

諏訪湖沿岸で冬季夜間の著しい低温時に発生する 気温変動現象

大久保 篤^{*1}・市川 寿^{*2}・田中 強^{*3}
河野 智一^{*3}・藤部 文昭^{*4}

要 旨

諏訪湖の沿岸では、冬季夜間の著しい低温時に周期数十分、変動幅数°Cの大きな気温変動が観測されることがある。この現象を解明するため、気象庁のルーチン観測資料を解析するとともに、2003年1～2月に諏訪湖周辺で野外強化観測を行った。気温変動は、諏訪湖が全面結氷し積雪があり、晴れて風が弱まった夜に発生していた。また、気温変動はほぼ諏訪盆地内全域で発生しているが、変動幅は湖岸に近い地点ほど大きく、気温が急降下するタイミングは湖畔の方が早かった。気温変動に対応して風向も変動し、湖からの風のときに前後の時間帯に比べて低温となる傾向があった。さらに、気温変動の発生する時は、地上から高度50 m付近にかけて冷気層が存在し、地上気温の変化と対応してその厚みが変動していた。これらは、「諏訪湖上に現れる冷気層の崩壊・流出と再形成のサイクルが気温変動に関与している」可能性を示唆している。

1. はじめに

長野県の諏訪湖沿岸では、冬季の晴れた夜に著しく冷え込んだとき、周期数十分、変動幅数°Cの大きな気温変動が繰り返されることがある。この気温変動現象の実態とメカニズムの解明を目的に、東京管区气象台と長野地方气象台は気象研究所の協力の下に2003年の1～2月に諏訪湖周辺で野外強化観測を実施した(大久保ほか, 2003)。本稿では、諏訪特別地域気象観測所(旧・諏訪測候所；以下誤解の可能性がなければ「諏訪」と記す)のルーチン資料と上記の野外強化観測で得られた資料の解析結果に基づき、冬季夜間の諏訪湖沿岸で発生する気温変動現象の特徴を述べる。

なお野外強化観測のデータは <http://www.tokyo-jma.go.jp/home/nagano/suwa/index.html> で公開されている。

2. ルーチン資料による気温変動現象の実態

第1図は諏訪湖周辺の地形を示す。諏訪湖は東西5 km, 南北4 km程度の大きさがあり、湖面の海拔高度は759 mである。湖の南東側には諏訪市、北西側には岡谷市と下諏訪町があり、それぞれ湖岸から数 km にわたってほぼ平らである。湖の北東側と南西側は湖岸から数百 m のところまで山が迫っている。諏訪特別地域気象観測所は湖の東岸にあり、1997年の諏訪測候所廃止(無人化)以降も引き続き各気象要素の自動観測を行っている。観測所は高さ数 m の護岸を隔てて湖に接し、その海拔高度は760.1 mである。

第2図は2001年1月21～22日の諏訪の気温変化を示す。22日の最低気温は-17.8°Cであり、標高が約200 m 高い軽井沢よりも約7°C低かった。第2図によると、宵のうちから明け方にかけて気温が下がっていく間、周期10～数十分程度の変動が繰り返されている。その後の昇温期にも気温の変動は続いている。

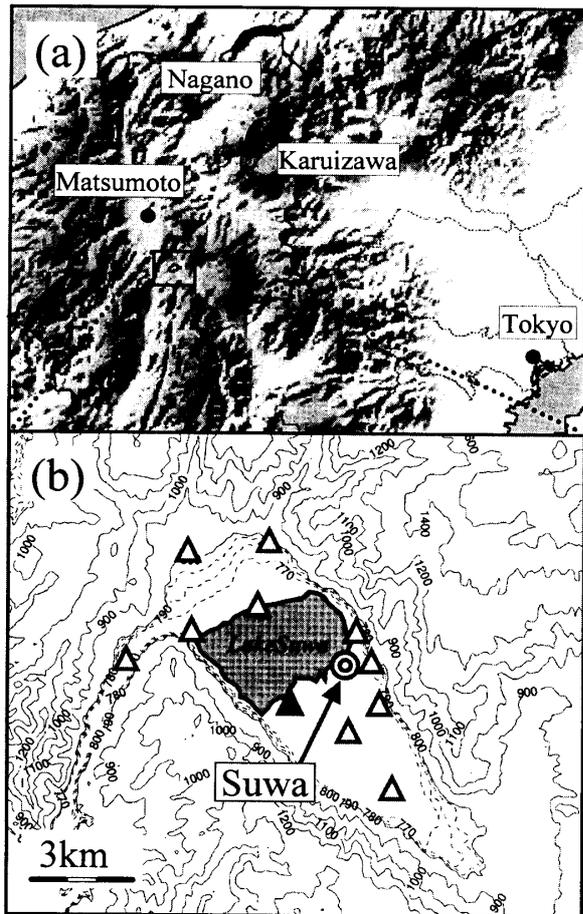
この変動は一見すると不規則に見えるが、よく似た形の変化を1～2時間ごとに繰り返しているようにも見える。第3図は、21時から03時について1次トレンドを除いてからFFT処理を行った結果である。約3600秒(60分)にピークがあることから、気温変動が規則性

