

GPS 相対測位による最近の東南極氷床の白瀬流域及び
ドームふじ周辺の氷床流動観測本山秀明^{1*}・古川晶雄¹・西尾文彦²Study of ice flow observations in Shirase drainage basin and around
Dome Fuji area, East Antarctica by differential GPS methodHideaki Motoyama^{1*}, Teruo Furukawa¹ and Fumihiko Nishio²

(2007年12月10日受付; 2008年5月20日受理)

Abstract: Surface ice sheet flow velocity has been observed using the differential GPS (Global Positioning System) method since 1992. The basic GPS stations along traverse routes from S16 to Dome Fuji were set up at 11 sites and the GPS observations were performed during inland traverse expeditions. After that, the observational area was expanded along contour lines and the main stream line in the Shirase drainage basin to the south of Dome Fuji Station. The flow velocities at GPS stations are reported. The thinning of the ice sheet surface reported from the past was observed in Mizuho Glacier basin. The thinning rates were 0.1–0.2 m/year.

要旨: 1992年から氷床流動観測を目的としたGPS (Global Positioning System: 全地球測位システム) 観測が開始された。最初は沿岸からドームふじ基地へのトラバースルート沿いに設けた11地点を基本観測点として、内陸旅行中に適宜GPS観測を行った。その後、白瀬流域の主流線沿いと等高線沿い、ドームふじ基地南方へと観測地域を拡大した。氷床流動に関しては、白瀬流域の下流ほど氷床流動速度が大きい。また白瀬流域において、従来から観測されている氷床表面の低下が確認され、この低下速度は0.1–0.2 m/年であった。

1. はじめに

南極氷床深層掘削を目的としたドームふじ観測計画のため、南極大陸沿岸のS16からドームふじ基地までの輸送ルートのうち、みずほ基地以南が1991年から新設された。このルート沿いに氷床流動観測点が11点設置された。1992年1月にS16, H15, H260, Mizuho St. (みずほ基地), MD120, MD364の6地点で最初のGPS (Global Positioning System: 全地球測位

¹ 情報・システム研究機構国立極地研究所. National Institute of Polar Research, Research Organization of Information and Systems, Kaga 1-chome, Itabashi-ku, Tokyo 173-8515.

² 千葉大学環境リモートセンシング研究センター. Center for Environmental Remote Sensing, Chiba University, 1-33 Yayoi, Inage, Chiba 263-8522.

* Corresponding author. E-mail: motoyama@nipr.ac.jp

システム) 観測が実施された。これより南の MD500, MD620, Dome Fuji St. (ドームふじ基地), DF80 については 1994 年 1 月に最初の観測を行った。Motoyama *et al.* (1995a) は、氷床流動速度に関する初期解析結果を報告した。その後、GPS 観測点の再測は、内陸行動に余裕があるときに実施した。第 38 次南極地域観測隊 (以降、第 38 次隊などと記す) ではドームふじ周辺の観測旅行を行い、1997 年 12 月に 4 地点 (S590, S650, S79°E42.5', S78°E40') にて最初の観測を行い、4 年後の 2001 年 12 月に再測した。5 カ年計画で氷床変動システムの研究観測計画が同じく第 38 次隊から始まり、白瀬流域の氷床流動集中観測のため第 40 次隊によって 1999 年 12 月から 2000 年 1 月に主流線 CF ルートとみずほ基地から等高線沿いのルートである YM ルート沿いに GPS 観測点を 14 点設置して観測した (Furukawa *et al.*, 2002)。これらの再測を第 42 次隊が 2 年後の 2001 年 12 月から 2002 年 1 月にかけて行った。氷床氷縁にある S16 に関しては国土地理院が独自に観測を開始し、その初期結果を Ootaki and Fujiwara (1998) で報告している。本報告では、1992 年から 2004 年までに実施した GPS 観測による氷床流動観測結果をまとめて報告する。

2. 観測地点及び観測方法

GPS 観測点の緯度、経度、標高と昭和基地からの直線距離を表 1 にまとめ、図 1 に GPS 観測点を示す。図 1 にはあわせてドームふじ観測計画期間中の内陸ルートと主要な観測項目も示した。氷床上の観測点は昭和基地から 19 km 離れた S16 から 1118 km 離れた S79E42.5 地点まで広範囲に広がっている。

GPS 観測の基準点とした昭和基地では GPS 連続観測が 30 秒間隔で行われている。昭和基地の基準点は 1991 年に設置された SYOW 観測点から 1997 年に SYOG 観測点に移行した。この 2 カ所の基準点の座標値に統一されたものがなく様々であったが、SYOG 観測点を基準として SYOW 観測点の座標値を同時観測にて決定したので、この座標値を基準座標として用いることにした (国土地理院, 2007)。昭和基地基準点の観測データと内陸 GPS 観測点での観測データで相対測位 (干渉測位) を計算した。相対測位による測定精度は観測点間距離 (基線距離) の 1 ppm 以内である。例えば 100 km 離れていると 10 cm 以内、1000 km だと 1 m 以内で相対位置が決定される。

氷床上における GPS 観測には、Trimble 社の 4000SST と 4000SSE を用いた。氷床上の GPS 観測点とは、現地において、いわゆる「赤白ポール」と呼ばれる測量ポールを立てた地点であり、GPS 測定時には、その測量ポールの真上に GPS アンテナ (Trimble 社 Compact L1/L2 w/Ground Plane) の中心が来るように設置した。測量ポールとアンテナの測定誤差は 1 cm 未満である。ほとんどの地点では雪上車旅行での内陸行動中であったため、観測時間は停泊中の 8-12 時間になった。また YM ルートや CF ルートは、第 42 次隊での再測の時、一日 2 地点の観測を行うことがあり、この際は昼食を兼ねての 1-2 時間で観測を実施してか

表 1 GPS 観測地点の位置情報. 観測地点名, 昭和基地からの直線距離, WGS-84 測地系での緯度, 経度, 標高.
Table 1. Geographical information on GPS stations.

| | Distance km | WGS-84 Latitude | Longitude | Altitude m |
|-------------|----------------|--------------------|-------------|---------------|
| S16 | 19 | 69 01'46" S | 40 03'06" E | 590 |
| H15 | 48 | 69 04'50" S | 40 46'32" E | 2050 |
| H260 | 156 | 69 52'34" S | 42 41'19" E | 1776 |
| Mizuho | 261 | 70 41'57" S | 44 17'03" E | 2248 |
| MD120 | 353 | 71 49'38" S | 43 52'55" E | 2601 |
| MD240 | 457 | 72 53'57" S | 43 28'19" E | 3001 |
| MD364 | 571 | 74 00'28" S | 42 59'48" E | 3353 |
| MD500 | 699 | 75 13'55" S | 42 00'45" E | 3573 |
| MD620 | 815 | 76 17'59" S | 40 49'59" E | 3720 |
| Dome Fuji | 927 | 77 19'01" S | 39 42'12" E | 3802 |
| DF80 | 933 | 77 22'24" S | 39 36'51" E | 3801 |
| S590 | 1005 | 78 00'38" S | 41 10'07" E | 3747 |
| S79E42.5 | 1118 | 79 00'02" S | 42 29'49" E | 3700 |
| S650 | 1117 | 79 01'30" S | 40 34'59" E | 3673 |
| YM154 | 334 | 71 52'56" S | 37 03'40" E | 2439 |
| YM140 | 321 | 71 48'43" S | 37 43'41" E | 2375 |
| YM120 | 308 | 71 45'18" S | 38 49'56" E | 2301 |
| YM100 | 301 | 71 41'53" S | 39 55'35" E | 2282 |
| YM85 | 292 | 71 35'58" S | 40 39'13" E | 2252 |
| YM70 | 287 | 71 30'08" S | 41 23'39" E | 2221 |
| YM60 | 286 | 71 26'33" S | 41 54'45" E | 2267 |
| YM50 | 283 | 71 21'24" S | 42 23'11" E | 2260 |
| YM30 | 270 | 71 06'09" S | 43 09'08" E | 2212 |
| YM15 | 264 | 70 54'15" S | 43 43'24" E | 2241 |
| CF40 | 326 | 71 47'11" S | 42 15'32" E | 2461 |
| CF80 | 366 | 72 07'46" S | 42 36'57" E | 2636 |
| CF120 | 406 | 72 28'21" S | 42 59'18" E | 2821 |
| CF162 | 447 | 72 49'15" S | 43 22'58" E | 2975 |
| Syowa(SYOW) | 0 | 69 00'25" S | 39 35'06" E | 42 |
| Syowa(SYOG) | 0 | 69 00'25" S | 39 35'01" E | 50 |

ら, 宿泊地にて 8-12 時間の観測を行った.

