

昭和基地におけるローカルタイ測量（第 65 次南極地域観測隊）

Local Tie Surveys at Syowa Station, Antarctica by JARE65

測地部 鈴木啓¹・岡村盛司・瀧修一・平岡喜文・吉藤浩之²・小門研亮³

Geodetic Department SUZUKI Akira, OKAMURA Seiji, TAKI Shuichi,

HIRAOKA Yoshifumi, YOSHIFUJI Hiroyuki and KOKADO Kensuke

九州地方測量部 福岡順洋

Kyushu Regional Survey Department FUKUZAKI Yoshihiro

要 旨

国土地理院は、1956 年の第 1 次南極地域観測隊から継続して職員を派遣し、測地分野の作業を担っている。測地分野では、南極地域の正確な位置情報や地図などの整備（測地測量と地形情報の整備）を主目的に GPS をはじめとする衛星測位（GNSS 測量）や空中写真撮影を実施し、南極地域における野外活動を支える基礎資料を作成している。その他にも、国際的な GNSS 連続観測局の保守や国際絶対重力基準網を維持するための観測を定期的に行っている。

また、昭和基地には、地球規模の測地観測に必要な VLBI 局、GNSS 局、DORIS 局といった観測局が併設されている。これらの観測局は、天体や人工衛星からの信号に基づいて、地球上における位置を測定することをはじめ、国際的な位置の基準である国際地球基準座標系の構築に必要な観測を実施している。しかし、異なる観測局間では観測技術の違いに伴う系統的な差が存在するため、それぞれの観測局同士で測定した位置は完全に一致しない。そのため、これらの異なる観測局を結合させるためには、観測局それぞれのアンテナ中心同士の精密な位置関係が必要となる。そこで、第 65 次南極地域観測隊では、昭和基地に併設する VLBI 局、GNSS 局、DORIS 局それぞれのアンテナ中心同士の位置関係を求める測量を実施したので報告する。

1. はじめに

GPS をはじめとする GNSS を用いた衛星測地技術は身近に利用されており、その位置情報（緯度、経度、高さ）は、主に国際地球基準座標系（International Terrestrial Reference Frame；以下「ITRF」という。）に基づいている。

ITRF は、複数の宇宙測地技術（VLBI、GNSS、SLR、DORIS）により構築され、国際地球回転・基準系事業（International Earth Rotation and Reference Systems Service；以下「IERS」という。）によって定期的に更新されている。

昭和基地は、VLBI 局、GNSS 局、DORIS 局を併設する南半球でも貴重な観測拠点であることから、これらの異なる観測局を結合させるため、それぞれ

のアンテナ中心同士の精密な位置関係（以下「ローカルタイベクトル」という。）を決定するための測量（以下「ローカルタイ測量」という。）が実施されてきた。

第 40 次隊（1998 年）において、VLBI 局、GNSS 局、DORIS 局のローカルタイ測量が実施され（国土地理院、2007）、その結果が、2001 年 3 月に IERS へ提出され、ITRF 更新時に活用されている

（<https://itrf.ign.fr/docs/solutions/itrf2020/ITRF2020-Tie-Residuals.dat>）。その後も第 50 次隊（2008 年）、第 52 次隊（2010 年）で VLBI アンテナの中心位置を求める測量が実施され、第 55 次隊（2013 年）でも、GNSS 局と DORIS 局のローカルタイ測量が実施されている。

IERS では、定期的にローカルタイ測量を実施することを推奨しているため（Poyard JC, 2017）、第 65 次隊（2023 年）において、ローカルタイ測量を実施した。本報告では、その結果をまとめるとともに、過去の結果との比較も行ったので報告する。

2. 昭和基地に併設された測地観測局

昭和基地に設置されている測地観測局の位置関係を図-1 に示す。昭和基地には、VLBI 局、GNSS 局、DORIS 局が併設され（写真-1）、南半球の高緯度に位置する貴重な観測拠点として、継続的に各観測が実施されている。



