

ジャガラムガラ風穴・盆地の地形,気象および植生の特徴

誌名	農業気象
ISSN	00218588
著者名	真木,太一
発行元	養賢堂
巻/号	54巻3号
掲載ページ	p. 255-266
発行年月	1998年9月

農林水産省 農林水産技術会議事務局筑波産学連携支援センター
Tsukuba Business-Academia Cooperation Support Center, Agriculture, Forestry and Fisheries Research Council
Secretariat



ジャガラモガラ風穴・盆地の地形、気象 および植生の特徴

真木 太一

(農業環境技術研究所気象管理科)

Characteristics of Topograph, Climate and Vegetation around Jagaramogara Wind Cave Basin

Taichi MAKI

(Division of Agrometeorology, National Institute of Agro-Environmental
Sciences, Kannondai, Tsukuba, Ibaraki, 305-8604 Japan)

Abstract

An investigation was carried out at the Jagaramogara basin in Tendo, Yamagata from 1996 to 1997. Obtained results are as follows:

(1) There are wind caves or holes with changeable wind direction, blowing out cool air from the holes in summer half year of May to October and drawing in cold air in winter half year of November to April at the basin bottoms of Ohjigoku and Shimojigoku in Jagaramogara. The author found that the entrances of wind in summer and exits of wind in winter are the stone holes from the region below the cliff of Amayobari west slope to the region fallen down on upper Murakumonoike, and also found that the same regions mentioned above are the entrance in summer and the exit in winter including with the upper holes of the sloped area at Shimojigoku basin.

(2) The hole air temperature was observed 0°C at the end of May, 2 to 3°C with relative humidity of 100% and wind speed of 1.5 m/s from July to August, maximum of 5.3°C in the middle ten days of October and minimum of -5.4°C in the last ten days of January. There are ices in the wind cave at least until June. The air temperature of blowing wind from the hole in summer is low based on the conduction heat contacted from the ice to air and by cooling of sublimation, fusion and evaporation heats.

(3) Inversion of air temperature frequently appeared at night from autumn to spring and is fairly even at the daytime in summer. Strong cooling continued for a long period by adding to the cold air lake with temperature inversion and to cold air blowing out from the holes of basin bottom under a proper condition.

(4) The cold air current being relatively dry and warm is observed and typical wind speed is fairly strong of 2.0 to 2.5 m/s. The air current starts to blow from the elevation 760 m on Amayobari Mt., slides down on the slope and joins in the basin. The cold air lake is developed by radiation cooling. The thermal belt appeared at the elevation of 560 to 570 m.

(5) The plant profile indicates the reverse distribution to elevation which the semi-alpine plants of dwarfing with cold-drought resistance are found near the lower part of basin. There are many plant species, but the number of holes were decreased recently.

Key words: Air temperature inversion, Basin, Cold air lake, Reverse plant profile, Wind cave or hole.

キーワード: 気温逆転, 植生逆転分布, 風穴, 盆地, 冷気湖

1. はじめに

風穴は洞窟(洞穴)風穴と累石風穴に分けられる。前者は人が入れる程の連続した洞窟状の風穴であるが、後者は碎石が積み重なった累石状の風穴であり、石間に空気が通過できる細かい間隙を持つ。前者には富士山溶岩流の抜け跡の富岳風穴、鳴沢氷穴などがあり、貯蔵庫に利用されたり、最近では観光資源となっている。後者にはこのジャガラモガラ風穴や長走、渡瀬などの風穴があり、半地下の建物に冷気を導入し、蚕、スギの種子を貯蔵した農業気象の利用例があるが、最近では冷蔵庫の普及で使われていない。しかし、化石燃料の消費による炭酸ガス増加に起因した地球温暖化の問題から考えて、無公害の自然エネルギーの再利用を見直す必要がある。

ジャガラモガラは1971年3月に山形県天童市の天然記念物に指定されたのに引き続き、1995年3月28日には県の有形文化財「ジャガラモガラ風穴植物群落」に指定された。そして歴史、地理、気象、植物などの謎を探る『天然記念物ジャガラモガラ』が出版された。

荒谷(1920)は秋田県大館市の長走風穴について対流説、志保井(1974)は北海道常呂郡の風穴について氷河期の永久凍土説、江川ら(1980)は宮城県白石市の渡瀬風穴について冷風穴と温風穴の対流説、佐々木(1986)は東北地方の43箇所の風穴について累石風穴が多く対流説を提起している。最近の研究では大館市教育委員会(1993)、福岡(1994)、米谷ら(1997)、Shaw *et al.* (1997)などがあり、ジャガラモガラ風穴の研究では安斎(1943)、天童市教育委員会(1987)、梅本(1994)、佐藤(1996a;b)、阿子島・興野(1996)などがある。

ジャガラモガラ盆地は土壌に覆われ植物が生えているが、低部の石礫間から夏季に冷気が吹き出す。この冷気の吹き出し口は不明であるが、吸い込み口の位置は不明である。本研究は風穴冷気の成因、正確な風穴温の年変化、盆地の冷気流・冷気湖・気温逆転の特性、植生分布の逆転状況などを解明するとともに、夏季の吹い込み口・冬季の吹き出し口を捜索、発見することを目的とした。

2. ジャガラモガラ盆地の地形と観測・調査方法

ジャガラモガラは天童市の東南東で雨呼山A(905.5m)の中腹(北緯 $38^{\circ}20'35''$ 、東経 $140^{\circ}26'20''$)にある(Fig. 1.2A)。東西約90m、南北約250mの標高560mの等高線に囲まれた盆(窪)地、掘り鉢状地形(深さ約70m)で、一般に東西約40m、南北約60mの楕円形(540m等高線)の範囲(大地嶽)を指すことが多い。ここでは地

域一帯をジャガラモガラと呼び、各盆地は次の呼び名で区別した。ジャガラモガラには大地嶽O(約535m)を中心に、大畑の窪Ob(約530m)、牛蒡畑の窪G(約540m)、村雲の窪M(約635m)、一丁八歩の窪I(約510m)、上地嶽K(約515m)、下地嶽S(約485m)があり(安斎, 1943)、また大地嶽北部の駐車場(出入口)P5近くの中窪N(約555m)など、数個の盆地がある。

観測、調査は1年半、6回(1996年7月19日、10月7~8日、11月20~21日、1997年4月25~26日、8月1日、11月22日)実施した。大地嶽と下地嶽を中心に植物の種類・分布、草丈・生育状況の植生調査を、また大地嶽・下地嶽の風穴(Fig.2B)、盆地、周辺山地で気象観測を実施した。

風穴内外の気温、相対湿度はデジタル温湿度計(チノー、HN-K)またはアスマン通風乾湿計(中浅測器、E-401)、風速はアネモマスター風速計(日本科学工業、6061)、長期間の風穴温・地温はサーモレコーダー(ティアンドディ、TR-72)で測定した。

気温、相対湿度は高度200、100、50、30、10cmと風穴内部10~50cmで、風速は高度150cmと風穴内部で測定した。風穴温(気温、雪氷温)は下地嶽の北斜面下部の風穴内部50cmの石間で、地温は地中で、1年間、毎時間測定した。1cm深の地温は1996年11月20日~1997年4月25日と8月1日~11月22日、10cm深の地温は4月25日~8月1日に測定した。平均気温は山形、天童(消防署)、白河、高山、河口湖、軽井沢、日光、蔵王の観測値から内挿法で推定した。

