

融雪水の積雪内浸透に関する実験的研究

北見工業大学 正員 中尾隆志

北見工業大学 正員 佐渡公明

1. はじめに

北海道のような積雪地域において積雪は利水上重要な水資源となるが反面、春先の急激な融雪出水は洪水災害をもたらす。融雪の大半は積雪表面で生じ、融けた水は積雪内部へ浸透を始める。融雪水を治水上安全に制御し、利水上有効に活用するには表面融雪水の積雪層内浸透過程を十分に理解する必要がある。融水の浸透過程は、降雨が土壌へ浸透する過程とほぼ同様であると考えられる。しかし、融雪水の積雪への浸透が降雨による土壌への浸透と最も異なる点は、積雪を構成する氷粒子の粗大化による積雪構造そのものが時々刻々と変化する点である。Colbeck¹⁾は積雪内の浸透過程を不飽和領域として取り扱い、融水のfluxを求める方法を提案している。しかし、この方法は予め積雪の固有透過係数、有効飽和度といったパラメータの算定が必要となる。一方、著者ら²⁾は低温室で行った融雪水の積雪浸透実験のデータをもとに貯留関数法を適用し、遅れ時間が積雪深と強い相関がみられることを指摘した。しかし、この実験で用いられたデータは実験装置の都合上、表面融雪水に相当する流入量は最小でも 26.13mm/hr あり、本学の寒地気象観測システムで測定されている野外における融雪最盛期の雪面融雪量(平成2年3月の最大雪面融雪量は4.53mm/hr)の約5.8倍あり、実際の北海道北部の融雪期のデータとしては十分ではない。

本年度は5mm/hr前後の流入量で浸透実験を行ない、さらに積雪層中の浸透水の様子が観測できるように実験装置に改良を加えた。また乾き雪と濡れ雪では初期含水率が違うため積雪中の融雪水の移動の仕方(特に水みちのできかた)の違いに着目して実験を行った。本報告は乾き雪と濡れ雪および積雪深が融雪水の流出開始、減水時間に与える影響について、いくつかの所見が見られたので以下に報告する。

2. 実験装置および方法

本実験で用いた積雪試料は予め平成2年の春先に大学構内で採取しておいた雪を低温室に保存しておいたものを使用した。雪質は固くザラメ化していたため実験開始時に細かく砕き、ふるい分け試験を行い雪の粒径が 0.30~4.76mm の範囲に納まるように雪の試料を作成し、各々の実験で雪の最大粒径、粒度分布がほぼ一定になるようにした。

図-1は本実験で用いた積雪浸透実験装置を示している。本実験では乾き雪、濡れ雪の浸透特性を明らかにする事を第一の目的としているため、以下に示す2つの浸透実験より成り立っている。まず、最初に先に

