

あすか観測拠点の排水孔掘削と孔底の上昇

石沢賢二¹・竹内貞男¹・高橋昭好²

Borehole Drilling for Sewage Disposal and Rise of the Hole's Bottom at Asuka Station, East Antarctica

Kenji ISHIZAWA¹, Sadao TAKEUCHI¹ and Akiyoshi TAKAHASHI²

Abstract: A borehole for sewage disposal was drilled in the snow at Asuka Station (71°31'34"S, 24°08'17"E, 930 m a.s.l.) in January 1987. The borehole, 400 mm in diameter and 27.5 m in depth, was drilled at 50 m apart from the main hut using a steam drilling system. The drilling speed was 4 m/h between the surface to 20 m depth. Total amount of kerosene used for melting snow and steam generation was 110 l.

Sewage stored in three tanks is directed to the borehole through a heated pipe.

The bottom of the borehole rose about 7 m in first 5 months, but after that the rising speed decreased gradually. The bottom rose 11.6 m up during a period of three years when 594 k l waste water was discharged. If we assume the contaminated area is cone-shaped, the cone's radius is calculated as 13.7 m.

要旨: あすか観測拠点の排水孔を基地から 50 m の位置にスチームドリルで掘削した。排水孔は、直径 40 cm、深さ 27.5 m である。掘削スピードは、4 m/h で、造水および蒸気発生に使用した灯油の総量は、110 l であった。汚水は各タンクにためられた後、特殊なヒーターで加温されたパイプを通して排水孔に捨てられる。排水孔の底面は最初の約 5 カ月で 7 m 上昇したが、上昇速度は、それ以降減少し、3 年間で 594 k l を捨てて、11.6 m 上昇した。雪面下の排水の浸透域の広がり、形状を円錐体と仮定すると半径は約 13.7 m になる。

1. はじめに

あすか観測拠点は、日本隊にとっては初めての本格的な氷上基地であり、みずほ基地での生活経験から、排水の処理が施設の設計上大きな問題となっていた。1970年に設置されたみずほ基地では、初めの数年間は排水を雪面に捨てていたが、建物がスノードリフトでしだいに埋没していったことと、風呂を使いたしたことなどの理由で、1974年の第15次観測隊から雪の中に捨てられ始めた (NAKAWO, 1985)。また、第17次観測隊から通年越冬が始まり本格的な風呂も使われたが、風呂場のすぐ近くに氷床の流動によってできたと思われるクラックがあり、これに排水を流す方法がとられた。しかし、1979年頃からこのクラックもつまりだしたため(国立極地研究所, 1980)、次々にクラックを換えて処理していた。しかし、使える

¹ 国立極地研究所. National Institute of Polar Research, 9-10, Kaga 1-chome, Itabashi-ku, Tokyo 173.

² (株)地球工学研究所. Geo Tecs Co., Ltd., 29, Shirakabe 4-chome, Higashi-ku, Nagoya 461.

クラックもなくなったため、排水孔を掘削したり、排水を捨てる前に加熱するなどの方法を取り対処した。

グリーンランドの氷床基地では、雪が多孔質であることを利用して空隙に汚水を浸透させる方法を取り、成功している。さらに使用後にはボーリングをして汚染区域を調査している (SCHMITT and RODRIGUEZ, 1963)。

以上のようなみずほ基地での経験と外国基地での方法を検討して、あすか観測拠点では、雪面下になるべく大口径の穴を掘削し、雪の空隙に汚水をしみこませる方法を採用することにした。

2. 排水設備

排水設備に関する配置図を図1に示す。汚物・汚水の貯蔵タンクは3カ所にある。これらのタンクから内径 50 mm のパイプで屋外の排水孔に連結されている。排水システムの系統図を図2に示す。それぞれの汚物・汚水槽からポンプで排出され、パイプを通過して建物から 50 m 離れて掘削された排水孔に入る。排水後は、発電棟内にあるエアータンクから約 2 kgf/cm^2 の圧力の圧搾空気が排出され、管内の残水が除去される。

