



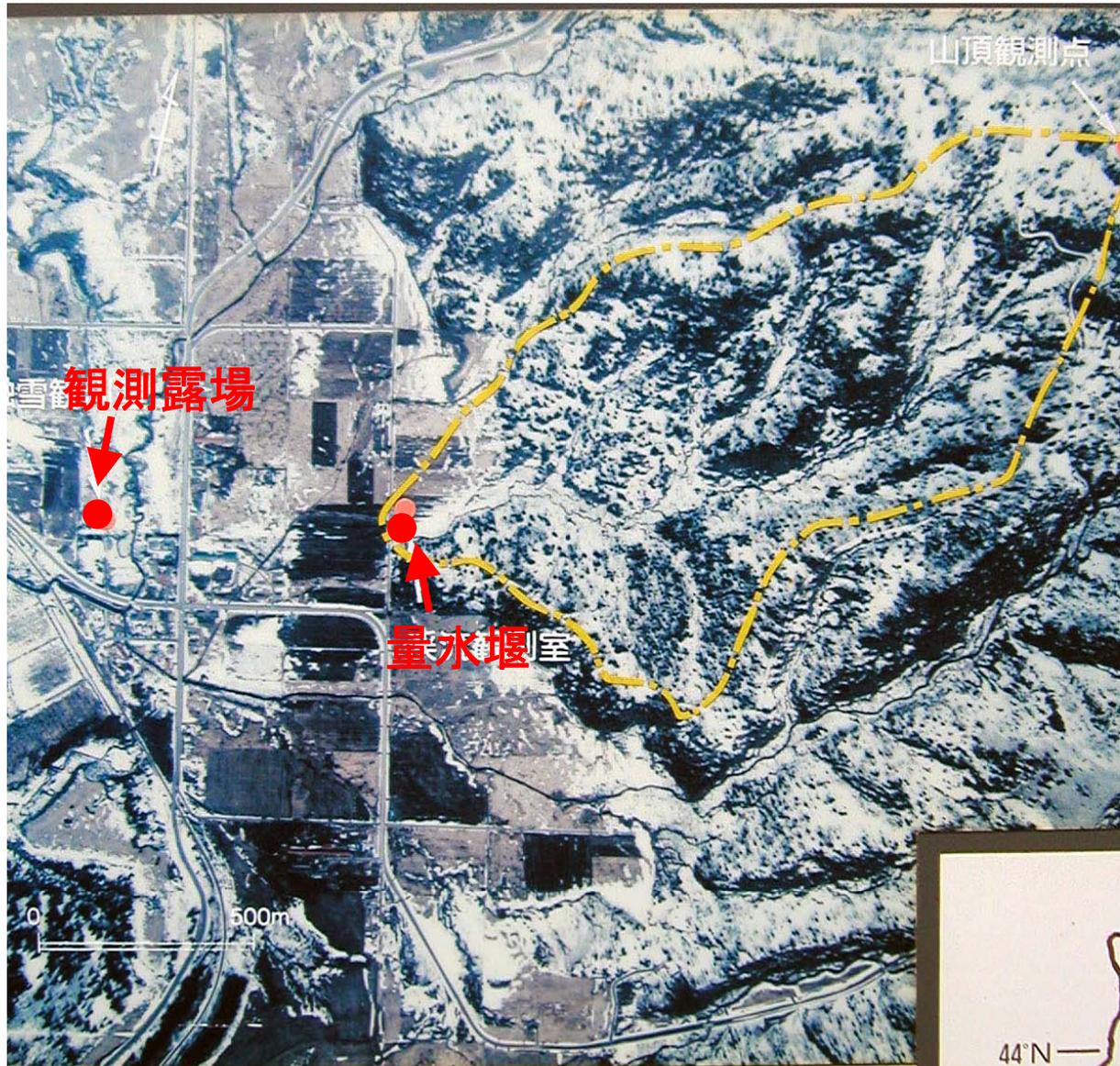
融雪現象と融雪流下機構

北海道大学低温科学研究所 石井 吉之

セミナー「近年の気象変化と融雪出水」

2006年7月7日 (独)土木研究所 寒地土木研究所





気象・熱収支観測露場

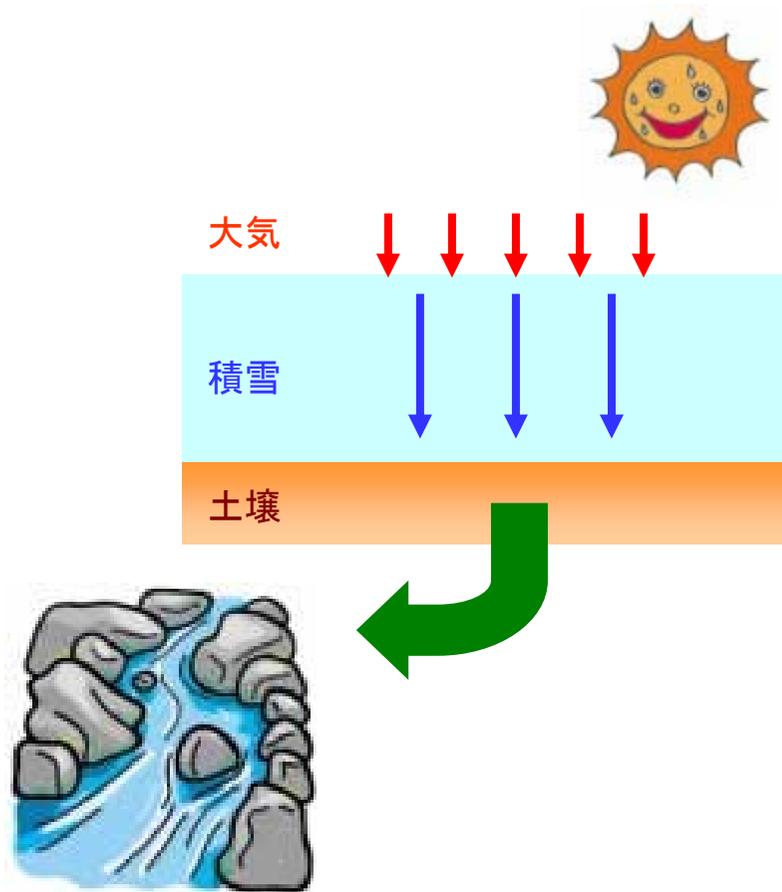


複合量水堰
(5~1000L/s)

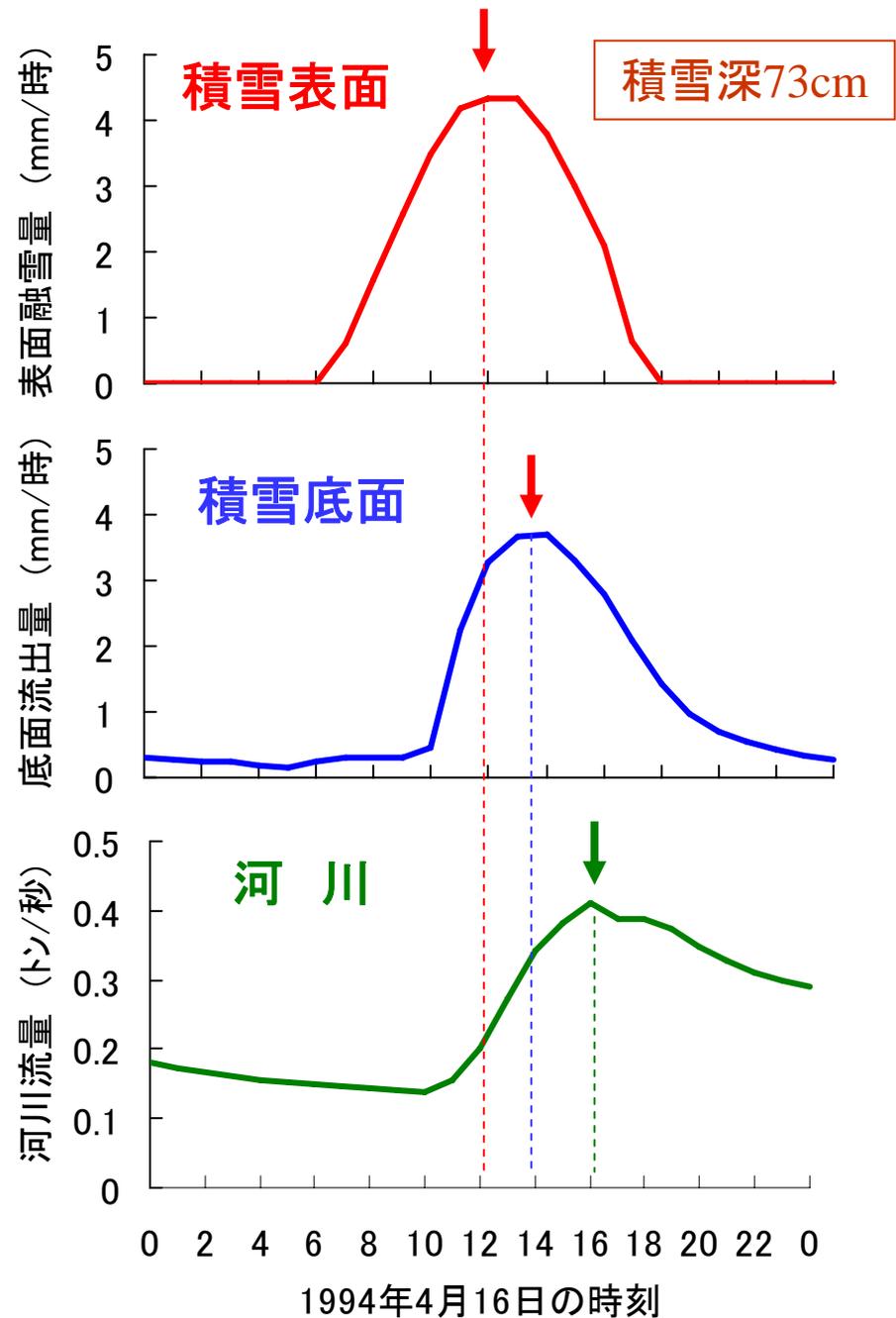
雨竜川源流部母子里の試験流域(面積1.3km²)
Moshiri experimental basin