相対測位の計算には Trimble 社の GPSurvey2.35 を用いてフロートあるいはダブルデフレンスでの解を求めた. 昭和基地との相対測位を行ったが, 1000 km 以上離れた地点もあり, 同時に感度よく受信できた GPS 衛星が少ないことがあり, 精度良い位置計算が出来ない場合もあった. また, 昭和基地も受信トラブルがあり, 氷床上の GPS 観測において, 単独測位しか出来ない場合があった.

3. 測定結果及び考察

図 1 に GPS 観測点としてドームふじ基地南方の S78E40 観測点とドームふじ基地西方の 3 地点があるが, 前者は相対測位の計算が収束しなかったため, 後者は再測定がされていないので, 本報告の対象から外した. はじめに沿岸からのドームふじ基地へのトラバースルート沿いの S16 から DF80 までの観測結果のうち, 相対測位計算が収束したデータのみを用い

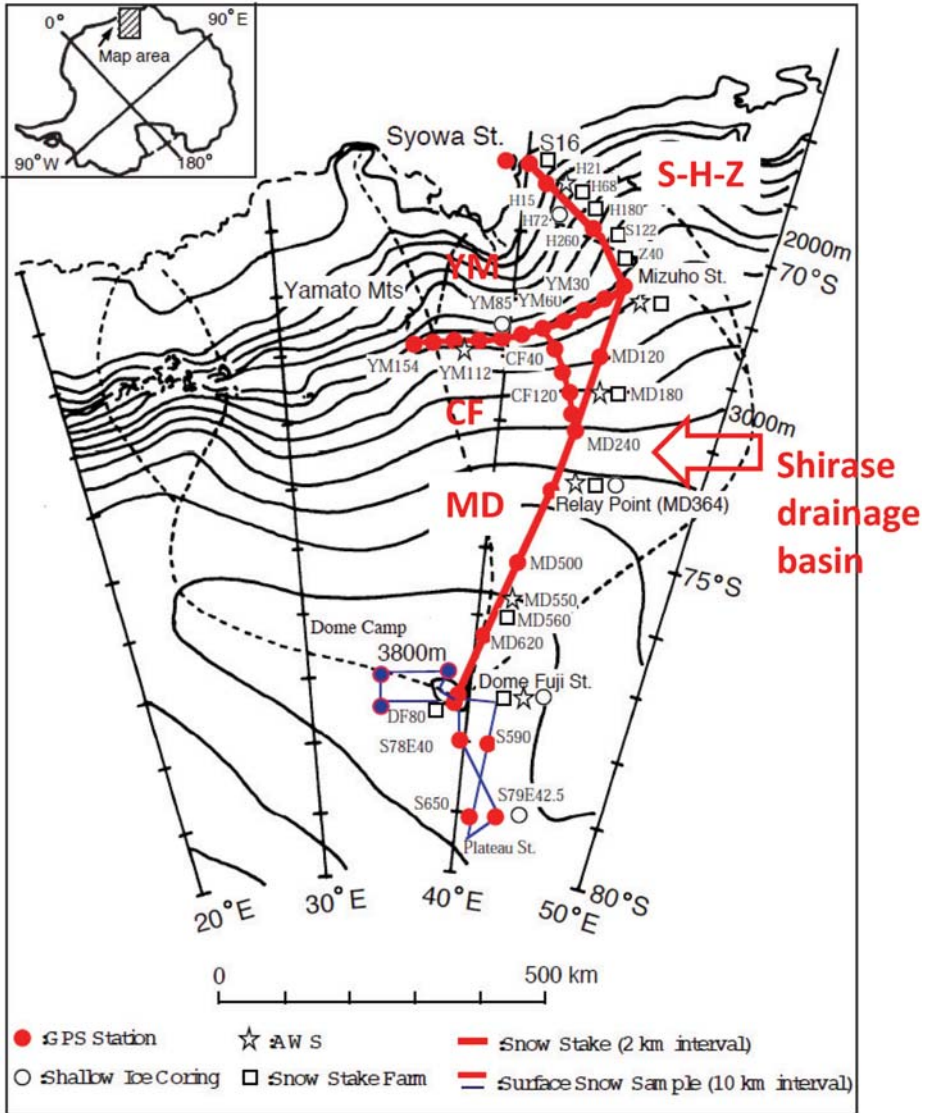


図 1 ドームふじ観測計画における内陸トラバースルートと主要な観測項目。
GPS 観測点を赤丸で示す。

Fig. 1. Location map of the traverse routes and GPS observational stations (red circles).

て、各々の期間内の移動量を求めて表 2 にまとめた。GPS 観測の基準になる測量ポール
の緯度方向 d (Lat), 経度方向 d (Lon), 高さ方向 d (Height) の移動量と、その合算である実移
動量 d (Position) を、次のようにそれぞれ計算した。

$$d(\text{Position}) = (d(\text{Lat})^2 + d(\text{Lon})^2 + d(\text{Height})^2)^{0.5}, \quad (1)$$

表 2 内陸ドームふじ輸送ルート沿いの S16 から DF80 までの GPS 観測点の水床表面流動観測結果。観測日に続くカッコ内に観測時間を示す。移動距離は年平均に換算した。d (Lat): 緯度方向の移動速度 (+が北, -が南), d (Lon): 経度方向の移動速度 (+が東, -が西), d (Height): 高さ方向の移動速度 (+が上昇, -が沈下), d (Position): 3次元の移動速度。流動速度の誤差要因として $dL \times 1 \text{ ppm}$: 基線長の 1 ppm, σ (dh): 相対測位における高度差の標準偏差を載せた。GPS 観測点に (*) が添付してある流動速度は 1996 年 1 月をささんでいる。

Table 2. Surface ice sheet velocity along the Dome Fuji traverse route (1). Recording times are indicated in the parentheses following the observational dates. The displacements were converted into annual averages. d (Lat): flow rate in the latitude direction (+: northward, -: southward), d (Lon): flow rate in the longitude direction (+: eastward, -: westward), d (Height): flow rate in the height direction (+: rise, -: sink), d (Position): three-dimensional flow rate. $dL \times 1 \text{ ppm}$ (1 ppm of base line) and σ (dh) (standard deviation of height difference of differential positioning) were causes of flow rate error. The flow speed (*) attached to the GPS observational station was calculated for a period including January 1996.