図-1 昭和基地に設置されている測地観測局

2.1 VLBI 局

昭和基地の VLBI 局は、1989 年に建設され、直径 11 m のパラボラアンテナに加え、南極の厳しい気象条件からパラボラアンテナを守るための直径 17 m のレドームから構成されている。このパラボラアンテナで天体からの微弱な電波を受信することにより、VLBI 局の位置を高精度に測定し、他の VLBI 局間の基線長変化から南極プレートの移動速度等を求めている。1998 年以降、国際 VLBI 事業の観測スケジュールに基づき、定期的な観測を現在でも継続している。

2.2 GNSS 局

昭和基地の GNSS 局は、1995 年に設置され、GPS や GLONASS などの測位衛星から電波を受信している。また、国際 GNSS 事業の観測局（SYOG）として、昭和基地における測量の原点としても位置づけ

られている。例年、国土地理院の隊員が、受信機やアンテナ、無停電電源装置（UPS）などの観測機器のメンテナンスを実施している。

2.3 DORIS 局

昭和基地の DORIS 局は、1993 年に設置されたが、1998 年に強風により倒壊したため、1999 年に再設置された。以降、国際 DORIS 事業の観測点（SYQB）として、継続して観測が行われている。

VLBI 局や GNSS 局と異なり、アンテナから発信する電波を SPOT や TOPEX/Poseidon などの人工衛星で受信し、そのドップラーシフトから衛星の精密な軌道を決している。

(https://scidbase.nipr.ac.jp/modules/metadata/index.php?content_id=217)。

なお、2024 年 1 月にアンテナの移設作業（旧位置から南東方向約 330 m へ移設）を実施した。



写真-1 各観測局のアンテナ（VLBI アンテナは黒いレドーム内）

3. 第 65 次隊で実施したローカルタイ測量

3.1 概要

国土地理院では、石岡測地観測局（茨城県石岡市）において VLBI 観測施設や GNSS 連続観測点を管理し、近年では、ローカルタイ測量を毎年実施している。昭和基地においても、石岡測地観測局で実施しているローカルタイ測量の手順をベースに検討したが、昭和基地にある VLBI アンテナは、常に黒いレドーム（以下「VLBI レドーム」という。）内で稼働しているため、VLBI レドーム内外の測量は、VLBI レドーム北側の出入口扉の 1 方向しか確保ができなかった。そのため、VLBI レドーム内にある VLBI

アンテナ中心位置を測定する観測点から VLBI レドーム外にある GNSS アンテナや DORIS アンテナを視準できない制約があり、このことが石岡測地観測局でのローカルタイ測量と大きく異なった。

その結果、観測多角網に単路線が幾つか含まれ、精度を確保できる観測多角網を形成することが難しい条件での作業となった。次の 1)～6)が、観測手順の概要である。また、今回実施したローカルタイ測量の観測概略図を図-2 に示す。

- 1) VLBI レドーム内の観測点で VLBI アンテナ中心位置を決定する測量
- 2) VLBI レドーム内の観測点の位置関係を決定する測量
- 3) VLBI レドーム内外にある観測点の位置関係を決定する測量
- 4) GNSS アンテナ及び DORIS アンテナの位置関係を決定する測量
- 5) GNSS 観測
- 6) 比高観測が可能な観測点間の水準測量

