

ガンマ線散乱形積雪密度計の小形軽量化

松尾 実*

株式会社第二精工舎

松井 正夫**

長岡技術科学大学機械系

木村 忠志***

国立防災科学技術センター雪害実験研究所

Improvement of Gamma-ray Scattering Snow-density Meter

By

Minoru Matsuo

Dai-ni Seikosha, Kameido, Koto-ku, Tokyo 136

Masao Matsui

*The Technological University of Nagaoka,
Kamitomioka, Nagaoka, Niigata-ken 984-54*

And

Tadashi Kimura

*Institute of Snow and Ice Studies,
National Research Center for Disaster Prevention,
Suyoshi, Nagaoka, Niigata-ken, 940*

Abstract

Fundamental data were collected to improve the structure of the snow-density meter including the measuring system of the scattered gamma-rays. The results played an important role to miniature the meter. An effort was made mainly to determine the optimum incidence angle of gamma-rays against snow surface as 20 degrees by comparing the lead shelters with various slopes. Then, the total weight of improved meter turned out to be about 2.6 kg, and its measuring range in snow proved to be about 5 centimeters each both for the thickness and the depth.

* 元長岡技術科学大学機械系修士課程

** 制御システム講座

*** 第2研究室

1. 序 論

任意の積雪表面に斜め方向からガンマ線を照射し、積雪から散乱するガンマ線の強度を、市販のシンチレーションサーベイメータで測定する形式の積雪密度計の試作が、本論文の共著者の一人によってなされている(木村忠志, 1983)。この試作装置は、密度 0.05 g/cm^3 の新雪から氷までの種々の密度の測定において、示度の直線性は良好であったが、ガンマ線源として ^{137}Cs (662 KeV, 半減期 30 年) の $100 \mu\text{Ci}$ 密封線源を使用したため、重量約 6.3 kg の鉛シェルター(以下シェルターと略記)が必要であり、サーベイメータも含めた装置の全重量が約 10 kg に達し、野外での携帯と測定操作が困難であった。そこで、この試作装置の測定形式を変更することなく、シェルターの小形軽量化を実現するために、室内実験を行なった。

シェルターの形状寸法を決める因子として、ガンマ線のエネルギー、測定部分への照射角度、線源の形状寸法、ガンマ線検出器のエネルギー感度と形状寸法などが考えられる。これらの因子は、ガンマ線散乱形積雪密度計の試作例がきわめて少ない現状では、実験的に決定せざるを得ない。

本研究では、上記の諸因子のうち、ガンマ線のエネルギーと照射角度を変数として、シェルターの形状寸法を実験的に検討した。

積雪層内の密度分布の測定は、数百 cm^3 の測定試料について行なうのがふつうなので、ガンマ線の散乱領域の検出限度が、数百 cm^3 の程度になるような照射角度を検討した。積雪層内に照射され、検出器の方向に散乱するガンマ線の強度は、照射角度とビーム巾によって変化するはずである。一方、エネルギーの小さいガンマ線ほど、物体への透過力が弱いので、シェルターを小型化するためには、できるだけ小さなエネルギーのガンマ線を放出する核種の線源を利用する必要があるが、サーベイメータのカットエネルギーが 100 KeV であり、また、半減期が実用上数年以上は必要なところから、 ^{133}Ba (356 KeV, 半減期 7.2 年) を使用した。線源はコイン形の密封線源で、放射能は $100 \mu\text{Ci}$ であり、法令による使用規制を受けない。

2. 実験試料

実験試料として、密度 0.47 g/cm^3 の雪と、氷を準備した。雪試料は、市販の氷水削氷製造用のスライサーで水道水を削って作った削氷を、2 mm 目のふるいに通したのち、 $100 \text{ mm} \times 100 \text{ mm} \times 200 \text{ mm}$ の横長のアクリル樹脂板製容器に、タッピングと手によって一様に圧縮して詰め、 -6°C の低温室内におよそ 1 週間放置して焼結させたものを使用した。氷試料は、30 分間煮沸して脱気した水道水を、 -6°C の低温室内で凍結させて氷塊を作り、この氷塊から、雪

