

## 南極みずほ基地の 700 m 掘削孔における温度分布

奥平文雄<sup>1</sup>・西尾文彦<sup>2</sup>・池上宏一<sup>3</sup>

### Temperature Profile in a 700 m Bore-Hole at Mizuho Station, East Antarctica

Fumio OKUHIRA<sup>1</sup>, Fumihiko NISHIO<sup>2</sup> and Kouichi IKEGAMI<sup>3</sup>

**Abstract:** A temperature profile was measured with a wall contact-type thermometer probe in a 700 m bore-hole at Mizuho Station, Antarctica.

The temperature rapidly decreased from the snow surface to the 100 m deep layer and slowly decreased toward deeper layers. It was the lowest ( $-35.48^{\circ}\text{C}$ ) at about 350 m depth and it gradually increased with depth.

The temperature profile measured could be suggested to differ from the condition of ice sheet predicted by the theoretical calculation.

**要旨:** 南極みずほ基地の 700 m 掘削孔を利用して、孔壁面に接触する温度計で氷床の垂直温度分布を測定した。

氷床の温度は深さ 100 m までは急激に、それより深い所ではゆるやかに下がった。そして深さ 350 m 付近で最低の温度 ( $-35.48^{\circ}\text{C}$ ) となり、それ以降は逆に深さが増すにつれて温度は上昇した。

実測された温度分布は、現在のみずほ基地付近の氷床の状態から推測されるものと少し異なることを示唆した。

#### 1. はじめに

1984 年 8 月、東南極みずほ基地において第 25 次日本南極地域観測隊 (JARE-25) は、深さ 700 m の掘削に成功した。

1985 年の 3 月及び 8 月にその掘削孔を利用して温度分布の測定を行った。

掘削は最初、大口径のサーマルドリルで行い、深さ 626 m で小口径のドリルに替えたため、掘削孔内に孔径の違いができ掘削孔壁に段差が形成された。1985 年の 3 月の 1 回目の測定では温度測定機は深さ 626 m まで入ったが、掘削孔には孔の収縮を防ぐための液体など、なにも封入していなかったため、上部の氷の圧力のため孔は収縮し、2 回目の 1985 年 8 月の測定時には、550 m までしか測定機を降ろすことができなかった。

この論文では、温度の測定結果を示すとともにその温度分布が示す氷床の状態を推測する。

<sup>1</sup> 岐阜県公害研究所. Gifu Prefectural Research Institute for Environmental Pollution, 58-2, Yabuta 8-chome, Gifu 500.

<sup>2</sup> 国立極地研究所. National Institute of Polar Research, 9-10, Kaga 1-chome, Itabashi-ku, Tokyo 173.

<sup>3</sup> (株) 白山工業. Hakusan Industry Co., Ltd., 1-18, Musashidai, Fuchu-shi, Tokyo 183.

## 2. 測定機と測定方法

温度測定機は孔内に降ろすプローブ部と地上に置く指示記録計部からなっている。プローブは図1に示すように2本の板バネを有し、それで孔壁を圧するようになっている。

センサーはサーミスターを用い、それはプローブの板バネの中央付近に取り付けてあったので、プローブが孔内にある時は、常時サーミスターは孔壁に押し付けられ、直接氷体の温度を測定できるようになっている。また、サーミスターは、 $0.01^{\circ}\text{C}$ の精度に検定されている。

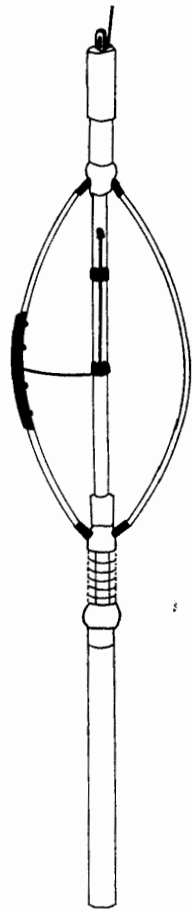


図1 温度測定用プローブ

Fig. 1. Thermister probe in the bore-hole.

