

## 氷床探査レーダーの開発及び現地での運用状況

藤田秀二<sup>1\*</sup>Development and use of ice sounding radars in the Japanese  
Antarctic Research ExpeditionShuji Fujita<sup>1\*</sup>

(2008年3月31日受付; 2008年4月23日受理)

**Abstract:** Antarctica is a continent characterized by the huge ice mass above the bedrock. Better understanding the internal physical mechanism for existence and changes is essential to study how ice is fixed on the continent in water cycles in the atmosphere—ocean—ice system on the earth. The National Institute of Polar Research, Tokyo, has a long history of using ice sounding radar to study the ice sheet. This paper gives a brief history of the development, specifications, observations and major results. In particular, it explains the use of multiple frequencies and polarization planes. This paper also comments on the recent use of phase information in addition to power information. I hope that this document will be useful for future use of the radar.

**要旨:** 南極大陸は基盤上の厚く広大な氷に象徴される大陸である。南極における種々の科学調査で氷床の厚さの把握が必要となるほか、地球上の大気—海洋—氷床システムの水循環・固定のメカニズムを考える上で、氷床の存在や消長にかかわる内部物理メカニズムの理解は欠かせない。国立極地研究所では、氷床探査を目的とした多種類のレーダーを長い間使用してきた。本報告では、ドームふじでの氷床深層掘削が本格化した1990年代以降を振り返り、この間の氷床探査レーダーの開発状況、仕様や、運用状況、主たる成果について記述する。特に、探査目的に応じて使用周波数を多周波とし、さらには電磁波の偏波面に依存する情報の活用を進めてきたことについて解説をする。また、近年は電力のみではなく位相情報の検知もできるレーダーの運用を開始したことについても述べる。将来の氷床探査での発展的な活用をにらみ、現状を説明する資料の提示を目的とする。

## 1. はじめに

氷床内部の探査に、レーダーは重要な機器である。氷床の研究者は、氷床探査レーダーを使用した研究について論文を書く際には、使用したレーダーの仕様については必ず要点を記載する。ただ、個々の論文には個々のレーダーについての記載のみとなる。その場合、使用し

<sup>1</sup> 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.

\* E-mail: sfujita@nipr.ac.jp

た機器の他の機器と比較しての特徴や、南極観測をより広くみたとときの位置付けは見えにくい。個々のレーダー機器は法的には無線局の扱いとなり、総務省に申請をして審査を受け、無線局免許の付与を得た上で使用する。無線局検査の際には、まさに本稿のような説明資料を作成し提出することになる。これにより、新規に開設をしようとしている無線局の開設必要性、周波数資源を利用する目的や位置付けが審査されることになる。筆者は、南極観測のコミュニティーに対しても、こうして機器一覧の俯瞰に視点を置いた情報提示は有意義であろうと考えた。なぜなら、レーダーの機器資源は氷床や氷床下の固体地球や氷床下環境を探る広い研究者に今後活用されるべきと考えるからである。俯瞰情報があれば、諸外国の南極研究者により使用されているレーダーと比較して国立極地研究所で整備してきたレーダーがどういう位置付けにあるか、あるいは、今後使用する際に使用目的に照らしどの機器が最も適するか、あるいは活用できるかが判断できるからである。筆者自身、氷床探査レーダーを活用するようになって以来、多数の研究者の助言や指導を受けながら、かつ観測・研究上のターゲットを注視しながら、延べ4台のレーダー製作に関わってきた。これらは今後も研究上の重要な機器資源となる。ここに現状での保有機器について要点の解説をしたい。

## 2. 氷床探査レーダーの目的と必要性

南極大陸を覆う巨大な氷体は、大陸上に流れ込んだ水蒸気が雪や霜として積み上がったものである。東南極の平均では、2200 mの厚さをもつ。最も厚い氷は4776 mが発見されている。もし全部が融解すれば、地球上の海水面が約70 m上昇する（たとえばLythe *et al.* (2001)）。氷床は、内陸から外側に向かって重力を駆動力として流動し、海にあふれ出しつつ形状を維持している。氷が大陸上にとどまる時間スケールは、 $10^5$ – $10^6$ 年である。氷床形成は雪や霜の堆積によるため、そこには層構造が存在し、各層に含まれる物質はその層の形成年代の地球環境を反映している。南極氷床の内陸部で、氷を掘削・解析する氷床コア研究は、こうした層構造を読み解き、氷が大陸上にとどまる時間範囲での地球環境変動史を解き明かす試みである。ドームふじで掘削された氷床コアの最深部の年代は約72万年と推定されており、人類史がその時間スケールにおさまる。氷床コア研究が掘削点一点での詳細な解読であるのに対し、氷床広域の内部構造を知ることは、氷床そのものの理を知ることである。言い換えれば、南極氷床とはそもそも何か・存在の理由・条件・形成史・内在物理機構の解明の試みである。氷床は、地球全体の気候システム（大気—海洋—氷床系）の中の重要な一要素であるから、その内部構造がわかれば、気候システムのなかでの氷床の受動的側面・能動的側面について多面的に理解が進む。内部構造の探査は、氷床流動モデル研究とは相補う両輪となる。

