

顕著現象におけるトレンドの検出および検定法

西澤 誠也 (京大・理)

1 はじめに

近年、温室効果気体の増加等に因る地球温暖化が関心を集めているが (Houghton et al., 2001; Ramaswamy et al., 2001, など)、平均気温の上昇だけでなく、大雨などの顕著な気象現象の強度や出現頻度にも、長期的なトレンドが存在することが報告されている (Landsea et al., 1996; Graham and Diaz, 2001; Frei and Schär, 2001; Osborn and Hulme, 2002, など)。顕著現象は、自然災害や農作物などを通じて、社会に大きな影響を与える可農政があり、その変化を知るとは、学術的興味からのみならず、人間社会にとっても重要な問題である。しかし、顕著現象は、物理量や地域、季節などへの依存性が大きく、そのトレンドについては不確実性が大きい。

現在、顕著現象のトレンドを検出するために、単位時間内の出現数の変化や、出現地域数の変化を調べることが多い。しかし、暖冬や冷夏、早魃などの時間的に長い顕著現象に対しては、単位時間とトレンドの時間スケールが同程度になってしまうため、単位時間内の出現数を数えることは適当ではない。また、出現地域数の変化を調べる方法は、データがある地点が限られている場合や、地域依存性を調べたい場合には、適当ではない。

本研究では、一つの時系列から、顕著現象のトレンドを検出する新しい方法および、その統計的有意性の検定方法を提案する。また、その検定法を、現実大気データに適用する。

2 顕著現象検出のための統計量と統計的有意性検定

ある一つ、または複数の時系列において、ある時刻においてある条件 C を満たす場合を顕著現象 (イベント) と定義する。ある時系列 $X_n, (n =$

$1 \dots N)$ を考える。 X_n が条件 C を満たす場合には 1、そうでない場合には 0 となるような変数 $\phi_n, (n = 1 \dots N)$ を考える。このとき、以下のように、統計量 S_N を定義する。

$$S_N = \sum_{n=1}^N \{n - (N + 1)/2\} \phi_n. \quad (1)$$

顕著現象の出現確率におけるトレンドの統計的有意性を調べるためには、顕著現象の出現確率が時間によらないと仮定し、帰無仮説検定を行えばよい。検定を行うために必要な S_N の分布関数を求める。顕著現象が起こる確率を α とする。 X_n は互いに独立であるとすると、 S_N の確率密度関数、および累積分布関数はそれぞれ

$$f_{S_N}(x) = (1 - \alpha)^N \sum_l Q_{\frac{l}{2}, N} \delta(x - 1/2) \quad (2)$$

$$F_{S_N}(x) = (1 - \alpha)^N \sum_l^{[x]} Q_{\frac{l}{2}, N} \quad (3)$$

となる。ここで、 l は整数、 $[\bullet]$ は床関数、 $\delta(\bullet)$ はデルタ関数、

$$Q_{\frac{l}{2}, N+2} = (1 + A^2) Q_{\frac{l}{2}, N} + A Q_{\frac{l}{2} + \frac{N+1}{2}, N} + A Q_{\frac{l}{2} - \frac{N+1}{2}, N}, \quad (4)$$

$$Q_{\frac{l}{2}, 1} = \begin{cases} 1 + A & \text{for } l = 0 \\ 0 & \text{for } l \neq 0 \end{cases} \quad (5)$$

$$Q_{\frac{l}{2}, 2} = \begin{cases} 1 + A^2 & \text{for } l = 0 \\ A & \text{for } l = -1, 1 \\ 0 & \text{for other } l \end{cases}, \quad (6)$$

$A \equiv \alpha/(1 - \alpha)$ である。式 (4)(5)(6) から、すべての l, N について $Q_{\frac{l}{2}, N}$ を求めることができ、したがって、 S_N の分布関数を求めることができる。明かに、 $Q_{-\frac{l}{2}, N} = Q_{\frac{l}{2}, N}$ であるから、 S_N の確率密度関数は偶関数である。したがって、 S_N の平均値、つまり期待値は 0 である。

実際の現象では、一般的に α は未知である。この場合、 α の推定値として、最尤推定値 $\frac{1}{N} \sum_{n=1}^N \phi_n$ を使うとよい。この推定値は、顕著現象の起こった回数をデータ長で割った値である。

この検定法は、ノンパラメトリックであり、もとの変動等の分布関数の形を仮定する必要が無い。大気変動の多くは、頻度分布は非正規分布であり (Conradsen et al., 1984; Wilks and Eggleston, 1992; Yoden et al., 2002, など)、このような変動を調べる際は、分布関数に依らないノンパラメトリックであることは大きなメリットである。

同様の統計量および検定法として、López-Díaz (2003) がある。López-Díaz (2003) の方法では、各時刻に順位を付け、上位 M 個の時系列の位置を足したものを統計量とする。時刻に順位を付けることができる場合は、この方法は有用である。

