

日本列島における大規模昇温とその発生要因

田上 善夫

Large-scale temperature rise in the Japanese Islands and its generation factor

Yoshio TAGAMI

E-mail: tagami@edu.u-toyama.ac.jp

Abstract

In this study, the large-scale temperature rise in the Japanese Islands was taken up. The daily values of AMeDAS in 2004 were used for data. Large-scale temperature rise was defined as the case when the deviation from the normal of the daily maximum temperature is 10°C or more. First of all, the region and the season of large-scale temperature rise were clarified. Then, the generation was analyzed. The results are as follows. 1) Large-scale temperature rise occurs mainly in the Sea of Japan coast from San-in to Tohoku. A lot of generations are also seen in Pacific coast and the Okhotsk coast from Kanto to Hokkaido. Many appear in spring. 2) Large-scale temperature rise starts from West Japan, and shifts to East Japan. Moreover, it starts from the inland, and shifts to the coast. Before and after the generation of a large-scale temperature rise, the anticyclone advances toward the east around Japanese Islands. When the Japanese Islands are covered with the anticyclone, warm air is formed in the inland. The warm air is carried to the leeward coast by the southerly wind on the west side of the anticyclone. This wind blocks the invasion of a cool sea breeze, and promotes the temperature rise.

キーワード：昇温，フェーン，暖気，強風

keywords：temperature rise, foehn, warm air, strong wind

I 昇温とフェーン現象

1. フェーン現象について

富山ではとくに春から夏にかけて、強い南風にもなると高温となり、これをさしてフェーン現象による昇温などということがある。富山に限らず全国各地に、類似の現象が現れる。それらは、フェーンのような、あるいはフェーンとみられる、といった表現がされることが多い。

フェーンと明確によばないのは、フェーン自体が、ヨーロッパアルプス北側に吹く局地風であることにもよる。また高温の出現が多様であって、模式的なフェーン現象の説明とは異なることが多いことも、その理由と考えられる。

フェーン現象は、よく知られているように、湿った気流が山の斜面を雨を降らせながら上昇するときに、湿潤断熱減率0.5°C/100mに従って降温し、山頂を越えて下降するときに、乾燥断熱減率1.0°C/100mに従って昇温するため、風下側でより高温となる、と説明される。

ただし風上側で降水がなくても、山頂付近では平

均的な気温減率0.6°C/100mに従って低温であり、これが風下側で下降気流となると1.0°C/100mで昇温するので、風下側の方はやはり高温となる。前者は熱力学的な湿ったフェーン、後者は力学的な乾いたフェーン、とよばれている。

いずれにせよ実際には、気流の経路は複雑であり、また多数の稜線の昇降が繰り返される。そのため、先述の断熱減率の計算を、観測値にそのまま適用することはできない。これらにより、昇温についてフェーンによる、と説明することを困難にしている。現在なお富山をはじめ、全国各地の類似現象について、以下のように多くの研究が進められている。

2. 高温・乾燥・強風とフェーンの効果

まずフェーンの出現の多い富山について、解析されている。富山でのフェーンを1976～2007年について抽出すると、64例があり、そのうち35例で台風との関与がみられたという。そのとき850hPaにはPacific-Japanパターンの波列がみられ、台風が定在ロスビー波の励起を介して、日本の東方の高気

圧を強化・持続させる。台風は高気圧の西縁を進み、東西の気圧傾度が高まって南寄りの強い地衡風の中で、フェーンが発生する。また、WRFモデルでは高温位空気塊の下降がみられる(柴田有紀子, 川村隆一, 初鹿宏壮, 2009)。

ここでは日最高気温 33°C 以上, 日最小湿度 45% 以下, 日平均風速 3m/s 以上, 風向SE~SSWが12時間以上の場合を対象としている。すなわち高温乾燥をもたらす強風の出現には, 同風向の地衡風が強まる場合が対応し, それは太平洋高気圧が強くて台風が迂回するようないきあたるとみられる。またモデルにより, 台風通過にともなう下降流が再現されることから, フェーン現象が起きているとみられる。

このように高温乾燥の出現には, 台風を背景としたフェーンが大きく影響している。ただし高温乾燥は, 盛夏に太平洋高気圧に覆われたときにも現れ, 強風は必ずしも伴わない。またフェーンにより昇温しても, 寒候期であれば必ずしも高温とはならない。このため, 高温, 乾燥, 強風と, フェーン現象とのかかわりに不明な点も残る。

3. 一時的昇温・強風とフェーンの効果

全国について急昇温した場合を抽出し, フェーン現象とのかかわりが, 解析されている。気温と風速が急増することは海岸付近で多く, 北海道では冬の東進する低気圧のとき, 日本海側では春から秋の日本海低気圧のときにあたる。富山では7~9月の高温のときには風速, 湿数が高く, フェーン現象と推測される。解像度 10km の地域気候モデルJMA-NHMでは, 南風が中部山岳の風下で強風となり, 高温位の気塊が下りてくる(石崎紀子, 高藪出, 2008)。

ここでは気象官署の2002年の1時間値にもとづいた, 同時刻の前後10日の計21日間の平均からの偏差を求め, 気温偏差 5K 以上で風速偏差が 3m/s 以上の場合が抽出されている。また南寄りの風に伴う昇温について, モデルによりフェーンの可能性が示されている。

ここでは21日間の移動平均からの偏差がとられているため, 比較的短周期の現象であるフェーンが抽出されやすいと考えられる。相対的な高温・強風は, 低気圧の通過に伴うことが指摘されているが, 低気圧通過であれば暖域内では高温となり, かつ強風となるものと理解される。

また海岸付近に多いことが指摘されているが, フェーン現象には地形がかかわり, とくに気流が山地を越えた風下側山麓で明瞭になるため, それ以外に海陸分布が要因となることが考えられる。すなわち海陸で温度差が大きい場合には, 海陸方向で風向の変化に伴い, 昇温・強風となる可能性が考えられる。北海道では冬に多くなるのは, 冬季に内陸が低温となり, また大陸からの北西季節風が日本海の幅が本州付近よりも狭いために低温のまま吹きつけるところに, 低気圧に伴って暖かな南風で昇温することが考えられる。すなわち一時的昇温・強風は, 季節や地域によっては, 海から吹きこむ風によりもたらされる場合も考えられ, これらはフェーン現象をとまわらない。

ところで後述のように, 月平均気温の年間偏差は $\pm 3^{\circ}\text{C}$ にも達するが, 21日間の移動平均とした場合, 寒冷な月も温暖な月にも, その間の相対的な昇温, 強風が対象となる。ただし, フェーンとよばれる現象が出現した場合, その月, さらにその季節は一般に温暖である。このことはフェーンに関しての現象と認識にずれがあるか, あるいはフェーン自体が短時間内での現象ではない可能性を含んでいる。

4. 異常昇温の継続とフェーン

日本海側の酒田では, 2004年8月に台風15号が通過したが, 同月19日に南東風が卓越して14時に酒田で 33.4°C を記録した。20日1~2時に南寄りの風が変わると特徴的な昇温が現れ, 日中の南東風, 夜間の南風などとともにフェーンであったとみられている(佐々木華織, 2005)。

このように, 高温で強風の期間に現れる異常な昇温はフェーンとみられるが, それらの継続時間は短く, フェーンの出現は特定の条件下に限定される可能性がある。

一方, 1998年5月1~2日には, 富山でフェーンが長時間持続したとされる。領域気候モデルNHRCMで, 1日と2日の12時を初期時刻として, 富山から放出した粒子の後方流線解析がされた。1日は降水がなく, 静的エネルギー(SE), 湿潤静的エネルギー(MSE)ともに, 6時間前以降は上昇し, 放射による加熱が気温の上昇に寄与している。2日は風上斜面に降水があり, SEは増加するがMSEは変化がなく, 潜熱が解放され湿潤断熱変化により気温が上昇したとされる(石崎紀子, 高藪出, 2009)。

この2日の場合には、気温上昇にはフェーンによる昇温効果が再現される。一方、1日のようにフェーンの昇温効果がなくても気温は上昇する。このように昇温にしても、フェーンのみならず放射も寄与しており、フェーンを理解を複雑にしている。

5. 昇温とフェーン以外の要因

風が山を越えても昇温せず、反対に山を越えなくても昇温することがある。

宮城県では風速13m/s以上の強風は、12~4月の9~15時に集中し、多くは北西~北風という。また昼と夜では違いがある。昼型では奥羽山脈の標高に等しい850hPa付近に逆転層が認められ、強風の吹き始める9時直後に昇温して、日没以降は強風がおさまる。夜型では925hPa付近に逆転層が認められ、顕著な温度傾度はみられない(五十嵐咲恵・中西幹郎, 2009)。

