

KURAMA-IIの開発とその利用について

谷垣 実

1. はじめに

2011年3月11日に発生した東日本大震災とそれに伴う津波により我が国最大の原子力災害が発生した。その結果、福島県を中心に広範囲にわたって放射性物質が拡散し、現在も多くの住民の方々が避難生活を余儀なくされたり、住環境や農水産物他の放射性物質による汚染といった様々な問題に直面している。

このような状況下で、住民の皆さんの被ばく状況や環境の汚染実態の把握、被ばく低減のための適切な行動計画の作成、帰還や生活再建のための環境修復を進めるに当たって、その基礎データとなる空間線量率マップは極めて重要であり、この空間線量率マップを信頼性、精度を十分に確保しつつ迅速かつ十分な頻度で更新できる体制を確立することは大きな意味を持つ。

京都大学原子炉実験所は、我が国の大学として最大の原子炉を保有し、多数の原子力や放射線に関連する分野の専門家を有する研究所である。事故対応活動の1つとして、事故直後の空間線量率分布の迅速かつ詳細な把握を目的としたKURAMA¹⁾を投入、さらに発展型であるKURAMA-II²⁾を開発した。現在、KURAMA-IIは福島県や国の走行サーベイによる空間線量率測定等で活用いただいているほか、住宅や農地の汚染分布調査等への応用のための開発も進んでいる。

今回は走行サーベイシステムとしてのKURAMA-IIについての紹介と、KURAMA/KURAMA-IIの開発や運用を通じて感じたこと

などを紹介したい。

2. KURAMA-IIについて

KURAMA-IIは、KURAMAでの経験を基に開発されたシステムである。KURAMA-IIの車載機の外観を図1に、またシステム全体の構成を図2に示す。KURAMA-IIの目標は完全自動化と生活圏の連続測定であり、そのためには車載機に十分な信頼性・堅牢性を確保することが課題である。そのため、全体の枠組みとしては図2のとおりKURAMAを踏襲する一方、車載機について様々な見直しを行った。

まず、従来のノートパソコンをやめNational Instruments社の小型組み込みコンピュータであるCompactRIOを採用した。CompactRIOは自