さて、氷床内部を知る上での直接的手段は氷床コア研究である。しかし、内陸基地での3000 m級の深層掘削の実現には、南極の現場のみで $10^4$ 人日レベルの-effortを伴う一大プロジェクトを要するため、大陸上の多点広域探査には現時点では適さない。氷床広域探査

に有効なりモートセンシング技術の代表格が電磁波探査技術である。氷床や氷河の氷厚や内部探査の目的で開発されてきたレーダーを、本稿では氷床探査レーダーと呼ぶ。観測では、航空機や車両に搭載したレーダーから鉛直下方の氷床に向かって電波を照射する。この技術により、数千メートルの厚さに及ぶ氷体内部の情報を電磁波の波長スケールの精度で検知できる。通常氷床探査には、VHF帯からUHF帯までの周波数を用いたパルスレーダーというタイプのレーダーを用いる。山岳氷河や、比較的浅い氷床の厚さを測る目的では、インパルスレーダー（別名、モノパルスレーダー、あるいは、Ground Penetrating Radar: GPR）が用いられることがあり、それらを含めて広義に通称でアイスレーダーと呼ぶこともある。なお、VHF帯からUHF帯の周波数は氷の中での電磁波の吸収が小さいいわゆる窓領域に相当し、かつ、氷結晶のもつ誘電分散帯にも該当しない。マイクロ波帯やミリ波帯の高周波では電磁波の浸透深さが急激に減少する（たとえば Fujita *et al.* (2000), 藤田 (2000)）。

氷床探査レーダー技術が登場した1960年代以降には、レーダーは主として氷厚計測用として用いられてきた。1970年代以降には、氷床探査レーダーのデータの中に氷床から層状の反射があることが報告され、氷床内部探査への応用が始まった。1980年代までの状況は文献 (Bogorodsky *et al.*, 1985) によくまとめられている。さらに、氷床底面での電磁波散乱の解析から、氷と岩盤の界面の物理状態の探査にも応用がなされている（たとえば Robin *et al.*, 1977）。氷床内部での電磁波の伝搬や散乱現象は、観測対象の物質である氷結晶の高周波電気物性を基礎としている。このため、氷の電気物性研究の進展に伴い、氷床探査レーダー技術にも新たな進展が現れる状況となっている。私たち日本の研究コミュニティの実施してきた研究は、特に、氷結晶の高周波電気物性の解明と氷床の内部構造の解明を並行して進め、独自性を発揮してきた。

### 3. 氷床内部での電磁波の伝搬と散乱

氷床内部に入射をする電磁波は、氷結晶の誘電的な性質にしたがって伝搬するが、媒体の電気的性質が異なるところで反射・散乱を起こす。氷と岩盤の界面があれば、そこで電磁波は反射し、基盤岩高度がわかる。氷と水の界面があれば強い反射が起こり、例えば氷床下湖の存在を同定できることになる。さらには、氷体の内部でも、入射した電磁波が反射・散乱をする。散乱がしばしば積層構造に伴う横並びの散乱体で発生するため、この電波散乱部位を内部反射層と呼ぶ。電波散乱原因については3つの主要機構が提案されており、それらは①氷の密度の不連続、②結晶主軸方位分布の不連続、③酸性度の不連続である (Fujita and Mae, 1994; Fujita *et al.*, 1999, 2000; Matsuoka *et al.*, 2003, 2004)。この3つの主要機構の出現の有無は、氷床内部の物理環境（深度や地域）や、レーダーに用いる電磁波の周波数によって変化する。さらに、これらの3つに加えて、氷床内部には第4の反射散乱形態の領域である電波無反射帯が存在し、そこでは電波散乱強度が2桁かそれ以上低下する (Fujita *et al.*,

1999). 上記のような氷床の物理要素をレーダーで観測・判別ができ、氷体の内部構造が詳細に読みとり可能である。レーダーを車両や航空機に搭載して、広域の情報を得ることができる。上で述べた3つの主要機構の出現の有無が電磁波の周波数により変化することによって、多周波数のレーダー観測が重要となる。酸性度による反射は、高周波ほど弱まるが、氷の密度の不連続や結晶主軸方位分布の不連続による反射強度は周波数に依存しない (Fujita and Mae, 1994)。実際に、多周波アルゴリズムによって、氷床内部を構成する多結晶の結晶方位分布 (空間中で選択的に配向する方位) についての情報が、近年明らかになりつつある。結晶主軸方位分布は、氷床の内部の粘性を考える上で重要である。これは氷体のひずみ履歴を表し、さらにはその後の流動活性度を規定するからである。我々が実施してきた観測によって、氷床の内部でせん断変形が特に卓越する層が、数百メートルの厚さを持ち氷床の中層と深層に存在することが明らかとなった (Fujita *et al.*, 1999; Matsuoka *et al.*, 2003, 2004)。特に、みずほ高原からやまと山脈にかけての広域に氷床では、最終氷期の末期に相当する数百メートルの厚さの氷の中で氷の結晶方位分布が1メートルからミリメートルのスケールで変動をしていることが明らかになった。