*1 東京管区气象台技術部気候・調査課(現：気象庁予報部予報課)。*2 東京管区气象台技術部気候・調査課。

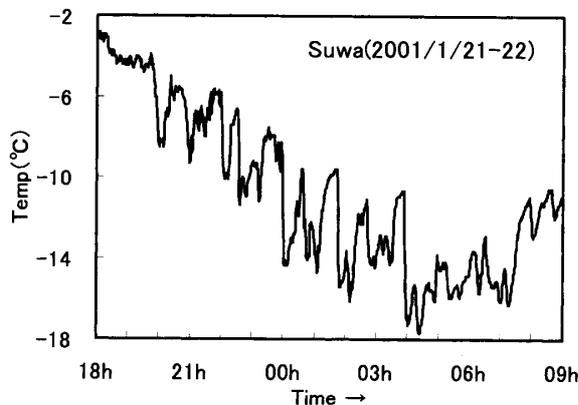
*3 長野地方气象台。*4 気象研究所予報研究部。

—2004年3月31日受領—

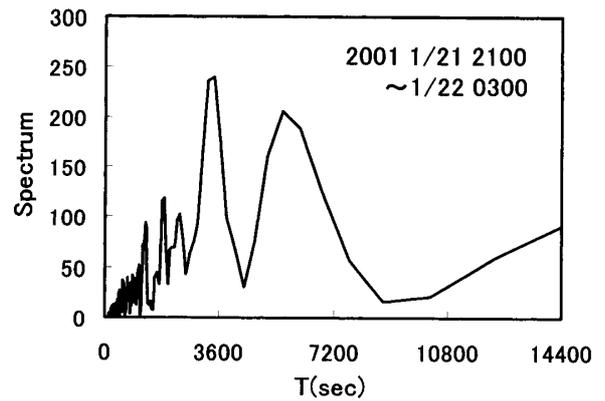
—2004年12月7日受理—



第1図 諏訪湖周辺の地図 (a: 広域図, b: 広域図の四角枠を拡大した図). aには諏訪湖周辺の気象官署を示す. bの◎は諏訪特別地域気象観測所, △は温度センサー設置地点, ▲は係留気球観測点を示す. bの等高線は100 m 間隔だが, 諏訪湖周辺のみ破線で10 m 間隔の等高線を示してある.



第2図 2001年1月21日18時から22日09時までの諏訪特別地域気象観測所の気温変化.

