

地下洞穴の気候資源と農産物貯蔵について

鈴木義則・早川誠而・日下達朗・宇都宮 宏・田中秀平・丸本卓哉

(山口大学農学部)

On the Climatic Resources of Underground Cave
and Preservation of Agro-productsYoshinori SUZUKI, Seiji HAYAKAWA, Tatsuro KUSAKA,
Hiroshi UTSUNOMIYA, Shuhei TANAKA and Takuya MARUMOTO(Faculty of Agriculture, Yamaguchi University,
Yoshida, Yamaguchi 753, Japan)

1. はじめに

自然がもつエネルギーを活用することは農業気象環境の立場からも重要なことである。ここでは地下洞穴の気象資源を評価しその有効利用法を図ることにし、山口県下に数多く存在する天然の鐘乳洞に着目した。これらは観光用を除くと、未利用状態で自然に放置されているのが実情である。ところで将来の人口増加に対処するには食糧の生産性の向上を図るとともに、保存技術の開発を進めることが重要である。視点を短くしても、農産物の一時的過剰の発現があり端境期に向けての出荷調整的保蔵もまた必要である。保蔵といえば現在はCA貯蔵が盛んであるが、これにはエネルギーの投入が不可欠である。一方地下洞穴には省エネルギー的利用法が期待できる。そのような観点から地下洞穴の利用は各地で行われ、大谷石の採石跡地の例(伊庭, 1988)などが有名である。しかし、データとしてはいろいろな場所について蓄積することが今なお必要な段階と思われる。

ここでは天然の鐘乳洞を対象に行っている気象環境の実測データと農産物の貯蔵可能性の検討結果の概要を紹介する。

2. 調査・実験方法

2.1 調査・実験場所

現地実験 山口県美祢郡秋芳町寺山の穴; 記録によれ

1989年7月26日 全国大会にて発表

1989年8月4日 受理

ばこの寺山の穴は全長1552mはあるといわれるが、利用可能空間は図1(山口ケイビング・クラブ, 1985)に示す第一主洞の一部に限定される。第一主洞は奥行き約100m、開口部は7m×8mで、開口部位置が胴体部より高いのが特徴である。入口から急傾斜で下って平坦部となった後は若干の凹凸はあるもののほぼ平坦に近い。しかし、洞穴の幅も天井の高さも不揃いであるため体積の正確な値は不明である。水路も一部にあり、垂直に落ち込む所がある。地表面は入口から坂の下までの間は大小の岩石がごろごろしており、平坦部になると粘土堆積物のみとなり、水路近くの一部は砂が堆積した状態を呈している。天井と側壁は鐘乳石(石灰質岩)である。入口付

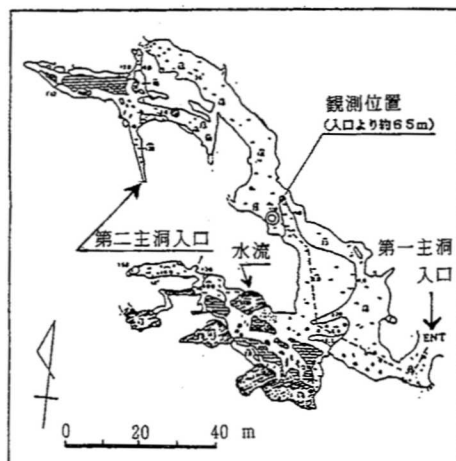


図1 鐘乳洞穴-寺山の穴平面図(山口県秋芳町)

近は杉や竹などがあり、日射の大半は樹体で遮断される。洞穴内は入口部が屈曲しているため25mほどで完全に暗黒になる。この第一主洞には第二主洞が人が腹這いでのみ出入りできる小さな穴で結合している。

