

中部ヨーロッパの風穴植生概説

佐藤 謙*

はじめに

1998年4月から翌年3月までの1年間、筆者は、スイス連邦工科大学リューベル地植物学研究所に留学し、スイス連邦共和国を中心にヨーロッパアルプスを歩き回る機会を得た。その際、テーマとした高山植生の比較研究とともに、それと密接に関係する風穴植生についても、可能な限り現地を観察した。それは、筆者が1992年以来、大雪山国立公園にある国内最大級の風穴地帯を破壊する士幌高原道路（道道士幌然別湖線）の建設問題に取り組んでおり、この風穴地帯を比較研究に基づいて科学的に評価しようと考えていたからである。留学以前の筆者は、北海道の風穴植生に関する調査結果や国内他地域との比較結果を報告し（佐藤ほか1993, 佐藤1994, 1995a, b, 1996, 1997, 1998a, 佐藤・紺野1997）、ヨーロッパアルプス周辺の風穴植生に関する文献収集も開始していた。

スイス滞在の開始時点において、盛夏の7～8月は真の高山帯を、風穴植生については初夏6月と秋季の9～11月に歩こうと踏査計画を立てた。春季のうちに国内で入手していた風穴植生関係文献の索引を繰り返し、表1に示すように、少なくとも26ヶ所の風穴地をリストアップした（表1）。結果として、表1と図1に示すように、13ヶ所において現地観察を行うことができた。そのうち、4ヶ所の風穴地に関する概況報告（佐藤1998b, 1999a, b, d）、その1ヶ所については文献の全文和訳も行った（佐藤1999c）。しかしながら、帰国直前の1999年3月に道路計画が中止された状況変化と帰国後の繁忙が重なり、中部ヨーロッパの風穴植生に関する観察結果は、日本生態学会北海道地区会における口頭発表に終わり、大半を未公表のままにした。

この小論は、13ヶ所の風穴植生に関する観察結果とリストアップした既存文献に基づいて、中部ヨーロッパの風穴植生に関する概説かつ旅日記としてまとめた。こ

* 北海学園大学工学部教授

表1 中部ヨーロッパの風穴植生一覧

[位置]	[標高 (m)]	[地質]**	[著者]	[北緯]	[東経]
SWITZERLAND					
* 1 Creu du Van, Jura	850 ~1190	石灰岩	Moor 1954, 1957, Richard 1961	46°56'	6°43'
2 Laegern, Zurich(Jura)	750	石灰岩	Gueller 1968		
* 3 Saentis, Appenzell	1200	石灰岩	Furrer 1966	47°16'37"	9°27'45"
4 Lauerzersee	460	石灰岩	Furrer 1961		
* 5 Waagtal, Schwyz	700 / 930	石灰岩	Furrer 1972	47°03'12"	8°48'36"
* 6 Kloental, Glarus	860	石灰岩	Furrer 1966	47°01'12"	8°58'32"
* 7 Glarus, Glarus	910 / 1050	石灰岩	Streiff-Becker 1945	47°03'13"	9°04'40"
* 8 Seelisberg	850 ~1100	石灰岩	Keller 1939	46°58'	8°35'
* 9 Unterschaechen, Uri	1080	砂岩, 頁岩	Furrer 1966	46°52'06"	8°47'30"
* 10 Brusio, Graubunden	730	頁岩?	Becherer 1952	46°15'19"	10°07'12"
GERMANY					
* 11 Feldberg, Schwarzwald	650 ~ 865	片麻岩	Mueller 1948, Aichinger 1952, Wilmanns 1971, Spathelf 1994	47°44'-45'	7°58'-59'
12 Westrwald and Eifel	350 / 530	玄武岩	Steinbach 1954 (Furrer 1966)		
* 13 Chiemgauer Alpen	970 ~1400	石灰質岩	Mayer 1961, 1964	47°35'	13°08'
AUSTRIA					
14 Hallein, near Salzburg	?	?	Morlot 1847 (Schaeftlein 1962)		
15 Batmund, Gallen	800	?	Blumrich 1935 (Punz et al. 1989)		
* 16 Schladming, Steiermark	1000	片麻岩	Schaeftlein 1962	47°22'	13°43'
17 Ameiskogel, Steiermark	?	粘板岩	Ullmann 1970		
18 Klammhoehe, Steiermark	1000	?	Ellmauer et al. 1992		
19 Matzen, Karawanken	1100 ~1300	石灰岩	Canaval 1893, Schindler et al. 1976		
20 Jauken, Gailtaler Alpen	1810	?	Canaval 1893, Weiss 1958		
21 Puchenstuben	1100	?	Punz et al. 1989		
22 Fernpass, Tirol	1100	ドロマイト, 石灰岩	Starlinger 1992		
ITALY					
23 Mittenberg, South Tirol	500	?	Andergassen 1981		
* 24 Eppan, South Tirol	550	流紋岩	Pfaff 1933a, Morton 1958, Punz, et al. 1989	46°27'	11°16'
25 Val Fredda, Trentino	750	?	Pfaff 1933b		
* 26 Val Cavallina, Bergamo	350 ~ 400	石灰岩	Fenaroli 1962	45°48'	10°02'

* 風穴植生が記録された26ヶ所のうち、実際に観察した13ヶ所を示す。

* * ? は、文献の孫引きが不十分であることを示す。

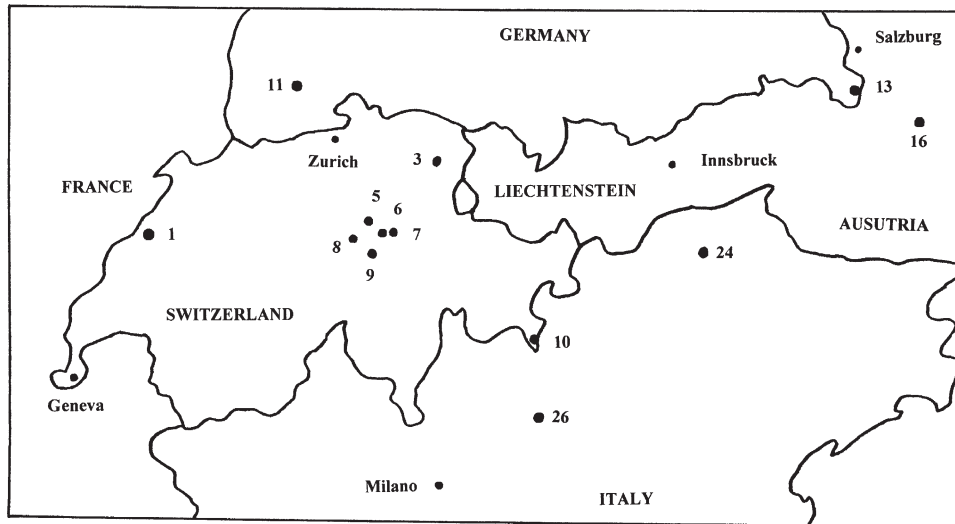


図 1. 中部ヨーロッパの風穴植生観察地

[スイス] 1: Creux du Van, 3: Bluehltobel, Saentis, 5: Waagtal, 6: Kloental, 7: Glarus,
8: Seelisberg, 9: Unterschafen, 10: Brusio,
[ドイツ] 11: Schwarzwald, 13: Berchtesgarden, [オーストリア] 16: Schaladming,
[イタリア] 24: Eppan, 26: Val Cavalina

の小論はまた、広島経済大学教授根平邦人先生の退任を記念してまとめるものである。根平先生には、小論に過ぎない点でお許しを願うが、筆者の旅日記を楽しんでいただきたいとの気持ちを込めて、本稿の気楽な記述を続けた。なお、根平先生には、広島大学大学院生物圏科学研究科教授の時代、筆者の博士論文主査として懇切丁寧な校閲と研究者として立つ絶大なる励ましをいただき、感謝の念に絶えない。

2. 個別の観察結果

(1) Creux du Van (スイス・ジュラ山脈：写真 1 A～1 C)

a) 既存文献情報：Ellenberg (1996) は、『アルプスを含む中欧の植生』の中で、スイス・ジュラ山脈の Creux du Van (標高1465m) において比較的低い標高範囲の岩塊堆積斜面に亜高山性ないし高山性の植生、すなわち風穴植生が成立することを、Richard (1961, 1965) の研究に基づいて紹介している。ジュラ山脈では1500m を超える標高までヨーロッパブナ林帯 (山地帯・冷温帯) に当たるが (Ellenberg 1961), Richard (1961, 1965) は、同じ標高範囲に成立する風穴地外のヨーロッパブナ *Fagus sylvatica*・ヨーロッパモミ *Abies alba* 混交林 (ヨーロッパモミ・ヨーロッパブナ群集), 風穴地内のヨーロッパトウヒ *Picea abies* 高木林 (スギカズラ・ヨ

ーロッパトウヒ群集), そして高山性矮低木群落 (スギカズラームゴマツ *Pinus mugo* 群集 *Salix retusa* 亜群集) の成立を明らかにし, これらの間において温度環境を比較した結果, 記述の順序で年平均気温が低くなること, 高山性低木群落において夏季の最低地温が最も低く, 地表面および地中の最高温度も最低となることを明らかにしている (図2と表2)。なお, この風穴植生に関する最初の報告は, Moor (1954) と Moor & Schwarz (1957) とされている。

b) 調査日とアプローチ: 1998年6月9日, Zurich 中央駅出発, Neuchatel 駅で乗り換え, Noiraigue 駅まで片道約2時間半, 列車で移動した。そこから徒歩によって Creux du Van の風穴地帯に入り込み, 周回7時間, 現地に滞在した。Noiraigue 駅 (標高約730m) からはしばらく牧草地の中を進むが, ヨーロッパブナ・ヨーロッパパモミ混交林内の歩道に入ると, まもなく Ferne Robert の山小屋 (標高約980m) に到着する。この場所は, 馬蹄形を呈する Creux du Van の石灰岩岩壁から崩落した岩塊堆積斜面の末端に位置するので (図2の右上), まず, 馬蹄形の奥へ向かって標高を増すように観察を続け, その後, 馬蹄形を呈する稜線部を一周した。

c) 風穴植生の観察結果と若干の考察: この山の風穴地ではない立地では, 馬蹄形を呈する山頂・山稜部を含んで, 元来の標高・温度的気候に応じたヨーロッパブナ

表2 Creux du Van における風穴植生および周辺植生の温度環境 (Richard 1961)

温度測定地点 *	1				2				3			
	ヨーロッパパモミ・ヨーロッパブナ群集				チャセンシダ・ヨーロッパトウヒ群集				スギカズラームゴマツ群集			
標高 (m)	1220				1190				1190			
方位	N				NE				NNW			
Pente (%)	30				50				70			
気温・地温の 測定位置 (cm)	Air	A ₀	AC	C	Air	A ₀	AC	C	Air	A ₀	AC	C
	+100	-5	-40	-130	+100	-5	-60	-140	+100	-5	-70	-160
植物季節の平均温度												
1958年												
5月15日～10月15日	14.5	9.7	8.7	7.2	15.7	8.2	4.4	2.1	16.8	5.3	0.9	-1.0
植物季節以外の平均温度												
1958年10月15日～												
1959年5月15日	2.7	1.1	1.6	1.9	2.3	-0.9	-0.6	-0.8	2.8	-1.8	-1.9	-1.9
1年間の平均温度												
1958年5月15日～												
1959年5月15日	7.8	4.7	4.5	4.1	7.9	2.9	1.5	0.4	6.8	1.2	-0.7	-1.5
植物季節における												
気温と5cm深地温の差	5.1				7.5				11.5			

* 測定地点が図2に番号で示される

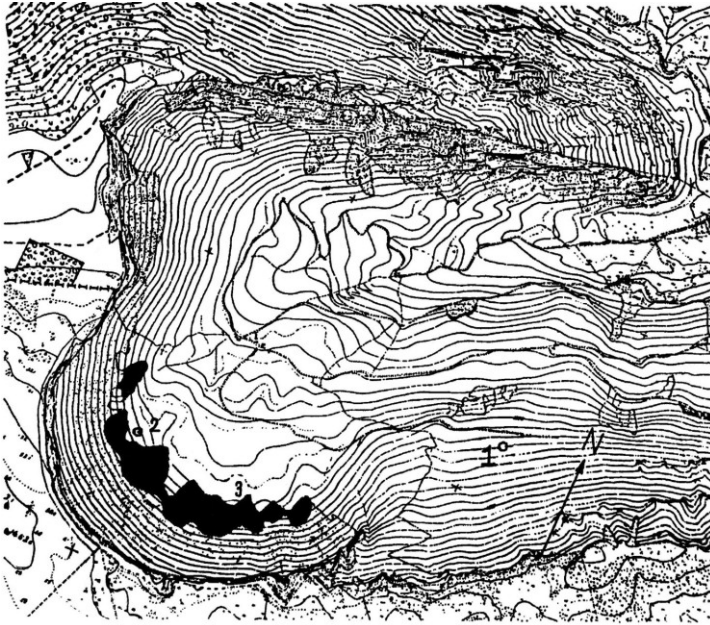


図2 Creu du Van の地形図（温度測定地点1～3は、表2に対応；Richard 1961）

とヨーロッパモミからなる針広混交林が広く認められた。したがって、観察した範囲は、植生の垂直分布上からは山地帯にあり、決して亜高山帯や高山帯に達していない。

山小屋（標高約980m）から標高を増す途中、標高約1150mで針広混交林からヨーロッパトウヒ高木林に交代した。林床では岩塊が多くなるとともに、ヨーロッパクロウソグ *Vaccinium myrtillus* のほか、スギカズラ、イワウサギシダ、チャセンシダ、コミヤマカタバミ、コイチャクソウ、コケモモ、ヒメマイヅルソウ、イワダレゴケ、オオフサゴケ、ダチョウゴケ、ホソバミズゴケなどが認められた。とくにチャセンシダの出現については、前述文献からチャセンシダーヨーロッパトウヒ群集の名称を知っていたにもかかわらず、同種が北半球の岩隙植生を特徴づけ、我が国では岩隙植生に限られるため、実際に観察するまで林床における生育状態はまったく想像がつかなかった。しかし、チャセンシダの生育は、薄暗い林床に散在する岩塊上に数多く認められた。

