

携帯型低周波アイスレーダの構造と仕様

松岡健一、齋藤良二

1. はじめに

アイスレーダは、氷河氷床の基盤地形や内部の探査に 1960 年代後半から、広く用いられてきた。極域においては、大型のレーダを航空機や雪上車に搭載して広領域で精密な探査が既に数多く行われている。一方、航空機や車両による支援が難しく観測手段が限定される山岳氷河や小規模な氷帽においては、もっぱら人力だけに頼った観測が現在も主流である。そのような場合、携帯性に優れ、短時間で広範囲を効率よく探査可能な計測器が不可欠である。また、低温、降水（雪）といった観測に不利な環境下では、観測者の利便性に配慮した使いやすい装置であることも重要となる。特に、人的資源が限られ必ずしもリモートセンシングを専門としない者が観測を担当せざるを得ない現状を鑑みれば、オシロスコープやパソコンといった汎用品の組み合わせではなく、限られた操作で観測が可能な所謂 **built-in-one** な装置が強く求められている。

北海道大学低温科学研究所氷河グループでは、株式会社ウオールナット（立川市）と共同で、山岳氷河等でも容易に運用可能な携帯型のアイスレーダを開発した。本稿では、今後のこのレーダの使用と更なる改良に資するために、このレーダの構造と仕様を示す。本装置は既に多様な氷河で用いられ、寒冷下や水を大量に含む氷河でも良好に動作している（本報告書の別稿参照）。

2. 携帯型低周波アイスレーダ

開発した携帯型低周波レーダは、インパルスレーダの一種である。インパルスレーダの場合、送信機で生成されるパルスの時間幅は数 100 ナノ秒以下であり広範囲な周波数成分を含むのに対し、一般にアンテナの帯域は狭く、アンテナは狭帯域フィルタとして作用する。結果的に、実際に送信される電波は、送信機で生成された鋭い単一のパルスではなく、リングングと呼ばれる周期的なノイズが重畳した複雑な波形となる（浦塚、1999）。一般に波形の評価は困難であり、近年になってようやくエコー強度の定量的な評価がされつつある段階にある（Gades, et al., 2000; Winebrenner et al., 2003）。一方、インパルスレーダは、パルスレーダ等に比べ装置の消費電力が小さく小型にできるという利点を持っている。そのため、設営的な制約の強い山岳氷河等での氷厚測定に多用されてきた。

氷河の氷厚探査を主目的とした場合には、周波数が 1~10 MHz 程度（氷中の波長は 5MHz で 30m 程度）の電波が用いられることが多い。これは、低周波ほどアンテナの利得が相対的に増大すること（例えば Ulaby et al., 1981）、低周波ほど波長が長く氷河中の水による散乱の影響を受けにくいこと（Watts and England, 1976）、が理由として

あげられる。一方、最近では、周波数数十 MHz から数百 MHz 程度の地中探査レーダ (GPR) を、水の影響が比較的少ない氷河や季節に用いることにより、高い水平分解能で基盤地形や氷河内部の水文環境を探査している (例えば Moore et al., 1999)。我々は、様々な技術的諸問題や運用条件を検討した上で、周波数 5MHz のインパルスレーダを開発することとした。なお、より高い周波数のレーダの開発も検討したが、新たな装置を開発することなく、GPR を運用する方が適切であると判断した。

2-1 概要

新たに開発したレーダは、コントローラ、受信機、送信機の 3 つの主な装置から構成される (図 1、図 2、表 1)。いずれの装置も、簡易防水仕様であり、通常想定される降雪雨下や濡れた雪氷面での使用が可能となっている。コントローラは、人が背負ったり前に抱える形で使用することを想定している。送受信機は、雪面に置いて引張ることを想定しており、震動や衝撃に配慮して、出来る限り頑丈なシールド装置とした。細かなケーブル類とバッテリーも含めた総重量は、12.5 kg である。