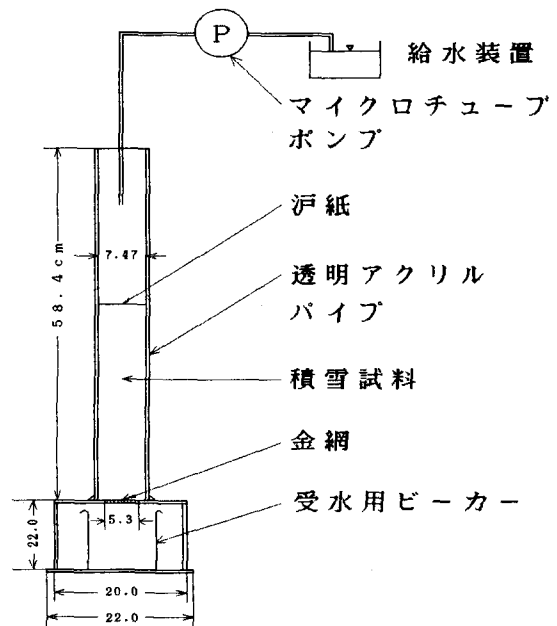


図-1 積雪浸透実験装置

Experimental Study on the Water Percolating in Snowpack

by Takashi NAKAO and Kimiteru SADO

述べた透明アクリル製の円筒容器(φ7.47cm、高さ58.4cm)に所定の積雪深になるまでハンドショベルで静かに流し込んだ積雪試料(乾き雪)を用い、積雪浸透実験を行ない、その後同一試料を用いて再び同様の方法で浸透実験を繰り返した(濡れ雪)。以下、簡単のため前者の実験を乾き雪実験、後者の実験を濡れ雪実験と称する。2つの実験とも実験開始前に予め円筒容器ごと重量を計り、これと積雪の体積より実験前の試料密度を求めた。アクリル円筒の側壁には積雪深のほぼ半分的位置に2カ所熱電対を貼り、これを積雪の温度とし、実験中積雪温度がほぼ0℃になるよう低温室の室温を制御しながら実験を行った。

積雪表面融雪量に相当する融雪水はマイクロチューブポンプにより、試料上部にセットしてある水槽から供給され、融雪水が試料に均等に浸透するよう試料上面には濾紙をのせてある。マイクロチューブポンプには流入量を調節させるためのダイヤルがついており、予め求めておいたダイヤルと流入量との校正表により予想流入量にダイヤルをセットし実験を行ったが、最終的な流入量の決定は実験前と実験後の水槽の重量の減少量より求めた。流入水となる水槽内の水はアクリルパイプの側壁の浸透の様子を観測できるようにするため乾き雪の実験ではウランinで、また濡れ雪の実験ではメチレンブルーで着色した水溶液を作り、これを流入させた。水槽内には水温が0℃になるよう氷を入れておき熱電対で水槽内の温度測定も行った。

流入水は水みちを形成しながら積雪試料内を浸透流下し、アクリルパイプ下端の金網から受水用ビーカーに集められる。流出量は流入開始より5分毎に受水ビーカーの重量を電子ばかりで計測し、これを水の密度と容器の断面積で割り、1時間当りの流出高に換算したものをを用いた。

実験終了時には積雪試料の積雪深の減少量および試料重量から実験後の試料の湿潤密度を求め、さらにアクリルパイプ内の重量の増加量から浸透水の貯留量を算出し、実験終了後の含水率を求めた。

3. 実験結果

表 1 実験条件

表1に本実験で用いた、流入量(mm/hr)、積雪深、試料の状態、流入継続時間(min)及び実験前後の試料密度を示している。実験開始前の積雪試料の密度は乾き雪で $0.51 \sim 0.55 \text{ g/cm}^3$ であり、ほぼ一定であったが実験終了時には $0.58 \sim 0.71 \text{ g/cm}^3$ といずれの場合も $0.04 \sim 0.13 \text{ g/cm}^3$ の密度の増加がみられるが、濡れ雪の場合実験の前後とも $0.57 \sim 0.71 \text{ g/cm}^3$ であり密度の増加は $-0.01 \sim 0.01 \text{ g/cm}^3$ とほぼ一定である。これは乾き雪の場合流入水の一部が懸垂水となって積雪層中に保持され、実験終了後でも積雪層内に貯留しているためである。流入継続時間は予想流入量をピーク流出量と想定し、実験開始からピーク流出量に達した後、さらに10分間流入し続けた。Case 1のみ乾き雪だけの実験であり、実験方法も積雪試料の下面と金網の間に濾紙を1枚おき、さらにアクリルパイプの周囲をスタイロホームで断熱したが、Case 2以降は流入水の浸透の様子を観察するため、低温室の温度管理を頻繁にし、流入水の凍結に気をつけながら実験を行ない、アクリルパイプ周囲の断熱材を撤去した。一方、試料底部の濾紙はメが細かく、しずくとなって流出してくる流出水が凍結する恐れがあるため撤去した。

