

令和元年6月10日現在

機関番号：11301

研究種目：基盤研究(B)（一般）

研究期間：2016～2018

課題番号：16H04459

研究課題名（和文）原発事故後の建築のための居住空間内 線空間線量率予測方法の確立

研究課題名（英文）Establishment of a method to predict indoor gamma-ray spatial dose rate distribution in the nuclear accident affected area

研究代表者

小林 光 (Kobayashi, Hikaru)

東北大学・工学研究科・准教授

研究者番号：90709734

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 13,300,000円

研究成果の概要（和文）：本研究は、原発事故被災地における新築や改修に伴う、実用的な居住空間の線空間線量率分布予測法の確立を目指した。建築周辺に沈着した放射性セシウムに由来する屋内の線量率の詳細調査、周辺敷地の除染状態等に応じた線の建築空間への影響検討、放射線解析を実際の建築計画に適用する際の問題の検討等を進め、最終的には、建物周辺での簡易な指向性放射線測定値のみを入力条件とする放射線解析に用いる放射線境界条件を提案すると共に、解析と建築CADデータを連携するツールの開発、フィールド調査に適した方向放射線計測器の開発等を行い、実用的な空間線量率予測を可能とする提案を行った。

研究成果の学術的意義や社会的意義

原発事故被災地の建築再建では、竣工後に室内に形成される線の空間線量率分布を予測し、必要に応じて対策を行うことが望まれる。精密なシミュレーションのためには半径100m圏内の放射能汚染の詳細な調査が必要で、現実には実施できない。そこで本研究では、建築敷地で4方位の指向性放射線計測を行うだけで、実用可能な精度のシミュレーションを行う方法を開発した。セシウム137に由来する線は250mm程度のコンクリートがあれば遮蔽可能であることから、本研究の解析方法を用いて検討し、建築の壁や庭に設けるコンクリート塀などを上手く使った計画を実現することで、建築空間内の線を低くする対策が可能と考えられる。

研究成果の概要（英文）：This study aimed to establish a practical method to predict the spacial gamma-ray dose rate distribution inside new or renewal buildings in the areas affected by the nuclear accident. Through the investigations of gamma-rays from radioactive cesium deposited around buildings, the effects of gamma-rays on building space according to the surrounding decontamination status and problems in applying radiation analysis to actual building projects, we proposed a practical analysis method with gamma-ray boundary condition model using very simple directional gamma-ray measurement. Besides, we also developed a tool which links analysis and architectural 3D CAD data and a directional radiation measurement instrument suitable for the field survey to facilitate practical prediction.

研究分野：建築環境工学

キーワード：空間線量率分布予測 線境界条件 指向性放射線

様式 C-19、F-19-1、Z-19、CK-19（共通）

1. 研究開始当初の背景

研究開始当初、申請者らは日本建築学会による震災復興支援活動に参加し、建築環境工学の視点で福島県内の放射能汚染地域に於ける居住者の放射線防護に関する活動を行っていたが、放射能汚染を把握するための調査研究及び屋外の除染は進捗しているものの、建築内部の空間線量率の低減策に関する建築計画の研究は十分ではなかった。復興に伴って被災地に新たな活動の場として建築空間を新築或は改修しようとするとき、先ずは計画中の建物が敷地周辺の汚染状況や土地利用、地形などの特性に応じて、どの様な空間放射線量率分布となるか実計画で運用可能な簡易な予測法が必要であると考えられた。

2. 研究の目的

以下の(1) (2) を本研究の目的の中心とし、進捗に伴う微修正を加えながら研究を進めた。

(1) 周辺汚染による影響の把握

被災地の建築空間内・外の放射線空間線量率を詳細に実測調査し、屋内外の線量率の関係、敷地の特性と線量率の関係を分析し、その傾向を明らかにする。

(2) 実用的 γ 線量率予測法確立

建築計画に伴い、敷地の実況と建築設計情報を反映して建築空間内の空間 γ 線量率を予測する方法を確立する。敷地の実況を極力簡易に解析に放射線解析に反映する方法の開発及び情報化された建築 3D モデルである BIM を連携する方法を確立し、これらを以って実用的 γ 線量率予測法とする。