2.2 調査・実験期間

1988.5-、継続中。

2.3 調査・実験方法

i) 洞穴内外の温度・湿度・風・水温・水量等の定点調査と移動観測。バイメタル・毛髪型自記温湿度計、赤外線放射温度計、サーミスタ温度計、熱型風速計、自記水位計等を使用して測定。

ii) 果物(二十世紀梨)の洞穴保蔵試験。プラスチック製棚に裸とポリ袋入りの状態で合計120個置き、重量変化、腐敗の進行状況を定期的に測定した。基礎実験は山口大学農学部で行った。

2.4 使用データ

実測値とアメダス秋吉台の観測値。

3. 結果と考察

3.1 洞穴内外の温度年変化特性

周辺を代表する秋吉台の気温の推移を旬平均値でみると、最高気温は夏季には約30℃、冬季には約7℃、最低気温は夏季には約20℃、冬季には約0℃であり、年平均気温は15℃であった。このような気候条件下にあって、入口を解放状態にしたままの洞穴内(入口から65m)は夏には10-12℃、冬に7-8℃と晩夏から秋にかけて高く冬に低い年変化を示した。上述の外気温に比較すると恒温に近いといえるが変動を示すこと、しかも地下について一般にいわれる冬に高温、夏に低温という変化パターンとは逆の推移を示す特徴が明らかになった(図2)。

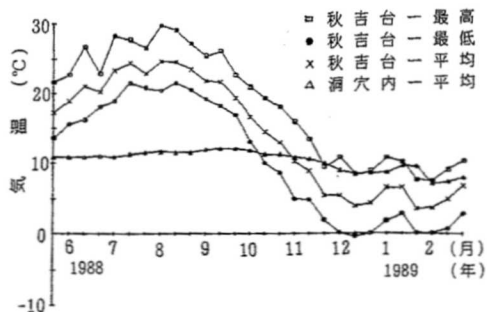


図2 秋吉台(最高・平均・最低)と寺山の穴内(平均)の気温の経時変化

また、洞穴内の温度は地下洞窟が通常示すといわれる当該地の年平均気温に比べて3(夏)-8℃(冬)も低いものであった。

洞穴内での最高気温の発現時期は洞穴外に比較して約

1.5カ月遅れであった。これはこの深度から考えると、熱伝導理論からははずれる傾向にあるというべきで(後述)、10月以降の洞穴内温度の低下は別の要因によってたらされたと見る必要性がでてきた。

以上、この入口解放型の洞穴の温度の年変化には通常の傾向とは異なる特性があることに注意が必要である。

3.2 洞穴内外の温度日変化特性

旬平均値での年変化特性だけでは貯蔵環境を十分に示しているとはいいがたく、平均値の背景にある日変動特性を明確にしておくことが重要である。そこで気温の日変化を検討した。夏季には洞穴外が洞穴内(入口から65m)より高温状態で明確な日変化を示すにもかかわらず、洞穴内はほとんど恒温(図3下)であった。冬季には洞穴外が洞穴内より低温状態で明確な日変化を示すのに対して、洞穴内も変化の幅は小さいものの変動(図3上)を示していた。これは、夏は洞穴外の高温が洞穴内の冷気層に影響しないこと、そして冬は逆に洞穴外の冷気が洞穴内の高温空気層に影響を及ぼすことを意味する。日変化の発現は秋に始まり、春季に終了するようであった。高温の影響が現われない夏安定型、低温の影響を受ける冬不安定型の温度変化の発現は洞穴の構造によると考えられる。ここでは洞穴内・外との気温差に基づく冷気流の発生消長がその原因と考えられた(後述)。

