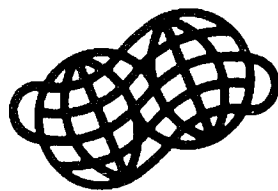


福島県下郷町中山風穴における風穴循環の成因

田中 博・村 規子・野原大輔



日本地理学会

地理学評論 (第77巻第1号) 抜刷

福島県下郷町中山風穴における風穴循環の成因

田中 博*・村 規子**・野原大輔***

(*筑波大学地球科学系, **気象庁富山地方気象台, ***筑波大学陸域環境センター)

本研究では、福島県下郷町にある中山風穴の冷気の成因解明のために、2001年夏季と冬季の2回にわたり現地観測を行った。夏季の風穴循環は斜面上部の温風穴から吸い込まれた外気が崖錐内部で冷やされて下方の冷風穴から吹き出すと考えられている。夏季の観測ではそれを実証するために、CO₂を用いたトレーサー実験を行った。その結果、温風穴から吸い込まれた外気は約1.5時間で140m下方の冷風穴から噴出することが実証された。この実験で得られた循環速度2.6cm/sから総質量フラックスを計算し、気流の温度変化を掛け合わせることで、夏季に約 4×10^{12} Jという熱量が崖錐に蓄えられるものと推定された。一方、冬季の風穴循環は逆転して、下方で寒気を吸い込み上方の温風穴から暖気を吹き出す。冬季の温風穴での地表面熱収支観測の結果、地中から上向きに約150W/m²の地中熱流量が観測された。これにサーモグラフィーで調べた温風穴の全面積を掛け合わせると、冬季に崖錐から放出される総熱量は約 5×10^{12} Jとなり、上記の値とオーダー的に一致した。以上の結果から、中山風穴の冷気は、冬季に活発な対流混合で蓄積された寒気が、夏季に重力流として穏やかに流出する、という対流説で定量的に説明できることが示唆された。したがって、風穴保護の観点からは、温風穴の位置をサーモグラフィーで見極め、その周辺の植生を伐採して崖錐表面の目詰まりを解放させてやるのが、効率的で有効な保護対策と考えられる。

キーワード：風穴、中山風穴、トレーサー実験、地表面熱収支、サーモグラフィー

I はじめに

福島県下郷町にある中山風穴は、中山(856m)の山腹に礫が積み重なった崖錐地形の隙間から夏季に冷気が吹き出す累石型風穴として有名である。風穴からの冷気により周辺は夏でも冷涼であるため、標高がさほど高くないにもかかわらずオオタカネバラ *Rosa acicularis* Lindl. などの特殊な高山植物が繁茂している。それが学術上貴重な植物群であるとして、1964年6月27日に中山風穴は国の天然記念物に指定され、近隣の塔のへつりと並んで観光資源としても注目されている(下郷町教育委員会 1998)。

しかしながら近年、中山風穴の高山植物は衰退してきており、天然記念物保護および観光資源保護の点から、その原因究明が求められている。高山植物衰退の原因として、天然記念物指定以前に行われていた焼き入れが行われなくなったことによる植生の繁茂が考えられ、伐採などの処置がとられている。しかし、風穴の成因がわからない段階でのそうした

処置は、逆に事態の悪化を招きかねない。したがって、風穴保護対策の第一歩としては、風穴の成因解明が急務となっている。

風穴の科学的な認識は牧野(1907)に始まり、荒谷(1920, 1923, 1926)による一連の研究で、その成因としては風穴内外の温度差に起因する対流説が有力である。その後の研究でも対流説(江川ほか 1980; 藤原 1985; Bae and Kayane 1986; Ohata et al. 1994; 田中 1997; 真木 1998)を支持するものが多いが、断熱膨張説(斎藤 1953; Kim 1968)、周氷河説(志保井 1974)、気化熱説(Moon and Hwang 1977; 黄・文 1981)などいくつかの説があり、いまだ定説をみるには至っていない。

最近、横井(1999)や横井・田中(2000)は中山風穴の長期観測を行い、崖錐上部の温風穴、下部の冷風穴の特徴的な温度変化を外気温の年変化と比較し、風穴の成因について対流説を支持する考察を行っている。その観測結果に基づいて、Tanaka et al. (2000a)は中山風穴と韓国のIce Valleyを対

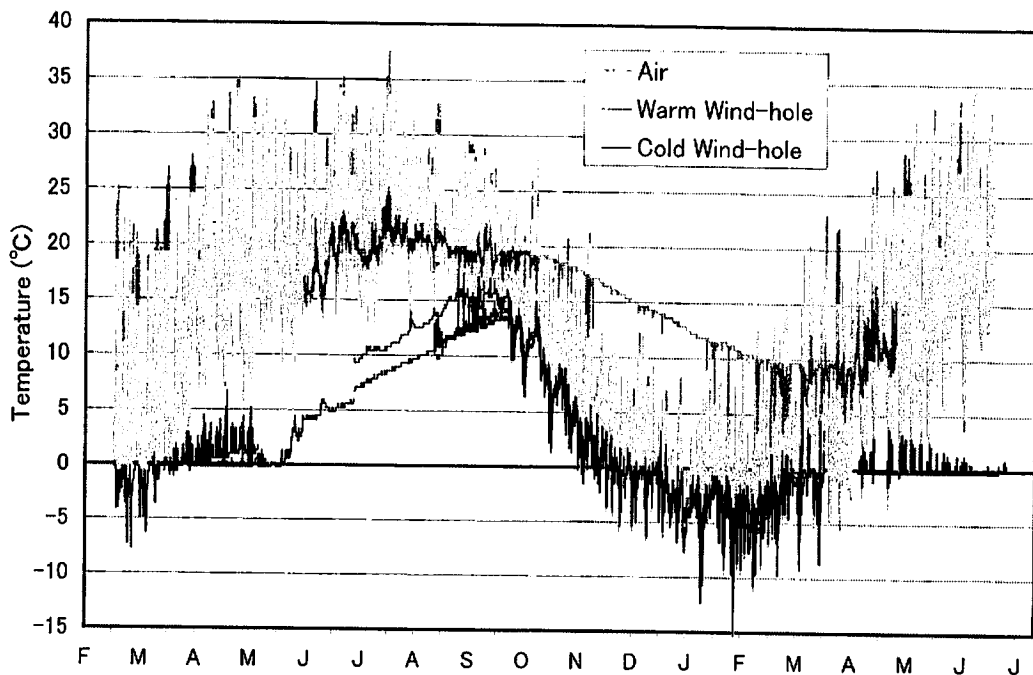


図1 中山風穴における冷風穴温度、温風穴温度、外気温の年変化

黒線は冷風穴温度、暗線は温風穴温度、灰線は外気温を示す。期間は1998年2月から1999年7月までで、測定間隔は約1時間、横軸は月を表し、目盛りは15日単位である。冷風穴は第2、第3、第4指定地の断片的観測を合成したもの。

(横井 (1999) より引用加筆)

Fig. 1 Annual variations in temperature of the outer air (gray line), cold wind holes (black lines), and warm wind hole (dark line) from the end of February 1998 to the beginning of July 1999 (after Yokoi 1999)

The abscissa denotes the month with 15-day intervals. The black lines are the combined observations at the second, third, and fourth protection areas.

象にした数値モデリングを行い、季節的に変化する風穴循環の全体構造を推測している。Ice Valleyは韓国の密陽郡に存在する有数の累石型風穴であり、中山風穴よりも規模は大きく、春から秋にかけて長期間にわたって風穴内に氷が存在する。しかしIce Valleyでも1999年の夏季は氷が全く形成されないなど衰退化が進んでおり、風穴保護の観点からこちらも衰退の原因を探るために風穴の成因の解明が求められている (Tanaka et al. 1999)。

横井 (1999) や Tanaka et al. (2000a) の研究結果によると、風穴内部の低温は、夏季と冬季で逆転する風穴循環により説明される。これは地温と気温の差によって対流が励起されるという対流説を支持するもので、図1のように夏季には外気が高温で崖内部が相対的に低温となるため、両者の間に気

圧傾度力が生じて崖下部の冷風穴から冷気が吹き出す。その空気を補償するために、崖上部の温風穴からは外気が吸い込まれる。逆に冬季には外気が低温で崖内部が相対的に高温となるため、冷風穴から外気を吸い込み温風穴から暖気を噴出するようになる。ここで、夏季の風穴循環は空気の成層状態がきわめて安定なため、冷気が重力流として穏やかに流出するのに対し、冬季の風穴循環は成層状態がきわめて不安定であり、活発な対流混合により外の寒気が崖内部まで一気に進入して短期間に岩全体を冷やす。このように、大気の力学的な成層不安定により生じた対流が、寒気だけを効率よく崖内部に蓄積するという熱フィルターの効果をもたらし、風穴の冷気が形成維持されていると考えられる。

