風穴循環のメカニズム

田中博（筑波大学計算科学研究センター）

１．　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（図１）. 風穴からの冷気によりオオタカネバラなどの特殊な高山植物が繁茂し 1964 年 6 月 27 日に国の天然記念物に指定されている(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.

風穴の科学的な解説は荒谷(1920)により行われ,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. Tanaka et al. (2000a) は中山風穴と韓国の Ice Valley を対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た. 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, 近年は夏季に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).

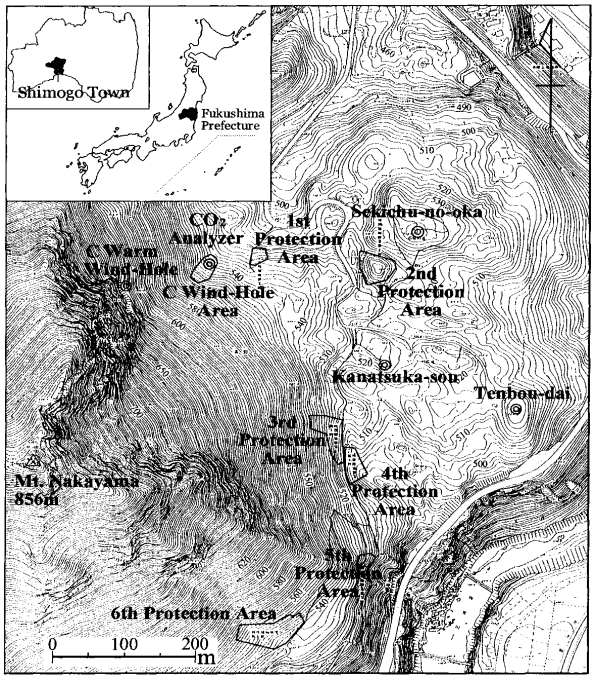

図１　中山風穴の冷風穴と温風穴の分布

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 500m 付近では,所々に直径数 10cm 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.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,保護地域になっている. このほかにも保護地域に指定されなかった風穴が風穴 A, 風穴 B などの名称で所々にみられ,第 1 指定地の西の風穴 C などからは活発に冷気が吹き出している.この標高 540m の風穴 C の上部の標高 630m 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).

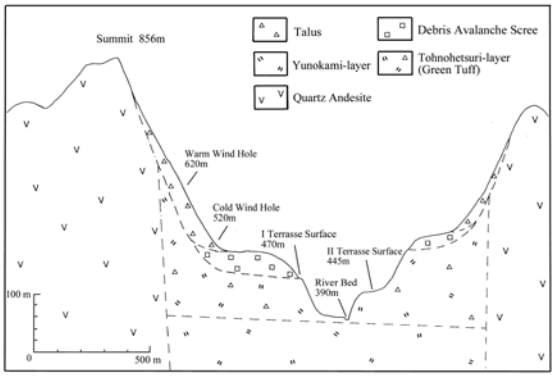

図２　中山風穴の冷風穴と温風穴の鉛直断面

図２に中山山頂から風穴 C の方向の鉛直断面の推定模式図を示した.中山の山体は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,山体崩壊により岩屑が堆積してできた崖錐斜面となっている.そのため,砕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.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温風穴 C と呼び,冷気を吹き出す通常の風穴を冷風穴 C と呼んで区別する.

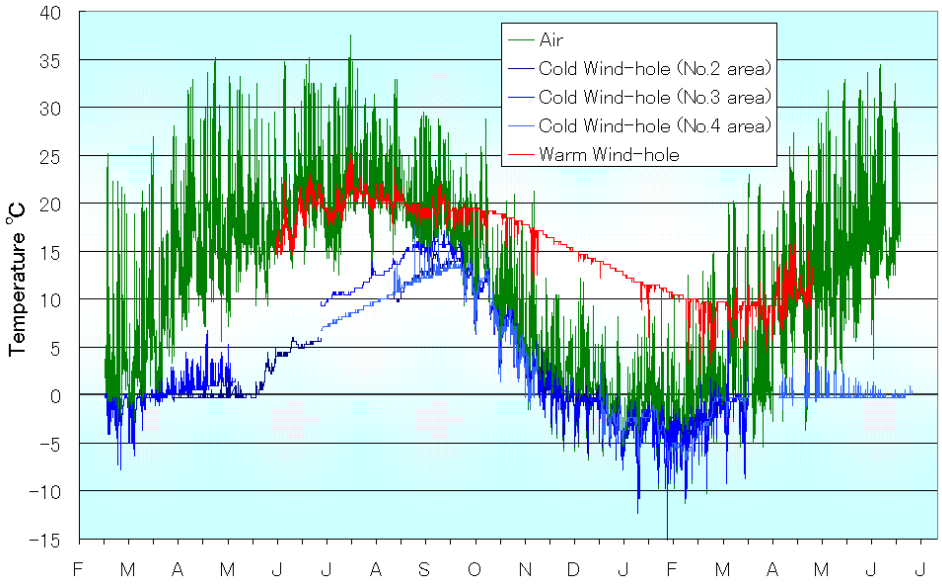

図３　中山風穴の冷風穴温度（青）と温風穴温度（赤），外気温（緑）の年変化

2.　風穴循環の年変化

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３はマイクロロガーによる外気温（緑）と冷風穴（青），温風穴（赤）の気温の年変化である．夏季には外気が高温で崖錐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錐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,崖錐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錐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温風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錐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錐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.韓国の Ice Valley では，春から夏にかけて，外気温が高ければ高いほど，冷風穴の氷が成長する．興味深いことに，中山風穴でも同様に，外気温が高くなるほど冷風穴の温度が下がるという特徴がみられる.

