

フロント・レンジ，インディアン・ピークス周辺の 残雪下の礫質ペイブメント地形の発達過程*

原 芳 生**

I はじめに

表層の礫または基盤岩石の表面が，舗道の敷石のように平坦な面を見せて並んでいる状況をペイブメント地形と呼んでいる。それらの発達する地域は，寒帯・亜寒帯・温帯・乾燥帯と多くの地域におよび，その形成要因もいろいろと考えられている。また，現成のものも化石化しているものも，どちらも報告されている。

ペイブメント地形は，古くは Spencer(1890)¹⁾ と Russel(1890)²⁾ に報告されている。それ以来数多くの報告があるが，総合的に体系だててペイブメントの形成過程を説明しているものは見あたらない。さらに，その用語「ペイブメント」の使用されかたも各研究者で統一されていない。そこで本研究ではペイブメントの形成の過程を考察する第一段階として，ペイブメント地形の分類を行い，各種のペイブメント地形の違いを明確にする。

さらに多種類あるペイブメントの中で，周氷河地域で発達する残雪下の礫質ペイブメントを調査研究対象としてとりあげることににより，上から押しつけられて平坦化するという作用だけでなく，そのほかにどのような条件（堆積物・水流など）がペイブメント形成に必要なかということを考察する。また，この地形は，積雪が直接的・間接的に多くの方法で作用していると考えられる。故に，積雪がどのように

地形形成作用に影響しているかという nival process を検討する上でも条件がよい。周氷河地域のペイブメント地形に関しては，Washburn (1980)³⁾ がその形成のメカニズムについてまとめているが，未だ確かめられていない。

II ペイブメント地形の分類と従来の研究動向

① pavement（ペイブメント）地形とは

自然状態で発達するペイブメント(pavement：舗石⁴⁾，舗道の敷石状)地形には，大別すると，その構成物質が基盤岩石（の表面）よりなるものと，礫が敷き詰められて，まさしく舗道の敷石状になるものの2種類が存在する。前者は，rock pavement, limestone pavement などと呼ばれ，後者は stone pavement, boulder pavement などと呼ばれている。しかし，その名称はその外にも約20種類(Tab. 1)あり，その使用方法は，研究者によって異なっており統一された見解はない。

② ペイブメント地形の分類

ペイブメントの形成過程を考察するために，世界各地でどのような発達がみられるかを正確にとらえる必要があろう。そこで本論では，まず，従来報告されてきたペイブメント地形の分類を行った。前節で示した基盤岩石よりなるものを基盤ペイブメント《bedrock pavement》，礫が敷き詰められたものを礫質ペイブメント《stone pavement》と，その構

* 本報告は1984年度日本地理学会春季学術大会および1987年11月の立正地理談話会に於て発表した内容を再構成したものである。

** 法政大学

Tab. 1 The list of terms for pavement forms

1. alpine subnival boulder pavement	(AS)
2. bedrock pavement	(BR)
3. boulder pavement	(BO)
4. desert pavement	(DS)
5. detrital pavement	(DT)
6. erosion pavement	(EP)
7. flattened pavement	(FP)
8. fluvial boulder pavement	(FB)
9. glacial pavement	(GP)
10. ice pavement	(IP)
11. ice-smoothed pavement	(IS)
12. limestone pavement	(LP)
13. marine boulder pavement	(MB)
14. nivation pavement	(NP)
15. pavement ground	(PG)
16. rock pavement	(RP)
17. serir pavement	(SR)
18. snow-patch pavement	(SP)
19. stone pavement	(SN)
20. striated boulder pavement	(ST)

成物質により分類する。

基盤ペイブメントとは、limestone pavement のように、氷食を受けてかなり平坦になった石灰岩の表面が、その後に露出し、節理が溶食を受け溝ができ舗石状になったものや、rock pavement のように、熱帯地域での基盤岩の風化作用の基底面（風化前線）⁵⁾ やその後の風化物質の侵食作用によって現れてきたインゼルベルグの上面などである⁶⁾。

礫質ペイブメントは、基盤ペイブメントより多くの種類・名称があり、より多くの気候地域で発達している。最も典型的な礫質ペイブメントにおいては、構成礫の多くのものがそれらの平滑な面を上に向け、まさしく敷石のように見えるものである⁷⁾。しかし、単に地表面が礫に覆われている岩海 (block field, Blockmeer) 状の地形を指してペイブメントとしている報告もある⁸⁾。これらはお互いに、どちらかのペイブメントが変形していった場合も考えられる。以下に周氷河性のペイブメント以外の礫質ペイ

ブメントについては、それぞれ簡単に分類・説明する。

乾燥地域に発達する desert pavement, serir pavement は、主として風食によって表面近くの細粒物質が除去され、pebble 大の礫が集積したもので、膠結している場合もある。平面的には一番広くひろがっている。

glacial pavement 又は ice pavement と限定されて使用されたり、あるいはただ単に boulder pavement, stone pavement とも使われている、氷河の氷の作用⁹⁾ によってできる礫質ペイブメントがある。これらは、氷成堆積物 (glacial till) の中の礫の集中した層で、異なった時期の氷河作用を示す指標とされている。氷河の後退期に、融氷水などにより細粒物質が除去され、礫の集積層が表面にできる。次の氷河の前進によって平坦化され上位にティルが堆積し、その上面には striation (擦痕) を多く残している場合が多い。故に、後の氷河水の流動方向を堆定するのに用いられる。これらは、かつて氷に覆われた地域（主として大陸氷）のヨーロッパや北アメリカで報告されている。stone line や lag concentrates と同義に使用されることもある¹⁰⁾¹¹⁾¹²⁾。

Shaw (1929)¹³⁾ が erosion pavement と呼んだペイブメント地形は、面状侵食 (sheet erosion) や雨溝侵食 (rill erosion) によって礫が地表面に残されて集積した状態を示している。Ruhe (1975)¹⁴⁾ は lag concentrates や stone line と呼ばれているものもそうだとし、侵食面 (erosion surface) の一種であり、その存在の指標としている。温暖・多湿な気候環境下の形成を考えている。

細粒物質の除去がなくとも、Vertisols (膨潤性粘土質土壌) 中において、shrink-swell (周期的な乾燥—湿潤¹⁵⁾ の変化) 作用により、攪乱 (churning) が発生し pebble~boulder 大の礫が土壌表面に集積してくる stone pavement を Johnson & Hester (1972)¹⁶⁾ は、カリフォルニアの地中海性気候の地域