(3) 建築的対策法の検討

被災地の建物を対象とした放射線測定によって、解析精度を検証すると共に、解析を用いたケーススタディによって放射線防護のために建築計画上有効な方法を検討する。

3. 研究の方法

(1) 周辺汚染による影響の把握

- ① 研究目的に合わせた、実測用の指向性 γ 線計測器の開発と建物内外の指向性放射線測定
- ② 福島県内の既存建築を対象とした建物周辺及び建物内の詳細な空間放射線量率測定

(2) 実用的 γ 線量率予測法確立

- ① 計画敷地の放射能汚染状況を簡易に放射線解析に反映する境界条件の検討及び開発
- ② 建築 CAD 専門家との協働による建築設計情報の放射線解析への連携方法の検討及び開発
- ③ 実測に基づく解析条件設定及び、空間線量率詳細実測結果を用いた解析法の精度検証

4. 研究成果

(1) 指向性放射線計測器の開発

- ① 放射能汚染された外部環境から屋内に入射する放射線を評価する為、空間 γ 線量率と共に指向性 γ 線計測が必要となった。 γ 線計測器は影響評価の目的に応じた広角、狭角の視野角が選択でき、また人力によるフィールド調査にて運用可能でなければならないが、従来提案された計測器に適切なものがなかった。そこで、本研究の目的に合致する指向性 γ 線計測器を開発した。開発の要点は研究及び実際の建築計画で実用可能なことであり、可用性を確保した上で、できるだけ高い精度を求めて方式等を選択した。計測器の設計には放射線解析を用いると共に、計測器の指向性と視野を評価する指標を定義して計画的に行った。また計測器を試作し、試験用 γ 線源を用いた測定精度検証によって解析の精度を確認し、計測器の指向性を定量的に把握した上で現地測定に供した（図 1, 写真 1）。

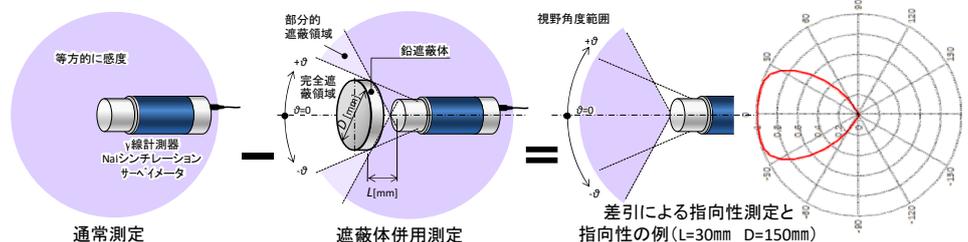


図 1 指向性 γ 線計測器の原理と指向性



写真 1 実測風景(左:通常測定、右:遮蔽体併用測定)

- ② 福島県富岡町の協力を得て、町保有の木造戸建て建物 2 棟、鉄筋コンクリート造建物 1 棟の屋内外における空間 γ 線量率詳細測定及び指向性 γ 線測定を実施した(図 2, 3)。従来福島の木造建物を対象として放射線解析と比較可能な空間 γ 線量率の 3 次元分布データがなかったが、本研究でこれを取得した。また、屋内外の連続した測定により、周辺汚染と屋

内に形成される空間 γ 線量率分布の関係を検討可能とした。木造では屋内外の線量率が連続的に変化し(図2)、外壁によるはっきりした遮蔽効果は確認されない。一方鉄筋コンクリート造では窓面を除く面密度の高い外壁面で遮蔽効果が確認された。指向性測定を併用することで、放射線の到来方向が確認され、空間 γ 線量率場の形成状況が推定可能となった。図2の建物は除染済みの敷地内を介して未除染の隣地と接しており、敷地内の除染を行った結果、敷地外から入射する γ 線の比率が相対的に増加した状態にある。除染によって放射能汚染の位置性状が換わることで、屋内の空間 γ 線量率分布性状に変化が生じると共に、屋内外の放射線量率の比(低減係数)に影響することなどが測定を通じて推定された。