図-2、3は本実験で得られた実験結果の一例として

	流入量 (mm/h)	積雪深 (cm)	試料 の状 態	流入継 続時間 (min)	密 度(g/cm^3)	
					実験前	実験後
Case 1	3.77	30	乾き	390	0.51	0.58
Case 2	4.99	10	乾き	240	0.54	0.71
Case 3	4.27	10	濡れ	60	0.71	0.71
Case 4	3.87	20	乾き	340	0.53	0.62
Case 5	4.34	20	濡れ	70	0.62	0.63
Case 6	4.19	30	乾き	420	0.53	0.61
Case 7	4.11	30	濡れ	120	0.61	0.61
Case 8	4.04	40	乾き	485	0.52	0.58
Case 9	2.98	40	濡れ	225	0.58	0.58
Case 10	4.41	50	乾き	460	0.51	0.58
Case 11	4.36	50	濡れ	210	0.58	0.60
Case 12	6.48	10	乾き	180	0.55	0.71
Case 13	6.34	10	濡れ	60	0.71	0.70
Case 14	7.20	20	乾き	240	0.54	0.63
Case 15	6.98	20	濡れ	100	0.63	0.64
Case 16	6.69	30	乾き	300	0.54	0.61
Case 17	4.62	30	濡れ	160	0.61	0.62
Case 18	6.27	40	乾き	330	0.52	0.58
Case 19	6.46	40	濡れ	160	0.58	0.60
Case 20	6.39	50	乾き	340	0.51	0.57
Case 21	6.27	50	濡れ	220	0.57	0.58
Case 22	6.38	20	乾き	270	0.52	0.63
Case 23	4.34	20	濡れ	90	0.63	0.63
Case 24	4.08	30	乾き	450	0.52	0.59
Case 25	6.19	30	濡れ	120	0.59	0.61

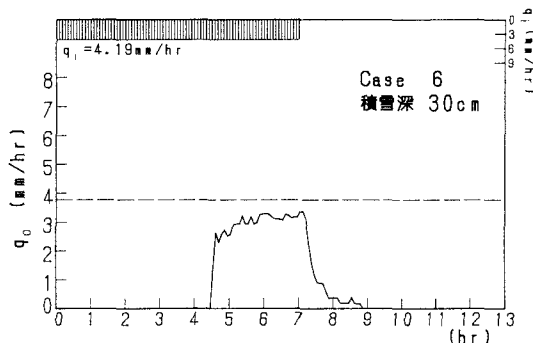


図-2 流出量の時間変化 (Case 6)

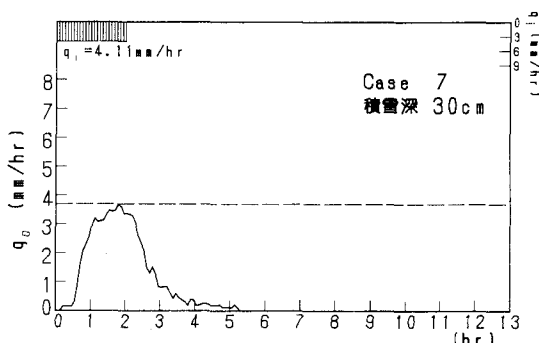


図-3 流出量の時間変化 (Case 7)

Case 6(乾き雪)とCase 7(濡れ雪)の流出量の時間変化を示している。何れの場合でも流出の開始と共に流出量が急激に上昇し、ピーク流出量に達するとほぼ一定となり、その後流入停止後緩やかな曲線を描きながら減水始める。なお、図中の破線は流入量の9割の値を示している。以下、流入開始直後から最初に流出が生じるまでの時間を流出開始時間(T_e)、最初に流出が生じた時間より流入量の9割に達するまでの経過時間をピーク量到達時間(T_r)、流入停止より流出量が完全に0となるまでの経過時間を減水時間(T_f)と呼ぶことにする。

