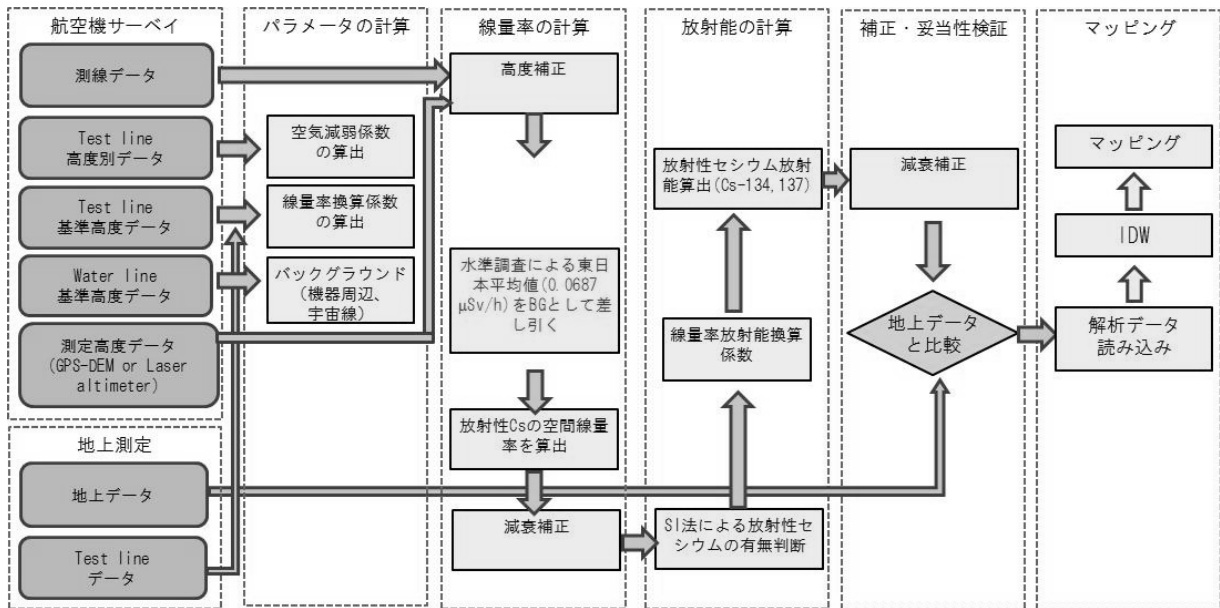


4.3 解析方法

解析手法のフローについて、Fig. 4-10、4-11 に示す。解析は、一般的にわかりやすいように、①地表 1 m 地点における全線量率 ($\mu\text{Sv/h}$: 地上でのサーベイメータと比較可能)、②放射性 Cs の地表沈着量 (Bq/m^2 ; 原子力発電所の影響の確認)、③ ^{137}Cs の地表沈着量 (Bq/m^2) 及び④ ^{134}Cs の地表沈着量 (Bq/m^2) を計算することとした。初期に実施した時には、放射性 Cs のないバックグラウンドの状態におけるデータが取れていなかったため (自衛隊のヘリコプタや防災隊のヘリコプタ) バックグラウンドの減算を東日本の平均値である $0.0687 \mu\text{Sv/h}$ を差し引いていた¹²⁾。西日本・北海道の測定では、放射性 Cs のないバックグラウンドの状態におけるデータが採取できたこと、放射性 Cs の影響がほとんど考えられない地域であることから、バックグラウンドを減算する MMGC 法¹⁾を適用した。詳細について、以下に示す。



SI 法: Spectrum Index 法 (4.3.4.2 章参照)

IDW: Inverse Distance Weighted 逆距離荷重法 (4.4.1 章参照)

Fig. 4-10 Analysis flow of ARMS in west japan

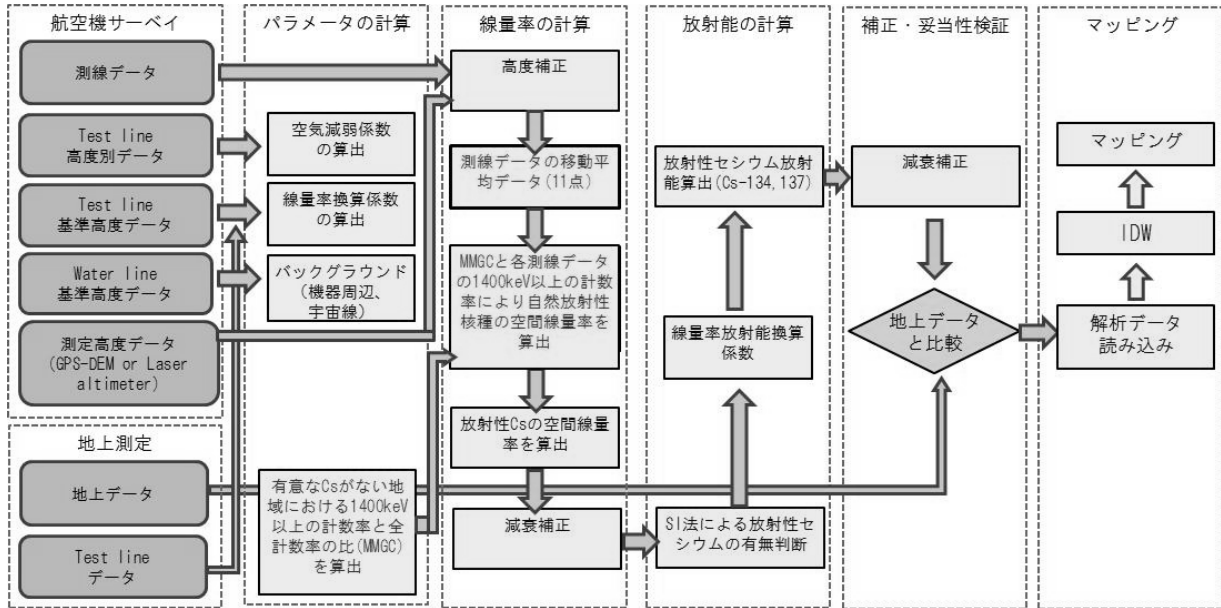


Fig. 4-11 Analysis flow of ARMS in east japan

4.3.1 線量換算係数(CD)

4.2.3 章に示したように、テストラインの地上における測定点の平均値とその上空 300 m (1,000 ft) をフライトした計数率の平均値の比を取って、線量換算係数を算出した。線量換算係数は、検出器とヘリコプタ機底の遮蔽状況に依存する。機器搭載型の MEXT や FUGRO の検出器は初期に実施した MEXT-1 によるモニタリング時には、搭載するヘリコプタが一定でなかったため、比較は難しいが、同じヘリコプタと検出器の組み合わせ時の平均値と 2σ を Table 4-3 に示す。

なお、MEXT-2、3 は線源によるレスポンスがほとんど同じだったため (Fig. 3-8、3-9)、結果を合算して計算した。また、東日本における結果を Table 4-4 に、西日本における結果を Table 4-5 に示す。MEXT の 3 システムについては、MEXT-1 と MEXT-2 がほぼ同様であった。MEXT-3 の感度が低いのは、S76 というヘリコプタに主に搭載していたためであると考えられる。S76 はヘリ底にタンクはないが Bell412 に比べると若干遮蔽効果が高いことが分かる (Table 4-1)。一方、NUSTEC、OYO、FUGRO システムについては、ほぼ同様な CD であることが分かった。各システムとも、標準偏差の 2 倍が平均値の 30% 程度であり、線量率やテストラインの核種組成比に大きく影響を受けないことが分かる。NUSTEC システムについて若干ばらつきが大きかったのは、検出器の劣化が原因と考えられる。

Table 4-3 Summary of CD and AF

System	CD (cps/ μ Sv/h)			AF (m^{-1})		
	Average	Stdev. (2σ)	Data number	Average	Stdev. (2σ)	Data number
MEXT-1	17200	4800	9	-0.00634	0.00087	9
MEXT-2+3	15900	4900	16	-0.00650	0.00083	16
MEXT-2	17700	3800	8	-0.00661	0.00086	8
MEXT-3	14200	3100	8	-0.00640	0.00095	8
NUSTEC	11000	6700	13	-0.00666	0.00092	13
OYO	11700	3200	9	-0.00569	0.00092	9
FUGRO	10900	4400	5	-0.00650	0.00083	5

