

(46) 消融雪ネットの原理と実水路への適用

金沢工業大学 正員 中 川 武 夫

1. はじめに

豪雪地帯が国土の52%を占め、そこに総人口の18%が住んでいるわが国において雪処理問題がいかに重要なウェイトを占めているかは全く異論のないところであろう。ところで、雪の処理方式が線的から面的変化を余儀されなくなった最大の理由の一つとして急激な自動車台数の増加を挙げることができる。さらに、今日においてはどのように小さな小路にも生活上あるいは経済上の要請から自動車が入り込まなくななくなってきたことがこの傾向に拍車をかけている。

現在までに知られている除雪工法は大きく三つに分けられる。第一番目は機械除雪である。この除雪工法はパワー・ショベル、ブルドーザー等による除雪行程とダンプ・カーによる雪捨場への排雪行程とから成り立っている。第二番目は流雪溝やスノー・メルター等の除雪施設を用いた工法である。流雪溝とは流水による雪の運搬能力を利用して排雪するための側溝であり、スノー・メルターとは雪を融解槽において水にするための施設である。そして、第三番目は散水、温水パイプ、電熱線、赤外線、薬剤、網状板等の融雪施設を用いた工法である。散水融雪とは消雪パイプと呼ばれる路面中に埋設された管から水を噴出させて雪を解かす工法である。なお、散水用の水としては地下水、河川水、温水、海水、伏流水等が用いられている。温水パイプ融雪とは路面中に埋設された管内に温水を循環させることによって路面上の雪を解かす工法である。電熱線融雪とは路面中に埋設された電熱線に通電することによって路面上の雪を解かす工法である。赤外線融雪とは赤外線ヒーターから発する熱線によって雪を解かす工法である。薬剤融雪とは塩化カルシウム、尿素などの水溶液の凝固点が純水より低いという物理的性質を応用して雪を解かす工法である。なお、薬剤は結晶または溶液として散布される。網状板融雪は少量の水が流れている野面石^{のづみし}を敷き詰めてつくった水路に投入された雪が良く解けることからヒントを得て桐生¹⁾によって考案・開発され、著者²⁾による実用実験によってすでにその有効性が確認されている。しかしながら、網状板融雪工法の原理を明解に解説した論文あるいは書物がなかったこと及びその実用実験結果が公表されなかったこと等の理由により、未だ豪雪地域の行政担当者あるいは個人にこの工法の広範かつ積極的採用を決断せしめる段階に至っていないのが現状である。

本論文においては網状板融雪工法の中で最も実用性が高いと考えられる消融雪ネットを用いた融雪原理をまず紹介する。続いて、側溝と用水において実施された消融雪ネットの2回の実用実験の結果についてそれぞれ報告する。最後に合成構造の活用という観点から現在考えられる種々の消融雪ネットの構造と材料に関して若干の検討を加える。

2. 消融雪ネットの原理

のづみし

消融雪ネットの原理を理解する鍵は水路床に敷き詰められた野面石^{のづみし}の間隙を連ねた小さな水路の間を縫うように流れる流水の存在にある。すなわち、排水路、用水あるいは河川の流路に沿って網状板を敷設することによって流路をまず二つに分離する。このように分離された流路の片側に雪を投入し、残りの部分を水路^{みづみち}として確保するわけである。ところが、投入された雪は網状板の網目を介して水路^{みづみち}を流れる水と接触することになるので流水の熱が雪へ伝わり、これを融解するわけである。したがって、消融雪ネットの上流からその敷設部へ流れ込んでくる流水はその中に含まれる熱の一部を融雪のために消費したのち次々と下流に流れ去っていくこととなる。

ところが地熱温度の方が流水の温度より高い場合には融雪ネット敷設部において流水の温度降下の程度が

大きいほどそれだけ多くの熱が地中から流水に補給されるので流水の温度は流下に伴ってもとの温度にもどることとなる。すなわち、消融雪ネットは流水から雪への熱輸送がいったん起こるとただちに流水内部の欠損した熱を地熱が補なうという一種の熱エネルギー回路とみることができよう。