標高をわずかに増加させた1200m付近で石灰岩の岩壁直下からつながる岩礫露出斜面に代わり、それと前述ヨーロッパトウヒ高木林に介在して、樹高1～2mのヨーロッパトウヒ萎縮木やムゴマツが散在し、チョウノスケソウ（母種）*Dryas octopetala*、ガンコウラン（母種）*Empetrum nigrum*、クロマメノキ、コケ

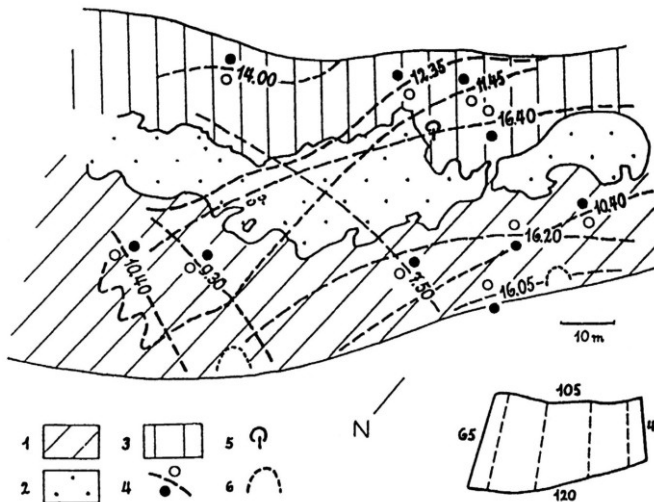
モモ、ヨーロッパクロウスゴなどの矮低木が密生する高山性矮低木群落が認められた。この群落では、さらにコスギラン、*Salix retusa*、ムカゴトラノオ、*Ranunculus alpestris*、*Sesleria caerulea*、*Carex sempervirens* などの高山植物、ハナゴケ属、エイランタイ属などの地衣類、イワダレゴケ、タチハイゴケ、オオフサゴケ、ダチョウゴケ、ミズゴケ類などの蘚類が混生していた。6月9日午前11時50分、気温18.0℃の下、この高山性矮低木群落が発達する岩塊間に氷が見え、岩塊間における10cm深の地温、0.2℃が測定された。以上の岩塊堆積斜面には、温度的気候からは山地帯・冷温帯にあるにもかかわらず、亜高山帯・亜寒帯性のヨーロッパトウヒ高木林と高山帯・寒帯性の矮低木群落が発達していた。なお、岩塊堆積斜面上部の岩塊露出地ではヨーロッパトネリコ *Fraxinus excelsior*、ヨーロッパカエデ *Acer pseudoplatanus* などの山地帯・冷温帯性落葉広葉樹、あるいはヨーロッパトウヒの高木が散在していた。

このような岩塊堆積斜面は、馬蹄形を呈する山頂部から比高100m余りの垂直な断崖直下に拡がり、斜面下部(標高約1200~1300m)、すなわち崖錐末端部に風穴地が形成されている。また、この斜面は北東に向いている。国内・北海道で風穴地が発達する例は、崖錐斜面下部、かつ北ないし東向き斜面である場合が多いので(佐藤1995a)、ここの風穴地の成立環境は、我が国の事例と共通している。ただし、地質が石灰岩である点、そして北海道では火山噴出、当地では崩壊という岩塊形成の原因が違う点で、国内の事例と異なっていた。前者の地質に関連して、チョウノスケソウなどヨーロッパにおける好石灰岩植物の出現が、国内風穴地の事例と異なっている。他方、局所的な低温環境に加え、ミズゴケ類の出現によって湿潤な環境が形成されていると推定された。このような風穴地の物理的特徴は、北海道の事例と同様であると思われる。

(2) Bluehltobel, Appenzel (スイス・北アルプス、センテス山塊の北東麓：写真2 A~2 C)

a) 既存文献情報：Furrer (1966) は、アルプス北部のセンテス山塊 Saentis の北東麓において、石灰岩岩壁直下の岩塊堆積斜面が、山地帯に位置するにもかかわらず、岩塊直下の草原、岩塊露出地に続く斜面下部では樹高1~2mのヨーロッパトウヒ萎縮木やムゴマツが散在し高山植物が混生する群落が成立すること、そのような斜面下部がとりわけ低温環境にあること、日当たりが悪いことなどを報告していた(図3)。

b) 調査日とアプローチ：1998年9月9日、Zurich 中央駅出発、Gossau 駅乗り換え、Appenzel 通過、Weissbad 駅まで片道約2時間の列車移動となる。Weissbad



- 1：ヨーロッパトウヒ萎縮木植分，2：岩塊露出地，3：草原，
4：1965年7月12～13日における日陰（黒丸）・日当たり（白丸）の境界線，
5：ヨーロッパブナ高木，6：山崩れによる小丘

図3 Brueltoebel の岩塊堆積斜面における植生配列 (Furrer 1966)

駅（標高820m）からバスにて標高920m地点まで，その後は徒歩で進む。最初は採草地の中を歩くが，Quel Schutzgebiet（標高約960m）からヨーロッパブナ林内に入る。ヨーロッパトネリコ，ヨーロッパカエデなどの広葉樹が混生したヨーロッパブナ林とともに，所によってヨーロッパトウヒが混生する混交林やヨーロッパトウヒの純林（標高1160m）が認められた。Schroendibach 川に沿った歩道脇には，所々に小規模な石灰岩岩壁が認められ，イチョウシダ，アオチャセンシダ，チャセンシダ，ナヨシダ，イワウサギシダなど我が国の岩隙植生との共通種のほか，*Campanula cochleariifolia*，*Sesleria caerulea* などの高山植物も確認された。徒歩で約1時間進んだところ，歩道に沿った風穴地（標高1180m）に到達した。風穴地の周辺では，ヨーロッパブナ林がこの風穴地を超えて標高約1250mまで上昇し，より高い標高地に発達するヨーロッパトウヒ林もまた下限域の成立として認められるので，この風穴地は，垂直分布上，山地帯上部から亜高山帯下部への移行的位置にある。

c) 風穴植生の観察結果と若干の考察：石灰岩岩壁の下方に続く岩塊堆積斜面（標高1180～1200m）は，北北西に向く傾斜角約35度の急斜面を呈し，角礫に富み，礫径は15～40cmであった。その斜面下部ではヨーロッパトウヒ萎縮木，ムゴマツ，カンバ類 *Betula pubescens*，ミドリハンノキ *Alnus viridis* など低木類が散在する群落に，ヨーロッパクロウスゴのほか，スギカズラ，ミヤマワラビ，シラネワラビ，イ

ワウサギシダ, コミヤマカタバミ, キバナノコマノツメ, コイチヤクソウ, コケモモ, コガネギク(母種), タチハイゴケ, オオフサゴケ, イワダレゴケ, ダチョウゴケなど日本との共通種が多く出現した。他方, この群落に介在する高山草原群落ではムカゴトラノオ, チョウノスケソウ(母種), クロマメノキなど日本との共通種が認められるほか, *Salix retusa*, *Salix reticulata*, *Ranunculus alpestris*, *Homogyne alpina*, *Sesleria caerulea*, *Carex firma*, *Tofieldia calyculata* など, アルプス高山帯の石灰岩地に生育する高山植物が多く出現した。なお, この高山草原群落は, 斜面下部において上記低木群落に介在して認められたものであり, 図3に示した草原(亜高山草原, Furrer 1966)とは異なっている。

岩塊露出斜面, その斜面下部に成立するヨーロッパトウヒ萎縮木・ムゴマツ散在低木群落, 高山草原群落, そして周辺のヨーロッパブナ林とヨーロッパトウヒ林において温度を測定した(表3)。測定は11時30分から13時15分にかけて行ったが, 深い谷であるために直射日光を受けない歩道で測定した1m高の気温(15.1~17.3℃)をコントロールと考えた。その結果, 低木群落, そして高山草原群落に向かうにつれて, とくに地温が低くなる傾向が認められた。

表3 Bluehltobel における風穴植生および周辺植生の温度環境

	1 m 高の気温	地表面温度	10cm深の地温
ブナ林 (1220m)	15.1	/	10.2~10.6 (3地点)
トウヒ林 (1160m)	12.2	11.8~12.1	9.9~10.4 (3地点)
岩塊露出斜面	11.4	12.2	10.7~10.9 (4地点)
低木群落	11.1~11.3	7.4~10.7	7.7~ 9.9 (9地点)
高山草原	10.8~12.5	4.4~ 8.2	3.0~ 6.7 (12地点)

(3) Waagtal, Schwyz (スイス・北アルプス：写真3A~3C)

a) 既存文献情報：Furrer(1972)により, Waagtal の崖錐地形に風穴地があることが報じられていた。

b) 調査日とアプローチ：1998年9月16日, Zurich 中央駅出発, Waedenswil 駅乗り換え, Einsiedeln 駅(標高約870m)まで1時間15分の列車の旅, そこからバス約25分で Unteriberg (標高920m) に達し, その後は石灰岩岩壁に囲まれたU字谷 Waagtal を上流に向かって歩く。10分ほど進むと, 既存文献に示された崖錐が右手(左岸)にあるはずであったが, そこは採石場として崖錐全体がすっかり破壊されて

いた（写真3 A）。降雨の中で気落ちを感じながら反対側（右岸）の斜面を見ると、左岸側より規模が小さな崖錘斜面ではあるが、露岩地、ヨーロッパトウヒ高木林、それらに挟まれた高山草原の組み合わせ、すなわち風穴植生を簡単に見つけることができた（写真3 Bと3 C）。

c) 風穴植生の観察結果と若干の考察：崖錘斜面のうち、斜面下部で高山草原に隣接するヨーロッパトウヒ高木林ではスギカズラ、ミヤマワラビ、コミヤマカタバミ、コイチヤクソウ、ヨーロッパクロウスゴ、コケモモ、コガネギク(母種)、ヒメマイヅルソウ、イワダレゴケが普通に見られた。他方、風穴地中心部では、樹高1～3 mのヨーロッパトウヒ萎縮木が散在するほか、以下のように多数の高山植物が出現した。すなわち、コスギラン、コケスギラン、リシリビャクシン、カマヤリソウ類 *Thesium alpinum*、ホソバツメクサ *Minuartia verna*、*Arabis alpina*、ウメバチソウ、*Saxifraga aizoides*、チョウノスケソウ(母種)、*Rubus saxatilis*、クロマメノキ、*Calluna vulgaris*、*Rhododendron hirsutum*、*Erica carnea*、ツマトリソウ、*Thymus polystricus* (*serpyllum* group)、*Pinguicula alpina*、*Campanula cochleariifolia*、*Campanula rotundifolia*、エゾノチチコグサ *Antennaria dioica*、*Sesleria caerulea*、*Carex firma*、*Carex sempervirens*、*Tofieldia calyculata* などである。

以上の植物群落が成立する崖錘は、標高910～950 m、方位 S80W、傾斜角 27度の急斜面を呈しており、とくに高山草原は斜面下部に約30 m×40 mの規模で2ヶ所認められた。堆積した石灰岩岩礫は、直径5、6 cmから120 cmまで変化に富んでいた。温度測定を試みたが、測定（11時40分～13時50分、曇り）の直前まで降雨が続いており、とくに地温は降水の影響を受けるため精度が低いので、表4を参考程度の結果として示した。しかしながら、高山植物が豊富に出現するこの群落において、10 cm深地温4.9℃が測定され、他群落より多少とも低い地温が認められた。

表4 Waagtal における風穴植生および周辺植生の温度環境

	1 m 高の気温	10cm深の地温
岩塊露出斜面	11.0～11.6	8.7～10.0（4地点）
トウヒ林	10.2～14.2	6.8～10.0（5地点）
高山草原	10.2～14.2	4.9～10.3（10地点）

(4) Kloental, Glarus (スイス・北アルプス)

a) 既存文献情報：Furrer (1972) は, Glarus 西方のクロンタール湖南岸 Ruechi 付近に風穴地があることを報告していた。

b) 調査日とアプローチ：1998年9月10日, Zurich 中央駅出発, Ziegelbruecke 駅乗り換え, Glarus 駅(標高約490 m)まで1時間10分の列車の旅, そこから Riederun (580 m) 経由, Kloental 湖の東端 Voraue (850 m), そして西端のバス停 Platz (853 m) までバスにて約30分の移動があった。その後は, 湖の南岸(北斜面基部)にある歩道を約4時間かけて半周した。Kloental 湖に面した斜面の上方には, 1.5~2 km の短距離間に Usse Fierberg (2605 m), Inner Fierberg (2627 m), Furggeli (2543 m), Ruchen (2901 m) などの Glaernisch 山塊が聳えており, 湖面からの標高差 1700~2000 m において多数の断崖と, 数個の扇形を呈する崖錐地形が認められた。その一つが, Furrer (1972) によって風穴地として記録されていた。

湖岸沿いの植生は, 主に, 沢筋ではヨーロッパトネリコ・ヨーロッパカエデ混生林かヨーロッパニレ *Ulmus glabra*・ヨーロッパカエデ混生林, 乾性的立地ではヨーロッパパナ純林かヨーロッパパナ・ヨーロッパトウヒ混交林からなり, いずれも山地帯に所属する森林であった。しかしながら, 所々に認められる小規模な石灰岩露岩地には, ナヨシダ, アオチャセンシダ, チャセンシダ, イワウサギシダ, ウメバチソウ, *Saxifraga aizoides*, *Alchemilla* spp., カラフトゲンゲ *Hedysarum hedysaroides*, キバナノコマノツメ, *Rhododendron hirsutum*, *Campanula rotundifolia*, *Aster bellidiastrium*, *Sesleria caerulea*, *Carex firma*, *Carex sempervirens*, *Carex ferrugineum*, *Tofieldia calyculata* など多数の高山植物が出現した。

c) 風穴植生の観察結果と若干の考察：前述の植物群落に加えて, 湖岸では崖錐に限られてヨーロッパトウヒ林が認められた。その林床では, 前述の落葉広葉樹林・針広混交林に出現した *Mercurialis perennis*, *Lilium martagon* などの山地帯・温帯性植物が消える代わりに, スギカズラ, イワウサギシダ, シラネワラビ, ミヤマワラビ, *Moehringia muscosa*, コミヤマカタバミ, コイチャクソウ, ヨーロッパクロウスゴ, コケモモ, コメススキ, ヒメマイヅルソウなどの亜高山帯・亜寒帯性植物, イワダレゴケ, タチハイゴケ, オオフサゴケ, ダチョウゴケなどの蘚苔類が優勢に出現した。