一方、もう一つの技術である多偏波アルゴリズムも、氷床内部の結晶方位分布や応力・ひずみの主軸 (対称軸) を明らかにする手法である。氷床を構成する多結晶の結晶方位分布は、ひずみの主軸の方向により選択的な方位に配向する。そうした氷床の内部を伝搬する電磁波には複屈折がおこる。複屈折を起こした電磁波は、氷床の中で、正常成分と異常成分と呼ばれる2成分に分離し、そうした電磁波成分が空中を伝わりレーダーに到達する際にはこの2成分の振幅と位相が互いに干渉する。氷床の上で電磁波の偏波面を多数変化させた観測結果の分析から、各深度でのひずみの主軸方位やその強度をひも解くことができる。この技術を用いて、氷床内部に蓄積したひずみの分析が可能である (Fujita *et al.*, 2003, 2006)。

#### 4. 現在までの日本の南極観測と氷床探査レーダー

表1には、日本南極観測隊による氷床探査レーダー観測の歴史を示す。日本が現在まで行ってきた南極観測の中で、南極氷床の研究は、「東南極、みずほ高原・エンダビーランド地域の雪氷観測計画 (1968年~1975年)」、「東クイーンモードランド雪氷観測計画 (1982年~1986年)」、「氷床ドーム深層掘削観測計画 (1992年~1996年)」、更に、「極域大気—雪氷—海洋圏における環境変動機構に関する研究 (1997年~2001年)」、さらに「南極域からみた地球規模環境変化の総合研究 (2002年~2006年)」として実施されてきた。現在進行中の南極地域観測第VII期計画では、「氷床内陸域から探る気候・氷床変動システムの解明と新たな手法の導入 (2007年~)」として研究や観測が実施されている。従来活用されてきた氷床探査レーダーについて大まかに述べると、初期には南極氷床 (厚さ数百~数千メートル) の厚さを調べる目的で、また近年は氷体内部の構造を調べる目的で使用されてきている。データ処理とし

表 1 日本南極観測隊による氷床探査レーダー観測の歴史

Table 1. A history of ice sounding radar observations by the Japanese Antarctic Research Expedition.

西暦	隊次	トピック
1968-70	10	35MHz雪上車搭載レーダー(陸35)による観測
1970-72	12	60MHz雪上車搭載レーダー(陸60-I)の新規製造とそれによる観測
1973-75	13	陸60-Iによる観測
1979-81	21	179MHz航空機搭載レーダー(空179-I)の新規製造とそれによる観測
1981-83	23	陸60-Iによる観測
1982-84	24	陸60-Iによる観測
1983-85	25	空179-Iの車載用への改造(空179-I陸)とそれによる観測
1984-86	26	空179-I陸による観測
1985-87	27	179MHz航空機搭載レーダー(空179-II)の新規製造とそれによる観測 陸60-Iによる観測
1986-88	28	空179-IIによる観測
1991-93	33	空179-IIの車載用への改造(空179-II陸)とそれによる観測
1995-97	37	60MHz車載レーダー(陸60-II)の新規製造 陸60-II、空179-II陸による観測
1998-2000	40	30MHz雪上車搭載レーダー(陸30)の新規製造 陸30、陸60-II、空179-II陸による観測
2005-06	47	179MHz雪上車搭載レーダー(陸179-III)の新規製造とそれによる観測
2006	48	434MHz雪上車搭載レーダー(陸434-I)の新規製造
2007-08	48, 49	陸30、陸60-II、空179-II陸、陸179-III、陸434MHzによる観測

なお、レーダーの記号名は、この報告の中で便宜的につけたもので、陸・空はそれぞれ雪上車搭載・航空機搭載を、次の数字は周波数 (MHz) を意味し、I, II は新規製造のたびに増やした。「空179-I陸」や「空179-II陸」は、当初航空用に開発し、その後陸上用に改修したものの。

では、デジタル記録技術が過去約 20 年に普及してきたため、効率的なデータ処理が可能になってきている。VHF 帯や UHF 帯のなかで、無線局として認可を受け使用されてきた周波数帯は、初期に 35 MHz であったが、この周波数は現在使用されていない。近年使用されている周波数帯は 4 帯域あり、30 MHz, 60 MHz, 179 MHz, 434 MHz である。さらに、2002 年には、当時の通信総合研究所 (現、情報通信研究機構) が開発・製作をした 1257.5 MHz レーダー (Uratsuka *et al.*, 2000) も譲渡を受け、総務省に申請し無線局免許を得ている。こうした多周波数の利用は、多周波数アルゴリズムの実現を目的としてきたほか、それぞれの周波数の電磁波の氷床内部の探査性能についての実証実験の目的を持っている。

### 5. 各レーダーの仕様・特徴や運用方法及び運用実績について

多周波数の必要性から、表 2 に示したような 4 つの周波数を持つ合計 5 種のレーダーを製作・維持してきた。レーダーの電波形式としては、すべてパルスレーダー形式である。パルスレーダー方式では、パルス幅を長く取るほど、電力としての積分値が増大し、その結果として探査深度を増すことができる。送信機の電力は、探査深度確保のためピーク電力を 1kW-500 W としている。この大きさの送信ピーク電力を必要とする理由は探査可能深度の確保である。氷床探査レーダーは、南極氷床内陸部で、最大氷厚 3000-3500 m 程度の氷床厚を検知する必要がある。過去に観測に用いてきたパルスレーダー、特に、表 1, 表 2 中の「空 179-II

表 2 国立極地研究所が現在活用している氷床探査レーダーの一覧

Table 2. A list of ice sounding radars currently used by the National Institute of Polar Research.