昼の場合、フェーン現象をとまなう熱対流混合風とみられている。ただし昇温には放射の影響があり、奥羽山脈の風上側と風下側の温度傾度は、冬季の日本海側と太平洋側での天候の影響が考えられる。夜には顕著な温度傾度がなく、フェーン現象はないと考えられているが、フェーン現象の昼のみの発生理由は明らかでない。

一方、冬季の急昇温へのフェーンの影響が解析されている。南岸低気圧の通過後に北西風となり、気温、湿度、風速が前橋で14時、熊谷で16時、東京で21時に急変し、フェーンによる昇温が南東に伝わったとされる。気象庁MSMデータとOISSTデータを用いて、領域気象モデルWRFで再現すると、北西風の収束域に高温域があり、日本海側に降水域があることから、熱力学的フェーンの可能性が指摘されている(渡来 靖, 2009)。

日本海側の湿った気流が山越えし、フェーン現象をとまなう関東平野に昇温をもたらすとき、南岸低気圧の影響範囲が関東平野南部中心であれば、日中に関東平野北部に放射により暖気が涵養されて、移流により東京まで達して昇温することも可能である。

6. フェーンによる昇温説明の問題点

上述のように、風上側よりも風下側で高温となる場合、モデルによる再現でもフェーン現象が認められることは多い。ただし、なんらかの原因で風上側

には冷気が、風下側に暖気が侵入あるいは涵養されると、フェーンのような山越えによる断熱降温・昇温が無くても、同様の状態になることがある。

これらはフェーンの解析を主な目的としているので、高温・乾燥・強風の場合に、モデルでもフェーン現象が認められる。しかし先述のように、昇温した場合にもフェーンを伴わないことがある。一方でフェーンが発生する条件下でも、昇温がみられないことがある。これらは、主にそれ以前に涵養された冷氣塊、暖気塊の影響が大きいことが考えられる。そのためここでは、顕著な昇温事例からみていくことにする。

顕著な高温を記録した2004年は、全年にわたり月平均気温が平年を上回り、寒候期にも季節外れの暖かき日が頻発した。この高温は全国的に出現しており、大規模な循環の影響を受けている。

さらに高温には顕著な出現域があり、山岳地形の影響も強く現れている。多くは風上側から風下側に気温偏差が増大しており、フェーンの影響がみられるが、高温の発現日時と地域は複雑である。

これには風上側の大気状態、気流の経路の地形、風下側でも前日までの地表の温度状態などの差異が、複合して昇温に影響している。こうした不時昇温における、とくにフェーンの影響について、全国規模での解明を試みる。

II 近年の気温変動と昇温の解析方法

1. 富山の気温の変動

観測開始以来の年ごとの変動

気温の経年変化について、富山県で観測開始の最も古い伏木は1886年以降、また富山では1939年以降のものを知ることができる。11年移動平均からは、伏木では1950年ころから上昇がみられ、1965年から1985の間はやや低かったが、それ以降は急速に上昇している(図1)。伏木、富山ともに、1945年が最も低くて12.0℃まで下降したが、1961年には伏木は14.2℃、富山は14.1℃に達した。1988年には伏木は13.0℃、富山は12.9℃に下降したが、2004年には伏木は14.9℃、富山は15.2℃と最高を記録した。

こうした高温の出現には地球規模での温暖化が背景にある。それとともに、フェーン現象のような、昇温をもたらす現象が増加している可能性もある。

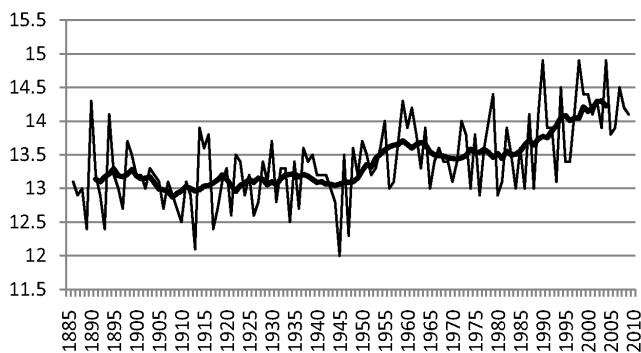


図1 年平均気温の経年変化
伏木, 1886-2009年。実線は11年移動平均

近年の月ごとの変動

また富山で2001年以降には、月平均気温は、2003年11月から2005年1月まで、14ヶ月間連続して平年値を上回り、これはこの間では最も長い(表1)。2004年では11, 2, 7月では2°Cを超え、比較的低温の1, 8, 10月にも平年値を上回っていた。前述のように、2004年は年最高気温が最高であるとともに、各月を通して平年値を上回っているため、昇温の分析の対象とする。

表1 近年の月平均気温の平年偏差

富山, 2001-2009年

月	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009
1	-1	0.7	-0.1	0.3	0.3	-1	2.2	0.5	1.2
2	0.9	2	0.9	2.2	-0.3	0.7	3.2	-0.5	2.9
3	0.8	2.9	0.3	1.7	0.2	0.3	1	2.2	1.6
4	0.8	2.6	0.8	1.4	1.4	-0.8	0	0.9	0.9
5	2.2	0.2	1.3	1.4	-0.5	0.4	0.8	1	1.2
6	0.5	0.5	1	1.4	2.2	0.8	0.8	-0.2	1.3
7	2.3	1.7	-2.2	2.1	0.2	-0.7	-1.4	2.1	-0.2
8	0.3	1.1	-0.5	0.6	0.8	1.8	2	0.1	-0.9
9	-0.2	0.7	1.1	1.8	2.1	0.2	2.9	0.9	0
10	1	0.8	-0.2	0.7	2.1	2	1.1	1.7	1.1
11	0.2	-2.4	2.3	2.7	0.6	1.7	0	0.4	1.4
12	-0.5	-0.5	0.8	1.9	-3.3	0.8	1.4	1.5	0.1

2004年の日ごとの変動

フェーン現象は気流が山を越えることがかわるため、特定の風向と結びついており、とくに春秋のように3~4日の総観周期で気圧配置が変わるようなときには、持続期間は短い。そのため昇温とフェーンの解析には、日単位以下でみる必要がある。

富山では2004年には、日平均気温が平年を上回った日は366日中262日あり、また日最高気温が平年を上回った日は249日あった(図2)。同じく平年を上回った日はそれぞれ34日、73日であっ

た。さらに10°C以上、上回った日は4日、11日であった。

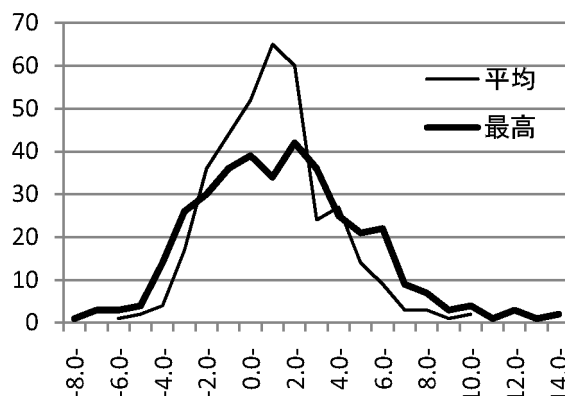


図2 日別気温平年偏差の階級別出現度数
日平均気温および日最高気温。富山, 2004年

富山県内の気温の変動

富山では、日平均気温や日最高気温の著しく高い日の出現数には、季節的な差異がある。日平均気温の平年偏差が5°Cを超える日は、春に多いが通年にわたり出現する。日最高気温の場合も、7°Cを超える日の場合には、同様となる(図3)。ただし極端に高い、すなわち平年より10°Cを超えるような場合は、2, 3, 4月に集中するようになる。

フェーンが風向とかかわるのは先述のとおりであるが、山越え気流の方向が富山とはやや異なる、富山平野東部と富山平野西部(砺波平野)について、魚津と南砺高宮を代表として比較する。

2004年に日最高気温の平年偏差が10°Cを超えた日を抽出すると、先述のように富山では11例であるが、魚津で10例、南砺高宮で9例あった。また富山を含めた3地点のいずれかで10°Cを超えた日は、13例あった。