このヨーロッパトウヒ林が成立する斜面の中で, 斜面末端(湖岸平坦地との地形変換線)においてのみ *Arabis alpina*, *Hutchinsia alpina*, *Saxifraga aizoides*, *Sesleria caerulea* など少数の高山植物やウロコミズゴケ, ホソバミズゴケなどのミ

ズゴケ類が出現する場所、あるいはイワダレゴケとダチョウゴケが優占する場所があり、それらの生育地が表5に示す低温環境下にあった。風穴地周辺の植生を含む温度測定は、11時10分～12時50分に行ったが、その間、直射光はなく、気温は約15～16℃で安定していた。その状況下において、ヨーロッパトウヒ林が成立する斜面末端においてのみ2.7～4.9℃の低温が測定された。しかし、ヨーロッパトウヒ林それ自体では他群落と明瞭に異なる低温は確認されなかった（表5）。

ところで、斜面末端で低温が測定されたヨーロッパトウヒ林は、高木の多くが伐採されていた。また、この風穴地では、低温が測定された斜面末端とその斜面上部の伐採跡地が相観的に連続しており、一定の面積を持った風穴植生として明瞭に区別できなかった。しかしながら、以上の風穴地を含むヨーロッパトウヒ林の立地は、ほぼ北向き（N15E）、崖錘末端の傾斜角37度を示す急斜面である点で他地域の風穴地と同様であるので、同様な風穴機構が働いていることは明らかであった。ここでは、長径10～30cmほどの石灰岩垂円礫が堆積しており、その上に20～30cmの厚さで土壌と蘚苔類層が発達していた。この風穴地は、残念ながら多くが破壊されているが、冷気を吹き出す風穴現象と少数種の高山植物がわずかに残された状態にあった。

表5 Kloental における風穴植生および周辺植生の温度環境

	1 m 高の気温	地表面温度	10cm深の地温
ブナ林	16.0～16.1	15.1～15.6	12.8～13.3（3地点）
トウヒ林	16.0	15.1	10.4～11.5（3地点）
同上（明瞭な風穴地）	15.0～15.6	4.0～ 8.0	2.7～ 4.9（6地点）

(5) Glarus 近郊（スイス・北アルプス）

a) 既存文献情報：古く Streiff-Becker (1945) により Glarus 近郊に風穴地が記録され、対流説における温風穴と冷風穴が同一斜面の相互に離れた場所にあることが特記されていた。

b) 調査日とアプローチ：1998年9月17日、Zurich 中央駅を出発、Ziegelbruecke 駅で乗り換え、Glarus 駅（標高約470m）まで約1時間10分の列車の移動があった。その後、標高1000m付近に記録された温風穴には到達できないとしても、標高約700mに記録された冷風穴のミルク貯蔵小屋や、標高約600mの冷風穴にあるヨーロッパトウヒ林を探しながら、既存文献に書かれた Glarus の西側地域、標高720m以下の範囲を約2時間歩き回った。この範囲では、放牧草原アルプのほかにヨーロッパ

ナ林, ヨーロッパブナ・ヨーロッパモミ混交林, そしてヨーロッパアカマツ *Pinus sylvestris* 林も見られるが, ヨーロッパトウヒ林の伐採跡地やその後に造林されたヨーロッパカラマツ *Larix decidua* やヨーロッパトウヒの植林地も広く認められた。

c) 風穴植生の観察結果と若干の考察: 既存文献に挙げられた冷風穴のミルク貯蔵小屋は見つからず, 文献に記録された標高にある冷風穴のヨーロッパトウヒ林も, 標高の上から現在の皆伐跡地に相当しており, 残念なことに, いずれの痕跡も認められなかった。

(6) Seelisberg (スイス・北アルプス)

a) 既存文献情報: 古く Keller (1839) により Seelisberg 周辺に風穴植生が記録されていたが, その論文からは場所の特定ができなかった。

b) 調査日とアプローチ: 1998年10月3日, Zurich 中央駅出発, Alth-Goldau 駅と Brunnen 駅 (標高約425m) でそれぞれ乗り換えて Seelisberg に達した。そこから, Urner See の西岸沿い, Seeli 湖 (標高738m) と呼ぶ小さな湖を含んで, Seelisberg 周辺の標高約760mから標高1100mまでの範囲を約5時間半歩き回った。この範囲の植生は, 放牧草原アルプのほかに, ヨーロッパブナ林とヨーロッパブナ・ヨーロッパモミ混交林が優勢であった。これらに, ヨーロッパカエデ, ヨーロッパトネリコ, セイヨウハシバミ, ヨーロッパニレ, ヨーロッパシナノキ *Tilia cordata*, ヨーロッパナナカマド *Sorbus aucuparia*, ヨーロッパアカマツなどが混生していた。他方, 小規模な石灰岩岩壁にナヨシダ, イワウサギシダ, イチヨウシダ, チャセンシダ, アオチャセンシダ, ウメバチソウ, *Calluna vulgaris*, *Sesleria caerulea*, *Tofieldia calyculata* などの高山植物が出現した。

c) 風穴植生の観察結果と若干の考察: 上記の山地帯植生の中で, 小規模な崖錘地形に対応して相対的に針葉樹が多くなった森林があり, その林床に高山植物が出現する場所が認められた。例えば, 標高約1055mにおけるヨーロッパブナ・ヨーロッパモミ混交林では, 極めて局所的 (約1m×5m) にコケモモ, ヨーロッパクロウスゴ, *Calluna vulgaris*, コガネギク (母種), *Homogyne alpina* が集中して出現した。また, 標高885mのヨーロッパトウヒ・ヨーロッパモミ林でもイワウサギシダ, ウメバチソウ, *Sesleria caerulea*, *Carex firma*, *Tofieldia calyculata* が, 標高約745mのヨーロッパブナ・ヨーロッパモミ・ヨーロッパトウヒ混交林ではチャセンシダ, *Arabis alpina*, *Saxifraga aizoides*, *Sesleria caerulea* がそれぞれ局所的に出現した。しかし, いずれにおいても特記できる低温は測定されず, Seelisberg における風穴地および風穴植生を再確認することができなかった。

(7) Unterschafen, Uri (スイス・北アルプス：写真4 A～4 D)

a) 既存文献情報：Furrer (1966) は、Unterschafen のU字谷において、その南側に聳える山岳、Griessstock 山 (標高2662m) の北カール (標高約1600～2300m) から発する急峻な北斜面の基部から、18個のミルク貯蔵小屋と多数の高山植物の出現を報告していた。

b) 調査日とアプローチ：1998年9月17日、(5)で述べた Glarus の風穴地探索に引き続いて、Glarus 駅から終点 Linthal 駅 (標高650m) まで約30分の列車の旅が続いた。その後はバスで45分、Krausen 峠 (標高1948m)・Balm バス停 (1900m) に至る急な登りがあった。ヨーロッパブナ林は標高約1300mでヨーロッパトウヒ林に交代し、標高約1600mで森林限界、トウヒ孤立木が散在する高山帯下部に入る。雪が舞う Balm でバスを乗り換え、Unterschafen に向かって下る。標高約1700mにトウヒ孤立木、1640mにヨーロッパカラマツが少し出現し、標高約1600mからヨーロッパトウヒ林、標高約1400mからヨーロッパブナ・ヨーロッパトネリコ・ヨーロッパカエデが混生する落葉広葉樹林にそれぞれ交代した。バス停 Ribi (標高約1050m) で下車、徒歩15分ほど上流の集落 Ribi に進んで目的の風穴地に達した。その途中、沢沿いには *Alnus incana* 林が発達しており、急峻な雪崩道に沿っては *Alnus viridus* 低木林が認められた。なお、バス停 Ribi (標高約1050m) からの帰途は、Unterschafen (標高990m) までバスで2分、その後 Zurich までの帰途は、Flueren 駅 (標高約420m) までバス35分、Zurich 中央駅まで1時間20分の列車の旅が続いた。したがって、逆に、Zurich 中央駅から Unterschafen・Ribi に直行するには、片道約2時間の移動が必要である。

c) 風穴植生の観察結果と若干の考察：急峻な北向き斜面の基部には、ヨーロッパトウヒ高木林とその萎縮木が散在する風穴植生が交互に認められた。前者では、ミヤマワラビ、ウサギシダ、コミヤマカタバミ、コイチヤクソウ、ヨーロッパクロウズゴ、コケモモ、ネムロブシダマ近縁種 *Lonicera xylosteum*、コメススキ、ヒメマイヅルソウ、イワダレゴケ、タチハイゴケなどが見られた。後者の風穴植生では、樹高0.5～2.5mのヨーロッパトウヒ萎縮木のほか、コスギラン、コケスギラン、*Salix retusa*、マルバギシギシ (ジンヨウスイバ)、ムカゴトラノオ、*Arabis alpina*、*Cardamine resedifolia*、キバナノコマノツメ、クロマメノキ、*Campanula scheuchzeri*、*Pinguicula alpina*、*Homogyne alpina*、*Festuca ovina* (var. *vivipara*)、そしてミズゴケ類が集中して出現した。

14時40分から15時30分にかけて温度を測定した結果は、表6に示すように、風穴植生における低温傾向が認められた。なお、既存文献に記録された18個のミルク貯

表6 Unterschafen における風穴植生および周辺植生の温度環境

	1 m 高の気温	10cm深の地温
Alnus viridus 林	10.0	9.1~9.5 (2 地点)
トウヒ林	10.0~10.1	7.1~8.8 (3 地点)
風穴地	10.0~10.8	5.1~7.1 (9 地点)

蔵小屋は、当時4個が残されていた。これらのミルク小屋は、斜面基部を掘り下げ、歩道までの斜面と屋根が同じ高さになるように設けられていた。これらは、現在の使用を確認していないが、文化財としての価値が高いと思われた。

(8) Brusio, Glaubuenden (スイス南東部, 中央アルプスの南斜面: 写真5 A~5 B)

a) 既存文献情報: Becherer (1952) は、イタリアに近い中欧アルプス南麓, Brusio の風穴地に Grotti と呼ばれる、冷気を利用した食料貯蔵庫があること、その周辺に高山植物が出現することを報告していた。

b) 調査日とアプローチ: 1998年11月6日, Zurich 中央駅出発, Chur (標高585 m), Samedan (1720m), Pontresina (1800m) と次々に乗り換えて標高を増しながら、中央アルプスを列車で Bernina 峠 (標高約2250m) まで登る。その後、スイスのイタリア語圏となる Cavaglia (1700m), Poschiavo (1015m), Miralago (965 m), Brucio (750m) と急な下りが続き、以上を合わせて、片道約6時間の列車の旅があった。Chur (標高585m) までの針葉樹林はヨーロッパトウヒが主役となり、ヨーロッパナは標高約700mまで見られた。その後の中央アルプスでは、ヨーロッパカラムツとセンブラマツ *Pinus cembra* が主体となる針葉樹林が続いた。標高約2200mの Lago Bianco 湖付近が高山帯となり、すっかり冠雪した白い世界になっていた。Bernina 峠からの下りでは、標高2150m付近が森林限界を形成するヨーロッパカラムツ・センブラマツ林、標高約1800mから下方ではヨーロッパトウヒが混生し始め、Cavaglia (約1700m) でヨーロッパトウヒ・ヨーロッパカラムツ林に交代した。U字谷に近づいた標高約1200m付近から、放牧草原アルプとともにヨーロッパトネリコ、ヨーロッパカエデ、セイヨウハシバミなどからなる落葉広葉樹林が認められ、標高約950mから下方ではセイヨウグリ *Castanea sativa* も出現した。Brusio (標高約750m) はすでにイタリア語圏であるが、駅前にドイツ語で Zimmer と書かれた小さな宿があった。その夜、イタリア語の筆談と図解によって Grotti を観に来たということ、明朝、若主人みずから案内するという。

c) 風穴植生の観察結果と若干の考察：Brusio 付近ではU字谷に面して岩塊堆積斜面・崖錐地形が多く認められ、市街地やアルプに接した斜面は擁壁として積み重ねた石組みによって岩礫崩壊が止められていた。宿の若主人は、そのような石組みを目指して10分ほど歩く。人間の背丈ほどある石組みに達したところ、その所々に開けられている穴を指して、イタリヤ語の冷氣 *Freddo* と食料貯蔵庫 *Grotti* の2語を繰り返して言う。穴の内部は小部屋になっており、当時、空であったが、食料貯蔵庫に使用されたことが理解された。若主人とお別れしてその周辺の植生観察を始めた。斜面下部の周辺ではセイヨウグリ、セイヨウハシバミ、サクラ類 *Prunus spinosa*、シダレカンバ *Betula pendula* などの落葉広葉樹の本立が認められたが、岩塊堆積斜面は半ば露出しており、ヨーロッパトウヒとヨーロッパカラマツの萎縮木(樹高それぞれ1.5mと4m)のほか、チャセンシダ、オオエゾデンダ、コガネギク(母種)、カワラマツバ(母種)、*Sedum septentrionale*、*Berberis vulgaris*、*Thymus* sp., *Festuca* sp., *Rumex scutatus* などが散生していた。この季節、植物観察に遅すぎる11月であったので確実な種名同定ができなかったが、上記種は、風穴による冷風・低温に対応した植物と言える。この斜面は西向きであったので、東向きの岩塊斜面を含んでU字谷の両側をジグザグに歩き、一つ下方の駅 Campocologno (標高550m) まで下ったが、*Grotti* やその周辺の高山植物は上記 Brusio で確認されただけであった。

