

融雪水の積雪内部への浸透過程に関する研究 Infiltration of Meltwater into a Snowpack

長岡技術科学大学建設系 早川 典生 N. Hayakawa
長岡技術科学大学建設系 河原 能久 Y. Kawahara
長岡技術科学大学大学院 山田 衛 M. Yamada
長岡技術科学大学建設系 後藤 巖 I. Goto

1. はじめに

太陽放射などにより生じる融雪水は貴重な水資源になる一方、春先の融雪洪水のような災害の原因にもなる。積雪からの融解水を有効に利用するためには、正確な融雪出水予測や融解に対する制御を行わなければならない。ここに積雪の融解、積雪内部における融解水の浸透およびそこから出水の各過程を把握する必要性がある。積雪の融解過程については既に多くの研究がなされている。しかし、融雪水の積雪層内部への浸透過程に対してはいくつかの研究が行われているものの、積雪のもつ多様な特性のために十分に解明されているとは言い難い。

融雪水の積雪層内部への浸透は積雪の構造や物理的諸元などの内的要因、表面気温や地面からの熱の移動などの外的要因の違いにより異なった様相を示すと考えられる。融雪水の浸透過程のモデルについて、従来の研究は2つに分けられる。1つは、均質な積雪中を融雪水が水平面内に一様に浸透すると考えるものであり、菅原¹⁾はそれに対応する物理モデルを提案している。2つめは、融雪水の大部分が積雪層に散在する水路を流下するというモデルである。Marsh^{2,3)}、Colbeck⁴⁾、Bengtsson⁵⁾は高緯度地方におけるフィールドの観測結果をもとに、浸透が2種類の浸透経路を通ると考えて解析を行っている。

本研究は、積雪上面で発生した融雪水の積雪内部への浸透現象を把握することを目的として2次元浸透室内実験を行ったものである。雪試料を用いた実験には困難さが予想されたので、砂層中の浸透実験を行って基礎的な検討をした。その上で、均質な積雪中の浸透実験を行った。

2. 実験

2. 1 砂を用いた実験

2. 1. 1 方法および条件

実験装置を図-1に示す。本体は、高さ90cm、幅84cm、奥行き0.5cmの亚克力製の平板状容器である。容器下部は金網張りとなっており、水と空気の入りが自由である。本体上部には水槽と、水槽水深を一定に保つための水供給装置が取り付けられている。

実験に用いる砂は、ふるいによって粒径をそろえたものである。粒径は、春の積雪中のザラメ雪の粒径を考慮し、0.4~0.6mm(平均0.5mm)、0.84~1.2mm(平均1.02mm)、1.2~2.5mm(平均1.85mm)の3種類とした。砂は実験装置本体の上端より流し込まれ、同時に木づちで装置に衝撃を与えることにより締め固められる。砂試料は本体上端より約10cm下の面まで詰め込み、その上面にフィルターペーパーを敷き、さらに上に粒径0.16mmの細砂を詰める。これは砂試料上面に水を均一に供給するためである。

実験では砂の粒径のほか、空隙率、供給水量、試料上面の起伏、初期飽和度を変化させた。ここで、試料上面の起伏とは、水路の形成が実験に固有なものであるかどうかを調べるために予め上面につけた波状の起

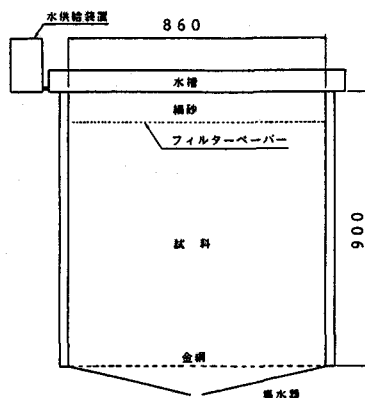


図-1 実験装置（砂試料）

伏のことである。実験条件を表-1に示す。上部の水槽に水を供給すると、水は細砂中を一様に浸透した後、砂試料上面より水路を発達させて浸透する。水供給開始を時刻0秒とし、適当な時刻に装置前面より浸透の様子を写真撮影した。そして水路の間隔、幅など、浸透状況の変化を観察した。