3. 盆地の周辺地形と植生の実態調査

ジャガラモガラは村雲の池Miの東南東、標高800mの峰P7と鶴沢山U(731m)の南東250mの峰(720m)の各尾根を境に西側に滑り落ちた環状(Fig.1の鎖線)の地滑り地帯(安斎, 1943)にあり、滑落下面および大地嶽、村雲の池や下地嶽の上層部の地表面には角ばった石英粗面岩(流紋岩)の碎石が堆積している。また大地嶽南東の峰P7の直下は断崖で現在も崩落しているが、この崖壁・碎石地域が風穴と密接な関係がある。

大地嶽の風穴群は主として東斜面の盆地底部の緩傾斜地にあり、直径20~100cmのものが約30個ある。地表面が縦10~30cm、横・高さ5~10cmの碎石と土に覆われた裸地上にある自然の風穴は10個程度であり、他は土壌に埋まった所を掘った人工の風穴で周囲は土である。これら30個の風穴群は碎石間に通気可能な直径2~3cmの細かい間隙、すなわち基本となる風穴を持つ、この細かい風穴の集合体である。なお、盆地底部は土壌と植生で被われている。

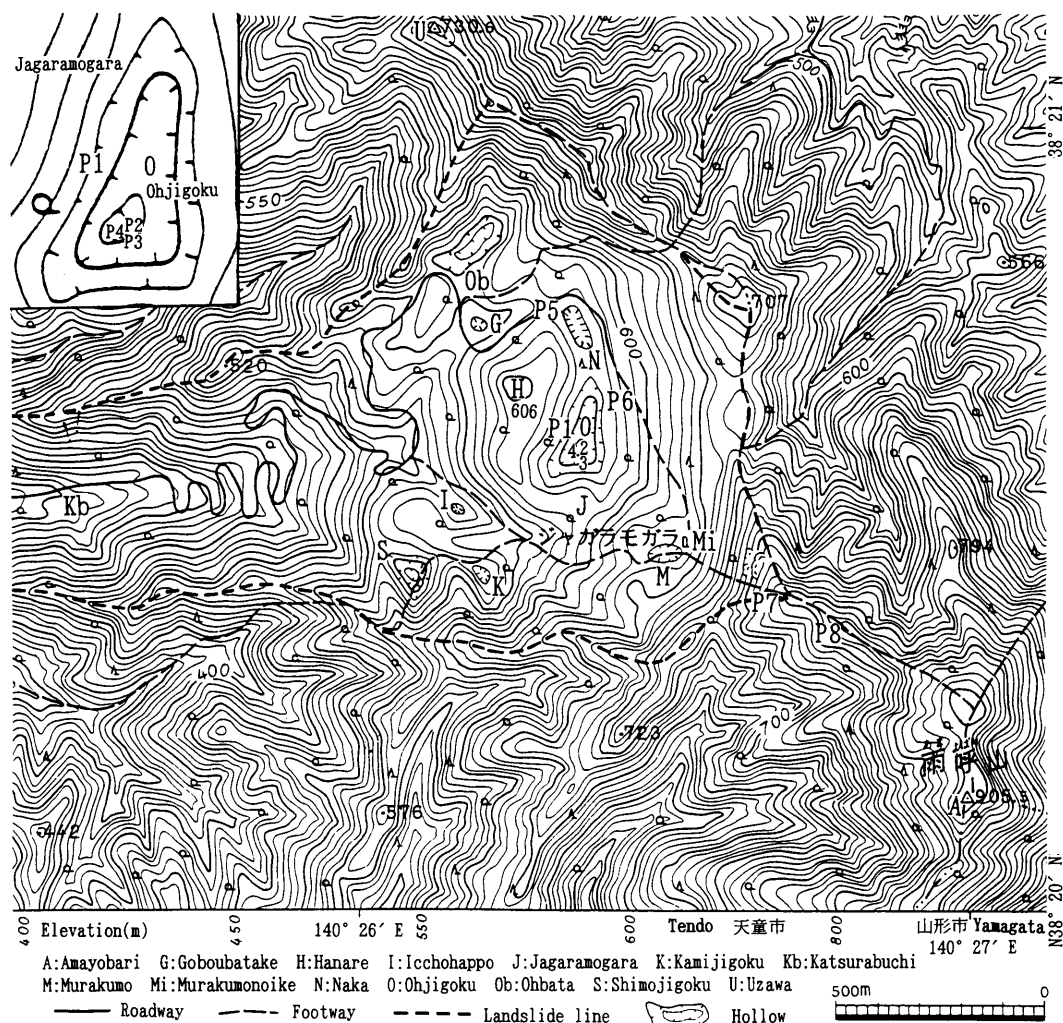


Fig. 1. Maps of Jagaramogara, Tendo, Yamagata and their observation points (P1 to P8).

下地獄では深さ 30 m の盆地北側の急斜面下端部のみ約 50 個の風穴があり，最大の直径は約 50 cm あるが，多くは 5～10 cm の小さい風穴(写真 B)である。それでも大地獄の風穴よりは相当大きい。周囲が土でないので大地獄のような細かい基本風穴の集合体とは形態が異なり，大地獄の基本風穴が下地獄の個々の風穴に相当する。

盆地の中・上層には縦 100 cm，横・高さ 50～100 cm の大きい碎石があり，上層部の所々にケヤキ，トチノキなどの高木が岩の間に根を張っている。盆地上層部の大きい穴は多数あり，樹下の岩の上には苔と羊歯などが生えている。夏季に冷気が吹き出す盆地下層の風穴周辺は苔などの植生が僅かであるが，底部には植生が繁茂している。

大地獄の植生は底部より 30 m の高さまでは高木がな

く，盆地下層部に矮小化した草本と低木などの亜高山植物があり，上層部にミズナラ，コナラの樹木や草本の非高山植物があり，植生の垂直分布が高度別に逆転している。さらに 700～900 m の高地にはブナ林がある。

大地獄は 535～560 m の低標高でありながら亜高山植物のベニバナイチヤクソウ，ウシノケグサ，レンゲツツジ，コキンバイ，ヤナギラン，ホソバノキリンソウ，クガイソウ，オミナエシなどがあり，また碎石地のため，ウシノケグサ，カワラナデシコ，キバナノカワラマツバ，ホタルカズラ，ウツボグサ，オミナエシなどの耐干性植物がある。下地獄では亜高山植物は少ないが，大地獄にないセツブンソウ，ニリンソウ，フクジュソウ，スギゴケ，クラマゴケなどもある。

上地獄，牛蒡畑の窪，大畑の窪では冷気の吹き出しが

なく、主に気温逆転に限定されるため亜高山植物は少ないが、それでも低平地と比較すると矮小植物が多い。矮小化はウツボグサ、キンミズヒキ、ハンゴンソウに見られ、その草丈は低平地の30~40%であることを確認した。

4. ジャガラモガラ盆地の気象観測結果

4.1 1996年11月20~21日の観測結果

(1) 気温・風穴温・相対湿度の時間変化

11月20日昼間は晴天で低温であったが、寒冷前線の通過に伴って20日21時頃より10mm程度のかなりの雨となり、21日2時頃まで続いた。その後21日4~12時は雲のやや多い晴天で、12時半頃から時々小雨が降る天候となった。