次に消融雪ネットの安全性と経済性の両面から検討することとする。消融雪ネットはすでに指摘したように常に一定の水路が確保されているために流雪溝の中へ流量に比して多すぎる雪を投入した場合にしばしば起こるいつ水の危険がないように側溝、用水、河川等の既存の水路を利用すれば網状板のみの費用で済む極めて経済的な融雪工法である。ちなみに、道路延長1 mあたりの雪処理費用は減価償却費、除雪費用等すべての費用を含めて機械除雪28,000円、消雪パイプ(散水融雪)133,000円、流雪溝6,500円となっている³⁾。なお、各種除雪機械の耐用年数はその使用実態調査から平均8年とした。

3. 実験方法

側溝における消融雪ネットの実用実験は石川県鶴来町の朝日地区の伏流水が流れる側溝(幅0.38 m深さ0.42 m)において実施された。図1にこの実験の概要図を、図2には実験直前の側溝内の写真をそれぞれ示した。網状板は東レ・モノフィラメント株式会社製の亀甲形ポリエステル・モノフィラメント網(表1, 表2参照)を鋼製枠に張り合わせた、大きさが縦0.82 m, 横0.58 mの合成構造である。網目寸法は50 mm, 線径は2.70 mmである。網状板と側溝左側壁との間の空間に雪を投入し、網状板と側溝右側壁との間を流水が流れることとなる。本実験中の写真を図3に示した。この写真は下流から上流に向って撮影したものであるため左側に網状板を、そして右側に投入された雪の解けつつある状況を認めることができる。

合計8枚の網状板を全長8.6 mの区間にわたって図1及び図2に示したように一列に側溝右側壁にもたせ掛けるように敷設した。続いて、傾斜網状板と側溝左側壁との間に約1.03 m³の雪をスコップにより投入した。なお、投入した雪の比重は0.49であった。

水温と水深の測定位置は図1に示したP1-P7までの合計7点であり、測定時間間隔は約20分であった。水温の測定は水面下約20 mmの点において温度計で、一方水深の測定は測深棒でそれぞれ実施した。なお、実験前の平均流速は0.27 m/s, 平均水深は57.5 mmであり平均流量は0.0059 m³/sであった。

一方、用水における消融雪ネットの実用実験は金沢市内を流れる鞍月用水において実施された。図4にこの実験の概要図を示した。網状板は東北流雪研究所製の菱型金網を鋼製枠に張り合わせたもので、単位の網状板の大きさは縦2 m, 横0.5 m程度であった。また、網目寸法は約50 mm, 線径約5 mmである。この網状板を図4に示したように用水内の全長15.60 mにわたって左側壁にもたせかけるように敷設した。網状板の支持棒としては直径約100 mmの丸太を用いた。網状板と用水右側壁との間の空間に約32.73 m³の雪を大型除雪車によって投入し、一方網状板と用水左側壁との間は水路として確保された。なお、投入した雪の比重は0.58であった。本実験中の写真を図5に示した。この写真は上流から下流に向って撮影したものであるため左側に網状板が、そして右側に投入された雪が解けつつある状況を認めることができる。

水温と水深の測定位置は図4に示したP1-P5までの合計5点であり測定時間間隔は約20分であった。水温の測定は水面下約50 mmの点において温度計で、一方水深の測定は測深棒でそれぞれ実施した。なお、実験前の平均流速は0.17 m/s, 平均水深は0.49 mであり、平均流量は0.36 m³/sであった。

両実験とも網状板敷設区間に投雪を完了するのに約20分を要したが、実験データの解析にあたっては投雪完了時点を時間原点 $t = 0$ と定義した。

4. 実験結果及び考案

図6は側溝内の各点における水温が時間にどのように依存するかを示している。この図には実験前の気温、地温、雪温もプロットされている。P1における水温は時間の経過に伴ってその初期値5.8℃から徐々に降下し $t = 70$ 分の時点でいったん最小値をとる。続いて、徐々に水温が上昇し、 $t = 86$ 分以後は平衡