| | Observational date (recording time) | days | d(Lat) (m/annual) | d(Lon) (m/annual) | d(Height) (m/annual) | d(Position) (m/annual) | d(Lx) ppm | σ (dh) m |
|-------------|-------------------------------------|--------------------|----------------------|----------------------|-------------------------|---------------------------|-------------|--------------------|
| S16 | 2001/2/8 (9.8h) | 2001/5/10 (2.1h) | 91 | 1.71 | -4.81 | -4.16 | 6.59 | |
| S16 | 1998/2/6 (12.0h) | 2001/2/8 (9.8h) | 1098 | 1.70 | -4.73 | 0.05 | 5.03 | |
| S16 | 1997/8/21 (12.0h) | 1998/2/6 (12.0h) | 169 | 1.36 | -4.50 | -0.74 | 4.76 | 0.02 |
| S16(*) | 1994/1/28 (21.0h) | 1997/8/21 (12.0h) | 1301 | 1.76 | -4.74 | -2.37 | 5.58 | |
| S16 | 1993/1/31 (4.0h) | 1994/1/28 (21.0h) | 363 | 1.76 | -4.70 | 0.03 | 5.01 | |
| S16 | 1992/1/31 (3.6h) | 1993/1/31 (4.0h) | 365 | 1.71 | -4.70 | -0.20 | 5.01 | |
| H15-3 | 2001/2/7 (13.6h) | 2001/10/26 (14.6h) | 261 | 3.29 | -5.71 | -2.02 | 6.89 | |
| H15-2 | 1997/9/25 (12.0h) | 1998/2/5 (9.8h) | 133 | 3.44 | -5.76 | 1.66 | 6.91 | 0.05 |
| H15-1 | 1993/1/29 (7.3h) | 1994/1/27 (6.3h) | 363 | 3.37 | -5.99 | -0.08 | 6.87 | |
| H15-1 | 1992/1/3 (5.3h) | 1993/1/29 (7.3h) | 392 | 3.40 | -5.73 | -1.48 | 6.82 | |
| H260 | 2001/1/1 (12.4h) | 2002/2/1 (18.1h) | 396 | 8.59 | -11.64 | -0.55 | 14.47 | |
| H260 | 1998/2/4 (12.9h) | 2001/1/1 (12.4h) | 1062 | 8.62 | -11.52 | 0.03 | 14.38 | |
| H260 | 1997/9/23 (12.0h) | 1998/2/4 (12.9h) | 134 | 8.53 | -11.52 | 0.39 | 14.34 | |
| H260 | 1996/12/31 (12.6h) | 1997/9/23 (12.0h) | 266 | 8.81 | -11.53 | -0.61 | 14.53 | 0.16 |
| H260(*) | 1994/1/26 (6.6h) | 1996/12/31 (12.6h) | 1070 | 8.03 | -11.02 | -2.47 | 13.86 | |
| H260 | 1993/1/27 (5.0h) | 1994/1/26 (6.6h) | 364 | 10.17 | -13.25 | -0.24 | 16.71 | |
| H260 | 1992/1/5 (5.2h) | 1993/1/27 (5.0h) | 388 | 8.52 | -11.82 | -1.30 | 14.63 | |
| Mizuho-2 | 1997/1/14 (12.0h) | 1998/2/2 (14.5h) | 80 | 10.34 | -19.46 | 0.21 | 22.03 | |
| Mizuho-1 | 2001/1/4 (0.5h) | 2001/10/30 (21.7h) | 299 | 10.10 | -19.62 | -0.62 | 22.07 | |
| Mizuho-1 | 1998/2/3 (20.7h) | 2001/1/4 (0.5h) | 1066 | 10.12 | -19.54 | -0.39 | 22.00 | 0.26 |
| Mizuho-1(*) | 1994/1/25 (7.5h) | 1998/2/3 (20.7h) | 1470 | 10.13 | -19.55 | -2.37 | 22.14 | |
| Mizuho-1 | 1993/1/25 (5.5h) | 1994/1/25 (7.5h) | 365 | 9.88 | -19.55 | 0.58 | 21.91 | |
| Mizuho-1 | 1992/1/8 (4.0h) | 1993/1/25 (5.5h) | 383 | 10.30 | -19.65 | -0.67 | 22.20 | |
| MD120(*) | 1994/1/23 (7.5h) | 1998/1/31 (12.7h) | 1469 | 15.59 | -8.23 | -2.24 | 17.77 | |
| MD120 | 1993/1/23 (6.6h) | 1994/1/23 (7.5h) | 365 | 15.57 | -8.21 | 0.09 | 17.60 | 0.35 |
| MD120 | 1992/1/11 (4.6h) | 1993/1/23 (6.6h) | 378 | 15.71 | -8.32 | 0.45 | 17.78 | 0.04 |

表 2 (続き).
Table 2 (continued).

| | | | | | | | | |
|----------------|--------------------|--------------------|------|-------|-------|-------|------|-----------|
| MD240 | 2001/1/8 (11.2h) | 2001/11/4 (24.0h) | 300 | 7.98 | -0.80 | -0.25 | 8.03 | |
| MD240 | 2000/1/24 (19.1h) | 2001/1/8 (11.2h) | 350 | 8.08 | -1.17 | 0.67 | 8.19 | |
| MD240(*) | 1994/1/21 (6.2h) | 2000/1/24 (19.1h) | 2194 | 8.03 | -0.83 | -1.62 | 8.23 | 0.46 0.01 |
| MD240 | 1993/1/21 (6.9h) | 1994/1/21 (6.2h) | 365 | 7.73 | -1.10 | 0.01 | 7.81 | |
| MD240 | 1992/1/20 (5.3h) | 1993/1/21 (6.9h) | 367 | 8.12 | -0.94 | -0.06 | 8.18 | |
| MD364 | 2001/1/11 (12.6h) | 2001/11/8 (17.3h) | 303 | 3.99 | -0.14 | -0.10 | 3.99 | |
| MD364 | 1998/1/28 (10.9h) | 2001/1/11 (12.6h) | 1079 | 4.01 | -0.07 | -0.02 | 4.01 | |
| MD364 | 1997/10/21 (12.0h) | 1998/1/28 (10.9h) | 99 | 3.90 | 0.51 | -0.36 | 3.95 | 0.57 0.01 |
| MD364(*) | 1994/1/16 (6.4h) | 1997/10/21 (12.0h) | 1374 | 4.03 | -0.09 | -2.14 | 4.56 | |
| MD364 | 1993/1/18 (7.5h) | 1994/1/16 (6.4h) | 363 | 3.99 | -0.08 | 0.00 | 4.00 | |
| MD364 | 1992/1/17 (5.1h) | 1993/1/18 (7.5h) | 367 | 3.99 | -0.03 | -0.36 | 4.00 | |
| MD500 | 1998/1/26 (11.7h) | 2001/11/10 (13.4h) | 1384 | 1.64 | 0.39 | -0.11 | 1.69 | |
| MD500(*) | 1995/1/18 (3.0h) | 1998/1/26 (11.7h) | 1104 | 1.60 | 0.37 | -0.23 | 1.66 | 0.70 0.01 |
| MD500 | 1994/1/13 (7.1h) | 1995/1/18 (3.0h) | 370 | 1.93 | 0.59 | -0.06 | 2.02 | |
| MD620(*) | 1995/1/21 (5.7h) | 1998/1/25 (11.9h) | 1100 | 0.24 | 0.79 | -0.29 | 0.87 | 0.82 0.02 |
| MD620 | 1994/1/11 (7.3h) | 1995/1/21 (5.7h) | 375 | 0.67 | 0.64 | -0.33 | 0.98 | |
| Dome Fuji-2 | 2003/2/23 (16.1h) | 2004/1/11 (19.6h) | 322 | -0.02 | 0.03 | -0.25 | 0.26 | |
| Dome Fuji-2 | 2001/12/9 (50.1h) | 2003/2/23 (16.1h) | 441 | 0.00 | 0.11 | -0.35 | 0.37 | |
| Dome Fuji-2 | 2001/1/17 (21.6h) | 2001/12/9 (50.1h) | 326 | 0.10 | 0.02 | -0.28 | 0.30 | |
| Dome Fuji-2 | 1999/1/26 (10.6h) | 2001/1/17 (21.6h) | 722 | 0.00 | 0.00 | 0.50 | 0.50 | |
| Dome Fuji-2 | 1998/1/13 (24.0h) | 1999/1/26 (10.6h) | 378 | 0.07 | 0.18 | -0.86 | 0.88 | 0.93 0.01 |
| Dome Fuji-2 | 1997/9/20 (24.0h) | 1998/1/13 (24.0h) | 115 | -0.66 | -0.16 | 0.12 | 0.69 | |
| Dome Fuji-2 | 1997/1/27 (24.0h) | 1997/9/20 (24.0h) | 236 | 0.24 | 0.03 | -0.21 | 0.32 | |
| Dome Fuji-2(*) | 1995/11/7 (7.6h) | 1997/1/27 (24.0h) | 447 | 0.06 | 0.09 | 0.65 | 0.66 | |
| Dome Fuji-1 | 1994/1/3 (21.3h) | 1995/1/25 (10.1h) | 391 | 0.06 | 0.08 | -0.23 | 0.25 | |
| DF80 | 2001/12/20 (26.0h) | 2003/12/16 (15.0h) | 726 | -0.05 | 0.04 | -0.36 | 0.37 | |
| DF80 | 2001/1/19 (23.1h) | 2001/12/20 (26.0h) | 335 | 0.01 | 0.06 | -0.23 | 0.24 | |
| DF80 | 1997/10/31 (12.0h) | 2001/1/19 (23.1h) | 1176 | -0.01 | -0.03 | 0.31 | 0.31 | 0.93 0.01 |
| DF80 | 1997/2/6 (18.8h) | 1997/10/31 (12.0h) | 267 | -0.25 | 0.02 | -0.34 | 0.43 | |
| DF80(*) | 1995/1/26 (6.8h) | 1997/2/6 (18.8h) | 742 | 0.01 | -0.10 | -0.35 | 0.36 | |
| DF80 | 1994/1/6 (7.4h) | 1995/1/26 (6.8h) | 385 | 0.03 | 0.07 | -0.47 | 0.48 | |