2. 1. 2 結果と考察

実験例を写真-1に示す。実験で観察される水路の発生と発達過程は以下の通りである。まず、水槽に水を供給すると、水は試料上部の細砂中をほぼ水平の浸透界面を形成して浸透し、試料上面に達する。水が試料中に入ると浸透界面は凸凹になり、凹部のうちのあるものが大きく発達して水路となる。水路は蛇行、合流、分流を繰り返し、間隔を変えながら下方へ進行する。水路ができると、水は一様浸透の場合より早く下部に到達し、流出する。

実験結果を表-1に示す。表中の点線は測定値不良、実線は水路が観測されなかったものである。水路間隔は試料上面付近で測定したもので、幅は上面から10cm程度下で測定したものである。水路間隔は新しい水路が発生する度に变化するが、実験開始後10分以内に一定となった。水路幅は実験時間内(30分程度)ではほとんど変わらなかった。透水係数 k は、次式で表される Kozenyの式⁶⁾を用いて計算した。

$$k = 0.0239 \frac{\rho g}{\mu} \frac{\phi^3}{(1-\phi)^2} d^2 \quad (1)$$

ここで、 ρ は水の密度、 g は重力加速度、 μ は水の粘性係数、 d は粒径、 ϕ は空隙率である。

実験条件と結果との関係は以下の通りである。

a) 粒径の影響

図-2に粒径 d と水路間隔 λ の関係、図-3に粒径 d と水路幅 W の関係

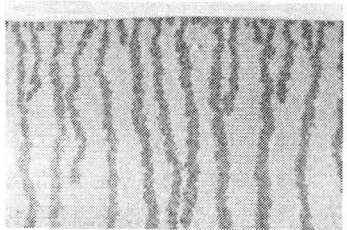


写真-1 水路の形成 (Case3)

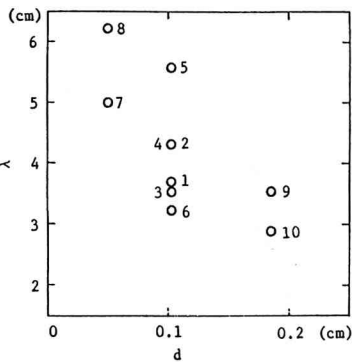


図-2 水路間隔と粒径の関係

表-1 実験条件 (砂試料)

Case No.	砂粒径 d (mm)	空隙率 ϕ (-)	透水係数 k (cm/sec)	初期飽和度 S (-)	供給水量 V (cm ³ /s / cm ²)	水路平均間隔 λ (cm)	水路平均幅 W (cm)	下路到達時刻 (sec)	流出開始時刻 (sec)
1	1.02	0.414	0.502	0	0.0199	3.70	1.82	325	458
2	1.02	0.410	0.503	0	0.0230	4.32	1.63	324	450
3	1.02	0.415	0.530	0	0.0297	3.52	1.69	225	415
4	1.02	0.325	0.187	0	0.0176	4.32	1.64	365	524
5	1.02	0.337	0.216	0	0.0166	5.53	1.96	352	578
6	1.02	0.414	0.525	0	0.0786	3.21	2.39	100	116
7	0.5	0.408	0.116	0	0.0229	5.00	2.92	533	697
8	0.5	0.403	0.107	0	0.0360	6.21	2.71	474	556
9	1.85	0.399	1.469	0	0.0185	3.52	1.54	236	350
10	1.85	0.400	1.420	0	0.0255	2.89	1.41	210	295
11 ¹⁾	1.02	0.420	0.573	0	0.0169	10.36	2.55	---	550
12 ²⁾	1.02	0.410	0.515	0	0.0265	5.88	1.88	246	349
13 ³⁾	1.02	0.421	0.553	0	----	4.50	1.34	560	---
14 ⁴⁾	1.02	0.410	0.552	0.046	0.0290	4.96	3.85	405	495
15 ⁴⁾	1.02	0.423	0.564	0.102	0.0167	---	---	730	879
16 ⁴⁾	1.02	0.391	0.449	0.286	0.0362	---	---	420	475

1) 砂上面に凹凸 (波長10cm 振幅2cm) 砂界面ベーパー無
2) 同上 (波長1cm 振幅0.5cm)
3) ストローク径0.5cm 間隔0.95cm)を通して水を供給
4) 砂界面ベーパー無