値 4.8°C を示している。一方、P 7 における水温はその初期値 5.8°C から急激に低下し、 $t = 20$ 分においていったん最小値をとったのちは徐々に増加し融雪完了時点 $t = 120$ 分においては点 P 1 における平衡値 4.8°C と等しくなっている。また、P 2 - P 6 における水温は P 1 と P 7 との中間の値を示していることがわかる。なお、これらのデータで欠落しているものがあるのは投入した雪のために測定できなかったことによる。P 1 が融雪雪ネット敷設区間の最上流端、P 7 がその最下流端から 2 m 後方の位置にあることを勘案すると、以上の結果から流水の熱エネルギーが投雪された雪に輸送される状況を理解することができよう。すなわち、投入された雪を解かすために融雪雪ネットの上流部の流水に含まれる熱も多少消費されるものの大部分は流水が融雪雪ネット敷設区間の水路を通過する間にその熱が消費されるものと考えることができる。図 6 の P 1 に関する曲線と P 7 に関する曲線との間の温度差に相当する熱エネルギーが実際に流水が融雪雪ネット敷設区間を通過する間に流水から雪に輸送されたこととなる。たとえば、 $t = 20$ 分において P 1 と P 7 との間の温度差が 1.4°C と最大であるので、この時点で流水から雪への熱輸送が最も活発であったことになる。しかしながら、時間の経過とともに残雪量が減少すると流水から雪への熱輸送が徐々に減少し、残雪量が初期投雪量の $\frac{1}{4}$ 程度となった $t = 105$ 分の時点においては P 1 と P 7 との間の温度差は 0.8°C となった。なお、この場合には水温が地温より常に高いので、地中から流水への熱輸送は起こりえないことに注意されたい。

図 7 は側溝内の各点における水深が時間にどのように依存するかを示している。この図は流雪溝の最大の欠点である側溝からのいつ水を融雪雪ネットの適用によっていかに効果的に防ぐことができるかという観点からとくに興味深い、すなわち、投雪に伴って水深増加が最大となるものと考えられる融雪雪ネット敷設部最上流端 P 1 における水深の時間変化に注目すると、 $t = -20$ 分における水深 65 mm から時間の経過に伴って徐々に増加し、投雪完了直後の $t = 5$ 分において水深 75 mm となったのちから融雪完了時点 $t = 120$ 分までほぼ一定値を保つことがわかる。これに対して、融雪雪ネット敷設部最下流端 P 6 における水深は $t = 5$ 分において 56 mm となる以外はほぼ時間とは独立に $t = -20$ 分における値 65 mm に保たれている。また、P 2 - P 5 における水深のデータが欠落しているのは投入した雪のためにこれらの測定ができなかったことによるが、いずれの値も P 1 における水深より小さいので側溝からのいつ水を考慮するうえで問題とはならない。すなわち、本実験条件下においては投雪に伴って側溝内において最大 1 cm 程度の水深の上昇に留まることが明らかとなった。

