

JAERI - M
91-166

積雪による地殻 γ 線の減衰の走行サーベイ測定

1991年10月

坂本 隆一・長岡 鋭・斎藤 公明
堤 正博・森内 茂

JAERI-Mレポートは、日本原子力研究所が不定期に公刊している研究報告書です。
入手の問い合わせは、日本原子力研究所技術情報部情報資料課（〒319-11茨城県那珂郡東海村）あて、お申しこしてください。なお、このほかに財団法人原子力弘済会資料センター（〒319-11茨城県那珂郡東海村日本原子力研究所内）で複写による実費頒布をおこなっております。

JAERI-M reports are issued irregularly.

Inquiries about availability of the reports should be addressed to Information Division, Department of Technical Information, Japan Atomic Energy Research Institute, Tokaimura, Naka-gun, Ibaraki-ken 319-11, Japan.

© Japan Atomic Energy Research Institute, 1991

編集兼発行 日本原子力研究所
印刷 株原子力資料サービス

積雪による地殻 γ 線の減衰の走行サーベイ測定

日本原子力研究所東海研究所環境安全研究部

坂本 隆一・長岡 鋭・齊藤 公明

堤 正博・森内 茂

(1991年9月19日受理)

積雪による居住環境中の地殻ガンマ線の広域の変動を解析するため、新潟県長岡市において、環境サーベイ車およびヘリコプタを用いた広域ガンマ線線量率分布調査を行なった。調査は無雪時および積雪時に行なった。長岡市内全体にわたる地殻ガンマ線の線量透過率（無雪時に対する積雪時の線量比を線量透過率と定義する）の分布から、積雪による減衰は市街中心部では少なく、郊外では大きい結果となった。さらに、線量透過率から積雪水量を求めた。公表積雪データと環境サーベイ車およびヘリコプタによる長岡市内のサーベイコース全体の広い地域での測定から得た積雪水量を比較した。公表積雪深から得た積雪量に比べて、サーベイから得た積雪水量は20～30%小さい値となった。

A Carborne Survey for the Evaluation of Diminution of
Terrestrial Gamma Ray due to Snow Cover

Ryuichi SAKAMOTO, Toshi NAGAOKA, Kimiaki SAITO
Masahiro TSUTSUMI and Shigeru MORIUCHI

Department of Environmental Safety Research
Tokai Research Establishment
Japan Atomic Energy Research Institute
Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken

(Received September 19, 1991)

The experiment was carried out to evaluate diminution of terrestrial gamma rays due to snow cover, in Nagaoka city, Niigata prefecture, in 1987, using a helicopter and a monitoring car. The measurement were performed in autumn before snowfall and in winter. From the measurements over wide areas in and around Nagaoka city, penetration ratios (ratios of terrestrial gamma ray doses on snow covered ground to those on snow free ground) were found to be small in the center of the city but high in the suburbs. Water equivalentents were calculated by penetration ratios derived from measured data by airborne survey and carborne survey. The calculated snow equivalentents were compared with a published snow depth. The former was 20-30% smaller than the latter with a wide of courses in and around Nagaoka city.

Kwywords: Carborne Survey, Snow Cover, Terrestrial Gamma Ray, Living Environment, Niigata Prefecture, Nagaoka City, Environmental Survey Car, Helicopter

目 次

1. 序	1
2. 調査の方法	2
2.1 調査地域の概観	2
2.2 ヘリコプタによる飛行測定	2
2.3 環境サーベイ車による地上走行測定	3
2.4 積雪深および土壌核種濃度の測定	4
3. データ処理	5
3.1 取得データおよび計算データ	5
3.2 取得データの処理	6
3.3 メッシュファイルの作成	11
4. 測定結果	12
4.1 線量率および線束密度	12
4.2 線量透過率	14
4.3 2.61 MeV γ 線透過率	17
5. 考 察	19
5.1 走行サーベイデータと空中サーベイデータの相関	19
5.2 積雪調査から得た積雪水量と走行および空中サーベイから得た積雪水量の比較	20
5.3 公表積雪値（気象協会）と野外測定による評価結果との比較	21
5.4 積雪時走行サーベイデータの解析	21
5.5 サーベイ方法の検討	22
5.6 広域透過率分布の検討	23
6. 結 言	23
謝 辞	24
参考文献	25

Contents

1. Introduction	1
2. Survey Methods	2
2.1 Outline of the Survey Areas	2
2.2 Airborne Survey	2
2.3 Carborne Survey	3
2.4 Measurement of Snow Depth and Radio-nuclides Concentration in Soil	4
3. Data Processing	5
3.1 Outline of Measured Data and Calculated Back-up Data	5
3.2 Processing of Measured Data	6
3.3 Production of Mesh Files	11
4. Results	12
4.1 Output of Measured Data	12
4.2 Penetration Ratios of Exposure Rates	14
4.3 Penetration Ratios of 2.61 MeV Gamma Ray	17
5. Discussion	19
5.1 Correlation of Exposure Rates Measured by Carborne Survey to Those by Airborne Survey	19
5.2 Comparison of Water Equivalent Derived from Observed Snow Depth with Those from Measurements	20
5.3 Comparison of Penetration Ratios Inferred from Published Snow Depth with Those Estimated by the Measurements	21
5.4 Analysis of Carborne Survey Data in the Snow Season	21
5.5 Discussion on Survey Methods	22
5.6 Discussion on Distribution of Penetration Ratios	23
6. Conclusion	23
Acknowledgement	24
References	25

1. 序

自然放射線の変動要因解明のため、原研では種々の居住環境下での自然放射線測定を行ない、その特性の解明、線量率データの蓄積を行なっている。この研究の一環として、積雪が自然放射線に与える影響を調査してきたが⁽¹⁾、本報告は昭和62年度に行なった長岡市での広域調査のうち、主として地上サーベイ、空中サーベイに関する結果をまとめたものである。この調査の目的は、積雪時における線量率レベルを実測により把握するとともに、サーベイ結果と公表積雪データとの関係を明確にし、積雪地方において、公表積雪データから居住環境での現実的な環境放射線のレベルを推定するための基礎的事項について考察することである。

環境放射線場は地殻ガンマ線、宇宙線、空气中ラドン娘核種等からの放射線、人工構造物からのガンマ線等で構成される。これらを変動させる要因はいくつか考えられるが、その重要なものの一つとして積雪がある。積雪は、地殻ガンマ線を遮蔽し、積雪量が変わることにより環境ガンマ線の線量レベルが大きく変動する。広い積雪地帯をもつ日本では、年間の2分の1の期間を積雪のなかで暮らす地方もあり、これらの地方の現実的な集団線量評価をする必要がある。

これまで積雪による地殻ガンマ線の減衰に関する報告はいくつかあるが⁽²⁾、走行サーベイによる調査方法、広域調査および公表積雪データと実効的積雪量の違いについてはあまり検討されていない。公表積雪量は特定の観測条件を満たす場所で観測された値であり、除雪等に影響される一般的な生活環境中の積雪とは異なることが多い。このため、生活環境中の積雪による地殻ガンマ線の減衰について検討するためには、実効的な積雪の量（以下、実効積雪量と定義する）を定義し、定量的これを求めることが必要となる。本報告では、走行サーベイ法を用いた積雪時の地殻ガンマ線の透過率の評価方法、広域のサーベイデータを用いた積雪時における地殻ガンマ線の線量透過率分布、公表されている積雪量と実効積雪量の違いについての検討結果を述べる。代表的積雪地帯の一つである新潟県長岡市において、飛行データと地上測定データとの関係を明らかにするために、地殻ガンマ線測定を実施した。環境サーベイ車による地上測定（地殻ガンマ線調査）、ヘリコプタによる飛行測定（地殻ガンマ線調査）および地上におけるRn測定⁽³⁾、土壤採取、積雪調査、TLD調査⁽⁴⁾を広域に行ない、また、同時に均一な土壤中核種濃度を持つと思われる平坦な地域（標準測定地）での精密測定を、無雪時と積雪時に行なった。公表積雪量と実効積雪量の違いの程度を解明するために、本調査から評価される積雪水量と公表積雪値から得られる積雪水量を比較する方法を用いた。比較は、公表積雪値が観測されている地点を含む100 km²の地域、積雪が徐々に変化する道路沿いの地域について行なった。なお、TLD調査⁽⁴⁾、Rn測定⁽³⁾および地上標準測定⁽³⁾については別に報告する。

2. 調査の方法

積雪が環境放射線場に与える影響を解明するため、同一地域における地殻ガンマ線線量率の測定を無雪時と積雪時の2回実施した。調査対象地域は50 kmにわたる道路沿いおよび10 km×10 kmにわたる広域であるため、広域サーベイに適したヘリコプタによる飛行測定と環境サーベイ車による地上測定を同時に実施した。両者のデータは上空値と地上値の関係を明らかにするためにも用いられた。また、調査対象地域内で積雪量調査、土壌試料の採取・分析を行なった。以下、調査の概要について述べる。

2.1 調査地域の概観

本調査は、積雪地域での集団線量評価に測定結果が活用でき、かつ解析評価が複雑にならない場所という観点から、比較的人工が集中した中都市で、地形的に平坦でかつ積雪が安定している長岡市を第1候補、新潟市を第2候補に設定した。無雪時には両地域の調査を行ない、冬期の積雪状態から判断して、最終的な調査地点を決定した。新潟県の信濃川沿いの地域は、新潟市から内陸に入るに従って積雪量が多くなる。長岡市は、信濃川沿いの人工18万人の豪雪地域の中都市で、市内面積は260 km²である。市の中央部には信濃川が南北に流れ、信濃川の地域に平野部が発達している。本調査では、平野部における積雪の広域調査、長岡市から新潟市に至る信濃川と並行して走る国道8号線沿いの積雪調査、長岡市郊外の水田に設定した狭い地域での標準測定調査を実施した。

2.2 ヘリコプタによる飛行測定

(1) 測定方法

空中サーベイでは、ヘリコプタに航空機ガンマ線サーベイシステム[®]を搭載して、予め定められたコースを飛行しながら測定を行なった。飛行測定の仕様は以下の通りである。

- ① 使用航空機：ベル、ロングレンジャー 206L型ヘリコプタ
- ② 搭乗者：パイロット、コースナビゲータ、測定オペレータ
- ③ 飛行条件

高度：対地150 m、但し標準測定地域では100、150、200 mの3高度
速度：～100 km/h

④ 主な測定機器

ガンマ線測定システム、高度計、MRS（電波を用いた位置計測システム）

⑤ 測定項目

下記のデータの毎秒測定
放射線データ

DET-1024 NaI (TI) シンチレーション検出器（4"×4"×16"のNaI

(TI) 検出器を4本組合せたもの) および5"φ×4"NaI (TI) シンチレーション検出器による2系統のガンマ線波高分布

位置データ

電波高度計による高度およびMRSによる主局 - 従局間距離

MRSの位置データについては、後述スキャン測定および標準測定において取得

(2) 飛行方法

上空における飛行は、定コース測定、スキャン測定、標準測定の3つのモードで行なった。以下に、それぞれの飛行方法およびコース上の積雪状態について述べる。

定コース測定

これは、国道8号線に沿って新潟市～長岡市間を飛行測定するモードである。この地域の積雪量は、内陸に向うに従って徐々に多くなる。このモードでは、MRSが使用できなかったため、国道沿いのコース上に多数のチェックポイントをあらかじめ決めておき、位置標定を行なった。

スキャン測定

これは、長岡市の信濃川をはさんだ平坦地を覆う南北10数kmの区間に、1.5～2km間隔毎に東西約10km長の直線飛行ラインを設定し、この設定ライン上を順次飛行測定するモードである。

標準測定

これは、長岡市郊外の水田上に設定した全長1.6kmの直線的な飛行ライン上を測定するモードである。ここでの飛行高度は、100、150、200mの3高度とした。測定場所の位置は平坦な地域の中央のさらに狭い範囲であることから、積雪量の変化がほとんど無く、精密測定に最適であると予想された。

バックグラウンド測定

地殻ガンマ線以外の放射線源である宇宙線、空气中ラドン娘核種、検出器系の自己汚染による線量率寄与分等を一括して評価するために、出雲崎沖合いの日本海上で測定を実施した。

2.3 環境サーベイ車による地上走行測定

(1) 測定方法

走行測定では、環境サーベイ車にガンマ線波高分布処理解析装置を搭載して、定められたコースを走行しながら測定を行なった。走行測定の仕様は以下の通りである。

- ① 使用車両：環境サーベイ車
- ② 搭乗者：運転手、コースナビゲータ、測定オペレータ
- ③ 走行条件

速度：50 km/h 以下

- ④ 主な測定機器

ガンマ線波高分布処理解析装置、磁気ジャイロ、距離計

⑤ 測定項目

放射線情報：5"φ NaI (TI) シンチレーション検出器によるガンマ線波高分布，毎10秒測定

位置情報：出発地点を原点とするXY座標系のXY成分

走行しながらの放射線測定と併せて測定位置の情報を取得した。位置情報は10秒毎に磁気ジャイロ内でA/D交換されたデジタルデータ（走行距離，地磁気センサからの南北成分，東西成分データ）が処理解析装置によりリアルタイムでXY座標に変換される。この座標はスタート地点を原点とする相対XY座標系である。なお，距離計の校正誤差，磁気角度センサのアンプ回路のドリフト等により相対XY座標系に誤差を生じるため，その補正を行なった。

放射線測定についてはサーベイ車の屋根に設置した5"φ球形NaI (TI) シンチレーション検出器により，γ線波高分布を測定し，得られた波高分布からリアルタイムで全線量率とトリウム系列からの線束密度を評価した。この結果は，磁気テープおよびフロッピーディスクに記録した。

(2) 走行方法

上空値と地上値の関係を調べるためには地上における走行測定コースとヘリコプタによる飛行測定コースとが一致していることが望ましいが，適当な道路が必ずしも無いこと，冬期の積雪時にも路上走行サーベイ径路を確保しなければならない等を考慮して以下の方法により，測定を行なった。

定コース測定

国道8号線沿いに走行サーベイを行ない，ヘリコプタによる測定と同様のコースで実施した。

スキャン測定

長岡市でのスキャン測定は，適当な道路が必ずしも無い，測定に要する時間がヘリコプタに比べてはるかに長い等の制約のため，国道，主要地方道路に限って測定を実施した。

2.4 積雪深および土壌核種濃度の測定

(1) 積雪調査

測定区域内における積雪水量分布調査を行なった。調査には，日本雪氷学会が紹介する方法^⑩を用いた。積雪水量分布調査は定コース測定範囲，スキャン測定範囲，標準測定範囲を対象に実施した。

積雪水量の測定方法

雪，氷または融水の形態で積雪中に存在する単位地表面積当たりの水の重量を積雪水量と定義する。積雪水量は，スノーサンプラーと呼ばれる円筒状の長尺採雪器で地面に対して垂直に採取された積雪の重量を，サンプラーの断面積で割ることにより得られる。この方法では積雪の深さをその場で読取ることができ，1観測地点当り数回の測定を行なった。

(2) 土壌核種分析

スキャン測定および標準測定を実施した地域において土壌試料の採取を行なった。試料は13

cm ϕ × 8 cm のタップウェアに採取し、後日、放射性核種組成分析および土中水分の測定を行なった。

3. データ処理

3.1 取得データおよび計算データ

本調査では、ヘリコプタによる空中サーベイデータ、環境サーベイ車による路上走行サーベイデータ、その他の調査データを取得した。

また、積雪水量と線量率の減衰との換算のために、シミュレーション計算から得た積雪水量による地殻 γ 線線量率の減衰の結果を用いた。

3.1.1 空中サーベイデータ

無雪時における空中サーベイ3ラン、積雪時における空中サーベイ9ランを実施し、データを取得した。無雪時には、長岡市周辺のスキャン測定1ラン、標準測定を含む長岡－新潟間のコース測定1ラン、検出器系バックグラウンド測定を1ランの合計3ラン、積雪時には長岡市周辺のスキャン測定2ラン、長岡－新潟間のコース測定3ラン、検出器系バックグラウンド測定2ラン、標準測定2ランの合計9ランを実施した。空中サーベイ全ランの一覧をTable 3.1に示す。

3.1.2 走行サーベイデータ

路上走行サーベイは、無雪時には新潟市周辺のスキャン測定4ラン、長岡市周辺のスキャン測定4ラン、長岡－新潟間のコース測定2ラン、東海－長岡間の走行測定2ラン、の合計12ラン、積雪時には長岡市周辺のスキャン測定6ラン、長岡－新潟間のコース測定1ラン、東海－長岡間の走行測定2ランの合計9ランを行なった。路上走行サーベイ全ランの一覧をTable 3.2に示す。

3.1.3 土壌核種濃度およびTLD測定

無雪時におけるその他の調査として、土壌採取とTLD測定⁽⁴⁾を行なった。土壌採取は長岡市内10地点、長岡市郊外の水田上5地点で行なった。TLD測定は居住環境中の環境ガンマ線の長期的変動を定量的に解析することを目的として、長岡市内4地点、新潟市1地点で実施した。積雪時におけるその他の調査として、積雪調査とTLD測定を行なった。積雪水量調査は長岡市内10地点、新潟市～長岡市を結ぶ国道8号線沿い8地点の計18地点で行なった。TLD測定は無雪時における調査と同じ地点で行なった。これらの調査の一覧をTable 3.3に示す。

3.1.4 計算から求めた地殻ガンマ線の高度による減衰

ヘリコプタによる空中サーベイにおいては、3種類の目標高度(100, 150, 200 m)で飛行測

cm ϕ × 8 cm のタップウエアに採取し、後日、放射性核種組成分析および土中水分の測定を行なった。

3. データ処理

3.1 取得データおよび計算データ

本調査では、ヘリコプタによる空中サーベイデータ、環境サーベイ車による路上走行サーベイデータ、その他の調査データを取得した。

また、積雪水量と線量率の減衰との換算のために、シミュレーション計算から得た積雪水量による地殻 γ 線線量率の減衰の結果を用いた。

3.1.1 空中サーベイデータ

無雪時における空中サーベイ3ラン、積雪時における空中サーベイ9ランを実施し、データを取得した。無雪時には、長岡市周辺のスキャン測定1ラン、標準測定を含む長岡－新潟間のコース測定1ラン、検出器系バックグラウンド測定を1ランの合計3ラン、積雪時には長岡市周辺のスキャン測定2ラン、長岡－新潟間のコース測定3ラン、検出器系バックグラウンド測定2ラン、標準測定2ランの合計9ランを実施した。空中サーベイ全ランの一覧を Table 3.1 に示す。

3.1.2 走行サーベイデータ

路上走行サーベイは、無雪時には新潟市周辺のスキャン測定4ラン、長岡市周辺のスキャン測定4ラン、長岡－新潟間のコース測定2ラン、東海－長岡間の走行測定2ラン、の合計12ラン、積雪時には長岡市周辺のスキャン測定6ラン、長岡－新潟間のコース測定1ラン、東海－長岡間の走行測定2ランの合計9ランを行なった。路上走行サーベイ全ランの一覧を Table 3.2 に示す。

3.1.3 土壌核種濃度および TLD 測定

無雪時におけるその他の調査として、土壌採取と TLD 測定⁽⁴⁾を行なった。土壌採取は長岡市内10地点、長岡市郊外の水田上5地点で行なった。TLD 測定は居住環境中の環境ガンマ線の長期的変動を定量的に解析することを目的として、長岡市内4地点、新潟市1地点で実施した。積雪時におけるその他の調査として、積雪調査と TLD 測定を行なった。積雪水量調査は長岡市内10地点、新潟市～長岡市を結ぶ国道8号線沿い8地点の計18地点で行なった。TLD 測定は無雪時における調査と同じ地点で行なった。これらの調査の一覧を Table 3.3 に示す。

3.1.4 計算から求めた地殻ガンマ線の高度による減衰

ヘリコプタによる空中サーベイにおいては、3種類の目標高度(100, 150, 200 m)で飛行測

定を行なったが、実際の飛行高度は目標高度を中心にして多少上下するため、得られたデータがある一定の基準高度での値に補正する必要がある。また、積雪水量と透過率を関連付けて解析する必要がある。このため地殻 γ 線線量率と ^{232}Th 系列の2.61 MeVの γ 線線束密度の高度による減衰の一覧表を準備した。積雪水量を 1 g/cm^2 毎に変えた場合の地上1, 20, 50, 100, 150, 200, 250, 300 mの各高度での線量率および ^{232}Th 系列の2.61 MeVの γ 線線束密度の減衰率を示すものである。これらは、モンテカルロ法による環境 γ 線挙動のシミュレーション計算⁽⁷⁾によって得られたものである。計算の詳細については別に報告されている。⁽⁸⁾地殻 γ 線の線量率減衰と ^{232}Th 系列の2.61 MeVの γ 線線束密度の減衰の一覧をTable 3.4に示す。高度補正の具体的なやり方については3.2.1で述べる。

3.2 取得データの処理

測定データの取扱い,処理方法について述べる。

3.2.1 空中サーベイデータ

以下に、位置データの処理方法、放射線データの処理方法について述べる。

空中サーベイによる測定結果から、地殻ガンマ線の寄与を評価するためには、測定値に含まれる宇宙線寄与分等地殻ガンマ線以外による線量率寄与分を評価し分離する必要がある。そのため次の(2)に述べる方法によりこれらバックグラウンドの評価を行ない、線量率寄与分を差し引き、地殻ガンマ線からの線量率を評価した。また、測定される地殻ガンマ線の強度は測定対地高度に依存するため、地上1 mでの値に補正した。

(1) 位置情報データの処理

XY座標

スキャン測定および標準測定において取得した位置データは、地上に設置された2つの従局からヘリコプタまでの距離として得られる。従って、これらの距離、2従局の位置およびヘリコプタの高度データを用い、三角法からヘリコプタ位置がxy座標系の1地点として求まる。この相対xy座標系をランベルト正角円錐図法上のXY座標(3.2.2参照)に変換した。定コース測定については、チェックポイントの位置をランベルト正角円錐図法上のXY座標で求め、チェックポイント区間の位置については内挿法により求めた。

地上1 m値への換算

地上1 m値への換算は地表の積雪の量(或いは積雪水量)、換算する対象(線量率か2.61 MeVガンマ線線束密度)によって異なる。ここでは、無雪の場合と積雪の場合に分けて換算した。上空での線量率(または2.61 MeVガンマ線線束密度)を地上1 mの線量率(または2.61 MeVガンマ線線束密度)に変換する換算係数は、モンテカルロ法を用いたシミュレーション結果(Table 4.4)を、簡単な近似式で表したものである。土壌中の核種濃度比は ^{238}U 系列: ^{232}Th 系列: ^{40}K = 1:2:20とした。以下の近似式は50~200 mの飛行高度で有効であり、A(H)は高度Hのときの換算係数を意味し、地上値への換算は得られた測定値に $1/A(H)$ を乗じることにより行なう。

a) 線量率

無雪時における線量率の地上1 m 値への換算係数

$$A(H) = 0.95 \exp(-0.0076H) \quad (1)$$

(但し, $50 \text{ m} < H < 200 \text{ m}$)

この式を用いた場合の補正に伴う誤差は5%以内である。

積雪時における線量率の地上1 m 値への換算係数

$$A(H) = 0.99 \exp(-0.00649H) \quad (2)$$

(但し, $50 \text{ m} < H < 200 \text{ m}$)

この式を用いた場合の換算に伴う誤差は積雪水量が 5 g/cm^2 以下で20%程度の過小補正となることを確認しているが、 $5 \sim 40 \text{ g/cm}^2$ の範囲では補正誤差10%以内である。

b) 2.61 MeV γ 線の線束密度

無雪時における2.61 MeV γ 線の線束密度の地上1 m 値への換算係数

$$A(H) = 0.81 \exp(-0.00783H) \quad (3)$$

(但し, $50 \text{ m} < H < 200 \text{ m}$)

この式を用いた場合の換算に伴う誤差は5%以内である。

積雪時における2.61 MeV γ 線の線束密度の地上1 m 値への換算係数

$$A(H) = 1.0 \exp(-0.00636H) \quad (4)$$

(但し, $50 \text{ m} < H < 200 \text{ m}$)

この式を用いた場合の換算に伴う誤差は積雪水量が 10 g/cm^2 以下で20%程度の過小となるが、 $10 \sim 40 \text{ g/cm}^2$ の範囲では換算誤差10%以内である。