で報告している。

③ 周氷河ペイブメント

ペイブメント地形の中でも、周氷河作用によって形成されたペイブメント（周氷河ペイブメント：periglacial pavement）が種類も多く¹⁷⁾、その形成作用も複雑であり、よく発達したペイブメントを¹⁸⁾形成している。その平坦化作用は、雪や氷河水以外の氷（海水・湖水・河川氷・icing による氷）などによる。前述したように、それらの形成メカニズムについては、Washburn (1979)¹⁹⁾が、それまでの研究から考えられるプロセスをまとめているだけで、確かめられてはいない。

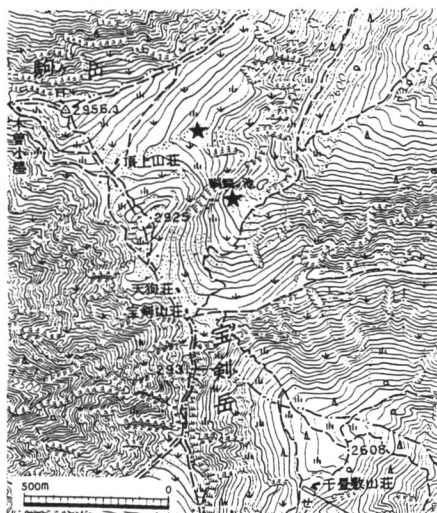
nivation pavement, snow-patch pavement, subnival boulder pavement などは、基盤岩の高まりの風下側や雪食凹地などの、雪が他の場所より多量に吹き溜るところ（雪渓・残雪地）に発達している。表面の平坦化作用は、その多量の積雪の重みによると考えられる。この地形は世界各地の周氷河地域（極地・亜極地・高山地域）で発達しているが、高山地域のものを White (1972)²⁰⁾は、alpine sub-

nival boulder pavement とよんでいる。

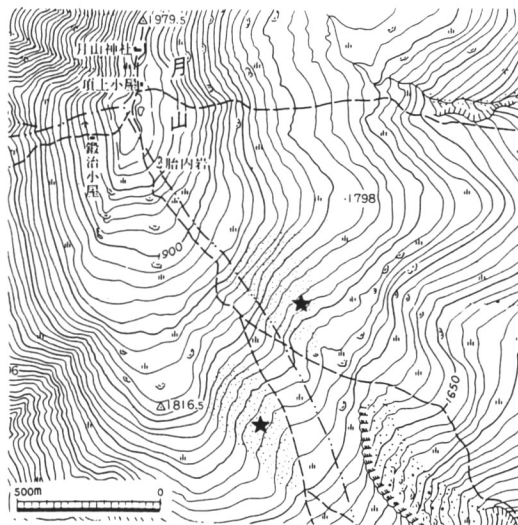
日本においても、中部地方から北海道にかけての高山地域で発達しており、小林国夫 (1955)²¹⁾や原芳生 (1983)²²⁾などの報告がある。筆者が調査した中央アルプス木曽駒ヶ岳²³⁾、東北地方月山のペイブメントを、Fig. 1 の地形図にその位置を示しておく。木曽駒ヶ岳では、頂上付近の鞍部の雪食凹地底に、月山では越年性の残雪付近の階段状の地形の上面に、いずれも 5~20 m と小規模であるが発達している。その他、北アルプスの立山の山崎カール内のモレインの内側に、大雪山系北鎮岳、北海岳の東方の小さい谷の残雪地に確認されている。

この雪渓下に発達するペイブメント地形については、White (1972)²⁴⁾によるロッキー山脈南部のコロラド・フロント・レンジ (Colorado Front Range) での報告があり、前述の Washburn²⁵⁾もその報告を利用している。しかし White もその形成プロセスを検証したわけではない。

極地・亜極地の海岸・湖岸には、冬期間に結氷したり流水として流されてきたりする海水・湖水によ



Mt. Kiso-Komagatake



Mt. Gassan

★ pavement contour interval = 10m

Fig. 1 Location map of pavements in Japanese mountains

って、ペイプメントが形成される。緩傾斜な礫質の堆積物の海岸・湖岸に、海流や風による運搬や、湖水の膨張によってのし上げてきた水が、地表面を押しつけることによって平坦な礫の面(ペイプメント)ができる²⁶⁾。後氷期のアイソスタティックな運動によって隆起をつづけている海岸では、化石化したペイプメントが数段見られるところもある²⁷⁾。単に stone pavement, boulder pavement ととも使われるが, marine boulder pavement, ice-smoothed pavement, flattened pavement などと使用されるものなどが、それらに相当する。

同じように、河川水によっても河岸や、中州、河口付近の潮間帯の河床に融水期に移動する河川水によって平坦な礫質のペイプメントが形成される。カナダ、アラスカの河川での報告が多い²⁸⁾²⁹⁾³⁰⁾。筆者も、フィンランド北部(ラップランド)のケボ(Kevo)付近における stone pavement を報告³¹⁾した。

湧水してきた地下水が、氷点下の大気に冷やされてひらたい水体ができる、icing の作用によっても、その氷点下にペイプメント地形の形成が報告されている³²⁾³³⁾。

III インディアン・ピークス周辺の残雪下の礫質ペイプメント地形

① インディアン・ピークス周辺の alpine sub-nival boulder pavement の分布と類型

ペイプメント地形の形成プロセスを解明するために本論では、多くの作用が働いていると考えられることから、周氷河ペイプメントの中でも、残雪下に発達する礫質ペイプメントをとりあげた。その残雪下のペイプメントがまとまって分布し、その他の地形の調査、自然環境のデータなどが豊富にあるコロラド・フロント・レンジのインディアン・ピークス(Indian Peaks) 周辺を調査地域³⁴⁾に選んだ。主として定量的な調査を行い、その一部は Hara & Thorn(1982)³⁵⁾に報告した。本論では、周囲の周氷