(9) Feldberg, Schwarzwald (ドイツ南西部, シュバルツバルツ：写真6A～6B)

a) 既存文献情報：ドイツ南西部 Schwarzwald の風穴植生については、Mueller (1948), Aichinger (1952), Willmanns (1971), Bogenrieder (1981), そして Spathelf (1994) の研究が知られていた。後三者は、Freiburg 大学 Otti Wilmanns 名誉教授の研究室における比較的近年の研究であったので、同名誉教授に氷穴 Eis-locher とその植生についてご教示を願う手紙を出したところ、すぐに現地を案内するとのご返事をいただいた。また、Aichinger (1952) の論文では、相観が同じ針葉樹林の下で、氷穴と結びついた林床と氷穴がない林床で種組成が異なることが指摘されていた。

b) 調査日とアプローチ：1998年10月5日、スイス Zurich 中央駅出発、Basel で乗り換え、Freiburg まで2時間弱の列車の旅となった。Freiburg 駅には、Otti Wilmanns 名誉教授と Bogenrieder 教授のお二人が待っており、Freiburg (標高約220m) から Schwarzwald の St. Wilhelm (標高約830m) まで車で移動した。その途中、ヨーロッパブナが優占し、ヨーロッパトネリコ、ヨーロッパカエデ、セイヨ

ウハシバミ、ヨーロッパモミなどが混生した針広混交林が見られた。ヨーロッパトウヒについては低標高地のものは人工林、標高が高いと自然林であるとの説明があった。St. Wilhelm (標高約830m) から徒歩で氷穴 Eis-locher (標高870m) を目指した。片麻岩からなる岩塊流の押し出しに登り出すと、ブナ・モミ混交林のうちブナが消えてモミが増加し、まもなくヨーロッパトウヒ林に交代した。そこが目的の氷穴地であった。また、その周辺を観察後、車で移動し Zastler 谷 (標高770m) の氷穴も観察した。

c) 風穴植生の観察結果と若干の考察：St. Wilhelm の氷穴では、ヨーロッパトウヒの純林 (Bazzanio-Piceetum) が成立していた。林床の種類組成は、スギカズラ、ヨーロッパクロウソグ、コケモモなどが見られたが高等植物は比較的少なく、ホソバミズゴケ、*Sphagnum capillifolium*, *Bazzania trilobata*, *Rhytidiadelphus loreus*, *Plagiothesium undulatum*, 希少であるという *Racomitrium vupestre* や *Cystocoleus niger* など蘚苔類が豊富に認められた。ここは、山崩れによる片麻岩の岩塊堆積地であり、全体として北に向く比較的緩やかな斜面を呈していた。その所々に縦穴となる岩塊間隙があり、それらが氷穴となって希少種を含む蘚苔類の豊富な出現に結びついていた。10時30分に気温を測定したところ、縦穴の外で8.4℃が得られたのに対して、2mの深さがある縦穴の底部では6.1~6.4℃が測定された。Willmanns 名誉教授によると、このヨーロッパトウヒ林は約3haの面積を持ち、周辺地域とは年平均気温で2.5~3℃低温になるとの説明があった。

Zastler 谷の氷穴では、ヨーロッパトウヒにヨーロッパモミが多く混生した針葉樹林が成立していた。モミの出現は西向きの斜面であるためであり、この森の辺縁に限られるとの説明があった。岩塊が堆積した林床では、ヨーロッパクロウソグが優勢であり、シラネワラビ、ホソイノデ(希少種という)、ウサギシダ、エゾイチゴ(母種)、コミヤマカタバミ、コケモモ、コメススキなどの高等植物とともに、ホソバミズゴケ、イワダレゴケ、ヒカリゴケ、*Rhytidiadelphus loreus*, *Plagiothesium undulatum*, *Dicranum scoparium*, *Polystichum attenuatum*, *Diplophyllum aricans* などの蘚苔類が多量に出現した。11時40分の気温9.9℃の際、10cm深の地温5.8~6.9℃が測定されたが、低温は顕著ではなかった。

Willmanns 名誉教授の説明によると、この森林は、St. Wilhelm の氷穴より面積が狭く、温度環境はより高温であるという。また、以上の氷穴における地下水は、通常7月まで残り、遅い年には8月初旬まで認められる。さらに、風穴、氷穴などの Terminology に関して議論がなされ、Bogenrieder 教授とお二人は、「風の穴」は奇妙なので Kaltluft-Locher (冷氣穴、冷風の吹き出し穴) を使用した方が良くと

の意見を述べられた。

(10) Berchtesgarden, Chiemgauer Alpen

(ドイツ南部, ベルヒテスガーデン国立公園: 写真 7 A ~ 7 B)

a) 既存文献情報: Mayer (1961, 1964) は, ドイツ南端部, 石灰岩からなる北アルプスの Berchtesgarden 国立公園に, 風穴地を含む「メルヘンの森」と呼ばれる森があり, その森では, 冷気が吹き出す風穴地に高山植物が多く出現すること, しかしその斜面全体は針葉樹林(チャセンシダーヨーロッパトウヒ群集)に被われていることを報告していた。また, この森が成立する斜面は, Fahlenleitenband と呼ばれる垂直に切り立った石灰岩岩壁(標高1716m)の北斜面下部に当たり, 山崩れによって形成されたという。現地を観察するまで, この森では, 他地域に多く見られるように, 風穴地において針葉樹高木林と高山性植物群落が区分されるのかどうか, 事前には不確かであった。

b) 調査日とアプローチ: 1998年10月16日, オーストリア Salzburg からドイツの Koenigssee と呼ばれる湖(標高約650m)までバスで南下, 約1時間のアプローチであった。そこからロープウェイを利用して放牧草原に使用される緩斜面(標高1220m)まで登る。その途中, 標高約1050mまでの範囲にヨーロッパブナとヨーロッパトウヒが混生した針広混交林が認められた。次第にヨーロッパカラマツ *Larix decidua* が多く混生し, 標高約1050mでヨーロッパトウヒとヨーロッパカラマツからなる針葉樹林に交代した。ロープウェイ終点の1220m地点から斜面上部を見上げると, 針葉樹林の上端にヨーロッパカラマツによる森林限界とその上のムゴマツ低木林や高山草原が見え, 植生の垂直分布が綺麗であった。標高1220m地点から放牧草原アルプと針葉樹林を縫うように整備されたワンダラー用の歩道を使用し, できるだけ目的地の「メルヘンの森」に近づくようにした。歩道を約1時間, 歩道を外れて約30分, 標高約1330~1400mにある目的地に到着することができた。

c) 風穴植生の観察結果と若干の考察: 目的地には, 樹高約30mのヨーロッパトウヒとヨーロッパカラマツからなる針葉樹林が成立していた。この森は, 外側から見ると, 普通の針葉樹高木林を呈するが, 林内に入ると, 林床に亜高山性植物だけではなく多数の高山植物が出現した。林床では, 石灰岩岩壁の崩壊に起因した直径2~5mに及ぶ巨大な岩塊が積み重なり, 人間の背丈以上の凹凸を持った顕著な地表面変化が認められた。ヨーロッパトウヒとヨーロッパカラマツの高木は, 大きな岩塊上の安定した凸地に生育して全体の相観を形成していた。他方, この針葉樹林の林床では, 全体にヨーロッパクロウソグ *Vaccinium myrtillus* が優占し, 他にスギ

カズラ、シラネワラビ、コイチャクソウ、コケモモ、コガネギク(母種)、コメスキ、イワダレゴケ、オオフサゴケ、タチハイゴケなど、亜高山性の植物が多く出現した。他方、ミズゴケ類やミヤマカギハイゴケ *Drepanocladus exannulatus* など、あるいはエイランタイ、ナギナタゴケ、ハナゴケなどの高山性地衣類、コスギラン、チャセンシダ、ナヨシダなど北海道と共通する高山植物のほか、ムゴマツ、*Arabis alpina*, *Moehringia muscosa*, *Ranunculus alpestris*, *Erica carnea*, *Rhododendron hirsutum*, *Campanula cochleariifolia*, *Homogyne alpina*, *Sesleria caerulea*, *Juncus trifidus*, *Carex ferrugineum* など、主に石灰岩からなるアルプスの高山草原を特徴づける高山植物が集中して出現するところがあった。以上のミズゴケ類や高山植物などの出現は、直立する巨礫の最下部や岩塊の斜面下方側となる凹地など、相対的に湿潤な場所であった。したがって、相観的には同じ針葉樹林の中で、地表面の変化に応じて異なる林床植生が認められた。

この観察地は、北に向く岩壁直下の急斜面であることと秋季であることから、調査時(11時30分~13時)快晴であったが直射光は全く届いていなかった。1 m 高の気温は、高山植物が認められない針葉樹林内で8.4~9.4℃、高山植物が多い林内で5.1~8.0℃が測定され、後者における低温が確認された。また10cm深の地温は、地表の凹凸によって明らかに異なり、凸地の5.6~6.3℃に対して、高山植物が多い巨礫最下部や凹地では1.7~4.6℃が測定され、明瞭な差が認められた。地下水は直接には観察できなかったが、秋季10月中旬における上記の低温は、凍土の存在を推測させるものであった。

(11) Schladming, Austria (オーストリア北部、シュラドミング：写真8A~8C)

a) 既存文献情報：Schaeftlein (1962) による『シュラドミング・タウエルン山地における特殊な高層湿原』は、高層湿原と題しているが、北海道の士幌高原道路予定地・東ヌプカウシ山域の風穴植生と最も似た植生の内容を報告していた。しかも、矮性のキョクチカンバ *Betula nana* が氷期の遺存種として隔離分布することが特記されていた。

b) 調査日とアプローチ：前述論文には「Schladming・Untertalの北斜面下部、標高約1000m、Tetter 旅荘の手前約1 km、規模は長さ約100m、幅約50m」という記述があった。そのため、まず、Schladmingを目指した。1998年10月14日、スイス Zurich 中央駅からオーストリアのInnsbruckまで列車で約4時間、この間、低い雲間からチロルの白く冠雪した山々とヨーロッパトウヒやヨーロッパカラマツの針葉樹林を垣間見ながらの旅となった。Innsbruckからは、標高が低くなるため落葉広葉

樹林のヨーロッパブナやヨーロッパカエデの黄葉を眺めながら Bischofschofen まで約3時間半、そこで乗り換えて約20分で Schladming に達し、Zurich から合計約8時間の列車の旅となった。夕刻に着いた Schladming は、町外れの閑散とした小さな駅であったが、10分ほど歩くと端正な市街地があり、ガストホッフと呼ばれる宿に宿泊することができた。宿の女将に、前述論文の表紙と5万分の1地形図を示して具体的な場所を聞くと、「地元では高層湿原 Hochmoor として有名、Tetter 旅荘までバスがある」との答、地形図上に位置を書いてくれた。

翌10月15日、盛夏と違ってバスがないことが分かり、降り続けている雨の中を Tetter 旅荘を目指して Untertal を登り出した。標高約750mの市街地から針広混交林、そして放牧草原アルプを通り抜ける緩やかな登り、入り組んでいる牧道に迷いながら地形図で確かめながら進む。2時間ほど歩くと、U字谷が狭まって針葉樹の黒い森が多くなり、風穴地の雰囲気が増厚になった。標識も何もない歩道を進んだところ、目的の風穴地に容易に達してしまった。

c) 風穴植生の観察結果と若干の考察：現地での第一印象は、「北海道東ヌプカウシ山域に良く似た風穴植生」であった。この風穴地は、周囲をヨーロッパトウヒにヨーロッパカラマツが少し混じった針葉樹高木林によって取り囲まれ、風穴地中心部ではヨーロッパトウヒとヨーロッパカラマツの萎縮木(樹高それぞれ0.5~2 m と0.5~4 m) が疎生し、地表が真っ赤なスギバミズゴケ *Sphagnum nemorosum*, イワダレゴケ, ハナゴケ類, エイランタイなどの蘚苔地衣類によって絨毯状に被われていた。以上の植生交代は、東ヌプカウシ山域におけるアカエゾマツ高木林から同矮樹林への交代と良く似ていた。また前者には樹高約1 mのムゴマツが集中した場所もあり、この相観も東ヌプカウシ山域のハイマツ低木林とそっくりであった。

蘚苔地衣類が優勢な風穴地では、クロマメノキ、コケモモなどの他に、ヒメツルコケモモ (Schaeftlein はツルコケモモと報告したが別種のヒメツルコケモモであった)、ヒメシャクナゲ、モウセンゴケなど、一般には高層湿原に出現する植物が認められた。また、Schaeftlein (1962) が注目した矮性のキョクチカンバ *Betula nana* は、晩秋のためほとんど落葉していたが、多量に認められた。この矮性カンバは、通常ツンドラ地帯に広分布し、ヨーロッパの中緯度地方では高層湿原に稀に隔離分布する氷期遺存種の代表例である。さらに、ここのガンコウランは、厳密には、キョクチガンコウラン *Empetrum hermaphroditum* (ガンコウランの変種 *Empetrum nigrum* var. *hermaphroditum* と扱われる場合がある) であり、アルプス高山帯に一般的なガンコウラン (母種) *Empetrum nigrum* とは異なっている。したがって、この風穴地は近隣のアルプス高山帯よりも極地ツンドラとの強い結びつきが認めら

れた。

ちなみに、この山域における植生の垂直分布は、山地帯・亜高山帯・高山帯に区分され、その順序にヨーロッパブナ、ヨーロッパカエデ、ヨーロッパトネリコなどからなる落葉広葉樹林(あるいはヨーロッパトウヒが混生する針広混交林)、ヨーロッパトウヒやヨーロッパカラマツからなる針葉樹林、そして高山植生が成立する。森林限界を超えたばかりの高山帯下部では、ムゴマツ低木林やアルペンローゼとして親しまれる矮性シャクナゲ *Rhododendron ferrugineum* の低木群落が見られる。この高山帯下部(森林限界と高木限界の移行帯)は、生態的には日本のハイマツ帯に相当する。シュラドミング風穴地(標高約1000m)は、山地帯・冷温帯にあるが、そこに出現する植物は、上述の湿原植物を除くと、通常は上記の高山帯下部に出現するものが多く、また極地のキョクチカンバとキョクチガンコウランの出現によって特徴づけられる。

風穴地の地形的特徴もまた、東ヌプカウシ山域の場合と良く似ていた。ここは、Kruegerzinken 山(標高2204m)から標高差1200mの北斜面の最下部に当たり、直径1m内外の岩塊(片麻岩)が堆積した山崩れ地である。Schaeftlein(既述)は、中欧の風穴地において地質の違いをほとんど指摘せず、地形(崖錘・山崩れ地)と局地気候(冷気の吹き出しなど)の関係が重要であることを強調している。そのため、実際に、温度を測定した結果、10時30分から11時30分に、気温10.5~11.3℃に対して、10cm深の地温は、トウヒ・カラマツ高木林とムゴマツなどが見られる風穴地中心部それぞれにおいて3.0~8.2℃と1.6~4.5℃が測定された。ここでは、Schaeftlein によって地下水・永久凍土の存在が指摘されているが、それを証明するかのように、秋季10月中旬でも低い地温と強い冷気の吹き出しを観測することができた。

