

放射能ゾンデ観測値の経年変化考察のための試み

井上聖吾*・岩坪昇平*・佐藤昌志*・藤田 建**・武井保幸***

The Trial for Secular Change Consideration of Radioactivity Sonde Observation Data

Shogo INOUE, Shohei IWATSUBO,
Masashi SATO, Tatsuru FUJITA and Yasuyuki TAKEI

要旨

放射能ゾンデ観測は、大気中にある人工放射性核種 ^{137}Cs から放射される γ 線の鉛直分布を直接観測するもので、1959年に業務として高層気象台に移管され、1年に3~4回観測を行っている。

今般、 γ 線計数値の経年変化を把握することを目的として、観測前に実施している飛揚前点検値から計数効率を求め観測値の補正を試みた。補正の結果は、補正後の値が補正前の値に比べバラツキが大きくなり、補正の有効性を確認できなかったが、飛揚前点検の方法について改善すべき点を明らかにすることができた。

1. はじめに

ラジオゾンデを用いた大気中の放射能観測は、気象研究所で1954年の夏から始められ、まもなく50年を経ようとしている。これまでに蓄積された観測値をもとに経年変化や平常時のバックグラウンド値を明らかにすることは、チェルノブイリ原発事故のように核関連施設で事故が発生した場合、事故の影響を評価する際に非常に有益となる。これまで観測を重ねながら、種々の改良が加えられてきたが、同じ検出器を繰り返し使用できないことから過去の観測値には γ 線検出器の器差による誤差がある。

過去の資料には、相互のデータ比較ができるようにと1960年代半ばから γ 線検出器の飛揚前点検を行っていた記録があるが、その実施方法や結果は残っていない。

今般、 γ 線計数値の経年変化の把握を目的として、現在の飛揚前点検と同様の実施方法となった1979年9月から2003年12月までの77観測について、飛揚前点検値から γ 線検出器の検出効率(以下「計数効率」という)を求め観測値の補正を試みた。

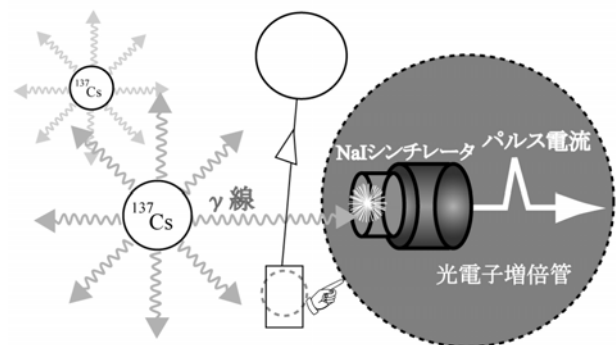


図1 放射能ゾンデ観測の概略図

2. シンチレーション検出器の原理

放射線が物質に当たると光を発する現象をシンチレーションといい、また、発光する物質をシンチレータという。シンチレーション検出器(以下「検出器」という)はこの現象を利用して放射線のうち主に γ 線を測定するもので、通常はシンチレータと光電子増倍管の一体構造となっている。特にNaI(Tl)シンチレータは γ 線の計数効率が高く、1973年から気象庁の放射能ゾンデに採用している。