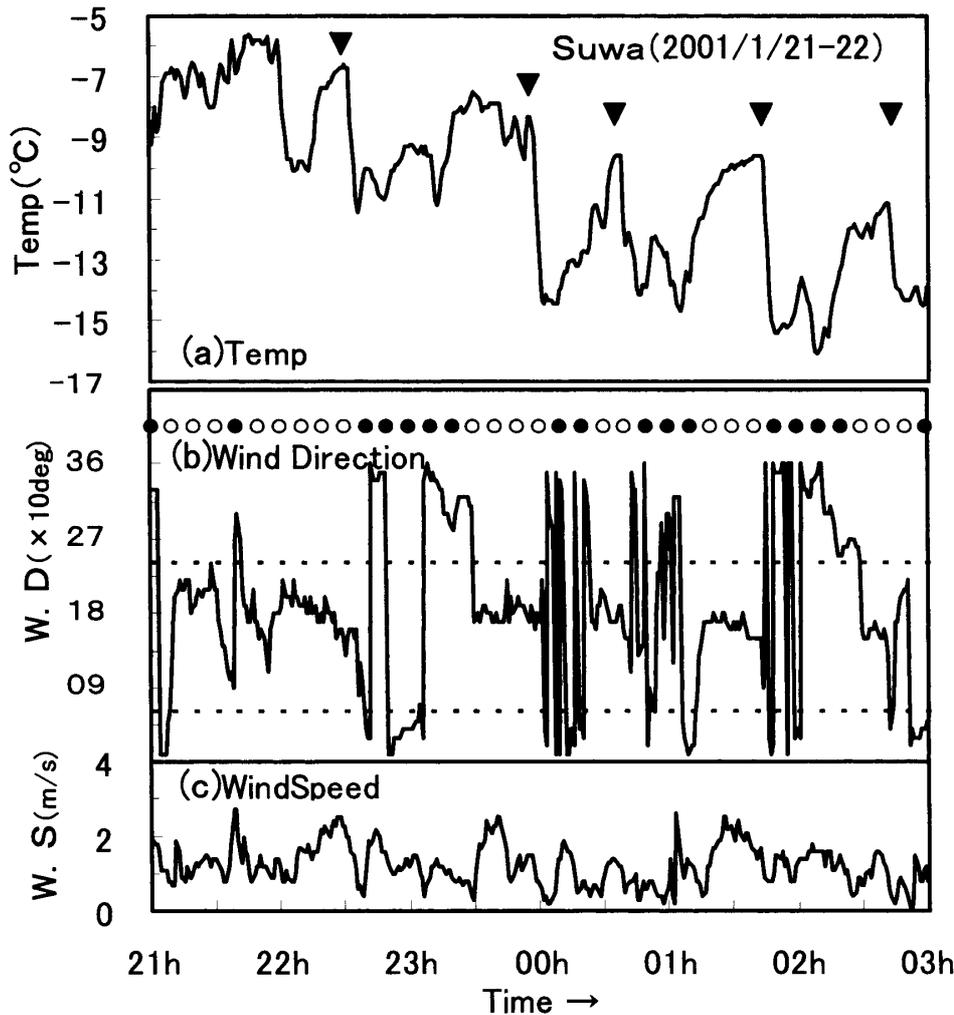


第3図 2001年1月21日21時~22日03時について, 1次トレンドを除いてからFFT処理を行った結果. 計算には1分間隔のデータを使用した.

第1表 1973年から2002年までの気温変動発生日.

No	事例日		最低気温 (°C)		松本夜天気	諏訪3h風速 (m/s)	諏訪9h積雪 (cm)	諏訪湖結氷
	年	月日	諏訪	軽井沢				
1	1977	2/13	-13.7	-12.3	晴れ	0.1	5	有
2	1981	2/28	-23.0	-18.5	〃	0.9	22	〃
3	〃	3/1	-13.4	-14.5	〃	0.0	21	〃
4	1984	1/20	-20.9	-15.1	〃	0.0	10	〃
5	〃	1/23	-17.6	-12.3	〃	0.7	16	〃
6	〃	1/24	-17.7	-11.9	〃	0.0	12	〃
7	〃	1/25	-19.1	-14.5	〃	0.4	11	〃
8	〃	2/19	-22.0	-16.7	〃	0.7	20	〃
9	〃	2/20	-19.7	-12.9	〃	1.5	15	〃
10	〃	2/21	-17.7	-15.6	〃	0.0	10	〃
11	〃	2/22	-11.2	-9.1	〃	0.3	6	〃
12	〃	3/12	-15.6	-9.2	〃	0.1	8	〃
13	2001	1/22	-17.8	-10.9	〃	0.6	32	〃

を持っており, その卓越周期は約60分であるといえる. 第4図は, 21時から03時までの諏訪の気温と風の時系列図である. 記号▼で示したように, 気温は小刻みな変動を伴って上昇した後に急降下する傾向がある (図中での最大の傾きは, 下降時が $-6.6^{\circ}\text{C}/10\text{分}$, 上昇時が $+3.5^{\circ}\text{C}/10\text{分}$). また, 気温変動と風向変動の関係を見ると, 前後に比べて気温の高い時間帯は陸からの風向 ($60\sim 240^{\circ}$: 同図bでは2本の破線の間, 記号○) であり, 気温の低い時間帯は湖からの風向 (記号●) となっている. つまり, 気温変動と地上風向がおおむね連動し, 湖からの風のときに低温となる傾向がある. 第1表は, 1973年から2002年までの30年間の自記記録に基づき, ひと晩に気温の上下変動を2回以上繰り返



第4図 2001年1月21日21時～22日03時の諏訪特別地域気象観測所の観測値 (a: 気温, b: 風向, c: 風速). 風向の破線は60°および240°, ○は風向が陸から, ●は風向が湖からであることを示す.

第1図に△印および◎印で示した12か所ですべて地上1.5mの高さに設置した. 温度センサーの感部はサーミスタで, -20～80°Cでの測定精度は±0.3°Cである. なお, ◎印で示した諏訪において温度センサーと通常測器による観測値との比較を行ったところ, 夜間はほぼ同じであるが, 07時以降は温度センサーが通常測器に比べ高めの値となり, 日射によるバイアスが示唆される. このため, 温度センサーによる観測値は, 18時～07時のみ使用することとした.

上記期間のうち1月中は諏訪湖が全面結氷して積雪があり, 1月24～25日と25～26日に気温変動現象が観測された. 積雪の深さ(09時)は25日が38cm, 26日が35cmであった. なお, 2月になると諏訪湖の水はとけ, 気温変動は発生しなかった.

返し, 最大の変動幅が10分間で5°C以上あった日を目視で判定して抜き出したものである. 該当例は13例あり, いずれも諏訪湖が全面結氷し積雪があって, 晴れて風が弱まった日である. また, 第1表には諏訪と軽井沢の最低気温も記入してあるが, 1例を除きすべて諏訪の方が低温となっている. なお, 気温変化の形や気温変動と地上風向の関係, 変動の周期は, 自記記録を見る限りではおおむね2001年1月21～22日と同様な傾向であった.

