

中小都市における都市気温の構造変化に関する研究

—36観測所1891-2004の114年間データに基づいて(2)—

田代 敬大* 上野 賢仁**

A Study on Structural Changes of Urban Air Temperature in Small and Medium-sized Cities

— On the Basis of Data at 36 Observatories for 114 Years of 1891-2004 (2) —

by

Takahiro TASHIRO* Takahito UENO**

要旨

わが国において蓄積されている100年以上の超長期的気温データを対象に、Chow Test等の統計分析を通して、わが国における都市温暖化現象を表現することが本研究の目的である。対象データは1891年から2004年までの114年間の日平均気温で、対象観測所は36箇所である。主な結論は、次のとおりである。第1に、対象とした観測所すべての気温変動は、極めて高い確度で、1本の回帰直線よりも2本の回帰直線で表現する方が妥当と判定された。第2に、気候区分が同じ観測所での比較検討により、観測所が所在する都市規模(行政区域人口)が大きいほど温暖化現象が著しいことが明らかとなった。第3に、対象観測所36箇所の気温上昇を5タイプに分類し特徴を記した。特に、1980年代末に気温の上方ジャンプをみせたタイプ以外では、大都市や中規模都市では対象期間の第2期つまり後半になって急激に気温上昇したことが判明した。これらにより、日本における都市部の温暖化現象は、地理的・気候的要因の規定を受けるものの、都市化現象の要因の影響が少なくないものと推測された。

Key Words: 都市温暖化現象、超長期気温データ、統計分析、Chow test、回帰分析

1. はじめに

わが国では、大都市から地方圏域に至るまで100年以上の気温観測データが蓄積されている観測所が少なくないものの、直接的にこの超長期的気温データを統計的に検討したものは比較的少ないものと推察される。これまで本研究室では、過去の気温変動を1本の回帰直線で表現した方が良いのか2本以上の回帰直線で表現した方が良いのかを判定するChow Testという統計手法を中心として都市温暖化現象を検討しているが^{1)~15)}、特に参考文献15)では本研究で用いる分析手法の概説と

もに、東京、札幌、京都、大阪、福岡という大都市圏所在の観測所データを対象に、1891~2004年の114年間のデータを検討しており、本稿に直接的に先行する内容となっている¹⁾。

本論文の目的は、前稿の5つの大都市圏を含む中小都市から地方圏域に及ぶ36観測所の1891年~2004年の対象期間データをChow Testを用いて分析し、同じ気候区分²⁾での都市間比較等を通して、都市温暖化現象を検討するものである。

論文構成は、次のとおりである。第2章では分析期間、対象観測所および本稿で用いる気候区分について述べる。第3章では同一気候区分内での都市規模が異なる観測所の比較検討を行い、温暖化現象についての要因を考察する。第4章では36観測所すべてについて分析結果を概観する。

*崇城大学工学部エコデザイン学科准教授

**崇城大学工学部エコデザイン学科教授



No.1 旭川	No.10 石巻	No.19 新潟	No.28 高知
No.2 札幌	No.11 山形	No.20 伏木	No.29 下関
No.3 寿都	No.12 福島	No.21 金沢	No.30 福岡
No.4 網走	No.13 宇都宮	No.22 京都	No.31 大分
No.5 根室	No.14 東京	No.23 大阪	No.32 厳原
No.6 函館	No.15 長野	No.24 和歌山	No.33 佐賀
No.7 青森	No.16 名古屋	No.25 広島	No.34 熊本
No.8 秋田	No.17 岐阜	No.26 境	No.35 宮崎
No.9 宮古	No.18 津	No.27 松山	No.36 鹿児島

図1 気候区分図と対象観測所

なお、本研究は地球温暖化現象の検討は主対象ではないが、本研究の手法から検討した地球温暖化現象についての補論を付している。

2. 分析期間と対象観測所

使用データは気象庁ホームページ掲載の日平均気温の年次データで、気温表示の単位は摂氏である¹⁶⁾。可能な限り長期間の観測データが得られること、また、観測所点間の比較ができるように、対象期間は1891年から2004年の114年間のデータとした。対象期間のデータが完備する観測所は図1に示す36観測所である。それらには日本全体にわたって大都市所在の観測所から地方圏域の観測所まで含まれている。本研究は地球温暖化現象を直接的に取り扱うものではないけれども、地方観測所は地球温暖化の影響が表れやすく、また、それらとの対比により都市温暖化現象も特徴が際立つと期待したからである³⁾。ただし、36地点を

対象にするということは、個々の観測所やその所在地域・都市を個別に検討するのではなく、日本全体の地球温暖化状況と都市温暖化状況を概観するという接近法である。なお、データの吟味を簡単には行ったけれども、基本的には公表されている情報に基づく分析である⁴⁾。

図1には気候区分も示している。日本国内に限定しても、各地域の気候は多様で複雑である。本研究の結果も基本的には各地域の気候に規定されており、その擾乱要因として都市化現象の影響が想定されるからである。気候区分は2つの数字で表示し、最初のローマ数字は大区分5種類、2番目のアラビア数字は中区分である。原図の区分名は地域名であり、各区分の気候的特徴の説明は略した⁵⁾。

3. 同一気候区分における観測所の比較⁶⁾

ここでは同一気候区分内で比較的近接しており都市規模が異なる観測所について、適宜、参考指標として観測所が所在する2000年の行政区域人口を示しながら比較検討する¹⁷⁾。周知のように東京、京都、大阪は古くからの相対的大都市であるが、現在のような大都市圏を形成するのは1950年代半ば以降である。また、その他の現在の大都市、中規模都市等も急激な都市拡大を示すのは、基本的には、1950年代半ば以降である。

以下では、まずChowの*F*値(以下、*F_c*値)の推移図を示し、最大*F_c*値により最大*F_c*値年の特定と構造変化の有無を検討する。あらかじめ結論を述べれば、すべての観測所の気温変動がかなりの確度で、「構造変化あり」となる(後述表2参照)。

次いで、各観測所の気温変動を最大*F_c*値年で分割したデータについて、2本の回帰直線を示す⁸⁾。回帰直線の気温勾配の検定は有意水準 $\alpha=5\%$ を基本としたが、煩雑になるので有意水準 $\alpha=5\%$ の記述は略した。また、回帰直線の係数等は観測所間の比較がしやすいように、小数点以下の桁を多めにとった。小さな桁は実態的な数値というよりも、便宜的な数値である。