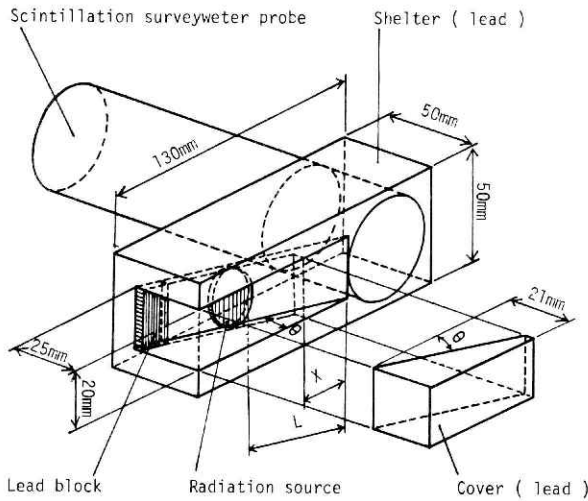


図1 シェルターの立体図
Fig. 1 Solid sketch of shelter

試料を納めたものと同じ材質寸法の容器にすき間なくはめこまれる寸法に、気泡の少ない部分を切りとって使用した、これらの試料を納めた容器には、上下にかぶせぶたをして、 -25°C の低温室内に保存し、測定時に上下のかぶせぶたを取りはずした。

3. 実験装置

図1に実験に使用したシェルターの構造を示す。全体は $50\text{mm} \times 50\text{mm} \times 100\text{mm}$ の角柱形で、一端にシンチレーションサーベイメータのプロープがはまる、直径 42mm の穴があり、この穴のふちから、角度 θ の斜面を底にもったみぞを図のように切り、このなかに線源が納まるようにした。線源は ^{133}Ba 、 $100\mu\text{Ci}$ の密封線源で、直径 25mm 、厚さ 4mm のジュラルミン製円板形ケースの中心部に、直径 10mm 、厚さ 0.5mm の放射性物質が封入されている。線源をみぞの底の適当な位置に、両面接着テープで固定したのち、図の右側に記入した形状のカバーをみぞにはめこみ、線源から放射されるガンマ線が、みぞの底とカバーで作られる、幅 25mm 、厚さ 4mm のスロットを通して検出器前方の空間に射出されるようにした。検出器と逆方向のスロットには、鉛のブロックをつめてガンマ線のリークを防いだ。このシェルターは、長手方向を水平に支持して測定する。図1で検出器が表面に出ている側面を、シェルターの前面と名付ける。

このシェルターは、角度 θ が 12° 、 20° 、 30° の3種類を準備した。図中のLは、検出器の外周から線源の外周までの、斜面に沿った最短距離で、これを照射距離と名付ける。また、同じくXは、検出器の外周からカバーの端までの前面に沿った長さで、これを開口長さとして名付

ける。開口長さは、カバーの寸法を変えて種々の長さに設定した。このシュルターと組みあ
わせたシンチレーションサーベイメータ（以下サーベイメータと略記）は、アロカ株式会社
製の TCS-121 形で、直径、長さとも 25 mm の NaI シンチレータにより、100 KeV 以上の
ガンマ線を検出する。検出したガンマ線の強度は、mR/h の単位で電流計に表示される。表
示のフル・スケールは、0.025, 0.05, 0.25, 0.5 および 2.5 の 5 段階に切り換えられる。統
計誤差は各フル・スケールの 5% 以内である。

実験装置の配置の平面図を図 2 に示す。氷または雪試料の長手方向の側面中央部に、線源
とプローブをとりつけたシュルターの前面を密着させ、測定を行なった。線源とプローブの
それぞれの中心線は、試料の底面から 50 mm の高さの平面上に位置させた。図中のプローブ上
端に点線で記入した正方形は、NaI シンチレータの位置を示す。