いずれにしても2, 3, 4月に集中し、類似の傾向

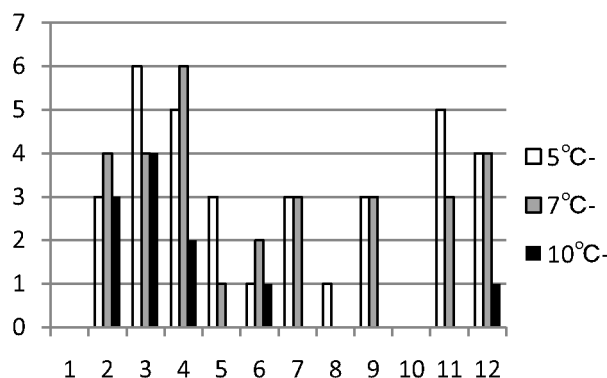


図3 日最高気温平年偏差の月別出現数
富山, 2004年

を示す。なお富山平野の南方にあり、かつ飛越山地の風上側に位置する神岡でも、10℃を超えた日は8例であり、2, 3, 4月に集中している。

全国の気温の変動

後述のように日本列島から5つの事例地域を選ぶが、紋別、小本、青梅、富山、弥栄、のアメダス5地点を代表として、2004年の日最高気温と平年値の変化を示す(図4)。

これら各地点で類似の変動がみられるが、偏差には差異がある。とくに平年偏差が10℃を超えるような日の出現に、時間差のあることがみてとれる。およそ南方では春先から現れ、北方ではやや遅れ、夏季に大きな正偏差が現れている。

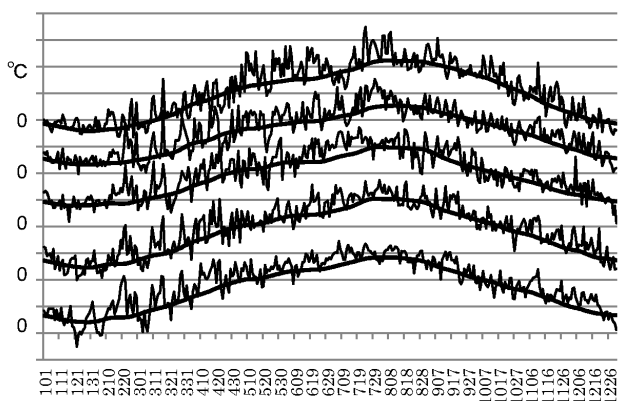


図4 2004年の日最高気温とその平年値の年変化
気温目盛線は10℃間隔。上から紋別、小本、青梅、富山、弥栄。2004年

2. 不時昇温について

富山でのように10℃以上の平年偏差が集中して現れる2, 3, 4月は、晩冬から初春にあたる。年平均気温よりも4~8℃ほど低い時期であり、盛夏の高温とは異なり、思いがけない時に著しい昇温がもたらされることになる。そのため、各地点において日最高気温が平年値より10℃以上高い、すなわち顕著昇温あるいは異常昇温について、季節が寒候期であることから、不時昇温日とする。

データとして、気象庁によるアメダス再統計値から、2004年の日別値および特別値、また日別平年値を用いた。不時昇温の抽出には、アメダス地点において、2004年の日別値あるいは日別平年値が、5日以上欠測のある地点を除いた、837地点を対象とした。

3. 不時昇温の出現

地方ごとの概要

前述のような不時昇温の出現は、延べ2,781日・地点あった。不時昇温の出現は寒候期に集中する(表2)。延べ数では2月に868件、3月に676件、4月に483件とずばぬけて多い。これは富山での傾向に似るが、とくに低温の2月に多くなっている。

出現の季節変化は、北海道と本州で大きく異なり、本州では2~4月に多く、北海道では5~7月に多い。さらに本州でも北寄りの岩手や富山と、南寄りの関東や山陰とでやや異なる。これは、同様の条件下でも、積雪のある地域では昇温が抑制されることを示すと考えられる。

表2 地方別・月別不時昇温数

AMeDASの延べ地点数。東海は長野、山梨、三重を含み、九州は山口を含む。2004年

月	北海道	東北	関東	東海	北陸	近畿	中国	四国	九州	沖縄	計
1											0
2	4	153	83	93	94	105	154	32	150		868
3	55	229	95	54	118	37	62	10	16		676
4	24	102	70	84	67	30	74	15	17		483
5	128	5	4	3							140
6	94	18	6	2	6	2	2		10		140
7	59	33	12	8	14						126
8	13										13
9	3	1	2	1	1						8
10		1		1							2
11	67	8		1	15				1		92
12		81	55	48	23	17	1	8			233
計	447	631	327	295	338	191	293	65	194	0	2781

出現地域

地点別に不時昇温の発生日数を集計する。とくに雄武の16日を最高として、北海道の紋別、福島県の飯館、長野県の飯山で15日など、年間10回以上出現したのは、29地点であった。

この不時昇温が多発するのは、本州の山陰から北陸を通る三陸にかけての地域と、北海道の知床から宗谷にかけての地域である(図5)。本州の場合、岩手-茨城の太平洋側、山形-島根の日本海側で、とくに多い。また本州内陸部でも中部地方から東北地方南部にかけて多い。北海道では、十勝平野南部にも現れる。

一方、銚子以西の太平洋岸では、出現がきわめて少ない。東海、瀬戸内、九州でも少ない。また秋田以北の日本海岸でも少ない。

これらにはフェーン現象の出現がよく知られてい

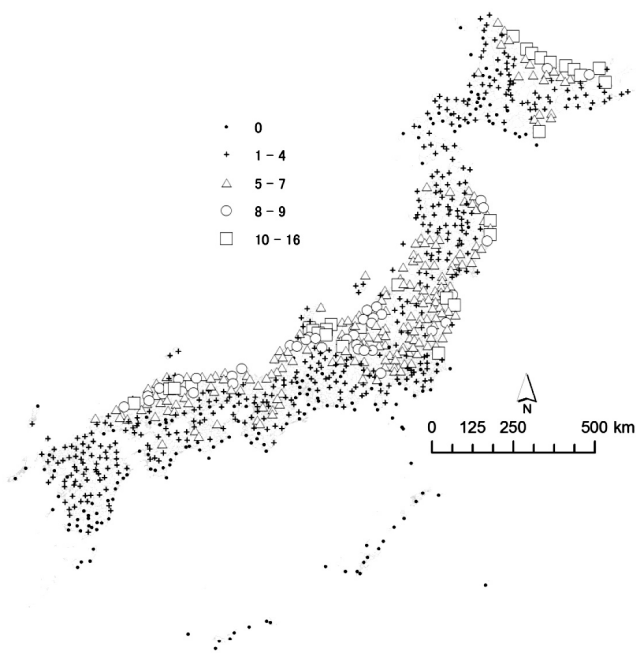


図5 日本列島における不時昇温の発生日数
AMeDAS 地点ごとの集計, 2004年

る北陸などを含むが、不時昇温はより広域に現れることを示している。

4. 解析事例日の抽出

日別に不時昇温発生日数を集計すると、2月22日の381地点、3月17日の354地点など、50地点以上の場合が10日現れる。この10日の合計1,901件で、全体の68%にあたる(表3)。

これら10日では、それぞれの日最高気温の平年偏差分布には、類似性がみられる。分布の中心が、オホーツク沿岸にある11月11日、三陸にある3月17日、関東にある3月11日、4月22日と12月5日、北陸にある2月22日と3月29日、山陰にある2月20日、2月21日と4月18日である。

これらより顕著な不時昇温の発生する地域(最大地点)と発生日の事例として、a) 山陰(弥栄): 2月21日, b) 北信越(富山): 3月29日, c) 関東(青

表3 不時昇温の出現日と地点数
日最高気温平年偏差10°C以上の AMeDAS 延地点数, 2004年

月	日	数	計	月	日	数	計	月	日	数	計	月	日	数	計	月	日	数	計
2	2	2	2	4	16	18		6	3	11		7	13	3	3	10	7	1	1
				4	17	21		6	4	14									
2	14	4	4	4	18	117		6	5	3		7	17	1	1	10	10	1	1
				4	19	31		6	6	7	35								
2	19	39		4	20	18						7	20	5		11	1	1	1
2	20	135		4	21	7		6	14	24	24	7	21	3	8				
2	21	281		4	22	227	439									11	11	61	
2	22	381						6	17	5		7	23	3		11	12	1	62
2	23	13	849	4	30	2	2	6	18	6		7	24	22					
								6	19	5		7	25	19	44	11	23	12	
2	25	3		5	9	28		6	20	28						11	24	1	13
2	26	4	7	5	10	16	44	6	21	9		7	29	1					
								6	22	9		7	30	7		11	26	15	
2	29	6	6	5	12	5	5	6	23	7		7	31	9	17	11	27	1	16
								6	24	6	75								
3	10	48		5	14	1						8	4	2		12	4	30	
3	11	97	145	5	15	41	42	6	26	1	1	8	5	1	3	12	5	163	193
3	16	43		5	17	3	3	6	29	2	2	8	8	4		12	10	14	14
3	17	354	397									8	9	5					
				5	20	10	10	7	4	2		8	10	1	10	12	15	1	1
3	28	7						7	5	16									
3	29	85		5	26	8		7	6	14		9	7	1		12	20	25	25
3	30	42	134	5	27	5		7	7	3		9	8	3	4				
				5	28	9	22	7	8	5									
4	10	9						7	9	14		9	21	4	4				
4	11	4		5	30	6		7	10	1	55								
4	12	29	42	5	31	8													
				6	1	1	15												

