

Appendix 3.4-1 : KURAMA-IIシステムによる空間線量率評価方法とデータ処理の概要

本項では、京都大学原子炉実験所で開発され本事業で整備したKURAMA-IIシステムに関連して、原子力機構として独自に実施した基礎特性試験およびその結果について以下に記載する。

(1) KURAMA-IIシステムの基礎特性

・装置の概要

KURAMA-IIシステムを図3.4.1-1に示す。35cm(縦)×15cm(横)×17cm(高さ)のケース内に、CsI(Tl)シンチレーション検出器、データ処理およびデータ送信用基板一式が搭載されている。測定された波高スペクトル分布データとデータ処理プログラム内に内蔵されたスペクトル線量換算演算子(以下、「G(E)関数」という。次節参照。)によって算出された3秒ごとの空間線量率データが、GPSによって記録された位置情報と共に、3G回線網を通じて30秒間隔でゲートウェイサーバへ送信される。KURAMA-IIシステムを乗用車内の右側後部座席のヘッドレストの後ろに設置して測定を実施し、車内での測定値から車外での地上高さ1mでの値への補正をデータの自動処理で行う。データ変換サーバに送られた後のデータ処理は、KURAMAシステムと同様である。

測定には、浜松ホトニクス製CsI(Tl)シンチレーション検出器(C12137、結晶サイズ:13mm×13mm×20mm)を使用した(図3.4.1-1(c)参照)。シンチレータからの光信号はMPPC(Multi-Pixel Photon Counter)を介して増幅され、30~2,000 keVの範囲の光子を測定可能である。測定される空間線量率の値の誤差は、空間線量率すなわち検出器へ入射する光子の計数率が大きいほど小さいが、例えばバックグラウンド(0.1 μSv/h以下)において、3秒間の計測で得られる空間線量率の誤差は約20%である。

(2) 空間線量率の導出に用いたG(E)関数

1) 計算方法

G(E)関数による線量評価手法では、γ線場のエネルギースペクトルの解析を行うことなく、測定した波高スペクトルから直接的に高い評価精度で線量を導出することが出来る^{3-1~3-3}。ここでは、G(E)関数を用いた線量計算手法の概要を述べる。

ある単色エネルギー E_0 の光子に対して、式(1)の積分方程式を成立させる様な荷重関数G(E)が存在し、単位フルエンス当りの線量換算係数h(E)は、検出器の応答関数n(E, E_0)を用いて以下の様に表すことができる。

$$h(E_0) = \int_0^{\infty} n(E, E_0) G(E) dE \quad (1)$$

よって、種々のエネルギー E_i のγ線混在場における全線量Dは、式(1)を用いて以下の様に書ける。

$$\begin{aligned}
D &= \sum_i \phi(E_i) h(E_i) \\
&= \sum_i \int_0^{\infty} \phi(E_i) n(E, E_i) G(E) dE \\
&= \int_0^{\infty} \sum_i \phi(E_i) n(E, E_i) G(E) dE \\
&= \int_0^{\infty} N(E) G(E) dE \quad (2)
\end{aligned}$$

ここで、 $N(E)$ は波高スペクトル、 $\phi(E_i)$ は γ 線のエネルギースペクトルである。

この様に、全線量 D は、場のエネルギースペクトルを解析することなく、測定される波高スペクトルと $G(E)$ 関数から簡単な演算により算出される。

CsI(Tl)結晶の応答関数計算には、連続エネルギーモンテカルロシミュレーションコードMCNP5³⁻⁴⁾を用いた。40～13,000 keVの24点において、単一エネルギーの光子に対する応答関数を計算した。

図3.4.1-2に示すように、平行ビームを結晶面に対して直角に入射させる条件で計算した。環境中に分布する放射能による光子線の線量測定では、結晶に対して等方的に γ 線が入射する体系が実際の状況に最も近いと考えられるが、環境放射能に対する線量測定³⁻¹⁾でも採用されている代表的な入射条件である平行ビームを用いた体系を採用した。