表 2 雪面低下量と流入水による融雪量

		実験前の 積雪深 (cm)	雪面 低下量 (mm)	流入水による雪面 融雪量 (mm)	流入継続時間 (min)	流入水の温度 (°C)
乾 き 雪	Case 1	30.0	7	0.00	390	0.0
	Case 2	10.0	2	0.46	240	1.0
	Case 4	20.0	6	0.68	340	1.3
	Case 6	30.0	6	0.14	420	0.2
	Case 8	40.0	5	0.40	485	0.5
	Case 10	50.0	20	1.65	460	2.0
	Case 12	10.0	2	0.67	180	1.5
	Case 14	20.0	3	0.34	240	0.5
	Case 16	30.0	4	1.40	300	1.8
	Case 18	40.0	7	0.75	330	0.9
	Case 20	50.0	10	1.87	340	2.1
	Case 22	20.0	5	1.24	270	1.8
	Case 24	30.0	5	0.37	450	0.5
濡 れ 雪	Case 3	9.8	0	0.06	60	0.6
	Case 5	19.4	2	0.13	70	1.1
	Case 7	29.4	2	0.04	120	0.2
	Case 9	39.5	3	0.03	225	0.1
	Case 11	48.2	2	0.18	210	0.5
	Case 13	9.8	0	0.00	60	0.0
	Case 15	19.7	0	0.00	100	0.0
	Case 17	29.7	3	0.00	160	0.0
	Case 19	39.3	3	0.24	160	0.6
	Case 21	49.0	2	0.66	220	1.2
	Case 23	19.6	1	0.08	90	0.5
	Case 25	29.5	3	0.00	120	0.0

3. 1 雪面低下の検討

実験終了後、乾き雪実験の場合いずれのCaseにおいても2~20mmの積雪深の低下がみられたが濡れ雪実験の場合その低下量は0~3mmであった。実験時における積雪の低下の原因として第一に考えられるのは流入水による雪面の融雪が考えられる。流入水による雪面の単位時間当りの融雪量 H (mm/hr)は流入量を q_i (mm/hr)、流入水の温度を θ_a (°C)、雪温を $\theta_s=0$ °C、雪の乾き密度 ρ_d (g/cm³)とすると次式で表わされる。

$$H = C_w \cdot \rho_w (\theta_a - \theta_s) / (797 \cdot \rho_d) \quad \dots (1)$$

ここに C_w 、 ρ_w は水の比熱(cal/g°C)、密度(g/cm³)である。

表2は実験終了時における雪面低下量と流入時間中の水槽の温度を用いて式(1)より得られる流入水による融雪量を示している。表より明らかなように流入水による融雪量は最大でもCase 20の1.87mmであり、これは雪面低下量の18.7%にしかすぎない。一方、乾き雪の雪面低下量2~20mmに対し、濡れ雪による雪面低下量は0~3mmと小さく、また同じ乾き雪でも積雪深の増加と共に雪面低下量も大となっている。先にも述べたように本実験で用いた積雪試料は、ザラメ雪を細かく砕いたものを使用しているため積雪の構造は単粒構造を形成している。このため最初の実験である乾き雪

実験の場合、流入水により上方の比較的小きな雪粒が下方の空隙に流れ込んだため、その分雪面低下が生じたと思われる。

3. 2 含水率・空隙率の変化

図-4は実験終了後の全積雪層の平均含水率と積雪深の関係を表わしている。積雪深が同じであれば、乾き雪、濡れ雪、流入量の大小に係わらず含水率はほぼ同じ値を示し、積雪深(hs)が大となると含水率(w)は減少する。この回帰式を求めたところ、 $W = 92.01 \cdot (hs)^{-0.62}$ 、 $r = -0.97$ と表わされる。