Table 4-4 CD and AF in east Japan

Measurement Area	Detector	Conversion Factor (cps/(μ Sv/h))	Attenuation Factor (m^{-1})
Fukushima 1th	MEXT-1	2.55E+04	-7.544E-03
Fukushima 3th		1.49E+04	-6.860E-03
Miyagi		1.86E+04	-6.462E-03
Ibaraki		1.62E+04	-6.888E-03
Tochigi		2.36E+04	-7.052E-03
Yamagata		1.28E+04	-6.289E-03
Gunma		1.21E+04	-6.961E-03
Fukushima 4th (~40 km, 10/25~27)		1.40E+04	-7.330E-03
Fukushima 4th (~40 km, 10/28)		1.31E+04	-7.711E-03
Fukushima 4th (40~80 km,)		1.26E+04	-7.981E-03
Akita		1.53E+04	-6.485E-03
Yamanashi		2.12E+04	-5.746E-03
Toyama		1.68E+04	-6.597E-03
Aichi		1.84E+04	-5.779E-03
Tochigi 2th		1.69E+04	-6.608E-03
Miyagi 2th	1.65E+04	-7.483E-03	
Gunma 2th	MEXT-2	1.54E+04	-7.152E-03
Fukushima West 2th		1.55E+04	-7.026E-03
Fukushima 1th	NUSTEC	1.87E+04	-7.544E-03
Fukushima 2th		1.21E+04	-4.753E-03
Fukushima 3th		1.05E+04	-7.329E-03
Fukushima West		1.21E+04	-6.616E-03
Niigata		1.34E+04	-6.289E-03
Nagano		1.34E+04	-6.735E-03
Aomori		1.25E+04	-4.539E-03
Fukushima 4th (40~80 km,)		9.10E+03	-7.329E-03
Ibaraki 2th		8.70E+03	-7.598E-03
Saitama	OYO	1.14E+04	-6.418E-03
Iwate		1.36E+04	-6.921E-03
Ishikawa		1.31E+04	-5.778E-03
Chiba	FUGRO	8.90E+03	-6.912E-03
Tokyo		9.70E+03	-6.972E-03
Kanagawa		9.70E+03	-7.404E-03
Shizuoka		1.15E+04	-6.525E-03
Gifu		1.07E+04	-6.943E-03
Fukui		1.50E+04	-4.843E-03

Table 4-5 CD and AF in west Japan

Category	Measurement Area	Detector	Conversion Factor (cps/(μ Sv/h))	Attenuation Factor (m^{-1})	Application in Category
Kyusyu1	Fukuoka	MEXT-3	1.19E+04	-6.015E-03	-
	Nagasaki		1.27E+04	-5.625E-03	o
	Saga		1.60E+04	-6.684E-03	-
Kyusyu2	Miyazaki	MEXT-1	1.35E+04	-5.184E-03	o
	Kumamoto		1.95E+04	-7.990E-03	-
	Kagoshima		1.48E+04	-6.119E-03	-
	Oita		1.90E+04	-5.212E-03	-
Kyusyu3	Okinawa	MEXT-1	1.74E+04	-6.504E-03	o
Shikoku	Ehime	OYO	1.14E+04	-5.878E-03	-
	Kagawa		1.17E+04	-5.106E-03	o
	Kochi		1.37E+04	-5.113E-03	-
	Tokushima		1.02E+04	-5.005E-03	-
Kinki1	Mie	MEXT-2	1.63E+04	-6.302E-03	-
	Shiga		1.95E+04	-6.667E-03	o
Kinki2	Osaka	NUSTEC	1.01E+04	-4.981E-03	o
	Nara		8.10E+03	-6.861E-03	-
	Wakayama		7.70E+03	-7.734E-03	-
Kinki3	Kyoto	MEXT-2	1.93E+04	-6.678E-03	o
Kinki4	Hyogo	MEXT-2	2.04E+04	-4.768E-03	o
Chugoku1	Hiroshima	MEXT-3	1.61E+04	-6.926E-03	o
	Yamaguchi		1.46E+04	-5.550E-03	-
Chugoku2	Okayama	OYO	1.17E+04	-5.349E-03	o
Chugoku3	Tottori	MEXT-3	1.33E+04	-5.678E-03	o
	Shimane		1.50E+04	-8.073E-03	-
Hokkaido1	Hokkaido	MEXT-2	1.75E+04	-6.596E-03	o
Hokkaido2	Hokkaido	MEXT-3	1.37E+04	-6.646E-03	o
Hokkaido3	Hokkaido	NUSTEC	5.90E+03	-5.714E-03	o
Hokkaido4	Hokkaido	OYO	8.70E+03	-5.606E-03	o

4.3.2 空気減弱係数(AF)

高度補正を行うために、高度を変化させたフライトを行い、実効的な空気減弱係数を求めた。Fig. 4-12 に 3.6 章で述べた計算コードを使用して、核種ごとの空気減弱係数を計算した結果を示す。高度補正には、以下の計算式を用いて、高度補正係数 HF を算出した。

$$HF = \exp(AF \times (H_{sd} - H_a)) \quad (1)$$

HF: 高度補正係数

H_{sd} : 基準高度 (1,000 ft = 300 m)

H_a : フライト高度 (GPS 高度 - DEM)

対地高度の算出には、GPS で記録した海拔高度から公開されている数値標高モデル (DEM: Digital Elevation Model) を差し引いて求めた。DEM は、東日本では 90 m メッシュ¹³⁾ を、西日本には 10 m メッシュ¹⁴⁾ を利用した。DEM については、300 m 上空で測定した場合、Fig. 3-19 で示したように、真下の半径 400 m の平均値が測定されていることから、400 m の平均値を示す DEM を使用することが望ましいと考えられるが、今回は、汎用的な DEM を用いて評価した。今後、計算結果の信頼性と DEM については、検討する必要があると考えられる。

Fig. 4-12 に示すように、¹³⁴Cs と ¹³⁷Cs の減弱係数はほとんど変わらないが、天然核種である ⁴⁰K 及びウラン、トリウム系列の減弱係数は放射性 Cs と比較して、それぞれ 10 - 30 % 小さいことが分かった。原子力発電所近傍以外は、放射性 Cs が存在したとしても、天然核種と混在しているため、計算結果の中間程度の値となることが予想される。

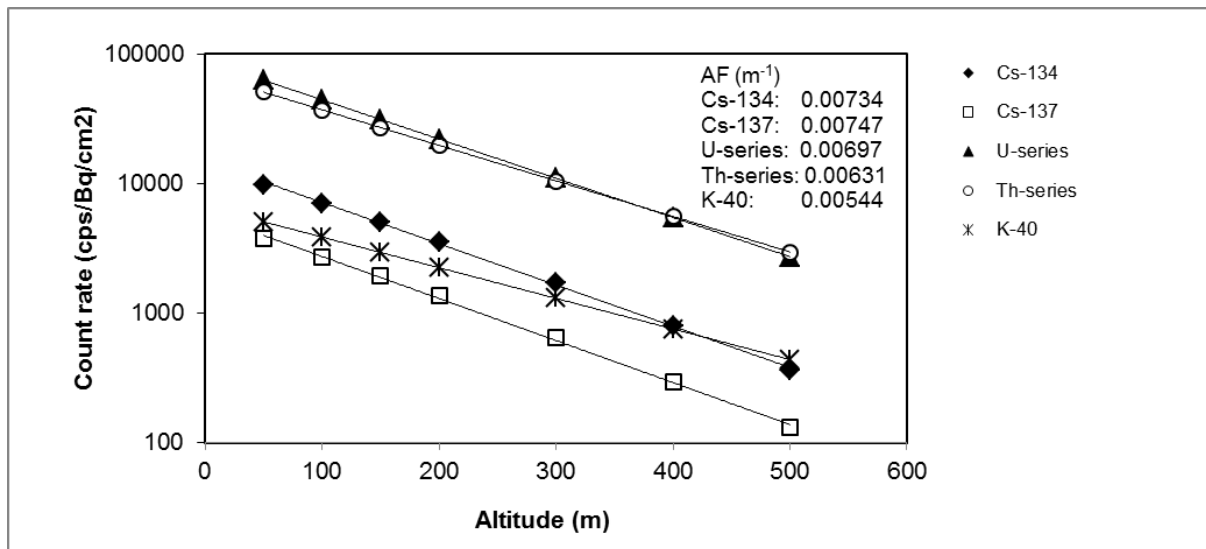


Fig. 4-12 Simulated attenuation factor using EGS5 (Source radius: 1000 m)