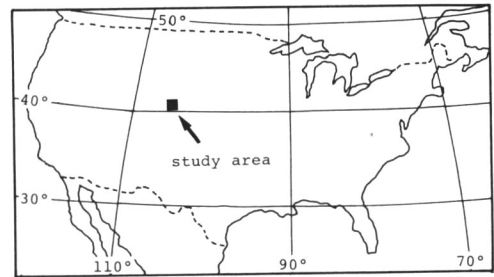


Fig. 2 Index map of study area

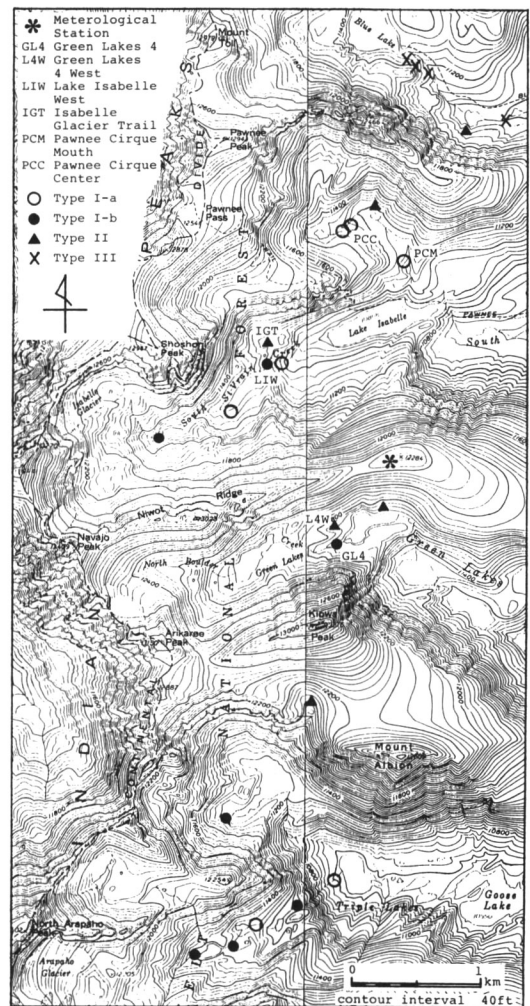


Fig. 3 Distribution of pavements in the Indian Peaks region (eastern slope)

河地域との比較など、その後の調査結果を含めて、残雪下のペイプメントの形成プロセスを考察する。

インディアン・ピークス地域は、ロッキー山脈南部（コロラド州）にあり、アメリカ大陸の分水嶺（Continental Divide）の一部のフロント・レンジに位置している（Fig. 2）。ペイプメントの多く分布している本調査地域は、その東側にあたり、ほぼ東西方向に支脈と氷食谷が交互に平行している地域である。

この地域内の残雪下のペイプメント地形の分布は、筆者の調査によれば、Fig. 3 に示すとうりである。氷食谷底や圏谷底の基盤岩の高まりの下部の残雪下に発達している。特に積雪の影響を定量的に考察するために、ペイプメントを3タイプに分類した。

タイプⅠとは、ペイプメント内に小水流のあるもので、さらにこれを残雪の消雪のしかた（ペイプメ

ントの平面形と、その場所の卓越風向の関係）で、(a)・(b) の二つに細分した（Fig. 5）。(a) は卓越風がペイプメントの水流に対して横方向から吹くもので、風上側の部分（Zone 2, Fig. 5）と風下側の部分（Zone 3）では積雪量の差が大きくなる。当然、Zone 1 の水流の部分部分が最も早く消雪する。(b) は卓越風が水流とほぼ同じ方向から吹くもので、水流の両側（Zone 2）での積雪量の差はほとんどない。しかし、風下側になるにしたがい積雪量は減少していく。

タイプⅡのペイプメントは、はっきりとした水流がペイプメント内にないもので、積雪量は風下側にむかって減少していくが、タイプⅠのような、場所（Zone）による積雪の大きな差は生じてこない。

タイプⅢはペイプメント内に小水流を持つが、ペイプメントの表面が階段状をしている特殊なもの

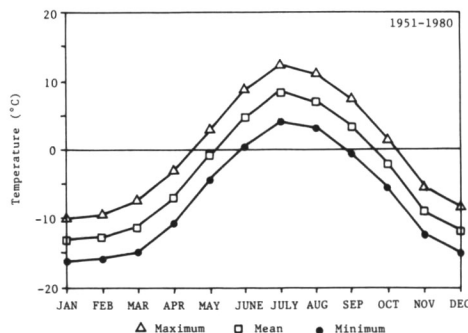
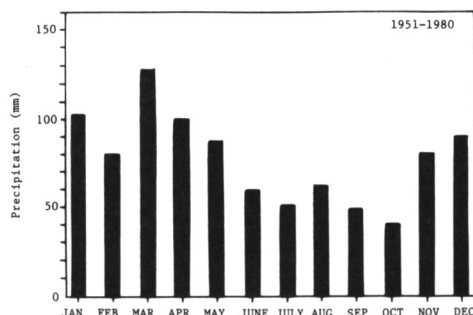


Fig. 4 Average annual temperature values and precipitation totals at Niwot Ridge

(after Greenland, 1987)³⁶⁾

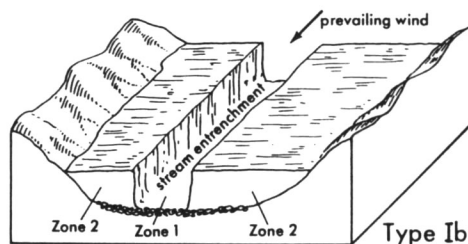
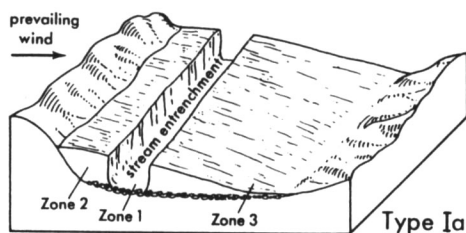


Fig. 5 Schematic zonation of Type Ia and Ib pavements

(after Hara & Thorn, 1982)³⁵⁾

で、今回の調査の対象からは除外してある。

② 調査方法

前節で述べたように、残雪下に発達するペイプメントは、いろいろな作用が働いて形成されている。しかし、その形成機構は未だ明らかにされていない。とくに積雪がどのように地形形成作用に影響しているかという nival process を考察する上で、このペイプメント地形は都合がよい。雪のグライドおよび重さがあること、水分の供給源（凍結－融解作用のためと細粒物質の洗い出し）、植物の生育を規制する役割など、積雪の持つ直接的・間接的作用を備えていると考えられる。

積雪がどのようにペイプメントの形成に影響しているか、さらにその他にどのようなプロセスが働いているかを定量的に検討するため、タイプⅢを除く各タイプ（3種類）から6個のペイプメントを選び、次の各項目について計測を行った。さらに、その発達の過程を考察するために、3ヶ所のペイプメントでは、周囲の地形との比較も行った。

それぞれのペイプメントの各 Zone 毎に、1m 四方の計測地点を何ヶ所か設けて、そこでペイプメントの平坦度（surface roughness）、細粒物質までの深さ（depth to fines）、ペイプメント構成礫の長径・円形度などを測定した。