図-5は実験前の積雪試料の空隙率と実験後の空隙率の差を空隙率の変化とし、これと積雪深の関係を示している。図から明らかなように乾き雪の場合、積雪深が増加すると空隙率の変化は減少し、濡れ雪の場合積雪深の増加とともに空隙率の変化は僅かながら増加する。含水率が乾き雪、濡れ雪の違いによらず一定なのに対し、空隙率の変化が乾き雪と濡れ雪で違いがみられるのは以下の理由による。乾き雪の場合、実験開始とともに流入水は水みちを形成しながら流下し積雪中の含水量を高めながら積雪下端へ到達するが下端に達した水はすぐには流出せず積雪下端部に2~3cmの飽和層を形成し、その後流出を始める。この飽和層は流出停止後もほぼ同じ高さで飽和層を維持し続ける。実験終了後の積雪試料の状態は全て濡れ雪なので、飽和層の占める割合が大きい積雪深が小さな場合に含水率が大となり、逆に積雪深が大の場合、含水率は小となる。一方、実験前の乾き雪の空隙率は積雪深に係わらず40~45%とほぼ一定の値であった。しかし、実験後は積雪下面の飽和層のためこの部分の空隙率は全て0となり、積雪深が小さな程空隙率は小となる。実験前後の空隙率の変化は積雪深が小さいほど大となる。濡れ雪の場合、実験開始前から飽和層が存在するため空隙率は実験後も殆ど変化しない。

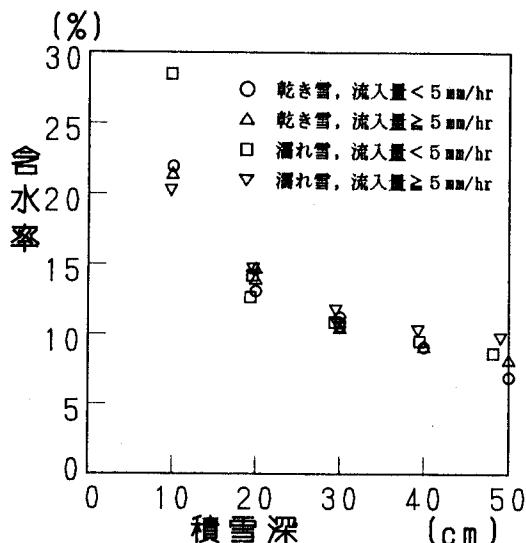


図-4 含水率と積雪深の関係

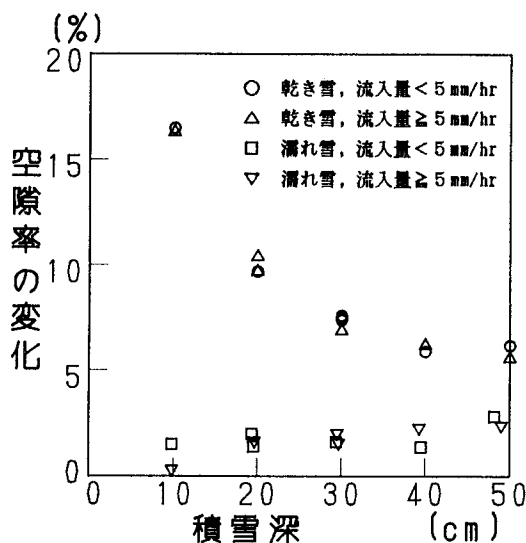


図-5 空隙率の変化と積雪深の関係

3. 3 流出開始時間・減水時間

流入開始から最初に流出が出現するまでの時間すなわち流出開始時間(T_E)は初期水みちの形成と大きなかわり合いがあると思われる。水みちがあまり発達しない場合、 T_E は小さく、水みちが十分発達する場合 T_E は大となる。図-6は本実験で得られた結果を乾き雪・流入量<5mm/hr(○印)、乾き雪・流入量≥5mm/hr(△印)、濡れ雪・流入量<5mm/hr(□印)、濡れ雪・流入量≥5mm/hr(▽印)の4つのグループに分け、 T_E と積雪深の関係を表わしている。図から明らかなように、乾き雪の場合新しく水みちを形成し、積雪中の含水量を高めながら融水が浸透していくため濡れ雪に比べ、 T_E は大となる。この傾向は流入量が5mm/hr以上よりも