N:+, S:- E:+, W:-

観測期間がそろっていないので、移動量は年平均値として載せた。データの妥当性の評価のため誤差要因となる二つの値として、基線になる昭和基地からの距離の 1 ppm と高度差計算における標準偏差を載せた。昭和基地から 1000 km 離れると基線長による誤差は最大 1 m にもなる。MD620 以南においては、移動量の観測値よりも、基線長に基づく誤差が大きくなっている。相対測位計算における水平方向の標準偏差より高度差の標準偏差のほうが大きい。各観測における高度差の標準偏差は最大 4 cm に収まっている。H15、みずほ基地とドームふじ基地は、測量ポールを移設して観測を継続したので、それらを枝番で区別した。

図 2 に、観測初日を原点として、その後の移動量を示した。図 2-a, 2-c は MD620 から南の観測点、図 2-b, 2-d は MD500 より北の観測点をそれぞれまとめた。また左の図で測量ポールの移動、右にその成分の中で鉛直方向の移動量（マイナスが沈下）を示した。ドームふじと DF80 は測定誤差（表 2 の $dL \times 1 \text{ ppm}$ 欄）より小さい移動量であるので定量的な評価は難しいが、ほとんど流動していないことがわかる。MD620 以北では、1992 年以降の観測期間内では一定な流動速度で動いていた。図 2 の右に示した測量ポールの高さ変化については以下にまとめる。ドームふじと DF80 については振幅 1 m 程度で変動しているようであるが、観測誤差と同等であるので定量的には評価できない。MD364 から S16 までの高さ変化は、

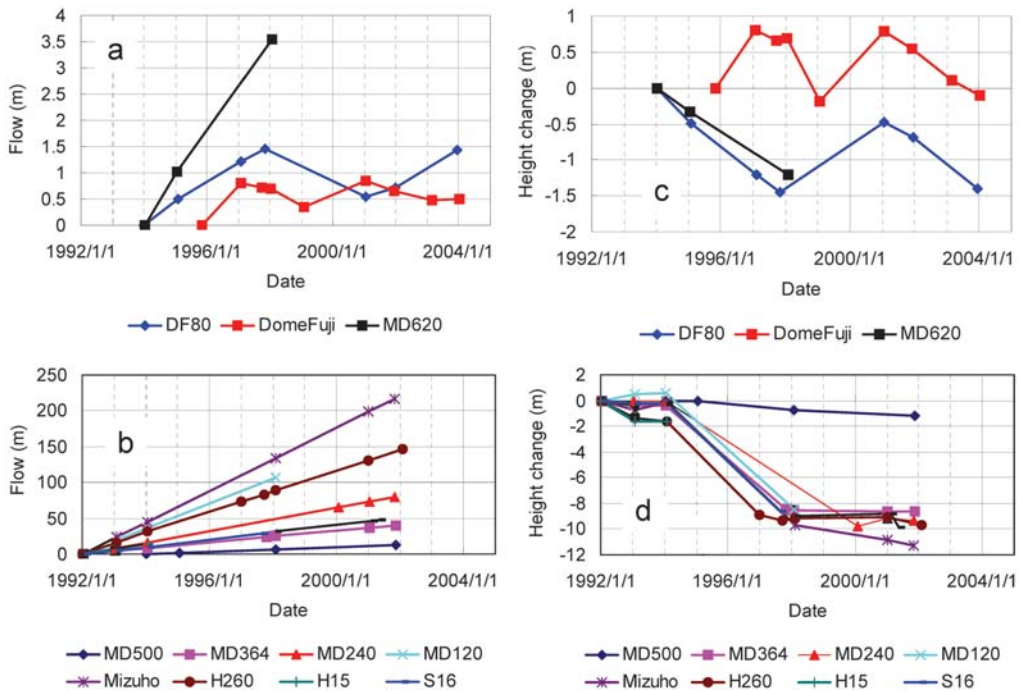


図 2 観測初日を原点とした氷床流動（測量ポールの移動位置）、3次元座標での移動量（図 2-a, 2-b）と鉛直成分のみの移動量（図 2-c, 2-d）。

Fig. 2. Ice sheet flow from the beginning of observations.