平坦度とは、ペイプメントの表面がどの程度たいらになっているか、つまり、個々の構成礫が平滑な面を上に向け、全体として平坦になっている度合を

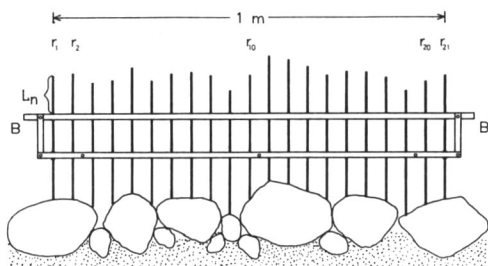


Fig. 6 Schematic diagram of micro-topographic profile gage ($L_1 = L_{21} = 16 \text{ cm}$)

現す指標のことである。残雪下のペイプメントの場合では、積雪の重さによって、上から力が加わると平坦さが増すと考えられる。実際には、Fig. 6 に示すような地表面の微起状を計測する器具³⁷⁾を用いて、1m 四方の各計測地点の中心を通り、最大傾斜の方向に測定した。図6の r_1 から r_{21} までの各ロッドの B—B' のバーより上に出た部分の長さ (L_1 から L_{21}) を測定し、その標準偏差 (SD) を求めて、その値を平坦度とした。

細粒物質までの深さは、各計測地点で5ヶ所（四隅と中心）測定した平均値で示す。これは、Fig. 7 のようにペイプメントの表面（構成礫層の上面）から、その下位にある砂やシルトなどの細粒物質までの長さである。構成礫が表面近くに集積し、平滑な面を上に向けるには、ある程度は表面から細粒物質が除去されていなければならないが、礫を動かすには凍上（up-freezing）や攪乱などの淘汰作用（sorting）が必要となろう。それには、主としてシルト大のどの細粒物質がどの程度礫層下に存在しているかが問題となり、その深さが一つの目安となる。

ペイプメント構成礫の礫形・長径は、1m 四方の計測地点で、最少15個以上の礫を大きいものから摘出して計測した。礫形は Powers (1953)³⁸⁾ の円形度（roundness scale）を用いて、円礫・亜円礫・亜角礫・角礫の4種類に区分した。これらの礫の計測は、ペイプメント構成物の起源などの地質条件や、移動距離・移動形式などの地形条件がどのようなものであるかを推測するために行った。

以上のような計測に利用したペイプメントは、図

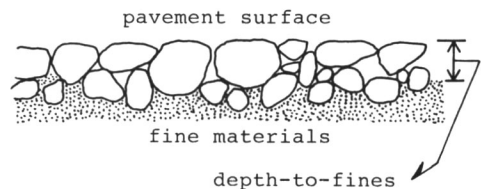


Fig. 7 Cross section of pavement

3の中に略号で示してあるが、

タイプ I (a)

Pawnee Cirque Mouth (P-C-M)

Pawnee Cirque Center (P-C-C)

タイプ I (b)

Green Lakes 4 (G-L-4)

Lake Isabelle West (L-I-W)

タイプ II

Isabelle Glacier Trail (I-G-T)

Green Lakes 4 West (L-4-W)

の各ペイプメントである。これらのペイプメントは、前述のように、フロント・レンジの東側に東西方向に発達する氷食谷底や圏谷底の基盤岩の高まりの下部の残雪下に発達している。4 ペイプメントについては、Fig. 8, Fig. 9 にその模式図および計測地点が示してあるが、P-C-C と L-I-W のペイプメントについては図示していない。P-C-C ペイプメントは、P-C-M ペイプメントの北西 500 m にあり、高度は 60 m 高い。表面の傾斜は 3~7 度、長さは 20 m あるが、平坦な面の発達は部分的である。L-I-

Tab. 2 Characteristics of research plots at Isabelle Glacier Trail and Green Lake 4 pavements and the adjacent areas

	Plot No.	Surface Roughness (S.D.)	Boulder						Depth-to-fines (cm)	Slope Angle (°)
			Shape				Size* ² (cm)	n.* ³		
			A.	S.A.	S.R.	R.* ¹ (%)				
Isabelle Glacier Trail pavement and the adjacent areas	1	1.2980	10.5	34.2	50.0	5.3	12.3	39	3.5	10
	2	0.9664	4.3	48.9	44.7	2.1	13.5	47	4.8	9
	3	1.3051	10.9	41.3	43.5	4.3	12.9	46	4.8	6
	4	1.1661	10.2	44.9	44.9	-	11.3	49	5.0	8
	5	1.4085	11.9	42.4	42.4	3.4	10.1	59	4.6	6
	6	1.5542	9.4	43.8	46.9	-	13.4	32	3.5	3
	7	1.1431	-	56.3	40.6	3.1	14.9	32	4.3	4
	8	1.6513	14.3	50.0	33.3	2.4	13.6	42	7.4	6
	9	1.9924	11.1	72.2	16.7	-	17.9	18	9.3	11
	10	2.3832	10.5	42.1	42.1	5.3	22.5	19	12.5	4
	11	2.8891	-	55.0	45.0	-	29.5	20	11.7	2
Green Lake 4 pavement and the adjacent areas	1	3.7130	-	41.9	54.8	3.3	20.4	31	15.9	5
	2	1.2851	-	53.2	44.7	2.1	16.5	47	10.3	4
	3	0.8914	6.6	52.6	40.8	-	9.2	76	-	1
	4	1.7772	-	51.7	48.3	-	15.3	60	9.8	4
	5	4.7726	4.0	48.0	44.0	4.0	23.3	25	-	1
	6	0.6493	25.8	35.5	38.7	-	9.9	31	0.0	3
	7	1.4073	20.0	36.0	40.0	4.0	12.9	25	0.0	1
	8	5.4222	47.6	28.6	19.0	4.8	24.4	31	-	1
	9	1.4073	9.7	48.4	41.9	-	22.1	21	10.1	2

*¹ : A.= Angular, S.A.= Subangular, S.R.= Subrounded, R.= Rounded

*² : Average size of stones measured.

*³ : Total number of stones measured.