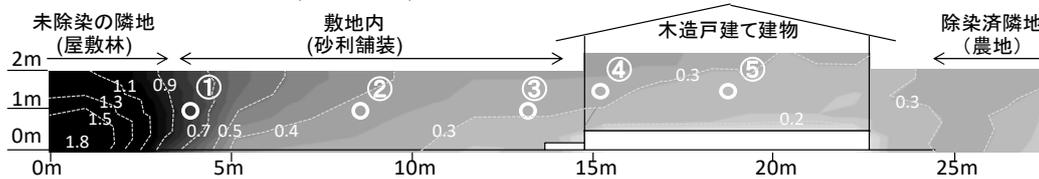


図2 木造平屋建物の屋内外空間 γ 線量率分布(単位: μ Sv)

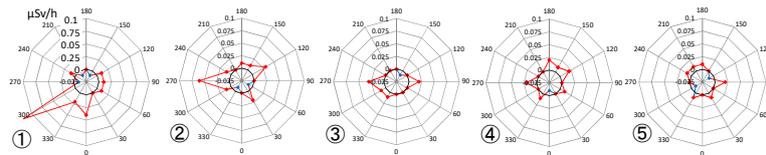


図3 視野角 $\pm 15^\circ$ の測定機による指向性 γ 線量率測定結果

(2) 実用的 γ 線量率予測法確立

- ① γ 線量率の予測は、放射線解析コードPHITSを基本として、建築計画地の状況を簡易に反映した解析を行うための方法を検討した。放射性セシウムに由来する γ 線の空気中の飛程が約100mであることから、解析対象建物を中心として半径100mの放射能汚染が建築空間に影響すると考えられる。よって、建築計画地周辺100mの全ての汚染状況を調査して、これを境界条件(線源)とすることで正確な解析が期待できる。しかしながら、建築計画に伴って、様々な土地利用や地物が存在する計画敷地周辺100mの全てを正確に調査することは現実的には不可能である。そこで、線源そのものを再現せず、建築の周囲に仮想的な境界面を設定し、この界面を外から内に通過する γ 線をモデル化する仮想線源モデルを開発した(図4)。本研究では周辺敷地がA 未除染、B 除染済、C 建物近傍のみ除染済、の3条件を標準的な周辺敷地条件として、100mの範囲から境界面に入射する γ 線を事前にPHITSにて解析し、標準化した境界面上の γ 線の強度及び方向性を作成するとともに、測定現地で前述の指向性 γ 線計測器にて建物周囲4方位に対して広角($\pm 45^\circ$)の指向性測定を行い、方位毎の線源強度を設定する方法とした。仮想線源モデルは境界面を通過する放射性セシウム(^{137}Cs)による γ 線のエネルギーが直接線(662[keV])から散乱線まで連続的に変化するため、 γ 線のエネルギーを階級に分割して整理するとともに、建物周りの境界面を地上0m~100mまで複数高さ(A-K)に分割して高さ毎に整理した。モデルは周辺状況や対象建物の高さ等に応じて調整を要するが、現地では指向性放射線計測のみで良く、実用性の高いモデルとなった。

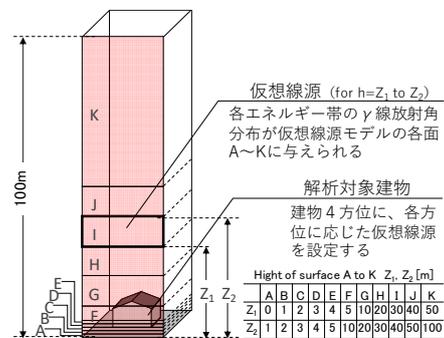


図4 仮想線源モデルの概要

- ② 建築設計情報の放射線解析への入力、建築モデルの一定の粗視化を行ってなお複雑で、正確な建築の解析モデルを手作業で構築する事は困難である。そこで実用的な解析のためには建築3D設計(BIM: Building Information Modeling)ソフト上で建築情報を作成し、BIMデータを直接PHITSと連携する必要がある。本研究ではBIMソフトとしてAutodesk社のRevitを採用し、RevitのデータからPHITSの入力データを生成するソフトウェアであるRevit-PHITSを開発した。建物の形状・構成、壁を構成する複数の建材のレイヤまで再現する。通常のBIMデータでは、壁のレイヤ構成はプロパティとして保有して図形化しないが、Revit-PHITSによって壁面構成を図形として生成・出力する。図5に前述の木造建築のBIMデータとPHITSに読み込んだ解析モデルを示す。また、Revit-PHITSは建築材料も区別して連携するため、PHITS側では建物モデルの最小限の確認と調整及び、線源の設定で解析が実施可能となった。



