〔論　文〕　306：415（トレンドモデル；気温極値；経年変化；再現期待値；再現期間；極値解析）

トレンドモデルにより経年変化を考慮した気温極値解析

酢　谷　真　巳*・水　野　　量**

要　旨

経年変化を考慮した，気温によるリスク発生の可能性・規模等の評価に資するため，トレンドモデルを用いた気温極値解析を行った．気温極値解析は，全国17気象官署における長期間の年最高気温・年最低気温データ（統計期間1931～2006年）に対して行った．9地点の最高気温，全地点の最低気温でパラメータにトレンドをもつモデルが選ばれた．トレンドモデルを用いることにより，気温の経年変化による母分布の非定常性を考慮し，精度よくクォンタイルの推定ができる分布を抽出でき，精度のよい再現期待値が得られた．

1．はじめに

異常に高い（低い）気温が観測された場合には，建築物への荷重効果，産業や健康への影響などのリスクが生じる．

建築物荷重指針（日本建築学会 2004）によると，建築物が建設される際には，年最高気温と年最低気温の再現期間100年（3.2節を参照）に対する値を基本値として，外気温による荷重効果を検討しなければならない場合がある．そのため，気温極値解析の精度良い推定結果が求められている．また，高温による産業，健康への影響として，熱死・熱射病及び農作物・家畜・家きん・養殖魚貝等の被害がある（気象庁 1990；気象庁 2002）．このような気温によるリスク発生の可能性・規模等の評価には，極端な気温の頻度・規模を知ること，つまり気温極値解析が不可欠である．

過去に行われた気温極値解析として，

①北沢ほか（1986a，b）による全国56地点についての気温極値解析（観測開始から1984年（最大102年）の気象庁の年最高気温及び年最低気温データ）

②日本建築学会（2004）による同地点についての気温極値解析（1961年から2001年までの41年間の気象庁データ）

がある．これらの研究は，気温極値の母分布（Gumbel, Frechet, Weibull の3種類）に定常性を仮定したものである．一方，藤部（1997）は，地域により気温極値に経年変化が存在することを述べており，異常気象レポート（気象庁 2005）では，気温極値における温暖化等の影響が示されている．このように，母分布自体に非定常性が想定される場合の極値解析では，パラメータに時間変化を持たせたトレンドモデルによる解析手法が有効である．

トレンドモデルを用いた過去の研究には，

- 全球結合モデルシミュレーションのIPCCアンサンブルでの気温と降水極値の変動（Kharin *et al*. 2007）
- 21世紀の北大西洋における波の気候変動シナリオ（Wang *et al*. 2004）
- GEV 分布を用いた中国における降水量の年極値のモデル化（Feng *et al*. 2007）

などがある．中でも Kharin *et al*.（2007）は，シミュレーションにより計算した最高気温あるいは最低気温の20年確率値を，2046～65年と1981～2000年とで比較しており，最高気温極値は乾燥化が進行する地域で，最低気温極値は高緯度の海域で，それぞれ昇温傾

* 釧路地方気象台.
** 気象庁観測部.

—2009年3月25日受領—
—2010年5月17日受理—

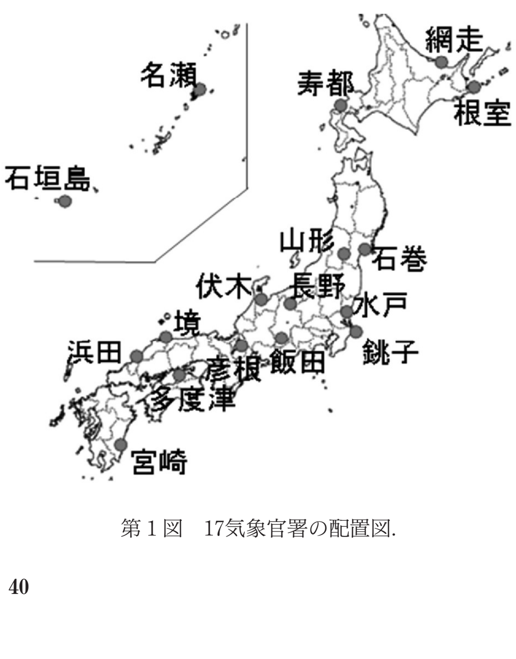
向が強いことを述べている．しかし，日本の気温極値に対してトレンドモデルを用いた詳細な研究は報告されていない．

以上の背景のもとに，本研究は，全国17気象官署の気温データに対するトレンドモデルを用いた気温極値解析を行い，気温極値の経年変動を調査すること，ならびに精度良い気温の再現期待値を得ることを目的とした．なお，本研究で調査した17地点は，気象庁（2005）が長期的な異常気象などの変動をみるため，20世紀初頭より観測データの均質性が継続していると選定した観測点であり，都市化の影響が比較的小さいことや地理的になるべく均等に分布するよう配慮されている．ただし，選定した観測点は，ほかの観測点と比べて都市化の影響が相対的に小さいということであり，その影響が全くないというわけではない．

この研究で用いられたデータを第2章に，具体的な解析方法を第3章に示す．次に，解析結果を第4章に示し，第5章では解析結果の適合性を議論する．

2．データ

解析に用いたデータは，第1図に示す全国17気象官署における1931年から2006年までの日最高気温・日最低気温データである．ただし，名瀬の1945年の日最高気温データは，データが不足していたため使用しなかった．これらの地点は，第1章で述べたように，都市化の影響が比較的小さいと気象庁が選定した地点である．これら全国17気象官署の日最高気温，日最低気温データの累年値から，毎年の年最高気温，年最低気温を算出して解析した．



第1図　17気象官署の配置図．

3．方法

3.1　概要

環境データを扱う場合，しばしば，データに非定常性（季節的なもの，長期の気候変動）が見られる．その結果，気温極値にも何らかのトレンドが現れることが想定される．本研究では，トレンドを考慮した気温極値を推定するために，Coles（2001）に従い母分布のパラメータを時間変化させた．まず，極値解析の概要を簡単にまとめる．

3.2　極値解析

極値解析では，観測データの平均ではなく大きな（小さな）値の変動が重要となる．いま，統計量 X が独立に生起し，ある特定の確率密度関数 $f(x)$ に従うと仮定する．確率密度関数 $f(x)$ は，どの程度の頻度で X が生じるかを指定する．X が x_p 以下となる確率 $f(x_p)$ は，

$$F(x_p)=\int_{-\infty}^{x_p} f(x)\,dx \tag{1}$$

で与えられ，$F(x)$ は X の分布関数と呼ばれる．$F(x_p)$ を非超過確率 p といい，$1-p=1-F(x_p)$ を超過確率という．

X が x_T 以上となるようなことが，平均的に T 年に一度の割合で生起することが期待されるとき，この T を再現期間（リターン・ピリオド），x_T を再現期待値と呼ぶ．再現期間 T と非超過確率 p との間には，次の関係

$$T=\frac{1}{1-p}=\frac{1}{1-F(x_T)} \tag{2}$$

がある．また，同じように X が x_T 以下となるようなことが平均的に T 年に一度の割合で生起することが期待されるとき，再現期間 T と非超過確率 p との間には，次の関係

$$T=1/p=1/F(x_T) \tag{3}$$

がある．

再現期待値 x_T は T 年確率値ともいう．極端な気温の頻度と規模は，分布関数 $F(x)$，再現期間 T に対する再現期待値 x_T（T 年確率値）から推定される．

3.3　モデルの作成

Coles（2001）は，トレンドモデルの分布形として

一般極値分布（GEV）を用いた．しかし，統計期間が十分長くない場合には，標本変動のため，それぞれの地点に複数の分布形が存在する．本研究の目的は，真の分布形を識別することではなく，精度良くクォンタイルの推定ができる分布を見つけることである．そこで，一般極値分布（GEV）に加え，3パラメータの一般正規分布（GNO），一般logistic分布（GLO），2パラメータのGumbel分布（Gum），正規分布（Nor）の計5つの分布に対しトレンドモデルを適用した．各分布の詳細は，付録A1〜A5に示す．以下，DISTはGEV（一般極値分布），GNO（一般正規分布），GLO（一般logistic分布），Gum（Gumbel分布），Nor（正規分布）のうちの一つを表す．なお，付録A1〜A5の表記は，Hosking and Wallis (1997) に倣っている．

ある分布の確率密度関数，分布関数を，それぞれ，f_{DIST}，F_{DIST}とする．観測年をi年とし，3パラメータ分布は，locationパラメータ$\mu(i)$，scaleパラメータ$\sigma(i)$，shapeパラメータ$\xi(i)$を持つとする．2パラメータ分布はshapeパラメータを持たず，locationパラメータ$\mu(i)$，scaleパラメータ$\sigma(i)$のみを持つ．ここで，各パラメータにトレンドを持たせるため，本研究では各パラメータを，

$$\mu(i)=\mu_0+\mu_1 t_i+\mu_2 t_i^2 \tag{4}$$

$$\sigma(i)=\exp(\sigma_0+\sigma_1 t_i) \tag{5}$$

$$\xi(i)=\xi_0 \tag{6}$$

とする．ここで，t_iは，

$$t_i=\frac{観測年\ i-観測開始年+1}{最新観測年-観測開始年+2},\quad 0<t_i<1 \tag{7}$$

である．$\mu(i)$はt_iに関して2次まで，$\sigma(i)$はt_iに関して1次までのトレンドを考慮する．$\xi(i)$は，トレンドを精度よく推定することが困難であるため，不変とする．例えば，μ_2を0とすれば，locationパラメータ，scaleパラメータの1次までのトレンドを考慮することになる．μ_0，μ_1，μ_2，σ_0，σ_1，ξを推定することにより，観測年i年における各パラメータを求めることができ，観測年i年における各再現期待値を推定できる．