W ペイブメントは、I—G—T ペイブメントのすぐ南、Isabelle 氷河から流れてくる川のところにあり、傾斜 5～10 度で 10 m 以上の長さがある。

③ 調査結果

各計測地点での測定結果については Fig. 8, Tab. 2 に一部示してある。三種類のタイプのペイブメントの代表を一つずつとりあげ、その表面形態と断面、各計測地点毎の平坦度と細粒物質までの深さを Fig. 8 に示す。細粒物質までの深さは、水流部分 (Zone 1) では一部計測不可能なところもあるが、タイプ I での (a) も (b) も、明らかに Zone 1 が深くなっている。また、タイプ II のペイブメントは、タイプ I のペイブメント ((a), (b) 共に) よりも総じて細粒物質までの深さが浅い (Tab. 3)。これらは、統計的にも、それぞれ 10 % レベル、1 % レベル

の有意水準で明らかに差が認められる³⁹⁾。しかし、タイプ II (I—G—T) においては、各計測地点での深さの差は認められなかった。これらは、細粒物質の除去は水流によることを、示しているといえる。

平坦度においても、Zone 1 は Zone 2, 3 よりも平坦さが少ない。タイプ I (b) でははっきりと出てこなかったが、タイプ I (a) では統計的な差 (5 % レベル) が認められた。さらに、タイプ I (a) では、Zone 2 と Zone 3 でののはっきりとした統計的な差異は認められなかった。つまり、Zone 1 は模式図 (Fig. 5) のように、明らかに水流によって早く消雪し、平坦度も悪くなるが、Zone 2, 3 のあいだでは、はっきりとした平坦度の差は存在しなかった。

Tab. 4 にあるように、全体的に円礫 (R) はひじょうに少ないが、タイプ II においては、タイプ I と

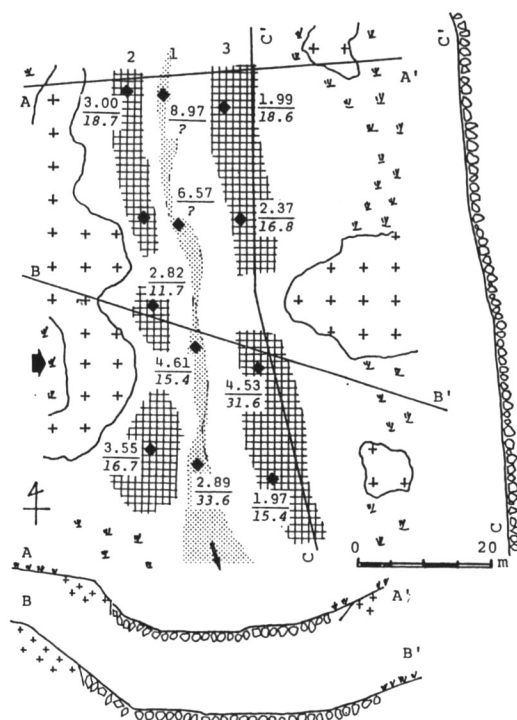
Tab. 3 Depth to fines within pavements (cm)

Pavements	Type	Measure			
		Zones	mean	SD	n
Pawnee Cirque Mouth	Ia	1	23.5	10.3	9
		2	15.8	4.2	15
		3	21.9	9.0	15
Pawnee Cirque Center	Ia	1	27.0	3.0	5
		2	16.9	7.0	10
		3	19.0	9.3	10
Green Lake 4	Ib	1	24.5	15.3	14
		2	16.7	6.1	19
		3	NA	NA	NA
Lake Isabelle West	Ib	1	NA	NA	NA
		2	18.0	7.9	18
		3	NA	NA	NA
Isabelle Glacier Trail	II	1	NA	NA	NA
		2	4.2	1.2	30
		3	NA	NA	NA
Lake 4 West	II	1	NA	NA	NA
		2	12.8	3.6	9
		3	NA	NA	NA

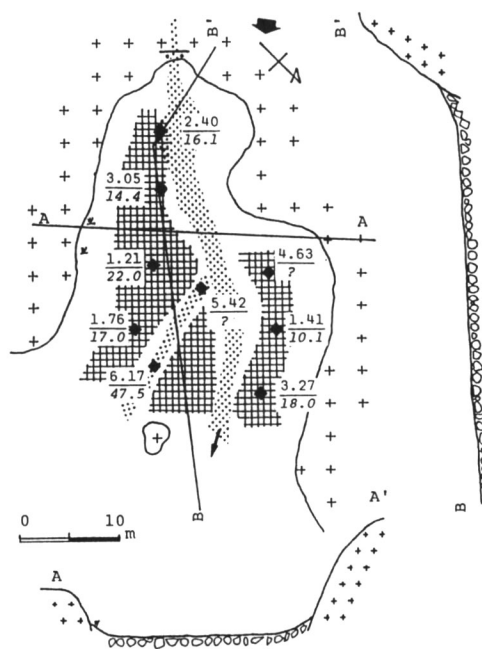
NA=Not applicable

SD=Standard deviation

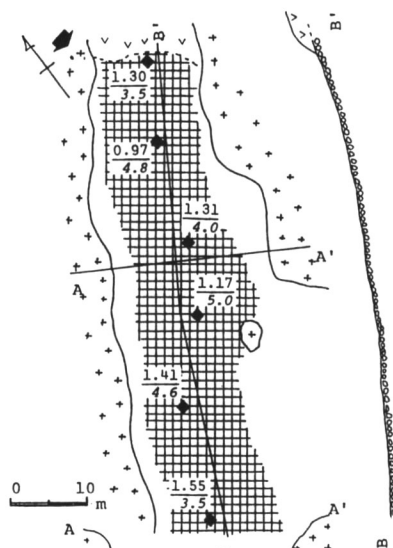
n=Number of measures



Pawnee Cirque Mouth (type - Ia)



Green Lake 4 (type - Ib)



Isabelle Glacier Trail
(type - II)

