

## 韓国ウールムゴルにおける夏季氷結現象の数値実験

田 中 博\*

韓国密陽 (Milyang) 郡には「密陽ウールムゴル」と呼ばれる峡谷がある。ウールムゴルとは水の谷 (Ice Valley) を意味する。本研究では、ウールムゴルの夏季氷結現象を対流水結モデルで説明できるかどうかを数値実験により調べた。ここで対流水結モデルとは、冬季には冷たくて重い空気がテラス内部に重力流として流れ込んで効率よく寒気を蓄積する一方、夏季にはテラス内部の強い安定成層が対流を抑制することで、蓄積された寒気を効率よく保存する、という累石風穴説のことをいう。

本研究による簡単な数値実験の結果、冬季には対流 (重力流) により比較的短時間のうちにテラスの内部まで冷えること、そして冬季に形成された氷が安定成層により夏季まで保存されることが、適当な外部パラメータのもとに検証された。

寒気を蓄積する上できわめて重要な働きをしているのが氷の存在そのものである。テラス内部に大量の水が存在する場合にはその融解熱が温度上昇を抑える働きをする。本研究の結果によると、テラスの下を流れる地下水から供給される水蒸気が冬季に大量の水となることが重要と考えられる。

キーワード：風穴、夏季氷結、ウールムゴル、数値モデル

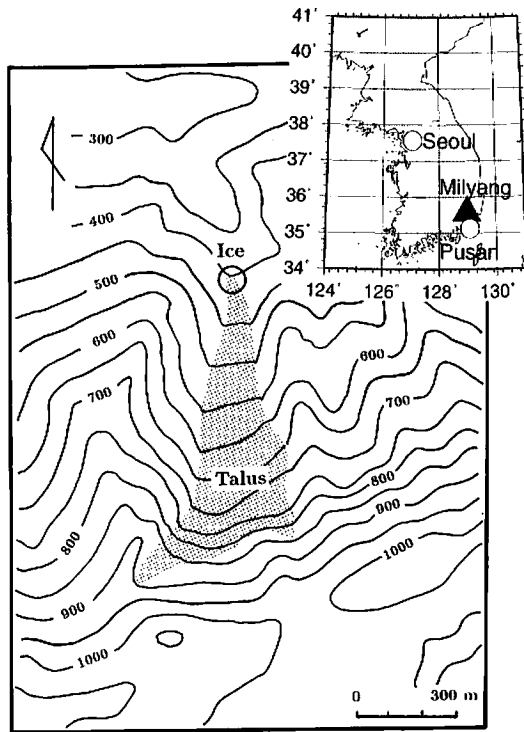
## I はじめに

韓国のプサンとウルサンの間の密陽 (Milyang) 郡には「密陽ウールムゴル」と呼ばれる峡谷がある。ウールムゴルとは水の谷 (Ice Valley) を意味する。このウールムゴルでは、夏の暑い盛りに斜面で氷が成長し秋になると消えてしまう、という興味深い現象が見られる (田中, 1995)。日本でも富士山麓などに風穴と呼ばれる洞穴があり、そこでは一年中氷が見られ、これに関する研究は数多く行われている (Ohata *et al.*, 1994a, b)。しかし、韓国のウールムゴルの氷はこれとは明らかに異なる現象である。日本における風穴の氷は洞窟の奥の比較的深いところに見られるが、このウールムゴルで興味深いのは、30°C 以上もある外気にさらけ出された斜面中腹で氷が露出しており、しかも、外気の温度が高ければ高いほどその氷は成長し、逆に、梅雨などで曇天が続くと氷は縮んでしまうという不可思議な観測事実である (黄・文, 1981)。そして、そのような氷も秋から冬にかけて消えてしまうのである。一見超常

\*筑波大学地球科学系

的な自然現象であり、学術的にも興味深いのであるが、これまでに十分な研究が行われてきたとはいえないようである。このウールムゴルの謎解きに挑戦した研究としては、これまでに断熱膨張説 (Kim, 1968)、気化熱説 (Moon and Hwang, 1977)、対流水結説 (Bae and Kayane, 1986) などがあり、これらは日本でも紹介されている (黄・文, 1981; Bae and Kayane, 1986)。

氷が発達するのは、プサンから北東に向かって約 100 km の密陽郡 (第 1 図) にある海拔高度 1189 m のチョンファン山頂 (北緯 35° 34′ 東経 128° 59′) の北東約 2 km の斜面中腹である。ここは、「密陽ウールムゴル」という名称で天然記念物になっており、毎年多くの観光客が集まってくる。著者がこのウールムゴルを訪ねた 1995 年 4 月 28 日の視察によれば、氷が発達するのは、海拔高度約 300 m の谷底からおよそ 100 m ほど登ったところである。谷の入り口での気温は 22°C であった。谷底を流れる細流は斜面中腹で湧き水となって消え、その湧き水の温度は 8.3°C であった。谷底には高さ 10 m 程度の雑木林が茂り、中腹では大きな礫がむき出しにな



第1図 韓国密陽郡のウールムゴルの位置  
テラス（網かけ部分）の底部で氷が発達する。

Fig. 1 Location of the Ice Valley in Korea  
The talus area is shaded, and the Ice Valley's ice is located at the bottom of the talus.

ってテラス (talus) と呼ばれる礫の堆積斜面を形成している。この礫の一つ一つの間隙から冷気が穏やかに吹き出し、それが集まって冷気流となり谷底の樹間を流れていた。湧き水付近で礫の間隙に 50 cm ほど奥まで測器を差し込んで温度・湿度を調べてみると、 $4.3^{\circ}\text{C}$ 、82.2%であった。さらに上流側に、谷底の礫が柵で囲まれた部分があり（写真1）、この柵の中の礫の間隙の 50 cm ほど奥に数 cm の厚さに発達した氷が認められた（写真2）。サーミスターで測定した氷周辺の気温は  $1.0^{\circ}\text{C}$  であった。案内人の説明によると、4月も終わりに近づき、気温が上昇してきたので最近氷ができたところだったそうである。また、昨年（1994年）の夏は日本同様に韓国も異常猛暑であり、そのため氷は数十



