博　士　論　文

上空における放射線測定値の解析手法に関する研究

佐々木　美雪

名古屋大学

工学研究科 総合エネルギー工学専攻

2021 年

目次

第１章 序章 9

１.１. 本研究の背景 9

１.２. 従来法の課題 11

１.３. 本研究の目的及び本論文の構成 14

１.４. 参考文献 15

第２章 森林による遮蔽を考慮した換算手法の開発 18

２.１. はじめに 18

２.２. 測定方法 19

２.３. 森林遮蔽減衰率の取得 21

２.４. 換算方法 22

２.４.１. FSM による換算方法 22

２.４.２. FSFM による換算方法 25

２.４.３. 地上測定値 25

２.５. 評価方法 25

２.６. 結果と考察 26

２.６.１. 森林遮蔽減衰率について.....26

２.６.２. 換算結果の比較.....28

２.７. まとめ.....34

２.８. 参考文献.....35

第３章 MLEM を用いた換算手法の開発.....36

３.１. はじめに.....36

３.２. MLEM 法.....37

３.２.１. 換算理論.....37

３.２.２. 使用したパラメータについて.....43

３.３. ベンチマークテスト.....46

３.３.１. ベンチマークテストについて.....46

３.３.２. 室内試験.....46

３.３.３. シミュレーション試験.....48

３.３.４. 結果と考察.....48

３.４. フィールドテスト.....53

３.４.１. 測定方法.....53

３.４.２. 換算方法 55

３.４.３. 評価方法 55

３.４.４. 結果と考察.....55

３.５. 測定分解能の評価.....66

３.５.１. 測定分解能について 66

３.５.２. 測定分解能の算出方法 66

３.５.３. フィールドデータとの比較評価.....67

３.５.４. 結果と考察.....67

３.６. まとめ 74

３.７. 参考文献.....75

第４章 人工ニューラルネットワークを用いた換算手法の開発 76

４.１. はじめに.....76

４.２. 換算方法.....77

４.２.１. ANN について.....77

４.２.２. ネットワークの構築について 78

４.２.３. 使用した訓練データ及びテストデータのデータセット 81

4.2.4. 構築したANNによる換算方法 84

4.3. 測定方法.....84

4.4. 評価方法.....84

4.4.1. 換算特性の評価について.....84

4.4.2. 入力変数の貢献度の評価について 86

4.4.3. 訓練データ数の評価について 86

4.4.4. フィールド測定値換算の評価について.....87

4.5. 結果と考察.....87

4.5.1. 換算特性の評価 87

4.5.2. 入力変数の貢献度の評価.....91

4.5.3. 訓練データ数の評価 92

4.5.4. フィールド測定値換算の評価 93

4.6. まとめ 101

4.7. 参考文献.....103

第5章 結論.....104

用語・略語一覧 108

謝辞.....108

論文リスト.....109

図の一覧

図 2-1　測定に使用した無人ヘリコプター及び放射線検出器外観 20
図 2-2　LaBr3 (Ce)シンチレータ検出器ガンマ線スペクトル.....20
図 2-3　歩行式サーベイメータ外観.....21
図 2-4　森林遮蔽減衰率の取得の概要 22
図 2-5　FSM による換算イメージ 23
図 2-6　推定樹高と線量率比の関係.....27
図 2-7　季節及び樹種による森林遮蔽の違い 27
図 2-8　エリア 1 における空間線量率分布.....30
図 2-9　エリア 1 における地上測定値と上空測定換算値のRDヒストグラム 31
図 2-10　エリア 2 における空間線量率分布.....32
図 2-11　エリア 2 における地上測定値と上空測定換算値のRDヒストグラム 33
図 3-1　MLEM と SIRT の換算結果の比較.....37
図 3-2　放射線測定値から線源の強度分布を推定するイメージ.....40
図 3-3　MLEM におけるCijに寄与する因子 41
図 3-4　MLEM 換算における線量分布の局所化の例及びフィルタリング処理結果 .41
図 3-5　MLEM 換算計算フロー 42
図 3-6　PHITS により算出した空気減衰率.....44
図 3-7　土壌散乱減衰率 PHITS 計算体系 45
図 3-8　土壌散乱減衰率 45
図 3-9　ベンチマークテスト測定試験の様子 47
図 3-10　ベンチマークテスト P0 測定換算結果.....50
図 3-11　P0 の計算回数に伴う MLEM 換算値と線源分布値との *RMSE*.....51
図 3-12 ベンチマークテスト P1-3 の測定換算結果 52
図 3-13　測定高度 20 m における模擬測定値及び換算結果 53
図 3-14　測定高度 50 m における模擬測定値及び換算結果 53
図 3-15　KURAMA-II の外観.....54
図 3-16　エリア A における空間線量率マップ 58
図 3-17　エリア A における地上測定値と上空測定換算値のRDヒストグラム.....59
図 3-18　エリア B における空間線量率マップ.....60
図 3-19　エリア B における地上測定値と上空測定換算値のRDヒストグラム.....61
図 3-20　エリア C における空間線量率マップ 62
図 3-21　エリア C における地上測定値と上空測定換算値のRDヒストグラム.....63
図 3-22　フィールドテストにおける計算回数に伴う MLEM 換算値と地上測定値の *RMSE*.....64

図 3-23　地面平均通過距離増加に伴う各換算値と地上測定値の *NMSE* 64
図 3-24　エリア B における空間線量率マップ詳細解析結果.....65
図 3-25　PHITS による測定値算出イメージ 67
図 3-26　点線源シミュレーションから算出した σ 69
図 3-27　線源分布の大きさの違いによる σ の違い 70
図 3-28　平均メッシュサイズによる地上測定値と上空測定換算値のRD標準偏差 ...71
図 3-29　各エリア測定の測定分解能に応じたメッシュサイズで表した空間線量率マップ 72
図 3-30　測定分解能に応じたメッシュサイズで算出したRDヒストグラム 73
図 3-31　測定分解能メッシュサイズで平均化した際の計算回数に伴う MLEM 換算値と地上測定値の *RMSE*.....74
図 4-1　ANN による計算例 78
図 4-2　CC モデルを用いた ANN 構築の様子 81
図 4-3　エネルギー区分ごとの入力変数の設定.....83
図 4-4　訓練データのデータ分布 83
図 4-5　パターン 1 の学習における測定高度ごとの ANN 換算値と全計数率の比 ...89
図 4-6　FSM 換算値と地上測定値のRDヒストグラム.....90
図 4-7　パターン 2 の学習における推定樹高ごとの ANN 換算値の減衰率 90
図 4-8　FSFM 換算値と地上測定値のRDヒストグラム.....91
図 4-9　パターン 3 の学習における入力変数の変化に伴う ANN 換算値の違い 91
図 4-10　各入力変数の貢献度.....92
図 4-11　訓練データ数と ANN 換算値と地上測定値の *RMSE* の関係 93
図 4-12　エリア A における空間線量率マップ 95
図 4-13　エリア B における空間線量率マップ.....96
図 4-14　エリア C における空間線量率マップ 97
図 4-15　エリア A、B、C における上空測定換算値と地上測定値のRDヒストグラム 98
図 4-16　エリア A、B、C における上空測定換算値の測定分解能.....99
図 4-17　エリア A、B、C における各換算値と地上測定値のRD標準偏差 100
図 4-18　ANN の訓練データ数が 200 以下のエリア 100
図 4-19　訓練データ数による換算精度の違い 101

表の一覧

表 1-1 上空からの放射線測定システム 13
表 2-1 各測定エリアの測定時期と測定面積 21
表 2-2 FSM 換算に使用したCD及びAF.....24
表 2-3 各エリアにおける上空測定換算値の地上測定値との比較 33
表 3-1 フィールドエリア測定情報.....54
表 3-2 線源分布の大きさの違いによる σ の違いの詳細 70
表 4-1 学習に使用したデータセットの測定情報.....82
表 4-2 学習に使用した入力変数と目的変数 82
表 4-3 ランダムトレーニングに使用したデータセット 87
表 5-1 各換算手法の特性一覧 107

第１章　序章

１.１.　本研究の背景

2011 年 3 月 11 日に発生した東北地方太平洋沖地震とそれに伴い発生した津波により、東京電力（株）福島第一原子力発電所（以下「1F」という。）において過酷事故が発生し、環境中へ大量の放射性物質が放出された。放出された放射性物質の分布状況を把握するために、国や自治体、研究機関等が協力し、放射性物質の分布状況の調査が行われた。放射性物質の分布調査は様々な手法を用いて多角的に実施され、その結果が評価された[1]。

地上からのアプローチでは、車両を用いた走行サーベイによる空間線量率の測定、NaI サーベイメータを用いた定点における空間線量率の測定、人が放射線検出器を背負い行う歩行サーベイによる空間線量率の測定、可搬型ゲルマニウムスペクトロメータを用いた土壌放射能の測定、スクレーパープレートによる土壌深度方向の放射能分布調査等が行われた[2-7]。上空からのアプローチでは有人ヘリコプターを用いた空間線量率の測定（以下「航空機モニタリング」という。)、無人ヘリコプターを用いた空間線量率の測定が行われた[8-11]。1F における事故以降、上記に示した測定手法を用いた定期的なモニタリングが当初は文部科学省、現在では原子力規制庁により継続して行われている[12]。モニタリングにより得られた放射線測定情報は 1F 周辺における避難区域の設定や解除、除染区域の決定、放射線物質の環境動態研究、住民被ばく線量の算出等に用いられ、様々な研究や政策決定の基礎データとして用いられている。

1F における事故時、地震とそれに伴う停電及び通信機能の停止により、初期の緊急時モニタリングの結果の共有等に問題があった経験も踏まえ、原子力規制委員会は「原子力災害対策指針」を制定した[13]。原子力災害対策指針では、初期対応において、施設の状況に応じて緊急事態の区分を決定し防護措置を実行するため、緊急事態区分に該当するか否かを原子力事業者が判断するための基準(Emergency Action Level, EAL)を設定するとともに、空間放射線量率や環境試料中の放射性物質の濃度等の観測値の指標に基づく判断基準（Operational Intervention Level, OIL）により、緊急時防護措置を迅速に実行できる意思決定の枠組みを構築した。

緊急時防護措置で必要となる初期モニタリングにおいて重要なことは、放射性物質が放出して数時間から数日間の間に、避難、屋内退避及び飲食物の摂取制限等の防護措置の実施の判断に必要な情報を把握することである。原子力災害対策指針において緊急防護措置を準備する区域は原子力施設からおおむね半径 30 ㎞（目安）とされており、広範囲にわたる放射線測定が必要となる。原子力発電所等を対象とした事故進展に応じた初期モニタリング対応方法として、放射性物質放出後はモニタリングポストや走行サーベイ、航空機モニタリングを実施するものとしている[14]。しかし 1F 事故直後は、地震に伴う津波や電源喪失の影響で 1F 構内の排気塔や周辺の殆どのモニタリング機器が機能せず、主にモニタリングカ

ーによる線量率分布の測定が行われ[15]、その後米国エネルギー省の協力を得て航空機モニタリングが行われた[8]。これらの測定は基本的に測定員が測定場所に行って作業を行う必要があり、高濃度の放射性物質による汚染があった場合、測定員に対する被ばく影響が懸念される。

遠方から放射線測定を行うことでき、また広範囲を測定できるものとして、無人機による上空からの放射線測定技術がある。上空からの放射線測定技術は当初、ウラン資源の探査目的で研究開発が行われた。1947 年に米国、カナダ、旧ソ連で、1951 年にはオーストラリアで、航空機による上空からの放射性物質探査が行われている[16]。1960～1970 年代に鉱物探査と環境モニタリングを目的とした航空機モニタリングが各地で実施され、その後は、マルチチャネルアナライザーの使用、デジタル記録、半導体検出器の開発、および PC を用いたデータ処理の改善等が行われてきた。

1979 年におけるスリーマイル島原子力発電所事故時は、米国のエネルギー省が航空機モニタリングを実施している。米国の Aerial Measurement System は、世界的に有名かつ実績のあるシステムである[17]。

日本では、1979 年のスリーマイル島原子力発電所事故をきっかけに、有人ヘリコプターを用いた航空機モニタリングの技術開発が行われていたが[18]、当時は緊急時に広範囲を測定できるシステムとして、配備されるまでは至らなかった。

欧州では 1986 年のチェルノブイリ原子力発電所事故後、Scottish Universities Environmental Research Centre を中心に、各国で運用されている航空機モニタリングシステムの比較測定を実施することで、データフォーマットや解析手法の標準化を行っている[19]。

無人機を使用した上空からの放射線測定技術は、1990 年代に米国の原子力施設の廃止措置作業を監視するために使用されており[20,21]、日本では 2008 年に奥山らが農業に使用される無人ヘリコプターを用いた放射線測定システムの開発成果を報告している[22]。

2011 年の 1F 事故直後は、日本の文部科学省と米国のエネルギー省によって航空機モニタリングが行われ[23,24]、日本全域の広域エリアの地上 1m の空間線量率分布と放射性セシウムの放射能濃度分布状況が明らかにした。この経験をもとに日本における航空機モニタリングの技術及び解析手法が確立された[25]。ここで開発された航空機モニタリングにおける測定手法は、より詳細な分布状況を取得することを目的とした、日本における無人ヘリコプター等による無人機を用いた測定手法の基礎となっている。

日本原子力研究開発機構が開発した自律型無人ヘリコプター放射線測定システムは、1F における事故以降、事故によって汚染された高線量のエリアや河川敷の測定に使用され[26-28]、そのシステムを用いた定期的なモニタリングが 1F から 5 ㎞圏内のエリアにおいて行われている[12]。彼らは、上空における放射線計数率を地上 1 m 空間線量率に変換するための分析方法を確立し、手法の有効性を大量の地上測定データとの比較によって実証した[11]。無人ヘリコプターによる測定システムは、広範囲にわたる空間放射線量率と放射能分布を視

覚的に把握することができる利点があるが、地上局からの最大飛行距離は、無線通信範囲の制限により 3 km 程度であり、また測定可能時間は最大で 90 分程度であるため、無線通信が難しい山岳地帯の測定や長時間のリアルタイムモニタリングは難しい課題があった。無人ヘリコプターでは測定できない領域を補完するために、日本原子力研究開発機構は宇宙航空研究開発機構と共同で無人飛行機を用いた放射線モニタリング無人機システム（Unmanned Airplane for Radiation Monitoring System：以下「UARMS」という。）を開発した [29]。UARMS は、地上局からの通信範囲が約 100 ㎞と長距離通が可能であり、最大約 6 時間の長時間運用を自律飛行で行うことができる。また近年、安価で制御しやすいマルチコプターの普及により、マルチコプターに搭載できる放射線監視システムが開発されており、中田らはピンホールコンプトンハイブリッドイメージングシステムを開発しマルチコプター等に搭載できるように検出器の軽量小型化を行い [30]、佐藤らは小型のコンプトンカメラをマルチコプターに搭載した放射線測定システムを開発している [31]。

表 1-1 に上空からの放射線測定システムの一覧を示す。これらの上空からの放射線測定技術は、広域を迅速に測定できる利点だけでなく、アクセスが困難な領域の測定、空間放射線量率の視覚的マッピングを可能とし、また無人機においては測定者が測定場所へ直接行く必要がないため人体への被ばく低減できる点から、原子力災害などにおける緊急時の放射線モニタリングや、災害後の詳細な放射能汚染状況の把握のためのツールとしての活用が期待できる。

1.2. 従来法の課題

上空で得られた放射線測定情報は、地上における空間線量率や放射能に換算され、情報共有される。上空での放射線測定値を地上の値へ換算する基本的な考え方は、以下の仮定に基づいて行われている [16]。

1) 上空で測定されている計数値は、上空を頂点とし対地高度を高さとした円錐の底面部分に該当する地上の放射線量の平均値である。
2) 測定対象は、平坦かつ放射線の分布は一様である。

従来から使用されている上空値を地上値へ換算する解析手法は、遮蔽物は空気のみで平面かつ、線源が均一に分布していることを仮定したモデル（Flat source model：以下「FSM」という。）を用いて換算を行っているため、森林等の遮蔽物、斜面等の地形の影響が考慮されていない。また上空から地上を遠隔測定する際、高度が上がると地上の対象となる範囲が広がる。よって上空からの測定は地上におけるサーベイメータ等を用いた測定に比べ精度が劣ることから、ローカルなホットスポット探査や放射性物質の挙動調査には十分なデータを提供することが難しい課題がある。航空機モニタリングにおいて Schwarz らは険しい

山脈等の地形（数十メートル級）で高さを補正するための手法を開発しており[32]、石崎らは積雪によるガンマ線減衰の補正を報告している[33]。しかしこれらの補正手法は航空機モニタリングを対象としたものであり、低高度（10～150 m）を飛行する無人機による測定において、より詳細な分布状況を取得したい場合、より小さなスケール（数メートル級）で地形効果等を考慮した新たな換算手法の開発が必要であった。

本研究では、無人機を用いて測定した上空における放射線測定値をより地上測定値に近い値へ換算するため、森林遮蔽効果や地形効果を考慮した新たな換算手法の開発を行った。本研究成果は、より安全でかつ高精度な放射線測定を可能とし、緊急時モニタリングや汚染後の放射線モニタリング等における無人機を活用した上空からの放射線測定の高度化に貢献するものと考えられる。

表 1-1　上空からの放射線測定システム

機体	有人ヘリコプター	無人飛行機※	無人ヘリコプター	マルチコプター
飛行エリア	100 km	数十 km	数 km	数百 m
高度	300 m 以上	100 m～150 m	10 m～150 m	10 m～150 m
飛行時間	約 90 分	約 360 分	約 90 分	約 15 分
最大ペイロード	約 100 kg	約 10 kg	約 30 kg	約 5 kg

※UARMS の性能を参考に記載

１.３． 本研究の目的及び本論文の構成

本研究の目的は、無人機を用いて測定した上空における放射線測定値を地上 1 m 空間線量率（1 cm 周辺線量当量率）へ換算するための新たな換算手法の開発である。

無人機を用いた上空からの放射線測定技術は、広範囲を迅速に測定することができ、また測定者の被ばくリスクを軽減することができるため、緊急時の測定や汚染後の区域制定等における放射線モニタリングツールとして有用である。上空での放射線測定値は、主に地上における空間線量率等に換算された状態で情報共有が行われるが、従来から使用されている上空値から地上値への換算手法は、遮蔽物は空気のみで平面かつ、線源が均一に分布していることを仮定したモデルを用いて地上値に換算を行っている。この換算手法は一定の精度で換算できるものの、仮定したモデルと異なるエリアでは、地上値との誤差が大きいという課題があった。汚染したエリアにおける詳細な放射性物質の分布を作成することは、避難指示区域や除染区域決定のための科学的根拠として役立つと考えられる。緊急時モニタリング等における測定では、精度よりもスピードが優先されると考えられるが、詳細解析を行う際に取得しなければいけないデータセットや換算精度をあらかじめ把握しておくことにより、状況に応じて必要な測定を行うことができる。

本研究では、上空からの放射線測定において詳細な分布を得るための解析処理における課題を改善するために、森林及び地形効果等を考慮した新たな換算手法を開発した。

本論文は 5 章で構成されている。各章の構成は以下のとおりである。

第 1 章は、本研究の背景を述べ、無人機を用いて測定した上空における放射線測定値の新たな換算手法の必要性と本研究の目的を述べた。

第 2 章は、森林遮蔽効果を考慮した換算手法の開発成果を述べる。

第 3 章は、地形効果と森林遮蔽効果を考慮した換算を行うため Maximum Likelihood-Expectation Maximization method（以下「MLEM」という）を用いた換算技術の開発成果を述べる。

第 4 章は、解析時間を必要とせず、FSM に比べより精度の高い換算を行うことができる換算手法として、Artificial Neural Network（以下「ANN」という。）を用いた新たな換算手法を開発した成果を述べる。

そして第 5 章は、本研究で得られた結果をまとめ、結論を述べる。

1.4. 参考文献

1) S. Takahashi. Radiation Monitoring and Dose Estimation of the Fukushima Nuclear Accident. Springer. ISBN-13:978-4431545828 (2014).

2) 文部科学省，東京電力株式会社福島第一原子力発電所の事故に伴い 放出された放射性物質の分布状況等に関する 調査研究結果について. https://radioactivity.nsr.go.jp/ja/contents/6000/5233/view.html (最終閲覧日：2021 年 3 月 11 日).

3) 三上智，松田規宏，安藤真樹，木名瀬栄，北野光昭，川瀬啓一，松本慎一郎，山本英明，斎藤公明. 福島周辺における空間線量率の測定と評価 V 福島周辺における空間線量率分布の特徴. Radioisotopes. 64, 9, 589-607 (2015).

4) M. Andoh, Y. Nakahara, S. Tsuda, T. Yoshida, N. Matsuda, F. Takahashi, S. Mikami, N. Kinouchi, T. Sato, M. Tanigaki, K. Takamiya, N. Sato, R. Okumura, Y. Uchihori and K. Saito. Measurement of air dose rates over a wide area around the Fukushima Dai-ichi Nuclear Power Plant through a series of car-borne surveys. Journal of Environmental Radioactivity. 139, 266-280 (2015).

5) S. Mikami, T. Maeyama, Y. Hoshide, R. Sakamoto, S. Sato, N. Okuda, S. Demongeot, R. Gurriaran, Y. Uwamino, H. Kato, M. Fujiwara, T. Sato, H. Takemiya and K. Saito. Spatial distributions of radionuclides deposited onto ground soil around the Fukushima Dai-ichi Nuclear Power Plant and their temporal change until December 2012. Journal of Environmental Radioactivity. 139, 320-343 (2015)

6) K. Saito, I. Tanihata, M. Fujiwara, T. Saito, S. Shimoura, T. Otsuka, Y. Onda, M. Hoshi, Y. Ikeuchi, F. Takahashi, N. Kinouchi, J. Saegusa, A. Seki, H. Takemiya and T. Shibata. Detailed deposition density maps constructed by large-scale soil sampling for gamma-ray emitting radioactive nuclides from the Fukushima Dai-ichi Nuclear Power Plant accident. Journal of Environmental Radioactivity. 139, 308-319 (2015)

7) 福島県，福島第一原子力発電所事故直後のモニタリング結果. https://www.pref.fukushima.lg.jp/site/portal/ps-genpatsu-ziko-chokugo.html（最終閲覧日：2021 年 3 月 11 日).

8) 文部科学省，文部科学省及び米国エネルギー省航空機による航空機モニタリングの測定結果. https://radioactivity.nsr.go.jp/ja/contents/4000/3710/view.html (最終閲覧日：2021 年 3 月 11 日).

9) 鳥居建男，眞田幸尚，杉田武志，田中圭. 航空機モニタリングによる東日本全域の空間線量率と放射性物質の沈着量調査. 日本原子力学会誌. 54, 3, 160-165 (2012).

10) Y. Sanada, T. Sugita, Y. Nishizawa, A. Kondo and T. Torii. The aerial radiation monitoring in Japan after the Fukushima Daiichi nuclear power plant accident. Progress

in Nuclear Science and Technology. 4, 76-80 (2014).

11) Y. Sanada and T. Torii. Aerial radiation monitoring around the Fukushima Dai-ichi nuclear power plant using an unmanned helicopter. Journal of Environmental Radioactivity. 139, 294-299 (2015).

12) 原子力規制委員会, 放射線モニタリング情報-モニタリング結果. https://radioactivity.nsr.go.jp/ja/list/512/list-1.html (最終閲覧日：2021 年 3 月 11 日)

13) 原子力規制委員会, 原子力災害対策指針. https://www.nsr.go.jp/activity/bousai/measure/index.html (最終閲覧日：2021 年 3 月 11 日).

14) 原子力規制委員会, 緊急時モニタリングについて (原子力災害対策指針補足参考資料) . https://www.nsr.go.jp/activity/monitoring/monitoring6-1.html (最終閲覧日：2021 年 3 月 11 日)

15) 環境省, 放射線による健康影響等に関する統一的な基礎資料 平成 30 年度版 第 6 章. http://www.env.go.jp/chemi/rhm/h30kisoshiryo.html (最終閲覧日：2021 年 3 月 11 日).

16) International Atomic Energy Agency. Guidelines for radioelement mapping using gamma ray spectrometry data. IAEA-TECDOC-1363 (2003).

17) R. H. Beers, Z. G. Burson, T. C. Maguire and G. R. Shipman. Airborne cloud tracking measurements during the Three Mile Island nuclear station accident. EGG-1 0282-1009 (1984).

18) 長岡鋭, 森内茂. 航空機γ線サーベイシステム ARSAS. 保健物理. 25, 4, 391-398 (1990).

19) D.C.W. Sanderson, A.J. Cresswell, J.J. Lang. An international comparison of airborne and ground based gamma ray spectrometry. Results of the ECCOMAGS 2002 exercise held 24th May to 4th June 2002, Dumfries and Galloway, Scotland. University of Glasgow, Glasgow. ISBN 0-85261-783-6 (2004).

20) U. S. Department of Energy, Geophex Airborne Unmanned Survey System (GAUSS), Topical report, October 1993 - September 1996. DOE/MC/30358—5612 (1998).

21) K. J. Hofstetter, D. W. Hayes and M. M. Pendergast. Aerial robotic data acquisition system. Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry volume. 193, 89-92 (1995)

22) S. Okuyama, T. Torii, A. Suzuki, M. Shibuya and N. Miyazaki. A Remote Radiation Monitoring System Using an Autonomous Unmanned Helicopter for Nuclear Emergencies. Journal of Nuclear Science and Technology. 45, 5, 414-416 (2008).

23) D. J. Blumenthal. Introduction to the special issue on the U.S. Response to the Fukushima accident. Health Physics. 102, 5, 482-484 (2012).

24) C. Lyons and D. Colton. Aerial measuring system in Japan. Health Physics. 102, 5, 509-515 (2012).

25) 眞田幸尚，石崎梓，西澤幸康，卜部嘉．有人ヘリコプタを用いた放射線モニタリング．分析化学. 66, 3, 149-162 (2017).

26) Y. Sanada, A. Kondo, T. Sugita, Y. Nishizawa, Y. Yuuki, K. Ikeda, Y. Shoji and T. Torii. Radiation monitoring using an unmanned helicopter in the evacuation zone around the Fukushima Daiichi nuclear power plant. Exploration Geophysics. 45, 3-7 (2014).

27) K. Azami, T. Ootagaki, M. Ishida and Y. Sanada. Characteristics of radiocesium contamination of dry riverbeds due to the Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant accident assessed by airborne radiation monitoring. Landscape and Ecological Engineering. 14, 1, 3-15 (2018).

28) Y. Sanada, T. Orita and T. Torii. Temporal variation of dose rate distribution around the Fukushima Daiichi nuclear power station using unmanned helicopter. Applied Radiation and Isotopes. 118, 308-316 (2016).

29) 佐藤昌之，村岡浩治，穂積弘毅，眞田幸尚，山田勉，鳥居建男． Multiple Model Approach による構造化ロバスト制御器設計法を適用した放射線モニタリング無人固定翼機の飛行制御則設計 -福島県浪江町における放射線モニタリング飛行-．計測自動制御学会論文集. 51, 4, 215-225 (2015).

30) N. Nakada, K. Shimazoe, H. Takahashi and Y. Shikaze. Directional Gamma-ray imaging for unmanned aerial monitoring system. IEEE. SICE International Symposium on System Integration, DOI:10.1109/SII.2017.8279258 (2017).

31) Y. Sato, S. Ozawa, Y. Terasaka, M. Kaburagi, Y. Tanifuji, K. Kawabata, H. N. Miyamura, R. Izumi, T. Suzuki and T. Torii. Remote radiation imaging system using a compact gamma-ray imager mounted on a multicopter drone. Journal of Nuclear Science and Technology. 55, 1, 90-96 (2018).

32) G.F. Schwarzr, E.E. Klingelé and L. Rybach. How to handle rugged topography in airborne gamma-ray spectrometry surveys. First Break. 10, 1, 11-17 (1992).

33) A. Ishizaki, Y. Sanada, A. Mori, M. Imura, M. Ishida and M. Munakata. Investigation of snow cover effects and attenuation correction of gamma ray in aerial radiation monitoring. Remote sensing. 8, 11, 892, DOI:10.3390/rs8110892 (2016).

第２章　森林による遮蔽を考慮した換算手法の開発

２.１.　はじめに

本章の目的は、上空から放射線測定を行った際に、その値を地上 1 m の空間線量率に換算する場合において換算誤差の要因となる、森林の存在による地面からの放射線減衰率の算出及びそのパラメータを用いた換算手法の開発及び評価である。

1F 事故の影響を大きく受けた福島県は県の面積のおよそ 70%が森林でおおわれている[1]。森林は人が入って放射線測定を行うことが非常に困難であり、汚染状況の把握は上空からの測定がメインとなるエリアであると考えられる。1F の事故後、放射性物質の影響を受けた森林の調査において、林野庁による調査結果では、葉や枝などの樹木に存在する放射性セシウムは事故後 1～２年で大幅に減少し、2019 年には全体の放射性セシウムの 71～97%が土壌中に分布し、現在は殆どの放射性物質が土壌に存在していることが報告されている[2]。事故時にスギは着葉していたため、放射性物質は主に樹冠部の針葉などに沈着し、広葉樹混交林では落葉期であったため、放射性物質は主に林床へ沈着していたのではないかと報告されている。

放射性物質が環境中に漏洩し、汚染発生後の速やかなモニタリングにおいて森林を上空から測定する場合、主な放射線源は林冠上部及び林床（地面）となる。上空から放射線測定を行う際、地面上に森林等の樹木が存在した場合、地面からの放射線は樹木に遮蔽され、そのまま上空計測値を地上 1 m の値へと換算すると、遮蔽物が無い場合の計数率と比べ低い値で換算される課題がある。他にも沈着工程の違い、積雪の有無等による放射線の遮蔽状況の違いも考えられるが、それらを考慮した詳細解析を行うためには無人機による上空からの計測作業以外のデータ取得作業等が必要となり、解析工程及び測定作業が複雑になる。本研究では樹木による地面からの放射線の遮蔽率のみを考えることとし、無人機によって取得できる測定データ（放射線全計数率情報及び地形情報）のみを用いた換算手法の開発を行った。

本章では林床に対して放射性セシウムによる汚染があった場合における、森林内の地上 1 m 空間線量率をおおまかに算出することを目的とし、無人ヘリコプターによる上空での放射線全計数率の取得と同時に、地上 1 m 空間線量率の測定を行った。両者のデータと地形情報との関係性を調査することで、森林による地表面線源の遮蔽パラメータを取得し、森林遮蔽を考慮した換算手法（Forest shielding factor model、以下「FSFM」という。）を開発し、成果を述べた。

２.２． 測定方法

上空からの放射線測定には無人ヘリコプター（FAZER-R-G2：ヤマハ発動機株式会社社製）に $LaBr_3$ (Ce)シンチレータ検出器（38 mm ϕ × 38 mm H × 3 本：日本放射線エンジニアリング株式会社社製）を搭載し、ガンマ線の測定を行った。無人ヘリコプターは元々、農薬散布用に開発された機体であり、測定者側であらかじめ指定したルートを自律航行することができるものである[3]。図 ２-1 に使用した機器の外観を示す。$LaBr_3$ (Ce)シンチレータ検出器は１秒（時定数＝１ s）ごとにガンマ線スペクトルデータ（50–2800 keV：cps）が得られ、Global Navigation Satellite System（以下「GNSS」という。）から得られた座標情報とリンク付けされる。GNSS には Differential GPS（OEM7：NovAtel 社製：MSAS 対応受信機）を用いており、誤差は正しい座標値と比較して±2 m 程度である。図 ２-2 は $LaBr_3$ (Ce)シンチレータ検出器で得られるガンマ線スペクトルの例である。$LaBr_3$ (Ce)シンチレータは自己汚染があるため[4]、放射線影響が少ない海上において 30 分間測定したデータから得られた平均計数率（cps）をバックグラウンドとし、測定値から差し引いた。上空で得られた放射線計数率（50-2800 keV 間の全計数率：cps）は FSM 及び FSFM を用いて、地上 1 m の空間線量率（μSv h^{-1}）へ換算した。解析方法の詳細は２.４.に示す。

地上におけるガンマ線測定には歩行式のサーベイメータであるホットスポットファインダー（株式会社日本遮蔽技研社製）を用いた。ホットスポットファインダーは検出部に CsI (Tl)シンチレータ検出器を用いた（38 mm L × 38 mm W × 25 mm H：浜松ホトニクス社製 C12137-01）検出器である。歩行式サーベイメータの外観を図 ２-3 に示す。ホットスポットハイダーを背負い、検出器の高さを約 1 m にした状態で地上測定を行った。ホットスポットファインダーは１秒ごとに空間線量率（μSv h^{-1}）が得られ、GNSS から得られた座標情報とリンク付けされる。GNSS には Differential GPS（A325：Hemispher 社製：MSAS 対応受信機）を用いており、誤差は正しい座標値と比較して±2 m 程度である。

測定エリアの地形情報は、無人ヘリコプターを用いて上空からの写真撮影を行い、3Dオルソ画像を作成することで建物や樹木を含んだ地球表面の高さの数値表層モデル Digital Surface Model（以下「DSM」という。）を取得した。地盤の高さの数値標高モデル Digital Elevation Model（以下「DEM」という。）は国土地理院における基盤地図情報サイトから入手したデータを使用した[5]。

それぞれのデータ（上空測定換算値、地上測定値、DSM、DEM）は同じ５ m メッシュ内で値を平均し、各データを比較した。

測定は降雨、降雪のない天候時に行い、測定日前日に降雨がない日を測定日に選定した。上空からの放射線測定と地上測定は同じ日に行った。測定エリアは福島県内の 1F の事故による放射能汚染の影響を受けた森林を選定した。測定エリア及び測定時期一覧を表 ２-1 に示す。エリア１は常緑樹と落葉樹のエリアに分かれた森林であり、年２回（夏と秋）の測定

を 2 年間実施し、季節変動及び常緑樹と落葉樹の違いによる測定値の変化を観察した。

なお本研究で測定したエリアは、エリア 1 に一部分存在したスギの人工林以外、常緑樹（マツ等）や落葉樹か混在しており、DSM 及び上空撮影写真からの立木密度の算出は難しかったため、立木密度を考慮した森林遮蔽減衰率の算出は行わなかった。

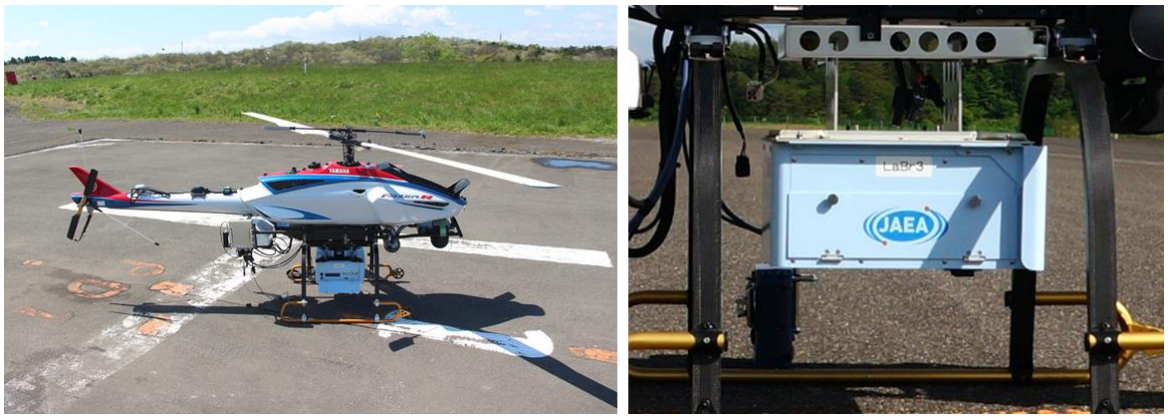


図 2-1　測定に使用した無人ヘリコプター及び放射線検出器外観

右が無人ヘリコプター（FAZER-R-G2：ヤマハ発動機株式会社社製）、左が LaBr3 (Ce)シンチレータ検出器（38 mm ϕ × 38 mm H × 3 本：日本放射線エンジニアリング株式会社社製）である。