ところで、Schaeftlein は、論文の題に『高層湿原』を使いながら、普通の高層湿原では傾斜が少なく地表面にブルテ(小凸地)・シュレンケ(小凹地)という高層湿原特有の微地形が発達するのに対して、相当の傾斜地に成立すること、しかも上記の微地形が認められないことを述べて、ここを『特殊な高層湿原』と呼んでいる。一方、Schaeftlein は、論文の大半を使用して中欧各地の風穴地を比較し、他地域と同様にここでも斜面下部から冷気が吹き出すこと、そして地温や地表面温度が非常に低いこと、ここを含んで中欧の風穴地では地質の違いを超えて崖錘・山崩れ地としての地形的特徴が共通すること、空気の対流も共通することを詳述しているが、この場所を風穴地 Wind-loecher とは呼んでいない。

以上の Schaeftlein によるまとめは、ミズゴケ類が優勢に出現し、矮性のキョクチ

カンバ、モウセンゴケ、ヒメツルコケモモなどが出現する種類構成に基づいて『高層湿原』と呼び、普通の高層湿原との環境の違いを強調して『特殊な高層湿原』という題名にし、他方で、実質的にはここが環境の上で風穴地であることを認めながら、風穴地とは呼んでいないのである。したがって、同氏は、植生（植物群落）の把握と呼称に関して種々の立場がある中で、種組成と環境の両方を複雑に使用した点で混乱している。ミズゴケ類が優勢に生じることは風穴地の湿潤環境に対応した一つの特徴であるので、シュラドミングの特殊な高層湿原について、環境面を先に出して、風穴地ならびに風穴植生と呼ぶ方が正しいと筆者は考えている。

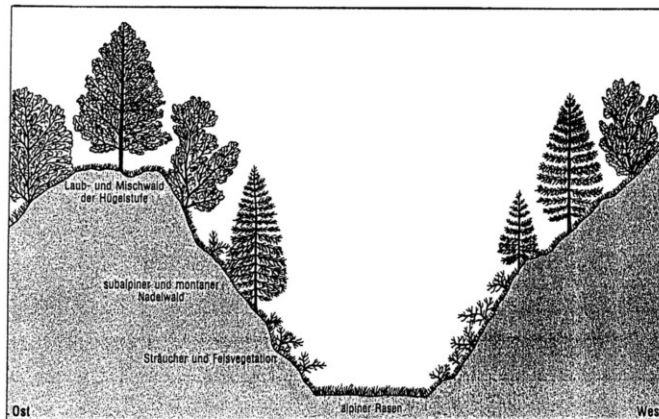
しかしながら、ミズゴケ類が全ての風穴地に共通して出現する訳ではない。筆者が中欧で確認した風穴地13ヶ所のうち、ミズゴケ類が優勢な風穴地は2ヶ所だけであった。このことは、Schaeftlein が高層湿原を強調した背景になるが、日本でも、すでに指摘してきたように（佐藤1995a）、とくに本州の風穴地ではミズゴケ類が出現しない風穴地が多く、北海道でも東ヌプカウシ山域のようにミズゴケ類が優勢な風穴地は限られている。したがって、風穴地の中でも、ミズゴケ類が優勢に出現すること、そして晩秋まで低温・湿潤状態が持続する特徴は、とくに、シュラドミング風穴地と東ヌプカウシ山域の風穴地に共通することになる。今後、詳細な比較研究が必要と考えるが、現段階でも、シュラドミング風穴地と東ヌプカウシ山域の両者は「とりわけ冷涼・湿潤な環境の下で、一般には高層湿原に生える植物を多く混在する風穴地である』とすることができる。

シュラドミング風穴地の規模は、最も著しい風穴地部分が長さ約100 m、斜面上方に向かう幅が約50 mに及ぶ。上述の地下水、フロラ（植物相）などを合わせた生態系の特殊性によって、ここは、オーストリアのビオトープ保護区として保護されている。ただし、それを知らせる標識は、車道側に一切なく、入り込んだハイキング用の歩道際に目立たないように設けられていた。また観察路は、風穴地の下縁部にほんのわずかだけ設けられ、心ある観察者のために『正確に解説された看板』2枚だけが立てられていた。さらに、U字谷を走る車道は、反対側の斜面基部に極めて自然に迂回されていた。トータルとして『何気ない、しかし細心な保護の仕方』に、感心させられるものがあった。

(12) Eppan, Bosen, Italy （イタリア北部ボーゼン近郊、エッパン氷穴：写真9 A～9 B）

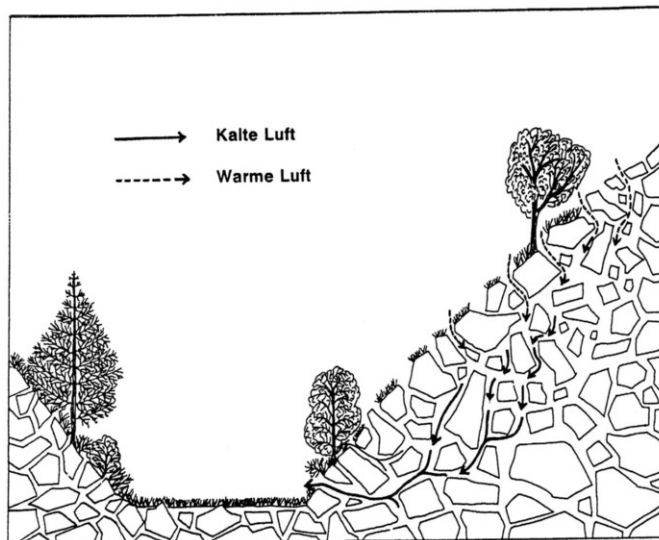
a) 既存文献情報：ここは、夏季まで岩塊間に氷が認められることから「エッパン氷穴 Eis-loecher」として有名であり、イタリアのビオトープ保護区に指定されている。諸文献(Pfaff 1933, Morton 1958a, Morton 1958b, Morton 1959, Morton

1962, Punz, et al. 1989) によると, Eppaner Gand と呼ばれる岩塊堆積斜面の末端部にある凹地の中で, 短距離の高低差の中で顕著な気温変化(低部ほど低くなる気温の逆転)がみとめられ, その急激な温度変化に応じて, 下方から高山帯, 亜高山帯, そして山地帯の植物群落がそれぞれ認められるという。Morton (1958a) のまとめを図4に示す。



A: エッパン氷穴における植生帯

丘陵帯落葉広葉樹林・針広混交林 Laub- und Mischwald der Högelstufe, 亜高山帯・山地帯針葉樹林 subalpiner und montaner Nadelwald, 矮低木群落と岩隙植生 Straeucher und Felsvegetation, 高山草原 alpine Rasen



B: 送風管現象(対流説)に基づくエッパン氷穴における冷風吹き出しの過程
冷風 Kalte Luft と温風 Warme Luft

図4 Eppan 氷穴における植生配列と冷風の吹き出し (Morton 1958a)

b)調査日とアプローチ：1998年10月7日、スイス Zurich 中央駅からイタリア Milano に向かって南下、特急列車で約3時間半の旅、アルプスを横断した。次は、Milano から Venice 行に乗り換えて、ポー平原の田園地帯を東へ進む。広大なポー平原は、自然の森林は失われ、全てトーモロコシ、インゲンなどの畑や牧草地に替えられており、ニセアカシア（北米からの帰化種）の本立やポプラ類の防風林が目立っていた。このようにして約2時間半、Venice への途中 Verona に到着した。ここで再度乗り換えて南チロル・アルプス前山地域の Bozen (Bolzano) に向けて北上した。U字谷には採草地とともに平坦面にリンゴ園、斜面にブドウ畑が目立ち、周辺にセイヨウグリ *Castanea sativa* やナラ類 *Quercus petraea* が主となる落葉広葉樹林が認められた。この林は、度重なる伐採によって樹高が低くなった二次林の相観を呈し、アルプス南麓では標高約800m以下の丘陵帯を代表する。エッパン風穴地（標高約650m）は、基本的にこの植生帯に位置する。

エッパン風穴地に関する複数の論文について、当時、諸文献に引用された内容を知っていたが、直接には一つも手に入れていなかった。全て孫引きの間接情報を持って Bozen に到着してしまったのである。その夜、街最大の本屋を教えてもらい、この風穴地について尋ねたところ、幸いにもその本屋（アテーシア）発行の詳細な『エッパン解説書』を手に入れることができた。翌10月8日、Eppaner Gand までバスで30分、ブドウ畑の中を約1時間歩き、「エッパン氷穴」に到着した。

c)風穴植生の観察結果と若干の考察：風穴地周辺の森林は、セイヨウグリ *Castanea sativa*、ナラ類 *Quercus petraea*、ヨーロッパブナ、サクラ類 *Prunus mahaleb* などからなる落葉広葉樹林あるいはこれらにヨーロッパアカマツ *Pinus sylvestris* が混生した針広混交林であった。問題の氷穴に近づく、ヨーロッパトウヒの小団林に交代した。そこではイワダレゴケ、コスギラン、スギカズラ、コケモモ、コガネギク（母種）、コメススキ、ヒメマイヅルソウなど北海道との共通種や、ミヤマハンショウヅルの近縁種 *Clematis alpina*, *Rhododendron ferrugineum*, *Calluna vulgaris*, *Erica carnea* などが認められた。また、風穴地中心部・地形的な最低部分ではミヤマソモソモ *Poa alpina*（本州高山に知られる）、*Homogyne alpina*, *Campanula scheuchzeri* など、アルプスの高山植物が確認された。

この風穴地は、Gandberg と呼ばれる流紋岩からなる岩峰（標高934m）の北東斜面下部、山崩れ地として直径1～3mの巨礫が堆積した斜面の下部にあった。斜面上方を見上げると岩塊露出斜面（Eppaner Gand）が拡がり、斜面下部だけが密生した植被に被われていた。とくに、斜面末端部が直径約20mの凹地形になった場所では、解説書通り、凹地の底部に吹き出した冷気が滞留すると推測され、高山植物が

集中していた。実際に地温を測定したところ、当日の降雨のせいかな季節的に対流が止んでしまったのか、高山植物生育地の地温と気温は風穴地外の気温などととも、いずれも8.8~9.9℃を示して差が認められなかった。なお、観察歩道以外は鉄柵で入り込めないように保護され、歩道際に「岩塊間を対流した空気が斜面下部で冷氣として吹き出すこと」を図示した解説看板が立てられていた。

(13) Val Cavallina, Italy (イタリア北部、ロベレ近郊カバリナ谷：写真10A~10B)

a)既存文献情報：Fenaroli (1962)によると、イタリア北部の Bergamo 付近、南アルプス南麓の石灰岩地に冷氣が吹き出すドリーネがあり、そこでは、凹地に低温が滞留する局所的な低温環境が形成され、チョウノスケソウなどの高山植物が多数出現するという。

b)調査日とアプローチ：1998年11月7日、(7)で述べたスイス・Brusio (標高750 m) の Grotti を観察した後、Lovere 近郊にある Val Cavallina を目指した。まず、スイスの Brusio・Compocologno からイタリアの Tirano (標高約440m) まで列車で約10分の短い旅があった。その後のアプローチは、列車による Milano・Bergamo・Lovere の移動も考えられたが、短距離の移動を選んで Tirano・Aprica・Edolo・Darfo・Lovere とバスを4回乗り継いだ。しかし、バスの乗り継ぎ・待ち合わせ時間が生じ、この移動に合計4時間20分を費やした。その夜、Lovere の宿で尋ねると、Val Cavallina は、「冷氣の谷 Valle del Freddo」として知られるが、最も近いバス停が Piangaiamo であり、Lovere から13分、帰途に使用する Bergamo からは42分のバス移動で達することが分かった。

c)風穴植生の観察結果と若干の考察：Lovere (標高175m) からバスで出発、Piangaiamo のバス停 (標高350m) から歩き出す。Val Cavallina では、石灰岩のドリーネを縦断する歩道と周囲を一周する歩道が設けられ、ドリーネの内部は真っ白に霜が降りて凍結していた。この「冷氣の谷」保護区は、全体にナラ類 *Quercus petraea*、セイヨウグリ *Castanea sativa*、エゾヤマナラシ *Populus tremula*、セイヨウアズキナシ *Sorbus aria*、トネリコ類 *Fraxinus ornus*、セイヨウハシバミ、カンバ類 *Betula verrucosa*、カエデ類 *Acer campestre*、サクラ類 *Prunus mahaleb* などの落葉広葉樹二次林に被われていた。そのため、当初、どこが風穴地であるか分からず、上記の歩道を二周してしまった。ドリーネの最低部分に近く、開けた場所を探しまわったところ、ようやくイチョウシダ、イワウサギシダ、ウメバチソウ、チョウノスケソウ (母種)、*Rhododendron hirsutum*、*Sesleria caerulea*、*Tofieldia calyculata* などの高山植物が集中して出現する小面積 (約3 m×3 m) を見つけるこ

とができた。この場所の標高は約370mであり、ヨーロッパアルプスでチョウノスケソウを観た最低標高となった。この場所は、ドリーネ底部に向かう崩壊斜面基部に当たり、岩塊間に空隙が認められたので、そこから吹き出す冷気がドリーネに滞留するものと考えられた。なお、Fenaroli (1962) によると、このドリーネ・風穴地の高山植物として、さらにアオチャセンシダ、ナヨシダ、エゾノヒメクラマゴケ、リシリビャクシン、*Carex firma*, *Erica carnea*, *Pinguicula alpina*, *Campanula rotundifolia*, セイヨウウスユキソウ *Leontopodium alpinum* など、そして亜高山植物のヨーロッパトウヒとヨーロッパカラマツの萎縮木が報告されている。

3. 観察記録のまとめ

(1) 風穴植生の種組成 (表7)