実測した AF の例を Fig. 4-13、4-14 に示す。AF は高度と計数率をプロットし、指数近似した傾きとして算出した。これらはホバリングで実施した場合とフライトラインを通過した場合の 2 つの方法で実施している。また、スペクトルを①450 keV 以下(放射性 Cs の光電ピークを含まない領域)、②450 keV 以上 (放射性 Cs の光電ピークを含む領域)、③900 keV 以上 (天然の放射線を含む領域) 及び④全計数の 4 つに分類し、AF を比較した。まず、テストラインを通過する場合には、

目印が分かりやすいためパイロットがフライトしやすいが、テストラインの線量率が一定でなければならない。一方、ホバリングでは、地上の線量率は一定であるものの、同じ場所でのフライトが難しいことが挙げられる。テストラインのデータ採取方法は、地上の状況を考慮し、決定すべきである。一方、スペクトルの領域で分けると①-③ではほとんど値が変わらないものの、④では大きくなった。これは、計算コードの結果と矛盾しない。

AFの測定結果を、Table 4-4、4-5にまとめて示し、システム毎の平均値と標準偏差をTable 4-3に示す。すべてのシステムで、標準偏差の2倍は平均値の15%程度であり、ばらつきは少なかった。また、OYOシステム以外は 0.0065 m^{-1} 程度であった。OYOシステムは若干大きな数字となったが、ノイズカットを目的として、低エネルギー側を計数しないように設定していることが原因と考えられる (Fig. 3-14)。

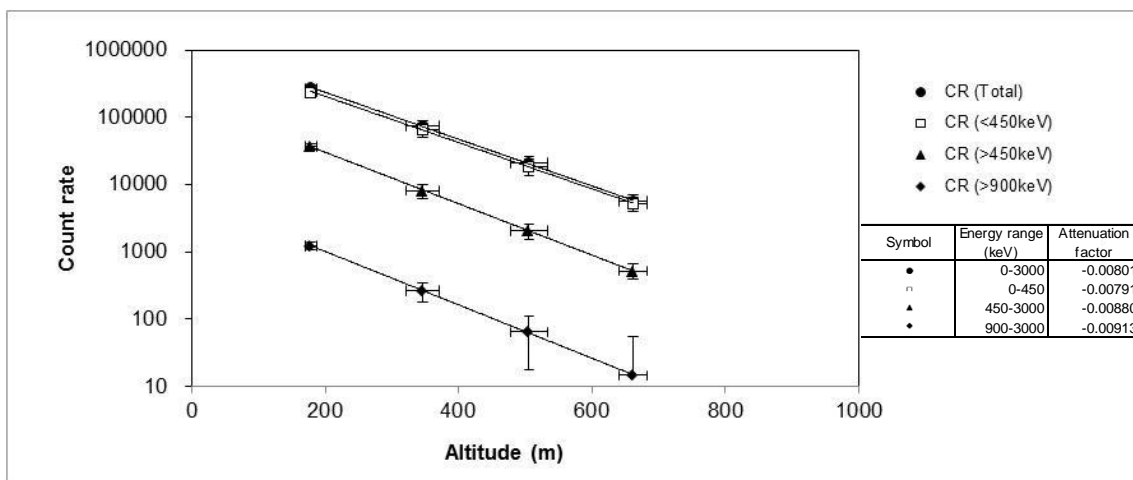


Fig. 4-13 Example for attenuation factor by hovering

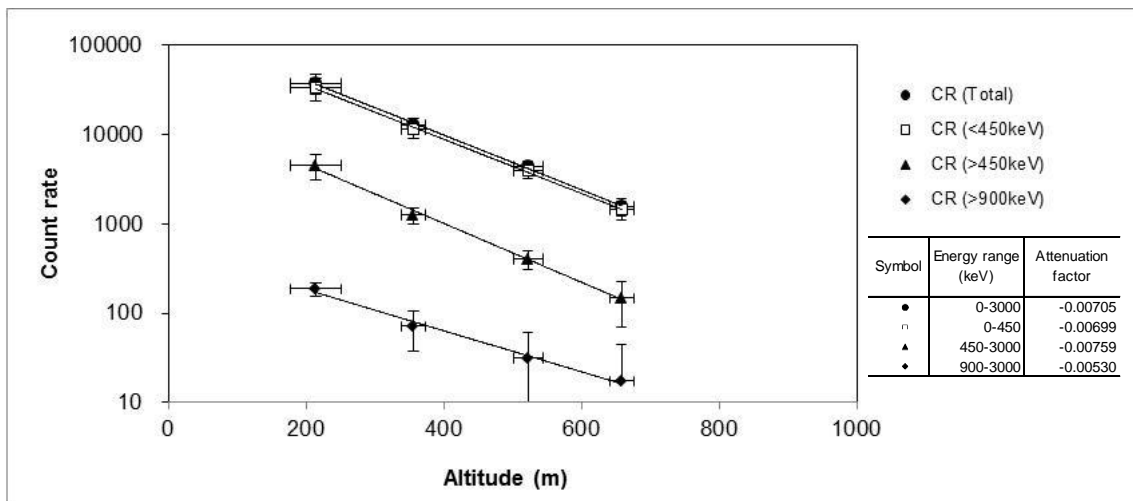


Fig. 4-14 Example for attenuation factor

4.3.3 線量率-放射能換算係数

線量率から放射能への換算は、文献¹¹⁾に記載のある $\beta = 1$ の場合の換算係数を適用し (^{134}Cs : $4.44 \times 10^{-3} (\mu\text{Gy/h})/(\text{kBq/m}^2)$, ^{137}Cs : $1.73 \times 10^{-3} (\mu\text{Gy/h})/(\text{kBq/m}^2)$)、あらかじめ In-situ Ge 検出器の結果等から求めておいた $^{134}\text{Cs}/^{137}\text{Cs}$ 比を用いて、地上 1 m 地点における線量率から地表における ^{134}Cs 、 ^{137}Cs の放射性物質濃度に換算した。 $^{134}\text{Cs}/^{137}\text{Cs}$ 比は、2011 年 8 月に福島県で 50 ポイント以上の In-situ Ge による測定データを採取し、2011 年 8 月 13 日時点での $^{134}\text{Cs}/^{137}\text{Cs} = 0.917$ を基本とした。その基準日から、航空機モニタリングのデータ採取日に減衰補正した。

4.3.4 バックグラウンドの減算方法

(1) BG-index の設定できる測定点について

スペクトルの領域ごとの指標を設定できるシステムとヘリコプタについては、放射性 Cs のない地域をあらかじめフライトし、設定した指標を用いてバックグラウンドを減算した。まず、放射性 Cs のない地域でフライトしたスペクトルに対し、(a) から (e) の領域でカウントを識別する。本方法は、米国エネルギー省が開発した方法を参考にしている^{1,2)}。