(1) No.2 札幌とNo.3 寿都 気候区分I2

札幌市の100万人を超える大都市(1822千人)に対し、寿都は小さな町(4千人)である。図2

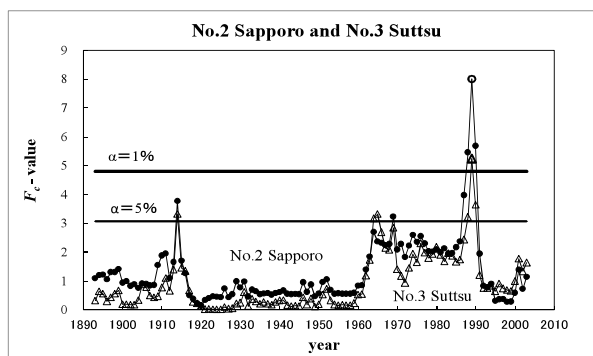


図2 札幌と寿都のChowのFc値の推移

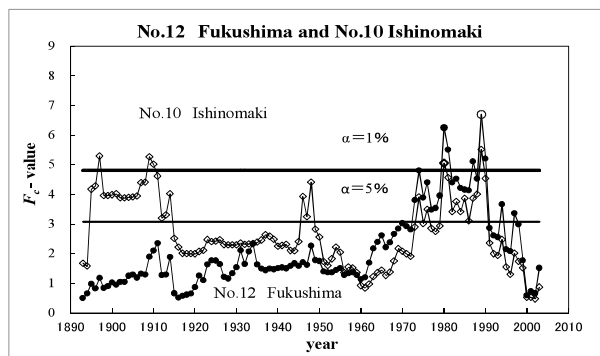


図5 福島と石巻のChowのFc値の推移

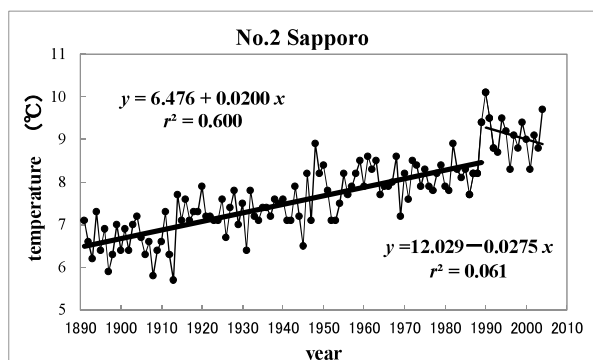


図3 札幌の気温変動と2本の回帰直線

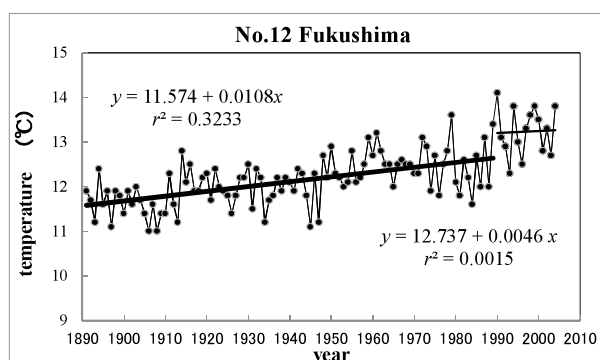


図6 福島の気温変動と2本の回帰直線

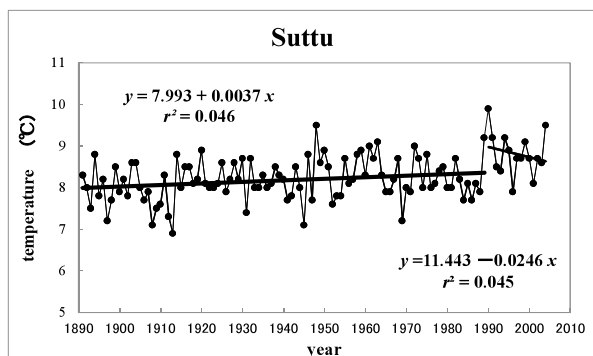


図4 寿都の気温変動と2本の回帰直線

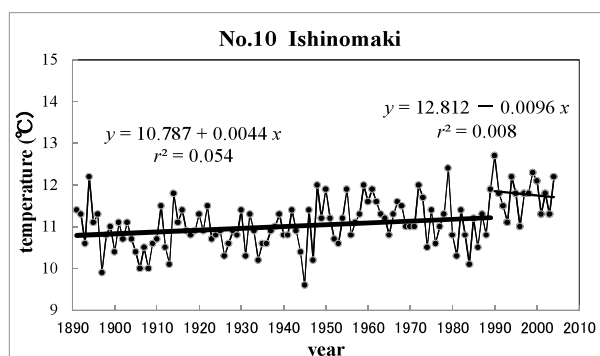


図7 石巻の気温変動と2本の回帰直線

のように、両観測所ともに低いFc値の水準で推移しており、全般的に札幌のFc値の方が寿都のそれよりもわずかに高い。それぞれのFc値の推移図の変動は類似している。最大Fc値年はともに1989年であり、有意水準 $\alpha=1\%$ で有意である。ただし、寿都で $\alpha=1\%$ を超えるFc値はこの年のみである。

札幌の気温変動と回帰直線を図3に、寿都を図4に示す。第2期間の気温勾配はともに $\alpha=5\%$ で有意でない。第1期の期間が同じなので、第1期間の回帰直線の気温勾配を比較することが可能である。それらは寿都の0.0037に対して、札幌は0.0200と相対的に大きな値となっている。

(2) No.12 福島とNo.10 石巻 気候区分IV2

福島は中小規模の都市(291千人)であり、石巻は小規模の港町(120千人)である。図5のように、両観測所ともに低い水準で類似した変動のFc値で推移しているが、1890年代から1960年代までは石巻のFc値の方が福島のそれよりもわずかに高いが、それ以降は福島の方がやや高く推移している。最大Fc値年はともに1989年である。

福島の気温変動と回帰直線を図6に、石巻を図7に示す。第2期間の気温勾配はともに有意でない。第1期間の回帰直線の気温勾配はともに小さいが、石巻0.0044を福島0.0108は上回っている。

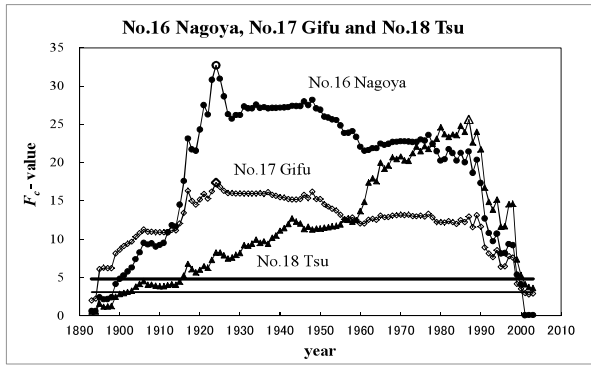


図8 名古屋、岐阜と津のChowのFc値の推移

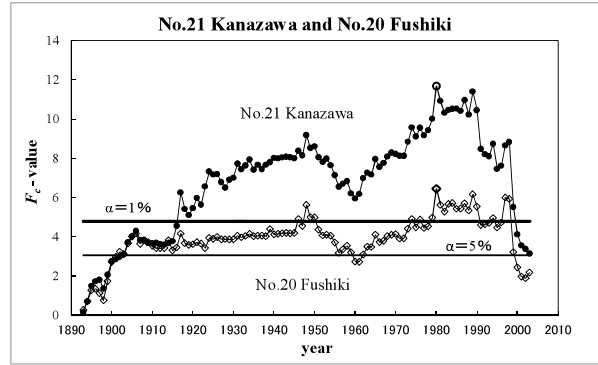


図12 金沢と伏木のChowのFc値の推移

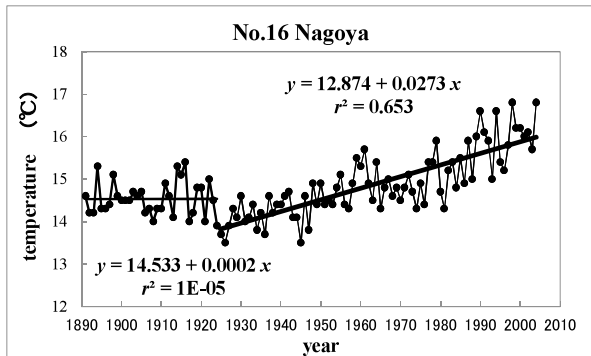


図9 名古屋の気温変動と2本の回帰直線

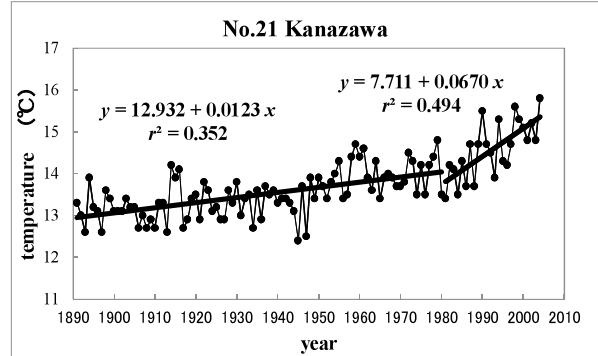


図13 金沢の気温変動と2本の回帰直線

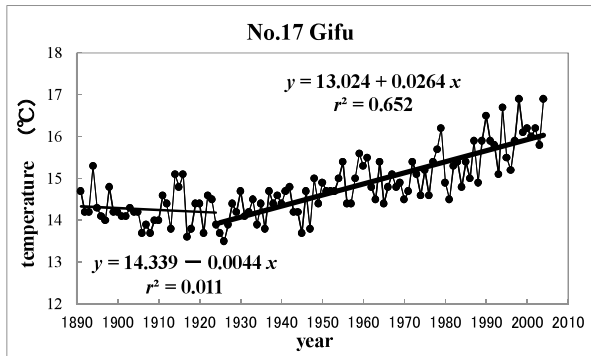


図10 岐阜の気温変動と2本の回帰直線

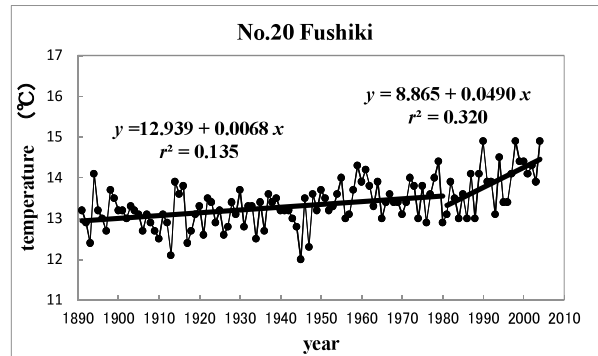


図14 伏木の気温変動と2本の回帰直線

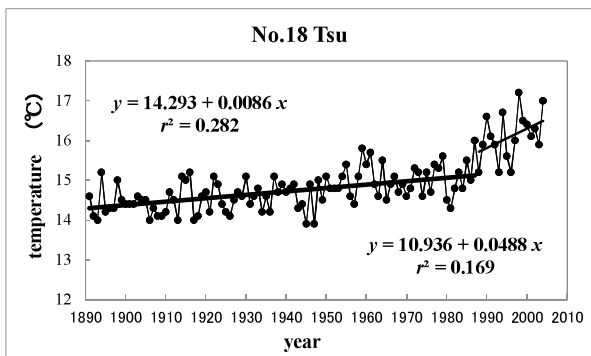


図11 津の気温変動と2本の回帰直線

(3) No.16 名古屋、No.17 岐阜と No.18 津 気候区分IV5

名古屋市は大都市（2172 千人）であり、岐阜市は中規模都市（403 千人）、津市は小都市（163 千人）である。これらの観測所の Fc 値の推移は図 8 のようになる。いずれの Fc 値も非常に大きい水準で 20 世紀のどの年次でもデータ分割ができるほどであるが、特に名古屋は非常に大きい値で推移している。名古屋と岐阜の Fc 値の変動は類似しているけれども、津はやや異なる形状で 20 世紀後半に高い Fc 値となっている。