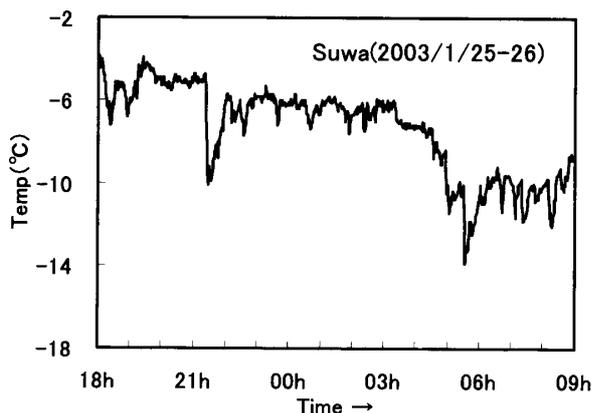
3. 野外強化観測の概要

3.1 諏訪湖周辺での地上気温観測

気温変動の発生範囲の把握を目的に, 諏訪湖周辺に温度センサーを設置し, 2003年1月20日～2月28日の期間中に2分間隔で気温の観測を行った. 観測地点は

3.2 係留気球を用いた下層気象観測

鉛直方向も含めた気象状況の把握を目的として, 諏訪湖畔(第1図の▲印の地点)において係留気球を用いて地上から高度900mまでの気象観測(気圧, 気温, 風)を実施した. 測定精度は気圧が±1hPa, 気温が±0.3°C, 風向が±5deg, 風速が±10%である. 観測は2夜行い, うち1夜は気温変動が発生した1月25～26日, もう1夜は発生しなかった2月21～22日であった. 観測時刻は21, 03, 06, 09時の4回を基本とし, このほかの時刻でも状況によって地上から200mまでの観測を加えた. なお, 測定間隔は1秒で, 係留気球の上昇速度からおおよそ高度50cm間隔の観測値が得られたことになる.



第5図 2003年1月25日18時から26日09時までの諏訪特別地域気象観測所の気温変化。

4. 野外強化観測の結果

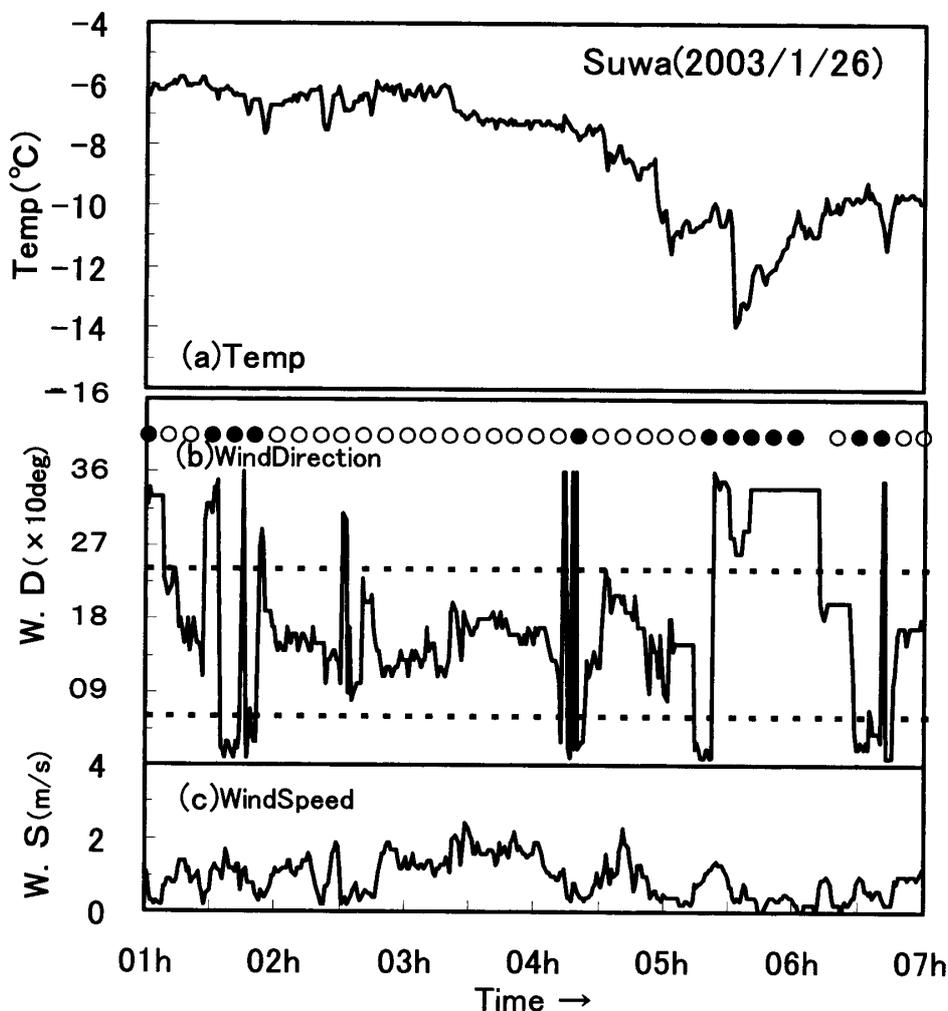
4.1 期間中に発生した気温変動現象

1月25日夜～26日朝の諏訪の気温変化を第5図に、このうち気温変動の大きかった時間帯の気温と風の時間変化を第6図に示す。第2節で示した2001年事例に比べて変動幅は小さいが、数十分周期の気温変動があり、湖からの風の時に前後の時間帯よりも低温となる傾向は同じである。また、図は略すが周期分析によると2001年事例と同様に約60分周期が卓越していた。これらから、当日に観測された気温変動はそれ以前に発現した気温変動に共通する特徴を持っていたといえる。