プローブ部はウィンチケーブルを通して、地上の温度指示計に接続されており、指示計は恒温箱 ( $23^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$ ) に入れられ、正常に作動するようにした。

温度測定は孔壁に沿って 25 m ごとに行い、温度が氷体と平衡状態となるのに十分な時間だけ一測点にとどめた。

プローブ本体の直径は 3.2 cm であり、原理的には孔径が約 3.5 cm の深さまで温度測定機を降ろすことができるはずである。しかし、測定の際には孔径が 5-6 cm のところまでしか降ろすことができなかった。これは、孔壁に多くの凹凸があり、孔壁面の凸部で測定機が接触し停止したためだと思われる。

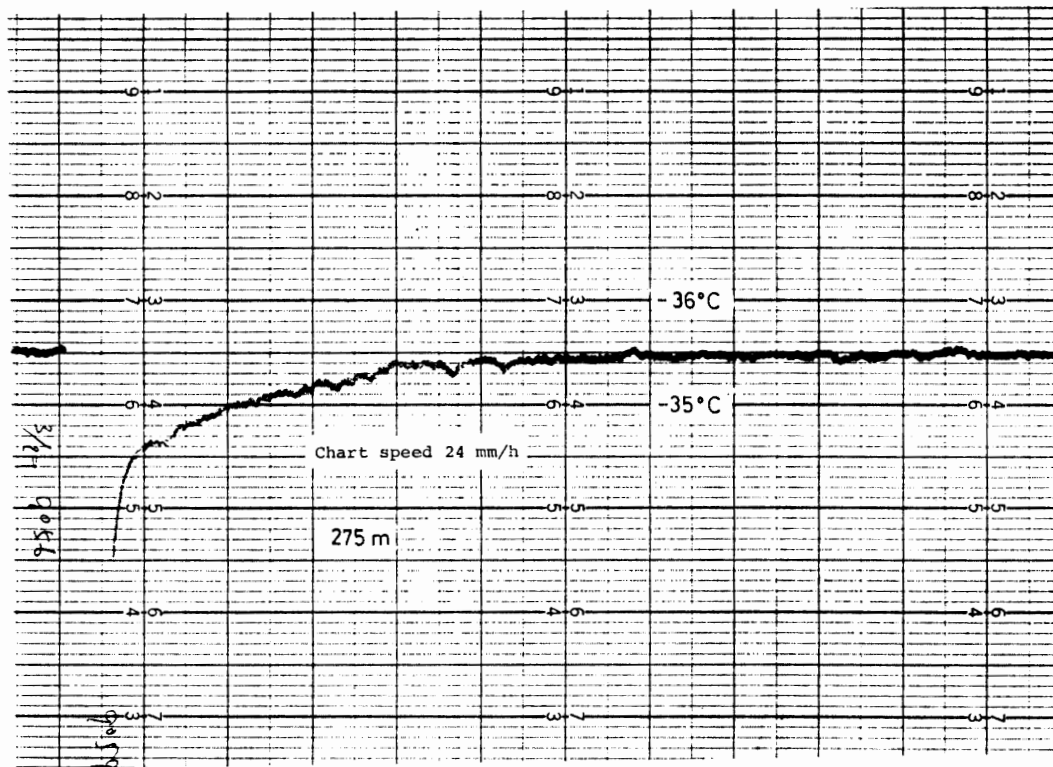


図 2 みずほ基地 700 m 掘削孔における温度測定の実例 (記録紙)

Fig. 2. An example chart of temperature measurements.

