波の強制を起こすメカニズムやその伝搬機構さらには成層圏化学過程の再現が不可欠であることを意味する。今後のモデルの改良のためのポイントが本研究により明らかになったと言える。