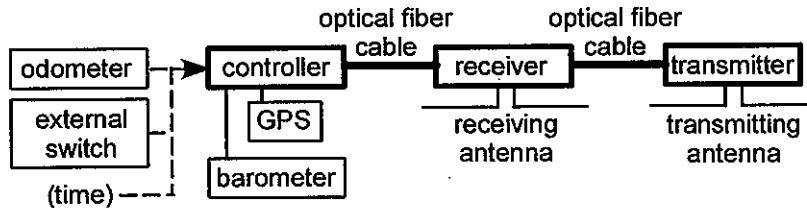
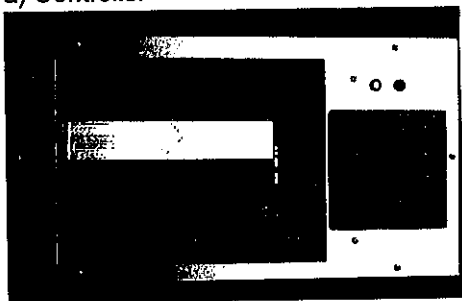


図 1 : 携帯型低周波アイスレーダの概要。コントローラ、受信機、送信機にはそれぞれ専用のバッテリーで、ハンドヘルド GPS 受信機は乾電池で、気圧計はコントローラから供給された電力で駆動している。測定は、コントローラで指定した時間・距離毎に、また任意のタイミングで可能である。距離測定のためのオドメータと外部スイッチもコントローラに接続される (取り外し可能)。コントローラ、受信機、送信機は光ファイバケーブルで接続されている。送受信機間は移動観測用の 30m ケーブルと定点観測用の 100m ケーブルが使用できる。コントローラ、受信機間のケーブル長は任意である (現在は 15m 長)。アンテナは送受信機に直結される。

表 1 : 携帯型低周波レーダを構成する主要装置の大きさ、重量と消費電力。ディスプレイのバックライトを消灯した場合のコントローラの消費電力をカッコ内に示した。

Item	Dimensions (cm) 縦、横、高さ (厚み)	Weight (kg)	Power consumption at 12 V supply (A)
Controller	23 x 37 x 10	4.2	1.15 (0.81)
Receiver	15 x 22 x 11	1.8	0.52
Pulser	10 x 14 x 8	0.7	0.29

a) Controller



b) Controller, top view



c) Transmitter and receiver

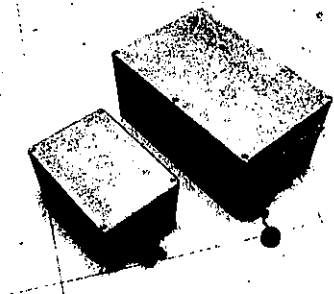


図 2 : 装置外観。(a)コントローラのディスプレイとキーボード部分。画面の上半分は Ascope、下半分は Zscope (90 波形を表示している)。画面下と右袖部分に、各種入力に対応した選択肢の表示と、時刻・動作状況の表示がされる。キーボード上のランプは電源ランプ (緑、左) と電波発信中に点灯するランプ (赤、右)。(b)コネクタを含む斜め上からみたコントローラ。接続されているのは電源ケーブル。光コネクタが手前の 2 つ (銀色部分)、それ以外のコネクタは、誤接続しないように、全てコネクタ形状が変えてある。(c)送信機 (左) および受信機 (右)。送信機はアンテナへの接続端子を手前に、受信機は電源コネクタと光コネクタを手前にして配置してある。

2-2 コントローラ

コントローラは、従来のアイスレーダのオシロスコープとパソコンに相当する機能を有しており、内部回路には数世代前のパソコン部品が主として用いられている（例えばインテル 386CPU）。輝度の高いカラーディスプレイと数値キーボード、各種周辺機器との接続コネクタ（筐体側面）、取り外し可能な記憶媒体等が、防水性と利便性を考慮して配置されている（図 2 a, b）。

全ての観測条件は、コントローラで設定する（表 2）。画面には設定可能な条件が表示されており、矢印キーでメニューを選択することにより設定できる。いずれも選択肢が限られており、操作の習得は容易である。なお、1 データの取得に要する時間は、表 2 に示した選択肢によって変わるが、平均化回数 256 回で観測時間幅を 2.4 μ s とすると、約 30 秒である。

表 2：コントローラで設定する観測条件。

項目	選択肢と備考
コントローラの内部時計 および時差	データファイルの管理に用いられる
観測する時間幅の設定 ¹	2.4 μ s, 4.8 μ s or 7.2 μ s (氷厚に換算して約 200 m, 400 m, 600 m)
記録する 1 データに対し、生 データを平均化する回数	0, 2, 4, 8, 16, 32, 64, 128, 256
観測開始のトリガー種類設定	時間、距離、外部ボタン、キーボード ²
観測の時間間隔	1 秒単位
観測の距離間隔	1 m 単位
オドメータの仕様	1 m 当たりのパルス数
波形の拡大表示 ³	時間軸に 2 段階、強度軸に 6 段階