しかし、この数値実験で推測されているような対

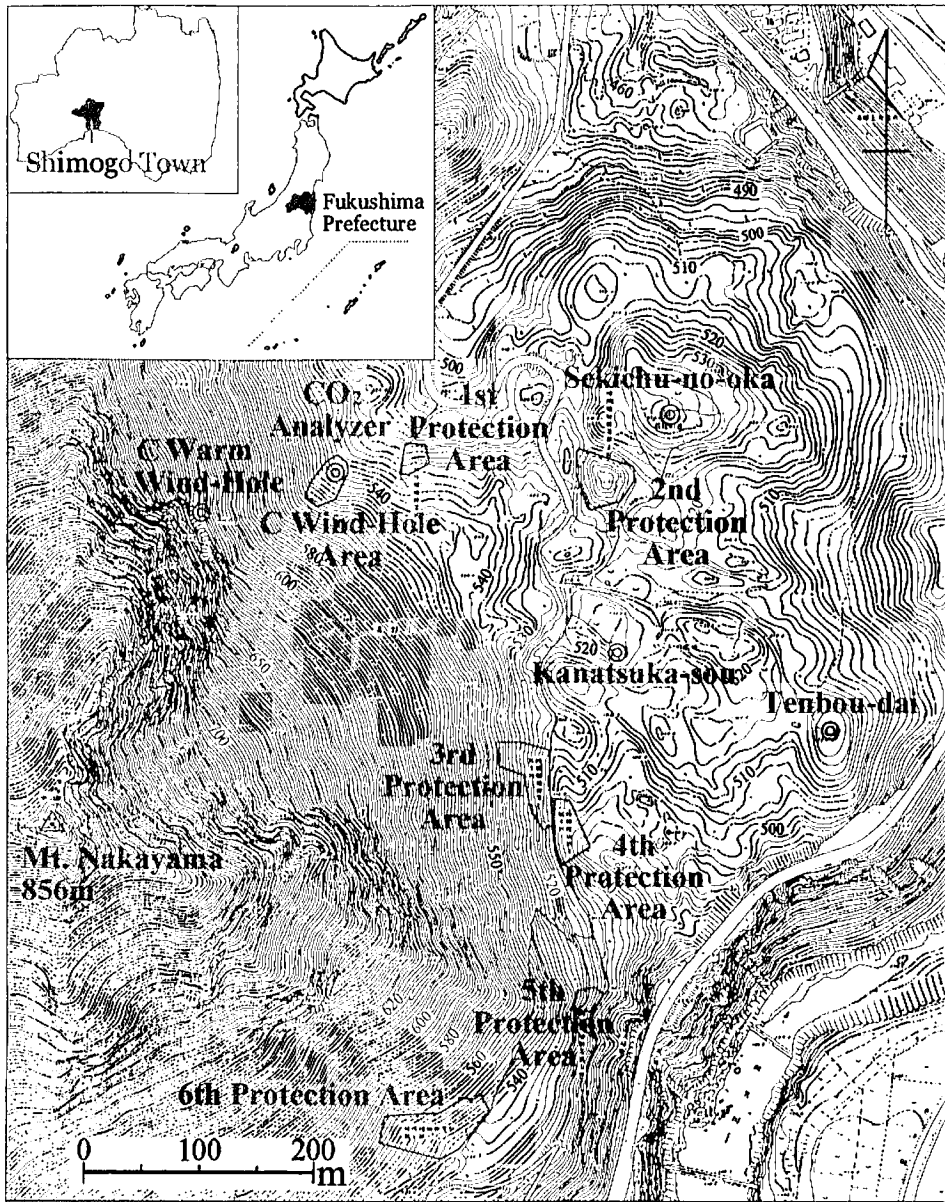


図2 福島県中山風穴の位置と周辺の地形
 囲いの領域は第1から第6までの保護指定地域。他に石柱の丘、展望台、金塚荘、C冷風穴、C温風穴の位置が記されている。

(下郷町教育委員会 (1998) から引用加筆)。

Fig. 2 Locations of the Nakayama wind-hole in Shimogo, Fukushima
 The six protection areas and the C wind-hole are marked by closed areas. Locations of Sekichu-no-oka, Tenbou-dai, Kanatsuka-sou, and warm wind-hole are marked on the map.
 (base map from the Shimogo Education Committee Report 1998).

流説を支持するためには、一層の観測事実の蓄積が必要である。たとえば、夏季に温風穴から吸い込まれた外気が実際に冷風穴から出ているかどうかを確認されているわけではない。これまでの数値実験の結果では、外気が吸い込まれてから出てくるまでの

滞留時間は約2日であり、平均流速は1 mm/s程度であると推定されている。しかし、それを実証するような観測事実が得られているわけではない。循環速度が定まらなると崖錐内に蓄えられる熱量計算ができない。また、冬季は冷風穴から外気を吸い込

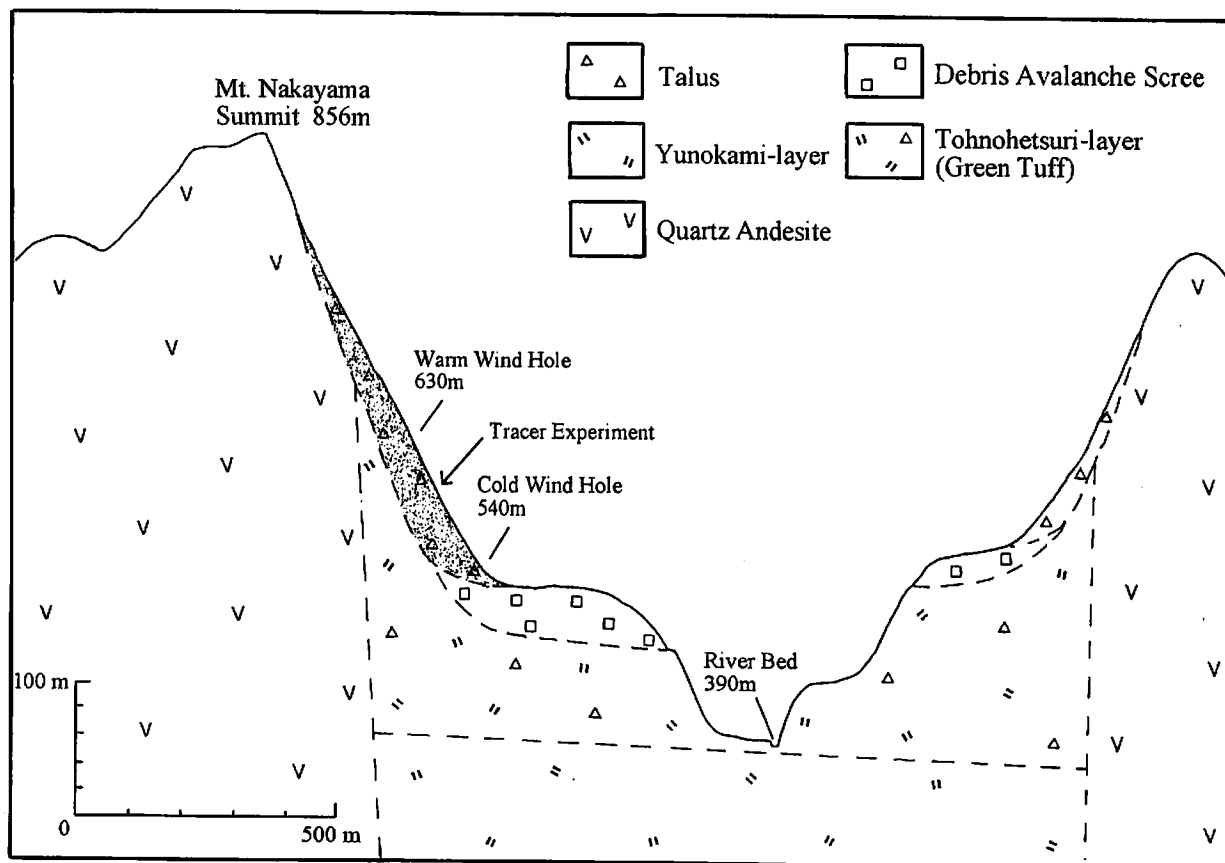


図3 中山山頂からC風穴方向の阿賀川に至る地形の鉛直断面の推定模式図
 トレーサー実験はハッチで示した中山山腹の温風穴(630m)と山麓の冷風穴(540m)の間で行った。
 (横井(1999)より引用加筆)。

Fig. 3 Vertical cross-section (speculation) from the summit of Nakayama toward the C wind-hole and to the Aga River (after Yokoi 1999)

The tracer experiment was conducted between the warm wind-hole (630 m) and the C cold wind-hole (540 m) at the hatched slope of the talus.