$\frac{1.99}{18.6}$ Roughness
Depth-to-fines

$\boxed{+}$ bedrock
knob or
bluff

w w vegetation
cover

||||| clear
pavement
surface

~~~~~ stream

\blacklozenge sample
plot

\blacktriangle direction
of snow
drift
prevailing
wind

v v snow bank

$\left. \begin{array}{l} 1 \\ 2 \\ 3 \end{array} \right\}$ Zones

vertical
exaggeration:
X 1.25

Fig. 8 Sketch maps of pavements in the Indian Peaks Region

ちがい、角礫 (A) も明らかに少ない (5 % レベル)。G-L-4 (タイプ I (b)) ペイプメントでは Zone 1 と Zone 2, P-C-M (タイプ I (a)) ペイプメントでは Zone 1 と Zone 2, 3 で差が認められる (5 % レベル)。つまり、水流部の方が少しだけ角礫の割合が多くなっている。これらのことから、ペイプメント構成礫の起源は、現在の水流 (河川) によって運搬されてきた礫ではないことを示している。ペイプメントが発達している場所から考えると、氷成の堆積物や、谷壁からの供給、その場での風化物質であろう。

G-L-4 と L-4-W ペイプメント周辺と、I-G-T ペイプメント周辺で、周囲の地形との比較を行った。L-4-W の南東には、不規則な形ではあるが、礫質多角形土 (non-sorted-stone-polygon) が発達し始めている (Fig. 9)。そこでも、L-4-W や G-L-4 のペイプメントと同じような計測を行った (Tab. 2)。礫形において大きな差異は認められない

が、細粒物質もあまり除去されていないのでその深さはひじょうに浅い。そのため平坦度は、地点 3 や 6 ではペイプメント (地点 2) より良い。

Fig. 10 は I-G-T ペイプメントとその北側にある植被階状土 (turf-banked terrace)⁴⁰⁾ の部分である。I-G-T ペイプメントそれ自体も、基盤岩の高まり (Rundhöcker) の間にある大きな一つの階段状の形態 (礫質階状土: stone-banked terrace) をしている。ここでの各計測地点での計測結果 (Tab. 2) は、平坦度や礫形の大きな差は認められないが、大きな水流部 (地点 10) や表層部のない凹地 (地点 11) の部分では礫は大きくなる。また、細粒物質までの深さは、ペイプメント外のところ (地点 8, 9, 10, 11) が深くなる。これらのことから、植被および礫質の双方とも堆積物 (構成礫) は、氷成の堆積物や氷食谷壁から風化して落下 (rock fall) した岩屑などで、差異はないと考えられる。しかし、水流の影響は明らかに現れている。

Tab. 4 Stone shape distributions (%)

Pavement/Zones	Type	A	S.A	S.R	R	N
Pawnee Cirque Mouth	Ia	24.9	41.2	32.6	1.3	233
Zone 1		15.5	42.3	40.8	1.4	71
Zone 2		41.7	44.0	14.3	0.0	84
Zone 3		15.4	37.2	44.9	2.5	78
Pawnee Cirque Center	Ia	30.7	43.2	23.5	2.6	153
Zone 1		35.4	41.7	20.8	2.1	48
Zone 2		41.5	35.8	18.9	3.8	53
Zone 3		15.4	51.9	30.0	1.9	52
Green Lake 4	Ib	26.2	46.6	26.7	0.5	202
Zone 1		36.8	43.7	18.4	1.1	87
Zone 2		18.3	48.7	33.0	0.0	115
Lake Isabelle West	Ib	17.6	52.6	26.8	3.0	131
Zone 1		19.4	36.1	38.9	5.6	36
Zone 2		16.8	58.9	22.1	2.1	95
Isabelle Glacier Trail	II	9.6	43.0	44.9	2.5	272
Lake 4 West	II	3.2	50.6	44.8	1.2	154

A = Angular, S.A = Subangular, S.R = Subrounded, R = Rounded

N = Total number of stones measured.

IV ま と め

残雪地に発達するペイブメント地形の形成機構を考察すると、同じような積雪があっても、水流があり他よりも早く消雪する部分では、平坦度が悪い。これは、雪の加重も少なくなるし、sortingなどを起こす細粒物質の量も少なくなるということである。つまり、どちらの作用（雪の直接的・間接的作用）も、ペイブメントの形成には重要であるという従来から推測されていたことを確認できたことになる。

L-4-WやI-G-Tペイブメントでは、周囲の

地形と比較してその形成過程の一部が明らかになった。L-4-Wの周辺では、礫質多角形土が発達しているところで、その中では比較的積雪が多くなって上からの加重が加わり、融雪水流が細粒物質を流出しはじめたようなところにペイブメントが形成され始めている。すぐ南のG-L-4と比べると、積雪量も水量も少ないので、その発達が悪い。また、I-G-Tの周辺のように、同じような solifluction terraceが発達したところでも、雪が多量に吹き溜るような環境になっていったところでは、礫質階状土のようになり、表面がペイブメント化していく。一方、

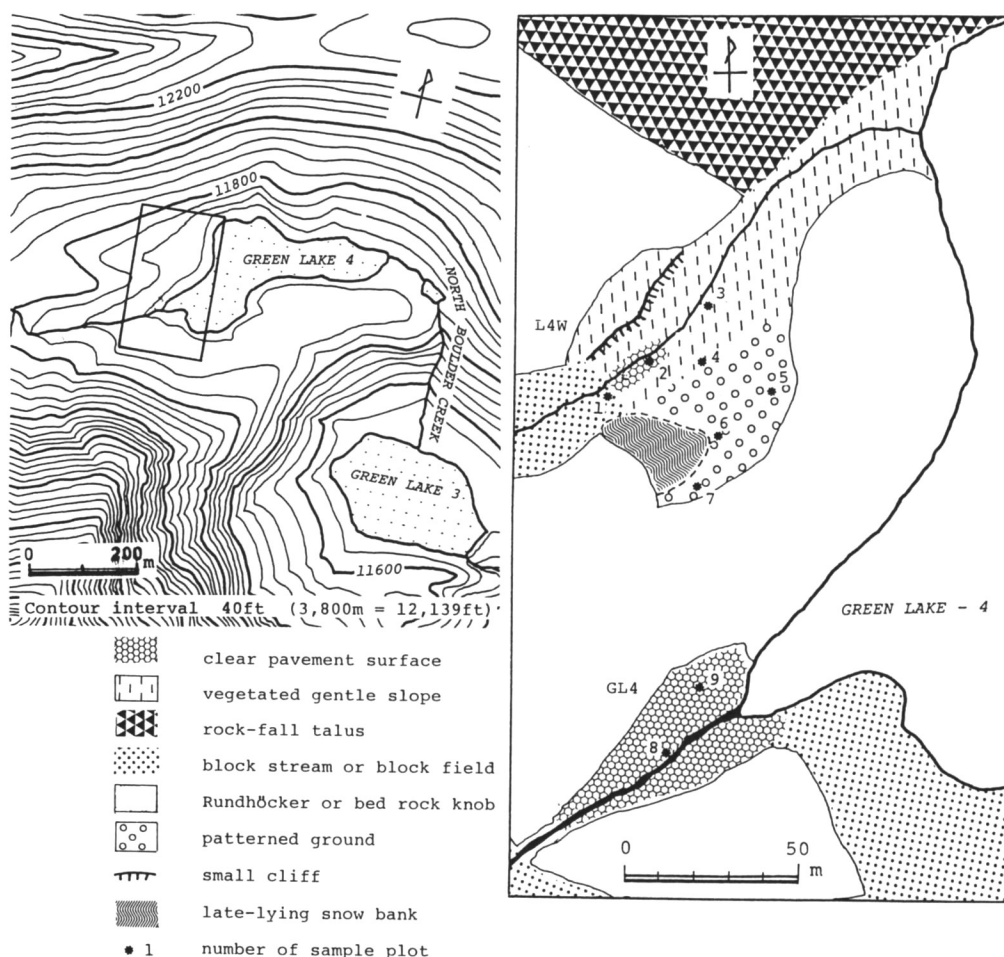
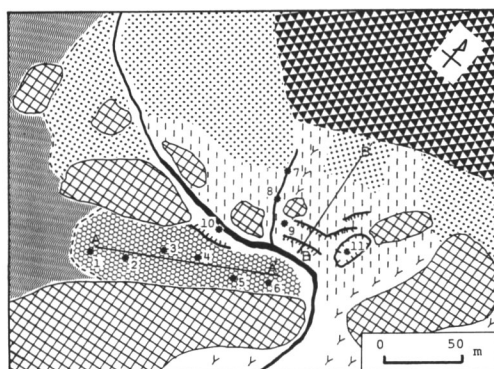
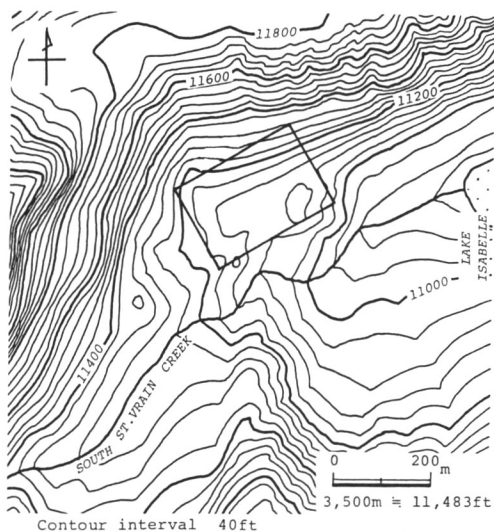


Fig. 9 Geomorphological map of Green Lake 4 Pavement site













-  clear pavement surface
-  vegetated gentle slope
-  rock-fall talus
-  block stream or block field
-  Rundhøcker or bed rock knob
-  unvegetated small depression
-  small cliff
-  late-lying snow bank
-  * 1 number of sample plot
-  Y bushes

Fig. 10 Geomorphological map of Isabelle Glacier Trail Pavement site

積雪量のあまり増加しなかったところは、雪によって植物の生育が妨げられず植生が付き、植被階状土のようになっていくと考えられる。

Harris (1981)⁴¹⁾ も、ロープ (solifluction lobe) 状の表面 (stone banked lobe や turfbanked lobe の表面) でのファブリックの分析から、長軸が表面の傾斜に平行になるような礫の構造傾向を報告している。つまり、ロープ状の地形の表面はペイプメント化されやすい礫の性質をもっていることになる。

周氷河環境下にあつて、多角形土やロープが発達するような環境から、やや湿潤な環境になり、降雪が多くなって残雪地 (late-lying snow patch) ができるような環境ができあがると、積雪による加重の増加と融雪水分増加との双方の効果でペイプメントが発達してくると考えられる。つまり、ペイプメントは、そのような、微妙な気候環境の変化、あるいは相違を示す指標になるのではないかと考えられる。

本報告の内容は立正地理談話会にて発表したものである。発表の機会を与えていただいた上に、有益な御助言をいただいた壽圓晋吾教授に感謝いたします。また、御批判をいただいた談話会の皆様にお礼申し上げます。さらに、常日頃から地形研究を御指導下されている大正大学教授の有井琢磨先生、本研究の初期の段階から多くの御意見をいただいた Dr. Colin E. Thorn, University of Illinois に感謝いたします。

(1988 年 3 月 15 日 受付)

(1988 年 4 月 12 日 受理)

注および参考文献

- 1) J. W. Spencer(1890) : Ancient shores, boulder pavement, and highlevel gravel deposits in the region of the Great Lakes. *Bulletin of the Geological Society of America* 1, 71-86.
- 2) I. C. Russel(1890) : Surface Geology of Alaska. *Bulletin of the Geological Society of America*, 1-2, 99-162.
- 3) Arthur L. Washburn(1980) : *Geocryology*. A Halstead Press. 406p.
- 4) 小林国夫 (1955) : 『日本アルプスの自然』築地書館, 258p. は, 「礫原 (stone pavement, Blockmeer)」と使用した. 『地学事典』(1970), 平凡社, 1540p. では「砂漠舗石 (desert pavement)」と訳しているが, 『地形学事典』(1981), 二宮書店, 767p. では, そのまま「ペイブメント」と用いている.