◆ 融雪出水の遅れ時間



雪融け水が川へ出てくるまでには積雪内及び土壌内での浸透過程を経るため、遅れが生じる。



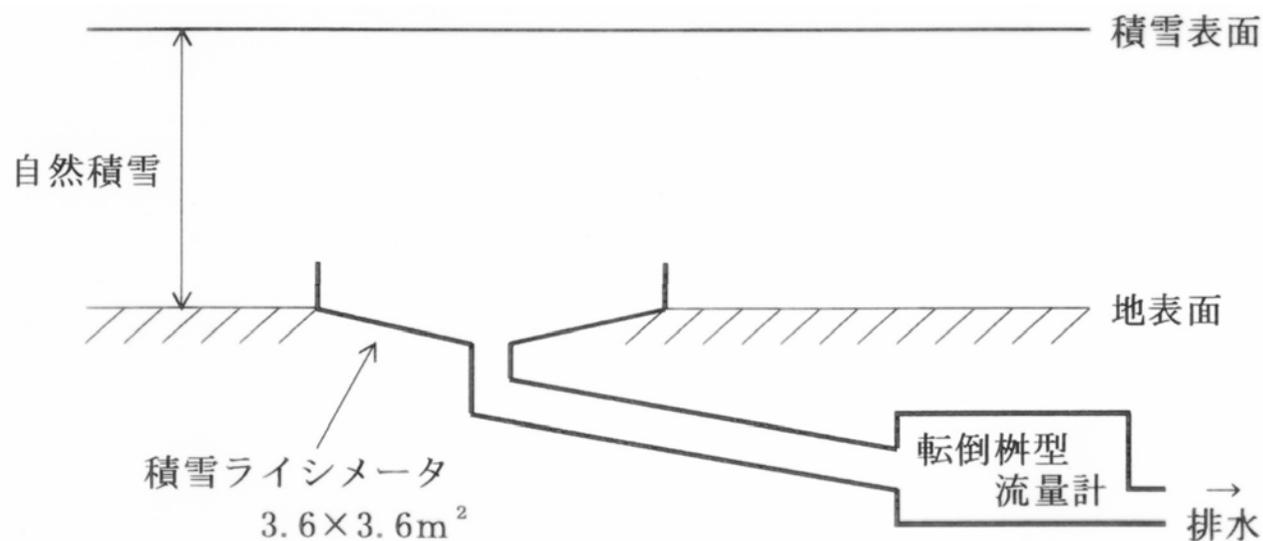
積雪底面から流出する水の量と質を測る



積雪ライシメータ

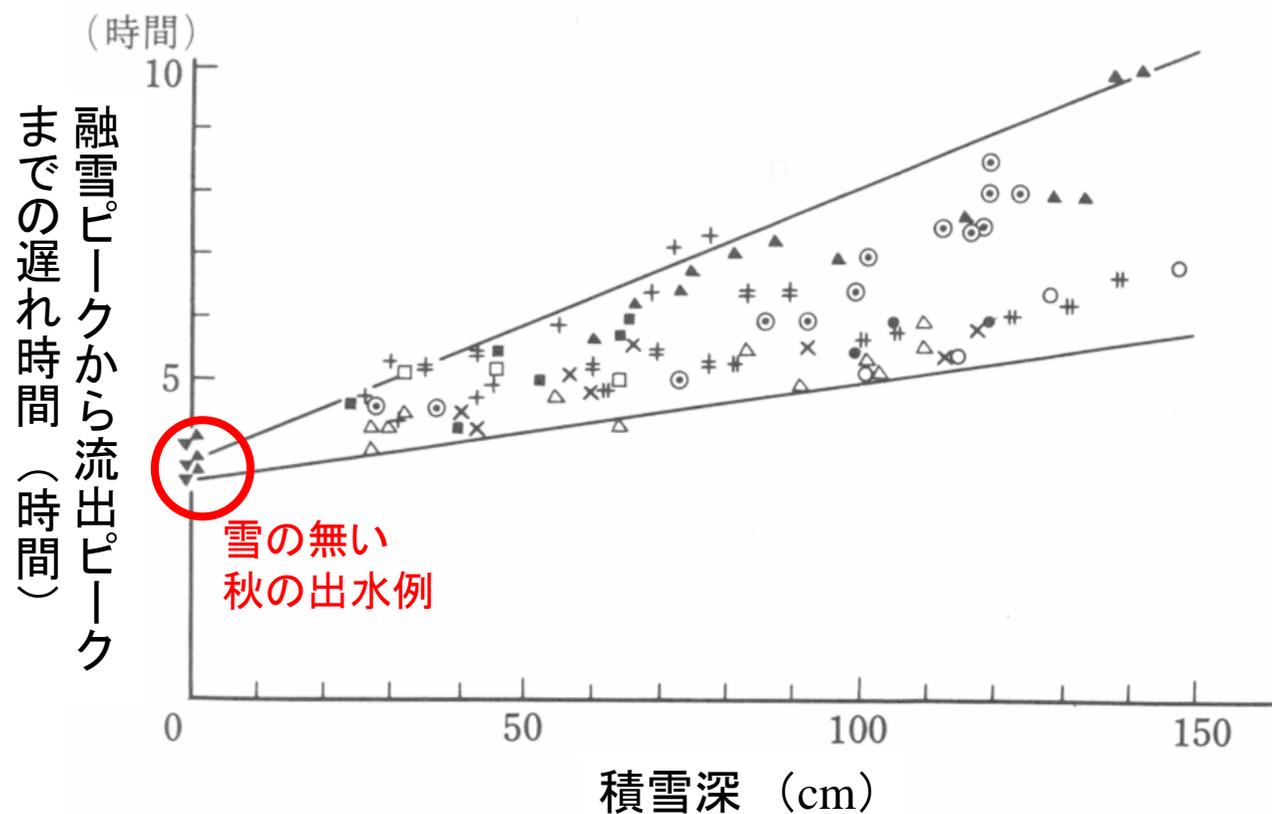
積雪の底面に敷いてこれより上の層から流出する融雪水を集める容器。大きいほどバラツキが小さくなって良いとされる。

※夏は大型の雨量計として使う(分解能0.04mm)



◆ 積雪深と遅れ時間の関係

(小林・本山,1985)



- ・ 1mの積雪があると、無い時に比べ川への流出が2~4時間遅れる。
- ・ 年ごとに積雪の特徴が異なるため、上記の関係には幅が見られる。

◆ 積雪ライシメータによる観測例



東京大学北海道演習林内(富良野)



カナダ・ケベック州ラバル大学演習林内

融雪流出過程

◆ 幾つかのサブ・プロセスに分けられる

サブ・プロセス

アプローチ

- 1) 積雪表面での融雪 : 融雪エネルギー論(熱収支)、
気象観測と融雪量測定
- 2) 融雪水の積雪内浸透 : ライシメータによる浸透量観測、
浸透理論の適用
- 3) 融雪水の地中流動 : 土壌水・地下水の応答観測、
トレーサー利用、斜面流理論
- 4) 河川流出 : 量水堰での応答観測、
開水路の水理学問題