図 8 は用水内の各点における水温が時間にどのように依存するかを示している。図中には気温、雪温の時間変化も同時にプロットされている。なお、実験前の地温は 2.0°C であった。 $t = -20$ 分においては、P 1 - P 5 の全水温及び気温が 2.0°C であったので図には代表として P 1 の水温データのみがプロットされている。P 1 と P 2 における水温は投雪完了時点 $t = 0$ 分まで 2.0°C に保たれているが、P 3 - P 5 の各点における温度は投雪開始直後から急激に減少し $t = 0$ 分で約 1.0°C を示している。しかしながら、P 1 と P 2 における水温も $t = 0$ 分以後急激に減少し $t \approx 20$ 分において他の測定点における温度と同様に約 1.0°C を示している。しかしながら、 $t \approx 20$ 分から $t \approx 37$ 分までの間は P 1 - P 5 のいずれの測定点における温度も時間とともに増加していることがわかる。この理由は網状板と用水右側壁との間に投入された雪塊の下方水潤部のみが融解したため、両者を結ぶ雪の橋が形成されたことによる。この結果、流水と雪との接触面積が大幅に減少したために流水から雪への熱輸送量も減少したのである。ところが、 $t \approx 37$ 分には網状板敷設区間上流部に形成されていた雪の大橋が崩れ落ち、流水と雪との接触面積が再び増大したので各測定点における温度が減少を開始していることがわかる。ここで、 $t \approx 37$ 分前後における P 1 と P 2 での温度の増加、減少が他の測定点のそれと比べて顕著に現われているのは雪の大橋の形成位置が網状板敷設区間の上流部であったことによる。また、 $t \approx 60$ 分以後の各測定点における水温は図 8 から明らかなように時間にほぼ独立となっている。しかしながら、図 8 から各時点での全測定点間の温度の大小関係は大きい順に P 1, P 2, P 3, P 5 そして P 4 となっていることがわかる。この結果は流水が網状板敷設区間の水路を

通過する距離が増加するほど流水の温度が減少するという側溝における実験結果と全く同様である。しかしながら、P4とP5における水温が逆転していることは注目に値しよう。図4から明らかなようにP4は網状板敷設区間下流端であり、P5はP4からさらに2.5 m下流の位置にある。すなわち、P5における水温がP4における水温より高いということは流水がP4からP5に至る間にどこからか熱を供給されていることを示唆している。この熱源としては地熱と空気中の熱の二つが考えられる。両者の熱容量の相違、地面と流水あるいは空気と流水との間の接触面積、そして気温、水温、地温相互間の関係等から判断してこの場合の主要熱源を地熱と見るのが妥当であろう。すなわち、この実験のように地熱が水温より高い場合に限って地熱が流水を介して雪へ輸送されるのである。

消融雪ネットの性能を評価する一つの基準は既知投雪量を融解するのに要する時間である。中川²⁾はこの融解時間が流水から雪へ伝えられる総熱量の時間変化に対する雪の温度を消融雪ネットの最下流端における温度まで上昇させるのに要する総熱量の比として求めている。この結果、理論値として投雪量の80%が融解するのに205分間という結果を得たが、対応する実験値は196分であった。この理論計算においては地熱、空気熱の影響を無視してはいるものの中川²⁾によって導びかれた公式が十分実用に耐えることがわっている。

図9には用水の各点における水深が時間にどのように依存するかを示している。側溝における実験の場合には全幅の半分を水路として確保したこともあって、投雪直後の網状板敷設区間最上流端における水深増加がわずか1 cm程度であったのに対して、本実験の場合には水路の幅が原用水全幅の $\frac{1}{4}$ 弱となったこともあって投雪直後の網状板敷設区間最上流端P2における水深が $t = -20$ 分の0.31 mから $t = 0$ 分において0.71 m程度にまで急増していることがわかる。それでも、金沢市内を流れる典型的な用水である鞍月用水において実施された本実験の場合においてまだ1 m以上の水深の余裕があるのでここで採用したような網状板の敷設方法は少なくともその他の金沢市内を流れる用水に直接適用することが可能であろう。図9から用水内の水深が最大となるのは投雪完了直後であり、以後は時間の変化に伴って漸減することがわかる。また、各時点での全測定点間の水深は網状板敷設区間最上流端P2において最大となり、P2より上流2.5 mのP1における値が第2番目である。以後P3、P4そしてP5の順となっている。すなわち、側溝の場合と同様に水深が最大となるのは網状板敷設区間の最上流端であることがわかる。