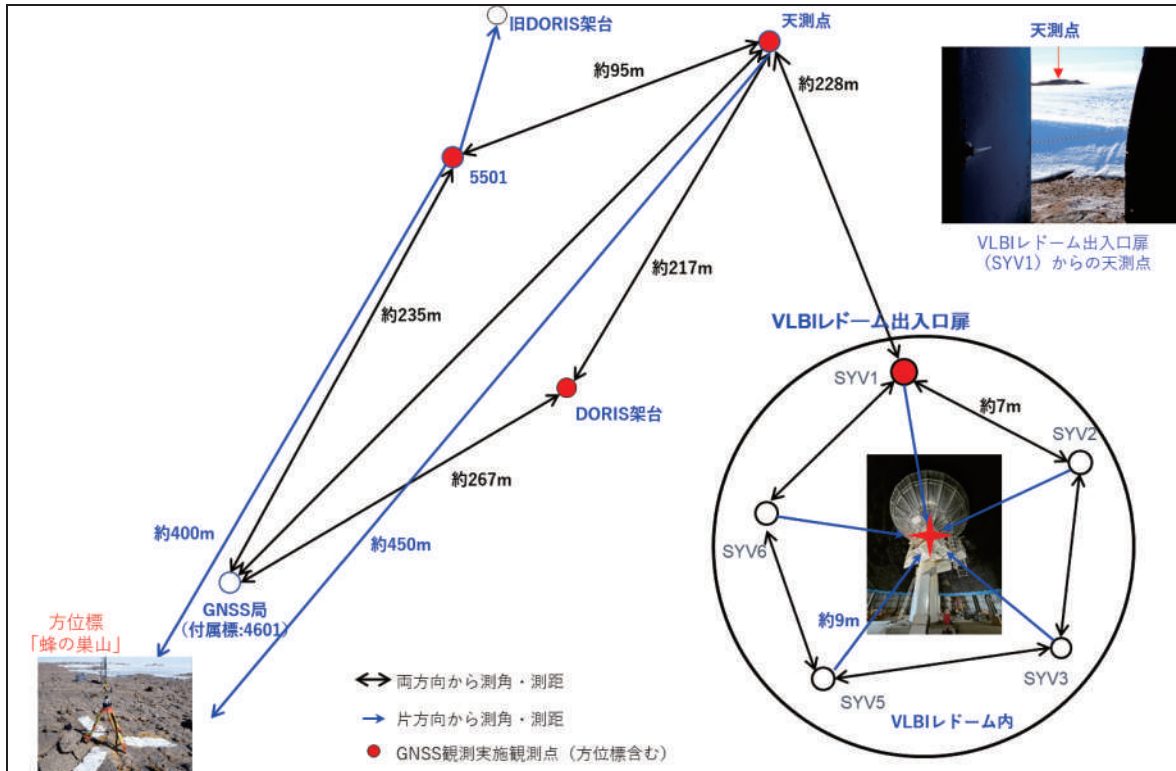


図-2 第 65 次隊で実施したローカルタイ測量の観測概略図

3.2 VLBI アンテナ中心位置の測定

VLBI アンテナ中心位置は、水平駆動軸（以下「AZ 軸」という。）と仰角駆動軸（以下「EL 軸」という。）との交点であり、アンテナの構造上直接視準できない。そのため、超広角にレーザー光を反射する特殊な小型ミラー（以下「超広角リフレクタ」という。）をアンテナ駆動部に取付け、アンテナを AZ 軸、EL 軸に回転させ、超広角リフレクタが描く円弧を VLBI レドーム内にあるアンテナ周囲の観測点（5 点）からトータルステーション（Trimble 社製 S9）を用いて測定して AZ 軸と EL 軸を推定し、その交点をアンテナ中心位置とした（写真-2）。

なお、観測手順の概要は、次の 1)～5)のとおりである。

- 1) 超広角リフレクタ 2 個をアンテナ駆動部に設置（写真-3）
- 2) 超広角リフレクタを視準するための観測点の確認（写真-4）
※第 50 次隊で設置済の金属標 5 点（SYV1, SYV2, SYV3, SYV5, SYV6 : SYV4 は亡失）を利用
- 3) アンテナを AZ 方向に 30° 毎を目安に 360° 回転させて、周囲の観測点から測距・測角
- 4) アンテナを EL 方向に 15° 毎を目安に 90° 付近まで回転させて、周囲の観測点から測距・測角
- 5) VLBI レドーム内の観測点間（SYV1, SYV2, SYV3, SYV5, SYV6）で測距・測角