図2に示すように、NaI(Tl)シンチレータに γ 線が入射すると、光電効果により γ 線の全エネルギーを与えられ

*高層気象台 観測第二課 **観測部 管理課 南極観測事務室 ***観測部 観測課 高層気象観測室

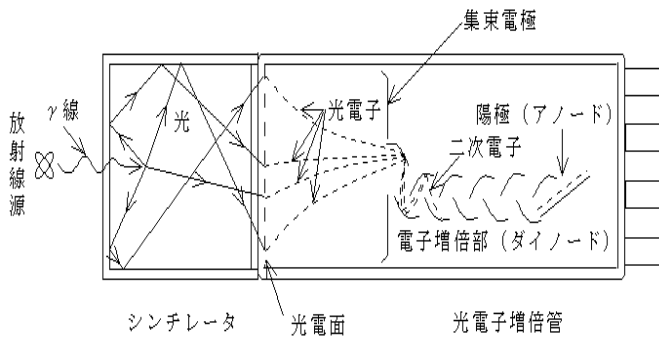


図2 シンチレーション検出器の原理

た自由電子は、原子から飛び出し軌道電子を励起させる。励起された軌道電子が基底状態に戻る際に光を発する。発光量はγ線のエネルギーに比例しているが極めて微弱である。光電子増倍管は、光電面、集束電極、電子増倍部、陽極を真空の容器に納めたもので、シンチレータから入射した光は光電面で電子に変換され、集束電極を通り電子増倍部に入る。電子増倍部では数段の電極(ダイノード)に高電圧が分割されてかけられており、電子は各ダイノードの間の電位差によって加速され、次段のダイノードに衝突して二次電子を放出する。放出された二次電子の一部は次段のダイノードとの間の電位差により更に加速され次のダイノードに衝突して二次電子を放出する。この動作を繰り返すことによって増倍され、陽極(アノード)からγ線のエネルギー(電圧)に比例した測定可能な強度の電気パルスが得られる。

放射能ゾンデ観測では、 ^{137}Cs から放射されるγ線のエネルギー(0.662MeV)を検出するために、光電子増倍管の後段にある波高弁別器で上限 0.71MeV および下限 0.55MeV の電圧値を設定して、電気パルスが設定した波高値のパルスのみを計数している(大野ほか：1995)。

3. 飛揚前点検

放射能ゾンデの飛揚前点検は、γ線検出器の直線性を確認するために、通常、観測の1~2週間前に行う。ただし、NaI(Tl)には吸湿性があり一定期間放置すると大気中の水分を吸収してしまい劣化するため雨天など湿度の高い時には行わない。

3.1 飛揚前点検の方法

図3に示すように、放射能ゾンデを架台に設置し、ゾンデ内にある検出器の上端面から一定の距離(0.2m, 0.5m, 1.0m, 1.5m)に標準放射線源(^{137}Cs) (以下「標準線源」という)を順に置き、それぞれの距離において、15分から20分程度データ収集を行う。処理画面では4秒値と1分値

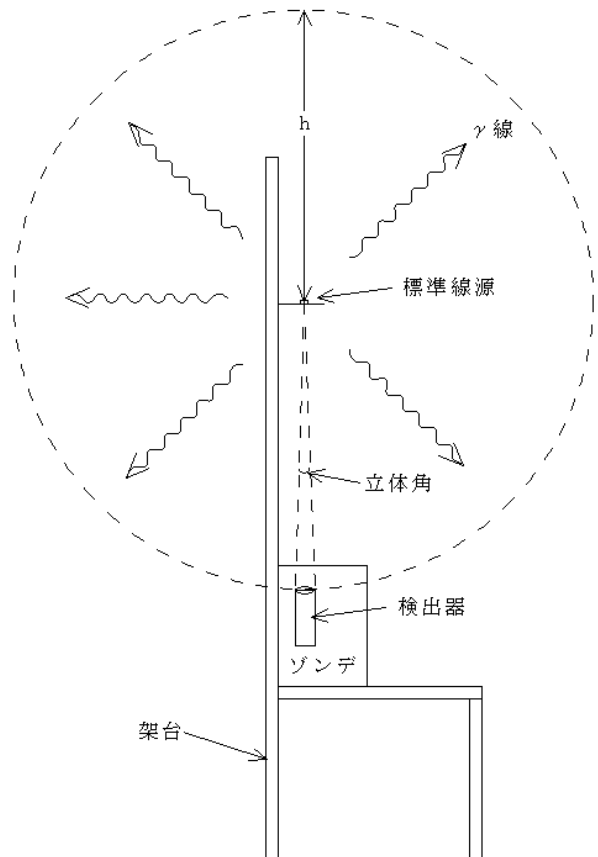


図3 飛揚前点検の概要

がグラフ表示される。区間選定画面において、データ収集時間のなかで、1分積算値の安定しているところを選択することにより、その時点から連続した10分間について各1分毎の積算値(以下「計数値」という)が表示される(図4の左表参照)。同様にして、バックグラウンド(標準線源を置かない状態)でも計測を行う。10分間の平均計数値からバックグラウンドの平均値を差し引いた値(BG減値)を、当該距離の計数値とする。

なお、標準線源の表面の中心を通る法線と、検出器の入射窓の中心を通る法線が一致しなければ、標準線源と検出器の入射窓で作る立体角が小さくなり検出器に入射するγ線はその分少なくなる。実測比較によると、標準線源から0.2mの位置で、法線からゾンデを10cmずらしたときの計数値は、法線が一致しているときの計数値より約100cpm減であり、法線が一致しているときに比べ、約8%の差があった。このことから、ゾンデと標準線源を置く位置はできる限り合わせる必要がある。