図5 BIMデータ(上)とPHITS上の建築モデル(下)

- ③ 解析法の精度検証を目的として、木造建物の実測と解析結果を比較した(図6)。図6は解析値にバックグラウンド放射を加算し、また、スケールを70%とすることで実測値との傾向の比較を行っている。屋内に形成される空間 γ 線量率は高所が高いことが報告されているが、本解析方法によってその分布傾向を再現することが確認された。また、平面的には、紙面手前側と左側の線量率が高い状態も再現された。一方で、前述の通り解析値は実測値に比べて3割程度小さい値を示す。このことは主に、解析で仮想線源面の建物側(内側)に沈着した汚染を再現しなかったことによると考えられる。本成果に加えて建物近傍を簡易且つ実用的に再現する線源設定方法の検討を継続している。

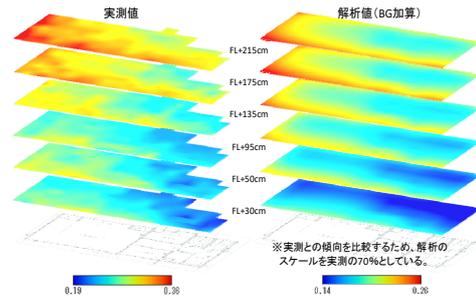


図6 実測値(左)と解析結果(右)

- (3) 成果の公開 (測定データおよび解析法・ツールの公開)
解析の継続検討を進めるとともに、本研究の成果となる測定値を整理し、また解析方法とRevit-PHITSのマニュアル化を進め、シンポジウムなどでの公開を検討する。

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計2件)

- ① 本多祥平, 小林光, 一條佑介, 山守諒, 土屋貴寛, 成田泰章, 野崎淳夫, 吉野博, 河川区域内の土壌に沈着した放射性物質が建築周辺環境に及ぼす影響調査, 臨床環境医学, 査読有, 26巻, 2018, 69-75
- ② Sato Tatsuhiko, Iwamoto Yosuke, Hashimoto Shintaro, Ogawa Tatsuhiko, Furuta Takuya, Abe Shinichiro, Kai Takeshi, Tsai Pi-En, Matsuda Norihiro, Iwase Hiroshi, Shigyo Nobuhiro, Sihver Lembit, Niita Koji, Features of Particle and Heavy Ion Transport code System (PHITS) version 3.02, Journal of Nuclear Science and Technology, 査読有, 55, 2018, 684-690
DOI: 10.1080/00223131.2017.1419890

[学会発表] (計17件)