(2) 線量率および2.61 MeV γ 線線束密度の算出

本調査では、感度の点で優れている DET-1024 検出器のデータを用いた。

線量率

DET-1024 検出器については $G(E)$ 関数が決定されていない。吸収エネルギーと線量率の関係が明らかになっているので⁵⁾、それを用いて線量率を評価した。

線量率を D とすると、

$$D = f \times A \text{ (nGy/h)} \quad (5)$$

ここに, $f = 0.0204 \text{ (nGy/h/MeV/sec)}$

A : 吸収エネルギー (MeV/sec)

2.61 MeV γ 線線束密度

トリウムウインドウ (2.5 ~ 2.75 MeV) 計数率, 2.61 MeV のピーク効率および DET-1024 検出器の断面積を用いて, 次式から 2.61 MeV γ 線の線束密度を求めた。ピーク効率は高度

150 m での方向分布とそれに対するピーク効率の積から求めた。

$$C_{Th} = N_{Th} / S / \eta_{Th} \quad (\gamma / \text{cm}^2 \cdot \text{sec}) \quad (6)$$

ここに、 N_{Th} : トリウムウインドウの計数率 (cps)
 S : DET-1024 検出器の断面積 1652 cm^2
 η : ピーク効率 0.251

バックグラウンドの評価

高度 150 m では、地殻ガンマ線線量率が地上 1 m 値の数分の 1 に減衰する。一方、ラドン娘核種からの線量率寄与は線源のジオメトリが 4π 方向となるため逆に増加する。このため、測定値に占めるラドン娘核種からの線量率寄与の割合が相対的に大きくなる。ラドン娘核種成分も含めた検出器系バックグラウンド測定を出雲崎沖で行なったが、長岡市と出雲崎沖では距離があるため、ラドン娘核種からの線量率寄与が異なる可能性がある。そのために、バックグラウンド線量率寄与分の評価は次の方法によった。

標準測定を行なった地域においては、地上線量率、土壤中核種濃度、積雪量が既知であるため、これらのデータ (Table 3.5) から下記の方法によって上空の各高度での地殻ガンマ線の線量率を推定した。標準測定地域の上空での測定値からこの推定値を差し引くことにより得られるバックグラウンド線量率寄与分と出雲崎沖で得られた測定値と比較し、下記方法によって妥当な値が算出できることが確認された。この詳細は以下に記す。

標準地域でのバックグラウンド算出法

標準測定における調査結果を Table 3.5 に示す。無雪時における地上 150 m でのヘリコプタによる測定値は 18.7 (nGy/h) であった。地上 150 m での地殻ガンマ線の線量率寄与分は Table 3.4 (1) から積雪水量 0 g/cm^2 、高度 150 m で地上 1 m 値の 30% となる。無雪時の地上 1 m での測定値が 34.8 (nGy/h) あるので、高度 150 m での地殻 γ 線寄与は 10.4 (nGy/h) と推定される。ゆえに、無雪時測定の際の地上 150 m におけるラドン娘核種等の線量率寄与分は 8.3 (nGy/h) と評価された。また、積雪時における地上 150 m でのヘリコプタによる測定値は 6.9 (nGy/h) であった。地上 150 m での地殻ガンマ線の線量率寄与分は Table 3.4 (1) から積雪水量 29 g/cm^2 、高度 150 m で無雪時地上 1 m 値の 5.3% となる。無雪時の地上 1 m での測定値が 34.8 (nGy/h) であるので、高度 150 m での地殻 γ 線寄与は 1.8 (nGy/h) と推定される。したがって、積雪時の地上 150 m におけるその他の線量率寄与分は 5.0 (nGy/h) と評価された。これらの結果と海上における測定値の比較を行なった結果、おのおのについて、標準測定地域でのラドン娘核種等からの寄与が 2.4 (nGy/h) および 0.5 (nGy/h) 大きいことがわかった。本調査の地上 150 m におけるラドン娘核種等線量率寄与分を含むバックグラウンドの値として上記 (無雪時: 8.3 (nGy/h)), 積雪時: 5.0 (nGy/h)) を用いた。

3.2.2 走行サーベイデータ

位置座標の補正方法、線量率の算出方法および地上値への換算方法について述べる。

(1) 位置座標の補正

走行サーベイの出発地点は常に異なるため、各ラン毎に原点が異なる。そのため、取得した

位置データを統一的に扱えるような相対座標系へ変換を行なうことが必要である。

各種の図法が存在するが、その主要特性で正積性、正角性、正方方位性に分けられる。広域を地図上に表わす用途に正角図法が用いられる事が多い。ランベルト正角円錐図法（2標準緯線）で描いた地図は、正角性を備え、かつ、2標準緯線を有しているため、緯度範囲の大きな地域を表現する場合、全体的にみて長さや面積の歪が少ない長所がある。本走行サーベイは、地域が関東地方、北陸地方等の広範囲となるため、この範囲を1枚の地図に表わすのに適した本図法を選択した。ここでは、原点を北緯36°、東経140°、2標準緯線は北緯33°、北緯38°とした。

サーベイルートにはチェック点を設け、サーベイ時にこの地点の地点名、通過時刻等を記録し、後日、これらの地点について、2.5万分の1或いは5万分の1の地形図（国土地理発行：TM図法）からデジタイザを用いて緯度・経度およびランベルト正角円錐図法上のXY座標を読取った。これは、以下の手順で行なう。地形図（2.5万分の1或いは5万分の1）とデジタイザを用い、地形図上のこれから求めようとする点について、デジタイザ上の計測座標を求め、これを左下隅（0,0）、右上隅（1,1）の正規化座標系へ変換し、さらに、地理座標系での緯度・経度を求める。この緯度・経度からランベルト正角円錐図法上のXY座標値を得る。サーベイ地点の相対xy座標は、この地点を挟むサーベイルート上のチェック点を基準にして、このチェック点のランベルト正角円錐図法上のXY座標データをもとに補間法により、ランベルト正角円錐図法上のXY座標に変換される。相対xy座標からランベルト正角円錐図法上のXY座標に変換することにより、サーベイした地域全体について統一的なデータ処理ができる。

補正前の座標系をxy座標、補正後の座標系をXY座標とすると以下のような関係がある。国土地理院発行の地形図を基準とした場合、サーベイコース内の2点A、B間の任意の1点 (x_i, y_i) は、補正後のランベルト正角円錐図法上のXY座標 (X_i, Y_i) に次式により変換される。

$$X_i = c \cdot ((x_i - x_1) \cos \theta - (y_i - y_1) \sin \theta) + X_1 \quad (7)$$

$$Y_i = c \cdot ((x_i - x_1) \sin \theta + (y_i - y_1) \cos \theta) + Y_1 \quad (8)$$

ここに、

$$c = ((X_2 - X_1)^2 + (Y_2 - Y_1)^2)^{0.5} / ((x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2)^{0.5}$$

$$\cos \theta = (X_2 - X_1)(x_2 - x_1) + (Y_2 - Y_1)(y_2 - y_1) / \Delta$$

$$\sin \theta = (x_2 - x_1)(Y_2 - Y_1) + (X_2 - X_1)(y_2 - y_1) / \Delta$$

$$\Delta = ((X_2 - X_1)^2 + (Y_2 - Y_1)^2)^{0.5} \cdot ((x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2)^{0.5}$$

X_1, X_2, Y_1, Y_2 : 任意の1点 (x_i, y_i) を挟むチェック点で、ランベルト正角円錐図法上のXY座標値

x_1, x_2, y_1, y_2 : 任意の1点 (x_i, y_i) を挟むチェック点で、補正前のxy座標値

となり、地形図上に設定した北緯36°、東経140°を原点とするXY座標値に変換される。

(2) 線量率および2.61 MeV γ 線線束密度の算出

線量率

測定されたガンマ線波高分布スペクトルのチャンネルとエネルギーとの関係は、 ^{40}K の 1.46 MeV および ^{208}Tl の 2.61 MeV のピークチャンネルから求めた。

線量計算は G (E) 関数法⁹⁾により行なった。用いた G (E) 関数はパルス波高分布スペクトルに直接適用する DBM 回路用である。NaI (Tl) シンチレータの波高 - エネルギーの関係は、発光効率の γ 線エネルギー依存性を考慮する必要があり、 ^{137}Cs (0.0662 MeV) で波高 - エネルギー校正をした場合には、波高とエネルギーの関係が比例するとした場合、 ^{40}K (1.460 MeV) および ^{208}Tl (2.61 MeV) のピークはみかけ上、下記のエネルギーに相当するチャンネルに現れる。

^{40}K	: 1.423 MeV
^{208}Tl	: 2.527 MeV

波高 - エネルギー校正は測定スペクトルから得られる各々のピークチャンネルと上記のみかけのエネルギー値を用いて行なった。

2.61 MeV γ 線線束密度

トリウム系列から 2.61 MeV γ 線を評価する目的で、得られる波高スペクトル分布にトリウムウィンドウ (2.50 - 2.75 MeV) を設定し、次式から 2.61 MeV γ 線の線束密度を得た。

$$n_{\text{TH}} = N_{\text{TH}} / S / \eta_{\text{TH}} \quad (9)$$

ここに、

n_{TH} : 正味 2.61 MeV γ 線線束密度 ($\gamma / \text{cm}^2 \cdot \text{sec}$)

N_{TH} : ウィンドウ計数率 (cps)

η_{TH} : ピーク効率 0.242

S : 5" ϕ NaI (Tl) 検出器の断面積 126.7 cm^2

(3) 地上 1 m 値への換算

検出器は環境サーベイ車の後部屋根に取り付けられている。このため、地殻 γ 線は車体により遮蔽され、測定値は地上 1 m と異なったものとなるので、地上 1 m 値に関する必要がある。走行サーベイにおける無雪時、積雪時の地上値への換算は、測定値から宇宙線および空気中ラドン娘核種による線量率寄与分を差し引いた後、1.3 倍することにより行ない、得られた値をその測定を行なった付近での平均的地上 1 m における値であるとした。この方法による地上 1 m 値換算結果を 4.1.1 (2) に示す。ここに、宇宙線寄与分 1.3 (nGy/h) およびラドン娘核種からの寄与分を 0.9 (nGy/h) と仮定し、これらの合計 2.2 (nGy/h) とした。地上換算係数 1.3 は様々な平坦地における地上値と車上値の比較から平均的な値として算出した。この換算係数は無雪時および積雪時の線量率分布を地上 1 m 値で表すために用いた。しかし、積雪時には、測定値に占める道路からの線量率寄与が無雪時に比べてかなり大きくなるため、積雪時の路上サーベイ結果は道路および周辺の地形や建物等の影響を受け易い。このため、測定を行なった付近の道路の影響を含まない部分の積雪による減衰の検討は、後述 4.2 の方法により行なった。

3.3 メッシュファイルの作成

ヘリコプタによる空中サーベイデータ、環境サーベイ車による路上走行サーベイデータ、各種調査データについて以下のデータ処理を行なった。各データの出力形式はお互いに比較しやすいようにメッシュファイル形式とした。ここで、メッシュとは調査地域を縦・横の区画に分割し、その1つ1つを意味する。メッシュの範囲および大きさは、Table 3.6 に示す。原点は3.2.2 (1) に述べたとおりである。メッシュファイルは、各メッシュの中央の場所の位置データおよび各メッシュに含まれる線量率および2.61 MeV γ 線線束密度データの単純平均値（走行サーベイデータは地上値換算をしない測定値、空中サーベイデータは地上値換算をした値）から構成される。メッシュによってはデータ数が少ないものもあるが、本報告では得られる全てのメッシュデータについて同様に処理した。

(1) 空中サーベイデータ

航空機 γ 線サーベイデータシステム (ARSAS) により取得されたデータは大型計算機で処理され、波高分布からは線量率、位置のデータからはヘリポートを原点とする XY 座標が求められ、線量ファイル、スペクトルファイル等の4種類のファイルとして出力される。このうち、線量、XY 座標値、時刻等を記録した線量ファイルを磁気テープに書込み、16 ビットパーソナルコンピュータ上で MT (磁気テープ) からフロッピーディスクデータに記録媒体の変換後、ランベルト正角円錐座標系への座標修正を行ない、線量率2.61 MeV γ 線線束密度のメッシュファイルを求めた。各メッシュの値はバックグラウンドを含まない地上1 m 高における地殻ガンマ線のみの成分の値となっている。

(2) 路上走行サーベイデータ

ガンマ線波高分布処理解析装置により取得されたデータはフロッピーディスクと磁気テープに記録される。フロッピーディスクには、時間情報、位置情報、線量率情報等が記録される。磁気テープには、上記フロッピーディスクに記録されているものと同じデータと波高分布が記録される。

ここではフロッピーディスク上のデータの処理を行なった。ガンマ線波高分布処理解析装置により得られるディスクデータフォーマットは CP/M 形式であるため、MS/DOS 形式に変換後16 ビットパーソナルコンピュータで処理を行なった。得られた位置座標は出発地点を原点 (0, 0) とする xy 座標系であるため、ランベルト正角円錐座標系への座標修正を行なった後、10 秒毎に得た線量率、2.61 MeV γ 線線束密度のデータからメッシュファイルを求めるために用いられた。但し、バックグラウンドを差し引いた地上値換算しない値となっている。

(3) その他の調査データ

土壌採取データは後日、鉄室内でのガンマ線スペクトルによりウラン系列、トリウム系列およびカリウム - 40 について核種分析を行ない、これらの濃度から地上1 m での線量率への変換を行なった。また、採取地点の緯度・経度から円錐座標系への座標変換を行ない、線量率メッシュファイルを作成した。

積雪調査データは、採取地点の緯度・経度から円錐座標系への座標変換を行ない、得られた積雪水量とともに積雪水量メッシュファイルを作成した。

4. 測定結果

4.1 線量率および線束密度

取得データとして、ヘリコプタによる空中サーベイデータ、環境サーベイ車による路上走行サーベイデータ、その他の調査データがある。これらをメッシュ出力した結果について線量率、2.61 MeV γ 線線束密度別に以下に述べる。

4.1.1 線量率

(1) 空中サーベイ

無雪時

長岡市内を1 km \times 1 kmのメッシュに分けた無雪時における線量率地上値換算は30～48 nGy/hの範囲の分布を示している。信濃川を境に東西に分けると、東側が西側に比べて低い傾向を示す。長岡～新潟間の国道8号線沿いの地域では、新潟寄りの地域が高く39～44 nGy/h、長岡寄りの地域が多少低めの35～39 nGy/hの範囲の値を示す。(Fig. 4.1(1)(3)参照)

積雪時

長岡市内を1 km \times 1 kmのメッシュに分けた積雪時における線量率地上値換算は22 nGy/h以下の値を示し、中心部では高く、周辺部では低い傾向を示した。長岡～新潟間の国道8号線沿いの地域では、新潟寄りの地域が高く22 nGy/h以上、三条市から長岡市にかけては徐々に低くなった。(Fig. 4.1(2)(4)参照)

(2) 路上走行サーベイ

無雪時

長岡市内を1 km \times 1 kmのメッシュに分けて出力した γ 線線量率は、無雪時において、3.2.2(3)に述べた地上値換算法ではほとんどの地域が26～44 nGy/hの範囲内に含まれ、特に30～35 nGy/hの地域が多い。長岡市内、新潟市内、信濃川沿いおよび阿賀野川沿いを含む2 km \times 2 kmの範囲のメッシュの線量率では、地上値換算で新潟市内が44～57 nGy/hで、長岡市内に比べて高い。越後平野における γ 線線量率について、信濃川沿いと阿賀野川沿いを比較すると、阿賀川沿いがほとんどの地域で44 nGy/h以上の値を示し、信濃川沿いより高い。広域に、長岡から新潟、国道49号経由郡山、東海までのコースと、東海から水戸、国道50号経由高崎、高崎から関越自動車道経由川越、さらに常磐自動車道柏IC～那珂IC間のコースの新潟～茨城を結ぶ環状地域の走行を行ない、これを6 km \times 6 kmの範囲のメッシュに分けて線量率分布を示した。地上値換算で48 nGy/h以上の地域として、阿賀野川沿い、久慈川上流(太子)(河川沿いは場所によって地形的影響も考えられる)、道路構造物の影響による常磐自動車道があげられ、30 nGy/h以下の比較的低い地域として、会津盆地、関東平野西部(群馬)があげられる。(Fig. 4.2(1)～(3)参照)

積雪時

長岡市内を1 km×1 kmのメッシュに分けて出力した積雪時における線量率メッシュでは、 γ 線線量率は3.2.2(3)に述べた地上値換算で9～35 nGy/hの範囲となり、無雪時に比べ線量率の変化が大きい。市街中心部では26 nGy/h以上で、周辺部では9～22 nGy/hの地域が多い。(Fig. 4.2(4)参照)

(3) その他の調査

土壌調査および積雪調査から得たデータはそれぞれのメッシュに1～2データしか存在せず、メッシュの代表値とするには不十分である。しかし、空中サーベイおよび走行サーベイ結果との比較を容易できるように、あえて図示した。

土壌調査

土壌濃度から得られた長岡市内の地上1 mでの全線量率は、信濃川の西側では39～44 nGy/h、東側では28～48 nGy/hの範囲であった。調査結果をTable 4.1およびFig. 4.3に示す。

積雪調査

積雪調査から得られた積雪水量は、長岡市内では信濃川の東西での違いは殆ど無く、27～40 g/cm²の値を示した。調査結果をFig. 4.4に示す。長岡～新潟間の国道8号線沿いの地域では、新潟寄りの地域では積雪がほとんど認められず、三条市から長岡市にかけては0～28 g/cm²の範囲で徐々に大きくなる傾向を示した。

4.1.2 2.61 MeVの γ 線線束密度

以下に、²³²Th系列の2.61 MeVの γ 線線束密度について述べる。

(1) 空中サーベイ

無雪時

長岡市内を1 km×1 kmのメッシュに分けて出力した無雪時における2.61 MeVの γ 線線束密度の地上1 m値は0.06～0.12 $\gamma/cm^2 \cdot s$ の範囲の分布を示した。中心部では0.06～0.10 $\gamma/cm^2 \cdot sec$ 、周辺部の山沿いの地域では0.10 $\gamma/cm^2 \cdot s$ 以上であった。長岡～新潟間の国道8号線沿いの地域では、新潟寄りの地域が0.10～0.12 $\gamma/cm^2 \cdot s$ 、長岡寄りの地域が0.08～0.12 $\gamma/cm^2 \cdot s$ を示した。(Fig. 4.5(1)(3)参照)

積雪時

長岡市内を1 km×1 kmのメッシュに分けて出力した積雪時における2.61 MeVの γ 線線束密度の地上1 m値は0.06 $\gamma/cm^2 \cdot s$ 以下の値を示し、中心部では高く、周辺部では低くなる傾向を示した。長岡～新潟間の国道8号線沿いの地域では、新潟寄りの地域が高く0.04 $\gamma/cm^2 \cdot s$ 以上、三条市から長岡市にかけては0.04 $\gamma/cm^2 \cdot s$ 以下と徐々に低くなった。

(Fig. 4.5(2)(4)参照)

(2) その他の調査

土壌濃度から得られた長岡市内の地上1 mでの2.61 MeVの γ 線線束密度は、場所によらず、0.10～0.14 $\gamma/cm^2 \cdot sec$ であった。(Table 4.1参照)

4.2 線量透過率

線量透過率の定義については既に述べた通りであるが、測定方法および評価方法の違いによる以下の三種類について算出法を述べる。

4.2.1 空中サーベイによる線量透過率の算出

空中サーベイでは、無雪時および積雪時に得た地殻ガンマ線線量率の上空値を地上換算した値を用いて、次式で定義される線量透過率 R_{HD} を算出した。

$$R_{HD} = D_{SH1} / D_{NH1} \quad (10)$$

D_{SH1} : 積雪時の地上 1 m における線量率

D_{NH1} : 無雪時の地上 1 m における線量率

取得データから得られた無雪時および積雪時における長岡市内 1 km × 1 km のメッシュファイルのそれぞれの対応するメッシュ毎に R_{HD} を算出した。(Fig. 4.6 (1)(2) 参照)

4.2.2 走行サーベイと空中サーベイの相関関係を用いた走行サーベイによる線量透過率算出

(1) 差分相関による方法

無雪時における線量率と積雪時における線量率の差を差分線量率 ΔD と定義する。

$$\Delta D = D_S - D_N \quad (11)$$

D_S : 積雪時の線量率

D_N : 無雪時の線量率

空中サーベイによる測定の差分線量率と路上走行サーベイによる測定の差分線量率はどちらも同じく積雪によって減少した線量率を示すが、路上走行サーベイでは積雪期においても多くの場合、道路上は除雪されているため、道路上以外の場所の積雪によって減少した線量率を意味する。このようにして得られた空中サーベイの差分線量率 ΔD_{H1} と路上走行サーベイでの差分線量率 ΔD_{CR} との関係について検討し、道路上も含め地面全体が雪に覆われていた場合に走行サーベイによって測定される差分線量率を推定することを考えてみる。空中サーベイの差分線量率は 3.3 (1) に述べた地上値換算したメッシュデータから求め、路上走行サーベイの差分線量率は 3.3 (2) に述べた地上値換算しないメッシュデータから求めた。

$$\Delta D_{H1} = D_{NH1} - D_{SH1} \quad (12)$$

$$\Delta D_{CR} = D_{NCR} - D_{SCR} \quad (13)$$

D_{NH1} : 無雪時の地上 1 m における線量率

D_{SH1} : 積雪時の地上 1 m における線量率

D_{NCR} : 無雪時の車上線量率

D_{SCR} : 積雪時の車上線量率

各メッシュの中で路上走行サーベイと空中サーベイの両方の測定値が存在するデータ間の相関

関係を用いて、走行データから地面全体が雪に覆われているとした場合の地上1m 差分線量率を求める。線量透過率 R_{CD} の算出は次式により行う。次式の分子は積雪時の地上1m における線量率を意味する。無雪時線量率 D_{NCI} は走行サーベイから得た地上1mでの線量率である。

$$R_{CD} = (D_{NCI} - \Delta D_1) / D_{NCI} \quad (14)$$

$$\Delta D_1 = \Delta D_{CR} / r \quad (15)$$

D_{NCI} : 無雪時の地上1m における線量率

ΔD_1 : 相関から得た地上1m 差分線量率

ΔD_{CR} : 走行サーベイでの差分線量率

r : 差分線量率 ΔD_{HI} と差分線量率 ΔD_{CR} との相関係数, 0.33

(2) 路上走行サーベイと空中サーベイの差分相関

無雪時における路上走行サーベイデータから地上1m 線量率 D_{NCI} への換算は道路構造物の放射能濃度とその地域の表層土の放射能濃度と余り違いが無い場合は容易である。

$$D_{NCI} = 1.3 \times D_{NCR} \quad (16)$$

D_{NCR} : 無雪時の走行サーベイ値

積雪時においては道路外からやってくるガンマ線は雪によって減衰される一方、除雪が行われた道路からのガンマ線はほとんど減衰を受けない。従って、線量率寄与の大部分は走行している道路からであると考えられる。このため、無雪時における手法で地上1m 線量率への換算を行なうことはできない。積雪時における空中サーベイで測定される値は道路からの線量率寄与とそれ以外からの線量率寄与を含んだ平均的線量率を意味する。この積雪時空中サーベイから得られた地上1m 線量率をその地域の平坦地に積雪した場合の平均的な地上1m 線量率とした。空中サーベイの差分線量率 ΔD_{HI} を基準にして、これに対する車上での差分線量率 ΔD_{CR} との相関関係を検討した。その結果、長岡市内の空中サーベイと市街地走行データの相関は余りないが、長岡～三条間の国道8号線沿いデータの相関は良いことが明らかになった。

(Fig. 4.7 (1)(2) 参照)

(3) 路上走行サーベイに差分相関適用による線量透過率の算出

差分線量率に関する空中サーベイと走行サーベイの相関が良かった長岡～三条間の国道8号線沿いの地域での相関関係を用いて、地面全体が雪に覆われているとした場合の地上1mでの差分線量率を求め、前述(14)式により線量透過率を算出した。

また、国道8号線沿いの地域とジオメトリの異なる地域への適用では誤差が大きくなる。

(Fig. 4.8 (1)(2) 参照)