盆地上層P1、盆地下層P2、風穴上P3、盆地底部P4の地上1.0m高の気温変化をFig.3Aに示す。20日は晴天で昼間の15、18時にも盆地低部では気温逆転が発生した。従って、風穴外気温の方が低温であったが、21時頃より降雨のため外気温より風穴温の方が低温となった。降雨が止んだ直後の21日4時にはまだその傾向があり、7時には風穴温より外気温の方が低温となった。そして日の出とともに外気温が急激に上昇した。

低温の20日10時~21日10時には吸い込みであるのに対して、21日11時頃より夕方までの高温時には吹き出しで、風速はどちらも0.2~0.5m/sであった。自記データを見ると風穴温が0.0℃では吹き出し、0.0~-0.6℃の氷点下では吸い込みであった。ただし、気温が0℃を境に風向変換が起こるのではなく、あくまで外気温と風穴地温の温度差で発生する。

Fig.3Bに相対湿度の日変化を示す。盆地であるので、P3の風穴より1m高いP2の湿度は11月20日18時から21日7時までほとんど100%になっており、夜間には霧が発生した。一方、風穴内湿度は98%が時々発生したが、大部分が100%であった。ただし21日12時の91%は、外の風による影響で低かった。

(2) 地表面近くの気温・相対湿度の垂直分布

盆地底部の高度2mまでの気温の逆転状況(Fig.4A)をみると、11月20日12時に高度2m間では0.52℃/mの大きい逆転強度で直線的に増加している。逆転が晩秋期の昼間にも顕著に出ている現象は、盆地内の日陰、冷気の吹き出しなどの影響が大きいことを表している。な

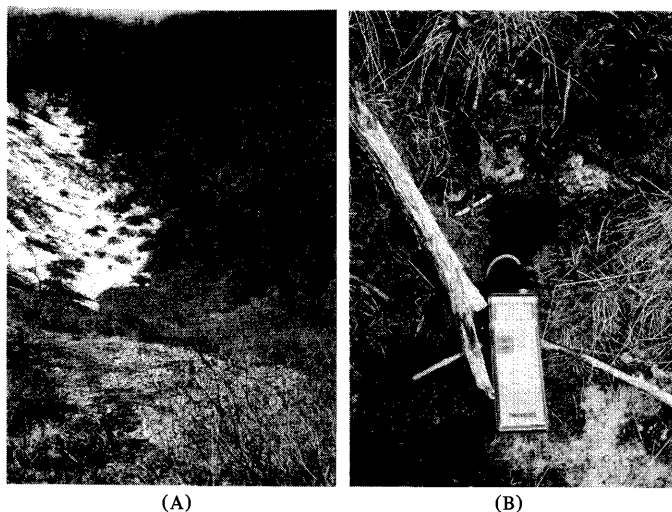


Fig. 2. Pictures of (A) Ohjigoku basin still found snow on April 26, 1997, and (B) one of wind caves at the bottom of Shimojigoku basin on November 20, 1996.

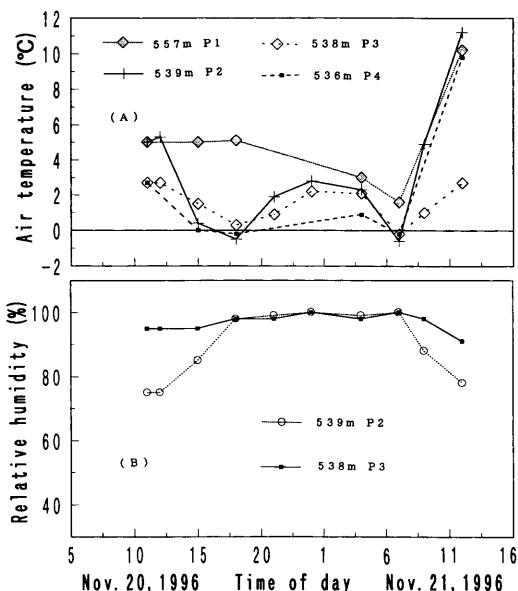


Fig. 3. Diurnal variations of (A) ambient (P1, P2, P4) and hole (P3) air temperature (B) ambient (P2) and hole (P3) relative humidity inside Ohjigoku basin.

P1: Upper point of hollow slope, P2: Outside the wind cave of lower hollow, P3: Inside the wind cave of lower hollow, P4: Bottom point of hollow.

お盆地低部には積雪はなかったが、50cmの雪だるまがあった。

一方、相対湿度では、Fig.4Bに示すように2m間で6.32%/mの大きい湿度減率で、直線的に減少している。

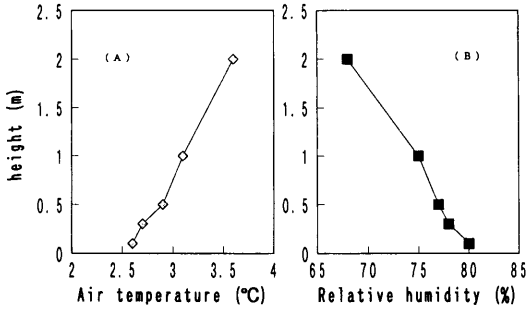


Fig. 4. Vertical profiles of (A) air temperature and (B) relative humidity near the ground surface at 12:00 Nov. 20, 1996.

(3) 盆地内の気温・相対湿度の垂直分布

Fig. 5A, Bに盆地内での気温・相対湿度の垂直分布を示す。20日11時にも気温逆転があり，20日15，18時に盆地上層部の林内の気温（Fig. 3A）は約5℃で変化はないが，盆地内の気温が急激に低下して，0℃前後になっている。また夜間には一時雨天であったが，晴天となった21日4時には再び逆転が発生し，7時には風穴温より低く，逆転が強かった。ただ盆地上層部の林内の気温も低下しており，逆転は弱まっている。日中の21日12時には東風になって急激に気温が上昇して10℃以上になり，盆地の中・上層部では逆転が解消したが，盆地内下層部には逆転が残っている。この時間帯も風穴から吹き出しがあり，風穴温1.7～2.7℃の冷気に影響されて低温であった。

相対湿度は20日11～18時に上層部が低く，特に18時では下層部が高かった。21日4，7時では550m以下では霧のため100%となっている。なお21日12時では相対的に下層部の気温が上昇したため，乾燥して75%前後であった。

(4) 冷気流と山地斜面の気温・相対湿度の垂直分布

11月20日18時の山地斜面での気温の垂直分布（Fig. 6A）によると，大地嶽・中窪の上層部や580m付近にもかなりの高温域があり，550～580m付近に斜面温暖帯，特に盆地の上端に相当する560m付近に最高高温域が認められた。高度557mと539m間の気温逆転強度は0.31℃/mと大きかった。なお，盆地内では放射冷却で急激な温度低下が起り，-0.5℃を記録している。

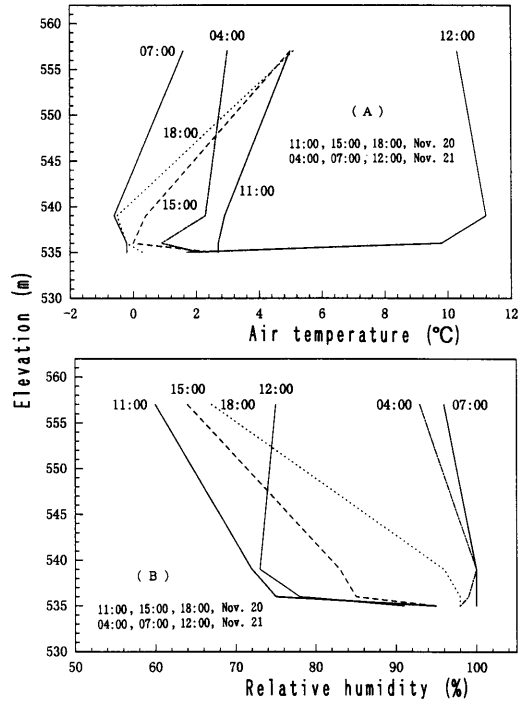


Fig. 5. Vertical profiles of (A) air temperature and (B) relative humidity around Ohjigoku basin at 11:00, 15:00, 18:00 Nov. 20, 4:00, 7:00, 12:00 Nov. 21, 1996.