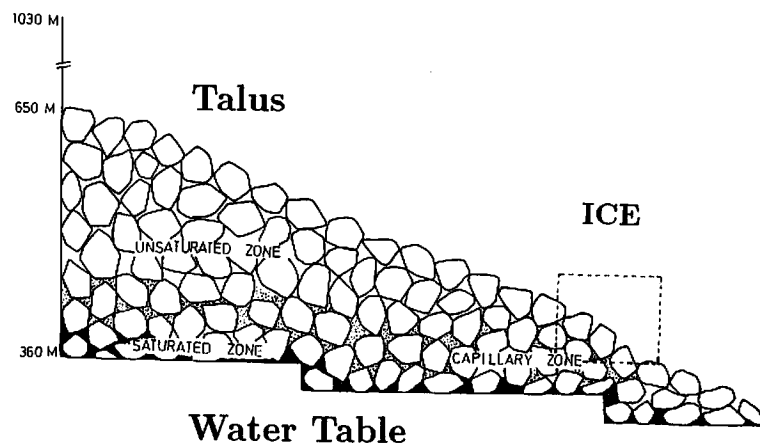
写真1 柵で囲ってあるウールムゴルの氷  
看板にはハングルでウールムゴルと書いてある。

Photo 1 The Ice Valley's ice in the fence  
The plate stands for Ice Valley in Korean script.

cm の厚さに達したそうである。夏の暑い盛りには、斜面上部の礫は直達日射で焼かれてきわめて熱くなる。そんな状況下で、外気に露出したままこの氷は成長するのである。プサン大学の黄 (Hwang) 氏・文 (Moon) 氏の現地におけるご指摘によると、これまでに地下の掘削等の本格的な観測が行われたことはなく、テラス内部の状況はまったく把握できていないという。第2図は Moon and Hwang (1977) から引用したウールムゴルの想像断面である。チョンファン山頂から東に延びる峯線の高度はウールムゴル付近で 1030 m となり、そこから北斜面に延びた谷の断面の一部を図示している。山頂付近から剥がれ落ちた直径 1.5 m 程度の大きな礫が



写真2 礫の中の氷と温度計  
Photo 2 Ice in boulders and the thermometer



第2図 テーラスの想像断面図

礫堆積物の底に地下水面があり、その上部に毛管現象による不飽和層がある。氷結現象は破線で囲まれた部分で見られる。

(Moon and Hwang, 1977 による)。

Fig. 2 Cross-section of the talus

The talus consists of large boulders and has a water table at the bottom. An unsaturated capillary zone is formed above the water table. The Ice Valley's ice is observed within the square-box area.

(after Moon and Hwang, 1977).

斜面中腹で蓄積し、テラスを形成している。斜面の傾斜角は  $20^{\circ} \sim 30^{\circ}$  であり、礫の堆積の厚さは最も厚いところで約 300 m に達すると考えられる。氷結現象が見られるのはこのテラスの下端で地下水が湧き出す地点の少し上部である。この地点での地下水面上には毛管現象により吸い上げられた水分による湿潤な層（不飽和層）があり、礫の隙間が大きいので、そこでも空気は自由に動けると考えられる。不飽和層では空気の流れにより盛んに気化熱が奪われ、礫を冷やすのに一役買っていると考えられる。この気化熱で水の形成を説明するのが Moon and Hwang (1977) による気化熱説である。ただし、これで  $0^{\circ}\text{C}$  以下まで冷えるかどうかは数値実験等により定量的に検討する必要がある。

密陽測候所での 1 月の平均気温は約  $-5^{\circ}\text{C}$  であり、寒候期には日によって約  $-10^{\circ}\text{C}$  の冷気が対流として礫の内部まで重力流として自由に流れ込み、礫を冷やして低温を保存し続ける。それに対し、暖候期には上部の礫が断熱層の役割を果たして日射を遮り、成層状態はきわめて安定なために暖気が礫の奥にまで入り込むことは難しい。そのため夏でも温度は上がらず地下水面上方の不飽和層で年平均温度が  $0^{\circ}\text{C}$  を下回り、局所的に永久凍土が形成されていると考えられる。これが対流水結説による累石風穴の説明である（藤原, 1985; Bae and Kayane, 1986）。冬に氷が見られないのは、露出している水が大気の乾燥により昇華してしまうからであり、春先に適度の雨が降り出すところにそれが凍って礫の隙間に氷を作るとされている。

断熱膨張説（Kim, 1968）とは文字どおりこの礫の隙間を勢いよく空気が吹き出すときの断熱膨張が礫を冷やすというものであるが、冷気流はこの理論を支持するほどに強くはない。ほかにもさまざまなメカニズムが考えられるが、テラスを掘るわけにもゆかず、いまだにこれといった定説は確立されていない。要するに、どうして氷ができるのかはま

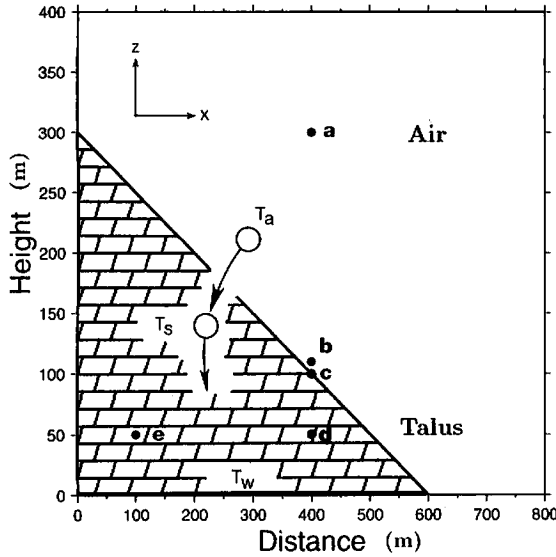
だわかっていないのである。テラス外部での観測データをもとに、数値実験によりそのメカニズムをある程度推定できると考えられるが、これまでにこのウールムゴルを解明する数値実験は行われていないようである。

そこで、本研究ではこれまでに提示された説明として最も支持されていると考えられる対流水結説に的を絞った数値実験を試みる。冬季に冷気が重力流として礫の内部まで自由に流れ込み、礫を冷やして低温を保存し続ける様子をモデルで確かめる。続いて夏季にはテラス上部がきわめて安定な成層状態となるために暖気がテラスの奥に入り込まず、冬の寒気が夏まで保存されることをモデルで確かめる。この対流水結のメカニズムによりテラス内部の年平均温度が  $0^{\circ}\text{C}$  を下回り、局所的な永久凍土が形成されるかどうかについて定量的に検証する。