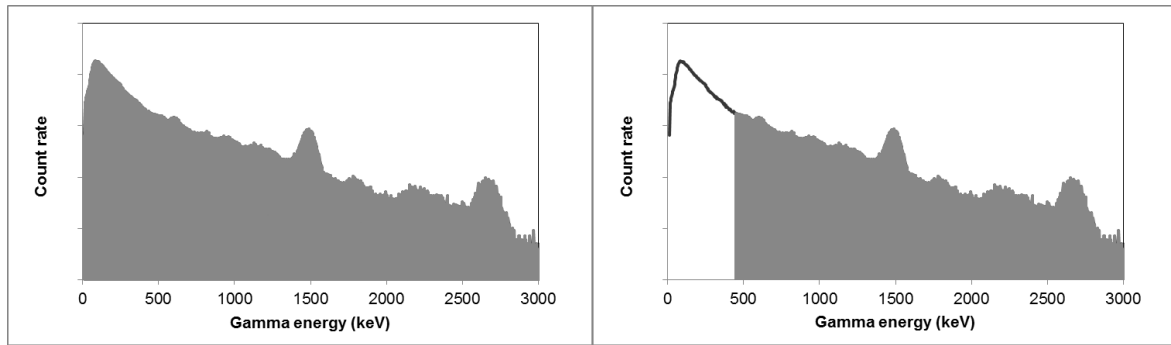
- (a) 全計数率
- (b) 450 keV から 2,800 keV の計数率
- (c) 900 keV から 2,800 keV の計数率
- (d) 1,400 keV から 2,800 keV の計数率
- (e) 2,800 keV 以上の計数率 (宇宙線)

Fig. 4-15 に識別したスペクトル領域のイメージを示す。これらの計数を、BG-index = (a)/(d)、Cs-index = (b)/(c) とし、設定する。また、(e) にあらかじめ高高度でフライトしたデータから、CR-index = (a)/(e) を求めておく。設定したインデックスを以下のような手順で、解析を行う。

- ① フライトデータを (a) から (e) の領域に分けて計算する。
- ② (e) に CR-index をかけて宇宙線のバックグラウンドとする。
- ③ 高高度もしくは海上をフライトしたデータから②を差し引き機体のバックグラウンドとする。
- ④ ①から②と③を差し引いた計数を C_{net} とし、テストラインデータで算出した CD、AF を用いて式 (2) から地表 1 m における全線量 D を算出

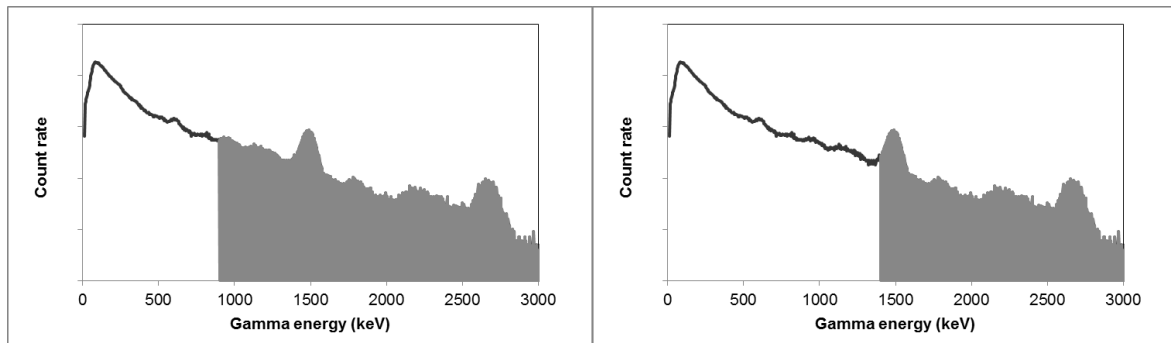
$$D = \frac{C_{net} \times AF}{CD} \quad (2)$$

- ⑤ (d) に BG index をかけて全計数から引き算し、有意な計数を放射性 Cs の計数とする。
- ⑥ 有意になったスペクトルに対し、(b)/(c)をもとめ、Cs-index と比較し有意にならない場合は放射性 Cs が検出されていないとする。
- ⑦ 換算した放射能を測定日に合わせて減衰計算する。
- ⑧ 減衰計算した値に CD を乗じて線量率に換算する。
- ⑨ 換算した線量率に天然放射線分を足し、全線量率とする。



(a) All count rate

(b) Count rate from 450 keV to 2,800 keV



(c) Count rate from 900 keV to 2,800 keV

(d) Count rate from 1,400 keV to 2,800 keV

Fig. 4-15 Spectrum area for BG-index and Cs-index

(2) BG-index の設定できない測定点について

文献¹²⁾における全データをヒストグラムにして Fig. 4-16 に示す。本データは、各県で 10 点ほどの測定ポイントにおいて、NaI サーベイメータで 5 年間測定したものであり、バックグラウンド放射線の代表的な値を示すものと考えられる。通常、航空機モニタリングでは、あらかじめ、放射性 Cs のない場所で、システムと機体の関係ごとにバックグラウンド測定を実施し、そのデータを実測値から差し引く方法が一般的である。しかしながら、初期のモニタリング(自衛隊のヘリや防災隊のヘリ)では、放射性 Cs のない場所をフライトすることができなかったため、Fig. 4-16 に示したような一般的なバックグラウンドの平均的な値 (0.0687 $\mu\text{Sv/h}$) を差し引いて、放射性 Cs の沈着量を算出することとした。算出式と手順を以下に示す。なお、文献¹²⁾におけるデータは、吸収線量 (Gy) で示されているが、ここでは、 $\text{Sv} = \text{Gy}$ として Sv で算出した。

- ① フライトデータから全計数率を計算。
- ② テストラインデータで算出した CD、AF を用いて式 (3) から地表 1 m における全線量 D を算出

$$D = \frac{C_{all} \times AF}{CD} \quad (3)$$

D: 全線量率、 C_{all} : 全計数率 (cps)

- ③ D から東日本の平均値 0.0687 $\mu\text{Sv/h}$ を減算し、CF を乗じて放射能に換算する。

- ④ 換算した放射能を測定日に合わせて減衰計算する。
- ⑤ 減衰計算した値に CD を乗じて線量率に換算する。
- ⑥ 換算した線量率に 0.0687 $\mu\text{Sv/h}$ を足し、全線量率とする。

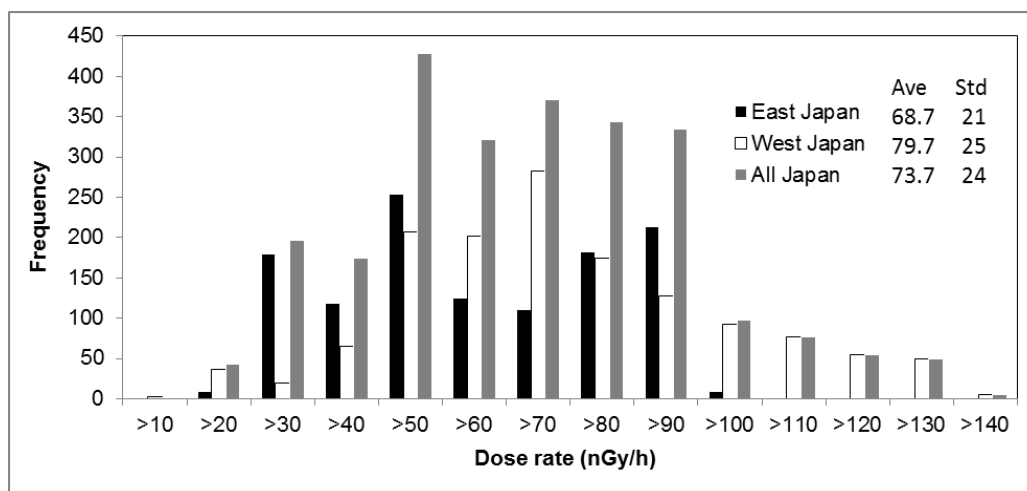


Fig. 4-16 Background dose rate using NaI survey meter (2005-2009)¹²⁾

4.3.4.1 BG-index

あらかじめ放射性 Cs の影響がない地域において求めた BG-index を、ヒストグラムとして、Appendix 3 に示す。また、MEXT-2 で採取した九州における BG-index の例を Fig. 4-17 に示す。Fig. 4-18 に示すように、全計数率と 1,400 keV 以上の計数率の関係は正の相関関係にあり、比をとると平均ヒストグラムはいずれも正規分布の形を示した。BG-index はシステムとヘリコプタに依存する。Fig. 4-19 及び Fig. 4-20 に MEXT-3 と OYO の BG-index について示す。このように、システムの遮蔽状況やスペクトルのエネルギーカット設定によって、数値は変わるが、いずれも正規分布の形をとっている。