一方，相対湿度の垂直分布（Fig. 6B）は気温と逆であり，特に高度560m付近に斜面温暖帯による乾燥域が顕著で，557mと539m間の湿度減率は1.61%/mで大きく，下層部では今にも霧が発生しそうに高湿であった。

4.2 夏季における気象観測結果

(1) 1996年7月19日の観測結果

1996年7月19日9～15時の風穴（気流出口）の気温

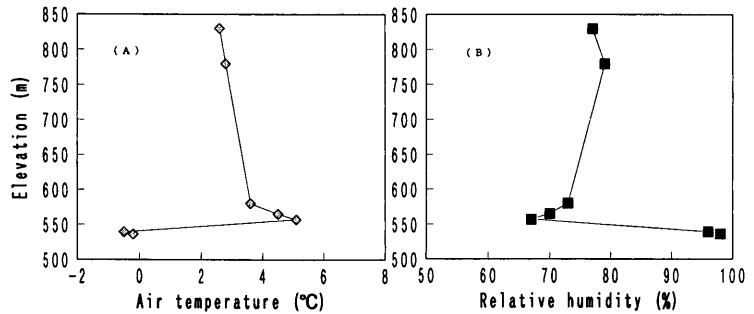


Fig. 6. Vertical profiles of (A) air temperature and (B) relative humidity around Ohjigoku basin and Amayobari Mountain at 18:00 Nov. 20, 1996.

P1: 557m, P2: 539m, P3: 538m, P4: 536m, P5: 565m, P6: 580m, P7: 780m, P8: 830m.

は2.8~6.0℃、相対湿度は80~100%、風穴からの冷気の吹き出し風速は0.5~1.5 m/sであった。大きい風穴と小さい風穴では測定位置によって気象値に差異(風穴固有の気温から外気温までの温度変化)が認められた。また、風穴での測定時間による気温・湿度差は小さかった。

(2) 1997年8月1日の観測結果

Fig. 7に盆地の気温の垂直分布を示すように、1997年8月1日1時には22℃を越える気温でありながら、盆地底部では10.7℃で10℃以上の逆転であり、特に標高557mまでは逆転が強い。また6時でも5℃の逆転が発生しているが、12時に標高539mでは、30℃近い高温で逆転は弱まり、僅かに風穴上で0.6℃の逆転があるのみである。なお、標高580~640m間は1時、6時には僅かな逆転であり、12時にはほとんど等温であった。

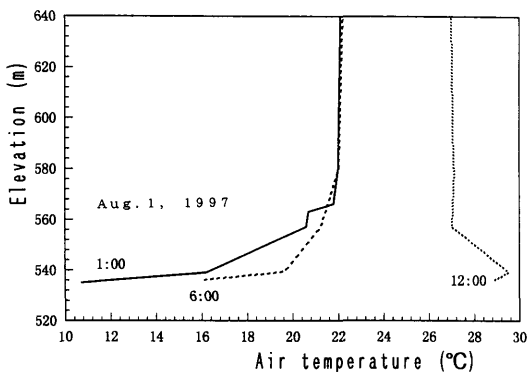


Fig. 7. Vertical profiles of air temperature around Ohjigoku basin at 1:00, 6:00 and 12:00 Aug. 1, 1997.

風穴温は8月1日の早朝から昼間には外気温より著しく低く、大地獄、下地獄で2.6~2.9℃であり、また8月1日の夜間には2.5℃まで低下しており、夏季としては非常に低温であった。一方、10 cm深の地温は8月1日の夜間には2.8~3.0℃であり、風穴温の影響を受けている。なお、8月1日の1 cm深の地温は最高20.6℃、夜間に7.8℃、8月2日の早朝には6.8℃であった。

風穴内の最高湿度は100%であるが、風穴内の測定位置で変わり外気の影響を受けるため、それ以下の場合が多かった。風穴気流の風速は最高1.5 m/sで、前年の風速と概ね同様であったが、これも外気の影響を受けている。

4.3 風穴温・地温の年・季節変化

(1) 風穴温・地温の年変化特性

ユリウス日(1997年1月1日が1日目)で表した5日間移動平均による最高・最低風穴温・地温の年変化(Fig. 8A, B)によると、風穴温の変動は非常に小さい。夏季

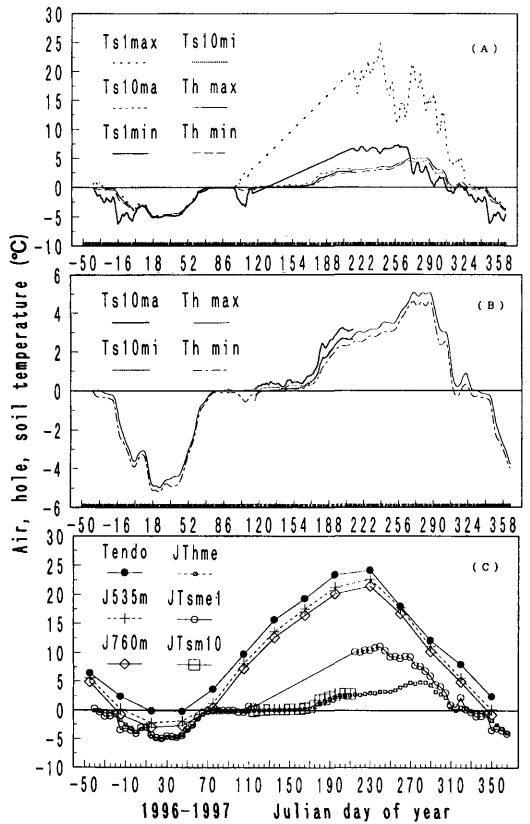


Fig. 8. Annual variations of (A, B) hole air and soil temperature and (C) every 5-day hole air temperature and soil temperature at Shimojigoku basin and monthly mean air temperature at Tendo and Jagaramogara.

Ts1max, Ts10ma: Maximum soil temperatures at 1 and 10cm depth, Ts1min, Ts10mi: Minimum soil temperatures at 1 and 10cm depth, Th max, Th min: Maximum and minimum hole air temperatures, Tendo: Monthly mean air temperature at Tendo, J535m, J760m: Estimated air temperatures at elevation 535m on Jagaramogara basin and 760m on Amayobari Mountain, JTsm5: Every 5-day hole air temperature of 5-day running mean, JTsm1, JTsm10: Soil temperature at 1 and 10cm depth.