5. 消融雪ネットの構造と材料

図10に種々の消融雪ネットの構造を整理して示した。(a)の水平網は桐生¹⁾によって考案された方式であり、水路軸方向へ一定間隔ごとに止水板と呼ばれるせきを設けるとより融雪効果が増すと報告されている。(b)の水平箱網は著者により考案された方式であり、吊り索を用いて箱網の底面を水面下に沈め、この中へ投入した雪を解かすわけである。この方式は箱網敷設時に水路内へ入る必要がないばかりでなく、簡易の消雪雪捨場としても利用できよう。(c)の斜網は桐生¹⁾によって考案され、中川²⁾によって実用実験が行なわれた方式であり、本論文での考察対象でもある。この方式は極めて柔軟性に富み、適用範囲が広いのが特徴である。本論文で取り扱われた大小二種の水路での実験結果からも容易に推測されるようにこの融雪方式は水路の大小、流速、流量、水深などの水理条件、水温の高低にかかわらず用いることが可能である。(d)~(f)の三つの方式は基本的には東レ・モノフィラメント株式会社によって考案されたものと同じで、それぞれ長方形、正方形、三角形断面を有する柱状の網から成り立っており、施行性に秀れているが、投入された雪による圧力に十分耐えうるような骨組み構造で補強する必要がある。なお、柱状体の断面形状は図示したもの以外にも円形、楕円形、半月形など任意のものを用いることができよう。(g)~(i)はいずれも著者によって全く新たに考案された方式である。(g)の富士山網は有孔パイプに網を巻き付けたもので、有孔パイプは水路の役割を果すのみならず雪の重量を支える役割をも荷なっている。また、有孔パイプとその外側の網との空間も水路として機能することとなる。(h)の蜂の巣網は半月形断面を有する籠の形状が雪による外力を受けた場合にも

保持されるように細い有孔パイプを複数本その内部に挿入したものである。籠の内側の有孔パイプ内外の空間は水路として機能することとなる。(i)の渦巻き網は有孔パイプの周辺に複数回にわたって網を巻き付けたものである。渦巻き網は原理的には上掲(g)の富士山網と同じであるが、網を有孔パイプに複数回巻き付けることによって網自体が受け持つ雪圧に対する抗力の増大を狙ったものである。

消融雪ネットの材料としては(a)の水平網および(c)の斜網の場合について菱形金網を用いた試作例があるが金網には腐食し易いという決定的な欠点がある。この理由により本論文で取り扱った側溝における実験においては網状板の材料として亀甲形ポリエステル・モノフィラメント網を採用したわけである。表1に示されたこの網の用途とその特徴・効果からも明らかなように、この網は腐食性に極めて秀れているばかりでなく、比重が金網の $1/6$ 程度と軽量、耐候性、耐海水性、耐薬品性なども良好である。一方、表2には亀甲形ポリエステル・モノフィラメント網と菱形金網との物性比較を参考のために示した。この表から両者の引張破断強さは同程度であるが、その他の種々の物性において前者の方が後者より秀れていることがわかれる。中でも、図10(g)~(i)に示したような籠型消融雪ネットの製作に亀甲形ポリエステル・モノフィラメント網とポリエステル製有孔パイプとを組み合わせることによって極めて耐久性に富み、かつ取り扱いに便利な製品の開発が可能となる。しかしながら、その一方で消融雪ネットを河川内に敷設し、市街地等から運搬されてきた大量の雪を融解処理するような工法に用いるような場合には剛性、耐衝撃性に秀れる金網を用いる方が良い場合もある。なお、大量の雪の融解処理のために消融雪ネットを用いることは本実験で証明されたその融雪効率と経済性の両面から極めて魅力に富むものである。

6 結 論

厳冬期においても側溝、用水、河川などの流水が氷結しない金沢市、福井市等の豪雪地帯における屋根、庭先、小路などの積雪処理のために消融雪ネットを用いる網状板融雪工法が極めて有効であることが明らかとなった。同時に、網状板融雪工法は豪雪期において大きな社会問題化している雪捨場問題の解決にも重要な一翼をなうことができることが明らかとなった。網状板融雪工法の主な利点を要約すると次のようになる。(1) 水路への投雪時にいつ水の危険を回避することができる。(2) 既存の河川、用水、側溝などを利用すれば道路延長1m当り数千円程度と他の工法と比較してはるかに経済的である。(3) 構造が簡単であるので維持費はほとんど不要である。(4) 耐久性に富む適当な材料を使用すれば半永久的に使用することができる。(5) 融雪のための主要エネルギー源は天然の地熱であるのでエネルギー効率において秀れているばかりでなく、自然に順応した工法でもあるので環境問題などを誘発するおそれが全くない。