梅)：12月5日，d) 三陸(小本)：3月17日，e) オホーツク(紋別)：11月11日，を選定した(図6)。

また，不時昇温の連続的な変化を解析するために，2月19日から23日の5日間を対象とする。この5日間での延べ発生数は849で，最大である。

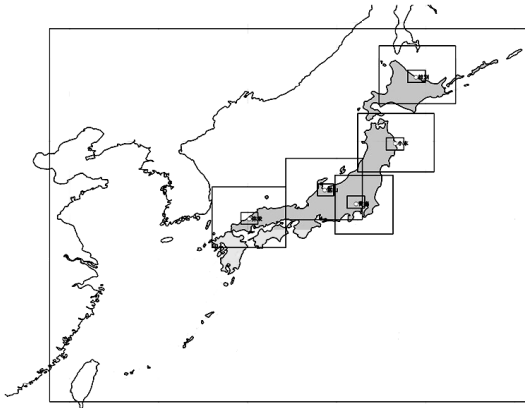


図6 不時昇温の解析地域
枠内は西から順に，図7～図11に対応

5. 総観気候解析資料

不時昇温が広域に発生するため，その解析には日本列島周辺の総観資料を必要とする。日本列島周辺の風や気温について，京大生存圏研で NetCDF (Network Common Data Form) 化された，気象庁の MSM (Meso Scale Model) データを用いる。

2004年では，およそ1時間ごとの5km格子のデータが得られる。このデータについて，OpenGrADSを利用して図化する。とくに総観的状态の把握のために，地上は日本列島周辺の気圧・風から，また大気下層は700hPaの高度・風・気温から把握する。さらに不時昇温出現時の局地的状態の把握のために，当該地方の気圧・風・気温から，また最大偏差地点付近の気圧・風・気温から把握する。なお日変化の把握のために，最大偏差地点の気温の日変化を図化する。

III 各地方の不時昇温出現日の経過

1. 山陰地方－2004年2月21日

移動性高気圧が日本列島を東進して太平洋上に出，一方低気圧が東シナ海を東進中で，東高西低の気圧配置となっている。九州・中国地方の一部では，この日に2月の月最高気温記録を更新した。

大規模昇温の発生

最大の不時昇温のあった島根県の弥栄は，海岸から10kmほどの内陸にあって，中国山地の西麓に位

置する。付近では山脈が北東から南西方向に走り，その間に谷が十数列にわたって入っている。弥栄は高度380mで，背後の山地との比高は500m程度であるが，20kmほど南方の恐羅漢山は1,346mと，付近で最も高度が高くなっている。

この21日には日本列島の広域にわたるアメダス281地点で，平年偏差10℃以上の昇温があった。とくに九州北部から山陰にかけての多数地点で，平年偏差12.0℃以上の昇温がみられた。大分県の玖珠(高度346m)，島根県の川本(132m)でも，14.5℃以上であった(図7-a)。

当日に弥栄では，日最高気温は21.4℃となり，平年偏差は15.5℃に達した。当日07時までは0℃前後であった。8時から昇温し始め，9時には13.2℃，12時には19.7℃，16時には20.9℃に達した。17時から降温しはじめ，20時には13.9℃になったが，その後も24時まで14℃前後を保った(図7-b)。

発生時の総観気候

日最高気温の出現した時刻付近では，地上付近は本州東方海上に高気圧，東シナ海に低気圧があり，東高西低の気圧配置となっていた。高気圧の位置は時間的に大きな変化がない一方で，低気圧は東進して，18時には朝鮮半島の西に近づいていた。西日本では等圧線は北東から南西にのび，風向はほぼ南であった(図7-c)。

下層の700hPaでは，気圧の尾根が中部日本にあったが，関東東方へと移動し，西日本は気圧の尾根の後面に位置していた。風向は西日本では大体南西であった。また等温線は，ほぼ東西にのびていた(図7-d)。

この日16時には，高温域が九州北部から山陰にかけて，東西にのびていた。山陰でもとくに気温が高い地域は，益田付近と米子平野である。これらの地域は，江の川によって分けられた中国山地の西部と，東部の北側に位置する。また気温は，鳥取平野でも高い。さらに高温域の中心は，九州では中津平野や直方平野に現れている。風向はほぼ南寄りである。中国山地付近では，気圧傾度が大きくなっている(図7-e)。

16時には，山陰でもとくに益田付近で高温となる。やや低温の浜田付近には，海風が侵入している。益田付近では，収束域は沖合にある。これは，広島・山口県境である，風上側の中国山地西部山塊の西縁に沿って，南風が北上するためと考えられる(図7-f)。

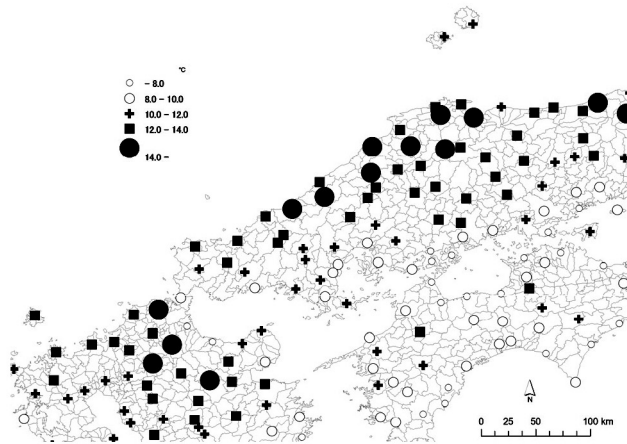


図 7-a 山陰地方における日最高気温の平年偏差
2004年 2月21日

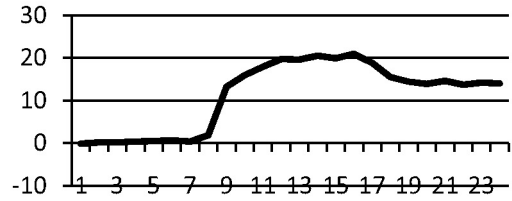
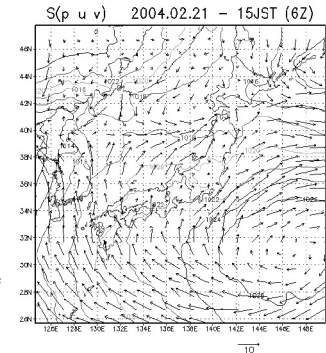


図 7-b 弥栄の気温日変化
2004年 2月21日, 16時に日最高気温

図 7-c 日本付近の気圧と風
2004年 2月21日15時



U-700(h u v) 2004.02.21 - 15JST (6Z)

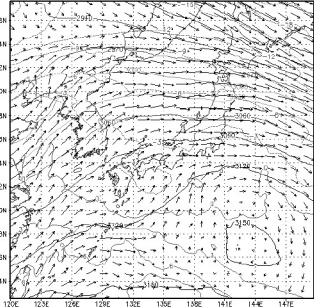


図 7-d 700hPa 面の高度, 風, 気温
2004年 2月21日15時

S(p u v) 2004.02.21 - 16JST (7Z)

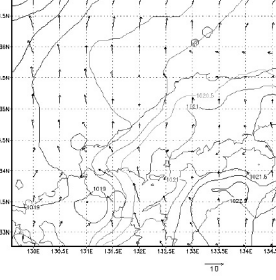


図 7-e 山陰付近の気圧, 風, 気温
2004年 2月21日16時

S(p t u v) 2004.02.21 - 16JST (7Z)

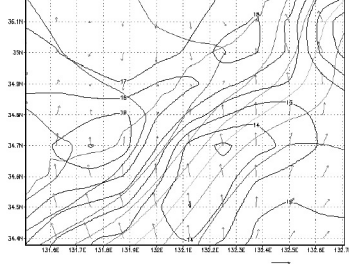


図 7-f 弥栄付近の気圧, 風, 気温
2004年 2月21日16時

2. 北陸地方－2004年 3月29日

この29日には、高気圧の中心が日本列島から太平洋上に出て、北陸付近は高気圧の後面となっている。この日は、富山で初の夏日となる。

大規模昇温の発生

最大の不時昇温のあった富山（高度 9 m）は、富山平野の中央に位置し、神通川河口から 5 kmほど上流にあたる。その25kmほど南方には、標高1,000 mほどの飛越山地が、北東から南西に走る。