3 適用例

3.1 冬季成層圏極域気温

冬季成層圏の極域では、突然昇温現象の発生などのために、年々変動が非常に大きく、トレンドの見積りが難しい。ここでは、顕著な高温に注目し、その発生頻度におけるトレンドの有無を調べる。使用したデータは、NCEP/NCAR の再解析データ (Kalnay and Coauthors, 1996) の 1979 年から 2006 年の冬季 (DJF) のデータである。

過去の上位 M 個の高温を顕著現象として定義し、いくつかの M についてトレンドの有無を検定した。López-Díaz (2003) の検定法による検定も同時に行った。危険率は 10% とした。

表 1, 2 にあるように、12 月の 10hPa における $M = 8$ のとき、および、1 月の 30hPa における $M = 2, 5, 50$ hPa における $M = 10$ のとき、統計的に有意な正のトレンドが検出された。一方、2 月には、10hPa における $M = 5, 8, 10$ 、および 30hPa における $M = 2, 5$ のとき、有意な負のトレンドが検出された (表 3)。López-Díaz (2003)

hPa \ M	2	5	8	10
10	no	no	+	no
30	no	no	no	no
50	no	no	no	no
70	no	no	no	no

表 1: 12 月の顕著な高温における優位なトレンドの有無。no, +, - はそれぞれ、有意なトレンドが検出されなかった、有意な正のトレンドが検出された、有意な負のトレンドが検出された、ことを表している。

hPa \ M	2	5	8	10
10	no	no	no	no
30	+	+	+	no
50	no	no	+	+
70	no	no	+	+

表 2: 1 月であること以外表 1 と同じ。

hPa \ M	2	5	8	10
10	no	-	-	-
30	-	-	no	no
50	no	no	no	no
70	no	no	no	no

表 3: 2 月であること以外表 1 と同じ。

の方法で同様の検定を行っても、同様の結果が得られた。

図 1 は、30hPa における各月の極域月最高気温の年々変動である。1 月においては後半に期間中上位の高温が多く、2 月においては前半に多いことが確認できる。

これらは、1 月においては顕著な高温の出現確立が増加傾向であり、2 月においては減少傾向であることを示している。稲津 et al. (2006) は、地球温暖化に伴って、突然昇温現象の発生が初冬に増加し、一方、晩冬では減少することをモデル実験により示した。本研究の結果は、この結果と矛盾しないものである。