4.2.3 修正係数を用いた走行サーベイによる線量透過率算出

(1) 修正係数法

路上走行サーベイにおける透過率 R_{CD} を求める手法として、修正係数 n_D を用いる方法についても検討した。本方法は全て車上での値を用いる他は前述4.2.2と同様に無雪時線量に対する積雪時線量を意味するが、特に、積雪する場所にだけ注目している。ここに、 n_D は全ガン

マ線量（サーベイ車屋根に取り付けた検出器によって無雪時に測定される線量率）に対する、積雪によって線量が減衰する部分から寄与する無雪時のガンマ線量の割合を意味し、0～1の間の値である。無雪時線量は無雪時に走行サーベイから得た車上で線量率である。

$$R_{CD} = 1 - \Delta D_{CR} / (D_{NCR} \times n_D) \quad (17)$$

ΔD_{CR} : 走行サーベイの差分線量率

D_{NCR} : 無雪時の車上における線量率

路上走行サーベイから得られた車上で差分線量率は、橋上ではその他の場所に較べて、特に低くなる。これは平地に比べ、河川に積雪しない橋上が無雪時と積雪時の線量の差が小さくなるためである。修正係数 n_D は、(16)式を変形し、透過率 R_{CD} の値として空中サーベイから得た透過率 R_{HD} を代入することにより次式となる。分母全体は道路上にも雪が一樣にある場合の車上で差分線量率、分子は実際に走行サーベイにより観測された車上の差分線量率を意味する。

$$n_D = \Delta D_{CR} / \{ D_{NCR} \times (1 - R_{HD}) \} \quad (18)$$

R_{HD} : 空中サーベイから得た線量透過率

走行サーベイにより観測される差分線量は道路およびその周辺の除雪による効果、建物、河川等による影響を大きく受ける。この結果、積雪時線量と無雪時線量の違いが小さく、したがって、空中サーベイに比べ、差分線量が小さい値となる。修正係数はこの程度を定量的に数値化したものである。

修正係数 n_D についての具体的な数値を検討するため、長岡市内の $1 \text{ km} \times 1 \text{ km}$ のメッシュの線量率ファイルで走行サーベイと空中サーベイのいずれのデータも存在するメッシュについて n_D を算出した。修正係数 n_D の地域分布は、橋上データを含むメッシュで $0 \sim 0.2$ 、道路の両側に建物等が比較的多い市街地では $0.2 \sim 0.4$ 、比較的幅の広い道路の両側に比較的建物が少ない地域では $0.4 \sim 0.6$ 、水田地域等の比較的幅の狭い地域では $0.6 \sim 0.8$ の値であった。

(Fig. 4.9 参照)

(2) 路上走行サーベイにおける線量減衰比と修正係数の相関

路上走行サーベイで測定された車上で線量の比を路上走行サーベイ減衰比 A_D と定義する。

$$A_D = D_{SCR} / D_{NCR} \quad (19)$$

D_{SCR} : 積雪時の車上における線量率

D_{NCR} : 無雪時の車上における線量率

これを用いて修正係数を表わすと次式のようなになる。

$$n_D = (1 - A_D) / (1 - R_{HD}) \quad (20)$$

長岡市内の $1 \text{ km} \times 1 \text{ km}$ のメッシュファイルで得られた修正係数と各メッシュに対応する減衰比とは、強い負の相関を示した。(Fig. 4.10 参照)

(3) 路上走行サーベイへの修正係数の適用による線量透過率の算出

修正係数を用いることにより前述 (16) 式から線量透過率を求めることができる。ここで、修正係数は、前述 (19) 式により減衰比と空中サーベイから得た透過率により決定される。しかしながら、走行サーベイを実施した全域について、空中サーベイから得た透過率のデータは無い。しかし、前述 (2) から修正係数と減衰比は相関をもつため、減衰比から修正係数を求めることができる。積雪時における長岡市街の $1 \text{ km} \times 1 \text{ km}$ のメッシュ毎に修正係数を求め、これと、3.3 (1) に述べたメッシュデータ（地上値換算しない無雪時・積雪時における長岡市内の $1 \text{ km} \times 1 \text{ km}$ のメッシュファイル）から差分を求め、この差分線量率ファイルから前述 (1) により、透過率の算出を行った。(Fig. 4.11 (1)(2) 参照)

4.3 2.61 MeV γ 線透過率

高度別地殻ガンマ線の積雪水量による減衰 (Table 3.4) に示す通り、積雪水量或いは高度と減衰の関係は線量率の減衰傾向と 2.61 MeV ガンマ線の減衰傾向では異なる。以下では、空中サーベイおよび走行サーベイにより得られた ^{232}Th 系列の 2.61 MeV の γ 線線束密度データを用いた 2.61 MeV の γ 線透過率算出について述べる。

4.3.1 空中サーベイによる 2.61 MeV γ 線透過率算出

(1) 空中サーベイ法

空中サーベイでは、無雪時および積雪時に得た 2.61 MeV の γ 線線束密度の上空値を地上換算した値を用いて、次式により定義される 2.61 MeV γ 線透過率 R_{HT} を算出した。

$$R_{HT} = T_{SH1} / T_{NH1} \quad (21)$$

T_{SH1} : 積雪時の地上 1 m における 2.61 MeV の γ 線線束密度

T_{NH1} : 無雪時の地上 1 m における 2.61 MeV の γ 線線束密度

取得データから得られた無雪時および積雪時における長岡市内の $1 \text{ km} \times 1 \text{ km}$ のメッシュファイルのそれぞれの対応するメッシュ毎に R_{HT} を算出した。(Fig. 4.12 (1)(2) 参照)

4.3.2 走行サーベイと空中サーベイの相関関係を用いた走行サーベイによる 2.61 MeV γ 線透過率算出

(1) 路上走行サーベイと空中サーベイの差分相関

2.61 MeV の γ 線線束についても路上走行サーベイデータから地上 1 m への換算は 4.2.2 (2) に述べたと同様の理由により、無雪時の場合と積雪時の場合とは異なる。

積雪時における空中サーベイで測定される値は道路からの 2.61 MeV の γ 線線束密度寄与とそれ以外からの 2.61 MeV の γ 線線束密度寄与を含んだ平均値を意味する。この積雪時サーベイから得られた地上 1 m 値をその地域の平坦地に積雪した平均的な地上 1 m での値とした。空中サーベイの差分 2.61 MeV γ 線線束密度 ΔT_{H1} および路上走行サーベイの差分 2.61 MeV γ 線線束密度 ΔT_{CR} は次式から求めた。

$$\Delta T_{H1} = T_{NH1} - T_{SH1} \quad (22)$$

$$\Delta T_{CR} = T_{NCR} - T_{SCR} \quad (23)$$

T_{NH1} : 無雪時の地上 1 m における 2.61 MeV γ 線線束密度

T_{SH1} : 積雪時の地上 1 m における 2.61 MeV γ 線線束密度

T_{NCR} : 無雪時の車上 2.61 MeV γ 線線束密度

T_{SCR} : 積雪時の車上 2.61 MeV γ 線線束密度

空中サーベいの差分 2.61 MeV γ 線線束密度 ΔT_{H1} を基準として、これに対する車上での差分 2.61 MeV γ 線線束との相関関係を検討した。その結果、長岡市内の市街地走行および長岡～三条間の国道 8 号線沿いの地域での空中サーベいと走行サーベいの差分相関は共に良くなかった。(Fig. 4.13(1)(2) 参照)

(2) 路上走行サーベいに差分相関適用による 2.61 MeV γ 線透過率の算出

前述した通り、差分相関が良くないため、これを適用した透過率の算出については行なわなかった。

4.3.3 修正係数を用いた走行サーベいによる 2.61 MeV γ 線透過率算出

(1) 修正係数法

透過率 R_{CT} を求める手法として、前述 4.2.3 と同様に、修正係数 n_T を用いる方法について検討した。

$$R_{CT} = 1 - \Delta T_{CR} / (T_{NCR} \times n_T) \quad (24)$$

ΔT_{CR} : 走行サーベいの差分 2.61 MeV γ 線線束密度

T_{NCR} : 無雪時の車上 2.61 MeV γ 線線束密度

修正係数 n_T は次式により表わされ、具体的数値を検討するため、長岡市内の 1 km \times 1 km のメッシュファイルで走行サーベいと空中サーベいのいずれのデータも存在するメッシュについて算出した。(Fig. 4.14 参照)

$$n_T = \Delta T_{CR} / \{ T_{NCR} \times (1 - R_{HT}) \} \quad (25)$$

R_{HT} : 空中サーベいから得た 2.61 MeV γ 線透過率

修正係数 n_T の地域分布は、橋上を含むメッシュおよび市街地の一部で 0 ~ 0.2, 道路の両側に建物等が比較的多い市街地では 0.2 ~ 0.4, 比較的幅の広い道路の両側に比較的建物が少ない地域では 0.4 ~ 0.6, 水田地域等の比較的道路幅の狭い地域では 0.6 ~ 0.8 の値を示した。

(2) 路上走行サーベい減衰比と修正係数の相関

路上走行サーベいで測定された車上での無雪時に対する積雪時の比を路上走行サーベい減衰比 A_T と定義する。

$$A_T = T_{SCR} / T_{NCR} \quad (26)$$

T_{SCR} : 積雪時の車上 2.61 MeV γ 線線束密度

T_{NCR} : 無雪時の車上 2.61 MeV γ 線線束密度

これを用いて修正係数を表わすと次式のようにになる。

$$n_T = (1 - A_T) / (1 - R_{HT}) \quad (27)$$

長岡市内の1 km×1 kmのメッシュファイルで得られた修正係数と各メッシュに対応する減衰比とは、強い負の相関を示した。(Fig. 4.15 参照)

(3) 路上走行サーベイに修正係数適用による2.61 MeV γ 線透過率の算出

修正係数を用いることにより前述の式から2.61 MeV γ 線透過率を求めることができる。ここで、修正係数は、前述の式により減衰比と空中サーベイから得た透過率により決定される。しかしながら、走行サーベイを実施した全域について、空中サーベイから得た透過率のデータは無い。しかし、前述(2)から修正係数と減衰比は相関をもつため、減衰比から修正係数を求めることができる。積雪時における長岡市街の1 km×1 kmのメッシュ毎に修正係数を求め、これと、3.3(1)に述べたメッシュデータ(地上値換算しない無雪時・積雪時における長岡市内の1 km×1 kmのメッシュファイル)から差分を求め、この差分線量率ファイルから前述(1)により、2.61 MeV γ 線透過率の算出を行なった。(Fig. 4.16 (1)(2) 参照)

5. 考 察

以下に、各種の地上・空中調査結果の相互関係について、項目毎に検討する。

5.1 走行サーベイデータと空中サーベイデータの相関

前述4.2.2(2)に述べた差分相関について、国道8号線沿いでは強い相関を示した。以下、この結果について考察する。

無雪時における地上1 m線量率を D_1 とすると、空中サーベイによる差分線量率 ΔD_{HI} は、その地域の平均的な透過率 R を用いて下記のように表わすことができる。

$$\Delta D_{HI} = D_1 \times (1 - R) \quad (28)$$

無限平面に一本の道路を仮定し、道路上の検出器で測定されるであろう全線量に対する道路外の部分から寄与の割合を、モンテカルロ計算により算出した結果をもとに、走行サーベイによって得られる差分線量率を計算すると下記の通りとなる。

$$\Delta D_{CR} = F \times D_1 \times (1 - H \times R) / C \quad (29)$$

H: この値は0.7で、道路外からくる地殻ガンマ線が積雪を斜に通過することによる透過率の補正值(透過率は無限平面を考慮した値であり、斜方向だけからの入射の場合、補正が必要)

F: 道路幅および検出器高などによって決る値で、全線量に占める道路外からの

これを用いて修正係数を表わすと次式のようにになる。

$$n_T = (1 - A_T) / (1 - R_{HT}) \quad (27)$$

長岡市内の1 km×1 kmのメッシュファイルで得られた修正係数と各メッシュに対応する減衰比とは、強い負の相関を示した。(Fig. 4.15 参照)

(3) 路上走行サーベイに修正係数適用による2.61 MeV γ 線透過率の算出

修正係数を用いることにより前述の式から2.61 MeV γ 線透過率を求めることができる。ここで、修正係数は、前述の式により減衰比と空中サーベイから得た透過率により決定される。しかしながら、走行サーベイを実施した全域について、空中サーベイから得た透過率のデータは無い。しかし、前述(2)から修正係数と減衰比は相関をもつため、減衰比から修正係数を求めることができる。積雪時における長岡市街の1 km×1 kmのメッシュ毎に修正係数を求め、これと、3.3(1)に述べたメッシュデータ(地上値換算しない無雪時・積雪時における長岡市内の1 km×1 kmのメッシュファイル)から差分を求め、この差分線量率ファイルから前述(1)により、2.61 MeV γ 線透過率の算出を行なった。(Fig. 4.16(1)(2) 参照)

5. 考 察

以下に、各種の地上・空中調査結果の相互関係について、項目毎に検討する。

5.1 走行サーベイデータと空中サーベイデータの相関

前述4.2.2(2)に述べた差分相関について、国道8号線沿いでは強い相関を示した。以下、この結果について考察する。

無雪時における地上1 m線量率を D_1 とすると、空中サーベイによる差分線量率 ΔD_{H1} は、その地域の平均的な透過率 R を用いて下記のように表わすことができる。

$$\Delta D_{H1} = D_1 \times (1 - R) \quad (28)$$

無限平面に一本の道路を仮定し、道路上の検出器で測定されるであろう全線量に対する道路外の部分から寄与の割合を、モンテカルロ計算により算出した結果をもとに、走行サーベイによって得られる差分線量率を計算すると下記の通りとなる。

$$\Delta D_{CR} = F \times D_1 \times (1 - H \times R) / C \quad (29)$$

H: この値は0.7で、道路外からくる地殻ガンマ線が積雪を斜に通過することによる透過率の補正值(透過率は無限平面を考慮した値であり、斜方向だけからの入射の場合、補正が必要)

F: 道路幅および検出器高などによって決る値で、全線量に占める道路外からの

地殻ガンマ線の割合（道路幅は 20 m，道路盛土により地表からのサーベイ車検出器高 4 m，道路上の検出器位置は片側車線の真ん中と仮定して得た値で 0.35 を用いた。）

C : 1.3 は地上値を車上値にするための換算係数

差分線量率の比をとると、

$$\Delta D_{CR} / \Delta D_{HI} = 0.35 \cdot (1 - 0.7 \cdot R) / 1.3 \cdot (1 - R) \quad (30)$$

本調査期間中の国道 8 号線沿いの透過率は場所により異なるが、0.1 ~ 0.5 である。透過率が 0.1 であるときの差分線量率比は 0.28，0.5 であるときの差分線量率比は 0.35 となる。Fig. 4.7 (1) の傾きはこの範囲の傾きに沿った分布を示している。

5.2 積雪調査から得た積雪水量と走行および空中サーベイから得た積雪水量の比較

5.2.1 長岡市内地域における比較

積雪調査 18 地点のうち長岡市内で行なわれた 12 地点の積雪水量と空中サーベイ，路上走行サーベイから得た対応するメッシュ（各々の地点を含むメッシュ）の積雪水量との比較を行った。空中サーベイ，路上走行サーベイから得た透過率から積雪水量への換算は、3.1.4 に述べた高度減衰の一覧表（Table 3.4）を用いた。調査地点の各々の場所で積雪量が異なるため、積雪調査から得た積雪水量で実験から得た各積雪水量を規格化し、方式毎にその値の平均値で比較する。積雪データから得た結果に較べて、空中サーベイの線量方式では 0.8，路上走行サーベイの差分相関方式では 0.7，線量方式では 0.7 となった。空中サーベイの 2.61 MeV γ 線方式では 0.7，路上走行サーベイの 2.61 MeV γ 線方式では 0.6 となった。これらの数値は積雪調査から得た積雪水量との違いを意味する。比較から二つのことが明らかになった。一つは積雪調査による量と実際の量の差，もう一つは各方式から求めた積雪水量がそれぞれどの程度異なるのかを示している。1.0 よりも小さい数値は観測値に比べ積雪量を小さく評価したことを意味する。方式により違いはあるが、各々の結果は積雪データから得た積雪水量の 6 ~ 8 割になった。これは、積雪調査を行った場所が水田等であり、その周辺で最も積雪の大きいことが原因していると考えられる。比較結果の一覧を Table 5.1 に示す。

5.2.2 国道 8 号線沿いにおける比較

積雪調査から得た国道沿い 8 地点の積雪水量と空中サーベイ，路上走行サーベイから得たメッシュデータの積雪水量との比較では、ヘリコプタを用いた線量方式では 0.9，2.61 MeV γ 線方式では 1.0，サーベイ車を用いた差分方式では 1.2，線量方式で 1.2，2.61 MeV γ 線方式で 1.0 となった。方式により違いはあるが、各々の結果は積雪データから得た透過率の 9 ~ 12 割の結果となった。長岡市内の評価結果に比べ、積雪調査結果に近い結果となった。これは、国道 8 号線沿いの地域が長岡市内の地域に比べて測定ジオメトリーの変化および除雪等による積雪場の乱れが小さいことによるものと思われる。比較結果の一覧を Table 5.2 に示す。

5.3 公表積雪値（気象協会）と野外測定による評価結果との比較

積雪調査の期間中（1988. 2. 27～2. 29）の気象協会の公表積雪値^①は、積雪深で65～66 cmであった。この時期における積雪密度を0.4としたときの積雪水量は26.0～26.4 g/cm²となる。長岡市内で行なった12地点の積雪実施調査から得た積雪水量の平均値は31g/cm²であった。長岡国道工事事務所で観測された積雪深は78～80 cmであり、積雪密度を0.4としたときの積雪水量は31.2～32.0 g/cm²となる。長岡市内のサーベイコース全体での空中サーベイによる線量方式では22～23 g/cm²、2.61 MeV γ線方式では20 g/cm²になった。一方、長岡市内を中心に行ったサーベイコース全体での路上走行サーベイによる差分相関適用方式では17 g/cm²、線量方式では21 g/cm²および2.61 MeV γ線方式では17～18 g/cm²になった。気象協会の値を基準に他の結果を定量的に評価すると、空中サーベイ結果が0.76～0.88、走行サーベイでは0.64～0.81となった。

以上、公表積雪深（気象協会）から得た積雪水量に較べて空中および走行サーベイから得た実効的な積雪水量は20～30%小さい値となることがわかった。これは、前述5.2から市街地での実効的な積雪水量は郊外に比べ、小さく観測されることによる。

5.4 積雪時走行サーベイデータの解析

走行サーベイにより得られる積雪時の線量値は無雪時に比べ減少するが、ここでは減少の程度を定量的に推定することを試みた。モンテカルロシミュレーション計算により無限平面に一本の道路を仮定し、道路上の検出器で測定されるであろう全線量に対する道路外の部分からの寄与の割合を計算した。この値は道路の幅、地表面からの検出器高および道路上での検出器の位置（真ん中、端等）によって異なる。但し、この計算ではサーベイ車自体の遮蔽については考慮していない。

長岡市内の特徴的な箇所について以下の推定式を用いて検討した。次式は、積雪時に観測される車上線量率 D_{snow} が道路からの成分と道路外からの積雪を通過する成分から成ることを示している。ここに、 b は道路外からの寄与の割合を示し、これは、前述した n_D と同様の意味をもつ。

$$D_{\text{snow}} = D_{\text{NCR}} \times (a + b \times R \times P) \quad (31)$$

D_{NCR} : 無雪時の車上線量率

a : 道路からの寄与の割合

b : 道路外からの寄与の割合

R : 実施調査から得た線量透過率

P : 道路外からくる地殻ガンマ線が積雪を斜に通過することによる透過率の補正值

① 関越道（長岡 I.C. ～ 小千谷 I.C.）

この区間は道路幅 20 m、道路の盛土によりサーベイ車の検出器高が地表面から 5 m、道路

上のサーベイ位置は片側車線の真ん中であるとする、推定式の係数 a , b および P はシミュレーション計算から、 R は実施調査から次の通りになる。

$$a = 0.6, b = 0.4, R = 0.12, P = 0.7$$

長岡～小千谷間の9メッシュについての D_{snow} の推定結果は積雪時の観測値と比較して±5%の範囲で一致した。

② 国道8号線（小曾根～大口）

この区間は道路幅20m、道路の盛土によりサーベイ車の検出器高5m、道路上のサーベイ位置は片側車線の真ん中とし、推定式の係数は①と同一であるとした。小曾根～大口間の6メッシュについての推定結果は積雪時の観測値と比較して±10%の範囲で一致した。

③ 長岡市街（宮内二丁目～東蔵王二丁目）

この区間は道路幅20m、検出器高2.5m、道路上のサーベイ位置は中央であるとして推定した。

$$a = 0.78, b = 0.22, R = 0.12, P = 0.7$$

宮内二丁目～東蔵王二丁目間の8メッシュについての推定結果は積雪時の観測値と比較して±10%の範囲で一致した。

④ 国道351号線（下山二丁目～浦）

この区間は道路幅6m、検出器高2.5m、道路上のサーベイ位置は中央であるとして推定した。

$$a = 0.5, b = 0.5, R = 0.12, P = 0.7$$

下山二丁目～浦間の7メッシュについての推定結果は積雪時の観測値と比較して-13～+27%の範囲で一致した。

⑤ 国道404号線（上富岡町～上栗・七日町）

この区間は道路幅6m、検出器高は2.5m、道路上のサーベイ位置は中央であるとし、推定式の係数は④と同一であるとした。上富岡町～上栗・七日町間の13メッシュについての推定結果は積雪時の観測値と比較して±20%の範囲で一致した。

以上により、関越自動車道など比較的道路周辺に外乱の少ない道路においては、推定式に最適な係数を決定することにより積雪時の線量値を推定できることがわかった。これは、積雪時の走行サーベイ値の解析が可能であることを示す。

5.5 サーベイ方法の検討

ヘリコプタおよび環境サーベイ車を用いた積雪による減衰調査の方法についての検討を行なう。前述5.2および5.3に述べた通り、積雪調査の結果と空中サーベイおよび走行サーベイ結果は積雪水量の比較では前者が後者より大きい値となった。しかし、これは除雪等によることが原因していると考えられ、傾向としては妥当であり、したがって、観測により得た積雪水量は現実に近い量を示しているものと思われる。透過率の調査に関する空中サーベイおよび走行サーベイによる方法の有効性は十分に確認された。

ヘリコプタによる調査は、上空からの調査になるため、狭い特定地域の調査には適さないが、前述3.2.1(2)の通り、バックグラウンドの評価を行なうことにより、積雪による地殻ガンマ線の透過率調査は容易である。環境サーベイ車を用いた調査では、差分相関による方式で検討を行なったが、市街地のような建物が道路沿いにある地域では測定ジオメトリーが変化するため、適さないことがわかった。修正係数を用いた方式は、予め空中サーベイと走行サーベイの相関から修正係数を算出する関係式が得られていれば、実用的であることがわかった。

また、積雪水量を測定するための線量方式と2.61 MeV γ 線方式の比較では、方式的には、空気中ランド等の影響を受けにくい後者が有利であると思われたが、測定する放射線の強度が積雪によりかなり減少するため、十分な計数が得られず、統計的誤差が大きくなり、有利ではない事がわかった。

5.6 広域透過率分布の検討

国道8号線沿いについての比較では、積雪調査から得た線量透過率はFig. 4.4(1)に示す通り、長岡市～三条市間で0.15～0.47であった。空中サーベイによる線量方式ではFig. 4.6(1)に示す通り、同区間で0.10～0.50となり、調査結果に近い値が得られた。走行サーベイによる差分方式ではFig. 4.8(1)に示す通り、同区間で0.32～0.58、線量方式ではFig. 4.11(1)に示す通り0.19～0.32となった。各方式で多少異なる結果を示すが、違いの程度については5.2.2に述べた通りである。

長岡市内についての比較では、積雪調査から得た線量透過率はFig. 4.4(2)に示す通り市内では0.07～0.21であった。空中サーベイによる線量方式ではFig. 4.6(2)に示す通り、同区間で0.07～0.56となり、調査結果との比較から除雪による影響があることを示した。走行サーベイによる差分方式ではFig. 4.8(2)に示す通り、同区間で0.0～0.99、線量方式ではFig. 4.11(2)に示す通り0.14～0.95となった。調査結果との比較では全体的に走行サーベイからの透過率が大きな分布の幅を示した。長岡市内の積雪による地殻ガンマ線の線量率減衰は予想通りに市街中心部では少なく郊外で大きい結果となった。