図 3 は、検出されるガンマ線の散乱領域の大きさを調べた実験装置を示す。図 3 左側は、
プローブの中心線を基準にして上下方向の散乱領域を調べた場合で、氷試料の上面からプロ
ーブの中心線までの距離 H を変えて、検出したガンマ線の強度を測定した。図 3 右側は、プ
ローブ前方の散乱領域を調べた場合で、氷試料のシュルター前面の間隔 L_D を変えて測定し
た。図 3 右側の場合には、プローブの中心線の高さを、氷試料の底面から 50 mm にとった。

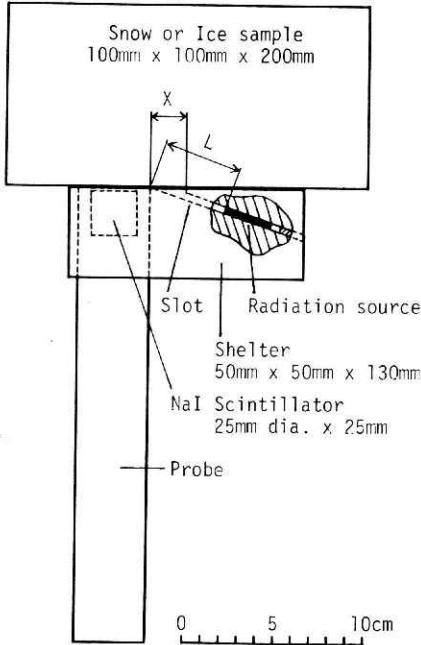


図 2 実験装置の配置

Fig. 2 Configuration of experimental devices

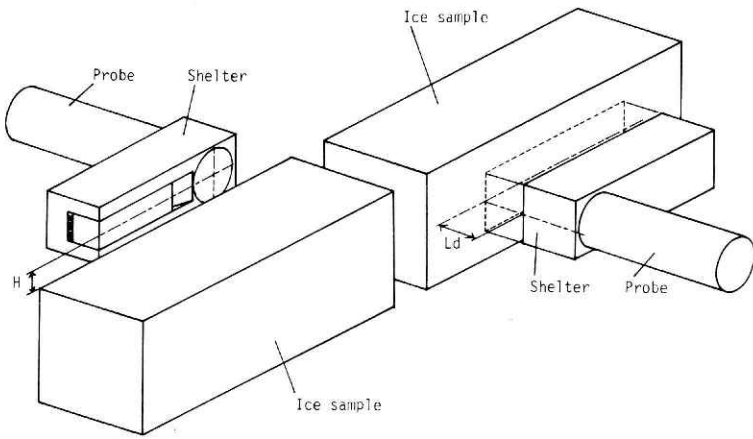


図3 散乱ガンマ線の検出領域の測定
Fig. 3 Measurement of detection range of scattered gamma-rays

4. 実験結果および考察

(1) 照射距離と散乱ガンマ線強度

図1および図2に示した装置により測定した、水および雪の試料からの散乱ガンマ線強度と照射距離の関係を図4に示す。θの異なる3種類のシェルターのそれぞれについての結果を、3つのグラフで示した。いずれも、横軸には試料の密度、縦軸には検出された散乱ガンマ線の強度をとり、照射距離をパラメータとした。シェルターの開口長さは、θが12°のものが構造上26mmとなったほかは、20mmにとった。照射距離は10mmから60mmまで8通りとったが、θが12°の場合は15mm以下を省いた。ここで密度0の値は、試料のない場合の表示