気温変動と回帰直線は名古屋が図 9、岐阜が図 10、津が図 11 である。名古屋と岐阜は第 1 期間の気温勾配が有意でなくて回帰直線は水平の可能性

があり、津は第 2 期間の気温勾配が有意でない。名古屋と岐阜は最大 F_c 値が同じ 1924 年なので、第 2 期間の気温勾配が比較できる。それは岐阜の 0.0264 よりも名古屋の 0.0273 はわずかに大きくなっている。これらに対して、津の最大 F_c 値年は 1987 年と遅く、第 1 期の回帰直線の気温勾配は 0.0086、1 本の回帰直線の気温勾配も 0.0147 と、いずれも名古屋と岐阜の第 2 期間の気温勾配よりも小さくなっている。

(4) No.24 金沢と No.20 伏木 気候区分 I 4

金沢市は中規模都市 (456 千人) であり、伏木は高岡市 (172 千人) に所在するがむしろ地方圏域の観測所であろう。 F_c 値の推移は図 12 のとおりで、金沢が伏木を常に上回っているが、変動パターンは類似している。伏木の F_c 値が $\alpha_c=1\%$ ラインを上回るのは基本的には 1970 年代末からである。

金沢の気温変動と回帰直線は図 13、伏木のそれは図 14 のとおりである。最大 F_c 値年はともに 1980 年であり、第 1 期から気温上昇がみられるが、第 2 期ではさらに上昇している。同じ期間の気温勾配は第 1 期の金沢が 0.0123、伏木が 0.0068、第 2 期の金沢が 0.0670、伏木が 0.0490 といずれも金沢が伏木を上回っている。

(5) No.23 大阪と No.24 和歌山 気候区分 V

大阪市 (2599 千人) は神戸市などとともにメガロポリスを形成している。一方、和歌山市 (387 千人) は中規模都市である。それぞれの観測所の F_c 値の推移は図 15 のようになり、比較的高い水準である。1930 年代から 1990 年頃にかけて大阪の F_c 値が和歌山のそれらを上回り気味であるが、形状は比較的類似している。大阪の最大 F_c 値年は 1943 年、和歌山のそれは 1950 年である。

気温変動と回帰直線は大阪が図 16、和歌山が図 17 のようになる。大阪の第 1 期の回帰直線は気温勾配が 0.0096 と緩やかな気温上昇を示しているが、第 2 期の気温勾配は 0.0328 と急上昇を示している。一方、和歌山の第 1 期の気温勾配は有意ではなく回帰直線は水平の可能性があり、第 2 期においての気温勾配は 0.0213 と上昇を示しているが、大阪よりは低い上昇である。

(6) No.30 福岡、No.29 下関と No.32 厳原 気候区分 II 1

福岡市は大都市 (1341 千人) で、下関市は中小

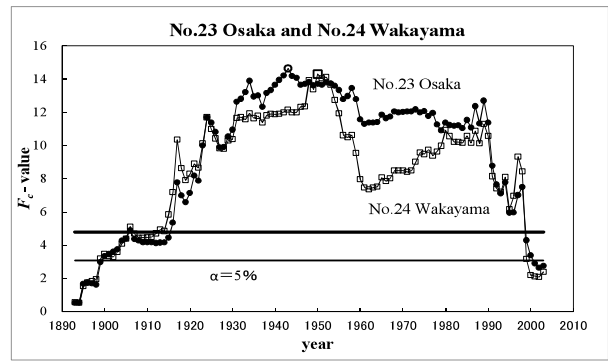


図 15 大阪と和歌山のChowの F_c 値の推移

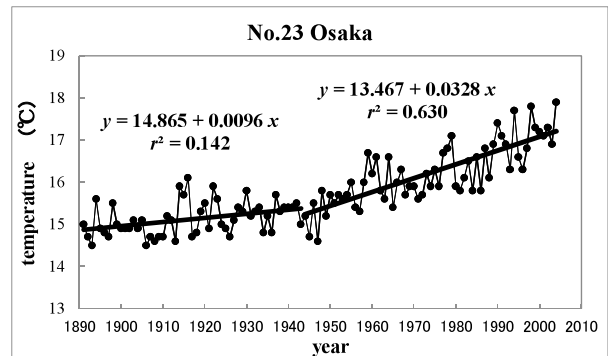


図 16 大阪の気温変動と 2 本の回帰直線

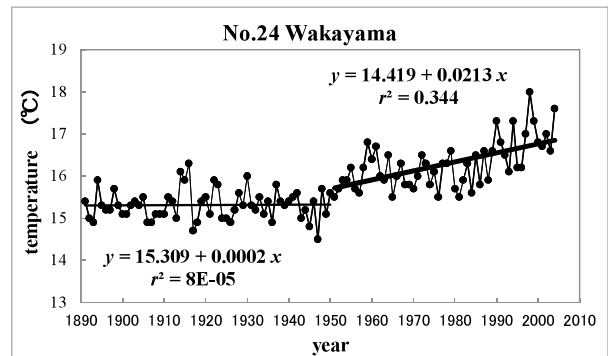


図 17 和歌山の気温変動と 2 本の回帰直線

都市 (252 千人) であり、厳原市は対馬の島々の中心的な町 (15 千人) である。図 18 のように、3 つの観測所の F_c 値の推移は形状も値の水準もかなり異なっている。下関は 1960 年代末から 1970 年代末にかけて非常に大きい値を示している。最大 F_c 値年は、福岡が 1917 年、下関が 1978 年、厳原が 1968 年である。

気温変動と回帰直線は福岡が図 19、下関が図 20、厳原が図 21 である。いずれも第 1 期の気温勾配よりも第 2 期の気温勾配の方が大きくなっている。下関と厳原は最大 F_c 値年が異なるので単純に比較できないが、第 1 期の気温勾配は下関が 0.0061 と