1996年1月をはさんで、7-10mの測量ポールの沈下が計算された。この急激な低下は、MD364より南方（遠方）であるMD500からDF80の観測点では観測されていない。この原因の一つには昭和基地の基準点に変更されたことに起因することが考えられるが、MD500以南では見られないことと矛盾する。表2にアスタリスクで区別した1996年1月をはさむ大きな沈下が見られた期間の流動速度 d (Position) は、沈下が大きくない期間の流動速度と大差はない。表3に、各観測点での平均流動速度を、大きな沈下が見られた1996年1月をはさんだデータも入れて全観測期間で平均したものを(A)とし、大きく沈下した期間(表2でアスタリスクを付した期間)を除いた平均流動速度を(B)として、まとめた。緯度方向や経度方向の移動速度や、測量ポールの移動速度には(A)と(B)の差は高々10cm程度の差であった。しかるに測量ポールの沈下量が(A)ではMD364からS16までは約1mと大きい(A)ではH15を除いて±35cmに収まっている。すなわち移動速度 d (Position) は大差ないが、測量ポールの沈下量が大きく異なる。この1996年1月をはさむ流動速度の成分の中で大きな沈下が見られることの解釈については、いまのところ原因不明であるので、今後の議論としては(B)の流動速度で検討することにする。

測量ポールの空間位置の変動をGPS観測することで氷床流動の研究を行っている。この測量ポールの沈下量の変動要因は、Naruse(1978)で報告されているように、氷床流動のために測量ポールの空間位置が沈下する。すなわち、氷床流動が定常状態であると仮定すると、氷床表面は傾斜しているので、流動すると測量ポールの高さは下がることになる。その見かけの沈下量を次に求める。氷床流動と氷床の傾斜は南北方向が最大であると仮定した。氷床表面の傾斜はKamiyama *et al.* (1994)で報告されているS16からDF80までのルート沿いの2kmごとの位置情報を使い、GPS観測点を中心に20km間隔での平均傾斜 a を求めた。これにGPS観測による南北方向の実測した流動速度 d (Lat) を使って、傾斜による測量ポールの沈下速度は d (Lat) \times $\tan(a)$ で計算される(表3)。沿岸S16がその最大で年間15cm沈下し、MD500より南では、ほぼ無視できる。これを考慮した正味の測量ポールの変化量を表3の d (Height)' に示す。3地点を除いて年間10-30cmの沈下量であった。H15地点では年間75cmと最大の沈下量を示し、逆にMD120とMD240では測量ポールが上向きに15-30cm持ち上げられた。この原因については章の後半で検討する。

表4と表5には、それぞれドームふじ南方の観測結果と白瀬流域内のYMルートとCFルートの観測結果を示す。これらは4年後と2年後に再測し、それぞれ年平均速度としてまとめた。ドーム南方の3地点に関しては昭和基地から1000km以上離れており基線長による測定誤差は最大1m以上と大きく定量的な解析が難しいが、流動方向は標高が低くなる方向と一致し、南南西から西南西である。白瀬流域のYMルートの観測点は西の2地点以外は標高が2200m台にあり流動速度は年間24-33mであった。昭和基地との基線長による最大測定誤差は30cm程度であり、それよりも十分大きい流動速度であった。氷床流動にとまらな

表 3 S16 から DF80 までの氷床表面流動速度と傾斜の補正. 全観測期間の観測データを用いて平均した氷床表面流動速度とその 3 次元成分, 各観測点での平均流動速度を, 大きな沈下が見られた 1996 年 1 月を基準データも入れて全観測期間で平均したものを (A) とし, 大きく沈下した期間を除いた平均流動速度を (B) とし, まとめた. 右の 2 列は $d(\text{Lat}) \times \tan(a)$: 傾斜による測量ボールの沈下速度と $d(\text{Height})$: 傾斜の影響を補正した正味の測量ボールの鉛直変化速度.

Table 3. Surface ice sheet velocity along Dome Fuji traverse route (2). The surface flow rate and the three-dimensional components averaged over all observation periods are shown. The average flow rates at each observational station are summarized: (A): the average flow rate for the period including January 1996 when large sinking was seen, (B): the average flow rate except for the period of large sinking. The right 2 lines: $d(\text{Lat}) \times \tan(a)$: sinking rate of a staff by the ice sheet surface slope, $d(\text{Height})$: vertical change rate of the staff corrected for the influence of the slope.

| | Observational date | | d(Lat) (m/annual) | d(Lon) (m/annual) | d(Height) (m/annual) | d(Position) (m/annual) | d(Lat) × tan(a) (m/annual) | d(Height) (m/annual) |
|---------------|--------------------|------------|----------------------|----------------------|-------------------------|---------------------------|-------------------------------|-------------------------|
| | start | end | | | | | | |
| S16 (A) | 1992/1/31 | 2001/5/10 | 1.71 | -4.72 | -1.06 | 5.13 | -0.15 | -0.09 |
| S16 (B) | 1992/1/31 | 2001/5/10 | 1.68 | -4.70 | -0.25 | 5.00 | -0.05 | -0.75 |
| HI15 (B) | 1992/1/3 | 2001/10/26 | 3.37 | -5.81 | -0.80 | 6.84 | -0.07 | -0.27 |
| HI260(A) | 1992/1/5 | 2002/2/1 | 8.60 | -11.59 | -0.96 | 14.46 | | |
| HI260(B) | 1992/1/5 | 2002/2/1 | 8.83 | -11.82 | -0.34 | 14.76 | | |
| Mizuho (A) | 1992/1/8 | 2001/10/30 | 10.12 | -19.56 | -1.15 | 22.05 | | |
| Mizuho (B) | 1992/1/8 | 2001/10/30 | 10.12 | -19.57 | -0.29 | 22.03 | | |
| MD120 (A) | 1992/1/11 | 1998/1/31 | 15.61 | -8.24 | -1.40 | 17.70 | | |
| MD120 (B) | 1992/1/11 | 1994/1/23 | 15.64 | -8.27 | 0.27 | 17.69 | | |
| MD240 (A) | 1992/1/20 | 2001/11/4 | 8.01 | -0.90 | -0.95 | 8.12 | | |
| MD240 (B) | 1992/1/20 | 2001/11/4 | 7.98 | -1.01 | 0.10 | 8.04 | | |
| MD364 (A) | 1992/1/17 | 2001/11/8 | 4.01 | -0.07 | -0.88 | 4.11 | | |
| MD364 (B) | 1992/1/17 | 2001/11/8 | 4.00 | -0.05 | -0.10 | 4.00 | | |
| MD500 (A) | 1994/1/13 | 2001/11/10 | 1.66 | 0.41 | -0.15 | 1.72 | | |
| MD500 (B) | 1994/1/13 | 2001/11/10 | 1.70 | 0.43 | -0.10 | 1.76 | | |
| MD620 (A) | 1994/1/11 | 1998/1/25 | 0.35 | 0.75 | -0.30 | 0.88 | | |
| MD620 (B) | 1994/1/11 | 1995/1/21 | 0.67 | 0.64 | -0.33 | 0.98 | | |
| Dome Fuji (A) | 1995/11/7 | 2004/1/11 | 0.02 | 0.06 | -0.07 | 0.06 | | |
| Dome Fuji (B) | 1994/1/3 | 2004/1/11 | 0.02 | 0.05 | -0.14 | 0.16 | | |
| DF80 (A) | 1994/1/6 | 2003/12/16 | -0.03 | 0.01 | -0.14 | 0.14 | | |
| DF80 (B) | 1994/1/6 | 2003/12/16 | -0.04 | 0.02 | -0.09 | 0.11 | | |

N:+, S:-; E:+, W:-

表 4 ドームふじ南方での水床表面流動観測結果, 各項目は表 2, 表 3 と同じ.

Table 4. Surface ice sheet velocity south of Dome Fuji.

| | Observational date (recording time) | | days | d(Lat) | d(Lon) | d(Height) | d(Position) | dL×1ppm | σ(dh) | d(Lat)×tan(a) | d(Height) |
|----------|-------------------------------------|-------------------|------|------------|------------|------------|-------------|---------|-------|---------------|------------|
| | start | end | | (m/annual) | (m/annual) | (m/annual) | (m/annual) | m | m | (m/annual) | (m/annual) |
| S590 | 1997/12/8(11.3h) | 2001/12/16(12.2h) | 1468 | -0.27 | 0.01 | 0.27 | 0.38 | 1.01 | 0.02 | 0.00 | 0.27 |
| S79E42.5 | 1997/12/11(14.8h) | 2001/1/12(14.3h) | 1468 | -0.09 | -0.19 | -0.09 | 0.23 | 1.12 | 0.01 | 0.00 | -0.09 |
| S650 | 1997/12/9(13.0h) | 2001/12/17(13.4h) | 1468 | -0.20 | -0.55 | 0.20 | 0.62 | 1.12 | 0.02 | 0.00 | 0.20 |

N:+, S:-

E:+, W:-

表 5 白瀬流域のみずは基地から等高線沿いのルートである YM ルートと水床主流線 CF ルートの水床表面流動観測結果, 各項目は表 2, 表 3 と同じ.