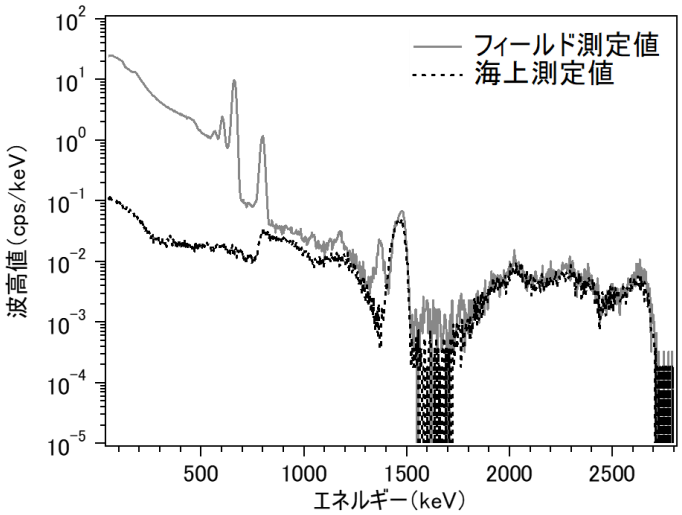


図 2-2　LaBr3 (Ce)シンチレータ検出器ガンマ線スペクトル

1F の事故による放射能汚染の影響を受けたエリアで取得したガンマ線スペクトルと、陸から 1 ㎞程度離れた海上において取得したガンマ線スペクトルを示している。

図 2-3 歩行式サーベイメータ外観

検出部に CsI (Tl)シンチレータ検出器を用いた（38 mm L × 38 mm W × 25 mm H）検出器である。

表 2-1 各測定エリアの測定時期と測定面積

エリア	測定時期	測定範囲（㎡）	測定平均高度（m）	測定間隔（m）	測定速度（m/s）
1	2017/06/27	28600	66.4	10	2
	2017/11/07		64.2	10	2
	2018/08/03		66.6	10	2
	2018/11/26		62.5	10	2
2	2017/03/06	28800	36.1	10	3
3	2017/07/20	11700	37.8	10	2
4	2018/07/23	26100	33.6	10	2
5	2018/12/04	26100	38.0	10	2

2.3. 森林遮蔽減衰率の取得

森林の存在による遮蔽効果を確認するために上空からのガンマ線測定と同時に、地上 1 m 空間線量率の測定を行った。測定エリアを 5 m 四方メッシュで区切り、メッシュごとに以下の値を算出した。

1) 上空測定値地上 1 m 換算値を地上測定値で割った値（以下、「線量率比」という。）
2) DSM から DEM を引いた値：m（以下、「推定樹高」という。）

図 2-4 に各種データのイメージを示す。上空測定値を地上 1 m 空間線量率へ換算する手法

としては FSM を用いた。FSM の詳細については２.４.１.に示す。ここで得られた推定樹高と線量率比の関係性から森林遮蔽減衰率を取得した。

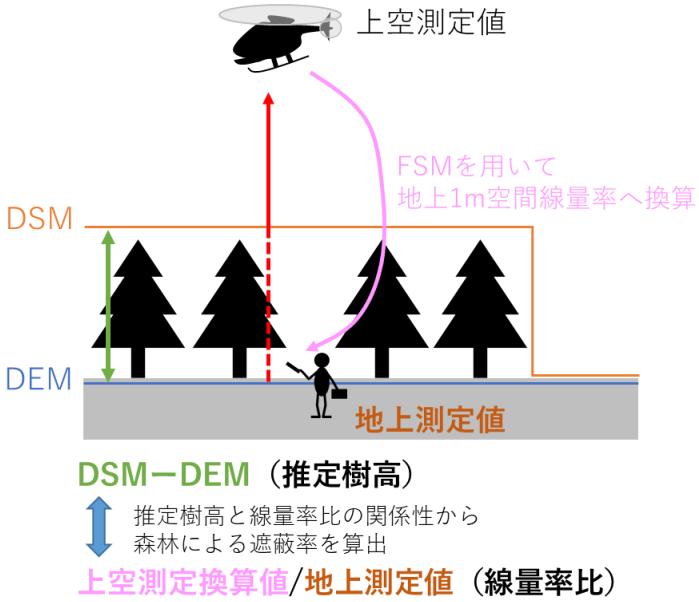


図　２-4　森林遮蔽減衰率の取得の概要

推定樹高と線量率比の関係性から、森林遮蔽減衰率を取得した。

２.４.　換算方法

２.４.１.　FSM による換算方法

FSM は線源が均一に分布していることを仮定したモデルであり、平坦なエリア上においてキャリブレーション飛行で得られた単純な換算係数によって変換される [6]。図　２-5 に FSM の換算イメージを示す。FSM で上空計数値を地上 1m 空間線量率へ換算する式を (1) に示す。

$$Y_{FSM\,i} = (C_{all\,i} - C_{BG}) \cdot CD \cdot \exp[AF(H_{m\,i} - H_{std\,i})] \qquad (1)$$

ここで$Y_{FSM\,i}$（μSv h^{-1}）は測定ポイントiにおける上空測定値を地上 1 m 空間線量率へ換算した値、C_{all}（cps）は上空で得られたガンマ線計数率、C_{BG}（cps）は検出器のバックグラウンド、CD（Conversion factor：μSv h^{-1} cps^{-1}）は計数率を空間線量率へ換算するための空間線量率換算係数、AF（Attenuation factor: m^{-1})は高度ごとのガンマ線計数率から対地高度とガンマ線計数率との関係式を求め取得した高度補正係数、H_{std}（m）は換算高度（＝1 m)、H_m（m）は測定対地高度である。CD及びAFは地形変動及び線量勾配がなるべく少ないエリア（計 33 箇所）において取得した平均値を用いた。表　２-2 に取得したCD、AF及び測定ポ

イントにおける DEM と DSM の情報を示す。表 2-2 に示した各エリアは、地形変動及び線量勾配がなるべく少ないエリアを選定して測定を行っているが、周囲に森林が存在する場合や、地形の凹凸が見られる箇所が多々あった。そのためCD及びAFにばらつきはあるが、CDは 0.0002～0.0004 μSv h^{-1} cps^{-1} の間、AFはおおよそ 0.006～0.008 m^{-1} の間となった。本研究の FSM の換算におけるCD及びAFは表 2-2 に示した値の平均値を用いた。

得られたY_{FSM}はマップとして示すため、マッピングソフトウェア（ArcGIS：Environmental Systems Research Institute Inc.）を用いて、クリギング処理を行い内挿補間した[7]。クリギングには球セミバリオグラムモデルを使用した。得られたデータは 5 m 四方のメッシュで値を平均し、同一メッシュで地上測定値、地形データと比較した。

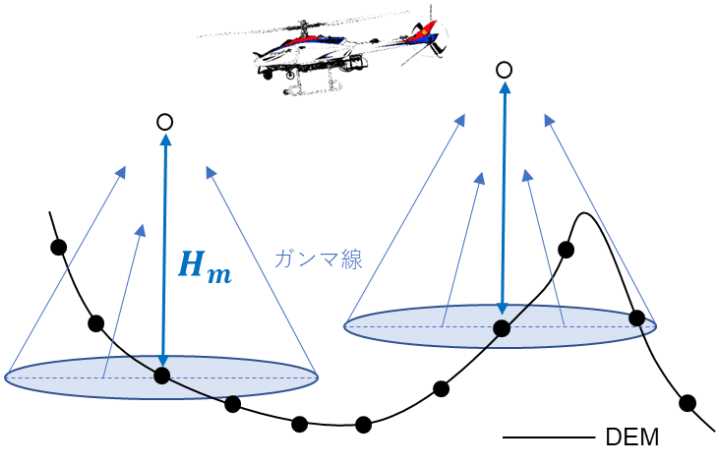


図 2-5 FSM による換算イメージ

FSM は測定ポイント直下の平らな表面からガンマ線が生成されると想定し換算を行う。

表 2-2 FSM 換算に使用したCD及びAF

No	測定日	推定樹高平均(m)	DEM 標準偏差(m)※	DSM 標準偏差(m)※	AF(m^{-1})	CD(μSv h^{-1} cps^{-1})
1	2013/05/28	–	0.191	–	0.00688	0.000323
2	2013/06/03	–	0.093	–	0.00466	0.000276
3	2013/07/10	0.458	1.068	0.789	0.00778	0.000219
4	2013/07/10	1.819	0.643	1.575	0.00824	0.000238
5	2013/12/09	–	5.105	–	0.00726	0.000343
6	2013/12/11	–	8.047	–	0.00668	0.000287
7	2014/01/07	1.819	7.420	1.575	0.00874	0.000245
8	2014/01/15	–	0.191	–	0.00745	0.000275
9	2014/04/24	–	0.191	–	0.00720	0.000296
10	2014/06/25	–	16.121	–	0.00707	0.000378
11	2014/07/24	–	1.027	–	0.00828	0.000302
12	2014/09/24	–	0.027	–	0.01227	0.000267
13	2014/10/17	–	0.087	–	0.00618	0.000239
14	2015/04/09	–	3.855	–	0.00662	0.000395
15	2015/06/05	–	0.637	–	0.00778	0.000277
16	2015/06/16	11.770	6.444	10.657	0.00719	0.000347
17	2016/01/08	–	13.750	–	0.00806	0.000341
18	2016/06/08	8.022	2.365	3.074	0.00626	0.000387
19	2016/06/29	11.770	6.444	10.657	0.00741	0.000352
20	2016/07/12	–	0.781	–	0.00781	0.000243
21	2017/06/15	11.770	6.444	10.657	0.00822	0.000450
22	2017/06/27	11.770	6.444	10.657	0.00746	0.000479
23	2017/09/30	3.033	1.865	4.096	0.00988	0.000268
24	2017/10/10	1.826	1.178	1.532	0.00891	0.000268
25	2017/11/07	11.770	6.141	10.862	0.00743	0.000471
26	2018/06/04	1.501	1.560	1.269	0.00874	0.000183
27	2018/08/23	0.322	1.813	2.150	0.00849	0.000250
28	2018/08/26	0.254	0.479	0.847	0.00612	0.000276
29	2018/11/26	11.770	6.444	10.657	0.00759	0.000283
30	2019/10/15	2.516	4.432	1.951	0.00930	0.000241
31	2020/06/17	0.995	0.479	1.341	0.00675	0.000260
32	2020/06/29	0.458	1.068	0.802	0.00842	0.000233
33	2020/07/27	0.255	1.054	0.963	0.00810	0.000240
				平均値	0.00773	0.000286
				(標準偏差)	0.00130	0.00007

※測定ポイントから半径 100 m 以内を対象に算出している。

※値が“–”の箇所は、DSM を取得できていない箇所である。

2.4.2. FSFM による換算方法

FSFM は FSM を元に、森林による遮蔽を考慮した換算方法である。森林による遮蔽効果は推定樹高に則った指数関数で表されるものとして、FSFM では森林遮蔽減衰率の因子を追加している。森林遮蔽減衰率の詳細については2.6.1.に示す。

FSFM における上空計数値を地上 1m 空間線量率へ換算する式を（2）に示す。

$$Y_{FSFM\,i} = (C_{all\,i} - C_{BG}) \cdot CD \cdot \exp[AF(H_{m\,i} - H_{std\,i})] \cdot \exp[FF \cdot h_i] \tag{2}$$

ここでFF（Forest shielding factor: m^{-1}）は図 2-4 に示す線量率比と推定樹高の関係性から得られた森林遮蔽係数、h_iは測定ポイントiにおける推定樹高である。得られた値は FSM と同様にクリギング処理を行い内挿補間した。また 5 m メッシュで値を平均し、同メッシュで他のデータと値を比較した。

2.4.3. 地上測定値

地上測定で得られた地上 1 m の空間線量率はマップとして示すため、FSM 等と同様にクリギング処理を行い内挿補間した。クリギングには球セミバリオグラムモデルを使用した。クリギングで得られたデータは 5 m 四方のメッシュで値を平均し、他のデータと比較した。

2.5. 評価方法

得られた換算値と地上測定値の一致度を評価するために、各値を同一の 5 m 四方のメッシュで平均化し、各メッシュの値の相対偏差（Relative Deviation：以下「RD」という。）を算出し、ヒストグラムを作成した。RDの算出式を（3）に示す。

$$RD_i = (Y_i - G_i)/G_i \tag{3}$$

ここでG_iは測定ポイントiにおける地上測定値である。

合わせて一致度を数値的に評価するために Root Mean Square Error（以下「$RMSE$」という。）を算出した。$RMSE$の算出式を（4）に示す。

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{N}(Y_i - G_i)^2}{N}} \tag{4}$$

ここでNは全測定ポイントのデータ数である。

また他の評価指標として、Normalized Mean Square Error（以下「*NMSE*」という。）及び相関係数rを算出した。*NMSE*を（5）に、rを（6）に示す。

$$NMSE = \frac{\sum_{i=1}^{N}(Y_i - G_i)^2}{\sum_{i=1}^{N} {G_i}^2} \tag{5}$$

$$r = \frac{\sum_i^N (Y_i - \bar{Y})\,(G_i - \bar{G})}{\sqrt{(\sum_i^N (Y_i - \bar{Y})^2)(\sum_i^N (G_i - \bar{G})^2)}} \tag{6}$$

ここで$\bar{Y}$と$\bar{G}$は各値の平均である。

2.6. 結果と考察

2.6.1. 森林遮蔽減衰率について

表 2-1 で示したすべてのエリアのデータを用いて算出した、線量率比と推定樹高の関係を図 2-6 に示す。図 2-6 において推定樹高は 2 m 以上の値を用いており、2-5 m、5-10 m、10-15 m、15-20 m、20-25 m、25-30 m でデータを分類し、各高さにおける線量率比の中央値と推定樹高の中央値の関係性を示している。各ポイントで示しているバーは各値の標準偏差、n はデータ数を示している。線量率比は推定樹高に伴い指数関数的に減衰する傾向が見られた。線量率比と推定樹高の関係から得られた近似式を（7）に示す。

$$F_h(h) = \exp(-FF \cdot h)\ \ (2 < h) \tag{7}$$

ここでF_hは森林遮蔽減衰率である。フィッティングの結果、FF=0.0152 m^{-1}が得られた。

図 2-7 はエリア 1 において得られた線量率比と推定樹高の関係を、夏と秋、常緑樹と落葉樹ごとに分けて示したものである。季節変動及び樹木の違いによる森林遮蔽係数の大きな違いは見られなかった。これは樹木の葉の存在の有無による遮蔽効果の変動が軽微であり、測定誤差により変動を検知できなかったと考えられる。本章では森林遮蔽減衰率は推定樹高に依存するものとし、樹種や葉の存在量によるパラメータの変更はしないこととした。

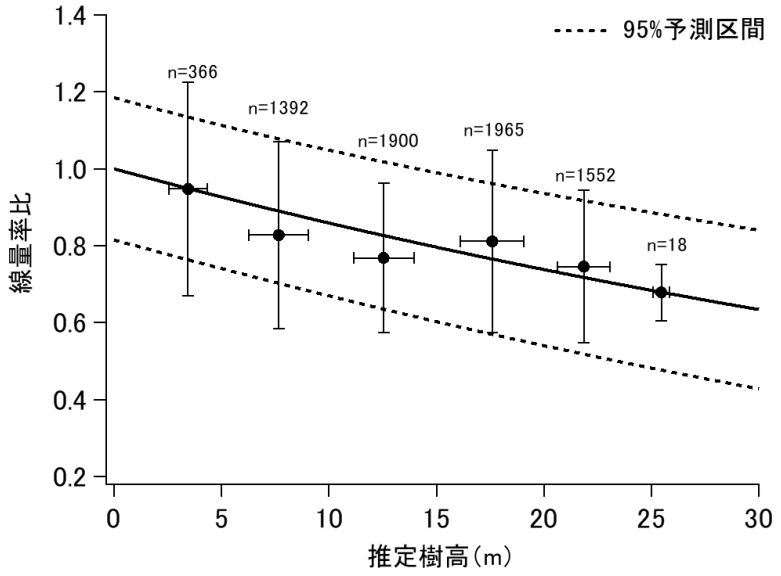


図　2-6　推定樹高と線量率比の関係

黒いラインはポイントに対する近似曲線、黒い点線は 95%予測区間、バーは各軸の値の標準偏差、n はデータ数である。

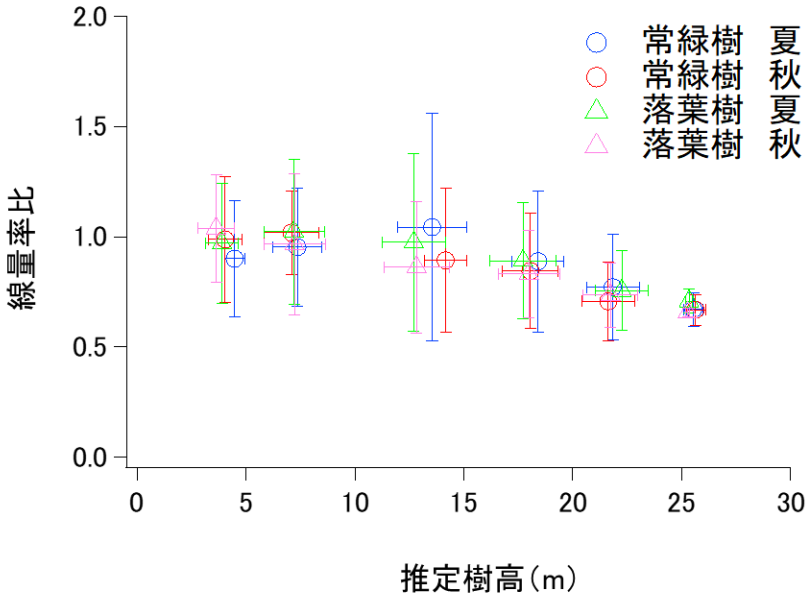


図　2-7　季節及び樹種による森林遮蔽の違い

表　2-1 のエリア 1 において取得した値であり、2 年分（計 4 回分）のデータから算出している。

2.6.2. 換算結果の比較

図 2-8 はエリア 1（2017 年 6 月）における空間線量率を測定した結果を示している。図 2-8（a）はエリア 1 の様子を示している。エリア 1 は常緑樹と落葉樹が混在したエリアであり、南東には畑等が存在する。エリア内には小さな川が流れており、それに沿った湿地帯が存在した。またエリア東側にはきのこの原木がある箇所が存在した。図 2-8（b）は常緑樹と落葉樹に分布を示している。図 2-8（c）は地上測定値、（d）は FSM を用いて換算した値、（e）は FSFM を用いて換算した値である。図 2-9 はエリア 1 における地上測定値と上空測定換算値を比較したRDのヒストグラムである。

図 2-8（c）の地上測定値では、エリア内にある小川のカーブがある箇所がスポット的に線量が高い傾向であることが分かった。またキノコの原木周辺は、キノコの原木がホットスポットとなっており、周囲と比較して高い空間線量率であった。図 2-8（d）の FSM による換算結果では（c）のような地上測定値の分布を再現することはできず、図 2-9 の（a）のRD中央値は-0.213 と全体的に低く換算された。これは樹木の存在による遮蔽を考慮していないことが大きな原因と考えられる。図 2-8（e）の FSFM を用いた結果では、おおよそ地上測定値に近い空間線量率の分布を得ることができ、図 2-9 の（b）のヒストグラムではRD中央値が 0.019 となり、FSM に比べRD中央値を 0 に近づけることができた。また FSM では $RMSE$ が 0.303 だったのに対し、FSFM では 0.236 に減少した。これらの結果より、エリア 1 では FSFM を用いることで、FSM に比べ、より地上測定値に近い分布を得ることができたと考えられる。しかし、小川付近のいくつかのホットスポット等を再現することはできなかった。

図 2-10 はエリア 2 における空間線量率を測定した結果であり、図 2-10（a）はエリアの様子、（b）は地上測定値、（c）は FSM を用いて換算した値、（d）は FSFM を用いて換算した値を示している。エリア 2 は西側にグラウンドのような平地が存在し、エリア中央は森林に重機等を入れるための道が存在した。図 2-11 はエリア 2 における各換算値と地上測定値を比較したRDのヒストグラムである。

図 2-10（c）の FSM による換算結果は、エリア 1 と同様に（b）の地上測定値と比較して低めに換算され、図 2-11（a）のヒストグラムを見てもRD中央値は-0.126 と全体的に低く換算された。図 2-10（d）の FSFM の換算結果では図 2-10 に示した白い点線で囲んだ森林エリアの空間線量率の分布を FSM に比べ、より地上測定値に近い分布として表すことができた。図 2-11（b）のヒストグラムを見ると、RD中央値は 0.026 と FSM に比べマイナス側へのピークの偏りが改善され、また FSM では $RMSE$ が 0.066 だったが、FSFM では 0.046 とわずかに減少を確認できた。これらの結果より、エリア 2 では FSFM を用いることで、FSM に比べ、より地上測定値に近い分布を得ることができたと考えられる。しかし、図 2-10（d）の FSFM の結果は（b）の地上測定値にある細かな線量率の勾配（西側の平地における線量率の低いエリアや、森林内の線量率分布）を再現することはできなかった。

エリア 1 及び 2 において、地上測定値にある細かな線量率の勾配を再現できなかった原

因は、上空における測定では地上測定で見られたホットスポット等は周囲の低い線量率と平均化された状態で測定され、FSM のパラメータに森林遮蔽の効果を付け加えたのみの FSFM による換算では再現できなかったことが大きな原因と考えられる。またエリア 1 では小川等があり、ホットスポットとなっている湿地帯の箇所は土壌に水分が多く含まれていた。土壌の状態の違いによる遮蔽効果の違いも線量率の勾配を再現できなかった原因の一つと考えられる。

表 2-3 は表 2-1 で示した全エリアにおける、上空測定換算値と地上測定値の *RMSE*、*NMSE*、r、RDの中央値と標準偏差一覧を示している。FSFM で換算した値と FSM で換算した値の *RMSE* を比較すると、FSFM の値は全てのエリアで減少を確認できた。またほとんどのエリアで *NMSE* の減少、相関係数の上昇、*RD* 中央値の絶対値の減少が見られた。これらの結果から、FSFM は FSM に比べ、より地上測定値に近い値に換算できたと考えられ、また本章で取得した森林遮蔽減衰率はおおよそ適切な値が得られたと考えられる。

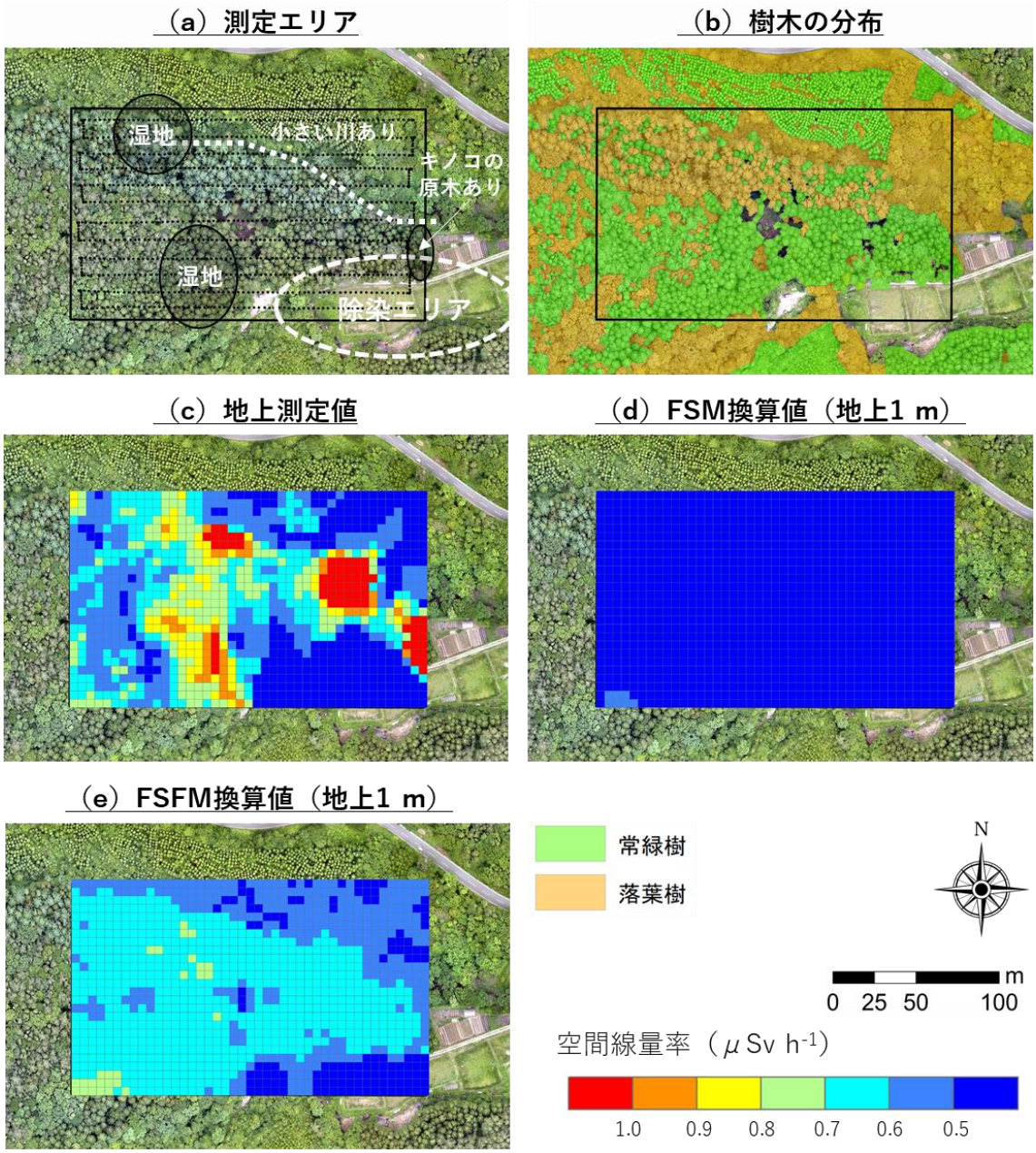


図 2-8 エリア１における空間線量率分布

(a) は無人ヘリコプターの測定ポイントを示したもの、(b) は常緑樹と落葉樹の分布、(c) は地上において歩行式サーベイメーターを用いて測定した空間線量率、(d) は FSM により、(e) は FSFM により無人ヘリコプターを用いて上空で取得した放射線測定値を地上 1 m 空間線量率に換算した結果である。背景の写真は上空写真撮影から作成したオルソ画像である。

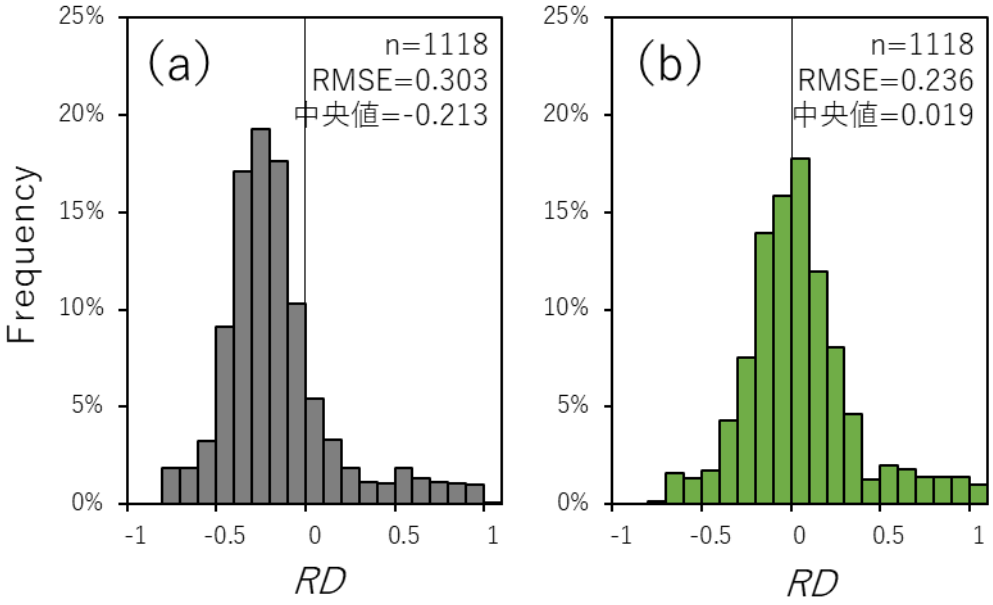


図 2-9 エリア 1 における地上測定値と上空測定換算値のRDヒストグラム

（a）は FSM 換算値と地上測定値のRD、（b）は FSFM 換算値と地上測定値のRDである。
ヒストグラムの右端の値は$RD \geqq 1$ の Frequency である。

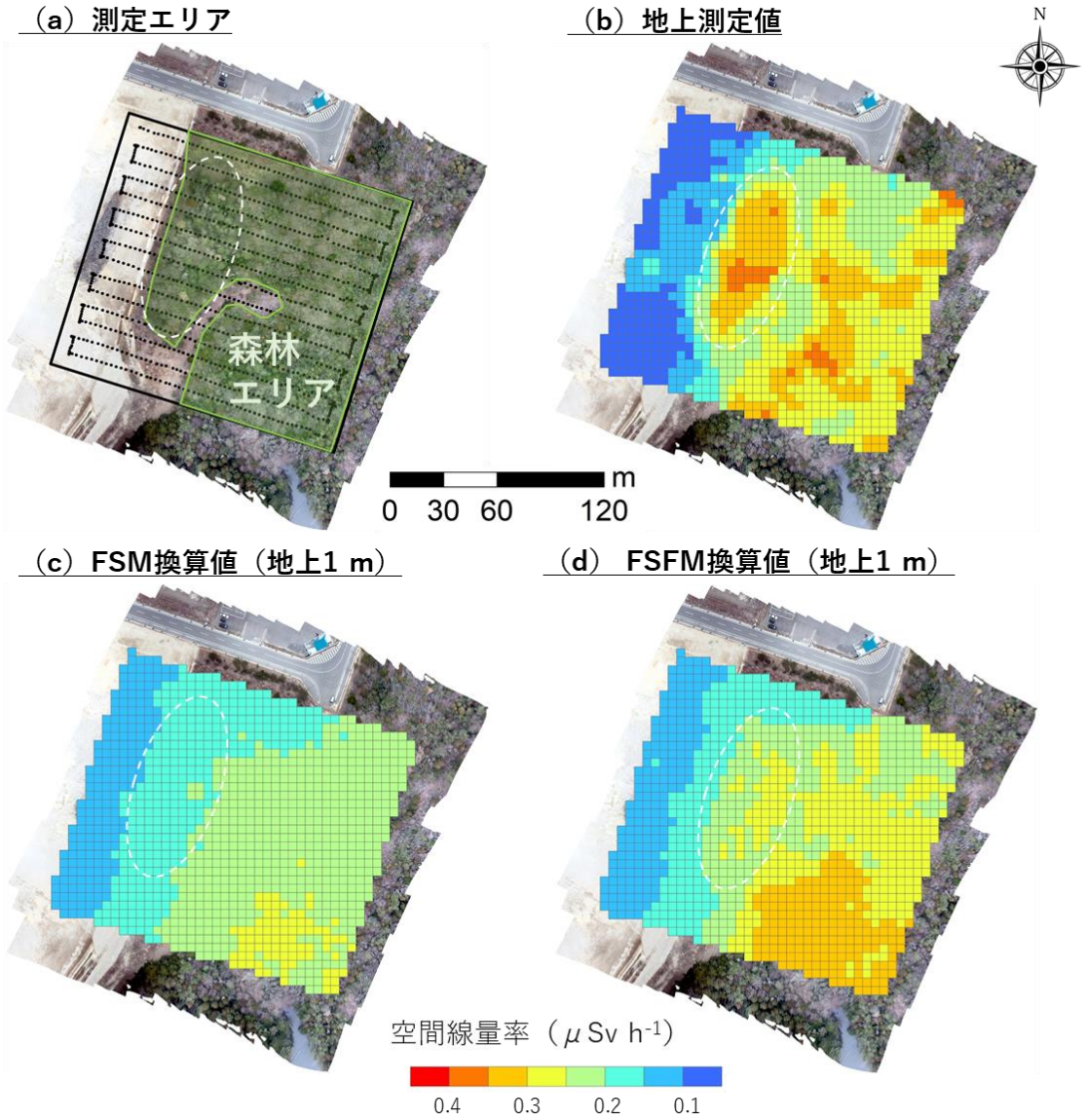


図 2-10 エリア 2 における空間線量率分布

（a）は無人ヘリコプターの測定ポイントを示したもの、（b）は地上において歩行式サーベイメーターを用いて測定した空間線量率、（c）は FSM により、（d）は FSFM により無人ヘリコプターを用いて上空で取得した放射線測定値を地上 1 m 空間線量率に換算した結果である。背景の写真は上空写真撮影から作成したオルソ画像である。

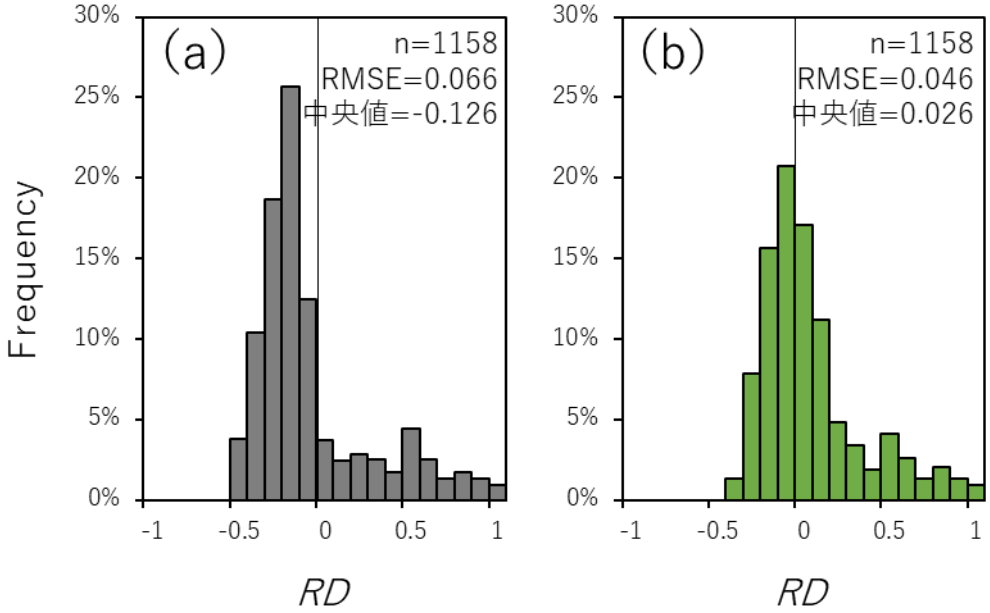


図 2-11 エリア 2 における地上測定値と上空測定換算値の*RD*ヒストグラム

(a) は FSM 換算値と地上測定値の*RD*、(b) は FSFM 換算値と地上測定値の*RD*である。ヒストグラムの右端の値は*RD*≧1 の Frequency である。

表 2-3 各エリアにおける上空測定換算値の地上測定値との比較

	RMSE		NMSE		相関係数		RD 中央値		RD 標準偏差	
エリア	FSM	FSFM	FSM	FSFM	FSM	FSFM	FSM	FSFM	FSM	FSFM
1	0.303	0.236	0.196	0.119	0.352	0.459	−0.213	0.019	0.322	0.330
	0.255	0.196	0.172	0.101	0.425	0.482	−0.196	0.036	0.299	0.308
	0.198	0.194	0.144	0.139	0.461	0.430	−0.047	0.240	0.367	0.388
	0.170	0.138	0.124	0.081	0.463	0.556	−0.094	0.105	0.316	0.306
2	0.066	0.046	0.073	0.036	0.838	0.866	−0.126	0.026	0.416	0.368
3	0.775	0.504	0.127	0.051	0.352	0.195	−0.355	−0.222	0.127	0.051
4	0.452	0.322	0.084	0.042	0.773	0.813	0.169	0.045	0.071	0.087
5	0.416	0.297	0.080	0.041	0.758	0.804	0.141	0.040	0.151	0.110

２.７． まとめ

本章では、森林の林床に放射性セシウムが沈着したエリアを無人機を用いて上空から放射線測定を行い、同エリアの地上測定値と比較することで森林の存在による放射線の遮蔽率（森林遮蔽減衰率）を実測データから算出した。また従来、使用されてきた手法（FSM）に森林遮蔽の要素を新たに加えた換算手法（FSFM）の開発及び評価を行った。

森林遮蔽減衰率は、上空測定値を地上 1m に換算した値と地上測定値の線量率比と、DSM から DEM を引いた推定樹高の関係性から算出した。季節や樹種ごとに森林遮蔽減衰率を比較したが、上空からの測定結果では大きな減衰傾向の違いは見られなかった。

放射性セシウムで汚染された森林エリアにおいて上空から放射線測定を行った値に対して、本章で得られた森林遮蔽減衰率を使用した FSFM を用いることで、従来の森林遮蔽減衰率を使用していない FSM に比べ、より地上測定値に近い値に換算できることが分かった。本章で得られた森林遮蔽減衰率は適切な値が得られたと考えられる。

本章で得られた森林遮蔽減衰率は放射性セシウムにより主に汚染されたエリアで取得されたものであり、また林床に放射性セシウムが存在する状態において得られたデータである。存在する線源の崩壊エネルギーが大きく異なる場合、森林遮蔽減衰率はエネルギーに応じで変更する必要がある。また樹木に水滴等が多く付着している場合、葉の量に応じて森林遮蔽減衰率の減衰傾向は、わずかに減衰が大きくなると考えられる。合わせて放射性物質の付着状態や場所がまばらな場合、遮蔽率は場所に応じて変化すると考えられる。

本章における FSFM による換算は FSM に森林の遮蔽因子を追加しただけであり、換算において仮定しているモデルは平面で線源が均一分布の体系を用いている。よって地形効果や各線源分布状況を考慮できていない。細かな森林の汚染状況等に応じた詳細な空間線量率分布の解析を行うためには、上空からの放射線測定及び写真撮影だけではなく、3D レーザースキャン等を用いた森林状態の把握及びエリア情報（線源付着状況、積雪情報、土壌水分含有量等）を取得し解析に反映する必要がある。また周辺の地形情報等を考慮した新たな換算アルゴリズムの開発等を行う必要がある。

２.８. 参考文献

1) 林野庁，都道府県別森林率・人工林率（平成 29 年 3 月 31 日現在）. https://www.rinya.maff.go.jp/j/keikaku/genkyou/h29/1.html (最終閲覧日:2021 年 3 月 11 日).
2) 林野庁，令和元年度 森林内の放射性物質の分布調査結果について. https://www.rinya.maff.go.jp/j/kaihatu/jyosen/R1_jittaihaaku.html (最終閲覧日：2021 年 3 月 11 日).
3) ヤマハ発動機株式会社，産業用無人ヘリコプター FAZER R G2. https://www.yamaha-motor.co.jp/ums/solution/fazer_r_g2.html (最終閲覧日：2021 年 3 月 11 日).
4) R. Nicolini, F. Camera, N. Blasi, S. Brambilla, R. Bassini, C. Boiano, A. Bracco, F.C.L. Crespi, O. Wieland, G. Benzoni, S. Leoni, B. Million, D. Montanari and A. Zalite. Investigation of the properties of a 1”× 1” LaBr3:Ce scintillator. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment. 582, 2, 21, 554-561 (2007).
5) 国土交通省，国土地理院，基盤地図情報サイト. https://www.gsi.go.jp/kiban/ (最終閲覧日：2021 年 3 月 11 日).
6) International Atomic Energy Agency. Guidelines for radioelement mapping using gamma ray spectrometry data. IAEA-TECDOC-1363 (2003).
7) Environmental Systems Research Institute Inc. ArcGIS. https://www.esrij.com/products/arcgis/ (最終閲覧日：2021 年 3 月 11 日).