6. 結 言

走行サーベイ法を用いた積雪時の透過率の評価では、差分相関による方式は測定ジオメトリーの変化が少ない国道8号線沿いでは有効、市街地では修正係数を用いる方法が実用的である。積雪地域での積雪量の状態は地理的条件・道路・建物等により均一でなく、公表される積雪量と測定により評価される積雪量が一致しないことが予想された。これらの具体的な数値について、気象協会の公表積雪値と空中サーベイおよび路上走行サーベイによる長岡市内全体での比較では、測定によって評価される値が積雪水量で2割～3割程度低くなる事が判明した。国道8号線沿いでの積雪調査とサーベイ結果との比較では、良く一致した。

ヘリコプタによる調査は、上空からの調査になるため、狭い特定地域の調査には適さないが、前述3.2.1(2)の通り、バックグラウンドの評価を行なうことにより、積雪による地殻ガンマ線の透過率調査は容易である。環境サーベイ車を用いた調査では、差分相関による方式で検討を行なったが、市街地のような建物が道路沿いにある地域では測定ジオメトリが変化するため、適さないことがわかった。修正係数を用いた方式は、予め空中サーベイと走行サーベイの相関から修正係数を算出する関係式が得られていれば、実用的であることがわかった。

また、積雪水量を測定するための線量方式と2.61 MeV γ 線方式の比較では、方式的には、空气中ランド等の影響を受けにくい後者が有利であると思われたが、測定する放射線の強度が積雪によりかなり減少するため、十分な計数が得られず、統計的誤差が大きくなり、有利ではない事がわかった。

5.6 広域透過率分布の検討

国道8号線沿いについての比較では、積雪調査から得た線量透過率はFig. 4.4(1)に示す通り、長岡市～三条市間で0.15～0.47であった。空中サーベイによる線量方式ではFig. 4.6(1)に示す通り、同区間で0.10～0.50となり、調査結果に近い値が得られた。走行サーベイによる差分方式ではFig. 4.8(1)に示す通り、同区間で0.32～0.58、線量方式ではFig. 4.11(1)に示す通り0.19～0.32となった。各方式で多少異なる結果を示すが、違いの程度については5.2.2に述べた通りである。

長岡市内についての比較では、積雪調査から得た線量透過率はFig. 4.4(2)に示す通り市内では0.07～0.21であった。空中サーベイによる線量方式ではFig. 4.6(2)に示す通り、同区間で0.07～0.56となり、調査結果との比較から除雪による影響があることを示した。走行サーベイによる差分方式ではFig. 4.8(2)に示す通り、同区間で0.0～0.99、線量方式ではFig. 4.11(2)に示す通り0.14～0.95となった。調査結果との比較では全体的に走行サーベイからの透過率が大きな分布の幅を示した。長岡市内の積雪による地殻ガンマ線の線量率減衰は予想通りに市街中心部では少なく郊外で大きい結果となった。

6. 結 言

走行サーベイ法を用いた積雪時の透過率の評価では、差分相関による方式は測定ジオメトリの変化が少ない国道8号線沿いでは有効、市街地では修正係数を用いる方法が実用的である。積雪地域での積雪量の状態は地理的条件・道路・建物等により均一でなく、公表される積雪量と測定により評価される積雪量が一致しないことが予想された。これらの具体的な数値について、気象協会の公表積雪値と空中サーベイおよび路上走行サーベイによる長岡市内全体での比較では、測定によって評価される値が積雪水量で2割～3割程度低くなる事が判明した。国道8号線沿いでの積雪調査とサーベイ結果との比較では、良く一致した。

謝 辞

本調査は、無雪時および積雪時にヘリコプタおよび環境サーベイ車を用いて広域に行なったものであり、いろいろの困難を伴った。しかし、無事故でこれを終了することができた。調査にあたっては、いろいろの御指導と御協力を戴いた長岡保健所環境課の方々、新潟県公害衛生研究所放射線監視センターの方々、ヘリポート使用に便宜を図って戴いた長岡市、東北電力長岡出張所の方々に謝意を表す。また、積雪データの入手にあたっては便宜を図って戴いた気象協会新潟支部の諸氏に謝意を表す。

参 考 文 献

- (1) 長岡鋭, 坂本隆一, 斎藤公明, 堤正博, 森内茂: “積雪による地殻 γ 線線量率の減衰 I. 保健物理, 23, 309 (1988).”
- (2) 藤元憲三: “大地から γ 線に対する雪の遮蔽効果”, 保健物理, 21, 3 (1986).
- (3) 長岡鋭, 坂本隆一, 斎藤公明, 堤正博, 森内茂: “積雪による地殻 γ 線線量率の減衰 II. 平坦地における実地調査”, (投稿予定).
- (4) 坂本隆一, 斎藤公明, 堤正博, 長岡鋭: “TLD を用いた積雪期間中の環境 γ 線線量率の減衰の測定”, (JAERIM 90-217).
- (5) 堤正博, 斎藤公明, 坂本隆一, 長岡鋭, 森内茂: “航空機ガンマ線サーベイシステムの開発・I- γ 線および位置計測機器とデータ処理法”, JAERIM 86-072 (1986).
- (6) 清水弘: “積雪観測法”, 日本雪氷学会誌, 4, 5 (1970).
- (7) K. SAITO and S. MORIUCHI: “Development of a Monte Carlo Code for the calculation of gamma ray transport in the natural environment”, Radiat. Prot. dosim., 12, 21 (1985).
- (8) K. SAITO: “External dose due to terrestrial rays on the snow cover”, Radiat. Prot. dosim., 35, 31-39 (1991).
- (9) 森内茂: “スペクトル - 線量変換演算子による線量評価法とその演算子の決定”, JAERI-1209 (1971).
- (10) 日本気象協会: “新潟県気象月報”, 昭和 62. 11 ~ 昭和 63. 4.
- (11) 建設省北陸地方建設局長岡国道工事事務所: “降積雪集計表”, 昭和 35 年度 ~ 昭和 59 年度.
- (12) 建設省北陸地方建設局長岡国道工事事務所: “降積雪観測表”, 昭和 35 年 12 月 ~ 昭和 63 年 3 月.
- (13) 科学技術庁国立防災科学技術センター: “長岡における積雪の断面観測資料”, 1983 ~ 1987.
- (14) 科学技術庁国立防災科学技術センター: “長岡における積雪の断面観測資料”, 1983 ~ 1987.
- (15) 新潟県: “新潟県降積雪および気温観測・調査報告書”, 昭和 59 年度 ~ 昭和 61 年度.
- (16) 建設省国土地理院: “国土数値情報の概要”, 1985.

Table 3.1 List of Airborne survey courses

ヘリコプタサーベイコース一覧

シリアル番号	実施月日	経路	調査項目	ヘリポート
1	1987・10・10	R8沿い	コース測定	新潟空港
2	1987・10・10	長岡市街	スキャン測定	長岡ヘリポート
3	1987・10・10	海上・R8沿い	ラドン・コース測定	長岡ヘリポート
4	1988・2・26	R8沿い	コース測定	新潟空港
5	1988・2・27	海上	ラドン測定	長岡ヘリポート
6	1988・2・27	長岡市街	スキャン測定 1	長岡ヘリポート
7	1988・2・28	海上	ラドン測定	長岡ヘリポート
8	1988・2・28	富島町水田	基準点測定 1	長岡ヘリポート
9	1988・2・28	富島町水田	基準点測定 2	長岡ヘリポート
10	1988・2・28	長岡市街	スキャン測定 2	長岡ヘリポート
11	1988・2・29	海上・北陸道	コース測定	長岡ヘリポート
12	1988・2・29	R8沿い	コース測定	長岡ヘリポート

Table 3.2 List of carborne survey courses

走行サーベイコース一覧

シリアル番号	実施月日	経路	始点	終点
1	1987・10・5	R118・R49	東海村(茨城)	新潟市
2	1987・10・6	新潟市街	新潟駅前	新潟衛研
3	1987・10・6	新潟市街	内野駅前	新潟衛研
4	1987・10・6	R402・新潟市街	巻町木山	新潟空港
5	1987・10・7	R8	新潟市	長岡市
6	1987・10・7	R404	長岡市	小千谷市
7	1987・10・7	関越道・R17・R351	小千谷市	長岡市
8	1987・10・8	R352	栖吉町	黒川(中条)
9	1987・10・8	長岡市街	鮫面橋	猿橋
10	1987・10・10	関越・北陸道	小千谷市	新潟市
11	1987・10・10	新潟市街	豊栄競馬場	泰平橋
12	1987・10・11	R49・R118	新潟市	東海村
13	1988・2・25	R6・R50・関越道	東海村(茨城)	長岡市
14	1988・2・26	R8	新潟市	長岡市
15	1988・2・27	R352	栖吉町	黒川(中条)
16	1988・2・27	長岡市街	鮫面橋	猿橋
17	1988・2・27	R351・R8	宮路	長岡I.C.
18	1988・2・29	R404・R351	下山三丁目	宮路
19	1988・2・29	R17	見附I.C.	見附I.C.
20	1988・2・29	関越・北陸道	見附I.C.	長岡I.C.
21	1988・3・1	関越・R16・常磐道	長岡市	東海村

Table 3.3 Summary of experiment carried out in the snow free season and in the snowfall season

調査の一覧

時期	調査内容	地点数	地点名
無雪時	土壌採取	市街地10点	1.福島町 2.鶴ヶ丘町 3.町田町 4.蔵王公園 5.神田町 6.土合 7.長岡ハイツ 8.高野町 9.宝地町 10.中沢
		基準点 5点	富島町水田 (1.6Km x 0.5Kmの範囲)
	TLD調査	長岡市 ・新潟市10点	1.長岡保健所 2.中越動物センター 3.長岡市小曾根 4.長岡市緑町 5.新潟公害衛生研究所
	スペクトル測定	基準点 8点	富島町水田 (1.6Km x 0.5Kmの範囲)
積雪時	積雪調査	国道8号沿い 8点	1.三条市石上 2.三条市西本成寺 3.栄村一ツ屋敷 4.栄村丸ノ曾根 5.見附市千刈 6.見附市大曲戸 7.長岡市新組町 8.長岡市富島町
		基準点 5点	富島町水田 (1.6Km x 0.5Kmの範囲)
		長岡市街10点	1.見附市椿沢町 2.三島町脇野町 3.長岡市深沢町 4.長岡市村松町 5.長岡市稲葉町 6.長岡市巻島町 7.長岡市川崎町 8.長岡市宝地町 9.長岡市上条町 10.長岡市才津町
	土壌採取	基準点 5点	富島町水田 (1.6Km x 0.5Kmの範囲)
	TLD調査	長岡市 ・新潟市10点	1.長岡保健所 2.中越動物センター 3.長岡市小曾根 4.長岡市緑町 5.新潟公害衛生研究所
	スペクトル測定	基準点 8点	富島町水田 (1.6Km x 0.5Kmの範囲)

Table 3.4(1) Attenuation of terrestrial exposure rate with the air and snow

地殻ガンマ線の高度別空気線量率の積雪水量による減衰

Comparison to the value at 1 m on the bare ground for total DOSE

H(m)= WE(g/cm2)	1.	20.	50.	100.	150.	200.	250.	300.
0.	.990995	.798596	.616621	.425113	.300592	.215887	.153662	.115672
1.	.898957	.736127	.574846	.396419	.281217	.201852	.144588	.108632
2.	.818933	.680045	.536168	.370145	.263278	.188997	.136138	.102104
3.	.748971	.629531	.500340	.346029	.246650	.177189	.128257	.096041
4.	.687480	.583885	.467139	.323845	.231221	.166314	.120898	.090402
5.	.633152	.542510	.436358	.303393	.216889	.156273	.114017	.085149
6.	.584911	.504893	.407809	.284499	.203562	.146979	.107575	.080251
7.	.541865	.470594	.381317	.267009	.191158	.138355	.101538	.075677
8.	.503270	.439234	.356722	.250788	.179603	.130337	.095874	.071400
9.	.468506	.410482	.333879	.235718	.168828	.122865	.090554	.067398
10.	.437052	.384056	.312653	.221693	.158773	.115888	.085553	.063647
11.	.408469	.359706	.292919	.208619	.149382	.109362	.080848	.060130
12.	.382387	.337218	.274564	.196415	.140604	.103247	.076418	.056827
13.	.358492	.316404	.257483	.185006	.132394	.097507	.072244	.053723
14.	.336517	.297098	.241581	.174327	.124709	.092113	.068309	.050804
15.	.316235	.279157	.226768	.164319	.117511	.087037	.064596	.048056
16.	.297452	.262454	.212963	.154931	.110766	.082253	.061092	.045468
17.	.280003	.246877	.200091	.146115	.104441	.077742	.057782	.043028
18.	.263746	.232326	.188082	.137830	.098507	.073483	.054656	.040727
19.	.248558	.218716	.176875	.130036	.092937	.069459	.051701	.038555
20.	.234336	.205969	.166408	.122701	.087706	.065654	.048909	.036504
21.	.220990	.194017	.156630	.115792	.082791	.062056	.046268	.034567
22.	.208443	.182797	.147489	.109283	.078172	.058650	.043771	.032736
23.	.196627	.172256	.138940	.103147	.073830	.055427	.041410	.031004
24.	.185486	.162345	.130940	.097361	.069745	.052376	.039176	.029367
25.	.174969	.153021	.123450	.091903	.065903	.049486	.037064	.027818
26.	.165034	.144243	.116434	.086756	.062286	.046751	.035066	.026353
27.	.155642	.135976	.109859	.081899	.058883	.044161	.033176	.024966
28.	.146762	.128188	.103693	.077317	.055678	.041709	.031389	.023653
29.	.138363	.120850	.097909	.072995	.052661	.039390	.029699	.022410
30.	.130422	.113935	.092479	.068918	.049818	.037196	.028102	.021234
31.	.122913	.107418	.087380	.065072	.047141	.035122	.026592	.020120
32.	.115818	.101277	.082588	.061447	.044619	.033161	.025165	.019066
33.	.109118	.095491	.078083	.058029	.042243	.031310	.023817	.018068
34.	.102794	.090041	.073846	.054808	.040004	.029562	.022544	.017123
35.	.096832	.084909	.069859	.051774	.037895	.027913	.021342	.016228
36.	.091217	.080078	.066104	.048917	.035907	.026359	.020208	.015382
37.	.085934	.075532	.062567	.046228	.034033	.024895	.019138	.014581
38.	.080970	.071257	.059233	.043698	.032268	.023517	.018128	.013823
39.	.076313	.067239	.056089	.041320	.030605	.022222	.017177	.013107
40.	.071949	.063465	.053122	.039085	.029037	.021004	.016280	.012429
41.	.067867	.059922	.050322	.036987	.027560	.019861	.015435	.011788
42.	.064056	.056599	.047678	.035017	.026169	.018790	.014640	.011182
43.	.060503	.053484	.045179	.033170	.024858	.017786	.013892	.010610
44.	.057199	.050567	.042817	.031438	.023623	.016846	.013188	.010069
45.	.054132	.047837	.040583	.029817	.022460	.015968	.012526	.009558
46.	.051292	.045286	.038469	.028301	.021365	.015147	.011904	.009076
47.	.048670	.042903	.036468	.026883	.020333	.014383	.011320	.008621
48.	.046256	.040681	.034572	.025559	.019362	.013671	.010772	.008192
49.	.044041	.038611	.032777	.024324	.018449	.013009	.010258	.007787
50.	.042017	.036685	.031075	.023173	.017589	.012395	.009777	.007405

Table 3.4(2) Attenuation of terrestrial 2.61 MeV gamma ray flux with air and snow

地殻ガンマ線の高度別 ^{208}Tl 2.61 MeV ガンマ線束の積雪水量による減衰

Comparison to the value at 1 m on the bare ground for FLUX of Th 2.61 MeV

H(m)= WE(g/cm ²)	1.	20.	50.	100.	150.	200.	250.	300.
0.	.990805	.753369	.558500	.360595	.247338	.172045	.122456	.093108
1.	.881507	.684807	.514012	.336321	.232012	.162629	.116155	.087938
2.	.788647	.624483	.473998	.313843	.217699	.153616	.110076	.082993
3.	.709243	.571183	.437907	.293020	.204330	.145010	.104229	.078277
4.	.640920	.523898	.405266	.273719	.191840	.136812	.098622	.073791
5.	.581777	.481783	.375670	.255822	.180167	.129019	.093260	.069536
6.	.530281	.444131	.348765	.239217	.169257	.121624	.088143	.065507
7.	.485189	.410344	.324249	.223804	.159058	.114619	.083270	.061701
8.	.445489	.379917	.301857	.209491	.149520	.107994	.078640	.058112
9.	.410349	.352423	.281359	.196193	.140598	.101737	.074248	.054733
10.	.379085	.327496	.262555	.183831	.132252	.095835	.070089	.051555
11.	.351132	.304825	.245269	.172335	.124441	.090275	.066155	.048570
12.	.326017	.284143	.229347	.161638	.117129	.085041	.062440	.045770
13.	.303348	.265221	.214655	.151680	.110284	.080120	.058935	.043145
14.	.282795	.247861	.201073	.142405	.103873	.075496	.055632	.040686
15.	.264082	.231893	.188497	.133763	.097867	.071154	.052522	.038384
16.	.246975	.217169	.176834	.125706	.092239	.067079	.049595	.036230
17.	.231276	.203559	.166001	.118191	.086964	.063256	.046843	.034215
18.	.216817	.190954	.155926	.111179	.082018	.059672	.044258	.032331
19.	.203457	.179254	.146543	.104632	.077380	.056313	.041829	.030568
20.	.191074	.168375	.137794	.098516	.073029	.053165	.039548	.028920
21.	.179564	.158243	.129628	.092801	.068945	.050215	.037407	.027378
22.	.168840	.148790	.121998	.087457	.065112	.047451	.035397	.025936
23.	.158824	.139960	.114863	.082459	.061513	.044861	.033511	.024586
24.	.149452	.131702	.108184	.077781	.058133	.042434	.031741	.023321
25.	.140669	.123970	.101928	.073400	.054957	.040159	.030079	.022136
26.	.132425	.116724	.096065	.069297	.051972	.038026	.028519	.021026
27.	.124680	.109928	.090567	.065451	.049166	.036027	.027053	.019983
28.	.117397	.103551	.085408	.061845	.046527	.034151	.025677	.019004
29.	.110544	.097564	.080566	.058462	.044045	.032390	.024383	.018083
30.	.104095	.091940	.076020	.055287	.041709	.030737	.023167	.017216
31.	.098024	.086657	.071751	.052306	.039510	.029184	.022023	.016399
32.	.092311	.081693	.067740	.049505	.037439	.027724	.020945	.015628
33.	.086935	.077029	.063972	.046872	.035489	.026350	.019930	.014899
34.	.081881	.072648	.060433	.044397	.033651	.025057	.018973	.014209
35.	.077131	.068533	.057107	.042068	.031918	.023839	.018070	.013555
36.	.072672	.064670	.053983	.039876	.030285	.022690	.017217	.012933
37.	.068490	.061044	.051049	.037812	.028744	.021605	.016410	.012341
38.	.064573	.057643	.048293	.035867	.027291	.020580	.015647	.011778
39.	.060908	.054455	.045706	.034034	.025918	.019611	.014923	.011239
40.	.057486	.051468	.043278	.032306	.024623	.018693	.014237	.010723
41.	.054295	.048672	.040999	.030676	.023399	.017823	.013585	.010229
42.	.051326	.046057	.038863	.029137	.022243	.016997	.012965	.009754
43.	.048569	.043614	.036860	.027684	.021151	.016212	.012374	.009296
44.	.046014	.041334	.034983	.026311	.020117	.015465	.011810	.008855
45.	.043654	.039209	.033226	.025014	.019140	.014754	.011272	.008429
46.	.041480	.037231	.031581	.023788	.018216	.014075	.010757	.008017
47.	.039485	.035392	.030044	.022627	.017341	.013427	.010264	.007617
48.	.037661	.033686	.028607	.021529	.016512	.012806	.009791	.007229
49.	.036002	.032107	.027267	.020490	.015728	.012212	.009337	.006852
50.	.034502	.030648	.026017	.019506	.014984	.011642	.008900	.006485

Table 3.5 Data of exposure rate in the calibration measurement

標準測定データ

時期	調査内容	調査結果	備考
無雪時	土壌分析	33.9(nGy/h)	U・Th・K濃度から地上1m値換算
	地上スペクトル測定	34.6(nGy/h)	波高分布から換算
	ヘリコプター測定	18.7(nGy/h) 5.8(nGy/h)	地上150mでの測定値 (ラドン寄与分等含) 海上150mでの測定値 (ラドン寄与分等)
積雪時	土壌分析	25.7(nGy/h)	U・Th・K濃度から地上1m値換算
	地上スペクトル測定	7.7(nGy/h)	波高分布から換算
	ヘリコプター測定	6.9(nGy/h) 4.5(nGy/h)	地上150mでの測定値 (ラドン寄与分等含) 海上150mでの測定値 (ラドン寄与分等)
	積雪調査	29.6(g/cm ²)	調査結果の平均積雪水量

Table 3.6 Ranges and sizes of mesh files

メッシュファイルの範囲・サイズ

調査項目	場所	X座標		Y座標		メッシュサイズ [*] (正方形) (m)
		MIN(m)	MAX(m)	MIN(m)	MAX(m)	
スキャン測定	長岡市街	-135000	-90000	130000	175000	1000
コース測定	長岡-新潟	-135000	-35000	130000	230000	2000
	新潟県内	-135000	-35000	130000	230000	2000
	新潟-茨城	-176000	90000	-110000	224000	6000
積雪調査	長岡市街	-135000	-90000	130000	175000	1000
	長岡-新潟	-135000	-35000	130000	230000	2000
土壌調査	長岡市街	-135000	-90000	130000	175000	1000

Table 4.1 Concentrations of K-40, U-series(Bi-214) and Th-series(Tl-208) in soil, flux densities and exposure rates at 1m evaluated from the concentrations.