3.2 飛揚前点検の合否判定

3.1により取得したデータは、片対数グラフ(図4の右

Tateno 2003/ 5/13

分	0.2m	0.5m	1.0m	1.5m	B.G
1	1311	204	70	42	20
2	1360	210	63	41	19
3	1320	217	67	37	20
4	1378	200	65	38	17
5	1319	210	71	37	17
6	1308	203	68	32	12
7	1328	214	62	35	16
8	1292	216	68	36	14
9	1343	199	71	34	15
10	1357	216	69	32	13
平均	1331.6	208.9	67.4	36.4	16.3
標準偏差	25.7	6.6	3.0	3.2	2.7
B.G減値	1315.3	192.6	51.1	20.1	

表中の数値の単位はcpm(count per minute)

キャリブ実施場所: GROUND
 点検者名: KATO, IWATSUBO, TUTIYA
 ゾンデ型名: RC-94
 ゾンデ番号: 0188
 検出器型名: 44/DM
 検出器番号: 020108-9
 放射線源: Cs-137 (176kBq)

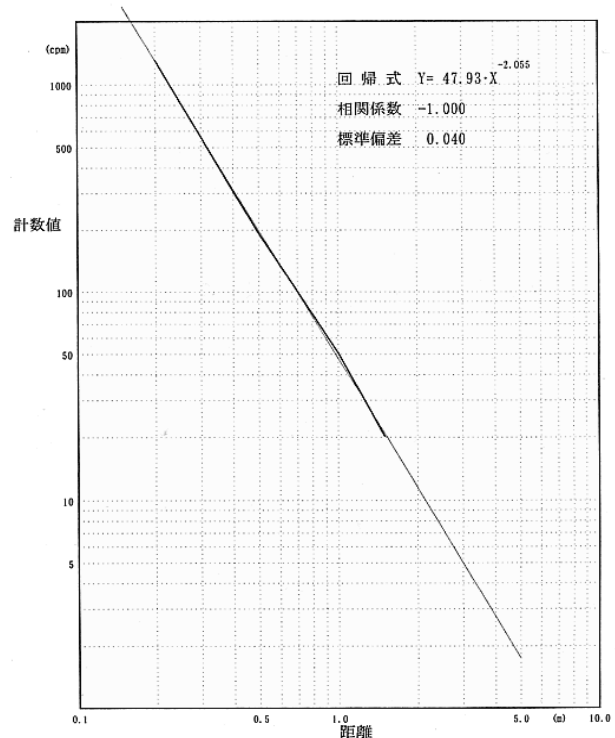


図4 飛揚前点検の結果例 (2003年5月13日実施)

図参照)に表され、計数値が距離の2乗に反比例している(検出器が正しく計測している)ことを確認する。合否の基準は、相関係数 $-1.0 \sim -0.98$, 標準偏差0.1以下となっており、この基準を満たしたものを観測に使用する。

4. 補正方法

期待される計数値は、標準線源の半減期を用いて飛揚前点検実施時における放射線源の放射能値を算出し、その放射能値と検出器の入射窓が作る立体角から求める。

補正に際して、検出器の周囲での減衰、分解時間は考慮しない。

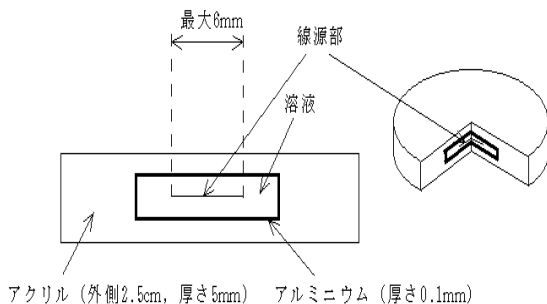


図5 標準線源の形状

4.1 標準線源の放射能値の算出

4.1.1 標準線源の形状

図5に示すように、標準線源は、 ^{137}Cs の線源部を溶液と厚さ0.1mmのアルミニウムの膜で覆い、その周囲をアクリルで包み込んだ形状で、線源部の直径は最大6mmの円盤状となっている。

4.1.2 標準線源の放射能値

微小時間 dt あたりに壊変する放射性元素の原子核数を dN とすると

$$dN = -\lambda N dt \quad (1)$$

ただし、 N : 標準線源に残存している放射性元素の原子核数
 λ : 壊変定数

(1)式を積分して

$$N = N_0 e^{-\lambda t} \quad (2)$$

ただし、 N_0 : $t=0$ のときの放射性元素の原子核数

となる.