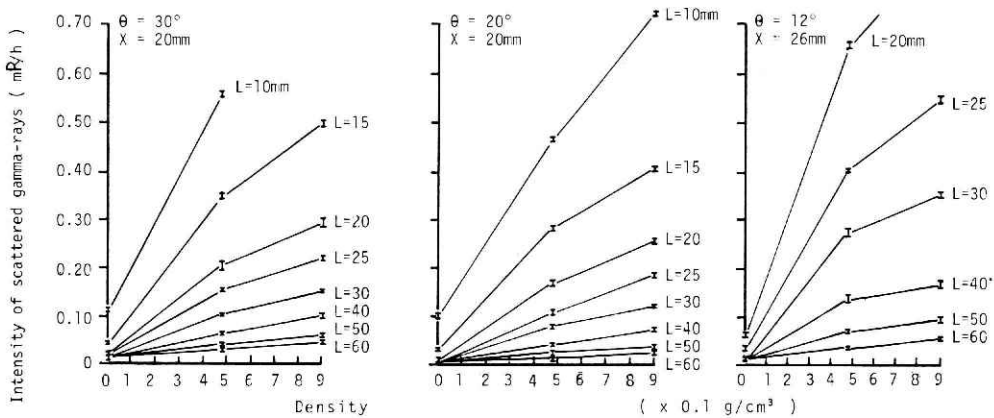


図4 散乱ガンマ線強度に及ぼす照射角度の効果
Fig. 4 Effect of the incident angle on the intensity of scattered gamma-rays

値であって、シェルターを通して、あるいはシェルター内部で散乱してシンチレータに入射する放射線強度の測定値である。これをバックグラウンドと称することにする。

図4が示すように、密度と散乱ガンマ線の強度はほぼ比例しているが、その傾向は照射距離が長いほどはっきりしており、良好な直線性を示す照射距離は、 θ が 12° の場合は50mm以上、 θ が 20° では25mm以上、 θ が 30° 以上では40mm以上になった。この相異は、たとえば同じ照射距離で3者を比較すると、線源とシンチレータの直線距離が、 θ が 20° の場合よりも 30° の場合のほうが短かく、シェルター内部を通してシンチレータに達する線量が 30° の方が多く、一方、 θ が 12° の場合には、線源と試料間のカバーの厚さがうすいので、カバーを通して試料中に放射される線量が多いことなどが原因していると考えられる。同じ照射距離と試料密度における散乱ガンマ線の強度、即ち感度を比較すると、 θ が 12° の場合が最大であり、 30° 、 20° の順に小さくなっているが、 30° と 20° の場合の差はあまり大きくないので、直線性の良好な照射距離が小さい 20° の場合が実用上有利であろう。直線性良好な範囲でのバックグラウンドも、 20° の場合が最も小さい。

(2) 開口長さと散乱ガンマ線の強度

図5は、図1および図2の装置によって、シェルターの開口長さをパラメータとして、照射距離と散乱ガンマ線強度の関係を調べた結果で、 θ が 20° と 30° のふたつの場合を示した。いずれも横軸に照射距離、縦軸に散乱ガンマ線強度をとった。また、図の左端に、サーベイメータの測定レンジを直線で示した。開口長さは、寸法の異なるカバーを用いて、20mm、27.5mm、32.5mmおよび37.5mmの4通りに変えた。図中のEmptyと添記した曲線群は、バックグラウンドの変化を示す。この測定には、氷試料のみを使用した。

図5のふたつの結果でEmptyの曲線群を比較すると、 θ が 20° の場合には照射距離が30mm以上ですべてのバックグラウンドが一致し、 θ が 30° の場合には同じく25mm以上で一致している。小さなバックグラウンドをもたらす照射距離が短いほど、シェルターを小さく設計できるが、照射距離が30mmでの両者のバックグラウンドを比較すると、 20° の場合が実用上有利といえる。また、いずれの場合にも、開口長さが大きくなるほど、散乱ガンマ線強度が大きくなる傾向が認められる。しかし、自然積雪の密度は 0.5 g/cm^3 以下のことが多いので、この範囲を、サーベイメータのひとつのレンジ全域を使って測定するとすれば、 0.05 mR/h のレンジを用いて、 θ を 20° 、照射距離40mm、開口長さ20mmとすれば良いことが、図5および図4から読みとれる。また、新雪から氷までをひとつのレンジで測定する場合には、 θ を 20° 、照射距離25mm、開口長さ27.5mmのシェルターを準備し、 0.25 mR/h のレンジを使用すればよいであろう。

(3) 上下方向の散乱ガンマ線検出領域

図3左側の装置により、上下方向の散乱ガンマ線の検出領域を測定した。図6にその結果を示す。図4の場合と同じく、 θ の異なる3種類のシェルターのそれぞれについて、試料上