Table 5. Surface ice sheet velocity along YM and CF routes.

| | Observational date | | days | d(Lat) | d(Lon) | d(Height) | d(Position) | dL×1ppm | σ(dh) | d(Lat)×tan(a) | d(Height) |
|-------|--------------------|-------------------|------|------------|------------|------------|-------------|---------|-------|---------------|------------|
| | start | end | | (m/annual) | (m/annual) | (m/annual) | (m/annual) | m | m | (m/annual) | (m/annual) |
| YM154 | 2000/1/8(13.6h) | 2002/1/5(17.1h) | 728 | 4.09 | -0.23 | 0.02 | 4.10 | 0.33 | 0.01 | -0.02 | 0.03 |
| YM140 | 2000/1/7(14.1h) | 2002/1/6(15.8h) | 730 | 11.30 | 1.41 | -0.01 | 11.39 | 0.32 | 0.01 | -0.05 | 0.04 |
| YM120 | 2000/1/6(14.3h) | 2002/1/4(14.1h) | 729 | 24.34 | 0.13 | -0.36 | 24.35 | 0.31 | 0.01 | -0.10 | -0.27 |
| YM100 | 2000/1/5(14.0h) | 2002/1/7(13.3h) | 733 | 25.08 | -3.88 | 0.20 | 25.37 | 0.30 | 0.01 | -0.10 | 0.30 |
| YM85 | 2000/1/4(14.5h) | 2002/1/3(13.5h) | 730 | 25.49 | -5.81 | -0.19 | 26.14 | 0.29 | 0.01 | -0.10 | -0.09 |
| YM70 | 2000/1/3(13.6h) | 2002/1/27(18.7h) | 755 | 26.02 | -11.23 | -0.14 | 28.34 | 0.29 | 0.02 | -0.10 | -0.03 |
| YM60 | 2000/1/17(20.1h) | 2002/1/2(13.7h) | 716 | 24.41 | -11.07 | 0.07 | 26.80 | 0.29 | 0.01 | -0.10 | 0.17 |
| YM50 | 2000/1/2(14.3h) | 2002/1/28(18.1h) | 757 | 21.95 | -18.64 | -0.92 | 28.81 | 0.28 | 0.01 | -0.09 | -0.83 |
| YM30 | 1999/12/31(19.0h) | 2002/1/29(1.1h) | 760 | 23.15 | -23.83 | -0.22 | 33.23 | 0.27 | 0.01 | -0.09 | -0.13 |
| YM15 | 1999/12/30(15.6h) | 2002/01/29(16.6h) | 761 | 14.73 | -20.68 | -0.08 | 25.39 | 0.26 | 0.01 | -0.06 | -0.02 |
| CF40 | 2000/01/19(12.9h) | 2001/12/31(24.0h) | 712 | 17.55 | -7.34 | -0.10 | 19.02 | 0.33 | 0.02 | -0.07 | -0.03 |
| CF80 | 2000/01/20(15.8h) | 2001/12/30(13.1h) | 710 | 13.45 | -3.35 | -0.12 | 13.86 | 0.37 | 0.01 | -0.04 | -0.08 |
| CF120 | 2000/1/22(12.7h) | 2001/12/30(0.8h) | 708 | 9.65 | -2.77 | 0.20 | 10.04 | 0.41 | 0.02 | -0.04 | 0.24 |
| CF162 | 2000/1/23(13.5h) | 2001/12/29(14.1h) | 706 | 8.01 | -0.69 | -0.09 | 8.04 | 0.45 | 0.03 | -0.04 | -0.05 |

N:+, S:-

E:+, W:-

氷床表面の傾斜による測量ポールの沈下量 $d(\text{Lat}) \times \tan(a)$ は表に示すように年間おおよそ 10 cm 程度あり、それを補正した正味の沈下量 $d(\text{Height})'$ は、YM50 にて最大 80 cm で、逆に YM100 では 30 cm 持ち上げられた。白瀬流域の主流線沿いの CF ルートは、下流ほど流速が大きい。CF120 のみ測量ポールが 24 cm 持ち上げられているが、再測定の見測時間が 1 時間に満たなく、測定誤差が大きいと考えられるため、定量的な議論は難しい。

図 3 にすべての GPS 観測点における氷床表面の傾斜による測量ポール沈下速度と、それを補正した正味の測定ポール沈下速度を示す。氷床表面が平衡状態であると仮定すると、測定ポールの正味の沈下量は、年間積雪収支量で補われるはずである。S16 から DF80 までは 1992 年以降の内陸ルートに沿った 2 km ごとの表面積雪収支観測報告から GPS 観測点における年間積雪収支量を求めた (Kamiyama *et al.*, 1994; Motoyama *et al.*, 1995b, 1999, 2002; Shiraiwa *et al.*, 1996; Azuma *et al.*, 1997; Fujita *et al.*, 1998; Furukawa *et al.*, 2002; Saito *et al.*, 2007; Kameda *et al.*, 2007)。ドーム南方と YM ルート、CF ルートについては、観測点を設置してからそれぞれ 4 年後、2 年後、2 年後に再測したときの観測値である。それぞれ白抜き棒グラフで年間積雪収支量を示す。H15 の大きな沈下量は大きな年間積雪収支量で補われてい

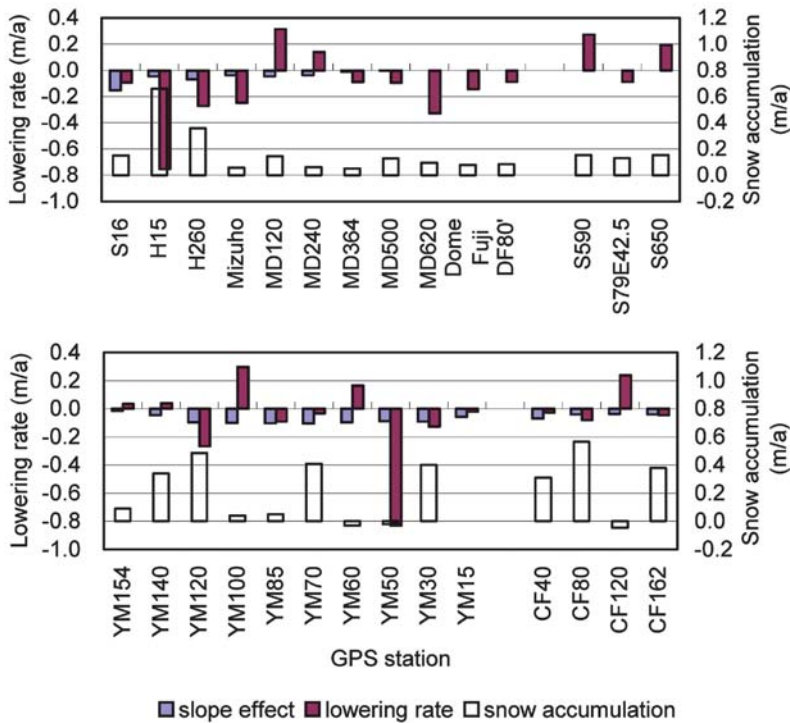


図 3 GPS 観測点における氷床表面の傾斜による測量ポール沈下速度 (青)、傾斜の影響を補正した正味の測定ポール沈下速度 (茶) と年間積雪収支量 (白抜)。

Fig. 3. Lowering rate of ice sheet surface and snow accumulation.