を示す。図中の番号は、表－１の実験番号に対応する。これより、砂粒径が小さいほど水路は太く、間隔が広くなることがわかる。これは、粒径が小さいほど毛管力の影響が強いためと考えられる。そして水路が太くなれば、すぐ隣の水路を合流して、結果的に水路間隔が広がると考えられる。

b) 空隙率の影響

表－１からは空隙率が水路に及ぼす影響は読み取れない。これは空隙率の変化の幅が小さかったためと考えられる。

c) 供給水量の影響

水量 V を粒径 d を用いて無次元化した値 $V/\sqrt{gd}$ と水路幅・間隔比 W/λ の関係を図－４に示す。これより、水量が多いか粒径が小さければ、水路部分の割合が大きくなり、一様浸透に近づくことがわかる。

d) 試料上面の起伏の影響

表－１のCase 1 1～1 3より、試料上面の起伏が水路間隔に影響を与えることがあることがわかる。すなわち、起伏の波長が本来の水路間隔に近い場合、水路間隔は起伏の波長に従う（写真－２参照）。波長が短い場合は、水路発生的一瞬间には起伏の波長に従ったとしても、すぐに隣の水路と合流してしまい、起伏の波長と関係ない水路間隔が観測されることが考えられる。なお、Case 1 3は水の供給を不均一にしたものだが、上面に起伏がある場合と同じ事が言えると考えられる。

e) 初期飽和度の影響

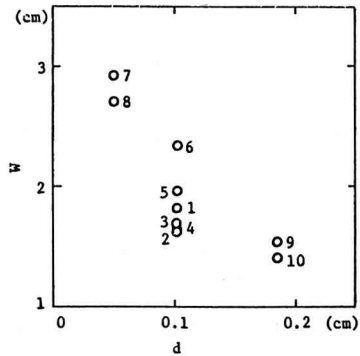
表－１のCase 1 4～1 6より、試料が最初から湿っているばあいには、かなり小さな初期飽和度でも、水路の発生を抑える方向に作用することがわかる。これは、砂粒子が湿っていることで浸透水との接触角が小さくなり、表面張力が水分を広く分布させる方向に作用するためと考えられる。このため試料がある程度ぬれていれば、供給された水はほぼ一様に浸透する（写真－３参照）。

2. 2 雪を用いた実験

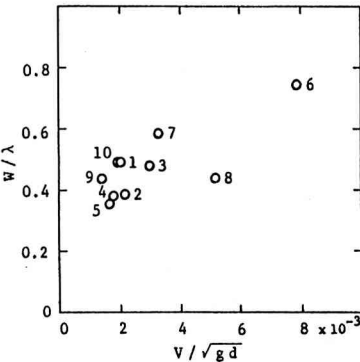
2. 2. 1 方法および条件

実験装置を図－５に示す。本体は、高さ45／9 1 cm、幅8 4 cm、奥行き2 cmの亚克力製容器である。本体の前、後面は断熱のため中空二重板構造となっている。下部は金網張りとなっており、水と空気の入りが自由である。容器には熱電対が取り付けられ、雪試料の温度を測定できる。装置内の雪試料を融解させるため、ミニレフ電球1 6個を一行に並べた熱源を、本体上部に取り付けた。熱源は、幅2 cmのスリットを通して電球のふく射エネルギーを雪試料に与えるものである。熱量の調節は、スライドレギュレータで電圧を調節することで行う。

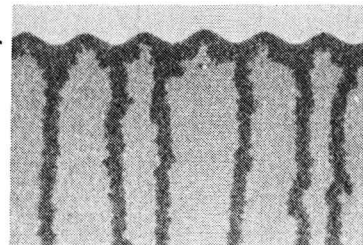
実験に用いる雪は、かき削った水を長期間低温室で保存してザラメ状の粒にしたもので、ふるいにより粒径をそろえてある。また、融雪水の浸透状況を可視化するため、トレーサとして着色した雪も用意した。試料を装置に入れるときは、装置を水平に寝かせて前面の板を外し、ふるいを用いて試料をすみずみまで行き渡らせる。表面を平らに均してから前面板をかぶせ、装置を立てる。最後に、装置の最上部に厚さ1 cm程度にトレーサ用の雪を入れる。



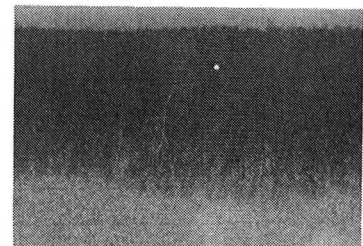
図－３ 水路幅と粒径の関係



図－４ 水路幅・間隔比と水量の関係



写真－２ 起伏下部での水路形成 (Case 1 1)