んで温風穴から暖気を噴出すると考えられているが、中山風穴において冷風穴での冬季の吸い込みは確認されていないし、温風穴も一つしか見つかっていない。対流説を裏付けるには、それらの循環を確認した上で、夏季に冷気を噴出する際に崖錐に貯蓄される熱量と冬季に温風穴を通して崖錐外に放出される熱量の定量的な評価も必要である。

そこで本研究では、福島県下郷町中山風穴を対象に、夏と冬で入れ替わる風穴循環の実態および成因を観測的に解明することを目的とする。特に、過去の対流説の研究で不明とされてきた、風穴循環の循環速度や風穴内部の熱容量、冬季の温風穴の分布などを明らかにする目的で現地観測を行った。夏季の

風穴循環に関する観測では、風穴循環速度および夏季の崖錐内の貯熱量を明らかにするためにCO₂を用いたトレーサー実験を行った。冬季の風穴循環に関する観測では、温風穴の分布を明らかにするために、サーモグラフィーを用いて温風穴の分布調査を行った。さらに、温風穴で地表面熱収支観測を行って、冬季に温風穴から放出される熱量を定量的に見積もった。これらの観測結果は村(2002)で報告されている。本研究では、これまでの断片的な観測事実を統合し、年間を通した熱収支解析とも照らし合わせて、中山風穴における風穴循環の成因解明を試みた。

II 中山風穴概要

中山（北緯 37°17′，東経 139°54′）は福島県南会津郡下郷町にある標高 856 m の山で、中山の東側には下郷町中央部を北流する阿賀川が深い谷を形成している（図 2）。中山の東斜面には流れ山として形成された石柱の丘と展望台があり、なだらかな丘を形成している。崖錐の下部にあたる標高 500 m 付近では、所々直径数 10 cm から大きいものでは 1~2 m にも及ぶ石英安山岩の礫が露出しており、その隙間から冷気が流出している。風穴の深さ数十 cm の内部には、外からも見える場所に氷が存在することがある。特に冷気の吹き出しが強い第 1 から第 6 までの指定地には高山植物が生息するため、国の天然記念物に指定され保護地域になっている（下郷町教育委員会 1998）。このほかにも保護地域に指定されなかった風穴が A 風穴、B 風穴などの名称で所々にみられ、第 1 指定地の西の C 風穴などからは活発に冷気が吹き出している。現在では第 1 指定地や第 5 指定地、A 風穴や B 風穴は衰退しており、C 風穴の方がむしろ吹き出しが強い。この標高 540 m の C 風穴の上部の標高 630 m 地点には温風穴が見つかっており、夏季には外気が盛んに吸い込まれ、冬季には湿度 100% の温風が吹き出す（Tanaka et al. 2000b）。

図 3 に中山山頂から C 風穴方向の鉛直断面の推定模式図を示した（横井 1999 より引用加筆）。中山の山体は塔のへつり層と呼ばれるグリーンタフを貫いた石英安山岩によって形成されており、中山の東側および南側は、山体崩壊により石英安山岩の岩屑が堆積してできた崖錐斜面となっている。そのため、顕著に柱状節理が発達し、碎石の隙間を空気が比較的自由に通り抜けることができる。地表面は薄い土壌に覆われ、夏季には樹木やしだ、苔などが繁茂する。ハッチで示した崖錐内部にはかなり広範囲にわたって空隙が広がっていると考えられるが、人

が中に入れるほどの大きな隙間ではない。そのため、このような崖錐地形にみられる風穴は累石型風穴と呼ばれ、富士山麓の熔岩洞にみられる富岳風穴、鳴沢氷穴などの洞窟風穴とは区別されている。

本研究ではこの温風穴を C 温風穴と呼び、冷気を吹き出す通常の風穴を冷風穴と呼んで区別する。

III ではこの C 温風穴と C 冷風穴の間でトレーサー実験を行い、実際につながっているかどうかを確かめた。

III 夏季の風穴循環の観測

夏季観測では、これまでの数値実験で不明な点とされていた、崖錐内部の空気の循環速度を求めるために、風穴循環に対するトレーサー実験を行った。用いたトレーサーは周辺環境に無害でかつ確実にその変化が自然変動と判別できる物質である必要を考慮して、本研究では CO₂ を用いた。CO₂ であれば自然に存在する物質であるので無害である。ドライアイスとして温風穴まで運搬が可能であるし、10 kg 程度のドライアイスを吸い込み口にて砕き、気化させれば、トレーサーとして使えると考えられた。CO₂ の検出には CO₂ アナライザー（LI-COR 社モデル LI-6262）を用いた。参照値とサンプル値の差を分析する Differential Mode を用い、参照値として冷風穴より約 2 m 上部の樹木付近を選び、冷風穴内のサンプル値との差を計測した。

CO₂ を流し込んだ吸い込み口は、中山風穴で唯一明らかになっている東斜面 630 m にある C 温風穴であり、その下の C 冷風穴の 540 m 地点に CO₂ アナライザーを置いてターゲットの空気塊が到着するのを待った。図 2 に両者の位置を記号で記載してある。両者の水平距離は約 110 m、デジタル高度計で測った高度差は約 90 m である。

トレーサー実験は 2001 年 5 月 30 日と 7 月 8 日の 2 度行った。1 度目の 5 月 30 日の天気は、日中曇りとなり、気温の鉛直断面の観測を行った 15:00 の

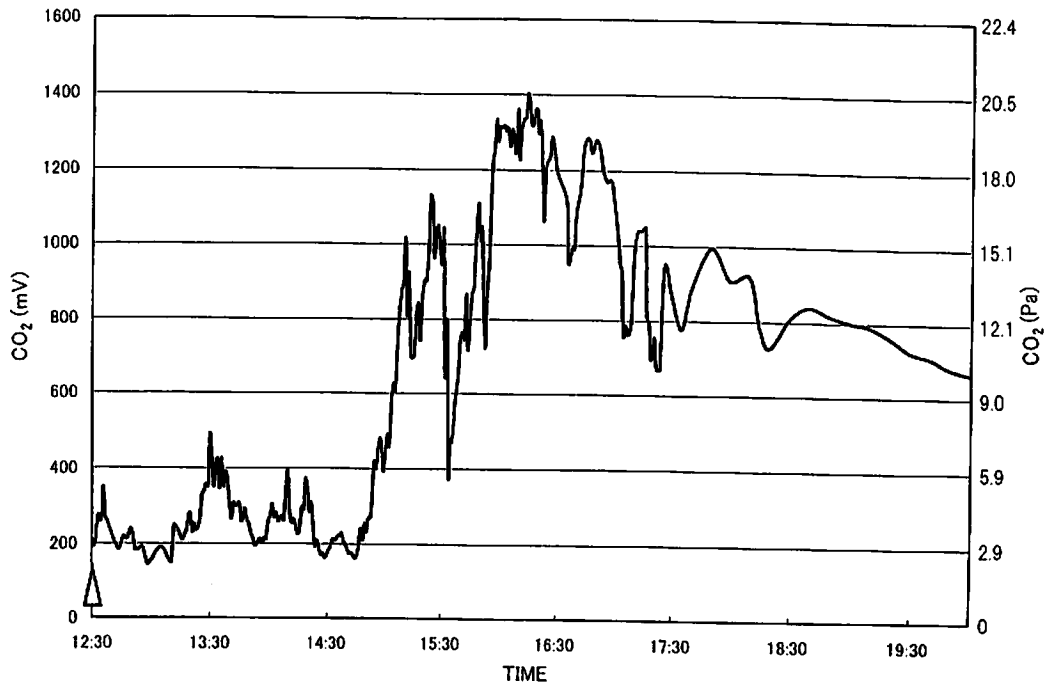


図4 2001年5月30日に行ったトレーサー実験の結果
 縦軸はC冷風穴におけるCO₂濃度（基準値からの差で、単位は左にmV、右にPa）で三角印はトレーサーをC温風穴に流し込んだ時間。

Fig. 4 Time variation in the CO₂ concentration (difference from the reference state) measured in mV (left) and in Pa (right) at the C cold wind-hole on May 30, 2001

The triangle at 12:30 indicates the time when 30 kg of CO₂ was released at the C warm wind-hole.

外気温は24°Cで、夕方から夜半にかけて雨がぱらつた。トレーサーに使ったドライアイスの量は30 kgである。重量は業者の規格に従い、断熱材の上からテープで完全密封し、輸送の際の昇華による損失は5%以下に抑える工夫をした。12:30に冷風穴でCO₂の検出を開始すると同時に、温風穴でドライアイスが砕いて吸い込ませ始めた。温風穴は勢いよく外気を吸い込んでおり、穴の中で砕いたドライアイスはほとんど外に漏れることなく、大部分が崖錐内に吸い込まれていった。全部吸い込ませるのには約10分を要した。数値実験の推定によると、CO₂投入後、検出までには2日程度かかることが予想されていたので、CO₂アナライザーの表示は生の値であるmVに設定し、変動に応じて1分から10分間隔で読み取り記録した。しかし、20:00頃にCO₂アナライザーが結露によって作動不可能となり、

実験は終了した。

5月30日の実験の結果を図4に示す。図の左側には測器の生の値であるmVを、そして右側にはPaに換算した値を目盛ってある。12:30に温風穴から吸い込ませたCO₂が、冷風穴で約2時間20分後の14:50頃に検出され始め、約3時間45分後の16:15頃にピーク値の20 Paを迎え、その後徐々に減少した。日没後は大気が安定するため、細かい変動が抑制される結果となっている。ただし、この時の実験では自動車のアイドリングから電力を得ていたため、エンジンの回転数のむらによってグラフは初期に細かい変動をしたと考えられる。しかし、グラフの立ち上がりやピークをみるには十分なデータであるといえるであろう。この結果から、崖錐内部の空気の滞留時間は約3時間45分で、C温風穴とC冷風穴の距離が約140 mであることから、風穴