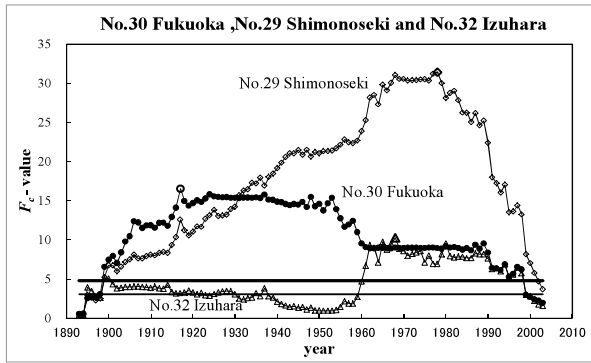


図18 福岡、下関と厳原のChowのF値の推移

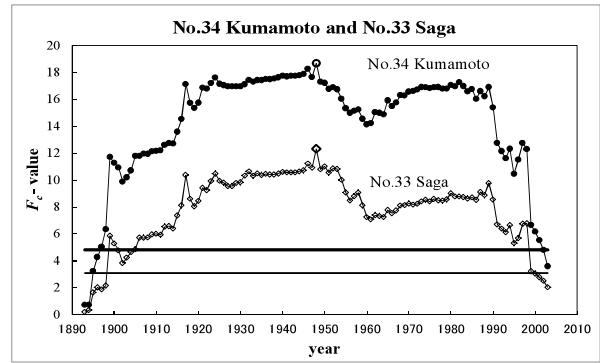


図22 熊本、佐賀のChowのF値の推移

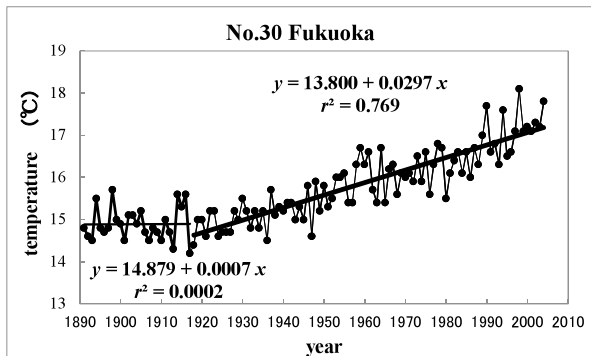


図19 福岡の気温変動と2本の回帰直線

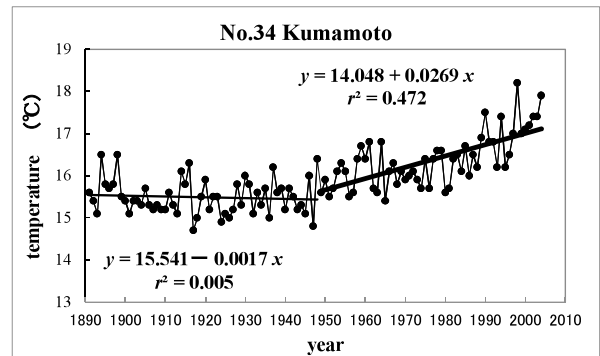


図23 熊本の気温変動と2本の回帰直線

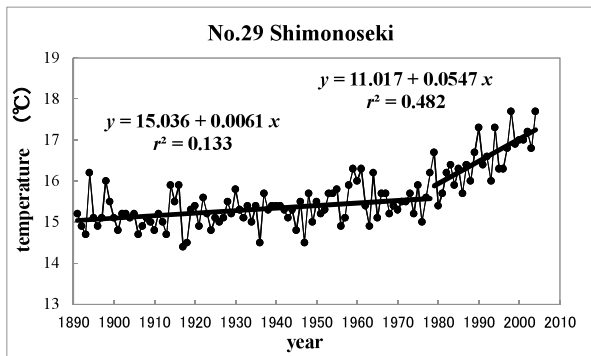


図20 下関の気温変動と2本の回帰直線

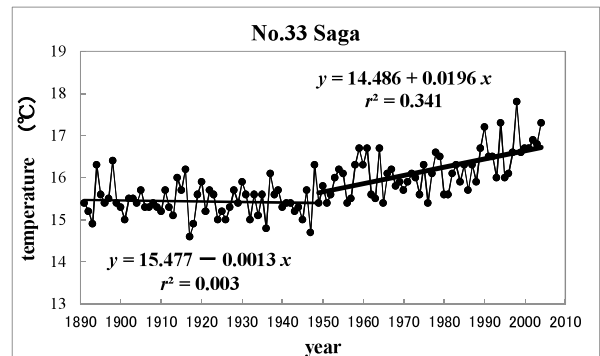


図24 佐賀の気温変動と2本の回帰直線

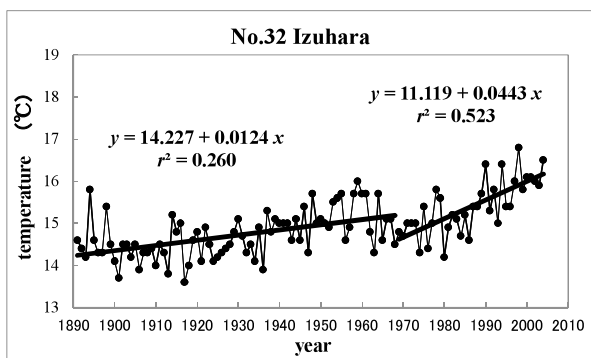


図21 厳原の気温変動と2本の回帰直線

厳原の 0.0124 より小さい値なのに対し、ともに急激な気温上昇を示す第2期では下関の気温勾配が

0.0547 と厳原の 0.0443 より大きい値を示すのは興味深いところである。

(7) No.34 熊本とNo.33 佐賀 気候区分II2

熊本市 (662 千人) はやや大きめの中規模都市であり、佐賀市 (168 千人) は小都市である。図 22 のように、両観測所の Fc 値の推移は類似しているが、熊本の値が佐賀のそれらよりも高くなっている。最大 Fc 値年はともに 1948 年である。

気温変動と回帰直線は熊本が図23、佐賀が図24である。ともに第1期の気温勾配は有意ではなく、第2期の気温勾配は比較可能で、熊本が 0.0269 と佐賀の 0.0196 を上回る気温上昇を示している。

表1 36観測点の主要結果一覧

温暖化 タイプ	観測所	気候区分	構造変化		2本の回帰直線				1本の回帰直線		行政区 人口 (千人)
			最大Fc値年	P値	第1期		第2期		気温勾配 a_1	r^2	
					気温勾配 b_1	r^2	気温勾配 c_1	r^2			
A	No.14 東京	IV 3	1909	9.4×10^{-5}	-0.0484	0.453	0.0303	0.778	0.0271	0.784	8135
	No.31 大分	VとIII 8	1948	6.4×10^{-10}	-0.0065	0.079	0.0276	0.486	0.0133	0.427	436
B	No.2 札幌	I 2	1989	0.00057	0.0200	0.600	-0.0275	0.061	0.0227	0.699	1822
	No.12 福島	IV 3	1989	0.00180	0.0180	0.323	0.0046	0.002	0.0138	0.477	291
	No.8 秋田	I 3	1989	0.00004	0.0106	0.320	0.0150	0.022	0.0145	0.502	318
	No.13 宇都宮	IV 3	1989	6.1×10^{-8}	0.0097	0.276	0.0304	0.072	0.0152	0.485	444
	No.19 新潟	I 4	1989	0.00001	0.0089	0.254	0.0186	0.029	0.0132	0.449	501
	No.11 山形*	I 3	1989	0.00001	0.0076	0.183	0.0054	0.002	0.0119	0.378	255
	No.15 長野*	I 4とIV 4	1989	0.00111	0.0075	0.176	0.0107	0.009	0.0110	0.347	360
	No.7 青森	I 3	1989	1.4×10^{-7}	0.0063	0.109	-0.0243	0.046	0.0118	0.315	298
	No.4 網走*	I 1	1989	0.00288	0.0058	0.076	-0.0221	0.023	0.0092	0.197	43
	No.25 広島	V	1989	8.1×10^{-16}	0.0052	0.105	0.1000	0.007	0.0138	0.369	1126
	No.10 石巻*	IV 3	1989	0.00521	0.0044	0.054	-0.0096	0.008	0.0075	0.176	120
	No.3 寿都*	I 2	1989	0.00664	0.0037	0.046	-0.0246	0.045	0.0061	0.141	4
	No.18 津	IV 5	1987	7.3×10^{-10}	0.0086	0.282	0.0488	0.169	0.0147	0.501	163
	No.35 宮崎*	III 8	1987	7.2×10^{-9}	0.0048	0.109	0.0422	0.189	0.0103	0.358	306
	C	No.22 京都	I 4とV	1980	0.00778	0.0240	0.691	0.0610	0.428	0.0248	0.769
No.24 金沢		I 4	1980	0.00002	0.0123	0.352	0.0670	0.494	0.0162	0.549	456
No.27 松山		V	1980	0.00001	0.0125	0.406	0.0577	0.482	0.0171	0.620	473
No.20 伏木*		I 4	1980	0.00224	0.0068	0.135	0.0490	0.320	0.0094	0.294	172
No.26 境*		I 5	1980	0.00002	0.0070	0.154	0.0618	0.491	0.0097	0.322	37
No.32 厳原		II 1	1968	0.00008	0.0124	0.260	0.0443	0.509	0.0131	0.431	15
No.29 下関		II 1	1978	1.6×10^{-11}	0.0061	0.133	0.0547	0.482	0.0151	0.497	252
D	No.23 大阪	V	1943	2.3×10^{-6}	0.0096	0.142	0.0328	0.630	0.0204	0.687	2599
	No.6 函館	I 2	1941	1.6×10^{-8}	0.0107	0.089	0.0230	0.381	0.0048	0.066	288
E	No.30 福岡	II 1	1917	5.2×10^{-7}	0.0007	0.000	0.0297	0.769	0.0229	0.732	1341
	No.1 旭川	I 2	1914	0.00732	0.0121	0.024	0.0154	0.379	0.0189	0.581	360
	No.5 根室*	IV 1	1914	0.00253	-0.0391	0.160	0.0065	0.084	0.0079	0.162	33
	No.9 宮古	IV 2	1914	0.02318	-0.0137	0.028	0.0053	0.074	0.0065	0.151	55
	No.16 名古屋	IV 5	1924	7.1×10^{-12}	0.0002	1.4×10^{-5}	0.0273	0.653	0.0135	0.395	2172
	No.17 岐阜	IV 5	1924	2.7×10^{-7}	-0.0044	0.011	0.0264	0.652	0.0170	0.558	403
	No.36 鹿児島	II 2	1948	2.8×10^{-13}	-0.0047	0.030	0.0366	0.686	0.0179	0.538	552
	No.34 熊本	II 2	1948	1.0×10^{-7}	-0.0017	0.005	0.0269	0.472	0.0146	0.482	662
	No.28 高知	III 8	1948	1.2×10^{-6}	-0.0020	0.007	0.0201	0.347	0.0145	0.501	331
	No.33 佐賀	II 2	1948	0.00001	-0.0013	0.003	0.0196	0.341	0.0119	0.429	168
No.24 和歌山	V	1950	3.0×10^{-6}	0.0002	8.2×10^{-5}	0.0213	0.344	0.0150	0.539	387	