温度測定記録の実例を図 2 に示す。図からもわかるように、温度は記録紙上で約  $0.08^{\circ}\text{C}$  の振幅で変動していた。この変動は、対流などの孔壁内で起こる現象を示しているのではなく、基地内の電気機器によるノイズであると思われたが、除去することはできなかった。そのため、それぞれの深さでの温度測定値の決定は、図 2 に示す記録紙上の変動振幅の中央を読み取って行った。また、1985 年 3 月と 8 月は同じ手法で温度測定を実施した。

### 3. 結果と考察

1985 年 3 月と 8 月に行った測定結果を表 1 及び図 3 に示す。図 3 には、みずほ基地の 700 m 掘削孔から約 50 m 北北西に位置し、約 10 年前に深さ 145 m の掘削孔で測定した FUJI (1978) の値も示した。

1985 年 3 月と 8 月の測定では、測定値に最大  $0.08^{\circ}\text{C}$  の差しかない。

温度は表面から深さ 100 m までは、約  $-32^{\circ}\text{C}$  から  $-34.8^{\circ}\text{C}$  と急激に下がり、100 m より深いところでは温度の減少傾向はゆるやかになる。そして深さ 350 m 付近で最低の温度 ( $-35.48^{\circ}\text{C}$ ) となり、深さ 350 m から 600 m までは深さが増すにつれ、温度は上昇していた。この温度分布の傾向は、比較的流れや積雪量が大きい氷床内部の理論的温度分布に一致する。この考察は後で述べる。

掘削はサーマルドリルで行ったので、掘削孔内で氷を融解したドリルの熱によって、掘削

表 1 みずほ基地の 700 m 掘削孔における 1985 年 3 月及び 8 月の温度測定結果  
 Table 1. 700 m bore-hole temperatures at Mizuho Station, 1985.

Depth (m)	Temperatures (°C)		Depth (m)	Temperatures (°C)	
	Mar. 1985	Aug. 1985		Mar. 1985	Aug. 1985
7.6	-31.95	-31.96	320	-35.45	-35.44
20	-33.11	-33.06	345	-35.48	-35.47
45	-34.03	-34.03	370	-35.47	-35.45
70	-34.52	-34.44	395	-35.46	-35.45
95	-34.72	-34.70	420	-35.41	-35.42
120	-34.92	-34.91	425	-35.40	-35.40
145	-35.04	-34.98	470	-35.37	-35.35
170	-35.13	-35.11	495	-35.27	-35.27
195	-35.22	-35.15	520	-35.26	-35.23
220	-35.30	-35.28	545	-35.22	-35.22
245	-35.38	-35.32	570	-35.12	
270	-35.41	-35.38	595	-34.97	
295	-35.44	-35.43	608	-34.94	