写真－３ 水の浸透状況 (Case 1 6)

試料を装置にいった後、周囲の気温を約0℃に設定し、試料温度を0℃に近づける。これは、融雪水が試料内部で再凍結するのを防ぐためである。試料温度が-1℃以上になったところで、上部に熱源を取り付け、試料の融解を開始する。適当な時刻に、トレーサによって着色された融雪水の浸透状況を、写真撮影する。撮影は、装置後面から光をあてて、水路をシルエットとして浮かび上がらせて行う。

実験では雪の粒径、空隙率、供給熱量を変化させた。実験条件を表-2に示す。

2. 2. 2 結果と考察

実験例を写真-4に示す。雪試料の融解による水路の発生と発達過程は以下の通りである。試料に熱の供給を開始すると、上部のトレーサ用の雪が解け始める。融雪水の浸透前面は試料上面直下から凸凹になり、あるものは水路に発達する。水路は蛇行、合流、分流しながら進行する。試料上面は融けた分だけ低下する。実験開始後1時間過ぎる頃から拡散の影響による水路幅の増大が目立ち始め、4～5時間で試料のほとんどが湿り状態となる。

実験条件と水路の観察結果を表-2に示す。表中の水路間隔は、砂の場合と同様に、試料上面付近で測定したもの、幅は上面から10cm程度下で測定したものである。これら水路に関する値は、実験開始後1時間のものである。供給熱量は実測が困難なため、融解による試料上面の低下割合（融解速度）から計算した。透水係数は、次の Colbeckの式を用いて計算された。

$$k = 0.077 \frac{\rho_g}{\mu} \frac{\Phi^3}{(1-\Phi)^2} d^2 \exp(-7.8 \frac{\rho_s}{\rho_w}) \tag{2}$$

ここで、 ρ_s 、 ρ_w はそれぞれ雪、水の密度である。

実験条件と結果の関係は以下の通りである。

a) 粒径の影響

粒径dと水路間隔λ、幅Wとの関係を図-6、7に示す。これを見る

表-2 実験条件（雪試料）

Case No.	雪粒径 d (mm)	空隙率 φ (-)	透水係数 k (cm/sec)	融解速度 (cm/hr)	供給熱量 Q (kJ/m²)	発生水量 V × 10 ⁻⁴ (cm³/s / cm²)	水路平均間隔 λ (cm)	水路平均幅 W' (cm)
1	1.02	0.593	2.382	1.36	473	1.42	3.74	1.57
2	1.02	0.486	1.108	1.37	597	1.79	5.30	2.34
3	1.02	0.497	1.119	1.17	499	1.49	4.56	2.24
4	1.02	0.537	1.596	1.13	446	1.34	4.62	1.92
5	1.02	0.444	0.820	2.06	974	2.92	3.86	1.94
6	1.85	0.548	5.679	1.31	502	1.50	3.61	1.43
7	1.85	0.544	5.519	1.30	504	1.51	4.47	2.03
8	1.85	0.570	6.647	1.17	426	1.28	4.06	1.52
9	1.85	0.596	8.006	1.13	389	1.17	3.54	1.78
10	1.85	0.467	3.181	2.37	1072	3.21	4.06	1.97
11	1.85	0.370	1.589	1.93	1033	3.10	4.59	2.18
12 ¹⁾	1.02	0.444	0.820	1.44	680	2.04	8.98	5.39
13 ²⁾	1.85	0.370	1.589	1.49	800	2.40	6.90	5.85

1) Case 5 終了4時間後に再融解したもの
2) Case 11 終了7時間後に再融解したもの

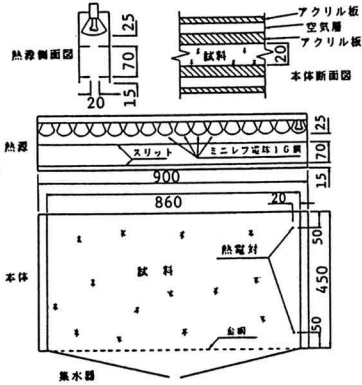


図-5 実験装置（雪試料）

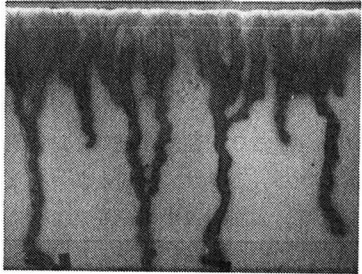


写真-4 水路の形成（Case5）

と粒径が大きくなると、間隔、幅共に減少する傾向が見られる。

b) 空隙率の影響

表-2から空隙率が大きくなると、水路間隔、幅共に小さくなる傾向が読み取れる。

c) 供給熱量の影響

熱量の変化はそのまま発生水量Vの変化となるので、粒径dを用いて無次元化した値 $V/\sqrt{gd}$ と幅・間隔比 W/λ の関係を図-8に示す。これは、わずかに右上がりの傾向がみられる。

