

II-21 融雪水の積雪層内浸透に対する 貯留関数法の適用

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

積雪地域における春先の融雪出水は利水上重要な水資源となるがその反面、急激な融雪出水は洪水災害をもたらす。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融雪出水機構を十分に理解する必要がある。融雪出水を解析するには大別して、1)積雪表面における融雪量の推定、2)表面融雪水の積雪層内の浸透過程、3)融雪水の地表面から河川への流出過程の3つに分け、検討する必要がある。このうち1)については厳密には雪面での熱収支を求めればよく、比較的簡便な方法としては気温のみを用いた Degree-Day、Degree-hour法により推定される。3)については融雪水の地表面到達量がわかればこれを入力データとして、通常の河川への流出解析と同様な取り扱いで解析を行なうことができる。2)については積雪層を不飽和浸透域として取り扱う方法や Laramieら¹⁾(以下、MIT法と略す)が行なっている1時間当りの地表面到達率を求める方法が提案されている。しかし、両者の方法はいずれもその算定にあたって、積雪密度や含水率等をパラメータとするため計算が複雑となり実際の融雪解析には実用的ではないと思われる。

本研究の目的は従来から洪水流出解析で広く用いられている貯留関数法を用い積雪表面融雪量から地表面到達量を求めることであり、最初に熱収支式を用いた積雪表面融雪量の算定方法と貯留関数法を用いた融雪水の地表面到達量の計算方法について述べ、次に低温室内で行なった積雪浸透実験データおよび北見工業大学寒地気象観測露場で得られた実測データをもとに貯留関数法を適用し、積雪層内の浸透に対するK、Pおよび遅れ時間T₁に対する検討を行なったものである。

2. 積雪表面融雪量と貯留関数法による地表面到達量の計算方法

雪面での融雪量は雪面における熱収支量より求めることができる。雪面に対する加熱を正とし、潜熱伝達率および顕熱伝達率として、風による強制対流のみを考え高さ1mの風速の関数とした小島²⁾の式を用いると、雪面熱収支量Htは次式で表わせる。

$$Ht = R_N + LU(e_a - e_s) \times 10^{-3} + 0.38U(\theta_a - \theta_s) + C_w \rho_w r(\theta_r - \theta_s) \quad \dots\dots\dots (1)$$

ここに、R_N:純放射量、L:蒸発の潜熱、U:風速、e_a:空気中の水蒸気圧、e_s:雪面の飽和水蒸気圧、θ_a、θ_s:気温、雪面の温度、C_w、ρ_w:水の比熱、密度、r:降水量、θ_r:雨滴の温度

融雪最盛期のような場合、積雪温度は0℃とみなされ、e_s=6.11mb、θ_s=0℃となり式(1)は簡単になる。積雪温度が0℃でない場合、Htは最初に積雪温度を上昇させ積雪全層を0℃にするのにHtの一部または全部が使われ、残りが表面融雪に寄与する。いずれの場合でも積雪表面の融雪量M₀は温度が0℃の時のHtを融解の潜熱lで除することにより次式で求まる。

$$M_0 = \frac{Ht}{l \cdot \rho_w} \quad \dots\dots\dots (2)$$

式(1)の最終項は雨の持ち込む熱量であり、降雪の場合は考慮しなくてもよい。雪面での融雪水は時間と共に徐々に積雪層内に浸透し、積雪層内の含水率を増加させながら積雪下面に達するが、融雪水の一部は懸垂水となって積雪層内に貯留される。MIT法では雪面融雪水の一部が積雪層内に貯留し、最大含水量を超

Applying Storage-Discharge Model to Water Percolating in Snow
by Takashi NAKAO and Kimiteru SADO