ここで，トレンドモデルをM_{nm}^{DIST}（DIST：前述，n：locationパラメータ$\mu(i)$のトレンドの次数，m：scaleパラメータ$\sigma(i)$のトレンドの次数）で表す．適用させるトレンドモデルの分布形は，前に述べた5つ（M_{nm}^{Gum}，M_{nm}^{Nor}，M_{nm}^{GEV}，M_{nm}^{GLO}，M_{nm}^{GNO}）であり，パラメータのもつトレンドは次の6通りとする．

M_{00}^{DIST}：トレンドなし
M_{10}^{DIST}：$\mu(i)$に1次のトレンド
M_{20}^{DIST}：$\mu(i)$に2次のトレンド
M_{01}^{DIST}：$\sigma(i)$に1次のトレンド
M_{11}^{DIST}：$\mu(i)$，$\sigma(i)$に1次のトレンド
M_{21}^{DIST}：$\mu(i)$に2次，$\sigma(i)$に1次のトレンド

比較のため，M_{00}^{DIST}としてトレンドを持たない場合もトレンドモデルに含む．本研究では，以上計30種類のトレンドモデルを用いて解析を行った．

3.4 パラメータの推定

パラメータの推定には，最尤法を用いる．x_iを観測年i年の観測値，βをパラメータベクトルとすると，分布DISTの尤度$L(\beta)$，対数尤度$l(\beta)$は，

$$L(\beta)=\prod_{i=観測開始年}^{最新観測年} f_{DIST}(x_i;\mu(i),\sigma(i),\xi(i)) \tag{8}$$

$$l(\beta)=\sum_{i=観測開始年}^{最新観測年} \log(f_{DIST}(x_i;\mu(i),\sigma(i),\xi(i))) \tag{9}$$

となる．$L(\beta)$あるいは$l(\beta)$を最大とするβを最尤推定値とし，パラメータに決める．最尤推定値は解析的に求めることができないため，数値的に求めることになる．

3.5 モデルの選択

モデルを選ぶために，データを最も良く表現する分布形とトレンドの次数を検討する必要がある．本研究では，最適な分布を選択する際に分布を問わず有効であるAIC（赤池の情報量基準，Akaike's Information Criteria）を用いて検定を行った．モデルM_kの最大対数尤度を$l(M_k)$，パラメータの自由度をm_kとすると，AICは次のようになる（水文・水資源学会編 1997）．

$$AIC=-2l(M_k)+2m_k \tag{10}$$

パラメータの自由度m_kが大きくなると，分布の適合がよくなり$l(M_k)$が大きくなるため，(10)の第1項はAICを小さくするが，(10)の第2項はAICを大きくする．この兼ね合いから，AICを最も小さくするモデルを，最適な分布として選択する．

3.6　再現期待値の推定

3.4節，3.5節により選択された分布，パラメータから，再現期待値を求めることができる．また，再現期待値におけるトレンドの程度を調べるため，50年確率値の再現期間の変化を調べる．まず，統計期間の始め10年（1931～1940年）の50年確率値を平均する．統計期間の終わり10年（1997～2006年）における，その平均値に対する再現期間を計算し，平均する．仮に，最高気温の観測値に増加傾向があれば，統計期間の始め10年の50年確率値を観測値が超過する頻度は増すため，統計期間の終わり10年での再現期間の平均値は50年未満となる．逆に，最高気温の観測値に減少傾向があれば，再現期間の平均値は50年以上となる．

3.7　トレンドモデルの推定精度

本研究における，適合基準AICにより選ばれたトレンドモデルの推定精度を調べるため，シミュレーションによりトレンドモデル選択の感度実験を行った．4.2節で述べるように，最高気温極値ではトレンドモデルの分布形としてNorが多く選ばれ，最低気温極値ではGEVが多く選ばれた．そこで，最高気温を代表して母分布をNorとした場合と，最低気温を代表して母分布をGEVとし，ξ値に年最低気温累年値にM_{00}^{GEV}を適合して得られるξの平均値0.39を用いた場合とにおいて，locatonパラメータとscaleパラメータに対するトレンドの影響を調べる．

3.7.1　母分布のlocationパラメータにトレンドがある場合の推定精度

母分布のlocationパラメータにトレンドが存在する場合のトレンドモデルの推定精度を検証するため，locationパラメータにのみ1次のトレンドを持つ場合を考える（母分布M_{10}^{Nor}，M_{10}^{GEV}）．ここで，locationパラメータを$\mu_0+\mu_1 t_i$とし，そのトレンドを$K_l(=\mu_1)$（°C/76年）とする．まず，locationパラメータにK_lのトレンドを持つ母分布に従う乱数を76年分発生させる．発生したデータに各トレンドモデル（3.3節の30種類）を適用させ，標本に対して最もあてはまりの良いトレンドモデルをAICの適合基準により選出する．

それぞれの母分布の各パラメータは次のように設定した．まず，locationパラメータを$\mu_0=0$，$\mu_1=K_l$（＝－4，－3，－2，－1，－0.5，0，0.5，1，2，3，4）とし，scaleパラメータは一定（1.2）とする．GEVは3パラメータ分布であるため，ξ値として各地点の最低気温から得られた値（0.39）を使用して検証を行った．

以上のパラメータの設定のもとで，乱数の発生からトレンドモデルの選出に至る手順を500回繰り返すことにより，locationパラメータのトレンドの大きさに対するトレンドモデルの推定精度を検証した．

3.7.2　母分布のscaleパラメータにトレンドがある場合の推定精度

母分布のscaleパラメータにトレンドが存在する場合におけるトレンドモデルの推定精度を検証するため，scaleパラメータ（$\sigma_0+\sigma_1 t_i$）にのみ1次のトレンドを持つ場合を考える（母分布，M_{01}^{Nor}，M_{01}^{GEV}）．3.7.1項と同様に，GEV分布のξ値として0.39を用いる．また，locationパラメータは一定（0）とする．3.7.1項と同様の手順で，scaleパラメータに1次トレンド（$\sigma_0=1.2$，$\sigma_1=K_s$（＝－1，－0.75，－0.5，－0.25，－0.1，0，0.1，0.25，0.5，0.75，1））を持つ母分布に従う乱数を76年分発生させ，各トレンドモデルを適用し，AICにより最適な分布を選択する．各トレンドモデルが選ばれる割合を検証することにより，scaleパラメータのトレンドの大きさに対するトレンドモデルの推定精度を検証した．

4．結果

まず，3.7節による予備的な結果を4.1節に示す．4.2～4.4節に解析結果を示す．また，具体的な数値は第3表，第4表に示す．再度，トレンドモデルをM_{nm}^{DIST}で表す（3.3節を参照）．

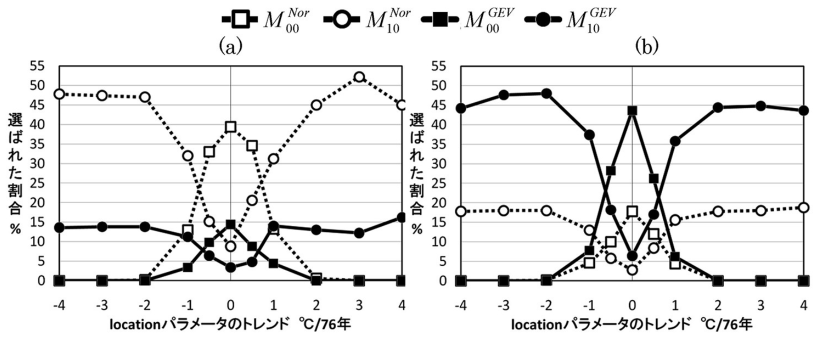
4.1　トレンドモデルの推定精度

4.1.1　母分布のlocationパラメータにトレンドがある場合の推定精度

3.7.1項に従い，locationパラメータのトレンドの大きさに対するトレンドモデルの推定精度を検証した結果を，第2図a，b，第1表a，bに示す．

第2図aは，最高気温を代表して母分布をNorとした場合において，第2図bは，最低気温を代表してGEV分布を母分布とした場合（$\xi=0.39$）において，横軸をlocationパラメータのトレンドの大きさ，縦軸を各トレンドモデルが選ばれる割合とし，選ばれる割合の多かった4種類のトレンドモデルをプロットしたものである．より詳細な結果（各トレンドK_lに対する選ばれる割合上位5種類のトレンドモデル）を，第1表a，bに示す．

第2図a，b，第1表a，bより，locationパラメータのトレンドによらず，母分布と等しい分布形，つまり第2図aでは正規分布（Nor）が，第2図bでは



第2図　locationパラメータのトレンドの大きさに対するトレンドモデルの推定精度．横軸をlocationパラメータのトレンドの大きさ，縦軸を各トレンドモデルが選ばれる割合とし，選ばれる割合の多かった4種類のトレンドモデルをプロットしたもの．(a)は，最高気温で多く選ばれたNorを母分布とした場合，(b)は，最低気温で多く選ばれたGEVを母分布とし，ξ値として最低気温を代表する0.39を用いた場合である．