d) 初期飽和度の影響

雪の実験では、一度融解実験を行った試料をしばらく放置してから、もう一度融解する実験を行った(Case 12, 13)。これは砂の実験では初期に試料中に水が存在する場合に相当する。その結果は写真-5にも示すように、砂の場合と同様に、水路の発達はかなり抑えられており、一様浸透に近づいている。

以上の結果で、図-6~8は、砂の実験の図-2~4に対応するものである。雪での実験の結果は、砂によるものと比べると、傾向があまりはっきりしない。この理由として次の事が考えられる。雪の粒径を2種類しか用意しないなど、パラメータの変化が小さい。水量の絶対量が小さい(砂の場合の10-2のオーダー)ため、各パラメータの変化が結果に有効に反映しない。下方への水分浸透速度が遅いため、相対的に拡散の影響が大きくなり、水路の縁がにじむので、水路間隔や太さを正確に測定できない。

しかし雪と砂の実験の、それぞれ対応する図を見比べてみると、雪での結果は砂の結果と同範囲か、延長上にある。このことから、雪の実験で発生する現象は、砂の実験のものと同じ性質を持つと考えられる。

3. 安定解析との比較

3.1 理論

二種類の流体が接しているとき、流体中の乱れにより境界面が波状に不安定となる現象を扱うものに安定解析がある。流体を水と空気とすると、多孔質中を水が浸透して行くときの水路発生の瞬間に適応でき、水路間隔を計算できる。安定解析には古典的な線形安定論から数値解析までであるが、ここではChuokeyらの表面張力を考慮した線形安定論²⁾を適用する。その理論によれば、境界面での乱れの波数 α と不安定発達率 n との関係式として次式が得られる。

$$n = (k-V)\alpha - \frac{\sigma k}{\rho g} \alpha^3 \quad (3)$$

ただし、Vは境界面の移動速度、 σ は表面張力である。

$n > 0$ 、 $\alpha > 0$ とおくと、不安定であるための必要条件が求められる。

$$V < k \quad (4)$$

また、 $dn/d\alpha = 0$ とおくと、不安定が最も発達しやすい波数が次の

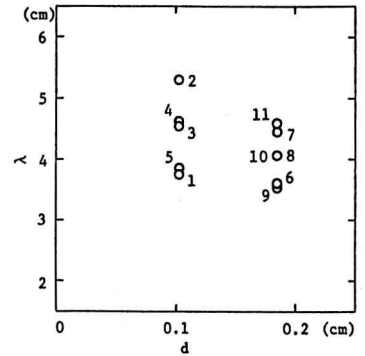


図-6 水路間隔と粒径の関係

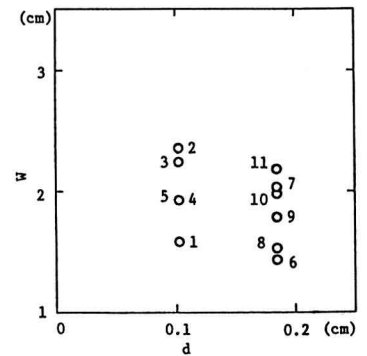


図-7 水路幅と粒径の関係

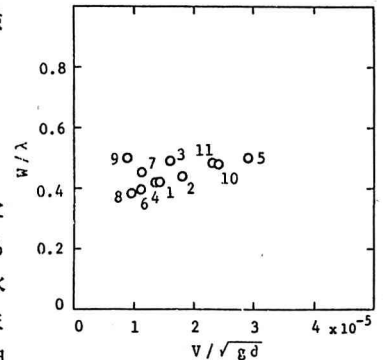


図-8 水路幅・間隔比と水量の関係

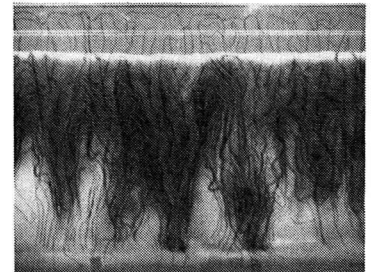


写真-5 水の浸透状況 (Case 12)