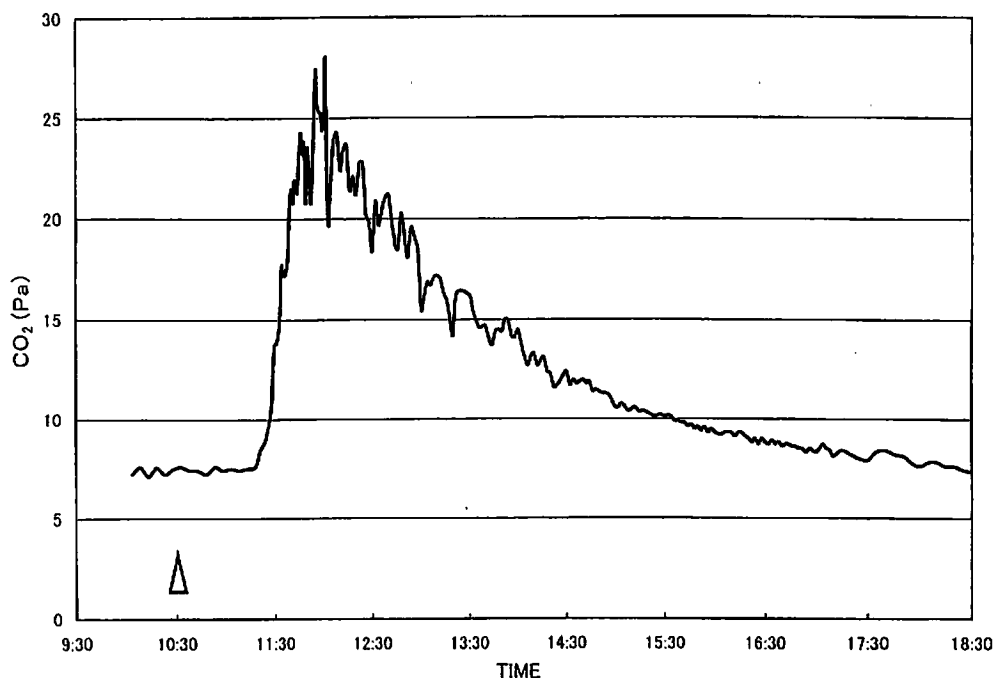


図5 2001年7月8日に行ったトレーサー実験の結果
縦軸はC冷風穴におけるCO₂濃度(基準値からの差で単位はPa)で三角印はトレーサーをC温風穴に流し込んだ時間。

Fig. 5 Time variation in the CO₂ concentration (difference from the reference state) measured in Pa at the C cold wind-hole on July 8, 2001

The triangle at 10:30 indicates the time when 20 kg of CO₂ was released at the C warm wind-hole.

の循環速度は約1.0 cm/sであることが明らかになった。

2度目の7月8日は、朝から夏空が広がり、一日中晴天が続いた。気温は朝に15°Cで日中は30°Cまで上昇し、冷風穴からは約7°Cの冷気が0.5 m/sで噴出しつづけていた。トレーサーに使ったドライアイスの量は、1度目の実験を踏まえて20 kgとした。10:00にC冷風穴でCO₂の検出を開始し、10:30にC温風穴でドライアイス砕いて吸い込ませた。CO₂投入後、数時間で検出されることがわかったので、CO₂アナライザーの表示はmVからPaに変換し、変動に応じて1分から10分間隔で読み取り記録した。

7月8日の実験の結果を図5に示す。10:30に温風穴から吸い込ませたCO₂が、冷風穴で約1時間後の11:30頃に検出され始め、約1時間半後の12:00頃にピークを迎え、その後徐々に減少した。こ

の時の実験ではバッテリーから直接インバーターにつなぎ電源を得ていたため、グラフは安定し、測定方法に改善がみられた。この結果から崖錐内部の空気の平均滞留時間は約1時間30分で、風穴の循環速度は約2.6 cm/sであるということが明らかになった。風穴内と基準値に選んだ森林内のCO₂濃度には7.4 Paのバイアスがみられるが、これは森林内の光合成によるCO₂濃度の低下と風穴内での動植物の呼吸が原因と考えられる。崖錐内部に風穴循環の流路軸とそれを取り囲む空隙がある場合には、流路軸のまわりで流速のシアが生じる。この場合には流路軸のまわりに取り残してきた残留トレーサーが時間をかけてゆっくりと流出してくるので、ガウス分布のように対称にはならず、ピーク後に尾を引くような濃度減少がみられる。実験はCO₂の値がドライアイス砕いて吸い込ませる前の値に戻った18:30に終了した。風穴の循環速度2.6 cm/sという値

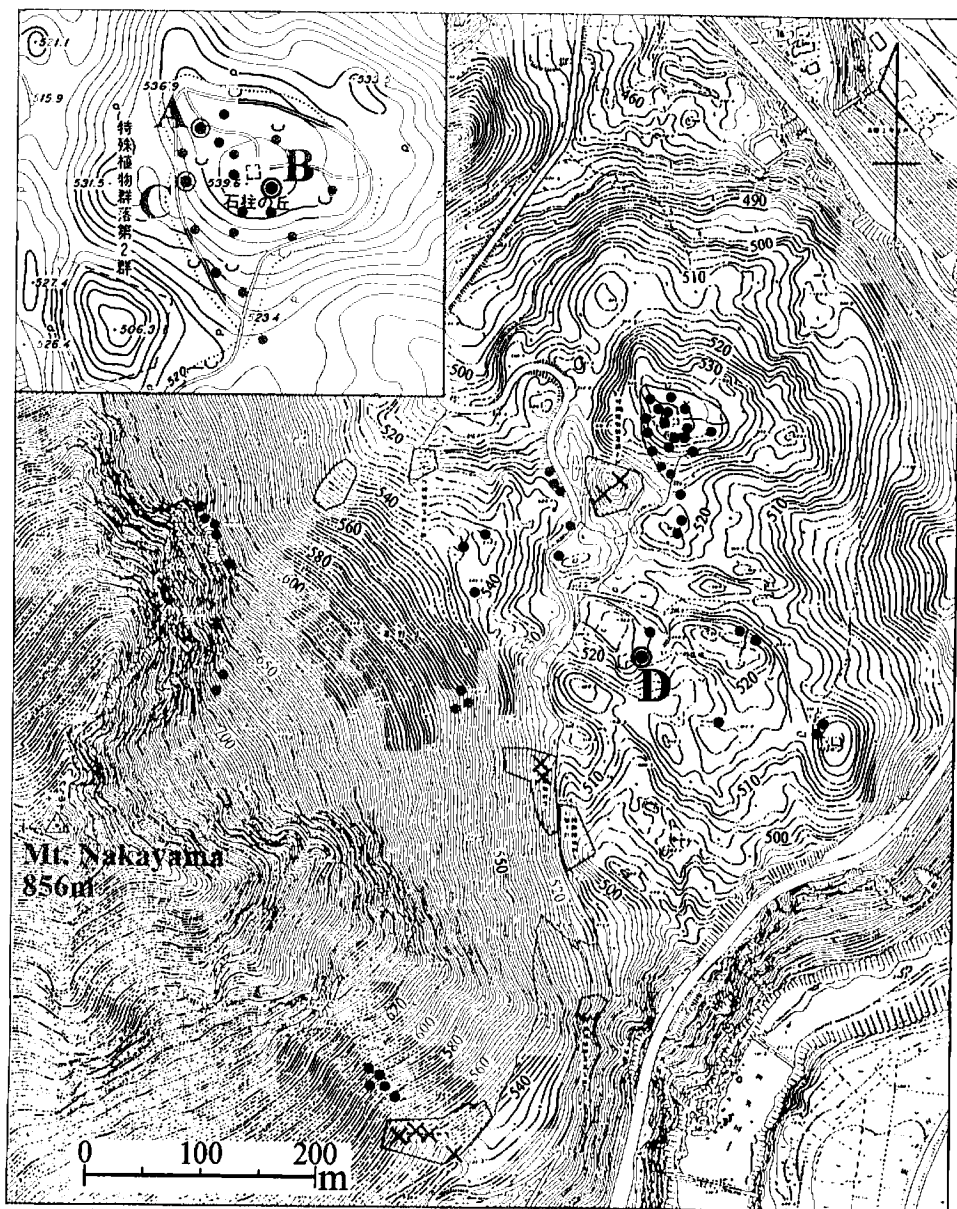


図6 サーマグラフィーと移動観測により得られた中山周辺の温風穴および吸い込み口の分布

黒丸は温風穴、×印は吸い込み口を示す。罫いは保護指定地域の位置。インセットは石柱の丘周辺の拡大図。図中のAからDはサーモグラフィーによる熱画像(図7)の地点を表す。

Fig. 6 Distribution of warm wind-holes (black dots) and suction area (crosses) around Mt. Nakayama observed by thermography and moving observations

The inset details the area of Sekichu-no-oka. The protection areas are marked by closed curves. The symbols A to D represent locations of warm wind-holes shown in Fig. 7.