## II 数値モデル

本研究で用いたモデルは浮力を考慮した空気についての運動方程式、熱力学の式、連続の式と岩（テラス）についての熱力学の式を組み合わせる方程式を閉じさせた簡単な 2 次元モデルである（第 3 図）。図中の  $x=600\text{ m}$ ,  $z=300\text{ m}$  を結ぶ線の下がテラスであり、その上が外気である。テラスの空隙に拡散で入り込んだ空気 ( $T_a$ ) が、テラスの岩 ( $T_r$ ) との温度差により冬にはさらに空隙の奥深く入り込み、夏には押し戻される浮力効果が考慮されている。テラス内部に対流として入り込んだ空気塊は、テラスとの温度差によって夏にはニュートン冷却、冬にはニュートン加熱を受けるが、熱エネルギー保存則により同量の熱がテラスの加熱（夏）および冷却（冬）に使われる。このようにして、空気塊がテラスより冷たく成層不安定になる冬には盛んに対流が生じ、テラスの奥深くまで寒気を送り込んでテラスを効率よく冷却する。一方、夏にはその逆に空気塊がテラスより暖かく成層安定

# Ice Valley Model



第3図 数値モデルにおけるウールムゴルの断面図

$T_a$ : 空隙に拡散で入り込んだ空気の温度  
 $T_s$ : テーラスの岩の温度

Fig. 3 A schematic illustration of the cross-section of the Ice Valley

$T_a$ : temperature of air  
 $T_s$ : temperature of talus

になるため、拡散で入り込んだ空気は浮力により押し戻されるので、熱交換は抑えられる。したがって冬の間に蓄えられた寒気（テーラスの低温状態）が効率よく夏まで保存されるというモデルである。

以下に、空気についての運動方程式、熱力学の式とテーラスについての熱力学の式を示す。

$$\frac{dw}{dt} = \frac{g}{T_s} (T_s - T_a) - \nu w + K_d \nabla^2 w \quad (1)$$

$$\frac{dT_a}{dt} = -\frac{g}{c_p} w - \frac{\alpha}{c_p} (T_s - T_a) + K_d \nabla^2 T_a \quad (2)$$

$$\frac{\partial T_s}{\partial t} = -\frac{\alpha M}{c_s} (T_s - T_a) + K_s \nabla^2 T_s \quad (3)$$

ここで、

$$\frac{d}{dt} = \frac{\partial}{\partial t} + u \frac{\partial}{\partial x} + w \frac{\partial}{\partial z} \quad (4)$$

空気塊の運動方程式 (1) 式の右辺はそれぞれ浮力、レーリー摩擦、拡散項、熱力学の式 (2) 式の右辺は

断熱変化、ニュートン冷却、拡散項である。テーラスの熱力学の式 (3) 式の右辺はニュートン冷却、熱伝導である。変数は空気塊の水平速度  $u$ 、鉛直速度  $w$ 、温度  $T_s$ 、定圧比熱  $c_p$ 、テーラスの温度  $T_s$ 、比熱  $c_s$ 、重力加速度  $g$ 、レーリー摩擦係数  $\nu$ 、ニュートン冷却係数  $\alpha$ 、空気の拡散係数  $K_d$ 、テーラスの熱伝導係数、 $K_s$  である。温度  $T_s$  の空気塊が温度  $T_s$  のテーラスの中で浮力を感じ、速度  $(u, w)$  で自由に動く対流効果が対流水結説の重要な要素である。

連続の式として非圧縮大気を仮定し発散はないものとする。

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (5)$$

したがって空気塊の運動は次の流線関数  $\psi$  を用いて計算できる。

$$w = \frac{\partial \psi}{\partial x}, \quad u = -\frac{\partial \psi}{\partial z} \quad (6)$$

方程式系の境界条件として、テーラスの底には地下水が流れていることから、そこでの温度を地下水温  $T_w$  として与えた。また、 $x, z$  軸に沿って流線関数を 0 に固定し（つまり表面摩擦はなく、境界を通過する運動はない）、それ以外は自由境界を仮定してある。大気基本場の温度に年周期を持たせるために、テーラス上方の温度  $T_s$  を外部条件として与えた。

上記支配方程式系は単位質量あたりの空気塊およびテーラスに関するものであるが、単位質量あたりのテーラスには岩石と空気が混在しているので単位質量のテーラスに含まれる空気の質量の比をテーラスの質量空隙率  $M$  として方程式に与えてある。本研究ではテーラスを密度  $\rho_r$  の岩石と密度  $\rho_a$  の空気が混在する物質として扱い、その体積空隙率  $\beta$  を約 20% と見積もって以下のように質量空隙率  $M$  を計算した。

$$M = \frac{\rho_a \beta}{\rho_r (1 - \beta) + \rho_a \beta} \sim 1 \times 10^{-4} \quad (7)$$

右辺の分母がテーラスの密度であり、 $M$  は単位質

第1表 モデルパラメーター一覧  
Table 1 List of model parameters

記号	値	意味 (MKS ユニット)
$\Delta_x$	20	水平グリッド (m)
$\Delta_z$	10	鉛直グリッド (m)
$\Delta_t$	1.0	時間ステップ (s)
$g$	9.8	重力加速度 ( $\text{ms}^{-2}$ )
$T_0$	278	地下水温 (K)
$\rho_a$	1.2	空気の密度 ( $\text{kg m}^{-3}$ )
$\rho_r$	2500	岩石の密度 ( $\text{kg m}^{-3}$ )
$\rho_w$	910	水の密度 ( $\text{kg m}^{-3}$ )
$\nu$	1.0	テラス外でのレーリー摩擦係数 ( $\text{s}^{-1}$ )
$\nu$	1.5	テラス内でのレーリー摩擦係数 ( $\text{s}^{-1}$ )
$\alpha$	5.0	ニュートン冷却係数 ( $\text{J kg}^{-1} \text{K}^{-1} \text{s}^{-1}$ )
$c_a$	1005	乾燥空気の定圧比熱 ( $\text{J kg}^{-1} \text{K}^{-1}$ )
$c_r$	750	テラスの比熱 ( $\text{J kg}^{-1} \text{K}^{-1}$ )
$L$	$3.34 \times 10^6$	水の融解熱 ( $\text{J kg}^{-1}$ )
$K_d$	1.0	空気の拡散係数 ( $\text{m}^2 \text{s}^{-1}$ )
$K_r$	$1 \times 10^{-6}$	テラスの熱伝導係数 ( $\text{m}^2 \text{s}^{-1}$ )
$M$	$1 \times 10^{-1}$	テラスの質量空隙率 ( $\text{kg kg}^{-1}$ )
$E$	0.02	テラスの初期質量含水率 ( $\text{kg kg}^{-1}$ )