ように得られる。

$$\alpha_m = \left[\frac{\rho g}{3\sigma k} (k-v) \right]^{1/2} \quad (5)$$

3. 2 実験との比較

実験で観測される水路は不安定発達率が最大となる波長で発生すると考え、式(5)よりその波長 λ_m を求めた。無次元化するために、独立変数を V/k とした。この式と実験結果をプロットしたのが図-9(a)(b)である。

$$\lambda_m \sqrt{\frac{\rho g}{\sigma}} = 2\sqrt{3} \pi \left(1 - \frac{V}{k}\right)^{-1/2} \quad (6)$$

これより、砂の実験値が右上がりの傾向を表すこと、雪の実験値では明かな傾向が認められないこと、さらにどちらの実験結果も解析結果より上方に存在することが知られる。雪に対する結果が明瞭な傾向を示さないのは、2. 2. 2で述べた理由によると考えられる。砂の実験も粒径が細かいほうが理論値と合わない。この理由は、粒径が細かいと水路が合流しやすく、水路間隔が大きくなりやすいためであると考えられる。実験結果が全体的に理論値よりも大きめであることは、測定位置が界面よりやや下方であることも影響していると思われる。また、 λ が λ_m より多少大きくなっても n は余り小さくならないので、この結果は測定誤差の範囲内と考えることができるかもしれない。

4. 結論

積雪上面で発生した融雪水の積雪内部への浸透機構について、主として実験的に検討した。その結果として得られた知見を以下に整理する。

- (1) 積雪粒子がザラメ雪程度の場合、初期の飽和度がゼロならば、浸透水は必ず水路を形成する。
- (2) 積雪に対する実験結果は砂を用いた実験結果と同じ傾向を示した。すなわち、粒径が小さいほど水路間隔が大きくなる。
- (3) 初期のわずかな水分分布でも水路の発達を抑える効果がある。
- (4) 水路間隔の実験結果は、線形安定解析による結果に比べやや大きい。

参考文献

- 1) 菅原征洋, 太田照和, 山田悦郎, 木元浩司: 日本機械学会論文集(B編), 48巻, 435号, pp.2407-2411, 1982.
- 2) Marsh P. and Woo M.: Water Res. Research, Vol.20, No.12, pp.1853-1864.
- 3) Marsh P. and Woo M.: Water Res. Research, Vol.20, No.12, pp.1865-1874.
- 4) Colbeck, S.C.: Cold Regions Sci. Tech., Vol.1, pp.37-45, 1979.
- 5) Bengtsson, L.: Cold Regions Sci. Tech., Vol.6, pp.73-81, 1982.
- 6) 八幡敏雄: 「土壌の物理」, 東京大学出版会, p.83, 1975.
- 7) Colbeck, S.C.: Advances in Hydroscience, Vol.11, Academic Press, pp.165-206, 1978.
- 8) Chuoke, R.L., van Meurs, P., and van der Poer, C: Trans. AIME., Vol.216, pp.188-194, 1959.

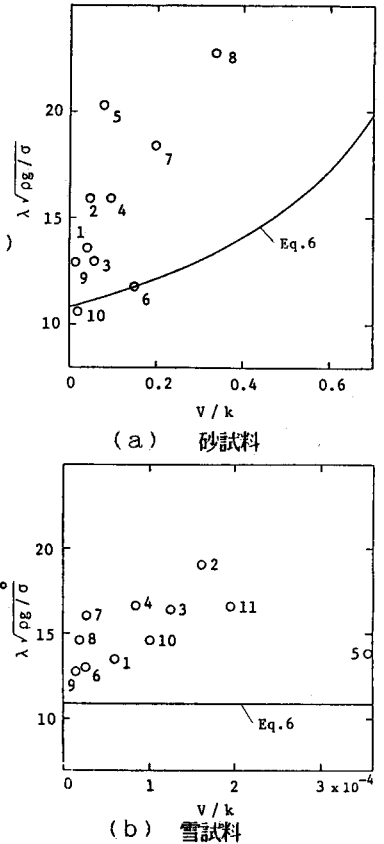


図-9 水路間隔の実験値と理論値の関係