線量換算係数には、ICRP Publication 74の光子フルエンスから周辺線量当量 $H^*(10)$ への換算係数を用いた³⁻⁵⁾。高次多項式で表した $G(E)$ 関数の各係数の値は、24点の単色エネルギー光子に対する応答関数と $H^*(10)$ 線量当量換算係数を用いて、最小二乗法によって決定した。

2) 計算結果

CsI(Tl)シンチレーション検出器の光子に対する $G(E)$ 関数を、周辺線量当量 $H^*(10)$ と共に図3.4.1-3に示す。 $G(E)$ 関数は100 keV付近で極小となり、 $H^*(10)$ と同様に、それ以上のエネルギー範囲において増加している。

(3) 照射試験

本装置の性能を確認するため、原子力機構において、Cs-137照射装置および公称放射能3.7 MBqの密封 γ 線源(核種: Am-241、Ba-133、Cs-137、およびCo-60)から成る γ 線校正場で照射試験を行った。

1) 空間線量率直線性試験

Cs-137 γ 線の周辺線量当量率 $H^*(10)$ を0.2～200 μ Sv/hで変化させた時の指示値の直線性を確認した。0.2～6 μ Sv/hについては密封 γ 線源、6～200 μ Sv/hについてはCs-137照射

装置を用いて試験を実施した。指示値は3秒ごとに表示されるため、1分間測定して20回指示値を読み取りその平均値を求め、バックグラウンドを差し引いた正味指示値を場のH*(10)で除して、レスポンスを求めた。

場のH*(10)とレスポンスの関係を図3.4.1-4に示す。ここで、¹³⁷Cs照射装置による試験の結果は、散乱線の影響で10%程度系統的に高い値を示すため、密封γ線源6 μSv/hの測定結果で規格化した。H*(10)が0.2~30 μSv/hの範囲では、レスポンスの変化は±10%であった。空間線量率の増加と共に数え落しによるレスポンス(指示値)の低下が見られた(100 μSv/hで約2割、200 μSv/hで約5割)が、本事業で実施した測定の空間線量率範囲では影響はなかったと考えられる。

2) 指示値変動試験

前項の空間線量率直線性試験で得られた指示値から変動係数(指示値の標準偏差を平均値で除した値の百分率)を求めた。指示値の平均値と変動係数との関係を図3.4.1-5に示す。試験結果から得られた変動係数は、検出器の公称感度(0.01 μSv/hあたり40 cpm)を元にポアソン分布を仮定した場合の推定値(実線)とよく一致した。空間線量率の低下と共に変動係数は大きくなり、0.2 μSv/hで16%程度となった。

3) 方向特性試験

Cs-137 γ線に対する方向特性を確認した。Cs-137照射装置を用いてH*(10)で20 μSv/h照射し、ケースの留め金を取り付けられている面を装置正面(0°)として、30°刻みに方位角(水平)方向でγ線入射角度を変化させた時の指示値を読み取り、空間線量率直線性試験と同様に、レスポンスを求めた。入射角度に対するレスポンスを図3.4.1-6に示す。入射角度に対するレスポンスの変化は、全方位で見ても最大23%であった。

4) エネルギー特性試験

γ線エネルギー60~1,250 keVに対するエネルギー特性を試験した。Am-241(60 keV)、Ba-133(300 keV)、Cs-137(660 keV)、およびCo-60(1,250 keV)の密封γ線源を用いて照射し、指示値を読み取り、空間線量率直線性試験と同様に、レスポンスを求めた。γ線エネルギーとレスポンスの関係を図3.4.1-7に示す。γ線のエネルギーによるレスポンスの変化は、±11%であった。