第３章　MLEM を用いた換算手法の開発

３.１.　はじめに

第 2 章では森林遮蔽減衰率を取得し、それを考慮した換算手法により、森林エリアの換算精度を向上させることができた。しかし FSFM の計算仮定モデルは平面体系を用いており、測定エリアの地形効果を考慮していない。

本章の目的は森林遮蔽効果に加え、地形効果を考慮した、新たな上空からの放射線測定値の換算手法の開発及び評価である。本章では従来、医療分野において画像再構成技術として使用されている MLEM を用い、地形効果等を考慮した換算手法を開発した [1,2]。

MLEM は逆問題解析手法であり、逐次近似法の一種である。逐次近似法としては他に、最小二乗法等を用いた勾配法や、Simultaneous reconstruction technique（以下「SIRT」という。）等がある [3]。それぞれ適用を試みたが、勾配法を用いた解析は初期値の設定に結果が大きく左右され、適切な初期値を与えなければ正解値に近い換算結果が得られず、解析者のノウハウが必要となるため本研究では採用しなかった。SIRT は、MLEM の換算結果と比較して、換算精度が低かったため採用しなかった。図 3-1 に MLEM と SIRT を用いた換算結果の比較を示す。MLEM は他の解析手法と比較して、初期値にあまり依存せず、他の手法と比較して換算精度が高かったため本研究で採用した。

本章では MLEM を用いた換算を、実験室内において線源を設置し測定した値とシミュレーションで算出した模擬測定値に対する適用（以下「ベンチマークテスト」という。）と、福島県内において 1F の事故による放射能汚染の影響を受けたフィールドにおいて無人ヘリコプターで上空から測定した値に対する適用（以下「フィールドテスト」という。）を実施し、評価を行った。ベンチマークテストでは本研究で作成した MLEM による換算アルゴリズムの妥当性及び換算特性の評価を行い、フィールドテストでは FSM と MLEM の換算値を地上測定値と比較することで、MLEM による換算の精度評価を行った。また上空からの放射線測定における測定分解能を算出し、測定分解能を考慮した FSM 及び MLEM の換算特性の評価を行った。

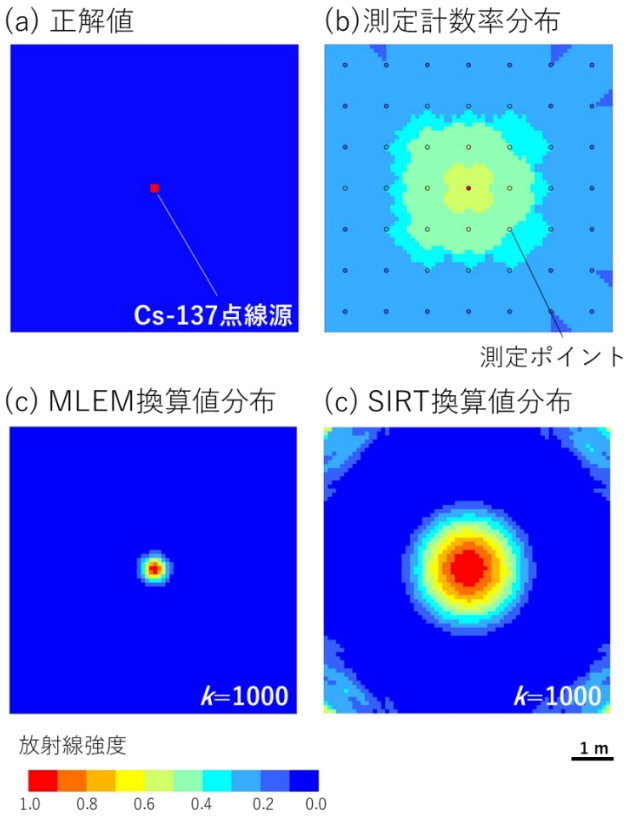


図 3-1 MLEM と SIRT の換算結果の比較

（a）は実際の線源分布である正解値、（b）は測定した計数率ポイントと計数率にクリギング処理を行ったマップ計数率分布、（c）は（b）の計数率ポイントを使用し MLEM で換算した分布、（d）は SIRT で換算した分布である。

3.2. MLEM 法

3.2.1. 換算理論

放射線源から離れた場所で測定を行ったとき、様々な遮蔽の影響を受け、減衰された状態の放射線が検出器でカウントされ測定値として得られる（図 3-2 参照）。この結果（測定値）から、測定値の原因となる線源の位置や強度を推定しようとした場合、線源から検出器に至るまでどのような減衰影響を受けるのか分かっていれば、定式化することができる。例えば線源が 100 cps であったとき、空気等の影響により値が半分に減衰することが分かっていれば、測定値は 50 cps 得られることが分かる。この計算過程は順問題となるが、本研究は測定値から原因となる線源強度分布を推定する逆問題を解くこととなる。先ほどの例であれば、測定値が 100 cps 得られたとき線源は 200 cps であると、解析的に線源を推定することができる。しかし求める値（線源）が、得られる値（測定値）の数より多い場合、解析

的に式を解くことはできない（図 3 -2 参照)。

求める値が多く、解析的に解くことが難しい大規模な逆問題に有効な方法として、逐次近似法がある。これは測定値と、仮定した状況で得られた算出データを比較し、その差を小さくするように、逐次、仮定した値を修正する方法である [4]。逐次近似法は医療分野等において、CT や MRI などの画像再構成に対して適用が行われており、Shepp らは放射型 CT に適用する EM（expectation maximization）アルゴリズムを提案した [2]。MLEM はそのＥＭアルゴリズムを用いた逐次近似画像再構成法である。以下に、MLEM の逐次近似式導出の流れを示す。

MLEM では測定値の確率分布はポアソン分布に従うことを仮定し計算を行う。本研究では、ある上空における測定ポイントiで平均測定値（実際に測定された値）がy_i（cps）得られるとき、測定値がη_i（cps）となる確率$L_{(\eta_i)}$はポアソン分布に従う式（8）で得られると考える。

$$L_{(\eta_i)} = \frac{y_i^{\eta_i}}{\eta_i!}\exp(-y_i) \tag{8}$$

このとき測定値y_iは地表面等における線源強度λ_j（cps）に、検出される効率C_{ij}をかけたものを合算したものと仮定する（式（9))。

$$y_i = \sum_{j=1}^{B} \lambda_j C_{ij} \tag{9}$$

ここでBは地上における線源存在ポイントjの総数、jは換算計算を行う計算ポイントである。ここで全ての測定値が（$\eta_1, \eta_2, \ldots, \eta_D$）となる確率$L_{(\boldsymbol{\eta})}$は式（10）で得られる。

$$L_{(\boldsymbol{\eta})} = \prod_{i=1}^{D} \frac{\left(\sum_{j=1}^{B} \lambda_j C_{ij}\right)^{\eta_i}}{\eta_i!}\exp\left(-\sum_{j=1}^{B} \lambda_j C_{ij}\right) \tag{10}$$

測定値が$\boldsymbol{\eta}$になる場合、もっとも確からしい線源強度λ_jは確率$L_{(\boldsymbol{\eta})}$を最大にするものである。最尤推定値をλ_jとし、対数尤度関数$\log L$のλ_jによる偏微分が 0 となる式を解くことで、式（11）が得られる。

$$\frac{1}{\sum_{i=1}^{D} C_{ij}} \sum_{i=1}^{D} \frac{y_i C_{ij}}{\sum_{j=1}^{B} C_{ij} \lambda_j} = 1 \tag{11}$$

これより逐次近似式（12）が得られる。

$$\lambda_j^{(k+1)} = \frac{\lambda_j^{(k)}}{\sum_{i=1}^{D} C_{ij}} \sum_{i=1}^{D} \frac{y_i C_{ij}}{\sum_{j=1}^{B} C_{ij} \lambda_j^{(k)}} \tag{12}$$

ここでkは反復計算回数である。式（12）で得られた逐次近似式を用いて、本研究では上空における測定値から地上 1 m における線源強度を求めた。MLEM による計算の各種値のイメージを図 3 -3 に示す。なお式（12）で重要なパラメータはC_{ij}であり、これをどのように設定するかで換算結果が変わる。C_{ij}の詳細な設定については３.２.２.で示す。

本研究では換算計算を行う計算ポイント j は地上から 1 m 高さのポイントに設定した。本来、jは地表面に設置した状態でλ_jを算出し、得られたλ_jから新たに地上 1 m における測定値の推定値を算出するべきであるが、両者の換算結果を比較した結果、大きな違いは見られなかったため、計算工程を簡略化し、計算ポイント jは地上から 1 m 高さのポイントに設定した。

式（12）で得られる値は線源強度であり、空間線量率へ換算する必要がある。本研究では MLEM で得られた地上線源強度を空間線量率へ換算するために、空間線量率換算係数 CD_{MLEM}（μSv h^{-1} cps^{-1}）の作成を行った。以下にCD_{MLEM}作成の流れを示す。

1） MLEM で換算する同エリアにおいて、FSM で地上 1 m 空間線量率を算出する。
2） MLEM で得られた線源強度と FSM で得られた空間線量率で散布図を作成する。
3） 散布図に線形近似を行い、線源強度を空間線量率に換算するCD_{MLEM}を取得する。

なお MLEM で得られた線源強度と実際の地上測定値の関係性からCD_{MLEM}を取得し、線源強度を空間線量率に変換する手法も試みたが、その場合、各エリアごとに換算値と地上測定値との誤差が安定する反復計算回数kが異なった。線源強度と FSM で得られた空間線量率からCD_{MLEM}を取得し換算することで、線源強度と実際の地上測定値の関係性から得られたCD_{MLEM}よりも換算精度は若干劣るが、換算値と地上測定値との誤差が安定するkを一定にすることができた。本研究では、地上測定値がない状態でも最適なkで値を取得できるように線源強度と FSM で得られた空間線量率の関係性から得られたCD_{MLEM}を用いることとした。

MLEM で得られたλ_jは式（13）を用いて空間線量率R_j（μSv h^{-1}）へ換算した。

$$R_j = \lambda_j \cdot CD_{MLEM} \tag{13}$$

MLEM で得られた値をそのまま使用すると、特定の場所に線源が集中したマップが得られ、実際の地上線源分布との誤差が大きくなる場合が多々あった。図 3-4 に線源分布が局所化した例を示す。MLEM の換算結果が局所化する理由としては、測定誤差及び設定パラメータの誤差が起因していると考えられる。本研究では MLEM で得られた局所的な分布を抑えるために、空間線量率換算後にフィルタリング処理を行った。フィルタリング処理では、ある空間線量率R_jから、作成したjのメッシュ幅の倍の大きさの半径範囲内にあるRを抽出し平均値を算出、R_jが平均値の 2 倍以上であった場合、R_jを算出した平均値に置き換える処理を行った。図 3-4 に置き換える処理の閾値を平均値の 2 倍以上、3 倍以上、4 倍以上、5 倍以上の場合の結果を表示している。本研究では図 3-4 のフィルタリングの結果から、閾値を 2 倍とした。

本研究ではフィルタリング処理を行って得られたR_jを用いて得た空間線量率$Y_{MLEM\ j}$（μSv h^{-1}）を MLEM で換算した地上 1 m の空間線量率とする。MLEM による換算の流れを図 3-5 に示す。本研究における MLEM による換算は、C++によりプログラムを作成し、値の算出を行った。

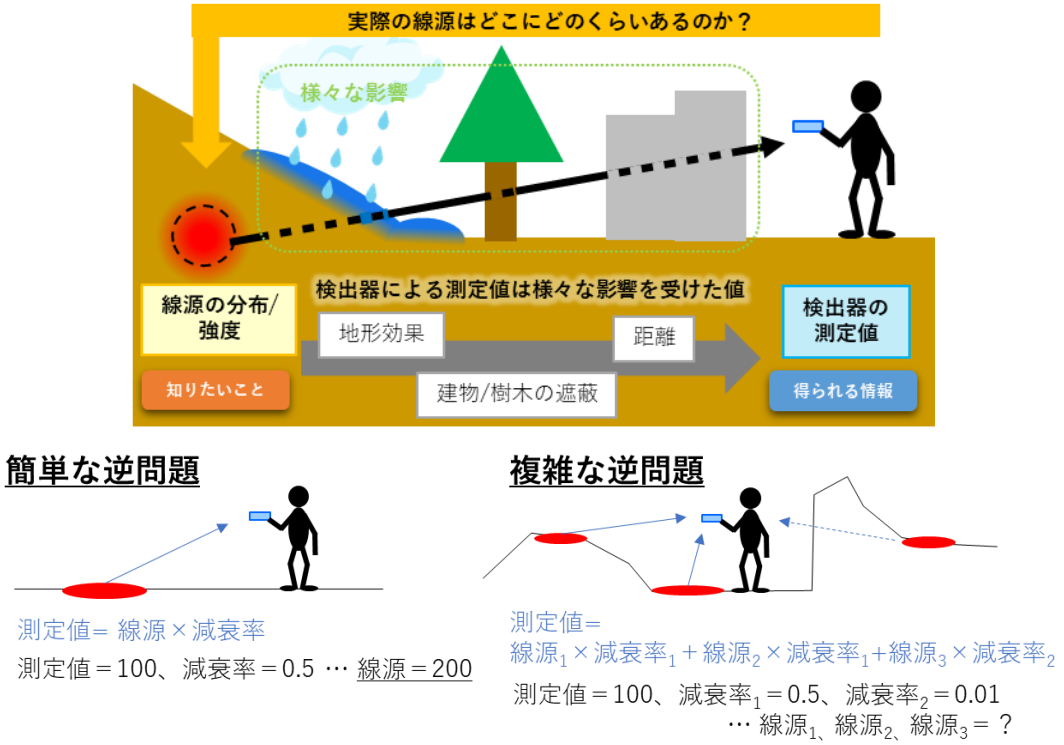


図 3-2 放射線測定値から線源の強度分布を推定するイメージ

離れた箇所から放射線源を推定する場合、複雑な逆問題解析を行うこととなる。

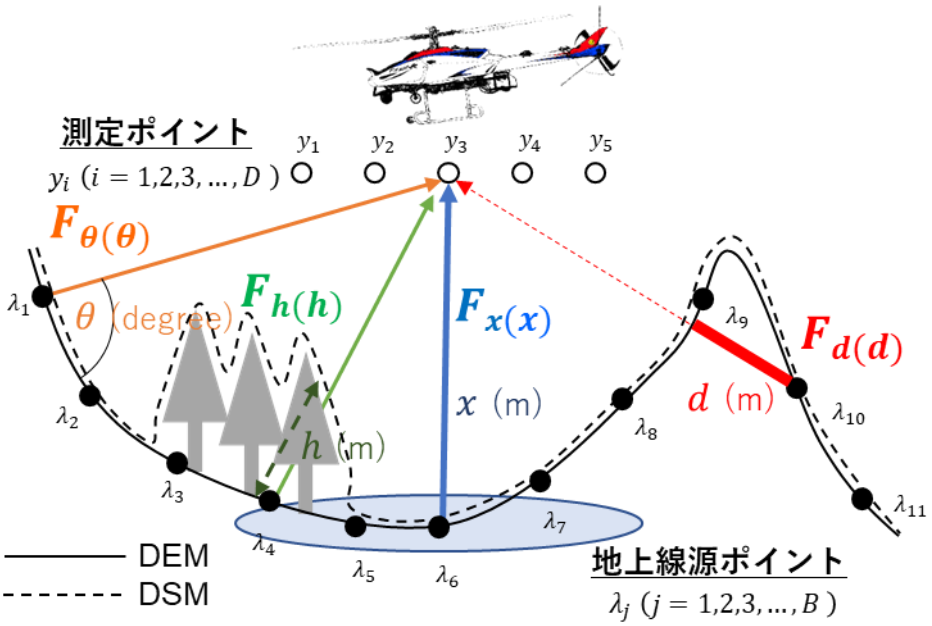


図 3-3　MLEM におけるC_{ij}に寄与する因子

MLEM による換算では地上線源ポイント（計算ポイント：j）から測定ポイント iに、放射線がどのような減衰影響を受けて到達するのか、減衰のパラメータC_{ij}を設定する必要がある。

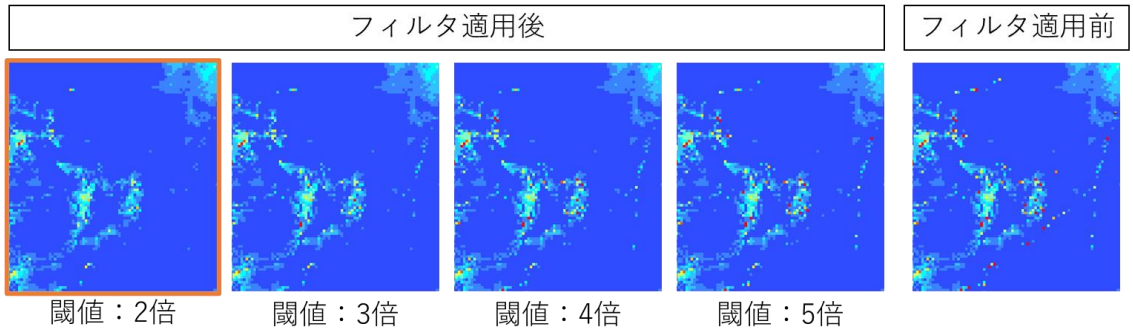


図 3-4　MLEM 換算における線量分布の局所化の例及びフィルタリング処理結果

分布のメッシュは 10 m 間隔である。

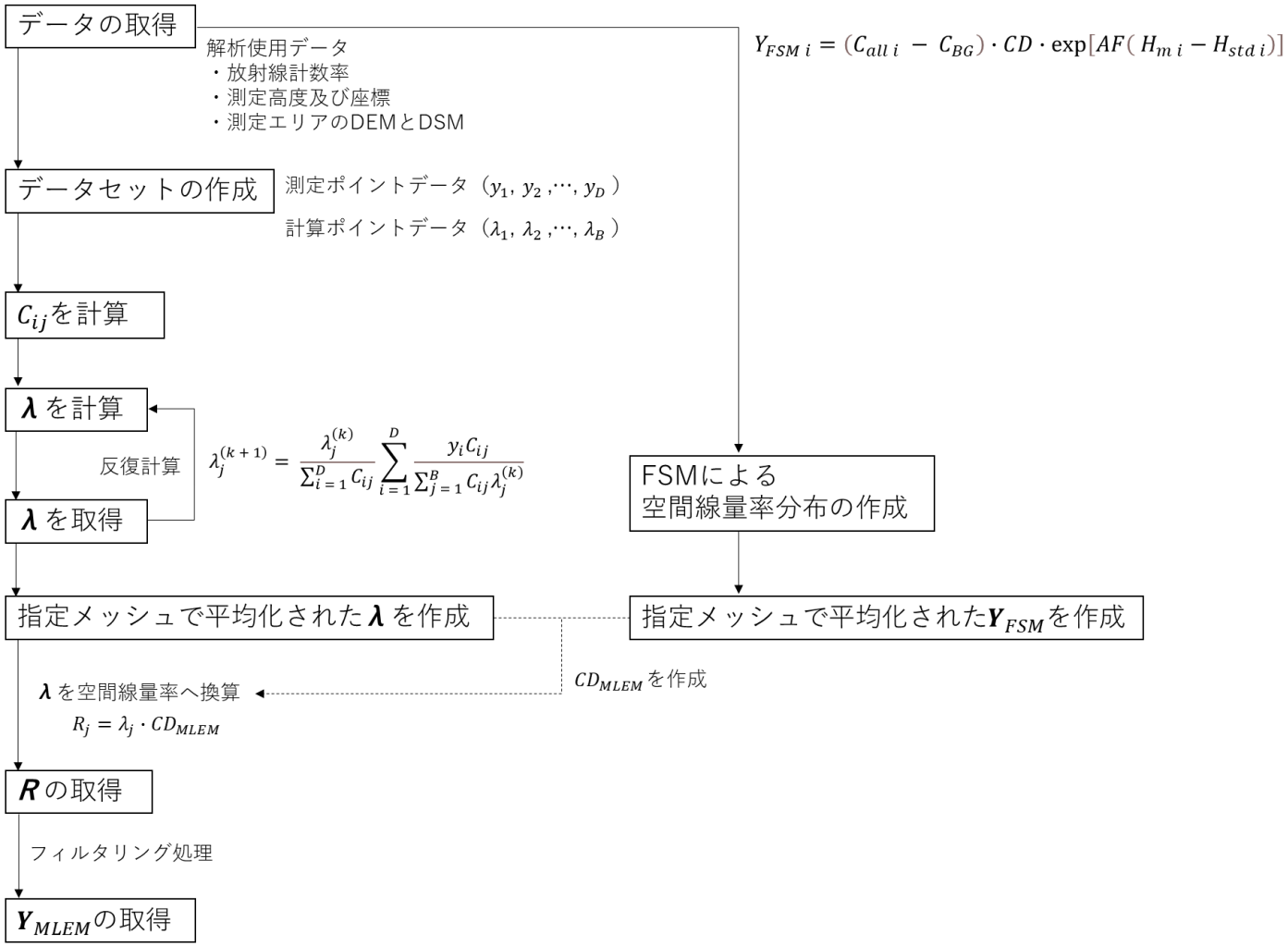


図 3-5 MLEM 換算計算フロー

3.2.2. 使用したパラメータについて

本研究では MLEM による換算で使用するC_{ij}に 4 つのパラメータを用いた。C_{ij}を式（14）に示す。

$$C_{ij} = F_x(x) \cdot F_\theta(\theta) \cdot F_h(h) \cdot F_d(d) \tag{14}$$

ここで$F_x(x)$は測定ポイントi―計算ポイントj間の線分の距離x（m）に応じた空気減衰率、$F_\theta(\theta)$は$i-j$を結ぶ線分と地面のなす角 θ（[π /180]rad）から得られる土壌散乱減衰率、$F_h(h)$は$i-j$間の線分上における DSM 通過距離h（m）に応じた森林遮蔽減衰率、$F_d(d)$は$i-j$間の線分上における DEM 通過距離d（m）に応じた地形遮蔽率である。x、θ、h、dは図 3-3 に示したものに対応している。各パラメータの説明を以下に示す。

3.2.2.1. 空気減衰率

空気減衰率は$i-j$間の距離x（m）に応じた空気による減衰を表している。空気減衰率はモンテカルロ計算コードの一種である Particle and Heavy Ion Transport code System :Version= 3.110（以下「PHITS」という。）を用いて、点線源が土壌の上（0-1 mm）に存在している状態で、点線源からの距離に応じた測定面に対する光子の入射数を算出した[5]。計算結果を図 3-6 に示す。

図 3-6 では 3 つの I-131（364 keV）、Cs-137（661 keV）、K-40（1461 keV）の点線源の場合における減衰を示している。図 3-6 を見ると、xが短い場合においては放射線のエネルギーごとの減衰率の変化は見られないが、xが 400 m を超えると減衰率が異なることが分かる。本研究では測定対地高度 50～150 m 程度のデータを取扱う。よって放射線のエネルギーごとの減衰率の設定は行わず、測定エリアに汚染物質としてメインで存在する Cs-137 の減衰率を用いて換算を行った。xが 100 m 以下とそれ以上では減衰傾向が異なったため、図 3-6 で取得した値の、xが 100 m 以下の場合、100～400 m の場合、400 m 以上の場合の 3 つの領域に分け、フィッティングを行った。フィッティングで得られた式を（15）（16）（17）に示す。本研究ではα=-2.036、t＝3.475E-07、x_0＝100、A_1＝3.298E-05、A_2=5.144E-05、T_1＝26.953、T_2＝73.272、A_3＝8.707E-05、β＝-0.0108 を使用した。

$$F_{x1}(x) = x^{-\alpha}\ (x \leq 100) \tag{15}$$

$$F_{x2}(x) = t + A_1 \cdot exp\left(\frac{-(x-x_0)}{T_1}\right) + A_2 \cdot exp\left(\frac{-(x-x_0)}{T_2}\right)\ (100 < x \leq 400) \tag{16}$$

$$F_{x3}(x) = A_3 \cdot exp(-\beta x)\ (400 < x) \tag{17}$$

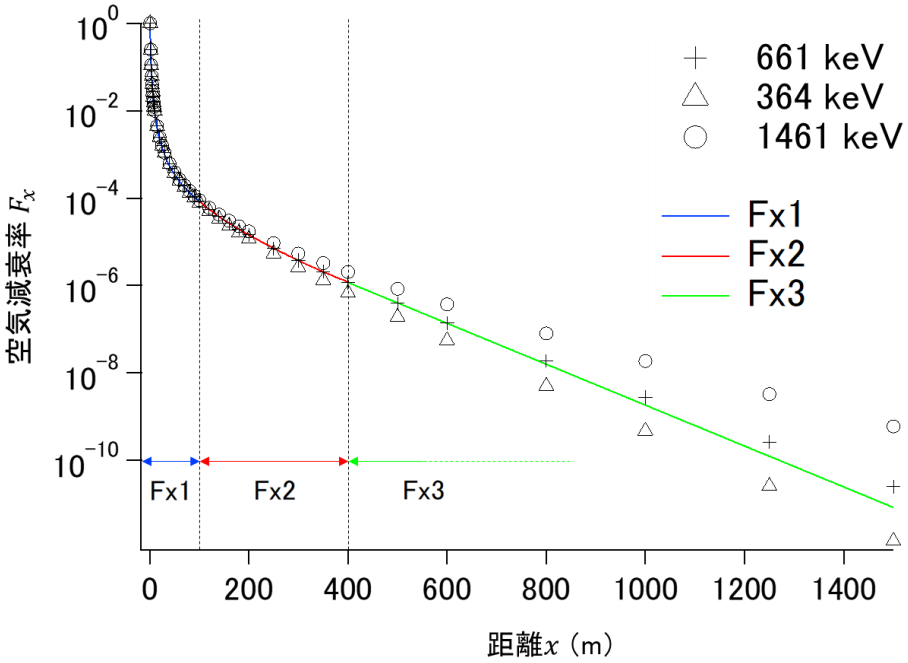


図 3-6　PHITS により算出した空気減衰率

I-131（364 keV）、Cs-137（661 keV）、K-40（1461 keV）の 3 種類の点線源で減衰率を算出し、近似曲線のフィッティングは 661 keV の結果に対して 3 つの式を用いて行った。

3.2.2.2. 土壌散乱減衰率

土壌散乱減衰率は$i-j$を結ぶ線分と地面のなす角 θ（[π/180]rad)に応じた土壌による放射線の散乱効果を表している。 土壌散乱減衰率は PHITS（Version= 3.110）を用いて、点線源が土壌の上（0-1 mm）に存在し、点線源から距離 10 m の位置に角度ごとに半径 10 ㎝の球上の検出面を設置、検出面に対する光子の入射数を算出した。計算体系のイメージを図 3-7 に、計算結果を図 3-8 に示す。図 3-8 では 3 つの I-131（364 keV)、Cs-137（661 keV)、K-40（1461 keV）の点線源で計算した結果を示している。放射線のエネルギーで若干の減衰率の違いが見られたが、大きな値の変化ではないため、本研究では放射線のエネルギーごとの減衰率の設定は行わず、Cs-137 の減衰率を用いて換算を行った。図 3-8 で取得した値から得られた近似式を（18）に示す。なお θ =90° のとき、線源の真上に検出面がある状態である。本研究ではB_1=1.008、B_2 = -0.365、γ = 0.0428 を使用した。

$$F_\theta(\theta) = B_1 + B_2 \cdot exp(-\gamma\theta)\ (0 < \theta \leq 90) \tag{18}$$

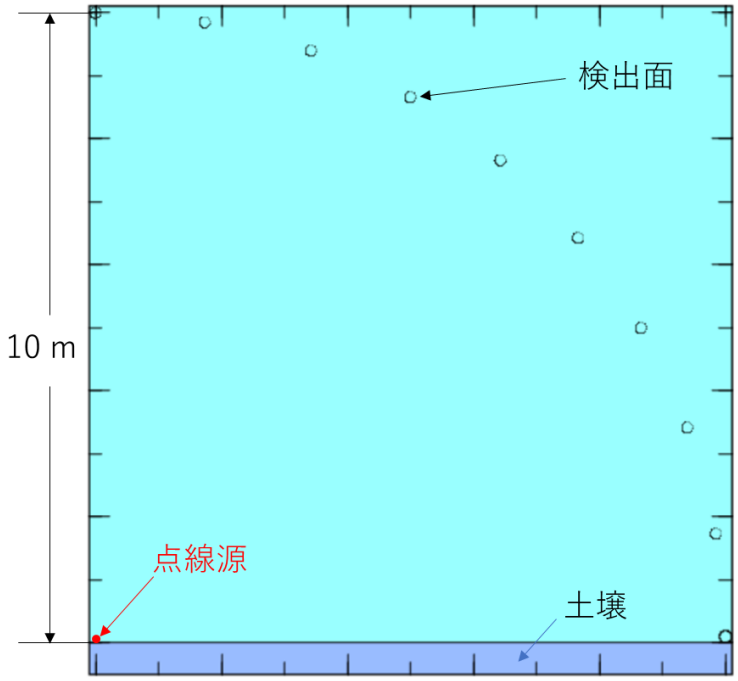


図　3-7　土壌散乱減衰率 PHITS 計算体系

点線源は土壌の上、0-1 ㎜に存在する。

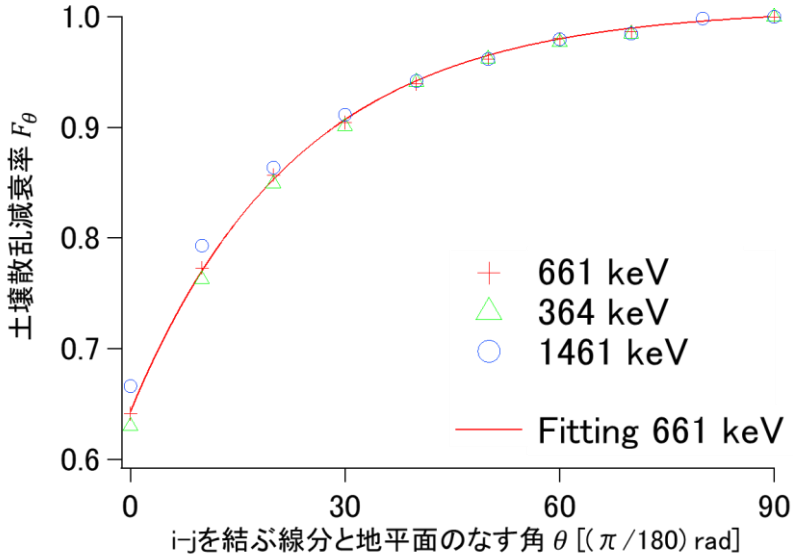


図　3-8　土壌散乱減衰率

PHITS により、図　3-7 の検出面に対する光子入射数を算出した結果である。

フィッティングは 661 keV 線源の結果に対して行っている。

3.2.2.3. 森林遮蔽減衰率

森林遮蔽減衰率は$i-j$間の線分上における平均 DSM 通過距離h（m）に応じた森林による減衰を表している。森林遮蔽減衰率はフィールド試験で得られた経験的なパラメータを用いた。パラメータ算出の詳細については2.6.1.に示す。森林遮蔽減衰率の式は（7）を用い、FFは 0.0152 m^{-1} を用いた。

3.2.2.4. 地形遮蔽率

地形遮蔽率は$i-j$間の線分上における DEM 通過距離d (m) に応じた遮蔽を表している。地形遮蔽率はdが 1 m 以上あった場合、$F_d(d)=0$とし、それ以外は$F_d(d)=1$とした。”汚染土壌の除染領域と線量低減効果の検討”[6] に示されている覆土による線量率の低減の減衰傾向を用いた換算処理の適用も行ったが、上記の計算方法に比べて換算精度が向上しなかったため、本研究では採用しなかった。

3.3. ベンチマークテスト

3.3.1. ベンチマークテストについて

ベンチマークテストでは、室内に線源を設置し測定したデータに対しての MLEM の適用（以下「室内試験」という。）と、シミュレーションにより模擬的な測定値（以下「模擬測定値」という。）を算出し、得られた値に対しての MLEM の適用を行い（以下「シミュレーション試験」という。)、MLEM による換算のテストを行った。

室内試験では点線源を用いた実際の測定データを使用した MLEM による換算の適用を行い、実際の線源分布に近いマップを得ることができるのかテストを行った。

シミュレーション試験では上空における模擬測定値を算出し、その値を用いて MLEM の換算適用を行った。シミュレーション試験では二つの線源の弁別能力を評価した。

3.3.2. 室内試験

室内試験は実験室内に点線源（Cs-137：10 MBq）を設置し、NaI サーベイメータ（TCS-172B：日立アロカメディカル社製）を用いて高さ 1 m におけるガンマ線計数率（cps）を測定した。測定エリアは 7 m × 7 m のエリアであり、1 m メッシュごとに測定を行った。測定の様子を図 3-9 に示す。NaI サーベイメータの時定数は 10 秒とし、5 回読み取った値の平均値を測定ポイントにおける計数率とした。また計数率は線源を設置しない実験室内における計数率をバックグランドとして差し引いた値を用いた。測定は 4 パターン行い、エリア中央に点線源を 1 つ設置したパターン（以下「P0」という。）と、2 つの点線源を 1 m

離して設置したパターン（以下「P1」という。）、2 つの点線源を 2 m 離して設置したパターン（以下「P2」という。）、2 つの点線源を 3 m 離して設置したパターン（以下「P3」という。）の線源配置で測定を行った。

測定した計数率はマッピングソフトウェア（ArcGIS：Environmental Systems Research Institute Inc.）を用いて、クリギング処理を行い内挿補間した [7]。クリギングには球セミバリオグラムモデルを使用した。クリギングで得られた計数率を以下「マップ計数率」という。MLEM による換算は 3.2.2.に示した減衰率を用いて、高さ 0 m における計数率に換算した。MLEM の計算ポイントjは 0.1 m 間隔で作成し、換算計算を行った。測定値と MLEM 換算値は比較のために最大値を 1 として規格化した。