には最高・最低地温は風穴温より高く、最高地温は冬季でも風穴温より僅かに高いが、10~12月は最低地温は風穴温より低い。積雪の多い1月上旬~4月上旬は最高・最低地温と風穴温はほとんど同じであり、雪が消えた4月10日より最高地温は風穴温より高く、最低地温は風穴温より低い。春・夏季の10 cm深の平均地温は風穴温より少し高い。また同最低地温は風穴温より4月下旬~6月中旬は低いが、7月末までは同温であり、風穴温の影響を受けて1 cmの地温より著しく低い。

Fig. 8Cの平均風穴温(JTsm5)、1, 10 cm深の平均地温(JTsm1, JTsm10)および天童市の月平均気温(Tendo)とジャガラムガラの標高535m, 760mの推定

月平均気温(J353 m, J760 m)の年変化によると，風穴温は風穴外気温より低く，特に暖候期には顕著である。風穴温の年較差は各地の気温較差より著しく小さい。また，平均地温がジャガラモガラや天童の平均気温より低いことは，風穴温と盆地の気温逆転による影響を顕著に受けている。風穴温は地温より夏季に低く，冬季には僅かに高い。これらの変化形態を細かく見ると次のとおりである。

(2) 秋季から春季への風穴温・地温の変化

秋季に風穴温は急降下して，1996年11月20日より-0.6℃の氷点下になり，1997年1月24日に-5.4℃の最低値を記録している。1月中旬～2月中旬が-4.7～-5.0℃の低温期で，積雪のため風穴温，地温ともほぼ一定である。この期間は深い積雪にもかかわらず，下端風穴から弱い吸い込みがあり，外気の低温が風穴内に伝達され，冷熱源の貯熱が進む。これは兩呼山の崖壁下部と村雲の池の上部碎石地付近に弱い吹き出し風がある事実を裏付けている。なお，最低地温は1996年12月16日と28日の-7.6℃であり，外気温の影響で低温であるが，12月中・下旬頃は積雪が少なく，風穴温の方は-2.6～-3.5℃であった。

風穴温は上述の最低値から緩やかに上昇し，2月5日の-5.0℃から15日，21日，28日，3月2日に1℃ずつ上昇して17日に0.0℃に，一方，地温は1月24～25日に最低-5.2℃，26日の-5.0℃から2月17日，21日，27日，3月2日に1℃ずつ上昇して，20日に0.0℃になっている。

(3) 春季から秋季への風穴温・地温の変化

風穴温は3月17日，地温は3月20日に0.0℃を記録した以降，5月1日までは時々氷点下が発生している。風穴温は4月11日まで-0.1～0.0℃であるが，風穴上の雪が消えると，外気温の影響で4月17日に-1.5℃，26日に-0.6℃の低温が発生している。風穴温は5月26日に0.0～0.1℃であり，6月10日頃までは0.1℃程度で，変動が極めて小さい。

地温は4月9日まで日較差が非常に小さく，0℃を越えることはなかったが，4月10日14時に最高1.0℃を記録した反面，この日に風穴内の温度計に接した断熱材である雪氷が消失したため，夜間には-1.3℃まで下がっている(Fig.9B)。そして4月12日-4.2℃，17日-5.5℃(日較差9.9℃)，26日-0.9℃などの低温を記録している。

日最高風穴温は6月28日の1.1℃以降，7月10日，8月2日，9月15日，9月27日に1℃ずつ上昇し，9月28日～10月16日に年最高5.3℃を何度も記録している。なお10月16日は5.3℃の最長日で，かつ最後の発

生日であった。その後急低下し，日最低は10月17日3.9℃，11月4日-0.1℃であった。

最低地温は4月頃は風穴温より低く，6～9月は高い。地温は日較差が非常に大きく，特に日最高地温の変動が大きいのに対して，日最低地温は8月1日～9月30日に6～8℃で比較的安定している。これは盆地での逆転層の発達と風穴からの冷気の吹き出しが影響しており，興味深い。

4.4 風穴温・地温の日変化

代表的な風穴温・地温の日変化(0～24時)をFig.9A～Cに示す。年最低地温を示した1996年12月16日には-3.1～-7.6℃であるが，外気温の影響が弱められ時間の遅れのある風穴温では-1.8～-2.7℃で，少し低温化しただけで変動幅は小さい。地温は16日7時に最低，15時に最高の顕著な日変化を示した。17時7時から急

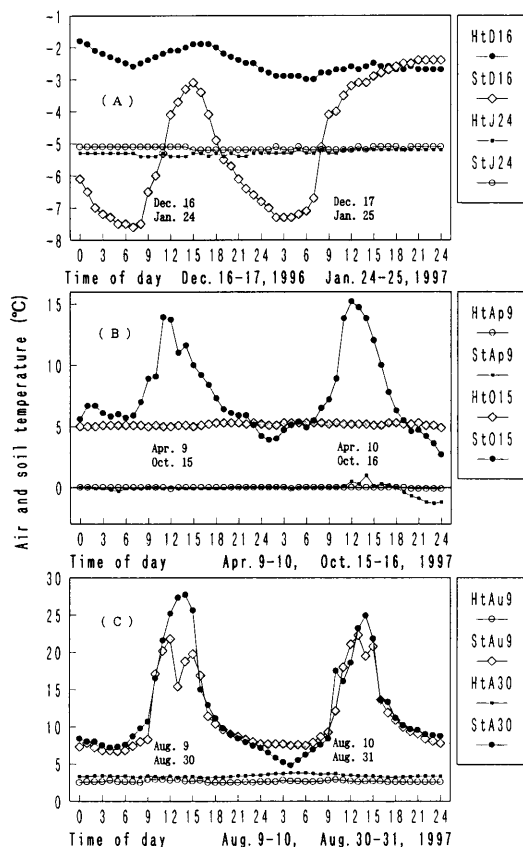


Fig. 9. Typical diurnal variations of hole air and soil temperatures of wind cave in Shimojigoku basin.

HtD16, StD16: Hole air and soil temperatures on Dec. 16-17, 1996, HtJ24, StJ24: Hole air and soil temperatures on Jan. 24-25, 1997, HtAp9, StAp9: Hole air and soil temperatures on Apr. 9-10, 1997, HtO15, StO15: Hole air and soil temperatures on Oct. 15-16, 1997, HtAu9, StAu9: Hole air and soil temperatures on Aug. 9-10, 1997, HtA30, StA30: Hole air and soil temperatures on Aug. 30-31, 1997.

激に上昇し、18時以降は風穴温を越え、降雪のため夜間にも上昇し続け、前日とは全く異なった変化形態を示した。

また、同温の年最低地温 -7.6°C を示した12月28日(図省略)には $-3.6\sim-7.6^{\circ}\text{C}$ の変化で、この日も積雪のため一日中上昇し続けており風穴温に近く、12月17日と類似している。1997年1月24日には風穴温は $-5.3\sim-5.4^{\circ}\text{C}$ 、地温は $-5.1\sim-5.2^{\circ}\text{C}$ で、特に25日には多積雪のため風穴温と地温はほとんど同温で、かつ温度変化のない典型的な変化形態を示した。

年最高値を最後に記録した前述の10月16日の風穴温は $4.9\sim 5.3^{\circ}\text{C}$ で、日変化が小さいが、地温は最低 2.7°C 、最高 15.2°C で、日変化が顕著である。なお、夜間には地温が風穴温よりも低い。

盛夏期の8月9～10日と年最高地温を示した8月30日の地温は日中には風穴温より著しく高く、夜間には少し高い。30日の最低地温は 7.1°C に対して最高地温は 27.7°C と顕著な日変化を示すが、風穴温は $3.1\sim 3.5^{\circ}\text{C}$ の小さい日変化である。両期間の風穴温は差が小さく、3週間で $0.5\sim 1.0^{\circ}\text{C}$ 上昇したのみである。なお8月9～10日13～14時頃の地温の一時的低下は狭い盆地北側の山陰、木陰に起因する。