レーダー整理記号	空179-II陸	陸60-II	陸30	陸179-III	陸434
製作年	1985/1991	1995	1998	2005	2006
製作時点の隊次	27次隊/33次隊 (*1)	37次隊	40次隊	47次隊	48次隊
<b>氷床の計測項目に対する適性</b>					
氷厚計測および氷床下湖探査	○	○	評価未了	○	評価未了
密度変化に起因する内部反射層	○	○	○	○	○
酸性度変化に起因する内部反射層	△	○	○	△	×
氷の結晶主軸変化に起因する内部反射	○	△	△	○	○
深層部の電波無反射帯の検知	○	×	評価未了	評価未了	評価未了
<b>送信部</b>					
送信周波数 (MHz)	179	60	30	179	434
ピーク送信電力 (kW)	1	1	1	1	0.5
パルス繰り返し周波数	1kHz	1kHz	1kHz	4Hz以下	4Hz以下
実効送信電力 (W)	1	1	1	0.0025	~ 0.001
送信パルス幅 (ns)	60, 250, 500, 1000	250, 500, 1000	500, 1000	60, 500	60, 500
送信パルス幅切替	手動	手動	手動	自動	自動
<b>受信部</b>					
受信周波数 (MHz)	179	60	30	179	434
受信帯域幅 (MHz)	14/4/1	4/1		14/2	14/4
NF	1.0dB以下	1.0dB以下	1.0dB以下	1.0dB以下	1.0dB以下
検波方式	電力のみ	電力のみ	電力のみ	IQ検波	IQ検波
ダイナミックレンジ(*2)	60dB以上	60dB以上	60dB以上	60dB以上	60dB以上
最小受信感度 (dBm)(*3)	-110	-110	-110	-110	-110
水中最大分解能 (m)	5	21	42	5	5
<b>空中線部</b>					
型式	3素子または8素子八木	3素子八木	3素子八木またはダイポール	交叉型3素子八木	交叉型8素子八木
絶対利得 (dBi)(*4)	8.15または14	7.2	7.0以下または2以下	8.2	14
偏波面の電気的な切り替え	無	無	無	有	有
アンテナ重量 (1基あたり, kg)	4または9	4	11	2以下	2以下
<b>その他の仕様</b>					
送信タイミング制御	受信機	受信機	受信機	GPSのPPS信号	GPSのPPS信号
消費電流 (A) (*5)	2.5	5	4.2	2.3	2.3
突入電流 (A)	2	20	no data	4	4
全体消費電力 (W)	60	120	100.8	55.2	~50
送信機寸法 (mm)	405/492/600	520/630/500	250/430/550	250/410/330	250/410/330
受信機寸法 (mm)	305/492/500	-	199/430/380	250/410/480	250/410/480
配電盤寸法 (mm)	100/480/250	-	-	-	-
重量 送信機・受信機・配電盤 (kg)	40/20/4	63.5/-/-	45/12/-	26.5/17/-	26.5/17/-
データ収録系 (現状)	オシロスコープとPC	オシロスコープとPC	オシロスコープとPC	PCのみ	PCのみ
PCのインターフェース	GPiB	GPiB	GPiB	USB	USB

\*1) 1985年に航空機搭載レーダーとして製作。1991年に雪上車搭載レーダーとして改修。

\*2) ダイナミックレンジの定義は、最小受信感度入力レベルから、60dB大きな入力レベルまで受信部のどのステージでも飽和しないこと、とする。

\*3) dBmとは電力の単位で、1mWを基準すなわち0dBmと定義し、デシベルスケールで表現をしたもの。

\*4) dBiとはアンテナ利得を表現する単位で、理想的に等方的なアンテナを基準すなわち0dBiと定義し、デシベルスケールで表現をしたもの。

\*5) 電源はすべて24VDC。

陸」と略称するレーダーの経験から、送信出力1kWで3素子八木アンテナや8素子八木アンテナを用いれば、東南極の内陸部では氷厚として3000-3500mを計測できることがわかっている。それに、氷の内部での電磁波の吸収は、HF、VHF帯とUHF帯でレーダー観測に

とっての本質的な違いは無いことが氷結晶の電気的な性質からわかっている。このため、UHF帯まで周波数をあげても吸収や減衰は限られている。仕様の詳細は表2に示す。これらのレーダーの実用上の特徴について以下に簡単にまとめる。