長岡市街における土壌濃度, エネルギー毎線束密度, 地上1m線量率推定結果

シリアル番号	採取地点名	濃度(% , ppm)			直達ガンマ線の線束密度($\gamma/cm^2 \cdot sec$)				地上1m線量率 (nGy/h)
		K %	U _{ppm}	Th _{ppm}	1.46MeV	1.76MeV	2.61MeV	2.61MeV	
1	福島町	0.93	1.20	5.89	0.28	0.029	0.11	34.5	
2	鶴ヶ丘町	0.73	0.88	5.08	0.22	0.022	0.09	28.0	
3	町田町	0.88	1.39	5.69	0.27	0.034	0.09	34.2	
4	蔵王公園	1.41	1.42	6.64	0.43	0.035	0.12	43.8	
5	神田町	1.60	1.15	5.69	0.48	0.028	0.10	42.2	
6	土合	1.58	1.40	5.84	0.48	0.034	0.11	43.8	
7	ハコト	1.22	1.13	5.95	0.37	0.028	0.11	37.9	
8	高野町	1.18	1.35	6.63	0.36	0.033	0.12	40.5	
9	宝地町	1.14	1.55	6.03	0.34	0.038	0.11	39.3	
10	中沢橋	1.25	1.62	6.06	0.38	0.040	0.11	41.2	

Table 5.1 Comparison between water equivalents measured by carborne survey and those by airborne survey in Nagaoka city

長岡市内の空中サーベイと走行サーベイによる積雪水量の比較

比較地点名	積雪水量(g/cm ²)	ハリコター調査積雪水量		カーバイ車調査積雪水量	
		線量方式	2.61MeV方式	線量方式	2.61MeV方式
長岡市深沢町	34	26 *	20 *	24	21
三島町脇野町	22	18	19		
長岡市才津町	32	25	19	24	20
長岡市宝地町	27	18 *	15 *	17 *	11 *
長岡市巻島町	27	24 *	19 *	25	17 *
長岡市村松町	40	30	25	25	21
長岡市上条町	35	26	24	19	10
長岡市稲葉町	28	27	21	25	16
長岡市新組町	27	17	13	22	20
長岡市川崎町	32	24	23	23	22
長岡市富島町	30	31	25		
見附市椿沢町	34	24 *	19 *	23	21
平均値	31	24	20	23	19
規格化平均値	1.0	0.79	0.66	0.73	0.59
					0.71

*: 両隣のメッシュの値から平均値として求めた。
規格化平均値: 積雪透過率による透過率を規格化した値の平均値

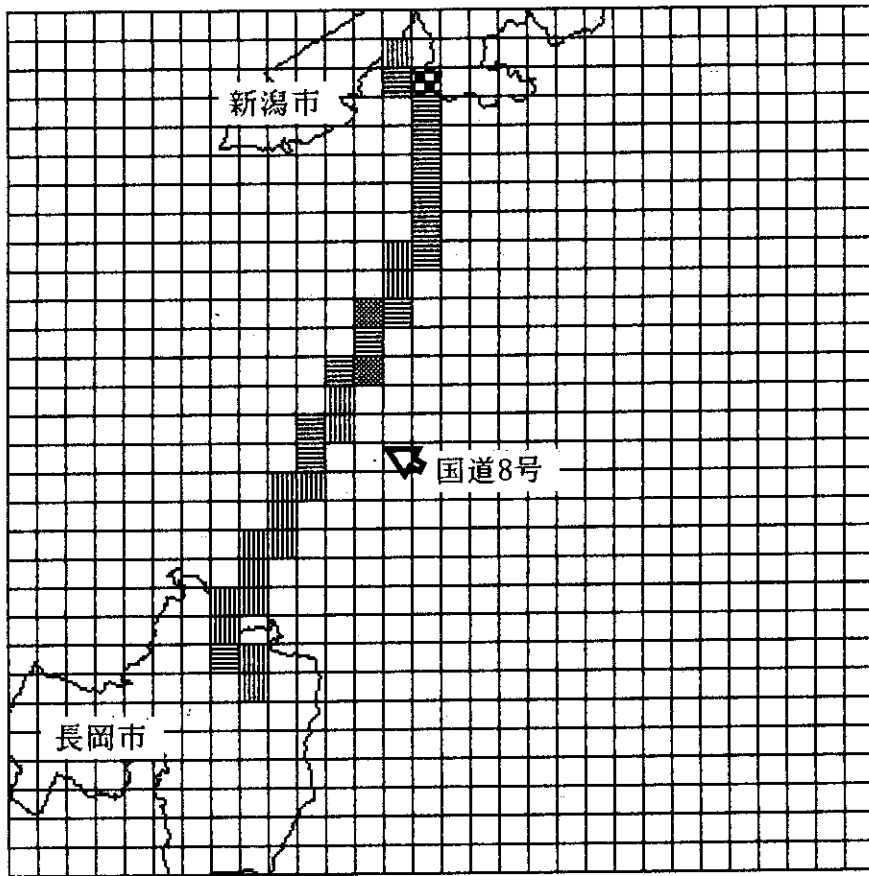
Table 5.2 Comparison between water equivalents measured by carborne survey and those by airborne survey along Route-8 between Nagaoka city and Niigata city

国道8号沿いの空中サーベイと走行サーベイによる積雪水量の比較

比較地点名	積雪水量(g/cm ²)	ハリコクター調査積雪水量		カーバイ車調査積雪水量		
		線量方式	2.61MeV方式	線量方式	2.61MeV方式	差分方式
三条市石上	9	8	10	15	-	6
三条市西本成寺	10	8	12	18	14	11
柴町一ツ屋敷	16	-	-	16	-	8
柴町丸ノ巻根	13	14	15	23	19	43
見附市千刈	22	-	-	-	-	-
見附市大曲戸	25	19	20	19	20	15
長岡市新組町	27	23	19	24	21	-
長岡市富島町	33	35	27	24	12	-
平均値	18	18	17	20	17	17
規格化平均値	1.0	0.91	0.96	1.23	0.96	1.23

規格化平均値：実測積雪水量で各方式によって推定した積雪水量を割って規格化した値の平均値

無雪時空中サーベイ



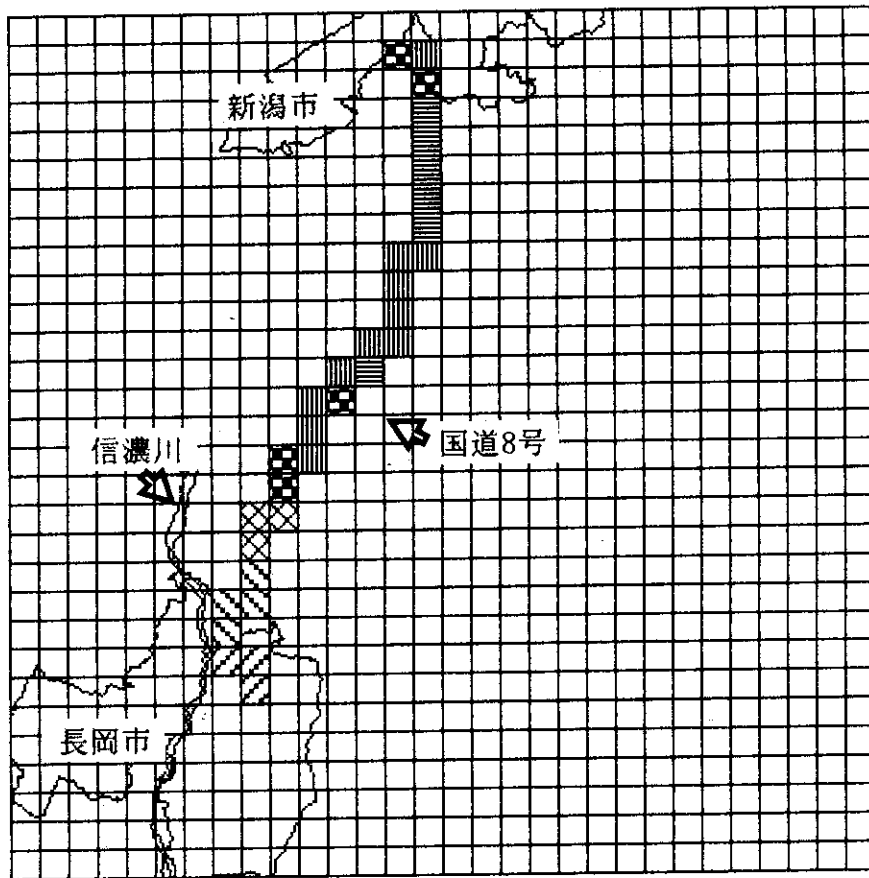
線量率レベル D (nGy/h) は下記の通りである。

- $50 \leq D$
- $45 \leq D < 50$
- $40 \leq D < 45$
- $35 \leq D < 40$
- $30 \leq D < 35$
- $25 \leq D < 30$
- $20 \leq D < 25$
- $D < 20$

Fig. 4.1(1) Distribution of exposure rates measured by airborne survey along the Route 8 between Niigata city and Nagaoka city in the snow free season

空中サーベイで測定した無雪時における新潟市～長岡市間の国道8号沿いの線量率分布

積雪時空中サーベイ



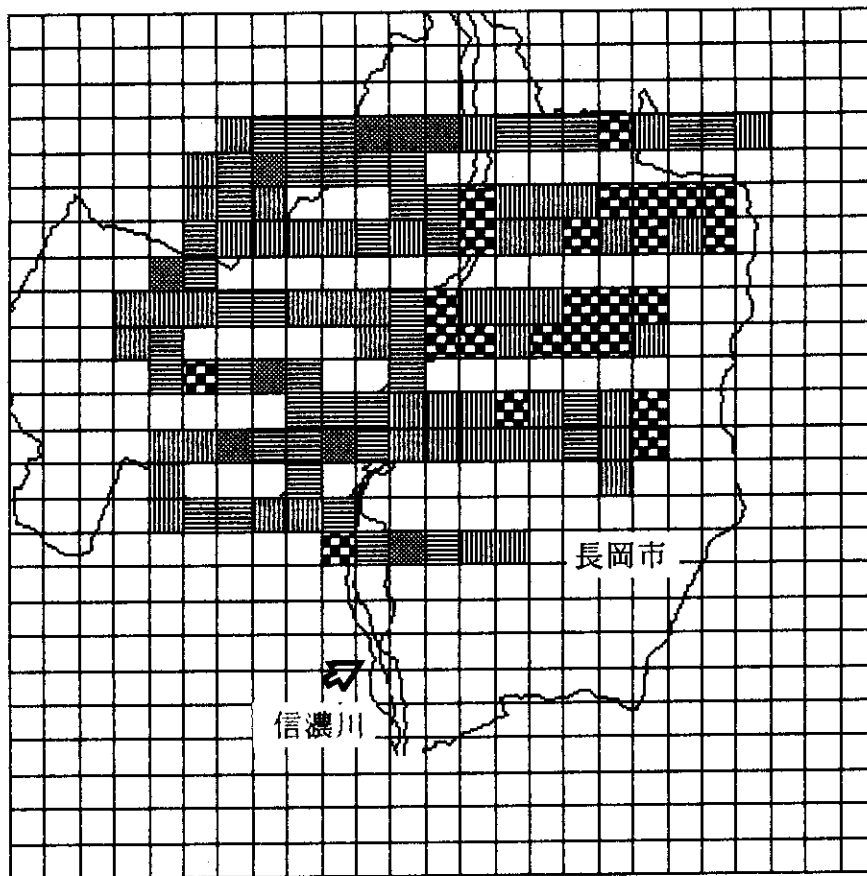
線量率レベル D (nGy/h)は下記の通りである。

- $35 \leq D$
- $30 \leq D < 35$
- $25 \leq D < 30$
- $20 \leq D < 25$
- $15 \leq D < 20$
- $10 \leq D < 15$
- $5 \leq D < 10$
- $D < 5$

Fig. 4.1(2) Distribution of exposure rates measured by airborne survey along the Route 8 between Niigata city and Nagaoka city in the snowfall season

空中サーベイで測定した積雪時における新潟市～長岡市間の国道8号沿いの線量率分布

無雪時空中サーベイ



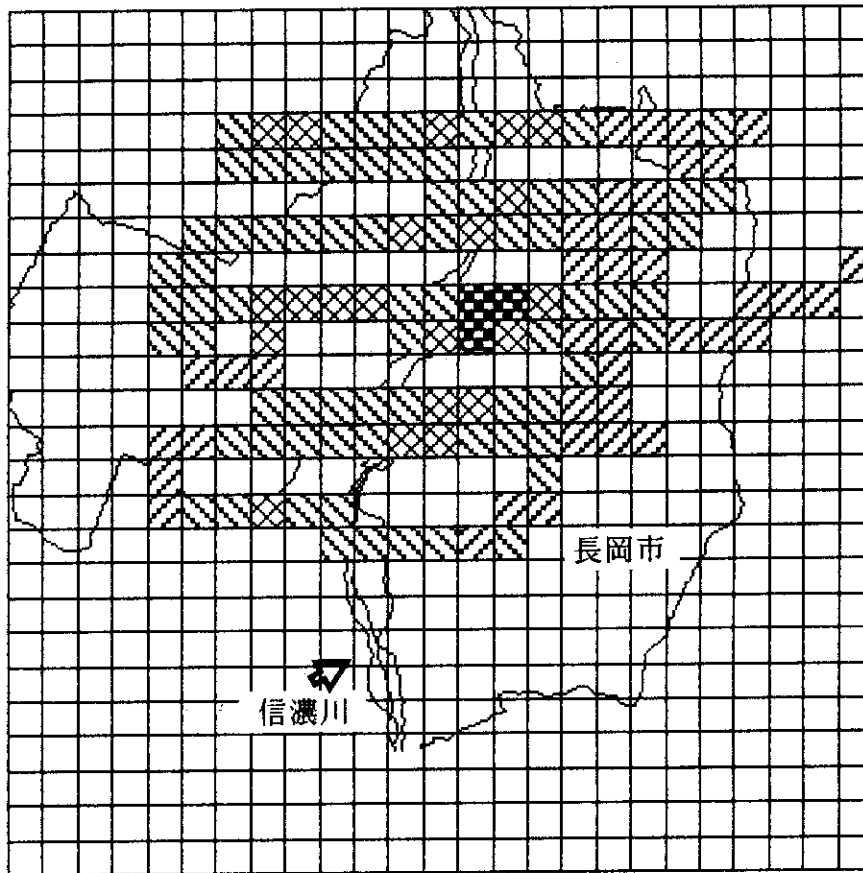
線量率レベル D (nGy/h) は下記の通りである。

■	$50 \leq D$
■	$45 \leq D < 50$
■	$40 \leq D < 45$
■	$35 \leq D < 40$
■	$30 \leq D < 35$
■	$25 \leq D < 30$
■	$20 \leq D < 25$
■	$D < 20$

Fig. 4.1(3) Distribution of exposure rates measured by airborne survey in and around Nagaoka city in the snow free season

空中サーベイで測定した無雪時における長岡市及びその周辺の線量率分布

積雪時空中サーベイ



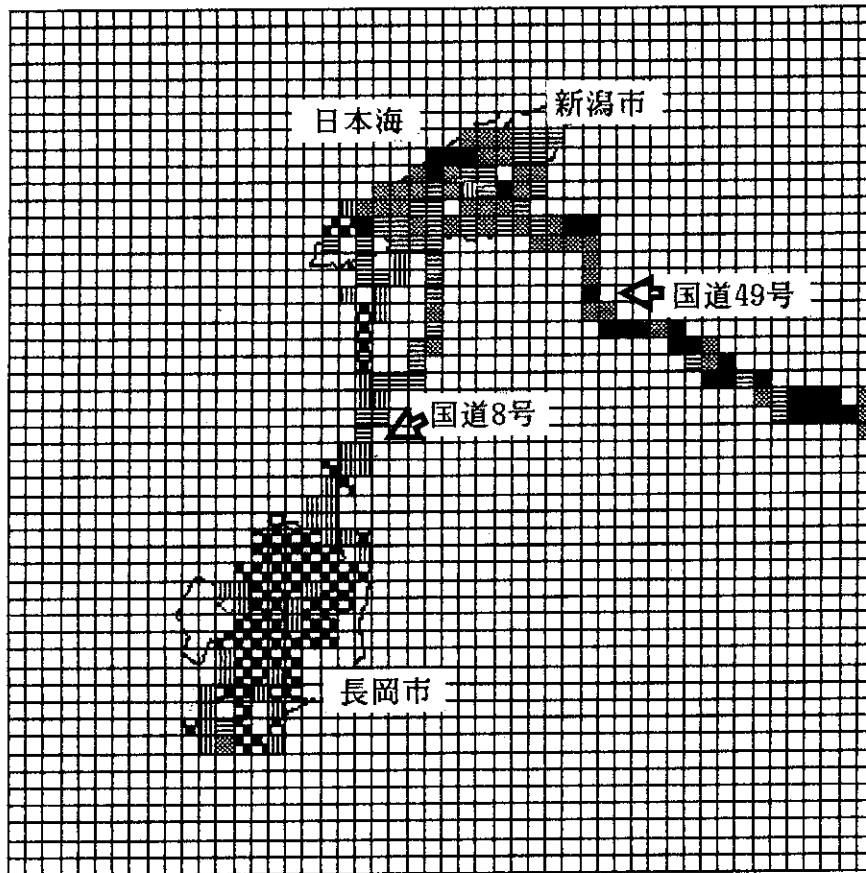
線量率レベル D (nGy/h) は下記の通りである。

■	$35 \leq D$
■	$30 \leq D < 35$
▨	$25 \leq D < 30$
▨	$20 \leq D < 25$
▨	$15 \leq D < 20$
▨	$10 \leq D < 15$
▨	$5 \leq D < 10$
▨	$D < 5$

Fig. 4.1(4) Distribution of exposure rates measured by airborne survey in and around Nagaoka city in the snowfall season

空中サーベイで測定した積雪時における長岡市及びその周辺の線量率分布

無雪時走行サーベイ



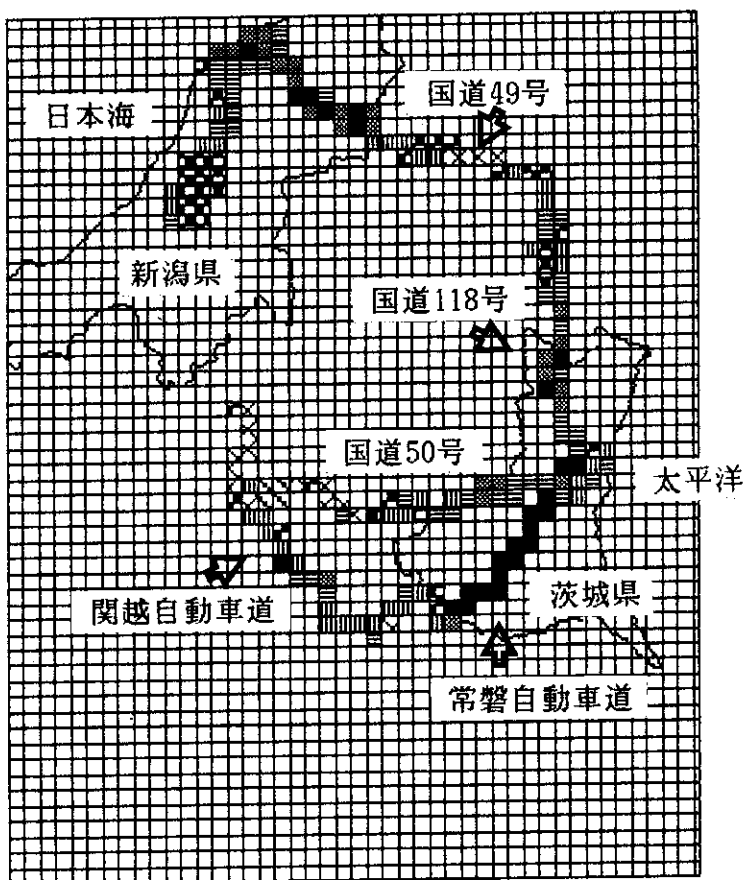
線量率レベルD (nGy/h)は下記の通りである。

- $50 \leq D$
- ▣ $45 \leq D < 50$
- ▤ $40 \leq D < 45$
- ▥ $35 \leq D < 40$
- ▦ $30 \leq D < 35$
- ▧ $25 \leq D < 30$
- ▨ $20 \leq D < 25$
- ▩ $D < 20$

Fig. 4.2(1) Distribution of exposure rates measured by carborne survey along the Route 8 between Niigata city and Nagaoka city in the snow free season

走行サーベイで測定した無雪時における新潟市～長岡市間の国道8号沿いの線量率分布

無雪時走行サーベイ



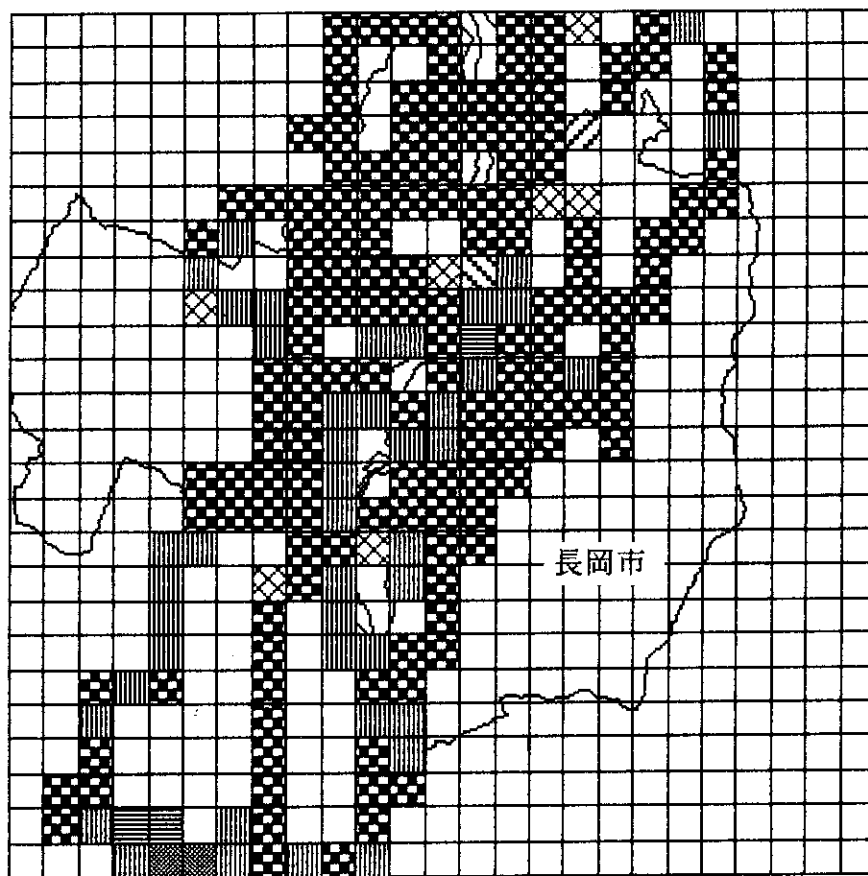
線量率レベルD (nGy/h)は下記の通りである。

- $50 \leq D$
- $45 \leq D < 50$
- $40 \leq D < 45$
- $35 \leq D < 40$
- $30 \leq D < 35$
- $25 \leq D < 30$
- $20 \leq D < 25$
- $D < 20$

Fig. 4.2(2) Distribution of exposure rates measured by carborne survey between Ibaraki prefecture and Niigata prefecture in the snow free season

走行サーベイで測定した無雪時における茨城県～新潟県間の線量率分布

無雪時走行サーベイ



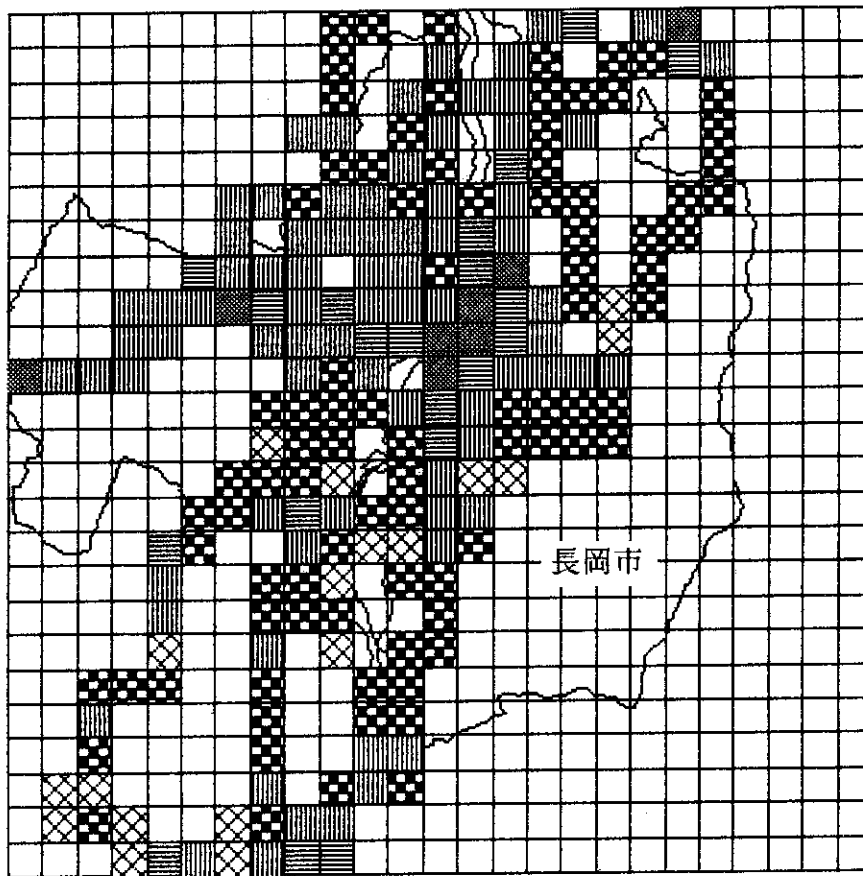
線量率レベルD (nGy/h)は下記の通りである。

- $50 \leq D$
- $45 \leq D < 50$
- $40 \leq D < 45$
- $35 \leq D < 40$
- $30 \leq D < 35$
- $25 \leq D < 30$
- $20 \leq D < 25$
- $D < 20$

Fig. 4.2(3) Distribution of exposure rates measured by carborne survey in and around Nagaoka city in the snow free season