注) 観測所名の*印: 気象庁による地球温暖化観測資料の観測所
 気温勾配
 ・ゴチック数字: $\alpha = 1\%$ で有意
 ・下線数字: $\alpha = 5\%$ で有意
 ・それ以外: $\alpha = 5\%$ で有意でない
 東京の行政区人口は特別区人口

以上のように、同じ気候区分の比較的近い距離の観測所の比較により、気候要因の影響を少なくして気温構造の変化を検討した。その結果、観測所が所在する都市規模（行政区人口）が大きいほど温暖化現象が著しいことが推測された⁹⁾。

4. 全対象結果の概観

すべての対象観測所の結果を、表1に要約する。掲載した項目は、最大Fc値年、機械的に計算した最大Fc値の有意確率P値、2本の回帰直線の第1期と第2期の気温勾配、参考として1本の回帰直線の気温勾配、気候区分、観測所が所在する西暦

2000年の行政区人口である。また、回帰直線の気温勾配は有意水準 $\alpha = 1\%$ 、 5% で有意かどうかを表示している。

表1のP値は非現実的なほど極端に小さい値が多いが、かなりの確度で気温の構造変化が生じていたとみてよい。すなわち、すべての観測所の気温変動は2本の回帰直線で表現した方が妥当となる。

各観測所は第1期と第2期の2本の回帰直線の形状により、大都市の5つのパターンに類型化して掲載した。各タイプの特徴は、次のとおりである。気温勾配の回帰係数の検定は、有意水準 $\alpha = 5\%$ を基に記述している。

タイプ A (東京タイプ) : 気温勾配はともに有意で、第 1 期は気温下降、第 2 期は気温上昇。

- ・ 東京以外は大分のみである。
- ・ 当然、第 1 期より第 2 期の気温勾配が大きくなる。
- ・ 1 本の回帰直線の気温勾配より、第 2 期の気温勾配が大きくなった。

タイプ B (札幌タイプ) : 第 1 期の気温勾配が有意で、第 2 期が有意でない。

- ・ 最も多いタイプで 14 観測所である。表では最大 Fc 値年が同年であれば、第 1 期の気温勾配が大きい順に並べた。
- ・ 最大 Fc 値年は 1989 年が 12 箇所と多く、1987 年が 2 箇所である。1980 年代末に地球規模で気温の上方ジャンプが生じたこととされる現象を反映しているものと推察される。
- ・ 観測所の位置は日本の北部地域と日本海側が多い（北海道地域、東北地域、関東地域、北陸地域）。気候区分は I と IV がほとんどであり、広島と宮崎は例外である。
- ・ すべての観測所で第 1 期に気温上昇している。最大 Fc 値が 1989 年の 12 箇所は比較可能で、広島を除くと都市規模（行政区域人口）が大きいほど気温勾配が大きい傾向がある⁽¹⁰⁾。
- ・ 1980 年代末の気温ジャンプを入れていないので、1 本の回帰直線の気温勾配より、第 1 期の気温勾配が小さくなっている。

タイプ C (京都タイプ) : 第 1 期、第 2 期ともに気温勾配が有意で、最大 Fc 値年が 1980 年付近。

- ・ このタイプに含まれる 7 箇所の観測所のうち、最大 Fc 値年が 1980 年であるのが 5 箇所、その他は 1968 年と 1978 年の 2 箇所である。
- ・ 観測所の所在地は日本海側の観測所が 6 箇所と多い。松山は例外的である。
- ・ 第 1 期の気温勾配より第 2 期の気温勾配の方が大きい。その意味で、温暖化現象が加速したといえる。
- ・ 第 2 期の気温勾配は回帰直線 1 本の気温勾配よりも大きくなっている。

タイプ D (大阪タイプ) : 第 1 期、第 2 期ともに気温勾配が有意で、最大 Fc 値年が 1940 年付近。

- ・ タイプ C との違いは最大 Fc 値年の時期のみであり、このタイプは 1940 年前半と、タイプ C

より早くなっている。

- ・ 大阪の他は函館のみであり、気温勾配の性格はタイプ C と同じである。

タイプ E (福岡タイプ) : 第 1 期の気温勾配は有意でなく、第 2 期は有意なタイプである。

- ・ 第 1 期の気温勾配で有意ではないことは回帰直線が水平の可能性もある（気温変動が定常過程であった可能性がある）ということであり、第 2 期の気温勾配はその後の温暖化現象を表現することになる。
- ・ このタイプの観測所が属する地域は 2 つに大別される。一つは最大 Fc 値年が 1914 年となる日本北部の地域であり、もう一つは日本中部地域・南部地域の太平洋側である。
- ・ 最大 Fc 値年が 1914 年の地方観測所の第 2 期の気温勾配は比較的小さく穏やかな気温上昇を示すのに対し、その他の観測所は相対的に大きい都市規模（行政区域人口）に所在するものが多く第 2 期では急激な気温上昇を示している。
- ・ 後者のタイプの第 2 期の気温勾配は、回帰直線 1 本のそれよりも大きい。すなわち、従来考えられていたよりも急激な都市温暖化現象が発生していたことになる。

全般的に概観すると、この 114 年間で地球温暖化ないし都市温暖化が進行したのは確実である。特に、タイプ B を除けば、すべて第 2 期の気温勾配が大きくなっている（タイプ B も上方へ気温ジャンプしているのだが）。また、タイプ B とタイプ E の 1914 年の最大 Fc 値年の観測所を除けば、19 箇所の観測所で 1 本の回帰直線の気温勾配よりも第 2 期の気温勾配が大きいことがわかる。さらに、第 2 期期間が短く、観測所が所在する都市規模（行政区域人口）が大きければ、第 2 期の気温勾配が大きくなる傾向が推測される。

試みに、タイプ A、タイプ C、タイプ D およびタイプ E の第 2 期の気温勾配 y を目的変数、都市人口規模（行政区域人口） x_1 と第 2 期年数 x_2 を説明変数として、重回帰分析を行うと次のようになる。回帰係数下の () 内数値は t 値である。

$$\text{重相関係数 } R = 0.898$$

$$\text{決定係数 } R^2 = 0.806$$

$$\text{自由度調整済み重相関係数 } \bar{R} = 0.887$$

$$\text{自由度調整済み決定係数 } \bar{R}^2 = 0.787$$

$$y = 0.06826 + 3.5 \times 10^{-6} x_1 - 0.00067 x_2$$

$$(15.706) \quad (3.158) \quad (-8.913)$$

自由度調整済み決定係数等のあてはまりの程度は比較的高い。観測所が所在する都市規模（行政区域人口） x_1 が大きく、第2期年数 x_2 が短いほど、第2期の気温勾配が大きくなるという符号条件を説明変数は満たしており、 t 値より推察されるようにいずれの偏回帰係数も $\alpha = 1\%$ で有意である。

一般的に言えば、都市温暖化現象は都市規模（行政区域人口）が大きく都市化の影響が大きい場合に、地球温暖化の気温上昇を上回る気温上昇である⁽¹¹⁾。すなわち、日本における都市温暖化現象は、地理的・気候的規定を受けるものの、概ね第2期になって急激に気温上昇したものと推測される。

本研究では直接的に都市温暖化現象の原因を探るものではないが、都市温暖化現象の原因を究明することは非常に興味深く、対策上も極めて重要である。ここでは包括的観点から常識的ではあるが、次の事柄を指摘するにとどめる。

すなわち、第1に、日本における多くの中規模以上の諸都市が第2次世界大戦の戦争災害によって焦土と化したこと（1945年頃）、1950年代からの人口増加、土地利用の変化、エネルギー消費と排熱量の増加等々といった都市化が進展したこと、これらから戦後の急激な都市化が原因となって、急激な都市温暖化現象を招来したと推測することができよう。