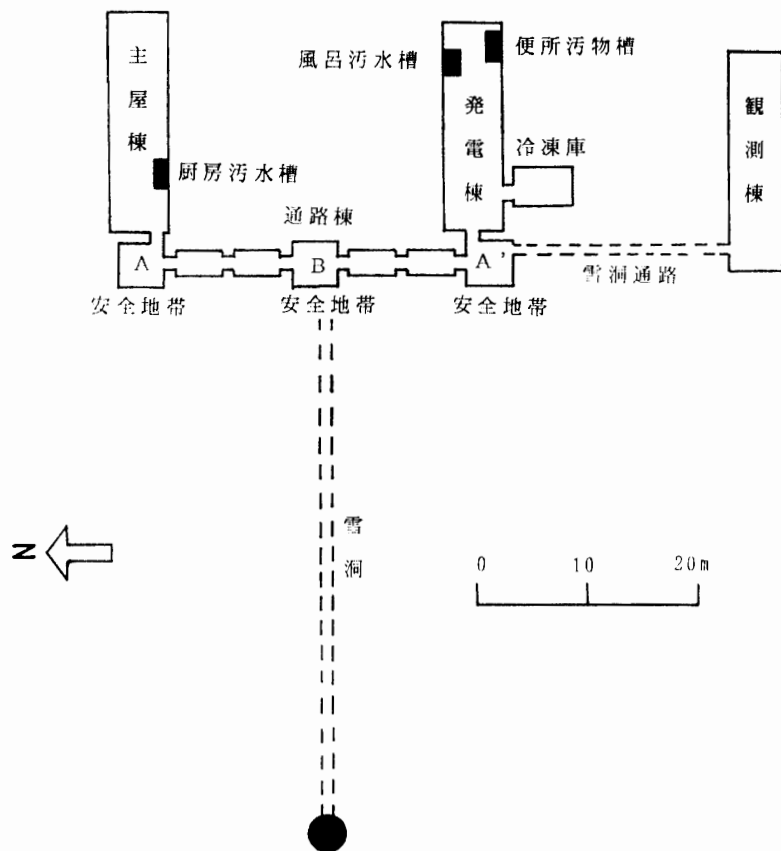


図1 あすか観測拠点の汚水槽と排水孔の位置

Fig. 1. Sewage tanks and borehole of sewage disposal at Asuka Station.

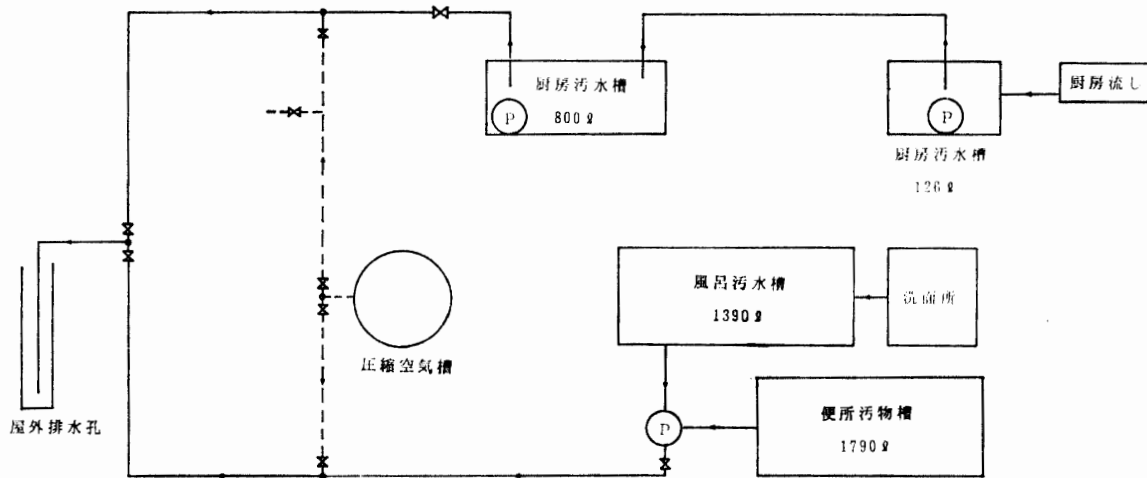


図 2 排水系統図

Fig. 2. Schematic diagram of sewage disposal system at Asuka Station.