はこれまでに数値実験から推定されていた1 mm/sと比べると26倍も速い値であり、それだけ大きな頭熱輸送が崖錐外部から内部へ向かって生じていることが判明した。

今回の実験では2度とも、C温風穴から吸い込ま

れたCO₂がC冷風穴で明瞭に検出され、温風穴と冷風穴が確かに繋がっていることが初めて観測的に実証された。風穴循環の循環速度については、CO₂の持つ密度差や低温による落下効果の影響も考えられるが、空気との混合や拡散が十分に進行し、

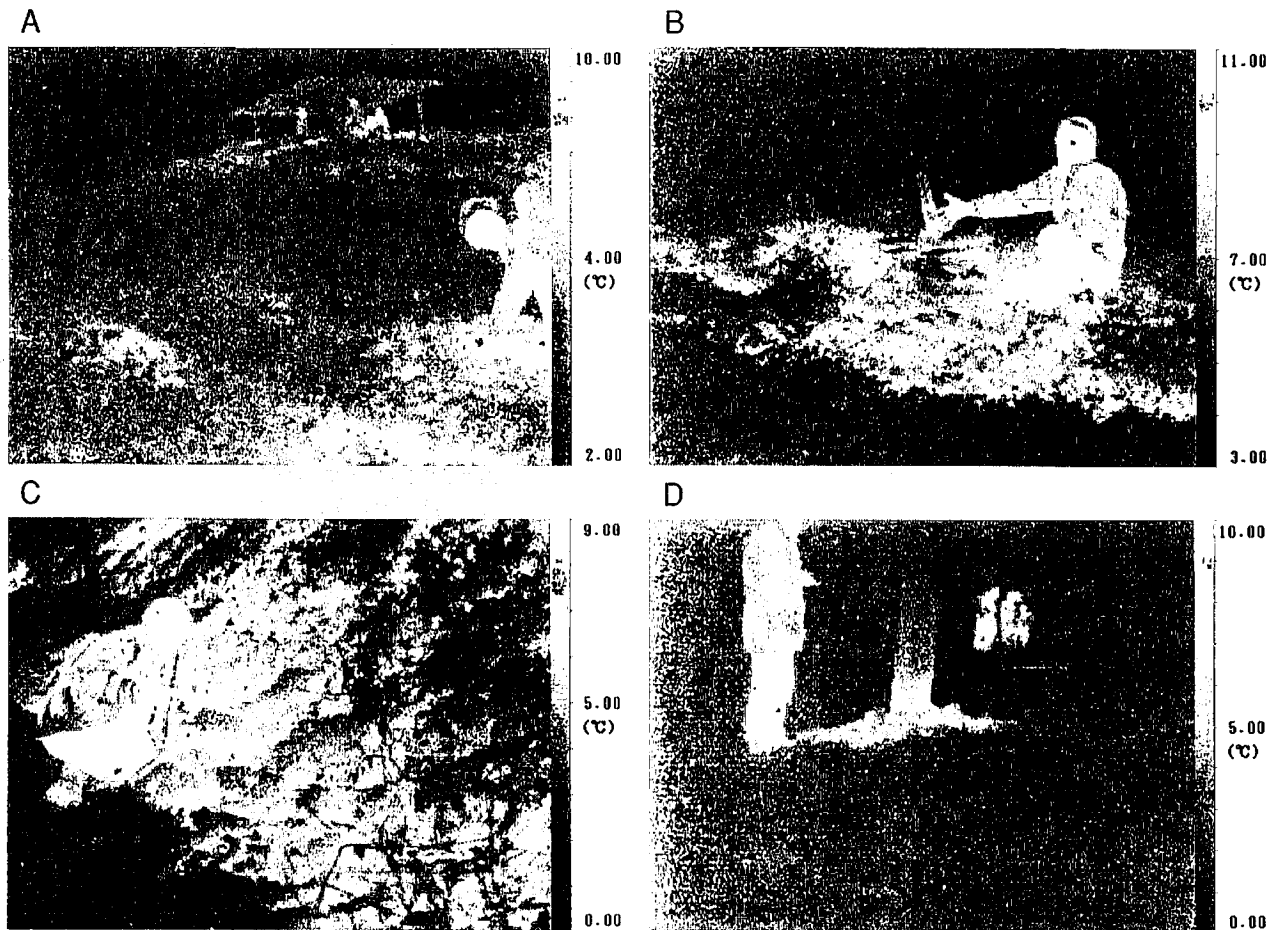


図7 サーモグラフィーによる熱画像

写真の濃淡は温度(°C: スケールは右側)を表す。

A: 石柱の丘の北西 B: 石柱の丘の頂上 C: 石柱の丘の西 D: 金塚荘脇の電柱 各地点は図6参照。

Fig. 7 Pictures of thermography

A: northwestern side of Sekichu-no-oka B: top of Sekichu-no-oka C: western side of Sekichu-no-oka D: foot of an electric power pole near Kanatsuka-sou

See Fig. 6 for locations.

検出時の濃度は初期の1万分の1のオーダーに希釈されているので、落下効果は無視できると考えられる。実際、30 kgのCO₂を用いた実験1よりも、20 kgのCO₂を用いた実験2の方が倍以上速く流出してきたことから、CO₂の密度差や低温による落下効果は無視できると判断できる。

IV 冬季の風穴循環に関する観測

中山風穴では、冷風穴の分布に関してはよく調べられているものの、温風穴についてはC冷風穴に対応するC温風穴以外明らかにされていない。し

かしそれでは、入口と出口の面積が圧倒的に違い過ぎるため、いまだ認識されていない温風穴が存在する可能性がある。そこで、これまでわかっている温風穴のほかに、中山には温風穴がどのように分布しているかを調べるために、冬季の温風穴分布調査を行った。

集中観測を行ったのは2001年12月4日の午後から5日の午前中にかけてである。夏冬とも、野外観測は筑波大学の学群実験の一環で、総勢30名を動員して実施した。温風穴分布調査には、地表面の温度を色で表し視覚的にとらえることのできるサーモ

グラフィーを用いた。温風穴は外気温の低い時に特に顕著にみられると考えられるので、5日未明の5時から9時頃にかけて1台のサーモグラフィーで保護指定地を拠点とする定点観測地を巡回し、石柱の丘を中心とした中山一帯の約100枚の熱画像を撮影して、温風穴の分布を調査した。それと同時に、冷風穴で吸い込みがみられるかどうか調査した。

サーモグラフィー班および移動観測班による観測結果から中山の温風穴分布図を作成した(図6)。今までわかっていたのは夏季の観測でトレーサー実験を行ったC温風穴のみであったが、そのほかにもそれぞれの冷風穴に対応して、中山の至る所に温風穴は分布していることが明らかになった。特に石柱の丘一帯はすべて温風穴になっており、その様子をサーモグラフィーでとらえると、地下から暖気が吹き出している部分の温度は周囲より 10°C 近く高くなっている。

サーモグラフィーは通常カラー写真で表示され、その例が野原ほか(2002)で報告されているが、ここではそれをモノクロ表示した画像を図7で紹介する。それぞれの撮影地点は図6のA, B, C, Dで示されている。図7-Aは石柱の丘の北西斜面から丘の頂上の東屋を望む熱画像で、白黒の濃淡は温度を表し、 2°C から 10°C の範囲で階調分けがしてある。東屋には数名の観測者の人影が映し出されているが、これは肉眼では暗闇の中で識別できないものである。手前の観測者の指さす部分の地面が白くなっているのは、その部分の温度が周囲より高くなっており、そこが温風穴になっていることを表す。このような温風穴が石柱の丘一帯に点在している。図7-Bは東屋脇の石柱の丘の頂上に設けた熱収支観測器の周辺映像で、熱収支観測器を指さす観測者の足下が白くなっており、温風穴が広がっているのがわかる。その温風穴一帯の温度は、その周囲の吹き出しのない部分の温度と比較すると、明らかに高くなっていることがわかる。この観測点から10mは

と離れた温風の吹き出しがみられない黒くなっている地点にも、別の熱収支観測点を設けてある。図7-Cは石柱の丘に通じる西斜面の道沿いで、広範囲にわたって温風が吹き出している。吹き出しの強い所の温度が特に高く、まだら模様になっている。図7-Dは金塚荘の脇の電柱の足下にみられる温風穴で、電柱埋設の際に掘り返した地面から周囲よりも 10°C も高い温風が吹き出しているのが明瞭に見て取れる。これは電柱を立てた際に、そこが空気の出出口となり温風穴となったものである。このほかに金塚荘に続く道路脇の斜面は、道路の切り出しによって絶壁となり、崖錐からの空気の出出口が作られ、そこが温風穴となっている。また、展望台入口の斜面も大規模な温風穴になっており、この一帯では日中に斜面から湯気が立ち上るのが観測されている。

これらの温風穴はそれぞれ対応する冷風穴につながっており、C温風穴は既知の通りC冷風穴に対応する温風穴であるし、石柱の丘の温風穴は第2指定地の冷風穴に対応すると推測される。また、第3および第6指定地の近くにある温風穴は、それぞれの指定地の冷風穴に対応するものと考えられ、弱いながら吸い込みが確認された。しかしながら道路脇や電柱根元、展望台の温風穴は、対応する冷風穴が明確ではない。これらに対応する冷風穴がほかに存在するのか、既知の冷風穴と対応するのかは明らかではない。トレーサー実験をそれぞれの経路に沿って繰り返し、確認する必要がある。

温風穴分布調査の結果得られた約100枚の熱映像から、中山全体の温風穴の総面積を見積もったところその値は概算で $5,000\text{ m}^2$ になった。この面積は、石柱の丘における温風穴の総面積を推定し、その割合を他の冷風穴に対しても拡張して算出したもので、かなりの誤差が伴うと思われるが、現時点ではそのオーダーを明らかにした最適推定値といえる。サーモグラフィーを用いた温風穴の分布図というものは過去に例はなく、風穴循環のメカニズムを解明する

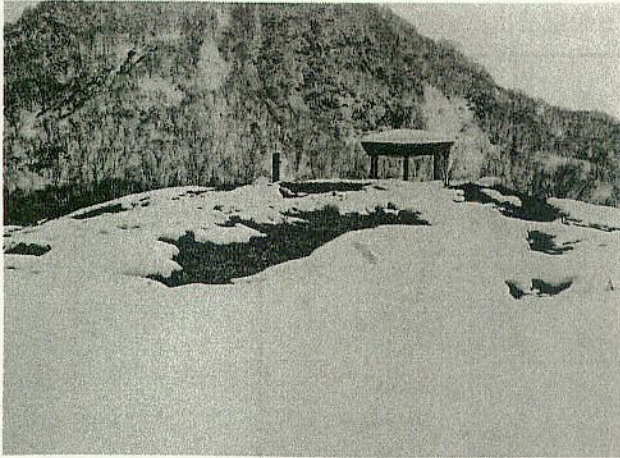


図8 石柱の丘で温風穴によりパッチ状に新雪が解けている様子

温風の吹き出しがない場所には雪が残っている。
(2001年12月28日撮影)。

Fig. 8 Warm wind-holes at Sekichu-no-oka where new snow has been partially melted by the warm air vent from the ground

The new snow remains where there is no warm air vent.
(photo is taken on December 28, 2001).