5) レスポンス個体差試験

装置の個体間のレスポンスの相違を確認した。上記1)~4)の試験を実施した装置(シリアル番号:016A98B5)を含めた計5台について、¹³⁷Cs照射装置を用いてH*(10)で20 μSv/h照射し、それぞれ指示値を読み取り、空間線量率直線性試験と同様に、レスポンスを求めた。装置ごとのレスポンスを表3.4.1-1に示す。試験した装置間のレスポンスの相違は、最大で3%となり非常に小さかった。

(4) データ処理の概要

KURAMA-IIシステムを用いた測定においてデータ変換サーバで実施したデータ処理の概要を、図 3.4.1-8 に示す。

1) 速報値

測定車内での測定値（図中の“測定値（元データ）”）に一律の補正係数（1.3）をかけて、車がない状態での道路上 1m での空間線量率（速報値）として、直ちに Google Earth に表示できるようにした。測定時、Google Earth にはこの値が表示される。

2) 暫定値

毎日の測定終了後、測定値（元データ）に対して、次項で述べる補正を自動で行い、Google Earth で閲覧できる様に処理を実施した。速報値の補正係数 1.3 を用いると、低い空間線量率（ $1.0 \mu\text{SV/h}$ 以下）の地点の空間線量率を実際よりも高く補正してしまう傾向があるため、暫定値では、空間線量率に応じた補正係数を用いて車外値を導出した。

3) 暫定値（位置データ非補正版）

道路データに基づく補正は、平成 15 年 3 月に国土地理院より刊行された“数値地図 25000（空間データ基盤）”のデータに基づいて実施した。実際の測定では、“数値地図 25000（空間データ基盤）”にデータのない道路における測定データがあり、前項の自動処理によって測定値が削除されてしまう、或いは実際に測定した道路と異なる位置に測定位置が変更されてしまう、といった事象が確認された。

そのため、参考データとして、位置データに関する補正を行わない暫定値（位置データ非補正版）を作成した。

4) 暫定値（100m メッシュ表示）

自治体より、測定値に対して、「これまでに測定された空間線量率と比較して高い」との問い合わせが複数寄せられた。KURAMA-IIシステムでは、3 秒間というごく短時間の平均値を測定していることから、表示される暫定値は KURAMA-IIシステムでの測定方法における不確かさ（統計的な値のばらつき）の範囲内にあると考えられる。そこで、統計的ばらつきを小さくするため、公表は 100m 四方内でデータを時間的・空間的に平均したメッシュ表示で行うこととした。また、自動車の遮蔽効果を補正するための補正係数が低い空間線量率の場で小さくなることが影響していることも考えられたため、空間線量率に依存する補正係数を用いることとした。

5) 公開版データ (100m メッシュ表示)

暫定値 (100m メッシュ表示) について、自治体に確認を依頼し、公道を含まない場合や測定に参加されていない自治体内で記録されている場合など、公表に適さないと判断されたデータについては自治体からの要望に基づいてデータを変更した。

上記の 1)～5) のデータの一覧を表 3.4.1-2 に示す。

(5) KURAMAシステムのデータ自動処理システムの開発

KURAMA-IIシステムによる測定にあたっては、約 200 の自治体にKURAMA-IIシステムを貸し出して詳細な空間線量率測定を実施した。測定の実施期間中は、連日KURAMA-IIシステムを搭載した乗用車が 100 台規模で走行して空間線量率を測定し、そのデータを原子力機構が取りまとめ、即日解析を実施したのち、速報版として各自治体に解析結果を通知することとしていた。本計画を実施するためには、毎日 100 万点を超えるデータを即日解析する必要がある。そのため、KURAMAシステムによる測定データを解析するプログラムを開発して自動化を行い、即日解析の要件に応えられるシステムを開発した。