2.1. 汚水タンク

汚物・汚水が出るところは、主屋棟の厨房、発電棟の便所、風呂・洗面所の3カ所である。主屋棟には、800ℓのステンレス製タンクを設置している。この汚水を排出前に約8時間投げ込み式のヒーターで約40°Cに加温する。排水頻度はほぼ3日に1度である（国立極地研究所，1989）。発電棟に設置してある風呂場には、浴槽の下部に約1390ℓのタンクがある。この汚水も約8時間30°C以上になるまでヒーターで熱した後排出する。洗面所の排水も同じタンクに貯める。排出頻度は月に5~6回である。トイレ下部には、1790ℓのタンクがあり風呂汚水で希釈した後排出する。汚水をヒーターで加温はしないが、タンク廻りの室温を約20°Cに保っているため、汚水も同じ温度であると思われる（国立極地研究所，1988）。排水頻度は月に1回である。

2.2. 配管

パイプは、ポリブデンパイプと呼ばれる材質のもので、軽量・耐熱性・耐寒性・施工性などの点で優れたプラスチック管である。発電棟内を除いては、管の外壁に自己温度制御型ヒーターを装着し、さらにその外側を厚さ30mmの発泡ポリエチレンで断熱している。国内で行った実験で、このヒーターに通電しておけば、通過する排水の温度は低下しないことが確かめられているので（石沢・中山，1989）、排水孔内の配管の末端から排出されるとき汚水の温度は、タンク内の温度とほぼ同じと考えられる。

通路棟から50m離れた排水孔までは、約1/50の勾配をつけた幅約80cmのトレンチを掘削し、この中に電気配線用のラックを設置し、この上に配管した。また、排水孔口から5mの深さまで配水管を降ろし、汚水の飛まつが孔壁に付着・凍結し、孔口近傍の内径が狭まるのを防ぐように配慮した。

3. 排水孔掘削

3.1. 掘削用スチームドリル

このスチームドリルはこの孔の掘削用に新たに設計された。排水孔は不透水層である氷層に達するまで掘削すればよく、それ以下の深さまでは必要ない。また、大きな孔径が望ましいが、あまり大きいと装置が大きくなり、人間が滑落する危険もある。これらのことを考慮した結果、切粉の回収も必要なく、しかも融水をしみこませて処理できる利点を持つ、スチームドリルと熱水ドリルが候補に挙がった。熱水ドリルは、多くの水が孔の周囲に浸透し大事な空隙を埋めてしまう恐れがあるため、スチームドリルを採用することに決定した。日本の南極観測隊では過去に雪温測定用に小型のものを使用したことがある (NARUSE and YOKOYAMA, 1975; NARUSE and SUZUKI, 1975; SATOW, 1977)。

図3にスチームドリルの構成図を示す。雪を溶かして水にするスノーメルター、蒸気をつくるスチームジェネレーター、蒸気を孔底に輸送するホース、掘削ノズル等より構成されている。図4にそり上に設置したスチームジェネレーターを示す。表1にジェネレーターの性能・諸元を示す。

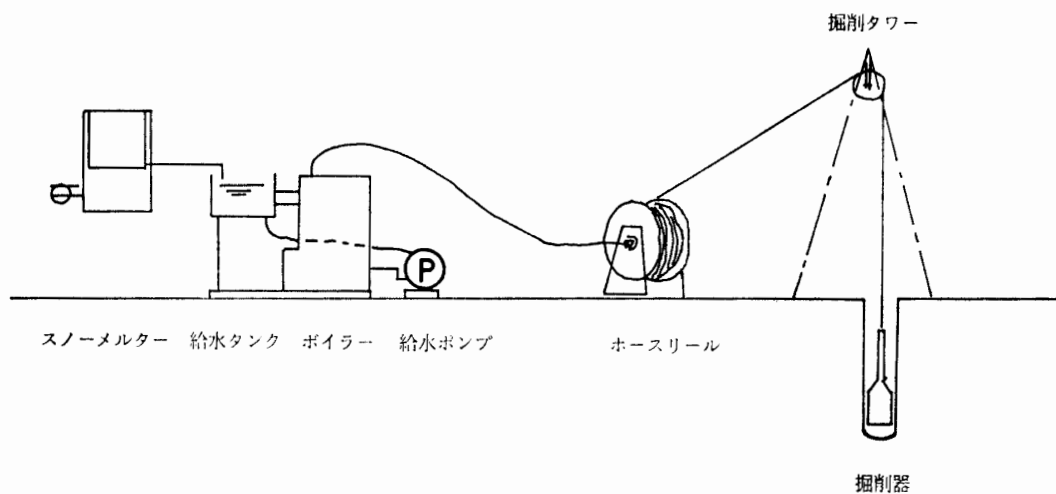


図3 スチームドリルシステム

Fig. 3. Steam drilling system.