- ① 遠藤聡人, 原発事故被災地の建築空間内 γ 線空間線量率分布に関する研究(その3)避難指示解除区域の建築内外における γ 線空間線量率分布の詳細実測, 日本建築学会大会, 2019-9
- ② 中島主策, 原発事故被災地の建築空間内 γ 線空間線量率分布に関する研究(その2)木造建築を対象とした γ 線空間線量率分布の解析, 日本建築学会大会, 2019-9
- ③ 小林光, 原発事故被災地の建築空間内 γ 線空間線量率分布に関する研究(その1) γ 線空間線量率解析に用いる実用的な放射線境界条件モデルの開発, 日本建築学会大会, 2019-9
- ④ 遠藤聡人, 原発事故後の建築空間における空間線量率の予測手法に関する研究(その6)建築空間内 γ 線空間線量率分布の実測による詳細調査, 空気調和・衛生工学会東北支部第8回学術技術報告会, 2019-3
- ⑤ 中島主策, 原発事故後の建築空間における空間線量率の予測手法に関する研究(その5)木造建築を対象とした γ 線空間線量率分布の解析, 空気調和・衛生工学会東北支部第8回学術技術報告会, 2019-3
- ⑥ 小林光, 原発事故後の建築空間における空間線量率の予測手法に関する研究(その4) γ 線空間線量率分布解析のための実用的放射線境界条件モデルの開発, 空気調和・衛生工学会東北支部第8回学術技術報告会, 2019-3
- ⑦ Hikaru Kobayashi, Detailed measurement of indoor γ ray dose rate distribution and directional radiation in detached house in Fukushima, 8th International Conference on Energy and Environment of Residential Buildings, 2018-11
- ⑧ 中島主策, 原発事故被災地における空間放射線ベクトル場の特性に関する研究, 第27回日本臨床環境医学会学術集会, 2018-7
- ⑨ 小林光, 建築設計段階における建築空間の放射線空間線量率分布の予測手法の開発, 第27回日本臨床環境医学会学術集会, 2018-7
- ⑩ 中島主策, 除染作業に伴う γ 線放射特性の変化に関する研究, 第7回環境放射能除染学会研究発表会, 2018-7
- ⑪ 中島主策, 原発事故後の建築空間における空間線量率の予測手法に関する研究(その3)原発事故被災地における空間放射線ベクトル場の特性に関する研究, 空気調和・衛生工学会東北支部第7回学術技術報告会, 2018-3
- ⑫ 山守諒, 原発事故由来の放射能汚染が建築空間に及ぼす影響に関する研究 その2 フィールド調査を意図した γ 線方向線量率の測定手法の検討, 日本建築学会大会, 2017-9
- ⑬ 本多祥平, 原発事故由来の放射能汚染が建築空間に及ぼす影響に関する研究 その1 河川区域内の放射能汚染が建築空間に及ぼす影響調査, 日本建築学会大会, 2017-9
- ⑭ 本多祥平, 河川区域内の土壌に沈着した放射性物質が建築周辺環境に及ぼす影響調査, 第26

- 回日本臨床環境医学会学術集会,2017-9
- ⑮ 山守諒, 測定精度及びフィールド調査を意図した γ 線方向線量測定器の開発, 第6回環境放射能除染学会研究発表会, 2017-7
 - ⑯ 山守諒, 原発事故後の建築空間における空間線量率の予測手法に関する研究 その2, 空気調和・衛生工学会東北支部第6回学術技術報告会, 2017-3
 - ⑰ 本多祥平, 原発事故後の建築空間における空間線量率の予測手法に関する研究 その1, 空気調和・衛生工学会東北支部第6回学術技術報告会, 2017-3

〔図書〕(計0件)

〔産業財産権〕

○出願状況(計0件)

名称:
発明者:
権利者:
種類:
番号:
出願年:
国内外の別:

○取得状況(計0件)

名称:
発明者:
権利者:
種類:
番号:
取得年:
国内外の別:

〔その他〕

ホームページ等

6. 研究組織

(1) 研究分担者

- ① 研究分担者氏名: 吉野 博
ローマ字氏名: (YOSHINO, Hiroshi)
所属研究機関名: 東北大学
部局名: 工学研究科
職名: 名誉教授
研究者番号(8桁): 30092373
- ② 研究分担者氏名: 吉田 浩子
ローマ字氏名: (YOSHIDA, Hiroko)
所属研究機関名: 東北大学
部局名: 薬学研究科
職名: 准教授
研究者番号(8桁): 10241522
- ③ 研究分担者氏名: 古田 琢哉
ローマ字氏名: (FURUTA, Takuya)
所属研究機関名: 国立研究開発法人日本原子力研究開発機構
部局名: 原子力科学研究部門 原子力科学研究所 原子力基礎工学研究センター
職名: 研究職
研究者番号(8桁): 40604575

- ④ 研究分担者氏名：野崎 淳夫
ローマ字氏名：(NOZAKI, Atsuo)
所属研究機関名：東北文化学園大学
部局名：健康社会システム研究科
職名：教授
研究者番号 (8桁)：80316447
- ⑤ 研究分担者氏名：一條 佑介
ローマ字氏名：(ICHIJO, Yusuke)
所属研究機関名：東北文化学園大学
部局名：科学技術学部
職名：講師
研究者番号 (8桁)：80550574

※科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。