残存している原子数が半分になるまでの時間(半減期)を T とすると,

$$\begin{aligned}\lambda T &= \log_e 2 \\ &= 0.693 \\ \lambda &= \frac{0.693}{T}\end{aligned}$$

となり(2)式は

$$N = N_0 \left(\frac{1}{2} \right)^{\frac{t}{T}} \quad (3)$$

となる.

(3)式により, 飛揚前点検実施日の標準線源の放射能値 N を求めた.

放射性元素の放射能は, 単位時間に崩壊する原子数であるから, 放射能 N' は,

$$\begin{aligned}N' &= -\frac{dN}{dt} \\ &= \lambda N \\ &= 0.693 \frac{N}{T}\end{aligned}$$

となる (石川ほか: 1989).

4.2 検出器の器差補正

標準線源から出るすべての γ 線のうち検出器に入射する γ 線の割合(幾何学的効率)と標準線源の放射能値との積は 1 秒間の期待される計数値となる. 期待される計数値と実際の計数値との比の差異をもって検出器の器差とした.

4.2.1 検出器の立体角補正

図 6 に示すように, 検出器は半径(r)1.27cm, 高さ(L)2.54cm の円柱形である. 全立体角は 4π であるから, 標準線源と検出器の窓で作る立体角を Ω とすると, 幾何学的効率 G は,

$$G = \frac{\Omega}{4\pi}$$

となる.

標準線源は円盤状の形状であり, これを考慮すると Ω は複雑な関数となる. しかし, 標準線源と検出器との距離 h が標準線源の半径 d や検出器の半径 r に比べ, 非常に大きい($d \ll h, r \ll h$)ので, 標準線源は等方点線源と考えて差し支えない.

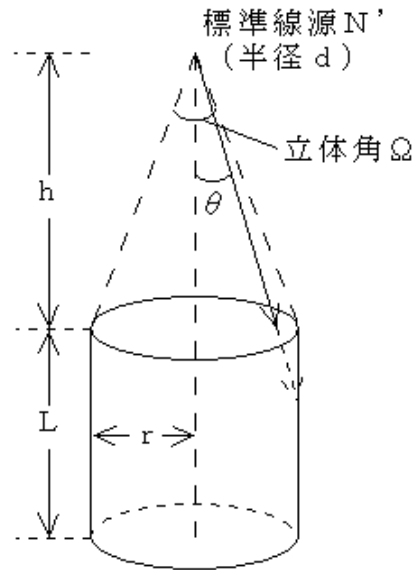


図6 標準線源と検出器

したがって, 幾何学的効率 G は

$$\begin{aligned}G &= \frac{1}{2}(1 - \cos \theta) \\ &= \frac{1}{2}\left(1 - \frac{h}{\sqrt{r^2 + h^2}}\right)\end{aligned}$$

で表される(気象庁: 2003).

4.2.2 検出器の計数効率

標準線源の放射能値 N' は毎秒値であるから, 幾何学的効率 G との積に 60 を乗じた値は 1 分間の期待される計数値となる.

したがって, 実際の計数値(バックグラウンド減値: 各距離の平均値からバックグラウンドの平均値を差し引いた値)を C とすると, 検出器の計数効率 ε は,

$$\varepsilon = \frac{C}{60 N' G} \quad (4)$$

となる.

(4)式により各距離における計数効率を求めたところ, その頻度分布は表 1 のとおりであった. 飛揚前点検では, 計数値が距離の 2 乗に反比例することを前提としているが, 実際には距離が遠いほど計数効率が良いことを示している.

図 6 において, 標準線源の放射能値を N' , γ 線の光子の全線減弱係数を μ , 標準線源と検出器の法線と γ 線の入射方向とで作る角度を θ とすると効率 ε_N は

表 1 各距離の計数効率の頻度
(期間：1979 年 9 月～2003 年 12 月)

計数効率 ε	頻 度			
	0.2m	0.5m	1.0m	1.5m
0.00	0	0	0	0
0.02	1	1	1	2
0.04	2	2	2	0
0.06	2	0	0	3
0.08	7	2	2	2
0.10	45	10	9	8
0.12	18	53	35	33
0.14	1	8	24	15
0.16	0	0	1	12
0.18	0	1	0	1
0.20	0	0	0	0
0.22	0	0	2	1
0.24	0	0	0	0
0.26	0	0	0	0
0.28	1	0	1	0

$$\varepsilon_N = \frac{\int_0^{\theta_0} N' [1 - \exp \{-\mu r(\theta)\}] \frac{1}{2} \sin \theta d\theta}{\frac{1}{2} N' \int_0^{\theta_0} \sin \theta d\theta}$$