マップ計数率及び MLEM 換算値は 0.1 m 四方のメッシュで平均化し、実際の線源分布（以下「正解値」という。）との誤差を算出し評価した。正解値は線源存在ポイントの値を 1 とし、それ以外は 0 とした。正解値との一致度の評価には (4) に示した *RMSE* を用いた。

MLEM 換算値と正解値との比較は、MLEM のC_{ij}を$F_x(x)$のみ使用した場合と、$F_x(x) \cdot F_\theta(\theta)$を使用した場合で比較することで、$C_{ij}$のパラメータ追加することによる精度変化の評価を行った。また MLEM の反復計算回数kの増加による *RMSE* 変化の評価を行った。

図 3-9 ベンチマークテスト測定試験の様子

NaI サーベイメータの検出部を三脚に固定し、測定を実施した。写真は点線源をエリア中央に設置したとき（P0）の測定風景である。

3.3.3. シミュレーション試験

シミュレーション試験では実際の上空からの測定を模擬するために、上空における模擬測定値を、指定した線源分布（高さ 0 m）で$C_{ij} = F_x(x) \cdot F_\theta(\theta)$とし、(9) に示した式を用いて算出した。上空からの測定における 2 つの線源の弁別能力を見るために、2 つの点線源の配置間隔距離を変化させながら、高さ 20 m と 50 m における 1 m メッシュごとの模擬測定値を算出した。算出した模擬測定値を用いて 1 m メッシュごとの高さ 0 m における線源強度分布を MLEM による換算で算出し、どの程度の線源配置間隔を離すことで線源を 2 つとして認識できるのかを観察した。得られた模擬測定値と MLEM 換算値、設定した線源分布（正解値）は同じ 1m 四方のメッシュでそれぞれの値を比較した。正解値は線源存在ポイントの値を 1 とし、それ以外は 0 とし、得られた模擬測定値と MLEM 換算値は最大値が 1 となるように規格化し、それぞれ比較した。

3.3.4. 結果と考察

室内試験 P0 における測定及び換算結果を図 3-10 に示す。図 3-10 の（a）は実際の線源配置分布（正解値）、(b) はマップ計数率の分布、(c) は MLEM で測定値を換算した結果である。図 3-10 の（c）を見ると、反復計算回数kが増加するごとに正解値である（a）の分布に近づいていることが分かる。また MLEM による換算値はkが多い場合（k＝100、またはk＝1000）、(b) のマップ計数率の分布に比べ、正解値に近い結果となった。正解値との誤差を数値的に評価するため、P0 のマップ計数率と各k における MLEM 換算値と正解値の *RMSE* を算出した結果を図 3-11 に示す。*RMSE* はkの増加と共に減少し、C_{ij}のパラメータが多い換算の方がより *RMSE* が小さくなる（おおよそ 0.05 程度減少する）ことが分かった。*RMSE* の減少は$k > 100$でほぼ値が収束した。

室内試験 P1、P2、P3 における測定及び換算結果を図 3-12 に示す。点線源が近い P1 では MLEM の換算により 2 線源を弁別できなかった。P2 では大まかに 2 線源の弁別をでき、P3 では 2 線源を弁別することができた。P1 において 2 線源を弁別できなかった原因としては、P1 の測定状況において識別できる限界の解像度が 1 m メッシュ以上であり、弁別できなかったと考えられる。

シミュレーションにより算出した各測定高度における模擬測定値及び MLEM 換算結果を比較したグラフを図 3-13 と図 3-14 に示す。図 3-13 は高度 20 m において点線源の配置間隔を 15 m、20 m、25m、30 m にした場合の正解値、模擬測定値、MLEM 換算値を示している。図 3-14 は高度 50m において点線源の配置間隔を 45 m、50 m、55 m、60 m にした場合の正解値、模擬測定値、MLEM 換算値を示している。図 3-13 と図 3-14 を見ると、模擬測定値において線源分布を分離できていない状況でも、MLEM ではおおよそ測定高度程度の点線源の配置間隔距離があれば、線源分布を分離できることが分かった。

室内試験及びシミュレーション試験の結果から、MLEM による換算はC_{ij}のパラメータが適切に設定されていれば、正解値に近い推定値を得ることができることが分かった。ただし測定高度に応じた線源を弁別できる限界の解像度（測定分解能）があり、その解像度以上の詳細な分布を得ることはできないことが分かった。測定分解能については、３.５． で詳しく考察を述べる。

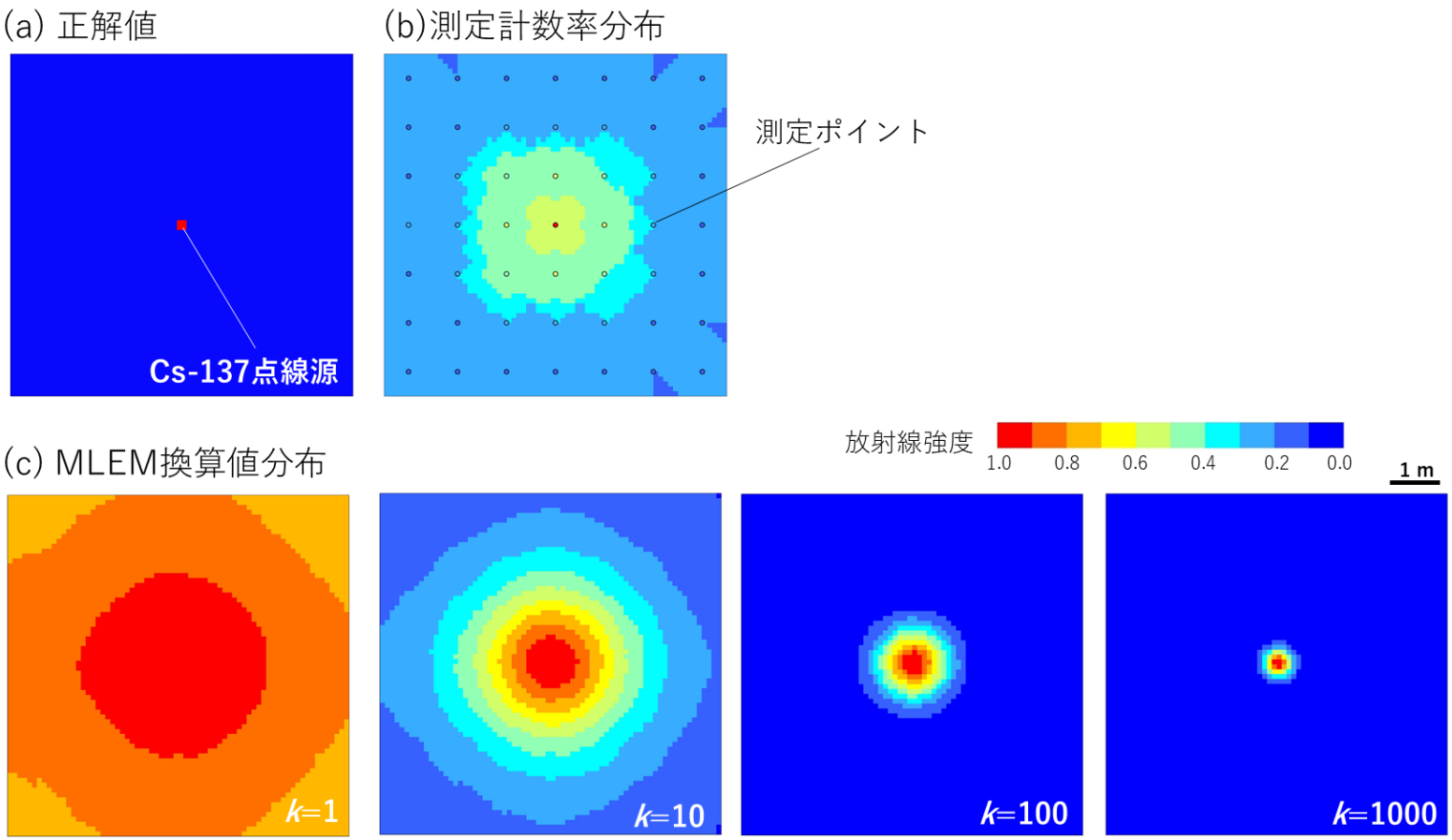


図 3-10 ベンチマークテスト P0 測定換算結果

（a）は実際の線源分布である正解値、（b）は測定した計数率ポイントと計数率にクリギング処理を行ったマップ計数率分布、（c）は（b）の計数率ポイントを使用し MLEM で換算した分布である。（c）は MLEM の反復計算回数kごとの分布を示しており、$F_x(x) \cdot F_\theta(\theta)$を使用した場合の換算結果である。

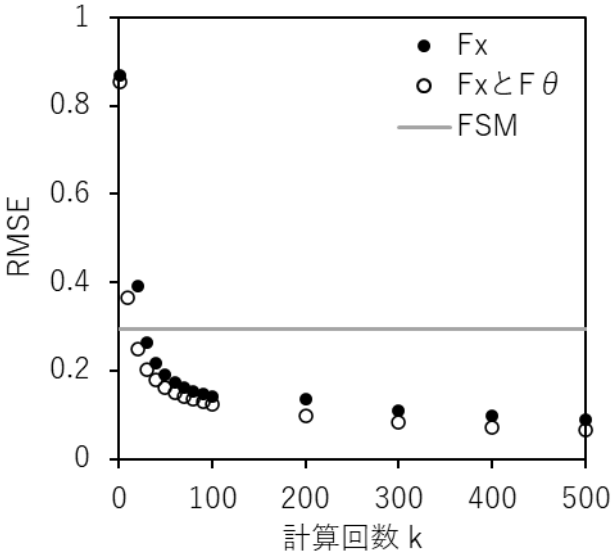


図 3-11　P0 の計算回数に伴う MLEM 換算値と線源分布値との *RMSE*

P0 における MLEM 換算値の計算回数kに伴う線源分布（正解値）との *RMSE* を示している。MLEM のC_{ij}を$F_x(x)$のみ使用した場合と、$F_x(x) \cdot F_\theta(\theta)$を使用した場合の換算の *RMSE* を表示している。

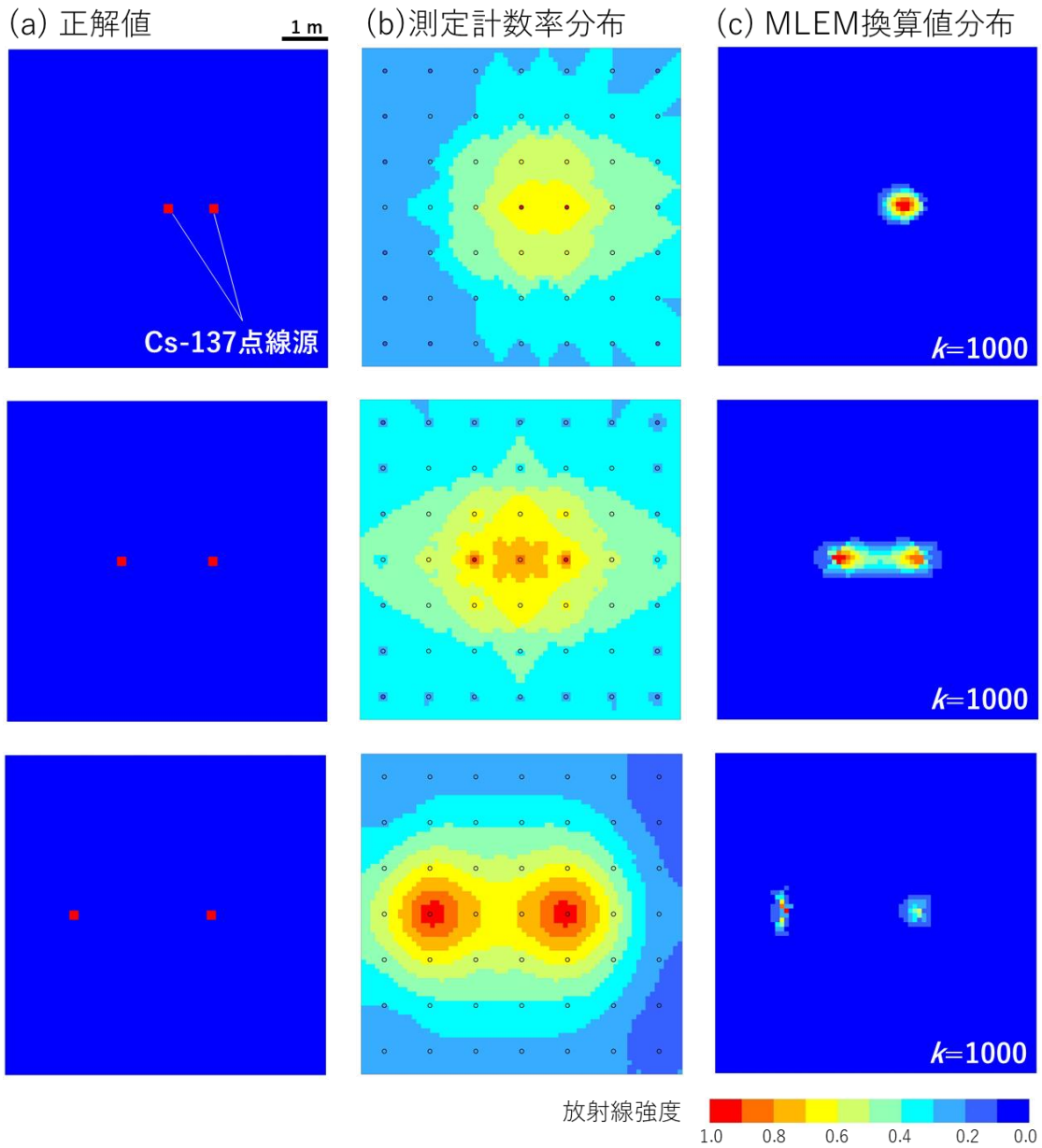


図 3-12 ベンチマークテスト P1-3 の測定換算結果

（a）は実際の線源分布である正解値、（b）は測定した計数率ポイントと計数率にクリギング処理を行ったマップ計数率分布、（c）は（b）の計数率ポイントを使用し MLEM で換算した分布である。（c）は MLEM の反復計算回数kごとの分布を示しており、$F_x(x) \cdot F_\theta(\theta)$を使用した場合の換算結果である。

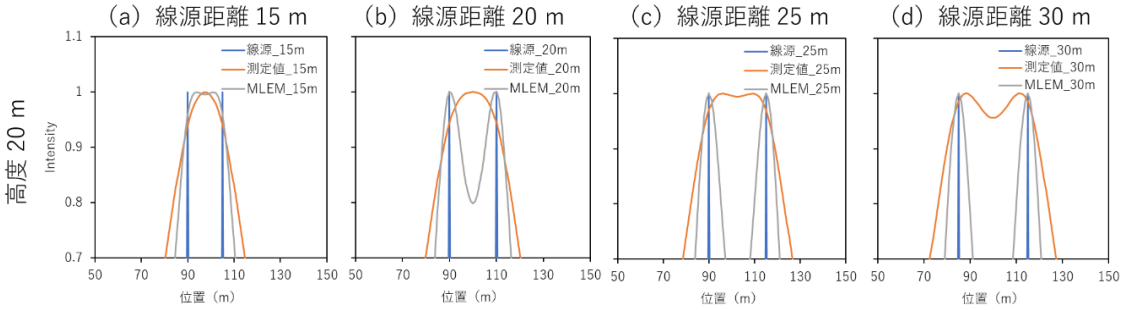


図 3-13 測定高度 20 m における模擬測定値及び換算結果

MLEM は$F_x(x) \cdot F_\theta(\theta)$を用いた$k$=1000 の換算結果である。

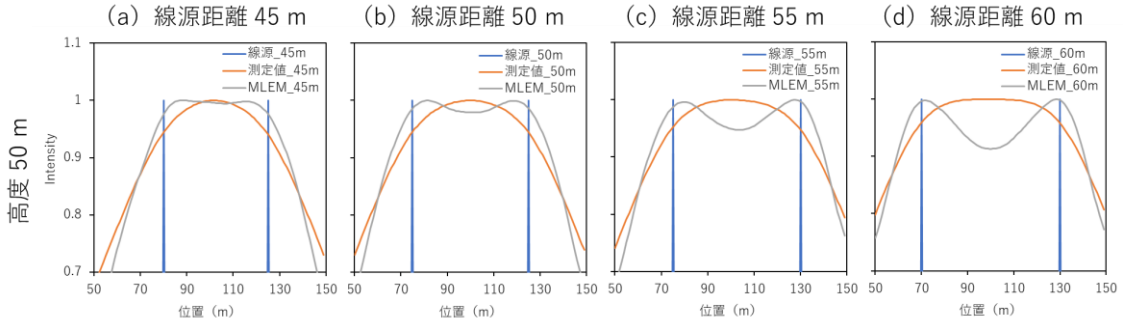


図 3-14 測定高度 50 m における模擬測定値及び換算結果

MLEM は$F_x(x) \cdot F_\theta(\theta)$を用いた$k$=1000 の換算結果である。

3.4. フィールドテスト

3.4.1. 測定方法

フィールドテストは 1F の事故により放出された放射性物質で汚染された福島県内の 3 つのエリアで測定した値で行った。無人ヘリコプターに $LaBr_3$ (Ce)シンチレータ検出器を搭載し、上空からガンマ線の測定を行った。無人ヘリコプター及び LaBr3 (Ce)シンチレータ検出器については 2.2.に記した機器と同様であり、詳細は本章では述べない。地上におけるガンマ線測定には KURAMA-II（Kyoto University Radiation Mapping system:松浦電弘社製）[8] を用いた。KURAMA-II は検出部に CsI (Tl)シンチレータ検出器（13 mm L × 13 mm W × 20 mm H：浜松ホトニクス社製 C12137）を用いた検出器であり、測定では 3 秒ごとに空間線量率（μSv h^{-1}）が得られ、GNSS から得られた座標情報とリンク付けされる。Differential GPS（GIR1600：株式会社ソキア社製：MSAS 対応受信機）を用いており、座標誤差は正しい座標値に比較して±2 m 程度である。KURAMA-II を背負子に搭載して背負い、検出器の高さを約 1 m にした状態で地上測定を行った。KURAMA-II の外観を図 3-15 に示す。

測定エリア及び測定時期一覧の詳細を表 3-1 に示す。測定エリアの地形情報(DSM)は、無人ヘリコプターを用いて上空からの写真撮影を行い、3Dオルソ画像を作成することで取得した。DEM は国土地理院における基盤地図情報サイトから入手したデータを使用した[9]。なお本測定値は内閣府及び原子力規制庁による「東京電力（株）福島第一原子力発電所事故に係るモニタリング及び被ばく線量の評価について」にて得られた成果を用いている[10]。

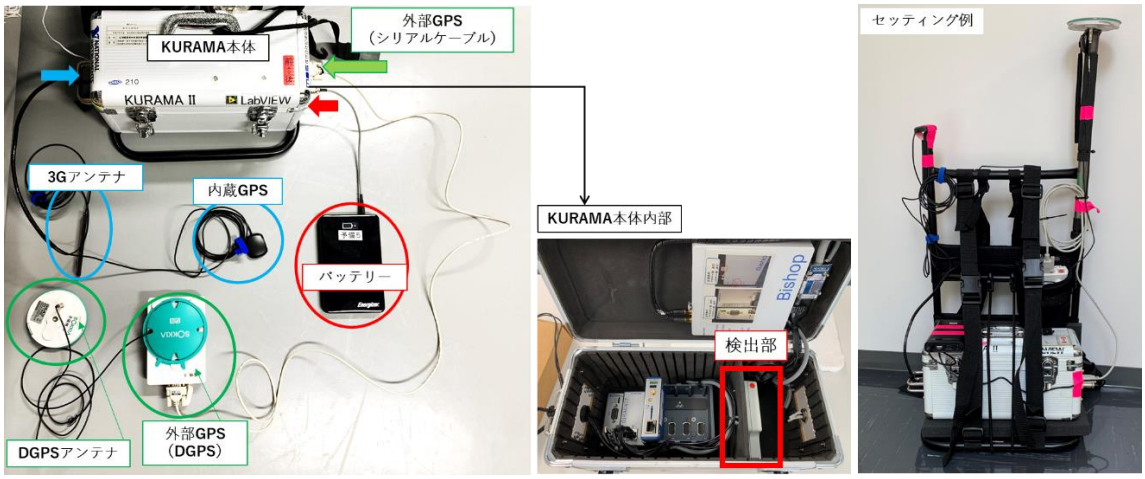


図 3-15 KURAMA-Ⅱの外観

背負子に KURAMA-Ⅱを搭載し、歩行式サーベイメータとして用いた。

表 3-1 フィールドエリア測定情報

エリア	測定時期	測定範囲 (km²)	測定平均高度 (m)	測定間隔 (m)	測定速度 (m/s)
A	2018/8/19	1.76	55.3	50	5
B	2018/8/22	1.53	61.3	50	5
C	2018/9/2	1.36	50.4	50	5

3.4.2. 換算方法

上空で測定した放射線計数率（cps）は FSM と MLEM を用いて地上 1m 空間線量率（μSv h^{-1}）へ換算した。FSM による換算は表 2-2 に記載したパラメータを用い、ArcGIS を用いてクリギング処理を行いマップ化した。クリギングには球セミバリオグラムモデルを使用した。MLEM による換算は 3.2.2.に記載したパラメータを用いた。MLEM の計算ポイントjは 10 m 間隔で作成し、換算計算を行った。

3.4.3. 評価方法

上空で測定した値の換算値及び地上測定値は測定エリア内で作成された 10 m 四方メッシュで平均化し、誤差を算出し評価した。誤差評価には（4）に示した *RMSE* を用いた。また（3）によりRDを算出し、両者のRDヒストグラムの比較を行った。

MLEM 換算値と地上測定値との比較は、MLEM のC_{ij}に$F_x(x)\cdot F_\theta(\theta)$を使用した場合と$F_x(x)\cdot F_\theta(\theta)\cdot F_h(h)$を使用した場合、$F_x(x)\cdot F_\theta(\theta)\cdot F_h(h)\cdot F_d(d)$を使用した場合で行った。これにより、$C_{ij}$のパラメータ追加することによる精度変化の評価を行った。また MLEM の反復回数kの増加による精度変化の評価を行った。

3.4.4. 結果と考察

図 3-16 はエリア A で放射線を測定及び換算した値のマップを示したものである。図 3-16（a）は無人ヘリコプターで測定したポイント、図 3-16（b）は地上 1 m空間線量率の測定結果、図 3-16（c）は上空で測定した値を FSM により地上 1 m 空間線量率に換算した値のマップ、図 3-16（d）は MLEM により地上 1 m 空間線量率に換算した値のマップである。図 3-16（d）はC_{ij}に$F_x(x)\cdot F_\theta(\theta)\cdot F_h(h)\cdot F_d(d)$を使用し、$k$=200 のときの値を使用している。

エリア A は 1F から北西約 5 ㎞の位置にあり、東側は 1F 事故時に放射性プルームが通過したエリアであり [11]、空間線量率が西側に比べて高い傾向となっている。エリア A の中央から北西部に白い点線円で示したエリアは除染が行われたエリアである。また河川が存在し、線路が南北に通っている。

エリア A の各換算値の精度を数値的に評価するため、地上測定値と各換算値のRDを算出し、ヒストグラムを作成した結果を図 3-17 に示す。地上測定値と各換算値の *RMSE* を算出した結果、FSM では *RMSE*=0.998、MLEM では *RMSE*=0.815 となり、*RMSE* の値は減少した。

図 3-18 はエリア B で放射線を測定及び換算した値のマップを示したものであり、図 3-16 と同様の図の配置である。エリア B は 1 F から南西約 5 ㎞の位置にあり、3 つのエ

リアの中で最も空間線量率が高いエリアとなる。東側には南北に線路が通っており、線路のエリアは除染が行われたエリアである。

エリア B の地上測定値と各換算値のRDを算出し、ヒストグラムを作成した結果を図 3-19 に示す。地上測定値と各換算値の *RMSE* を算出した結果、FSM では *RMSE*=1.090、MLEM では *RMSE*=1.038 となり、*RMSE* の値はわずかに減少した。

図 3-20 はエリア C で放射線を測定及び換算した値のマップを示したものであり、図 3-16 と同様の図の配置である。エリア C は 1 F から南西約 7 ㎞の位置にあり、3 つのエリアの中で最も空間線量率が低いエリアとなる。エリア C の西側には南北に線路があり、南には大きな池が存在し、また東側には河川が存在している。エリア C は他のエリアに比べて除染エリアが多いエリアである。

エリア C の地上測定値と各換算値のRDを算出し、ヒストグラムを作成した結果を図 3-21 に示す。地上測定値と各換算値の *RMSE* を算出した結果、FSM では *RMSE*=0.496、MLEM では *RMSE*=0.491 となり、*RMSE* の値はわずかに減少した。

図 3-22 は MLEM の計算回数とそれに伴う換算値と地上測定値の *RMSE* の変化を示したものである。図 3-22 (a)、(b)、(c)、はそれぞれエリア A、B、C に対応している。図 3-22 はC_{ij}に$F_x(x) \cdot F_\theta(\theta)$を使用した場合と、$F_x(x) \cdot F_\theta(\theta) \cdot F_h(h)$を使用した場合、$F_x(x) \cdot F_\theta(\theta) \cdot F_h(h) \cdot F_d(d)$を使用した場合の *RMSE*の変化を示しており、C_{ij}に$F_x(x) \cdot F_\theta(\theta) \cdot F_h(h) \cdot F_d(d)$を使用した場合が、最も *RMSE* が小さくなり、$F_d(d)$が換算精度向上に貢献していることが分かった。エリア A において、*RMSE* は計算回数と共に収束したが、エリア B と C においては発散する結果となった。原因としては測定誤差の影響及びC_{ij}のパラメータ設定誤差、測定分解能の考慮不足が原因と考えられる。*RMSE* の発散については測定分解能の考察も踏まえ、 3.5.4. で詳しく考察を述べる。

各エリアにおける換算結果を見ると、FSM の換算値に比べ MLEM の換算値の方が地上測定値との *RMSE* が減少し、また各エリアのRDヒストグラムを見ると、MLEM は FSM に比べてよりRDの中央値を 0 に近づけることができた。MLEM による換算は FSM に比べより地上測定値に近い値へ換算できたと考えられる。また MLEM による換算はC_{ij}のパラメータを増やすことで、換算精度が向上することが分かった。その中でも$F_d(d)$が換算精度向上に大きく貢献していることが分かった。

図 3-23 はある高度における測定ポイントiと、計算ポイントjの間に存在した地面(DEM)の平均通過距離と、各換算値と地上測定値の *NMSE* の関係を示している。*NMSE* は式 (5) を用いており、N=1 として各メッシュごとに *NMSE* を算出している。DEM 平均通過距離（m）は、iから半径 100 m 以内に存在するjとの、$i-j$間の地面の通過距離の平均値（図 3-3 におけるdの平均値）を用いた。図 3-23 はエリア A、B、C の各換算値データから算出し、DEM 平均通過距離を 10 m 間隔でデータを分け、DEM 平均通過距離ごとの各換算値と地上測定値の *NMSE* の平均値をプロットしている。図 3-23 を見ると、FSM は DEM 平均通過距離が大きくなると *NMSE* が増加したが、MLEM は FSM と比べ、*NMSE* の増加

は少なかった。

図 3-22及び図 3-23の結果からMLEMよる換算では、地形効果を加味することでFSMに比べ、換算精度を向上させることができたと考えられる。

しかしMLEMの換算結果において、測定ラインに沿って筋状に換算される現象が見られた。特にエリアBにおける換算結果において、顕著にその現象が見られた。図 3-24 はエリアBにおいてMLEMの換算値が筋状になったエリアを拡大したものである。筋状に換算された測定値には測定異常等は特になく、測定高度や放射線の全計数率、地形等は特殊な状況ではなかった。筋状になった原因としては、測定値の誤差及びC_{ij}設定の誤差が要因と考えられる。測定値の誤差の要因としては、位置情報の誤差、放射線計数誤差等が挙げられる。C_{ij}設定の誤差としては、地形情報（DEM、DSM）の誤差、建物や道路、土壌状況等の細かな地形情報の誤差、放射線エネルギーごとの減衰率設定を行っていないための誤差等が挙げられる。MLEM では測定値y_iを基準として、(9) のy_iと$\sum_{j=1}^{B}\lambda_j C_{ij}$の差が最小となる$\lambda_j$を算出する。換算計算は$y_i$を元に計算が行われるため、$y_i$が誤差の影響を強く受けた場合、誤差による計数率の勾配を線源の存在によるカウントの勾配と認識した状態で MLEM の計算は行われてしまう。MLEM による計算はy_iに対する依存性が強く、十分な精度を持ったy_iと適切なC_{ij}を設定しないと、MLEMの推定値は発散する傾向がある。筋状になった要因としては、y_iに対する強い依存性が大きな要因と考えられる。これを抑えるためには、MLEM の換算に使用するy_iの適切な平滑化処理、誤差を加味した逐次近似式の開発を行うことで抑えることができると考えられる。

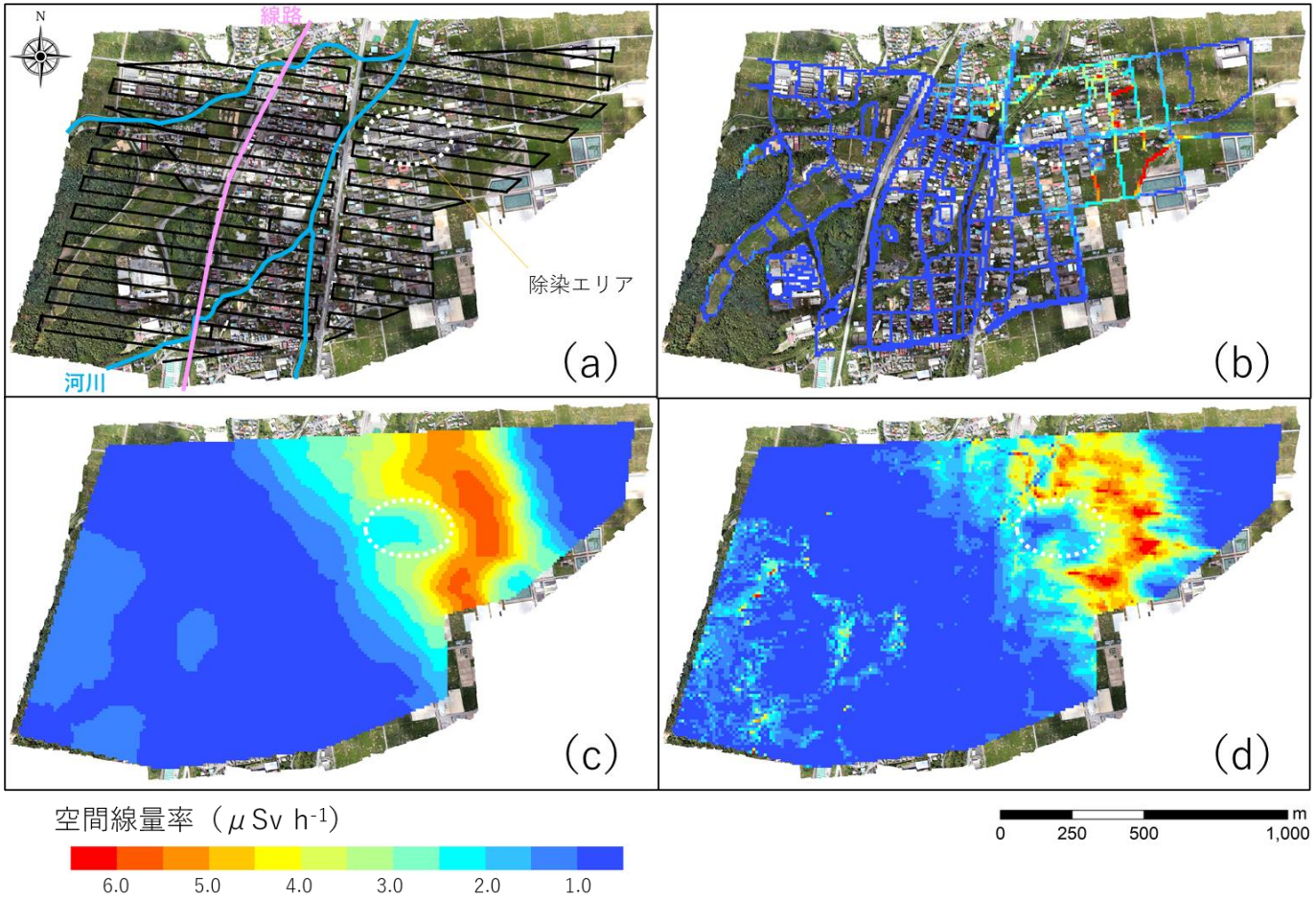


図 3-16　エリア A における空間線量率マップ

（a）は測定ラインと測定エリアの様子を示したもの、（b）は地上測定結果、（c）は FSM 換算結果、（d）は MLEM 換算結果である。

（d）は$F_x(x) \cdot F_\theta(\theta) \cdot F_h(h) \cdot F_d(d)$を用いた$k$=200 の MLEM 換算結果である。

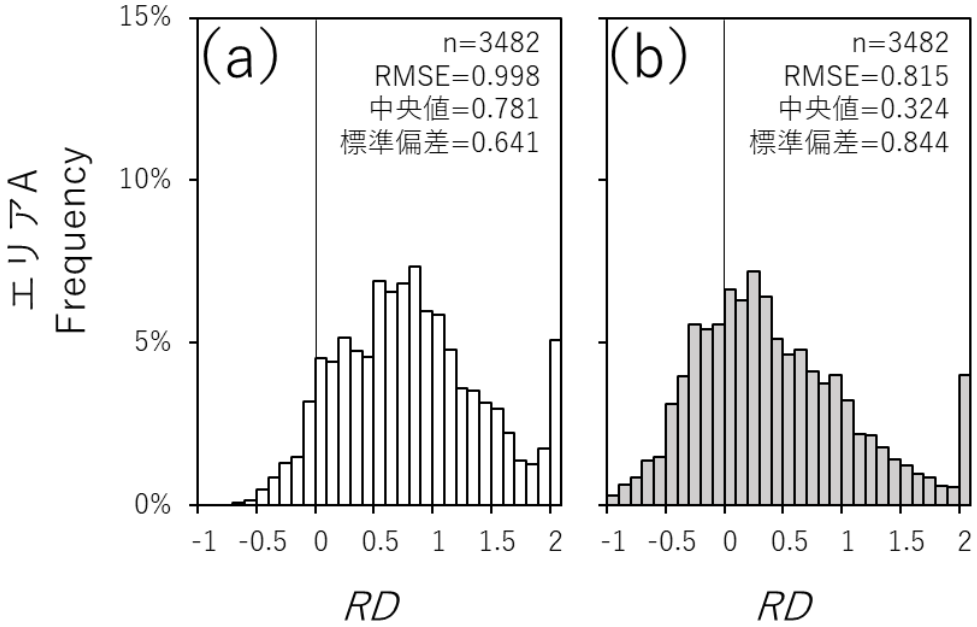


図 3-17 エリア A における地上測定値と上空測定換算値のRDヒストグラム

（a）は FSM 換算値、（b）は MLEM 換算値と地上測定値のRDである。

ヒストグラムの右端の値は$RD \geqq 2$ の Frequency である。

MLEM は$F_x(x) \cdot F_\theta(\theta) \cdot F_h(h) \cdot F_d(d)$を用いた$k$=200 の換算結果である。