図1 KURAMA-II車載機
全体が34.5 cm×17.5 cm×19.5 cmの大きさのツールボックスに収まっている

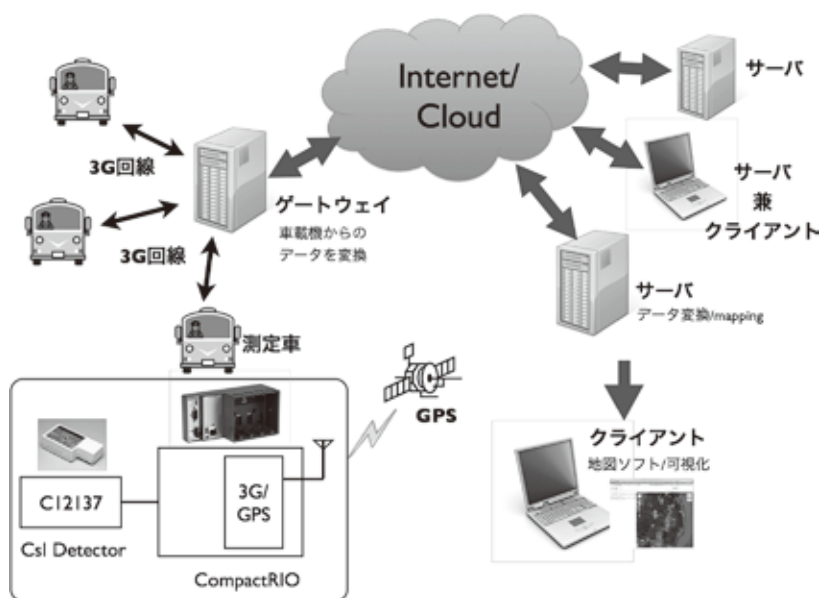


図2 KURAMA-IIのシステム構成

KURAMAと異なり直接Dropboxと接続できないため、ゲートウェイを介して従来のDropboxによる共有を実現する

動車衝突試験などで使われるなどの高い堅牢性を備えつつ、ネットワーク機能や各種計測・制御モジュールの追加が可能な拡張スロットも装備している。さらに、CompactRIOはLabVIEWでプログラミング可能なので、実績あるKURAMAのソフトウェア資産をほぼそのまま流用できるのも利点である。ただし、CompactRIOの採用するリアルタイムOS上ではDropboxが稼働しないため、KURAMAのように直接Dropboxを利用したデータの共有ができない。そこで、新たに開発したRESTful Webサービスによるファイル転送プロトコルで一旦gatewayサーバへ転送した後、従来のKURAMAと同じDropboxによる共有を実現している。最近になってNational Instruments社からWindowsベースながら低価格を実現したcDAQシリーズが登場し、従来のKURAMA同

様直接Dropboxによるデータ共有が実現できるようになると期待している。

また、放射線検出部に浜松ホトニクス(株)のCsI検出器C12137シリーズを採用した。C12137シリーズは、CsI結晶のシンチレーション光の受光部分に低電圧動作で磁場の影響を受けない小型高感度の光半導体素子であるMPPC(Multi-Pixel Photon Counter)を採用、光電子増倍管を使ったサーバイメータに比べ大幅に小型化しながらも高い性能を維持

している。また、USBで出力される測定した γ 線ごとの波高情報から測定地点ごとの γ 線の波高スペクトルを生成、G(E)関数法により周辺線量当量 $H^*(10)$ を導出している。KURAMA-IIで使用されているG(E)関数は、日本原子力研究開発機構(JAEA)の津田修一らによって評価検証されたものである。詳細は本コーナーに掲載された津田修一の解説³⁾を参照されたい。

長期の連続運用では、検出器の健全性の確認が大きな問題になる。現行のKURAMA-IIでは、起動～停止までの積算の波高スペクトルを内部で生成、次回起動時にこの波高スペクトル中の特定の γ 線のピーク位置をフィッティングで確認するとともに、波高スペクトルそのものも自動的に送信する機能を持たせ、これにより検出器の健全性を確認している。さらに、測定地点ごとの波高スペクトルにGPSの位置情報

を付加して送信する機能も開発済みで、一部の KURAMA-II に実装して実証試験中である。このデータをデータベースに登録、地理情報や各種統計データと組み合わせれば、様々な条件での波高スペクトルを再構成することが可能である。この機能を本格的に運用すれば、環境中の Cs の動向や人々の活動状況を反映した集団被ばくの推定といった高度な解析も可能になるのではと期待している。

3. KURAMA-II の運用

2015 年 4 月現在、KURAMA-II は主に京都大学による実証試験⁴⁾、福島県、JAEA、京都大学の共同事業で行う測定^{5,6)}、原子力規制庁事業による広域モニタリング⁷⁾で使用されている。京都大学による実証試験は、京都大学原子炉実験所が KURAMA-II の開発を目的に独自に実施しているもので、福島交通(株)の協力の下、福島市内で 2011 年 12 月に開始、1 年後の 2012 年 12 月には福島交通(株)のほか新常磐交通(株)と会津乗合自動車(株)の協力も得て、郡山市、いわき市、会津若松市に対象地域を広げ、現在まで 5 台の KURAMA-II による測定を継続している。福島県、JAEA、京都大学の共同事業は、2013 年より実施しているもので、京都大学の技術指導の下、福島県が購入した KURAMA-II を路線バスに 28 台、県パトロールカーに 2 台、県の委託業者の車両 19 台の計 49 台で福島県全域を測定対象とし、測定データの解析と公開は JAEA によって行われる。原子力規制庁事業による広域モニタリングは、2011 年 6 月に文部科学省の事業として始まったもので、現在は原子力規制庁の事業として継続している。委託を受けた JAEA が主体となり、東日本一帯の自治体に約 100 台の KURAMA-II を貸与する形で年に数回実施されている。