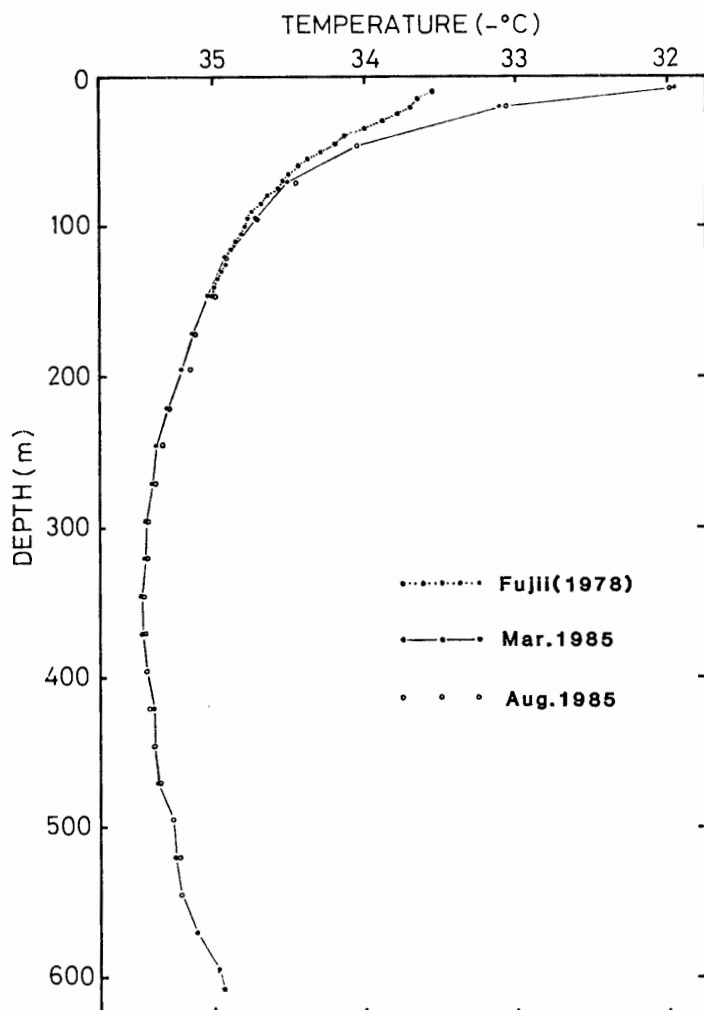


図 3 みずほ基地 700 m 掘削孔における垂直温度分布。1977 年にみずほ基地の 145 m 掘削孔において FUJII (1978) が測定した値ものせてある

Fig. 3. Vertical temperature profile in a 700 m bore-hole at Mizuho Station, Antarctica. FUJII (1978)'s data of measurement of another 145 m bore-hole at Mizuho Station in 1977 are plotted in this figure.

孔壁面の温度は高くなっているおそれがある。

中尾 (1982) は、サーマルドリルによる掘削孔における温度上昇を簡単な一次元熱伝導モデルにより試算した。それによると、掘削中に  $0^{\circ}\text{C}$  近くまで上昇した掘削孔壁面の温度が、もとの温度に回復する時間はきわめて長く、掘削後一年でも約  $0.1^{\circ}\text{C}$  だけ孔壁の温度はもとの温度より高い結果を得た。しかし、1985 年 3 月 (掘削後約 240 日) と 8 月 (掘削後約 1 年) の測定値に差がないこと、さらに浅いところを除けば、FUJII (1978) の測定値 (掘削後約 5 年の値) とほぼ一致しているため、サーマルドリルによる温度上昇の影響は、この温度測定機による総合精度約  $0.08^{\circ}\text{C}$  以内では認めることができないと考えられる。

一方、約 100 m より浅いところにおいて、今回の測定値は FUJII (1978) の測定値より高い温度を示している。この温度上昇の原因の一つに、基地での排水等による温度上昇が考えられる。

NAKAWO (1985) は、みずほ基地の 700 m 掘削孔から約 15 m 離れた基地内での施設が集中している污水处理廃棄孔を中心にして、雪温の上昇があることを実測で示した。そして、雪温が上昇するのは、廃棄した汚水がある深さで凍るときに、潜熱が発生するためであるとした。

みずほ基地において、汚水の廃棄は 1976 年より本格化し、その量は一日当たり 30 kg 程度と見積もられている。NAKAWO (1985) は廃棄した汚水が深さ 15 m で凍ると仮定して、雪温上昇を計算で求めたところ、ほぼ実測した温度上昇を説明することができた。

FUJII (1978) は 1977 年に掘削孔の温度分布を測定した。測定を行った掘削孔は、汚水廃棄孔より約 40 m 離れており、しかも汚水廃棄が始まったばかりであったので、その測定値は汚水による影響はあまり受けていないと考えられる。したがって、今回の温度分布測定値と FUJII (1978) の温度分布の測定値の相違は、汚水による温度上昇を示すものであると考えられる。

NAKAWO (1985) は汚水による温度上昇の度合を計算するため、円筒座標を用いて熱伝導方程式を解き次式を得た。式は定常状態の時の解である。

$$T - T_s = \frac{Ld}{4\pi K} \left[ \frac{1}{\sqrt{r^2 + (h-z)^2}} - \frac{1}{\sqrt{r^2 + (h+z)^2}} \right], \quad (1)$$

ここで、 $T_s$  は表面 ( $z=0$ ) の温度、 $h$  は熱源の深さ、 $r$  は水平方向の距離、 $z$  は深さ、 $L$  は潜熱、 $d$  は一日当たりの汚水量 (温度は  $0^{\circ}\text{C}$  と仮定)、 $K$  は熱伝導率を示す。このうち、 $K$  は雪あるいは氷の状態に応じて  $0.11\text{--}2.5\text{ W/m}\cdot^{\circ}\text{C}$  の値を取る。