走行サーベイで測定した無雪時における長岡市及びその周辺の線量率分布

無雪時走行サーベイ



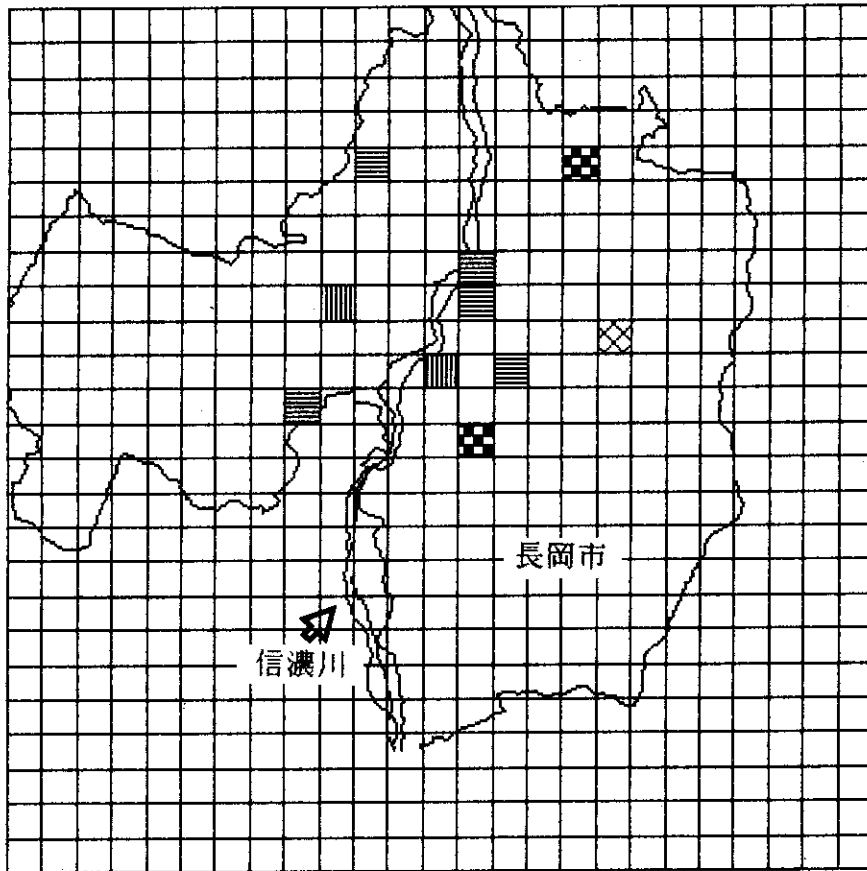
線量率レベルD (nGy/h)は下記の通りである。

- $35 \leq D$
- $30 \leq D < 35$
- $25 \leq D < 30$
- $20 \leq D < 25$
- $15 \leq D < 20$
- $10 \leq D < 15$
- $5 \leq D < 10$
- $D < 5$

Fig. 4.2(4) Distribution of exposure rates measured by carborne survey in and around Nagaoka city in the snowfall season

走行サーベイで測定した積雪時における長岡市及びその周辺の線量率分布

積雪調査



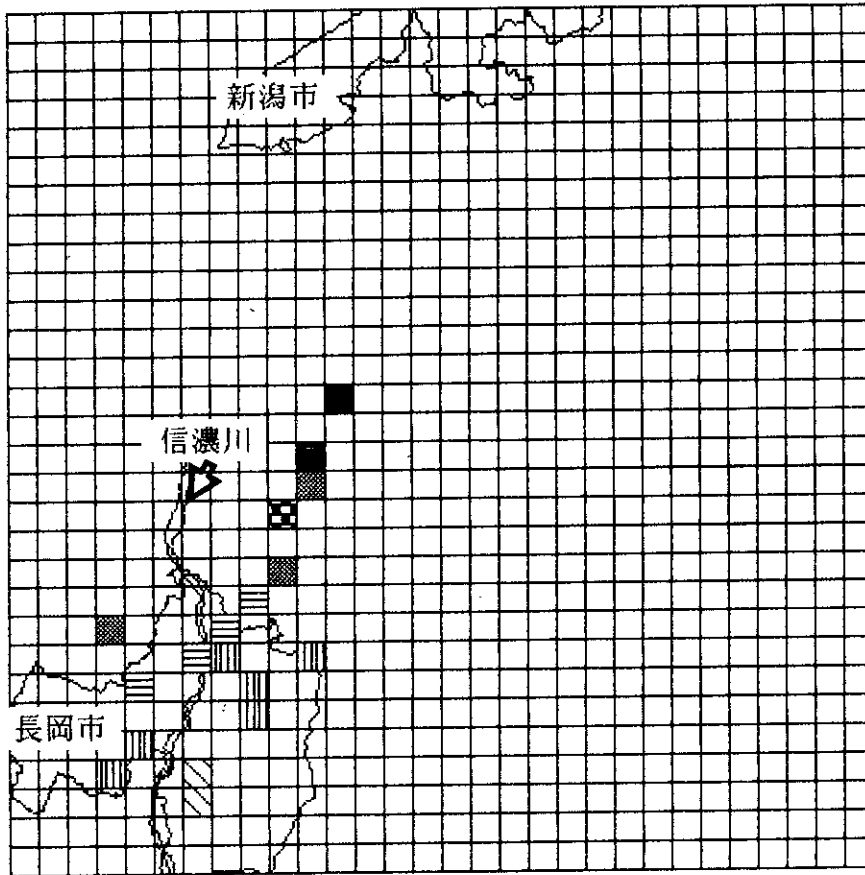
線量率レベル D (nGy/h) は下記の通りである。

■	$50 \leq D$
■	$45 \leq D < 50$
■	$40 \leq D < 45$
■	$35 \leq D < 40$
■	$30 \leq D < 35$
■	$25 \leq D < 30$
■	$20 \leq D < 25$
■	$D < 20$

Fig. 4.3 Distribution of exposure rates inferred from nuclide concentrations in soil in Nagaoka city

長岡市内で採取した土壌の分析結果から得たガンマ線の線量率分布

積雪調査



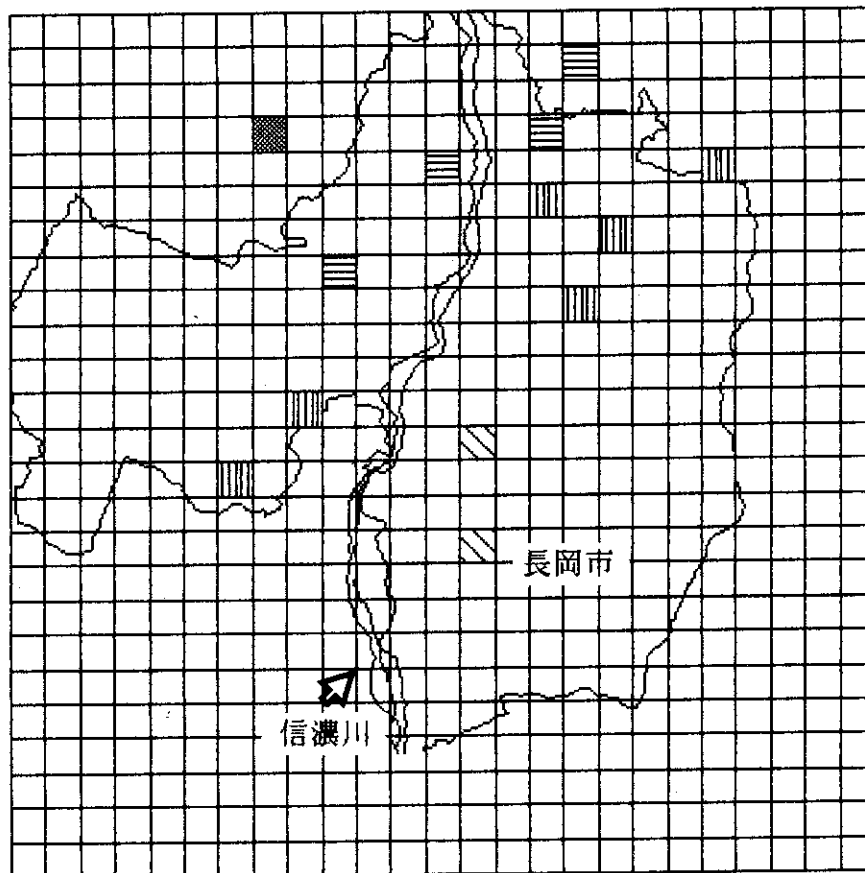
線量透過率Rは下記の通りである。

■	$0.4 \leq R$	(WE: 0~11 g/cm ²)
▣	$0.3 \leq R < 0.4$	(WE: 11~16 g/cm ²)
▤	$0.2 \leq R < 0.3$	(WE: 16~23 g/cm ²)
▥	$0.15 \leq R < 0.2$	(WE: 23~28 g/cm ²)
▦	$0.1 \leq R < 0.15$	(WE: 28~34 g/cm ²)
▧	$R < 0.1$	(WE: 34~ g/cm ²)

Fig. 4.4(1) Distribution of penetration ratios of exposure rates inferred from snow depth along the Route 8 between Nagaoka city and Sanjo city

三条市～長岡市間の国道8号沿いで調査した積雪水量から得た線量透過率

線量透過率調査



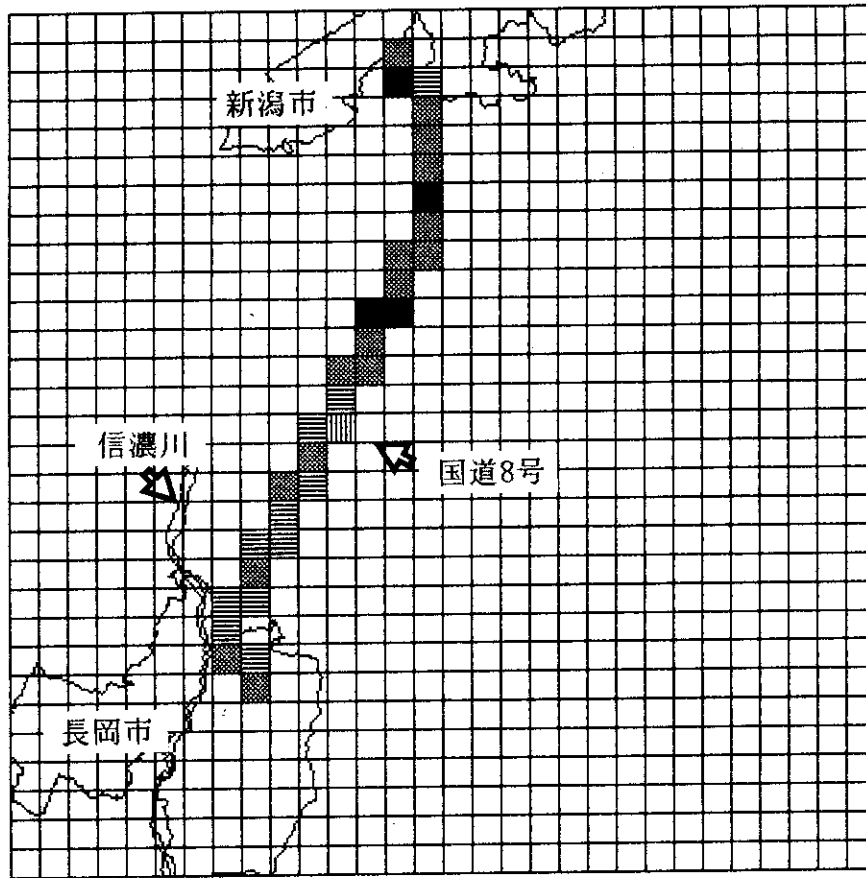
線量透過率Rは下記の通りである。

■	$0.4 \leq R$	(WE: 0~11 g/cm ²)
▣	$0.3 \leq R < 0.4$	(WE: 11~16 g/cm ²)
▤	$0.2 \leq R < 0.3$	(WE: 16~23 g/cm ²)
▥	$0.15 \leq R < 0.2$	(WE: 23~28 g/cm ²)
▦	$0.1 \leq R < 0.15$	(WE: 28~34 g/cm ²)
▧	$R < 0.1$	(WE: 34~ g/cm ²)

Fig. 4.4(2) Distribution of penetration ratios of exposure rates inferred from snow depth in Nagaoka city

長岡市内で調査した積雪水量から得た線量透過率

無雪時空中サーベイ



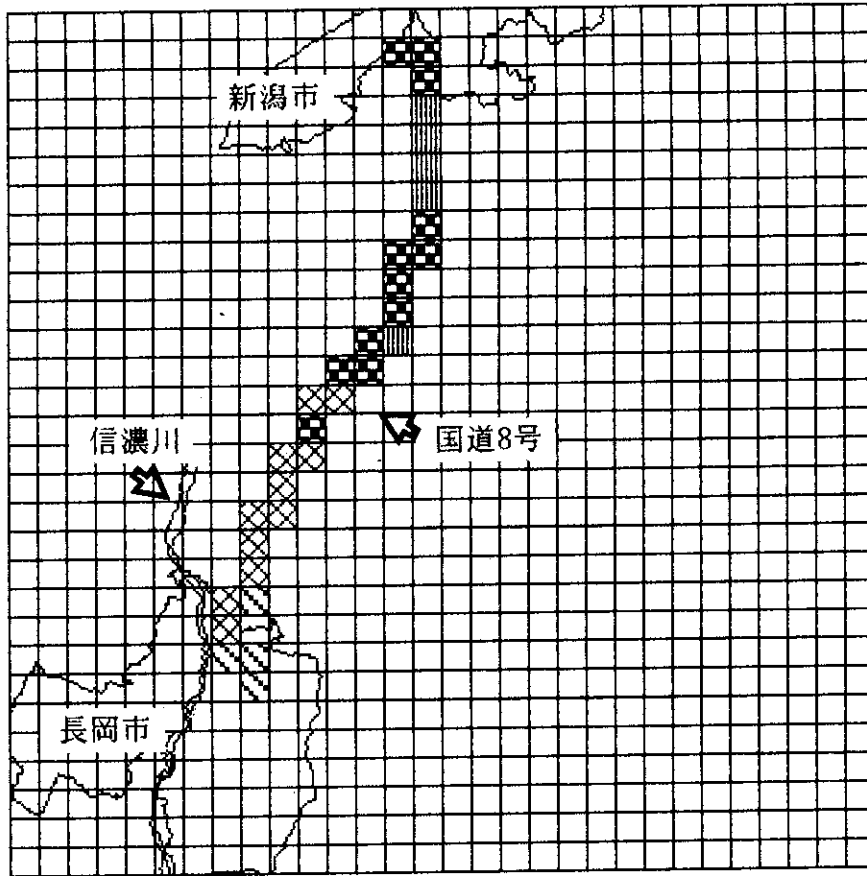
2.61 MeV γ 線線束密度 F ($\gamma/\text{cm}^2 \cdot \text{sec}$) は下記の通りである。

- $0.12 \leq F$
- $0.10 \leq F < 0.12$
- $0.08 \leq F < 0.10$
- $0.06 \leq F < 0.08$
- $0.04 \leq F < 0.06$
- $0.02 \leq F < 0.04$
- $0.01 \leq F < 0.02$
- $F < 0.01$

Fig. 4.5(1) Distribution of 2.61 MeV gamma ray flux densities measured by airborne survey along the Route 8 between Niigata city and Nagaoka city in the snow free season

空中サーベイで測定した無雪時における新潟市～長岡市間の国道8号沿いの2.61 MeV γ 線線束密度分布

積雪時空中サーベイ



2.61 MeV γ 線線束密度 F ($\gamma/\text{cm}^2 \cdot \text{sec}$) は下記の通りである。

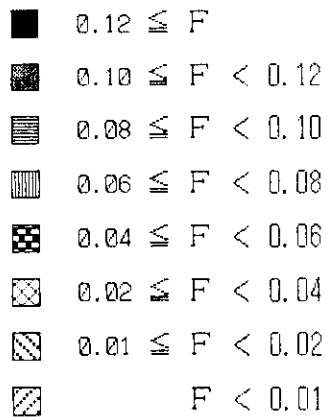
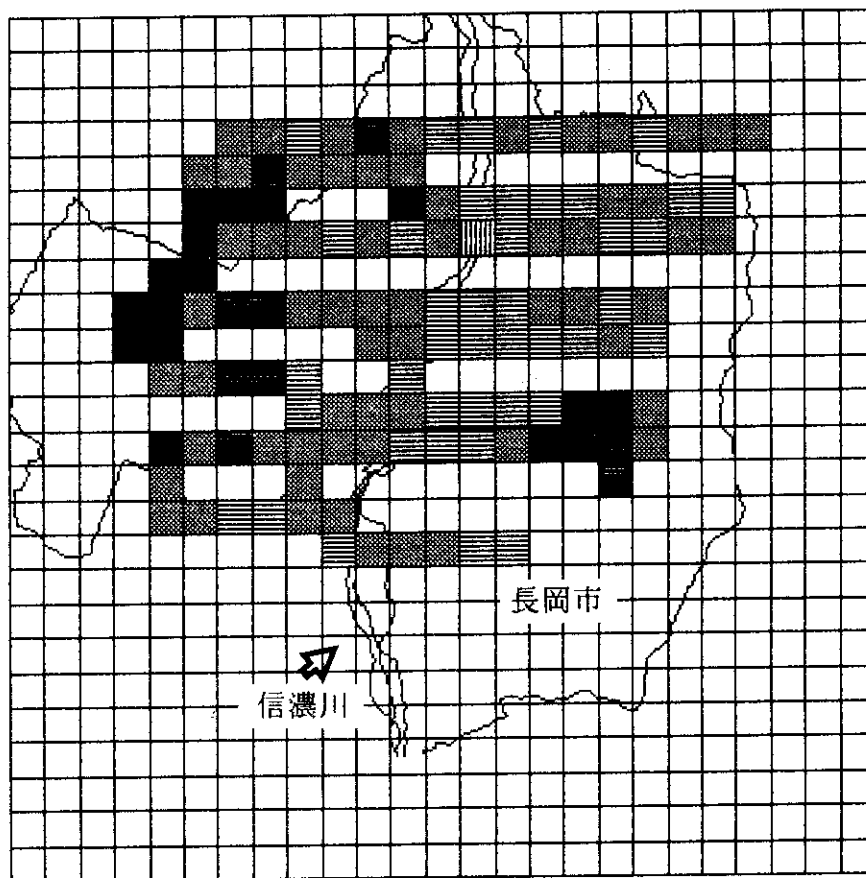


Fig. 4.5(2) Distribution of 2.61 MeV gamma ray flux densities measured by airborne survey along the Route 8 between Niigata city and Nagaoka city in the snowfall season

空中サーベイで測定した積雪時における新潟市～長岡市間の国道8号沿いの2.61 MeV γ 線線束密度分布

無雪時空中サーベイ



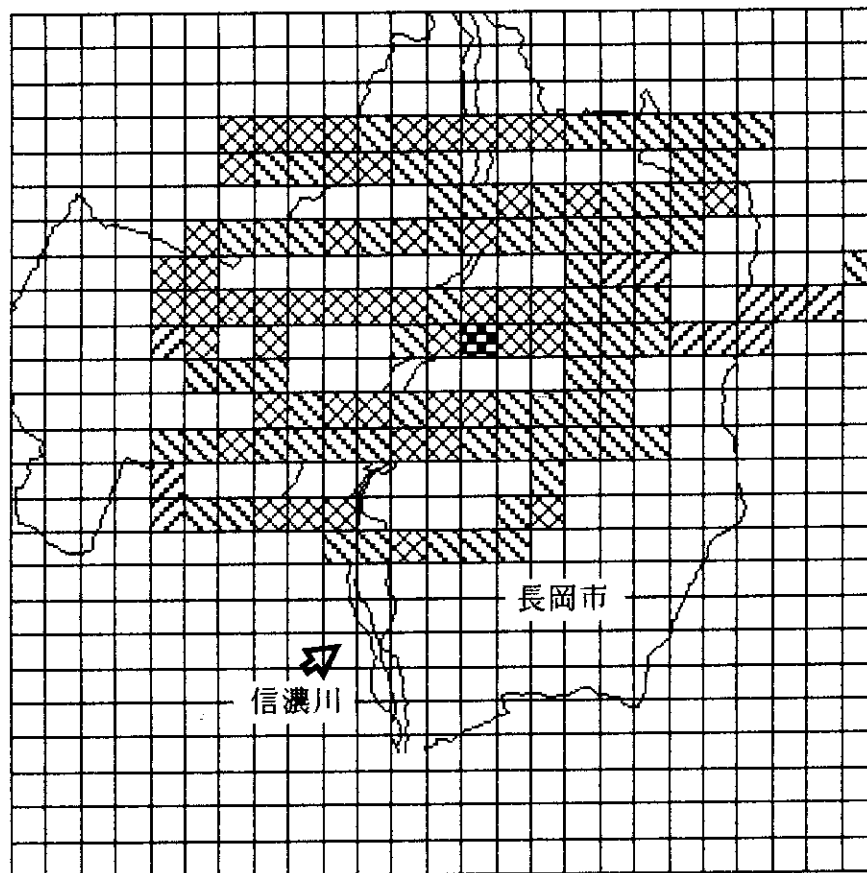
2.61 MeV γ 線線束密度 F ($\gamma/\text{cm}^2 \cdot \text{sec}$) は下記の通りである。

■	$0.12 \leq F$
■ (diagonal lines)	$0.10 \leq F < 0.12$
■ (horizontal lines)	$0.08 \leq F < 0.10$
■ (vertical lines)	$0.06 \leq F < 0.08$
■ (cross-hatch)	$0.04 \leq F < 0.06$
■ (diagonal lines, top-left to bottom-right)	$0.02 \leq F < 0.04$
■ (diagonal lines, top-right to bottom-left)	$0.01 \leq F < 0.02$
■ (white)	$F < 0.01$

Fig. 4.5(3) Distribution of 2.61 MeV gamma ray flux densities measured by airborne survey in and around Nagaoka city in the snow free season

空中サーベイで測定した無雪時における長岡市及びその周辺の 2.61 MeV γ 線線束密度分布

積雪時空中サーベイ



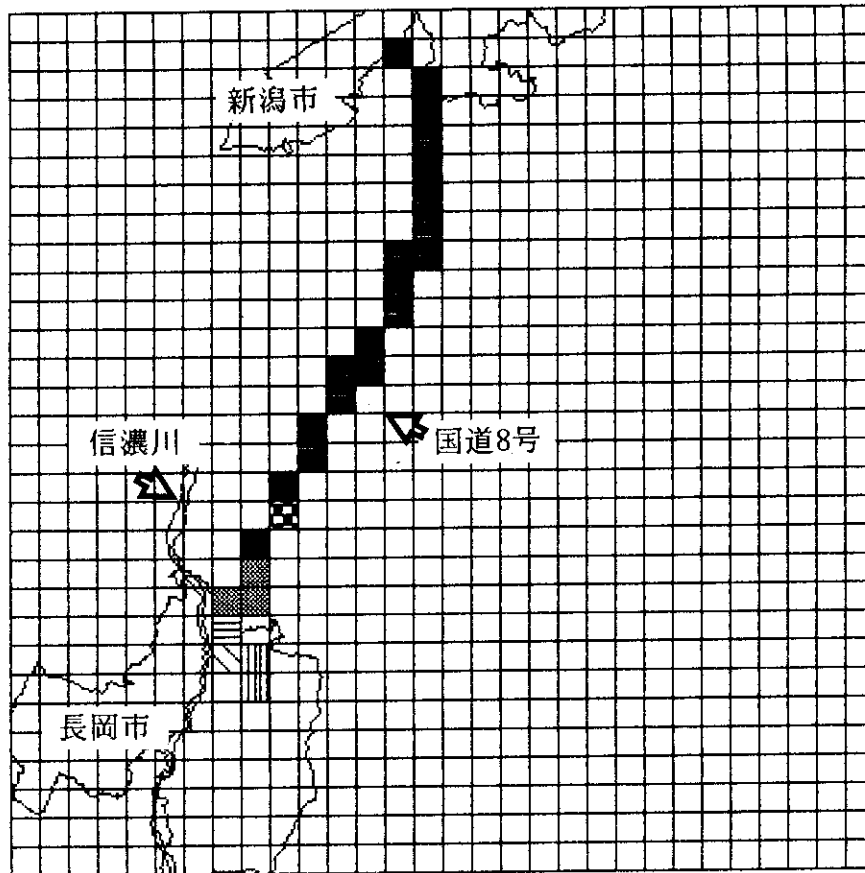
2.61 MeV γ 線線束密度 F ($\gamma/\text{cm}^2 \cdot \text{sec}$)は下記の通りである。