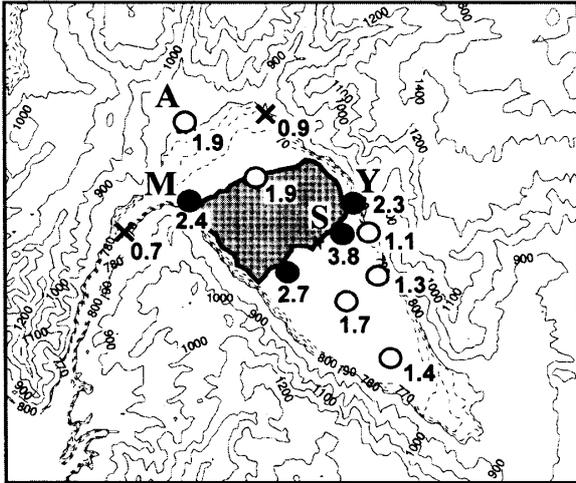
4.2 地上気温変動の空間的・時間的特徴

第7図は温度センサーで観測した気温変動幅（10分間の気温差）の最大値の分布である。●および○で示された1°C以上の変動は、ほぼ諏訪盆地内の全域に分布している。しかし、●で示される2°C以上の変動幅を持つ地点は湖畔のみとなっている。つまり、気温変動はほぼ諏訪盆地内全域で発生しているが、変動幅は湖に近い地点ほど大きいといえる。

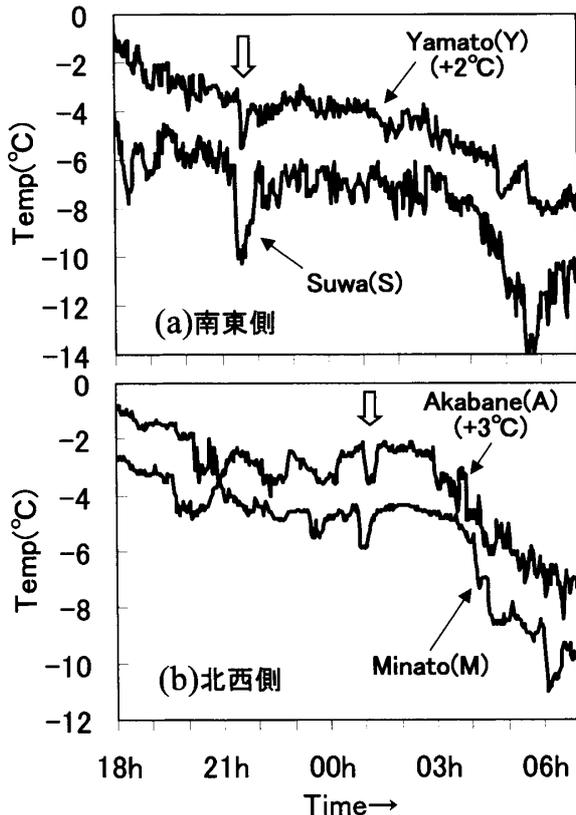
第8図は諏訪湖の南東側(a)と北西側(b)について、それぞれ湖畔および周辺部の観測点を1地点ずつ選び、気温変化を示したものである（観測点の位置は第7図参照）。南東側と北西側では気温変化は異なるが、南東側どうし、北西側どうしでは気温変化の傾向は良く似ている。さらに白抜き矢印で示したような比較的大きな気温変動のタイミングもほぼ同じとなっている。なお、この他の観測点についても気温経過の比較



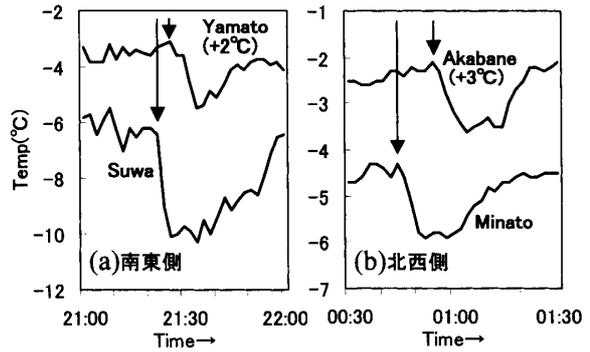
第6図 2003年1月26日01時～07時の諏訪特別地域気象観測所の観測値（a：気温，b：風向，c：風速）。記号は第4図と同じ。



