

## 報 文

# 超音波積雪深計の開発について

## —地域ニーズによる共同研究—

青森職業訓練短期大学校 工 藤 光 昭

Development of the snow accumulator by ultrasonic.

Mitsuaki Kudo

**要 約** 昭和60年8月青森地域テクノポリス開発機構が承認され、地域産業振興を促す気運の中で昭和61年1月青森県情報サービス産業懇話会が設立された。

懇話会のテーマの1つとして“雪情報システム”が取り上げられ、この地域問題を産学官で取り組むこととなった。

既存積雪深計は、データ転送速度が遅く、大超音波出力(3~10 [W])、しかも高価である。

この報告は、地域企業との共同研究で開発することになったオリジナルの超音波積雪深計の研究に拘る報告である。

新しい要素技術と既存の要素技術の徹底した活用から開発できた超音波積雪深計は、測定回数毎秒6回・測定精度±2 [cm]・測定環境-20~+40 [°C]という仕様であり、既存積雪深計と同等仕様を超音波出力250 [mW]で実現できた。

この報告の中では、主要な技術の基本原則と概要を述べている。

結果、[安価で、簡単な操作で、データ集計処理機能のある任意の位置から遠隔地の積雪深を測定できる]という積雪深計が開発でき、積雪深情報から降雪量を求め除雪車・雪搬出用トラック等の手配までコンピュータで系統的に運用できるようになった。

## I はじめに

積雪地帯において積雪深情報を得ることは、道路の保全のため欠くことのできない作業であるが、多くの労苦と費用をとまなう。

従来、除排雪の手順は、深夜、自動車で巡回測定し積雪深情報を得て、除廃雪本部に戻り除廃雪配車計画をたて、一部業者に発注するという手続きをしてきている。

自動車で巡回現地測定ということの積雪地域で抱える問題を解決するためには、無人観測・電話回線データ転送システムが必要である。

青森地域テクノポリス開発機構が、昭和60年8月に承認され、地域産業振興を促す気運の中で昭和61年1月青森県情報サービス産業懇話会が設立された。その会合のテーマの一つが、無人で雪の情報を得ることである。

会合参加の企業は、昭和61年3月既存の積雪深計(海上電機製)を青森市役所前に設置し予備実験を開始した。

その後、地域から[既存システムの精度を維持し、安価で、地域に合った独自のシステムを構築できないか]との要求があり、雪情報システムという計画が地域企業から提案された。

雪情報システムとは、青森市を6区画に分け積雪深情報収集から除雪車・雪搬出用トラック等の手配までコンピュータで系統的に運用するものである。

この基本計画は、地域企業(株)NTTおよび(株)ビジネスサービス)を中心に討議を進め、その研究分担の中から筆者はシステムの端末となる積雪深計を開発することとなった。

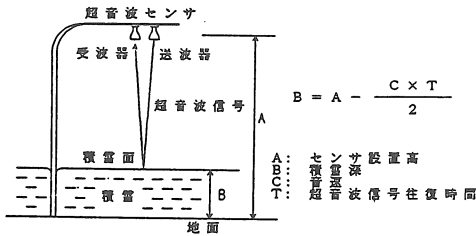
昭和61年7月関係企業と共同研究の計画を立案し、具体的研究開発に着手した。

この開発の展開は、雪の性質を調べることから始まり、目的とする信号をとらえる増幅器を試作すること、適性センサを探し出すことと進めていった。

結果、システム端末としての仕様を満たす超音波積雪

深計が開発できたので報告する。

## II 雪の超音波反射特性



図一 超音波積雪深測定原理

図一は、超音波積雪深計の測定原理である。積雪の量(積雪深)は、地面から超音波センサーまでの高さをあらかじめ求めて置き、その値から超音波伝播距離の1/2(片道分)を差し引いた量である。

この積雪深計は、超音波を積雪面に送波し、その反射波をもって積雪深を求めるので雪の超音波反射率は重要である。

音圧反射率  $R_p$  は、次式で示される。

$$R_p = \frac{Z_2 \cos \theta_i - Z_1 \cos \theta_t}{Z_2 \cos \theta_i + Z_1 \cos \theta_t} \quad [1]$$