過した分が時間と共に地表面に到達するとしており、1時間後の地表面到達量は、積雪深をパラメータとした地表面到達率 P_c と積雪層内の最大含水量からの超過分 ΔW_c より、

$$M_m = (P_c / 100) \times \Delta W_c \quad \dots\dots\dots (3)$$

と求められる。積雪深が大となれば P_c は小となり、密度が大となれば最大含水量は大となるので積雪深か密度のいずれかが大きくなれば M_o と M_m の差は大きくなる。このように雪面での融雪はすぐに地表面に到達せず積雪内に貯留され、時間の経過と共に地表面に達し、その流出過程は一般に非線形と思われる。従って、運動方程式として積雪層内の貯留量 S を地表面到達量 M_s の指数型関数とすると次式で示される。

$$S_i = K \cdot M_{s,i}^P \quad \dots\dots\dots (4)$$

但し、 $M_{s,i}$:遅れ時間 T_i を考慮した融雪水の地表面到達量 $M_{s,i} = M_s(t + T_i)$ 、 K, P :定数
一方、 f として、遅れ時間 T_i を考慮した融雪水の地表面到達量曲線の総地表面到達量と同時間内の総表面融雪量の比とすれば、連続の式は式(5)で表わされ、式(4)と式(5)から式(6)が得られる。

$$\frac{dS_i}{dt} = f \cdot M_o - M_{s,i} \quad \dots\dots\dots (5), \quad \frac{dM_{s,i}}{dt} = \frac{(f \cdot M_o - M_{s,i})}{K \cdot P} M_{s,i}^{1-P} \quad \dots\dots\dots (6)$$

これは貯留関数法における降雨強度の項を表面融雪量に置き換え、流出高から初期流出高を差し引いたものを地表面到達量に置き換えたものに等しい。

3. 積雪浸透実験

これまで述べた本方法の適用例として本学に設置してある低温室内で行なった積雪浸透実験のデータによる解析結果を示す。

3. 1 実験装置および方法

図-1は本実験で用いた積雪浸透実験装置を示している。積雪試料は予め平成元年の春先に野外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。雪質はザラメ化しており固結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最大粒径、粒度分布がほぼ一定になるように試料を作成し、円筒の容器(φ10.9cm、高さ42.0cm)に積雪深が40.975cmになるまでハンドショベルで静かに流し込み、これを積雪試料とした。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。円筒の周囲には水と氷を入れておき、常に0℃に保っておき、さらに実験装置の周囲を断熱材で覆い外部との熱の出入りを遮断している。水と氷の中には熱電対を入れ温度を測定し、積雪試料が周囲の水と氷の温度(0℃)とほぼ等しくなったと思われるとき実験を開始した。

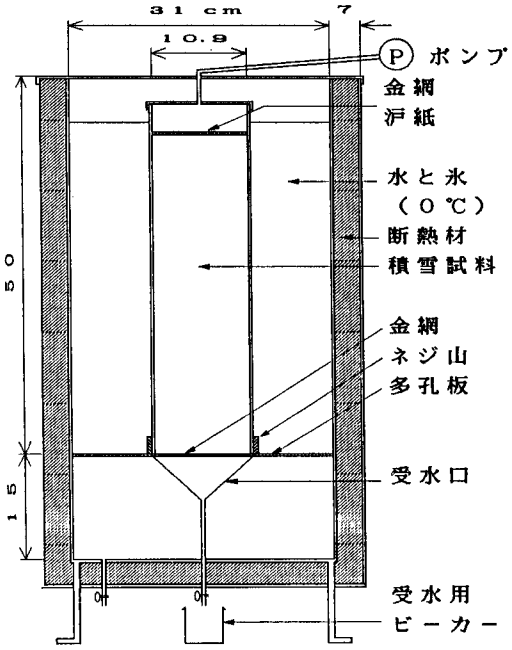


図-1 積雪浸透実験装置

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金網と濾紙がのせてある。融雪水は水みちを形成しながら積雪試料内を浸透し、受水口を通り受水ビーカーに集められる。マイクロチューブポンプからの流入量は実験開始前、終了後にそれぞれ5分間ビーカーで流入量を計り、その平均値を流入量とした。実験中は1分毎に水と氷の中にセットしておいた熱電対の温度を記録し、また流出量は流入開始より1分毎に受水ビーカーの重量を計り、

これを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、さらに円筒容器内の重量の増加量から積雪試料の貯留量を算出し、この値と総流入量、総流出量より水収支量を求め円筒容器と融雪装置本体の取り付け部分からの水の流入、流出がないかを確認した。