スチームジェネレーターには水位計が付いており、ある水位以下になると給水ポンプが自動的に働き、水をジェネレーターに送り込む。約 8 kgf/cm^2 の蒸気 (飽和温度 174.5°C) をホースに送り込む。圧力が下がらないように主気弁で流量を調節する。また、圧力スイッチで設定した蒸気圧 (約 9 kgf/cm^2) になると、自動的に燃焼を停止し、なんらかの原因でさらに圧力が上昇すると安全弁が働いて蒸気を逃がす。ジェネレーターからホースリールまでの約 10 m の区間はホースを発泡スチロールで断熱している。ホースリールにはスイベルジョ



図 4 そり上に設置したスチームジェネレーター

Fig. 4. Steam generator installed on sledge.

表 1 スチームドリルの性能・諸元

Table 1. Performance and specifications of steam drilling system.

要素	項目	製造会社	性能・諸元
スノーメルター	ガンタイプオイルバーナー	オリンピア工業	電源 3φ 200V, ガンノズル 0.85 gal/h
	多管貫流式ボイラー	(株)地球工学研究所	有効伝熱面積 1.7m ²
スチームジェネレーター	液面コントローラー	(株)地球工学研究所	電極式フロートレススイッチ
	給水ポンプ	丸山製作所 型式: 10-BFM-50A	モーター 3φ 200V, 0.4 kW, 定格回転数 2850 rpm/50 Hz, 揚程 90 m, 流量 320 l/h
	ガンタイプオイルバーナー	オリンピア工業	電源 3φ 200V, ガンノズル 1.35 gal/h
ホース繰り出し装置	スチーム用ホース	ブリジストン 型式: G1 12	ワイヤーブレード補強, 内径 19 mm, 外径 32.4 mm, 最高流体温度 210°C, 内管耐熱性合成ゴム, 外管耐候性合成ゴム, 重量 0.81 kg/m
	ホースリール	(株)地球工学研究所	直径 700 mm, 20A スイベルジョイント付き
	三脚	(株)地球工学研究所	アルミ製 2.5 m 三脚, 直径 600 mm 木製滑車
	ホース自動繰り出し装置	(株)地球工学研究所	0-1 rpm 可変 DC モーター
掘削ノズル	スカート	(株)地球工学研究所	直径 300 mm, 長さ 400 mm, 厚さ 1 mm, SUS304
	ノズル	(株)地球工学研究所	直径 40 mm の真ちゅう製のノズルに直径 1 mm の噴き出し孔が19個付いている