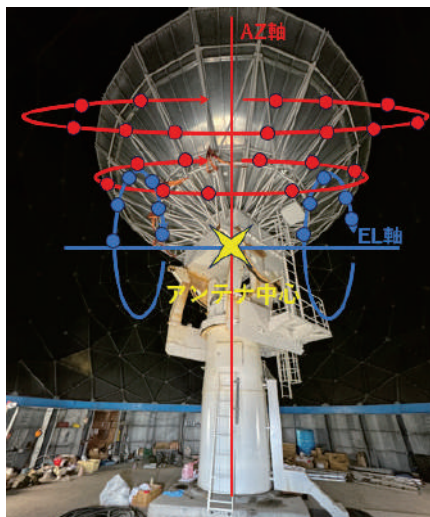


写真-2 VLBI アンテナの中心位置

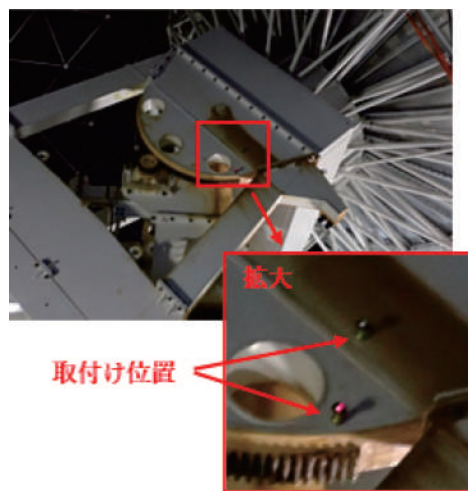


写真-3 アンテナ駆動部に取り付けた超広角リフレクタ

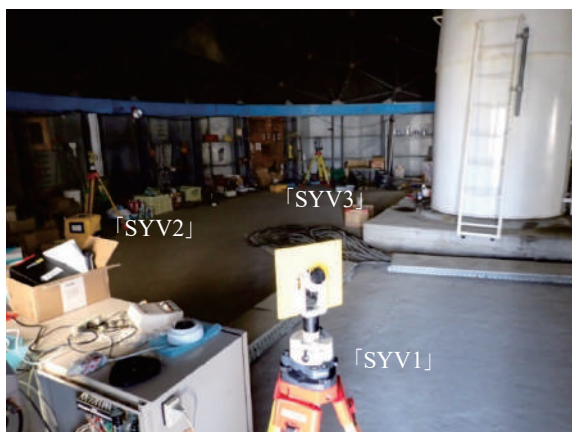


写真-4 VLBI レドーム内の観測点



3.3 VLBI レドーム内外の測量

VLBI レドーム出入口扉から最も近い観測点「SYV1」から屋外へ唯一視準できる観測点「天測点」、その他の既設点「5501」、GNSS 局の付属標「4601」と DORIS アンテナを設置する架台を利用して観測網を形成して(図-2)、観測を実施した(写真-5, 6)。

また、方位標を GNSS 局から南西方向の「蜂の巣山」に設け、方位標観測についても実施した。



写真-5 「天測点」での測量



写真-6 GNSS 局の付属標「4601」での測量

3.4 GNSS アンテナ及び DORIS アンテナの位置関係を決定する測量

GNSS アンテナの中心位置は、レドームに覆われているため、構造上直接測定できない。そのため、まずは、観測点からレドーム両端を目標に水平角観測を行い、レドーム両端で得られた値の平均値をアンテナ中心とし、その中心位置に測量用反射シールを貼付けた。次に、測量用反射シールを目標に鉛直角と斜距離を測定し、得られた値を用いて、観測点から測量用反射シールまでの水平距離を計算した。最後に、GNSS アンテナ図面を用いて、測量用反射シールとアンテナの中心との間の位置関係を求めることにより、間接的に観測点から GNSS アンテナ中心位置までの斜距離を算出した。

DORIS アンテナ（旧 DORIS アンテナ含む）についても同様の測定方法により、観測点から DORIS アンテナ中心位置までの斜距離を算出した。具体的な観測手順概要は、次の 1)～2)とおりである。

1) GNSS アンテナの位置関係を決定する測量

- ① DORIS アンテナ架台を観測点とし、「4601」にミラーを設置
- ② GNSS アンテナ両端を測定し、GNSS アンテナ中心位置を確定
- ③ 確定した GNSS アンテナ中心位置に測量用反射シールを貼付け（写真-7）、鉛直角と斜距離を測定