量のテラスに含まれる空気の質量を表している。

同様に、単位質量あたりのテラスには岩石や空気のほかに氷が形成されているものとし、単位質量のテラスに含まれる氷の質量の比をテラスの質量含水率  $E$  とし、融解熱  $L$  を用いて次の式によりテラスの加熱量から氷の融解量を計算した。

$$L\Delta E = c_r \Delta T_r \quad (8)$$

ここで右辺は対流や拡散によって加熱される熱量を表す。これが  $0^\circ\text{C}$  を越える際には氷の融解熱として用いられる。本研究で用いたパラメータの値を第1表に掲げる。岩石密度やテラスの比熱などは本研究対象領域内で相当変化する量であり、典型的値を代入しているが必ずしも最適であるとの保証はない。テラス内部の氷の初期量として  $E=0.02$  を与えてある。つまり、1 kg のテラスに 20 g の氷が初期に含まれていると仮定した。

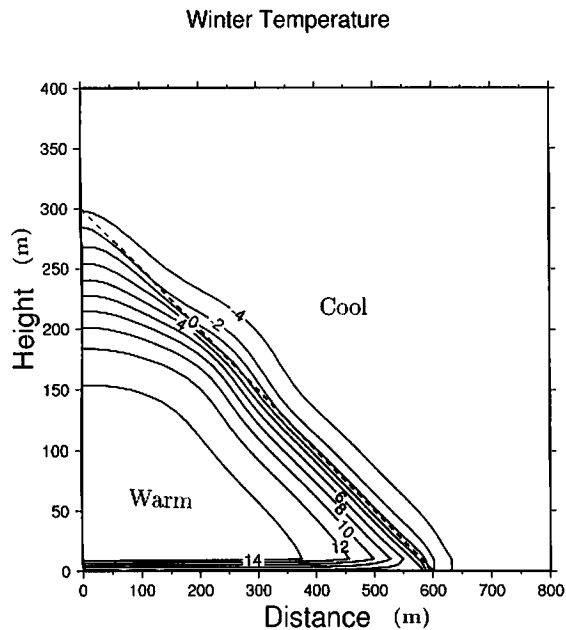
### III 冬季の数値実験

はじめに、冬季のウールムゴルの数値実験を行った。Moon and Hwang (1977) によると、プサン

での1月の月平均気温は約  $-5^\circ\text{C}$  であり、1.5 m の深さの地中温度は約  $15^\circ\text{C}$  である。プサンと比べて海拔高度約 400 m のモデル領域の気候値の差は、無視できるものとする。対流水結説の本質である対流による選択的寒気の蓄積がない場合、モデルの地中温度を支配するメカニズムは伝導・拡散過程のみであり、地中温度は長期間の時間積分の後には平衡状態として年平均気温 (約  $15^\circ\text{C}$ ) に収束すると考えられる。地下水温は1月に高く  $8^\circ\text{C}$ 、それが7月には  $6^\circ\text{C}$  に低下し、気温の季節変化との間に時差がある (Moon and Hwang, 1977)。このような気候データに基づいて、冬季の数値実験として外気温を  $-5^\circ\text{C}$ 、テラス内部温度を  $15^\circ\text{C}$ 、地下水温を  $5^\circ\text{C}$  にそれぞれ初期値として設定し、5日間の時間積分を行った。ただし、対流による温度変化の様子を調べるために、ここでは氷の融解・凍結は考慮していない。また、冬季・夏季の数値実験に関してのみ、温度変化を加速させる目的でテラスの比熱を10分の1に調整してある。

数値実験の結果得られたテラス断面の温度分布を第4図に示す。テラス内部は  $T_r$  の値、外部は  $T_0$  の値が示してある。外気温の  $-5^\circ\text{C}$  からテラス内部の  $15^\circ\text{C}$  まで斜面に沿って連続的に温度が変化し、とくに斜面上で温度の勾配が密になっている。テラス表面ではほぼ  $0^\circ\text{C}$  となっており、地上約 50 m で外気温  $-5^\circ\text{C}$  に遷移している。一方、地中では約 100 m の深さで  $15^\circ\text{C}$  に達している。テラス内部の温度分布を見ると、斜面上部で温度の低下が比較的大きく、寒気が対流として入り込んでいることが推測される。テラスの底の部分では、地下水温  $5^\circ\text{C}$  への急な遷移が見られるが、これは熱伝導が対流混合に比べきわめて小さいためである。

次に、テラス断面の流線関数  $\psi$  の分布を第5図に示す。テラス内の流線関数は隙の空隙を流れる空気塊の空間平均的運動を表現しており、空隙を流れる個々の空気塊の流速を表すものではない。高度



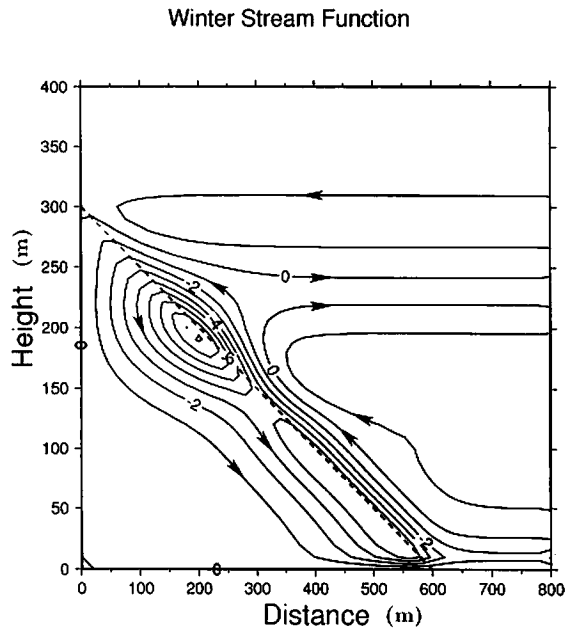
第4図 冬季の実験の温度断面図  
Fig. 4 Cross-section of the simulated temperature ( $^{\circ}\text{C}$ ) for winter