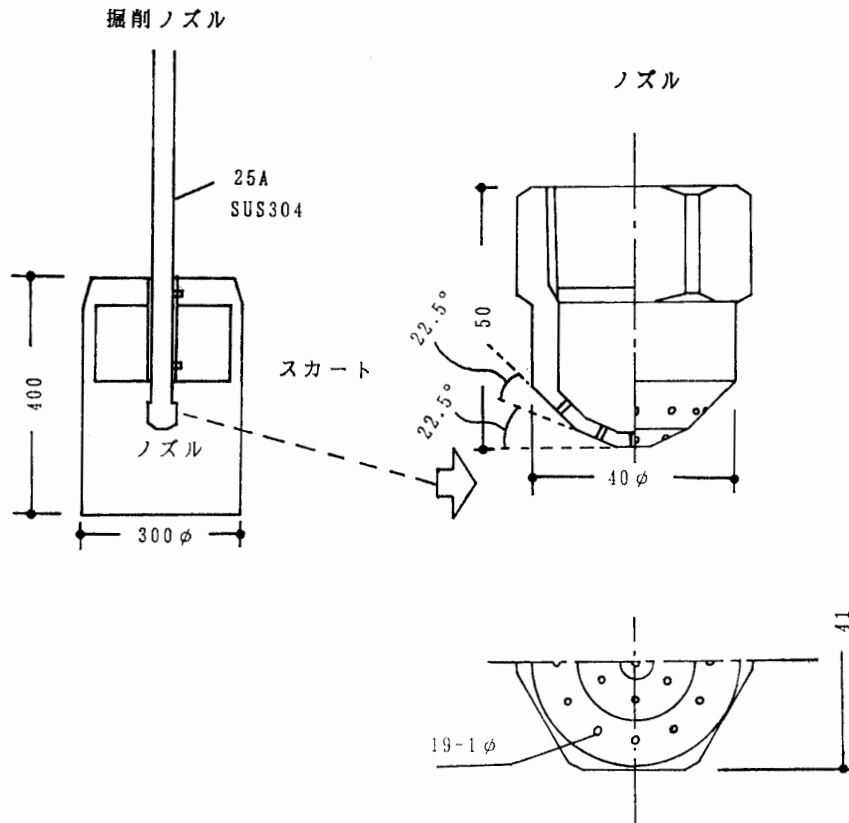


図5 掘削ノズル：左がノズルとスカート相结合した掘削状態の図。右はノズル先端の形状
 Fig. 5. Nozzle: (left) Nozzle with skirt in drilling. (right) Shape of the nozzle.

イントが付いており、入力ホースをホースリールに連結したままで穴の中にホースを送り出すことができる。

ホースの自動送りは、次のようにして行う。三脚の一脚下部に微速モーターを取り付ける。このモーターは DC モーターに減速機を取り付けたもので、0-1 rpm の範囲で連続的に回転数を変えることができる。モーターにはロープリールが取り付けられており、直径 6mm のロープが巻かれてある。ホースリールのブレーキをかけ、このロープの先端をモーターともっとも近い位置にあるホースにプルーチック結びで固定する。ブレーキを解除し、ゆっくりホースを送り出す。ロープの先端が滑車の近くまで移動したら、ブレーキをかけロープ先端を最初の位置まで戻す。同じように繰り返して徐々にホースを送り出す。

図5に示すように、掘削ノズルは、スカートとノズル本体から成っており、スカート先端からノズルまでの位置は自由に変えることができる。ノズルの形状は3種類あり、雪の性質とスカート先端との距離により適当に選択する。

3.2. あすか観測拠点での掘削

図1に示すように、あすか観測拠点の通路棟安全地帯 B から東に 50m 離れた地点まで、幅 80cm、深さ約 1.5m のトレンチを掘った。この 50m 地点のトレンチの底から掘削は開

始された。スノーメルター、ジェネレーター等は 2t 積みそりに設置し、掘削タワーとホースリールを掘削孔の近傍に設置した。スノーメルター・スチームジェネレーター用のバーナーと給水ポンプおよび微速モーターに使用する 3φ 200V 電源は、発電棟から供給した。掘削は 1987 年 2 月 9 日に行われ、約 9 時間蒸気を流した。掘削速度は、深さ約 20 m までは 4 m/h であった。スカート先端が着底しているかどうかは、ホースをときどき引っ張り上げて確認したが、20 m 以深ではホースの重量が大きくなり、手ごたえではわからなかった。9 時間後の孔口からの深さは、ホースに記入した目盛りでは 35.7 m だったが、終了後深さを測定したところ、孔口から 27.5 m であった。また、直径は 40 cm である。使用した燃料(灯油)は、スノーメルターとジェネレーターを含めて 110 l であった。掘削の様子を図 6 に示す。この掘削機の問題点をまとめると表 2 のようになる。



図 6 排水孔の掘削現場

Fig. 6. Drilling operation at Asuka Station.

表 2 使用したスチームドリルの問題点
Table 2. Problems of steam drill used in this operation.

問 題 点	現地での対処と今後の対策
深くなるとスカートが孔底に着底しているかどうかわからない。	深くなるとホースの重量が増し、手ごたえがなくなる。圧力センサー等で探知する必要あり。
動作してないと給水ポンプがすぐ凍結する。	ヒーターで周囲を暖房する。
ジェネレーターのボイラーが間欠的動作をさせると不着火を起こす。	主気弁を開き気味にして連続運転した。強風で不着火になるので防風対策をとる。

4. 孔底の変化

排水孔の孔底の上昇を監視するために、目盛りのついたひもを孔底まで降ろし、深度を測定した。深度は孔口からの深度であり、雪面からのものではない。排水孔の深度と排水量の関係を表3に示す。排水量は、前回の深度測定が行われた日から次の測定日までの累計を示している。1987年2月14日に初めて排水が行われたが、7月7日までは深度の測定は行われなかった。80100 lはこの期間の累計排水量を示す。図7に排水孔使用後の通算日数と深度、累計排水量の関係を示す。最初の約200日まで急速に上昇した後、上昇・下降を繰り返して、徐々に上昇している。約200日まで急に深度が上昇した原因として、この期間、風呂及び便所の排水温度が約12°Cと低かったことが考えられる(国立極地研究所, 1988)。図8に累計排水量と深度の関係を示す。排水量がほぼ一定の割合で排出されているにもかかわらず、深度は激しく変化する。この原因ははっきりしない。