- $0.12 \leq F$
- ▣ $0.10 \leq F < 0.12$
- ▤ $0.08 \leq F < 0.10$
- ▥ $0.06 \leq F < 0.08$
- ▦ $0.04 \leq F < 0.06$
- ▧ $0.02 \leq F < 0.04$
- ▨ $0.01 \leq F < 0.02$
- ▩ $F < 0.01$

Fig. 4.5(4) Distribution of 2.61 MeV gamma ray flux densities measured by airborne survey in and around Nagaoka city in the snowfall season

空中サーベイで測定した積雪時における長岡市及びその周辺の2.61 MeV γ 線線束密度分布

積雪時空中サーベイ



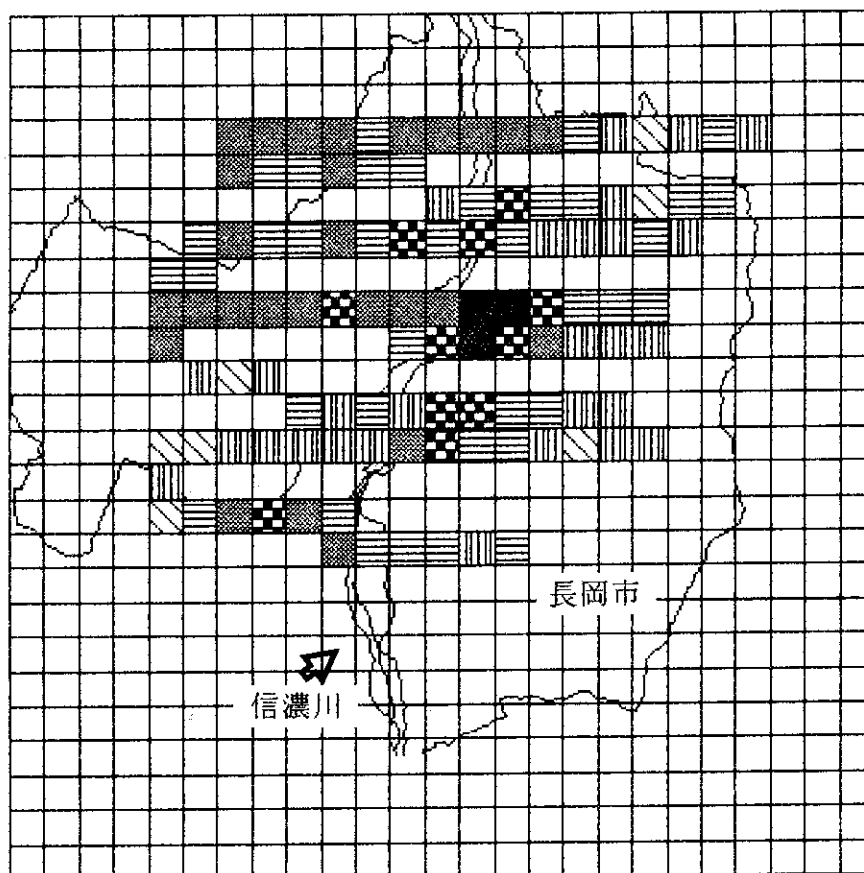
線量透過率Rは下記の通りである。

■	$0.4 \leq R$	(WE: 0~11 g/cm^2)
▣	$0.3 \leq R < 0.4$	(WE: 11~16 g/cm^2)
▤	$0.2 \leq R < 0.3$	(WE: 16~23 g/cm^2)
▥	$0.15 \leq R < 0.2$	(WE: 23~28 g/cm^2)
▦	$0.1 \leq R < 0.15$	(WE: 28~34 g/cm^2)
▧	$R < 0.1$	(WE: 34~ g/cm^2)

Fig. 4.6(1) Distribution of penetration ratios of exposure rates measured by airborne survey along the Route 8 between Niigata city and Nagaoka city

空中サーベイで測定した積雪における新潟市～長岡市間の国道8号沿いの地殻ガンマ線の線量透過率分布

線量透過率調査

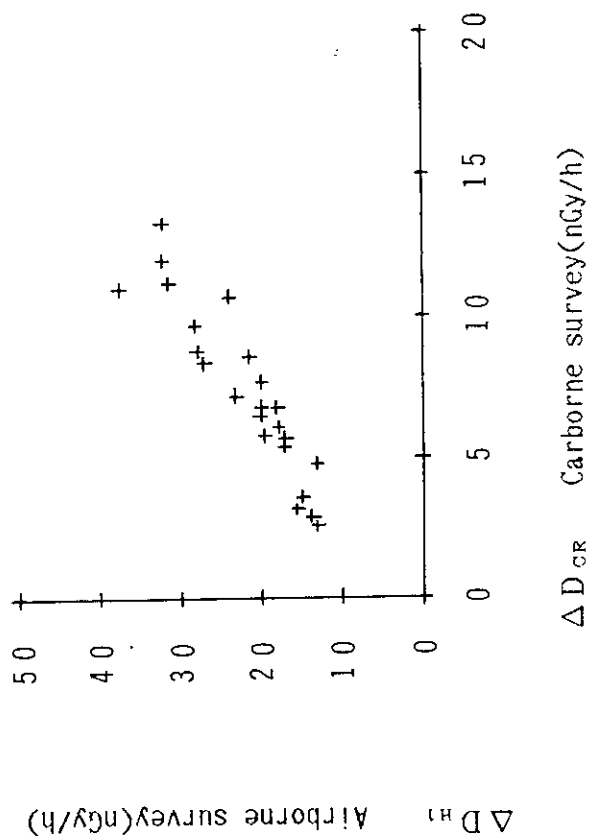


線量透過率Rは下記の通りである。

■	$0.4 \leq R$	(WE: 0~11 g/cm^2)
▣	$0.3 \leq R < 0.4$	(WE: 11~16 g/cm^2)
▤	$0.2 \leq R < 0.3$	(WE: 16~23 g/cm^2)
▥	$0.15 \leq R < 0.2$	(WE: 23~28 g/cm^2)
▦	$0.1 \leq R < 0.15$	(WE: 28~34 g/cm^2)
▧	$R < 0.1$	(WE: 34~ g/cm^2)

Fig. 4.6(2) Distribution of penetration ratios of exposure rates measured by airborne survey in Nagaoka city

空中サーベイで測定した積雪における長岡市内の地殻ガンマ線の線量透過率分布

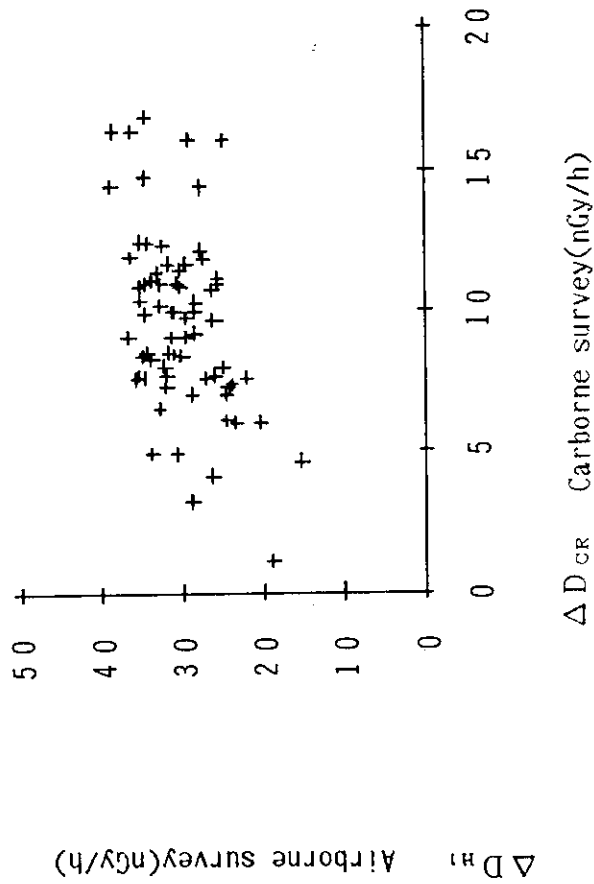


ΔD_{H1} : 空中サーベイによる無雪時と積雪時の地上1mでの線量率の差

ΔD_{CR} : 走行サーベイによる無雪時と積雪時の車上での線量率の差

Fig. 4.7(1) Correlation of exposure rates measured by carborne survey to those measured by airborne survey along the Route 8 between Niigata city and Nagaoka city

新潟市～長岡市間の国道8号沿いでの走行サーベイと空中サーベイの線量率相関



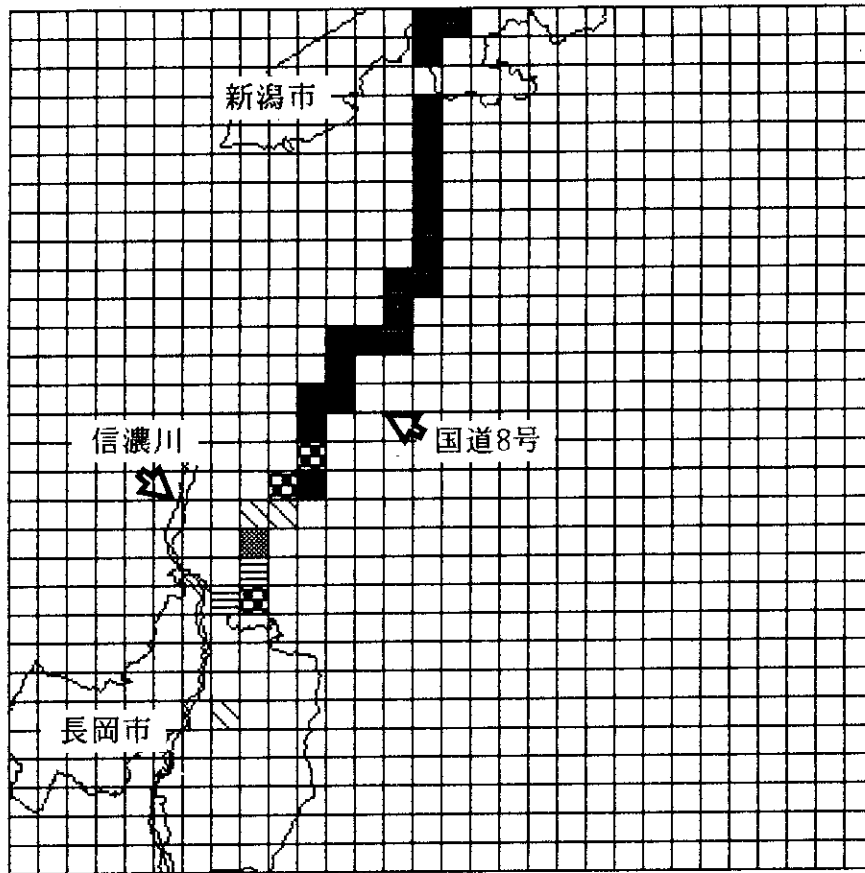
ΔD_{H1}：空中サーベイによる無雪時と積雪時の地上1mでの線量率の差

ΔD_{CR}：走行サーベイによる無雪時と積雪時の車上での線量率の差

Fig. 4.7(2) Correlation of exposure rates measured by carborne survey to those measured by airborne survey in and around Nagaoka city

長岡市及びその周辺の走行サーベイと空中サーベイの線量率相関

線量透過率調査



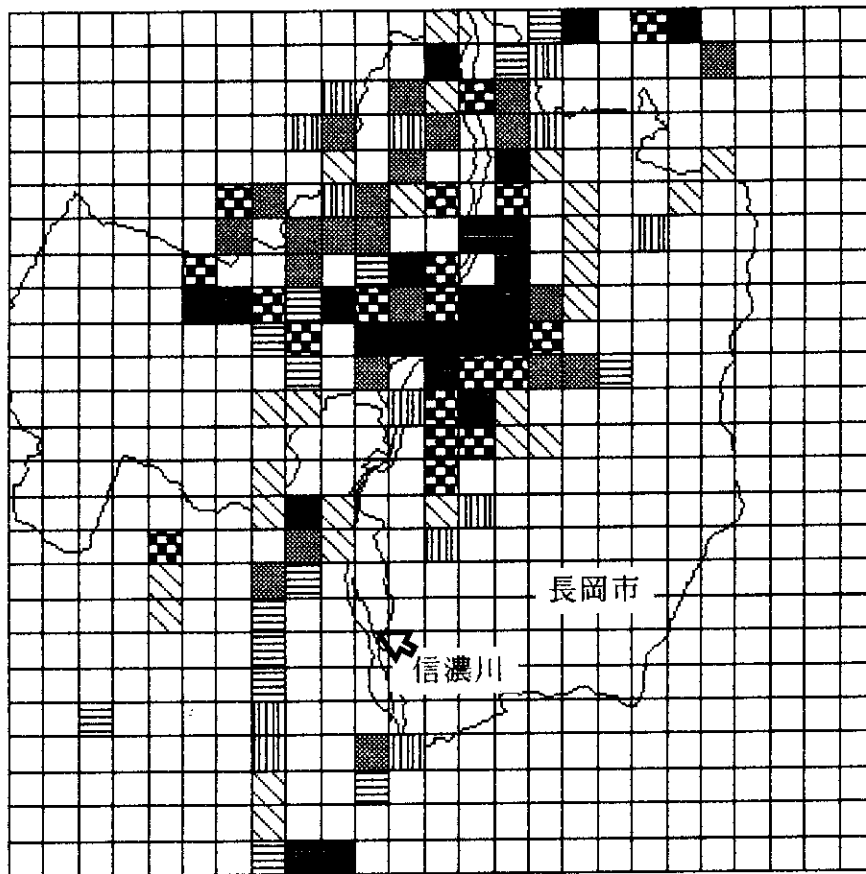
線量透過率Rは下記の通りである。

■	$0.4 \leq R$	(WE: 0~11 g/cm^2)
▣	$0.3 \leq R < 0.4$	(WE: 11~16 g/cm^2)
▤	$0.2 \leq R < 0.3$	(WE: 16~23 g/cm^2)
▥	$0.15 \leq R < 0.2$	(WE: 23~28 g/cm^2)
▦	$0.1 \leq R < 0.15$	(WE: 28~34 g/cm^2)
▧	$R < 0.1$	(WE: 34~ g/cm^2)

Fig. 4.8(1) Distribution of penetration ratios calculated using correlation of exposure rates measured by carborne survey to those measured by airborne survey along the Route 8 between Niigata city and Nagaoka city

走行サーベイと空中サーベイの相関関係を用いた走行サーベイによる積雪時の新潟市～長岡市間の国道8号沿いでの地殻ガンマ線の線量透過率分布

線量透過率調査



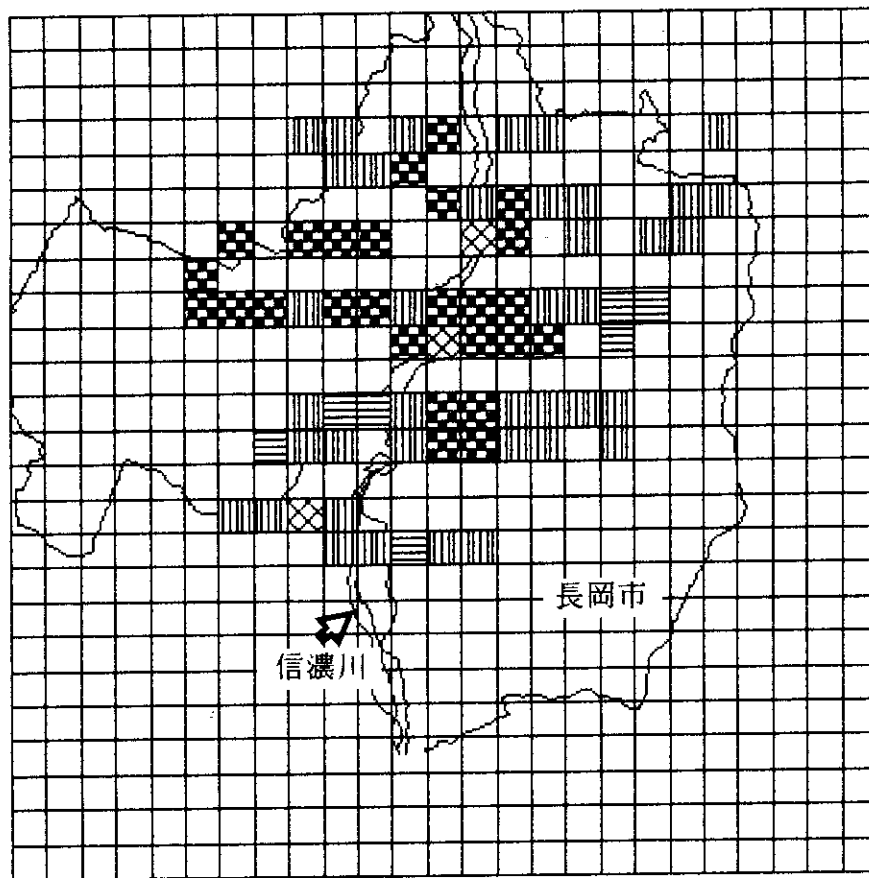
線量透過率 R は下記の通りである。

■	$0.4 \leq R$	(WE: 0~11 g/cm ²)
▣	$0.3 \leq R < 0.4$	(WE: 11~16 g/cm ²)
▤	$0.2 \leq R < 0.3$	(WE: 16~23 g/cm ²)
▥	$0.15 \leq R < 0.2$	(WE: 23~28 g/cm ²)
▦	$0.1 \leq R < 0.15$	(WE: 28~34 g/cm ²)
▧	$R < 0.1$	(WE: 34~ g/cm ²)

Fig. 4.8(2) Distribution of penetration ratios calculated using correlation of exposure rates measured by carborne survey to those measured by airborne survey in and around Nagaoka city

走行サーベイと空中サーベイの相関関係を用いた走行サーベイによる積雪時の長岡市及びその周辺の地殻ガンマ線の線量透過率分布

線量修正係数



線量率修正係数Fは下記の通りである。

- $0.8 \leq F < 1.0$
- ▨ $0.6 \leq F < 0.8$
- ▤ $0.4 \leq F < 0.6$
- ▩ $0.2 \leq F < 0.4$
- ▧ $0.0 \leq F < 0.2$

Fig. 4.9 Distribution of correction factor of exposure rates

線量修正係数の分布

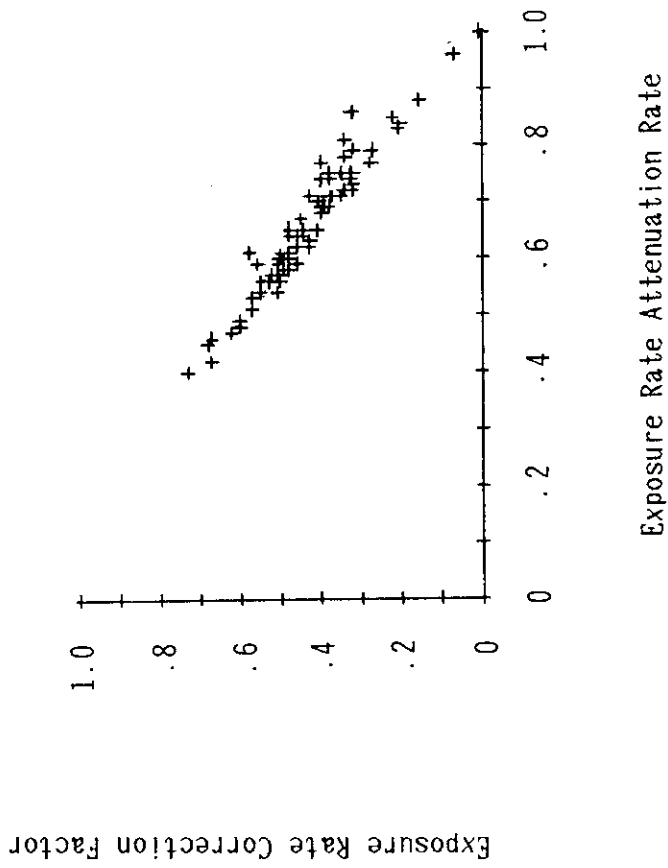
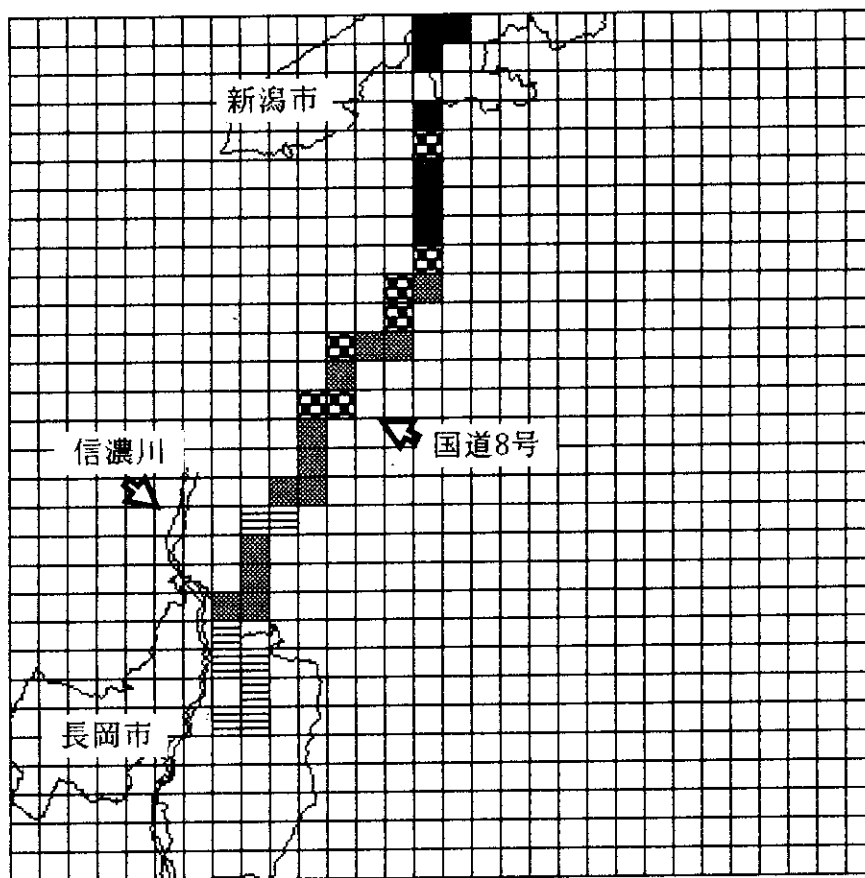


Fig. 4.10 Comparison of attenuation ratios of exposure rates and correction factors of those

線量減衰比と線量修正係数の相関

線量透過率調査



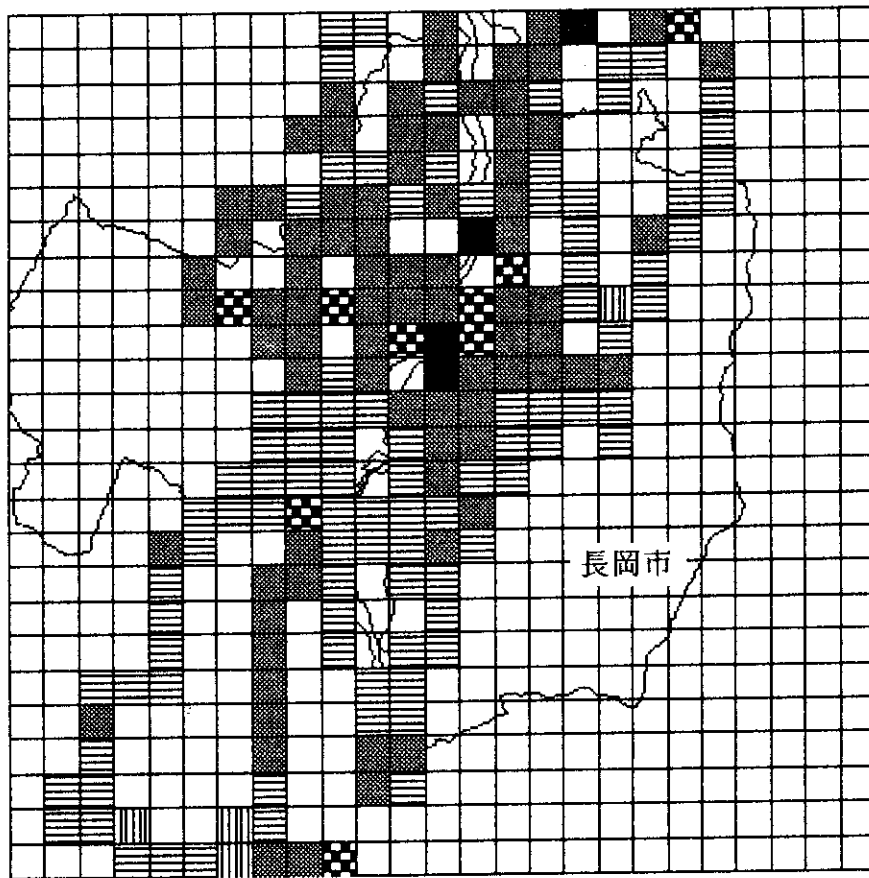
線量透過率Rは下記の通りである。

■	$0.4 \leq R$	(WE: 0~11 g/cm ²)
▣	$0.3 \leq R < 0.4$	(WE: 11~16 g/cm ²)
▤	$0.2 \leq R < 0.3$	(WE: 16~23 g/cm ²)
▥	$0.15 \leq R < 0.2$	(WE: 23~28 g/cm ²)
▦	$0.1 \leq R < 0.15$	(WE: 28~34 g/cm ²)
▧	$R < 0.1$	(WE: 34~ g/cm ²)