◆個々のサブ・プロセスについては概ね理解が進んだ

➡ 現象全体としてのモデル化が可能

◆また、観測する上でも融雪期は好都合

1) 毎日定刻に増水と減水が起こる

- ・HQ曲線の作成に好都合
- ・危険を予め予想できる
- ・今日失敗しても明日がある

2) 晴天日ほど顕著な流出が起きる

- ・ズブ濡れにならずに仕事ができる

➡ 『しかし、まだまだ問題がある』 という例を示したい

◆ 融雪出水の例

川の流量は毎日規則的な日周変動を繰り返す。

・右上の北海道の例では、

日最小 ... 9~10時

日最大 ... 16~17時

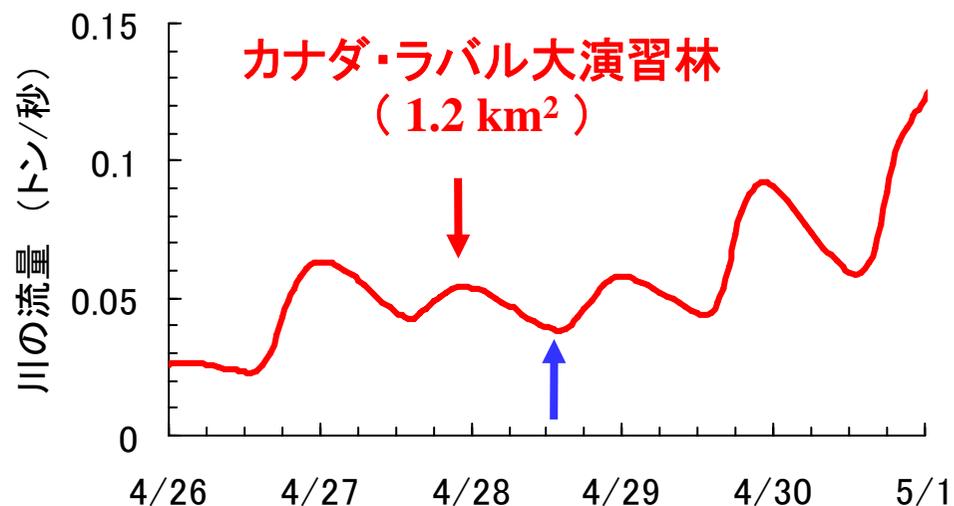
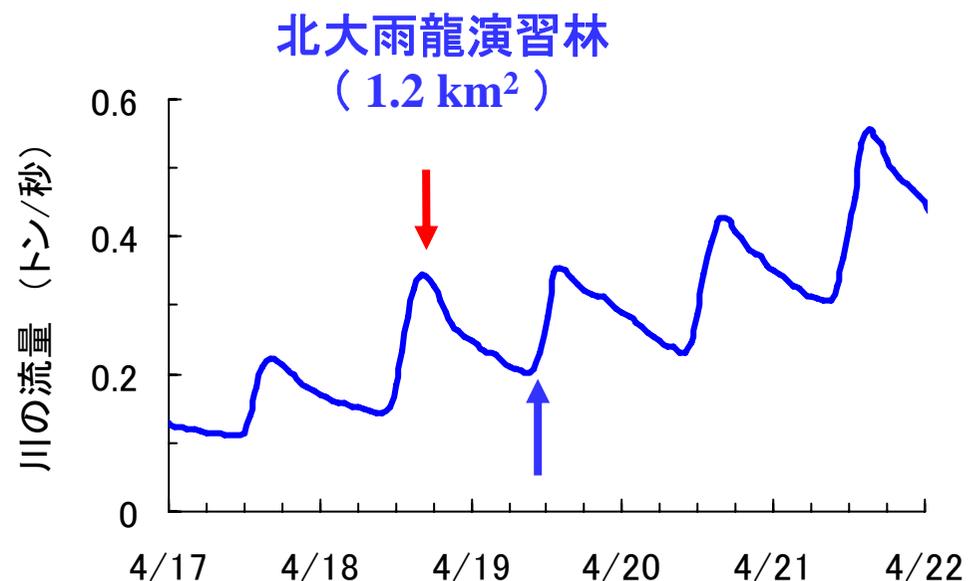
・右下のカナダ・ケベック州では、