孔底上昇のメカニズムは次のように考えられる。いま、孔底は不透水層に達しているものとする。孔底に達した排水は周りの雪(フィルン)を溶かし0°Cの水になる。融けた水と排水は雪の孔隙に浸透・凍結し、新たな不透水層を形成する。次の排水時には同じことを繰り返す。孔底は徐々に上昇するが、深度が浅いほど孔隙率が増すため、多くの排水を吸い込

表3 排水孔の深度と排水量
Table 3. Relation between hole's depth and amount of discharged sewage.

測定日	通算日数	深度(m)	排水量(l)	排水量累計(l)	測定日	通算日数	深度(m)	排水量(l)	排水量累計(l)
1987. 2. 14	0	-27.5		0	1988. 6. 30	502	-16.5	21300	281122
1987. 7. 7	143	-20.4	80100	80100	1988. 7. 31	533	-16.1	20100	301222
1987. 7. 16	152	-19.7	5000	85100	1988. 8. 31	564	-16.5	19900	321122
1987. 7. 26	162	-19.3	5500	90600	1988. 9. 30	594	-18	16600	337722
1987. 8. 6	173	-18.6	4200	94800	1988. 10. 31	625	-17.9	18300	356022
1987. 8. 17	184	-18.7	6800	101600	1988. 11. 30	655	-15.2	15300	371322
1987. 8. 27	194	-18.5	5400	107000	1988. 12. 31	686	-17.5	18500	389822
1987. 9. 7	205	-17.9	6800	113800	1989. 1. 31	717	-14.7	21700	411522
1987. 9. 17	215	-18	4200	118000	1989. 2. 28	745	-17.3	17554	429076
1987. 10. 9	237	-17.6	10600	128600	1989. 3. 31	776	-14.5	16768	445844
1987. 10. 20	248	-17.6	6000	134600	1989. 4. 30	806	-13.9	13819	459663
1987. 10. 31	259	-17.6	7200	141800	1989. 5. 31	837	-14.2	14364	474027
1987. 11. 10	269	-17.7	6800	148600	1989. 6. 30	867	-14.1	12992	487019
1987. 11. 20	279	-17.6	9800	158400	1989. 7. 31	898	-13.5	9266	496285
1987. 11. 30	289	-17.3	9400	167800	1989. 8. 31	929	-16.5	10988	507273
1987. 12. 10	299	-17.6	7800	175600	1989. 9. 30	959	-13.2	13028	520301
1987. 12. 20	309	-18.6	10600	186200	1989. 10. 31	990	-12.7	12162	532463
1988. 2. 29	380	-19.5	20200	206400	1989. 11. 30	1020	-12.4	10501	542964
1988. 3. 31	411	-17.5	18600	225000	1989. 12. 31	1051	-16.1	22135	565099
1988. 4. 30	441	-17	16222	241222	1990. 1. 31	1082	-15.9	29047	594146
1988. 5. 31	472	-17.1	18600	259822					