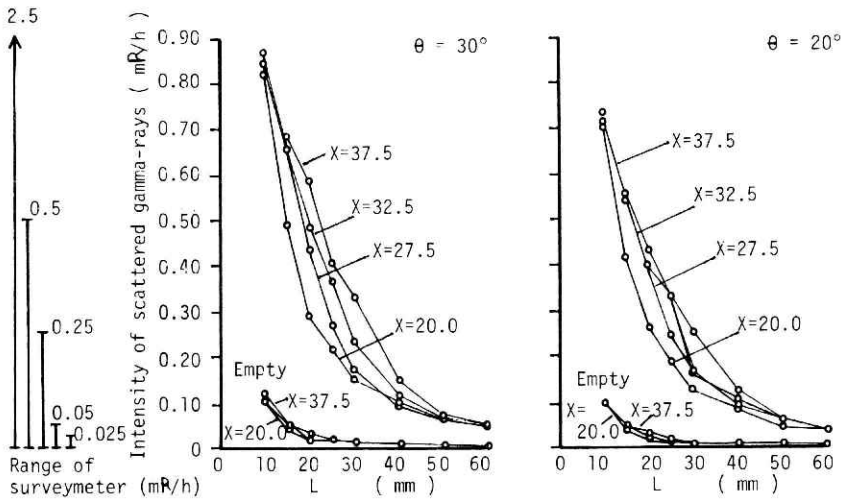


図5 散乱ガンマ線強度に及ぼす照射距離の効果

Fig. 5 Effect of the radiation length on the intensity of scattered gamma-rays

面とプローブ中心線の垂直距離Hをパラメータとして、照射距離を横軸に、散乱ガンマ線強度を縦軸にそれぞれとって、測定結果をまとめた。Emptyの添記のある曲線は、バックグラウンドの変化を示す。Ice block centerと添記した曲線は、プローブの中心線を試料の中央部にあわせた場合のもので、 θ が 20° の場合に、これが $H=0\text{mm}$ の場合のほぼ2倍になっているところから、この測定は良好な値を示していると判断される。 θ が 30° の場合にも

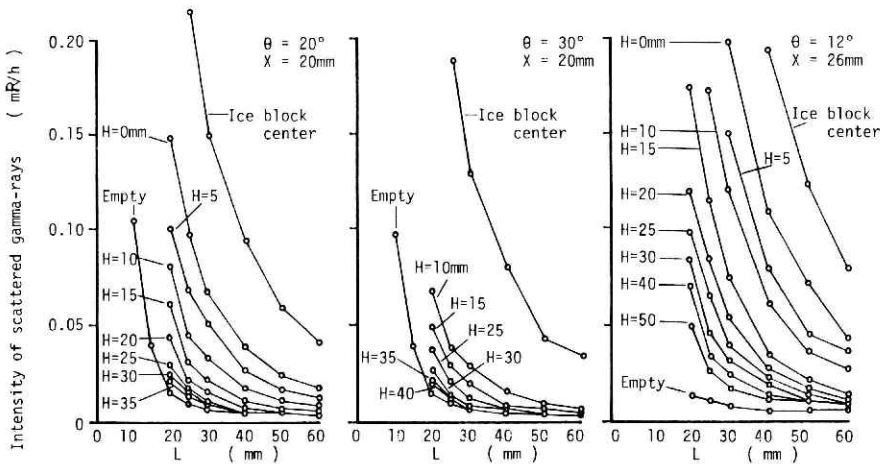


図6 シェルターの垂直移動による散乱ガンマ線強度の変化

Fig. 6 Variation of the intensity of scattered gamma-rays measured by moving the shelter along a vertical line

同様な傾向が得られたが、 $H = 0$ mmの曲線の記入を省略した。 θ が 12° の場合には、この関係は成立していない。

図6において、 θ が 20° の場合には40 mm以上、 θ が 30° の場合には50 mm以上の照射距離のとき、25 mm以上のHにおける散乱ガンマ線強度が等しくなり、しかもバックグラウンドと一致している。 θ が 12° の場合には、バックグラウンドをわずかにうまわっているが、照射距離60 mm以上で、Hが25 mm以上の場合の散乱ガンマ線強度が一致している。これらの結果は、 θ が 20° 、開口長さ20 mmのシェルターで照射距離を40 mmにとれば、 ± 25 mmのHが上下方向の散乱ガンマ線検出領域になり、 θ が 30° 、開口長さ20 mmの場合には、照射距離50 mmで同様な検出領域になることを示している、 ± 25 mmのHの長さは、シェルターの厚さに等しいので、これを上下方向の検出領域にきめておけば、実用上便利であろう。実際の測定では、積雪の部分に、シェルターの前面が一様に接触することになるので、この実験で得られた検出領域は、実測ではわずかに小さくなるはずである。