雪の密度から考えて、深さ 10–40 m の熱伝導率は、 $0.4\text{--}0.8\text{ W/m}\cdot^{\circ}\text{C}$  程度であるとした。40 m より深いところの熱伝導率は純氷の値を用いた。

これらの  $K$  の値に対し、式 (1) を  $h=r=15\text{ m}$  の時の温度上昇を計算して図 4 に示した。図 4 には、今回の測定値 ( $T_{85}$ ) から FUJII (1978) の測定値 ( $T_{77}$ ) を差し引いた値  $\Delta T = T_{85}$

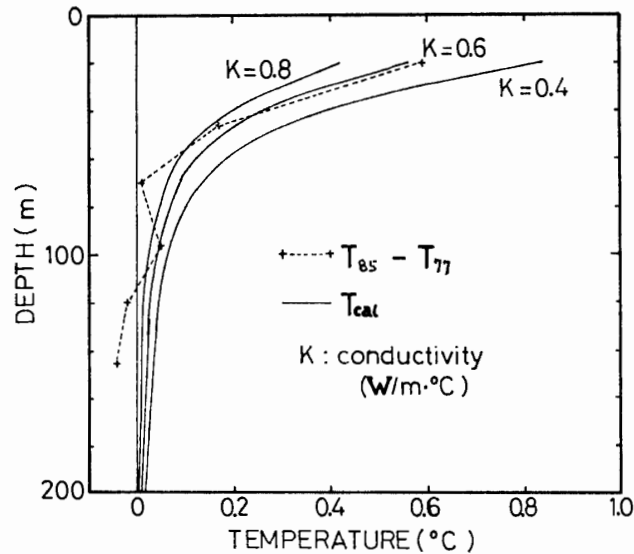


図4 みずほ基地の廃棄汚水による昇温の計算結果(実線)と1985年の測定値から1977年のFUJII(1978)の値を差し引いた値(破線)との比較

Fig. 4. Temperature rise by waste water of Mizuho Station (solid line) and the difference of temperature between 1985 and 1977 (dotted line).

$-T_{77}$  も乗せた。この  $\Delta T$  を計算値  $T_{cal}$  でほぼ説明できると考えられる。深さ 20–40 m では、 $K=0.6 \text{ W/m}\cdot\text{°C}$  によく一致している。深くなるにつれて大きい  $K$  の値で説明できる傾向をもつ。深くなると  $K$  の値が大きくなり温度拡散が大きくなるので計算による温度上昇は、小さくなることと、熱源が表面近くにあるので 100 m 程度の深いところでは、 $T_{cal}$  は図 3 に示したものよりさらに小さくなり、温度上昇は 0 に近づくものと考えられる。

以上のことから、今回の測定値から FUJII (1978) の測定値を差し引いた値  $\Delta T$  は、汚水による温度上昇の結果であると結論できる。

みずほ基地における温度分布として、100 m より浅いところは FUJII (1978) の値を、それより深いところは今回の値を用いれば、人工的な乱れの無い自然状態の氷床の温度分布になると考えられる。

次に、氷床がどのような状態の時に 1985 年 3 月に測定した温度分布を示すかということを検討した。

このことについては既に NISHIO *et al.* (1981) によって、みずほ基地の 145 m 掘削孔の温度分布データによって検討されている。今回 145 m より深いところまでの温度分布のデータが得られたので再検討を行った。解析手法は NISHIO *et al.* (1981) と同じである。

定常状態での氷床の温度分布を示すものとして、次のような BUDD (1969) の理論式がある。

$$k \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} + \frac{b}{h} z \frac{\partial T}{\partial z} = ua\lambda, \quad (2)$$

ここで、

- $z$  : 底面からの高さ,  
 $k$  : 氷の熱拡散率,  
 $b$  : 年間積雪量,  
 $h$  : 氷床の厚さ,  
 $\alpha$  : 表面傾斜,  
 $u$  : 年間の流動速度,  
 $\lambda$  : 海拔高度に対する氷床表面近くの温度傾度,