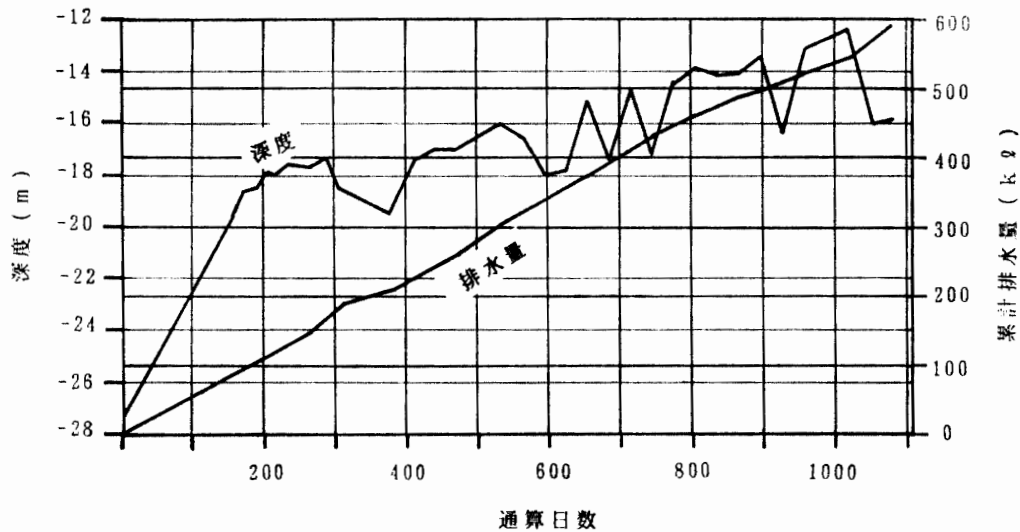


図 7 排水開始後の通算日数と深度・累計排水量の関係

Fig. 7. Relation between days from the first discharge of sewage and hole's depth and cumulative amount of sewage.

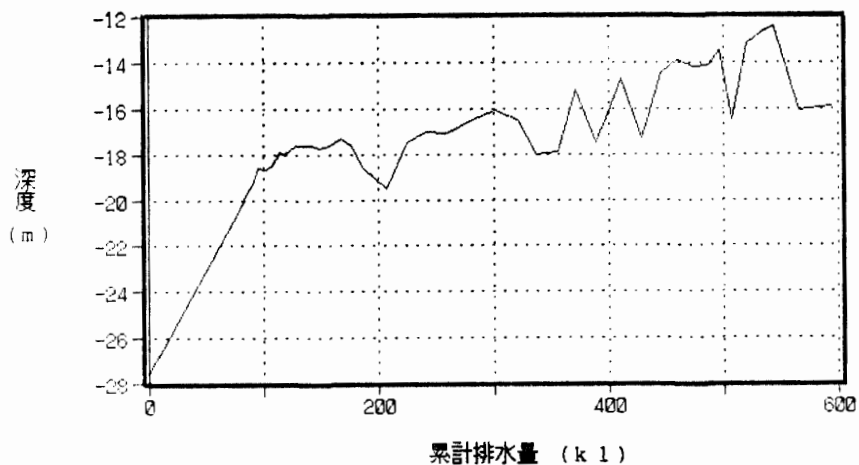


図 8 累計排水量と深度の関係

Fig. 8. Relation between cumulative amount of discharged sewage and hole's depth.

める。そのため、孔底の上昇速度は遅くなる。

次に、BADER らの理論 (BADER and SMALL, 1955) を用いて、汚染区域の広がりを計算してみる。使われる記号を次のように定義する。

V_w : 排水量 (l),

t_w : 排水の温度 ($^{\circ}\text{C}$),

γ : フィルンの密度 (g/cm^3),

t_s : フィルンの雪温 ($^{\circ}\text{C}$),

n : フィルンの孔隙率 ($n=(0.917-\gamma)/0.917$),

V_s : 排水の熱によって融解するフィルンの体積 (l),

V_{ss} : 0°C の水で満たされるフィルンの体積 (l),

H_w : 排水の持つ熱量 (cal).

排水の持つ熱量は次式で表される.

$$H_w = V_w \cdot t_w. \quad (1)$$

この熱のすべてがフィルンを融解するのに使われるとすると,

$$H_w = V_s \cdot \gamma (80 - 1/2 t_s). \quad (2)$$

排水の熱によって融解する雪の体積は, 式 (1), (2) より

$$V_s = V_w \cdot t_w / \gamma (80 - 1/2 t_s), \quad (3)$$

であり, これは排水を流したときにできる空洞の容積である. 排水とこの融解水を合わせた孔内の全水量は,

$$V_w + V_s \cdot \gamma = V_w (1 + t_w / (80 - 1/2 t_s)), \quad (4)$$

であり, この一部は空洞内で凍結し, その他はフィルンに吸収される.

いま, この全水量は, 最初空洞にたまり, 残った水が孔隙率 n のフィルンに吸収されると仮定すると, フィルンに吸収される水量は, 次のようになる.

$$\begin{aligned} V_f &= V_w + V_s \cdot \gamma - V_s \\ &= V_w ((1 + (\gamma - 1) \cdot t_w / (\gamma (80 - 1/2 t_s))), \end{aligned} \quad (5)$$

$\gamma = 0.6$, $t_s = -18.5^\circ\text{C}$ (あすか観測拠点の年平均気温) と仮定すると,

$$V_f = V_w (1 - 0.0075 t_w),$$

となり, 排水の温度が 133.3°C であれば, 排水の熱量で融解した空洞にだけ排水をため, フィルンに浸透させる必要がないことがわかる. 排水の温度が低くなれば, 徐々にフィルンに吸収させる割合が増加し, 100°C で 25%, 25°C で 81.3% である.