5. 結果の考察

5.1 盆地・風穴の気象観測結果の考察

(1) 夏季における気象特性の考察

1996年7月19日の大地嶽風穴の気温、湿度、風速は変動が大きいが、これは吹き出しの弱い風穴における測定位置の違いであって、風穴本来の値ではない。従って、最大風速 1.5m/s 、最低気温 2.8°C 、最高湿度100%が風穴本来の気象値と考えられる。風穴温は夏季としては極めて低く、風穴内は多湿であるが、出口付近で結露するほどではなく、岩石面の水や濡れた水面からの蒸発による飽和空気である。

1997年8月1日の大地嶽の風穴温(Fig.8)は $2.8\sim 2.9^{\circ}\text{C}$ 、下地嶽では $2.5\sim 2.9^{\circ}\text{C}$ であり、盆地内での夜間の逆転は非常に大きかった。この冷気の原因は、風穴からの吹き出しによる低温化と夜間・晴天下での放射冷却による低温化が作用するが、主因はあくまで風穴からの吹き出しである。また、風穴の風速、気温、湿度は測定位置によってかなり変化するが、大地嶽、下地嶽ともに気温は最低 2.5°C 、相対湿度は最高100%、風速は最大 1.5m/s が風穴の特性値である。

(2) ジャガラモガラ風穴の気温特性の考察

ジャガラモガラの標高別の年平均気温を天童(105m)の 11.3°C 、山形(152.5m)の 11.2°C 、軽井沢(999.1m)

の 7.7°C 、日光(1291.9m)の 6.6°C などから推定すると盆地底の標高535mでは 9.6°C 、760mでは 8.7°C となるが、この年平均気温より年最高風穴温の 5.3°C の方がはるかに低温である。従って、風穴の低温は年平均気温・地温に起因するのではなく、後述するようにその成因には冷熱源の水が地中に長期間存在することを意味している。

なお、大館市北部の長走(矢立)風穴(夏季、国見山上部の標高500mでの吸入と標高165mでの放出)の風穴温は12～6月に 0.0°C 、7～11月の順に 0.6 、 1.1 、 1.7 、 3.3 、 1.7°C であり、10月に最高 3.3°C であった(荒谷、1920)。また20cm深の最低地温は1992年6月12～13日に 0.8°C 、11月3日に 0.6°C である(大館市教育委員会、1993)。これらは長走風穴(北緯 $40^{\circ}20'$ 、標高165m)、渡瀬風穴(38° 、300m)の緯度、標高からは妥当と考えられる。

一方、阿子島・興野(1996)によるジャガラモガラの最低気温は5～11月の順に 2.7 、 6.7 、 8.7 、 9.3 、 8.7 、 5.3 、 -1.3°C であるが、これは風穴上に小さい屋根型シェルターを掛けた測定値で、風穴近くの外気温と判断される。

(3) 吹き出し・吸い込み風穴の原理とモデル

安斎(1943)、天童市教育委員会(1987)は大地嶽の底部から吹き出す冷気は、その標高より低い桂淵Kb(Fig.1)からの吸い込みの風であり、気圧説を提起しているが、これは風向が逆であり、事実と反する。

梅本(1994)は植生逆転の主原因が盆地への冷気流の流入による放射冷却・気温逆転と冷気湖の発生に起因する低温化であり、風穴冷気による低温化の影響は小さいとしたが、盆地だけの低温化では弱いと判断される。それは5.2(1)で述べる盆地の逆転発生、特に昼間の高発生頻度(6回の観測日のすべてで逆転が発生)および大畑・牛芳畑の窪の盆地はスケールの大地嶽と類似するが、現在は冷風穴がなく、亜高山植物があまりないことから、大地嶽での冷風穴の関与が示唆される。

阿子島・興野(1996)は、1995年の実測から、①春季は吸い込み、②夏季は吸い込み>放射冷却の加算、③秋季は吸い込み<放射冷却の加算、④冬季は吸い込みによる冷気の地中岩石層への負の蓄熱のモデルを提案しているが、ジャガラモガラより高標高域からの吸い込みと吹き出しの現象に気付いていないのは実に残念である。

事実、暖候期には雨呼山の層部からの吸い込み空気が碎石空隙を伝わって盆地底部付近から吹き出す。この考え(次のモデル)はジャガラモガラの文献には全くないものである。多くの風穴は傾斜地の片斜面の下層にあり、低温の吹き出し範囲が狭いが、原理的には荒谷(1920)の簡単な対流説(モデル)で説明できる。

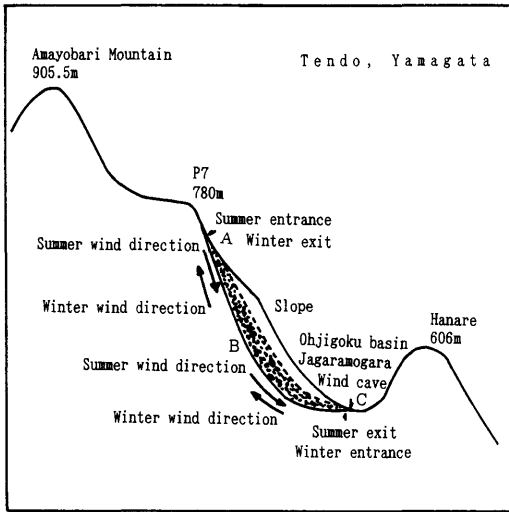


Fig. 10. Schematic model of wind directions in summer and winter at the wind cave in Ohjigoku basin of Jagaramogara.

A: Upper hole, B: Middle hole, C: Lower hole.

この対流モデルは斜面の上端出入口Aから地中内部Bを経て下端出入口Cに連続した穴がある場合、冬季は地中温が外気温より高いため、Bの軽い空気はA(温風穴)から吹き出すので、それをCから補う。逆に夏季は地中温が外気温より低い場合、Bの重い空気はC(冷風穴)から流れ出すので、それをAから補うモデルである。このモデルをジャガラムガラに適用すると Fig.10 のようになる。

(4) 温度差による風向逆転の原理

前述したとおり、ジャガラムガラの大地嶽、下地獄などは暖候期(5~10月)には冷気の吹き出し穴となり、寒候期(11~4月)には吸い込み穴となる。ただし、暖候・寒候期の境界期4~5月や10~11月前後では、地中内岩石温(地温、風穴温)との温度差によって気温が高い昼間では吹き出し、気温の低い夜間では吸い込みとなる。

昼間には風穴内下層部の気温が山地上層部の気温より低いと、風穴内空気の密度は高くなり、密度差によって重い空気は風穴内斜面を流下して、下端の冷風穴から吹き出す。逆に夜間には風穴内の気温が山地上層部の風穴外気温より高いと風穴内上層部の空気の密度は低くなり、軽い空気は風穴内斜面を上昇する、そして下端の風穴では呼応して吸い込みとなる。従って、あくまで風穴内温度と山地上層部の上端の風穴付近の気温との温度差に起因して気流が発生する原理であり、周辺との気温差によって吸い込み・吹き出し風向が逆転する現象は興味深い。

このように、吹き出し・吸い込み風は季節や標高による温度差が関与するため、ある特定の限界温度で風向が

変わる訳ではない。外気温と風穴内気温との温度差で、風穴温が高ければ吸い込み、低ければ吹き出しとなる。ただし、温度差による風向変化は時間的な遅れが関与するため、短時間の小さい温度変化には応答できない。