3.2 実験結果

表1に本実験で用いた、流入量(mm/h)、流入継続時間(min)、実験開始前の試料密度、使用した試料の最大粒径および実験終了時の試料密度を示す。実験開始前の積雪試料の密度は0.46~0.55g/cm³とほぼ0.50g/cm³前後であったが実験終了時には0.51~0.63g/cm³といずれの場合も0.04~0.13g/cm³の密度の増加がみられた。これは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。

使用した試料の最大粒径はCase 13の4.8mmを除き、Case 1~12までは全て2.0mmであり、このうちCase 1~10およびCase 13は流出量がピーク流量になってもさらにほぼ10分間流入を継続し、その後流入を停止している。Case 11~12の流入継続時間は流出量がピークになるのとほぼ同時に流入を停止している。このうち、Case 1は積雪試料の上部に濾紙を使用しなかったため実験終了後、円筒容器から試料を取り出して見たところ流入水が試料に滴下する部分が流入水のため試料の下部まで穴が開いたようになっており、その部分の周辺以外は流入水があまり浸透しておらず解析から除外した。またCase 3およびCase 4は水収支量を測定したところ、いずれも試料内の貯留量と流出量の和が流入量よりも大幅に上回ったためやはり解析から除外した。この原因としては積雪試料を詰めた円筒容器を実験装置に取り付けるとき取り付け方が不十分であり、試料を0℃に保っている水と氷の水の一部が試料内に流入したものと思われる。

遅れ時間 T_1 および f については測定された流入量 Q_i と流出量 Q_o を1時間当りの単位に変換し、 $M_o=Q_i$ 、 $M_s=Q_o$ と置き換え、 $T_1=0$ 分から1分毎に変化させ、 T_1 を考慮した総流出量と総流入量の比より f を計算した後、式(5)を用いて f 、 Q_i 、 Q_o より S_1 を求め、 S_1 と Q_o の関係が最も一価関数に近くなる T_1 を求めた。最終的に貯留係数 K 、 P は S_1 と Q_o の値より最小自乗法で決定した。

図-2は上記の方法により得られた K 、 P 、 T_1 、 f の値を用い、式(6)をRunge-Kutta法で解いて得られる Q_s (○印)と実測値 Q_o (実線)による流出量の比較の一例として、Case 6の場合を示している。 Q_s は積雪内部の S_1 が一定になるとピーク流出量となり、 $f \cdot Q_i (=43.25\text{mm/h})$ と同じ量が流出し続け、流入を停止した後も遅れ時間 $T_1 (=3\text{min})$ までピーク流出量を維持しその後、減少し始める。実測値が0となっても Q_s が生じるのは $S_1=0$ になるまで流出させようとするためであり、実測値がピーク流出量付近で変化するのは、後

表 1 実験条件

	流入量 (mm/h)	流入継続時間 (min)	密度 (g/cm ³)		試料の最大粒径 (mm)
			実験前	実験後	
Case 1	89.19	45	0.50	0.55	2.0
Case 2	88.11	40	0.46	0.51	2.0
Case 3	66.32	45	0.50	0.55	2.0
Case 4	47.28	45	0.50	0.56	2.0
Case 5	30.48	55	0.50	0.63	2.0
Case 6	47.47	40	0.51	0.56	2.0
Case 7	67.92	40	0.55	0.60	2.0
Case 8	37.38	55	0.48	0.55	2.0
Case 9	26.13	65	0.47	0.52	2.0
Case 10	47.85	30	0.48	0.52	2.0
Case 11	46.19	25	0.51	0.56	2.0
Case 12	47.22	33	0.51	0.56	2.0
Case 13	47.53	40	0.48	0.52	4.8

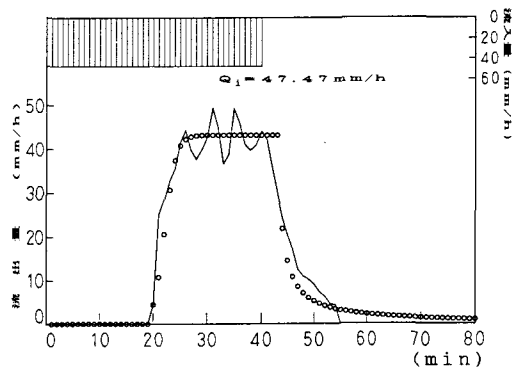


図-2 流出量の時間変化 (Case 6)