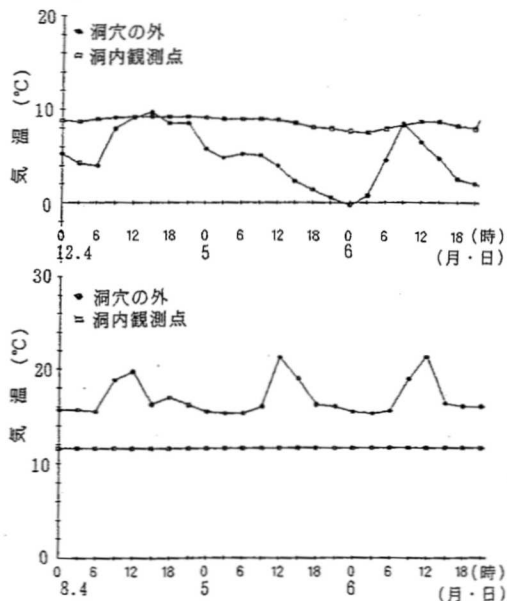


図3 洞穴内外の気温の日変化特性 (上:冬季, 下:夏季)

3.3 洞穴内地表面温度の分布特性

放射温度計による地表面温度の測定結果を夏季と冬季について各2例ずつ図4に示した。夏は内外10℃の温度

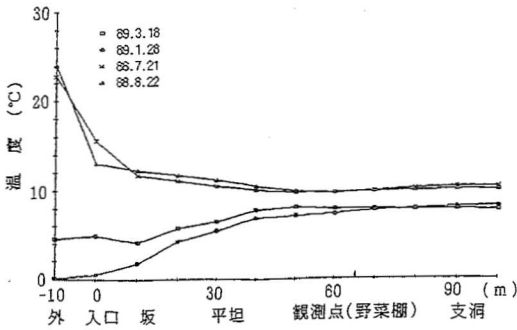


図4 洞穴内外の地表面温度の縦断分布特性の季節による差異

差(内<外)がありながら洞穴入口側で0.5℃未満の昇温がみられただけであった。一方、冬季には5℃程度の内外温度差(内>外)のもとで洞穴入口側での大幅な温度低下と洞穴内50mより奥の方では地点差が小さいことが認められた。このように夏と冬で分布特性が異なること、それが外気侵入の有無によることがわかった。そして、夏と冬の温度差が洞穴の奥の方でも生じていることから、冬季を中心とする低温期間の温度の引き下げ作用が大きな存在となっていることがわかった。

3.4 洞穴内の風分布と風速

温度環境の考察には換気量が必要であるが、洞穴自体が巨大かつ複雑で測定が困難なため、ここでは空気の流れを知ることにした。これは貯蔵物体から出る各種ガス成分の拡散に対する影響などを考える上でも必要である。

洞穴内風向分布は冬季は低層では内部に向かうものが一般的であり、最終的にはいくつかの支洞に吸い込まれるように流れ込んでいた。垂直的に見た場合、入口の坂の中途では地面から天井までの高度の下2/3の範囲は下降流で、残りの上部では入口の方に向かって流れていた。下降流の風速は当然のことながら内外気温差に比例するように変化した。

夏季には、冬季とはほぼ逆の動きを示した。入口付近は停滞気味で、内部では入口側に向かう方向が多く出現

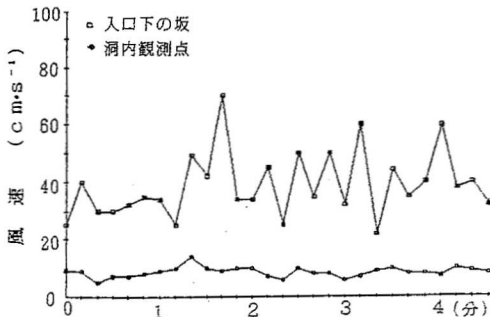


図5 洞穴入口付近と洞穴内の風速の経時変化の一例

した。しかし、風速は冬季に比較して弱かった。支洞結合部では風が吹き出してきており、その強さは100 $\text{cm}\cdot\text{s}^{-1}$ をこえる場合があり脈動を示した。なお、吹き出し流の温度はこちら側とそれほど変わらないようであった。