測定データの解析では、具体的に以下の処理を行った。

- 異常値の削除
検出器のレンジオーバーやGPS装置の精度の低さを示唆するデータを検出して削除する。
- スパイクデータの削除
KURAMAシステムの測定データから時系列データを解析し、ノイズと推定される、線量値が大きく変動している地点のデータを削除する。
- 同一時刻データの削除
KURAMAシステムの時刻データを解析し、測定時刻が重複しているかどうかをチェックする。同一時刻のデータが存在した場合、最初に出現したデータ以外を異常値として削除する。
- トンネル内データの削除
KURAMAシステムの測定データから緯度・経度・方向データを解析し、GISデータを用いて近接地点がトンネルか一般道路かを検出する。トンネル内は汚染されておらず、周囲の汚染状況を反映していないため、トンネル内の測定データは削除する。
- 座標補正ツール
KURAMAシステムの測定データから緯度・経度データを解析し、GISデータを用いて近接道路から一定範囲内の測定データを道路上の座標に補正する。近接道路から一定範囲外の測定データは異常値として削除する。
- メッシュ表示ツール
KURAMAシステムによって収集されたモニタリングデータのあるサイズのメッシュ単位に分割し、メッシュ内の測定データの空間線量率の平均値を求める。

表 3.4.1-1 KURAMA-IIシステムの装置ごとのレスポンス（レスポンス個体差）

シリアル番号	線量当量レスポンス (016A98B5 で規格化)
016A98B5	1.00±0.02
016AC43E	0.99±0.03
016AC433	0.98±0.02
016AC442	0.97±0.02
016AC461	0.97±0.02

表 3.4.1-2 KURAMA-IIシステムでの測定で作成したデータ一覧

		暫定値	暫定値(位置データ非補正版)	暫定値(100mメッシュ表示)	公開版データ(100mメッシュ表示)
測定時間に基づく補正	同一時刻のデータの削除	○	○	○	○
	測定前後5分間のデータの削除のとりやめ	○	○	○	○
位置データに関する補正	位置データが不正((0,0)或いはマイナス)なデータの削除	○	—	○	○
	測定自治体を含む都県外のデータの削除	○	—	○	○
	道路データに基づく測定値の削除・位置情報の補正	○	—	○	○
	トンネル内の測定値の削除	○	—	○	○
線量率に関する補正	低線量率の地点の線量率の補正	○	○	○	○
	スパイクデータの削除	○	○	○	○
	不正データの削除(測定値低、検出器の温度異常)	○	○	○	○
自治体からのご要望に基づくデータの変更		—	—	—	○
データの表示方法		データ1点ごと表示		100mメッシュ(平均値)	