で表される(Tsoufanidis：1986)。

これは、効率が検出器の厚さや半径に依存することを示しており、距離 h が小さく(近く)なれば、効率の値は小さくなる。すなわち、距離が近いほど検出器に斜めに入射し検出器の側面から出る γ 線が多くなるので、結果として、 γ 線が検出器内を通過する距離が短くなりシンチレーションの発生数が少なくなって効率が悪くなると考えられる。

距離 0.2m, 0.5m, 1.0m, 1.5m の標準偏差をそれぞれ σ_1 , σ_2 , σ_3 , σ_4 、計数効率をそれぞれ ε_1 , ε_2 , ε_3 , ε_4 とすると、計数効率の加重平均値 ε_H は

$$\varepsilon_H = \frac{\frac{1}{\sigma_1^2} \varepsilon_1 + \frac{1}{\sigma_2^2} \varepsilon_2 + \frac{1}{\sigma_3^2} \varepsilon_3 + \frac{1}{\sigma_4^2} \varepsilon_4}{\frac{1}{\sigma_1^2} + \frac{1}{\sigma_2^2} + \frac{1}{\sigma_3^2} + \frac{1}{\sigma_4^2}} \quad (5)$$

その誤差 σ_H は

$$\sigma_H = \frac{1}{\sqrt{\sigma_1^2 + \sigma_2^2 + \sigma_3^2 + \sigma_4^2}} \quad (6)$$

表 2 計数効率 ε_H および誤差 σ_H の頻度分布
(期間：1979 年 9 月～2003 年 12 月)

計数効率 ε_H	頻度	誤差 σ_H	頻度
0.02	1	0.01	0
0.04	2	0.02	2
0.06	1	0.03	14
0.08	6	0.04	33
0.10	39	0.05	12
0.12	26	0.06	12
0.14	0	0.07	1
0.16	1	0.08	0
0.18	0	0.09	2
0.20	0	0.10	1
0.22	1		

で表される。したがって、 ε_H は当該観測を代表する計数効率となる。

1979 年 9 月～2003 年 12 月までの 77 観測の計数効率 ε_H および誤差 σ_H を(5)式および(6)式により求め、その頻度分布を表 2 に示す。

4.2.3 補正の結果

異なる検出器による観測値を比較するために、観測された計数値を 4.2.2 の方法で求めた計数効率 ε_H で除し、2003 年 12 月 16 日の観測値を 1 とした相対値で表すこととする。図 7 に最大計数値とバックグラウンド値の経年変化を示す。

なお、図示した 1991 年 12 月～2003 年 12 月は、各観測における計数値の時間移動平均法(放射能プロファイルに影響する)が 5 分間加重移動平均に統一された期間である。

この期間の計数効率 ε_H は 0.10～0.12、誤差 σ_H は 0.03～0.10 であった。最大計数値は、補正前・補正後とも期間を通して同様な変化をしているが、1992 年 3 月から 1994 年 3 月の間は補正後凹凸が顕著になった。このように、補正することにより凹凸が顕著になった事例は他の期間でも見られた。また、1997 年 9 月の計数値は補正によって前後の計数値との差が更に明瞭となった。高度毎の計数値も 2003 年 12 月の計数値と比較すると、12km まではあまり差は見られないが、14km あたりから差が広がり、特に 32km では 2.5 倍の差があった(図 8 参照)。

バックグラウンド値は、2003 年 12 月の計数値が 37cpm と 1991 年 12 月以降では最も高い値であったため相対値 1 以下で推移しており、1992 年 3 月から 1994 年 3 月の間は最大計数値と同様に補正後凹凸が顕著になった。最大計数値の経年変化で明瞭な差が認められ