第2に、人口増加は総合指標であって、土地利用の変化、エネルギー消費量という物理的变化をもたらす都市化現象がより本質的影響を都市温暖化現象に与えている可能性が推測できることである。なぜならば、近年、中規模都市では実質的都市人口だけでなく行政区域の都市人口も減少に転じている都市が少なくないと推測される一方、気温上昇は続いているからである。

5. おわりに

本研究の主要結果は、次のとおりである。

第1に、Chow testにより、対象とした36観測所すべての気温変動は、極めて高い確度で、1本の回帰直線式よりも2本の回帰直線式で表現する

方が妥当と判定された。

第2に、同じ気候区分で比較的近距离に位置する観測所の比較検討より、観測所が所在する都市規模（行政区域人口）が大きいほど温暖化現象が著しいことが析出された。

第3に、気温の構造変化を分類したところ、多くの大都市や中規模都市では、対象期間の第2期つまり後半になって急激に気温上昇したことが判明した。

これらにより、日本における都市部の温暖化現象は、地理的・気候的要因の規定を受けるものの、観測所の所在する都市の都市化現象の影響を強く受けているものと推察される。

今後の課題は、統計的アプローチに限定しても、少なくない。まずは日平均気温だけでなく、日最低気温・日最高気温データを対象に分析することにより気温構造を検討することであり、次いで都市温暖化現象と都市規模の関係をより詳細に検討するためには、対象期間が短くなるという欠点も生じるものの、対象観測所数を増加させることである。

なお、繰り返し記述しているように、本研究は都市気温に関する時系列データを統計的に検討するだけで、都市気温の構造変化の原因を探るものではない。都市気温の変化ないし構造変化と都市化過程の関連に関する研究は、次の段階の大きな研究課題といえるが、多重共線性の発生などにより統計的手法の適用はよほどの工夫がない限り困難と予想され、むしろ物理モデルなど別のアプローチが必要になるものと推察される。

ただ、物理モデルを用いて都市気温と都市化過程の関連を検討するにしても、都市気温変化現象の構造的把握がその前提として不可欠となろう。

謝辞

本研究はエコデザイン学科田代研究室の卒業研究が基になっている。平成17年度卒の西山博晃君、平成18年度卒の川口大介君、藤本一精君、藤山達郎君、本田竜君、平成23年度卒の須藤徹君、藤田幸利君の卒業研究である。膨大な基礎作業を行ってくれた諸君に、記して謝する次第である。

工学部宇宙航空システム工学科の橋本毅教授、建築学科の村田泰孝准教授からは貴重なご意見を多数いただいた。感謝の意を表します。

【補論】 地球温暖化観測点の構造変化と寄与率について

1. はじめに

わが国における地球温暖化の観測資料として、気象庁 HP は「都市化の影響は受けているものの比較的影響が少ない」17 観測点を挙げている。この 17 観測点の日平均気温データを対象に、17 観測点の平均気温の直線回帰式の気温勾配項の各 17 観測点寄与率への分解、Chow test による構造変化の有無を検討する。ただし対象期間はデータが完備する 1901~2010 年の 110 年間である。

2. 対象観測点平均気温の 110 年間の寄与率分解

気象庁が挙げる観測点は、網走・根室・寿都（北海道）、山形、石巻（宮城）、伏木（富山）、長野・飯田（富山）、水戸（茨城）、銚子（千葉）、境（鳥取）、浜田（島根）、彦根（滋賀）、宮崎、多度津（香川）、名瀬（鹿児島）、石垣島（沖縄）の 17 地点である。この 17 観測点の日平均気温（年次データ）の観測点平均の 110 年間の推移は、図 i のように示される。17 観測点平均は実態の意味を持たないが、操作的概念として取り扱うことができよう。

図 i には 110 年間の全期間を 1 本で当てはめた回帰直線を示しているが、この回帰直線は次式となる。

$$1901\sim 2010\text{年} \quad r=0.693 \quad r^2=0.481 \quad DW=1.73$$

$$y_t = 12.791 + 0.0119 x_t \quad (i)$$

(168.7) (9.998)

ここに、 y_t は 17 観測点平均気温、 x_t は計算開始年を 1 とした年次、 r は相関係数、 r^2 は決定係数、DW はダービン・ワトソン比、() 内数値は t 値である。式(i)の気温勾配項は有意水準 1% で有意である。ここで、式(i)の気温勾配を各観測地点の寄与率

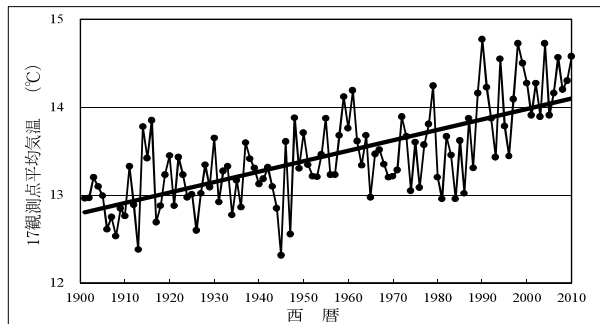


図 i 1901—2010 年の 17 観測地点平均気温

に、次式のように分解する⁽¹²⁾。

$$C_k = \beta_k / \beta_m \quad (ii)$$

ここに、 C_k は観測点 k の寄与率、 β_k は k の回帰直線の気温勾配、 β_m は 17 観測点平均の回帰直線の気温勾配である。

観測点別の寄与率は、図 ii のようになる。17 観測点の気温勾配はいずれも正であり、有意水準 1% で有意である。図には全観測点が一樣に気温上昇に寄与した場合の 5.9% の線も示している。この図では寿都の寄与の低さが目立つが、根室、石巻も低く、山形、彦根、宮崎等の都市的観測点の寄与がやや高いものの、全般的には地理的差異や都市的差異等の明白な傾向は認められないようである。

3. 構造変化の検出と寄与率分解

17 観測点平均の気温変動について、Chow test を用いて構造変化の有無を検討する。Chow の F 値の対象期間における推移は、図 iii のようになる。1903~1960 年頃までは低い値で推移しているが、1960 年代から上昇を示して高い水準を維持した後、2000 年頃から低下している。有意水準 $\alpha_c=5\%$ の F 値が 3.082、 $\alpha_c=1\%$ の F 値が 4.811 なので、1960 年代後半から 2000 年頃にかけて構造変化が生じていたものとみなすことができる。

2 本の回帰直線を明示するため、機械的に最大の Fc 値を示す 1989 年でデータを分割すると（有意確率 P 値は 0.0001）、図 iv の回帰直線で表現され、次式となる。

$$1901\sim 1989\text{年} \quad r=0.472 \quad r^2=0.223 \quad DW=2.00$$

$$y_t = 12.935 + 0.0075 x_t \quad (iii)$$

(166.4) (5.000)