(4) シェルター前方の散乱ガンマ線検出領域

図3右側の装置により、シェルター前方の散乱ガンマ線の検出領域を調べた。この実験では、図3左側の装置による実験の場合と同じく、 θ の異なる3種類のシェルターを、いずれも照射距離50 mm、開口長さを20 mmとして比較した。図7にその結果を示す。

横軸にシェルター前面と試料表面の間の距離 L_D をとり、縦軸には散乱ガンマ線の強度をとった。図に示すように、 θ が 12° の場合には L_D が60 mm以上、 20° の場合は40 mm以上、

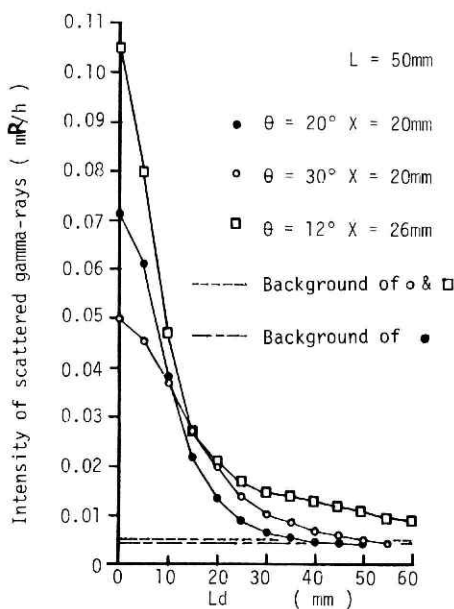


図7 シェルターの前後移動による散乱ガンマ線強度の変化

Fig. 7 Variation of the intensity of scattered gamma-rays measured by moving the shelter forward and backward

30°の場合は50mm以上で、それぞれのシェルターにおけるバックグラウンドに等しい散乱ガンマ線強度が得られた。この結果から、 θ が20°および30°の各シェルターにおいては、シェルターの前面から50mm以内が、散乱ガンマ線の検出領域になると考えられる。また、図6および図7に示した実験結果から、使用した100mm×100mm×200mmの氷および雪試料は、散乱ガンマ線検出領域よりも十分に大きく、測定に支障はなかったと考えてよいであろう。

5. シェルターの設計

以上の実験結果にもとづいて、シェルターの設計を2種類こころみた、サーベイメータとガンマ線源は、本実験のものを使用することにした、設計した2種類のシェルターを図8に示す。左側は θ が20°、照射距離40mm、開口長さ20mmのもの、右側は θ が30°、照射距離50mm、開口長さ20mmの場合で、いずれも上段はシェルターの前面側からみた側面図、下段は平面図である。基本的な構造は両方共同じてあって、直方体の鉛ブロックの、図では左端に、サーベイメータのプロープのはまる直径42mmの穴があり、この穴の右に接して、ガンマ線の射出されるスロットの開口部が位置する。スロットの奥には、線源が納まる。図中には点線で書いた二重の同心円で線源を示したが、内側の小円は放射性物質の位置を示す。 θ が