前項まで述べた個別な観察結果のうち2ヶ所では明瞭な風穴地が確認されなかった。残る11ヶ所の風穴地に出現した主な高山植物とともに、観察の機会を得なかった風穴地のうち文献に高山植物が示された3ヶ所の既存資料を加え、合計14ヶ所の風穴地における風穴植生の種組成的概観を試みた(表7)。その結果、以下の特徴を指摘できる。

中部ヨーロッパの高山植生を概観すると、地形要因と地質要因が二つの軸となって群落立地が細分され、それぞれに対応した高山植物群落が成立している(Ellenberg1961)。すなわち、高山帯における風衝地、雪田、崖地、崩壊地など、主として地形変化に応じた積雪の多寡・土壌湿度の違いなどによって区分された立地は、それぞれが石灰岩質岩(石灰岩、ドロマイトなど)であるか珪質岩(その他の岩石)であるかの地質の差によって二分され、これら地形・地質の違いに応じてそれぞれ異なる植物群落が成立している。このような高山植生に対して、共通種が多く出現する風穴植生では、第一に、高山帯における地質と高山植物の対応関係が風穴植生の種組成にもそのまま反映された。表7で取り上げた風穴地14ヶ所のうち、9ヶ所が石灰質岩からなり、残る5ヶ所が珪質岩の風穴地となり、それぞれ対立的な出現種の違いを示した。

第二に、高山植生の立地・高山植物の生育地は、高山帯において上記のように地形要因に応じて区分され、それに加えてヨーロッパトウヒやヨーロッパカラマツなどの針葉樹萎縮木、*Pinus mugo*, *Rhododendron ferrugineum* (珪質岩)あるいは*Rhododendron hirsutum* (石灰質岩) などからなる低木群落が成立する森林限界と高木限界の移行帯(既述のEllenbergは高山帯下部とする)も含んでいる。アルプ

表7 ヨーロッパの風穴地に出現する主な高山植物

[地質] [風穴地]	石灰質岩								硅質岩					
	1	3	4	5	6	13	19	22	26	9	16	24	11	10
立地・生育地 高山植物														
風衝地 (石灰質岩)														
<i>Sesleria caerulea</i>	+	+	+	+	+	+	.	+	+
<i>Dryas octopetala</i>	+	+	.	+	.	.	.	+	+
<i>Carex sempervirens</i>	+	+	.	+
<i>Carex firma</i>	.	+	.	+	+
<i>Pedicularis verticillata</i>	.	.	.	+
<i>Arctostaphylos alpinus</i>	+
<i>Polygonum viviparum</i>	+	+	.	+	.	.	+	.	.	+
雪田草原・雪田荒原 (石灰質岩)														
<i>Tofieldia calyculata</i>	+	+	+	+	+
<i>Saxifraga aizoides</i>	.	+	+	+	+
<i>Parnassia palustris</i>	.	.	+	+	.	.	+	.	+
<i>Aster bellidiastrum</i>	+	.	+	.	.	.	+
<i>Hutchinsia alpina</i>	+	+	.	.	+
<i>Ranunculus alpestris</i>	+	+	.	.	.	+
<i>Gentiana clusii</i>	+	.	.	+
<i>Pinguicula vulgaris</i>	+
<i>Soldanella alpina</i>	+
<i>Salix reticulata</i>	.	+
<i>Carex atrata</i>	.	+
<i>Primula farinosa</i>	.	.	.	+
<i>Antennaria dioica</i>	.	.	.	+
<i>Minuartia verna</i>	.	.	.	+
<i>Lycopodium alpinum</i>	+
<i>Arabis alpina</i>	+	+	+	.	+	+	.	.	.	+
<i>Salix retusa</i>	+	+	.	+	+
<i>Pinguicula alpina</i>	.	+	.	+	.	.	.	+	.	+
崖地および崩壊地 (石灰質岩)														
<i>Campanula cochlearifolia</i>	+	+	+	+	+	+
<i>Campanula rotundifolia</i>	.	.	+	+	+	.	+	.	+
<i>Thymus polytrichus</i>	.	.	.	+	.	.	+	.	+
<i>Festuca pumila</i>	+	+
<i>Saxifraga hostii</i>	+
<i>Moehringia muscosa</i>	+	.	+	.	+	+	.	.	+	.	.	+	.	.
亜高山帯上部・高山帯下部の ツツジ科低木群落 (石灰質岩)														
<i>Rhododendron hirsutum</i>	.	+	+	+	.	+	+	+	+
<i>Gymnocarpium robertianum</i>	+	+	.	+	+	+
<i>Juniperus communis</i>	.	.	.	+	.	.	+	.	+
<i>Empetrum nigrum</i>	+
<i>Juncus trifidus</i>	+
<i>Erica carnea</i>	.	.	+	+	.	+	.	+	+	.	.	+	.	.
同上 (硅質岩)														
<i>Rhododendron ferrugineum</i>	+	+	+	.	.
<i>Gymnocarpium dryopteris</i>	+	+	+	.	.
<i>Atrantia minor</i>	+
<i>Empetrum hermaphroditum</i>	+	.	.	.
雪田 (硅質岩)														
<i>Oxyria digyna</i>	+
<i>Festuca ovina</i> (v. <i>vivipara</i>)	+
<i>Viola biflora</i>	+
<i>Cardamine resedifolia</i>	+
<i>Nardus stricta</i>	+	.	.	.

チョウノスケソウ (母種)

タカネシオガマ

ウラシマツツジ (母種)

ムカゴトラノオ

ウメバチソウ

ムシトリスミレ (母種)

ユキワリソウ (母種)

エゾノチチコグサ

ホソバツメクサ

ミヤマヒカゲノカズラ

イワウサギシダ

リシリビャクシン

ガンコウラン (母種)

ウサギシダ

(キョクチガンコウラン)

マルバギシギシ

ウシノケグサ

キバナノコマノツメ

表 7 続き

[地質] [風穴地]	石灰質岩								硅質岩							
	1	3	4	5	6	13	19	22	26	9	16	24	11	10		
高山帯の立地																
高山植物																
高層湿原																
<i>Betula nana</i>	+	(キョクチカンバ)	
<i>Vaccinium microcarpum</i>	+	ヒメツルコケモモ	
<i>Andromeda polyfolia</i>	+	ヒメシャクナゲ	
<i>Drosera rotundifolia</i>	+	モウセンゴケ	
蘚苔類																
<i>Sphagnum</i> spp. ミズゴケ類	+	+	.	.	+	+	.	+	.	+	+	.	+	.		
<i>Sph. quinquefarium</i>	+	+	.	.	+	.	+	.		
<i>Sph. acutifolium</i>	+	+		
<i>Sph. rubellum</i>	+	ウスベニミズゴケ	
<i>Sph. girgensohnii</i>	+	.	+	.	.	ホソバミズゴケ	
<i>Sph. nemoreum</i>	+	スギバミズゴケ	
<i>Sph. recurvum</i>	+	サンカクミズゴケ	
<i>Sph. subsecundum</i>	+	ユガミミズゴケ	
<i>Drepanocladus exannulatus</i>	+	.	.	.	+	ミヤマカギハイゴケ	
<i>Calliergon stramineum</i>	+	.	イトササバゴケ	
<i>Ptilium crista-castrensis</i>	+	+	.	.	.	+	ダチョウゴケ	
亜高山帯上部・高山帯下部の ツツジ科低木群落																
<i>Vaccinium vitis-idaea</i>	+	+	+	+	+	+	+	+	.	+	+	+	+	.	コケモモ	
<i>Vaccinium myrtillus</i>	+	+	+	+	+	+	+	+	.	+	+	+	+	.	(ヨーロッパクロウスゴ)	
<i>Homogyne alpina</i>	+	+	.	.	.	+	+	+	.	+	.	+	+	.		
<i>Pyrola secunda</i>	+	+	+	.	+	+	+	.	.	+	.	.	+	.	コイチャクソウ	
<i>Vaccinium uliginosum</i>	+	+	.	+	.	.	.	+	.	+	+	.	+	.	クロマメノキ	
<i>Lycopodium selago</i>	+	+	.	+	+	+	+	+	.	コスギラン	
<i>Deschampsia flexuosa</i>	.	.	+	.	+	+	+	.	.	+	.	+	+	.	コメススキ	
<i>Calluna vulgaris</i>	.	.	.	+	.	+	+	+	.	+	+	+	.	.		
<i>Pinus mugo</i>	+	+	.	.	+	.	+	.	.	+	.	+	+	.	(ムゴマツ)	
<i>Lycopodium annotinum</i>	+	+	+	.	+	+	+	+	+	.	スギカズラ	
雪田																
<i>Poa alpina</i>	.	+	.	+	.	.	+	+	.	+	ミヤマソモソモ	
<i>Selaginella selaginoides</i>	.	.	.	+	.	.	+	.	.	+	コケスギラン	
<i>Deschampsia caespitosa</i>	.	.	+	+	.	.	.	ヒロハコメススキ	
<i>Botrichium lunaria</i>	+	+	.	.	ヒメハナワラビ	
<i>Festuca rubra</i>	+	オオウシノケグサ	
<i>Alchemilla</i> spp.	+	+	.	+	+	+	.	.	.	+		
崖地および崩壊地																
<i>Campanula scheuchzeri</i>	.	.	.	+	.	.	+	+	.	+	+	+	.	.		
<i>Rumex scutatus</i>	+	+		

スの高山帯で風衝地、雪田、崖地、崩壊地などに分かれて出現する高山植物は、表 7 に示すように、風穴地では共存して出現した。この点は、高山植生と異なって風穴植生の第二の特徴となる。このことは、風穴地では地質要因に次いで低温条件そのものが主要因となり、それらが高山植物の生育を支えることを示唆している。しかしながら、高山帯における群落立地・植物の生育地の地形的な差が何故、風穴地では反映されないのか、あるいは、まだ証明されていないことであるが、風穴地の高山植物は、風穴地における岩塊から岩塊間隙にかけての温度や土壤乾湿度などの

微細な変化・微小立地の違いに個別に反応しているのではないか、これらの疑問については今後の研究課題となる。

第三に、風穴地におけるミズゴケ類、あるいは湿原植物の出現は、石灰質岩と硅質岩のいずれでも認められたが、とくに後者の硅質岩からなる(9) Unterschafen と(16) Schladming の風穴地で顕著であった。石灰質岩の風穴地では、地質の影響を直接受ける高山草原ではなく、その周辺で土壌が発達した、しかしなお風穴現象が認められる針葉樹高木林でミズゴケ類が出現する傾向が認められる。他方、ミズゴケ類が多く出現する国内の風穴植生は、とくに大雪山国立公園の士幌高原道路予定地(東ヌプカウシ山域)やこれに近い位置にあり永久凍土が確認されている十勝三股に知られてきた。これら国内の風穴地は、安山岩(中性岩)ないし流紋岩質溶結凝灰岩(酸性岩)の火成岩からなり、化学成分上は硅質岩に近いものである。したがって、まず、ミズゴケ類や湿原植物は塩基性土壌よりも酸性土壌を選ぶ傾向があることを指摘できる。次に、低温かつ湿潤になるという風穴地の中で、永久凍土、あるいは季節的に遅くまで凍結する季節的凍土が形成される風穴地は、とりわけ湿潤な環境が長く持続することから、ミズゴケ類や湿原植物の生育に結びつくと考えられる。

(2) 風穴植生の立地・風穴地の成立について

中欧の風穴地は、Schaeftlein (1962)によると、岩壁 Felswaenden あるいは岩石急斜面 Steinhaengen の麓にある岩塊碎石斜面 Grobschutt の粗礫堆積地 Amhaefungent に認められる。これらは、崩落性碎石地 Schutthaeden や山崩れ地 Bergsturzmassen と呼ばれているが、現在の地形学用語から崖錐 Talus (広義)と呼ぶことができる。この小論で紹介した11ヶ所の風穴地(13ヶ所のうち2ヶ所は風穴地が不明瞭であった)は、広い意味ではすべてが崖錐地形であった。ただし、ドイツの(9) Schwalzwald と(10) Berchtesgarden, ならびにイタリアの(12) Eppan における風穴地は、巨大な岩礫が積み重なって地表面の凹凸が顕著であり、前述の中では崩落性碎石地ではなく山崩れ地に相当する。これらの風穴地では、低温条件が斜面下方の、とくに凹地に限られ、そこに高山植物あるいは湿原の植物が集中して出現した。他方、残る風穴地は、崩落性碎石地、狭義の崖錐に当たるが、そこでは斜面下部ほど低温が顕著になり、そこに限られる高山植物群落の成立と周辺のヨーロッパトウヒなどの針葉樹高木林との違い、林冠から林床に及ぶ全層群落の交代を説明した。また、(13) Val Cavallina ではドリーネという石灰岩地特有の凹地において、その底部に高山植物が生育したが、そこは、岩屑が堆積した崖錐斜面、崩落性碎石地

でもあった。ただし、このドリーネの例は、(12)Eppan などと同様に、凹地に重い冷気が滞留する点が別の特徴として加わる。

以上の風穴地に関する地形学的特徴に関して、筆者が北海道の風穴植生を概説した際、風穴地のほとんどが崖錐斜面の下部に成立するが、さらに安山岩岩塊（直径30～50cm）と安山岩質流紋岩の平板状岩屑がそれぞれ堆積する斜面では、前者にミズゴケ類が多く出現する違いを指摘した（佐藤1995a）。したがって、崖錐を形成する基質の化学性だけではなく、基質の大小によって生じる微小な群落立地・生育地の環境変化と出現植物について、今後、詳細な調査研究が必要と考える。

(3) 風穴植生の保護について

国内の風穴植生は、北海道大雪山国立公園の士幌高原道路予定地の風穴植生や、国の天然記念物に指定された秋田県長走風穴、福島県中山風穴を含んで、本来は、気候帯・大気候から期待できない相対的な寒冷地の植物が隔離分布的に局在して出現するため、多くが保護地域に指定されている。他方、筆者によるヨーロッパの風穴観察記録は、風穴植生（風穴 Wind-Locher や氷穴 Eis-Locher, あるいは冷気が吹き出す場所の植生）として既存文献がある場合に追認を試みた結果であるが、ヨーロッパアルプスでは、文献に記録されてこなかった風穴地が諸処に認められ、放牧草原アルプスでは、現在でもミルクやチーズの貯蔵場所として使用されている風穴地がかなり普通に見られる。急峻なアルプスでは、とくにU字谷に面した崖錐地形・山崩れ地形が多く認められるため、ヨーロッパでは隔離分布植物が局限して出現する、とりわけ低標高の風穴地が保護地域にされているが、逆に、それ以外の風穴地は放置されているものが多く、場所によっては破壊されてしまっている。