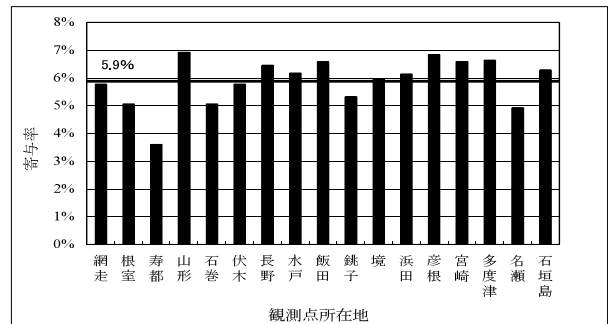


図 ii 1901—2010 年気温上昇の観測点寄与率

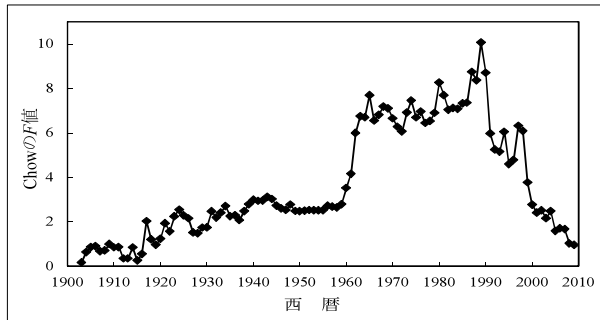


図 iii Chow の F_c 値の推移

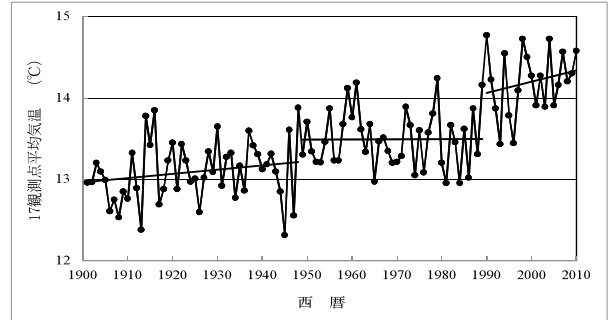


図 vi Chow test による 3 本の回帰直線

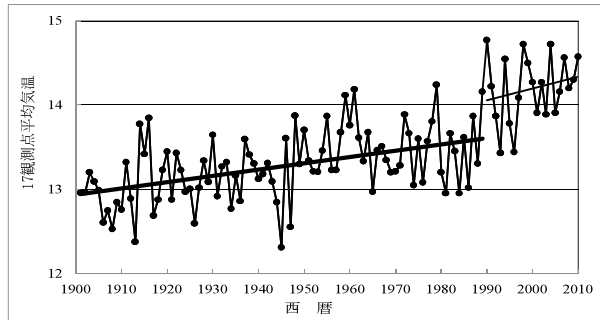
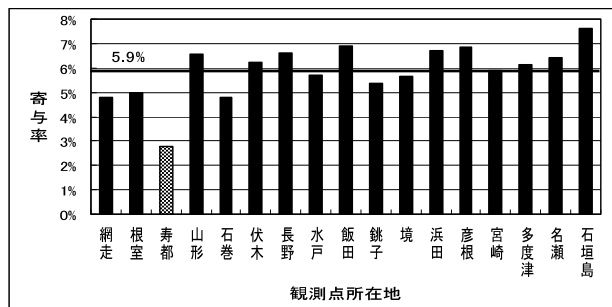


図 iv Chow test による 2 本の回帰直線



注) 寿都の気温勾配は $\alpha=5\%$ でも有意でないが、寄与率総和を 100% とするため形式的に表示。

図 v Chow test 前半 (1901-1989) の寄与率

1990~2010年 $r=0.217$ $r^2=0.047$ $DW=1.93$

$$y_t = 14.045 + 0.0138x_t \quad (iv)$$

(168.7) (9.998)

注意されるのは、式(iii)の気温勾配は $\alpha=1\%$ でも有意であるのに対し、式(iv)では $\alpha=5\%$ でも有意でないことである。すなわち図ivのように1901~1989年間では緩やかな気温上昇を続けた後、1989~1990年でジャンプし、1990年以降は気温勾配が0の水平な直線の可能性があることになる。

図vは分割データ前半部(1901~1989年)の各観測点の寄与率である。これも北海道・東北地方の観測所の寄与が相対的に低いが、地理的・都市的差異の明白な傾向は認められないようである。

4. 2段階 Chow test

図ivを観察すると、1989年以前も幾つかに区分されるようにもみえる。そこで1901~1989年の期間に2段階Chow testを実施すると、最大 F_c 値の1948年の F_c 値は3.147と小さいが (P 値は0.048)、回帰直線式は次式に分割される。

1901~1948年 $r=0.196$ $r^2=0.038$ $DW=2.17$

$$y_t = 12.963 + 0.0052x_t \quad (v)$$

(120.8) (1.357)

1949~1989年 $r=0.006$ $r^2=0.00003$ $DW=1.93$

$$y_t = 13.484 + 0.0002x_t \quad (vi)$$

(119.6) (0.036)

ここでも、相関係数、 t 値から推察されるように、式(v)、式(vi)のいずれも気温勾配は $\alpha=5\%$ で有意とならない。式(v)、式(vi)、式(iv)の回帰直線を図viに示すが、いずれも水平の可能性がある。

すなわち、本データ期間と手法を前提にすれば、Chow test の有意水準を $\alpha_c=1\%$ にとるならば図ivのように継続的に気温上昇した後に上方ジャンプしたことになるし、 $\alpha_c=5\%$ にとるならば図viのように地球温暖化は継続的に上昇したのではなく、2段階の上方ジャンプによるものとなる。

5. おわりに

わが国の地球温暖化を回帰直線で表現するとすれば、Chow test の見地からは、1本の回帰直線よりも2本以上で表現する方が妥当といえる。また、各観測地点の寄与率からは、地理的差異や都市的差異等の明白な傾向は認められないようであり、その意味でのマクロの見地からは17観測点がわが国の地球温暖化傾向を表現するとみなすのも、一応、妥当かもしれない。ただし、各観測点のミクロなデータの吟味等は大きな課題である。

注

- (1) 本研究で用いる Chow Test の概要や東京、札幌、京都、大阪、福岡の大都市圏所在の観測所の Chow の F 値の推移図、気温変動と 2 本の回帰直線による表現は、文献 15) の第 2 章、第 3 章を参照されたい。
- (2) 後述の図 1。日本列島は周囲を海に囲まれ、北東部から南西部へかけての緩やかな弓状の列島であり、また、列島中央部に山地が走るため、各地域の気候は多様で複雑である。このため、様々な気候区分図が提案されている。図 1 は一般によく使用される関口武の気候区分図を基に 18)~19)、簡略化して作図したものである。原図には遷移領域が設けられており、京都、長野、大分は遷移領域に入るが、図 1 では簡略化した。
- (3) 地球温暖化の観測資料として、気象庁は「都市化の影響は受けているものの比較的影響が少ない」17 観測所の気温変動を挙げている。そのなかで、本研究の対象観測所は寿都、網走、根室、石巻、山形、長野、伏木、境、宮崎の 9 地点である。対象期間を 1901 年以降とすれば 17 観測所すべてのデータが得られるので、補論では 1901~2010 年を対象としている。
- (4) 114 年間の気温データの吟味は、難しい問題である。気象庁ホームページの年次データには、観測所の移設や使用機器の変更等によりデータが不連続となる年次が示されている。

本研究では簡単にデータの吟味を行っている。まず、不連続となる年次付近に最大 Fc 値年が来る箇所を調べたところ、そのような箇所は函館と広島のみであった(共に 2 年の違い)。次に、データ不連続の影響は一定誤差になるものと想定して、幾つかの観測所の不連続年の前後のデータについてダミー変数を用いた重回帰分析を実施した。その結果は、有意水準 $\alpha=5\%$ の下では「ダミー変数の係数が 0」の帰無仮説は棄却されなくなった(ただし上記の函館と広島では最大 Fc 値年と不連続年は区別ができなかった)。データ不連続の影響があったとしても、統計的には検出されない程度であろうと推測される。ただ、このような検定はすべての観測所のすべての不連続点について実施する必要があり、検定手法も工夫する余地がある。

しかし、もっと深刻な問題は、使用観測機器の変更だけでなく、1 日における観測回数などの観測方法、観測機器周囲の状況などの影響の大きさと補正の必要性が指摘されていることである²⁰⁾。このような細部にわたる検討を主な観測所だけでも長期的に実施することは、気象庁などが組織的に行わなければ実質的に不可能であろう。もともと、いまとなっては、そのような記録はもはや存在しないかもしれない。

- (5) 前述の注(2)。文献 18) は社会・地理の教科書で多く採用されている気候区分の原典である。
- (6) ここでの同一気候区分内での都市間比較は、ある程度限定的な比較の例示である。図 1 を機械的に組み合わせれば他の比較も考えられるが、東京と宇都宮のように最大 Fc 値年が異なって比較しにくい都市間比較も行っていない。気候区分はマクロな区分であり、ミクロな条件は考慮していない。臨海部や内陸部等々の各都市の地理的位置や地形条件はもちろん、地図や航空写真によれば、単一中心都市的、多核都市的、分散型都市など都市形態・土地利用形態は様々であり、周辺の背後地も様々である。ヒートアイランド研究における物理モデル等を適用して、各都市の温暖化現象を具体的かつ長期的に検討する際には、ミクロな条件はもちろん、各観測所が所在する都市実態の成長過程と衰退過程を追跡する必要がある。
- (7) 都市規模を表現する単一指標としての利便性から、行政区域人口を挙げたにすぎない。なぜならば、現在の行政区域人口は必ずしも都市規模を表すとは限らないことに注意する必要があるからである。1950 年代以降、日本の中規模以上の都市は域外からの人口流入と合併を繰り返して行政区人口の増加と空間領域が拡大した例が多い。政府が主導した合併でも昭和の大合併(1953-1956 年)、平成の大合併(1999-2010 年)があり、その間でも多くの都市では周辺市町村と合併を繰り返して現在に至っている。
- (8) すべての観測所で「構造変化あり」と判定されるので、回帰直線のためのデータ分割は、第 1 期が 1891 年~最大 Fc 値年、第 2 期がその次年(構造変化年)~2004 年となる。回帰直線の年次項 x_t は 1891 年を $x=1$ とする自然数とした。