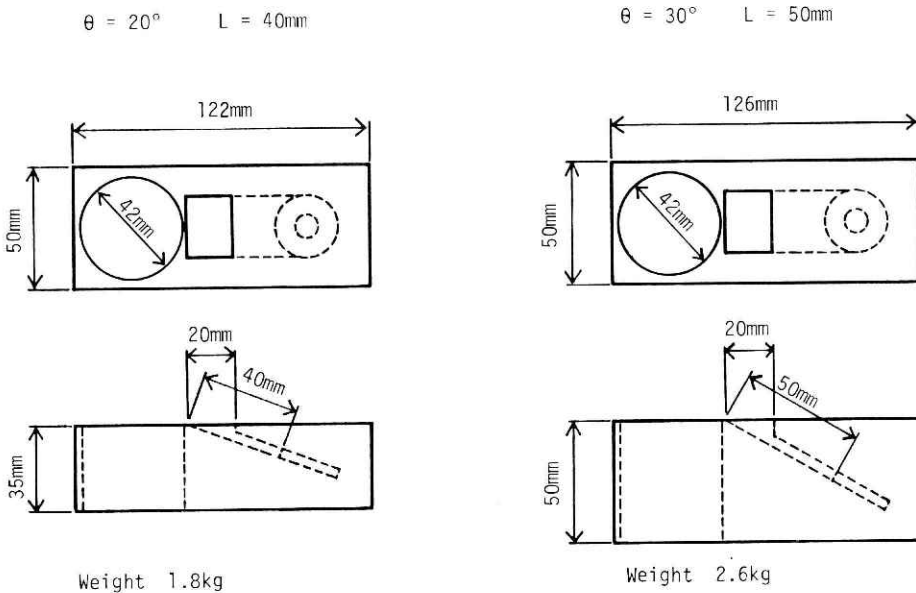


図8 シェルターの設計例
Fig. 8 Designed shelters

20°のシェルターについては、上述した諸条件のほかに、スロットの方向を除く線源の周囲に、実験で用いたシェルターにおける線源の外周からシェルター前面までの最短距離に等しい鉛の層が、最低限存在するように、シェルターの厚さと長さを定めるという方針で設計して、図示のように、122 mm × 50 mm × 35 mmの直方体の外形が得られた。重量は1.8 kgになるはずである。一方、 θ が30°の場合には、線源外周とシェルターの表面までの鉛の厚さの最小値が、 θ が20°の場合を越えないことを条件に加えて、図示の寸法となった。予定重量は2.6 kgで、 θ が20°のシェルターよりも重い。

ここで、使用するサーベイメータの重量が3.6 kgなので、 θ が20°のシェルターを用いた場合には、装置の全重量は5.4 kgとなる。これは、携帯用装置としては軽量とはいえない。しかし、サーベイメータのプロープのみの重量が0.8 kgなので、サーベイメータ本体とプロープを分離し、プロープにシェルターを固定して使用するならば、その重量は2.6 kgとなり、野外での片手操作が可能となるであろう。

この設計は、上述した実験結果にもとづいて行なったが、例えば、線源として点線源に近いものを採用すれば、シェルターは更に小型軽量化できるであろう。また、検出器の寸法を小さくすることも、同様な効果をもたらすであろう。

6. 結 論

小型軽量化を目標とした、ガンマ線散乱型積雪密度計の基礎実験によって、市販のシンチレーションサーベイメータを利用するかぎり、線源として ^{133}Ba の100 μCi 密封線源が適当であること、ガンマ線の測定部分への照射角度は20°が最適であること、測定領域の厚さと奥行をそれぞれ50 mm以内にできること、現場での片手操作が可能な程度に、装置の手持部分の重量を減らしうることなどが判明した。

また、線源の周囲に必要な鉛の層の厚さが判明したことにより、更に小型軽量化をはかるためには、線源の寸法の縮小が必要と考えられる。また、ガンマ線検出器に、より小型でエネルギー感度の高い半導体センサーを採用し、低エネルギーのガンマ線源、たとえば ^{57}Co や ^{241}Am と組みあわせることにより、装置は更に小型軽量化されるであろう。

あ と が き

本研究は、昭和57年9月から昭和58年3月にかけて実施された、国立防災科学技術センター雪害実験研究所第2研究室と、長岡技術科学大学機械系制御システム講座による共同研究「 γ 線による積雪密度計測に関する研究」の成果である。

参 考 文 献

- 1) 木村忠志 (1983) : γ 線散乱法による積雪密度の測定予備実験. 雪氷, **45**, 3, pp.119-124.

(1983年6月9日 原稿受理)