ここで、 $Z_1$  : 空気の音響インピーダンス

$Z_2$  : 雪の音響インピーダンス

$\theta_i$  : 音圧入射角

$\theta_t$  : 音圧透過屈折角

音響インピーダンスは、 $\rho \cdot C$  で与えられる。 $\rho$  は媒質の密度、 $C$  は媒質の音波伝播速度である。

このことから、音圧反射率は、雪の密度が同じでも雪温が異なれば積雪中の音速も異なり変化する。

降雪の構造は、結晶といわれる幾何学的形状をしているが、積雪の構造は小さいランダムな氷の粒が連結したもので、つまり氷の骨組み状態になっている。<sup>(3)</sup>

雪の状態は気温・雪温・湿度等により時々刻々変化する。雪の密度が小さい程、積雪中の音速は速くなり(空気伝播速度に近くなり)音圧反射率を低下させる。また密度が同じでも積雪粒子が大きいと音速が速くなる。このように、雪の密度と音圧反射率(積雪中の音速)は、相関はあるものの一義的ではない。

雪の密度と積雪中音速は、測定報告例はあるものの地域によって雪質が異なる。そこで、青森職業訓練短期大学校構内の雪を対象に音圧反射率の測定実験を行った。実験方法は、積雪面と完全反射体とみなせるもの(軟鋼

板)の反射波音圧を測定し、その比から音圧反射率を求め、密度は一定体積の雪を溶かし水量から求めた。

表一 音圧反射率の測定結果

1987年2月測定					
気温 (°C)	雪温 (°C)	密度 (g/cm <sup>3</sup> )	反射率 (%)	音響インピーダンス (g/cm <sup>2</sup> s)	伝播速度 (m/s)
+1.0	0.0	0.33	58.3	162.0	507
+1.0	0.0	0.32	58.3	162.0	491
+1.0	0.0	0.22	25.0	71.1	323
+1.0	0.0	0.16	10.0	52.1	326
-4.0	-2.6	0.19	9.2	51.4	270
-4.0	-2.6	0.18	8.3	50.4	280
-4.0	-2.6	0.17	10.8	53.0	311
-4.0	-2.6	0.16	9.2	51.3	320

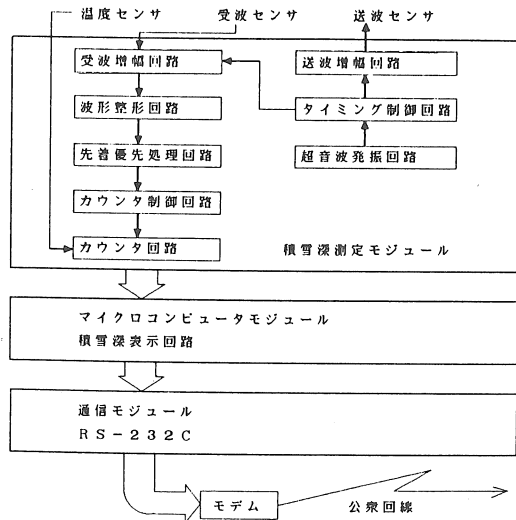
表一は、音圧反射率の測定結果である。

音響インピーダンス・積雪中の音速は、測定した音圧反射率・密度から[1]式を用い逆算した値である。空気の音響インピーダンスは、1気圧、0 [°C]での概数42.8 [g/cm<sup>2</sup>s]を用いた。<sup>(6)</sup>

測定対象の雪は、風で運ばれて小玉となった雪、何日も留まった雪である。

この測定結果から、超音波送受に関する部分は、音圧反射率が5~10 [%]で対応できるようにする必要がある。

## III 超音波積雪深計の構成



図二 超音波積雪深計の構成

図二は、開発した超音波積雪深計の構成である。それぞれのモジュールを説明する。

積雪深測定モジュールは、超音波パルスを送波し、積雪面での反射波を受波する。このモジュールの主たる役目は、超音波パルスを送波してから受波するまでの時間をカウントすることにある。

音波の伝播速度は、媒質、つまり気温により異なる。このことから、カウントパルスは、気温補正回路を持った発振器から出力する。

気温補正発振器は、アナログデバイス製 AD537S で構成している。この IC は、電圧/周波数コンバータであり、MIL 規格仕様である。さらに、温度に対応した電圧出力を有しているため容易に温度/周波数変換器を作ることができる。<sup>(4)</sup>

この気温補正発振器の精度は、 $-55 \sim +120$  [°C] の範囲で  $\pm 0.1$  [%] を保っている。

マイクロコンピュータモジュールは、伝播時間のカウントデータを取り込み、演算処理し積雪深データを作り出す。このデータは、順次積雪深データ領域に書き込み、同時に7セグメント LED で積雪深を表示する。LED は、現場補正・動作確認のため必要な機能である。蓄積された積雪深データは、500個毎に平均化処理し信頼できる転送用のデータとして確定する。