これらの事業における KURAMA-II の運用



図 3 路線バス車内に設置された KURAMA-II の様子
通常、車内最後部センターライン側に設置される

方法は、基本的に従来の KURAMA と同じである。車内の定められた場所に載せて車内での空間線量率を測定、これを車内外補正係数で補正して道路上高さ 1 m の空間線量率を求める。また、データはネットワーク経由でリアルタイムに回収するというものである。完全自律測定が基本の KURAMA-II の場合、設置や操作に熟練した測定員は不要である。路線バスでの測定では、各バス事業者の整備担当者に取り付け方法を説明、電源周りの取り扱いや後部座席後方センターライン側への設置をお願いしている(図 3)。設置後は一切操作は行わず、バスが起動して電源が供給される間だけ測定する。運転手にも操作や特段の配慮を求めている。

車内外補正係数については、京都大学の実証試験開始直前の 2011 年 12 月に KURAMA の場合と同じ方法で実測し、一般的な路線バスでは車内測定値の 1.6 倍との結果を得ている。しかし、福島県、JAEA、京都大学で実施している事業では多数の路線バスを使用しており、各社の配車計画に支障をきたすため個々の車両について車内外補正係数の測定実施は困難である。そこで、原子力規制庁事業の広域走行サーベイが実施されるたびにその結果と比較し、補正係

数を求めている。それによれば、車両型式への依存性はあまり見られない一方、地域差が大きいことが分かってきた。これは、 ^{134}Cs 、 ^{137}Cs と環境中での分布が異なる天然核種の空間線量率に対する寄与の割合の違い、また地形などの地域的要因を反映しているとみられる。

また、冬の氷点下から夏の摂氏 60 度弱までと温度差が大きい車内で検出器の健全性が維持できるかどうかは大きな問題である。京都大学の路線バスによる実証試験中の 2013 年 1 月からの約 8 か月間、 ^{134}Cs の 796 keV ピークの長期追跡を行ったところ、ピーク位置の変動は±2%の偏差に収まっていることが確認された。これは線量率換算で±4%の偏差に相当する。

各事業で得られたデータは主に web を通じて一般向けに広く公開されている。福島市駅前のビルには JAEA の武宮博らが開発した大型ディスプレイが設置され（図 4）、京都大学の実証試験分と福島県、JAEA、京都大学の事業で測定中の KURAMA-II のリアルタイムデータ、週単位で 100 m メッシュにまとめたこれまでの測定結果、さらにそのメッシュごとの経時変化を、一般の方がタッチパッドで自由に操作して見ることができるようになって⁸⁾。

4. 運用を通じて感じたこと

しばしば、「KURAMA/KURAMA-II のどこが新しいのか？」と聞かれることがある。小型の空間線量率計と GPS を組み合わせた走行サーベイシステムは既に存在しており、それらと同じではないか、という指摘である。その際には「1 台だけで運用するなら変わらないと思います」と答えることにしている。筆者自身、KURAMA/KURAMA-II の真骨頂は、1 台でできることが 100 台でもできるというスケーラビリティにあると考えている。

このスケーラビリティに大きく貢献している

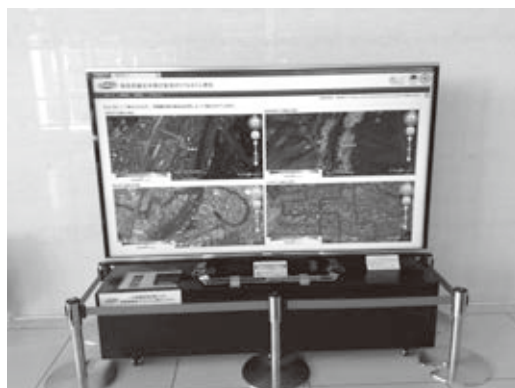


図 4 KURAMA-II のデータを表示する大型ディスプレイ
リアルタイム表示だけでなく、過去のデータや地点ごとの経時変化をユーザー自らが操作して見ることができる