日最小 ... 13~14時

日最大 ... 23~24時

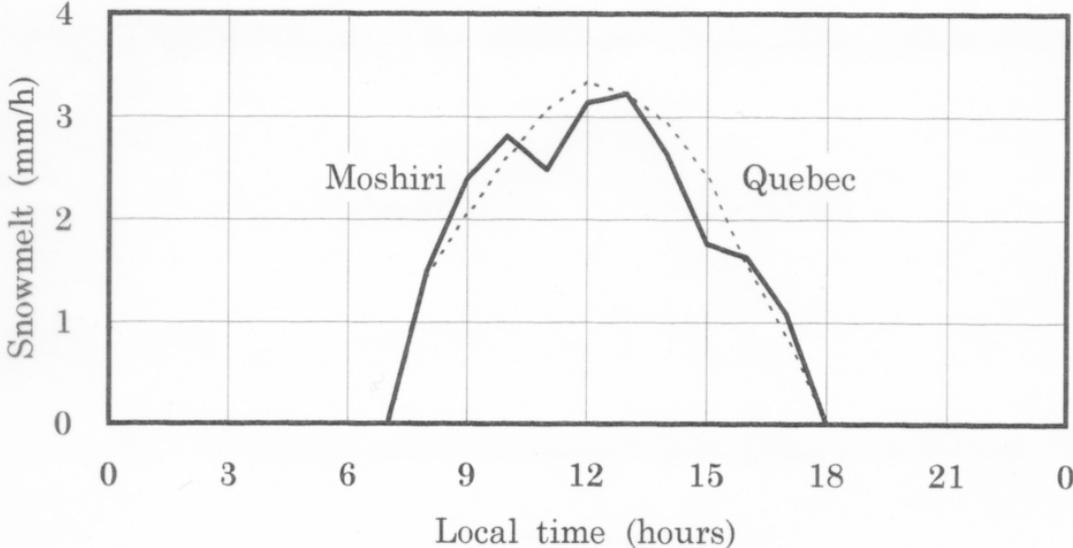
➡流域の地形・地質構造の違いに加え雪質の違いも効いている。

積雪深が少なくなると日最大流量が現れる時間も早くなる。

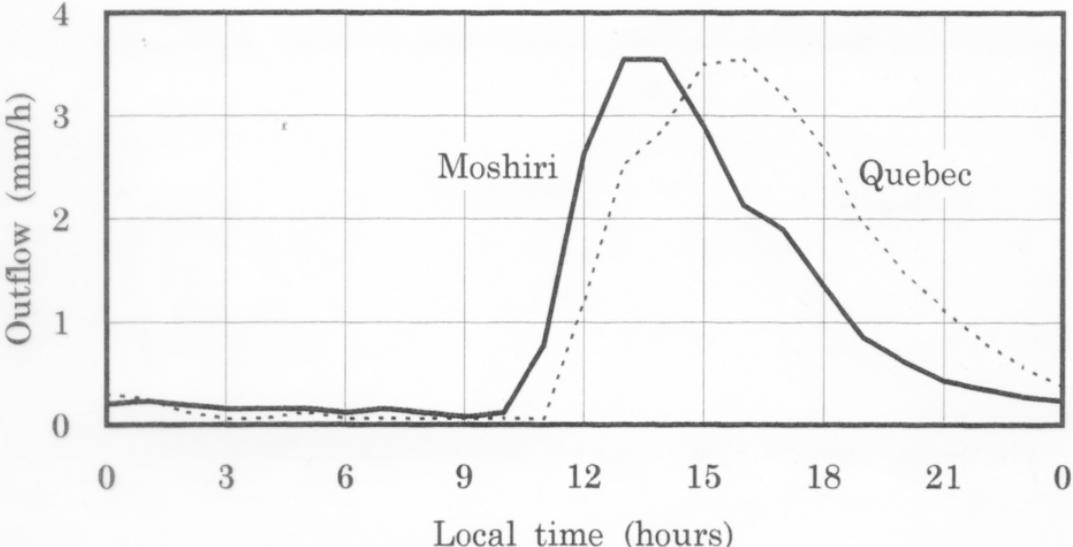


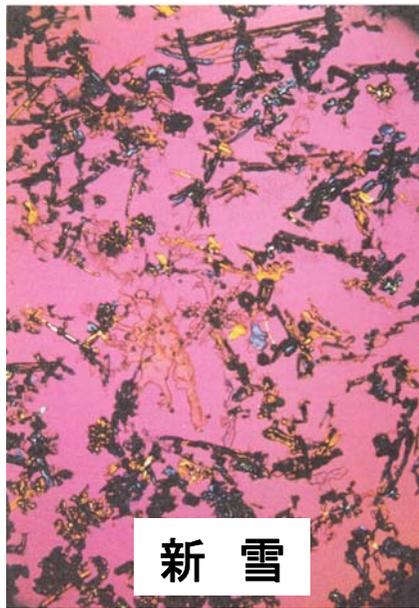
積雪表面融雪量

Moshiri: HS=65cm , Quebec: HS=81cm



積雪底面流出量

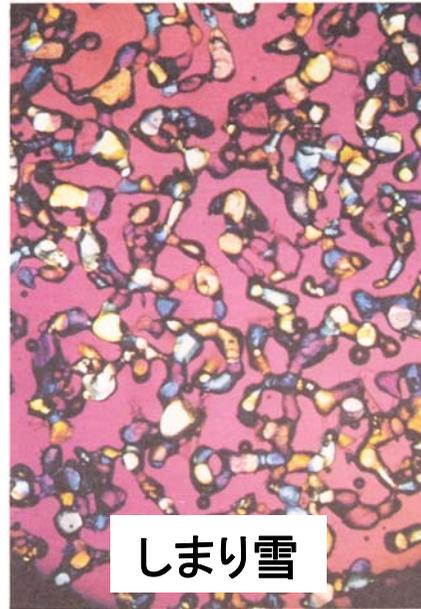




新雪



乾燥等温過程



しまり雪



乾燥温度勾配過程

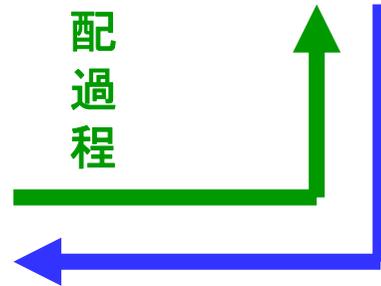


しもざらめ雪



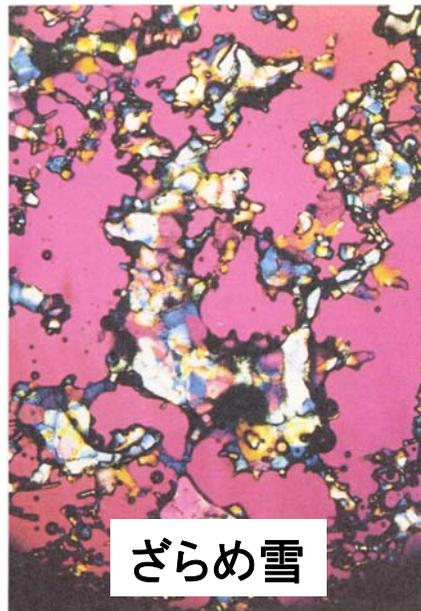
融解過程

- ① 焼結
- ② 圧密



融解過程

◆積雪の変化過程



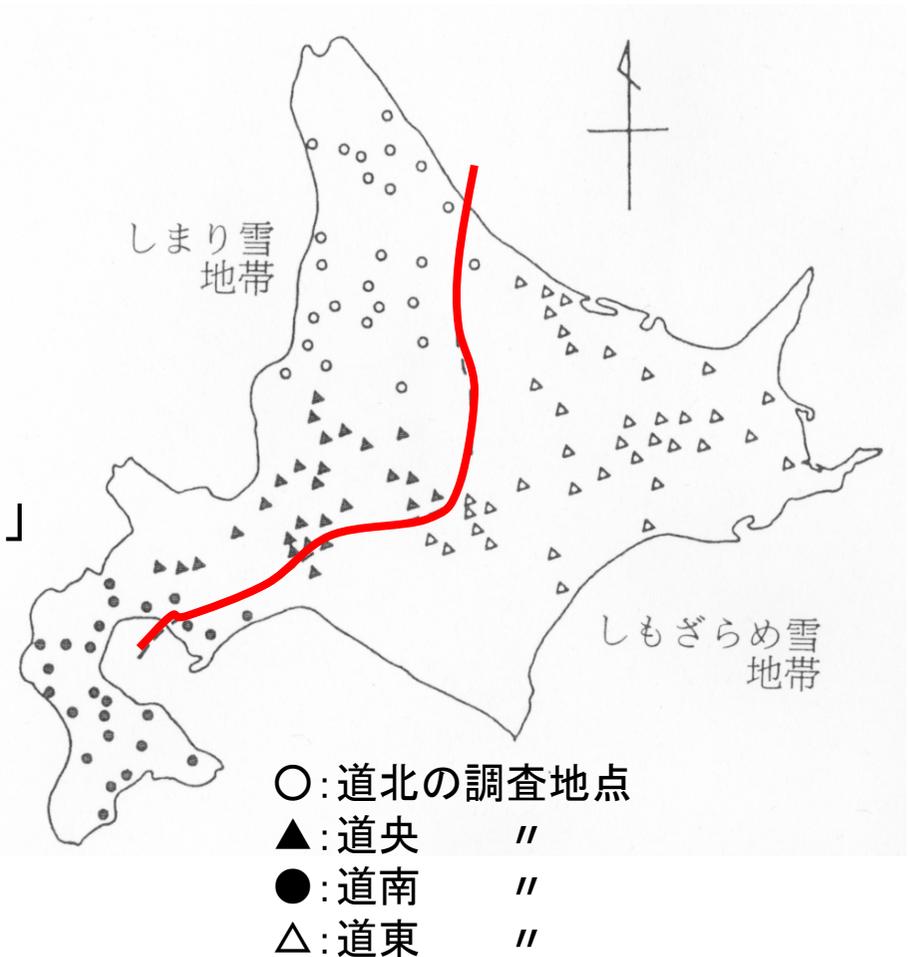
ざらめ雪

※ 乾燥過程： 乾き変態
 融解過程： 濡れ変態
 (図はアニリン薄片写真)

道東の雪は世界の雪

◆ 積雪の分布特性

- ・ 北海道の雪質は 2 タイプに区分される
 - ① **しまり雪地帯**
西部から北部の多雪地帯
 - ② **しもざらめ雪地帯**
東部の少雪地帯（寡雪寒冷気候）
- ・ 世界の**平地積雪**の多くは「しもざらめ雪」
日本で「しもざらめ雪」が分布するのは
道東と一部の本州山岳地帯に限られる。
 - ➡ **道東の雪は世界の雪**



(秋田谷・石井,1992)

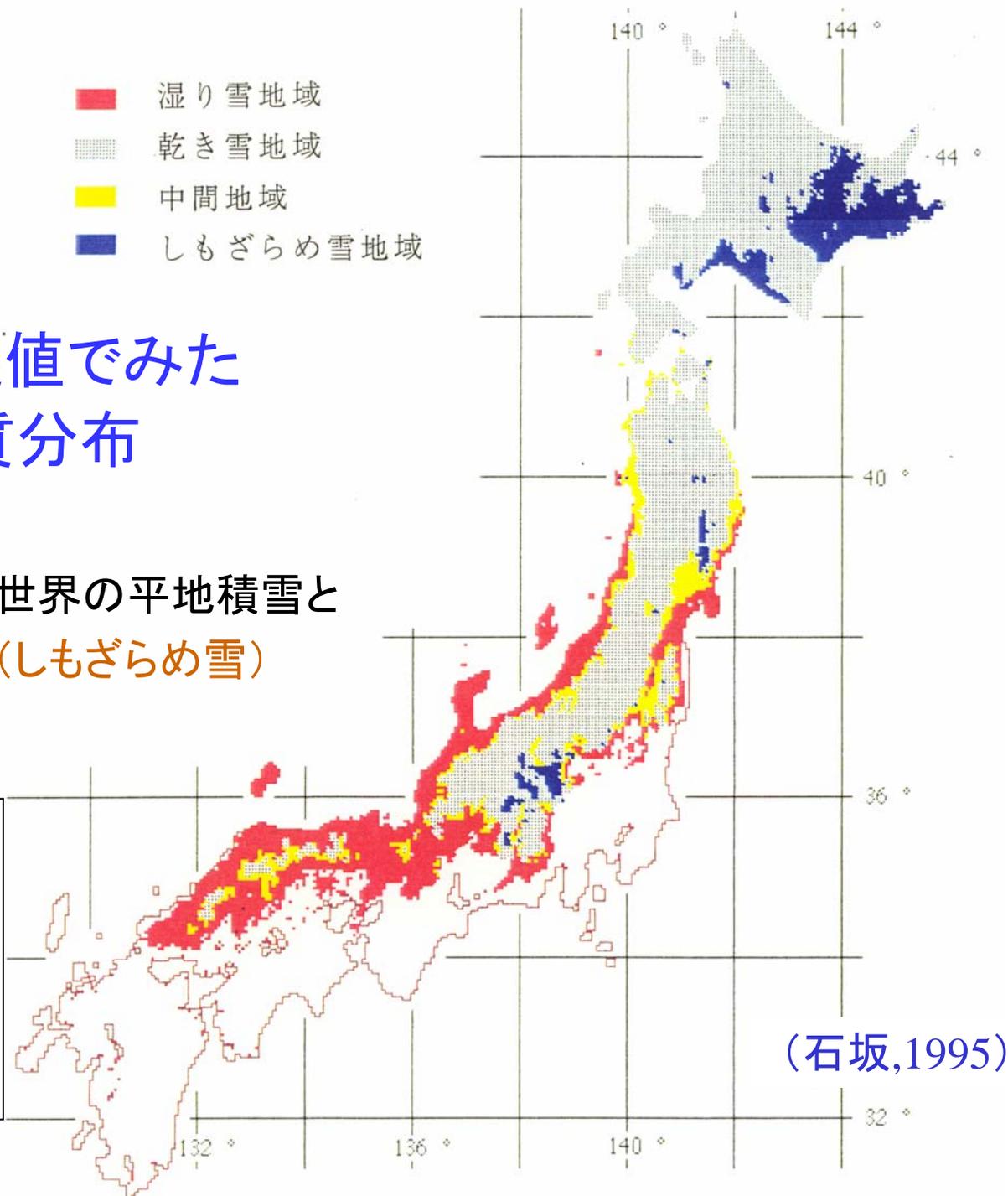
- 湿り雪地域
- 乾き雪地域
- 中間地域
- しもざらめ雪地域

◆ メッシュ気候値でみた 日本の雪質分布

北海道東部の雪質は世界の平地積雪と
共通した特徴をもつ (しもざらめ雪)

備考

メッシュ気候値(平年値)は、
気象庁が作成したもので、3
次メッシュ(約1km四方)ご
とに最高気温、最低気温、平
均気温、降水量の、月単位
の平年値が収録されている。