- 5) Julius Büdel(1982) : *Climatic Geomorphology*. Princeton University Press. 443p.
- 6) Michael F. Thomas(1974) : *Tropical Geomorphology*. Macmilan. 332p.
- 7) stone pavement with a flat side up.
- 8) 例えば, Jan Dylik(1967) : The main elements of Upper Pleistocene paleogeography in Central Poland. *Biuletyn Peryglacjalny*, No. 16, 85-115.
- 9) limestone pavement も氷河作用を受けたペイブメントであるが, 基盤ペイブメントである.
- 10) Aleksis Dreimainis(1976) : Tills: their origin and properties. *Special Publication of The Royal Society of Canada*, No. 12, 11-49.
- 11) Richard F. Flint(1971) : *Glacial and Quaternary Geology*. John Wiley & Son. 892p.
- 12) J. B. Whittow & D. F. Ball (1970) : Northwest Wales. Colin A. Lewis ed. *The Glaciation of Wales and Adjoining Regions*. Longman. 21-58.
- 13) Charles F. Shaw (1929) : Erosion pavement. *Geographical Review*, 19, 638-641.
- 14) Robert V. Ruhe (1975) : *Geomorphology*. Houghton Mifflin. 246p.
- 15) 乾燥収縮—湿潤膨張の反復作用.
- 16) Donald L. Johnson & Norman C. Hester (1972) : Origin of stone pavements on Pleistocene marine terraces in California. *Proceedings, Association of American Geographers*, No. 4, 50-53.
- 17) 名称も多いが一般的には boulder pavement 又は stone pavement と使用されることが多い.
- 18) 前掲 7) のペイブメント.
- 19) 前掲 3).
- 20) Sydney E. White (1972) : Alpine subnival boulder pavements in Colorado Front Range. *Geological Society of America Bulletin*, 83, 195-200.
- 21) 前掲 4).
- 22) 原 芳生 (1983) : 木曾駒ヶ岳の pavement 地形. 東北地理, 35, 119.
- 23) 22) に報告した.
- 24) 前掲 20).
- 25) 前掲 3).
- 26) 前掲 1) など.
- 27) Robert L. Nichols(1968) : Coastal Geomorphology, McMurdo Sound, Antarctica. *Journal of Glaciology*, 7, 449-478.
- 28) Jean-Claude Dionne (1972) : Caractéristiques des Blocs Erratiques des Rives de L'Estuaire du Saint-Laurent. *Revue de Géographie de Montréal*, XXVI, 125-152.
- 29) J. Ross Mackay & D. K. Mackay (1977) : The stability of ice-push features, Mackenzie River, Canada. *Canadian Journal of Earth Sciences*, 14, 2213-2225.
- 30) John D. Collinson (1971) : Some effects of ice on a river bed. *Journal of Sedimentary Petrology*, 41, 557-564.
- 31) 田 淵 洋, 原 芳生 (1987) : フィンランド最北部, Jesnalvaara, Kevojärvi の周氷河地形. 日本地理学会予稿集, 31, 16-17.
- 32) Stephen C. Porter (1966) : Pleistocene geology of Anaktuvuk Pass, Central Brooks Range, Alaska. *Arctic Institute of North America Technical Paper*, No. 18, 100p.
- 33) Jonas Åkerman (1980) : Studies on periglacial geomorphology in West Spitsbergen. *Meddelanden från Lunds Universitets Geografiska Institution Serie Avhandlingar*, LXXXIX, 297p.
- 34) 20) White (1972) と同じ地域.
- 35) Yoshio Hara & Colin E. Thorn (1982) : Preliminary quantitative study of alpine subnival boulder pavements, Colorado Front Range, U.S.A. *Arctic and Alpine Research*, 14, 361-367.
- 36) David Greenland (1987) : The climates of the long-term ecological research sites. *Institute of Arctic and Alpine Research, University of Colorado Occasional Paper*, No. 44, 81p.
- 37) M. Paul Mosley (1975) : A device for the accurate survey of small scale slopes. *British Geomorphological Research Group Technical Bulletin*, No. 17, 3-6. による

と, microtopographic profile gage という名称で説明されている。

- 38) M. C. Powers (1953): A new roundness scale for sedimentary particles. *Journal of Sedimentary Petrology*, 23, 117-119.

- 39) 統計的な検定方法については, 35) Hara & Thorn (1982) に詳しく報告した。

- 40) 図 10 では小崖 (small cliff) のある植生に被われた緩斜面 (vegetated gentle slope) になっている。

- 41) Charles Harris (1981): Periglacial Mass-wasting: A Review of Research. *British Geomorphological Research Group, Research Monograph Series, No. 4*, 204p.

Developmental Processes of Subnival Stone Pavements within Periglacial Regions

Yoshio HARA*