３．　夏季の風穴循環

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. 2001 年 7 月 8 日の実験の結果を図４に示す．朝 10:30 に温風穴 C から吸い込ませた CO2 が,冷風穴 C 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．今回の実験では，温風穴 C から吸い込ませた CO2 が冷風穴 C で明瞭に検出され,温風穴と冷風穴が確かにつながっていることが初めて観測的に実証された.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 2.6cm/s であるということが明らかになった.

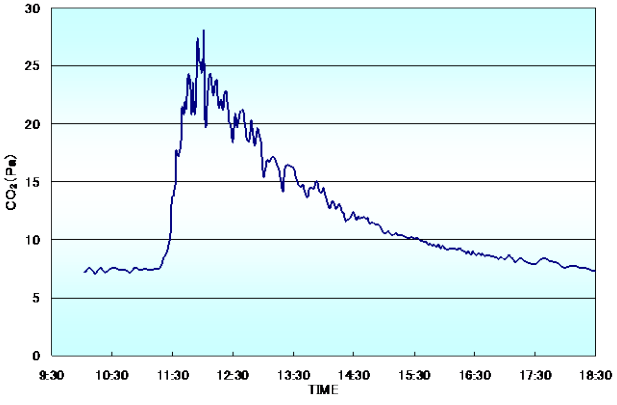

図４　夏季の風穴循環速度の測定実験

４． 冬季の風穴循環

冬季の風穴循環に関する観測は 2001 年 12 月 4 日から 5 日の未明にかけて行なわれた．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．図 5 は石柱の丘の赤外画像で，手前に観測者，上方に東屋が見える．この観測により，石柱の丘は一帯が温風穴となっていることが解った．地下から周囲よりも 10℃も高温な温風が噴き出しており，その相対湿度は 100%であった．吸い込み口の一部は第 2 風穴にあると思われる．

さらに,この石柱の丘頂上の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.熱収支観測では正味放射,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 6 に示す.正味放射がマイナスの値を示す夜間に,温風穴では顕熱,潜熱フラックス共に 50～100 W/m2 の熱放出を行っている.それらのフラックスを補うかたちで,地中熱流量は上向きに約 150 W/m2 の大きな値を示し,早朝には約 200 W/m2 にも達していることが明らかになった.これらの観測結果は田中他(2004)で報告されている．

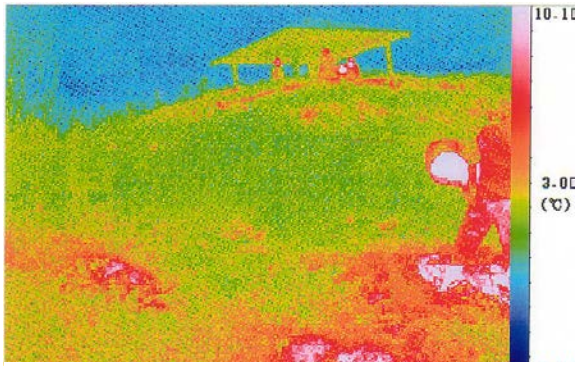

図 5　冬季の石柱の丘の温風穴の赤外画像

５． 風穴循環の数値シミュレーション

夏季と冬季の風穴循環の観測を通して得られた理解をもとに，風穴循環のメカニズムを定量的に再現するために，風穴循環の数値モデルを新たに構築した．計算領域は水平 240 m，鉛直 120 m の 2 次元斜面モデルで崖錐を表現し，外気温の年変化を Ice Valley での観測から与え，崖錐内部の岩の温度と岩の隙間を通過する空気塊の温度との差により，熱のやり取りを行うというモデルである．質量保存則には非圧縮性流体を考え，鉛直には静力学平衡を仮定することで，水平方向の運動方程式は，気圧傾度力と崖錐内

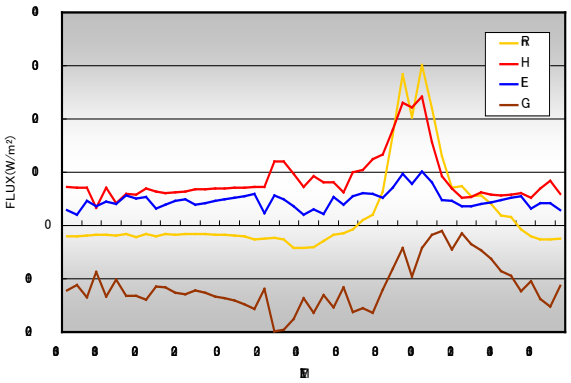

図 6　冬季の温風穴の地表面熱収支

部の粘性摩擦がバランスするものとした．田中他(2004)で推定された岩の空隙率から岩と空気の混合比を与えてモデルを閉じた．また，崖錐内部の空気の流路は，双曲線タイプの流線関数で固定し，領域平均の気圧傾度力で流速を変化させた．モデルの詳細については Tanaka et al. (2006)を参照されたい．