で詳しく述べる水みちの
でき方が複雑であり、流
出量が一定しないため
であると思われる。

表2はK、P、 T_1 、fの値
および、式(6)をRunge-
Kutta 法で解いて得られ
るQsと実測値Qoの誤差
および流出の開始時刻を
示している。ほぼ同一の
流入量であるが Case 6、
10、12、13の場合は流出開
始時刻に違いがみられる。
この理由の1つとして融
雪水が積雪内を浸透して
行く時、水みちのでき方
に違いがあるように思わ

れる。本実験では積雪試料を円筒容器内に詰める際、容器を傾け静かに試料を流し込んだが、試料の詰まり
方が一様でなく密な部分と粗な部分が生じた場合、水みちは密度の粗な部分を通り下方へ浸透してゆき、水
みちは複雑に発達せずすぐに受水口に到達するが、試料が一様に詰まっている場合、浸透水が積雪層内の横
方向にも浸透し、水みちを樹枝状に形成しながらゆっくりと下方へ伸びてゆくため受水口への到達時間も遅
くなると思われる。

貯留係数K、Pについては、Kの値が 642~2663と大きく変化するが流入量および流入継続時間との特定
の関係はみられない。Pは0.012~0.062の範囲にあり、特に流出量がピークとなった直後に流入を停止した
Case 11とCase 12のPの値は0.012、0.013と小さな値となっている。fについては、Case 12を除き0.881~
1.422の範囲にあり、その平均は 1.065とほぼ1に近い値となる。特に、Case 12 のfの値が他の Caseに比
べ大きな値となったのはピーク流量が流入量の1.61倍と大きく、積雪層内に貯留していた融雪水が一度に流
出したためである。遅れ時間 T_1 はKと同様に流入量および流入継続時間との関係はみられないが、 T_1 の値
は最大でも5分であった。表から明らかなように、流入量が大きくなると実測の流出量QoとQsの誤差は一
般に大きくなっているが、図-2でも示したように流出量を良くシミュレートしている。

4. 北見工業大学寒地気象観測露場に対する適用

次に融雪モデルの野外での適用例として、融雪最盛期である昭和63年 3月21~29日および平成元年4月
26~27日まで北見工業大学寒地気象観測システムで得られたデータを用い、1時間毎の熱収支計算を行ない
雪面融雪量の計算値と、同時に測定された融雪量の実測値との比較検討を行なう。

4. 1 昭和63年3月の融雪量観測

本気象観測システムでは地表面上に90×90cmのスノーライシメータを2台設置し、塩化ビニールパイプ
で地下室に導かれた融雪水をそれぞれ0.5mm、1.0mmの転倒枡で計測し、地表面到達量を実測している。スノ
ーライシメータに到達する融雪水の集水面積を受け皿の面積に一致させるため、3月9日に受け皿の周りの
積雪層を乱さないよう掘り起こし、ビニールで受け皿上の90×90cmの積雪柱に囲いをした後、周りの積雪を
埋め戻した。なお、0.5mm用のスノーライシメータの設置場所は観測小屋に近く、観測小屋からの輻射熱の影
響で融雪が早く進行したため、今回の解析から除外した。

表 2 浸透実験によるK、P、 T_1 、fの値と同定誤差

	K	P	f	T_1 (min)	流出開始 時間	誤 差 の 絶対値の平均 (mm/h)	誤差の 平 均 (mm/h)	誤 差 の 標準偏差 (mm/h)
Case 1	—	—	—	—	17'55"	—	—	—
Case 2	1499.39	0.038	1.046	5	22'10"	5.86	-1.54	9.55
Case 3	—	—	—	—	17'14"	—	—	—
Case 4	—	—	—	—	26'00"	—	—	—
Case 5	1161.21	0.024	1.015	3	41'00"	1.38	-0.06	2.70
Case 6	642.40	0.057	0.911	3	19'44"	2.28	-0.32	3.50
Case 7	1665.11	0.062	1.253	0	22'39"	6.21	-1.99	9.19
Case 8	2138.68	0.040	1.422	0	43'08"	4.03	-2.43	7.90
Case 9	864.31	0.038	0.881	2	41'39"	0.71	-0.25	1.37
Case 10	812.32	0.042	1.101	0	16'16"	3.56	-1.18	6.43
Case 11	980.49	0.013	0.972	1	23'31"	0.78	0.62	3.27
Case 12	2663.22	0.012	1.960	1	30'24"	2.48	1.29	7.18
Case 13	920.75	0.028	0.980	2	22'19"	2.96	-0.17	5.26

