

氏名	にし ざわ せい や 西 澤 誠 也
学位(専攻分野)	博 士 (理 学)
学位記番号	理 博 第 2887 号
学位授与の日付	平成 17 年 3 月 23 日
学位授与の要件	学 位 規 則 第 4 条 第 1 項 該 当
研究科・専攻	理 学 研 究 科 地 球 惑 星 科 学 専 攻
学位論文題目	大気変動にみられるトレンドに関する確率統計理論および数値実験

論文調査委員 (主査) 教授 余田成男 教授 木田秀次 助教授 石岡圭一

### 論 文 内 容 の 要 旨

近年の地球温暖化問題をはじめとして、大気変動にみられる線形トレンドを見積もり、大気システムの外部条件の線形的な変化と関連づけて議論することが多くある。しかし、長さが有限の時系列データから線形トレンドを見積もる場合には、システム内の過程で生じる内部変動が存在することにより、「見かけのトレンド」が生じる。ここで、見かけのトレンドは、外部条件の変化による「真のトレンド」からのずれとして定義される。本研究は、この内部変動に起因する見かけのトレンドについての確率統計理論を構築するとともに、単純化した3次元大気循環モデルを用いて大気内部変動と見積もられたトレンドとの関係を調べたものである。

まず、ある確率変数で与えられる内部変動が線形トレンドに加えられた場合について、見かけのトレンドの性質を確率統計理論により調べた。有限長のデータから最小二乗法で見積もったトレンドと真のトレンドとの差として見かけのトレンドを定義し、そのモーメントを理論的に求めたところ、見かけのトレンドの奇数次モーメントはすべてゼロであり、標準偏差は漸近的にデータ長の  $-3/2$  乗に比例し、尖度はデータ長の  $-1$  乗に比例して小さくなることがわかった。また、内部変動が正規分布に従う場合について、見かけのトレンドの分布関数を求め、それが正規分布となることを示した。さらに、内部変動が非正規分布の一般的な場合については、見かけのトレンドの分布関数のエッジワース展開の定式化を行い、データ長が大きくなるにつれて分布関数が正規分布に収束する特性を陽に示した。ここで、エッジワース展開により見かけのトレンドの分布関数を求めるには、内部変動のいくつかのモーメントが必要であり、4次の正確度で求めるには内部変動の標準偏差と尖度が必要である。

成層圏大気の日々変動は特に冬季極域で正規分布からのずれが大きいため、高々50年程度の観測データからトレンドの議論を行うには、まず大気内部変動の特徴をつかみ、その分布関数を精度良く求めておく必要がある。そこで、長時間積分するために単純化した3次元大気循環モデルを用い、外部強制としてはトレンドのない年周サイクルのみを与えて15,200年間のデータを取得した。この長期間の月平均気温データを用いて、標本モーメントの見積もり誤差の標本データ長に対する依存性を調べ、非正規分布の典型例である冬季極域成層圏および正規分布に近い対流圏のデータに対して、各モーメントをある精度内で求めるのに必要な標本数を見積もった。また、この長期間データを用いて内部変動のモーメントの空間・季節分布を調べた。成層圏内には歪度や尖度が大きな領域や季節が存在することを示し、そこでの非正規分布の特徴を量的に評価した。

次に、内部変動を含む有限長データに基づく成層圏寒冷化トレンドの検出可能性を議論するために、同じ大気循環モデルで線形トレンドをもつ放射強制を与えてアンサンブル50年積分実験を行った。得られた見かけのトレンドの標準偏差の分布は、理論的な推定を支持する結果となり、内部変動の標準偏差の時空間分布とはほぼ一致していた。見かけのトレンドの標準偏差は内部変動の標準偏差が小さな夏季成層圏で小さく、そこでは20年のデータ長でも寒冷化トレンドを検出できた。また、50年積分の各ランで見積もられたトレンドについて、それぞれの統計的有意性の検定を行った。従来から行われている  $t$ -