2) DORIS アンテナの位置関係を決定する測量

- ① 「4601」を観測点とし、「5501」にミラーを設置
 - ② DORIS アンテナ中心位置を確定し、400 MHz（下部）と 2 GHz（上部）に測量用反射シールを貼付け（写真-7）、鉛直角と斜距離を測定
- ※旧 DORIS アンテナについては、「5501」を観測点とし、「天測点」にミラーを設置

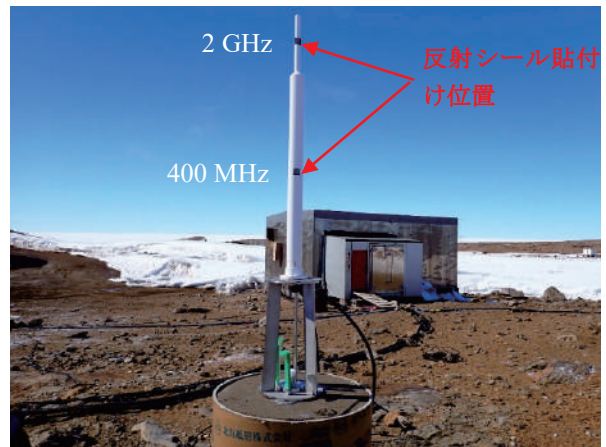


写真-7 各アンテナに貼付けた測量用反射シール
（左：GNSS アンテナ，右：DORIS アンテナ）

3.5 GNSS 観測

昭和基地周辺の局所座標系を ITRF に結合させるため、方位標「蜂の巣山」を含む 4 つの観測点（「天測点」、「5501」、「SYV1」）において、GNSS 観測を実施した。使用した受信機とアンテナは、Trimble 社製 ALLOY と TRM159900.00 を用いた。また、DORIS アンテナ架台においても、DORIS アンテナ設置前に単独で GNSS 観測を実施した。各観測点の観測時間等は、表-1 のとおりである。

3.6 水準測量（観測点間の比高観測）

観測点間の比高を観測するため、水準測量を実施した。実施した観測点は、VLBI アンテナレドーム内 5 点の観測点と GNSS 局の付属標「4601」である。使用した水準儀は、Trimble 社製 Dini0.3、標尺は、カールツァイス社製 LD13 を用いた。また、その他の観測点については、残雪の影響により実施できなかった。各観測点の比高差は、表-2 のとおりである。

表-1 GNSS 観測を実施した観測点

観測点	アンテナ高 (m)	観測開始 (UTC)	観測終了 (UTC)
方位標「蜂の巣山」	0.798	20240106 12:47	20240107 11:11
天測点	1.182	20240106 13:23	20240107 11:42
5501	1.185	20240106 13:07	20240107 06:54
SYV1	1.182	20240106 13:44	20240107 05:25
DORIS 架台	0.346	20240108 08:20	20240108 17:27

表-2 水準測量の結果

4601	(m)	SYV1	(m)	SYV2	(m)	SYV3	(m)	SYV5	(m)	SYV6
	-3.9696	→	0.0222	→	-0.0004	→	-0.0072	→	-0.0043	
	3.9701	←	-0.0223	←	0.0005	←	0.0072	←	0.0042	

4. 観測局間のローカルタイベクトル

4.1 算出方法と結果

ローカルタイベクトル算出のための一連の計算には、Land Information New Zealand (LINZ) により公開されているソフトウェア pyaxis (Land Information New Zealand, 2015) を用いた。なお、本ソフトウェアは、石岡測地観測局でのローカルタイベクトル算出にも使用されている計算ツールである。

今回 3.2 節～3.6 節で実施した測量結果（水平角，鉛直角，斜距離をはじめ，SINEX 形式で出力した GNSS の解析結果と観測点間の比高）を入力値とし

て，VLBI アンテナの AZ 軸と EL 軸の交点の算出や各観測点との位置関係を推定した。また，DORIS アンテナについては，400 MHz の位置をアンテナ中心位置として，各アンテナ間のローカルタイベクトルを算出した。算出したローカルタイベクトル及び標準偏差を表-3 と表-4 にまとめる。結果としては，水平方向で 1～2 cm，上下方向で最大 4 cm 程度の標準偏差となった。