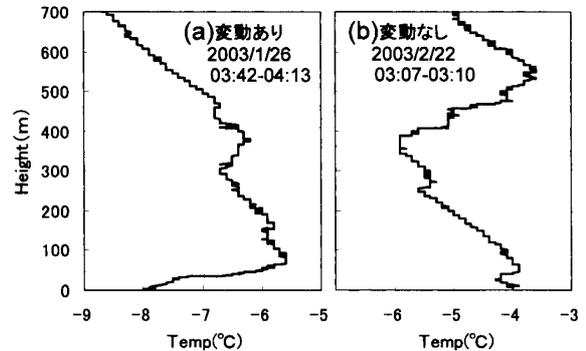
第7図 2003年1月25日18時～26日07時の気温変動幅(10分間気温差)の最大値。×は 1°C 未満, ○は 1°C 以上 2°C 未満, ●は 2°C 以上の地点。Y, S, A, Mは第8図で時系列を示す地点。



第8図 2003年1月25日18時～26日07時の気温経過。aは諏訪湖南東側の2地点(大和: Yamato, 諏訪特別地域気象観測所: Suwa), bは諏訪湖北西側の2地点(赤羽: Akabane, 湊: Minato)の気温経過。大和および赤羽は線が重ならないようにそれぞれ 2°C および 3°C プラス側にずらしている。



第9図 第8図について白抜き矢印で示した大きな気温低下の発生した時間帯を拡大した図。



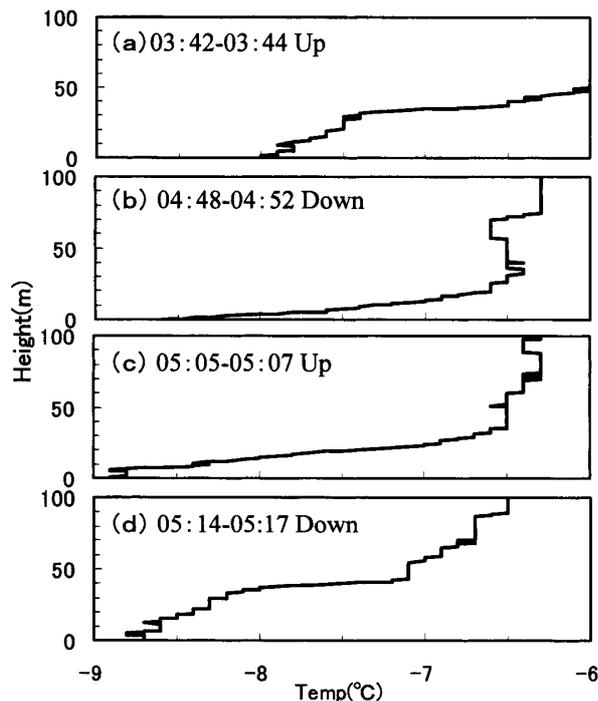
第10図 係留気球観測による気温の鉛直プロファイル (a: 気温変動の発生した2003年1月26日03時頃, b: 気温変動の発生していない2月22日03時頃)。

を行ったが、南東側どうし、北西側どうしの観測点の気温経過が良く似た傾向を示している点は同様であった。

第9図は、第8図で白抜き矢印で示した気温急降下の発生した時間帯について時間軸を拡大して示したものである。記号↓で示した気温急降下が始まったタイミングに着目すると、同図aの南東側では諏訪湖畔の「諏訪」よりも諏訪湖から約0.5 km離れた「大和」の方が約5分遅れて出現し、同図bの北西側でも諏訪湖畔の「湊」より諏訪湖から約2 km離れた「赤羽」の方が約10分遅れて出現している。つまり、諏訪湖の南東側、北西側ともに、気温の急降下は湖から離れた地点よりも湖畔の方が早く出現していることになる。

4.3 気温変動発生時の下層大気状態

第10図は係留気球により観測した気温の鉛直分布である。同図aが気温変動の発生した1月26日のものであるが、地上付近は下層ほど気温が低くなっており冷気層が存在することを示している。温度勾配の最も急



第11図 気温変動の発生した2003年1月26日の気温の鉛直プロファイル。観測時間はaが03時42～44分、bが04時48～52分、cが05時05～07分、dが05時14～17分。Upは係留気球の上昇時の観測、Downは下降時の観測を示す。

な高度50 m 付近を冷気層の上端とみなすと、これより下に約 2°C低い顕著な冷気層が存在しているといえる。同図 b は気温変動の発生しなかった2月22日の気温の鉛直分布であるが、顕著な接地冷気層は存在していない。係留気球の観測はこの他の時間にも行っているが、同様の結果であった(図略)。したがって、高度50 m より下の冷気層の存在は、気温変動現象発生時の特徴と考えられる。

この冷気層の時間変化を示したのが第11図である。a は第10図と同じ観測値である。この後、b では冷気層の厚さは一旦10 m 程度まで薄くなっている。しかし、その後 c から d にかけて再び冷気層が厚みを増し、b から約30分後の d では a と同じ50 m 程度まで厚さを増している。つまり、冷気層は厚みが一定でなく、短時間で変動している。さらに、第11図で地上付近の気温に注目すると、冷気層の厚みが減少する a から b にかけては気温が低下しているが、冷気層が厚みを増す c から d にかけてはほとんど変化がなく、むしろやや上昇している。このことは、冷気層の厚みの変動と地上気温の変動に何らかの関係があることを示唆している。