である。

式 (2) を解くための境界条件として、表面の温度  $T_s$  と底面での温度勾配が必要である。

底面での温度勾配は地殻熱流量  $\gamma_G$  と氷の流動による摩擦熱が加わり、次式で与えられる。

$$\left(\frac{\partial T}{\partial z}\right)_b = \frac{\gamma_G}{K} + \frac{\tau_b u}{JK}, \quad (3)$$

ここで、

- $J$  : 熱の仕事当量,  
 $K$  : 氷の熱伝導率,  
 $\tau_b$  : 底面でのせん断応力,

である。

みずほ基地で実測した温度分布と式 (2), (3) を用いて計算で求めることができる温度分布を比較するために、計算に採用した因子の値は、表 2 に示した。

みずほ基地での実測した深さ 100–600 m までの温度分布は、人工的な乱れのない氷床の温度分布を表していると考えられるので、これらの実測値にもっとも一致するように、諸因子を変えて温度分布の計算を実行した。それぞれの因子のなかで実測値がない地殻熱流量は、東南極地域の地殻で妥当と考えられている値を採用している (BUDD, 1969)。また、氷床表面傾斜の値は歪方陣による測定では 40 分になるが、流動方向の高度測定から求めた平均的な

表 2 みずほ基地付近の氷床の雪氷学的諸因子の値  
 Table 2. Values of various parameters at Mizuho Station.

Symbol	Parameter	Value
$k$	Thermal diffusivity	$1.82 \times 10^{-8} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$
$h$	Ice thickness	2000 m
$\alpha$	Surface slope	$5.8 \times 10^{-3} \text{ rad}$
$\lambda$	Temperature gradient	$1.1^\circ\text{C} \cdot (100 \text{ m})^{-1}$
$K$	Heat conductivity of ice	$2.26 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$
$\tau_b$	Basal shear stress	$1.05 \times 10^5 \text{ Pa}$
$\rho$	Density of ice	$917 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$
$\gamma_G$	Geothermal heat flux	$4.186 \times 10^{-2} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$
$b$	Accumulation rate	$8 \text{ cm} \cdot \text{a}^{-1}$ in ice
$u$	Horizontal velocity	$20.17 \text{ m} \cdot \text{a}^{-1}$
$T_s$	Surface temperature	$-33.20^\circ\text{C}$

表面傾斜 20 分を用いて計算を行った。氷の厚さは電波氷厚計による測定値，その他の密度や熱拡散率などの物理定数は氷の値を用いた。

このようにして，温度の実測値に合うように表面温度，氷床の流動速度及び年間函養量を変化させて計算を行うと，表面から 100 m 付近を除けば，表面温度が  $-34.4^{\circ}\text{C}$ ，流動速度が  $17\text{ m}\cdot\text{a}^{-1}$ ，氷相当の函養量が  $8\text{ cm}\cdot\text{a}^{-1}$  の場合の計算値がよく実測値にあった。