約 200 m の斜面上を中心に流線関数の負の値が見られることから、この流線関数の等値線に沿って反時計回りに一つの対流が見られる。テラス斜面に沿って上昇流があり、テラス上部からテラスの内部に向かって寒気が流れ込んでいる様子が理解できる。テラス内部では斜面に沿う下降流があり、地下水面上でその流れが集まっている。大気と地境層で斜面に沿う上昇流があるが、高度約 250 m で反流となっている。

冬季のウールムゴルの対流の特徴は、外気温を  $-5^{\circ}\text{C}$ 、地中温度を  $15^{\circ}\text{C}$  という  $20^{\circ}\text{C}$  の温度差に対し、5 日後にはテラス内部の 150 m の深さにまで対流による冷却が生じるということである。この対流による冷却はテラス内部の熱伝導による効果よりもはるかに大きいものであることがわかる。

#### IV 夏季の数値実験

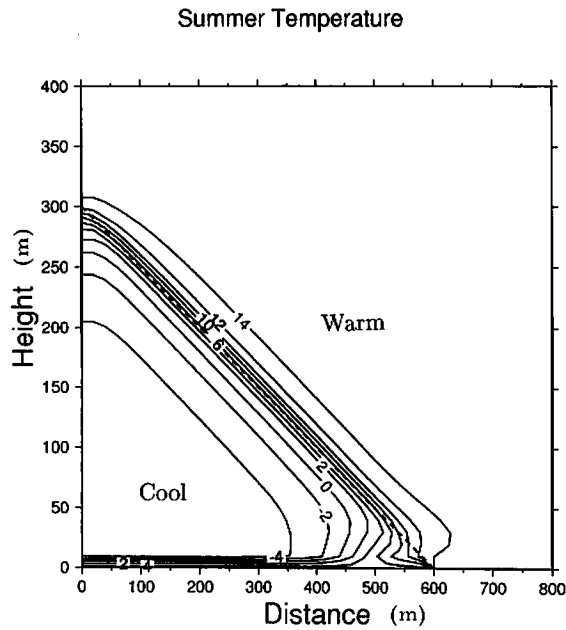
次に、夏季のウールムゴルの数値実験を行った。



第5図 冬季の実験の流線関数断面図  
Fig. 5 Cross-section of the simulated stream function ( $\text{m}^2 \text{s}^{-1}$ ) for winter

Moon and Hwang (1977) によると、プサンでの7月の月平均気温は約  $25^{\circ}\text{C}$  である。一方、テラスの底の部分には地下水が流れているのでこの上下の高温層に挟まれた領域で氷が存在する。ここでは冬季の実験と比較するために、初期値として外気温を  $15^{\circ}\text{C}$ 、テラス内部温度を  $-5^{\circ}\text{C}$ 、地下水温を  $5^{\circ}\text{C}$  にそれぞれ設定し、5 日間の時間積分を行った。冬季の場合と同じ  $20^{\circ}\text{C}$  の温度差に対し、成層状態が逆の夏季にはどのような違いが見られるかを調べることがこの実験の目的である。ただし、対流による温度変化の様子を調べるために、ここではあえて氷の融解・凍結は考慮していない。

数値実験の結果得られたテラス断面の温度分布を第6図に示す。外気温の  $15^{\circ}\text{C}$  からテラス内部の  $-5^{\circ}\text{C}$  まで斜面に沿って連続的に温度が変化し、とくに斜面上で温度の勾配が集中している。テラス表面で温度は約  $6^{\circ}\text{C}$  となっており、高度約 50 m で外気温  $15^{\circ}\text{C}$  に遷移している。一方、地中では約

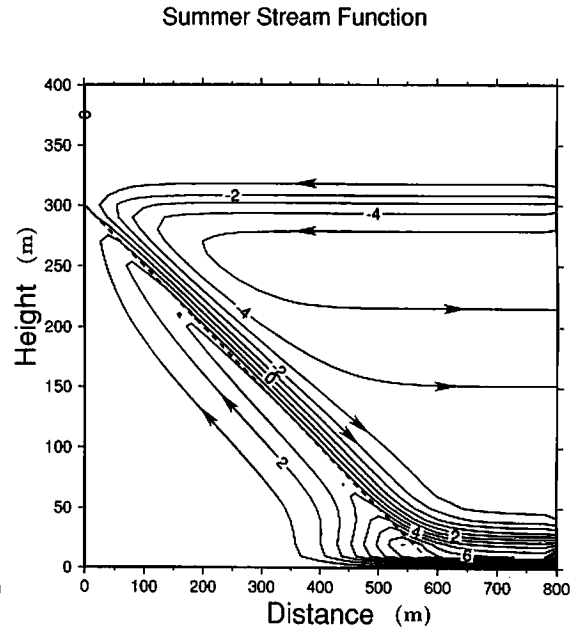


第6図 夏季の実験の温度断面図  
Fig. 6 Cross-section of the simulated temperature distribution ( $^{\circ}\text{C}$ ) for summer

100 m の深さで  $-5^{\circ}\text{C}$  に達している。テラスの底の部分では、地下水温  $5^{\circ}\text{C}$  への急な遷移があり、地中に氷点下の領域が上下から挟まれた状態で存在している。温度の等値線は冬季と比較するときわめて斜面に平行であり、対流による乱れは小さい。

次に、テラス断面の流線関数  $\psi$  の分布を第7図に示す。テラスで冷やされた冷気が冷気流となって斜面を駆け降り、その補償流が高度約 300 m 付近で形成されている様子が明瞭である。冷気流の流速は約 10 cm/s である。興味深いことは、大気中での補償流と同じようにテラス内部でも斜面冷気流の補償流として上昇流が形成されていることである。テラスの下部の地下水面と接するあたりに一つの時計回りの循環が形成され、テラス下部で寒気が下降流として流れ出すものの、テラスの奥では斜面に沿う上昇流が卓越している。

夏季のウールムゴルの対流の特徴は、外気温を  $15^{\circ}\text{C}$ 、地中温度を  $-5^{\circ}\text{C}$  という  $20^{\circ}\text{C}$  の温度差に対



第7図 夏季の実験の流線関数  
Fig. 7 Cross-section of the simulated stream function ( $\text{m}^2\text{s}^{-1}$ ) for summer