### 5.1. 空 179-II 陸

このレーダーは、1985年に明星電気株式会社によって製作されて以降、航空機搭載観測や陸上観測の大部分の探査に使用されてきた。観測成果に関わる論文出版数も最も多い。航空機観測として、南極セール・ロンダネ近傍の氷床内部エコーの分析結果が *Uratsuka et al.* (1996) により発表された。また、ドームふじ基地近傍の氷床の最初の基盤地形探査は、前野ら (1997), *Maeno et al.* (1994, 1995, 1996) が実施している。その後も大陸沿岸部からドームふじ近傍を結ぶ広域で使用され、多周波数観測・多偏波観測の主たる観測機器となってきた。その後の関連論文発表も特に多い (*Fujita et al.*, 1999, 2002, 2003, 2006; *Matsuoka et al.* 2002, 2003, 2004)。ハードウェアは、1985年の製作後既に20年以上たつにもかかわらず、安定した性能が維持されている。氷厚計測には現在の5台のレーダーの中で最も大きな深度探査性能を持つ。氷床下湖の検知にも有効に活用されてきた。また、高分解能探査を目的とした60 nsのパルスも有しているため、氷床浅部の内部層探査にも適している。1991年以降は車載用に改修され、車両搭載で運用されている。氷厚計測を目的とするのであればこのレーダーの性能と信頼性は高い。対照的に、多パルス、多偏波情報や、位相情報の検知が研究上本質的に必要な場合には後述の「陸 179-III」が適している。実際の運用時の外観を図 1a に示す。

### 5.2. 陸 60-II

このレーダーは、「空 179-II 陸」とあわせた多周波観測を目的として1995年に東栄電気工業(株)が製作した。それ以降の観測の大部分の探査に使用されてきた。ピーク電力である1 kWや最低受信感度等からみた時、「空 179-II 陸」とほぼ同一の探査深度を持つ仕様となっている。実際の運用経験に基づけば、わずか5 dB程度ではあるが「空 179-II 陸」の方が探査性能は良い。氷厚計測を目的とする観測については、「空 179-II 陸」と並びこのレーダーの信頼性は高い。最短パルスが250 nsであるため、氷床内部層探査に対する分解能は氷中で約21 mとなる。これは「空 179-II 陸」の最短パルス60 nsの約5 mに比べて低分解能である。このレーダーを用いた研究は、常に179 MHzと60 MHzの2周波数、それに以下に述べる「陸 30」との比較として議論されてきた。関連論文群は5.1節に述べた「空 179-II 陸」のものと重なる。氷床内部での電波反射機構の周波数ごとの差異や、氷床内部で起こる複屈折の周波数に対する依存性が中心的な論点となってきた。実際の運用時の外観を図 1a 及び 1c に示す。

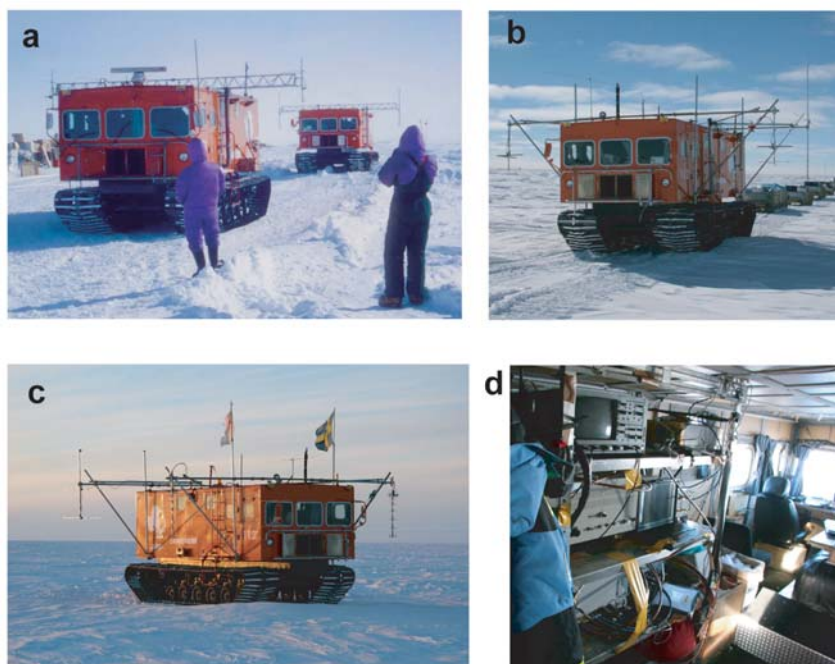


図 1 (a) 前方雪上車に「空 179-II 陸」を搭載，後方雪上車に「陸 60-II」を搭載．第 37 次観測隊．(b) 「陸 179-III」を前方に，「陸 30」を後方に搭載．第 49 次観測隊．(c) 「陸 434 MHz」を前方に，「陸 60-II」を後方に搭載した雪上車．第 49 次観測隊．(d) レーダー機器を搭載した雪上車内の機器棚．

Fig. 1. (a) 179 MHz radar is mounted on the tracked vehicle in front. 60 MHz radar is mounted on the tracked vehicle behind. Both radars use logarithmic amplifiers. (b) 179 MHz polarimetric radar is mounted in front. 30-MHz radar is mounted in the rear. The photo is from the 49th Japanese Antarctic Expedition. (c) 434-MHz polarimetric radar is mounted in front. 60 MHz radar is mounted in the rear. The photo is from 49th Japanese Antarctic Expedition. (d) A photo showing the inside of the tracked vehicle. The radars are mounted on shelves.