第1表　locationパラメータのトレンドの大きさに対するトレンドモデルの推定精度．各トレンドK_lに対して，選ばれた割合の多かった上位5種類のトレンドモデルを示す．トレンドモデルは，DIST　n　m（DIST：Nor，Gum，GEV，GLO，GNO，n：locationパラメータのトレンドの次数，m：scaleパラメータのトレンドの次数）と表す．(a)は，最高気温で多く選ばれたNorを母分布とした場合，(b)は，最低気温で多く選ばれたGEVを母分布とし，ξ値として最低気温を代表する0.39を用いた場合である．

(a)

	選ばれたトレンドモデル上位5つ　%									
℃/76年	1位		2位		3位		4位		5位	
−4.0	Nor10	47.8	GEV10	13.6	Nor20	8.8	Nor11	8.6	GLO10	3.8
−3.0	Nor10	47.4	GEV10	13.8	Nor11	8.6	Nor20	8.0	GLO10	5.2
−2.0	Nor10	47.0	GEV10	13.8	Nor20	9.6	Nor11	6.4	GEV20	3.6
−1.0	Nor10	32.0	Nor00	13.0	GEV10	11.2	Nor20	7.2	Nor11	7.0
−0.5	Nor00	33.0	Nor10	15.2	GEV00	9.8	GEV10	6.4	Nor01	5.4
0.0	Nor00	39.4	GEV00	14.4	Nor10	8.8	Nor01	6.6	Nor20	5.4
0.5	Nor00	34.6	Nor10	20.6	GEV00	8.8	Nor01	5.2	GEV10	4.8
1.0	Nor10	31.2	GEV10	14.0	Nor00	13.2	Nor20	6.8	Nor11	6.2
2.0	Nor10	45.0	GEV10	13.0	Nor11	10.2	Nor20	9.0	GEV11	4.0
3.0	Nor10	52.2	GEV10	12.2	Nor11	8.0	Nor20	7.8	GEV20	4.2
4.0	Nor10	45.0	GEV10	16.2	Nor11	10.2	Nor20	8.4	GLO10	4.4

(b)

	選ばれたトレンドモデル上位5つ　%									
℃/76年	1位		2位		3位		4位		5位	
−4.0	GEV10	44.2	Nor10	17.8	GEV20	11.6	GEV11	9.0	Nor20	4.0
−3.0	GEV10	47.6	Nor10	18.0	GEV20	10.4	GEV11	6.8	GNO10	3.6
−2.0	GEV10	48.0	Nor10	18.0	GEV20	10.6	GEV11	7.2	GNO10	4.4
−1.0	GEV10	37.4	Nor10	13.0	GEV20	9.8	GEV00	7.8	GEV11	7.2
−0.5	GEV00	28.2	GEV10	18.2	Nor00	10.0	GEV20	8.8	GEV01	8.0
0.0	GEV00	43.6	Nor00	17.8	GEV01	9.0	GEV10	6.4	GEV20	5.6
0.5	GEV00	26.2	GEV10	17.0	Nor00	12.0	Nor10	8.4	GEV20	7.8
1.0	GEV10	35.8	Nor10	15.6	GEV20	11.2	GEV00	6.2	GEV01	6.2
2.0	GEV10	44.4	Nor10	17.8	GEV20	12.8	GEV11	8.2	GNO10	4.4
3.0	GEV10	44.8	Nor10	18.0	GEV20	13.8	GEV11	7.6	GNO10	4.2
4.0	GEV10	43.6	Nor10	18.8	GEV20	12.6	GEV11	10.6	Nor20	4.0

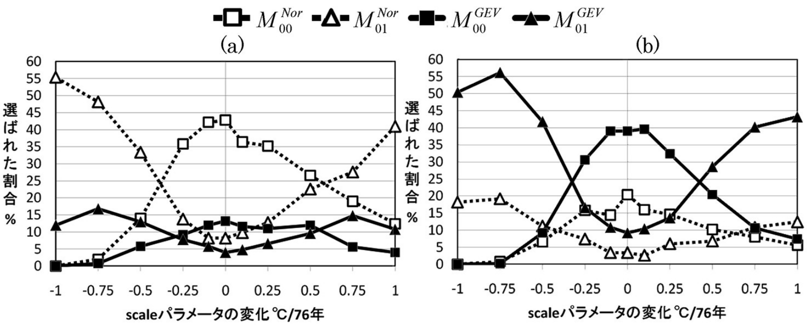
GEV分布が分布形として常に最も多く選択されている．また，母分布と等しいトレンドをもつモデル（locationパラメータに1次のトレンドをもつモデルM_{10}^{DIST}）が選択される割合は，$|K_l|\geq 1$では上位2位を占めたが（計約60%），$|K_l|<1$になると，トレンドのないモデル（M_{00}^{DIST}）が選ばれる割合を下回るようになった．

4.1.2　母分布のscaleパラメータにトレンドがある場合の推定精度

3.7.2項に従い，scaleパラメータのトレンドの大きさに対するトレンドモデルの推定精度を検証した結果を，第3図a，b，第2表a，bに示す．

第3図aは，最高気温を代表して母分布をNorとした場合において，第3図bは，最低気温を代表してGEV分布を母分布とした場合（ξ=0.39）において，選ばれる割合の多かった4種類のトレンドモデルを，横軸をscaleパラメータのトレンドの大きさとしてプロットしたものである．より詳細な結果（各トレンドK_sに対する選ばれる割合上位5種類のトレンドモデル）を第2表a，bに示す．

第3図a，b，第2表a，bより，scaleパラメータのトレンドによらず，それぞれの母分布と等しい分布形が最も多く選択され



第3図　scale パラメータのトレンドの大きさに対するトレンドモデルの推定精度．横軸を scale パラメータのトレンドの大きさ，縦軸を各トレンドモデルが選ばれる割合とし，選ばれる割合の多かった4種類のトレンドモデルをプロットしたもの．(a)は，最高気温で多く選ばれた Nor を母分布とした場合，(b)は，最低気温で多く選ばれた GEV を母分布とし，ξ 値として最低気温を代表する0.39を用いた場合である．

第2表　scale パラメータのトレンドの大きさに対するトレンドモデルの推定精度．各トレンド K_s に対して，選ばれた割合の多かった上位5種類のトレンドモデルを示す．第1表と同様にトレンドモデルを表す．(a)は，最高気温で多く選ばれた Nor を母分布とした場合，(b)は，最低気温で多く選ばれた GEV を母分布とし，ξ 値として最低気温を代表する0.39を用いた場合である．

(a)

	選ばれたトレンドモデル上位5つ　%									
℃/76年	1位		2位		3位		4位		5位	
−1.00	Nor01	55.4	GEV01	12.0	GLO01	7.0	GNO01	6.2	Nor11	4.8
−0.75	Nor01	48.2	GEV01	16.8	Nor11	6.0	Nor21	5.4	GNO01	4.4
−0.50	Nor01	33.4	Nor00	14.0	GEV01	13.0	GEV00	5.8	Nor11	4.8
−0.25	Nor00	35.8	Nor01	13.8	GEV00	9.2	GEV01	7.8	Nor10	6.2
−0.10	Nor00	42.2	GEV00	12.0	Nor10	8.2	Nor01	8.2	GEV01	5.8
0.00	Nor00	42.8	GEV00	13.2	Nor01	8.2	Nor10	7.0	Nor20	6.2
0.10	Nor00	36.4	GEV00	11.6	Nor01	9.8	Nor10	8.0	Nor20	6.2
0.25	Nor00	35.2	Nor01	12.8	GEV00	11.0	Nor10	7.4	GEV01	6.6
0.50	Nor00	26.6	Nor01	22.6	GEV00	12.0	GEV01	9.6	Nor10	4.6
0.75	Nor01	27.6	Nor00	19.0	GEV01	14.8	GEV00	5.6	Nor11	5.0
1.00	Nor01	41.0	Nor00	12.4	GEV01	10.8	Nor11	6.6	GEV00	4.0

(b)

	選ばれたトレンドモデル上位5つ　%									
℃/76年	1位		2位		3位		4位		5位	
−1.00	GEV01	50.4	Nor01	18.2	GEV21	5.6	GEV11	5.4	Nor11	5.2
−0.75	GEV01	56.2	Nor01	19.2	GEV11	5.6	GEV21	4.0	Nor11	3.6
−0.50	GEV01	41.8	Nor01	11.2	GEV00	9.2	Nor00	6.6	GEV10	5.8
−0.25	GEV00	30.6	GEV01	16.6	Nor00	15.8	GEV10	7.8	Nor01	7.4
−0.10	GEV00	39.0	Nor00	14.4	GEV01	10.8	GEV10	8.0	GEV20	5.4
0.00	GEV00	39.0	Nor00	20.4	GEV01	9.2	GEV10	6.6	GEV20	4.6
0.10	GEV00	39.6	Nor00	16.0	GEV01	10.4	GEV10	9.4	GEV20	5.2
0.25	GEV00	32.4	Nor00	14.6	GEV01	13.6	GEV10	9.6	Nor01	6.0
0.50	GEV01	28.6	GEV00	20.4	Nor00	10.2	GEV10	7.2	Nor01	6.8
0.75	GEV01	40.2	Nor01	10.8	GEV00	10.6	Nor00	8.0	GEV10	6.4
1.00	GEV01	43.2	Nor01	12.4	GEV00	7.4	GEV21	5.8	Nor00	5.6