7 謝 辞

本研究の実施にあたって東レ・モノフィラメント株式会社から材料および資料等の提供を、また同社の椿修氏、星合多津二氏からは実験の準備等種々の援助を受けた。ここに、深く感謝の意を表わす次第である。

8 参考文献

- 1) 桐生三男 米沢市における克雪対策の実情—流雪溝・消融雪溝、開発と保全、第8号、昭和58年3月。
- 2) 中川武夫 A device for melting snow 金沢工業大学研究紀要 A No.23 1986, 11-19。
- 3) 佐原甲吉 雪処理と水資源利用 日本海学会誌 第6号 1983, 21-32。

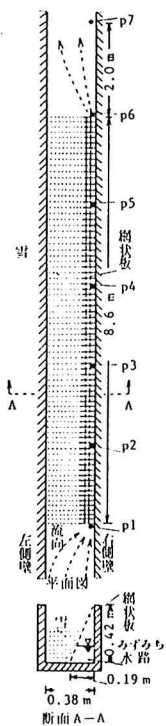


図1 側溝内消融雪ネット
実用実験概要図

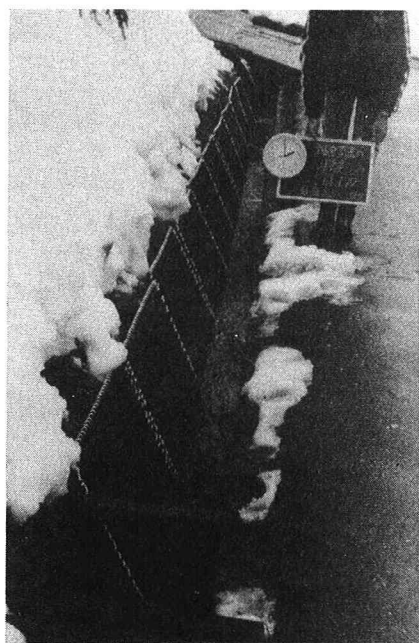


図2 実験直前の側溝の状況

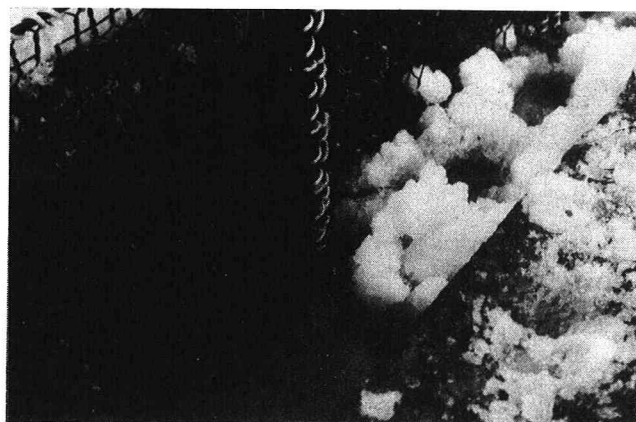


図3 側溝内消融雪ネット実用実験の状況

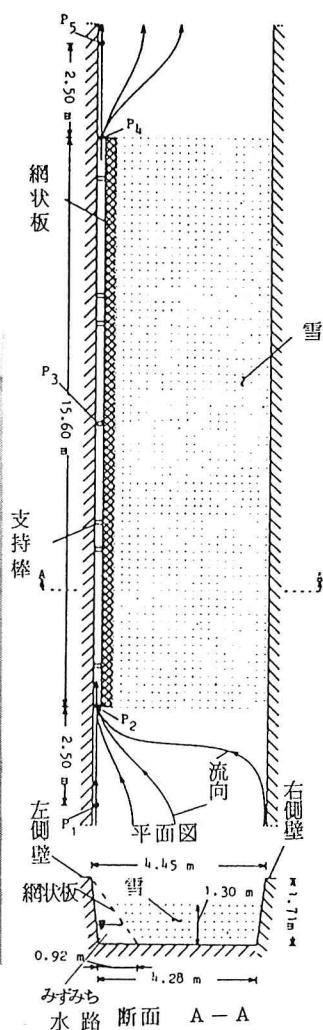


図4 用水内消融雪ネット実用実験概要図



図5 用水内消融雪ネット
実用実験の状況

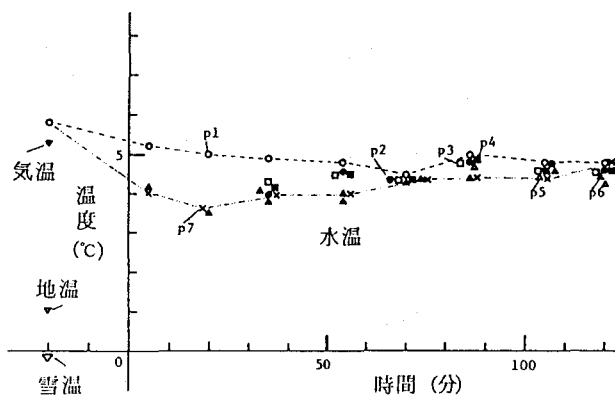


図6 側溝内の水温と時間との関係

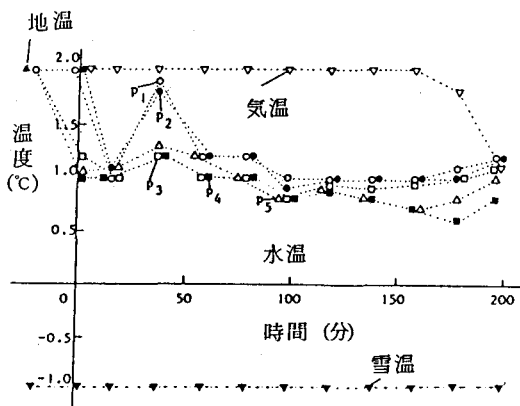