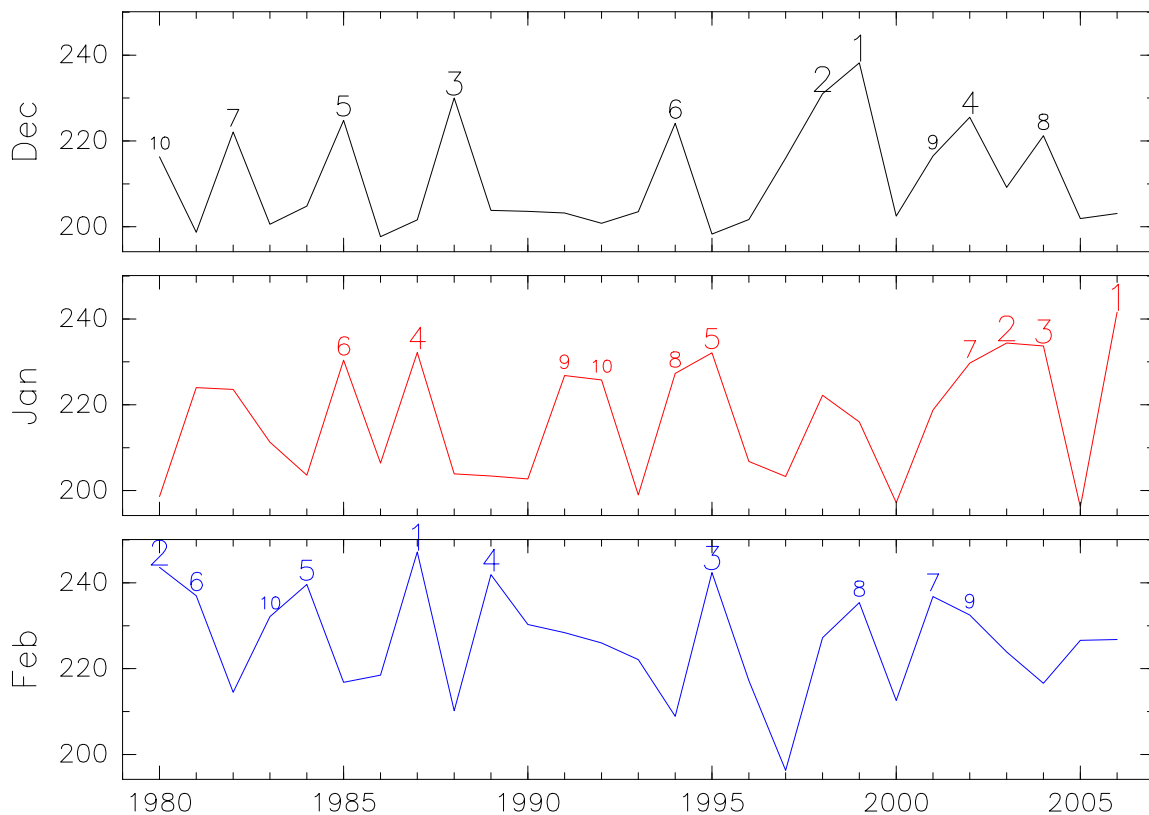


図 1: 30hPa における、極域月最高気温の経年変化。期間中の上位 10 個の高温の年に、その順位を示す数字を付けている。上から 12 月、1 月、2 月の結果である。

4 まとめ

本研究では、顕著現象の発生確立におけるトレンドの検出法を提案した。この方法は、顕著現象を定義する条件を与え、その条件を満たす時刻の時系列における位置の合計を基に、トレンドの有無を検出するものである。これはノンパラメトリックな手法であり、もとの変動の分布関数を仮定する必要が無く、大気変動など、その分布が非正規分布である場合にも利用可能である。

同様の検出法に、各時刻を順位付けし、上位任意の数を顕著現象とし、その時刻の時系列の位置を基にトレンドの有無を検出する López-Díaz (2003) がある。

適用例として、冬季成層圏の極域において顕

著な高温の出現確率におけるトレンドの有無を調べた。成層圏突然昇温が起こる冬季成層圏気温は、年々変動が大きく、一般にトレンドの検出は難しいが、本研究の手法を用いることで、顕著な高温にはトレンドが存在することが分かった。近年、顕著な高温の出現確率が、12 月および 1 月においては有意に増加しており、一方、2 月においては有意に減少している。

冬季成層圏の極域における顕著な高温は、突然昇温現象の発生と密接に関係していると考えられる。したがって、本研究の結果は、突然昇温現象の発生確立においても、トレンドが存在することを示唆している。

参考文献

- Conradsen, K., L. B. Nielsen, and L. P. Prahm (1984), Review of Weibull statistics for estimation of wind speed distributions, *J. Climate Appl. Meteor.*, **23**, 1173–1183.
- Frei, C., and C. Schär (2001), Detection probability of trends in rare events: Theory and application to heavy precipitation in the Alpine region, *J. Climate*, **14**, 1568–1584.
- Graham, N. E., and H. F. Diaz (2001), Evidence for intensification of North Pacific winter cyclones since 1948, *Bull. Amer. Meteorol. Soc.*, **82**, 1869–1893.
- Houghton, J. T., Y. Ding, D. J. Griggs, M. Noguer, P. J. van der Linden, and D. Xiaosu (Eds.) (2001), *Climate change: The scientific basis, contribution of working group I to the third assessment report of the intergovernmental panel on climate change (IPCC)*, 944 pp., Cambridge University Press, Cambridge.
- Kalnay, E. M., and Coauthors (1996), The NCEP/NCAR reanalysis project, *Bull. Amer. Meteorol. Soc.*, **77**, 437–471.
- Landsea, C. W., N. Nicholls, W. M. Gray, and L. A. Avila (1996), Downward trends in the frequency of intense Atlantic hurricanes during the past five decades, *Geophys. Res. Lett.*, **23**, 1697–1700.
- López-Díaz, J. A. (2003), A nonparametric test for trends in the occurrence of rare events, *J. Climate*, **16**, 2602–2614.
- Osborn, T. J., and M. Hulme (2002), Evidence for trends in heavy rainfall events over the UK, *Philos. Trans. Roy. Soc. London*, **360**, 1313–1325.
- Ramaswamy, V., M.-L. Chanin, J. Angell, J. Barnett, D. Gaffen, M. Gelman, P. Keckhut, Y. Koshelkov, K. Labitzke, J.-J. R. Lin, A. O’Neill, J. Nash, W. Randel, R. Rood, K. Shine, M. Shiotani, and R. Swinbank (2001), Stratospheric temperature trends: Observations and model simulations, *Rev. Geophys.*, **39**, 71–122.
- Wilks, D. S., and K. L. Eggleston (1992), Estimating monthly and seasonal precipitation distributions using the 30- and 90-day outlooks, *J. Climate*, **5**, 252–259.
- Yoden, S., M. Taguchi, and Y. Naito (2002), Numerical studies on time variations of the troposphere-stratosphere coupled system, *J. Meteorol. Soc. Japan*, **80**, 811–830.
- 稲津将, 木本昌秀, 住明正 (2006), 温暖化時の成層圏突然昇温, 第4回「異常気象と長期変動」研究集会報告.