1：観測時間幅に関係なく 1024 点のデータが取得される。従って、サンプリング周波数は可変である。

2：指定された回数平均した 1 波形を得て表示する。ただし記録はしない。すなわち、測定条件やアンテナ接続状態等の試験用のトリガーである。

3：画面表示を変更するだけであり、記録する波形は変わらない。

観測の開始、終了もコントローラのキーで行う。観測実施中の個々の観測タイミングは、時間、距離間隔で指定できる。また、外部スイッチを押すことにより、任意のタイミングで測定を行うことも可能であるし、時間（または距離）間隔をゼロとすれば連続測定できる。観測中は、赤ランプの点灯消灯で電波発信中か否かを示し、より詳細な状態（レーダ動作、GPS データ取り込み、気圧計データ取り込み）は画面に表示する。またレーダデータと測定気圧も画面に表示される（図 2a）。

レーダデータは2種類の表示が行われる。一つは、受信波形の時間変化を示すもので、平均化された1データを表示する（いわゆる Ascope）。エコーが弱い場合には振幅軸と時間軸を独立に拡大して、詳細な波形を観察することも可能である。もう一つの表示形式は、Ascope を時間順に並べて氷河の断面図を構成したものである（いわゆる Zscope）。カラー表示により、どれぐらいの強度のエコーがどの深度から戻ってきているのかを知ることができる。Zscope は最大で 150 波形分を表示可能である。150 波形を超えると、既に観測した 50 波形に 100 波形ずつ付け加えていく表示を、150 波形ごとに繰り返す。両者により、ケーブルの破断やバッテリーの有無、また基盤地形の連続性等を確認しながら観測を行うことができる。

図 1 に示したように、トリガー供給のオドメータと外部スイッチ以外にも、コントローラには様々な周辺機器が接続される。まず、受信機とは光ファイバで接続されている。気圧計（Vaisala 社製、デジタル気圧計 PTB210、50～1,100 hPa、±0.2 hPa）からは 1 秒毎に気圧が送られている。GPS 受信機からは世界海事機構が定め多くのハンディ GPS 受信機で使われている NMEA 型式で 2 秒に 1 回データが送られている。現在用いている GPS 受信機は EMPEX 社の FG-543 であり、アンテナと GPS 本体を分離することにより、簡単に GPS の受信環境を整えることができる。

コントローラは観測時のその場観察だけでなく、データの収納されたディレクトリを指定することにより、既に取得したデータをまとめて表示する機能も搭載している。これにより、パソコン等を観測現場に持ち込むことなく、観測後の簡単なデータ確認等も行うことができる。

2-3 受信機

受信機の機能は、コントローラから供給された観測条件に基づき、送信機に電波発信のタイミングを与え、波形をデジタル化して平均化し、平均済みデータをコントローラに送ることである。従って、実際の波形処理の大部分は受信機で行われており、コントローラは受け取った波形を表示し記憶する機能のみを分担している。

従来のアイスレーダの多くは、送信機から空気中を伝播して直接受信機に到達する波 (airwave) の到達時刻と送受信機間の距離から、電波発信時刻を推定していた。本システムでは、電波発信とデータ取り込みとを回路遅延を考慮して同期させており、従来よりも時間軸の信頼性に優れている。具体的な動作過程は次の通りである。

まず、送信機に電波送信のタイミングを与える。次に、このタイミングと同期して受信波形（電圧値）を取り込む。受信波形のサンプリングは、観測窓の長さ（表 2）に関係なく、1024 点で行う。1つの送信波に対して取得できる波形情報は 1024 点の時点のうちただ一つである。そのため、1024 回電波を送信しタイミングを順にずらして取得した電圧値を再構成して初めて、1つの波形を得ることができる（sequential sampling）。機器の消費電力を考えると（表 1 参照）、電波の送信にではなく、デジタルを含む波形処理回路で電力を使っている。そのため、超高速サンプリングやランダムサンプリングといった他の手法に比べ、より省電力でより波形再現性が高いという理由で、このサンプリング方法を採用した。電圧値は 12 bit（4096 階調）で線形にデジタル化されており、1 階調に対応する電圧値は約 0.5 mV である。なお、波形を平均化する場合は、まず指定された個数の完全な波形を sequential sampling により得た後、平均化する。