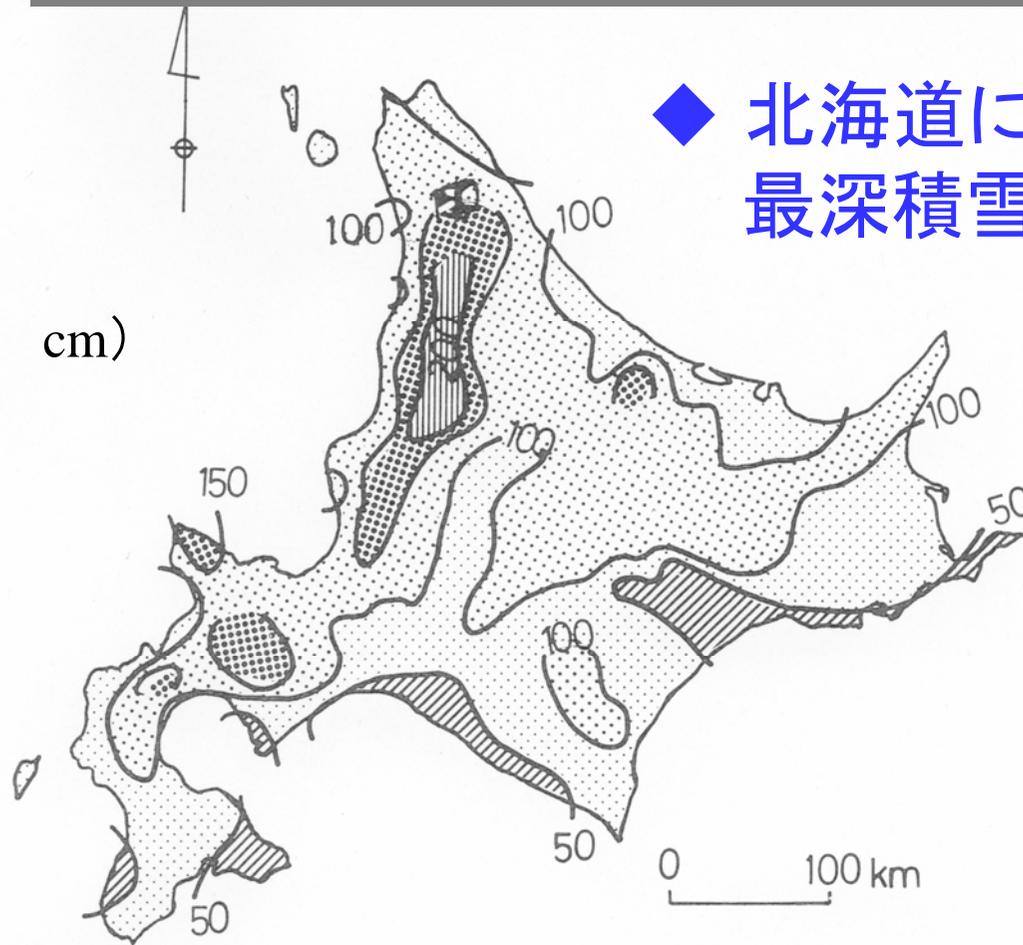


(石坂,1995)

どうして雪質が異なるのか

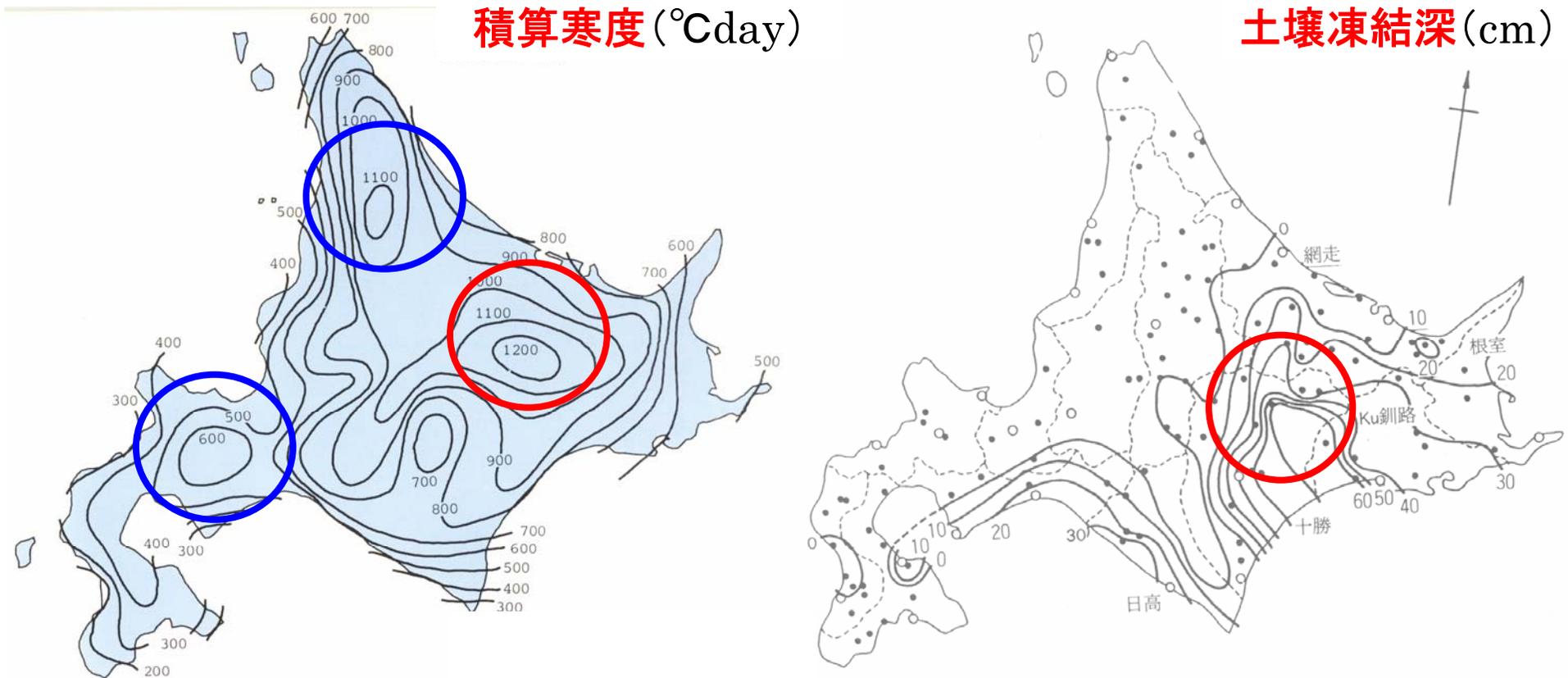
◆ 北海道における 最深積雪の分布

(単位: cm)



北空知から中空知、ニセコ・羊蹄山系で多雪、浦河・静内、
帯広・釧路が少雪、という明瞭な**東西コントラスト**が存在する。

◆ 北海道における積算寒度と土壌凍結深の分布

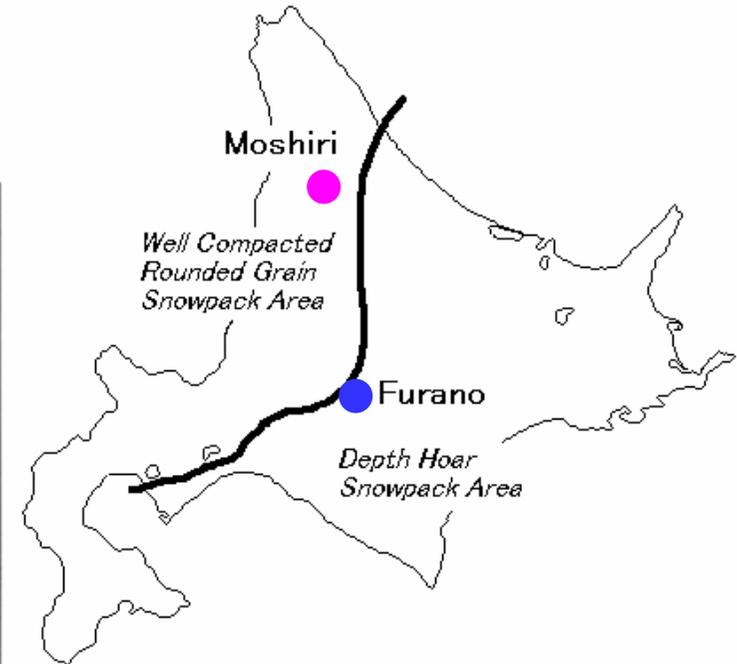


- ・ 積算寒度が大きい3地域 : 上川・名寄盆地、十勝平野、ニセコ羊蹄山系
- ・ 凍結深が大きいのは赤丸だけ ➡ 青丸ヶ所で凍結しないのは積雪が深いため
(積雪の断熱効果)

カナダの雪の代わりに富良野の雪を使って母子里の雪と比較した

表1 富良野と母子里における積雪の特性値

富 良 野	date	2/16	4/3	4/12	4/19
	積雪深 (cm)	94	87	64	29
	積雪水量 (mm)	285	345	278	138
	平均密度 (g/cm ³)	0.31	0.40	0.43	0.48
	ラム硬度 (kg)	8	9	5	2
	含水率 (%)	—	6	9	11
	空隙率 (%)	66	59	57	53
	体積含水率 (%)	—	2	4	5
母 子 里	date	2/18	4/8	4/13	4/26
	積雪深 (cm)	182	166	148	92
	積雪水量 (mm)	613	751	700	465
	平均密度 (g/cm ³)	0.34	0.46	0.47	0.51
	ラム硬度 (kg)	37	58	36	26
	含水率 (%)	—	—	6	8
	空隙率 (%)	63	50	52	49
	体積含水率 (%)	—	—	3	4



ただし、空隙率 $P = 1 - (\rho_{dry} / \rho_{ice})$
 体積含水率 $\theta = \rho_{wet} \cdot w$
 ρ_{dry} : 乾き密度 = $\rho_{wet} (1 - w)$, ρ_{wet} : 濡れ密度,
 ρ_{ice} : 氷の密度 (= 0.917), w : 重量含水率