Fig. 4.11(1) Distribution of penetration ratios derived from exposure rates measured by carborne survey between Niigata city and Nagaoka city along the Route 8 using the correction factor methods

修正係数方式を用いた走行サーベイによる積雪時の新潟市～長岡市間の国道8号沿いでの地殻ガンマ線の線量透過率分布

線量透過率調査



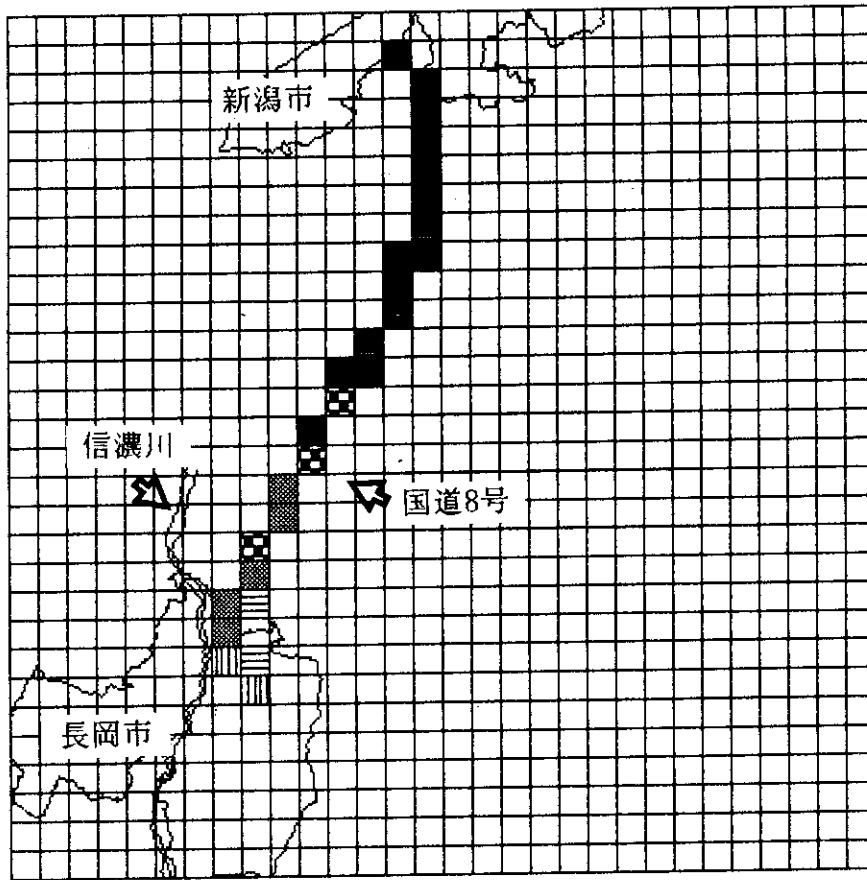
線量透過率Rは下記の通りである。

■	$0.4 \leq R$	(WE: 0~11 g/cm ²)
▣	$0.3 \leq R < 0.4$	(WE: 11~16 g/cm ²)
▤	$0.2 \leq R < 0.3$	(WE: 16~23 g/cm ²)
▥	$0.15 \leq R < 0.2$	(WE: 23~28 g/cm ²)
▦	$0.1 \leq R < 0.15$	(WE: 28~34 g/cm ²)
▧	$R < 0.1$	(WE: 34~ g/cm ²)

Fig. 4.11(2) Distribution of penetration ratios derived from exposure rates measured by carborne survey in and around Nagaoka city using the correction factor methods

修正係数方式を用いた走行サーベイによる積雪時の長岡市及びその周辺の地殻ガンマ線の線量透過率分布

2.61MeV γ 線透過率調査



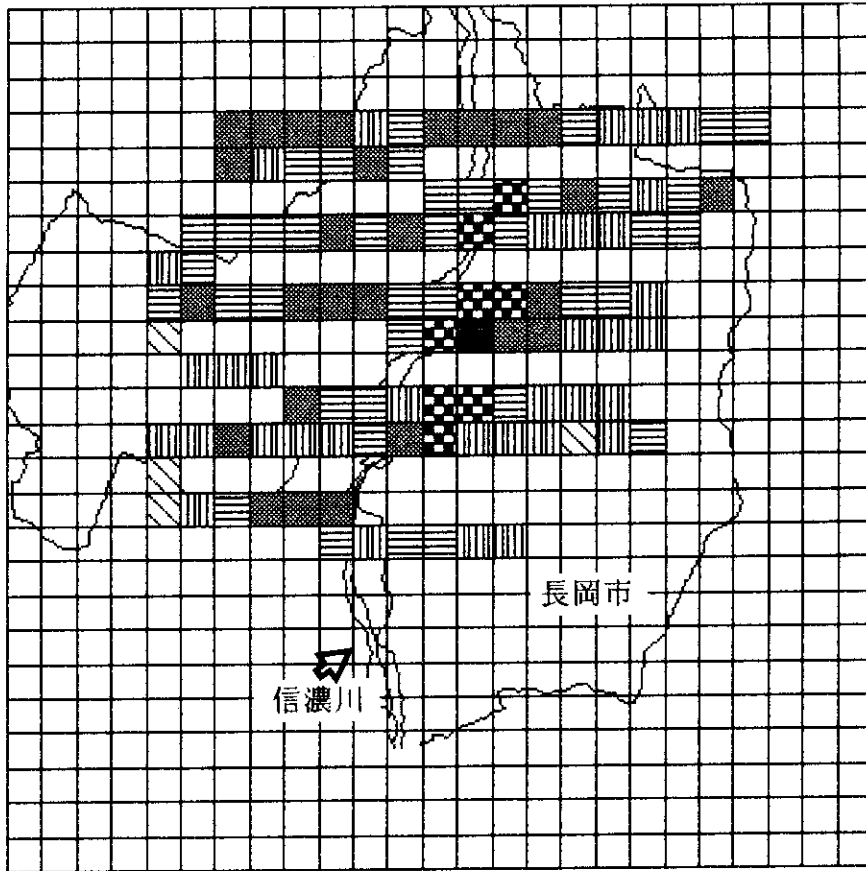
2.61MeVガンマ線透過率Rは下記の通りである。

- $0.4 \leq R$ (WE: 0~9 g/cm²)
- ▣ $0.3 \leq R < 0.4$ (WE: 9~13 g/cm²)
- ▤ $0.2 \leq R < 0.3$ (WE: 13~19 g/cm²)
- ▥ $0.15 \leq R < 0.2$ (WE: 19~24 g/cm²)
- ▦ $0.1 \leq R < 0.15$ (WE: 24~31 g/cm²)
- ▧ $R < 0.1$ (WE: 31~ g/cm²)

Fig. 4.12(1) Distribution of penetration ratios derived from 2.61 MeV gamma ray flux densities measured by airborne survey along the Route 8 between Niigata city and Nagaoka city

空中サーベイによる積雪時の新潟市～長岡市間の国道8号沿いでの
2.61 MeV ガンマ線の透過率分布

2.61MeV γ 線透過率調査

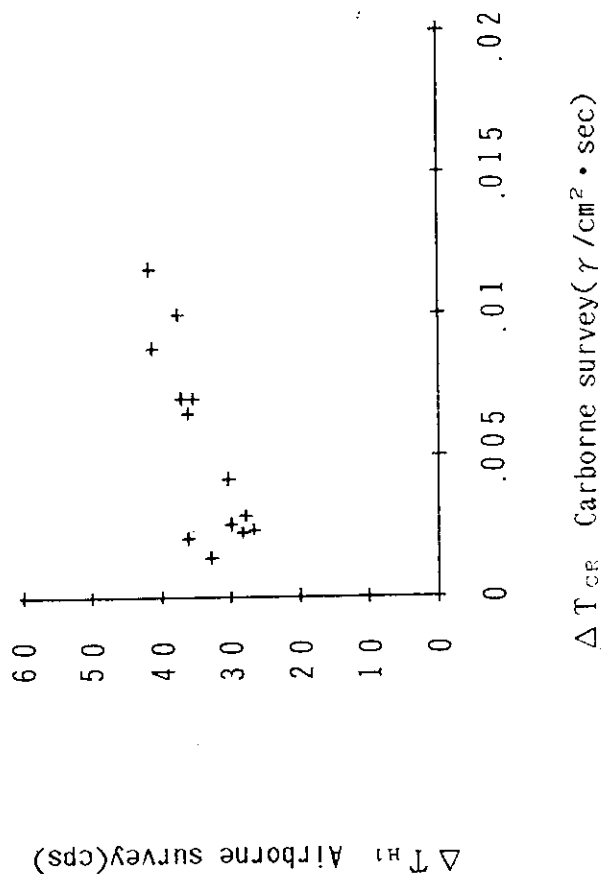


2.61MeVガンマ線透過率Rは下記の通りである。

■	$0.4 \leq R$	(WE: 0~9 g/cm ²)
▣	$0.3 \leq R < 0.4$	(WE: 9~13 g/cm ²)
▤	$0.2 \leq R < 0.3$	(WE: 13~19 g/cm ²)
▥	$0.15 \leq R < 0.2$	(WE: 19~24 g/cm ²)
▦	$0.1 \leq R < 0.15$	(WE: 24~31 g/cm ²)
▧	$R < 0.1$	(WE: 31~ g/cm ²)

Fig. 4.12(2) Distribution of penetration ratios derived from 2.61 MeV gamma ray flux densities measured by airborne survey in and around Nagaoka city

空中サーベイによる積雪時の長岡市及びその周辺の2.61 MeVガンマ線の透過率分布

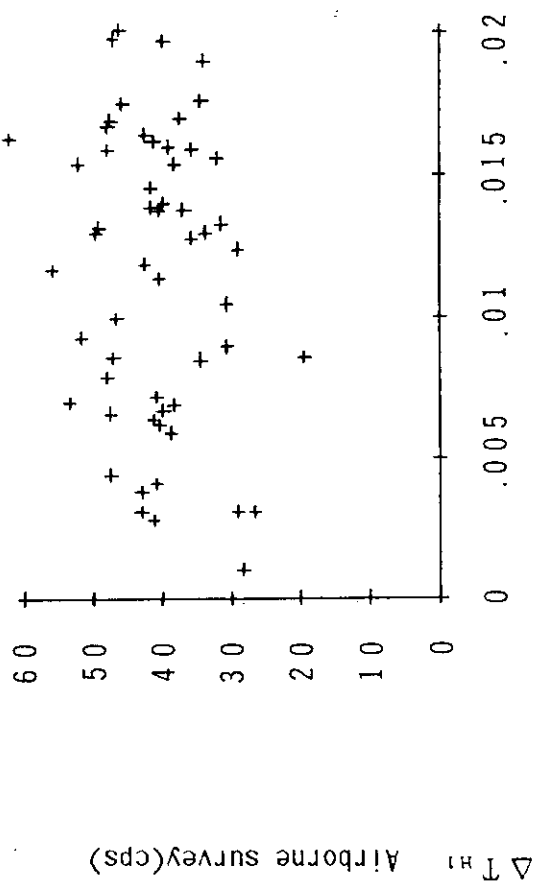


ΔT_{H1} : 空中サーベイによる無雪時と積雪時の地上1mでの2.61MeV γ 線線束密度の差

ΔT_{CR} : 走行サーベイによる無雪時と積雪時の車上での2.61MeV γ 線線束密度の差

Fig. 4.13(1) Correlation of 2.61 MeV gamma ray flux densities measured by carborne survey to those measured by airborne survey along the Route 8 between Niigata city and Nagaoka city

新潟市～長岡市間の国道8号沿いでの走行サーベイと空中サーベイの2.61 MeV ガンマ線の線束密度の相関



ΔT_{CR} Carborne survey($\gamma / \text{cm}^2 \cdot \text{sec}$)

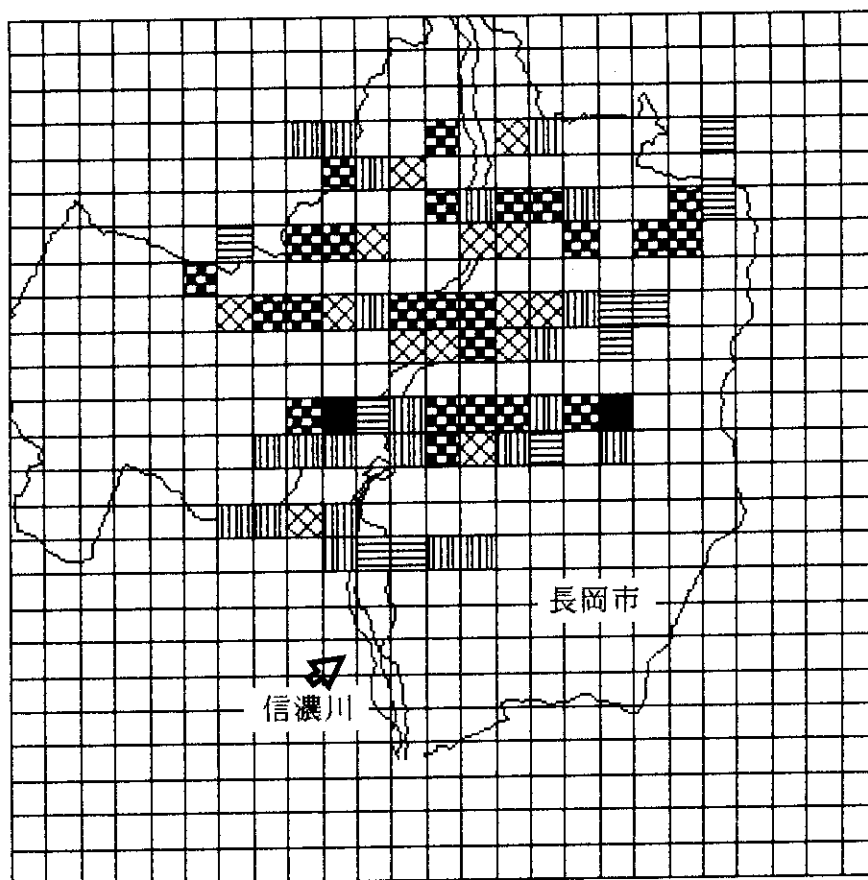
ΔT_{H1} : 空中サーベイによる無雪時と積雪時の地上1mでの2.61MeV γ 線線束密度の差

ΔT_{CR} : 走行サーベイによる無雪時と積雪時の車上での2.61MeV γ 線線束密度の差

Fig. 4.13(2) Correlation of 2.61 MeV gamma ray flux densities measured by carborne survey to those measured by airborne survey in and around Nagaoka city

長岡市及びその周辺の走行サーベイと空中サーベイの2.61 MeVガンマ線の線束密度の相関

2.61MeV γ 線修正係数



2.61MeVガンマ線修正係数Fは下記の通りである。

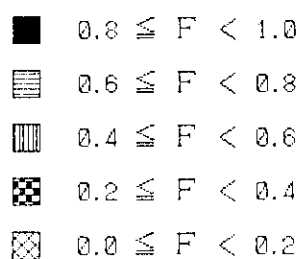
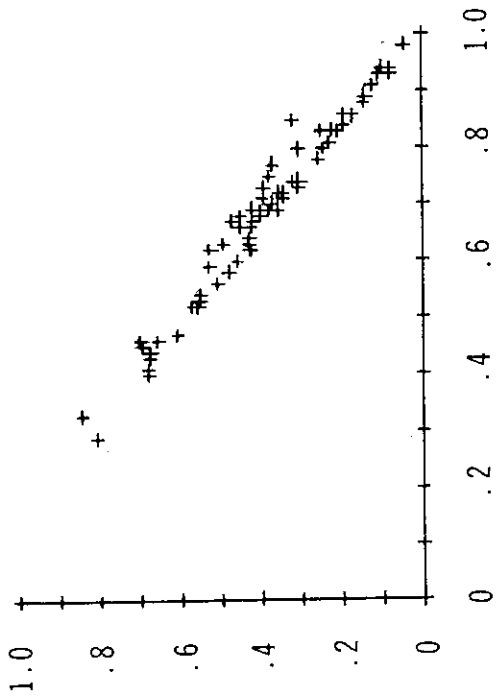


Fig. 4.14 Distribution of correction factors of 2.61 MeV gamma ray flux densities

2.61 MeV ガンマ線修正係数の分布

2.61 MeV Gamma Ray Correction Factor

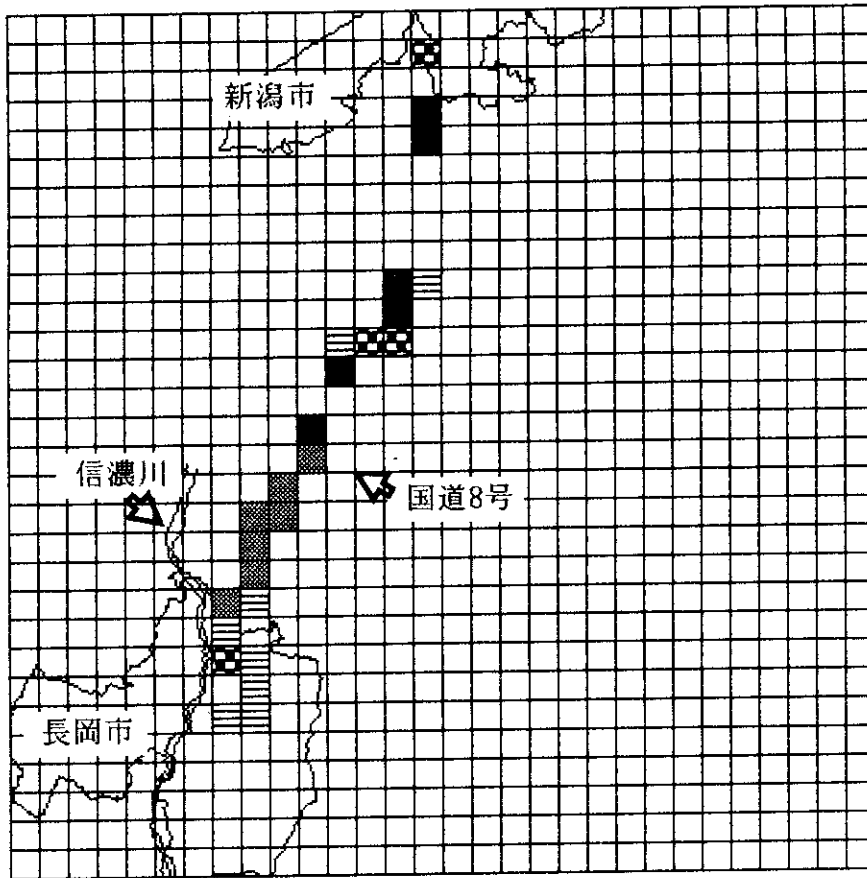


2.61 MeV Gamma Ray Attenuation Rate

Fig. 4.15 Comparison of attenuation rates of 2.61 MeV gamma ray flux densities and the correction factor

2.61 MeV ガンマ線減衰比と 2.61 MeV ガンマ線修正係数の相関

2.61MeV γ 線透過率



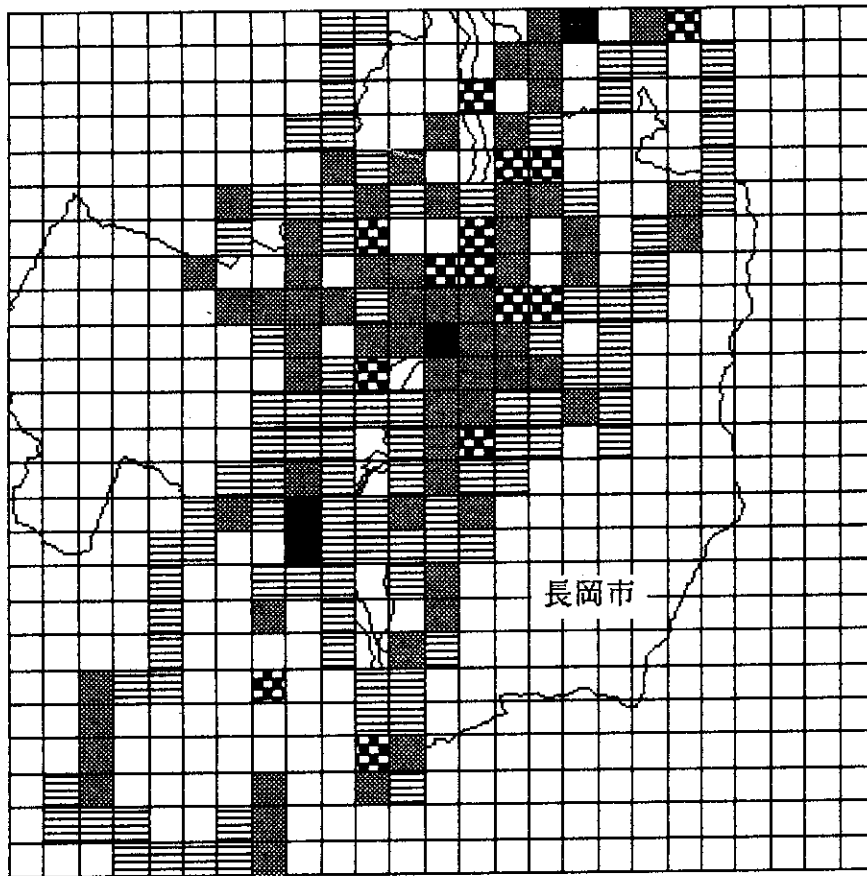
2.61MeVガンマ線透過率Rは下記の通りである。

■	$0.4 \leq R$	(WE: 0~9 g/cm ²)
▣	$0.3 \leq R < 0.4$	(WE: 9~13 g/cm ²)
▤	$0.2 \leq R < 0.3$	(WE: 13~19 g/cm ²)
▥	$0.15 \leq R < 0.2$	(WE: 19~24 g/cm ²)
▧	$0.1 \leq R < 0.15$	(WE: 24~31 g/cm ²)
▨	$R < 0.1$	(WE: 31~ g/cm ²)

Fig. 4.16(1) Distribution of penetration ratios derived from 2.61 MeV gamma ray flux densities measured by carborne survey along the Route 8 between Niigata city and Nagaoka city using the correction factor method

修正係数方式を用いた走行サーベイによる積雪時の新潟市～長岡市間の国道8号沿いで地殻ガンマ線の2.61 MeVガンマ線の透過率分布

2.61MeV γ 線透過率



2.61MeVガンマ線透過率Rは下記の通りである。

■	$0.4 \leq R$	(WE: 0~9 g/cm ²)
▣	$0.3 \leq R < 0.4$	(WE: 9~13 g/cm ²)
▤	$0.2 \leq R < 0.3$	(WE: 13~19 g/cm ²)
▥	$0.15 \leq R < 0.2$	(WE: 19~24 g/cm ²)
▧	$0.1 \leq R < 0.15$	(WE: 24~31 g/cm ²)
▨	$R < 0.1$	(WE: 31~ g/cm ²)

Fig. 4.16(2) Distribution of penetration ratios derived from 2.61 MeV gamma ray flux densities measured by carborne survey in and around Nagaoka city using the correction factor method

修正係数方式を用いた走行サーベイによる積雪時の長岡市及びその周辺での地殻ガンマ線の2.61 MeVガンマ線の透過率分布