(a) 外観



(b) ケース内



(c) CsI(Tl)シンチレーション
検出器

図 3.4.1-1 KURAMA-II システム

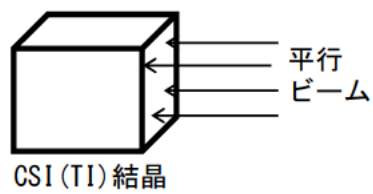


図 3.4.1-2 シミュレーション計算における CsI 結晶への光子の入射方向

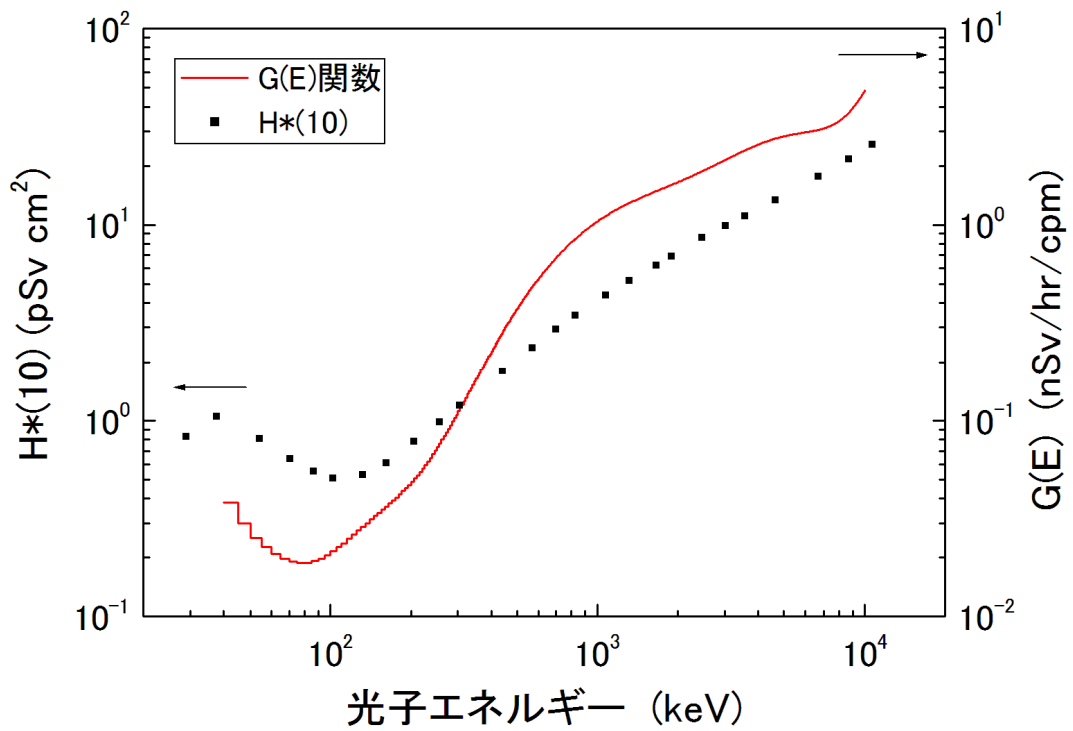


図 3.4.1-3 計算した $G(E)$ 関数と周辺線量当量 $H^*(10)$

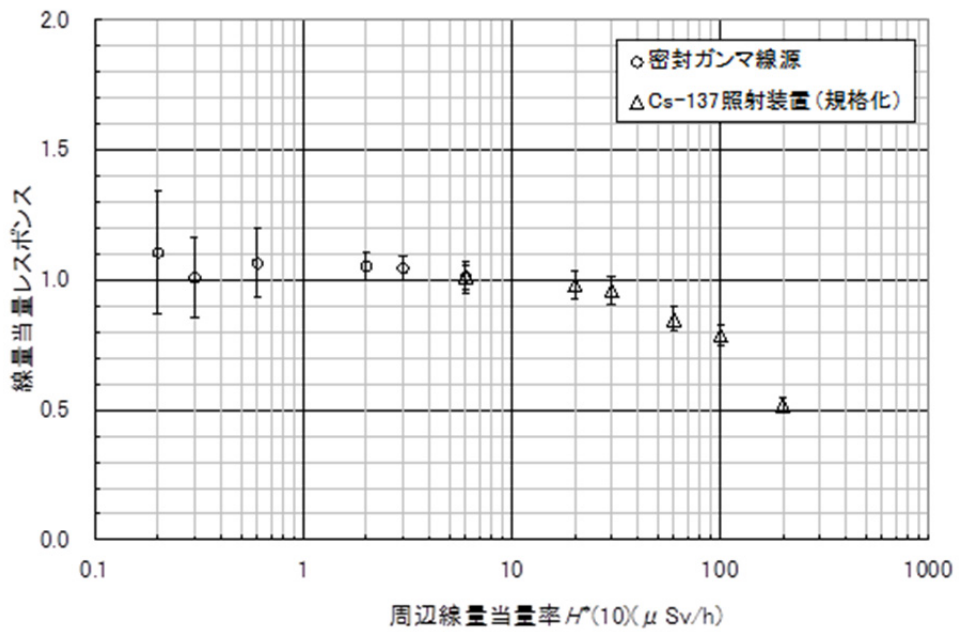


図 3.4.1-4 周辺線量当量率 $H^*(10)$ とレスポンスの関係 (空間線量率直線性)