この29日には山陰から北陸で、日最高気温の平年偏差が、10°Cを超える地点が多い。とくに山麓から内陸側で高くなる。能登半島、また新潟県の沿岸部では相対的に低く10°C以下である。富山のほか伏木でも11.5°C以上であった（図 8-a）。

当日は富山では最高24.6°Cで、平年偏差は12.4°Cに達した。夜半より昇温が始まっており、01時には6.6°Cであったが、03時に11.7°Cに上昇した。06時ころまで等温に保たれたが、07時より昇温して

14時には24.3°Cに達した。その後降温して21時には14.3°Cまで下がったが、その後やや昇温して16°C前後が続いた（図 8-b）。

発生時の総観気候

地上付近では、高気圧の中心は本州の東方海上にあり、低気圧の中心は中国の東北地方にあって、冬季の西高東低型のほぼ反対の東高西低のパターンを示している。風向は南寄りから西寄りへと、変化している（図 8-c）。

下層の700hPaでは、気圧の尾根が東進中であり、09時には西日本にあったが、18時には中部日本に達している。富山付近の風向はほぼ西寄りであるが、やや南偏している（図 8-d）。

高温域の中心は富山付近にあるが、15時ころからは若狭湾付近でも同じくらいの高温となる。なお、風向が南寄りでは富山に、西寄りになると他地点で、高温の可能性もある。また富山平野付近で局地的に低圧部が形成される一方、若狭湾では沖合まで気圧

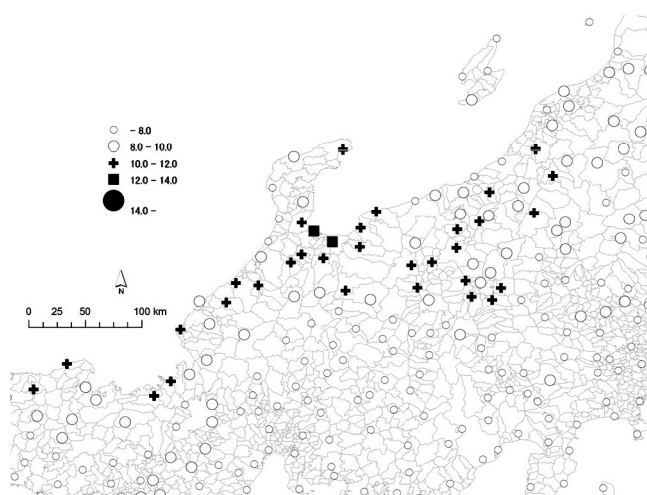


図 8-a 中部日本における日最高気温の年平均偏差
2004年3月29日15時

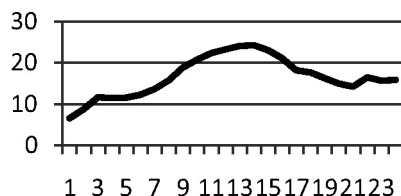


図 8-b 富山の気温日変化
2004年3月29日, 14時に日最高気温

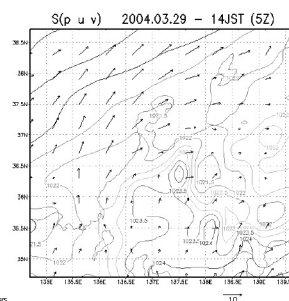


図 8-e 中部日本の気圧, 風, 気温
2004年3月29日14時

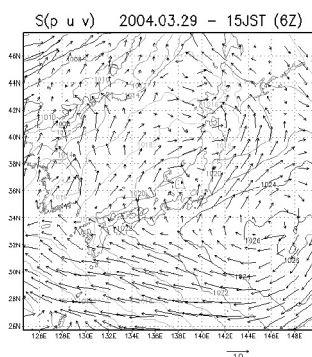


図 8-c 日本付近の気圧と風
2004年3月29日15時

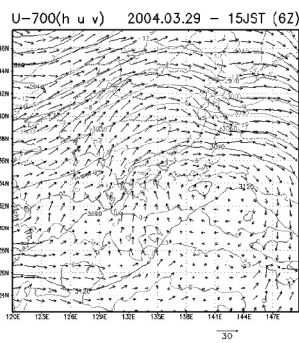


図 8-d 700hPa面の高度, 風, 気温
2004年3月29日15時

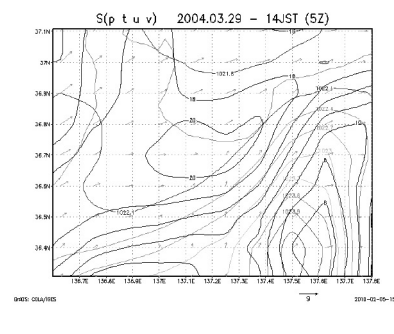


図 8-f 富山付近の気圧, 風, 気温
2004年3月29日15時

が相対的に高い。これは気流が吹き抜けることによると考えられる(図 8-e)。

局地的には、とくに富山平野に高温部がみられる。低圧部が、北東の富山湾方向から南西の砺波平野側にのびている。飛越越えの南風と、加越越えの西風とが収束しており、この収束域は13時には富山平野の中央部にあったが、16時には富山平野の南部に移動した(図 8-f)。

3. 関東地方-2004年12月5日

5日には、台風27号から変わった温帯低気圧が北東進するとともに、沿海州の低気圧が東進して、関東地方に達した。この日熊谷では夏日となった。

大規模昇温の発生

最大の不時昇温のあった青梅(高度155m)は、東流する多摩川の開口部に位置する。その10km西に御岳山(高度929m)がそびえる。

この5日には中部地方の内陸盆地から、関東平野にかけて、日最高気温の年平均偏差が、10°Cを超

えた。関東地方でも房総半島や湘南付近では、10°C以下であった。関東山地の山麓よりでは、とくに高くなる。また青梅のほかに、新潟県の入広瀬(230m)でも、年平均偏差が13.5°Cを超えた(図 9-a)。

当日青梅では最高26.2°Cで、年平均偏差は14.2°Cに達した。01時には6.8°Cであったが緩やかに上昇し、08時以降には大きく昇温して、13時には25.6°Cに達した。その後降温して、24時には7.4°Cまで下降した(図 9-b)。

発生時の総観気候

地上付近では、低気圧の中心が09時には三陸沖にあったが、北東進して18時には根室の東方に達した。また12時より低気圧中心部の西方の秋田沖に低圧部が発生し、その位置に停滞した。等圧線は関東の西では南北方向、南では東西方向にのびる。風向はほぼ西寄りであるが、北寄りに変わっていく(図 9-c)。

下層の700hPaでは、低気圧の中心は青函海峡を東進して、根室沖に達する。関東地方上空では西風

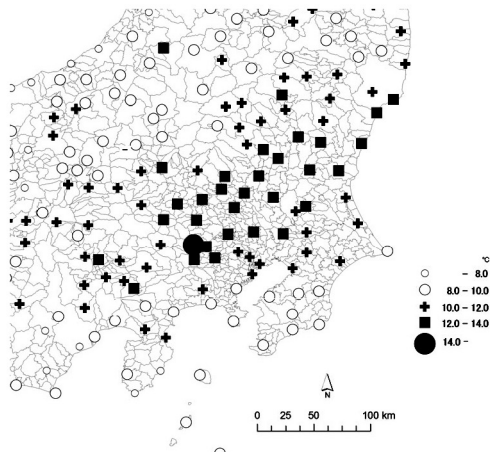


図 9-a 関東付近における日最高気温の平年偏差
2004年12月5日

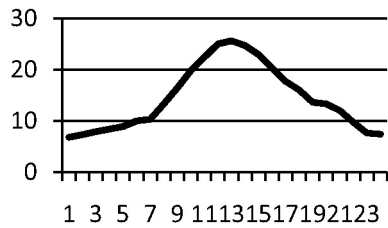


図 9-b 青梅の気温日変化
2004年12月5日, 13時に日最高気温

図 9-e 関東付近の気圧,
風, 気温
2004年12月5日13時

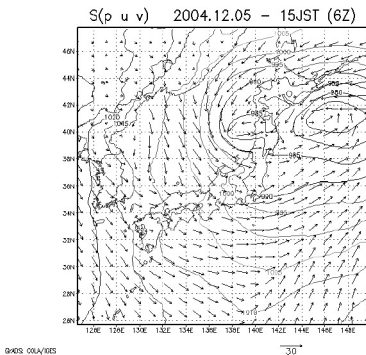
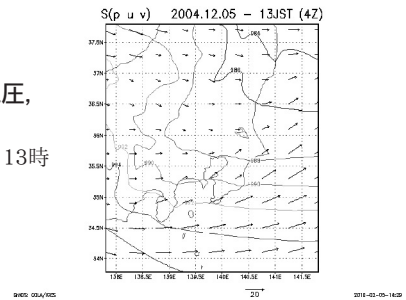