た．また，母分布と等しいトレンドをもつモデル（scale パラメータに1次のトレンドをもつモデル M_{01}^{DIST}）が選択される割合は，$|K_s|\geq0.5$ では上位2位を占めたが（計約60%），$|K_s|<0.5$ になると，トレンドのないモデル（M_{00}^{DIST}）が選ばれる割合を下回るようになった．

4.1.1項，4.1.2項より，location，scale パラメータにおけるトレンドがある程度大きい場合には（それぞれおよそ±1（℃/76年）以上と±0.5（℃/76年）以上），母分布の持つそれぞれのトレンドの推定精度はおよそ60%であった．一方，location，scale パラメータのトレンドが小さくなるにつれて（それぞれおよそ±1（℃/76年）未満，±0.5（℃/76年）未満），トレンドのないモデル（M_{00}^{DIST}）が選ばれる割合が多くなった．

これらの検証は先に示した限られた条件下で行ったものであるが，これらの検証により，母分布のパラメータの持つトレンドがある程度大きい場合には，トレンドモデルによりトレンドの存在を推定することが可能であると考えられる．一方，パラメータのトレンドが小さい場合や統計期間が50年未満と短い場合，複数の分布形が適応可能な場合などには，必ずしも真のトレンドモデルが選択されるとは限らないということ

に注意が必要である．

4.2　モデルの選択

3.5節で述べたように，AICにより各地点の気温データに適合するトレンドモデルを選択した．推定されたパラメータを含む地点ごとの詳細として，最高気温，最低気温の結果を第3表，第4表に示す．

最高気温の場合，気象官署17地点中12地点で正規分布が選択された．また，およそ半分の9地点でパラメータにトレンドをもつモデルが選択された．主なトレンドは，locationパラメータの2次の変化であった．

一方，最低気温の場合，17地点中6地点で正規分布が，9地点でGEV分布がそれぞれ選択された．また，全地点でパラメータにトレンドをもつモデルが選択された．トレンドは，主にlocationパラメータの変化であり，一部scaleパラメータに変化を持つ地点もあった．

これらのトレンドモデルは，3.3節や4.1節で示したように，複数の分布形が適応可能な場合やlocation，scaleパラメータのトレンドが小さい場合には，必ずしも真のトレンドモデルが選択されているとは限らないものの，過去のデータを最も適切に表現できた分布形であると考えられる．

4.3　再現期待値の推定

推定した各地点の再現期待値のいくつかを，第4図～第7図に示す．地点ごとの詳細は，第3表，第4表に示す．

第4図は，伏木における最高気温の再現期待値の経年変化を示している．伏木の最高気温累年値において，基準AICにより選択されたモデルはM_{00}^{Nor}であり，トレンドのあるモデルは選択されなかった．M_{00}^{Nor}は，最高気温において，17地点中最多の5地点（網走，寿都，伏木，浜田，石垣島）で選択された．パラメータはトレンドを持たないため，再現期待値は経年変化しない．

第5図は，長野における同様の結果である．長野の最高気温累年値は，M_{20}^{Nor}への当てはまりが最もよく，最高気温において，M_{20}^{Nor}はM_{00}^{Nor}と同じ最多の5地点（根室，長野，飯田，彦根，宮崎）で選択された．locationパラメータに2次のトレンドを持つため，2006年における確率密度関数は1931年のそれと比べてわずかに高温側にシフトし，再現期待値は統計期間の最初に減少，後半に増加している．

第6図は，飯田の最低気温における同様の結果である．飯田の最低気温累年値は，M_{10}^{GEV}への当てはまりが最もよく，最低気温において，M_{10}^{GEV}は最多の4地点（石巻，飯田，境，彦根）で選択された．locationパラメータに1次の増加トレンドを持つため，1931年における確率密度関数に比べ2006年のそれは高温側にシフトし，再現期待値は1次のトレンドで増加している．

第7図は，伏木における同じく最低気温の結果である．伏木の最低気温累年値は，M_{11}^{GEV}への当てはまりが最もよく，最低気温において，2地点（伏木，多度津）でM_{11}^{GEV}が選択された．locationパラメータ，scaleパラメータともに1次の増加トレンドを持つため，2006年における確率密度関数は1931年のそれに比べ高温側にシフトし，かつ分布のすそが短くなっている．そのため，年が経つにつれ再現期待値は増加し，また，再現期待値間の差が小さくなり，極端な低温になりにくくなっている．

全体として，最高気温に比べ最低気温の方が，再現期待値にトレンドをもつ地点が多く，最高・最低気温ともに，主なトレンドは平均値の昇温によるlocationパラメータの増加であった．ただし，最高気温3地点（水戸，銚子，多度津）では，極端な高温となりやすくなり極値のばらつきが大きくなったため，scaleパラメータに増加傾向が見られた．一方，最低気温3地点（伏木，長野，多度津）では，極端な低温となりにくくなっており，scaleパラメータに減少傾向が見られた．

4.4　50年確率値の再現期間の変化

再現期待値の増加・減少傾向を調べるため，3.6節の方法により50年確率値の再現期間の変化を調べた．結果の具体的な数値は，第3表，第4表に示す．

第8図は，最高気温において，統計期間の始め10年の50年確率値が統計期間の終わり10年に何年確率値となるのかを示している．8地点で再現期間に変化なし，同じく8地点で再現期間の減少傾向があった．特に，関東から九州にかけて，統計期間おわり10年における再現期間が50年未満となった地点，つまり昇温傾向のある地点が多い．水戸が最も再現期間が小さくなり，2.8年となった．次に小さくなったのは境で，再現期間7.8年となった．一方，飯田は再現期間128年と再現期間が大きくなった．

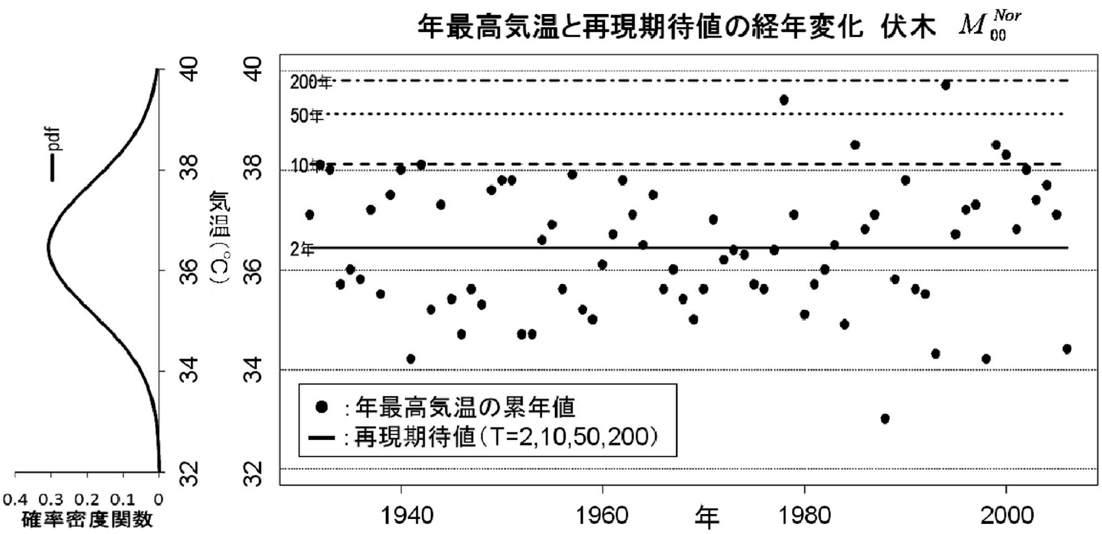
第9図は，最低気温における同様の結果である．全地点で，統計期間おわり10年における再現期間が50年以上となり，昇温傾向がみられた．特に，中部地方，

第3表　選択されたトレンドモデル，パラメータ，再現期待値（最高気温）．17気象官署の最高気温データに対する，統計年数，選択されたトレンドモデル，パラメータ数，トレンドモデルのパラメータ（μ_0，μ_1，μ_2，σ_0，σ_1，ξ），対数尤度，AIC，再現期間 T 年（$T=2$，5，10，20，30，50，100，200）の再現期待値（°C），再現期間の変化を示す．再現期待値は，上段に1931年のもの，下段に2006年のものを示した．再現期間の変化は統計期間の始め10年（1931～1940年）の50年確率値の平均値に対する，統計期間の終わり10年（1997～2006年）の再現期間の平均値である（4.4節参照）．トレンドモデルのパラメータ（μ_0，μ_1，μ_2，σ_0，σ_1，ξ）から，(4)～(7)により，$\mu(i)$，$\sigma(i)$，$\xi(i)$が求まる．ただし $\sigma(i)$は，σ_0，σ_1 が存在するとき(5)に従い，σ_1 が存在しないときは $\sigma(i)=\sigma_0$ とする．