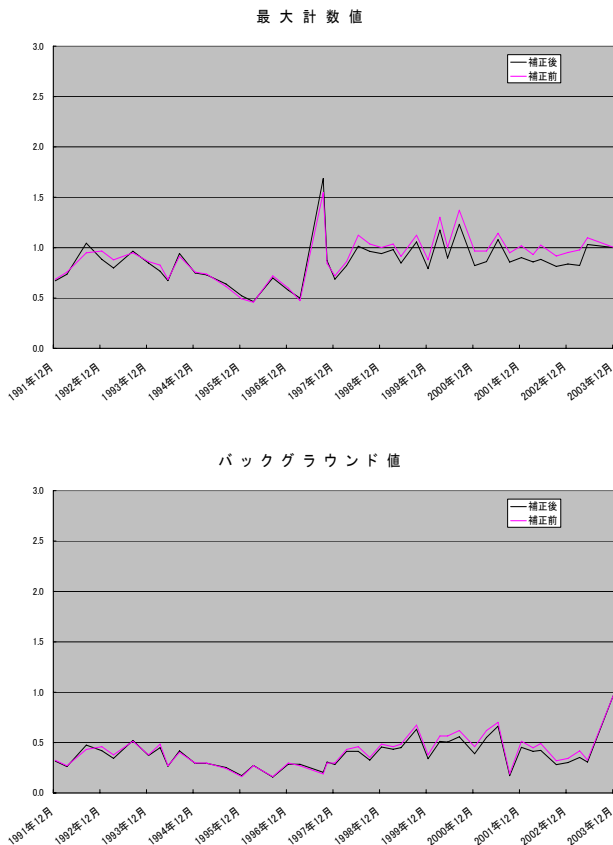


図7 1991年12月～2003年12月までの経年変化図
(2003年12月の計数値を1とした相対値で表した)

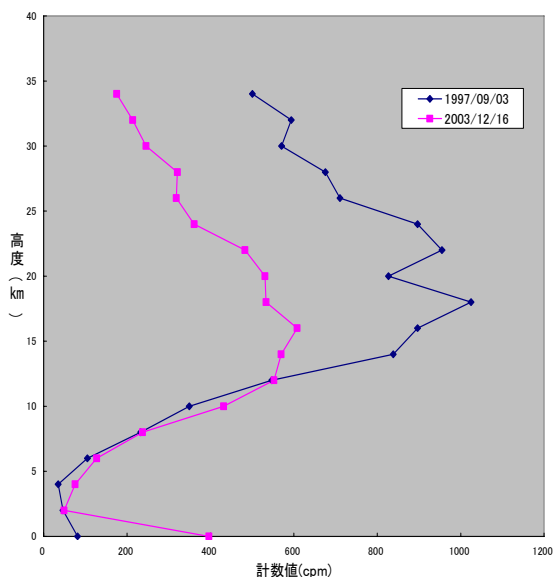


図8 補正後の1997年9月3日と2003年12月16日の γ 線の鉛直分布

た1997年9月の値は補正後の相対値が0.206と特段の変化は見られなかった。

5. まとめ

1979年9月～2003年12月までの放射能ゾンデ観測値から経年変化を把握することを目的として、飛揚前点検値を用いて観測値の補正が可能であるか試みた。

1979年9月以降、標準線源を2度更新しているが、半減期を用いて飛揚前点検時の放射能値を算出した上で、検出器の計数効率を求め、補正前と補正後の計数値を相対比較した。

結果は、次のとおりであった。

- ① 観測毎の計数効率 ε_H は0.01～0.21, その誤差 σ_H は0.02～0.10と大きな差があった。
- ② 補正前に比べ補正後の方が、凹凸が顕著になる事例があった。
- ③ 飛揚前点検では、標準線源の中心を通る法線と検出器の入射窓の中心を通る法線が一致しない場合、検出器に入射する γ 線が少なくなるので、標準線源と検出器の位置に注意する必要がある。

上述の結果から、放射能ゾンデ観測値の経年変化を考察する際には、各観測値と計数効率 ε_H の導入により計数値の経年変化が誇張される理由などを精査する必要がある。引き続き、誤差原因を追究するとともに、より良質な観測値を得る努力をしていきたい。

謝 辞

本稿の執筆に際し、観測部環境気象課の井上長俊調査官および今滝利博放射能係長に多大な助言を賜った。また、観測第二課の皆様からも貴重な助言を戴いた。ここに深く感謝の意を表します。

引用文献

- 石川友清・飯田博美・江藤久美・河野宗治(1989): 初級放射線. 通商産業社, 479 pp.
- 気象庁(2003): 大気放射能観測指針. 気象庁, 131 pp.
- 大野恭治・東島圭志郎・川上勝弘(1995): 小型・軽量の放射能ゾンデ(RC-94型)の開発とそのデータ処理. 高層気象台彙報, 55, 49-54.
- Tsoufanidis N.(1986): 放射線計測の理論と演習(上巻)基礎編. 現代工学社, 339pp.