数値モデルの結果を図 7 に示した．緑の線は外気温，青の線は冷風穴，赤の線は温風穴，そして黒の線は同じ流線に沿う崖錐内部の温度である．冬から夏にかけて外気温が上昇するなかで，冷風穴は 6 月まで 0℃を保ち，その後上昇する．その間，空気の吸い込み口となる温風穴は外気温にほぼ等しい．逆に夏から冬にかけて外気温が低下する際に，夏季に崖錐内で蓄積された熱が温風穴から放出される．その間，冷風穴は外気温が日々の最低気温となる時間帯だけ吸い込み口となり，寒気だけを選択的に崖錐内部に蓄える熱フィルターの働きをしている．計算結果は図 3 の中山風穴での観測値と一致する．

風穴の謎であった，「春から夏にかけて，気温が高ければ高いほど風穴内の氷が成長する．」という特徴がモデルでも再現されている．同様に，秋から冬にかけて，気温が低ければ低いほど，温風穴から温風が噴き出し，温風穴の温度が上昇するという観測で見られた特徴も再現されている．簡単な雪氷モデルの結果によると，崖錐内部の氷は 12 月に形成されはじめ，2 月に最大となり，その後，徐々に減少して 9 月に消えるという結果になった．外気温が 0℃以下になる期間は冬季の一部に限られるが，その間に盛んに対流混合が起こり，冷気を崖錐内部に効率的に貯蔵する．このような数値実験により風穴循環の多くの特徴が再現されたことから，風穴の冷気は冬季の第一級の寒波が訪れた際に崖錐内部に蓄

積されたもので，対流説が正しいことが裏付けられた.

6． まとめ

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.

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している.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，循環速度は 2.6 cm/s と推定され，わずか 90 分で冷気が崖錐内を循環していることが判明した.

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している.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 150 W/m2 の地中熱流量が観測された.これは乱流フラックスと対流フラックスの和である.夏季に崖錐に貯蔵された総熱量は，冬季に温風穴から吹き出す総熱量と一致し，その年周期の結果を数値モデルにより再現することに成功した.

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ことが,効率的で有効な保護対策であることが結論付けられた.

参考文献

荒谷武三郎 1920.風穴の研究.理学界 18: 208-213.

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・村規子・野原大輔 2004.福島県下郷町中山風穴における風穴循環の成因.地理学評論 77-1: 1-18.

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 summer time 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.

Tanaka, H. L., Nohara, D., and H.-R. Byun 2006. Numerical simulation of wind hole circulation at Ice Valley in Korea using a simple 2D model. J. Meteor Soc. Japan, 84, 1073-1084.

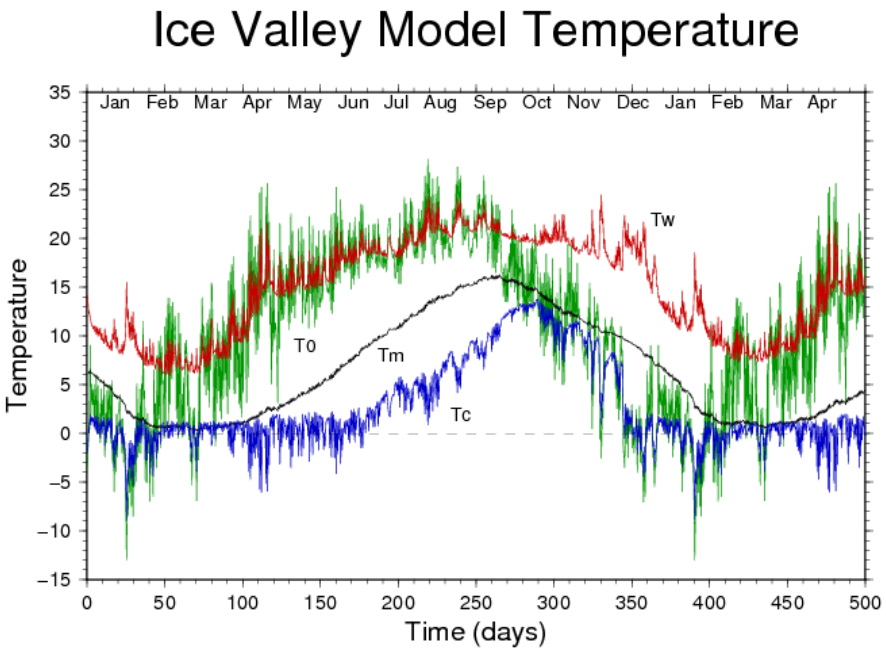

図 7　数値モデルによる冷風穴温度（青）と温風穴温度（赤），外気温（緑）の年変化