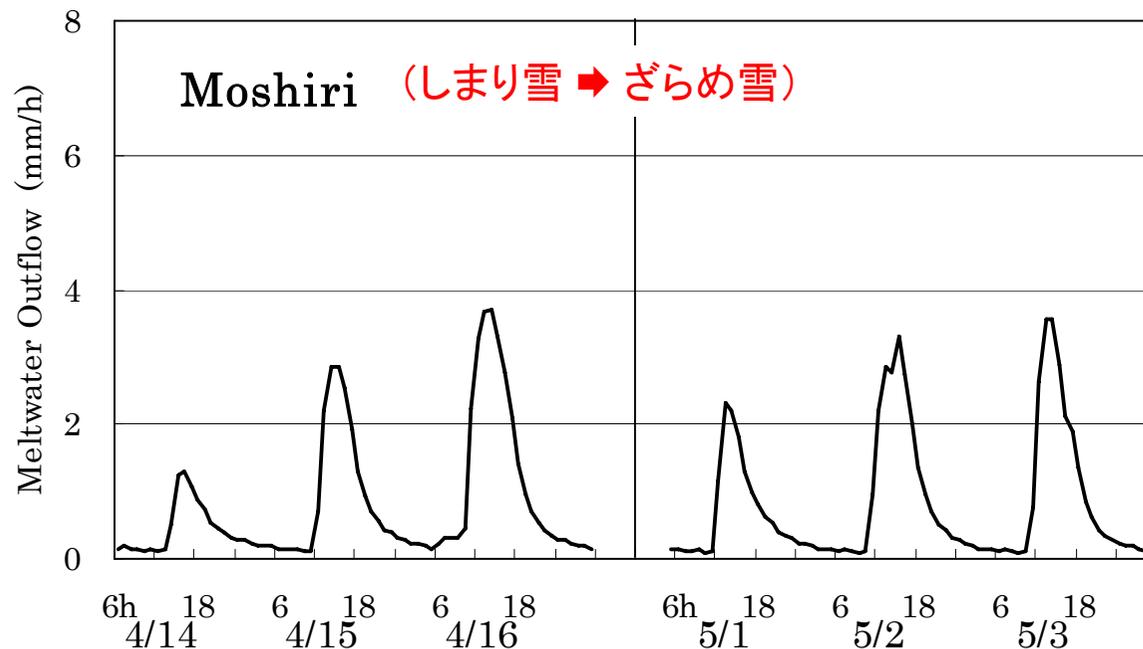
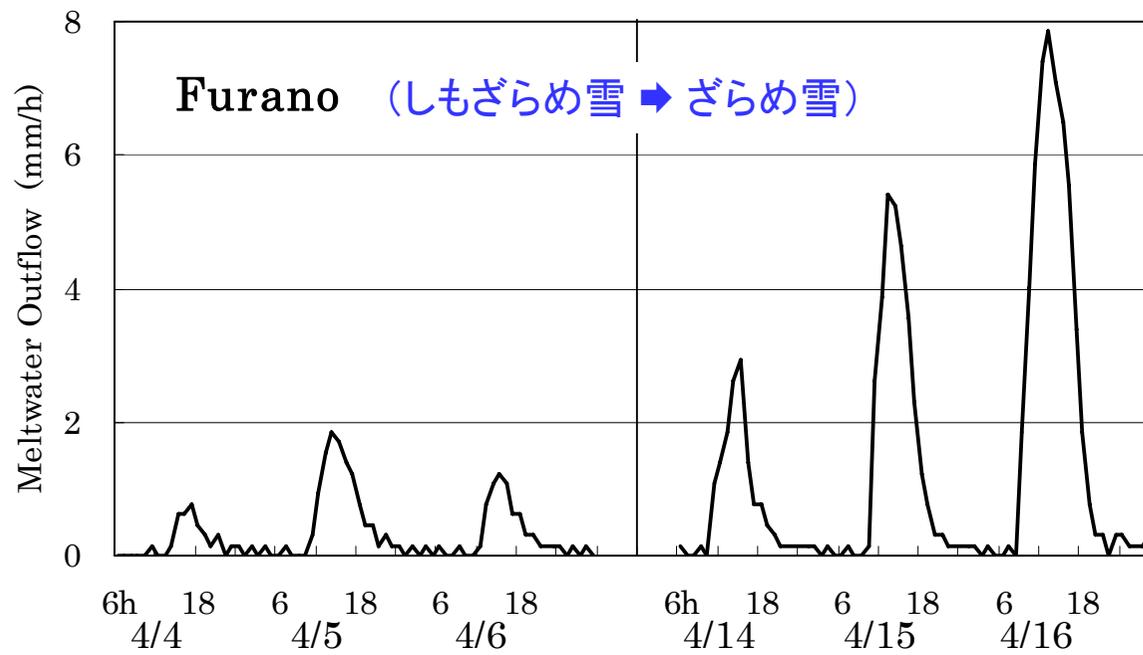
ライシメータで観測した積雪底面流出量の比較