通信モジュールは、RS-232C 準拠の通信制御機能を持つもので、モデムを介して公衆電話回線で積雪深データを転送する。

このように、公衆電話回線を介在させることは、データの集計処理機能を持つ位置（基地局）で多地点の遠隔積雪深計（端末）を制御できることを意味する。

それぞれのモジュールは、別基板上で構成としている。

これは、開発期間の短縮と仕様変更柔軟に対処するために有効である。特に、ハード・ソフト両面のバグチェックのためには、効率的な開発手法である。

#### IV 受波増幅回路

超音波積雪深計の構成で重要なモジュールは、積雪深測定モジュールであり、主要なブロックは受波増幅回路である。

音波は、媒質を伝播していくにつれて減衰する。そこで、音波の空気伝播における単位距離あたりの最大減衰値概数を  $D_{max}$  とすると、次式で示される。なお、この場合の音波は平面波としてとらえている。

$$D_{max} = 0.028 \times \text{kHz} \quad [\text{dB}/\text{m}] \quad [2]$$

これは、H. O. Kneser の理論によるものであるが可聴周波数領域ばかりではなく超音波領域でも大略の値は類

似するとされている。<sup>(1)</sup>

ここで、40 [kHz] を与えると、単位距離あたり最大で 1.1 [dB] 減衰するものと考えることができる。

いま、センサの高さを 4 [m] と仮定すると、往復で 8 [m] の伝播距離を持つことになるので、減衰の最大値は、8.8 [dB] である。

雪面での反射率を 5 [%] と仮定すると 26 [dB]、センサの損失は送受合わせて 2~3 [dB]、このことから損失の総計は、約 38 [dB] を見込まなければならない。

以上から、受波増幅器の利得は、最低約 38 [dB] 必要とする。しかし、これは、パルスを送波して受波するまでの 8 [m] 伝播後に必要な利得である。

8 [m] の伝播時間は、約 23 [ms] であるからパルスを送波して 23 [ms] 後に必要な利得である。

このことは、時間の経過ともなって利得が変化する増幅器の必要とすることを意味する。

この要求を満たす増幅器が、経時2乗増幅器である。2乗とはいっても演算を目的としているのではないのでアナログ乗算器のような精度は必要ない。

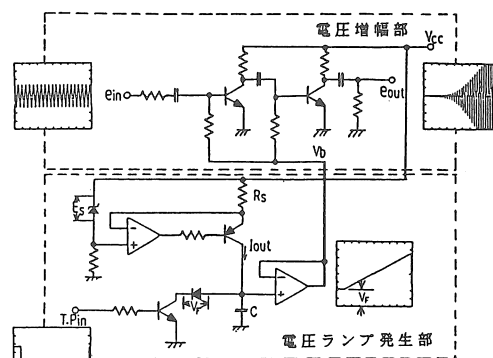


図-3 経時2乗増幅器の構成

図-3は、経時2乗増幅器の構成である。この機能は、遠いところからの反射波は伝播時間もかかり多く減衰しているため、その分増幅し、近いところからの反射波は伝播時間も短く減衰が少ないので少し増幅する。

これは、一般に STC (Sensitivity Time Control) と呼ばれる増幅器である。

##### 1. 基本原理

利得制御の原理を説明する。トランジスタの固定バイアス回路における電圧増幅率  $A_v$  は、次式で示される。

$$A_v \doteq \frac{h_{fe} \cdot R_c}{h_{ie}} \quad [3]$$

ここで、 $h_{fe}$  : 小信号電流増幅率  
 $h_{ie}$  : 入力インピーダンス  
 $R_c$  : コレクタ負荷抵抗

[3] 式は、 $h_{fe}$ 、 $h_{ie}$  が変化すれば  $A_v$  が変化することを示している。トランジスタの  $h$  定数- $I_c$  特性からコレクタ電流  $I_c$  を変えると  $h$  定数が変わる。したがって、 $I_c$  を変えることで  $A_v$  を制御できる。 $I_c$  は、ベース電流  $I_b$  で変化し、 $I_b$  は、ベース電圧  $V_b$  で制御できる。