4.2 平成元年4月の融雪量観測

平成元年の観測では融雪量の観測はスノーライシメータに氷板が形成されたため解析の対象から除外した。この後、4月25日に最大で20cmの降雪があり26～27日の2日間融雪が生じたのでこの期間を解析の対象とした。この観測では積雪が一度全て融けた後の季節外れの降雪であり、また積雪期間が2日間と短かったため、ビニールで受け皿の周囲を囲わなかった。また、4月27日には1.0mm用のスノーライシメータの一部が露出したため0.5mm用のスノーライシメータの値を融雪水の地表面到達量の実測値として用いた。さらに冬期間からの融雪が終了(消雪日は4月5日)して相当日数が経っており、降雪前には地中内に融雪水がほとんどなく地温の変化が大きくなっており、地温による融雪の影響も考えられるため、地表面下0.1.2.5.10cmまでの地温と地表面下10cmに埋設してある熱流板を用いて土層分割法により積雪層への地中伝熱量を求め、スノーライシメータの実測値から地温による融雪量を差し引いた値を融雪水の地表面到達量の実測値とした。

4.3 結果

雪面融雪量 M_o の算定は気象観測システムで得られたデータより、式(1)を用いて雪面の熱収量を求めた後、式(2)より得られる。なお、両年とも融雪の最盛期であり、積雪の温度は 0°C であるとし、また気温は高さ1.5m、風速は5.89mの値をそのまま用いており高さ1mに対する高度変換は行っていない。

昭和63年3月の観測データについては M_o がスノーライシメータの実測値 M_{obs} と同時刻かまたはそれ以前に出現する3月21.27.28.29日の4日間について、また平成元年4月のデータについては4月26.27日の2日間について、積雪浸透実験と同様な方法で $T_1=0\text{h}$ より0.01h毎に T_1, f を決定し、この6日間に対しそれぞれ M_o, M_{obs} から S_1 を求め、最小自乗法により K, P を求めた。

図-3は1mmスノーライシメータで測定された実測値 M_{obs} 、式(6)をRunge-Kutta法で解いて得られた M_s およびMIT法による計算値 M_m の比較の一例として3月28日の融雪量の時間変化を示している。 M_m に比べ M_s の方が M_{obs} により適合している。 M_{obs} が0となっても M_s が生じるのは $S_1=0$ になるまで流出させるようにしたからである。

図-4は同様な方法で4月26日の M_{obs} より得られた M_s と実測値 M_{obs} の比較を示している。2日とも本方法で得られた M_s は実測値 M_{obs} とよく一致していることがわかる。

この6日間に対して得られた K, P, f, T_1 および M_s と実測値 M_{obs} との誤差を表3に示す。6日間の f の平均値は0.688であり、 K, P については積雪浸透実験で得られた K, P の値よりも K は0.694～1.929とかなり小さくなっており、逆に P の値は0.271～0.844の範囲にあり大きな値となっている。これはこの6日間の M_o の最大値は4月27日12時の5.24mm/hであるのに対し、積雪浸透実験での流入量 Q_i の最小値はマイクロチューブポンプの能力の限界によりCase 6の26.13mm/hであり、積雪浸透実験での流入と M_o の比は最小でも約5倍となり積雪浸透実験の Q_i が大きかったためである。このことから表面融雪量の値が大きくなると K は一般に大となり、相対的に P は小さくなる。遅れ