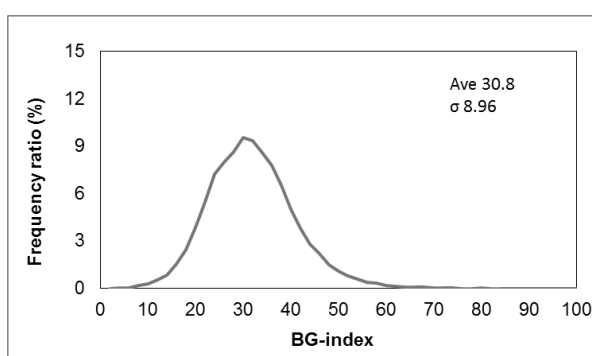


Fig. 4-17 Histogram of BG-index at MEXT-2

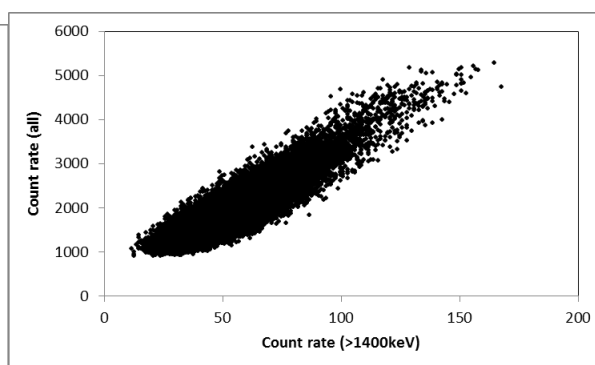


Fig. 4-18 Comparison with all count rate and >1,400 keV count rate at MEXT-2

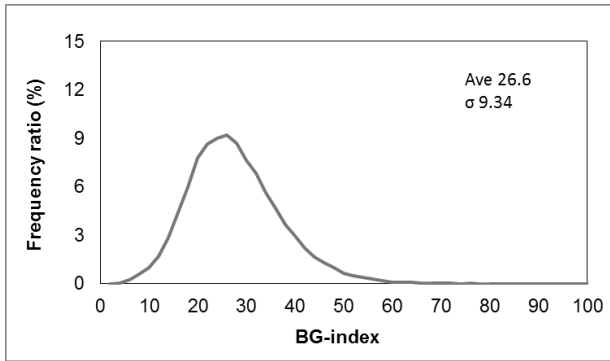


Fig. 4-19 Histogram of BG-index at MEXT-3

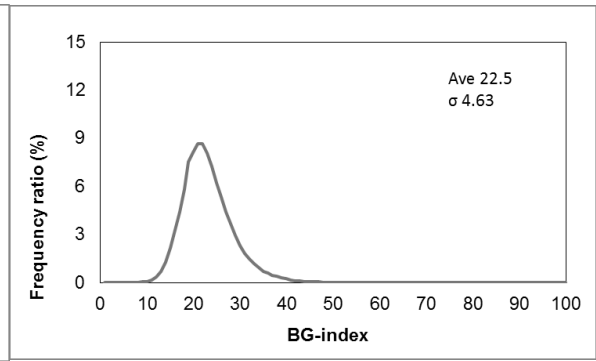


Fig. 4-20 Histogram of BG-index at OYO

4.3.4.2 Cs-index

あらかじめ放射性 Cs の影響がない地域において求めた Cs-index を、ヒストグラムとして Appendix 3 に示す。BG-index のように、900 keV 以上には、 ^{134}Cs の 1,365 keV の γ 線が領域に含まれるため、放射性 Cs と天然核種が混在するスペクトルから天然核種のみを減算することはできないが、計数が多い領域の比であるため、実際に測定したスペクトルで比較することによって、放射性 Cs のあるなしを BG-index より低いレベルで判断することができる。Fig. 4-21 に放射性 Cs のある地域と少ない地域で測定した Cs-index の例を示す。このように、放射性 Cs がある地域は値が高くなり、あらかじめ閾値を設定しておくことによって (例えば、放射性 Cs のない地域で求めた Cs-index の平均値+3 σ)、天然か放射性 Cs かの判断基準となる。Fig. 4-22 に MEXT-1 で採取した Cs-index をヒストグラムにして示す。

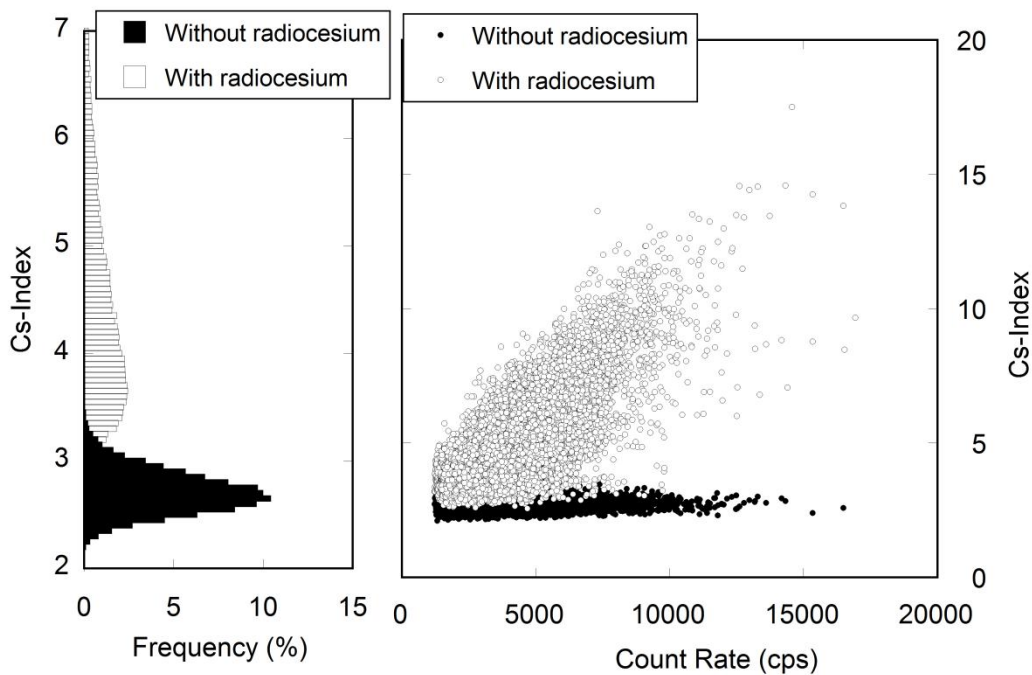


Fig. 4-21 Example for Cs-index in MEXT-1

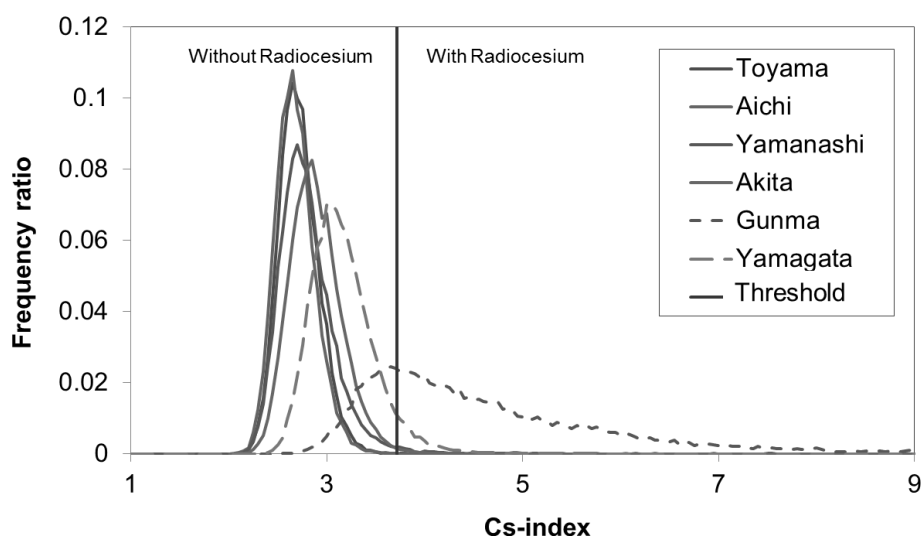


Fig. 4-22 Example for histogram of Cs-index in MEXT-1

4.3.5 海拔高度による宇宙線の影響

フライトは、対地高度 1,000 ft (= 300 m) を保ち実施するが、山間部など海拔高度が高くなる場所をフライトする場合がある。海拔高度が高くなると宇宙線の影響が大きくなる。Fig. 4-23 に海拔高度と 2,800 keV 以上の計数率の関係を示す。このように、1,000 ft ごとに宇宙線起源の計数は 1.2 倍ほどになる。現在までの測定結果からすると、時期や場所で大きな変化がないため、あらかじめ機器ごとに、海上や 5,000 ft 以上で採取したスペクトルから [全計数率] と [>2,800 keV の計数率] の比 (前出 P32) を設定しておき、測定スペクトルから [>2,800 keV の計数率] をもとめ CR-index を掛けることにより、全体の宇宙線計数を差し引くこととした。