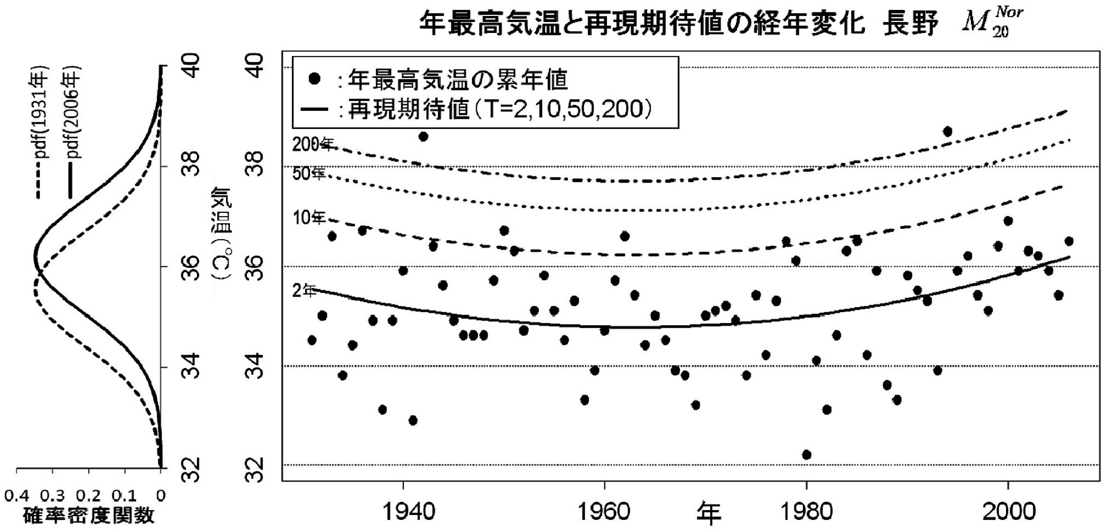
観測所名	統計年数	トレンドモデル	パラメータ数	$\mu0$	$\mu1$	$\mu2$	$\sigma0$	$\sigma1$	ξ	対数尤度	AIC		再現期待値(°C)								再現期間の変化
													T＝2年	5年	10年	20年	30年	50年	100年	200年	
網走	76	M_{00}^{Nor}	2	32.18	−	−	2.04	−	−	−161.9	327.7	1931年	32.2	33.9	34.8	35.5	35.9	36.4	36.9	37.4	50.0
												2006年	32.2	33.9	34.8	35.5	35.9	36.4	36.9	37.4	
根室	76	M_{20}^{Nor}	4	27.31	6.86	-6.01	1.74	−	−	−150.0	308.0		27.4	28.9	29.6	30.3	30.6	31.0	31.5	31.9	20.1
													28.2	29.7	30.5	31.1	31.4	31.8	32.3	32.7	
寿都	76	M_{00}^{Nor}	2	29.79	−	−	1.62	−	−	−144.7	293.3		29.8	31.2	31.9	32.5	32.8	33.1	33.6	34.0	50.0
													29.8	31.2	31.9	32.5	32.8	33.1	33.6	34.0	
山形	76	M_{00}^{GLO}	3	35.63	−	−	0.75	−	−0.09	−129.4	264.8		35.6	36.7	37.4	38.1	38.5	39.1	39.8	40.6	50.0
													35.6	36.7	37.4	38.1	38.5	39.1	39.8	40.6	
石巻	76	M_{00}^{GEV}	3	32.23	−	−	1.42	−	0.45	−127.6	261.2		32.7	33.8	34.2	34.6	34.7	34.8	35.0	35.1	50.0
													32.7	33.8	34.2	34.6	34.7	34.8	35.0	35.1	
伏木	76	M_{00}^{Nor}	2	36.44	−	−	1.30	−	−	−128.0	260.1		36.4	37.5	38.1	38.6	38.8	39.1	39.5	39.8	50.0
													36.4	37.5	38.1	38.6	38.8	39.1	39.5	39.8	
長野	76	M_{20}^{Nor}	4	35.59	−3.87	4.53	1.14	−	−	−117.8	243.7		35.5	36.5	37.0	37.4	37.6	37.9	38.2	38.5	17.7
													36.2	37.1	37.6	38.1	38.3	38.5	38.8	39.1	
水戸	76	M_{21}^{Nor}	5	34.43	−1.54	3.10	−0.17	0.47	−	−112.7	235.5		34.4	35.1	35.5	35.8	36.0	36.2	36.4	36.6	2.8
													35.9	37.1	37.6	38.1	38.4	38.7	39.0	39.4	
飯田	76	M_{20}^{Nor}	4	36.12	−6.24	5.80	1.13	−	−	−117.2	242.5		36.0	37.0	37.5	37.9	38.1	38.4	38.7	39.0	127.6
													35.6	36.6	37.1	37.5	37.7	37.9	38.3	38.5	
銚子	76	M_{21}^{Gum}	5	32.05	−5.54	5.89	−0.26	0.52	−	−120.6	251.2		32.3	33.1	33.7	34.3	34.6	35.0	35.5	36.1	10.4
													32.8	34.2	35.2	36.1	36.7	37.3	38.2	39.1	
境	76	M_{20}^{GLO}	5	35.12	−1.99	3.22	0.54	−	0.01	−105.1	220.2		35.1	35.8	36.3	36.7	36.9	37.1	37.5	37.9	7.8
													36.3	37.0	37.5	37.9	38.1	38.3	38.7	39.1	
浜田	76	M_{00}^{Nor}	2	34.73	−	−	1.21	−	−	−122.5	249.0		34.7	35.7	36.3	36.7	36.9	37.2	37.5	37.8	50.0
													34.7	35.7	36.3	36.7	36.9	37.2	37.5	37.8	
彦根	76	M_{20}^{Nor}	4	35.46	−3.37	3.44	0.91	−	−	−100.4	208.7		35.4	36.2	36.6	36.9	37.1	37.3	37.5	37.8	44.2
													35.5	36.3	36.7	37.0	37.2	37.4	37.6	37.8	
宮崎	76	M_{20}^{Nor}	4	35.90	−1.65	2.36	0.99	−	−	−106.9	221.8		35.9	36.7	37.1	37.5	37.7	37.9	38.2	38.4	13.8
													36.6	37.4	37.8	38.2	38.4	38.6	38.9	39.1	
多度津	76	M_{21}^{Nor}	5	36.33	−4.71	4.69	−0.29	0.39	−	−100.7	211.5		36.3	36.9	37.2	37.5	37.7	37.8	38.0	38.2	15.5
													36.3	37.2	37.7	38.1	38.3	38.5	38.8	39.1	
名瀬	76	M_{00}^{Gum}	2	34.37	−	−	0.71	−	−	−92.9	189.7		34.6	35.4	36.0	36.5	36.8	37.1	37.6	38.1	50.0
													34.6	35.4	36.0	36.5	36.8	37.1	37.6	38.1	
石垣島	76	M_{00}^{Nor}	2	33.94	−	−	0.67	−	−	−77.7	159.3		33.9	34.5	34.8	35.0	35.2	35.3	35.5	35.7	50.0
													33.9	34.5	34.8	35.0	35.2	35.3	35.5	35.7	

第 4 表　選択されたトレンドモデル，パラメータ，再現期待値（最低気温）．17気象官署の最低気温データに対する，統計年数，選択されたトレンドモデル，パラメータ数，トレンドモデルのパラメータ（μ_0，μ_1，μ_2，σ_0，σ_1，ξ），対数尤度，AIC，再現期間 T 年（T= 2， 5，10，20，30，50，100，200）の再現期待値（°C），再現期間の変化を示す．以下第 3 表と同様．