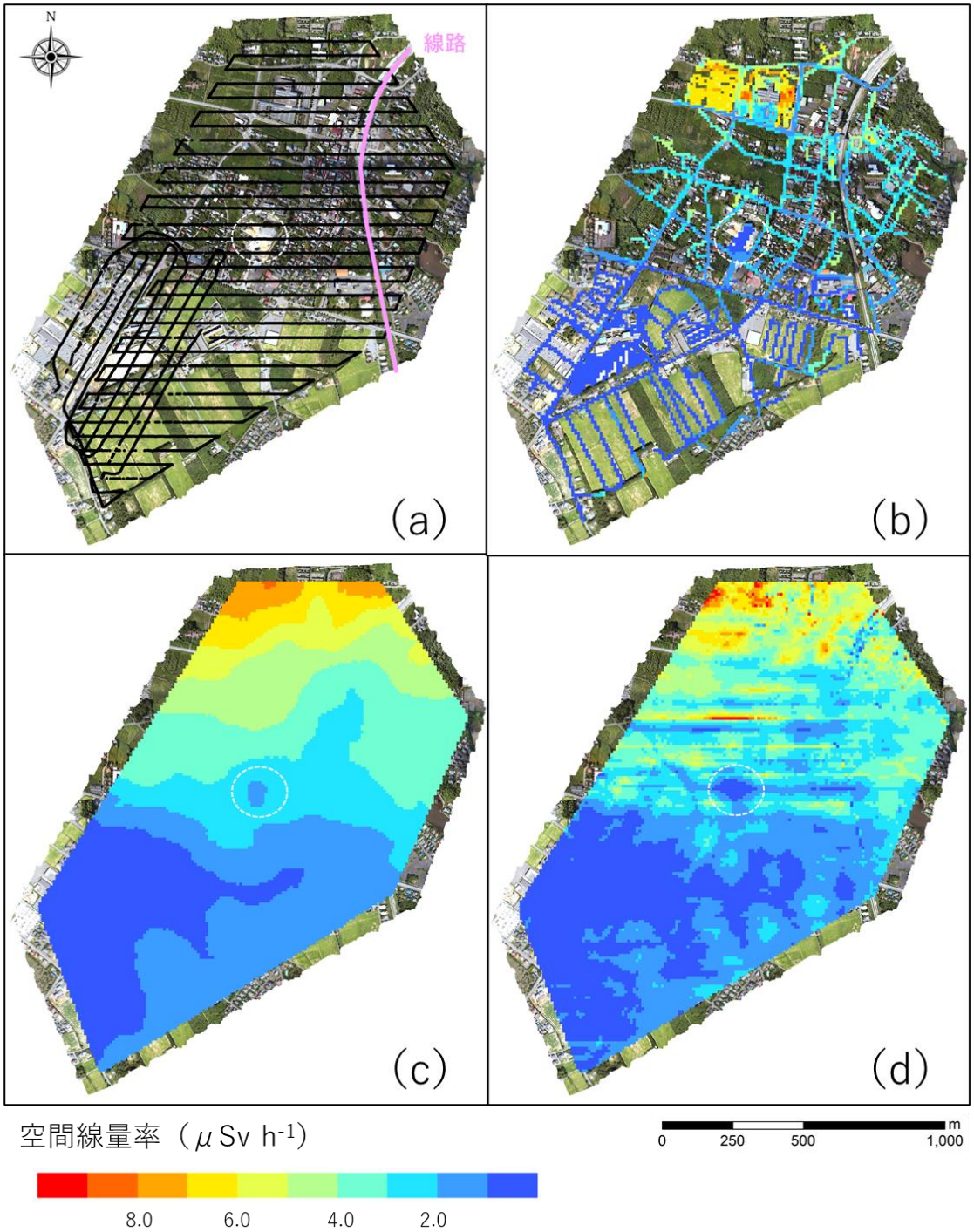


図 3-18　エリア B における空間線量率マップ

（a）は測定ラインと測定エリアの様子を示したもの、（b）は地上測定結果、（c）は FSM 換算結果、（d）は MLEM 換算結果である。（d）は$F_x(x) \cdot F_\theta(\theta) \cdot F_h(h) \cdot F_d(d)$を用いた k=200 の MLEM 換算結果である

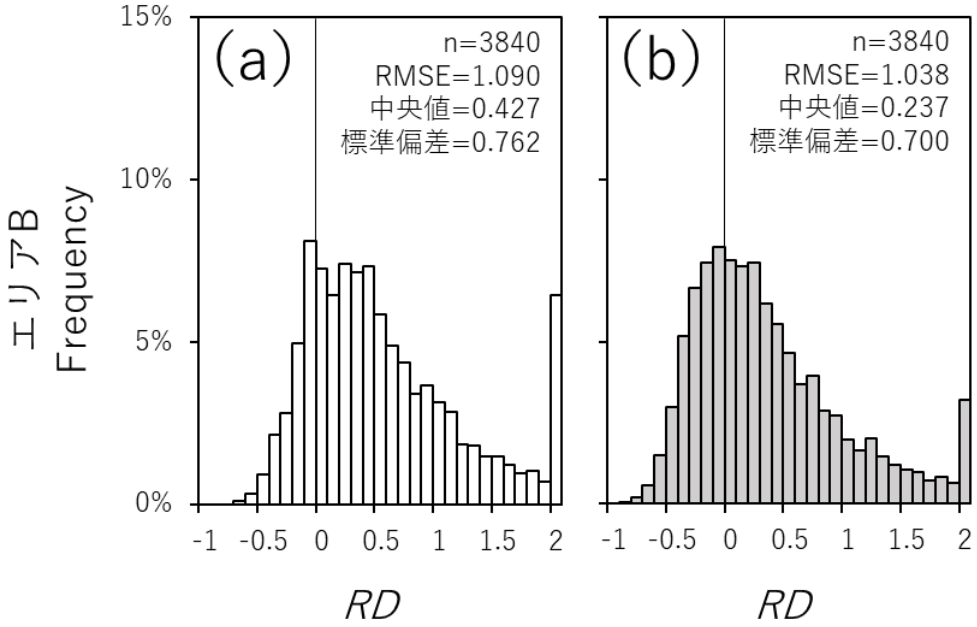


図 3-19 エリア B における地上測定値と上空測定換算値のRDヒストグラム

（a）は FSM 換算値、（b）は MLEM 換算値と地上測定値のRDである。

ヒストグラムの右端の値は$RD \geqq 2$ の Frequency である。

MLEM は$F_x(x) \cdot F_\theta(\theta) \cdot F_h(h) \cdot F_d(d)$を用いた$k$=200 の換算結果である。

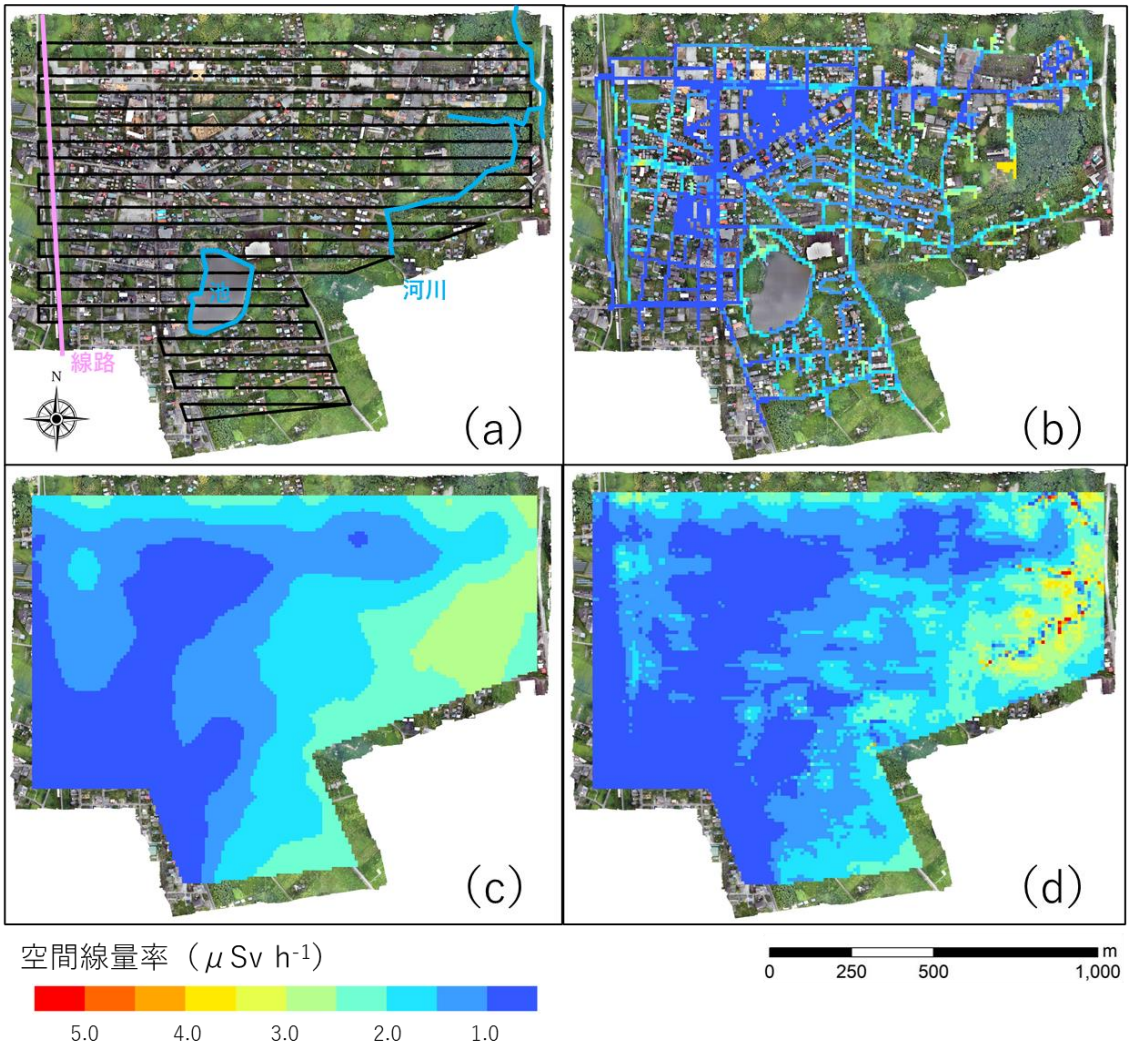


図 3-20 エリア C における空間線量率マップ

（a）は測定ラインと測定エリアの様子を示したもの、（b）は地上測定結果、（c）は FSM 換算結果、（d）は MLEM 換算結果である。（d）は$F_x(x) \cdot F_\theta(\theta) \cdot F_h(h) \cdot F_d(d)$を用いた$k$=200 の MLEM 換算結果である

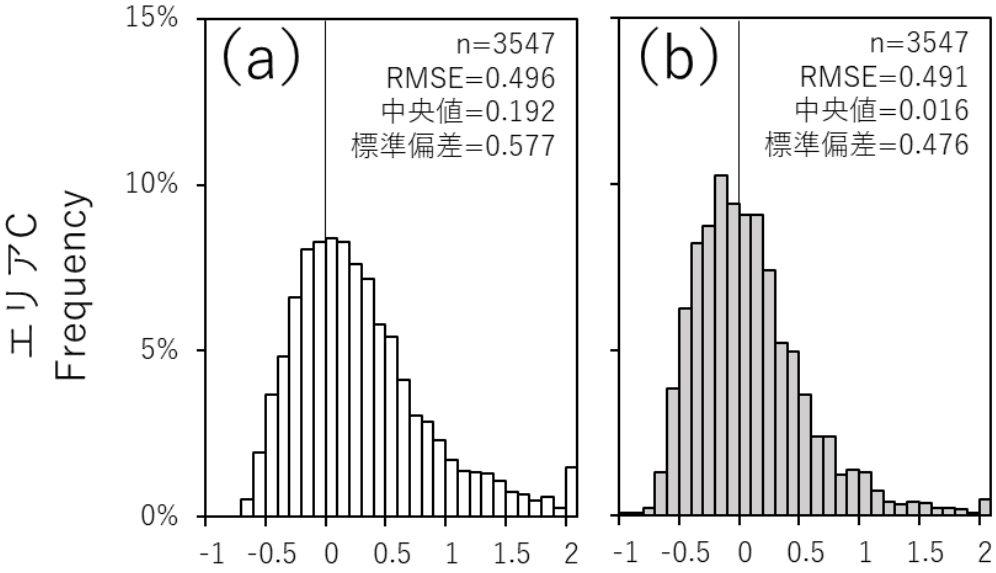


図 3-21 エリア C における地上測定値と上空測定換算値のRDヒストグラム

（a）は FSM 換算値、（b）は MLEM 換算値と地上測定値のRDである。

ヒストグラムの右端の値は$RD \geqq 2$ の Frequency である。

MLEM は$F_x(x) \cdot F_\theta(\theta) \cdot F_h(h) \cdot F_d(d)$を用いた$k$=200 の換算結果である。

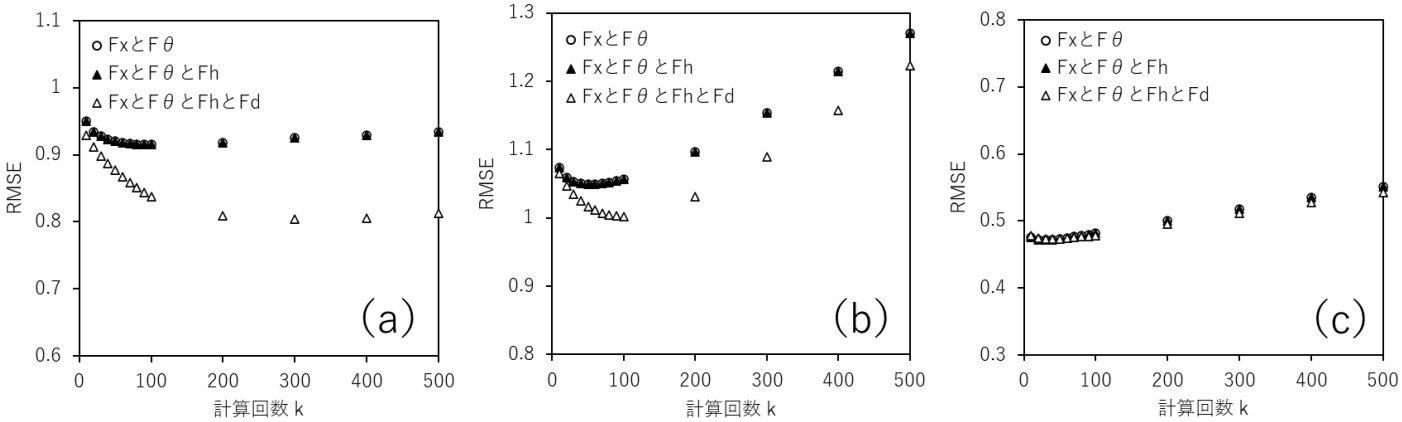


図 3-22 フィールドテストにおける計算回数に伴う MLEM 換算値と地上測定値の *RMSE*

(a) はエリア A、(b) はエリア B、(c) はエリア C の MLEM 換算値である。

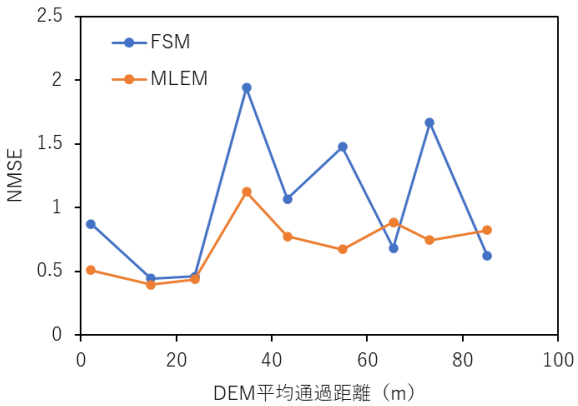


図 3-23 地面平均通過距離増加に伴う各換算値と地上測定値の *NMSE*

MLEM は$F_x(x) \cdot F_\theta(\theta) \cdot F_h(h) \cdot F_d(d)$を用いた$k$=200 の換算結果である。

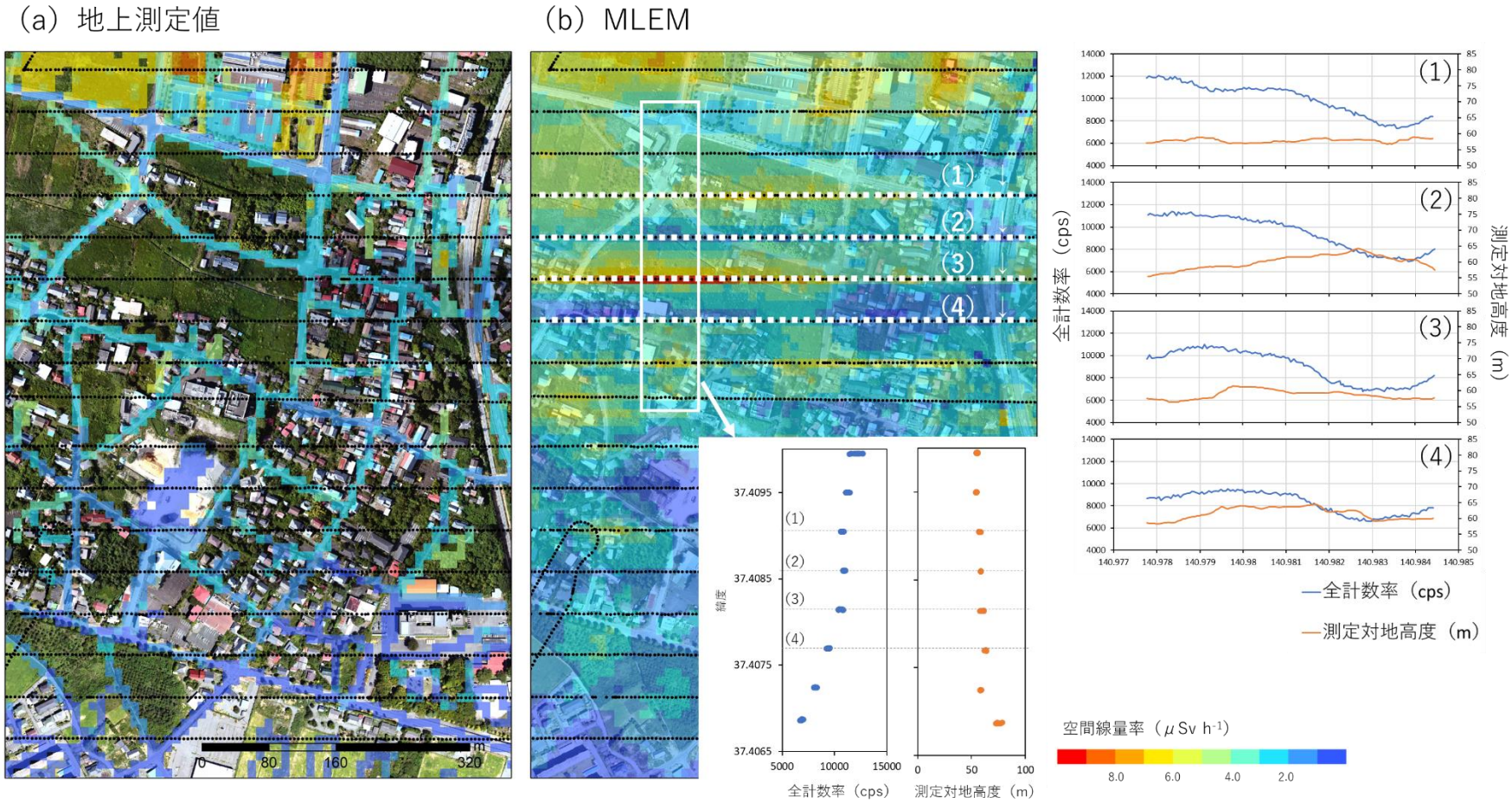


図 3-24　エリア B における空間線量率マップ詳細解析結果

メッシュは 10m 四方メッシュである。（b）は$F_x(x)\cdot F_\theta(\theta)\cdot F_h(h)\cdot F_d(d)$を用いた$k$=200 の MLEM 換算結果である。

3.5. 測定分解能の評価

3.5.1. 測定分解能について

上空測定換算値と地上測定値を比較する際、上空で得られる測定値は地上にある線源からの影響の総和であると仮定すると、比較のために平均化するメッシュサイズを大きくしたときに、上空測定換算値と地上測定値の誤差は減少すると考えられる。ただし、誤差はメッシュサイズが大きくなっていくと小さくなり続けるのではなく、あるメッシュサイズ以降はおおむね一定になるものと考えられる。誤差が収束するメッシュサイズは、ある測定高度における測定値に影響を多く与える線源面積におおよそ等しく、それはその測定高度における線源を弁別できる限界メッシュサイズと考えられる。本章ではある測定高度において識別できる限界の線源サイズのことを測定分解能と呼ぶこととする。

本節では上空からの放射線測定における測定分解能をシミュレーションにより算出した。またフィールド測定値の平均化するメッシュサイズを大きくしたとき、上空測定換算値と地上測定値の誤差がどのように変化するのか観察し、シミュレーションから算出した測定分解能との関係性を評価した。

3.5.2. 測定分解能の算出方法

3.5.2.1. シミュレーションによる算出

測定分解能は PHITS（Version= 3.110）を用いたシミュレーションにより算出した。シミュレーションでは平面の測定エリア中央に点線源を設置し、ある指定した高度h（m）において、線源上空を通るようにライン状に半径 25 ㎝球の検出面を 1 m 間隔で配置した。配置した各検出面への光子入射率を算出し、模擬測定値を算出した。図 3-25 に PHITS による計算体系を示す。線源はガンマ線エネルギーの違いによる測定分解能を評価するために、Cs-137（661 keV）、K-40（1461 keV）及び I-131（365 keV）の点線源を用い、それぞれの模擬測定値を算出した。得られた模擬測定値のラインの分布の広がり度合いを数値的に算出するために、放射線スペクトルのピークにおけるエネルギー分解能の算出方法を参考に[12]、得られた測定値の分布に対してガウスフィッティングを実施し、フィッティングしたガウス関数の標準偏差σを取得した。

また算出したσとその測定高度における識別できる限界の線源サイズ（測定分解能）との関係性を確認するため、設置する線源を一様な面線源（円状）にし、線源の大きさを変化させたときのσの変動を算出した。

以下（19）にフィッティングに使用したガウス関数を示す。

$$f_{(x)} = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma}} exp\left(\frac{-(x-\mu)^2}{2\sigma^2}\right) \tag{19}$$

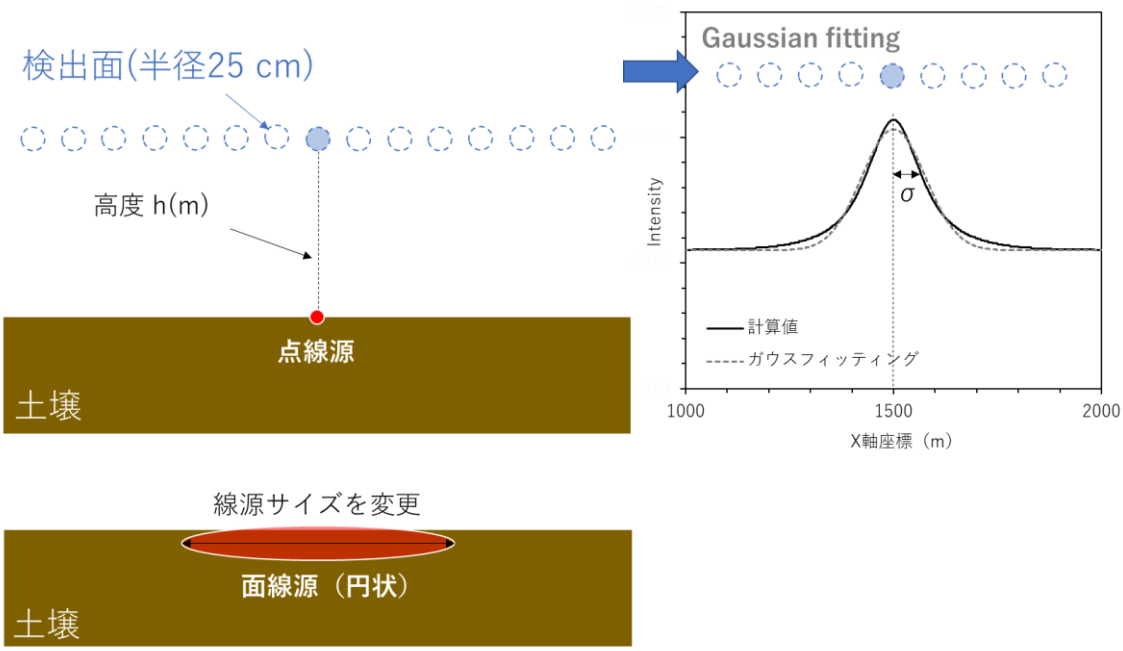


図 3-25 PHITS による測定値算出イメージ

線源は土壌の上、0-1 ㎜に存在する。線源上空で得られた模擬測定値の分布に対して、ガウスフィッティングを行った。

3.5.3. フィールドデータとの比較評価

FSM 及び MLEM による換算で得られた空間線量率と地上測定で得られた空間線量率を、指定のメッシュサイズで値を平均し、地上値と上空測定換算値の *RMSE*、*NMSE* 及び*RD* の標準偏差を算出した。*RD*、*RMSE*、*NMSE* は式（3）（4）（5）を用いて算出した。平均化メッシュのサイズ増加における *RMSE*、*NMSE* 及び*RD* の標準偏差の変化傾向と、シミュレーションから算出した測定分解能の関係性を見ることで、算出した測定分解能の妥当性を評価した。フィールドデータの上空測定換算値および地上測定値は 3.4.のエリア A、B、C のデータを用いた。

3.5.4. 結果と考察

図 3-26 は、図 3-25 に示した計算体系において点線源を設置した場合における σ の算出結果を測定高度ごと及び各種線源ごとに表したものである。σ はおおよそ測定高度の 0.5～1 倍の値となった。測定高度が高い場合、σ は線源のエネルギーに依存するが、100 m

以下では大きな違いは見られなかった。

線源を一様な円状の面線源にし、線源直径を変化させた場合のσの結果を図 3-27 及び表 3-2 に示す。図 3-27 に示す縦と横の点線は、その計算値の測定高度における点線源から算出したσの値のラインである。線源直径がその高度において算出した点線源の σ 以内の大きさのとき、面線源と点線源の σ は同じような値となった。この結果は、存在する線源が σ 以内の大きさである場合、大きさの違いを検知できないことを意味し、またその範囲内で複数の線源が存在しても、線源の弁別をできないことを意味する。すなわち、算出したσはその測定高度において、線源の大きさや分布の違いを識別できる限界の解像度（測定分解能）であると言える。

ここで FSM 及び MLEM による換算値の測定分解能について考える。FSM による換算は、測定値に対して係数を掛け合わせるだけであるため、FSM 換算値の測定分解能は、図 3-26 で求めた値に則り、高度により決定されると考えられる。MLEM による換算は、測定値の違いと周辺情報を用いて地上の線源強度分布を推定する。よって測定値で線源の存在による計数率の増減や地形効果等による計数率の増減を検知できなければ、MLEM ではその線源分布を推定することは難しい。図 3-27 に示したように測定分解能の範囲内においては、どのように線源が分布をしているのか、測定値から検出することは難しいため、MLEM による換算の測定分解能もまた高度により決定されると考えられる。3.3.におけるベンチマークテストのシミュレーション試験において、おおよそ測定高度程度、点線源の距離が離れていれば、MLEM の換算において 2 点線源の弁別が可能であった。3.3.で得られた線源を弁別できる線源間隔距離は図 3-26 において算出した測定分解能とおおよそ一致する結果である。MLEM の測定分解能は測定高度に依存し、FSM 及び MLEM は同程度の測定分解能と考えられる。

図 3-28 はエリアA、B、Cのフィールドデータを用いて、平均化するメッシュのサイズ増加における地上測定値と上空測定換算値の *RMSE*、*NMSE* 及び*RD*の標準偏差を示している。図 3-28 で縦のラインで示されている点線は、図 3-26 の結果から得た測定分解能の結果に対して二次関数フィッティングを行い近似式を取得し、そのエリアの平均測定高度を用いて近似式より算出したσの値のラインである。

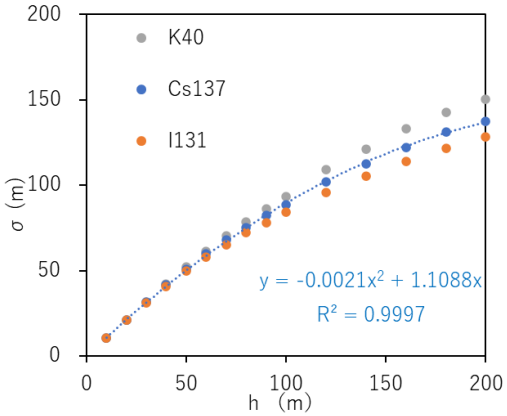
RMSE、*NMSE* 及び*RD*の標準偏差はそれぞれ、メッシュサイズのサイズ増加に伴い減少する傾向が見られた。特に*RD*標準偏差は各エリアともにメッシュサイズが平均測定高度から算出したσ以上の値になると変化が小さくなる傾向が見られ、FSM 及び MLEM 共に同様の傾向が見られた。これらの結果から、シミュレーションにより算出した測定分解能は妥当な値が得られたと考えられる。

測定分解能を考慮し、各エリアの換算結果を測定分解能メッシュサイズで平均化しマップにしたものを図 3-29 に、測定分解能メッシュサイズで各換算値と地上測定値の*RD*ヒストグラムを作成したものを図 3-30 に示す。各エリアの換算値と地上測定値の *RMSE* を見ると、測定分解能のメッシュサイズで平均化した場合においても、MLEM は FSM に比べ

小さい値となり、またRDの中央値が 0 に近づく結果となった。

MLEM 換算値と地上測定値を各エリア平均測定高度における測定分解能のメッシュサイズで平均化し、MLEM 換算における反復計算回数とそれに伴う換算値と地上測定値の *RMSE* を算出したものを図 3-31 に示す。図 3-22 ではエリア B、エリア C において、*RMSE* は反復とともに発散していたが、測定分解能を考慮すると、各エリアの発散傾向が緩和された。しかしエリア C に関しては測定分解能を考慮しても、kが小さい段階で発散傾向が見られた。図 3-20 のエリア C の線量分布をみると、エリア A、B に比べ線量が低く、また空間線量率の変動があまりない。MLEM による換算は測定値に誤差があった場合、それを線源分布による勾配として換算してしまうため、特に線源分布が均一なエリアにおいては測定誤差の影響を受け換算値と正解値の誤差が大きくなる傾向がある。換算におけるC_{ij}の設定誤差、測定誤差に加えて線源分布の均一性が、エリア C の換算の発散傾向の原因であると考えられる。

線源分布状況や測定状況等に応じて、計算回数に伴う *RMSE* の傾向は異なるものの、ベンチマークテスト及びフィールドテストの解析では、反復回数はおおよそ 100～200 程度で線源分布及び *RMSE* は一定の値となった。測定分解能を考慮すると、計算回数に伴う *RMSE* の傾向はエリアが異なる場合でも安定し、反復計算回数の目安としては測定分解能メッシュにおいて、k=200 程度が良いことが分かった。



高度 h (m)	Cs137		I131		K40	
	σ	決定係数	σ	決定係数	σ	決定係数
10	10.4	0.952	10.4	0.953	10.4	0.952
20	21.0	0.953	21.0	0.955	21.0	0.951
30	31.5	0.956	31.2	0.959	31.7	0.953
40	41.6	0.959	40.8	0.964	42.1	0.955
50	51.0	0.964	49.7	0.969	52.1	0.959
60	59.8	0.968	57.8	0.973	61.5	0.963
70	68.0	0.973	65.1	0.977	70.4	0.966
80	75.4	0.976	72.1	0.981	78.6	0.970
90	82.2	0.979	78.3	0.983	86.2	0.973
100	88.9	0.982	84.2	0.985	93.6	0.975
120	102.1	0.985	95.7	0.989	109.2	0.979
140	112.7	0.988	105.5	0.992	121.3	0.982
160	122.1	0.991	113.8	0.994	132.9	0.985
180	131.3	0.992	121.6	0.995	142.7	0.987
200	137.6	0.992	128.3	0.996	150.6	0.988

図 3-26 点線源シミュレーションから算出した σ

点線源を設置した場合における σ の算出結果を測定高度、各種線源ごとに示している。左の表における決定係数は算出した測定値の分布とガウス関数の決定係数を示している。

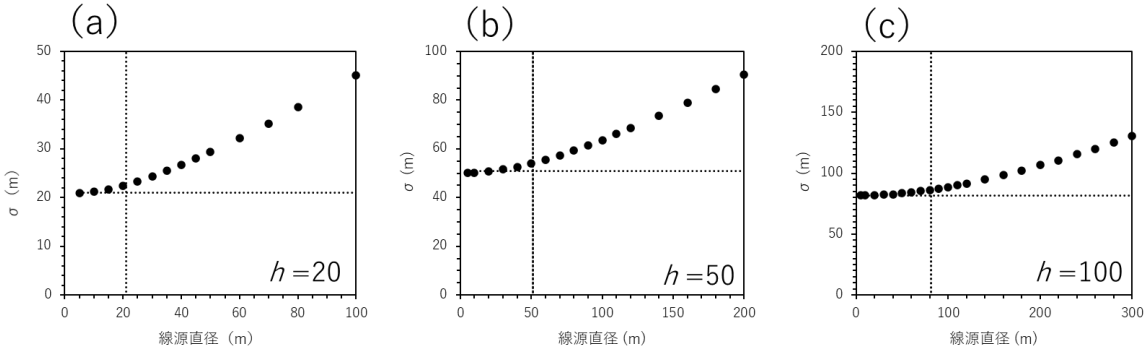


図 3-27　線源分布の大きさの違いによる σ の違い

(a)　高度 20 m における計算結果、高度 20 m における点線源の σ は 21.0 m である

(b)　高度 50 m における計算結果、高度 50 m における点線源の σ は 51.0 m である

(c)　高度 100 m における計算結果、高度 100 m における点線源の σ は 88.9 m である

表 3-2　線源分布の大きさの違いによる σ の違いの詳細

線源直径	高度 20 m		線源直径	高度 50 m		線源直径	高度 100 m	
(m)	σ	決定係数	(m)	σ	決定係数	(m)	σ	決定係数
5	20.9	0.961	5	50.1	0.976	5	81.7	0.986
10	21.2	0.963	10	50.2	0.976	10	81.8	0.986
15	21.7	0.964	20	50.7	0.977	20	81.9	0.986
20	22.5	0.967	30	51.5	0.978	30	82.4	0.986
25	23.4	0.970	40	52.6	0.979	40	82.8	0.987
30	24.4	0.972	50	53.9	0.981	50	83.6	0.987
35	25.5	0.975	60	55.6	0.982	60	84.3	0.988
40	26.8	0.978	70	57.3	0.984	70	85.3	0.988
45	28.1	0.981	80	59.3	0.986	80	86.3	0.989
50	29.5	0.984	90	61.4	0.988	90	87.4	0.989
60	32.3	0.988	100	63.7	0.989	100	88.7	0.990
70	35.2	0.992	110	66.0	0.991	110	90.0	0.991
80	38.6	0.993	120	68.5	0.992	120	91.5	0.992
100	45.0	0.995	140	73.6	0.994	140	94.9	0.993
			160	79.0	0.996	160	98.6	0.995
			180	84.7	0.997	180	102.4	0.996
			200	90.4	0.997	200	106.6	0.997
						220	110.7	0.998
						240	115.8	0.998
						260	120.2	0.999
						280	125.5	0.999
						300	130.7	0.998