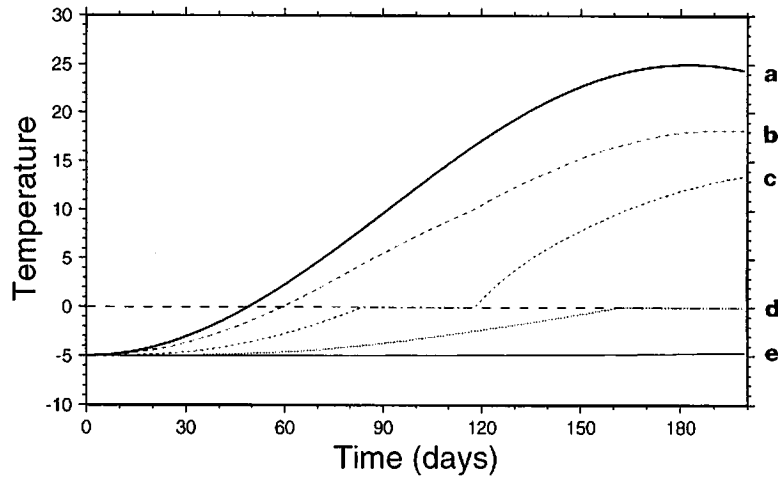
し、テラス内部への対流は空気のきわめて安定な成層により抑制されるため、冬季と比べると対流による温度上昇は明らかに小さいことがわかる。

#### V 冬から夏への数値実験

以上の冬季・夏季の試験的数値実験による情報に基づいて、冬から夏への数値実験を行った。初期値(2月1日)として外気およびテラスの温度は一律に  $-5^{\circ}\text{C}$  とし、外気温を半年後(8月上旬)には  $25^{\circ}\text{C}$  になるように変化させたとき、テラス断面の温度がどのように変化するかを第8図に示す。図中の線はそれぞれ第3図の a, b, c, d, e における温度変化で、それぞれ外気温、地上 10 m の温度、地表面温度、地下 50 m の温度、およびテラスの最深部の温度を表す。外気温は 50 日(3月下旬)にはプラスとなる。地上 10 m の温度は外気温に対応して変化し、180 日目に  $18^{\circ}\text{C}$  となるが、この時点で外気温よりも  $7^{\circ}\text{C}$  低い。地表面温度は 80 日(4



# Ice Valley Model



第8図 第3図, a~e 地点における冬から夏にかけての温度変化  
 a: 外気温 b: 10 m の温度 c: 地表面温度 d: 地下 50 m の温度 e: テーラスの最深部の温度  
 Fig. 8 Seasonal change in simulated temperature at locations a-e in Fig. 3

月下旬) に融点に達し, その後氷が完全に融けるまでの約 1 カ月間  $0^{\circ}\text{C}$  の状態を保っている。氷が融け終わる 120 日 (6 月上旬) には比較的急速に温度が上昇する。地下 50 m の温度は 160 日 (7 月中旬) にやっと  $0^{\circ}\text{C}$  に達し, そのままの状態が夏の間続いている。テーラスの最深部では, 温度は夏になってもほとんど上昇することなく, 氷点下を保っている。

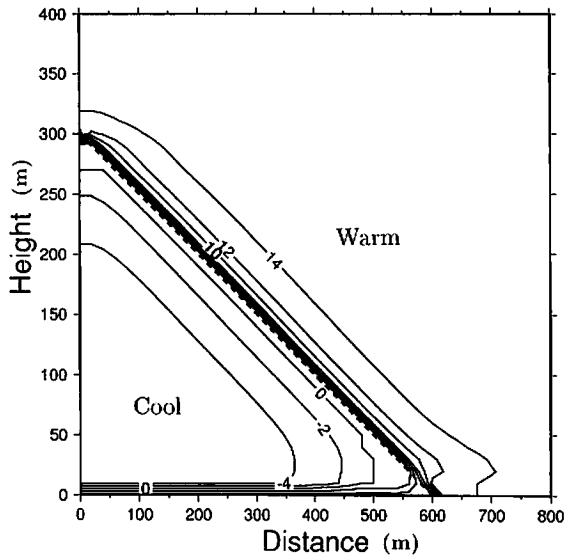
外気温が上述の夏季の数値実験と同様の  $15^{\circ}\text{C}$  となる 110 日 (5 月下旬) について, 温度の断面図を作成した結果を第 9 図に示す。テーラス表面の温度は約  $0^{\circ}\text{C}$  であり, その上層で急激に温度が上昇し, 50 m の高度で外気温と一致している。テーラス内部はほとんどが氷点下であり, 100 m の深さでは冬の温度をほとんどそのまま保っている。上述の夏季の実験では氷が考慮されていなかったが, ここでは氷の融解がテーラスの温度上昇を妨げている。テーラスの底の部分では, 氷点下から地下水温  $5^{\circ}\text{C}$  へ

の急な遷移があるが, 拡散や熱伝導過程でその上の氷を融かすことは本研究の結果からは重要ではないといえる。

このときの流線関数の分布を第 10 図に示す。テーラス断面の流れの分布は, 上述の夏季の数値実験と同様にテーラスで冷やされた冷気が冷気流となって斜面を駆け降りる特徴が再現されている。これは観測と一致する。テーラス上端高度で補償流による反対向きの流れが集中しているが, 現実大気の観測的裏付けはない。テーラス内部では冷気流と逆向きの緩やかな上昇流が存在し, テーラス上端で冷気流を補償している。一方, テーラス下端にはテーラス内部への温かい空気の吸い込み口が見られる。

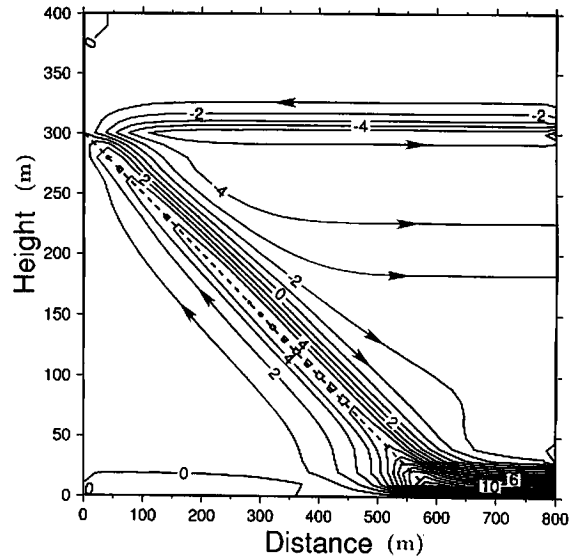
最後に, 外気温が最も高くなる 180 日 (8 月上旬) における温度の断面図を第 11 図に示す。外気温は  $25^{\circ}\text{C}$  であり, 温度はテーラス上の 25 m 程度の厚さの接地層で急降下し, テーラス表面では  $10^{\circ}\text{C}$  程度となっている。テーラス内部の約 25 m