### 5.3. 陸 30

このレーダーは、「空 179-II 陸」や「陸 60-II」とあわせて多周波観測，特に低周波側のデータ取得を目的として 1998 年に東栄電気工業(株)が製作した．特に，周波数が低いほど相対的に大きな信号を発生する酸性度の変化をとらえる目的で製作された．南極観測隊の隊次としては第 40 次隊と第 49 次隊での探査に使用されてきた．データの一部分は Matsuoka *et al.* (2002) に報告されている．氷厚計測及び内部層の検知ができています．ただ，実際の運用では送信機からの信号が受信系にノイズを与える技術的問題が見出されている．初期運用であった第 40 次隊でこの問題が生じ，受信系を一部改修後に第 49 次隊で使用を試みたが，結果的に改修には成功をしておらず，依然，改善を要する問題が見出されている．南極観測の現場



での取り回しのしやすさの観点からみたとき、低周波であるため、アンテナが「空 179-Ⅱ陸」や「陸 60-Ⅱ」よりもずっと大きい（図 1b に示した雪上車の後部参照）点が不利である。雪上車に搭載をしての運用時には、アンテナが人員や櫓や他の車両に接触事故を起こすことがないように常に注意を払うことが特に要求されることになる。

#### 5.4. 陸 179-Ⅲ

この「陸 179-Ⅲ」レーダーは、三光社(株)が製作をした。上に述べてきた 3 種のレーダーは、すべて受信電力をログアンプを介して受信するタイプのレーダーであった。これらの 3 種のレーダーを用いた 2005 年頃までの研究によって、多種の偏波方向と多種のパルス幅によるデータを合理的に取得できるシステムの必要性が認識されていた。また、電力のみではなく、電波の振幅と位相を検知することも氷床内部構造を研究する上での課題であった。これらの要素を実現するためのレーダーとして新型の 179 MHz レーダーを製作した。周波数の選択は長年の 179 MHz の使用実績に基づく。無線局を新規に開設する際にも運用実績が考慮されるため、既の使用をしてきた周波数帯の使用が最も受け入れられやすい。この新型レーダーは、以下に列記した点について合理的に観測することを志向したレーダーである。

- ① 電波散乱の偏波依存性。多偏波の一括観測により、氷体の力学構造解明に資する。
- ② 氷床深部の散乱。「空 179-Ⅱ陸」と同様の探査深度性能を用い、未知深部の氷床物理構造の解明に資する。
- ③ 長いパルス（500 ns）と短いパルス（60 ns）の繰り返し観測により、氷床深部と基盤情報にかかる情報と、氷床中層までの高分解能層位情報を検知し、岩盤や内部層についての大量の情報を取得する。伝統的に使用してきた「空 179-Ⅱ陸」は、周波数やパルスの観測設定を変えるたびに、独立測定を繰り返す必要があった。つまり、一つの測線の計測では、条件を変えながら何度も同じルートを走行し直す必要があった。また、偏波特性を計測するには、アンテナ設置方位角度を変更しながら計測をする必要があった。内陸調査では、観測現場に居る時間や燃料資源は極めて限定されている。そうした状況下で同じ測線を繰り返し計測することは多大の観測負担を要する。観測現場に滞在する短期間の時間範囲で、科学展開に必要な情報をできるだけ効率的に取得できるレーダーを検討した。具体的な性能として以下を取り入れた。

- ① 雪上車の進行方向の平行偏波と、横方向の平行偏波の同時計測。

これは、交差したアンテナを用意し、送・受信に使う素子のスイッチングによって実現した。送受信アンテナを、送信 V、送信 H、受信 V、受信 H の 4 種用意をした。送受の組み合わせとして、VV, HH, VH, HV として電子的に制御ができるものとした。

- ② パルス幅の選択

基盤探査には、長いパルス、内部探査には、短いパルスとして、2 種のパルスを繰り返し送

受信する仕様とした。2種パルスの計測を同時に実行できるので、効率的な計測が可能になった。具体的には、基盤/深部計測に 500 ns、高分解能計測に 60 ns を設置した。

### ③ IQ 検波の実現

受信信号は、電力としての受信ではなく、振幅と位相に相当する受信方式である IQ 検波を選択した。反射面での位相変化や、繰り返し計測時の変位検知等、合成開口レーダーで用いられるのと同様な信号処理が可能になる。具体的な運用としては、氷床の内部層の変位検知がターゲットになる。

実際の観測では、送受信アンテナの切替えとパルス幅の切替えを組み合わせる観測をする。1秒ごとに下記の4つのタイミングの計測を実施している(表3)。

表 3 1秒間に起こる送信と受信のタイミング、及びその際のパルス幅  
Table 3. Timing of signal transmission and signal receiving per second, and pulse width.