図 9-c 日本付近の気圧と風
2004年12月5日15時

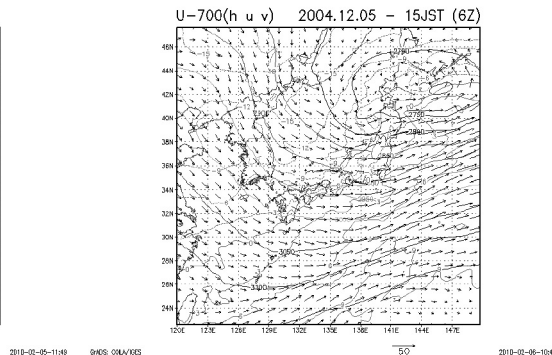


図 9-d 700hPa 面の高度, 風, 気温
2004年12月5日15時

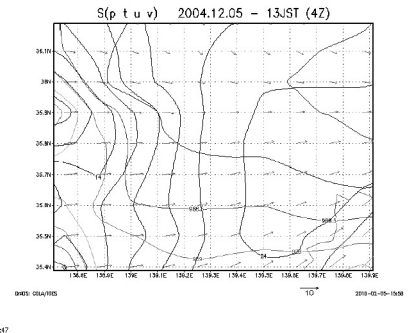


図 9-f 青梅付近の気圧, 風, 気温
2004年12月5日13時

であるが、南寄りから北寄りに変わる。本州上では気温経度が大きくなり、風下である東方で急に高くなる(図9-d)。

13時には、関東平野南部に高温域の中心があり、関東山地の山麓部から東にのび、さらにやや北東寄りにのびるようになる。大体西寄りの風で、収束域も関東平野南部を東西にのびる。等圧線は東西方向に走るが、関東山地付近では南北に走る(図9-e)。

局地的には13時に、とくに気温は平野部で高くなっている。風向は大体西で、青梅付近から東は、北寄りの風と南寄りの風の収束域にあたっている。風速は西の山側で大きい、青梅など山麓にあたる付近で小さくなり、平野部で再び大きくなっている。気圧は13時には平野側で低下し、気圧傾度が小さかったが、15時ころからは徐々に上昇した。ただし南北方向の等圧線が、平野部に張り出している(図9-f)。

4. 三陸地方－2004年3月17日

17日には太平洋上に高気圧があり、宗谷海峡西方に低気圧があつて、前線が日本海を西にのび、東高西低の気圧配置となっていた。福岡と宇和島で、全国で最も早く桜が開花した。

大規模昇温の発生

最大の不時昇温のあつた岩手県の小本(高度10m)は、東流する小本川の河口に位置する。50kmほど西に、北上山地の標高1,000mほどの主稜部が、南北に走る。また20kmほど西方にも、標高1,000mほどのやや小さな山脈が南北に走る。

この17日に東北地方では、日最高気温の平年偏差がほぼ10°C以上となった。とくに男鹿半島以南の日本海側と、福島を除いた内陸部、中部以北の三陸沿岸では、平年偏差が13°C以上であった。小本のほかにも、新潟県の糸魚川、高田、中条、山形県の狩川(高度17m)、岩手県の譜代、種市でも、平年偏差が15.5°C以上であった(図10-a)。

当日には小本では最高23.4℃で平年偏差は16.5℃に達した。06時に5.7℃まで降温したが、07時より徐々に昇温し、15時には23.1℃に達した。その後徐々に下降して20時には11.4℃になり、22時に一時昇温した後、24時には7.5℃まで下降した(図10-b)。

発生時の総観気候

17日に地上付近では、東方に北太平洋高気圧があり、樺太南部付近を低気圧が東進している。風向は、はじめ南寄りであったが、東北地方南部から西偏しはじめ、18時にはほぼ西寄りの風となった(図10-c)。

下層の700hPaでは、東北地方は気圧の谷の前面にあり、南西風が吹いている。また気圧の谷の後面には、低温域がある(図10-d)。

この日には庄内平野、横手盆地、北上盆地、三陸北部(宮古以北)でとくに高温となった。三陸付近では高温域の中心が北上し、16時には中心は八戸付近にある。風向はだいたい南西であった。等圧線は北東から南西に走るが、東北地方の陸域では北西から南東に走り、山地前面で気圧が上昇している(図10-e)。

とくに高温の中心の一つが、14時ころまでは小

本付近にあった。16時ころからは久慈より北の方に中心が移動した。風向は南西寄りであったが、海岸付近では15時ころから南寄りとなり、海上の影響が出てきたことが考えられる(図10-f)。

5. 道北地方－2004年11月11日

11日には、高気圧が三陸東方海上にあり、一方低気圧は間宮海峡付近にあった。

大規模昇温の発生

最大の不時昇温のあった紋別(高度16m)は、渚滑川の河口付近にある。オホーツク海沿岸に、幅の狭い海岸平野が続く。その西方に北見山地が南北に連なり、南西70kmには天塩岳(1558m)がそびえる。20kmほど南西に高度1,000mほどの山々、また2kmほど西に紋別山(333m)がそびえる。

この11日には、道北に日最高気温の平年偏差が9℃を超える地点が多く、とくに宗谷、上川、網走では10.5℃以上となる。さらにオホーツク海沿岸部では12℃以上である。紋別のほかにも滝上(高度165m)、下川(140m)、興部、中頓別(25m)でも平年偏差は13℃を超えた(図11-a)。

当日紋別では最高気温は21.5℃で、平年偏差は13.9℃に達した。03時に6.6℃に下がったが、04時

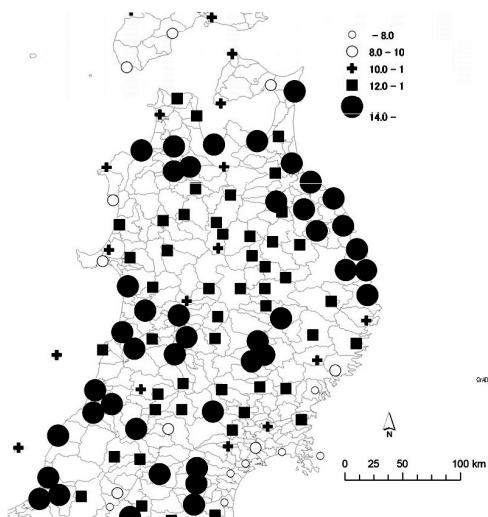


図10-a 東北における日最高気温の平年偏差
2004年3月17日

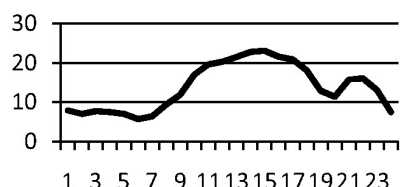


図10-b 小本の気温日変化
2004年3月17日, 15時に日最高気温

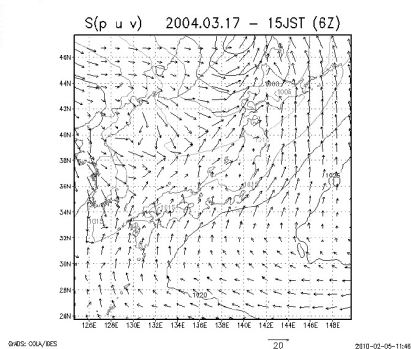


図10-c 日本付近の気圧と風
2004年3月17日15時

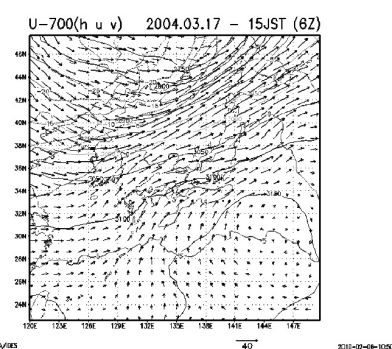


図10-d 700hPa面の高度, 風, 気温
2004年3月17日15時

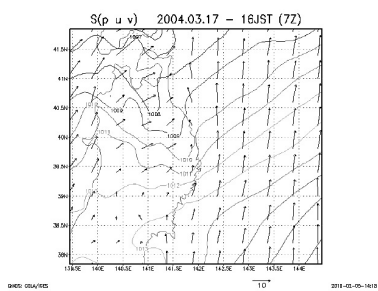


図10-e 三陸付近の気圧, 風, 気温
2004年3月17日15時

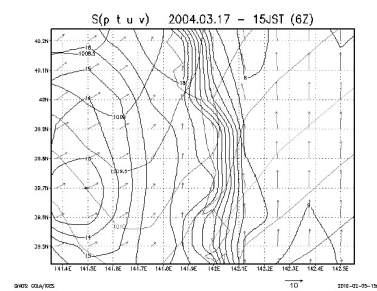


図10-f 小本付近の気圧, 風, 気温
2004年3月17日15時

より昇温し始め、08時に13.2℃まで昇温した。その後やや降温したが、13時より急に昇温し、14時には21.0℃に達した。その後変動しながら降温し、24時に10.6℃まで下がった(図11-b)。