観測所名	統計年数	トレンドモデル	パラメータ数	$\mu 0$	$\mu 1$	$\mu 2$	$\sigma 0$	$\sigma 1$	ξ	対数尤度	AIC		再現期待値(°C) T=2年	5年	10年	20年	30年	50年	100年	200年	再現期間の変化
網走	76	M_{20}^{GNO}	5	−18.00	−7.88	9.84	2.25	−	0.14	−169.3	348.7	1931年	−18.1	−20.1	−21.2	−22.2	−22.8	−23.4	−24.2	−25.0	229
												2006年	−16.2	−18.2	−19.3	−20.3	−20.9	−21.5	−22.3	−23.1	
根室	76	M_{20}^{GEV}	5	−16.53	−5.88	9.60	2.83	−	0.49	−177.9	365.8		−15.7	−18.1	−19.5	−20.7	−21.3	−22.1	−23.0	−23.9	736
													−12.0	−14.5	−15.9	−17.1	−17.7	−18.5	−19.4	−20.3	
寿都	76	M_{00}^{Nor}	3	−12.11	1.34	−	1.60	−	−	−143.6	293.1		−12.1	−13.4	−14.1	−14.7	−15.0	−15.4	−15.8	−16.2	360
													−10.8	−12.1	−12.8	−13.4	−13.7	−14.1	−14.5	−14.9	
山形	76	M_{20}^{GNO}	5	−13.51	10.24	−5.45	1.78	−	0.41	−151.6	313.2		−13.4	−15.0	−15.9	−16.7	−17.1	−17.6	−18.3	−18.9	6218
													−8.7	−10.3	−11.2	−12.0	−12.4	−13.0	−13.6	−14.2	
石巻	76	M_{10}^{GEV}	4	−9.94	1.92	−	1.61	−	0.41	−138.9	285.8		−9.4	−10.8	−11.5	−12.2	−12.5	−12.9	−13.4	−13.8	726
													−7.5	−8.9	−9.7	−10.3	−10.6	−11.0	−11.5	−11.9	
伏木	76	M_{11}^{GEV}	5	−8.03	3.53	−	0.73	−0.62	0.41	−134.2	278.4		−7.3	−9.1	−10.0	−10.8	−11.3	−11.8	−12.4	−12.9	4.63E+08
													−4.2	−5.1	−5.7	−6.1	−6.3	−6.6	−6.9	−7.2	
長野	76	M_{21}^{Nor}	5	−14.42	8.55	−3.88	0.79	−0.72	−	−140.5	290.9		−14.3	−16.1	−17.1	−17.9	−18.3	−18.8	−19.4	−19.9	3.47E+13
													−9.8	−10.7	−11.2	−11.5	−11.8	−12.0	−12.3	−12.6	
水戸	76	M_{20}^{GEV}	5	−8.25	−2.04	3.47	1.44	−	0.63	−120.4	250.9		−7.8	−9.1	−9.9	−10.6	−10.9	−11.4	−12.0	−12.5	232
													−6.4	−7.7	−8.5	−9.2	−9.5	−10.0	−10.6	−11.1	
飯田	76	M_{10}^{GEV}	4	−12.68	2.81	−	1.68	−	0.49	−137.6	283.2		−12.1	−13.5	−14.4	−15.1	−15.5	−15.9	−16.5	−17.0	1542
													−9.3	−10.8	−11.6	−12.3	−12.7	−13.2	−13.7	−14.2	
銚子	76	M_{20}^{Nor}	4	−2.74	−3.84	5.51	1.15	−	−	−118.2	244.4		−2.8	−3.8	−4.3	−4.7	−4.9	−5.1	−5.5	−5.7	2836
													−1.2	−2.1	−2.6	−3.0	−3.3	−3.5	−3.8	−4.1	
境	76	M_{10}^{GEV}	4	−5.28	1.38	−	1.59	−	0.51	−132.9	273.7		−4.7	−6.1	−6.9	−7.6	−7.9	−8.4	−8.9	−9.4	247
													−3.4	−4.8	−5.6	−6.2	−6.6	−7.0	−7.6	−8.1	
浜田	76	M_{10}^{Nor}	3	−3.80	1.03	−	1.55	−	−	−141.2	288.4		−3.8	−5.1	−5.8	−6.3	−6.6	−7.0	−7.4	−7.8	231
													−2.8	−4.1	−4.8	−5.3	−5.6	−6.0	−6.4	−6.8	
彦根	76	M_{10}^{GEV}	4	−7.04	3.14	−	1.62	−	0.42	−138.5	285.0		−6.4	−7.9	−8.6	−9.3	−9.6	−10.0	−10.5	−10.9	5681
													−3.4	−4.8	−5.6	−6.2	−6.5	−6.9	−7.4	−7.9	
宮崎	76	M_{21}^{Nor}	5	−4.99	−0.42	3.05	−0.28	0.51	−	−105.8	221.6		−5.0	−5.6	−6.0	−6.2	−6.4	−6.6	−6.8	−7.0	1495
													−2.4	−3.5	−4.0	−4.5	−4.7	−5.0	−5.3	−5.6	
多度津	76	M_{11}^{GEV}	5	−3.81	1.40	−	0.36	−0.64	0.51	−100.8	211.7		−3.3	−4.6	−5.3	−5.9	−6.2	−6.6	−7.1	−7.5	1.64E+05
													−2.2	−2.8	−3.2	−3.5	−3.7	−3.9	−4.2	−4.4	
名瀬	76	M_{20}^{GEV}	5	5.88	−0.51	2.33	0.81	−	0.66	−74.2	158.4		6.1	5.4	5.0	4.6	4.4	4.1	3.7	3.4	1661
													7.9	7.2	6.7	6.3	6.1	5.9	5.5	5.2	
石垣島	76	M_{10}^{Nor}	3	9.07	2.08	−	1.13	−	−	−117.3	240.7		9.1	8.1	7.6	7.2	7.0	6.8	6.5	6.2	7251
													11.1	10.2	9.7	9.3	9.0	8.8	8.5	8.2	



第4図 伏木における最高気温の再現期待値の経年変化と確率密度関数.(右図)再現期待値の経年変化，横軸：観測年（年)，縦軸：気温（℃)，（左図）確率密度関数，横軸：確率，縦軸：気温（℃)



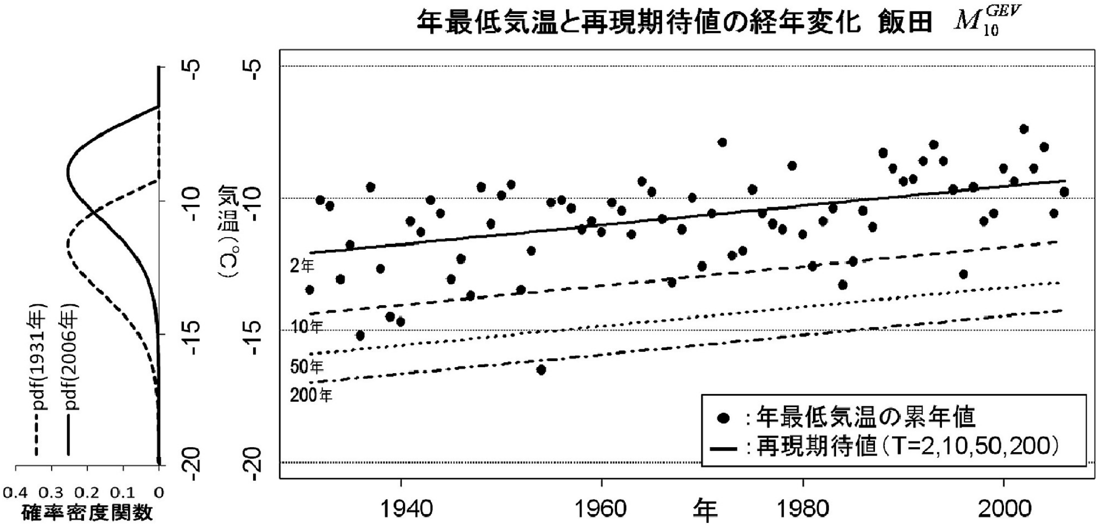
第5図 長野における最高気温の再現期待値の経年変化と確率密度関数．左図，右図とも第4図と同じ.

四国地方，九州地方，南西諸島で昇温傾向が大きい．また，昇温傾向は，最高気温に比べ顕著であった．

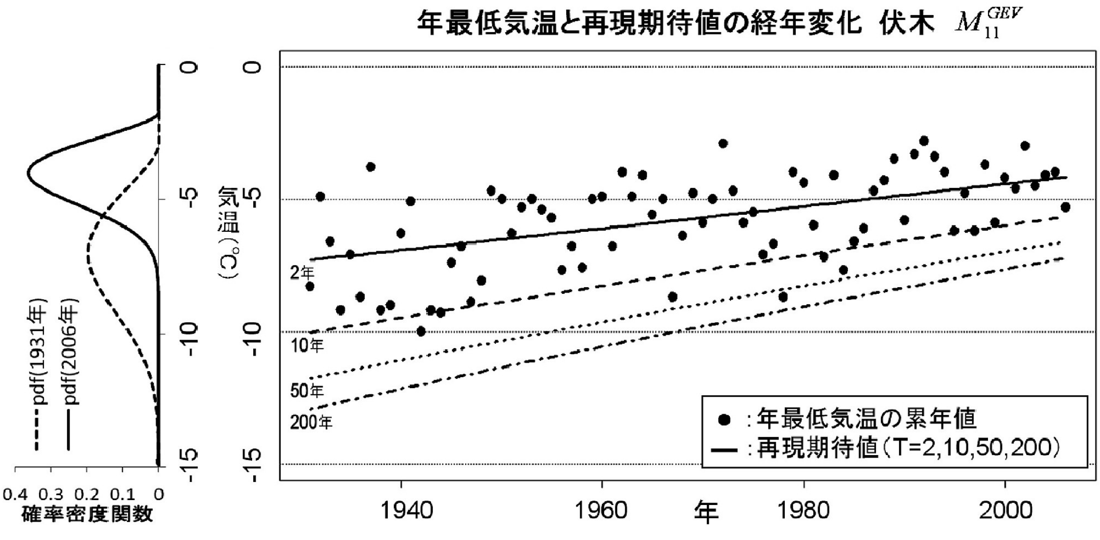
5．議論

4.3節で求めた17気象官署における気温極値解析の結果の適合度を調べるため，再現期待値に対する超過地点数を調べた．

最高気温の再現期待値に対する超過地点数の理論的な期待値は，次のように計算できる．ある年に地点 i で T 年再現期待値 x_T を超える確率は $1/T$ であり，x_T を超えない確率は $1-1/T$ である．したがって，統計期間 N_i 中に x_T を超えない確率は，$(1-1/T)^{N_i}$ となり，統計期間中に少なくとも一度 x_T を超える確率は，$1-(1-1/T)^{N_i}$ となる．これを地点ごとに求めて，足し合わせれば，(11)式から最高気温の再現期待値に対する理論的な超過地点数が求まる．