図8 用水内の水温と時間との関係

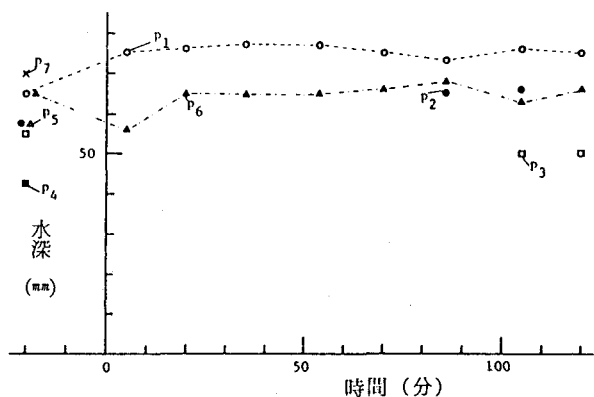


図7 側溝内の水深と時間との関係

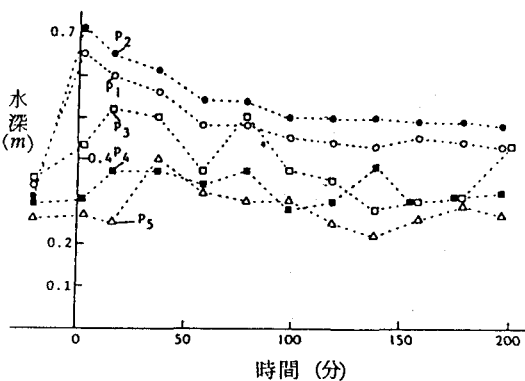


図9 用水内の水深と時間との関係

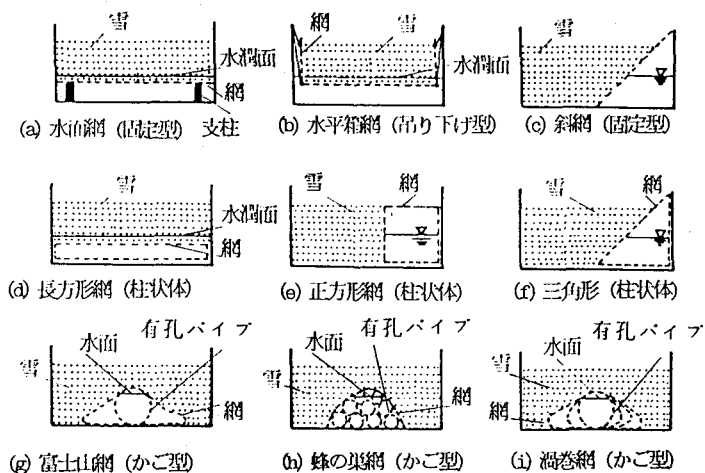


図10 種々の消融雪ネットの構造

表-1 亀甲形ポリエステルモノフィラメント網の用途とその特徴・効果

用 途		1. 魚類養殖用 イクス	2. フェンス 防風ネット 砂防ネット	3. 緊急用 蛇かご	4. 魚貝類乾燥 用ネット	5. 流木防止ネ ット(ダム サイト等)	6. 農園芸用 (蔓、枝等 支持用)	7. 家畜飼育用 囲い
特 長	腐蝕しない	○	○	○	○	○	○	○
	軽 い	○	○	○	○	○	○	○
	耐候性良好	○	○	○	○	○	○	○
	耐海水性良好	○	○		○	○		
	耐薬品性良好	○	○					
	無 公 害*1 カラフル可能	○	○					
効 果		①魚類の成 育良好 ②魚体質・ 色共天然物 に近い ③取扱いや すい	*2 ①施工容易 ②周辺の環 境に適合可 ③温泉地、 海岸用に好 適	①作業性良 好 ②長期保管 ができる	①清潔 ②取扱い容 易 ③長期使用 に耐える	①作業性良 好 ②長期使用 に耐える	①遮光少な い ②長持ちす る ③取扱い、 収納簡便	①長持ちす る ②取扱簡便 ③施工容易

[注] 使用温度60℃以下