Temperature (day=110)



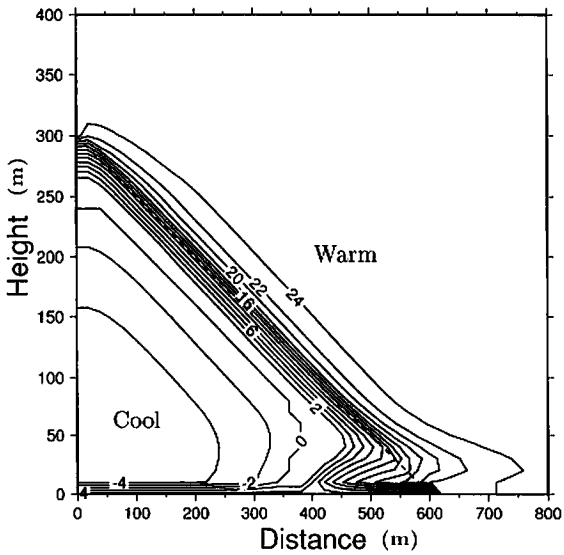
第9図 モデルの110日の温度断面図  
Fig. 9 Cross-section of the temperature ( $^{\circ}\text{C}$ ) at day 110 of long-term simulation from winter to summer

Stream Function (day=110)



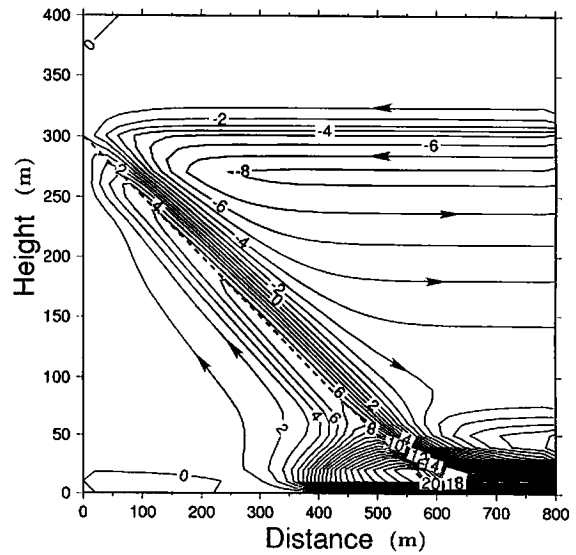
第10図 モデルの110日の流線関数断面図  
Fig. 10 Cross-section of the stream function ( $\text{m}^2 \text{s}^{-1}$ ) at day 110 of long-term simulation from winter to summer

Temperature (day=180)



第11図 モデルの180日の温度断面図  
Fig. 11 Cross-section of the temperature ( $^{\circ}\text{C}$ ) at day 180 of long-term simulation from winter to summer

Stream Function (day=180)



第12図 モデルの180日の流線関数断面図  
Fig. 12 Cross-section of the stream function ( $\text{m}^2 \text{s}^{-1}$ ) at day 180 of long-term simulation from winter to summer

の深さで氷点下に達し、そこに氷が残っている。興味深い特徴として、テラス内部への温かい空気の吸い込み口がテラス下端にあることから、そこで氷の融解が進み温度が上昇し、地下水よりも温度が高くなっていることがあげられる。氷は下からえぐり取られるように融けている。結果として、温度が相対的に低い場所はテラス下端から 50 m ほど登ったところで見られる。この結果は偶然かもしれないが氷結が実際に見られる高度とほぼ一致する。

このときの流線関数の分布を第 12 図に示す。外気温との温度差が大きいことから、110 口の結果よりもさらに強い冷気流が吹き降りている。冷気流の風速は約 50 cm/s である。そして、テラスの下端内部の氷がえぐり取られている領域では、夏季の数値実験の結果と同様に、時計回りの循環が形成され、これにより相対的に温かい空気がテラスを下から上に向かって吹き上げているという結果になっている。

## VI まとめと考察

本研究では、藤原 (1985) や Bae and Kayane (1986) により主張された対流水結説により、韓国密陽郡のウールムゴルの夏季氷結現象が説明できるかどうかを数値実験により調べた。ここで、対流水結説とは、冬季には冷たくて重い空気が隙間だけのテラス内部に重力流として流れ込むことで効率よく寒気を蓄積する一方、夏季にはテラス内部の強い安定成層が対流を抑制することで冬季に蓄積された寒気を効率よく保存する、という累石風穴説のことをいう。本研究による簡単な数値実験の結果、冬季には対流（重力流）により比較的短時間のうちにテラスの内部まで冷えること、そして冬季に形成された氷が安定成層により夏季まで保存されることが、適当な外部パラメータのもとに検証された。

冬季において、寒気はテラスの上部から侵入し、テラス内部をゆっくりと下降する。逆にテラス

の表面では斜面に沿う上昇流が存在し、この二つの逆向きの流れが対流を形成してテラスの効率的な冷却に貢献している。一方、夏季においてはテラス表面で冷気流としての斜面下降流が卓越し、大気側で局地循環が形成されると同時に、テラス内部にも冷気流の補償流として緩やかな上昇流が形成される。その上昇流の入り口はテラス下部にあって、そこでは暖気の移流により氷が下からえぐり取られるように融けてゆく。その結果、テラスの下部から 50 m ほど登ったところで温度の最低が現れる。この結果は、氷結が実際に見られる高度とほぼ一致する。