タイミング順	送信アンテナ	受信アンテナ	パルス
1	送信V	受信V, 受信H	500
2	送信H	受信V, 受信H	500
3	送信V	受信V, 受信H	60
4	送信H	受信V, 受信H	60

結果として、測線を1回走行測定すれば、研究対象となる測定条件の計測は実現されるレーダーとした。1秒ごとに、4つのタイミング、2種(VH)の受信アンテナ、IQ(振幅・位相)信号として合計16列のデータが取得できる。レーダーの制御とデータ収録はPCからUSBを用いて行うものとした。現在のUSBを介したデータ転送速度の制約から、送受信の頻度をこれ以上上げることはできない。単純に氷床の厚さのみを計測したい場合には、「空179-II陸」等の送信頻度は1kHzであるから、1秒間のデータ取得回数をより多くとれることになる。従って、単純な氷厚計測には「空179-II陸」や「陸60-II」が適している。この「陸179-III」レーダーは、第47次夏隊の際に中継拠点・ドームふじ間で初期の運用試験をしたのち、第49次夏隊実施をした日本・スウェーデン共同トラバースにおいて雪上車長距離走行の本格的運用をした(外観は図1bの前方のアンテナ)。延べ走行距離は2000kmに及ぶ。性能の最終評価を今後進めることになる。

## 5.5. 陸434

このレーダーも、三光社(株)が製作をした。「陸179-III」と基本的な構造は同一にして、氷床探査レーダーとしては高い周波数となる434MHzを採用したものである。この周波数は、UHF帯であり、また、マイクロ波のバンド帯の呼称ではPバンドマイクロ波ということになる。この周波数は、2つの大きな目的を持って選択された。

① 氷床内部の氷結晶組織の層位構造を検知する。

## ② 将来の人工衛星による氷床レーダー探査の可能性を調査する。

以下に事情をより詳しく述べる。氷床コア掘削によって得られた試料の解析から、南極氷床中には、氷結晶組織の異なる氷が層状に積み重なっている構造があることが明らかになってきた。さらに、過去十年間に、既存の3周波のレーダー（30 MHz, 60 MHz, 179 MHz）で実施した研究から、氷床内部の氷結晶組織の層位構造を検知するには、レーダーに使用する周波数が高周波であるほど有利であることが明らかになってきた。氷結晶組織の層構造を立体的に把握することは、特に氷床の流動機構や気候変化に対する氷床変動・氷床動力学的の研究にとって役に立つ基礎データとなる。VHF帯である既存の179 MHzのレーダーでは、氷結晶組織の変化による電波反射と、酸性度の変化による電波反射が、依然混在した形で検知される。氷結晶組織の情報をより高い純度で検知するために、既存のVHF帯周波数の約2-3倍程度の周波数であるUHF帯（300-500 MHz付近）でのレーダー観測の実施を検討した。UHF帯ならば、既存の179 MHzのVHF帯レーダーと比較して、酸性度の変化の及ぼす効果を約5-10 dB取り除くことができる。高周波ほど電磁波の減衰も増大するが、UHF帯であればVHF帯とは実効的に変わらないと見積もった。

無線局申請の結果、最終的に434 MHzの使用が認められた。この周波数帯はアンテナの寸法も小さくて済むため、将来の人工衛星搭載型レーダーの実現も視野にはいつてくる。そのための基礎データとしても、まずは地上でこの周波数帯の計測を実現することを目的とした。

第49次観測隊夏隊において、ドームふじ基地近傍でこのレーダーの運用試験をした（外観は図1cの前方のアンテナ）。残念なことに、本格的な試験に入る前に、送信信号が停止してしまい、2008年1月の走行運用は充分には実施できなかった。今後停止原因を解明した上で再試験の必要がある。

## 6. ま と め

ここに示してきた通り、南極観測における氷床探査では、レーダーを重要な観測機器としてとらえ整備と運用を進めてきた。開発と使用の状況は確実に進歩を続けている。研究成果やデータも着実に積み重ねており、今後さらなる展開を期することができる状況となっている。一方、「陸30」や「陸434」のように今後問題解決を要する重要なレーダーもある。将来の観測計画の中でこれらはレーダーの真価を発揮させていかなければならない。氷床研究の視点からは、基盤岩近傍の電波無反射帯を含む大深部の検知や、電波の広帯域を使用した高分解能の内部層検知等も将来の課題としては重要である。また、高速・高効率のデータ収録系の研究も将来の研究展開には大きく資すると信じる。氷床研究における研究上のターゲットや必要性と、上記のレーダー技術の両面を常に見据えつつ研究が進められるべきものとする。本稿による情報整理が、将来への検討に向けての一助になれば幸甚である。

## 謝 辞

氷床探査レーダーの運用や開発については、筆者が関わった1990年代以降多くの方々からのご指導やご協力をいただいていた。前晋爾先生には氷の高周波誘電特性の研究に際し多くのご指導をいただいていた。氷床レーダー研究の先達としては、西尾文彦先生（現在、千葉大学環境リモートセンシングセンター教授）、浦塚清峰氏、前野英生氏ら情報通信機構の方々にはこれまで多くのご助言や議論をいただいていた。松岡健一氏（ワシントン大学）には日頃研究上の多くの議論をいただいている。本稿に述べてきた氷床探査レーダーの開発と使用は、これらの方々先達としての労やご助言や議論が大きく寄与している。ここに深く感謝申し上げたい。