*1……金属イオン、有機錫化合物を一切含まない。

*2……支柱はフックが上下位置調整可能なもの、例えば川鉄建材工業㈱製フェンス支柱の使用が好適。

表-2 亀甲形ポリエステルモノフィラメント網と菱形金網との物性比較

品 種		亀甲形モノフィ ラメント網	菱 形 金 網	品 種		亀甲形モノフィ ラメント網	菱 形 金 網
項 目				項 目			
線 径	mm	2.70	2.60	線 :			
比 重		1.38	7.86	引張破断強さ	kg	180	200
融 点	℃	250~260	1,530	" 伸び%		67	6
耐 候 性		◎	○	屈曲疲労度	*1 回	8,000~	8 (ただし
耐 海 水 性		◎	×			10,000	線径3.2mm)
耐 薬 品 性		①弱酸および弱 アルカリで強力 低下なし ②一般溶剤に不 溶解、ただし熱 メタクレゾール、 熱オークロフ ェノール、熱ニ トロベンゼン等 に溶解	①稀薄酸に溶解 アルカリに安定、 ただし亜鉛メッ キ部は酸、アル カリに溶解 ②一般溶剤に不 溶解、ただし亜 鉛メッキ部はア ルキル化合物と 反応して亜鉛ア ルキルを生ずる	*2 線同志の切断		60,000~	17,000
				摩耗回数	回	100,000	(ただし線径 3.2mm)
				1目タテ網目 :			
				引張破断強さ	kg	300	300
				" 伸び%		77	6

*1…屈曲角度260°、荷重1.5kg、屈曲速度180回/分

*2…接触荷重3kg