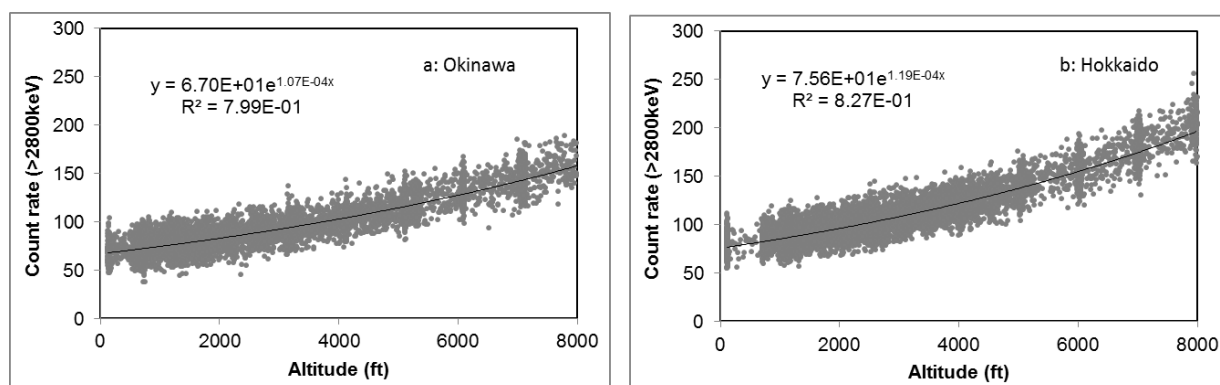


Fig. 4-23 Count rate of cosmic-ray above sea

4.3.6 Rn 子孫核種の影響

これまでの海上での測定結果から、フライトの時期や高度によって機体周辺の空気中の Rn 子孫核種が計数されることが分かっている。Rn 子孫核種が厄介であるのは、濃度が一定しないことにある。Fig. 4-24 に海上で高度を変化させてフライトした計数率から宇宙線の影響を除いた例を示

す。

Fig. 4-24 (a) の北海道のデータのように Rn 子孫核種の影響がなければ、計数率は一定になるはずであるが、Fig. 4-24 (b) の対馬沖で採取したデータのように、Rn 子孫核種の影響により、計数率が上昇する例がある。また、計数率が上昇する高度も場所も一定ではない。これまでの経験では、MEXT システムで最大 600 cps 程度になる場合があり、平均的な CD で換算すると地上 1 m の線量率として $0.04 \mu\text{Sv/h}$ 相当になる。高い精度が求められる場合には、今後、何らかの評価方法を加えることが望ましい。

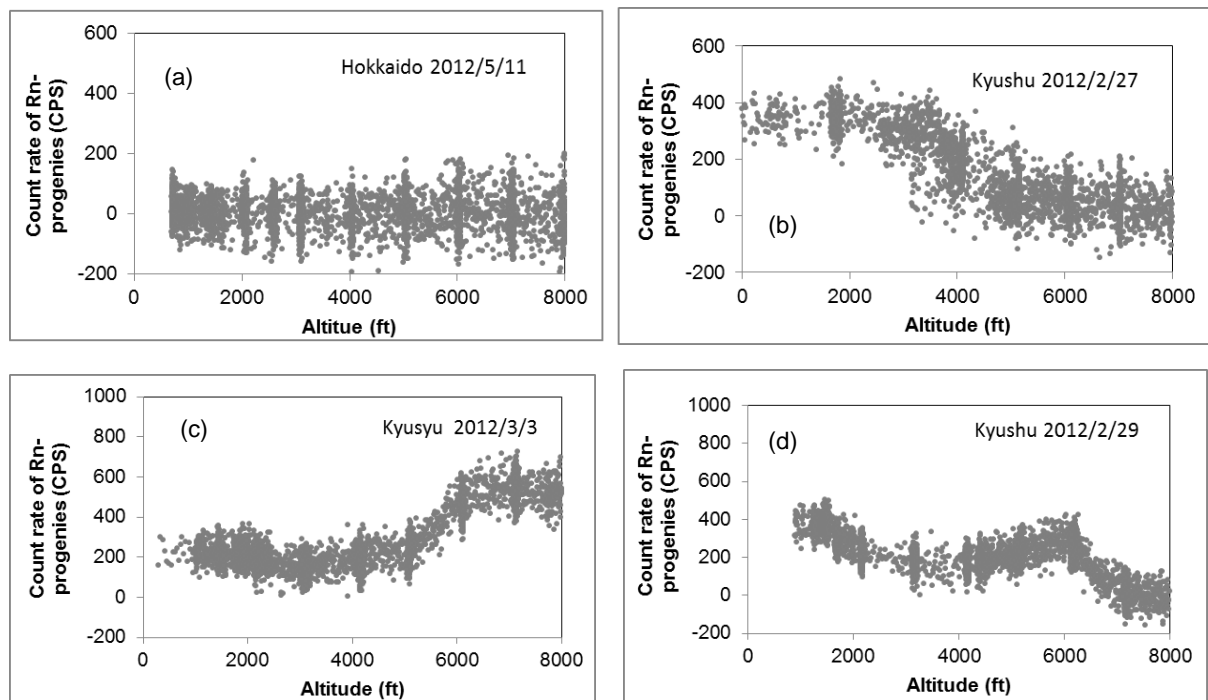


Fig. 4-24 Count rate of Rn-progeny above sea

4.3.7 減衰補正

福島原発の放射性核種が放出されてから時間が経過し、半減期の短い核種はほぼ減衰しており、平成23年8月13日以降では、 ^{134}Cs と ^{137}Cs が評価核種である。ここでは、線量率から放射能への ^{137}Cs 換算係数、 $^{134}\text{Cs}/^{137}\text{Cs}$ 濃度比及び測定時点の線量率を評価時点の線量率に補正する暫定的な算出方法について記述する。4.3.3章でも記載した通り、線量率から放射能への換算は、文献¹¹⁾に記載のある $\beta = 1$ の場合の換算係数CFを適用し(^{134}Cs : 4.44×10^{-3} ($\mu\text{Gy/h}/(\text{kBq/m}^2)$), ^{137}Cs : 1.73×10^{-3} ($\mu\text{Gy/h}/(\text{kBq/m}^2)$))、あらかじめ求めておいた $^{134}\text{Cs}/^{137}\text{Cs}$ 比を用いて、地上1m地点における線量率から地表における ^{134}Cs 、 ^{137}Cs の放射性物質濃度に換算した。文献¹¹⁾に記載のある β とCFの関係についてFig. 4-25に示す。 $^{134}\text{Cs}/^{137}\text{Cs}$ 比は、2011年8月に福島県で50ポイント以上のIn-situ Geによる測定データを採取し、2011年8月13日時点での $^{134}\text{Cs}/^{137}\text{Cs} = 0.917$ (B_0)を基本とした。その基準日から、航空機モニタリングのデータ採取日に減衰計算して換算した。評価時における ^{137}Cs 及び ^{134}Cs の濃度 $C_{\text{Cs}137}$ 、 $C_{\text{Cs}134}$ は、航空機サーベイデータから求まる全線量率から天然核種によるバックグラウンドの線量率を引いた線量率 $E_{\text{Cs}137+134}$ ($\mu\text{Sv/h}$)及び評価時における $^{134}\text{Cs}/^{137}\text{Cs}$ 比 B を用い、下記の式(4)、(5)から算出する。

$$C_{\text{Cs}137} = A \cdot E_{\text{Cs}137+134} \quad (4)$$

$$C_{\text{Cs}134} = B \cdot C_{\text{Cs}137} \quad (5)$$

ここで、評価時の線量率からのCs-137濃度換算係数Aは、式(6)で表される。

$$A = \frac{\exp(-\lambda_{\text{Cs}137} \cdot t)}{CF_{\text{Cs}137} \cdot \exp(-\lambda_{\text{Cs}137} \cdot t) + B_0 \cdot CF_{\text{Cs}134} \cdot \exp(-\lambda_{\text{Cs}134} \cdot t)} \quad (6)$$