※表の決定係数は算出した測定値の分布とガウス関数の決定係数である。

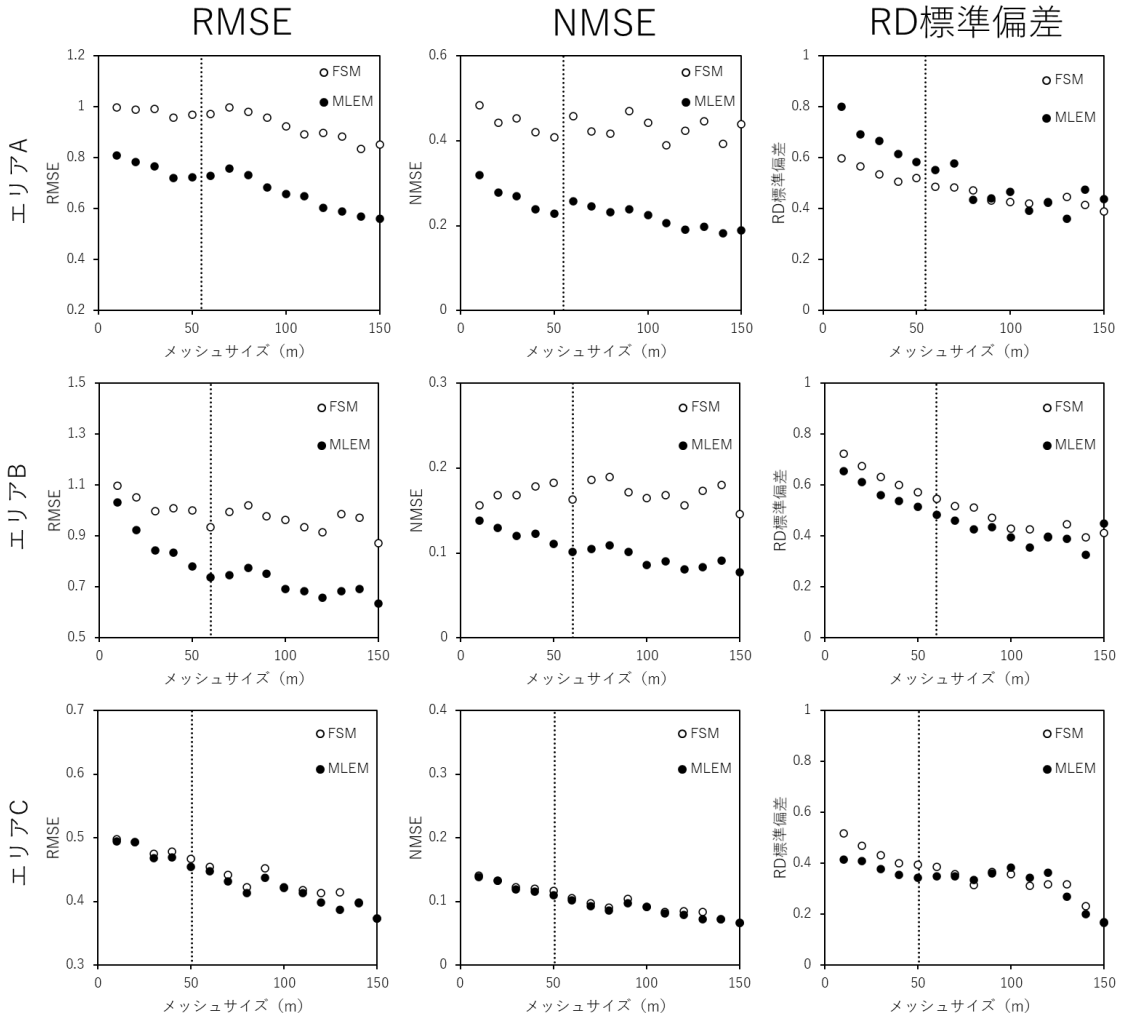


図 3-28　平均メッシュサイズによる地上測定値と上空測定換算値のRD標準偏差

各グラフに示す縦の点線ラインは、各エリアにおける平均測定高度におけるσである。エリア A は平均測定高度 55.3 m（σ＝54.9 m）、エリア B は平均測定高度 61.3 m（σ＝60.0 m）、エリア C は平均測定高度 50.4 m（σ＝50.6 m）である。MLEM は$F_x(x)\cdot F_\theta(\theta)\cdot F_h(h)\cdot F_d(d)$を用いた$k$=200 の換算結果である。

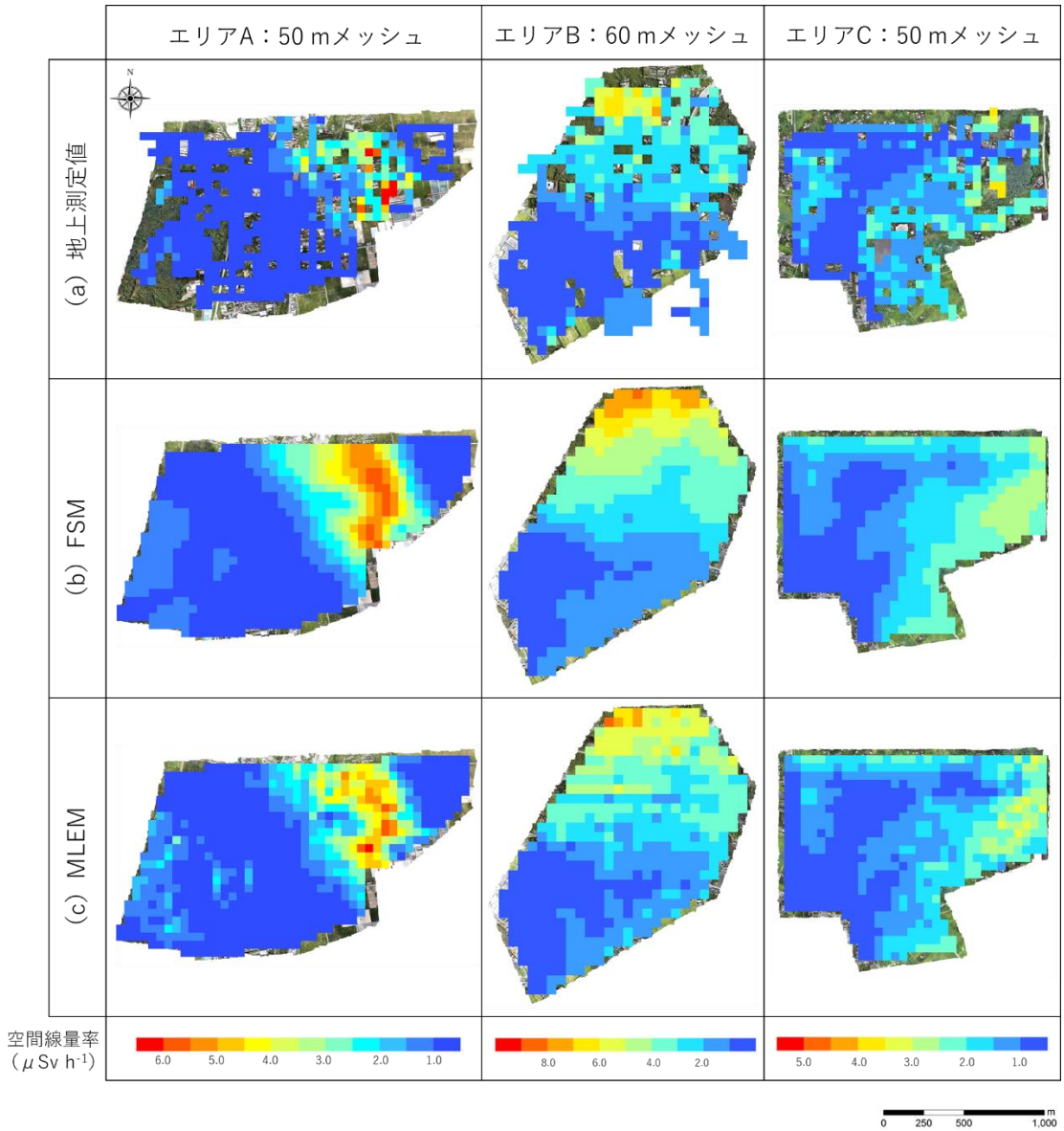


図 3-29 各エリア測定の測定分解能に応じたメッシュサイズで表した空間線量率マップ

MLEM は$F_x(x) \cdot F_\theta(\theta) \cdot F_h(h) \cdot F_d(d)$を用いた$k$=200 の換算結果である。

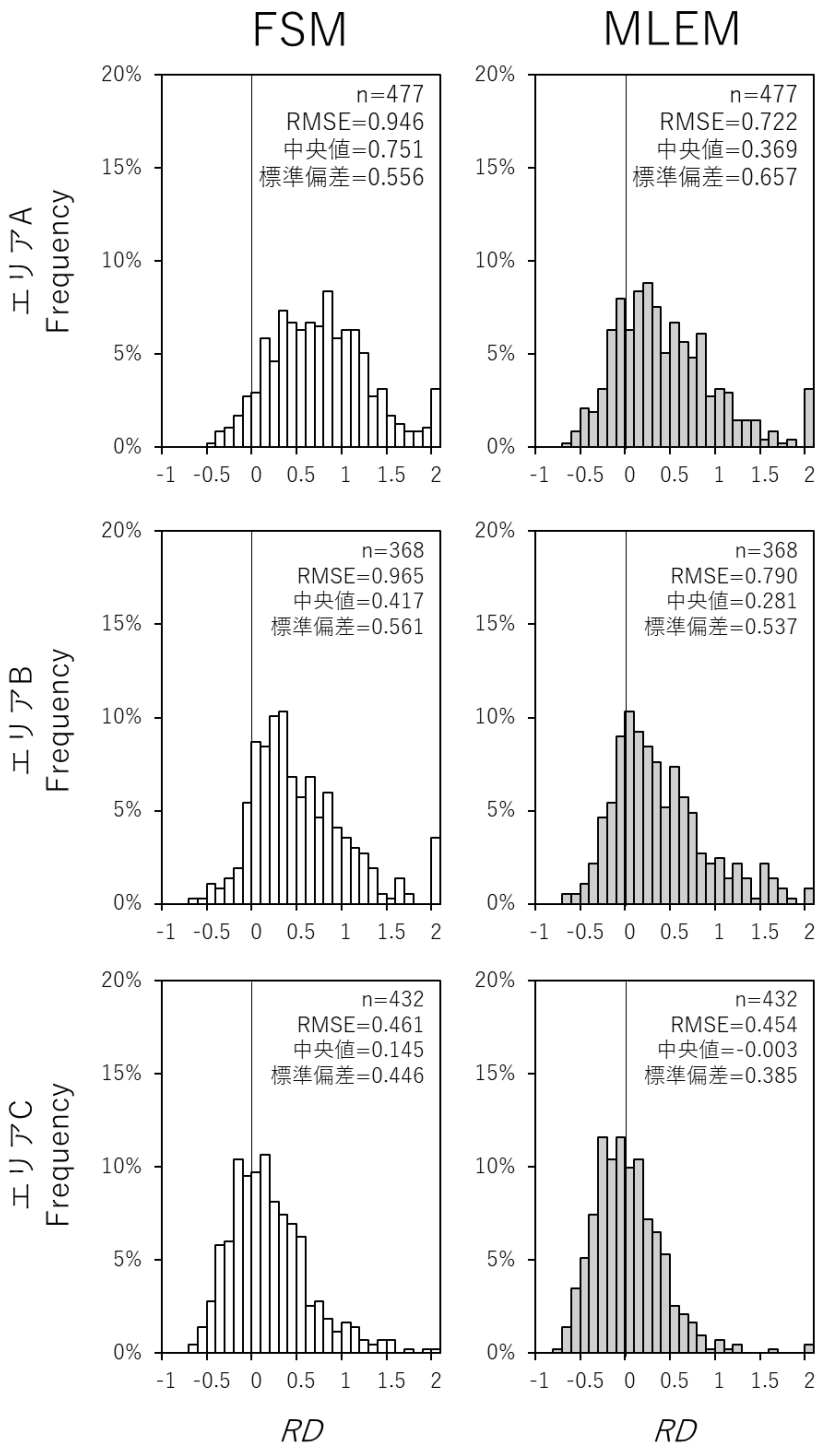


図 3-30 測定分解能に応じたメッシュサイズで算出したRDヒストグラム

MLEM は$F_x(x) \cdot F_\theta(\theta) \cdot F_h(h) \cdot F_d(d)$を用いた$k$=200 の換算結果である。

ヒストグラムの右端の値はRD≧2 の Frequency である。

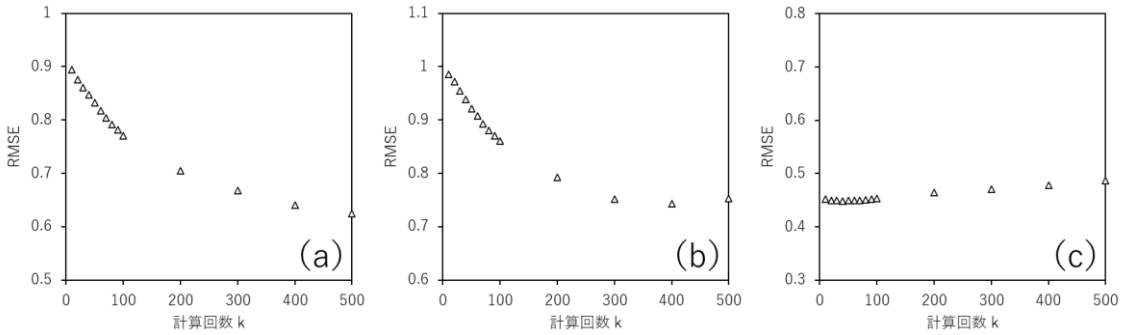


図 3-31　測定分解能メッシュサイズで平均化した際の計算回数に伴う MLEM 換算値と地上測定値の *RMSE*

（a）はエリア A、（b）はエリア B、（c）はエリア C の$F_x(x) \cdot F_\theta(\theta) \cdot F_h(h) \cdot F_d(d)$を使用した場合の MLEM 換算値である。平均化メッシュサイズは（a）と（c）は 50 m、（b）は 60 m である。

3.6. まとめ

本章では、従来、医療分野において画像再構成技術として使用されている MLEM を環境中の放射線測定値解析用に改良し、従来の手法では考慮されていなかった森林遮蔽効果及び地形効果を考慮した、新たな上空からの放射線測定値の換算手法の開発及び評価を行った。

室内線源試験及びシミュレーション試験で得られたシンプルな線源分布においての放射線測定結果に対し、MLEM による換算を適用し、換算特性を評価した。その結果、MLEM による換算は線源から測定点に至るまでの放射線の減衰率を表すC_{ij}が適切に設定されていれば、正解値に近い推定値を得ることができることが分かった。ただし測定高度に応じた線源を弁別できる限界の解像度（測定分解能）があり、上空からの測定で 2 つの点線源の弁別する場合、線源が測定高度程度離れていれば弁別が可能であることが分かった。

放射性物質で汚染されたフィールドにおいて、無人ヘリコプターを用いて上空で得られた放射線測定値に対し、MLEM による換算を適用した。従来から用いられてきた FSM による換算値と MLEM による換算値を比較した結果、FSM に比べ MLEM はより地上測定値に近い換算を行うことができることが分かった。また MLEM による換算は、C_{ij}のパラメータを増やすことで、換算精度が向上することが分かった。C_{ij}のパラメータをより詳細に設定することで、測定分解能範囲内でより換算精度の向上が期待できる。

３.７． 参考文献

1） L. A. Shepp and Y. Vardi. Maximum Likelihood Reconstruction for Emission Tomography. IEEE Transactions on Medical Imaging. 1, 2, 113-122 (1982).

2） K. Lange and R. Carson. EM Reconstruction Algorithms for Emission and Transmission Tomography. Journal of Computer Assisted Tomography. 8, 2, 306-316 (1984).

3） 篠原広行，中世古和真，坂口和也，橋本雄幸．逐次近似画像再構成の基礎．医療科学社．ISBN-13:978-4860034399 (2013).

4） 橋本雄幸，篠原広行．C 言語による画像再構成の基礎．医療科学社．ISBN-13:978-4860033705 (2006).

5） T. Sato, Y. Iwamoto, S. Hashimoto, T. Ogawa, T. Furuta, S. Abe, T. Kai, P. Tsai, N. Matsuda, H. Iwase, N. Shigyo, L. Sihver and K. Niita. Features of Particle and Heavy Ion Transport code System (PHITS) version 3.02, Journal of Nuclear Science and Technology. 55, 6, 684-690 (2018).

6） 岩元洋介，佐藤大樹，遠藤章，坂本幸夫，呉田昌俊，久語輝彦．汚染土壌の除染領域と線量低減効果の検討. JAEA-Technology 2011-026 (2011).

7） Environmental Systems Research Institute Inc. ArcGIS. https://www.esrij.com/products/arcgis/ (最終閲覧日：2021 年 3 月 11 日).

8） M. Tanigaki, R. Okumura, K. Takamiya, N. Sato, H. Yoshino, H. Yoshinaga, Y. Kobayashi, A. Uehara and H. Yamana. Development of KURAMA-II and its operation in Fukushima. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment. 781, 57-64 (2015).

9） 国土交通省，国土地理院，基盤地図情報サイト. https://www.gsi.go.jp/kiban/ (最終閲覧日：2021 年 3 月 11 日).

10） 舟木泰智，高原省五，佐々木美雪，吉村和也，中間茂雄，眞田幸尚．特定復興再生拠点区域におけるモニタリング及び被ばく評価手法の検討．DOI:10.11484/jaea-research-2018-016 (2019).

11） Y. Sanada and T. Torii. Aerial radiation monitoring around the Fukushima Dai-ichi nuclear power plant using an unmanned helicopter. Journal of Environmental Radioactivity. 139, 294-299 (2015).

12） 原子力規制委員会．放射線測定法シリーズ No.7 ゲルマニウム半導体検出器による γ 線スペクトロメトリー．令和 2 年 9 月改訂版 (2020).

第４章　人工ニューラルネットワークを用いた換算手法の開発

４.１.　はじめに

第３章で示した MLEM による換算は、C_{ij}のパラメータを増やすことで、換算精度の向上を期待できるが、パラメータの取得には多くのシミュレーションと実験が必要となり、またパラメータを多くすることで換算のための計算時間が多く必要となる課題がある。また計算量が多く FSM に比べて計算時間を要するため、リアルタイム解析が困難である課題がある。本章では FSM に比べ換算精度が高く、また計算時間を必要としない換算手法を開発するために、ANN を用いた換算手法の開発を行った成果を述べた。

近年のコンピュータ機器の進歩に合わせ、機械学習に関するソフトの普及により、機械学習を用いたデータ解析や画像解析の適用が多岐の分野にわたって行われている [1-3]。航空機を用いた測定分野において ANN を用いた例として、Schetselaar らは岩相ユニットをマッピングするために、上空で測定した磁気及びガンマ線データを用いた教師あり学習によるマッピングを試みている [4]。本章では教師あり学習により ANN を構築し、上空における放射線測定値を ANN を用いて地上 1 m の空間線量率に換算できるのか、適用及び評価を行った。

ANN による換算は、学習によって減衰パラメータ等を自動で作成できるのが強みの１つであるが、与えられたデータに対する推論の過程がブラックボックス化され、その入力値からなぜその出力値が得られたのかという理論的な説明ができないという課題がある。緊急時モニタリング等において避難区域等決定のための重要な意思決定のためのデータとして解析データを使用するには、判断の根拠が必要であり、ANN を用いた解析データを使用するには、ANN による換算の妥当性や信頼性を評価する必要がある。本章では構築した ANN を用いて、測定高度の違い、DSM と DEM の差（推定樹高）の違い、測定エリアの色（写真情報）の違いによる換算傾向を取得し、既存の減衰率との比較を行った。また ANN から得られたパラメータを用いることで、従来のパラメータを用いた場合との換算精度の違いを評価した。合わせて各入力変数が構築した ANN の換算において与える影響の評価を行った。

また ANN の学習において、おおよそ必要となる訓練データ数の評価を行った。機械学習では集めたデータ特性とその関連性について学習を行うため、訓練データのデータ量だけでなく、データの質も重要となってくる。そのため一概に必要となる訓練データ量を求めるのは難しい。しかしデータ取得の労力及びコスト面を考えると、おおよそ必要となる訓練データ量を算出する必要がある。本章では、特定の測定高度及び放射線計数率のデータを用意し、その中らかランダムにデータ抽出と学習を実施し、訓練データ数が増えることによる換算値の精度の変化を取得、精度変化が収束する訓練データ数を求め、ある程度の精度を持っ

た換算を行うために必要となるおおよその訓練データ数の評価を行った。

また無人ヘリコプターで取得されたデータを用いて ANN を構築し、1F の事故による放射能汚染の影響を受けたフィールドの測定結果に対する ANN による換算適用を行い、ANN 換算値と FSM 換算値及び地上測定値と比較し、換算精度の評価を行った。

4.2. 換算方法

4.2.1. ANN について

ANN は人間の脳の働きを模倣する数理モデルとして提唱されたものである。単純な ANN の例を図 4-1 に示す。ネットワークに対して、データ入力を行い、図 4-1 の左から入力層、隠れ層、出力層を経て、結果の値である出力値が得られる。最初に入力層にデータが入力される。入力層から隠れ層に値が伝達する工程では、入力層の値に対して重み値が掛け合わされ、各入力層からの値及びバイアス値の総和が隠れ層の関数に入力され変換される。この関数は活性化関数と呼ばれる。次の工程に隠れ層が存在する場合、同じように重み値が掛け合わされ次の隠れ層の活性化関数に入力され、次の層へ出力される。最後は出力層に到達し、出力層の関数によって変換され、出力値が得られる。

ANN における学習は、ある問題を解くために ANN の重み値やバイアス値、関数等のチューニングを行うことである。チューニングに用いるデータセットのことを本章では訓練データと呼ぶ。訓練データは入力変数と目的変数のデータセットを保持しており、入力変数は ANN に入力するデータ、目的変数はその入力変数が入力されたときの正解値である。学習では、ある ANN に対して、訓練データの入力変数を入力し、ANN から出力された値と目的変数の誤差を算出し、その誤差が減る方向に ANN の重み値やバイアス値を更新する。これがチューニング（学習）の工程となる。最後に構築した ANN 学習を評価するために、訓練データ以外のデータセットを用いて ANN で計算を行い、学習が適切に行われているか、過学習が起きていないかを評価する。本章ではこの評価のためのデータをテストデータと呼ぶ。

一般的に広く用いられている誤差伝搬法[5]による ANN の学習は、まずネットワークの構造（隠れ層の数、活性化関数の設定、出力層の関数設定、どの層とどの層を接続するか等）を計算者が設定する必要があり、最適なネットワークを見つけるノウハウが必要となる。本研究では、誤差伝搬法に比べノウハウを必要としない Cascade Correlation（以下「CC」という。）[6]モデルを用いて ANN の構築を行った。CC モデルの詳細については 4.2.2.に示す。

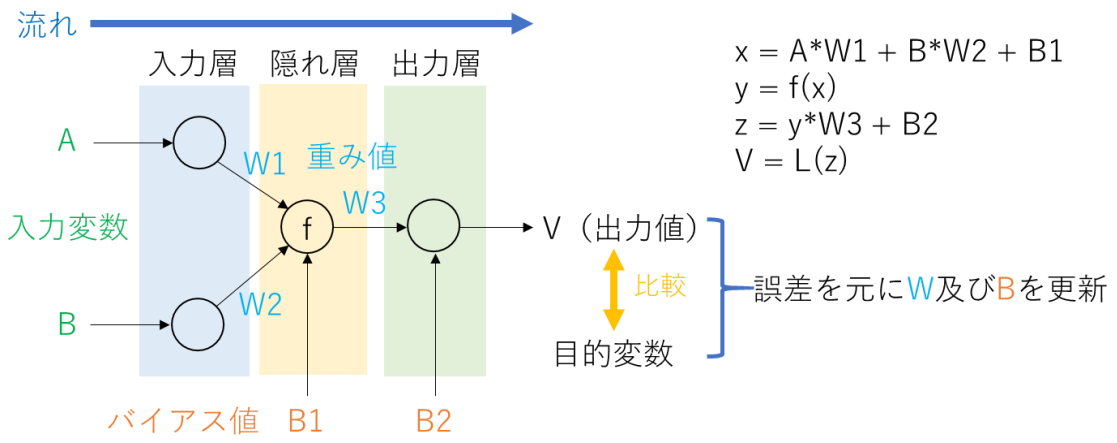


図 4-1 ANN による計算例

ANN では入力層、隠れ層、出力層を経て、結果の値である出力値が得られる。
出力値と目的変数の誤差を減少させるように重み値とバイアス値を更新する。

4.2.2. ネットワークの構築について

ANN におけるネットワークの構築及び学習には、NeuralWorks Predict (NeuralWare, Carnegie, USA)を使用した[7]。ネットワークの構築には CC モデルを用いてネットワークを構築した。CC モデルは建設的な学習ルールであり、フィードフォワードネットワークを構築する教師あり学習のアルゴリズムである。 学習は入力層と出力層のみで構成される最小限のネットワークから始まり、ネットワークの全体的なエラーを最小限に抑えるために、新しい隠れ層が段階的に追加される。 CC は、1 つの隠れ層が 1 つのニューロンを持つネットワークを構築する。 ANNの構築には訓練データからランダムに抽出した 70%のデータを ANN の構築に、残りの 30%の訓練データは出力値と目的変数の誤差評価に使用した。誤差の指標としては相関係数rを用いた。相関係数の算出式（20）に示す。

$$r = \frac{\sum_i^N (y_i - \bar{y})(t_i - \bar{t})}{\sqrt{(\sum_i^N (y_i - \bar{y})^2)(\sum_i^N (t_i - \bar{t})^2)}} \tag{20}$$

ここで Nはデータの総数、yは ANN の出力層からの出力値、tは正規化された目的変数、$\bar{y}$と$\bar{t}$は各値の平均である。ここでのyは出力層におけるシグモイド関数から出力された値であるため、値のスケールを合わせるためにtは正規化されている。学習の工程でrが指定した値以上の改善が見られなかったとき、新たに隠れ層を追加し、新たに隠れ層を追加してもrの改善が見られなかったとき、学習を停止した。重みの更新には Adaptive subgradient method（以下「AdaGrad」という）[8]を使用した。AdaGrad の更新式を（21）に示す。重み

更新の指標となる出力値と目的変数の誤差を算出するための目的関数は、リッジ回帰を追加した交差エントロピーを使用した。使用した目的関数を式（22）に示す。

$$h \leftarrow h + \frac{\partial L}{\partial w_k} \cdot \frac{\partial L}{\partial w_k}$$
$$w_k \leftarrow w_k - \eta \frac{1}{\sqrt{h}} \frac{\partial L}{\partial w_k} \tag{21}$$

$$L(\boldsymbol{w}) = -\frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}(t_i \log y_i + (1-t_i)\log(1-y_i)) + \frac{\alpha}{2}\sum_{k=1}^{M}|w_k|^2 \tag{22}$$

ここでw_kは全部でM個存在するwのk番目の ANN 内の重み値、L は目的関数、ηは学習の更新度合いの係数、α は調整パラメータである。η =0.01、α =0.0005、hの初期値は 10 とし、学習を行った。（21）のhは、これまで経験した勾配の値を二乗和として保持しており、w_kを更新する際に$1/\sqrt{h}$を乗算することで、学習の度合いを調整し、w_kの更新された量に応じて学習係数（$\eta \times 1/\sqrt{h}$）を小さくする効果がある。学習係数は 1 回の学習でw_kをどれだけ更新するかの量を表している。（22）の目的関数は網掛けのある部分が交差エントロピーであり、後ろの項はリッジ回帰の項である。交差エントロピーは出力値と目的変数の誤差を表し、リッジ回帰はw_kが大きくなることを防ぐために付け加えており、αを大きな値に設定するほど、大きな値のw_kを取ることに対して強いペナルティを課すことになる。

以下に、ANN の学習の流れを示す。図 4 -2 に、ANN のモデリングフローチャートを示す。

1） 入力変数の変換

入力変数（放射線測定情報等）をいくつかの関数で変換し、入力変数と目的変数（地上 1 m 空間線量率）の相関が高いデータが、入力データとして追加される。変換された入力データは－1 から 1 の間の値になるように、変換された入力データの最大値と最小値を用いて正規化される。

2） 入力層と出力層の学習

学習は最初に、隠れ層なしで入力層と出力層のみで行われる。出力層の活性化関数にはシグモイド関数使用した。式（23）にシグモイド関数を示す。

$$f(x) = \frac{1}{1 + exp(-x)} \tag{23}$$

なおこのとき出力層から得られる値は 0 から 1 の間の値である。本学習は回帰問題だ

が、目的変数を規格化することでシグモイド関数の出力でも対応できるようにしている。最終的に換算値としての出力値を得るときは、目的変数（地上 1 m 空間線量率）の単位にするために、目的変数と出力層から得られる値（0～1）で相関をとり、変換を行うことで出力値（μSv h^{-1}）を得る。

3）隠れ層の追加

手順 2）の学習において出力値と目的変数のrの改善が見られなくなったとき、1 つの隠れ層を追加する。隠れ層はいくつか候補が作成され、それまでに作られたネットワークの出力値と目的変数の誤差と、相関が最大になるように重み値、バイアス値が選定されたものが追加される。全ての隠れ層の活性化関数は（24）に示す tanh 関数とした。本研究では、上空測定値を ANN によって地上値に換算できるかどうかを判断するために、シンプルに 1 種類の活性化関数を使用することとした。tanh 関数で得られる値は -1 から+1 の間であり、微分値の最大値は 1 となる。シグモイド関数の微分値の最大値は 0.25 であり、tanh 関数はシグモイド関数に比べ勾配が大きいという利点があるため本研究で採用した。

$$f(x) = \frac{exp(x) - exp(-x)}{exp(x) + exp(-x)} \tag{24}$$

4）再学習

隠れ層を追加して学習を再開する。このとき隠れ層と入力層の間の重み値とバイアス値は固定されており更新されない。rが改善されなくなったとき、1 つの隠れ層が再度追加される。隠れ層を追加しても、rが改善されなかった場合、隠れ層の追加は停止され、学習は終了となる。改善はrの値が 0.001 以上の上昇が見られなかったとき、改善がなくなったとみなした。

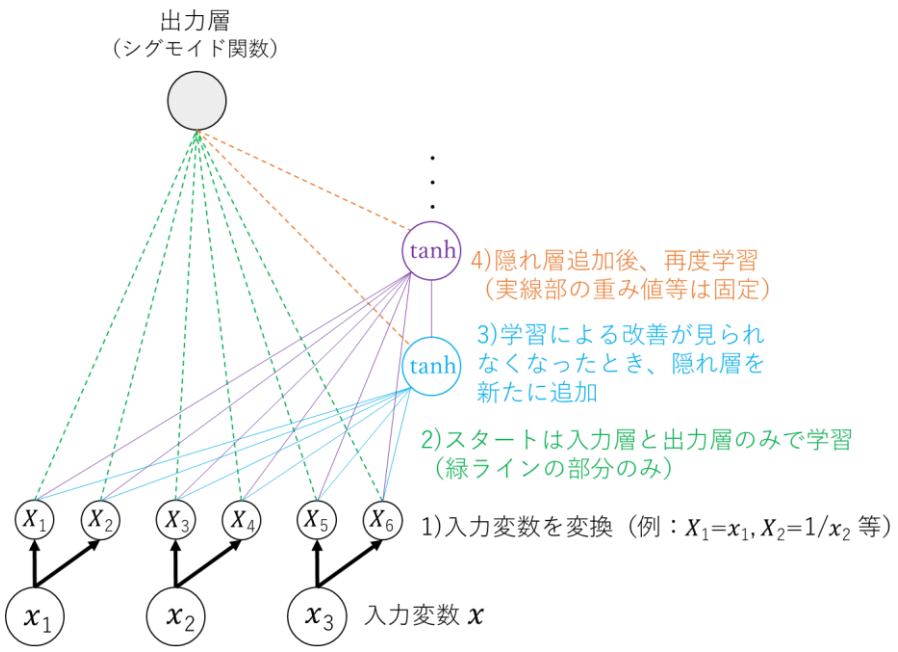


図 4-2 CC モデルを用いた ANN 構築の様子

はじめは入力層と出力層のみのネットワークから始まり、学習工程で隠れ層が追加される。

4.2.3. 使用した訓練データ及びテストデータのデータセット

訓練データ及びテストデータのデータセットは 1F 周辺のエリアにおいて測定したデータを用いた。表 4-1 にデータセットの測定情報を示す。4.4.1.に示す換算特性の評価及び 4.4.2.に示す入力変数の貢献度の評価では、表 4-1 に示すデータセット全てを訓練データとして使用した。 4.4.3. に示す訓練データ数の評価では表 4-1 に示す全てのデータセットから指定した数の訓練データを抽出し、抽出されたデータ以外からテストデータを別に抽出した。 4.4.4. に示すフィールド測定換算値の評価では、表 4-1 に示したエリアで、換算を行うフィールド以外のデータを訓練データとして使用し、換算を適用したフィールドのデータをテストデータとして使用した。なお表 4-1 に示すエリア A、B、C は 3.4.の測定エリア A、B、C と同じである。

ネットワークの入力変数には無人ヘリコプターで取得した放射線測定値及び地形データ、写真色データを使用した。目的変数は同エリアで歩行式サーベイメータを使用して取得した地上 1 m 空間線量率を使用した。表 4-2 に入力変数と目的変数の詳細を示す。放射線測定値は図 4-3 に示すように、散乱線成分（P2）、Cs137 からの直接線成分（P3）、天然放射線影響の成分（P4、P5）で分け、入力変数として用いた。得られた表 4-1 のデータセットは主に放射性セシウムにより汚染されたエリアで取得されたデータである。表 4-1 のデータセットの P2、P3 のカウント比には平均的に P2：P3＝12：1 の関係性があり、P4、P5 の値はおおよそ一定であった。

図 4-4 に表 4-1 の全てのデータセットの P1 及び全計数率（P2+P3+P4+P5）の値の分布を示す。本研究で取得したデータセットは P1 が 40-170 m、全計数率が 0-5000 cps のデータが多く、P1 が 200 m 以上及び全計数率が 10000 cps 以上のデータは数が少ない。

表 4-1 学習に使用したデータセットの測定情報

エリア	測定時期	測定範囲（km²）	測定平均高度（m）	測定間隔（m）	測定速度（m/s）	データ数
A	2018/8/19	1.76	55.3	50	5	3442
B	2018/8/22	1.53	61.3	50	5	3842
C	2018/9/2	1.36	50.4	50	5	3558
D	2019/6/13,17,19,20 2020/7/24,26,28	11.4	121.3	80	8	10080
E	2019/6/25,26,27 2020/7/1,2,3,11,18,24,25	19.8	132.6	80	8	10271
F	2020/7/1,2,9,10,11,15,17	10.6	133.9	80	8	10185

表 4-2 学習に使用した入力変数と目的変数

入力変数	データ	単位
P1	測定対地高度	m
P2	50 - 450 keV 間の計数率 （散乱線）	cps
P3	450 - 900 keV 間の計数率 （直接線）	cps
P4	900 - 1400 keV 間の計数率 （U、Th 系列の天然放射線）	cps
P5	1400 - 2800 keV 間の計数率 （K40、U、Th 系列の天然放射線）	cps
P6	測定ポイントにおける DSM と DEM の差 （推定樹高：DSM-DEM）	m
P7-9	測定ポイントにおける 上空から撮影したエリア写真の色情報 （RGB 値：0～255）	-
目的変数		
T1	地上 1 m 空間線量率測定値	μSv h^{-1}

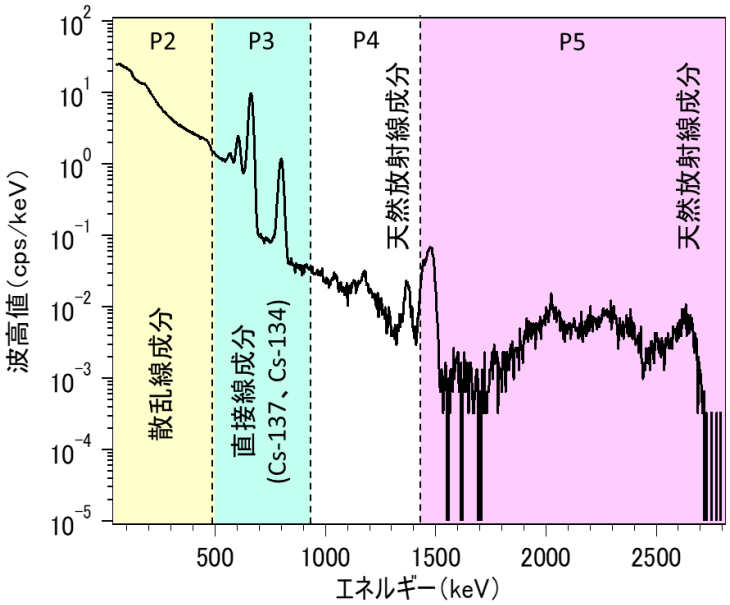


図 4-3　エネルギー区分ごとの入力変数の設定

得られたスペクトルデータをエネルギー区分ごとに合計し、入力変数として使用した。

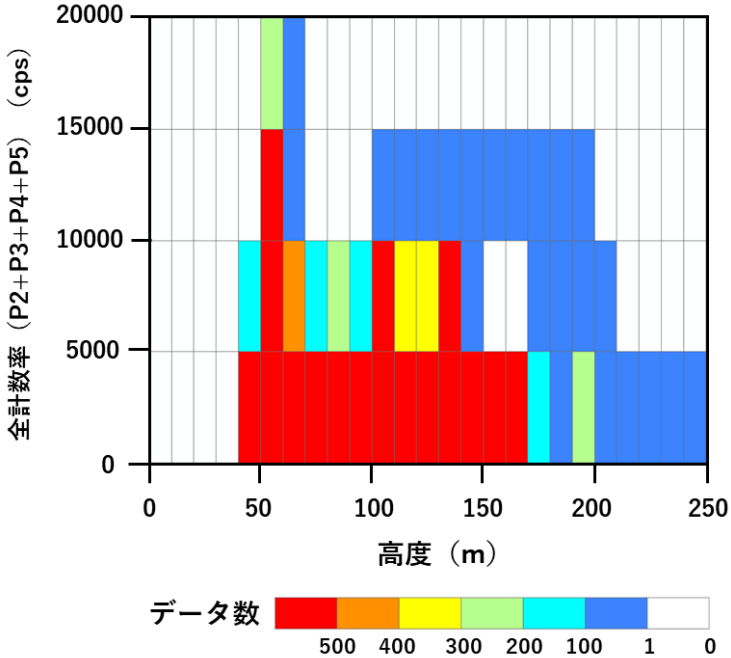


図 4-4　訓練データのデータ分布

全計数率は 5000 cps ごと、高度は 10 m ごとにデータ数をカウントしている。

4.2.4. 構築したANNによる換算方法

上空測定値を構築したANNを用いて換算するにあたって、表 4-2に示した入力変数のデータセットを作成した。構築したANNでは一つの入力変数のセットから、そのデータが得られたポイントにおける地上1m空間線量率（μSv h^{-1}）が得られる。無人ヘリコプターで得られた測定データでそのまま換算すると、測定されたポイントしか換算を行うことができないため、測定高度と放射線計数率のデータ（P1～P5）はArcGISを用いて、クリギング処理を行い内挿補間してデータを増量させることで、測定ポイント以外の場所もANN換算をできるようにした。クリギングには球セミバリオグラムモデルを使用した。入力変数データセットは10 m間隔でポイントを作成及び取得し、構築したANNに対して入力し、出力値を得た。