(5) 吹き出し・吸い込み風穴の位置特定

暖候期は、ジャガラムガラの冷気の吹き出し口(冷風穴)は、その風穴の標高535mより相当高い標高の吸い込み口(温風穴、冬季に温風が吹き出す)と連結していて、上から吹き込み、下から吹き出す。逆に寒候期は暖候期の吹き出し穴が吹き込み穴に代わり、高標高地の温風穴から温風が吹き出す。この温風穴は、雨呼山の大地嶽に面した西側滑落斜面上層部の石英粗面岩崩落(崖錐)地域から村雲の池Miの上部にある碎石堆積の急斜面地域であり、その位置を特定した(Fig.1)。厳密な意味での同一空気の吸い込み・吹き出しではないが、1996年11月、1997年8月に両地点での吹き込み・吹き出しを確認した。

下地獄では底部から30m直上までの斜面に堆積する大型の碎石空間が主な吸い込み穴である他に、上述のMi南部の急斜面崩落・岩屑地域の間隙穴が下地獄の冷気の吹き出し穴に連結していると考えられる。その理由としては、大地嶽と下地獄の風穴温が1996~97年の観測で一致した事実が挙げられる。

(6) ジャガラムガラ風穴における冷熱源の時期・場所の共通性

1997年では少なくとも5月26日までは風穴温は氷点下であり、例えば1996年・1997年の7月19日における大地嶽の風穴温は2.6~2.8℃であった(Fig.8)。このように夏季においても低温で、年平均気温・地温よりはるかに低いことは、山中地下に冷熱発生源があることを示唆している。従って5月27日以降も相当の期間、氷による冷熱源があると推測される。また1997年7月19日の大地嶽、下地獄の風穴温は、前述のとおり風穴が違ってほとんど同温であることは一層興味深く、重要な意味を持っている。

さらには、1996年10月6日の大地嶽の最低は4.7℃、1997年10月5、6日に下地獄の最低は4.7、4.8℃であった(Fig.8)。また、1996年11月21日の大地嶽、下地獄の最低は同じ-0.1℃、1997年11月21日の下地獄の最低は0.0℃であった。その他、1997年4月25日にも大地嶽と下地獄の風穴温は一致した。このように年次、場所の違いにも関わらず一致することは上述の発生源が同一地域の冷熱源で、同じ冷却機構に起因する事実を示唆している。

(7) 風穴内冷気の発達と持続の原理

富士山の風穴(約1000m)では年中、矢立風穴(165

m) では夏季6月にも水があるように、ジャガラモガラ風穴内部にも水が長期間あると考えられる。従って、この水が残存する期間は冷却作用によって0℃以下に維持される。

風穴温が長期間低温である原理は、盆地内での夏季の低温と冷気の停滞、大地嶽、下地嶽での類似した気象などから考察すると、暖候期に融解したばかりの0℃に近い水滴が風穴内の天井石面から落下または壁面を伝わって流下する時に、天井付近では風穴の中を吹く風(上端の吸い込み穴からの気流)によって蒸発する。その際に蒸発潜熱(597.3 cal/g)が奪われることで急速にその水滴は冷やされ、落下する時や壁面を流下する時に再氷結する。従って、風穴内では壁面および下部の石面(床面)に氷があり、天井や壁面上部では氷は融解するが、下層部では凍り、その状態が細かい空隙内で繰り返されるため、氷の位置は下がるが氷の量はあまり変わらない。

再度凍った氷が融ける時にも周辺の空気を冷却するため床面ではこの氷に触れた空気は熱伝導で冷却される。また融解熱(79.7 cal/g)の他に、直接氷から昇華する時の昇華熱(676.9 cal/g)も冷却に大きく寄与する。冷やされた空気は各間隙の床面付近に移動するとともに、風穴の吹き出し口へと流下する。一方、夏・秋季には、たとえ氷がなくなっても岩石、土砂の地下冷源からの熱伝導と気流の流下による蒸発潜熱に起因して低温化する。

大きい洞窟内では融解・氷結は一度だけであるが、ジャガラモガラのような細かい風穴内では何度も繰り返され、長期間継続することになる。このため標高の低い所でも長期にわたり持続する。前述の長走・渡瀬風穴の緯度と標高から判断してジャガラモガラ下地嶽では485mでも夏季に著しい低温の風穴が十分存在することになる。

なお、風穴の上端・下端間は碎石と空隙で連結しているが、ジャガラモガラでは中間の表面層は土砂と森林で覆われている。その土砂と碎石面では碎石間同志の接触面が極めて少なく空隙が沢山あって上層からの熱伝導は極端に小さく断熱状態に近いため、主に碎石と外気との熱収支に支配される。

以上のように、風穴内の氷は融解、氷結を繰り返しながら次第に下層へと移動するが、水滴は最終的には地下へ落下して伏流水となり1km下流の桂淵Kbから流れ出す。

5.2 ジャガラモガラ盆地の局地気象現象

(1) 冷気流・放射冷却・逆転層・冷気湖の特徴

ジャガラモガラでは雨呼山の上層部から風速1.0~2.5 m/sの冷気流が盆地内に流れ込み冷気湖を形成するが、盆地の容積が小さいため、すぐ冷気で満杯になり、底部の空気は安定して動きにくくなる。それでも慣性による

冷気流の吹き込みによって盆地内の一部の空気は中窪付近から溢れ出す。同時に大地嶽下面では夜間中、放射冷却で一層低温となる。冷気流は日の出後、解消の方向に向かうが、盆地底部では冷気源が安定的にあり、逆転が日中でもかなりの頻度で解消しない状況が続く。

大地嶽の気温逆転(5m間差)の発生頻度は暖候期5~10月に31%、最多の10月では52%、最少の7月で19%である(阿子島・興野, 1996)。ただし、気温逆転の観測位置の点で過小評価である。それでも、一般の盆地では日中の逆転発生は希であるが、大地嶽では風穴からの吹き出しで発生頻度が非常に高い。

ジャガラモガラは盆地という特徴があり、盆地内への冷気の流入、放射冷却、気温逆転・冷気湖の形成と盆地底部の風穴からの冷気放出という非常に特殊な条件下での低温化が加算されて、一層強く、長期間冷却する。この低温の両条件が相関連して周辺環境や植生に影響を与えることは特異な珍しい現象である。

(2) ジャガラモガラ盆地の冷気流の特徴

盆地下層で吹く冷気流は、近藤(1984)の次セル法で表される。真木・黒瀬(1988)は愛媛県西条市での冷気流(局地風アラセ)の算定に利用し、実測値とよい一致を得ている。

冷気流速:

$$U_k = \left\{ \frac{\theta_a - \theta_s}{1+F} \frac{C_H}{C_M} \frac{g}{T_m} L_s \sin \alpha \right\}^{1/2} \quad (1)$$

冷気層厚:

$$H_k = C_H L_s \quad (2)$$

ここで、 θ_a : 気塊温位、 θ_s : 斜面の地表面温位、 F : 地表面と冷気層内の摩擦応力(=1)、 C_H : 斜面の熱バルク係数、 C_M : 地表面の摩擦バルク係数、 g : 重力加速度、 T_m : 大気平均気温、 L_s : 冷気滑降距離、 α : 斜面傾斜角である。10m高の植被粗度面では $C_H/C_M=0.5$ (近藤, 1984)である。