検定およびブートストラップ検定に加えて、内部変動の標準偏差と尖度をもとに分布関数のエッジワース展開を用いたより正確な検定を行い、それぞれの検定結果を比較した。内部変動の尖度が大きな領域や季節では見かけのトレンドが正規分布に従うという仮定がなりたらず、 $t$ -検定を適用することはできないが、実際そのような領域ではエッジワース展開を利用した検定との差が見られた。

さらに、20年および39年のデータ長の2種類の現実大気データを用いて気温トレンドを見積もり、それらの統計的有意性を調べた。北半球極域成層圏では夏季から秋季にかけて有意な寒冷化トレンドが見出されたが、現実データにはトレンドと内部変動の両方が含まれており、一般に回帰残差から内部変動のモーメントを見積もるときに大きな誤差をとまう。ここでは、この見積もり誤差を減らす一方策として、最先端の大気大循環モデルを併用して内部変動のモーメントを求める方法を提案した。

## 論文審査の結果の要旨

大気変動にみられる線形トレンドを有限長の時系列データから見積もり、大気システムの外部条件の線形的な変化と関連づけて議論しようとする場合、大気の内変動に関する知見が必要となる。内部変動が存在することにより、外部条件の変化による「真のトレンド」からのずれとして定義される「見かけのトレンド」が生じうるからである。本研究では、この内部変動に起因した見かけのトレンドに関する確率統計理論を構築するとともに、単純化した3次元大気循環モデルを用いて大気内部変動と見積もられたトレンドとの関係を明らかにした。

内部変動が確率変数で与えられる場合、見かけのトレンドも確率変数となり、ある分布関数をもつ。この分布関数の標準偏差は知られており、一般的に正規分布を仮定することで区間推定や統計的有意性の検定が行われてきた。しかし、冬季極域成層圏を具体例として、大気の内変動はさまざまな分布をしており、見かけのトレンドが正規分布に従うという仮定は適切でない場合がある。ここでは見かけのトレンドの分布関数に着目し、非正規型の一般的な分布関数のエッジワース展開の定式化を行って、有限のデータ長に対して見積もられたトレンドの有意性を正確に知るためには内部変動の分布関数を知る必要があることを指摘した。そして、エッジワース展開を用いた、より正確な有意性検定の方法を提示し、擬似乱数を使ったモンテカルロシミュレーションおよび3次元大気循環モデルを用いたトレンドのアンサンブル実験によりその有効性を検証した。トレンドに関する従来の研究では分布関数の違いを考慮したものではなく、非正規分布の重要性を指摘した本研究には独自性があり、新しい視点を与えるものである。

見かけのトレンドの議論には内部変動の分布を知ることが必要であることがわかったので、本研究では単純化した3次元大気循環モデルを用いて15,200年間という長期間のデータを取得した。このデータを用いて、モデル内での大気変動のモーメントの空間・季節分布を調べた。特に成層圏極域では内部変動が正規分布からずれているために、見かけのトレンドが正規分布であると仮定できない領域・季節があることを明らかにした。この結果は正規分布の仮定を必要とする検定方法を安易に使うことに警鐘を鳴らすものである。

また、このデータを用いて標本モーメントの見積もり誤差のデータ長依存性を調べて、内部変動の各モーメントをある精度内で求めるのに必要な標本数を見積もり、これからのトレンド研究において重要な基本情報を得た。さらに、2種類の現実大気データを用いてトレンド解析を行い、統計的有意性の考察を行った。高々数十年分のデータは、内部変動の各モーメントを精度良く得るには十分でないことを指摘するとともに、現実データから見積もられたトレンドの有意性評価に最先端の大気大循環モデル結果を併用する方法を提案している。

この研究は、申請者の確率統計理論および数値実験に関する力量の高さを立証するものである。また、気候変動論の理論的な発展に寄与するものであり、高く評価できる。よって、本論文は博士（理学）の学位論文として価値あるものと認める。また、論文内容とそれに関連した事項について口頭試問を行った結果、合格と認めた。