したがって、第1期、第2期ともに定数項は1890年での切片を表すが、当然、本質的なのは気温勾配項である。回帰直線の回帰係数については、回帰係数が0という帰無仮説を有意水準 $\alpha=5\%$ を基に検定を行っている。

(9) Chowの F 値の推移図は観測所によって様々なタイプがあるけれども、共通する場合もある。日本の北部地域では低い水準で類似した形状を示す傾向があり、南部地域では高い水準で別の類似した形状を示す傾向があるなどである。一般的に、気温が低く気温変動が小さい地方観測所で小さく、気温が高く気温変動が大きい南部地域や大都市部で大きいという印象を受けるが、統計的に確かなことは不明である。したがって、本研究ではChowの F 値の解釈は定義どおりの形式的意味のみと考える。

ところで、理由は明らかでないが、Chowの F 値の変動には興味深い性質がみられる。すなわち、直接的な気温変動の分析からは得られない観測所データの性格が、Chowの F 値の変動を整理することで得られる可能性があることである。金融工学のE-V分析にならって、各観測所

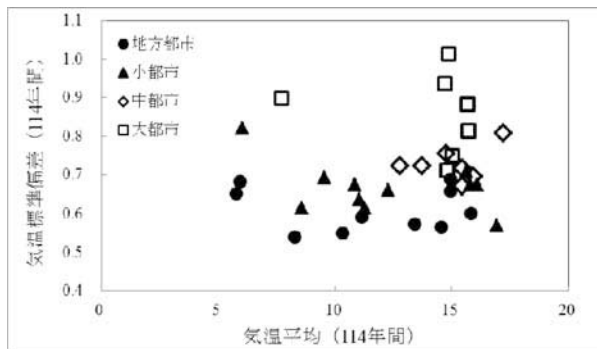
の気温変動の平均と標準偏差を散布図に描けば図Aのようなになる。各点は広く散布してほとんど無相関で(決定係数 $r^2=0.021$ 、相関係数 $r=0.145$)、気温変動では一貫した関係は認められないことになる。図の各点は便宜的に大都市(人口100万人以上)、中都市(40万人~100万人)、小都市(20万~40万人)、地方都市(20万人以下)に分類しているが、気温の標準偏差により大中規模都市の観測所と小規模・地方都市の観測所が分離しているようにもみえる。

一方、Chowの F 値の平均と標準偏差の散布図は図Bのようなになる。各観測所の値は直線的に散布して全体として非常に高い相関を示している(決定係数 $r^2=0.821$ 、相関係数 $r=0.906$)。図BのChowの F 値の散布はあたかも何らかの‘線形的構造’を有しているようにもみえる。また、原点近くでは地方観測所と小都市観測所が集中し、大中規模の都市観測所は右上方向に散布している。特に原点付近は京都・札幌以外は地方観測所が集中しているが、京都・札幌と他の地方観測所とは気温勾配で区別することができる。

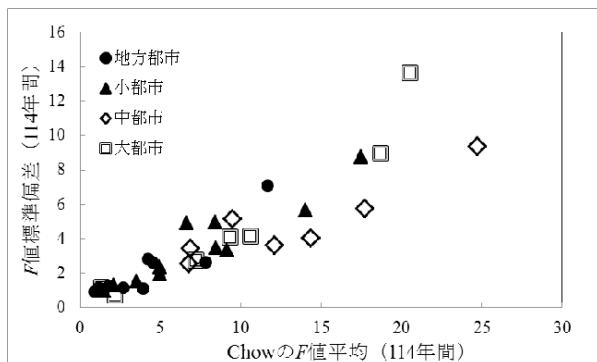
このような傾向が一般的に観察されるかどうかは、観測所の数をさらに増加させて検討する必要がある。なぜならば、本研究の対象観測所の所在地は日本北部では地方都市・小都市が多く、南部では中都市・大都市が多いからである。

(10) 広島を含めれば、都市規模(行政区域人口)と第1期の気温勾配の決定係数 $r^2=0.335$ 、相関係数 $r=0.579$ 、広島を除外すれば決定係数 $r^2=0.571$ 、相関係数 $r=0.775$ である。

(11) もちろんこれは一般的・概念的な記述であって、地球温暖化現象と都市温暖化現象を測定値から推定することは容易ではない。地球規模の地球温暖化現象は地域的な差異も大きく(補論は日本における状況の検討である)、また、地球温暖化現象と都市温暖化現象を各観測所の測定値から分離して推定することも容易ではない。文献7)で示したように、都市人口等の都市化指標は年次との相関が非常に高く、多重共線性が発生するからである(都市化指標を人口以外に求めても同様であろう。‘都市化’とは何らかの指標の絶えざる増加ないし減少であるから)。



図A 114年間の気温平均と標準偏差



図B Chowの F 値の平均と標準偏差

なお、諸学会で最も多い質問が、①本研究での温暖化現象の「原因」に関してと、②Chowの F 値の「解釈・性質」に関して、である。いささか蛇足ながら、①についてはこの注釈と本文の次の段落での一般的指摘、②については注釈(9)を付した次第である。

(12) 回帰直線の分解による寄与率算出については、文献11)を参照されたい。そこでは年平均気温の回帰直線を各月別平均気温の回帰直線に分解して寄与率を算出したが、ここでは17観測所平均の回帰直線を各観測所の回帰直線に分解して寄与率を算出している。

参考文献

- 1) 仲村穰次、田代敬大「Chow testによる熊本市気温変動の構造変化の検出について」土木学会西部支部研究発表会講演概要集(平成17年度)、平成18年3月
- 2) 宮西隼矢、田代敬大「気温構造変化の都市間比較について」土木学会西部支部研究発表会講演概要集(平成17年度)、平成18年3月
- 3) 小島周太、田代敬大「大都市における観測開始以降の気温変動の構造変化について」土木学会西部支部研究発表会講演概要集(平成17年度)、平成18年3月
- 4) 西山博晃、田代敬大「気温変動の年次回帰直線の月別分解と寄与について」土木学会西部支部研究発表会講演概要集(平成17年度)、平成18年3月
- 5) 藤山達郎、田代敬大「地方観測所の気温構造の変化について」土木学会西部支部研究発表会講演概要集(平成18年度)、平成19年3月
- 6) 本田竜、田代敬大「中規模都市の平均気温構造の変化について」土木学会西部支部研究発表会講演概要集(平成18年度)、平成19年3月
- 7) 北村善人、田代敬大「都市人口・時間項による熊本平均気温の重回帰分析とChow testについて」土木学会西部支部研究発表会講演概要集(平成19年度)、平成20年3月
- 8) 内山周太、田代敬大「HPフィルターによる平均気温の構造変化の検出について」土木学会西部支部研究発表会講演概要集(平成19年度)、平成20年3月
- 9) 藤田幸利、須藤徹、田代敬大「追加データを考慮した長期気温変動の構造変化について」土木学会西部支部研究発表会講演概要集(平成23年度)、平成24年3月
- 10) 須藤徹、藤田幸利、田代敬大「地球温暖化観測点の構造変化と寄与率について」土木学会西部支部研究発表会講演概要集(平成23年度)、平成24年3月
- 11) 田代敬大「熊本市の長期気温変化についてー日本における長期気温データの統計的研究(その1)ー」崇城大学紀要第37巻第1号、平成24年3月
- 12) 田代敬大、上野賢仁、森山総之、片山哲朗「九州主要都市の長期気温変化についてー日本における長期気温データの統計的研究(その2)ー」崇城大学紀要第37巻第1号、平成24年3月
- 13) T.Tashiro, T.Ueno, "On Structural Change of Urban Temperature in Japan," *7th Japanese German Meeting on Urban Climatology*, 1914 Oct.
- 14) T.Tashiro, T.Ueno, "A Study on Structural Changes of Urban Air Temperature in Japan - Data for 114 Years of 1891-2004 at 36 Observatories -," *Journal of Heat Island Institute International* Vol. 9-2 (2014), 1915 Feb.
- 15) 田代敬大、上野賢仁「大都市における都市気温の構造変化に関する研究ー36観測所1891-2004の114年間データに基づいて(1)ー」崇城大学紀要第41巻第1号、平成28年3月
- 16) 気象庁HP掲載データ、
<http://www.data.jma.go.jp/>
- 17) 総務省統計局「国勢調査」、2000年
- 18) 関口武「日本の気候区分」東京教育大学地理学研究報告、(3)、1959年
- 19) 吉野正敏「生気候による日本の地域区分」地球環境 Vol.8 No.2、2003年
- 20) 近藤正純「M41. 日本のバックグラウンド温暖化量と都市昇温」
www.asahi-net.or.jp/~rk7j-kndu/