1) 富良野では前期に流出過少、後期に過多となる

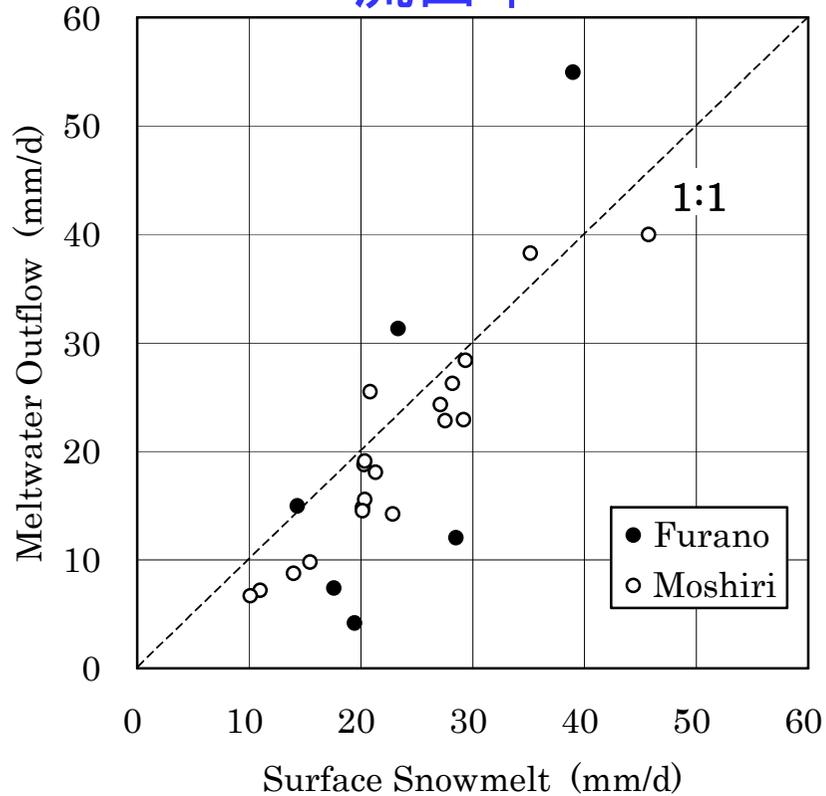
➡積雪内貯留が顕著

2) 母子里では前・後期とも流入流出が1:1に対応

➡流出率はほぼ100%



流出率



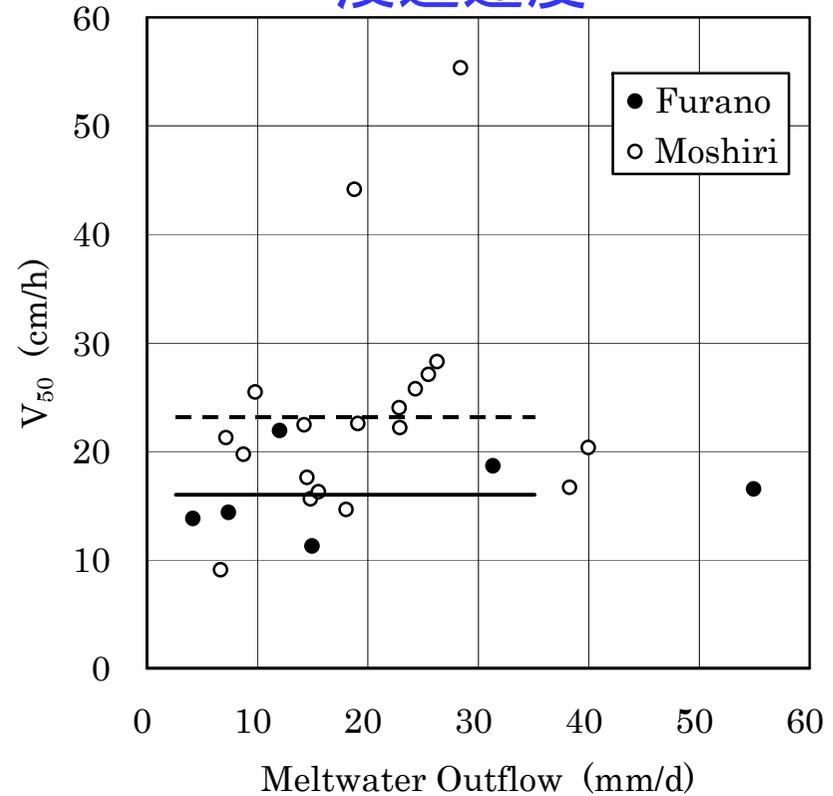
1) 富良野では前期に流出過少、
後期に過多となる

➡積雪内貯留が顕著

2) 母子里では前・後期とも1:1

➡流出率はほぼ100%

浸透速度



浸透速度の大小は、

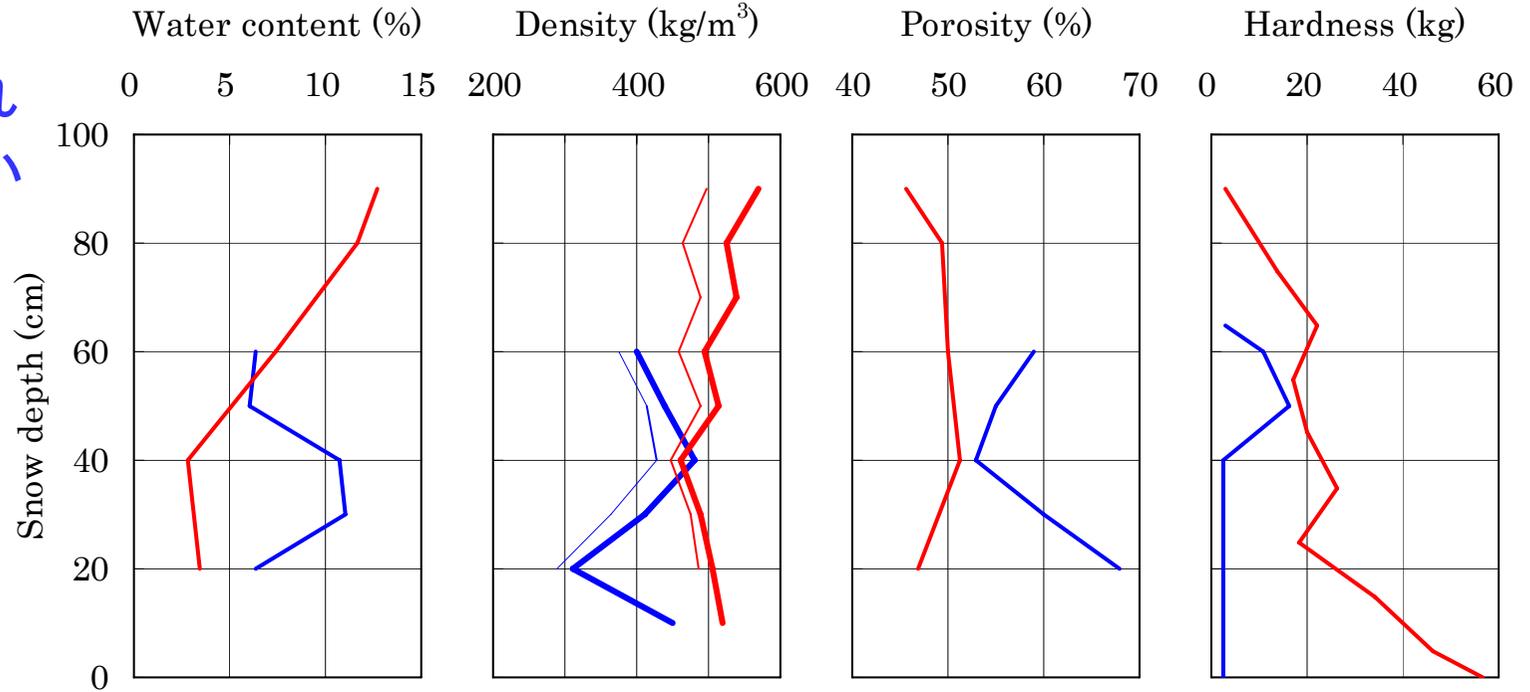
富良野 < 母子里

【重心】 16.1 cm/h 23.6 cm/h

【peak】 21.6 42.2

参考までにケベックでは、【重心】15.6cm/h、
【peak】17.9cm/hと、富良野での値に近かった

雪質はどれ
くらい違うか



サイト	母子里	富良野	ケベック
月日	26 April 1994	12 April 1994	27 April 1991
積雪深 (cm)	92	64	83
水当量 (mm)	465	278	338
濡れ密度 (kg/m ³)	510	430	410
ラム硬度 (kg)	26	5	-
空隙率 (%)	49	57	59
含水率 (%)	6	9	7
粒径 (mm)	1-1.5	1-1.5	1-1.5

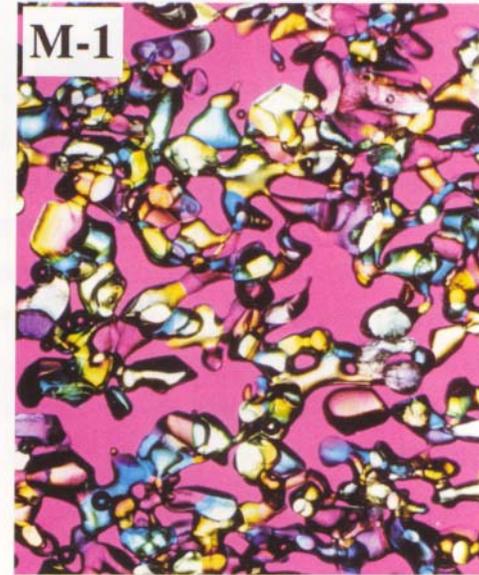
赤: 母子里
青: 富良野

多孔質体の3相構成から見ると、わずかに気相が10%違うだけ

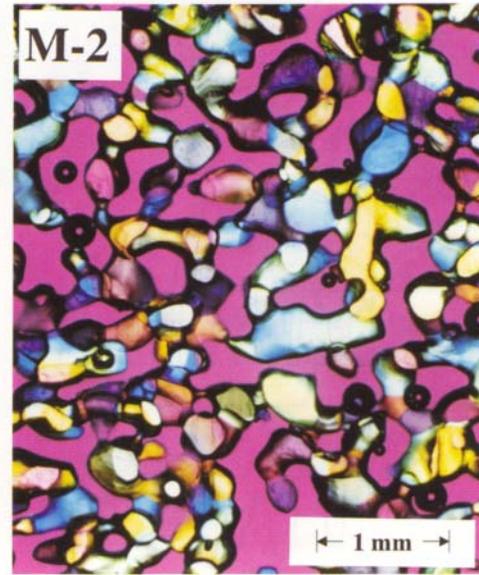
富良野

母子里

融雪前期



融雪最盛期



Discussion :

Factors causing the difference of percolation rate

富良野での浸透速度が遅くなる理由

1. Storage within the snowpack

1) 積雪内部での貯留

2. Snowpack properties such as

2) 空隙に富んだ脆い雪

density, grain size and shape, water content, impurities, hardness and stratification

3. Existence of ice layers and/or flow fingers

3) 水みちでの集中流下

----- preferential flow

1) 積雪内部での貯留:

前・後期で著しい貯留効果の違いが見られたが、
浸透速度に大きな変化はなかった

➡ 浸透速度の大小には効かない

Does the 10 % difference of porosity cause the difference in percolation rates ?

2) 空隙に富んだ脆い雪質:

1. Intrinsic permeability (Shimizu, 1970)

$$k_s = 0.077 d^2 \exp(-7.8 \rho_d / \rho)$$

密度大ほど透水性小 → 逆!!

2. Propagation speed of gravity flow (Colbeck, 1978)

$$V = (3 / \phi_{\text{eff}}) (\rho g k_s / \mu)^{1/3} q^{2/3}$$

空隙率大ほど伝播速度小 → 一見良さそう

3. Unsaturated hydraulic conductivity

$$K(S^*) = k_s S^{*n}$$

飽和度には大きな違いはない

where, d : grain diameter, ρ_d : density of dry snow, ρ : density of water,
 ϕ_{eff} : effective porosity, μ : dynamic viscosity of water,
 g : acceleration due to gravity, q : meltwater flux,
 S^* : relative saturation, n : constant (= 3)

→ No!

Meltwater percolation through the snowpack is made under low relative saturation condition.
Porosity doesn't affect the percolation rate remarkably.

10%の空隙率の違いで浸透速度の差を説明できるか

1. 透水性の粒径・密度依存性
2. 重力流理論 (Colbeck)
3. 不飽和透水係数

積雪内浸透は飽和度が著しく小さい条件下で起きている

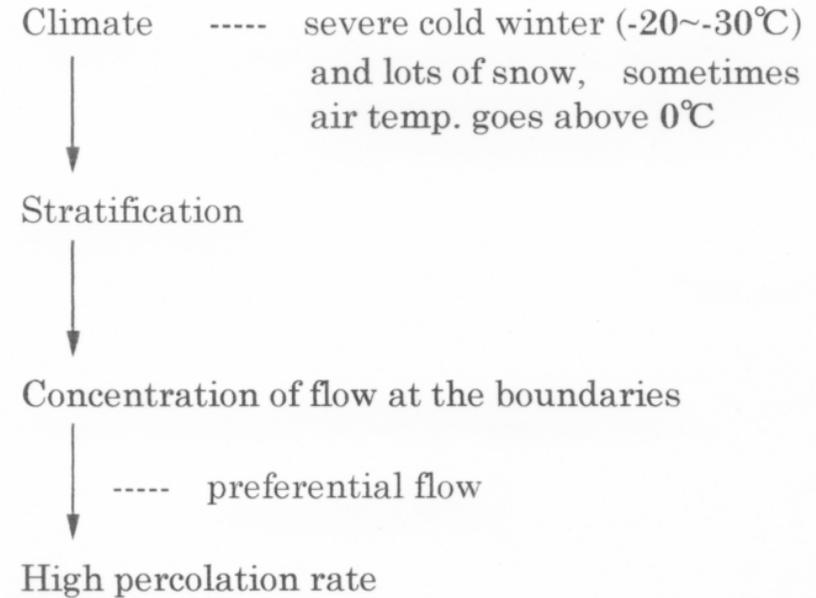
→ 空隙率の大小は浸透速度にあまり影響を与えない

3) 水みちでの集中流下:



層境界では流れの集中化が起きる
(写真は野村(1994)による)