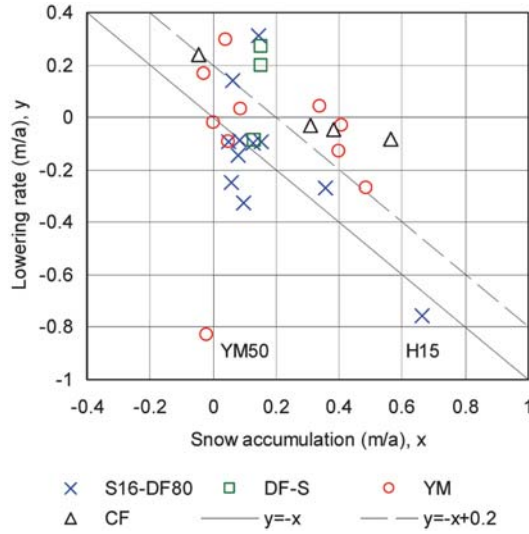


図 4 GPS 観測点における年間積雪収支量 (x) と傾斜の影響を補正した正味の測定ポール沈下速度 (y) の関係. 参考のために, $y = -x$ (実線) と $y = -x + 0.2$ (破線) の関係を示す.

Fig. 4. Relationship between snow accumulation rate and lowering rate of ice sheet surface.

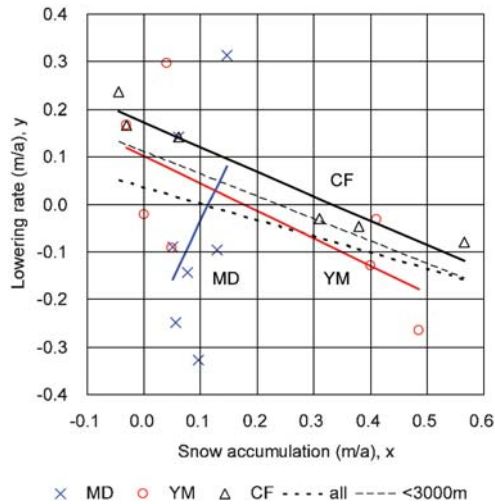


図 5 白瀬流域内に限定した GPS 観測点における年間積雪収支量 (x) と傾斜の影響を補正した正味の測定ポール沈下速度 (y) の関係. 青が Mizuho から Dome Fuji のルート沿い, 赤が YM ルート沿い, 黒が YM60 と MD240 を加えた CF ルート沿い. 点線は全観測点での一次相関式, 破線は標高 3000 m 以下の観測点での一次相関式. 相関係数などは本文に記載した.

Fig. 5. Relationship between snow accumulation rate and lowering rate of ice sheet surface in Shirase drainage basin.

るように見える。図4に年間積雪収支量 (x) と氷床沈下量 (y : 低下をマイナス) の関係を示す。参考のために $y = -x$ と $y = -x + 0.2$ の関係式を実線と破線で示した。1992年以降の長期データのある S16 から DF80 までのルート沿いの観測点に関しては、 $y = -x$ の関係に近く、YM ルートと CF ルートに関しては、 $y = -x + 0.2$ の関係に近いように見える。これを定量的に評価するため、白瀬流域の GPS 観測点のみで考察した。図5にその結果を示す。YM50 に関しては年間積雪収支量と氷床沈下量の関係が他の観測点と大きく異なっているので、以下の検討では使わないこととした。白瀬流域全観測点での関係は点線で示す

$$y = -0.34x + 0.04 \quad (r^2 = 0.12), \quad (2)$$

となり、標高3000m以下の観測点では破線で示す

$$y = -0.47x + 0.11 \quad (r^2 = 0.29), \quad (3)$$

となる。標高2200m台のYMルートでは

$$y = -0.58x + 0.10 \quad (r^2 = 0.48), \quad (4)$$

YM60 と MD240 を加えた白瀬水河主流線 CF ルートでは

$$y = -0.52x + 0.17 \quad (r^2 = 0.93), \quad (5)$$

と有意な関係が見られる。すなわち積雪によって補てんされる以上に 10-20 cm 氷床表面が低下していることになる。

白瀬流域の氷床流動は白瀬水河出口に向かっており、内陸から沿岸に向かって流速が早くなることと、流域中央部ほど流速が早いことが報告されている。さらに氷床表面の低下も報告されており (Naruse, 1978, 1979; Mae and Naruse, 1978; Nishio *et al.*, 1989), 今回も同様な観測結果を得た。みずほ基地の流動速度に関しては、氷床内部の温度分布を解析し、定常状態を仮定した氷床流動にて 100 m 以深の温度分布を説明するためには、流動速度が年間 17 m と推定された。しかし氷床表面流動の実測値は年間 20.4 m であったと報告されている (奥平ら, 1998)。この理由として、Ohmae (1988) が白瀬流域の不安定性は氷床底面の水膜、湿潤状態に原因し、近年底面すべり速度が大きくなっていることに起因していると報告している。今回の観測結果では、これが年間 22.0 m に加速されているように見える。

氷床表面の低下に関しては、氷床底面の状態が不安定であることに起因すると説明されている。一方、逆に測量ポールが持ち上げられる地点も観測された。この理由として氷床下の基盤地形による氷床流動への影響を考えた。Kamiyama *et al.* (1994) にて S16 から DF80 までの氷床表面高度と基盤高度が報告されているので、このデータを使用した。MD120 と MD240 が特異な地点であり、この GPS 観測点をはさんで南北に 40 km の測線を設け、緯度

を横軸にして、氷床表面高度、岩盤高度を折れ線で、年間積雪収支量を縦棒で図6と図7に示す。矢印でGPS観測点を示した。MD240については、基盤地形によって氷床底面付近の流動が阻害されて上向きの流動が発生し、それが伝播して測量ポールを押し上げていると考えてもよいであろう。比較的急斜面にあり、年間積雪収支量も少ない。MD120に関しては、図に示されている基盤地形による影響は大きくないと考えられるが、比較的氷床表面の傾斜が急であり、空間的に見た基盤地形の何らかの原因があると思われるが、今後の研究とする。

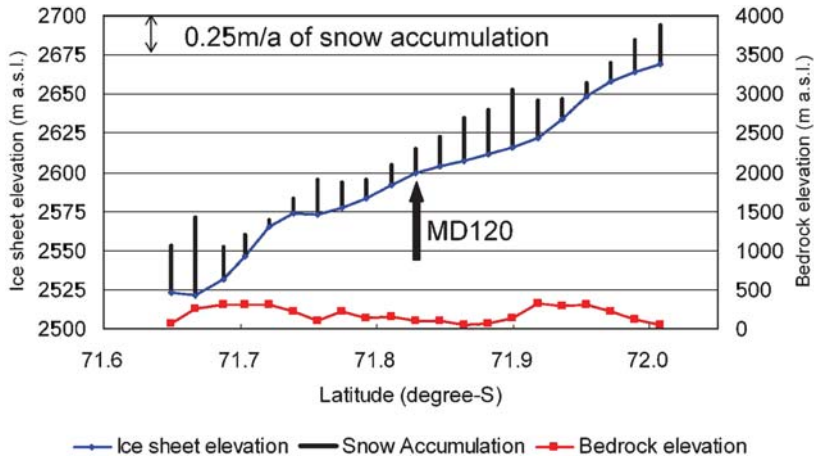


図6 GPS観測点MD120を中心にした氷床表面高度(青線)、岩盤高度(赤線)と、年間積雪収支量(縦棒)。データの間隔は約2km。矢印でMD120を示した。
Fig. 6. Ice sheet elevation, bedrock elevation and snow accumulation rate around MD120.