表-3 各アンテナ間のローカルタイベクトル (ITRF2020)

	$\Delta X(m)$	$\Delta Y(m)$	$\Delta Z(m)$	$\Delta L(m)$
VLBI-GNSS (SYOG)				
ローカルタイベクトル	-13.7142	120.5850	24.3403	123.7791
標準偏差	0.0079	0.0118	0.0228	
VLBI-DORIS				
ローカルタイベクトル	-0.9020	58.7033	7.3256	59.1655
標準偏差	0.0166	0.0139	0.0236	
SYOG-DORIS				
ローカルタイベクトル	12.8123	-61.8817	-17.0147	65.4446
標準偏差	0.0173	0.0107	0.0304	
SYOG-旧 DORIS				
ローカルタイベクトル	-298.0435	23.3783	-90.0142	312.2164
標準偏差	0.0171	0.0227	0.0370	

表-4 各アンテナ間のローカルタイベクトル（局所座標系）

	$\Delta N(m)$	$\Delta E(m)$	$\Delta U(m)$
VLBI-GNSS (SYOG)			
ローカルタイベクトル	70.5894	101.6729	1.0161
標準偏差	0.0112	0.0066	0.0235
VLBI-DORIS			
ローカルタイベクトル	36.8996	45.8161	6.3131
標準偏差	0.0174	0.0106	0.0246
GNSS (SYOG) -DORIS			
ローカルタイベクトル	-33.6920	-55.8552	5.2957
標準偏差	0.0141	0.0090	0.0326
GNSS (SYOG) -旧 DORIS			
ローカルタイベクトル	-232.8117	207.9130	7.0698
標準偏差	0.0079	0.0226	0.0401

4.2 考察

石岡測地観測局で算出されるローカルタイベクトルは、IERS の目標精度である標準偏差 1 mm 以内（Poyard JC, 2017）の基準を各成分でおおむね満たしているが、今回、昭和基地で得られた各ローカルタイベクトルは、標準偏差が cm 単位となり、やや精度に欠ける結果となった。各ローカルタイベクトルが目標精度に達しなかった主な要因については、以下の 1)～2)が挙げられる。

1) VLBI レドームの存在

- ① VLBI レドーム内外への観測が、出入口扉 1 か所と限られたため、複数方向からの観測ができず、多角網に単路線が含まれたこと。
- ② VLBI レドーム内が薄暗く、トータルステーションを用いた観測視準が不安定になったこと。

2) VLBI アンテナ駆動部への観測量と超広角リフレクタの配置

- ① 石岡測地観測局の場合は、AZ 軸測定で計 48 回、EL 軸測定で計 40 回の観測量をベースとしているのに対し、今回は、AZ 軸測定で計 24 回、EL 軸測定で計 32 回の観測量と少なかったこと。
- ② 超広角リフレクタの取付け位置から描かれる円弧が EL 軸よりも下側に偏っており、推定位置が外挿となったため、特に上下方向の精度が悪くなったこと。

今後、精度改善のためには、観測量を増やすことが必要とされる。しかし、昭和基地の夏期間オペレーション（12 月中旬から翌年 1 月末まで）では、基地内の施設・設備の修理やメンテナンスの一環で計画停電が優先して行われるため、VLBI アンテナの

駆動に制約があり、実質的に 1～2 日程度の測量作業日数が確保できないことが現状であった。よって、人数を増やして短時間に多数の観測を行うか、あるいは、比較的時間に余裕がある越冬期間中（2 月から 12 月中旬まで）に、ローカルタイ測量を複数回行うことも検討すべきである。また、VLBI レドーム内の観測点から GNSS アンテナや DORIS アンテナへの視通を確保できる小扉などを VLBI レドームに設置することも検討すべきである。単路線の観測網が除かれることにより、更なる精度向上が期待できる。