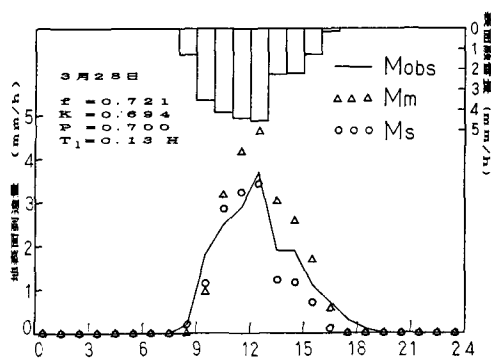


図-3 融雪量の比較 (3月28日)

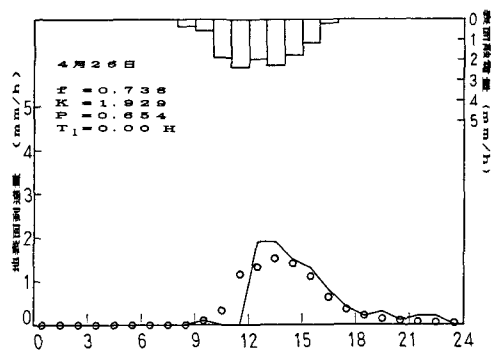


図-4 融雪量の時間変化 (4月26日)

時間 T_1 については融雪の進行とともに T_1 の値が小さくなっていく。

図-5は日平均積雪深 H_s と遅れ時間 T_1 の関係を示している。図からも明らかなように、 H_s と T_1 には良い相関がみられ、最小自乗法により直線回帰式を求めると、 $T_1 = -0.225 + 0.0190 \cdot H_s$ 、 $r = 0.981$ が得られた。

表 3 野外観測における K 、 P 、 T_1 、 f の値と同定誤差

	K	P	f	T_1 (h)	誤差の 絶対値の平均 (mm/h)	誤差の 平均 (mm/h)	誤差の 標準偏差 (mm/h)
'88 3/21	0.812	0.844	0.912	0.26	0.05	0.03	0.10
3/27	0.717	0.676	0.657	0.20	0.10	0.10	0.17
3/28	0.694	0.700	0.721	0.13	0.18	0.13	0.29
3/29	1.460	0.271	0.646	0.00	0.14	0.11	0.31
'89 4/26	1.929	0.654	0.736	0.00	0.14	0.02	0.29
4/27	1.745	0.639	0.458	0.00	0.20	0.02	0.34

5. 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) 低温室内で行なった積雪浸透実験及び融雪の野外観測で得られた融雪データに貯留関数法を適用し融雪量の積雪下面到達量のシミュレーションを行い、実測値の傾向をシミュレートできた。
- 2) 積雪浸透実験及び融雪の野外観測データで得られた K 、 P の値の比較より雪面融雪量 M_0 が大となると K は大となり、逆に P の値は小となる。
- 3) 低温室内で行なった積雪浸透実験より融雪水の流出開始時間は積雪内の水みちのでき方により、変化する。
- 4) 野外観測で得られたデータより、遅れ時間は積雪深に比例し、積雪深が大きいと遅れ時間も大となる。

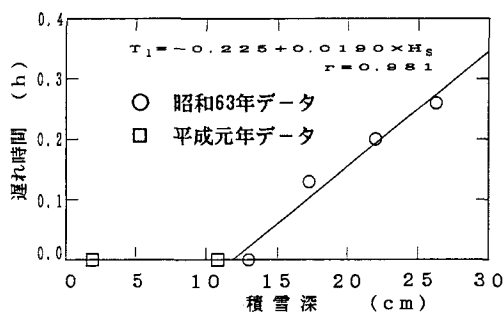


図-5 H_s と T_1 の関係

今後は積雪層の浸透過程を不飽和領域として解析し、さらに低温室内での積雪浸透実験において積雪深、積雪密度の変化が係数 K 、 P にどのような影響をおよぼすかを詳しく調べ、さらに野外観測も繰り返し測定精度を向上させる予定である。

【参 考 文 献】

- 1) Laramie, R.L. and J.C. Schaake: Simulation of the Continuous Snowmelt Process, M.I.T. Report No. 143, 1972.
- 2) 小島賢治: 融雪機構と熱収支、気象研究ノート、Vol.136, pp.1~38, 1979.