ちなみに、スイスの植物分布図（Lauber & Wagner 1996）を見ると、南から北に向かって南アルプス・中央アルプス・北アルプス、中央低地およびジュラ山脈の5地域にスイスを分ける中で、高山植生を構成する高山植物は前三者に連続分布するように図示されているものが多い。多くの高山植物が前三者に連続分布するように図示される理由は、ヨーロッパバナ林やヨーロッパトウヒ林に高山植物は本来的に出現しないが、それら山地帯や亜高山帯において、この小論でも記述してきたように、散在する岩壁や風穴地にも高山植物が普通に出現するからである。この事例は、逆に、ヨーロッパアルプスでは風穴地が普通に見られることを示している。

4. 風穴現象に関する若干のまとめ

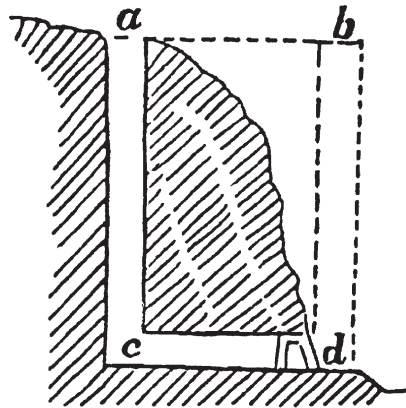
オーストリア・シュラドミングの風穴植生を報じた Schaeftlein (1962) は、中欧における風穴地文献を網羅的に引用してそれらを解説している。そのため、筆者は、この論文の全文を和訳することによって、中欧における風穴地と風穴植生に関して文献による解説を試みた (佐藤1999c)。他方、今回の小論では、上記論文にも引用されている既存文献がある風穴地を可能な限り多く確認しようとした観察記録を示した。以上の二つを付き合わせることによって、中欧の風穴植生の立地と風穴現象について、以下に改めて概説する。

冷気を吹き出す風穴地は、中欧では風穴 Windlocher, 天候穴または通風穴 Wetterlocher, 氷穴 Eislocher, 氷室 Eiskeller, 水筒穴 Kantenen, 通気孔 Ventarole, 食料貯蔵洞穴 Grotti, ワイン室 Weinkeller などの異なる名称で呼ばれてきた。

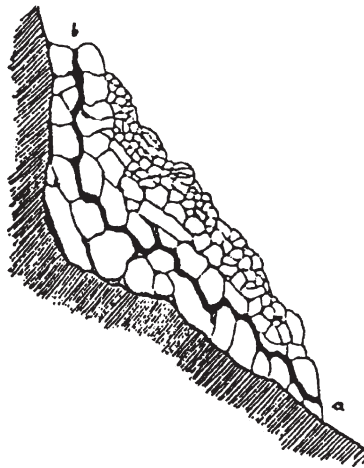
中欧における諸文献には、斜面下部から冷風が吹き出す風穴現象について諸説が示されている。Schaeftlein (1962) の解説は、概ね、以下の通り送風管システム Windroehren system, すなわち対流説を主流としていた (図5: 佐藤1999c)。

冷風が吹き出す風穴現象の原因に関して、Saussure (1786) 以来約200年間に、Keller (1839) とそれに続く Morlot (1847), あるいは Canaval (1893) による送風管システムに関する重要な意見が発表され、一方で種々の「夏氷説」も主張されてきた。しかしながら、Fugger (1880) 以来、氷は寒冷な年に形成されたものであり、基本は、冷気の対流が夏季まで長く維持されること、すなわち風穴現象が送風管システム・対流説によって説明できることはほとんど疑われていない。

送風管システムとしての空気の流れに関する物理学は、鉱山採掘における気象学として古くから知られており、自然の風穴現象を説明できる。鉱山における送風管は、縦坑 **a-c** と横坑 **c-d** の連結にあり (図5 A. Morlot 1847), 夏季に、横坑の坑口から著しく冷却された空気が出るが、冬季には低温の空気が横坑に入り込み、暖められた空気が縦坑上部の開口部から出る。この対流の原因は、地表面から2, 3 m下の岩石が外気温の年間変動と連動して温度が変動し、より深い所では常に一定に保たれた温度となり、その場所の年平均気温とほぼ一致することにある。空所における内部空気の温度は、暖かい気象の日には外気温より低く、寒い日にはそれより暖くなる。それ故、暖かい気象の日、空気の柱 **a-c** は横坑の坑口に至る **b-d** よりも重くなり、重い空気は縦坑内で沈み、横坑の坑口に押し出される。逆に、暖かい空気の場合は、吸い込まれる。吸い込まれた空気もまた、岩石によって徐々に冷



A：鉱山採掘における縦坑と横坑（Morlot 1847）



B：送風管現象の模式図（Fugger 1880）

図5 送風管現象・対流説に関する説明図（佐藤1999c）

やされ重くなるので、上方から下方への空気の流れが生じる。この速度と冷却の程度は、色々な要因、特に空所の大きさと形態によって左右されるが、いずれの場合も、上方と下方の開口部の比高と、内部空気と外気との温度差に比例している。寒い気象の場合、縦坑の空気は比較的暖かく、外気より軽い。それ故、この空気は縦坑の上部 **a** から出るが、一方で横坑入口 **d** では寒い空気がこのシステムに入り込

み、徐々に加熱されていく。もしも外気と内部の空気がほぼ同じ温度であるなら、空気の移動が生じなくなる。新たな移動への方向転換は、春季と秋季の暖かい日中と寒い夜間や一日の朝と夜に生じる。

崖錐または山崩れ地が比較的密に閉じられ、上方と下方だけが開口した空所システムの場合にも、上記と全く同様な状況が認められる。Keller (1839) と Morlot (1847) の研究に基づいた Fugger (1880) によるまとめを図 5 B に示す。この図は、急峻な岩壁の麓にある崖錐を示すが、次の仮定を伴う。すなわち、「岩壁が比較的大きく、硬く、崩落した岩屑が徐々に、あるいは稀にしか動かず、岩塊の剝離がわずかであるので、斜面下部は植生に被われ、通常の密な森林土壌が形成される。…b の岩壁付近では土壌が著しく少なく、多少とも新しい崩壊が生じている」。このために、外気が斜面の内部に入り込むことができる。ただし、自然状態では、岩塊堆積斜面において高い位置と低い位置に開口部を見つけられない場合があること、内部の空気が岩塊間を自由に対流できない場合があることなど、上記の対流を上手く説明できない場合がある。

送風管現象における空気の対流と温度変化に関する根本的な原因に加えて、個別に解明すべき点がある。送風管現象において下部の開口部から流出する空気は、内部の氷の存在を除き、最高の条件でも深い地下の一定温度、その場所の年平均気温まで冷却されるが、たいてい最低でも氷点より 2, 3℃ 高くなる。しかしながら、Saussure (1786) から Pfaff (1933) まで多数の観察記録があり、それらによると、氷が存在しない場合でも送風管現象における斜面下部の開口部では相当に低い温度が測定される。例えば、地中海気候の端にあるルガノ湖では Ebel (1805) によって、6 月に 2.3℃ が測定されている (Fugger 1880)。

送風管における氷形成の前提条件として、三相のいずれかの形での水の存在と、冬季の温度が長時間氷点下に下がる、その地域の気候的位置が挙げられる。寒冷的な空気は送風管システムの下部の開口部から侵入し、上昇するにつれて暖められるが、氷はとりわけ送風管の下部に形成される。そこに氷が長期間保存・維持され、暖かい年でも空気がそこで冷却されるようになるので、氷の融解に要求される熱はわずかで消費される。とりわけ、我々の興味深い崖錐や山崩れ地における送風管システムでは、圧倒的に、氷の形成が冬季から春季への変わり目に生じる。これらの季節には、雪と凍結した土壌層上部が融け、その結果、空所に水がしみ出て、そこで寒い夜に再凍結する。

ここまで述べた内容は、シュラドミングの高層湿原における観察結果と良く一致する。すなわち、夏季の暖かい日に湿原下縁部の岩塊間隙から冷気が流出すること、

そして冷涼な天候下および曇天下では空気の移動が停止すること、斜面下部に氷が形成され長期間保存されていること、斜面の上部と下部における地温が相違することである。

以上のように、Schaeftlein (1962) は、中欧における風穴現象をほぼ送風管システム・対流説によって説明できると概説している。これに対して、国内の風穴地は、ほとんどが斜面下部に認められるので、対流説は重要な仮説である。しかしながら、東ヌプカウシ山域などでは永久凍土説（夏氷説）も決して無視することができないので（佐藤1995a）、風穴現象のシステムに関する詳細な研究が待たれる。

引用文献

中部ヨーロッパに風穴植生に関する文献探索として、風穴植生が成立する地域の植生全般に関する文献を含んで孫引きを繰り返した結果、合計約150篇の論文がリストアップされた。しかしながら、本稿では、直接引用された文献に限って収録する。また、今後、国内の風穴植生との比較研究を進めるため、筆者が公表してきた文献を付記しておく。

- Aichinger, E. 1952. Fischenwaelder und Fichtenforste als Waldentwicklungstypen. *Angewandte Pflanzensoziologie* Wien, **7** : 5-178.
- Andergassen, G. 1981. Die Warmloeher auf dem suedlichen Auslaeufer des Mitterberges bei Pfatten. *Der Schlern*, **55**(1-6) : 158-159.
- Becherer, A. 1952. Eine Kaelteflora im Bereich der Brusasker Grotti (Puschlav). *Ber. Schweiz. Botan. Ges.*, **62** : 664.
- Bogenrieder, A. 1981. Alpenpflanzen im Mittelgebirge-der Felber im Schwarzwald. *Biologie in unsere Zeit*, **6** : 174-182.
- Canaval, R. 1893. Ein Eiskeller in den Karawanken. *Carinthia* II. **83** : 178-180.
- Ebel, J. G. 1805. Anleitung auf die nuetzlichste und genussvollste Art die Schweiz zu bereisen. ed. 2, 3. Zurich.
- Ellenberg, H. 1961. *Vegetation Mitteleuropas mit den Alpen in oekologischer Sicht*. Stuttgart, Ulmer.
- Ellenberg, H. 1996. *Vegetation Mitteleuropas mit den Alpen in oekologischer Sicht*. 6 Aufl., Stuttgart, Ulmer.
- Ellmauer, T. & G. M., Steiner. 1992. *Vegetationsoekologische Untersuchungen an einem Konderns-wasermoor in Tragoess (Steiermark)*. *Ber. nat.-med. Verein Innsbruck*, **79** : 37-47.
- Fenaroli, L. 1962. Una stazione di piante microtermiche in Val Cavallina (Prealpi Bergamasche). *Edizione insubriche*, Bergamo, 24p.
- Fugger, E. 1880. *Untersberg. Wissenschaftliche Beobachtungen und Studien*. 2. dtsh. oestr. Alpenverein, **11** : 117-197.
- Furrer, E. 1958. Die Edelkastanie in der Innerschweiz. *Mitt. schweiz. Anst. forstl.*

- Versuchsw., **34** : 84-182.
- Furrer, E. 1961. Ueber Windloecher und Kaelteflora am Lauerzersee(Schwyz). Ber. Geobot. Institut., Stiftung Ruebel, **32**(1960) : 83-96. Zurich.
- Furrer, E. 1966. Kuemmerfischtenbestaende und Kaltluftstroeme in den Alpen der Ost-und Inner-schweiz. Schweiz. Ztschr. f. Forstw. (Schweizerischen Zeitschrift fuer Forstwesen), **10** : 720-733.
- Furrer, E. 1972. Kaltluftvegetation im Waagtal(Schwyz). Ber. Geobot. Inst. ETH Stiftung Ruebel, Zurich, **41** : 21-24.
- Gueller, A. 1968. Das Eisloch an der Laegern. Naturf. Ges. Zuerich, **113** : 103-118.
- Keller, F. 1839. Bemerkungen ueber die Wetterloecher und natuerlichen Eisgrotten in den Schweizer Alpen. Neujahrsbl. d. Naturf. Ges. in Zurich, **41** : 1-10.
- [Keller, F. 1839. Ueber Wetterloecher oder Windhoehlen.] An die Zuercherische Jugend aud das Jahr 1839. Von der Naturforschenden Gesellschaft. [Neujahrsblatt, 41. Stueck.] Ein grosser Teil der schwer erreichbaren Ausfuehrungen Kellere ist uebernommen in Marbachs Physikalisches Lezikon, ed. 2(1854), **3** : 836.
- Lauber, K. and G. Wagner 1996. Flora Helvetica. 1613p. Haupt, Bern.
- Mayer, H. 1961. Maerchenwald und Zauvberwald im Gebirge. Zur Beurteilung des Blockfichtenwaldes (Asplenio-Piceetum). Jb. Ver. z. Schulze der Alpenpflanze und -Tiere, **26** : 22-37.
- Mayer, H. 1964. Bergsturzbesiedlungen in den Alpen. Mitteilungen aus der Staatsforstverwaltung Bayerns, **34** : 191-203.
- Morlot, A. 1847. Erlaeuterungen zur geologischen Uebersichtskarte der nordoestlichen Alpen. Wien.
- Moor, M. 1954. Fichtenwaelder im Schweizer Jura. Vegetatio, **5/6** : 542-552.
- Moor, M. & Schwarz, U. 1957. Die kartographische Darstellung des Creux du Van-Gebietes (Jura des Kantons Neuenburg). Beitr. z. Geobot. Landesaufn. d. Schweiz, **37** : 1-114.
- Morton, F. 1958a. Die Eisloecher von Eppan in Ueberetsch. Natur und Volk (Frankfurt a. Main), **88** : 413-420.
- Morton, F. 1958b. Bei den Eisloechen von Eppan. Universum, Natur und Technik(Wien), **13** : 268-270.
- Morton, F. 1959. Mikroklimatische Untersuchungen am *Rhododendron ferrugineum* L. im Bergsturzbereiche der Eppaner Gand. Der Schlern, **33** : 339-342, 424-426. Bozen.
- Morton, F. 1962. Die Eisloecher bei Eppan. Natur und Land (Wien), **48** : 46.
- Mueller, K. 1948. Vegetation der Eisloecher. In: Mueller, K. (ed. Der Feldberg im Schwarzwald. Naturwissenschaftliche, landwirtschaftliche, forstwirtschaftliche, geoschichtliche und siedlungs-geschichtliche Studien. 1948. Freiburg i. Br., 284-287.
- Pfaff, W. 1933. Die Eisloecher in Ueberetsch. Ihre Vegetationsverhaeltnisse und ihre Flora. Schlernschriften, **24** : 1-72. Innsbruck..