発生時の総観気候

地上付近では、関東の東方海上に高気圧があり、樺太付近を低気圧が東進している。北海道付近では風向は南寄りから南西に変化した(図11-c)。

下層の700hPaでは、北海道付近は、風向はほぼ南西風であるが、18時には西南西に変化した(図11-d)。

高温域が道北の沿岸部一帯に現れ、天塩、枝幸付近でやや低く、とくに高温である地域は、留萌付近、宗谷、オホーツク海岸北部の3地域に分かれる。風向は13時から16時かけて、南から南西に変わる。高温域もオホーツク海岸北部のみが、明瞭となる(図11-e)。

とくに高温域の中心は、13時には滝の上から興部方面に南北にのびていた。高温域は変動するが、

16時ころまで大体同様である。風向は大体南西であるが、南寄りから西寄りに変化している。14時以降に、滝の上を中心とした低圧部が現れている(図11-f)。

IV 日本列島での昇温の時間変化

1. 昇温の出現地域の移動

Ⅲ章1節のように、山陰地方で顕著な昇温のあった2月21日は、前後の2月19日から23日の期間内に、全国の延べ849地点で不時昇温があった(表3)。これは連続する期間では、この年の最大であり、また単一日で比べても、翌22日に381地点で不時昇温があり、この年最大となっている。この最大規模の不時昇温である、同期間を事例として、昇温の出現の変化を明らかにする(図12)。

対象期間前日の2月18日には、日最高気温の平均偏差が10℃を超える、不時昇温地点はまだ現れていない。しかし、西南日本では気温は高めとなっており、とくに中国、四国、九州の内陸部で、偏差

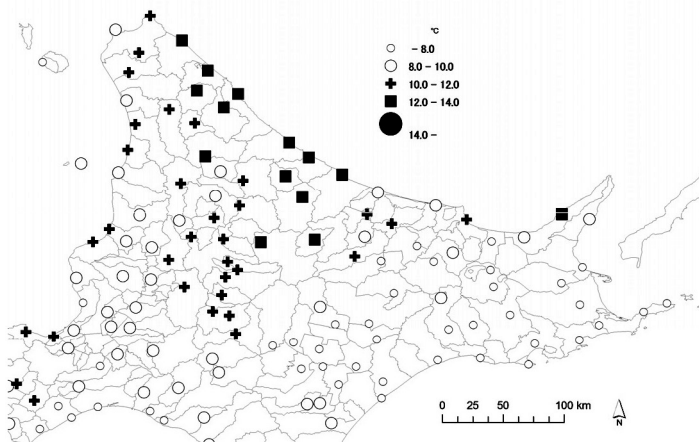


図11-a 北海道における日最高気温の年平均偏差
2004年11月11日

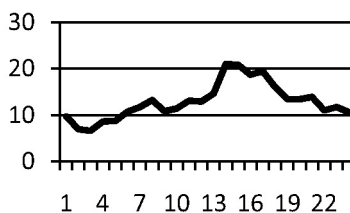


図11-b 紋別の気温日変化
2004年11月11日、14時に日最高気温

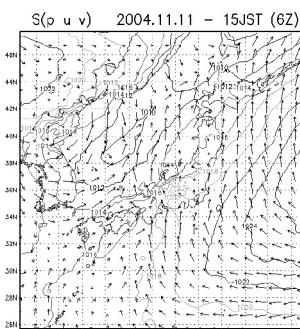


図11-c 日本付近の気圧と風
2004年11月11日15時

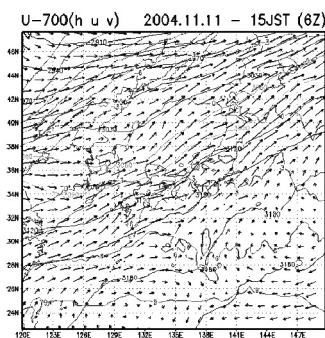


図11-d 700hPa面の高度、風、気温
2004年11月11日15時

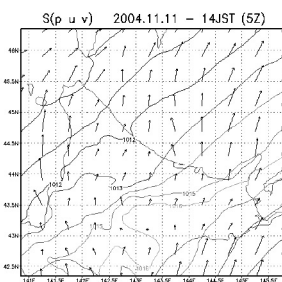


図11-e 北海道の気圧、風、気温
2004年11月11日14時

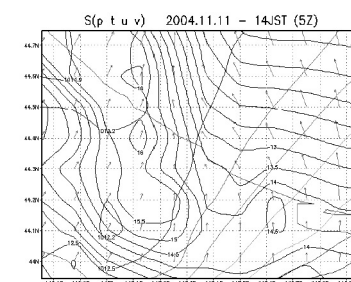


図11-f 紋別付近の気圧、風、気温
2004年11月11日14時

が7.5°Cを超える地点が多くなっている。

19日になると、昇温域は東に移動して東北日本南部に達し、中国地方ではとくに大きく、その内陸部では偏差が10°Cを超えるようになった。ただし九州では、前日よりやや低下している。

20日には昇温域は、北海道の日本海側にまで達する。また九州でも前日にくらべ昇温している。不時昇温は、中部地方以西の内陸部に現れる。とくに中国地方の内陸部で顕著である。

21日には、昇温域が全国に広がり、西南日本側でより大きい。不時昇温は東北以南に現れるが、前日までと異なり、内陸部からさらに日本海側に出現地域が拡大している。

22日には北海道ではやや下がるが、昇温域は東に移動し、とくに東北から関東にかけての太平洋側に昇温の中心が移っている。また内陸部では一部を除いて下がっている。内陸では、中部、中国、四国、九州にみられるように、それぞれの東側で昇温が大きくなっている。

23日には、西日本から昇温域は消失し、北海道を除く東北日本に残る程度になっている。不時昇温は三陸から福島の太平洋岸に現れる。

2. 気圧分布と風の変化

この大規模な不時昇温が発生した2月19日から23日の、日本付近の気圧と風の分布の変化は、以下のものであった(図12)。

19日には西南日本から朝鮮半島にかけて高気圧があった。そこでは風は南寄りであるが、かなり弱い状態であった。

20日には、日本列島の全域が高気圧に覆われる。とくに内陸では、風の弱い状態であった。東北日本の太平洋側では、風は北寄りであった。

21日には高気圧の中心は日本列島の南東洋上に移動する。日本列島は高気圧の後面にあたって、南寄りの風が卓越していた。

22日には高気圧が日本列島から東に遠ざかり、前日には東シナ海にあった低気圧が日本海に入る。日本列島では北海道と九州西部を除いて強い南風が吹走した。

23日には低気圧が青函海峡の東に抜けて、日本列島付近は北寄りの風が吹走する。東北地方でもまた北西の風である。

3. 昇温地域の南北変移の比較

前節のように、2月19~23日の期間には、北海道でだけ顕著な昇温がみられなかった。一方、Ⅲ章4節のように、3月17日に東北の小本で顕著に昇温したときには、北海道でも不時昇温が出現した。その前日の3月16から17日にかけての、風と気圧分布の変化は以下である(図13)。

16日には、日本列島は広く高気圧に覆われた。内陸を中心に風が弱く、この状態は前述の2月20日に似ている。

3月17日には、高気圧の中心は日本列島の東方に移動し、日本列島付近は高気圧の後面にある。低気圧が東進しているが、その位置は2月の例のような青函海峡付近ではなく、樺太北部付近にある。そのため日本列島ではおよそ南風が卓越し、北海道でも南風が吹走した。

すなわち、2月の例のように低気圧が南方の青函海峡を通過すると、瀬戸内から関東地方で昇温する。一方、3月のように、低気圧が北方の宗谷海峡以北を通過すると、三陸やオホーツク沿岸で昇温する。これら2月と3月の事例について、高気圧・低気圧の中心の位置の移動を比較する(図14)。

高気圧は、2月には大陸からゆっくりと南東進して、小笠原北東海上に達している。3月の場合もこれに似るが、中心はやや北方の伊豆諸島東方にある。

低気圧は2月、3月ともに東シナ海から移動する。2月にはほぼ東進して青函海峡を東にぬける。しかし3月の場合には、沿海州に沿って北東進する。

2月の高気圧は移動性で南偏したのに対し、3月の高気圧の位置はあまり変わらず、やや北進している。そのため、低気圧の移動経路が北に偏したものと考えられる。

4. 昇温の起時の移動

この3月16日から18日には、気温の変化は地点により異なり、昇温の起時にもずれがみられる(図15)。西に位置する富山では16日に昇温し、高温状態は17日にも続いている。東に位置する小本では、16日には昇温はなく、17日になって昇温し、さらに18日には富山よりも高温となる。