上で、画期的な新事実の報告といえるが、今後のより定量的で詳細な観測が望まれる。

図8は石柱の丘一帯が新雪に覆われた12月28日に撮影した写真で、パッチ状に雪が融けている所がみられるが、実はこの領域が温風穴になっている。サーモグラフィーで温風穴と確認された領域では地下から暖気が吹き出し、その部分だけ新雪が融けている様子が理解できる。図8の雪の分布パターンが示すように、温風穴はおおよそ10m四方の範囲で

各所に点在し、その周辺の新雪が残っている所では吹き出しがなく、温風穴にはなっていない。雪があるとこのように温風穴とそうでない所が明瞭に分かれるが、サーモグラフィーを用いることで、雪がなくてもこのようなパッチ構造を把握することが可能になる。

サーモグラフィー観測で、温風穴の分布とおおよその面積が推定できたので、単位面積当たりの熱の放出量がわかれば、中山全体で冬季に温風穴から放出される熱量を見積もることができる。非常に粗い見積りではあるが、過去に温風穴上の熱流量を測定した研究例はなく、1地点だけでも実測して全体を見積もることの意義は大きいと考えられる。

そこで、石柱の丘の頂上の温風穴(図7-B参照)と、そこから南東に約10m離れた温風穴になっていない場所(サーモグラフィーで黒くなっている場所)の2カ所で同時に熱収支観測を行い、地表面熱収支がどのようになっているか調べた。温風穴では熱収支各項のうち、顕熱フラックス、潜熱フラックスを実測で求め、正味放射を実測の地面温度で補正して求め、地中熱流量を残差で求めた。そのすぐ脇の温風穴でない観測点では顕熱フラックス、正味放射、地中熱流量を実測で求め、潜熱フラックスを残差で求めた。乱流フラックスの測定高度は地上約30cm、地中熱流板の深さは約5cmである。観測の様子は野原ほか(2002)のカラーページでも紹介されている。

熱収支観測は2001年12月4日16:30から翌日5日の18:00まで行った。観測中の天気はおおむね曇りで、5日の午前中に一時的に晴れ間が覗いた。得られたデータは、たとえば16:30から16:59までのデータを16:30のデータ、というように30分ごとにまとめ、正味放射、顕熱フラックス、潜熱フラックス、地中熱流量の値を算出した。観測によって得られた温風穴での地表面熱収支各項の時系列を図9-aに示す。また、同じ石柱の丘の頂上で温風

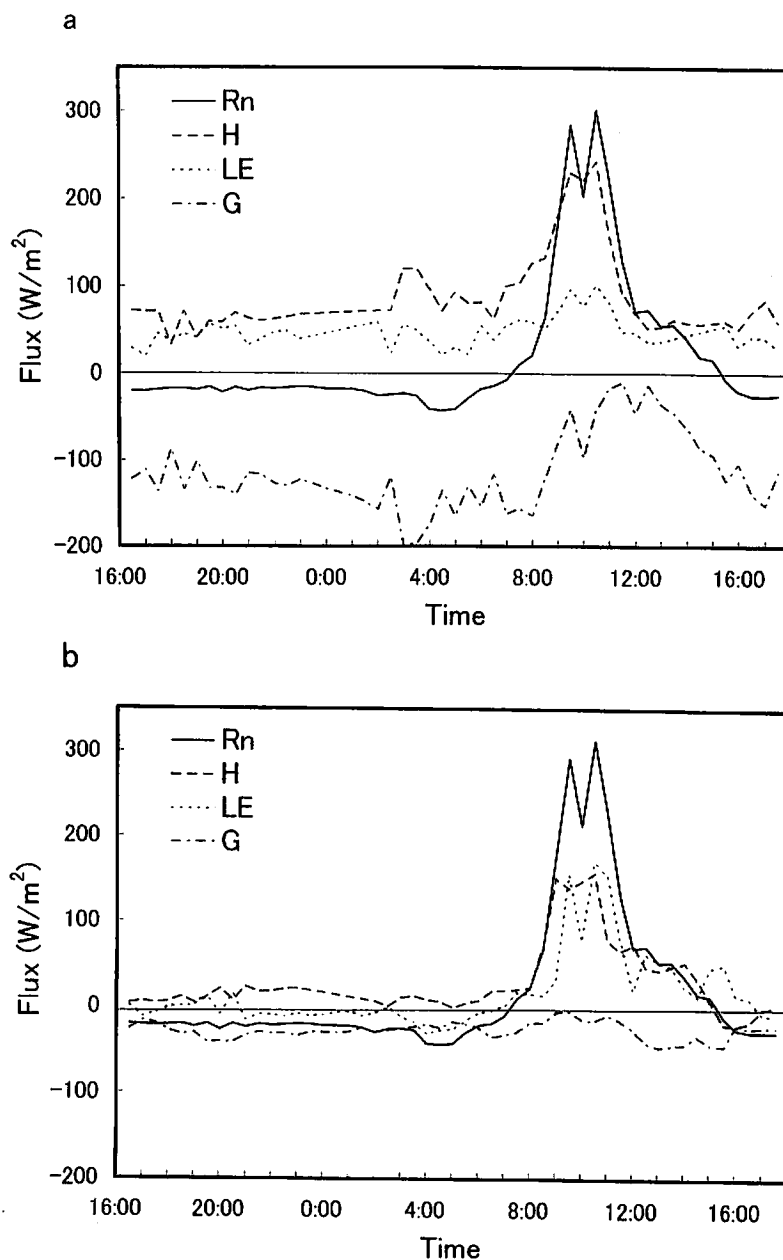


図9 石柱の丘の頂上 (図7-B参照) の地表面熱収支各項の日変化

a: 温風穴の上 b: 温風穴脇の吹き出しのない場所

期間は2001年12月4日16:30から翌日5日の18:00まで。正味放射 (Rn: 実線)、顕熱輸送 (H: 破線)、潜熱輸送 (LE: 点線)、地中熱流量 (G: 一点鎖線) で単位は W/m^2 。

Fig. 9 Diurnal variation of surface heat flux at the top of Sekichu-no-oka during December 4 to 5, 2001

a: on the warm wind-hole b: beside the warm wind-hole without the ventilation

The lines denote net radiation (Rn: solid line), sensible heat flux (H: dashed line), latent heat flux (LE: dotted line), and ground heat flux (G: dot-chain line).

穴でない所での地表面熱収支各項の時系列を図9-bに示す。正味放射がマイナスの値を示す16:30から翌7:00までと15:00以降に、温風穴でない所の顕熱、潜熱フラックスの値は 0 W/m^2 近辺を推移しているのに対し、温風穴では顕熱、潜熱フラックス共に 50 W/m^2 程度の熱放出を行っている。さらに、温風穴では早朝の3:00頃に顕熱フラックスが 120 W/m^2 にまで増加している。それらのフラックスを補うかたちで、地中熱流量の絶対値が大きくなっている。すなわち、温風穴上での夜間の地中熱流量は上向きに約 150 W/m^2 の大きな値を示し、早朝には約 200 W/m^2 にも達していることが明らかになった。

V 風穴循環に伴う熱の出入りの考察

まず、本研究により、夏季の風穴循環に関するトレーサー実験によって、C温風穴で吸い込まれた外気が崖内部で冷却されてC冷風穴から冷気として噴出しているということが観測的に初めて実証された。このことは、風穴の成因としてこれまで考えられてきた対流説における風穴循環の存在を実証する重要な証拠となる。また、崖内部の空気の滞留時間は、2度の実験で多少の違いはあるものの、数時間というオーダーであるということがわかった。

この値はTanaka et al. (2000a)の数値実験で考えられていた1~2日より1オーダー短い。外気は数時間のオーダーでほぼ零度にまで冷やされ、冷風穴から流れ出る。このことは、これまで考えられていたより多くの熱量が、外気から崖内部に輸送されていることを意味する。その加熱に対抗して夏季の冷風穴を維持するためには冬季に相当量の寒気の蓄積が達成されなければならない。崖内部にそれだけの熱容量があるのだろうか。