ここで、 t : 基準日(2011/8/13)からの経過時間、 $\lambda_{\text{Cs}137}$ 及び $\lambda_{\text{Cs}134}$: 崩壊定数(0.693/半減期)としている。 $^{134}\text{Cs}/^{137}\text{Cs}$ とAの関係についてFig. 4-26に示す。

線量率の換算方法は、以下のような手順を設定した。

- ① 換算した放射能を測定日に合わせて減衰補正する。
- ② 減衰補正した値にCFを乗じて線量率に換算する。
- ③ 換算した線量率にバックグラウンド線量率を足し、全線量率とする。

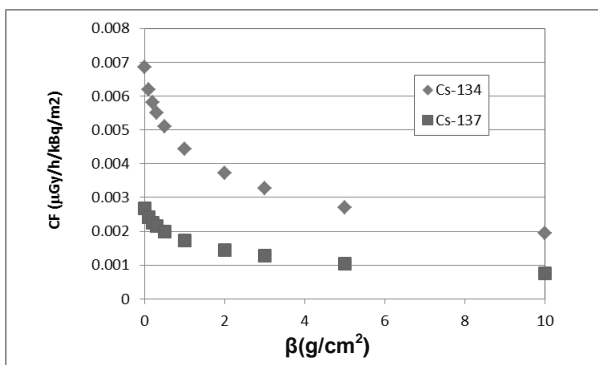


Fig. 4-25 CF in β (g/cm^2)⁸⁾

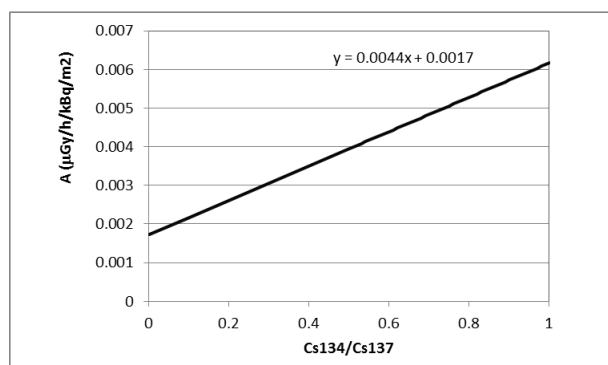


Fig. 4-26 $^{134}\text{Cs}/^{137}\text{Cs}$ and A

4.3.8 検出下限値及び信頼性

検出下限 (limit of detection) と信頼性について評価を行った。まず、式 (7) 及び式 (8) に ARMS における全線量への換算方法及び放射性 Cs の沈着量の換算式について示す。本式をもとに、検出下限値及び信頼性について検討を行った。

$$D = (C_{all} - BG_{self} - BG_{cos}) \times CD \times \exp(-AF \times (H_{std} - H_m)) \quad (7)$$

$$Rd_{134} = (C_{all} - BG_{nat} - BG_{cos} - BG_{self}) \times CD \times \exp(-AF \times (H_{std} - H_m)) \times CF \times R \frac{134}{134+137} \times DC_{134} \quad (8)$$

ここで、

D: 全線量率 ($\mu\text{Sv/h}$)

C_{all} : 全計数率 (cps)

BG_{self} : 機体の汚染 (cps)

CD: 線量率換算係数 (cps/ $\mu\text{Sv/h}$)

AF: 空気減弱係数 (m^{-1})

H_{std} : 基準高度 (m)

H_m : 測定高度 (m)

Rd_{134} : 放射性 Cs の沈着量 (Bq/m^2) (* ^{137}Cs の場合は 134 を 137 に読み替える)

BG_{nat} : 天然起源の計数率 (cps) $C_{BG} \times I_{BG}$ (C_{BG} : 1400-2800 keV の計数率; I_{BG} : BG index)

BG_{cos} : 宇宙線起源の計数率 (cps) $C_{cos} \times I_{cos}$ (C_{cos} : >2800 keV の計数率; I_{cos} : CR index)

CF: 線量率-放射能換算係数 ($(\mu\text{Gy/h})/(\text{Bq/m}^2)$)¹¹⁾

R: 放射性 Cs に対する ^{134}Cs (^{137}Cs) の割合

DC: 減衰補正係数 ($=\exp(-\lambda\tau)$) (* τ : 経過時間)

4.3.9 全線量率の検出下限

全線量率は BG_{self} と BG_{cos} に依存する。 BG_{cos} は 4.3.5 章に記載した通り、測定した海拔高度に依存する。これまでの測定結果を見ると概ね 200-500 cps の範囲に入ることが分かっている。ここでは、検出下限値を評価するため、500 cps として評価する。 BG_{cos} は C_{cos} にあらかじめ求めた I_{cos} をかけて算出するため、計数誤差が伝播し 30 % 程度の不確かさが生じる。そこで単純な標準偏差ではなく、 500 ± 150 cps として検出下限を計算する。また、 BG_{self} は 4.3.5 章に示したように、海上の測定データから宇宙線成分を減算し、算出する。後述する初期のモニタリングに使用した機体以外では、MEXT のシステムを搭載したヘリコプタにおいては、概ね 400 ± 60 cps 程度であった。ここから、誤差の伝播を考慮し、 $BG_{self} + BG_{cos} = 900 \pm 162$ cps となる。よって、検出下限は、162 cps となり、Table 4-1 に示した MEXT 機器の標準的な CD (17000 cps/ $\mu\text{Sv/h}$) から計算すると、0.0095 $\mu\text{Sv/h}$ となる。これは、機体の汚染のない MEXT 検出器による、地上 1 m 地点における線量率の検出下限といえる。同様に、その他のシステムについて計算すると、Table 4-6 のようになった。

一方、モニタリングの初期には、 BG_{self} は各県で湖や海上などで測定した。 BG_{self} を Fig. 4-27 に示す。このように、モニタリングの初期に使用したヘリコプタには測定に影響する、ある程度の汚染があったことが分かる。この値は、機体の汚染と宇宙線の影響を含むものであるが、3 分間

の水上フライトにおけるデータしかないため、参考までに、この最大値 8,800 cps の標準偏差の 10 倍を検出下限 (limit of detection) とし、Table 4-3 に示した MEXT 機器の標準的な CD (17000 cps/ μ Sv/h) から計算すると、0.055 μ Sv/h となる。

Table 4-6 Limit of detection of ARMS

System	Limit of detection	
	Dose rate at 1m above the ground (μ Sv/h)	Radioactivity of deposition radiocesium (kBq/m^2) *
MEXT	0.0095	16
NUSTEC	0.015	26
OYO	0.014	24