寒気を蓄積する上できわめて重要な働きをしているのが氷の存在そのものである。もし、全体が乾燥していて氷がなければ、氷点下の低温は主にテラスの岩石によって維持されることになるが、岩石の比熱は比較的小さいので、大気の乱流拡散により夏まで氷点下を保持し続けることはほとんど不可能である。本研究の結果によると、テラス内部に大量の氷が存在し、その融解熱の吸収が温度上昇を抑える働きをしていることが重要といえる。本研究の結果、質量含水率が大きい場合には、対流水結説によりテラスの比較的浅い領域でも夏まで氷が十分に残る可能性が示された。このように考えると、テラスのすぐ下を地下水が流れ水蒸気で飽和しているため、冬季に大量の氷が形成されるという条件が重要と考えられる。しかし、本当にこのように大きな含水率を冬季に蓄えることができるかどうかは今後の課題となろう。

また、本研究は細かい点で多くの問題を残している。その一つは、夏季に氷の前面はテラスの内部に後退するので、この点では日本で見られる風穴の説明にはなっても氷が地表に露出しているウールムゴルの説明にはなっていないということである。なぜ氷が表面に露出できるのかがいまだに明らかでない。氷が露出する場合、氷の形成には大気の放射過

程も考慮する必要がある。また、対流氷結説ですべてが説明できるほど現地の冬の寒さは厳しくないように思える。したがって、Moon and Hwang (1977) による地下水の不飽和層からの強制蒸発による冷却も無視できないことが本研究からも推測できる。

さらに、重力流としてテラスの下層に集まった冷気流の流速が大きすぎるという問題も残っている。本研究では座標軸に沿うモデルの境界摩擦は考慮されていない。テラスの間隙は浅いところで大きく、深いところでは小さくなり、深いところほど空気は流れにくくなるのが妥当であるが、本研究では深いところも浅いところも同じように流れてしまうので、境界付近で流速が速くなりすぎる傾向にある。実際の谷底には雑木林があり、冷気流はモデルのように最下層まで滑らかに流れるわけではない。また、雑木林のある下層ほど礫の隙間に腐食土が溜まり、モデルのようにテラス内部を抵抗なく流れる状況とはほど遠いのが現状である。これらの空間的非一様性に起因する問題点を考慮して、モデルを一層改良することは今後の課題である。

しかし、それにも増して不可解なのが、暑い夏ほど氷が成長し涼しい夏には氷が消えるという点である。なぜ初夏に成長するのかという点でいまだに大きな問題が残っている。一見非現実的ともいえる断熱膨張説の効果もあるのかもしれない。本研究による数値実験の試みはウールムゴルの理解に向けての第一歩である。このような問題点に留意し、今後一層の数値実験とそれを検証する現地観測が必要である。

本研究では、プサン大学の文 (Moon) 教授と黄 (Hwang) 助教授に資料の提供、現地視察や議論のうえで大変お世話になった。また、元筑波大学の榎根教授、滋賀県立大学の大畑教授から貴重なコメントをいただいた。ここに記して謝意を表す。本研究は日本気象学会 1996 年春季大会 (1996 年 5 月開催) において発表された。  
(投稿 1996 年 3 月 19 日)  
(受理 1996 年 9 月 7 日)

## 文 献

- 田中 博 (1995): 暑い夏ほど氷が成長する韓国の不思議な Ice Valley. *天気*, **42**, 647-649.
- 黄 水鎮・文 勝義 (1981): 韓国密陽「ウールムゴル」の夏季氷結現象について. *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.
- 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. *釜山大学校師範大学自然科学論文集*, **4**, 47-57 (in Korean with English abstract).
- Ohata, T., Furukawa, T. and Higuchi, K. (1994a): Glacioclimatological study of perennial ice in the Fuji Ice Cave, Japan. Part 1. Seasonal variation and mechanism of maintenance. *Arctic and Alpine Research*, **26**, 227-237.
- Ohata, T., Furukawa, T. and Osada, K. (1994b): Glacioclimatological study of perennial ice in the Fuji Ice Cave, Japan. Part 2. Interannual variation and relation to climate. *Arctic and Alpine Research*, **26**, 238-244.

## A Numerical Simulation of Summertime Ice Formation in the Ice Valley in Milyang, Korea

Hiroshi L. TANAKA\*

A numerical simulation was carried out to examine the mechanism of summertime ice formation at the Ice Valley in Milyang, Korea. The Ice Valley's ice is different from ordinary perennial cave ice in that the ice is formed at the surface of the talus, exposed to hot air during summer, and disappears during winter. The talus consists of sedimentation of large boulders about 100 cm in diameter along the mountain slope and has sufficient open space between the boulders for cold air to penetrate during winter.

The author attempted to simulate the Ice Valley's ice based on a theory of convective ice formation. This theory explains ice formation by an effective drainage flow of cold air penetrating into the talus during winter, since the air temperature above is colder than the temperature of the talus. The wintertime ice may be preserved by the extremely stable stratification of the air within the talus until the next summer.

A numerical model was developed based on a system of the equation of motion for air, the continuity equation for air, and the thermodynamic energy equation for both air and talus. The physical processes considered in the model are: 1) buoyancy; 2) Rayleigh friction; 3) adiabatic heating; 4) Newtonian cooling; 5) diffusion of air; and 6) thermal conduction of the talus. The governing equation is integrated in time by controlling the air temperature from  $-5^{\circ}\text{C}$  in winter to  $25^{\circ}\text{C}$  in summer to examine the ice distribution and the stream function in the talus.

The result of the simulation appears to support the theory of convective ice formation under suitable model parameters. We confirmed that cold air can penetrate deep into the talus to form ice in winter and that the wintertime ice is preserved until the next summer. During winter, the penetration of the cold air starts from the top region of the talus, a moderate downward motion occurs inside the talus, and an upward motion dominates along the slope of the talus surface. Conversely, in summer a descending motion along the talus slope develops to create a typical cold air flow, as observed. A moderate ascending motion is induced inside the talus to compensate for the strong cold air descending motion. The Ice Valley's ice melts fast at the region of the warm air intake at the foot of the talus slope. Hence, the coldest region appears slightly above the foot of the talus slope, which is consistent with observations.

It was found in this study that the ice itself plays an important role in preserving wintertime coldness owing to its abundant solidification heat. Without the existence of ice, rocks in the talus alone

are inadequate to maintain the freezing temperature during summer because of its their specific heat capacity. The results of this study suggest that the moisture supply from the underground water table at the bottom of the talus is a necessary condition to form the Ice Valley's ice.

**Key words:** cave ice, summertime ice, numerical simulation, Ice Valley