2-4 送信機

氷河観測用インパルスレーダ送信機は、コンデンサに蓄えた電荷を放電することにより送信パルスを形成している。電荷の充電・放電のスイッチに、従来はトランジスタが多用されてきた（例えば、Watts and Wright, 1981）。しかし、スイッチング回路にトランジスタを用いると、放電電圧を一定に保つことが一般に難しく、結果的に送信電力が時々刻々と変化してしまう。そのため、受信強度の定量解析は困難となる。また、送信出力を高めるために、耐電圧の低いトランジスタを複数積み上げられることも多い（Narod and Clarke, 1994）。この方法の場合、安定動作時は良好に動作するものの、一端少しでも不安定な状況になった場合は積み木が崩れるように全てのトランジスタが焼損することが予想されるし、部品点数も多くなる。

そのため、本装置には、高速 FET 素子をスイッチに採用した（図 3）。この回路は、超音波のパルス発生には従来から用いられており、近年の素子の信頼性向上と、部品点数の少なさから、長期間安定した動作が期待できる回路である。パルス回路の出力を図 4 に示す。パルスの振幅は 990V で、平均化前生波形の振幅の時間変動は $\pm 2V$ 以下である。したがって、アンテナ特性が一定とすると、送信電力の時間変動は 0.4% 以下となる。なお、この送信機は中心周波数（レーダの周波数）5MHz での運用に最適化されている。

通常の観測時に用いる受信機からのトリガー供給に加え、装置の試験目的で、内部に連続電波発信用のスイッチを設けてある。出力電圧をオシロスコープでモニターすることが第一の目的であるが、コントローラや受信機が動作不良となったとき、オシロスコープに受信アンテナを直結することにより簡易的な測定もできるようになっている。

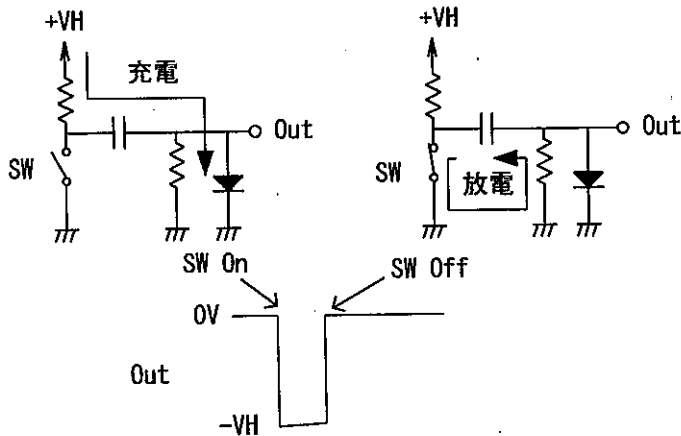


図 3：送信機パルス発生回路。FET 素子がスイッチ(SW)として動作し、定常は off 状態でコンデンサに電荷が蓄えられる。スイッチが入るとコンデンサに蓄えられた電荷が放電され、負のパルス信号が出力される。

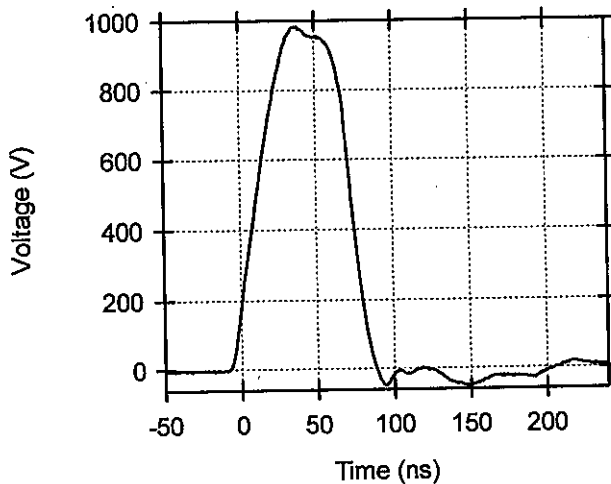


図 4：送信機の実出力波形（平均化回数：16）。パルス振幅は 990V、立ち上がり時間は 28 ns、立ち下がり時間は 20 ns。

2-5 バッテリー

低温下での安定した装置の使用には、信頼性の高いバッテリーが不可欠である。また、バッテリーが装置全体の重量の大部分を占めるため、軽量で効率の高いバッテリーは軽量化の重要な要素である。自動車用等に用いられる鉛シールドバッテリーは、入手が容易ではあるが、バッテリー自体の性能は低い。そのため、電圧の温度特性、放電時の時間特性や、実際に必要とする時間率を考慮して検討した結果、水素リチウ