また, 全水量を空洞にためることなく, フィルンに吸収されるとすると, 排水で満たされるフィルンの体積は, 式 (4) より

$$\begin{aligned} V_{ss} &= (V_w + V_s \cdot \gamma) / n \\ &= 0.917 V_w / (0.917 - \gamma) \cdot (1 + t_w / (80 - 1/2 t_s)), \end{aligned} \quad (6)$$

である. $\gamma = 0.6$, $t_s = -18.5^\circ\text{C}$ を代入して, 次式を得る.

$$V_{ss} = 2.89 V_w (1 + 0.0112 t_w). \quad (7)$$

排水温度が上昇するとフィルンを融解し水ができるので, その分だけ大きな体積が必要となる. SCHMITT and RODRIGUEZ (1963) によると排水はほぼ円錐体状に浸透することがわかっている. 累計 594 kl を排水した 1990 年 1 月 31 日の孔底は, 排水を始めてから 11.6 m 上昇した位置にあるので, これを円錐体の高さとし $t_w = 30^\circ\text{C}$ と仮定すると, この時の円錐体の半径は 13.7 m と計算できる.

実際は, 空洞内にも水が残り凍結すると思われるので, この半径よりは小さくなっているはずである.

5. おわりに

あすか観測拠点の排水孔は、使用し始めてからすでに3年以上を経過したが、詰まることなく順調に機能している。第29次観測隊では予備として、現在の場所より風下10mの位置にほぼ同じ深さの穴を掘削したが、ここ数年は使わなくても済みそうである。順調に機能している原因としては、みずほ基地に比べ雪温が高いので雪が融解しやすく空洞がすぐできること、高温の排水を流していることで空洞ができやすいこと、排水孔を深く掘削したので、深部の空隙から利用できたことなどがあげられる。

謝 辞

この排水システムの実施にあたり多くの方々にご協力していただいた。計画の段階からの全般に渡っては、国立極地研究所の寺井啓氏、前国立極地研究所の村越望氏に有益なご助言をいただいた。また、あすか観測拠点の設備工事と掘削は、鮎川勝越冬副隊長をはじめとする第28次あすか越冬隊の方々と、第28次夏隊の寺井啓、宮下良雄、村松金一の各氏と筆者の一人、石沢が行った。現地での深度と排水量の測定は、第28次・29次・30次・31次あすか越冬隊の方々に実施していただいた。これらの方々に深く感謝致します。

文 献

- BADER, H. and SMALL, F. A. (1955): Sewage disposal at ice cap installations. SIPRE Tech. Rep., 21, 1-4.
- 石沢賢二・中山邦之 (1989): 南極に特有な電気設備. 電気設備学会誌, 9(11), 832-839.
- 国立極地研究所編 (1980): 日本南極地域観測隊第20次隊報告 (1978-1980). 東京, 140.
- 国立極地研究所編 (1988): 日本南極地域観測隊第28次隊報告 (1986-1988). 東京, 477-482.
- 国立極地研究所編 (1989): 日本南極地域観測隊第29次隊報告 (1987-1989). 東京, 321-323.
- NAKAWO, M. (1985): The rise of snow temperatures caused by the sewage disposal, Mizuho Station, Antarctica. Mem. Natl Inst. Polar Res., Spec. Issue, 39, 223-232.
- NARUSE, R. and SUZUKI, Y. (1975): A steam-operated drill used by the 14th Japanese Antarctic Research Expedition (1972-1974). Nankyoku Shiryô (Antarct. Rec.), 53, 53-56.
- NARUSE, R. and YOKOYAMA, K. (1975): Position, elevation and ice thickness of stations. JARE Data Rep., 28 (Glaciology 3), 7-10.
- SATOW, K. (1977): Snow temperatures at a depth of 10 meters. JARE Data Rep., 36 (Glaciology 4), 7-10.
- SCHMITT, R. P. and RODRIGUEZ, R. (1963): Glacier water supply and sewage disposal systems. Symposium on Antarctic Logistics, Boulder, 1962, 329-338.

(1990年3月20日受付; 1990年5月17日改訂稿受理)