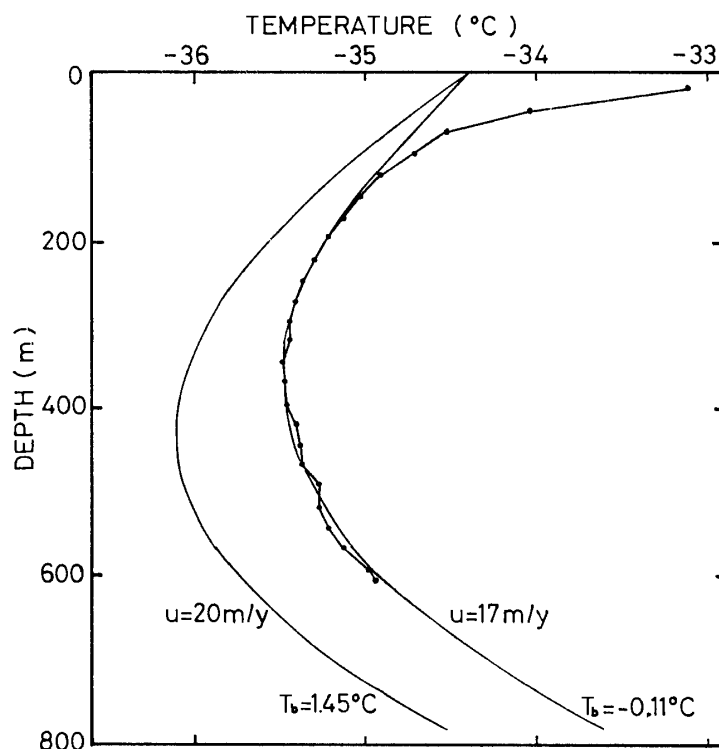


図 5 BUDD (1969) の理論式を用いて氷床の温度分布を計算した結果と 1985 年 3 月の測定値との比較。理論式で用いた諸因子の値は表 2 を参照

Fig. 5. Temperature profile based on BUDD's theoretical thermal equation and measured in March 1985.

この計算結果を図 5 に示した。図 5 によると，100 m より深いところではかなりよく一致している。しかも，底面付近では融解点付近の温度， $-0.11^{\circ}\text{C}$  に達している。

一方，表面流動速度は実測が  $20.42\text{ m}\cdot\text{a}^{-1}$  である。図 4 で示されているように，実測値から大きくはずれてしまい，しかも，底面での温度は  $+1.45^{\circ}\text{C}$  と融解点より非常に高くなってしまふ。また，表面流動速度を  $20\text{ m}\cdot\text{a}^{-1}$  で表面温度を  $-34.4^{\circ}\text{C}$  から高くして  $-33^{\circ}\text{C}$  近くにしても，実測値に一致する妥当な因子を求めることはできない。しかも，底面での温度が  $+5^{\circ}\text{C}$  近くとなり，考えにくい温度分布となった。したがって，定常温度分布で実測値に近似させる場合，表面流動速度は約  $17\text{ m}\cdot\text{a}^{-1}$  となり実測値よりも小さい。このことは，みずほ基地周辺の氷床の流動速度が，加速されていることを示唆している可能性がある。また，表面温度は実測値 ( $-33.2^{\circ}\text{C}$ ) と比較して低い値である。このことは最近の氷床表面の低



下,あるいは温暖化に起因する気温上昇の結果とも考えられる。これについての議論は別の機会に譲る。

#### 4. 結 論

みずほ基地の 700 m 掘削孔において,掘削後約 240 日及び 360 日に温度測定を行い,次の結果を得た。

- 1) 温度は深さ 100 m までは急激に下がり,100 m より深いところではゆるやかに下がっていた。そして深さ 350 m 付近で最低の温度 ( $-35.48^{\circ}\text{C}$ ) となり,それ以降は逆に深さが増すにつれ,温度は上昇していた。
- 2) 測定値にはサーマルドリルによる温度上昇の影響を認めることはできなかった。
- 3) 深さ 100 m 付近までの測定値には基地の汚水などの影響があると結論できる。
- 4) 測定した温度分布は,基地付近の表面温度が現在の温度より低いときの状態を示すと考えられる。

#### 文 献

- BUDD, W. F. (1969): The dynamics of ice masses. ANARE Rep., 108, 216p.
- FUJII, Y. (1978): Temperature profile in the drilled hole. Mem. Natl Inst. Polar Res., Spec. Issue, 10, 169.
- 中尾正義 (1982): 掘削孔を利用した氷温測定に対する熱式ドリルによる昇温の影響。南極東クィーンモードランド氷床の雪氷学的研究, 東 晃編。札幌, 北海道大学工学部, 10-18.
- 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.
- NISHIO, F., FUJII, Y. and KUSUNOKI, K. (1981): Measured and computed temperature profiles at Mizuho Station, East Antarctica. Sea Level Ice and Climatic Change, ed. by I. ALLISON. Wallingford, IAHS, 239-246 (IAHS Publication, No. 131).

(1988年9月7日受付; 1988年10月8日改訂稿受理)