第6図 飯田における最低気温の再現期待値の経年変化と確率密度関数．左図，右図とも第4図と同じ．

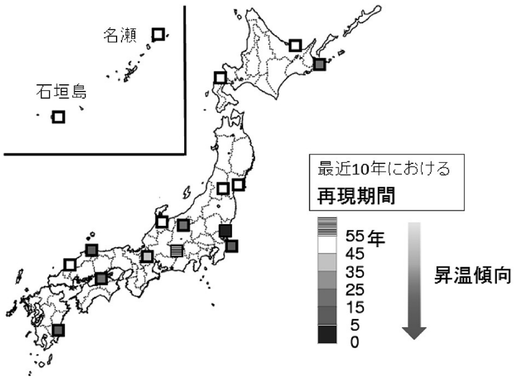


第7図 伏木における最低気温の再現期待値の経年変化と確率密度関数．左図，右図とも第4図と同じ．

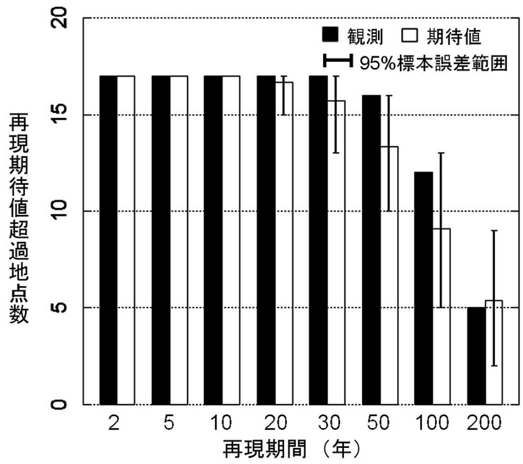
$$\sum_{i=1}^{17}\{1-(1-1/T)^{N_i}\} \tag{11}$$

一方，第3表，第4表に示した結果から，ある地点における年ごとに計算した T 年再現期待値と，その地点の年ごとの観測値とを比較し，その地点において統計期間中に観測値が T 年再現期待値を上回ることがあったかを判断する．統計期間中に T 年再現期待値を上回ることのあった地点数と，先に述べた理論的な超過地点数とを比較することにより，解析結果の適合度を調べた．

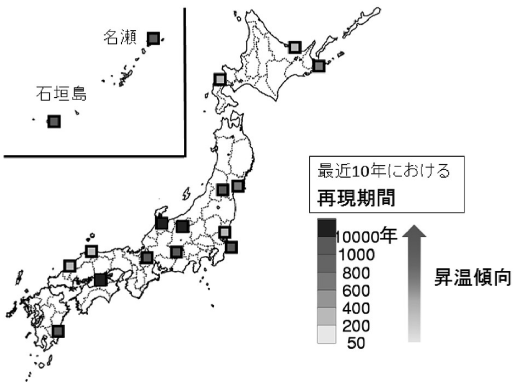
また，理論的な超過地点数の標準誤差範囲を調べるため，次のシミュレーションを行った．地点ごとに76個（名瀬75個）の乱数を発生させ，T 年再現期待値を超えた地点数を数える．これを1000回繰り返して，超過地点数の95％範囲を標準誤差範囲とした．最低気温の場合には，以上の手順で T 年再現期待値 x_T を統



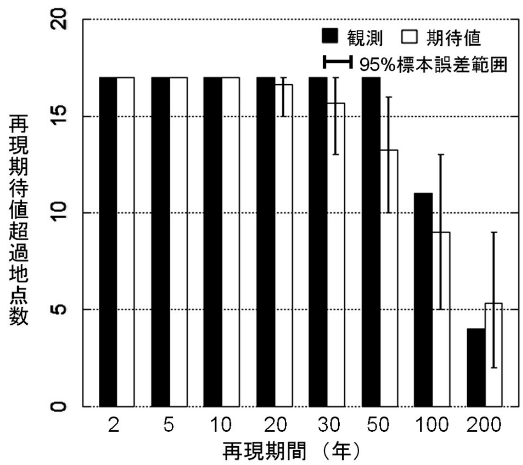
第８図　最高気温の再現期間の変化．統計期間始め10年（1931～1940年）の最高気温の50年確率値の平均値が，統計期間終わり10年（1997～2006年）において，平均して再現期間何年の値に相当するのかを示す．



第10図　17気象官署最高気温の再現期待値の超過地点数（全17地点）．



第９図　最低気温の再現期間の変化．統計期間始め10年（1931～1940年）の最低気温の50年確率値の平均値が，統計期間終わり10年（1997～2006年）において，平均して再現期間何年の値に相当するのかを示す．



第11図　17気象官署最低気温の再現期待値の超過地点数（全17地点）．

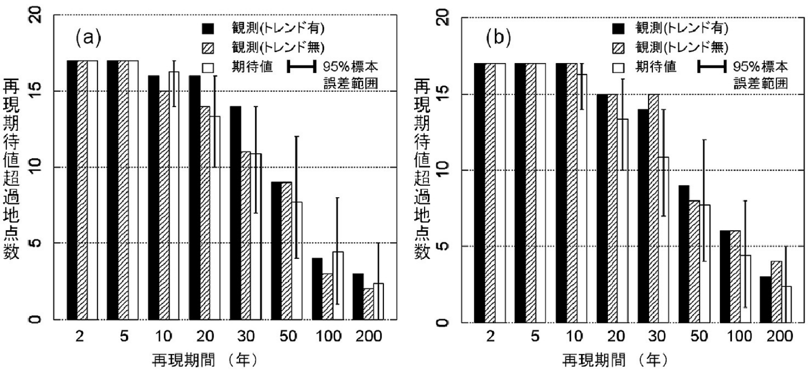
計期間中に下回ったとして考える．

第10図は，最高気温の再現期待値についての超過地点数である．実際の超過地点数は，期待値の95％標本誤差範囲内にあり，よく適合しているといえる．一方，第11図より，最低気温では，再現期間50年において95％標本誤差範囲内にないものの，その他の再現期間ではよく適合している．

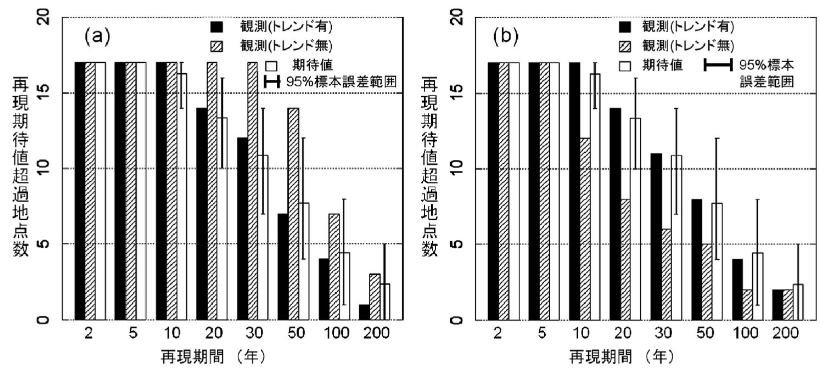
続いて，トレンドを考慮した場合と考慮しない場合の再現期待値の超過地点数を比較することにより，観測値におけるトレンドを考慮したことで再現期待値の推定精度が向上したのかを調べる．算出した再現期待値を観測値が超過する割合は，観測年によらないことが理想的である．トレンドモデルを用いたことにより再現期待値の推定精度が向上したならば，観測値に経年変化がある場合でも，観測年に対する超過地点数の偏りは小さいはずである．一方，経年変化を考慮しなければ，例えば観測値に昇温傾向がある場合，各再現期待値の超過地点数は最高気温ならば統計期間後半に，最低気温ならば統計期間前半に多くなり，各観測年において再現期待値を精度よく推定しているとはい

えなくなる．最高気温において実際に比較した結果を第12図に，最低気温における同様の結果を第13図に示す．なお，トレンドの無い場合とは，3.3節で示した５つの分布形のうち，パラメータにトレンドを持たないモデルM_{00}^{DIST}から，AICの適合基準によりモデルを選択した場合とした．

第12図ａは，統計期間始め30年における最高気温の超過地点数の比較を，第12図ｂは，統計期間終わり30年における最高気温の超過地点数の比較を示している．最高気温の評価においては，トレンドを持つモデルが適合した地点数は約半数に留まっていたため，トレンドを考慮した場合とトレンドを考慮しない場合とで大きな違いは見られない．しかしながら，トレンドを考慮しない場合には，統計期間後半（第12図ｂ）の方が統計期間前半（第12図ａ）に比べて超過地点数が多く評価されることが分かる．一方で，トレンドを考慮した場合には，統計期間の前半と後半での超過地点数の評価が安定している．これらのことは，最低気温においてより明瞭である．最低気温による同様の結果を第13図ａ，ｂに示す．第13図ａ，ｂより，トレンドを考慮しない場合には，再現期待値を下回ることが統計期間前半に偏っている．一方，トレンドを考慮した場合には，超過地点数が観測年によらず安定している．すなわち，トレンドを考慮しないモデルでは，再現期待値を精度よく推定することが困難であるが，トレンドを考慮することにより再現期待値の推定精度向上が期待されると判断できる．



第12図　17気象官署最高気温の再現期待値の超過地点数（全17地点）．(a)は統計期間始め30年における超過地点数の比較，(b)は統計期間終わり30年における超過地点数の比較を示す．■はトレンドを考慮したモデルによる再現期待値を超過した地点数，▨はトレンドを考慮しないモデルによる再現期待値を超過した地点数，□は理論的な超過地点数である．



第13図　17気象官署最低気温の再現期待値の超過地点数（全17地点）．(a)は統計期間始め30年における超過地点数の比較，(b)は統計期間終わり30年における超過地点数の比較を示す．■はトレンドを考慮したモデルによる再現期待値を超過した地点数，▨はトレンドを考慮しないモデルによる再現期待値を超過した地点数，□は理論的な超過地点数である．

６．まとめ

全国17気象官署の年最高，年最低気温データに対して，トレンドモデルを用いた気温極値解析を行った．観測値のトレンドを考慮した場合と考慮しない場合とにおける，観測値が再現期待値を超過した地点数を比較した結果から，トレンドモデルを用いることにより，精度よくクォンタイルの推定ができる分布を抽出でき，再現期待値の推定精度が向上したといえる．最高気温の場合，気象官署17地点中12地点で正規分布が選択され，９地点でトレンドをもつモデルが選択され