* Total BG count: 3,000 cps

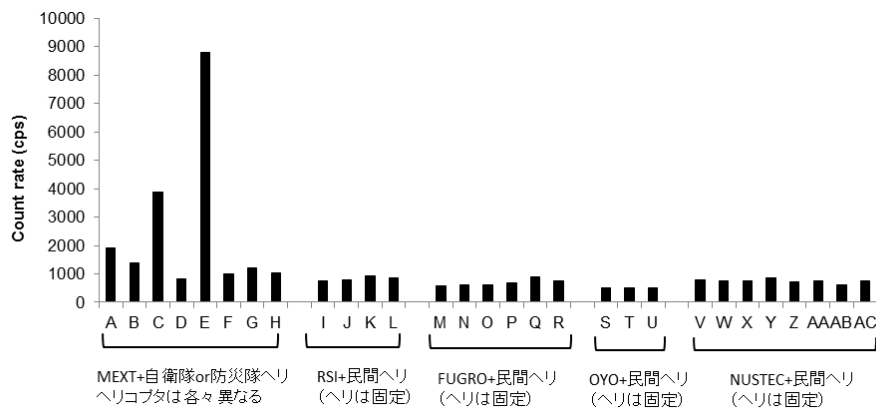


Fig. 4-27 Value of BG_{self} each prefecture

4.3.10 全線量率換算の不確かさ

地上 1 m 高さにおける線量率を算出する不確かさを論ずる上で、CD と AF は重要なファクタとなる。Table 4-1 に示したように、CD 及び AF は各県に設定したテストフライト 1 箇所から算出しており、測定する場所によるばらつきが大きいと考えられる。CD は、Fig. 3-17 に示した計算コードによるエネルギーレスポンス計算を考慮すると、 γ 線のエネルギーに大きく影響しないと考えられるため、機体の遮蔽状況が同じであれば、定数として考えてよい。

Table 4-1 で示した CD および AF の実測値の標準偏差の 2 倍の平均値に対する割合をばらつきと定義し、Table 4-7 に示す。現状では、CD は平均値からおよそ 30 % のばらつきがある (NUSTEC システムでは 60 %; 機器の劣化が原因)。これは、地上測定と上空での測定の誤差を含んでいると考えられる。当初は、各県で測定した CD をそのまま適用していたため、 $\pm 30\%$ の不確かさが否めないが、テストラインの測定を何回も経験し、平均値の当たりがついてきた後半の測定では、この不確かさ要因は小さくなっていると考えられる。

Table 4-7 Dispersion of CD and AF

System	CD (cps/ μ Sv/h)			AF (m^{-1})		
	(1) Average	(2) Stdev. (2σ)	(2)/(1) Dispersion	(1) Average	(2) Stdev. (2σ)	(2)/(1) Dispersion
MEXT-1	17200	4800	0.28	-0.00634	0.00087	0.14
MEXT-2+3	15900	4900	0.31	-0.00650	0.00083	0.13
MEXT-2	17700	3800	0.21	-0.00661	0.00086	0.13
MEXT-3	14200	3100	0.22	-0.00640	0.00095	0.15
NUSTEC	11000	6700	0.61	-0.00666	0.00092	0.14
OYO	11700	3200	0.27	-0.00569	0.00092	0.16
FUGRO	10900	4400	0.40	-0.00650	0.00083	0.13

一方、AFは15%程度のばらつきがある。AFの違いで高度補正係数(HF)にどの程度影響が出るかを評価するために、Fig. 4-28にAFが $0.0056 m^{-1}$ と $0.0072 m^{-1}$ (Table 4-1に示したMEXTシステムの最大、最小値)におけるHFの比を示す。現在、対地高度で、150 mから500 m程度であれば、高度補正を行っている(それ以外のデータは欠測としている)、AFによる不確かさは $\pm 20%$ 程度であると考えられる。一方、基準高度(300 m)でのフライトデータは高度補正の必要がない。よって、測定した対地高度によるが、HFは最大で20%の不確かさを含んでいるものの、テストラインの測定を何回も経験し、平均値の当たりがついてきた後半の測定では、この不確かさ要因は小さくなっていると考えられる。これらを考え合わせると、CD、HFのパラメータによる不確かさは、 $\pm 36%$ 程度であると評価できる。

これらのパラメータによる不確かさの他に、4.3.6.章で示したRnの子孫核種については、現方法でも補正ができていない。Rnの子孫核種の補正方法は、検出器の上側に、Rn測定用の検出器を配置し、その値を差し引くことが一般的であるが^{1,2)}、今回用いたシステムには搭載されていない。これまでの経験では、地上1 mの線量率に換算した時に、最大で 0.04μ Sv/h分の影響があると考えられる。よって、空中にRnの子孫核種が存在する場所において、最大 0.04μ Sv/h過剰に評価する可能性があると考えられる。

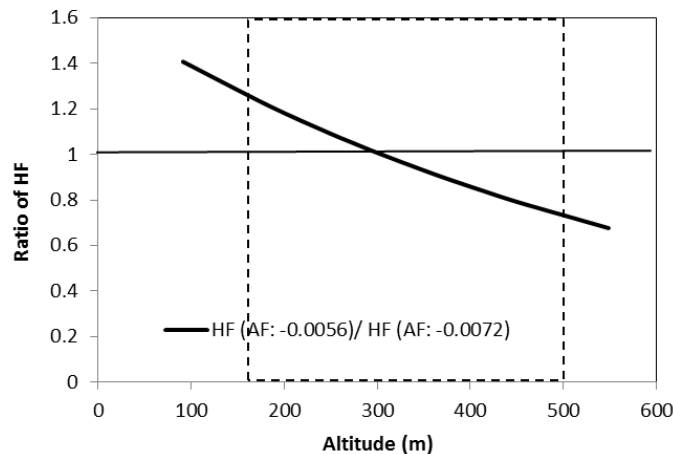


Fig. 4-28 Relationship of AF and altitude

4.3.11 放射性 Cs の沈着量の検出下限

放射性 Cs の沈着量は、4.3.4.章で述べたように、 γ 線スペクトルのデータから、バックグラウンド (Rn 子孫核種、宇宙線、機体の汚染) を差し引き求めている。放射性 Cs の沈着量の検出下限を求める上で、実際の測定データから、差し引くバックグラウンドを考慮し、各々の計数誤差 (= 放射性 Cs の計数率の検出下限) の 3σ を計算した。バックグラウンドの合計と放射性 Cs の計数率の検出下限を Fig. 4-29 に示す。当たり前ではあるが、バックグラウンド計数率が上昇すると、検出下限も上昇する。この計数率の検出下限を、Table 4-3 に示した MEXT 機器の標準的な CD (17000 cps/ μ Sv/h) 及び AF (0.0065 m^{-1}) で線量率に換算し、2012 年 5 月 30 日に減衰補正した。結果を Fig. 4-30 に示す。このように、ばらつきはあるものの、放射性 Cs の沈着量の検出下限は、最大で 15 kBq/ m^2 程度であることが分かる。同様に計算した、NUSTEC 及び OYO の検出下限値について Table 4-6 に示す。

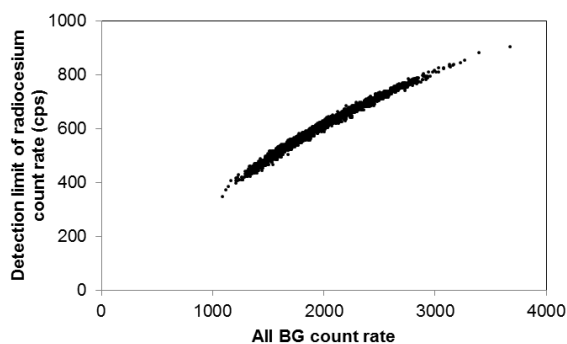


Fig. 4-29 Detection limit of radiocesium count rate

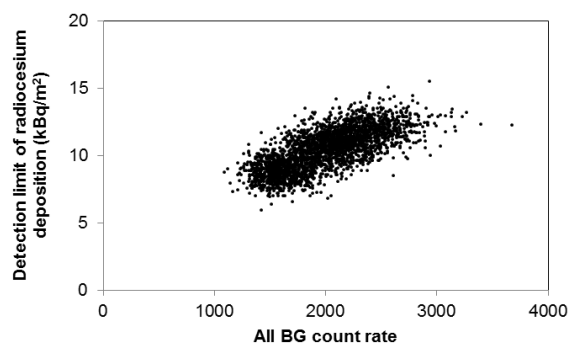


Fig. 4-30 Detection limit of radiocesium deposition (kBq/ m^2)

4.3.12 放射性 Cs の沈着量の不確かさ

放射性 Cs の沈着量の不確かさ要因としては、4.3.10.章で述べた、線量率と変わらない。したがって、パラメータによって、 $\pm 50\%$ の不確かさである。また、空中の Rn の子孫核種による影響はスペクトルで差し引かれるため、放射性 Cs の沈着量には大きな影響はないと考えられる。