冷気流は800mよりやや下層の760mの断崖付近から吹き始め、式(1)を用いると、標高差($L_s \sin \alpha$): 200m(P5の標高560mとP7より少し下層の吹き始め地点の標高760mの差)、逆転層温度差: 1~3℃とすると冷気流の風速は1.0~2.3m/s、冷気流層の厚さは2.7~3.4mと推定された。

冷気流は、雨呼山の西向斜面を盆地へと流れるが、P5付近の1.0~2.5m/sの風は、この冷気流と盆地から溢れ出した風との合流した相対的に0.2m/s程度大きい気流であり、算定値とほぼ一致する。

5.3 ジャガラモガラ盆地の植生の動態

大地嶽、下地嶽の植生には、①暖候期に盆地底部より吹き出す冷風と②盆地の地形特性に起因した冷気流の停

滞、逆転層の発達、冷気湖の形成による低温とその低温に遭遇する時間が長い、③冬・春季は積雪が深い、④狭い盆地のため日陰の時間が長く、霧の発生が多い、⑤碎石のため乾燥化しやすいなど、非常に特殊な多くの条件が作用して、耐寒性・耐干性・矮性の亜高山植物が優先する特徴がある。従って、盆地低部では秋の紅葉は早く、春の萌芽は遅い。また紅葉は盆地上層から下層へ、萌芽は上層から下層へと進行する逆転した特徴を示す。

佐藤(1996b)によると、大地嶽では寒地・高山性の植物の他に、山地植物や人里植物が加わっているため、盆地底部の長径62m、短径30mの楕円形の僅かな範囲に36科79種の豊富な植物種がある。5月中旬に盆地周辺は深緑でレンゲツツジは満開でも、低地になるにつれて開花してなく、底部では冬季のような堅い蕾状態である(著者はこの状態を1998年5月22~23日に確認した)。また、大地嶽では、近年、盆地底部への土壌の流入と土壌堆積により風穴が減少し、高温・湿潤化してウシノケグサ、ベニバナイチヤクソウ、ハナゴケ、カワラナデシコが減少している。逆にヤナギラン、コキンバイや非高山性のチマキザサ、ノダケ、ハンゴンソウ、カセンソウ、樹木ではキンギンボク、クロウメモドキ、エゾイボタンキ、オクチョウジザクラ、また人里植物ではセイヨウタンポポ、オオバコ、シロツメクサなどが増えている。

天然記念物として風穴を保存するには、ある程度、土壌と非高山植物の撤去が必要である。従って天童市教育委員会(1987)、佐藤(1996b)は一部土壌を剥し、風穴を作り一般植物、特にチマキザサ、キンギンボクを除去した結果、ジャガラモガラ本来の植生が回復しつつある。

6. ま と め

(1) ジャガラモガラ盆地の大地嶽、下地嶽の底部には風穴があり、暖候期(5~10月)に冷気の吹き出し口(冷風穴)となり、逆に寒候期(11月~4月)には冷気の吸い込み口に交替する。大地嶽風穴への暖候期の吸い込み口・寒候期の吹き出し口(温風穴)は雨呼山の西斜面上層域の崖下部およびそこから崩れ落ちた村雲の池上方の碎石地帯であり、下地嶽風穴への同碎石地帯および盆地上層域の碎石地帯である。

(2) 風穴温は5月下旬に0℃、7~8月に2~3℃(相対湿度100%, 風速1.5m/s)、10月中旬に最高5.3℃、1月下旬に最低-5.4℃であった。暖候期の風穴の内部には少なくとも6月頃まで水があり、その水や岩石の冷源による風穴内気流への接触伝導と水の昇華・融解・蒸発による昇華熱・融解熱・蒸発潜熱による冷却のため、風穴温は低温となる。

(3) 晴天、弱風時には、盆地の気温逆転は秋・冬・春

季の夜間はもとより、夏季の昼間にもかなりの頻度で発生する。顕著な気温逆転は地面から2mまでの逆転強度で0.50℃/m、536~560m間でも0.31℃/mであり、相対湿度減率は6.3%/m、1.6%/mであった。盆地内では盆地底部の風穴からの冷気放出と気温逆転、冷気湖形成という特殊な条件による低温化が加算されて、一層強く長期間冷却される。

(4) 典型的な冷気流では2.0~2.5m/sとなる相対的に乾燥・高温の風は雨呼山の上層760m付近から吹き始め、斜面を滑降して盆地内に流入し、放射冷却によって冷気湖を形成して、一部の気流は大地嶽北部の盆地上端より溢れ出す。逆転層の上端付近に形成される乾燥した高温の斜面温暖帯は盆地上端の560~570m付近に発生する。

(5) 盆地低部には耐干・耐寒性の矮小化した亜高山植物が分布しており、植生分布が逆転している。亜高山植物に山地植物・人里植物が加わり、植物の種類が豊富である。近年、土壌流入・堆積と植生量の増加によって風穴が埋没、減少している。

謝辞：資料提供に関して山形大学阿子島 功先生、天童市立旧東村山郡役所資料館、天童市消防署に、測器借用に関して九州農業試験場大場和彦室長に感謝します。

引用文献

- 阿子島 功・興野寛久、1996：天童市ジャガラモガラのふしぎ。「天然記念物ジャガラモガラ」、13-69。
 荒谷武三郎、1920：風穴の研究。理学界、**18**(3)、208-213。
 安斎 徹、1943：天然記念物ジャガラモガラ並びに三ツ石調査書。「史跡名勝天然記念物調査」(第2報)。山形県、2-14。
 江川良武・堀 伸三郎・坂山利彦、1980：風穴の成因について一過去における低温気候起源説に対する反論一。地学雑誌、**89**(2)、85-96。
 福岡義隆、1994：風穴の微気象に関する研究。気象利用研究、**7**、13-16。
 近藤純正、1984：地形と地表面性質が夜間の斜面風・山風・盆地大気の冷却に存ぼす効果(1)。天気、**31**、625-632。
 米谷俊彦・宮下晃一・山地一代・柏木良明、1997：羅生門ドリーネにおける微気象要素の経時変化。中国・四国の農業気象、**10**、44-45。
 真木太一・黒瀬義孝、1988：愛媛県西条市のハウレンソウ栽培地域に吹く局地風アラセの特性解明。農業気象、**43**(4)、311-320。
 大館市教育委員会、1993：国指定天然記念物長走風穴高山植物群落調査報告書。長走風穴調査会、pp.97。
 佐々木 洋、1986：東北地方における風穴の地理的分布。東北地理、**38**、34-35。
 佐藤定四郎、1996b：ジャガラモガラの植物。「天然記念物ジャガラモガラ」、71-125。

佐藤輝夫, 1996 a : 地名ジャガラモガラの謎. 「天然記念物ジャガラモガラ」, 1-12.
志保井利夫, 1974 : 北海道常呂郡留辺蘂町, 温根湯つつじ山の風穴について. 地学雑誌, **83**(2), 25-38.
Shaw, R. H., Maitani, T. and Miyashita, K., 1997: Micrometeorology of a depression and the influence of cave air flow. 12th Symp. on Boundary

Layer and Turbulence, Vancouver, Canada, 502-503.

天童市教育委員会, 1987 : 「天童市指定天然記念物ジャガラモガラ植生調査報告書」. 大風印刷, pp. 47.

梅本 亨, 1994 : 山形県天童市ジャガラモガラ付近の気温について. 季刊地理学, **46**(3), 198.