ムバッテリーが本装置に最適であると結論した。様々な市販品を検討し、放送業務用ビデオカメラ向けのバッテリーを制作している Paco 社（本社東京、<http://www.pacobattery.com>）の既存品（HP-30A）をベースに、Paco 社にて改良して頂いた。水素リチウムバッテリーの単セル当たりの出力は 1.2 V であるが、低温下での電圧低下にも配慮して、11 セルを組み合わせた。過放電の防止回路は内蔵されている。また、装置系は 12V 動作を基準としているが、バッテリー満充電時の高電圧に対応できるように設計してある。重量は 1 個当たり 880 g である。

充電には交流電源と専用充電器が必要である。しかし、1 組（3 本）のバッテリーにより寒冷下でも 3 時間程度の運用時間が確保できるため、数組のバッテリーを持参すれば交流電源が不要となることも多いであろう。

2-6 アンテナ、ケーブル類

送受信アンテナは、従来から氷河観測に多用されている抵抗装架型半波長ダイポールアンテナを用いた（表 3）。本装置独自の改良点はない。電線は、数製品を比較し、シリコンゴム被覆されたものを選んだ。アンテナには、この電線と 0.25W 金属皮膜抵抗を用いて制作した。

表 3 : 5MHz アンテナの抵抗装架。アンテナ長は 10m。Watts and England (1981) 式(1)において、resistive loading constant を 310 とした理論値をもとに、市販されている抵抗を用いた。

給電点からの距離 (m)	抵抗値 (オウム)	給電点からの距離 (m)	抵抗値 (オウム)
0.5	33	5.5	68
1.5	33	6.5	82
2.5	39	7.5	120
3.5	47	8.5	220
4.5	56	9.5	620

光ファイバ芯線そのものは低温下でも充分曲げ伸ばしが可能であるが、被覆された加工品の状態では、曲げ伸ばしが自由な製品は著しく限られる。これは、光ケーブルは頻りに敷設状態を変えないことから、今回のような用途向けの需要が無いことに起因していると思われる。10 社程度から様々なサンプルを取り寄せ試験した結果、沖電線 FC ケーブルシリーズを選定した。コントローラと受信機間は双方向の通信が行われるため 2 芯のものを、送受信機間は送信機への 1 方向通信のため 1 芯のものを、用いた。

2-7 各装置類に共通する工夫点

本装置の開発に当たり特に留意したのは、信頼性である。第一に、装置全体は、部品選定の段階から、出来るだけ耐低温性の高いものを選定するよう努力した。結果的に、 -10°C と -25°C での低温試験においても、装置全体の動作は勿論のこと、ディスプレイの視認性、ケーブル取り扱いが容易さ、バッテリーの時間特性も含め、充分に実用的な性能を確認した。

第二に、うっかりミスを排除し使い勝手の良い設計である。例えば、コントローラには各種機器が接続されるが、全て異なるコネクタを用いることにより、誤接続は生じ得ない。また、光接続も含め全てのコネクタはネジで締め込む方式であり、簡単には抜け落ちないようにしている。入力用のキーボードも大型のものを採用し、手袋をはめたままでの運用が可能である。

3 レーダデータの仕様

取得したデータの保存は以下のように行われる。まず、測定開始時にデータを保存するディレクトリ名を数字4桁の組み合わせにより指定する。既存のディレクトリ名と重複しない最小のディレクトリ名がデフォルトで与えられるが、任意に指定可能である。このディレクトリ内に、キーボードの測定開始ボタンを押してから終了ボタンを押すまでの一連の情報が収納される。(平均化済み) レーダデータ1個に対応して1ファイル(拡張子: ary) が作成される。ファイル名は1から始まる通し番号である。データファイル以外に、観測の設定条件(表2)を収納したテキストファイル(ファイル名: PAR) と、観測終了時作成されるデータ数(データファイル数)を収納したテキストファイル(ファイル名: TRACENO) が、そのディレクトリに作成される。なお、PARファイルの中身が欠落するバグがあるため(現段階では原因不明)、観測開始時(PAR)と終了時(PAR2)にそれぞれ1つつファイルを作成するようにしている。今までのところ、2ファイルが共に欠落する事態は経験していない。