以下に風穴循環に伴う熱の出入りについて定量的な考察をする。まず、安定した値を得ることができた7月8日のトレーサー実験の結果から、崖の空

隙体積を推定する。CO₂の分子量を $M=44$ とすると、C温風穴に吸い込ませた質量が $m=20 \text{ kg}$ なのでモル数は $n=m/M=20/44 \text{ kmol}$ となる。状態方程式 $PV=nRT$ において冷風穴温度を $T=300 \text{ K}$ とし、この高度の気圧を $P=95000 \text{ Pa}$ とすると、モル数 n は既知なので投入したCO₂の体積は $V=11.1 \text{ m}^3$ となる。ここで、 R は一般気体定数(8314 J/K/kmol)であり、状態方程式においてCO₂の分圧と体積の積 PV が保存される。出口のC冷風穴ではこれが空気に希釈されて、最大 25 Pa の分圧のCO₂が検出された。図5からCO₂が出始めてから出終わるまでの7時間の平均濃度(バイアスを引いたもの)を読み取ると、約 5.1 Pa となり、約 5.1 Pa に希釈されたCO₂が7時間にわたって流れ出たと換算することができる。状態方程式により PV の値が保存されることから、CO₂の分圧が初期値の $P=95000 \text{ Pa}$ から 5.1 Pa に下がった時の体積は $V=2.07 \times 10^5 \text{ m}^3$ となり、これがCO₂を希釈した空気の総体積を意味する。それだけの体積の空気がCO₂が出始めてから出終わるまでの7時間に崖内部を通過したということから、平均滞留時間の1.5時間に崖内部を通過した空気の体積は $4.4 \times 10^4 \text{ m}^3$ となる。この体積はトレーサーの流路に沿った崖の空隙体積と等しいと考えられる。

崖の空隙体積がわかると、1日の循環回数および夏季の循環日数より、一夏に崖内部を通過して冷却される空気の総体積を求めることができる。ここで、1日の循環回数は2度のトレーサー実験の結果を考慮して、平均的に約10回であるとし、夏季の循環日数は5月から9月の5カ月間を夏季循環期であるとして、150日とする(図1参照)。そうすると空気の総体積は $6.6 \times 10^7 \text{ m}^3$ となる。この値に空気の密度($\rho_a=1.275 \text{ kg/m}^3$)、空気の定圧比熱($C_p=1004 \text{ J/K/kg}$)、外気と冷風穴の平均温度差($\Delta T=10^\circ\text{C}$)を掛けると、夏季の崖の貯熱量を求めることができる。その値は、 $8.4 \times 10^{11} \text{ J}$ となる。

しかしここで注意すべきことは、今回の実験によって求められた熱量はあくまでもC温風穴とC冷風穴の間とその周辺の崖錐の貯熱量であるということである。その面積は $1.5 \times 10^4 \text{ m}^2$ 程度であり、山全体から考えると一部にすぎない。C風穴地と同様に現在も冷風穴が存在している所としては第2指定地、第3指定地、第4指定地、第6指定地があるので、それらの規模が同程度であったとすると、今回の実験によって求めた熱量の5倍の熱量が中山全体で貯蓄されていると推定され、その値は、 $4.2 \times 10^{12} \text{ J}$ となる。

一方、冬季の風穴循環に関する観測では、温風穴の分布が明らかになり、中山全体の温風穴の総面積は約 $5,000 \text{ m}^2$ と推定された。また、第2、3、6指定地の冷風穴で吸い込みが発見され、冷風穴から外気を吸い込んで温風穴から暖気を噴出する循環が確認された。さらに、地表面熱収支観測の結果から冬季夜間の循環によって大気中に放出される上向きの地中熱流量は 150 W/m^2 と推定された。図9-aから温風穴の1日の地中熱流量を積算すると、 $9.8 \times 10^6 \text{ J/m}^2$ であった。冬季の風穴循環日数を11月末から3月初頭の約100日とし、その間観測日と同じ循環をしていたとすると、一冬の風穴循環によるフラックスは $9.8 \times 10^8 \text{ J/m}^2$ となる。ここで先に見積もった中山全体の温風穴の総面積 $5,000 \text{ m}^2$ を掛けると、 $4.9 \times 10^{12} \text{ J}$ という値が得られる。

上述の議論により、夏季に崖錐内部に貯蓄される熱量は $4.2 \times 10^{12} \text{ J}$ で、逆に冬季に温風穴から放出される熱量は $4.9 \times 10^{12} \text{ J}$ と推定された。この二つの値は若干は異なるものの、推定の精度等から考えるとオーダー的にはほとんど同じ値であるといつてよい。夏季に崖錐内部に貯蓄される熱量を、崖錐から放出される寒気と読み換え、そして冬季に温風穴から放出される熱量を、崖錐内部に蓄積される寒気と読み換えれば、夏季に冷風穴から噴出する冷気は、冬季に蓄積された寒気によってまかなえる、という

ことが定量的に示されたことになる。ただし、夏に行ったトレーサー実験の循環経路と、冬に行った熱収支解析の循環経路は異なる。夏冬とも1点観測の結果を山麓全域に拡張して総熱量を推定していることから、誤差はきわめて大きく、今後の包括的な観測による一層の裏付けが必要である。

崖錐にはそれだけの熱量を貯蓄する熱容量があることが示されたので、それを崖錐の温度変化に換算して見積もってみた。まず崖錐の体積であるが、トレーサー実験の結果でC温風穴およびC冷風穴付近の空隙の体積が $4.4 \times 10^4 \text{ m}^3$ と推定されている。中山全体を見積もるにあたって、貯熱量の推定と同様に、現在も冷風穴が存在している第2指定地、第3指定地、第4指定地、第6指定地に同程度の崖錐および空隙があると考え5倍する。すると、中山全体で冷風穴の存在に関わって空気が入り出る空隙の体積が、 $2.2 \times 10^5 \text{ m}^3$ と推定される。ここで崖錐の空隙率を20%とし、残りの80%が岩石であったとする。しかし岩石の芯まですべてが熱交換に関わっているとは考えにくいので、岩石の表層から体積にして25%が熱交換に関わっていると仮定する。そうすると中山全体で熱交換に関わる岩石の総体積は、 $2.2 \times 10^5 \text{ m}^3$ と推定される。

次に岩石の密度を $2,500 \text{ kg/m}^3$ 、比熱を 750 J/K/kg とすると(Tanaka et al. 2000a 参照)、岩石 1 m^3 の温度を 1°C 変化させるのに必要な熱量は、約 $1.9 \times 10^6 \text{ J/K/m}^3$ となる。したがって、中山全体で熱交換に関わる岩石の温度を 1°C 変化させるのに必要な熱量は、 $4.1 \times 10^{11} \text{ J/K}$ となる。先に見積もった崖錐と外気で交換される熱量、夏季 $4.2 \times 10^{12} \text{ J}$ 、冬季 $4.9 \times 10^{12} \text{ J}$ によって起こり得る岩石の温度変化は、約 10°C となる。ここで、夏季に冷風穴から噴出する冷気の温度および、冬季に温風穴から噴出する暖気の温度は、崖錐内部の温度を反映していると考えられる。図1からそれらの温度を読み取ると、前者の最低は 0°C 、後者の最高は約 18°C

で、その差は約 18°C であり、前者と後者の季節平均の差は約 10°C となる。この値は、見積もられた熱量によって起こり得る岩石の温度変化、約 10°C に匹敵するものである。つまり崖錐の岩石の温度が約 10°C 変化するだけで、夏季と冬季に貯蓄・放出される熱量を溜め込むだけの熱容量があるということである。

以上の結果と考察をまとめると、風穴循環を励起するのは崖錐内部と外気の温度差で、夏季には崖錐内部の温度が外気より低くなるため崖錐内部で下降流が生じ、冬季は崖錐内部の温度が外気より高くなるため上昇流が生じる。その結果、夏季は崖錐下部の冷風穴から冷気を噴出し、逆に冬季は崖錐上部の温風穴から暖気を噴出するのである。崖錐内部と外気の温度差を生じさせているのは、崖錐の岩石である。氷の存在は二次的であると考えられる。夏季は崖錐内部に入ってきた外気から熱量を奪い、冬季は崖錐内部に入ってきた外気に熱量を与える役割をしている。その熱量の総和は夏季と冬季ではほぼ一致することが今回の観測で確認されたので、風穴循環は気化熱説や周水河説のように特別な冷源や熱源でなくとも、対流説のみで説明がつくということが示唆された。

風穴循環が起こるには、山の斜面の崖錐内部に十分な空隙が存在すること、その斜面の上部と下部に、外気と空気のやり取りを行うことのできる穴が存在すること、そして崖錐内部の熱容量が大きいことの3点が必須である。崖錐内部の熱容量が大きいため、内部温度は外気温の季節変化に遅れて緩やかに変動する。そのため斜面内部と外気に温度差が生じ、斜面の内部と外部で自由に行き来できる空気は、夏季と冬季で入れ替わる風穴循環を形成する。風穴循環は斜面の内部と外部の温度差によって生じるものであるため、外気温の日変化によって温度差がなくなれば循環は止まる。逆に温度差が大きくなれば循環は強まる。夏季循環で循環が止まるのは早朝のわ

ずかな時間だけであり、日中外気温が上がると風穴循環が強まり、冷風穴は活発化する。また、暑い夏ほど風穴循環が強まり、冷風穴の氷が成長する Ice Valley のメカニズムも理解できる。これらの観測事実は風穴循環が対流説によって矛盾なく定量的に説明できることを示している。

VI 結 論

本研究では、累石型風穴として有名な福島県下郷町の中山風穴を対象に、風穴循環の成因を解明することを目的とし、夏季と冬季の2回にわたり現地観測を行った。夏季循環に関しては、風穴の循環速度を明らかにするために CO_2 を用いたトレーサー実験を行った。その結果、崖錐上部の温風穴で吸引させた CO_2 が、わずか1.5時間後には140 m 下方の冷風穴から噴出することが確認された。これで、風穴循環の吸い込み口と吹き出し口が厳密に同定されたことになる。風穴の空気は約1.5時間に1回入れ替わっており、循環速度は約 2.6 cm/s であるということがわかった。これはこれまで数値実験等により考えられていた循環速度より1オーダー速い速度であった。崖錐を通り抜ける質量フラックスと通過の際の温度変化がわかったため、この結果から中山全体で夏季に崖錐内に貯蓄される熱量を推定すると約 $4 \times 10^{12} \text{ J}$ という値が得られた。

冬季循環に関しては、サーモグラフィーを用いて今までわかっていなかった温風穴分布を調査し、さらに温風穴での熱収支観測を行った。これまでC風穴の崖錐上部にしか確認されていなかった温風穴は、第3指定地および第6指定地の冷風穴の崖錐上部にも存在することがわかった。また、石柱の丘や展望台付近にも、温風穴が点在していることがわかり、中山全体での温風穴の総面積は約 $5,000 \text{ m}^2$ にも達した。地表面熱収支観測によるとそれらの温風穴では、夜間および早朝に約 150 W/m^2 の上向きの地中熱流量が存在することがわかった。それを冬

季, 中山全体で積算すると約 5×10^{12} J となり, 夏季に貯蓄された熱量とオーダー的に一致した.