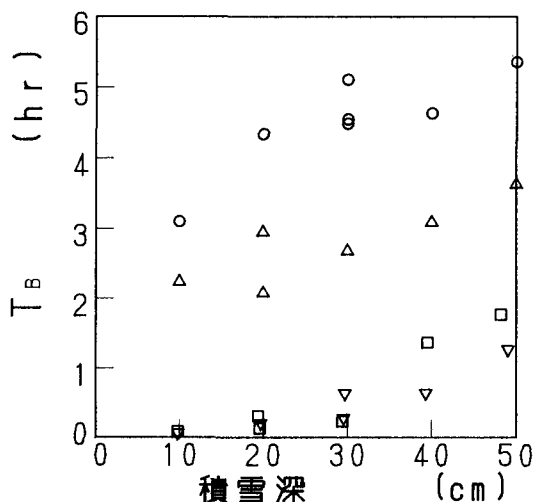


図-6 T_B と積雪深の関係

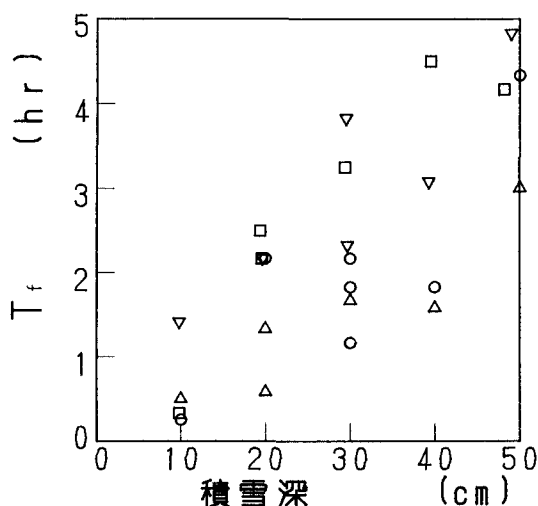


図-7 T_f と積雪深の関係

5mm/hr未満の場合の方が T_B は大となっている。このことより流入水が浸透、流下するとき流入量が小さければ積雪層内の水みちは、より複雑に形成されていくことが分かる。また、同程度の流入量では積雪深が大となると流下するのに余計に時間がかかるため T_B は大となる。

図-7は図-6と同様に実験結果を4つのグループに分け、流入を停止してから流出が終了するまでの時間すなわち減水時間 T_f と積雪深の関係を表わしている。何れの場合においても積雪深が大となると T_f も大となる。また濡れ雪の方が乾き雪に比べ T_f は大となっている。これは流入を停止した後、積雪内の含水は最大含水量までしか融水を保持できずに余分な水は下方へ流下するが、先に述べたように乾き雪に比べ濡れ雪の方が水みちが発達しており、また積雪深が大であると最大含水量を越える融水が積雪内に多く存在しておりそれだけ T_f は大となる。図-6、7から明らかなように積雪内部の水みちの形成は T_B 、 T_f に大きな影響を与える。

図-8は積雪深30cm、流入量5mm/hr未満の乾き雪を用い、いままで述べてきた方法と同様に浸透実験を行いさらに濡れ実験を連続3回行ったときの T_B 、 T_f の変化を示している。これより T_B は濡れ雪となる2回目以降は殆ど変化しないが T_f は僅かに増加の傾向がみられる。このことより濡れ雪でも浸透実験を繰り返す毎に少しずつ水みちが発達していると思われる。

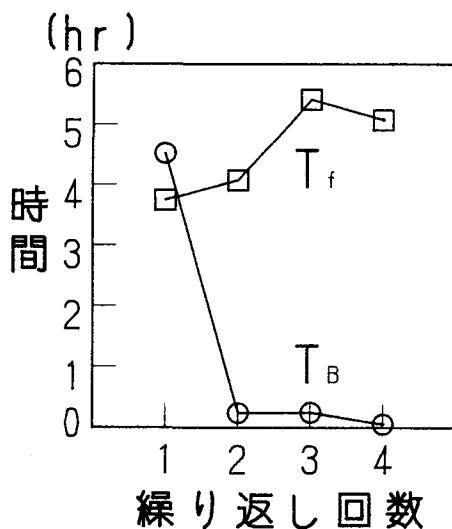


図-8 T_B 、 T_f の繰り返しによる変化

3.4 ピーク量到達時間

図-9は流出が開始してから流入量の9割に達するまでの時間(ピーク量到達時間 T_p)を表わしている。流出が開始した後すぐに流入水の全部が流出するわけではない。流入水の一部は積雪中で水みちを発達させ、積雪層中を十分覆いつくした後、流入量と同じ量だけ流出する。したがって T_p は水みちの発達を示