このように、 $V_b$  で増幅率を自由に制御できる。原理的には、この回路を2段にすると増幅率が2乗となる。

## 2. 電圧ランプ発生部

電圧ランプ発生部は、OP アンプを用いた定電流回路で構成している。定電流回路の電流  $I_{out}$  は  $E_s/R_s$  で定まる。

この  $I_{out}$  は、C を充電し時間の経過と共に電圧が上昇する。電圧ランプ波は、C の電圧をボルテージホロアを介して出力する。走査の傾き  $\Delta v/\Delta t$  は、 $I_{out}/C$  で決まる。

一般に、シリコントランジスタの増幅作用は、ベース-エミッタ間電圧  $V_{be}$  が  $0.6[V]$  以下において機能しない。そこで、ダイオード D は、順方向電圧降下  $V_F$  を利用して、ランプ波の底上げのために用いている。

ランプ波の周期は、送波パルスと同期をとるためタイミングパルス TP を与えて制御している。

電圧ランプ波は、経時2乗増幅器の利得を経時制御する。

## V 超音波センサ

超音波センサは、開発または特注に応じてくれる企業が少なく、費用もかかる。そこで、市販されているものから選択した。

採用したものは、ムラタ製作所の MA40E1S/R というセラミック共振子を用いた防滴構造の超音波センサである。このセンサは、防滴・耐環境特性が使用目的と一致する。センサの主な仕様は、次に示す。<sup>(5)</sup>

公称周波数： 40 [kHz]  
 音 圧： 106 [dB]  
 静電容量： 2200 [pF]  
 絶縁抵抗： 100 [MΩ] 以上  
 温度特性：  $-30 \sim +80$  [°C] で

音圧変化-10 [dB] 以内

センサは、波長に比べて振動板の寸法を大きくすると、振動板の正面軸上に音波を平面波として集中させることができる。つまり、指向性が鋭くなる。<sup>(2)</sup>

指向性は、表現方法として-3dB 角 ( $\theta_{-3dB}$ ) という方法がある。<sup>(2)</sup>これは、同じ指向性をもつもので送受すると-3 [dB] を示す角度において、送波で3 [dB]、受波で3 [dB] の減衰があり、合計6 [dB] = 1/2となることを意味する。

-3dB 角 ( $\theta_{-3dB}$ ) は、次式で示される。<sup>(2)</sup>

$$\theta_{-3dB} = 29 \frac{\lambda}{D} \quad [^\circ] \quad [4]$$

ここで、 $\lambda$  : 波長

$D$  : 振動板の直径

選択したセンサの振動板の直径は、8.0 [mm] であり鋭い指向性は期待できない。

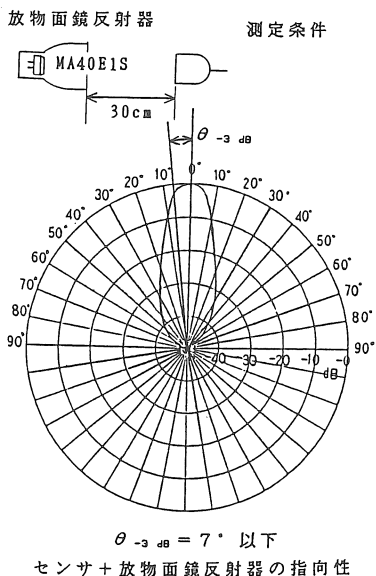
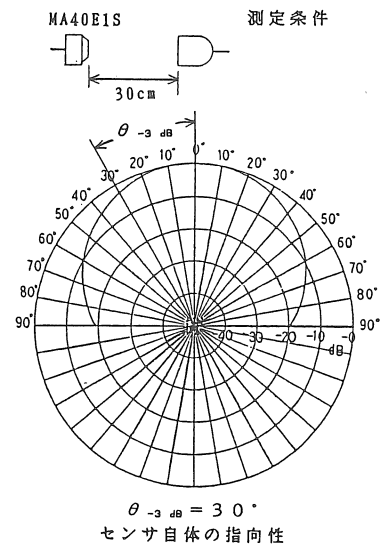


図-4 超音波センサの指向性

図-4は、センサの指向性を示す。振動板の寸法から、-3dB角を求めてみると30.8[°]となる。この角度は、センサの指向性を実測したものと、ほぼ一致している。これでは、積雪を測定するための範囲が広くエネルギーの効率が悪い。