5. 議論

本論文で扱う気温変動現象は、諏訪湖が結氷し積雪があるという条件下で、晴れて風の弱まった夜に起こる。この条件は盆地内で冷却が進み強い冷気湖ができる条件(近藤・山澤, 1983)と符合する。言い替えると、今回の気温変動現象は盆地冷却に伴う強い冷気湖の内部に生ずる変動という性格がうかがえる。観測資料が限られているため、変動のメカニズムに踏み込むのは難しいが、以下考えられることを簡単に議論する。

山間部で夜間に観測される気温変動現象としては、山風(斜面下降流)の間欠性に伴うものが知られている(鳥谷, 1985; 福田, 2002など)。諏訪湖周辺でも、周辺の高山から吹き下りる山風の存在は容易に想像できる。しかし、山風の間欠性が典型的に観測されるのは、冷気が堆積しにくい緩斜面上の場所である。強い冷気湖がある場合は、山風は流下に伴う断熱昇温のため盆地底までは吹き下りず、冷気湖の上へ流れるものとされる(近藤, 1982)。よって、諏訪の気温変動に山風が関わっているとしても、その関わりは冷気湖を隔てた間接的なものであろうと考えられる。

夜間の接地逆転層内では、内部重力波による風や気温の変動が観測されることがある。横山ほか(1981, 1984)は、関東平野で観測された周期10分程度の変動の例を示し、その励起源として1984年論文の事例については川の堤防を挙げた。諏訪盆地上の冷気湖について、その水平・鉛直スケールと温度偏差を適当に仮定してみると、そこに発生する定在振動のうち最も波長の長いモードの周期は数十分のオーダーになる。具体的には、盆地の半径を R 、安定層の厚さを H 、その温位偏差を θ' 、基本場の温度を θ_0 、重力加速度を g とすると周期は $T \sim \pi R / (gH\theta' / \theta_0)^{1/2}$ であり、 $R \sim 4$ km, $H \sim 200$ m, $\theta' / \theta_0 \sim 0.01$ ならば $T \sim 3000$ 秒である(H や θ' の与え方には任意性があるので、これはあくまでもごく大まかな見積もりである)。このように、周期だけを見ると内部重力波による振動が気温変動の一因である可能性はあるが、この振動では気温の降下時と上昇時の時間変化率が異なることを説明できないなど問題点も残る。

気温変動において、「湖からの風のとときに前後の時間と比べて低温となり」、「気温の急降下が湖畔で内陸よりも先に起こり」、「その降下量も湖畔のほうが内陸側の地点より大きい」という観測事実は、湖が冷気源になっていたことを示唆する。地上の気温低下時に接地冷気層が薄くなり、その後再び厚さを増すという変化

からも、湖上の冷氣層の崩壊・流出と再形成のサイクルが示唆される。これらから、ひとつの可能性として「諏訪湖上に現れる冷氣層の崩壊・流出と再形成のサイクルが気温変動に関与している」と考えられる。ただし、変動が現れる日は湖面も周囲の陸地も積雪におおわれ、地物の有無を別にすれば表面の状態に大きな違いがないので、湖面上に陸地よりも強い冷氣が生じ得るかどうかにについては疑問がないわけではない。しかしこの疑問を別にすれば、冷源からの間欠的な冷氣流出は山風（上記）のほか、都市域の緑地でも見出されており（桑田ほか、2000）、気温変動の要因になり得ると考えられる。なお係留気球の観測では、地上気温の急降下後の緩やかな上昇ははっきりと捉えることができなかった。気温上昇の原因として、湖に向かう風による相対的に暖かい空気の移流や、乱流による上層の高温の層との混合などが考えられるが、その詳細は今後明らかにしていきたい。

今回の解析結果は夜間の気温が単調に下がっていくとは限らず、数°C幅の短周期変動を伴う場合もあることを示している。このような夜間冷却時の気温変動を引き起こすメカニズムに関する理論的・数値的説明や、他の地域を対象にした解析なども、今後の課題と考えている。

6. まとめ

諏訪湖沿岸で冬季夜間に発生する著しい低温を伴う気温変動現象について、諏訪特別地域気象観測所のルーチン資料と2003年1～2月に実施した野外強化観測で得られた資料の解析を行った。得られた結果は次のとおりである。

(1) ルーチン資料の解析結果

- 気温変動現象は、諏訪湖が全面結氷し積雪があり、晴れて風の弱まった夜に発生していた。
- 気温が変動する際には小刻みに上下しながら上昇した後に急降下する傾向があった。
- 気温変動と地上風向が概ね連動し、湖からの風のとくに前後の時間に比べて低温となる傾向があった。
- 気温変動の卓越周期は約60分であった。