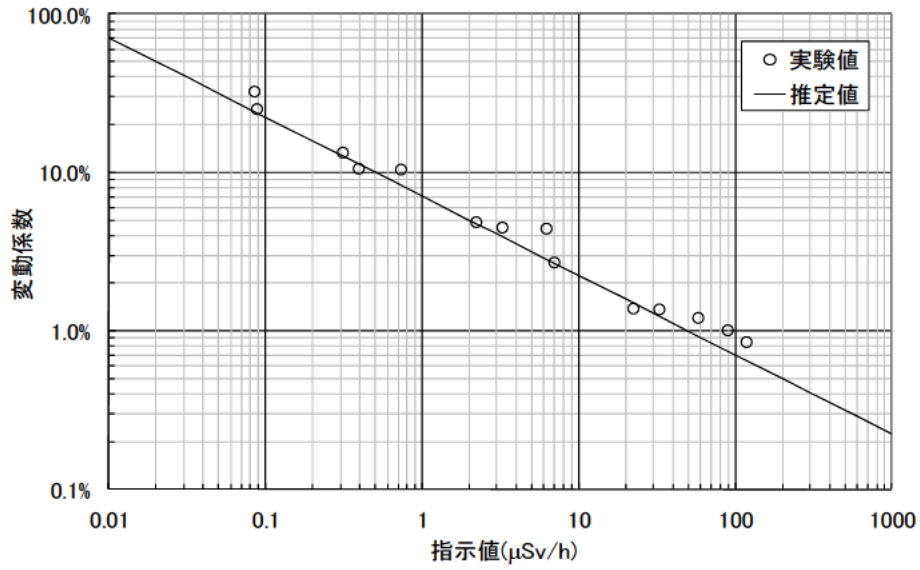


図 3.4.1-5 指示値と変動係数の関係 (指示値変動)

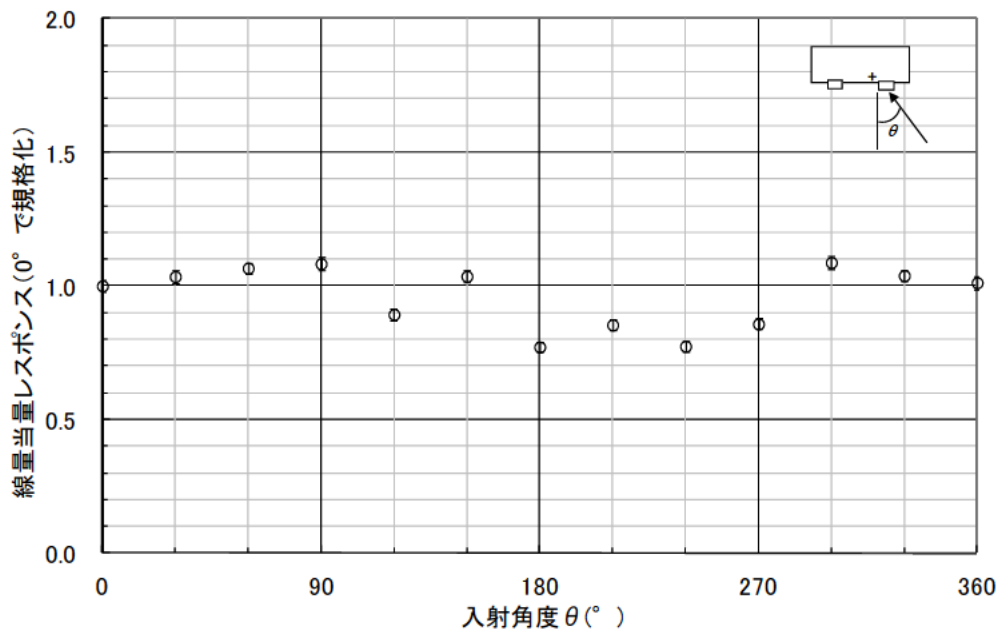


図 3.4.1-6 γ 線入射角度とレスポンスの関係 (方向特性)