4.3. 測定方法

表 4-1に示したデータセット（訓練及びテストデータのセット）は1Fの事故により放出された放射性物質で汚染された福島県内の6つのエリアで取得した。測定したエリアは全て1Fから半径約10 ㎞圏内に位置する。上空からの測定は無人ヘリコプターにLaBr3(Ce)シンチレータ検出器を搭載し、ガンマ線の測定を行った。地上におけるガンマ線測定にはKURAMA-IIを用いた。各種機器は3.4.1.で用いたものと同様であるため本章における詳細な説明は省略する。測定エリアの地形情報は、無人ヘリコプターを用いて上空からの写真撮影を行い、3Dオルソ画像を作成することでDSMを取得した。DEMは国土地理院における基盤地図情報サイトから入手したデータを使用した。

4.4. 評価方法

4.4.1. 換算特性の評価について

表 4-1に示した全てのデータを訓練データとしてANNを構築し、構築したANNの換算の傾向を評価した。指定した入力変数を使用してANNを構築し、構築したANNが出力する値から測定高度の変化による減衰率と推定樹高（DSMとDEMの差）の変動による減衰率を算出した。算出した減衰率はFSMやFSFMで用いていたパラメータと比較を行った。また入力変数に測定エリアの色データ（P7,P8,P9）を使用したANNによる換算において、色ごとに換算値がどのように変化するのか評価した。以下に構築したANNのパターンを示す。

パターン 1：
入力変数として測定高度（P1)、放射線計数率（P2, P3, P4, P5）を使用した ANN

パターン 2：
入力変数として測定高度（P1)、放射線計数率（P2, P3, P4, P5）と推定樹高（P6）を使用した ANN

パターン 3：
入力変数として表 4 -2 に示した入力変数全てを使用した ANN

パターン 1 は測定高度の変化による換算の違いを評価するために用いた。得られたパターン 1 の ANN を使用し、P1 を変動させたテストデータに対して換算を適用し、高度変化による換算値の減衰率を算出した。テストデータの P2、P3 のカウントは P2：P3＝12：1 として P2 を 1000～15000 cps まで 1000 cps 刻みで 15 パターン作成し、P4、P5 の値は訓練データの平均値をテストデータとした。パターン 1 の ANN の換算傾向は、測定高度と放射線計数率のみを入力変数に用いており、適切に学習されている場合、FSM による換算と同様に、測定高度と全計数率（P2+P3+P4+P5）に則った換算傾向を示し、換算のパラメータ(CD及びAF)の値は異なるが、FSM の換算傾向と大きく異なることはないと考えられる。パターン 1 の ANN の換算値が FSM による換算と同様の換算傾向であると考えた時、ANN 換算値と全計数率（P2+P3+P4+P5）の比は$CD \cdot \exp[AF(H_{m\,i} - H_{std\,i})]$と同等である。パターン 1 の ANN 換算値と全計数率の関係性から、パターン 1 の ANN におけるCD及びAFを算出し、表 2 -2 に示した実測の減衰傾向と比較した。

パターン 2 は推定樹高の変化による換算の違いを評価するために用いた。得られたパターン 2 の ANN を使用し、P6 を変動させたテストデータに対して換算を適用し、推定樹高の変動による換算値の減衰率を算出した。テストデータの P2、P3 のカウントは P2：P3＝12：1 として P2 を 1000～15000 cps まで 1000 cps 刻みで 15 パターン作成し、P4、P5 の値は訓練データの平均値をテストデータとした。得られた推定樹高ごとの ANN 換算値は推定樹高が 0 m のときを基準として規格化し、2.6.1.において実測で得られた森林遮蔽減衰率と比較した。

パターン 3 では、P7、P8、P9 を変動させたテストデータに対して ANN による換算を適用し、色の違いによる換算値の変化を算出した。テストデータの P7、P8、P9 は以下の色データを使用した。

1） 森林エリアにおける RGB データ 10 点の平均値 RGB=（85, 98, 75）■
2） 田んぼのエリアにおける RGB データ 10 点の平均値 RGB=（173, 183, 111）■
3） 建物があるエリアにおける RGB データ 10 点の平均値 RGB=（222, 213, 211）■

4） 道路のエリアにおける RGB データ 10 点の平均値 RGB=（213，213，214）■
5） 白色の RGB データ RGB=（255，255，255）□
6） 黒色の RGB データ RGB=（0，0，0）■

各色の換算値は 5)の白色の換算値（P1=50 m、P6＝0 m）を 1 として規格化し、比較した。テストデータの P7、P8、P9 以外の入力変数は、P2～P5 は基本、訓練データの平均値（P2＝2810 cps、P3＝228 cps、P4＝17 cps、P5＝16 cps）を使用し、(a) P1=50 m、P6＝0 m、(b) P1=50 m、P6=20 m、(c) P1=100 m、P6＝0 m、(d) P2 と P3 を他の二倍の値、P1=50 m、P6=0 m の 4 パターンの換算値を作成し、各入力変数の変化による換算値の変動を比較した。

4.4.2. 入力変数の貢献度の評価について

各入力変数が ANN の換算においてどの程度の影響力があるのか評価するために、表 4-1 に示したエリアで取得した全てデータを用いて ANN を構築し、構築した ANN における各入力変数の貢献度を算出した。貢献度の算出の流れを以下に示す。

1） 表 4-1 に示したエリアで取得した全てデータを用いて ANN を構築する。
2） 構築した ANN で訓練に使用した入力変数セットを用いて ANN 換算値を得る。
3） 構築した ANN で訓練に使用した各入力変数の中央値を算出する。
4） 貢献度を算出する入力変数を 3)で算出した中央値に置き換え、再度 1)で構築した ANN により換算値を得る。
5） 2)と 4)の換算値の差を得る。
6） 各入力変数で得られた 5)の換算値の差で絶対値が最大のものを基準として値を規格化（最大値＝1）し、各入力変数の換算値の差のデータセットを得る。
7） 6)で得られた値の平均値を算出し、貢献度を得る。

以上の流れで、同様に FSM の換算結果における測定対地高度及び全計数率の貢献度を算出した。貢献度を算出する元データとしては 3.4. における測定データを使用した。ANN 換算と FSM 換算における各入力変数の貢献度を比較し、ANN 換算の換算傾向を評価した。

4.4.3. 訓練データ数の評価について

どの程度の数の訓練データを用意することで ANN 換算値と地上測定値の誤差が収束するのか、指定した訓練データを用いて検証を行った。訓練データは表 4-3 に示す条件のデータを用いて学習を行った。各訓練データセットは、図 4-4 に示す全データセットの中でデータ数が多い箇所を抽出した。ある条件のデータセットからランダムに、指定した数の訓

練データを抽出して ANN を構築し、訓練データに使用したデータ以外の 500 データをテストデータとして、構築した ANN により換算を適用し、ANN 換算値と目的変数の誤差を算出した。誤差は式（4）の *RMSE* を用いて算出した。本章ではこのトレーニングのことを「ランダムトレーニング」と呼ぶこととする。

表 4-3　ランダムトレーニングに使用したデータセット

データ	P1（m）	P2+P3+P4+P5(cps)	T1（μSv h−1）	データ数
Type1	50−60	0−5000	0.12−3.5	2469
Type2	50−60	5000−10000	0.39−6.8	1544
Type3	110−120	0−5000	0.09−7.1	4189
Type4	50−60	0−5000	0.12−1.0	1626
Type5	110−120	0−5000	0.09−1.0	2458

4.4.4.　フィールド測定値換算の評価について

表 4-1 に示したエリアで取得したデータを用いて ANN を構築し、地上測定値及び FSM、MLEM の換算値と比較を行った。ANN による換算はエリア A、B、C のエリアに対して適用を行った。エリア A を換算する ANN の構築にはエリア A 以外で取得したデータを訓練データとし、エリア A のデータをテストデータとして用いた。エリア B、C も同様にして対象エリア以外のデータで ANN を構築し、換算を行った。地上測定値と各種換算値の比較には、式（3）（4）に示したRD及び *RMSE* を用いて誤差を算出し評価を行った。

合わせて ANN 換算値を平均化するメッシュサイズを変更し、メッシュサイズごとの地上測定値と換算値の *RMSE*、*NMSE* 及びRDの標準偏差を算出した。そしてメッシュサイズ増加による換算値と地上測定値の誤差変動を観察した。

4.5.　結果と考察

4.5.1.　換算特性の評価

パターン 1 の学習における測定高度ごとの ANN 換算値と全計数率（P2+P3+P4+P5）の比を図 4-5 に示す。図 4-5 に示した ANN の減衰傾向に対して指数関数近似を行いCD及びAFを求めた結果、CD=0.000283 μSv h^{-1} cps^{-1}、AF =0.00239 m^{-1} となった。このCD及びAFを用いて、表 4-1 に示した全測定データに対して FSM の換算を行い、地上測定値と FSM 換算値のRDヒストグラムを作成した結果を図 4-6 に示す。図 4-6（a）は表 2-2 に示したキャリブレーション測定から得られたCD及びAFを用いた場合、図 4-6（b）はパタ

ーン 1 の ANN 換算から得られたCD及びAFを用いた場合である。図 4 -6（a）では地上測定値よりも高めの傾向で換算が行われていたが、図 4 -6（b）ではRDの中央値が 0.804 から-0.031 と 0 に近づき、また *RMSE* は（a）1.073 から（b）0.710 と(a)に比べ小さな値となり、より地上測定値に近い換算結果を得ることができた。表 2 -2 に示す FSM のCD及びAFは、空気による減衰傾向のみを取得するために平面で障害物のないエリアを選定し得たものである。ANN 換算値から得られたCD及びAFは、平面なエリアのみではなく、多くの地形パターンから得られたものであり、表 2 -2 のCD及びAFと比べて、測定エリアが限定的ではない。ANN では森林部や地形の凹凸があるエリア等におけるCD及びAFを平均化した値を得ることができたため、精度が向上したと考えられる。

パターン 2 の学習における推定樹高ごとの ANN 換算値の減衰率を図 4 -7 に示す。ANN の換算傾向で得られた推定樹高ごとの減衰率は図 2 -6 において実測で得られた森林遮蔽減衰率とおおよそ同様の減衰傾向が得られたが、推定樹高が 15 m 付近で最も減少し、それ以降は上昇する傾向が得られた。これは実測で得られた森林遮蔽減衰率は森林のみでパラメータを算出したが、ANN 換算値は森林のみではなく住宅街等も含まれているため、傾向が若干異なったと考えられる。ANN で得られた減衰傾向に対して、二つの指数関数を用いてフィッティングを行い、得られた近似式を用いて FSFM による換算を行った。換算式を（25）に示す。

$$Y_{ANN_F\,i} = (C_{all\,i} - C_{BG}) \cdot CD \cdot \exp[AF(H_{m\,i} - H_{std\,i})] \cdot (A_1 \exp[FF_1 \cdot h_i] + A_2 \exp[FF_2 \cdot h_i])^{-1} \quad (25)$$

A_1、A_2、FF_1及びFF_2は図 4 -7 示した値に対するフィッティングから、A_1=0.863、A_2=0.152、FF_1=-0.0332 m^{-1}及びFF_2=0.0383 m^{-1}が得られた。

パターン 2 の ANN 換算傾向から得られたパラメータを用いて、表 4 -1 に示した全測定データの中で、P6 が 5 m 以上のデータに対して FSFM の換算を行い、地上測定値と換算値のRDヒストグラムを作成した結果を図 4 -8 に示す。図 4 -8 の換算は表 2 -2 に示した、キャリブレーション測定から得られたCD及びAFを用いており、図 4 -8（a）は図 2 -6 で得られたFFを用いて FSFM により換算した場合、(b）はパターン 2 の ANN 換算傾向から得られたパラメータ（FF_1、FF_2）用い、式（25）で換算した場合のRDヒストグラムである。両者の換算結果を比較した結果、ANN から得られた換算傾向を用いても、従来のFFを用いた FSFM の換算に比べて、地上測定値との *RMSE*、RD中央値及び標準偏差に大きな改善は見られず、同様の換算傾向を示した。

パターン 1 とパターン 2 の結果から、構築した ANN は FSM 及び FSFM と同じような傾向で換算されていることが分かった。また ANN 換算値からパラメータを取得し、他の換算手法のパラメータを補う手法として活用できることが分かった。

パターン 3 の学習における RGB の変化に伴う ANN 換算値の違いを図 4 -9 に示す。図 4 -9 を見ると、森林色は他と比較して値が若干高めに換算されていることが分かる。これは森林エリアの場合、樹木による遮蔽効果があるためと考えられる。合わせて黒色に近いエリアはおおよそ森林エリアであるため、黒色も高めに換算されたと考えられる。図 4 -9 の（a)、(b)、(c)、(d）を比較すると、(a）に示した色（P7、P8、P9）の違いによる線量率比の変動は基準の白色を 1 として 0.8～1.1 の間の変動であり、他の入力変数の違いによる変動に比べ小さく、P7、P8、P9 は他の入力変数に比べて換算に与える影響が小さいことが分かった。

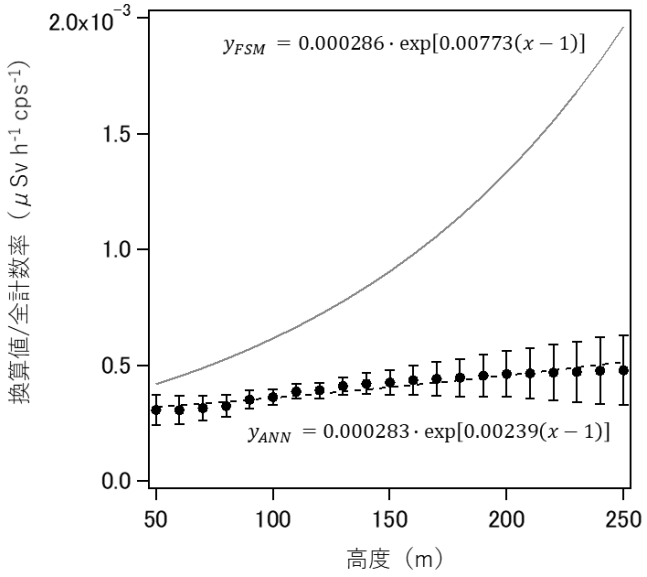


図 4 -5　パターン 1 の学習における測定高度ごとの ANN 換算値と全計数率の比

黒い点で示したものが ANN から得られた換算傾向、グレーのラインで示したものが表 2 -2 で示したパラメータを用いた減衰率である。バーは ANN 換算傾向の標準偏差である。

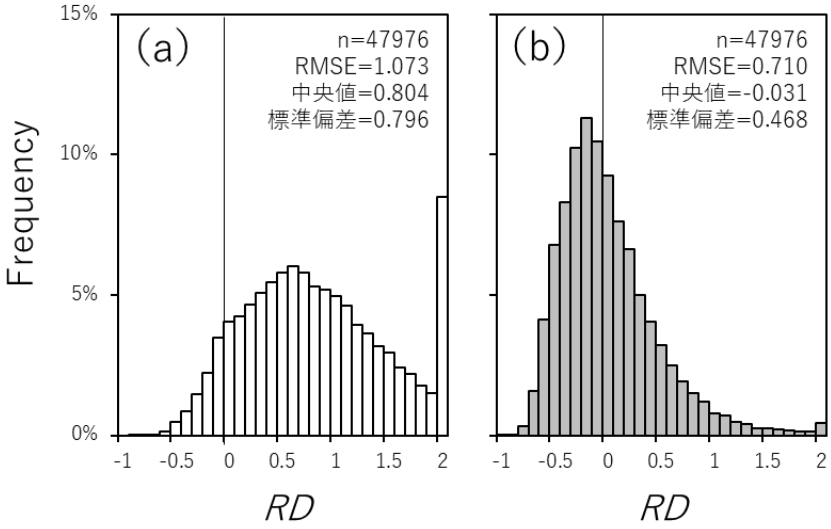


図 4-6 FSM 換算値と地上測定値のRDヒストグラム

（a）は表 2-2 のCD及びAFを用いて、（b）は ANN 換算傾向から算出したCD及びAFを用いて FSM により換算した結果と地上測定値のRDヒストグラムを作成した結果である。ヒストグラムの右端の値は$RD \geqq 2$ の Frequency である。

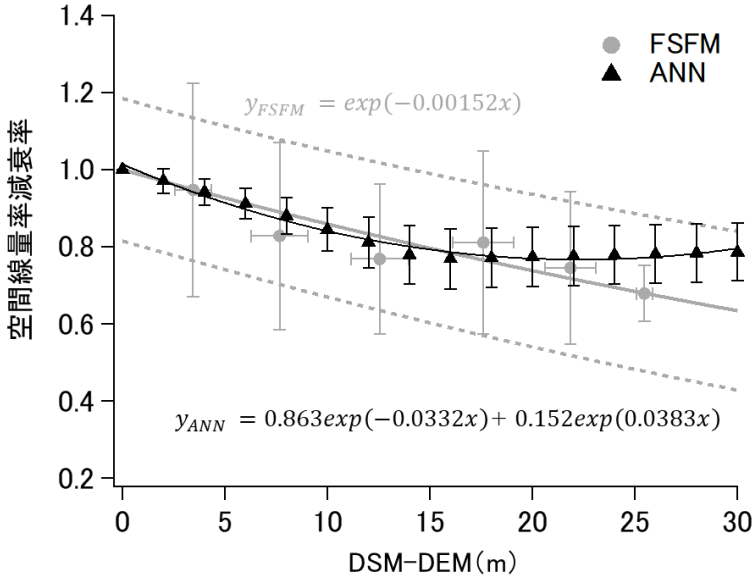


図 4-7 パターン 2 の学習における推定樹高ごとの ANN 換算値の減衰率

黒色で示したものが ANN から得られた減衰率、グレーで示したものが図 2-6 で示した減衰率である。バーは空間線量率減衰率の標準偏差である。

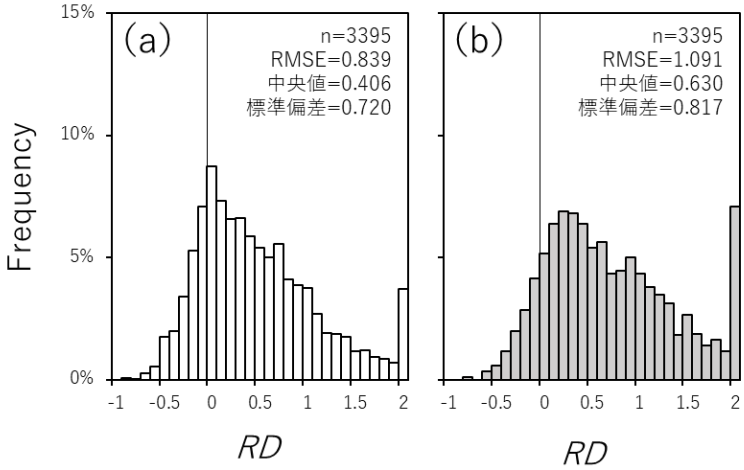


図 4-8　FSFM 換算値と地上測定値のRDヒストグラム

(a) は表 2-2 のCD及びAFと図 2-6 から得られたFFを用いて、(b) は表 2-2 のCD及びAFと ANN 換算傾向から算出した図 4-7 に示した換算式を用いて FSFM により換算した結果と地上測定値のRDヒストグラムを作成した結果である。ヒストグラムの右端の値はRD≧2 の Frequency である。

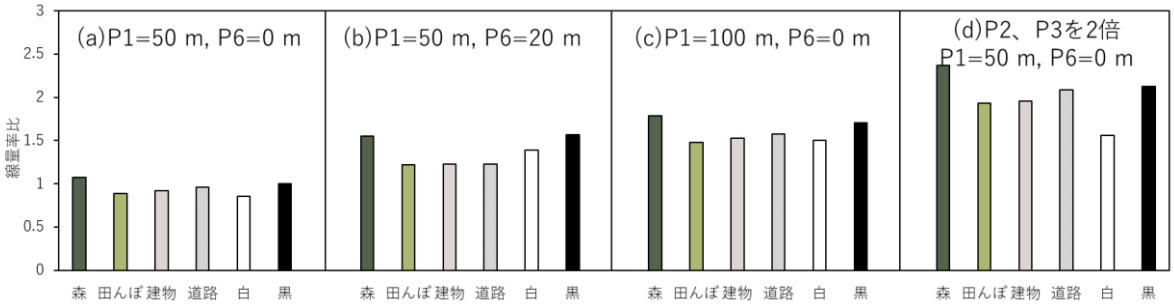


図 4-9　パターン 3 の学習における入力変数の変化に伴う ANN 換算値の違い

(a) の白の値を 1 とし規格化した値を示している。

なお各棒グラフの色が、入力変数として使用した色を示している。

4.5.2.　入力変数の貢献度の評価

図 4-10 は ANN による換算及び FSM による換算における各入力変数の貢献度を算出した結果である。ANN の換算においては P3 が最も貢献度が高い結果となった。P3 は放射性セシウムの直接線の影響を受ける領域の計数率である。本研究で換算を適用したエリアは、放射性セシウムにより主に汚染されたエリアであり、空間線量率の算出に影響を与える因子として重要な値であり、妥当な結果と考えられる。次に P1 が高い結果となった。FSM の換算における貢献度と比較すると、FSM の測定高度と ANN の P1 の貢献度は同じような値となった。これらの結果から、本研究で構築した ANN による換算は　4.5.1.　の結果

も踏まえ、FSM による換算とおおよそ同じ傾向で換算されていることが分かった。

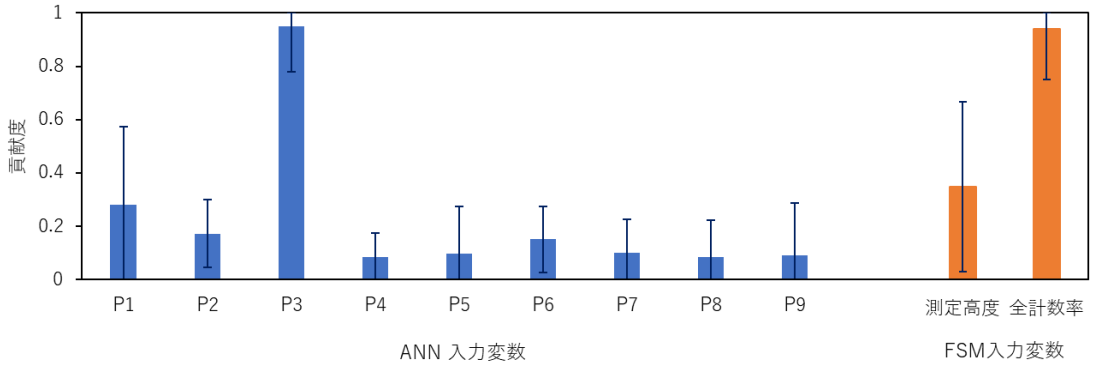


図 4-10 各入力変数の貢献度

ANN 換算の入力変数は表 4-1 に示したエリアで取得した全てデータを用いて構築した ANN から、FSM 換算の入力変数は3.4. におけるエリアA、B、Cの測定データの換算結果から貢献度を算出した。バーは貢献度の標準偏差である。

4.5.3. 訓練データ数の評価

ランダムトレーニングを行った結果を図 4-11 に示す。図 4-11 の各値はランダムトレーニングを 10 回実施し、得られた *RMSE* を平均した値である。各トレーニング共に学習データ数の増加に伴い、目的変数との *RMSE* の改善が見られた。また各トレーニング共に学習データ数が 200 以上で *RMSE* が収束した。Type1、Type2 及び Type3 の *RMSE* の収束値が異なる値となった理由としては、各トレーニングの訓練データの目的変数の分散が影響したと考えられる。Type4 及び Type5 は Type1 及び Type3 の訓練データに目的変数の値範囲の制限を与え、データを抽出したものである。Type4 及び Type5 は同程度の *RMSE* で収束した。これらの結果より、得られた入力変数の領域（高度 10 m 区切り、全計数率 5000 cps 区切り、目的変数 1.0 μSv h^{-1} 区切り）における訓練データが目安として 200 以上あれば、一定の精度を持った換算を行うことができることが分かった。

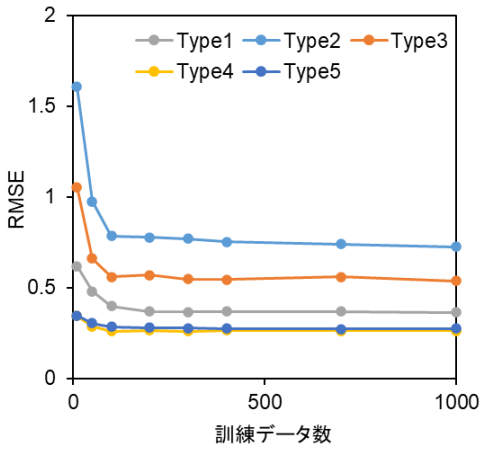


図 4-11 訓練データ数と ANN 換算値と地上測定値の *RMSE* の関係

それぞれの値はランダムトレーニングを 10 回実施し、得られた *RMSE* の平均値である。

4.5.4. フィールド測定値換算の評価

エリア A、B、C において測定したデータを、適用するエリア以外の訓練データを用いて ANN を構築し、換算を行った。エリア A の換算結果を図 4-12、エリア B の結果を図 4-13、エリア C の換算結果を図 4-14 に示す。各エリアの換算結果の（a）は測定エリアと測定ラインを示したもの、（b）は地上 1 m 空間線量率測定値、（c）は FSM による換算値、（d）は入力変数として P1、P2、P3、P4、P5 を、（e）は P1、P2、P3、P4、P5、P6 を、（f）は P1、P2、P3、P4、P5、P6、P7、P8、P9 を使用した ANN による換算値である。各換算手法と地上測定値の*RD* ヒストグラムを図 4-15 に示す。ANN 換算値のヒストグラムは P1、P2、P3、P4、P5、P6、P7、P8、P9 を使用した ANN による換算値と地上測定値の*RD* を用いて作成している。各 ANN の換算値は FSM 及び MLEM に比べ、*RD* の標準偏差がおおよそ半分程度に減少し、また*RD* 中央値をより 0 に近づけることができた。

図 4-16 は各エリアにおいて、換算値を平均化するメッシュのサイズ増加における地上測定値と上空測定換算値の *RMSE*、*NMSE* 及び*RD* の標準偏差を示している。図 3-28 の結果に P1、P2、P3、P4、P5、P6、P7、P8、P9 を使用した ANN による換算値の結果を付け加えたものである。FSM 及び MLEM に比べ、ANN は小さいメッシュサイズの段階で*RD* 標準偏差が安定し、他の換算値と比べて値が半分程度と小さい特徴が見られた。*RMSE* 及び *NMSE* に関しては、FSM 及び MLEM に比べ ANN は絶対値が減少したものの、メッシュサイズ増加による変動は同じような傾向を示した。

図 4-17 は各測定エリアにおける各換算値の*RD* 標準偏差を比較したグラフである。各 ANN の値は、入力変数に①P1 と全計数率（P2+P3+P4+P5）、②P1～P5、③P1～P6、④P1～P9 を使用して訓練を行った ANN により換算した値である。図 4-17 では特にエリア B において、ANN の入力変数を増やすと*RD* の標準偏差の減少が見られた。しかし特定の入

力変数を付け加えることにより、劇的にRDの標準偏差が減少することはなかった。図 4-10 に示した入力変数の貢献度の結果から、本研究で構築した ANN の換算において重要な因子は P3 であることが分かっている。ANN における換算におけるRD標準偏差が他の換算手法に比べ減少した理由としては、FSM 及び MLEM で考慮されていなかったエネルギー区間ごとの放射線計数率情報と写真色情報が入力変数として付け加えられることにより、換算精度が少しずつ改善されたためと考えられる。

図 4-12、図 4-13、図 4-14 の各（d）（e）（f）の ANN の換算値のマップを見ると、入力変数の増加と共に道路や線路等の除染エリア、池等の線量が局所的に低いエリアの分布の表現ができることが分かった。しかし、(c)の FSM の結果と比較すると、特に図 4-12、図 4-13 において線量の高いエリアが ANNでは低めの換算結果となっていることが分かる。この原因は高線量のエリアの学習データ数が不足しているからと考えられる。

図 4-18 は各エリアにおける ANN 換算において、訓練データ数が 200 未満で換算されたエリアを示したものである。エリア A で訓練データ数が 200 未満のエリアは、プルームが通過した高線量率のエリアが主に該当した。エリア B の訓練データ数が 200 未満のエリアは、エリア北側の空間線量率がおおよそ 5 μSv h^{-1} 以上のエリアが該当した。エリア C は線量率が低い箇所においても、訓練データ数が 200 未満であったが、これは該当する測定高度（P1）領域に訓練データ数が少ないためであった。

図 4-19 はエリア A、B、C の ANN 換算値と地上測定値を、訓練データ数ごとに比較したものである。訓練データ数が 200 未満(a)と 200 以上(b)を比較すると、200 以上の方が *RMSE*、中央値、標準偏差ともにより地上測定値に近い換算をできていることが分かる。合わせて地上測定値が 5 μSv h^{-1} 以上の個所は多くの場合、学習データ数が 200 以下であることが分かる。高線量エリアは訓練データの不足により、低めの換算結果になったと考えられる。エリア C においては全体的に訓練データが不足していたが、図 4-15 を見ても ANN の換算精度は他のエリアに比べて悪い結果ではなかった。これは入力変数の換算における貢献度が P1 の影響が放射線計数率（主に P3）の貢献度に比べて低いからと考えられる。

今後、訓練データが 200 に満たない測定パターンにおいて、訓練データを増やすことで換算精度の向上が期待できる。特に放射線計数率の入力変数パターンをより多く学習させることが精度向上に貢献すると考えられる。しかし実測により高線量エリアの測定データを取得すことは、現状困難である。実測データ取得が難しいデータ領域に関しては、シミュレーション等を用いた訓練データの補間により、精度を向上させることができると考えられる。また本研究では ANN の構築に使用した活性化関数は一種類のみであり、ネットワーク構造の最適化等を行っていない。本研究では ANN のネットワーク構造の決定を自動で行うことができる CC モデルを使用したが、今後ネットワーク構造の最適化を行うことにより、換算精度を向上させることができると考えられる。

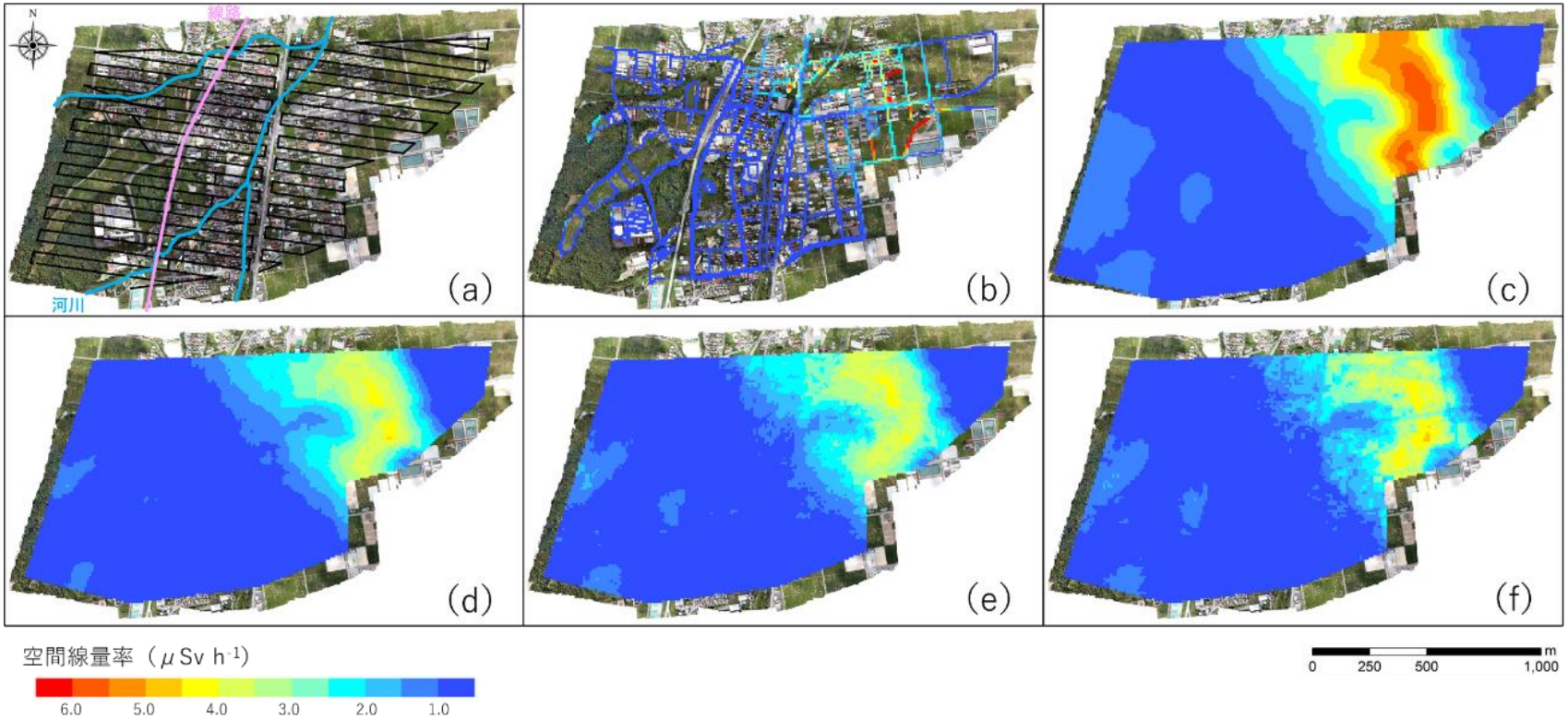


図 4-12　エリア A における空間線量率マップ

（a）は測定ラインとエリアの様子を示したもの、（b）は地上 1 m の空間線量測定値、（c）は FSM 換算値、（d）は入力変数として P1、P2、P3、P4、P5 を、（e）は P1、P2、P3、P4、P5、P6 を、（f）は P1、P2、P3、P4、P5、P6、P7、P8、P9 を使用した ANN による換算値である。