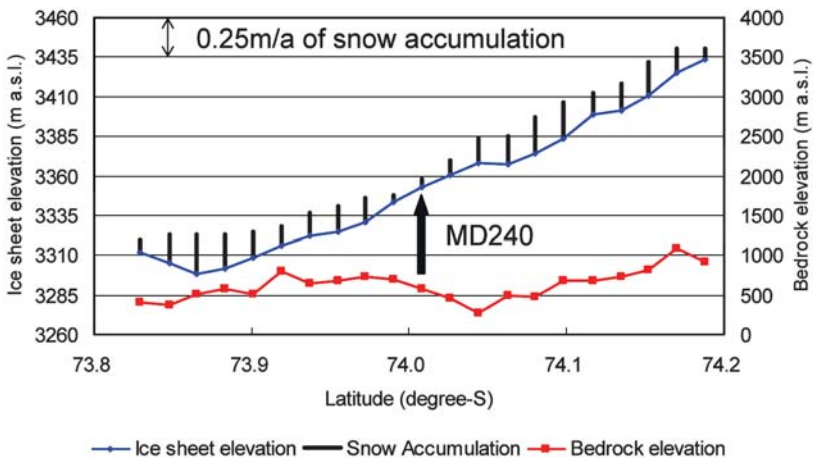


図7 GPS観測点MD240を中心にした氷床表面高度(青線)、岩盤高度(赤線)と、年間積雪収支量(縦棒)。データの間隔は約2km。矢印でMD240を示した。
Fig. 7. Ice sheet elevation, bedrock elevation and snow accumulation rate around MD240.

4. ま と め

1992年から氷床流動観測を目的としたGPS観測が開始された。最初は沿岸からドームふじ基地へのトラバースルート沿いに設けた11地点を基本観測点として、内陸旅行中に適宜GPS観測を行った。その後、白瀬流域の主流線沿いと等高線沿い、ドームふじ基地南方へと観測地域を拡大した。氷床流動に関しては、白瀬流域の下流ほど氷床流動速度が大きい。また白瀬流域において、従来から観測されている氷床表面の低下が確認され、この低下速度は0.1–0.2m/年であった。

謝 辞

南極地域観測隊及び国土地理院の協力によりGPS観測を実施することができ、関係者、関係機関に感謝します。特に気象条件の厳しい現地での観測に携わった多くの隊員に深く感謝します。匿名の査読者からは的確なコメントをいただき、感謝します。

文 献

- Azuma, N., Kameda, T., Nakayama, Y., Tanaka, Y., Yoshimi, H., Furukawa T. and Ageta, Y. (1997): Glaciological data collected by the 36th Japanese Antarctic Research Expedition 1995–1996. JARE Data Rep., **223** (Glaciology 26), 83 p.
- Fujita, S., Kawada, K. and Fujii, Y. (1998): Glaciological data collected by the 37th Japanese Antarctic Research Expedition during 1996–1997. JARE Data Rep., **234** (Glaciology 27), 46 p.
- Furukawa, T., Yamada, T., Suzuki, K., Suzuki, T., Matsuoka, K., Horikawa, K., Murakata, E., Yasugahira, K. and Iizuka, Y. (2002): Glaciological data collected by the 39th and 40th Japanese Antarctic Research Expedition during 1998–2000. JARE Data Rep., **267** (Glaciology 29), 61 p.
- Kameda, T., Fujita, K., Sugita, O. and Hashida, G. (2007): Glaciological data collected by the 44th Japanese Antarctic Research Expedition during 2003–2004. JARE Data Rep., **298** (Glaciology 32), 92 p.
- Kamiyama, K., Furukawa, T., Maeno, H., Kishi, T. and Kanao, M. (1994): Glaciological data collected by the 33rd Japanese Antarctic Research Expedition in 1992. JARE Data Rep., **194** (Glaciology 21), 67 p.
- Mae, S. and Naruse, R. (1978): Possible causes of ice sheet thinning in the Mizuho Plateau. *Nature*, **273**, 291–292.
- Motoyama, H., Enomoto, H., Furukawa, T., Kamiyama, K., Shoji, H., Shiraiwa, T., Watanabe, K., Namasu, K. and Ikeda, H. (1995a) Preliminary study of ice flow observations along traverse routes from coast to Dome Fuji, East Antarctica by differential GPS method. *Nankyoku Shiryo (Antarct. Rec.)*, **39**, 94–98.
- Motoyama, H., Enomoto, H., Miyahara, M. and Koike, J. (1995b): Glaciological data collected by the 34th Japanese Antarctic Research Expedition in 1993, JARE Data Rep., **202** (Glaciology23), 42 p.
- Motoyama, H., Kawamura, Y., Kanao, M., Hirasawa, N., Kaneto, S. and Yamanouchi, T. (1999): Glaciological data collected by the 38th Japanese Antarctic Research Expedition in 1997–1998. JARE Data Rep., **239** (Glaciology28), 74 p.
- Motoyama, H., Nishimura, K., Kubo, S., Aoki, T., Wada, M., Yamaguchi, K. and Kato, Y. (2002): Glaciological data collected by the 41st and 42nd Japanese Antarctic Research Expedition during 2000–2002. JARE Data Rep., **268** (Glaciology 30), 58 p.
- Naruse, R. (1978): Surface flow and strain of the ice sheet measured by a triangulation chain in Mizuho Plateau. *Mem. Natl Inst. Polar Res., Spec. Issue*, **7**, 198–226.
- Naruse, R. (1979): Thinning of the ice sheet in Mizuho Plateau, East Antarctica. *J. Glaciol.*, **24**, 45–52.
- Nishio, F., Mae, S., Ohmae, H., Takahashi, S., Nakawo, M. and Kawada, K. (1989): Dynamical behavior of the ice sheet in Mizuho Plateau, East Antarctica. *Proc. NIPR Symp. Polar Meteorol. Glaciol.*, **2**, 97–104.
- 国土地理院 (2007): 国土地理院南極観測事業 50 年の変遷. *国土地理院時報*, **111**, 1–30.

- Ohmae, H. (1988): Radio-echo studies on the sub-ice conditions of the Antarctic ice sheet. Doctor thesis, Graduate School and Faculty of Science, Hokkaido University, Japan, 120 p.
- Ootaki, O. and Fujiwara, S. (1998): Measurement of ice sheet movement at S16, East Antarctica using GPS. *Polar Geosci.*, **11**, 9–13.
- 奥平文雄・西尾文彦・池上宏一 (1988): 南極みずほ基地の 700 m 掘削孔における温度分布. *南極資料*, **32**, 277–285.
- Saito, T., Kinoshita, J., Kanehama, S., Yoshii, K. and Kamiyama, K. (2007): Glaciological data collected by the 43rd Japanese Antarctic Research Expedition during 2001–2003. *JARE Data Rep.*, **297** (Glaciology 31), 38 p.
- Shiraiwa, T., Saito, T., Saito, T., Shoji, H., Taguchi, Y., Abo, T., Yamamoto, T., Inagawa, Y., Yokoyama, K. and Watanabe, O. (1996): Glaciological data collected by the 35th Japanese Antarctic Research Expedition in 1994–1995. *JARE Data Rep.*, **211** (Glaciology 25), 69 p.