5. 過去の結果との比較

1 章で述べたように、第 40 次隊（1998 年）がローカルタイ測量を実施しており、その結果が公表されている（Shibuya et al., 2005）。そこで、今回得られたローカルタイベクトルと比較可能な、VLBI-GNSS (SYOG)、GNSS (SYOG) -旧 DORIS について比較を行った。比較結果を表-5 にまとめる。

VLBI-GNSS (SYOG) では、水平方向で 1 cm 以下、上下方向で約 2 cm の較差が生じた。この要因としては、Shibuya et al. (2005) では、VLBI アンテナの EL 軸の位置をアンテナの設計図面から決定しており、測定方法の違いが考えられる。

過去の結果と比較検証を行うため、今回のローカルタイ測量では、4.2 節で述べたとおり、超広角リフレクタの描く円弧が EL 軸位置よりも上下に描けるように、超広角リフレクタを配置すべきと考える。

一方、GNSS (SYOG) -旧 DORIS では、水平方向で最大 2.5 cm の較差であった。これについても 3.4 節で述べたように観測が 1 方向のみとなったため、望ましい精度が得られなかったと考えられる。

表-5 Shibuya et al. (2005) のローカルタイベクトルとの比較

	ΔN (m)	ΔE (m)	ΔU (m)	
VLBI—GNSS (SYOG)				
ローカルタイベクトル	70.5894	101.6729	1.0161	第 65 次隊
	70.5910	101.6640	0.9930	Shibuya et al., (2005)
差	-0.0016	0.0089	0.0231	
GNSS (SYOG) — 旧 DORIS				
ローカルタイベクトル	-232.8117	207.9130	7.0698	第 65 次隊
	-232.7940	207.9380	7.0560	Shibuya et al., (2005)
差	-0.0177	-0.0250	0.0138	

6. まとめと今後の課題

第 65 次南極地域観測隊では、昭和基地に併設する測地観測局（VLBI 局、GNSS 局、DORIS 局）において、観測局それぞれのアンテナ中心同士の位置関係を求めるローカルタイ測量を実施した。

ローカルタイ測量の結果、求められた各ローカルタイベクトルの標準偏差は、水平方向で 1~2 cm、上下方向では最大 4 cm 程度となった。IERS が推奨する目標精度（標準偏差 1 mm）には及ばない結果となったが、観測網や観測方法を検討し、観測量を増やすことにより、今回以上の精度でローカルタイベクトルを求めることが期待できる。特に VLBI レドームの存在が大きいいため、VLBI レドーム内外の観測点で複数か所の視通を確保し、複数点から GNSS アンテナや DORIS アンテナが視準できれば、大きな精度向上が見込まれる。

また、ローカルタイ測量の実施頻度についても、長期間空けずに数年おきに実施することができれば、細かい観測手法や制約条件も継承できるため、日本国内と異なる厳しい観測条件にある昭和基地において、より効率的な作業の実施が図れる。

謝 辞

本ローカルタイ測量に御協力いただいた観測隊の皆様には多大な御支援をいただきました。ここに記して感謝の意を表します。

(公開日：令和 7 年 3 月 31 日)

参 考 文 献

- Kazuo Shibuya, Koichiro Doi, Yoshihiro Fukuzaki and Masao Iwata (2005) : Geodesy reference points within Syowa Station, Antarctica, and their local geodetic ties, National Institute of Polar Research, Polar Geosci., 18, 130–161, 2005.
- Land Information New Zealand (2015): Warkworth Observatory Local Tie Survey, Land Information New Zealand, Record A1387321.
- 国土地理院 (2007) : 国土地理院南極地域観測事業 50 年の変遷, 国土地理院時報, 111, 1–100.
- Poyard JC (2017): IGN best practice for surveying instrument reference points at ITRF co-location sites, IERS Technical Note No. 39, <https://www.iers.org/IERS/EN/Publications/TechnicalNotes/tn39.html?nn=94912> (accessed 28 Feb. 2025).