指向性は、風の影響を考慮すると広く、雪の反射係数の低下を考慮すると鋭く高感度にと、相反する要求があるが、実験から5~6[°]程度が適当と判断される。

指向性の改善は、放物面鏡反射器を用いて解決した。この結果、センサの特性の改善は、指向性、音圧比共に5倍の効果をj得ている。

このことから、センサの高さを4[m]と仮定すると、雪面において積雪情報を得る範囲は、センサ直下の半径50[cm]の範囲となる。

## VI 動作試験

開発した超音波積雪深計の動作試験は、実際に使用される環境の中で繰り返してきた。

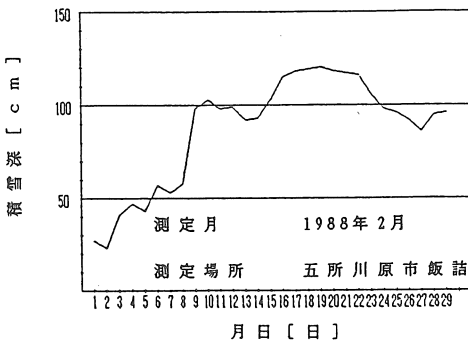


図-5 積雪深測定記録

図-5は、開発した超音波積雪深計による測定記録である。この記録は、モデムを介し1時間毎に記録したデータを時刻を定めて処理した1988年2月の測定結果である。

図-6は、超音波積雪深計の記録と雪尺による実測値の比較を示す。

このデータでは、±1[cm]の範囲で一致しており、既存の積雪深計と比較してみても、十分満足できる精度である。

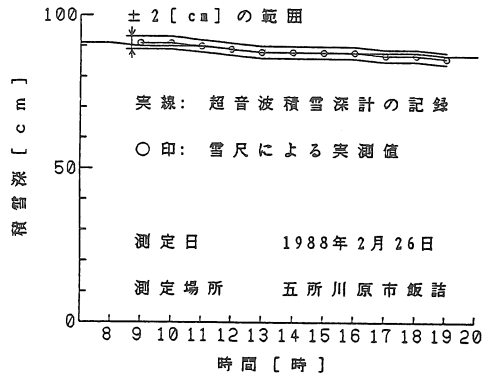


図-6 超音波積雪深計と雪尺の比較

## VII むすび

開発した超音波積雪深計の仕様を示す。

- 積雪深測定範囲： 0~3[m]
- センサ設置高： 4[m]
- 発振周波数： 40[kHz]
- 発振出力： 250[mW]
- 測定領域：センサ直下半径50[cm]以内
- 測定周期：毎秒6回(ソフトウェア処理含む)
- 測定精度： ±2[cm]
- 測定環境：-20~+40[°C]
- データ転送速度： 1200[bps]

積雪深測定が、250[mW]の発振出力(超音波出力)で実現できた。これは、既存積雪深計の1/40~1/10の発振出力であり、直接製品コストと結びつく。

結果、地域の要求を満足するような積雪深計は、できたが、気温の急激な変動があった場合追従が遅いという問題もあり、この問題を解決するためには、温度センサの小型化とセンサの周りの空気循環について研究を進めることが今後の課題である。

謝辞 この開発研究は、地域及び地域企業との協力体制の中で行われた。

積雪深計設置のために小学校の校庭を提供して下さった青森市、設置工事・公衆電話回線を使わせて頂いた(株)NTT、ソフトウェア開発・試料提供で共同研究計画者である(株)ビジネスサービス及びシステムイン弘前、数々の情報を提供して下さった青森県工業試験場岡部敏弘氏、青森職業訓練短期大学校森田永雄氏、種市隆三氏にあらためて心中より感謝申し上げます。

## 参考文献

- (1) 丹波 登 : [空気中の超音波による計測と制御], 計測と制御, 1964年7月号 P483~491
- (2) 丹波 登 : [超音波計測], (株)昭晃堂
- (3) 大垣 正勝・竹村 英夫: [積雪の音響特性] 電子通信学会技術研究報告, US86-55
- (4) [アナログデバイセズデータブック] DATA-ACQUISITION, アナログデバイセズ(株)昭和61年7月
- (5) 増田久喜・佐井行雄・星野幸男・増田 徹: [最新センサ規格表], CQ 出版(株)
- (6) 実吉純一・菊池喜充・能本乙彦: [超音波技術便覧] 新訂2版, 日刊工業新聞社
- (7) 工藤 光昭: [経時2乗増幅器の試作], 青森職業訓練短期大学校校内研究発表会予稿1986年