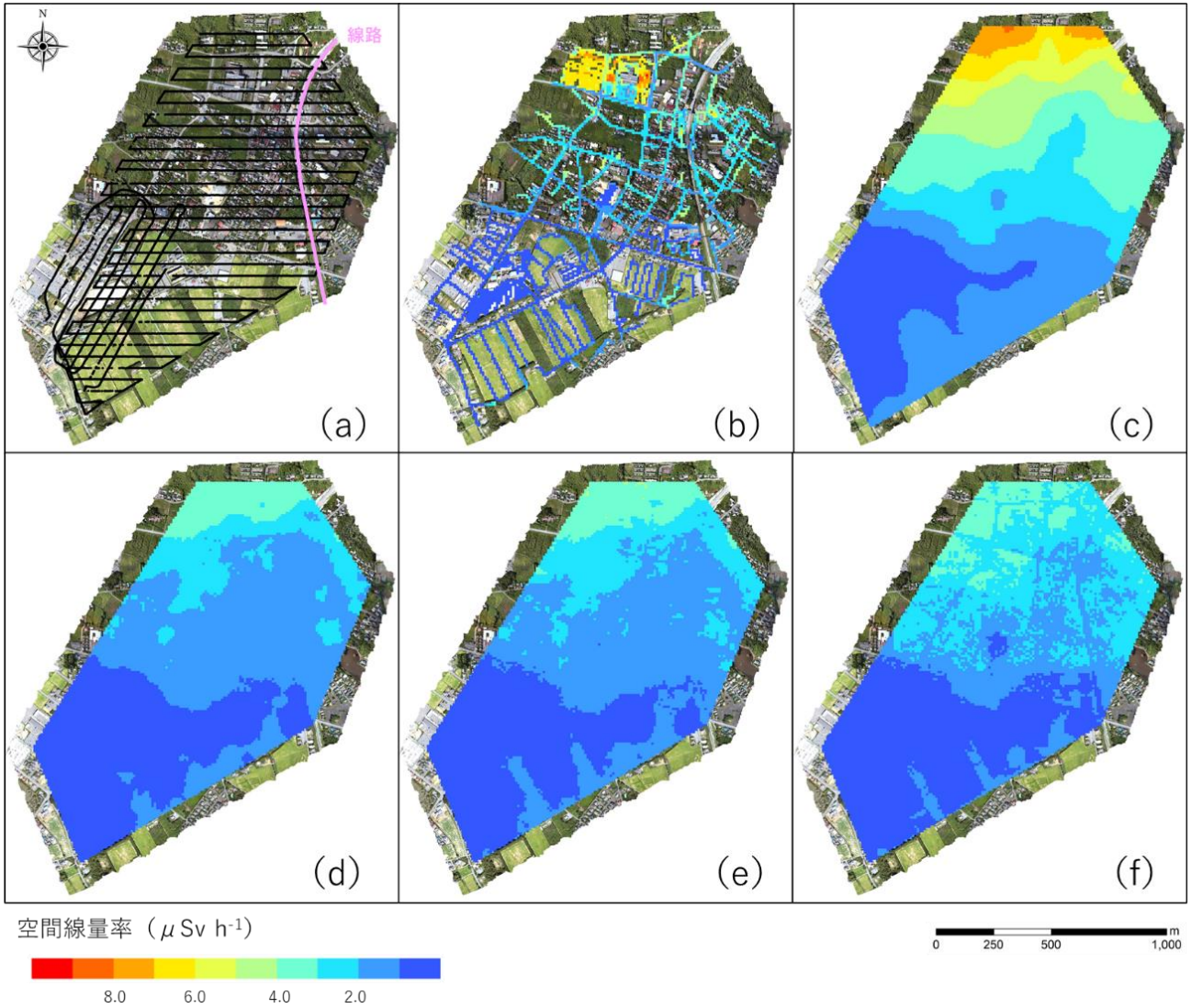


図 4-13　エリア B における空間線量率マップ

（a）は測定ラインとエリアの様子を示したもの、（b）は地上 1 m の空間線量測定値、（c）は FSM 換算値、（d）は入力変数として P1、P2、P3、P4、P5 を、（e）は P1、P2、P3、P4、P5、P6 を、（f）は P1、P2、P3、P4、P5、P6、P7、P8、P9 を使用した ANN による換算値である。

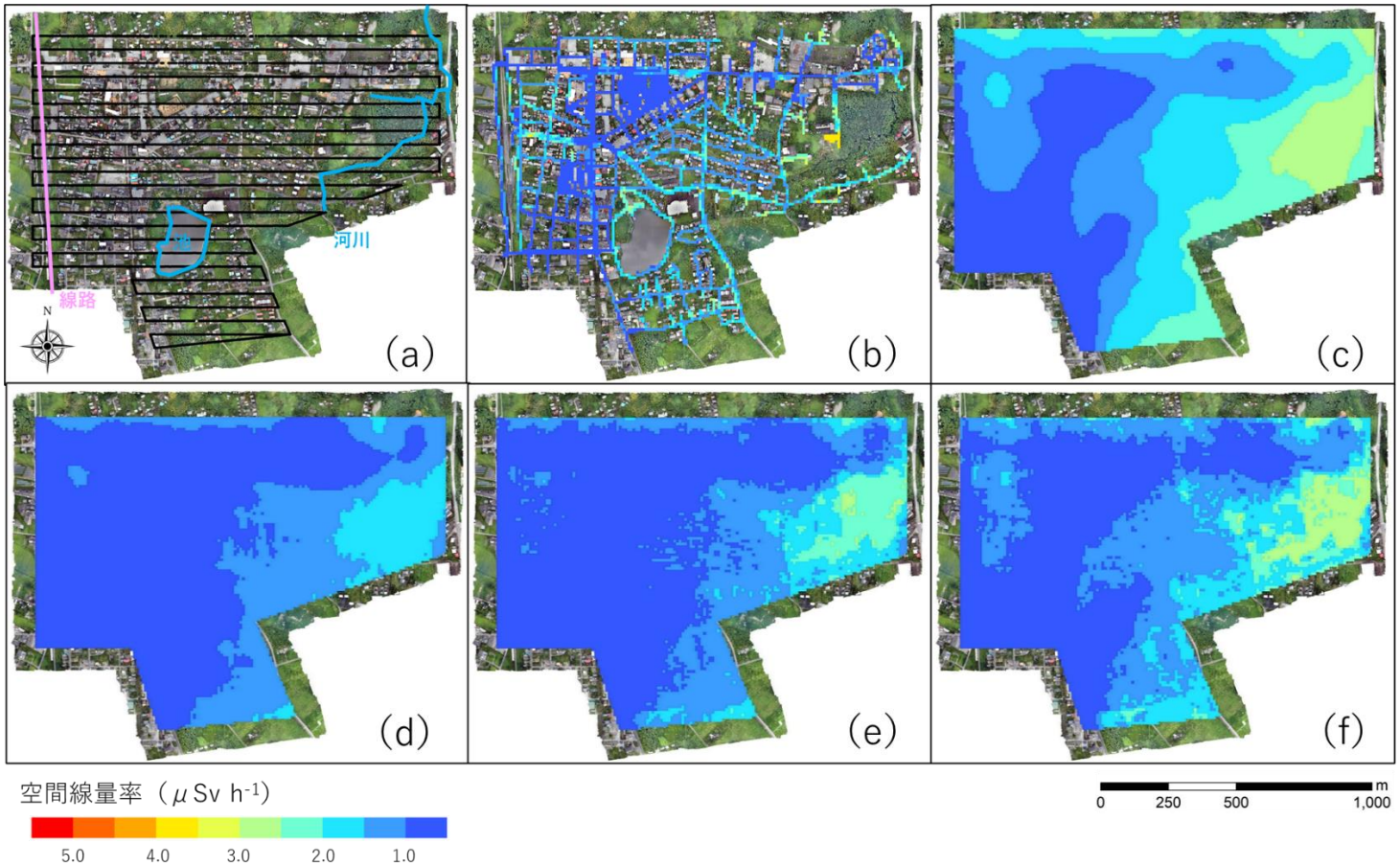


図 4-14　エリアＣにおける空間線量率マップ

（a）は測定ラインとエリアの様子を示したもの、（b）は地上 1 m の空間線量測定値、（c）は FSM 換算値、（d）は入力変数として P1、P2、P3、P4、P5 を、（e）は P1、P2、P3、P4、P5、P6 を、（f）は P1、P2、P3、P4、P5、P6、P7、P8、P9 を使用した ANN による換算値である。

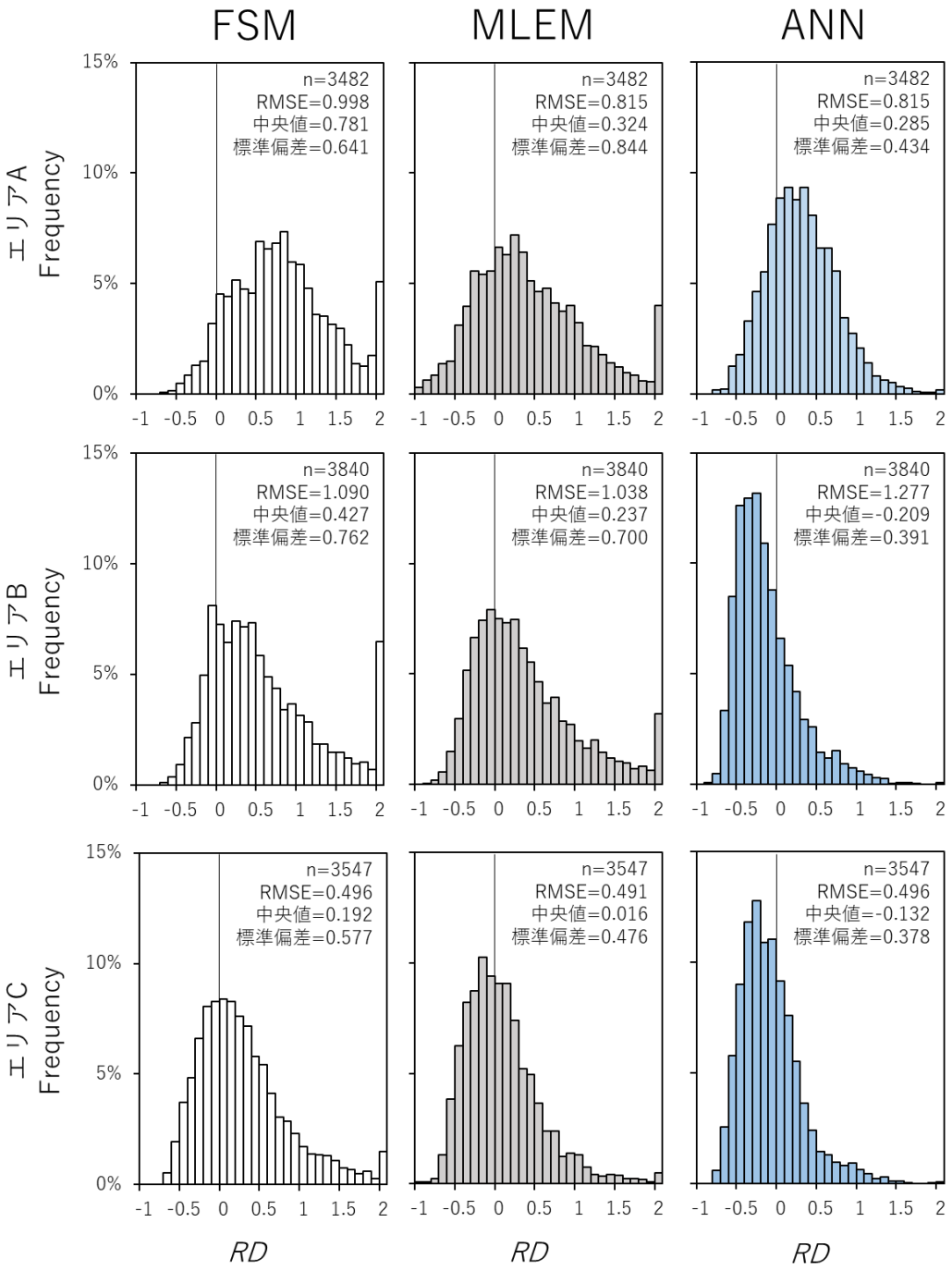


図 4-15 エリア A、B、C における上空測定換算値と地上測定値のRDヒストグラム

左は FSM 換算値、中央は MLEM 換算値、右は ANN 換算値と地上測定値のRDヒストグラムである。MLEM は$F_x(x) \cdot F_\theta(\theta) \cdot F_h(h) \cdot F_d(d)$を用いた$k$=200 の換算結果を、ANN 換算値のヒストグラムは P1、P2、P3、P4、P5、P6、P7、P8、P9 を使用した ANN による換算値と地上測定値のRDを用いて作成している。ヒストグラムの右端の値は$RD \geqq 2$ の Frequency である。

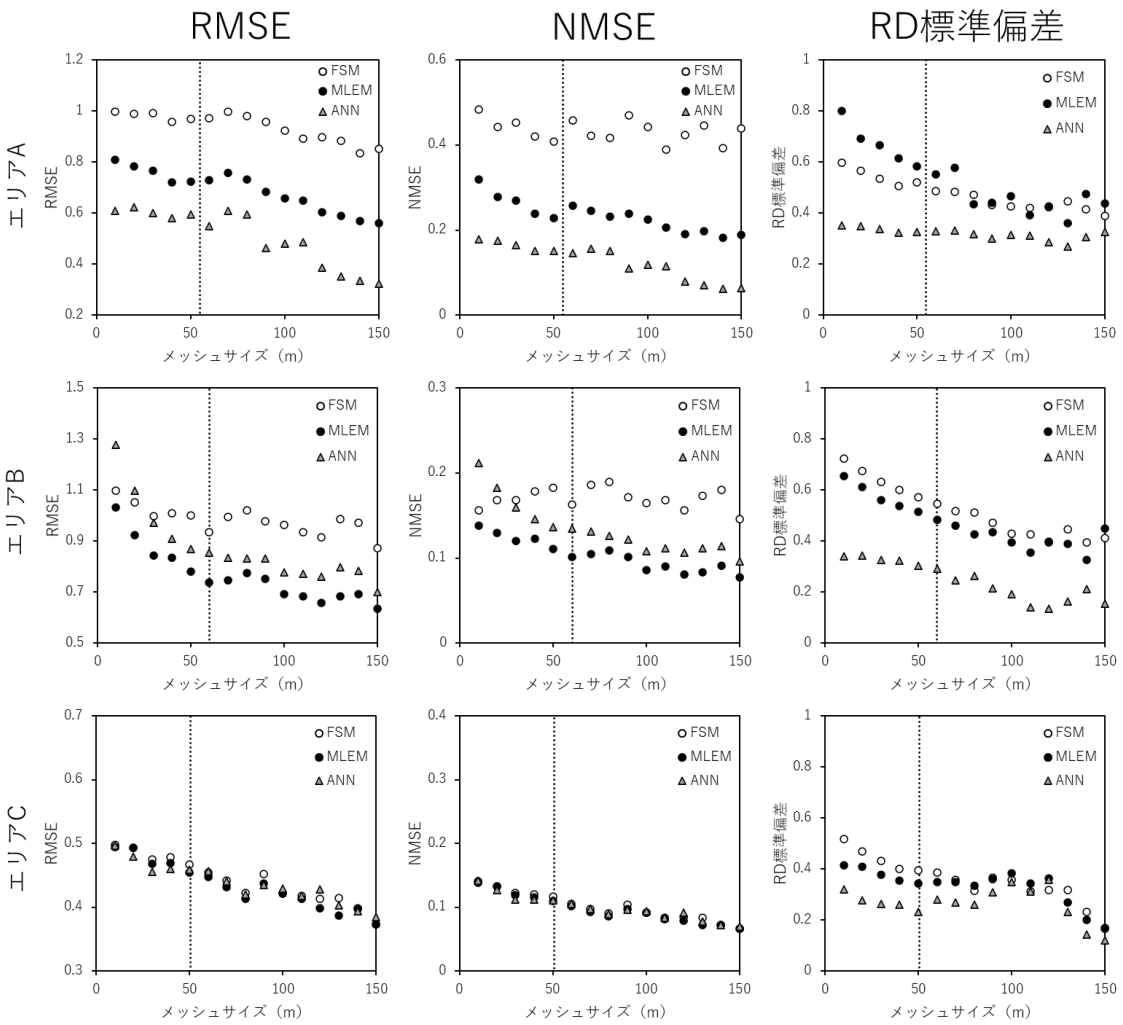


図 4-16 エリア A、B、C における上空測定換算値の測定分解能

MLEM は$F_x(x) \cdot F_\theta(\theta) \cdot F_h(h) \cdot F_d(d)$を用いた$k$=200 の換算結果を、ANN は P1、P2、P3、P4、P5、P6、P7、P8、P9 を使用した換算結果である。

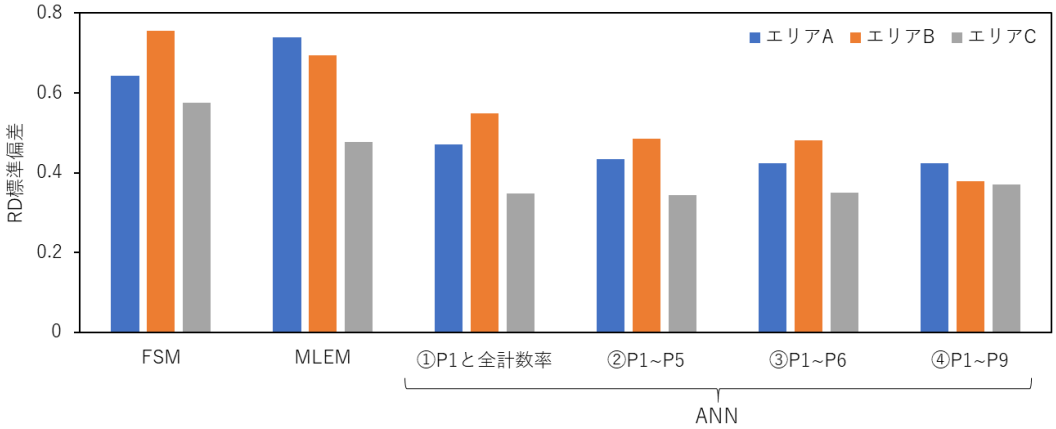


図 4-17 エリア A、B、C における各換算値と地上測定値の*RD*標準偏差

MLEM は$F_x(x) \cdot F_\theta(\theta) \cdot F_h(h) \cdot F_d(d)$を用いた$k$ =200 の換算結果を用いている。
ANN 換算値は学習における入力変数を、記載した変数で構築した ANN を使用している。
値は 10 m メッシュで比較し算出したものである。

図 4-18 ANN の訓練データ数が 200 以下のエリア

訓練データは入力変数を高度 10 m 区切り、全計数率 5000 cps 区切り、地上測定値（目的変数）1.0 μSv h^{-1} 区切りで分類し、訓練データ数をカウントして得られたものである。

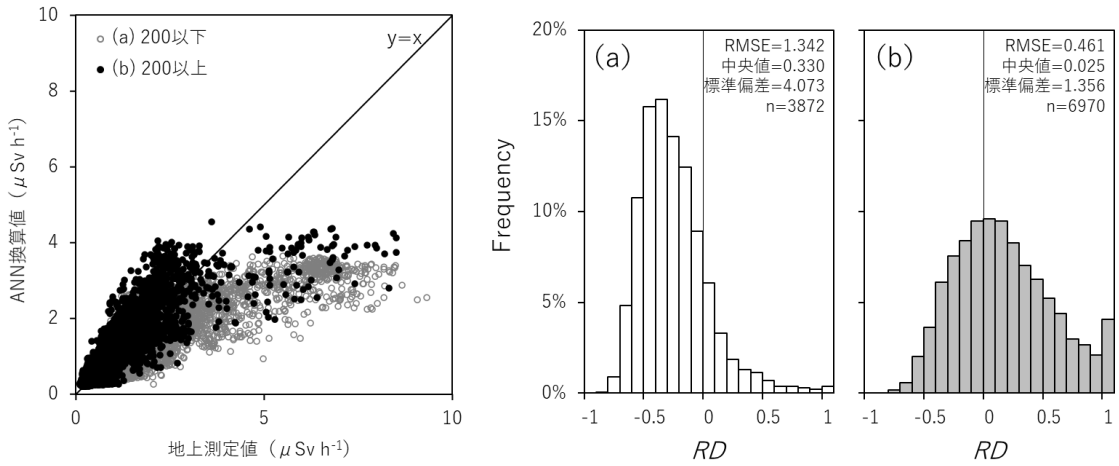


図 4-19 訓練データ数による換算精度の違い

（a）は訓練データ数が 200 以上、（b）は 200 以下の ANN 換算結果である。ANN は P1、P2、P3、P4、P5、P6、P7、P8、P9 を使用した換算結果である。ヒストグラムの右端の値はRD≧2 の Frequency である。

4.6. まとめ

上空における放射線測定値を地上 1 m の空間線量率へ換算するために、上空放射線測定情報、地上測定情報及び地形情報を用いて ANN を構築し、構築した ANN の換算の妥当性について評価を行った。

構築した ANN による換算は、FSM 及び FSFM と同様に、測定高度、DSM と DEM の差（推定樹高）に関連した減衰傾向を示した。ANN の換算傾向から得られた空気減衰率は従来得られていたパラメータ（CD及びAF）に比べ、より地上測定値に近い換算をできるパラメータであった。森林遮蔽減衰率は従来と同様の減衰傾向が得られた。入力変数としての上空撮影写真の色（RGB）データが換算に与える影響は、他の入力変数（放射線計数率、測定高度、推定樹高）が与える影響に比べて小さいものの、黒色に近い森林等のエリアにおいて、他の色のエリアに比べて高めに換算する傾向であることが分かった。また構築した ANN の換算において、換算結果に与える影響（貢献度）が高い入力変数は放射性セシウムの直接線成分の計数率であることが分かった。

ANN を用いた換算において訓練データを増やしながら ANN の換算値と地上測定値の *RMSE* の変化を見た結果、訓練データ数が 200 セット以上のとき *RMSE* が収束した。フィールド測定値に対して ANN による換算を適用した場合においても、学習データが 200 セット以下の場合において、地上測定値と大きくずれる傾向となった。学習データ数は ANN による換算値の信頼性の一つの指標として用いることができると考えられる。

1F の事故により放出された放射性物質で汚染されたエリアにおいて ANN を用いた換算を適用した結果、十分な訓練データが得られていれば、FSM に比べ精度よく、また MLEM による換算では数時間の解析時間を要したものが、ANN における換算解析は数分で行うことができ（ANN を構築するための訓練時間は除く）、MLEM に比べて素早く換算結果を出せることが分かった。また放射線計数率情報以外の入力変数は、換算への貢献度は低いが、入力変数を増やすことにより、わずかに換算精度を向上させることが分かった。

ANN の換算に使用する入力変数は今後、最適化する必要があると考えられるが、十分な訓練データが得られていれば、測定高度、放射線計数率情報、地形情報（推定樹高）、上空からの撮影写真情報を用いて換算を行うことで、FSM 及び MLEM に比べて精度の高い換算結果が得られるため、今後の上空からの放射線モニタリング等の精度向上に貢献できると考えられる。ANN による換算特性上、換算の根拠の理論的な説明ができない課題はあるが、直接的な換算だけではなく、他の手法の補間手法として、減衰率等のパラメータ取得方法として使用できることが本研究で分かった。他の手法と併用して ANN の換算傾向を使用することにより、従来用いてきた手法等におけるパラメータ等を最適化し、換算精度を向上させることができると考えられる。

しかし本研究で構築した ANN は放射性セシウムで汚染されたエリアで取得した訓練データを用いており、図 4 -10 に示すように放射性セシウムの直接線の計数率を重要な因子として換算している。よって異なる崩壊エネルギーを持つ放射性物質で汚染されたエリアに対して本研究で構築した ANN による換算を適用しても、妥当な結果を得ることは難しいと考えられる。放射性セシウムとは異なる崩壊エネルギーを持つ放射性物質で汚染されたエリアに対して ANN を用いて換算できるようにするためには、実測及びシミュレーションを用いた模擬測定値の作成等を行うことにより訓練データを蓄積し、新たに学習する必要がある。特に換算において貢献度の高い、放射線計数率の入力変数パターンをより多く学習させることで、換算精度向上に貢献できると考えられる。

今後、不足している訓練データの取得及び入力変数の最適化、ネットワークの最適化を行うことで、より ANN による換算の精度を向上させることができると考えられる。

４.７． 参考文献

1） Y. LeCun, Y. Bengio and G. E. Hinton. Deep learning. Nature. 521, 7553, 436-444 (2015).

2） G. E. Hinton, S. Osindero and Y. Teh. A fast learning algorithm for deep belief nets. Neural Computation. 18, 7, 1527–1554 (2006).

3） K. Suzuki. Overview of deep learning in medical imaging. Radiological Physics and Technology. 10, 3, 257–273 (2017).

4） E. Schetselaar, C. F. Chung and K. E. Kim. Integration of Landsat TM, Gamma-Ray, Magnetic, and Field Data to Discriminate Lithological Units in Vegetated. Remote Sensing of Environment. 71, 1, 89-105 (2000).

5） D. E. Rumelhart, G. E. Hinton and R. J. Williams. Learning representations by back-propagating errors. Nature. 323, 533–536 (1986).

6） S. E. Fahlman and C. Lebiere. The Cascade-Correlation Learning Architecture. Advances in Neural Information Processing Systems 2. 524-532 (1990).

7） NeuralWare. NeuralWorks Predict. https://www.neuralware.com/index.php/products (最終閲覧日：2021 年 3 月 11 日).

8） J. Duchi, E. Hazan and Y. Singer. Adaptive Subgradient Methods for Online Learning and Stochastic Optimization. The Journal of Machine Learning Research. 12, 2121-2159 (2011).

第 5 章　結論

1F における事故以降、環境中に放出された放射線物質の分布調査のため、有人ヘリコプターや無人ヘリコプターを用いた上空からの放射線モニタリングが行われてきた。事故以降、有人ヘリコプターによる 1F から 80 ㎞圏内エリア及び無人ヘリコプターによる 1F から 5 ㎞圏内エリアの放射線モニタリングが継続的に行われている。上空からの放射線測定は、迅速に広範囲を測定できる利点があり、人の立ち入りが困難である森林等の測定も行うことが出来るため、上空放射線測定で得られたデータは様々な研究や政策決定の基礎データとして用いられている。また無人機による上空からの放射線測定技術は、人体への被ばく低減できる点から、原子力災害などにおける緊急時の放射線モニタリングツールとして有用である。一方、上空からの放射線測定は地上からの影響を平均化した値として測定値が得られるため、地上におけるサーベイメータ等を用いた測定に比べ測定解像度が劣る。よってローカルなホットスポット探査や放射性物質の挙動調査には十分なデータを提供することは難しい。その要因の一つは、従来から用いられている上空値から地上値への換算手法が、遮蔽物は空気のみで平面かつ、線源が均一に分布していることを仮定したモデルを用いて地上値に換算を行っているため、森林等の遮蔽物、斜面等の地形の影響が考慮されていないことにある。

本研究の目的は、上空における放射線測定値を地上 1 m 空間線量率へ換算するための新たな換算手法の開発である。無人ヘリコプターに放射線検出器を搭載し、上空からのガンマ線測定及び地形測量を実施し、得られた測定データに対して新たな換算手法を適用し評価を行った。無人ヘリコプターによる測定と同時に地上 1 m 空間線量率の測定を行い、換算値と地上測定値を比較することで換算精度の評価を行った。上記課題に対して、森林遮蔽を考慮した換算計算を行うための森林遮蔽のパラメータの取得及び適用（第 2 章)、地形効果を考慮した換算計算を行うための MLEM を用いた換算手法の開発及び評価（第 3 章)、合わせて換算計算高速化のための ANN を用いた換算手法の開発及び評価（第 4 章）を行った。成果の概要は以下の通りである。

（1）森林による遮蔽を考慮した換算手法の開発（第 2 章）

本研究では上空における放射線測定値を地上 1 m 空間線量率へ換算するための新たな手法として森林遮蔽を考慮した換算手法の開発を行った。上空放射線測定において森林が存在した場合、樹木や葉の存在によって地上から得られる放射線は減衰するため、実際の地上値よりも上空測定換算値は低めの値となる課題があった。本研究では放射線物質（主に放射性セシウム）で汚染された森林エリアにおけるガンマ線測定を実施し、上空におけるガンマ線測定値、地上における空間線量率測定値、測定エリアの地形情報から、森林の存在によるガンマ線の遮蔽は樹木の樹高と関係性があることを導出した。樹高との関係性から得られ

た森林の遮蔽パラメータを用いることで、従来法に比べ、森林エリアをより地上測定値に近い値に換算できること分かった。

（2）MLEM を用いた換算手法の開発（第 3 章）

本研究では従来医療分野で画像再校正に用いられている MLEM を応用し、上空における放射線測定値を地上 1 m における空間線量率に換算するため、森林遮蔽効果と地形効果を加味した新たな換算手法を開発した。本研究では MLEM を用いた換算アルゴリズムの開発、換算精度及び特性の評価を行った。換算値の評価では、実験室内における線源測定結果と、シミュレーションによる線源の模擬測定値算出結果、1F 周辺の放射性物質で汚染された複数のフィールドにおける放射線測定結果を用いて換算の適用及び評価を行った。評価の結果、MLEM を用いることにより、従来の手法では考慮できていなかった地形情報及び放射線入射角度等の遮蔽効果を反映することが可能となり、従来の換算手法（FSM）に比べより地上測定値に近い値を算出可能であることが分かった。

（3）ANN を用いた換算手法の開発（第 4 章）

ML-EM 法による換算は、各種遮蔽パラメータを考慮することで換算精度が向上するが、個々のパラメータを導出するためには多くのシミュレーションと実験が必要であり、また計算量が多く従来手法に比べて計算時間を要する課題があった。本研究では解析時間を必要とせず、従来手法に比べより精度の高い換算を行うことができる換算手法として、ANN を用いた新たな換算手法を開発した。

ANN を用いた学習では、上空からの放射線測定値や周辺地形の状況等（入力データ）と、地上において取得した放射線測定値（正解値）の多くの訓練データセットから、換算傾向を取得し、入力データから地上 1m 空間線量率を推定する ANN を構築した。本研究で構築した ANN の換算傾向を評価した結果、従来の換算手法と同様の換算傾向であることが分かった。また構築した ANN を用いて換算を適用した結果、ML-EM 法に比べ、より短時間で換算を行うことが可能となり、また ANN の学習が十分行われている場合、従来法に比べより地上値に近い値の算出が可能であることが分かった。

以上の研究成果によって、上空からの放射線測定値を地上 1 m 空間線量率へと換算する新たな手法を開発し、妥当性を評価した。成果（1）では FSM では考慮できなかった森林遮蔽を加味した換算計算を行うことが可能となった。成果（2）では地形遮蔽効果と森林遮蔽効果を加味した換算計算を、MLEM を用いることで可能となった。MLEM を用いた換算を評価した結果、FSM に比べてより地上測定値に近い分布を得られることを確認し、また遮蔽因子のパラメータを増やすことで精度向上することを確認した。成果（3）では MLEM に比べ、計算時間を必要としない換算手法を開発するために ANN を用いた換算手法の妥当性を評価した。ANN による換算では訓練データが十分にある場合、MLEM と同程度以上の換

算精度を得られ、MLEM で数時間の計算時間を要していた換算計算が数分に短縮されることを確認した。

表 5 -1 に各換算手法の特性一覧と課題を示す。現状、FSFM 及び MLEM による換算は、まだ課題はあるものの、現行の上空からの放射線モニタリング等に適用が可能であると考えられる。ANN を用いた換算においては、FSFM 及び MLEM に比べ検討課題が多いものの、1 F 事故により汚染されたエリアに対する放射線モニタリングにおいては、他の換算結果と照らし合わせながら、換算の信頼性を評価することで現場運用へ適用することができると考えられる。これらの換算技術開発を進めることにより、緊急時における放射線モニタリング等において、放射線源の分布情報を瞬時に把握することが可能となり、より安全でかつ高精度な放射線測定が可能となると考えられる。

表 5-1 各換算手法の特性一覧

換算手法	FSM	FSFM	MLEM	ANN
換算計算の際に 必要となるデータ	**・放射線スペクトル情報** **（全計数率：cps）** **・測定対地高度** **・測定位置座標** **・空間線量換算係数：CD** **・高度補正係数：AF**	**・放射線スペクトル情報** **（全計数率：cps）** **・測定対地高度** **・測定位置座標** **・測定エリアのDEM及びDSM** **・空間線量換算係数：CD** **・高度補正係数：AF** **・森林遮蔽係数：FF**	**・放射線スペクトル情報** **（全計数率：cps）** **・測定対地高度** **・測定位置座標** **・測定エリアのDEM及びDSM** **・空間線量換算係数：CD** **・高度補正係数：AF** **・森林遮蔽係数：FF** **・各種放射線減衰率：Cij**	**・学習により構築したANN** **・放射線スペクトル情報** **（全計数率：cps** 又は スペクトル） **・測定対地高度** **・測定位置座標** ・測定エリアのDEM及びDSM ・測定エリアの上空撮影写真　※
換算精度（目安）	RD：-0.5～2.0の範囲内 RD中央値：0.5付近	RD：-0.5～2.0の範囲内 RD中央値：0.5付近	RD：-0.5～2.0の範囲内 RD中央値：0.3付近	RD：-0.5～1.0の範囲内 RD中央値：-0.1付近
1時間測定データの 解析時間（目安）	数分	数分	2時間程度	数分
特徴	シンプルな換算手法であり、おおよそ地上測定値と一致する結果が得られる。地形勾配や森林遮蔽等がある場合、換算精度が低下する。全体的に地上測定値と比較して高めに換算される。	FSMに比べ、森林エリアの換算精度が向上。地形勾配や森林以外の遮蔽要素がある場合、換算精度が低下する。	FSMに比べ、特に地面遮蔽がある場合の換算精度が向上。測定値と換算モデルの誤差が大きい場合は換算精度が落ちる。ホットスポットやロースポットをはっきりと示すのに適している。線源分布が均一なエリアは、誤差が大きくなりやすい。	十分な訓練データが得られている場合、FSM及びMLEMに比べ精度高く換算できる。
備考	キャリブレーション測定を別途行い、CD及びAFを取得する必要がある。	キャリブレーション測定を別途行い、CD、AF及びFFを取得する必要がある。	キャリブレーション測定を別途行い、CD、AF及びFFを取得する必要がある。またCijを設定する必要がある。	別途、訓練データセットを取得し、ANNを構築しておく必要がある。
課題	―	本研究で得られたFFは放射性セシウムにより林床が汚染されたエリアで取得したものであるため、線源や線源付着状況等が異なる場合、FFの値を最適化する必要がある。	測定値及び換算モデル設定の誤差が大きい場合、反復計算すると地上値と換算値の誤差が発散する。今後精度を上げるには、より詳細なCijの設定と換算に使用する測定値の適切な平滑化処理、誤差を加味した逐次近似式の開発を進めることで精度向上が期待できる。	本研究で得られたANNは放射性セシウムにより汚染された1F周辺のエリアのデータを用いて構築したものであり、異なる核種で汚染されたエリアの換算は難しい。今後換算精度を上げるには、実測及びシミュレーションを用いてより多くの訓練データを取得する必要がある。

※ **太字**は最低限必要なデータ、それ以外はデータがなくても換算を行うことはできる。

用語・略語一覧

1F　東京電力（株）福島第一原子力発電所
FSM　平面かつ線源が均一に分布していることを仮定した換算モデル（Flat source model）
MLEM　最尤推定期待値最大化法（Maximum Likelihood- Expectation Maximization method）
ANN　人工ニューラルネットワーク（Artificial Neural Network）
FSFM　森林遮蔽を考慮した換算モデル（Forest shielding factor model）
GNSS　全球測位衛星システム（Global Navigation Satellite System）
DEM　地盤の高さの数値標高モデル（Digital Elevation Model）
DSM　建物や樹木を含んだ地球表面の高さの数値表層モデル（Digital Surface Model）
RD　相対偏差（Relative deviation）
RMSE　二乗平均平方根誤差（Root Mean Square Error）
NMSE　正規化平均二乗誤差（Normalized Mean Square Error）
CC　カスケードコリレーション（Cascade Correlation）

謝辞

本論文の執筆にあたり、多くの方々にご支援いただきました。本研究のために調査にご協力いただいた各企業の皆様に感謝申し上げます。

本論文の執筆にあたり、山澤弘実教授、芳原新也准教授、遠藤知弘准教授、森泉純准教授、渡辺賢一准教授より、学位論文審査会においてご指導とご助言を賜りました。厚く御礼を申し上げます。

主指導教員である山本章夫教授には、研究の着想から、調査、論文執筆まで多くのご指導をいただきました。厚く御礼を申し上げます。

最後に、日本原子力研究開発機構　福島研究開発部門　廃炉国際共同研究センター　環境モニタリングディビジョンの皆様には多くのご支援をいただきました。厚く御礼を申し上げます。

論文リスト

(1) 博士論文を構成する発表論文リスト

論文題目	公表の方法及び時期	著者
1. Development of analysis method for airborne radiation monitoring using the inverse problem solutions	Progress in Nuclear Science and Technology, Vol. 6, p. 63-67 (2019)	Miyuki Sasaki, Azusa Ishizaki and Yukihisa Sanada
2. Application of the forest shielding factor to the maximum-likelihood expectation maximization method for airborne radiation monitoring	Radiation Protection Dosimetry, Vol. 184, Issue 3-4, p. 400–404 (2019)	Miyuki Sasaki, Yukihisa Sanada and Akio Yamamoto
3. New method for visualizing the dose rate distribution around the Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant using artificial neural networks	Scientific Reports, Vol. 184, 1857, DOI: 10.1038/s41598-021-81546-4 (2021)	Miyuki Sasaki, Yukihisa Sanada, Estiner W. Katengeza and Akio Yamamoto

(2) その他の発表論文リスト

論文題目	公表の方法及び時期	著者
特定復興再生拠点区域におけるモニタリング及び被ばく評価手法の検討	JAEA-Research 2018-016, (2019)	舟木　泰智, 高原　省五, 佐々木　美雪, 吉村　和也, 中間　茂雄, 眞田　幸尚