- Punz, W., Maier, R., Sieghardt, H. et al. 1989. Mikrometeorologische und oekologische Untersuchungen in der Eppaner "Eisloechern". Der Schlern, **63**(5) : 261-278.
- Richard, J.-L. 1961. Les forets acidophiles du Jura. Mat. pour le leve geobot. de la Suisse (Beitr. z. geobot. Landesaufn. d. Schweiz), **38** : 1-164.
- Richard, J.-L. 1965. Extraits de la Carte Phytosociologique des Forets du Canton de Neuchatel. Commission Phytogeographique de la Societe Helvetique des Sciences Baturelles, **47** : 5-46.
- Saussure, H. B. 1786. Voyages dans les Alpes. Bd. 3.
- Schaeftlein, H. 1962. Ein eigenartiges Hochmoor in den Schladminger Tauern. Mitt. d. Naturwiss. Vereins fuer Steiermark, **92** : 104-119. Graz. (Ferner in: Natur und Land, **49**. Heft 5 : 114-118.1963.)
- Schindler, H., Kinzel, H., Burian, K. et al. 1976. Oekophysiologische Untersuchungen der Matzen-Eisstandorte. Ein Exkursionsbericht des Pflanzensoziologischen Institutes der Universitaet Wien. Carinthia II, **166**(86 Jg.): 269-307. Klagenfurt.
- Spathelf, J. A. 1994. Die Eisloecher im Feldberggebiet, Mikrometeorologische und vegetations kundliche Untersuchungen. Albert-Ludwigs-Universitaet Freiburg (Diplomaarbeit). 68p. Breisgau.
- Starlinger, F. 1992. Rotfoehren- und Spirkenwaelder am Fernpass (Tirol). Tuexenia, **12** : 67-91. Goettingen.
- Steinbach, A. 1954. Beobachtungen und Messungen an Eishoehlen im Westerwald und in der Eifel. Jahrb. d. Nassauischen Ver. f. Naturkunde, **91** : 8-36.
- Streiff-Becker, R. 1945. Die Windloecher bei Ennetbuehls. Mitteil. d. Naturf. Ges. Kt. Glarus, **7** : 247-255.
- Ullmann, H. 1970. Vegetation und Klima des Hochmoores Rotmoos bei Weichselboden in der Obersteiermark. Dissertation Univ. Wien. 169p.
- Weiss, E. H. 1958 Eine eisfuehrende Schutthalde in den Gailtaler Alpen. Carinthia II, **68**(148) : 62-63. Klagenfurt.
- Wilmanns, O. 1971. Verwandte Zuege in der Pflanzen- und Tierwelt von Alpen und Suedschwarzwald. Jb. Ver. Schutze Alpenpflanzen und -Tiere, **36** : 36-50.
- 佐藤謙 1994. 土幌高原の自然は極めて特殊である. 北海道の自然, **32** : 48-53. 北海道自然保護協会. 札幌.
- 佐藤謙 1995a. 北海道の風穴植生概説. 上土幌町ひがし大雪博物館研究報告, **17** : 107-115. 上土幌.
- 佐藤謙 1995b. 山の風景ウォッチング③, 危機に瀕する大雪山系の稀少な自然. 梅澤俊・瀬尾央著「新版・空撮登山ガイド1, 北海道の山々」, 83. 山と溪谷社. 東京.
- 佐藤謙 1996. 大雪山の不思議な自然を守れ. 週間金曜日, **146** : 50-52. 東京.
- 佐藤謙 1997. 東ヌプカウシ山域の多様な自然. 北海道の自然, **35** : 24-28. 北海道自然保護協会. 札幌.
- 佐藤謙 1998a. 土幌高原道路全線トンネル案の環境影響評価に関する問題点—工学的発想で自然への影響を無視. 北海道の自然, **36** : 30-37. 北海道自然保護協会. 札幌.

- 佐藤謙 1998b. ヨーロッパの風穴植生を観て (その1). 北海道自然保護協会会報(NC), **104**: 8-9. 北海道自然保護協会. 札幌.
- 佐藤謙 1999a. ヨーロッパの風穴植生を観て (その2). 北海道自然保護協会会報(NC), **105**: 8-9. 北海道自然保護協会. 札幌.
- 佐藤謙 1999b. ヨーロッパの風穴植生を観て (その3). 北海道自然保護協会会報(NC), **106**: 12-13. 北海道自然保護協会. 札幌.
- 佐藤謙 1999c. ハンス・シェフトライン著「シュラトミング・タウエルン山地の特殊な高層湿原」(全訳). 北海学園大学学園論集, **99**: 93-115.
- 佐藤謙 1999d. オーストリアのシュラトミング風穴地. 北海道の自然, **37**: 72-76. 北海道自然保護協会. 札幌.
- 佐藤謙 2000. ユニークな生態系, 風穴地帯は未来に残すべき大きな遺産. 北海新聞社編「検証士幌高原道路と時のアセス」, 113-128. 北海道新聞社. 札幌.
- 佐藤謙・工藤 岳・植村 滋 1993. 定山溪漁入ハイデの風穴植生. 日本生態学会誌, **43**: 91-98.
- 佐藤謙・紺野康夫 1997. 東ヌプカウシ山域の多様でユニークな自然. 大雪山のナキウサギ裁判を支援する会編「大雪山のナキウサギ裁判」, 131-173. 緑風出版. 東京.



1 A : Creux du Van 全景



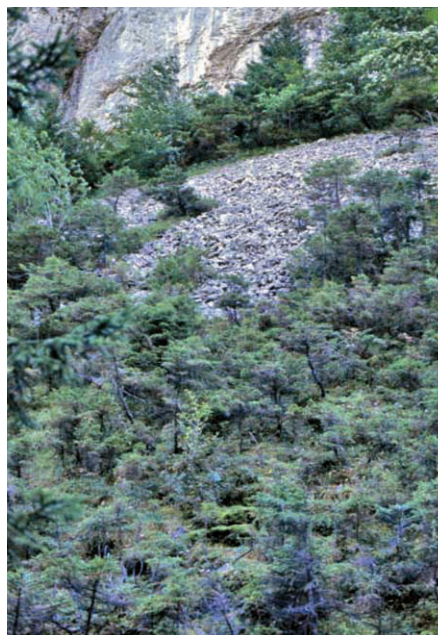
1 B : チョウノスケソウ母種



1 C : *Ranunculus alpestris*



2 A : Blueltoebel 全景



2 B : ヨーロッパトウヒ萎縮木群落



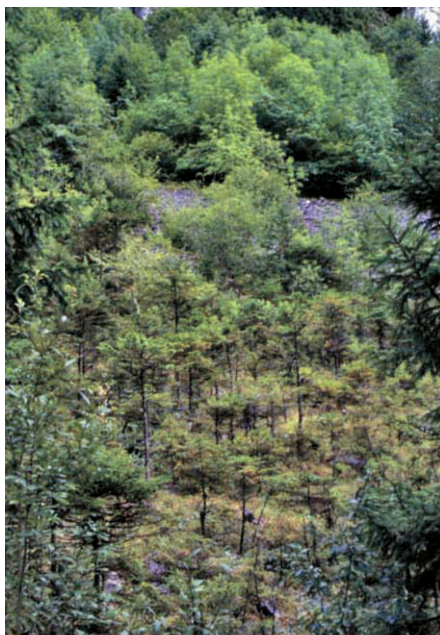
2 C : チョウノスケソウ母種と *Carex firma*



3 A : Waagtal 採石場



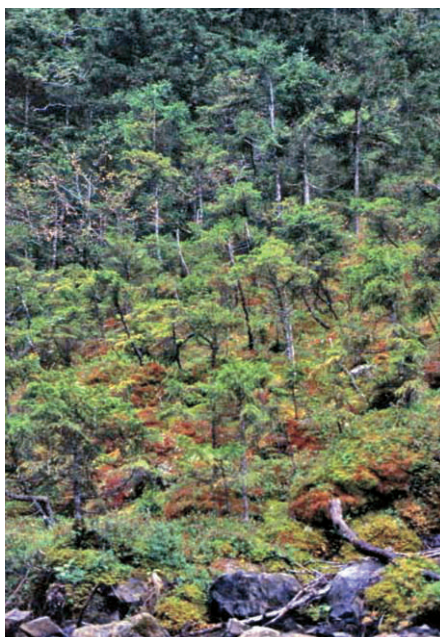
3 B : 斜面下部の風穴地



3 C : ヨーロッパトウヒ萎縮木群落



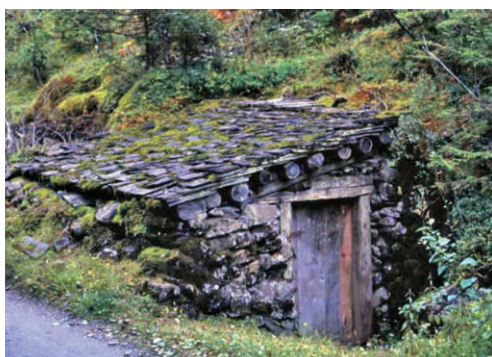
4 A : Untersachefen 全景



4 B : ヨーロッパトウヒ萎縮木群落



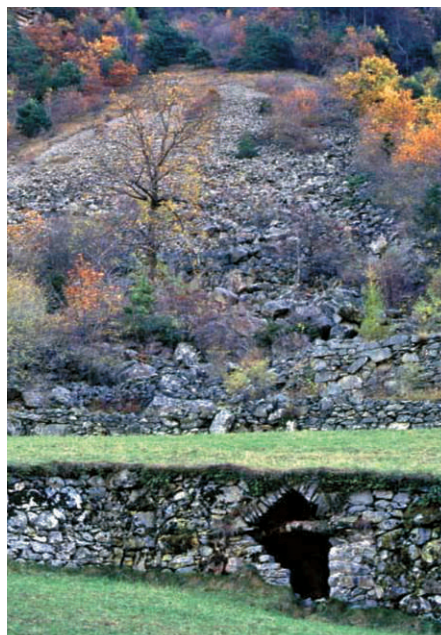
4 D : *Arabis alpina*



4 C : ミルク貯蔵小屋



5 A : Brusio 全景



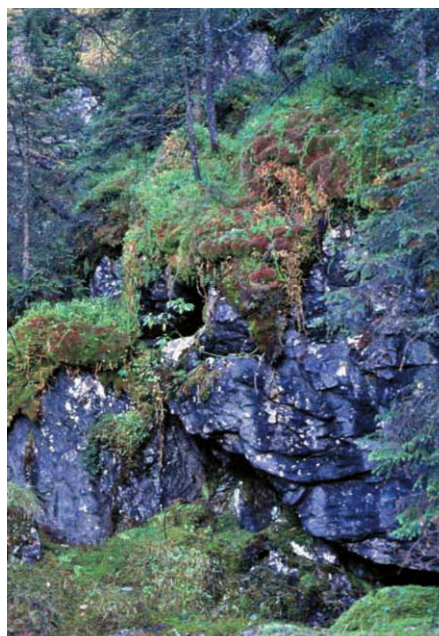
5 B : 食料貯蔵庫 Grotti



6 A : Schwarzwald ヨーロッパトウヒ林



6 B : Willmanns 名誉教授と Bogenrieder 教授

7 A : Berchtesgarden
メルヘンの森 1

7 B : メルヘンの森 2



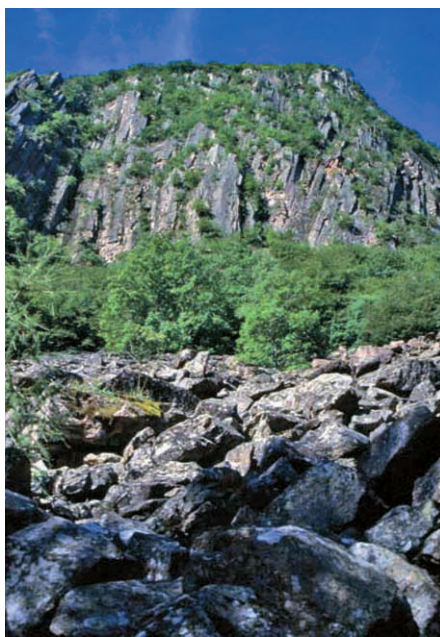
8 A : Schladming 全景



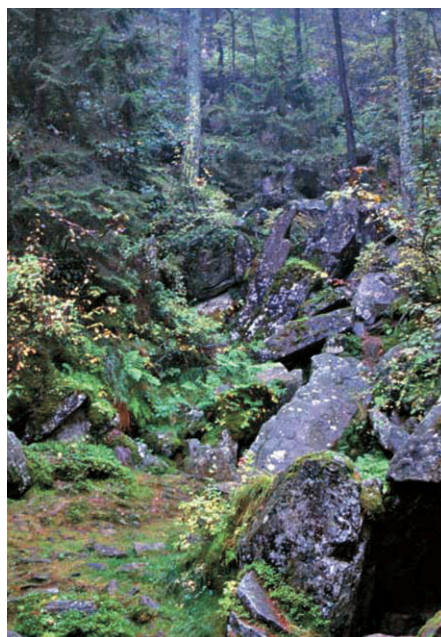
8 B : ヨーロッパトウヒ萎縮木とスギバミズゴケ



8 C : キョクチカンバ *Betula nana* (澤田結基氏撮影)



9 A : Eppan 全景 (澤田結基氏撮影)



9 B : 高山草原



10A : Val Cavalina 全景

10B : *Tofieldia calyculata*