風速の場所による違いを春季(1989.3.18)を例にとって示したのが図5で、入口斜面中途と内部野菜棚付近の地上15cm高度の風速である。前者では30-60 $\text{cm}\cdot\text{s}^{-1}$ の冷気流が存在し、後者では10 $\text{cm}\cdot\text{s}^{-1}$ 程度の微風であった。

3.5 洞穴内相対湿度

相対湿度は夏は日変化もなくほぼ100%で極めて高い状態を維持し、冬は冷気の侵入もあいまって若干の湿度低下が認められ、95%程度への低下がみられた。これらは貯蔵物の乾燥の進捗や7-12℃を適温とするカビ類、病原菌の蔓延に関係すると考えられるが、乾燥についてはこの程度の湿度変化では大きく進むことは少なかった。

3.6 水温

洞穴内には一部に水流と水溜りがある。夏季の水温は11℃程度に維持され一般的には気温に平衡していた。

3.7 洞穴内温度の発現のしかた

外気温に対し洞穴内は冬季高温であるが降温現象を示し、夏季は低温でありながら恒温を保持した。この温度の発現のしかたを考えてみる。

i) 熱伝導面からの考察

洞穴の温度の発現のしかたとして第一に思い浮かぶのは熱伝導理論である。外界の温度変化が熱伝導理論(例えば八鍬)に従って洞穴内に伝えられるとして、地中における最高温度起時の深さによる遅れを求めて実測値と比較した。もし両者が等しくなれば熱伝導が主力成因となるし、逆に実測結果との差が大きくできれば別の要因を考えなければならなくなる。熱伝導理論によると岩石のみの単一組成とした場合でも、地下10mでは180日、15mでは260日以上遅れがでる結果となった。これに対して現実には40-50日で、これに相当する深さは高々3m未満でしかなく、両者は大幅に異なることがわかった。実際の遅れが短いのは、熱伝導に基づく現象の進行を攪乱するものがあることを示唆する。なお、熱伝導で説明がつく地下石室の例には坂上・早川(1974)の報告例がある。

ii) 洞穴開口部の位置と空気流動面からの考察

これまでの結果を総合すると、洞穴内温度の発現のしかたとしては洞穴開口部と洞本体との相対的位置関係、内外温度差による空気流動の存否が支配要因といえる。

冬季低温化の発現 冬季には高所にある開口部側に低温の重い空気が出現し、これが下部の洞穴高温層の中に内外の温度差に応じて流入し(冷気流の形)、洞穴内の低温化を徐々に進行せしめるためである。この時高温の

空気は浮力によって上昇するが、上昇によって高温空気が消滅してしまわないのは、洞穴およびそれを取り囲む岩石、土砂、植物被覆などに保存されている熱が洞穴内部に入り込む空気と与え続けられるためである。

夏季恒温の発現 夏季には高所の洞穴入口が解放状態であっても、洞穴内にある低温の空気は上昇することなく安定したままで、強風が入口付近で吹き込まない限り低温安定層の破壊は起こらない。また、洞穴温度より高温の水流が山裾から入り込んでも、洞穴到達以前の長い地下経路で放熱を終了する場合が多く洞穴温度に影響することは少ないようである。

iii) 冷熱蓄熱発生期間について

当地の洞穴内への冷熱蓄熱が起こる期間を知るために、秋吉台と洞穴内の温度差(対最高・平均・最低気温)を示した(図6)。温度差が0℃のラインより下方になる期間が冷熱の蓄熱期間である。この冬季の冷熱が洞穴構成物質に積算的に蓄積されていくために、年平均気温よりかなり低い温度状態を創出することになると思われる。したがって、構造的に開口部が上位にある洞穴では、洞穴内部に高温噴気などの熱源がない場合には、冷熱蓄熱型の自然エネルギー利用貯蔵庫となると結論づけられ、洞穴の気候資源と評価できる。