(2) 野外強化観測資料の解析結果

- 気温変動は、ほぼ諏訪盆地内の全域で発生しているが、変動幅は湖岸に近い地点ほど大きい。

- 気温変化は諏訪湖の南東側どうし、北西側どうしで良く似ており、気温の急降下は湖から離れた地点よりも湖畔の方が早く出現していた。
- 気温変動の発生する時は、地上から高度50 m付近にかけて冷氣層が存在していた。
- 冷氣層の厚さは時間変動しており、これに対応して地上気温が変化していた。

以上から、ひとつの可能性として「諏訪湖上に現れる冷氣層の崩壊・流出と再形成のサイクルが気温変動に関与している」と考えた。

謝 辞

野外強化観測の実施にあたり、諏訪湖周辺の市町村および住民の皆様には大変お世話になりました。また、観測の実施および論文作成にあたり気象研究所物理気象研究部の萩野谷成徳主任研究官、予報研究部の吉崎正憲第一研究室長、永戸久喜主任研究官、環境・応用気象研究部の山本 哲主任研究官には多大なご協力と有用な助言をいただきました。この場をかりて御礼申し上げます。

参 考 文 献

- 福田和代、2002：福岡平野に流出する夜間冷氣流の野外観測、日本風工学会論文集、(93)、103-113。
- 近藤純正、1982：複雑地形における夜間冷却—研究の指針—、天気、29、935-949。
- 近藤純正、山澤弘実、1983：夜間の地表面放射冷却と積雪および日本各地の最低気温の極値について、天気、30、295-302。
- 桑田直也、三上岳彦、成田健一、本條 毅、2000：都市内緑地のクールアイランド現象に関する実測（その2）、日本地理学会2000年度春季学術大会要旨集、270-271。
- 大久保 篤、川上正志、城尾泰彦、田中 強、藤部文昭、諏訪低温調査グループ、2003：冬季の長野県諏訪地域での著しい低温を伴う気温変動現象、気象学会春季大会講演予稿集、(83)、130。
- 鳥谷 均、1985：斜面下降風吹走時における斜面上の風と気温の時間変化について、天気、32、311-319。
- 横山長之、水野建樹、山本 晋、1981：晴夜安定層中の乱流と波動の測定、公害、16、67-76。
- 横山長之、水野建樹、山本 晋、林 正康、鈴木基雄、1984：接地安定層中の波動と乱流の解析、公害、19、303-312。

Temperature Oscillation around Lake Suwa Associated with Intense Nocturnal Cooling in Wintertime.

Atsushi OOKUBO*¹, Hitoshi ICHIKAWA*², Tsuyoshi TANAKA*³,
Toshikazu KOUNO*³ and Fumiaki FUJIBE*⁴

*¹ (*Corresponding author*) *Technical Department Climate and Weather Research Division, Tokyo District Meteorological Observatory (Present affiliation : Forecast Division Forecast Department, Japan Meteorological Agency, Chiyoda-ku, Tokyo 100-8122, Japan).*

*² *Technical Department Climate and Weather Research Division, Tokyo District Meteorological Observatory.*

*³ *Nagano Local Meteorological Observatory, Nagano.*

*⁴ *Meteorological Research Institute.*

(Received 31 March 2004 ; Accepted 7 December 2004)



第2回量的降水予測と水文に関する国際シンポジウムのご案内

近年のマルチスケール水循環研究の進展に併せて、
標記シンポジウムが下記のように開催されます。

このシンポジウムにおいては、降水量の推定や予測、
また、その結果としての水文への影響などに関する発表
を募集しています。地域、局地スケールに共通する
話題などに着目し、時間スケールとしては、ナウキャ
ストから季節内現象まで幅広く扱います。

以下のようなトピックスを予定していますが、これ
以外のものでも構いません。

- (a) ナウキャスト
- (b) 降水・水文予測のためのデータ同化
- (c) 影響の大きな現象の降水・水文予測における確率
予報
- (d) 降水・水文予測の検証
- (e) 利用者が望む予報と利用者への伝達
- (f) 降水量推定のためのリモートセンシング
- (g) 大気水文結合予測
- (h) 水文における暖候期 vs 寒候期問題
- (i) 降水・水文学量予測における不確実情報の定量化お

よび利用法

要旨投稿や参加登録が可能な web サイトは、下記の
WMO ホームページに作成予定です。

[http://www.wmo.int/web/arep/wwrp/wwrp_](http://www.wmo.int/web/arep/wwrp/wwrp_homepage.shtml)
[homepage.shtml](http://www.wmo.int/web/arep/wwrp/wwrp_homepage.shtml)

限りはありますが旅費の援助が可能な場合もありま
すので、お問い合わせください。

主 催：世界気象機関(WMO)および世界天気研究計
画(WWRP)

日 時：2006年6月4～8日

場 所：コロラド大学(アメリカ合衆国コロラド州ボ
ルダー)

使用言語：英語

要旨締切：2006年2月1日(300語以内)

問い合わせ先：気象庁予報部数値予報課 露木 義

Tel : 03-3212-8341 (ext. 3301)

E-mail : tsuyuki@met.kishou.go.jp