## 文 献

- Bogorodsky, V.V., Bentley, C.R. and Gudmandsen, P.E. (1985): Radioglaciology. Dordrecht, D. Reidel Pub., 254 p.
- 藤田秀二 (2000): 大陸氷と惑星氷のレーダーサウンディング—氷の高周波誘電物性からみた現状と将来展望—。雪氷, **62**, 49-60.
- Fujita, S. and Mae, S. (1994): Causes and nature of ice-sheet radio-echo internal reflections estimated from the dielectric properties of ice. *Ann. Glaciol.*, **20**, 80-86.
- Fujita, S., Maeno, H., Uratsuka, S., Furukawa, T., Mae, S., Fujii, Y. and Watanabe, O. (1999): Nature of radio-echo layering in the Antarctic ice sheet detected by a two-frequency experiment. *J. Geophys. Res.*, **104** (B6), 13013-13024.
- Fujita, S., Matsuoka, T., Ishida, T., Matsuoka, K. and Mae, S. (2000): A summary of the complex dielectric permittivity of ice in the megahertz range and its applications for radar sounding of polar ice sheets. *Physics of Ice Core Records*, ed. by T. Hondoh. Sapporo, Hokkaido University Press, 185-212.
- Fujita, S., Maeno, H., Furukawa, T. and Matsuoka, K. (2002): Scattering of VHF radio waves from within the top 700 m of the Antarctic ice sheet and its relation to the depositional environment: a case-study along the Syowa—Mizuho—Dome F traverse. *Ann. Glaciol.*, **34**, 157-164.
- Fujita, S., Matsuoka, K., Maeno, H. and Furukawa, T. (2003): Scattering of VHF radio waves from within an ice sheet containing the vertical-girdle-type ice fabric and anisotropic reflection boundaries. *Ann. Glaciol.*, **37**, 305-316.
- Fujita, S., Maeno, H. and Matsuoka, K. (2006): Radio-wave depolarization and scattering within ice sheets: a matrix-based model to link radar and ice-core measurements and its application. *J. Glaciol.*, **52**, 407-424.
- Lythe, M.B., Vaughan, D.G. and the BEDMAP Consortium. (2001): BEDMAP: A new ice thickness and subglacial topographic model of Antarctica. *J. Geophys. Res.*, **106** (B6), 11335-11351.
- Maeno, H., Kamiyama, K., Furukawa, T., Watanabe, O., Naruse, R., Okamoto, K., Sultz, T. and Uratsuka, S. (1994): Using a mobile radio echo sounder to measure bedrock topography in East Queen Maud Land, Antarctica. *Proc. NIPR Symp. Polar Meteorol. Glaciol.*, **8**, 149-160.
- Maeno, H., Fujita, S., Kamiyama, K., Motoyama, H., Furukawa, T. and Uratsuka, S. (1995): Relation between surface ice flow and anisotropic internal radio-echoes in the east Queen Maud Land ice sheet, Antarctica. *Proc. NIPR Symp. Polar Meteorol. Glaciol.*, **9**, 76-86.
- Maeno, H., Uratsuka, S., Okamoto, K. and Watanabe, O. (1996): Subsurface survey of the Antarctic ice sheet using a mobile radio-echo sounder. *J. Commun. Res. Lab.*, **43** (2), 139-149.
- 前野英夫・浦塚清峰・神山孝吉・古川晶雄・渡邊興亜 (1997): アイスレーダによる白瀬水河流域の氷床基盤と内部構造の観測。雪氷, **59**, 331-339.
- Matsuoka, K., Maeno, H., Uratsuka, S., Fujita, S., Furukawa, T. and Watanabe, O. (2002): A ground-based, multi-frequency ice-penetrating radar system. *Ann. Glaciol.*, **34**, 171-176.
- Matsuoka, K., Furukawa, T., Fujita, S., Maeno, H., Uratsuka, S., Naruse, R. and Watanabe, O. (2003):

- Crystalorientation fabrics within the Antarctic ice sheet revealed by a multipolarization plane and dual-frequency radar survey. *J. Geophys. Res.*, **108** (B10), doi: 10.1029/2003JB002425.
- Matsuoka, K., Uratsuka, S., Fujita, S. and Nishio, F. (2004): Ice-flow-induced scattering zone within the Antarctic ice sheet revealed by high-frequency airborne radar. *J. Glaciol.*, **50**, 382–388.
- Robin, G.de Q., Drewry, D.J., and Meldrum, D.T. (1977): International studies of ice sheet and bedrock, *Philos. Trans. R. Soc. Lond., Ser. B*, **279**, 185–196.
- Uratsuka, S., Nishio, F. and Mae, S. (1996): Internal and basal ice changes near the grounding line derived from radio-echo sounding. *J. Glaciol.*, **42**, 103–109.
- Uratsuka, S., Maeno, H., Sultz, T. and Fisher, D.A. (2000): Development and field experiment of L-band high-resolution ice-radar. *IEICE T. Commun.*, **E83-B**, 1969–1977.