のが、測定者の操作を介在させないネットワーク経由のデータ回収である。実はこの点が KURAMA-II を導入したい方々にはしばしば不評で、「通信機能を省き、測定者が毎日データをコピーすればシンプルに安くできますよね？」と言われることが多い。たしかにたかだか 1、2 台を限られた場所と期間のみ使用するのであればそのとおりである。しかし、大規模、広域あるいは長期にわたる調査では測定と解析は異なるグループの場合が多く、人的操作で加わったミスや不具合の検証は極めて難しくなる。筆者が聞いたある調査では、測定地点の記録として GPS 端末の緯度経度表示をそのまま記録用紙に記載するという指示に対し、度の十進表示と度分秒の六十進表示の混乱、勝手な桁数の打ち切りなどの問題が頻発、結局写真などを頼りに手作業で一つひとつ再確認したそうである。このような事後の検証や処理のコストはその後の測定事業の継続を左右しかねない。特に大規模な計画では、“測定者、操作者が気を付ければミスや間違いは十分排除できる”という前提に立たず、事後の作業まで見通した調



図5 JAEAのサイトで公開されているKURAMA-IIで除染効果の捉えた地点の紹介
除染による空間線量率低減とその効果が維持されている様子が経時変化にはっきり現れている

査計画をされるべきと考える。そのような観点で見れば、ほかのグループの類似の測定が単発で終わったり限定的なものであったりする中、100台以上のKURAMA-IIが東日本一帯で定期的に一斉測定を継続的に実施したり、福島県内の路線バス等の約50台のKURAMA-IIが日々データを蓄積し続けていることは、我々の狙いの正しさを示していると考えている。

またKURAMA-IIを緊急時用として導入し、運用コストを抑えるため平常時は運用せず保管を希望される場合も多い。しかし、運用の負担の小さいKURAMA-IIであるから、日常の業務で使う車に乗せるなどして平常時から使ってほしいと思う。平常時に当たり前に動かせないものが緊急時にうまく使えるはずもないし、基準となる平常時のデータの十分な蓄積がなかった

ことが今回の事故の大きな反省点だとも考えているためである。

ところで、JAEAのwebサイトでは、除染作業による線量率低減がKURAMA-IIで確認された地域を紹介している(図5)。線量率が基準を下回ったらもう測定は不要とするのではなく、このように改善効果とその維持の状況を一般向けに公開し続け、万一線量率上昇が見られた際には適切に対処する体制の確立が住民の皆さんの安心につながるのではないだろうか。そのような体制を低コストで運用するためにKURAMA-IIが活用されることを期待したい。

5. おわりに

KURAMA-IIが幅広く活用されていることは存外の喜びである。これからもKURAMA-IIの特徴を生かし、より多くの皆さんに使っていただければと考えている。更に使いやすく負担の少ないシステムとなるよう、引き続き精力的に開発を進めていきたい。

参考文献

- 1) Tanigaki, M., et al., *Nuclear Instruments and Methods A*, **726**, 162-168 (2013)
- 2) Tanigaki, M., et al., *Nuclear Instruments and Methods A*, **781**, 57-64 (2015)
- 3) 津田修一, *Isotope News*, **706**, 59-62 (2013)
- 4) http://www.rri.kyoto-u.ac.jp/kurama/kouiki/kurama2_test.html
- 5) <http://info-fukushima.jaea.go.jp/joho/>
- 6) <https://www.pref.fukushima.lg.jp/sec/16025d/soukou.html>
- 7) <http://emdb.jaea.go.jp/emdb/portals/b131/>
- 8) TOPICS 福島 No. 56, <http://fukushima.jaea.go.jp/magazine/pdf/topics-fukushima056.pdf>

(京都大学原子炉実験所
粒子線基礎物性研究部門)