2月の場合にも、昇温地域の移動、起時のずれから、不時昇温には以下の出現過程が考えられる。

まず、内陸地域で暖気が涵養される。2月20日は、内陸地域のみで昇温している。沿岸地域は低温であ

るが、広域で海風が吹走している。

次にこの内陸に涵養された暖気が、高気圧の後面の南風で、押し出される。2月21日が、高気圧による暖気の押し出しにあたり、弱い南風により内陸および風下側沿岸部でも昇温する。

さらに東進する低気圧前面で、涵養された暖気が引き出される。2月22日は、低気圧による暖気の引き出しにあたり、強い南風となって風下側のみで昇温する。

すなわちこの場合にみられるように、昇温の起時は西で早く東で遅く、また内陸で早く沿岸で遅い。このことは、昇温は基本的には、暖気が涵養され、その移流で生じることを示している。

5. 昇温の要因

しかしこの暖気に加えてさらに、一定の気圧配置のもとで、特定の方向の風が卓越することにより、山越えの気流が昇温効果を加える、すなわちフェーン現象が伴う可能性がある。

ただし、風上側となる日本列島の南岸では、洋上からの冷気が侵入して降温する結果、南北方向の気温傾度を増大させる。このことは、フェーン現象を解析するとき、注意を要する。風速が10m/sとしても、名古屋-富山に相当する180kmを進むのには、5時間を要する。そのため、同時に見たときの、風上と風下の気塊の起源は同じではなく、山越えの熱力学的昇温を確かめるには、移動にともなう変質としてみる必要がある。

また風下側の日本海側では、南風により海風の侵入が遮断され、結果的に昇温したともみられる。このような場合も、フェーン効果が伴わなくても、昇温が起こることを示している。

ところでこのような不時昇温は、北寄りの風ではみられなかった。いわゆる関東平野を吹走する空っ風が、山越え気流でも低温が特色のボラ型とされ、高温のフェーン型とは異なるとされるのは、もともとの気塊が低温のためである。

しかし熱力学的な湿ったフェーンにせよ、力学的な乾いたフェーンにせよ、気流が山を越えるときには、風下側で昇温が起こる。10℃の昇温は、湿ったフェーンなら2,000mの山越えで発生し、乾いたフェーンなら2,500mの山越えで発生する。冬季季節風の吹出時のように、強風が山を越えても、夜間に風上・風下側でこうした差異が起こらないのは、

フェーンの効果小さいことを示すと考えられる。

また冬季に不時昇温の発生は少なく、またとくに北海道では冬季の不時昇温が少ない。これには太平洋側で高気圧が弱く、低気圧の位置も南偏することも影響している。さらに、積雪上では暖気が涵養されないことが、不時昇温の少なさにかかわると考えられる。

すなわち、不時昇温の発生には、内陸に暖気が涵養されることが必要である。しかも日本列島上で、十分な時間をかけて涵養されることが不時昇温につながる。さらに低気圧により、風下側へ引き出されるようにして移流が起きて、顕著に昇温する。このとき沿岸部では海風が遮断され、そこでは高気圧の影響下の海風時よりも、さらに気温が上昇すると考えられる。

V 不時昇温の発生要因について

1. 不時昇温の出現

本研究では、日本列島における大規模昇温の発生の実態を明らかにし、さらにそれに関するフェーンの効果について検証を試みた。とくに、日最高気温が平年値を10℃以上上回る場合を、不時昇温日として、解析の対象とした。年間を通じて高温であった2004年について、とくに昇温が広域に発生し、その発生地域が異なる、5日について事例とした。不時昇温の出現には以下の特色がある。

出現時刻

まず出現時刻は、各事例日における不時昇温の最大地点である、弥栄、富山、青梅、小本、紋別では、08時ころから気温が急上昇を始める。日最高気温は、13時~16時に現れている。すなわち夜間と日中とで差異が大きい。

出現地域

不時昇温の出現地域は、5事例日における日最高気温の起時前後には、風下側地域の海岸線や山麓に沿って伸びている。それらの地域には、以下のような特色がみられる。

- 1) 2月21日のように、昇温域はほぼ全国の広域に連なり、風上側の山地地形の影響による差異はみられない。
- 2) 12月5日のように、関東では高温域は東西方向に広がるが、風上側の甲府盆地付近からすでに昇温している。
- 3) 3月17日のように、三陸では海岸線付近で、気

温傾度が著しく大きくなる。

- 4) 11月11日のように、オホーツク海沿岸では北の稚内方面に高温域が延びるが、風上側に高い山地がないことがある。

広域での出現

北陸から三陸にかけての地域では、不時昇温の出現季節が類似するが、3月17日のように、同日にも富山から山形にかけての日本海側と、三陸北部で不時昇温が出現する。このことは、昇温を山越えのフェーンによる効果とした場合、反対方向の風向であることが条件となる。

この3月17日の14時前後の地上風では、北陸付近での南風が一度日本海上に出て、向きを北東方向に変え、東北地方に再上陸して横断し、三陸から東海上に吹き抜けることが示される。そのため、再上陸した地に、再度の暖気の涵養があり、また断熱昇温をしたことも考えられる。

2. 不時昇温の発生要因

大規模な不時昇温の発現日には、日本列島の東方には高気圧があり、また日本海には低気圧がある。低気圧が日本列島に近い場合には、山陰や北陸に昇温域が現れ、低気圧が北偏したり、東方にあると、関東、三陸とオホーツク沿岸に昇温域が現れる。

このような不時昇温は、高気圧後面から低気圧前面という気圧配置のもとで、南風が山を越えて現れているので、フェーン現象が影響している可能性がある。とくに昇温の出現時刻に限ってみた場合には、フェーンによる説明があてはまる。

しかし、気塊の移動時間、また高・低気圧の東進という、気圧配置が大きく変化しているときであるため、上記の説明には注意を要する。とくに昇温日には日変化が大きく、夜間はとくに昇温していないので、フェーン効果はみられない。また、昇温に風上側山地地形の差異による影響がみられない。さらに、昇温域は山地の風下というより、内陸域の風下であることは、一定の高度の山地を越えていないことを示す。

そのため、とくに不時昇温のような範囲も程度も大規模な昇温では、フェーン現象が影響している可能性はあるが、それに加えてさらに説明を必要とする。すなわち、大規模昇温が発生するには、まず暖気が涵養されることが必要である。それは高気圧下の安定した天候のときであるが、このときには海風

が発生するために、沿岸部ではなく内陸部を中心として暖気が涵養される。沿岸部での昇温とはこの暖気の移流があったときである。このときにはまた海風も遮断されることになり、昇温を促進する。

すなわち大規模昇温とは、内陸での暖気の涵養と、その沿岸部への移流に主としてとづいて発生する。高気圧後面、低気圧前面という気圧配置は、移流を引き起こして、その効果を大きなものとすると考えられる。

なおこの不時昇温について、日最高気温を用いているために、基本的に日別値での解析をしている。いうまでもなく昇温は1日の間に変化しているので、さらに時別値にもとづくことを必要とする。その解析やさらに再現は、今後の課題である。

文献

- 五十嵐咲恵, 中西幹郎 (2009): 冬季東北南部太平洋側における強風の出現特性. 2009年度春季大会講演予稿集 (日本気象学会), p252.
- 石崎紀子, 高藪 出 (2008): 日本域における強風を伴う昇温現象—2002年事例解析—. 2008年度秋季大会講演予稿集 (日本気象学会), p505.
- 石崎紀子, 高藪 出 (2009): NHRCMを用いたフェーン現象の熱量解析. 2009年度春季大会講演予稿集 (日本気象学会), p294.
- 佐々木華織 (2005): 山形県庄内地方において観測された台風0415号接近に伴うフェーンの特徴. 2005年度春季大会講演予稿集 (日本気象学会), p381.
- 柴田有紀子, 川村隆一, 初鹿宏壮 (2009): 盛夏期の北陸地方で発生するフェーンの特徴と大規模循環場の影響について. 2009年度春季大会講演予稿集 (日本気象学会), p253.
- 渡来 靖 (2009): 2009年2月20日に関東平野内陸域で見られた急激な気温上昇現象の事例解析. 2009年度秋季大会講演予稿集 (日本気象学会), p336.

(2010年5月20日受付)

(2010年7月14日受理)