Many kinds of pavement landforms are developed under various climates almost all over the world. These landforms have individually been studied by many previous researchers. However, comprehensive studies including the synthetical classification for the landforms have never been done up to this time. Under these circumstances, firstly, the author classified them into two kinds of the pavement forms based on their structures; "bedrock pavement" and "stone pavement". The surfaces of bedrock pavements are flattened bare rocks with joints such as limestone pavements. On the other hand, that of the stone pavements are accumulations of rock fragments, especially cobbles and boulders, in which stones are fitted together like a mosaic. Secondly, he classified the stone pavements into several sub-kinds of ones by paving processes and ways of concentration of boulders. The subnival stone pavement is a pavement occurred beneath a late-lying snow patch and one of sub-kinds of stone pavements developed under periglacial environments with paving processes of snow and ice. It is assumed that there are many processes for forming subnival stone pavements; weight of snow, melting water to saturate fine materials beneath the pavement stones and to wash fines away from pavements.

In order to clarify the pavement developmental processes, the main field researches by the author carried out on the alpine subnival boulder pavements (a kind of the subnival stone pavements) at the floor of glaciated valleys and the bottom of glacier cirques in the Indian Peaks Region, Colorado Front Range, Rocky Mountains. The same kinds of studies by the author have been done in the Central Japan Alps, the North Japan Alps, Mt. Gassan in N.E. Japan, Mt. Daisetsu in Hokkaido and Lapland, Finland and Norway, respectively. In this paper, he has, however, limited his study to the subnival pavements in the Colorado Front Range.

The main subjects in this paper are summarized as follows:

- 1) The quantitative study for the pavements has been reported in Hara & Thorn (1982) by

the data based on the measurements of boulder shape and size, depth-to-fines, and surface roughness. Their statistical analysis showed that origins of pavement forming stones were weathered blocks and boulders (autochthonous) or glacial till and rock fall debris (allochthonous). The importance of streams in the pavements, the streams scour fines from beneath a coarse surficial layer, is also statistically significant. The surface roughness is related to depth of snow over the pavements; well developed pavement surfaces (less roughness) under deeper snowpack accumulation.

2) The parts of developmental stages of the alpine subnival boulder pavements have been examined from the comparative study to other adjacent periglacial landforms at two pavement sites; L-4-W and I-G-T in Fig. 3. Polygonal patterned ground are developed to the south of the L-4-W pavement (Fig. 9) and a vegetated gentle slope to the north. A clear pavement surface occurs only a small part over the stream at the foot of a block stream. The stone shape and size of each sample plot show similar values. The smaller values of depth-to-fines show not so much washing of fines away from pavements. The surface roughness of sample plots 3 and 6 around the L-4-W have slightly less values (more flat) than plot 2 in the pavement (L-4-W). In the opinion of the author, the results of those measurements shows gradual transition from a polygonal patterned ground to a subnival boulder pavement because of removal of fines by streams and paving process of snow.

3) The turf-banked terraces have been developed very well at the north of the I-G-T pavement (Fig. 10). Furthermore, this pavement itself represents similar features to the stone-banked terraces in its form. The results of the measurements on both parts, the I-G-T pavement and the turf-banked terraces, show that the surface forms and materials are the same except stream parts. Judging from these facts, it seems to the author that the both parts have originally been developed as the same kinds of solifluction terraces on the bottom in one single glacial cirque. Moreover, at the deeper and long lasting snow part in the cirque, a well developed pavement surface has been formed by late-lying snow. On the other hand, at less snow part in the same cirque, the turf-banked terraces have been developed by an invasion of vegetation instead of pavementation because of little snow.

As stated above, the author draws a model, on the developmental processes of subnival stone pavements, deduced from the field-data in the Colorado Front Range. However, the adequate experimental studies for this remains to solve this problems in connection with on both more precise measurements and the comparative studies for these landforms.