以上の夏冬の観測事実により, 中山風穴内部の低温は, 夏季と冬季で逆転する風穴循環に伴う熱輸送により定量的に説明が可能と考えられる. 本研究の結果は, 崖錐内部と外気温の差によって対流が励起されるという対流説を支持するもので, 冬季の最低気温となる早朝に, 成層不安定により発生する活発な対流混合が, 比較的短期間に崖錐内部にまで寒気を蓄積し, 蓄積された寒気が夏季に重力流として穏やかに流出することで風穴が形成維持されていることを示した. 大気の力学的な成層不安定により生じる対流が, 寒気だけを効率よく崖錐内部に蓄積するという自然界の熱フィルターの役割を果たしている. これが風穴の冷気の主な成因と考えられる.

以上の風穴循環の成因の理解に立つと, 風穴保護のためには繁茂する植生の伐採が必要であり, 表層腐植土を撤去して崖錐表面の目詰まりを解放させることが重要と考えられる. しかし, 山腹に焼き入れを行って闇雲に植生を除去するのではなく, 風穴循環の通り道となっている温風穴の位置をサーモグラフィで見極め, その周辺の植生を伐採して崖錐表面の目詰まりを解放させてやるのが効率的で有効な保護対策と考えられる.

本研究では, 福島県下郷町教育委員会に資料の提供, 現地視察や保護対策についての議論などで大変お世話になった. また, 筑波大学地球科学系の安成哲三教授 (現在, 名古屋大学地球水循環研究センター), 木村富士男教授からはゼミなどで貴重なコメントをいただいた. 同大学生物学系の鞠子 茂助教授には CO₂ アナライザーを, そして, 東京都立大学の三上岳彦教授にはサーモグラフィを貸していただいた. 東京大学の宮崎 真博士には熱収支観測でお世話になった. また, 研究室の本田 恭子さんには技術支援をいただいた. ここに記して謝意を表す. 本研究は日本気象学会 2002 年春季大会 (2002 年 5 月開催) において発表された.

(投稿 2002 年 7 月 30 日)

(受理 2003 年 10 月 4 日)

文 献

- 荒谷武三郎 1920. 風穴の研究. 理学界 18: 208-213.
荒谷武三郎 1923. 秋田県片山風穴. 地学雑誌 36: 732-738.
荒谷武三郎 1926. 秋田県長走風穴に就いて. 地球 8: 426-441.
江川良武・掘伸三郎・坂山利彦 1980. 風穴の成因について. 地学雑誌 89(2): 1-12.
斎藤 実 1953. 風穴地帯に於ける地中温度と植物群落との関係. 生態学会報 2: 151-155.
志保井利夫 1974. 北海道常呂郡留辺蕊町, 温根湯つつじ山の風穴について. 地学雑誌 83: 89-102.
下郷町教育委員会 1998. 『中山風穴地の自然 下郷町文化財調査報告書第 8 集』下郷町教育委員会.
田中 博 1997. 韓国密陽郡の ICE VALLEY における夏季水結現象の数値実験. 地理学評論 70A: 1-14.
野原大輔・村 規子・田中 博 2002. 福島県中山風穴の冬季に見られる地温高温域. 天気 49: 745-746.
黄 水鎮・文 勝義 1981. 韓国密陽「ウルムゴル」の夏季水結現象について. 日本地理学会予稿集 19: 218-219.
藤原滋水 1985. 箱根・早雲山の累石風穴. 気象 29: 8135-8137.
真木太一 1998. ジャガラモガラ風穴・盆地の地形, 気象および植生の特徴. 農業気象 54: 255-261.
牧野富太郎 1907. 羽後長走小丘. 植物学雑誌 240: 20.
村 規子 2002. 福島県中山風穴における風穴循環の成因の研究. 筑波大学第一学群自然科学類卒業論文.
横井みずほ 1999. 福島県中山風穴の成因に関する観測的および理論的研究. 筑波大学第一学群自然科学類卒業論文.
横井みずほ・田中 博 2000. 中山風穴における風穴現象について. 気象利用研究 13: 57-60.
Bae, S. K., and Kayane, I. 1986. Hydrological study of Ice Valley, Korea. *Ann. Rep., Inst. Geosci., Univ. Tsukuba* 12: 15-20.
Kim, S. S. 1968. On the ice formation at the Ice-Valley, Milyang Koon, Korea in summer season. *J. Korean Meteor. Soc* 4: 13-18 (in Korean with English abstract).
Moon, S.-E., and Hwang, S.-J. 1977. On the reason of the ice-formation at the Ice-Valley, Milyang Kun, Korea in the summer season. *Natural Science Collection, Pusan University* 4: 47-57 (in Korean with English abstract).
Ohata, T., Furukawa, T., and Higuchi, K. 1994. Glacioclimatological study of perennial ice in the Fuji Ice Cave, Japan. Part 1. Seasonal variation and mecha-

- nism of maintenance. *Arctic and Alpine Research* 26: 227-237.
- Tanaka, H. L., Moon, S.-E., and Hwang, S.-J. 1999. An observational study of summertime ice formation at the Ice Valley in Milyang, Korea. *Science Report, Inst. Geosci., Univ. of Tsukuba* 20A: 35-51.
- Tanaka, H. L., Nohara, D., and Yokoi, M. 2000a. Numerical simulation of wind hole circulation and summertime ice formation at Ice Valley in Korea and Nakayama in Fukushima, Japan. *J. Meteor. Soc. Japan* 78: 611-630.
- Tanaka, H. L., Yokoi, M., and Nohara, D. 2000b. Observational study of summertime ice at the Nakayama Wind-Hole in Shimogo, Fukushima. *Science Report, Inst. Geosci., Univ. of Tsukuba* 21A: 1-21.

Geographical Review of Japan 77-1 1-18 2004

Mechanism of Cold Air Vent at the Nakayama Wind-hole in Shimogo, Fukushima

TANAKA, H. L.* , MURA Noriko** , and NOHARA Daisuke***

(*Institute of Geoscience, University of Tsukuba, **Japan Meteorological Agency,

***Terrestrial Environmental Research Center, University of Tsukuba)

The Nakayama wind-hole in Shimogo, Fukushima, is a famous natural monument where cold air vents from the foot of the talus along the mountain during summer. The wind-hole with various species of alpine plants is a wellknown tourist attraction, but has been decaying in recent years. The local government has replanted the surrounding forest to protect the natural monument. However, protection efforts might result in further destruction if we do not understand the mechanism of the wind-hole well. The first step in protecting the important natural monument is thus to understand the mechanism of the cold air vent at the Nakayama wind-hole.

In this study, we carried out extensive in situ observations of the wind-hole in both summer and winter in 2001. In summer, cold air blows from the cold wind-holes at the foot of the talus. It has been inferred that the air inhaled at the warm wind-hole up the slope cools in the talus and blows out from the cold wind-hole. To confirm this speculation, we conducted a tracer experiment using CO₂, which is harmless to the environment. As a result, it was found that the air inhaled at the warm wind-hole is exhaled from the cold wind-hole 140 m downslope only after 90 minutes. Based on the resulting mass flux of 2.6 cm/s and the known cooling rate of the air, we found that a total of 4×10^{12} J of thermal energy is stored in the talus during summer.

In winter, on the other hand, warm moist air blows from the warm wind-holes at the top of the talus. Using thermographic instruments, we found that such warm wind-holes are located ubiquitously at high altitudes, especially around Sekichu-no-oka. We measured the surface heat budget at the warm wind-hole and found that 150 W/m^2 of heat flux arises from the underground section of the talus. The heat flux is multiplied by the total area of the warm wind-holes, and a total of $5 \times 10^{12} \text{ J}$ of thermal energy is released from the talus during winter. The result is consistent, at least in terms of the order, with the amount of heat accumulated during summer.

Hence, we conclude that the cold air gently blowing from the cold wind-hole during summer can be quantitatively explained by the cold accumulated during winter. Convective overturning under the unstable stratification in winter and stable stratification in summer behaves as an effective thermal filter which accumulates only cold in the talus. This mechanism of a natural thermal filter is essential to maintain the cold air vent from the wind-hole during summer. Based on this conclusion regarding the mechanism of the wind-hole, we suggest cutting trees and opening vents around the warm wind-holes after identifying them thermographically to protect the important natural monument of the Nakayama wind-hole.

Key words: cold air vent, wind-hole, Nakayama wind-hole, tracer experiment, surface heat budget, thermography