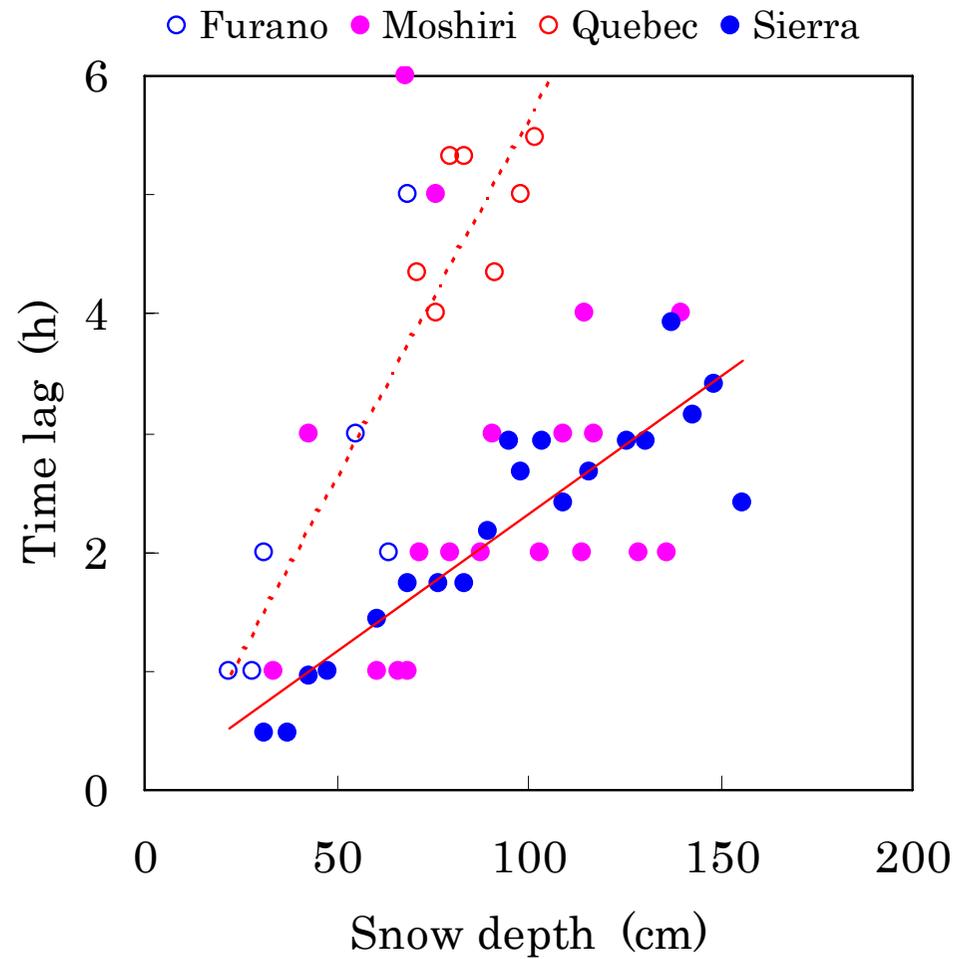
High percolation rate at the Moshiri basin :



多雪地帯の母子里では積雪の層構造が発達し、融雪期には層境界で流れの集中化が起きる
(野村, 1994)

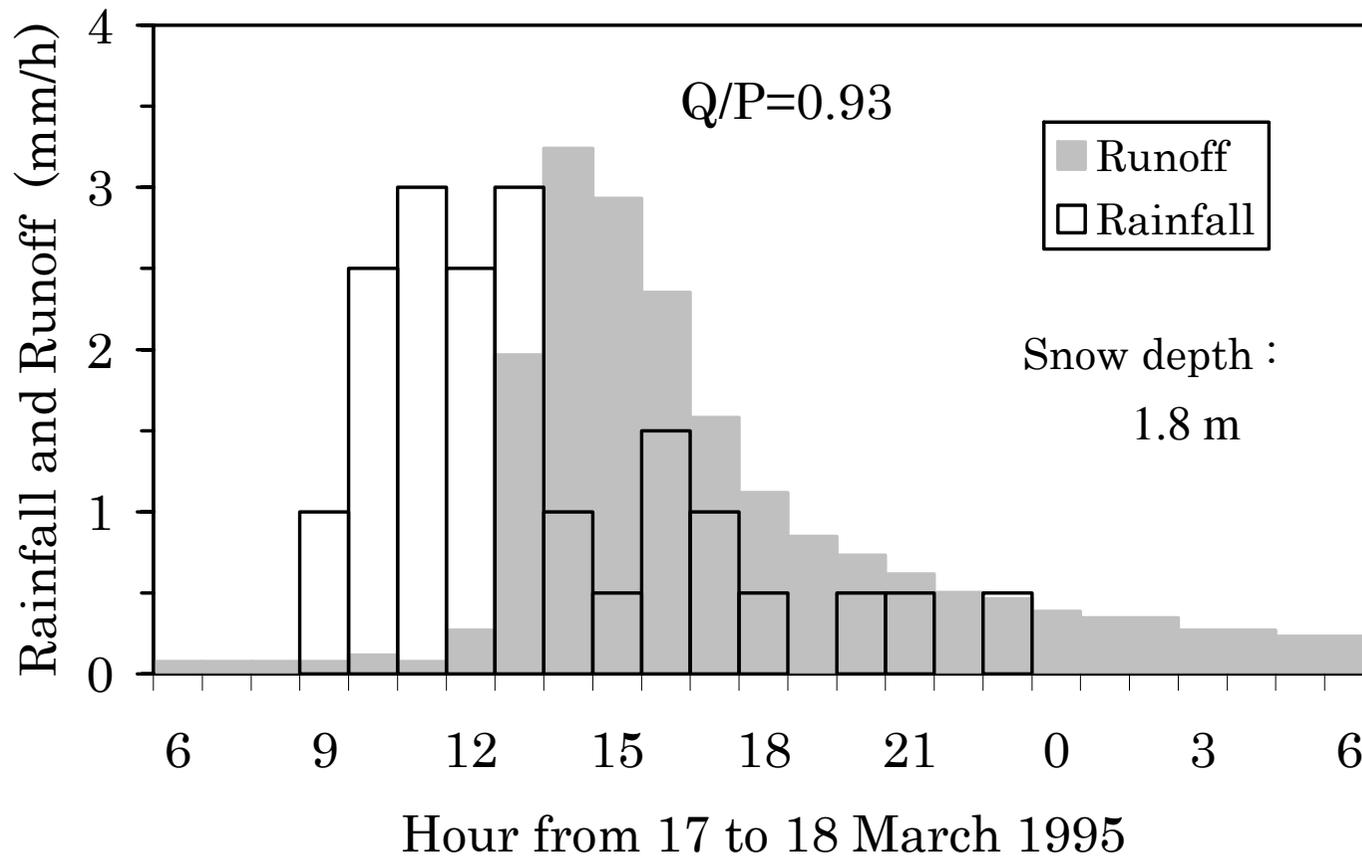
集中化(水みち)によって水量が増えると、その分だけ流速も増す(速度が流量に依存するため)

富良野が遅いのではなく、母子里が早いために速度の違いが起きている



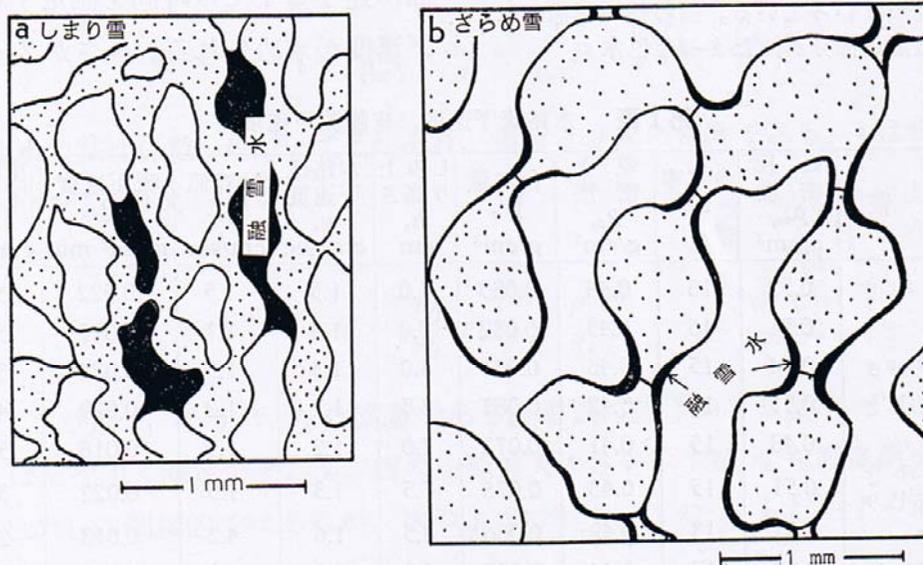
寡雪地帯と多雪地帯とでは、雪質の違いにより、融雪水の浸透速度に顕著な違いが生じる。

◆ 融雪初期に18mmの降雨があった時の積雪底面流出



◆ 積雪内での浸透速度

- 1) 吉田(1965)・・・皮膜流下と水路流下
- 2) 若濱(1968)・・・染料による速度の実測
- 3) 藤野(1968)・・・拡散を伴う流下現象



第1図 とけ水が積雪内を流下するばあい、2通りのしかたがあることを模式的に示した図。点をまぶした部分が、積雪の骨組み。(a) 水路流下；とけ水は積雪内の空隙をうめながら流下する。(b) 皮膜流下；とけ水が、水の粒の表面を皮膜状に包みながら流下する

(若濱,1968)

・吉田(1965)の理論的考察は土壌内の浸透理論とは異なる独自観点から

➡但し、**地中浸透理論との比較議論がやや困難になってしまった**

・若濱(1968)の実測した流下速度は着色水塊の先端速度であり、速度が過大に見積もられている

➡水路:7~11m/h, 皮膜:1~2m/h

・藤野(1968)は電解質マーカから拡散を伴った皮膜流下速度を測定

➡皮膜:7~18cm/h(1968)、
30~100cm/h(1971)

大部分は**水路流下と皮膜流下が混在している**

・石井・小林・野村ら(1992-2002)
水みち流下の重要性を指摘