レーダデータのファイルフォーマットを表4に示す。ヘッダ部には、観測の日時や諸条件が記録される。GPS情報は、GPS受信機から送られた情報がそのままアスキーコードで記入されている。GPSによる位置測定精度を高めるための平均化等の処理は行っていない。このデータには、時刻、位置、位置精度(HDOP)等が含まれている。気圧データは、平均化済み1レーダデータを取得する時間内に得られた気圧データを平均して記録している。

なお、データの解析用の専用ソフトウェアは用意していない。例えば、Matlab, Igor, IDLと言ったソフトウェアであれば高度な解析が可能であろう。またGPRデータの解析用に使われているReflexw(山本他、本報告書参照)にも読み込み可能である。

表 4：データファイルのフォーマット。ヘッダ部分 256 バイトと、波形データ 2048 バイトから構成される。*はアスキーコードでの記録を示す。アスキーコード以外は 2 の補数で表現され、波形データは下位 12 ビットが有効である。

項目	バイト数	オフセット
トレース番号	2	0
年	2	2
月	1	4
日	1	5
時	1	6
分	1	7
秒	1	8
1/100 秒	1	9
データ観測窓幅	2	10
送受信機間ケーブル長	2	12
平均化回数	2	14
トリガー種別	2	16
オドメータ距離分解能	2	18
オドメータ距離間隔	2	20
トリガー時間間隔	2	22
空きエリア	8	24
区切り文字カンマ	1*	32
測定開始時 GPS 情報	100*	33
区切り文字カンマ	1*	133
測定終了時 GPS 情報	100*	134
区切り文字カンマ	1*	234
大気圧	16*	235
空きエリア	5	251
波形データ	2 バイト×1024 点	256

4. 最後に

本装置は、別項の報告で述べられているように、温暖氷河や寒冷氷河において運用され、温暖氷河で 300m 程度の氷厚を取得している。また、更なる改良の要望はあるものの、厳しい環境において良好な運用実績を示しており、当初の目的は達成されたと考えている。

謝辞

本装置の開発には、北海道大学工学部（当時）の前晋爾教授、通信総合研究所の浦塚清峰博士、前野英生博士、低温科学研究所の大井正行氏にご参加頂き始まった低温研共同研究費による先立つ準備期間があつてこそ、実現したものである。ここに感謝の意を記す。

参考文献

- Gades, A. M., C. F. Raymond, H. Conway and R. W. Jacobel. 2000. Bed properties of Siple Dome and adjacent ice streams, West Antarctica, inferred from radio-echo sounding measurements. *Journal of Glaciology*, **46** (152), 88-94.
- Ulaby, F.T., R.K. Moore, and A.K. Fung. 1981. *Microwave Remote Sensing: active and passive*, Artech House, MA.
- Moore, J. C., A. Palli, F. Ludwig, H. Blatter, J. Jania, B. Gadek, P. Glowacki, D. Mochnacki and E. Isaksson. 1999. High-resolution hydrothermal structure of Hansbreen, Spitsbergen, mapped by ground-penetrating radar. *Journal of Glaciology*, **45** (151), 524-532.
- Narod, B. B. and G. K. C. Clarke. 1994. Miniature high-power impulse transmitter for radio-echo sounding. *Journal of Glaciology*, **140** (134), 190-194.
- Winebrenner, D., B. Smith, G. Catania, H. B. Conway and C. F. Raymond. 2003. Radio-frequency attenuation beneath Siple Dome West Antarctica from wide-angle and profiling radar observations. *Annals of Glaciology*, **37**.
- Watts, R. D. and A. W. England. 1976. Radio-echo sounding of temperate glaciers: ice properties and sounder design criteria. *Journal of Glaciology*, **17** (75), 39-48.
- Watts, R. D. and D. L. Wright. 1981. Systems for measuring thickness of temperature and polar ice from the ground or from the air. *Journal of Glaciology*, **27** (97), 459-469.
- 浦塚清峰, 1999. 雪氷圏のリモートセンシング (第7章)、ウェーブサミット講座 地球環境計測、オーム社。

*この原稿は、現在国際誌に投稿中の論文に加筆し日本語で記したものである。