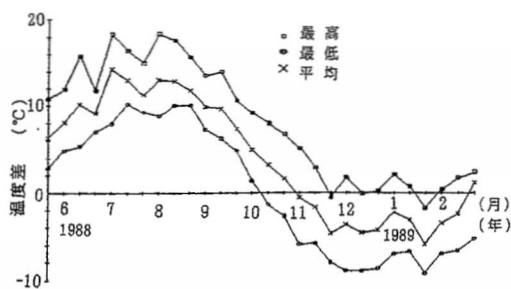


図6 洞穴内への冷熱蓄積可能期間判定資料—外界(秋吉台)と洞穴内の温度差の経時変化—

他での例には大谷石の採石跡地(伊庭, 1988)があり、入口が高い地下洞窟の気象は類似の傾向を示していた。

3.8 農産物の貯蔵の一例

幾つかの農産物について貯蔵実験をしたが、ここでは二十世紀梨の例を簡単に述べる。

現地近くの梨園で120個を採取し生体重量を秤量した後洞穴においた。期間は1988年9月6日-12月19日であった。この間に洞穴温度は12℃から8℃に変化した。104日後の梨は外観的には外皮が薄緑から薄黄に変わったが、重量、みずみずしさは貯蔵前とほぼ同じであり、糖度、pHなど品質にも変化は起こらなかった。ただし、果柄の先端部分が黒色を帯びるものがでた。とはいえ果実内部には何らの問題もなかった。

CA貯蔵では二十世紀梨の温度の最適設定値を0-2℃としている(果樹試験場, 1989)。これからするとこの温度は過高温である。もしこの0-2℃以外では障害が現われるならば、本洞穴の12℃から8℃の条件下では腐敗等が出現したはずである。しかし、現実には貯蔵に耐える結果となった。梨の貯蔵に天然の状態では晩夏から初冬にかけてエネルギーを消費しないで成功したことは鐘乳洞の気象資源を明確にしておき、有効利用の道を拓くものである。商品価値からみれば果柄の黒変部はカットすればよく、また価格の上がるクリスマス出荷が可能という出荷調整上のメリットが注目される。この洞穴は当初述べたごとく大規模であるため、貯蔵量を実用規模に増大させても果実の呼吸熱の影響は無視でき、上述と類似の結果となることが予想される。

4. まとめ

山口県秋吉台の地下洞穴(寺山の穴)は当地の年平均気温よりかなり低温であって、夏季には恒温多湿(10-12℃, 100%)で場所による違いが僅少、冬季には温湿度低下(7-8℃, 95%)と日変化の発生並びに入口側での温度低下を示した。これは洞穴の入口開口部(解放状態)の位置が洞穴本体より高いことによる冷気流の発生(温度が内>外の期間)が主要因と考えられた。二十世紀梨を貯蔵したが、通常の貯蔵温度に比べ高温であるにもかかわらず、100日を越えても品質の変化はほとんどみられず成功を納めた。これは洞穴の気候資源と評価できる。

謝 辞

本実験・調査に当たって格別なるご配慮を賜った寺山の穴所有者福田隆繁氏、秋吉台科学博物館館長庫本正博士、秋芳町川村町長、秋芳町梨生産組合の皆様へ深甚なる謝意を表す。また、観測の手伝いをいただいた山口大農環専攻学生豊田治、佐藤善人、久保勝徳、小池隆之、末広雅信、佐々木弘泰、宮崎昌宏、板垣明法の各君にお礼申し上げる。

引用文献

- 伊庭慶昭, 1988: 果実の省エネルギー貯蔵. ハイテク農業情報, 化学工業日報社, 194-195.
 果樹試験場, 1989: 果実の貯蔵・加工施設と高度利用技術, 1989, 農林水産技術情報, 農林調査会, 250-266.
 坂上 務・早川誠而, 1974: 地下石室内の環境に関する研究. 農業気象, 30, 11-16.
 八畝利助, 1961: 地中における熱伝導. 農業物理学, 養賢堂, 65-70.
 山口ケイピング・クラブ, 1985: 西秋吉台の石灰洞. 11月号, 57; 105-106.