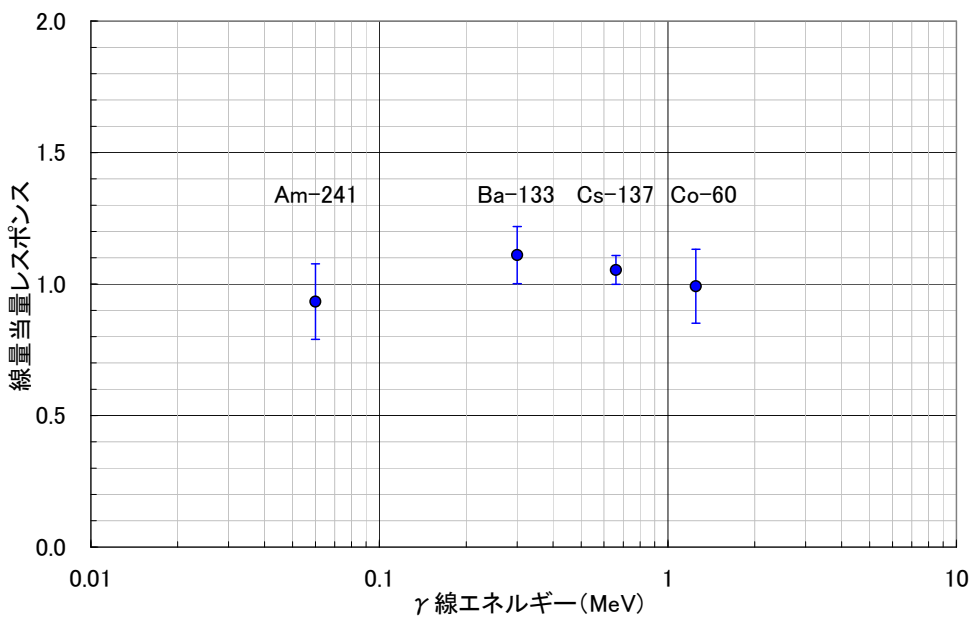


図 3. 4. 1-7 γ線エネルギーとレスポンスの関係 (エネルギー特性)

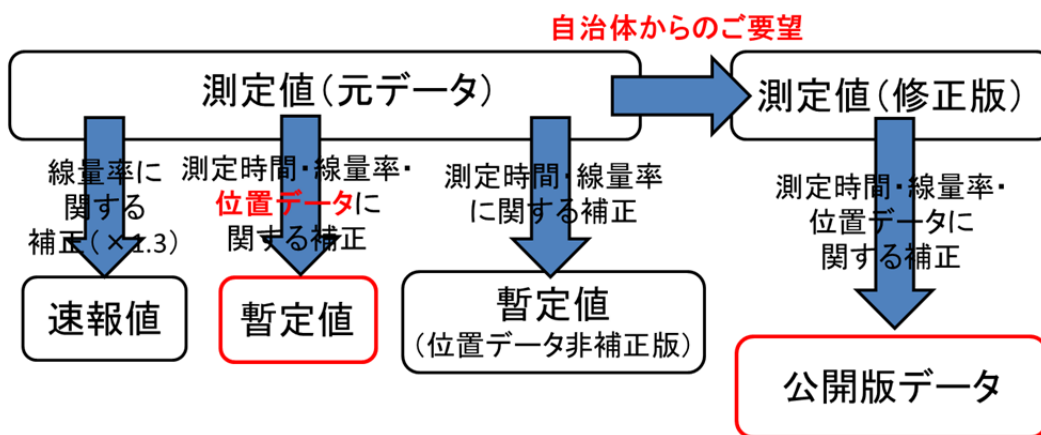


図 3. 4. 1-8 KURAMA-IIシステムを用いた測定におけるデータ処理の概要

以上