していると考えられる。図から明らかなように積雪深との傾向はみられない。また、流入量の9割に達したCaseは全25Caseの内、15Caseのみであった。これは水みちのでき方が試料により様々で水みちそのものが雪の粒子間の空隙の疎の部分に出来易く、積雪試料をアクリルパイプに詰める際、雪の詰まり方に違いが生じたためと思われる。しかし、図-8の結果から判断すると水みちの発達是最初融雪が以後、積雪内で凍結しない限り乾き雪から濡れ雪に変化するとき殆ど終了しているものと思われる。

4. 結 論

以上、得られた結果をまとめると以下のような結論が得られる。

- 1) 実験終了時積雪面の低下が観測されたが雪面低下量は濡れ雪よりも乾き雪の場合の方が大きかった。流入水による融雪量を求めたところ最大でも1.87mm以下であり、また濡れ雪よりも乾き雪の雪面低下量が大きな事からこの原因は実験に用いた試料が単粒化構造をなしているため、流入水により、大きな空隙に小さな雪粒が入り込んだためと考えられる。
- 2) 流入開始までの時間は乾き雪と濡れ雪では大きな違いがみられるが何れの場合でも積雪深と強い相関がみられる。
- 3) 減水時間は積雪深が大きくなると減水時間も大となる。また、乾き雪の場合よりも濡れ雪の場合の方が減水時間は大となる。
- 4) 上記2), 3)を同一試料を用いて4回繰り返して実験を行ったところ流出開始時間は乾き雪から濡れ雪へ変わる2回目で急激に減少し、その後ほぼ一定となる。また減水時間は繰り返し回数の増加と共に僅かに大となる。
- 5) 実験後の含水率は乾き雪、濡れ雪ともほぼ同じであり、その値は積雪深の増加と共に減少する。

本実験で用いた積雪試料は春先に採取しておいた雪を実験開始前にふるい分けした試料を用いたため、構造的には単粒構造をなしているが、自然の積雪は層構造を形成しているため本実験とは異なる現象を呈することが考えられる。今後は自然の積雪による浸透実験も行ない、実験精度を向上させ、さらに浸透過程を不飽和領域として解析したモデルを確立し実験結果と比較検討する予定である。

なお、本研究は、平成2年度文部省科学研究費補助金、奨励研究(A)、課題番号02750418の援助により行った。記してここに感謝する。

【参 考 文 献】

- 1) Colbeck, S.C.: Dynamics of Snow and Ice Masses, ACADEMIC PRESS, 1980.
- 2) 中尾隆志・佐渡公明: 融雪水の積雪層内浸透に対する貯留関数法の適用、土木学会北海道支部論文報告集、第46号、PP.287~292、1990.

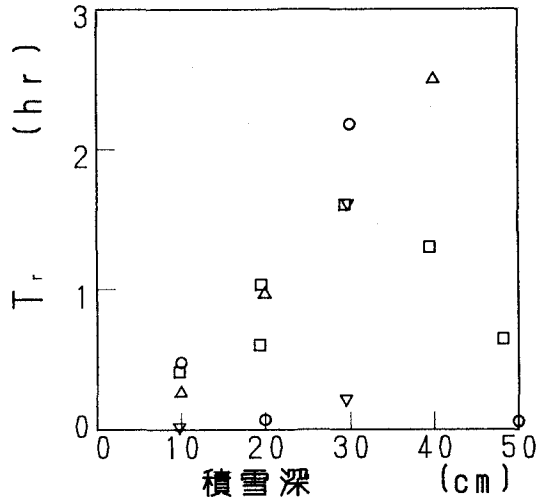


図-9 T_rと積雪深の関係