た．最低気温の場合，17地点中6地点で正規分布が，9地点でGEV分布が選択され，全地点でトレンドをもつモデルが選択された．最高気温・最低気温ともに，主なトレンドは，平均値の昇温によるlocationパラメータの増加であったが，最高気温3地点では極値のばらつきの増大によるscaleパラメータの増加傾向が，最低気温3地点では極端な低温が出にくくなったことによるscaleパラメータの減少傾向が見られた．全体として，最高気温に比べ最低気温の方が，気温の増加トレンドが顕著であった．また，scaleパラメータにおけるトレンドを見ることにより，極端な値の出やすさの変化を見積もることができた．再現期間の変化を見ることにより，17地点中8地点では過去の極端な高温が出やすくなっており，全地点で極端な低温が出にくくなっているといえる．なお，今回得られたトレンドモデルは，過去のデータを最も適切に表現できたモデルであると考えられるが，複数のトレンドモデルが適応可能な場合には，真のモデルではない可能性があるということに注意が必要である．

謝　辞

トレンドモデルにおいてRのパッケージismev（Coles and Stephenson 2006）を使用した（http://cran.r-project.org/）．また，地図など図の一部は，柴田（2003）を参考にしてフリーソフトのGMT（http://gmt.soest.hawaii.edu/，2004.5.20閲覧）を用いて作成した．さらに，解析に使用した17気象官署の気温データは，平成18〜20年度科学研究費補助金による「極端な気象現象の発生頻度とその長期変動に関する研究」（研究代表者：藤部文昭）に関連して提供されたものである．ここに謝意を表する．

参　考　文　献

Coles, S., 2001：An Introduction to Statistical Modeling of Extreme Values. Springer, 105-123.

Coles, S. and A. Stephenson, 2006：Ismev：An introduction to statistical modeling of extreme values. http://cran.r-project.org/web/packages/ismev/index.html（2006.11.28閲覧）.

Feng, S., S. Nadarajah and Q. Hu, 2007：Modeling annual extreme precipitation in China using the generalized extreme value distribution. J. Meteor. Soc. Japan, **85**, 599-613.

藤部文昭，1997：都市気象官署における気温極値の経年変化. 天気, **44**, 101-112.

Hosking, J. R. M. and J. R. Wallis, 1997：Regional Frequency Analysis：An Approach Based on L-moments. Cambridge Univ. Press, Cambridge, 224pp.

Kharin, V. V., F. W. Zwiers, X. Zhang and G. C. Hegerl, 2007：Changes in temperature and precipitation extremes in the IPCC ensemble of global coupled model simulations. J. Climate, **20**, 1419-1444.

気象庁，1990：異常気象・気象災害調査指針．気象庁，137-139.

気象庁，2002：気象災害報告（災害速報・災害報告）作業マニュアルと手引き．気象庁，37pp.

気象庁，2005：異常気象レポート2005：近年における世界の異常気象と気候変動〜その実態と見通し〜(Ⅶ)．気象庁，383pp.

北沢正彦，川北司郎，中島裕之，久保雅邦，石田良三，1986a：鋼製橋脚における鋼構造物温度の実測と温度荷重の検討（上）. 橋梁と基礎, **20**(11), 23-27.

北沢正彦，川北司郎，中島裕之，久保雅邦，石田良三，1986b：鋼製橋脚における鋼構造物温度の実測と温度荷重の検討（下）．橋梁と基礎，**20**(12)，35-40.

日本建築学会，2004：建築物荷重指針・同解説第4版．丸善，559-617.

柴田のり子，2003：GMTを使ってみよう．東管技術ニュース，(145)．(CD-ROM)

水文・水資源学会編，1997：水文・水資源ハンドブック．朝倉書店，228-255.

Wang, X. L., F. W. Zwiers and V. R. Swail, 2004：North Atlantic ocean wave climate change scenarios for the twenty-first century. J. Climate, **17**, 2368-2383.

付録A　各分布の詳細

A.1　Gumbel分布（Gum）

パラメータ(2)：μ(location)，σ(scale)．

xの範囲：$-\infty < x < \infty$

確率密度関数f，分布関数F，分布関数の逆関数xは次の通りである．

$$f(x)=\sigma^{-1}\exp\{-(x-\mu)/\sigma\}\exp[-\exp\{-(x-\mu)/\sigma\}] \quad \text{(A1)}$$

$$F(x)=\exp[-\exp\{-(x-\mu)/\sigma\}] \quad \text{(A2)}$$

$$x(F)=\mu-\sigma\log(-\log F) \quad \text{(A3)}$$

A.2　正規分布（Nor）

パラメータ(2)：μ(location)，σ(scale)．

xの範囲：$-\infty < x < \infty$

確率密度関数f，分布関数Fは次の通りである．

$$f(x)=\sigma^{-1}\phi\{(x-\mu)/\sigma\} \quad (A4)$$

$$F(x)=\Phi\{(x-\mu)/\sigma\} \quad (A5)$$

ここで，

$$\phi(x)=(2\pi)^{-1/2}\exp\left(-\frac{1}{2}x^2\right),\ \Phi(x)=\int_{-\infty}^{x}\phi(t)\,dt \quad (A6)$$

分布関数の逆関数$x(F)$は解析的な形をとらない．

A.3　一般極値分布（GEV）

ここに示すGEVのパラメータは，Coles（2001）ではなくHosking and Wallis（1997）の表記を使っていることに注意が必要である．

パラメータ(3)：μ(location)，σ(scale)，ξ(shape)．

xの範囲：$-\infty<x\leq\mu+\sigma/\xi \quad (\xi>0)$

$-\infty<x<\infty \quad (\xi=0)$

$\mu+\sigma/\xi\leq x<\infty \quad (\xi<0)$

確率密度関数f，分布関数F，分布関数の逆関数xは次の通りである．

$$f(x)=\sigma^{-1}e^{-(1-\xi)y-e^{-y}} \quad (A7)$$

$$F(x)=e^{-e^{-y}} \quad (A8)$$

$$x(F)=\begin{cases}\mu+\sigma\{1-(-\log F)^{\xi}\}/\xi, & \xi\neq0\\ \mu-\sigma\log(-\log F), & \xi=0\end{cases} \quad (A9)$$

$$y=\begin{cases}-\xi^{-1}\log\{1-\xi(x-\mu)/\sigma\}, & \xi\neq0\\ (x-\mu)/\sigma, & \xi=0\end{cases} \quad (A10)$$

特別な場合として，$\xi=0$の場合はGumbel分布，$\xi=1$の場合は逆指数分布である．

A.4　一般logistic分布（GLO）

パラメータ(3)：μ(location)，σ(scale)，ξ(shape)．

xの範囲：$-\infty<x\leq\mu+\sigma/\xi \quad (\xi>0)$

$-\infty<x<\infty \quad (\xi=0)$

$\mu+\sigma/\xi\leq x<\infty \quad (\xi<0)$

確率密度関数f，分布関数F，分布関数の逆関数xは次の通りである．

$$f(x)=\sigma^{-1}e^{-(1-\xi)y}/(1+e^{-y})^2 \quad (A11)$$

$$F(x)=1/(1+e^{-y}) \quad (A12)$$

$$x(F)=\begin{cases}\mu+\sigma[1-\{(1-F)/F\}^{\xi}]/\xi, & \xi\neq0\\ \mu-\sigma\log\{(1-F)/F\}, & \xi=0\end{cases} \quad (A13)$$

$$y=\begin{cases}-\xi^{-1}\log\{1-\xi(x-\mu)/\sigma\}, & \xi\neq0\\ (x-\mu)/\sigma, & \xi=0\end{cases} \quad (A14)$$

特別な場合として，$\xi=0$の場合はlogistic分布である．

A.5　一般正規分布（GNO）［対数正規分布］

パラメータ(3)：μ(location)，σ(scale)，ξ(shape)．

xの範囲：$-\infty<x\leq\mu+\sigma/\xi \quad (\xi>0)$

$-\infty<x<\infty \quad (\xi=0)$

$\mu+\sigma/\xi\leq x<\infty \quad (\xi<0)$

確率密度関数f，分布関数Fは次の通りである．

$$f(x)=\mathrm{e}^{\xi y-y^2/2}/(\sigma\sqrt{2\pi}) \quad (A15)$$

$$F(x)=\Phi(y) \quad (A16)$$

$$y=\begin{cases}-\xi^{-1}\log\{1-\xi(x-\mu)/\sigma\}, & \xi\neq0\\ (x-\mu)/\sigma, & \xi=0\end{cases} \quad (A17)$$

Φは，(A6)で定義された標準正規分布の累積分布関数である．

分布関数の逆関数$x(F)$は解析的な形をとらない．

特別な場合として，$\xi=0$の場合はパラメータμ，σを持った正規分布である．

Statistical Analysis of Temperature Extremes in Japan Considering Interannual Temperature Variations by Trend Model

Masami SUYA* and Hakaru MIZUNO**

* *Kushiro Local Meteorological Observatory, 10-3, Saiwai-chou, Kushiro, Hokkaido, 085- 8586, Japan.*

** *Observations Department, Japan Meteorological Agency, 1-3-4, Otemachi, Chiyoda, Tokyo, 100-8122, Japan.*

(Received 25 March 2009; Accepted 17 May 2010)